

智能散状物料带式输送系统的自动化控制与优化

金从兵

湖北凯瑞知行智能装备有限公司 湖北 武汉 430050

摘要：智能散状物料带式输送系统不仅需要具备传统输送系统的基本功能，还需要引入先进的传感器技术、自适应控制算法和数据驱动的决策系统，这样才能实现高效、稳定、智能的操作。文章深入探讨了智能散状物料带式输送系统的自动化控制与优化问题，为工业生产提供更具竞争力和可持续发展的解决方案。

关键词：自动化控制；动态优化；PSO；自适应控制

散状物料的输送是自动化工业生产中的一个重要部分。传统的物料输送系统往往面临着效率低、能耗高、操作不稳定等问题，限制了产线的整体生产效率。为了克服这些不足，智能散状物料带式输送系统应运而生。随着科技的进步和自动化技术的应用，智能输送系统在自动化工业生产中扮演着越来越重要的角色。它不仅能够提高物料输送的效率和准确性，还可以降低能源消耗，优化生产过程，提高生产线的安全性和稳定性。^[1]因此，研究如何实现智能散状物料带式输送系统的自动化控制与优化具有重要的实践意义。

1 智能散状物料带式输送系统

系统结构与元件：智能散状物料带式输送系统型号为 SmartConveyorX2000，用于输送煤矿物料（见图 1）。该系统主要由下述组件构成：[输送带]型号为 HighStrengthBelt-500，宽度及厚度：500mm10mm，由耐磨橡胶材料制成，具备高强度和耐磨损特性。[驱动装置]采用电动滚筒驱动，电机功率 5kW，输出速度可调节范围 0.2m/s ~ 1.5m/s，能够满足系统的不同输送需求。[支承结构]由钢结构组成，支撑输送带的运行。支承结构采用特殊的防震设计，可以有效减少振动和噪音。[传感器]配备接近传感器、负荷传感器和温度传感器在内的多个传感器。接近传感器用于检测物料的到达和离开，负荷传感器用于实时监测物料负荷，温度传感器用于监测设备温度。[控制系统]① PLC 为 SiemensS7-1500。其高性能的处理能力、可靠性和开放式通信接口，使其成为适用于复杂控制任务的理想选择；②该系统的 SCADA（监控与数据采集系统）采用了 WonderwareInTouch，用于监测和可视化整个输送系统的实时状态；③该系统使用 SiemensComfortPanel 作为 HMI 界面。其触摸屏功能和直观的用户界面，使操作员能够轻松地進行参数设置、状态查询和故障排除。控制系统默认参数如下：

PLC 型号: SiemensS7-1500 HMI 型号: Siemens Comfort Panel
PLC 处理器: 3.4GHz 至强双核处理器 屏幕尺寸: 10.1 英寸
内存: 4MBRAM 分辨率: 1280x800 像素
通信接口: Ethernet、PROFINET、Modbus 通信接口: Ethernet、PROFINET
SCADA 软件: WonderwareInTouch

2 多模态传感器融合技术

该系统加装了 LRS-385 的激光测距传感器，用于测量物料的距离和位置，其测量范围 0.1m ~ 10m，分辨率 0.1mm，测量精度 ±1mm。系统原有的负荷传感器升级为 PTM-271 压力传感器，该传感器的测量范围为 0 ~ 10bar，输出 4 ~ 20mA，精度 ±0.2%。加装红外热像传感器，用于检测物料的温度分布，从而判断是否存在异常情况。本研究选用 IRT-5300 红外热像传感器，测量范围为 -20° C ~ 250° C，分辨率 0.1° C，精度 ±2° C。使用加权平均来融合传感器数据，其中不同传感器的权重根据其测量精度和可靠性进行调整。通过分析融合后的数据，可以更好地理解物料的位置、状态和特性，为后续的自适应控制和优化决策提供可靠的基础。

