

拟申报奖种：自然科学奖

完成人：王龙、谢广明、肖峰、孙元功、郑元世

项目名称：网络化动态系统的分析与控制

推荐专家意见：

姓名：程代展

工作单位：中国科学院数学与系统科学研究院

技术职称：研究员

学科专业：系统科学

推荐意见：该项目从节点动力学、动态性能、结构属性和网络效应等方面对网络化动态系统协同控制中若干核心基础问题进行了深入的研究，取得了一系列具有国际影响力的创新性成果。主要成果如下：构建了两类更接近实际物理对象特性的系统结构，分别设计了相应的局部控制协议并严格证明其收敛性；设计了连续状态反馈下的精确一致性协议，建立了网络化动态系统解决精确一致性问题的判据准则；通过定义切换序列的连接，构建了一个切换序列，建立了具有切换拓扑结构的网络化动态系统的可控性判据；针对拓扑结构时变和存在时变通信时滞的网络化动态系统，提出了局部控制协议设计方案，建立了解决一致性协同的判据准则；提出了信息采样下系统的控制协议设计方案，证明了所设计协议能在宽松条件下有效解决一致性协同问题。该项目所形成的理论和成果成功应用于多机器人系统的编队控制，在学术界产生重要影响，为发展网络化动态系统的分析与控制提供了重要的理论基础和关键技术。成果得到国内外专家学者的高度认可，论文被多国科学院或工程院院士和 70 多位 IEEE Fellow 引用，8 篇代表性论文 SCI 他引 900 次，Google 学术他引 2142 次，ESI 高被引论文 5 篇。该项目部分成果获 2015 年教育部自然科学一等奖。第一完成人获长江学者称号，是国家杰出青年基金获得者。完成人获 Elsevier 高被引学者称号，国家优秀青年基金，山东省杰出青年基金等学术荣誉。

姓名：李伯虎

工作单位：北京航空航天大学

技术职称：研究员

学科专业：计算机控制

推荐意见：该项目从节点动力学、动态性能、结构属性和网络效应等方面对网络化动态系统协同控制中若干核心基础问题进行了深入的研究，取得了一系列具有国际影响力的创新性成果。主要成果如下：构建了两类更接近实际物理对象特性的系统结构，分别设计了相应的局部控制协议并严格证明其收敛性；设计了连续状态反馈下的精确一致性协议，建立了网络化动态系统解决精确一致性问题的判据准则；通过定义切换序列的连接，构建了一个切换序列，建立了具有切换拓扑结构的网络化动态系统的可控性判据；针对拓扑结构时变和存在时变通信时滞的网络化动态系统，提出了局部控制协议设计方案，建立了解决一致性协同的判据

准则；提出了信息采样下系统的控制协议设计方案，证明了所设计协议能在宽松条件下有效解决一致性协同问题。该项目所形成的理论和成果成功应用于多机器人系统的编队控制，在学术界产生重要影响，为发展网络化动态系统的分析与控制提供了重要的理论基础和关键技术。成果得到国内外专家学者的高度认可，论文被多国科学院或工程院院士和 70 多位 IEEE Fellow 引用，8 篇代表性论文 SCI 他引 900 次，Google 学术他引 2142 次，ESI 高被引论文 5 篇。该项目部分成果获 2015 年教育部自然科学一等奖。第一完成人获长江学者称号，是国家杰出青年基金获得者。完成人获 Elsevier 高被引学者称号，国家优秀青年基金，山东省杰出青年基金等学术荣誉。

姓名：桂卫华

工作单位：中南大学

技术职称：教授

学科专业：自动控制

推荐意见：该项目从节点动力学、动态性能、结构属性和网络效应等方面对网络化动态系统协同控制中若干核心基础问题进行了深入的研究，取得了一系列具有国际影响力的创新性成果。主要成果如下：构建了两类更接近实际物理对象特性的系统结构，分别设计了相应的局部控制协议并严格证明其收敛性；设计了连续状态反馈下的精确一致性协议，建立了网络化动态系统解决精确一致性问题的判据准则；通过定义切换序列的链接，构建了一个切换序列，建立了具有切换拓扑结构的网络化动态系统的可控性判据；针对拓扑结构时变和存在时变通信时滞的网络化动态系统，提出了局部控制协议设计方案，建立了解决一致性协同的判据准则；提出了信息采样下系统的控制协议设计方案，证明了所设计协议能在宽松条件下有效解决一致性协同问题。该项目所形成的理论和成果成功应用于多机器人系统的编队控制，在学术界产生重要影响，为发展网络化动态系统的分析与控制提供了重要的理论基础和关键技术。成果得到国内外专家学者的高度认可，论文被多国科学院或工程院院士和 70 多位 IEEE Fellow 引用，8 篇代表性论文 SCI 他引 900 次，Google 学术他引 2142 次，ESI 高被引论文 5 篇。该项目部分成果获 2015 年教育部自然科学一等奖。第一完成人获长江学者称号，是国家杰出青年基金获得者。完成人获 Elsevier 高被引学者称号，国家优秀青年基金，山东省杰出青年基金等学术荣誉。

