



基于FBG传感器的带式输送机故障监测研究

方新秋 吴洋 宋扬 陈宁宁 丰宇龙 冯豪天 贺德幸 乔富康

引用本文：

方新秋, 吴洋, 宋扬, 等. 基于FBG传感器的带式输送机故障监测研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 326–340.
FANG Xinqiu, WU Yang, SONG Yang. Research on fault monitoring of belt conveyor based on FBG sensor[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 326–340.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-1040>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于负载估计的带式输送机系统节能控制方法研究

Research on energy saving control method of belt conveyor system based on load estimation
煤炭科学技术. 2021, 49(7): 139–146 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f4580e79-9c02-449a-aa95-2f7d76d44042>

基于OTDR的缠绕式光纤应变传感器研制及性能测试

Development and performance testing of OTDR-based twisted fiber optic strain sensors
煤炭科学技术. 2024, 52(11): 247–259 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0831>

基于激光测距矿用带式输送机多参数检测方法研究

Research on multi-parameters detection method of mine belt conveyor based on laser ranging
煤炭科学技术. 2020, 48(8): 131–138 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/77cc2e01-881c-4fff-990b-ac99b657cf4c>

基于1DCNN-ELM的带式输送机托辊轴承故障诊断研究

Research on fault diagnosis of idler bearing of belt conveyor based on 1DCNN-ELM
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 383–389 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1195>

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>

基于弱光纤光栅传感技术的围岩变形监测研究

Research on deformation monitoring of surrounding rock based on weak fiber grating sensing technology
煤炭科学技术. 2023, 51(6): 11–19 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0510>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

方新秋, 吴 洋, 宋 扬, 等. 基于 FBG 传感器的带式输送机故障监测研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 326–340.

FANG Xinqiu, WU Yang, SONG Yang, et al. Research on fault monitoring of belt conveyor based on FBG sensor[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 326–340.

基于 FBG 传感器的带式输送机故障监测研究

方新秋^{1,2}, 吴 洋^{1,2}, 宋 扬^{1,2}, 陈宁宁^{1,2}, 丰宇龙^{1,2}, 冯豪天^{1,2}, 贺德幸^{1,2}, 乔富康^{1,2}

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 智能化开采研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘要: 带式输送机的故障监测有助于预防安全事故、提高生产效率以及实现设备智能化运行。从带式输送机常见故障分析、综合保护系统组成、光纤型传感器阵列设计与分析、核心敏感元件设计与选材等方面, 对基于 FBG 传感器的带式输送机故障监测进行了深入研究。首先针对传统监测手段无法定量感知、实时性不足、数据融合能力薄弱等问题, 提出了一种基于光纤光栅(FBG)的带式输送机综合保护系统, 明确了光纤型传感器阵列的设计是系统搭建的重要前提。其次, 在分析带式输送机常见故障形成原因和表现形式的基础上, 以 FBG-等强度悬臂梁为核心敏感元件设计了一系列故障监测传感器, 组成了带式输送机综合保护系统的光纤型传感器阵列, 实现了故障的实时定量监测。接着, 通过理论分析和 Ansys 有限元仿真, 对 FBG-等强度悬臂梁的尺寸结构设计和材料选择进行了深入研究, 在传感模型中分析了灵敏度和精度的影响因素, 并据此确定了敏感元件的结构尺寸, 优选了尼龙 6 作为制作材料。最后, 通过试验对 FBG-等强度悬臂梁的结构有效性、灵敏度和稳定性进行了验证。在灵敏度试验中, 敏感元件表现出良好的线性响应特性, 理论灵敏度 $S = 52.978 \text{ } 0 \text{ N/nm}$, 实际灵敏度 $S^* = 38.115 \text{ } 7 \text{ N/nm}$; 在重复性试验中, 平均重复性误差仅为 1.002%, 表现出良好的重复性和稳定性; 温度敏感性试验和温度补偿试验则验证了光纤光栅在温度测量中的线性相关性, 从而进一步揭示了温度补偿对提升传感灵敏度的必要性, 即便在微小温度变化环境下, 补偿机制仍能有效提高灵敏度 0.6%。所设计的光纤型传感器阵列解决了现有带式输送机运行故障无法实时定量感知的问题, 为实现设备智能化感知与控制提供了坚实的数据基础。研究成果不仅能有效降低带式输送机故障率, 提高生产效率, 更推动了煤矿行业向自动化、智能化方向的发展。

关键词: 光纤光栅; 等强度悬臂梁; 温度补偿; 光纤型传感器阵列; 带式输送机综合保护

中图分类号: TH712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2025)01-0326-15

Research on fault monitoring of belt conveyor based on FBG sensor

FANG Xinqiu^{1,2}, WU Yang^{1,2}, SONG Yang^{1,2}, CHEN Ningning^{1,2}, FENG Yulong^{1,2},
FENG Haotian^{1,2}, HE Dexing^{1,2}, QIAO Fukang^{1,2}

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Research Center of Intelligent Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The fault monitoring of belt conveyors serves as a pivotal tool in preventing safety incidents, enhancing production efficiency, and facilitating the intelligent operation of equipment. This comprehensive study delves into the multi-sensor fault monitoring of belt conveyors utilizing Fiber Bragg Gratings (FBGs), examining aspects such as common fault analysis, the composition of integrated protection systems, the design and analysis of fiber-optic sensor arrays, and the design and material selection of core sensing elements. Firstly, to address the shortcomings of traditional monitoring methods, including the inability to quantify faults, inadequate real-time performance, and weak data fusion capabilities, an FBG-based integrated protection system for belt conveyors is proposed. This system underscores the cruciality of designing a fiber-optic sensor array as a fundamental prerequisite for system establishment. Secondly, building upon an analysis

收稿日期: 2024-07-17 策划编辑: 常 琛 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.12438/cst.2024-1040

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52474183); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX23-2775)

作者简介: 方新秋(1974—), 男, 浙江永康人, 教授, 博士生导师。E-mail: xinqiu@163.com

通讯作者: 宋 扬(1997—), 男, 陕西汉中人, 博士研究生。Tel: 0516-83590577, E-mail: song.yang@cumt.edu.cn

of the root causes and manifestations of common faults in belt conveyors, a series of fault monitoring sensors are devised, with FBG-based equal-strength cantilever beams serving as the core sensing elements. These sensors constitute the fiber-optic sensor array within the integrated protection system, enabling real-time and quantitative fault monitoring. Thirdly, theoretical analyses and Ansys finite element simulations are conducted to thoroughly investigate the dimensional design and material selection of FBG-based equal-strength cantilever beams. The influencing factors on sensitivity and accuracy are analyzed within the sensing model, guiding the determination of the structural dimensions of the sensing elements. Nylon 6 is selected as the optimal material for fabrication. Finally, experimental validation is performed to assess the structural effectiveness, sensitivity, and stability of the FBG-based equal-strength cantilever beams. In sensitivity tests, the sensing elements exhibit exceptional linear response characteristics, with a theoretical sensitivity of 52.978 0 N/nm and an actual sensitivity of 38.115 7 N/nm. In repeatability tests, an average repeatability error of merely 1.002% is recorded, demonstrating robust repeatability and stability. Temperature sensitivity and compensation tests verify the linear correlation of FBGs in temperature measurement, emphasizing the necessity of temperature compensation for enhancing sensing sensitivity. Even under minor temperature variations, the compensation mechanism effectively boosts sensitivity by 0.6%. The designed fiber-optic sensor array resolves the challenge of real-time and quantitative fault perception in current belt conveyor operations, providing a solid data foundation for intelligent sensing and control. This research not only contributes to reducing belt conveyor failure rates and enhancing production efficiency but also propels the coal mining industry towards automation and intelligence.

Key words: fiber bragg grating; equal-strength cantilever beam; temperature compensation; fiber optic sensor array; comprehensive protection system for belt conveyors

0 引言

煤矿智能化开采的 3 要素包括智能感知、智能决策和智能控制^[1]。其中,智能感知是实现智能化开采的第 1 步,也是智能决策和智能控制的基础和重要依据。带式输送机作为煤矿生产过程中的重要运输设备^[2],其智能化监测是实现煤矿智能化开采的必要环节^[3]。目前,常用的带式输送机故障监测装置为电子类开关量传感器^[4-5],缺乏对故障演化过程的实时定量监控,不利于数据的深度融合与分析,难以及时指导参数调整和停机维修^[6]。同时,传统的电子类传感器在复杂煤矿环境中的抗干扰能力和远距离传输能力不足,难以满足实时定量监测对信号传输的高精度要求^[7]。因此,寻求一种安全可靠、可实时定量测量的带式输送机故障监测方式非常必要。

方崇全^[8]提出利用巡检机器人收集带式输送机运行状态音、视频信息并分析健康状态,降低了人工巡检成本和工作量,但单点巡检的方式在故障实时全面监测方面仍然存在一定的局限性。汪楚森^[9]与韩涛等^[10]利用机器视觉技术对带式输送机进行故障监测,具有成本小、非接触式测量等优势,但视觉监测的精度易受光线影响,且煤尘污染镜头可能会直接导致监测功能失效。马宏伟等^[11]采用红外热成像技术监测带式输送机的关键部件温度,克服了传统点式温度测量法的监测区域小、布线复杂等难题,但该技术亦存在抗干扰能力弱、分辨率低等缺点。而光纤型传感器可实现对应变、温度等物理量的精确测量^[12],相较于传统传感器具有:体积小、抗电磁干

