

2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

固定时间收敛控制理论及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

“固定时间收敛控制理论及应用”项目团队围绕导航、制导与控制，控制科学与工程等领域的科学问题开展了创新性研究工作，取得了可降低初始控制量冲击的固定时间收敛控制理论、高阶系统固定时间收敛状态一致协同控制理论、拒止干扰环境下可固定时间收敛的强鲁棒协同制导技术等若干标志性研究成果，部分研究成果属国内外首次提出，被学术界公认并广泛引用，成果已应用于航天科技第一研究院第十二研究所等单位，项目核心研究成果获陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖，具备陕西省科技奖励提名条件，建议提名陕西省自然科学二等奖。

三、项目简介

固定时间收敛控制理论是当前国际学术前沿与科技创新的重要研究方向，对提升社会服务能力和军事技术水平具有显著的基础支撑作用。快速响应、敏捷变化的复杂系统控制技术，也是实现智能化和协同化国家战略需求的关键保障。

在混杂系统控制、低延时自主控制及多产业链切换供应等实际工程应用场景中，系统通常需要在切换至下一任务模式前实现严格稳定，以避免误差累积导致的性能恶化问题。与传统的渐进收敛控制及依赖初始条件的有限时间控制相比，固定时间收敛控制理论不仅能确保闭环系统的调节时间具有一致上界，而且收敛时间上界估计不依赖系统初始状态。这一特性使其特别适用于对收敛时间有严格要求的飞行器协同制导和伺服电机位置跟踪等控制系统。

然而，传统固定时间收敛方法伴随着极大的初始控制指令需求，实际飞行器和伺服执行结构等被控对象的可控能力通常是受限的，仅仅将固定时间收敛控制理论简单移植应用于实际控制受限系统中是不完善的。不仅如此，对于由多个个体组成的群体系统，协同控制算法的收敛特性同时受本体节点、邻居节点和整个集群网络化系统特性的影响，高动态系统阶数的扩增、复杂不确定系统状态信息的不完备、以及强对抗环境下的恶意干扰因素都将加剧解析和界定期望收敛时间的技术难度。

项目组在国家自然科学基金项目、教育部中国高校产学研创新基金项目、以及思源人工智能科学与技术协同创新联盟开放基金项目的支持下，结合飞行器制导控制系统和电机位置控制系统中的实际任务需求和复杂工况约束因素，深入开展了可降低初始控制量冲击的固定时间收敛控制理论、高阶系统固定时间收敛状

态一致协同控制理论、拒止干扰环境下可固定时间收敛的强鲁棒协同制导技术等系列化研究工作。本成果主要科学发现点包括：

(1) 提出了可降低初始控制量冲击的固定时间收敛控制理论，并应用于永磁电机位置跟踪控制。将已有固定时间收敛控制方法中导致初始控制量极大的双幂次项通过连续切换的方式工作于不同时域区间，并解析界定了所提出固定时间控制方法的收敛时间上界和稳态收敛紧集，使收敛时间上界的估计不依赖集群系统的全局信息。相比已有固定时间收敛控制方法，本成果所提出方法能够显著降低初始控制量冲击。基于此方法研究给出了可实际固定时间收敛的永磁直流力矩电机位置跟踪控制方法，并在永磁直流力矩电机驱动的单轴飞行仿真转台中得到有效验证。在单体对象控制的基础上，将此方法扩展至多个体系统的协同控制，研究给出了可固定时间收敛的一致性协同跟踪控制方法，有力支撑了本项目第一完成人同合肥中科深谷科技发展有限公司联合开发的六永磁同步电机对拖无刷直流电机的多运动体协同控制试验平台。

