

数字孪生驱动的长距离带式输送机运行优化方法

杨春雨¹ 卜令超¹ 陈斌¹

摘要 长距离带式输送机是矿山、港口等领域运输散装物料的主要工具。针对长距离带式输送机的安全节能运行问题,研究数字孪生驱动的运行优化方法。首先,构建由数字孪生模型、模型同步算法、控制策略和现实带式输送机组成的数字孪生驱动运行优化框架;然后,建立数字孪生模型,包括基于变质量牛顿第二定律和有限元分析法的输送带动力学模型、物料流动态模型和动态能耗模型;最后,提出数字孪生驱动的计算决策-仿真评估-优化校正 (Decision-simulation-correction, DSC) 优化决策方法,优化带式输送机的稳态和暂态运行带速,形成可行带速设定曲线。实验结果表明,数字孪生驱动的带式输送机运行优化方法可以实现带式输送机安全节能运行。与传统控制方法相比,能够根据运行工况实时调速,提高输送带填充率,节能 13.87%。

关键词 长距离带式输送机, 数字孪生, 运行优化, 动态模型

引用格式 杨春雨, 卜令超, 陈斌. 数字孪生驱动的长距离带式输送机运行优化方法. 自动化学报, 2024, 50(11): 2204-2218

DOI 10.16383/j.aas.c210979

CSTR 32138.14.j.aas.c210979

An Operation Optimization Method for Long Distance Belt Conveyors Driven by Digital Twin

YANG Chun-Yu¹ BU Ling-Chao¹ CHEN Bin¹

Abstract Long distance belt conveyors are used as a main tool for transporting bulk materials in the fields of mines, ports and so on. For the safe and energy saving operation of long distance belt conveyors, the operation optimization method driven by digital twin is studied. Firstly, the framework of the operation optimization driven by digital twin is constructed, which includes digital twin models, model synchronization algorithms, control strategy, and realistic belt conveyors. Then, digital twin models are established, including the dynamic model of conveyor belt based on the variable quality Newton's second law and finite element analysis method, material flow dynamic model and dynamic energy model. Finally, the decision-simulation-correction (DSC) optimization method driven by digital twin is proposed, which can optimize the steady and transient belt speed of the belt conveyor to build a feasible speed setting curve. Experiments show that the operation optimization method driven by digital twin can result in a belt conveyor that is both safe and energy efficient. Compared with the traditional method, the proposed method can adjust the belt speed setpoint in real-time based on operating conditions, increasing the conveyor belt fill rate, which results in energy savings of 13.87%.

Key words Long distance belt conveyor, digital twin, operation optimization, dynamic model

Citation Yang Chun-Yu, Bu Ling-Chao, Chen Bin. An operation optimization method for long distance belt conveyors driven by digital twin. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(11): 2204-2218

带式输送机是矿山、电厂、港口等领域运输散装物料的关键设备之一^[1]。随着经济的快速发展,带式输送机已朝着大运量、长距离的方向发展,其运输效率和运行安全问题日益突出。带式输送机的能

耗成本占其运行成本很大一部分^[2]。在煤矿等应用带式输送机的实际场合中,传统的带式输送机多以恒定带速运行,常处于轻载或空载状态,造成能源浪费^[3]。根据载荷调节带速是有效节能手段,但长距离带式输送机运行动态特性明显,如果变速时间过短,将会对各部件产生强烈的冲击,进而影响到设备的稳定性和使用寿命^[4]。因此,长距离带式输送机的稳定和高效运行是一个重要问题。

目前,关于带式输送机能效优化的研究大多集中在设备和操作层面^[5]。事实上,通过引进高效设备可以达到带式输送机节能的目的,但会带来设备资金的投入增加^[6]。运行优化是提高带式输送机能源

收稿日期 2021-10-16 录用日期 2022-02-10

Manuscript received October 16, 2021; accepted February 10, 2022

国家自然科学基金 (61873272, 62073327), 江苏省自然科学基金 (BK20200086, BK20200631) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61873272, 62073327) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20200086, BK20200631)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 中国矿业大学信息与控制工程学院 徐州 221116

1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116

效率的有效方式^[7-8], 其核心是带速控制^[9], 分为主动控制和被动控制两种方式^[10]. 传统的速度控制为被动控制, 通过人为设定带速调节带式输送机运行, 在一定时间内带速是固定的; 主动控制是指通过调整带速以匹配给料速率的变化, 可以实现输送带填充率的提高, 从而达到提高能源利用率的目的^[11]. 目前, 许多学者对带式输送机的主动速度控制进行研究, 并取得了重要成果. 例如, Zhang 等^[5] 基于带式输送机能耗模型, 建立了带速优化问题, 并提出了带速设定值优化设计方法, 能够实现带式输送机的节能降耗. 但该项研究基于静态能耗模型进行优化, 并未考虑运载物料动态, 适用于短距离带式输送机. Mathaba 等^[12-13] 建立了运载物料的动态模型, 提出带式输送机动态能耗模型, 并建立了以带速范围、物料承重范围、运量需求等为约束条件的优化问题, 利用有效集算法, 提出了带速设定值优化设计方法, 节能效果显著. 但该项研究没有考虑设定速度改变造成的潜在风险. 目前的研究仍然关注于稳态带速的节能效果, 没有考虑带式输送机暂态运行的动态特性.

长距离带式输送机动态特性明显, 运行动态复杂. 输送带在暂态过程中会存储或释放大量的能量, 这些能量会在输送带内部形成动态张力, 导致输送带张力过大或过小^[14], 存在潜在风险. 暂态运行的潜在风险主要包括输送带张裂、滚筒处打滑、物料溢出等^[15]. 虽然分析带式输送机动态特性的文献很多, 但大多集中在带式输送机启停过程^[16]. 文献^[17] 针对带式输送机暂态运行的安全控制问题, 提出估计-计算-优化三步法, 确定带式输送机的最小变速时间, 为带式输送机暂态运行优化提供了参考. 但该方法的计算环节并没有考虑暂态运行物料动态特性的影响. 同时, 估计-计算-优化三步法无法根据运行数据更新模型参数, 不能实现模型实时更新. 因此, 有必要建立一个能够利用高精度模型进行优化决策的带式输送机控制系统.

自 2003 年首次提出, 数字孪生技术便被引入到控制领域中, 为现代控制提供了新的思路^[18-19]. 数字孪生通过实体模型与虚拟模型之间的信息交互, 可以实现对实体模型的数据管理、状态更新、预测控制和安全监控^[20-21], 进而能够做出更准确的预测、更理性的决策和更可行的规划^[22]. 葛世荣等^[23] 建立了数字孪生智采工作面系统, 为无人化运行提供了新的监控系统架构, 实现了煤炭的安全高效开采. 江献良等^[20] 提出一种基于数字孪生模型的直驱部件高精度控制方法, 实现了直驱系统的运动性能优化控制. 金杰等^[24] 基于数字孪生技术设计了火箭起飞安全系统, 可以利用数字化仿真技术实现火箭姿

态的优化和控制, 为火箭安全起飞提供了保障. 然而, 数字孪生技术在带式输送机优化控制领域缺乏相应的研究. 数字孪生的出现为带式输送机的优化运行和安全监督提供了一个可行的工具, 但如何基于数字孪生技术实现带式输送机的节能、安全运行, 仍然是一个开放的课题.

模型是数字孪生的关键组成部分, 是实现数字孪生功能的重要前提^[25]. 输送带动态模型是模拟和分析输送带运行动态的关键^[26]. 早在 20 世纪 90 年代就已经发展起对输送带有限元模型的研究. Lodewijks 等^[27] 利用牛顿第二定律, 推导出输送带有限元模型, 已被广泛接受和使用^[17, 28]. 周广林等^[28] 基于输送带有限元模型, 设计带式输送机启动曲线, 研究不同启动时间情况下, 带式输送机系统启动的稳定性. 但是, 上述有限元模型利用传统的牛顿第二定律建模, 忽略了运载物料的动态特性, 存在一定误差. 现代带式输送机的运输距离不断增长, 这增加了带式输送机运输物料时的随机性、非线性和时变性, 给带式输送机的动态建模带来一定挑战^[29].

如图 1 所示, 传统的带式输送机控制是通过人为设定带速控制带式输送机的运行, 本文目的是利用数字孪生技术形成可行决策的信息和指令, 实现长距离带式输送机的监测、预测、优化和控制. 本文的主要工作包括: 1) 建立数字孪生驱动的长距离带式输送机运行优化框架; 2) 建立数字孪生模型, 包括基于变质量牛顿第二定律和有限元分析法的输送带有限元模型、物料流动态模型和动态能耗模型; 3) 提出数字孪生驱动的长距离带式输送机运行优化方法, 为数字孪生驱动的控制提供优化决策的算法基础, 实现长距离带式输送机的高效运行.

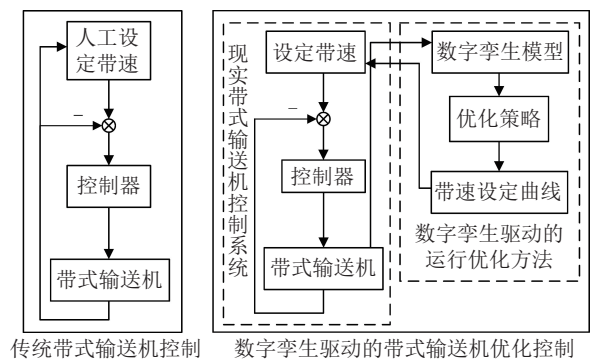


图 1 传统控制与数字孪生驱动优化控制模式

Fig. 1 The modes of traditional control and optimization control driven by digital twin

本文结构如下: 第 1 节建立带式输送机数字孪生驱动运行优化框架, 第 2 节建立长距离带式输送机数字孪生模型, 第 3 节提出带式输送机运行优化方法, 第 4 节进行实验验证, 第 5 节为结束语.

1 数字孪生驱动的运行优化框架

数字孪生融合了传感、通信、仿真、控制等多领域技术成果^[30], 在数字世界中创建物理实体的虚拟模型, 模拟物理实体在真实环境中的行为, 并通过虚拟交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等实现物理实体的状态监测和实时控制^[31]. 带式输送机由输送带、驱动滚筒、张紧装置、托辊等装置组成, 通过驱动滚筒与输送带之间的摩擦力带动输送带运行. 本文设计的长距离带式输送机数字孪生驱动运行优化框架如图 2 所示, 主要包括数字孪生模型、模型同步算法、控制策略和现实带式输送机四个模块.

数字孪生模型可以镜像现实带式输送机, 预测优化决策的控制效果. 带式输送机的建模仿真理论和方法为实现带式输送机数字孪生核心功能奠定了基础. 通过机理建模, 把带式输送机运行的各个环节抽象为相应的数学模型, 从而刻画出各环节的复杂动态特征.

