



综采工作面巡检机器人柔性轨道设计与运动学仿真

张旭辉 杜永刚 霍鑫健 王川伟

引用本文：

张旭辉, 杜永刚, 霍鑫健, 等. 综采工作面巡检机器人柔性轨道设计与运动学仿真[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 240–246.

ZHANG Xuhui, DU Yonggang, HUO Xinjian. Design of flexible track and kinematics simulation of inspection robot in fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 240–246.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2020-0705>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿综采工作面巡检机器人系统研究

Research on inspection robot system for fully-mechanized mining face in coal mine

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0988492b-5856-4082-a405-ee00721d312b>

综采工作面自动巡检机器人系统设计

Design of automatic inspection robot system for fully-mechanized coal mining face

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 145–149 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8b2026b0-3666-4b22-a290-41ab7b075fc8>

综采工作面巡检机器人关键技术研究

Study on key technology of patrol robots for fully-mechanized mining face

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/596a52d7-e87f-4e5c-beb2-7d750056f6f1>

柔性轨道式环境巡检机器人设计原理与试验

Design principles and experiments of flexible track-type environmental inspection robot

煤炭科学技术. 2022, 50(6): 303–312 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bc653f08-8659-4a9d-96bf-5f15d6d0ff29>

基于功能分析的带式输送机自动巡检机器人设计

Design of automatic inspection robot for beltconveyor based on functional analysis

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 227–235 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e25522d6-1214-4533-8810-13194e453210>

综采巡检机器人关键技术研究

Research on key technology of patrol robot in fully-mechanized mining face

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 247–255 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1da24f09-a73d-4674-abab-5c334200038d>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张旭辉, 杜永刚, 霍鑫健, 等. 综采工作面巡检机器人柔性轨道设计与运动学仿真[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 240-246.

ZHANG Xuhui, DU Yonggang, HUO Xinjian, et al. Design of flexible track and kinematics simulation of inspection robot in fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 240-246.

综采工作面巡检机器人柔性轨道设计与运动学仿真

张旭辉^{1,2}, 杜永刚¹, 霍鑫健¹, 王川伟^{1,2}

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 煤矿井下综采工作面空间狭小、设备动作频繁, 位置关系复杂等问题, 导致常规巡检机器人难以直接在工作面运行, 自动化监测难度大。根据工况需求, 结合环境及设备群动作特点, 提出工作面巡检轨道设计要求, 采用模块化设计、仿真模拟和样机试验的方法, 设计一种新型跨座式巡检机器人柔性轨道, 实现在工作面环境的安装调节及当安装设备发生动作变形时轨道自身的自适应补偿。首先设计了巡检机器人柔性轨道的机械结构并确定安装运行方式。其次, 以轨道跨接在刮板输送机线缆槽一侧为例, 分析刮板输送机在平直、弯曲和起伏3种工况下的弯曲和俯仰变形量, 并对柔性轨道进行运动学仿真。在3种工况下, 该轨道可随工作面设备完成水平弯曲0~5.4°、竖直倾斜0~6°、伸缩变形0~120 mm, 满足实际工况要求。巡检机器人通过柔性轨道时, 其主运动方向始终保持匀速直线运动, 水平或竖直方向在柔性过度段存在波动, 波动幅值均在安全允许范围内。最后搭建柔性轨道物理样机及工作面试验平台, 对工作面巡检机器人柔性轨道进行性能验证。结果表明: 新型跨座式巡检机器人柔性轨道结构设计合理, 可以适应工作面巡检的不同工况, 对实现煤矿井下综采工作面机器人巡检具有重要意义。

关键词: 综采工作面; 柔性轨道; 巡检机器人; 刮板输送机; 运动学仿真

中图分类号: TP242 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2022)12-0240-07

Design of flexible track and kinematics simulation of inspection robot in fully-mechanized mining face

ZHANG Xuhui^{1,2}, DU Yonggang¹, HUO Xinjian¹, WANG Chuanwei^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Monitoring, Xi'an 710054, China)

