



# 逻辑系统控制专题简介

李海涛<sup>1\*</sup>, 冯俊娥<sup>2</sup>, 胡晓明<sup>3</sup>

1. 山东师范大学, 济南 250358, 中国

2. 山东大学, 济南 250100, 中国

3. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm 10044, Sweden

\* 通信作者. E-mail: lihaitao\_sdu@163.com

逻辑是人类认识世界和改造世界的基本工具, 在人工智能的知识表示、推理和验证中发挥着重要作用. 逻辑动态系统是依照逻辑运算更新的系统, 已被广泛应用于人工智能、信息安全、基因调控、博弈论等热点领域, 成为一个涉及信息科学、数学、工程学等多学科交叉的前沿研究方向. 在非线性系统控制问题的仿真实验验证中, 系统的状态、输入和输出通常被量化为有限值, 此时逻辑动态系统不仅是验证迭代算法有效性的基本工具, 还是对传统非线性系统进行逼近和分析的重要数学工具.

近年来, 随着矩阵半张量积方法的引入, 虽然逻辑动态系统的分析与控制取得了显著进展, 但是仍有大量富有挑战性的理论和应用难题亟需解决. 理论难题主要包括半张量数学理论与应用体系的完善、部分无模型或完全无模型的逻辑动态系统的处理、大规模复杂逻辑动态系统的降维等, 应用难题主要包括逻辑动态系统在工业异构物联网场景、含随机扰动的拥塞博弈、传感器攻击下的安全控制、智能电网的优化控制等方面的典型应用. 为了展示这些问题的最新研究进展, *SCIENCE CHINA Information Sciences* 在 2026 年 69 卷第 4 期组织并出版了“逻辑系统控制专题”(Special Topic: Logical System Control). 经过严格评审, 本专题录用 15 篇文章, 其中包含 5 篇论文和 10 篇科技短文. 这些文章的合作者遍布中国、意大利、德国、加拿大、日本、马来西亚等国家. 我们将这些新的研究成果呈现给读者, 期望通过此举推动该领域的研究进入新的阶段.

Cheng 等的论文 “Semi-tensor product-based

convolutional neural network” 针对传统卷积神经网络在处理图像边界及不规则数据时必须依赖零填充或掩码操作, 从而导致信息冗余和边界伪影的问题, 提出了一种全新的数学框架. 该研究基于半张量积理论, 将传统内积运算扩展至维度自由空间, 构建了一种无需填充的卷积算子. 该算子能够在数学层面上消除了填充带来的干扰. 通过引入块哈达玛积和感受野矩阵, 建立了该算子的统一线性代数表达, 使其能够无缝适配二维不规则图像、部分受损数据以及三维体素信号的处理需求. 这一框架从理论层面为跨维度、非规则数据的鲁棒特征提取提供了新的路径, 并为后续的反向传播训练和大规模应用奠定了严格的数学基础.

Disaro 等的论文 “Optimal control of Boolean control networks: a data-driven perspective” 聚焦布尔控制网络的有限和无限时域最优控制问题, 克服传统方法依赖系统精确模型的短板, 构建了全新的纯数据驱动研究框架. 此研究基于数据信息性概念, 为两类最优控制问题推导了可解的充要条件, 设计出求解数据最优解的有效算法, 给出真实最优解的上下界. 论文所提出的方法丰富了布尔控制网络最优控制的理论体系, 为基因调控网络、智能系统等领域的优化控制提供了基于数据驱动的创新思路.

Zhong 等的论文 “A data-driven framework for constrained control of Boolean networks” 关注模型未知时布尔网络的约束控制问题, 提出了一种系统化的数据驱动控制框架. 该方法通过设计控制输入获取充分的运行数据, 仅依赖数据即可构造控制器, 实现对网

引用格式: 李海涛, 冯俊娥, 胡晓明. 逻辑系统控制专题简介. 中国科学: 信息科学, 2026, 56: 1296-1298, doi: 10.1360/SSI-2026-0090

Li H T, Feng J-E, Hu X M. Special topic: logical system control. *Sci Sin Inform*, 2026, 56: 1296-1298, doi: 10.1360/SSI-2026-0090

络行为的有效调控. 进一步地, 该框架可统一处理多类约束控制任务, 包括最优控制与多任务控制等, 为模型未知情形下逻辑网络的控制设计提供了一种新的研究思路.

