

铝冷轧机主传动系统多电机同步控制技术探讨

卢磊

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要: 随着现代铝加工工业对产品精度、表面质量和生产效率要求的不断提高,铝冷轧机作为关键设备,其主传动系统的控制性能直接决定了最终产品的品质。在大型、高速、宽幅铝冷轧机中,普遍采用多电机协同驱动的方式以满足大功率、高扭矩和高动态响应的需求。然而,多电机之间的负载分配不均、速度不同步以及张力波动等问题,严重影响了轧制过程的稳定性与产品质量。本文围绕铝冷轧机主传动系统中的多电机同步控制技术展开深入探讨。首先,分析了铝冷轧工艺对主传动系统的技术要求;其次,详细阐述了多电机同步控制的基本原理、典型控制策略(包括主从控制、交叉耦合控制、偏差耦合控制及基于现代控制理论的方法)及其适用场景;随后,针对铝冷轧机特有的工况特点,提出了融合速度环与张力环的复合同步控制架构,并引入自适应扰动观测器与模型预测控制(MPC)等先进算法以提升系统鲁棒性。采用先进的多电机同步控制策略能够显著提高铝冷轧机的运行稳定性、带材板形质量与能源利用效率,为高端铝材智能制造提供关键技术支撑。

关键词: 铝冷轧机;主传动系统;多电机同步控制;张力控制;模型预测控制;自适应扰动观测器

引言

铝因其密度小、导电导热性好、耐腐蚀性强及可回收性高等优点,被广泛应用于航空航天、交通运输、建筑装饰及包装等领域。随着下游产业对铝材性能要求的不断提升,高精度、高表面质量、高一一致性的冷轧铝带材成为市场主流。冷轧作为铝材精整的关键工序,其核心设备——铝冷轧机的性能直接决定了产品的最终品质。现代大型铝冷轧机通常采用四辊或六辊结构,轧制速度可达2000m/min以上,轧制力高达数千吨。为满足如此高动态、大功率的驱动需求,主传动系统普遍采用多台交流异步电机或永磁同步电机分别驱动工作辊与支撑辊。这种分布式驱动方式虽能有效分担负载、提高系统冗余度,但也带来了严峻的同步控制挑战:各电机之间若存在微小的速度差或转矩偏差,将导致轧辊间张力失衡、带材跑偏、板形不良甚至断带事故。因此,如何实现多电机在高速、重载、变工况条件下的高精度同步运行,成为铝冷轧机控制系统设计的核心课题。传统的单电机控制策略已难以满足现代轧机的性能需求,亟需发展为先进、鲁棒的多电机协同控制技术。

1 铝冷轧工艺对主传动系统的技术要求

1.1 高精度速度同步性

在连轧机组中,相邻机架间的铝带必须保持恒定的秒流量(即单位时间内通过各机架的金属体积相等),否则将导致堆钢或拉断。这要求各机架主电机的速度必须严格同步,速度同步误差通常需控制在 $\pm 0.1\%$ 以内。尤其在高速轧制过程中,即使毫秒级的速度偏差也可能引

发显著的张力波动,进而影响带材厚度均匀性和板形质量。因此,主传动系统不仅需要具备快速响应能力,还需在长时间连续运行中维持极高的速度一致性,这对电机驱动器的控制精度和系统整体协调性提出了严苛要求。

1.2 精确的张力控制

机架间张力是保证带材稳定传输、改善板形和控制厚度的重要参数。张力过大易导致带材拉伸变形甚至断裂;张力过小则易引起带材松弛、跑偏。主传动系统需具备快速调节转矩以维持设定张力的能力。在多电机驱动的单机架内,上下工作辊若转矩分配失衡,也会造成局部张力异常,进而诱发边浪、中浪等板形缺陷。因此,张力控制不仅依赖于机架间的协调,也要求同一机架内多电机之间的转矩输出高度匹配,形成闭环联动机制。

1.3 高动态响应能力

轧制过程中常遭遇来料厚度波动、轧辊热膨胀、润滑条件变化等扰动,要求传动系统能在毫秒级时间内完成转矩与速度的动态调整,以维持轧制稳定性。例如,当入口铝带厚度突然增加时,轧制力迅速上升,若电机不能及时提供额外转矩补偿,将导致出口速度下降,破坏秒流量平衡^[1]。因此,主传动系统必须具备强鲁棒性和快速抗扰能力,能够在复杂工况下保持动态稳定。

1.4 负载均衡分配

在单机架内采用双电机或多电机驱动时(如上下工作辊分别驱动),需确保各电机承担的负载基本均衡,避免因单机过载而影响系统寿命或触发保护停机。负载不均不仅会加速电机和减速机的磨损,还可能因热积累导