模型同步算法用于更新数字孪生模型参数. 数字孪生模型的参数容易受到物理实体不同操作和环境条件的影响而发生变化^[20]. 在模型参数同步阶段, 通过现实带式输送机传感器采集的数据, 更新数字孪生模型状态, 利用递推最小二乘法修正数字孪生模型参数^[1]. 通过模型更新和参数修正, 实现自我优化和自我更新, 使数字孪生模型成为物理实体的精确镜像.

建立数字孪生系统的目的是更好地实现物理实体的优化控制, 提高物理实体的运行性能. 因此, 控制策略是基于数字孪生的优化控制中至关重要的环节. 如图 2 所示, 在优化决策环节中, 利用运行信息、静态约束、能耗和物料流动态模型进行决策, 形成优化带速设定曲线. 基于数字孪生模型评估带速设

定曲线的效果, 并对可行带速设定曲线进行优化校正. 通过仿真评估和优化校正的迭代优化, 形成可行的带速设定曲线, 对现实带式输送机进行控制, 保证其运行的高效性和安全性.

2 数字孪生模型

动态模型是数字孪生系统的核心要素, 针对传统的输送带有限元模型不完全适用于长距离带式输送机, 本节基于变质量牛顿第二定律和有限元分析法, 建立输送带动态模型, 与物料流动态模型、动态能耗模型共同组成带式输送机数字孪生机理模型, 用于描述带式输送机在运行过程中的动态特性.

2.1 输送带动力学模型

输送带主要由钢丝绳芯、橡胶组成, 其动力学模型是数字孪生模型的重要组成部分, 建立能够准确描述输送带动态的动力学模型是模拟输送带运行的关键所在. 本节基于变质量牛顿第二定律和有限元分析法, 建立输送带动力学模型.

如图 3 所示, 将总长为 $2 \times L$ 的输送带拆分成 n 个微元段, 承载侧包含 j 段, 返回侧包含 $(n - j)$ 段, 张紧装置一个微元段, 每个微元段用 Kelvin-Vogit 模型表示^[27].

为了更清晰地表述, 本文以第 2 个微元段为例进行建模, 根据动量定理, 第 2 个微元段在时间微元 dt 前后的动量差 dP_2 为:

$$F_2 dt = dP_2 = (m_2 + dm_2)(\dot{s}_2 + d\dot{s}_2) - m_2 \dot{s}_2 - \dot{s}_1 dm_2 \quad (1)$$

忽略二阶微量 $dm_2 d\dot{s}_2$, 式 (1) 可表示为:

$$F_2 = m_2 \frac{d\dot{s}_2}{dt} + (\dot{s}_2 - \dot{s}_1) \frac{dm_2}{dt} = m_2 \ddot{s}_2 + (\dot{s}_2 - \dot{s}_1) \dot{m}_2 \quad (2)$$

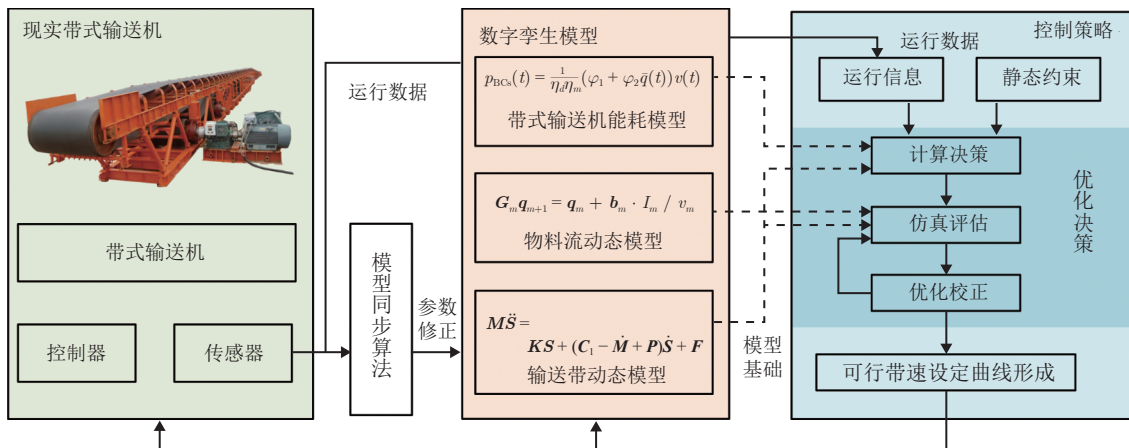


图 2 带式输送机数字孪生驱动运行优化框架

Fig. 2 Framework for operation optimization of belt conveyor driven by digital twin

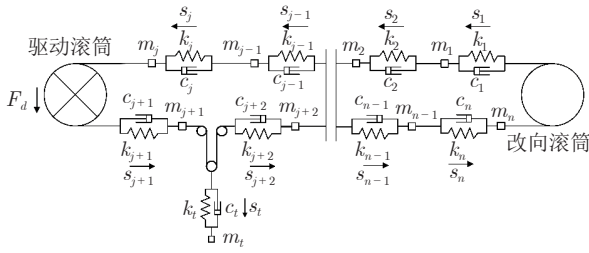


图 3 带式输送机有限元模型

Fig. 3 The finite element model of belt conveyor

第 2 个微元段所受外力和为:

$$F_2 = k_2(s_3 - s_2) - k_1(s_2 - s_1) + c_2(\dot{s}_3 - \dot{s}_2) - c_1(\dot{s}_2 - \dot{s}_1) - f_2 \quad (3)$$

联立式 (2) 和式 (3), 可得第 2 个微元段运动状态:

$$m_2\ddot{s}_2 + (\dot{s}_2 - \dot{s}_1)\dot{m}_2 = k_2(s_3 - s_2) - k_1(s_2 - s_1) + c_2(\dot{s}_3 - \dot{s}_2) - c_1(\dot{s}_2 - \dot{s}_1) - f_2 \quad (4)$$

同理, 假设第 1 个微元段中 dm_1 的初始速度为 0, 第 1 个微元段的运动状态可描述为:

$$m_1\ddot{s}_1 + \dot{s}_1\dot{m}_1 = k_1(s_2 - s_1) - k_n(s_1 - s_n) + c_1(\dot{s}_2 - \dot{s}_1) - c_n(\dot{s}_1 - \dot{s}_n) - f_1 \quad (5)$$

第 3 个至第 j 个微元段的运动状态可描述为:

$$m_i\ddot{s}_i + (\dot{s}_i - \dot{s}_{i-1})\dot{m}_i = k_i(s_{i+1} - s_i) - k_{i-1}(s_i - s_{i-1}) + c_i(\dot{s}_{i+1} - \dot{s}_i) - c_{i-1}(\dot{s}_i - \dot{s}_{i-1}) - f_i, \quad i = 3, \dots, j \quad (6)$$

第 $j+1$ 个微元段的运动状态描述为:

$$m_{j+1}\ddot{s}_{j+1} = k_{j+1}(s_{j+2} - s_{j+1}) - k_j(s_{j+1} - s_j) + c_{j+1}(\dot{s}_{j+2} - \dot{s}_{j+1}) - c_j(\dot{s}_{j+1} - \dot{s}_j) - f_{j+1} + F_d + \frac{k_t}{2} \left(\frac{s_{j+2} - s_{j+1}}{2} - s_t \right) + \frac{c_t}{2} \left(\frac{\dot{s}_{j+2} - \dot{s}_{j+1}}{2} - \dot{s}_t \right) \quad (7)$$

第 $j+2$ 个微元段的运动状态描述为:

$$m_{j+2}\ddot{s}_{j+2} = k_{j+2}(s_{j+3} - s_{j+2}) - k_{j+1}(s_{j+2} - s_{j+1}) + c_{j+2}(\dot{s}_{j+3} - \dot{s}_{j+2}) - c_{j+1}(\dot{s}_{j+2} - \dot{s}_{j+1}) - f_{j+2} - \frac{k_t}{2} \left(\frac{s_{j+2} - s_{j+1}}{2} - s_t \right) - \frac{c_t}{2} \left(\frac{\dot{s}_{j+2} - \dot{s}_{j+1}}{2} - \dot{s}_t \right) \quad (8)$$

第 $j+3$ 至第 $n-1$ 个微元段的运动状态描述为:

$$m_i\ddot{s}_i = k_i(s_{i+1} - s_i) - k_{i-1}(s_i - s_{i-1}) + c_i(\dot{s}_{i+1} - \dot{s}_i) - c_{i-1}(\dot{s}_i - \dot{s}_{i-1}) - f_i, \quad i = j+3, \dots, n-1 \quad (9)$$

第 n 个微元段的运动状态描述为:

$$m_n\ddot{s}_n = k_n(s_1 - s_n) - k_{n-1}(s_n - s_{n-1}) + c_n(\dot{s}_1 - \dot{s}_n) - c_{n-1}(\dot{s}_n - \dot{s}_{n-1}) - f_n \quad (10)$$

张紧装置微元段的运动状态描述为:

$$m_t\ddot{s}_t = -k_t \left(s_t - \frac{s_{j+2} - s_{j+1}}{2} \right) - c_t \left(\dot{s}_t - \frac{\dot{s}_{j+2} - \dot{s}_{j+1}}{2} \right) - f_t + m_t g \quad (11)$$

在承载侧, $i = 1, \dots, j$:

$$\begin{cases} m_i = (q_i + q_B + q_{RO})\Delta L_{RO} \\ f_i = \mu(q_i + q_B + q_{RO})\Delta L_{RO} \text{sgn}(\dot{s}_i) \end{cases} \quad (12)$$

在返回侧, $i = j+1, \dots, n$:

$$\begin{cases} m_i = (q_B + q_{RU})\Delta L_{RU} \\ f_i = \mu(q_B + q_{RU})\Delta L_{RU} \text{sgn}(\dot{s}_i) \\ f_t = \mu m_t g \text{sgn}(\dot{s}_t) \end{cases} \quad (13)$$

将式 (4) ~ (11) 简化为如下矩阵形式:

$$M\ddot{S} = KS + (C_1 - \dot{M} + P)\dot{S} + F \quad (14)$$

式中, $M = \text{diag}\{m_1, m_2, \dots, m_n, m_t\}$, $\text{rank}(M) = n+1$, $S = [s_1, s_2, \dots, s_n, s_t]^T$, $F = [-f_1, -f_2, \dots, -f_{j+1} + F_d, \dots, -f_n, -f_t + m_t g]^T$, K 和 C_1 的表达式见下页.

$$P = \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ \dot{m}_2 & & & & & \\ & \dot{m}_3 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \dot{m}_j & & \\ & & & & \mathbf{0}_{(n+1-j) \times (n+2-j)} & \end{bmatrix}, \quad P \in \mathbf{R}^{(n+1) \times (n+1)}$$

定义第 1 个微元段的速度为带式输送机的带速 v , 选取 S 和 \dot{S} 为状态变量, 选取带式输送机的带速 v 为输出变量, 将式 (14) 描述为如下的状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = C_2 x \end{cases} \quad (15)$$

式中, $x = [S, \dot{S}]^T$; $B = E_{(2n+2) \times (2n+2)}$, E 为单位矩阵; $u = [0_1 \times (n+1), -f_1, -f_2, \dots, -f_{j+1} + F_d, \dots, -f_n, -f_t + m_t g]^T$; $C_2 = [0_1 \times (n+1), 1, 0_1 \times n]$:

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & E \\ M^{-1}K & M^{-1}(C_1 - \dot{M} + P) \end{bmatrix}$$

本节使用变量的具体意义如表 1 所示.

