



矿用刮板输送机垂直冲击下负载电流特性研究

司垒 李嘉豪 谭超 王忠宾 李小玉 霍小泉 袁增云

引用本文:

司垒, 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. Study on load current characteristics of scraper conveyor under vertical impact[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 400–411.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1140>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

刮板输送机中部槽多区域运输状态预测

Prediction of multi-area transportation state in the central trough of scraper conveyor

煤炭科学技术. 2021, 49(11): 200–210 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2473a96f-4d8a-4096-8784-d89cac3ada22>

不同工况条件下刮板输送机刚散耦合效应研究

Research on rigid-discrete coupling effect of scraper conveyor under different working conditions

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 190–201 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0293>

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>

薄煤层刮板输送机技术现状与改进

Technical status and improvement of thin coal seam scraper conveyor

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/32694b73-08cf-4a81-a7a9-f186f9d8e23c>

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>

智能综采工作面刮板输送机直线度监测方法研究

Study on straightness monitoring method of scraper conveyor in intelligent fully-mechanized mining face

煤炭科学技术. 2022, 50(4): 246–255 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a3ab4304-0801-469e-b5e5-2b04b89a7246>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

司 垒,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.

矿用刮板输送机垂直冲击下负载电流特性研究

司 垒¹,李嘉豪¹,谭 超¹,王忠宾¹,李小玉¹,霍小泉²,袁增云²

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 陕西陕煤铜川矿业有限公司, 陕西 铜川 727000)

摘 要: 矿用刮板输送机在运行过程中易受液压支架推移不齐、采煤机截割底板不平的影响, 承受着多种类型冲击, 其中垂直方向的冲击作用最为明显, 造成刮板输送机传动系统磨损严重、驱动电机功率不平衡等问题。笔者通过分析刮板输送机垂直冲击的形成原因, 计算了不同垂直冲击作用下刮板输送机的运行阻力, 建立了刮板输送机传动系统的垂直冲击仿真模型, 并对刮板输送机在中部槽间隙、中部槽凸起弯曲、中部槽凹陷弯曲等工况下的冲击负载电流情况进行了仿真分析, 结果表明: 中部槽间隙越大, 中部槽与中板发生的撞击就会越强烈, 对刮板输送机传动系统的冲击越明显; 垂直冲击产生的负载电流峰值与中部槽凹陷或凸起弯曲程度呈正相关; 相邻中部槽最大弯曲角是决定刮板输送机冲击负载电流突变峰值及冲击稳定后负载增量的主要因素; 中部槽凸起和凹陷弯曲产生的冲击对系统运行阻力的影响程度最大约为 12%, 是影响驱动系统电机功率不平衡的主要因素。在煤矿井下搭建了刮板输送机冲击负载监测平台, 开展了不同垂直弯曲角度下的冲击负载电流监测试验, 结果表明: 不同程度的垂直冲击均使刮板输送机传动系统电机负载电流产生明显波动, 且在短时间内, 冲击电流峰值最高可达正常工作电流的 1.5 倍, 对刮板输送机的链条、电机等零部件造成严重损害; 现场采集的刮板输送机受到冲击后的电机电流曲线与仿真曲线变化趋势基本保持一致, 平均绝对误差范围为 0.435~1.342 A, 验证了刮板输送机垂直冲击仿真模型的正确性与合理性。研究成果为提升刮板输送机的智能控制水平、保障煤矿运输装备的负载稳定和功率平衡提供了理论依据, 进而降低综采工作面的运输成本, 延长运输装备的使用寿命。

关键词: 刮板输送机; 垂直冲击; 负载电流特性; 中部槽弯曲角度; 中部槽间隙

中图分类号: TH6; TD42

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)02-0400-12

Study on load current characteristics of scraper conveyor under vertical impact

SI Lei¹, LI Jiahao¹, TAN Chao¹, WANG Zhongbin¹, LI Xiaoyu¹, HUO Xiaoquan², YUAN Zengyun²

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Shanxi Shanmei Tongchuan Mining Co., Ltd., Tongchuan 727000, China)

Abstract: During the operation of the mine scraper conveyor, it is easy to be affected by the uneven movement of hydraulic support and the uneven cutting bottom of shearer, bearing various types of impact, of which the impact in the vertical direction is the most obvious. This phenomenon will lead to serious wear of the transmission system and unbalanced power of the driving motor. In this article, the formation mechanism of vertical impact of scraper conveyor is studied and the running resistance of the scraper conveyor under different vertical impact effects is calculated. The vertical impact simulation model of the scraper conveyor transmission system is established. The load conditions of scraper conveyor under different working conditions of middle slot clearance, convex and concave of middle slot are simulated and analyzed. The simulation results show that when the middle slot clearance increases, the impact between the middle groove and the middle plate will be stronger, and the impact on the drive system of the scraper conveyor will be more obvious. The peak value of load current produced by vertical impact is positively correlated with the degree of concave or convex bending of the middle groove. The maximum bending angle of adjacent middle slots is the main factor determining the sudden peak value of impact load and the load increment

收稿日期: 2022-05-01 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-1140

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074271); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2018]87号)

作者简介: 司 垒(1987—), 男, 江苏徐州人, 副教授, 博士。E-mail: sileicool@163.com

after impact stability of scraper conveyor. The impact caused by the convex and concave bending of the middle groove has a maximum impact on the running resistance of about 12%, which is the main factor affecting the motor power imbalance of the drive system. In the coal mining face, the impact load monitoring platform of scraper conveyor is built, and some impact load monitoring experiments under different vertical bending angles are carried out. The comparison results show that different degrees of vertical impact make the load current fluctuate obviously, and in a short time, the peak value of the impact current can reach 1.5 times of the normal working current, causing serious damage to the chain, motor and other parts of the scraper conveyor. The change trend of the motor current curve after impact is basically consistent with the simulation curve, and the average absolute error range is about 0.435A ~ 1.342A, which verifies the correctness and rationality of the vertical impact simulation model of the scraper conveyor. The research results provide a theoretical basis for improving the intelligent control level of scraper conveyor and ensuring the load stability and power balance of coal mine transportation equipment, so as to reduce the transportation cost of fully mechanized mining face and prolong the service life of transportation equipment.

Key words: scraper conveyor; vertical impact; load current characteristics; bending angle of middle slot; middle slot clearance

0 引 言

我国是煤炭生产和消耗大国,煤炭作为国家重要能源,其采掘运输方式尤为重要。煤矿综采工作面的采煤机、刮板输送机及液压支架被称为综采工作面“三机”,是综采成套装备的核心。刮板输送机在煤矿综采工作面运行过程中,既负责落煤的输送,又提供采煤机的行走轨道和液压支架推移定位,是综采设备的联结点,其安全高效运行对保障矿井生产综合效益有着不可替代的重要作用^[1-3]。

刮板输送机运行工况复杂多变,随着工作面的推进,刮板输送机在运煤过程中承受来自多方面的作用力,包括压力、拉力、冲击、振动和摩擦力等。由于综采工作面空间狭窄和采煤机移动割煤,刮板输送机的负载变化又具有时变性和随机性,很容易造成刮板输送机运行电流过大、停机率高等问题,甚至还会对刮板输送机各零部件造成损耗,降低其使用寿命^[4]。由于中部槽之间的不平齐,刮板输送机在启动、制动和运行过程中,会产生冲击载荷。在刮板输送机调速过程中,短时间内冲击载荷加大,易使负载突变,导致电机功率不平衡,甚至造成断链事故的发生。

