

机电与自动化

刮板输送机首尾电动机功率平衡控制研究

毛君 曹昊 谢苗

(辽宁工程技术大学 机械工程学院 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对刮板输送机运行过程中首尾双机功率不平衡问题,采用变频调速方法进行电动机的转矩控制,考虑影响刮板输送机电动机功率平衡的因素,依据链条最小张力法确定负载转矩的比值,进而根据负载转矩调节电动机转速,实现电动机的功率平衡。利用 AMESim 建立仿真模型,设定合理的仿真参数,对控制系统进行仿真,分析在电动机负载波动条件下控制系统的控制效果,验证控制系统的合理性,并实现功率平衡控制。

关键词: 刮板输送机; 功率平衡; 变频驱动; 直接转矩控制

中图分类号: TD421; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)02-0130-06

Study on power balance control of head and tail electric motors applied to scraper conveyor

Mao Jun, Cao Hao, Xie Miao

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

Abstract: According to the power unbalance problems of head and tail electric motors during operation process of scraper conveyor, a frequency conversion speed regulation method was applied to the torque control of electric motor. In consideration of factors affected to power balance of electric motors applied to scraper conveyor, according to the minimum tension method applied to set up load torque ratio, based on rotary speed of electric motor regulated with load torque, the power balance of electric motors was realized. The AMESim was applied to establish the simulation model and to set up rational simulation parameters. The simulation was conducted on the control system, the control effect of system under the condition of load fluctuation was analyzed, the rationality of control system was verified and the power balance control was realized.

Key words: scraper conveyor; power balance; frequency conversion driving; direct torque control

0 引言

随着刮板输送机装机功率的增大及变频调速技术的发展,刮板输送机的电动机功率控制逐渐成为热点。国外学者对该方面的研究较早, Sikora W^[1] 研究和分析刮板输送机的驱动系统负荷是否均匀,给出了实现驱动装置的功率平衡条件。Dolipski M^[2] 分析了驱动系统中包含有液力联轴器的刮板输送机的启动动力学特性。国内对于电动机功率平衡的问题研究起步较晚,且集中于大型带式输送机的

研究,着重于启动过程中的功率平衡控制器的设计方面。文献[3]利用参数预算和模糊控制等方法,通过预算电动机电流实现多机功率平衡。文献[4]分析了影响带式输送机多点驱动功率平衡的因素,提出了功率平衡的措施。文献[5]提出按转矩进行负荷分配,基于转矩跟随的功率平衡控制原理。文献[6]设计了用于带式输送机的模糊神经网络功率平衡控制器,提高了控制器的响应速度和控制精度。对于刮板输送机的功率控制问题研究较少,文献[7]充分考虑了刮板输送机的各种运行阻力,计算

收稿日期: 2016-07-11; 责任编辑: 赵瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.02.021

基金项目: 辽宁省教育厅创新团队资助项目(LT2013009); 辽宁省教育厅资助项目(L2012118); 国家自然科学基金资助项目(51304107)

作者简介: 毛君(1960—),男,辽宁鞍山人,教授,博士生导师。E-mail: m18841848290@163.com

引用格式: 毛君,曹昊,谢苗.刮板输送机首尾电动机功率平衡控制研究[J].煤炭科学技术,2017,45(2):130-135.

Mao Jun, Cao Hao, Xie Miao. Study on power balance control of head and tail electric motors applied to scraper conveyor[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 130-135.

