

团 体 标 准

T/SIGA 004—2025

皮带输送机挂轨机器人故障诊断技术要求

Technical requirements for fault diagnosis of
belt conveyor rail-mounted robots

2025-07-22 发布

2025-07-22 实施

上海市图像图形学学会

发布

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由上海市图像图形学学会归口。

本文件起草单位：新疆大学、新疆准东特变能源有限责任公司、深圳优艾智合机器人科技有限公司。

本文件主要起草人：袁亮、陶庆、张建博、肖文东、冉腾。

本文件首批承诺执行单位：新疆大学、新疆准东特变能源有限责任公司、深圳优艾智合机器人科技有限公司。

皮带输送机挂轨机器人故障诊断技术要求

1 范围

本文件规定了皮带输送机挂轨机器人故障诊断的流程，以及在线故障诊断、在线故障报警、离线测试诊断和诊断结果要求。

本文件适用于皮带输送机挂轨机器人制造商、使用单位、维护服务商等相关方进行故障诊断工作，设备的安全、稳定运行，提高故障诊断的准确性和效率。其他型式的挂轨机器人故障诊断可参照采用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2298—2010 机械振动、冲击与状态监测 词汇

GB/T 19873.2—2009 机器状态监测与诊断 振动状态监测 第2部分：振动数据处理、分析与描述

GB/T 22394.1—2015 机器状态监测与诊断 数据判读和诊断技术 第1部分：总则

GB/T 25889—2010 机器状态监测与诊断 声发射

GB/T 29716.1—2013 机械振动与冲击 信号处理 第1部分：引论

GB/T 42983.2—2023 工业机器人 运行维护 第2部分：故障诊断

GB/T 43782—2024 人工智能 机器学习系统技术要求

ISO 18129:2015 机器状态监测和诊断 性能诊断方法 (Condition monitoring and diagnostics of machines - Approaches for performance diagnosis)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

故障 **fault**

系统或部件不能执行某项规定功能的状态

3.2

在线 **online**

处于运行状态。

3.3

离线 **offline**

处于脱离生产的、非作业状态。

3.4

故障特征 **fault feature**

用于检测皮带故障是否发生、严重程度的表征参数。

3.5

异常报警 **abnormal alarm**

当皮带检测系统中出现偏离正常标准的状态时触发的预警信号。此类报警表明系统存在潜在风险，需干预但尚未完全丧失功能。

3.6

故障报警 fault alarm

皮带系统因部件劣化或失效导致丧失规定功能时触发的紧急信号。此类报警表明设备已无法执行预定任务，需立即停机维修。

3.7

故障诊断 diagnose

为确定故障性质（种类、状况、程度）而进行的检验。

3.8

卷积神经网络 convolutional neural network; CNN

一种专门用来处理具有类似网络结构数据的神经网络，是主要的深度神经网络结构之一。

3.9

数据清洗 diagnose

对采集到的机器状态监测数据进行清洗，去除噪声和异常值。

3.10

特征提取 diagnose

利用深度学习技术自动从原始数据中提取有用的特征，这些特征可能包括时域特征、频域特征、时频域特征等。

3.11

Yolo 目标检测算法 you only look once

YOLO 是一种实时目标检测算法，其核心思想是将目标检测视为单次回归问题。

4 故障诊断流程

4.1 皮带输送机挂轨机器人故障诊断宜按照图 1 所示的流程进行。

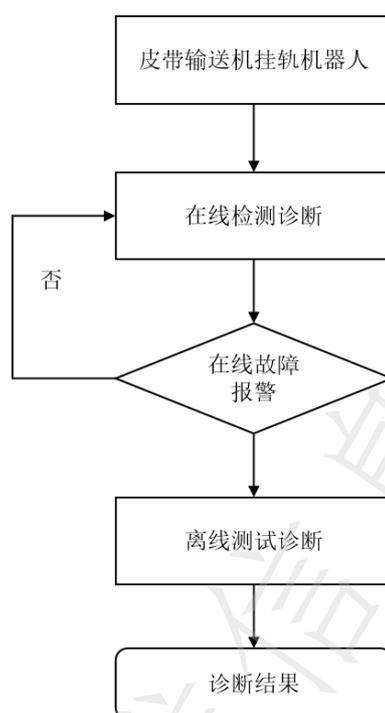


图 1 皮带输送机挂轨机器人故障诊断流程

4.2 皮带输送机挂轨机器人技术要求参见附录 A。

5 在线故障诊断

5.1 在线监测参数应符合 GB/T 42983.1—2023 中监测参数类别、监测项目和监测方式等的要求。

5.2 皮带输送机挂轨机器人在线故障报警宜基于控制总线信号和附加传感器的方式并结合人工智能方法，识别皮带输送机是否存在异常或故障，若不存在异常或故障，则持续进行在线监测。

5.3 若报警则对皮带输送机进行离线测试诊断，离线测试诊断包括离线测试和离线诊断。离线测试时宜按照皮带输送机是否能独立运动来选择测试方式，测试方式包括单轴测试和工况测试；离线诊断宜采用信号处理方法和人工智能诊断方法对皮带输送机进行故障诊断。