注 1. 本文基于变质量牛顿第二定律对输送带微元段的受力情况进行分析, 建立输送带动力学模型. 相比于传统输送带动力学模型, 该模型考虑了物料质量变化对输送带张力产生的影响.

表 1 输送带动力学模型符号意义
Table 1 The significance of the symbols of the conveyor belt dynamic model

符号	含义 (单位)	符号	含义 (单位)
c_i	第 i 个微元段的等效黏性系数 (N·s/m)	$q(i, m)$	m 时刻输送带上 i 位置平均物质量 (kg/m)
c_t	张紧装置微元段的等效黏性系数 (N·s/m)	q_B	每米输送带的质量 (kg/m)
F_d	驱动电机作用在驱动滚筒上的驱动力 (N)	q_{RO}	每米承载侧托辊平均质量 (kg/m)
F_i	第 i 个微元段承受的外力和 (N)	q_{RU}	每米返回侧托辊平均质量 (kg/m)
f_i	第 i 个微元段所受摩擦力 (N)	s_i	第 i 个微元段的位置 (m)
f_t	张紧装置微元段所受摩擦力 (N)	\dot{s}_i	第 i 个微元段的速度 (m/s)
g	重力加速度 (m/s ²)	\ddot{s}_i	第 i 个微元段的加速度 (m/s ²)
k_i	第 i 个微元段的等效弹性系数 (N/m)	ΔL_{RO}	承载侧微元段的长度 (m)
k_t	张紧装置微元段的等效弹性系数 (N/m)	ΔL_{RU}	返回侧微元段的长度 (m)
m_i	第 i 个微元段的等效质量 (kg)	μ	运载物料与输送带之间的摩擦系数
m_t	张紧装置微元段的等效质量 (kg)		

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -(k_1 + k_n) & k_1 & & & & & & & & & k_n & 0 \\ k_1 & -(k_1 + k_2) & k_2 & & & & & & & & & 0 \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & & & & & & & \vdots \\ & & & k_j & -(k_{j+1} + k_j + \frac{k_t}{4}) & k_{j+1} + \frac{k_t}{4} & & & & & & -\frac{k_t}{2} \\ & & & & k_{j+1} + \frac{k_t}{4} & -(k_{j+1} + k_{j+2} + \frac{k_t}{4}) & k_{j+2} & & & & & \frac{k_t}{2} \\ & & & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & & \vdots \\ & & & & & & & k_{n-2} & -(k_{n-1} + k_{n-2}) & k_{n-1} & & 0 \\ k_n & & & & & & & & k_{n-1} & -(k_{n-1} + k_n) & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\frac{k_t}{2} & \frac{k_t}{2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & -k_t \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} -(c_1 + c_n) & c_1 & & & & & & & & & c_n & 0 \\ c_1 & -(c_1 + c_2) & c_2 & & & & & & & & & 0 \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & & & & & & & \vdots \\ & & & c_j & -(c_{j+1} + c_j + \frac{c_t}{4}) & c_{j+1} + \frac{c_t}{4} & & & & & & -\frac{c_t}{2} \\ & & & & c_{j+1} + \frac{c_t}{4} & -(c_{j+1} + c_{j+2} + \frac{c_t}{4}) & c_{j+2} & & & & & \frac{c_t}{2} \\ & & & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & & \vdots \\ & & & & & & & c_{n-2} & -(c_{n-1} + c_{n-2}) & c_{n-1} & & 0 \\ c_n & & & & & & & & c_{n-1} & -(c_{n-1} + c_n) & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\frac{c_t}{2} & \frac{c_t}{2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & -c_t \end{bmatrix}$$

2.2 物料流动态模型

在现有文献中, 假设运载物料在输送带上均匀分布, 这适用于短距离带式输送机^[17, 32]. 对于长距离带式输送机, 物料流是动态变化的, 运载物料需要较长时间达到均匀分布^[12]. 当 $t \in (m \cdot \Delta t, (m + 1) \cdot \Delta t]$ 时, $v(t) = v_m, I(t) = I_m$. 由文献 [12] 可知, $m + 1$ 时刻输送带上各段的物料平均质量可由 m 时刻的相关信息求取:

$$\mathbf{G}_m \mathbf{q}_{m+1} = \mathbf{q}_m + \mathbf{b}_m \cdot \frac{I_m}{v_m} \tag{16}$$

式中, $\mathbf{G}_m \in \mathbf{R}^{j \times j}$, 具体表达式见下页; $\mathbf{b}_m \in \mathbf{R}^{j \times 1}$; $\mathbf{b}_m = [\gamma_m/2, 0, \dots, 0]^T$; $\mathbf{q}_m = [q(1, m), \dots, q(j, m)]^T$; $q(1, m)$ 为 m 时刻第 1 个微元段上物料的平均质量, 单位为 kg/m; $\gamma_m = v_m \Delta t / \Delta L_{RO}$, v_m 为 m 时刻的带速, 单位为 m/s; Δt 为时域采样间隔, 单位为 s; I_m 为 m 时刻的给料量, 单位为 kg/s.

$$\mathbf{G}_m = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\gamma_m}{2} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\gamma_m}{2} & 1 & \frac{\gamma_m}{2} & & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\gamma_m}{2} & 1 & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & 1 & \frac{\gamma_m}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & -\frac{\gamma_m}{2} & 1 & \frac{\gamma_m}{2} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -\gamma_m & (1 + \gamma_m) \end{bmatrix}$$

2.3 带式输送机动态能耗模型

DIN22101 和 ISO5048 等标准建立了带式输送机的运行阻力计算公式, 但是需要详细的参数^[11, 33]. 文献 [12] 通过整合化简参数, 建立了适用于长距离带式输送机的运行阻力计算公式, 将所有的参数简化为两个可以通过系统辨识获得的参数:

$$F_U(t) = \varphi_1 + \varphi_2 \bar{q}(t) \quad (17)$$

式中, $F_U(t)$ 为带式输送机运行阻力, 单位为 N; $\bar{q}(t) = \text{average}(\mathbf{q}_t)$, 为运载物料的平均质量, 单位为 kg/m; φ_1 和 φ_2 分别为由带式输送机固有参数整合的模型参数. 根据式 (17) 和功率计算公式, 可得带式输送机的功率表达式为^[12]:

$$p(t) = (\varphi_1 + \varphi_2 \bar{q}(t))v(t) \quad (18)$$

式中, $p(t)$ 为带式输送机功率, 单位为 W; $v(t)$ 为运行带速, 单位为 m/s.

考虑驱动系统和电机的损耗, 则带式输送机系统的能耗模型为:

$$p_{BCs}(t) = \frac{1}{\eta_d \eta_m} (\varphi_1 + \varphi_2 \bar{q}(t))v(t) \quad (19)$$

式中, η_d 和 η_m 分别为驱动系统和电机的效率. 式 (19) 考虑了运载物料的动态特性, 适用于长距离带式输送机系统的能耗优化.

能耗模型易受带式输送机不同操作和运行工况的影响, 其模型参数发生退化. 本文将文献 [1] 提出的具有等待期的两阶段模型参数辨识方法作为模型同步算法, 根据现实带式输送机的运行数据, 实现模型参数的同步更新.

注 2. 本文建立带式输送机数字孪生模型的物理模型包括输送带动力学模型、物料流动态模型和带式输送机动态能耗模型. 鉴于输送带具有显著的黏弹性和物料的动态变化, 利用有限元法和变质量牛顿第二定律建立了输送带动力学模型, 能够刻画输送带微元段的受力和运动情况. 由于输送带上物料以波浪状运动, 利用质量平衡原理建立物料流数

学模型, 实时计算出输送带上物料流分布情况. 带式输送机的功率消耗源于克服运行阻力, 利用功率计算公式建立动态能耗模型. 将输送带动力学模型、物料流动态模型和动态能耗模型集成在一起, 形成完整的带式输送机数字孪生模型. 基于模型同步算法, 利用现实带式输送机实时运行数据, 实现数字孪生模型的参数同步更新. 该模型能够描述带式输送机的运行动态, 为运行优化奠定基础.

3 数字孪生驱动的运行优化方法

带式输送机系统是一个复杂的综合性运输系统, 涉及多个设备融合和技术的集成, 其运行优化控制涉及经济性和安全性两个方面, 是一个极其困难而且复杂的问题. 带式输送机优化控制的实现可以大幅度提高运输效率、设备安全, 降低能源动力成本, 减少人员的工作量^[34-35]. 本节面向长距离带式输送机的安全、高效运行, 基于数字孪生可以预测物理实体全生命周期过程的特点, 研究带式输送机运行优化方法.

