

长距离带式输送机新型起动曲线及其动态特性分析

袁媛¹ 寇俊雄¹ 周利东²

(1. 太原科技大学 车辆与交通工程学院, 太原 030024)

(2. 太原科技大学 机械工程学院, 太原 030024)

摘要:【目的】针对长距离带式输送机起动过程中的纵向振动问题, 基于输送带黏弹特性分析, 构建了带式输送机的动力学方程。以实际工程中的长距离带式输送机为例, 利用AMESim平台搭建了动力学仿真模型, 旨在探究起动过程中的加速度曲线及最佳加载时间。【方法】首先, 分析了常见起动曲线对输送带张力的影响, 提出一种“正弦+抛物线”的新型组合起动曲线; 其次, 通过引入爬行段和调整预起动阶段的速度, 对该曲线进行了优化; 最后, 对比分析了不同加载时间下输送带的张力变化规律。【结果】结果表明, 在起动过程中采用优化后的“正弦+抛物线”组合起动曲线后, 输送带产生的最大张力值较常用的正弦加速度曲线降低了5.8%; 在系统稳定运行后加载物料, 可有效降低输送带受到的张力冲击, 从而延长设备使用寿命。

关键词: 带式输送机; 起动曲线; AMESim; 最大张力值; 动态特性; 负载

中图分类号: TD528 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.2026.01.019

0 引言

随着现代化工业的快速发展, 带式输送机由于具有运输速度快、运输量大、运输距离远及可以通过自动控制而连续运行等一系列优点^[1], 已经成为煤炭、港口、矿山和物流中心等多个领域不可或缺的设备。在起动过程中, 输送带的黏弹特性等原因会引起输送带一系列的动态特性问题, 从而造成带式输送机系统的损坏。因此, 优化带式输送机的起动过程, 减小输送带的纵向振动, 提高设备的稳定性和安全性, 具有极其重要的实际工程意义。

李冬梅等^[2]研究了不同起动曲线对带式输送机动态性能的影响, 优化了张紧力, 以避免起动时局部应力异常, 确保系统平稳运行。刘点点^[3]分析了输送机在不同运行阶段输送带张力、速度和加速度的分布, 并使用波动理论解释了这些动态现象的原因。XIAO等^[4]根据三相异步电动机的直接转矩控制, 探讨了双电动机功率平衡的控制原理, 提出一种主从控制策略: 主电动机采用速度控制, 从电动机则采用转矩控制。杨庭杰等^[5]构建连续加载过程中的时变系统动力学模型, 分析了带式输送机在实际操作中

输送带各部分的速度、加速度和动张力的变化情况。FENG等^[6]分析了不均匀载荷分布对输送带张力的影响, 提出带式输送机的数学建模方法和一种新的组合型抛物线加速度曲线。姚艳萍等^[7]基于输送带的本构方程, 建立长距离带式输送机纵向振动的驱动力分配模型, 探讨了输送带弹性模量对多驱动系统功率平衡的影响。LI等^[8]通过对机械式自动变速箱(Automated Mechanical Transmission, AMT)软启动系统的分析与建模, 提出基于AMT输出轴角加速度控制的皮带加速度调控策略。韩京哲等^[9]在RecurDyn软件中, 基于Voigt模型建立了重锤式带式输送机的动力学模型, 并通过电动机驱动和负载转矩反馈实现闭环控制, 以引导系统平稳启动并稳定运行。

近年来, 针对带式输送机动态特性的研究主要集中于控制策略和功率平衡等方面, 关于起动曲线的创新研究相对较少。因此, 本文建立了一种新型组合起动曲线, 并确定了合适的加载时间, 以减缓起动过程中输送带受到的张力冲击。

1 带式输送机动力学方程及仿真模型研究

以输送带的黏弹性模型为基础, 建立了带式输

收稿日期: 2024-09-09

基金项目: 山西省科技成果转化引导专项(202104021301062, 202204021301060)

作者简介: 袁媛, 女, 1982年生, 河南濮阳人, 博士, 副教授; 主要研究方向为物流装备及物流系统设计; 365119348@qq.com。

寇俊雄(通信作者), 男, 1997年生, 山西临汾人, 在读硕士研究生; 主要研究方向为带式输送机动态特性分析; 2233829340@qq.com。

引用格式: 袁媛, 寇俊雄, 周利东. 长距离带式输送机新型起动曲线及其动态特性分析[J]. 机械传动, 2026, 50(1):155-162.

YUAN Yuan, KOU Junxiong, ZHOU Lidong. Analysis of new starting curve and dynamic characteristics of long-distance belt conveyors [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2026, 50(1):155-162.