Abstract: The problems of narrow space, frequent operation of equipment and complex positional relationship in coal mine fully-mechanized mining face make it difficult for the conventional inspection robot to run directly on the mining face and automated monitoring. According to the requirements of working conditions, combined with the environment and the action characteristics of equipment group, the design requirements of working face inspection track are proposed. A new type of flexible track for cross-seat inspection robot is designed by using modular design, simulation, and prototype test methods to realize the installation and adjustment of the working face environment and the adaptive compensation of the track itself when the installation equipment moves and deforms. Firstly, the mechanical structure of the flexible track of the inspection robot is designed and the installation operation mode is determined. Secondly, taking the track spanning on the side of the cable groove of the scraper conveyor as an example, the bending and pitching deformation of the scraper conveyor under three different working conditions of straightness, bending and fluctuation are analyzed and the kinematics simulation of the flexible track is carried out. Under three working conditions, the track can be completed with horizontal bending 0~5.4°, vertical inclination of 0~6° and telescopic deformation 0~120 mm with the working face equipment to meet the actual working conditions. When the inspection robot on board passes through the flexible track under three different working conditions, it can always maintain uniform linear

motion in the main operating direction, and the horizontal or vertical direction fluctuates in the flexible transition section, and the amplitude of the fluctuation is within the safe allowable range. Finally, the physical prototype of the flexible track and the test platform of the working face are built to verify the performance of the flexible track of the working face inspection robot. The results show that the flexible track structure is designed reasonably and can be adapted to different working conditions of the mining face inspection. It is of great significance to realize the inspection of the robot in the fully mechanized working face under the coal mine.

Key words: fully-mechanized mining face; flexible track; inspection robot; scraper conveyor; kinematics simulation

0 引言

煤矿综采工作面是煤炭资源开采的最前线,具有环境煤尘多、湿度大,设备体积大、数量多,空间狭小、不断变形的特点,是煤矿事故的多发地^[1]。对工作面设备环境的实时巡检是保证设备正常运行及避免引发重大安全事故的重要手段,工作面巡检机器人^[2]是代替人工完成高强度、高危险性任务^[3-4],实现自动化工作面的关键技术。

特殊复杂的工作环境,要求巡检机器人具备较高的环境感知和环境适应能力,因此高效、稳定且适应性强的行走方式是工作面巡检机器人运行的必备条件。现有的巡检机器人运行方式主要有刚性轨道式、地面行走式和柔性轨道式3种^[5]。其中刚性轨道式多采用工字钢作为巡检机器人的运行轨道,因其具有较强的刚度和承载能力,多次被作为巡检机器人的巡检行走方式,如中信重工开诚智能装备有限公司研制的轨道式巡检机器人^[6-7],然而刚性轨道无法实现弯曲伸缩,因此无法较好适应工作面环境;在现有的地面行走方式中,履带式的环境适应能力和越障能力最佳,如中国矿业大学的商德勇团队设计的六履带四摇臂巡检机器人^[8-9],其被应用在薄煤层工作面^[10]的巡检,然而由于自身结构的复杂性及机器人自重,降低了巡检时的移动速度和灵活性;西安科技大学姜俊英^[11]、靳子浩^[12]等设计的钢丝绳悬挂式巡检机器人和中信重工开诚智能装备有限公司张树生^[13]设计的分段柔性轨道悬挂式巡检机器人,两种机器人的轨道都具有较好的弯曲变形特性,后者在柔性轨道中增加刚性轨道段,相对于前者具有更好的承载能力,然而结构相对复杂,且吊挂式机器人在运行过程中易出现晃动等问题。

基于此,设计了一种新型跨座式柔性轨道系统,其对现有的柔性轨道进行结构简化,同时提升轨道承载能力和弯曲变形能力,进一步提高轨道的运行稳定性和工作面环境适应性。为降低对工作面原有设备和环境的影响,本柔性轨道系统设计紧凑灵活,可随工作面设备推移被动完成伸缩弯曲变形,完全适应工作面设备群动作,为工作面巡检机器人提供

了一种安全可靠的运行轨道。

1 巡检机器人柔性轨道设计要求

煤矿井下综采工作面的巡检工作与其他巡检环境相比,具有较高的巡检难度。工作面具有如下特征:环境内设备多、体积大,使原本有限的工作空间变得更加狭小;因采煤工艺要求设备群需不断动作,设备空间位姿随之变换,形成复杂多变的巡检环境^[14];工作面顶底板淋水、煤尘大、矿压显现、煤层片帮、设备振动等都会影响机器人运行;工作面设备种类多、数量大、维护成本高,同时需要检测的环境参数多,自动化监测难度大。

考虑在工作面规定的安全区域内设置一条适合巡检机器人独立运行的轨道^[15],为满足工作面巡检需求,对轨道提出以下设计要求:针对不同的工作面环境需提供多种轨道安装固连方式,快速安装,便捷稳固,且不影响设备的正常运行,结构紧凑^[16],轻量化;为保证其上搭载的巡检机器人运行稳定,轨道需满足强度和承载能力要求;针对多变的工作面巡检作业环境,需满足自适应调节要求,实现对弯曲和伸缩变量的补偿,保证轨道的完整性和连续性;鉴于煤矿井下安全要求,轨道应具有防尘、防水、防锈及防爆等功能。