国内外学者对刮板输送机动态特性进行了诸多研究。针对刮板输送机结构特性的问题,史志远等^[5]开展了中部槽中板与煤、矸石、水等混合物料的磨损试验,试验表明中板的磨损分区及磨损机制在一定的接触压力及滑行速度下会发生过渡。夏瑞等^[6]采用离散元方法建立了散煤刮板输送机相互作用分析模型,对刮板输送机槽在运输过程中的磨损进行预测。针对刮板输送机动态特性的问题,姚艳萍等^[7]研究了刮板输送机驱动装置的非线性振动特性,通过离散元法建立了刮板输送机物料输送的动态过程,分析了链轮参数对刮板输送机中部槽冲击磨损的影响规律。毛君等^[8-9]研究了矿用重型刮板

输送机的实际工况和受力状态,建立了刮板输送机非线性、时变性、动力耦合的有限元模型,构造了刮板输送机线路的形态函数,提供了自动建模方法。WANG Haijian 等^[10]设计了刮板输送机动态张力测试和智能协调控制系统,实现了在重载下驱动刮板输送机链轮的协调控制。张行等^[11]建立了双链牵引链传动系统虚拟样机模型,分析了驱动链轮的啮合特性和刮板链的张力变化。李云峰等^[12]研究了矿用刮板输送机在运行过程中其中部槽磨损的影响因素,通过 SolidWorks 与 3DEC 联合仿真分析,明确了刮板间距对中部槽磨损量的影响程度较大。王旭峰等^[13]针对刮板输送机的受力状态和链轮驱动的多边形效应,构造了刮板输送机链传动系统纵向振动方程,并对刮板输送机的动张力特性以及圆环链载荷谱进行了仿真分析。侯德安^[14]建立了刮板输送机链传动系统的仿真模型,分析了多边形效应对刮板链运行速度和加速度的影响规律。王继文^[15]利用有限元法构建了刮板输送机系统的动力学模型,分析了不同工况下刮板输送机系统在启动时的动力学特性。可以看出,国内外学者从不同角度对刮板输送机动态特性进行了研究,但忽略了垂直方向冲击对刮板输送机传动系统的影响,且无法判断不同冲击类型对驱动系统电机功率的影响程度。

刮板输送机垂直冲击是影响煤矿运输设备的负载稳定和功率平衡的重要因素,对刮板输送机垂直冲击特性分析与试验研究具有重要的理论意义。笔者在分析刮板输送机垂直冲击形成原因的基础上,建立了刮板输送机垂直冲击仿真模型,对不同中部槽间隙、不同中部槽凸起和凹陷弯曲角度下产生的冲击特性进行了仿真分析,并在煤矿井下进行了相关试验数据对比验证,为解决由冲击造成的刮板输送机功率不平衡、设备磨损过快等问题提供理论依据,从而降低综采工作面的运输成本,延长运输装备的使用寿命。

1 刮板输送机垂直冲击形成原因

1.1 刮板输送机中部槽结构

刮板输送机布置在采煤工作面和采区巷道,与采煤机、液压支架进行配套,实现采煤、装煤、运煤和推移的机械化。刮板输送机中部槽作为物料承载装置,为适应综采工作面的推溜工艺,其结构的主要特点是具有可弯曲性。由于在运行中要承载摩擦、拉压和弯曲冲击等多种作用,中部槽还具备结构强度高、耐磨损等特点,其结构如图 1 所示。

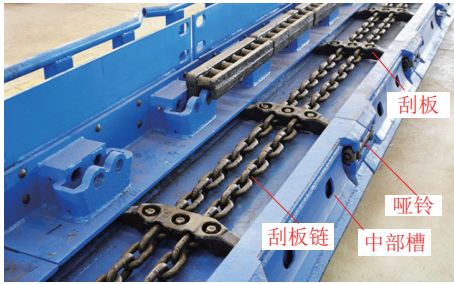


图 1 刮板输送机中部槽部分

Fig.1 Middle trough of scraper conveyor

1.2 垂直冲击形成过程

刮板输送机垂直冲击主要包括中部槽之间的凹陷、凸起区域及间隙区域造成的弯曲冲击。当液压支架推移不齐或者采煤机截割底板不平时,刮板输送机的铺设面并不平整,这种情况下相邻中部槽之间会产生一定角度的凸起或凹陷,如图 2a 所示,刮板经过图中虚框标注区域时会发生碰撞,从而产生垂直冲击。其次,刮板输送机中部槽之间一般采用哑铃形式连接,因此相邻中部槽连接处存在一定间隙,如图 2b 所示。当刮板在槽内滑行时,经过中部槽弯曲和间隙区域时(图中红色椭圆区域),刮板与中部槽中板发生正面撞击产生冲击载荷,撞击造成的冲击负载峰值很大,破坏刮板输送机运行的稳定性,造成严重的能量损耗和零部件磨损。

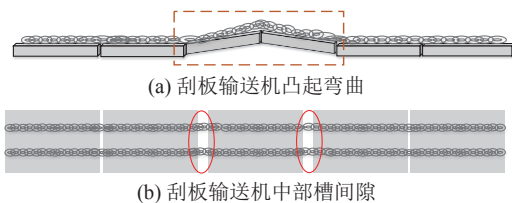


图 2 刮板输送机垂直弯曲区域示意

Fig.2 Schematic of vertical bending area of scraper conveyor

2 刮板输送机垂直冲击特性分析

2.1 冲击振动原理

刮板输送机传动系统采用链传动方式,链条可

看作一个粘弹性体,笔者采用了 Vogit-Kelvin 模型对其进行分析。

1) Vogit-Kelvin 模型。Vogit-Kelvin 是一个弹簧和阻尼器并联的模型如图 3 所示,该模型可表示为^[16]:

$$F_{11} - F_{12} = k_1(x_a - x_b) + c_1(\dot{x}_a - \dot{x}_b) \quad (1)$$

式中: F_{11} 和 F_{12} 分别为模型所受的拉力和阻力; k_1 为刮板链弹性刚度; c_1 为链条的粘性阻尼系数; x_a 和 x_b 分别为模型受力前后的位移。

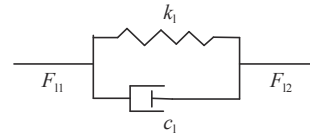


图 3 Vogit-Kelvin 模型

Fig.3 Vogit Kelvin model

2) 冲击振动微分方程。刮板输送机中部槽在垂直方向的弯曲使滑行过程中的刮板和中部槽产生碰撞,基于 Vogit-Kelvin 模型进行分析,碰撞载荷的大小主要取决于刮板的质量和碰撞速度。垂直冲击属于正碰撞,即刮板的运动方向与产生碰撞的表面垂直,此时冲击载荷包括系统弹性振动带来的冲击和刮板运行速度先减小后增大带来的动能变化^[17-18]。

①冲击力由零增加到最大值,系统的振动微分方程为

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + k_s x_s - c_s (\dot{x}_g - \dot{x}_s) - k_g (x_g - x_s) = 0 \\ m_g \ddot{x}_g + c_g (\dot{x}_g - \dot{x}_s) + k_g (x_g - x_s) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

刮板与中部槽撞击的冲击力为

$$F_a = k_g (x_g - x_s) \quad (3)$$

②冲击力由最大值减小至 0,系统的振动微分方程为

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + k_s x_s - c_m (\dot{x}_g - \dot{x}_s) - k_m (x_g - x_s) = \\ (k_g - k_m) [x_g(\Delta t) - x_s(\Delta t)] \\ m_g \ddot{x}_g + c_m (\dot{x}_g - \dot{x}_s) + k_m (x_g - x_s) = \\ -(k_g - k_m) [x_g(\Delta t) - x_s(\Delta t)] \end{cases} \quad (4)$$