项目简介

随着工程系统规模的日益扩大,大量物理设备作为节点通过各种通信方式连接成动态演化网络,构成了网络化动态系统。网络节点之间实时发生着各种相互作用和相互影响,导致系统的复杂程度迅速增加。现有的控制理论与方法已经不能完全适应其发展变化,迫切需要发展面向网络化动态系统的新理论与新方法。

在国家杰出青年基金和若干其他基金项目资助下,由师生关系自然形成的团队经过十余年的协同攻关,从节点动力学、动态性能、结构属性和网络效应等方面对网络化动态系统协同控制中若干核心基础问题进行了全面深入研究,取得了关键性突破,为发展网络化动态系统的协同控制提供了坚实的基础理论和原创性关键技术。项目主要创新点如下:

- 1) **网络化动态系统复杂节点动力学和动态性能:** 提出了两类更接近实际物理对象特性的系统结构,针对其协同控制问题,设计了对应的局部控制协议并严格证明了所提协议的收敛性;设计了连续状态反馈下的精确一致性协议,建立了系统解决精确一致性协同的判据准则,揭示了系统收敛时间与通信拓扑图的内在联系。
- 2) **网络化动态系统结构属性的研究:** 提出了切换序列的可达集、切换序列的链接等新概念和新工具,建立了两个切换序列链接之后的可达集与原切换序列的可达集之间的定量关系,构建切换序列生成了整个系统的能控状态空间;利用列空间、循环不变子空间的概念和几何空间方法,建立了网络化动态系统更一般的可控性判据,揭示了通信拓扑图的连接边权重对系统可控性的重要影响。
- 3) **网络化动态系统中网络效应的研究:** 针对拓扑结构时变、时变通信时滞等网络效应,提出了系统解决协同问题的局部控制协议设计方案,通过构建等价的增广系统和树形变换法,克服了时变网络效应对这类系统的分析和控制带来的困难,建立了网络化动态系统解决一致性协同的判据准则。
- 4) **网络化动态系统的采样控制:** 针对信息采样下的网络化动态系统,提出了时滞依赖的局部控制协议设计方案,证明了所设计的协议在宽松条件下可有效解决一致性协同问题,揭示了系统异步一致性控制与网络时滞之间的内在关联。

项目大部分论文都发表在系统与控制领域的主流期刊上,包括IEEE Transactions on Automatic Control、Automatica等顶级期刊论文。**8篇代表性论文SCI他引900次, Google学术他引2142次, ESI高被引论文5篇,单篇SCI他引最高173次。**成果得到了美国工程院院士T. Basar、 J. Tsitsiklis、澳大利亚科学院前院长B.D.O. Anderson、澳大利亚两院院士D.J. Hill、德国科学院院士W. Marquardt、匈牙利科学院院士T. Vicsek、巴西科学院院士G. Celso、欧洲科学院院士A. Barabasi、G. Chen等院士以及70多位IEEE Fellow等知名学者的正面评价,如美国东北大学A. Barabasi教授和麻省理工学院J. Slotine教授在Nature上发表的论文明确指出本项目的部分成果为具有“**开创性概念的工作**”。

本项目部分成果获 **2015年教育部自然科学一等奖**。第一完成人获教育部长江学者称号,是国家杰出青年基金获得者。项目完成人中2人入选 Elsevier 高被引学者称号,1人获得国家优秀青年基金,1人获得山东省杰出青年基金。

客观评价

本项目大部分论文都发表在系统与控制领域主流期刊上，包括IEEE Transactions on Automatic Control、Automatica、Systems & Control Letters等控制领域权威期刊论文。**8篇代表性论文SCI他引900次，Google学术他引2142次，ESI高被引论文5篇，单篇SCI他引最高173次**。引用者来自六十多个国家或地区的高校，其中包括哈佛大学、普林斯顿大学、麻省理工学院、斯坦福大学、加州理工学院、澳大利亚国立大学、瑞典皇家理工学院等著名高校，包括中国、美国、加拿大、德国、澳大利亚、匈牙利、西班牙等国家科学院或工程院院士和**70多位IEEE Fellow**，他们对项目成果给予正面评价。