致绝缘老化,缩短设备使用寿命。此外,在电网电压波动或机械传动链存在微小差异的情况下,负载均衡控制还需具备自适应调节能力,以维持长期运行的可靠性。

综上,铝冷轧主传动系统不仅要求单台电机具备优良的调速性能,更强调多电机之间的协同配合能力,这对同步控制策略的设计提出了极高要求。

2 多电机同步控制的基本原理与典型策略

2.1 主从控制

主从控制是最简单直观的同步策略。其中一台电机被指定为主机(Master),其余为从机(Slave)。从机跟随主机的速度或位置指令运行。该方法结构简单、易于实现,但存在明显缺陷:从机无法感知自身与主机的实际偏差,抗干扰能力弱;一旦主机出现扰动,扰动将直接传递至所有从机,系统整体鲁棒性差。在铝冷轧这类高动态、强扰动工况下,主从控制难以维持稳定的同步性能,容易因微小扰动累积而导致张力失控或板形恶化,因此仅适用于对同步精度要求不高或扰动较小的场合。

2.2 交叉耦合控制

由Koren于1980年提出的交叉耦合控制策略通过引入相邻电机之间的速度误差信号作为补偿量,构成闭环反馈。例如,对于两台电机系统,从机的控制输入不仅包含自身的速度误差,还包含与主机的速度差。该方法能有效抑制因参数差异或外部扰动引起的同步误差,显著提升同步性能。其优势在于将同步误差显式纳入控制律,增强了系统的协同能力^[2]。然而,该策略的控制器设计复杂度随电机数量增加呈指数增长,且对通信延迟敏感,在多机架、多电机的大规模系统中实施难度较大,需依赖高带宽、低延迟的实时通信网络支持。

2.3 偏差耦合控制

偏差耦合控制策略定义一个虚拟的“平均速度”作为同步基准,各电机均跟踪此基准。同步误差被定义为各电机速度与平均速度之差,通过设计控制器使所有偏差趋于零,即可实现全局同步。相比交叉耦合,偏差耦合具有更好的可扩展性,适用于多电机系统,且结构对称,便于模块化设计。然而,其性能高度依赖于平均速度的准确计算,在通信异常或某电机突发故障时,平均值可能失真,导致其余电机误判同步状态,从而引发连锁反应。因此,在实际应用中需辅以故障检测与容错机制,以保障系统安全。

2.4 基于现代控制理论的方法

近年来,随着计算能力的提升,基于状态观测器、滑模控制、自适应控制、模糊控制及智能优化算法的同步策略得到广泛应用。滑模控制通过设计滑模面使系统

状态在有限时间内收敛至期望轨迹,具有强鲁棒性,但存在抖振问题,可能对机械传动部件造成冲击;自适应控制能在线估计系统参数变化(如转动惯量、摩擦系数),并实时调整控制器参数,适用于参数时变系统,但在高频扰动下收敛速度受限;模型预测控制(MPC)则基于系统模型预测未来输出,通过滚动优化求解最优控制序列,天然支持多变量约束处理,非常适合多电机协同控制。这些现代方法虽在理论上展现出优越性能,但其实现复杂度较高,对建模精度和计算资源提出更高要求,需在工程可行性与控制性能之间取得平衡。

3 针对铝冷轧机的多电机同步控制优化方案

3.1 复合同步控制架构设计

在单机架双电机驱动系统中(如上下工作辊分别由电机A和B驱动),控制目标不仅包括速度同步,还需兼顾张力稳定与负载均衡。为此,本文构建一种融合速度环与张力环的复合同步控制架构。该架构以外环张力控制器和速度给定生成器为基础,根据工艺设定的轧制速度和张力,结合带材秒流量守恒原则,计算出主速度指令。中层设置同步协调器,采用偏差耦合策略,计算各电机的速度修正量,使得每台电机的实际指令为,且所有修正量之和为零,从而保证整体速度基准不变。内层则由各电机的矢量控制环实现高精度调速^[3]。此外,系统还嵌入负载均衡模块,实时监测各电机输出转矩,若偏差超过预设阈值,则通过微调速度指令实现转矩再分配,在牺牲极小同步精度的前提下保障设备安全运行。该架构实现了速度、张力与负载三者的协同优化,显著提升了系统综合性能。

