

• 四川大学建校 130 周年特刊约稿 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202600464



本刊网刊

大规模互联系统分散式控制研究现状与趋势

宋永端, 谭 燕, 叶合夫

(重庆大学 自动化学院, 重庆 401331)

摘 要: 互联控制系统广泛存在于能源网络、工业过程和多机器人系统等现代工程领域, 其由多个子系统通过物理连接、物质流或能量交换形成整体动力学系统, 但子系统间的动态耦合作用可能导致系统性能退化甚至失稳。随着大规模工程系统对实时性和可扩展性的需求不断提高, 分散式控制因仅依赖局部信息、无须全局通信而受到广泛关注, 但如何在互联影响下保证系统稳定性并提升暂态响应性能仍是需要解决的重要问题。为此, 本文系统综述了分散式控制在大规模互联系统建模与表征、耦合作用处理及闭环性能分析等方面的代表性理论成果与技术进展。首先, 从信息结构角度比较集中式、分布式与分散式控制架构, 明确不同控制方式的信息需求和适用范围。随后, 围绕互联结构建模问题, 概述了状态互联、输入互联、输出互联、动态互联及时滞互联等典型模型, 并分析其特点及对控制设计的影响。在此基础上, 根据互联信息已知程度, 总结了精确补偿与解耦、鲁棒控制、小增益分析、自适应估计及智能逼近等主要耦合处理方法, 并讨论了其适用条件与局限性。进一步地, 本文梳理了分散式控制由渐近稳定控制、有限时间控制、固定时间控制到预设性能控制和预设时间控制的发展过程, 分析了不同方法在收敛速度、初值依赖性和工程实现方面的特点。同时, 针对实际系统运行约束, 讨论了状态约束、输出约束及安全控制方法在分散式控制中的应用。最后, 本文结合强耦合系统、未知互联、智能控制和安全弹性等方向, 分析了当前挑战并展望未来发展趋势。

关键词: 分散式控制; 大规模系统; 互联系统; 暂态性能; 预设时间控制

中图分类号: TP13

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)05-0121-17

能源网络、复杂流程工业、机器人集群和无人系统等现代工程对象, 通常由多个具有独立动态的子系统经由能量、物质或力学通道相互连接。系统规模的扩大不仅增加了模型维数, 而且使局部动态与跨子系统耦合共同决定闭环行为; 即使每个孤立子系统均可稳定, 互联作用仍可能降低稳定裕度、放大暂态振荡, 甚至诱发整体失稳。因此, 大规模互联系统的控制难点不能简单归结为“高维系统的降阶控制”, 其本质是在结构化信息约束下, 同时处理局部动态、互联传播与全局性能之间的耦合关系^[1-3]。

集中式控制通常依赖于整个互联系统的动力学模型和全局状态测量信息, 理论上能够通过统一的控制器设计实现整体性能优化, 但其通信负担、计算复杂度会随着系统规模的扩大而显著增加。分布式控制则允许各控制器利用邻居子系统的状态或输出信息设计控制律, 通常借助图论描述不同子系统之间可能

存在的信息交互拓扑, 其主要应用于多智能体一致性、编队控制、协同决策等问题。与二者不同, 分散式控制是指各局部控制器在运行阶段仅使用其各自子系统的状态或输出, 不依赖于系统间实时通信, 通过所有局部控制的共同作用保证互联系统的整体稳定与性能。由此, 分散式控制的核心矛盾是: 控制决策所需的信息被限制在局部, 而需要保证的稳定性和性能却是全局的。这一信息结构约束特征使分散式控制无须依赖通信网络和全局状态获取, 因此, 特别适用于地域分散、通信受限或对单点故障敏感的大规模系统。然而, 由于局部信息结构的限制, 分散式控制的性能提升通常受到信息结构的根本约束。

分散式控制理论是围绕上述信息结构约束下的可镇定性开展研究的, 例如: Wang 等^[4]以分散固定模态刻画了线性定常系统在给定局部输入-输出结构下采用动态反馈可镇定的条件, 揭示了某些不稳定模态

收稿日期: 2026-05-31 修回日期: 2026-08-12 网络出版日期: 2026-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(62273286)

作者简介: 宋永端, 男, 教授, 中国工程院外籍院士。研究方向: 智能控制、自适应协调控制、预设时间控制。E-mail: ydsong@cqu.edu.cn

无法由任何容许的局部反馈移动。Sandell 等^[1]进一步从中心化信息假设失效的角度,系统总结了大系统的分解、稳定性分析及分散式控制问题。Anderson 等^[5]对固定模态进行了代数刻画,Šiljak^[6]则通过分解、比较系统和向量 Lyapunov 函数等工具建立了较为系统的分散式控制理论框架。这些研究回答了“局部反馈是否可能稳定整体系统”,但其主要依赖线性时不变模型、确定互联和固定信息结构,对非线性、强耦合及未知动态的解释能力有限。

随着研究对象扩展到非线性互联系统,理论研究的关注由结构可镇定性转向局部控制器与非线性耦合共同作用下的全局稳定、跟踪和调节。向量 Lyapunov 函数、Lyapunov 分解、输入状态稳定性理论,以及非线性小增益理论等,为利用子系统局部稳定性性质分析互联系统整体稳定性提供了系统化的组合分析框架;反步法、高增益设计、滤波技术等则为控制器的构建提供了有效的设计工具。在此基础上,Ioannou^[7]提出了分散自适应控制,将未知参数和互联影响纳入局部在线调节;Shi 等^[8]进一步处理高阶互联项;Wen 等^[9-11]发展了分散自适应调节、积分反步及动态输入-输出互联下的控制方法;Jiang^[12]则推动了非线性小增益、输出反馈、自适应跟踪和扰动衰减在大规模系统中的应用;Ye 等^[13]将输出调节理论拓展到一类大规模非线性系统。这一研究阶段突破了线性模型的限制,但许多研究成果仍依赖已知互联上界、匹配或三角结构、Lipschitz 增长条件及已知相对阶;当耦合增强或结构信息不足时,小增益条件和鲁棒上界往往较为保守。

在复杂不确定互联系统研究阶段,未知强耦合、时变时滞、未建模动态、输出不可测、执行器故障、采样与事件触发约束等复杂因素逐渐被纳入分散式控制系统的建模与设计过程。相应的研究形成了几类互补的技术路线:鲁棒控制与滑模控制方法依赖对系统不确定性、外部扰动及互联项影响范围的先验界进行抑制;自适应方法通过在线参数估计或耦合强度调整降低未知因素的影响;神经网络与模糊系统利用函数逼近能力描述难以参数化的未知非线性;观测器和动态高增益技术用于重构不可测状态;事件触发机制则在闭环控制性能与通信、计算资源消耗之间寻求平衡^[14-16]。这些技术降低了对精确系统模型的依赖,但并未完全摆脱对系统结构、不确定性特征及互联关系的先验假设,而是将其转化为不确定性界、Lipschitz 增长条件、逼近误差界、基函数选择、时滞上界或触发参数约束等形式;同时,上述技术可能会导致噪声敏感性、函数逼近残差、参数估计漂移及控制器设计复杂度等问题,仍限制了这些技术在强耦合大规模工程互

联系统中的进一步应用^[17-19]。

与此同时,研究目标开始由“是否稳定”转向“以何种暂态品质及在多长时间达到目标”。渐近稳定仅保证系统状态随时间趋近于目标状态,而不保证在有限时间内实现收敛;有限时间控制能够实现有限时间的收敛,但其收敛时间通常依赖初始状态;固定时间控制进一步消除了收敛时间对初始状态的依赖,能够给出统一的收敛时间上界,但该上界通常仍受控制器设计参数的影响^[20-21];预设性能控制通过构造时变性能约束函数,将跟踪误差限制在预先指定的动态边界内,以同时调节超调量、收敛速度和稳态精度。与有限时间和固定时间稳定理论主要关注收敛时间性质不同,预设性能控制更加关注整个动态响应过程中的性能指标约束^[22-24]。近年来,预设时间控制进一步要求收敛时间由设计者预先指定,并已由状态反馈拓展至互联系统输出反馈^[25-27]。然而,组成互联系统的子系统的动态阶次差异、观测误差、时变高增益、执行器峰值约束之间存在复杂耦合关系,如何在满足工程约束的条件下同时实现预设时间收敛与全局稳定性,仍缺乏统一的理论框架^[28-29]。

综上,现有研究仍面临 4 个方面的关键挑战:1) 现有状态互联、输入/输出互联及三角结构模型在描述强耦合、动态互联、时滞和结构切换等复杂特征时存在一定局限,如何在提升模型对复杂互联系统动态特性的描述能力与保持理论可分析性之间取得平衡,仍是重要问题。2) 精确补偿方法依赖已知互联模型;鲁棒控制和小增益方法依赖不确定性界与耦合强度上界,且可能引入较强保守性;自适应与智能逼近方法在完全未知互联条件下通常只能保证闭环信号有界性,如何降低未知耦合处理中的保守性仍未得到充分解决。3) 有限时间、固定时间、预设性能和预设时间控制分别针对不同暂态性能指标进行约束,尚缺少能够同时兼顾收敛时间、超调约束、控制输入峰值、输出反馈设计及子系统间扰动与误差传播效应的统一控制框架。4) 强化学习、图神经网络和数字孪生等智能技术为在线优化、拓扑关系表征及模型校准提供了新的研究工具^[30],但学习误差、工况变化和分布偏移如何被纳入可验证的 Lyapunov 分析或安全性证书体系,仍是智能方法应用于分散闭环控制面临的关键问题。

针对上述问题,本文以“互联结构表征—耦合作用处理—暂态性能提升—智能化分散式控制”为主线,对大规模互联系统分散式控制的理论演进和方法边界进行系统梳理。主要内容如下:1) 从信息结构和控制对象两个维度辨析集中式、分布式与分散式控制,明确物理互联、通信拓扑和局部反馈之间的关系,

