

刮板输送机链传动系统动态仿真分析

王志高, 卢学军, 张颖越
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 为研究刮板输送机链传动系统的动力学特性, 基于有限元刚体法建立其数学模型, 并采用 Matlab/Simulink 软件包建立刮板输送机链传动系统的动力学仿真模型, 分析其在正常启动、意外卡链等工况下, 运行速度、加速度以及张力在链条上的分布规律, 并分析了施加预紧力对系统造成的影响, 可为综采设备的合理配置提供参考依据。

关键词: 刮板输送机; 链传动系统; Matlab/Simulink; 动态特性

中图分类号: TD528.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2013)04-0060-05

Dynamic Simulation Analysis of the Ring Chain Transmission System of the Armoured Face Conveyor

WANG Zhigao, LU Xuejun, ZHANG Yingyue

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to analyze the dynamic behavior of the ring chain transmission system of the armoured face conveyor, its simulation model was established based on the finite element rigid body method. The dynamic behavior of the ring chain transmission system was simulated with Matlab/Simulink Package. The distribution of velocity, acceleration and tension on the chain was analyzed under normal and chain stuck conditions. The preloading force of the chain transmission system was also discussed. The results can provide some useful reference for the matching of comprehensive mechanized coal mining equipment.

Key words: armoured face conveyor; ring chain transmission system; Matlab/Simulink; dynamic behavior

作为刮板输送机最为关键的组成部分, 链传动系统的稳定性及可靠性将直接影响整机的工作效率和输送能力。Wauge^[1]对刮板输送机驱动系统的动态性能进行了分析研究, 得出其动态特性在很大程度上对链传动系统有重要影响, 而且还决定着链条和整个输送系统的可靠性的结论; 刘克铭^[2]建立了基于有限元法模型, 对链环进行了动力学仿真, 得出了链条张力变化的关系式; 杨秀芳^[3]把刮板链作为弹性体进行受力分析, 建立刮板输送机的动态连续模型, 并通过软件编程对连续模型进行了仿真。

本文基于 Matlab/Simulink 软件包对某型中双链刮板输送机的链传动系统进行动态仿真, 分析其在满载正常启动、意外卡链等工况下的链条运行速度、加速度和张力的变化情况, 可为设计和优化链传动系统提供参考依据。

1 刮板输送机链传动系统离散化有限元模型

图 1 为某型中双链刮板输送机的三维模型。刮板输送机采用高强度圆环焊接链, 其工作原理是链条及刮板受驱动链轮带动, 在溜槽上推动物料前移。链条在整个工作过程中只能承受拉力而不能承受压力。

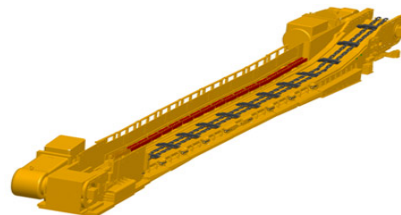


图 1 刮板输送机模型

Fig. 1 Model of armoured face conveyor

为建立刮板输送机链传动系统的动力学模型, 对其进行如下假设:

- (1) 把刮板与链条作为一个整体进行研究, 且让其等效质量均匀的沿中部槽分布;
- (2) 运行过程中所有影响因素(摩擦阻力等)在各分支上沿中部槽均匀分布;
- (3) 重点研究链条与刮板的纵向动力学特性, 忽略横向振动的影响;
- (4) 忽略链轮的多边形效应影响;
- (5) 把刮板输送机的链传动系统根据空间位置的不同划分成若干个短距离区域.

1.1 选择模型

在实际工作中, 刮板、链条和货载相互作用, 克服较大的摩擦阻力, 承受较大的静载荷和动载荷, 表现出复杂的力学特性, 具有典型的黏弹性性质, 其力学行为介于理想弹性体和理想黏性体之间, 适合建立具有黏弹性链传动系统离散化有限元模型^[4].

黏弹性模型包括 Maxwell 模型、Kelvin-Voigt 模型和 Burgers 模型. 其中在对 Kelvin-Voigt 模型施加应力载荷时, 弹性元件的伸长受到黏性元件的限制, 随着时间的增加, 黏性元件逐渐伸长, 这使得弹性元

件也得到拉伸, 直到弹性元件的弹性效应完全发挥出来并达到稳定状态. 理论分析和实践证明, Kelvin-Voigt 模型比较适合描述刮板输送机链传动系统. 图 2 为链条离散化后的 Kelvin-Voigt 模型, 该黏弹性模型的表达式为

$$F_j = k_j (x_j - x_{j+1}) + c_j (\dot{x}_j - \dot{x}_{j+1}) \quad (1)$$

式中: k_j 为第 j 个刮板链条单元的刚度系数; c_j 为第 j 个刮板链条单元的阻尼系数.

