

机电与智能化



移动扫码阅读

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.

## 带式输送机智能化关键技术现状与展望

王海军<sup>1,2</sup>, 王洪磊<sup>1</sup>

(1. 煤炭科学研究总院有限公司 智能矿山研究院, 北京 100013; 2. 中煤科工集团信息技术有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 带式输送机是煤炭主运输系统的关键装备, 带式输送机的智能化是矿井煤炭安全高效运输的重要保障, 对于提升煤矿安全水平、保障煤炭稳定供应具有重要意义。在新技术革命的推动下, 带式输送机智能化领域处于加速发展阶段, 信息系统平台、智能控制、测量感知等智能化关键技术不断取得进展, 呈现多点突破、全面发展的态势, 但相关技术在煤矿企业多为试验性应用, 未得到普遍推广。综述了近年来带式输送机智能化关键技术的发展情况, 分析了工程应用中存在的问题, 指出了带式输送机智能化关键技术的发展趋势。首先, 概括介绍带式输送机智能化的发展历程, 重点阐述不同承载方式的带式输送机的技术特点及对智能化发展的技术要求; 然后, 以托辊式带式输送机为对象, 分别介绍带式输送机节能运行技术、煤流量感知技术、健康状态监测技术和安全保障技术等智能化关键技术的研究现状, 梳理了计算机视觉、大数据分析、智能控制与决策等技术在工程中的应用情况, 对存在的问题及未来发展趋势进行讨论; 最后, 结合对国内外相关技术研究成果的分析, 从智能化监测与控制研究的角度出发, 指出了带式输送机变频节能控制、非接触式煤流智能感知、基于多源信息融合的透明输送和虚拟现实等智能化关键技术的研究方向。

**关键词:** 智能矿山; 带式输送机; 智能化; 绿色节能; 智能感知

**中图分类号:** TD67      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2022)12-0225-15

### Status and prospect of intelligent key technologies of belt conveyor

WANG Haijun<sup>1,2</sup>, WANG Honglei<sup>1</sup>

(1. Intelligent Mine Research Institute, Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China;

2. China Coal Technology & Engineering Group Information Co. Ltd., Xi'an 710000, China)

**Abstract:** As the key equipment of the coal transportation system, the intelligence of the belt conveyor is crucial to the safe and efficient transportation of coal mines. And it is of great significance to improve the safety level of coal mines and ensure a stable supply of coal. Driven by the new technological revolution, the field of belt conveyor intelligence is in the stage of accelerated development. Key intelligent technologies such as information system platforms, intelligent control, measurement and sensing have made continuous progress, showing a trend of multi-point breakthroughs and all-around development. However, the relevant technologies are mostly applied experimentally in coal mining enterprises and have not been widely promoted. This paper reviews the research and development trend of key technologies for intelligent belt conveyors in recent years and summarizes the problems encountered in engineering applications. First, the authors give an overview of the development of belt conveyor intellectualization, focusing on the technical characteristics of belt conveyors with different carrying types and the technical requirements for intelligent development. Then, the key technical problems that need to be solved for idler belt conveyor intelligence are pointed out. The current research status of four key directions, such as energy saving technology of belt conveyors, coal flow sensing technology, health status monitoring technology, and safety assurance technology, is introduced. The article analyzes the application of computer vision, big data analysis, intelligent control, and decision-making technologies in engineering, and discusses the existing problems and future development trends. Finally, the development suggestions for belt conveyors

收稿日期: 2022-08-01      责任编辑: 周子博      DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1243

基金项目: 中国煤炭科工集团科技创新重点资助项目 (2020-2-TD-ZD002, 2020-2-TD-ZD001)

作者简介: 王海军(1975—), 男, 蒙古族, 陕西西安人, 正高级工程师, 硕士生导师, 博士。E-mail: wanghaijun@cctegxian.com

are proposed from the perspective of intelligent monitoring and control research, combined with the analysis of related technology research results at home and abroad. The future research directions of intelligent key technologies such as non-contact coal flow intelligent sensing of belt conveyors, transparent conveying based on multi-source information fusion, frequency conversion and energy-saving control, and virtual reality are discussed.

**Key words:** intelligent mine; belt conveyor; coal mine intellectualization; green energy saving; intellisense

## 0 引言

带式输送机也称作“皮带机”，凭借其运送能力大、运输距离长、适用性强、工作平稳、动力消耗低、使用维护方便等优点，在现代化高产高效矿井中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。随着煤矿智能化建设的发展，带式输送机作为煤炭主运输系统的关键装备，其智能化程度直接影响了煤炭外运效率及煤矿智能化建设水平。国家发展改革委、国家能源局等八部委联合印发的《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》提出到2035年各类煤矿基本实现智能化，构建多产业链、多系统集成的煤矿智能化系统，建成智能感知、智能决策、自动执行的煤矿智能化体系。各个煤炭主产区省市，各大煤业集团先后出台了煤矿智能化建设的实施方案，针对主运输系统提出了建设智能感知、智能决策、自动执行的全矿井煤流智能运输系统，与工作面开采系统和煤仓存储系统智能联动，实现全矿井煤流系统智能运行，同时要构建低碳、环保、绿色高效、以人为本的主运输系统运行模式<sup>[2]</sup>，利用高速发展的计算机技术、传感检测技术、网络通讯技术以及智能控制理论，对带式输送机实现智能联动控制，绿色节能运行，精准故障预警，为带式输送机逐步实现无人值守提供技术支撑。

通过分析带式输送机的技术现状，理清带式输送机智能化运行中存在的科学问题及技术难点，对于攻克带式输送机无人值守、低碳绿色运行关键技术，提升我国煤矿主运输系统智能化水平具有重大意义。首先以带式输送机智能化的发展历程为切入点，重点阐述不同承载方式的带式输送机的技术特点及对智能化发展的技术要求；然后，以托辊式带式输送机为对象分别介绍带式输送机节能运行技术、煤流量感知技术、健康状态监测技术和安全保障技术等智能化关键技术的研究现状；最后，从理论研究和工程实践方面展望了带式输送机智能化过程中的技术发展趋势。

## 1 带式输送机发展历程与智能化技术需求

世界上第一台输送机出现在英国，至今已有150余年的历史，随后美国人 Thomas Robins 发明了基于槽形托辊结构的带式输送机，并将其应用于采

矿工业中。随着人类社会的进步和科技的发展，带式输送机的结构和性能也更加成熟。带式输送机作为煤矿行业等散装物料运输的主要运输设备，不断向功能多元化、应用范围广、智能化绿色高效运行方向发展。按照带式输送机的承载方式不同，可以将输送机分为：托辊式带式输送机、气垫带式输送机、液垫带式输送机、磁悬浮带式输送机和其它输送机等<sup>[3]</sup>。不同结构形式的带式输送机其智能化发展的技术要求也各不相同。

1)托辊式带式输送机。托辊式带式输送机为最常见的传统输送机，如图1所示，其主要工作原理是：通过驱动装置产生的牵引力由摩擦力传导至输送带，带动整个系统运转。由于输送机使用摩擦力对动力进行传导，其在起动时间上会相对较慢。托辊式带式输送机受托辊支撑结构的影响，其智能化过程中需要实时感知托辊运行状态、带式输送机上方的物料状态、智能调速及故障诊断。

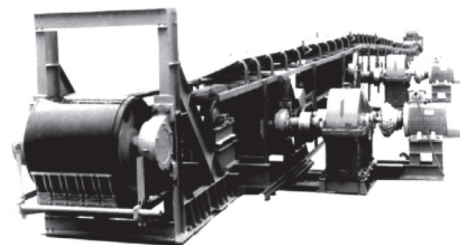


图1 托辊式带式输送机<sup>[2]</sup>

Fig.1 Idler belt conveyor<sup>[2]</sup>

2)气垫带式输送机。气垫带式输送机利用压力气体来承担输送带和物料的载荷，通过图2所示的试验分析可知，相比于托辊式带式输送机，其运行阻力明显的降低。

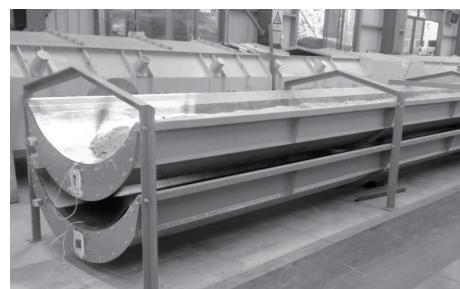


图2 气垫带式输送机试验台<sup>[4]</sup>

Fig.2 Air cushion belt conveyor test bench<sup>[4]</sup>

气垫带式输送机基本结构如图 3 所示, 其用带孔的盘槽来代替托辊, 通过风机给气室输送有压力的空气, 气室内的空气会通过盘槽上的孔溢出, 在输送带和盘槽之间形成气垫来对输送带进行支撑作用。

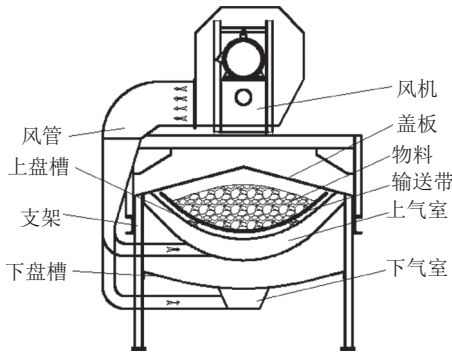


图 3 气垫带式输送机结构<sup>[4]</sup>

Fig.3 Structure of air cushion belt conveyor<sup>[4]</sup>

气垫带式输送机最早由荷兰特文特大学 JONKERS 教授<sup>[5]</sup>提出, 之后荷兰 Sluis 公司、英国 Simon-Carves 等公司对其进行转化应用并逐步形成产品。太原科技大学和山西原平机械厂在 20 世纪 80 年代共同开发了国内首台气垫式输送机。随后国内企业开始对气垫带式输送机进行研制、生产和使用<sup>[5]</sup>。针对气垫带式输送机, 智能化过程中需要根据物料负载实时调节气流大小, 保证输送带运行时处于一个最佳的低阻状态<sup>[6-8]</sup>。但智能化控制难度较大。

