

7-3-2020

Analysis of Lateral Force and Deviation of Permanent Magnetic Levitation Belt Conveyor

Kun Hu

1. Anhui Mine Electromechanical Equipment Cooperative Innovation Center, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;;2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

Wang Shuang

2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

Yongcun Guo

1. Anhui Mine Electromechanical Equipment Cooperative Innovation Center, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;;2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

Deyong Li

2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Analysis of Lateral Force and Deviation of Permanent Magnetic Levitation Belt Conveyor

Abstract

Abstract: On the basis of reasonable assumptions, lateral force mathematical model of permanent magnetic levitation belt conveyor maglev support system was simulated. The simulation results showed that conveyor lateral force and offset could have a monotonically increasing relationship. If the belt shifted, it would cause an increase in lateral force, which could cause conveyor belt further deviation. The traditional physical anti-deviation measures couldn't apply to non-contact suspension support. In order to *effectively solve the permanent magnetic levitation belt conveyor deviation problem, an automatic offset device was designed and the corresponding control strategy was proposed.* The value of the lateral force was changed by adjusting the relative position of the permanent magnetic field and the belt, which would control the permanent magnetic levitation belt conveyor deviation. And its feasibility can be verified by the further simulation.

Keywords

permanent magnetic levitation belt conveyor, lateral force, deviation, anti-deviation

Recommended Citation

Hu Kun, Wang Shuang, Guo Yongcun, Li Deyong. Analysis of Lateral Force and Deviation of Permanent Magnetic Levitation Belt Conveyor[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(5): 1173-1178.

永磁悬浮带式输送机侧向力与跑偏仿真分析

胡坤^{1,2}, 王爽², 郭永存^{1,2}, 李德永²

(1. 安徽理工大学安徽矿山机电装备协同创新中心, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 在合理假设的基础上, 对一种永磁悬浮带式输送机的磁悬浮支撑系统所受的侧向力数学模型进行仿真分析, 仿真结果表明磁性输送带所受的侧向力与偏移量呈单调递增关系, 输送带若发生偏移, 则会引起侧向力的增加, 从而引起输送带的进一步跑偏。而传统物理防跑偏措施并不适用于悬浮非接触式支撑方式。为了有效地解决永磁悬浮带式输送机的磁性输送带跑偏问题, 设计了一种自动调偏装置并提出了相应的控制策略, 通过调整永磁磁场与输送带的横向相对位置来改变侧向力大小, 从而控制永磁悬浮带式输送机的跑偏, 进一步的仿真验证了其可行性。

关键词: 永磁悬浮带式输送机; 侧向力; 跑偏; 防跑偏

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 05-1173-06

Analysis of Lateral Force and Deviation of Permanent Magnetic Levitation Belt Conveyor

Hu Kun^{1,2}, Wang Shuang², Guo Yongcun^{1,2}, Li Deyong²

(1. Anhui Mine Electromechanical Equipment Cooperative Innovation Center, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: On the basis of reasonable assumptions, lateral force mathematical model of permanent magnetic levitation belt conveyor maglev support system was simulated. The simulation results showed that conveyor lateral force and offset could have a monotonically increasing relationship. If the belt shifted, it would cause an increase in lateral force, which could cause conveyor belt further deviation. The traditional physical anti-deviation measures couldn't apply to non-contact suspension support. In order to effectively solve the permanent magnetic levitation belt conveyor deviation problem, an automatic offset device was designed and the corresponding control strategy was proposed. The value of the lateral force was changed by adjusting the relative position of the permanent magnetic field and the belt, which would control the permanent magnetic levitation belt conveyor deviation. And its feasibility can be verified by the further simulation.

Keywords: permanent magnetic levitation belt conveyor; lateral force; deviation; anti-deviation

引言

输送带跑偏是带式输送机运行过程中最为常见的故障之一, 危害性极大^[1]。不仅影响到物料输

送的运输效率, 还存在着潜在的安全隐患, 对带式输送机本身造成严重的损害^[2-4]。永磁悬浮带式输送机是近年来出现的一种极具发展潜力的新型低阻力带式输送机, 它与普通带式输送机的托辊支撑结构不同, 依靠永磁体与磁性输送带相同磁极之间的磁斥力支撑输送带和物料, 实现了悬浮非接触式支撑^[5]。由于永磁悬浮带式输送机目前仍处于基础理论研究阶段^[6], 对其稳定运行过程中的跑偏问题



