

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.056

基于 MPC 的煤矿胶带机实时柔性调速控制优化策略

王长久, 马国帅, 王吴军, 朱珠

(中煤陕西公司大海则煤业公司, 陕西 榆林 719012)

摘 要: 煤矿胶带机实时调速控制时, 若不能平滑柔和地完成调速控制, 会造成胶带机卡顿, 影响胶带机的安全运行。为此提出基于模型预测控制(MPC)的煤矿胶带机实时柔性调速控制优化策略。通过监测胶带机运行过程中的运行状态数据, 获取输送机运行状态参数。将运行状态参数作为输入变量设计煤矿胶带机实时柔性调速控制器。通过模糊规则来获取控制器的模糊关系并输出相应的控制信号, 基于 MPC 算法对输出控制信号进行优化, 从而实现胶带机速度的实时柔性调速。实验结果表明: 基于 MPC 的控制策略开展煤矿胶带机调速控制时, 实际控制时间短, 调速控制效果好、性能高, 以期提升煤矿运输效能和操作灵活性, 确保煤矿运输的工作效率和安全性。

关键词: MPC 算法; 煤矿胶带机; 柔性调速控制; 控制器设计; 模糊原理

中图分类号: TD63+4 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0285-05

Optimization Strategy for Real Time Flexible Speed Control of Coal Mine Belt Conveyor Based on MPC

WANG Changjiu, MA Guoshuai, WANG Wujun, ZHU Zhu

(Dahaize Coal Industry Company of Shaanxi Company, China National Coal Group, Yulin 719012, China)

Abstract: To avoid the jam and unsafe operation of belt convey in its real-time speed regulation control in coal mine due to failure in smooth speed control, an optimization strategy for real-time flexible speed regulation control of coal mine belt conveyor based on model predictive control (MPC) is proposed. The operating status data of the belt conveyor is monitored in operation, and the operating status parameters of the convey are obtained. Based on MPC algorithm, the output control signal is optimized, and real-time flexible speed regulation of the belt conveyor is chieved. The experimental results show that controlling coal mine belt conveyor speed based on the MPC control strategy yeilds short actual control time, good speed control effect and high performance, which improves the efficiency and operational flexibility of coal mine transportation and ensure the work efficiency and safety of coal mine transportation.

Keywords: MPC algorithm; coal mine belt conveyor; flexible speed control; controller design; fuzzy principle

0 引言

煤矿胶带机是一种常用的运输设备, 主要用于将煤炭从开采区域运送到其他地方待用^[1-2]。煤矿胶带机具有高工作负荷、长距离运输、运行稳定性较好等特点。由于煤矿胶带机是一个连续运输系统, 其运输煤炭时间较长且距离较远, 因此需要精确控制煤矿胶带机速度, 满足煤炭从采矿点到加工厂或储运设施的需求, 以此达到煤炭运输和装卸操作目的。煤矿胶带机也被用于火力发电厂或燃煤锅炉等能源设备。在大型港口和物流中心, 煤矿胶带机被用于卸载船只或货车上的煤炭, 并将其运送到指定储存区域。煤矿胶带机在煤炭开采领域、能源领域、物流领域均具有广泛的应用前景。但在实际应用条件下, 煤矿胶带机工况环

境仍具有一定的复杂性和多变性, 实现煤矿胶带机精确调速控制面临一些挑战。

付文强等^[3]根据机器运行过程的扰动问题, 提出一种改进自抗扰的调速控制方法。该方法首先引入虚拟控制量对机器运行时的电流实施自抗扰解耦控制, 并以此提升扰动观测器观测精度; 再根据获取的扰动观测器实施改进处理, 从而建立调速控制; 最后通过设计的控制器完成机器的柔性调速。但是, 该方法存在故障率较高、反应速度较慢的问题。石元铎^[4]针对胶带输送机在运行过程中出现的液力耦合器保护效果差的问题, 提出一种胶带机变频调速控制方法。该方法首先根据胶带机自身工作原理, 确定各项控制参数; 再以此为基础结合变频调速控制算法完成变频调速控制器的设计; 最后通过所设计的控制器, 实现对胶带