3)液垫带式输送机。液垫带式输送机是在传统托辊式带式输送机和气垫式带式输送机的基础上创新发展出来的, 其基本结构如图 4 所示, 包括一些与托辊带式输送机相同的部件, 如驱动辊、换向辊、中心支撑、头部支撑、尾部支撑和下辊; 一套以水垫带式输送机为特征的水垫装置, 包括支撑槽、喷嘴、液压系统等。当水垫带式输送机开始工作时, 由水泵向总水管供水, 通过旁路后, 从固定在支撑槽上的喷嘴喷射到输送带和支撑槽之间的空间。在输送带和支撑槽之间可以稳定地形成水垫, 水从支撑槽中通过回流管流回水箱, 下输送带由下辊支撑, 水垫有足够的压力形成静水润滑, 以分离输送带和支撑槽。因此, 输送带与支撑槽之间的摩擦更小, 功耗也会明显降低<sup>[9]</sup>。

液垫带式输送机由苏联科学家首次提出, 输送带由水垫支撑, 具有运动阻力小、承载能力高、运输平稳、安全可靠等特点, 其应用范围、技术性能、运行状况、经济效益和社会效益均优于气垫带式输送机<sup>[10-12]</sup>。液垫带式输送机存在液体浸湿输送带导致驱动力降低, 智能化过程中需要对驱动力进行实时

监测, 对水泵压力和流量进行自动调节, 存在智能化控制难度大和低温工作环境下使用受限等问题, 仍需要进行深入的研究。

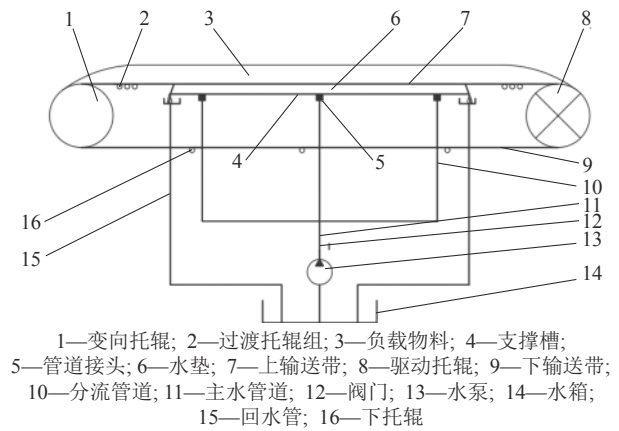


图 4 液垫带式输送机的工作原理<sup>[9]</sup>

Fig.4 Structure diagram of liquid cushion belt conveyor<sup>[9]</sup>

4)磁悬浮带式输送机。磁悬浮带式输送机的结构类似于托辊式输送机, 仅在承载部分采用了磁性支承, 从悬浮机理可以分为电动悬浮型(EDS)和电磁悬浮型(EMS)2 种<sup>[13-15]</sup>。前者利用永磁体间斥力来实现悬浮, 后者则是利用电磁吸力实现悬浮。这两种方式各有优劣, 前者由于磁场复杂多有耦合和漏磁现象并且永磁体不可调控, 后者通过通电产生磁力, 虽然可控, 但电磁线圈容易发热, 能耗也较大。研究人员将永磁体与电磁铁进行组合进行磁电混合悬浮的研究, 对磁体结构进行优化, 对磁悬浮的能耗节约及可应用性的提高有着重要意义。

安徽理工大学设计的磁电混合悬浮带式输送机的结构如图 5 所示, 该结构中悬浮支撑系统如图 6 所示。其主要通过永磁体提供基础主悬浮力, 电磁铁部分用于提供调节力, 主悬浮力和调节力的叠加最后得到总悬浮力。总悬浮力将悬浮块浮空, 悬浮块将输送带拉至空中进行无接触运动, 大幅减小了运行过程中的摩擦阻力, 降低了能量损耗。

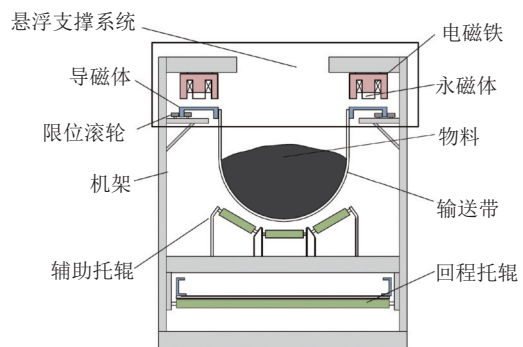
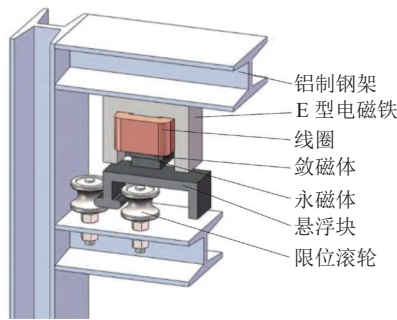


图 5 磁电混合悬浮带式输送机结构<sup>[17]</sup>

Fig.5 Structure of magnetoelectric hybrid suspension belt conveyor<sup>[17]</sup>

图6 悬浮支撑系统结构<sup>[17]</sup>Fig.6 Structure of suspension support system<sup>[17]</sup>

磁悬浮带式输送机具有运行阻力小,能耗低,承载能力大,运行平衡的优点,但其也存在着输送带跑偏和输送带变形的问题,因此其智能化技术需求是解决自动调偏控制<sup>[16]</sup>和输送带变形问题<sup>[17]</sup>。

带式输送机的结构形式改变会导致智能化技术应用难度增加,受煤矿使用条件及技术安全可靠性的影响,托辊式带式输送机仍然是目前带式输送机智能化技术应用的主要对象。

## 2 带式输送机智能化技术现状及难点

以托辊式带式输送机为对象的带式输送机智能化是指利用信息化、自动化、物联网和大数据等技术手段实现输送系统的安全可靠、绿色高效运行。节能高效是带式输送机智能化的目标,煤流量智能感知是实现带式输送机智能调速的依据,健康状态智能监测是带式输送机智能化运行的保障,安全可靠运行是带式输送机智能化的前提。上述关键技术的发展直接影响带式输送机智能化实施的最终效果。

### 2.1 带式输送机智能节能运行技术

传统的带式输送机在实际生产大多以恒定速度运行,但在实际生产中,输送机并不是一直满载,当输送带载重减少时,输送机仍以额定速度运行,势必会造成电能的浪费,输送机的实际工作效率只有40%~60%<sup>[2]</sup>。在国家“节能减排”政策下,为了节约煤矿生产成本,需要对带式输送机智能节能运行技术进行了广泛且深入的研究。

带式输送机的智能节能运行技术主要通过输送系统控制优化来实现即根据输送机的实际输送状态进行输送机速度等相关系统参数的控制进而使输送机效率最大化,减小单位输送量的平均功率,提高输送机动力的利用率,达到带式输送机绿色节能,智能运行的效果。

现有的输送系统控制优化节能技术包括对输送机输送的流程、功率和速度进行优化控制<sup>[18]</sup>,主要技

术方法有带式输送机减电动机节能技术、带式输送机系统启动流程优化节能技术<sup>[19]</sup>、异步电动机“Y-Δ”接法变换节能技术和交流变频节能技术。

1)带式输送机启动流程优化节能技术。带式输送机系统启动流程优化节能技术是针对多个输送机启动顺序进行优化。通常情况下,整个输送线路系统中的输送机在输送开始时会同时启动,而物料输送时会有一个滞后效应,当物料仅在第一级输送机上传输时,后面的多个输送机都在空载运行,引起电能浪费。而带式输送机启动流程优化节能技术是通过物料位置的感知,在物料接近上一级输送机末端时,再启动下游相邻输送机直到全部启动完成。该启动方式有效避免了多个输送机空载运转造成的电能浪费,提高了运输中的电能利用率,节约了生产运营成本,延长设备的使用寿命,具有良好的应用前景。

2)带式输送机减电动机节能技术。带式输送机减电动机运行节能技术是根据输送机所带负载大小,更改驱动电动机数量以达到节能的效果。传统作业方式中,无论物料位置如何、输送机是否满载,所有电动机均保持运行状态,造成电能的浪费。减电动机节能技术根据智能感知输送机上物料位置和当前负载大小来控制电动机的启动数量,达到一定范围内合理的输出功率进而实现节能的目标。

带式输送机减电动机节能技术的难点在于增减电动机的条件和增减电动机的数量。目前主要通过电动机电流检测法和位置检测法进行增减电动机条件的判断。当输送机负载变化时,输送机的工作电流会产生一个较大的变化,可以通过对电动机电流的变化监测来判断输送机的负载量;位置检测法则是针对不均匀少量物料的情况,当物料达到一定的位置时,输送机会对电动机进行选择性开关,从而实现节能。

3)异步电动机Y-Δ接法变换节能技术。异步电动机在启动过程中,会产生较大的电流,为减小启动电流的同时产生一定的启动转矩,采用异步电动机Y-Δ接法变换节能技术,其中Y-Δ接法是指定子绕组的接法。当电动机启动时,采用Y形连接,来降低启动电压,待电动机启动后,再采用Δ接法使得电动机全压运行<sup>[20-21]</sup>。但由于输送机间断输送物料的情况较少,而且电动机的频繁启动会影响电动机的使用寿命,所以其在实际应用中有一定的局限性。

4)交流变频调速节能技术。变频节能技术的基本原理是根据输送机当前的运输状态,包括物料重量、物料分布等状态,相应改变输送机的工作电源频

率以实现电动机转速调节,进而实现输送机的节能运行和延长设备寿命的目标<sup>[22]</sup>。电动机的转矩是电动机内部的磁通与转子中电流相互作用产生的,为了保持电动机最大转矩不变,电动机的频率和电压需要同时进行调整,满足电动机恒转矩负载的运行需求。目前,交流变频调速节能技术是输送系统主流控制优化节能技术,为了更加精确和高效地运用交流变频调速节能技术对节能进行控制,研究人员开展了大量的研究工作。文献 [23] 采用重量信号作为反馈信号,设计了基于 PLC 控制下的变频节能系统,实现了闭环控制。文献 [24] 采用 BP 神经网络原理建立了输送机的节能模型并基于遗传算法与神经网络对该节能模型进行了相关参数优化,最终通过模糊控制算法在带式输送机上实现了变频调节的节能运行。文献 [25] 将矿井自动化平台、PLC 控制技术和变频调速控制技术相结合并针对具体的煤矿生产系统进行了策略调整,提高了主斜井带式输送机的控制精度和节能效果。文献 [18] 在建立带式输送机 BP 神经网络能耗优化模型的基础上采用了粒子群优化算法对模型参数进行了优化,最终通过基于 PLC 的模糊控制器实现了根据煤量大小对输送带速度进行自动调节的智能控制。