免费获取

送机的动力学微分方程；在 AMESim 平台中搭建其离散动力学模型，提出一种新型加速度起动曲线；并通过引入爬行段和改变预起动阶段的速度，对该起动曲线进行优化，旨在建立一种较理想的起动方式；通过分析加载过程中动张力的变化，确定了合适的加载时间。研究路线如图 1 所示。

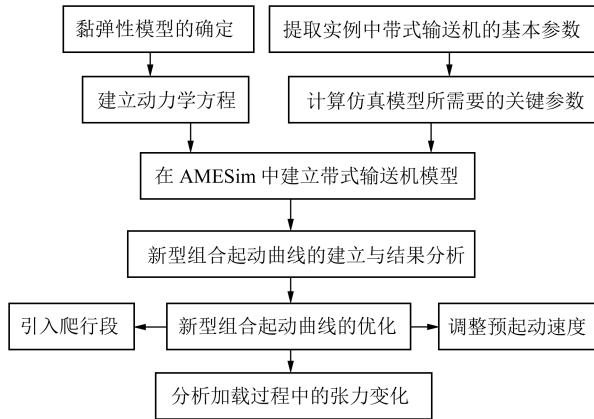


图 1 起动曲线研究技术路线图

Fig. 1 Research roadmap of the starting curve

1.1 建立带式输送机模型的假设条件

在实际应用中，带式输送机的运行受多种复杂因素的影响。为了便于分析，建立模型时提出以下假设^[10]。

- 1) 只考虑输送带的纵向振动，忽略其横向振动。
- 2) 在承载段和回程段，输送带单元质量、物料质量、托辊等效质量以及运行过程中所受到的阻力沿输送带均匀分布。
- 3) 输送带以外的其他装置均视为刚性体。
- 4) 输送带与驱动滚筒间无滑动，且忽略绕在各滚筒上的输送带质量^[11]。
- 5) 输送机的机架和托辊架不存在弹性振动。

1.2 输送带的黏弹性模型

研究发现，在建立输送带模型时，只采用理想的弹性模型或者黏性模型难以模拟出输送带的黏弹特性，必须结合这两种模型才能精确描述输送带的动力学特性^[12]。本文采用 Kelvin-Voigt 模型进行分析。Kelvin-Voigt 模型由 1 个弹性元件与 1 个黏性元件并联构成，两种理想模型被施加外力时的应变相同，总应力为两者的应力之和，其表达式为

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \quad (1)$$

式中， σ 为应力； E 为弹性模量； ε 为应变； η 为黏性系数。

Kelvin-Voigt 模型能够反映输送带对应力的变化，是模拟输送带黏弹特性的最优模型^[13]。该模型在

AMESim 中的构成如图 2 所示。

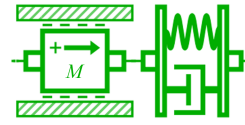


图 2 AMESim 中的 Kelvin-Voigt 模型

Fig. 2 Kelvin-Voigt model in AMESim

1.3 输送带动力学微分方程

输送带是带式输送机的核心部件。在输送机系统的动态分析中，重点在于研究输送带的动张力。所以，构建输送带的动力学模型至关重要^[14]。本文采用离散有限元分析方法。首先，将输送带分割成多个节段，每个节段包含 1 个 Kelvin-Voigt 模型和 1 个质量单元；然后，有序连接这些节段，构成输送带的动力学模型^[15]。输送带动力学模型如图 3 所示。

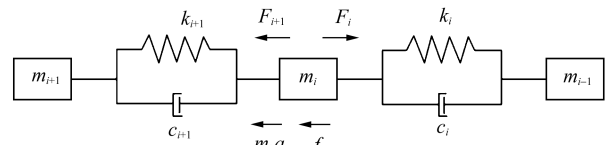


图 3 输送带动力学模型

Fig. 3 Dynamic model of the conveyor belt

图 3 中， m_i 为第 i 节质量单元的质量； k_i 为第 i 节的刚度系数； c_i 为第 i 节的阻尼系数； F_i 为第 i 节质量单元的右向拉力； F_{i+1} 为第 i 节质量单元的左向拉力； f_i 为第 i 节质量单元所受阻力； a 为第 i 节质量单元的加速度； x_i 为第 i 节质量单元的位移。

选择图 3 中的离散单元 i 及相邻的单元 $i+1$ 、 $i-1$ 作为研究对象，对其进行受力分析。建立的动力学方程为

$$m_i \ddot{x}_i + F_{i+1} - F_i = -f_i \quad (2)$$

$$F_i = k_i(x_{i-1} - x_i) + c_i(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i) \quad (3)$$

$$F_{i+1} = k_{i+1}(x_i - x_{i+1}) + c_{i+1}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) \quad (4)$$

将式(3)、式(4)代入式(2)，可得

$$m_i \ddot{x}_i + k_{i+1}(x_i - x_{i+1}) + c_{i+1}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) - k_i(x_{i-1} - x_i) - c_i(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i) = -f_i \quad (5)$$

1.4 基于 AMESim 的带式输送机仿真模型

1.4.1 带式输送机的基本参数

以山西某煤矿使用的长距离带式输送机为例，进行动态分析，其基本参数如表 1 所示。

1.4.2 带式输送机仿真模型关键参数的计算

1) 输送带单元的划分

将总长度为 L 的带式输送机等分为若干段，每段长度为 l ；将 50 m 作为该仿真模型的 1 个标准单元长度；将带式输送机分成多个仿真单元，每个仿真单元包含 1 个质量块和 1 个 Kelvin-Voigt 模型。单元数的计算方法为