了电动机的功率分配比。文献 [8] 研究了影响刮板输送机功率分配的因素, 选择了合适的启动时间差, 改善了重载启动的功率不平衡问题。但对稳定运行工况的研究较少, 不足以解决负载扰动条件下的多电动机稳定运行问题, 电动机功率控制问题仍有待研究。

1 功率平衡控制基本思路

以刮板输送机处于平稳运行状态为前提, 确定驱动电动机功率平衡的控制方案。由电动机功率与电流关系可知, 刮板输送机电动机的功率平衡控制等同于电动机的电流平衡, 其控制原则根据负载的变化, 通过变频器调节各电动机的转速来调节输出转矩, 使机头和机尾驱动链轮输出转矩的差值在合理范围内, 避免电动机出现过载或欠载的情况^[9-11], 具体结构如图 1 所示。

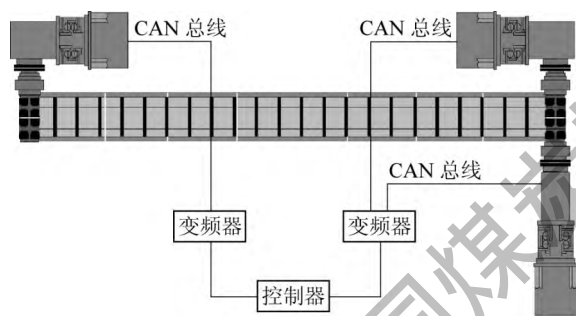


图 1 功率平衡控制系统结构

Fig 1 Structure of power balance control system

笔者研究的刮板输送机为三电动机驱动, 即机尾单电动机、机头双电动机, 并且 3 个电动机的额定功率相同。刮板输送机电动机功率平衡控制系统包括隔爆型三相异步电动机、有直接转矩控制功能的矿用变频器、CAN 通信总线和 PLC 控制器, 异步电动机为控制系统的控制对象, 矿用变频器为控制系统的硬件控制器, CAN 总线用于实现数据的通信, PLC 控制器与矿用变频器进行数据交换, 并控制变频器的参数。机头的 2 个电动机采用一拖二的变频器, 机尾为一拖一的变频器, 由于刮板输送机的铺设长度较长, 故选择稳定性较好的 CAN 通信总线。变频器能够采集到异步电动机的定子电流, 并通过 CAN 总线将电流数据传递给 PLC 控制器, 经过 PLC 内部程序的处理, 输出给变频器一个转速值(给定转速), 拥有直接转矩控制功能的变频器根据给定转速控制异步电动机的电磁转矩, 从而实现电动机的功率平衡控制, 控制思路如图 2 所示。

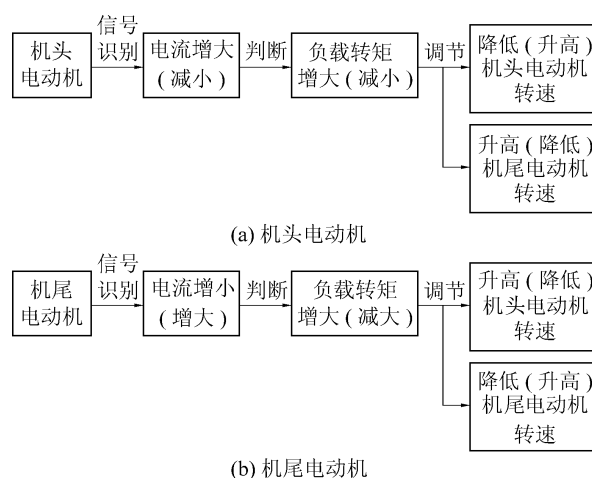


图 2 依据负载变化的功率平衡控制示意

Fig. 2 Sketch of power balance control based on load variation

2 依据最小张力法的电动机功率分配方案

在刮板输送机输送物料时, 链条张力反映了负载的大小和整机的稳定性, 通过分析链条张力, 为电动机的调速提供理论依据^[12-14]。对于刮板输送机链条张力的计算, 一般采用逐点计算法, 刮板输送机双端驱动、向上运输如图 3 所示。