3.1 基于数字孪生模型的 DSC 优化策略

为了实现带式输送机运行优化, 本文提出基于数字孪生模型的计算决策-仿真评估-优化校正 (Decision-simulation-correction, DSC) 优化策略. 如图 4 所示, 该优化策略集决策、预测、分析和校正于一体. 通过决策算法、数字孪生模型和现实带式输送机的协同工作实现优化控制, 从而保证带式输送机的安全和经济运行. 假设给料速率已知, DSC 优化策略能够根据带式输送机的运行数据, 通过计算决策环节形成优化带速设定曲线. 然后, 仿真评估环节预测优化带速设定曲线可能出现的控制效果, 并做出安全评估. 优化校正环节依据评估结果, 校正优化带速设定曲线, 经过优化校正和仿真评估的循环迭代, 最终形成可行的优化带速设定曲线, 对现实带式输送机进行优化控制. 图 4 中, v^* 为稳态最优带速, 单位为 m/s; v_s 为暂态优化带速, 单位

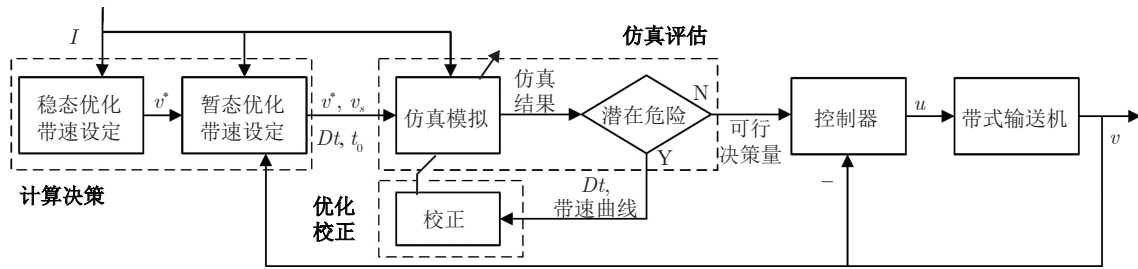


图 4 基于数字孪生的 DSC 优化策略

Fig.4 DSC optimization strategy based on digital twin

为 m/s; I 为给料速率, 单位为 kg/s; t_0 为变速初始时刻, 单位为 s; t_s 为采样间隔, 单位为 s; Dt 为变速时间, 单位为 s; v 为带式输送机的实时带速, m/s, u 为底层控制器输出。

计算决策环节包括带式输送机稳态带速和暂态带速的设计. 该环节基于已知给料速率和当前运行带速, 通过设定稳态运行带速, 调节输送带填充率, 优化带式输送机的实际运行功率, 从而达到节能运行的目的. 通过设计暂态带速实现带式输送机在不同稳态带速之间的安全过渡, 保证带式输送机的安全运行。

仿真评估环节包括仿真模拟和安全评估. 基于带式输送机数字孪生模型, 按照带速设定曲线虚拟运行, 预测其优化效果, 并判断其虚拟运行是否在安全运行范围之内. 带式输送机运行是一个复杂的动态过程, 一旦发生安全事故, 会造成停产、人员伤亡等严重后果^[36]. 因此, 本环节从物料溢料、皮带打滑、皮带张裂方面, 对带式输送机的安全运行做出评估, 通过镜像物料流和输送带张力分析, 分别评估物料溢料风险和皮带打滑、张裂风险。

优化校正环节依据评估结果对有潜在危险的优化带速曲线进行校正, 校正后的优化带速曲线继续进行仿真评估和优化校正, 直至消除潜在危险。

如图 4 所示, 当预知时域内给料速率发生变化时, 触发 DSC 优化策略. 其控制流程为:

步骤 1. 计算决策. 获取带式输送机运行数据, 按照运行优化算法设计下一稳态最优带速 v^* 和暂态变速时间 Dt , 由稳态最优带速 v^* 和暂态优化带速 v_s 形成优化带速设定曲线。

步骤 2. 仿真评估. 利用感知状态量、数字孪生模型, 通过仿真模拟环节预测步骤 1 设定稳态、暂态带速的运行效果, 并判断仿真结果是否存在潜在的危险. 如果不存在潜在危险, 将步骤 1 形成的设定曲线作为可行曲线控制带式输送机; 否则, 进行步骤 3。

步骤 3. 优化校正. 根据步骤 2 反馈的潜在风险, 按照相应的校正策略对稳态和暂态带速进行校

正, 形成校正优化带速设定曲线. 继续重复步骤 2 和步骤 3, 直至消除潜在风险, 将最终的设定带速形成可行带速设定曲线传递给控制器, 控制器对带式输送机进行速度控制。

综上所述, DSC 优化策略的输入为预知给料速率和当前运行带速, 利用数字孪生模型预测带式输送机在优化带速设定曲线下的运行效果, 输出为可行带速设定曲线. 本策略消除带速设定曲线的潜在危险, 保证了带式输送机运行的有效性和安全性, 提高了带式输送机的运行效率, 降低了运行成本。

3.2 稳态带速设定

根据德国标准 DIN22101, 通过匹配带速与运输物料量, 能使整个输送带始终处于满载状态, 可以实现节能^[11]. 为了充分利用带式输送机的运载能力, 设定其稳态运行带速为^[37]:

$$v^* = \frac{I}{Q_{\max}} \quad (20)$$

式中, Q_{\max} 为输送带每单位为长度能够承受的最大物料量, 单位为 kg/m。

3.3 暂态带速设定

暂态为带式输送机处于启/停、加/减速等速度过渡阶段的运行状态. 长距离带式输送机动态特性明显, 变速时会在输送带中形成很大的应力波, 剧烈的变速会使输送带处于不稳定状态, 产生过多应力循环, 减少带式输送机的寿命, 甚至导致溢料、断带等危险发生^[38]. 因此, 需要较长变速时间来避免上述危险. 另一方面, 暂态时间过长会影响带式输送机的节能效果. 针对上述两个问题, 本节在分析带式输送机静态受力和物料动态的基础上, 提出暂态优化控制策略。

考虑到潜在的危险, 需要将带式输送机的加速度控制在所允许的加速度范围内, 本文建立带式输送机变速约束:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \in [a_{d, \max}, a_{a, \max}] \quad (21)$$

式中, a 为带式输送机加速度的绝对值, 单位为 m/s^2 ; Δv 为速度增量, 单位为 m/s ; Δt 为时间增量, 单位为 s ; $a_{a, \max}$ 和 $a_{d, \max}$ 分别为所允许的最大加、减速度, 单位为 m/s^2 . 由文献 [16] 可知, 变速时带式输送机所允许的最大加速度为:

$$a_{a, \max} = \min(a_{a, \max, \text{tension}}, a_{a, \max, \text{slip}}) \quad (22)$$

加速时, 考虑断带和打滑情况, 所允许的最大加速度为:

$$a_{a, \max, \text{tension}} = \left(\frac{m_t g}{2L(q_{\text{RU}} + q_{\text{RO}} + 2q_B + Q_{\text{max}})} + Cfg \right) \frac{S_{B, \min} - S_{A, \min}}{S_{A, \min}} \quad (23)$$

$$a_{a, \max, \text{slip}} = \frac{(e^{\mu_1 \alpha} - 1)m_t g}{2L(q_{\text{RU}} + q_{\text{RO}} + 2q_B + Q_{\text{max}})} - Cfg \quad (24)$$

式中, $a_{a, \max, \text{tension}}$ 为考虑输送带张裂的最大加速度, 单位为 m/s^2 ; $a_{a, \max, \text{slip}}$ 为考虑输送带打滑的最大加速度, 单位为 m/s^2 ; C 为附加阻力系数; f 为摩擦系数; L 为输送带长度, 单位为 m ; Q_{max} 为输送带每米所允许的最大平均物料质量, 单位为 kg/m ; $S_{A, \min}$ 和 $S_{B, \min}$ 分别为暂态运行和稳态运行的最小安全系数; α 为输送带在驱动滚筒上的围包角; μ_1 为驱动滚筒与输送带间的摩擦系数.

减速时, 施加在驱动滚筒上的驱动力逐渐减小, 运行带速平稳降低. 此时, 带式输送机不能提供驱动力, 带式输送机减速度可表示为:

$$a_d = -\frac{F_U}{m_{\text{total}}} \quad (25)$$

式中, m_{total} 为输送带、托辊和运载物料的总质量, 单位为 kg . 带式输送机的运行阻力由主要阻力、附加阻力、特种阻力和倾斜阻力组成, 根据德国标准 DIN22101, 水平带式输送机的主要阻力和附加阻力占总阻力的 95% 以上. 因此, 可以忽略水平带式输送机的特种阻力和倾斜阻力, 将最大运行阻力近似为:

$$F_{U, \max} = CfgL(q_{\text{RU}} + q_{\text{RO}} + 2q_B + Q_{\text{max}}) \quad (26)$$

减速时, 由式 (25)、式 (26), 带式输送机所允许的最大减速度可表示为:

$$a_{d, \max} = -Cfg \quad (27)$$

为了在变速时尽量减小对输送带和各部件的冲击, 使驱动系统输出的驱动力平稳、输送带变速平缓, 国内外研究人员提出了很多控制曲线^[39]. 与文献 [40] 相似, 本文采用正弦形变速曲线, 其变速表达式为:

$$v(t) = \begin{cases} \frac{v^* - v_0}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{Dt} \right) + v_0, & 0 \leq t \leq Dt \\ v^*, & t > Dt \end{cases} \quad (28)$$

式中, v_0 为变速前的带速, 单位为 m/s ; Dt 为变速时间, 单位为 s . 理论上, 正弦形变速曲线产生的最大加/减速度为:

$$a_{s, \max} = \left| \frac{\pi v^* - v_0}{2Dt} \right| \quad (29)$$

以加速为例, 正弦形变速曲线如图 5 所示, 在变速过程中, 加速度先平稳增加, 在 $(t + Dt)/2$ 时刻达到最大值, 然后平稳减小. 待速度增加到稳态设定速度 v_{end} 时, 加速度减为 0. 整个过程变速平缓, 可以缓解由变速给设备带来的冲击力, 延长设备的使用寿命.

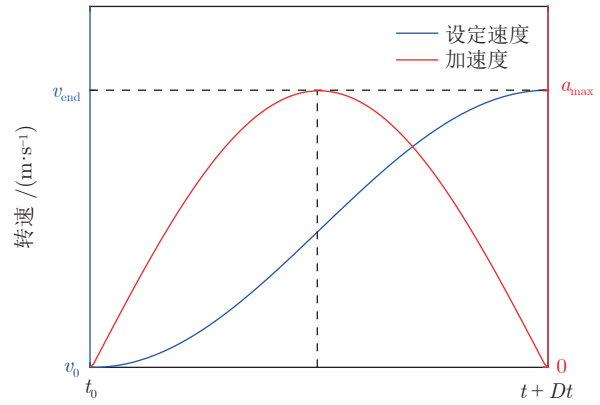


图 5 变速曲线

Fig. 5 The curve of variable speed

由于稳态带速是根据给料速率的改变而发生变化的, 如图 6 所示, 为了避免带式输送机因变速产生物料溢出, 本文在给料速率增加前, 完成加速; 在给料速率减少后, 完成减速.

由式 (28) 可知, 带式输送机暂态设定带速由过渡时间 Dt 确定. 由上述分析可知, 带式输送机在暂态过程中, 需要采用足够长的变速时间来避免潜在危险; 另一方面, 变速时间过长, 则会影响节能效果. 针对上述问题, 本节基于动态能耗模型、动力学模型和物料流动态模型, 构建带式输送机暂态运行优化问题, 在避免潜在危险的同时, 实现节能.