并以分散固定模态为起点回顾结构约束下可镇定性理论的发展。2)按照状态、输入、输出、动态输入-输出及时滞互联总结建模假设,并依据互联信息由完全已知、有界未知、参数未知到完全未知的变化,建立精确补偿、鲁棒/小增益抑制、自适应估计和智能逼近之间的对应关系,比较其适用条件与保守性来源。3)区分渐近稳定、有限时间稳定、固定时间稳定和预设时间稳定等不同时间收敛性质,同时,讨论预设性能控制等针对暂态响应指标约束的设计方法。从收敛时间上界与初始状态的关系、时间参数的可设计性、输出反馈实现条件及控制输入约束等方面评述相关研究进展。重点讨论互联系统预设时间输出反馈、分离原理和分散-分布式控制。4)面向模型未知、拓扑变化和安全约束,分析数字孪生、强化学习、图神经网络与安全控制对传统分散式控制的补充作用,并从稳定性可验证、局部安全证书的全局组合及理论-工程闭环验证等角度提出未来的研究问题。

1 大规模互联系统:从自然现象到工业实体

自然界与现代工程系统中广泛存在由多个相互作用单元构成的大规模互联系统。这些系统通过物理连接形成复杂动态关联,其整体行为不仅取决于各子系统自身特性,还受到子系统之间耦合作用的显著影响。典型实例包括自然系统中的菌根真菌-植物根系共生网络^[31]、大气环流物理耦合网络^[32]和蚁群协作力学互联系统^[33],以及工程系统中的并网微电网多能源互联系统^[34]、多级泵站串联供水系统^[35]和多机器人协同作业系统^[36]。这些系统的共性在于由多个子系统通过物理耦合相互作用而构成,故被统称为互联系统。在研究此类系统问题时,经抽象后的数学模型通常允许子系统数目为任意多个,因此,此类系统也被称为大规模互联系统^[3]。

互联系统是由按照特定方式相互连接的多个子系统构成的复合大系统,其核心特征在于整体行为并非各子系统行为的简单叠加,由子系统之间的相互作用共同决定,互联关系可能产生单个子系统所不具备的涌现特性^[37]。随着现代工程系统规模不断扩大及控制任务日益复杂,大规模互联系统的建模、分析与控制问题逐渐受到关注。分散式控制通过利用子系统局部信息进行控制器设计,为复杂系统提供了一种具有良好扩展性的解决方案。然而,如何在互联影响下实现系统稳定性、动态性能与约束条件之间的协调,仍是分散式控制领域需要解决的重要问题。因此,本文围绕分散式控制在互联系统建模、控制器设计及性能分析等方面的研究进展进行综

述,并进一步讨论当前挑战与未来发展方向。

2 分散式控制架构与概念辨析

2.1 大规模互联系统的基本特征

大规模互联系统通常由多个具有相对独立动态特性的子系统构成,子系统之间通过物理耦合或动态关联形成整体系统。与一般高维系统相比,其关键特征不是状态维数,而是整体分析与控制任务必须被分解为若干相互关联的局部问题^[1-3]。设系统由 N 个子系统组成,第 i 个子系统可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(x_i, u_i) + \Delta_i(x, u, t), \\ y_i = h_i(x_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_i \in \mathbb{R}^{n_i}$ 、 $u_i \in \mathbb{R}^{m_i}$ 和 $y_i \in \mathbb{R}^{p_i}$ 分别为第 i 个子系统的状态、控制输入和测量输出,其中, n_i 、 m_i 和 p_i 分别为第 i 个子系统的状态维数、输入维数和输出维数; $f_i(\cdot)$ 为第 i 个子系统的局部动态函数, $f_i(\cdot): \mathbb{R}^{n_i} \times \mathbb{R}^{m_i} \rightarrow \mathbb{R}^{n_i}$; $h_i(\cdot)$ 为对应的输出映射函数, $h_i(\cdot): \mathbb{R}^{n_i} \rightarrow \mathbb{R}^{p_i}$; $\Delta_i(x, u, t)$ 为其他子系统对第 i 个子系统产生的互联项; x 和 u 分别为整个互联系统的状态和控制输入, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, $u = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$,其中, x_N 、 u_N 分别为第 N 个子系统的状态、控制输入。

式(1)包含两个不同层次的结构:1)由 $f_i(\cdot)$ 描述的局部动态,决定去除互联项后单个子系统自身的动态特性,包括可控性、相对阶和零动态等性质;2)由 $\Delta_i(\cdot)$ 描述的互联作用,刻画子系统之间的状态、输入及扰动的相互影响关系。分散式控制的难点在于,局部控制器通常无法实时获得完整的系统状态 x 和控制输入 u ,且需要保证由所有子系统共同构成的闭环系统稳定。因此,忽略互联作用时各子系统的稳定性,仅提供局部设计,并不能直接推导出互联系统能够通过分散反馈实现稳定。

从控制角度看,大规模互联系统具有以下共性特征:1)子系统之间存在不可忽略的物理耦合,局部控制作用会通过子系统间的耦合关系影响其他子系统的动态行为^[38];2)可获得的信息通常具有局部性,集中获取完整系统状态所需的通信资源和计算负担会随着系统规模增加而显著增长^[39];3)子系统数量、参数配置、外部负载及互联拓扑结构可能发生变化,要求控制器具备良好的可扩展性,并支持子系统增减和结构变化下的控制器重构^[40];4)整体性能不仅取决于各子系统自身动态特性,还受到子系统间耦合影响传递的共同作用,局部性能指标通常无法简单叠加得到系统级性能指标^[41]。

2.2 集中式、分布式与分散式控制原理

控制架构之间的主要区别在于信息结构,即控制器在运行过程中能够利用的信息范围及不同控制器之间的信息交互方式。图 1 给出了集中式、分布式与分散式控制架构的信息交互方式。如图 1 所示,集中式控制依赖中央控制器获取全局信息并完成统一决策;分布式控制通过通信网络实现邻域信息交互,在局部自治基础上实现系统协同;分散式控制主要利用子系统自身信息完成控制设计,避免对全局通信网络的依赖。

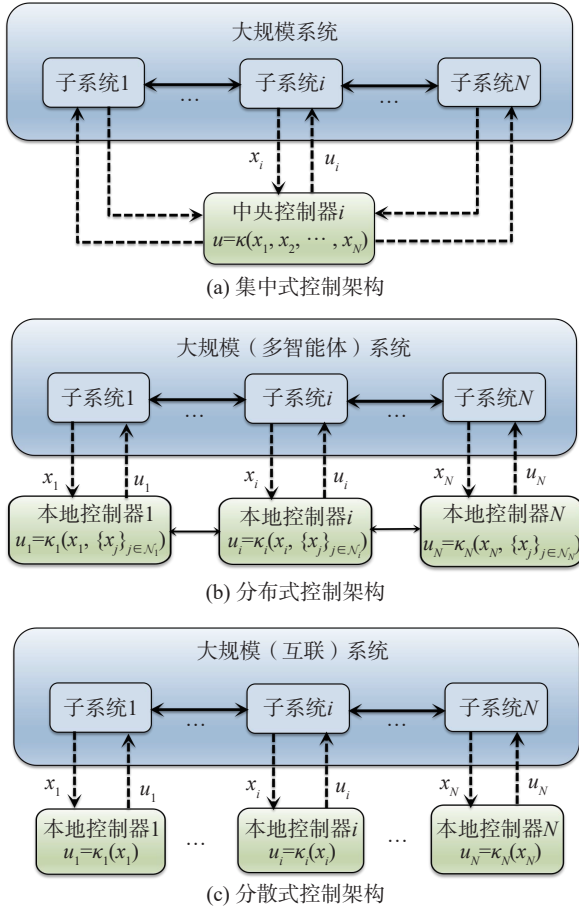


图 1 集中式、分布式与分散式控制架构的信息交互方式
Fig. 1 Information interaction structures of centralized, distributed and decentralized control architectures

对于由 N 个子系统构成的互联系统,集中式控制器可表示为:

$$u_i = \kappa_i(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2)$$

式中, $\kappa_i(\cdot)$ 为第 i 个控制器对应的反馈控制律。集中式控制器的每个控制输入原则上可以利用全部系统状态信息,如图 1(a)所示,所有子系统信息均上传至中央控制单元,由控制中心完成状态分析、控制器计算及控制指令生成。集中式架构便于直接优化整体性能,但依赖全局通信、统一模型和集中计算。当系统规模扩大或通信条件恶化时,计算复杂度、通信负担及对中央控制单元的依赖将成为其主要局限。

分布式控制器通常表示为:

$$u_i = \kappa_i(x_i, \{x_j\}_{j \in \mathcal{N}_i}) \quad (3)$$

式中, $\mathcal{N}_i$ 为通信图中第 i 个节点的邻居集合, x_j 为第 j 个子系统的状态。如图 1(b)所示,每个控制器不仅能利用自身状态信息,还能利用邻居子系统的信息。该架构依赖邻居信息交换,主要用于多智能体一致性、编队、协同估计和分布式优化。通信拓扑是分布式控制的重要组成部分,其结构特性决定了控制器之间的信息可获得性,并进一步影响上述控制目标的可实现条件^[36,42]。

分散式控制器通常表示为:

$$\begin{cases} u_i = \kappa_i(x_i), \\ u_i = \kappa_i(y_i) \end{cases} \quad (4)$$

分散式控制器仅利用本地信息,不同的局部控制器在在线运行过程中独立完成控制决策,不依赖其他子系统的实时状态或输出信息,但各子系统仍通过被控对象的物理互联关系产生动态耦合。如图 1(c)所示,在分散式控制结构中,每个子系统均配置独立控制器,控制器之间不存在信息交互。分散式控制降低了对通信基础设施和集中计算中心的依赖,具有较强的独立性、系统可扩展性及局部故障隔离能力。然而,由于其局部控制器无法直接获取其他子系统的状态信息,互联项 $\Delta_i(x, u, t)$ 所引起的动态影响在局部控制器视角下通常表现为未知耦合项或外部扰动。因此,如何在缺乏全局信息的条件下处理子系统间耦合项,并保证整体闭环系统的稳定性与暂态性能,是分散式控制区别于单体系统控制问题的核心挑战。

需要指出的是,物理互联关系与通信拓扑属于不同层次的系统结构。互联系统关注被控对象内部客观存在的动态耦合关系,而多智能体系统则强调多个具有自主决策能力的主体通过信息交互实现一致性、编队或协同任务。对于控制架构而言,分布式控制依赖控制器之间的邻居信息交互,而分散式控制原则上仅利用各子系统可获得的局部信息进行控制决策。需要特别区分的是,当一个系统同时包含物理耦合和通信网络时,描述被控对象动态耦合关系系统的互联结构与描述控制器信息交换关系的通信拓扑可能并不一致。因此,不能简单依据是否采用图论建模或是否存在网络结构来判断控制方法属于分散式还是分布式,而应根据控制器是否利用子系统间的信息交互进行区分。