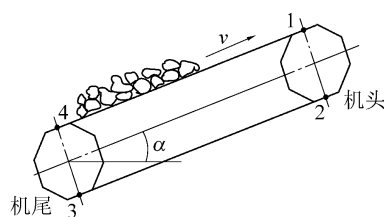


图 3 刮板输送机运输示意

Fig. 3 Transport sketch of scraper conveyor

刮板输送机的任务是将物料从机尾运输到机头, 根据刮板输送机稳态运行状态下阻力特性可推出:

$$S_1 = S_4 + W_{zh0} \quad (1)$$

$$S_3 = S_2 + W_k \quad (2)$$

其中: S_i 为链条特殊点张力, $i=1, 2, 3, 4$; W_{zh0} 为有载侧阻力, N; W_k 为无载侧阻力, N。若机头机尾驱动链轮的转速、半径相同, 已知机头与机尾电动机的功率比为 2:1, 可知机头机尾驱动负载转矩也为 2:1, 则:

$$S_1 - S_2 = 2(S_3 - S_4) = \frac{2}{3}(W_{zh0} + W_k) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3), 可得:

$$S_2 - S_4 = \frac{1}{3}(W_{zh0} - 2W_k) \quad (4)$$

根据各特殊点的张力比较能够推出: $S_1 > S_2$, $S_3 > S_4$, 而 S_2 和 S_4 大小取决于有载侧和无载侧的阻力。若 $W_{zh0} > 2W_k$, 则最小张力点为 S_4 , 即机尾驱动链轮与链条的分离点; 若 $W_{zh0} < 2W_k$, 则 S_2 显然为最小张力点, 即机头驱动链轮与链条的分离点。

$$\begin{cases} S_1 = S_4 + W_{zh0} \\ S_2 = S_4 + \frac{1}{3}(W_{zh0} - 2W_k) \\ S_3 = S_4 + \frac{1}{3}(W_{zh0} + W_k) \\ S_4 = S_4 \end{cases} \quad (5)$$

由于刮板输送机的无载侧阻力主要来自链条和刮板的自重, 可视为定值, 则可知, 有载侧的阻力是不断变化的, 运行阻力的变化是影响各特殊点张力的主要因素。根据特殊点的张力可知机头机尾驱动链轮的负载转矩, 见式(6)。

$$\begin{cases} T_h = (S_1 - S_2)R \\ T_l = (S_3 - S_4)R \end{cases} \quad (6)$$

其中: R 为链条接触点到驱动轮中心等效半径, m 。根据各电动机的转矩 T_i 确定电动机实际功率配比 λ_i 为

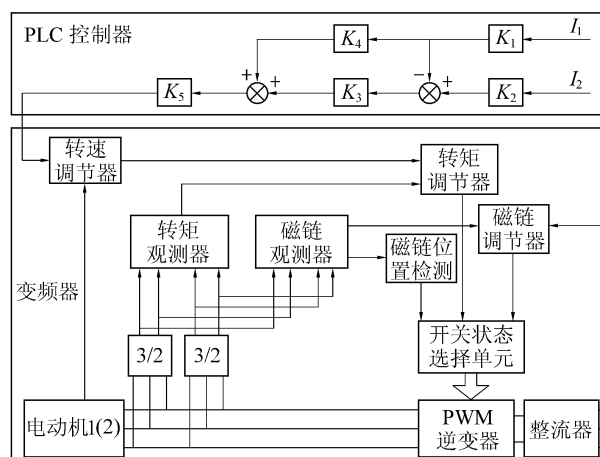
$$\lambda_i = \frac{P_i}{\sum_i P_i} = \frac{T_i \omega_i}{\sum_i T_i \omega_i} = \frac{P_{ei}}{\sum_i P_{ei}} \quad (7)$$

式中: P_i 为各电动机实际功率, kW; P_{ei} 为各电动机的额定功率, kW; i 为电动机数量, $i=1, 2, 3$, 1 为机头 1 号电动机, 2 为机头 2 号电动机, 3 为机尾电动机; ω_i 为各电动机转速, rad/s; T_i 为各电动机的输出转矩, N·m; T_1 和 T_2 分别为机头 2 个电动机的输出转矩, $T_1 = T_2$; T_3 为机尾电动机的输出转矩。