Qi 等的论文 “A dimension-keeping semi-tensor product framework for compressed sensing” 面向压缩感知在资源受限环境下测量矩阵存储与传输成本高的挑战, 通过引入维数保持半张量积运算, 有效降低测量矩阵的存储需求, 并利用信号内部的组间非相干性与组内相关性, 显著提升了图像重建质量与抗噪性能, 为高效鲁棒的信号采集与重建提供了新的解决方案.

Li 等的论文 “Non-oscillation of asynchronous stochastic logical networks through negative circuits of the joint interaction graph” 聚焦于异步随机逻辑网络的非振荡性问题, 从网络拓扑视角构建联合交互图与局部交互图理论体系, 揭示了负回路与系统非振荡性的基本关系; 基于节点移除技术, 通过逻辑函数简化与变量约简算法, 设计了从降维网络逆向推导原网络不动点的算法. 此研究所建立的联合交互图负回路方法, 大幅降低了现存方法的计算复杂度, 不仅丰富了随机逻辑网络的基础理论体系, 还为基因调控网络动态分析、分布式智能系统协同控制等提供了全新的技术路径.

Wang 等的科技短文 “Communication and control co-design for heterogeneous industrial IoT over state-dependent Markov fading channels” 针对工业异构物联网场景下, 智能体移动易引发无线信道阴影衰落并劣化传输质量的问题, 提出了无线传输与智能体控制的联合优化方法. 为刻画传输 - 控制耦合机理, 建立了状态依赖 Markov 衰落信道模型, 解析表征无线传输成功概率对智能体位置演化依赖关系的同时, 刻画了工业现场信道的时变相关性. 为克服系统耦合下无线控制系统连续动态与智能体逻辑动态的混杂难题, 采用矩阵半张量积实现状态聚合, 建立了系统均方稳定性判据, 并据此实现了联合设计问题的等价转化与高效求解.

Ge 等的科技短文 “Observability and approximate observability of Boolean control networks from finite offline data” 聚焦布尔控制网络的能观性问题, 研究如何仅依靠有限离线数据评估系统状态是否可被区分. 并提出近似能观性定义、结构化能观性指标以及数据驱动的上下界分析方法, 无需模型辨识. 论文还证明了相关性, 并通过合成网络、生物网络和随机实验验证了方法的有效性.

Chai 等的科技短文 “Algebraic expressions for

stochastic dynamics in populations: from strategy profile to aggregate state” 致力于缓解种群演化动力学中 “维度灾难” 问题, 提出了基于匿名性的聚合方法, 旨在将对个体策略局势的精确刻画转化为对经验分布的描述以实现降维. 研究首先构建了由收益结构与概率性策略更新规则诱导的离散时间随机逻辑动力学; 随后利用匿名性聚合同一经验分布下的策略局势, 建立经验分布层面的逻辑动力学. 论文进一步刻画了策略局势与经验分布两类代数表达之间的关系, 为利用半张量积开展群体随机动力学的理论分析与控制设计提供了一个可行的路径.

Fu 等的科技短文 “Equilibrium existence and convergence of congestion games with stochastic disturbances” 聚焦含随机扰动的拥塞博弈, 重点分析随机干扰对共享资源成本与博弈动态的影响, 建立了相应的网络化拥塞博弈模型. 该研究以矩阵半张量为工具, 给出了势函数构造方法与纯策略纳什均衡的求解公式, 并得到博弈策略以概率 1 有限时间收敛到期望均衡的充要条件. 同时, 文章设计了全局收敛的策略调节方案, 从均衡存在、收敛特性与稳定控制三个层面完善了随机扰动下拥塞博弈的理论体系, 为交通、能源、服务组合等受扰动影响的共享资源优化问题提供了新的研究路径.

