

长距离带式输送机运行优化控制策略研究

Research on Optimization Control Strategy for Long-Distance Belt Conveyor Operation

李宇佳

LI Yujia

晋能控股煤业集团有限公司马脊梁矿, 山西 大同 037027

Majiliang Mine of Jinneng Holding Coal Industry Group Co., Ltd., Datong 037027, Shanxi, China

摘要: 文章聚焦于长距离带式输送机运行过程的建模与优化控制问题, 提出了基于数字孪生技术的动态稳定控制系统 (dynamic stability control, DSC) 优化控制策略。该策略通过结合数字孪生模型的预测分析能力, 实现了对带式输送机运行状态的实时监测与优化控制。实验结果表明, DSC 优化控制策略能有效提升带式输送机的安全性和经济性, 显著降低能耗。

关键词: 长距离带式输送机; DSC; 数字孪生技术

Abstract: This paper focuses on the modeling and optimization control of long-distance belt conveyor operation process, and proposes a Dynamic Stability Control (DSC) optimization control strategy based on digital twin technology. The strategy realizes real-time monitoring and optimization control of the running state of the belt conveyor by combining the prediction analysis ability of the digital twin model. The experimental results show that the DSC optimization control strategy can effectively improve the safety and economy of the belt conveyor and significantly reduce the energy consumption.

Keywords: long-distance belt conveyor; DSC; digital twin technology

分类号: TD528

1 长距离带式输送机运行优化控制策略

1.1 DSC 优化策略控制流程

(1) 计算决策阶段。实时采集带式输送机的运行数据, 运用尖端算法确定最佳稳定带速, 并进一步规划暂态变速时段及对应的暂态优化带速, 据此构建出

优化带速设定曲线^[1]。

(2) 仿真评估阶段。利用高精度数字孪生技术构建虚拟模型, 输入优化带速设定曲线进行虚拟运行模拟, 预测节能效果和输送效率, 并从物料溢料、皮带打滑、张裂等方面全面评估安全风险。

(3) 优化校正阶段。依据仿真评估的反馈结果, 识别系统中存在的潜在风险点, 随后采取针对性的校正措施, 据此调整并优化带速设定曲线。此过程须反复进行仿真评估与优化调整, 直至有效消除所有潜在风险。

(4) 控制器执行阶段。将经过验证的、可行的带速设定曲线传输至控制系统, 以实现带式输送机速度的精确调控, 从而达到提高运行效率与优化性能的目标。整个过程须确保带式输送机在安全、经济、高效的状态下运行。

1.2 稳态带速设定

为了实现节能目标并最大化提高带式输送机的运载效率, 需要精确匹配带速与所运输的物料量^[2], 以确保输送带在整个运行过程中维持满载状态, 从而避免浪费能耗和运力。输送机稳定运行状态下最优带速与其所能传输的最大物料量之间的关系式如下:

$$V^* = \frac{1}{Q_{\max}} \quad (1)$$

式中: V^* 为稳态最优带速; Q_{\max} 为输送机能够传输的最大物料量。

2 仿真实验

2.1 仿真实验硬件设计

基于可编程逻辑控制器 (programmable logic con-

作者简介: 李宇佳, 男, 本科, 助理工程师, 研究方向为机电工程。

troller, PLC) 与 dSPACE 硬件, 构建长距离带式输送机仿真平台。平台核心为 dSPACE MicroLabBox, 运行虚拟带式输送机模型, 精确模拟实际运行状态, 包括输送速度、物料负载等^[3]。MicroLabBox 通过输入/输出 (input/output, I/O) 接口与 PLC 通信, 接收控制指令并反馈状态信息。PLC 作为控制器, 实现控制算法, 通过以太网等接口发送控制指令至 MicroLabBox, 如启动、停止、调整速度等。同时, PLC 接收 MicroLabBox 反馈, 监测带式输送机的状态, 确保其稳定运行。dSPACE ControlDesk 软件用于调整虚拟带式输送机参数, 模拟不同运行场景。PLC 编程软件 TIA Portal 支持编写和优化控制算法。带式输送机系统硬件仿真框架如图 1 所示。

2.2 运行过程优化控制实验

依托已搭建的带式输送机系统硬件仿真平台, 对基于数字孪生技术的长距离带式输送机 DSC 优化控制策略进行实验验证。实验以某港口煤炭带式输送机为实例, 该带式输送机的额定带速设定为 3.25 m/s, 并配置了特定的能耗模型参数, 包括阻力系数为 24.510, 面积速度比为 120.375 m²/s², 最大加速度为 0.410 m/s², 最大减速度为 -0.324 m/s², 最大张力为 73.6 kN 及最大张力变化量 $\Delta F_{T, \max}$ 为 75.0 kN。为了深入分析, 输送带被均匀划分为 20 个微段, 承载侧与返回侧各占 10 段, 将张紧装置作为独立的微段进行考虑。为全面评估数字孪生驱动的 DSC 优化控制策略的应用效果, 设计了安全性和经济性两组实验, 其中, 安全性实验采用短仿真时间, 快速验证带式输送机的安全状态; 经济性实验延长仿真时间, 以准确评估节能减排效果^[4, 5]。