表 1 给出了集中式、分布式与分散式控制架构比较。集中式控制适合系统规模有限且全局通信可靠的场景;分布式控制适合控制器之间需要通过局部信息交互实现协调决策或整体性能优化的系统;分散式控制则适合物理耦合显著但全局信息难以实时获得的

大规模系统。对于分散式控制而言,研究重点在于如何基于局部信息建立有效的互联建模方法、控制器设计方法及闭环性能分析框架,从而实现复杂互联系统的稳定控制与性能优化。

表1 集中式、分布式与分散式控制架构比较

Tab. 1 Comparison of typical control architectures

控制方式	信息需求	通信需求	计算方式	扩展能力	性能特点	典型应用
集中式控制	全局状态与模型	全局信息集中传输	中央集中计算,随规模增加受限	受系统规模和计算资源限制	全局优化能力强	小规模优化系统
分布式控制	本地及邻居信息	依赖通信拓扑	节点协同计算,依赖通信协议	具有较好的扩展性	兼顾协同与计算效率	多智能体协同系统
分散式控制	本地状态或输出	无须实时通信	局部独立计算,模块化能力较强	适用于大规模模块化系统	通信成本低,但受局部信息限制	物理互联系统

3 互联结构表征与耦合项处理方法

互联结构的建模方式不仅决定了系统中不同子系统之间的动态关联如何被描述,也限定了稳定性分析和控制器设计所需处理的耦合特征。对于同一类工程系统,可以根据耦合项所依赖的变量、互联环节是否具有内部动态及是否存在时滞等因素,建立不同形式的互联模型。即使采用相同的互联形式,控制器可利用的互联信息也可能存在显著差异。例如,互联结构及参数可能完全已知,也可能仅已知其增长界、参数化形式,甚至无法获得明确的解析模型。因此,从互联形式和互联信息

条件两个维度,对大规模互联系统的典型建模方法及相应的耦合项处理机制进行梳理。

3.1 按互联形式划分的系统模型

按照耦合项在系统模型中的作用位置及其动态特征,现有互联模型可概括为状态互联、输入互联、输出互联、动态互联、时滞互联等类型。表2给出了典型互联模型比较。不同模型并非对同一系统的简单形式替换,而是分别对应不同的物理机理、测量条件和分析需求。一般而言,模型能够描述的互联特征越复杂,其物理适用范围越广,但相应的稳定性分析和分散式控制器设计也更加困难。

表2 典型互联模型比较

Tab. 2 Comparison of typical interconnection models

模型类型	主要假设	典型方法	主要局限
状态互联	状态耦合结构已知或满足给定界	固定模态、线性矩阵不等式(LMI)、输入-状态稳定性(ISS)、小增益	依赖状态耦合描述及增长条件
输入互联	输入耦合关系已知或有界	解耦、鲁棒补偿、自适应控制	其他控制器输入通常不可直接获得
输出互联	输出或端口变量决定耦合项	输出反馈、耗散性、无源性方法	内部状态影响可能难以刻画
动态互联	互联环节包含内部动态	动态补偿、ISS、观测器	互联阶次和内部状态可能未知
时滞互联	互联时滞已知或具有给定上界	Lyapunov-Krasovskii、Razumikhin	稳定性条件依赖时滞信息

3.1.1 状态互联

状态互联是大规模系统研究中最常见的建模形式之一,即一个子系统的动态直接受到其他子系统状态的影响。对于线性互联系统,第*i*个子系统通常表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N A_{ij} x_j, \\ y_i = C_i x_i \end{cases} \quad (5)$$

式中,*A_i*和*B_i*分别为第*i*个子系统自身的状态动态和控制输入作用,*A_{ij}*为第*j*个子系统状态变化对第*i*个子系统动态的影响。线性状态互联模型适用于在给定工作点附近运行的电力系统、结构系统和过程网络,具有物理含义较为清晰、便于矩阵分析和数值求解等优点。分散固定模态、线性矩阵不等式(LMI)、二次稳定性及分散式*H_∞*控制等理论大多建立在此类模型基础上^[4-6]。在线性状态互联模型中,耦合关系通常由已知

块矩阵或具有给定稀疏结构的整体系统矩阵描述。当*A_{ij}*存在较大参数不确定性、随时间变化或随系统工作点发生显著改变时,基于精确耦合矩阵的补偿和解耦方法可能因模型失配而失效。此外,模型中出现其他子系统的状态并不意味着局部控制器能够实时获得这些状态。因此,需要严格区分系统模型中客观存在的状态耦合关系与控制器在线运行时能够使用的信息。对于非线性互联系统,状态互联可进一步表示为:

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, u_i) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \phi_{ij}(x_j) \quad (6)$$

式中, $\phi_{ij}(\cdot)$ 表示由第*j*个子系统状态引起的非线性互联作用。该模型能够描述电力系统中的非线性功角作用、机械系统中的非线性力学耦合及流程系统中的状态相关物质传递等现象。与线性模型相比,非线性状态互联模型能够保留耦合项的非线性特征,并可结合向量Ly-

apunov 函数、输入状态稳定性及非线性小增益理论分析整体闭环稳定性^[43-44]。现有研究通常假设 $\phi_{ij}(\cdot)$ 满足已知增长条件、Lipschitz 条件或可分离上界,例如,

$$\|\phi_{ij}(x_j)\| \leq \alpha_{ij}(\|x_j\|) \quad (7)$$

式中, α_{ij} 为已知或部分未知的非负增益函数。此类条件使互联项能够被纳入局部 Lyapunov 函数导数的估计过程,进而将整体稳定性问题转化为局部稳定性与耦合增益之间的关系。然而,一方面,较强的增长条件可能排除非光滑、非全局 Lipschitz 或耦合项快速增长的系统;另一方面,为覆盖较宽的运行范围而选取过大的互联上界,又可能导致控制增益过高,或者使小增益条件难以满足,从而增加理论结果的保守性。

3.1.2 输入互联

当一个子系统的动态直接受到其他子系统控制输入或执行器作用的影响时,可采用输入互联模型,表达式为:

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, u_i) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \psi_{ij}(u_j) \quad (8)$$

式中, $\psi_{ij}(u_j)$ 描述第 j 个子系统的控制输入 u_j 对第 i 个子系统动态产生的影响。输入互联常见于多个子系统共享能源供给、流量资源或执行机构的工程场景。例如,多个能源变换单元可能通过公共母线发生相互影响,多个过程控制回路也可能共享阀门、压力源或物料供给。输入互联模型直接刻画不同局部控制行为之间的动态关联,适用于研究控制器相互作用、输入约束及执行器资源共享等问题。输入互联的主要困难在于, u_j 由其他局部控制器在线生成,通常不属于第 i 个控制器可直接获得的信息^[45]。当输入互联关系完全已知时,可以考虑前馈补偿或解耦设计;当互联关系未知时,实现直接抵消往往需要额外的信息交换或构建整体系统模型。如果采用鲁棒上界处理,则第 i 个控制器的设计条件可能依赖其他局部控制器的增益,从而在不同控制器参数之间形成循环约束。

3.1.3 输出互联

当子系统之间的耦合项主要由输出变量或端口变量决定时,可采用输出互联模型,表达式为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(x_i, u_i) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \phi_{ij}(y_j), \\ y_j = h_j(x_j) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\phi_{ij}(y_j)$ 描述第 j 个子系统输出 y_j 对第 i 个子系统动态的影响。输出互联模型适用于耦合项主要通过可测物理量、传感变量或能量端口产生的系统。与直接使用完整状态的互联模型相比,输出互联更符合部分工程系统的测量条件,并有利于采用耗散性、无源性及输入-输出稳定性理论开展分析^[46-47]。需要注意的是,互联项依赖

y_j 并不意味着第 i 个局部控制器能够直接使用 y_j 。如果局部控制器需要通过通信网络实时接收其他子系统的输出,则相应控制架构已经包含分布式信息交互。对于严格分散式控制, $\phi_{ij}(y_j)$ 应被视为由被控对象的物理互联关系引入,但无法由本地控制器直接测量的耦合项,并基于本地状态或本地输出设计鲁棒控制器和观测器。此外,不同内部状态可能对应相同输出,而不可测内部状态仍可能影响互联作用。因此,仅依据输出变量描述互联关系可能引入内部动态不确定性,从而增加输出反馈稳定性分析和控制器设计的难度。

3.1.4 动态互联

状态、输入和输出互联通常将子系统之间的耦合项表示为静态映射。然而,在电力电子、机械、流体和流程系统中,连接不同子系统的物理环节可能具有不可忽略的内部动态。此时可引入互联状态,并将系统表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(x_i, u_i) + \sum_{j \neq i} n_{ij}(z_{ij}), \\ \dot{z}_i = q_{ij}(z_{ij}, y_j, u_j) \end{cases} \quad (10)$$

式中, z_{ij} 为连接第 j 个子系统与第 i 个子系统的互联环节内部状态, $n_{ij}(\cdot)$ 为由动态互联状态引起的耦合作用函数, $q_{ij}(\cdot)$ 为互联环节的状态演化函数。动态互联模型通过引入内部状态描述子系统间传输通道的动态特性,可用于刻画具有储能、惯性、阻尼或时滞特征的物理连接过程^[11]。其相应的控制难点在于,互联项可能包含未知阶次、不可测状态或不稳定内部模态。若将动态互联简单等效为有界扰动,可能忽略互联项内部的能量积累和相位变化;若将所有互联状态统一并入整体系统状态,又会显著增加模型维数,并削弱局部控制器设计的独立性。因此,动态互联系统通常需要结合输入状态稳定性、耗散性、动态补偿或扩张状态观测器等方法进行分析和控制。

3.1.5 时滞互联

物理传输、物质输运、信号采集和计算过程可能使子系统之间的耦合项具有时间延迟。典型时滞互联模型可表示为:

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, u_i) + \sum_{j \neq i} \phi_{ij}(x_j(t - \tau_{ij}(t))) \quad (11)$$

