

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.03.007

升降输送机滚珠丝杠的动力学研究

郭一行, 孙东明*, 秦野秋, 王 斌
(昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:针对升降输送机中滚珠丝杠受到径向载荷时滚珠丝杠易受到损伤的问题,对滚珠丝杠在升降输送机工作过程中的受力情况及产生径向载荷的原因进行了研究。得到了升降输送机在启动、输送和制动过程中滚珠丝杠的受力情况,提出了增加导向杆和在升降输送机机架两侧增加 4 个液压缸这两种减小滚珠丝杠径向载荷的方法;运用 Adams 进行了动力学分析,讨论了在不同改进方案下,升降输送机在启动、输送以及制动过程中滚珠丝杠受力的变化规律及滚珠丝杠受到径向载荷的大小。研究表明:提出的减小滚珠丝杠径向载荷的两种方法能有效减小滚珠丝杠受到的径向载荷,减小了径向载荷对滚珠丝杠造成的损伤,增加了滚珠丝杠的使用寿命,提高了升降输送机的输送效率。

关键词:升降输送机;滚珠丝杠受力分析;径向载荷;结构改进;仿真模拟

中图分类号:TH22;TH113

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)03-0267-05

Dynamic analysis of ball screw in lifting conveyor

GUO Yi-hang, SUN Dong-ming, QIN Ye-qiu, WANG Bin
(Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of
Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the problem that the ball screw of the lifting conveyor was susceptible to damage when subjected to radial load, the force of the ball screw during the working process of the lifting conveyor and the cause of the radial load were studied. The force of the ball screw in the process of starting, conveying and braking of the lifting conveyor was obtained, and two methods of increasing the guide rod and adding four hydraulic cylinders on both sides of the lifting conveyor frame to reduce the radial load of the ball screw were proposed. The dynamic analysis of Adams was used to discuss the variation of the ball screw force and the radial load of the ball screw during the starting, transporting and braking of the lifting conveyor under different improved schemes. The results indicate that the proposed two methods of reducing the radial load of the ball screw can effectively reduce the radial load on the ball screw, the damage caused by the radial load on the ball screw is reduced, the service life of the ball screw is increased, and the conveying efficiency of the lifting conveyor is improved.

Key words: lifting conveyor ; force analysis of ball screw; radial load; structural improvement; simulation

0 引 言

目前为止,国内对升降式输送机的应用大多数集中在食品生产、矿山机械等领域,且多数为带式输送机和刮板输送机^[1]。对于电解铜包装生产线的研究和应用少之又少,而升降式输送机作为电解铜包装生产线中的关键设备,其在冶金生产方面相关的研究更是寥寥无

几。升降式输送机的设计和参数的确定主要依靠经验而缺少理论依据,且没有相关的仿真和实验数据的验证。徐进^[2]通过构建升降机的运动方程,对丝杠传动的效率与使用寿命做了研究分析,仔细地讨论了机械传动与工作时间的关系,并推导出了两者之间的计算公式;孙东明等人^[3-4]对丝杠升降机进行了仿真分析,得到了升降输送机的动态特性和丝杠机构的应力分布;HAR-

收稿日期:2018-10-23

作者简介:郭一行(1994-),男,河南临颖人,硕士研究生,主要从事机电装备系统集成方面的研究。E-mail:gyhlsy2017@126.com

通信联系人:孙东明,男,教授,硕士生导师。E-mail:kmustsdm@126.com

RISON A^[5]以动力学理论为依据,对带式输送机的工作特性做了相关的分析与研究;SCHULZ G^[6]对带式输送机的长度与其工作特点的关系做了相关分析,得到了输送机在工作平面上的波动规律;LODEWIJKS G^[7]讨论了非线性动力学对于带式输送机工作特点的影响;焦宏章、杨兆健等人^[8]通过构建刮板输送机的三维仿真模型及其工作环境,分析了输送机启动瞬时与输送过程中的驱动力矩变化规律;何柏岩^[9]通过有限元分析理论建立了刮板输送机的三维有限元仿真模型,分析了纵向冲击对输送机系统造成的影响。国内外学者对升降输送机的动力学特性及其理论原理作了详细的分析,但对升降式输送机的关键机构滚珠丝杠在启动及运输过程中的受力情况研究较少。

