

文章编号: 1671-251X(2023)06-0149-10

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2023030099](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2023030099)

# 带式输送机系统故障诊断方法综述

杨春雨，曹博仕，张鑫，姬明君

(中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 输送带和驱动装置是带式输送机的主要组成部分且为故障高发部位, 以输送带故障和驱动装置故障为切入点, 分析了输送带跑偏、打滑、损伤、堆料撒料等故障及驱动装置滚筒、托辊、减速器等故障的机理, 重点阐述了知识驱动和数据驱动的带式输送机故障诊断方法研究进展。知识驱动法以知识处理技术为基础, 实现符号处理和数值处理的统一、推理过程和算法过程的统一, 主要包括专家系统、故障树分析法。数据驱动法采用机器学习和数据挖掘等技术对历史数据进行分析处理, 建立诊断模型, 达到故障诊断目的, 主要包括支持向量机(SVM)、比差法、基于声音和视觉的诊断方法。分析了带式输送机故障诊断方法目前存在的挑战和未来发展趋势: ①结合历史故障数据和实时数据推断设备健康状况, 预测早期微小故障, 提醒工作人员进行预测性维护。②揭示带式输送机耦合故障的关联关系, 利用人工智能等新兴技术研究耦合故障联合诊断方法。③利用多模态机器学习技术研究带式输送机多模态信息融合利用机制, 开发带式输送机多模态信息融合故障诊断方法。④将故障知识图谱和带式输送机领域知识相结合, 实现带式输送机设备故障追踪、故障超前预警, 通过知识查询、知识推理和辅助决策功能, 提高故障处理、精准挖掘设备潜在故障风险的能力。

**关键词:** 带式输送机; 故障诊断; 输送带故障; 驱动装置故障; 知识驱动; 数据驱动

中图分类号: TD634 文献标志码: A

Summary of fault diagnosis methods for belt conveyor systems

YANG Chunyu, CAO Boshi, ZHANG Xin, JI Mingjun

(School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The conveyor belt and driving device are the main components of the belt conveyor and are the high-risk areas for faults. Taking conveyor belt faults and driving device faults as the starting point, this paper analyzes the mechanisms of conveyor belt deviation, slipping, damage, stacking and scattering, as well as the faults of the driving device roller, idler and reducer. It focuses on the research progress of knowledge-driven and data-driven fault diagnosis methods for belt conveyors. Based on the knowledge processing technology, the knowledge-driven method realizes the unification of symbol processing and numerical processing, the unification of reasoning process and algorithm process. It mainly includes expert system and fault tree analysis. The data-driven method uses machine learning and data mining techniques to analyze and process historical data. It establishes diagnostic models, and achieves fault diagnosis purposes. It mainly includes support vector machines (SVM), comparison method, and diagnosis methods based on sound and vision. This paper analyzes the current challenges and future development trend of belt conveyor fault diagnosis methods. ① The historical fault data and real-time data should be combined to infer equipment health. The early minor faults should be predicted so as to remind the staff to carry out predictive maintenance. ② The correlation between coupling faults of belt conveyors

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-06-08; 责任编辑: 胡娟。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61873272)。

作者简介: 杨春雨(1979—), 男, 辽宁凌源人, 教授, 博士, 研究方向为多时间尺度系统自适应与自学习优化控制方法、多电动机系统最优协调控制、智能机器人导航与控制、基于机器学习的智能装备健康状态评价, E-mail: chunuyang@cumt.edu.cn。

引用格式: 杨春雨, 曹博仕, 张鑫, 等. 带式输送机系统故障诊断方法综述[J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 149-158.

YANG Chunyu, CAO Boshi, ZHANG Xin, et al. Summary of fault diagnosis methods for belt conveyor systems[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 149-158.



扫码移动阅读

should be revealed. The emerging technologies such as artificial intelligence should be used to study joint diagnosis methods for coupling faults. ③ The multimodal machine learning technology should be utilized to study the mechanism of multimodal information fusion and utilization of belt conveyors. Fault diagnosis methods for multimodal information fusion of belt conveyors needs to develop. ④ The fault knowledge graph and the belt conveyor domain knowledge should be combined to realize the belt conveyor equipment fault tracking and fault early warning. Through the knowledge query, knowledge reasoning and auxiliary decision-making functions, the capability of fault handling and precise mining of potential fault risks of equipment can be improved.

**Key words:** belt conveyor; fault diagnosis; conveyor belt fault; driving device fault; knowledge-driven; data-driven

## 0 引言

带式输送机是一种结构复杂的大型煤炭物料运输设备,长期处于高负荷运行状态,一旦发生故障,会造成巨大的经济损失,甚至导致人员伤亡<sup>[1-3]</sup>。由于带式输送机机械结构复杂,工作环境恶劣,在检修不及时或不到位的情况下,会引起一系列输送带故障和驱动装置故障。通过故障诊断方法及时发现带式输送机故障并进行处理,具有重要的现实意义。

传统的故障诊断方法主要包括知识驱动法、模型驱动法和数据驱动法 3 类<sup>[4-5]</sup>。目前带式输送机故障诊断方法主要分为数据驱动法和知识驱动法 2 类。数据驱动法不需要精确的数学解析模型,依据数据特征,通过阈值判断等手段实现故障检测,主要包括时频域分析法<sup>[6]</sup>、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)<sup>[7-8]</sup>、谱峭度法<sup>[9]</sup>、比差法<sup>[10]</sup>等。这类方法的缺点在于故障数据特征的通用性差,特征选取较困难。随着机器视觉技术<sup>[11]</sup>的快速发展,红外图像处理<sup>[12-14]</sup>、多光谱图像处理<sup>[15]</sup>、激光辅助检测<sup>[16]</sup>等视觉图像处理技术被用于带式输送机系统部分故障的检测和诊断中。知识驱动法主要基于人工分析和逻辑判断等主观分析方法实现故障检测<sup>[5]</sup>。该类方法同样不依赖于精确的数学解析模型,但需要合适的模型来反映系统的运行状态和故障机制,主要包括专家系统<sup>[17-18]</sup>、故障树分析法<sup>[19-20]</sup>等。知识驱动法获得的结果具有良好的可解释性,但是缺乏对历史故障知识及耦合知识的进一步挖掘利用,且对诊断输入的精确度要求较高。由于知识驱动法依赖大量历史数据,所以诊断速度远远慢于数据驱动法。虽然数据驱动法和知识驱动法均不需要精确的数学模型,但对于一些复杂系统,仍需要专家经验和知识来辅助数据分析,以便更好地识别和定位故障。因此,可将数据驱动法和知识驱动法相结合,提高故障诊断的准确性和效率。

