

表 7 教师代表性科研项目

| 序号 | 项目编号      | 项目名称                         | 项目类型         | 负责人 | 时间            | 金额     |
|----|-----------|------------------------------|--------------|-----|---------------|--------|
| 1  | 11931008  | 基于图与组合优化的生物数据和网络数据挖掘算法研究     | 国家自然科学基金重点项目 | 乔立山 | 202001-202312 | 32/270 |
| 2  | U24A20264 | 复杂环境下基于隐私保护的分布式控制与决策         | 国家自然科学基金重点项目 | 夏建伟 | 202501-202812 | 26/260 |
| 3  | 61573177  | 多性能指标下随机时滞切换系统的稳定性分析与控制      | 国家自然科学基金面上项目 | 夏建伟 | 201601-201912 | 65     |
| 4  | 61773191  | 时滞奇异随机跳变系统容许性分析与控制器设计研究      | 国家自然科学基金面上项目 | 庄光明 | 201801-202112 | 63     |
| 5  | 61973148  | 切换-Markov 跳变随机系统的非周期采样控制     | 国家自然科学基金面上项目 | 夏建伟 | 202001-202312 | 63     |
| 6  | 61976110  | 功能脑图学习的高阶正则化框架及其应用研究         | 国家自然科学基金面上项目 | 乔立山 | 202001-202312 | 56     |
| 7  | 62173174  | 采样机制下奇异混杂系统异步反馈与脉冲控制研究       | 国家自然科学基金面上项目 | 庄光明 | 202201-202512 | 58     |
| 8  | 62176112  | 脑功能数据上的图表示与分类学习              | 国家自然科学基金面上项目 | 张丽梅 | 202201-202512 | 57     |
| 9  | 62373177  | 基于离散时间积分二次约束方法的非均匀采样系统鲁棒控制研究 | 国家自然科学基金面上项目 | 陈国梁 | 202401-202712 | 50     |
| 10 | 62373178  | 基于广义特征值方法的随机时滞系统精确控制研究       | 国家自然科学基金面上项目 | 夏建伟 | 202401-202712 | 50     |
| 11 | 62473185  | 柔性关节驱动下肢康复机器人系统的建模与自适应控制     | 国家自然科学基金面上项目 | 孙伟  | 202501-202812 | 50     |
| 12 | 61403178  | 随机奇异时滞系统跟踪控制及几类滤波器设计研究       | 国家自然科学基金青年项目 | 庄光明 | 201501-201712 | 24     |
| 13 | 61603170  | 仿射运动学约束不确定非完整系统的镇定及跟踪控制      | 国家自然科学基金青年项目 | 孙伟  | 201701-201912 | 20     |

|    |                |                               |                  |     |                |     |
|----|----------------|-------------------------------|------------------|-----|----------------|-----|
| 14 | 62003154       | 变周期采样随机 Markov 跳变时滞系统稳定性分析与控制 | 国家自然科学基金青年项目     | 陈国梁 | 202101-202312  | 24  |
| 15 | 62103175       | 具有逆动态特征的随机非线性系统输出反馈有限时间控制     | 国家自然科学基金青年科学基金项目 | 蒋蒙蒙 | 202201-202412  | 30  |
| 16 | 62103176       | 逻辑动态系统鲁棒控制及其在博弈论中的应用          | 国家自然科学基金青年科学基金项目 | 付世华 | 202201-202412  | 30  |
| 17 | 12226311       | 非均匀异步采样网络化控制系统鲁棒控制研究          | 国家自然科学基金天元项目     | 陈国梁 | 202301-202312  | 10  |
| 18 | ZR2020KA010    | 带有执行器约束欠驱动机器人系统的固定时间控制理论研究与应用 | 山东省自然科学基金重点项目    | 孙伟  | 2021-2023      | 30  |
| 19 | ZR202102250482 | 智能控制系统与安全防护                   | 山东省自然科学基金杰青项目    | 解相朋 | 2022.1-2024.12 | 100 |
| 20 | ZR2024YQ033    | 柔性下肢康复机器人智能安全与柔顺控制研究          | 山东省自然科学基金优秀项目    | 孙伟  | 202501-202712  | 50  |



|        |                    |
|--------|--------------------|
| 项目批准号  | 11931008           |
| 申请代码   | A0112              |
| 归口管理部门 |                    |
| 依托单位代码 | 25010008A0746-1394 |



# 国家自然科学基金委员会 资助项目计划书

资助类别： 重点项目

亚类说明： \_\_\_\_\_

附注说明： 网络数据与生物数据分析中的组合优化算法

项目名称： 基于图与组合优化的生物数据和网络数据挖掘算法研究

直接费用： 270万元                      执行年限： 2020.01-2024.12

负责人： 李国君

通讯地址： 山东省济南市山大南路27号山东大学数学学院

邮政编码： 250100                      电      话： 0531-88364652

电子邮件： gjli@sdu.edu.cn

依托单位： 山东大学

联系人： 孙婕                              电      话： 0531-88369277

填表日期：                                      2019年08月16日

国家自然科学基金委员会制



## 国家自然科学基金委员会资助项目计划书填报说明

- 一、项目负责人收到《关于国家自然科学基金资助项目批准及有关事项的通知》（以下简称《批准通知》）后，请认真阅读本填报说明，参照国家自然科学基金相关项目管理办法及《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》（请查阅国家自然科学基金委员会官方网站首页“政策法规”栏目），按《批准通知》的要求认真填写和提交《国家自然科学基金委员会资助项目计划书》（以下简称《计划书》）。
- 二、填写《计划书》时要求科学严谨、实事求是、表述清晰、准确。《计划书》经国家自然科学基金委员会相关项目管理部门审核批准后，将作为项目研究计划执行和检查、验收的依据。
- 三、《计划书》各部分填写要求如下：
  - （一）简表：由系统自动生成。
  - （二）摘要及关键词：各类获资助项目都必须填写中、英文摘要及关键词。
  - （三）项目组主要成员：计划书中列出姓名的项目组主要成员由系统自动生成，与申请书原成员保持一致，不可随意调整。如果批准通知中“项目评审意见及修改意见表”中“对研究方案的修改意见”栏目有调整项目组成员相关要求的，待项目开始执行后，按照项目成员变更程序另行办理。
  - （四）资金预算表：根据批准资助的直接费用，按照《国家自然科学基金项目预算表编制说明》填报资金预算表和预算说明书。国家重大科研仪器研制项目、重大项目还应按照预算评审后批复的直接费用各科目金额填报资金预算表、预算说明书及相应的预算明细表。
  - （五）正文：
    1. 面上项目、青年科学基金项目、地区科学基金项目：如果《批准通知》中没有修改要求的，只需选择“研究内容和研究目标按照申请书执行”即可；如果《批准通知》中“项目评审意见及修改意见表”中“对研究方案的修改意见”栏目明确要求调整研究期限和研究内容等的，须选择“根据研究方案修改意见更改”并填报相关修改内容。
    2. 重点项目、重点国际（地区）合作研究项目、重大项目、国家重大科研仪器研制项目：须选择“根据研究方案修改意见更改”，根据《批准通知》的要求填写研究（研制）内容，不得自行降低、更改研究目标（或仪器研制的技术性能与主要技术指标以及验收技术指标）或缩减研究（研制）内容。此外，还要突出以下几点：
      - （1）研究的难点和在实施过程中可能遇到的问题（或仪器研制风险），拟采用的研究（研制）方案和技术路线；
      - （2）项目主要参与者分工，合作研究单位之间的关系与分工，重大项目还需说明课题之间的关联；
      - （3）详细的年度研究（研制）计划。



3. 国家杰出青年科学基金、优秀青年科学基金和海外及港澳学者合作研究基金项目：须选择“根据研究方案修改意见更改”，按下列提纲撰写：
  - (1) 研究方向；
  - (2) 结合国内外研究现状，说明研究工作的学术思想和科学意义（限两个页面）；
  - (3) 研究内容、研究方案及预期目标（限两个页面）；
  - (4) 年度研究计划；
  - (5) 研究队伍的组成情况。
4. 国家自然科学基金基础科学中心项目：须选择“根据研究方案修改意见更改”，应当根据评审委员会和现场考察专家组的意见和建议，进一步完善并细化研究计划，作为评估和验收的依据。按下列提纲撰写：
  - (1) 五年拟开展的研究工作（包括主要研究方向、关键科学问题与研究内容）；
  - (2) 研究方案（包括骨干成员之间的分工及合作方式、学科交叉融合研究计划等）；
  - (3) 年度研究计划；
  - (4) 五年预期目标和可能取得的重大突破等；
  - (5) 研究队伍的组成情况。
5. 对于其他类型项目，参照面上项目的方式进行选择和填写。



## 简表

|        |                |                          |    |   |      |                       |    |               |  |
|--------|----------------|--------------------------|----|---|------|-----------------------|----|---------------|--|
| 申请者信息  | 姓名             | 李国君                      | 性别 | 男 | 出生年月 | 1958年08月              | 民族 | 汉族            |  |
|        | 学位             | 博士                       |    |   | 职称   | 教授                    |    |               |  |
|        | 是否在站博士后        | 否                        |    |   | 电子邮件 | gjli@sdu.edu.cn       |    |               |  |
|        | 电话             | 0531-88364652            |    |   | 个人网页 |                       |    |               |  |
|        | 工作单位           | 山东大学                     |    |   |      |                       |    |               |  |
|        | 所在院系所          | 数学学院                     |    |   |      |                       |    |               |  |
| 依托单位信息 | 名称             | 山东大学                     |    |   |      |                       | 代码 | 25010008A0746 |  |
|        | 联系人            | 孙婕                       |    |   | 电子邮件 | kjcjj@sdu.edu.cn      |    |               |  |
|        | 电话             | 0531-88369277            |    |   | 网站地址 | http://www.sdu.edu.cn |    |               |  |
| 合作单位信息 | 单位名称           |                          |    |   |      |                       |    |               |  |
|        | 中国矿业大学    聊城大学 |                          |    |   |      |                       |    |               |  |
| 项目基本信息 | 项目名称           | 基于图与组合优化的生物数据和网络数据挖掘算法研究 |    |   |      |                       |    |               |  |
|        | 资助类别           | 重点项目                     |    |   |      | 亚类说明                  |    |               |  |
|        | 附注说明           | 网络数据与生物数据分析中的组合优化算法      |    |   |      |                       |    |               |  |
|        | 申请代码           | A0112:运筹学                |    |   |      | A0116:组合数学            |    |               |  |
|        | 基地类别           | 微生物技术国家重点实验室             |    |   |      |                       |    |               |  |
|        | 执行年限           | 2020.01-2024.12          |    |   |      |                       |    |               |  |
|        | 直接费用           | 270万元                    |    |   |      |                       |    |               |  |



## 科学问题属性

- “鼓励探索，突出原创”：科学问题源于科研人员的灵感和新思想，且具有鲜明的首创性特征，旨在通过自由探索产出从无到有的原创性成果。
- “聚焦前沿，独辟蹊径”：科学问题源于世界科技前沿的热点、难点和新兴领域，且具有鲜明的引领性或开创性特征，旨在通过独辟蹊径取得开拓性成果，引领或拓展科学前沿。
- “需求牵引，突破瓶颈”：科学问题源于国家重大需求和经济主战场，且具有鲜明的需求导向、问题导向和目标导向特征，旨在通过解决技术瓶颈背后的核心科学问题，促使基础研究成果走向应用。
- “共性导向，交叉融通”：科学问题源于多学科领域交叉的共性难题，具有鲜明的学科交叉特征，旨在通过交叉研究产出重大科学突破，促进分科知识融通发展为完整的知识体系。

请阐明选择该科学问题属性的理由（800字以内）：

生物技术的飞速发展产生了海量的生物数据，并且正在和继续成爆炸式增长，如何从这些海量的生物数据中挖掘出与生物医学密切相关的信息是当今世界范围科学技术领域面临的巨大的挑战。另一方面，计算机技术的飞速发展为大数据科学研究提供了强大的计算能力和计算资源，使得用计算的手段研究生命科学成为现实。生命科学研究已经进入大数据时代，精准医学已经从观念走向实践。然而，相比生物大数据的不断积累速度，对不同类型的大数据的整合分析严重滞后，使得数据的价值难以充分发挥。因此针对具体的各类科学问题来研发数据分析的新方法新流程成为目前最大的挑战。

本项目旨在用数学的理论和方法研究生物医学大数据科学领域中的重大科学问题，研究内容属于生物信息学的范畴，具有鲜明的学科交叉特征。针对生物医学领域中的重大科学问题，研究新的数学模型，设计新的求解方法，研发高效可靠的算法软件。在理论上实现分科知识融通并形成完整的知识体系，在技术上突破现有算法瓶颈使计算机软件具有高度的普适性，在应用上使其理论和产品在生物医学领域得到广泛的认可。



## 项目摘要

### 中文摘要:

生物技术的飞速发展产生了海量的生物数据，并且正在和继续成爆炸式增长。虽然计算机技术的发展为大数据科学研究提供了强大的计算能力和计算资源，已使得用计算机处理分析生物大数据并进而研究生命科学成为现实，但是相比生物大数据的不断积累速度对不同类型大数据的整合分析却严重滞后，使得数据的价值难以充分发挥。究其原因缺乏高效可靠的生物大数据挖掘算法和软件，从而给数学和计算机科学带来了无限的机遇和挑战。本项目旨在用组合最优化的理论和方法研究生物医学大数据科学领域中的重大科学问题，研究内容属于生物信息学的范畴，具有鲜明的学科交叉特征。针对生物信息学领域中的重大科学问题，譬如：组学数据组装、基因表达数据分析、组合药物筛选、功能脑网络构建等，研发高效可靠的算法。在理论上实现分科知识融通并形成完整的知识体系，在技术上突破计算瓶颈并使其算法软件具有高度的普适性，在应用上使其理论和产品在生物医学领域得到广泛的认可。

### Abstract:

The rapid development of biotechnology has produced massive amounts of biological data and is continuing and exploding. Although the development of computer technology provides powerful computing resources, and enables the analysis of biological big data and the study of life sciences, the integration analysis of big data is seriously lagging behind, making the value of data difficult to fully play. The reason is the lack of efficient and reliable bio-big data mining algorithms and software, which therefore brings unlimited opportunities and challenges to mathematicians and computer scientists. This project aims to study major scientific issues in the field of biomedical big data science by using combinatorial optimization theories and methods. The research content belongs to the category of bioinformatics and has distinct interdisciplinary characteristics. For the major scientific issues in the field of bioinformatics, such as: genomic data assembly, gene expression data analysis, drug combination screening, functional brain network construction, etc., we develop efficient and reliable algorithms. In theory, a complete knowledge system will be formed by fusion of disciplines. In technology, we will break technical bottleneck and develop highly universal software. In practice, the new theories and products will be widely recognized in the biomedical field.

**关键词(用分号分开):** RNA-seq 数据; 基因表达数据; 药物组合数据; 功能脑网络; 算法

**Keywords(用分号分开):** RNA-seq data; Gene expression data; Drug combination data; Functional brain network; Algorithms

项目组主要成员

| 编号  | 姓名  | 出生年月    | 性别 | 职称  | 学位 | 单位名称   | 电话            | 证件号码               | 项目分工       | 每年工作时间(月) |  |     |  |
|-----|-----|---------|----|-----|----|--------|---------------|--------------------|------------|-----------|--|-----|--|
| 1   | 李国君 | 1958.08 | 男  | 教授  | 博士 | 山东大学   | 0531-88364652 | 370112195808087418 | 项目负责人      | 9         |  |     |  |
| 2   | 陈兴  | 1984.11 | 男  | 教授  | 博士 | 中国矿业大学 | 17312868188   | 342601198411010218 | 组合药物算法设计   | 8         |  |     |  |
| 3   | 刘丙强 | 1983.05 | 男  | 教授  | 博士 | 山东大学   | 15154160787   | 370112198305087452 | 双聚类算法设计    | 8         |  |     |  |
| 4   | 吴吉昌 | 1973.09 | 男  | 副教授 | 博士 | 山东大学   | 13173005882   | 370728197309240273 | 图模型理论研究    | 8         |  |     |  |
| 5   | 乔立山 | 1979.11 | 男  | 教授  | 博士 | 聊城大学   | 0635-8238621  | 372330197911196190 | 功能脑网络建模与分析 | 8         |  |     |  |
| 6   | 柳军涛 | 1988.11 | 男  | 讲师  | 博士 | 山东大学   | 15098905196   | 37028519881130293X | 拼接算法设计与实现  | 8         |  |     |  |
| 7   | 穆增超 | 1977.11 | 男  | 讲师  | 博士 | 山东大学   | 15550689423   | 370881197711031119 | 双聚类算法实现与测试 | 8         |  |     |  |
| 8   | 于婷  | 1989.12 | 男  | 博士生 | 学士 | 山东大学   | 15106900332   | 370322198912144918 | 拼接算法测试     | 10        |  |     |  |
| 9   | 瞿佳  | 1992.03 | 女  | 博士生 | 硕士 | 中国矿业大学 | 17851148130   | 341181199203286242 | 组合药物设计算法实现 | 10        |  |     |  |
| 10  | 李頔  | 1994.11 | 女  | 博士生 | 学士 | 山东大学   | 17862936393   | 371082199411200147 | 表达数据收集与分析  | 10        |  |     |  |
| 总人数 |     | 高级      |    | 中级  |    | 初级     |               | 博士后                |            | 博士生       |  | 硕士生 |  |
| 32  |     | 5       |    | 2   |    | 0      |               | 0                  |            | 13        |  | 12  |  |



## 国家自然科学基金项目直接费用预算表（定额补助）

项目批准号：11931008

项目负责人：李国君

金额单位：万元

| 序号 | 科目名称                 | 金额       |
|----|----------------------|----------|
| 1  | 项目直接费用合计             | 270.0000 |
| 2  | 1、设备费                | 16.0000  |
| 3  | (1)设备购置费             | 16.00    |
| 4  | (2)设备试制费             | 0.0000   |
| 5  | (3)设备升级改造与租赁费        | 0.0000   |
| 6  | 2、材料费                | 0.0000   |
| 7  | 3、测试化验加工费            | 10.00    |
| 8  | 4、燃料动力费              | 10.00    |
| 9  | 5、差旅/会议/国际合作与交流费     | 83.00    |
| 10 | 6、出版/文献/信息传播/知识产权事务费 | 40.00    |
| 11 | 7、劳务费                | 95.00    |
| 12 | 8、专家咨询费              | 16.0000  |
| 13 | 9、其他支出               | 0.00     |



## 预算说明书（定额补助）

（请按照《国家自然科学基金项目预算表编制说明》等的有关要求，对各项支出的主要用途和测算理由，以及合作研究外拨资金、单价 $\geq 10$ 万元的设备费等内容进行必要说明。）

本项目申请直接经费280.00万元，预算按照国家自然科学基金管理办法和山东大学有关财务规定制定的。具体预算说明如下：

1. 设备费：34.00万元

(1) 设备购置费34.00万元：

• 项目需要购买小型机、小型工作站用于数据处理。其中，小型机：30.00万/台\*1台，共计30.00万，该小型机可供一定规模数据上的运算和测试使用；小型工作站：2.00万/台\*2台，共计4.00万。

2. 材料费 9.00万元

• 项目研究中耗费的纸张、打印耗材、文具等，以及存储数据所需的U盘等移动存储产品，五年预计约9.00万元。

3. 测试化验加工费：10.00万元

• 用于高性能计算服务器租用，网页服务器开发后期完善等费用。其中服务器租用按照每年1.60万元计算；网页服务器开发按照2.00万元计算。

4. 燃料动力费：10.00万元

• 用于实验室的仪器设备工作等产生的电费以及水费等，五年预计花费10.00万元。

5. 差旅/会议/国际合作与交流费：80.00万元

• 项目实施过程中针对项目的研究内容计划组织相关学术会议2次，预算为8.00万元；

• 项目组成员参加国内相关学术交流、学术会议等160人次。依据规定住宿费平均0.032万元/天/人次，伙食及公杂费0.018万元/天/人次，按每人出差3天计算，长途交通费平均约0.10万元/人次。五年学术会议会议注册费预计约8.00万元。该部分预算总计为48.00万元

• 项目组成员出国访问按照3.00万元/人次计算，计划6次，预算18.00万元；

• 邀请海外专家来访按照1.50万元/人次计算，计划4次，预算6.00万元。

6. 出版/文献/信息传播/知识产权事务费 40.00万元

• 会议论文注册费：0.20万元/篇 \* 20篇 = 4.00万元；

• SCI期刊论文：0.80万元/篇 \* 40篇 = 32.00万元。

• 检索费、资料费等预计：4.00万元

7. 劳务费：75.00万元

• 博士生10人，劳务费每人每月0.10万元，共计50.00万元；

• 硕士生10人，劳务费每人每月0.05万元，共计25.00万元。

8. 专家咨询费：16.00万元

• 邀请生物学或生物信息学专家作报告，0.30万元/人次 \* 25人次，共计7.50万元；

• 邀请计算机科学专家作报告，0.30万元/人次 \* 25人次，共计7.50万元；

• 评阅论文等书信通讯咨询方式等共计1.00万元。

各单位经费分配

本项目根据各单位的任务分工，特制定以下的经费分配。（1）山东大学负责项目的组织与实施，承担转录组拼接和双聚类算法设计，主要参与者人数（包括课题组负责人李国君）共5人，分配金额185.00万元，占资助总金额的~68.5%；（2）中国矿业大学承担协同药物组合预测任务，课题负责人陈兴，分配金额53.00万元，占资助总金额的~19.6%；（3）聊城大学承担脑功能网络研究任务，课题负责人乔立山，分配金额32.00万元，占资助总金额的~11.9%。该经费分配方案得到了各单位认可，并已经与各单位签订了合作协议。

项目负责人签字：

科研部门公章：

财务部门公章：



## 报告正文

研究内容和研究目标按照申请书执行。



## 国家自然科学基金资助项目签批审核表

| <p>我接受国家自然科学基金的资助，将按照申请书、项目批准意见和计划书负责实施本项目（批准号：11931008），严格遵守国家自然科学基金委员会关于资助项目管理、财务等各项规定，切实保证研究工作时间，认真开展研究工作，按时报送有关材料，及时报告重大情况变动，对资助项目发表的论著和取得的研究成果按规定进行标注。</p> <p style="text-align: right; margin-top: 20px;">项目负责人（签章）：<br/>年 月 日</p> | <p>我单位同意承担上述国家自然科学基金项目，将保证项目负责人及其研究队伍的稳定和研究项目实施所需的条件，严格遵守国家自然科学基金委员会有关资助项目管理、财务等各项规定，并督促实施。</p> <p style="text-align: right; margin-top: 20px;">依托单位（公章）<br/>年 月 日</p>  |    |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |
|--|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|--|--|--|--|--|--|
| 本<br>栏<br>目<br>由<br>基<br>金<br>委<br>填<br>写  | <p>科学处审查意见：</p><br><br><p>建议年度拨款计划（本栏目为自动生成，单位：万元）：</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">年度</th> <th style="width: 10%;">总额</th> <th style="width: 10%;">第一年</th> <th style="width: 10%;">第二年</th> <th style="width: 10%;">第三年</th> <th style="width: 10%;">第四年</th> <th style="width: 10%;">第五年</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">金额</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | 年度 | 总额  | 第一年 | 第二年 | 第三年 | 第四年 | 第五年 | 金额 |  |  |  |  |  |  |
|  | 年度  | 总额 | 第一年 | 第二年 | 第三年 | 第四年 | 第五年 |     |    |  |  |  |  |  |  |
|  | 金额  |    |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |
| <p>科学部审查意见：</p><br><br><br><br><p style="text-align: right; margin-top: 20px;">负责人（签章）：<br/>年 月 日</p>  |   |    |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |
| 本<br>栏<br>目<br>主<br>要<br>用<br>于<br>重<br>大<br>项<br>目<br>等   | <p>相关局室审核意见：</p><br><br><br><br><p style="text-align: right; margin-top: 20px;">负责人（签章）：<br/>年 月 日</p>  |    |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |
|  | <p>委领导审批意见：</p><br><br><br><br><p style="text-align: right; margin-top: 20px;">委领导（签章）：<br/>年 月 日</p>   |    |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |



|        |                    |
|--------|--------------------|
| 项目批准号  | U24A20264          |
| 申请代码   | F0301              |
| 归口管理部门 |                    |
| 依托单位代码 | 21009408A0687-1245 |



U24A202641003727

# 国家自然科学基金 资助项目计划书 (预算制项目)

资助类别: 联合基金项目

亚类说明: 重点支持项目

附注说明: 区域创新发展联合基金

项目名称: 复杂环境下基于隐私保护的分布式控制与决策

直接费用: 260万元

执行年限: 2025.01-2028.12

负责人: 徐胜元

BRID: 09105.00.56163

通讯地址: 江苏省南京市孝陵卫200号南京理工大学自动化学院

邮政编码: 210094

电话: 025-84315463

电子邮件: syxu@njust.edu.cn

依托单位: 南京理工大学

联系人: 魏鹏

电话: 025-84313017

填表日期: 2024年12月02日

国家自然科学基金委员会制



## 国家自然科学基金资助项目计划书填报说明 （预算制项目）

- 一、项目负责人收到《国家自然科学基金资助项目批准通知》（以下简称《批准通知》）后，请认真阅读本填报说明，参照国家自然科学基金相关项目管理办​​法和新修订的《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》（以下简称《资金管理办法》，请查阅国家自然科学基金委员会官方网站首页“政策法规”栏目），按《批准通知》的要求认真填写和提交《国家自然科学基金资助项目计划书》（以下简称《计划书》）。
- 二、填写《计划书》时要科学严谨、实事求是、表述清晰、准确。《计划书》经国家自然科学基金委员会相关项目管理部门审核批准后，将作为项目研究计划执行、检查和验收的依据。
- 三、《计划书》各部分填写要求如下：
  - （一）简表：由系统自动生成。
  - （二）摘要及关键词：各类获资助项目都应当填写中、英文摘要及关键词。
  - （三）项目组主要成员：计划书中列出姓名的项目组主要成员由系统自动生成，与申请书原成员保持一致，不可随意调整。如果《批准通知》所附“项目评审意见及修改意见表”中“修改意见”栏目有调整项目组成员相关要求的，待项目开始执行后，按照项目成员变更程序另行办理。
  - （四）资金预算表：根据批准的项目资助额度，按规定调整项目预算，并按照《国家自然科学基金项目计划书预算表编制说明》填报资金预算表和预算说明书。
  - （五）正文：
    1. 面上项目、地区科学基金项目：如果《批准通知》所附“项目评审意见及修改意见表”中“修改意见”栏目没有修改要求的，只需选择“研究内容和研究目标按照申请书执行”即可；如果《批准通知》中上述栏目明确要求调整研究期限或研究内容等的，须选择“根据研究方案修改意见更改”并填报相关修改内容。
    2. 重点项目、重点国际（地区）合作研究项目、重大项目、重大研究计划重点支持项目、重大研究计划集成项目、国家重大科研仪器研制项目、联合基金项目、原创探索计划项目、重大科学基础设施国际合作研究计划专项：须选择“根据研究方案修改意见更改”，根据《批准通知》的要求填写研究（研制）内容，不得自行降低、更改研究目标（或仪器研制的技术性能与主要技术指标、验收技术指标等）或缩减研究（研制）内容。此外，还要突出以下几点：
      - （1）研究的难点和在实施过程中可能遇到的问题（或仪器研制风险），拟采用的研究（研制）方案和技术路线；
      - （2）项目主要参与者分工，合作研究单位（如有）之间的关系与分工，重大项目还需说明课题之间的关联；
      - （3）详细的年度研究（研制）计划。
    3. 创新研究群体项目：须选择“根据研究方案修改意见更改”，按下列提纲撰写：



- (1) 研究方向；
  - (2) 结合国内外研究现状，说明研究工作的学术思想和科学意义（限两个页面）；
  - (3) 研究内容、研究方案及预期目标（限两个页面）；
  - (4) 年度研究计划；
  - (5) 研究队伍的组成情况。
4. 基础科学中心项目：须选择“根据研究方案修改意见更改”，根据《批准通知》的要求和现场考察专家组的意见和建议，进一步完善并细化研究计划，按下列提纲撰写：
- (1) 五年拟开展的研究工作（包括主要研究方向、关键科学问题与研究内容）；
  - (2) 研究方案（包括骨干成员之间的分工及合作方式、学科交叉融合研究计划等）；
  - (3) 年度研究计划；
  - (4) 五年预期目标和可能取得的重大突破等；
  - (5) 研究队伍的组成情况。
5. 数学天元基金项目：天元前沿重点专项项目和数学与其他学科交叉联合资助项目，参照重点项目的方式进行选择和填写；其他类型项目，参照面上项目的方式进行选择和填写。
6. 对于其他类型项目，参照面上项目的方式进行选择和填写。



## 简表

|         |                |                      |    |      |                           |          |    |               |  |
|---------|----------------|----------------------|----|------|---------------------------|----------|----|---------------|--|
| 项目负责人信息 | 姓名             | 徐胜元                  | 性别 | 男    | 出生年月                      | 1968年10月 | 民族 | 汉族            |  |
|         | 学位             | 博士                   |    |      | 职称                        | 教授       |    |               |  |
|         | 是否在站博士后        | 否                    |    | 电子邮件 | syxu@njust.edu.cn         |          |    |               |  |
|         | 电话             | 025-84315463         |    | 个人网页 |                           |          |    |               |  |
|         | 工作单位           | 南京理工大学               |    |      |                           |          |    |               |  |
|         | 所在院系所          | 自动化学院                |    |      |                           |          |    |               |  |
| 依托单位信息  | 名称             | 南京理工大学               |    |      |                           |          | 代码 | 21009408A0687 |  |
|         | 联系人            | 魏鹏                   |    | 电子邮件 | jcyjk@njust.edu.cn        |          |    |               |  |
|         | 电话             | 025-84313017         |    | 网站地址 | https://www.njust.edu.cn/ |          |    |               |  |
| 合作单位信息  | 单位名称           |                      |    |      |                           |          |    |               |  |
|         | 北京理工大学    聊城大学 |                      |    |      |                           |          |    |               |  |
| 项目基本信息  | 项目名称           | 复杂环境下基于隐私保护的分布式控制与决策 |    |      |                           |          |    |               |  |
|         | 资助类别           | 联合基金项目               |    |      | 亚类说明                      | 重点支持项目   |    |               |  |
|         | 附注说明           | 区域创新发展联合基金           |    |      |                           |          |    |               |  |
|         | 申请代码           | F0301:控制理论与技术        |    |      |                           |          |    |               |  |
|         | 基地类别           |                      |    |      |                           |          |    |               |  |
|         | 执行年限           | 2025.01-2028.12      |    |      |                           |          |    |               |  |
|         | 直接费用           | 260万元                |    |      |                           |          |    |               |  |



## 项目摘要

### 中文摘要:

随着人工智能、大数据等新技术的发展，隐私保护问题受到了工业界和学术界的广泛关注。无人系统协同任务在执行过程中需要频繁进行通信交互，易遭受数据泄露、被窃取或篡改。在实现隐私保护的同时，完成无人系统的控制和决策任务，对于推动人工智能和自动控制的发展至关重要，同时也带来了许多控制理论研究的新挑战。本项目面向无人系统隐私保护的客观需求，从提升隐私保护水平、算法性能和系统性能等多目标角度出发，研究复杂环境下基于隐私保护的分布式控制与决策的理论与方法。具体研究内容包括：1) 研究隐私保护下的时滞系统稳定性分析；2) 提出隐私保护下的分布式动态平均一致性算法；3) 设计隐私保护下的强化学习最优协同算法；4) 建立隐私保护下的分布式优化与博弈策略。旨在构建隐私保护下的分布式控制与决策理论的一体化研究框架，并在无人车/机集群中验证所提出的理论算法，为群体智能及信息安全基础研究提供理论和方法支撑。

### Abstract:

With the development of new technologies such as artificial intelligence and big data, the issue of privacy-preserving has received extensive attention from industry and academia. The cooperative tasks of unmanned systems need frequent communication and interaction in the process of execution, which can lead to data leakage, theft or tampering. The achievement of privacy-preserving while completing the control and decision-making tasks of unmanned systems is crucial to promote the development of artificial intelligence and automatic control, but also brings many new challenges in control theory research. Facing the objective requirements of privacy-preserving of unmanned systems, this project studies the theory and method of distributed control and decision-making based on privacy-preserving in complex environments from the perspective of multiple objectives such as improving the level of privacy-preserving, algorithm performance and system performance. The specific contents include: 1) Research on the stability analysis of time-delay systems under privacy-preserving; 2) Propose distributed dynamic average consensus algorithms under privacy-preserving; 3) Design optimal cooperative algorithms of reinforcement learning under privacy-preserving; 4) Establish distributed optimization and game strategies under privacy-preserving. This project aims to construct an integrated research framework of distributed control and decision-making theory under privacy-preserving, and verifies the proposed theoretical algorithms in the unmanned vehicle/machine cluster, which provides theoretical and methodological support for the basic research of swarm intelligence and information security.

**关键词(用分号分开):** 系统稳定性与镇定; 时滞系统; 分布式控制; 分布式博弈; 隐私保护

**Keywords(用分号分开):** stability and stabilization; time-delay systems; distributed control; distributed games; privacy preserving



## 项目组主要成员

| 编号  | 姓名  | 出生年月    | 性别 | 职称  | 学位 | 单位名称   | 电话           | 证件号码               | 项目分工  | 每年工作时间（月） |  |     |  |
|-----|-----|---------|----|-----|----|--------|--------------|--------------------|-------|-----------|--|-----|--|
| 1   | 徐胜元 | 1968.10 | 男  | 教授  | 博士 | 南京理工大学 | 025-84315463 | 330106196810274079 | 项目负责人 | 9         |  |     |  |
| 2   | 刘坤  | 1982.11 | 男  | 研究员 | 博士 | 北京理工大学 | 15911021569  | 371482198211021117 | 理论分析  | 9         |  |     |  |
| 3   | 夏建伟 | 1978.09 | 男  | 教授  | 博士 | 聊城大学   | 06358239926  | 372501197809191173 | 理论分析  | 9         |  |     |  |
| 总人数 |     | 高级      |    | 中级  |    | 初级     |              | 博士后                |       | 博士生       |  | 硕士生 |  |
| 19  |     | 3       |    | 0   |    | 0      |              | 0                  |       | 10        |  | 6   |  |



### 国家自然科学基金预算制项目预算表

项目批准号：U24A20264

项目负责人：徐胜元

金额单位：万元

| 序号 | 科目名称             | 金额       |
|----|------------------|----------|
| 1  | 一、科学基金资助项目直接费用合计 | 260.0000 |
| 2  | 1、设备费            | 12.0000  |
| 3  | 其中：设备购置费         | 12.0000  |
| 4  | 2、业务费            | 184.0000 |
| 5  | 3、劳务费            | 64.0000  |
| 6  | 二、其他来源资金         | 0.0000   |
| 7  | 三、合计             | 260.0000 |

注：请按照项目研究实际需要合理填写各科目预算金额。



## 预算说明书

### 一、科学基金资助项目直接费用

请按照《国家自然科学基金项目计划书预算编制说明》等有关要求，按照政策相符性、目标相关性和经济合理性原则，实事求是编制项目预算。填报时，直接费用应按设备费、业务费、劳务费三个科目填报，每个科目结合科研任务按支出用途进行说明。

#### 1. 设备费：12 万元

- 1) 用于购置高性能仿真和计算平台，购置 5 台，按每台 0.8 万元计，共计 4 万元。
- 2) 无线通信设备：用于搭建无人机/车之间的通信网络，购置 8 套，按 0.5 万/套，共计 4 万元；
- 3) 数据采集终端：用于搭建无人机位置和姿态数据捕捉平台，购置 4 套，按 1 万/套，共计 4 万元；

#### 2. 业务费：184 万元

- 1) 材料费：50 万元
  - (1) 元器件耗材：用于购置易损的机架、单片机、传感器、电机、螺旋桨、电池等元器件耗材，共计 28 万元；
  - (2) 计算平台耗材：用于购置维护和升级仿真平台的耗材，包括固态硬盘、内存卡等，共计 12 万元；
  - (3) 其他耗材：用于购置防护网、调试架、安全绳、拆装工具等耗材，共计 10 万元。
- 2) 差旅、会议、国际交流费：108 万元
  - (1) 调研和参加学术会议的交通费、住宿费等，课题组每年 50 人次的调研和参加会议，每人次交通费平均 800 元，住宿费平均 400 元/人/天，每次出差平均按 3 天算，四年费用共计  $(0.08+0.04*3)*50*4 = 40$  万元；
  - (2) 课题组每年参加学术会议 20 人次，注册费平均 0.3 万元，四年 24 万元；
  - (3) 组织学术交流、研讨会 4 次，承担会议场所费、会议资料费、与会人员交通住宿等，按 8 万/次，共计 32 万元；
  - (4) 课题组每年 1 人次的出国（境）参加会议或短期合作交流，每人次交通（含机票）费、住宿费平均 3 万元，四年约  $3*4 = 12$  万元。
- 3) 出版/文献/信息传播/知识产权事务费：26 万元
  - (1) 版面费、出版费、审稿费、专利费等，约 15 万元；
  - (2) 购买纸质图书、购买专业软件、下载电子参考资料等的资料费，约 5 万元；
  - (3) 文献检索费、专业通信费等，约 6 万元。

#### 3. 劳务费：64 万元

- 1) 用于支付参与项目研究工作的研究生劳务费。博士生劳务费： $0.1$ 万/人/月\* $10$ 人\* $40$ 月= $40$ 万；硕士生劳务费： $0.05$ 万/人/月\* $6$ 人\* $40$ 月= $12$ 万。每人每年按10个月工作时间计算。参与项目申请的学生毕业后，相应劳务费发给后续加入项目研究的学生。
- 2) 邀请专家做相关的学术交流、讨论和咨询的费用，平均每年邀请专家 12 人次，每次费用 0.25 万，四年共计  $12*0.25*4 = 12$  万元。

### 二、其他来源资金

对其他来源资金的经费来源、主要用途、支出预算做简要说明。

无

### 三、合作研究外拨资金

对合作研究单位承担研究任务及资金外拨情况进行必要说明。如存在多个合作研究单位，请逐一说明。如存在资金外拨的情况，还需对外拨资金的金额进行重点说明。

本项目的合作单位是北京理工大学和聊城大学，出于项目研究任务分工的工作量考虑，分别向北京理工大学和聊城大学拨付经费的25%和10%。



## 报告正文

### 一、研究内容

- 1、隐私保护下时滞系统稳定性分析
  - (1) 基于差分隐私的时滞系统的稳定性分析
  - (2) 基于状态分解的时滞系统的稳定性分析
- 2、隐私保护下分布式动态平均一致
  - (1) 基于改进噪声机制的隐私保护动态平均一致
  - (2) 基于双重对手的隐私保护动态平均一致
  - (3) 基于非理想网络环境的隐私保护动态平均一致
- 3、隐私保护下基于强化学习的最优协同
  - (1) 隐私保护下分布式强化学习最优协同
  - (2) 隐私保护下联邦强化学习最优协同
- 4、隐私保护下的分布式优化与博弈
  - (1) 基于改进噪声机制的隐私保护动态平均一致
  - (2) 基于通信压缩的隐私保护分布式博弈
  - (3) 基于零阶反馈信息的隐私保护分布式优化与博弈
- 5、地空协同无人自主运动平台实验验证

### 二、研究难点、研究方案和技术路线

#### 1、研究难点

时滞会降低系统的控制性能，如何有效估计系统中时滞的容许范围，同时实现系统稳定和隐私保护，是研究难点之一；保护时变参考信号的隐私需要保证无穷时间内的参考信号不被窃取，如何有效保护时变的参考信号，设计动态平均一致性算法实现保证精确收敛的同时提高算法的隐私保护水平，是研究难点之二；如何选取合适的指标衡量算法的隐私保护程度，并综合分析隐私性能与分布式优化与博弈收敛性能的相互依赖关系，进而实现二者的权衡是研究难点之三。

#### 2、研究方案和技术路线

本项目针对复杂环境下基于隐私保护的分布式控制与决策问题，围绕隐私保护下的时滞系统稳定性分析、分布式动态平均一致、基于强化学习的最优协同以及分布式优化与博弈四个方面展开研究，并给出稳定性和隐私性分析。最后，利用无人车/机集群系统验证所设计理论方法的有效性。本项目的整体技术路线如图 1 所示。

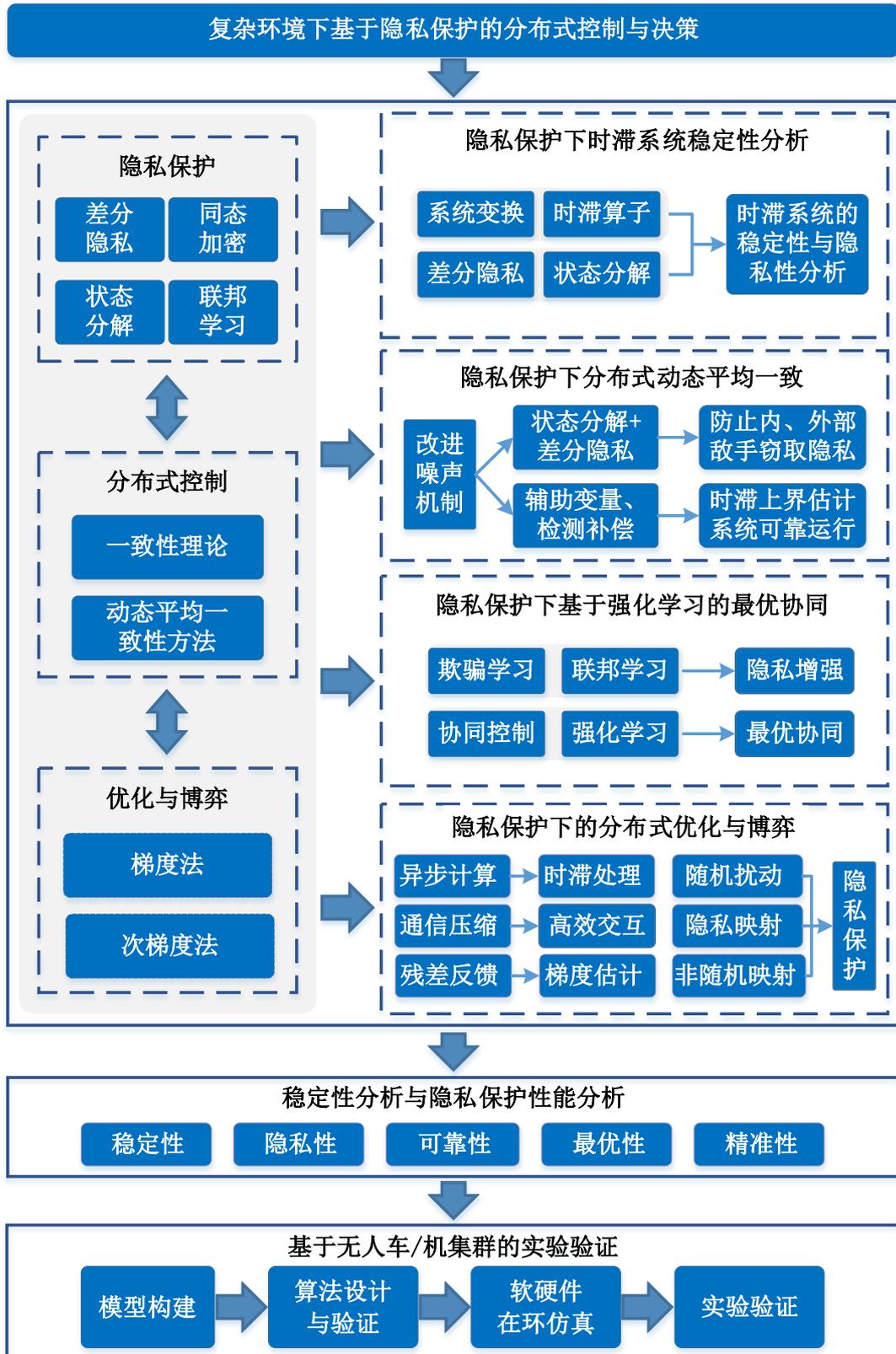


图 1 整体技术路线

## 2.1 隐私保护下时滞系统稳定性分析研究方案

本部分主要研究隐私保护下的时滞系统的稳定性分析与算法设计问题，具体



技术路线如图 2 所示。

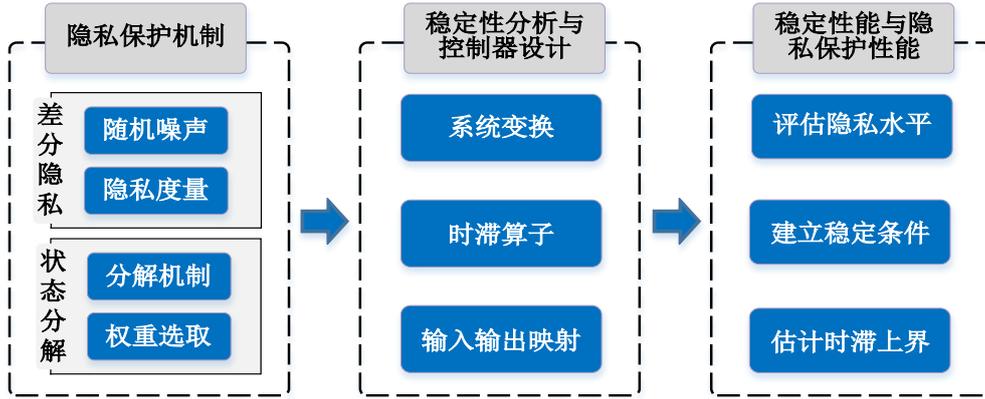


图 2 隐私保护下的时滞系统的稳定性分析

### (1) 基于差分隐私的时滞系统的稳定性分析

首先，基于对系统状态添加随机噪声 $W(k)$ 的差分隐私机制，本部分通过系统分析和相位型概率分布近似等方法研究随机输入时滞下的时滞与隐私水平相互影响的定量关系。考虑如下带有概率密度函数为 $f(k) = \lambda e^{-\lambda k}, k \in \mathbb{N}_{\geq 0}$ 的随机输入时滞 $\tau_k$ 的系统：