(2) 高阶系统固定时间收敛状态一致协同控制。

随着现代工程系统向网络化、智能化和集群化方向快速发展，多智能体协同控制在制导控制系统、智能电网系统、工业机器人系统等领域的应用需求更加显著。这些系统往往具有高阶非线性动力学特性，且在实际运行中不可避免地会面临模型不确定性、外部干扰和部分状态不可测等特性。发展高阶系统固定时间协同控制技术，不仅具有重要的学术价值，而且对促进解决智慧能源、智能制造等国家战略需求的关键技术问题具有重要支撑作用。本项目研究提出了高阶系统受限不完备信息条件下的固定时间收敛分布式估计方法、匹配与非匹配干扰同时作用系统时的高阶系统固定时间收敛镇定控制方法，解决了群体系统关键节点状态的分布式全局估计难题和传统固定时间收敛高阶系统控制方法依赖递归设计的局限性。研究成果发表于控制领域顶级期刊 *IEEE Transactions on Automatic Control* 和 *Nonlinear Dynamics*。

(3) 拒止干扰环境下可固定时间收敛的强鲁棒协同制导技术。

多弹同时命中目标的饱和攻击战术是打击具有防御系统保护目标的绝佳方式，剩余飞行时间或弹目距离的一致性收敛程度直接决定能否形成同时逼近的攻击压制优势，在飞行器抵达目标之前实现协同状态误差的稳定收敛是保证攻击时间一致精度的重要先决条件。不仅如此，强对抗反介入/区域拒止作战环境下恶意攻击和干扰手段对协同制导系统的鲁棒性和容错能力也提出了更高的要求，如何在拒止环境下形成稳定可靠的协同制导能力是当前国内外军事领域的重要议题。本项目首次提出了当飞行器执行机构遭受恶意攻击出现部分失效故障时，可固定时间收敛的容错协同制导方法，构建了自适应律补偿执行机构部分失效造成的攻击时间一致性偏差。同时，本项目考虑通信链路被注入虚假错误信息情形，通过引入安全判别系数给出了可对信息失真链路快速识别和自主抑制的抗干扰协同制导方法。研究成果发表于 *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*，相关技术在中国航天科技集团第一研究院第十二研究所、中国航天科

工集团仿真技术有限公司和无人机领域翘楚企业北京卓翼智能科技有限公司得到有效应用。

本项目相关研究成果发表在 IEEE Transactions on Automatic Control、IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems、IEEE/ASME Transaction on Mechatronics 等领域顶级期刊，或航空学报、宇航学报等国内权威期刊，申报国家发明专利 23 项，已授权 9 项，其中一项以实施许可方式转化 15 万元。本项目由西北工业大学、北京航空航天大学 and 天津大学三家单位共同完成，项目成果受到中国科学院院士、IEEE Life Fellow、IEEE Fellow、国家自然科学基金委杰出青年科学基金获得者等著名学者采用“Novel(新颖的)”、“Well-known (有名的)”、“Only (仅有的)”、“Improvement (促进)”、“Developed (发展的)”、“Proposed (提出的)”和“Main Trend (主要趋向)”等词进行肯定评价，本成果相关技术在航空航天科研院所和企事业单位得到有效实践应用和技术推广。

四、客观评价

中国科学院院士、北京航空航天大学郭雷教授在 2022 年发表于 IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 的论文“Finite-Time Refined Anti-disturbance Velocity Tracking Control for Gimbal System of Control Moment Gyros With Harmonic Drive”评价称“As an improvement to the traditional ESO, a sliding mode ESO was developed in [18] to achieve finite-time compensation of the output-effect disturbance in the PMSM. (文献[18]改进了传统扩张状态观测器，发展了一种滑模扩张状态观测器啦实现对输出有影响干扰的有限时间补偿)”。文献[18]为本项目研究成果。

中国科学院唐志共院士在 2024 年发表于宇航学报的论文“一种分布式协同拦截制导方法及半实物仿真验证”中评价称“也有学者将时间协同和距离协同结合起来，主飞行器群组保持剩余时间一致，从飞行器群组保持和主飞行器的距离一致 [12]”，其中文献[12]为本项目研究成果。

IEEE Life Fellow、西班牙塞维利亚大学 Leopoldo G. Franquelo 教授，IEEE Fellow、西班牙塞维利亚大学教授 Sergio Vazquez、IEEE Fellow、瑞士 ABB 公司的 Tobias Geyer 博士联合研究发表于 IEEE Open Journal Of The Industrial Electronics Society 的论文“Long Prediction Horizon FCS-MPC for Power Converters and Drives”中评价称“Among these works, the main trend is the usage of disturbance observers [88], [89] or model-free predictive controllers (MFPC) [90] (在所有这些工作中，主要趋向是使用干扰观测器[88], [89]或不依赖模型的预测控制器 [90]”，其中文献[88]为本项目研究成果。

