刮板输送机起动工况的动力学仿真

师建国，刘克铭，毛　君

（辽宁工程技术大学机械工程学院，辽宁阜新　123000）

摘要：构造刮板输送机的动力学模型及动力学微分方程。通过对刮板输送机的直接起动过程和可控起动过程的动力学仿真，研究不同工况下链条张力和速度的变化规律，通过对比二者的链条张力变化发现，可控起动工况链条张力的数值较直接起动工况可降低26.667%，采用可控起动方式有利于降低链条起动张力，提高链条的可靠性。

关键词：矿山机械；刮板输送机；起动；动力学；仿真

中图分类号：TD4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674-2850(2010)08-1720-5

Dynamics simulation on start operating performance of scraper conveyer

SHI Jianguo, LIU Keming, MAO Jun

(*School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning*　123000, *China*)

Abstract: The dynamics model and the dynamics differential equation of scraper conveyer were established in this paper. Through dynamics simulation on direct starting process and controllable starting process of scraper conveyer, the changing law of the tension and speed of the chain under different operating performance was studied. The corresponding result is that the tension of controllable starting process is reduced 26.667% compared with that of the full-voltage starting process. It is proved that the start tension of chain can be decreased and its reliability can be increased by adopting controllable starting.

Key words: mining machinery; scraper conveyer; starting; dynamics; simulation

0　引言

刮板输送机能否正常地顺利起动对井下设备的安全生产及综采设备生产效率的提高都有着决定性影响，分析起动方式对刮板输送机的链条张力的幅值及其分布规律的影响对减少断链故障、提高刮板输送机运行的安全性等有着十分重要的意义。为此，需要建立刮板输送机在起动工况下的动力学模型，对不同起动工况下链条的张力变化进行对比研究，从而为确定刮板输送机合理的起动控制过程奠定理论基础[1~2]。

1　刮板输送机动力学模型的建立

刮板输送机的平面布置图如图1所示，输送机的驱动方式为双电机驱动，1，4点为链条与链轮的啮入点；3，6点为链条与链轮的分离点；v为链条的运行速度（m/s）；X为位置坐标，$X_L=480$，$X_0=0$；而链条运动位移用y表示，方向与v相同。

在不考虑溜槽弹性及输送机线路弯曲的情况下，将输送机链条划分为有限个节点，并与驱动系统联系起来，构造出刮板输送机的动力有限元模型，如图2所示。动力方程为

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金（20060147001）

作者简介：师建国（1977－），男，讲师，主要研究方向：机械系统动力学与控制. E-mail：jianguo_shi@163.com

$$\begin{cases} J_{10}\ddot{\varphi}_{10} + k_{n+1}(\varphi_{10} - \varphi_1) + c_{n+1}(\dot{\varphi}_{10} - \dot{\varphi}_1) = M_{10(t)}, \\ J_1\ddot{\varphi}_1 + k_{n+1}(\varphi_1 - \varphi_{10}) + c_{n+1}(\dot{\varphi}_{10} - \dot{\varphi}_1) + (F_{1(t)} - F_{n(t)})R_1 = 0, \\ \dfrac{\mathrm{d}(m_2\dot{x}_2)}{\mathrm{d}t} = F_{1(t)} - F_{2(t)} - W_2, \\ \vdots \\ \dfrac{\mathrm{d}(m_j\dot{x}_j)}{\mathrm{d}t} = F_{(j-1)(t)} - F_{j(t)} - W_j, \\ \vdots \\ J_i\ddot{\varphi}_i + k_i(\varphi_i - \varphi_{i0}) + c_i(\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_{i0}) + (F_i(t) - F_{(k+1)(t)})R_i = 0, \\ J_{i0}\ddot{\varphi}_{i0} + k_i(\varphi_{i0} - \varphi_i) + c_i(\dot{\varphi}_{i0} - \dot{\varphi}_i) = M_{i0(t)}, \\ \vdots \\ \dfrac{\mathrm{d}(m_n\dot{x}_n)}{\mathrm{d}t} = F_{n-1(t)} - F_{n(t)} - W_n, \end{cases} \tag{1}$$