1. 欧洲科学院院士、美国东北大学A. Barabasi教授的评价

冯·诺依曼奖获得者、欧洲科学院院士、美国东北大学A. Barabasi教授和美国麻省理工学院J. Slotine教授在国际顶级期刊Nature上发表的论文Controllability of Complex Networks正面评价了本项目代表性论文8，明确指出代表性论文8为具有“开创性概念的工作”（“...pioneering conceptual work¹⁷⁻²³...”），摘自Nature, 473: 167-173, 2011，其中文献[19]是本项目代表性论文8）。

2. 匈牙利科学院院士、罗兰大学T. Vicsek教授的评价

匈牙利科学院院士、美国物理学会Fellow、匈牙利罗兰大学T. Vicsek教授在国际杂志Physics Reports (IF: 16.24) 上发表的论文Collective Motion正面评价了本项目代表性论文5，明确指出代表性论文5“发现在有向网络中存在生成树是起决定性的”（“...Xiao and Wang (2006) found the existence of spanning trees to be crucial in directed graphs...”），摘自Physics Reports, 57:71-140, 2012，其中Xiao and Wang (2006)即为本项目代表性论文5）。

3. IEEE Fellow、IEEE控制系统协会前主席M.E. Valcher教授的评价

IEEE Fellow、IEEE控制系统协会前主席、意大利帕多瓦大学M.E. Valcher教授在其论文Reachability Properties of Single-Input Continuous-Time Positive Switched Systems中明确指出代表性论文4“率先研究了...”并“构造性的证明了存在一个切换序列保证系统可达”（“...reachability, controllability and observability were first addressed [8], [13], [21], [26]...”和“...it has been proved (and the proof is a constructive one) [26] that reachability ensures the existence of a single switching sequence along which every state can be reached...”），摘自IEEE Transactions on Automatic Control, 55(5):1117-1130, 2010，其中[26]为本项目的代表性论文4）。

4. IEEE Life Fellow、澳大利亚科学院前院长B.D.O. Anderson教授的评价

IEEE Life Fellow、澳大利亚科学院前院长、前IFAC主席、澳大利亚科学院院士、美国科学院外籍院士、澳大利亚国立大学B.D.O. Anderson教授多次对项目成果进行引用正面评价，将代表性论文1作为精确一致性的重要文献（“...finite time consensus algorithm has been extensively studied in, for example, [20, 21].”，摘自International Journal of Robust and Nonlinear Control, 26:2824-2844, 2016，其中文献[20]为本项目的代表性论文1）

5. IEEE Fellow、瑞典皇家理工学院K.H. Johansson教授的评价

IEEE Fellow、瑞典皇家理工学院K.H. Johansson教授在论文Distributed Control of Networked Dynamical Systems: Static Feedback, Integral Action and Consensus中正面评价了本项目的代表性论文2并“推广该结果”（“...The following theorem generalizes the results in [29]...” ，摘自IEEE Transactions on Automatic Control, 59(7):1750-1764, 2014, 其中[29]为本项目的代表性论文2）。

6. IEEE Fellow、澳大利亚两院院士D.J. Hill教授的评价

IEEE Fellow、澳大利亚科学院院士、工程院院士、瑞典皇家理工学院外籍院士、澳大利亚悉尼大学D.J. Hill教授在论文Multi-Agent Systems with Dynamical Topologies: Consensus and Applications中正面评价了代表性论文5处理时延的方法，声称对于时延不为零的情况，无穷个随机矩阵的乘积的方法很难直接应用于离散时间网络化动态系统的一致性分析，而代表性论文5“推广这个方法到时变时延的情况”（“... Xiao and Wang [18] generalized this method to the case of time-varying delays...” ，摘自IEEE Circuits and Systems Magazine, 13(3):21-34, 2013, 其中文献[18]为代表性论文5）。