收稿日期: 2015-06-03 修回日期: 2015-08-12;
基金项目: 中国博士后科学基金(一等)(2013M540506);
安徽省博士后基金(2014B037); 安徽高校省级优秀青年人才基金重点项目(2013SQRL0272D);
作者简介: 胡坤(1981-), 男, 安徽淮南, 博士, 副教授, 研究方向为连续运输机械。

研究尚未见文献公开报道,其磁性输送带是否存在跑偏,跑偏形成机理以及防跑偏控制等问题亟待探究。而输送带跑偏又关系到永磁悬浮带式输送机的正常稳定运行,有必要对其进行深入地研究。

1 输送带侧向力数学模型

本文的磁性输送带跑偏研究基于安徽理工大学课题组设计的一种永磁悬浮带式输送机,其主要结构如图 1 所示^[7]。以磁性输送带—永磁悬浮支撑替代普通输送带上托辊支撑结构,实现了无辊式非接触支撑,并采用防磁滚筒和防磁回程托辊组,以防对磁悬浮系统产生干扰。

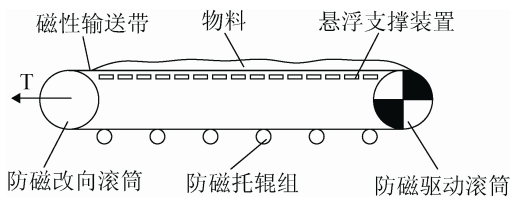


图 1 永磁悬浮式带式输送机结构示意图

1.1 永磁悬浮支撑力学模型

在前人关于永磁悬浮系统二维模型的基础上^[8],建立改进的永磁悬浮系统三维力学模型,如图 2 所示。磁性输送带下方分布着等距不连续的矩形永磁体,永磁体静止,磁性输送带沿着 y 轴方向做低速且匀速运动。

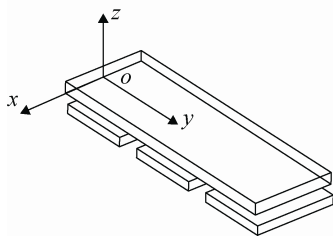


图 2 永磁悬浮系统三维简化力学模型

简化模型基于如下假设^[9-11]:

- (1) 边界条件: 只考虑结构问题; 忽略内阻隙、漏磁; 空气气隙均匀, 永磁体 BH 线为线性关系;
- (2) 磁系统各项物理参数均匀, 且各向同性;
- (3) 忽略磁材料之间的干扰, 只考虑永磁体和磁性输送带之间的耦合作用力。

1.2 求解

在自由空间, 无需考虑介电质或磁化物质, 则根据 Maxwell 方程^[12]有

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times B &= \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J_f + \frac{\partial D}{\partial t} \end{aligned} \right\}$$

式中, $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$, $B = \mu_0 \mu_r H$, $J_f = \sigma E$, μ_0 是真空中的磁常数, H/m; ϵ_0 是真空中的电常数, F/m; ϵ_r 是相对电常数, F/m, μ_r 是相对磁常数, H/m; σ 是永磁体的磁导率; D 是电位移, C/m²; J_f 是自由电流密度, A/m²; H 是辅助磁场。

在磁性运输带运动方向上, 相对运动速度远小于光速, 且在永磁体磁场中, 没有瞬时参数, 所以认为永磁磁场是似稳磁场。为了使数值求解更加贴近带式输送机工况, 设 f_0 为似稳磁场修正系数, 沿 y 运动方向, 变量带有 $e^{j(\omega t - ky)}$ 因子, 其中 $\omega = 2\pi f_0 v / \lambda_0$, $k = 2\pi / \lambda_0$, 其中 λ_0 是永磁体的有效长度, 是磁性输送带由于沿 y 轴做匀速且低速运动, 切割永磁磁场的磁感应线, 内部产生涡流, 因此磁性带的磁场是时谐场, 变成复向量形式有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

在气隙中建立 Maxwell 方程, 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

在永磁体和空气气隙接触面, 视二者磁感应强度近似相等, 即得

$$B_{xg}=B_x$$

$$B_{yg}=B_y$$

$$B_{zg}=B_z$$

通过带入化解可得到磁性输送带表面 $z=0$ 的

$$\text{气隙磁场为 } H_x = \frac{-jk_s}{\sin hkg - j\lambda_1 \cos hkg} e^{j(\omega t - kx)}.$$

