

机电与自动化

## 大功率刮板输送机软启动过程仿真研究

张庚云 刘 伟 王 腾

(中国煤炭科工集团太原研究院, 山西 太原 030006)

**摘 要:** 针对刮板输送机存在启动困难、多机驱动功率不均衡等突出问题, 建立了刮板输送机传动系统的动力学模型, 并在 MATLAB/Simulink 软件平台上构建其仿真模型, 以  $2 \times 855$  kW 刮板输送机为例, 对刮板输送机的软启动过程进行数值仿真, 分析了耦合器充液流量、电动机额定转速、链轮半径和链条阻尼对刮板输送机软启动过程的影响。结果表明: 合理的充液流量可以充分利用电动机的峰值力矩, 提高耦合器的启动力矩; 电动机额定转速和链轮半径差异对机头、机尾驱动电动机的功率分配不均有较大影响; 链条阻尼决定了刮板输送机上链链速震荡衰减的快慢。

**关键词:** 刮板输送机; 阀控型液力耦合器; 软启动; 数值仿真

中图分类号: TD529

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2013)04-0071-04

### Study on Simulation on Soft Start Process of Mine High Power Scraper Conveyor

ZHANG Geng-yun, LIU Wei, WANG Teng

(Taiyuan Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** According to the starting difficulty, imbalance of multi driving power and other major problems existed in the scraper conveyor, a kinetics model on the driving system of the scraper conveyor was established and a simulation model was established based on the MATLAB/Simulink platform. Taking  $2 \times 855$  kW scraper conveyor as an example, a numerical simulation was conducted on the soft start process of scraper conveyor. The paper had an analysis on the flow of the filled liquid in the coupling, rated speed of the eclectic motor, radius of the sprocket and chain damping affected to the soft start of scraper conveyor. The results showed that the rational filled liquid flow could fully utilize the peak torque of the electric motor and improve the start torque of coupling. The rated speed of the electric motor and the sprocket radius difference would have high influences to the non-uniformity of the power distribution for the driving motors at the head and tail of the conveyor. The chain damping would determine the damped oscillation fast-slow of the chain speed in the scraper conveyor.

**Key words:** scraper conveyor; valve controlled type hydraulic coupling; soft start; numerical simulation

## 0 引 言

刮板输送机是长壁采煤工作面的关键设备, 随着煤炭开采向集约化、大型化发展, 刮板输送机的装机功率越来越大。目前, 国外综采最大工作面使用的刮板输送机运量已达  $6\,000$  t/h, 装机功率  $3 \times 1\,600$  kW, 运距  $450$  m; 国内自主研发的刮板输送机运量已达  $3\,500$  t/h, 装机功率  $3 \times 700$  kW, 运距  $300$  m<sup>[1]</sup>。刮板输送机的驱动方式已由电动机 + 限矩型耦合器 + 减速器、双速电动机 + 减速器直接驱动的

硬启动方式, 发展为电动机 + 阀控型耦合器 + 减速器、电动机 + CST 减速器、变频电动机 + 减速器等软启动方式。目前, 我国的软启动装置仍完全依赖进口, 传动系统一直是影响刮板输送机可靠运行的薄弱环节, 其存在的突出问题有: ①启动困难。在满载工况下或停机一段时间后, 启动困难, 启动负荷大, 形成启动冲击负载, 易使链条、齿轮等传动元件发生断裂和早期失效; 启动电流大, 对电网的冲击大; 启动电流持续时间长, 极易烧毁电动机。②多机驱动功率不平衡。多机驱动时, 由于电动机额定参数差

收稿日期: 2012-11-02; 责任编辑: 赵 瑞

基金项目: 山西省科技攻关资助项目(20090321006); 太原市科技明星专项资助项目(09121017)

作者简介: 张庚云(1982—), 男, 山西运城人, 助理研究员, 硕士。Tel: 0351-7685604, E-mail: zhanggengyun@163.com

引用格式: 张庚云, 刘 伟, 王 腾. 大功率刮板输送机软启动过程仿真研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(4): 71-74.