2 工作面巡检机器人柔性轨道结构设计

工作面巡检机器人系统分为柔性轨道系统和机器人本体2部分。如图1所示,柔性轨道系统采用模块化设计,按照功能模块划分,由轨道固连机构、刚性轨道及柔性过渡机构等3部分构成。轨道固连机构将刚性轨道与工作面设备连接,为轨道运行提供牢固稳定的附着点,柔性过渡机构将相邻两段刚

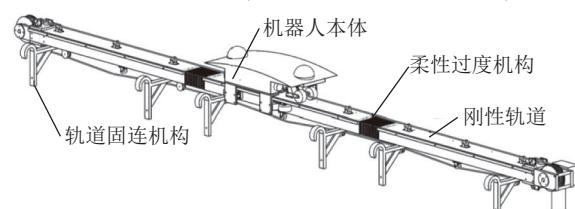


图1 巡检机器人系统结构示意
Fig.1 Schematic of inspection robot system structure

性轨道连接,使整个柔性轨道系统连接成整体,刚性轨道作为主要承载单元,保证轨道的承载能力和稳定性。机器人本体为轨道上方的移动平台^[16],可携带多种传感器用于检测工作面环境和设备状态。

2.1 轨道固连机构

轨道固连机构作为巡检机器人柔性轨道系统与工作面设备直接连接的机构,应保证轨道的牢固稳定,其次降低轨道对工作面设备正常运行的影响。设计轨道固连结构时,考虑轨道的固连、安装和调节3个功能,机构由设备固连部分、轨道安装部分及轨道调节部分等3部分构成。

通过研究工作面设备群的运行方式及动作特点,确定刮板输送机线缆槽外侧挡板作为巡检机器人轨道的安装固定位置。为增强轨道的互换性,提高安装便捷性,所设计的轨道安装部分保持一致,与刚性轨道的安装孔位对应。轨道调节部分是对轨道安装后进行角度调节的重要手段,轨道的起始角度调整水平后可为机器人位姿测量等提供较为精确的初始位姿数据,对后期工作面设备位姿检测^[17-18]具有重要作用,具有简单、稳定及易操作等特点。

2.2 刚性轨道

系统所采用的刚性轨道为矩形钢管,具有足够的刚度及抗冲击性能,底部配合轨道固连机构实现轨道的安装及固定,为轨道系统整体提供力学支撑点;轨道上方可供巡检机器人行走巡检、短暂停留、实时维修和充电等;轨道两侧设计突出护栏,防止机器人在运行过程中发生侧翻状况;轨道两端可安装柔性过渡机构,为机构变形提供作用受力点,传递工作面设备位置及角度的变形量;同时轨道可作为系统基座,跨接安装多种巡检机器人巡检所需要的辅助设备,如机器人清洗车间、机器人充电桩等。

2.3 柔性过渡机构

柔性过渡机构是柔性轨道系统在受到工作面设备动作变形影响后,通过自主变形补偿因轨道为适应工作面环境变化而产生的长度和角度变量,同时保证整体轨道连续完整的重要机械结构。

柔性过渡机构由双伸缩万向节、防护板和伸缩外壳等3部分构成,如图2所示,其中伸缩万向节单个连接节可实现垂直和水平方向的±45°转角变形,一个伸缩万向节设置2个连接节,理论上即可实现2个垂直方向的±90°转角变形;防护板外形尺寸与轨道截面一致,中心穿过两组伸缩万向节,多个防护板由伸缩外壳按照一定间距串联连接成整体,最后与固定挡板连接。