第一作者简介: 王长久(1984—), 男, 重庆人, 高级工程师, 本科, 研究方向为煤矿机电, zhangenkang9631@126.com。

输送机的柔性调速控制。但是,该方法无法满足大型煤矿自动化输送的要求。倪云峰等^[5]首先根据煤炭输送机运行原理,建立输送机带速控制模型,确定控制器相关参数;结合PID控制算法完成煤炭输送机调速控制器的设计;最后利用蚁群算法实时对控制器中参数展开寻优处理,完成控制器优化,并通过优化后的控制器来实现胶带输送机柔性调速控制。但是,该方法仍无法在调速控制前及时确定煤矿胶带机瞬时煤量值,导致在煤矿胶带机调速控制时,实时控制效果差。

为了解决上述煤矿胶带机实时柔性调速控制时存在的问题,本文提出基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的煤矿胶带机实时柔性调速控制优化策略。

1 煤矿胶带机运行状态参数获取

煤矿胶带机由机头传动装置、转向装置、储带仓架、游动小车、液压自控张紧装置、机尾等环节组成。煤矿胶带机总体布置如图1所示。

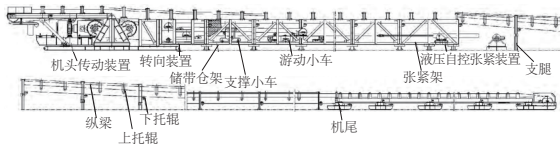


图1 煤矿胶带机总体布置图

煤矿胶带机进行实时柔性调速控制前,需要获取运行带速、运输距离以及输送量等参数。通过对这些数据的深入研究,可以充分了解胶带机的运行特性和工况变化,为后续调速控制器的设计与优化提供重要依据^[6-7]。

1.1 运行带速计算

设定煤矿胶带机的输入煤量为 $p_{d,in}, t$;上游输入煤量为 $p_{i,in}, t$;以此获取煤炭胶带机的瞬时输出煤量值,结果如下式所示。

$$p_{d,out} = p_{i,in} + p_{d,in} \quad (1)$$

式中 $p_{d,out}$ 为煤矿胶带机的输出煤量值。

根据确定的输出煤量值,计算煤矿胶带机煤量与速度之间比值,并通过瞬时煤量大小实时调整煤矿胶带机速度,完成当前状态下煤矿胶带机带速值,通过实时调整速度,可以使煤矿胶带机在不同工况下运行更加稳定和高效,核心计算流程如下式所示。

$$\begin{cases} v = p_{d,out} / t(p_{max}), & p' \leq p_{d,out} \\ v = v_m, & p' > p_{d,out} \end{cases} \quad (2)$$

式中: p_{max} 为煤炭的最大线密度, kg/m^3 ; t 为时间参数, h ; v 为煤矿胶带机上运行带速, m/h ; p' 为瞬时煤量, t ; v_m 为煤矿胶带机的最小保护速度, m/h 。

1.2 运输距离计算

在煤矿胶带机工作过程中,由于卸料点变化和工作面的不断推进,会使运输距离发生变化。设定胶带机工作过程中,第 i 条胶带机机头、卸料点煤量采样信号分别为 $\phi(k)$ 、 $\varphi(k)$,以此获取二者之间互相关函数,公式如式(3)所示。

$$E_{\phi\varphi}(m) = W[\phi(k)\varphi(k-t)] \quad (3)$$

式中: k 为离散时间变量, h ; W 为数学期望系数; $E_{\phi\varphi}(m)$ 为建立的互相关函数。

根据上述计算结果,完成煤矿胶带机的运输距离值,公式如式(4)所示。

$$l_i = \frac{M - n_{max}}{g} v_i \quad (4)$$

式中: n_{max} 为互相关函数能量最大值节点位置, m ; g 为采样频率, Hz ; v_i 为胶带机第 i 条输送带的运行速度, m/h ; M 为采样信号长度, m ; l_i 为煤矿胶带机的运输长度值, m 。