异、链条节距变化、输送机上负载分布变动和链条张力变化,存在严重的电动机功率不平衡问题,不能充分发挥配置功率的作用。2台电动机总输入功率远低于输送机的配置功率,机头、机尾电动机存在频繁超载、周期性过载现象;在空载运行时,机头、机尾电动机功率呈现交替变化的现象。对于重型刮板输送机,这种负载不均问题会更加突出。③无过载保护或过载保护装置在刮卡制动工况下动作不灵敏、不可靠,易发生断链、断齿等恶性事故<sup>[2-4]</sup>。针对以上问题,笔者建立了以三相异步电动机串阀控型液力偶合器为驱动方式的刮板输送机动力学模型,利用MATLAB/Simulink软件平台构建了刮板输送机的仿真模型,并以JOY公司的 $2 \times 855$  kW刮板输送机为例,对刮板输送机的启动过程进行数值仿真模拟,研究不同参数对刮板输送机软启动过程的影响。

## 1 刮板输送机传动系统动力学模型建立

阀控型液力偶合器是一种通过电液控制阀调节充液量的偶合器,它以清水为工作介质,安装在刮板输送机的驱动部,位于电动机和减速器之间,其工作原理是:当电动机启动后,打开充液阀,关闭排液阀,偶合器开始充液,并带动刮板输送机缓慢启动;在刮板输送机启动达到满速后,压力开关响应,关闭充液阀,停止充液,进入正常工作循环,并通过一定的控制策略,实现刮板输送机的软启动和功率均衡<sup>[5]</sup>。

刮板输送机传动系统由三相异步电动机、阀控型液力偶合器、减速器和刮板输送机等组成。其中,电动机、偶合器、减速器均可作为集中参数模型处理,而封闭链条作为连续体,存在不同的分析方法。封闭链条作为连续体,可以建立连续的波动方程,但由于是无限参数模型,不利于系统特征分析及仿真模拟。笔者采用有限段建模方法,对减速器、链条进行离散处理,简化后的动力学模型如图1所示。

## 2 刮板输送机传动系统数学模型建立

### 2.1 传动系统动力学模型

由动力学模型转化为数学模型通常采用隔离分析法和能量法(拉格朗日方法),2种方法结果没有区别。在此,笔者采用隔离分析法。现在分别建立三相异步电动机模型、电动机转子-偶合器泵轮动力学模型、阀控型液力偶合器模型、刮板输送机链传动系统模型,并对减速器进行简化处理,将其惯量简

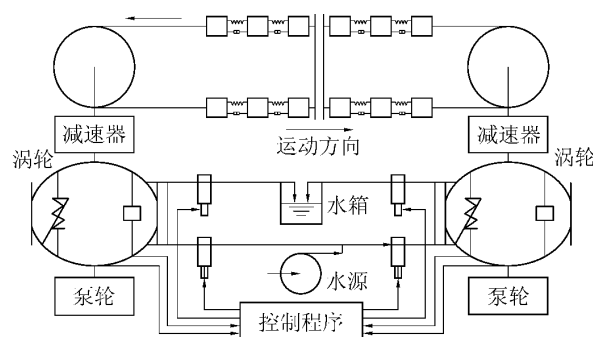


图1 刮板输送机传动系统动力学模型  
化到链轮轴上,对其进行隔离分析,再组装成完整的刮板输送机传动系统动力学模型。

### 2.2 三相异步电动机模型

在工程应用中,为了简化计算,通常采用一条直线代表电动机的机械特性<sup>[2]</sup>,电动机的机械特性可表示为 $T_d = kv_d + d$ ,其中 $k = T_e / (v_e - v_0)$ , $d = -T_e v_0 / (v_e - v_0)$ ,则

$$T_d = T_e (v_d - v_0) / (v_e - v_0) \quad (1)$$

式中: $T_d$ 为电动机实际输出力矩; $T_e$ 为电动机额定输出力矩; $v_d$ 为电动机实际输出转速; $v_e$ 为电动机额定输出转速; $v_0$ 为电动机同步输出转速。