式中, $\tau_{ij}(t)$ 为常值或时变互联时滞。时滞会改变互联项的相位特性,并可能破坏无时滞闭环系统原有的稳定性。局部控制器增益、互联强度和允许时滞上界之间通常会存在相互的制约关系。常用的分析工具包括 Lyapunov-Krasovskii 泛函、Razumikhin 方法、时滞小增益条件^[14-15]。互联系统还可能同时受到采样、量化、丢包和事件触发等网络化因素影响^[48]。需要区分的是,

物理互联时滞来源于被控对象内部的传输或输运过程,而控制通信时滞来源于控制器之间的信息交换。两类时滞可以在数学上统一表示,但其形成机理和可调节程度并不相同,前者通常由物理结构决定,后者则可能通过通信协议、带宽分配或触发机制进行调整。总体而言,互联形式决定了耦合项通过何种变量和动态环节影响各子系统。状态、输入和输出互联强调耦合变量的不同,动态互联进一步考虑连接环节自身的内部动态,时滞互联则反映互联作用的延迟特征。在实际系统中,上述互联形式可能同时存在。例如,一个过程网络可能同时包含状态相关物质传递、执行器共享、输运时滞。因此,互联模型应在物理描述

表 3 不同互联信息条件下耦合项处理方法比较

Tab. 3 Comparison of coupling handling methods under different interconnection information conditions			
互联信息条件	代表方法	关键假设	主要局限
完全已知	精确补偿、解耦、动态补偿	互联结构和参数准确已知	模型依赖强,对失配敏感
有界未知	鲁棒控制、滑模、小增益、ISS	已知增长界或增益约束	条件可能保守,强耦合下难满足
参数未知	自适应控制、反步法、动态面控制	互联满足已知参数化结构	参数收敛依赖激励,设计复杂
完全未知	神经网络、模糊逼近、观测重构	逼近区域、权值和残差满足有界条件	计算负担较大,严格验证困难

3.2.1 完全已知互联:补偿与解耦

当互联结构、互联参数及其作用方式均已知时,可直接利用模型信息补偿耦合项。常用方法包括前馈补偿、坐标变换、静态或动态解耦,以及集中式控制器的分散实现。对于线性互联系统,分散固定模态理论用于判断给定信息结构下是否存在能够稳定整体系统的分散式控制器^[4-5]。若系统并未存在不稳定的分散固定模态,则可进一步设计局部静态或动态补偿器。Lavaci^[49]研究了给定集中式控制器的分散实现问题,通过构造分层动态结构,使分散闭环系统的响应逼近集中式控制效果。精确补偿方法能够直接利用已知互联结构改善闭环性能,避免将确定的耦合动态作为最坏情形扰动处理;在模型准确、系统结构固定且互联变量可获得时,该类方法通常能够获得较低保守性的控制结果。然而,精确补偿法对模型精度有较强依赖性。当互联参数随工作条件变化、互联环节包含未建模动态,或者子系统数量和连接关系发生改变时,模型失配会形成无法被完全抵消的残余耦合,严重时可能破坏解耦后系统的稳定性。此外,部分补偿方法需要实时获得其他子系统的状态、输出或输入,这与严格分散式控制仅依赖本地信息的要求并不一致。

3.2.2 有界未知互联:鲁棒控制、小增益与输入-状态稳定性

当互联函数的精确表达式未知,但其作用满足已知增长界或增益约束时,可将互联作用视为结构化不确定性或外部输入。此时的典型条件可表示为:

的准确性与稳定性分析、控制器实现的复杂度之间取得平衡。

3.2 按互联信息条件划分的耦合项处理方法

互联形式描述耦合项以何种方式进入系统,而互联信息条件决定局部控制器能够采用何种处理机制。根据互联结构、参数及动态信息的已知程度,现有分散式控制方法可概括为完全已知互联下的补偿与解耦、有界未知互联下的鲁棒抑制、参数未知互联下的自适应估计,以及完全未知非线性互联下的智能逼近与观测重构。该分类能够直接揭示不同方法对先验信息的依赖及其适用边界。表 3 给出了不同互联信息条件下耦合项处理方法比较。

$$\| \Delta_i(x,u,t) \| \leq \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} (\| x_j \|) + d_i \tag{12}$$

式中, γ_{ij} 为已知非负增益函数, d_i 为有界外部扰动项。

鲁棒控制方法通常通过提高局部闭环的扰动抑制能力,或者引入滑模项、阻尼项、饱和函数和鲁棒补偿项,减弱未知互联对局部动态的影响。向量 Lyapunov 函数和比较系统方法则将整体稳定性问题转化为局部 Lyapunov 不等式与耦合增益矩阵之间的关系^[6,50]。输入-状态稳定性和非线性小增益理论进一步提供了由局部性质推导整体稳定性的组合分析框架。若每个局部闭环系统对来自其他子系统的互联输入具有输入-状态稳定性,并且不同子系统之间的增益循环满足小增益条件,则可以推导出整体互联系统的稳定性。该类方法不要求直接构造一个覆盖所有状态的高维 Lyapunov 函数,而是利用局部稳定裕度与互联增益之间的关系建立整体稳定性条件,其主要局限在于互联界的可获得性与保守性。为覆盖较宽的工作范围和不确定性集合,设计者往往需要选取偏大的统一上界,导致控制增益、滑模增益或局部耗散要求显著增加。对于强耦合系统,小增益条件可能无法成立,即使实际闭环系统能够保持稳定,也可能难以获得相应的理论证明。因此,如何利用互联方向、符号、稀疏结构和局部作用范围等信息构造较低保守性的稳定性条件,是鲁棒分散式控制需要解决的重要问题。

3.2.3 参数未知互联:自适应控制与反步法

当互联作用的解析结构已知,但其中包含未知常

参数时,可将第*i*个子系统的互联项表示为:

$$\Delta_i(x, u, t) = \Phi_i(x, u, t)\theta_i \quad (13)$$

式中, $\Phi_i(\cdot)$ 为已知回归向量或回归矩阵, θ_i 为未知参数向量。

自适应控制通过局部参数估计和在线调节机制补偿未知互联,以避免直接采用覆盖全部不确定性的最坏情形上界。早期,非线性分散式控制研究主要围绕未知互联参数和复杂非线性动态条件下的稳定性问题开展。针对参数不确定互联系统,分散自适应控制通过在线参数估计与局部 Lyapunov 分析实现未知耦合作用补偿,为非线性大系统控制提供了基本方法框架^[7-8]。随后,相关研究进一步考虑高阶互联项、动态输入-输出耦合及更一般的非线性结构,并结合积分反步法建立了适用于严格反馈型互联系统的递推控制设计方法^[9-11]。

对于具有严格反馈结构的非线性子系统,反步法通过逐层构造虚拟控制器和 Lyapunov 函数,将未知参数估计与控制律设计相结合,能够有效处理局部高阶非线性动态,并获得状态或输出跟踪性能的保证。然而,反步法通常依赖系统结构满足递推设计条件(严格反馈或三角结构、已知控制方向及已知相对阶),对非三角结构和强耦合系统的适用性仍有局限。针对状态不可测情况下的控制需求, Jiang^[12]研究了大规模非线性系统的输出反馈自适应跟踪问题,表明在满足可观测性、相对阶及互联增益约束条件下,仅利用局部输出信息仍可实现整体跟踪控制。进一步地, Ye 等^[13]将自适应输出调节理论拓展至大规模非线性互联系统,为处理扰动抑制和稳态跟踪问题提供了新的理论框架。自适应方法降低了控制器对未知参数精确数值的依赖,但仍需要已知的参数化结构。若系统缺少持续激励,参数估计通常不能保证收敛到真实参数。互联不确定性和局部模型不确定性同时作用于自适应律时,还可能出现参数漂移、估计量相互影响及控制输入增大等问题。此外,反步法伴随重复求导引起的计算膨胀问题;动态面控制等方法能够缓解重复求导问题,但会引入滤波误差和额外的调节参数。

3.2.4 完全未知互联:智能逼近与观测重构

当互联作用无法写成已知参数化形式,且难以获得明确的增长函数时,可采用神经网络、模糊系统或其他函数逼近器在线描述未知非线性,例如:

$$\Delta_i(x, u, t) = W_i^{*T} \sigma_i(\zeta_i) + \varepsilon_i(\zeta_i) \quad (14)$$

式中, W_i^* 为理想权值向量, $\sigma_i(\cdot)$ 为选定的基函数向量, ζ_i 为逼近器输入, $\varepsilon_i(\cdot)$ 为逼近误差向量。

智能逼近方法将复杂未知函数的处理转化为有限维权值的在线调节问题,并可与反步法、自适应控

制和预设性能变换相结合,用于处理未知非线性、状态约束、时滞及较强互联作用^[15,18,51]。当局部状态、互联状态或总扰动无法直接测量时,还可以采用高增益观测器、扩张状态观测器、神经网络观测器或多模型估计器重构未知动态。观测重构的目标通常不是准确恢复所有外部子系统的状态,而是依据本地输入和输出信息获得足以支持稳定控制设计的互联作用估计。需要指出的是,“完全未知”并不意味着控制设计不再依赖任何先验条件。神经网络和模糊逼近通常仍要求状态轨迹位于给定紧集内,基函数能够覆盖所考虑的工作区域,理想权值及逼近残差具有适当界。多数现有结果主要保证闭环信号一致最终有界,而非未知互联函数或网络权值的精确辨识。随着网络规模和基函数数量增加,在线权值调节还会显著增加计算负担。训练误差、工作区域变化及未被训练数据覆盖的状态范围,也难以直接纳入传统的 Lyapunov 稳定性分析。因此,智能逼近更适合作为解析模型和鲁棒控制方法的补充,而不能替代闭环稳定性证明。从理论发展过程看,互联作用的处理方式经历了由基于精确模型的补偿与解耦,向基于上界信息的鲁棒抑制,再向基于在线估计和数据辅助逼近的方向演进。需要强调的是,模型依赖并未随着方法发展而完全消失,而是由精确互联参数转化为增长界、增益条件、参数化结构、逼近区域、基函数及数据覆盖范围等不同形式的先验条件。因此,应当结合考虑互联形式与互联信息条件。相同的状态互联模型,在互联矩阵完全已知时,可采用精确补偿方法;在仅已知增益界时,需要采用鲁棒或小增益方法;在参数未知时,可采用自适应估计;而在解析结构难以获得时,则可能需要智能逼近或观测重构。反之,同一种控制方法在状态互联、输入互联、输出互联和动态互联条件下,也会面临不同的信息可获得性和稳定性分析问题。未来的研究需要进一步融合物理结构、局部测量和在线数据,在降低未知耦合处理保守性的同时,保持整体闭环稳定性与动态性能结论的可验证性。