该过程产生的冲击力为

$$F_b = k_m (x_g - x_s) + (k_g - k_m) [x_g(\Delta t) - x_s(\Delta t)] \quad (5)$$

式中: m_s 为单位中部槽质量; m_g 为单位刮板质量; x_s 为中部槽变形量; x_g 为刮板与中部槽总的变形量; k_s 、 k_g 分别为中部槽、刮板的刚度系数; c_s 、 c_g 为中部槽、刮板的阻尼系数; Δt 为冲击力由 0 增大到峰值所用的时间; k_m 和 c_m 分别为中部槽碰撞后的刚度系数和阻

尼系数。

将刮板输送机相关的物理参数代入上述 Vogit-Kelvin 模型的振动微分方程, 可以求解出刮板-中部槽碰撞下的冲击负载变化情况。

2.2 刮板输送机垂直冲击特性分析

2.2.1 中部槽凸起区域的冲击载荷

刮板经过中部槽凸起区域时, 刮板与中部槽中板碰撞产生碰撞冲击, 刮板链的拉力方向沿凸起角度发生变化, 方向变化与凸起角度 θ_1 有关, 如图 4 所示。

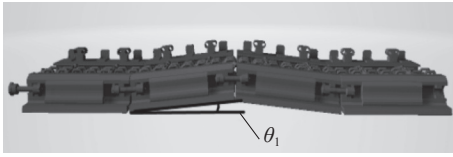


图 4 刮板输送机凸起弯曲区域示意

Fig.4 Schematic of convex bending area of scraper conveyor

当相邻中部槽出现凸起弯曲角 θ_1 时, 刮板撞击中部槽中板的冲击力 F_u 计算公式为

$$F_u = \max\{F_a, F_b\} \sin \theta_1 \quad (6)$$

刮板链的牵引力方向随凸起角度发生变化, 可分解为沿刮板运动方向和垂直于刮板运动方向的分力, 沿刮板运动方向的拉力 F_{T1} 计算公式为

$$F_{T1} = F_0 \cos \theta_1 \quad (7)$$

式中: F_0 为稳定运行时刮板链的牵引力。

当中部槽产生凸起弯曲时, 无法确定产生垂直弯曲的中部槽数量, 需要引入随机因子 r , 根据现场经验分析, 确定随机因子 $r \sim U[0, 0.2]$ 。因此, 刮板输送机在凸起状态下的冲击力 F_{up} 为:

$$F_{up} = rN[F_0 - F_{T1} + \max\{F_a, F_b\} \times \sin \theta_1 + mgsin \theta_1] \quad (8)$$

式中: F_{up} 为刮板输送机在凸起状态下的冲击力; m 为刮板和物料的总重; θ_1 为凸起角度; N 为刮板输送机中部槽总数量; F_a 和 F_b 分别由式(3)和式(5)计算得到。

2.2.2 中部槽凹陷区域冲击载荷

当刮板经过中部槽凹陷区域时, 该过程与凸起弯曲情况类似, 刮板与中部槽中板碰撞产生碰撞冲击, 刮板链的拉力方向沿凹陷角度发生变化, 方向变化与凹陷角度 θ_2 相关, 如图 5 所示。

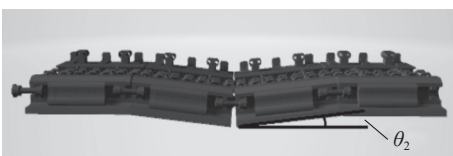


图 5 刮板输送机凹陷弯曲区域示意

Fig.5 Schematic of concave bending area of scraper conveyor

刮板撞击中部槽中板的冲击力 F_d 和沿刮板运动方向的拉力 F_{T2} 分别为

$$F_d = \max\{F_a, F_b\} \sin \theta_2 \quad (9)$$

$$F_{T2} = F_0 \cos \theta_2 \quad (10)$$

刮板输送机在凹陷状态下冲击力 F_{down} 的计算公式为

$$F_{down} = rN[F_0 - F_{T2} + \max\{F_a, F_b\} \times \sin \theta_2 + mgsin \theta_2] \quad (11)$$

式中: F_{down} 为刮板输送机在凹陷状态下的冲击力; θ_2 为中部槽凹陷弯曲角度。

2.2.3 刮板输送机中部槽间隙区域冲击载荷

受中部槽活动联接方式的限制, 经过多次推移后的刮板输送机中部槽之间无法紧密的连接, 导致相邻中部槽产生间隙, 刮板滑行至间隙处与中板碰撞, 产生冲击力, 如图 6 所示。

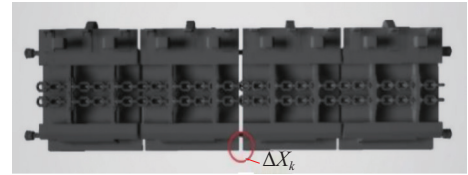


图 6 中部槽间隙区域示意

Fig.6 Schematic of middle slot clearance area of scraper conveyor

刮板在经过中部槽间隙时, 产生的冲击力 F_k 计算公式为

$$F_k = \frac{\Delta x_k}{L} \max\{F_a, F_b\} rN \quad (12)$$

式中: F_k 为刮板经过中部槽间隙时产生的冲击力; Δx_k 为相邻中部槽之间的间隙; L 为单节中部槽长度。

综上所述, 刮板输送机垂直方向总冲击载荷 F_Z 为:

$$F_Z = F_{up} + F_{down} + F_k \quad (13)$$

垂直冲击产生的总冲击载荷作用在电机上产生的负载转矩 T_c 为

$$T_c = F_Z \cdot R_s \quad (14)$$

式中: T_c 为冲击载荷作用在电机上产生的负载转矩; R_s 为链轮半径。

3 垂直冲击模型建立与仿真分析

刮板输送机垂直冲击的不确定性是引起电机功率突变的主要因素。中部槽不同垂直弯曲角度和不同间隙大小引起的冲击, 在刮板输送机电机处混叠, 多类冲击之间产生非线性叠加, 综合反映在电机电流的变化上, 进而导致电机功率波动较大。为探究各类冲击信号对电机功率变化的影响程度, 以 SGZ1250/2400 型刮板输送机为例, 对其传动系统的

冲击耦合关系进行分析,通过改变中部槽间隙、中部槽数量及弯曲角度,对仿真得到的电流信号进行深入分析,探讨刮板输送机电流负载变化特性以及不同冲击类型对刮板输送机运行阻力的影响程度。

3.1 刮板输送机传动系统动力学模型

刮板输送机由多节物理特性相同的中部槽连接而成,闭合的刮板链在刮板输送机槽内带动刮板滑行。将刮板输送机分为 n 个质量单元,各单元用 Voigt-Kelvin 模型联接,构成刮板输送机的整机简化模

型^[19-20]。如图7所示,该系统由弹性杆与刚体组成,当物体受到力的撞击时,记每个离散单元产生形变为 x_i 、弹性恢复力为 k_i 、阻尼力为 c_i 。由于刮板输送机机头和机尾均装有驱动装置,因此机头和机尾各占一个单元,质量分别记为 m_1 和 m_n 。将有载侧和无载侧各分为 $n-1$ 个质量单元,有载侧的单元体质量是单位长度刮板、链条和物料的总质量,记为 m_i , $i = 2, 3, \dots, n$; 无载侧的单元体质量是单位长度刮板和链条的总质量,记为 m_j , $j = n+1, n+2, \dots, 2n$ 。