本文以输送带故障和驱动装置故障为切入点,

分析了带式输送机故障机理,归类总结带式输送机故障诊断方法的热门研究方向和国内外研究进展,讨论了故障诊断方法中亟待解决的问题及发展趋势,以期为故障诊断提供理论依据,为后续研究提供借鉴。

## 1 带式输送机故障分类及故障机理

带式输送机主要由滚筒、托辊、减速器等驱动装置及输送带、机架等组成,如图 1 所示。带式输送机运行过程中易受到多种因素的影响而出现故障,如恶劣的工作环境、工作人员的不正当操作、带式输送机设计缺陷等<sup>[21-22]</sup>。本文将带式输送机故障分为输送带故障和驱动装置故障 2 类,输送带故障主要包括输送带跑偏、打滑、损伤和堆料撒料故障,驱动装置故障包括滚筒故障、托辊故障和减速器故障。

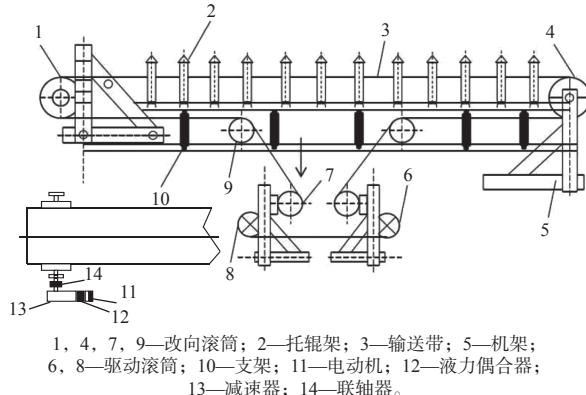


图 1 带式输送机结构

Fig. 1 Structural of belt conveyor

### 1.1 输送带故障

1) 跑偏故障。在带式输送机运行过程中,如果输送带偏移量超过带宽的 5%,就可认为输送带出现了跑偏现象,如图 2 所示。由于输送带复杂的巡回特性,跑偏故障是最常见的输送带故障,跑偏故障通常会对输送带造成不可逆的损伤,严重时会导致输送带断带,从而引起“飞带”现象,对周围工作人员造成安全威胁。据统计,在多类导致停产、停机后果的事故中,约有 20% 是由跑偏故障引起的<sup>[23]</sup>。在工程

实际中,跑偏故障大多是由于系统部件问题或误操作引起的。在输送带运行过程中,拉紧装置失效会导致输送带过松,运行时忽左忽右,从而引起跑偏。除此之外,主从动滚筒水平度不一、机架安装不当、输送带接口与中心线不垂直、部件质量不符合规定等部件安装质量问题也是引起跑偏故障的主要原因<sup>[24-25]</sup>。



图 2 输送带跑偏故障

Fig. 2 Deviation fault of conveyor belt

2) 打滑故障。在系统正常运行的情况下,输送带带速与滚筒速度相同,若带速低于滚筒速度的95%,即可判定发生打滑故障。长时间的打滑会使输送带与托辊、滚筒间产生过度摩擦,导致输送带温度过高并伴随大量烟雾,严重时会诱发火灾。引起打滑故障的原因如下:①摩擦力不够。一般来说,张紧装置失效及输送带老化都会导致输送带过松,从而使得输送带与滚筒之间的摩擦力不够,引起打滑<sup>[26]</sup>。②清扫器失效。输送带一般运输粉末状或块状物料,当物料粉尘粘附在滚筒表面或大块物料卡阻清扫器时,会导致摩擦力减小,引起打滑。③输送带初张力不足。该情况一般发生在带式输送机刚启动时<sup>[27]</sup>。

3) 输送带损伤故障。输送带损伤故障主要包括撕裂和断带2种,撕裂又可分为纵向撕裂和横向撕裂<sup>[28-29]</sup>,如图3所示。输送带运行时受到异物外力穿透,就可能沿着输送带运行方向撕裂,即纵向撕裂<sup>[30]</sup>。输送带横向受到超过自身极限的外力时,就会发生横向撕裂,严重时会导致横向断裂,即断带<sup>[31]</sup>。



(a) 纵向重叠撕裂

(b) 横向撕裂

图 3 输送带损伤故障

Fig. 3 Damage fault of conveyor belt

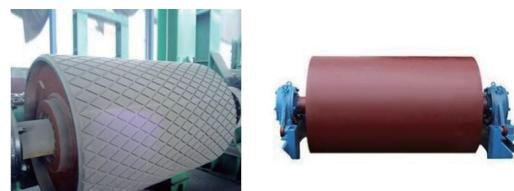
4) 堆料撒料故障。带式输送机运行过程中输送带上出现大量物料堆积称为堆料故障,出现大量物

料掉落称为撒料故障<sup>[32]</sup>。在带式输送机高速运转的情况下,物料与输送带之间的摩擦力不足以克服物料的惯性,就可能导致物料与输送带之间产生速度差,导致物料失稳撒落或在落料口处发生物料堆积现象,这是物料撒落和堆积的根本原因。此外,挡料板损坏导致输送带上落料不均,会使物料堆积过多,这也是导致物料堆积撒落的重要原因之一。对于设计有凹段的带式输送机,如果凹段的曲率半径过小,会使输送带产生悬空,此时输送带槽角增大,易使部分物料撒落<sup>[33]</sup>。

