

火电厂输煤系统节能优化自动控制技术研究

桑永明

(大唐东营发电有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 针对火电厂输煤系统存在的多线路多煤仓耦合制约、负荷波动和输送延迟导致能耗浪费等问题, 设计了改进模型预测控制(MPC)-长短期记忆网络(LSTM)的节能优化协同控制方法。首先, 构建多煤仓物料平衡动态方程, 通过MPC实现输煤线路协同调度与料位均衡分配, 构建包含运行能耗、启动能耗和空载能耗的系统能耗多优化目标函数。其次, 利用LSTM网络预测未来煤量需求, 结合皮带机变速控制策略, 提前响应负荷变化, 避免时间延迟造成的供需失配。实验结果表明, 相比传统料位控制, 所提方法能够实现20%的节能率, 设备启动次数减少57.05%, 平均空载时间降低68.45%, 煤仓料位波动标准差降至0.13, 供需失配时长缩短至23.50 min。

关键词: 输煤系统; 负荷波动; 模型预测控制; 长短期记忆网络; 皮带机变速

中图分类号: TP273

文献标识码: A

DOI: 10.19769/j.zdhy.2026.09.019

Research on Energy-Saving Optimization and Automatic Control Technology for Coal Conveying Systems in Thermal Power Plants

SANG Yongming

(Datang Dongying Power Generation Co., Ltd., Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: To address issues such as multi-line and multi-bunker coupling constraints, load fluctuations, and energy waste caused by transportation delays in the coal conveying system of thermal power plants, this paper designs an improved Model Predictive Control (MPC)-Long Short-Term Memory (LSTM) energy-saving optimization collaborative control method. Firstly, a dynamic material balance equation for multiple bunkers is established, enabling coordinated scheduling of coal conveying lines and balanced material level distribution through MPC. A multi-objective function for system energy consumption is constructed, incorporating operational energy, startup energy, and no-load energy. Secondly, an LSTM network is employed to predict future coal demand, combined with a belt conveyor speed control strategy, to proactively respond to load changes and eliminate supply-demand mismatches caused by time delays. Experimental results demonstrate that compared to traditional material level control, the proposed method achieves a 20% energy-saving rate, reduces equipment startup frequency by 57.05%, lowers average no-load time by 68.45%, decreases bunker material level fluctuation standard deviation to 0.13, and shortens supply-demand mismatch duration to 23.50 minutes.

Key words: coal conveying system; load fluctuation; MPC; LSTM; belt conveyor speed regulation

0 引言

传统火电厂输煤系统采用基于煤仓料位上下限的简单反馈控制策略。然而, 各煤仓独立运行、线路调度缺乏协同优化, 导致设备频繁启停和长时间空载运行。机组负荷波动时煤流传输存在时间延迟, 传统控制无法提前预判需求变化, 造成供需失配和能量浪费。本文针对多线路耦合、负荷波动和时间延迟问题, 提出基于改进模型预测控制

(Model Predictive Control, MPC)-长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)的协同优化控制方法, 通过预测驱动的线路调度、料位均衡和变速协同, 实现输煤系统的能耗最小化, 为火电厂输煤系统智能化运行提供技术支持。

1 火电厂输煤系统特性

1.1 多线路多煤仓的耦合性

火电厂输煤系统采用多条输煤线路并联, 通过多个煤仓向锅炉供煤。通常, 600 MW 机组配置 2~3 条输煤线路,

收稿日期: 2025-11-30 修回日期: 2025-12-27

作者简介: 桑永明, 1984年生, 助理工程师, 研究方向为火电厂集控运行与智能化应用。

每条线路包含4~6台皮带机串联运行,末端连接3~4个原煤仓,构成多对多供煤网络。煤仓料位受上游供煤量和下游耗煤量双重影响,各煤仓因共享输煤线路而相互制约。当某条线路向煤仓A供煤时,其他煤仓只能依赖剩余输煤线路或暂停充煤^[1]。这种耦合关系直接影响系统能耗,不合理的输煤线路分配会造成设备频繁启停、空载运行或过载运行。要实现节能优化控制,需建立数学模型描述输煤系统的这一动态特性。为此,本节设计了多煤仓系统的物料平衡方程:

$$\frac{dH_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^M \alpha_{ij}(t)Q_j(t) - D_i(t), i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: $H_i(t)$ 表示第*i*个煤仓料位; $Q_j(t)$ 表示第*j*条输煤线路供煤量; $\alpha_{ij}(t)$ 表示输煤线路和煤仓连接开关变量; $D_i(t)$ 表示煤仓出煤量; M 表示输煤线路数; N 表示煤仓数。

