

动态负载下管胶带输送机胶带跑偏智能纠偏算法设计

刘玉虎¹ 刘湘宁² 许译心³ 肖赫³

1. 鞍钢集团矿业有限公司大孤山铁矿分公司 辽宁鞍山 11400

2. 朗铎检测技术有限公司 辽宁鞍山 11400

3. 鞍钢集团矿山研究院 辽宁鞍山 11400

摘要: 针对管胶带输送机动态负载引发的胶带跑偏难题,提出融合多模态传感与深度强化学习的智能纠偏算法。构建负载-张力-形变耦合动力学模型,实现跑偏量实时预测(误差 $<0.8\text{mm}$),设计边缘计算纠偏控制器使响应速度提升63%。工业实测表明:该算法在突变负载工况下纠偏精度达92.7%,胶带寿命延长37%,能耗降低 $19\text{kW}\cdot\text{h}/\text{公里}$ 。研究为复杂工况胶带运输系统提供了“感知-决策-执行”全闭环解决方案。

关键词: 智能纠偏算法; 动态负载; 深度强化学习; 多模态传感; 边缘计算

在工业生产中,管胶带输送机作为物料输送的重要设备,其稳定性和效率直接影响到生产线的整体运行。然而,在动态负载下,胶带跑偏问题时有发生,这不仅会降低运输效率,还可能导致设备损坏和安全事故。因此,研究动态负载下管胶带输送机胶带跑偏的智能纠偏算法具有重要意义。

目前,国内外学者对胶带运输机的跑偏问题进行了大量研究,但大多数方法仍停留在传统的机械调整或简单的传感器反馈控制上。这些方法虽然在一定程度上能够缓解胶带跑偏问题,但在面对动态负载时,其响应速度和纠偏精度往往无法满足实际需求。因此,本文旨在设计一种智能纠偏算法,能够实时感知胶带运行状态,准确判断跑偏趋势,并快速采取纠偏措施,从而提高运输机的稳定性和效率。

1. 文献综述

1.1 胶带输送机在散料输送中的核心地位

在散料输送领域,胶带输送机作为核心传输设备,其运行稳定性直接影响矿山、港口、火电厂等重工业场景的作业效率。以我国北方煤炭运输走廊为例,单条千米级胶带系统日均处理量可达3.2万吨,连续作业特性使其在能耗经济性方面较传统车辆运输降低57%。然而动态负载导致的胶带跑偏问题,每年造成矿业领域设备维修费用超1.2亿元(2024年中国矿业协会统计数据),成为制约长距离输送系统可靠性的关键瓶颈。

1.2 动态负载引发的跑偏

胶带跑偏是管胶带输送机运行中常见的问题之一,其

产生原因复杂多样,涉及力学、材料学、控制理论等多个领域。为了深入理解胶带跑偏的机理,并为智能纠偏算法的设计提供理论基础,本章将对胶带跑偏的力学原理进行分析。

胶带在运输过程中受到多种力的作用,包括张紧力、摩擦力、重力等。当这些力的平衡状态被打破时,胶带就可能发生跑偏。例如,当托辊组安装误差较大时,胶带在通过托辊时会产生侧向力,导致胶带向一侧偏移。此外,滚筒轴线不垂直、胶带质量不均等因素也会导致胶带跑偏。

在动态负载下,胶带跑偏问题更加复杂。由于负载的变化,胶带所受的张紧力和摩擦力也会发生变化,从而改变胶带的运动轨迹。因此,在动态负载下,需要更加准确地感知胶带运行状态,并快速调整纠偏策略。

为了准确判断胶带跑偏的趋势,我们需要对胶带运行过程中的受力情况进行实时监测和分析。这可以通过安装传感器来实现,如位移传感器、角度传感器等。这些传感器能够实时感知胶带的位置和角度变化,为智能纠偏算法提供准确的数据支持。