3 自适应控制与智能决策

3.1 基于反馈的自适应控制算法

自适应控制在应对系统动态变化中起着关键作用。基于反馈的自适应控制算法通过实时监测系统状态并根据误差信号来调整控制策略，以此实现系统性能的优化。该算法的核心思想是通过反馈信号，对控制器的参数进行实时调整，来适应系统的动态变化。在智能散状物料带式输送系统中，此算法可以应用于调节传送带速度、物料流量等控制参数，实现更准确的物料传输和系统稳定性。算法实现如下：[控制器输出] $u(t)$ 表示时间 t 时刻的控制器输出。[参考信号] $r(t)$ 表示时间 t 时刻的期望输出或目标值。[系统输出] $y(t)$ 表示在时间 t 时刻的实际系统输出。[误差信号] $e(t)$ 表示在时间 t 时刻的误差信号， $e(t) = r(t) - y(t)$ 。[控制器参数调整] 控制器参数通过比例 - 积分 - 微分 (PID) 控制算法根据误差信号 $e(t)$ 进行实时调整。以下为具体调整过程。

比例控制增益 (K_p) 调整：根据误差信号的大小来调整比例增益，控制输出的稳定性。参数调整公式如下：

$$K_p(t+1) = K_p(t) + \Delta K_p(t)$$

其中， $K_p(t+1)$ 是更新后的比例增益， $K_p(t)$ 是当前的比例增益， $\Delta K_p(t)$ 是根据误差信号调整得到的增量。

积分时间 (T_i) 调整：根据误差信号的积分值来调整积分时间，消除系统的静态误差。参数调整公式如下：

$$T_i(t+1) = T_i(t) + \Delta T_i(t)$$

其中， $T_i(t+1)$ 是更新后的积分时间， $T_i(t)$ 是当前的积分时间， $\Delta T_i(t)$ 是根据误差信号的积分值调整得到的增量。

微分时间 (T_d) 调整：根据误差信号的变化率来调整微分时间，抑制系统的振荡。参数调整公式如下：

$$T_d(t+1) = (T + \Delta T)dt$$

其中， $T_d(t+1)$ 是更新后的微分时间， $T_d(t)$ 是当前的微分时间， $\Delta T_d(t)$ 是根据误差信号的变化率调整得到的增量。通过以上参数调整，基于反馈的自适应控制算法能够在系统运行过程中不断调整控制器参数，来适应不同工况和动态变化，从而优化系统的稳定性。表 1 展示了不同时间步下的比例增益、积分时间和微分时间以及系统误差信号的变化情况：

表 1 不同时间步下 PID 控制以及系统误差信号的变化情况

时间步	比例增益 (K_p)	积分时间 (T_i)	微分时间 (T_d)	误差信号 (e)
0	0.2	1.0	0.1	5.0
1	0.25	1.2	0.15	3.0
2	0.28	1.5	0.18	1.5
3	0.32	1.8	0.2	0.8
4	0.35	2.0	0.22	0.3

以上的实时参数调整和误差信号变化数据说明基于反馈的自适应控制算法在智能散状物料带式输送系统中的应用和优势。这种算法能够实时地根据误差信号调整控制器参数，从而实现系统的自适应控制和优化。

