



永磁限矩减速驱动的刮板输送机冲击动态特性研究

冯浩帅 崔红伟 廉自生 师理智 曹保林 苏兴涛 刘志

引用本文:

冯浩帅, 崔红伟, 廉自生, 等. 永磁限矩减速驱动的刮板输送机冲击动态特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 233–246.

FENG Haoshuai, CUI Hongwei, LIAN Zisheng. Research on impact dynamic characteristics of scraper conveyor driven by permanent magnet limited torque reduction drive[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 233–246.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0925>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

刮板输送机多永磁电机串联驱动新模式及关键技术

New mode and key technology of series drive of multiple permanent magnet motors for scraper conveyor
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 238–252 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1396>

双端驱动刮板输送机机电耦合模型及动力学仿真分析

Electromechanical coupling model and dynamics simulation analysis of two-motor drive scraper conveyor
煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c7d335b9-33a3-4c34-8698-1ee162fd6651>

新型大功率分断式永磁涡流摩擦限矩器的轴向力-滑差特性研究

Research on the axial force-slip characteristics of permanent magnetic eddy current Frictional torque limiter
煤炭科学技术. 2023, 51(4): 198–208 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1352>

矿用刮板输送机垂直冲击下负载电流特性研究

Study on load current characteristics of scraper conveyor under vertical impact
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 400–411 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1140>

永磁驱动技术及其在矿山装备领域的应用现状

Permanent magnet driving technology and its application status in the field of mining equipment
煤炭科学技术. 2022, 50(3): 275–285 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b11bc765-faac-40fa-87dd-2542fe8d4a9d>

基于永磁涡流传动的长距离带式输送机启动特性研究

Research on starting characteristics of long distance belt conveyor based on permanent magnet eddy current transmission
煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/24e2bd0c-2588-4f45-9649-55ce04537d47>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

冯浩帅, 崔红伟, 廉自生, 等. 永磁限矩减速驱动的刮板输送机冲击动态特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 233–246.

FENG Haoshuai, CUI Hongwei, LIAN Zisheng, *et al.* Research on impact dynamic characteristics of scraper conveyor driven by permanent magnet limited torque reduction drive[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 233–246.

永磁限矩减速驱动的刮板输送机冲击动态特性研究

冯浩帅¹, 崔红伟^{1,2}, 廉自生^{1,2}, 师理智³, 曹保林³, 苏兴涛¹, 刘 志¹

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 煤矿综采装备山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

3. 山西维达传动科技有限公司, 山西 太原 030032)

摘 要: 刮板输送机作为煤矿综采工作面核心装备, 不断向大运量、长运距、大功率方向发展, 传统的刮板输送机驱动系统多采用“异步电机+软启动装置+减速器”的方式来实现低速大扭矩驱动, 智能化程度的提高及极端恶劣的工作环境使得其发生故障的概率显著增加, 严重影响开采效率。因此, 设计研发了一种新型的永磁限矩减速装置, 高度集成了永磁同步电机、二级行星减速器和柱面摩擦限矩器, 运用 ADAMS 和 MATLAB/Simulink 软件建立了刮板输送机及行星减速器的动力学仿真模型、柱面摩擦限矩器关键部件的刚柔耦合模型和永磁电机的控制模型, 实现了机电耦合系统的联合仿真。仿真分析了新型永磁限矩减速装置驱动的刮板输送机在冲击载荷工况下永磁同步电机的转速、转矩、三相电流和刮板机链传动系统的速度、张力、转矩以及行星传动的转速、转矩、啮合力等动态响应。结果表明, 有无限矩器保护下的冲击负载电流分别为稳定运行时的 2.9 倍和 7.7 倍, 冲击故障下电机输出功率降低约 48%, 柱面摩擦限矩器的存在很好地降低了负载端冲击载荷对电机的影响; 当冲击载荷过大时, 链传动系统各部件之间受到较大的力作用, 此时限矩器会立刻打滑, 系统进行卸载, 对各传动部件起到过载保护作用; 过大的冲击载荷也会导致减速器齿轮之间冲击增大, 限矩器能起到快速、准确的保护, 传动系统所受负载冲击减少约 78%, 证明该永磁限矩减速装置能很好地满足低速大扭矩的工程应用。研究内容可为提高刮板输送机传动系统的可靠性及推进煤机装置智能化奠定基础。

关键词: 永磁限矩减速驱动; 刮板输送机; 冲击载荷; 动态特性; 机械保护

中图分类号: TD528

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)11-0233-14

Research on impact dynamic characteristics of scraper conveyor driven by permanent magnet limited torque reduction drive

FENG Haoshuai¹, CUI Hongwei^{1,2}, LIAN Zisheng^{1,2}, SHI Lizhi³, CAO Baolin³, SU Xingtao¹, LIU Zhi¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Fully Mechanized Coal Mining Equipment, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Shanxi Weida Transmission Technology Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: As the main piece of equipment used in coal mining, the scraper conveyor is always evolving to have larger capacities, longer haulage distances, and higher power. The traditional scraper conveyor drive system mostly adopts the method of “asynchronous motor + soft start device + reducer” to realize the low-speed and high torque drive. However, due to increased intelligence and extremely harsh working conditions, there is a significant risk of failure, which has a negative impact on mining efficiency. The possibility of failure increases dramatically due to the extremely hard-working environment and the rise in intelligence, which has a major impact on mining effi-

收稿日期: 2024-07-03

策划编辑: 常 琛

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2024-0925

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1810123); 山西省重点研发计划资助项目(201803D121011)

作者简介: 冯浩帅(2000—), 男, 河南郑州人, 硕士研究生。E-mail: fenghszz@163.com

通讯作者: 崔红伟(1986—), 男, 山西左权人, 副教授, 博士。E-mail: cuihongwei@tyut.edu.cn

ciency. Therefore, a new type of permanent magnet torque-limiting reduction device was designed and developed, which was highly integrated by a permanent magnet synchronous motor, a two-stage planetary reducer, and a column surface friction torque limiter. Additionally, The dynamic simulation model of the scraper conveyor and planetary reducer, the rigid-flexible coupling model of key components of the column friction torque limiter, and the control model of the permanent magnet motor were established by using ADAMS and MATLAB/Simulink software, realizing the joint simulation of the electromechanical coupling system. Dynamic response of speed, torque, and three-phase current of permanent magnet synchronous motor and speed, tension, and torque of scraper chain drive system as well as speed, torque, and meshing force of planetary drive of a scraper conveyor driven by a new type of permanent magnet torque-limiting reducer device were simulated and analyzed under impact load condition. The results show that the inrush load current with and without torque limiter protection is 2.9 and 7.7 times higher than that in stable operation, and the motor output power is reduced by about 48% under the inrush fault. The effect of shock loads on the motor at the load side is well reduced by the column friction torque limiter. When subjected to excessive shock loads, the chain drive system components are subjected to large forces between them. In this case, the torque limiter slips immediately, the system is unloaded and the drive components are protected against overload. The shock between the gears of the reducer is also increased by excessive shock loads, which are quickly and accurately protected by the torque limiter. Conventional systems are subjected to about 78% less load impact, proving that the permanent magnet limited-pitch reduction device is well suited for low-speed, high-torque engineering applications. The research findings have the potential to enhance the scraper conveyor drive system's dependability and boost the coal machine device's intelligence.

Key words: permanent magnet limited torque reduction drive; scraper conveyors; shock loads; dynamic behavior; mechanical protection

0 引言

我国煤炭资源储量丰富,2023年,煤炭消费量占能源消费总量的55.3%,随着经济的高速发展,对能源的需求也日益增加,煤炭作为主体能源其地位依然稳固,我国煤炭开采技术也在不断进步,综采智能化装备越来越得到广泛应用^[1]。刮板输送机、采煤机和液压支架并称为煤矿综采装备“三机”,其中刮板输送机作为最主要的运煤设备,不仅要为采煤机提供运行轨道,还要为液压支架提供推溜的支点^[2-3]。

目前刮板输送机正朝着大功率方向发展,传统的驱动方式采用异步电机进行驱动,由于其设计上的缺陷,极数不能设计的很大,为了满足需求,通常采用“异步电机+软启动装置+减速器”的传动方式,但由此造成传动链过长,不满足煤矿井下的空间需求^[4]。在煤矿井下工作中有着多种不确定因素,刮板输送机的异常载荷工况无法避免,如煤块脱落导致的片帮等会对传动系统的稳定运行造成重大影响,且常用的机械保护装置对于大质量大惯性的刮板输送机过载保护性能有限,单一的电气保护需要延时一段时间后才能起到保护作用。因此研究高效、可靠的驱动系统及异常载荷下刮板输送机动力学特性尤为关键。

刮板输送机能否高效稳定运行,直接关系着煤矿企业生产的效率的高低。刘广鹏^[5]和李书安^[6]等采用虚拟样机技术建立刮板输送机链传动系统的动力学模型,对链传动系统各部件之间的动力学特性