扰、灵敏度高、耐腐蚀、可定量测量、本质安全等优点^[13],在航空、医疗、机械生产等领域已有广泛应用。近年来,光纤传感器在煤矿领域的应用也逐渐得到了发展。NARUSE 等^[14]构建了一个基于布里渊光时域反射原理的分布式光纤地下矿井应变传感系统,现场实验证明该系统能够有效监测煤矿大规模开采区域周围应力分布不均而导致的回风巷道变形。柴敬等^[15]研发的钻孔植入式光纤光栅传感系统,为煤岩变形的监测提供了一种有效方法。梁敏富等^[16]提出了一种感知锚杆杆体轴力的光纤光栅传感器,并比较测试了影响应变传递效率的因素,发现黏结剂种类对应变传递效率影响最为明显。李丽君等^[17]提出了一种光纤光栅矿压传感器,可以埋入煤、岩层用于压力测量。张登攀等^[18]针对煤层瓦斯压力不能多点同步测量的问题,提出一种基于弹性膜片的光纤光栅瓦斯压力传感器,能够有效避免安装误差和迟滞带来的影响,同时便于组链开展多点分布式测量。梁敏富等^[19]基于光纤光栅传感原理及弹性膜片结构,设计了一种新型的压力传感器,实现了温度补偿的压力测量并成功用于锚杆支护质量监测。孙丽等^[20]以连通器为基本原理,设计了一种基于等强度悬臂梁的新型双光纤光栅静力水准仪,用于解决建筑结构不均匀沉降监测问题。于涛等^[21]针对煤矿巷道顶板离层监测设备可靠性低、准确度差及无法实现实时监测等问题,设计了一种基于等强度悬臂梁的光纤光栅顶板离层仪,具有灵敏度高、量程大、安装方便等优点。此外,光纤传感技术在液压支架阻力监测^[22]、刮板机直线度感知^[23]、设备结构件变形测

量^[24]等方面也有广泛应用。上述研究利用光纤传感器的应变敏感特性,实现了对煤矿环境参数和设备状态的监测,为煤矿的安全高效生产提供了技术支持。然而,带式输送机作为煤矿生产的主要运输设备,利用光纤传感技术对其进行故障监测的研究却鲜有报道。

为了寻求安全可靠、可定量测量的带式输送机故障监测与保护方案,笔者提出了一种基于FBG的带式输送机综合保护系统,明确了光纤型传感器阵列的设计是系统搭建的重要前提。在分析输送机常见故障特征的基础上,设计了多种光纤型传感器并组成了带式输送机综合保护系统的传感器阵列。作为光纤型传感器阵列的核心敏感元件,笔者对FBG-等强度悬臂梁的结构尺寸设计和材料选择进行了深入研究,借助理论分析、数值模拟及实验室试验等手段对其结构有效性、灵敏度和稳定性进行了验证。所设计的光纤型传感器阵列解决了现有带式输送机运行故障无法实时定量感知的问题,为实现设备智能化感知与控制提供了坚实的数据基础。

1 带式输送机结构及故障分析

1.1 带式输送机结构分析

在众多带式输送机类型中,托辊式带式运输机凭借其良好的稳定性、适应性和承载能力成为煤矿运输领域应用最广的运输设备^[25],故本文以托辊式带式输送机为故障监测对象(下文简称带式输送机)。

如图1所示,带式输送机主要由5部分构成:输送带、驱动装置、滚筒、托辊及机身机架。其中,输送带承载并运输物料;驱动装置(电机与减速器)提供

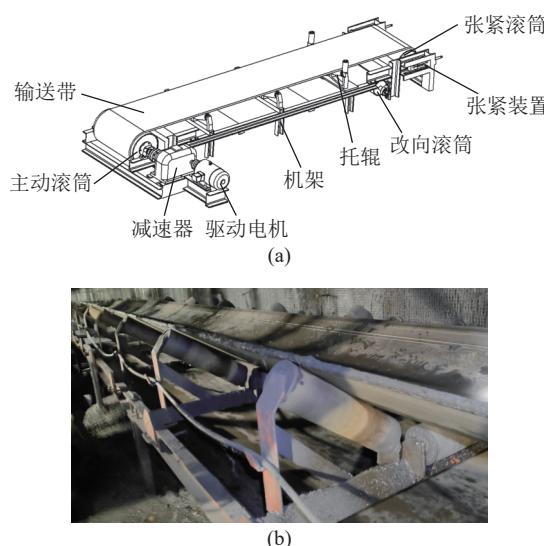


图1 带式输送机结构示意
Fig.1 Structural diagram of the belt conveyor

供动力;滚筒分为主动滚筒和改向滚筒,前者连接驱动装置驱动输送带,后者改变输送带方向;托辊数量众多,支撑并导向输送带以保证其稳定运行;机架为输送机各部分提供支撑。此外,还包括头尾轮、导向轮、张紧装置和联结装置等辅助部件,共同构成完整的带式输送机系统。

1.2 常见故障分析

带式输送机在运行过程中,常会出现诸如跑偏、打滑、堆料、过热和撕带等故障。

1) 跑偏故障。跑偏故障是指输送带偏离期望轨道的现象,其主要原因是张紧装置异常导致的输送带两侧牵引力不均,从而发生跑偏;其次,输送带的老化、损坏、连接处松动,滚筒和托辊磨损严重以及机架变形引起的倾斜也可能引发跑偏故障。

2) 打滑故障。打滑故障是指输送带与驱动滚筒之间因摩擦力不足发生打滑而无法正常传递动力的现象。张紧装置调节不当或故障,会导致输送带张力不足,无法与主动滚筒产生足够摩擦力;此外,输送带卡阻,主动滚筒变形和包胶材料磨损老化导致的摩擦因数减小也会诱发打滑故障。

3) 堆料故障。堆料故障是指物料在输送带或输送路径上堆积的现象。常见原因包括:驱动装置异常引起的输送速度与上料速度不匹配;张紧装置异常会导致输送带松弛,物料在输送过程中易滑落堆积;此外,滚筒和托辊的磨损、变形、卡滞等问题,也会影响输送机正常运行,造成带上物料分布不均,增加堆料风险。

4) 过热故障。过热故障是指带式输送机组成部件温度异常升高的现象。输送带磨损老化、托辊卡滞和滚筒打滑等可能导致输送带摩擦过热严重,进而引发输送带或物料起火;前述跑偏和堆料故障的未及时纠正会加剧摩擦升温;此外,驱动装置故障或过载,也是温度异常的重要原因。

5) 撕带故障。撕带故障是指输送带出现的撕裂或破损现象。输送带的磨损与老化会直接导致其发生撕裂或断裂;滚筒、托辊表面磨损严重,大块物料落入或卡入会施加异常摩擦力或冲击力于输送带上,从而引发撕带故障。此外张紧装置异常,导致输送带张力偏离正常范围,也会增加撕带风险。

带式输送机运行故障与部件健康状态的关系,如图2所示。这些故障不仅能反映组成部件的损坏与性能劣化,更是衡量整个输送机健康状态的重要指标^[26]。通过对这些故障的实时定量监测与综合分析,能够帮助工作人员及时确定故障部件,把握输送

机的整体健康状态, 提高设备运维效率, 确保高效生产和设备稳定运行。

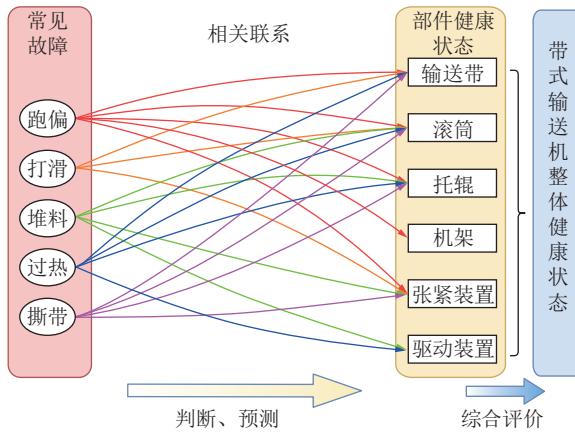


图 2 运行故障与部件健康状态关系

Fig.2 Relationship diagram between operational failures and component health status

2 带式输送机综保系统传感器阵列

2.1 FBG 带式输送机综合保护系统

传统的带式输送机综合保护系统的监测形式主要表现为开关量信号的采集, 这种简单的监测形式缺乏对故障演化过程的实时定量监控, 在数据融合与分析方面存在明显局限性, 难以支撑现代工业对智能化、精细化保护系统的迫切需求。为了推动带式输送机向更智能化的方向迈进, 亟需引入实时、定量的故障监测方式, 为设备的潜在故障提前预警、故障根源精准定位和自调节提供数据基础。

针对上述问题, 笔者提出了一种基于 FBG 的带式输送机综合保护系统, 如图 3 所示。该系统主要由光纤型传感器阵列、光纤数据传输系统、数据处理与分析单元、报警与预警系统、人机交互界面和故障应急控制系统六大功能部分组成。

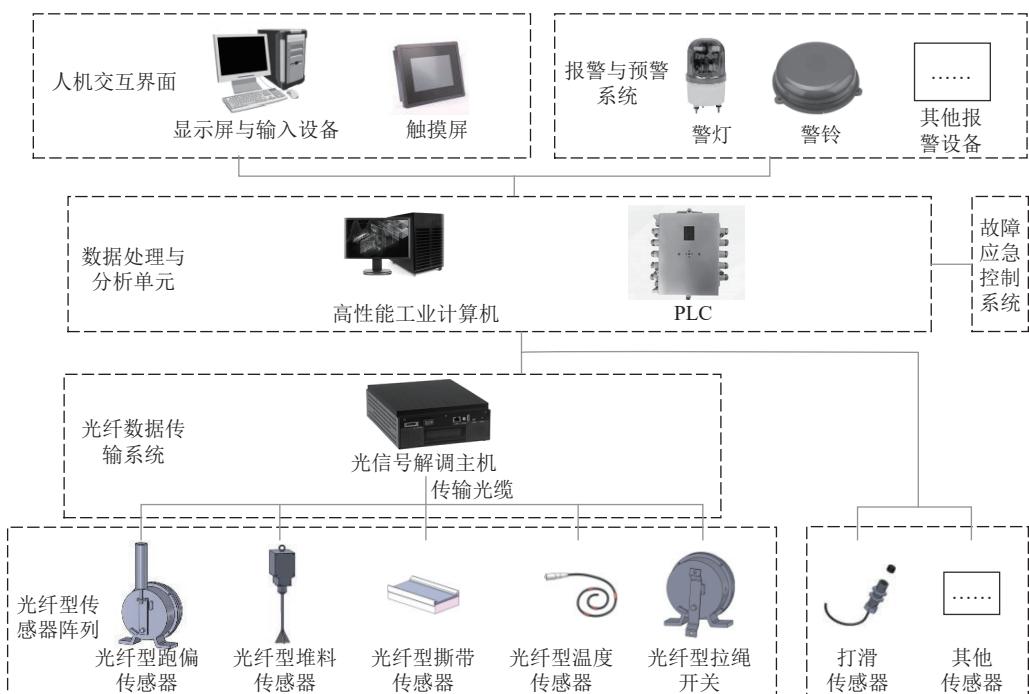


图 3 基于 FBG 的带式输送机综合保护系统结构示意

Fig.3 Schematic diagram of the comprehensive protection system for belt conveyors based on fiber bragg grating