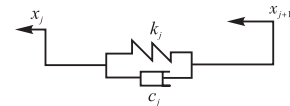


图 2 Kelvin-Voigt 模型
Fig. 2 Model of Kelvin-Voigt

1.2 建立模型

通过有限元刚体法将刮板链均匀的离散成若干个单元, 每个单元由一个集中质量块构成, 各相邻质量块间分别用一个 Kelvin-Voigt 模型连接起来, 刮板输送机的链传动系统是一个闭合的连续体, 上边链为负载链, 下边链为无载链, 图 3 为刮板输送机链传动系统离散化后的模型.

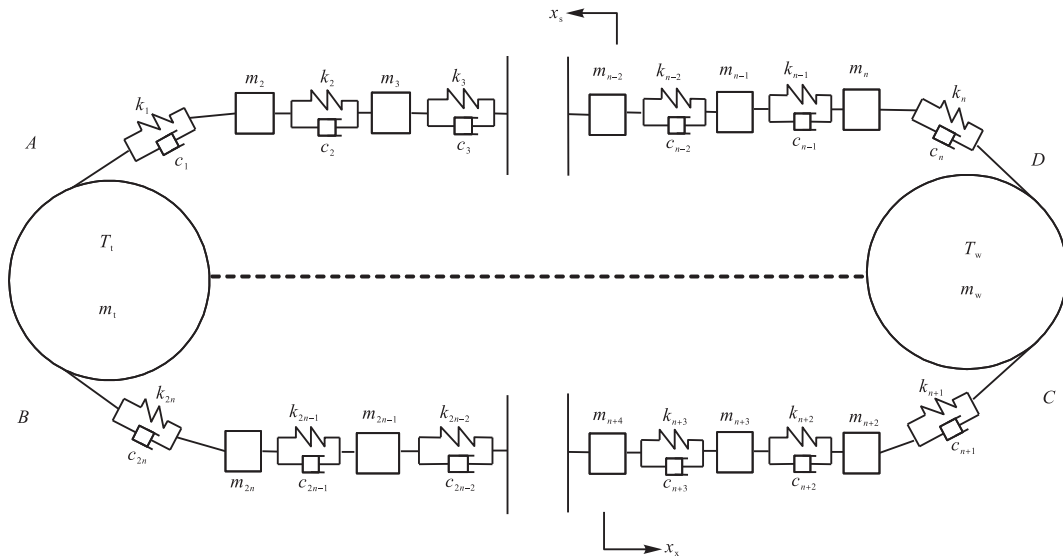


图 3 刮板输送机链传动系统的离散化有限元模型
Fig. 3 Finite element model of chains for armoured face conveyor

链传动系统的机头机尾单元做扭转运动, 同时还是电机驱动载荷的输入端, 故单元需要建立转动动态方程式; 其他链单元做平动, 需建立平动动态方程. 刮板输送机上边链、下边链单元通用动力学方程为

$$F_{j-1} - F_j - f_j = m_j \ddot{x}_j \quad (2)$$

式中: F_j 、 F_{j-1} 为第 j 、 $j-1$ 单元所受到的外力; f_j 为

第 j 单元的摩擦阻力; m_j 为第 j 单元的集中质量; \ddot{x}_j 为第 j 单元的加速度.

机头和机尾单元的运动形式为转动, 其动力学方程为

$$\begin{cases} T_t + (F_{2n} - F_1 - f_t)R_t = J_t \ddot{\theta}_t \\ T_w + (F_n - F_{n+1} - f_w)R_w = J_w \ddot{\theta}_{n+1} \end{cases} \quad (3)$$

式中： T_t 、 T_w 分别为机头、机尾单元所受到的驱动扭矩； R_t 、 R_w 分别为机头、机尾链轮的半径； J_t 、 J_w 分别为机头、机尾单元的转动惯量； $\ddot{\theta}_1$ 、 $\ddot{\theta}_{n+1}$ 分别为与机头、机尾啮合链条单元转动的角加速度； f_t 、 f_w 分别为机头、机尾对啮合链条单元的摩擦阻力； F_1 、 F_n 、