进行研究。马国清等^[7]利用多体动力学软件所建立的刮板机链传动系统刚柔耦合模型进行动力学分析,深入研究了链环过载卡死时传动系统各部件的受力。焦宏章等^[8]在所建动力学模型的基础上,仿真分析了各种工况下的动力学特性。JIANG等^[9]将实验和模拟相结合,分析了链传动系统在异常载荷工况下的动态特性。为研究单侧断链工况对刮板链系统纵向振动和横向摆动的影响,XIE等^[10]采用数值模拟的方法分析,得出其振动的动态响应规律。ZHANG等^[11]通过建立联合仿真模型,运用数值模拟和仿真分析研究了链传动系统的动态特性。

相较于常见的永磁直驱传动形式,由永磁电机加减速器的驱动方式在一定程度上可以减轻冲击或扭振对于电机轴的影响。针对于齿轮传动系统的动力学研究,BAO等^[12]对所建立行星传动虚拟样机模型的分析,进一步验证了虚拟样机模型的正确性。李辉云^[13]对NGW型行星减速器虚拟样机模型进行仿真分析,为减速器传动系统的强度校核和优化设计等提供可靠数据。

随着稀土资源的开发利用,永磁电机因其具有可靠性高、起动转矩大、启动电流小、较异步电机易于控制且效率高等优点逐渐被广泛应用,最初应用于风力发电、机器人等领域,现逐渐应用于煤矿采掘中^[14]。王文豪等^[15]采用模拟仿真与数学建模相结合的方法,对“永磁电机+直齿轮减速+刮板输送机”系统在非稳态工况下的动力学特性进行研究。LU等^[16]提出一种刮板输送机速度控制仿真方法,通过仿真发现,永

磁直驱系统能够实现刮板输送机平稳启动。吕洪波^[17]和王洋洋^[18]等搭建刮板输送机永磁直驱矢量控制模型,研究系统的机电耦合特性,证明了永磁电机驱动刮板输送机具有显著优势。张强等^[19]通过建立刮板输送机机电耦合模型,针对不同工况下系统的动力学响应进行仿真研究。WANG等^[20]提出一种适用于大功率、高速型的永磁电机PI控制算法。MENG等^[21]为实现永磁同步电机(PMSM)的高精度控制在自抗扰控制的基础上提出一种优化控制策略。

煤矿井下工作环境恶劣,刮板输送机的工作面弯曲以及较易发生的煤块片帮等会导致额外附加载荷,因此有必要对刮板输送机采取相应的保护措施。刘兆懿^[22]基于弹性地基梁原理,设计了一种柱面摩擦限矩器,并对有无限矩器保护及限矩器位置选择进行分析。LI等^[23]设计了一种新型的永磁涡流驱动系统,以解决刮板输送机在恶劣工况下的驱动问题。焦宏章^[24]和于鹏飞^[25]建立刮板输送机等效刚体动力学模型,考虑系统中存在摩擦限矩器,分析卡链、断链典型工况下系统的动力学特性。

目前对于重型刮板输送机动态特性的研究多采用实验模拟或仿真分析的方法,由于刮板输送机的质量和体积较为庞大,通过实验模拟来研究其动态特性较为困难,仿真分析则可以很好地避免这些问题。但多体动力学软件对永磁电机特性的仿真设计上具有很大的局限,只靠电气仿真软件也无法对多自由度系统进行正确全面的分析。

因此,笔者分别对驱动系统、传动系统和负载系统分析,分别建立永磁电机的数学模型和行星减速

器、柱面摩擦限矩器及刮板输送机链传动系统的动力学模型,以探究刮板输送机在冲击载荷工况下新型永磁限矩减速驱动装置的输出特性与刮板输送机的动态响应。

1 刮板输送机驱动系统结构与原理

作为综采装备的核心组成之一,刮板输送机正向着大运量、长运距、大功率的方向发展。驱动装置是刮板输送机的心脏,它直接影响了输送效率。为满足煤矿井下狭窄、复杂的工作环境,以及弥补传统驱动方式的不足,设计了一种集成机械保护的永磁限矩减速装置,并对各个部分进行关键结构参数设计。

如图1为刮板输送机永磁限矩减速装置的传动系统简图。相较于传统的异步电机驱动形式,该永磁限矩减速装置采用永磁同步电机作为驱动源,由永磁电机输出转速和转矩,经由二级行星减速器实现降速增扭后,输出给刮板输送机链轮,驱动链轮做旋转运动带动封闭链条运动,从而实现煤等物料在刮板输送机上的运输。在行星减速器和链轮之间配置柱面摩擦限矩器来对传动系统进行机械保护,限矩器铜套集成在行星减速器第二级行星架中,衬套则通过联轴器与后方链轮轴连接,减速器的第一级与永磁电机集成一体。该永磁限矩减速装置将永磁同步电机、减速器和限矩保护一体化,在刮板输送机遭遇恶劣工况时,限矩器铜套和衬套之间会迅速发生相对滑动,从而对整个传动系统包括齿轮传动部以及永磁电机起到很好的保护作用。刮板输送机、永磁电机及柱面摩擦限矩器的主要技术参数见表1。

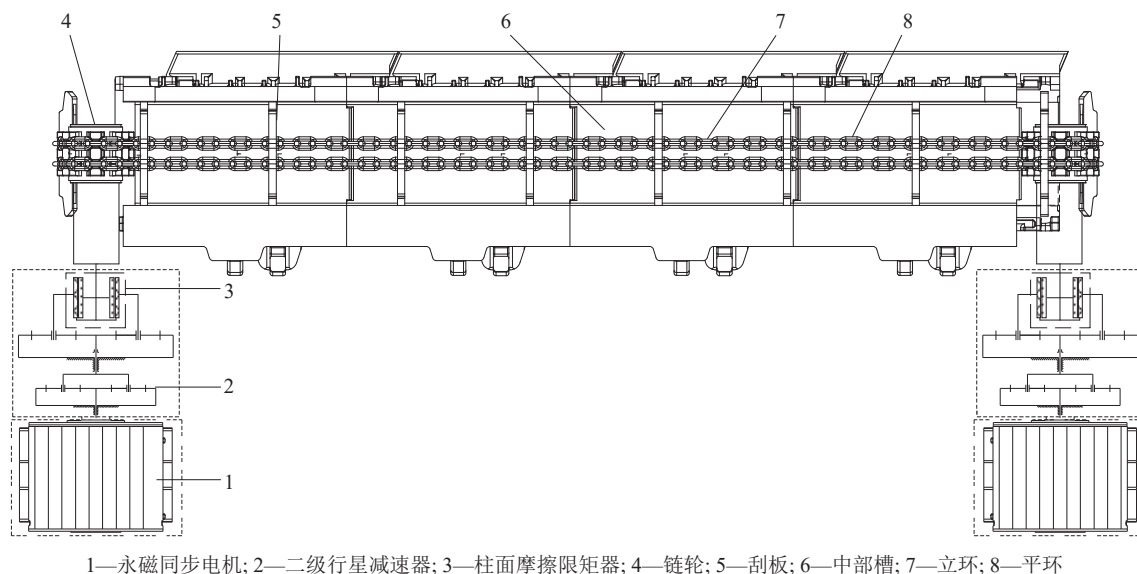


图1 刮板输送机永磁限矩减速装置传动系统简图

Fig.1 Permanent magnetic torque limiting reduction device drive system sketch for scraper conveyor

表 1 关键部件参数
Table 1 Specifications of main parts

装备	参数	数值
刮板输送机	输送量/(t · h ⁻¹)	1 500
	圆环链规格/mm	ø34×126
	链轮齿数/个	7
	运行速度/(m · s ⁻¹)	1.2
	刮板链型式	中双链
	链条破断载荷/kN	≥1 450
永磁同步电机	铺设倾角/(°)	0
	额定功率/kW	400
	额定电压/V	3 300
	额定转速/(r · min ⁻¹)	792
	极对数/个	8
	一级减速器传动比	4.222
柱面摩擦限矩器	二级减速器传动比	4.750
	限矩器耐磨铜套长/mm	121
	限矩器楔块倾角/(°)	11
	耐磨铜套厚度/mm	5
	耐磨铜套内径/mm	250
	耐磨铜套与输出轴的摩擦因数	0.1
	耐磨铜套与衬套的摩擦因数	0.05
	螺栓公称直径/mm	12
	螺栓强度等级	12.9
	螺栓个数/个	27

2 机电耦合模型

2.1 永磁电机双闭环矢量控制模型

2.1.1 永磁电机数学模型

在静止坐标系下,三相永磁同步电机是一个强耦合、时变的高阶复杂系统,且具有非线性特性,为了方便控制器的设计,必须采用合适的坐标变换对数学模型进行降阶和解耦变换,一般采用 Park 变换和 Clarke 变换等对三相交流绕组进行转换,从而使分析得到大幅简化。

同步旋转坐标系 d - q 下的定子电压方程为

$$\begin{aligned} u_d &= R_s i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega_r \Phi_q \\ u_q &= R_s i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} - \omega_r \Phi_d \end{aligned} \quad (1)$$

式中, u_d 、 u_q 分别为 d 轴和 q 轴的定子电压分量, V; i_d 、 i_q 分别为 d 轴和 q 轴的定子电流分量, A; Φ_d 、 Φ_q 分别为 d 轴和 q 轴的定子磁通分量, mVs; R_s 为定子电阻, Ω ; ω_r 为电机转子的电角速度, rad/s。