1.3 输送量计算

根据上述确定的煤矿胶带机运输距离,设定预测周期为 T, h ,以此获取煤矿胶带机的输送量分布函数,公式如式(5)所示。

$$D(t+T, l_i) = D(t, l_i + v_i T) \quad (5)$$

当获取输送量参数后,将其作为调速控制器输入变量,确定输出控制信号,提高煤矿胶带机运行效率,从而确保煤矿生产安全性。

2 煤矿胶带机柔性调速控制方法

在传统的煤矿胶带机调速控制方法中,通常采用固定速度设置或简单的PI控制算法。然而,这种方法无法充分考虑到实际的煤炭分布情况和运输长度变化,难以实现精确的运行控制。根据上述确定的相关参数,再结合模糊原则来完成煤矿胶带机调速控制器的设计,采用MPC算法制定与控制器相适应的控制算法,从而实现煤矿胶带机实时柔性调速控制^[8-9]。通过引入模糊控制和MPC算法,能够更好地应对煤矿胶带机调速控制中的复杂性和不确定性。

2.1 基于模糊规则获取调速控制器输出控制信号

根据模糊控制原理^[10-11],结合上述确定的煤矿胶带机各项运行参数,完成煤矿胶带机调速控

制器的设计。煤矿胶带机调速控制器结构如图2所示。

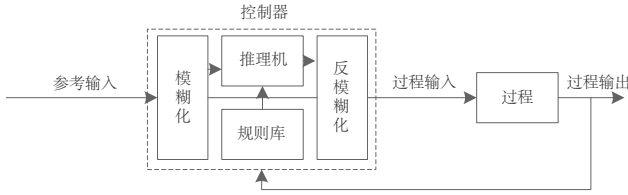


图2 煤矿胶带机调速控制器结构图

根据图2可知,煤矿胶带机调速控制器可分为4个部分,即规则库、推理机、模糊化接口以及反模糊化接口。规则库是模糊逻辑控制系统的核心部分,描述了输入变量与输出变量之间的关系;推理机根据规则库中的模糊规则推理,将模糊化的输入变量通过模糊规则进行匹配和推理,得出相应的模糊输出结果;模糊化接口是将输入变量从实际值转化为模糊集合的过程;而反模糊化接口是将模糊输出结果转化为具体的控制指令,以实现煤矿胶带机的调速控制。

在煤矿胶带机调速控制时,采用单输入、单输出的一维模糊控制器。控制器根据预设的参数进行反馈和控制,当接收到输送机上瞬时出煤量 $p_{d,out}$ 、运输距离 l_i 以及输送量 $D(t+T, l_i)$ 等参数后,采集信号实施模糊化处理,将结果传输至推理机,基于模糊规则获取输出控制量。

由于设计控制器是一维模糊控制器,所以这种控制器的输入、输出变量均只有1个。对于每个输入变量和输出变量,将其划分为模糊集合。设定调速控制器的输入变量为 x (煤矿胶带机煤量分布函数),输出变量为 u ,完成模糊控制规则制定,其表达式为

$$\begin{cases} 1: \text{if } x \text{ is } A_1 \text{ Then } u \text{ is } B_1 \\ 2: \text{if } x \text{ is } A_2 \text{ Then } u \text{ is } B_2 \\ \vdots \\ m: \text{if } x \text{ is } A_m \text{ Then } u \text{ is } B_m \end{cases} \quad (6)$$