F_{n+1} 、 F_{2n} 为其相应单元所受到的外力。

本文将刮板输送机链传动系统划分为 $2n$ 个离散单元，根据式(1)、式(2)、式(3)得出式(4)所示刮板输送机链传动系统的动态方程。

$$\begin{cases} \frac{1}{2}m_1R_t\ddot{\theta}_1+(c_1+c_{2n})R_t\dot{\theta}_1-c_1\dot{x}_2-c_{2n}\dot{x}_{2n}+(k_1+k_{2n})R_t\theta_1-k_1x_2-k_{2n}x_{2n}=\frac{T_t}{R_t}-f_t \\ m_2\ddot{x}_2+(c_1+c_2)\dot{x}_2-c_1R_t\dot{\theta}_1-c_2\dot{x}_3+(k_1+k_2)x_2-k_1R_t\theta_1-k_2x_3=-f_2 \\ \dots \\ m_n\ddot{x}_n+(c_n+c_{n-1})\dot{x}_n-c_{n-1}\dot{x}_{n-1}-c_nR_w\dot{\theta}_{n+1}+(k_n+k_{n-1})x_n-k_{n-1}x_{n-1}-k_nR_w\theta_{n+1}=-f_n \\ \frac{1}{2}m_wR_w\ddot{\theta}_{n+1}+(c_{n+1}+c_n)R_w\dot{\theta}_{n+1}-c_{n+1}\dot{x}_{n+2}-c_n\dot{x}_n+(k_{n+1}+k_n)R_w\theta_{n+1}-k_{n+1}x_{n+2}-k_nx_n=\frac{T_w}{R_w}-f_w \\ m_{n+2}\ddot{x}_{n+2}+(c_{n+1}+c_{n+2})\dot{x}_{n+2}-c_{n+1}R_w\dot{\theta}_{n+1}-c_{n+2}\dot{x}_{n+3}+(k_{n+1}+k_{n+2})x_{n+2}-k_{n+1}R_w\theta_{n+1}-k_{n+2}x_{n+3}=-f_{n+2} \\ \dots \\ m_{2n}\ddot{x}_{2n}+(c_{2n-1}+c_{2n})\dot{x}_{2n}-c_{2n-1}\dot{x}_{2n-1}-c_{2n}R_t\dot{\theta}_1+(k_{2n-1}+k_{2n-2})x_{2n}-k_{2n-1}x_{2n-1}-k_{2n}R_t\theta_1=-f_{2n} \end{cases} \quad (4)$$

式中： m_1 、 m_2 、 m_n 、 m_w 、 m_{n+2} 、 m_{2n} 分别为各离散单元的集中质量； θ_1 、 θ_{n+1} 、 $\dot{\theta}_1$ 、 $\dot{\theta}_{n+1}$ 分别为与机头、机尾啮合链条单元转动的转角、角速度； x_2 、 x_{2n} 、 \dot{x}_2 、 \dot{x}_{2n} 、 \ddot{x}_2 、 \ddot{x}_{2n} 分别为各离散单元的位移、速度、加速度。

预紧效果不明显，容易发生松弛事故，过大则导致输送机无益功率的消耗量增加，降低传动效率。

2.3 刚度系数与阻尼系数的确定

在刮板输送机链传动系统的实际工作过程中，当后一个链的位移大于前一个链位移时，相邻链条单元不受相互作用，即两链单元分离，此时链环单元不表现出其黏弹性性质，即可以用式(7)来描述该过程^[5]。

将以上常微分方程转化为矩阵形式

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (5)$$

式中： M 为各个单元的质量(包含链条、刮板、物料等)组成的质量矩阵； C 为各个单元的阻尼组成的阻尼矩阵； K 为各个单元的刚度组成的刚度矩阵； F 为各个单元所受的外力组成的矩阵； X 、 \dot{X} 、 \ddot{X} 分别为各单元的位移矩阵、速度矩阵和加速度矩阵。

$$k = \begin{cases} 0 & (x_1 \leq x_2) \\ k & (x_1 > x_2) \end{cases} \quad (7)$$

在相邻链条未分离，即前一单元的位移大于后一单元的位移时，如果前一单元的速度小于后一单元的速度，根据黏性力的存在与否可分为两种模型：若黏性力不存在则为单向阻尼模型；若存在黏性力则为双向阻尼。如果前一单元的速度大于后一单元的速度，刮板输送机模型存在黏性力与弹性力。在刮板输送机正常工作时，负载链上的货载与无载链上带回的残余货载均有可能与刮板链发生相对运动，故本文采用双向阻尼模型进行仿真分析，用式(8)来描述其黏性性质。

