

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

网络化系统的稳定控制理论及其电力调频应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：该项目研究聚焦于网络化系统稳定分析与镇定控制理论及在电力系统频率调整中的应用，面向传统的分析条件过保守使闭环稳定域难界定、设计条件过苛刻使控制器增益难获取、优化求解过复杂使系统性能难提升、收敛时间过长使性能指标难优化的全新挑战，针对网络化系统中诱导时滞可变、采样周期抖动和警报阈值约束等问题，提出了能解决复杂网络化系统的稳定性分析、可镇定控制、有限时间收敛等开放难题的方法体系，形成了递归网络系统的时滞依赖稳定与估计、网络化系统的可镇定控制与快速最优一致、时滞电网系统的闭环稳定与负荷频率调控等重要发现与科学方案。项目组将理论成果转化为代表性论著 6 篇，在 IEEE TNNLS、IEEE TFS、IEEE TII、IEEE TPS、Systems Control Letters 等国际知名期刊上发表了高水平论文，在国际著名出版公司美国学术出版社 Academic Press 撰写了创新性专著，受到了领域知名专家和国内外同行的正面引用与高度评价。项目所获成果推动了相关科学研究的发展，具有很强的学科前瞻性，对典型网络化系统的稳定性分析与先进性控制及广域电网的负荷频率调节提供了理论指导与技术方案。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。特提名为陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介

该项目属于自动控制应用理论与工程控制论等多学科交叉的基础研究领域。2024 年，习总书记在中共中央政治局就新能源技术与我国能源安全进行的第十二次集体学习时强调，需“推进电网基础设施智能化改造”，提升清洁能源接纳与调控能力。网络化作为现代信息技术的核心特征，整合了通信与控制功能的复杂动态网络化系统，正逐步成为能源互联网稳定、安全、高效、智能运行的理论基础与实现路径。现代电力系统深度融合计算、通信与控制技术，呈现出复杂网络化特征，维持其功率平衡和频率稳定是其核心要求。频率波动易导致发电机组脱离正常运行状态，影响电力系统稳定性，甚至引发连锁故障。在信息物理深度融合的网络化电力系统中，非线性、诱导时滞、变采样周期及警报阈值约束等因素耦合共存，常导致系统性能恶化甚至失稳。为确保广域电网闭环系统稳定运行并具备优良动态性能，发展低保守性的稳定性分析准则与高效率的负荷频率控制策略，已成为系统安全经济运行的关键需求。因此，开展网络化系统稳定控制及其在电力系统频率调节中的应用研究至关重要。

稳定性是设计动态网络化系统的首要目标,频率调节是保障电力系统稳定运行和智能控制的关键环节。在传统的网络化动态系统稳定性分析判据与控制器设计方法及电力系统的稳定分析与频率调控中,系统信息利用太少、泛函导数界定太松、决策变量引入太多,导致分析条件过保守使闭环稳定域难界定、设计条件过苛刻使控制器增益难获取、优化求解过复杂使系统性能难提升。为解决这些瓶颈问题,在国家自然科学基金“计及攻击的自动发电信息物理系统网络化控制与优化研究”与“基于凸组合技术的时滞依赖稳定性分析与应用”和陕西省自然科学基金基础研究计划“含时延电网系统时滞依赖稳定分析与广域控制”等持续资助下,该项目提出了复杂动态网络化系统稳定性分析与控制器设计的非线性凸组合技术框架,提供了将无穷维难题等效转化为可解有限维问题的方法体系,获得了低保守的参数依赖稳定性分析准则和高效率的快速优化控制律综合策略,促进了理论成果在多域电网系统负荷频率智能调控中的应用研究,取得了主要包括以下三方面的系列学术创新及重要科学发现。

1. 阐明了递归神经网络的平衡点稳定性机理,发现了状态估计鲁棒重构的新方法。针对局域和静态递归神经网络,提出了一类非线性凸组合技术框架即二次凸组合,构造带负定项的增广 Lyapunov-Krasovskii(L-K)能量泛函分析了时变时滞递归神经网络平衡点处的稳定性,放宽了激活函数的约束条件,在广义二次凸组合框架下降低了递归网络稳定性判据的保守性,扩展了新型的重构状态估计器,改善了递归网络系统状态估计的鲁棒性能,为扩大电力系统闭环稳定裕度提供了新技术。