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_p x(k) + B_p u(k - \tau_k) \\ y(k) &= C_p x(k) + D_p u(k - \tau_k) \end{aligned}$$

其中 $x(k)$ 为系统第 $k$ 时刻的状态； $u(k)$ 是系统第 $k$ 时刻的控制输入； $y(k)$ 是系统第 $k$ 时刻的输出； $A_p$ 、 $B_p$ 、 $C_p$ 和 $D_p$ 为系统矩阵。通过相位类型的分布将时滞和隐私噪声的概率分布统计在相同的概率分布下进行分析。

记 $Y$ 为输出序列，将其表示为 $Y(k) = O(k)x_0 + N(k)U(k)$ ，其中

$$\begin{aligned} O(k) &= \text{col}[C_p \quad C_p A_p \quad \cdots \quad C_p A_p^k] \\ N(k) &= \begin{bmatrix} D_p & 0 & \cdots & 0 \\ C_p B_p & D_p & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_p A_p^{k-1} B_p & C_p A_p^{k-2} B_p & \cdots & D_p \end{bmatrix} \end{aligned}$$

根据 $(\varepsilon, \delta)$ -差分隐私的定义得到与时滞相关的隐私水平和量化分析：

$$\begin{aligned} P(O(k)x_0 + N(k)U(t - \tau_k) + W(k) \in S) \\ \leq e^{\varepsilon(\tau_k)} P(O(k)x'_0 + N(k)U(t - \tau_k) + W(k) \in S) + \delta(\tau_k) \end{aligned}$$

基于上述表达式，可分析出 $\varepsilon(\tau_k)$ 和 $\delta(\tau_k)$ 的具体表达。

然后，研究差分隐私下时滞系统的均方稳定性。通过对离散时间模型的稳定性分析，对隐私保护后的输入和输出进行 $Z$ 变换得到 $\hat{y}(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} y(n)z^{-n}$ 和



$\hat{u}(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} u(n)z^{-n}$ ，建立系统输入和输出的映射关系，通过对传递函数的约束给出稳定性条件。基于此，给出稳定性分析条件，并给出时滞上界的估计。

最后，设计保证达到隐私水平的时滞系统镇定控制器，进行系统变换处理，得到如下整体的闭环系统方程：

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \begin{bmatrix} A_p & B_p C_p (I + \Delta_k) \\ 0 & A_p \end{bmatrix} x(k) \\ y(k) &= [C_p \quad D_p C_p (I + \Delta_k)] x(k) \end{aligned}$$

其中 $\Delta_k$ 为时滞算子，满足 $\Delta_k x(k) = x(k - \tau_k) - x(k)$ 。在稳定性分析的条件约束下，处理非凸矩阵不等式的影响，进而对矩阵 $A_p$ 、 $B_p$ 、 $C_p$ 和 $D_p$ 进行求解，得到控制器的表达式，实现闭环系统的稳定。

## (2) 基于状态分解的时滞系统的稳定性分析

首先，针对(1)中的时滞系统模型，为实现隐私保护，将状态 $x(k)$ 分解为两部分 $x^\alpha(k)$ 和 $x^\beta(k)$ ，其中 $x^\alpha(k)$ 在数据通路中作为信息传输， $x^\beta(k)$ 则隐藏起来使得窃听者难以获取系统完整的状态信息，达到隐私保护的目的。所设计的分解机制和权重机制满足：

$$x(k) = \alpha(k)x^\alpha(k) + \beta(k)x^\beta(k)$$

其中 $\alpha(k)$ 和 $\beta(k)$ 为分解的两个子状态的时变权重函数，且对于该系统是私有的参数，不会被窃听者知道，满足如下关系式：

$$\alpha(k) + \beta(k) = 1, \quad \alpha(k), \beta(k) \in (0,1)$$

为了避免状态分解对系统稳定性的影响，分解后的子状态 $x^\alpha(k)$ 满足：

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x^\alpha(k) = x(k)$$

分解后的系统方程为：

$$\begin{aligned} x^\alpha(k+1) &= A_p x^\alpha(k) + B_p u(k - \tau_k) \\ y(k) &= C_p x^\alpha(k) + D_p u(k - \tau_k) \end{aligned}$$

然后，基于分解出的子状态 $x^\alpha(k)$ 设计如下隐私保护下的控制器：

$$u(k) = Kx^\alpha(k)$$

其中 $K$ 为待确定的控制增益。通过引入时滞算子 $\Delta_k x(k) = x(k - \tau_k) - x(k)$ ，结合所设计的权重机制，构建如下时滞相关的闭环系统模型：

$$\begin{aligned} x(k+1) &= (A_p + B_p K \delta(k - \tau_k))x(k) + B_p K \delta(k - \tau_k) \Delta_k x(k) \\ y(k) &= (C_p + D_p K \delta(k - \tau_k))x(k) + D_p K \delta(k - \tau_k) \Delta_k x(k) \end{aligned}$$



其中 $A_p$ 、 $B_p$ 、 $C_p$ 和 $D_p$ 为上一小节(1)中所定义的系统矩阵。

进一步，基于离散时间框架对给定的权重机制和分解机制下时滞系统的稳定性进行分析，通过模型变换等方式得到整体的输入和输出，建立系统稳定的条件，并且给出时滞上界的估计和控制增益 $K$ 的取值。

需要指出的是，上述基于状态分解的方案是通过将时滞系统的状态分解为用于通信传输和隐藏保护的两部分来防止整体的状态被窃听。方案中权重函数的选取是至关重要的，原因在于权重函数过大时虽然有利于系统稳定性能，但可能会导致隐私保护水平下降；而权重函数太小则会在增强隐私水平的同时使得系统稳定性能下降。因此本部分将在系统稳定的条件下给出最优的状态分解机制和权重机制的设计来实现隐私保护。

## 2.2 隐私保护下的分布式动态平均一致研究方案

本部分主要研究隐私保护下的动态平均一致性问题，具体的技术路线如图 3 所示。

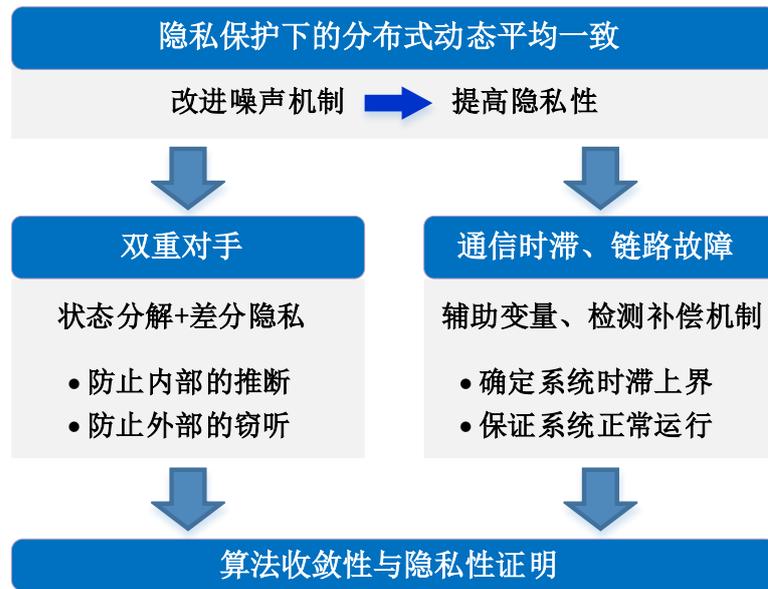


图 3 隐私保护下的分布式动态平均一致

### (1) 基于改进噪声机制的隐私保护动态平均一致

针对如下动态平均一致性问题：

$$\mathcal{P} \triangleq (J, L)$$

其中 $J \triangleq \{r_1, \dots, r_m\}$ 是 $m$ 个子系统时变参考信号的集合， $L$ 是系统交互的权重矩阵，且 $L = \{L_{ij}\}$ ， $i, j \in [m]$ ， $[m] = \{1, \dots, m\}$ ，如果子系统 $j$ 和子系统 $i$ 可以直接通信，



则 $L_{ij} > 0$ ，否则 $L_{ij} = 0$ ； $L_{ii}$ 定义为 $L_{ii} \triangleq -\sum_{j \in \mathbb{N}_i} L_{ij}$ ，其中 $\mathbb{N}_i$ 表示 $i$ 的邻居集合。隐私保护下的动态平均一致问题是指在所有子系统跟踪时变参考信号的平均值 $\bar{r}(k) \triangleq \frac{\sum_{i=1}^m r_i(k)}{m}$ 的同时保证自己的参考信号不被泄露。具体算法设计为：

第一步，基于差分隐私算法框架，为每个子系统设计服从一定分布的随机噪声，即每个子系统根据拉普拉斯分布 $\omega_i \sim \text{Lap}(0, b(k))$ 来产生随机噪声 $\omega_i$ ，其中 $b(k)$ 表示时变的方差序列，此处随机噪声的均值设计为 $0$ 。

第二步，基于所改进的噪声机制，设计差分隐私下的动态平均一致性算法：

$$x_i(k+1) = r_i(k+1) + \sum_{j \in \mathbb{N}_i} L_{ij} (x_j(k) + \omega_j(k) - x_i(k)) \\ + (1 - \alpha(k))(x_i(k) - r_i(k))$$

其中 $x_i(k)$ 是第 $i$ 个子系统第 $k$ 时刻的状态； $r_i(k)$ 是第 $i$ 个子系统第 $k$ 时刻的参考信号值； $\omega_j(k)$ 是第 $j$ 个子系统第 $k$ 时刻的噪声； $\alpha(k)$ 是反馈项 $x_i(k) - r_i(k)$ 的时变步长； $x_i(0) = r_i(0)$ 。

第三步，定义 $x(k+1) = [x_1(k+1), \dots, x_m(k+1)]^T$ ，通过计算收敛误差 $\|x(k+1) - \mathbf{1}_N \bar{r}(k+1)\|$ 的条件期望，来证明该算法能使每个子系统的状态 $x_i(k)$ 收敛到时变参考信号的平均 $\bar{r}(k)$ ，从而实现对算法收敛性能的分析。

最后，根据差分隐私的定义，借助一系列数学分析工具，推导得出 $\|x(k+1) - x'(k+1)\|_1$ 的上限表达式，即

$$\Delta(K+1) \triangleq \sup_{\mathcal{O} \in \mathcal{O}} \left\{ \sup_{x \in \mathcal{R}_{\mathcal{P}, x(0)}^{-1}(\mathcal{O}), x' \in \mathcal{R}_{\mathcal{P}', x(0)}^{-1}(\mathcal{O})} \|x(k+1) - x'(k+1)\|_1 \right\}$$

其中 $x'_i(k+1)$ 是与 $\mathcal{P} \triangleq (J, L)$ 相邻的动态平均一致问题 $\mathcal{P}' \triangleq (J', L')$ 下产生的状态， $L' = L$ ； $x(0) = [x_1(0), \dots, x_m(0)]^T$ 是状态初值； $\mathcal{O}$ 是算法（记为 $\mathcal{A}$ ）产生的观测值序列，即 $\mathcal{R}_{\mathcal{P}, x(0)}(\mathcal{A}) \triangleq \mathcal{O}$ 。基于上式进一步求出隐私预算 $\epsilon$ 的上限，从而证明该算法能实现 $\epsilon$ -差分隐私。

## (2) 基于双重对手的隐私保护动态平均一致

为了实现双重对手下的精确收敛和隐私保护，本部分将状态分解法和差分隐私方法相结合，设计如下基于隐私保护的动态平均一致性算法：



$$\begin{aligned}
x_i^{\beta_1}(k+1) &= \chi(k) \sum_{j \in \mathbb{N}_i} L_{ij} \left( x_j^{\beta_1}(k) + \omega_j(k) - x_i^{\beta_1}(k) \right) \\
&\quad + \varepsilon l_i \left( x_i^{\beta_2}(k) - x_i^{\beta_1}(k) \right) \\
x_i^{\beta_2}(k+1) &= r_i(k+1) + (1 - \alpha(k)) \left( x_i^{\beta_2}(k) - r_i(k) \right) \\
&\quad + \varepsilon l_i \left( x_i^{\beta_1}(k) - x_i^{\beta_2}(k) \right)
\end{aligned}$$

其中  $x_i^{\beta_1}(0) = r_i(0)$ ,  $x_i^{\beta_2}(0) = r_i(0)$ ,  $\forall i \in [m]$ ;  $\omega_j(k)$  是服从上述改进的拉普拉斯分布  $\omega_j \sim \text{Lap}(0, b(k))$  的噪声; 每个子系统的原始状态  $x_j(k)$  通过状态分解法被分解为两个子状态  $x_j^{\beta_1}(k)$  和  $x_j^{\beta_2}(k)$ , 子状态  $x_j^{\beta_1}(k)$  充当原始状态, 在添加噪声  $\omega_j(k)$  后用于与邻居进行信息交互, 而子状态  $x_j^{\beta_2}(k)$  只与  $x_j^{\beta_1}(k)$  进行交互;  $l_i$  是两个子状态  $x_i^{\beta_1}(k)$  和  $x_i^{\beta_2}(k)$  之间的权重并且假设该值对  $i$  是私有的;  $\varepsilon$  是正的步长;  $\chi(k)$  是衰减因子, 满足下列之一的假设:

- a)  $\sup_k \chi(k) \leq \frac{1}{\lambda_N(\mathcal{L})}$ ,  $\sum_{k=0}^{\infty} \chi(k) = \infty$ ,  $\lim_{k \rightarrow 0} \chi(k) b^2(k) = 0$ ,
- b)  $\sup_k \chi(k) \leq \frac{1}{\lambda_N(\mathcal{L})}$ ,  $\sum_{k=0}^{\infty} \chi(k) = \infty$ ,  $\lim_{k \rightarrow 0} \chi^2(k) b^2(k) = 0$ ,

其中  $\mathcal{L}$  表示权重矩阵  $L$  对应的拉普拉斯矩阵;  $\lambda_N(\mathcal{L})$  表示  $\mathcal{L}$  最大特征值。

然后, 定性分析该算法是如何实现同时防止被外部对手和内部诚实但好奇的对手推测敏感信息的, 并计算收敛误差的条件期望, 来证明该算法能使每个子系统的状态几乎必然收敛到时变参考信号的平均值  $\bar{r}(k)$ 。

最后, 定量分析隐私保护水平, 并对算法收敛性能和隐私保护水平之间的关系进行分析和权衡。

### (3) 基于非理想网络环境的隐私保护动态平均一致

第一步, 假设子系统  $i$  为子系统  $j$  的邻居且二者之间在  $k$  时刻的通信时滞为  $\tau_{ji}[k]$ , 且对于任意的  $\tau_{ji}[k]$  都满足  $0 \leq \tau_{ji}[k] \leq \tau_{max}$  以及  $\tau_{jj}[k] = 0$ 。假设  $i$  在第  $k$  步的状态变量为  $x_i(k)$ , 参考信号为  $r_i(k)$ , 并且初始值满足  $x_i(0) = r_i(0)$ 。为了实现隐私保护的目标,  $j$  对其状态  $x_j(k)$  加入差分隐私噪声  $\omega_j(k)$ , 然后向  $i$  发送扰动后的状态  $\tilde{x}_j(k) = x_j(k) + \omega_j(k)$ , 其中  $\omega_j \sim \text{Lap}(0, b(k))$ ,  $b(k)$  表示时变的方差序列, 此处随机噪声的均值设计为 0。

第二步, 考虑通信时滞对算法设计的影响。由于通信时滞的存在,  $i$  收到的  $j$  信息可以表示为  $\tilde{x}_j(k - \tau_{ji}[k]) = x_j(k - \tau_{ji}[k]) + \omega_j(k - \tau_{ji}[k])$ 。根据收到的延迟信息,  $i$  采用如下策略更新自己的状态:



$$x_i(k+1) = \sum_{j \in \mathbb{N}_i} \sum_{s=0}^{\tau_{max}} L_{ij} \left( \tilde{x}_j(k-s) - x_i(k) \right) \theta_{k-s,ij}(s) \\ + (1 - \vartheta(k))(x_i(k) - r_i(k)) + r_i(k+1)$$

其中 $L_{ij}$ 为拉普拉斯矩阵第 $i$ 行第 $j$ 列的元素； $\vartheta(k)$ 为 $k$ 时刻的步长； $\theta_{k-s,ij}(s)$ 用于区分时滞是否存在，当存在时滞时， $\theta_{k-s,ij}(s) = 1$ ，否则 $\theta_{k-s,ij}(s) = 0$ 。

第三步，考虑链路故障对算法设计的影响。当链路故障发生时，系统无法通过该链路获得理想的信息。针对该问题，子系统 $i$ 所采取的策略如下：

$$x_i(k+1) = \mu \sum_{j \in \mathbb{N}_i} \sum_{s=0}^{\tau_{max}} (1 - \rho_{ij}(k)) L_{ij} \left( \tilde{x}_j(k-s) - x_i(k) \right) \theta_{k-s,ij}(s) \\ + \mu \sum_{j \in \tilde{\mathbb{N}}_i} \sum_{s=0}^{\tau_{max}} \rho_{ij}(k) L_{ij} \left( \tilde{x}_j(k-s) - x_i(k) \right) \theta_{k-s,ij}(s) \\ + (1 - \vartheta(k))(x_i(k) - r_i(k)) + r_i(k+1)$$

其中 $\mu$ 为待确定设计参数， $\rho_{ij}(k)$ 用于表示 $i$ 和 $j$ 之间通信链路故障发生的概率， $\tilde{\mathbb{N}}_i$ 表示 $i$ 未发生链路故障的邻居集合。

第四步，综合考虑时滞和链路故障对算法收敛性的影响，确定系统时滞上界以及链路故障发生概率 $\rho_{ij}(k)$ 需要满足的条件，然后通过理论分析对算法的收敛性进行讨论。

第五步，对算法的隐私保护性能进行分析，探讨时滞和链路故障的存在对隐私保护水平的影响。根据差分隐私的定义，计算 $x_i(k+1) - x'_i(k+1)$ ，并求出隐私预算 $\epsilon$ 的上限，然后分析与时滞和链路故障有关的参数对算法收敛性能和隐私预算的影响。

### 2.3 隐私保护下基于强化学习的最优协同研究方案

本部分主要研究面向隐私保护基于强化学习的最优协同问题，具体技术路线图如图4所示。

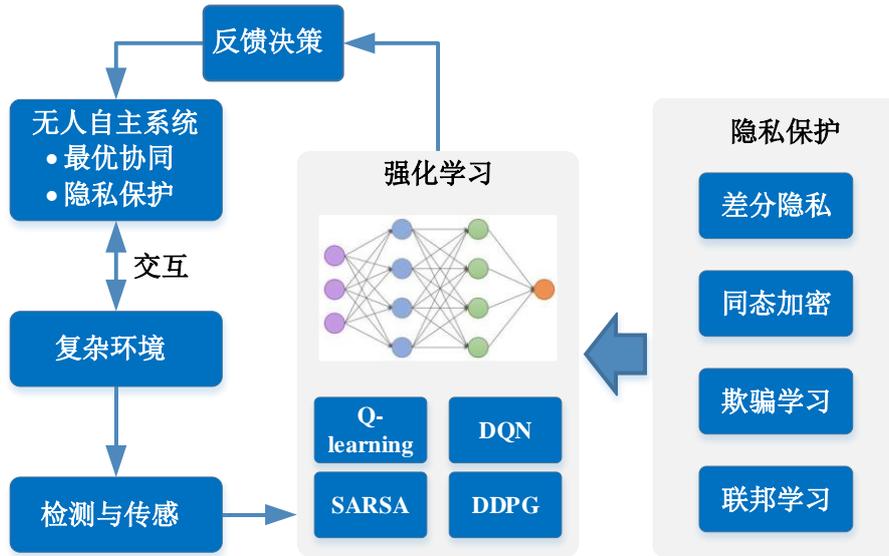


图 4 隐私保护下基于强化学习的最优协同

(1) 隐私保护下分布式强化学习最优协同

本部分研究隐私保护下分布式最优协同问题，将状态信息和奖励函数作为隐私保护对象，基于强化学习设计全局最优策略。具体方案如下：

考虑一类由 $N$ 个子系统组成的多无人系统，记第 $i$ 个子系统的状态为 $s_i, s_i \in S_i$ ，其中 $S_i$ 是状态空间；执行的动作为 $a_i, a_i \in A_i$ ，其中 $A_i$ 是对于状态 $s_i$ 的有效动作空间；动作奖励为 $r_i(s_i, a_i, s'_i)$ ，表示执行动作 $a_i$ ，使状态 $s_i$ 转换到状态 $s'_i$ 得到的奖励。

首先，为量化隐私风险，综合考虑最优协同目的和数据处理方式，定义隐私保护水平。

然后，将状态信息 $S_i$ 作为隐私保护对象，利用差分隐私或者同态加密等方法设计隐私保护机制，得到保护后的状态信息 $\tilde{S}_i$ 。

接着，将最优协同问题转换为马尔科夫决策过程，由元组 $\{\tilde{S}_i, A_i, P_i, r_i, \gamma_i\}$ 表示该过程，其中 $P_i(\tilde{s}_i, a_i, \tilde{s}'_i)$ 表示执行动作 $a_i$ ，使状态 $\tilde{s}_i$ 转换到状态 $\tilde{s}'_i$ 的概率； $\gamma_i \in (0,1)$ 表示折扣因子。马尔科夫决策过程的目的是找到最优策略 $\pi_i^*$ 使得以下值函数取到最大值：

$$V_{\pi_i}(\tilde{s}_i, a_i) = \mathbb{E}[\sum_{t \in T} \gamma_i r_i(\tilde{s}_i(t), a_i(t), \tilde{s}'_i(t+1))]$$

为实现全局最优，在分布式环境中，本部分拟采用各子系统相互交换策略和奖励信息的方式予以解决。

进而，按照以下几个步骤设计强化学习算法以得到 $\pi_i^*$ 。

第一步，探索环境。在状态空间 $\tilde{S}_i$ 内随机选择状态 $\tilde{s}_i$ ，并在动作空间 $A_i$ 中随



机选择动作 $a_i$ ，得到状态 $\tilde{s}'_i$ 和对应的奖励 $r_i$ ，记为 $\{\tilde{s}_i, a_i, r_i, \tilde{s}'_i\}$ 。然后重复以上步骤 $N_i$ 次，得到一组数据 $\{\tilde{s}_i(t_k), a_i(t_k), r_i(t_k), \tilde{s}'_i(t_k + 1)\}_{t_k}^{N_i}$ ，并将其储存。

第二步，网络训练。对上一步存储的数据进行采样，使用随机梯度下降法更新网络权重 $\eta_i$ ，从而使损耗函数 $l_i(\tilde{s}_i) = \mathbb{E}[r_i - V_{\pi_i}(\tilde{s}_i, a_i; \eta_i)]$ 最小。

第三步，得到最优协同策略： $\pi_i^* = \operatorname{argmax}_{a_i \in A_i} V_i^*(\tilde{s}_i, a_i; \eta_i)$ 。

最后，根据预定义的隐私保护水平分析隐私保护效果。

以上方案仅考虑对状态信息进行隐私保护。接下来，考虑将状态信息和奖励函数同时作为隐私保护对象，给出以下解决方案。为保护奖励函数信息，拟采用欺骗强化学习方法，将最优协同问题转换为欺骗马尔科夫决策过程 $\{\tilde{S}_i, A_i, P_i, R_i, r_i, B_i, L_i, \gamma_i\}$ ，其中 $R_i$ 表示一组候选奖励函数，包括真实奖励函数 $r_i$ 和至少一个虚假奖励函数； $B_i$ 是观测者的观点集； $L_i(\tilde{s}_i, a_i, \tilde{s}'_i, b_i)$ 是观点诱导奖励函数，表示在状态 $\tilde{s}_i$ 执行动作 $a_i$ 转移到状态 $\tilde{s}'_i$ 时，受观测者关于系统真实奖励函数的观点 $b_i$ 影响后的奖励函数。此时为得到可以最大化观点诱导值函数：

$$V_{\pi_i}(\tilde{s}_i, a_i) = \mathbb{E}[\sum_{t \in T} \gamma_i r_i(\tilde{s}_i(t), a_i(t), \tilde{s}'_i(t + 1), b_i)]$$

的最优策略 $\pi_i^*$ ，按照以上强化学习算法设计步骤设计欺骗强化学习算法。

## (2) 隐私保护下联邦强化学习最优协同

首先设计基于联邦强化学习的系统架构。整个系统包括1个聚合中心和 $N$ 个子系统。聚合中心将全局模型信息下发给每个子系统，使其利用自身数据训练本地模型，该训练过程可用马尔科夫决策过程 $\{S_i, A_i, P_i, r_i, \gamma_i\}$ 表示。

其次，每个子系统均采用强化学习中的深度Q网络（Deep Q Network, DQN）算法来训练本地模型，找到最优的模型参数。整个训练过程依赖于系统与环境的交互，通过 $Q$ 值更新来实现。对于第 $i$ 个子系统， $Q$ 值更新过程如下：

$$Q_{t+1}(s_i, a_i; \theta_i) \leftarrow \mathbb{E}_{s'_i} \left[ r(s_i) + \gamma_i \max_{a'_i \in A_i} Q_{t+1}(s'_i, a'_i; \theta_i) | s_i, a_i \right]$$

$$\pi_i^* = \operatorname{argmax}_{a_i \in A_i} Q^*(s_i, a_i; \theta_i)$$

其中 $s_i$ 为状态， $a_i$ 为动作， $s'_i$ 和 $a'_i$ 对应于下一时刻的状态和动作， $r(s_i)$ 为当前的奖励函数， $\theta_i$ 为模型参数， $\pi_i^*$ 为最优协同策略。 $Q$ 值更新的过程实质上是通过贝尔曼方程，采用时序差分的方式迭代更新状态-动作函数，找到可以使得累计平均奖励最大化的最优协同策略。值得指出的是，可采用其他强化学习算法进行以上



模型训练，例如 Q-learning、SARSA (State-Action-Reward-State-Action)、DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) 等。

然后，聚合中心收集各子系统学习到的模型参数，进行聚合操作。本部分针对现有加权平均聚合算法的不足，考虑每个子系统数据的异构性，拟根据系统环境及性能差异设计一种动态聚合算法，利用以下式子得到更加精准的全局模型参数：

$$\Theta_t = \sum_{i=1}^N \frac{K_i}{K} f(\Theta_t^i)$$

其中  $\Theta_t$  表示  $t$  时刻的全局参数， $\Theta_t^i$  表示第  $i$  个子系统  $t$  时刻所学习到的参数， $K_i$  表示第  $i$  个子系统的数据总量， $K$  表示所有子系统的数据总量， $f(\Theta_t^i)$  为所设计的聚合函数。

最后，聚合中心将聚合后的全局模型参数  $\Theta_t$  下发给各个子系统，用于本地模型的参数更新。为提高子系统的训练效率，本部分拟引入可用的先验知识，加速参数训练过程。为了定量分析算法隐私性，拟利用信息熵来衡量隐私泄露风险，并利用隐私损失评估隐私保护强度。

## 2.4 隐私保护下的分布式优化与博弈研究方案

考虑复杂对抗环境下分布式决策中的隐私安全、通信时滞、通信受限与目标函数未知等难点，针对基于隐私保护的分布式优化与博弈理论开展研究，具体技术路线如图 5 所示。

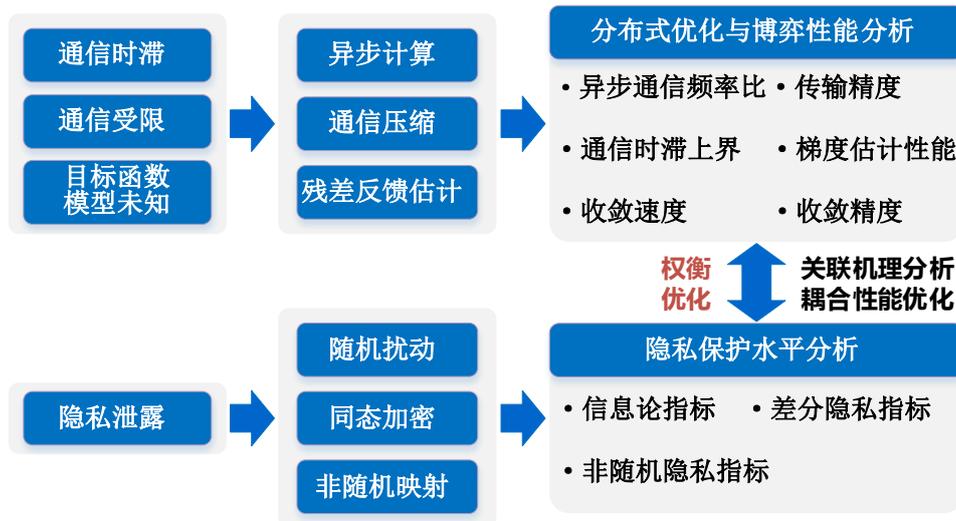


图 5 隐私保护下的分布式优化与博弈研究方案

### (1) 基于异步计算的隐私保护分布式优化



首先，针对分布式优化的隐私泄露和通信时滞问题，提出基于异步计算的隐私保护分布式优化算法：

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \sum_{j \in N_i(t)} [x_j(t - \tau_j^t) - x_i(t)] - \nabla f_i(x_i(t))$$

其中， $x_i(t)$ 表示节点*i*在*t*时刻的优化决策变量； $N_i(t)$ 表示节点*i*在*t*时刻的邻居节点集合； $\tau_j^t$ 表示*t*时刻节点*j*的通信传输中存在的时滞； $\nabla f_i(x_i(t))$ 是目标函数 $f_i$ 在 $x_i(t)$ 处的梯度。根据通信时滞的上界，可以进一步建立分布式网络的增广通信拓扑 $G_{delay}(V, E)$ ，其中， $V$ 表示网络节点与虚拟节点构成的点集，而 $E$ 为考虑通信时滞后的增广边集。然后，根据网络拓扑结构 $G_{delay}(V, E)$ 的特点，采用相关随机扰动与同态加密等技术构建有效的隐私保护机制，实现本地决策变量 $x_j(t - \tau_j^t)$ 的隐私保护。

考虑具有环境约束的分布式凸优化以及非凸优化问题，分析算法收敛速度与通信时滞、传输精度、异步通信频率比以及网络拓扑结构的关联关系。选取合适的隐私衡量指标，例如互信息 $I(X, Y) = \sum_{x, y} p(x, y) \log p(x, y) / p(x)p(y)$ 以及 $(\epsilon, \delta)$ -差分隐私，并研究通信时滞等因素对优化收敛速度与隐私保护水平之间权衡的影响。进一步，通过节点随机休眠机制降低分布式节点的隐私信息传输频率，在维持算法收敛速度的基础上增强隐私保护水平，实现异步、高效的隐私保护分布式优化求解。

## (2) 基于通信压缩的隐私保护分布式博弈

考虑大规模的多方博弈问题：

$$P = \{\phi, \Omega, J\}$$

其中 $\phi$ 为博弈节点集合， $\Omega$ 为策略集合， $J$ 为目标函数集合。针对博弈中策略交互导致网络通信数据量剧增，提出基于通信压缩的隐私保护分布式纳什均衡搜索算法。

基于本地私有化的通信压缩输出，设计截断拉普拉斯分布扰动并通过离散化构建隐私映射机制，得到扰动 $r$ 的概率质量函数如下：

$$(r; a, \lambda) = \begin{cases} \frac{H}{2} e^{-\frac{|r|-0.5}{\lambda}} \left(1 - e^{-\frac{1}{\lambda}}\right), & r \in [-a, a], r \neq 0 \\ H \left(1 - e^{-\frac{1}{2\lambda}}\right), & r = 0 \end{cases}$$

其中 $H = (1 - e^{-\frac{a+0.5}{\lambda}})^{-1}$ 为归一化因子， $a$ 为截断上界， $\lambda$ 为扰动方差。

然后，利用通信压缩误差补偿方法动态调整压缩器区间长度（即 $\Delta(t) =$



$\|x_i(t) - \hat{x}_i(t-1)\|/u$ , 其中 $\hat{x}_i(t)$ 是算法的量化更新策略,  $u$ 为量化传输精度), 使得离散扰动的方差根据收敛误差自适应变化, 确保分布式博弈算法精确收敛到纳什均衡点。

进一步, 针对通信时滞问题采用异步计算方式, 并研究离散扰动的方差 $\lambda$ 和截断上界 $a$ 等参数与算法步长间的关联关系, 在有限传输精度下实现分布式博弈算法收敛速度与隐私保护水平的权衡。

### (3) 基于零阶反馈信息的隐私保护分布式优化与博弈

考虑到复杂对抗环境下分布式优化与博弈的目标函数难以显式表达, 采用单点残差反馈估计技术构建梯度估计如下:

$$g_i(t) = \frac{n}{\zeta} [J_i(\tilde{x}(t)) - J_i(\tilde{x}(t-1))\mu(t)]$$

其中 $\tilde{x}(t)$ 是根据随机向量 $\mu(t)$ 构造的实际执行策略;  $n$ 为优化或博弈的策略维度;  $\zeta$ 为随机算法的采样参数;  $J_i$ 为节点 $i$ 的本地目标函数。

然后, 针对时滞的零阶反馈信息, 设计基于 Nesterov 动量加速或自适应梯度学习率的分布式优化与博弈异步算法:

$$\begin{aligned} v_i(t+1) &= x_i(t) - \alpha g_i(t) \\ x_i(t+1) &= v_i(t+1) + \beta(v_i(t+1) - v_i(t)) \end{aligned}$$

其中 $\alpha$ 和 $\beta$ 为算法的固定步长,  $v_i(t)$ 为加速算法中的梯度下降部分。

进一步, 研究随机扰动与非随机映射等隐私保护方法对梯度估计准确度和方差的影响机理, 并根据分布式优化与博弈算法收敛精度、收敛速度以及隐私保护水平的具体需求设计隐私保护机制。通过选取合适的隐私衡量指标, 构建并求解隐私参数 $\epsilon$ 和 $\delta$ 、估计参数 $\zeta$ 以及算法步长 $\alpha$ 和 $\beta$ 间的权衡优化问题。

## 2.5 基于无人车/机集群的实验验证

基于现有的空地协同无人自主系统实验平台, 以轮式/履带无人车与四旋翼无人机分别模拟复杂环境下不同的作战单元, 进而对本项目的理论研究成果展开全方位实验验证。实验方案主要分为以下四个步骤: 模型构建、算法设计与验证、软硬件在环仿真以及实验验证。具体如下:

第一步, 建模阶段包括建立不同作战单元的系统模型、复杂环境下网络通信拓扑模型以及任务决策奖励/目标函数模型。首先, 根据不同类型的无人车与无人机的动力学特性和运动学特性, 分别构建各作战单元的非线性系统模型。然后,



根据复杂环境下作战场景与协同任务特点明确系统内作战单元间的通信协议与规则，进而构建具体的分布式网络通信拓扑模型。进一步，基于集群或各作战单元的实际任务（例如路径规划、协同编队以及攻防作战等）与具体的任务需求（例如信息侦查效率、协同合作效率以及目标攻击与防御拦截准确度等），设计无人系统分布式决策的奖励/目标函数模型。

第二步，根据研究内容与研究方案设计理论算法，利用 MATLAB/Simulink 工具箱进行算法验证，并评估其在不同情况下的性能表现，结合理论分析初步设计基于隐私保护分布式控制与决策的算法参数。

第三步，将所设计的算法嵌入到 Airsim 和 Quanser 等无人系统仿真平台中进行软件在环仿真，模拟无人机与无人车集群的多种作战任务场景，同时利用开源自动驾驶仪 PX4 进行硬件在环仿真，进而根据软硬件实时的仿真效果优化所设计的算法并调整相关参数。

第四步，基于现有的空地协同无人自主系统实验平台进行算法验证。首先编写通信时滞以及隐私窃听攻击的模块化程序，并通过数据接口连接实验平台。该平台主要由无人车/无人机系统、定位系统、无线通信系统以及控制系统四部分构成。其中，定位子系统依托于 Vicon 光学动态视觉捕捉系统，通过识别无人车与无人机上的光学反光球获取其位置及姿态信息，实现精确定位。平台采用基于 Wi-Fi 的 UDP 模式通信，根据通信数据格式要求对应用层协议进行自定义，并从 SDK 接口读取数据进行打包发送，实现 Vicon 定位系统与无人车/无人机之间的通信。然后，模拟多种无人自主系统的作战任务场景，包括分布式协同编队、目标追捕、攻防对抗等。执行基于隐私保护的分布式控制、强化学习、优化与博弈算法，并通过不断调整模块化程序中通信时滞上界与隐私窃听攻击强度以进行测试，全面验证所提出的基于隐私保护分布式算法的有效性与安全性。通过对实验数据结果进行分析对比，进一步研究隐私保护水平与算法性能间的权衡问题以提高算法的实用性和可靠性，从而完善基于隐私保护的分布式控制与决策算法的研究成果。

### 三、研究目标

本项目以隐私保护水平和控制性能等多指标为目标，旨在探讨控制系统中时滞对隐私保护性能和稳定性能的影响，阐明隐私保护下的时滞系统稳定性分析方法和控制器设计思路。建立面向双重对手的隐私保护动态平均一致性算法，揭示时滞和链路故障等非理想网络环境对隐私保护水平的影响。探索隐私保护机制与



强化学习算法的有效融合，保证在系统隐私信息不被泄露的同时实现分布式最优协同。提出基于异步计算、通信压缩以及零阶反馈的隐私保护分布式优化与博弈算法，实现复杂环境下算法隐私性能与收敛速度、通信带宽的权衡。本项目旨在实现隐私保护和控制与决策方法的一体化研究，形成有特色的创新成果，推动和丰富群体智能及信息安全基础研究体系。

#### 四、合作研究单位的关系和分工

本项目由南京理工大学牵头，合作研究单位是北京理工大学和聊城大学。本团队与北京理工大学刘坤教授团队在时滞系统稳定性分析、多智能体系统分布式控制与决策等方向长期以来保持着学术交流和讨论；本团队与聊城大学夏建伟教授团队在复杂动态系统稳定性分析与协同控制方向有着良好的论文合作基础。

分工如下：

“研究内容一：隐私保护下时滞系统稳定性分析”由南京理工大学和聊城大学负责；

“研究内容二：隐私保护下分布式动态平均一致”由南京理工大学和北京理工大学负责；

“研究内容三：隐私保护下基于强化学习的最优协同”由南京理工大学和北京理工大学负责；

“研究内容四：隐私保护下的分布式优化与博弈”由南京理工大学和北京理工大学负责；

“研究内容五：地空协同无人自主运动平台实验验证”由南京理工大学负责。

#### 五、年度研究计划

##### 2025年1月-2025年12月

提出基于差分隐私机制和状态分解机制的时滞系统稳定性分析方法和控制器设计方案，并分析时滞容许范围内的稳定性能和隐私保护性能。

参加国内外举办的具有影响力的学术会议，在会上报告项目的研究成果。邀请国内外学者来校访问。组织学术研讨会、交流会。

##### 2026年1月-2026年12月

改进现有的噪声机制，在同时存在诚实但好奇的对手和窃听者的情况下，设计基于改进噪声机制的动态平均一致性算法，并分析时滞和通信链路故障等非理想因素对算法的收敛性能和隐私保护水平的影响。

参加国内外举办的具有影响力的学术会议，在会上报告项目的研究成果。邀



请国内外学者来校访问。组织学术研讨会、交流会。

### 2027年1月-2027年12月

提出能同时保护系统状态信息和奖励函数的分布式欺骗强化学习算法，获得最优协同策略，并给出基于强化学习的隐私保护水平分析。比较不同模型聚合算法对联邦强化学习算法性能的影响，探讨改进算法性能的方法。

参加国内外举办的具有影响力的学术会议，在会上报告项目的研究成果。邀请国内外学者来校访问。组织学术研讨会、交流会。

### 2028年1月-2028年12月

设计基于隐私保护的异步分布式优化算法，探索维持算法收敛速度的基础上提升隐私保护水平的方法。设计基于通信压缩的隐私保护分布式博弈算法，分析隐私参数与算法步长的关系。将所建立的隐私保护下的分布式控制与决策的方法应用至无人机/车集群系统，并基于实验平台验证方法的有效性。

参加国内外举办的具有影响力的学术会议，加强学术交流。邀请国内外学者来校访问，安排项目组成员赴国外相关研究机构（高校）访问。组织学术研讨会、交流会。

进行项目总结，提交结题报告。



## 国家自然科学基金项目负责人、依托单位承诺书

## 国家自然科学基金项目负责人承诺书

本人郑重承诺：我接受国家自然科学基金的资助，严格遵守中共中央办公厅、国务院办公厅《关于进一步加强科研诚信建设的若干意见》《关于进一步弘扬科学家精神加强作风和学风建设的意见》《关于加强科技伦理治理的意见》《科技伦理审查办法（试行）》等规定，和国家自然科学基金委员会关于资助项目管理、项目资金管理等各项规章，在《计划书》填写及项目执行过程中：

（一）按照《批准通知》《国家自然科学基金资助项目计划书填报说明》的要求填写《计划书》，未自行降低、更改目标任务或约定要求，或缩减研究（研制）内容；

（二）树立“红线”意识，严格履行科研合同义务，按照《计划书》负责实施本项目（批准号：U24A20264），切实保证研究工作时间，按时报送有关材料，及时报告重大情况变动，不违规将科研任务转包、分包他人，不以项目实施周期外或不相关成果充抵交差；

（三）遵守科研诚信、科技伦理规范和学术道德，认真开展研究工作，对资助项目发表的论著和取得的研究成果按规定进行标注，不在非本项目资助的成果或其他无关成果上标注本项目批准号，反对无实质学术贡献者“挂名”，不在成果署名、知识产权归属等方面侵占他人合法权益，并如实报告本人及项目组成员发生的违背科研诚信要求的任何行为；

（四）尊重科研规律，弘扬科学家精神，严谨求实，追求卓越，反对浮夸浮躁、投机取巧，不人为夸大学术或技术价值，不传播未经科学验证的现象和观点；

（五）将项目资金全部用于与本项目研究工作相关的支出，并结合科研活动需要，科学合理安排项目资金支出进度；

（六）做好项目组成员的教育和管理，确保遵守以上相关要求。

如违背上述承诺，本人愿接受国家自然科学基金委员会和相关部门做出的各项处理决定。

项目负责人（签字）：

年 月 日

依托单位科研管理部门：

负责人（签章）：

年 月 日

依托单位财务管理部门：

负责人（签章）：

年 月 日

## 国家自然科学基金项目依托单位承诺书

我单位同意承担上述国家自然科学基金项目，将保证项目负责人及其研究队伍的稳定和研究项目实施所需的条件，严格遵守中共中央办公厅、国务院办公厅《关于进一步加强科研诚信建设的若干意见》《关于进一步弘扬科学家精神加强作风和学风建设的意见》《关于加强科技伦理治理的意见》《科技伦理审查办法（试行）》等规定，和国家自然科学基金委员会有关资助项目管理、项目资金管理、科研诚信管理和科技伦理管理等各项规定，并督促实施。

依托单位（公章）

年 月 日



## 国家自然科学基金资助项目签批审核表

本栏目由自然科学基金委填写

科学处审查意见：

负责人（签章）：  
年 月 日

科学部审查意见：

负责人（签章）：  
年 月 日

## 关于国家自然科学基金资助项目批准及有关事项的通知

夏建伟 先生/女士：

根据《国家自然科学基金条例》的规定和专家评审意见，国家自然科学基金委员会（以下简称自然科学基金委）决定批准资助您的申请项目。项目批准号：

61573177，项目名称：多性能指标下随机时滞切换系统的稳定性分析与控制，直接费用：65.00万元，项目起止年月：2016年01月至2019年12月，有关项目的评审意见及修改意见附后。

请尽早登录科学基金网络信息系统（<https://isisn.nsf.gov.cn>），获取《国家自然科学基金资助项目计划书》（以下简称计划书）并按要求填写。对于有修改意见的项目，请按修改意见及时调整计划书相关内容；如对修改意见有异议，须在计划书电子版报送截止日期前提出。**注意：请严格按照《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》填写计划书的资金预算表，其中，劳务费、专家咨询费科目所列金额与申请书相比不得调增。**