式中 A_i 、 B_i 分别为控制器中输入、输出域上的模糊集合中的模糊变量。

根据上述制定的模糊控制规则,完成控制器模糊规则的模糊关系获取,将模糊结果转换为具体的控制信号,如式(7)所示。

$$R(x, u) = \bigcup_{i=1}^m A_i B_i \quad (7)$$

煤矿胶带机的运行过程中存在着不确定性,模糊关系可以通过模糊化处理,将实际的输入变

量转化为模糊集合,从而能够处理这种不确定性。

2.2 采用MPC算法优化输出控制信号

针对不同工况下的调速要求,未经优化的控制器输出控制信号无法为每个控制挡位设置一个适当的阈值,导致煤矿胶带机的运行不稳定、能耗增加、生产效率降低以及设备寿命缩短等不良影响。为此,采用MPC算法将控制器输出控制信号作为参考信号进行优化,通过设定以确定最佳的控制指令^[12],从而辅助控制器完成煤矿胶带机运行过程中的实时柔性调速控制。根据MPC算法的控制原理,将设计调速控制器的控制系统转换成数学模型,公式如式(8)所示。

$$\begin{cases} y(t) = R(x, u)y(t) + A_i^p \beta(t) + B_i^y \chi(t) \\ e(t) = Cy(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $y(t)$ 为控制器控制系统数学模型的状态量; $\beta(t)$ 为控制量; $\chi(t)$ 为干扰系数; $e(t)$ 为输出量; C 为常数系数。

利用建立的数学模型,MPC算法可以预测煤矿胶带机未来的运行状态,对控制系统数学模型实施离散变换,并以此获取离散阶跃响应值 s_k ,得到系统输出值,公式如式(9)所示。

$$e_k = \sum_{i=1}^k e(t) s_{k-i+1} \Delta \beta_{i-1} \quad (9)$$

式中: $\Delta \beta_i$ 为系统输入量; e_k 为获取的系统输出值; k 为系统当前时刻。

根据上述计算结果,将控制器输出控制信号作为参考信号,将控制步数设定成 m ,预测步数设定成 ζ ,调速控制器输出控制信号外部干扰设定成 ξ ,以此预测出输出控制信号在 k 时刻的系统输出,输出矩阵如式(10)所示。

$$\begin{aligned} \hat{e}(k+q|k) &= \hat{e}(k+q|k-1) + [s_q \times \Delta \beta(k)] + \\ e_m(k) - \hat{e}(k|k-1) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\hat{e}(k+q|k)$ 为煤矿胶带机调速控制器在 k 时刻后 q 步系统预测输出值; $e_m(k)$ 为干扰输出; s_q 为系统当前状态离散阶跃响应。

在控制器中根据系统输出矩阵反映不同状态下的控制挡位,并根据设定的优化目标为每个控制挡位设置一个适当的阈值,从而实现煤矿胶带机的柔性调速控制。过程如式(11)所示。

$$T = \begin{cases} \hat{e}(k+q|k) \leq \rho_{\min}, & \gamma = 1 \\ \rho_{\max} \geq \hat{e}(k+q|k) \geq \rho_{\min}, & \gamma = 2 \\ \rho_{\max} < \hat{e}(k+q|k), & \gamma = 3 \end{cases} \quad (11)$$

式中: T 为建立的阈值; $\rho_{\max}$ 、 $\rho_{\min}$ 分别为煤炭量上、

下限; $\gamma=(1,2,3)$ 为煤矿胶带机挡位。

通过上述方法以及公式的计算,可实现对煤矿胶带机的柔性调速控制。

3 实验分析

3.1 实验环境

选取一台带有500 m长胶带的煤矿胶带输送机为测试目标,其负载惯性为 $10\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,摩擦因数为0.1。设置MPC控制器的采样周期为0.1 s,预测时间窗口为1 s,控制时间窗口为0.2 s,并通过Matlab/Simulink仿真软件输出实验结果。控制目标具体参数如表1所示,示意图如图3所示。

表1 煤矿胶带机基本参数

参数	数值	参数	数值
输送量/(t/h)	400	输送距离/mm	25 920
带速/(m/s)	1.25	倾角/(°)	10
功率/kW	15	容质量/(t/m ³)	0.80
头轮直径/mm	500	尾轮直径/mm	400



