

针对多电机协同的电力拖动自动化协同控制架构

栗起超 412825199007087015

摘要：随着工业生产自动化水平不断提升，多电机协同控制已经成为电力拖动系统实现高精度、高效率运行的核心技术方向。传统单电机控制架构难以满足现代复杂生产流程中多执行机构同步运行的需求，容易出现协同误差大、响应速度慢、抗干扰能力弱等问题。本文针对多电机协同电力拖动系统的控制需求，构建分层分布式协同控制架构，通过感知层、协同决策层与执行层的三级结构设计，实现多电机运行状态的实时同步与动态调节。研究表明，该架构能够有效降低协同控制误差，提升系统抗干扰能力，满足现代工业电力拖动系统的自动化运行需求。

关键词：多电机协同；电力拖动；自动化控制；控制架构

一、引言

电力拖动系统是现代工业生产设备的核心动力来源，承担着将电能转化为机械能驱动生产设备运行的核心功能。早期工业生产中，生产流程复杂度较低，多数生产设备仅依靠单电机驱动即可满足运行需求，控制架构以单电机闭环控制为主。近年来，随着智能制造、柔性生产等新型生产模式的推广，越来越多的工业生产设备需要多个电机配合完成生产动作，比如纺织机械的多辊同步牵引、包装生产线的多工位协同传动、智能仓储的多 AGV 协同运行等场景，都对多电机的协同控制精度与响应速度提出了更高要求。

传统多电机控制多采用主从控制模式，以一台电机作为主电机设定运行参数，其余从电机跟随主电机的运行状态调整输出，这种架构结构简单，易于实现，但在负载波动较大或者存在外部干扰的场景下，容易出现协同误差累积的问题，严重时会导致生产流程紊乱，影响产品质量甚至造成设备损坏。因此，构建适应多电机协同需求的新型电力拖动自动化控制架构，已经成为当前工业自动化领域的重要研究方向。

二、多电机协同电力拖动系统的控制需求分析

多电机协同电力拖动系统的核心目标是实现多个电机输出的转速、位置、转矩等参数保持同步，满足生产流程对运动精度的要求，具体控制需求可以归纳为三个方面：第一，同步精度需求。不同生产场景对同步精度的要求存在差异，但

高精度协同控制要求多电机的位置误差不超过 ± 1 个脉冲，转速误差控制在 0.5% 以内，才能保证生产产品的质量稳定性。比如在高精度印刷设备中，多组印刷辊的位置同步误差如果超过允许范围，就会出现套印偏差，导致印刷产品报废。

第二，动态响应需求。当生产流程发生工艺调整或者出现负载波动时，协同控制架构需要能够快速调整各电机的输出参数，在短时间内重新恢复同步状态，避免误差扩大。传统主从控制架构中，从电机的响应存在滞后性，当主电机出现动态调整后，从电机需要经过数个控制周期才能完成跟随，动态性能较差，无法满足快速调整的需求。

第三，抗干扰需求。工业现场环境复杂，电网电压波动、负载变化、机械磨损等都会对电机运行产生干扰，协同控制架构需要具备良好的抗干扰能力，能够抑制局部干扰对整个系统同步性能的影响，保证系统长期稳定运行。如果单个电机受到干扰出现运行偏差，不会影响其他电机的正常运行，同时系统能够快速对偏差进行修正，避免误差扩散。

三、分层分布式多电机协同控制架构设计

针对上述控制需求，本文构建分层分布式的协同控制架构，整体分为感知层、协同决策层与执行层三个层级，各个层级分工明确，通过高速工业以太网实现数据交互，具体结构如下：

3.1 感知层：多源运行状态采集

感知层是整个控制架构的基础，负责采集各个电机的实时运行参数，为协同决策提供数据支撑。在每个电机的拖动单元上布置转速编码器、位置传感器、转矩传感器与电流电压检测模块，实时采集电机的运行状态数据，数据采样频率不低于 1kHz，保证能够捕捉电机运行的动态变化。同时，感知层还负责采集生产设备的工艺参数，比如生产速度设定值、负载变化信号等，将这些数据通过高速以太网传输到协同决策层进行处理。为了降低数据传输延迟，感知层采用边缘预处理的方式，对采集到的原始数据进行滤波、降噪处理，只上传处理后的有效数据，减少网络传输压力，提升数据传输效率。

3.2 协同决策层：全局同步动态调节

协同决策层是整个控制架构的核心，负责根据感知层上传的运行数据，计算各个电机的控制输出指令，实现全局协同调节。与传统主从控制不同，该架构中协同决策层采用对等协同控制逻辑，所有电机的运行状态都接入决策层，决策层以全局同步误差最小为目标函数，计算每个电机需要调整的控制量，而非单纯的

跟随主电机。具体来说，协同决策层首先建立多电机协同误差模型，计算每个电机与目标同步参数的偏差以及电机之间的相对偏差，然后采用模型预测控制算法计算每个电机的控制输出，在每一个控制周期内更新一次控制指令，保证动态调整的实时性。同时，协同决策层还具备故障诊断与容错控制功能，当某一台电机出现故障或者运行偏差超出允许范围时，决策层能够快速调整其他电机的运行参数，保证生产流程继续运行，提升系统的可靠性。

3.3 执行层：局部闭环控制响应

执行层布置在每个电机的控制单元，负责接收协同决策层下发的控制指令，结合本电机的实时运行状态完成本地闭环控制，快速调整电机的输出参数。执行层采用速度环与电流环双闭环控制结构，电流环负责快速跟踪电流指令，抑制电网干扰，速度环负责跟踪协同决策层下发的速度指令，保证电机运行速度符合协同要求。

四、架构性能测试与分析

为了验证本文提出的协同控制架构的性能，搭建由四台伺服电机构成的多电机协同测试平台，分别对本文架构与传统主从架构的同步误差、动态响应时间与抗干扰能力进行对比测试，测试结果如表 1 所示：

测试指标	传统主从控制架构	本文协同控制架构
稳态位置同步误差（脉冲）	±3.2	±0.8
动态调整响应时间（ms）	128	42
干扰后同步恢复时间（ms）	215	68

从测试结果可以看出，本文提出的分层分布式协同控制架构在各项指标上都优于传统主从控制架构，稳态位置同步误差降低了 75%，动态响应时间缩短了 67%，干扰后恢复时间缩短了 68%，能够有效满足多电机协同电力拖动系统的控制需求。当出现局部负载扰动时，本文架构能够快速实现全局调整，避免误差累积，具备更好的抗干扰能力。

五、结论

多电机协同控制是现代电力拖动自动化系统的核心需求，传统控制架构已经难以满足高精度、快响应的控制要求。本文提出的分层分布式协同控制架构，通

过感知层、协同决策层与执行层的分工协作，实现了多电机运行状态的全局同步动态调节，有效降低了同步误差，提升了系统的动态响应能力与抗干扰能力。该架构可以广泛应用于纺织机械、印刷设备、包装生产线等多电机拖动的工业设备中，对提升工业生产自动化水平与产品质量稳定性具有重要的实际应用价值。未来研究将进一步优化协同决策算法，降低控制计算量，提升架构在更多电机协同场景下的适应性。

参考文献

- [1] 张承慧, 石成梁, 李斌. 多电机协同控制技术研究现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3901-3914.
- [2] 王迎发, 刘小河. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 215-248.
- [3] 王耀南, 江一鸣, 张昌凡. 基于模型预测的多电机协同控制方法研究[J]. 控制与决策, 2019, 34(5): 961-968.