计划书电子版通过科学基金网络信息系统（<https://isisn.nsf.gov.cn>）上传，由依托单位审核后提交至自然科学基金委进行审核。审核未通过者，返回修改后再行提交；审核通过者，打印为计划书纸质版（一式两份，双面打印），由依托单位审核并加盖单位公章后报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。计划书电子版和纸质版内容应当保证一致。

向自然科学基金委提交和报送计划书截止时间节点如下：

- 1、提交计划书电子版截止时间为**2015年9月11日16点**（视为计划书正式提交时间）；
- 2、提交计划书电子修改版截止时间为**2015年9月18日16点**；
- 3、报送计划书纸质版截止时间为**2015年9月25日16点**。

请按照以上规定及时提交计划书电子版，并报送计划书纸质版，未说明理由且逾期不报计划书者，视为自动放弃接受资助。

附件：项目评审意见及修改意见

国家自然科学基金委员会  
信息科学部  
2015年8月17日

## 附件：项目评审意见及修改意见表

|   |                         |       |                     |       |         |
|---|-------------------------|-------|---------------------|-------|---------|
| 项目批准号   | 61573177                | 项目负责人 | 夏建伟                 | 申请代码1 | F030106 |
| 项目名称  | 多性能指标下随机时滞切换系统的稳定性分析与控制 |       |                     |       |         |
| 资助类别  | 面上项目                    | 亚类说明  |                     |       |         |
| 附注说明  | 常规面上项目                  |       |                     |       |         |
| 依托单位  | 聊城大学                    |       |                     |       |         |
| 直接费用  | 65.00 万元                | 起止年月  | 2016年01月 至 2019年12月 |       |         |
| <p>通讯评审意见：</p> <p>&lt;1&gt;本项目拟研究多性能指标下随机时滞切换系统的稳定性分析与控制。主要研究内容包括：1. 提出基于高次齐次多项式的LK稳定性分析方法，同时基于自由权矩阵和Wirtinger不等式技术，给出时滞系统保守性低的渐近稳定、指数稳定性分析结果；2. 通过构造非卷积多LK泛函、鞅分析及平均驻留时间等，研究时滞切换系统多性能指标下的控制和滤波问题；3. 进一步研究系统在复杂不确定情形下的滑模控制问题。申请书在立项依据，国内外研究现状分析等方面给出详细清晰的论述。在研究内容、目标、拟解决的关键问题以及技术路线等方面论述清楚合理。项目成员梯队合理。已经取得的成果表明，申请人及项目组成员具有很好的相关背景知识和研究基础。建议优先资助。</p> <p>&lt;2&gt;</p> <p>随机时滞切换系统控制问题是控制理论的一个重要研究领域。申请书拟对多种随机时滞切换系统在稳定性分析基础上，研究多性能指标下的控制器、滤波器及滑模控制等问题。主要存在问题如下：</p> <p>1、所提研究内容过于分散，衔接性不够。具体的三个主要研究内容分别是：</p> <p>（1）高次齐次多项式的L-K稳定性分析方法；</p> <p>（2）多性能指标下的控制、滤波问题；</p> <p>（3）状态未知，控制器受限、执行器故障等扰动或者信息不全情况下的滑模控制问题。</p> <p>分别用三中方法解决三个方面的问题，三者之间没有必然技术上的联系。</p> <p>2、拟解决的关键科学问题凝练不够。以“滑模面和滑模控制器的设计方法研究”为例：项目拟针对“输入矩阵不同，系统状态不可测、执行器失效、观测器含参数扰动，信息丢失”等情况研究不确定随机时滞切换系统的滑模控制。但是没有阐述考虑上述情况后，对随机时滞切换系统进行滑模控制设计带来的本质难点是什么？需要解决的根本问题是什么？仅仅用“从分析随机时滞切换系统的稳定性和滑模控制方法的结构特点出发，给出各类滑模面和滑模控制器的设计方法”作为关键问题显然不够具体，不够恰当。</p> <p>3、采取的技术路线均为已有研究成果的简单组合，创新性不够。仍以“多种不确定情况下随机时滞切换系统的滑模控制”为例：所提4个步骤具体技术路线均为已有滑模变结构控制理论成果和方法的常用手段，未能体现出项目应有的独特性和创新性。</p> <p>建议进一步研究探索，凝练出更具体的科学问题后再做申请。</p> <p>&lt;3&gt;随机时滞切换系统由于其自身结构的复杂性，同时能够有效描述诸多实际对象，其研究有重要的理论意义和应用价值。本项目拟对各类随机时滞切换系统，在稳定性分析基础上，研究系统多性能指标下的控制器、滤波器设计及滑模控制等问题。</p> <p>1.</p> <p>申请人在立项依据中全面的分析了国内外的研究现状，然后总结了目前该方向研究中存在的问题，进而提出了本项目的研究内容，该研究内容详细而全面，具有一定的特色，研究目标明确。提出的基于高次齐次多项式的L-K泛函方法具有一定的创新。</p> <p>2.</p> <p>申请人具体的提出了拟解决的科学问题，这些问题的解决可以有效的解决本项目的难点问题，申请人也非常好的给出了研究方案，详细的给出了该项目研究的技术路线，逐项分析了本项目研究的可行性。</p> <p>3.</p> <p>申请团队结构合理，围绕本项目的研究前期做了大量的工作，积累了丰富的经验，也发表了一系列高水平的研究成果，无论从软件还是硬件都具有非常好的研究条件。</p> |                         |       |                     |       |         |

综合以上分析认为可以优先资助本项目。

<4>该课题主要研究时滞系统的相关稳定性分析、多指标下随机时滞切换系统的控制与滤波、多种不确定情况下的滑模控制等问题。主要采用的理论方法包括泛函理论、自由权矩阵以及Wirtinger积分不等式技术等。研究内容充实，研究目标明确，研究方案整体可行。该课题具有一定的研究价值和创新性，建议资助。其他建议：研究队伍不合理，外单位人员超过5位，且外单位博士研究生参与该课题的时间和力度值得怀疑。

对研究方案的修改意见：

信息科学部

2015年8月17日

## 关于国家自然科学基金资助项目批准及有关事项的通知

庄光明 先生/女士：

根据《国家自然科学基金条例》的规定和专家评审意见，国家自然科学基金委员会（以下简称自然科学基金委）决定批准资助您的申请项目。项目批准号：

61773191，项目名称：时滞奇异随机跳变系统容许性分析与控制器设计研究，直接费用：63.00万元，项目起止年月：2018年01月至2021年12月，有关项目的评审意见及修改意见附后。

请尽早登录科学基金网络信息系统（<https://isisn.nsf.gov.cn>），获取《国家自然科学基金资助项目计划书》（以下简称计划书）并按要求填写。对于有修改意见的项目，请按修改意见及时调整计划书相关内容；如对修改意见有异议，须在计划书电子版报送截止日期前提出。**注意：请严格按照《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》填写计划书的资金预算表，其中，劳务费、专家咨询费科目所列金额与申请书相比不得调增。**

计划书电子版通过科学基金网络信息系统（<https://isisn.nsf.gov.cn>）上传，由依托单位审核后提交至自然科学基金委进行审核。审核未通过者，返回修改后再行提交；审核通过者，打印为计划书纸质版（一式两份，双面打印），由依托单位审核并加盖单位公章后报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。计划书电子版和纸质版内容应当保证一致。

向自然科学基金委提交和报送计划书截止时间节点如下：

- 1、提交计划书电子版截止时间为**2017年9月11日16点**（视为计划书正式提交时间）；
- 2、提交计划书电子修改版截止时间为**2017年9月18日16点**；
- 3、报送计划书纸质版截止时间为**2017年9月26日16点**。

**请按照以上规定及时提交计划书电子版，并报送计划书纸质版，未说明理由且逾期不报计划书者，视为自动放弃接受资助。**

附件：项目评审意见及修改意见表

国家自然科学基金委员会  
信息科学部  
2017年8月17日

## 附件：项目评审意见及修改意见表

|   |                         |       |                     |       |         |
|---|-------------------------|-------|---------------------|-------|---------|
| 项目批准号   | 61773191                | 项目负责人 | 庄光明                 | 申请代码1 | F030106 |
| 项目名称  | 时滞奇异随机跳变系统容许性分析与控制器设计研究 |       |                     |       |         |
| 资助类别  | 面上项目                    | 亚类说明  |                     |       |         |
| 附注说明  | 常规面上项目                  |       |                     |       |         |
| 依托单位  | 聊城大学                    |       |                     |       |         |
| 直接费用  | 63.00 万元                | 起止年月  | 2018年01月 至 2021年12月 |       |         |
| <p>通讯评审意见：</p> <p>&lt;1&gt;该项目研究时滞奇异随机跳变系统容许性分析与控制器设计，既有很好的理论意义，又有很强的实际背景。申请者组成了一支结构合理的研究团队，提出了明确的研究目标和具体的研究问题方法，有创新性好的研究思想。申请者主持国家青年基金和山东省属高校优秀青年基金，有很好的工作基础，相信可以完成预定研究目标，建议优先资助。</p> <p>&lt;2&gt;本项目拟以时滞奇异随机跳变系统为研究对象，旨在提出有效的容许性分析与控制器设计方法。项目申请人对于研究目标和研究内容做了详细、明确的阐述，研究内容具有一定的理论价值。另外，研究方案具有一定的创新之处。项目申请人的团队在相关领域有一定的前期积累和较为丰富的研究经验，预期能够保证项目的顺利完成。</p> <p>&lt;3&gt;本项目拟研究时滞奇异随机跳变系统的容许性分析和控制器设计问题。从立项依据来看，本项目的选题有一定意义，但缺乏特色；从研究内容来看，内容的提炼不太具体。技术路线比较清晰。申请人在随机奇异时滞系统的跟踪控制方面有一定的前期工作基础。总的来说，申请项目具有一定的科学研究价值或应用前景，总体研究方案尚可，可以资助。</p> <p>&lt;4&gt;本项目拟研究时滞影响下奇异随机跳变系统的容许性分析与控制器设计问题，选题具有重要的理论意义。拟研究的迟钝型时滞奇异Markovian跳变系统和中立型时滞奇异Markovian跳变系统的稳定性分析，伊藤随机迟钝型和中立型时滞奇异跳变系统的容许性分析与控制器设计问题，在理论上存在一定的难度。本文关键科学问题凝练较好，采取的研究方案具有创新性，需要注意的是研究成果在实际工程中的具体应用前景。研究团队合理，具有较好的前期研究基础，有望取得较好的成果。</p> <p>综上，建议优先资助。</p> <p>&lt;5&gt;本项目研究时延广义随机跳变系统的容许性分析与控制问题，项目具有重要的理论意义，在电力系统等领域具有广泛的应用前景。本项目研究目标明确，研究内容丰富，具有挑战性，拟解决的关键科学问题阐述清晰，研究方案和技术路线可行，理论方法具有创新性。申请人在相关领域取得了重要的前期积累，期待在理论方法和成果方面取得重要进展，发表高水平论文。建议优先资助。</p> <p>修改意见：</p> <p style="text-align: right;">信息科学部<br/>2017年8月17日</p> |                         |       |                     |       |         |

## 国家自然科学基金资助项目批准通知

夏建伟 先生/女士：

根据《国家自然科学基金条例》和专家评审意见，国家自然科学基金委员会（以下简称自然科学基金委）决定批准资助您的申请项目。项目批准号：61973148，项目名称：切换-Markov跳变随机系统的非周期采样控制，直接费用：63.00万元，项目起止年月：2020年01月至2023年12月，有关项目的评审意见及修改意见附后。

请尽早登录科学基金网络信息系统（<https://isisn.nsf.gov.cn>），获取《国家自然科学基金资助项目计划书》（以下简称计划书）并按要求填写。对于有修改意见的项目，请按修改意见及时调整计划书相关内容；如对修改意见有异议，须在电子版计划书报送截止日期前向相关科学处提出。

电子版计划书通过科学基金网络信息系统（<https://isisn.nsf.gov.cn>）上传，依托单位审核后提交至自然科学基金委进行审核。审核未通过者，返回修改后再行提交；审核通过者，打印纸质版计划书（一式两份，双面打印），依托单位审核并加盖单位公章后报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。电子版和纸质版计划书内容应当保证一致。向自然科学基金委提交和报送计划书截止时间节点如下：

- 1、提交电子版计划书截止时间为**2019年9月11日16点**（视为计划书正式提交时间）；
- 2、提交电子修改版计划书截止时间为**2019年9月18日16点**；
- 3、报送纸质版计划书截止时间为**2019年9月26日16点**。

**请按照以上规定及时提交电子版计划书，并报送纸质版计划书，未说明理由且逾期不报计划书者，视为自动放弃接受资助。**

附件：项目评审意见及修改意见表

国家自然科学基金委员会  
2019年8月16日

## 附件：项目评审意见及修改意见表

|  |                         |       |                     |       |         |
|--|-------------------------|-------|---------------------|-------|---------|
| 项目批准号  | 61973148                | 项目负责人 | 夏建伟                 | 申请代码1 | F030101 |
| 项目名称   | 切换-Markov跳变随机系统的非周期采样控制 |       |                     |       |         |
| 资助类别   | 面上项目                    | 亚类说明  |                     |       |         |
| 附注说明   |                         |       |                     |       |         |
| 依托单位   | 聊城大学                    |       |                     |       |         |
| 直接费用   | 63.00 万元                | 起止年月  | 2020年01月 至 2023年12月 |       |         |
| <p>通讯评审意见：</p> <p>&lt;1&gt;具体评价意见：</p> <p>一、请针对创新点详细评述申请项目的创新性、科学价值以及对相关领域的潜在影响。<br/>本项目研究马尔科夫跳变系统的非周期采样开展问题。目前马尔科夫跳变系统研究非常多，需要结合工程应用开展理论研究。本项目抓住了非采样控制这个工程设计中较为重要的问题，不仅有很好的理论意义也具有一定的工程价值。</p> <p>二、请结合申请项目的研究方案与申请人的研究基础评述项目的可行性。<br/>研究基础较好，研究方案可行。</p> <p>三、其他建议<br/>结合工程实例开展仿真研究。</p> <p>&lt;2&gt;具体评价意见：</p> <p>一、请针对创新点详细评述申请项目的创新性、科学价值以及对相关领域的潜在影响。<br/>项目拟针对切换随机系统、Markovian跳变随机系统、切换-Markovian跳变随机系统及大规模切换-Markovian网络化系统，研究非周期采样控制的分析和设计方法，揭示切换信号、时滞、马尔科夫跳变等因素在非周期采样控制设计中的影响，给出各类系统的稳定性条件及设计方案。重点解决系统切换模态和采样控制器模态异步问题，为基于数字信号处理的实际系统控制提供理论基础。</p> <p>二、请结合申请项目的研究方案与申请人的研究基础评述项目的可行性。<br/>研究方案具体、可行。项目申请人一直从事随机系统和切换系统，曾荣获山东高等学校优秀科研成果奖自然科学奖一等奖（2015）和二等奖（2017），有扎实的科学研究基础和经验。</p> <p>三、其他建议</p> <p>&lt;3&gt;具体评价意见：</p> <p>一、请针对创新点详细评述申请项目的创新性、科学价值以及对相关领域的潜在影响。<br/>本项目针对非周期采样切换随机系统以及切换Markovian跳变随机系统进行研究，包括同步或者异步条件下的性能优化以及相应的算法实现。此研究问题具有一定的挑战性，拟解决的关键科学问题有较好的创新性，具体表现在：1. 所提出的设计方案能有效克服最大采样周期不大于最小驻留时间的条件约束；2. 所提出的设计方案可以克服采样控制器模态与系统模态一致的条件约束。研究内容属于该领域的难点，科学问题凝练深刻，有重要的学术价值。项目研究将完善和发展切换随机系统以及切换Markovian跳变随机系统的控制理论，同时对工程实践具有指导意义。</p> <p>二、请结合申请项目的研究方案与申请人的研究基础评述项目的可行性。<br/>本项目研究目标明确，研究思路清晰，并且研究方案叙述详细合理，具有较好的可行性。项目组成员配置合理，在该研究领域有了较好的积累，发表了一些相关的高水平论文，预期目标有望达到。</p> |                         |       |                     |       |         |

三、其他建议

无。

<4>具体评价意见:

一、请针对创新点详细评述申请项目的创新性、科学价值以及对相关领域的潜在影响。

本项目主要研究了切换-Markov跳变随机系统的非周期采样控制问题，具有一定的理论创新、内容充实、重点突出、具有一定的科学价值和应用前景。申请人具有较好的研究基础，建议优先资助。

二、请结合申请项目的研究方案与申请人的研究基础评述项目的可行性。

技术路线设计合理，人员配置恰当，前期研究成果较好，研究方案可行。

三、其他建议

摘要中应该阐述一下预期的研究成果。

<5>具体评价意见:

一、请针对创新点详细评述申请项目的创新性、科学价值以及对相关领域的潜在影响。

该项目在新的非周期采样反馈系统的基础上，创新性地提出了一套有效地稳定性分析和控制设计的新方法。该项目成员组成合理，经费预算符合要求，立项依据充分，文献综述较好，重点突出，清晰地阐述了该领域的前沿问题。根据当前存在的问题，提出了本项目的研究内容。提出的关键科学问题较为凝练，且在研究方案中给出了具体的解决办法，技术路线可行，创新性明显。申请人在领域内发表了多篇学术论文，研究基础好。建议给予优先资助。

二、请结合申请项目的研究方案与申请人的研究基础评述项目的可行性。

该项目的研究方案具体，申请人在控制领域内的主流刊物上发表了多篇学术论文，项目完成的可行性好。

三、其他建议

无

修改意见:

信息科学部

2019年8月16日



|        |                    |
|--------|--------------------|
| 项目批准号  | 61976110           |
| 申请代码   | F060504            |
| 归口管理部门 |                    |
| 依托单位代码 | 25205908A0648-1193 |



619761101004790

# 国家自然科学基金委员会 资助项目计划书

资助类别：面上项目

亚类说明：

附注说明：

项目名称：功能脑图学习的高阶正则化框架及其应用研究

直接费用：56万元                      执行年限：2020.01-2023.12

负责人：乔立山

通讯地址：山东省聊城市湖南路1号 聊城大学数学科学学院

邮政编码：252000                      电     话：15006354718

电子邮件：qiaolishan@lcu.edu.cn

依托单位：聊城大学

联系人：李恒帅                      电     话：0635-8239599

填表日期：2019年08月21日

国家自然科学基金委员会制



## 国家自然科学基金委员会资助项目计划书填报说明

- 一、项目负责人收到《关于国家自然科学基金资助项目批准及有关事项的通知》（以下简称《批准通知》）后，请认真阅读本填报说明，参照国家自然科学基金相关项目管理办法及《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》（请查阅国家自然科学基金委员会官方网站首页“政策法规”栏目），按《批准通知》的要求认真填写和提交《国家自然科学基金委员会资助项目计划书》（以下简称《计划书》）。
- 二、填写《计划书》时要求科学严谨、实事求是、表述清晰、准确。《计划书》经国家自然科学基金委员会相关项目管理部门审核批准后，将作为项目研究计划执行和检查、验收的依据。
- 三、《计划书》各部分填写要求如下：
  - （一）简表：由系统自动生成。
  - （二）摘要及关键词：各类获资助项目都必须填写中、英文摘要及关键词。
  - （三）项目组主要成员：计划书中列出姓名的项目组主要成员由系统自动生成，与申请书原成员保持一致，不可随意调整。如果批准通知中“项目评审意见及修改意见表”中“对研究方案的修改意见”栏目有调整项目组成员相关要求的，待项目开始执行后，按照项目成员变更程序另行办理。
  - （四）资金预算表：根据批准资助的直接费用，按照《国家自然科学基金项目预算表编制说明》填报资金预算表和预算说明书。国家重大科研仪器研制项目、重大项目还应按照预算评审后批复的直接费用各科目金额填报资金预算表、预算说明书及相应的预算明细表。
  - （五）正文：
    1. 面上项目、青年科学基金项目、地区科学基金项目：如果《批准通知》中没有修改要求的，只需选择“研究内容和研究目标按照申请书执行”即可；如果《批准通知》中“项目评审意见及修改意见表”中“对研究方案的修改意见”栏目明确要求调整研究期限和研究内容等的，须选择“根据研究方案修改意见更改”并填报相关修改内容。
    2. 重点项目、重点国际（地区）合作研究项目、重大项目、国家重大科研仪器研制项目：须选择“根据研究方案修改意见更改”，根据《批准通知》的要求填写研究（研制）内容，不得自行降低、更改研究目标（或仪器研制的技术性能与主要技术指标以及验收技术指标）或缩减研究（研制）内容。此外，还要突出以下几点：
      - （1）研究的难点和在实施过程中可能遇到的问题（或仪器研制风险），拟采用的研究（研制）方案和技术路线；
      - （2）项目主要参与者分工，合作研究单位之间的关系与分工，重大项目还需说明课题之间的关联；
      - （3）详细的年度研究（研制）计划。



3. 国家杰出青年科学基金、优秀青年科学基金和海外及港澳学者合作研究基金项目：须选择“根据研究方案修改意见更改”，按下列提纲撰写：
  - (1) 研究方向；
  - (2) 结合国内外研究现状，说明研究工作的学术思想和科学意义（限两个页面）；
  - (3) 研究内容、研究方案及预期目标（限两个页面）；
  - (4) 年度研究计划；
  - (5) 研究队伍的组成情况。
4. 国家自然科学基金基础科学中心项目：须选择“根据研究方案修改意见更改”，应当根据评审委员会和现场考察专家组的意见和建议，进一步完善并细化研究计划，作为评估和验收的依据。按下列提纲撰写：
  - (1) 五年拟开展的研究工作（包括主要研究方向、关键科学问题与研究内容）；
  - (2) 研究方案（包括骨干成员之间的分工及合作方式、学科交叉融合研究计划等）；
  - (3) 年度研究计划；
  - (4) 五年预期目标和可能取得的重大突破等；
  - (5) 研究队伍的组成情况。
5. 对于其他类型项目，参照面上项目的方式进行选择和填写。



## 简表

|        |         |                      |    |      |                        |          |    |               |  |
|--------|---------|----------------------|----|------|------------------------|----------|----|---------------|--|
| 申请者信息  | 姓名      | 乔立山                  | 性别 | 男    | 出生年月                   | 1979年11月 | 民族 | 汉族            |  |
|        | 学位      | 博士                   |    |      | 职称                     | 教授       |    |               |  |
|        | 是否在站博士后 | 否                    |    | 电子邮件 | qiaolishan@lcu.edu.cn  |          |    |               |  |
|        | 电话      | 15006354718          |    | 个人网页 |                        |          |    |               |  |
|        | 工作单位    | 聊城大学                 |    |      |                        |          |    |               |  |
|        | 所在院系所   | 数学科学学院               |    |      |                        |          |    |               |  |
| 依托单位信息 | 名称      | 聊城大学                 |    |      |                        |          | 代码 | 25205908A0648 |  |
|        | 联系人     | 李恒帅                  |    | 电子邮件 | lihengshuai@lcu.edu.cn |          |    |               |  |
|        | 电话      | 0635-8239599         |    | 网站地址 | http://www.lcu.edu.cn/ |          |    |               |  |
| 合作单位信息 | 单位名称    |                      |    |      |                        |          |    |               |  |
|        | 聊城市人民医院 |                      |    |      |                        |          |    |               |  |
| 项目基本信息 | 项目名称    | 功能脑图学习的高阶正则化框架及其应用研究 |    |      |                        |          |    |               |  |
|        | 资助类别    | 面上项目                 |    |      | 亚类说明                   |          |    |               |  |
|        | 附注说明    |                      |    |      |                        |          |    |               |  |
|        | 申请代码    | F060504:知识发现与数据挖掘    |    |      | F060205:统计学习           |          |    |               |  |
|        | 基地类别    |                      |    |      |                        |          |    |               |  |
|        | 执行年限    | 2020.01-2023.12      |    |      |                        |          |    |               |  |
|        | 直接费用    | 56万元                 |    |      |                        |          |    |               |  |



## 项目摘要

### 中文摘要:

功能脑图(或脑网络)是研究大脑工作机制和神经心理疾病的重要工具,而图的构建或学习是开展相关研究的必要前提。功能磁共振成像(fMRI)为宏观尺度上学习脑图提供了主要的数据源,但其信号弱且受到大量噪声干扰,加之大脑的复杂性,使得估计“好的”脑图至今仍是一个公开问题。前期研究发现:目前的脑图学习算法通常仅在特定数据上表现良好,一旦数据规模、来源或预处理等发生细微变化,其性能将大打折扣,这表明相关算法并未捕获真实的大脑连接模式。为此,本课题拟根据fMRI数据的特点和大脑的有关先验,深入研究脑图学习算法:首先将功能脑图学习统一至一个高阶正则化框架,进而在此框架下研究1)网络拓扑先验的代数编码,2)数据拟合误差的自适应学习,3)网络动态特性的张量表示,旨在设计更加稳健的功能脑图学习算法,显著提升功能脑图的估计质量,并通过挖掘富含信息的脑图模式(作为生物标记),探索其在阿尔茨海默症早期诊断中的应用。

### Abstract:

Functional brain graphs (FBG), aka, brain networks, provide an important way of studying the brain working mechanism and neurological/mental disorders. In doing this, the graph construction or learning is a prerequisite, and functional magnetic resonance imaging (fMRI) has become the main data source for learning FBG in a macro-scale. However, estimating a “good” FBG is still an open problem, due to the weakness of fMRI signals and the complexity of the brain. Our previous studies have shown that the existing FBG learning methods can only work well on some specific data, but their performances tend to drop significantly once subtle changes, such as scales, sources and even preprocessing pipelines, occur in the fMRI data. This means the learning algorithms cannot capture the essential connectivity pattern of the brain. Therefore, in this project, we plan to study the FBG learning problem with applications, according to the characteristics of fMRI data and the priors of the brain. First, we consider the FBG learning in a high-order regularized framework, and then study 1) the algebraic expression of the network priors, 2) the self-adaptive modelling of data-fitting errors, and 4) the incorporation of dynamic network property, aiming to design more reliable learning algorithms for improving the quality of FBGs, and explore its applications in the early diagnosis of Alzheimer's disease by mining informative patterns from the learnt FBGs.

**关键词(用分号分开):** 图挖掘; 功能磁共振成像; 图学习; 脑网络; 阿尔茨海默症

**Keywords(用分号分开):** Graph Mining; Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI); Graph Learning; Brain Network; Alzheimer's Disease



## 项目组主要成员

| 编号  | 姓名  | 出生年月    | 性别 | 职称    | 学位 | 单位名称         | 电话                | 证件号码               | 项目分工            | 每年工作时间(月) |
|-----|-----|---------|----|-------|----|--------------|-------------------|--------------------|-----------------|-----------|
| 1   | 乔立山 | 1979.11 | 男  | 教授    | 博士 | 聊城大学         | 15006354718       | 372330197911196190 | 项目负责人           | 10        |
| 2   | 张寒  | 1982.12 | 男  | 研究员   | 博士 | 北卡罗莱纳大学教堂山分校 | +1 (919) 962-8135 | 650108198212011910 | fMRI数据预处理与分析    | 3         |
| 3   | 张丽梅 | 1978.11 | 女  | 副教授   | 博士 | 聊城大学         | 0635-8239926      | 372330197811203082 | 图学习与优化算法设计      | 8         |
| 4   | 张传臣 | 1974.02 | 男  | 副主任医师 | 博士 | 聊城市人民医院      | 0635-8272130      | 37292719740201009X | fMRI数据采集与实验结果解释 | 5         |
| 5   | 刘学彦 | 1985.10 | 男  | 讲师    | 博士 | 聊城大学         | 0635-8239926      | 371521198510296914 | 图像重建与数据预处理      | 6         |
| 6   | 张婷琳 | 1988.01 | 女  | 讲师    | 博士 | 聊城大学         | 0635-8239926      | 371502198801047863 | BOLD信号处理与分析     | 6         |
| 7   | 张锦  | 1982.06 | 女  | 讲师    | 博士 | 聊城大学         | 0635-8239926      | 372925198206284749 | 图像配准            | 3         |
| 8   | 徐海涛 | 1979.01 | 男  | 讲师    | 硕士 | 聊城大学         | 0635-8239926      | 610113197901242190 | 张量分类器设计与脑图分类    | 3         |
| 9   | 王建军 | 1991.12 | 男  | 博士生   | 硕士 | 聊城大学         | 15969620440       | 370323199112171011 | 脑动力系统建模与分析      | 7         |
| 10  | 薛艳芳 | 1994.10 | 女  | 硕士生   | 学士 | 聊城大学         | 17862181693       | 372930199410084467 | 编码实现            | 10        |
| 总人数 |     |         |    | 高级    | 中级 | 初级           | 博士后               | 博士生                | 硕士生             |           |
| 10  |     |         |    | 4     | 4  | 0            | 0                 | 1                  | 1               |           |



## 国家自然科学基金项目直接费用预算表（定额补助）

项目批准号：61976110

项目负责人：乔立山

金额单位：万元

| 序号 | 科目名称                 | 金额      |
|----|----------------------|---------|
| 1  | 项目直接费用合计             | 56.0000 |
| 2  | 1、设备费                | 5.0000  |
| 3  | (1)设备购置费             | 0.00    |
| 4  | (2)设备试制费             | 0.00    |
| 5  | (3)设备升级改造与租赁费        | 5.00    |
| 6  | 2、材料费                | 0.00    |
| 7  | 3、测试化验加工费            | 0.00    |
| 8  | 4、燃料动力费              | 0.0000  |
| 9  | 5、差旅/会议/国际合作与交流费     | 18.0000 |
| 10 | 6、出版/文献/信息传播/知识产权事务费 | 12.0000 |
| 11 | 7、劳务费                | 18.0000 |
| 12 | 8、专家咨询费              | 3.00    |
| 13 | 9、其他支出               | 0.0000  |



## 预算说明书（定额补助）

（请按照《国家自然科学基金项目预算表编制说明》等的有关要求，对各项支出的主要用途和测算理由，以及合作研究外拨资金、单价≥10万元的设备费等内容进行必要说明。）

本项目直接费用预算 56 万元，其中聊城大学 50 万元，聊城市人民医院 6 万元，计算依据如下：

### （一）聊城大学

1. 设备费 4 万元。
  - (1) 设备购置费：无
  - (2) 设备试制费：无
  - (3) 设备升级改造与租赁费：每年 1 万元，4 年共需 4 万元。主要用于升级内存、GPU 卡以及实验环境所需的外接 USB 扩展卡等。
2. 材料费：无
3. 测试化验加工费：无
4. 燃料动力费：无
5. 差旅/会议/差旅费/国际合作与交流费：16 万元。(1) 项目组成员参加国内学术会议与校际交流学习，以及与国内合作单位往来的交通费、住宿费等，按每年 5 人次，每次平均 0.2 万元计算，4 年 4 万元；(2) 拟组织与本课题有关的研讨会 2 次，费用包括参加人员的住宿费、伙食补助费等，共计 4 万元；(3) 邀请国外专家来华交流支付的机票、住宿费等，拟邀请 2 人次，每次 2 万元，共计 4 万元；(4) 课题组出国开会与学术交流，按 2 人次计算，每次 2 万元，共计 4 万元。
6. 出版/文献/信息传播/知识产权等费：10 万元。(1) 论文版面费共计 5 万元；(2) 申请专利、注册软件费、专利维护费共计 5 万元。
7. 劳务费：18 万元。每年 3 名研究生协助项目研究，每人每年劳务费 1.5 万元，共计 18 万元。
8. 专家咨询费：2 万元。项目实施过程中，将聘请专家约 4 人次进行咨询，每次 0.5 万元，共计 2 万元。

### （二）聊城市人民医院

1. 设备费：1 万元。
  - (1) 设备购置费：无
  - (2) 设备试制费：无
  - (3) 设备升级改造与租赁费：主要用于升级内存、显卡以及实验环境所需的 USB 扩展卡等。
2. 材料费：无
3. 测试化验加工费：无
4. 燃料动力费：无
5. 差旅/会议/差旅费/国际合作与交流费：2 万元。参加国内学术会议的差旅及注册费。按每年 1 人次，每次平均 0.5 万元计算，4 年 2 万元。
6. 出版/文献/信息传播/知识产权等费：2 万元。用于支付论文版面费，申请和维护专利等。
7. 劳务费：无
8. 专家咨询费：1 万元。项目实施过程中，将聘请高级职称的专家约 2 人次进行咨询，每次 0.5 万元，共计 1 万元。

项目负责人签字：

科研部门公章：

财务部门公章：



## 报告正文

研究内容和研究目标按照申请书执行。



## 国家自然科学基金资助项目签批审核表

| <p>我接受国家自然科学基金的资助，将按照申请书、项目批准意见和计划书负责实施本项目（批准号：61976110），严格遵守国家自然科学基金委员会关于资助项目管理、财务等各项规定，切实保证研究工作时间，认真开展研究工作，按时报送有关材料，及时报告重大情况变动，对资助项目发表的论著和取得的研究成果按规定进行标注。</p> <p style="text-align: right; margin-top: 20px;">项目负责人（签章）：<br/>年 月 日</p> | <p>我单位同意承担上述国家自然科学基金项目，将保证项目负责人及其研究队伍的稳定和研究项目实施所需的条件，严格遵守国家自然科学基金委员会有关资助项目管理、财务等各项规定，并督促实施。</p> <p style="text-align: right; margin-top: 20px;">依托单位（公章）<br/>年 月 日</p>  |    |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |
|--|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|--|--|--|--|--|--|
| 本<br>栏<br>目<br>由<br>基<br>金<br>委<br>填<br>写  | <p>科学处审查意见：</p><br><br><br><p>建议年度拨款计划（本栏目为自动生成，单位：万元）：</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">年度</th> <th style="width: 10%;">总额</th> <th style="width: 10%;">第一年</th> <th style="width: 10%;">第二年</th> <th style="width: 10%;">第三年</th> <th style="width: 10%;">第四年</th> <th style="width: 10%;">第五年</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">金额</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | 年度 | 总额  | 第一年 | 第二年 | 第三年 | 第四年 | 第五年 | 金额 |  |  |  |  |  |  |
|  | 年度  | 总额 | 第一年 | 第二年 | 第三年 | 第四年 | 第五年 |     |    |  |  |  |  |  |  |
|  | 金额  |    |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |
| <p>科学部审查意见：</p><br><br><br><p style="text-align: right; margin-top: 20px;">负责人（签章）：<br/>年 月 日</p>  |   |    |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |
| 本<br>栏<br>目<br>主<br>要<br>用<br>于<br>重<br>大<br>项<br>目<br>等   | <p>相关局室审核意见：</p><br><br><br><p style="text-align: right; margin-top: 20px;">负责人（签章）：<br/>年 月 日</p>  |    |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |
|  | <p>委领导审批意见：</p><br><br><br><p style="text-align: right; margin-top: 20px;">委领导（签章）：<br/>年 月 日</p>   |    |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |

# 国家自然科学基金资助项目批准通知

## (预算制项目)

庄光明 先生/女士:

根据《国家自然科学基金条例》、相关项目管理办法规定和专家评审意见,国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)决定资助您申请的项目。项目批准号: 62173174, 项目名称: 采样机制下奇异混杂系统异步反馈与脉冲控制研究, 直接费用: 58.00万元, 项目起止年月: 2022年01月至 2025年12月, 有关项目的评审意见及修改意见附后。

请您尽快登录科学基金网络信息系统(<https://isisn.nsf.gov.cn>), **认真阅读《国家自然科学基金资助项目计划书填报说明》并按要求填写《国家自然科学基金资助项目计划书》(以下简称计划书)**。对于有修改意见的项目,请您按修改意见及时调整计划书相关内容;如您对修改意见有异议,须在电子版计划书报送截止日期前向相关科学处提出。

请您将电子版计划书通过科学基金网络信息系统(<https://isisn.nsf.gov.cn>)提交,由依托单位审核后提交至自然科学基金委。自然科学基金委审核未通过者,将退回的电子版计划书修改后再行提交;审核通过者,打印纸质版计划书(一式两份,双面打印)并在项目负责人承诺栏签字,由依托单位科研、财务管理等部门审核、签章并在承诺栏加盖依托单位公章,且将申请书纸质签字盖章页订在其中一份计划书之后,一并报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。纸质版计划书应当保证与审核通过的电子版计划书内容一致。**自然科学基金委将对申请书纸质签字盖章页进行审核,对存在问题的,允许依托单位进行一次修改或补齐。**

向自然科学基金委提交电子版计划书、报送纸质版计划书并补交申请书纸质签字盖章页截止时间节点如下:

1. **2021年10月22日16点:** 提交电子版计划书的截止时间(视为计划书正式提交时间);
2. **2021年10月29日16点:** 提交修改后电子版计划书的截止时间;
3. **2021年11月5日16点:** 报送纸质版计划书(其中一份包含申请书纸质签字盖章页)的截止时间。

4. 2021年11月25日16点：报送修改后的申请书纸质签字盖章页的截止时间。

请按照以上规定及时提交电子版计划书，并报送纸质版计划书和申请书纸质签字盖章页，未说明理由且逾期不报计划书或申请书纸质签字盖章页者，视为自动放弃接受资助；未按要求修改或逾期提交申请书纸质签字盖章页者，将视情况给予暂缓拨付经费等处理。

附件：项目评审意见及修改意见表

国家自然科学基金委员会

2021年10月12日

## 附件：项目评审意见及修改意见表

|   |                        |       |                     |       |       |
|---|------------------------|-------|---------------------|-------|-------|
| 项目批准号   | 62173174               | 项目负责人 | 庄光明                 | 申请代码1 | F0301 |
| 项目名称  | 采样机制下奇异混杂系统异步反馈与脉冲控制研究 |       |                     |       |       |
| 资助类别  | 面上项目                   | 亚类说明  |                     |       |       |
| 附注说明  |                        |       |                     |       |       |
| 依托单位  | 聊城大学                   |       |                     |       |       |
| 直接费用  | 58.00 万元               | 起止年月  | 2022年01月 至 2025年12月 |       |       |
| <p>通讯评审意见：</p> <p>&lt;1&gt;具体评价意见：</p> <p>一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。</p> <p>本项目将奇异Markov跳变系统、奇异脉冲系统统一到采样机制下，充分利用采样信息、Markov模态跳变信息和外部脉冲信息，借助奇异值分解、慢快分解等技术给出新颖的奇异混杂系统容许性判定条件和反馈控制条件；限于系统信息的离散可测、状态信息未知、模态信息不同步等特点，基于量测输出采样，利用新颖的事件驱动和隐马尔科夫模型(HMM)等有效策略和技术，将同步状态反馈控制器设计拓展到异步观测器和异步动态补偿器设计，可以克服状态信息未知和模态信息不同步的约束，实现异步状态重构和异步动态输出反馈控制，进而可以实现异步跟踪控制；考虑到现实问题中众多动态系统不能忍耐持续控制输入、性能指标不统一等特点，在采样机制下利用离散可测信息建立间歇式脉冲控制器、脉冲观测器、脉冲反卷积分滤波器设计方法。因此，该申请项目的研究思想和研究方案具有新颖性和独特性。</p> <p>二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。</p> <p>奇异混杂系统充分地考虑了系统内部突变或外部环境干扰对系统状态的影响，能准确地反映事物本身的变化规律和特点，从而能更有效地描述诸多实际系统。在采样机制下实现状态已知/未知奇异混杂系统的容许性分析、异步反馈和脉冲控制等问题是控制理论研究中亟待解决的前沿和热点问题，极富挑战性，具有深远的理论意义与实际价值。本项目研究内容丰富且新颖，涉及到数据采样、内外部脉冲干扰、事件触发、Markov模态跳变、异步反馈、脉冲控制等热点问题，具有鲜明的前瞻性特征。本项目可以为奇异混杂系统在现实中的应用提供新的研究方法和切实有效的控制途径，可以有效地丰富和发展奇异混杂系统控制理论研究，并可以积极地拓展和推动奇异混杂系统在工程实践中的应用。</p> <p>三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。</p> <p>本项目申请人及项目组成员理论基础扎实，在奇异系统、Markov跳变系统、切换系统、随机系统、采样系统等动态系统的稳定性分析及控制综合方面具备坚实的研究能力，熟悉关键科学问题的理论和应用背景、研究方法及最新进展，研究成果丰富。本项目主要采用理论分析、仿真验证、拓展应用相结合的研究思路，从存在的关键问题出发，按照由简单到复杂、由特殊到一般的研究原则，循序渐进地开展基于系统状态采样、量测输出采样和/或事件触发策略的奇异混杂系统容许性分析、异步反馈、脉冲控制等前沿问题的研究工作。本项目研究内容明确，技术路线清晰且合理，研究方法明确且有效。申请人及其团队成员研究基础扎实，清楚本课题的关键科学问题，掌握本研究领域的核心技术和理论。因此，本项目研究方案具体、详实、可行度高。</p> <p>四、其他建议</p> <p>&lt;2&gt;具体评价意见：</p> <p>一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。</p> <p>项目以奇异混杂系统为研究对象，在采样机制条件下研究奇异马氏跳变系统、奇异脉冲系统、奇异脉冲马氏跳变系统的容许性分析、异步反馈和脉冲控制问题。奇异混杂系统最近几年一直是控制系统领域的研究热点，研究人员众多，研究成果丰富，申请人拟通过量测输出采样，设计控制器实现异步状态同构和异步动态反馈，从而实现控制目标，从这个角度上说，研究方案有比较好的新颖性。</p> |                        |       |                     |       |       |

二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。

申请项目的研究对象是控制领域一类重要的系统，有着重要的科学价值，但应用到实际问题中还有相当大的距离，原因在于一是如何判断系统出现马氏跳变？马氏状态转移的机制在实际问题中如何得到？这些问题实际上都没有得到很好的解决，几乎所有的研究都基于有限状态马氏链假定存在的条件下进行；二是控制系统的结构方程如何从实际问题导出？通过输出采样或者事件触发方式设计控制方案能确保新闭环系统方程的解依旧存在吗？实际上，这些问题在研究中几乎都回避了。

三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。

申请人及研究团队一直从事随机跳变系统和奇异系统的研究，发表了一系列重要的成果，具备了不错的研究基础。从研究方案上看，采用的理论手段和技术分析方法同以往的研究并无本质上的不同，此外，申请书对研究问题拟采用的研究方案大都泛泛而谈，缺乏比较深入细致的讨论和分析。

四、其他建议

<3>具体评价意见：

一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。

该申请项目拟采用基于奇异值分解和慢快分解技术研究奇异混杂系统的容许性分析问题，采用基于周期采样和/或非周期采样的事件触发策略研究奇异混杂系统状态反馈与状态重构，以及基于量测输出采样和/或事件触发策略研究奇异混杂系统动态输出反馈控制。同时，在采样机制下设计脉冲控制器、脉冲观测器、脉冲反卷积滤波器实现奇异混杂系统脉冲控制。项目研究内容明确，相应技术路线具体，且富有新颖性，可为奇异混杂系统在现实中的应用提供新的研究方法和切实有效的控制途径

二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。

由于奇异混杂系统充分考虑了内部突变或外部环境干扰对系统状态的影响，能准确地反映事物本身的变化规律和特点，目前得到了国内外学者的广泛研究。该申请项目以奇异混杂系统为研究对象，在采样机制下聚焦奇异Markov跳变系统、奇异脉冲系统、奇异脉冲Markov跳变系统容许性分析、异步反馈和脉冲控制问题。从项目研究目标、内容和相应技术路线来看，该项目期望能够对奇异混杂系统控制理论的发展及其在工程实践中的应用起到推动作用。

三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。

项目前期进行了较多与本课题直接相关的研究工作，包括多篇高水平论文和多个自然科学科技奖励。项目申请人过去所研究的结果与该项目有着紧密的联系，该项目具有扎实的研究基础和条件。

四、其他建议

<4>具体评价意见：

一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。

申请项目针对奇异混杂系统具有广泛的工程应用背景，在采样机制下对奇异混杂系统的异步反馈和脉冲控制在普遍存在的数字化和网络化情况下具有现实意义。该项目的创新之处主要体现在：1. 充分利用采样信息、Markov模态跳变信息和外部脉冲信息；2. 将同步状态反馈控制器设计拓展到异步观测器和动态补偿器；3. 在采样机制下利用离散可测信息建立间歇式控制器等。项目具有较强的创新性。故应优先资助。

二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。

其关键科学问题明确，主要为：1. 给出奇异脉冲系统和奇异脉冲Markov跳变系统容许性成立的判定标准；2. 设计新颖的事件驱动/触发策略及构建泛函；3. 实现奇异混杂系统异步反馈与脉冲控制。上述问题的解决可以推动相关领域的发展。

三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。

研究基础很好，研究方案清晰，合理明确，可行性较高。

四、其他建议

无

<5>具体评价意见:

一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。

该项目聚焦奇异混杂系统（包括奇异跳变，奇异脉冲），旨在解决此类系统在采样机制下的异步反馈，容许性分析以及脉冲控制等科学前沿问题。奇异系统及混杂系统，本身具有广泛的工程应用价值，结构复杂且新颖。本课题提出将其统一到采样机制下，利用量测输出采样，以及新颖的事件驱动及隐马尔可夫等策略和技术，来克服状态信息和模型不同步的问题，进行控制问题研究，该研究思想和方案新颖独特且合理可行。