2. 揭示了网络化模糊系统的可镇定控制规律,发展了快速最优一致控制的新方案。针对网络环境下非线性系统,提出了一种松弛性更强的弹性模糊稳定控制方法,引入新型时变平衡矩阵调节不同单项式的正负项,设计了切换型增益调度控制策略,解决了阈值触发条件难满足的弹性控制难题;针对网络化线性自主系统,提出了可精确指定收敛时间的运动规划方法,设计了依赖实时状态信息的闭环控制律,解决了有限时间最优一致性控制难题,为提升电力系统频率调控性能提供了新途径。

3. 给出了多域电力系统的凸组合稳定性准则,发掘了电网频率智能调控的新思路。针对广域电网系统,建立了电力系统在互联环境下的多区域负荷频率调控模型,基于科学发现 1 和 2 的放松稳定判据和智能控制策略设计了比例+积分型负荷频率控制方案,考虑了各控制区域间的联络线功率交换过程,采用混合非线性凸组合思想构造了增广能量泛函,推导了广域电力系统的闭环稳定性判据,实现了自动发电控制系统负荷频率智能调节的功能,为信息物理融合电网的安全经济运行提供了新方向。

本项目申请人在 IEEE 汇刊和国内外顶刊等发表了系列高水平论文。项目组 5 篇代表性论文的 SCI 总他引次数为 608,单篇最高 SCI 他引高达 187 次,得到了国内外权威科研机构学者的正面引用与高度评价。中国科学院院士管晓宏和欧洲科学院院士、世界科学院院士、香港城市大学陈关荣评价项目组论文方法更好

地维护电力系统的经济性和安全性。管晓宏院士单独评价项目成果“具有重要理论意义”。中国工程院院士王耀南借鉴了项目组网络化系统模糊弹性镇定控制方法，提出了增强型抗噪归零神经网络模型。加拿大工程院院士、加拿大工程研究院院士、IEEE TIE 主编 Yang Shi 评价项目组研究提供了有效的时滞依赖稳定性分析方法论。项目成果还得到了加拿大皇家科学院院士 W. Pedrycz，加拿大工程院院士 Peter X. Liu、Biao Huang，美国国家发明家科学院院士 F. L. Lewis、Mengchu Zhou，英国爱丁堡皇家学会院士、马其顿科学艺术院院士、欧洲科学院院士、Chaos 主编 J. Kurths，塞尔维亚工程院院士 G. M. Dimirovski，新加坡工程院院士 Shuzhi Sam Ge、Changyun Wen、Lihua Xie，俄罗斯工程院外籍院士、欧洲科学与艺术学院院士、欧洲科学院院士、IEEE TCYB/TSMCS 期刊曾任主编 C. L. Philip Chen，俄罗斯工程院外籍院士、IEEE TII 共同主编岳东，韩国科学技术院院士 J. Park，日本工程院外籍院士 Yan Shi，南非国家科学院院士 Qing-Guo Wang，立陶宛科学院院士、巴基斯坦科学院院士曹进德，国际系统与控制科学院院士姜斌、Journal of the Franklin Institute 主编 J. Lam，IEEE TCYB 主编 Peng Shi，IEEE SMC 杂志主编 Tingwen Huang，国际欧亚科学院院士、IEEE TNNLS 主编宋永端，欧洲科学院院士、IEEE-CAA JAS 主编 Qing-Long Han，欧洲科学与艺术院院士谢旻，欧洲科学院院士王钧、刘德荣、姜钟平、刘国平，IEEE 终身会士、IEEE TPS 主编 Ian A. Hiskens，IEEE 会士 P. Fiorini、E. Fridman、M.A. Sotelo、K. Soummya、C. Buccella、C. Cecati、A. Davoudi、M. Egerstedt、W.E. Dixon、S.V. Kulkarni 等知名学者的正面评价。

依托该项目，第一完成人获得了陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖，中国自动化学会自然科学奖三等奖，韩国 ICROS 协会、陕西省及西安市自然科学优秀学术论文奖等，指导研究生荣获陕西省优秀毕业生；第二完成人获得了国家自然科学基金优秀青年基金，中国自动化学会青年科技奖，中国自动化学会自然科学奖二等奖，担任 IEEE TFS/TII/TCYB 期刊编委等；第三完成人获得了陕西省自然科学优秀学术论文奖，与第一完成人合作申请了国家自然科学基金面上项目；也授权了相关代表性国家及国际发明专利和软件著作权十余项，并将其应用于秦创原国家高新技术企业的智能产品系统、华能集团铜川照金煤电公司的自动发电控制系统和中国航天科技集团西安航天动力测控技术研究所的智能配电系统等。