国家杰出青年科学基金获得者、国家技术发明奖第一完成人、东南大学宋爱国教授在 2022 年发表于 Mechanical Systems and Signal Processing 上的论文 Cascade predictor for a class of mechanical systems under large uncertain measurement delays 中评价称“ There are several well-known kinds of observers, such as linear high gain observer [15,16], sliding mode observer [17,18], and super-twisting observer

[19,20].(存在几类著名的观测器, 比如线性高增益观测器[15,16], 滑模观测器[8], 和超螺旋观测器[19,20])”, 其中文献[17]为本项目研究成果。

国家杰出青年科学基金获得者、北京航空航天大学段海滨教授在 2021 年发表于 Aircraft Engineering and Aerospace Technology 的论文 Active disturbance rejection attitude control of unmanned quadrotor via paired coevolution pigeon-inspired optimization 中评价称 “To improve the robustness of the optimal control strategy of the finite control set, a sliding mode extended state observer is proposed to estimate the disturbance of the output effect (Wu and Li, 2018). In this paper, improved ADRC (IADRC) is developed. A novel non-singular fast terminal sliding mode (NFTSMC) control law is proposed to replace nonlinear state error feedback (NLSEF) control law, by which the tracking error converges in finite time and the control effect is improved (为了改善有限控制集模型预测控制的鲁棒性, 文献(Wu and Li, 2018)中提出了一种滑模扩张状态观测器估计干扰, 在该文中发展了一种改进的自抗扰控制器, 一种新颖的非奇异快速终端滑模控制律被提出用于替换非线性状态误差反馈控制律, 通过这种方式实现了跟踪误差在有限时间内收敛和控制效果的改善)”。文献(Wu and Li, 2018)为本项目研究成果。

飞行器制导控制领域顶级期刊 AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics 副主编、美国密苏里大学信明在发表于 Journal of Franklin Institute 的论文 “Three-dimensional vector guidance law with impact time and angle constraints” 中评价称 “In [27], a distributed cooperative guidance law with appointed impact time was derived under the leader-follower architecture. (文献[27]在主-从式架构下推理出了一种可获得期望攻击时间的分布式协同制导方法)”, 其中文献[27]为本项目研究成果。

航空工业 XX 系统设计技术首席专家梁晓庚总师在发表于 International Journal of Aeronautical and Space Sciences 的论文 “Three-Dimensional Prescribed-Time Impulsive Pinning Cooperative Guidance” 中称代表作 5 “Combining the prescribed-time consensus [28] with axial velocity control, [31] and [32] proposed the prescribed-time cooperative guidance laws for planner engagement. (结合预定时间控制和轴向速度控制, 提出了可预定时间收敛的二维协同制导律)”, 其中文献[31]为本项目研究成果。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

（按照表格所示栏目填写支撑本项目重要科学发现的代表性论文专著详细情况，不超过 8 篇，按重要程度排序。所列论文专著应公开发表 2 年以上即 2023 年 8 月 1 日以前公开发表。所列代表作及论文应以省内单位或个人为主要完成单位，署名第一单位（标号为 1 的单位）应为国内单位。

“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”、“第一作者（含共同第一作者）”和“国内作者”，均应基于论文的全部作者进行填写，不得只填写本项目完成人或少填漏填。

其中，“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”和“第一作者（含共同第一作者）”的姓名表述应与论文原文的署名保持一致，“国内作者”填写作者的中文姓名。

该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的作者的同意，其中，未列入项目主要完成人的第一作者、通讯作者（含共同第一作者、共同通讯作者）已出具知情同意书面签字意见，与其他作者的有关知情证明材料均存档备查。）