## 1.2 驱动装置故障

驱动装置是带式输送机系统的动力来源,很大程度上决定了带式输送机的运行效能。在连续的煤炭开采中,带式输送机驱动装置故障不仅会导致较大的停产损失,还会引起输送带故障,产生不良连锁反应<sup>[34]</sup>。驱动装置故障主要分为滚筒故障、托辊故障及减速器故障。

1) 滚筒故障。滚筒是带式输送机的承载部件和动力传动部件,同时起到张紧和改向的作用,是带式输送机的主要受力部件<sup>[35]</sup>。滚筒按照用途可分为驱动滚筒、改向滚筒<sup>[36-37]</sup>,如图4所示。驱动滚筒利用与输送带之间的摩擦力为系统提供运行动力。改向滚筒可改变输送带的运行线路和方向,一般布置在带式输送机前端。此外,还有张紧滚筒,张紧滚筒为输送带的正常运行提供足够的张力,起张紧装置的作用。引起滚筒故障的主要原因包括滚筒包胶磨损、通体受压开裂、滚筒轴损坏、轴承座损坏等<sup>[38]</sup>。



(a) 驱动滚筒

(b) 改向滚筒

图 4 滚筒装置

Fig. 4 Rollers

2) 托辊故障。托辊作为输送带的承载装置,能够减小输送带的运行阻力,保证输送带沿着预定方向稳定运行<sup>[39]</sup>。托辊是带式输送机日常维护管理的主要部件,其选用和设计对带式输送机的正常运行、维修等有重要影响<sup>[40]</sup>。托辊按照用途及结构可分为槽型托辊、缓冲托辊、调心托辊,如图5所示。托辊故障原因可分为内部原因和外部原因,内部原因是托辊的内部轴承损坏,外部原因是受到外力导致损坏,主要包括托辊筒皮磨损、托辊弯曲变形和托辊卡阻。托辊故障也是引起输送带故障的主要

原因之一<sup>[41]</sup>。



(a) 槽型托辊



(b) 缓冲托辊



(c) 调心托辊

图 5 托辊装置

Fig. 5 Idlers

3) 减速器故障。减速器是一种由封闭在刚性外壳体内的齿轮传动、蜗杆传动、齿轮—蜗杆传动所组成的独立部件(图 6),用于连接液力偶合器和电动机。液力偶合器的缓冲性能较高,与电动机、减速器结合使用,可使输送带在不改变张力的情况下实现各工况下的稳定运行<sup>[42-43]</sup>。减速器故障主要包括减速器断轴<sup>[44]</sup>、异常噪声<sup>[45]</sup>等,一般由设备质量问题及维护问题引发。



图 6 减速器装置

Fig. 6 Reducer

## 2 带式输送机故障诊断方法

现阶段带式输送机诊断过程主要分为数据采集、故障识别和评价与决策 3 个部分,如图 7 所示。使用传感器对带式输送机各部位进行状态检测,通过各种诊断方法进行数据特征分析,根据数据特征确定系统发生的故障类型及故障程度,对故障危害

及严重程度进行评价。

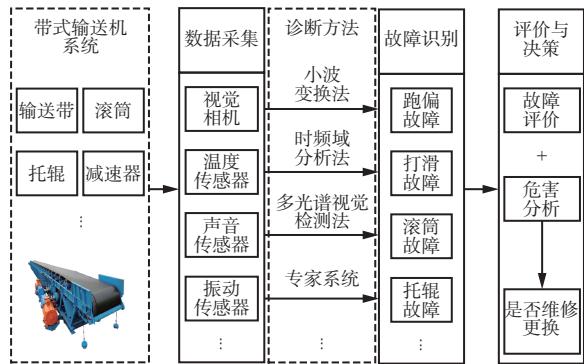


图 7 带式输送机故障诊断流程

Fig. 7 Fault diagnosis process of belt conveyor

及时对各类故障进行诊断分析并制定相应的故障处理措施,是带式输送机使用过程中亟待解决的重要问题<sup>[46]</sup>。本文从输送带故障和驱动装置故障 2 个方面阐述知识驱动和数据驱动的故障诊断方法。

### 2.1 输送带故障诊断方法

由于井下工作环境复杂恶劣,且带式输送机长期高负荷运行,输送带很容易出现跑偏、打滑、损伤等故障。特别是长距离运输或多级输送组合而成的带式输送机系统,一旦发生故障,易出现故障难以排查、不能及时修复等问题<sup>[47]</sup>。输送带故障诊断技术主要包括专家系统、神经网络、时频域分析法、小波包分解法等,可分为知识驱动法和数据驱动法。

#### 2.1.1 知识驱动的输送带故障诊断方法

知识驱动法以知识处理技术为基础,实现符号处理和数值处理的统一、推理过程和算法过程的统一<sup>[48]</sup>。该类方法主要包括专家系统、故障树分析法。

专家系统是利用领域专家长期积累下来的领域知识建立数据库,通过设计推理和决策过程实现故障诊断的智能系统<sup>[49]</sup>。文献[50]以故障知识故障树为基础建立推理机的推理策略,构建故障诊断专家系统。文献[51]设计了一种故障诊断专家系统,对带式输送机运行过程中的各类故障进行预警及处置提示,解决了常规运行模式下带式输送机检测不全面的问题。专家系统不需要精确的数学模型,表现直观且易于理解,但是存在知识获取难度较大、自适应学习能力弱的问题<sup>[52]</sup>。故障诊断专家系统主要由故障知识库、推理机、故障数据库、人机接口及解释器等部分组成,如图 8 所示。