其中，$M_{10(t)}$，$M_{i0(t)}$ 分别为双端驱动装置的转矩（N·m）；k_{n+1}，c_{n+1} 分别为头部驱动装置的等效刚度系数和阻尼系数；k_i，c_i 分别为尾部驱动装置的折算刚度系数和阻尼系数；J_{10}，J_{i0} 分别为头部和尾部驱动装置的转动惯量；J_1，J_i，φ_1，φ_2，R_1，R_2 分别为头部、尾部装置的转动惯量、转角和节圆半径；W_j 为第 j 个质点运动时的阻力。

$$F_j = k_j(x_j - x_{j+1}) + c_i(\dot{x}_j - \dot{x}_{j+1})，当 j \neq i，n，1，k+1 时，$$

$$F_i = k_{i+1}(\varphi_i R_2 - x_{i+2}) + c_{i+1}(\dot{\varphi}_i R_2 - \dot{x}_{i+2}),$$

$$F_n = k_n(x_n - \varphi_1 R_1) + c_n(\dot{x}_n - \dot{\varphi}_n R_1),$$

$$F_1 = k_1(\varphi_1 R_1 - x_2) + c_1(\dot{\varphi}_1 R_1 - \dot{x}_2),$$

$$F_{k+1} = k_{k+1}(x_{k+1} - \varphi_i R_2) + c_{k+1}(\dot{x}_{k+1} - \dot{\varphi}_i R_2).$$

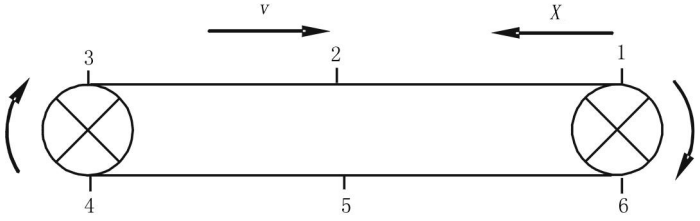


图 1 输送机平面布置图

Fig. 1 Plane disposal diagram of scraper conveyer

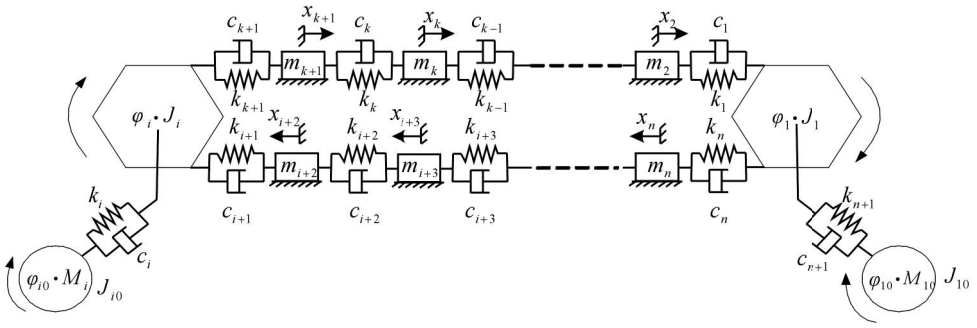


图 2 双端驱动刮板输送机动力学模型

Fig. 2 Dynamics model of double-driven scraper conveyer

2 刮板输送机的参数

图 1 所示刮板输送机长度 $L=240$ m；额定输送量 $Q=1\ 800$ t/h；刮板额定链速 $V_0=1.25$ m/s；输送机倾角 $\beta=0°$（或 $\pm5°$）；中部槽长度 $L_C=1.5$ m；中部槽宽度 $B=1.2$ m；中部槽上槽高度 $h_1=0.123$ m；中部槽允许转角[α] = $=1°$；输送机水平推进步距 $a=0.75$ m；传动装置效率 $\eta=0.87$；刮板链条每米长度重量；原煤松散密度 $\rho=980$ kg/m^3；中板上装煤高度 $H=0.430$ m；槽帮上装煤高度 $h=0.310$ m；电动机总功率 1 200 kW；减速器速比 $i=28$；电动机额定参数 $n_0=1\ 500$ r/min ；链轮节圆半径 $R_e=0.252$ m；齿数 $Z=9$. 驱动装置由电动机 + 减速器 + 链轮组成。采用以上参数可以对刮板输送机的起动过程进行动力学仿真[3]。