二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。

该项目涉及采样理论，随机理论，控制理论等诸多方面知识。奇异混杂系统能充分反应外界环境变化或者干扰对系统内部状态及机制的影响，能充分表征工程系统变化规律和特点，在采样机制下进行控制及相关问题研究，具有广泛的工程应用价值。该项目关注的科学问题，属前沿科学问题，具有工程应用价值和潜在的贡献。

三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。

该申请人在奇异系统，混杂系统控制等方面发表多篇IEEE系列论文，以及多篇高被引论文，有多篇研究成果涉及隐马尔可夫，混杂系统、采样理论等策略和技术，研究基础很好，该项目申请方案是申请人在前期研究基础上总结凝练出的新研究方案，具有较强的可行性。

四、其他建议

修改意见：

信息科学部

2021年10月12日



|        |                    |
|--------|--------------------|
| 项目批准号  | 62176112           |
| 申请代码   | F0605              |
| 归口管理部门 |                    |
| 依托单位代码 | 25205908A0648-1193 |



62176112 1006650

# 国家自然科学基金 资助项目计划书 (预算制项目)

资助类别：面上项目

亚类说明：

附注说明：

项目名称：脑功能数据上的图表示与分类学习

直接费用：57万元                      执行年限：2022.01-2025.12

负责人：张丽梅

通讯地址：山东省聊城市湖南路1号 聊城大学数学科学学院

邮政编码：252000                      电      话：13562023104

电子邮件：zhanglimei@lcu.edu.cn

依托单位：聊城大学

联系人：李恒帅                      电      话：0635-8239599

填表日期：2021年10月21日

国家自然科学基金委员会制

# 国家自然科学基金资助项目批准通知

## (预算制项目)

陈国梁 先生/女士:

根据《国家自然科学基金条例》、相关项目管理办法规定和专家评审意见,国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)决定资助您申请的项目。项目批准号: 62373177, 项目名称: 基于离散时间积分二次约束方法的非均匀采样系统鲁棒控制研究, 直接费用: 50.00万元, 项目起止年月: 2024年01月至 2027年12月, 有关项目的评审意见及修改意见附后。

请您尽快登录科学基金网络信息系统(<https://grants.nsf.gov.cn>), **认真阅读《国家自然科学基金资助项目计划书填报说明》并按要求填写《国家自然科学基金资助项目计划书》(以下简称计划书)**。对于有修改意见的项目,请您按修改意见及时调整计划书相关内容;如您对修改意见有异议,须在电子版计划书报送截止日期前向相关科学处提出。

请您将电子版计划书通过科学基金网络信息系统(<https://grants.nsf.gov.cn>)提交,由依托单位审核后提交至自然科学基金委。自然科学基金委审核未通过者,将退回的电子版计划书修改后再行提交;审核通过者,打印纸质版计划书(一式两份,双面打印)并在项目负责人承诺栏签字,由依托单位科研、财务管理等部门审核、签章并在承诺栏加盖依托单位公章,且将申请书纸质签字盖章页订在其中一份计划书之后,一并报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。纸质版计划书应当保证与审核通过的电子版计划书内容一致。**自然科学基金委将对申请书纸质签字盖章页进行审核,对存在问题的,允许依托单位进行一次修改或补齐。**

向自然科学基金委提交电子版计划书、报送纸质版计划书并补交申请书纸质签字盖章页截止时间节点如下:

1. **2023年9月7日16点:** 提交电子版计划书的截止时间;
2. **2023年9月14日16点:** 提交修改后电子版计划书的截止时间;
3. **2023年9月21日:** 报送纸质版计划书(一式两份,其中一份包含申请书纸质签字盖章页)的截止时间。
4. **2023年10月7日:** 报送修改后的申请书纸质签字盖章页的截止时间。

请按照以上规定及时提交电子版计划书，并报送纸质版计划书和申请书纸质签字盖章页，逾期不报计划书或申请书纸质签字盖章页且未说明理由的，视为自动放弃接受资助；未按要求修改或逾期提交申请书纸质签字盖章页者，将视情况给予暂缓拨付经费等处理。

附件：项目评审意见及修改意见表

国家自然科学基金委员会

2023年8月24日

## 附件：项目评审意见及修改意见表

|   |                              |       |                     |       |       |
|---|------------------------------|-------|---------------------|-------|-------|
| 项目批准号   | 62373177                     | 项目负责人 | 陈国梁                 | 申请代码1 | F0311 |
| 项目名称  | 基于离散时间积分二次约束方法的非均匀采样系统鲁棒控制研究 |       |                     |       |       |
| 资助类别  | 面上项目                         | 亚类说明  |                     |       |       |
| 附注说明  |                              |       |                     |       |       |
| 依托单位  | 聊城大学                         |       |                     |       |       |
| 直接费用  | 50.00 万元                     | 起止年月  | 2024年01月 至 2027年12月 |       |       |
| <p>通讯评审意见：</p> <p>&lt;1&gt;具体评价意见：</p> <p>一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。<br/>该项目采用离散时间积分二次约束方法研究非均匀采样系统鲁棒控制问题，在研究思路及方案构思方面有一些新颖见解，在一定程度上带有独辟蹊径的意味，但独特性不够充分。</p> <p>二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。<br/>申请书中提出了若干关键科学问题，有理论深度和概括提炼，其科学价值比较突出。项目研究工作较有意义，其潜在贡献具有成长性。</p> <p>三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。<br/>申请人研究基础较好，前期理论积累比较扎实，发表过高水平论文。项目组整体科研实力较强。项目研究方案比较明确，可行性充分，有创新之处，有可能取得预期成果，达到项目目标。</p> <p>四、其他建议<br/>项目研究方案显得琐碎，需要加以提炼；同时要加强应用背景，注重理论研究的应用实现。</p> <p>&lt;2&gt;具体评价意见：</p> <p>一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。<br/>该项目研究内容较新颖，通过对非均匀采样控制中的关键问题进行有效的整合分析，解析非均匀采样控制过程中各种性能指标之间的优化关系，以解决非均匀采样控制系统研究中的科学问题，具有一定独特性，且对实际工程控制问题确实具有参考价值和应用意义。聚焦于控制领域的非均匀采样这一热点前沿问题，本项目将会给出一种计算复杂度更小，保守性更低的权衡分析方法，同时给出更加优化的建模方法和控制器求解算法。</p> <p>二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。<br/>该项目聚焦于控制领域的非均匀采样这一热点前沿问题，拟给出一种计算复杂度更小，保守性更低的权衡分析方法，同时给出更加优化的建模方法和控制器求解算法。预期研究成果对于解决实际工程控制问题具有重要的参考价值。</p> <p>三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。<br/>该项目针对非均匀采样控制系统的关键问题进行了深入研究，并提出了相应的理论方法和实验验证。申请者对相关国际研究动态十分了解，具有较强的独立科研能力，已有很好的前期研究基础和积累。本课题研究内容、研究目标明确，方案翔实、切实可行。研究队伍结构合理，实力强，建议予以优先资助。</p> <p>四、其他建议<br/>建议在理论研究的基础上，进一步扩大实验验证的范围，加强与实际工程的应用结合，提高成果的实用性和推广价值。此外，项目团队可以考虑与相关领域的合作，拓展研究领域，并将成果向产业化方向推进。</p> <p>&lt;3&gt;具体评价意见：</p> |                              |       |                     |       |       |

一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。  
本项目围绕非均匀采样控制中的一些关键问题，分析了非均匀采样过程中各项性能指标之间的优化关系，研究非均匀采样控制系统等价离散化系统模型和反馈互联模型，提出离散时间积分二次约束鲁棒分析理论，并通过设计更加优化的采样控制算法，提升控制系统的性能。最后在汽车悬架实物仿真平台上进行工程应用验证。项目设计较新颖，具有较好的研究意义。

二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。  
申请项目对于当前理论研究中存在的采样控制性能优化等问题开展深入研究，能够进一步完备离散控制理论（数字控制）相关研究成果，对于理论与应用两方面都具有一定的潜在贡献。

三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。  
申请人在相关研究领域也已经发表了多篇权威期刊论文，具有扎实的学术研究功底和前期预研基础。项目设计详实，研究内容清晰，研究方案较合理，申请书撰写充分。

四、其他建议  
1) 建议进一步考虑在实际工程对象中如出现状态受限，执行器故障或者约束等各类实际工程条件下，这类算法的可用性。  
2) 针对于汽车悬架系统，开展非均匀采样控制的主要动机与研究目标可以更为明确，也就是针对这类典型工业应用问题，应用本项目所提出的方法能够在哪些指标上取得突破。

<4>具体评价意见：  
一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。  
本申请项目拟采用离散时间积分二次约束方法研究非均匀采样控制中的关键科学问题。本项目聚焦于控制领域中非均匀采样这一热前沿，建立非均匀采样控制系统的离散等价化系统模型并提出优化的控制算法，独辟蹊径，研究思想新颖，研究方案和思路有一定创新。

二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。  
由于基于数字控制器的网络化控制系统已经广泛应用到生产生活中的各个领域，而非均匀采样更能满足实际系统的需要，因此对非均匀采样控制的研究具有重要的科学意义。本项目围绕非均匀采样控制中关键的科学问题进行研究，对网络化控制系统这一前沿领域具有潜在贡献。

三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。  
申请人长期致力于非均匀采样系统控制研究，主持两项国家项目，在非均匀采样控制方面积累了丰富的研究成果。本项目的立项依据充分，针对国内外的相关研究进展进行了仔细分析，在研究内容、研究目标及拟解决问题方面都进行了重点阐述。研究方案可行，给出了具体的研究思路。

四、其他建议

<5>具体评价意见：  
一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。  
该项目聚焦于非均匀采样系统鲁棒控制研究，采用离散时间积分二次约束的方法，并在汽车悬架系统开展验证，具有较好的新颖性和创新性，能够将理论与实际相结合，符合“聚焦前沿、独辟蹊径”的科学问题属性。

二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。  
项目围绕不同采样方法，设置了4项研究内容，凝练了3方面的科学问题，同时考虑了鲁棒性、安全性等问题，较具科学价值，属于领域前沿，可望推动本领域研究成果

三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。  
申请人前期理论基础较好，发表了多篇高水平论文，可以支持本项目的顺利开展，建议优先资助

四、其他建议

修改意见：

信息科学部

2023年8月24日

# 国家自然科学基金资助项目批准通知

## (预算制项目)

夏建伟 先生/女士:

根据《国家自然科学基金条例》、相关项目管理办法规定和专家评审意见,国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)决定资助您申请的项目。项目批准号: 62373178, 项目名称: 基于广义特征值方法的随机时滞系统精确控制研究, 直接费用: 50.00万元, 项目起止年月: 2024年01月至 2027年12月, 有关项目的评审意见及修改意见附后。

请您尽快登录科学基金网络信息系统 (<https://grants.nsf.gov.cn>), **认真阅读《国家自然科学基金资助项目计划书填报说明》并按要求填写《国家自然科学基金资助项目计划书》(以下简称计划书)**。对于有修改意见的项目,请您按修改意见及时调整计划书相关内容;如您对修改意见有异议,须在电子版计划书报送截止日期前向相关科学处提出。

请您将电子版计划书通过科学基金网络信息系统 (<https://grants.nsf.gov.cn>) 提交,由依托单位审核后提交至自然科学基金委。自然科学基金委审核未通过者,将退回的电子版计划书修改后再行提交;审核通过者,打印纸质版计划书(一式两份,双面打印)并在项目负责人承诺栏签字,由依托单位科研、财务管理等部门审核、签章并在承诺栏加盖依托单位公章,且将申请书纸质签字盖章页订在其中一份计划书之后,一并报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。纸质版计划书应当保证与审核通过的电子版计划书内容一致。**自然科学基金委将对申请书纸质签字盖章页进行审核,对存在问题的,允许依托单位进行一次修改或补齐。**

向自然科学基金委提交电子版计划书、报送纸质版计划书并补交申请书纸质签字盖章页截止时间节点如下:

1. **2023年9月7日16点:** 提交电子版计划书的截止时间;
2. **2023年9月14日16点:** 提交修改后电子版计划书的截止时间;
3. **2023年9月21日:** 报送纸质版计划书(一式两份,其中一份包含申请书纸质签字盖章页)的截止时间。
4. **2023年10月7日:** 报送修改后的申请书纸质签字盖章页的截止时间。

请按照以上规定及时提交电子版计划书，并报送纸质版计划书和申请书纸质签字盖章页，逾期不报计划书或申请书纸质签字盖章页且未说明理由的，视为自动放弃接受资助；未按要求修改或逾期提交申请书纸质签字盖章页者，将视情况给予暂缓拨付经费等处理。

附件：项目评审意见及修改意见表

国家自然科学基金委员会

2023年8月24日

## 附件：项目评审意见及修改意见表

|   |                        |       |                     |       |       |
|---|------------------------|-------|---------------------|-------|-------|
| 项目批准号   | 62373178               | 项目负责人 | 夏建伟                 | 申请代码1 | F0301 |
| 项目名称  | 基于广义特征值方法的随机时滞系统精确控制研究 |       |                     |       |       |
| 资助类别  | 面上项目                   | 亚类说明  |                     |       |       |
| 附注说明  |                        |       |                     |       |       |
| 依托单位  | 聊城大学                   |       |                     |       |       |
| 直接费用  | 50.00 万元               | 起止年月  | 2024年01月 至 2027年12月 |       |       |
| 通讯评审意见：<br><1>具体评价意见：<br>一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。<br>本项目拟在广义特征值框架下研究随机时滞系统的精确控制问题，选题属控制科学前沿，有重大的理论意义与应用前景，4个研究内容具体、清晰，前3个在控制科学中具有基础作用，研究目标明确，提炼的3个关键科学问题有一定难度和普适性，研究方案基本可行，特别是申请者对随机系统理论有深刻认识，并能长期坚持基础研究，形成了系列研究基础，但是，就研究思想、研究方法、技术路线的新颖性和独特性而言还有待提升，另外，申请者尽管有一定的研究基础，但与其他申请书相比，近几年的研究工作稍显差距。<br><br>二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。<br><br>三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。<br><br>四、其他建议<br><br><2>具体评价意见：<br>一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。<br>该项目拟基于广义特征值方法开展针对随机时滞系统精确控制问题的研究。主要研究内容包括：线性随机时滞系统区间稳定性分析与精确控制，线性随机时滞系统区域稳定性分析与精确控制及非线性随机时滞系统精确控制等。项目研究思想具有一定的新颖性。<br><br>二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。<br>项目研究内容具有一定的科学价值，但对相关前沿领域的贡献有限。<br><br>三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。<br>申请人前期研究基础尚可，研究方案具有一定的可行性。<br><br>四、其他建议<br>无<br><br><3>具体评价意见：<br>一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。<br>本项目研究基于广义特征值方法的随机时滞系统精确控制问题，申请书的研究内容、关键科学问题、研究目标清晰且明确。本项目的研究思想具有独特性和新颖性。<br><br>二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。<br>所关注的关键科学问题具有较好的科学价值，创新性的实现对该领域有潜在的贡献。<br><br>三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。<br>申请人具有较好的前期研究基础，研究方案和技术路线可行性较高，方法可行。 |                        |       |                     |       |       |

#### 四、其他建议

##### <4>具体评价意见:

一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。

随机时滞系统的研究是近年来控制领域的研究热点，现有成果难以满足实际系统对控制精度的要求。本项目基于模型转化思想，以谱算子和全驱系统控制方法为工具，通过提出广义特征值的定义实现随机时滞系统的精确控制，研究思想和方案具有较好的新颖性和独特性，可为随机时滞系统的高精度控制研究开辟新的蹊径。

二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。

随机系统广泛存在于众多工程领域，对其进行分析和设计是控制领域的热点和难点。本项目针对随机时滞系统的稳定性能分析和控制这一前沿问题，以谱算子和全驱系统控制方法为工具，开创性的提出广义特征值和区间/区域等概念，以全新的思路开展随机系统的精确控制问题研究，对随机系统理论的发展起到了积极推动作用，具有重要的科学价值。

三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。

申请人研究基础雄厚，发表了多篇高水平的学术论文。申请书的研究方案详实、技术路线清晰，具有较好的可行性。项目组成员结构合理、成果显著，都具有从事科学研究的工作经历，完全有能力完成本项目的预期目标。

#### 四、其他建议

##### <5>具体评价意见:

一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。

本项目借助模型转化思想，巧妙地使用谱算子和近期兴起的全驱系统控制方法，通过定义广义特征值来实现对随机时滞系统的精确控制。该方案有较强的新颖性，特别是用全驱系统方法将非线性随机时滞系统转化为基于空间描述的线性随机时滞系统，进而现有工作可以用来实现对系统收敛速度的估计，这一点应该说是比较独特的。

二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。

该申请项目所关注的随机时滞系统问题一直是控制领域备受瞩目的课题，具有较高的科学价值，但也是由于其较高难度，一直缺少系统性理论。该项目通过定义广义特征值对其进行研究，对完善随机系统理论有着积极的意义。

三、请评述申请人的研究基础与研究方案的可行性。

申请人多年以来一直从事随机系统、时滞系统和非线性系统的研究，取得了较好的成果，在国内外学术期刊上发表多篇高质量的学术论文，入选高被引学者，研究成果受到了业内的关注与积极评价，研究基础扎实。研究方案叙述详尽，技术路线清晰可行，建议优先资助。

#### 四、其他建议

修改意见:

信息科学部

2023年8月24日

# 国家自然科学基金资助项目批准通知

## (预算制项目)

孙伟 先生/女士:

根据《国家自然科学基金条例》、相关项目管理办法规定和专家评审意见,国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)决定资助您申请的项目。项目批准号: 62473185, 项目名称: 柔性关节驱动下肢康复机器人系统的建模与自适应控制, 直接费用: 50.00万元, 项目起止年月: 2025年01月至 2028年12月, 有关项目的评审意见及修改意见附后。

请您尽快登录科学基金网络信息系统(<https://grants.nsf.gov.cn>), **认真阅读《国家自然科学基金资助项目计划书填报说明》并按要求填写《国家自然科学基金资助项目计划书》(以下简称计划书)**。对于有修改意见的项目,请您按修改意见及时调整计划书相关内容;如您对修改意见有异议,须在电子版计划书报送截止日期前向相关科学处提出。

请您将电子版计划书通过科学基金网络信息系统(<https://grants.nsf.gov.cn>)提交,由依托单位审核后提交至自然科学基金委。自然科学基金委审核未通过者,将退回的电子版计划书修改后再行提交;审核通过者,打印纸质版计划书(一式两份,双面打印)并在项目负责人承诺栏签字,由依托单位科研、财务管理等部门审核、签章并在承诺栏加盖依托单位公章,且将申请书纸质签字盖章页订在其中一份计划书之后,一并报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。纸质版计划书应当保证与审核通过的电子版计划书内容一致。**自然科学基金委将对申请书纸质签字盖章页进行审核,对存在问题的,允许依托单位进行一次修改或补齐。**

向自然科学基金委提交电子版计划书、报送纸质版计划书并补交申请书纸质签字盖章页截止时间节点如下:

1. **2024年9月9日16点:** 提交电子版计划书的截止时间;
2. **2024年9月16日16点:** 提交修改后电子版计划书的截止时间;
3. **2024年9月23日:** 报送纸质版计划书(一式两份,其中一份包含申请书纸质签字盖章页)的截止时间。
4. **2024年10月8日:** 报送修改后的申请书纸质签字盖章页的截止时间。

请按照以上规定及时提交电子版计划书，并报送纸质版计划书和申请书纸质签字盖章页，逾期不报计划书或申请书纸质签字盖章页且未说明理由的，视为自动放弃接受资助；未按要求修改或逾期提交申请书纸质签字盖章页者，将视情况给予暂缓拨付经费等处理。

附件：项目评审意见及修改意见表

国家自然科学基金委员会

2024年8月23日

## 附件：项目评审意见及修改意见表

|  |                          |       |                     |       |       |
|--|--------------------------|-------|---------------------|-------|-------|
| 项目批准号  | 62473185                 | 项目负责人 | 孙伟                  | 申请代码1 | F0311 |
| 项目名称   | 柔性关节驱动下肢康复机器人系统的建模与自适应控制 |       |                     |       |       |
| 资助类别   | 面上项目                     | 亚类说明  |                     |       |       |
| 附注说明   |                          |       |                     |       |       |
| 依托单位   | 聊城大学                     |       |                     |       |       |
| 直接费用   | 50.00 万元                 | 起止年月  | 2025年01月 至 2028年12月 |       |       |
| <p>通讯评审意见：</p> <p>&lt;1&gt;具体评价意见：</p> <p>一、请评述申请项目研究思想的创新性。请详细阐述判断理由。<br/>本项目柔性关节康复机器人的建模与控制问题，选题具有一定的创新性，研究思想主要在申请人已有工作经验基础上，开展建模与控制问题的研究。未发现逻辑漏洞。</p> <p>二、请评述申请项目所提出科学问题的价值以及对相关前沿领域的贡献。<br/>项目选题“柔性关节驱动下肢康复机器人系统的建模与自适应控制”具有一定的科学价值，如果真正实现理论问题的落地，创造经济效益，那于国于民都大有裨益。</p> <p>三、请评述该申请项目的研究基础与可行性；如有可能，请对完善研究方案提出建议。（如果申请项目提出的创新点特别突出，可以弱化对研究基础的考虑）<br/>从年度计划来看，申请人有意对一类模型进行建模，建议结合具体实体康复机器人进行建模。文中所提研究方案具有可行性，研究基础充分，人员组成合理。</p> <p>四、其他建议</p> <p>&lt;2&gt;具体评价意见：</p> <p>一、请评述申请项目研究思想的创新性。请详细阐述判断理由。<br/>本项目针对带有柔性关节的下肢康复机器人系统，对其进行精确建模并研究安全高效的控制策略与方法，从而实现良好的康复效果。本项目拟将非线性控制方法应用于康复机器人系统，研究思想上具有一定的新意。</p> <p>二、请评述申请项目所提出科学问题的价值以及对相关前沿领域的贡献。<br/>项目拟围绕柔性关节驱动下肢康复机器人系统开展研究，对柔性关节下肢康复机器人系统建模，并从状态约束、收敛时间以及测量噪声等方面进行控制方法研究。控制方法主要基于Lyapunov函数进行设计和分析。此外，本项目主要是针对康复机器人系统的控制理论方面研究，对控制领域有一定的贡献，但不能确定本项目的研究能否对实际的康复机器人系统有实质的帮助。</p> <p>三、请评述该申请项目的研究基础与可行性；如有可能，请对完善研究方案提出建议。（如果申请项目提出的创新点特别突出，可以弱化对研究基础的考虑）<br/>申请人前期在机器人系统、自适应理论等非线性理论与应用方面，发表IEEE汇刊论文20篇，具有较好的研究基础。但项目给出的研究方案比较笼统，有些较为关键的问题没有给出相应的处理方法，如广义障碍 Lyapunov 函数所需的高增益控制如何应用于实际康复机器人系统、如何搭建实验平台以及实验验证指标不清楚。此外，项目三家合作单位前期合作基础相对薄弱。</p> <p>四、其他建议</p> <p>&lt;3&gt;具体评价意见：</p> <p>一、请评述申请项目研究思想的创新性。请详细阐述判断理由。<br/>项目研究柔性关节驱动的下肢康复机器人系统的建模与自适应控制，探索其精确建模和安全高效的控制策略与方法，研究具有很好的创新性。</p> |                          |       |                     |       |       |

二、请评述申请项目所提出科学问题的价值以及对相关前沿领域的贡献。  
项目拟解决带有柔性关节的下肢康复机器人系统的精确动力学建模、实际约束下的新颖控制算法、内外部扰动下的自适应预设时间跟踪控制等问题，实现更加安全高效的康复效果，具有重要的科学价值和应用前景。

三、请评述该申请项目的研究基础与可行性；如有可能，请对完善研究方案提出建议。（如果申请项目提出的创新点特别突出，可以弱化对研究基础的考虑）  
申请人和团队成员在项目相关的非线性系统理论与应用领域，发表了多篇ESI高被引论文，具有非常好的研究成果积累。研究内容具体，研究方案合理可行。

#### 四、其他建议

##### <4>具体评价意见：

一、请评述申请项目研究思想的创新性。请详细阐述判断理由。  
该申请项目针对康复机器人提出快速精准的控制策略与方法，以实现更安全高效的康复效果，所提出的研究思想具有创新性。项目具有重要的理论意义和应用价值。

二、请评述申请项目所提出科学问题的价值以及对相关前沿领域的贡献。  
项目针对下肢康复机器人控制所提出的三个科学问题凝练清晰，具有很好的针对性和创新性，对该领域具有参考价值。

三、请评述该申请项目的研究基础与可行性；如有可能，请对完善研究方案提出建议。（如果申请项目提出的创新点特别突出，可以弱化对研究基础的考虑）  
申请人已主持完成国家自然科学基金青年项目，在机器人系统、自适应控制理论等方面进行了长期积累。该申请项目研究基础扎实，研究方案清晰，技术路线合理，可行性强。

#### 四、其他建议

##### <5>具体评价意见：

一、请评述申请项目研究思想的创新性。请详细阐述判断理由。  
面对系统耦合性及非线性增强、状态变量数目增加等难题，本项目拟开展柔性关节驱动下肢康复机器人系统的建模与自适应控制研究。主要内容如下：1) 结合人体的关节结构以及运动特点，建立柔性关节下肢康复机器人的动力学模型；2) 针对人体关节旋转的角度和速度不能过大的问题，设计基于状态约束的轨迹跟踪控制方案以保证康复过程的安全性；3) 提出预设时间跟踪控制算法，确保腿部连杆快速跟踪上步态轨迹，降低内外部干扰因素的影响，保持系统始终平稳安全地运行；4) 针对传感器测量输出不准确的情况，借助于投影算子设计全新自适应律，实现对未知信号的补偿，减少测量信号偏差带来的安全隐患。本项目针对康复机器人提出快速精准的控制策略与方法，以实现更加安全高效的康复效果，具有重要的理论研究意义和应用价值。

二、请评述申请项目所提出科学问题的价值以及对相关前沿领域的贡献。  
本项目拟解决的关键科学问题如下：(1) 对于带有柔性关节的下肢康复机器人控制问题而言，建立准确的动力学模型。(2) 设计全新的障碍 Lyapunov 函数及控制方法，确保下肢康复机器人在约束条件下安全运行。(3) 针对受未知测量灵敏度等内外界影响的下肢康复机器人系统，构造新的智能学习算法，提高系统的稳定性及柔顺性。所凝练的科学问题逻辑性强，层次鲜明，创新点突出。

三、请评述该申请项目的研究基础与可行性；如有可能，请对完善研究方案提出建议。（如果申请项目提出的创新点特别突出，可以弱化对研究基础的考虑）  
申请人在本领域有很好的理论研究基础，有技术开发的良好经验，理论研究和应用研究相结合，研究方案详实、可行。

#### 四、其他建议

修改意见：

信息科学部

2024年8月23日



|        |                    |
|--------|--------------------|
| 项目批准号  | 61403178           |
| 申请代码   | F030107            |
| 归口管理部门 |                    |
| 依托单位代码 | 25205908A0648-1193 |



614031781014341

# 国家自然科学基金委员会

## 资助项目计划书

资助类别：青年科学基金项目

亚类说明：

附注说明：

项目名称：随机奇异时滞系统跟踪控制及几类滤波器设计研究

资助经费：24万元 执行年限：2015.01-2017.12

负责人：庄光明

通讯地址：山东省聊城市湖南路1号

邮政编码：252000 电话：0635-8239926

电子邮件：zgmtsg@126.com

依托单位：聊城大学

联系人：王春明 电话：0635-8239599

填表日期：2014年08月27日

国家自然科学基金委员会制



## 国家自然科学基金委员会资助项目计划书填报说明

- 一、项目负责人收到《关于国家自然科学基金资助项目批准及有关事项的通知》（以下简称《批准通知》）后，请认真阅读本填报说明和自然科学基金相关项目及财务管理办法（查阅<http://www.nsf.gov.cn/>），按《批准通知》的要求认真填写《国家自然科学基金委员会资助项目计划书》（以下简称《计划书》）。
- 二、填写《计划书》时要求科学严谨、实事求是、表述清晰、准确。《计划书》经主管科学部审核批准后，将作为项目研究计划执行和检查、验收的依据。
- 三、《计划书》简表部分自动生成，其他部分按以下要求填写：
  - （一）各类获资助项目都必须填写中、英文摘要及主题词，按批准经费填报经费预算表。
  - （二）正文撰写：
    1. 对于面上项目、青年科学基金项目、地区科学基金项目，如果《批准通知》中没有修改要求的，只需选择“研究内容和研究目标按照申请书执行”即可；如果《批准通知》中明确要求调整研究内容的，须选择“根据研究方案修改意见更改”并填报相关修改内容。
    2. 对于重点项目、重大项目、科学仪器基础研究专款项目及国家重大科研仪器设备研制专项（自由申请）项目，须选择“根据研究方案修改意见更改”，根据《批准通知》的要求填报研究内容，不得自行降低、更改研究目标（或仪器研制指标）或缩减关键的研究内容。此外，还要突出以下几点：
      - 1) 研究的难点和在实施过程中可能碰到的问题（或仪器研制风险），拟采用的研究方案和技术路线；
      - 2) 项目主要参与者分工，并请说明课题及合作单位之间的关系与分工。
    3. 对于国家杰出青年科学基金、优秀青年科学基金和海外及港澳学者合作研究基金项目，须选择“根据研究方案修改意见更改”，按下列提纲撰写：
      - 1) 研究方向；
      - 2) 结合国内外研究现状，说明研究工作的学术思想和科学意义（限两个页面）；
      - 3) 研究内容、研究方案及预期目标（限两个页面）；
      - 4) 分年度进度安排；
      - 5) 研究队伍的组成情况。
    4. 对于其他类型项目，参照面上项目填报。



## 简表

|        |        |                        |    |      |                         |          |    |               |  |
|--------|--------|------------------------|----|------|-------------------------|----------|----|---------------|--|
| 申请者信息  | 姓名     | 庄光明                    | 性别 | 男    | 出生年月                    | 1979年02月 | 民族 | 汉族            |  |
|        | 学位     | 硕士                     |    |      | 职称                      | 讲师       |    |               |  |
|        | 电话     | 0635-8239926           |    | 电子邮件 | zgmtsg@126.com          |          |    |               |  |
|        | 传真     |                        |    | 个人网页 |                         |          |    |               |  |
|        | 工作单位   | 聊城大学                   |    |      |                         |          |    |               |  |
|        | 所在院系所  | 数学科学学院                 |    |      |                         |          |    |               |  |
| 依托单位信息 | 名称     | 聊城大学                   |    |      |                         |          | 代码 | 25205908A0648 |  |
|        | 联系人    | 王春明                    |    | 电子邮件 | wangchunming@lcu.edu.cn |          |    |               |  |
|        | 电话     | 0635-8239599           |    | 网站地址 | http://www.lcu.edu.cn/  |          |    |               |  |
| 合作单位信息 | 单位名称   |                        |    |      |                         |          |    | 代码            |  |
|        | 南京理工大学 |                        |    |      |                         |          |    | 21009408A0687 |  |
|        |        |                        |    |      |                         |          |    |               |  |
| 项目基本信息 | 项目名称   | 随机奇异时滞系统跟踪控制及几类滤波器设计研究 |    |      |                         |          |    |               |  |
|        | 资助类别   | 青年科学基金项目               |    |      | 亚类说明                    |          |    |               |  |
|        | 附注说明   |                        |    |      |                         |          |    |               |  |
|        | 申请代码   | F030107:随机与不确定系统控制     |    |      | F030106:时滞系统控制          |          |    |               |  |
|        | 基地类别   |                        |    |      |                         |          |    |               |  |
|        | 执行年限   | 2015.01-2017.12        |    |      |                         |          |    |               |  |
|        | 资助经费   | 24.0000万元              |    |      |                         |          |    |               |  |



## 项目摘要

**中文摘要(500字以内):**

本课题以几类具有不确定参数和不同类型时滞的随机奇异系统(随机奇异马尔科夫跳变时滞系统、伊藤随机奇异时滞系统及网络化随机奇异时滞系统)为研究对象,深入研究其鲁棒稳定性、跟踪控制和滤波器设计等问题,给出期望控制器和滤波器时滞相关的存在条件及设计方案。另一方面,针对随机奇异系统的网络化所导致的信号传递延迟和数据丢包等实际问题,分别设计高效的跟踪控制器、故障检测滤波器、非脆滤波器和反卷积滤波器,并努力实现上述几类控制器和滤波器的实际工程应用。课题的研究目标是,围绕不确定随机奇异时滞系统的鲁棒稳定性分析、跟踪控制及滤波器设计问题,补充或者改进已有的相关理论研究,建立一套较完整的理论研究成果体系,以期对随机奇异系统控制理论的发展起到积极的推动作用。

**关键词:** 随机奇异系统; 马尔科夫跳变系统; 不确定时滞系统; 跟踪控制; 鲁棒滤波器

**Abstract(limited to 500 words):**

This project is concerned with the problems of robust stability theory, tracking control and filter design for several kinds of stochastic singular systems with different parameter uncertainties and time delays. The mentioned stochastic singular systems include stochastic singular markovian jumping time delay systems, Ito stochastic singular time delay systems and the corresponding networked stochastic singular time delays systems. Based on the further study of robust stability theory of the aforementioned stochastic singular systems, we deal with the state tracking control, output tracking control and filter design problems deeply, give time delay dependent conditions of expected controllers, filters and the corresponding design methods. On the other hand, this project investigates the effective designs and practical applications of tracking controller, robust fault detection filter, non-fragile filter and deconvolution filter for stochastic singular systems with limited communication capacity including signal transmission delay and data packet dropout, which appear simultaneously in a networked control system framework. The project research goal is as follows: centering on robust analysis, tracking control and filter design issues of uncertain stochastic singular time delay system, we will establish a complete system of theoretical research results, improve or supplement existing and related theories, push forward the development of control theory of stochastic singular system actively.

**Keywords:** Stochastic singular systems; Markovian system; uncertain delay system; tracking control; robust filtering



## 项目组主要成员

| 编号  | 姓名  | 出生年月    | 性别 | 职称  | 学位 | 单位名称   | 电话           | 电子邮件                     | 项目分工    | 每年工作时间(月) |  |     |  |
|-----|-----|---------|----|-----|----|--------|--------------|--------------------------|---------|-----------|--|-----|--|
| 1   | 庄光明 | 1979.02 | 男  | 讲师  | 硕士 | 聊城大学   | 0635-8239926 | zgmtsg@126.com           | 项目负责人   | 10        |  |     |  |
| 2   | 夏建伟 | 1978.09 | 男  | 副教授 | 博士 | 聊城大学   | 06358239237  | jianweixia78@gmail.com   | 理论分析    | 8         |  |     |  |
| 3   | 赵军圣 | 1981.09 | 男  | 讲师  | 硕士 | 聊城大学   | 06358239926  | zhaojunsheng@lcu.edu.cn  | 理论分析    | 8         |  |     |  |
| 4   | 张化生 | 1978.05 | 男  | 讲师  | 博士 | 聊城大学   | 06358239926  | zhanghuasheng@lcu.edu.cn | 理论分析与仿真 | 7         |  |     |  |
| 5   | 魏云亮 | 1984.09 | 男  | 博士生 | 硕士 | 南京理工大学 | 02584315114  | xllweiyunliang@gmail.com | 理论分析    | 6         |  |     |  |
| 6   | 赵俊杰 | 1986.12 | 男  | 博士生 | 硕士 | 南京理工大学 | 02584315114  | junjiezhaol986@sina.com  | 理论分析与仿真 | 6         |  |     |  |
| 7   | 陈富  | 1983.01 | 男  | 博士生 | 硕士 | 南京理工大学 | 02584315114  | chenfu_1983@126.com      | 理论分析与仿真 | 6         |  |     |  |
| 8   | 张慧慧 | 1991.04 | 女  | 硕士生 | 学士 | 聊城大学   | 06358239926  | zhhlly0217@163.com       | 数值仿真    | 8         |  |     |  |
| 总人数 |     | 高级      |    | 中级  |    | 初级     |              | 博士后                      |         | 博士生       |  | 硕士生 |  |
| 8   |     | 1       |    | 3   |    |        |              |                          |         | 3         |  | 1   |  |



## 经费预算表

(金额单位:万元)

| 预算编制说明:   |                 |   |
|---|-----------------|---|
| 1. 在填报本表之前, 请根据项目资助类别认真阅读相关的资助经费管理办法; 经费预算的编制以申请书中的《经费申请表》为基础, 以《国家自然科学基金项目资助批准通知书》中的资助金额为依据; |                 |   |
| 2. 编制经费预算时, 不考虑不可预见因素和前期投入;   |                 |   |
| 3. 购置与试制仪器设备在5万元以上(包括5万元)时, 须在报告正文中逐项说明用途和必要性。  |                 |   |
| 科目  | 预算经费            | 备注(计算依据与说明)                                 |
| <b>一. 研究经费</b>  | 17.1000         |   |
| 1. 科研业务费  | 10.7000         |   |
| (1) 测试/计算/分析费   | 0.1000          | 实验测试、数据分析、仿真计算等                             |
| (2) 能源/动力费  | 0.1000          | 水电费、能源费等                                    |
| (3) 会议费/差旅费   | 6.0000          | 会议、调研差旅 $0.25 \times 4 \times 2 \times 3$ 年 |
| (4) 出版物/文献/信息传播事务费  | 4.5000          | 版面、资料、打印、邮寄、网络等 $1.5 \times 3$              |
| (5) 其他  | 0               |   |
| 2. 实验室材料费   | 3.6000          |   |
| (1) 原材料/试剂/药品购置费  | 2.7000          | 实验耗材、微机耗材等 $0.9 \times 3$                   |
| (2) 其他  | 0.9000          | 数据采集、办公耗材等 $0.3 \times 3$                   |
| 3. 仪器设备费  | 2.0000          |   |
| (1) 购置  | 2.0000          | 工作站(机)、打印机、扫描仪等设备                           |
| (2) 试制  | 0               |   |
| 4. 实验室改装费   | 0.8000          | 隔断、大尺寸可移动黑板等                                |
| 5. 协作费  | 0               |   |
| <b>二. 国际合作与交流费</b>  | 2.1000          |   |
| 1. 出境国际旅费   | 0               |   |
| 2. 境外合作人员来华生活费  | 0               |   |
| 3. 来华举办学术会议费  | 2.1000          | 交通、住宿、报告酬金等 $0.7 \times 3$                  |
| 4. 其他   | 0               |   |
| <b>三. 劳务费</b>   | 3.6000          | 直接参加项目研究的研究生、博士后人员的劳务费用                     |
| <b>四. 管理费</b>   | 1.2000          | 不得超过预算经费的5%                                 |
| <b>合计</b>   | 24.0000         |   |
| 与本项目相关的其他经费来源   | 国家其他计划资助经费      | 0   |
|   | 其他经费资助(含部门匹配)   | 0   |
|   | <b>其他经费来源合计</b> | 0   |



## 报告正文

研究内容和研究目标按照申请书执行。



## 国家自然科学基金资助项目签批审核表

| <p>我接受国家自然科学基金的资助，将按照申请书、项目批准意见和计划书负责实施本项目（批准号：61403178），严格遵守国家自然科学基金委员会关于资助项目管理、财务等各项规定，切实保证研究工作时间，认真开展研究工作，按时报送有关材料，及时报告重大情况变动，对资助项目发表的论著和取得的研究成果按规定进行标注。</p> <p style="text-align: right; margin-top: 20px;">项目负责人（签章）：<br/>年 月 日</p> | <p>我单位同意承担上述国家自然科学基金项目，将保证项目负责人及其研究队伍的稳定和研究项目实施所需的条件，严格遵守国家自然科学基金委员会有关资助项目管理、财务等各项规定，并督促实施。</p> <p style="text-align: right; margin-top: 20px;">依托单位（公章）<br/>年 月 日</p>   |     |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 本<br>栏<br>目<br>由<br>基<br>金<br>委<br>填<br>写  | 科学处审查意见：   |     |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 建议年度拨款计划（本栏目为自动生成，单位：万元）：  |     |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">年度</th> <th style="width: 10%;">总额</th> <th style="width: 10%;">第一年</th> <th style="width: 10%;">第二年</th> <th style="width: 10%;">第三年</th> <th style="width: 10%;">第四年</th> <th style="width: 10%;">第五年</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>金额</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | 年度  | 总额  | 第一年 | 第二年 | 第三年 | 第四年 | 第五年 | 金额 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 年度   | 总额   | 第一年 | 第二年 | 第三年 | 第四年 | 第五年 |     |     |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 金额   |  |     |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 科学部审查意见：   |  |     |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 本<br>栏<br>目<br>主<br>要<br>用<br>于<br>重<br>大<br>项<br>目<br>等   | 相关局室审核意见：  |     |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 委领导审批意见：   |     |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

## 关于国家自然科学基金资助项目批准及有关事项的通知

孙伟 先生/女士：

根据《国家自然科学基金条例》的规定和专家评审意见，国家自然科学基金委员会（以下简称自然科学基金委）决定批准资助您的申请项目。项目批准号：

61603170，项目名称：仿射运动学约束不确定非完整系统的镇定及跟踪控制，直接费用：20.00万元，项目起止年月：2017年01月至2019年12月，有关项目的评审意见及修改意见附后。

请尽早登录科学基金网络信息系统（<https://isisn.nsf.gov.cn>），获取《国家自然科学基金资助项目计划书》（以下简称计划书）并按要求填写。对于有修改意见的项目，请按修改意见及时调整计划书相关内容；如对修改意见有异议，须在计划书电子版报送截止日期前提出。**注意：请严格按照《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》填写计划书的资金预算表，其中，劳务费、专家咨询费科目所列金额与申请书相比不得调增。**

计划书电子版通过科学基金网络信息系统（<https://isisn.nsf.gov.cn>）上传，由依托单位审核后提交至自然科学基金委进行审核。审核未通过者，返回修改后再行提交；审核通过者，打印为计划书纸质版（一式两份，双面打印），由依托单位审核并加盖单位公章后报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。计划书电子版和纸质版内容应当保证一致。

向自然科学基金委提交和报送计划书截止时间节点如下：

- 1、提交计划书电子版截止时间为**2016年9月11日16点**（视为计划书正式提交时间）；
- 2、提交计划书电子修改版截止时间为**2016年9月18日16点**；
- 3、报送计划书纸质版截止时间为**2016年9月26日16点**。

请按照以上规定及时提交计划书电子版，并报送计划书纸质版，未说明理由且逾期不报计划书者，视为自动放弃接受资助。

附件：项目评审意见及修改意见

国家自然科学基金委员会  
信息科学部  
2016年8月17日

## 附件：项目评审意见及修改意见表

|   |                         |       |                     |       |         |
|---|-------------------------|-------|---------------------|-------|---------|
| 项目批准号   | 61603170                | 项目负责人 | 孙伟                  | 申请代码1 | F030101 |
| 项目名称  | 仿射运动学约束不确定非完整系统的镇定及跟踪控制 |       |                     |       |         |
| 资助类别  | 青年科学基金项目                | 亚类说明  |                     |       |         |
| 附注说明  |                         |       |                     |       |         |
| 依托单位  | 聊城大学                    |       |                     |       |         |
| 直接费用  | 20.00 万元                | 起止年月  | 2017年01月 至 2019年12月 |       |         |
| <p>通讯评审意见：</p> <p>&lt;1&gt;项目拟开展具有放射运动学约束的不确定非完整系统的镇定、跟踪控制及其应用研究。具有重要的理论意义与应用背景。研究内容需更详细论述。总体研究方案基本合理。申请人具有较好的研究基础。</p> <p>&lt;2&gt;1、本课题研究具有仿射运动学约束的不确定非完整系统的镇定及跟踪控制，具有较好的工程应用背景及意义，参考文献偏旧。<br/>                 2、研究内容比较具体，但缺乏创新性。<br/>                 3、研究方案基本合理可行。<br/>                 4、经费预算不合理，设备购置费偏高。</p> <p>&lt;3&gt;该项目的研究具有重要的理论意义，申请人在相关方向做了十分重要的前期研究。</p> <p>&lt;4&gt;本项目拟针对带有仿射运动学约束的不确定非完整系统开展镇定与跟踪控制方法研究。该项目不仅在包括移动轮式机器人、水下运动车辆等在内的众多实际对象中有重要的应用价值，而且具有较强的科学创新性和理论价值，特别是在仿射运动学约束的处理方面是具有一定挑战性的。项目的研究内容充实，研究目标明确，拟解决的关键科学问题提炼准确，研究的方案和技术路线合理可行。项目负责人具有良好的前期积累和创新潜力。不足在于经费预算：计算机和打印机等属于必备工具，其购置放在经费预算中，不太妥当；另外，会议费一般是举办会议的费用。鉴于项目研究本身的重要性，建议可以优先资助。</p> |                         |       |                     |       |         |
| <p>对研究方案的修改意见：</p> <p style="text-align: right;">信息科学部<br/>2016年8月17日</p>   |                         |       |                     |       |         |

## 国家自然科学基金资助项目批准通知

陈国梁 先生/女士：

根据《国家自然科学基金条例》规定和专家评审意见，国家自然科学基金委员会（以下简称自然科学基金委）决定资助您申请的项目。项目批准号：62003154，项目名称：变周期采样随机Markov跳变时滞系统稳定性分析与控制，直接费用：24.00万元，项目起止年月：2021年01月至2023年12月，有关项目的评审意见及修改意见附后。