表1 带式输送机基本参数

Tab.1 Basic parameters of the belt conveyor

参数	数值
输送机全长/m	6 600
垂直提升高度/m	-28
线路倾角/(°)	-0.243
输送量/(t/h)	2 000
重锤质量/kg	30 000
带宽/mm	1 400
带速/(m/s)	4
输送带型号	ST-2000
起动时间/s	60
驱动布置	头三尾一
弹性模量/(N/mm)	143 850
输送带单位长度质量/(kg/m)	38.8
物料单位长度质量/(kg/m)	138.9
上托辊间距/m	2
下托辊间距/m	4
上托辊单位长度等效质量/(kg/m)	12.2
下托辊单位长度等效质量/(kg/m)	5.55
大(小)改向滚筒直径/mm	1 400(800)
驱动滚筒直径/mm	1 400
模拟摩擦因数	0.025
输送带流变常数	0.8

$$n = \frac{L}{l} \quad (6)$$

式中, n 为输送带模型被划分单元的数量。

2) 单元质量块质量计算

输送带承载段满载质量为

$$m_{\text{承}} = (q_B + q_M + q_{RO})l \quad (7)$$

输送带回程段质量为

$$m_{\text{回}} = (q_B + q_{RU})l \quad (8)$$

式中, q_B 为输送带单位长度的质量; q_M 为物料单位长度的质量; q_{RO} 为上托辊单位长度的等效质量; q_{RU} 为下托辊单位长度的等效质量。

3) Kelvin-Vogit 模型刚度系数和阻尼系数的计算
刚度系数为

$$k_i = \frac{EB}{l} \quad (9)$$

阻尼系数为

$$c_i = \frac{EB\tau}{l} \quad (10)$$

式中, B 为输送带的宽度; τ 为输送带的流变常数, 取 0.8。

4) 单元运行阻力计算

带式输送机在运行过程中受到的阻力类型有主

要阻力、倾斜阻力、附加阻力和特种阻力。其中, 倾斜阻力是由物料和输送带升降产生的。本次仿真中使用的输送带线路的倾斜角度为 0.243° , 由此产生的倾斜阻力较小, 近似为水平运输。在长距离带式输送机中, 附加阻力和特种阻力相对较小, 不足主要阻力的 1%, 故在计算时可以忽略这部分阻力^[6]。带式输送机的主要阻力计算方法如下所述。

承载段满载时的单元阻力为

$$W_{\text{承}} = fm_{\text{承}}g \quad (11)$$

回程段的单元阻力为

$$W_{\text{回}} = fm_{\text{回}}g \quad (12)$$

式中, f 为输送带的模拟摩擦因数; g 为重力加速度。

根据表 1 中的参数以及式(6)~式(12), 可计算得到在 AMESim 平台中建立带式输送机模型所需要的参数, 如表 2 所示。

表2 带式输送机 AMESim 模型参数

Tab.2 AMESim model parameters of the belt conveyor

参数	数值
输送带被划分的单元数量	132
输送带承载段满载质量/kg	9 495
输送带回程段质量/kg	2 217.5
刚度系数/(N/m)	4 027 800
阻尼系数/[N/(m/s)]	3 222 240
承载段满载时的单元阻力/N	2 326.275
回程段的单元阻力/N	543.288

1.4.3 建立带式输送机仿真模型

依据表 1、表 2 中的数据, 建立该长距离带式输送机的 AMESim 仿真模型, 如图 4 所示。

2 带式输送机新型起动曲线的研究

合理的加速策略是确保带式输送机平稳起动的关键。以上述研究为理论依据, 将不同的加速度起动曲线转化为控制信号, 输入到 AMESim 仿真模型中的驱动模块, 对头部驱动滚筒绕入点的张力变化等动态特性展开深入分析。

2.1 单一起动曲线下的输送带张力分析

目前, 带式输送机常见的几种加速度曲线有矩形加速度曲线、三角形加速度曲线、梯形加速度曲线、抛物线加速度曲线和正弦加速度曲线^[7]。

1) 矩形加速度曲线

$$a = \frac{V}{T} \quad (13)$$

式中, V 为带式输送机稳定运行速度; T 为起动时间。

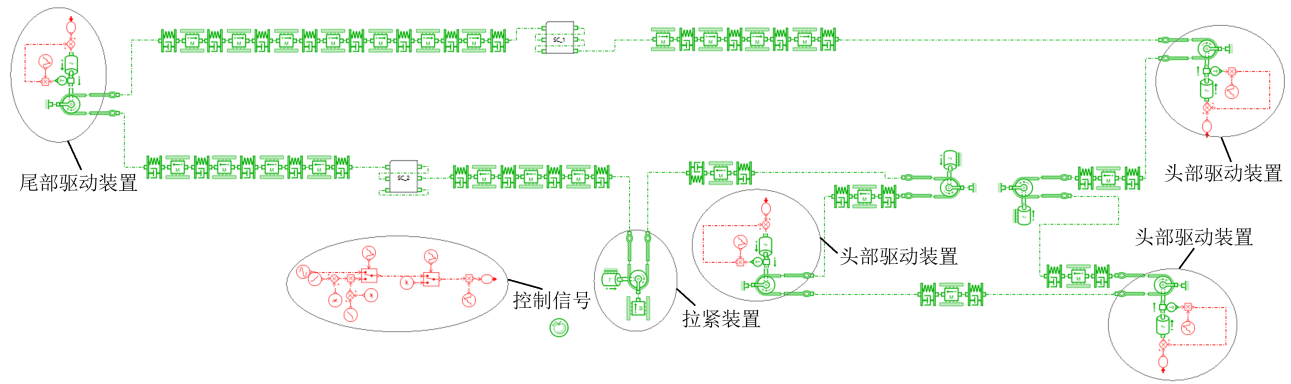


图4 带式输送机 AMESim 仿真模型

Fig. 4 AMESim simulation model of the belt conveyor

2) 三角形加速度曲线(Nordell 加速度曲线)

$$a(t) = \begin{cases} \frac{4V}{T^2}t, & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ \frac{4V}{T}(1 - \frac{t}{T}), & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (14)$$

