



归口管理部门	信息科学部
申请代码	F0301

基础科学中心项目

中期检查评议书

项目批准号：62188101

项目名称：高阶全驱系统理论与航天器控制技术

项目负责人：段广仁

依托单位：哈尔滨工业大学

合作研究单位：中国航天科工集团有限公司、南方科技大学

资助金额：6000 万元

已拨金额：4200 万元

项目执行期限：2022 年 1 月 - 2026 年 12 月

国家自然科学基金委员会

二 00 二年制

检查组成员	郭雷，童小华，边桂彬，刘连庆，彭艳，孙健，孙希明，王大轶，吴枫，徐胜元，阳春华		
检查时间	2024 年 12 月 14 日	地点	哈尔滨
检查形式	专家评审会		

检查组综合意见：（包括计划完成情况、成果及研究意义和水平、人才培养和国际合作与交流的成效等方面的评价意见。）

国家自然科学基金委员会信息科学部组织专家对哈尔滨工业大学段广仁教授负责的基础科学中心项目“高阶全驱系统理论与航天器控制技术”（批准号：62188101）进行了中期检查。专家组听取了项目负责人及主要研究人员关于该项目的研究内容和完成情况的汇报，经质询与讨论，形成中期检查意见如下：

1. 该项目执行三年来，探索建立了一个关于控制系统分析与设计的全驱系统方法体系，围绕该体系的基础理论、应用基础和实验验证三个方面开展了系统深入的研究工作，项目执行情况好。

2. 项目三年执行期间取得了一批创新成果如下：

在基础理论研究方面：

（1）建立了描述动态系统的全驱系统模型，系统地提出了基于全驱系统模型的全驱系统方法，进一步发展了反馈线性化、微分平坦、动态阶等一批典型非线性系统控制理论。针对连续和离散的、确定和不确定的、带有时变参数和时滞的复杂非线性系统，建立了实现系统镇定和亚镇定的一系列全驱系统控制方法。

（2）证明了常规线性系统能控的充要条件是其可化为高阶全驱系统，并将该结果推广到离散系统、时变系统和时滞系统，提出了各类线性系统特征谱配置问题的更加简洁和有效的方法。证明了严反馈系统可以等价地转化为全驱系统，并给出了实现该转化的迭代递推公式，提出了高阶严反馈系统和亚严反馈系统，并建立了相应的高阶反步法和亚镇定方法。

（3）基于全驱系统方法解决了一批常规非完整系统的镇定问题，同时将常规的非完整系统推广到时变和时滞的情形，揭示了非完整系统的本质特征，给出了亚镇定反馈控制器。基于全驱系统模型解决了一批复杂非线性系统的鲁棒控制、容错控制、自适应控制、预测控制、最优控制以及跟踪控制等问题。

在应用基础研究方面：

（1）针对航天器姿态系统中控制力矩失效所导致的非完整系统，提出了亚镇定的概念，并基于全驱系统方法建立了实现该类非完整系统及其推广形式的亚镇定光滑反馈控制器。

（2）针对有向图情形下微小型航天器异构集群姿态的同步跟踪问题，考虑外部干扰、转动惯量不确定性和执行器饱和等约束，提出了基于高阶全驱理论的完全分布式控制设计方法。

（3）针对有障碍物约束的航天器交会控制问题，同时考虑轨道摄动引起的外部干扰力和力矩，提出了基于全驱系统理论与人工势场函数的预设性能控制方法，解决了航天器交会

对接控制中的避障设计难题。

(4) 提出了基于全驱系统理论的高速飞行器姿态控制方法，有效克服了强非线性及强耦合性对飞行器稳定控制的影响。

(5) 针对四类典型的时变欠驱动系统，提出了基于全驱系统理论的亚镇定控制方法，并成功地应用于惯性轮倒立摆系统等若干欠驱动机械系统的控制。

在应用实验验证方面：

(1) 针对空间双臂机器人的位姿混合控制问题，提出了一种基于全驱系统理论的位姿积分型滑模控制方法，地面全物理仿真实验表明减小了系统超调量，提高了响应速度。

(2) 基于数值仿真和半实物仿真完成了基于全驱系统理论的高速飞行器姿态控制方法的综合实验验证，结果表明所设计的姿态控制系统可以实现强非线性、强耦合和不确定条件下对姿态指令的稳定跟踪。

(3) 搭建了多气浮台航天器模拟器半物理仿真演示验证系统，并开展了一系列基于全驱系统方法的控制应用实验研究，包括多智能体协同控制、预测控制、最优控制和自适应控制等演示验证。

(4) 开展了基于全驱系统理论和方法的无人机和机器人等方面的控制应用实验验证研究，包括四旋翼无人机、无人机机械臂、伺服电机、微电网、各种欠驱动倒立摆等系统。

3. 项目三年共计发表 SCI 论文 294 篇，其中 Automatica 论文 12 篇、中国科学英文版 17 篇、IEEE 汇刊 94 篇，授权专利 112 件，出版英文专著 3 部、中文著作 2 部、译著 2 部。

4. 项目执行期间，项目组有 1 人入选俄罗斯工程院外籍院士，2 人入选 IEEE Fellow，1 人入选 IET Fellow，2 人分获国家自然科学基金委杰出青年基金和优秀青年基金资助，11 人入选海外优青，8 人入选国家万人计划青年拔尖人才和教育部青年长江学者，引进国家青年千人 2 人，1 人获 IEEE 维纳奖和米特尔曼成就奖，1 人获钱学森杰出贡献奖。另外，培养的博士和硕士毕业人数分别为 92 和 139 人。

5. 项目在执行期间还取得下述相关进展：

(1) 工作带动了中、美、加等全球 60 余所高校的百余个团队在该方向上公开发表论文 450 余篇；

(2) 项目负责人组织成立了中国自动化学会全驱系统理论与应用专业委员会；

(3) 获得省部级奖励 6 项，所完成的“控制理论的全驱系统方法体系”项目成果获得黑龙江省自然科学特等奖；所完成的“全驱系统控制理论”项目成果入选 2023 年度“中国高等学校十大科技进展”；

(4) 获批 2 个全国重点实验室和“全驱系统控制理论与技术”广东省重点实验室；

(5) 项目组成员应邀在 IEEE 工业电子会议和中国自动化大会等国内外顶级学术会议上做关于全驱系统理论方向的大会报告 40 余次；

(6) 项目组核心人员创办了“全驱系统理论与应用”国际学术年会，并已经成功举办了三届，参会代表已达 600 余人，会议论文集已进入 IEEE Xplore 数据库，在国内外产生了重大影响。

6. 项目组高度注重成员的分工合作和学科交叉融合，系统开展了从控制科学与工程、宇航科学与工程到机械和能源的跨学科、跨领域研究，广泛开展了富有成效的国内外合作，促进了重大问题的解决与突破。

专家组认为，该项目按计划完成了阶段性任务，取得突出进展，同意通过中期检查。

建议：在前期研究基础上，进一步聚焦重大科学目标，加大跨学科合作力度，注重与工程实践的融合。

评定项目实施等级：A

专家组组长签字：

郭雷

2024年12月14日

科学处意见:

同意

科学处负责人 (签章):



2025 年 1 月 3 日

科学部意见:

同意

科学部主任 (签章):



2025 年 1 月 3 日

分管委主任意见:

同意



分管委主任 (签章):

2025 年 1 月 10 日