4 暂态性能提升:从渐近稳定到预设时间控制

稳定性需要明确系统状态是否最终趋近目标,而工程任务通常还关心调节时间、超调量、振荡幅度和控制峰值。对于互联系统,暂态性能不仅由局部控制器决定,还受到耦合项和其他子系统初始状态的影响。因此,单个子系统的收敛速度不能直接代表整体系统的暂态性能。

4.1 互联作用引起的暂态性能退化

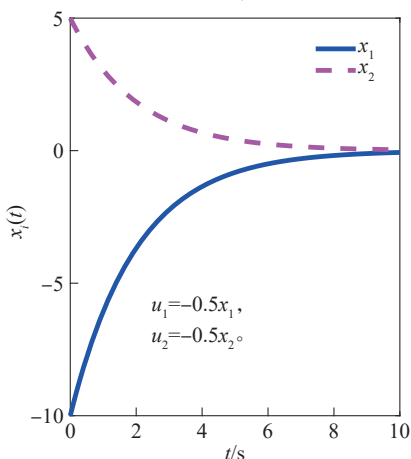
由于子系统之间存在物理耦合或动态交互,互联作用可能改变闭环特征结构,稳定裕度降低、收敛速度下降,甚至引起系统失稳。因此,分析互联耦合对系统稳定性和暂态性能的影响,是设计高性能分散式控制器的基础。

为说明互联项对系统动态性能的影响,考虑如下由两个一阶子系统构成的简单互联系统:

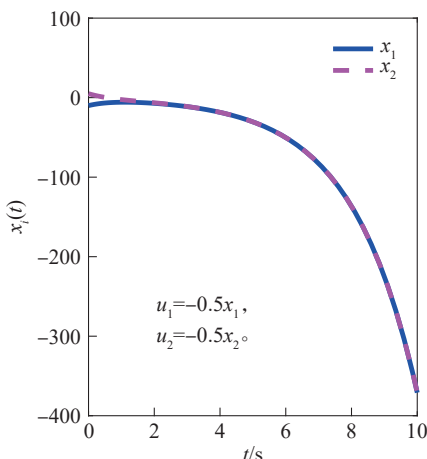
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = u_1 + \epsilon x_2, \\ \dot{x}_2 = u_2 + \epsilon x_1 \end{cases} \quad (15)$$

式中, ϵ 为子系统之间的互联耦合强度,用于刻画两个子系统状态变量之间的动态相互作用程度。

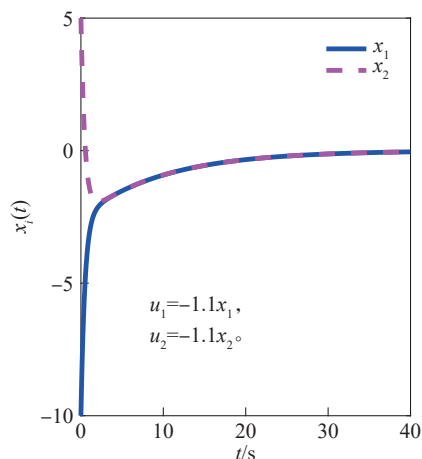
选取局部控制器,表达式为:



(a) 无互联系统



(b) 互联导致失稳



(c) 增强控制后稳定

图2 互联系统交互扰动下收敛性能差异分析

Fig. 2 Analysis of convergence performance differences of interconnected systems under interactive disturbances

对于未知互联,单纯增大局部控制增益虽可能提高鲁棒裕度,却会引起控制峰值过大、噪声放大和执行器饱和。因此,暂态性能设计不能仅依赖“足够大的控制增益”,而应显式处理耦合强度、时间指标和控制资源之间的关系。

4.2 渐近稳定到预设性能控制

早期的分散式控制主要基于渐近稳定理论,通过Lyapunov方法保证系统状态最终收敛至平衡点,即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0 \quad (19)$$

式中, $x(t)$ 为系统在时刻 t 的状态。

若能够证明式(20),则可获得指数衰减率 λ ,指数稳定能够定量描述收敛速度,但达到给定误差邻域所需时间仍依赖初始状态。对于互联系统,整体衰减率往往由最弱局部稳定裕度和最大互联增益共同决定,小增益条件只能给出保守下界^[7]。

$$\|x(t)\| \leq ce^{-\lambda t} \|x_0\| \quad (20)$$

式中: c 为收敛系数, $c > 0$; x_0 为系统初始状态。

有限时间控制要求系统状态能够在有限时间

$$\begin{cases} u_1 = -k_1 x_1, \\ u_2 = -k_2 x_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中, k_1, k_2 为设计参数。闭环系统为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 & \epsilon \\ \epsilon & -k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其特征多项式为:

$$\lambda^2 + (k_1 + k_2)\lambda + (k_1 k_2 - \epsilon^2) \quad (18)$$

式中, λ 为闭环系统矩阵的特征值。

当 $\epsilon^2 > k_1 k_2$ 时,即使两个孤立子系统均稳定,整体闭环仍会失稳;当 ϵ^2 接近 $k_1 k_2$ 时,系统虽然稳定,但衰减速度明显下降。这表明互联作用不仅决定最终稳定性,还改变闭环特征值、收敛速度和振荡程度。互联系统交互扰动下收敛性能差异分析如图2所示。

$T(x_0)$ 内收敛至平衡点,并在达到平衡状态后保持稳定不变^[20],其典型Lyapunov条件为:

$$\dot{V} \leq -cV^\alpha, 0 < \alpha < 1 \quad (21)$$

式中, α 为Lyapunov函数指数参数, V 为正定Lyapunov函数。由此可得:

$$T(x_0) \leq \frac{V^{1-\alpha}(0)}{c(1-\alpha)} \quad (22)$$

式中, $V(0)$ 为初始时刻的Lyapunov函数值。

与渐近稳定控制相比,有限时间控制能够提高收敛速度和抗扰能力。但调节时间显式依赖系统状态初值,当初始状态增大时,时间上界可能显著增加。然而,有限时间控制通常依赖非Lipschitz连续反馈或滑模等非连续控制机制,在提高收敛速度的同时可能导致控制输入快速变化和抖振现象,从而增加执行器响应带宽、采样频率及数字实现精度的要求。对于存在互联耦合和通信约束的大规模系统,局部控制输入的快速变化还可能通过互联通道放大,引发邻近子系统暂态性能退化^[52]。

固定时间控制要求存在与初始状态无关的统一时间上界 $T_{\max}$, 其典型 Lyapunov 条件为:

$$\dot{V} \leq -aV^p - bV^q, 0 < p < 1 < q \tag{23}$$

式中, a, b, p, q 为设计参数。从而, 可以得到:

$$T(x_0) \leq T_{\max} \leq \frac{1}{a(1-p)} + \frac{1}{b(q-1)} \tag{24}$$

固定时间控制消除了调节时间对系统状态初值的依赖, 适合初始状态范围难以准确获得的系统^[21]。但所得时间上界通常是充分条件下的保守估计, 且用户不能总是按任务要求直接指定任意收敛时间。对于互联系统, 各局部控制参数共同决定整体时间界, 若分别设计局部固定时间控制器, 仍不能自动保证整体系统具有统一固定时间性质^[53]。

预设性能控制通过性能函数对跟踪误差 $e(t)$ 施加动态约束:

$$-\underline{\delta}\rho(t) < e(t) < \bar{\delta}\rho(t) \tag{25}$$

式中: $\rho(t)$ 为决定允许的初始误差、收敛速度和稳态误差范围的性能函数; $\underline{\delta}$ 和 $\bar{\delta}$ 分别为误差下界和上界, 用于调节初始误差范围和性能约束精度。通过误差变换, 可将约束误差控制转化为无约束变换误差稳定问题^[22]。

预设性能控制的主要优势是能够同时设计超调量、收敛速率和稳态精度, 并可与自适应、神经网络和输出反馈方法结合^[23-24]。该方法通过构造性能函数约束误差演化过程, 使系统误差始终保持在预设性能域内, 但该约束并不必然意味着误差在指定时刻精确收敛至零。因此, 其性能函数设计需要满足初始误差可行性条件。在互联系统中, 未知或强耦合扰动还可能导致误差超出性能边界, 使误差变换失效。相比之下, 预设时间控制直接针对收敛时刻进行设计, 其目标是保证系统状态在指定时间内达到目标状态。

4.3 预设时间控制

预设时间控制要求收敛时间上界由用户预先指定, 并与系统初始状态无关。与固定时间控制相比, 其关键区别不只是存在统一上界, 而是该上界能够通过控制参数直接设定。其常用机制包括时间尺度变换、时变高增益、非线性反馈和动态增益设计^[25,54]。

互联系统预设时间控制面临 3 个附加难题: 1) 局

部误差在预设时间内收敛并不能自动推导出互联状态同步收敛, 必须解决耦合增益沿网络或物理通道传播的问题。2) 状态不可测时, 观测误差与控制误差必须在同一时间尺度内协调收敛; 传统渐近分离原理不能直接用于预设时间闭环。3) 时变高增益在终端时刻附近可能增大, 容易引起控制峰值过大、噪声放大和执行器饱和。

近年来, 预设时间分散式控制已由状态反馈拓展到输出反馈。针对非线性互联系统, 局部动态观测器和时变反馈可在缺少全状态测量的条件下实现预设时间稳定^[25]; 预设时间分离原理进一步研究了观测器与控制器独立设计后整体闭环的时间性能^[27]。对于不同阶次、非同构子系统, 输出反馈设计需要协调观测器维数、局部增益和互联补偿, 从而降低统一结构假设的限制^[29]。输入状态稳定性方法则将互联项视为内部输入, 为局部预设时间稳定推导出整体预设时间稳定提供了组合分析途径^[28]。

当系统同时包含物理互联和通信协同时, 可进一步形成分散-分布式综合架构: 底层分散式控制器仅利用本地信息保证各物理子系统的稳定, 上层分布式协议则通过邻居通信完成一致性、参考生成或资源协调^[26]。该架构避免将物理镇定和网络协同混为同一问题, 但其稳定性证明需要同时处理局部闭环动态、物理互联和通信拓扑。