3 电动机功率平衡控制系统设计

基于异步电动机变频控制的直接转矩控制系统, 结合第 2 节电动机功率平衡的控制方案, 设计刮板输送机电动机的功率平衡控制系统, 如图 4 所示。 I_1 、 I_2 分别为机头等效电动机和机尾电动机的定子电流, 二者的大小反映了机头、机尾电动机的负载转矩变化, 根据负载转矩比与额定值的偏离量来调节机头、机尾电动机的转速, 可以达到电动机功率平衡的目的。

电动机的转矩电流与负载转矩成正比关系, 通



K_1 — K_5 为 PLC 控制器中的功率调节系数

图 4 刮板输送机电动机的功率平衡控制系统结构

Fig. 4 Structure diagram of power balance control system of scraper conveyor motor

过检测转矩电流, 可知机头、机尾驱动链轮的负载转矩比 $T_h : T_l$ 。已知刮板输送机的额定功率分配比为 2:1, 在出现功率不平衡的情况时, 为保证实际功率比接近额定值, 需按照负载转矩比调节机头、机尾电动机的转速^[15-17], 设机头等效电动机的实际转速为 n_1 , 机尾电动机的实际转速为 n_2 , 可知

$$\delta = \frac{n_1}{n_2} \quad (8)$$

$$s_n = \frac{n_2 - n_1}{n_2} \quad (9)$$

式中: δ 为机头等效电动机与机尾电动机的转速比; s_n 为机头等效电动机与机尾电动机的转差率, %。

当机头等效电动机和机尾电动机的功率为额定, 并且具有相同转速时, 可知额定关系值为

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{i_1}{i_2} = \frac{T_h}{T_l} = \frac{2}{1} \quad (10)$$

其中: N_1 为机头等效电动机功率, kW; N_2 为机尾电动机功率, kW; i_1 为机头等效电动机转矩电流, A; i_2 为机尾电动机转矩电流, A。若出现机头过载、机尾欠载时, 则

$$\frac{T_h}{T_l} > \frac{2}{1}$$

由于刮板输送机的总运行阻力已知, 即 $W_0 = 1.1(W_{zh0} + W_k)$, 则可知刮板输送机的总负载转矩 $T_0 = RW_0$, 为消除机头过载、机尾欠载的功率不平衡现象, 需通过机尾驱动链轮分担机头驱动链轮的负载, 需分担的负载大小可以按照实际负载转矩比与额定转矩比来计算, 即

$$\Delta T = FR \quad (11)$$

式中: ΔT 为机头过载时, 机尾需要分担的转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; F 为机头过载时, 无载侧链条需要增加的牵引力, N , $F = ma$, $a = (n_2 s_n) / t$; a 为机头过载时, 无载侧链条的加速度, m/s^2 。

若机头欠载、机尾过载, 则通过实现机头等效电动机转速的增加, 降低机尾电动机的负载转矩, 进而实现电动机的功率平衡控制。除此之外, 在保证机头、机尾功率平衡的前提下, 机头 2 个电动机同样存在功率平衡问题。2 个电动机作用在同一链轮, 各运行参数基本相同, 所以机头电动机 1 与电动机 2 功率分配比(负载转矩比)与额定功率比相等为 1:1, 控制原理与机头、机尾比例分析一致。

4 仿真分析

假定理想状态, 各驱动链轮保持同步转速, 设定机头、机尾驱动单元的功率分配比为 2:1, 机头电动机 1 与电动机 2 功率分配比为 1:1, 仿真分析电动机在负载稳定和波动条件下的参数变化, 分析控制系统的有效性。由 AMESim 软件创建仿真模型, 分析复杂的系统特性^[18-21]。仿真参数如下:

额定转速 $n_N / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 475
极对数	2
转子电阻 R_r / Ω	0.27
转子电感 L_r / H	0.003 73
额定频率 f / Hz	50
额定功率 P_N / kW	15
额定电压 U_N / V	380
定子电阻 R_s / Ω	0.30
定子电感 L_s / H	0.002 63
主电感 L_m / H	0.006 46

4.1 电动机负载稳定条件下仿真分析

设给定电动机的转速为 1 000 r/min, 各电动机的负载转矩始终为 80 $\text{N} \cdot \text{m}$, 仿真时间为 5 s, 仿真结果如图 5、图 6 所示。