交流变频调速技术相对于其它调速技术,在速度调节范围、多机调节、功率平衡等方面有着显著的优越性,因此该技术应用在输送机上有着良好的发展前景。

## 2.2 带式输送机煤流智能感知技术

在煤炭主运系统中,煤流量是衡量主运系统运力的主要指标,也是主运系统调速的关键参数。实现煤流量在线检测可以节省主运系统运营成本,达到节能减排的目标。目前,在煤流量检测领域,实现方式主要分为接触式检测和非接触式检测。接触式检测方法主要是电子皮带秤检测法;非接触式检测方法主要分为核子秤、超声波、激光雷达、单目视觉法、双目视觉法、结构光视觉法。

1) 电子皮带秤检测法。20 世纪 60 年代末,我国开始应用电子皮带秤作为带式输送机称重仪器<sup>[26]</sup>,经过 60 a 的发展,电子皮带秤已经成为在工业现场应用的成熟仪器<sup>[27]</sup>。电子皮带秤一般由称重传感器、机械秤架、测速传感器和皮带秤主机等部分组成。其工作原理是当输送带输送物料时,物料、机械秤架、托辊和输送带的重量共同作用在称重传感器上,称重传感器将采集到的重量信号放大调整和 A/D(模拟信号/数字信号)转换之后发送给皮带秤主机,图 7 为

电子皮带秤流量计的原理图<sup>[28]</sup>。测速传感器对输送带的速度进行测量并将速度脉冲信号发送给皮带秤主机。皮带秤主机对获得的速度信号和重量信号进行处理,得到输送带上瞬时物料流量值,利用上位机软件实现流量数据统计相关功能。电子皮带秤存在的问题有:输送带张力、自重、刚度及输送带安装角度等诸多因素都会影响测量精度,实际使用中为保证计量精度,需经常校准和维护<sup>[29]</sup>。

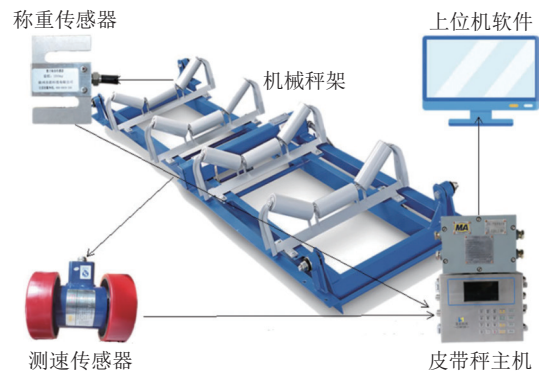


图 7 电子皮带秤流量统计原理<sup>[31]</sup>

Fig.7 Schematic of electronic belt scale<sup>[31]</sup>

2) 核子秤法。从 20 世纪 80 年代开始,我国开始引进核子秤<sup>[30]</sup>。图 8 为核子秤煤流量计量原理图,核子秤的工作原理是:通过核子秤的放射源稳定放射  $\gamma$  射线,射线穿透带式输送机后,被下方的探测器接收。当输送带有煤运行时, $\gamma$  射线会被堆煤吸收,探测器接收到的  $\gamma$  射线强度减弱。通过探测器输出信号的强度来反映输送带上物料的多少<sup>[31]</sup>。核子秤存在的问题主要有:放射性物质存在很大的安全隐患,安全措施要求十分严格,一旦出现问题,危害极大;输送带上煤的成分、含水率以及堆积形状不同对  $\gamma$  射线的吸收也不同,这对核子秤的精度有很大的影响;放射源按照指数规律自然衰变,随着使用时间的增加,核子秤的计量精度会下降<sup>[32]</sup>。

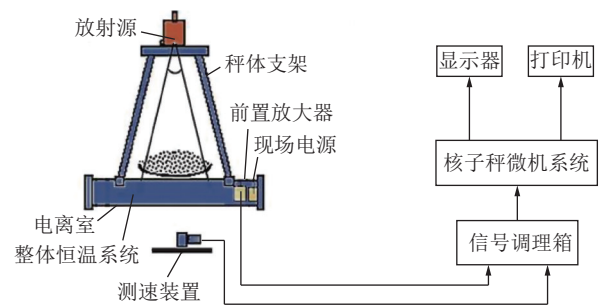


图 8 核子秤煤流量统计原理<sup>[34]</sup>

Fig.8 Schematic of nuclear belt scale<sup>[34]</sup>

3) 超声波检测法。超声波测距仪利用超声波的较高频率和较好的定向性和反射性特性<sup>[33]</sup>。超声波

检测煤流量的原理如图9所示,超声波测距仪检测煤流量的原理是把输送带上堆煤表面近似看成平面,堆煤截面近似成一个梯形,利用超声波测距仪分别测量空载时输送带底部和负载时输送带上煤表面的高度,利用托辊长度、托辊夹角、堆积角等参数计算煤的截面积,再结合密度和输送带运行速度计算煤流量。与电子皮带秤、核子秤相比,超声波检测法在效率、安全性上都有提高,但依然存在以下问题:把堆煤表面近似为平面和堆煤截面近似为梯形的方式大幅降低了计量精度;超声波测距仪具有声波的扇形发射特性,回波较多,检测时容易出错<sup>[34]</sup>;超声波测距仪检测频率较低,不适用于高速煤流精准计量<sup>[35]</sup>。

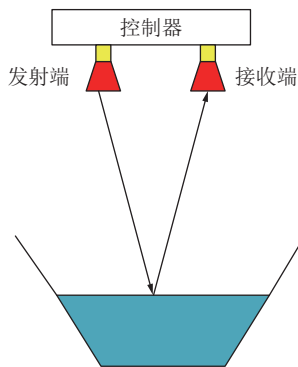


图9 超声波检测煤流量原理<sup>[36]</sup>

Fig.9 Schematic of ultrasonic detection of coal flow<sup>[36]</sup>

4)激光雷达法。激光雷达法相较于超声波法,采集速度更快,精度更高。激光雷达检测煤流量的原理如图10所示,激光雷达发出多点构成的激光线,形成扫描扇面,经堆煤表面发射后接收,计算反射时间和距离,组成一帧点云,分别计算空载扇形面积和负载扇形面积,做差即可得到煤流截面积,再结合编码器检测输送带速度,换算煤流量<sup>[36]</sup>。2019年,SICK公司Bulkscan采用SICK LMS511/111测量激光雷达硬件技术,基于时间飞行原理,对传送带上物体散料体积和流量进行非接触式测量,通过发送与接收激光脉冲的时间差,计算出2D轮廓,结合输送带速度,生成体积流量信号,该方法采集点云最大帧率75 fps,可实现低速场景下的应用<sup>[37]</sup>。激光雷达法的三维激光扫描雷达元器件成本相对较高,对于井下恶劣环境的适用性有待进一步提高。

5)单目视觉法。近年来,随着计算机视觉技术的发展,应用视觉技术检测煤流量成为研究热点。单目视觉法是指仅利用一台摄像机完成视觉定位和感知任务,其深度感知能力受到限制,但视野会增加。2003年,文献[38]提出一种煤矿井下带式输送机煤

流量图像识别方法,使用小波分析和神经网络结合的方法提取煤流边界,计算煤流量。2018年,文献[39]通过获取负载状态下输送带堆煤的视频流,并通过等间隔从视频流中抽取图像帧,利用2个图像帧在预设输送带检测区域内对应像素处像素点的灰度差值获取灰度差分图像,对灰度差分图像进行分析并分割,确定煤流量检测边界,估算煤流量。2020年,文献[40]提出了一种基于机器视觉的带式输送机煤流量自适应检测方法,如图11所示,采用基于小波变换的融合算法和otsu算法,实现快速准确的图像分割和增强,再对分割图像进行轮廓检测、面积信息提取、煤流量计算等处理,实现煤流量检测。同年,文献[41]提出了基于目标检测的煤流量检测方法,利用Retinex图像增强结合卷积神经网络方法对煤矿带式输送机监控视频进行图像增强,利用Dense-Yolo进行煤流量分级检测和非煤异物的识别。单目视觉法对煤流量进行定性检测,实现煤量多少的分级,无法实现定量检测,仅可用于带式输送机模糊控制。

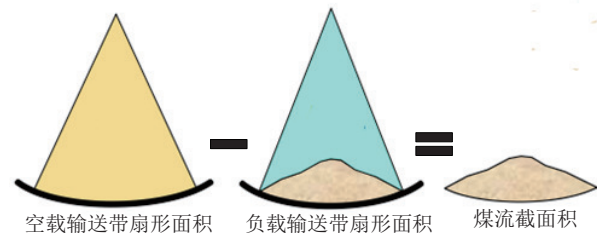
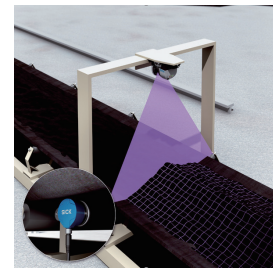


图10 激光雷达检测煤流量原理<sup>[39]</sup>

Fig.10 Schematic of coal flow detected by lidar<sup>[39]</sup>

6)双目视觉法。双目立体视觉是计算机视觉的一个重要分支,模拟人眼对深度的感知能力,通过2台相机同时获取同一场景的图像对,利用双目视觉原理,计算场景中的三维坐标,再利用三维坐标针对具体需求进行检测。2014年,文献[42]利用双目立体视觉静态测量小型煤堆的体积,利用SURF特征进行立体匹配,计算速度和精度都不高,未能实现带式输送机上煤的动态测量。2017年,文献[43]提出了一种由运输煤料识别模块、三维信息提取模块和煤量计算模块组成的基于双目视觉深度感知的带式输送机煤量检测方法,如图12所示。受限于煤料图