请尽早登录科学基金网络信息系统（<https://isisn.nsf.gov.cn>），获取《国家自然科学基金资助项目计划书》（以下简称计划书）并按要求填写。对于有修改意见的项目，请按修改意见及时调整计划书相关内容；如对修改意见有异议，须在电子版计划书报送截止日期前向相关科学处提出。

电子版计划书通过科学基金网络信息系统（<https://isisn.nsf.gov.cn>）上传，依托单位审核后提交至自然科学基金委进行审核。审核未通过者，返回修改后再行提交；审核通过者，打印纸质版计划书（一式两份，双面打印），依托单位审核并加盖单位公章，将申请书纸质签字盖章页订在其中一份计划书之后，一并将上述材料报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。电子版和纸质版计划书内容应当保证一致。**自然科学基金委将对申请书纸质签字盖章页进行审核，对存在问题的，允许依托单位进行一次修改或补齐。**

向自然科学基金委补交申请书纸质签字盖章页、提交和报送计划书截止时间节点如下：

1. **2020年10月14日16点**：提交电子版计划书的截止时间（视为计划书正式提交时间）；
2. **2020年10月21日16点**：提交电子修改版计划书的截止时间；
3. **2020年10月28日16点**：报送纸质版计划书（其中一份包含申请书纸质签字盖章页）的截止时间。
4. **2020年11月18日16点**：报送修改后的申请书纸质签字盖章页的截止时间。

请按照以上规定及时提交电子版计划书，并报送纸质版计划书和申请书纸质签字盖章页，未说明理由且逾期不报计划书或申请书纸质签字盖章页者，视为自动放弃接受资助；未按要求修改或逾期提交申请书纸质签字盖章页者，将视情况给予暂缓拨付经费等处理。

附件：项目评审意见及修改意见表

国家自然科学基金委员会  
2020年9月18日

## 附件：项目评审意见及修改意见表

|   |                             |       |                     |       |       |
|---|-----------------------------|-------|---------------------|-------|-------|
| 项目批准号   | 62003154                    | 项目负责人 | 陈国梁                 | 申请代码1 | F0301 |
| 项目名称  | 变周期采样随机Markov跳变时滞系统稳定性分析与控制 |       |                     |       |       |
| 资助类别  | 青年科学基金项目                    | 亚类说明  |                     |       |       |
| 附注说明  |                             |       |                     |       |       |
| 依托单位  | 聊城大学                        |       |                     |       |       |
| 直接费用  | 24.00 万元                    | 起止年月  | 2021年01月 至 2023年12月 |       |       |
| <p>通讯评审意见：</p> <p>&lt;1&gt;具体评价意见：</p> <p>一、请针对创新点详细评述申请项目的创新性、科学价值以及对相关领域的潜在影响。项目拟针对变周期采样对随机Markov跳变时滞系统带来的问题进行研究，研究内容和目标明确，申请书规范，技术路线可行，但可行性分析未针对研究内容的可行性进行展开分析。鉴于前期工作基础较好，可考虑给予支持！</p> <p>二、请结合申请项目的研究方案与申请人的研究基础评述项目的可行性。</p> <p>三、其他建议</p> <p>&lt;2&gt;具体评价意见：</p> <p>一、请针对创新点详细评述申请项目的创新性、科学价值以及对相关领域的潜在影响。项目“变周期采样随机Markov跳变时滞系统稳定性分析与控制”属于应用基础研究，选题具有一定的理论意义和潜在的应用价值。项目针对存在时滞、变采样周期、随机参数的复杂系统进行理论研究，是控制理论当中的难点问题，对复杂对象的控制具有指导意义。</p> <p>二、请结合申请项目的研究方案与申请人的研究基础评述项目的可行性。申请人具有较好的控制理论基础，尤其是在本项目领域有多篇高水平论文发表，项目技术路线具体，研究方案可行。项目当中应用领域陈述较少，实验验证环境略显欠缺。</p> <p>三、其他建议<br/>无</p> <p>&lt;3&gt;具体评价意见：</p> <p>一、请针对创新点详细评述申请项目的创新性、科学价值以及对相关领域的潜在影响。课题创新之处主要包括：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 给出随机系统放宽在采样间隔内部要求泛函为正的约束的严格证明，提出基于环泛函的方法，给出基于时滞相关微分线性矩阵不等式方法的充要条件。</li> <li>2. 设计基于概率的最优反馈调度采样控制器，给出全局一致收敛求解算法。</li> </ol> <p>课题创新性较好，创新点新颖，研究内容具有较好的科学价值。项目负责人具有较好的研究基础，研究思路清晰，研究方案具有较好的可行性。</p> <p>二、请结合申请项目的研究方案与申请人的研究基础评述项目的可行性。</p> <p>三、其他建议</p> <p>修改意见：</p> |                             |       |                     |       |       |

信息科学部

2020年9月18日

# 国家自然科学基金资助项目批准通知

## (包干制项目)

蒋蒙蒙 先生/女士:

根据《国家自然科学基金条例》、相关项目管理办法规定和专家评审意见,国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)决定资助您申请的项目。项目批准号: 62103175, 项目名称: 具有逆动态特征的随机非线性系统输出反馈有限时间控制, 资助经费: 30.00万元, 项目起止年月: 2022年01月至 2024年12月, 有关项目的评审意见及修改意见附后。

请您尽快登录科学基金网络信息系统 (<https://isisn.nsf.gov.cn>), **认真阅读《国家自然科学基金资助项目计划书填报说明》并按要求填写《国家自然科学基金资助项目计划书》(以下简称计划书)**。对于有修改意见的项目,请您按修改意见及时调整计划书相关内容;如您对修改意见有异议,须在电子版计划书报送截止日期前向相关科学处提出。

请您将电子版计划书通过科学基金网络信息系统 (<https://isisn.nsf.gov.cn>) 提交,由依托单位审核后提交至自然科学基金委。自然科学基金委审核未通过者,将退回的电子版计划书修改后再行提交;审核通过者,打印纸质版计划书(一式两份,双面打印)并在项目负责人承诺栏签字,由依托单位在承诺栏加盖依托单位公章,且将申请书纸质签字盖章页订在其中一份计划书之后,一并报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。纸质版计划书应当保证与审核通过的电子版计划书内容一致。**自然科学基金委将对申请书纸质签字盖章页进行审核,对存在问题的,允许依托单位进行一次修改或补齐。**

向自然科学基金委提交电子版计划书、报送纸质版计划书并补交申请书纸质签字盖章页截止时间节点如下:

1. **2021年10月22日16点:** 提交电子版计划书的截止时间(视为计划书正式提交时间);
2. **2021年10月29日16点:** 提交修改后电子版计划书的截止时间;
3. **2021年11月5日16点:** 报送纸质版计划书(其中一份包含申请书纸质签字盖章页)的截止时间

# 国家自然科学基金资助项目批准通知

## (包干制项目)

付世华 先生/女士:

根据《国家自然科学基金条例》、相关项目管理办法规定和专家评审意见,国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)决定资助您申请的项目。项目批准号: 62103176, 项目名称: 逻辑动态系统鲁棒控制及其在博弈论中的应用, 资助经费: 30.00万元, 项目起止年月: 2022年01月至 2024年12月, 有关项目的评审意见及修改意见附后。

请您尽快登录科学基金网络信息系统(<https://isisn.nsf.gov.cn>), **认真阅读《国家自然科学基金资助项目计划书填报说明》并按要求填写《国家自然科学基金资助项目计划书》(以下简称计划书)**。对于有修改意见的项目,请您按修改意见及时调整计划书相关内容;如您对修改意见有异议,须在电子版计划书报送截止日期前向相关科学处提出。

请您将电子版计划书通过科学基金网络信息系统(<https://isisn.nsf.gov.cn>)提交,由依托单位审核后提交至自然科学基金委。自然科学基金委审核未通过者,将退回的电子版计划书修改后再行提交;审核通过者,打印纸质版计划书(一式两份,双面打印)并在项目负责人承诺栏签字,由依托单位在承诺栏加盖依托单位公章,且将申请书纸质签字盖章页订在其中一份计划书之后,一并报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。纸质版计划书应当保证与审核通过的电子版计划书内容一致。**自然科学基金委将对申请书纸质签字盖章页进行审核,对存在问题的,允许依托单位进行一次修改或补齐。**

向自然科学基金委提交电子版计划书、报送纸质版计划书并补交申请书纸质签字盖章页截止时间节点如下:

1. **2021年10月22日16点:** 提交电子版计划书的截止时间(视为计划书正式提交时间);
2. **2021年10月29日16点:** 提交修改后电子版计划书的截止时间;
3. **2021年11月5日16点:** 报送纸质版计划书(其中一份包含申请书纸质签字盖章页)的截止时间

4. 2021年11月25日16点：报送修改后的申请书纸质签字盖章页的截止时间。

请按照以上规定及时提交电子版计划书，并报送纸质版计划书和申请书纸质签字盖章页，未说明理由且逾期不报计划书或申请书纸质签字盖章页者，视为自动放弃接受资助；未按要求修改或逾期提交申请书纸质签字盖章页者，将视情况给予暂缓拨付经费等处理。

附件：项目评审意见及修改意见表

国家自然科学基金委员会

2021年10月12日

## 附件：项目评审意见及修改意见表

|  |                      |       |                     |       |       |
|--|----------------------|-------|---------------------|-------|-------|
| 项目批准号  | 62103176             | 项目负责人 | 付世华                 | 申请代码1 | F0311 |
| 项目名称   | 逻辑动态系统鲁棒控制及其在博弈论中的应用 |       |                     |       |       |
| 资助类别   | 青年科学基金项目             | 亚类说明  |                     |       |       |
| 附注说明   |                      |       |                     |       |       |
| 依托单位   | 聊城大学                 |       |                     |       |       |
| 直接费用   | 30.00 万元             | 起止年月  | 2022年01月 至 2024年12月 |       |       |
| <p>通讯评审意见：</p> <p>&lt;1&gt;具体评价意见：</p> <p>一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。</p> <p>矩阵半张量积下的代数状态空间方法是研究具有破产风险的网络演化博弈的一个新方法。它可以方便地运用控制的观点和方法分析和优化所研究的网络演化博弈，进而解决仿真方法无法解决的一些新问题。用控制论的方法研究网络演化博弈是近年来出现的博弈与控制的新学科，它融合了博弈和控制双方的工具和方法，是一个具有自身特色的新学术生长点。</p> <p>二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。</p> <p>本项目拟针对逻辑动态系统鲁棒控制及其在博弈论中的应用等关键问题进行研究。该项目内容新颖，触及学科前沿，具有很强的理论研究意义和很好的应用价值。研究内容和方法均具有较强的创新性。主要创新为：研究逻辑动态系统的鲁棒不变性以及控制不变性，给出计算已知集合内最大鲁棒不变集与控制不变集，系统鲁棒极限环与控制极限环的方法；将逻辑动态系统鲁棒控制理论推广到混合值逻辑网络，得到混合值逻辑网络鲁棒集合稳定与集合镇定的充要条件，并给出控制设计算法；将结果用于分析和优化具有破产风险的网络演化博弈，得到外部干扰影响下博弈破产机制传播规律，并给出避免玩家破产、最小化破产玩家个数以及最大化博弈长期整体收益的策略调控方法；本项目的研究不仅完善了逻辑动态系统鲁棒控制理论，为具有破产风险的网络演化博弈提供了策略优化方案，而且在很多其它领域也具有好的应用前景。</p> <p>三、请评述申请人的创新潜力与研究方案的可行性。</p> <p>申请者对背景知识熟悉，对相关领域的研究现状很了解，项目的研究目标明确，研究内容充实恰当，研究重点突出，技术路线清晰，条理清楚且针对性强，总体研究方案合理可行。项目申请人研究方面具有丰富的经验，前期工作积累非常好。申请人具有良好的教育经历和研究基础，已经做了比较突出的前期研究，在 AMC 等国际控制领域的权威期刊发表论文多篇。申请人研究实力强，研究基础和仪器设备等实验条件好，足以保证项目的顺利开展。评阅人相信该项目申请组有能力完成该项目，并取得有价值的研究成果。</p> <p>通过综合考虑，特此推荐该项目优先资助。</p> <p>四、其他建议</p> <p>&lt;2&gt;具体评价意见：</p> <p>一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。</p> <p>本项目针对在生物和经济等领域均有广泛应用的逻辑动态系统，拟运用矩阵半张量积方法，研究干扰影响下逻辑动态系统的鲁棒不变性以及鲁棒控制不变性、鲁棒集合稳定与鲁棒集合镇定等问题，并将逻辑动态系统鲁棒控制理论用于分析和优化具有破产风险的网络演化博弈。该项目是一个将控制、经济与数学多个学科相融合的项目，运用矩阵半张量积方法和博弈理论开展研究，其研究思想具有新颖性，且研究方案独特。</p> <p>二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。</p> <p>该项目关注的逻辑动态系统，是描述基因调控网络和网络演化博弈等复杂网络的常用模型，在生物、经济和众多其它领域均有广泛应用。考虑的干扰，存在于基因调控网络、经济系统中。目前，逻辑动态系统鲁棒不变性、鲁棒集合文档与镇定问题，及具有破产风险的网络演化博弈模型的研究结果很少。该项目的研究不仅完善了逻辑动态系统鲁棒控制理论，为具有破产风险</p> |                      |       |                     |       |       |

的网络演化博弈提供了策略优化方案，而且具有良好的应用前景。

三、请评述申请人的创新潜力与研究方案的可行性。

采用的矩阵半张量积方法对于逻辑动态系统的研究有着相对成熟的理论框架，半张量积方法可将具有破产风险的网络演化博弈建模成具有代数形式的离散时间逻辑动态系统，相关研究结果可为这类博弈的各类策略优化问题研究提供理论支持。研究方案采用的研究思路逻辑清晰，具备可行性。且申请人具有坚实的前期研究基础，可保证项目任务的顺利完成。

四、其他建议

<3>具体评价意见：

一、该申请项目的研究思想或方案是否具有新颖性和独特性？请详细阐述判断理由。

针对复杂网络演化博弈研究，创新将具有干扰影响和破产风险的网络演化博弈建模成逻辑动态系统，探究鲁棒集合镇定问题，具有较强的新颖性和独特性。

二、请评述申请项目所关注问题的科学价值以及对相关前沿领域的潜在贡献。

本项目主要关注系统鲁棒不变集和控制不变集的计算问题和干扰及变拓扑影响下的破产机制传播抑制问题，具有很好的理论和实际应用研究价值。

三、请评述申请人的创新潜力与研究方案的可行性。

项目研究思路清晰，研究方案可行。申请人具有一定研究基础，可为工作开展提供保障。

四、其他建议

修改意见：

信息科学部

2021年10月12日

# 国家自然科学基金资助项目批准通知

## (预算制项目)

陈国梁 先生/女士：

根据《国家自然科学基金条例》、相关项目管理办法规定和专家评审意见，国家自然科学基金委员会（以下简称自然科学基金委）决定资助您申请的项目。项目批准号：12226311，项目名称：非均匀异步采样网络化控制系统鲁棒控制研究，直接费用：10.00万元，项目起止年月：2023年01月至2023年12月，有关项目的评审意见及修改意见附后。

请您尽快登录科学基金网络信息系统 (<https://grants.nsf.gov.cn>)，**认真阅读《国家自然科学基金资助项目计划书填报说明》并按要求填写《国家自然科学基金资助项目计划书》（以下简称计划书）**。对于有修改意见的项目，请您按修改意见及时调整计划书相关内容；如您对修改意见有异议，须在电子版计划书报送截止日期前向相关科学处提出。

请您将电子版计划书通过科学基金网络信息系统 (<https://grants.nsf.gov.cn>) 提交，由依托单位审核后提交至自然科学基金委。自然科学基金委审核未通过者，将退回的电子版计划书修改后再行提交；审核通过者，打印纸质版计划书（一式两份，双面打印）并在项目负责人承诺栏签字，由依托单位科研、财务管理等部门审核、签章并在承诺栏加盖依托单位公章，且将申请书纸质签字盖章页订在其中一份计划书之后，一并报送至自然科学基金委项目材料接收工作组。纸质版计划书应当保证与审核通过的电子版计划书内容一致。**自然科学基金委将对申请书纸质签字盖章页进行审核，对存在问题的，允许依托单位进行一次修改或补齐。**

向自然科学基金委提交电子版计划书、报送纸质版计划书并补交申请书纸质签字盖章页截止时间节点如下：

1. **2022年10月28日16点**：提交电子版计划书的截止时间；
2. **2022年11月04日16点**：提交修改后电子版计划书的截止时间；
3. **2022年11月11日**：报送纸质版计划书（一式两份，其中一份包含申请书纸质签字盖章页）的截止时间。

请按照以上规定及时提交电子版计划书，并报送纸质版计划书和申请书纸质签字盖章页，逾期不报计划书或申请书纸质签字盖章页且未说明理由的，视为自动放弃接受资助；未按要求修改或逾期提交申请书纸质签字盖章页者，将视情况给予暂缓拨付经费等处理。

附件：项目评审意见及修改意见表

国家自然科学基金委员会

2022年10月08日

### 附件：项目评审意见及修改意见表

|                      |                      |       |                     |       |       |
|----------------------|----------------------|-------|---------------------|-------|-------|
| 项目批准号                | 12226311             | 项目负责人 | 陈国梁                 | 申请代码1 | A0601 |
| 项目名称                 | 非均匀异步采样网络化控制系统鲁棒控制研究 |       |                     |       |       |
| 资助类别                 | 数学天元基金项目             | 亚类说明  | 数学天元基金              |       |       |
| 附注说明                 |                      |       |                     |       |       |
| 依托单位                 | 聊城大学                 |       |                     |       |       |
| 直接费用                 | 10.00 万元             | 起止年月  | 2023年01月 至 2023年12月 |       |       |
| 通讯评审意见：              |                      |       |                     |       |       |
| 修改意见：                |                      |       |                     |       |       |
| 数理科学部<br>2022年10月08日 |                      |       |                     |       |       |

# 山东省自然科学基金

## 重点项目任务书

|      |                                   |      |                         |
|------|-----------------------------------|------|-------------------------|
| 指南方向 | 数理--新一代信息技术中的数学理论研究与应用            |      |                         |
| 项目名称 | 带有执行器约束欠驱动机器人系统的固定时间控制理论研究与应<br>用 |      |                         |
| 立项编号 | ZR2020KA010                       |      |                         |
| 资助经费 | 30.00                             | (万元) | 执行期限: 2021-01 至 2023-12 |
| 负责人  | 孙伟                                |      |                         |
| 联系电话 | 15066493137                       |      |                         |
| 依托单位 | 数学科学学院                            |      |                         |
| 合作单位 | 南开大学; 南京科沃信息技术有限公司                |      |                         |
| 申报日期 | 2020-11-03                        |      |                         |

山东省自然科学基金委员会办公室

二〇二〇年制

## 填报说明

- 一、省自然科学基金重点项目使用本立项任务书，作为项目执行、经费使用及验收的依据。
- 二、填写立项任务书前，请认真阅读本填报说明并参照相关管理办法，按要求填写和提交。
- 三、填写立项任务书应实事求是，文字表述清晰、准确。
- 四、资助经费为总经费，请按照省自然科学基金及本单位经费使用相关规定，确定直接经费、间接经费及其中的绩效等。
- 五、正文部分应与申报书保持一致。
- 六、本任务书需用 A4 纸双面打印，一式三份，项目负责人一份，依托单位一份，省科技厅一份。

## 基本信息

|  |                     |               |                             |           |             |            |         |                        |        |
|--|---------------------|---------------|-----------------------------|-----------|-------------|------------|---------|------------------------|--------|
| 项目情况   | 项目名称                |               | 带有执行器约束欠驱动机器人系统的固定时间控制理论与应用 |           |             |            |         |                        |        |
|  | 所属学科                | 名称 1          | 运动稳定性及其控制                   |           |             | 学科代码 1     | A020203 |                        |        |
|  |                     | 名称 2          | 复杂动态系统建模与分析                 |           |             | 学科代码 2     | F030307 |                        |        |
| 起止时间   | 自 2021-01 至 2023-12 |               |                             |           |             |            |         |                        |        |
| 申报者  | 姓名                  | 孙伟            | 性别                          | 男         | 出生年月        | 1986-02-10 |         | 所在院系或部门                | 数学科学学院 |
|  | 专业技术职务              | 副教授           |                             | 学位        | 博士          |            | 获得时间    | 2015-3-24              |        |
| 依托单位   | 单位名称                | 聊城大学          |                             |           |             | 邮政编码       | 252000  |                        |        |
|  | 详细地址                | 山东省聊城市湖南路 1 号 |                             |           |             | 联系人        | 李恒帅     |                        |        |
|  | 联系电话                | 06358239599   |                             | 手机        | 13475895656 |            | 电子信箱    | lihengshuai@lcu.edu.cn |        |
| 项目组  | 总人数                 | 高级职称          | 中级职称                        | 初级职称      | 辅助人员        | 在读博士后      | 在读博士生   | 在读硕士生                  |        |
|  | 11                  | 5             | 1                           | 0         | 0           | 0          | 1       | 4                      |        |
| 应用领域   |                     |               |                             | 新一代信息技术产业 |             |            |         |                        |        |
| <p>研究内容摘要（400 字以内）</p> <p>关于欠驱动系统的跟踪控制问题，现有文献大部分实现了系统的实际、渐近跟踪控制目标，而固定时间控制器设计的报道鲜有出现。此外，这些结果成立于一种理想的假设前提条件下：执行器的输出值通常等于其输入的控制信号。如果去掉这一假设，系统不但具有更一般性的数学模型，而且具有更广泛的实际应用价值，但同时也为该类系统的控制器设计和稳定性分析带来巨大挑战。本项目针对执行器带有非线性约束的欠驱动系统，研究其固定时间跟踪控制。对作用于欠驱动系统的执行器非线性约束进行合理的建模并分析其对系统结构的影响。通过应用状态和输入变换，将一阶速度约束和二阶加速度约束的欠驱动系统分别转化为链式系统和级联非线性系统，并考虑这些系统的固定时间控制器设计问题。本课题所考虑的系统模型具有实际的应用背景，如车载倒立摆、吊车系统等，对于所提出的控制方案均通过实际物理模型的仿真算例来验证其有效性。</p> |                     |               |                             |           |             |            |         |                        |        |

# 任务书正文

## 一、主要研究内容

针对执行器带有非线性约束的不确定一阶速度约束欠驱动系统:

$$J(q)\dot{q} = 0 \quad (1)$$

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = B(q)\tau + J^T(q)\lambda \quad (2)$$

和二阶加速度约束欠驱动系统:

$$\begin{aligned} M_{11}(q)\ddot{q}_1 + M_{12}(q)\ddot{q}_2 + F_1(q, \dot{q}) &= \tau \\ M_{21}(q)\ddot{q}_1 + M_{22}(q)\ddot{q}_2 + F_2(q, \dot{q}) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中系统(2)和(3)中的 $\tau$ 均带有非线性约束,本项目拟研究其固定时间跟踪控制问题.对作用于欠驱动系统的执行器非线性约束进行合理的建模并分析其对系统结构的影响,并考虑这类系统固定时间跟踪控制器设计.详细来讲,本课题拟研究以下四个控制问题:

### (1) 系统在执行器非线性约束下的数学建模

针对执行器非线性约束的不同类型,建立统一的数学描述,并利用拉格朗日建模或者牛顿力学分析法,深入剖析非线性约束与系统(状态)之间的耦合关系及对系统产生的结构影响,完成数学建模,且进一步探索在不同约束下固定时间补偿控制器的设计问题.

### (2) 一阶加速度约束欠驱动系统的固定时间跟踪控制

一阶速度约束欠驱动系统的运动学系统(1),在约束状态个数为2时,可以通过状态和输入变换,转化为如下链式系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= \lambda_0(t)u_0 + \psi_0(t, x_0, \theta) \\ \dot{x}_1 &= \lambda_1(t)u_0x_2 + \psi_1(t, u_0, x_0, x, \theta) \\ \dot{x}_i &= \lambda_i(t)u_0x_{i+1} + \psi_i(t, u_0, x_0, x, \theta), i = 2, 3, \dots, n-2 \\ \dot{x}_{n-1} &= \lambda_{n-1}(t)u_1 + \psi_{n-1}(t, u_0, x_0, x, \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

当系统(1)和(2)具有执行器非线性约束时,探索利用非线性变换把(1)化为类似于(4)的链式(或多链式)结构的方法,并考虑由广义速度作为输入的运动学系统的固定时间跟踪控制设计.在此基础上,借助于加幂积分器的构造方法和级联控制方法来实现整个系统(1)和(2)的固定时间跟踪控制.

### (3) 二阶速度约束欠驱动系统的固定时间跟踪控制

二阶加速度约束欠驱动系统 (3), 通过划分全驱动和欠驱动子系统的方式并利用状态和输入变换可以将其转化为如下非线性级联形式:

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= F(\eta, x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1r_1}, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2r_2}, x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ir_i}) \\ \dot{x}_{k1} &= x_{k2}, \dot{x}_{k2} = x_{k3}, \dots, \dot{x}_{kr_{k-1}} = x_{kr_k}, \dot{x}_{ki_k} = u_k, k = 1, \dots, i \end{aligned} \quad (5)$$

本课题将考虑在具有执行器非线性约束下, 探索二阶加速度约束欠驱动系统转化为相关的非线性级联形式的状态和输入变换. 在此基础上, 将采用加幂积分器/时变尺度变换设计与输入到状态稳定性 (Input-to-State Stability, ISS) 相结合的方法, 针对变换后的级联系统研究其固定时间跟踪控制器设计问题.

#### (4) 控制算法在实际系统中的应用

欠驱动系统在工程实际中是广泛存在的, 如轮式移动机器人、吊车系统、欠驱动水面(或水下)航行器、车载倒立摆等. 我们将所提出的固定时间控制方案应用在这些实际系统中, 验证控制方案的可行性和有效性, 可以获得较好的控制效果.

## 二、预期研究目标

### 1. 拟解决的重大科学难题、关键核心技术和具体的技术指标

(1) 针对执行器非线性约束的每一种类型, 如何运用恰当的数学工具和数学技巧, 找出它们输入输出关系的共同规律, 建立符合实际情况的数学模型, 并利用拉格朗日建模或者牛顿力学分析法, 深入剖析非线性约束与系统之间的耦合关系及其对系统结构的影响是本项目拟解决的关键科学问题之一.

(2) 针对带有执行器非线性约束的系统 (1) 和 (2), 拟实现其固定时间控制, 要解决的关键问题是: 如何设计加幂积分器或时变尺度变换和控制输入  $\xi_0(t)$  实现  $\xi_0(t) \neq 0, \forall t \in [0, T), \xi_0(t) \rightarrow 0, t \rightarrow T$ , 以及固定时间补偿控制器, 从而保证非连续  $\sigma$ -变换的可实施性. 应用此  $\sigma$ -变换后, 系统变为非线性链式系统, 设计新的有效的时变尺度变换并结合已有的非线性控制设计方法, 实现此类欠驱动系统的固定时间跟踪控制.

(3) 针对执行器非线性约束的系统 (3), 寻求状态和输入变换将其转化为如 (5) 式的非线性级联形式, 然后判定非线性零动态子系统是否为最小相位或者零输入状态稳定. 当满足 ISS 条件时, 要解决的关键问题是: 如何设计扩展加幂积分器或时变尺度变换及递推控制达到固定时间跟踪控制. 不满足 ISS 条件时, 要解决的关键问题: 利用有效的非线性技术将非线性零动态子系统变换成零输入状态稳定的子系统, 并通过非线性级联系统

的控制设计方法实现其固定时间跟踪控制. 若不能实现上述转换, 要解决的关键问题: 把变换后的带有执行器约束的级联系统变换成能够利用递推设计控制器的形式, 通过构造子系统的李雅普诺夫控制函数来实现递推设计.

## 2. 拟取得的主要科研成果

课题研究完成后, 预计完成 20 篇左右高质量的学术论文发表在国内外知名学术期刊, 在国内外主要学术会议上报告 8 篇会议论文. 在欠驱动机器人控制系统集成、工艺软件包申请国家发明专利 2 项, 申请实用新型专利 2 项, 申请软件著作权 1 项;

培养硕士生 5-8 名, 联合培养博士生 2 名;

争取获批山东省优秀科研成果奖 2 项以上; 省部级自然科学奖 1 项以上.

## 3. 研究成果应用情况及经济、社会效益

面向欠驱动机器人系统如吊车、移动机器人等, 提出快速精准的控制策略, 研制出高效率型工业机器人系统, 具有非常好的经济效益前景. 通过本项目的实施, 预计显著提高欠驱动机器人在生产线的操作能力和运行效率 20%以上; 预期降低单位综合能耗与成本 15%以上.

## 三、主要创新点

(1) 针对执行器非线性约束下欠驱动系统, 研究其固定时间控制和稳定性分析问题, 充分考虑了系统所受的执行器物理特性和不确定性因素的影响, 故**建立的系统模型更具一般性**, 实现固定时间控制目标**能有效地提高这些欠驱动机械系统的控制性能**. 这是本项目研究的基础, 也是本项目的创新点之一.

(2) 有关执行器非线性约束下欠驱动系统的固定时间跟踪控制和稳定性分析的研究尚处于起步阶段, 有诸多问题亟待研究. 在本项目的研究中, 一个根本的创新点在于**构造一个新的或改进已有的非线性系统和欠驱动系统的理论工具**, 如增加幂积分器控制技术、固定时间控制技术、级联方法、Backstepping 设计方法、自适应理论等, 来实现上述控制目标.

## 项目经费预算表

| 科目名称                               | 金额（单位：万元） | 备注（计算依据与说明）  |
|------------------------------------|-----------|--|
| 项目资助总额                             | 30        |  |
| 一、项目直接费用                           | 27        |  |
| 1、设备费                              | 2         |  |
| (1) 设备购置费                          | 2         | 工作站一台, 1.2万元/台*1台=1.2万元; 打印机一台, 0.2万元/台*1台=0.2万元; 现有计算机软硬件升级费0.6万元;          |
| (2) 设备试制费                          | 0         |  |
| (3) 设备改造与租赁费                       | 0         |  |
| 2、材料费/测试化验加工费/燃料动力费                | 12        | 搭建实验仿真平台所需的实验材料, 如电池, 芯片, 单片机, 小型电机等, 4万元/年*3=12万元                           |
| 3、差旅/会议/国际合作与交流费(直接费用10%以上需填写测算依据) | 2         | 到天津, 北京参加欠驱动系统控制会议的差旅费: 预计10人, 每人次0.2万元(交通费0.05万元, 住宿费0.15万元), 共0.2万元*10=2万元 |
| 4、劳务费/专家咨询费                        | 11        | 用于参加研究的研究生的劳务费: 5.5万元; 向国内外的权威学者专家进行咨询: 5.5万元.                               |
| 5、其他支出                             | 0         |  |
| 二、项目间接经费不超过（直接经费-设备购置费）*30%        | 3         |  |
| 1、房屋占用/日常水电气暖消耗                    | 0         |  |
| 2、管理费                              | 1.5       |  |
| 3、绩效支出                             | 1.5       |  |
| 三、自筹经费                             | 0         |  |

## 山东省自然科学基金重点项目负责人承诺书

本人郑重承诺：在山东省自然科学基金重点项目执行过程中，

（一）尊重科研规律，弘扬科学家精神，严谨求实，追求卓越；

（二）遵守科研诚信和科研伦理规范，认真开展科学研究；

（三）项目经费全部用于与本项目研究工作相关的支出，不用于与科学研究无关的支出，不截留、挪用、侵占项目经费；

（四）项目结题时，同意在单位内部公开项目经费决算和项目结题/成果报告，接受监督。

如违背上述承诺，本人愿接受山东省自然科学基金委员会和相关部门做出的各项处理决定。

签字：

日期：

## 资助项目签批审核表

承诺：本人/团队接受山东省自然科学基金的资助，严格遵守山东省自然科学基金委员会关于资助项目管理和财务管理的各项规定，认真开展研究工作，按照立项任务书的内容完成各项指标。按时报送有关材料，及时报告重大变动情况，对资助项目发表的论著和取得的研究成果按规定进行标注。

项目负责人签字：

年 月 日

依托单位意见

山东省自然科学基金委员会  
办公室意见

我单位同意承担该项目，将保证项目负责人及其研究队伍的稳定和项目实施所需要的条件，严格遵守山东省自然科学基金委员会有关资助项目管理、财务等各项规定，并做好督促协调工作。

(公章)

年 月 日

(公章)

年 月 日

附件：

无外拨声明.pdf

项目合作协议书.pdf

|       |         |
|-------|---------|
| 项目类别  | 学科代码    |
| 省杰青基金 | F031001 |

# 山东省自然科学基金 申报书

申报编号： ZR202102250482

---

申报者： 解相朋

---

项目名称： 智能控制系统与安全防护

---

依托单位： 聊城大学

---

申请日期： 2021-02-25

---

山东省自然科学基金委员会办公室  
二〇二一年制

## 填 报 说 明

- 一、 填写申请书前，请先认真查阅《山东省自然科学基金管理办法》及申报通知，确认是否具备申报资格。
- 二、 实事求是，逐条认真填写申请书（含封面）各项内容。
- 三、 填写内容表达要清晰、严谨。外来语要同时用原文和中文表达。第一次出现的缩写词，须注出全称。
- 四、 封面右上角填写项目类别： 杰青、优青。
- 五、 所属学科：应尽量根据学科代码分类细化，填写两个学科代码，其中学科 1 为主学科。
- 六、 学科代码：与所属学科相对应，采用 2018 年国家自然科学基金委代码系统，包括数理科学 A，化学科学 B，生命科学 C，地球科学 D，工程与材料科学 E，信息科学 F， 医学科学 H。
- 七、 项目性质：基础研究：指以认识自然现象、探索自然规律为目的，不直接考虑应用目标的研究活动。应用基础研究：指有广泛应用前景，但以获取新知识、新原理、新方法为目的的应用理论研究。
- 八、 填时间的填写格式为：yyyy-mm-dd。
- 九、 年龄不超过 38 周岁（1983 年 1 月 1 日后出生），在《关于转发科技部等部门<加强“从 0 到 1”基础研究工作方案>的通知》发布之日后（2020 年 8 月 12 日）申请国家优青进入最后评审阶段未获立项的申请人，须在基本信息表“是否直接申请”填写“是”，填写参加国家优青答辩时间，在附件中提交国家优青的答辩及未立项通知等证明材料。
- 十、 年龄不超过 40 周岁（1981 年 1 月 1 日后出生），在《关于转发科技部等部门<加强“从 0 到 1”基础研究工作方案>的通知》发布之日后（2020 年 8 月 12 日）申请国家杰青进入最后评审阶段未获立项的申请人，须在基本信息表“是否直接申请”填写“是”，填写参加国家杰青答辩时间，在附件中提交国家杰青的答辩及未立项通知等证明材料。

## 一、基本信息

|  |          |              |               |             |             |                         |                          |    |  |  |
|--|----------|--------------|---------------|-------------|-------------|-------------------------|--------------------------|----|--|--|
| 申请者  | 姓名       | 解相朋          | 性别            | 男           | 出生年月        | 1982-05-09              | 民族                       | 汉族 |  |  |
|  | 专业技术职务   | 研究员          |               | 学位          | 博士          | 研究专业、方向                 | 自动化/智能控制                 |    |  |  |
|  | 电话       | 0635-8238282 |               | 手机          | 15895987876 | 邮箱                      | xiexiangpeng1953@163.com |    |  |  |
| 依托单位   | 单位名称     | 聊城大学         |               |             |             | 邮编                      | 252000                   |    |  |  |
|  | 详细地址     | 山东省聊城市湖南路1号  |               |             |             | 联系人                     | 李恒帅                      |    |  |  |
|  | 电话       | 0635-8239599 | 手机            | 13475895656 | 邮箱          | lihengshuai@lccu.edu.cn |                          |    |  |  |
| 项目信息   | 项目名称     | 智能控制系统与安全防护  |               |             |             |                         |                          |    |  |  |
|  | 项目性质     | 应用基础研究       |               |             |             |                         |                          |    |  |  |
|  | 所属学科     | 名称1          | 智能控制理论与方法     |             |             | 学科代码1                   | F031001                  |    |  |  |
|  |          | 名称2          | 复杂工业过程智能控制与优化 |             |             | 学科代码1                   | F031005                  |    |  |  |
|  | 申请总经费    |              | 100.00万元      |             |             |                         |                          |    |  |  |
|  | 是否申请直接资助 |              | 否             |             |             | 参加答辩时间                  |                          |    |  |  |
| <p>研究内容摘要（不超过400字）</p> <p>金属带材轧制过程是一类典型的多变量、不确定性、强非线性、工况变化频繁的“黑箱”难控过程，传统控制理论与技术普遍面临着“控制难，测不准，成本高”三个突出问题。本项目面向冷轧行业转型升级需求和聊城区域经济主战场，发挥控制科学与工程学科特色，以快速发展中的聊城大学控制科学与技术科研团队为智力基础开展“工业互联网+智能制造”背景下冷轧板形智能控制与安全防护研究。主要研究内容有：提出融入轧机上游关键信息的机理-数据联合建模方法，解决耦合影响机理复杂的冷轧异构数据建模问题；由经验判断模式向数据支撑人机合作决策判断模式转变，实现个性化需求到底层控制指令无缝衔接；基于设备参数定期体检和预警式主动防护思想，构建能够保障关键设备安全运行的模糊专家系统。基于上述理论研究，拟通过知名冷轧企业聊城市冠洲股份有限公司等民营冷轧企业进行轧制数据采集，最终构建半实物仿真平台对智能控制系统进行技术验证。</p> |          |              |               |             |             |                         |                          |    |  |  |

## 二、申请者情况

### 1、简历

按照时间先后顺序列出大学以上学历、所获学位、授予单位以及主要学术任职、主要科研工作经历、所得荣誉称号（授予单位和时间）

教育经历：

2000-2004 东北大学，热能与动力工程专业，本科，工学学士

2004-2010 东北大学，控制科学与工程专业，博士研究生(硕博连读)，工学博士

主要学术任职：

担任SCI国际期刊《International Journal of Fuzzy Systems》(IF: 3.085)、《International Journal of Control, Automation, and Systems》(IF: 2.173) 编委，中国自动化学会青年工作委员会委员、中国自动化会能源互联网专业委员会委员等学术职务。

主要科研工作经历：

2010-2014 中冶集团中冶南方国家工程技术中心，工程师、高级工程师

2014-2020 南京邮电大学，副研究员、研究员

2021-至今 聊城大学，研究员

所得荣誉称号：

2020年科睿唯安ESI全球高被引科学家(跨学科领域)

主要科研业绩介绍：

申请人研究方向为复杂工业过程智能控制理论与应用。冷轧板形控制技术属于冶金工业领域高技术含量的关键技术之一，其最难控环节为乳化液冷却系统。自博士毕业以来，通过主持包括国家自然科学基金优秀青年基金等10余项国家、省部级纵向科研项目和企业横向课题，以解决乳化液冷却模糊控制技术面临的“控制难，测不准，成本高”三个突出问题为目标，提出了基于多时空齐次多项式技术的模糊控制理论方法、多时间尺度模糊状态估计与故障诊断理论方法，且理论方法支撑关键技术创新而研发出自主知识产权控制系统并实现初步工业应用。自2010年博士毕业以来，发表与录用智能控制领域顶级TOP期刊《IEEE Trans. on Fuzzy Systems》、《IEEE Trans. on Cybernetics》等IEEE汇刊67篇(第一/通讯作者22篇)、《自动化学报》2篇。获上海市自然科学奖二等奖(3/4)、中国自动化学会自然科学奖一等奖(2/5)、中信所中国百篇最具影响国际学术论文奖(第一作者)等科研奖励。授权第一发明人发明专利25项，行业主流媒体《世界金属导报》用整版篇幅对申请人研发的板形智能控制新技术进行推介，申请人还入选张家港市科技专员(首批10人)。

研究成果获得国际模糊系统学会主席Michio Sugeno教授、加拿大皇家学会院士Witold Pedrycz教授、美国自动控制协会主席Masayoshi Tomizuka教授、欧洲控制学会主席和IEEE计算智能学会主席 Marios M. Polycarpou教授、波兰科学院院士Jacek. M. Zurada教授(IEEE Life Fellow、IEEE Vice President)、《IEEE Trans. on Fuzzy Systems》主编Chin-Teng Lin 教授、《IEEE Trans. on Industrial Electronics》主编Mo-Yuen Chow教授、中国工程院钱锋院士等60位中外院士和IEEE Fellow正面引用，并被国际知名专家评价为：“极具挑战性问题”(a very challenging problem)、“重要作用”(an important role)、“至关重要”(paramount importance)等。独立科研以来(2010年一至今)，申请人学术论文在SCI数据库中严格他引2493次，第一作者单篇最高SCI他引193次，ESI热点论文6篇次，ESI高被引论文21篇次，同时入选2020年科睿唯安ESI全球高被引科学家(跨学科领域)。

2、申请者近五年承担主要科研项目（只填写省部级以上项目，包括国家、省部级各类科技发展规划、国家及省自然科学基金计划、人才类科研项目）的完成或进展情况

| 项目编号 | 项目名称                          | 资助金额<br>(万元) | 位次 | 计划类别           | 计划下达单位    | 起止年月                  | 完成或进展情况 |
|------|-------------------------------|--------------|----|----------------|-----------|-----------------------|---------|
| 1    | 复杂工业过程智能控制及应用                 | 120.00       | 1  | 国家自然科学基金优秀青年基金 | 国家自然科学基金委 | 2021-01-01至2023-12-31 | 进行中     |
| 2    | 具有自主适配功能的模糊动态系统HPPD型控制方法及应用研究 | 65.00        | 1  | 国家自然科学基金面上项目   | 国家自然科学基金委 | 2018-01-01至2021-12-31 | 进行中     |

3、申请者近五年成果获奖情况

仅填报国家级科技奖励（国家自然科学奖、国家发明奖、国家科学技术进步奖）、省部级奖励（二等以上）和国际学术性奖励，包括 获奖项目/成果名称、奖励名称、等级、获奖者（按顺序全部列出）、年份；已授权的发明专利授权情况（注明授权时间、国别、专利名称及位次）

| 授予时间       | 成果名称  | 奖励名称              | 等级      | 第一完成人 | 本人位次 | 授予单位        |
|------------|---|-------------------|---------|-------|------|-------------|
| 2019-01-10 | 网络化测控系统事件驱动通信与控制  | 上海市科学技术奖自然科学奖     | 二等奖     | 彭晨    | 3    | 上海市人民政府     |
| 2017-10-31 | Control synthesis of discrete-time T-S fuzzy systems via a multi-instant homogenous polynomial approach | 中信所中国百篇最具影响国际学术论文 | 百篇优秀论文奖 | 解相朋   | 1    | 中国科学技术信息研究所 |

4、近五年代表性论文论著（不超过10篇，署名（独立）通讯作者的文章，备注一栏中必须标明并说明期刊所属分区，附件上传。）

| 发表时间       | 论著名称  | 发表刊物、出版社   | 本人位次 | 收录情况 | 影响因子   | 备注          |
|------------|---|--|------|------|--------|-------------|
| 2016-03-01 | Control Synthesis of Discrete-Time T-S Fuzzy Systems via a Multi-Instant Homogenous Polynomial Approach | IEEE Transactions on Cybernetics, Vol. 46, No.3, pp. 630-640 | 1    | SCI  | 11.079 | 一区，ESI高被引论文 |

| 发表时间       | 论著名称   | 发表刊物、出版社  | 本人位次 | 收录情况 | 影响因子   | 备注                 |
|------------|--|---|------|------|--------|--------------------|
| 2017-09-01 | Control Synthesis of Discrete-Time T-S Fuzzy Systems: Reducing the Conservatism Whilst Alleviating the Computational Burden                            | IEEE Transactions on Cybernetics, Vol. 47, No.9, pp. 2480-2491                            | 1    | SCI  | 11.079 | 一区, ESI高被引论文       |
| 2017-09-01 | Fault Estimation Observer Design for Discrete-Time Takagi-Sugeno Fuzzy Systems Based on Homogenous Polynomially Parameter-Dependent Lyapunov Functions | IEEE Transactions on Cybernetics, Vol. 47, No.9, pp. 2504-2513                            | 1    | SCI  | 11.079 | 一区                 |
| 2017-10-01 | Multi-Instant Observer Design of Discrete-Time Fuzzy Systems: A Ranking-Based Switching Approach   | IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 25, No.5, pp. 1281-1292                          | 1    | SCI  | 9.518  | 通讯作者, 一区, ESI高被引论文 |
| 2018-10-01 | Relaxed Fuzzy Observer Design of Discrete-Time Nonlinear Systems via Two Effective Technical Measures  | IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 26, No.5, pp. 2833-2845                          | 1    | SCI  | 9.518  | 一区                 |
| 2018-12-01 | Relaxed Real-Time Scheduling Stabilization of Discrete-Time Takagi-Sugeno Fuzzy Systems via A Alterable-Weights-Based Ranking Switching Mechanism      | IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 26, No.6, pp. 3808-3819                          | 1    | SCI  | 9.518  | 一区, ESI高被引论文       |
| 2020-04-01 | Observer Design of Discrete-Time Fuzzy Systems Based on An Alterable Weights Method  | IEEE Transactions on Cybernetics, Vol. 50, No.4, pp. 1430-1439                            | 1    | SCI  | 11.079 | 一区, ESI高被引论文       |
| 2020-08-01 | Observer-Based State Estimation of Discrete-Time Fuzzy Systems Based on A Joint Switching Mechanism for Adjacent Instants                              | IEEE Transactions on Cybernetics, Vol. 50, No.8, pp. 3545-3555                            | 1    | SCI  | 11.079 | 一区                 |
| 2018-12-01 | Relaxed Control Design of Discrete-Time Takagi-Sugeno Fuzzy Systems: An Event-Triggered Real-Time Scheduling Approach                                  | IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Vol. 48, No.12, pp.2251-2262 | 1    | SCI  | 9.309  | 一区, ESI高被引论文       |

| 发表时间       | 论著名称  | 发表刊物、出版社  | 本人位次 | 收录情况 | 影响因子  | 备注 |
|------------|---|---|------|------|-------|----|
| 2020-04-03 | Enhanced Switching Stabilization of Discrete-Time Takagi-Sugeno Fuzzy Systems: Reducing the Conservatism and Alleviating the On-line Computational Burden | IEEE Transactions on Fuzzy Systems, DOI (identifier) : 10.1109/TFUZZ.2020.2986670 | 1    | SCI  | 9.518 | 一区 |

| 5、近五年国际学术会议上作大会报告、特邀报告情况（会议名称，地点，时间，国家；提供邀请信或通知的复印件） |              |      |    |                        |
|--|--------------|------|----|------------------------|
| 会议时间   | 会议名称         | 会议地点 | 国家 | 备注                     |
| 2020-11-06   | 2020年中国自动化大会 | 上海   | 中国 | 专题论坛5：信息物理系统特邀报告(30分钟) |