3 直接起动工况的动力学仿真

直接起动工况是采用电动机一次加全电压的起动过程，初始条件为

$$\begin{cases} \{\ddot{x}\}|_{t=0}=\{\dot{x}\}|_{t=0}=\{x\}|_{t=0}=0, \\ \{\omega\}=\{\omega_{(i)}\}\{\mathrm{sgn}\}(\dot{x}_i)\}, \\ \text{如果}\left|\sum F_i-\omega_{(i)}\right|\leqslant 0 \quad \text{且} \quad \dot{x}_{(i)}=0, \quad \text{则} \quad \ddot{x}_{(i)}=0. \end{cases} \tag{2}$$

运用 Matlab 软件对刮板输送机直接起动的动力学仿真[4]结果如图 3 ~ 图 7 所示。图 3 和图 4 分别为直接起动刮板输送机链条张力和速度变化过程的三维图，可以看出张力在 0 ~ 6.5 s 内变化较大，然后趋于平稳，而速度在 7 s 后也趋于平稳。

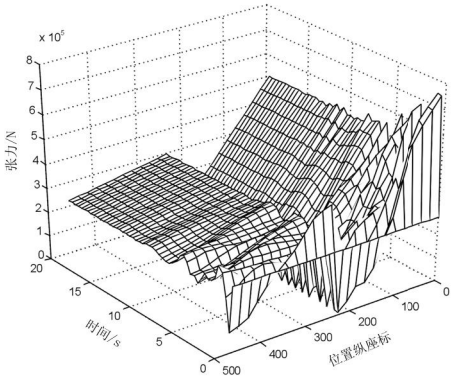


图 3 直接起动链条张力分布
Fig. 3 Strain distribution of chains for direct starting

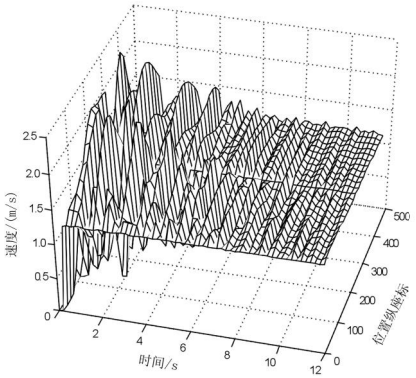


图 4 直接起动链条速度
Fig. 4 Speed of chains for direct starting

起动过程中头尾部驱动链轮两边链条张力变化过程如图 5 所示。从图 5 中看出，最大张力达到 7.6×10^5 N，较稳定运行最大张力 5.2×10^5 N 高出 46.1%. 位于输送机头部的链条与链轮相遇点处及尾部链轮与链条分离点处振荡较强烈，尾部处链条松边张力出现零值，发生这种变化的原因主要是在直接起动情况下松边初始预紧力不足，因此应采用具有链条张力自动调节的系统进行控制[3~4]。

图 6a 和图 6b 分别为有载侧头部驱动链轮处和中点处以及尾部驱动链轮和无载侧中点处链条速度的变化过程，从中可以看出，直接起动链条波动很大，速度在 0 ~ 2.6 m/s 间波动。但无载侧波动略小于有载侧，这是由于有载侧物料的