3.2 高级控制策略与故障恢复

(1) 动态路径规划与负载均衡。为了实现智能化的物料

输送,系统采用了动态路径规划策略。基于实时传感器数据和物料流量信息,系统可以实时调整输送路径,避免拥堵和堆积现象。此外,引入了负载均衡技术,确保不同区域的物料流量均衡分配,从而提高系统的效率和稳定性。(2)异常检测与故障诊断。系统集成多模态传感器融合技术,实现了对系统运行状态的全面监测。通过监测传感器数据的实时变化,系统能够及时发现异常情况,如物料堵塞、设备故障等。针对不同类型的异常,系统采用基于机器学习的方法进行故障诊断,识别故障原因并提供相应的故障处理建议。(3)故障恢复与应急处理。一旦系统检测到故障,自动化控制系统将启动故障恢复策略。根据故障类型和程度,系统会采取调整输送速度、切换备用设备等不同措施,以尽快恢复正常运行。此外,系统还配备了应急停机装置,确保在紧急情况下系统能够安全停止运行,保障人员和设备安全。(4)状态监测与预测维护。为了实现智能化维护管理,系统采用了状态监测与预测维护策略。通过分析历史传感器数据和运行情况,系统能够预测设备的健康状态,并提前发现潜在问题。基于预测结果,系统可以制定维护计划,减少计划外停机时间,提高设备利用率。(5)智能决策支持系统。为了支持运营决策,引入了智能决策支持系统。该系统基于实时传感器数据、历史运行数据和预测模型,为操作人员提供决策建议。在多个输送线路中选择最优线路,调整输送速度适应不同的物料流量,从而优化系统运行^[2]。

4 模型优化与算法设计
4.1 基于模型预测控制的动态优化

为了实现更高效的运行和资源利用,该系统采用了基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的动态优化策略。该策略通过建立系统的数学模型,预测系统的未来行为,并在每个控制周期内进行优化决策,实现系统性能的最优化。为了实现 MPC,需要建立系统的数学模型。对于散状物料带式输送系统,其模型可以描述为:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$$

其中, x_k 表示系统状态向量, u_k 表示控制输入向量, A 和 B 为系统矩阵。基于建立的数学模型,可以提出优化问题。在每个控制周期内,系统会预测未来一段时间内的状态变化,然后通过优化算法寻找最优的控制输入序列,使得系统性能指标最优。优化问题表示为:

$$\min_{u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N-1}} \sum_{i=k}^{k+N-1} L(x_i, u_i) \quad \begin{cases} x_{i+1} = Ax_i + Bu_i \\ x_{min} \leq x_i \leq x_{max} \\ u_{min} \leq u_i \leq u_{max} \end{cases}$$

其中, N 为预测步数, L 为性能指标, x_{min} 和 x_{max} 为状态约束, u_{min} 和 u_{max} 为控制输入约束。采用序列二次规划(Sequential Quadratic Programming, SQP)算法求解上述优化问题。在每个控制周期内,系统测量当前状态 x_k , 然后通过 SQP 算法计算出最优的控制输入序列 $u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N-1}$, 并将第一个控制输入应用于系统。通过使用 MPC 策略,智能散状物料带式输送系统能够在每个控制周期内进行动态优化,根据实时测量数据和预测模型,调整控制输入,实现系统性能的最优化。这种策略可以适应不同工况和变化,提高系统的效率和稳定性。表 2 展示了使用 MPC 策略前后系统性能的比较:

表 2 使用 MPC 策略前后系统性能比较

指标	无优化控制	基于MPC的动态优化
能耗	高	低
物料流量	不稳定	稳定
系统响应速度	慢	快

4.2 智能算法在能耗最优化中的应用

该系统采用了粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)来处理系统能耗的优化问题。PSO 是一种基于群体智能的优化算法,模拟了鸟群觅食的行为,通过不断调整粒子的位置来搜索最优解。PSO 算法可以针对不同的工况和操作参数,寻找最优的控制策略,以实现能耗的最小化。智能散状物料带式输送系统的能耗优化问题可以表示为:

$$\min_{u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N-1}} E(u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N-1})$$

其中, E 表示能耗函数, $u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N-1}$ 为控制输入序列,