序号	论文专著 名称	刊名	作者	年卷页 码（xx 年 xx 卷 xx 页）	发表 时间	通讯 作者	第一 作者	国内作者	他 引 总 次 数	检索 数据 库	知识产权 是否归国 内所有
1	Robust leader-Follower Cooperative Guidance Under False-Data Injection Attacks	IEEE Transactions on Aerospace and Electronic	Li Guofei, Zuo Zongyu	59(4):451 1-4524	2023- 08-01	Zuo Zongy u	Li Guofei	李国飞，左 宗玉	15	SCI	是

2	Practical Fixed-Time position Tracking Control of Permanent Magnet DC Torque Motor Systems	IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	Wu Yunjie, Li Guofei, Zuo Zongyu, Liu Xiaodong, Xu Pengya	26(01):563-573	2021-02-01	Li Guofei	Wu Yunjie	吴云洁, 李国飞, 左宗玉, 刘晓东, 许朋亚	16	SCI	是
3	Adaptive fault-tolerant cooperative guidance law for simultaneous arrival	Aerospace Science and Technology	Li Guofei, Wu Yunjie, Xu Pengya	82-83(2018):243-251	2018-01-01	Li Guofei	Li Guofei	李国飞, 吴云洁, 许朋亚	37	SCI	是
4	Distributed Consensus Observer for Multiagent Systems With High-Order Integrator Dynamics	IEEE Transactions on Automatic Control	Zuo Zongyu, Michael Defoort, Tian Bailing, Ding Zhengtao	65(4):1771-1778	2020-04-01	Ding Zhengtao	Zuo Zongyu	左宗玉, 田栢苓	88	SCI	是
5	Fixed-time stabilization of high-order integrator systems with mismatched disturbances	Nonlinear Dynamics	Tian Bailing, Lu Hanchen, Zuo Zongyu, Wang Hong	(2018)94:2889-2899	2018-08-30	Tian Bailing	Tian Bailing	田栢苓, 鲁瀚辰, 左宗玉, 王宏	66	SCI	是
合 计									222		

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
李国飞	1	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	本项目中可降低初始控制量冲击的固定时间收敛控制理论、拒止干扰环境下可固定时间收敛的强鲁棒协同制导技术的主要完成人，代表作 1, 2, 3 作者。
左宗玉	2	无	教授	北京航空航天大学	北京航空航天大学	本项目中高阶系统固定时间收敛状态一致协同控制理论、拒止干扰环境下可固定时间收敛的强鲁棒协同制导技术的主要完成人，代表作 1, 2, 4, 5 作者。
田栢苓	3	无	教授	天津大学	天津大学	本项目中高阶系统固定时间收敛状态一致协同控制理论的主要完成人，代表作 4 和 5 作者。
吴云洁	4	无	教授	北京航空航天大学	北京航空航天大学	本项目中可降低初始控制量冲击的固定时间收敛控制理论的主要完成人，代表作 2 和 3 作者。

七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	项目第一完成人李国飞所在单位，主要贡献可降低初始控制量冲击的固定时间收敛控制理论、拒止干扰环境下可固定时间收敛的强鲁棒协同制导技术
北京航空航天大学	2	项目第二完成人左宗玉，第四完成人吴云洁所在单位，主要贡献可降低初始控制量冲击的固定时间收敛控制理论、高阶系统固定时间收敛状态一致协同控制理论、拒止干扰环境下可固定时间收敛的强鲁棒协同制导技术
天津大学	3	项目第三完成人田栢苓所在单位，主要贡献高阶系统固定时间收敛状态一致协同控制理论

八、完成人合作关系说明

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文	李国飞（1）、左宗玉（2）、吴云洁（4）	2021-02-01	Practical Fixed-Time position Tracking Control of Permanent Magnet DC Torque Motor Systems	代表作论文 2
2	论文	李国飞（1）、左宗玉（2）	2023-02-15	Robust leader-Follower Cooperative Guidance Under False-Data Injection Attacks	代表作论文 1
3	论文	左宗玉（2）、田栢苓（3）	2020-04-01	Distributed Consensus Observer for Multiagent Systems With High-Order Integrator Dynamics	代表作论文 4
4	论文	左宗玉（2）、田栢苓（3）	2018-08-30	Fixed-time stabilization of high-order integrator systems with mismatched disturbances	代表作论文 5