故障树分析法能清晰地表现出带式输送机各类故障及故障原因之间的关系,将故障原因列出优先次序,是一种可靠性较高的方法。文献[23]分析了

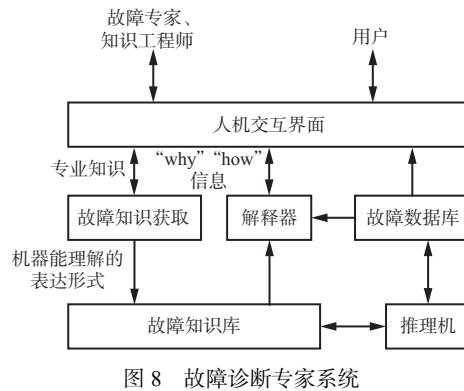


Fig. 8 Expert system for fault diagnosis

跑偏故障的机理及原因,建立了输送带跑偏故障树模型,一方面加快了故障诊断速度,提高了维修效率,另一方面减少了输送带跑偏故障,提高了输送带的使用寿命。文献[53]建立了输送带故障树,通过定性和定量分析确定底事件对顶事件的影响程度,快速确定故障所在位置。

### 2.1.2 数据驱动的输送带故障诊断方法

数据驱动法采用机器学习和数据挖掘等技术对历史数据进行分析处理,建立诊断模型,达到故障诊断目的。该类方法主要包括SVM、比差法、基于声音和视觉的诊断方法。

SVM建立在结构风险最小化原则的基础上,专门针对样本数量较少的机器学习问题,具有自适应学习能力和非线性逼近能力,将故障分类问题转换成二次规划问题,理论上得到的结果是全局最优解,常用于故障分类<sup>[54]</sup>。文献[55]将主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)和SVM相结合,利用PCA确定各传感器的故障贡献率,采用SVM进行故障诊断及分类,从而实现输送带跑偏故障的快速识别,诊断流程如图9所示。



图 9 基于 PCA 和 SVM 的跑偏故障诊断流程

Fig. 9 Diagnosis process of deviation fault based on principal component analysis and support vector machine

比差法对2类或多类数据信号值进行比较,实现故障诊断,常用于输送带打滑故障检测。文献[9]利用主动滚筒和从动滚筒之间的速度比差判断输送带运行状态。文献[56]提出利用速度传感器检测输送带和滚筒速度,对2个速度信号进行分析对比,进而判断出输送带是否存在打滑现象。

声音信号的采集便捷,且蕴含大量环境或设备状态信息,能够很好地反映被采集的设备是否存在故障。输送带撕裂故障往往是通过异常声音发现的。文献[57]通过对采集的声音信号进行处理,得

到频率系数和能量参数,形成特征数据并输入SVM中进行分类和识别,具有准确性高、速度快的优点,诊断流程如图10所示。

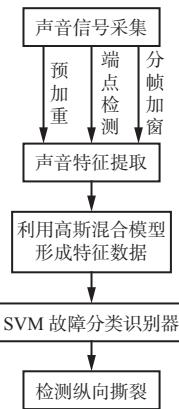


图 10 基于声音的撕裂故障诊断流程

Fig. 10 Diagnosis process of tear fault based on sound

基于视觉的故障诊断方法主要应用图像处理及激光辅助检测技术,从采集到的图像数据中获取故障信息,实现故障检测与诊断,整个过程分为图像采集、图像融合、图像处理、特征提取和状态分析5个部分<sup>[58-59]</sup>。该方法处理过程简单,处理速度快,能及时发现故障,保证带式输送机安全稳定运行,具有很好的应用前景。文献[14]提出了一种多光谱视觉诊断方法,实现了对输送带纵向撕裂、跑偏和堆料故障的准确分类和识别,流程如图11所示。文献[15]提出了一种线激光辅助视觉检测方法,通过CCD相机采集因纵向撕裂故障而改变的线激光条纹,获取故障特征,以极值点个数作为诊断依据,实现对输送带纵向撕裂故障的准确、有效检测和诊断。文献[60]提出了撕裂故障分类机制,能有效区分真假撕裂故障,降低误报率。



图 11 基于视觉的故障诊断流程

Fig. 11 Visual based fault diagnosis process

## 2.2 驱动装置故障诊断方法

驱动装置故障诊断方法主要包括专家系统、故障树分析法、时频域分析法、小波变换法和最小熵理论等,可分为知识驱动法和数据驱动法2种<sup>[61]</sup>。

### 2.2.1 知识驱动的驱动装置故障诊断方法

专家系统和故障树分析法也适用于驱动装置故障诊断。文献[62]基于故障事件之间的关联关系,建立了带式输送机故障树模型。文献[63]将故障树分析法和专家系统相结合,设计了基于故障树和专家系统的知识获取、知识表示与故障推理流程(图12),有效减少了专家系统知识内容冗余度,增加了推理

效率,减少了推理时间。文献[64]针对故障树的底事件给出故障处理方案,能够辅助操作员准确判断带式输送机可能发生的故障。

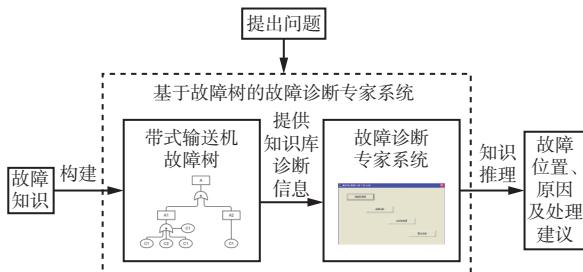


图 12 故障树分析法与专家系统相结合的故障诊断方法

Fig. 12 Fault diagnosis method combining fault tree analysis with expert system

### 2.2.2 数据驱动的驱动装置故障诊断方法

数据驱动法在驱动装置故障诊断中使用较多,常用的包括时频域分析法、最小熵理论、神经网络及小波变换法。文献[5]通过分析减速机内部振动信号时域特性指标的变化趋势,检测减速机内部齿轮存在的磨损和崩齿故障,并结合信号的时域指标和频域指标定位减速器齿轮故障的具体位置。文