2 模型中关键参数的确定

2.1 摩擦力的计算

在模拟动态仿真时，其摩擦力是随时间变化的，其变化规律可用式(6)描述。

$$f = \begin{cases} F_{i-1} - F_i & (v \approx 0, F_{i-1} - F_i < f_s) \\ f_s & (v \approx 0, F_{i-1} - F_i = f_s) \\ f_d & (v > 0, x > 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$c = \begin{cases} 0 & (x_1 \leq x_2) \\ c & (x_1 > x_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中： F_i 为该单元与前一个单元接触点处的张力； F_{i-1} 为该单元与后一个单元接触点处的张力； f_s 为单元静摩擦力； f_d 为单元动摩擦力。

2.2 预紧力的施加

为了消除链条的松弛现象，在刮板输送机启动之前预先施加一个预紧力，链条在预紧力的作用下产生一个伸长量。对链条施加的预紧力要适当，过小时

3 典型工况的仿真及分析

3.1 仿真模型建立

为了方便研究，统一了输出量的单位属性，即将机头机尾单元的输出也 \ddot{x}_{2n} 转化为线位移和线速度： $x_t = R_t\theta_t$ ， $x_w = R_w\theta_w$ ， $\dot{x}_t = R_t\dot{\theta}_t$ ， $\dot{x}_w = R_w\dot{\theta}_w$ 。选取系

统状态变量为 $V_1 = x_1, V_2 = \dot{x}_1, V_3 = x_2, V_4 = \dot{x}_2, \dots$, 则有状态方程如下^[6]:

$$\begin{cases} \dot{V} = AV + BU \\ y = CV + DU \end{cases} \quad (9)$$

采用 Matlab/Simulink 建立链传动系统模型进行动态仿真, 仿真模型的数据传递流程见图 4.

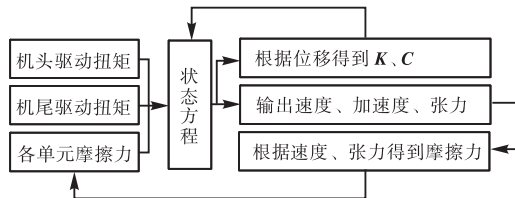
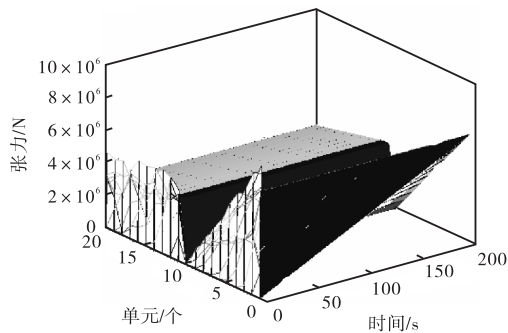


图 4 链传动系统动态仿真模型数据传递流程

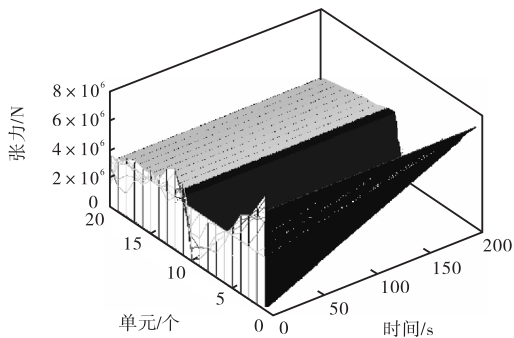
Fig. 4 Data transfer flow of the simulation model of the ring chain transmission system

3.2 满载工况下启动

在满载的工况下进行仿真, 有、无预紧力两种情况下各链段的三维张力分布见图 5.



(a) 无预紧力



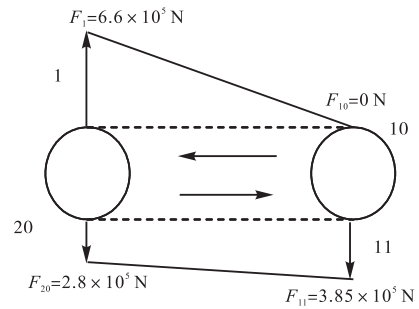
(b) 有预紧力

图 5 满载工况下启动时链传动系统的三维张力分布

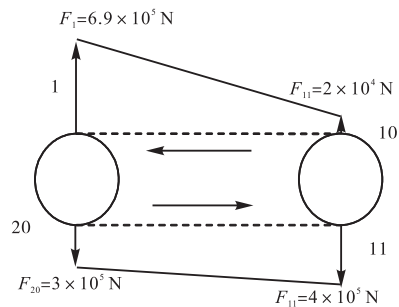
Fig. 5 Three-dimensional tension of the ring chain transmission system starting at full load condition

在前 5 s 系统波动较大的时间段内, 无预紧时系统的波动比有预紧时系统的波动大. 根据图 5 可以得

到, 相对稳定后 (200 s) 的系统张力分布图如图 6 所示.