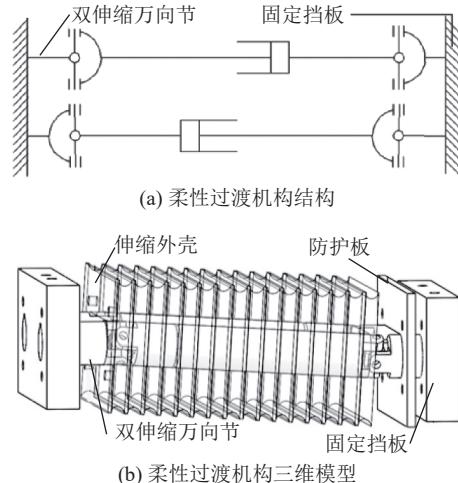


图2 柔性过渡机构结构示意

Fig.2 Schematic of flexible transition mechanism

柔性过渡机构动作时,由其左右两端连接的刚性轨道将工作面设备动作所产生的弯曲伸缩变量传递到双伸缩万向节,带动伸缩外壳随万向节发生弯曲伸缩变形。与此同时,双伸缩万向节作为机构整体的“脊梁”,防护板为“骨架”,伸缩外壳为“皮肤”,共同实现了柔性过渡机构在不改变外部截面尺寸的情况下完成不同角度和长度的伸缩变形,其次双伸缩万向节连接轴改变传统万向节的花键结构使用载能力更强、安装加工更为便捷经济的圆柱式伸缩轴,将伸缩万向节的两端分别与两刚性轨道固定,当伸缩万向节的两端均固定时,伸缩万向节亦会保持当时姿态不再变化,当刚性轨道发生变形时,两组万向节同步变形,同步固定,配合完成角度和长度的变量补偿。

3 基于ADAMS的巡检机器人柔性轨道运动学仿真

针对综采工作面空间环境不断变化的特点,结合前文对巡检机器人柔性轨道安装位置的讨论,试验仿真的运行环境选择安装跨接在刮板输送机线缆槽一侧的安全区域内,该区域在实际运行过程中,相对于液压支架^[19],设备动作少,伸缩变形量相对较小。为保证巡检机器人柔性轨道结构设计的合理性,需对其进行运动学仿真^[20]。

3.1 巡检机器人柔性轨道虚拟样机运动模型建立

在实际运行过程中,刮板输送机的推移倾斜变形将直接传递到机器人柔性轨道,因此可直接通过计算搭建工作面在不同工况下轨道的弯曲和倾斜状态,仿真机器人的通过性,验证柔性轨道的适应性及稳定性。

依据煤矿综采工作面环境与采煤工艺特点,工作面刮板输送机运行位姿状态包括两刮板输送机平直、两刮板输送机水平成一弯曲角度及两刮板输送机竖直方向成一角度等3种工况^[21]。其中两刮板输送机平直是较为精确和良好的工作面工况,然而在实际工作中由于环境因素限制或人为操作经验不足,工作面平直段较少。如图3a所示,前后2组刮板输送机因工作面设备分段推移或推移量前后不一致导致2组刮板输送机之间在水平方向形成一定角度;如图3b所示,前后2组刮板输送机因工作面出现坡度或地面不平整而导致相邻刮板输送机在竖直方向发生错位变形,在竖直方向形成一定角度。

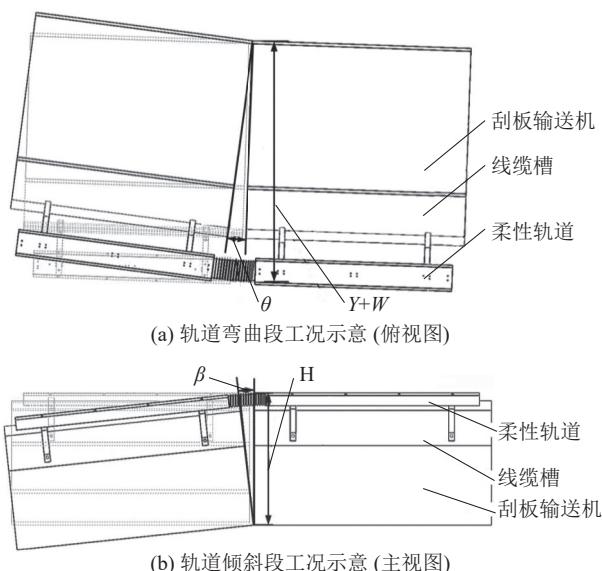


图3 柔性轨道不同工况示意

Fig.3 Schematic of different working conditions of flexible track

针对巡检机器人柔性轨道结构进行可行性验证,需计算三种工况下轨道弯曲和伸缩变形参数:

$$\tan \theta = \frac{D}{nL} \quad (1)$$

$$\alpha = 2\theta \quad (2)$$

$$\Delta X = (Y + W) \tan \alpha \quad (3)$$

式中, θ 为工作面刮板输送机允许最大偏移角度; D 为刮板输送机一次推移深度即采煤机一次截割深度; n 为弯曲段刮板输送机数量; L 为单组刮板输送机的长度; α 为安全弯曲角度, 安全系数取 2; ΔX 为弯曲段轨道伸缩量; Y 为轨道外侧距刮板输送机外侧的距离, 为 300 mm; β 为工作面倾斜角度; W 为刮板输送机宽度; H 为轨道上表面距离地面的高度。据常规采煤工艺及设备要求, 工作面过渡段应至少由 12 组刮板输送机完成, 单组长度 L 为 1 500 mm, 过渡前移距离 D