### 三、申请者主要学术成绩、创新点及科学意义

#### 1.1 学术成绩概述

申请人博士毕业于东北大学控制科学与工程专业,先后在中国冶金科工集团国家钢铁生产能效优化工程技术研究中心(2010-2014)、南京邮电大学(2014-2020)从事模糊智能控制及在冷轧带钢板形控制中应用研究工作,2021年1月通过山东省高校“青创人才引进计划”加盟家乡高校聊城大学,加入聊城大学复杂系统智能分析与控制创新团队(山东省高等学校优秀青年创新团队)。独立从事科研工作以来,针对严重制约模糊控制广泛工业应用的若干挑战性问题,申请人构建出独特的齐次多项式参数化分析框架,系统地提出了具有自主适配功能的HPPD(全称 Homogenous Polynomially Parameter Dependent)型模糊智能控制理论与方法,取得破解 H. Hellendoorn 教授所提出公开性难题的重要进展;研究成果得到 60 位中外院士和 IEEE 会士正面评价,国际模糊系统学会(IFSA)主席 M. Sugeno 教授在其著名综述《Fuzzy Control Systems: Past, Present and Future》中着重强调申请人提出了非传统的模糊控制策略。面向冷轧带钢板形控制实际工业需求,将其模糊控制理论成果应用于双机架冷轧系统,突破乳化液冷却喷射模糊控制的技术瓶颈,板形质量达到国际先进水平(稳态成品板形指标在 6I 以内),冶金行业主流媒体《世界金属导报》以整版篇幅对申请人主持研发的板形控制新技术进行推介。

- 发表与录用智能控制领域顶级 TOP 期刊《IEEE Trans. on Fuzzy Systems》、《IEEE Trans. on Cybernetics》等 IEEE 汇刊 67 篇(第一/通讯作者 22 篇)、《自动化学报》2 篇,且上述 67 篇 IEEE 汇刊论文均为中科院分区一、二区论文。
- 获上海市自然科学奖二等奖(3/4)、中国自动化学会自然科学奖一等奖(2/5)、中信所中国百篇最具影响国际学术论文奖(第一作者)、江苏省教育厅研究成果奖(高校自然科学研究类)二等奖(排名第一)等科研奖励。
- 国家优秀青年基金获得者、入选 2020 年科睿唯安 ESI 全球高被引科学家(跨学科领域),江苏省生产力促进中心张家港市科技专员(首批 10 人)。
- 主持国家自然科学基金优秀青年基金项目、面上项目、青年基金等多项国家、省部、市厅级纵向科研项目;主持双机架冷轧平整机组冷轧带钢板形控制系统研发、新疆电科院应对极端灾害能力智能评估与应急策略规划分析项目等多项横向课题,参与国家自然科学基金重点项目各 1 项。
- 《单机架六辊轧机板形控制系统优化设计》荣获央企中冶南方工程技术有限公司技术研发成果一等奖(排名第一,电气控制专业有史以来首项),相关技术成果作为第一发明人获授权发明专利 25 件;发表在《自动化学报》上的第一作者成果被写入由中国工程院王耀南院士执笔的“2010-2011 控制科学与工程学科发展报告智能控制发展研究专辑”。

**国内外学术影响:**研究成果获得国际模糊系统学会主席 Michio Sugeno 教授、加拿大皇家学会院士 Witold Pedrycz 教授、美国自动控制协会主席 Masayoshi Tomizuka 教授、欧洲控制学会主席和 IEEE 计算智能学会主席 Marios M. Polycarpou 教授、波兰科学院院士 Jacek. M. Zurada 教授(IEEE Life Fellow、IEEE

Vice President)、《IEEE Trans. on Fuzzy Systems》主编 Chin-Teng Lin 教授、《IEEE Trans. on Industrial Electronics》主编 Mo-Yuen Chow 教授、中国工程院钱锋院士等 60 位中外院士和 IEEE Fellow 正面引用(详细名单见表格 1), 并被国际知名专家评价为: “极具挑战性问题”(a very challenging problem)、“重要作用”(an important role)、“至关重要”(paramount importance)等。博士毕业以来, 申请人学术论文在 SCI 数据库中被严格他引 2493 次, 第一作者单篇最高 SCI 他引 193 次, ESI 热点论文 6 篇(第一作者 4 篇), ESI 高被引论文 21 篇(第一作者 12 篇), 入选 2020 年科睿唯安 ESI 全球高被引科学家(跨学科领域)。以“Homogenous Polynomial”为关键词在 Google 学术引擎搜索中约有 87900 条结果, 按照相关性排序, 排第 1 位的是申请人的第一作者论文。

**表格 1 正面评价申请人工作的 60 位中外院士和 IEEE Fellow 名单**

|                       |  |
|-----------------------|--|
| 中国工程院院士(5)            | 钱锋院士、桂卫华院士、陈杰院士、薛禹胜院士、王耀南院士  |
| 国外院士(8)               | 加拿大皇家学会院士 Witold Pedrycz、波兰科学院院士 Jacek. M. Zurada、韩国科学院院士 J.-H. Park、加拿大工程院院士 Peter Xiaoping Liu、Yang Shi、南非国家科学院院士 Baozhu Guo、Qingguo Wang、墨西哥科学院院士 Wen Yu  |
| 国际学会主席和 IEEE 汇刊主编(10) | Michio Sugeno、Marios M. Polycarpou、C. L. Philip Chen、Masayoshi Tomizuka、Derong Liu、Haibo He、Chin-Teng Lin、Shun-Feng Su、Mo-Yuen Chow、Xinghuo Yu               |
| 欧美地区 IEEE Fellow(12)  | Thomas Parisini、H.K. Lam、M. Sotelo、Josep M. Guerrero、Wenhua Chen、Steven X. Ding、Zidong Wang、Donald C. Wunsch、Fen Wu、Kwang Y. Lee、Frank L. Lewis、Mengchu Zhou |
| 亚太地区 IEEE Fellow(12)  | Jams Lam、Gang Feng、Tingwen Huang、Hanxiong Li、Daniel W. C. Ho、Wen-June Wang、Guangbin Huang、Zhaoyang Dong、Peng Shi、Weixing Zheng、Qing-Long Han、Kazuo Tanaka    |
| 中国大陆 IEEE Fellow(13)  | 周东华、关新平、曹进德、吴敏、姜斌、张军、吴立刚、高会军、孙宏斌、曾志刚、宋永端、徐泽水、李世华   |

**控制科学与工程学术服务:**

- 控制领域 SCI 国际期刊《International Journal of Fuzzy Systems》(IF: 3.085)、《International Journal of Control, Automation, and Systems》(IF: 2.173) 编委。
- 担任中国自动化学会青年工作委员会、能源互联网专委会委员等学术职务。
- 美国《Mathematical Reviews》特约评论员(No.14097)。
- 担任《IEEE Trans. on Automatic Control》、《Automatica》、《IEEE Trans. on Fuzzy Systems》、《IEEE Trans. on Cybernetics》、《自动化学报》等 30 余种权威期刊审稿人。
- 受邀在华中科技大学、四川大学、东南大学、东北大学、武钢研究院等 20 余家高校或央企研发机构做模糊控制、板形控制学术报告。

## 1.2 主要学术创新点及其科学意义

### 1.2.1 系统地提出具有自主适配功能的 HPPD 型模糊智能控制理论新方法

**研究背景：**国际模糊系统学会欧洲区主席、荷兰 H. Hellendoorn 教授在其著名的综述论文(A survey on industrial applications of fuzzy control, Computers in Industry, 62(3): 213- 226, 2011)中特别指出：**模糊控制理论在工业生产中广泛应用时面临“控制器无解或虽有解但不满足控制系统实时性要求”这一公开性难题的挑战**，亟需同时从两个关键科学问题层面来构建非传统的解决途径：1) 如何降低控制设计保守性；2) 从实现成本的角度来提出低成本的模糊控制器。

从具体的模糊控制技术角度来分析：基于“分段线性化”思想且人为赋予被控对象若干理论化假设条件基础上常规模糊控制理论提出一种线性加权形式的所谓PDC (Parallel Distributed Compensation) 型控制策略。实践证明，这种简单线性加权形式的控制器很难捕捉到时变非线性被控对象的高阶非线性特征，其实际工业控制效果并不理想。由于各前件变量之间的交叉影响，导致基于PDC技术的非线性系统控制设计的主要结果中存在若干耦合参数项，其可解性严重依赖于耦合参数项的各类简化处理手段，而简化处理方法在控制设计中不可避免地引入较大的保守性，导致传统PDC方法的应用范围受到严重限制。此外，已有的模糊控制器投入运行时因为需要周期性在线计算若干组矩阵逆而求逆运算非常耗时，导致很难满足电气控制系统的实时性要求。从本质上讲，由于模糊控制算法在控制设计保守性与实现成本之间存在着互相制约的矛盾关系，如何寻找攻克上述问题的解决途径被国际权威专家公认为是一个极具挑战性的问题(IFAC 技术委员会副主席、《IEEE Trans. on Fuzzy Systems》副主编、法国 T. M. Guerra 教授，“a very challenging problem”，IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 27 (2):402-410, 2019)。

**学术成绩和创新点：**申请人发现了耦合参数项解耦与控制器架构以及阶次之间的内在联系，**构建出独特的齐次多项式参数化分析框架**；攻克了高阶异构多项式技术与多维同胚模糊理论之间无损性转化的难题，提出了**渐近意义下的 HPPD 型模糊控制充分必要条件设计方法**；实现了冗余变量的精准去除和控制设计功能的无损性过渡，建立了保守性、离线与在线计算量三方博弈模型并完善了博弈个体与被控对象的自主适配功能，获得了**比以往结果保守性更小且离线/在线计算负担亦更小的更高效率模糊控制器设计方法**。被评价为取得破解 H. Hellendoorn 教授所提出的公开性难题道路上的重要进展。具体学术创新点如下：

(1) **构建出独特的齐次多项式参数化分析框架，为大幅降低模糊控制设计条件保守性提供了解决途径**。支撑成果包括：论文[1.1]、[1.2]。

使用传统 PDC 方法很难捕捉到时变非线性被控对象的高阶非线性特征，且其用于参数解耦的简化处理进一步引入了保守性，导致传统 PDC 方法的应用范围受到限制。针对此问题，申请人另辟蹊径：揭示了不同模糊前件间的内在关系与演化机理，发现了耦合参数项解耦与控制器架构以及阶次之间的内在联系，创新性地构建出独特的齐次多项式参数化分析框架继而设计出与高阶非线性控制对象相匹配的 HPPD 型模糊控制器，获得不含任何耦合参数项的松弛性结果，为大幅降低模糊控制设计条件保守性提供了解决途径(被《IEEE Trans. on Fuzzy Systems》副主编、法国 T. M. Guerra 教授称之为“**development of more advanced**

**control approach**”, IEEE Trans. on Fuzzy Systems,27 (2):402-410, 2019)。以国际上公认经典算例为比较依据, 所提出的方法将 T. M. Guerra 教授的模糊系统可控设计参数范围显著提升。在此基础上, 申请人率先利用模糊前件求导时具有多组正负特性组合信息, 成功实现模糊子空间的在线自动划分与即刻识别(论文[1.2]), 与国际知名学者成果相比控制设计条件保守性进一步降低 (见表格 2)。

**表格 2 论文[1.2]成果与国际学者相关成果对比**

78

X.-P. Xie et al. / Fuzzy Sets and Systems 263 (2015) 71–81

[24]和[26]为IEEE TIE 副主编Palhares教授和Oliverira教授的相关成果

Table 1

Maximum of feasible values of  $\lambda$  with different  $\phi$  and different methods.

| $\phi$                 | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| [24]                   | 29.7 | 21.0 | 16.3 | 13.4 | 11.3 | 9.8  | 8.6  | 7.6  | 6.8 |
| [26]                   | 30.0 | 21.4 | 16.9 | 14.2 | 12.3 | 10.9 | 9.8  | 9.0  | 8.4 |
| Theorem 4 with $i = 1$ | 31.3 | 23.2 | 19.1 | 16.6 | 14.7 | 13.2 | 11.9 | 10.8 | 9.8 |
| Theorem 4 with $i = 2$ | 31.2 | 23.0 | 18.8 | 16.2 | 14.4 | 12.9 | 11.7 | 10.7 | 9.8 |

① 论文[1.1]在 IEEE Fellow、《IEEE Trans. on Fuzzy Systems》主编 Chin-Teng Lin 教授主导推出的“The structure and citation landscape of IEEE Transactions on Fuzzy Systems (1994-2015), IEEE Trans. on Fuzzy Systems,26 (2):430-442,2018”高影响力论文评选中入选为“**TOP 10 References with Strong Citation Bursts**”(前 10 论文排名第 2)。此外, 论文[1.1]发表后连续 7 年持续入选每一期 ESI 高被引论文。

② IEEE Fellow、加拿大皇家学会院士 W. Pedrycz 教授指出, 论文[1.1]的成果在模糊控制理论及应用领域起到了**重要作用** (“**play an important role**”, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 22(6): 1585-1597, 2014)。

③ 国际模糊系统学会主席 M.Sugeno 教授在 IEEE 计算智能学会旗舰刊物《IEEE Computational Intelligence Magazine》上发表的长篇综述“Fuzzy Control Systems: Past, Present and Future, 14(1):56-68,2019”中着重强调申请人提出了**非传统的模糊控制策略** (“It should be **stressed** that **alternative control schemes ... been proposed** in the T-S fuzzy literature [65]”, 文献[65]即论文[1.1])。

(2) 提出了渐近意义下的**HPPD型模糊控制充分必要条件设计方法**, 实现了**保守性显著降低且模糊控制器在线计算量满足电气控制系统实时性要求的双重目标**。支撑成果包括: 论文[1.3]、[1.4]、[1.5]。

在显著降低控制设计保守性的同时, 如何从实现成本角度提出低成本的模糊控制器以确保每一采样时刻的模糊控制器在线计算量均满足电气控制系统实时性要求变得尤为重要。针对此问题, 申请人突破了高阶异构型模糊前件构成的矩阵多项式与多维同胚模糊求和之间转化过程的相关壁垒, 攻克了高阶异构多项式技术与多维同胚模糊理论之间无损性转化的难题, 系统性提出了多项式型右侧松弛矩阵方法(论文[1.3])、增广多指标矩阵方法(论文[1.4])、渐近意义下的HPPD型模糊控制**充分必要条件设计方法**(论文[1.5]), 实现了**保守性显著降低且模糊控制器在线计算量满足电气控制系统实时性要求的双重目标**。值得指出的是, 申请人提出的用于衡量模糊控制设计计算复杂度的( $\log, N_d, N_f$ )函数测算方法已被权威同行学者所认可, 已成为领域内定量评估模糊控制算法效率的通用性工具(例如 T. M. Guerra教授撰文指出: “the computational burden is usually estimated by **the method in Xie et al. 2014**”, ISA Transactions, 84(1): 104-110, 2019)。

#### 客观评价:

① 韩国科学院院士Ju H. Park教授和IEEE Fellow、长江学者特聘教授关新平教授指出, 论文[1.4]通过提出增广多指标矩阵方法而解决了模糊系统稳定性问题 (“**Xie et al. addressed ... the method of the augmented multi-indexed matrix**”, IEEE Trans. on Cybernetics, DOI:10.1109/TCYB.2019.2918793, 2019)。

② IFAC 技术委员会副主席、《IEEE Trans. on Fuzzy Systems》副主编 T. M. Guerra 教授和IEEE Fellow、IEEE工业电子学会主席、澳大利亚皇家墨尔本大学 Xinghuo Yu 教授分别指出, 论文[1.3]和[1.5]是国际上突破常规二次型模糊稳定性框架束缚、构建更高级模糊控制系统分析工具以获得渐近意义下充要设计条件的 “**early works**” (Fuzzy Sets and Systems, 306:48-62, 2017)、 “**important results**” (IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 26 (4):2261-2272,2018)。

(3) 实现了冗余变量的精准去除和控制设计功能的无损性过渡, 获得比以往结果保守性更小且离线/在线计算负担亦更小的更高效率模糊控制器设计方法, 取得了破解 H. Hellendoorn 教授所提出公开性难题道路上的重要进展。支撑成果包括: 论文[1.6-1.10]。

上述控制设计充要条件得益于大规模松弛矩阵变量的引入。申请人发现了松弛矩阵变量中相当一部分属于冗余变量(约占全部变量 1/2~2/3), 揭示出冗余变量未起到任何积极作用却额外增加离线/在线计算负担甚至导致维数灾问题。针对此问题, 提出了一种冗余变量甄选与去除机制, 完成了冗余变量精准去除和控制设计功能无损性过渡(论文[1.6]); 打破了以往模糊权值固定的零和博弈思维束缚, 建立了保守性、离线与在线计算量三方博弈模型, 提出一种可变权值切换控制策略(论文[1.7]); 继而提出一种齐次矩阵多项式扩展表示方法, 给出了相同功能松弛矩阵变量的等价性严格证明(论文[1.8]); 最终提出一种增强型模糊信息更新机制来强化模糊控制设计条件保守性、在线/离线计算量三者间的协同优化(论文[1.9]), 完善了博弈个体与具体被控模糊对象的自主适配功能, 获得了保守性更小且离线/在线计算负担亦更小的更高效率模糊控制方法(论文[1.10])。

#### 客观评价:

① 《IEEE Trans. on Industrial Electronics》副主编 Reinaldo M. Palhares 教授 (IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 27(9):1833-1843,2019)指出, 论文[1.6]获得了在不增加计算负担条件下保守性更小的结果: “**obtaining less conservative results without increasing the computational burden**”, 取得了破解 H. Hellendoorn 教授 2011 年所提出公开性难题道路上的重要进展 “**significant improvements**”。

② IEEE Fellow、美国德州农工大学卡塔尔分校 Tingwen Huang 教授(IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, DOI: 10.1109/TSMC.2019.2946248,2019)评价论文[1.7]提出了新的切换机制从而解决了模糊松弛型实时调度镇定控制问题: “In [53], a **new alterable-weights based ranking switching mechanism was proposed**, and the relaxed real-time scheduling stabilization problem was **solved**”。

**本研究方向成果简述:** 申请人通过近十年的系统性深入研究, 以解决 H. Hellendoorn 教授所提出公开性难题为目标, 循序渐进地构建了一套有机整体性

的具有自主适配功能的 HPPD 型模糊智能控制理论方法。本方向申请人以第一作者发表 10 篇学术论文, 包括《**IEEE Trans. on Fuzzy Systems**》(4 篇)、《**IEEE Trans. on Cybernetics**》(3 篇)、《**Fuzzy Sets and Systems**》((1 篇)、《**IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**》(2 篇), 其中有 3 篇入选 ESI 热点论文, 6 篇入选 ESI 高被引论文:

[1.1] **Xiangpeng Xie**, etc. Control synthesis of discrete-time T-S fuzzy systems based on a novel non-PDC control scheme. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 21, No.1, pp. 147-157, 2013. (ESI 高被引论文)

[1.2] **Xiangpeng Xie**, etc. An efficient approach for reducing the conservatism of LMI-based stability conditions for continuous-time T-S fuzzy systems. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 263, No.1, pp. 71-81, 2015. (ESI 热点和高被引论文)

[1.3] **Xiangpeng Xie**, etc. Further studies on control synthesis of discrete-time T-S fuzzy systems via useful matrix equalities. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 22, No.4, pp. 1026-1031, 2014.

[1.4] **Xiangpeng Xie**, etc. Further studies on control synthesis of discrete-time T-S fuzzy systems via augmented multi-indexed matrix approach. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 44, No.12, pp. 2784-2791, 2014. (ESI 高被引论文)

[1.5] **Xiangpeng Xie**, etc. Control synthesis of discrete-time T-S fuzzy systems via a multi-instant homogenous polynomial approach. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 46, No.3, pp. 630-640, 2016. (ESI 热点和高被引论文, 中信所 2016 年度中国百篇最具影响国际学术论文)

[1.6] **Xiangpeng Xie**, etc. Control synthesis of discrete-time T-S fuzzy systems: reducing the conservatism whilst alleviating the computational burden. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 47, No.9, pp. 2480-2491, 2017. (ESI 高被引论文)

[1.7] **Xiangpeng Xie**, etc. Relaxed real-time scheduling stabilization of discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems via an alterable weights based ranking switching mechanism. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 26, No.6, pp. 3808-3819, 2018. (ESI 热点和高被引论文)

[1.8] **Xiangpeng Xie**, etc. Reducing the conservatism of stabilization for discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems via a new extended representation approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 50, No.1, pp. 4387-4393, 2020.

[1.9] **Xiangpeng Xie**, etc. Enhanced switching stabilization of discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems: reducing the conservatism and alleviating the on-line computational burden. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, DOI:10.1109/TFUZZ.2020.2986670, 2020.

[1.10] **Xiangpeng Xie**, etc. Enhanced stabilization of discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems based on a comprehensive real-time scheduling model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, DOI: 10.1109/TSMC.2020.3009728, 2020.

### 1.2.2 构建了有机整体性的多时间尺度模糊状态估计与故障诊断理论新方法

**研究背景:** 在实际工业系统中由于非线性、不确定性和时变性而导致系统状态变量的难测性,检测元件的测量能力与配置经济性等客观原因也加重了工业系统的在线检测问题。此外,控制系统的检测元件、执行机构部件也会在不可预知情况下发生故障。以冷轧带钢板形控制为例:受制于物理原因的限制,板形仪只能在线检测工作辊辊缝出口六倍辊径之后的板形值,且由于现场乳化液温度的剧烈波动造成板形仪(检测元件)以及工作辊(执行机构)故障。近十年来,模糊状态估计与故障诊断问题受到广泛关注且产生了一批理论研究成果;但是,正如 IFAC 技术委员会副主席、《IEEE Trans. on Fuzzy Systems》副主编 T. M. Guerra 教授所指出的:已知设计方法并非最佳的可行方案(is not the “best” possible one), 研究者们亟需在方法本质上做出变革(“change in the initial method”, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 20:187-192, 2012)。更为糟糕的是,绝大部分理论研究成果相对孤立地研究控制设计、状态估计和故障诊断三个问题,没有考虑三者在线控制进程中运行演变的时间尺度不同,导致理论方法在实际应用中出现控制器通讯与计算负荷过重、状态估计能力不足、故障误报率居高不下等棘手问题,亟需形成一套有机整体性的多时间尺度模糊状态估计与故障诊断解决方案。

**学术成绩和创新点:** 申请人提出了一种全新的 Multi-Instant 型模糊观测器架构,显著降低了模糊状态估计结果的保守性并提高了计算效率,实现了 T. M. Guerra 教授所倡导的“方法本质上的变革”;又提出了多维度协同设计的研究思路,进一步提高了模糊状态估计结果的精准度、鲁棒性以及算法效率;最后以全局角度优化协调了在线控制器、状态估计和故障诊断三者在线控制进程中运行演变的时间尺度调度问题,系统性提出 ranking-based 切换方法、故障诊断联合实时时序调度方法、事件触发实时时序调度方法等方法,构建了一套有机整体性的多时间尺度模糊状态估计与故障诊断理论新方法,显著地降低了控制器通讯与计算负荷、提高了控制系统状态估计能力、减少了故障误报率,增强了相关理论方法面向实际工业系统的适应能力。具体学术创新点如下:

(1) 提出了一种全新的 Multi-Instant 型模糊观测器架构,显著降低了模糊状态估计结果的保守性并提高了计算效率,实现了 T. M. Guerra 教授所倡导的“方法本质上的变革”。支撑成果包括:论文[2.1]、[2.2]、[2.3]。

立足于在方法本质上做出变革的原创性出发点,申请人提出了一种全新的 Multi-Instant 型模糊观测器架构并成功揭示了相邻采样时刻模糊前件间取值大小的继承与演化机理,继而创新性提出多时刻组合型 Lyapunov 泛函分析方法,彻底解决了模糊观测器设计方面困扰已久的解耦设计问题且能够更加有效地考虑模糊前件的隐含信息,显著地降低模糊状态估计结果的保守性并提高了计算效率,实现了 T. M. Guerra 教授倡导的“方法本质上的变革”(可解域提升 10 倍以上,见表格 3)。着眼于工业控制系统的“控制未动(100ms 级),检测先行(50ms 级)”现实时间尺度要求,率先将模糊前件变量的大小分布信息融合到模糊观测器设计中,通过提出了一种 ranking-based 切换方法成功将模糊前件变量的大小分布信息在较小时间尺度内予以有效利用,获得了保守性更小且能够在 50ms 内快速实现的模糊观测器(见论文[2.2])。此外,通过对多指标矩阵技术的优化设计,去除

了设计中的冗余项，提升了算法的计算效率(见论文[2.3])。

表格3 论文[2.1]成果与国际知名学者相关成果对比

1718

[27]为 T. M. Guerra 教授于2012年发表在IEEE TFS上的研究成果

TABLE I  
MAXIMUM OF FEASIBLE INTERVALS OF  $b$  VIA DIFFERENT METHODS

| $a$    | 1.00       | 2.00       | 3.00       | 4.00       |
|--------|------------|------------|------------|------------|
| [27]   | [-0.4,0.7] | [-0.4,0.9] | [-0.4,0.9] | [-0.2,0.3] |
| Case 1 | [-0.4,157] | [-0.4,35]  | [-0.4,16]  | [-0.4,10]  |
| Case 2 | [-0.4,186] | [-0.4,38]  | [-0.4,17]  | [-0.4,10]  |
| Case 3 | [-0.4,213] | [-0.4,41]  | [-0.4,17]  | [-0.4,11]  |

#### 客观评价:

① 波兰科学院院士、IEEE Life Fellow、美国路易斯维尔大学的 Jacek. M. Zurada (IEEE Vice President) 教授在其论文中系统性评价了申请人五篇模糊观测器方向的第一作者论文，并指出论文[2.1]是模糊观测器理论领域的本质性工作 (“**essential**”, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 26(2):761-770, 2018)。

② IEEE Fellow、台湾国立中央大学 Wen-June Wang 教授亦指出，论文[2.1]提出了一种“a **new** fuzzy observer”，这项成果为如何降低模糊系统观测器设计保守性提供了解决途径(IET Control Theory and Applications, 10:151-161,2016)。

③ Takagi-Sugeno 模糊模型提出者、国际模糊系统学会主席 M.Sugeno 教授在 IEEE 计算智能学会旗舰刊物《IEEE Computational Intelligence Magazine》上发表长篇综述“Fuzzy Control Systems: Past, Present and Future, 14(1):56-68, 2019”中着力肯定申请人学术贡献并指出论文[2.2] **大幅度提升了** T-S 模糊观测器性能水平(“performance specifications have been **largely developed**”)。

④ 《IEEE Trans. on Fuzzy Systems》副主编、墨西哥国立理工大学 J. A. Meda Campana 教授评价论文[2.2]构建了快速有效的新型切换机制“a **new** ranking-based switching mechanism” (IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 26(5): 2649-2662, 2018)。

(2) 提出了多维度协同设计的研究思路，进一步提高了模糊状态估计结果的**精准度、鲁棒性以及算法效率**。支撑成果包括：论文[2.4]、[2.5]、[2.6]。

对于苛刻较为的小时间尺度实时性要求下的模糊状态估计问题，如何同时提高模糊状态估计结果的精准度、鲁棒性以及算法效率具有相当的挑战性。申请人提出一种具有可变隶属度权值的实时切换机制，解决了模糊隶属度不同模态下的状态估计矩阵最优选择问题(见论文[2.4])；提出一种多采样点联合切换机制，解决了相邻采样点间的模糊隶属度模态信息实时共享问题(见论文[2.5])；提出了一种多维度模糊空间深度划分方法，实现了模糊状态估计问题的多维度协同设计并成功应用于电路系统状态估计(见论文[2.6])，信号估计精度明显提升。

#### 客观评价:

① 韩国科学院院士 Ju H. Park 教授评价论文[2.4]为：“**an efficient tool in studying nonlinear control systems**” (IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics: Systems, DOI: 10.1109/TSMC.2019.2931530,2019)。

② IEEE Fellow、欧洲科学院院士、IEEE SMC 学会前主席 C. L. Philip Chen 教授指出论文[2.4]是其团队拓展非线性系统方面的未来研究方向(“**The future**

research direction”, IET Control Theory & Applications, 13(4):534-542,2019)。

③ IEEE Fellow、国际模糊系统学会前主席 Shun-Feng Su 教授评价论文[2.4]为其解决复杂高阶非线性控制问题提供了**新颖的途径**(“**novel fuzzy systems proposed** in [49] will be used to solve the above control problems”, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics: Systems, DOI: 10.1109/TSMC.2019.2956063,2019)。

(3) 提出了一种故障诊断联合实时时序调度方法,实现了基于多批次采样数据的联合故障诊断,显著降低了故障误报率;成功解决了多批次采样数据引入后造成的数据冗余问题;提出了一种事件触发实时时序调度方法,构建了一套有机整体性的多时间尺度模糊状态估计与故障诊断理论新方法。支撑成果包括:论文[2.7]、[2.8]、[2.9]、[2.10]。

先前故障诊断方面的理论成果侧重于实现系统故障的即时预报,但单纯依赖于由当前批次采样数据所产生的诊断结果往往会造成**对即时性数据过于敏感而导致误报率较高**。为了解决此问题,将用于故障诊断的有效数据范围由当前时刻单一批次采样数据追溯到不同时刻多批次采样数据,提出了一种故障诊断联合实时时序调度方法,实现了基于多批次采样数据的联合故障诊断,显著降低了故障误报率(见论文[2.7]);进一步,通过改进用于故障诊断误差系统稳定性分析的齐次矩阵多项式型李雅普诺夫函数而提升了上述故障诊断方法的计算效率(见论文[2.8])。在此基础上,申请人又通过提出一种“最大-最小-优先切换机制”而**成功解决了多批次采样数据引入后造成的数据冗余问题**(见论文[2.9])。基于申请人所提出的模糊控制、状态估计和故障诊断成果,申请人在论文[2.10]中以全局角度研究了在线控制器、状态估计和故障诊断三者 in 控制系统中运行演变进程中的多时间尺度问题,剖析出多时刻模糊前件取值演化机理与可追溯机制,提出了一种事件触发实时时序调度方法,构建了一套有机整体性的多时间尺度模糊状态估计与故障诊断理论新方法,显著地降低了控制器通讯与计算负荷、提高了控制系统状态估计能力、减少了故障误报率,增强了相关理论方法面向实际工业系统的适应能力。论文[2.10]在发表后相继受到美国自动控制协会主席 Masayoshi Tomizuka 教授、中国工程院钱锋院士、IEEE Life Fellow、美国密歇根州立大学 Kwang Y. Lee 教授等知名学者的关注与引用,论文入选 ESI 高被引论文。

#### 客观评价:

① IEEE Fellow、英国拉夫堡大学 Wen-Hua Chen 教授评价论文[2.7]实现了基于观测器技术的故障诊断 (“While in fault estimation-based approach [7], a fault is **indicated** when fault estimates deviate from a predefined threshold.” IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics: Systems, 48(12): 742-751,2019)。

② IEEE Fellow、美国自动控制协会主席 Masayoshi Tomizuka 教授在机械工程大类一区期刊《Mechanical Systems and Signal Processing》中指出论文[2.10]为解决外部干扰影响下的非线性输出调节策略问题提供了“**a systematic framework for the design**”(Mechanical Systems and Signal Processing, 104:436-448,2018)。

③ IEEE Fellow、香港城市大学 Gang Feng 教授评价论文[2.10]是处理实际复杂非线性系统控制问题的**特别成功**的模糊控制方法(“**particularly successful**”, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics: Systems, DOI: 10.1109/ TSMC.2018.

2792218, 2018)。

**本研究方向成果简述:** 申请人通过近七年的系统性深入研究, 构建了有机整体性的多时间尺度模糊状态估计与故障诊断理论新方法。该方向以第一作者发表 10 篇 IEEE 汇刊学术论文, 包括《**IEEE Trans. on Fuzzy Systems**》(3 篇)、《**IEEE Trans. on Cybernetics**》(3 篇)、《**IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers**》(2 篇)、《**IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**》(2 篇), 其中有 3 篇入选 ESI 高被引论文:

[2.1] **Xiangpeng Xie**, etc. Observer design of discrete-time T-S fuzzy systems via multi-instant homogenous matrix polynomials. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 22, No.6, pp. 1174-1179, 2014.

[2.2] **Xiangpeng Xie**, etc. Multi-instant observer design of discrete-time fuzzy systems: a ranking-based switching approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 25, No.5, pp. 1281-1292, 2017. (ESI 高被引论文)

[2.3] **Xiangpeng Xie**, etc. Relaxed fuzzy observer design of discrete-time nonlinear systems via two effective technical measures. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 26, No.5, pp. 2833-2845, 2018.

[2.4] **Xiangpeng Xie**, etc. Observer design of discrete-time fuzzy systems based on an alterable weights method. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 50, No.4, pp. 1430-1439, 2020. (ESI 高被引论文)

[2.5] **Xiangpeng Xie** etc. Observer-based state estimation of discrete-time fuzzy systems based on a joint switching mechanism for adjacent instants. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 50, No.8, pp. 3545-3555, 2020.

[2.6] **Xiangpeng Xie**, etc. Observer-based relaxed multi-instant fuzzy state estimation design of discrete-time nonlinear systems and its application: a deep division approach. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Vol. 67, No.5, pp. 1775-1785, 2020.

[2.7] **Xiangpeng Xie**, etc. Fault estimation observer design of discrete-time nonlinear systems via a joint realtime scheduling law. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 47, No.7, pp. 1451-1463, 2017. (SCI 一区, IF: 7.351)

[2.8] **Xiangpeng Xie**, etc. Fault estimation observer design for discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems based on homogenous polynomially parameter-dependent Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 47, No.9, pp. 2504-2513, 2017.

[2.9] **Xiangpeng Xie**, etc. Observer-based fault estimation for discrete-time nonlinear systems and its application: a weighted switching approach. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Vol. 66, No.11, pp. 4377-4387, 2019.

[2.10] **Xiangpeng Xie**, etc. Relaxed control design of discrete-time Takagi-Sugeno fuzzy systems: an event-triggered real-time scheduling approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 48, No.12, pp.2251-2262, 2018. (ESI 高被引论文)

### 1.2.3 申请人理论成果在冷轧带钢板形乳化液冷却控制中的工业应用

**研究背景：**冷轧带钢是连轧机组最高端的产品，其板形质量等级体现出一个国家冶金工艺、装备制造和控制技术的真实水平。冷轧带钢板形控制技术属于《国家中长期科学与技术展规划纲要(2006-2020)》的优先发展主题《可循环钢铁流程工艺与装备》的重要组成部分。它是一类典型的多变量、不确定性、强非线性、工况变化频繁的复杂难控过程。在实际生产中冷轧带钢生产机组会产生大量热量，这些热量促使轧机工作辊产生不均匀的热膨胀，形成工作辊热凸度而改变辊缝分布，最终使得出口板形具有不均匀分布的高次板形缺陷。常规板形控制手段，如轧辊倾斜、工作辊弯辊、中间辊窜辊等，往往难以消除这些不规则的高次板形缺陷。现代板形控制系统中通常采用乳化液喷射装置喷射乳化液来带走轧制过程中产生的热量，释放工作辊内应力以提高出口板形质量。工业实践显示：**冷轧带钢乳化液冷却控制是整个冷轧带钢生产控制系统中最为精密、难控的环节**，直接影响着成品等级。借助于模糊理论在处理复杂非线性问题方面的优势，行业巨头瑞士 ABB 公司成功应用常规的模糊控制理论开发出冷轧带钢板形控制软件包并实现单一规格产品初步工业应用。由于 ABB 公司对我国采取的核心技术封锁，长期以来国内冷轧企业既未拥有核心的**冷轧带钢乳化液冷却控制模型更未掌握先进的乳化液冷却智能控制技术**，因而不能充分发挥高价引进的先进电气控制系统的作用。直接造成了我国现有冷轧产品档次较低，下游高端制造领域企业仍然需要花费大量外汇从发达国家购买高精度的金属带材冷轧产品的生存困境。从控制技术角度来讲，要拥有核心的冷轧带钢乳化液冷却控制模型与掌握先进的乳化液冷却智能控制技术亟需攻克四个技术难题：

- ◆ **控制模型落后：**国内普遍采用传统的轧机出口端后置板形辊的反馈控制模型，由于轧机辊缝与板形辊直接的水平距离造成的检测滞后导致对二次以上的板形缺陷失去调控能力，造成“四分之一浪形”和“鼓包”等高阶次板形缺陷频发，直接降低了产品品质；
- ◆ **状态估计能力不足：**板形辊每个采样周期内只能检测一组轧机出口处带钢横向上的 26 个测量点的带钢张力值，工程上使用简单的线性插值方法来进行未测量点的状态估计，这也会造成对张力分布情形的误判，而传统的状态估计理论方法因为其保守性大且计算效率不高而被工程技术人员弃用；
- ◆ **误报率居高的故障诊断机制：**控制系统不能有效区分“临时性故障”和“永久性故障”，导致频繁故障报警进而造成不必要机组停机检查，既影响了生产进度又增加了生产操作人员与技术研发人员之间的隔阂与矛盾；
- ◆ **先进模糊控制算法在主流西门子 TDC 平台系统集成时的经济性难题：**由欧美日引进的板形控制系统大多以西门子 TDC 为算法实现平台，平台成本在控制系统总成本中占比超过 60%。随着下游高端用户对板形质量和品质等需求的普遍提升，板形控制对控制系统实时数据处理能力、网络通讯、控制算法的更高要求进一步加剧了控制系统对于西门子 TDC 平台的过重投资依赖，造成了新开发的模糊控制算法因为系统集成的经济性原因而被束之高阁。

**学术成绩和创新点：**申请人长期从事模糊智能控制、冷轧带钢板形智能控制系统研发等相关研究工作。理论成果应用于具有自主知识产权的河北迁安思文科

德薄板科技公司双机架冷轧系统，突破乳化液冷却喷射模糊控制的技术瓶颈，成功解决了上述四个技术难题，板形质量达到国际先进水平(稳态时板形指标在 6I 以内)。具体学术创新点如下：

(1) 申请人结合冷轧带钢实际控制对象的物理意义和机械特性，建立了冷轧带钢乳化液冷却 Roesser 型 2-D 系统模糊控制模型(图 1)。区别于先前控制模型，该模型同时在冷轧带钢测量方向和轧制方向上进行建模，具有向轧制方向上游回溯计算的能力，消除了由于轧机辊缝与板形辊直接的水平距离造成的检测滞后影响；继而设计出基于该模型的 HPPD-CL 型模糊控制器，确保了控制设计条件保守性显著降低同时又满足电气控制系统实时性要求，从而增强了控制系统对二次以上的板形缺陷的调控能力，能够显著减少“四分之一浪形”和“鼓包”等高阶次板形缺陷。该方向研究成果以第一作者发表学术论文 3 篇：《自动化学报》2 篇，ESI 高被引论文 1 篇。基于上述研究创新点授权第一发明人发明专利 4 项 (见代表性已授权专利[1]-[4])。

**客观评价：**申请人第一作者发表在《自动化学报》上的 Roesser 型 2-D 系统模糊放松收敛镇定成果被写入由中国工程院王耀南院士执笔的 2010-2011 控制科学与工程学科发展报告智能控制发展研究专辑；IEEE Fellow、教育部长江学者吴敏教授指出：申请人提出新颖的 2-D 系统控制律(“Xie et al. [17] proposed a novel ... control scheme”, IET Control Theory & Applications, 12:718-727, 2018)。

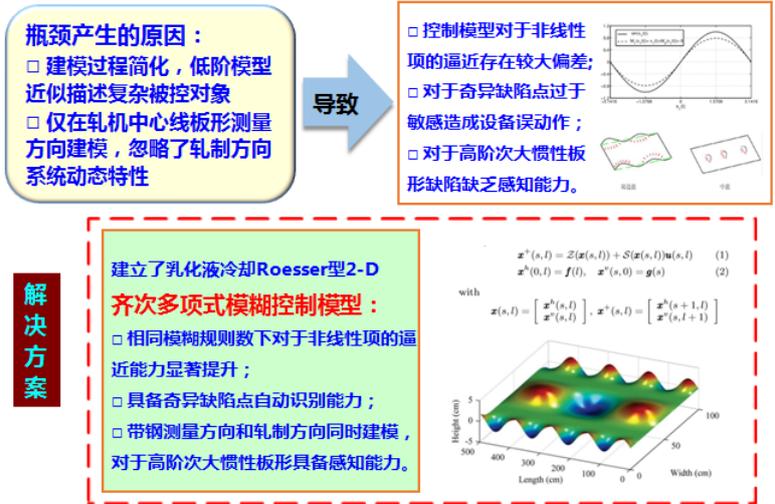


图 1 冷轧带钢乳化液冷却 Roesser 型 2-D 系统模糊控制模型

(2) 将理论研究成果所提出的“Multi-Instant 型模糊观测器架构”应用于板形辊未测量点的张力值在线估计，并着眼于工业控制系统的“控制未动(100ms 级)，检测先行(50ms 级)”小时间尺度要求，提出与板形测量相适应的多采样点联合切换机制，最终实现了在较小时间尺度内予以有效利用模糊前件变量的大小分布信息，获得估计精度高且能够在 50ms 内快速实现的模糊观测器，能够准确而快速地在在线估计出板形辊未测量点的张力值，基本避免了板形检测系统对残余应力分布模式的误判(误判率由 5% 降至 0.1% 以内)。该成果以第一作者发表于信号处理领域主流国际刊物上(Signal Processing(SCI 二区), 94:102-107, 2014)。基于上述研究创新点授权第一发明人发明专利 4 项(见代表性已授权专利[5]-[8])。

**客观评价：**韩国科学院院士 Ju H. Park 教授指出，申请人该成果成功回答了

热工过程(冷轧热膨胀模型)基于 2-D 系统建模与数字化滤波这一挑战性问题(“it is very interesting to ask the first challenging question... their application ...such as thermal processes [11]”, IET Signal Processing, 8(8):885-890, 2014)。

(3) 将理论研究成果的“故障诊断联合实时时序调度方法”应用于实现对板形辊测量元件、乳化液冷却喷头的故障诊断。所使用数据的范围由当前时刻单一批次采样数据追溯到多个时刻多批次采样数据,减少了诊断结果对于单一批次数据的依赖度和敏感度,从而有效区分开由于乳化液雾化反应造成的“临时性故障”和由于板形辊机械磨损造成的“永久性故障”,显著降低了故障误报率(误报率由 20%降至 5%以内)。该成果以第一作者发表于国际仪器、系统与自动化协会会刊(SCI 二区)上(ISA Transactions, 94:102-107, 2018)。基于上述研究创新点授权第一发明人发明专利 3 项(见代表性已授权专利[9]-[11])。

**客观评价:** IEEE Fellow、台湾国立中央大学 Wen-June Wang 教授正面评价该成果为模糊控制理论在智能控制应用中的典型代表性成果 (“intelligent control methodologies (e.g., fuzzy control [10], neural networks [11], and expert systems [12])”, ISA Transactions, 86:287-298, 2019)。

(4) 自主研发“工控机+WinAC+西门子 TDC”复合型平台集成架构,除小时间尺度的状态估计功能模块外,其余功能模块均采用更低价格的工控机为硬件平台,较大幅度降低了控制系统硬件成本;提出了融合计算机、数据库、网络通讯、智能模糊控制等多项技术的新型冷轧带钢板形控制系统架构,通过软 PLC 时钟同步(多时间尺度时间戳标定)、多线程在线计算、面向对象的程序设计、千兆工业以太网通讯技术等技术集成创新实现了先进模糊控制算法功能的模块化、嵌入式及可移植化,上述技术创新能够显著地降低控制器通讯与计算负荷、提高了控制系统状态估计能力、减少了故障误报率,增强了相关理论方法面向实际工业系统的适应能力。此项研究成果由于**涉及技术保密原因不能对外公开发表论文**,相应技术成果形成技术方案三件(均为第一完成人):《单机架六辊轧机板形控制系统优化设计》、《冷轧带钢板形测量信号的补偿技术研究》、《沪久双机架平整机板形控制系统优化设计》。其中《单机架六辊轧机板形控制系统优化设计》荣获中冶南方工程技术有限公司一等奖(排名第一,电气控制专业有史以来首项)。基于上述研究创新点授权第一发明人发明专利 4 项(见代表性已授权专利[12]-[15])。

**技术应用:** 依托于申请人所任职四年的中冶南方工程技术有限公司暨国家钢铁生产能效优化工程技术研究中心,申请人以研发负责人身份主持完成拥有完全自主知识产权的冷轧带钢板形控制系统研发设计、编程、调试以及达产工作。通过研究成果的工业应用,板形质量达到国际先进水平(大张力条件下板形指标控制在 4I 以内,小张力条件下稳态时板形指标在 6I 以内),控制系统硬件投资仅为纯 TDC 方案的 1/6(单套成本由 270 万元降为 45 万元),行业主流媒介《世界金属导报》给予刊登报导与技术推介(《世界金属导报》,2014.3.4,“中冶南方基于工控机的冷轧带钢板形控制技术”,见图 2)。2015 年 6 月,申请人为第二完成人的武汉市科技局研发项目“五机架冷连轧机自动控制系统关键技术研发”顺利通过武汉市科技局验收。自 2015 年以来,申请人致力于在江苏省张家港市扬子江冶金工业园、山东省聊城市冠洲股份有限公司等民营冷轧企业进行技术推广应用

与服务工作，并入选江苏省生产力促进中心张家港科技专员(首批 10 人)。

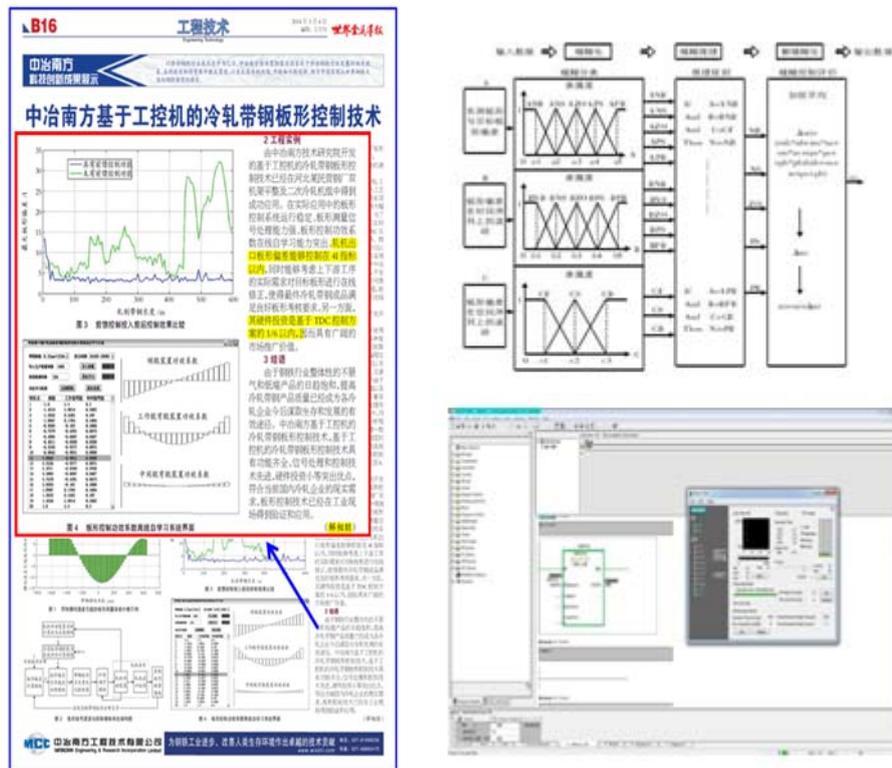


图 2 申请人主持研发的板形控制技术应用

附：申请人代表性已授权发明专利成果：

- [1] 一种冷轧带钢板形板厚综合控制系统,专利号: CN201210115701.0,发明人: 解相朋, 赵菁, 吴有生, 祝兵权, 授权日期: 2014-09-10.
- [2] 一种冷轧带钢板形前馈控制系统,专利号: CN201210020839.2,发明人: 解相朋, 赵菁, 授权日期: 2014-07-02.
- [3] 冷轧机板形调控功效系数离线自学习系统,专利号: CN201210012408.1,发明人: 解相朋, 赵菁, 授权日期: 2014-06-25.
- [4] 冷轧带钢板形横向整体优化控制系统,专利号: CN201210017185.8,发明人: 解相朋, 赵菁, 授权日期: 2014-02-12.
- [5] 一种冷轧带钢板形辊包角在线计算方法,专利号: CN201210292700.3,发明人: 解相朋, 褚学征, 赵菁, 任朝晖, 李永, 单秉仁, 赵昊裔, 授权日期: 2014-07-02.
- [6] 确定冷轧带钢卷取半径的方法,专利号: CN201210002404.5,发明人: 解相朋, 赵菁, 授权日期: 2014-08-13.
- [7] 冷轧带钢板形闭环控制周期的确定方法,专利号: CN201210072411.2,发明人: 解相朋, 赵菁, 授权日期: 2013-11-20.
- [8] 冷轧带钢板形测量信号测量值的降阶处理方法,专利号: CN201110269183.3,发明人: 解相朋, 赵菁, 授权日期: 2013-11-20.
- [9] 板形仪失效测量通道的板形信号补偿方法,专利号: CN201210012372.7,发明人: 解相朋, 赵菁, 授权日期: 2014-05-07.
- [10] 冷轧带钢横向温差引起板形检测误差的修正系统,专利号:

CN201110314505.1,发明人:解相朋,赵菁,授权日期:2014-04-09.