四、客观评价

本项目组的 6 篇代表性论著得到了 50 多个国家和地区、30 多所全球排名百位的国际名校、40 余位院士、60 余位会士、20 余位主编的正面评价。统计结果如下表。

表 1 项目 5 篇代表性论文的引用统计表

引文单位	麻省理工学院、帝国理工学院、密歇根大学、南洋理工大学、阿尔伯塔大学、阿德莱德大学、苏黎世联邦理工、伦敦国王学院、卡内基梅隆大学、香港大学、香港城市大学、延世大学、浦项科技大学、巴黎萨克雷大学、洪堡
------	--

	大学、新南威尔士大学、阿齐兹国王大学、丹麦科技大学、悉尼科技大学、圣保罗大学、清华、中科大、浙大、复旦、上交大等全球排名前 100 大学。
引用学者	管晓宏、王耀南、陈关荣、W. Pedryc、F. L. Lewis、J. Kurths、G.M. Dimirovski、J. Lam、Peter X. Liu、Sam S. Ge、Peng Shi、Yang Shi、J. H. Park、C. L. Philip Chen、Qing-Long Han、Qing-Guo Wang、Zhong-Ping Jiang、Yan Shi、Biao Huang、Changyun Wen、Mengchu Zhou、Lihua Xie、Tingwen Huang、谢旻、王钧、宋永端、曹进德、岳东、刘德荣、刘国平、姜斌、王震等中外院士。
	Ian A. Hiskens、P. Fiorini、E. Fridman、M.A. Sotelo、H.-K. Lam、C. Cecati、A. Davoudi、K. Soummya、C. Buccella、M. Egerstedt、W.E. Dixon、S.V. Kulkarni、Wen-June Wang、Le Yi Wang、Wei Xing Zheng、Hong Wang、Jinhua She、Shun-Feng Su、Peng Wang、Wei Ren、曾志刚、吴敏、侯忠生、曹一家、关新平、邱剑彬、华长春、窦春霞、谢开贵、李志武等 IEEE/ IFAC 会士。

针对科学发现 1 的客观评价：加拿大工程院院士、加拿大化工研究院院士、**Control Engineering Practice** 荣誉主编、阿尔伯塔大学 Biao Huang 教授等合作发表的综述论文(JPS, 2018, 代表性引文 1)指出代表性论著 1(对应文献[118])的二次凸组合是网络系统时变时滞估计的三大技术之一，将[118](2013)和[119](2014)作为二次凸组合的经典文献。其又在发表于 IEEE TCYB 的论文将代表性论著 1 作为时变参数估计的经典范例。新加坡工程院院士、IEEE TIE 共同主编、南洋理工大学 Changyun Wen 教授和国际欧亚科学院院士、IEEE TNNLS 主编宋永端教授等合作发表的论文(IEEE TNNLS, 2017, 代表性引文 2)将代表性论著 1 作为神经网络自适应控制的代表性文献。塞尔维亚工程院院士、欧洲科学院院士 G. M. Dimirovski 教授和国际系统与控制学院院长/院士、欧洲科学院院士、IEEE TCYB 主编、澳大利亚阿德莱德大学 Peng Shi 教授等合作发表的论文多次指出代表性论著 1 提供了一种适用于时滞神经网络系统性能分析的 LKF 构造新方法，即含三重积分项的 LKF。国际系统与控制科学院院士、欧洲科学与艺术院院士、美国德州农工大学卡塔尔分校 Tingwen Huang 教授和 IEEE 会士曾志刚教授等合作发表的论文将代表性论著 1 作为分布式时滞的典型研究。南非科学院院士、ISA 会刊常务副主编 Qing-Guo Wang 教授和 IEEE 会士吴敏教授等合作发表的论文评价代表性论著 1 设计了“effective LKFs”，将其作为针对时滞神经网络构造增广 L-K 泛函并获得低保守稳定性判据的代表性文献。

