

长胶带系统的协同控制与算法优化

王宝平¹ 潘孝号²

1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 浙江 杭州 310012

2. 浙江华东工程建设管理有限公司 浙江 杭州 310012

摘要: 针对传统变频主从控制在长胶带多驱动系统中存在功率分配不均、能耗高、动态响应慢等问题^[1], 本文针对某项目三级串联式48km胶带机系统, 提出了一种基于注意力机制融合双向LSTM动态预测与多目标优化的协同控制架构。通过建立多维时序特征分析模型实现前瞻性补偿, 采用AI算法求解能耗-寿命-效率的最优解, 结合模糊PID的在线参数整定策略, 实际表明, 该控制算法使吨骨料耗降低18.7%, 功率分配偏差可控制在 $\pm 2.5\%$ 以内, 转矩跟踪延迟缩短至6.8ms, 动态响应提高了1ms, 显著提升了运行效率和可靠性。^[2]

关键词: 长距离胶带机协同控制; 动态功率分配; 协调合作

引言

长胶带是散状物料连续运输的核心装备, 随着工程建设规模的不断扩大, 多驱动单元串联协作的超长距离胶带系统应运而生。然而驱动点的增多极大地增加了系统控制的复杂性, 在传统的长胶带多驱动控制中, 普遍采用基于变频调速的主从控制策略。该策略虽能实现基本的同步运行, 但在实际应用中逐渐暴露出诸多局限性。近年来, 人工智能(AI)技术在复杂工业过程的建模、预测与优化控制中展现出强大潜力。将AI算法与经典控制理论深度融合, 为解决长胶带多驱动系统的协同控制难题提供了新的思路。基于数据驱动模型能够更精准地刻画系统的动态特性, 实现前瞻性补偿; 多目标优化算法则可以为系统在多变工况下的运行策略提供科学决策依据。本文针对某重点工程中总长约48公里的三级串联式长胶带系统, 开展协同控制与算法优化的关键技术研究。在保留现有变频器及鼠笼电机硬件配置的前提下, 旨在构建一套集智能预测、多目标优化与自适应调节于一体的协同控制新架构, 显著提升长胶带系统的功率平衡精度、动态响应速度与综合能效, 为同类超长距离物料输送系统的智能化升级提供工程实践参考。

1 概述

某项目长胶带约48km, A1长19.7km, 电机配置7×1400 kW(头3中3尾1), A2长15.3km, 电机配置8×1600 kW(头3中4尾1), A3长12.1km, 电机配置7×1400 kW(头3中3尾1), 这些电动机协同控制在整个工作中起着关键作用。

常规控制方案变频调速异步电机+变频器控制。具体

课题: 全强风化花岗岩水洗砂制备工艺关键技术研究 KY2024-JG-01-09

控制方案: 每个驱动部位均配置一套PLC子站, 子站之间通过PROFINET总线(光纤)交换数据; 各部位驱动电机均采用高压变频器驱动, 头尾多驱动电机设置主从控制。从拓扑方案可知, 从机需要实时跟随主机调整运行状态, 实时数据响应速度慢使得电机工作在非最优效率区间, 低频运行时铜损增加导致的发热问题会显著降低系统能效, 增加了系统复杂性和能耗成本。同时动态响应延迟是功率失衡的重要原因, 当主从通信延迟超过10ms(在非实时总线中常见), 从机的调整滞后会使功率偏差短时超过5%的允许范围。参数设置不匹配(如主机加速时间40秒而从机设为30秒)更会导致“电机拖电机”的异常工况, 可能引发负功率或直流母线过压故障。转矩跟踪性能受限于控制架构的固有缺陷。主从模式切换(如速度控制与转矩控制间的转换)时, 若逻辑设计不当, 积分项的累积会导致转矩突跳, 对机械系统造成冲击。应用案例显示, 从机因频率限幅失效导致转矩分配失衡, 使主机电流超载达30%。编码器依赖性也是重要瓶颈, 高精度转矩跟踪需要编码器提供实时反馈, 但编码器故障或信号受干扰时, 从机可能进入开环状态, 出现“飞车”等失控现象。面对这类非线性负载, 传统的线性调节算法响应迟缓, 难以避免转矩超调或持续振荡。^[3]

这些缺陷的根源在于传统控制方法的静态性和分割性——参数固化无法适应动态工况, 各控制环节(速度环、转矩环)孤立运作缺乏协同。而AI算法的引入正可以针对这些本质问题提供系统性解决方案。^[4]