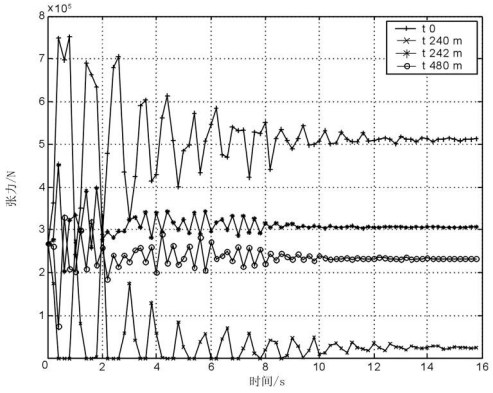


图 5 直接起动特殊点链条张力
Fig. 5 Strain of chains for direct starting at special point

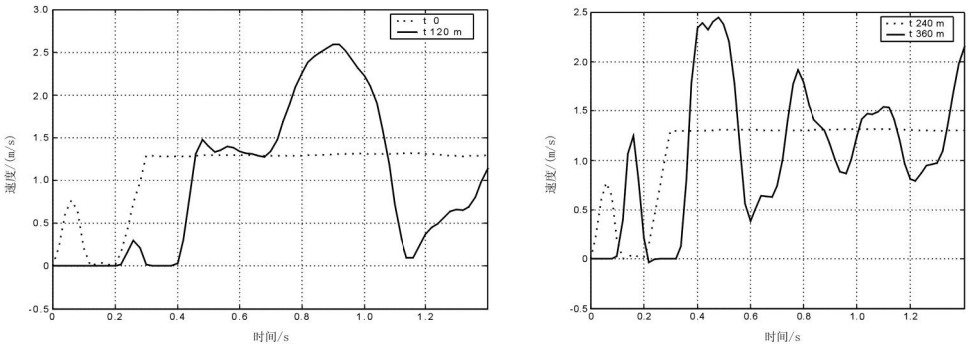


图 6 直接起动时链条速度

Fig. 6 Speed of chains for direct starting startup

a－“1”点和“2”点链条速度；b－“4”点和“5”点速度

a-Speed of chains at point “1” and “2”; b-Speed of chains at point “4” and “5”

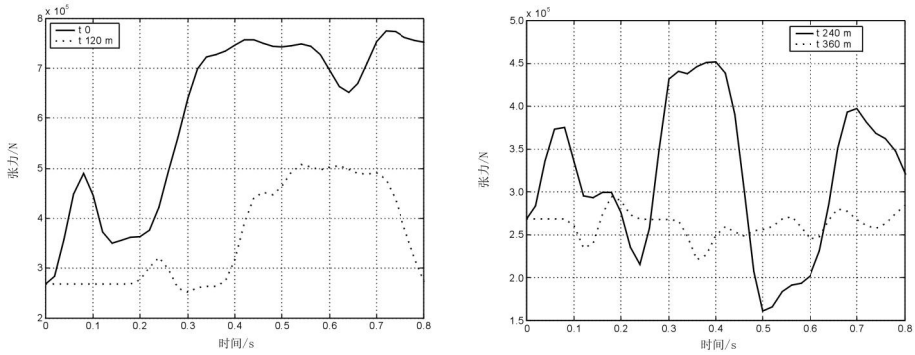


图 7 直接起动各点张力变化

Fig. 7 Strain variety for direct starting

a－“1”点和“2”点张力变化；b－“4”点和“5”点张力变化

a-Strain variety at point “1” and “2”; b-Strain variety at point “4” and “5”

振动和干摩擦。图 7a 和图 7b 表示相应点链条张力变化情况。通过对比分析可知，两组图的变化规律有相似之处，应力和速度都出现近似周期的波动。此时，有载侧处应力波的传递速度 C_1 =670 m/s，无载侧处应力波的传递速度 C_2 =1 495 m/s.

4 可控起动工况的动力仿真

可控制起动过程是指驱动装置的速度或驱动力等可按预定的方式施加。假定刮板输送机链轮的速度是可控制的，并按直线规律在 10 s 内达到稳定。即

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\beta}}_1 = \dot{\boldsymbol{\beta}}_2 = \omega_1 = \omega_2 = \dfrac{1}{10} \cdot 2\pi n_{e1} t, \\ \ddot{\boldsymbol{\beta}}_1 = \ddot{\boldsymbol{\beta}}_2 = \dfrac{1}{10} \cdot 2\pi n_{e1}. \end{cases} \tag{3}$$

其中，$\dot{\boldsymbol{\beta}}_1 = \dot{\boldsymbol{\beta}}_2$ 分别为头尾部驱动链轮的角速度 ω_1 和 ω_2；n_{e1} 为驱动链轮的额定转速，$n_{e1} = n_{e2} = \dfrac{V_0}{ZL_p}$；$Z$ 为链轮齿数；L_p 为链条节距。

这种起动工况的动力学模拟结果如图 8～图 11 所示，其中，图 11 为“2”点和“5”点的速度变化。由仿真结果可以看出：该起动方式较直接起动工况链条的张力幅值降低了 26.667%，最小张力点的张力大于 0，最大张力为 5.6×10^5 kN.