可以求得在磁性输送带表面的电流密度为

$$J_x = \sigma m v B_x = \frac{-jk_s}{\sin hkg - j\lambda_1 \cos hkg} e^{j(\omega t - kx)} \quad (1)$$

式中: $\lambda_1 = \mu_0 v$, $k_s = jkM_{pn}$, m 是永磁体厚度。

磁性带中的涡流和磁场相互作用产生悬浮力 F_z , 阻力 F_x 和 F_y , 三者两两垂直, 根据洛伦兹定律有 $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}^*$, 经作者进一步推导可得^[13], 磁性输送带所受的侧向分力为

$$F_x = J \times B_y = \frac{\mu_0 L w m k_s^2}{\sin^2 hkg + (\mu_0 m v)^2 \cos^2 hkg} x^2 \quad (2)$$

式中, L 是磁性输送带的长度, h 是磁性输送带和永磁体之间的间隙距离, g 是重力加速度。

2 仿真分析

2.1 仿真参数

永磁悬浮系统模型基本参数设定如下: 永磁体厚度 0.01 m, 永磁体间隙为 0.01 m, 磁性输送带的长为 0.11 m, 永磁体与磁性输送带之间的气隙为 0.002 m, 永磁体为钕铁硼硬磁材料。考虑到带式输送机正常运行时, 带速一般都较低且为匀速, 取常见带速 $v=1.25$ m/s 进行分析。

2.2 仿真结果分析

在 MATLAB 软件中对磁性输送带的侧向力仿真, 并绘制侧向力与水平位移关系图, 如图 3 所示。

由图 3 可知: (1) 磁性输送带的侧向力与水平位移关系曲线呈近似抛物线形, 即磁性输送带的侧向力与横向偏移量(水平位移的绝对值)呈单调递增关系。磁性输送带横向偏移量很小时, 侧向力较小, 当横向偏移量为 0 时(即磁性输送带沿理论中心线正常运行, 没有发生任何偏移), 侧向力亦为 0,

当磁性输送带横向偏移量变大时, 侧向力也随之增大; (2) 无论磁性输送带发生正向偏移或是逆向偏移, 所承受的跑偏力都将大于未发生跑偏的磁性输送带。由以上分析可知, 永磁悬浮带式输送机系统中的磁性输送带一旦发生偏移, 将会引起侧向力的增加, 若不加以控制, 易导致磁性输送带的进一步跑偏。

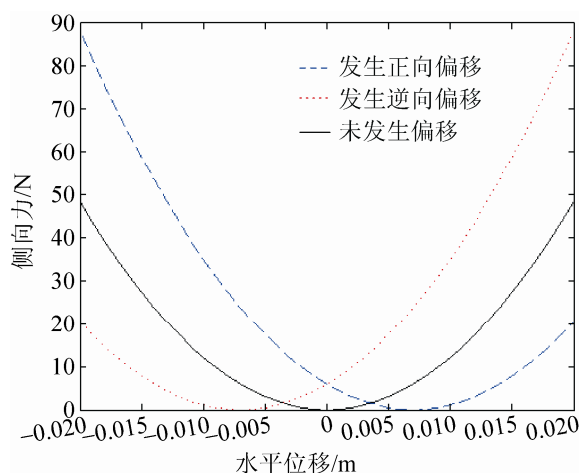


图 3 磁性输送带侧向力与水平位移关系图

3 磁性输送带跑偏分析与控制

3.1 磁性输送带跑偏分析

由于永磁悬浮带式输送机仍然采用滚筒驱动装置, 滚筒的制造安装误差以及输送带本身缺陷都会使输送带两侧受到的拉力不平衡, 从而会造成跑偏现象的发生^[14-15]。此外, 永磁悬浮带式输送机所采用的永磁悬浮支撑结构也可能引起输送带的跑偏, 具体如下:

(1) 永磁悬浮磁场为似稳磁场, 磁性输送带在磁场某处受到非恒定力作用致使输送带两侧受力不均, 产生跑偏;