带式输送机暂态优化的关键是使其在安全运行的前提下, 实现稳态最优带速的跟踪. 变速时间过短会造成潜在的危险, 变速时间过长会影响稳态最优带速的节能效果. 因此, 带式输送机暂态优化问题的决策变量是变速时间 Dt , 性能指标是暂态过程的能耗值, 约束条件是输送带的加速度约束和物料

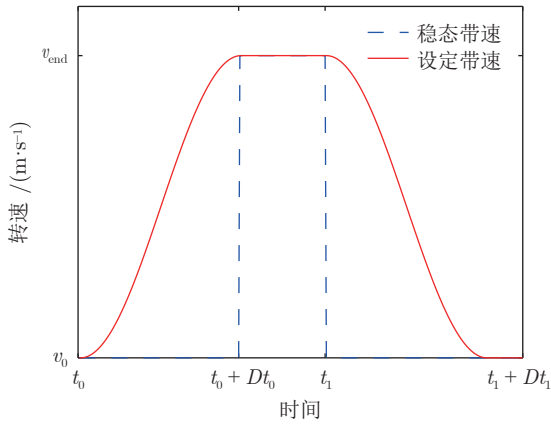


图 6 变速策略

Fig.6 The strategy of variable speed

溢出约束. 本文设计如下优化目标函数:

$$J = \sum_{i=t_0}^{t_0 + \frac{Dt}{t_s}} p_{BCs}(i)t_s = \frac{1}{\eta_d \eta_m} v(i)(\varphi_1 + \varphi_2 \bar{q}(i))t_s \quad (30)$$

带式输送机暂态优化控制问题构建如下:

$$\min J = \sum_{i=t_0}^{t_0 + \frac{Dt}{t_s}} p_{BCs}(i)t_s = \frac{1}{\eta_d \eta_m} v(i)(\varphi_1 + \varphi_2 \bar{q}(i))t_s$$

s.t.

$$v(i) = \frac{v^* - v_0}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{Dt} (i - t_0) \right) \right) + v_0$$

$$|a_{s, \max}| \leq \begin{cases} a_{a, \max}, & v^* - v_0 \geq 0 \\ |a_{d, \max}|, & v^* - v_0 < 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{G}_{i-1} \mathbf{q}_i = \mathbf{q}_{i-1} + \mathbf{b}_{i-1} \cdot \frac{I(i-1)}{v(i-1)}$$

$$\bar{q}(i) = \text{average}(\mathbf{q}_i) \quad (31)$$

本文考虑在防止输送带张裂、打滑和驱动电机过热情况下的最大加速度, 构建暂态优化控制问题. 因此, 依据问题 (31) 获得的变速时间形成暂态优化带速曲线是可行的, 可以避免上述危险.

3.4 基于仿真评估的优化校正

造成潜在风险的原因可以分为设备原因和操作原因两种. 对于设备原因, 需要更换合适部件以消除风险. 本文仅考虑操作原因, 利用操作优化消除潜在运行风险. 由于需要调整带速以匹配給料速率的变化, 从而充分利用带式输送机的运载能力. 当給料速率变化时, 设定不适当的稳态带速, 会使带式输送机面临溢料的风险. 不适当的变速会造成输送带张力过大、输送带打滑、溢料等潜在风险^[38]. DSC 计算决策环节将输送带视为刚体, 从而进行带速的初步优化, 没有考虑输送带动力学和物料溢出的影响. 如果直接应用于带式输送机控制, 可能会

造成打滑、断带等安全问题. 因此, 在形成优化带速设定曲线之后, 需要从动力学角度, 分析其安全性. 本节基于数字孪生模型, 对优化带速设定曲线的控制效果进行仿真评估, 根据不同潜在风险, 制定优化校正策略; 依据评估结果, 对优化带速设定曲线进行校正, 达到对带式输送机运行带速的安全规划.

如图 7 所示, 从设备运行角度考虑, 当紧侧张力 F_{T1} 和松侧张力 F_{T2} 同时满足 $F_{T1} \leq F_{T2} e^{\mu_1 \alpha}$ 时, 可以避免输送带打滑^[11]. 带式输送机采用重锤张紧装置时, F_{T2} 可以近似等于 $m_t g/2$. 当 $\max(F_{T1}) > m_t g e^{\mu_1 \alpha} / 2 = F_{T1, \max}$ 时, 在仿真模拟中出现了输送带打滑现象, 需要延长加速时间, 减小 $\max(F_{T1})$, 克服打滑现象, 校正策略为:

$$Dt_{\text{new}} = Dt_0 + p_{F_{T1}} \cdot \frac{Dt_0}{4}, \quad F_{T1} > F_{T1, \max} \quad (32)$$

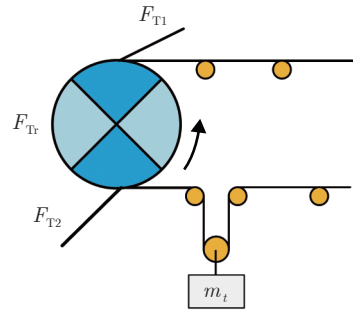


图 7 张力示意图

Fig.7 The label of tension

输送带的强度主要由其材质的强度决定, 对于确定的输送带, 其张力等级是恒定的^[40], 应该限制带式输送机运行过程中产生的驱动力 F_{Tr} . 由文献 [11] 可知, F_{Tr} 的最大值应不超过由式 (17) 确定的 $F_{U, \max}$ 的 1.7 倍, 即 $F_{T1, \max} = 1.7 F_{U, \max}$. 同时, 在运行过程中, 若 F_{Tr} 的瞬时变化幅度过大, 会给输送带、驱动电机等设备带来强烈的冲击, 造成非正常的设备损耗, 甚至导致输送带断裂. 若仿真评估环节出现驱动力变化剧烈, 需要延长加速时间以消除输送带张裂等潜在风险, 校正策略如下:

$$Dt_{\text{new}} = \begin{cases} Dt_0 + p_{\Delta F_{Tr}} \cdot \frac{Dt_0}{2}, & \Delta F_{Tr} > \Delta F_{Tr, \max} \\ Dt_0 + p_{F_{Tr}} \cdot \frac{Dt_0}{4}, & F_{Tr} > F_{Tr, \max} \text{ 且} \\ & \Delta F_{Tr} \leq \Delta F_{Tr, \max} \\ Dt_0, & \text{其他} \end{cases} \quad (33)$$

式中, ΔF_{Tr} 为 F_{Tr} 的瞬时变化量, 单位为 N; $\Delta F_{Tr, \max}$ 为所允许 ΔF_{Tr} 的最大值, 单位为 N; $p_{\Delta F_{Tr}} = [\max(\Delta F_{Tr}) - \Delta F_{Tr, \max}] / \Delta F_{Tr, \max}$ 为 ΔF_{Tr} 的超出比; $p_{F_{Tr}} = [\max(F_{Tr}) - F_{Tr, \max}] / F_{Tr, \max}$ 为 F_{Tr} 的超

出比; $F_{Tr, \max}$ 为所允许 F_{Tr} 的最大值, 单位为 N.

根据不同的发生时期, 可将带式输送机溢料分为稳态溢料、加速溢料和减速溢料三种情况. 针对稳态溢料, 可通过提高运行带速降低输送带上单位为长度的物料量, 稳态给料的校正策略为:

$$v_{\text{new}} = \frac{I}{Q_{\max} - \bar{q}_{\text{of}}} \quad (34)$$

式中, v_{new} 为校正后的稳态带速, 单位为 m/s; $\bar{q}_{\text{of}} = \max(\bar{q}) - Q_{\max}$, 为物料溢出处的平均物料溢出质量, 单位为 kg/m.

针对加速溢料和减速溢料, 从设备运行层面考虑, 在执行变速时, 加速结束时间晚于物料增加时间或减速开始时间早于物料减少时间. 本环节对变速溢料的调速时间进行调整. 根据调速经验, 将加速或减速结束时间点分别提前或延后 Δt , $\Delta t = L_{\text{of}}/v_0$, 其中 L_{of} 为变速结束时输送带发生溢料长度, 单位为 m; v_0 为暂态初始带速, 单位为 m/s.

4 实验验证

为了验证数字孪生驱动的长距离带式输送机运行优化方法的有效性, 本文根据图 2, 利用 PLC 和 dSPACE 搭建了半实物仿真实验平台, 开展带式输送机运行优化控制实验.

4.1 实验平台的建立

本文建立的半实物仿真实验平台如图 8 所示, 硬件由两台主机、S7-1500 PLC 和 dSPACE MicroLabBox 实验箱组成, 软件由装载在主机 1 里的 TIA Portal v15 和装载在主机 2 里的 ControlDesk 和 Matlab/Simulink 组成. 其中, 数字孪生模型、控制策略和模型同步算法在主机 1 中运行, 现实带式输送机将由运行在 MicroLabBox 里的虚拟带式输送机代替, ControlDesk 用于人为设定虚拟带式输送机参数. 仿真平台具备控制算法的运行能力和虚拟带式输送机监测控制能力, dSPACE 可以输出带

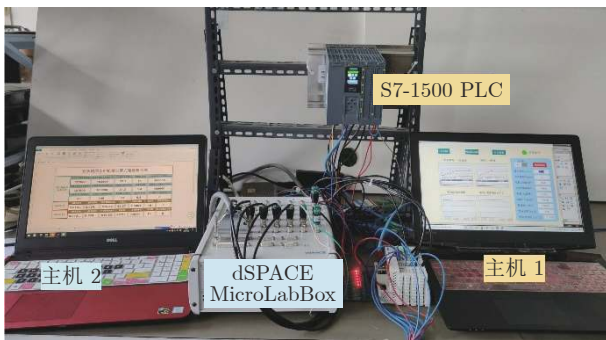


图 8 半实物仿真实验平台

Fig. 8 Hardware-in-the-loop simulation platform

式输送机的运行状态.

以中国某港口煤炭带式输送机为例^[41], 参数值如表 2 所示, 额定带速为 3.15 m/s, 能耗模型参数 $\varphi_1 = 24.0450$ kN, $\varphi_2 = 112.4523$ m²/s², $a_{a, \max} = 0.310$ m/s², $a_{d, \max} = 0.314$ m/s², $F_{T1, \max} = 73.6$ kN, $F_{Tr, \max} = 74.6$ kN, $\Delta F_{Tr, \max} = 7.46$ kN. 将输送带平均分为 20 段, 承载侧与返回侧各 10 个, 张紧装置单独一个微元段.