光纤型传感器阵列实时监测带式输送机的运行状态, 运行故障会触发相应光纤型传感器动作并产生承载故障信息的光信号; 借助光纤数据传输系统, 故障信息得以在复杂的煤矿环境中, 以传输安全、抗干扰能力强的光信号形式传输至主机室; 经光信号解调主机解调得到的故障信息, 一方面被传输到地面控制室存储显示, 方便工作人员随时了解输送机健康状态; 另一方面被传输至数据处理与分析单元, 经报警(预警)逻辑分析后, 生成控制指令并传递给

报警与预警系统和故障应急控制系统; 报警与预警系统接受控制信号后, 立即发出声光报警提醒工作人员故障发生; 故障应急控制系统接受控制信号后, 自动执行诸如调整设备运行参数或停机等操作^[27], 最小化故障对设备和生产的影响。

作为系统运行、决策、动作的依据, 故障监测传感器是带式输送机综合保护系统的核心单元之一。相较传统监测系统, 所提出的基于 FBG 的带式输送机综合保护系统的优势均得益于其采用了光纤传感

技术对带式输送机进行故障监测。然而,尽管光纤传感技术在工业监测领域已经展现出了巨大潜力,但目前其在带式输送机故障监测领域的研究仍处于初级阶段。因此,光纤型传感器阵列的设计是构建光纤型带式输送机综合保护系统的重要前提。

2.2 光纤型传感器阵列

光纤型传感器凭借其实时定量测量的特性,可为搭建自动化、智能化的带式输送机综合保护系统提供数据基础,从而实现报警条件自定义、故障提前预警和健康状态综合分析等功能;此外,在煤矿井下这类复杂环境中,光纤型传感器具有相较传统电子类传感器更强的抗电磁干扰和远距离传输能力,更适用于有实时定量要求的精准测量。

在分析带式输送机故障原理的基础上,基于光纤光栅的应变敏感特性设计了以 FBG-等强度悬臂梁为核心敏感元件的光纤型跑偏传感器、光纤型堆料传感器、光纤型撕带传感器和光纤型拉绳开关;基于光纤光栅的温度敏感特性设计了光纤型温度传感器。这些传感器协同工作,组成了带式输送机综合保护系统的光纤型传感器阵列。

2.2.1 应变敏感类故障传感器

应变敏感类故障传感器以 FBG-等强度悬臂梁为核心敏感元件,通过相应的传感结构将故障监测量转换为等强度悬臂梁的应变;粘贴在等强度悬臂梁表面的光纤光栅由于应变敏感特性,内部反射光中心波长发生偏移;经解调仪解调和温度补偿后得到由单一应变引起的中心波长偏移量,最后根据相应的结构动作关系建立的传感模型即可解算出故障监测量。该类传感器的温度补偿措施通常为内置一个温补光纤光栅,粘贴在无应变的敏感基材上(文中为尼龙 6)或搭配柔性导热材料使用,在避免应变干

扰的同时,又具有良好的导热性,以达到理想的温度补偿效果。

1) 跑偏传感器。跑偏传感器被成对安装在输送带张力变化较大区域的输送带两侧,尤其是输送机的机头和机尾处,能够实时监测到输送带的跑偏情况,便于系统及时采取应对措施。如图 4 所示,跑偏传感器主要由跑偏传动机构、凸轮、压力传动机构、等强度悬臂梁、光纤光栅及外壳等组成。其中,跑偏传动机构由拨杆、连接柄、扭力弹簧、转轴组成;压力传动机构由滑轮、滑轮轴、弹簧板 1、压力弹簧、限位筒、弹簧板 2 组成。

带式输送机发生跑偏时,输送带推动拨杆绕转轴摆动,进一步通过跑偏传动机构驱使凸轮旋转;压力传动机构将凸轮旋转角转换为施加在等强度悬臂梁上的作用力,最后使粘贴在等强度悬臂梁表面的光纤光栅产生应变。利用光纤光栅的应变敏感特性和传感模型分析,即可得到输送带的跑偏量。

2) 堆料传感器。堆料传感器被安装在输送机上料点、下料点和两条输送机重叠点处的输送带中线上方,安装高度据平均物料流量和堆料裕量设定。如图 5a 所示,堆料传感器主要由拨杆、球阀、压力传动机构、等强度悬臂梁、光纤光栅及外壳等组成。其中压力传动机构由上顶板、下顶板、压力弹簧组成。测量过程如图 5b 和图 5c 所示。

当带式输送机发生堆料故障时,堆积的物料推动拨杆,进一步驱使球阀转动;压力传动机构将球阀转动角转换为施加在等强度悬臂梁上的作用力,最后使粘贴在等强度悬臂梁表面的光纤光栅产生应变。利用光纤光栅的应变敏感特性和传感模型分析,即可得到堆料高度。

3) 撕带传感器。撕带传感器被安装在输送带上

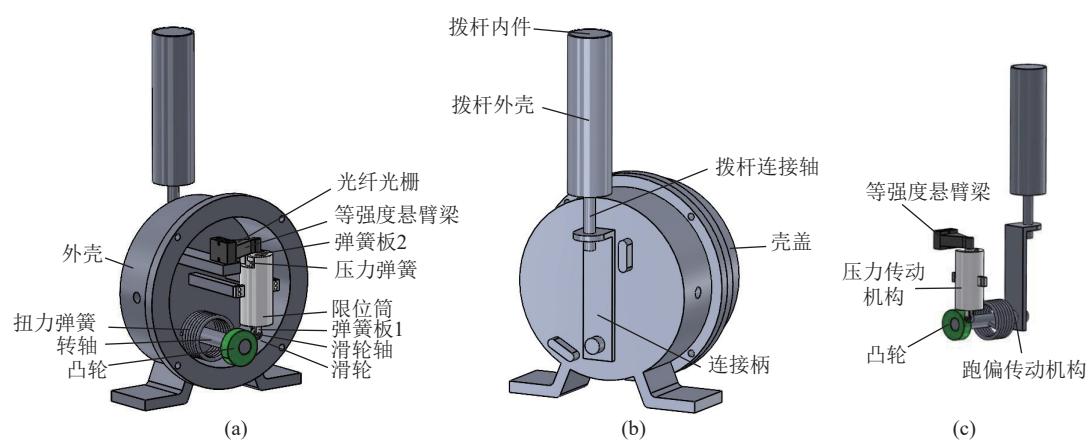


图 4 光纤型跑偏传感器示意
Fig.4 Schematic diagram of optical fiber deviation sensor

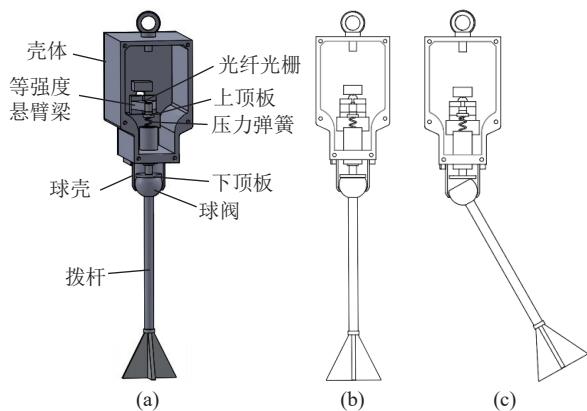


图 5 光纤型堆料传感器示意

Fig.5 Schematic diagram of fiber optic material piling sensor

料点向物流方向上的 10~15 m 处, 且介于上下输送带之间。通常撕带故障一旦出现即需立刻停机, 而利用光纤光栅实现定量测量的意义在于可根据现场情况自定义报警阈值, 有效减少因物料飞溅误触发而对正常生产造成的妨碍。此外, 撕带传感器还能够实现对物料飞溅异常增多的感知, 为故障的提前预警分析提供数据基础。如图 6 所示, 撕带传感器主要由载料板、侧挡板、下底壳、限位柱、承重簧、压力传动机构、等强度悬臂梁和光纤光栅等组成。

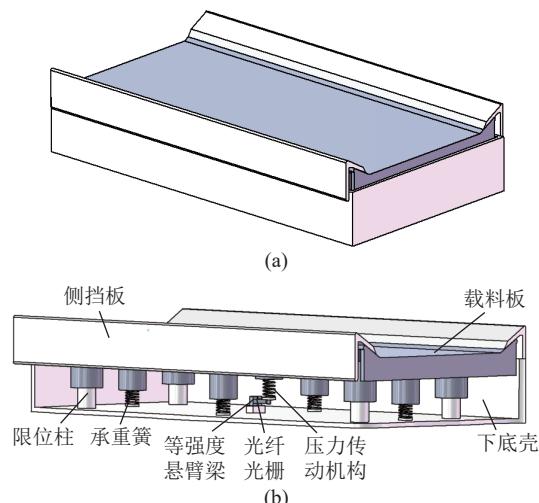


图 6 光纤型撕带传感器示意

Fig.6 Schematic diagram of fiber optic belt tearing sensor

撕带故障的测量过程包括 3 个阶段: 预加载与稳定支撑阶段, 承重簧首先执行第 1 压缩行程, 用于支撑传感器自身质量和正常洒落的物料。撕裂测量阶段, 当输送带发生纵向撕裂故障或物料飞溅异常增多时, 超过一定质量的物料落在载料板上, 承重簧进入第 2 压缩行程; 同时, 压力传动机构也开始工作, 产生压力作用在等强度悬臂梁的自由端; 最后使粘贴在等强度悬臂梁表面的光纤光栅产生应变; 利用

光纤光栅的应变敏感特性和传感模型分析, 即可得到物料飞溅情况和撕带情况。过载保护阶段, 载料板上方物料超出承重上限, 承重簧和压力传动结构停止动作, 限位柱接管承重任务避免传感器过载损坏。