1.2 负荷波动下的供需失配

机组负荷波动引起锅炉耗煤量变化,但煤流从输煤起点传递到煤仓存在一定时间延迟。这种延迟使供煤量难以实时跟踪负荷变化,造成能量浪费。对于总长1 000~2 000 m的输煤线路,皮带机额定速度为2.5 m/s时,煤流传输时间达7~13 min^[2]。传统控制策略基于煤仓料位反馈启动输煤设备,当料位低于下限时才开始供煤,但煤流到达煤仓时负荷已发生变化,形成供需失配。这种滞后响应导致两个方面的能耗损失:(1)为避免延迟导致的断煤风险,必须提高煤仓下限设定值并延长供煤时间,增加了输送总量和搬运功耗;(2)负荷突升时供煤响应滞后,需临时加开多条线路快速补充煤量,会产生额外的启动能耗和短时高负荷运行损耗。本节采用式(2)来量化负荷波动下的时间延迟^[3]:

$$Q_c(t) = \sum_{j=1}^M \alpha_{ij}(t-\tau_j)Q_j(t-\tau_j) \quad (2)$$

式中: $Q_c(t)$ 表示*t*时刻到达煤仓的实际煤量; τ_j 表示第*j*条线路的输送延迟时间。式(2)表明,供煤控制必须提前 τ_j 时间预判负荷变化,否则将出现供需失配。

2 基于改进MPC-LSTM的输煤系统节能优化控制建模

2.1 基于多煤仓物料平衡的料位协同调度

针对多线路共享导致煤仓间相互制约^[4],构建基于改进MPC的多煤仓协同调度模型。首先,基于式(1)的物料平衡关系,将煤仓离散化为状态空间形式。设采样周期为 T_s ,则第*k*时刻煤仓料位状态更新方程为:

$$H_i(k+1) = H_i(k) + T_s \left[\sum_{j=1}^M \alpha_{ij}(k)Q_j(k) - D_i(k) \right], i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中: $\sum_{j=1}^M \alpha_{ij}(k) \leq 1$ 表示每条线路最多向一个煤仓供煤;

$Q_j(k)$ 表示输煤线路的启停状态。

协同调度的目标是优化线路分配,使各煤仓料位维持在安全区间且趋于均衡,同时最小化系统能耗。输煤系统总能耗包括皮带机运行能耗、启动能耗和辅助设备能耗。对于第*j*条线路,其运行能耗可表示为:

$$E_j(k) = [P_j + \eta_j Q_j(k)] \cdot T_s \cdot u_j(k) \quad (4)$$

式中: P_j 表示线路空载功率; η_j 表示负载功率系数; $u_j(k)$ 表示线路运行状态。

2.2 负荷驱动下的变速煤量需求预测

为实现提前决策,进一步构建变速LSTM的煤量需求预测模型,并设计皮带机变速反馈策略。根据LSTM预测的未来煤量需求动态调节各输煤线路的运行速度。当预测煤量需求较低时,减缓皮带机运行速度,以降低输送功率;当预测负荷快速爬升时,提前提速增加供煤强度,避免料位跌破下限。变速控制需满足设备安全约束,皮带机速度调节范围设定为额定速度的40%~100%,单次调速幅度不超过20%^[5]。LSTM的核心计算公式为:

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t, h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \quad (5)$$

式中: C_t 表示细胞状态,存储机组负荷的周期性规律和变化趋势; f_t 表示遗忘门,通过遗忘门可选择性保留历史负荷模式(如日峰谷规律); i_t 表示输入门,通过输入门可接收当前负荷信息(如突发的负荷波动); h_t 表示隐藏状态输出,编码当前时刻的负荷特征,用于生成未来 N_p 步的煤量需求预测; o_t 表示输出门,用来控制输出与MPC决策相关的预测信息。

3 实验

3.1 实验设置

本研究基于600 MW火电机组的真实运行数据进行仿真验证。系统配置包括3条输煤线路并联运行,每条线路由5台皮带机串联组成,末端连接4个原煤仓,总输送距离约1 500 m。采集连续168 h的运行数据,包括机组负荷曲线、煤仓料位、设备启停记录和能耗数据,采样周期为5 min。为全面评估所提方法的有效性,设置4种对比控制策略:传统料位控制(基于料位上下限的简单反馈控制)、仅MPC(仅考虑料位协同优化)、MPC-LSTM联合控制(增加负荷预测)以及本文提出的方法(MPC-LSTM协同+变速控制)。评价指标涵盖能耗、设备启动次数、空载时间、料位波动、供需匹配度等多个维度。

3.2 不同控制策略性能对比

不同控制策略的性能对比如表1所列。本文方法在所有评价指标上均显著优于对比方法。相比传统料位控制,本文方法的节能率达到20%,设备启动次数减少57.05%,平均空载时间降低68.45%。仅MPC通过线路协同优化实

现 10% 节能,但因缺乏负荷预测仍存在供需失配问题。MPC-LSTM 联合控制进一步将节能率提升至 15%,供需失配时长缩短至 42.7 min。本文方法通过引入变速协同控制,在保持料位稳定性的同时,将供需失配时长压缩至 23.5 min,最大料位偏差仅为 0.24。

表 1 不同控制策略的性能对比

评价指标	传统料位控制	仅 MPC	MPC-LSTM 联合控制	本文方法
总能耗/(kW·h)	12 500	11 250	10 625	10 000
节能率/%	0	10	15	20
设备启动次数/次	156	118	89	67
平均空载时/min	48.5	35.8	22.4	15.3
料位波动标准差	0.42	0.28	0.19	0.13
供需失配时长/min	125.6	78.3	42.7	23.5
最大料位偏差	0.85	0.56	0.38	0.24