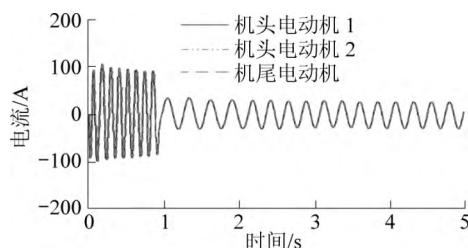


图 5 电动机负载稳定条件下机头机尾各电动机 a 相电流
Fig. 5 Phase current a of head and tail motor under the condition of motor load stability

由图 5 可知, 相同输入信号给定之后, 各电动机 a 相电流在 0.8 s 左右后趋于稳定且 a 相电流幅值、相位等保持一致。由图 6 可知, 各电动机的电磁转矩在经过前期的波动后, 稳定于 80 $\text{N} \cdot \text{m}$ 左右, 各电动机电磁转矩比近似于 1:1:1。

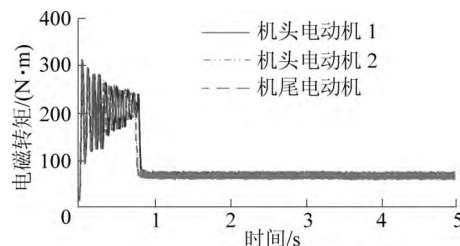


图 6 电动机负载稳定条件下机头机尾各电动机电磁转矩
Fig. 6 Electromagnetic torque of motor head and tail under the condition of motor load stability

将机头的两电动机功率进行折算, 并与机尾电动机的输出功率比较, 如图 7、图 8 所示, 根据电动机的功率分配方案进行计算, 可知仿真结果符合功率分配的要求, 完成首尾电动机功率平衡的同时, 又保证了机头双电动机的功率平衡。

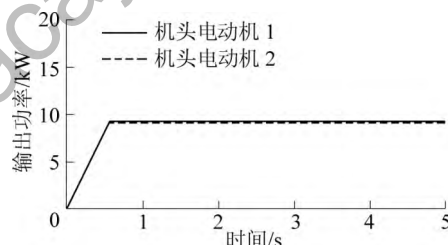


图 7 电动机负载稳定条件下机头双电动机输出功率
Fig. 7 Output power of two head motors under the condition of motor load stability

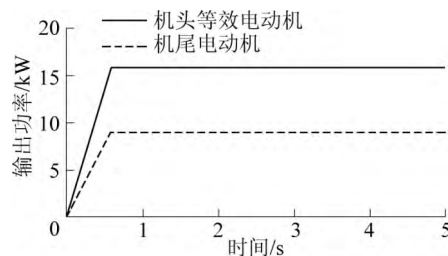


图 8 电动机负载稳定条件下机头机尾电动机输出功率
Fig. 8 Output power of head and tail motor under the condition of motor load stability

4.2 电动机负载波动条件下仿真分析

设给定电动机的转速为 1 000 r/min, 各电动机的负载转矩初始为 80 $\text{N} \cdot \text{m}$, 2 s 后负载转矩变为 100 $\text{N} \cdot \text{m}$, 仿真时间为 5 s, 仿真结果如图 9、图 10 所示。

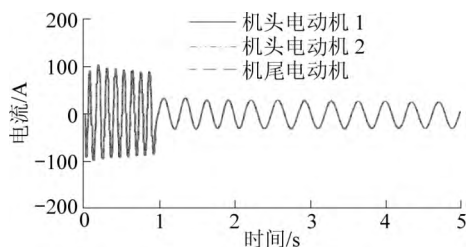


图9 电动机负载波动条件下机头机尾各电动机a相电流

Fig. 9 Phase current a of head and tail motor under the condition of motor load fluctuation