2 优化控制算法设计

在保持变频器+普通电机(鼠笼式电机)配置方案不变的情况下, 本项目通过优化控制系统, 使上述问题均

得到了显著改善，具体控制系统如下：

2.1 协同控制架构



感知层通过振动传感器、电流互感器、激光测距仪等传感器采集设备运行的实时数据（电流，输出扭矩，运行速度，轴承振动等）。数据融合层在滑动窗口通过时间对齐精准衍生出同时间段的动态数据（转矩波动率，速度变化率，电流谐波畸变率，垂度变化率，温度影响因素等），形成控制算法需要的源头数据。决策层配置BiLSTM预测模块，NSGA-II优化器，模糊PID控制器等核心模块。执行层由多电平变频器和驱动电机执行。

2.2 核心算法设计

2.2.1 基于Attention机制的双向LSTM预测模型 (BiLSTM)

3层BiLSTM网络是控制逻辑的核心架构，其通过分层处理时序信号实现对胶带机动态特性的精准建模，通过数据融合层数据处理得到的动态数据作为输入，第一层提取局部实时数据特征，第二层捕捉负载变化趋势，第三步建模系统慢动态行为。

层级	时间	工程应用
第一层	0.1s-1s	捕捉电机启动冲击（500ms内转矩突变）
第二层	1~10s	识别骨料不均导致的周期性速度波动
第三层	1分钟以上	预测轴承寿命衰减，皮带撕裂等

前向传播 (Forward Pass)，时序方向从当前时刻 t_1 到未来 t_n 。数学表达： $\leftarrow = LSTM(X_t, \leftarrow)$ 。能捕捉驱动电机电流的建立过程，识别负载突变引发的正向波动。反向传播 (Backward Pass)，时序方向从 t_n 回溯至 t_1 。数学表达： $\rightarrow = LSTM(X_t, \rightarrow)$ 。分析振动信号的衰减特性，追溯故障源传播路径（如滚筒轴承损伤的逆向传递），输出拼接 (Concatenation)，将双向隐藏状态在特征维度拼接 $h_t = \left[\leftarrow, \rightarrow \right]$ ，全面表征系统的运行状态，实时实现双向协同平衡皮带机张力波动。

注意力机制(Attention)：注意力计算公式 Attention

$$(Q, K, V) = \text{soft} \left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} \right) V, \text{ 动态聚焦关键传感器信号。}$$

Q —查询向量（当前控制需求）； K —键向量（历史状态特征）； V —值向量（实际传感器数据）； d_k —键向量维度；

相似度计算： QK^T 衡量当前需求与历史状态的匹配

新型控制系统采用分层协同架构^[5]，如下图所示。

度，识别与当前故障最相关历史片段；例如当出现4.6Hz有剧烈振动时，自动匹配过去相似波形。

缩放处理： $\frac{1}{\sqrt{d_k}}$ 防止点积结果过大导致softmax饱和，可平衡计算复杂度与精度。

权重归一化：softmax将相似度转化为概率分布，权重总和为1，突出关键时间点，突加负载时，最近5个采样点权重提高到70%。

加权融合，权重矩阵与 V 相乘，生产上下文向量，抑制噪声干扰，增强有效信号。

2.3 多目标优化控制 (NSGA-II优化器)

建立能耗-寿命-效率三目标优化模型：

$$\text{目标函数：最小化总功耗：} P_{total} = \sum_{i=1}^3 (I_i^2 R_i + k_f v_i^3),$$

电流平方项表征铜损，速度立方项表征机械损耗，总和反映系统总能耗。优化目标是通过调整速度曲线和功率分配，最小化总功耗。

I_i —第 i 台驱动电机电流有效期 (A)；反映负载大小，与运输量正相关。

R_i —电机绕组电阻 (Ω)；温度函数： $R_i = R_0 [1 + 0.00393(T-25)]$

k_f —胶带运行阻力系数 ($N \cdot s^2/m^3$)；与托辊类型、倾角相关，

v_i —第 i 段胶带速度 (m/s)；速度立方项体现空气阻力损耗。

最大化设备寿命： $L_{bearing} = \frac{1}{\sum (\Delta T^2 + \delta_v^2)}$ ，转矩波动和速度波动是轴承疲劳的主要诱因，优化目标是抑制动态载荷冲击，延长设备寿命。分母越小寿命越长。

ΔT —转矩波动幅值 (Nm)，可反映齿轮啮合冲击， $> 50Nm$ 预警。

δ_v —速度波动标准差 (m/s)，表征传动平稳性， $> 0.05m/s$ 触发降载。

最大化运输效率： $E_{trans} = \frac{Q \cdot v_{avg}}{P_{total}}$ ，分子体现运输能力，分母代表能耗成本，比值越大表示单位能耗的运输产出越高。