针对科学发现 2 的客观评价：中国工程院院士王耀南教授等发表的论文(IEEE TFS, 2023, 代表性引文 3)基于代表性论著 2 提出的模糊弹性控制方法，设计了一种增强型抗噪归零神经网络模型。加拿大皇家科学院院士、IEEE 终身会士、加拿大阿尔伯塔大学 W. Pedrycz 教授和 IEEE 会士、澳门科技大学李志武教授等发表的论文(IEEE TFS, 2023, 代表性引文 4)指出代表性论著 2 提出了一种基于切换型增益调度控制律的新型松弛鲁棒模糊镇定方法又在合作发表的论文正面引用了代表性论著 2 中网络化模糊系统弹性控制的优异成果。美国国家发明家科学院院士、新泽西州立大学 Mengchu Zhou 教授等发表的论文(IEEE TSMCS,

2017, 代表性引文 5)指出**代表性论著 3**设计出一种网络化自主体系统的有限时间最优控制律。Peng Shi 教授等发表的论文指出**代表性论著 2**提出了能降低性能分析与控制综合难度的成熟技术。加拿大工程院院士、卡尔顿大学 Peter X. Liu 教授等发表的论文指出**代表性论著 3**设计的控制方案使动态系统实现快速稳定。英国爱丁堡皇家学会院士、马其顿科学艺术院院士、欧洲科学院院士 J. Kurths 教授和 Tingwen Huang 教授等合作发表的论文参考**代表性论著 2**提出的切换型增益调度控制律性质, 设计了多自主体系统的协同控制策略。新加坡工程院院士 Lihua Xie 教授, 立陶宛科学院院士、巴基斯坦科学院院士曹进德教授, 俄罗斯工程院外籍院士、欧洲科学院院士、欧洲科学与艺术院院士 C. L. Philip Chen 教授等发表的论文均对**代表性论著 3**的快速控制算法进行了正面评价。

针对科学发现 3 的客观评价: **IEEE 终身会士、IEEE TPS 主编、美国密歇根大学安娜堡分校 Ian A. Hiskens 教授和国家级青年人才、清华大学长聘副教授胡泽春**等合作发表的论文(IEEE TPS, 2020, 代表性引文 6)多次引用了**代表性论著 4 和 5**, 指出**代表性论著 4 和 5**分别引入的截断无穷级数积分不等式和 B-L 不等式集成倒数凸组合的方法可降低时滞裕度估计的保守性, 该论文还直接使用这两篇论文中多域电网系统多传输时滞的简化处理方法。**IEEE 会士、以色列特拉维夫大学 E. Fridman 教授**等发表的论文(IEEE TPS, 2020, 代表性引文 7)引用了**代表性论著 4 和 5**, 指出为克服网络时延的影响, **代表性论著 4 和 5**分别基于截断无穷级数积分不等式和 B-L 不等式提出了频率调节稳定性新判据。**中国科学院院士、IEEE 终身会士管晓宏教授, 欧洲科学院院士、世界科学院院士、IEEE 终身会士、香港城市大学陈关荣教授和国家级领军人才、浙江大学吴争光教授**等合作发表的论文(IEEE TASE, 2023, 代表性引文 8)指出**代表性论著 5**研究的负荷频率控制设计方法是高效和鲁棒的重要频率控制策略, 能更好维持电网系统的经济性和安全性。**IEEE 会士、西班牙阿尔卡拉大学 M. A. Sotelo 教授**等发表的论文指出**代表性论著 4**的负荷频率控制方法可有效避免电网出现较大的频率波动。**IEEE 会士、印度理工学院孟买分校 S. V. Kulkarni 教授**等发表的论文中指出**代表性论著 4**基于线性矩阵不等式给出了电网负荷频率控制闭环系统的新型稳定性判据。**俄罗斯工程院外籍院士、IEEE TII 共同主编、IEEE 会士岳东教授**等发表的论文指出**代表性论著 5**针对时滞电力系统设计的比例+积分控制器保守性较低。

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）

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	Stability analysis for neural networks with time-varying delay based on quadratic convex combination	IEEE Transac tions on Neural Network s and Learnin g Systems	Huaguang Zhang, Feisheng Yang, Xiaodong Liu, Qingling Zhang	2013 年 24 卷 513-521 页	20 13 年 01 月 14 日	Hu ag ua ng Zh an g	Hu ag ua ng Zh an g	张化光， 杨飞生， 刘晓东， 张庆灵	176	SCI	是