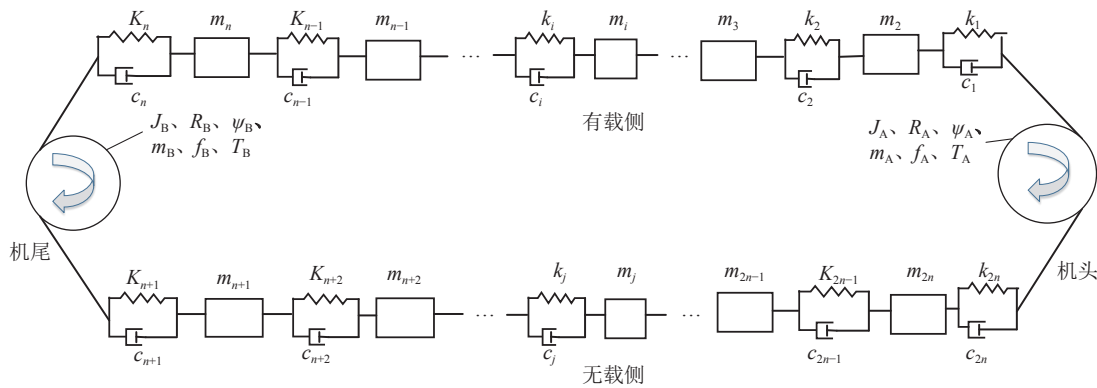


图7 刮板输送机系统简化模型

Fig.7 Simplified model of scraper conveyor

3.2 刮板输送机离散单元状态方程

采用 Voigt-Kelvin 模型作为离散单元体的受力分析模型,将各离散单元体连接起来,两端加入动力装置,就构成了刮板输送机的系统动力学模型。以 m_2 为例,单元体的受力如图8所示,其中, F_1 和 F_2 分别为机头和机尾方向的拉力, f_2 为运行阻力, $m_2\ddot{x}_2$ 为单元体 m_2 产生的惯性力。

结合式(1)和图8受力分析可得:

$$F_1 - F_2 = m_2\ddot{x}_2 + f_2 \quad (15)$$

其中, $F_1 = k_1\varphi_A R_A + c_1\dot{\varphi}_A R_A - k_1x_1 - c_1\dot{x}_1$, $F_2 = k_2x_2 + c_1\dot{x}_2 - k_2x_3 - c_1\dot{x}_3$ 。

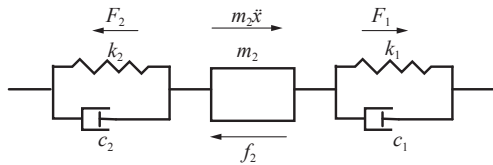


图8 m_2 单元体受力示意

Fig.8 Force of unit body m_2

则离散单元体 m_2 的动力学方程为

$$k_1\varphi_A R_A + c_1\dot{\varphi}_A R_A - k_1x_1 - c_1\dot{x}_1 - k_2x_2 - c_1\dot{x}_2 + k_2x_3 + c_1\dot{x}_3 - f_2 = m_2\ddot{x}_2 \quad (16)$$

则第 n 个离散单元体 m_n 的动力学方程为

$$k_{n-1}x_{n-1} + c_{n-1}\dot{x}_{n-1} - (k_{n-1} + k_n)x_n - (c_{n-1} + c_n)\dot{x}_n + k_nx_{n+1} - c_n\dot{x}_{n+1} - f_n = m_n\ddot{x}_n \quad (17)$$

刮板输送机离散单元整机模型的动力学方程为

$$\begin{cases} J_A\ddot{\varphi}_A + (F_1 - F_{2n})R_A + f_A R_A = M_A \\ m_2\ddot{x}_2 + F_2 - F_1 + f_2 = 0 \\ m_i\ddot{x}_i + F_{i+1} - F_i + f_i = 0 \\ \dots \\ J_B\ddot{\varphi}_B + (F_{n+1} - F_n)R_B + f_B R_B = M_B \\ m_{n+2}\ddot{x}_{n+2} + F_{n+2} - F_{n+1} + f_{n+2} = 0 \\ m_j\ddot{x}_j + F_j - F_{j-1} + f_j = 0 \\ \dots \\ m_{2n}\ddot{x}_{2n} + F_{2n} - F_{2n-1} + f_{2n} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: J_A 、 J_B 为转动惯量; M_A 、 M_B 为链轮转矩; φ_A 、 φ_B 为链轮装置的转角; R_A 、 R_B 为链轮的节圆半径; f_A 、 f_B 分别为刮板链经过机头机尾的附加阻力。下标 A 和 B 分别代表机头和机尾的电机。

将机头和机尾单元体的转角量换算为与刮板链单元体一致的位移,即 $x_1 = \varphi_A R_A$, $\dot{x}_1 = \dot{\varphi}_A R_A$, $x_{n+1} = \varphi_B R_B$, $\dot{x}_{n+1} = \dot{\varphi}_B R_B$, 便可将公式(20)简化为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (19)$$

式中: M 为刮板输送机的质量矩阵,由各离散单元的质量构成其对角元素; C 为阻尼系数矩阵; K 为刚度系数矩阵; F 为冲击力矩阵。

3.3 冲击特性仿真分析

根据刮板输送机系统动力学模型的矩阵方程,设计了刮板输送机动力学模型的仿真原理图,如

图 9 所示。由所建立的刮板输送机动力学模型,对刮板输送机正常稳定运行、中部槽间隙及中部槽凸

起和凹陷弯曲等不同工况下的电流负载情况进行仿真分析。

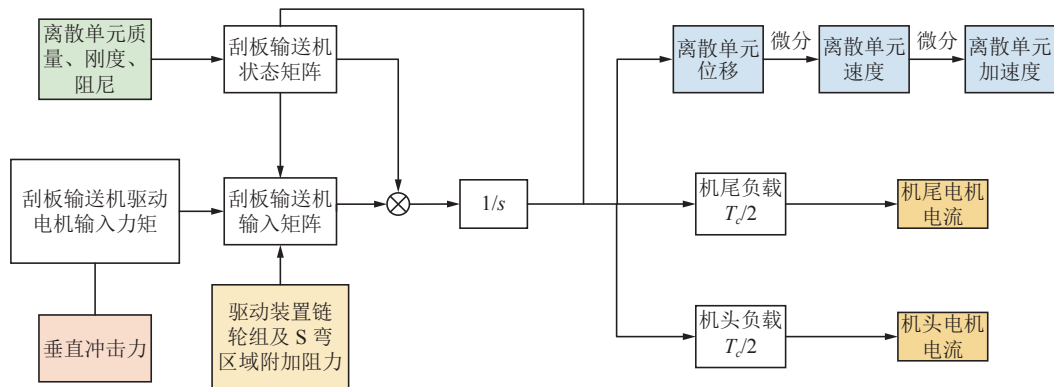


图 9 刮板输送机动力学仿真原理

Fig.9 Dynamic simulation model of scraper conveyor

1)刮板输送机在启动后的一段时间内,各部件开始运行,电机电流增大。之后采煤机开始截割工作,刮板输送机承接落煤,电流产生波动,当落煤均匀、各部件稳定运行时,电机电流趋于稳定,定义此时为刮板输送机稳定运行下的电机电流。图 10 为刮板输送机启动至稳定状态的电机电流变化情况。