4) 拉绳开关。工作人员发现异常情况, 可通过拉绳开关手动控制停机。为确保在输送机沿线均能及时控制停机, 拉绳开关被间隔安装在输送机的两侧机架上和机头、机尾处, 两两之间用钢绳连接, 钢绳中间用托环支撑。拉绳开关的定量化增加了触发条件的可自定义功能, 降低了对连接钢绳的安装要求; 同时, 通过合理设置触发动作范围和触发时间阈值, 可减少意外接触引起的误触发, 避免妨碍正常生产。如图 7 所示, 堆料传感器与跑偏传动机构相似, 主要由拉力传动机构、凸轮、压力传动机构、等强度悬臂梁、光纤光栅及外壳等组成。其中, 拉力传动机构由拉杆、转轴、扭力弹簧组成; 压力传动机构由滑轮、滑轮轴、弹簧板 1、压力弹簧、限位筒、弹簧板 2 组成。

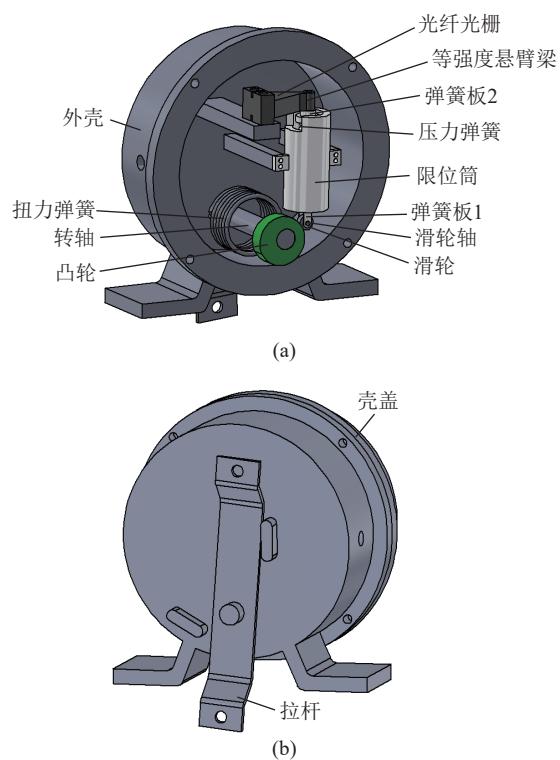


图 7 光纤型拉绳开关示意

Fig.7 Schematic diagram of fiber optic rope pull switch

工作人员发现故障需要紧急停机带式输送机时, 可拉动沿线安装的拉绳开关; 拉力传动机构驱动凸轮旋转, 凸轮旋转角经压力传动机构转换为施加在等强度悬臂梁上的作用力, 最后使粘贴在等强度悬臂梁表面的光纤光栅产生应变。利用光纤光栅的应变敏感特性和传感模型分析, 即可感知到拉绳动作。

2.2.2 温度传感器

温度传感器被铺设在温度异常高风险的区域内,用于监测过热故障,如输送机机头和机尾的易高温区域、沿线机架上、滚筒和托辊附近等。FBG温度传感器可以实现温度的准分布式测量,同时,根据所在通道数和原始中心波长可以实现温度异常点的定位功能。如图8所示,温度传感器主要由光缆、光纤光栅、金属导热管、光缆接头等组成,金属导热管套设在光纤光栅栅区外,方便导热以及防止光纤光栅受应变影响。

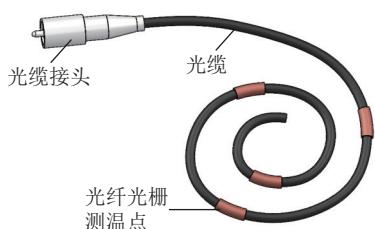


图8 光纤型温度传感器示意

Fig.8 Schematic diagram of fiber optic temperature sensor

FBG温度传感器被按需铺设在输送机上,测温点间隔可以通过调整光纤光栅栅区间隔按需定制;同一光纤通道,支持不同中心波长的多个光纤光栅串联同时测量;光纤光栅的反射光中心波长受温度影响产生偏移;经解调仪解调后,可以得到由温度变化产生的中心波长偏移量。根据光纤光栅的温度敏感特性,可进一步解算出温度情况。

所设计的光纤型传感器阵列考虑了如下措施提高传感精度和灵敏度:①光纤光栅具有一定的栅区长度,采用等强度悬臂梁而非普通悬臂梁,使测量区的应变接近相同值;②考虑黏胶长度与应变传递效率的关系^[28-29],选用光纤光栅的栅区长度为1 cm,对应黏胶长度2 cm;③考虑温度补偿,通过设置温补光纤,消除温度影响。

2.3 磁敏式打滑传感器

目前,光纤型敏感元件在转速测量方面的实现难度颇高,相较之下,磁敏式转速传感器凭借其灵敏度高、抗干扰能力强、热稳定性好以及非接触式测量等优点,在低转速测量领域得到了广泛应用^[30]。如图9所示,将磁敏式转速传感器作为打滑故障监测的解决方案。此类传感器以霍尔元件或磁敏电阻为敏感元件,当被测物体旋转带动磁场变化时,磁敏元件内部的电子受洛伦兹力作用,会在导体中形成电动势或电流。电信号和方向与磁场的强度和变化率有关,通过对该电信号的测量即可实现对物体转速的感知,进而为打滑故障的监测提供可靠依据。

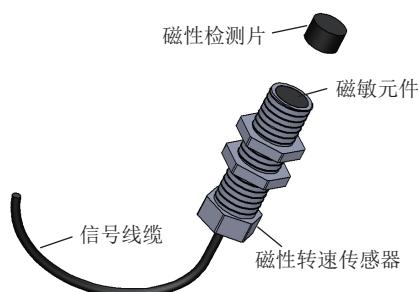


图9 磁敏式打滑传感器示意

Fig.9 Schematic diagram of magnetic slip sensor

打滑故障程度可以通过比较目标驱动速度和实际运行速度衡量。目标驱动速度可以通过测量驱动滚筒的转速,结合其半径计算得到;而由于张紧滚筒、托辊的转动完全由输送带摩擦驱动,故输送带的实际运行速度可以通过测量张紧滚筒、托辊的转速,并结合其半径计算得到。

3 FBG-等强度悬臂梁

在所设计的光纤型传感器阵列中,包括凸轮廓结构、压力弹簧和扭力弹簧等经典机械元件已经能够实现精确设计与加工,且动作传递关系明确。而等强度悬臂梁虽在传感器领域已经有应用,但其在光纤传感领域的适用性以及如何实现预期传感效果的研究尚不成熟,主要体现在结构尺寸设计和材料选择两个方面。下文以跑偏传感器的测量要求和传感模型为例,对FBG-等强度悬臂梁的结构设计和材料选择进行深入研究,并分析传感精度和灵敏度的影响因素。研究成果同样适用于光纤型传感器阵列中的其他传感器。

3.1 FBG 感知及补偿原理

光纤光栅常用于测量温度和应变2个基本物理量,其基本感知理论^[16]如下:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - P_e)\varepsilon + K_T \Delta T \quad (1)$$

式中: λ 、 $\Delta\lambda$ 、 P_e 、 ε 、 K_T 、 ΔT 分别为光纤光栅的初始中心波长, 波长偏移量, 弹光系数 ($P_e = 0.22$), 应变, 温度灵敏度和温度变化量。

当光纤光栅工作在无应变条件下时 ($\varepsilon = 0$), 反射光中心波长与温度的变化关系如式(2)所示;用光纤光栅测量应变时,只需在相同测量环境中再设置一温补光纤光栅,即可实现温度补偿,光纤光栅中心波长与应变关系如式(3)所示:

$$\frac{\Delta\lambda_T}{\lambda_T} = K_T \Delta T \quad (2)$$

$$\frac{\Delta\lambda_p}{\lambda_p} - \frac{\Delta\lambda_T}{\lambda_T} = (1 - P_e)\varepsilon \quad (3)$$

式中: λ_T , $\Delta\lambda_T$, λ_p , $\Delta\lambda_p$, $\Delta\lambda_T$ 分别为温度敏感光纤光栅的初始中心波长和波长偏移量, 应变敏感光纤光栅的初始中心波长和中心波长偏移量, 温度变化量。

根据式(2)和式(3), 可分别实现对温度和应变的测量。

3.2 尺寸和结构设计

FBG-等强度悬臂梁设计的关键在于: 根据传感器的一般工况, 控制其受力和应变范围, 在不超过光纤光栅应变测量范围前提下, 尽可能控制应变范围更大, 以弥补传感器加工精度的不足, 提高传感精度。跑偏传感器的测量要求为跑偏角变化范围($0^\circ, 60^\circ$), 对应作用力变化范围(0, 100 N), 在此前提下, 对FBG-等强度悬臂梁进行尺寸和结构设计。

根据式(3), 初始中心波长 λ_p 的确定由最大中心波长偏移量 $\Delta\lambda_{p\max}$ 和最大应变 ε_{\max} 决定。 $\Delta\lambda_{p\max}$ 和 ε_{\max} 的增大, 能提高 FBG-等强度悬臂梁及传感器的精度和灵敏度。当应变 $\varepsilon \leq 2000 \times 10^{-6}$, 波长变化量 $\Delta\lambda_p \leq 2 \text{ nm}$ 时, 光纤光栅的测量稳定性最佳^[31-32], 为了达到最高精度和灵敏度, 理想状态下的参数选择: $\varepsilon_{\max} = 2000 \times 10^{-6}$, $\Delta\lambda_{p\max} = 2 \text{ nm}$, $\lambda_p = 1282 \text{ nm}$ 。根据光纤光栅解调仪常见解调范围, 调整参数为 $\lambda_p = 1530 \text{ nm}$, $\Delta\lambda_{p\max} = 2 \text{ nm}$, $\varepsilon_{\max} = 1675 \times 10^{-6}$ 。再结合跑偏传感器的一般工况, 确定 FBG-等强度悬臂梁的设计目标为: 作用力 F 的变化范围(0, 100 N), 对应应变 ε 的变化范围($0, 1675 \times 10^{-6}$)。

所设计的等强度悬臂梁外形如图 10a 所示, 其中, h 为截面高度; 截面宽度 $b = b(x)$, $x \in (0, L)$, x 为截面到固定端的距离; L 为悬臂梁的最大长度。