Li 等的科技短文 “A Boolean algebra approach for the disturbance decoupling problem of large-scale Boolean control networks” 针对基于布尔网络模型的大规模基因调控网络在干扰解耦研究中存在的计算复杂度这一核心难题, 利用布尔代数理论, 给出了实现干扰解耦的充分必要条件; 同时引入简化的 Karnaugh map 方法设计干扰解耦控制器, 有效规避了传统方法中需计算系统结构矩阵与依赖全状态空间的缺陷, 显著降低了计算复杂度. 该研究通过理论推导与数值仿真验证了所提方法的有效性, 为大规模基因调控网络的干扰解耦提供了新途径.

Xuan 等的科技短文 “Probabilistic bounds and ramp control in linear threshold dynamics” 聚焦于异步线性阈值动力系统的鲁棒控制问题, 该模型中的每个个体都拥有一个独特的 “激活阈值”, 反映了其对外部影响的接受程度. 针对传统控制策略容易导致执行器高负荷和高能耗的问题, 该研究引入了斜坡控制 (ramp control) 方法, 以平滑控制信号过渡并进一步降低瞬时控制成本. 该研究构建了平衡控制成功率与平滑度的多目标优化模型, 并推导出了在有限时间内实现预定次

数一致性振荡概率的理论下界. 该工作从理论上验证了这类系统的有限时间可控性, 并为设计高效的网络控制策略提供了可行的理论依据与研究方案.

Zhang 等的科技短文 “STP-based sensor attack-resilient supervisory control of logical finite state machines with encrypted channel” 致力于解决传感器攻击下逻辑有限状态机的安全控制难题, 重点关注攻击的实时检测以及安全状态的约束. 在此过程中, 构建了基于置换矩阵的加密通道和传感器替换攻击模型, 并借助矩阵半张量积框架, 严谨推导了攻击检测的充要条件, 并设计了确保状态安全转移的动态监督控制器. 本研究从检测、加密与控制一体化的视角出发, 为信息物理系统的安全防护提供了新方案.

Yang 等的科技短文 “Robust stabilization of random impulsive logical dynamical systems via a hybrid-index model” 致力于解决带有扰动的随机脉冲逻辑动态系统的镇定问题. 为了实现系统的鲁棒反馈镇定, 该研究通过构建干扰可达集来有效处理扰动输入. 在此基础上, 提出了验证鲁棒镇定的理论判据, 并设计了镇定控制器的构造算法. 进一步, 该方法被验证能够确定所有的时间最优状态反馈控制器, 为解决生物等实际系统中的抗干扰控制问题提供了坚实的理论支撑.

Zhao 等的科技短文 “Optimal control of smart grids

based on weighted network congestion games with time delay via state-flipped control” 针对状态翻转控制下基于加权网络拥塞博弈的智能电网最优控制问题展开研究. 首先, 他们利用矩阵的半张量积推导出基于加权网络拥塞博弈的智能电网代数形式, 并在此基础上得到势函数; 随后, 借助分块逻辑矩阵理论分析了系统的稳定性, 实现了系统镇定, 并提出了翻转控制方法. 该研究聚焦于带有时滞的加权智能电网控制问题, 既为相关研究开辟了博弈论视角的新方向, 又提供了创新的控制器设计方法, 具有重要的理论意义与实际应用价值.

Kong 等的科技短文 “Finite-time stability of stochastic block logical dynamical systems and its application” 致力于降低时滞概率逻辑网络研究中的计算复杂度问题. 首先, 提出了一种新型的随机非线性系统, 称为随机块逻辑动态系统. 其次, 结合矩阵半张量积和全期望公式, 建立了一种构造随机逻辑动态系统的等价代数形式方法. 基于等价代数形式的转移概率矩阵, 提出了随机块逻辑动态系统有限时间稳定的判据. 最后, 应用随机块逻辑动态系统的稳定性判据验证了时滞概率逻辑网络的稳定性问题.

最后, 我们对本专题的所有审稿人及时严谨的评审表示感谢. 同时, 我们对编辑部各位老师在本专题征稿、论文评审、定稿出版过程中的辛勤付出表达诚挚谢意.