3.3 料位协同控制效果分析

本节以 24 h 为运行周期,对比了传统料位控制和本文方法在 4 个原煤仓的料位变化曲线,如图 1 所示。传统料位控制采用独立反馈策略,各煤仓料位呈现明显的锯齿波动特征。煤仓 1 和煤仓 3 因共享输煤线路产生竞争关系,料位交替出现过高和过低的极端情况,最大波动幅度达 0.70。煤仓 2 和煤仓 4 的料位分布不均衡,标准差分别为 0.38 和 0.44,频繁触发线路切换导致设备启停次数增加。相比之下,本文方法通过 MPC 协同调度实现料位全局优化,4 个煤仓料位始终维持在 0.35~0.65 的安全区间内,料位曲线平稳且趋于一致,煤仓间最大偏差仅为 0.18。LSTM 负荷预测使供煤提前响应负荷变化,避免了料位突降风险。变速控制进一步平滑了料位波动,使各煤仓料位标准差均小于 0.15。

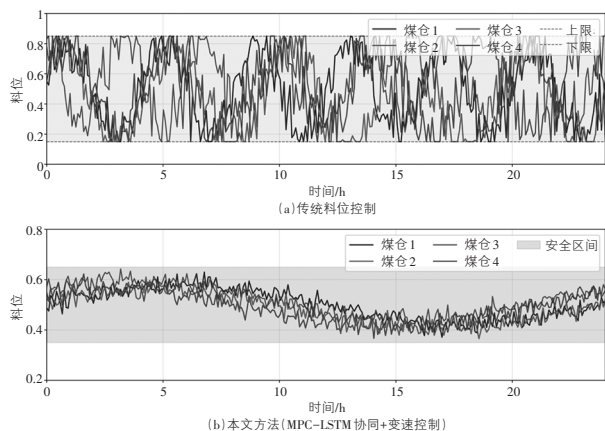


图 1 多煤仓料位 24 h 对比图

图 2 进一步对 7 天运行周期的总能耗进行分解。本文方法将总能耗降低至 10 000 kW·h,运行能耗占比提升至 66.5%,启动能耗锐减至 16.5%,空载能耗降至 17.00%。节能贡献率分解显示,设备启动次数从 156 次降到 67 次,可以贡献节能量 780 kW;空载时间从 48.50 min 缩短到 15.30 min,可以贡献 500 kW·h;优化线路协同运行贡献 620 kW·h;

变速控制通过降低输送功率贡献 600 kW·h。该结果表明,MPC 协同调度通过减少无效启停和线路竞争实现主要节能效果,而变速控制和负荷预测进一步挖掘节能潜力。

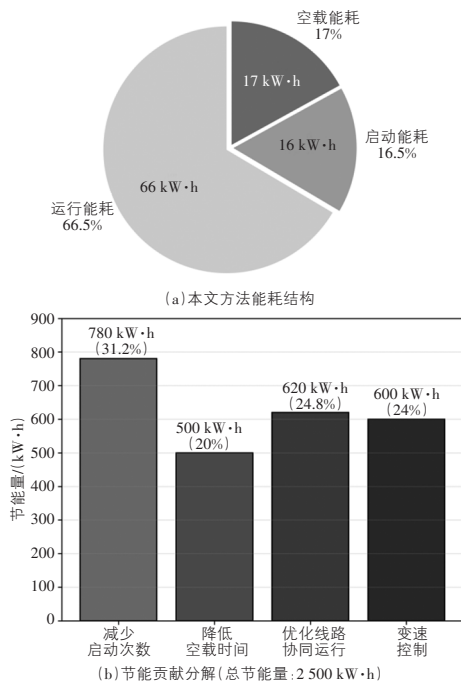


图 2 能耗分解与节能贡献

4 结语

本文针对火电厂输煤系统节能优化问题,提出了基于 MPC-LSTM 的协同控制方法,该方法具有全局优化、预测驱动和多层协同的显著优势。通过改进 MPC,解决了传统控制中线路竞争和设备无序启停的问题;利用 LSTM 负荷预测提前规划供煤策略,有效避免时间延迟导致的供需失配;设计皮带机变速控制策略,为火电厂输煤系统智能化运行提供了技术方案。未来将进一步研究设备故障条件下的鲁棒控制策略,探索深度强化学习在输煤系统实时优化中的应用。

参考文献

[1] 谢海艳. 基于 PLC 的火电厂输煤程控系统[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(4): 146-147+150.

[2] 胡民超, 莫少康, 海斌, 等. 基于巡检机器人的火电厂输煤栈桥智能识别技术研究[J]. 中国高科技, 2025(17): 15-17.

[3] 杨国鑫. 火电厂输煤无动力除尘装置改造设计研究[J]. 电力设备管理, 2024(20): 107-109.

[4] 谭吉川. 火电厂输煤系统节能优化自动控制技术研究[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(10): 136-138.

[5] 张超. 某电厂输煤系统沉煤池自动化清理方案整体设计与研究[J]. 科技创新与生产力, 2024, 45(7): 116-118+122.