由图9可知,机头机尾各电动机的a相电流0.8s左右后趋于稳定,当负载转矩增大,a相电流的频率在2s后减小,但机头机尾各电动机a相电流的幅值、相位保持一致,说明在负载转矩改变的情况下,该控制方法的控制效果明显。由图10可知,机头、机尾各电动机的电磁转矩在经过前期的波动后,稳定在 $80\text{ N}\cdot\text{m}$ 左右,2s后负载转矩变为 $100\text{ N}\cdot\text{m}$ 后,电动机的电磁转矩迅速增大,最后稳定在 $100\text{ N}\cdot\text{m}$ 左右,各电动机电磁转矩波动后,经调整各电动机比快速趋于1:1:1。

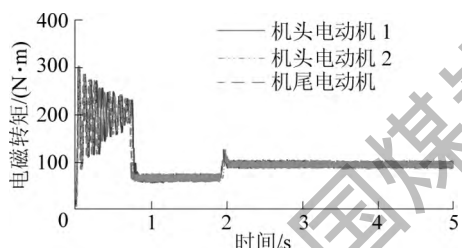


图10 电动机负载波动条件下机头机尾各电动机电磁转矩

Fig. 10 Electromagnetic torque of motor head and tail under the condition of motor load fluctuation

在2s时负载转矩出现波动,各电动机的功率同样出现一个波动,经过电动机功率的折算、比较,如图11、图12所示。

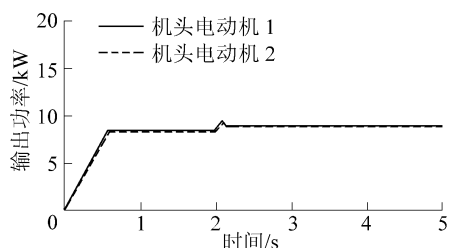


图11 电动机负载波动条件下机头双电动机输出功率

Fig. 11 Output power of two head motors under the condition of motor load fluctuation

电动机功率的比例与分配方案一致,能够说明功率调配控制系统可靠,既实现了首尾电动机功率

平衡,又完成了机头双电动机的功率平衡。

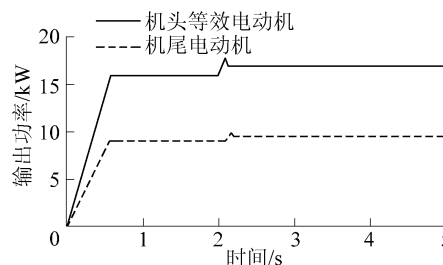


图12 电动机负载波动条件下机头机尾电动机输出功率

Fig. 12 Output power of head and tail motor under the condition of motor load fluctuation

5 结 语

基于变频调速控制理论,设计了直接转矩控制器,根据机头机尾电动机的电流确定负载转矩的比值,针对控制系统建立仿真模型,设定具体的仿真参数,仿真分析在负载稳定和波动条件下的电动机特性,通过比较机头机尾各电动机的a相电流和电磁转矩,计算机头等效电动机和机尾电动机的功率,得出结论:在负载稳定条件下,各电动机的a相电流和电磁转矩较稳定,功率配比与控制目标一致;在负载波动条件下,各电动机的a相电流和电磁转矩出现了波动,但很快趋于稳定,仿真结果符合预期效果。

参考文献(References):

- [1] Sikora W. The inhomogeneity of drive device of efficient scraper conveyor[J]. Przegl. Gorn., 1993(4): 23-26.
- [2] Dolipski M. The stress of chain efficient scraper conveyor[J]. Mech. Autom. Gorn., 1993(10): 21-23.
- [3] 欧阳名三,莫丽红.采用参数预测及模糊控制的胶带多机驱动功率平衡的研究[J].煤炭学报, 2005, 30(2): 255-258.
Ouyang Mingsan, Mo Lihong. Research on power balance of multi-motors in belt system based parameter forecast and fuzzy control[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 255-258.
- [4] 王坤,包继华,吴艳.变频在带式输送机多点驱动功率平衡的研究[J].煤矿机械, 2010, 31(6): 66-68.
Wang Kun, Bao Jihua, Wu Yan. Study of frequency converter in multi-motored power balance of belt conveyor[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(6): 66-68.
- [5] 邢金岭.变频驱动带式输送机功率平衡控制研究[J].煤炭科学技术, 2014, 42(7): 84-87.
Xing Jinling. Research on power balance control of belt conveyor with variable frequency drive[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(7): 84-87.
- [6] 杨光辉.基于模糊神经网络的多电动机功率平衡控制研究[D].北京:中国矿业大学(北京), 2014.