[11] 单机架轧机工作辊的乳化液分段冷却控制方法,专利号:CN201110310664.4,发明人:解相朋,赵菁,授权日期:2013-09-18.

[12] 一种冷轧带钢平直度的鲁棒优化控制系统及方法,专利号:CN201110316290.7,发明人:解相朋,赵菁,授权日期:2014-09-10.

[13] 主动避免执行器饱和现象发生的冷轧带钢板形控制系统,专利号:CN201110269162.1,发明人:解相朋,赵菁,授权日期:2013-11-20.

[14] 冷轧带钢板形控制系统及方法,专利号:CN201210119481.9,发明人:解相朋,赵菁等,授权日期:2014-09-10.

[15] 冷轧带钢分段式保成本板形控制方法,专利号:CN201110269191.8,发明人:解相朋,赵菁,授权日期:2013-09-18.

#### 四、拟开展的研究工作

着重阐述拟开展的研究工作的创新性构思、主要研究方向、初步研究方案以及预期的研究成果。（不超过 3000 字）

### “工业互联网+智能制造”背景下的冷轧带钢板形智能控制与安全防护

#### 2.1 立项背景与科学意义

先进制造业位于制造业价值链的顶端，是国家综合国力和核心竞争力的重要体现，也是未来国民经济发展的主导力量。新一轮以“互联网+”为代表的科技革命日新月异，促使制造业发展模式发生着深刻变革，世界各国纷纷出台战略规划，针对先进制造业进行前瞻布局，如美国 2012 年通过制定《先进制造业国家战略计划》着力倡导“制造业回归”以巩固其实体经济研发能力的领先地位，德国 2013 年推出《“工业 4.0”战略》来积极谋求在关键工业技术上的国际领先地位，中国政府推出“中国制造 2025”计划。李克强总理在 2018 年政府工作报告中指出：深入开展“互联网+”行动，推动大数据、云计算、物联网广泛应用，新兴产业蓬勃发展，传统产业深刻重塑。实施“中国制造 2025”，推进工业强基、智能制造、绿色制造等重大工程，加快发展钢铁、石化、电力等关键领域先进制造业。

“互联网+”推动生产制造模式变革，智能制造成为新型生产方式。互联网在制造业领域应用日益广泛深入，推动生产制造向着数字化、网络化、智能化方向发展。工业信息系统通过互联网实现互联互通和综合集成，促进机器运行、车间配送、企业生产、市场需求之间的实时信息交互，原材料供应、零部件生产、产品集成组装等全生产过程变得更加精准协同。工业云平台成为新型生产设施，为研发设计、加工制造、经营管理等生产经营活动提供资源支撑和服务保障，工业生产要素实现优化整合和高效配置。冷轧带钢作为冶金工业的最高端产品之一，其质量水平体现出一个国家电气控制技术的最高水平。由于历史原因，行业集中度低使得不同钢铁企业之间各自为政、重复投资、低端产能过剩等问题严重。近两年来，伴随着钢铁企业的合并与整合优化，为基于“互联网+智能制造”背景下的工业生产要素实现优化整合和高效配置提供了客观条件。新形势下，冷轧带钢板形智能控制领域面临诸多机遇与挑战，具有重要的研究价值与意义：

- ◆ “互联网+智能制造”提供给我们更多更全的生产、设备和过程数据(包含更多生产规格的传动力矩、带钢张力、轧辊压力、乳化液流量、板形 CCF 图像等异构数据)，这些数据蕴含着丰富的工艺变动和设备运行信息，为我们获得更好的控制效果提供了可能；但是如何有效利用这些海量异构数据，在难于建立金属带材轧制过程准确数学机理模型的情况下实现对制造过程的智能建模和在线优化依然是一个巨大的挑战。
- ◆ “互联网+智能制造”拉近了生产企业与终端客户之间的距离，为“个性化制造”的实现提供了可能并成为企业新的利润增长点，也为冷轧企业的长远发展注入了生机和活力；但是如何将终端客户的个性化要求转化为切实可行的在线控制指令，并能保证生产过程的经济性和稳定性，将是一个具有现实性挑战。
- ◆ 互联网与工控网络的互联，极大地降低了工控数据采集、储存、交换、分析等操作产生的费用，为企业内的资源优化配置提供更大的便利；但是与此同时，工业控制系统的内在与外在环境变化使得其面临日益增大的网络安全威

胁。2010年，“震网”病毒 Stuxnet 利用工业控制系统漏洞夺取对系统可编程逻辑控制器(PLC)的控制权，造成伊朗布什核电站核反应堆长时间无法运行。冷轧带钢控制系统大量使用德国西门子和美国罗克韦尔的 TDC、PLC 等硬件产品，且未有很好的安全防护措施，控制系统运行数据普遍暴露在外界监测范围内，一旦遭受更高级的恶意攻击，后果不堪设想。



图 3 项目主要研究内容与难点问题

## 2.2 研究内容与创新性

本项目紧紧围绕“互联网+智能制造”背景下的冷轧带钢板形智能控制的建模、优化控制和网络安全等共性问题开展基础性、原创性和系统性的研究，项目主要研究内容与难点问题见图 3。具体的，各研究内容与创新性阐述如下：

### (1) 基于异构数据的金属带材轧制过程聚类模糊建模

工业实践表明冷轧带钢卷曲方向上的无规律型板形缺陷很难在现有基于下游接触式板形测量的反馈控制机制下进行有效消除。另一方面，冷轧机组上游的卷取机组运行时产生的张力数据信号中隐含了上述无规律型板形缺陷的信息，已有国外学者通过在轧制机组上游入口处配置非接触式激光工业摄像机来实时检测板形缺陷图像数据，用以实现对无规律型板形缺陷的前馈控制，工业实践表明其在一定程度减少无规律型板形缺陷的同时却加重了有规律型板形缺陷的严重程度，出现了顾此失彼的控制困境。以冷轧生产全流程数据运用为切入点，拟使用模糊聚类分析方法分别构建过程控制级 L2 与基础自动化级 L1 的控制模型，即：1) 过程控制级 L2：如何使用卷取机组运行时产生的张力数据来构建基于机理-数据的冷轧带钢板形控制设定点模糊智能决策模型(图 4 (a))；2) 基础自动化级 L1：如何快速将非接触式板形图像数据集成与融合到控制设计中，基于异构数据的金属带材轧制过程模糊前馈-反馈综合控制模型(图 4 (b))。传统的聚类分析是一种硬划分，即把每个待辨识的对象严格的划分到某类中，此类划分的界限是分明的；而冷轧带钢大多数对象没有严格的属性，它们在形态和类属方面具有“亦此亦彼”的性质，因而模糊聚类分析可以更好地解决这类问题。特别地，基础自动化级 L1 涉及的海量异构数据的模糊聚类建模问题将是本研究内容的关键之处。通过上述研究，力争为实现冷轧带钢无规律型板形缺陷与无规律型板形缺陷的同时有效消除提供有力的控制模型支撑。

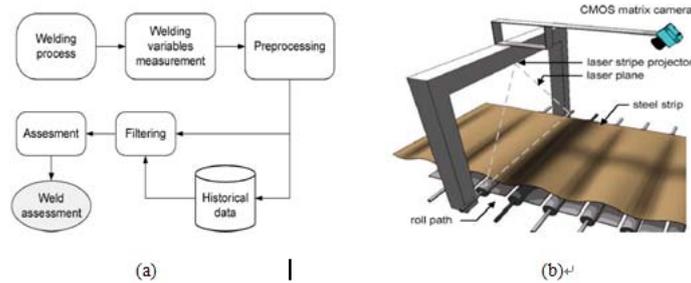


图 4 异构数据来源：(a) 上游卷取机张力数据 (b) 非接触式板形图像数据

## (2) 满足终端客户的个性化要求的模糊智能控制方法设计

终端客户的个性化要求往往会导致对同一带卷带钢的板形张力分布的差异化需求。举例说明，下游高端汽车生产企业通常要求同一带卷的边部板形张力按照一组变化的工艺曲线分布，以保证开卷后带钢形状能够更加符合机械加工要求。对于变化的工艺曲线，先前的模糊镇定控制问题将转化为更加复杂的动态目标函数下模糊模型预测(MPC)控制问题，必然会引入更多不确定性进而对模糊控制方法保守性、控制器实时性、在线优化指标及约束条件提出更苛刻要求，甚至影响整个控制系统的平稳运行。针对典型终端客户的个性化要求，从过程数据种类、控制器架构复杂度、控制进程时间尺度关系、模糊系统阶次在线优化等若干重要维度上进行协同在线优化，寻找显著降低优化控制条件保守性、有效减轻在线计算负担、同时又满足在线优化指标的动态目标函数下模糊 MPC 控制新方法。

## (3) 主动抵御网络攻击的工业控制模糊专家系统设计

2014 年底，德国联邦信息安全办公室(BSI)发布了一份《2014 年信息安全报告》，披露了一起针对钢铁厂生成设施的网络攻击。攻击者的行为导致工控系统的控制组件和整个生产线被迫停止运转，由于不是正常的关闭炼钢炉，从而给钢厂带来了重大破坏。BSI 表示，随着其他国家威胁行为者日益关注工控和关键基础设施系统，必须采取更为积极主动的态度捍卫工控网络系统并强化其安全性。申请人拟在过程控制级 L2 建立主动抵御网络攻击的工业控制模糊专家系统，实现对于来自于工控网络的测量信号、控制指令的在线安全评估。其中，典型工控系统遭受网络攻击时的脆弱性分析问题将是研究内容中的重中之重。

## 2.3 研究工作的研究方案与技术路线

本项目拟对上述研究内容逐项突破，构建较为完善理论成果体系并积极开展工业应用验证。具体地，拟采取的初步研究方案如下：

### (1) 基于异构数据的金属带材轧制过程聚类模糊建模研究方案

过程控制级 L2：拟使用卷取机组运行时产生的张力数据来构建基于机理-数据的冷轧带钢板形控制设定点模糊智能决策模型问题。依托与申请人有合作关系的典型金属带材轧制企业，采集现场轧制过程海量异构生产数据并根据工艺条件进行数据预处理。拟运用模糊聚类分析方法建立带钢卷曲时的工艺数据与板形张力分布 T 直接的映射函数(图 5(a))，并基于工艺原理和模糊控制理论建立基于机

理-数据的冷轧带钢板形控制设定点模糊智能决策数据库。考虑到工业现场工况恶劣，机械设备安装存在误差、液压驱动设备压力不足、测量仪表零点漂移、现场温度和湿度变化剧烈等都会影响到测量信号的精度，且上述因素影响机理难以掌握，拟提出依据专家经验知识的设定点模糊智能决策数据库的在线修正算法。

基础自动化级 L1：拟建立基于异构数据的金属带材轧制过程模糊前馈-反馈综合控制模型问题。对于板形 CCF 图像数据信息，通过使用面向特征提取的低秩与稀疏图嵌入理论与算法来快速建立实时图像数据与板形缺陷之间的数据分组关系。数据分组后，拟采用模糊聚类分析方法对过程数据进行特征提取，依据提取结果完善数据驱动的金属带材轧制过程控制模型的结构，并使用模糊径向基神经网络进行控制模型关键控制参数的离线辨识，从海量的异构过程数据中提取出准确反映复杂工业被控对象的动态特性(图 5(b))。考虑到工业过程的时变特性，设计基于变工况过程数据的模糊控制模型关键控制参数的在线自学习算法，以适应金属带材轧制过程控制系统的实时性和高精度要求。此外，拟从数据驱动角度出发，从相关过程数据中挖掘出不利因素对测量信号产生的影响，讨论兼具鲁棒性和快速性的低高阶信号分类途径，给出一种基于数据核的模糊神经网络分类方法，实现轧制过程中测量信号的快速有效分类，有效解决过程控制中测量信号补偿和快速分类问题。在此基础上，通过非接触式测量信号实现前馈控制、接触式测量信号实现反馈控制功能，最终为实现无规律型板形缺陷与无规律型板形缺陷的同时有效消除提供控制模型依据。

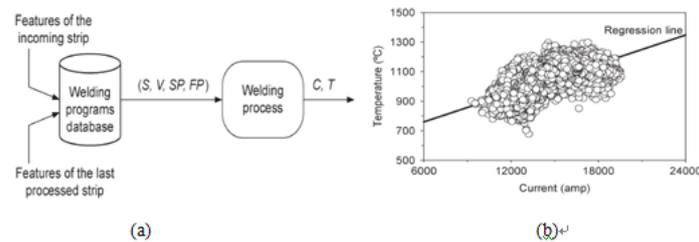


图 5 异构数据拟使用策略

## (2) 满足终端客户的个性化要求的模糊智能控制方法设计研究方案

终端客户的个性化要求在实际生产中将由工艺专业人员转化为一组变化的工艺曲线。对应控制专业来讲，首先要确定出表征工艺曲线变化的动态目标函数，包括：工艺曲线变化所引起的出口板形分布、控制执行机构饱和阈值、乳化液分区喷射关停切换损耗成本等。其次，研究此类复杂的动态目标函数下模糊 MPC 控制问题。由于工艺曲线变化的带来更多不确定性进而对模糊控制方法保守性、控制器实时性、在线优化指标及约束条件提出更苛刻要求，甚至影响整个控制系统的平稳运行。拟从过程数据种类、控制器架构复杂度、控制进程时间尺度关系、模糊系统阶次在线优化等若干重要维度上进行协同在线优化，寻找显著降低优化控制条件保守性、有效减轻在线计算负担、同时又满足在线优化指标的动态目标函数下模糊 MPC 控制新方法。通过对带记忆型模糊 MPC 控制器设计、Lyapunov 函数增广设计、多时域采样点控制思想和在线优化指标约束条件双重影响下衍生的复杂高阶耦合型多项式矩阵不等式解耦线性化等方面进行深入研究，提出能够融合多维度的新型模糊 MPC 控制器并且研究如何有效消除控制设计中冗余变量

的方法,提出降低优化控制条件保守性、有效减轻控制器在线计算负担、同时满足在线优化指标的模糊控制 MPC 新方法,通过显著提升模糊 MPC 控制算法可控能力和性能指标来满足工艺曲线变化的要求。

### (3) 主动抵御网络攻击的工业控制模糊专家系统设计研究方案

拟在过程控制级 L2 建立主动抵御网络攻击的工业控制模糊专家系统,实现对于来自工控网络的测量信号(设备状态)、控制指令(工艺曲线)的在线安全评估、预警等功能。对于典型工控系统遭受网络攻击,例如“拒绝服务”、“重放”、“数据注入”,其对于冷轧板形控制系统的影响具体体现在动态目标函数的篡改、执行机构的超负荷动作两个方面。特别值得指出的是,并不是所有网络攻击都会对控制系统造成较大危害,如果对于所有网络攻击发生时都进行停机检查是不合理的;因此,典型工控系统遭受网络攻击时的脆弱性分析问题属于本研究内容中的重中之重。首先,建立各规格工艺曲线对应动态目标函数的样本库和每一个轧制规格下系统发生断带、出口板形与目标板形严重偏离时的执行机构设定点样本库。其次,使用模糊评判算法计算工控网络每次传输过来的动态目标函数与各规格工艺曲线对应动态目标函数的样本库中样本的相似性测度,并锁定相似度最高的轧制规格。然后,根据锁定的轧制规格,再次使用模糊评判算法计算执行机构设定点与执行机构设定点样本库中发生断带、出口板形与目标板形严重偏离时所有样本的相似性测度,如果相似性测度超过一定阈值,则认为网络攻击会引起严重事故或者影响产品质量等级需要机组停机检查,反之,则不必停机检查。项目预研过程中开发了以工控机为硬件载体、以西门子 WinLC RTX 实时控制软件组成的控制平台。上述控制平台已成功通过工业网络通讯测试,并且通过对“拒绝服务”、“重放”、“数据注入”等典型网络攻击的检测模型的初步测试。

### (4) 理论研究成果的半实物仿真验证与工业应用研究方案

首先,在实验室构建半实物仿真平台来验证和完善所得到的理论研究成果的有效性。以工控机为硬件平台,使用微软 VS 2016 的 C#编程语言和 Socket 网络通信技术搭建非线性网络控制系统的半实物仿真平台及辅助设计系统,并且兼容不同的网络通讯协议(MPI、TCP/IP、PPI、PROFIBUS 等),构建通用性好的网络化控制系统平台;同时分析系统在不同的通讯协议下(例如 MPI、TCP/IP、PPI、PROFIBUS 等)的控制效果,不断优化仿真平台架构。使用 WinAC ODK V4.2 版本的实时控制系统开发软件进行编程实现先进控制功能块,并将其所搭建基于冷轧带钢板形控制系统的半实物仿真平台上在线运行中,实现理论研究成果的应用验证和完善。其次,通过与申请人有着长期合作关系的张家港扬子江冷轧板有限公司、山东省聊城市冠洲股份有限公司等民营冷轧企业进行技术研发与服务的机会,针对冷轧企业的生产过程中遇到的新问题,运用本项目的理论研究成果给出相应的解决方案,并在其冷轧机组上进行初步应用验证。

## 2.4 项目预期研究成果

面向冷轧行业转型升级需求,发挥控制科学与技术专业学科特色,开展“工业互联网+智能制造”背景下冷轧板形智能控制研究。通过本项目研究,提出融入轧机上游关键信息的机理-数据联合建模方法,解决耦合影响机理复杂的冷轧

异构数据建模问题；由经验判断模式向数据支撑人机合作决策判断模式转变，实现个性化需求到底层控制指令无缝衔接；基于设备参数定期体检和预警式主动防护思想，构建能够保障关键设备安全运行的模糊专家系统。

项目研究成果预期在领域权威国际期刊和自动化学报等国内核心刊物发表论文 10 篇以上，其中中科院一、二区以上 SCI 论文 6 篇以上；申请发明专利 5 件，培养团队青年教师 5 名以上、培养研究生 10 名以上；力争获省部级获国家级学会科学技术奖二等奖一项；技术应用层面，通过与申请人有着长期合作关系的张家港扬子江冷轧板有限公司、山东省聊城市冠洲股份有限公司等民营冷轧企业以技术研发与服务的形式进行轧制数据采集，最终构建基于“工业互联网+智能制造”技术的冷轧带钢板形智能控制与安全防护系统半实物仿真测试平台，实现先进智能控制算法的仿真验证。

| 五、论文收录与被引用情况统计 |             |        |       |      |             |           |
|----------------|-------------|--------|-------|------|-------------|-----------|
|                | 论文收录情况（近5年） |        |       |      | 近五年SCI被引用情况 |           |
|                | CSCD        | CSTPCD | 《SCI》 | 《EI》 | 他人引用次数      | 单篇被引用最高次数 |
| 第一作者论文         |             |        | 28    |      | 1196        | 193       |
| 通讯作者论文         |             |        | 12    |      | 326         | 81        |
| 非第一作者论文        |             |        | 10    |      | 431         | 106       |

填表说明：

(1) CSCD：中国科学引文数据库（Chinese Science Citation Database），是由中国科学院文献情报中心建立，核心库约660多种期刊。

(2) CSTPCD：中国科技论文与引文分析数据库（Chinese Science and Technology Paper and Citation Database）是在中国科技信息研究所历年开展科技论文统计分析工作的基础上，由万方数据开发的一个具有特殊功能的数据库，核心库约1200多种期刊。

(3) CSCD、CSTPCD二者选一即可。

(4) SCI请标明是《SCI光盘版》还是《SCI网络版》。

(5) 他引的定义为：文献被除作者及合作者以外其他人的引用，也就是说引用文献和被引用文献中，只要有一个作者相同，那么为自引，没有相同的作者为他引。“他人引用次数”也就是文献被他引的总篇次数。

## 六、团队建设情况

简要介绍团队的人员、专业组成情况及近三年的主要研究工作（不超过1500字）

研究团队入选山东省高等学校优秀青年创新团队--复杂系统智能分析与控制创新团队，团队所属大数据智能分析与优化控制实验室为山东省高等学校“十三五”重点实验室，并建有基于大数据的智能信息处理与复杂系统研究平台，设备总价值1000余万元。团队成员有：夏建伟教授、庄光明教授、孙伟副教授、张化生副教授、赵军圣副教授、陈国梁博士、蒋蒙蒙博士、丁春晓博士、付世华博士等。

夏建伟教授，控制科学与工程专业博士毕业，从事随机切换系统、非线性时滞系统控制方面研究。近年来在IEEE汇刊、中国科学等权威期刊发表SCI论文40余篇，ESI高被引论文13篇。主持国家自然科学基金项目3项。获山东高等学校优秀科研成果奖一等奖2项、二等奖1项。同时还担任中国自动化学会青年工作委员会常务委员、山东省自动化学会、山东省数学会理事。

庄光明教授，控制科学与工程专业博士毕业，山东省优青，聊城大学百人计划第二层次人才，聊城大学光岳英才，山东省高等学校科学技术奖一等奖获得者。在IEEE汇刊等国际权威期刊发表论文40余篇，主持国家自然科学基金2项（青年基金和面上基金各1项），主持山东省属高校优秀青年人才联合基金1项。

孙伟副教授，控制科学与工程专业博士毕业，担任SCI期刊IJFS编委。研究方向为自适应模糊控制，机器人控制。近三年来，以第一或通讯作者在《IEEE TCB》、《IEEE TFS》等上发表控制领域权威IEEE汇刊论文11篇。其中，3篇论文入选ESI工程领域高被引论文。主持国家自然科学基金青年项目1项，山东省自然科学基金重点项目1项。

张化生副教授，应用数学专业博士毕业。在IEEE汇刊、中国科学等国内外权威T期刊发表论文10余篇，参与国家自然科学基金4项，主持山东省自然科学基金面上项目1项，主持山东省高校科技计划项目各1项。主要的研究兴趣包括随机系统分析与控制等。

赵军圣，副教授。从事随机系统分析与控制方面的研究。2011年-2015年就读于东南大学自动化学院，师从魏海坤教授攻读博士学位。近3年来以通讯作者论文在IJRNC等发表一区SCI论文2篇。

陈国梁，博士，讲师。长期从事随机马尔科夫跳变系统、切换系统、时滞系统、网络化控制系统的稳定性分析与采样控制方面的研究。2016年-2020年就读于北京理工大学控制科学与工程专业，师从孙健教授攻读博士学位；2020年2月-8月，在香港大学机械工程学院访问研究。近五年来在IEEE汇刊等国内外学术期刊发表论文SCI论文20余篇，ESI高被引论文3篇。主持国家自然科学基金项目1项。获山东高等学校优秀科研成果一等奖1项（排名第二）。

蒋蒙蒙，博士，讲师。从事随机非线性系统、时滞系统的稳定性分析与控制方面的研究。2016年-2019年就读于曲阜师范大学数学专业，师从解学军教授攻读博士学位。近3年来以第一作者在IEEE TAC发表论文一篇、中国科学发表论文一篇。

丁春晓，博士，讲师。从事传染病建模、分析与控制方面的研究。2012年-2017年就读于南京理工大学数学专业，师从朱元国教授攻读博士学位。主持参与国家自然科学基金1项，主持山东省自然科学基金1项，近3年来以第一作者论文一篇。

付世华，博士，讲师。目前的研究方向主要包括：矩阵半张量积方法研究网络演化博弈的策略调控与优化、布尔网络以及多值逻辑网络的分析与控制等问题。以第一作者以及通讯作者发表SCI收录论文10余篇。主持山东省自然科学基金一项。

七、项目组成员（与团队主要成员一致，限定成员人数，不超过10位）

| 姓名  | 性别 | 年龄 | 专业技术<br>职务 | 学位 | 专业          | 工作单位 | 在本项目<br>中的分工 | 每年用于<br>本项目工<br>作的月数 | 签字 |
|-----|----|----|------------|----|-------------|------|--------------|----------------------|----|
| 夏建伟 | 男  | 43 | 教授         | 博士 | 控制科学<br>与工程 | 聊城大学 | 数据建模         | 8                    |    |
| 庄光明 | 男  | 42 | 教授         | 博士 | 控制科学<br>与工程 | 聊城大学 | 智能算法         | 8                    |    |
| 孙伟  | 男  | 35 | 副教授        | 博士 | 控制科学<br>与工程 | 聊城大学 | 控制设计         | 8                    |    |
| 张化生 | 男  | 43 | 副教授        | 博士 | 计算数学        | 聊城大学 | 数据分析         | 9                    |    |
| 赵军圣 | 男  | 40 | 副教授        | 博士 | 控制科学<br>与工程 | 聊城大学 | 平台设计         | 9                    |    |
| 陈国梁 | 男  | 32 | 讲师         | 博士 | 控制科学<br>与工程 | 聊城大学 | 算法设计         | 9                    |    |
| 蒋蒙蒙 | 女  | 32 | 讲师         | 博士 | 应用数学        | 聊城大学 | 数据分析         | 9                    |    |
| 丁春晓 | 女  | 34 | 讲师         | 博士 | 应用数学        | 聊城大学 | 智能建模         | 9                    |    |
| 付世华 | 女  | 35 | 讲师         | 博士 | 应用数学        | 聊城大学 | 算法分析         | 9                    |    |

附件：

代表作1.pdf

代表作2.pdf

代表作3.pdf

代表作4.pdf

代表作5.pdf

代表作6.pdf

代表作7.pdf

代表作8.pdf

代表作9.pdf

代表作10.pdf

2020年中国自动化大会专题报告人邀请函.pdf

2020年科睿唯安ESI全球高被引科学家证书.jpg

2018年度上海市自然科学二等奖证书.jpg

2017年度中信所中国百篇最具影响国际学术论文证书.jpg

SCI国际刊物IJCAS编委.pdf

SCI国际刊物IJFS编委.pdf

近五年主持国家项目批准书.pdf



# 山东省自然科学基金（包干制）

## 项目合同书

立项编号：ZR2024YQ033

项目名称：柔性下肢康复机器人智能安全与柔顺  
控制研究

填写日期：2024年11月05日

山东省科学技术厅

2024年制

## 填写说明

根据《中华人民共和国科学技术进步法》《中华人民共和国促进科技成果转化法》《科学技术活动违规行为处理暂行规定》等国家法律、规章，以及《山东省科学技术进步条例》《山东省自然科学基金项目管理办法》《山东省自然科学基金项目经费管理办法》《山东省科技计划项目撤销与终止管理暂行办法》《山东省科技计划项目科研诚信管理办法》等法规和有关科技计划项目及资金管理规范性文件和相关政策通知，依据项目立项通知，为保证项目的顺利实施和科研经费的合理使用，各方签署本合同书：

1. 本合同书适用于省自然科学基金青年、面上、优秀青年、杰出青年、联合基金五类实施经费“包干制”项目。合同书中甲方为山东省科学技术厅；乙方为项目承担单位（法人单位）、项目负责人；丙方为项目推荐单位。

2. 合同书中的承担单位名称，应按规范全称填写，并与单位公章一致，乙方盖章必须是单位公章，项目负责人必须是本人签字，其他无效。

3. 合同书条款中所有空项都须如实填写，内容及经济技术指标必须与申报书一致，确无此项的，须在该栏中打“/”。青年、面上、优秀青年、杰出青年基金项目无需填写指南内容。

4. 项目申报书是合同书填报的重要依据，合同书填报不得降低考核指标，合同书约定的主要内容原则上不得调整。项目申报书和本合同书共同作为项目过程管理、绩效评价、验收和监督评估的重要依据。

5. 合同书一式陆份，甲方贰份、乙方贰份、丙方贰份。甲、乙、丙各方对合同书及其他技术资料负有保密责任。

6. 有合作单位的项目须在合同书中附相应的联合申报协议。

7. 如表格空间不够，可视情况自行添加。

8. 合同书签字盖章页面需扫描上传，不再提交纸质材料。

## 依托单位承诺书

我单位作为项目依托单位承诺做到：

1. 按照《山东省自然科学基金项目管理办法》等有关规定和《项目申报书》《项目合同书》中的约定，为项目实施提供必要的条件和进行有效的管理。

2. 切实履行法人责任及相应的管理和监督职责，确保独立核算、专款专用，确保配套资金到位，建立健全内部管理制度，明确内部管理权限和审批程序，确保资金使用安全规范。

3. 本单位按照要求经丙方审核后报送项目阶段执行情况、相关数据和资料，逾期不报，本单位承担相应责任。对填报内容真实性负责，确保项目中无知识产权纠纷。

4. 认真履行项目管理相应的监督、保密和风险防控职责。严格遵守国家法律、法规和规章制度，履行保密义务。

5. 严格执行《科学技术活动违规行为处理暂行规定》《科研失信行为调查处理规则》《山东省科技计划项目科研诚信管理办法》等规定，加强项目全过程科研诚信管理，对项目申报、评审、实施、结题、成果发布等活动中的科研失信行为，应按照甲方要求，主动开展并积极配合调查，依据职责权限对违规责任人作出处理。

6. 严格执行《关于加强全省科技伦理治理的实施意见》《科技伦理审查办法（试行）》等规定，加强科技伦理监管。

我单位将认真履行承诺，如违背上述承诺，愿接受相关处理。

依托单位（盖章）

2024年11月4日





## 项目负责人承诺书

本人承诺将坚决做到：

1. 按照要求填写《合同书》，未自行降低、更改目标任务或约定要求，或缩减研究（研制）内容；
  2. 认真履行项目合同书规定的职责和任务要求，确保项目目标按期实现，保质保量完成知识产权等指标。
  3. 严格履行科研合同义务，按时报送有关材料，及时报告重大情况变动，不违规将科研任务转包、分包他人，不以项目实施周期外或不相关成果充抵交差。
  4. 省拨经费禁止出现财政科研项目经费管理使用负面清单（鲁财科教〔2022〕11号）相关情形。
  5. 严格遵守国家法律、法规和规章制度，履行保密义务。
  6. 遵守科研诚信、科技伦理规范和学术道德，项目所有材料内容真实准确，观点原创可靠，不存在抄袭、剽窃、造假等学术不端行为，除已明确注明直接引用的内容外，不含其他个人或集体已发表或撰写过的研究成果。如本人被举报在项目实施中存在科研失信行为，将积极配合相关调查机构组织开展的调查。
  7. 做好项目组成员的教育和管理，确保遵守以上要求。
- 本人将认真履行承诺，如违背上述承诺，愿接受相关处理。

项目负责人签字：

孙伟

2024年11月5日

## 基本信息

|   |           |   |         |             |      |            |                       |             |
|---|-----------|---|---------|-------------|------|------------|-----------------------|-------------|
| 项目情况  | 项目名称      | 柔性下肢康复机器人智能安全与柔顺控制研究  |         |             |      |            |                       |             |
|   | 项目性质      | 应用基础研究  |         |             |      |            |                       |             |
|   | 对应产业链     | 新一代信息技术产业链-人工智能与大数据   |         |             |      |            |                       |             |
|   | 所属学科      | 名称1   | 控制理论与技术 |             |      | 学科代码1      | F0301                 |             |
|   |           | 名称2   | 控制系统    |             |      | 学科代码2      | F0302                 |             |
|   | 起止时间      | 2025-01 至 2027-12   |         |             |      | 资助总经费      | 50.0 (万元)             |             |
| 是否申请直接资助  | 否         |   |         |             |      |            |                       |             |
| 申报人   | 姓名        | 孙伟  | 性别      | 男           | 出生年月 | 1986-02-10 | 民族                    | 汉族          |
|   | 专业技术职务/职称 | 副教授   | 学位      | 博士          | 学历   | 研究生        | 手机                    | 15066493137 |
|   | 研究方向      | 控制理论与控制工程   |         |             |      | 邮箱         | sunw8617@163.com      |             |
| 依托单位  | 单位名称      | 聊城大学  |         |             |      | 邮政编码       | 252000                |             |
|   | 详细地址      | 山东省聊城市东昌府区湖南路1号   |         |             |      | 联系人        | 朱文倩                   |             |
|   | 电话        | 0635-8239599  | 手机      | 17861815259 |      | 邮箱         | zhuwenqian@lcu.edu.cn |             |
| <p>摘要：</p> <p>为缓解康复医疗资源供给需求，提高患者康复过程中的安全性与舒适性，本项目将能耗性低、灵活性强的柔性关节应用于下肢康复机器人中。面对系统耦合性及非线性增强、状态变量数目增加等难题，本项目拟开展柔性关节驱动下肢康复机器人的智能安全与柔顺控制研究。主要内容如下：(1) 提出预设时间平稳跟踪控制算法，确保腿部连杆快速跟踪上步态轨迹，并实现速度的同步匹配，降低内外部干扰因素的影响，保持系统始终平稳安全地运行；(2) 针对受传感器攻击的下肢康复机器人系统，设计分布式预设时间状态安全估计方案以增强系统鲁棒性；(3) 将患者的主观运动行为信息融合到康复机器人的期望阻抗模型中，设计人机交互控制方案，实现主动柔顺控制。本项目针对康复机器人提出快速精准的安全与柔顺控制方法，以实现更加安全高效的康复效果，具有重要的理论研究意义和应用价值。</p> |           |   |         |             |      |            |                       |             |
| 关键词   |           | 系统控制；下肢康复机器人；智能算法；自适应控制   |         |             |      |            |                       |             |
| 关键词（英文）   |           | system control; lower limb rehabilitation robots; intelligence algorithms; adaptive control |         |             |      |            |                       |             |

## 一、基本内容

### 项目主要任务分解

#### 1. 项目负责人：孙伟

主要研究任务：项目整体布局，方法设计，统筹

研究目标：提出多种控制方法，并进行实验验证

#### 2. 项目参与人员：蒋蒙蒙

主要研究任务：自适应控制方法设计

研究目标：设计出自适应控制算法

#### 3. 项目参与人员：杨桐

主要研究任务：实验平台搭建

研究目标：设计并搭建实验平台

#### 4. 项目参与人员：孙宁

主要研究任务：实验平台搭建指导

研究目标：指导实验平台搭建顺利进行

#### 5. 项目参与人员：李延辉

主要研究任务：数据采集

研究目标：进行数据采集及

#### 6. 项目参与人员：夏建伟

主要研究任务：项目指导

研究目标：指导项目顺利开展

#### 7. 项目参与人员：解相朋

主要研究任务：项目指导

研究目标：指导项目顺利开展

**8. 项目参与人员：刁淑贞**

主要研究任务：优化设计及验证

研究目标：设计出优化控制方法及进行实验验证

**9. 项目参与人员：袁君豪**

主要研究任务：优化控制方法设计

研究目标：设计出优化控制方法

**10. 项目参与人员：李传鑫**

主要研究任务：智能控制方法设计

研究目标：设计出神经网络及模糊控制智能方法

山东省自然科学基金

## 二、实施机制

### （一）项目的组织管理措施

对科研项目的相关负责人实行责任聘请，促进人员流动。在管理上，加强对全程的检测，及时跟进；对项目的技术管理要素力求准确无误；加强对核心技术资料的保密管理等。

### （二）是否产学研结合

否。

### （三）知识产权与成果管理及权益分配

归项目负责人和项目组成员所有。

### （四）项目实施过程中的难点及对策

无。

### 三、项目参加人员情况

| 序号 | 姓名  | 性别 | 出生年月       | 职务  | 职称  | 学历  | 人员分类   | 证件类型  | 证件号码               | 手机号码        | 工作单位    | 项目中承担的主要工作 | 投入本项目工作时间(月) |
|----|-----|----|------------|-----|-----|-----|--------|-------|--------------------|-------------|---------|------------|--------------|
| 1  | 孙伟  | 男  | 1986-02-10 | 无   | 副高级 | 研究生 | 项目负责人  | 居民身份证 | 37012419860210607X | 15066493137 | 聊城大学    | 项目整体管理     | 8            |
| 2  | 蒋蒙蒙 | 女  | 1989-10-10 | 无   | 中级  | 研究生 | 骨干研究人员 | 居民身份证 | 371427198910100725 | 15020698989 | 聊城大学    | 控制算法设计     | 5            |
| 3  | 杨桐  | 女  | 1994-10-27 | 无   | 中级  | 研究生 | 骨干研究人员 | 居民身份证 | 120105199410271520 | 15822746899 | 南开大学    | 平台建设与实践    | 3            |
| 4  | 孙宁  | 男  | 1988-03-11 | 无   | 正高级 | 研究生 | 主要研究人员 | 居民身份证 | 370724198803112057 | 13820010686 | 南开大学    | 平台建设指导     | 2            |
| 5  | 李延辉 | 男  | 1978-04-14 | 副院长 | 正高级 | 研究生 | 其他研究人员 | 居民身份证 | 370126197804140418 | 13310655289 | 聊城市中医医院 | 数据采集       | 2            |
| 6  | 夏建伟 | 男  | 1978-09-19 | 院长  | 正高级 | 研究生 | 骨干研究人员 | 居民身份证 | 372501197809191173 | 13969587172 | 聊城大学    | 项目整体指导     | 3            |
| 7  | 解相朋 | 男  | 1982-05-09 | 无   | 正高级 | 研究生 | 主要研究人员 | 居民身份证 | 370782198205097217 | 15072304983 | 聊城大学    | 控制算法指导     | 2            |
| 8  | 刁淑贞 | 女  | 1997-03-11 | 无   | 其他  | 研究生 | 骨干研究人员 | 居民身份证 | 372928199703110225 | 17865814709 | 南开大学    | 控制算法设计     | 4            |
| 9  | 袁君豪 | 男  | 2001-08-11 | 无   | 其他  | 本科  | 其他研究人员 | 居民身份证 | 370282200108117311 | 15550580831 | 聊城大学    | 实验验证       | 10           |
| 10 | 李传鑫 | 男  | 1999-02-23 | 无   | 其他  | 本科  | 其他研究人员 | 居民身份证 | 371526199902231219 | 17606217209 | 聊城大学    | 系统仿真       | 10           |

| 项目组总人数<br>(不含申报人) | 高级职称 | 中级职称 | 初级职称 | 其他 | 在读博士后 | 在读博士生 | 在读硕士生 |
|-------------------|------|------|------|----|-------|-------|-------|
| 9                 | 4    | 2    | 0    | 0  | 0     | 1     | 2     |

填表说明:

1. 项目负责人和主要参加人员请填写表中相关详细信息。研究生、博士生等流动或临时聘用人员只估算人员数量;
2. 职称请填写: 院士、正高级、副高级、中级、初级、其他;
3. 人员分类请填写: 项目负责人、骨干研究人员、主要研究人员、其他研究人员;
4. 证件类型: 主要包括身份证、护照等;
5. 工作单位: 填写单位全称。

#### 四、项目指标

|              |    |                          |     |
|--------------|----|--------------------------|-----|
| (一) 研究成果描述   |    |                          |     |
| 空            |    |                          |     |
| (二) 量化指标     |    |                          |     |
| 预期成果类型       | 数量 | 预期成果类型                   | 数量  |
| 1.结题报告（不少于1） | 1  | 8.专利                     | 4   |
| 2.科技报告（不少于1） | 1  | 9.获省部级以上奖励               | 1   |
| 3.SCI收录论文    | 8  | 10.人才培养（硕士研究生）           | 8   |
| 4.其他论文       | 4  | 11.人才培养（博士研究生）           | 0   |
| 5.专著         | 0  | 12.团队建设（省级以上高层次人才<br>引育） | 1   |
| 6.会议报告       | 6  | 13.成果转化（万元）              | 0.0 |
| 7.参与制（修）订标准  | 0  |                          |     |
| 其他           |    |                          |     |
| 内容           |    | 数量                       |     |
| 空            |    | 0                        |     |
| (三) 支撑产业发展情况 |    |                          |     |
| 空            |    |                          |     |