3) 梯形加速度曲线

$$a(t) = \begin{cases} \frac{a_m}{t_1}t, & 0 \leq t < t_1 \\ a_m, & t_1 \leq t < t_2 \\ a_m \frac{t_3 - t}{t_3 - t_2}, & t_2 \leq t \leq t_3 \end{cases} \quad (15)$$

式中, t_1 、 t_2 、 t_3 分别为预起动开始时间、主起动开始时间、主起动结束时间; a_m 为最大加速度, $a_m = \frac{NV}{(N-1)T}$ 。其中, $t_1 = t_3 - t_2 = \frac{T}{N}$; N 为整数, 取值为10。

4) 抛物线加速度曲线

$$a(t) = \frac{3V}{2T}(\frac{4t}{T} - \frac{4t^2}{T^2}), \quad 0 \leq t \leq T \quad (16)$$

5) 正弦加速度曲线

$$a(t) = \frac{V\pi}{2T} \sin \frac{\pi t}{T}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (17)$$

采用不同的加速度曲线起动时, 带式输送机最大张力点的张力变化分别如图5、表3所示。

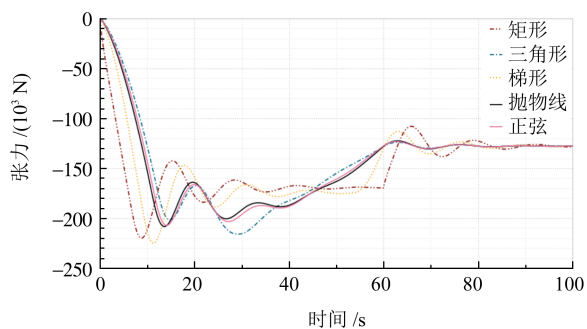


图5 单一起动曲线下的张力变化曲线

Fig. 5 Tension variation curves under single starting curve

表3 5种起动曲线下的最大张力值及到达峰值的时间

Tab. 3 Maximum tension and time to reach peak value under five starting curves

起动曲线	到达峰值的时间/s	最大张力值/N
矩形	8.7	219 772
三角形	29.1	215 604
梯形	11.2	224 787
抛物线	13.5	208 105
正弦	14.0	206 981

由以上仿真结果可知, 随着时间的推移, 输送带张力先急剧变大, 经过一段时间波动后逐渐减小至一个稳定值。其中, 采用正弦和抛物线加速度曲线时, 最大张力值明显低于另外3种, 张力变化也更为平缓, 并且这两种起动曲线在达到最大值时的时间比较相近。

2.2 新型组合起动曲线

2.2.1 组合型起动曲线的建立

由上述分析可知, 正弦和抛物线曲线是目前较理想的起动曲线, 且这两种起动曲线在开始段和结束段的速度变化曲线基本是水平的。所以, 这两种起动曲线在衔接部分更为平顺。将这两种加速度曲线进行组合, 可以得到4种组合方式, 如表4所示。其对应的速度和加速度变化曲线分别如图6、图7所示。

2.2.2 组合型起动曲线的仿真结果分析

当采用上述4种组合型起动曲线时, 带式输送机最大张力点的张力变化曲线如图8所示, 关键参数汇总如表5所示。

分析上述仿真结果可知, 采用组合型起动曲线时, 输送带的最大张力值远小于单一起动曲线。因此, 在带式输送机起动过程中引入预起动阶段能够显著减小张力波动对输送带造成的冲击。在主起动过程中, 采用抛物线曲线时的最大加速度和最大张力值更小, 且两者成正相关。综上所述, 正弦+抛物线加速度起动曲线是这4种组合方式中效果最佳的起动曲线。

表4 4种组合方式及其加速度公式

Tab. 4 Four combinations and their acceleration formulas

预起动阶段	主起动阶段	加速度曲线表达式
正弦	正弦	$a(t) = \begin{cases} \frac{V_1 \pi}{2T_1} \sin \frac{\pi t}{T_1}, & 0 \leq t < t_1 \\ \frac{V_2 \pi}{2T_2} \sin \frac{\pi(t-t_1)}{T_2}, & t_1 \leq t \leq T \end{cases}$
抛物线	抛物线	$a(t) = \begin{cases} \frac{3V_1}{2T_1} \left(\frac{4t}{T_1} - \frac{4t^2}{T_1^2} \right), & 0 \leq t < t_1 \\ \frac{3V_2}{2T_2} \left[\frac{4(t-t_1)}{T_2} - \frac{4(t-t_1)^2}{T_2^2} \right], & t_1 \leq t \leq T \end{cases}$
正弦	抛物线	$a(t) = \begin{cases} \frac{V_1 \pi}{2T_1} \sin \frac{\pi t}{T_1}, & 0 \leq t < t_1 \\ \frac{3V_2}{2T_2} \left[\frac{4(t-t_1)}{T_2} - \frac{4(t-t_1)^2}{T_2^2} \right], & t_1 \leq t \leq T \end{cases}$
抛物线	正弦	$a(t) = \begin{cases} \frac{3V_1}{2T_1} \left(\frac{4t}{T_1} - \frac{4t^2}{T_1^2} \right), & 0 \leq t < t_1 \\ \frac{V_2 \pi}{2T_2} \sin \frac{\pi(t-t_1)}{T_2}, & t_1 \leq t \leq T \end{cases}$