7. IEEE Fellow、IFAC Fellow F. L. Lewis教授的评价

IEEE Fellow、IFAC Fellow 美国德克萨斯大学Frank L. Lewis教授在专著中“沿用[24]的方法分析了二阶一致性”（“...The first method for analyzing second-order consensus follows [24]...” ，摘自Cooperative Control of Multi-Agent Systems: Optimal and Adaptive Design Approaches, London: Springer-Verlag, 2014, 其中[24]为本项目的代表性论文2）；在论文Consensus of Heterogeneous First- and Second-order Multi-agent Systems with Directed Communication Topologies中采用代表性论文7的概念，进一步研究了异质网络化动态系统的一致性问题，11次正面引用并指出其结果是代表性论文7的拓展（“...Theorem 1 extends the results in [9]...” ，摘自International Journal of Robust and Nonlinear Control, 25(3):362-375, 2015, 其中文献[9]为本项目的代表性论文8）。

8. IEEE Fellow， 欧洲科学院院士G. Chen教授的评价

IEEE Fellow、欧洲科学院院士、香港城市大学G. Chen教授在论文Finite-time Consensus of Multiagent Systems with a Switching Protocol中11次正面评价代表性论文1，明确指出其论文是采用代表作1的想法进行研究的（“Following the idea proposed in [31], we...” ，摘自IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 27(4): 853-862, 2015, 其中文献[9]为本项目的代表性论文1）。

其他正面评价还包括美国工程院院士T.Basar、 J. Tsitsiklis、德国科学院院士W. Marquardt、巴西科学院院士G. Celso、巴基斯坦科学院和第三世界科学院院士T. Hayat、IEEE Fellow A. Jadbabaie、J.A. Farrell、V.D. Blondel等人

本项目部分成果获2015年教育部自然科学一等奖。第一完成人获教育部长江学者称号，是国家杰出青年基金获得者。项目完成人中2人入选Elsevier高被引学者称号，1人获得国家优秀青年基金，1人获得山东省杰出青年基金。

代表性论文专著目录

序号	论文专著名称/ 刊名/作者	影响 因子	年卷页码 (xx年xx 卷xx页)	发表 时间 年月 日	通讯 作者	第 一 作 者	国内 作者	SCI 他 引 次 数	他引 总次 数	知识 产权 是否 归国 内所 有
1	Finite-time consensus problems for networks of dynamic agents/IEEE Transactions on Automatic Control/L. Wang, F. Xiao	2.777	2010年55卷 950-955 页	2010年 04月 01日	王龙	王龙	王龙, 肖峰	173	392	是
2	Consensus control for a class of networks of Dynamic agents/International Journal of Robust and Nonlinear Control/G. Xie, L. Wang	2.527	2007年17卷 941-959 页	2007年 07月 10日	谢广明	谢广明	谢广明, 王龙	142	325	是
3	Asynchronous consensus in continuous-time multi-agent systems with switching topology and time-varying delays/IEEE Transactions on Automatic Control/F. Xiao, L. Wang	2.777	2008年53卷 1804-1816 页	2008年 09月 01日	肖峰	肖峰	肖峰, 王龙	165	389	是
4	Controllability and stabilizability of Switched linear-systems/ Systems & Control Letters/G. Xie, L. Wang	1.980	2003年48卷 135-155 页	2003年 02月 15日	谢广明	谢广明	谢广明, 王龙	76	221	是

5	State consensus for multi-agent systems with switching topologies and time-varying delays/International Journal of Control/F. Xiao, L. Wang	1. 88	2006年79卷 1277-1284页	2006年 10月 01日	肖峰	肖峰	肖峰, 王龙	86	227	是
6	Average consensus in networks of dynamic agents with switching topologies and multiple time-varying delays/Systems & Control Letters/Y. Sun, L. Wang, G. Xie	1. 980	2008年57卷 175-183页	2008年 02月 01日	孙元功	孙元功	孙元功, 王龙, 谢广明	128	317	是
7	Consensus of heterogeneous multi-agent systems/IET Control Theory and Applications/Y. Zheng, Y. Zhu, L. Wang	1. 957	2011年5卷 1881-1888页	2011年 11月 03日	郑元世	郑元世	郑元世, 朱韵茹, 王龙	69	113	是
8	Controllability of a Leader-follower dynamic network with Switching topology/IEEE Transactions on Automatic Control/B. Liu, T. Chu, L. Wang, G. Xie	2. 777	2008年53卷 1009-1013页	2008年 05月 01日	刘波	刘波	刘波, 楚天广, 王龙, 谢广明	61	158	是
合 计								900	2142	