应力 σ 与弯矩 $M(x)$ 的关系为

$$\sigma = \frac{M(x)}{W(x)} \quad (4)$$

等强度悬臂梁允许的最大应力 σ_{\max} 等于所用材料的许用应力 $[\sigma]$, 即:

$$\frac{M(x)}{W(x)} = [\sigma] \quad (5)$$

弯矩 $M(x)$ 为

$$M(x) = F(L - x) \quad (6)$$

抗弯截面系数 $W(x)$ 为

$$W(x) = \frac{b(x)h^2}{6} \quad (7)$$

联立式(5)、式(6)和式(7), 可得截面宽度函数 $b(x)$ 为

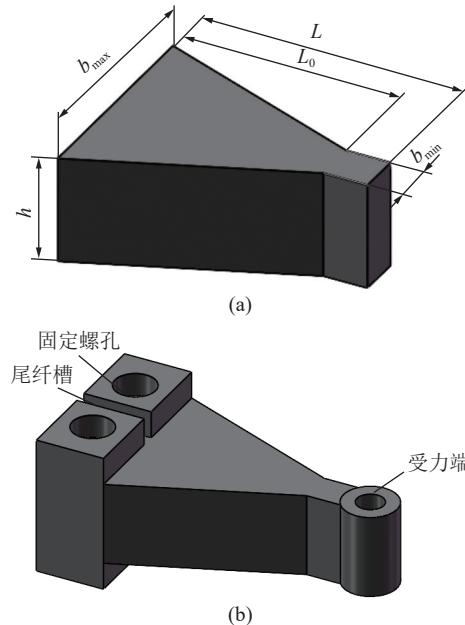


图 10 等强度悬臂梁结构示意

Fig.10 Structural diagram of an equal-strength cantilever beam

$$b(x) = \frac{6F_0(L - x)}{h^2[\sigma]} \quad (8)$$

式中: F_0 为预设力, 即设计允许的自由端的最大受力。

分析式(8)可知, 等强度悬臂梁的截面宽度 $b(x)$ 是关于 x 且斜率为负的一次函数。特别地, 当 $x = L$ 时, $b(x) = 0$, 显然不能满足剪切强度要求, 因此需要根据剪切强度要求确定自由端附近的最小截面宽度 b_{\min} 。

悬臂梁的切应力强度条件为

$$\tau_{\max} = \frac{3F_s}{2bh} \leq [\tau] \quad (9)$$

其中, $[\tau]$ 为许用切应力, F_s 为剪力。悬臂梁的剪力为

$$F_s(x) = F \quad (10)$$

联立式(9)和式(10)可得:

$$b_{\min} = \frac{3F_0}{2[\tau]h} \quad (11)$$

且当 $x = L - \frac{h[\sigma]}{4[\tau]}$ 时, $b(x) = b_{\min}$ 。

综上, FBG-等强度悬臂梁的尺寸设计依据如下:

$$b(x) = \frac{6F_0(L - x)}{h^2[\sigma]} \quad (12)$$

$$b_{\min} = \frac{3F_0}{2[\tau]h}, \quad x = L_0 = L - \frac{h[\sigma]}{4[\tau]} \quad (13)$$

$$b_{\max} = \frac{6F_0L}{h^2[\sigma]}, \quad x = 0 \quad (14)$$

分析式(12)、式(13)和式(14)可知, 等强度悬臂梁的尺寸设计影响因素包括: ① 材料特性。许用

应力 $[\sigma]$ 和许用切应力 $[\tau]$;②预设力 F_0 。其中,材料特性难以控制,应将材料选择作为设计考虑的主要因素;预设力 F_0 的设定相对灵活,将其作为设计考虑的辅助因素,补偿材料特性引起的尺寸和应变范围的不合理。

传感器中的悬臂梁常选用弹性材料或弹塑性材料,对于弹塑性材料,以屈服极限 σ_s 为基准,许用应力 $[\sigma]$ 和许用切应力 $[\tau]$ 分别为

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_1}, \quad n_1 \in (1.5, 2.5) \quad (15)$$

$$[\tau] = [\sigma]n_2, \quad n_2 \in (0.6, 1.0) \quad (16)$$

经后续的理论分析和有限元仿真发现,当 $n_1 = 2.5, n_2 = 0.6$,选用材料尼龙6,并将预设力调整到 $F_0 = 1000 \text{ N}$ 时,FBG-等强度悬臂梁的尺寸和应变表现最好。尼龙6的屈服极限 $\sigma_s = 1.036 \times 10^{-8} \text{ N/m}^2$,弹性模量 $E = 2.62 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。代入计算,得到等强度悬臂梁的最合理尺寸:截面高度 $h = 12.06 \text{ mm}$,总长 $L = 30 \text{ mm}$,最大截面宽度 $b_{\max} = 24.86 \text{ mm}$,当 $L_0 = 24.975 \text{ mm}$ 时取到最小截面宽度 $b_{\min} = 5 \text{ mm}$ 。

为了方便受力、固定和粘贴光纤光栅,本文优化了等强度悬臂梁结构,分别设置了受力区域、固定区域和光纤光栅尾纤槽,如图10b所示。

3.3 应变传递模型

FBG-等强度悬臂梁在外力作用下能够产生均匀应变并进行测量,这是光纤型传感器阵列工作的重要一环,其转换关系值得深入研究。

应变 ε 和悬臂梁应力 σ 的计算公式分别为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{Mh}{2I_z} \quad (18)$$

I_z 为悬臂梁的惯性矩:

$$I_z = \frac{h^3}{12}b(x) \quad (19)$$

联立式(17)、式(18)和式(19)可得:

$$\varepsilon = \frac{6M(x)}{Eh^2b(x)} \quad (20)$$

联立式(8)、式(20)可得应变 ε 与力 F 的传递关系:

$$\varepsilon = \frac{F[\sigma]}{F_0E} \quad (21)$$

式(21)中, $[\sigma]、F_0、E$ 均为常量,因此,所设计的等强度悬臂梁的应变 ε 随力 F 变化而均匀变化。

同时,式(21)也提供了目标工况下等强度悬臂梁的尺寸设计思路:可以通过材料的 $\frac{[\sigma]}{E}$ 来初步调节

应变 ε 与作用力 F 的变化关系;在确定材料后,可以通过调整预设力 F_0 来进一步调节应变 ε 达到合理范围。

3.4 传感模型分析

为了探究FBG-等强度悬臂梁的相关设计因素对传感器精度和灵敏度的影响,根据设计的跑偏传感器建立了跑偏量传感模型,并基于此模型进行分析。跑偏传感器的监测量与实际测得的中心波长偏移量的映射关系可概括为:跑偏量-角度-力-应变-中心波长偏移量。带式输送机和传感器安装的相对位置决定跑偏量-角度的转换关系;力与应变的转换关系如式(21)所示;应变-波长偏移量的转换关系如式(3)所示;角度-力的转换关系如下。

如图11所示,跑偏传感器的压力传动机构内部主要为压力弹簧,当凸轮转动带动滑轮杆上下移动时,弹簧压缩并产生弹力作用在等强度悬臂梁的自由端。



图11 压力传动结构

Fig.11 Structural diagram of pressure transmission mechanism

通过合适的凸轮外形设计和弹簧选择,可以将转动角度 θ 与压力 F 的对应关系控制为

$$F = K\theta \quad (22)$$

式中: K 为传动系数,根据跑偏传感器的一般工况: $\theta \in (0^\circ, 60^\circ) \rightarrow F \in (0, 100 \text{ N})$,得到 $K = 1.67 \text{ N/}^\circ$ 。

综合式(3)、式(12)、式(21)和式(22),得到跑偏传感模型为

$$F = \frac{F_0E}{(1-P_e)[\sigma]} \left(\frac{\Delta\lambda_p}{\lambda_p} - \frac{\Delta\lambda_T}{\lambda_T} \right) \quad (23)$$

$$\theta = \frac{F_0E}{(1-P_e)[\sigma]K} \left(\frac{\Delta\lambda_p}{\lambda_p} - \frac{\Delta\lambda_T}{\lambda_T} \right) \quad (24)$$

跑偏传感器的传感灵敏度 S_1 和FBG-等强度悬臂梁的灵敏度 S_2 分别为

$$S_1 = \frac{F_0E}{(1-P_e)[\sigma]\lambda_p K} \quad (25)$$

$$S_2 = \frac{F_0E}{(1-P_e)[\sigma]\lambda_p} \quad (26)$$

$$S_2 = KS_1 \quad (27)$$

由式(25)可知,跑偏传感器的灵敏度与材料特性 $\frac{E}{[\sigma]}$ 、预设力 F_0 正相关,与初始中心波长 λ_p 、传动系数 K 反相关;其中 $\frac{E}{[\sigma]}$ 、 F_0 、 λ_p 是 FBG—等强度悬臂梁的主要设计因素。在设计传感器时,应该协调各参数关系,满足尺寸合理性,并达到目标应变范围。尼龙 6 的 $E = 2.62 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $[\sigma] = 4.144 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, 代入计算得到跑偏传感器的理论灵敏度 $S_1 = 31.723 3^\circ/\text{nm}$, FBG—等强度悬臂梁的理论灵敏度 $S_2 = 52.978 0 \text{ N/nm}$ 。在跑偏传感器最大量程

$\theta = 60^\circ$ 时,对应波长变化量 $\Delta\lambda_p \approx 1.89 \text{ nm}$ (目标 $\Delta\lambda_p = 2 \text{ nm}$),符合设计要求。

4 数值分析及有限元仿真

4.1 材料分析

测试分析了多种材料设计的等强度悬臂梁,其中金属材料包括:304 不锈钢、易切削黄铜、3003—铝合金、1345 铝合金等;塑料材料包括:尼龙 101、尼龙 6/10、尼龙 6 等,通过计算和 ANSYS 有限元仿真得到各自最合理尺寸及最大量程应变,结果见表 1。

表 1 材料选择与尺寸设计

Table 1 Table of material selection and dimension design

材料	F_0/N	F_{\max}/N	最优尺寸				最大量程应变	评价
			b_{\max}/mm	b_{\min}/mm	h/mm	L_0/mm		
304 不锈钢	100	100	93	2	1.5	29.4	4.5×10^{-4}	尺寸不合理
易切削黄铜	100	100	55.14	2	2.52	28.9	4.0×10^{-4}	尺寸不合理
3003—铝合金	100	100	39.5	3	5.1	27.9	2.55×10^{-4}	应变过小
1345 铝合金	100	100	25.6	3	7.5	26.9	1.8×10^{-4}	应变过小
尼龙 101	100	100	25.6	2	5.2	27.8	2.3×10^{-2}	应变过大
尼龙 6/10	100	100	62.05	2	2.25	29.1	6.3×10^{-3}	尺寸不合理
尼龙 6	100	100	45.73	2	3	28.7	1.5×10^{-2}	应变较大