同步旋转坐标系 d - q 下的磁链方程为

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + \Phi_f \\ \Phi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_d 、 L_q 分别为 d 轴和 q 轴的电感分量, H; Φ_f 为永磁体在定子上产生的磁链, mVs。

同步旋转坐标系 d - q 下的定子电流方程为

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{u_d - R_s i_d + L_q i_q \omega_r}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{u_q - R_s i_q + L_d i_d \omega_r - \omega_r \Phi_f}{L_q} \end{aligned} \quad (3)$$

永磁电机在 d - q 旋转坐标系下的电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p i_q [\Phi_f + (L_d - L_q) i_d] \quad (4)$$

式中: T_e 为电磁转矩, kN · m; n_p 为转子磁极对数。

永磁电机在 d - q 旋转坐标系下的机械运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (5)$$

式中: T_L 为负载转矩, kN · m; J 为转动惯量, kg · m²; ω_m 为转子机械角速度, rad/s; B 为黏滞系数。

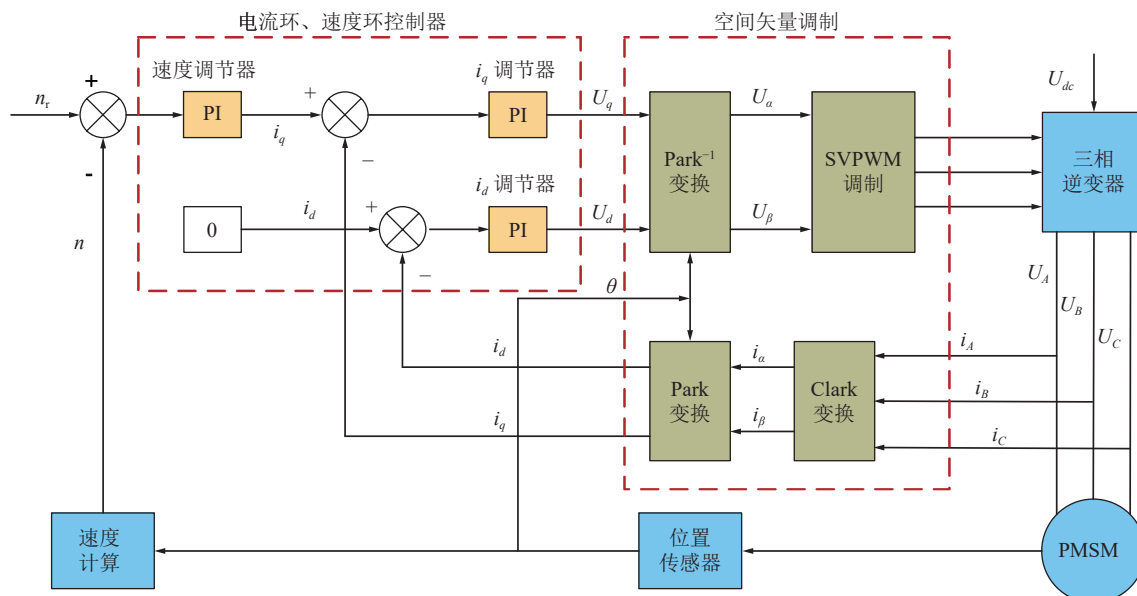
2.1.2 永磁电机矢量控制策略

针对电机的矢量控制方式有多种,较为常见的有 $i_d=0$ 控制、直接转矩控制、弱磁控制和 $\cos \varphi=1$ 控制等。刮板输送机是典型的低速大扭矩系统,而 $i_d=0$ 的矢量控制方式在低速下能发挥更好的优良控制性能,且调速范围宽、控制简单。因此,本文采用 $i_d=0$ 的双闭环矢量控制方式,以更好适配刮板输送机系统,具体控制简图如下图 2 所示。

$i_d=0$ 的矢量控制采用双闭环级联控制结构,包括速度外环和电流内环。首先根据给定转子速度参考值和实际值,将二者差值输入速度 PI 控制器,实现误差补偿;三相电流检测电路中的三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 先后经过 Clarke 变换和 Park 变换变为两相旋转坐标下的直轴电流分量 i_d 和交轴电流分量 i_q ,通过比较之后反馈给电流 PI 控制器,输出直轴和交轴电压分量 u_d 、 u_q ,经过 Park 逆变换输入到 SVPWM 模块中输出 PWM 脉冲信号,控制逆变器内部元器件的通断,使其输出三相交流电,完成对永磁同步电机的矢量控制。

2.2 刮板输送机动力学模型

实际的刮板输送机系统较为庞大,采用虚拟仿真软件对其进行多体动力学分析时有必要进行相应的简化,忽略掉对结果影响不大的机头机尾链轮轴等部件。在 SolidWorks 软件中绘制刮板输送机链传动系统的三维模型,并进行装配,最后通过与 ADAMS

图 2 永磁电机 $i_d=0$ 矢量控制原理Fig.2 Permanent magnet motor schematic diagram with $i_d=0$ vector management

的交流接口,将三维模型导入到动力学软件 ADAMS 中,建立刮板输送机链传动系统的动力学仿真模型。

为了确保仿真能够顺利进行,必须要对系统各个部件进行相应的动力学约束。其中,中部槽与地面以固定副连接;链轮与地面之间为旋转副;平环与刮板固结;各圆环链之间、平环和中部槽之间、立环和中部槽之间、刮板和中部槽之间、刮板和链轮之间、平环和链轮之间都由接触力连接。刮板输送机各部件之间具体的拓扑关系如图 3 所示。

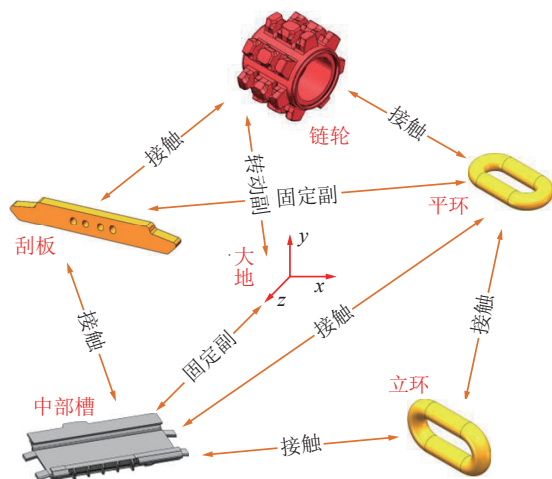
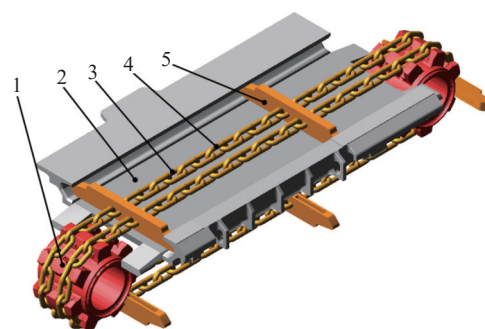


图 3 刮板输送机链传动系统拓扑关系

Fig.3 Topology relationship of the chain drive system of a scraper conveyor

最终建立的刮板输送机动力学模型如图 4 所示,包括 2 个链轮、5 个刮板、120 条圆环链、1 个中部槽。



1—链轮; 2—中部槽; 3—平环; 4—立环; 5—刮板

图 4 刮板输送机链传动系统动力学模型

Fig.4 Scraper conveyor chain drive system dynamics modeling

2.2.1 接触力的计算

链传动系统仿真模型中存在大量的接触,相邻平环和立环之间、平环和链轮之间以及二级行星减速器各个齿轮之间力的传递都是通过接触实现的。接触力的计算采用 Impact 函数模型,该模型基于 Hertz 接触理论,其中接触刚度和阻尼系数对接触力的影响最大。

接触刚度 K 的理论值由 Hertz 理论计算,如式(6)所示:

$$\begin{cases} K = \frac{4}{3} R^{*\frac{1}{2}} E^* \\ \frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \\ \frac{1}{E^*} = \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \end{cases} \quad (6)$$

式中, K 为物体的接触刚度, N/mm; R_1 、 R_2 为两碰撞物体在接触点处的曲率半径, mm; E_1 、 E_2 为相互接触

两物体的弹性模量, Pa; v_1 、 v_2 为两个相互接触物体的泊松比。

阻尼系数 C 表征了接触达到最大时的最大阻尼, 可由式 (7) 确定; 最大阻尼系数的理论值可由式 (8) 确定。

$$C_M = \text{step}(x, 0, 0, \delta, C) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ C(x/\delta)^2(3-2x/\delta), & 0 < x < \delta \\ C, & x \geq \delta \end{cases} \quad (7)$$

$$C = \frac{3K(1-\varepsilon^2)}{4U} \delta^e \quad (8)$$

式中, C_M 为接触过程中的实时阻尼系数; C 为最大阻尼系数; x 为碰撞时的实时穿透深度, mm; δ 为接触过程中的最大穿透深度, mm; ε 为两个相互接触物体的碰撞恢复系数; U 为两个相互接触物体在接触点的相对速度, mm/s; e 为接触力的非线性指数。