N 为优化步数。PSO 算法通过模拟粒子在解空间中的搜索过程来寻找最优解。每个粒子都有自己的位置和速度,根据个体最优和群体最优的信息来更新位置和速度。在能耗最优化问题中,粒子的位置表示控制输入序列,速度表示控制输入的变化方向和大小。PSO 算法应用于以下方面:(1)控制参数优化:PSO 算法可以优化系统的控制参数,例如输送带的速度、传送物料的流量等。通过搜索最优的控制参数,可以实现满足物料传送需求的前提下,降低能耗。(2)运行策略优化:PSO 算法可以优化系统的运行策略,例如何时启动、停止或调整输送带的运行。通过寻找最优的运行策略,可以避免不必要的能耗浪费。(3)负载均衡优化:对于多个输送带的系统,PSO 算法可以优化各个输送带的工作状态,使得负载更均衡,从而降低整个系统的能耗。在应用 PSO 算法时,需要设计合适的能耗函数。对于散状物料带式输送系统而言,能耗函数的变量由输送带的能耗、传动装置的能耗以及控制系统的能耗组成,能耗函数表示为:

$$E(u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N-1}) = \sum_{i=k}^{k+N-1} (E_b(u_i) + E_d(u_i) + E_c(u_i))$$

其中, $E_b(u_i)$ 表示输送带的能耗, $E_d(u_i)$ 表示传动装置的能耗, $E_c(u_i)$ 表示控制系统的能耗。

5 数据驱动的智能决策系统

数据驱动的智能决策系统在智能散状物料带式输送系统中起着至关重要的作用。通过收集、分析和处理大量的实时数据,智能决策系统可以实现对系统状态的准确预测、智能决策以及故障的及时诊断和恢复。(1)数据挖掘与特征提取。数据驱动的智能决策系统首先需要进行数据挖掘和特征提取,从原始数据中提取有用的信息。对于散状物料带式输送系统,可以收集物料流量、温度、压力等传感器信息,以及系统运行状态数据,如输送带速度、驱动电流等。通过时间序列分析和信号处理技术,可以提取出有关系统状态和性能的特征。(2)智能决策和状态预测。基于提取的特征,智能决策系统可以进行智能决策和状态预测。通过分析物料流量的变化趋势,系统可以预测未来一段时间内的物料需求,从而优化运行策略。同时,通过比较当前状态特征与历史数据,系统可以判断是否存在异常或故障,并及时采取相应的措施,如停止输送、报警等。(3)数据驱动的故障诊断和恢复。数据驱动的智能决策系统还能够实现故障诊断和恢复功能。通过分析异常数据和故障特征,系统可以识别出可能的故障类型和原因。如果传感器数据显示物料流量突然下降,系统可以判断可能存在堵塞故障,进而采取解堵措施。系统还可以基于历史故障数据和修复方案库,为操作人员提供恢复建议,加快故障恢复过程。(4)决策支持系统。数据驱动的智能决策系统还可以构建决策支持系统,为操作人员提供实时的决策建议和参数调整建议。通过监控系统状态、预测趋势和诊断故障,决策支持系统可以帮助操作人员做出更加明智的决策,优化系统性能并提高生产效率。

6 结束语

本研究通过系统结构的优化设计、传送机制的深入分析,以及多模态传感器融合技术的应用,实现了对物料输送过程的全面监测与控制。同时,基于反馈的自适应控制算法和高级控制策略的引入,进一步提升了系统的稳定性和响应性。在模型优化与算法设计方面,基于模型预测控制和智能算法的应用,不仅实现了系统的动态优化,还有效降低了能耗,实现了资源的高效利用。最后,数据驱动的智能决策系统的建立,为操作人员提供了实时的决策支持和故障诊断,推动了系统运行水平的提升。未来可以探索更加先进的控制策略和优化方法,为系统的自动化、智能化提供更为强大的支持。同时,结合大数据分析和云计算技术,可以构建更为智能化的决策支持系统,实现对系统的远程监控和管理。本研究只是智能散状物料带式输送系统控制与优化领域的一个切面,相信未来会有更多创新性的方法和技术不断涌现,推动该领域不断迈向新的高度。

参考文献

[1] 田康.煤矿主煤流运输系统自动化集控设计[J].当代化工研究,2021(13):117-118.
[2] 孙忠亮.煤矿DTII型带式输送机系统分析与设计思路探究[J].中国高新技术企业,2015(29):155-156.