## 五、拟开展的研究工作（5000 字以内）

### 5.1 主要特色与创新之处

本项目针对强非线性、强耦合的下肢康复机器人提出快速精准的安全与柔顺智能控制方法，以实现更加安全高效的康复效果，具有重要的理论研究意义和应用价值。本项目的主要特色在于“聚焦前沿，独辟蹊径”的科学问题属性，科学问题源于国家重大需求“加强我国机器人产业的核心技术研发”，旨在响应现实生活中的迫切需要。具体如下：

- **本项目的特色之处：**

本项目**将柔性关节装置嵌入下肢康复机器人中**，拟弥补现有电机带动绳索柔性康复机器人系统存在的驱动重量过小、易断裂等缺陷。针对所提模型，设计行之有效的对应控制策略，实现快速精准的康复效果，为提高医疗康复效率以及康复过程中的安全性和平稳性提供可靠的技术支持。

- **本项目的创新之处：**

(1) **针对柔性关节驱动的新型下肢康复机器人，建立其动力学模型**。现有下肢康复机器人系统多数为传统的刚性关节结构的驱动方式，而对**柔性关节的下肢康复机器人的研究较少**。本项目能够克服关节柔顺性带来的强耦合、高度非线性等困难，准确分析各个关节和连杆间的相互关系，建立笛卡尔空间坐标系下的运动学模型和基于欧拉-拉格朗日方法的动力学模型，为提高下肢康复机器人的跟踪控制性能奠定基础，这是本项目的创新之处。

(2) **根据实际需求提出新颖具体的控制算法**。针对下肢康复机器人系统，考虑到柔性关节摆幅和速度以及电机的位置和速度等控制对象，本项目将基于全驱系统理论设计自适应预设时间控制方案，充分利用系统的全驱特性、更换系统的动态特性，保持系统耦合特性和降低计算复杂度的同时，确保系统能够在预设时间内追踪目标轨迹，并实现速度的同步匹配，从而提升系统的动态响应性能。这是本项目的创新之一。

(3) **针对人机交互、外部环境以及网络攻击带来的影响，提出切实可行的预设时间智能控制方案**。针对受传感器攻击的下肢康复机器人系统，设计分布式安全测量预选器和预设时间观测器组成的分布式预设时间状态安全估计方案。将患者的主观运动行为信息融合到康复机器人的期望阻抗模型中，实现交互模态下的对应柔顺程度调节，提高交互灵活性。这是本项目的另一个创新之处。

## 5.2 主要研究内容

为进一步提高下肢康复机器人的工作效率、确保康复训练时的安全性，本项目拟将柔性关节嵌入下肢康复机器人中，考虑跟踪速率、外部攻击、交互环境等因素，设计安全高效的自适应控制算法，以确保下肢康复机器人能够辅助患者进行高效、安全、平稳的康复训练，主要内容如图 4 所示。接下来，将对本项目的研究内容进行详细阐述。



图 4 本项目主要研究内容

### (1) 基于全驱系统理论的下肢康复机器人系统的预设时间同步跟踪控制

在康复工程领域，康复机器人的精确运动对于疗效至关重要。若康复机器人无法迅捷地追踪预定的运动轨迹，则其康复效果将会受到影响。在下肢康复机器人的设计中，柔性关节的使用增加了额外的复杂性，相较于刚性关节，柔性关节的动力学系统状态变量数量倍增，且系统变量间的耦合关系更为复杂。这些因素显著增加了控制策略设计的难度和挑战性。在控制器设计阶段，若仅考虑连杆追踪误差向量的范数，虽然能够在一定程度上减轻计算负担，但同时可能降低追踪精度，从而无法实现最佳的康复效果。因此，为了提升追踪精度，单独分析每个连杆误差的收敛行为显得尤为关键。

鉴于此，本项目提出了一种全新的控制策略，旨在确保康复机器人的各个连杆信号能够准确追踪目标轨迹，并维持良好的稳定性。首先，引入预设时间性能函数，对二维连杆向量间的耦合关系及其对系统结构的影响进行严格分析。通过适当的非线性变换，利用全驱系统理论设计一种自适应控制算法。该算法在保持系统耦合特性和降低计算复杂度的同时，确保系统能够在预设时间内追踪目标轨迹，并实现速度的同步匹配，有效抵御外部扰动，保持良好的追踪状态，从而提升系统的动态响应性能。与基于一阶状态空间的传统方法相比，该策略避免降阶处理，减少控制器数量，进而节约资源，紧接着，选择一个理想的 Lyapunov 函数，并对整个系统的稳定性进行严格的证明和分析。最后，通过实验平台，充分验证了所提出控制策略的有效性和优越性。

### (2) 受传感器攻击的下肢康复机器人的智能安全控制

下肢康复机器人是典型的多输入多输出非线性系统，变量之间耦合性强，在运行过程中

极易受到间歇性传感器攻击，此时系统受到数据传输中的错误或攻击影响，无法获得系统状态真实值，进而使得设计的控制算法性能下降或失效，造成康复治疗效果不佳或系统崩溃的严重后果。

基于上述问题，针对受传感器攻击的下肢康复机器人系统，首先建立间歇的传感器攻击抑制模型，设计一种由分布式安全测量预选器和预设时间观测器组成的分布式预设时间状态安全估计策略，确保系统的状态在预设的时间内被准确估计出来。然后，利用获得的安全状态估计，借助反步设计方法，建立一套分布式预设时间安全控制算法。

### (3) 人机交互下的下肢康复机器人动态柔顺控制

交互控制会为康复患者创造一个安全、舒适、自然并且具备主动柔顺性的训练环境，避免患肢由于痉挛、颤抖等异常的肌肉活动或病人的主动运动而与机器人产生对抗，保护患者不会受到二次损伤。为此，研究者需要使下肢康复机器人更加准确地理解康复者的主观运动行为，并提出行之有效的控制方法，保证下肢康复机器人能够对应动态调节阻抗特性，快速跟随操作者运动，提高交互灵活性。

针对上述问题，本项目拟利用接触力和末端执行器位置信息建立自适应神经网络结构，并采用并行学习技术对康复患者的主观运动行为进行在线学习。然后，设计基于末端执行器位置信息和患者运动行为的时变权重函数，并将其融合到下肢康复机器人的期望阻抗模型中，实现不同交互模态下的变阻抗柔顺调节，提高交互灵活性。最后，采用Lyapunov-Krasovskii函数消除信号反馈延迟的不利影响，并借助预设时间控制技术加快收敛速度，进一步提高工作效率。

## 5.3 拟采取的研究方案

### (1) 柔性关节下肢康复机器人的位置和速度同步快速预设时间跟踪控制方法

在康复训练领域，康复机器人的精确步态轨迹跟踪对于患者的康复效果至关重要。若机器人无法在预定时间内准确追踪规划的步态轨迹，则可能对患者的康复进程产生不利影响。此外，当系统遭受外部作用力或其他干扰时，若所设计的控制器无法确保机器人维持正常运行从而导致偏离预定轨迹，康复设备可能对患者造成二次伤害。因此，本研究提出了一种基于全驱系统理论的预设时间控制方法，旨在实现机器人对目标轨迹的快速跟踪，并在速度上与之同步，同时有效抵御外部干扰，保持良好的跟踪状态。如图5所示，本项目的技术路线包括以下关键步骤：

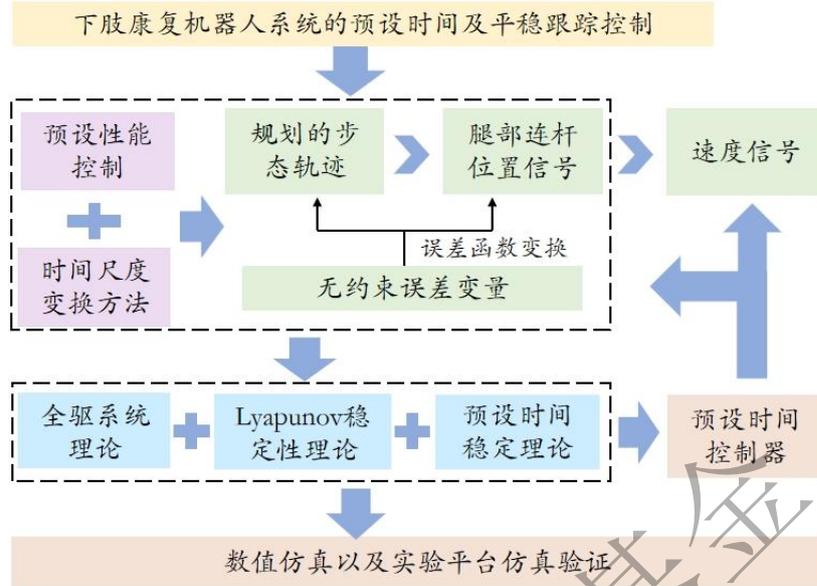


图 5 柔性关节下肢康复机器人的位置和速度同步快速预设时间跟踪控制技术路线

本研究首先定义了跟踪误差向量  $e = q_1 - q_d$ ，其中  $q_1 = [q_{11}, q_{12}]^T$ ， $q_d = [q_{d1}, q_{d2}]^T$  分别为下肢康复机器人系统的输出和目标轨迹向量。进一步引入预设时间性能函数  $B(t)$ ，该函数为单调递减的光滑函数，并确保在预设时间  $T_0$  内误差收敛至原点附近的某个邻域内。虽然基于误差向量范数  $\|e\|$  的函数变换能在一定程度上降低计算负荷，但这可能不利于实现对每个关节的精细控制。为了降低误差变量间的耦合关系，并提高控制精度，本研究为每个误差变量  $e_i, i = 1, 2$ ，独立引入了预设时间性能函数  $B_i(t)$ ，并为其设计了相应的变换

$$\xi_i = \frac{e_i}{B_i^2 - e_i^2}.$$

接下来利用全驱系统方法设计控制器，充分利用系统的全驱特性、更换系统的动态特性，以期实现全局稳定并实现指数收敛。在选取合适的Lyapunov候选函数后，本项目设计了控制器并对系统稳定性进行了深入分析。通过证明所构造变量的有界性，本项目确保了所有跟踪误差  $e_i$  均能被限制在由边界函数定义区间  $(-B_i(t), B_i(t))$  内，从而实现了位置和速度的同步快速跟踪，并保证了动态性能的一致性。最终，通过仿真和实验平台的测试，验证了所提出控制策略的有效性和实用性。

## (2) 受传感器攻击的下肢康复机器人的智能安全控制

在复杂的训练环境下，柔性关节下肢康复机器人通过网络传输数据时很容易受到传感器攻击。这种攻击会破坏传输数据源的完整性和可用性，当传感器注入虚假数据时，传输信号和系统数据的真实性被改变，若不加以防范，不仅会导致操作者做出错误的决策，甚至会缩短机器人的生命周期。为此，项目组将构建一套安全控制算法，在传感器受到攻击的情况下保证柔性关节下肢康复机器人系统的稳定性和鲁棒性，技术路线如图 6 所示。

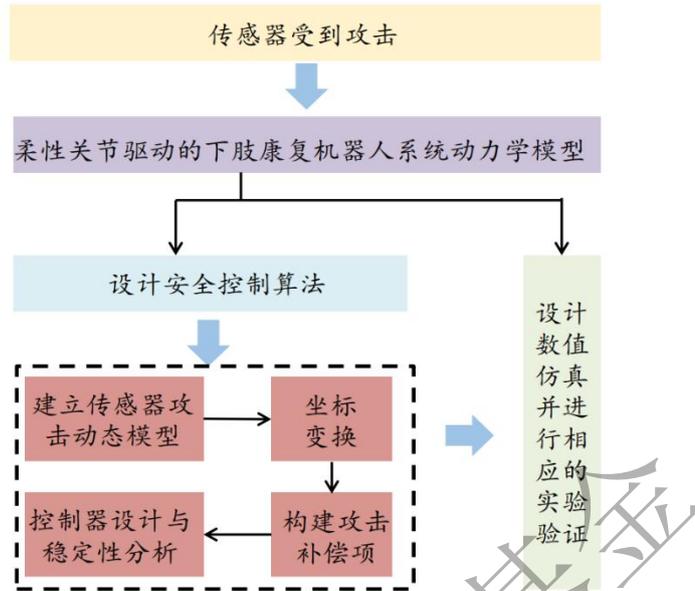


图6 柔性关节下肢康复机器人的安全跟踪控制技术路线

首先，定义受到传感器攻击的系统状态的动态方程为

$$\bar{x}_i(t) = x_i(t) + \varpi_i(t, x_i(t)), \quad i=1,2,3,4,$$

其中  $x_i(t) \in R^n$  是系统的真实状态， $\varpi_i(t, x_i(t)): R \times R^n \rightarrow R^n$  是传感器受到的攻击，其被建模为

$$\varpi_i(t, x_i(t)) = \omega_i(t)x_i(t),$$

其中  $\omega_i(t) \in R^{n \times n}$  是未知时变权重，并存在正的设计参数  $\omega_{i,1}$  和  $\omega_{i,2}$  满足  $|\omega_i| \leq \omega_{i,1}$ ， $|\dot{\omega}_i| \leq \omega_{i,2}$ 。随后设计攻击补偿信号  $\chi_1 = \bar{x}_1 - y_d - \hat{\omega}_1 y_d$ ，并构建传感器攻击补偿项  $\hat{\omega}_1$  来减轻所设计的控制系统中出现的未知攻击所带来的影响。同时，设计一种新的坐标变换，使其直接参与控制器设计与稳定性分析，从而利用受到攻击影响的系统状态实现安全跟踪控制，达到理想的控制性能。然后，对受传感器攻击的整个闭环系统的稳定性进行分析。最后，通过仿真和实验平台验证安全控制算法的可行性。

### (3) 面向“人在环中”的下肢康复机器人动态柔顺控制

在人机交互场景下，需要康复机器人能够主动配合康复患者完成任务，而不是被动服从于接触力、成为患者的额外负担。然而，康复患者由于经常发生痉挛、颤抖等异常的肌肉活动使得康复机器人很难直接理解操作者的主观运动行为，难以对应调节自身阻抗特性以跟随操作者运动；同时，硬件限制造成的信号反馈延迟还会降低机器人的响应速度，进而给人机交互过程带来极大的安全隐患。

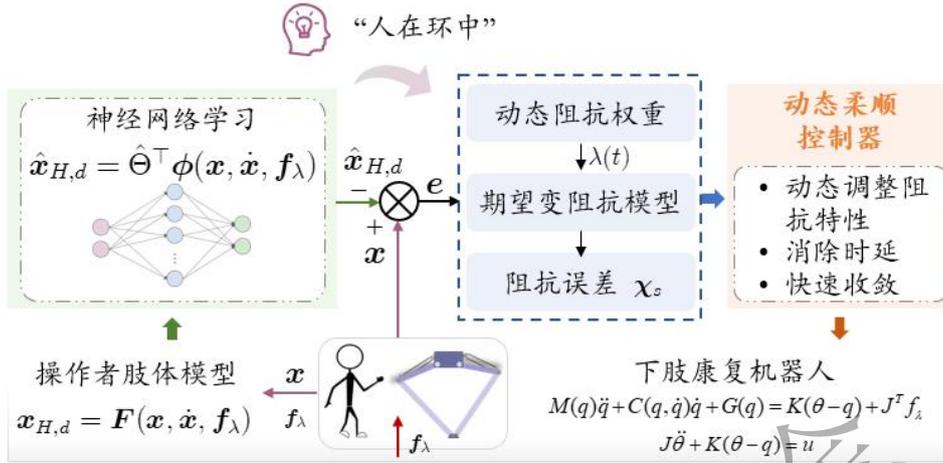


图7 面向“人在环中”的动态柔顺控制框图

针对上述问题，本项目拟设计一种面向“人在环中”的动态柔顺控制方法(如图7所示)。首先，基于接触力、末端执行器位置信息建立自适应神经网络结构，在线学习操作者的运动行为。然后，将患者的主观运动行为信息融合到康复机器人的期望阻抗模型中，实现不同交互模式下的对应柔顺程度调节，提高交互灵活性。最后，借助Lyapunov-Krasovskii函数和固定时间控制技术，消除信号反馈延迟的不利影响，提高收敛速率。

具体而言，建立如下由阻尼和弹簧元素主导的简化操作者肢体模型：

$$-B_H \dot{x} + K_H (x_{H,d} - x) = f_\lambda,$$

其中  $x$  是交互位置坐标， $x_{H,d}$  是对应的目标轨迹， $B_H$  和  $K_H$  分别为操作者肢体的阻尼和刚度矩阵， $f_\lambda$  是接触力。为了将操作者的主观运动行为信息传递给康复机器人，拟使用神经网络在线学习操作者的目标轨迹  $x_{H,d} = F(x, \dot{x}, f_\lambda)$ ，即

$$\hat{x}_{H,d} = \hat{\Theta}^T \phi(x, \dot{x}, f_\lambda),$$

其中  $\hat{x}_{H,d}$  是  $x_{H,d}$  的实时估计， $\phi(x, \dot{x}, f_\lambda)$  是神经网络的基函数， $\hat{\Theta}$  是利用并行学习技术在线更新的权重估计值，进一步提高参数估计的精度。然后，充分考虑不同交互模式对机器人柔顺水平的需求，建立基于操作者目标轨迹估计值  $\hat{x}_{H,d}$  的下肢康复机器人期望变阻抗模型：

$$M_d \lambda(t) (\ddot{x} - \ddot{\hat{x}}_{H,d}) + B_d \lambda(t) (\dot{x} - \dot{\hat{x}}_{H,d}) + K_d \lambda(t) (x - \hat{x}_{H,d}) = f_\lambda,$$

这里  $M_d$ ， $B_d$  和  $K_d$  分别为期望的惯性、阻尼和刚度矩阵， $\lambda(t)$  是一个与  $x$  和  $\hat{x}_{H,d}$  有关的权重函数。当末端执行器位置  $x$  能够较好跟随操作者的目标轨迹估计值  $\hat{x}_{H,d}$  时，定义末端执行器的跟踪误差  $e = x - \hat{x}_{H,d}$  以及阻抗误差：

$$\chi_s = \ddot{e} + M_d^{-1} B_d \dot{e} + M_d^{-1} K_d e - M_d^{-1} \lambda^{-1}(t) f_\lambda,$$

进一步使用 Lyapunov-Krasovskii 函数消除信号反馈延迟的不利影响，构造自适应预设时间控制器，保证下肢康复机器人能够根据操作者的主动运动行为、实时跟踪效果调整自身的阻抗特性，快速跟随操作者运动，实现“人在环中”的动态柔顺控制，提高人机交互的灵活性。

## 六、年度研究计划及预期研究结果（1000 字以内）

### 6.1 年度研究计划

2025.01-2025.12: 项目组拟针对研究问题作进一步研讨交流, 细分研究内容, 分类整理相关文献, 建立带有柔性关节下肢康复机器人系统的动力学模型, 深入分析外界干扰及内部组件变化给系统建模带来的影响, 探讨基于全驱系统理论的下肢康复机器人系统的预设时间同步跟踪控制, 搭建实验平台, 完成学术论文 3-5 篇。拟在本年度的 CCC 或 CCDC 组织一个关于下肢康复机器人系统控制的邀请组, 项目组成员参加本年度学术会议 2-3 次。

2026.01-2026.12: 针对受传感器攻击的下肢康复机器人系统, 提出一种间歇性传感器攻击抑制模型, 通过设计一种分布式预设时间状态安全估计策略, 建立一套分布式预设时间安全控制算法。完成学术论文 3-5 篇。拟在本年度七月份举办一个关于机器人系统控制的小型研讨会, 诚邀 40 位左右国内外知名专家学者来校交流, 并于今年前往南开大学方勇纯教授课题组访问交流。项目组成员参加国际学术会议 2-3 次。

2027.01-2027.12: 全面开展研究工作, 形成课题研究讨论班, 理清研究内容之间的内在联系和技术区别。针对人机交互下的下肢康复机器人动态柔顺控制问题, 将时变权重函数与系统期望阻抗模型结合, 实现不同交互模态下的变阻抗柔顺调节。结合建立的下肢康复机器人系统模型, 完善实验平台, 完成学术论文 3-5 篇。申请专利 3-5 件。收集整理研究结果, 撰写结题报告。

### 6.2 预期研究结果

本项目的研究成果将进一步完善带有柔性关节的下肢康复机器人系统的智能控制理论, 为复杂的下肢康复机器人系统控制问题提供理论依据和实践方案, 具有深远的理论意义和潜在的应用价值。

(1) **学术成果:** 课题项目组将根据拟解决的研究问题开展深入的研究, 力争做出一批高质量的研究成果。采用预设时间控制、容错控制、全驱系统方法深入探索柔性下肢康复机器人的智能安全与柔顺控制设计方法, 做出创新性研究成果, 并将理论成果应用到实际系统的模型中, 完成实验验证。

(2) **论文发表:** 课题研究完成后, 预计完成 12 篇左右高质量的学术论文, 其中在国内外知名学术期刊, 如国内期刊《中国科学: 信息科学》、《自动化学报》以及国外期刊 Automatica, IEEE 汇刊, International Journal of Robust and Nonlinear Control 等发表论文 6-8 篇。

(3) **人才培养:** 依托该项目培养硕士生 5-8 名, 合作培养博士生 1 名。

(4) **实验平台:** 搭建柔性关节下肢康复机器人仿真实验平台, 将本项目所设计的自适应控制算法进行实验验证, 确保控制方案的可行性。最后, 受理/授权发明专利 3-5 件。

## 七、项目年度目标及资金支出计划

| 实施期  |                       | 项目目标分解及进度安排<br>(列出重要进度节点的研究内容及阶段性成果情况)  | 年度资金预算(万元) | 其中:省财政资金预算(万元) | 备注说明                               |
|------|-----------------------|---|------------|----------------|------------------------------------|
| 第一年度 | (2025-01至<br>2025-12) | 2025.01-2025.12: 针对柔性关节驱动的新型下肢康复机器人, 建立其动力学模型。开展针对下肢康复机器人的基于全驱系统理论的预设时间跟踪控制研究。预期完成2篇左右高质量的学术论文。 | 20         | 20             | 无                                  |
| 第二年度 | (2026-01至<br>2026-12) | 2026.01-2026.12: 针对受传感器攻击的下肢康复机器人系统的智能安全控制研究。预期完成5篇左右高质量的学术论文。受理、授权发明专利1-2件。                    | 20         | 20             | 无                                  |
| 第三年度 | (2027-01至<br>2027-12) | 2027.01-2027.12: 研究人机交互下的下肢康复机器人动态柔顺控制, 对以上研究成果进行整理总结。预期完成5篇左右高质量的学术论文。受理、授权发明专利1-3件。           | 12         | 10             | 学校匹配2万元外拨到南开大学, 用于孙宁教授在本项目的业务科研支出。 |

## 八、约定条款

### （一）总则

根据《中华人民共和国科学技术进步法》《中华人民共和国促进科技成果转化法》《科学技术活动违规行为处理暂行规定》等国家法律、规章，以及《山东省科学技术进步条例》《山东省自然科学基金项目管理办法》《山东省自然科学基金项目资金管理办法》《山东省科技计划项目撤销与终止管理暂行办法》《山东省科技计划项目科研诚信管理办法》等法规和有关科技计划项目、资金及诚信管理规范性文件和相关政策通知，现由省科技厅（甲方）与项目依托单位及项目负责人（乙方）、项目主管部门或项目推荐单位（丙方）依据省自然科学基金项目立项通知签订三方《项目合同书》，作为项目执行、过程管理、综合绩效评价、验收的依据，保证项目的顺利实施和科研经费的合理使用。

合同书签署各方承诺，将严格遵守认真履行本合同书的各项条款，保证任务目标按时完成和财政性资金使用安全。

### （二）各方职责、权利义务

#### 1. 甲方职责

（1）甲方应按省科技财政资金统筹安排计划，根据不同类型科研项目特点、研究进度、资金需求等，结合项目预算评审、支出计划等，合理制定经费拨付计划并及时拨付资金。甲方有权根据乙方自筹和地方匹配经费到位进度和项目实施进展情况对分年度经费安排作适当调整。

(2) 项目执行期满后，甲方同步开展综合绩效评价与验收工作，制定绩效评价标准，量化评价指标，组织高水平专家或委托项目管理专业机构开展项目评价，审核并形成绩效评价与验收结论；

(3) 甲方应按照相关规章、规范性文件规定的程序审核批复或直接下达项目调整、延期、撤销、终止等处理意见，并作出处理决定；

(4) 甲方对在绩效评价、项目验收、监督检查、审计等过程中发现存在科学技术活动违规行为的，应进行调查核实、评估责任和作出认定，并视事实、性质、情节作出相应处理决定；

(5) 根据法律、法规、规章、规范性文件和政策，甲方应当履行的科技计划管理其他职责。

## 2. 乙方权利义务

(1) 乙方（项目依托单位）应根据本《项目合同书》确定的目标任务、分工安排、考核指标、经费预算等内容按进度高质量完成相关研发任务，为项目实施提供承诺的技术与条件保障，切实履行法人责任，确保资金使用安全规范，对省级财政资金和其他来源的资金分别单独核算，确保专款专用，按照承诺保证其他来源资金及时足额到位并用于本项目支出，承诺不发生《省级财政科研项目经费管理使用负面清单》（鲁财科教〔2022〕11号）所列行为；

(2) 《项目合同书》以《项目申报书》为依据，项目依托单位、项目负责人、项目合作单位、项目实施周期、项目预算总额、研究内容和考核指标等主要内容原则上不

得调整。项目实施期内确需调整的，由乙方（项目负责人、项目依托单位）向丙方提出书面申请，丙方研究形成意见，报甲方审核批复；项目延期原则上只能申请1次，延期时间原则上不超过12个月；

(3) 乙方项目被撤销或终止的，乙方应配合甲方、丙方完成项目撤销或终止相关工作，按规定退回撤销或终止项目财政资金；

(4) 乙方应积极配合省级科技部门、财政部门开展项目绩效评价工作；应配合有关部门开展监督或审计等工作；

(5) 乙方原始记录等能够证明承担探索性强、风险高的科学技术研究开发项目的科学技术人员已经履行了勤勉尽责义务仍不能完成项目的，可申请予以免责。

(6) 在项目实施过程中，实行重大事项报告制度。发生如下事项的，乙方应以书面形式经丙方及时告知甲方。因乙方未及时报告造成的一切后果，由乙方负责：

- ① 项目执行过程中实现重大突破的；
- ② 乙方或其他参加单位发生重大变故、出现财务状况危机；
- ③ 乙方或其他参加单位的研究进度严重滞后的；
- ④ 项目负责人不能正常履行职责，严重影响课题研究工作的；
- ⑤ 乙方或其他参加单位发生分立、合并、企业重组、并购等情况的；
- ⑥ 其他应当告知甲方的与本合同书项目实施、管理有关的事项。

### 3. 丙方职责

(1) 丙方应协助甲方对乙方及其执行项目情况开展项目管理工作；

(2) 丙方应督促乙方执行项目，按规定开展项目年度绩效评价，对项目能否完成预定任务目标作出判断，对无法完成预定目标的项目，提出项目优化调整、撤销或者终止建议，并按程序报送相关材料，审核乙方项目撤销或终止相关材料并提出审核意见报甲方复审；督促乙方按规定退回撤销或终止项目财政资金；

(3) 丙方应按照甲方部署参与项目监督，配合甲方对项目实施中存在的问题进行核查处理；

(4) 根据法律、法规、规章和规范性文件，丙方应当履行的科技计划管理其他职责；甲方委托的其他相关任务。

#### (三) 知识产权和促进科技成果转化

本项目主要研发活动应在山东省境内开展，项目形成的知识产权的归属、使用和转移，在不损害国家安全、国家利益和重大社会公共利益的前提下，授权项目承担单位或个人依法取得相关知识产权，乙方和项目合作单位应签订联合申报协议，约定项目知识产权归属、成果管理及合作等内容。项目成果应优先在山东省境内实施转化应用，如确需到山东省外转化的，应向甲方做出报告说明。在本合同书生效后5年内，甲方有权因非商业目的(如：在政府性会议、报告、文件、统指标计资料等)使用乙方及其项目的信息。

乙方应积极应用和有序扩散项目成果，传播和普及科

学知识，促进技术交易和成果转化，并落实科研人员激励政策；乙方在合理期限内没有实施项目所形成的知识产权且无正当理由的，甲方有权通过责成乙方将成果在省级技术产权交易市场挂牌转让等方式许可他人有偿实施或无偿实施；为了国家安全、国家利益和重大社会公共利益的需要，国家可以无偿实施，也可以许可他人有偿实施或者无偿实施。

#### （四）保密、档案管理

1. 保密：甲、乙、丙各方对合同书及其他技术资料负有保密责任，乙方应建立、完善并严格落实内部保密管理制度和技术安全防范措施。

2. 甲、乙、丙各方应严格执行《科学技术研究档案管理规定》（国家档案局 科技部令第15号）等有关档案管理规定，做好全过程档案的整理、保存、归档等工作。

#### （五）违约责任、违规行为处理

1. 项目实施过程中，发生项目无法继续实施或在管理、资金使用等方面存在违规违纪等情形的，或因客观原因导致项目无法继续实施或无法完成合同书约定的主要任务的，属于乙方违约行为，且可能同时存在违规行为。根据国家相关法律、法规、规章和《山东省科技计划项目撤销与终止管理暂行办法》（鲁科字〔2022〕114号）规定，通过调查核实，甲方可作出项目撤销或终止的处理决定；乙方应按规定报送项目撤销或终止报告、按规定退回撤销或终止项目财政资金，并配合开展监督检查或审计等工作；甲方对于撤销或终止项目的乙方、乙方负责人以及拒不配合相

关工作的单位、人员可单独或合并采取责令整改、约谈、通报、记入科研诚信严重失信行为数据库、停止拨付结转资金、收回结余或已拨资金、阶段性或永久性取消申报资格等惩戒性措施。

2. 项目执行期满后，项目经甲方综合绩效评价与验收被评定为“绩效评价等级为差、验收结论为不通过”的，属于乙方违约行为，且可能同时存在违规行为。根据相关法律、法规和《科学技术活动违规行为处理暂行规定》（科学技术部令第19号），甲方对乙方和乙方科学技术人员无正当理由不履行本合同书约定的主要义务、故意拖延或拒不履行科学技术活动管理合同约定义务等违规行为，可单独或合并采取约谈、追回结余资金、追回已拨财政资金以及违法所得、禁止在一定期限内承担或参与财政性资金支持科学技术活动、记入科研诚信严重失信行为数据库等处理措施。

3. 乙方已勤勉尽责、因项目本身探索性强、风险性高原因不能完成该项目的，应及时通知甲方、丙方，并提供原始记录等相关证明，经甲方审核同意，可以免除乙方责任；对于确因不可抗因素造成项目撤销或终止的可从轻或者免于惩戒。

4. 乙方存在《科学技术活动违规行为处理暂行规定》和相关法律、法规、规章或规范性文件规定的其他违规行为的，甲方依职责和权限可单独或合并采取约谈、追回结余资金、追回已拨财政资金以及违规所得、禁止在一定期限内承担或参与财政性资金支持科学技术活动、记入科

研诚信严重失信行为数据库等处理措施；乙方违规行为达到国家法律、法规、规章关于实施行政处罚标准的，由甲方依法做出行政处罚。

#### （六）附则

1. 本合同书未尽事宜，按照国家、省相关法律、法规、规章、规范性文件和有关科技计划与经费管理等规定执行。

2. 乙方对甲方行政行为有异议的，可申请复查，或直接依法申请行政复议、提起行政诉讼。乙方在法定期限内不申请行政复议或者提起行政诉讼，又不履行甲方行政决定的，甲方可以申请人民法院强制执行。

3. 本合同书正本一式陆份（甲、乙、丙方各执贰份），自甲、乙、丙三方签章后生效。

4. 本合同书有关词语、条款的含义，如无特别说明的，按照科技项目管理的通常认识和理解予以解释。

5. 本合同书与我省省级各类科技计划项目管理文件中的任务书具备相等效力，甲方拥有最终解释权。

#### （七）专用条款

1. 项目负责人全面负责基金项目的实施，包括按立项通知要求填写项目合同书，定期报告项目的执行和进展，如实编报项目研究工作总结和资助经费决算等情况，按期申报结题。项目依托单位对本单位基金项目负有监督、管理和保证的责任，主要包括：保证项目的人员稳定、条件落实；监督项目的实施和经费使用；定期报告项目的管理

情况；协助有关部门实施项目检查和绩效评价；审查结题项目的经费决算和研究工作总结，组织申报结题。

2. 青年、面上、优秀青年、杰出青年、联合基金项目实施经费“包干制”，资助经费不再区分直接费用和间接费用。

3. 项目负责人填报合同书时，无需编制项目预算。项目资金项目负责人在承诺遵守科研伦理道德和作风学风诚信要求、资金全部用于本项目研究的基础上，自主决定经费使用。

4. 项目结题时，项目负责人根据实际使用情况编制项目经费决算，经依托单位财务、科研管理部门审核后报送。项目完成后，依托单位组织编制、内部公开项目经费决算和项目结题/成果报告等，接受监督。

5. 项目依托单位应当健全完善项目经费绩效管理制度，落实绩效监控主体责任。

#### (八) 需要约定的其他内容

### 九、附件

## 山东省自然科学基金优秀青年项目联合申报协议

甲方（项目牵头单位）：

聊城大学

负责人：孙伟

乙方（合作研究单位）

南开大学

负责人：孙宁

丙方（合作研究单位）

聊城市中医医院

负责人：李延辉

经甲乙丙三方协商一致，联合申报山东省自然科学基金优秀青年项目，申报项目名称为“柔性下肢康复机器人智能安全与柔顺控制研究”，就有关事宜达成如下协议：

一、各方同意由聊城大学作为该项目的牵头申报单位，其他方作为该项目的合作研究单位，共同组成联合体申报该项目。

二、各方承诺针对同一项目不进行多头申报或重复申报。

三、各方同意由聊城大学对项目进行任务划分。各方应积极配合进行项目申报，并完成相应的承担任务。具体任务分工如下：

**任务 1：考虑下肢康复机器人系统建模、提出智能控制算法、完成实验验证。**

牵头单位：聊城大学

考核指标：采用预设时间控制、容错控制、全驱系统方法深入探索柔性下肢康复机器人的智能安全与柔顺控制设计方法，做出创新性研究成果，将理论成果应用到实际系统的模型中，完成实验验证。发表期刊论文不少于 12 篇，申请/授权发明专利不少于 4 项。

**任务 2：协助完成实验验证、实验平台的建设**

牵头单位：南开大学

考核指标：无

**任务 3：协助完成下肢康复机器人系统的建模**

牵头单位：聊城市中医医院

考核指标：无

四、经费安排

按照省财政经费不外拨的规定，各方就该项目省拨经费和配套资金承诺如下：

1、本项目经费共52万元，其中省拨经费为50万元；聊城大学匹配经费为2万元。

2、合作研究外拨资金情况：

1) 经第一合作研究单位负责人南开大学人工智能学院孙宁同意，把聊城大学匹配经费2万元拨给南开大学，用于孙宁、杨桐、刁淑贞对项目实验验证及平台建设的业务费科研支出。

2) 经第二合作研究单位参与人聊城市中医医院李延辉同意，不再将经费拨给聊城市中医医院，根据项目进展，需要在聊城市中医医院进行数据采集、算法测试时，按照聊城市平均工资水平，以劳务费形式支付给数据采集者。

五、成果分配

1、三方在申报本项目之前各自所获得的知识产权均归各自所有，不因共同申报本项目而改变。

2、甲乙丙三方在本项目研究过程中，针对各自承担的研究任务所产生的研究成果归承担方所有，三方共同参与研发的科技成果归三方共同所有。

六、其他事宜

1、本协议内容及在合作过程中一方接触到任何对方的任何技术方案、内部资料、软件代码、商务资料、文档资料等商业秘密信息，各方应予以严格保密，不得以任何形式留存、擅自使用或向外公开，负责人应当承担因此给对方造成的所有经济损失。

2、本协议一式6份，甲乙丙三方各持2份，均具有同等法律效力。

3、合作三方因履行本合同而发生的争议，应协商、调解解决，若协商、调解解决不成，可依法向人民法院起诉。

4、协议未尽事宜，三方本着互惠互利、友好协商的原则另行协商约定。

5、协议自签订日期起，5年内有效。



甲方（盖章）：

聊城大学

项目负责人（签字）：

孙伟

2024年11月4日



乙方（盖章）：

南开大学

项目负责人（签字）：

孙宁

2024年11月5日



丙方（盖章）：

聊城市中医医院

项目负责人（签字）：

2024年11月5日

十、合同书签订各方

甲方：山东省科学技术厅

处室审核意见：

审核人：

责任人：

盖章  
年 月 日

乙方：项目负责人、项目依托及合作单位

项目负责人（签字或盖章）：

孙伟



丙方：项目主管部门（项目推荐单位）

法定代表人或委托代理人（签字或盖章）：



姜运平

表 8 近年来标志性教研项目

| 序号 | 项目名称   | 项目类型                          | 负责人 | 获批时间   |
|----|--|-------------------------------|-----|--------|
| 1  | “人工智能+”视野下的系统科学<br>“一线贯通、三融并举”拔尖创新<br>人才自主培养研究 | 山东省研究生教育<br>教学改革研究项目<br>重大项目  | 白成林 | 202412 |
| 2  | “一中心双主体三融合四举措”高<br>等数学教学范式探索                   | 山东省本科教学改<br>革研究项目重点项<br>目     | 赵军圣 | 202502 |
| 3  | 国际视野-科教互融-文化浸润：系<br>统科学专业拔尖创新人才培养模式<br>探索与实践   | 山东省研究生教育<br>教学改革研究项目<br>面上项目  | 夏建伟 | 202312 |
| 4  | 《概率论与数理统计》线上线下混<br>合式教学方式实践与创新研究               | 山东省本科教学改<br>革研究项目面上项<br>目     | 庄光明 | 201810 |
| 5  | 基于在线教育资源的高等数学课程<br>混合式教学模式改革的研究与实践             | 高等学校大学数学<br>教学研究与发展中<br>心教改项目 | 樊树芳 | 202006 |
| 6  | 《概率论与数理统计》线上线下融<br>合式教学的实践与研究                  | 高等学校大学数学<br>教学研究与发展中<br>心教改项目 | 赵军圣 | 202307 |
| 7  | 线性系统理论   | 山东省研究生优质<br>课程                | 庄光明 | 202012 |
| 8  | 系统科学概论   | 山东省研究生优质<br>课程                | 庄光明 | 202412 |

# 山东省教育厅

鲁教高函〔2025〕6号

## 山东省教育厅 关于公布2024年本科教学改革研究项目 立项名单的通知

各普通本科高等学校：

根据《山东省教育厅关于做好2024年本科教学改革研究项目立项申报和管理工作的通知》（鲁教高函〔2024〕34号，以下简称《通知》）要求，我厅组织开展了2024年山东省本科教学改革研究项目申报评审工作。经学校推荐、评审、公示等程序，确定立项重大专项1项、重点项目451项、面上项目363项。现将项目名单予以公布（详见附件），并就有关事项通知如下：

一、各有关高校要高度重视，切实履行主体责任，落实项目支持政策、经费投入和条件保障。要加强项目过程管理，认真组织项目团队开展项目研究，及时协助解决研究中出现的问题。要按时组织项目结题和验收，严格审查，确保每个项目都能高标准完成，取得实效。

二、项目负责人要按照《通知》要求和研究进度安排，认真

开展项目研究，积极探索有利于人才培养的新理论、新模式、新方法，争取形成可借鉴、可推广的高质量教学成果。项目研究成果，如以论文或教材等形式公开发表或出版的，应注明“山东省高等教育本科教学改革研究项目”字样和项目编号。

三、我厅将通过“山东省本科教改项目管理系统”对项目进行过程管理。项目组应及时提交相关研究成果，按年度提交项目进展和实施成效；所在高校应按时提交项目管理年度总结报告、结题总结报告和验收报告。

附件：2024年山东省本科教学改革研究项目立项名单

山东省教育厅

2025年2月21日

附件

## 2024年山东省本科教学改革研究项目立项名单

| 项目编号     | 项目类型 | 项目名称                                   | 主持人姓名 | 主持单位名称 | 合作单位               | 项目主要成员                            | 备注 |
|----------|------|--|-------|--------|--------------------|-----------------------------------|----|
| D2024001 | 重大项目 | “四维融合”促进海洋科学领域“四个一流”的建设与实践             | 吴立新   | 中国海洋大学 | 无                  | 林霄沛、陈旭、丁黎黎、辛远征、孙建、荣增瑞、孟静、马倩       |    |
| Z2024001 | 重点项目 | “AI+HI”重构生物化学智慧教学                      | 任桂杰   | 山东大学   | 北京世纪超星信息技术发展有限责任公司 | 肖鹏、刘志方、张鹏举、朱德裕、陈蕾                 |    |
| Z2024002 | 重点项目 | “AI+科普+医学人文”三位一体：新型口腔医学实习大科普实践体系的构建与实施 | 于美娇   | 山东大学   | 无                  | 吴峻岭、梁伟、赵晓、王艳红、陈虹瑜、王婷、张小玢、何薇、王萍    |    |
| Z2024003 | 重点项目 | AI赋能新型电力系统卓越人才“全过程、全环节、全方位”培养改革与实践     | 叶华    | 山东大学   | 无                  | 丁磊、李常刚、陈健、孙媛媛、赵浩然、牟倩颖、孙润稼、李红伟、张婷婷 |    |
| Z2024004 | 重点项目 | “创新转化管理”交叉学科复合型人才培养研究与实践               | 卢翠翠   | 山东大学   | 无                  | 韩圣浩、乔岳、初大平、连杰、张立伟、牛水叶、曹震、赵云、刘莎莎   |    |
| Z2024005 | 重点项目 | 从物理现象到科学思维：开放式物理演示实验的教学模式创新与拔尖人才培养     | 王春明   | 山东大学   | 无                  | 王蓓、潘旭、王茜、梁恩萌、苏文斌、俞琳               |    |
| Z2024006 | 重点项目 | 低碳与智能建造背景下土木工程专业教育与创新创业教育融合模式研究与实践     | 李召峰   | 山东大学   | 无                  | 林春金、张健、李凯、许振浩、朱良成、张龙云             |    |

| 项目编号     | 项目类型 | 项目名称                                      | 主持人姓名 | 主持单位名称 | 合作单位                             | 项目主要成员                             | 备注 |
|----------|------|---|-------|--------|----------------------------------|------------------------------------|----|
| Z2024271 | 重点项目 | 地方高校教育数据智能化管理与教学应用的探索与实践                  | 刘丙利   | 聊城大学   | 曲阜师范大学、聊城大学东昌学院、潍坊学院             | 马中东、孙娜、侯金奎、张惠、王超、黄春平、李庆华、韩丽华、孔亚    |    |
| Z2024272 | 重点项目 | 地方应用型高校会计专业实践教学模式创新与探索——基于“项目驱动”视角        | 张延辉   | 聊城大学   | 聊城华越有限责任会计师事务所                   | 周琳、冯英丽、公维才、匡萍、翁怀达、张晶、张同岳、赵耀腾       |    |
| Z2024273 | 重点项目 | 基于“国际标准、中国经验、职业需求”的地方高校师范生人工智能素养培育机制研究与实践 | 李军    | 聊城大学   | 无                                | 岳建军、满忠坤、邵怀领、陈晶                     |    |
| Z2024274 | 重点项目 | 基于知识图谱和AI赋能的智慧课程建设与实践——以“大气污染控制工程”为例      | 王岩    | 聊城大学   | 无                                | 郭琳、姚昕、李珊珊                          |    |
| Z2024275 | 重点项目 | 新高考背景下高中生物学与大学生物学专业课程衔接的研究                | 周国利   | 聊城大学   | 淄博市淄川区般阳中学                       | 宋娟、李妹芳、侍福梅、褚鹏飞、周秀玲、王猛、吕艳伟、于帅       |    |
| Z2024276 | 重点项目 | “一中心双主体三融合四举措”高等数学教学范式探索                  | 赵军圣   | 聊城大学   | 济宁学院                             | 宋颖、李瑞芹、樊树芳、庄光明、张凤霞、丁纪玲、张昕丽、辛祥鹏、孙伟  |    |
| Z2024277 | 重点项目 | 黄河精神结构化、层次化、系统化、流程化融入环境生态工程专业课程体系研究       | 宋宁宁   | 德州学院   | 山东锦铭检测技术有限公司                     | 刘芬、庞海洋、吕志轩、宋广元、范克胜、赵春宇、邸向红、温晓金、李魏魏 |    |
| Z2024278 | 重点项目 | 基于OBE理念的生物学类专业“教科创”一体化应用型人才培养模式改革与实践      | 孙颖慧   | 德州学院   | 济宁学院、山东福洋生物科技股份有限公司、山东雪榕生物科技有限公司 | 曾强成、孙晨晨、李洪亮、范克胜、宋建、师艳秋、宋希亮、刘娟、赵伟   |    |