链轮与链环之间的接触位置会随链传动系统的运行一直发生变化, 接触位置的曲率半径也随平环和立环的运动而时刻变化, 所以在实际的接触过程中, 接触刚度和阻尼并不是定值, 而在 ADAMS 软件中, 接触刚度一经计算始终保持不变, 因此接触刚度和阻尼的设置需要根据实际的仿真结果进行适当调整。基于式 (6)、(8) 计算的初始值并经过反复调试, 定义接触刚度为 $K=2 \times 10^7$ N/mm, 阻尼为 $C=500$ N·s/mm, 力指数为 1.5, 穿透深度为 0.01, 在发生接触时, 可以快速达到相对稳定状态。

2.2.2 运行阻力的计算

计算中不考虑刮板输送机的倾斜。在实际运行过程中需要克服多方面的阻力: 煤和矸石等物料与中部槽之间的摩擦力、圆环链和刮板与中部槽之间的摩擦力、各级传动装置内部的运行阻力以及中部槽弯曲倾斜所产生的附加阻力等。

刮板输送机有载侧的运行阻力为:

$$W_{zh} = q_1 g L (\mu_1 \cos \beta \pm \sin \beta) + q_2 g L (\mu_2 \cos \beta \pm \sin \beta) \quad (9)$$

刮板输送机无载侧的运行阻力为:

$$W_k = q_2 g L (\mu_2 \cos \beta \mp \sin \beta) \quad (10)$$

总运行阻力为:

$$W_0 = k_1 k_2 (W_{zh} + W) \quad (11)$$

式中, q_1 、 q_2 分别为单位长度上煤等物料和刮板链的质量, kg/m; μ_1 、 μ_2 分别为刮板输送机有载侧和无载侧的运行阻力, N; g 为重力加速度, m/s²; L 为刮板输送机的长度, m; β 为刮板输送机的倾角, (°); k_1 、 k_2 分别为刮板输送机的弯曲阻力系数和附加阻力系数。

2.3 柱面摩擦限矩器模型

运用 SolidWorks 建立的柱面摩擦限矩器三维模型如图 5 所示, 限矩器由拧紧螺栓 1、楔块 2、基体 3、外壳 4、铜套 5 和衬套 6 组成。通过调节拧紧螺栓上的拧紧力, 使得楔块挤压基体, 从而改变铜套和衬套之间的正压力大小, 实现对柱面摩擦限矩器最大打滑转矩的调节。

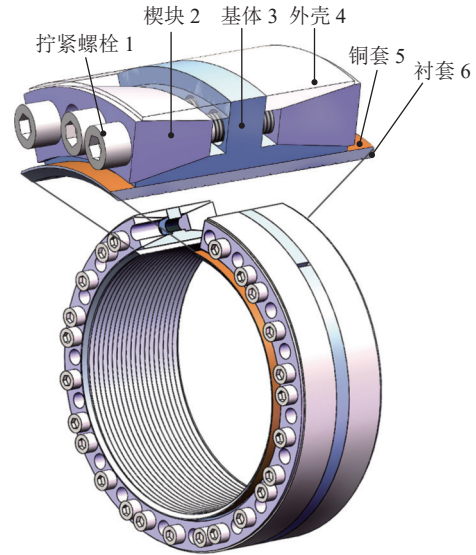


图 5 柱面摩擦限矩器结构

Fig.5 Diagram of the construction for the cylinder friction torque limiter

拧紧螺栓在施加扭矩后受到一轴向力作用, 楔块受此力向内挤压基体, 进而基体向下对铜套产生径向挤压力。由此, 螺栓的预紧力转换为铜套对衬套的正压力。

如图 6 对限矩器进行受力分析可知, 螺栓的拧紧扭矩与打滑转矩之间的关系如下:

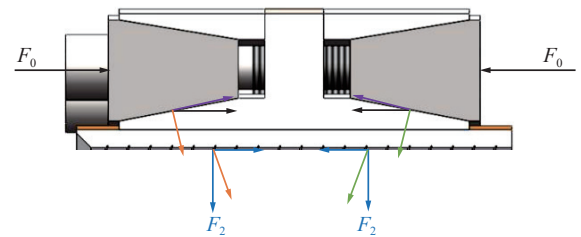


图 6 柱面摩擦限矩器受力情况

Fig.6 Diagram of the torque limiter force analysis for column surface friction

$$F_{0d} = 0.6F_0 = \frac{0.6M}{k_1 d_2} \quad (12)$$

$$F_{2d} = \frac{1}{2} F_{0d} \sin \theta \cos \theta \quad (13)$$

$$N = 2nF_{2d} \quad (14)$$

式中, F_0 为单螺栓预紧力, N; F_{0d} 为多螺栓系统预紧力, N; k_1 为力矩系数; d_2 为螺纹中径, mm; M 为单个螺栓拧紧力矩, N; F_{2d} 为多螺栓系统径向分力, N; θ 为楔块倾角, ($^\circ$); N 为铜套所受正压力, N。

为了更加真实的模拟限矩器铜套的变形, 提出一种利用有限元与刚体建模结合的刚柔耦合方法。利用有限元仿真软件 hypermesh 对铜套进行柔性化处理, 如图 7, 将生成的柔性体 mnf 文件导入到 ADAMS 中, 通过模态力来描述施加在柔性体节点上的载荷。模态力一般用来定义施加在柔性体部件表面的分布载荷, 可借助有限元载荷文件来实现, 而模态计算生成的 mnf 文件是不携带节点载荷信息的, 借助 ADAMS Flex Toolkit 命令可以将外部的有限元载荷文件添加到柔性体 mnf 文件中, 最终建立的柱面摩擦限矩器关键部件刚柔耦合图如下图 7 所示。

2.4 机电耦合模型

基于前文所建立的永磁电机数学模型、刮板输送机动力学模型及柱面摩擦限矩器关键部件刚柔耦合模型, 并根据参数建立二级行星减速器动力学模型, 最终建立机电耦合模型, 耦合原理如图 8 所示。

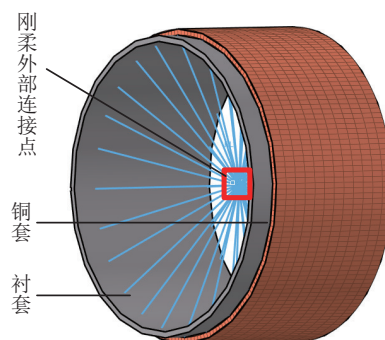


图 7 限矩器关键部件刚柔耦合图

Fig.7 Diagram showing rigid-flexible coupling of torque limiter's essential parts

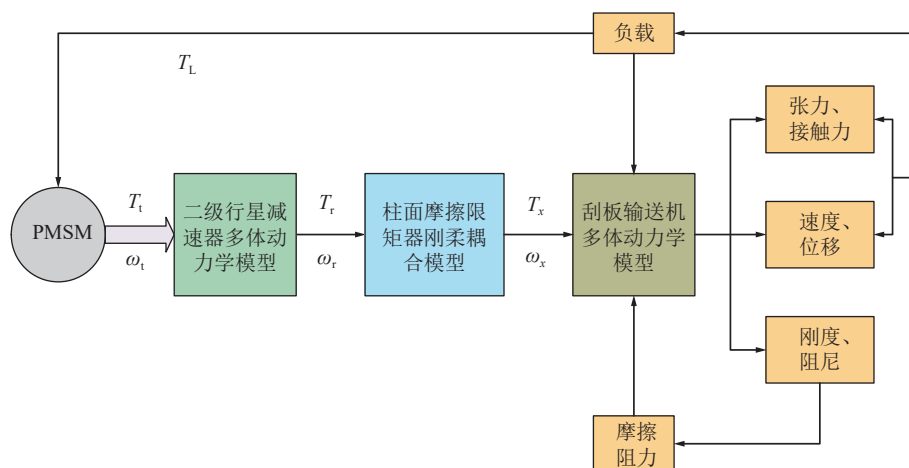


图 8 机电耦合原理

Fig.8 Schematic of an electromechanical connection

永磁同步电机作为动力源, 输出转矩和角速度, 经二级行星减速器减速增扭, 输出给柱面摩擦限矩器, 最后传递给刮板输送机链轮, 带动刮板输送机上的负载传动, 同时向电机反馈, 电机根据负载变化合理调控输出转矩。

在 MATLAB/Simulink 软件中建立如图 9 所示的机电耦合联合仿真图, 创建通过代数方程定义的状态变量来将 ADAMS 中的输入输出量传递给 Simulink, 完成 ADAMS 和 Simulink 的数据交流与通信。

3 冲击载荷工况动态特性结果分析

刮板输送机在工作中, 会经常发生煤壁片帮、煤炭脱落, 由此产生的惯性冲击严重影响了驱动系统

的正常运行。基于所搭建永磁限矩减速驱动的刮板输送机机电耦合模型, 分别对有限矩器保护下永磁电机的输出特性、刮板输送机链传动系统的动态特性以及行星传动的动态特性进行仿真分析。