图3 控制目标示意图

3.2 实验结果与分析

测试过程中采用基于MPC的煤矿胶带机实时柔性调速控制技术(所提方法)、改进型自抗扰解耦的PMSM调速控制方法研究(文献[3]方法)、煤矿用带式输送机变频调速控制技术(文献[4]方法)开展胶带机柔性调速控制。从瞬时煤量、控制时间以及控制效果3个方面,验证上述3种方法在柔性调速控制过程中的实际控制性能。

1) 瞬时煤量测试

利用所提方法、文献[3]方法以及文献[4]方法对在柔性调速控制时的瞬时煤量展开测试,不同方法的瞬时煤量值测试结果如图4所示。

在煤矿胶带机柔性调速控制器设计过程中,若不能准确获取煤矿胶带机运行过程的瞬时煤量值,会直接降低控制器的控制精度。通过分析图4可知,所提方法在胶带机调速控制过程中检测

出的瞬时煤量与胶带机运行过程中的实际瞬时煤量一致,而文献[3]方法和文献[4]方法检测出的瞬时煤量与实际煤矿胶带机运行瞬时煤量之间存在较大差距。由此可证明,使用所提方法开展煤矿胶带机调速控制时,调速效果好。

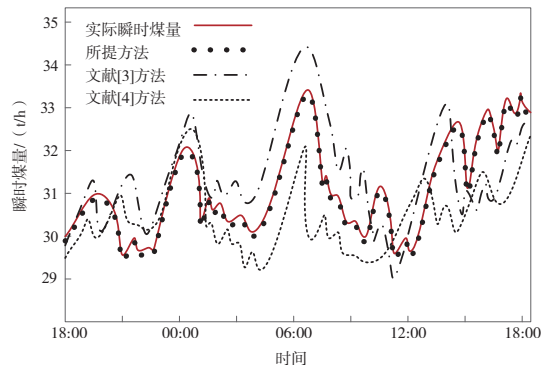


图4 不同方法的瞬时煤量值测试结果

2) 控制时间测试

采用所提方法、文献[3]方法以及文献[4]方法开展煤矿胶带机柔性调速控制时,对不同方法的实际控制时间展开测试,测试结果如表2所示。

表2 不同方法的实际控制时间测试结果

待控制胶带机数量/个	煤矿胶带机调速控制时间测试结果/s		
	所提方法	文献[3]方法	文献[4]方法
1	0.001	0.002	0.003
2	0.003	0.004	0.005
3	0.005	0.007	0.009
4	0.008	0.010	0.011
5	0.012	0.015	0.026
6	0.025	0.028	0.038

分析表2可知,开展煤矿胶带机调速控制时,3种方法测试出的调速控制时间均呈现出不同程度的上升趋势。但所提方法的煤矿胶带机调速控制时间整体低于文献[3]方法和文献[4]方法,这是因为所提方法在控制器设计前,准确地获取了煤矿胶带机瞬时煤量以及煤量分布值,所以该方法在煤矿胶带机实际调速控制时,调速控制时间短。

3) 控制效果测试

基于上述实验结果,继续使用所提方法、文献[3]方法以及文献[4]方法开展煤矿胶带机柔性调速控制,以此测试不同方法下煤矿胶带机在调速控制过程中的实际控制效果。调速控制过程

中结果如表3、图5所示。

表3 不同方法的控制性能测试结果

方法	超调量/%	上升时间/s	振荡次数/次
原始值	36.88	5.5	8
所提方法	6.22	4.3	2
文献[3]方法	10.89	5.0	6
文献[4]方法	19.73	5.2	4