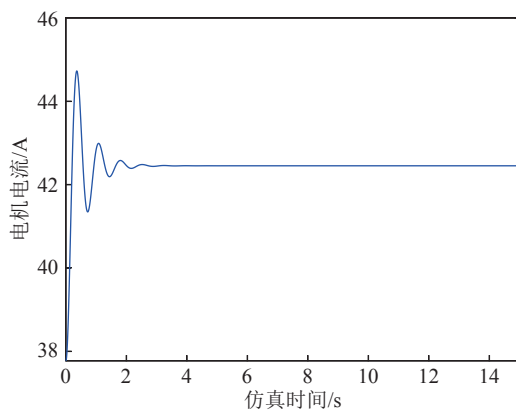


图 10 刮板输送机稳定运行下的电机电流

Fig.10 Motor-output current of scraper conveyor under stable operation

2)选取刮板输送机直线段的相邻两节中部槽,调节联接处的哑铃销,使中部槽之间产生不同距离的间隙。当间隙为 40、80、120 和 160 mm 时,仿真结果如图 11 所示。

由图 11 可以看出,加入中部槽间隙冲击后,电机电流短时间内产生较大波动,最大冲击电流达到 52 A,稳定后冲击载荷增加 1.5 ~ 3.0 A。当间隙增加时,电流呈非线性增大趋势。这是由于间隙较大时,刮板处于中部槽间隙的部分将失去中部槽的支撑,

导致其垂直方向坐标略低于中部槽平面,因此与中板发生的撞击就会越强烈。

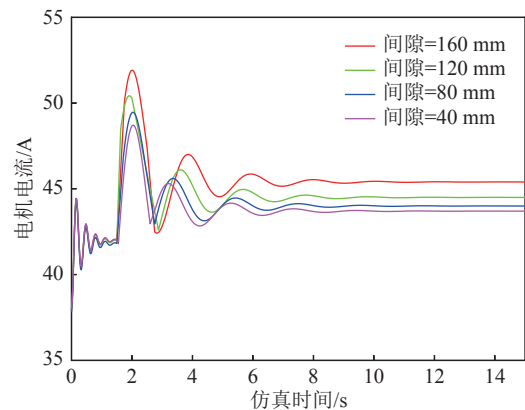
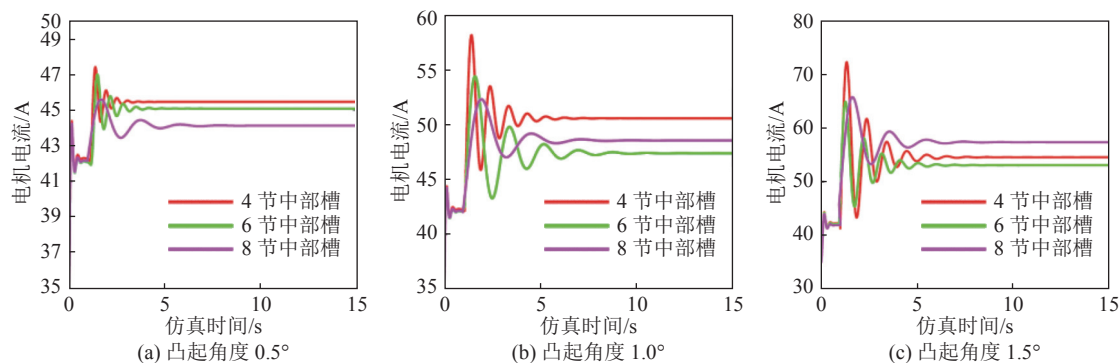


图 11 不同中部槽间隙下的电机电流

Fig.11 Motor current under different middle slot clearance

3)在刮板输送机启动平稳后,分别将中部槽弯曲角度为 0.5°、1.0°、1.5°的冲击作为外力输入到仿真模型,获取电机负载电流变化情况。选取刮板输送机 4 ~ 8 节中部槽来产生不同的凸起弯曲角度,其仿真结果如图 12 所示。

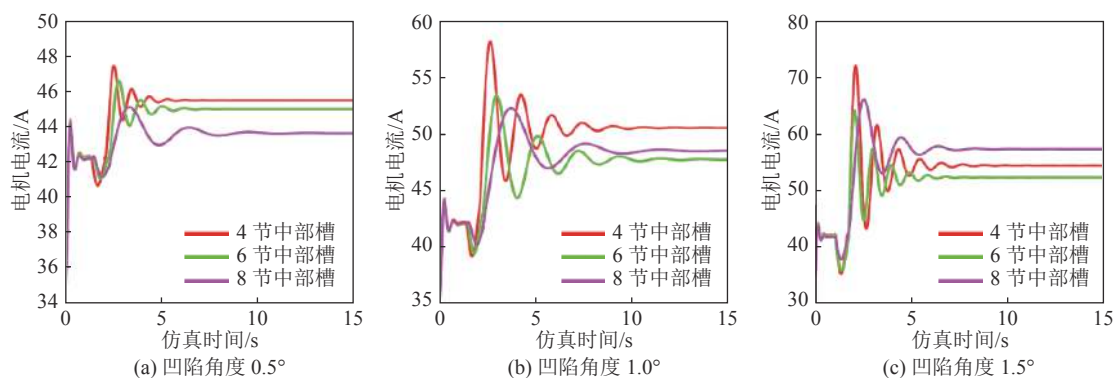
由图 12 可以看出:①当垂直凸起弯曲角度为 0.5° ~ 1.5°时,3 种弯曲状态下的刮板输送机电机电流波动峰值区间分别为 45.5 ~ 47.2 A、52.4 ~ 57.9 A 和 64.9 ~ 72.5 A。冲击波动稳定后,刮板输送机的冲击负载均有所增加,比正常运行负载电流增大 1.6 ~ 3.3 A、5.0 ~ 8.5 A 和 10.1 ~ 15.0 A。另外,与 0.5°和 1.0°的弯曲角相比,当弯曲角增大到 1.5°时,8 节中部槽弯曲产生的冲击负载明显更大,为刮板输送机稳定运行状态下负载电流的 1.36 倍,其中冲击电流的

图12 凸起弯曲角度为 $0.5^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$ 时电机电流变化曲线Fig.12 Change curves of motor current with different convex bending angles between $0.5^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$ degrees

最大峰值可达正常工作电流的1.7倍左右,在实际工况中属于过载状态,会加剧刮板输送机系统的磨损情况,功率损耗大幅增大。②从电流的变化趋势来看,无论弯曲角度大小,最先达到电流峰值且峰值最大的情况均是由4节中部槽构成的弯曲区域。当中部槽数量增加时,相邻中部槽的弯曲角度进行了非线性划分,每节中部槽的弯曲程度均有所降低,因此在相同的垂直弯曲角度下,参与构成该弯曲区域的中部槽数量越多,相邻中部槽的弯曲角度越小,所以3种情况下的冲击电流峰值依次减小。③由于构成弯曲角的中部槽数量不同,在相同垂直弯曲角度下,同时处在弯曲区域中部槽上运行的离散单元数量与弯曲区域中部槽的数量呈正相关。弯曲段中部槽数

量越多,每2个相邻中部槽之间的弯曲角度虽然有所减小,但产生的冲击数量也随之增多,因此冲击大小与冲击数量2种因素共同决定了冲击稳定后的电流值。④相同中部槽数量的冲击状态下,改变垂直弯曲角度,各曲线表现出相似的波动性,且变化趋势基本一致。垂直弯曲区域的中部槽数量越多,电流到达波峰的时间越长,冲击造成的电流波动趋势越平缓。

4)在相同仿真条件下,分别将中部槽弯曲 0.5° 、 1.0° 、 1.5° 的凹陷角度冲击作为外力输入到仿真模型,获取电机负载变化情况。刮板输送机4~8节中部槽构成的不同凹陷角垂直弯曲的仿真结果如图13所示。