3.1 永磁电机的电气特性

如图 10 为永磁电机在冲击载荷工况下的电气特性。从图 10a 中看出将其转速变化分为 3 个部分: ①稳定运行阶段、②冲击阶段一、③冲击阶段二。在刮板输送机达到稳定运行后, 若有小块煤炭脱落引起链传动系统受到一较小的冲击载荷时 (如②冲击阶段一), 此时引起的附加负载转矩并未达到限矩器设定打滑转矩, 限矩器仍能保持刚性连接, 保证传动系统稳定运行。若受到较大的冲击载荷 (如③冲击

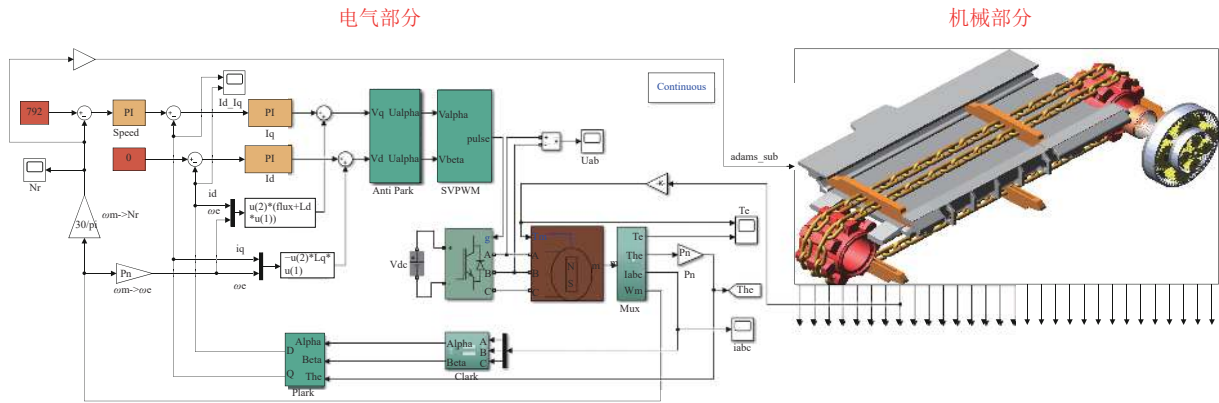


图9 永磁限矩减速驱动的刮板输送机机电耦合模型

Fig.9 Modeling of an electromechanical coupling for a scraper conveyor powered by a permanent magnet limited moment reduction motor

阶段二), 无限矩器保护的传动系统负载迅速升高, 超过限矩器的最大承载, 电机出现失速; 而有限矩器保

护时, 由于限矩器的过载保护作用, 电机仍保持稳速运行。

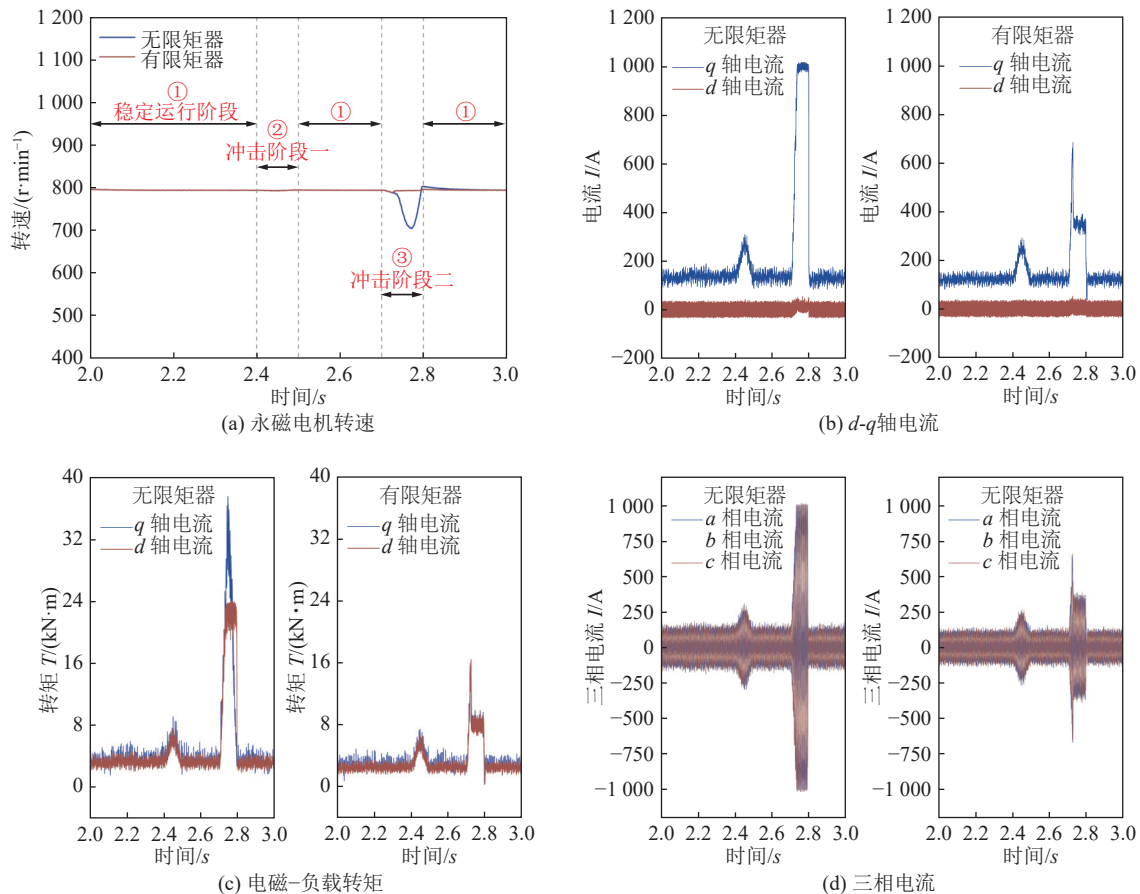


图10 永磁电机电气特性

Fig.10 Permanent magnet motor electrical properties

如图10b—图10c分别为永磁电机d-q轴电流变化曲线和输出转矩曲线。从图中可以看出由于链轮的多边形效应和齿轮传动的周期性啮合特点, 永磁电机d-q轴电流及转矩都呈现周期性波动。分析电流图知, 由于采用 $i_d = 0$ 的矢量控制方式, d轴电流

恒定为0, 无限矩器保护的q轴电流在 $t=2.7$ s到2.8 s之间为了满足负载的需求, 电流也达到最大, 约是稳定运行阶段的7.7倍; 有限矩器保护的电流在达到满足限矩器最大打滑转矩所需电流后, 由于打滑保护, 电机所受负载转矩降低, 电流也相应降低, 电流峰值

为稳定阶段的 5.8 倍。由转矩图可知,因为采用 $i_d=0$ 的矢量控制方式,由永磁电机的电磁转矩方程(式 4)可知,电机输出的电磁转矩与 q 轴电流成正比关系,变化趋势也具有 consistency; 同样的,当冲击载荷导致刮板输送机链传动系统上的载荷增大时,电机的电磁转矩也会迅速增大以此来驱动刮板链,电磁转矩能很好的跟随负载转矩的变化而变化。

如图 10d, 为永磁同步电机三相电流变化曲线,分析可知,三相电流根据负载变化调节所需电流值,其变化规律对比 q 轴电流的变化具有良好的相似性。

3.2 柱面摩擦副接触变形及载荷特性

铜套的应力分布随时间不同具有差异性,其分布并不是相对均匀的。图 11 为 $t=2.7$ s 时刻铜套的应力场,此时限矩器的铜套和衬套之间发生相对滑动,铜套保持稳定运行,衬套速度迅速下降为 0。从图中可以看出最大应力出现在铜套的边缘处,这是因为在摩擦打滑过程中,铜套和衬套在轴向方向上是完全接触的,由边缘效应可知,长度不相等的两物体在完全接触时会在接触边界上产生应力集中现象。此时铜套上的最大应力达 $\sigma_{\text{Max}}=8.13$ MPa, 低于材料的屈服强度。

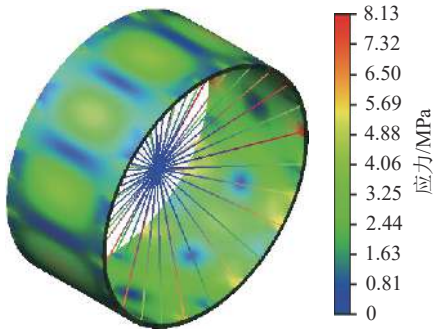


图 11 铜套 mises 应力场

Fig.11 Mises stress field of copper bushing

图 12 为铜套的总变形图,由图可知铜套两端边缘处变形最小,最大变形位于铜套中点处为 $v=0.01$ mm。结合图 5 所示柱面摩擦限矩器结构图分析可知,柱面摩擦限矩器的基体轴向尺寸小于铜套的轴向尺寸,故铜套两端并未直接受到挤压作用,铜套两端的变形程度也应小于中点处,变形情况符合实际。

如图 13、图 14 分别为柱面摩擦限矩器摩擦副所受转矩图。当刮板输送机上因片帮、卡链、飘链等造成负载增大时,铜套和衬套所受转矩也会随负载的增大而增大,如冲击阶段一所变化情况;当系统所受载荷过大,超过限矩器设定的最大打滑转矩时,限