本文将升降式输送机滚珠丝杠进行受力分析,并通过 ADAMS 进行动力学分析,以得出减小滚珠丝杠载荷的方法。

1 升降输送机工作原理

改进后升降式输送机如图 1 所示。

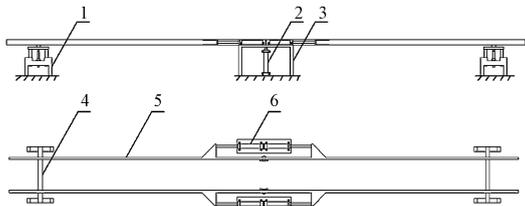


图 1 改进后升降式输送机示意图

1—滚珠丝杠;2—升降液压缸;3—支架;4—支板;5—输送机机架;6—径向加固液压缸

改进后升降式输送机在输送机机架两端安装有 4 个滚珠丝杠,滚珠丝杠将螺旋运动转化为直线运动,使输送机机架上升,同时输送机水平运动。理论上滚珠丝杠带动输送架垂直运动过程中滚珠丝杠只受轴向力,但由于上升过程中输送机水平运动,会使滚珠丝杠受到径向载荷的作用,而径向载荷过大会损坏滚珠丝杠的螺纹,从而缩短和滚珠丝杠的寿命。

滚珠丝杠受力如图 2 所示。

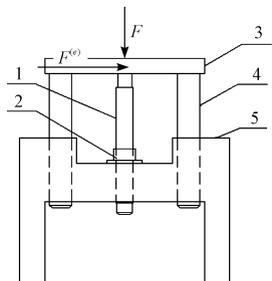


图 2 滚珠丝杠整体受力图

1—滚珠丝杠;2—螺母;3—固定支板;4—导向杆;5—机架

在工作过程中滚珠丝杠受到由铜垛产生的轴向载荷 F 和由于输送机水平运动产生的惯性力 $F^{(e)}$ 。

2 升降式输送机的输送动量方程及分析

输送机参数示意图如图 3 所示。

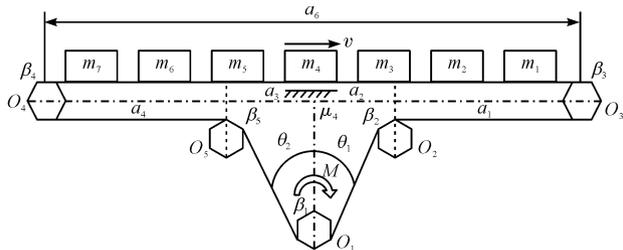


图 3 输送机参数示意图

O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 —链轮; $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7$ —电液铜垛; μ_d —链条与机架的动摩擦系数; a_0 — O_3 与 O_4 的中心距; a_1 — O_2 与 O_3 的中心距; a_2 — O_1 与 O_2 的中心距; a_3 — O_1 与 O_5 的中心距; a_4 — O_4 与 O_5 的中心距; M —链轮; O_1 —输入转矩; K_y —悬垂系数; q —链条每米质量; g —重力加速度

在计算输送机输送过程合外力时,可忽略链轮的多边形效应所引起的主动轮与从动轮之间瞬时速度的不相等,以及链条速度的微小波动。因为上述原因所引起的径向冲击较小,并不会影响到滚珠丝杠升降机的正常工作^[10]。