(2) 永磁悬浮带式输送机无槽型托辊组的辅助导向, 磁性输送带处于悬浮状态与支撑装置无摩擦作用, 输送带若受侧向外力作用易发生失稳, 最终使磁性输送带跑偏。

3.2 磁性输送带防跑偏措施

传统的带式输送机防跑偏措施是主要是安装

调心托辊组或者调整原有托辊组的位置,但永磁悬浮带式输送机采用无辊式非接触式支撑,因此传统防跑偏方式并不完全适用^[15]。考虑其特殊的输送带支撑结构,以及永磁悬浮带式输送机在运行过程中跑偏,磁性输送带偏离中心线引起侧向力增加,因而加大输送带偏移的趋势,本文提出磁性输送带防跑偏措施,具体如下:

(1) 物理阻断防跑偏措施

在磁性输送带两侧边缘处安装立辊,以限制其跑偏。立辊组须采用非磁性材料,如铝合金、陶瓷等,以免对输送机系统磁场产生干扰,具体如图 4 所示。此种方法利用物理措施直接作用于磁性输送带以限制输送带跑偏,结构简单且可靠性高,但也存在着容易磨损磁性输送带等明显缺点。为增加系统运行稳定性,可以在永磁悬浮输送机机身两侧沿程间隔性布置防跑偏立辊,以配合其它防跑偏措施,只备不用。同理,亦可以在磁性输送带两边设置导槽,起到辅助导向及防止跑偏的作用,如图 5 所示。

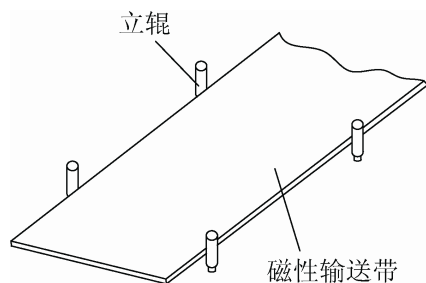


图 4 立辊限制跑偏示意图

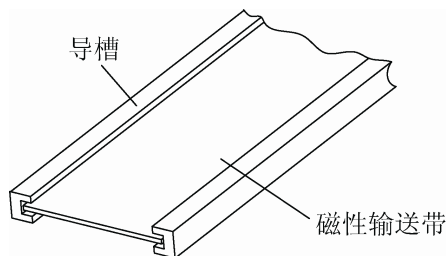


图 5 导槽防跑偏示意图

(2) 动态参数调整

由式(2)侧向力的数学模型可以看出,式中大

部分参数都为常量,带速 v 是永磁悬浮带式输送机在运输过程中最直观可调整的系统参数,带速 v 增大,则 $(\mu_0 D v)^2$ 越大,磁性输送带的跑偏侧向力 F_x 减小,有利于永磁悬浮带式输送机的稳定运行。但当带速增加至一定数值后,侧向力 F_x 减小的趋势则会逐渐减缓,此时再改变带速,对磁性输送带侧向力的影响会很小甚至忽略不计。

由于带式输送机的带速与输送带带宽、运量、物料密度等众多因素相关,随意改变带速会影响整机运行的稳定性以及上料、卸料环节的有序衔接,再者现阶段带式输送机的常见带速一般不高于 4 m/s,带速可调节的范围也十分有限,故通过改变带速调整磁性输送带跑偏亦不可取。

(3) 自动调偏策略

针对永磁悬浮带式输送机特点,从磁性输送带的侧向力控制入手,综合磁力、机械、液压、控制等专业知识,本文提出了一种系统自动调偏装置,将永磁体支撑装置进行模块化分段设计,每间隔若干段正常磁力支撑模块,设置一个可侧向移动的自动调偏装置。该自动调偏装置,主要由磁力支撑模块、侧向移动机构、传感器、控制系统、液压系统等组成,系统结构示意图参见图 6。

其相应的自动调偏策略具体如下:磁性输送带的两侧等间距布置跑偏传感器,由数据采集系统实时采样检测。一旦防跑偏传感器检测到磁性输送带发生跑偏,且跑偏量超过了用户设定的阈值,信号将即时传递给调偏控制系统。控制系统接收到信号后进行计算处理,发出相应指令控制侧向移动机构的执行液压缸根据偏移量做出相应的伸缩,磁力支撑模块完成侧向移动,以改变磁场中磁性输送带与永磁体支撑模块的相对位置从而调整磁场,使磁性输送带受到与原先跑偏方向相反的跑偏力,经过动态调节后,使磁性输送带始终在中心线位置附近稳定运行。