主要完成人情况

姓名	王龙	排名	1
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	北京大学	完成单位	北京大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本项目的主要负责人，组织本项目的研究工作，确定总体研究方向和方案。代表性论文1的第一作者和代表性论文2-8的主要作者，是发现点一、发现点二、发现点三和发现点四的主要完成人。主要完成了以下工作：1、提出了两类更接近实际物理对象特性的网络化动态系统结构，设计了连续状态反馈下的精确一致性协议；2、建立了一类网络化动态系统的可控性判据；3、设计了一类存在时变网络效应情形下网络化动态系统的局部控制协议；4、提出了信息采样下网络化动态系统的局部控制协议设计方案。</p>			

姓名	谢广明	排名	2
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	北京大学	完成单位	北京大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本项目的合作者之一，是代表性论文2、4的第一作者和代表性论文6、8的主要作者，发现点一、发现点二、发现点三和发现点四的主要完成人。主要完成了以下工作：1、设计了一类解决二阶一致性问题局部控制协议并严格证明其收敛性；2、提出了切换序列的可达集，构建切换序列生成了整个系统的能控状态空间，由此建立一类网络化动态系统的可控性充要判据；3、设计了信息采样下网络化动态系统的包围控制协议。</p>			

姓名	肖峰	排名	3
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	哈尔滨工业大学	完成单位	北京大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本项目的合作者之一，是代表性论文3、5的第一作者和代表性论文1的主要作者，发现点一、发现点三和发现点四的主要完成人。主要完成了以下工作：1、建立了一类网络化动态系统解决精确一致性问题的判据准则；2、针对存在时滞的离散时间网络化动态系统，通过构建等价的增广系统，建立了其解决一致性协同的判据准则；3、提出了一类异步更新网络化动态系统的协同控制问题，证明了其在较宽松条件下可解决一致性协同问题。</p>			

姓名	孙元功	排名	4
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	济南大学	完成单位	北京大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本项目的合作者之一，是代表性论文6的第一作者，发现点三的主要完成人。主要完成了以下工作：针对切换拓扑和存在时变通信时滞的连续时间网络化动态系统，建立了若干系统达到一致性协同的可解的线性矩阵不等式条件；针对网络化动态系统的数据丢包问题，建立了系统达到一致性协同的拓扑条件。</p>			

姓名	郑元世	排名	5
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	西安电子科技大学	完成单位	西安电子科技大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本项目的合作者之一，是代表性论文7的第一作者，发现点一的主要完成人。主要完成了以下工作：针对具有异质节点动力学的网络化动态系统设计了局部控制协议，分别建立了其解决一致性协同和精确一致性协同的判据准则，揭示了一阶一致性和二阶一致性的内在关联。</p>			

完成人合作关系说明

一、合作基础

2001.07—2003.06，谢广明在王龙的指导下完成博士后研究工作；

2003.07—今，谢广明加入王龙的研究团队，进一步开展合作研究；

2004.09—2008.07，肖峰在王龙的指导下攻读博士学位；

2004.09—2008.12，孙元功在王龙的指导下攻读博士学位；

2009.09—2012.12，郑元世在王龙的指导下攻读博士学位。

二、合作形式和合作成果

五位完成人存在非常密切的师生关系，一直合作开展网络化动态系统的分析与控制方面的研究工作，如共同承担国家自然科学基金项目、共同发表高质量学术论文等多种方式开展实质性的合作，取得了丰硕的研究成果。特别的，王龙是全部 8 篇代表性论文的合作者，第一作者为本人或其指导的博士生（后）。具体而言，王龙与谢广明合作完成代表性论文 2、4、8；王龙与肖峰合作完成代表性论文 1、3、5；王龙、谢广明和孙元功合作完成代表性论文 6；王龙和郑元世合作完成代表性论文 7。王龙、肖峰和孙元功共同申报的国家自然科学基金项目(60674050,网络化动态系统的分析与综合)获得立项并顺利结题；王龙和郑元世共同申报的国家自然科学基金项目(61375120, 复杂网络化动态系统的分析与控制)获得立项。王龙、谢广明、肖峰和郑元世共同获得 2015 年教育部自然科学一等奖。

知情同意证明

本人刘波（身份证号：110107197708190928）是 Controllability of a leader-follower dynamic network with switching topology（IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53（4）: 1009-1013）的第一作者。该文是本人在北京大学攻读博士学位期间在导师王龙、谢广明等老师指导下完成的，通讯地址是北京大学工学院系统与控制研究中心。该文内容是将两位老师发表在 Systems & Control Letters（2003, 48（2）: 135-155）上的结果应用于多智能体系统中。对于他们申报 2017 年国家自然科学奖的人员安排，本人知情并完全同意该文申报国家自然科学奖（项目名称：网络化动态系统的分析与控制）。

本人签名：刘波

2016年11月30日