设均为质量均匀的链轮,若其质心不变,则该质点系动量为:

$$\sum P_i = \sum m_i v_i = \int_{t_1}^{t_2} F^{(e)} dt \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sum P_i &= \sum_{i=1}^7 m_i v + 2a_0 q v + 2a_1 q v + 2a_2 q \frac{v}{(\sin\theta_1)^2} = \\ &\left(\sum_{i=1}^7 m_i + 2a_0 q + 2a_1 q + 2a_2 q \frac{1}{(\sin\theta_1)^2} + \right. \\ &\left. 2a_3 q \frac{1}{(\sin\theta_2)^2} + 2a_4 q + 4\pi R q \right) v \quad (2) \end{aligned}$$

$$F^{(e)} = F \sin\theta_1 - \left(\sum_{i=1}^7 m_i + 2a_0 q \right) \mu_d g =$$

$$\left(\frac{M}{R} + qv^2 + K_y q g a_0 \right) \sin\theta_1 - \left(\sum_{i=1}^7 m_i + 2a_0 q \right) \mu_d g \quad (3)$$

根据质心运动定理,质点系所受外力的矢量和等于质心的加速度和质点系总质量相乘的值^[11]。根据以上所建立的输送动量方程(2),可以得到输送机所受合外力的公式(4)。由式(4)可知输送机质点系合外力与输送机质点系单位时间内速度变化量 dv/dt ,即启动加速度有关:

$$\frac{d(\sum P_i)}{dt} = \left(\sum_{i=1}^7 m_i + 2a_0q + 2a_1q + 2a_2q \frac{1}{(\sin\theta_1)^2} + 2a_3q \frac{1}{(\sin\theta_2)^2} + 2a_4q + 4\pi Rq \right) \frac{dv}{dt} = \left(\frac{M}{R} + qv^2 + K_y q g a_0 \right) \sin\theta_1 - \left(\sum_{i=1}^7 m_i + 2a_0q \right) \mu_D g = F^{(e)} \quad (4)$$

由式(4)可得:输送机质点系合外力的大小与输送机质点系在单位时间内速度变化量有关。

输送机的驱动关系式为:

$$l = \int_0^{\Delta t_1} \frac{v_2}{\Delta t_1} t dt + \int_0^{\Delta t_2} v_2 dt + \int_0^{\Delta t_3} \frac{v_2}{\Delta t_3} t dt = \frac{1}{2} v_2 \Delta t_1 + v_2 \Delta t_2 + \frac{1}{2} v_2 \Delta t_3 = v_2 \left(\frac{1}{2} \Delta t_1 + \Delta t_2 + \frac{1}{2} \Delta t_3 \right) \quad (5)$$

式中: L —输送机输送位移; Δt_1 —匀加速运动时间; Δt_2 —匀速运动时间; Δt_3 —匀减速运动时间; V_2 —匀速度。

已知输送机输送位移 L 及输送时间 t 为定值, $\Delta t_1 \approx \Delta t_3$,由式(5)知:当 V_2 增加时, Δt_1 增加, Δt_2 减少, Δt_3 增加;当 V_2 减少时, Δt_1 减少, Δt_2 增加, Δt_3 减少。

当匀速输送时 $F^{(e)} = 0$ 。由式(4)得:

$$\begin{cases} \frac{d(\sum p_i)}{dt} = F^{(e)} > 0, t \in \Delta t_1 \\ \frac{d(\sum p_i)}{dt} = F^{(e)} = 0, t \in \Delta t_2 \\ \frac{d(\sum p_i)}{dt} = F^{(e)} < 0, t \in \Delta t_3 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)得:当 $t \in \Delta t_1$ 时, $F^{(e)} \geq 0$,输送机处于加速状态,其合外力方向与输送方向相同;当 $t \in \Delta t_3$, $F^{(e)} = 0$,输送机处于匀速状态,其合外力为零; $t \in \Delta t_3$, $F^{(e)} \leq 0$,输送机处于减速状态,说明其所受合外力方向与输送方向相反;升降式输送机质点系合外力 $F^{(e)}$ 恒不等于零,因此作用在升降机滚珠丝杠径向方向的动载荷不为零。