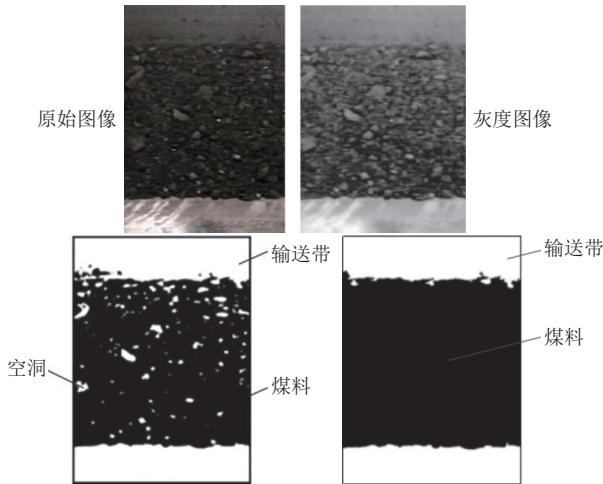


图 11 单目视觉法检测煤流量<sup>[43]</sup>

Fig.11 Coal flow detection by monocular vision method<sup>[43]</sup>

像立体匹配的速度, 未能实现高速运行状态下带式输送机的煤量识别。2021 年, 文献 [44] 提出了基于深度学习的带式输送机煤流量双目视觉测量方法, 构建基于深度学习的煤料立体匹配 PSM-Net 模型, 获取煤料体积, 依据堆煤二维平面特征提出基于离散元法的煤料堆积填充率计算方法, 计算煤料堆积密度, 依据煤料体积和堆积密度计算带式输送机煤流量, 该方法计算速率达到 1.1 s/帧, 不足以完全覆盖高速应用场景。双目视觉法可实现煤流量定量检测, 但其测量精度不高, 测量速度慢的问题仍然无法满足实际应用场景。

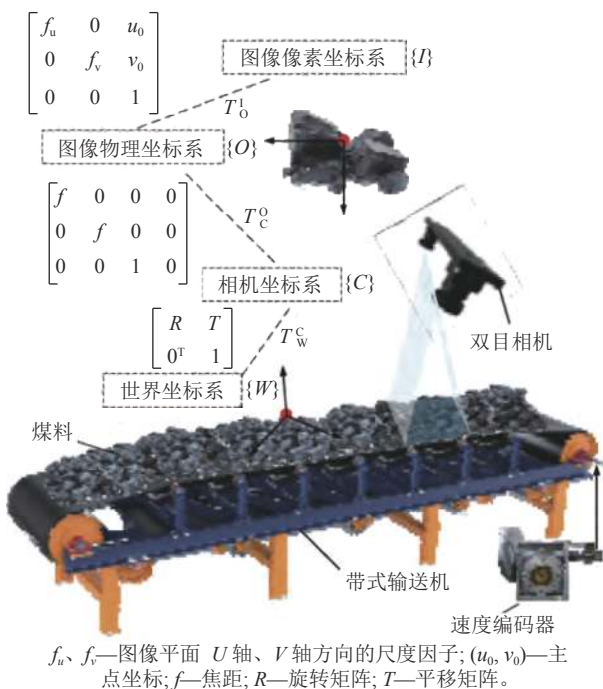


图 12 带式输送机煤流量双目视觉测量系统<sup>[46]</sup>

Fig.12 Binocular vision measurement system for belt conveyor<sup>[46]</sup>

7)结构光视觉法。结构光视觉法是通过主动发射结构光到被测物体表面, 通过结构光的变形来确定被测物的尺寸参数<sup>[45]</sup>。2017 年, 文献 [46] 在三角测量原理的基础上, 提出线结构光动态煤炭计量方法, 用于粒煤和末煤的体积测量, 处理速度为 30 fps, 适用于低速场景下小颗粒煤量测量。2020 年, 文献 [47] 利用激光发射器和数字摄像头获取实时煤流截面图像, 通过空载和负载状态下的煤流轮廓图像解算封闭的煤料包络曲线, 计算煤料包络曲线内像素点数占额定负载状态下包络曲线像素点数的比例形成瞬时煤流量, 如图 13 所示, 图像处理和煤流量计算过程都在地面控制中心进行。

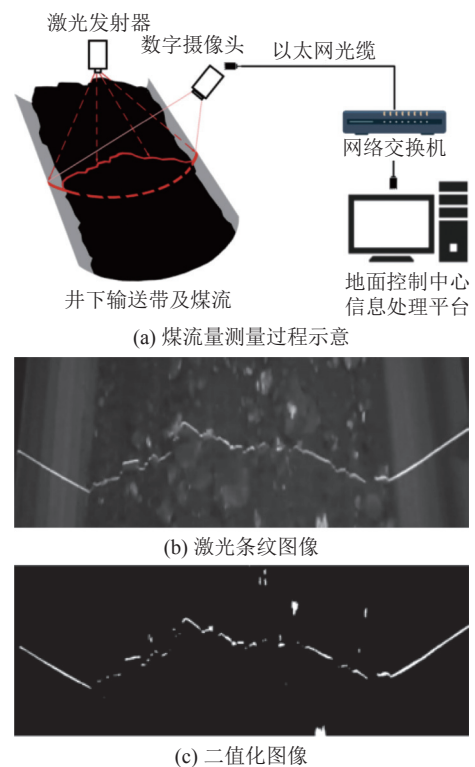


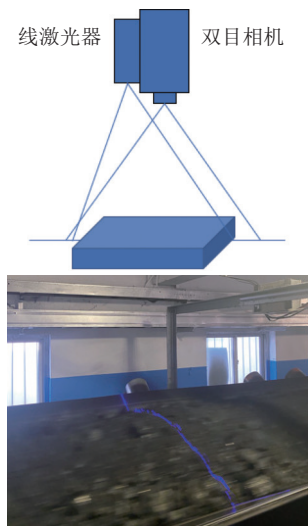
图 13 单目结构光测量煤流量<sup>[50]</sup>

Fig.13 Measurement of coal flow by monocular structured light<sup>[50]</sup>

2021 年, 文献 [48] 利用双目立体视觉结合结构光视觉的方法, 采用 2 个相机获取煤流截面图像, 利用双目立体视觉模型完成二维图像坐标到三维坐标的转换, 安装测速装置获取输送带运行速度, 通过对单位时间内堆煤点云均匀采样积分计算煤流量, 如图 14 所示。该方法利用 FPGA 和 ARM 实现硬件加速, 最大深度数据生成速度达 2 000 fps, 可实时获取稠密的煤流点云, 实现高带速下煤流量准确在线检测。

### 2.3 带式输送机健康状态智能监测技术

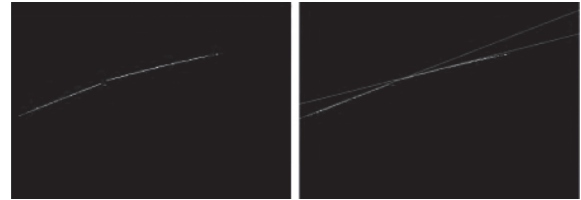
带式输送机是矿井生产的主要运输设备, 在煤

图14 双目结构光检测煤流量<sup>[51]</sup>Fig.14 Detection of coal flow by binocular structured light<sup>[51]</sup>

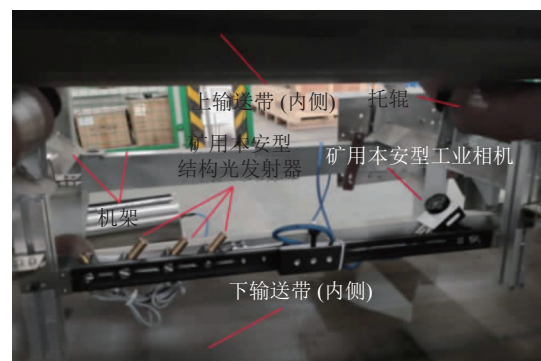
矿恶劣的环境下连续高强度运行,易发生纵撕、跑偏、托辊损坏、打滑、火灾等事故<sup>[49]</sup>,其中,多数事故为设备故障未能及时发现所导致。若能在设备故障早期或发生前进行预警,将有效提高煤流运输过程的安全性,保障煤矿连续、稳定、高效生产<sup>[50]</sup>。传统的带式输送机故障诊断与识别依靠人工巡检,由于矿山作业环境复杂,巡检作业强度大、时间长,巡检的效果无法保障。近年来,随着煤炭行业数字化转型升级发展,加快智能化建设步伐,许多科研单位及企业针对带式输送机的智能化巡检与故障诊断开展研究,以减少巡检人员数量和工作量,提高巡检效果。相关传感器及检测系统主要分为固定式安装和依托巡检机器人布设两类,目前,针对带式输送机故障检测的研究主要包含:

1) 输送带纵撕检测技术。对于输送机输送带纵向撕裂的检测,目前多采用机器视觉方法,随着硬件设备算力的提高与算法的改进,检测系统可具备较高的实时性,同时,非接触式的测量方式使得系统便于现场安装。文献<sup>[51]</sup>采用LED面光源照明,CCD相机采集输送带下方图像,对图像进行预处理后,使用Otsu算法对图像进行分割,统计前景点的数量判断输送带是否发生撕裂。文献<sup>[52]</sup>采用图像处理方法,基于FAST角点检测和Hough变换的直线检测算法,检测输送带是否存在纵向撕裂,并结合速度传感器确定撕裂位置和长度,图15为基于Hough变换的纵向撕裂检测效果。文献<sup>[53]</sup>采用Gabor滤波对采集到的输送机输送带图像进行处理,突出输送带撕裂位置的图像纹理特征,弱化输送带表面划痕、磨损等干扰带来的影响,以提高输送带撕裂痕迹相对

背景纹理不明显时的检出效果。文献<sup>[54]</sup>通过组合使用MobileNet和Yolov4网络,实现了对撕裂、表面磨损等多种输送带损伤类型的识别,轻量化的网络设计使得识别速度可达70.26 fps,模型使用其他现有文献中的输送带损伤图像进行测试,证明具有较好的泛化能力。

图15 基于Hough变换的纵向撕裂检测<sup>[55]</sup>Fig.15 Longitudinal tear detection based on Hough transform<sup>[55]</sup>