由表 1 可知,金属材料的屈服极限和弹性模量较大,制作的等强度悬臂梁在尺寸合理性和传感精度方面均表现不佳。以 304 不锈钢制作的等强度悬臂梁为例,最大截面宽度为 93 mm,需要在 29.4 mm 的距离内过渡到 2 mm 的最小截面宽度,尺寸表现显然不合理;同时,其最大量程应变均值仅有 450×10^{-6} (目标 1675×10^{-6}),传感精度也表现不佳。使用铝合金 1345 虽然能够获得合理的设计尺寸,但同样其最大量程应变仅有 180×10^{-6} ,难以满足传感精度

要求。

多数尼龙类材料虽然能够获得合理的设计尺寸,但其弹性模量较小,最大量程应变过大,超出了光纤光栅的应变测量范围,因此可以根据式(21)调整预设力 F_0 ,从而获得更合理的应变范围和外形参数。材料尼龙 6 具有强度高、耐磨和耐腐蚀等优点,常被用于制造各种机械零件。综合考虑尺寸和应变范围的合理性以及材料的易获得性等因素,确定尼龙 6 作为等强度悬臂梁的材料。最终设计参数见表 2。

表 2 最终材料选择与尺寸设计
Table 2 Table of final material selection and dimension design

材料	F_0/N	F_{\max}/N	最优尺寸				最大量程应变	评价
			b_{\max}/mm	b_{\min}/mm	h/mm	L_0/mm		
尼龙 6	1 000	100	24.8	5	12.1	24.9	2.2×10^{-3}	尺寸、应变均合理

4.2 有限元仿真与分析

在确定等强度悬臂梁的尺寸设计和材料选择后,利用有限元分析软件 ANSYS 对等强度悬臂梁作进一步的力学分析。网格单元尺寸设置为: 0.2 mm。

划分网格后,生成单元 513 164 个,节点 301 221 个。对等强度悬臂梁的固定区域施加固定载荷,模拟现实中对悬臂梁的固定约束。设置作用力变化范围(0,100 N)。从 0 开始,按照 10 N 的梯度加载到

100 N, 并记录应变表现。加载区域为受力端圆环区域, 加载方向垂直于圆环区域表面。仿真分析得到

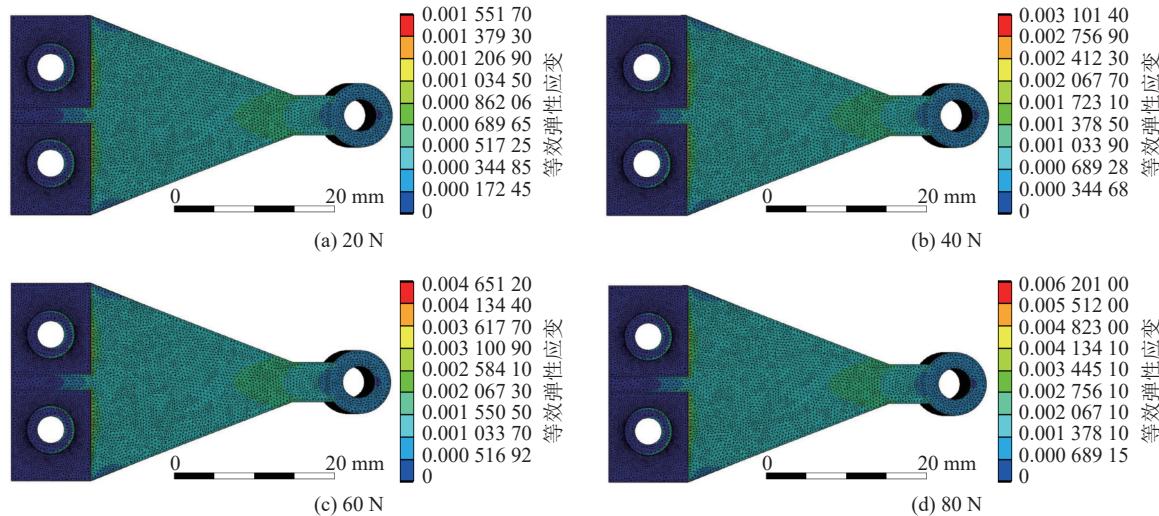


图 12 等强度悬臂梁应变云图

Fig.12 Strain nephogram of an equal-strength cantilever beam

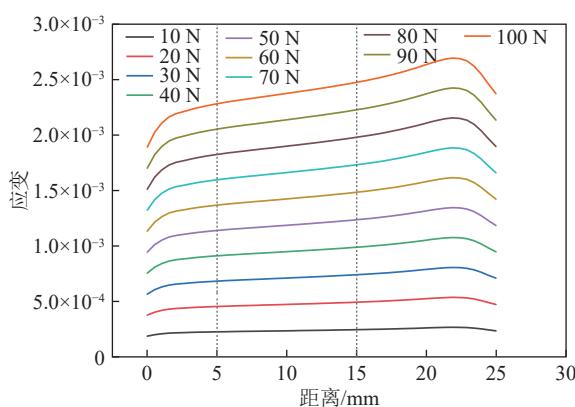


图 13 等强度悬臂梁应变随压力、距离变化分布曲线

Fig.13 Distribution curves of strain in an equal-strength cantilever beam varying with pressure and distance

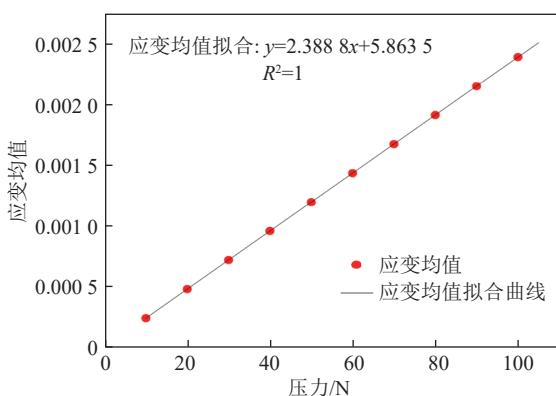


图 14 等强度悬臂梁应变均值随压力变化曲线

Fig.14 Variation curve of mean strain in an equal-strength cantilever beam with changing pressure

等强度悬臂梁的应变情况如图 12、图 13 所示, 测量区的应变均值随压力变化情况如图 14 所示。

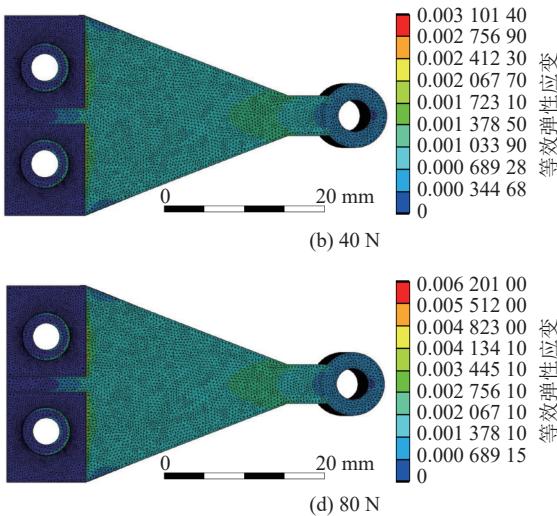


图 12 等强度悬臂梁应变云图

Fig.12 Strain nephogram of an equal-strength cantilever beam

由图 12 可知, 所设计的等强度悬臂梁在上表面中轴线附近处具有良好的等值应变表现, 对于提升光纤光栅的栅区测量精度意义重大。由图 13 进一步得知, 在确定的压力作用下, 等强度悬臂梁在上表面中线区域的应变波动较小, 即在误差可接受的情况下, 所设计的等强度悬臂梁应变与距离无关, 满足光纤光栅的栅区应变近似相等的设计目标。由图 14 可知, 所设计的等强度悬臂梁应变均值与自由端受力 F 的大小成线性正相关关系, 与理论推导式(21)相符。

5 性能测试与结果分析

5.1 传感器测试系统及装置

通过实验室试验进一步对 FBG-等强度悬臂梁的结构有效性、灵敏度和稳定性进行了验证。测试系统由图 15 中的光纤光栅、等强度悬臂梁、夹具、光纤光栅解调仪、客户端、应变片、应变仪和图 16 中的万能试验机等组成。光纤光栅粘贴在等强度悬臂梁上表面中轴线位置, 连接光纤光栅解调仪, 测量应变引起的反射光中心波长偏移量; 客户端连接光纤光栅解调仪, 显示和记录波长变化情况; 应变片粘贴在等强度悬臂梁下表面, 连接应变仪, 用于测量实际应变并与波长变化量进行实时对应; 等强度悬臂梁固定在夹具上, 方便万能试验机加压, 实验室试验如图 16 所示。

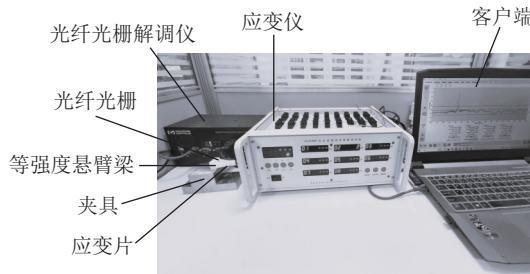


图 15 试验装置实物

Fig.15 Physical diagram of the experimental apparatus



图 16 试验现场实物

Fig.16 Physical diagram of the experimental scene

5.2 试验及结果分析

试验采用逐步加载、分级记录的试验形式。加载增速为 1 N/s , 加载终点设置为 105 N 。考虑万能试验机的加载特点, 以 $F = 2.4 \text{ N}$ 作为初始点, 此时中心波长作为初始波长, 应变仪调零。记录作用力在 $0 \sim 100 \text{ N}$ 内的波长和应变的变化情况, 记录间隔 5 N 。