矩器摩擦副之间所能提供的不足以满足需要,铜套和衬套会迅速发生相对滑动,铜套和衬套之间经历由“相对静摩擦—滑动摩擦—相对静摩擦”的变化。

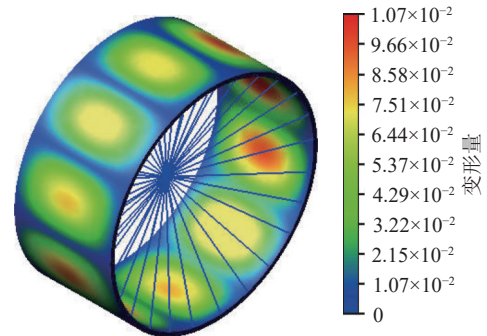


图 12 铜套变形云图

Fig.12 Copper bushing deformation cloud diagram

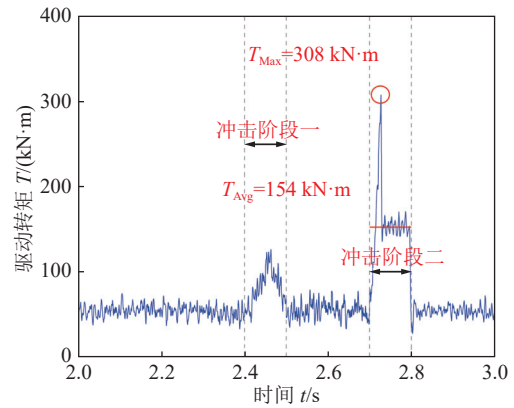


图 13 铜套转矩

Fig.13 Torque of copper bushing

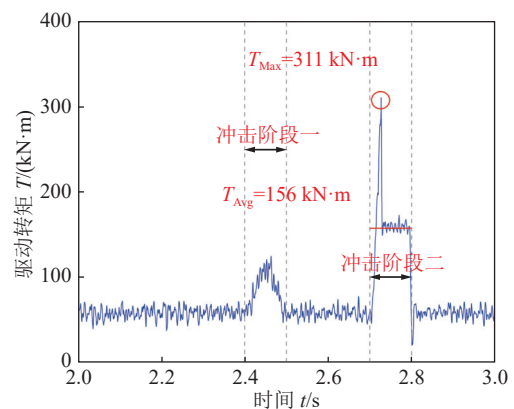


图 14 衬套转矩

Fig.14 Torque of bushing

3.3 刮板输送机链传动系统动力学特性

图 15 为受冲击载荷下链环动力学特性。图 15a 为受冲击载荷位置处平环链速曲线,从图中可以看出,刮板链在 $t=2.4$ s 受到一冲击载荷,链环速度受到微弱影响,但仍保持稳定运行;在 $t=2.7$ s 时,较大

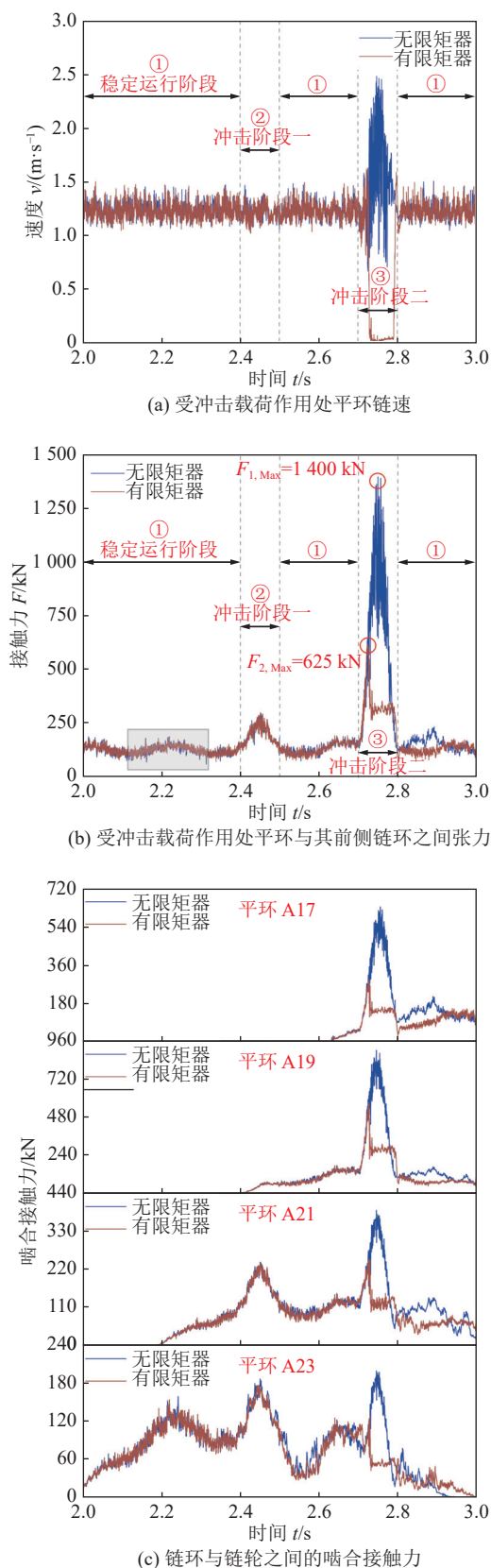


图15 链环动力学特性

Fig.15 Chain rings' dynamical characteristics

的冲击载荷致使无限矩器保护的刮板输送机链速产生高于正常约2倍的剧烈波动,链环产生剧烈震颤,由此产生的冲击可能会对系统产生较大破坏;

而对比有限矩器保护的刮板输送机,较大的冲击载荷致使限矩器打滑,切断了行星减速器和链轮之间的动力传递,链环速度在短时间内降低为0,在冲击阶段二结束后,随着附加载荷的消失,快速恢复正常运行。

如图15b,为在承受冲击载荷下,受冲击位置链环及其前侧链环之间张力变化曲线。从图中可以看出在稳定运行阶段,链环之间的接触力呈现一定规律的周期性变化,这种变化主要是因为链轮的多边形效应导致的。在冲击阶段一,此时链传动系统受到一瞬时冲击载荷,导致链环之间的接触力也在短时间内阶跃到一较大峰值,但并未超过限矩器所能提供的最大值,系统仍保持稳定运行,在冲击载荷结束后,链环之间接触力又恢复到正常值,此时,有无限矩器保护下接触力变化保持一致。在冲击阶段二,由于受到较大的冲击载荷,无限矩器保护的接触力急剧增大,最高达 $F=1\,400\text{ kN}$,是稳定运行阶段接触力的12倍左右,并且由于链环的震颤,链环之间的张力也波动剧烈;有限矩器保护时,较大的冲击载荷致使链环之间的接触力大于限矩器所能提供的最大值(为 $F=625\text{ kN}$,约为稳定运行阶段的5.6倍),限矩器打滑,发挥过载保护作用,链环间的接触力也在短时间内降低。

当刮板链和驱动链轮完全啮合时,部件之间的接触力主要表现在平环与驱动链轮之间,如图15c所示为有载侧4个平环随时间变化与主动链轮的啮合接触力曲线。链环与链轮之间的啮合力整体呈现先增大后减小的趋势。在 $t=2.4\sim 2.5\text{ s}$,平环A19、A21、A23已啮入链轮,由于冲击阶段一的作用,可以看出平环与链轮之间的啮合接触力在短时间内增大为一幅值。在 $t=2.7\sim 2.8\text{ s}$,由于较大冲击载荷的影响,无限矩器保护的链环和链轮之间啮合接触力急剧增大,若长时间运行在此种条件下,会加剧链轮链窝的磨损;而有限矩器保护的情况下,此时柱面摩擦限矩器动作,隔绝从减速器输入到链轮的动力,从图中也可以看出,在限矩器打滑过程中($t=2.7\sim 2.8\text{ s}$),所研究的四个平环与链轮之间的啮合力均出现瞬间升高然后快速下降为一稳定水平。

图16为受到冲击载荷时刮板输送机两端链轮的动力学响应曲线,从图16a中可以看出在刮板输送机达到稳定运行时,主、从动链轮的转速均呈明显的周期性变化,这是由于行星减速器的存在,齿轮之间的啮合存在一定的周期性,从而引起后端链轮和链速也具有周期性的波动。在②冲击阶段一中,系

统在承受较小的冲击载荷时仍能保持稳定运行,验证了永磁减速装置具有良好的稳定性和抗干扰能力。在③冲击阶段二,无限矩器保护的链轮转速在承受较大的冲击载荷时,链速会产生剧烈波动,会对传动系统乃至永磁电机造成较大的冲击;而在限矩器保护下,较大的冲击载荷致使限矩器打滑,切断了行星减速器和链轮之间的动力传递,链轮速度在短时间内降低为 0,在冲击阶段二结束后,快速恢复正常运行。从主动链轮所受驱动转矩图 16c 中可以看出,在冲击阶段一 ($t=2.4 \sim 2.5$ s) 中,由于等效在限矩器上的负载转矩未达到限矩器设定的最大打滑转矩,此时限矩器相当于刚性联轴器,虽然所受转矩有所增