为 800~850 mm, 工作面倾斜角度 β 不能大于 3°。

依据公式可得, 轨道弯曲段安全弯曲角度为 5.4°, 伸缩量为 120 mm, 倾斜段最大安全倾斜角度为 6°, 伸缩量为 56 mm, 由此即可得到不同工况下机器人柔性轨道的变形参数, 为机器人运动学仿真提供较为真实的数据。巡检机器人柔性轨道结构参数见表1, 如图4所示, 即为简化后不同工况下巡检机器人运行虚拟样机模型。

表1 巡检机器人柔性轨道结构参数

Table 1 Structural parameters of flexible track for inspection robot

参数	数值
刚性轨道	长度 1 200 mm
	截面形状 150 mm×80 mm(长×宽)
柔性过渡机构	收缩长度 300 mm
	拉伸长度 450 mm
弯曲角度	水平 ±90° 垂直 ±90°



图4 巡检机器人柔性轨道仿真虚拟样机模型

Fig.4 Virtual prototype model of patrol robot flexible track simulation

3.2 机器人运动仿真分析

对巡检机器人通过平直段轨道、弯曲段轨道及倾斜段轨道3种运动状态进行仿真, 设置仿真牵引力300 N于机器人底板上, 静摩擦因数为0.3, 动摩擦因数为0.25, 机器人负载为25 kg, 并假设刮板输送机在机器人运行过程中保持稳定, 不产生振动, 其仿真结果如图5—图7所示。

机器人运行通过的轨道包括刚性轨道和柔性过渡段两部分, 为了对比说明各部分对机器人运行稳定性的影响, 将各图中时间位移曲线分为三部分, 即刚性轨道1、柔性过渡段和刚性轨道2, 各部分的最大摆动值见表2。