矩阵束等代数方法为预设时间控制提供了另一种思路, 其价值在于从闭环矩阵结构、系统阶次和控制器参数之间的代数关系出发, 分析时变反馈或比例控制器的可实现性, 从而减少纯 Lyapunov 增益整定的保守性。但这类方法目前主要适用于具有特定规范形或线性化结构的系统, 若要向未知非线性、输出反馈和强互联系统推广仍需进一步研究。

表 4 给出了主要暂态性能控制范式比较。总体而言, 暂态性能理论并非简单的单向替代关系。有限时间控制和固定时间控制主要约束调节时间, 预设性能控制主要约束误差演化包络, 预设时间则强调时间界的可指定性。未来的研究需要在统一框架下同时处理时间、误差、控制幅值和安全约束, 并明确局部性能条件如何组合保证互联系统的全局性能。

表 4 主要暂态性能控制范式比较

Tab. 4 Comparison of transient performance-oriented control paradigms

方法	收敛时间特性	初值依赖	主要局限
渐近稳定控制	无限时间收敛	依赖初值	无法指定有限收敛时间, 互联可能降低衰减速度
有限时间控制	有限时间收敛	通常依赖初值	大初值可能导致收敛时间增加, 存在非光滑问题
固定时间控制	存在统一时间上界	与初值无关	时间上界可能保守, 难以直接指定
预设性能控制	性能函数约束误差演化	依赖初始性能域	强扰动或强耦合下易越界
预设时间控制	收敛时间可预先指定	与初值无关	存在高增益、噪声放大和执行器约束问题

4.4 安全约束下的分散式控制

传统分散式控制主要关注闭环系统的稳定性和跟踪性能,通过Lyapunov方法保证状态收敛或误差渐近消除。然而,在智能电网、多机器人系统及复杂工业过程等安全关键应用中,仅保证系统稳定已难以满足工程需求,控制系统还需要确保运行过程中状态变量和输出变量始终满足预设约束。因此,约束条件逐渐成为分散式控制性能设计的重要组成部分,研究目标由“最终稳定”进一步拓展为“全过程安全”。

根据约束对象的不同,现有研究主要可分为状态约束控制和输出约束控制两类。状态约束控制要求系统内部状态始终保持在给定安全区域内,例如,机械系统中的关节变量限制、能源系统中的运行边界约束及无人系统中的运动范围限制。针对具有不确定性、时滞和复杂互联作用的非线性系统,Zhang等^[55]结合自适应控制、神经网络逼近及分散式控制方法,在未知控制方向和全状态约束条件下实现闭环稳定控制,有效提升了系统在受限运行条件下的适应能力。

近年来,安全控制进一步拓展了分散式控制的约束性能研究。与传统基于Lyapunov函数的稳定性分析不同,控制障碍函数(CBF)通过构造安全集合,将状态约束转化为控制输入约束。对于安全集合有:

$$\mathcal{C} = \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) \geq 0\} \quad (26)$$

式中, $h(x)$ 为安全函数。CBF要求控制输入满足式(27),以保证系统状态始终保持在预设安全区域内。

$$L_f h(x) + L_g h(x)u + \gamma h(x) \geq 0 \quad (27)$$

式中: $L_f h(x)$ 和 $L_g h(x)$ 分别为安全函数 $h(x)$ 沿系统动态项和控制输入方向的Lie导数; γ 为安全约束参数,用于调节安全集合的不变性条件。针对复杂不确定非线性互联系统,Xu等^[56]将事件触发机制与安全控制相结合,在降低通信负担的同时保证系统状态满足预设安全约束。此外,针对存在时滞和未知非线性动态的互联系统,神经网络逼近、自适应控制与安全约束设计相结合的方法能够在线估计未知动态,并保证闭环系统在约束条件下保持稳定运行^[57]。

然而,安全约束、快速收敛性能与互联耦合作用之间仍存在一定矛盾。快速收敛往往需要较大的控制增益,可能降低安全裕度;同时,复杂互联可能使局部安全约束难以保证整体系统安全。现有安全分散式控制方法通常依赖已知约束边界、互联增益或系统结构,对于强耦合、动态拓扑及未知环境下的统一安全性能分析仍存在不足。未来需要进一步融合预设时间控制、弹性控制和智能增强方法,建立同时满足稳定性、暂态性能及安全约束的统一分散式控制框架。

5 工程应用、实现挑战与未来发展趋势

分散式控制的工程价值在于利用局部信息实现模块化控制,降低对全局通信和集中计算的依赖。然而,不同工程对象的互联来源、信息条件和性能约束存在明显差异。因此,应用分析需要关注物理耦合机制、本地可测信息及控制目标,而非简单罗列应用领域。

智能电网是分散式控制的重要应用场景。发电单元、变流器、储能装置和负荷通过电气网络形成动态互联系统,局部电压、频率和功率变化会通过潮流耦合影响其他节点。因此,仅保证单个能源单元稳定并不能直接保证整体系统性能。分散式控制器可利用本地测量信息实现电压、频率和功率调节,减少对集中调度的依赖^[34,38,58]。然而,可再生能源波动、运行点变化、变流器约束及故障传播等因素,使强耦合条件下的稳定性与动态性能仍是关键问题。对于包含功率协调和频率一致性的任务,通常需要引入有限通信机制,此时应明确区分底层分散稳定控制与上层分布式协调控制。

在多机器人和机械互联系统中,耦合可能来源于接触力、共享负载、机械约束或协同任务。例如:多机械臂共同操作同一目标时,系统动态由物理耦合决定;基于无线通信实现编队或一致性的移动机器人系统则更接近分布式多智能体控制。对于物理互联系统,分散式控制可利用本体状态、关节力矩和局部传感信息完成控制设计,避免对全阶高维模型的求解。主要挑战包括动力学不确定性、接触切换、输入饱和及安全约束。自适应、鲁棒和预设性能方法分别为参数不确定、外部扰动和误差约束提供了处理途径,但局部安全条件向整体协同安全的推广仍需进一步研究^[59-61]。

流程工业和能源化工系统通常由反应器、换热器、供水单元等多个子过程组成,通过物质流、能量流和压力通道形成复杂互联。局部控制回路之间的耦合可能导致振荡、性能下降及约束冲突。分散式控制能够将高维过程划分为多个局部控制单元,利用温度、压力、流量等局部信息降低控制复杂度。针对非线性、时滞和输入约束问题,鲁棒控制、自适应控制及分散模型预测控制得到广泛研究。然而,当系统存在共享资源和全局约束时,严格分散结构通常难以实现协调优化,因此,需要结合有限通信或分层控制架构。

无人系统集群的应用进一步体现了分散式控制在动态环境下面临的挑战。无人机、无人车和水下机器人通常具有复杂本体动力学,并受到通信中断、拓扑变化、外部扰动和安全风险影响。需要指出的是,单

个无人系统的姿态和轨迹稳定属于分散式控制问题,而编队、一致性和任务分配通常依赖邻居通信,更接近分布式协同控制。因此,未来无人系统控制需要在分散稳定控制与分布式协同决策之间建立有效的协调机制。

虽然上述应用的物理背景不同,但均面临复杂耦合、信息受限、不确定动态和性能约束等共性问题。面向工程实现,分散式控制方法不仅需要保证理论稳定性,还应综合考虑控制峰值、通信成本、计算时间、传感误差及故障恢复能力。未来的工程验证需要突破基于理想数学模型的仿真验证模式,进一步考虑模型不确定性、参数偏差、耦合强度变化及运行环境扰动对闭环性能的影响,并结合控制器在环实验、硬件在环测试和多子系统实验平台开展系统级验证。实际系统可能同时包含连续与离散动态、不同阶次、时滞及结构变化,因此,需要发展能够描述复杂物理互联关系,并支持组合稳定分析的新型模型框架。现有向量 Lyapunov 函数、小增益理论和耗散性方法仍具有重要作用,但需要进一步降低保守性,提高对复杂耦合结构的刻画能力。纯模型方法难以处理未知工况,而纯数据方法缺少稳定性的保证,因此,模型-数据融合控制将成为未来的重要研究方向。

未来的研究需要结合在线辨识、数字孪生和稳定性分析方法,实现互联动态估计、控制器调整和闭环验证的一体化。同时,强化学习和图神经网络为未知环境下的自主控制提供了新的可能,但仍需结合 Lyapunov 约束、安全屏障函数和鲁棒优化方法,保证学习过程和闭环系统的安全性。此外,预设时间控制的工程实现仍需进一步研究,现有方法主要关注理论收敛时间,对执行器约束、噪声放大、采样误差及控制峰值考虑不足,需要进一步研究满足输入幅值和带宽限制条件下的预设时间可实现性,并协调观测器、控制器及通信机制之间的时间尺度。针对复杂网络中的故障和攻击问题,安全弹性分散式控制也是重要的发展方向。未来的控制系统不仅需要具备故障检测和补偿能力,还应实现主动防御、自主隔离和性能恢复。同时,即插即用控制和标准化接口设计将推动分散式控制由理论研究走向大规模工程部署。

6 结 论

大规模互联系统分散式控制的基本目标,是在各局部控制器仅能获得本地状态或输出的条件下,利用局部反馈共同保证整体系统的稳定性与动态性能。经过长期发展,该领域已经形成若干基本共识:信息结构会从根本上限制系统的可镇定性和可实现性能;单

个子系统稳定不能直接推导出互联系统稳定;互联模型及其可用信息决定耦合项的处理方式;局部控制性能只有在满足适当组合条件时才能转化为全局性能的保证。

从理论演进看,分散式控制已由线性系统固定模式和结构镇定问题,拓展到非线性、不确定、时滞、状态不可测和通信受限的复杂互联系统。耦合作用的处理也经历了从精确补偿与解耦,到鲁棒抑制和小增益分析,再到自适应估计、神经网络或模糊逼近的发展过程。与此同时,控制目标由渐近稳定逐步扩展到有限时间控制、固定时间控制、预设性能控制和预设时间控制,研究重点从定性稳定性保证转向以收敛时间、误差边界和控制代价为指标的定量设计。现有理论仍存在明显局限。复杂异构强耦合系统缺少兼顾模型表达能力和可分析性的统一框架;鲁棒和小增益方法通常依赖已知互联界并存在保守性;自适应与智能逼近方法在完全未知互联下多以一致最终有界为主要结论;预设时间控制中的时变高增益、观测误差、控制峰值和执行器约束尚未得到统一处理。此外,分散式控制、分布式控制和多智能体协同控制在部分研究中仍存在概念交叉,需要从物理互联和通信信息结构两个层次加以区分。