表 2 带式输送机参数值

Table 2 The parameters value of belt conveyor			
符号	数值	符号	数值
C	1.336	q_{RU}	7.76 kg/m
f	0.024	Q_{\max}	176.37 kg/m
g	9.8 m/s ²	$S_{A, \min}$	5.4
L	313.25 m	$S_{B, \min}$	8
m_t	4000 kg	α	180°
q_B	18.73 kg/m	μ_1	0.35
q_{RO}	15.75 kg/m		

为了验证数字孪生驱动的运行优化方法的有效性, 本文设置了两组实验, 分别从安全性和经济性两个方面进行实验验证. 为了方便观察带式输送机运行的安全性和显示优化方法的经济性, 安全性实验设置仿真周期较短, 经济性实验设置仿真周期较长. 在经济性实验中, 数字孪生驱动和优化控制根据带式输送机的给料速率进行变速, 传统定速控制按照额定带速运行.

4.2 暂态安全性验证

本次实验验证数字孪生驱动的运行优化方法的安全性, 设置采样时间为 1 s, 仿真总时长为 2000 s. 为了方便观察变速曲线, 本次实验设定每 500 s 改变一次给料速率, 给料速率分别设置为 555 kg/s、361 kg/s、472 kg/s 和 333 kg/s.

1) 计算决策

经过 DSC 优化策略的决策, 4 次求得的稳态带速分别为 3.15 m/s、2.05 m/s、2.68 m/s 和 1.89 m/s, 经过 DSC 仿真评估和优化校正的迭代优化, 最终求解的 4 次变速时间分别为 17 s、6 s、4 s 和 4 s, 并基于式 (28) 形成优化带速设定曲线.

2) 仿真评估

基于数字孪生模型, 对优化带速设定曲线的控制效果进行预测. 各微元段速度如图 9 所示, 虚线为优化带速设定曲线, 其余实线为输送带各个微元段带速. 可以看出, 各微元段可以很好地跟踪设定带速, 表明带式输送机能够按照带速设定稳定运行. 运行加速度如图 10 所示, 预测的最大加、减速度分别为 0.291 m/s²、-0.280 m/s², 未超过设备允许的

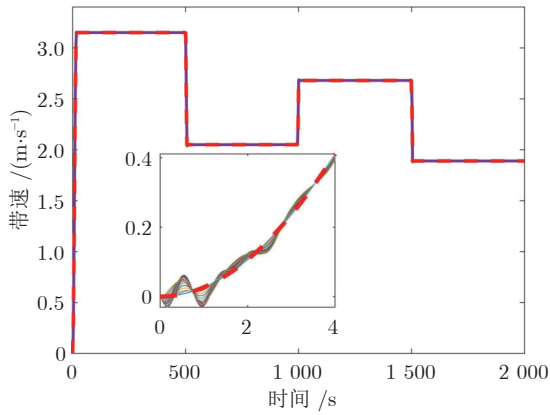


图 9 各微元段带速 (本文方法)

Fig.9 The velocity of each segment (by the proposed method)

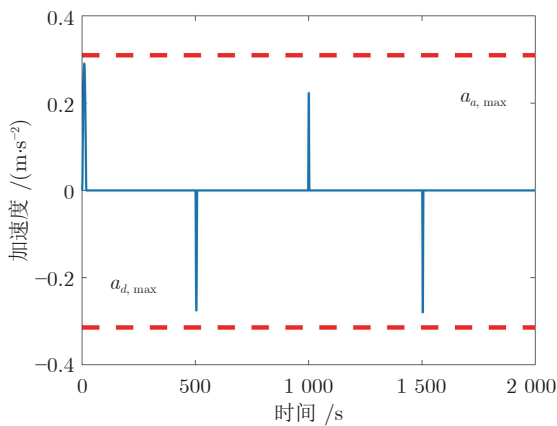


图 10 运行加速度

Fig.10 Operating acceleration

最大、最小值,表明从输送带刚性角度分析,优化带速设定曲线不存在打滑、张裂风险.

如图 11 所示,从动力学角度分析,带式输送机紧侧张力在所允许的范围之内,表明输送带不存在打滑现象.输送带驱动滚筒处张力如图 12 所示,4 次变速 F_{Tr} 均未超过其最大值,表明在变速过程中,驱动滚筒安全驱动带式输送机运行.但是,如图 13 所示,其驱动滚筒处张力瞬时变化幅度超过了所允许最大驱动滚筒处张力的 10%,瞬时变化幅度较大,这会给驱动电机和输送带带来较为强烈的冲击,造成不必要的损耗,甚至造成输送带的断裂.

输送带上物料流情况如图 14 所示,平均运载物料质量在 140 s 左右达到最大值,并在之后的运行中始终稳定保持最大值.输送带上,各个时刻的运载物料最大平均质量如图 15 所示,整个仿真过程物料流量均未超过带式输送机的运输能力,表明带式输送机未发生溢料情况.

综上所述,计算决策环节产生的优化带速设定曲线存在输送带张裂风险,需要对其进行优化校正.

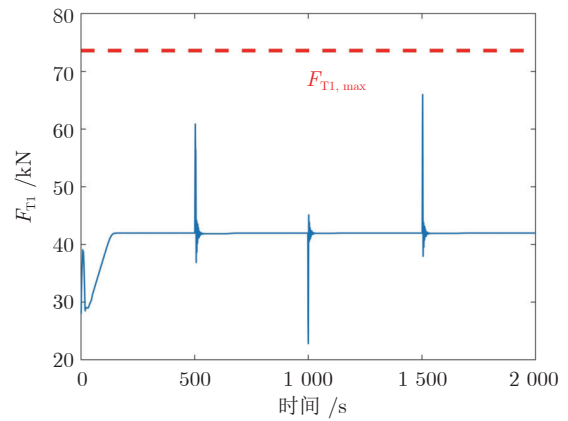


图 11 紧侧张力 (本文方法)

Fig.11 Tight-side tension (by the proposed method)

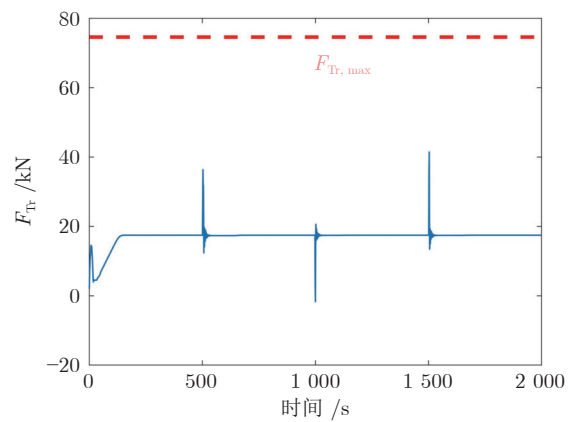


图 12 驱动滚筒处张力

Fig.12 The tension at the drive pulley

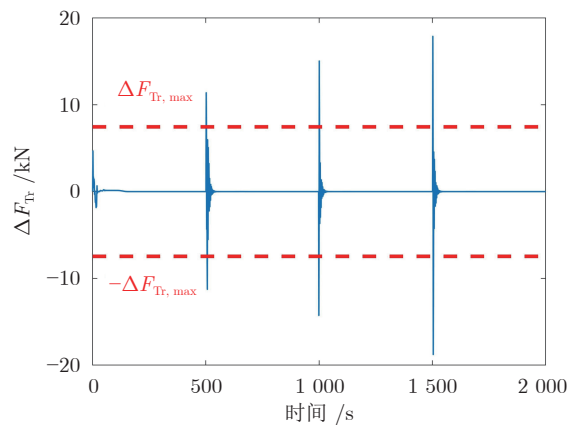


图 13 驱动滚筒处张力瞬时变化 (本文方法校正前)
Fig.13 Instantaneous variation of tension at driving drum (by the proposed method without correction part)

3) 优化校正

仿真评估结果中,各项指标在变速过程中的最

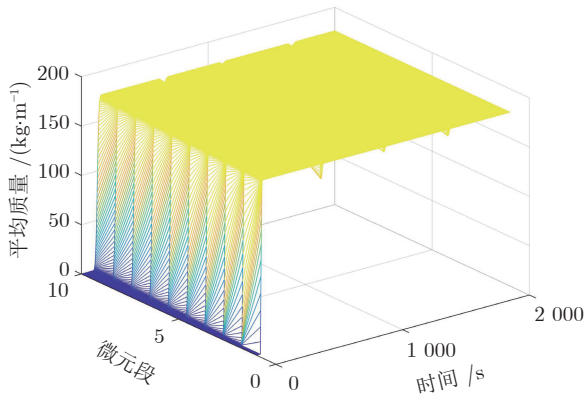


图 14 物料流三维图

Fig. 14 3D map of material flow

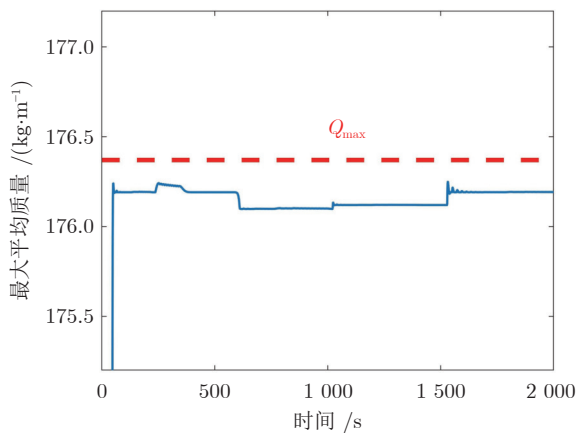


图 15 运载物料最大平均质量 (本文方法)

Fig. 15 The maximum average quality of carrying material (by the proposed method)

大值如表 3 所示. 可以看出, 第 2、3、4 次变速的 ΔF_{Tr} 超过了设定范围. 按照式 (33) 对优化带速设定曲线进行校正. 校正后 4 次变速时间分别为 17 s、8 s、7 s 和 7 s, 如表 3 所示, 校正后的各项指标均在所允许的范围之内. 其驱动滚筒处张力的瞬时变化如图 16 所示, 没有超过安全范围, 消除了仿真评

估环节预测的输送带运行潜在风险, 校正后的优化带速设定曲线可作为可行曲线控制带式输送机.

4.3 稳态经济性验证

为了检验数字孪生驱动的运行优化方法的经济性, 本次实验对比了定速控制实验和数字孪生驱动优化控制实验的结果. 设置采样时间为 1 s, 为了更好地研究两种控制方法的运行效果, 本次仿真总时长为 4 h, 实验设定每 1 h 改变一次给料速率, 给料速率分别设置为 555 kg/s、361 kg/s、472 kg/s 和 333 kg/s.

定速控制实验初始运行带速为 0 m/s. 在 0 s, 不考虑变速时长进行变速, 变速后运行带速为额定带速 3.15 m/s. 数字孪生驱动优化控制实验采用与第 4.2 节相同步骤, 优化后的变速时间分别为 17 s、8 s、7 s 和 7 s, 并形成可行带速设定曲线.

如图 17 所示, 由于定速控制实验运行带速为额定运行带速, 带式输送机运载物料的最大平均质量未超过最大值 Q_{max} , 表明未发生溢料情况.