献[35]针对滚筒轴承早期故障特征难以提取的问题,提出了一种最小熵解卷积方法,对微弱故障信号进行最优滤波,提高了轴承故障信号的信噪比。文献[65]提出了一种基于小波变换和 BP 神经网络的减速器故障诊断方法,能准确识别出减速器内部齿轮和轴承的磨损、侵蚀等故障。文献[66]利用托辊声音信号的频域特征检测设备的最终故障和突变故障,利用声音信号的时频域特征检测托辊轴承故障,取得了一定效果。文献[67]结合小波包分解和 SVM 提出一种托辊故障诊断方法,可在有限传感器条件下定位故障托辊组位置。文献[68]利用堆叠稀疏编码器和卷积神经网络对带式输送机音频数据进行分析,利用聚类算法从音频数据中提取出故障特征,实现托辊故障检测,具有一定的准确性和实时性。基于音频的托辊故障诊断流程如图 13 所示。



图 13 基于音频的托辊故障诊断流程

Fig. 13 Diagnosis process of idler fault based on audio

各类故障诊断方法对比见表 1。

表 1 各类故障诊断方法对比

Table 1 Comparison of fault diagnosis methods

类型	诊断方法	故障类型	优缺点
知识驱动	专家系统 <sup>[50-51]</sup>	跑偏、打滑、损伤、堆料撒料、滚筒故障	不需要数学模型,但知识库建立较难
	故障树 <sup>[23,53,64]</sup>	跑偏、打滑、损伤、堆料撒料、滚筒故障	因果关系清晰明了,但复杂系统故障树异常复杂
	时频域分析法 <sup>[5,66]</sup>	减速器故障、滚筒故障、托辊故障	计算简单快速,不需要滤波处理,且精度较高,但不能分析随时间变化的信号
	最小熵理论 <sup>[8,35]</sup>	滚筒故障	数据波动情况下精度较高,但易受噪声影响
	BP、卷积神经网络 <sup>[65,68]</sup>	减速器故障、托辊故障	准确度较高,但样本量直接决定模型精度
数据驱动	小波包分解法 <sup>[67,69]</sup>	托辊故障、滚筒故障、减速器故障	可观察信号的局部特性,但冗余度较大
	SVM <sup>[55,68]</sup>	托辊故障、损伤故障	鲁棒性好,但对于大容量样本,难以实现,运算量大
	比差法 <sup>[56]</sup>	打滑故障	简单直接,但是应用场景较少,且误差较大
	音频特征分析法 <sup>[57-58,66-68]</sup>	托辊故障、损伤故障	计算量较小,但易受外界噪声影响
	视觉信息分析法 <sup>[14-15]</sup>	跑偏故障、损伤故障、托辊故障	具有无损检测的优势,但计算量较大,易受外界因素影响

## 3 现存问题及发展趋势

### 3.1 带式输送机故障诊断方法现存问题

1) 早期微小故障难以发现。带式输送机具有复杂的结构,故障诱因较多,演化规律复杂,故障发生前隐蔽性强。虽然带式输送机故障诊断方法日渐成熟,但仍难以发现早期微小故障。

2) 耦合故障难以隔离。带式输送机故障种类繁多,多种故障往往相关,有时会出现一种故障发生后引起另一种故障的现象,易造成误判。例如,输送带跑偏故障会引起撕裂故障,撕裂故障严重时会加重

输送带的损伤,从而引起断带故障。托辊故障会引起跑偏、打滑、撕裂故障。

3) 缺少多模态信息融合利用机制。带式输送机故障诊断常用的信号类型有振动、温度、压力、声音、速度、图像等。现有的带式输送机故障诊断方法往往只利用单一模态的数据,缺少多模态信息融合利用的有效机制。

### 3.2 带式输送机故障诊断方法发展趋势

1) 带式输送机早期微小故障智能预测方法。结合历史故障数据和实时数据推断设备的健康状况,

并预测未来某个时刻是否会发生故障,可提醒工作人员进行预测性维护,从而避免事故发生。合理的故障预测体系能克服传统维修计划过剩的缺点,提高设备的利用率,减少故障维修费用,从而降低成本,提高企业的综合竞争力<sup>[57]</sup>。

2) 带式输送机耦合故障联合诊断方法。带式输送机系统往往发生彼此关联耦合的故障事件,现有单一故障诊断方法不能达到预期的诊断效果。为此,揭示带式输送机耦合故障的关联关系,利用人工智能等新兴技术研究耦合故障联合诊断方法,是带式输送机故障智能诊断方法的发展趋势。

3) 带式输送机多模态信息融合故障诊断方法。智能传感技术的发展促使带式输送机状态感知向精密化和多维化方向发展<sup>[12]</sup>,为振动、温度、压力、声音、速度、图像等多模态信息的采集奠定了基础。利用多模态机器学习技术研究带式输送机多模态信息融合利用机制,开发带式输送机多模态信息融合故障诊断方法,将成为带式输送机故障智能诊断方法发展的重要方向之一。

4) 知识图谱驱动的故障诊断方法。故障知识图谱是包含众多故障实体和故障实体之间关系的结构化故障知识库,通过“实体—关系—实体”的三元组形式将不同的故障实体连接起来,构成语义网络,可清晰体现各类故障现象及故障原因之间的关系网。将故障知识图谱和带式输送机领域知识相结合,能够实现带式输送机设备故障追踪、故障超前预警,通过知识查询、知识推理和辅助决策功能,可提高故障处理、精准挖掘设备潜在故障风险的能力。

#### 4 结语

将带式输送机故障分为输送带故障和驱动装置故障,其中输送带故障主要包括输送带跑偏、打滑、损伤和堆料撒料故障,驱动装置故障包括滚筒故障、托辊故障和减速器故障。分析了带式输送机各类故障的机理及原因,重点阐述了知识驱动和数据驱动的故障诊断方法的研究进展。最后指出了带式输送机故障诊断方法目前存在的问题和未来发展趋势,认为带式输送机早期微小故障智能预测方法、耦合故障联合诊断方法、多模态信息融合故障诊断方法、知识图谱驱动的故障诊断方法是带式输送机故障智能诊断方法发展的重要方向。

#### 参考文献(References):

- [1] 向秀华. 煤矿带式输送机智能故障诊断方法的研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2017.