3 运动模型验证分析

3.1 升降式输送机模型的建立与参数设置

3.1.1 输送式升降机模型的建立

本文主要研究的是滚珠丝杠升降机在输送机启动和停止过程中所受到的径向冲击,以及对应的几种改进方案对滚珠丝杠升降机的保护作用的有效性,并简

单模拟升降输送机的输送过程,以确定其速度、加速度等数据参数。为减少不必要的运算量,本研究将滚珠丝杠简化为螺母丝杠模型,并省去链条的建模,只给定电解铜垛的运动方向、输送位移以及输送时间;在一定程度上简化液压缸模型,满足升降式输送机运动需求,符合其工作运动过程。ADAMS/View 采用交互式环境,将仿真计算,动画显示,优化设计,交互式建模等功能集成于一体^[12]。由于 ADAMS 软件对复杂模型的建模比较繁琐,本研究通过 Pro/Engineer 三维软件建立升降式输送机的简化模型后导入 ADAMS/View 软件中,升降式输送机的虚拟样机简化模如图 4 所示。

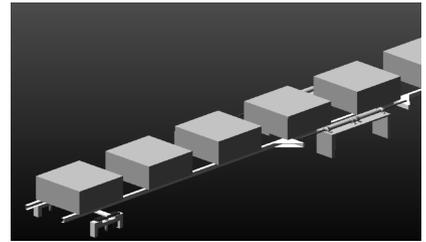


图 4 升降式输送机的简化模型

3.1.2 仿真参数设置

由于要模拟升降式输送机进行 75 s 的运动仿真,丝杠螺母上升位移 $l_1 = 200$ mm,下降位移 $l_2 = 200$ mm,电解铜垛输送位移 $L = 1\ 500$ mm,工作时间 $T = 15$ s,上升时间为 $t_1 = 7$ s,下降时间为 $t_2 = 7$ s,电解铜垛输送时间 $t_3 = 16$ s,且各个升降机是同步驱动。升降式输送机各个零件机构均设置为刚体,电解铜垛材料设置为均质 2.5 t,根据公式 $m = \rho V$,由模型体积推算其密度为 $8\ 545.0$ kg/m³,泊松比 0.324,根据电解铜与钢材的接触参数资料,设置其动摩擦系数为 0.15。除电解铜垛外其他零件模型均设置为材料库中钢材 Steel。

3.2 仿真结果分析

笔者对升降式输送机的工作过程进行仿真分析,分析输送机输送工作时的速度、加速度以及启动、制动过程中产生的惯性力的变化情况。升降式输送机输送过程产生的径向冲击与电解铜垛的加速度、速度以及动能有关,因此需要讨论输送过程中电解铜垛的运动参数,其运动参数如图(5~7)所示。