### 2.3 电动机转子-偶合器泵轮动力学简化模型

电动机转子-偶合器泵轮动力学简化模型如图2所示。

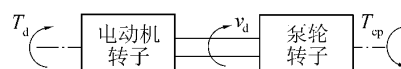


图2 电动机转子-偶合器泵轮动力学简化模型

由此建立电动机转子-偶合器泵轮的二阶系统模型方程为 $Ja_d = T_d - T_{cp}$ ,将式(1)代入此方程得

$$Ja_d - T_e (v_d - v_0) / (v_e - v_0) = -T_{cp} \quad (2)$$

式中: $J$ 为电动机转子的转动惯量; $a_d$ 为电动机实际输出加速度; $T_{cp}$ 为偶合器的传递力矩。

### 2.4 阀控型液力偶合器模型

文献[5]详细分析了阀控型液力偶合器的充液量、泵轮转速与偶合器传递力矩之间的关系,得出当偶合器部分充液时,偶合器不存在特性跌落的结论。因为偶合器的外特性曲线具有在低速阶段传递力矩变化平缓,而在高速阶段,传递力矩随着泵轮涡轮转速比的增大呈现迅速减小的特点。根据这些特点,可以利用sigmoid函数构造出一个与偶合器外特性曲线相似的函数,利用这个函数可以简化偶合器的建模过程。当偶合器部分充液,偶合器的特性方程可

表示为<sup>[5]</sup>

$$T_{cp} = \mu T_e \frac{\rho}{\rho_0} \frac{e^{-\delta(j-1)} - e^{\delta(j-1)}}{e^{-\delta(j-1)} + e^{\delta(j-1)}} \left( \frac{v_d}{v_{cp}} \right)^2 \left( j = \frac{v_w}{v_d} = i \frac{v}{v_d} \right)$$

式中:  $\mu$ 、 $\delta$  为常数, 分别为 3 和 8.67;  $\rho$  为充液量;  $\rho_0$  为设计充液量;  $v_{cp}$  为偶合器设计泵轮转速;  $i$  为减速器的传动比;  $v_w$  为涡轮的输出转速;  $v$  为减速器输出轴的转速(即链轮角速度)。

## 2.5 刮板输送机链传动系统模型<sup>[6]</sup>

由于刮板输送机的链条是由机头机尾链轮驱动的, 在中部槽上移动, 带动负载工作, 链条只能承受拉力, 而不能承受压力, 因此刮板输送机安装后, 运转前都要进行预紧, 保证运转时最小张力点不出现松弛。在这个条件下, 链条可以认为是线性的。链条的弹性振动可用波动方程描述, 但波动方程在动力学分析和仿真使用中均不方便, 因此笔者采用有限段单元法。

在建立刮板输送机动力学方程时可作以下假设: ①不考虑输送机的水平弯曲, 且底板平坦; ②输送机上链煤的质量沿长度均匀分布; ③将涡轮、减速器、链轮的等效转动惯量折算到链轮轴上。刮板输送机有限元动力模型的微分方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_z$$

式中:  $M$  为由各单元质量组成的质量矩阵;  $C$  为

各单元阻尼组成的阻尼矩阵;  $K$  为由各单元刚度组成的刚度矩阵;  $F_z$  为各单元所受外力组成的列阵;  $x$ 、 $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$  分别为模型的位移列阵、速度列阵与加速度列阵。

## 3 MATLAB/Simulink 数值仿真分析

建立系统的数学模型后, 利用 MATLAB 中 Simulink 模块库可直接根据系统的数学模型创建仿真模型。笔者所建立的刮板输送机双机驱动仿真模型比较庞大, 模型中信息的主要流向不容易辨认, 因此, 通过状态方程建立系统中各元件的仿真模型, 创建子系统, 再根据状态方程中各变量间的关系连接各子系统得到仿真模型。

1) 不同充液流量对启动过程的影响。刮板输送机在工作中会出现工作面片帮、刮板链刮卡、落煤量过大、过载启动等情况, 需要较高的启动转矩。为了能够获得较高的启动转矩, 应当选择合理的偶合器充液量。合理的充液量是指液力偶合器与电动机匹配时, 能使偶合器的静态启动转矩尽可能接近而又不超过电动机的峰值力矩时的充液量。充液流量  $Q$  则反映充液速度的快慢, 在保证充液量相同的情况下, 观察不同充液流量下的刮板输送机电动机输出力矩和链条速度, 如图 3 所示。