XIANG Xiuhua. Research on intelligent fault diagnosis of coal mine belt conveyor[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

- [2] ZHOU Donghua, ZHAO Yinghong, WANG Zidong, et al. Review on diagnosis techniques for intermittent faults in dynamic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020; 2337-2347.
- [3] 魏晓宾, 马小平, 李亚朋. 故障诊断技术综述[J]. 煤矿机电, 2009, 30(1): 63-65.
- WEI Xiaobin, MA Xiaoping, LI Yapeng. Survey of fault diagnosis technology[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2009, 30(1): 63-65.
- [4] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 748-758.
- ZHOU Donghua, HU Yanyan. Fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 748-758.
- [5] 孙振宇, 王震坡, 刘鹏, 等. 新能源汽车动力电池系统故障诊断研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 87-104.
- SUN Zhenyu, WANG Zhenpo, LIU Peng, et al. Overview of fault diagnosis in new energy vehicle power battery system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 87-104.
- [6] 薛光辉, 张军, 吉晓冬, 等. 井下带式输送机减速器振动故障诊断研究[J]. 工矿自动化, 2014, 40(6): 51-53.
- XUE Guanghui, ZHANG Jun, JI Xiaodong, et al. Research of vibration fault diagnosis of underground belt conveyor gear reducer[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(6): 51-53.
- [7] DENG Xiaogang, ZHANG Zheng. Nonlinear chemical process fault diagnosis using ensemble deep support vector data description[J]. Sensors, 2020, 20(16). DOI: 10.3390/s20164599.
- [8] LI Xiangong, LI Yu, ZHANG Yuzhi, et al. Fault diagnosis of belt conveyor based on support vector machine and grey wolf optimization[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020. DOI: 10.1155/2020/1367078.
- [9] 王怡恬. 基于谱峭度和最小熵反卷积的轴承故障增强检测[D]. 长沙:国防科技大学, 2017.
- WANG Yitian. Bearing fault enhancement detection based on spectral kurtosis and minimum entropy deconvolution[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [10] 王荣杰. 带式输送机打滑事故原因及对策[J]. 矿山机械, 2001, 29(8): 77.
- WANG Rongjie. Causes and countermeasures of belt conveyor slipping accident[J]. Mining & Processing Equipment, 2001, 29(8): 77.
- [11] YANG Yanli, MIAO Changyun, LI Xianguo, et al. Online conveyor belts inspection based on machine

- vision[J]. *Optik*, 2014, 125(19): 5803-5807.
- [12] YU Binchao, QIAO Tiezhu, ZHANG Haitao, et al. Dual band infrared detection method based on mid-infrared and long infrared vision for conveyor belts longitudinal tear[J]. *Measurement*, 2018, 120: 140-149.
- [13] QIAO Tiezhu, CHEN Lulu, PANG Yusong, et al. Integrative binocular vision detection method based on infrared and visible light fusion for conveyor belts longitudinal tear[J]. *Measurement*, 2017, 110: 192-201.
- [14] QIAO Tiezhu, LIU Weili, PANG Yusong, et al. Research on visible light and infrared vision real-time detection system for conveyor belt longitudinal tear[J]. *Iet Science Measurement & Technology*, 2016, 10(6): 577-584.
- [15] HOU Chengcheng, QIAO Tiezhu, ZHANG Haitao, et al. Multispectral visual detection method for conveyor belt longitudinal tear[J]. *Measurement*, 2019, 143: 246-257.
- [16] 付胜, 刘毅. 带式输送机输送带纵向撕裂线激光辅助视觉检测方法[J]. 矿山机械, 2016, 44(6): 31-35.  
FU Sheng, LIU Yi. Linear laser aided vision inspection method for longitudinal rip of conveyor belt[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2016, 44(6): 31-35.
- [17] 潘学文, 张福生, 路超. 基于故障树的故障诊断专家系统设计[J]. 煤矿机械, 2021, 42(3): 174-176.  
PAN Xuewen, ZHANG Fusheng, LU Chao. Design of fault diagnosis expert system based on fault tree[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(3): 174-176.
- [18] 陈作炳, 刘阳. 基于B/S架构及专家系统的带式输送机远程监控系统设计[J]. 煤矿机械, 2021, 42(5): 202-205.  
CHEN Zuobing, LIU Yang. Design of remote monitoring system for belt conveyor based on B/S architecture and expert system[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(5): 202-205.
- [19] 刘强, 尹同舟, 唐秀山, 等. 掘进机截割系统的故障树-层次分析法诊断分析[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(3): 123-127.  
LIU Qiang, YIN Tongzhou, TANG Xiushan, et al. Diagnosis analysis on fault tree-analytic hierarchy process of roadheader cutting system[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(3): 123-127.
- [20] 彭华亮, 沈暑龙, 李军, 等. 基于故障树的故障诊断专家系统设计[J]. 控制工程, 2019, 26(3): 584-588.  
PENG Hualiang, SHEN Shulong, LI Jun, et al. Design of diagnostic expert system for launch vehicles based on FTA[J]. *Control Engineering of China*, 2019, 26(3): 584-588.
- [21] JEINSCH T, SADER M, NOACK R, et al. A robust model-based information system for monitoring and fault detection of large scale belt conveyor systems[C]. The 4th world congress on intelligent control and automation, Shanghai, 2002: 3283-3287.
- [22] RAVIKUMAR S, KANAGASABAPATHY H, MURALIDHARAN V. Fault diagnosis of self-aligning troughing rollers in belt conveyor system using k-star algorithm[J]. *Measurement*, 2018, 133: 341-349.
- [23] 汪列文. 基于故障树分析的输送带跑偏故障研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.  
WANG Liewen. Study on the deviation fault of conveyor belt based on fault tree analysis[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [24] 武晓斌. 带式输送机跑偏故障治理技术研究[J]. 自动化应用, 2020, 61(6): 153-154, 156.  
WU Xiaobin. Research on treatment technology of belt conveyor deviation fault[J]. *Automation Application*, 2020, 61(6): 153-154, 156.
- [25] 闫峰. 带式输送机跑偏故障综合治理措施研究[J]. 机械工程与自动化, 2020(1): 194-195, 198.  
YAN Feng. Research on comprehensive treatment measures for belt conveyor deviation[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2020(1): 194-195, 198.
- [26] 崔融融. 带式输送机故障自动巡检机器人系统设计[J]. 煤矿机械, 2021, 42(3): 15-18.  
CUI Rongrong. Design of automatic fault inspection robot system for belt conveyor[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(3): 15-18.
- [27] 胡雪. 带式输送机工作状态分析与故障预警方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.  
HU Xue. Research on the working status analysis and fault early warning method of belt conveyor[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [28] 朱艳军, 任晓迪, 席冉. 煤矿主运输带式输送机故障监测和防治系统研究[J]. 中国煤炭, 2014, 40(4): 73-75.  
ZHU Yanjun, REN Xiaodi, XI Ran. Research on fault monitoring and controlling system of main belt conveyor in coal mine[J]. *China Coal*, 2014, 40(4): 73-75.
- [29] 井坤. 基于红外图像处理的带式输送机故障诊断系统研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2021.  
JING Kun. Research on fault diagnosis system of belt conveyor based on infrared image processing[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2021.
- [30] LI Jie, MIAO Changyun. The conveyor belt longitudinal tear on-line detection based on improved SSR algorithm[J]. *Optik*, 2016, 127(19): 8002-8010.
- [31] ZHANG Chuanwei, ZHANG Junnan. Detection of longitudinal belt rip based on canny operator[C]. International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication, Guangzhou, 2017: 939-941.
- [32] 康宏. 矿井带式输送机故障的分析与处理[J]. 煤矿机械, 2009, 30(1): 172-174.  
KANG Hong. Malfunction analysis and disposal of mine belt conveyer[J]. *Coal Mine Machinery*, 2009, 30(1):