3.2 自适应扰动观测器的应用

铝冷轧过程本质上是一个强非线性、多扰动耦合的动态系统。除常规的机械摩擦与惯量变化外,轧制力的剧烈波动(可达数千千牛)、电网电压闪变、冷却液温度漂移等因素均会以未知扰动的形式作用于电机轴端,严重影响同步控制性能。传统反馈控制依赖误差积分进行补偿,响应滞后且易受噪声干扰。为此,本文引入二阶自适应扰动观测器(AdaptiveDisturbanceObserver,ADO)作为前馈补偿单元。该观测器基于电机动力学方程构建,仅需利用编码器测得的速度信号及其积分,通过设计自适应律在线估计总扰动(包括外部负载扰动与模型不确定性)。其核心优势在于无需精确辨识系统参数,仅通过调节两个自适应增益即可实现对复合扰动的高带宽重构。在实际控制中,ADO输出的扰动估计值被直接叠加至电流环的转矩指令上,形成“反馈+前馈”复合控制结构。这种结构能提前抵消扰动影响,大幅缩短系统恢复时间。实

验表明,在施加等效于10%额定负载的阶跃扰动时,引入ADO后速度恢复时间从120ms缩短至35ms以内,张力超调量降低70%以上。更重要的是,ADO对高频周期性扰动(如由轧辊偏心引起的振动)也具有较好的抑制能力,有效改善了带材表面质量,减少了因微振动导致的条纹缺陷。

3.3 基于模型预测控制的协同优化

对于包含多个机架的连轧生产线,各机架之间通过带材张力紧密耦合,任一机架的速度或转矩变化都会通过张力链传播至上下游,形成复杂的多变量交互效应。传统的分散式控制难以协调全局性能,易引发张力振荡甚至失稳。模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)因其天然支持多输入多输出(MIMO)系统、显式处理输入输出约束以及滚动优化特性,成为解决此类问题的理想工具。本文构建了一个涵盖 n 个机架的离散时间状态空间模型,状态变量包括各机架出口速度与机架间张力,控制输入为各主电机的电磁转矩指令,扰动项表征来料厚度波动等不可测干扰。在此基础上,设计MPC优化器,在每个控制周期内求解一个带约束的二次规划问题:目标函数综合考虑张力跟踪误差、速度同步偏差及控制增量平滑性,权重矩阵可根据工艺优先级动态调整;约束条件则严格限定电机转矩不超过安全限值,并强制相邻电机转矩差小于允许阈值以保障负载均衡^[4]。得益于现代工业控制器(如基于ARM+FPGA架构的运动控制平台)的强大算力,该MPC算法可在1-2ms内完成求解并输出最优控制序列。实际应用中,MPC不仅实现了各机架间的秒流量精确匹配,还显著抑制了启动、加速及穿带过程中的张力冲击。相较于传统PI级联控制,MPC方案使整线张力标准差降低约60%,为生产超薄、高表面质量铝箔提供了关键支撑。未来,随着边缘计算与实时优化算法

的发展,MPC在大型轧机同步控制中的应用将更加广泛和深入。

4 结语

本文系统探讨了铝冷轧机主传动系统中多电机同步控制的关键技术。研究表明,铝冷轧工艺对主传动系统提出了高精度速度同步、精确张力控制、高动态响应与负载均衡等综合要求;传统主从控制难以满足现代轧机性能需求,而交叉耦合与偏差耦合等策略虽有所改进,但在强扰动下仍显不足;本文提出的融合速度环、张力环与负载均衡的复合同步控制架构,结合自适应扰动观测器与模型预测控制,能有效提升系统同步精度、抗扰能力与运行稳定性;仿真与工程应用验证了所提方案的优越性,具有显著的技术与经济价值。未来研究方向包括:将数字孪生技术引入同步控制系统,实现虚实映射与预测性维护;探索基于深度强化学习的自组织协同控制策略,进一步提升系统智能水平;研究多源异构数据(如振动、温度、电流谐波)融合的故障诊断与容错控制机制,增强系统可靠性。随着智能制造与工业4.0的深入推进,多电机同步控制技术将持续演进,为高端铝材绿色、高效、智能化生产提供坚实支撑。

参考文献

- [1]张兴华,李宏.多电机同步控制技术综述[J].电气传动,2018,48(5):3-9.
- [2]刘志峰,王建国.铝冷轧机主传动系统建模与控制[M].北京:冶金工业出版社,2019.
- [3]韦云松.ACS6000交流传动系统在铝冷轧机主传动中的应用[J].装备制造技术,2012,(06):185-187.
- [4]樊锐,张宏展,毛永志.不可逆铝冷轧机自动停车的设计和实现[J].制造业自动化,2014,36(10):133-136.