3 应用效果分析

3.1 安全性分析

为验证数字孪生技术在长距离带式输送机运行优化中的安全性, 实验设定采样间隔时间为 1 s, 总仿真时间为 2 000 s, 旨在通过调整给料速率来观察带式输送机的变速性能。具体而言, 给料速率每 500 s 变换一次, 依次设定给料速率为 525 kg/s、350 kg/s、470 kg/s 和 315 kg/s。运用 DSC 优化控制策略进行决策分析后, 确定了 4 个稳态带速值, 分别为 3.20 m/s、2.12 m/s、2.64 m/s 及 1.87 m/s。这一结果是通过 DSC 优化控制策略中的仿真评估与优化校正环节多次迭代得出的。在历经多次循环验证与调整后, 设定 4 次变速的关键时间, 分别为 17 s、6 s、4 s 及 4 s。

在仿真评估阶段, 利用带式输送机的数字孪生模型, 对优化后的带速设定曲线进行预测。预测结果显示, 输送带上各微小单元段的速度波动极小, 贴合预设的带速曲线, 提升了带式输送机运行的平稳性。同时, 虚拟运行过程中的最大加、减速度均未超出设备允许范围, 从输送带刚性角度判断, 降低了打滑或张裂风险。

在驱动滚筒处观测到张力存在显著的瞬时波动, 其幅度超出了允许最大值的 10%。这一状况对驱动电机及输送带构成剧烈冲击, 加剧了磨损风险, 并有可能导致结构损坏甚至断裂事故的发生。针对上述问题, 对优化带速设定曲线进行了校正, 经过优化调整, 变速时间标定为 17 s、8 s、7 s、7 s, 该配置可确保所有关键性能指标均达标, 满足安全规范的标准要求。张力瞬时变化如图 2 所示, 对驱动滚筒部位的张力变化