- [7] 刘成宏, 张擎宇, 李作鹏. 刮板输送机电动机功率的分析与计算[J]. 山西焦煤科技, 2010(2): 7-9.
Liu Chenghong, Zhang Qingyu, Li Zuopeng. Analysis and calculation of motor power of scrape conveyor[J]. Shanxi Coking Coal Science and Technology, 2010(2): 7-9.
- [8] 李艳伟, 李小凡. 刮板输送机两机驱动下功率不平衡研究[J]. 煤炭工程, 2013(10): 86-88.
Li Yanwei, Li Xiaofan. Research on power imbalance of scraper conveyor under two motors[J]. Coal Engineering, 2013(10): 86-88.
- [9] 付永领, 齐海涛. LMS Imagine.Lab AMESim 系统建模与仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [10] 余发山, 韩超超, 田西方, 等. 带式输送机多机变频驱动功率平衡控制研究[J]. 工矿自动化, 2013, 39(3): 69-73.
Yu Fashan, Han Chaochao, Tian Xifang *et al.* Research of power balance control for multi-motor frequency-conversion drive of belt conveyor[J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(3): 69-73.
- [11] 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]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 50-56.
He Baiyan, Sun Yanghui, Nie Rui *et al.* Dynamic behavior analysis on the ring chain transmission system of an armoured face conveyor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 50-56.
- [12] 丁守坤. 重型刮板输送机预张力的计算及伸缩机尾紧链油缸的确定[J]. 煤矿机械, 2010, 31(10): 3-6.
Ding Shoukun. Calculation of pretension of heavy-duty scraper conveyor and determination of tight chained cylinder of expansion-tail[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(10): 3-6.
- [13] 朱正中, 邢方方. 刮板输送机链条张力监测理论及方法研究[J]. 煤矿开采, 2015, 20(1): 48-51.
Zhu Zhengzhong, Xing Fangfang. Chain tension monitoring theory and method of scraper conveyer[J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(1): 48-51.
- [14] 张强, 王海舰, 毛君, 等. 基于压电振动俘能的自供电刮板输送机张力检测系统[J]. 传感技术学报, 2015, 28(9): 1335-1340.
Zhang Qiang, Wang Haijian, Mao Jun *et al.* Self-Powered tension testing system for scraper conveyor based on piezoelectric vibration energy harvested[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(9): 1335-1340.
- [15] 王中华. 矿井煤流输送系统优化控制关键技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- [16] Silva N M, Martins A P. Torque and speed modes simulation of a DTC-Controlled induction motor[C]. Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation-MED, Lisbon, Portugal, 2002.
- [17] 马燕, 吴韬. 异步电动机的转速公式与功率控制调速理论[J]. 西北民族大学学报: 自然科学版, 2005, 26(6): 21-27.
Ma Yan, Wu Tao. Speed formula and Power control speed regulation theory on motor[J]. Journal of Northwest Minorities University for Nationalities: Natural Science, 2005, 26(6): 21-27.
- [18] Wilfrid Marquis-Favre, Eric Bideaux, Serge Scavarda. A planar mechanical library in the AMESim simulation software[J]. Part I: Formulation of dynamics equations. Simulation Modeling Practice and Theory, 2005, 17(3): 55-65.
- [19] Imagine. AMESim USER Manual [D]. France: IMAGINE S A, 2004.
- [20] 付永领, 祁晓野. AMESim 系统建模和仿真: 从入门到精通[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2005.
- [21] 付永领, 齐海涛. LMS Imagine.Lab AMESim 系统建模与仿真[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2011.