(a) 无预紧力



(b) 有预紧力

图 6 满载工况下启动时链传动系统的二维张力分布

Fig. 6 Two-dimensional tension of the ring chain transmission system starting at full load condition

由图 6 可以看出: 不管是否有预紧, 满载工况下启动时各单元的张力大小均从第 1 单元到第 10 单元依次递减, 从第 11 单元到第 20 单元也依次递减; 第 10 单元 (图 3 中 D 点) 在无预紧满载启动时张力近似为 0, 此处链段松弛, 易发生链条堆积而引发事故; 施加预紧后, 第 10 单元处的张力为 $2 \times 10^4 \text{ N}$, 避免了堆链事故的发生.

由于链条预紧力过大, 会导致输送机无益功率的消耗量过大, 降低传动效率, 所以施加预紧力要在满足其要求的同时, 尽可能小.

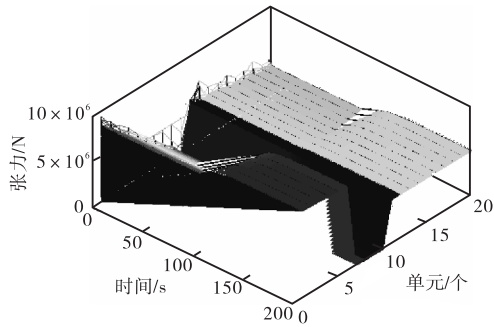
3.3 意外卡链

假设在满载运行稳定后, 突然有一大质量块落入第 7 单元范围内, 即第 7 单元集中质量突然增加, 该单元处阻力也同时突然增大. 卡链工况下链传动系统的张力分布见图 7.

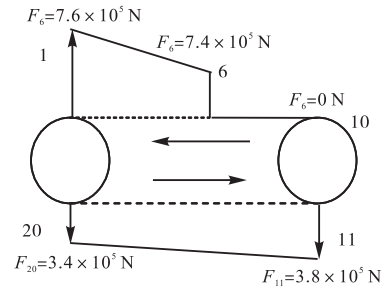
由图 7 可以看出, 发生卡链 35 s 后各张力发生变化, 卡链单元前的区域内张力增加, 第 1 单元处的张力由 $6.5 \times 10^5 \text{ N}$ 增加到 $7.6 \times 10^5 \text{ N}$; 第 6 单元处的张力由 $3.1 \times 10^5 \text{ N}$ 增加到 $7.4 \times 10^5 \text{ N}$; 单元 1 至单元 6 之间易发生链环断裂. 从卡链单元到啮出

机尾链轮单元处区域(图 3 中 D 点)内的张力近似为

0, 此处链条发生松弛. 下链单元张力也略有增加.



(a) 三维张力分布



(b) 二维张力分布

图 7 卡链工况下链传动系统的张力分布

Fig. 7 Tension of the locked ring chain transmission system

4 结 语

本文基于有限元刚体法建立刮板输送机链传动系统动力学模型, 对摩擦力、刚度系数和阻尼系数等关键参数的动力学模型进行了讨论和计算.

采用 Matlab/Simulink 对刮板输送机在典型工况下的动态特性进行仿真. 结果表明, 对链传动系统施加预紧力可以减少系统在运行过程中的波动, 同时减少发生堆链的几率; 但施加的预紧力不宜过大, 要保证最小张力区域内不为 0, 最大张力区域内张力尽可能的小. 在卡链工况下, 发生卡链单元之前的区域内张力大幅增加, 容易发生链环断裂, 而发生卡链单元及之后区域内张力近似为 0, 链环过于松弛, 容易发生堆链事故.

参考文献:

- [1] Wauge D H. Modeling of an Armoured Face Conveyor[D]. Queensland: The University of Queensland, 2002.
- [2] 刘克铭. 刮板输送机的力学研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2005.
- [3] 杨秀芳. 刮板输送机的动态研究与仿真[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- [4] 张国柱, 方佳雨. 综采输送机[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1986: 21-25, 34-36.
- [5] 孙阳辉. 工作面输送机传动特性与参数匹配研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [6] 何柏岩, 孙阳辉, 聂锐, 等. 矿用刮板输送机圆环链传动系统动力学行为研究[J]. 机械学报, 2012, 48(17): 50-56.

责任编辑: 常涛