通过分析仿真数据, 可得以下结论: ①在平直段

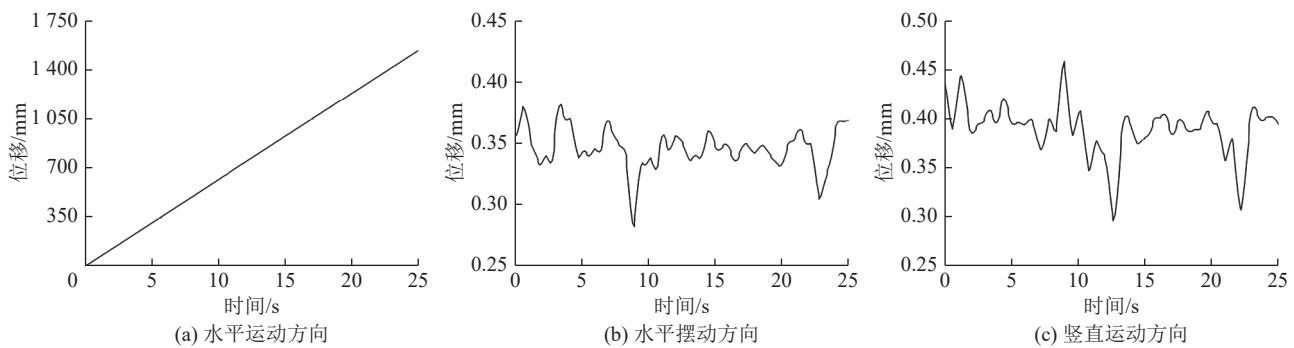


图5 平直段轨道机器人时间-位移曲线

Fig.5 Time-displacement curve of straight section track conditions

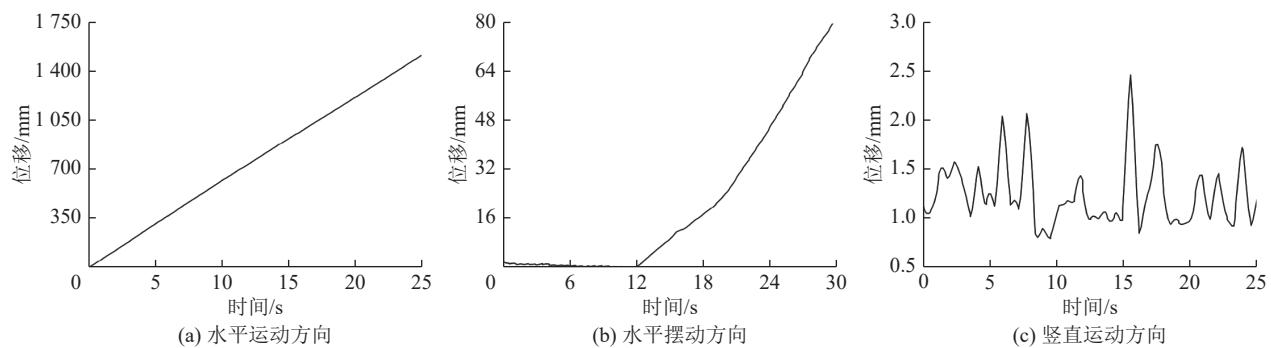


图6 弯曲段轨道机器人时间-位移曲线

Fig.6 Time-displacement curve of curved section

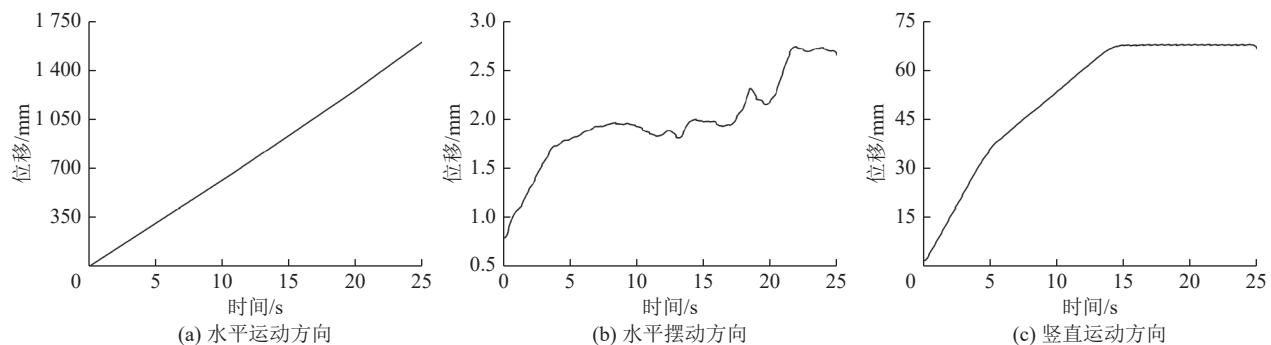


图7 倾斜段轨道机器人时间-位移曲线

Fig.7 Time-displacement curve of inclined track

表2 巡检机器人非位移方向不同工况下最大摆动值

Table 2 Maximum swing value of inspection robot under different working conditions in non-displacement direction

工况	位移方向	轨道最大摆动值/mm		
		刚性 轨道1	柔性 过渡段	刚性 轨道2
平直段	水平	0.10	0.28	0.18
	竖直	0.27	0.48	0.33
弯曲段	竖直	1.38	2.00	0.85
倾斜段	水平	1.28	0.60	0.43

和弯曲段,摆动最大值均集中在柔性过渡段,其与过渡段的伸缩结构有关;②在倾斜段工况中,刚性轨道

1为倾斜轨道,机器人在爬行过程中易受蠕滑力影响,使机器人产生单向微小偏移,在机器人通过后,偏移量逐渐被修正减小,且偏移量均在安全允许范围内;③巡检机器人柔性轨道可以满足3种不同工况下的角度弯曲和伸缩变形量,并保持一定的稳定性及连续性;④巡检机器人在3种不同工况的柔性轨道上运行具有较好的适应性及稳定性,证明该巡检机器人柔性轨道机构设计的合理性。

4 巡检机器人柔性轨道试验验证

基于以上设计方案和运动学仿真验证,本团队开发制作了综采工作面巡检机器人柔性轨道物理样

机。为检验其实际运行的可行性,需将柔性轨道安装在综采工作面环境中对其运行状态进行试验。然而实际综采工作面危险系数大,实地测试难度较大,且一般工作面试验平台尺寸较小或工作面设备固定无法推移,对巡检机器人柔性轨道关键运动性能无法实现检验,因此本团队结合实际综采工作面刮板输送机的运行原理,设计并搭建了可推移升降的刮板输送机试验平台,如图8所示。通过调节刮板输送机试验平台相邻两节刮板输送机之间角度及单节刮板输送机的高度和倾斜角度,可实现巡检机器人柔性轨道在综采工作面不同模拟真实工况下的运行状态检验。