由于输送带划痕、表面残煤等的影响,图像处理方法难以直接将撕裂区域从背景中分割出来,结合线激光的纵向撕裂检测逐渐成为研究热点<sup>[55-56]</sup>。文献<sup>[57]</sup>提出了一种采用线激光辅助的输送带纵向撕裂图像识别系统,通过提取采集图像中激光条纹骨架,计算激光条纹骨架单像素点的波动情况,判定输送带的纵向撕裂情况。文献<sup>[58]</sup>提出了一种基于多道线性激光的带式输送机纵向撕裂检测方法,如图16所示,向输送带表面投射多条激光条纹,采用工业相机采集激光条纹图像,通过提取激光条纹中心线并分析其特征来判断是否发生纵向撕裂。

图16 基于多道线激光的纵向撕裂检测<sup>[61]</sup>Fig.16 Longitudinal tear detection based on multi linear lasers<sup>[61]</sup>

2) 输送带跑偏检测技术。输送机输送带跑偏检测通常采用行程开关检测输送带的偏移情况<sup>[59]</sup>,当输送带发生跑偏,触碰到行程开关,触发报警电路或控制紧急停机。近年来,机器视觉技术也被应用于输送带的跑偏检测。文献<sup>[60]</sup>采用线阵CCD相机采集输送带实时图像,采用灰度平均法分割输送带与背景,并设计了跑偏角和偏移量特征来表征输送



带的偏移情况。文献 [61] 使用 CMOS 相机采集输送带图像数据,设计了一种基于坐标统计法和分组近似法相结合的输送带跑偏识别方法,并在 FPGA 中实现,可脱离工控机独立工作,实时检测输送带的运行状态。文献 [62] 在输送带上方安装工业相机和光源,对采集到的图像进行预处理后,使用 Canny 算法进行边缘提取,采用 Hough 变换对输送带的边缘直线进行特征提取和处理,从而实现输送带跑偏状态的判断。

文献 [63] 基于 VGGNet 模型构建了多任务卷积神经网络以实现带式输送机输煤量和跑偏的同步检测,输煤量检测与跑偏检测共享同一个网络底层结构与参数,减小了模型的体积,提高了运行效率。跑偏识别模型将输送带跑偏划分为“左跑偏”“无跑偏”“右跑偏”3类,检测效果如图 17 所示。

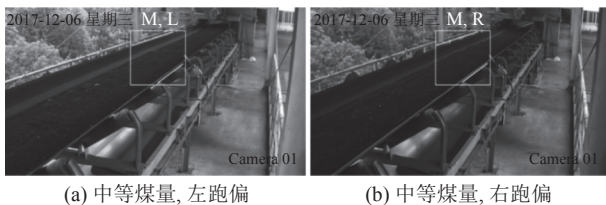


图 17 基于图像识别的输送带跑偏检测<sup>[66]</sup>

Fig.17 Deviation detection of belt conveyor based on image recognition<sup>[66]</sup>

3) 输送带托辊故障检测技术。托辊是带式输送机的重要组成部分,当托辊发生故障时,若不能及时发现并处理,容易造成严重的火灾事故。托辊的故障诊断与识别,一般依赖于人工巡检,由于带式输送机托辊数量众多,巡检作业量大,容易出现漏检和误检等现象。可以依据托辊故障时的声音特征和温度特征进行托辊的故障检测。文献 [64] 使用 FPGA 作为核心控制器,采集托辊运行时的音频信号进行还原与调制,提出了一种基于电力载波通信的带式输送机托辊运行状态监测系统。文献 [65] 使用巡检机器人搭载声音传感器采集托辊运行的声音信号,选取时域信号均方根、反峰值等特征参数进行托辊轴承异常的初步判断,再结合 FFT 峰值检测进一步确认托辊轴承是否异常。

在现场嘈杂的背景声音中提取故障托辊的声音特征还存在技术难题,且托辊故障并非均表现出声音的异常,加之温度传感器现场布设困难<sup>[66]</sup>,所以采用热成像、计算机视觉等技术检测托辊的故障成为主要的研究方向<sup>[67]</sup>。文献 [68] 采用红外热像仪采集输送机托辊和滚筒的图像,基于改进的区域生长法对图像进行分割,计算图像的 Zernike 矩和灰度共生

矩阵特征,使用支持向量机对图像进行分类,设定三级温度阈值,实现托辊与滚筒的故障检测与预警,采集的不同状态托辊红外图像如图 18 所示。文献 [69] 使用改进的 CNN+LSTM 双流网络模型对托辊异常运转状态进行识别,将托辊运行状态划分为正常、缓速和静止 3 类,单次检测平均耗时 8.12 s。

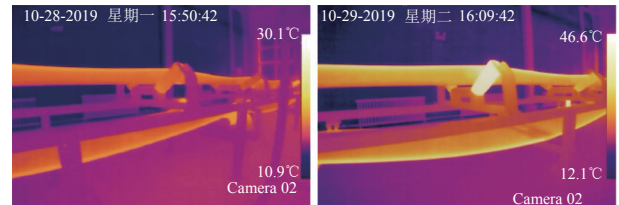


图 18 不同状态托辊红外图像<sup>[71]</sup>

Fig.18 Infrared images of idlers in different states<sup>[71]</sup>

4) 输送带打滑检测技术。带式输送机正常运行时,传动滚筒与输送带之间没有相对运动,当发生打滑故障时,会造成输送带与驱动滚筒之间的牵引摩擦力减小,长时间未纠正会使得滚筒空载转动引起滚筒发热严重,甚至会引发火灾<sup>[70]</sup>。针对输送带打滑时滚筒温度会发生明显变化的特征,对输送带打滑的检测可通过在滚筒布置温度传感器实时输出滚筒温度变化信号,结合主滚筒转速、从动滚筒转速以及托辊转速的变化,通过多源数据的对比分析实现输送带打滑的准确检测和预警<sup>[71]</sup>。

## 2.4 带式输送机运行环境及安全保障技术

带式输送机是实现矿物在各个采矿环节之间流通的主要运输装备,从采煤工作面到运输巷道,再到洗煤厂、焦化厂等后续处理的环节均有分布。由于输送带分布范围广,与周围环境接触和人员交互的频率高,环境和人员的安全问题不得不引起重视。输送带运输过程中噪声和粉尘是最直观的环境问题,此外输送带运行过程中产生的火灾由于巷道特殊的结构传播更为迅速,危害更大。在输送带高速运动过程中,人员的防护同样是重要问题。因此,带式输送机运行环境及安全保障技术也是带式输送机实现智能化运行的关键技术之一。

1) 带式输送机噪声防控技术。输送带运行过程中,其带面速度可达到几米每秒,电动机的运转、托辊的转动、输送带的摩擦和矿物的震动均会产生噪声。通过在带式输送机沿线加装音频振动传感器,当噪声值超过预设安全值时,系统会进行预警,并提示巡检人员从托辊、输送带、物料及驱动部等噪声源进行排查。托辊起到支撑和导向输送带的作用,在转动过程中会与转轴之间发生摩擦,而载荷的变化则会引起辊子与转轴之间的震动。托辊排布密集,

是带式输送机噪声的主要来源。输送带具有一定的弹性,但长时间的运行会发生老化,输送带的打滑和撕裂也会产生异响。矿石在输送带上运动,在辊子正上方和辊子之间的运动,由于重力作用导致的输送带变形会引起矿石的规律震动,矿石之间的相互摩擦和撞击,以及与带面之间的摩擦和撞击同样会产生噪声。通过分析不同噪声源的音频特征值可以初步判断噪声产生原因,通过改善机械传动、增加减振,更换材料、提高装配精度等方式去降噪<sup>[72]</sup>。

输送带驱动部分主要由电动机和减速机构成,采用更高精度的电动机和齿轮是减少噪声的直接方法。选择更大功率的电动机以减少因为载荷分布不均而引起的速度变化,可降低啸叫和震动<sup>[73]</sup>。电动机和减速机由于安装问题和长时间的运行导致的螺栓松动也会引起震动,应当定期的检修和更换老化的零部件。电动机的伺服系统和驱动系统需要和电动机匹配,变频器的选用应按照被控对象的类型、调速范围、静态速度精度、启动转矩来考虑<sup>[74]</sup>。减速机齿轮之间的震动噪声可通过增大齿面接触面积,选用斜齿轮等方式保证齿间的连续接触,减小冲击。

辊子可采用更精密的轴承以减小摩擦阻力,同时注意润滑膜的添加和轴承位置的防尘处理。辊子所在的支架采用铸铁等材料提高稳定性,同时有利于震动的传递。支架底部增加弹性垫层等阻尼元件增加支架稳定性的同时也可起到吸收震动的作用。轴承噪声难以避免,可在轴承、托辊内外壁增加隔音套或消音器来降低噪声的传播,在滚筒外加工轴向沟槽,减少输送带与托辊接触产生的音爆<sup>[75]</sup>。

带式输送机托辊多为钢制材料,更换本体材料为橡胶或尼龙可显著减小噪声,其中橡胶托辊的效果更为明显,相对金属托辊的噪声能够减小约15%<sup>[76]</sup>。高分子材料的使用在摩擦系数和抗腐蚀性能上也有明显的优势,减少辊子表面的腐蚀变形引起的震动噪声。近些年,陶瓷材料也逐渐被用来制备托辊的表面材料,在保证刚度的同时相对于金属材料有更小的摩擦阻力,相对于高分子材料则具有更大的抗磨损性能。

2)带式输送机运行过程中粉尘抑制技术。带式输送机的运输过程是煤矿中粉尘产生的主要位置之一。带式运输系统包括矿物的装载点、卸载点和中间的运输过程。装载点矿物落到输送带上因为较大的冲击会产生大量粉尘,矿物的运动也会带动气流向周围扩散。卸载点与装载点情况类似。矿物在与运输过程中,输送带的震动扬起粉尘,而矿物高速运动形成的气流促进了粉尘的传播。在输送带转载位

置还会产生大量的落煤,由于无法对落下的煤尘进行清扫,可能形成严重的煤尘二次飞扬,不但对作业人员造成健康损害,严重时还会引发爆炸事故<sup>[77-78]</sup>。