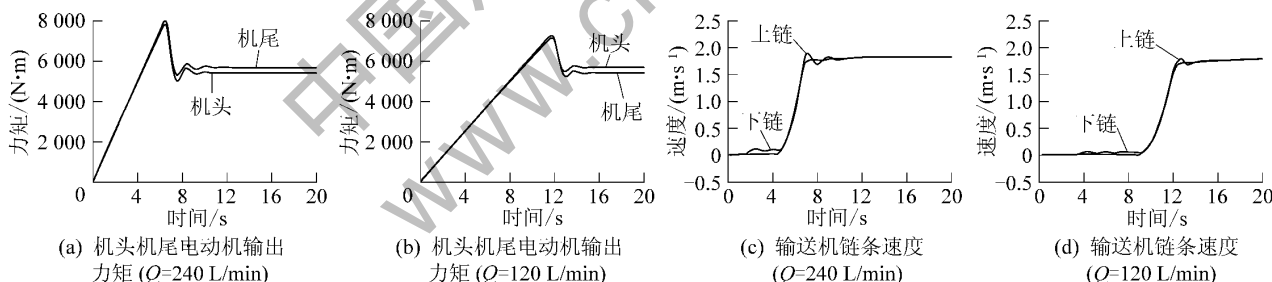
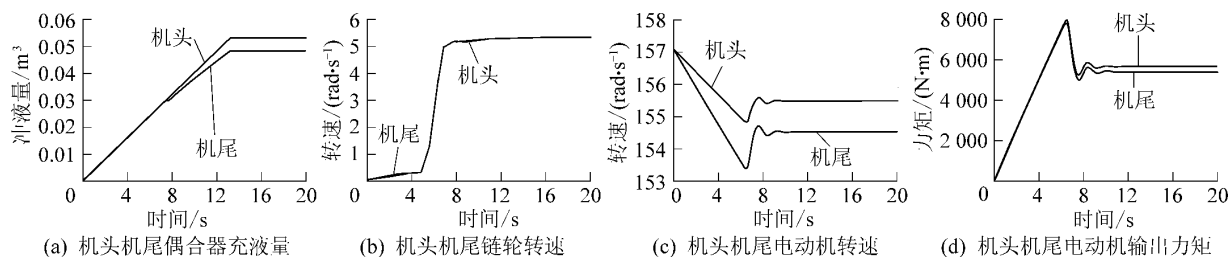


图3 不同充液流量下刮板输送机电动机力矩和链条速度

通过比较 2 种不同充液流量 (240 和 120 L/min) 下的启动过程, 可以看出, 在 240、120 L/min 充液流量下, 启动过程中的力矩峰值分别为 7 800 和 7 200 N·m。增大充液流量可以提高偶合器的启动转矩; 减小偶合器的充液流量, 不但偶合器的启动转矩会降低, 而且会使输送机启动前链条的蠕动时间延长, 导致偶合器发热。因此, 实际使用过程中, 应当在电动机与偶合器匹配的前提下, 选择合适的充液流量和充液量。

## 2) 电动机额定参数对启动过程的影响(链轮半

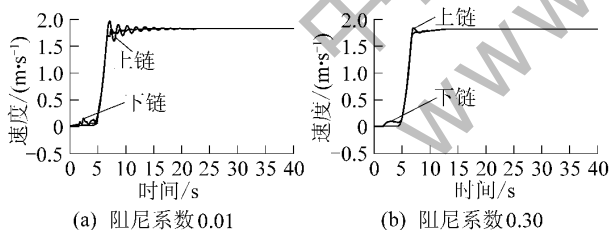
径相同)。带式输送机机头、机尾电动机额定转速分别为 1 485 和 1 475 r/min。机头电动机的额定转速比机尾电动机略高, 因此, 充液阶段和运行阶段, 总是机头偶合器过载, 机尾偶合器欠载。根据控制策略要求, 机头偶合器的充液速度应比机尾偶合器的充液速度稍慢, 以便使过载一侧的负载向欠载一侧转移, 且过载一侧的偶合器总是不满, 而欠载一侧的偶合器始终是充满的, 如图 4a 所示。机头、机尾链轮半径相同, 因此, 机头、机尾链轮转速相同, 如图 4b 所示。