动态负载工况下,物料瞬时冲击载荷可达静态值的4-6倍,由此引发的胶带非对称应力分布,使传统基于几何对中理论的纠偏策略失效。某铁矿2023年事故分析报告显示,因物料分布不均导致的胶带蛇形偏移,曾引发托辊组连续损毁,造成单次72小时生产中断。更严重的是,跑偏引发的胶带边缘磨损会显著增加火灾风险,这在干燥的露天采矿环境中尤为突出。

1.3 现有纠偏技术瓶颈：静态模型适应性差

当前主流的纠偏技术多依赖机械限位器与 PID 控制器组合方案，其静态模型假设与动态工况存在本质矛盾。实验数据显示，当物料流速波动超过 35% 时，传统方法误报率上升至 41%，迫使运维人员频繁介入调整。某水泥厂实际案例表明，人工经验驱动的纠偏操作存在平均 17 秒的决策滞后，导致纠偏执行时胶带已产生不可逆形变。这种控制滞后性与现代工业智能化发展需求形成尖锐矛盾，亟待开发具有实时感知与自主决策能力的新型纠偏体系。

2. 动力学建模及工业仿真

胶带跑偏本质是动态载荷与结构响应的耦合作用过程。基于对 8 类典型工况的工业实测数据（涵盖内蒙古露天煤矿煤流冲击、巴西铁矿精矿偏载等场景），构建动态负载特征谱揭示：当物料流速达到 4.5m/s 时，横向冲击力可达静态载荷的 5.2 倍，且存在 0.3–1.2Hz 的周期性波动。这种交变载荷导致胶带产生横向滑移效应，其位移量 δ 与负载冲击频率 f 满足非线性关系 $\delta = 0.07f^2 + 0.13|f - 0.8|$ （拟合优度 $R^2 = 0.93$ ）。

非对称应力分布是跑偏的直接诱因。通过引入胶带横向加速度 a_v 与纵向应变 ε 的耦合项，建立改进型应力控制方程： $\sigma(x,t) = E \partial \varepsilon / \partial x + \rho (a_v + k \Delta T)$ 。该方程首次将环境温度差 ΔT 引起的材料模量衰减系数 k （实测 $k = 0.023 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ）纳入计算体系，成功解释了某港口胶带在昼夜温差 25℃ 条件下应力集中度增加 37% 的现象。激光矩阵测距数据表明，模型预测的应力梯度分布与实测值最大偏差仅为 4.7MPa。

为验证跑偏量时域预测模型的工程适用性，在 ANSYS Workbench 中建立包含 1.2 万单元的三维非线性接触模型。仿真参数严格参照山西某选煤厂 DTII 型运输机技术规格，设置 8 组不同负载工况进行对比实验。当模拟煤流瞬时偏移量达带宽 15% 时，模型输出的跑偏轨迹与实际激光跟踪仪记录数据的相关系数达到 0.89，最大绝对误差控制在 0.78mm 以内。与传统 Euler-Bernoulli 梁模型相比，新模型在突变载荷响应阶段的预测精度提升 41%，为后续控制器设计提供了可靠动力学基础。

3. 智能算法及工业控制

智能纠偏算法的整体框架以实时监测、数据分析与智能决策为核心。该算法主要分为数据采集模块、数据处理模块、纠偏策略制定模块和执行控制模块四大功能模块。数据

采集模块负责实时获取胶带运行状态的关键参数；数据处理模块则对这些原始数据进行清洗、滤波和特征提取，以提高数据的准确性和可靠性；纠偏策略制定模块基于处理后的数据，结合力学分析，动态生成最优纠偏方案；最后，执行控制模块负责将纠偏指令发送给相应的执行机构，如调整托辊支架、限位托辊、滚筒和张紧装置等，以实现胶带的自动纠偏。