Q —小时运量 (t/h)； v_{avg} —三段胶带平均速度；

P_{total} —系统总功率；

通过约束条件：功率偏差： $|P_i - P_{avg}| \leq 2.5\%$ ；加速度限制： $a(t) \leq 0.3m/s^2$ ；垂度限制： $\delta \leq 120mm$

采用NSGA-II算法求解帕累托最优解集。

2.4 模糊PID控制器

设计自适应模糊PID控制器，规则库如下表所示。

误差 e	误差变化率 Δe	ΔK_p (比例增益)	ΔK_i (积分)	ΔK_d (微分)	对应工况
NB	PS	+0.15	-0.08	+0.20	突卸负载(负责中断)
NS	ZO	+0.10	-0.05	+0.12	轻载缓慢加速
ZO	NS	-0.05	+0.03	-0.08	重载平稳运行中轻微减速

NB-严重负偏差(实际值远低于预测值)；NS-轻微负偏差；ZO-接近零偏差(稳态)；PS-轻微正偏差；PB-严重正偏差；

NB+PS组合的工程响应，比如驱动滚筒瞬间失去负载(如胶带断裂)，快速响应转矩突降(大幅提升比例增益+0.15)，降低积分作用(-0.08)，防止速度超调，增强微分控制(+0.2)，抑制机械谐振。

ZO+NS组合的工程响应，比如运量大幅降低(从6000t/h降低至4000t/h)，小幅降低比例增益(-0.05)，增加积分作用(+0.03)消除稳态误差，降低各驱动间的速度偏差；减弱微分控制(-0.08)，平稳减速曲线，加速度限制在 $0.25m/s^2$ 内。

动态权重调整公式： $K_p(t) = K_{p0} \cdot \left(1 + \gamma \cdot \frac{T_{t+1}}{T_{rated}}\right)$ ，当

LSTM预测到未来转矩 T_{t+1} 超过额定值 $1.1T_{rated}$ 时，按比例提升 K_p ，LSTM预测置信度加权系数 γ ，平衡响应速度与超调风险。比如预测到突加负载 $T_{t+1} = 1.1T_{rated}$ ， $K_p = 1 \times (1 + 0.12 \times 1.1) = 1.32$ (提升13.2%)(敏感系数 $\gamma = 0.12$)，仅一次乘加运算可以直接快速的适用于冲击负载的瞬时响应。

动态规则权重调整公式： $\omega_{rule} = \frac{e^{-\beta|e-\hat{e}|}}{\sum e^{-\beta|e-\hat{e}|}}$ ，模糊PID控

制器与LSTM预测模型协同工作的核心算法，用于动态调整模糊规则的激活强度。

e —当前时刻实际误差(传感器测量值-LSTM预测值)； \hat{e} —LSTM预测的未来误差趋势(未来三步预测均值)； β —权重衰减系数，通过网格搜索优化确定， ω_{rule} —模糊规则的激活权重。 $|e-\hat{e}|$ 衡量实际误差与预测趋势的偏离程度。 $e^{-\beta|e-\hat{e}|}$ 将偏差映射为权重基数，通过归一化处理，确保分母所有权重之和为1，形成概率分布。

总结

在实际工程实施中，该控制算法经过严格的调试和测试，验证了其稳定性与高效性。

功率平衡能力：通过协调控制算法，各胶带机速度同步精度达到 $\pm 0.2\%$ ，比传统0.5%有了很大地提高；

转矩跟踪：通过LSTM算法改进，动态调整控制参数、实时预测负载需求并自适应补偿，启动阶段转矩响应时间显著缩短，精度提升15%，自适应变负载，转矩波动减少40%。

故障定位误差：基于光纤振动传感器与控制算法，故障定位误差 $< 50m$ ；

能耗指标：吨骨料耗降低18.7%

参考文献

- [1]刘春. 龙开口长距离胶带机输送系统控制[J]. 低碳世界,2013(23):103-105.
- [2]刘镇. 锦屏一级水电站长距离胶带机的驱动与控制研究[J]. 人民长江,2013,44(14):39-41. DOI:10.3969/j.issn.1001-4179.2013.14.011.
- [3]唐其林. 长距离胶带机机械及控制保护系统的改造与改进[J]. 水利科技与经济,2013,19(12):103-104.
- [4]周保卫. 多级串联带式输送机智能协调控制系统[J]. 煤矿机械,2020,(12):180-182.
- [5]冯猛志. 长距离胶带输送机智能化控制系统优化设计[D]. 上海:上海交通大学,2001.