大,但依旧能保持前后端部件稳定运行,与未配置限矩器的情况一致;但若受到过大的冲击负载(如冲击阶段二),致使限矩器上的转矩达到设定打滑转矩值,摩擦限矩器会立刻动作,限矩器的铜套和衬套之间也由静摩擦快速转变为滑动摩擦,使得系统各部件所受的负载转矩降低,起到过载保护作用。待冲击载荷作用结束,因为铜套和衬套之间动静摩擦系数相差较小,二者也能快速恢复到相对静止状态,反观无限矩器保护的情况,链轮转矩增大至 $T=603 \text{ kN} \cdot \text{m}$,约为稳定运行阶段的 12 倍,较大的负载转矩将会严重影响传动系统各部件的寿命,甚至造成破坏。

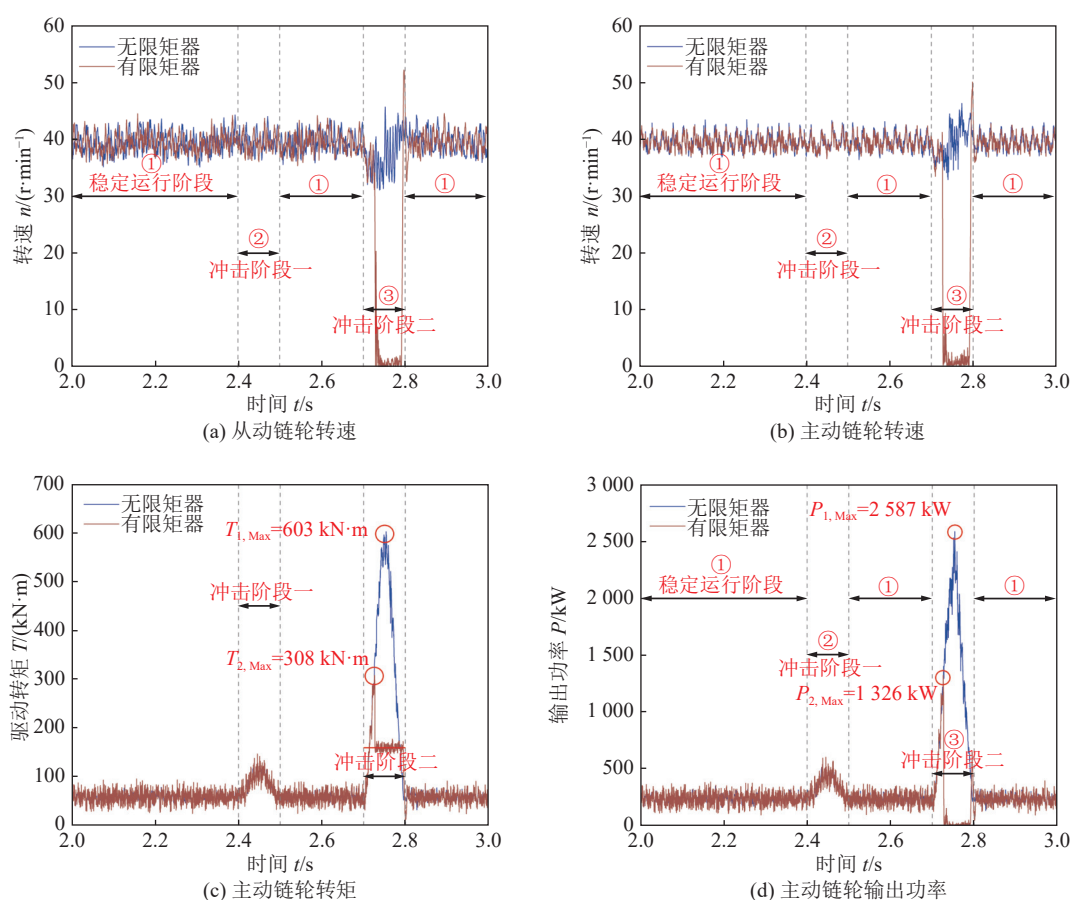


图 16 链轮动力学特性

Fig.16 Dynamic properties of sprockets

如图 16d 为有限矩器下主动链轮输出功率对比图。从图中可以看出,在 $t=2.7$ s 左右,无限矩器保护的主动链轮输出功率迅速达到 $P=2587 \text{ kW}$,是额定功率的 6.5 倍,这对于电机的使用极其不利,严重情况下会烧毁电机。有限矩器保护的主动链轮输出功率最高达到 1326 kW ,是额定功率的 3.3 倍左右,而永磁同步电机具有远高于异步电机的过载能力,运行在额定功率 3 倍左右仍具有良好的输出特性。

3.4 行星传动系统动态特性

如图 17 为行星减速器各级太阳轮及行星架输出转速图。从图中可以看出,在刮板输送机启动后,保持稳定运行过程中,行星减速器也保持稳定运行,具有良好的输出特性。在 $t=2.7 \sim 2.8$ s,较大的冲击载荷使得无限矩器保护的行星减速器太阳轮和行星架转速呈现明显降低;对比有限矩器的保护下,较大的冲击载荷使得限矩器打滑,对系统进行卸载,减速

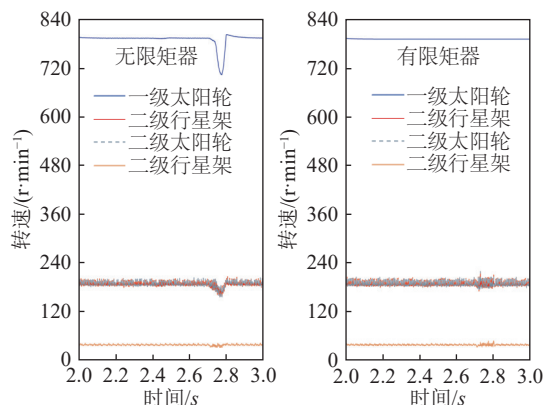


图 17 行星减速器各级转速

Fig.17 Planetary gearbox rotation speeds at all levels

器的输出波形也受到一定影响,但仍能保持相对稳定运行。

如图 18 为各级减速器齿轮间啮合接触力。从

图中分析可知,在系统稳定运行过程中,若因片帮、煤炭脱落等导致传动系统所受负载突增时,行星减速器各齿轮之间的啮合力也会因为后端阻力增大而随之增大数倍,呈现类似前文链轮转矩的变化。如果长时间运行在此种条件下,会加剧齿轮之间的磨损,可能会诱发齿面点蚀甚至引起齿根折断,对于生产极其不利。

如图 19 为一级太阳轮驱动转矩图。在冲击阶段一,冲击载荷使得作用在传动系统的负载增加,一级太阳轮的转矩随着负载的增大而增大。在冲击阶段二,限矩器所能提供的转矩已不能满足较大冲击载荷所带来的等效负载转矩,限矩器立刻发生打滑,对系统卸荷,避免了过大的负载对传动系统各部件造成危害。

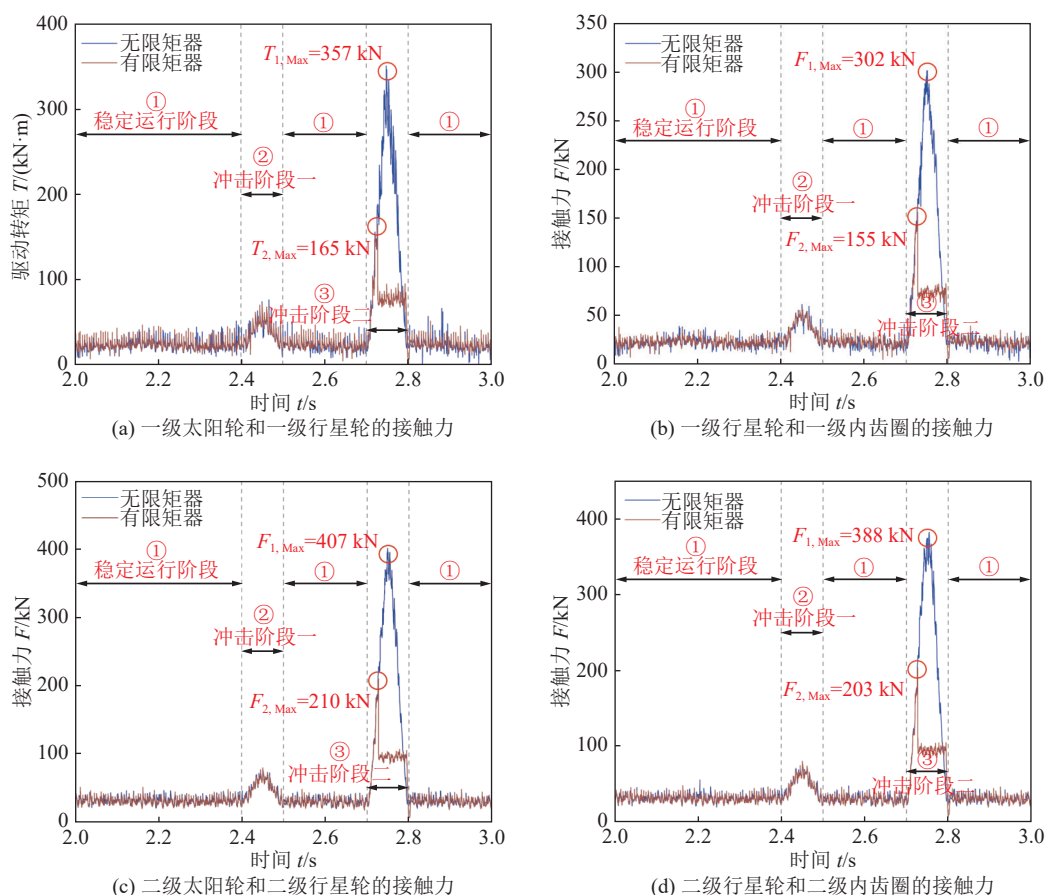


图 18 减速器各级部件间啮合接触力

Fig.18 All levels of contact forces exist between the speed reducer's components.