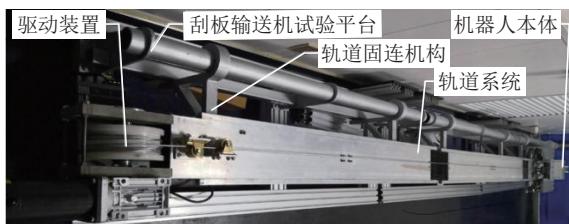


图8 综采工作面巡检机器人物理样机及试验平台

Fig.8 Physical prototype and experiment platform of inspection robot for fully-mechanized mining face

将工作面巡检机器人柔性轨道跨接于刮板输送机的缆线槽上,将负载25 kg的巡检机器人本体及钢丝绳驱动机构安装在轨道上的对应位置,其中钢丝绳驱动机构由一台300 W直流电机及减速比为80的蜗轮蜗杆减速器组成。通过推移升降调节刮板输送机,模拟3种不同工况下的刮板输送机试验平台姿态,对柔性轨道的通过性及承载能力进行试验验证。试验结果表明,本巡检机器人柔性轨道可以适应多种刮板输送机弯曲变形工况,供其上运行的巡检机器人以10 m/min的速度完成巡检动作,到达预期设计任务需求。

5 结 论

1) 采用模块化设计方法,研制了一款适用于综采工作面的巡检机器人柔性轨道,其跨接在刮板输送机线缆槽一侧,由柔性过渡机构连接相邻两段刚性轨道,借助柔性过渡机构特定的被动补偿能力,可保证整体轨道的连续性。

2) 分析了综采工作面设备运行工况,得出两组刮板输送机在工作过程中,最大弯曲变形为6°,最大伸缩位移为120 mm。柔性过渡机构在水平和垂直方向可弯曲变形±90°,伸缩变形0~150 mm,满足刮板输送机运行变形需求。

3) 通过对巡检机器人柔性轨道在刮板输送机平直、弯曲及倾斜3种不同工况下的运动学仿真及物理样机试验验证,实现巡检机器人负载25 kg,以10 m/min的速度在轨道上稳定运行,证明该柔性轨道结构设计合理,可适应工作面巡检的不同工况。

参考文献(References):

- [1] 徐青云,赵耀江,李永明.我国煤矿事故统计分析及今后预防措施[J].*煤炭工程*,2015(3):80~82.
XU Qingyun, ZHAO Yaojiang, LI Yongming. Statistical analysis and precautions of coal mine accidents in China[J]. *Coal Engineering*, 2015(3): 80~82.
- [2] 葛世荣.煤矿机器人现状及发展方向[J].*中国煤炭*,2019,45(7):18~27.
GE Shirong. Present situation and development direction of coal mine robots[J]. *China Coal*, 2019, 45(7): 18~27.
- [3] 刘林山,郝 铭.井下巡检机器人仿生关节用超声电机驱动及控制技术探索与设计[J].*黄金*,2018,39(7):54~57.
LIU Linshan, HAO Ming. Technical exploration and design of ultrasonic motor drive and control of inspection robots'biomimetic joint in underground mine[J]. *Gold*, 2018, 39(7): 54~57.
- [4] 张士海.矿用巡检机器人在煤矿中的应用[J].*煤矿机电*,2016(5):76~79.
ZHANG Shihai. Application of mine inspection robot in coal mine[J]. *Colliery Mechanical & Electrical Technology*, 2016(5): 76~79.
- [5] 沈 超.矿用自动巡检机器人在黄陵一号煤矿的应用[J].*陕西煤炭*,2020,39(2):118~120,141.
SHEN Chao. Application of mine automatic inspection robot in Huangling No.1 mine[J]. *Shaanxi Coal*, 2020, 39(2): 118~120,141.
- [6] 周明静,裴文良,岑 强.一种煤矿轨道巡检机器人的研制[J].*制造业自动化*,2018,40(4):107~108,114.
ZHOU Mingjing, PEI Wenliang, CEN Qiang. Development of a coal mine track inspection robot[J]. *Manufacturing Automation*, 2018, 40(4): 107~108,114.
- [7] 裴文良,张树生,李军伟.矿用巡检机器人设计及其应用[J].*制造业自动化*,2017,39(2):73~74,94.
PEI Wenliang, ZHANG Shusheng, LI Junwei. The design and application of inspection robot for mine[J]. *Manufacturing Automation*, 2017, 39(2): 73~74,94.
- [8] 商德勇,杨 壘,杜少庆,等.薄煤层工作面巡检机器人越障前动力学分析[J].*机械设计与制造*,2018(1):261~263.
SHANG Deyong, YANG Lei, DU Shaoqing, et al. Dynamic analysis before the obstacle crossing of inspection robot in thin coal seam[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2018(1): 261~263.
- [9] 商德勇,杨 壘,杜少庆,等.基于ADAMS宏命令的薄煤层工作面巡检机器人建模与仿真[J].*机床与液压*,2017,45(15):20~22,38.
SHANG Deyong, YANG Lei, DU Shaoqing. Modeling and simulation on inspection robot in thin coal seam based on ADAMS