图13 凹陷弯曲角度为 $0.5^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$ 时电机电流变化曲线Fig.13 Change curves of motor current with different concave bending angles between $0.5^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$ degrees

由图13可以看出:①当垂直凹陷弯曲角度为 $0.5^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$ 时,3种弯曲状态下的刮板输送机电机电流波动峰值区间分别为41.0~47.5 A、39.5~58.0 A和35.0~72.0 A。冲击波动稳定后,刮板输送机的冲击负载均有所增加,比正常运行负载电流分别增大1.8~3.75 A、5.5~8.5 A和10.0~15.2 A。②垂直凹陷弯曲冲击加入后,电机电流在开始阶段的短时间

内产生一个下降的波动,这是因为在中部槽向下凹陷弯曲时,刮板及刮板链构成的离散单元体在运行方向上出现短暂下行过程,此时的重力在弯曲方向上的分量为刮板运行提供了一定的助力。③电流值在小范围的下降后快速上升到下一个电流波动的峰值,且电流上升的波动比下降波动冲击更加明显,这是因为刮板输送机系统受到垂直冲击时,刮板与中

部槽碰撞产生的冲击力相当于对运动单元体的紧急制动作用,冲击力与牵引力方向完全相反,短时间的冲击就可以产生较大峰值。

从上述仿真结果可以得到以下结论:①中部槽间隙越大,中部槽与中板发生的撞击就会越强烈,对刮板输送机传动系统的冲击越明显;中部槽凹陷或凸起弯曲冲击对传动系统造成的冲击载荷变化趋势一致;垂直冲击产生的负载电流峰值与垂直弯曲程度呈正相关;中部槽数量越多,弯曲角度越大,系统稳定后的冲击载荷也越大。②在凸起弯曲角度为1.5°的4节中部槽弯曲区域,产生的电机电流冲击峰值最大,响应时间最快。在6组仿真试验中,1.5°弯曲角下的冲击载荷增量约是0.5°弯曲角下增量的22.23%。由此可知,相邻中部槽最大弯曲角是决定刮板输送机冲击负载突变峰值及冲击稳定后负载增量的主要因素。

由以上3种工况下的冲击仿真结果可知,不同冲击类型产生的作用力差异较大。按照冲击产生方式,计算出负载增量占刮板输送机系统稳定状态下运行阻力的比例,以此数据表示冲击作用的影响程度,见表1。

从表1中的对比结果可知,中部槽间隙冲击对

系统运行阻力的影响程度最大为6.5%,中部槽凸起和凹陷弯曲产生的冲击对系统运行阻力的影响程度最大约为12%,是影响驱动系统电机功率不平衡的主要因素。

表 1 3 种类型冲击的作用程度对比

Table 1 Comparison of the effects of three types of impact

| 冲击类型 | 中部槽间隙 | 凸起弯曲 | 凹陷弯曲 |
|------|--------|---------|---------|
| 作用程度 | 0~6.5% | 0~11.7% | 0~12.9% |

4 现场试验

笔者在陕西陕煤铜川矿业有限公司玉华煤矿智能化工作面搭建了刮板输送机冲击负载监测平台,如图14所示,开展了刮板输送机垂直冲击负载电流监测试验。该工作面“三机”配套设备型号为:MG1000/2500-WD型采煤机、ZY12000/28/64D型液压支架和SGZ1250/2400型刮板输送机,工作面煤层平均厚度达9.5 m,倾斜长度160 m。通过试验分析不同工况下刮板输送机传动系统的电机电流变化情况,验证所建刮板输送机垂直冲击仿真模型的正确性。

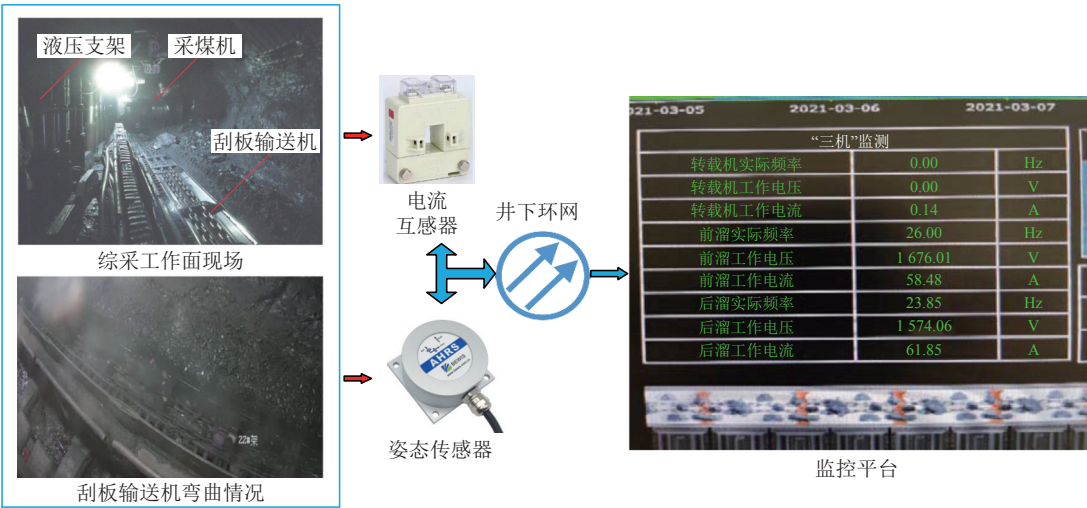


图 14 刮板输送机冲击负载监测平台

Fig.14 Impact load monitoring platform for scraper conveyor

4.1 试验方案设计

由仿真结果可知,刮板输送机中部槽凸起和凹陷弯曲产生的冲击电流变化趋势基本一致,因此可选取其中一种弯曲形式进行现场试验。另外,由表1可知,中部槽凸起和凹陷弯曲产生的冲击对刮板输送机系统运行阻力的影响程度最大。由于煤矿井下条

件恶劣,结合采煤工作面的实际情况,笔者主要进行了中部槽凸起弯曲下的冲击试验分析,方案设计如下:

1)利用安装在中部槽的姿态传感器感知各中部槽的凸起角度,并通过监控中心的PC端界面实时监测电机电流变化情况。

2)从大量监测数据中选取与仿真参数一致的

部槽弯曲状态,提取该弯曲状态下的刮板输送机机电流数据,并将试验数据与仿真结果(理论值)进行对比分析。

4.2 试验结果分析

1)图15为凸起弯曲角度为 0.5° 时,不同弯曲区域中部槽数量下的电机电流理论-实测值对比图。

从图15可以看出,电机电流的实际测量结果与仿真结果变化趋势基本保持一致,电机经过冲击载荷突变后在运行时间为4 s后趋于稳定状态,此时电流均值分别为51.6、50.0和49.8 A,由此可以看出垂直弯曲角度较小的情况下,构成同一弯曲角度的中

部槽数量越少,垂直冲击对刮板输送机传动系统的影响越大。

从冲击响应速度上看,实测电流产生波动的时间较仿真曲线更慢一些,实测电流到达峰值的时间与仿真曲线相比略有延迟。以图15c为例,在8节中部槽弯曲 0.5° 的情况下,理论上刮板输送机机电流在2 s内达到波动峰值,但是在井下试验时垂直冲击加入2.5 s后对电流的扰动作用达到最大,这是因为刮板输送机运输调速系统具有一定的滞后性,对冲击响应时间及到达电流稳定值的时间均比理想模型状态下有所延迟。