未来的研究应从理论、方法和工程 3 个层面推进。在理论层面,需要发展面向动态、异构和强耦合系统的组合建模与低保守稳定性条件,并研究局部性能和安全证书的全局组合机制。在方法层面,应推动研究模型-数据融合、具有稳定性约束的强化学习、拓扑可迁移的图神经网络及面向攻击和故障的安全控制。在工程层面,应结合数字孪生、硬件在环和真实多子系统平台,系统评估控制方法在模型误差、通信异常、采样噪声和执行器约束下的性能。分散式控制的未来发展重点并非单纯增加控制器复杂度,而是在有限局部信息和有限控制资源下,保证可解释、可组合、可验证、可工程实施的整体性能。沿着“互联结构表征—耦合作用处理—暂态性能提升—智能化与安全增强”的路径推进,有望进一步缩小分散式控制理论与大规模工程系统实际需求之间的差距。

参考文献:

- [1] Sandell N,Varaiya P,Athans M,et al.Survey of decentralized control methods for large scale systems[J].IEEE Transactions on Automatic Control,1978,23(2):108-128.
- [2] Bakule L.Decentralized control:An overview[J].Annual Reviews in Control,2008,32:87-98.
- [3] Kordestani M,Safavi A A,Saif M.Recent survey of large-scale systems: Architectures,controller strategies,and indus-

- trial applications[J].IEEE Systems Journal,2021,15(4):5440–5453.
- [4] Wang S H,Davison E.On the stabilization of decentralized control systems[J].IEEE Transactions on Automatic Control,1973,18(5):473–478.
- [5] Anderson B D O,Clements D J.Algebraic characterization of fixed modes in decentralized control[J].Automatica,1981,17(5):703–712.
- [6] Šiljak D.Decentralized Control of complex systems[M]. New York:Academic Press,1991.
- [7] Ioannou P.Decentralized adaptive control of interconnected systems[J].IEEE Transactions on Automatic Control,1986,31(4):291–298.
- [8] Shi L,Singh S K.Decentralized adaptive controller design for large-scale systems with higher order interconnections[J].IEEE Transactions on Automatic Control,1992,37(8):1106–1118.
- [9] Wen Changyun.Decentralized adaptive regulation[J].IEEE Transactions on Automatic Control,1994,39(10):2163–2166.
- [10] Wen Changyun,Soh Y C.Decentralized adaptive control using integrator backstepping[J].Automatica,1997,33(9):1719–1724.
- [11] Wen Changyun,Zhou Jing,Wang Wei.Decentralized adaptive backstepping stabilization of interconnected systems with dynamic input and output interactions[J].Automatica,2009,45(1):55–67.
- [12] Jiang Zhongping.Decentralized and adaptive nonlinear tracking of large-scale systems *via* output feedback[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2000,45(11):2122–2128.
- [13] Ye Xudong,Huang Jie.Decentralized adaptive output regulation for a class of large-scale nonlinear systems[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2003,48(2):276–281.
- [14] Yoo S J,Park J B.Decentralized adaptive output-feedback control for a class of nonlinear large-scale systems with unknown time-varying delayed interactions[J].Information Sciences,2012,186(1):222–238.
- [15] Yoo S J,Park J B.Neural-network-based decentralized adaptive control for a class of large-scale nonlinear systems with unknown time-varying delays[J].IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics,Part B(Cybernetics),2009,39(5):1316–1323.
- [16] Li Yuanxin,Yang Guanghong.Graph-theory-based decentralized adaptive output-feedback control for a class of nonlinear interconnected systems[J].IEEE Transactions on Cybernetics,2019,49(7):2444–2453.
- [17] Ma Hongjun,Xu Linxing.Decentralized adaptive fault-tolerant control for a class of strong interconnected nonlinear systems *via* graph theory[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2021,66(7):3227–3234.
- [18] Liu Siqi,Jiang Xiaoli.Adaptive neural network decentralized control for nonlinear interconnected systems with time-varying constraints[J].International Journal of Robust and Nonlinear Control,2022,32(9):5520–5533.
- [19] Sun Haibin,Hou Linlin,Wei Yunliang.Decentralized dynamic event-triggered output feedback adaptive fixed-time funnel control for interconnection nonlinear systems[J].IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2024,35(1):1364–1378.
- [20] Bhat S P,Bernstein D S.Finite-time stability of continuous autonomous systems[J].SIAM Journal on Control and Optimization,2000,38(3):751–766.
- [21] Polyakov A.Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2012,57(8):2106–2110.
- [22] Bechlioulis C P,Rovithakis G A.Adaptive control with guaranteed transient and steady state tracking error bounds for strict feedback systems[J].Automatica,2009,45(2):532–538.
- [23] Hua Changchun,Zhang Liuliu,Guan Xinping.Decentralized output feedback adaptive NN tracking control for time-delay stochastic nonlinear systems with prescribed performance[J].IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2015,26(11):2749–2759.
- [24] Zhang Jinxi,Song Junguo,Shi Peng.Decentralized robust global prescribed performance control of unknown interconnected nonlinear systems[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2024,71(11):14701–14711.
- [25] Ye Hefu,Wen Changyun,Song Yongduan.Decentralized prescribed-time control for interconnected nonlinear systems *via* output-feedback[J].Automatica,2024,163:111571.
- [26] Ye Hefu,Wen Changyun,Song Yongduan.Decentralized and distributed control of large-scale interconnected multiagent systems in prescribed time[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2025,70(2):1115–1130.
- [27] Ye Hefu,Song Yongduan.A separation principle for the prescribed-time stabilization of a class of nonlinear systems[J].Automatica,2025,171:111983.
- [28] Ye Hefu,Wen Changyun,Lam J,et al.Decentralized prescribed-time input-to-state stabilization for interconnected normal form nonlinear systems[J].Automatica,2025,180:112480.
- [29] Tan Yan,Ye Hefu,Wen Changyun,et al.Decentralized prescribed-time output-feedback control for interconnected systems with coupled non-identical subsystems of different

- orders[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2026, 13(5): 1097–1107.
- [30] Liu Jinliang, Zhang Nan, Zha Lijuan, et al. Reinforcement learning-based decentralized control for networked interconnected systems with communication and control constraints[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 21(3): 4674–4685.
- [31] van der Heijden M G A, Martin F M, Selosse M A, et al. Mycorrhizal ecology and evolution: The past, the present, and the future[J]. New Phytologist, 2015, 205(4): 1406–1423.
- [32] Donges J F, Zou Y, Marwan N, et al. Complex networks in climate dynamics: Comparing linear and nonlinear network construction methods[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2009, 174(1): 157–179.
- [33] Beni G. Swarm intelligence[M]//Complex Social and Behavioral Systems: Game Theory and Agent-Based Models. New York: Springer, 2020: 791–818.
- [34] Chen Meng, Xiao Xiangning, Guerrero J M. Secondary restoration control of islanded microgrids with a decentralized event-triggered strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(9): 3870–3880.
- [35] Wang Ye, Puig V, Cembrano G. Non-linear economic model predictive control of water distribution networks[J]. Journal of Process Control, 2017, 56: 23–34.
- [36] Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215–233.
- [37] 陈禹六. 大系统理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [38] Guo Yi, Hill D J, Wang Youyi. Nonlinear decentralized control of large-scale power systems[J]. Automatica, 2000, 36(9): 1275–1289.
- [39] Liu Yangyu, Slotine J J, Barabási A L. Controllability of complex networks[J]. Nature, 2011, 473(7346): 167–173.
- [40] 涂序彦. “大系统控制论”的创立及其应用[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(12): 1613–1615.
- [41] 高为炳, 霍伟. 大系统的稳定性、分散控制及动态递归控制基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994.
- [42] Li Zhongkui, Ren Wei, Liu Xiangdong, et al. Consensus of multi-agent systems with general linear and Lipschitz nonlinear dynamics using distributed adaptive protocols[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(7): 1786–1791.
- [43] Zhang Ying, Wen Changyun, Soh Y C. Robust decentralized adaptive stabilization of interconnected systems with guaranteed transient performance[J]. Automatica, 2000, 36(6): 907–915.
- [44] Niu Ben, Liu Jidong, Wang Ding, et al. Adaptive decentralized asymptotic tracking control for large-scale nonlinear systems with unknown strong interconnections[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(1): 173–186.
- [45] Wen Changyun, Hill D J. Global boundedness of discrete-time adaptive control just using estimator projection[J]. Automatica, 1992, 28(6): 1143–1157.
- [46] Lunze J. Feedback control of large-scale systems[M]. New York: Prentice-Hall, 1992: 162–165.
- [47] Cai He, Hu Guoqiang. Distributed tracking control of an interconnected leader–follower multiagent system[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(7): 3494–3501.
- [48] Zhang Zhirong, Wen Changyun, Zhao Kai, et al. Decentralized adaptive control of uncertain interconnected systems with triggering state signals[J]. Automatica, 2022, 141: 110283.
- [49] Lavaei J. Decentralized implementation of centralized controllers for interconnected systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(7): 1860–1865.
- [50] Hill D J, Wen Changyun, Goodwin G C. Stability analysis of decentralised robust adaptive control[J]. Systems & Control Letters, 1988, 11(4): 277–284.
- [51] Du Peihao, Liang Hongjing, Zhao Shiyi, et al. Neural-based decentralized adaptive finite-time control for nonlinear large-scale systems with time-varying output constraints[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (Systems), 2021, 51(5): 3136–3147.
- [52] Cao Yongcan, Ren Wei, Meng Ziyang. Decentralized finite-time sliding mode estimators and their applications in decentralized finite-time formation tracking[J]. Systems & Control Letters, 2010, 59(9): 522–529.
- [53] Yao Yangang, Tan Jieqing, Wu Jian, et al. Decentralized fixed-time control for state-constrained stochastic systems via nonlinear state-dependent function approach[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2022, 32(8): 4923–4945.
- [54] Song Yongduan, Wang Yujuan, Holloway J, et al. Time-varying feedback for regulation of normal-form nonlinear systems in prescribed finite time[J]. Automatica, 2017, 83: 243–251.
- [55] Zhang Liuliu, Zhu Lingchen, Hua Changchun, et al. Adaptive decentralized control for interconnected time-delay uncertain nonlinear systems with different unknown control directions and deferred full-state constraints[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2023, 34(12): 10789–10801.
- [56] Xu Yan, Sun Ang, Qin Chunbin. Decentralized event-triggered safe control for complex uncertain nonlinear intercon-

- nected systems with safety constraints[J/OL].Chinese Physics B,[2026-05-31]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-1056/ae4e88>.
- [57] Liu Chong,Wang Leiming,Chu Zhousheng,et al.Neural network-based adaptive decentralized safe control for interconnected nonlinear systems with time delays[J].ISA Transactions,2025,166:168-178.
- [58] Olivares D E,Mehrizi-Sani A,Etemadi A H,et al.Trends in microgrid control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,5(4):1905-1919.
- [59] Ren Wei.Distributed attitude alignment in spacecraft formation flying[J].International Journal of Adaptive Control and Signal Processing,2007,21(2/3):95-113.
- [60] Ning Boda,Han Qinglong.Prescribed finite-time consensus tracking for multiagent systems with nonholonomic chained-form dynamics[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2019,64(4):1686-1693.
- [61] Dong Xiwang,Li Yangfan,Lu Chuang,et al.Time-varying formation tracking for UAV swarm systems with switch-

ing directed topologies[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2019,30(12):3674-3685.