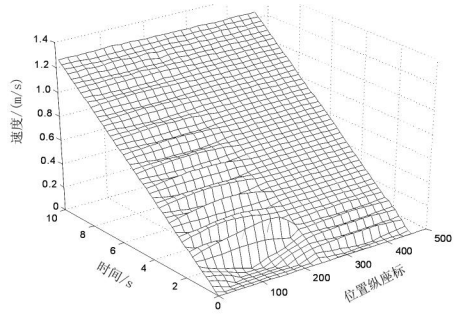


图 8 可控直线起动链条速度（$T=10$ s）
Fig. 8 Speed of chains for controllable linear starting ($T=10$ s)

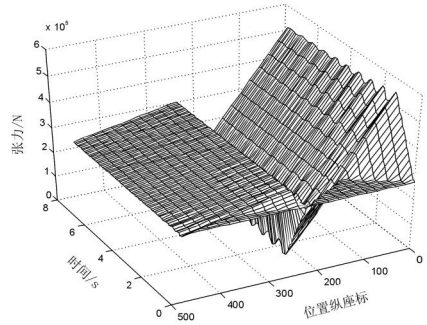


图 9 可控直线起动链条张力（$T=10$ s）
Fig. 9 Strain of chains for controllable linear starting ($T=10$ s)

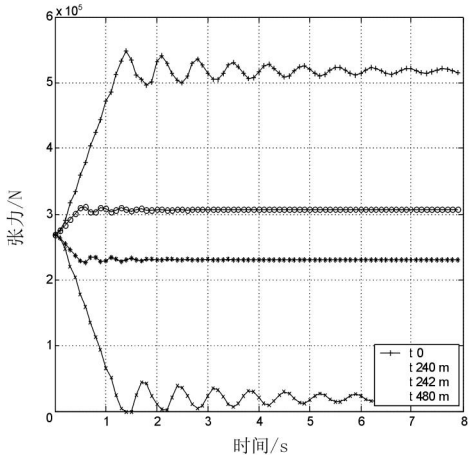


图 10 可控直线起动特殊点链条张力（$T=10$ s）
Fig. 10 Strain of chains for controllable linear starting at special point ($T=10$ s)

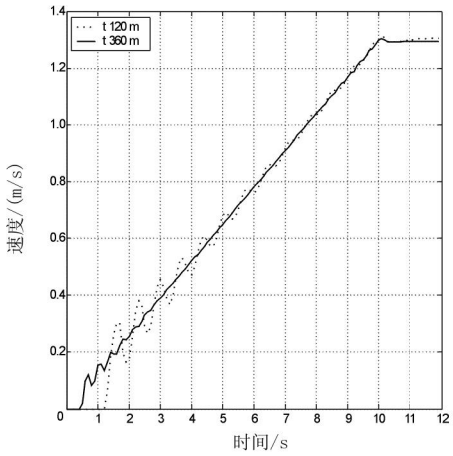


图 11 可控直线起动“2”，“5”点速度
Fig. 11 Speed at the point “2” and “5” for controllable linear starting

5 结论

给出了刮板输送机的动力学模型及动力微分方程，并利用 Matlab 进行了仿真，结果表明：可控起动工况张力和速度变化幅度较直接起动工况有明显降低，链条张力降幅达到 26.667%，刮板输送机尤其是重型机械应该采用可控起动方式减小链条起动张力，该方式有利于提高链条的可靠性。

[参考文献] (References)

[1] 毕建平. 刮板输送机链条可靠性分析方法研究[J]. 煤矿机电，2004（4）：20-22.
BI J P. Analytic methods of reliability of scraper conveyer chains[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2004 (4): 20-22. (in Chinese)

[2] 付晨. 刮板输送机设计计算[Z]. 张家口：张家口煤机厂，1997.
FU C. Design and calculations of scraper conveyor[Z]. Zhangjiakou: Zhangjiakou Coal Depot, 1997. (in Chinese)

[3] 毛君. 刮板输送机动力学行为分析与控制理论研究[D]. 阜新：辽宁工程技术大学，2006.
MAO J. Dynamic behavior analysis and control theory research of scraper conveyor[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006. (in Chinese)

[4] XI P Y, ZHANG H T, LIU J. Dynamics simulation of the belt conveyor possessing feedback loop during starting[J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2005, 11(1): 83-85.