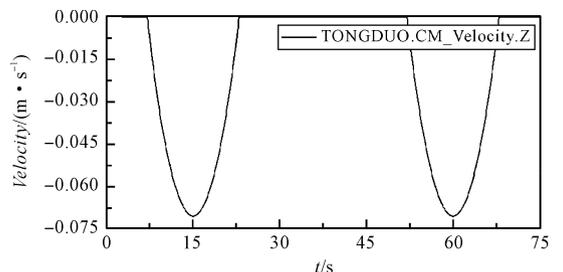


图 5 电解铜垛输送过程运动速度图

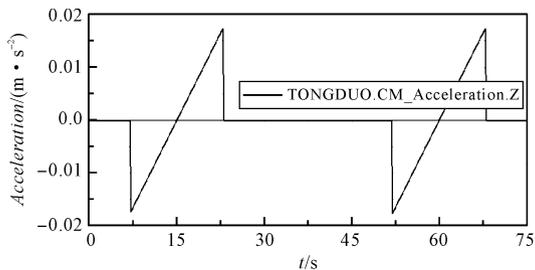


图 6 电解铜垛输送过程运动加速度图

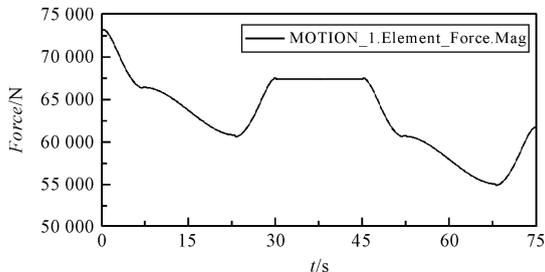


图 7 模型一滚珠丝杠受力情况

由图(5~7)可知:当升降输送机启动输送电解铜垛时,启动瞬间产生较大的惯性力对滚珠丝杠造成冲击,当输送过程进入平稳阶段时,惯性力减小至消失,滚珠丝杠受到的冲击力减小,在这个过程中滚珠丝杠受力成下降趋势;在升降输送机启动瞬间受到冲击力最大;在升降输送机输送机构启动和制动过程中产生加速度突变,在运输过程中加速度先减小后反向增大,对应的滚珠丝杠受到的径向载荷先增大后减小,相对于运输过程启动和制动时受到的径向载荷达到最大。很明显滚珠丝杠受径向载荷大小与输送过程的加速度大小有很大的线性关系。

4 减小径向载荷措施及仿真分析

滚珠丝杠在工作过程中不能承受过大的径向载荷,而升降输送机在输送过程中由于惯性力会产生较大的径向冲击,对滚珠丝杠造成损害。因此本研究设计两种结构改进方案对滚珠丝杠进行保护,提高其工作寿命。(1)建立模型二,增加了导向杆保护的滚珠丝杠升降机,导向杆设计在滚珠丝杠的两侧,分担其受到的部分径向冲击;(2)建立模型三,在输送机机架两侧增加了 4 个液压缸,在输送机输送电解铜垛的时候,顶住机架以分担输送机在启动和制动过程中产生的惯性力,同时保护滚珠丝杠,减少其

受到的径向冲击。通过 ADAMS 仿真分析进而确定改进方案的可行性,对比改进前后滚珠丝杠的受力。模型二滚珠丝杠受力情况仿真结果如图 8 所示。模型三滚珠丝杠受力情况仿真结果如图 9 所示。

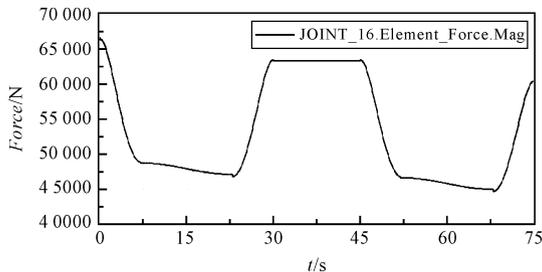


图 8 模型二滚珠丝杠受力情况

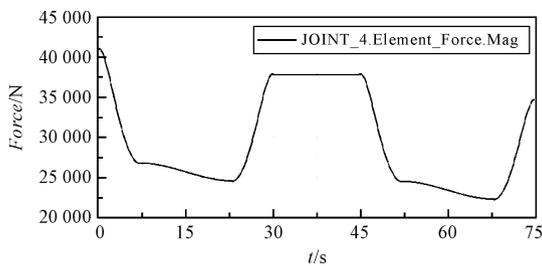


图 9 模型三滚珠丝杠受力情况

仿真得到在相同的工作环境下滚珠丝杠启动与制动时的受力最大值,3 种模型滚珠丝杠受力最值对比如表 1 所示。

表 1 3 种模型滚珠丝杠受力最值对比

模型	启动最大值/N	制动最大值/N
模型一	73 208	67 320
模型二	66 508	63 334
模型三	41 113	36 834

对比 3 个模型的启动时丝杠受到的冲击力,模型二比模型一丝杠受到的启动冲击力减少 9.2%,对比模型三与模型一丝杠受到的启动冲击力减少 43.8%。

综上所述,升降输送机在输送机启动、制动的过程中,会产生较大的惯性力,对滚珠丝杠造成径向冲击,降低其动作效率,减少工作寿命。本研究通过改进改进升降机的升降结构,并为机架增加固定装置,从而减少了滚珠丝杠受到的径向冲击,确保了升降输送机的工作效率和使用寿命。

(下转第 288 页)

本文引用格式:

郭一行,孙东明,秦野秋,等.升降输送机滚珠丝杠的动力学研究[J].机电工程,2019,36(3):267-270,288.

GUO Yi-hang, SUN Dong-ming, QIN Ye-qiu, et al. Dynamic analysis of ball screw in lifting conveyor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(3):267-270,288. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn