

doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1638

刮板输送机永磁直驱系统机-电耦合模型仿真与试验研究

王洋洋^{1,3}, 鲍久圣^{1,*}, 葛世荣^{1,2}, 阴妍¹, 王世博¹, 张磊¹

(1.中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院 北京 100083; 3. 比亚迪, 产品规划与汽车新技术研究院 广东 深圳 518118)

摘要: 刮板输送机作为综采工作面关键机械设备, 其性能好坏直接决定了井下煤炭开采的效率及成本的高低, 而驱动系统是保障刮板输送机性能稳定、高效运行的首要条件。为解决刮板输送机传统异步驱动系统因减速器存在而造成的传动效率低、故障率高、可靠性低等问题, 基于永磁同步电机设计了一套年输送量可达 1500 万吨的刮板输送机永磁直驱系统, 并匹配计算了所需了永磁同步电机功率、转速以及变频控制器容量。根据永磁直驱系统与刮板输送机之间的机-电耦合关系, 利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建刮板输送机永磁直驱系统的机-电耦合模型, 仿真分析了永磁直驱系统在空载启动、满载运行、多边形效应等多种工况下永磁同步电机的输出转速、转矩、三相电流以及刮板链的速度、加速度、张力等动态特性变化规律。仿真结果表明, 永磁直驱系统在刮板输送机启动及负载变化时能够快速响应且比较准确, 由于减少了减速器的柔性缓冲, 电机输出转速与转矩对负载突变响应波动较大; 永磁直驱系统的动态响应在突变负载下与突变变量成正相关关系, 应当从驱动系统控制算法的优化角度出发减小波动, 改善其性能; 多边形效应影响系统速度控制的稳定性, 机头链轮啮合处的链条更易受到多边形效应的影响。最后, 搭建小功率永磁同步电机直驱模拟试验台架, 将仿真得到的机械负载特性曲线等效处理后通过测功机加载输入, 开展了刮板输送机永磁同步电机直驱系统的模拟驱动试验。试验结果表明, 台架试验测得的永磁同步电机动态特性曲线与对应仿真试验得到的永磁同步电机动态曲线的变化规律基本一致, 从而从侧面验证了本文所建立刮板输送机永磁直驱系统机-电耦合模型的正确性。研究结果对于指导永磁直驱刮板输送机的设计制造和实际应用具有一定理论意义和实用价值, 也可为其领域永磁直驱系统的设计及使用提供理论参考。

关键词: 刮板输送机; 永磁同步电机; 直驱系统; 机-电耦合模型; 动态特性**中图分类号:** TP 528+.3 **文献标识码:** A

Simulation and experimental study on electromechanical coupling model of permanent magnet direct drive system for scraper

WANG Yangyang^{1,3} BAO Jiusheng^{1,*} GE Shirong^{1,2} YIN Yan¹ WANG Shibo¹ ZHANG Lei¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Product Planning and Automotive New Technology Research Institute, BYD, Shenzhen 518118, China)

Abstract: As the key mechanical equipment in the fully mechanized coal face, the performance of scraper conveyor directly determines the efficiency and cost of coal mining, and the driving system is the primary condition to ensure the stability of performance and efficient operation of scraper conveyor. In order to solve the

收稿日期: 2019-11-26 修回日期: 2020-3-11 责任编辑: 郭晓炜

基金项目: 国家自然科学基金-山西煤基低碳联合基金重点项目 (U1610251); 中国矿业大学重大项目培育专项项目 (2014ZDPY10); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 王洋洋 (1990—), 男, 河南人, 硕士, 高级仿真工程师。Tel: 18666288813, E-mail: cumtmotor@163.com

*通讯作者: 鲍久圣 (1979—), 男, 安徽人, 博士, 教授, 博士生导师。Tel: 0516-83991191, E-mail: cumtbjs@cumt.edu.cn

problems of low transmission efficiency, high failure rate and low reliability caused by the existence of reducer in the traditional asynchronous drive system for scraper conveyor, based on the permanent magnet synchronous motor, a permanent magnet direct drive system for scraper conveyor with an annual capacity of 15 million tons is designed, and the required power, speed and variable frequency controller capacity of the permanent magnet synchronous motor are calculated. According to the electromechanical coupling relationship between the permanent magnet direct drive system and the scraper conveyor, the electromechanical coupling model of the scraper conveyor is established in the MATLAB/Simulink. And the law of dynamic characteristic change of the output speed, torque, and three-phase current of PMSM and chain speed, acceleration and displacement of scraper conveyor are simulated analysis under typical working condition such as no-load startup, full load, polygon effect. The simulation results show that the permanent magnet direct drive system can respond quickly and accurately when the scraper conveyor starts and the load changes. And the output speed and torque of the motor fluctuate greatly in response to the sudden change of the load without the reducer. The dynamic response of the permanent magnet direct drive system has a positive correlation with the sudden change. Therefore, the optimization of the control algorithm of the drive system should be considered to improve its performance. The polygonal effect affects the stability of the speed control system, and the chain at the mesh of the head sprocket is more susceptible to the polygonal effect. Finally, the simulation test bench of small power PMSM direct drive is established, and the mechanical load characteristic curve obtained from the simulation is treated equivalently and then input through the dynamometer, and the simulation drive test of the PMSM drive system for scraper conveyor is carried out. The results show that the change trend of the characteristic curves of the PMSM obtained by the experiment are basically consistent with the characteristic curves of the PMSM obtained by the simulation, thus correctness of the electromechanical coupling model of the PMSM direct drive system for scraper conveyor is verified from the side. The research results have theoretical significance and practical value for guiding the design, manufacture and practical application of permanent magnet direct drive for scraper conveyor, and also can provide theoretical reference for the design and use of permanent magnet direct drive system in other fields.

Keywords: scraper conveyor; permanent magnet synchronous motor; direct drive system; electromechanical coupling model; dynamic characteristics

2018 年我国煤炭消费量 46.4 亿吨, 约占能源消费总量的 59.0%, 能源消费以煤炭为主^[1]。煤炭综采技术是当前煤炭开采效率最高的采煤技术, 主要包括采煤机、液压支架和刮板输送机。其中, 刮板输送机不仅负责运煤, 而且为采煤机提供运行轨道, 也为液压支架提供往前推移的支撑等作用, 是综采技术中最为核心的设备之一。刮板机也随着煤矿的大型化朝着大功率方向发展, 而研究刮板输送机驱动系统是保证其高产、高效运行的首要条件, 直接影响煤矿企业的开采效率^[2-4]。煤矿井下现有的刮板输送机主要采用三相异步电动机作为其驱动系统的动力源, 然而三相异步电动机因为自身的特性, 不能直接低速驱动大扭矩负载。为满足工程应用中低速大扭矩场合, 选择齿轮减速器与三相异步电动机配合使用。目前, 以三相异步电动机为动力源的驱动系统主要有“三相异步电动机+减速器+液力耦合器+链轮”、“三相异步电动机+可控传动装置+链轮”、“三相异步电动机变频驱动”等。刘伟^[5]推导和绘制电机与耦合器的联合特性曲线, 为刮板机驱动设备的配

置和相关软启动产品的开发提供理论参考, 常浩^[6]利用仿真软件 Adams 建立 CST 齿轮传动系统模型并进行动力学仿真, 以及搭建 CST 齿轮箱试验台, 得出的动态特性可为实际工程应用提供一定的依据, 王旭启^[7]利用 MATLAB/Simulink 研究一种基于异步电机变频驱动的直接转矩控制方法。但是, 三相异步电动机和减速器的配套应用, 虽然可以实现低速大扭矩的输出, 但是同时也降低三相异步电动机的使用效率, 增加额外的设备成本及伴随着严重的振动和噪声、潜在的润滑油渗漏污染、大量的日常维护等弊端^[8]。最近几年, 永磁同步电机得到快速的发展和应用, 并以其不借助齿轮减速器就能实现低速大扭矩输出的特性被逐渐应用到刮板输送机驱动系统。例如, 中国矿业大学鲍久圣^[9]申请一种不借助减速器传递动力的刮板输送机永磁直驱系统专利; Lu En^[10]研究 1140V 电压平台下的单个永磁直驱刮板输送机, 而现在煤矿慢慢普及双兆瓦级电机驱动的刮板输送机系统, 并且井下设备 3300V 的电压平台也得到越来越多的应用。因此, 本文以此为背景设计和验证

一种不借助齿轮减速器的刮板输送机，采用兆瓦级永磁同步电机作为动力源，利用MATLAB/Simulink软件搭建刮板输送机永磁直驱系统机-电耦合仿真模型进行仿真研究，并搭建小功率实验模拟台架开展试验验证^[11]。研究结果可为提高刮板输送机传动系统可靠性和效率以及研究矿山装备永磁驱动技术奠定技术理论基础。

表 1 刮板输送机关键部件主要技术参数

Table1 Main technical parameters of key parts of scraper conveyor

conveyor	
名称	数值
工作面长度(m)	300
输送能力(t/h)	2500
刮板链速(m/s)	1.5
链环规格(mm)	Φ48×152
刮板链型式	中双链
中部溜槽(mm)	1500×1200×376
铺设倾角	0°

表 2 永磁同步电机及变频器参数

Table2 Parameters of permanent magnet synchronous motor and inverter

and inverter	
名称	数值
额定功率(kW)	1000
额定电压(V)	3300
额定电流(A)	196
额定转速(r/min)	42
额定频率(Hz)	11.57
极对数	16
冷却方式	水冷
流速(m/s)	2.8
变频器容量(kW)	1120.3
变频器额定电流(A)	205.8
冷却方式	水冷
流速(m/s)	6.8

2 刮板输送机永磁直驱系统机-电耦合模型建立

基于电磁扭矩 T 和转速 ω ，驱动电机控制子系统与机械负载子系统构建形成机-电耦合关系，机-电耦合模型原理图如图 1 所示，耦合模型由永磁电机矢量控制子系统与刮板输送机机械负载子系统组成，两者是研究机电耦合模型的基础。

因此，首先推导其子系统数学模型并单独搭建各子系统，在此基础上，研究机-电耦合模型之间的数学关系并对关键参数进行选定。最后，依据耦合模型的数学关系，利用 MATLAB/Simulink 软件进行电气模型与机械负载模型之间的联合建模实现刮板输送机永磁直驱系统的机-电耦合^[12]。

1 刮板输送机永磁直驱系统设计

随着煤矿年产量越来越大，输送量更大的重型刮板输送机逐渐得到应用，本文设计一种年输送量 1500 万吨的重型刮板输送机^[11]，并完成永磁电机、变频器和刮板输送机匹配计算。其中，经计算得到的刮板输送机关键技术参数如表 1 所示，以及所配套使用的永磁同步电机及变频器技术参数如表 2 所示。

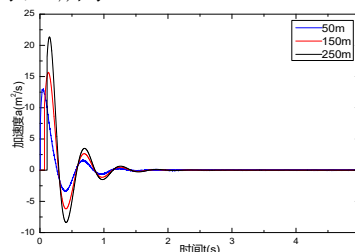


图 1 刮板输送机永磁直驱系统仿真模型原理图

Fig.1 Schematic block diagram of simulation model of permanent magnet direct drive system of scraper conveyor

2.1 永磁电机矢量控制子系统电气模型

电机控制系统最常用的矢量控制方式有 $i_d=0$ 控制、最大转矩/电流比控制、弱磁控制、功率因数等于 1 控制等。鉴于矿用刮板输送机永磁直驱系统是低速大扭矩的工程应用，需要满足运行平稳、操作简单等要求。因此，本文选用 $i_d=0$ 的矢量控制方法，其控制简图如图 2 所示^[13]。

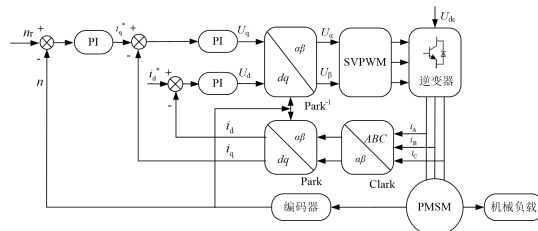


图 2 永磁同步电机矢量控制系统结构图

Fig.2 Vector control structure diagram of permanent magnet synchronous motor

2.2 刮板输送机机械负载动力学模型

2.2.1 模型选择

刮板输送机的刮板链、刮板与煤料之间粘弹性特性复杂，其简化模型主要有两种：麦克斯韦(Maxwell)模型和伏格特(Kelvin-Voigt)模型。其中，Kelvin-Voigt 模型能够反映物体在受到外力之后的蠕变过程及其恢复过程，是物体对应力的响应。刮板机在实际输煤的过程中，刮板链没有表现出松弛现象，因此选用伏格特模型更适合用来表达刮板输送机的力学特性^[14-15]，如图 3 所示。

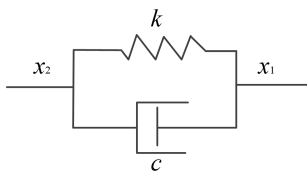


图3 刮板链 Kelvin-Voigt 模型

Fig.3 Kelvin-Voigt mode

模型可以用公式(1)表示为:

$$F = k(x_2 - x_1) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (1)$$

式中, k 为刮板机链条的刚度系数, 和其结构、材料有关, 单位 N/m; c 为刮板链的阻尼系数, 一般会将其与煤炭的粘性特性一起考虑, 单位 N·s/m。

2.2.2 模型建立

刮板输送机中部槽的刚度远大于刮板链的刚度, 因此将中部槽视为刚体结构, 本文不考虑其动力学特性。此时, 刮板机的动力学模型如图 4

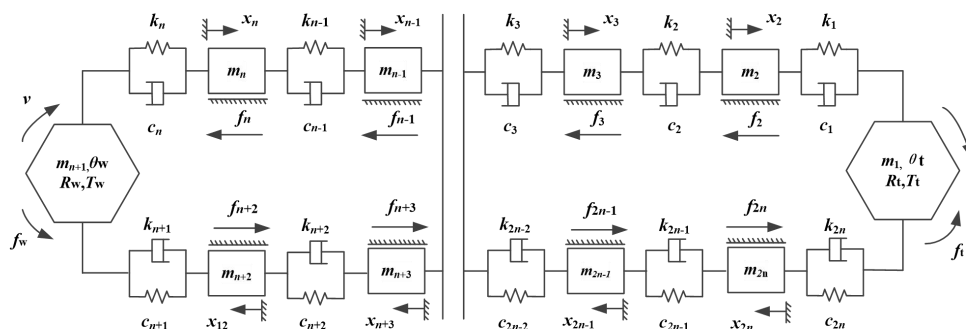


图4 刮板输送机动力学离散化模型

Fig.4 Dynamic discrete element model of the scraper conveyor

式中, T_t 、 T_w 分别为机头、机尾电机输出转矩, N·m; R_t 、 R_w 分别为机头、机尾链轮半径, m; $\ddot{\theta}_t$ 、 $\ddot{\theta}_w$ 分别为机头、机尾单元转动的角加速度, rad/s; f_t 、 f_w 分别为机头、机尾单元处的附件阻力, N; F_1 、 F_n 、 F_{n+1} 、 F_{2n} 为对应离散单元所受到的外力, N。所以刮板输送机整个机械负载的动态方程为:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}m_1R_t\ddot{\theta}_t + k_1(R_t\theta_t - x_2) + c_1(R_t\dot{\theta}_t - \dot{x}_2) + k_{2n}(R_t\theta_t - x_{2n}) + c_{2n}(R_t\dot{\theta}_t - \dot{x}_{2n}) = \frac{T_t}{R_t} - f_t \\ m_2\ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_3) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_1(x_2 - R_t\theta_t) + c_1(\dot{x}_2 - R_t\dot{\theta}_t) = -f_2 \\ \vdots \\ m_n\ddot{x}_n + k_n(x_n - R_w\theta_w) + c_n(\dot{x}_n - R_w\dot{\theta}_w) + k_{n-1}(x_n - x_{n-1}) + c_{n-1}(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) = -f_n \\ \frac{1}{2}m_wR_w\ddot{\theta}_w + k_{n+1}(R_w\theta_w - x_{n+2}) + c_{n+1}(R_w\dot{\theta}_w - \dot{x}_{n+2}) + k_n(R_w\theta_w - x_n) + c_n(R_w\dot{\theta}_w - \dot{x}_n) = \frac{T_w}{R_w} - f_w \\ \vdots \\ m_{2n}\ddot{x}_{2n} + k_{2n}(x_{2n} - R_t\theta_t) + c_{2n}(\dot{x}_{2n} - R_t\dot{\theta}_t) + k_{2n-1}(x_{2n} - x_{2n-1}) + c_{2n-1}(\dot{x}_{2n} - \dot{x}_{2n-1}) = -f_{2n} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)写成矩阵形式, 即^[18]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (6)$$

式中, M 为离散单元体的质量矩阵; C 为离散单元体的阻尼矩阵; K 为离散单元体的刚度矩阵; F 为离散单元体的外力矩阵; x 为离散单元体的位移矩阵; \dot{x} 为离散单元体的速度矩阵; \ddot{x} 为

所示^[16]。

机头永磁同步电机和机尾永磁同步电机分别驱动机头链轮和机尾链轮, 两个链轮与刮板链啮合进而带动刮板链做平动运动。根据图 4 刮板输送机动力学模型得到刮板输送机承载段和空载段单元体动力学方程^[17]:

$$F_{i-1} - F_i - f_i = m_i\ddot{x}_i \quad (2)$$

式中, F_i 、 F_{i-1} 为第 i 、 $i-1$ 单元体所受的外力, N; f_i 为第 i 单元体的摩擦阻力, N; m_i 为第 i 单元体等效质量, kg; \ddot{x}_i 第 i 单元体的加速度, m^2/s 。

机头、机尾单元体为扭转运动, 其动力学方程为:

$$T_t + (F_{2n} - F_1 - f_t)R_t = \frac{1}{2}m_tR_t^2\ddot{\theta}_t \quad (3)$$

$$T_w + (F_n - F_{n+1} - f_w)R_w = \frac{1}{2}m_wR_w^2\ddot{\theta}_w \quad (4)$$

散单元体的加速度矩阵。

将矩阵方程写成状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{V} = AV + BU \\ y = CV + DU \end{cases} \quad (7)$$

式中, V 为离散单元体的位移和速度组成的矩阵; U 为电动机转矩和摩擦力组成的矩阵; A 为方程的状态矩阵; B 为方程的输入矩阵; C 为方程的输出矩阵; D 为方程的直联矩阵。

2.2.3 模型中关键参数确定

(1) 摩擦力计算

图 3 中的摩擦力主要是指刮板链与中部槽之间的摩擦力, 在动态仿真过程中, 其摩擦阻力是随时间变化的, 其变化规律如下所示:

$$f = \begin{cases} F_i - F_{i-1} & (v \approx 0, x \approx 0) \\ f_d & (v > 0, x > 0) \end{cases} \quad (8)$$

式中, f_d 为刮板链的动摩擦力, N; F_i 为第 i 个单元体与前一个单元体之间的张力, N; F_{i-1} 为第 $i-1$ 个单元体与前一个单元体之间的张力, N。

(2) 刚度系数与阻尼系数

刮板机在实际工作过程中，链传动系统当前一个刮板链位移小于其后一个刮板链的位移时，此时的两个刮板链之间没有互相作用力，即刮板链只承受一个方向上的拉力而不承受另一个方向上的压力。所以，各个离散单元体的刚度系数可用公式 (9) 表示：

$$k_{i-1} = \begin{cases} k & (x_{i-1} > x_i) \\ 0 & (x_{i-1} \leq x_i) \end{cases} \quad (9)$$

MATLAB/Simulink 中搭建机-电耦合模型。

$$\begin{cases} T_t + (F_{2n} - F_1 - f_t)R_t = \frac{1}{2}m_t R_t^2 \ddot{\theta}_t \\ T_w + (F_n - F_{n+1} - f_w)R_w = \frac{1}{2}m_w R_w^2 \ddot{\theta}_w \end{cases} \quad (11)$$

同理，各个离散单元体的阻尼系数可用公式 (10) 表示：

$$c_{i-1} = \begin{cases} c & (x_{i-1} > x_i) \\ 0 & (x_{i-1} \leq x_i) \end{cases} \quad (10)$$

2.3 永磁直驱系统机-电耦合模型

机头链轮和机尾链轮的运动形式为转动，其动力学方程可以用式 (11) 表示^[14]。依据该式的输出转矩与机械负载之间的机电耦合关系即可在

此时，刮板输送机永磁直驱系统机-电耦合模型如图 5 所示。

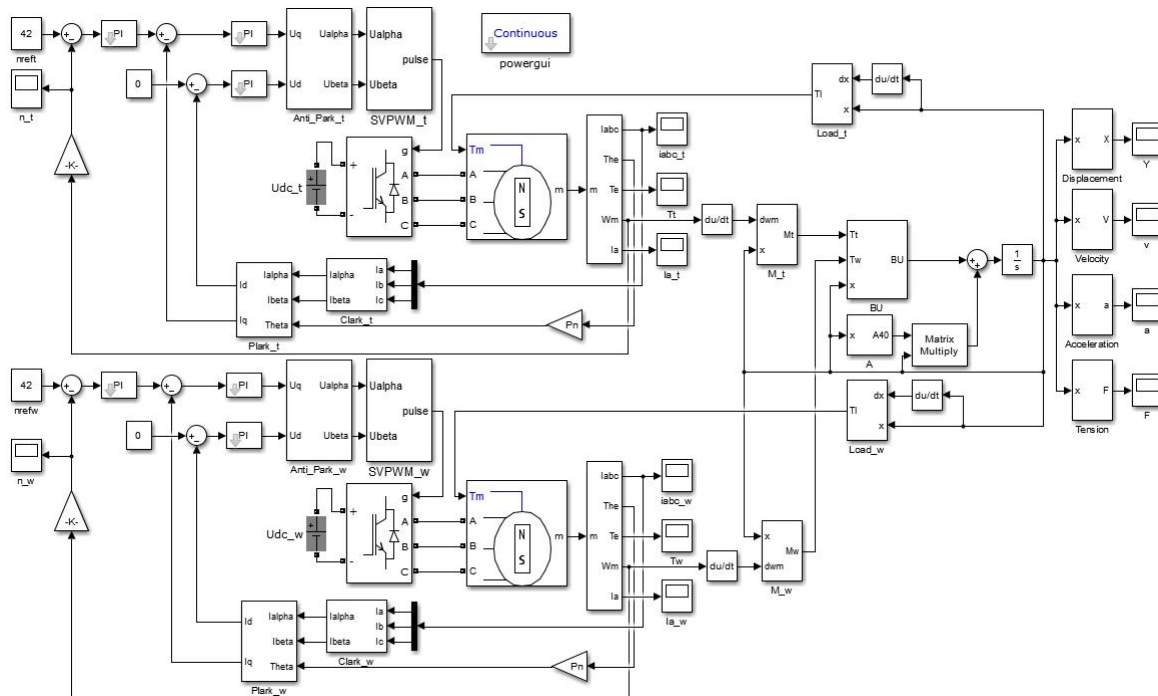


图 5 刮板输送机永磁直驱系统机-电耦合仿真模型

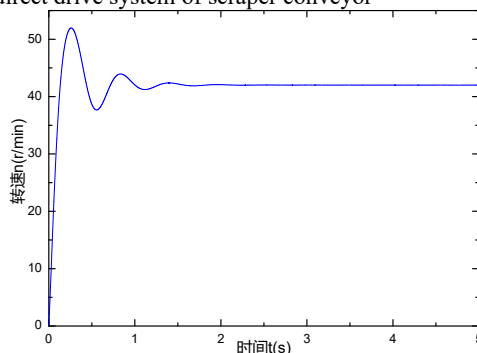
Fig.5 Electromechanical coupling simulation model of permanent magnet direct drive system of scraper conveyor

3 刮板输送机永磁直驱系统机-电耦合模型仿真分析

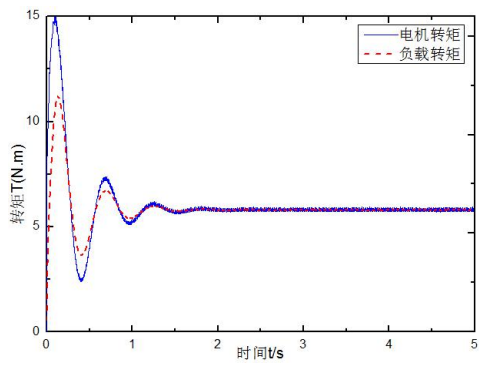
基于刮板输送机永磁直驱系统机-电耦合模型，分别仿真分析永磁直驱系统在空载启动、满载运行、多边形效应 3 种工况下永磁电机的输出转速、转矩、三相电流以及刮板链的速度、加速度、张力等动态特性。

3.1 空载启动仿真

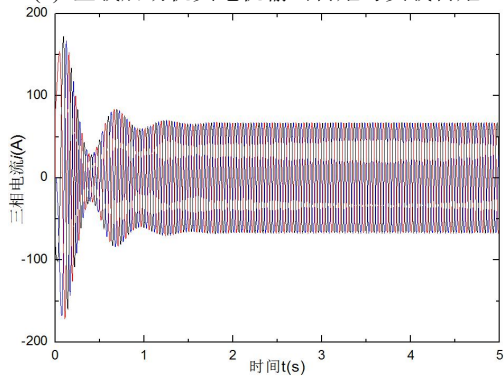
对空载启动工况进行仿真，得到的仿真曲线如图 6 所示。



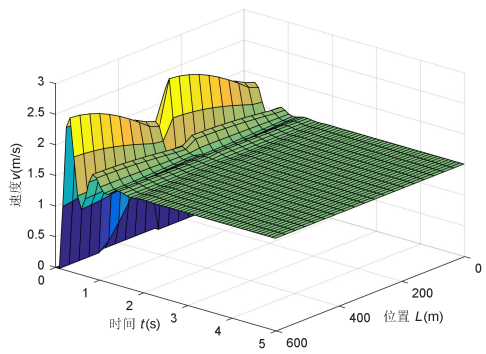
(a) 空载启动机头电机输出转速



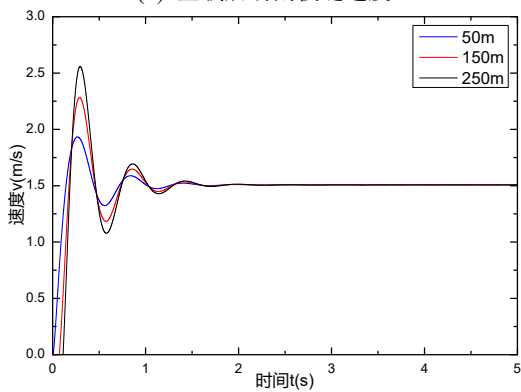
(b) 空载启动机头电机输出转矩与负载转矩



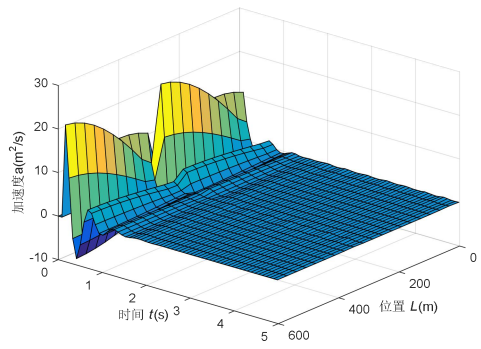
(c) 空载启动机头电机三相电流



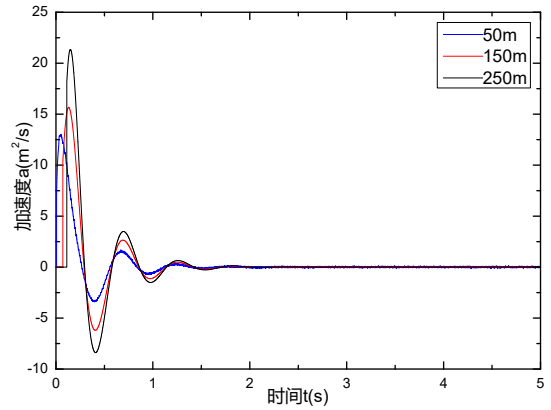
(d) 空载启动刮板链速度



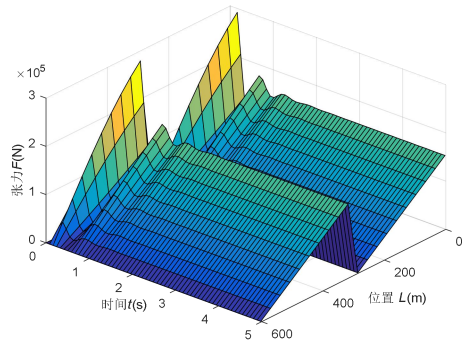
(e) 空载启动特殊点链条速度



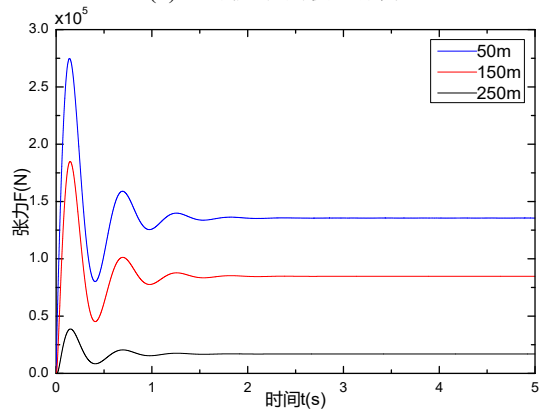
(f) 空载启动刮板链加速度



(g) 空载启动特殊点链条加速度



(h) 空载启动刮板链张力



(i) 空载启动特殊点链条张力

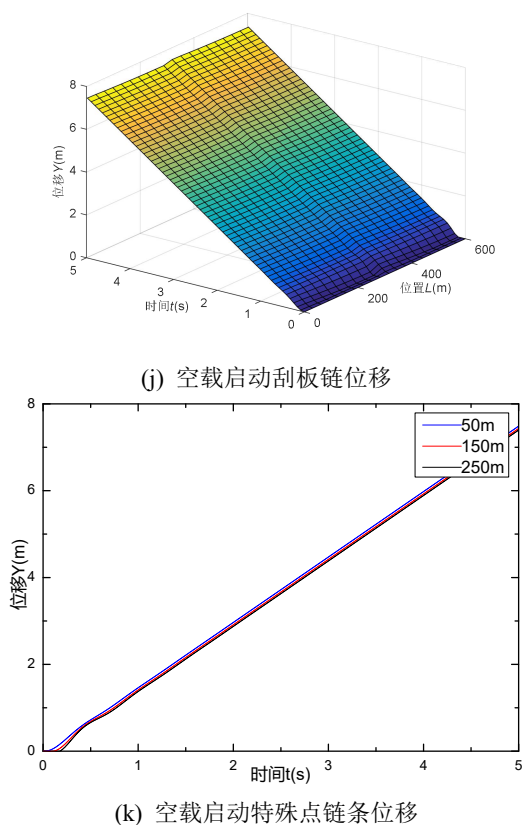


图6 空载时刮板输送机永磁直驱系统机电耦合动态特性

Fig.6 No-Load electromechanical coupling dynamic characteristics of permanent magnet direct drive system of scraper conveyor

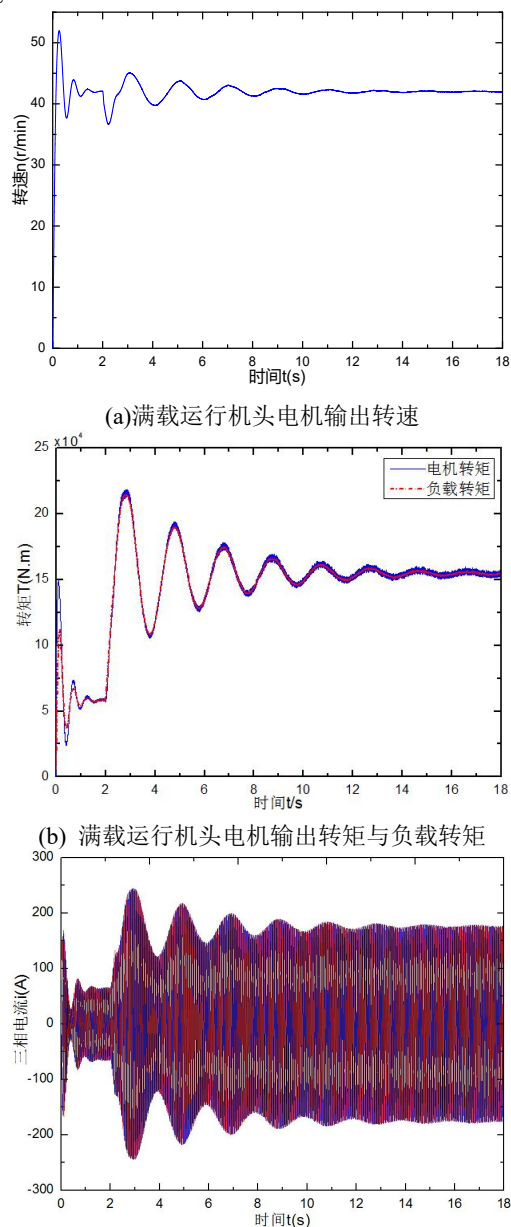
由图 6(a)可得,电机启动时输出转速快速达到最大值 52r/min,然后经过短暂的超调过程后也快速稳定运行在目标转速 42r/min,实现了其低转速运行。由图 6(b)可得,永磁同步电机在启动时电磁转矩快速达到最大值 $1.5 \times 10^5 \text{N}\cdot\text{m}$,经短暂的超调过程后稳定运行在 $5.7 \times 10^4 \text{N}\cdot\text{m}$ 左右,并且永磁同步电机输出转矩与摩擦阻力刚好达到动态平衡。此外,稳态时电机输出转矩围绕中心值上下波动,其原因在于电机控制系统采用速度控制,在速度保证稳定运行的前提下就会导致电机转矩略有波动。图 6(c)为刮板输送机机头电机空载启动时的三相电流,发现启动时出现的瞬时电流最大值为 170A 左右,并稳定运行在 65A 左右且远小于其变频器额定电流,说明其空载最大启动电流符合设计要求。

由图 6(d)、(f)与(h)的刮板输送机空载启动链条速度、加速度和张力的变化过程三维图可得,各段链条速度、加速度、张力在 0~1s 内变化较大,随后波动逐渐降低,并且三者者在 1.5s 左右时开始趋于平稳。图 6(e)、(g)、(i)和(k)分别给出的是承载段第 50m、150m 和 250m 处链条的速度、加速度、张力和位移变化过程图,由图 6(e)与(k)可得,

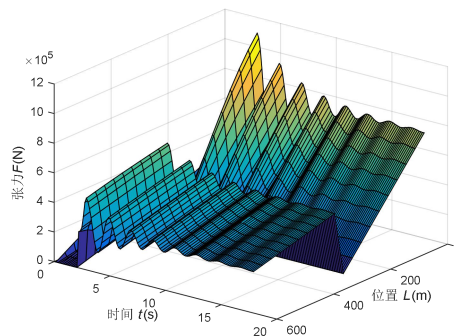
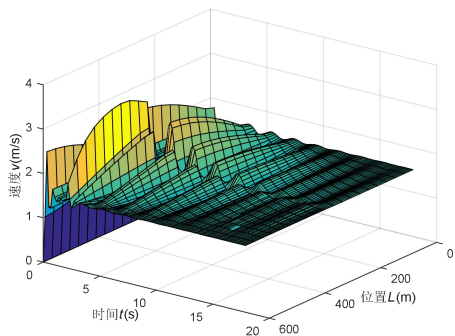
电机启动后第 50m、150m、250m 处链条依次响应,因刮板链存在弹性作用,使得链条运动是以一定的速度从机头到机尾逐渐响应,而不是整个链条同时运动,不同位置点的刮板链速度和位移存在一定的时间差。并且从图 (e)和(g)中看出第 250m 处的链条速度波动与加速度波动要比第 50 处、第 150m 处的速度波动与加速度波动要大,即靠近链条与链轮分离点的链条速度和加速度波动要比靠近链条与链轮啮合点的链条速度和加速度波动要大。

3.2 满载运行仿真

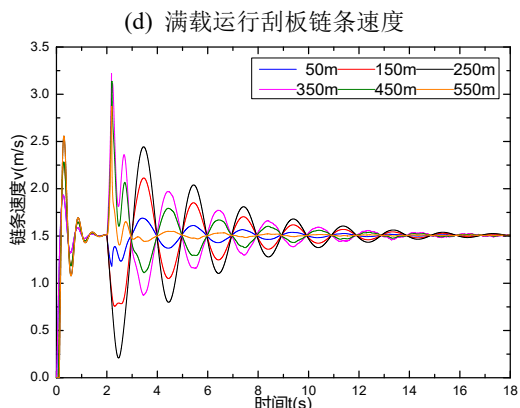
从图 6 中发现在经过大约 1.5s 的超调后,刮板输送机永磁直驱系统基本实现稳定运行,所以在 2s 时对刮板输送机施加负载实现满载工况运行,即对刮板输送机承载侧负载施加单位长度煤料 463kg,此时由仿真模型得到的曲线如图 7 所示。



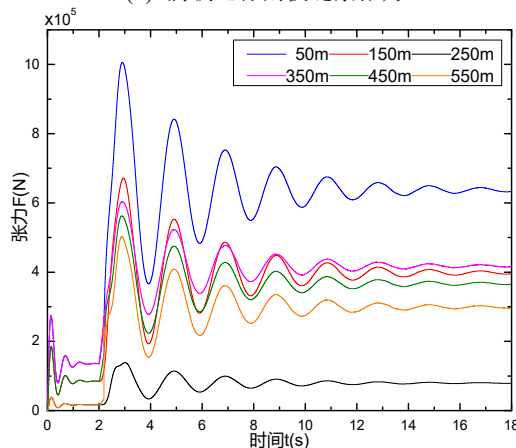
(c) 满载运行机头电机三相电流



(h) 满载运行刮板链条张力

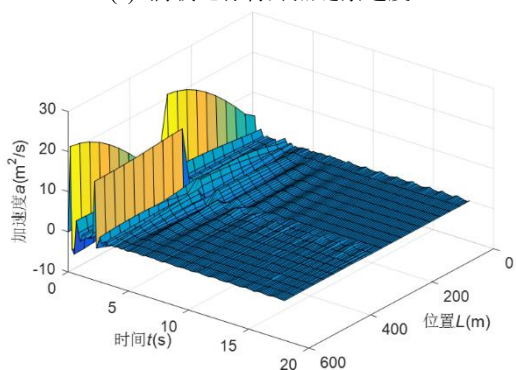


(d) 满载运行刮板链条速度

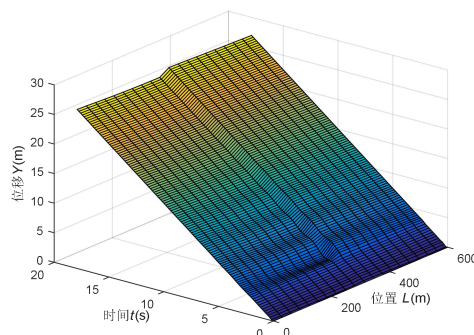


(i) 满载运行特殊点链条张力

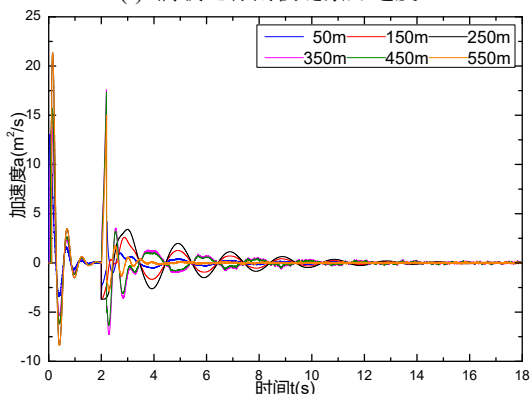
(e) 满载运行特殊点链条速度



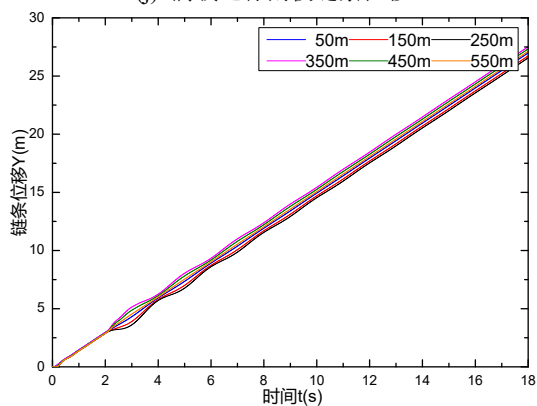
(f) 满载运行刮板链条加速度



(j) 满载运行刮板链条位移



(g) 满载运行特殊点链条加速度



(k) 满载运行特殊点链条位移

图7 满载运行刮板输送机永磁直驱系统机电耦合动态特性

Fig.7 Full-Load electromechanical coupling dynamic characteristics of permanent magnet direct drive system of scraper conveyor

如图 7(a)所示,当刮板输送机由稳定运行到突然满载时,机头电机输出转速会突然下降,经过约 14 秒的超调过程基本稳定在设定转速 42r/min,在超调过程中有转速波动差值仅为 8r/min,波动率小于 20%;图 7(b)可得,刮板输送机满载突变时电机输出转矩先上升后下降,其中转矩波动的最大值约为 $2.15 \times 10^5 \text{N}\cdot\text{m}$,说明其永磁电机驱动系统在突增负载过程中输出转速与转矩能够快速响应,迅速恢复到稳态运行工况。此外,永磁同步电机输出转矩与负载转矩两者波形吻合较好,这说明电机对负载波动的响应追踪的较准确。传统的减速器虽然降低了传动效率,但具有一定的柔性缓冲作用,本文中的永磁直驱系统无减速器装置,电机输出转速与转矩对负载突变响应较快,且波动较大。由图 7(c)可得最大突变电流约 245A,小于变频器的最大过载电流,且持续时间较短,说明该机电耦合模型能够满足满载运行过程中的最大突变电流带来的冲击。

图 7(d)~(k)为突变载荷下的刮板输送机动态响应特性曲线,其中从图 7(d)与(e)中看出,载荷突变时承载段的刮板链速度首先表现出降低,空回段刮板链速度表现出增加,并且第 250m 处的刮板链速度降低量要比第 50m 处、第 150m 处链条速度降低量要大,第 350m 刮板链速度增加量要比第 450m 处、第 550m 处链条速度增加量要大,这说明载荷突变时靠近机尾链轮处刮板链的波动要比靠近机头链轮处的刮板链受到的影响大且持续时间更长。并且从图 8(f)与(g)看出刮板链加速度变化规律与其速度变化规律类似。由于刮板输送机从空载到满载的过程是整个承载段同时突变的且突变时间较短,导致其空回段刮板链加速度在载荷突变后出现短暂的较高峰值,并且载荷突变时链条速度波动也较为厉害。从图(h、i)看出,满载运行时承载段刮板链之间的张力相差较大,空回段刮板链之间的张力相差较小,并且承载段刮板链要比空回段刮板链响应要快。

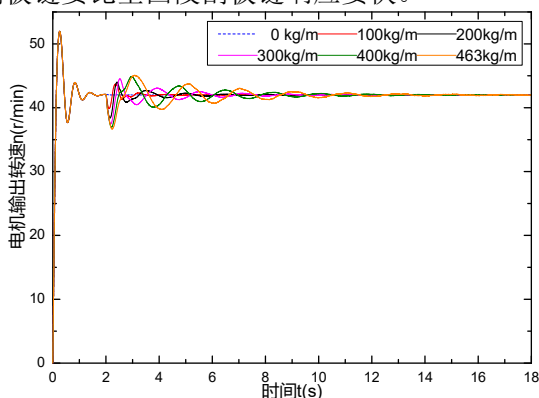


图 8 不同负载突变永磁同步电机输出转速

Fig.8 The output speed of the PMSM with different load mutations

图 8 给出了刮板输送机不同负载突变量,即设定刮板输送机空载启动并稳定运行,然后分别在第 2s 时施加单位长度煤料 100kg、200kg、300kg、400kg、463kg 的工况下永磁同步电机输出转速变化的情况。从图中看出,随着刮板输送机负载突变量的增大,永磁同步电机输出转速波动的波谷波峰之间的差值也就越大,波动持续的时间也就越长,即输出速度受到的影响大小及持续时间长短与负载突变量是成正相关关系。电动机输出转矩以及三相电流都有类似的突变响应规律,此处不再多述。

3.3 链轮多边形效应仿真

前面的研究忽略了刮板输送机链轮的多边形效应,因此为了分析多边形效应对永磁直驱系统的动态特性的影响,仿真研究空载工况下的刮板输送机系统。假设刮板机链轮状态如图 9 所示,则链轮和链条啮合处的速度和加速度分别如下 [19-21];

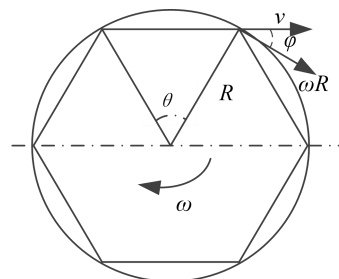


图 9 链轮与链条啮合原理

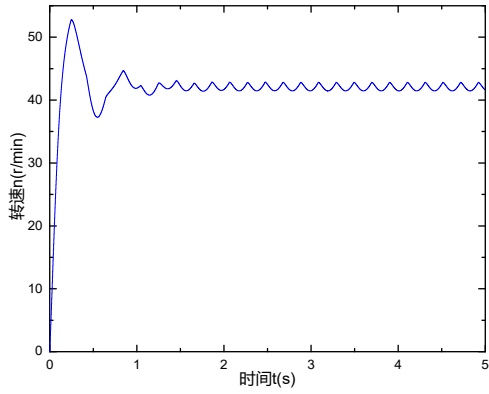
Fig.9 Mesh principle of sprocket and chain

$$\begin{cases} v_{(t)} = R\omega \cos(\varphi) \\ \alpha_{(t)} = \dot{v}_{(t)} = R[\dot{\omega} \cos(\varphi) - \dot{\varphi} \omega \sin(\varphi)] \\ \varphi = \varphi_0 + \theta_{(t)} - \text{INT} \left[\theta_{(t)} \times \frac{Z}{2\pi} \right] \times \frac{2\pi}{Z} - \frac{\pi}{Z} \end{cases} \quad (12)$$

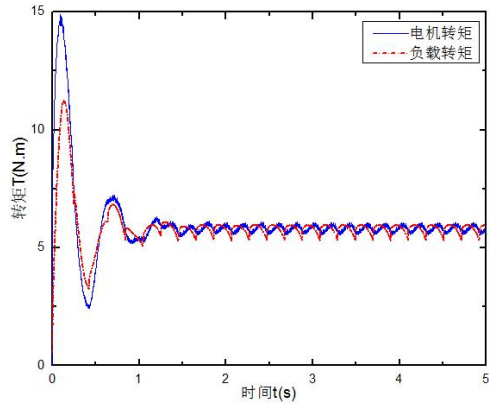
式中, R 为刮板机链轮的节圆半径, m; $\theta_{(t)}$ 为刮板机链轮的转角, rad; $\omega_{(t)}$ 为刮板机链轮角速度, rad/s; φ_0 为初始位置角度, rad; INT 为向下取整函数; φ 为啮合处轮齿的圆周速度 ωR 与水平线的夹角, rad。

刮板输送机链轮多边形效应影响下的永磁直驱系统动态特性曲线如图 10 所示,发现因为链轮的多边形,永磁同步电机输出转速、转矩、三相电流以及链条速度、加速度、张力等动态特性曲线呈现出周期性波动,其中电机输出转速在 41.4r/min~42.8r/min 之间波动,波动率不到 3%。并且从图 10(e)、(g)与(i)中看出第 50m 处链条比第 150m、250m 处链条受到链轮多边形效应的影

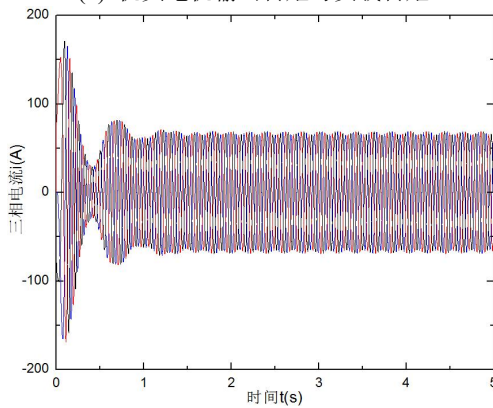
响更大，即与机尾链轮分离处的链条比，机头链轮啮合处的链条更易受到多边形效应的影响。



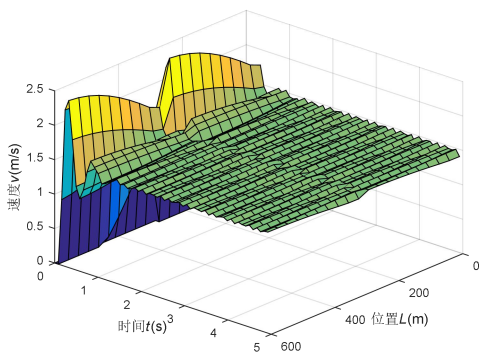
(a) 机头电机输出转速



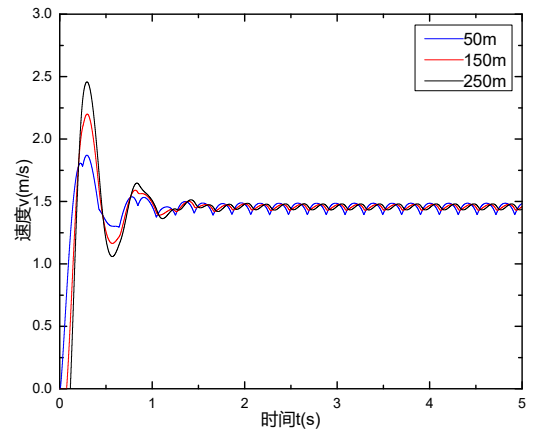
(b) 机头电机输出转矩与负载转矩



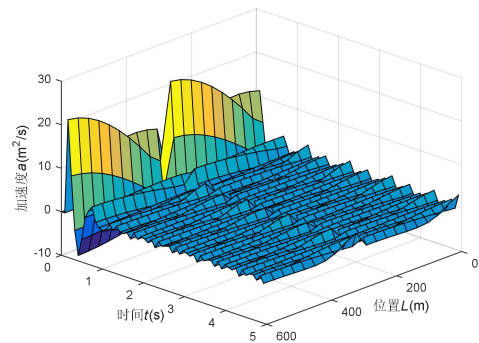
(c) 机头电机三相电流



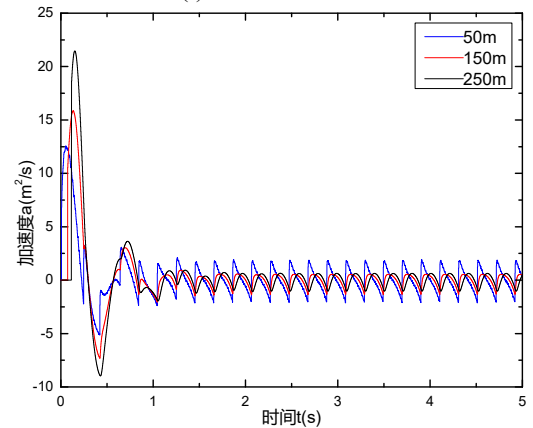
(d) 刮板链速度



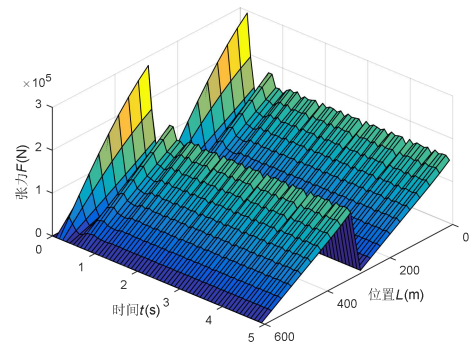
(e) 特殊点链条速度



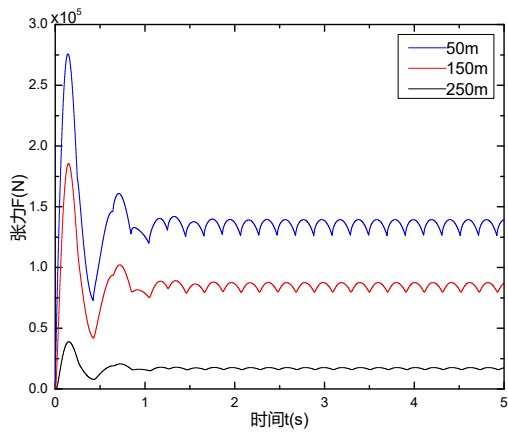
(f) 刮板链加速度



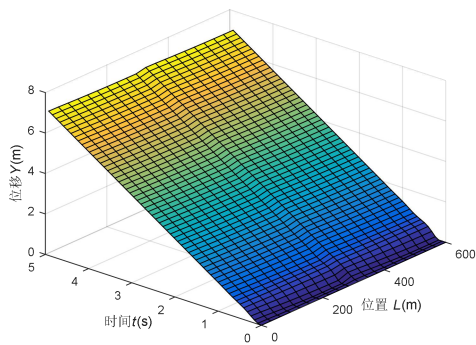
(g) 特殊点链条加速度



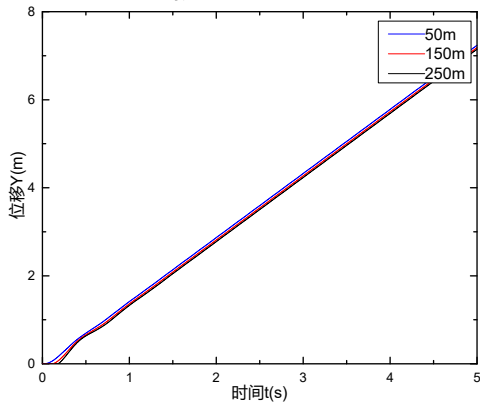
(h) 刮板链张力



(i) 特殊点链条张力



(j) 刮板链位移



(k) 特殊点链条位移

图 10 链轮多变形时刮板输送机永磁直驱系统机电耦合动态特性

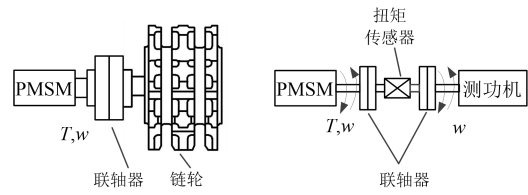
Fig.10 Electromechanical coupling model dynamic characteristics of permanent magnet direct drive system of scraper conveyer with sprocket polymorphism

4 刮板输送机永磁直驱系统模拟试验研究

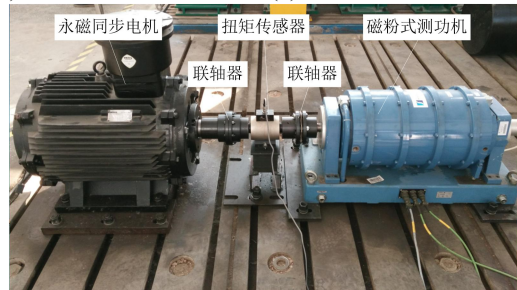
4.1 刮板输送机机械负载等效处理

刮板输送机永磁直驱系统通过联轴器直接驱动链轮，其结构简图如图 11(a)所示。但是鉴于永磁同步电机直驱刮板输送机实物试验的局限性条件，因此在实验室允许的条件下开展永磁直驱系统的模拟试验研究，并将磁粉式测功机作为模拟负载装置，模拟试验系统结构简图如图 11(b)所示。

示。



(a)永磁直驱系统结构简图 (b)模拟试验系统结构简图

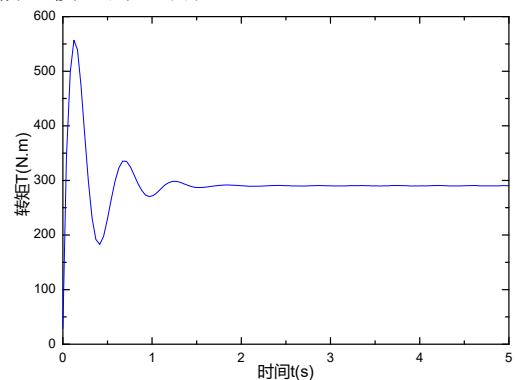


(c) 小功率永磁同步电机直驱试验平台

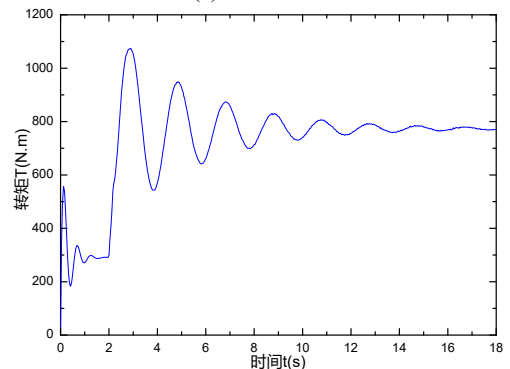
图 11 永磁直驱系统与负载模拟试验系统示意图

Fig.11 Experiment platform of small power PMSM direct drive

鉴于实验室永磁电机功率仅有 37kW,无法满足刮板输送机永磁直驱电机设计功率，因此将仿真得到的空载启动、满载运行和多边形效应等几种工况下的负载动态特性曲线缩小 200 倍后加载到测功机里，并作为试验永磁电机的模拟负载曲线，如图 12 所示。若通过模拟试验台架得到的电机输出转速、转矩和电流变化趋势与对应工况的机-电耦合模型仿真得到的相关参数变化规律保持一致，即可从侧面说明所建立永磁直驱系统机电耦合模型的正确性。



(a) 空载启动



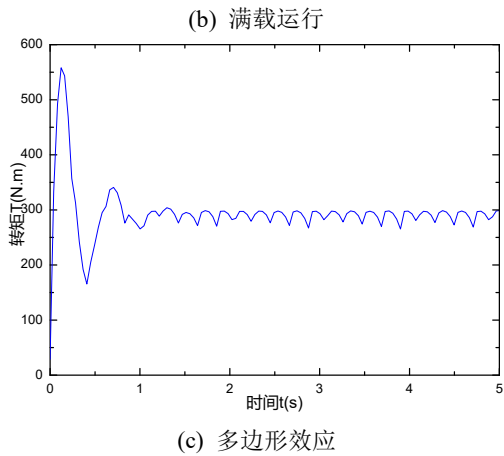
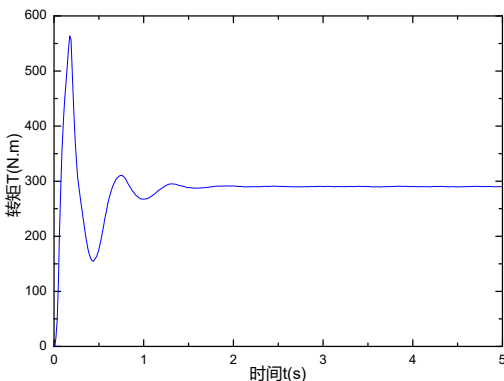


图 12 刮板输送机机械负载等效特性曲线

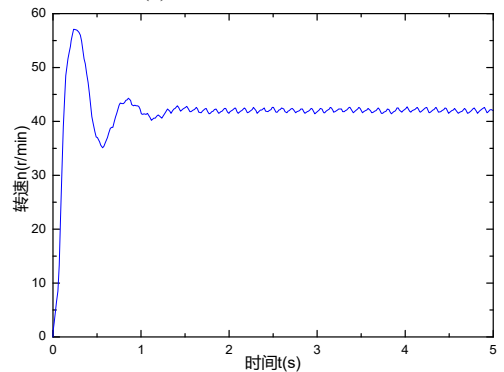
Fig.12 Mechanical load equivalent characteristic curve of scraper conveyor

4.2 空载启动试验

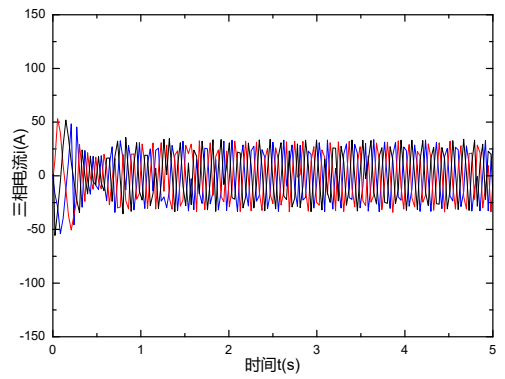
通过简化的模拟试验得出的电机输出转速、输出转矩以及三相电流曲线如图 13 所示，比较试验得到的电机转矩(图 13(a))和机械负载特性曲线(图 12(a))，发现试验永磁电机输出转矩响应速度比测功机里加载的机械负载曲线略慢，这是因为测功机响应速度稍有滞后的原因。但是通过台架模拟试验得出的电机特性曲线(图 13(a、b、c))变化规律和仿真试验得到的特性曲线(图 6(b、a、c))变化规律基本保持一致，从侧面验证了所搭建模型仿真结果的合理性。



(a) 试验电机输出转矩



(b) 试验电机输出转速



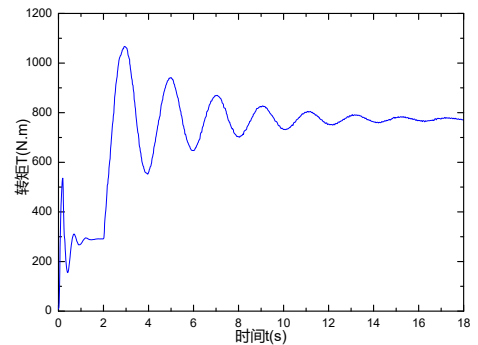
(c) 试验电机三相电流

图 13 空载启动时永磁驱动系统动态响应

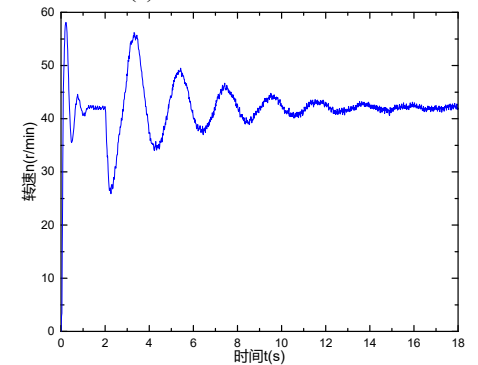
Fig.13 No-load start dynamic response of permanent magnet drive system

4.3 满载运行试验

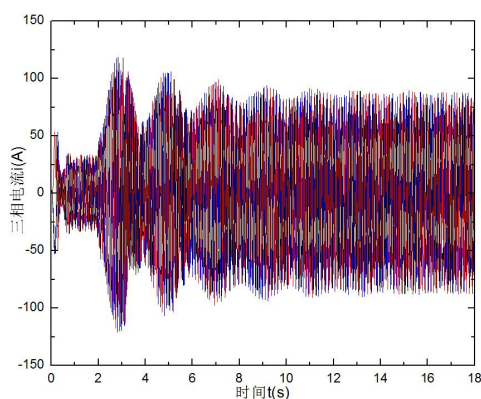
通过台架模拟试验得出的电机输出转矩、输出转速以及三相电流如图 14 所示。比较图 14(a)与图 12(b)，发现电机转矩特性曲线(图 14(a))变化趋势与加载的特性曲线(图 12(b))变化趋势基本保持一致。在负载变化后的 14 秒内，电机转矩波动比较剧烈，随后才逐渐稳定下来。比较图 14(b)和图 7(a)，得到试验电机转速(图 14(b))波动比较大，其中波动时最大转速为 55.5r/min，最小波动转速 26r/min。电机试验得到的三相电流(图 14(c))和仿真得到的三相电流(图 7(c))变化趋势基本保持一致。直驱系统电机对负载变化较为敏感，应该增加对直驱电机的控制算法研究，以减小速度的波动，增强直驱系统的稳定性和工作性能。



(a) 试验电机输出转矩



(b) 试验电机输出转速



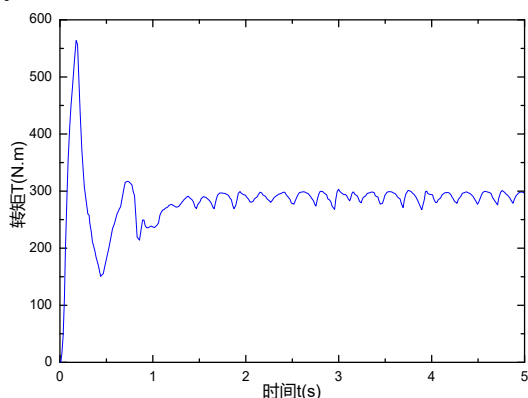
(c) 试验电机三相电流

图 14 满载运行时永磁驱动系统动态响应

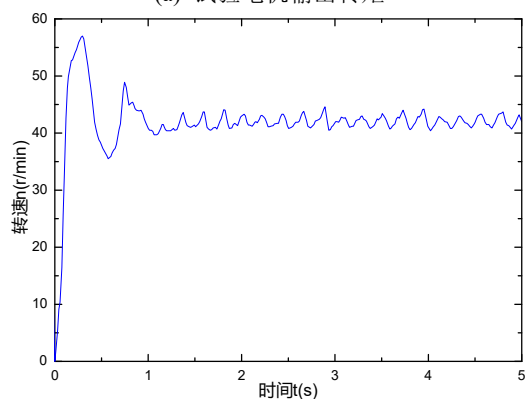
Fig.14 Full Load dynamic response of permanent magnet drive system

4.3 链轮多边形效应试验

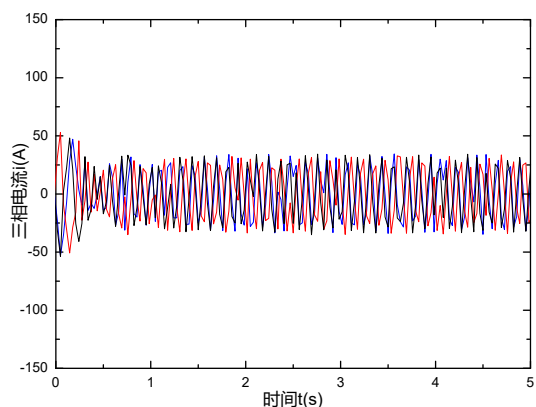
通过台架试验得到的电机输出转速、输出转矩以及电流如图 15(a、b、c)所示。运行稳定后,电机输出转矩(图 15(a))波动范围为 265.5~303N·m,电机输出转速(图 15(b))波动范围为 41.5~44.6 r/min,波动率为 7.3%。从图 15 中得出多边形效应造成永磁直驱系统出现周期性波动。



(a) 试验电机输出转矩



(b) 试验电机输出转速



(c) 试验电机三相电流

图 15 多边形效应时永磁驱动系统动态响应

Fig.15 Dynamic response of permanent magnet drive system in polygon effect

5 结论

本文首先根据年输送量 1500 万吨分别完成永磁同步电机和刮板输送机关键技术参数的匹配计数,然后通过搭建永磁直驱刮板输送机系统机-电耦合模型,仿真研究永磁直驱系统在空载启动、满载运行和多边形效应等几种工况的特性曲线,并通过直驱模拟台架试验从侧面验证所建机电耦合模型的正确性。主要有以下结论:

(1) 传统的减速器虽然降低了传动效率,但具有一定的柔性缓冲作用,本文中的永磁直驱系统无减速器装置,整个系统表现出对负载的响应较快且比较准确,但电机输出转速与转矩对负载突变响应波动较大,对直驱电机性能要求比较高。

(2) 永磁直驱系统的动态响应在突变负载下与突变量成正相关关系,系统波动较大,应当从驱动系统控制算法的优化角度出发减小波动,改善其性能。

(3) 分析链轮多边形的影响,得出多边形效应会造成电机输出转速、输出转矩、三相电流以及链条速度、加速度和张力的等呈现出周期性波动,且越靠近机头链轮啮合处的链条更易受到多边形效应的影响。

参考文献:

- [1] 中国能源研究会. 中国能源发展报告[R], 北京:中国建材出版社, 2018.
China Energy Research Society. The energy development research of China[R]. Beijing: Chinese building materials industry publication, 2018.
- [2] Wang Jinhua, Yu Bin, Kang Hongpu, Wang Guofa, Mao Debing, Liang Yuntao, Jiang Pengfei. Key technologies and equipment for a fully mechanized top-coal caving operation with a large mining height at ultra-thick coal seams[J]. International Journal of Coal

- Science & Technology* 2015,2(2): 97-161.
- [3] 杨晓东.工作面刮板输送机技术现状及发展方向[J]. 煤矿机械, 2017, 38(3): 6-7.
YANG Xiaodong. Present situation and development direction of working face scraper conveyor[J]. *Coal Mine Machinery*, 2017, 38(3): 6-7.
- [4] Wang Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines[J]. *International Journal of Coal Science & Technology* 2014, 1(3):253-260.
- [5] 刘伟. 液力耦合器对刮板电机功率分配的影响[J]. 煤矿机械, 2014, 35(10): 63-65.
LIU Wei. Influence of motor power budget about coupling to armored face conveyor[J]. *Coal Mine Machinery*, 2014, 35(10): 63-65.
- [6] 常浩. 刮板输送机减速箱箱体有限元分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
CHANG Hao. Finite element analysis of gearbox of scraper conveyor[D]. Taiyuan: Taiyuan university of technology, 2017.
- [7] 王旭启, 杜振华. 刮板输送机变频驱动控制策略研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(2): 283-286.
WANG Xuqi, DU Zhenhua. Control strategy of variable frequency drive for scraper conveyor[J]. *Journal of Xinyang Normal University Natural Science Edition*, 2017, 30(2): 283-286.
- [8] 闫晓栋. 刮板输送机减速器事故原因及改进措施[J]. 能源与节能, 2018(1): 164-165.
YAN Xiaodong. Causes of the accident in speed reducer of scraper conveyor and the improvement measures[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2018(1): 164-165.
- [9] 鲍久圣, 王洋洋, 葛世荣 等. 一种智能水冷的刮板输送机永磁变频直驱系统: 中国, CN107555082A [P]. 2018-01-09.
BAO Jiusheng, WANG Yangyang, GE Shirong et al. An intelligent water-cooled permanent magnet frequency conversion direct drive system of scraper conveyor: China, CN107555082A [P]. 2018-01-09.
- [10] Lu E., Li W., Yang X.F., et al. Simulation study on speed control of permanent magnet direct-driven system for mining scraper conveyor[J]. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 2018, 10(1): 1-11.
- [11] 王洋洋. 刮板输送机永磁直驱系统机电耦合模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
WANG Yangyang. Research on electromechanical coupling model of permanent magnet direct drive system of scraper conveyor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [12] 张强, 王海舰, 毛君 等. 刮板输送机系统机电耦合模型及仿真分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(23): 3134-3139.
ZHANG Qiang, WANG Haijian, MAO Jun, et al. Electromechanical coupling modeling and simulation analysis of scraper conveyor system[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(23): 3134-3139.
- [13] 王春民, 嵇艳鞠, 栾卉 等. MATLAB/SIMULINK 永磁同步电机矢量控制系统仿真[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2009, 27(1): 17-23.
WANG Chunmin, JI Yanju, LUAN Hui, et al. Simulation of PMSM vector control system based on MATLAB/SIMULINK[J]. *Journal of Jilin University(Information Science Edition)*, 2009, 27(1): 17-23.
- [14] Dolipski M. The stress of chain efficient scraper conveyor[J]. *Mech. Autom Gorn.* 1993, (10): 21-23.
- [15] Lu E., Li W., Yang X.F., et al. Composite sliding mode control of a permanent magnet direct-driven system for a mining scraper conveyor[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 22399-22408.
- [16] 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. Dynamic behavior analysis on the ring chain transmission system of an armoured face conveyor[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(17): 50-56.
- [17] 张东升, 毛君, 刘占胜. 刮板输送机启动及制动动力学特性仿真与试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 513-521.
ZHANG Dongsheng, Mao Jun, Liu Zhansheng. Dynamic simulation and experiment on the starting and braking of scraper conveyor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(2): 513-521.
- [18] 张志雄. 重型刮板输送机启动问题研究与无共振设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
ZHANG Zhixiong. The research on start-up problem and no resonance design of heavy scraper conveyor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [19] 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 Jun. Dynamic behavior analysis and control theory research of scraper conveyor[D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2006.
- [20] 葛世荣, 鲍久圣, 曹国华. 采矿运输技术与装备[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2015
GE Shirong, BAO Jiusheng, CAO Guohua. *Transportation and hoisting technology and equipment in mining*[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2015. [J]. *机械管理开发*, 2017(11): 133-135.
- [21] Cheng Wangjun, Chi Chengzhong, Wang Yongzhen, Lin Peng, Liang Wei. Upper-bound and finite element analyses of multi-row sprocket during cold semi-precision forging process [J]. *International Journal of Coal Science & Technology* 2015, 2(3): 245-253.