- 172-174.
- [33] 冯全兴,于庆龙.带式输送机常见故障分析与处理[J].科技创新导报,2011,8(20):60.  
FENG Quanxing, YU Qinglong. Analysis and treatment of common faults of belt conveyor[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011, 8(20): 60.
- [34] 李小元,周久华.神东矿区带式输送机故障统计分析[J].矿山机械,2014,42(6):136-138.  
LI Xiaoyuan, ZHOU Jiuhua. Statistical analysis of belt conveyor faults in Shendong mining area[J]. Mining & Processing Equipment, 2014, 42(6): 136-138.
- [35] 冷军发,郭松涛,荆双喜,等.基于最小熵解卷积的带式输送机传动滚筒轴承故障诊断[J].河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(4):514-519.  
LENG Junfa, GUO Songtao, JING Shuangxi, et al. Rolling element bearing fault diagnosis of belt conveyor driving drum based on minimum entropy deconvolution[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2015, 34(4): 514-519.
- [36] 姚艳萍,孟文俊,王细平.煤矿带式输送机改向滚筒故障分析[J].煤矿机械,2014,35(3):252-254.  
YAO Yanping, MENG Wenjun, WANG Xiping. Failure analysis of belt conveyor bend pulley in coal mine[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(3): 252-254.
- [37] 张强.基于新型检测方法的带式输送机滚筒故障诊断[J].机械管理开发,2022,37(6):144-145, 151.  
ZHANG Qiang. Fault diagnosis of belt conveyor roller based on new detection method[J]. Mechanical Management and Development, 2022, 37(6) : 144-145, 151.
- [38] 任勇.煤矿带式输送机的常见故障与原因分析[J].现代矿业,2019,35(4):147-148.  
REN Yong. Analysis of common faults and causes of coal mine belt conveyor[J]. Modern Mining, 2019, 35(4): 147-148.
- [39] LIU Xiangwei, PANG Yusong, LODEWIJKS G, et al. Experimental research on condition monitoring of belt conveyor idlers[J]. Measurement, 2018, 127: 277-282.
- [40] SHIRI H, WODECKI J, ZIETEK B, et al. Inspection robotic UGV platform and the procedure for an acoustic signal-based fault detection in belt conveyor idler[J]. Energies, 2021, 14(22). DOI: 10.3390/en14227646.
- [41] GŁADYSIEWICZ L, KRÓL R, KISIELEWSKI W. Measurements of loads on belt conveyor idlers operated in real conditions[J]. Measurement, 2018, 134: 336-344.
- [42] 韩龙.煤矿皮带运输机的减速装置断轴分析及改进[J].机械管理开发,2018,33(8):285-287.  
HAN Long. Analysis and improvement of shaft breaking of deceleration device of belt conveyor in coal mine[J]. Mechanical Management and Development, 2018, 33(8): 285-287.
- [43] 姚少波.矿用带式输送机减速机断轴原因分析与改进措施研究[J].机电工程技术,2020,49(6):199-200.  
YAO Shaobo. Analysis and improvement of shafts broken of mine belt conveyor reducer[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(6) : 199-200.
- [44] 陈志矿.浅谈小煤矿皮带运输机常见故障的处理方法[J].科技信息,2011(14):697.  
CHEN Zhikuang. Brief discussion on the treatment of common faults of belt conveyor in small coal mines[J]. Science & Technology Information, 2011(14): 697.
- [45] 何宝泉,王彬.带式输送机减速器的轴承故障诊断[J].煤矿机械,2013,34(10):256-257.  
HE Baoquan, WANG Bin. Bearing fault diagnosis belt conveyor reducer[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(10): 256-257.
- [46] 宋钦一.基于故障树和贝叶斯网络的带式输送机故障诊断[J].矿山机械,2022,50(9):55-58.  
SONG Qinyi. Fault diagnosis on belt conveyor based on fault tree and Bayesian network[J]. Mining & Processing Equipment, 2022, 50(9): 55-58.
- [47] 宋康康.带式输送机输送带故障智能监测保护系统的设计[J].机械管理开发,2020,35(5):193-195.  
SONG Kangkang. Design of intelligent monitoring and protection system for belt conveyor belt fault[J]. Mechanical Management and Development, 2020, 35(5): 193-195.
- [48] 周东华,纪洪泉,何潇.高速列车信息控制系统的故障诊断技术[J].自动化学报,2018,44(7):1153-1164.  
ZHOU Donghua, JI Hongquan, HE Xiao. Fault diagnosis techniques for the information control system of high-speed trains[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(7): 1153-1164.
- [49] XIAO Yanjun, HAN Furong. Research on fault diagnosis method of rapier loom based on the fusion of expert system and fault tree[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 41(2): 3429-3441.
- [50] 宋新扩.带式输送机故障分析及其诊断系统设计研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.  
SONG Xinkuo. Fault analysis and diagnosis system design of belt conveyor[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [51] 张学舜.带式输送机监测监控及故障诊断专家系统的设计及应用[J].机械管理开发,2022,37(8):164-165, 168.  
ZHANG Xueshun. Design and application of an expert system for monitoring and fault diagnosis of belt conveyors[J]. Mechanical Management and Development, 2022, 37(8): 164-165, 168.
- [52] 金鑫,任献彬,周亮.智能故障诊断技术研究综述[J].国外电子测量技术,2009,28(7):30-32.  
JIN Xin, REN Xianbin, ZHOU Liang. Overview on