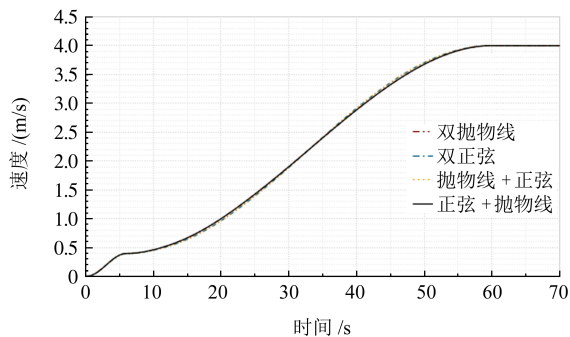


图6 组合型起动曲线的速度变化曲线

Fig. 6 Speed variation curves of combined starting curves

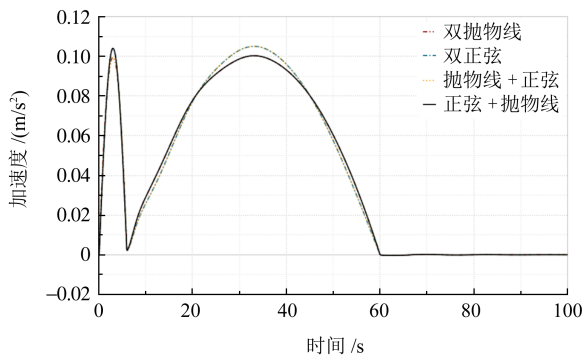


图7 组合型起动曲线的加速度变化曲线

Fig. 7 Acceleration variation curves of combined starting curves

3 正弦+抛物线加速度起动曲线的优化

通过在预起动和主起动阶段之间加入爬行段以及改变预起动阶段的速度, 确定所提新型加速度曲线的最优方案。

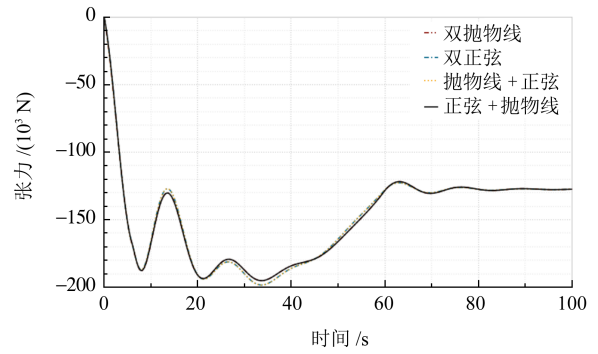


图8 组合型起动曲线的张力变化曲线

Fig. 8 Tension variation curves of combined starting curves

表5 4种组合型起动曲线的关键参数汇总

Tab. 5 Summary of key parameters for four combined starting curves

参数	双抛物线	双正弦	抛物线+正弦	正弦+抛物线
到达峰值的时间/s	33.7	33.7	33.7	33.7
最大张力值/N	195 146	198 364	198 377	195 133
主起动阶段加速度到达最大值时间/s	33.1	33.1	33.1	33.1
主起动阶段最大加速度值/(m/s²)	0.100 29	0.105 03	0.105 03	0.100 29

3.1 爬行段对输送带最大张力的影响

当采用组合型加速度起动曲线时, 预起动阶段结束后速度会达到一个预定值; 然后加入一段稳定运行的时间, 使输送带拉紧后继续起动, 这段时间被称为爬行段^[18]。在正弦+抛物线曲线中引入爬行段后, 整个起动过程中速度和加速度的变化过程为: 预起动阶段, 加速度从0升至最大, 随后又降为0; 爬行段时, 速度维持恒定, 加速度保持为0; 主起动阶段, 加速度再次从0升至最大后降为0; 到达稳定运行阶段时, 加速度恢复为0, 速度保持稳定^[19]。

分别设置引入爬行段的时间为0、3、5、6、10 s。其对应的张力变化过程如图9所示, 最大张力值如表6所示。

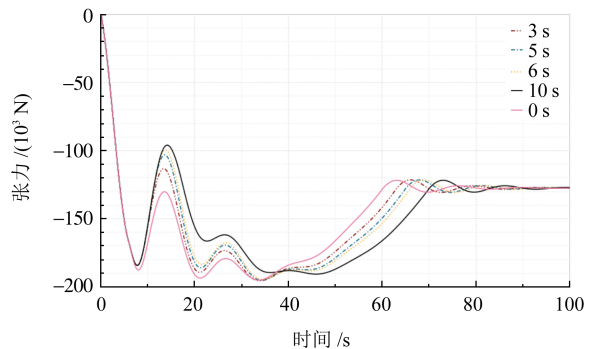


图9 爬行段时间不同时的张力变化曲线

Fig. 9 Tension variation curves under different crawling period durations

表6 不同爬行段时长下的最大张力值

Tab. 6 Maximum tension values under different crawling period durations

爬行段时间/s	最大张力值/N
0	195 133
3	195 651
5	195 204
6	194 613
10	190 702

从以上数据可知,随着起动过程中爬行段时间的增加,输送带的最大张力值逐渐减小。当爬行段时间大于等于6 s时,输送带的最大张力值比无爬行段时小。

在起动过程中引入爬行段的同时,整个起动过程的时间也会增加,而增加起动时间同样会使输送带最大张力值减小。从图9可以看出,无论是否存在爬行段,起动过程中的最大张力值始终出现在主起动阶段。因此,可以考虑将引入爬行段的时间转移到主起动阶段。鉴于爬行段时间小于6 s时的张力曲线的效果较差,所以,只选取增加的时间为6 s和10 s时进行分析,结果分别如图10、图11所示。

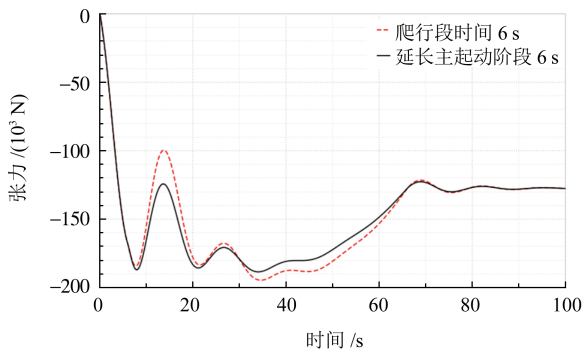


图10 延长时间为6 s时的张力变化对比

Fig. 10 Comparison of the tension variation with 6 s extension

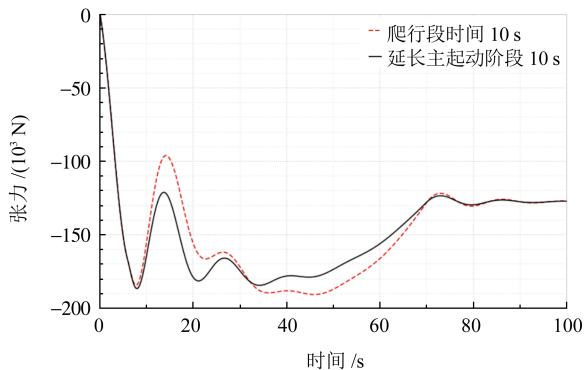


图11 延长时间为10 s时的张力变化对比

Fig. 11 Comparison of the tension variation with 10 s extension

从图10、图11可以看出,引入爬行段后,第一个张力峰值会略微降低,但在其前后的张力波动幅度会更加剧烈;且延长相同的时间在主起动阶段,

输送带的最大张力值更小。

综合考虑,带式输送机采用正弦+抛物线加速度曲线时,将加入爬行段所用的时间转移到主起动阶段上,可以有效降低输送带的振荡程度及输送带的最大张力值。

3.2 预起动速度的优化

带爬行段的组合型起动曲线通常以运行速度的1/10为预起动速度。因此,在进行以上研究时,以0.4 m/s为预起动速度的初始值。接下来,对正弦+抛物线起动曲线的预起动速度进行优化。

设定预起动速度分别为0.5、0.4、0.3、0.2、0.1、0.04 m/s,仿真结果分别如图12、图13所示,其数据如表7所示。

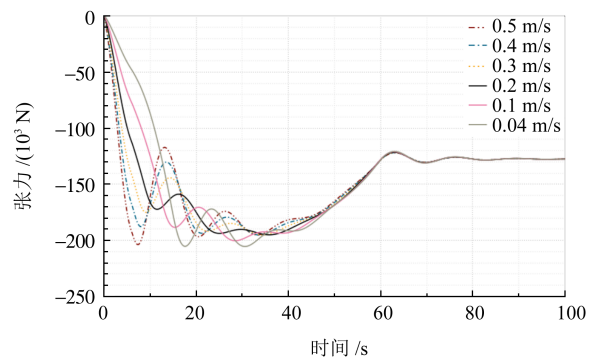


图12 不同预起动速度下的张力变化曲线

Fig. 12 Tension variation curves at different pre-starting speeds

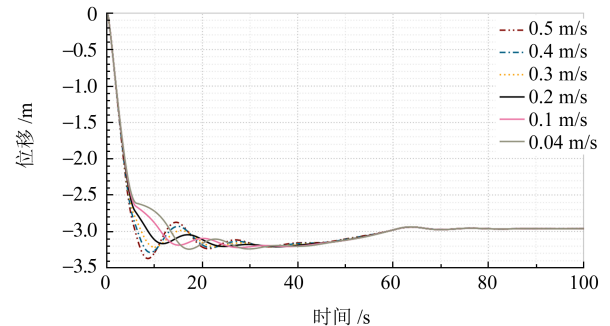


图13 不同预起动速度下的重锤位移曲线

Fig. 13 Displacement curves of the heavy hammer at different pre-starting speeds

表7 不同预起动速度下的最大张力值和最大位移

Tab. 7 Maximum tension and maximum displacement at different pre-starting speeds

预起动速度/(m/s)	最大张力值/N	最大位移/m
0.5	203 718	3. 368
0.4	195 133	3. 285
0.3	195 144	3. 212
0.2	194 986	3. 205
0.1	200 257	3. 217
0.04	205 382	3. 239

通过分析图12、图13、表7可知,随着预起动速度减小,输送带上的最大张力值和拉紧重锤的最大位移都是先逐渐减小,然后逐渐增大;在预起动速度为0.2 m/s时,这两个参数均达到最小值;并且整个起动过程中的张力波动和重锤运动也更加平稳。

综上所述,选择正弦+抛物线起动曲线时,将预起动速度设置为稳定运行速度的1/20,能够将输送带受到的张力冲击最小化。

4 加载过程中输送带张力的变化

在带式输送机起动过程中,输送带的张力变化不仅受起动曲线的影响,还与其承载段载荷的变化密切相关^[20]。以往对输送带负载特性的研究,往往局限于空载、满载及半满载等特定工况,针对加载过程中输送带张力变化的研究相对较少。本节以上述优化后的正弦+抛物线起动曲线为基础,分析不同加载工况下输送带张力的变化情况,以确定最为适宜的加载时间。

4.1 加载物料时带式输送机的仿真模型

在整个加载过程中,物料从给料点加入,并随带式输送机的运行逐渐铺满整条输送带。在AMESim中模拟该加载过程时,承载段每个单元的结构如图14所示,除承载段外,其余部分与图4相同。

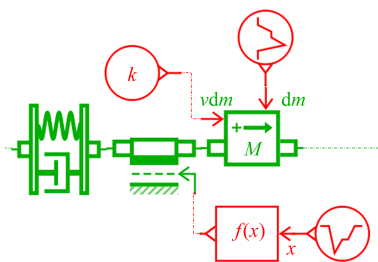


图14 加载时的输送带单元仿真模型

Fig. 14 Simulation model of the conveyor belt unit during loading

4.2 物料加载时间不同对输送带张力的影响

为深入探究带式输送机在加载过程中的动力学行为,分别设定两种不同的加载策略:第一种策略是在带式输送机起动完成后,进入稳定运行阶段时开始加载物料;第二种策略则是在起动开始时便加载物料。通过仿真,对这两种加载过程中输送带的动张力变化进行研究,并与满载状态下起动时的动张力变化进行对比。相应的仿真结果如图15所示。

由图15可知,随着运行过程中载荷的增加,输送带张力逐渐增大,直至达到满载状态后稳定;与起动时加载物料相比,稳定运行后再添加物料可降低输送带产生的张力;在输送带被物料完全覆盖之前,满载运行时的张力始终高于加载过程,但随着

物料的增加,这一差值会逐渐缩小直至消失,最终两者张力值相等。

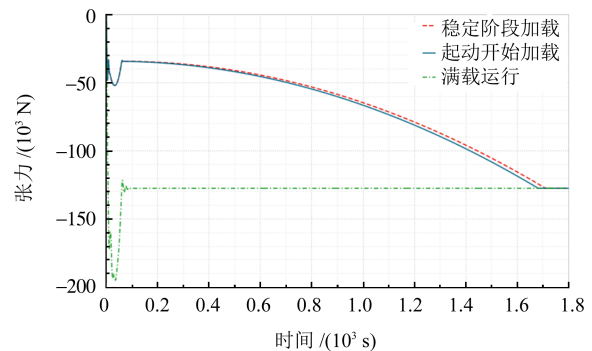


图15 加载过程中输送带的张力变化曲线

Fig. 15 Tension variation curves of the conveyor belt during loading process

综上所述,应优先考虑在空载状态下起动,并在稳定运行后再加载物料,从而可有效降低输送带张力波动。

5 结论

采用理论与数值仿真相结合的方法,研究了不同起动曲线及加载策略对输送带张力的影响,得出以下结论:

1) 以预起动阶段使用正弦曲线、主起动阶段使用抛物线曲线的方式组合,并加入爬行段,可有效减少输送带受到的张力冲击;若将爬行段所用时间转移到主起动阶段,输送带受到的张力冲击会更小。在实际应用中,应根据工程需求决定是否加入爬行段。若对起动时间没有必要限制,可以在主起动阶段时间达到饱和状态之后再考虑加入爬行段,以进一步降低输送带的动张力。

2) 通过分析不同预起动速度对输送带张力的影响发现,选取预起动速度为稳定运行速度的1/20时,张力变化曲线和重锤位移曲线的波动幅度更为平缓且极值最小;此时,输送带的最大张力值相比正弦起动曲线降低了5.8%,是较理想的加速度起动曲线。

3) 通过对不同的加载策略分析可知,在空载条件下起动带式输送机,并在系统达到稳定运行状态后再加载物料,可以显著降低输送带所承受的张力冲击。

本文设计的正弦+抛物线加速度起动曲线,结合空载起动后再加载物料的方案,不仅能延长输送带的使用寿命,还能扩大可选用的输送带型号范围,为输送机匹配最合适的输送带,从而全面提升带式输送机的性能和经济性。

参 考 文 献

- [1] 张杰,李军霞. 基于 AMESim 的带式输送机制动过程的动态分析[J]. 机械设计与制造,2016(8):161-163.
ZHANG Jie, LI Junxia. Study on dynamic characteristic of belt conveyor during braking process based on AMESim[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(8):161-163.
- [2] 李冬梅,赵士明. 带式输送机拉紧装置启动过程动态仿真分析[J]. 机械传动,2017,41(2):100-103.
LI Dongmei, ZHAO Shiming. Dynamic simulation analysis of the start-up process of take-up device of the belt conveyor[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(2):100-103.
- [3] 刘点点. 带式输送机动态特性仿真分析与实验研究[D]. 太原: 太原理工大学,2018:9-15.
LIU Diandian. Simulation analysis and experimental research on dynamic characteristics of belt conveyor [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018:9-15.
- [4] XIAO D M, LI X J, HE K F. Power balance of starting process for pipe belt conveyor based on master-slave control [J]. IEEE Access, 2018, 6: 16924-16931.
- [5] 杨庭杰,郝洪涛,张超,等. 带式输送机启动与加载过程建模仿真[J]. 机械设计与研究,2019,35(5):153-157.
YANG Tingjie, HAO Hongtao, ZHANG Chao, et al. Modeling and simulation of starting and loading process of belt conveyor [J]. Machine Design & Research, 2019, 35(5):153-157.
- [6] FENG Y, ZHANG M T, LI G P, et al. Dynamic characteristic analysis and startup optimization design of an intermediate drive belt conveyor with non-uniform load[J]. Science Progress, 2020, 103(1):36850419881089.
- [7] 姚艳萍,张必胜. 输送带纵向振动对多驱动驱动力分配影响的研究[J]. 振动与冲击,2021,40(7):231-236.
YAO Yanping, ZHANG Bisheng. Effects of longitudinal vibration of conveyor belt on multi-driving force distribution[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(7):231-236.
- [8] LI Y X, LI L. Research on segmented belt acceleration curve based on automated mechanical transmission[J]. Processes, 2022, 10(1):106.
- [9] 韩京哲,熊晓燕,陈帅,等. 带式输送机时变负载驱动特性的研究[J]. 机械设计与制造,2023(12):146-151.
HAN Jingzhe, XIONG Xiaoyan, CHEN Shuai, et al. Research on driving characteristics of virtual prototype of belt conveyor [J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(12):146-151.
- [10] 陈艳,齐晓勇. 基于 AMESim 的带式输送机的启动研究[J]. 煤炭技术,2018,37(4):199-201.
CHEN Yan, QI Xiaoyong. Research on starting of belt conveyor based on AMESim[J]. Coal Technology, 2018, 37(4):199-201.
- [11] 揭施军. 输送带张紧力控制系统研究[D]. 太原:太原理工大学,2018:30-38.
JIE Shijun. Research on conveyor belt tension control system [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018:30-38.
- [12] 单辉亚,肖冬明. 三电动机驱动圆管带式输送机启动控制方法[J]. 工矿自动化,2019,45(9):86-91.
SHAN Huiya, XIAO Dongming. Starting control method of pipe belt conveyor driven by three motors[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9):86-91.
- [13] 揭施军,熊晓燕,武兵,等. 张紧方式对带式输送机启动特性的影响[J]. 液压与气动,2019,43(6):53-57.
JIE Shijun, XIONG Xiaoyan, WU Bing, et al. Effect of tensioning mode on starting characteristics of belt conveyor[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, 43(6):53-57.
- [14] 王繁生. 输送带柔性多体动力学建模方法研究[J]. 机械传动, 2018, 42(4):43-46.
WANG Fansheng. Research of flexible multibody dynamics modeling of conveyor belt[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(4):43-46.
- [15] 赵东升. 基于 AMESim 的带式输送机仿真建模方法研究[J]. 中国矿业,2013,22(2):114-116.
ZHAO Dongsheng. Research on belt conveyor simulation modeling methods base on AMESim[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(2):114-116.
- [16] 张必胜. 输送带纵向振动对多驱动功率分配的分析研究[D]. 太原:太原科技大学,2020:38-44.
ZHANG Bisheng. The analysis and research of multi-drive power distribution by longitudinal vibration [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2020:38-44.
- [17] 吴波,廉自生,张鑫. 长距离带式输送机输送带的动态特性仿真[J]. 煤炭科学技术,2014,42(2):82-84.
WU Bo, LIAN Zisheng, ZHANG Xin. Dynamic characteristic simulation for belt of long distance belt conveyor [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2):82-84.
- [18] 周亚傲. 大型带式输送机系统仿真分析方法的研究[D]. 北京:华北电力大学,2016:39-50.
ZHOU Yaa. Study on simulation analysis method for large scale belt conveyor system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016:39-50.
- [19] 宋伟刚,邓永胜. 大型带式输送机合理可控启动曲线的研究[J]. 起重运输机械,2002(8):20-23.
SONG Weigang, DENG Yongsheng. Research on reasonable and controllable starting curve of large belt conveyor[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2002(8):20-23.
- [20] 张曼,金昊炫,杨勇强,等. 带式输送机输送带纵向振动与稳定性分析[J]. 机械传动,2020,44(8):52-56.
ZHANG Man, JIN Haoxuan, YANG Yongqiang, et al. Longitudinal vibration and stability analysis of conveying belt of belt conveyor[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(8):52-56.