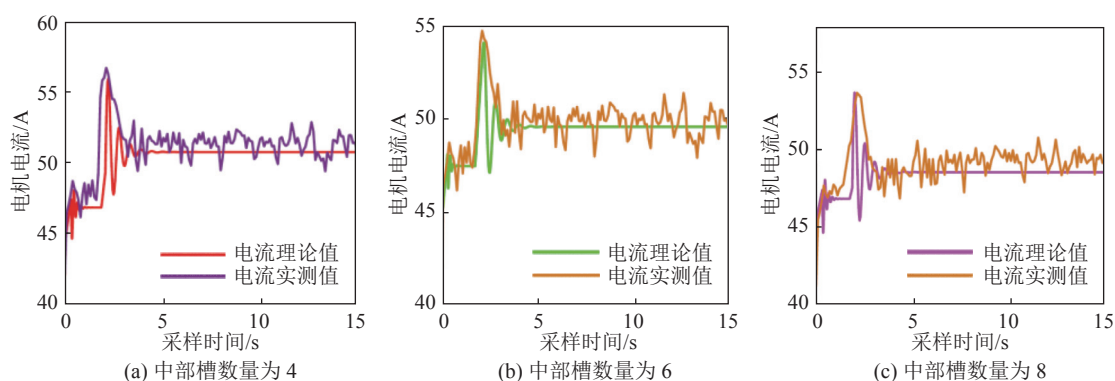


图15 中部槽垂直弯曲 0.5° 的电机电流理论-实测值对比曲线

Fig.15 Comparison curves between theoretical and measured current values of vertical bending 0.5° in middle trough of scraper conveyor

2)图16为凸起弯曲角为 1.0° 时,不同弯曲区域中部槽数量下的电机电流理论-实测值对比图。

从图16可以看出,电机电流的实际测量结果与仿真结果仍基本保持一致。与 0.5° 弯曲角的情况相比,加入冲击后电机电流实测数据产生波动的时间以及电流值趋于稳态的时间大致相同。从电流波动峰值分析,弯曲角度增加后,相对应的中部槽弯曲数量的波动幅值增加5 A左右,幅值的增量变化与理论值相近。试验中刮板输送机经过冲击载荷突变后

在运行时间为4 s时趋于稳定状态,电流稳定均值分别为54.5、50.9和52.3 A,由此可以看出垂直弯曲角度增大时,垂直弯曲区域的中部槽数量与冲击稳定后的电机电流增量不再呈负相关关系,冲击负载增量受中部槽弯曲角度及构成弯曲区域的中部槽数量的共同影响。

3)图17为凸起弯曲角度为 1.5° 时,不同弯曲区域中部槽数量下的电机电流理论-实测值对比图。

从图17可以看出,电机电流受到垂直冲击后产

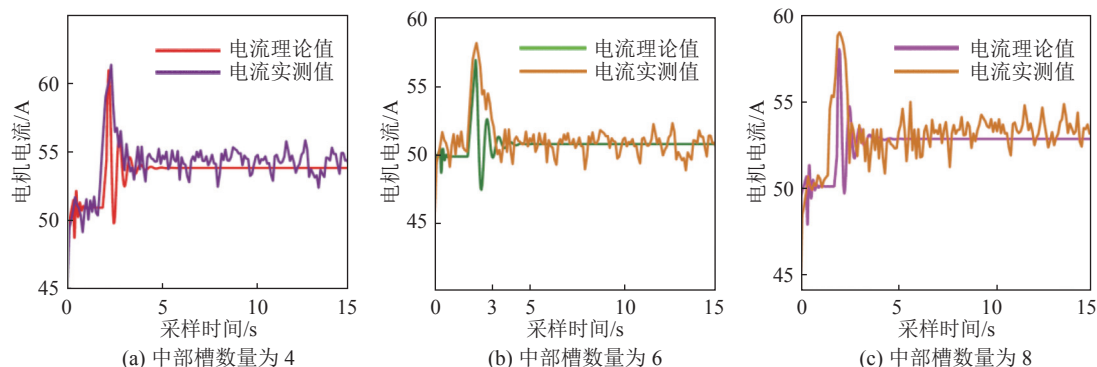


图16 中部槽垂直弯曲 1.0° 的电机电流理论-实测值对比曲线

Fig.16 Comparison curves between theoretical and measured current values of vertical bending 1.0° in middle trough of scraper conveyor

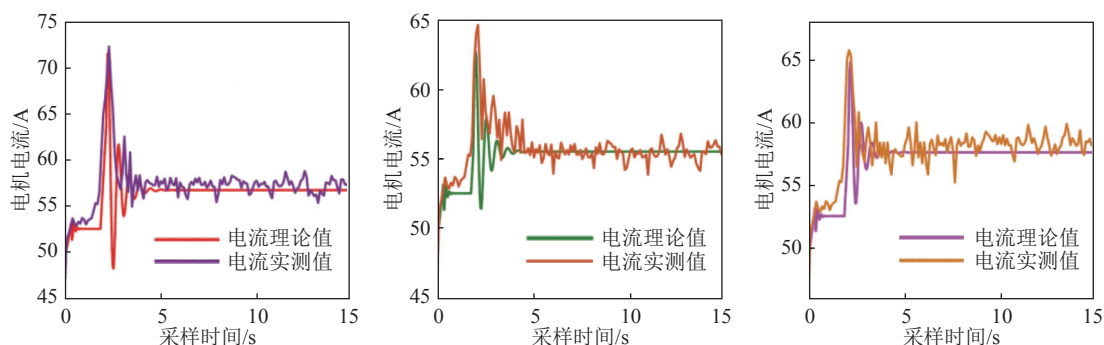


图 17 中部槽垂直弯曲 1.5° 的电机电流理论-实测值对比曲线

Fig.17 Comparison curves between theoretical and measured current values of vertical bending 1.5° in middle trough of scraper conveyor

生突变的时间及变化幅值均与理论值接近,在加入冲击后大约经过 4 s 后,电机电流达到稳定状态,稳定值随刮板输送机中部槽弯曲数量的增加而增大。电机电流值的最大误差发生在中部槽弯曲数量为 4 节时,这是由于在建立刮板输送机动力学仿真模型时,为保证模型受到冲击后能够快速调整并达到稳定运行状态,加入了反馈环节,当系统输入的冲击扰动较大时,通过负反馈调节能够及时调整输入参数,避免电机长时间过载,电机功率超出额定功率运行。而在实际工况中,实测电流的超调量更小,原因是煤矿运输系统会通过控制放煤量、调整运输速度和运输过载保护等多种方法进行调度,以此避免运输装备因为过载或压死频繁重载启停。

综上所述可知,不同程度的垂直冲击均使刮板输送机传动系统电机负载电流产生明显波动,是造成驱动装置电机功率不平衡的主要因素。在短时间内,冲击电流峰值最高可达正常工作电流的 1.5 倍,对刮板输送机的链条、电机等零部件造成严重损害。

4.3 误差分析

为进一步验证垂直冲击数学仿真模型的正确性,采用平均绝对值误差 MAE(Mean Absolute Error)进行对上述试验结果进行分析,其计算公式如下:

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |I_{ac}(i) - I_{th}(i)| \quad (20)$$

式中: m 为数据采样个数; I_{ac} 为实际电流值; I_{th} 为理论电流值(仿真值)。

通过式(20)可以计算出 3 试验的 MAE 值,见表 2。由表 2 可知,在 3 种不同垂直弯曲角度下,刮板输送机电机的实测电流与理论计算电流值平均绝对误差范围为 0.435 ~ 1.342 A。其中,在垂直弯曲角度为 1.5° 时,电机电流的测量误差相对其他两组测量数据较大,其原因在于,较大的中部槽弯曲角度会产