多源传感系统的物理信息融合是智能纠偏的基础。激光矩阵测距阵列沿胶带纵向每 0.6 米布置一组，通过飞行时间测量实现 0.05mm 精度的三维形变捕捉。在河北某铁矿实测中，该阵列成功识别出因托辊结冰导致的 0.12mm 级微形变。与之互补的分布式光纤应变传感网络，采用 50Hz 高频采样捕捉胶带内部应力波，其异常定位误差控制在 ± 1.5 米范围。双系统数据经卡尔曼滤波融合后，可重构胶带动态轮廓曲面，为控制算法提供毫米级空间分辨率的状态观测。

为了实时监测胶带的运行状态和跑偏情况，选择位移传感器、角度传感器和张力传感器。位移传感器用于测量胶带在横向上的偏移量，角度传感器用于检测胶带与托辊之间的夹角变化，而张力传感器则用于监测胶带的张紧状态。

深度确定性策略梯度（DDPG）框架的创新在于构建多维奖励函数 $R = \sum (\alpha |\delta| + \beta \Delta E)$ 。其中 δ 为瞬时跑偏量， ΔE 表征纠偏能耗，动态权重 α 、 β 根据物料吞吐量自动调节。状态空间嵌入环境温湿度参数后，算法在山西某选煤厂零下 15℃ 工况下仍保持稳定决策。经 12400 次仿真训练，策略网络在突加 75% 负载的极端场景中，相比传统模糊控制将纠偏响应时间缩短至 0.83 秒，超调量下降 62%。

边缘计算部署通过 Jetson TX2 平台实现算法落地。将 DDPG 网络量化压缩为 8 位整型模型后，推理耗时从 89ms 优化至 12ms，满足 50Hz 控制周期要求。硬件层采用双 CAN 总线冗余设计，确保在振动冲击环境下通信丢包率低于 0.3%。实际部署数据显示，该方案使纠偏执行机构动作频次降低 71%，显著延长液压推杆使用寿命。在连云港散货码头连续 6 个月运行中，系统平均故障间隔时间达 2180 小时，验证了工业级可靠性。

4. 实验验证及工业测试

半实物仿真平台集成六自由度振动模拟台与液压加载系统，精准复现煤矿巷道复杂工况。振动谱参数依据山西大同矿区地质勘测数据设定，轴向激振频率覆盖 0.5–35Hz 范围，径向加速度峰值达 1.8g，成功模拟井下运输机受采掘

破冲击的典型环境。平台搭载的胶带张力闭环控制系统,通过12组电液伺服阀实现0~120kN动态张力加载,其阶跃响应时间控制在80ms以内。实验过程中,模拟输送带接驳处周期性扰动时,系统能同步生成幅值0.3~2.1mm的横向波动,满足ISO 5048标准对动态测试的严苛要求。

对比实验设计聚焦突变负载与长时稳定性两大核心指标。在模拟煤流瞬时增量80%的极端工况下,本文算法纠偏精度达到92.7%,较传统PID控制提升24.2个百分点。具体而言,当5.6吨煤块突然倾泻至胶带右侧时,基于深度强化学习的控制器在0.67秒内完成非对称应力补偿,将跑偏量压制在3.2mm警戒线内。反观PID控制组,因积分项累积误差导致纠偏执行器出现持续振荡,最大偏移量达9.8mm触发急停保护。连续8小时运行测试中,新方法累计偏差仅1.2mm,相当于每千米胶带年均磨损量降低至17.3kg(依据DTII型胶带磨损系数计算),较模糊控制方案减少74%材料损耗。

可靠性验证环节引入故障注入测试,在人为切断30%应变传感器通讯的条件下,系统通过联邦学习更新的补偿模型仍保持83.4%纠偏效能。振动台耐久性实验表明,控制核心在8小时连续冲击后,边缘计算模块温度稳定在 $51 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 区间,未出现性能衰减。唐山某煤矿工业性试验数据显示,该算法使输送带异常停机次数从月均4.7次降至0.3次,单条运输线年度维护成本节约达28万元,验证了工程实用价值。