目前,通过在带式输送机转载点增加粉尘检测装置,同时与抑尘装置进行智能联动,矿井下最常用的除尘方法即安装水雾装置,通过对扬尘位置进行水雾喷洒不仅能够润湿矿物表面,抑制粉尘的脱离,也可通过粘附空气中的粉尘颗粒降低粉尘浓度。水雾装置的喷洒方式和喷洒量可根据输送带运行速度及产尘量进行自动调节,达到最佳的抑尘效果<sup>[79]</sup>。

另外一种简单的方案是直接将输送带置于封闭空间中或在输送带上安装防尘罩,但成本相对较高。也可仅在装卸矿物的位置封闭装置,在降低成本的同时控制粉尘产生的主要源头<sup>[80]</sup>。此外,输送带转载处落煤位置需要增加喷雾和隔离装置以减小粉尘的扩散。针对落煤现象,应加装接粉箱,定期清理,采取清扫器扫煤,配合除尘器来实现除尘的目的。在带式输送机机尾加装接料除尘装置,避免二次扬尘<sup>[81]</sup>。

输送带的运动速度和风速影响粉尘的迁移速度,魏德宁等<sup>[82]</sup>通过数值仿真研究了风速和煤炭含水量对巷道内粉尘浓度的影响,结果显示运输巷内粉尘浓度随巷道风速并非线性关系,当巷道风速在1.67~2.5 m/s时,巷道内的粉尘浓度有明显的下降;粉尘浓度还随煤炭含水率的增加而减少,当含水率从4%增加到5%时,巷道内粉尘浓度大幅减小。

3)带式输送机火灾监测技术。矿井火灾是煤矿5种常见灾害之一,由于工作环境复杂且长时间连续的运行,带式输送机因如滚筒打滑、托辊故障、煤粉自燃和外界意外火源等诱发火灾<sup>[83]</sup>。输送带火灾作为矿井巷道火灾的一种,具有突发性强、涉及范围广、发展迅猛、灭火和救护困难大等特点。如果能及时地发现火情,预先准确掌握井下巷道火势发展趋势、烟气转移规律和不同环境条件下火灾的燃烧强度、影响范围,则可以减小因输送带火灾造成的人员和财产损失。

运输巷火灾的发生和发展过程中,由于通风和热动力的相互作用下,尺度效应对火灾期间的风烟流演化影响很大。许多学者通过数值计算模拟了巷道内输送带运行过程中气流的分布对火灾和烟雾扩散的过程,探究了通风条件和水雾装置对火势蔓延的影响<sup>[84]</sup>。获得的流场信息能够为通风参数的设计提供有效指导。

运输巷发生火灾会产生大量的浓烟毒气,巷道内风速较小时,巷道内火灾产生的高温有毒有害气体对火源下游巷道内空气污染严重,随着巷道内风

速增大,排出烟气的速率有所增大,对火源下游巷道的污染会减轻,巷道气流的温度也随之降低,排烟的效果更好<sup>[85]</sup>。

通过检测输送带周围的温度和利用光纤传感器<sup>[83]</sup>、视频技术<sup>[86]</sup>等监控输送带周围的情况,利用机器学习判断火源和扩散过程,可及时预警并控制自动灭火装置进行火灾的消灭<sup>[87]</sup>。另外通过传感器监控巷道内一氧化碳、甲烷等有毒气体的浓度,可用于通风设计和人员疏散路线的优化。

4)带式输送机作业人员安全保障技术。输送带运输产生的噪声、粉尘、火灾等问题不仅是对环境的危害,也威胁着井下工人的健康和生命安全。长时间暴露在高强度的噪声环境中会引起听力下降甚至永久的听力丧失,而粉尘是导致尘肺病的主要原因。

噪声和粉尘的问题不仅要从源头上治理,人员防护装备也是解决这些问题的关键方法。噪声的防护可通过耳塞、耳罩类防护装备达到显著的降噪效果,而粉尘的问题则可通过佩戴口罩、防毒面罩等装备进行防护。全封闭类的个人防护装备也逐渐在矿井中配备,将提供更高等级的防护服性能<sup>[88]</sup>。

此外,高速运动的带式输送机在与工人交互过程中存在很多安全隐患,比如托辊将工人异物或工具卷入机身造成的人员伤亡<sup>[89]</sup>、在静止输送带上休息的工人被突然启动的输送带卷入设备造成的事故。这类问题可通过加装隔离罩和增加智能监控等方式等到控制。

### 3 带式输送机智能化技术展望

近几年,矿山底层基础设备自动化的建设越来越广泛,生产系统的远程集中监控程度越来越高,通过数据分析、数据整合,整个综合自动化系统实现了集中控制和数据共享。随着信息化、智能化关键技术的不断发展,智能矿山的建设即将迎来新的高潮。应用大数据技术、物联网技术、人工智能技术、专家系统等开展煤矿井下主煤流系统智能感知、智能决策、自动执行,危险源检测、识别及预测预警研究,通过与工作面开采系统和煤仓存储系统智能联动,真正实现全矿井煤流系统绿色智能运行。

未来带式输送机输送系统智能化的关键技术发展趋势主要有:

1)基于控制系统优化的节能运行技术。未来带式输送机系统控制优化节能技术应主要以交流变频调速节能技术为主,在其基础上,可以通过对输送机的运输状态等进行精细化数学模型建立,将控制领域中的模糊控制技术、神经网络控制技术、模型预测技

术等控制技术应用用于智能变频节能技术中,同时完善的输送机工作监测控制技术和变频驱动与调速装置的提升将为该节能技术提供技术上的保障,实现输送机节能目标,最大程度提高经济效益。

2)非接触式煤流智能感知技术。虽然针对带式输送机煤流量检测的方法逐步成熟,已经能够较为准确地在线计量体积流量,但针对体积检测的方法都基本忽略了堆煤的内部间隙和煤炭含水量的差异,缺少对煤质信息的实时获取,未来随着煤质在线检测技术的发展,利用视觉深度学习和红外光谱分析实现煤流信息的一站式感知,可以为带式输送机的智能控制提供重要的参考依据。

3)多源信息融合的透明输送技术。在煤流输送过程中,数据融合主要是根据由信息层所整理分类的信息,通过解决数据冲突、进行数据合并后,综合推导界定与现实带式输送机状态最接近的虚拟数字化煤流输送状态,为实现带式输送机透明输送提供可靠的信息依据。

4)基于虚拟现实的带式输送机运维管控技术。通过掌握采煤工作面 and 煤仓存储信息,各带式输送机的实时煤量、运行工况,对煤流系统整体环境综合分析后给出可操作的运维管控指导。得到动态装备仿真模型,然后再将环境与装备统一,最终在计算机内完全重现煤流系统的状态。

## 4 结 语

1)针对带式输送机工况的实时智能感知,故障预测分析以及大数据运维管控等方面可以进行深入的研究。随着煤矿智能化建设的深入开展及矿区管理水平的不断提升,运用新材料、新工艺和新技术实现带式输送机的绿色节能、高效智能运行成为可能。

2)以煤矿带式输送机多机协同、煤流均衡输送为重点,以非接触式煤量检测、转载点卡堵、输送带撕裂等关键工况场景需求为突破,可实现带式输送机智能化建落地实施。

3)利用先进的图像识别感知技术、智能控制技术、大数据分析技术以及虚拟现实技术实现主煤流运输系统的智能管控运维将成为带式输送机智能化发展的重要支撑。

### 参考文献(References):

[1] 杨兰峰. 国内外带式输送机的现状及发展趋势[J]. 机械管理开发, 2016, 31(4): 119-120.

YANG Lanfeng. Development trend and status of belt conveyor[J]. Mechanical Management and Development, 2016,