生极其猛烈的垂直冲击,进而造成刮板输送机某些零部件的物理参数发生变化,导致电流理论计算出现偏差,但上述的误差均在可接受范围内。另外,井下恶劣的工况环境也会使电流信息的采集出现一定偏差。总而言之,电机电流的试验数据与仿真结果(理论值)的吻合程度较高,可认为所建立的刮板输送机垂直冲击仿真模型是合理的、可行的。

表 2 垂直弯曲角为 0.5°~1.5° 时的电机电流 MAE 值

Table 2 MAE between measured and theoretical current when vertical bending angle between 0.5 ~ 1.5 degrees

| 垂直弯曲角度/(°) | 弯曲段中部槽数量/个 | MAE/A |
|------------|------------|-------|
| 0.5 | 4 | 1.157 |
| | 6 | 0.569 |
| | 8 | 0.781 |
| 1.0 | 4 | 0.435 |
| | 6 | 0.714 |
| | 8 | 0.833 |
| 1.5 | 4 | 1.342 |
| | 6 | 0.726 |
| | 8 | 0.838 |

5 结 论

1) 建立了刮板输送机传动系统冲击仿真模型,对不同中部槽间隙、不同凸起弯曲、不同凹陷弯曲产生的冲击进行了仿真分析,仿真结果表明:中部槽间隙越大,中部槽与中板发生的撞击就会越强烈,对刮板输送机传动系统的冲击越明显;垂直冲击产生的负载电流峰值与中部槽凹陷或凸起弯曲程度呈正相关;相邻中部槽最大弯曲角是决定刮板输送机冲击负载突变峰值及冲击稳定后负载增量的主要因素;中部槽凸起和凹陷弯曲产生的冲击对系统运行阻力

的影响程度最大约为12%,是影响驱动系统电机功率不平衡的主要因素。

2)搭建了刮板输送机冲击负载监测平台,开展了刮板输送机垂直冲击负载电流监测试验。采集了不同中部槽凸起弯曲下的电机电流数据,并进行了分析处理。试验结果表明:不同程度的垂直冲击均使刮板输送机传动系统电机负载电流产生明显波动,在短时间内,冲击电流峰值最高可达正常工作电流的1.5倍,对刮板输送机的链条、电机等零部件造成严重损害。现场采集的刮板输送机受到冲击后的电机电流变化曲线与仿真曲线变化趋势基本保持一致,平均绝对误差范围为0.435~1.342 A,验证了刮板输送机垂直冲击仿真模型的正确性与合理性。

3)研究成果为解决刮板输送机传动系统零部件磨损、驱动电机功率不平衡等问题提供了理论依据,保障了煤矿运输装备的负载稳定和功率平衡,为提升刮板输送机的智能控制水平提供了参考依据,进而降低综采工作面的运输成本,延长运输装备的使用寿命。

参考文献(References):

- [1] 王国法,徐亚军,张金虎,等.煤矿智能化开采新进展[J].*煤炭科学技术*,2021,49(1):1-10.
WANG Guofa, XU Yajun, ZHANG Jinhu, *et al.* New development of intelligent mining in coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 1-10.
- [2] 王国法,庞义辉,任怀伟.煤矿智能化开采模式与技术路径[J].*采矿与岩层控制工程学报*,2020,2(1):5-19.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei. Intelligent coal mining pattern and technological path[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2020, 2(1): 5-19.
- [3] 王国法,刘峰,孟祥军,等.煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J].*煤炭科学技术*,2019,47(8):1-34.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, *et al.* Research and practice on intelligent coal mine construction (primary state)[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(8): 1-34.
- [4] 王国法,刘峰,庞义辉.煤矿智能:煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J].*煤炭学报*,2019,44(2):349-357.
WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui. Coal mine intelligence-core technical support for high-quality development of coal industry[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(2): 349-357.
- [5] 史志远.严酷工况下刮板输送机中部槽磨损规律[J].*煤炭学报*,2017,42(S2):541-546.
SHI Zhiyuan. Wear law of middle trough of scraper conveyor under severe conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S2): 541-546.
- [6] XIA Rui, WANG Xuwen, LI Bo, *et al.* The prediction of wear on a scraper conveyor chute affected by different factors based on the discrete element method[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(17): 203-210.
- [7] 姚艳萍,高志鹏,张善震.链轮参数对刮板输送机中部槽冲击磨损的影响研究[J].*现代制造工程*,2021,489(6):130-134.
YAO Yanping, GAO Zhipeng, ZHANG Shanzhen. Study on the influence of sprocket parameters on the impact wear of the middle groove of scraper conveyor[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2021, 489(6): 130-134.
- [8] 毛君,师建国,张东升.重型刮板输送机动力建模与仿真[J].*煤炭学报*,2008,33(1):107-110.
MAO Jun, SHI Jianguo, ZHANG Dongsheng. Dynamic modeling and Simulation of heavy scraper conveyor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(1): 107-110.
- [9] SHI Jianguo, MAO Jun, WEI Xiaohua. Research on dynamic tension control theory for heavy scraper conveyor[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 34-35: 1956-1960.
- [10] WANG Haijian, ZHANG Qiang, XIE Fei. Dynamic tension test and intelligent coordinated control system of a heavy scraper conveyor[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2017, 11(7): 871-877.
- [11] 张行,江帆,贾晨曦,等.刮板输送机链传动系统受力特性研究[J].*煤矿机械*,2021,42(8):53-56.
ZHANG Xing, JIANG Fan, JIA Chenxi, *et al.* Research on force characteristics of chain drive system for scraper conveyor[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(8): 53-56.
- [12] 李云峰,李云聪.矿用刮板输送机中部槽磨损的离散元法分析与研究[J].*矿业研究与开发*,2021,41(1):169-173.
LI Yunfeng, LI Yuncong. Discrete element analysis and research on the abrasion of the middle groove in scraper conveyor[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(1): 169-173.
- [13] 王旭峰,梁影.刮板输送机张力特性分析与仿真[J].*煤炭科学技术*,2019,47(S2):59-63.
WANG Xufeng, LIANG Ying. Analysis and simulation of dynamic tension characteristics of scraper conveyor[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(S2): 59-63.
- [14] 侯德安.矿用刮板输送机链传动系统稳定性分析与仿真[J].*机械工程与自动化*,2021,224(1):57-59.
HOU Dean. Analysis and simulation of stability of mining scraper conveyor chain drive system[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2021, 224(1): 57-59.
- [15] 王继文.不同工况下刮板输送机启动时的动力学特性研究[J].*机械管理开发*,2019,34(9):143-145.
WANG Jiwen. Study on dynamic characteristics of scraper conveyor under different working conditions[J]. *Mechanical Management and Development*, 2019, 34(9): 143-145.
- [16] 焦宏章,杨兆建,王淑平.刮板输送机链轮传动系统接触力学仿真分析[J].*煤炭学报*,2012,37(S2):494-498.
JIAO Hongzhang, YANG Zhaojian, WANG Shuping. Contact dynamics simulation analysis of sprocket drive system of scraper conveyor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(S2): 494-498.
- [17] 刘婷.刮板输送机S弯区域水平弯曲角优化关键技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.

- LIU Ting. Research on key technology of horizontal bending angle optimization in S-bend area of scraper conveyor [D]. Xuzhou: China University of mining and technology, 2019.
- [18] 王季鑫, 李军霞, 王 沅. 刮板输送机链传动系统波动特性分析[J]. *机械传动*, 2019, 43(9): 118–122.
- WANG Jixin, LI Junxia, WANG Yuan. Fluctuation characteristic analysis on scraper chain transmission system[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2019, 43(9): 118–122.
- [19] 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.
- [20] 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.