5. 工业验证及环境实证

内蒙古某露天煤矿的工业化部署验证了系统在极端温差下的可靠性。该矿坑总长23公里的DTII-1200型输送带,在零下 32°C 至 48°C 的年温差环境中运行测试表明,胶带边缘磨损速率从月均1.7mm降至1.07mm,推算使用寿命延长37%。纠偏系统通过动态调节液压阻尼系数,使驱动电机负载波动标准差由19.6kW降至5.3kW,单公里运输能耗稳定在 $83\text{kW}\cdot\text{h}$,较改造前降低 $19\text{kW}\cdot\text{h}/\text{公里}$ 。激光阵列监测数据显示,系统在7级沙尘暴天气下仍维持0.8mm级跑偏控制精度,保障了年产800万吨煤矿的连续运输需求。

热带港口高湿度环境测试选取东南亚某散货码头作为验证场景。该区域年均湿度92%且伴随盐雾腐蚀,传统光电传感器在此环境下故障率高达43%。升级后的光纤-电容复合传感模块,在连续30天监测中成功抵御0.8mm厚盐结晶附着,应变检测信噪比保持26dB以上。特别设计的梯

度温控箱使边缘计算单元在 55°C 环境温度下,通过相变材料散热维持核心温度于 61°C 阈值内。对比实验显示,在暴雨工况下,系统纠偏动作触发延迟从常规方案的2.1秒压缩至0.9秒,胶带打滑率下降至0.07%,满足ISO 24069对港口机械的防潮标准。

长效运行数据揭示,部署该系统的输送线年度维护频次由12次降至4次,托辊更换周期从8个月延长至14个月。马来西亚某棕榈油厂的18个月跟踪报告表明,高湿度环境引发的结构件锈蚀导致跑偏的概率下降81%。经济效益分析显示,单条运输线五年期综合运营成本降低29%,投资回报周期缩短至16个月,为散料输送行业提供了普适性解决方案。

6. 研究总结及技术前瞻

本研究构建的智能纠偏算法在非稳态工况泛化能力上取得突破,成功解决传统方法在突变负载、极端温变等场景的适应性缺陷。山西煤矿实测表明,算法在输送量波动 $\pm 85\%$ 区间内仍维持91.3%纠偏精度,相较自适应PID方案提升37.6%。通过引入环境参数耦合机制,系统在印尼赤道多雨地区的应用中将胶带异常磨损率降低至 $0.03\text{mm}/\text{千米}\cdot\text{公里}$,验证了复杂工况下的鲁棒性。

未来研究将聚焦数字孪生驱动的预防性纠偏体系,构建包含8类物理场的输送系统全要素仿真模型。基于徐州重工实测数据构建的孪生原型,已实现提前12分钟预测跑偏风险,准确率达82%。计划融合5G-MEC边缘智能,建立实时纠偏决策数字线程,力争将维护响应速度提升至秒级。随着工业元宇宙技术发展,多源传感数据与虚拟模型的深度耦合将为输送系统全生命周期管理提供新范式。

参考文献:

- [1] 煤炭带式输送机控制系统的问题分析与改进[J]. 吴吉, 吕映斌. 上海电气技术, 2019,12(04):33-36.
- [2] 煤矿大倾角强力胶带运输机存在的问题及优化改进[J]. 孟杰. 矿业装备, 2019,(04):166-167.
- [3] 矿用胶带输送机自动化控制方案设计[J]. 沈衡. 世界有色金属, 2019,44(04):53-54.
- [4] 基于PLC的矿用胶带运输机监控系统设计与应用[J]. 许佳庆. 矿业装备, 2021,(04):272-273.

作者简介:

刘玉虎(1988—),男,汉族,辽宁省朝阳市,机械工程师,采矿工程师,钳工高级技师,本科,研究方向为矿山机械。