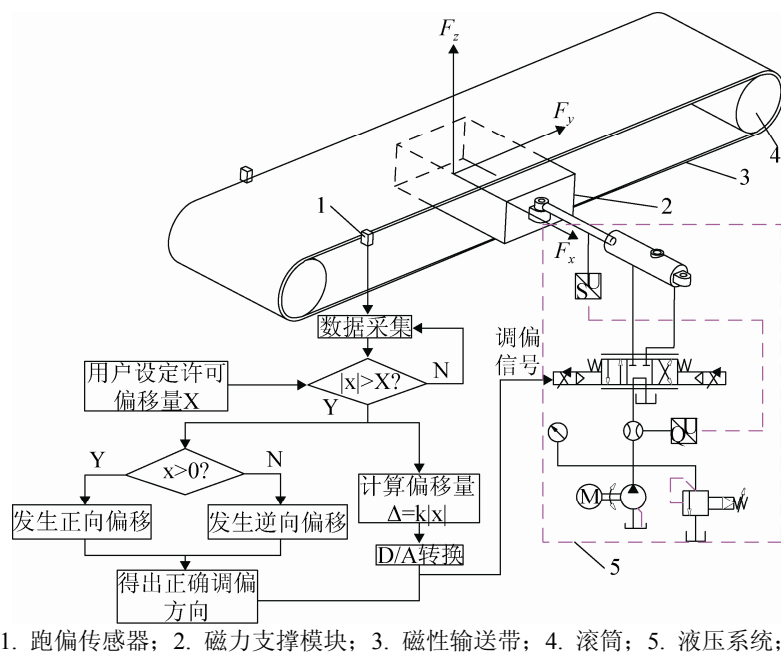


图 6 自动调偏装置结构示意图

为了验证磁性输送带自动调偏装置的可行性, 对其自动调偏过程进行仿真分析。在系统仿真软件 AMESim 中建立自动调偏装置模型, 系统模型作以下定义: 系统作适当简化; 磁性输送带侧向力由式 (2) 侧向力数学模型定义; 磁性输送带横向受随机载荷作用; 考虑到原始模型中磁性输送带带宽较小, 设置磁性输送带跑偏阈值为 5 mm, 其中调偏参数 $k=1.0\sim1.1$ 。

经过 10 s 仿真, 磁性输送带自动调偏装置仿真结果如图 7 所示。

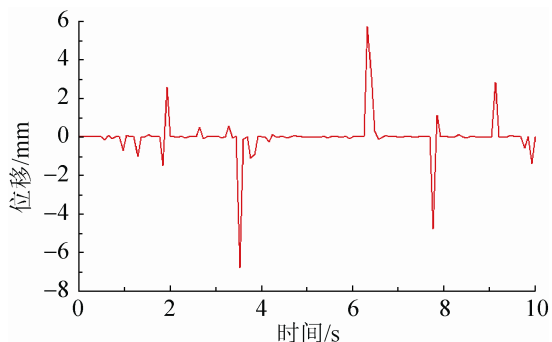


图 7 自动调偏装置仿真图

由图 7 可知, 磁性输送带在运行过程中发生跑偏, 当偏移量超过规定阈值时, 自动调偏装置介入,

执行机构即时调整输送带偏移量, 控制输送带侧向力大小, 从而抑制输送带的跑偏程度, 使磁性输送带动态的保持在中心线附近运行。另外, 在图中位移曲线中有部分波峰超过了 5 mm, 说明调偏装置工作后, 输送带存在惯性作用, 要经历减速偏移—静止—恢复正常的过程。

磁性输送带的总侧向力仿真结果如图 8 所示, 当磁性输送带偏移量超过设定阈值时, 自动调偏装置动作, 执行机构即时调整输送带偏移量, 使磁性输送带受到的总侧向力数值上逐渐减小, 随后产生一个与原先跑偏方向相反的总侧向力, 逐渐纠正跑偏的磁性输送带, 最终让磁性输送带动态的维持在初始位置。