- intelligent technology of fault diagnosis[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2009, 28(7) : 30-32.
- [53] 高文博. 静态故障树分析法在皮带机胶带故障检测中的应用[J]. 江西煤炭科技, 2016(3): 134-136, 140.
- GAO Wenbo. Application of static fault tree method to belt fault detection in belt conveyor[J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2016(3): 134-136, 140.
- [54] 刘宏达, 汉京勇, 申乃军, 等. 基于支持向量机的 SCR 整流电路故障诊断方法[J]. 船舶工程, 2012, 34(6): 25-29.
- LIU Hongda, HAN Jingyong, SHEN Naijun, et al. Fault diagnosis method for SCR rectifier circuit based on support vector machines[J]. Ship Engineering, 2012, 34(6): 25-29.
- [55] 蒋权, 甄晓阳, 王晓辉, 等. 输送带跑偏故障的原因及诊断[J]. 机械工程与自动化, 2014(1): 141-143.
- JIANG Quan, ZHEN Xiaoyang, WANG Xiaohui, et al. Reasons and fault diagnosis of conveyor belt running deviation[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(1): 141-143.
- [56] 马晶晶. 带式输送机运行状态综合监测研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
- MA Jingjing. Research on comprehensive monitoring of belt conveyor running state[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013.
- [57] 苗长云, 邵琦. 基于声音的带式输送机输送带纵向撕裂检测方法[J]. 天津工业大学学报, 2021, 40(6): 70-75, 82.
- MIAO Changyun, SHAO Qi. Detection method of longitudinal tear of belt conveyor belt based on sound[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2021, 40(6): 70-75, 82.
- [58] 祁隽燕, 谭超, 李浩. 基于数字图像处理的皮带纵向撕裂视觉识别[J]. 煤炭技术, 2006, 25(11): 15-17.
- QI Junyan, TAN Chao, LI Hao. Vision identification for longitudinal rip of steel-cord belt based on digital image process[J]. Coal Technology, 2006, 25(11): 15-17.
- [59] 祁隽燕, 闫海峰, 谭超, 等. 基于LabVIEW的胶带撕裂机器视觉检测系统研究[J]. 煤炭工程, 2009, 41(9): 123-125.
- QI Junyan, YAN Haifeng, TAN Chao, et al. Machine vision inspection system of belt tearing base on LabVIEW[J]. Coal Engineering, 2009, 41(9): 123-125.
- [60] PENG Xiaoming. A novel image-based method for conveyor belt rip detection[C]. IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing, Kunming, 2013: 1-4.
- [61] HOMIŠIN J, GREGA R, KAŠŠAY P, et al. Removal of systematic failure of belt conveyor drive by reducing vibrations[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 99: 192-202.
- [62] 陈劭康. 带式输送机故障预测与健康状态评估技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- CHEN Shaokang. Research on fault prediction and health assessment technology of belt conveyor[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [63] 崔扬扬. 可伸缩带式输送机故障诊断与对策[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
- CUI Yangyang. Fault diagnosis and countermeasure of telescopic belt conveyor[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2013.
- [64] 于淑政, 崔扬扬, 曹艳芳. 带式输送机故障分析与处理[J]. 煤矿机械, 2012, 33(10): 282-284.
- YU Shuzheng, CUI Yangyang, CAO Yanfang. Analysis and treatment of belt type conveyor fault[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(10): 282-284.
- [65] 闫来清. 矿用带式输送机减速器故障诊断方法研究[J]. 电气应用, 2014, 33(23): 82-85.
- YAN Laiqing. Research on fault diagnosis method for reducer of mining belt conveyor[J]. Electrotechnical Application, 2014, 33(23): 82-85.
- [66] LIU Yi, MIAO Changyun, LI Xianguo, et al. Research on the fault analysis method of belt conveyor idlers based on sound and thermal infrared image features[J]. Measurement, 2021, 186. DOI: 10.1016/j.measurement. 2021.110177.
- [67] LI Wei, WANG Zewen, ZHU Zhencai, et al. Design of online monitoring and fault diagnosis system for belt conveyors based on wavelet packet decomposition and support vector machine[J]. Advance in Mechanical Engineering, 2013. DOI: 10.1155/2013/797183.
- [68] YANG Mingjin, ZHOU Wenju, SONG Tianxiang. Audio-based fault diagnosis for belt conveyor rollers[J]. Neurocomputing, 2020, 397: 47-56.
- [69] 曹贯强. 带式输送机托辊故障检测方法[J]. 工矿自动化, 2020, 46(6): 81-86.
- CAO Guanqiang. Fault detection method for belt conveyor roller[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(6): 81-86.