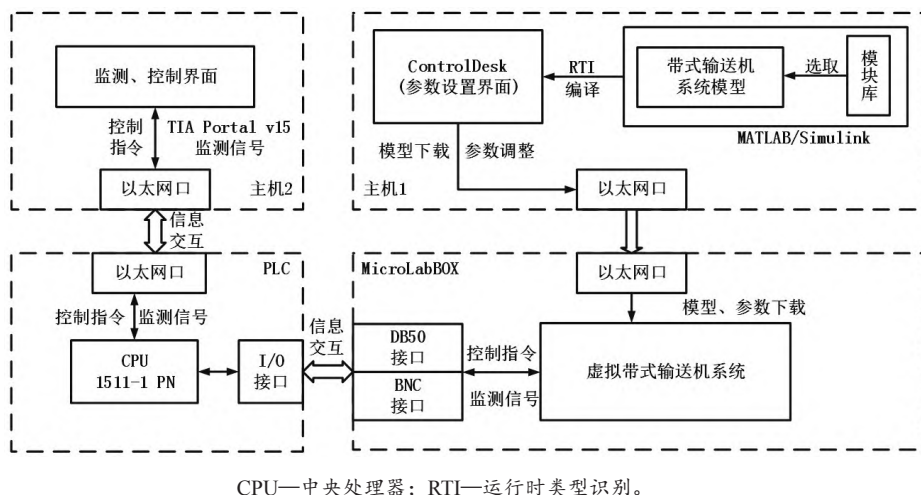


图 1 带式输送机系统硬件仿真框架示意图

进行精确管理,成功实现了对瞬时张力波动的有效控制,从根本上规避了输送带在作业过程中的风险隐患。

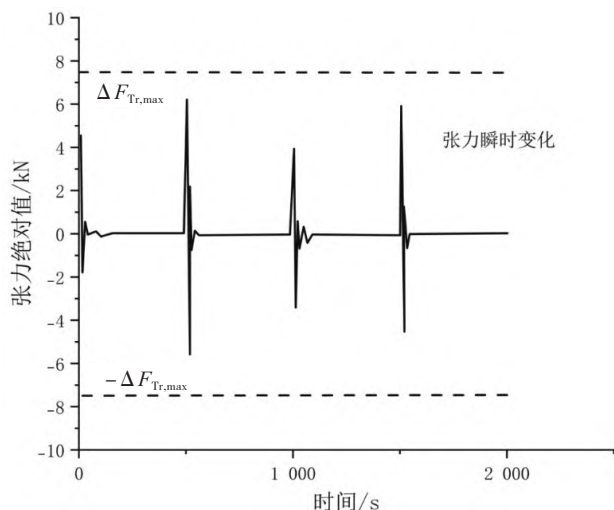


图2 张力瞬时变化图

3.2 经济性分析

为验证该策略在经济性方面的优势,进行了定速控制实验与数字孪生驱动优化控制对照实验。在实验中,采样时间设定为1 s,并规划了4 h的仿真周期,期间每小时调整一次给料速率,将给料速率具体设置为525 kg/s、350 kg/s、470 kg/s和315 kg/s。两项实验的初始带速均设为0,其中,定速控制实验在时间为0时选定额定带速为3.20 m/s,不考虑变速过程;数字孪生驱动优化控制通过优化算法,得出变速时间分别为17 s、8 s、7 s和7 s,并据此生成了合理的带速设定曲线。

在仿真评估阶段,不同控制策略下的输送带填充率如图3所示。在输送机运行1 h内,由于两种控制策略均使给料速率与带速保持在额定水平,因此填充率呈现出相似性。然而,在随后的3 h内,在定速控制策略下,随着给料速率的波动,填充率变化显著,为70%~100%;相比之下,采用数字孪生驱动优化控制策略的系统通过精确调控带速,成功将填充率稳定维持在98%~100%,显著提升了输送机的整体运输效能。

不同控制策略下的能耗功率如图4所示。在输送机运行1 h内,由于给料速率与速度设置相同,数字孪生驱动优化控制策略和定速控制策略的能耗相近,但自输送机运行2 h起,数字孪生驱动优化控制策略凭借其动态速度调节能力,维持了高填充率,并且同时展现了极强的节能效果。数字孪生驱动优化控制策略在实验期间的节能率高达14.17%。

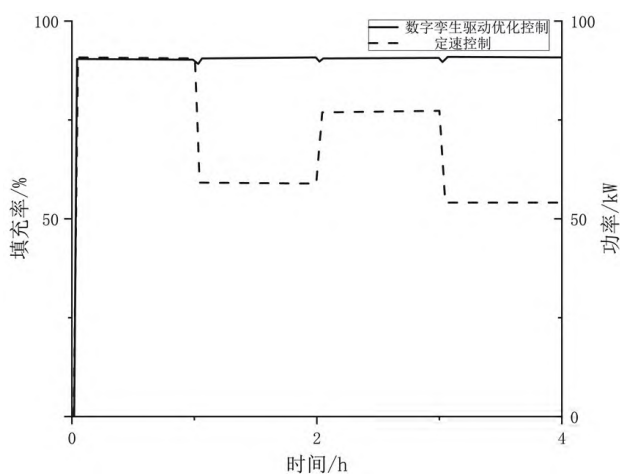


图3 不同控制策略下的输送带填充率

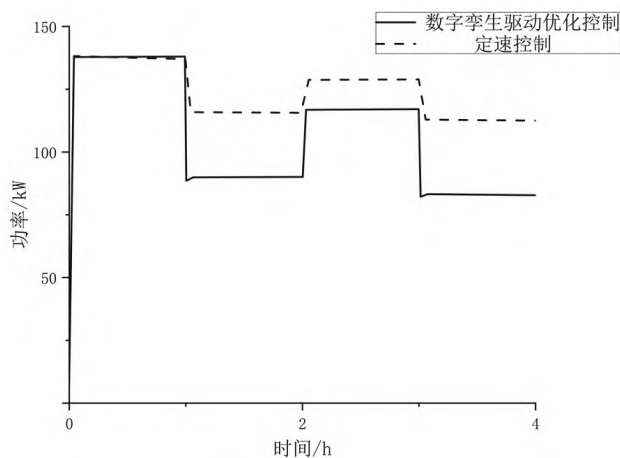


图4 不同控制策略下的能耗功率

4 结束语

文章依托仿真平台,对基于数字孪生技术的长距离带式输送机DSC优化控制策略进行深入验证。实验结果表明,DSC优化控制策略不仅能显著提升带式输送机的安全性,通过精细调控带速,有效避免输送机出现张裂、打滑等潜在风险,还能显著降低其能耗,实现卓越的经济效益。

参考文献

- [1] 王振华,段自强,张瑞峰,等.不连沟煤矿主运输智能煤流监控系统的应用[J].智能矿山,2024,5(10):60-66.
- [2] 蒋习伟,郭靖,郭世永,等.煤矿机电皮带运输系统节能技术研究[J].电气技术与经济,2024(8):239-241.
- [3] 郭珂.长距离带式输送机液压自动张紧装置的研究[J].机械管理开发,2023,38(3):156-157,160.
- [4] 华绪钦,欧玉林,陈敏,等.长距离曲线胶带输送机在原料场的应用[J].宝钢技术,2023(3):50-53.
- [5] 王增晖,刘春晖,张强.长距离平面转弯带式输送机的设计及应用[J].起重运输机械,2022(10):41-44.