在定速控制中, 不考虑暂态软变速, 输送带各微元段带速如图 18 所示. 在启动前期, 各微元段带速变化幅值较大, 启动不稳定, 加速度超过带式输送机的所允许范围. 紧侧张力如图 19 所示. 在启动时, 远超最大紧侧张力, 存在输送带打滑风险. 驱动滚筒处张力瞬时变化如图 20 所示, 其中虚线为上/下限, 在前 10 s, 驱动滚筒处瞬时张力变化幅度大, 远超设定的安全范围, 这极易造成输送带断带事故.

两种控制方式的输送带填充率如图 21 所示. 在 0 ~ 1 h, 两种控制方式的给料速率和带速均为额定数值, 因此, 两种控制方式的填充率是相似的; 在 1 ~ 4 h, 定速控制方式的输送带填充率受给料速率的影响, 填充率的大小在 60% ~ 100%; DSC 策略通过速度调节, 使带式输送机填充率达到 99% ~ 100%, 最大化利用带式输送机的运输能力.

两种控制方式在仿真周期的能耗功率如图 22

表 3 迭代优化过程

Table 3 The process of iterative optimization

迭代次数	变速次数	Dt (s)	a_{max} ($m \cdot s^{-2}$)	F_{T1} (kN)	F_{Tr} (kN)	ΔF_{Tr} (kN)	\bar{q} ($kg \cdot m^{-1}$)
0	1	17	0.291	41.97	17.47	4.69	0
	2	6	-0.275	60.86	36.36	11.39	176.19
	3	4	0.223	45.10	20.60	15.04	176.10
	4	4	-0.279	65.96	41.46	17.88	176.12
1	1	17	0.291	41.97	17.47	4.69	0
	2	8	-0.212	55.27	30.77	6.47	176.19
	3	7	0.140	42.84	18.34	4.07	176.10
	4	7	-0.176	52.42	27.92	6.05	176.12

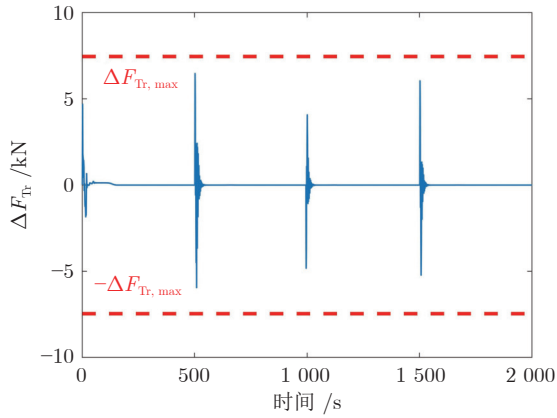


图 16 驱动滚筒处张力瞬时变化 (本文方法校正后)
Fig.16 Instantaneous variation of tension at the drive pulley (by the proposed method with correction part)

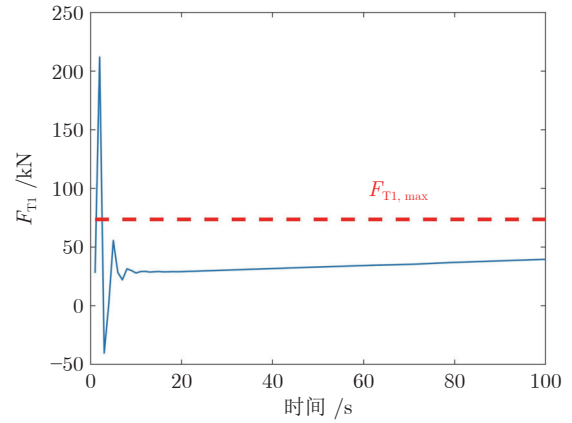


图 19 紧侧张力 (定速方法)
Fig.19 Tight-side tension (by the method for constant speed)

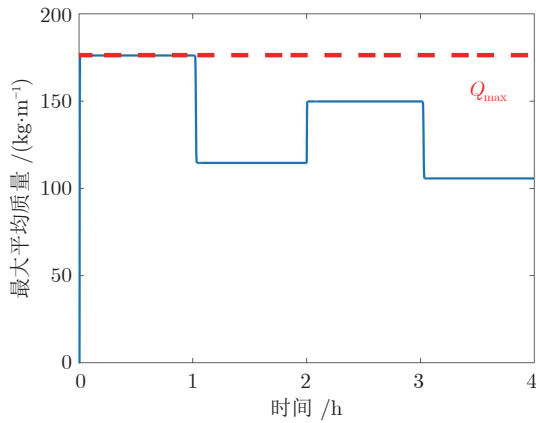


图 17 运载物料最大平均质量 (定速方法)
Fig.17 The maximum average quality of carrying material (by the method for constant speed)

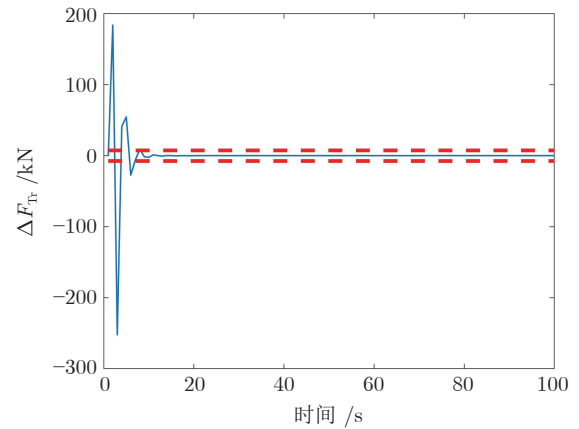


图 20 驱动滚筒处张力瞬时变化 (定速方法)
Fig.20 Instantaneous variation of tension at the drive pulley (by the method for constant speed)

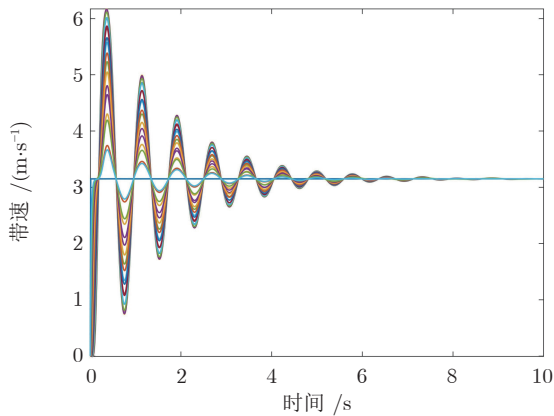


图 18 各微元段带速 (定速方法)
Fig.18 The velocity of each segment (by the method for constant speed)

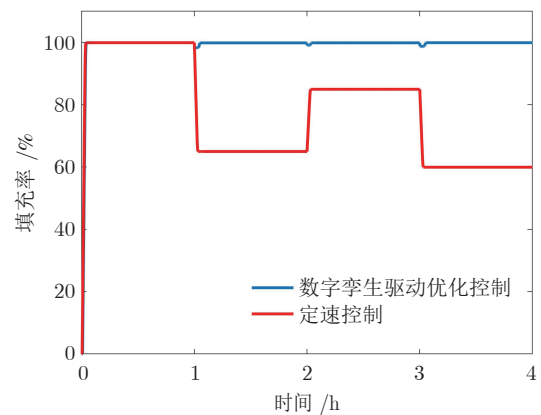


图 21 输送带填充率
Fig.21 The filling rate of conveyor belt

所示. 在 0 ~ 1 h, 两种方式的给料速率和速度是一致的, 能耗功率相似; 在 1 ~ 4 h, 与定速控制相比,

DSC 策略通过速度调节, 最大化输送带填充率, 达到了一定的节能效果. 在整个仿真过程中, 数字孪

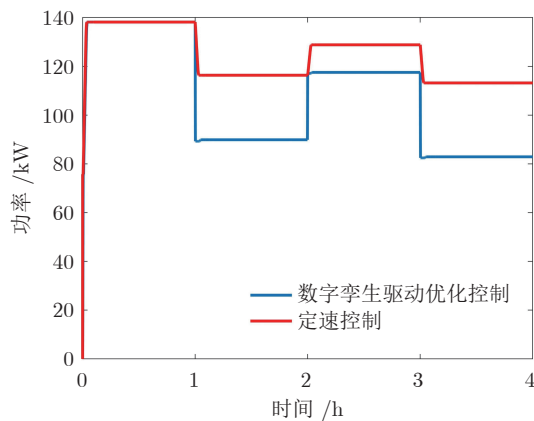


图 22 能耗功率

Fig. 22 The energy consumption power

生驱动优化控制节能率达到了 13.87%。

综上所述, 数字孪生驱动的运行优化方法不但能通过设定暂态带速, 保证带式输送机在变速过程的安全运行。而且, 通过稳态带速的设定, 充分利用带式输送机的运输能力, 最大化输送带填充率。与传统模式相比, 在运输同等质量物料情况下, 数字孪生驱动的运行优化能够消耗更少电能, 安全性更高, 保证了带式输送机运行的有效性和经济性。

5 结束语

本文提出数字孪生驱动的长距离带式输送机运行优化方法, 解决长距离带式输送机运行过程中的能源浪费和潜在风险问题。主要贡献有以下 3 点: 1) 提出数字孪生驱动的长距离带式输送机运行优化控制架构; 2) 根据变质量牛顿第二定律和有限元分析法建立了输送带动力学模型, 与物料流动态模型和动态能耗模型共同组成了带式输送机数字孪生模型; 3) 提出数字孪生驱动的带式输送机运行优化方法, 设定带式输送机稳态、暂态运行带速, 形成可行的带速设定曲线。本文利用半实物仿真实验平台, 实验验证所提方法的可行性和有效性。实验结果表明, 数字孪生驱动的运行优化方法能够保证带式输送机安全运行, 提高了输送带填充率, 实现带式输送机节能高效运行。本文基于数字孪生技术的优化控制策略对于复杂装备和工业系统的运行优化有一定借鉴意义。

