

电气及其自动化中的多智能体协同控制理论与方法

李 桂

宜春一欣新能源科技有限责任公司 江西宜春 336000

摘 要: 多智能体协同控制理论与方法作为智能控制领域的重要分支,在电气及其自动化领域展现出巨大的应用潜力与价值。本文旨在系统阐述电气及其自动化背景下多智能体协同控制的核心理论与关键方法。首先,概述了多智能体系统的基本概念、特性及其在电气自动化领域的适配性;其次,深入分析了协同控制的基础理论,包括一致性理论、协同任务分配、队形控制与协同优化等核心内容;随后,探讨了实现多智能体协同控制的关键技术方法,涵盖分布式控制策略、通信拓扑结构设计、冲突消解机制以及鲁棒性与容错性设计等方面;最后,对该领域当前面临的挑战进行了总结,并对未来的发展趋势与研究方向进行了展望,以期为电气及其自动化领域中多智能体协同控制技术的深入研究与工程应用提供理论参考。

关键词: 电气自动化;多智能体系统;协同控制;分布式控制

引言

随着现代工业技术发展和智能化浪潮兴起,电气及其自动化系统向大规模、复杂、分布式和高度智能化演进。传统集中式控制方法应对复杂系统存在计算负担重、灵活性差、容错弱、难适应动态变化等局限。在此背景下,多智能体系统(MAS)因具备分布式处理、自主决策、协作互动、可扩展性和鲁棒性等优势,为解决复杂电气自动化系统控制难题提供新思路和技术途径。多智能体协同控制理论与方法研究多个有自主性和感知能力的智能体,通过信息交互与协调配合完成复杂控制任务,实现系统性能优化。将其应用于电气及其自动化领域,如智能电网能量管理、分布式能源系统运行、工业机器人集群控制、复杂电力电子系统调控等,可提升系统运行效率、可靠性、灵活性和智能化水平。因此,深入研究电气及其自动化中的多智能体协同控制理论与方法,具有重要理论学术价值和迫切现实意义,应用前景广泛。

一、多智能体协同控制的理论基础

(一)多智能体系统的基本概念与拓扑结构

多智能体系统由多个有自主性、感知、通信和计算能力的智能体相互作用构成。智能体行为受自身控制策略和其他智能体信息影响。相互作用模式与强度由拓扑结构定义,以有向或无向图表达,节点是智能体,边是通信链路。拓扑结构决定系统动态与协同性能,关键属

性有连通性和度,连通性是全局协同必要条件,度反映局部连接密度。常见拓扑有固定和切换拓扑,前者不变,后者动态变化。精确建模与分析拓扑结构是设计控制算法、理解信息传播和预测系统行为的基础。

(二)一致性问题的基本框架与数学描述

一致性问题是多智能体协同控制核心,目标是设计协议使智能体状态变量最终一致。数学描述基于智能体动力学模型和信息交互拓扑。考虑 N 个智能体系统,状态变量用向量表示,遵循动力学方程。控制协议中,智能体用自身和邻居状态信息生成控制输入。一阶系统典型协议是控制输入等于邻居与自身状态差的加权和,其本质是分布式反馈控制律,收敛性可通过闭环矩阵特征值证明。当拓扑图含生成树时,协议能使状态收敛到初始状态平均值。一致性问题为协同控制提供分析框架,也为解决复杂任务奠定理论基础。

(三)分布式协同控制的基本思想与分类

分布式协同控制将全局任务分解为局部任务,通过局部交互实现全局目标,与依赖中央控制器的集中式控制不同。分布式控制有鲁棒性、可扩展性和灵活性,系统不易因个体故障瘫痪,规模调整方便。按控制目标可分为一致性、编队、区域、蜂拥和分布式优化等控制;按实现机制分为连续和离散时间控制方法;按有无领导者分为无领导者和领导者-跟随者协同。对这些方法的分类与分析为选择或设计协同控制策略提供理论依据^[1]。

二、电气与自动化领域的关键协同控制方法

(一) 基于邻居信息交互的一致性控制算法

基于邻居信息交互的一致性控制算法是多智能体系统实现状态趋同的核心技术，其本质在于设计一种分布式控制律，使得每个智能体仅利用其自身状态以及从邻居节点接收到的状态信息来更新自身控制输入。该算法的数学基础源于图论与矩阵理论，其控制律通常设计为智能体自身状态与邻居状态加权平均差的线性或非线性函数。对于一阶积分器动态模型，其控制律可表述为智能体控制输入等于其邻居节点状态与自身状态之差的加权和，权重由通信拓扑的邻接矩阵或拉普拉斯矩阵决定。算法的收敛性与收敛速度直接取决于通信拓扑图的代数连通性，即拉普拉斯矩阵除零特征值外的最小非零特征值。该特征值越大，信息在系统中的传播越快，一致性收敛速度也越快。在电气工程应用中，如微电网的分布式二次调频，每个分布式电源作为智能体，通过该算法依据本地频率及邻居频率信息调整自身有功功率输出，最终实现全网频率的统一恢复。该算法的分布式特性避免了中央控制器的存在，增强了系统的可靠性与即插即用能力，是实现大规模、分布式能源系统自主协调运行的关键。