2	Relaxed resilient fuzzy stabilization of discrete-time Takagi-Sugeno systems via a higher order time-variant balanced matrix method	IEEE Transactions on Fuzzy Systems	Xiangpeng Xie, Cong Wei, Zhou Gu, Kaibo Shi	2022 年 30 卷 5044-5050 页	2022 年 11 月 1 日	Xi an gp en g Xi e	Xi an gp en g Xi e	解相朋，魏聪，顾洲，施开波	187	SCI	是
3	Finite-time formation control for linear multi-agent systems: A motion planning approach	Systems & Control Letters	Yongfang Liu, Zhiyong Geng	2015 年 85 卷 54-60 页	2015 年 10 月 08 日	Yo ng fa ng Li u	Yo ng fa ng Li u	刘永芳，耿志勇	88	SCI	是

4	New stability criteria of delayed load frequency control systems via infinite-series-based inequality	IEEE Transactions on Industrial Informatics	Feisheng Yang, Jing He, Dianhui Wang	2018 年 14 卷 231-240 页	2017 年 09 月 12 日	Feisheng Yang	Feisheng Yang	杨飞生，贺静，王殿辉	83	SCI	是
5	Further improvement on delay-dependent load frequency control of power systems via truncated B-L inequality	IEEE Transactions on Power Systems	Feisheng Yang, Jing He, Quan Pan	2018 年 33 卷 5062-5071 页	2018 年 03 月 16 日	Feisheng Yang	Feisheng Yang	杨飞生，贺静，潘泉	74	SCI	是

6	Control Strategy for Time-Delay Systems Part II: Engineering Applications-Chapter Five - State estimation strategy for continuous-time systems with time-varying delay via a novel L-K functional	A Volume in Emerging Methodologies and Applications in Modelling	Feisheng Yang, Jing He, Peipei Kang	2021 年 111-141 页	2021 年 01 月 29 日	Feisheng Yang	Feisheng Yang	杨飞生，贺静，康沛沛	0		是
7											
8											
合 计									608		

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
杨飞生	1	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	针对复杂动态网络化系统，提出了稳定性分析与控制器设计的非线性凸组合技术框架，提供了将无穷维难题等效转化为可解有限维问题的方法体系，实现了多域电网系统负荷频率智能调控。对应第一和第三项科学发现。是代表性论著 1、4、5、6 的主要完成人，代表性论著 4、5、6 的通讯作者。作为本成果的负责人，是项目的选题、组织、设计与直接领导者。
解相朋	2	副院长	教授	南京邮电大学	南京邮电大学	针对网络化非线性模糊系统，为更易满足弹性模糊镇定的警报阈值条件，首次引入新型时变平衡矩阵，设计了切换型增益调度控制律，降低了弹性模糊控制的保守性。对应第二项科学发现，是代表性论著 2 的第一作者及通讯作者。

刘永芳	3	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	针对线性动态多智能体系统，将其看作非线性网络化系统的线性化模型，基于庞特里亚金极大值原理，首次提出了一种使多智能体系统在有限时间内达到期望编队构型的最优控制律。对应第二项科学发现，是代表性论著 3 的第一作者及通讯作者。
	4					
	5					
	6					

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	西北工业大学作为本项目的第一完成单位，在项目的实施过程中，十分重视并积极支持课题的研究工作，对该项目所需要的政策、人力、物力和工作时间等条件给予保障，为代表性论文著作的发表提供了必要的科研环境保障，对本项目每个科学发现做出了很大贡献。
南京邮电大学	2	本项目第二完成人解相朋教授的部分研究工作在南京邮电大学完成并取得突破。针对网络化非线性模糊系统，提出了一种松弛性更强的弹性模糊稳定控制方法，引入新型时变平衡矩阵调节不同单项式的正负项，设计了切换型增益调度控制策略，解决了阈值条件难满足的弹性镇定控制难题。对第二项科学发现做出了直接贡献。南京邮电大学对本项目所需要的政策、人力、物力和时间等条件给予充分保障。
	3	

八、完成人合作关系说明

本项目第一完成人是西北工业大学杨飞生，牵头负责本项目的研究工作，与其余两位完成人合作关系非常紧密，持续开展了近十年研究。

本项目第二完成人南京邮电大学解相朋教授与本项目第一完成人杨飞生副教授攻博期间为同一博士生导师，已合作多年，共同开展网络化系统稳定分析与镇定控制研究，已合作发表学术期刊论文多篇。

本项目第三完成人西北工业大学刘永芳副教授与本项目第一完成人杨飞生合作顺利结题了一项国家自然科学基金面上项目(批准号 61973251)，进一步发展了代表性论著 5 的工作。