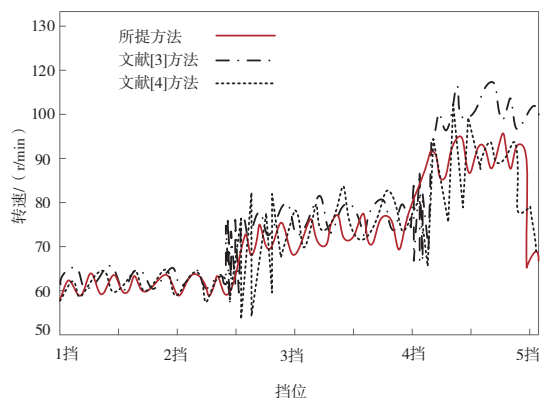


图5 不同方法的实际柔性调速控制效果测试结果

分析表3可知,通过上述3种方法完成煤矿胶带机调速控制时,相比于煤矿胶带机原始值,所提方法在控制调速过程中超调量及振荡次数均有明显改善,控制过程中的上升时间明显有所下降。且分析图5可知,所提方法能够平滑柔性地完成煤矿胶带机运行过程中的换挡控制,过程中转速不会出现大幅波动;而文献[3]方法以及文献[4]方法在控制性能测试时,测试出的超调量与振荡次数虽然出现下降,但是改善效果较不明显。由此可知,使用所提方法开展煤矿胶带机柔性调速控制时,控制效果好、性能高。

4 结语

煤矿胶带机作为重要的煤炭运输设备,在煤炭开采、燃煤发电、港口物流等领域具有广泛的应用。但由于煤矿胶带机的复杂性和多变的工况环境,容易造成煤矿胶带输送机调速控制产生偏差。本文提出基于MPC的煤矿胶带机实时柔性调速控制方法,在获取运行带速、运输距离以及输送量参数的基础上结合模糊控制方法计算调速控制器

模糊关系。利用MPC算法辅助控制器完成煤矿胶带机实时柔性调速控制。实验结果表明:所提方法能够实现煤矿胶带机实时柔性调速控制,且控制效果较好。但该方法在设计控制器时,控制器内部算法还较为复杂,未来的研究将结合当前成果继续探索更先进的调速控制算法。在研究条件充足的情况下,将结合数据驱动等新型技术,进一步提升煤矿胶带机的实时柔性调速计算能力,降低算法时间复杂度,推动煤炭行业的现代化和可持续发展。

参考文献:

- [1] 郭文波. 带式输送机运行能耗优化控制系统设计及应用分析[J]. 机械管理开发, 2023, 38(3): 131-133.
- [2] 张帅. 矿用带式输送机故障控制系统设计[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(9): 86-87.
- [3] 付文强, 赵东标, 张瑶. 改进型自抗扰解耦的PMSM调速控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(4): 646-650.
- [4] 石元铎. 煤矿用带式输送机变频调速控制技术改造及其效果[J]. 机械管理开发, 2021, 36(10): 222-223.
- [5] 倪云峰, 樊娇娇, 叶健. 矿用带式输送机调速控制算法研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(1): 210-213.
- [6] 吕剑锋, 贺振华, 王新宇. 基于激光雷达的带式输送机煤量检测技术[J]. 煤炭工程, 2021, 53(增刊1): 54-59.
- [7] 熊念强, 文锋, 李清, 等. 带式输送机胶带撕裂检测技术综述[J]. 煤炭工程, 2022, 54(7): 79-85.
- [8] 乔升威, 徐正超, 周湛清. 轮毂电机驱动电动汽车预测差速控制策略[J]. 计算机仿真, 2022, 39(1): 124-129.
- [9] 龚嫚, 王园, 方泽立. 新型核电应急柴油发电机组调速控制器开发与试验[J]. 柴油机, 2023, 45(1): 39-43.
- [10] 刘睿, 李明, 达俊宇, 等. 基于自适应模糊控制的空气源热泵温度控制系统[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2023, 43(1): 16-20.
- [11] 陈明霞, 赵金迪, 周冬冬, 等. 基于Smith-模糊控制算法的橡胶挤出机料筒温度控制系统研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(2): 33-38.
- [12] 袁武, 曾山. 基于周期控制方法的MPC开关频率调节策略[J]. 电气传动, 2021, 51(12): 16-22, 46.

收稿日期: 2023-07-07