【校友简介】



宋永端,IEEE会士(Fellow),中国工程院外籍院士。现任重庆大学人工智能学院院长。曾任美国国家航空航天研究院六位Langley杰出教授之一,并担任合作系统研究中心创始主任。主要研究方向包括智能系统、制导导航与控制、生物启发式自适应系统及协同控制系统等。曾担任多个国际权威期刊编委,包括*IEEE Transactions on Automatic Control*、*IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*、*IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*、*IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*等。目前担任*IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*主编。获得授权中国、美国、日本发明专利100余项。

Research Advances and Future Trends of Decentralized Control in Large-scale Interconnected Systems

SONG Yongduan, TAN Yan, YE Hefu

(School of Automation, Chongqing University, Chongqing 401331, China)

Abstract:

Significance Interconnected control systems are widely encountered in modern engineering applications, including energy networks, industrial processes, and multirobot systems. These systems comprise multiple relatively independent subsystems coupled through physical connections, material flows, energy exchanges, or other dynamic interactions, thereby forming an integrated large-scale dynamical system. Unlike conventional high-dimensional systems, the main difficulty in using interconnected systems does not arise solely from the increase in system dimensions, but from the strong coupling relationships among subsystems and the resulting challenges in stability analysis and controller design. A fundamental problem in such systems is that the satisfactory stability of individual subsystems does not guarantee the stability and performance of the overall system. Dynamic interactions among subsystems may modify closed-loop characteristics, reduce stability margins, deteriorate transient responses, and even cause instability under certain operating conditions. With the continuous expansion of engineering system scales and increasing complexity of control objectives, traditional centralized control strategies face considerable limitations in communication requirements, online computational burden, and scalability. The need for global system information and centralized decision-making mechanisms makes such approaches difficult to implement in large-scale systems with limited communication resources and real-time constraints. Decentralized control strategies, which have been developed by designing local feedback controllers based only on subsystem-level states or outputs without requiring global state information or information exchange among controllers, provide an effective solution with simple structures, low implementation costs, and favorable scalability. However, due to physical couplings and dynamic interactions, decentralized controllers designed independently for individual subsystems may still experience degraded transient performance, including increased settling time, excessive overshoot, and intensified oscillations. Therefore, improving closed-loop transient performance while maintaining stability under interconnection effects has become an important research challenge in the decentralized control of large-scale interconnected systems.

Progress In this article, representative theoretical achievements and technical developments in decentralized control for large-scale intercon-

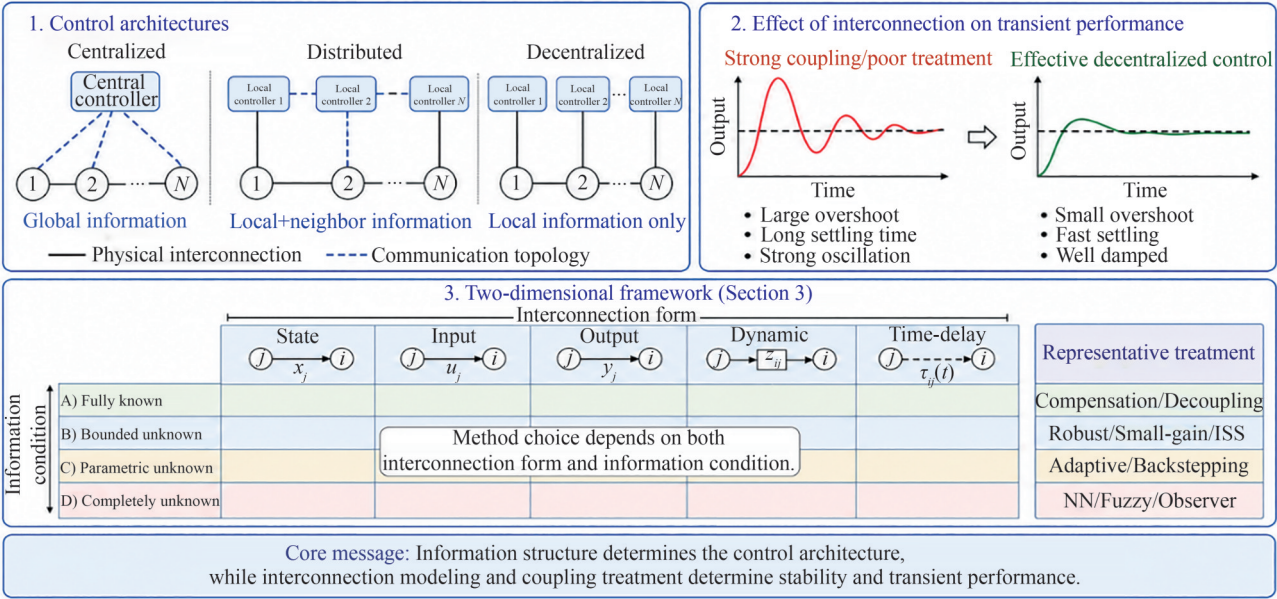
nected systems are systematically reviewed from three perspectives: interconnected system modeling and characterization, coupling effect mitigation, and closed-loop performance analysis. First, centralized, distributed, and decentralized control architectures were compared from the perspective of information structures. This enabled the differences in information requirements, communication mechanisms, computational modes, scalability, and typical application scenarios to be clarified. It was found that centralized control relies on global system information and centralized computation, distributed control requires information exchange among neighboring subsystems through communication networks, whereas decentralized control mainly relies on local subsystem information without real-time communication among controllers. Next, typical modeling approaches for interconnected systems were summarized. State interconnection, input interconnection, output interconnection, dynamic interconnection, and time-delay interconnection models were reviewed according to their different physical coupling mechanisms. The characteristics, modeling assumptions, and limitations of these interconnection structures were analyzed, together with their influences on stability analysis and controller design. State interconnection models were used to describe the coupling effects caused by subsystem states, whereas input and output interconnection models were adopted to characterize the interactions through control actions and measured variables. Dynamic and time-delay interconnection models were used to describe more complex physical processes involving internal coupling dynamics, transmission delays, and memory effects. Furthermore, coupling-handling methods under different levels of interconnection information availability were reviewed. For systems with completely known interconnections, exact compensation, decoupling control, and dynamic compensation approaches were found to directly utilize structural coupling information. For systems with bounded but uncertain interconnections, robust control, sliding-mode control, input-to-state stability analysis, and small-gain techniques were investigated to guarantee stability without requiring accurate coupling models. For systems with unknown parameters, adaptive control, backstepping methods, and dynamic surface control approaches were adopted to estimate uncertain parameters online and reduce the influence of modeling errors. When nonlinear interconnections are completely unknown, neural-network approximation, fuzzy approximation, and observer-based reconstruction methods were explored to approximate unknown dynamics. The applicable conditions, theoretical advantages, and inherent limitations of these approaches were compared, particularly regarding conservatism, computational complexity, and practical implementation difficulties. In terms of closed-loop performance improvement, the review focused on the evolution of decentralized control objectives from asymptotic stability to finite-time control, fixed-time control, prescribed performance control, and prescribed-time control. Different control paradigms were analyzed according to the convergence characteristics, dependence on initial conditions, transient response improvement, and engineering implementation constraints. Additionally, considering the safety requirements of practical systems, state constraints, output constraints, and safety control methods were investigated. The integration of constraint handling and safety mechanisms into decentralized control extended the research objective from guaranteeing final stability to ensuring safe operation throughout the entire control process.

Conclusions and Prospects Although substantial advances have been made in the decentralized control of interconnected systems, several challenges remain. For strongly coupled and heterogeneous systems, unified modeling frameworks and effective analysis methods are required to describe complex interconnection structures while reducing conservatism in stability conditions. The treatment of unknown interconnections remains challenging because existing approaches often rely on predefined bounds or structural assumptions, which may limit their applicability in uncertain operating environments. Improving transient performance through rapid convergence mechanisms may introduce large control gains, noise amplification, and actuator saturation problems, leading to difficulties in practical implementation. The integration of intelligent control methods also requires further investigation to ensure stability, interpretability, and reliable performance guarantees rather than relying solely on data-driven optimization. Future research should focus on modeling and analysis of strongly coupled heterogeneous systems, adaptive compensation of unknown interconnections, model-data fusion-based decentralized control, intelligent enhancement with stability guarantees, and resilient control under safety constraints and external disturbances. These developments are expected to move decentralized control theory toward more scalable, reliable, and practical solutions for future large-scale complex engineering systems.

Key words: decentralized control; large-scale system; interconnected system; transient performance; prescribed-time control

Graphical abstract:

Decentralized control of large-scale interconnected systems



(编辑 赵 婧)

引用格式: Song Yongduan, Tan Yan, Ye Hefu. Research advances and future trends of decentralized control in large-scale interconnected systems[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(5): 121–137. [宋永端, 谭燕, 叶合夫. 大规模互联系统分散式控制研究现状与趋势[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(5): 121–137.]