4 结 论

1) 对驱动部输出特性分析,对比有无限矩器保护时,负载电流分别是稳定运行阶段的 2.9 倍和 7.7 倍左右,证明当传动系统中配置限矩器保护时,能降

低较大冲击载荷对电机的影响,保证永磁电机的正常稳定运行。传统的电气保护动作时限长,速动性差,且无法消除因停机带来的惯性冲击,可能会对机械部件造成进一步的损害;该永磁限矩减速装置可

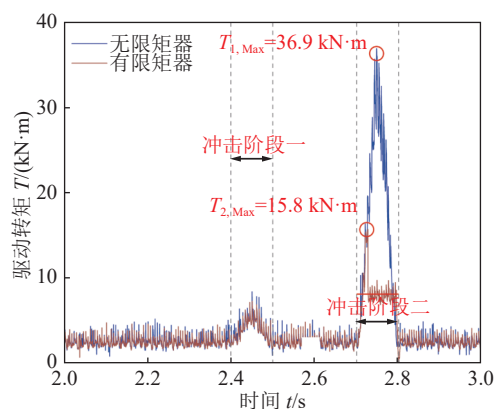


图 19 一级太阳轮转矩

Fig.19 Torque of the primary sun wheel

在过载时对永磁电机进行较好的保护,防止过载电流对电机造成损坏,同时限矩器能迅速释放掉多余的扭矩和能量,防止这些能量以惯性冲击的形式作用到机械部件上,起到了快速、准确、高效的过载保护效果。

2) 探究了有限矩器保护下的刮板输送机链传动系统的动力学特性。在稳定运行阶段,限矩器相当于刚性联轴器,能保证前后端部件同步稳定运行。受到冲击过载时,链传动系统各部件将受到高于正常阶段 12 倍左右的负载,而限矩器的存在能使系统所受负载降低约 78%,极大地延长了链传动系统的寿命。

3) 从二级行星减速器在冲击载荷下表现出的动态特性可以看出,若无限矩器的保护,冲击载荷引起的附加载荷会随着传动链影响到行星减速器的稳定运行,减速器各级部件间的啮合接触力最大分别骤增至 357、302、407、388 kN,由此导致的冲击与波动会导致齿轮之间反复发生碰撞,严重影响了齿轮机构的寿命,而限矩器的存在隔绝了大部分的冲击,相比于没有有限矩器时分别为 165、155、210、203 kN。

(4) 新型永磁限矩减速装置充分集成永磁电机起动力矩大、高效率等优点,行星齿轮传动结构紧凑的特点,并在电气保护的基础上搭配柱面摩擦限矩器对系统进行有效的机械保护。研究结果为提高刮板输送机的驱动传动性能及可靠性奠定理论基础。

参考文献(References):

- [1] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.
- [2] 司全, 李嘉豪, 谭超, 等. 矿用刮板输送机垂直冲击下负载电流特

性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 400-411.

SI Lei, LI Jiahao, TAN Chao, et al. Study on load current characteristics of scraper conveyor under vertical impact[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 400-411.

- [3] 王海军, 王洪磊. 带式输送机智能化关键技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 225-239.
WANG Haijun, WANG Honglei. Status and prospect of intelligent key technologies of belt conveyor[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 225-239.
- [4] 葛世荣, 郝尚清, 张世洪, 等. 我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 28-46.
GE Shirong, HAO Shangqing, ZHANG Shihong, et al. Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 28-46.
- [5] 刘广鹏, 王学文, 杨兆建, 等. 刮板输送机链传动系统动力学特性分析[J]. 机械传动, 2014, 38(7): 115-118.
LIU Guangpeng, WANG Xuewen, YANG Zhaojian, et al. Dynamics characteristic analysis of chain transmission system of scraper conveyor[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(7): 115-118.
- [6] 李书安. 刮板输送机链传动系统动态特性研究分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
LI Shu'an. Research and analysis on dynamic characteristics of chain drive system of scraper conveyor[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [7] 马国清, 任桂周, 汤易. 刮板输送机链传动系统刚-柔混合动力学仿真研究[J]. 河北工业大学学报, 2015, 44(1): 73-77.
MA Guoqing, REN Guizhou, TANG Yi. Study on the rigid-flexible hybrid dynamics simulation of scraper conveyor chain transmission system[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2015, 44(1): 73-77.
- [8] 焦宏章, 杨兆建, 王淑平. 刮板输送机链轮传动系统接触动力学仿真分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S2): 494-498.
JIAO Hongzhang, YANG Zhaojian, WANG Shuping. Contact dynamics simulation analysis for sprocket transmission system of scraper conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 494-498.
- [9] JIANG S B, REN W J, MAO Q H, et al. Dynamic analysis of the scraper conveyor under abnormal operating conditions based on the vibration and speed characteristics[J]. Shock and Vibration, 2021, 1: 8887744.
- [10] XIE C X, LIU Z X, XIE M. Dynamic response analysis of scraper conveyor under the condition of chain broken[J]. Journal of Vibroengineering, 2023, 25(6): 1053-1067.
- [11] ZHANG X, REN M M, WANG H J, et al. Simulation study on dynamic characteristics of the chain drive system for mining scraper conveyor driven by the permanent magnet synchronous motor[J]. Processes, 2024, 12(1): 165.
- [12] BAO J H, HE W D. Dynamics simulations of virtual prototypes of double crank ring-plate-type pin-cycloidal gear planetary drive with three gears[C]//2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICASM 2010). Taiyuan, China. IEEE, 2010: V2-332-V2-336.

- [13] 李辉云. 行星齿轮减速器仿真及有限元研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
LI Huiyun. Research of dynamic simulation and finiteelement for planetary gear reducer[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [14] 张磊, 鲍久圣, 葛世荣, 等. 永磁驱动技术及其在矿山装备领域的应用现状[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 275–284.
ZHANG Lei, BAO Jiusheng, GE Shirong, *et al.* Permanent magnet driving technology and its application status in the field of mining equipment[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 275–285.
- [15] 王文豪. 永磁半直驱刮板输送机传动系统动力学研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
WANG Wenhao. Dynamic study on transmission system of permanent magnet semi-direct drive scraper conveyor[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [16] XU S Y, 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.
- [17] 吕洪波. 刮板输送机永磁直驱传动系统动态特性及结构优化研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
LYU Hongbo. Study on dynamic characteristics and structural optimization of permanent magnet direct drive transmission system of scraper conveyor[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [18] 王洋洋, 鲍久圣, 葛世荣, 等. 刮板输送机永磁直驱系统机电耦合模型仿真与试验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2127–2139.
WANG Yangyang, BAO Jiusheng, GE Shirong, *et al.* Simulation and experimental study on electromechanical coupling model of permanent magnet direct drive system for scraper conveyor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2127–2139.
- [19] 张强, 王禹, 王海舰, 等. 双端驱动刮板输送机机电耦合模型及动力学仿真分析[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 159–165.
ZHANG Qiang, WANG Yu, WANG Haijian, *et al.* Electromechanical coupling model and dynamics simulation analysis of two-motor drive scraper conveyor[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 159–165.
- [20] WANG L, LIU H, ZHU Y Q, *et al.* A PI control strategy for Surface Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2035(1): 012022.
- [21] MENG Y B, LIU B Y, WANG L C. Speed control of PMSM based on an optimized ADRC controller[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 1: 1–18.
- [22] 刘兆懿. 刮板输送机柱面摩擦限矩器转矩及过载保护特性研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
LIU Zhaoyi. Research on torque and overload protection characteristics of scraper conveyor cylinder friction torque limiter [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [23] LI D Y, WANG S. Characteristics of new permanent magnetic eddy current drive system of the scraper conveyor[J]. *The Journal of Engineering*, 2021, 2021(10): 552–558.
- [24] 焦宏章. 刮板输送机链轮与圆环链接触动力学分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
JIAO Hongzhang. Contact dynamics analysis for sprocket and round-link chain of scraper conveyor [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [25] 于鹏飞. 刮板输送机圆环链传动系统动力学特性及疲劳寿命研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
YU Pengfei. Research on dynamic characteristics and fatigue life of armoured face conveyor chain transmission system [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.