5.2.1 灵敏度及重复性试验

在室温 $10 \sim 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试验环境下, 对试制的 3 个 FBG-等强度悬臂梁试样(试样 1, 2, 3)分别进行压力应变试验, 得到各试样在不同压力作用下, 等强度悬臂梁受力与应变变化曲线, 如图 17 所示; 等强度悬臂梁受力与光纤光栅中心波长偏移量变化曲线, 如图 18 所示。选取灵敏度表现较好的试样 1, 再进行重复性加载试验, 得到等强度悬臂梁受力与应变重复性试验变化曲线, 如图 19 所示。

据图 17 可知, 所设计的等强度悬臂梁应变随压力增大而线性增大。3 个试样均能够有效地将压力转换为应变, 且转换关系表现出良好的线性关系。受到最大作用力 100 N 时, 3 个试样的实际应变均在 2000×10^{-6} 附近, 符合设计目标(目标 2000×10^{-6})。由图 18 可知, 光纤光栅波长偏移量随着压力增大而线性增大, 利用光纤光栅这点特性可以测量等强度悬臂梁的应变, 即所设计的 FBG-等强度悬臂梁结构能够实现力-应变-光纤光栅波长偏移量的转换, 且拟合结果(表 3)表现出良好的线性关系。试验所得 3 个试样的平均灵敏度为 $S_2^* = 38.1157 \text{ N/nm}$, 代入

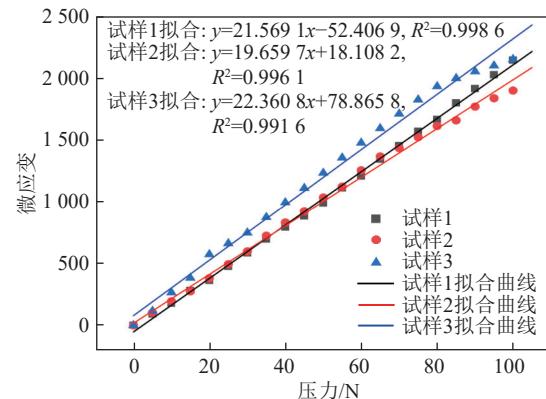


图 17 等强度悬臂梁压力与应变变化曲线

Fig.17 Variation curves of strain with applied force in an equal-strength cantilever beam

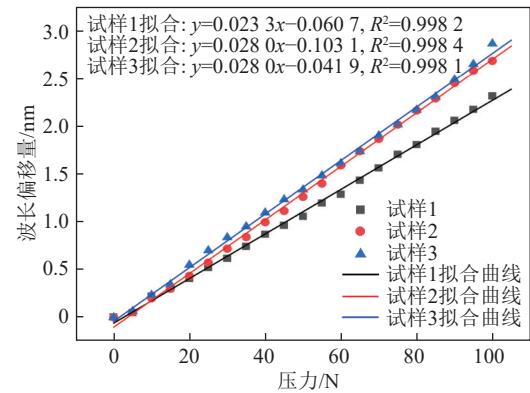
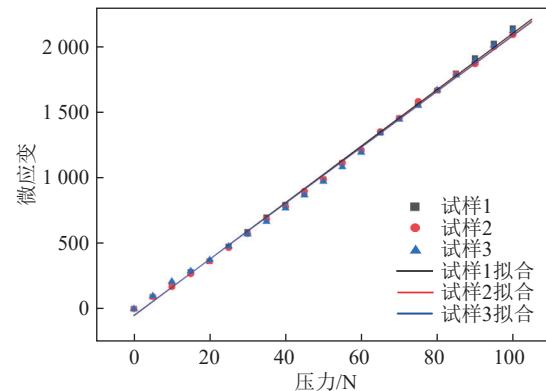


图 18 等强度悬臂梁压力与光纤光栅中心波长偏移量变化曲线

Fig.18 Variation curves of central wavelength shift in fiber bragg gratings with applied force in an equal-strength cantilever beam

图 19 等强度悬臂梁压力与应变重复性试验变化曲线
Fig.19 Variation curves of repetitive stress and strain tests on cantilever beams with uniform strength

跑偏传感模型得到实际的平均灵敏度为 $S_1^* = 22.8238(\text{ }^{\circ})/\text{nm}$ 。此外, 受最大作用力 100 N 时, 3 个试样产生的光纤光栅波长偏移量均在 $2.0 \sim 2.5 \text{ nm}$,

符合设计要求(目标2 nm)。据图19可知,所设计的FBG-等强度悬臂梁试样在重复加载的情况下,

3次试验中力-应变表现基本重合,平均重复性误差仅为1.002%,表现出良好的重复性和稳定性。

表3 等强度悬臂梁受力与光纤光栅中心波长偏移量数据拟合
Table 3 Table of data fitting between the applied force on an equal-strength cantilever beam and the central wavelength shift of fiber bragg gratings

试样	拟合函数	拟合系数	传感灵敏度/(N·nm ⁻¹)	平均灵敏度 $S_2^*/(N\cdot nm^{-1})$
试样1	$y=0.0233x-0.0607$	0.9982	42.9185	
试样2	$y=0.0280x-0.1031$	0.9984	35.7143	38.1157
试样3	$y=0.0280x-0.0419$	0.9981	35.7143	

试验测得的跑偏传感器的灵敏度 $S_1^*=22.8238(^{\circ})/nm$,FBG-等强度悬臂梁的灵敏度 $S_2^*=38.1157\text{ N}/nm$,相比理论灵敏度平均灵敏度 $S_1=31.7233(^{\circ})/nm$, $S_2=52.9780\text{ N}/nm$ 偏小,分析误差原因:①胶层应变传递效率和光纤光栅应变测量效率难以达到100%,这是误差形成的主要原因;②光纤光栅的手工粘贴位置和胶层情况难以控制;③等强度悬臂梁尺寸计算设计及加工有误差。但在加工传感器时,需要根据实际表现调整标定关系,可以接受小范围误差的存在。

5.2.2 温度敏感性及温度补偿试验

1) 温度敏感性试验

在不加载的条件下,对试样1和试样2的光纤光栅进行温度补偿敏感性试验,测试试样在不同温度下的中心波长变化情况,温度测试间隔5℃,测试范围10~50℃。试验结果如图20所示。

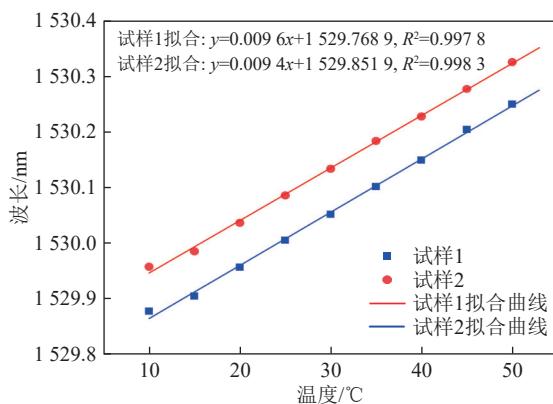


图20 温度敏感性试验曲线

Fig.20 Curves of temperature sensitivity experimental analysis

对实验结果进行线性拟合分析,试样1的线性拟合系数为0.9978,试样2的线性拟合系数为0.9983,可见光纤光栅对温度变化敏感,且中心波长随着温度变化而线性变化。这表明:用光纤光栅测量应变时,需要进行温度补偿以消除温度影响,提高传感精度;此外,还可利用该特性设计温度传感器,

实时测量带式输送机相关部件的温度。

2) 温度补偿试验

在3个试样中选择压力应变试验中灵敏度表现最佳的试样1,将其波长变化量代入式(3)得到应变测量计算值,并参考应变仪读出的实际应变,对比其在温度补偿前后的表现,试验结果如图21所示。

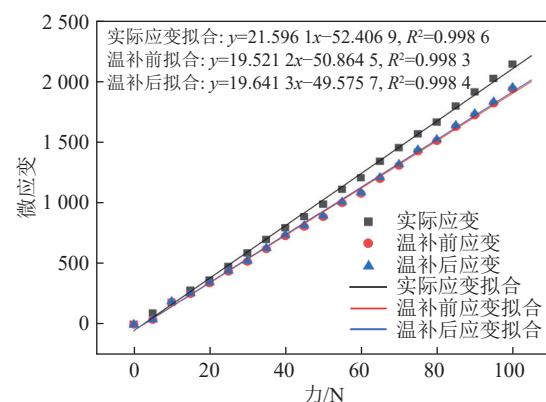


图21 试样1温度补偿试验曲线

Fig.21 Curves of temperature compensation test for sample 1

据图21可知,在温度补偿前后,试样1通过光纤光栅测量得到的应变都随压力变化而线性变化,与应变片测量得到的实际应变趋势表现基本一致。而实际应变与温度补偿前后通过光纤光栅测量得到的应变存在一定差异,分析其主要原因为胶层应变传递效率和光纤光栅应变测量效率难以达到100%,在加工传感器时,尤其要考虑该误差因素,并根据实际情况进行标定。

温度补偿试验数据拟合情况见表4,相比温度补偿前FBG-等强度悬臂梁的应变测量灵敏度 $19.5212\times 10^{-6}\text{ N}^{-1}$,温度补偿后的应变测量灵敏度为 $19.6413\times 10^{-6}\text{ N}^{-1}$,更接近实际应变拟合灵敏度 $21.5961\times 10^{-6}\text{ N}^{-1}$ 。可见,即便在微小温度变化环境下(10~12℃),补偿机制仍能有效提高灵敏度0.6%。因此,在实际应用过程中,尤其是在温度变化复杂的环境下,需要考虑温度补偿。

表 4 温度补偿试验数据拟合
Table 4 Table of data fitting for temperature compensation experiments

试验内容	拟合函数	拟合系数	灵敏度/(10 ⁻⁶ N ⁻¹)
实际应变	$y=21.5961x-52.4069$	0.9986	21.5961
温补前测量应变	$y=19.5212x-50.8645$	0.9983	19.5212
温补后测量应变	$y=19.6413x-49.5757$	0.9984	19.6413

6 结 论

1) 为了寻求更加安全有效的带式输送机监测与保护方案, 本文分析了带式输送机常见故障原理与表现形式, 基于光纤传感技术, 提出了一种基于 FBG 的带式输送机综合保护系统, 明确了光纤型传感器阵列的设计是系统搭建的重要前提。以 FBG—等强度悬臂梁为核心传感结构设计了多种传感器, 组成了带式输送机综合保护系统的传感器阵列。