- 31(4): 119-120.
- [2] 郝喜军. 带式输送机节能降耗控制方法研究[J]. 山西焦煤科技, 2015(4): 19-21.  
HAO Xijun. Study on control method of energy saving and reducing consumption of belt conveyor[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2015(4): 19-21.
- [3] 孟敏瑜. 无托辊带式输送机的研究进展[J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(8): 36-39.  
MENG Minyu. Research progress of belt conveyor without idler[J]. Coal Science And Technology, 1999, 27(8): 36-39.
- [4] JONKERS C O, 曹秉忠. 输送机胶带利用气膜代替托辊——空气带式输送机可供选择[J]. 起重运输机械, 1974(6): 62-67.  
JONKERS C O, CAO Bingzhong. Conveyor belt uses air film instead of idler-air belt conveyor is optional[J]. Lifting the transport machinery, 1974(6): 62-67.
- [5] 秦浩然. 分布式气垫带式输送机关键技术研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2020.  
QIN Haoran. Research on key technology of distributed air cushion belt conveyor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2020.
- [6] 余建山. 气垫带式输送机的发展与应用[J]. 中国铸造装备与技术, 1996(6): 10-13.  
YU Jianshan. Development and application of air-cushion conveyor[J]. China Foundry Machinery & Technology, 1996(6): 10-13.
- [7] 宋伟刚, 彭兆行. 气垫带式输送机的设计与计算(I)——气垫带式输送机的发展概况、种类及特点[J]. 矿山机械, 1994(6): 12-15.  
SONG Weigang, PENG Zhaoxing. Design and calculation of air cushion belt conveyor(i)—development, types and characteristics of air cushion belt conveyor[J]. Mining & Processing Equipment, 1994(6): 12-15.
- [8] 庞明军, 张锁龙. 气垫带式输送机气垫压力场研究与数值模拟[J]. 起重运输机械, 2006(3): 59-62.  
PANG Mingjun, ZHANG Suolong. Research and numerical simulation of air cushion pressure field of air cushion belt conveyor[J]. Lifting the transport machinery, 2006(3): 59-62.
- [9] LIU X W, WANG J S, WU L T, et al. Study on water cushion belt conveyor[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1016: 14-18.
- [10] ZHANG C. Design of belt conveyor control system based on motion controller[C]// 2014 International Conference on Energy Science and Applied Technology Daqing: Applied Mechanics and Materials, 2014: 710-713.
- [11] 张爱东. 水垫带式输送机关键技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.  
ZHANG Aidong. Study on the key techniques of water cushion belt conveyor[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2014.
- [12] 范迅, 刘宪伟, 郑侠, 等. 水垫带式输送机设计原理及基本参数的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006(5): 581-585.  
FAN Xun, LIU Xianwei, ZHENG Xia, et al. Research on design theory and basic parameters of a water cushion belt conveyor[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006(5): 581-585.
- [13] 刘文旭, 李文龙, 方进. 高温超导磁悬浮技术研究论述[J]. 低温与超导, 2020, 48(2): 48-53.  
LIU Wenxu, LI Wenlong, FANG Jin. Review of research on high temperature maglev[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2020, 48(2): 48-53.
- [14] 陈殷, 李耀华, 李艳. 板式双边永磁电动悬浮三维解析计算[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(12): 31-36.  
CHEN Yin, LI Yaohua, LI Yan. Three-dimensional analytical calculation of plate-type double permanent magnet electrodynamic suspension[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(12): 31-36.
- [15] 胡坤, 季晨光, 蒋浩, 等. 磁悬浮带式输送机新型敛磁式混合磁体设计与试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 558-569.  
HU Kun, JI Chenguang, JIANG Hao, et al. Design and experimental research on a new type of convergent hybrid magnet for magnetic levitation belt conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 558-569.
- [16] 胡坤, 王爽, 郭永存, 等. 永磁悬浮带式输送机侧向力与跑偏仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(5): 1173-1178.  
HU Kun, WANG Shuang, GUO Yongcun, et al. Analysis of lateral force and deviation of permanent magnetic levitation belt conveyor[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(5): 1173-1178.
- [17] 潘泽. 磁电混合悬浮带式输送机输送带变形特性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.  
PAN Ze. Study on the deformation characteristics of the conveyor belt of the magnetoelectric hybrid suspension belt conveyor[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.
- [18] 刘宝军. 矿井带式输送机能耗优化控制系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.  
LIU Baojun. Research on energy consumption optimization control system of mine belt conveyor[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [19] 孙汪洋. 长距离带式输送机节能优化策略的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.  
SUN Wangping. Studies of long distance belt conveyor and energy saving optimization strategy[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [20] 石志勇. 三相异步电动机Y/Δ降压启动的分析与改进[J]. 职业, 2012(26): 95-96.  
SHI Zhiyong. Analysis and improvement of Y/Δ step-down starting of three-phase asynchronous motor[J]. Occupation, 2012(26): 95-96.
- [21] 胡翠云, 胡海英, 赵欣. Y/Δ降压启动与Δ/YY变极调速接法比较[J]. 科技资讯, 2008(36): 90.  
HU Cuiyun, HU Haiying, ZHAO Xin. Comparison between Y/Δ step-down start and Δ/YY pole changing speed regulation connection[J]. Science & Technology Information, 2008(36): 90.
- [22] 冯俊宾. 变频调速技术在带式输送机上的节能应用[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(1): 142-144.  
FENG Junbin. Energy Saving application of frequency control technology in belt conveyor[J]. Mechanical Research & Application, 2021, 34(1): 142-144.
- [23] 邢宇峰, 孙虎儿. 选煤厂带式输送机节能技术研究与实践[J]. 煤矿机械, 2009, 30(6): 59-60.

- XING Yufeng, SUN Huer. Research and practice of belt conveyor energy-saving technology about coal preparation plant[J]. *Coal Mine Machinery*, 2009, 30(6): 59-60.
- [24] 孙伟, 王慧, 杨海群. 带式输送机变频调速节能控制系统研究[J]. *工矿自动化*, 2013, 39(4): 98-101.
- SUN Wei, WANG Hui, YANG Haiqun. Research of energy-saving control system with frequency-conversion speed-regulation for belt conveyor[J]. *Industry and Mine Automation*, 2013, 39(4): 98-101.
- [25] 苟学亮. 变频调速节能控制在带式输送机上的应用[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- GOU Xueliang. Application of variable frequency speed and energy-saving control technology in belt conveyor[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [26] 方原柏. 皮带秤系统试验装置发展四十年回顾[J]. *衡器*, 2021, 50(8): 42-51.
- FANG Yuanbai. Review of 40 years development of belt weigher system test device[J]. *Weighing Instrument*, 2021, 50(8): 42-51.
- [27] 马辉. 电子皮带秤计量、校准及误差分析[J]. *衡器*, 2019, 48(1): 11-13.
- MA Hui. The measurement accuracy and error analysis of electronic belt scale[J]. *Weighing Instrument*, 2019, 48(1): 11-13.
- [28] 厉达, 何福胜. 皮带秤技术现状及发展趋势[J]. *衡器*, 2012, 41(9): 1-4, 10.
- LI Da, HE Fusheng. Technical status and development trend of belt weigher[J]. *Weighing Instrument*, 2012, 41(9): 1-4, 10.
- [29] 李萍, 王彦文. 煤炭在线动态称重系统研究[J]. *工矿自动化*, 2013, 39(12): 29-33.
- LI Ping, WANG Yanwen. Research of online dynamic weighting system of coal[J]. *Industry and Mine Automation*, 2013, 39(12): 29-33.
- [30] 顾世双. 核子皮带秤和电子皮带秤的比较[J]. *衡器*, 2011, 40(6): 49-50, 54.
- GU Shishuang. Comparison between nuclear belt scale and electronic belt scale[J]. *Weighing Instrument*, 2011, 40(6): 49-50, 54.
- [31] 关西锋. 新型电子皮带秤和微机核子秤在钼原矿计量的应用[J]. *衡器*, 2013, 42(10): 12-16.
- GUAN Xifeng. The utilization of new electronic belt scale and micro computerized nuclear scale when measuring the molybdenum ore[J]. *Weighing Instrument*, 2013, 42(10): 12-16.
- [32] 苏毅. 可实现物料流量精确控制的自动核子皮带秤[J]. *中国测试*, 2012, 38(6): 57-59, 63.
- SU Yi. Automatic nucleonic belt weigher with function of precise material-flow control[J]. *China Measurement & Test*, 2012, 38(6): 57-59, 63.
- [33] 肖志红. 超声皮带秤测量系统的实现[J]. *现代电子技术*, 2006(20): 160-162.
- XIAO Zhihong. Realization of measuring system with ultrasonic belt scale[J]. *Modern Electronics Technique*, 2006(20): 160-162.
- [34] 曾飞. 带式输送机物料瞬时流量激光测量方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015(2): 40-47.
- ZENG Fei. Measurement of material instantaneous flow on belt conveyors based on laser scanning[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2015(2): 40-47.
- [35] 陈湘源. 基于超声波的带式输送机多点煤流量监测系统的设计[J]. *工矿自动化*, 2017, 43(2): 75-87.
- CHEN Xiangyuan. Design of multipoint coal flow monitoring system of belt conveyor based on ultrasonic[J]. *Industry and Mine Automation*, 2017, 43(2): 75-87.
- [36] 张少宾. 基于实况负载的带式输送机智能控制研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.
- ZHANG Shaobin. Control research of belt conveyor intelligence based on live load[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019.
- [37] VIEROSLAV M, KATARINA L. Design of clamping structure for material flow monitor of pipe conveyors[J]. *Open Engineering*, 2019, 9(1): 586-592.
- [38] 孟凡芹, 王耀才. 煤矿井下带式输送机煤流图像识别方法的研究[J]. *煤炭学报*, 2003(1): 91-95.
- MENG Fanqing, WANG Yaocai. Study of the methods for recognizing the coal flow image of coal mine's conveyor belt[J]. *Journal of China Coal Society*, 2003(1): 91-95.
- [39] 北京广天夏科技有限公司. 基于图像识别的井下煤流量检测方法[P]. 中国: ZL108664874, 2018-10-16.
- [40] 李瑶, 王义涵. 带式输送机煤流量自适应检测方法. *工矿自动化*, 2020, 46(6): 98-102.
- LI Yao, WANG Yihan. Adaptive coal flow detection method of belt conveyor[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(6): 98-102.
- [41] 冯媛. 融合感知的带式输送机煤流量监控系统[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- FENG Yuan. Coal flow monitoring system of belt conveyor with integrated perception[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.
- [42] 高如新, 王俊孟. 基于双目立体视觉的煤体积测量[J]. *计算机系统应用*, 2014, 23(5): 126-133.
- GAO Ruxing, WANG Junmeng. Volume measurement of coal based on binocular stereo vision[J]. *Computer Systems & Applications*, 2014, 23(5): 126-133.
- [43] 代伟, 赵杰, 杨春雨, 等. 基于双目视觉深度感知的带式输送机煤量检测方法[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(S2): 547-555.
- DAI Wei, ZHANG Jie, YANG Chunyu, et al. Detection method of coal quantity in belt conveyor based on binocular vision depth perception[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S2): 547-555.
- [44] 杨春雨, 顾振, 张鑫, 等. 基于深度学习的带式输送机煤流量双目视觉测量[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 41(8): 164-174.
- YANG Chunyu, et al. Binocular vision measurement of coal flow of belt conveyors based on deep learning[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 41(8): 164-174.
- [45] 李玥华, 周京博, 刘利剑. 线结构光测量技术研究进展[J]. *河北科技大学学报*, 2018, 39(2): 115-124.
- LI Yuehua, ZHOU Jingbo, LIU Lijian. Research progress of the line structured light measurement technique[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2018, 39(2): 115-124.
- [46] 李萍, 王彦文. 煤炭计量计质信息系统研究[J]. *工矿自动化*, 2014, 40(6): 11-13.