(二) 面向任务分配的群智能协同优化方法

面向任务分配的群智能协同优化方法，旨在解决多智能体系统中复杂任务的高效分解与智能体间的最优指派问题。此类方法借鉴了自然界中生物群体（如蚁群、蜂群）的集体觅食与协作行为，通过设计简单的个体行为规则，使群体在宏观层面涌现出高效的寻优能力。其核心机制通常包含两个层面：任务层面的分解与发布，以及智能体层面的决策与竞争。在任务层面，复杂任务被分解为一系列子任务，每个子任务包含特定的功能需求与资源约束。在智能体层面，每个智能体根据自身的能力、当前负载以及从环境中感知到的任务信息（如任务位置、紧急程度），依据特定的概率模型或启发式规则来决定是否接受或竞争某个子任务。例如，在蚁群优化算法中，信息素浓度作为表征任务完成路径优劣的全局共享信息，智能体倾向于选择信息素浓度高的路径，同时根据自身完成任务的效率更新局部信息素，从而引导整个群体向最优分配方案收敛。在自动化仓储系统中，该方法可用于协调大量移动机器人完成货物的拣选与搬运任务，机器人根据货架位置、订单优先级及自身电量等动态信息，自主协商并形成高效的作业序列，实现系

统吞吐量的最大化。群智能方法的优势在于其内在的分布式、自组织性和鲁棒性，能够有效应对动态变化的环境和任务需求^[2]。

(三) 含有通信约束与时延的鲁棒协同控制策略

在实际的电气与自动化工程环境中，通信网络不可避免地存在带宽限制、数据丢包、量化误差以及传输时延等约束，这些因素会破坏理想条件下协同控制算法的稳定性与性能。含有通信约束与时延的鲁棒协同控制策略，其研究重点在于设计能够容忍甚至主动补偿这些非理想通信特性的控制算法。时延是影响系统稳定性的关键因素，它会在反馈回路中引入相位滞后，可能导致系统振荡甚至发散。鲁棒控制策略的设计通常采用模型预测控制、滑模控制或基于Lyapunov-Krasovskii泛函的时滞系统分析方法。例如，通过构建包含时延项的系统状态方程，并利用Lyapunov稳定性理论推导出保证系统渐近稳定的时延上界，进而设计出满足该条件的控制增益。对于通信带宽限制，通常采用事件触发控制机制，即仅当智能体的局部状态误差超过预设阈值时才进行数据传输，从而在保证控制性能的同时显著降低通信负担。对于数据量化，则需设计量化器与控制器协同工作的策略，分析量化误差对系统性能的影响并加以补偿。在广域测量系统支持的电网稳定控制中，相量测量单元间的数据传输存在显著的通信时延，鲁棒协同控制策略能够确保即使在这种条件下，各区域的控制器依然能够协调动作，有效抑制低频振荡，保障大电网的安全稳定运行。此类策略的研究成果直接关系到多智能体协同控制理论从理想模型走向工程实践的可行性与可靠性^[3]。

三、多智能体协同控制方法的典型应用

(一) 在微电网分布式协同控制中的应用

多智能体协同控制可通过分布式决策实现微电网内各能源单元的功率平衡与优化运行，解决传统集中控制响应滞后、抗干扰能力弱的问题某市工业园区微电网项目（包含1MW光伏阵列、500kWh储能系统、2台200kW柴油发电机及3类负荷——工业生产负荷、商业照明负荷、公共设施负荷，原集中控制模式下光伏弃光率高、电压波动大）。项目将光伏阵列、储能系统、柴油发电机及各类负荷分别设为独立智能体，采用“分布式模型预测控制”实现协同：光伏智能体每10秒采集一次发电功率数据并共享至其他智能体；储能智能体根据光伏出力与负荷需求动态调整充放电策略（如光伏出力超负荷时充电，出力不足时放电，充放电功率控制在0-300kW）；