References

- 1 Yang C, Bu L, Chen B. Energy modeling and online parameter identification for permanent magnet synchronous motor driven belt conveyors. *Measurement*, 2021, **178**: Article No. 109342
- 2 Zhang S, Xia X. Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems. *Applied Energy*, 2010, **87**(6): 1929–1937
- 3 Mu Y, Yao T, Jia H, Yu X, Zhao B, Zhang X, et al. Optimal scheduling method for belt conveyor system in coal mine considering silo virtual energy storage. *Applied Energy*, 2020, **275**: Article No. 115368
- 4 Ristic L B, Bebic M Z, Jevtic D S, Mihailovic I D, Statkic S Z, Rasic N T, et al. Fuzzy speed control of belt conveyor system to improve energy efficiency. In: Proceedings of the 15th International Power Electronics and Motion Control Conference. Novi Sad, Serbia: IEEE, 2012. 9–17
- 5 Zhang S, Xia X. Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors. *Applied Energy*, 2011, **88**(9): 3061–3071
- 6 Yang Chun-Yu, Li Heng, Che Zhi-Yuan. Energy consumption modeling and parameter identification for double-motor driven coal mine belt conveyors. *Control Theory & Applications*, 2018, **35**(3): 335–341
(杨春雨, 李恒, 车志远. 煤矿双电机驱动带式输送机的能耗建模与参数辨识. 控制理论与应用, 2018, **35**(3): 335–341)
- 7 Zeng F, Wu Q, Chu X, Yue Z. Measurement of bulk material flow based on laser scanning technology for the energy efficiency improvement of belt conveyors. *Measurement*, 2015, **75**: 230–243
- 8 Yang C, Liu J, Li H, Zhou L. Energy modeling and parameter identification of dual-motor-driven belt conveyors without speed sensors. *Energies*, 2018, **11**(12): 1–17
- 9 Zhang S, Mao W. Optimal operation of coal conveying systems assembled with crushers using model predictive control methodology. *Applied Energy*, 2017, **198**: 65–76
- 10 He D, Liu X, Zhong B. Sustainable belt conveyor operation by active speed control. *Measurement*, 2020, **154**: Article No. 107458
- 11 Continuous Conveyors-belt Conveyors for Loose Bulk Materials-basis for Calculation and Dimensioning, IEEE Criteria for Class IE Electric Systems (Standards Style), IEEE Standard 308, 1969.
- 12 Mathaba T, Xia X. A parametric energy model for energy management of long belt conveyors. *Energies*, 2015, **8**(12): 13590–13608
- 13 Mathaba T, Xia X. Optimal and energy efficient operation of conveyor belt systems with down-hill conveyors. *Energy Efficiency*, 2017, **10**(2): 405–417
- 14 Li J, Zhang J, Wang N. The study and application of examples of starting impact limitation for the belt conveyor. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering and Technology for Manufacturing Growth. Vancouver, Canada: Information Engineering Research Institute, 2015. 77–81
- 15 He D, Pang Y, Lodewijks G. Determination of acceleration for belt conveyor speed control in transient operation. *International Journal of Engineering and Technology*, 2016, **8**(3): 206–211
- 16 He D, Pang Y, Lodewijks G. Speed control of belt conveyors during transient operation. *Powder Technology*, 2016, **301**: 622–631
- 17 He D, Pang Y, Lodewijks G. Green operations of belt conveyors by means of speed control. *Applied Energy*, 2017, **188**: 330–341
- 18 Sun Tao, Zhou Cheng, Duan Xiao-Dong, Lu Lu, Chen Dan-Yang, Yang Hong-Wei, et al. Digital twin network (DTN): Concepts, architecture, and key technologies. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(3): 569–582
(孙滔, 周铨, 段晓东, 陆璐, 陈丹阳, 杨红伟, 等. 数字孪生网络 (DTN): 概念、架构及关键技术. 自动化学报, 2021, **47**(3): 569–582)
- 19 Hou Zheng-Hang, He Wei-Ping. Modeling and control of digital twin-based aircraft assembly state inspection robot. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, **27**(4): 981–989
(侯正航, 何卫平. 基于数字孪生的飞机装配状态巡检机器人的建模与控制. 计算机集成制造系统, 2021, **27**(4): 981–989)
- 20 Jiang Xian-Liang, Chen Ling-Yu, Zheng Jie-Ji, Tan Ruo-Yu, Li Bao-Yu, Fan Da-Peng. High-precision control method of direct drive components based on digital twin model. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, **57**(17): 98–109
(江献良, 陈凌宇, 郑杰基, 谭若愚, 李宝宇, 范大鹏. 基于数字孪生模型的直驱部件高精度控制方法. 机械工程学报, 2021, **57**(17): 98–109)
- 21 Yang Lin-Yao, Chen Si-Yuan, Wang Xiao, Zhang Jun, Wang

- Cheng-Hong. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(11): 2001–2031
(杨林瑶, 陈思远, 王晓, 张俊, 王成红. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望. 自动化学报, 2019, **45**(11): 2001–2031)
- 22 Tao F, Zhang H, Liu A, Nee A Y C. Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **15**(4): 2405–2415
- 23 Ge Shi-Rong, Zhang Fan, Wang Shi-Bo, Wang Zhong-Bin. Digital twin for smart coal mining work-face: Technological frame and construction. *Journal of China Coal Society*, 2020, **45**(6): 1925–1936
(葛世荣, 张帆, 王世博, 王忠宾. 数字孪生智采工作面技术架构研究. 煤炭学报, 2020, **45**(6): 1925–1936)
- 24 Jin Jie, Xia Chao, Xiao Shi-Li, Guo Yi-Jing, Wang Xiao-Fei. Rocket launch safety system design scheme based on digital twins. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, **25**(6): 1337–1347
(金杰, 夏超, 肖士利, 郭逸婧, 王晓菲. 基于数字孪生的火箭起飞安全系统设计. 计算机集成制造系统, 2019, **25**(6): 1337–1347)
- 25 Tao F, Qi Q. Make more digital twins. *Nature*, 2019, **573**(7775): 490–491
- 26 Yang G. Dynamics analysis and modeling of rubber belt in large mine belt conveyors. *Sensors & Transducers*, 2014, **181**(10): 210–218
- 27 Lodewijks G, Kruse D J. The power of field measurements: Part I. *Bulk Solids Handling*, 1998, **18**(3): 415–427
- 28 Zhou Guang-Lin, Han Zhong-Hui, Zhang Ji-Tong. Research on dynamic characteristics of large belt conveyor based on fractal dimension. *Coal Science and Technology*, 2019, **47**(2): 125–130
(周广林, 韩忠惠, 张继通. 基于分形维数的大型带式输送机动态特性研究. 煤炭科学技术, 2019, **47**(2): 125–130)
- 29 Li Jun-Xia, Kou Zi-Ming. Simulation and experimental study of a composite brake system for downward belt conveyor. *Journal of China Coal Society*, 2015, **40**(S2): 553–559
(李军霞, 寇子明. 下运带式输送机复合制动系统仿真及试验研究. 煤炭学报, 2015, **40**(S2): 553–559)
- 30 Wang Cheng-Shan, Dong Bo, Yu Hao, Wu Jian-Zhong, Yan Jin-Yue, Li Peng. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city. *Proceedings of the CSEE*, 2021, **41**(5): 1597–1608
(王成山, 董博, 于浩, 吴建中, 严晋跃, 李鹏. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用. 中国电机工程学报, 2021, **41**(5): 1597–1608)
- 31 Zhang K, Qu T, Zhou D, Zhang K, Qu T, Zhou D, et al. Digital twin-based opti-state control method for a synchronized production operation system. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 2020, **63**: Article No. 101892
- 32 Luo J, Huang W, Zhang S. Energy cost optimal operation of belt conveyors using model predictive control methodology. *Journal of Cleaner Production*, 2015, **105**: 196–205
- 33 Continuous Mechanical Handling Equipment-belt Conveyors With Carrying Idlers-calculation of Operating Power and Tensile Forces, ISO5048, 1989.
- 34 Yang Xiao-Lin, Ge Shi-Rong, Zu Hong-Bin, Bao Jiu-Sheng, Chang Guo-Qiang, Zhang Lei, et al. Permanent magnet intelligent drive system and control strategy of belt conveyor. *Journal of China Coal Society*, 2020, **45**(6): 2116–2126
(杨小林, 葛世荣, 祖洪斌, 鲍久圣, 常国强, 张磊, 等. 带式输送机永磁智能驱动系统及其控制策略. 煤炭学报, 2020, **45**(6): 2116–2126)
- 35 Chen Long, Wang Xiao, Yang Jian-Jian, Ai Yun-Feng, Tian Bin, Li Yu-Chen, et al. Parallel mining operating systems: From digital twins to mining intelligence. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(7): 1633–1645
(陈龙, 王晓, 杨健健, 艾云峰, 田滨, 李宇宸, 等. 平行矿山: 从数字孪生到矿山智能. 自动化学报, 2021, **47**(7): 1633–1645)
- 36 Li Ge, Li Chun-Guang, Liang Mu, Wu Fu-Jun. Accident analysis of belt conveyor used in coal mine and its protective measures. *China Safety Science Journal*, 2006, **16**(3): 140–144
(李铭, 李春广, 梁睦, 武福军. 煤矿带式输送机事故分析及防护措施. 中国安全科学学报, 2006, **16**(3): 140–144)
- 37 Sun Wang-Ping. Studies of Long Distance Belt Conveyor and Energy Saving Optimization Strategy [Master thesis], Hefei University of Technology, China, 2015.
(孙汪洋. 长距离带式输送机节能优化策略的研究 [硕士学位论文], 合肥工业大学, 中国, 2015.)
- 38 Pang Y, Lodewijks G. Improving energy efficiency in material transport systems by fuzzy speed control. In: Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics. Budapest, Hungary: IEEE, 2011. 159–164
- 39 Li Yu-Jin. Dynamic analysis and soft starting design of belt conveyor. *Journal of China Coal Society*, 2002, (3): 294–299
(李玉瑾. 带式输送机的动态特性分析与软启动设计. 煤炭学报, 2002, (3): 294–299)
- 40 He D, Pang Y, Lodewijks G, He D, Pang Y, Lodewijks G, et al. Healthy speed control of belt conveyors on conveying bulk materials. *Powder Technology*, 2018, **327**: 408–419
- 41 Zhang S, Xia X. A new energy calculation model of belt conveyor. In: Proceedings of the Africon. Nairobi, Kenya: IEEE, 2009. 1–6



杨春雨 中国矿业大学信息与控制工程学院教授。2009年获得东北大学博士学位。主要研究方向为智能系统与先进控制。本文通信作者。

E-mail: chunyuang@cumt.edu.cn
(**YANG Chun-Yu** Professor at the School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology. He received his Ph.D. degree from Northeastern University in 2009. His research interest covers intelligent system and advanced control. Corresponding author of this paper.)



卜令超 中国矿业大学信息与控制工程学院硕士研究生。主要研究方向为系统建模与控制。

E-mail: lingchaobu@cumt.edu.cn
(**BU Ling-Chao** Master student at the School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology. His main research interest is system modeling and control.)



陈斌 中国矿业大学信息与控制工程学院硕士研究生。主要研究方向为模型预测控制, 分布式优化控制。

E-mail: chenbincumt@cumt.edu.cn
(**CHEN Bin** Master student at the School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology. His research interest covers model predictive control and distributed optimal control.)