- LI Ping, WANG Yanwen. Research of information system for coal weight measurement and quality analysis[J]. *Industry and Mine Automation*, 2014, 40(6): 11-13.
- [47] 郭伟东, 李明, 亢俊明, 等. 基于机器视觉的矿井输煤系统优化节能控制[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(10): 69-75.
- GUO Weidong, LI Ming, KANG Junming, *et al.* Optimal energy saving control of mine coal transportation system based on machine vision[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(10): 69-75.
- [48] LI Jiacheng, WANG Honglei, ZHANG Junsheng, *et al.* Coal flow volume measurement of belt conveyor based on binocular vision and line structured light[C]/IEEE International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology, 2021.
- [49] 蒋卫良, 王兴茹, 刘冰, 等. 煤矿智能化连续运输系统关键技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 134-142.
- JIANG Weiliang, WANG Xingru, LIU Bing, *et al.* Study on key technology of coal mine intelligent continuous transportation[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 134-142.
- [50] 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.
- [51] 郭启东, 乔铁柱. 基于Otsu算法的输送带撕裂视觉检测系统研究[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(4): 279-282.
- GUO Qihuang, QIAO Tiezhu. Research of conveyor belt tear vision detection system based on Otsu algorithm[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(4): 279-282.
- [52] 刘伟力, 乔铁柱. 矿用输送带纵向撕裂检测系统研究[J]. *工矿自动化*, 2017, 43(2): 78-81.
- LIU Weili, QIAO Tiezhu. Research on longitudinal tearing detection system of mine-used conveyor belt[J]. *Industry and Mine Automation*, 2017, 43(2): 78-81.
- [53] 刘晓阳, 刘晶, 张向阳, 等. 基于二维Gabor滤波器的胶带撕裂检测[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(4): 103-107.
- LIU Xiaoyang, LIU Jing, ZHANG Xiangyang, *et al.* Two-dimensional Gabor filter-based belt tear detection[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(4): 103-107.
- [54] ZHANG Mengchao, ZHANG Yuan, ZHOU Manshan, *et al.* Application of lightweight convolutional neural network for damage detection of conveyor belt[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(16): 7282.
- [55] 李现国, 苗长云, 杨彦利, 等. 一种基于线激光图像的输送带纵向撕裂在线检测方法[P]. 中国: ZL106276132A, 2017-01-04.
- [56] LYU Zhiwei, ZHANG Xiaoguang, HU Jiangdi, *et al.* Visual detection method based on line lasers for the detection of longitudinal tears in conveyor belts[J]. *Measurement*, 2021: 183.
- [57] 李现国, 明紫旭, 苗笛, 等. 基于线激光和ARM的输送带纵向撕裂监控系统设计[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(2): 146-150.
- LI Xianguo, MING Zixu, MIAO Di, *et al.* Design on monitoring and control system of conveyor belt longitudinal tearing based on line laser and ARM[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(2): 146-150.
- [58] 徐辉, 刘丽静, 沈科, 等. 基于多道线性激光的带式输送机纵向撕裂检测[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(7): 37-44.
- XU Hui, LIU Lijing, SHEN Ke, *et al.* Longitudinal tear detection of belt conveyor based on multi linear lasers[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(7): 37-44.
- [59] 马永兵. 基于PLC的煤矿带式输送机监控系统设计与探讨[J]. *江西煤炭科技*, 2020(1): 51-53.
- MA Yongbing. Discussion on Design of belt conveyor monitoring system based on PLC in coal mine[J]. *Jiangxi Coal Science & Technology*, 2020(1): 51-53.
- [60] 杨彦利, 苗长云, 亢伉, 等. 输送带跑偏故障的机器视觉检测技术[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(6): 667-671.
- YANG Yanli, MIAO Changyun, KANG Kang, *et al.* Machine vision inspection technique for conveyor belt deviation[J]. *Journal of North University of China(Natural Science Edition)*, 2012, 33(6): 667-671.
- [61] 王磊, 张磊, 董妍, 等. 基于FPGA的输送带跑偏检测系统设计[J]. *煤矿机械*, 2019, 40(7): 27-30.
- WANG Lei, ZHANG Lei, DONG Yan, *et al.* Design of conveyor belt deviation detection system based on FPGA[J]. *Coal Mine Machinery*, 2019, 40(7): 27-30.
- [62] 王平. 基于数字图像处理的输送带跑偏状态实时监测技术[J]. *煤矿机械*, 2021, 42(2): 168-170.
- WANG Ping. Real-time monitoring technology of conveyor belt deviation state based on digital image processing[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(2): 168-170.
- [63] 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.
- [64] 姜阔胜, 毛中元, 谢有浩, 等. 矿用带式输送机托辊运行状态监测系统[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(7): 45-49.
- JIANG Kuosheng, MAO Zhongyuan, XIE Youhao, *et al.* Mine belt conveyor roller operation condition monitoring system[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(7): 45-49.
- [65] 郝洪涛, 倪凡凡, 陈亮, 等. 远程带式输送机托辊故障巡检方法[J]. *煤矿机械*, 2018, 39(11): 133-135.
- HAO Hongtao, NI Fanfan, CHEN Liang, *et al.* Investigation of inspection method on roller of remote belt conveyor[J]. *Coal Mine Machinery*, 2018, 39(11): 133-135.
- [66] 苏辉, 牛蒿楷, 张琨. 基于ZigBee无线传感网络的托辊卡死故障监测系统设计与实现[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(7): 14-17.
- SU Hui, NI Linkai, ZHANG Kun. Design of roller fault monitoring system based on ZigBee wireless sensor network[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(7): 14-17.
- [67] 朱振. 带式输送机托辊运行状态在线巡检机器人关键技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.
- ZHU Zhen. Research on the key technology of on-line inspection robot for the running state of belt conveyor roller[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [68] 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.
- [69] 刘宇琦. 基于深度学习的托辊异常检测方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.  
LIU Yuqi. Research on abnormal detection method of idler based on deep learning[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [70] 任晓力. 防止输送带打滑的新方法[J]. *煤炭技术*, 2020, 39(1): 181-183.  
REN Xiaoli. New method to prevent slipping of conveyor belt[J]. *Coal Technology*, 2020, 39(1): 181-183.
- [71] 武林海. 带式输送机常见故障检测及防治系统研究[J]. *煤矿机械*, 2019, 40(2): 145-147.  
WU Linhai. Research on common fault detection and prevention system of belt conveyor[J]. *Coal Mine Machinery*, 2019, 40(2): 145-147.
- [72] 刘晓宁. 变频技术在皮带输送机调速系统中的应用标准[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2021, 41(5): 164-166.  
LIU Xiaoning. Application standard of frequency conversion technology in belt conveyor speed regulation system [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2021, 41(5): 164-166.
- [73] KUMAR C H V, MURTHY CH S N, *et al.* Noise Assessment in Mines – A Critical Review[J]. *Concurrent Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 2(1): 6-11.
- [74] 朱志明. 变频技术在皮带机调速系统中的应用[J]. *石化技术*, 2019, 26(12): 35-36.  
ZHU Zhiming. Application of frequency conversion technology in belt conveyor speed regulation system[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2019, 26(12): 35-36.
- [75] 周利东, 贾志鹏, 白纯刚, 等. 托辊噪声机理分析及降噪方法[J]. *煤矿机械*, 2021, 42(4): 80-83.  
ZHOU Lidong, JIA Zhipeng, BAI Chungang, *et al.* Mechanism analysis and noise reduction method of idler[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(4): 80-83.
- [76] 米雨, 倪永帅, 温日正. 基于不同材料的低噪声托辊对带式输送机噪声的影响及分析[J]. *起重运输机械*, 2021, 14: 66-68.  
MI Yu, NI Yongshuai, WEN Rizheng. Influence and analysis of low noise idler based on different materials on belt conveyor noise[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2021, 14: 66-68.
- [77] PATRA A. K, GAUTAM S, KUMAR P. Emissions and human health impact of particulate matter from surface mining operation - a review[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2016, 5: 233-249.
- [78] 张晨. 关于皮带落煤转载除尘装置研究[J]. *石化技术*, 2020, 27(1): 270-272.  
ZHANG Chen. Research on belt coal falling transfer dust removal device[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2020, 27(1): 270-272.
- [79] 刘志斌. 矿山井下巷道除尘系统构建与改造[J]. *中国新技术新产品*, 2021, 10: 79-81.  
LIU Zhibin. Construction and transformation of mine underground roadway dust removal system[J]. *Chinese Selected New Technologies and Products*, 2021, 10: 79-81.
- [80] 李跃飞. 洗煤厂皮带输送机中抑尘罩的设计和使用[J]. *现代国企研究*, 2019, 10: 146-147.  
LI Yuefei. Design and application of dust suppression cover in belt conveyor in coal washing plant[J]. *Modern SOE Research*, 2019, 10: 146-147.
- [81] 郁洋. 探讨选煤厂输煤系统粉尘的治理[J]. *江西煤炭科技*, 2018, 4: 122-124.  
YU Yang. Discussion on dust control in coal handling system of coal preparation plant[J]. *Jiangxi Coal Science & Technology*, 2018, 4: 122-124.
- [82] 魏德宁, 荆德吉, 齐庆杰, 等. 皮带运输巷粉尘运移规律实验研究[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(6): 503-508.  
WEI Dening, JING Deji, Qi Qingjie, *et al.* Experimental study on dust transport law in belt transportation roadway[J]. *Journal of Liaoning Technical University (natural science edition)*, 2020, 39(6): 503-508.
- [83] 程永新. 煤矿带式输送机火灾光纤传感检测技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(2): 131-135.  
CHENG Yongxin. Research on fire optical fiber sensing detection technology of coal mine belt conveyor[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(2): 131-135.
- [84] 上官昌培. 皮带巷火灾数值模拟与人员疏散[J]. *煤炭与化工*, 2021, 44(1): 116-120.  
SHANGGUAN Changpei. Numerical simulation of belt lane fire and personnel evacuation[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2021, 44(1): 116-120.
- [85] 郝海清, 王凯, 张春玉, 等. 矿井皮带巷火灾风烟流场-区-网演化与调控规律[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(4): 716-724.  
HAO Haiqing, WANG Kai, ZHANG Chunyu, *et al.* Smoke flow field area network evolution and regulation law of mine belt roadway fire[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(4): 716-724.
- [86] 张燕宁. 矿井主运输皮带巷自动灭火报警技术研究应用[J]. *能源与节能*, 2021(1): 210-211.  
ZHANG Yanning. Research and application of automatic fire extinguishing alarm technology in mine main transportation belt roadway[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2021(1): 210-211.
- [87] 苏墨. 矿井胶带火灾灾变规律数值模拟及自动灭火系统设计研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.  
SU Mo. Numerical simulation of mine belt fire disaster law and design of automatic fire extinguishing System [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [88] 王海军, 刘少权, 王洪磊, 等. 一种煤炭职业病防护智能穿戴装备[P]. 中国: ZL211659100U, 2020-01-20.
- [89] 穆中礼. 大型皮带运输设备安全运行维护及管理[J]. *中国金属通报*, 2021, 7: 59-60.  
MU Zhongli. Safe operation, maintenance and management of large belt transportation equipment[J]. *China Metal Bulletin*, 2021, 7: 59-60.