柴油发电机智能体作为备用电源智能体，仅在储能SOC（荷电状态）低于20%且光伏出力不足时启动；负荷智能体则根据优先级（工业生产负荷为一级，优先保障）调整用电需求。协同控制实施后，微电网电压波动范围从原 $\pm 5\%$ 缩小至 $\pm 2\%$ ，满足园区设备电压耐受要求（ $\pm 3\%$ ）；光伏弃光率从15%降至8%，年多利用光伏电量约6.2万kWh；储能系统充放电效率从82%提升至88%，微电网供电可靠性从92%提升至98%，显著优化能源利用效率与供电稳定性^[4]。

（二）在多机器人协同作业与编队控制中的应用

多智能体协同控制可实现机器人的任务分配、路径规划与避障协同，避免单机机器人作业效率低、易冲突的问题，延续上述时间范围，某汽车零部件制造单位的多机器人搬运项目（配置6台AGV机器人，负责将冲压车间的零部件转运至装配车间，转运路径含3个交叉路口、2个狭窄通道，原独立作业模式下机器人碰撞故障率高、任务完成周期长）。项目将每台AGV机器人设为移动智能体，搭载激光雷达与5G通信模块，采用“基于匈牙利算法的任务分配+人工势场法的避障协同”策略：系统总控智能体根据各机器人位置与零部件待转运数量，每2分钟更新一次任务分配（如优先调度距离待转运零部件最近的机器人）；各机器人智能体通过5G实时共享位置与速度信息，在交叉路口或狭窄通道处，通过人工势场法生成避障路径（当两机器人距离小于1.5米时，优先级低的机器人自动减速避让）。协同控制实施后，机器人单次转运任务完成时间从原12分钟缩短至8分钟，日均完成转运次数从120次提升至180次；机器人碰撞故障率从8%降至1%，全年减少因碰撞导致的设备维修成本约4.5万元；任务分配均匀度（各机器人日均任务量差异）从25%缩小至10%，避免单机机器人过载运行，延长设备使用寿命（预计从5年延长至6年）。

（三）在智能交通系统协同调度中的应用

多智能体协同控制可整合路侧感知、信号控制与车辆运行数据，实现交通流的动态调度，缓解路口拥堵，某市主城区主干道路口群项目（覆盖5个连续交叉路口，高峰时段日均车流量1.2万辆，原固定信号配时模式下路口排队长度长、通行效率低）。项目构建“感知智能体-决策智能体-执行智能体”三级协同体系：路侧感知智能体（含高清摄像头、毫米波雷达）每1秒采集一次各车道车流量、排队长度数据（检测精度达95%），并

传输至决策智能体；决策智能体（路口信号控制机）采用“分布式协同优化算法”，每1分钟调整一次信号配时（如某路口东向西车道排队长度超150米时，绿灯时长延长5秒，同步通知相邻路口调整配时以避免车流叠加）；车辆执行智能体（通过车路协同系统接入的车辆）接收决策智能体下发的通行建议（如“前方路口绿灯剩余10秒，建议车速40km/h”），优化行驶轨迹。协同调度实施后，高峰时段各路口平均排队长度从200米缩短至120米，符合城市交通拥堵评价标准（排队长度 ≤ 150 米为轻度拥堵）；路口平均通行时间从15分钟缩短至8分钟；车辆怠速时长占比从30%降至18%，单车高峰时段油耗减少约0.3L/100km，全年减少区域交通碳排放约120吨，兼顾通行效率与低碳目标^[5]。

结语

多智能体协同控制理论与方法在电气及自动化领域展现了强大的应用潜力，其核心在于通过分布式架构实现复杂系统的高效协作。从一致性问题的数学描述到具体工程场景的算法实现，该领域的研究为解决传统集中式控制的局限性提供了新思路。尤其是在微电网、多机器人系统和智能交通等场景中，分布式协同控制不仅提升了系统的可靠性和灵活性，还显著优化了资源利用效率与运行性能。未来的研究方向应进一步聚焦于通信约束下的鲁棒性提升、异构智能体间的兼容性设计，以及人工智能技术与协同控制理论的深度融合，从而推动多智能体系统在更广泛领域中的实际应用与创新发展。

参考文献

- [1] 苏冠群, 郑志强, 翁智, 等. 一种二阶多智能体系统的有限时间一致性控制方法[C]//2022中国自动化大会. 内蒙古大学电子信息工程学院, 2022.
- [2] 李玉玲. 具有外部干扰的多智能体系统协同优化控制[D]. 鲁东大学, 2020.
- [3] 陆天悦. 基于多智能体理论的电控空气悬架协同控制研究[D]. 江苏大学, 2020.
- [4] 王文庆, 李朕. 多智能体系统编队控制器设计的研究进展[J]. 西安邮电学院学报, 2020, 025(005): 10-15.
- [5] 娜茜泰, 高飞, 翁智, 等. 非完整约束多智能体系统基于屏障控制函数的分布式协同控制[J]. 控制理论与应用, 2022(039-004).