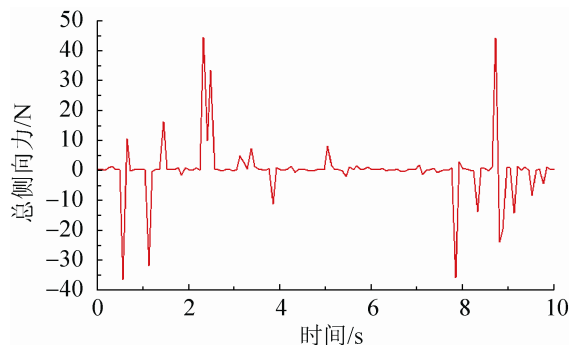


图 8 自动调偏过程中的总侧向力图

实际情况下,永磁悬浮带式输送机长度一般足够长,而永磁体支撑装置是采用模块化分段设计的,每段长度均较大,且每隔 10 组设置一个自动调偏装置。与传统的调偏托辊相比较,虽然二者都是利用集中力作用于输送带进行纠偏,但自动调偏装置的受力面积更大,所引起的输送带局部变形量要优于传统的调偏托辊。由于自动调偏系统采用 PID 控制,且调偏阈值可根据需要进行调整,只有当侧向偏移量大于阈值时才会进行调偏,避免了装置反复调偏动作的发生。

4 结论

为了保障一种新型低阻力永磁悬浮带式输送机的稳定运输,对磁性输送带—永磁体支撑系统的跑偏特性进行研究,得出以下结论:

(1) 在合理假设的基础上,对作者建立的三维永磁悬浮系统的侧向力数学模型进行仿真分析,仿真结果表明输送带的侧向力与偏移量呈单调递增关系,输送带若发生偏移,则会引起侧向力的增加,从而引起输送带的进一步跑偏,因此采取有效措施防止磁性输送带跑偏十分重要。

(2) 在分析永磁悬浮带式输送机的磁性输送带跑偏特性的基础上,设计了一种自动调偏装置并提出了相应的控制策略,通过调整永磁磁场与磁性输送带的横向相对位置来改变侧向力大小,从而控制永磁悬浮带式输送机的跑偏,进一步的仿真验证了其可行性。

参考文献:

- [1] 蔡林沁, 张优东, 杨卓, 等. 基于多智能体的井下安全事故虚拟现实仿真 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(12): 2914-2920. (Cai Linqi, Zhang Youdong, Yang Zhuo, et al. Virtual Reality Simulation of Safety Accidents in Mine Based on Multi-agent [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(12): 2914-2920.)
- [2] 刘元柱. 带式输送机的跑偏原因及调试 [J]. 煤炭技术, 2011, 30(8): 32-34.
- [3] 席平原, 李耀明, 申屠留芳. 具有反馈环节的带式输送机动力学仿真 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 207-210.
- [4] 汪德才, 余世云, 肖红春, 等. 管状带式输送机跑偏装置的改进与应用 [J]. 矿山机械, 2012, 40(6): 133-135.
- [5] 韩冰, 刘立鑫, 陈燕. 磁力研磨法加工弯管内表面的工艺参数优化 [J]. 中国机械工程, 2015, 26(6): 814-817.
- [6] 林佐轮. 基于磁悬浮技术的带式输送机虚拟样机设计研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 25-26.
- [7] 程刚. 磁垫式带式输送机的研究 [D]. 合肥: 安徽理工大学, 2012: 37-38.
- [8] 吕刚, 范瑜, 马双云, 等. 直线感应电机推力和法向力的解析计算与分析 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14(3): 77-82.
- [9] Li S, Fan Y, Fang J, et al. HTS axial flux induction motor with analytic and FEA modeling [J]. Physica C-Superconductivity and its Applications(S0921-4534), 2013, 494(11): 230-234.
- [10] Lequesne B, Liu Buyun, TW Nehl. Current machines with permanent magnets and solids rotors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications (S0093-9994), 1997, 33(5): 1289-1294.
- [11] Nehl T W, Lequesne B, Gangla V, et al. Nonlinear two-dimensional finite element modeling of permanent magnet eddy current couplings and brakes [J]. IEEE Transactions Magnetics(S0018-9464), 1994, 30(5): 3000-3003.
- [12] 李春生, 杜玉梅, 夏平畴, 等. 直线型 Halbach 磁体和导体板构成的电动式磁悬浮系统的分析及实验 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 18-22.
- [13] 胡坤, 王爽, 李德永, 等. 一种永磁磁垫式带式输送机的气隙特性研究 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 701-706.
- [14] 宋伟刚, 战欣, 王元元. 大型带式输送机驱动装置比较研究 [J]. 工程设计学报, 2004, 11(6): 301-311.
- [15] 宋伟刚, 柳洪义, 王鹰. 带式输送机动力学及其计算机仿真的研究 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(9): 133-138.