2) 对 FBG—等强度悬臂梁的结构设计和材料选择进行了深入研究, 优选了尼龙 6 作为等强度悬臂梁的制作材料。通过理论分析、数值模拟及实验室试验等手段对 FBG—等强度悬臂梁的结构有效性、灵敏度和稳定性进行了验证。理论分析和试验表明: FBG—等强度悬臂梁的理论灵敏度为 $S = 52.9780 \text{ N/nm}$, 实际灵敏度为 $S^* = 38.1157 \text{ N/nm}$; 光纤型传感器对温度变化敏感, 通过温度补偿能够提高传感精度。所设计的光纤型传感器阵列解决了现有带式输送机运行故障无法实时定量感知的问题, 为实现设备智能化感知与控制提供了坚实的数据基础。

3) 以视觉、激光、红外热成像等新兴技术为代表的非接触式测量具有适用性强、测量范围广等优点, 但易受环境波动的影响、测量精度有限。包括所设计的光纤型传感器阵列在内的接触式测量, 虽然测量精度高, 但在高强度恶劣工作环境中难免出现精度衰减或损坏的情况。鉴于此, 未来应该着眼于多种传感器的综合应用。具体而言, 对于监测范围广、数量多且精度要求不高的部件采用非接触式测量。而对于精度要求高, 且测量点位规律或集中的部件, 采用接触式测量。从而, 有效提高故障监测效率, 降低设备故障率, 推动煤矿行业向更高水平的自动化、智能化方向迈进。

参考文献(References):

- [1] 王国法, 张德生. 煤炭智能化综采技术创新实践与发展展望[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 459–467.
WANG Guofa, ZHANG Desheng. Innovation practice and development prospect of intelligent fully mechanized technology for
- coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 459–467.
- [2] 王清峰, 辛德忠, 陈航. 煤矿井下自动化钻探技术概况与智能化发展前瞻[J]. 智能矿山, 2020, 1(1): 71–77.
WANG Qingfeng, XIN Dezhong, CHEN Hang. Overview of automatic drilling technology in underground coal mine and prospect of intelligent development[J]. Journal of Intelligent Mine, 2020, 1(1): 71–77.
- [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] GONG X Y, ZHAO M X, WU Y, et al. Study on fuzzy comprehensive evaluation model for the safety of mine belt conveyor[J]. MATEC Web of Conferences, 2017, 136: 02001.
- [5] SALISBURY R, MITCHELL A. System and method for monitoring belt conveyor, FR20160053630[P], FR3035501B1, 2020.
- [6] YUAN L M, MAINIERO R J, ROWLAND J H, et al. Numerical and experimental study on flame spread over conveyor belts in a large-scale tunnel[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 30: 55–62.
- [7] FARIA H D, LIZARRALDE F, COSTA R R, et al. ROSI: A mobile robot for inspection of belt conveyor[J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(2): 10031–10036.
- [8] 方崇全. 煤矿带式输送机巡检机器人关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 263–270.
FANG Chongquan. Research on key technology of inspection robot for coal mine belt conveyor[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 263–270.
- [9] 汪楚森. 基于机器视觉的煤矿井下带式输送机故障诊断技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
WANG Chusen. Research on fault diagnosis technology of belt conveyor in coal mine based on machine vision[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [10] 韩涛, 黄友锐, 张立志, 等. 基于图像识别的带式输送机输煤量和跑偏检测方法[J]. 工矿自动化, 2020, 46(4): 17–22.
HAN Tao, HUANG Yourui, ZHANG Lizhi, et al. Detection method of coal quantity and deviation of belt conveyor based on image recognition[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(4): 17–22.
- [11] 马宏伟, 杨文娟, 张旭辉. 基于红外热像的带式输送机监测与预警系统[J]. 激光与红外, 2017, 47(4): 448–452.
MA Hongwei, YANG Wenjuan, ZHANG Xuhui. Monitoring and warning system of belt conveyor based on infrared thermography[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(4): 448–452.
- [12] 尉婷, 乔学光, 贾振安, 等. 平面圆形膜片式光纤布拉格光栅温度补偿压强传感[J]. 光学学报, 2007, 27(1): 80–84.

- WEI Ting, QIAO Xueguang, JIA Zhen'an, et al. Temperature-insensitive fiber Bragg grating pressure sensing with plane round metal diaphragm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(1): 80–84.
- [13] 梁敏富, 方新秋, 薛广哲, 等. 光纤光栅测力锚杆的标定试验[J]. 煤矿安全, 2015, 46(1): 44–46.
- LIANG Minfu, FANG Xinqiu, XUE Guangzhe, et al. Calibration test of force-measuring bolt based on fiber grating[J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(1): 44–46.
- [14] NARUSE H, UEHARA H, DEGUCHI T, et al. Application of distributed fiber optic strain sensing system to underground mine monitoring[J]. *Ieice Technical Report*, 2006, 106(497): 71–76.
- [15] 柴敬, 邱标, 李毅, 等. 钻孔植入光纤 Bragg 光栅检测岩层变形的模拟实验[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(1): 44–47.
- CHAI Jing, QIU Biao, LI Yi, et al. Simulation experiment of embedded fiber Bragg grating monitoring in rock deformation through borehole[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(1): 44–47.
- [16] 梁敏富, 方新秋, 陈宁宁, 等. 正交试验设计的 FBG 测力锚杆结构封装优化及应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2950–2960.
- LIANG Minfu, FANG Xinqiu, CHEN Ningning, et al. Structure packaging optimization and application of FBG dynamometry bolts based on the orthogonal test design[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(8): 2950–2960.
- [17] 李丽君, 张旭, 唐斌, 等. 一种微型光纤光栅矿压传感器[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 2084–2088.
- LI Lijun, ZHANG Xu, TANG Bin, et al. A kind of micro-fiber Bragg grating mine pressure sensor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(11): 2084–2088.
- [18] 张登攀, 郑艳, 姚新景. 基于光纤光栅的煤矿瓦斯压力传感器的研制[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 8–13.
- ZHANG Dengpan, ZHENG Yan, YAO Xinjing. Study on a new gas pressure sensor based on Fiber Bragg Grating[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2018, 37(2): 8–13.
- [19] 梁敏富, 方新秋, 柏桦林, 等. 温补型光纤 Bragg 光栅压力传感器在锚杆支护质量监测中的应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(11): 2826–2833.
- LIANG Minfu, FANG Xinqiu, BAI Hualin, et al. Application of temperature compensation fiber Bragg grating pressure sensor for bolting quality monitoring[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(11): 2826–2833.
- [20] 孙丽, 王兴业, 李闯, 等. 基于等强度梁的新型双光纤光栅静力水准仪[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 58–66.
- SUN Li, WANG Xingye, LI Chuang, et al. New double fiber Bragg grating static level based on equal strength beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 58–66.
- [21] 于涛, 陈玉璞, 王壮, 等. 基于等强度梁的光纤光栅顶板离层仪研究与应用[J]. 煤炭技术, 2023, 42(10): 195–199.
- YU Tao, CHEN Yupu, WANG Zhuang, et al. Research and application of fiber grating top plate delamination instrument based on equal strength beam[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(10): 195–199.
- [22] 方新秋, 梁敏富, 邢晓鹏, 等. 光纤光栅支架压力表的研制及性能测试[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 945–952.
- FANG Xinqiu, LIANG Minfu, XING Xiaopeng, et al. Development of hydraulic support pressure gauge based on FBG and its performance test[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(5): 945–952.
- [23] 方新秋, 陈宁宁, 冯豪天, 等. 刮板输送机直线度光纤精准感知与调直关键技术[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(5): 1043–1056.
- FANG Xinqiu, CHEN Ningning, FENG Haotian, et al. Key technologies of optical fiber accurate perception and straightening of straightness of the scraper conveyor[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(5): 1043–1056.
- [24] 谭跃刚, 陈宇佳, 李瑞亚, 等. 高精度弓型光纤光栅微位移传感器[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(3): 556–564.
- TAN Yuegang, CHEN Yujia, LI Ruiya, et al. High-precision bow-shaped fiber Bragg grating micro-displacement sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(3): 556–564.
- [25] 周坪, 马国庆, 周公博, 等. 智能化带式输送机健康监测技术研究综述[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(12): 1–21.
- ZHOU Ping, MA Guoqing, ZHOU Gongbo, et al. Health monitoring technology for the intelligent belt conveyor: A review[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(12): 1–21.
- [26] 杨鑫, 苏乐, 程永军, 等. 基于多种图结构信息融合的刮板输送机健康状态识别[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(8): 171–181.
- YANG Xin, SU Le, CHENG Yongjun, et al. Health status identification of scraper conveyor based on fusion of multiple graph structure information[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(8): 171–181.
- [27] 王伟峰, 杨泽, 赵轩冲, 等. 矿井带式输送机液压拉紧 Fuzzy-PID 控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 217–224.
- WANG Weifeng, YANG Ze, ZHAO Xuanchong, et al. Research on hydraulic tension Fuzzy-PID control technology of mine belt conveyor[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(3): 217–224.
- [28] 李天梁, 谭跃刚, 张翔, 等. 受弯件上粘贴型光纤布拉格光栅的应变传递规律[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1254–1264.
- LI Tianliang, TAN Yuegang, ZHANG Xiang, et al. Strain transfer factors of pasted FBG on bending part surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1254–1264.
- [29] 权志桥, 方新秋, 薛广哲, 等. 表面粘贴布拉格光纤光栅传感器的应变传递耦合机理研究[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 163–172.
- QUAN Zhiqiao, FANG Xinqiu, XUE Guangzhe, et al. Strain transfer coupling mechanism of surface-bonded fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 163–172.
- [30] 王威. 基于机器视觉的微小振动测量技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- WANG Wei. Research on micro vibration measurement technology based on machine vision[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [31] 姜达洲. 小型光纤光栅加速度传感器传感特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- JIANG Dazhou. Study on sensing characteristics of small fiber grating acceleration sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [32] 解鹏, 董继军, 郭学让, 等. 基于光纤光栅的 OPGW 输电杆塔多参数监测[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(4): 107–111.
- XIE Peng, DONG Jijun, GUO Xuerang, et al. Multi-parameter monitoring of OPGW transmission tower based on fiber Bragg gratings[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2023, 21(4): 107–111.