图4 电动机额定转速对启动过程的影响( $Q = 240 \text{ L/min}$ )

从图4c和图4d可以看出,机头电动机转速和力矩都比机尾电动机略高,说明机头过载,机尾欠载。由文献[2]可知,机头、机尾电动机的功率差与两电动机额定转速差成正比,而与刮板输送机的总负载及上链、下链负载比例关系无关。因此,为避免由于电动机特性差异引起功率不均,导致电动机过载、闷车,甚至烧毁,应调节机头机尾耦合器的充液量,使两电动机的功率差控制在合理范围内。

3) 链轮半径对启动过程的影响(电动机额定参数相同)。机头机尾链轮半径不同,影响两电动机功率分配不均,功率分配关系与刮板输送机的总负载有关,且功率呈周期性变化,变化周期为链条沿输送机循环一周的时间<sup>[2-3]</sup>。仿真结果与图4a、图4c、图4d类似,不再赘述。

4) 链条阻尼对启动过程的影响。由图5可以看出,链条、煤与中部槽之间的黏性阻尼系数决定了刮板输送机上链链条速度震荡衰减的快慢。

图5 不同链条阻尼下刮板输送机链条速度( $Q = 240 \text{ L/min}$ )

## 4 结 论

1) 建立了以三相异步电动机串阀控型液力耦合器为驱动装置的刮板输送机传动系统数学模型,并在MATLAB/Simulink软件平台上搭建了仿真模型,可直接用于刮板输送机的动力学分析。

2) 为了充分利用电动机转子的惯性,提高耦合器的启动力矩,应选择合适的充液流量。充液流量过大将导致耦合器启动冲击力矩过大,充液流量过小,则耦合器启动力矩下降,输送机启动前蠕动时间

过长,耦合器很快发热。

3) 电动机额定转速和链轮半径差异对机头和机尾电动机的功率分配不均有较大影响,为了使负载从过载的一侧向欠载的一侧转移,应当减少过载一侧耦合器充液量,增加欠载一侧耦合器的充液量。

4) 链条的阻尼系数决定输送机上链链条速度震荡衰减的快慢。

5) 能够为刮板输送机的软启动控制策略研究及阀控型液力耦合器控制器的设计提供参考依据。

### 参考文献:

- [1] 张庚云,刘伟. CST软启动技术在大功率刮板输送机上的应用[J]. 煤矿机械, 2012, 33(3): 208-210.
- [2] 王腾. 刮板输送机电动机负载分配问题分析[J]. 煤炭科学技术, 1998, 26(8): 47-50.
- [3] 王腾,张红顺,张志珍,等. T型传动电动机功率分配浅析及选型计算[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(9): 45-47.
- [4] 毛君,师建国,张东升,等. 重型刮板输送机动力建模与仿真[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 103-106.
- [5] 王腾. 阀控充液型液力耦合器外特性建模及其线性化[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(1): 99-103.
- [6] 王腾,刘伟,张庚云. 基于阀控型液力耦合器的刮板输送机驱动控制系统研究[R]. 太原: 中国煤炭科工集团太原研究院, 2011: 12-25.
- [7] 王永生,陈华清,敖晨阳,等. 舰船液力耦合器数学建模新方法[J]. 海军工程大学学报, 2012, 14(6): 40-45.
- [8] David H Wauge. Modeling of an Armored Face Conveyor [D]. Queensland: The University of Queensland, 2002.
- [9] 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: 59-68.
- [10] 宋伟刚,柳洪义. 带式输送机动力学及其计算机仿真的研究[J]. 机械工程学, 2003, 39(9): 133-138.
- [11] 张玉献. 使用液力耦合器应注意的几个问题[J]. 煤炭技术, 2005, 24(12): 17-18.
- [12] 毛君,赵金元. 刮板输送机的启动动力特性与软启动技术[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(2): 38-42.
- [13] 郭永存. 多机驱动电动机功率均衡的研究[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(4): 60-62.