- Macro Instruction[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2017, 45(15): 20-22,38.
- [10] 杨生华,周永昌,芮 丰,等.薄煤层开采与成套装备技术的发展趋势[J].煤炭科学技术,2020,48(3):49-58.
YANG Shenghua, ZHOU Yongchang, RUI Feng, *et al.* Development trend of thin coal seam mining and complete equipment technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(3): 49-58.
- [11] 姜俊英,周 展,曹现刚,等.煤矿巷道悬线巡检机器人结构设计及仿真[J].*工矿自动化*,2018,44(5):76-81.
JIANG Junying, ZHOU Zhan, CAO Xiangang, *et al.* Structure design of suspension line inspection robot in coal mine roadway and its simulation[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(5): 76-81.
- [12] 靳子浩.矿用悬挂式巡检机器人设计[D].西安:西安科技大学,2017.
JIN Zihao. Design of mine suspended inspection robot[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [13] 张树生,马静雅,岑 强,等.煤矿综采工作面巡检机器人系统研究[J].*煤炭科学技术*,2019,47(10):136-140.
ZHANG Shusheng, MA Jingya, CEN Qiang, *et al.* Research on inspection robot system for fully-mechanized mining face in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(10): 136-140.
- [14] 索智文.煤矿综采工作面无人化开采技术研究[J].*工矿自动化*,2017,43(1):22-26.
SUO Zhiwen. Study on unmanned mining technology of fully mechanized coal mining face[J]. *Industry and Mine Automation*, 2017, 43(1): 22-26.
- [15] 张袁浩,陈杨阳,王小蕾.煤矿机器人应用场景需求分析[J].*内蒙古煤炭经济*,2019(18): 1-3.
ZHANG Yuanhao, Chen Yangyang, WANG Xiaolei. Demand analysis of coal mine robot application scenarios[J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, 2019(18): 1-3.
- [16] 李学民.矿用巡检机器人关键技术分析[J].*煤矿机械*,2018,39(5): 71-73.
LI Xuemin. Key technologies analysis of mine inspection robot[J]. *Coal Mine Machinery*, 2018, 39(5): 71-73.
- [17] 张旭辉,周 颖,杨文娟,等.位姿检测技术在煤矿井下工作面巡检机器人中的应用[J].*传感器与微系统*,2020,39(5):152-155,160.
ZHANG Xuhui, ZHOU Ying, YANG Wenjuan, *et al.* Application of positioning and pose detection technology in working face inspection robot underground coal mine[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(5): 152-155,160.
- [18] 杨学军,王然风,等.基于运动过程还原法的液压支架巡检机器人位姿检测[J].*太原理工大学学报*,2020,51(2):162-170.
YANG Xuejun, WANG Ranfeng, *et al.* Pose measurement of detection robot in hydraulic supports based on the motion process restoration method[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2020, 51(2): 162-170.
- [19] 韩菲娟,任 芳,杨兆建,等.综采工作面“三机”运动仿真研究[J].*工矿自动化*,2018,44(9): 15-19.
HAN Feijuan, REN Fang, YANG Zhaojian, *et al.* Simulation research on motion of three machines on fully mechanized coal mining face[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(9): 15-19.
- [20] 潘祥生.矿用悬线式巡检机器人的设计及动力学分析[J].*煤矿机械*,2019,40(11): 4-7.
Pan Xiangsheng. Design and dynamic analysis of suspension line patrol robot used in mine[J]. *Coal Mine Machinery*, 2019, 40(11): 4-7.
- [21] 乔春光,王学文,谢嘉成,等.基于采煤机运行轨迹的刮板输送机竖直面形态解算方法[J].*工程设计学报*,2018,25(5):495-502.
QIAO Chunguang, WANG Xuwen, XIE Jiacheng *et al.* Vertical plane shape calculation method of scraper conveyor based on running track of shearer[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2018, 25(5): 495-502.