6 在线故障报警

6.1 控制总线的控制异常报警

皮带输送机控制异常报警包括硬件报警、控制超差报警和通信异常报警，在线故障报警中关于控制总线异常报警的要求如下（包括但不限于）：

- a) 硬件报警宜采用模拟硬件电路方式，当硬件电路输入异常时输出特定电平，发生硬件报警；
- b) 控制超差报警宜采用阈值比较方式，监测参数在规定时间内超过值，发生控制超差报警；
- c) 通信异常报警宜采用“问答”方式，若规定时间内无反馈，则状态标志位置 1，发生通信异常报警。

6.2 残差故障的故障报警

- 6.2.1 基于总线通信的数据获取方式,宜采用观测器和残差对皮带输送机进行在线故障报警。
- 6.2.2 针对电机故障报警,可建立伺服电机观测器,宜采用电流作为观测器输出参数,驱动器信号(转矩、转速、转角等)作为输入参数,使用电流残差值对电机进行在线故障报警。观测器的建立应符合 ISO 18129:2015 中 5.2 的要求。

6.3 附加传感器的故障报警

- 6.3.1 皮带输送机伺服电机和减速器宜采用振动传感器、声发射传感器和温度传感器等附加传感器进行在线故障报警。
- 6.3.2 针对电机故障报警,宜采用附加振动传感器和温度传感器来进行在线故障报警。
- 6.3.3 对于附加振动传感器,宜采用振动信号的均方根值作为特征指标来对电机进行在线故障报警。
- 6.3.4 对于附加温度传感器,宜采用温度信号的有效值作为特征指标来对电机进行在线故障报警。
- 6.3.5 针对减速器故障报警,宜采用附加振动传感器和声发射传感器来进行在线故障报警。
- 6.3.6 对于附加振动传感器,宜采用振动信号的均方根值作为特征指标来对减速器进行在线故障报警。
- 6.3.7 对于附加声发射传感器,宜选用声发射信号的能量作为特征指标来对减速器进行在线故障报警。
- 6.3.8 特征指标的选取应符合 GB/T 19873.2—2009 中 3.3、GB/T 25889—2010 中 4.1 和 GB/T 2298—2010 中 6.11 的要求,同时宜按如下方法选择:
- a) 针对振动传感器,采用均方根值等作为特征指标;
 - b) 针对声发射传感器,采用能量等作为特征指标;
 - c) 针对温度传感器,采用平均值等作为特征指标。

6.4 有人工智能辅助的故障报警

6.4.1 基本要求

- 6.4.1.1 在执行环境智能感知任务时,皮带输送机挂轨机器人宜集成可见光图像、红外图像及声音采集功能,实施多源信息采集。
- 6.4.1.2 机器人运用大数据筛选、图像处理、视觉跟踪及机器学习技术,通过图像与声音检测识别技术,结合低光照图像增强与声音去噪技术,有效提取并准确识别起火,托辊高温,皮带高温等故障特征。

6.4.2 视频采集

- 6.4.2.1 应在皮带机头部和尾部关键位置安装高清摄像头,并辅以光源以克服环境黑暗,确保视频清晰。
- 6.4.2.2 采集的视频应经抽帧处理转化为图像数据,随后进行帧间差分、背景减除等预处理,并对图像数据进行标注操作,以构皮带撕裂,皮带偏移,托辊松动数据集。

注 1: 在机器学习和计算机视觉中,标注指对原始数据添加结构化标签的过程。

6.4.3 声音采集

- 6.4.3.1 应配置多通道音频采集技术,确保能全面捕捉不同位置和方向的声音数据。
- 6.4.3.2 声音发射传感器的安装位置与方向应在传感器信号感知范围内,并定期校准以保证其灵敏度和准确性。在声音预处理阶段,应运用小波变换或傅里叶变换等去噪技术,去除背景噪声并增强异常声音的可听性。
- 6.4.3.3 宜利用 Mel 频率倒谱系数、Chroma 特征和频谱平坦度等方法提取关键声音特征,并通过卷积神经网络等深度学习模型进行异常声音的自动分类与识别。

注 1: Mel 频率倒谱系数是一种广泛用于语音识别和音频处理领域的特征提取技术,简称 MFCC。它模拟人耳对声音频率的非线性感知特性。

注 2: chroma 特征是一种描述音乐调性内容的音频特征。

注 3: 频谱平坦度用来描述信号频谱的均匀性。

6.4.4 算法训练与测试

6.4.4.1 宜采用 Yolo 目标检测算法进行目标检测,并通过融合注意力机制、替换主干网络等手段优化模型,以提取皮带运动过程中的关键特征,如速度、加速度、位移及皮带表面纹理、颜色变化等。算法精度宜按照准确率和召回率作为参考指标,目标检测得准确率宜不小于 65%、召回率不小于 60%。

6.4.4.2 为进一步提升检测效果,宜采取不同的目标检测算法或设置不同的损失函数替换原 Yolo 算法中的损失函数,确保所选算法在检测速度上能满足检测精度和实时性需求。

6.4.5 异常报警

人工智能报警宜符合 GB/T 43782—2024 中 6.2 的要求。

7 离线故障诊断

7.1 诊断流程

宜按照图 2 所示流程进行离线测试诊断。离线故障诊断内容包括数据采集,信号处理和人工智能诊断,宜满足 GB/T 22394.1—2015 中 6.3 和 6.4 的要求。

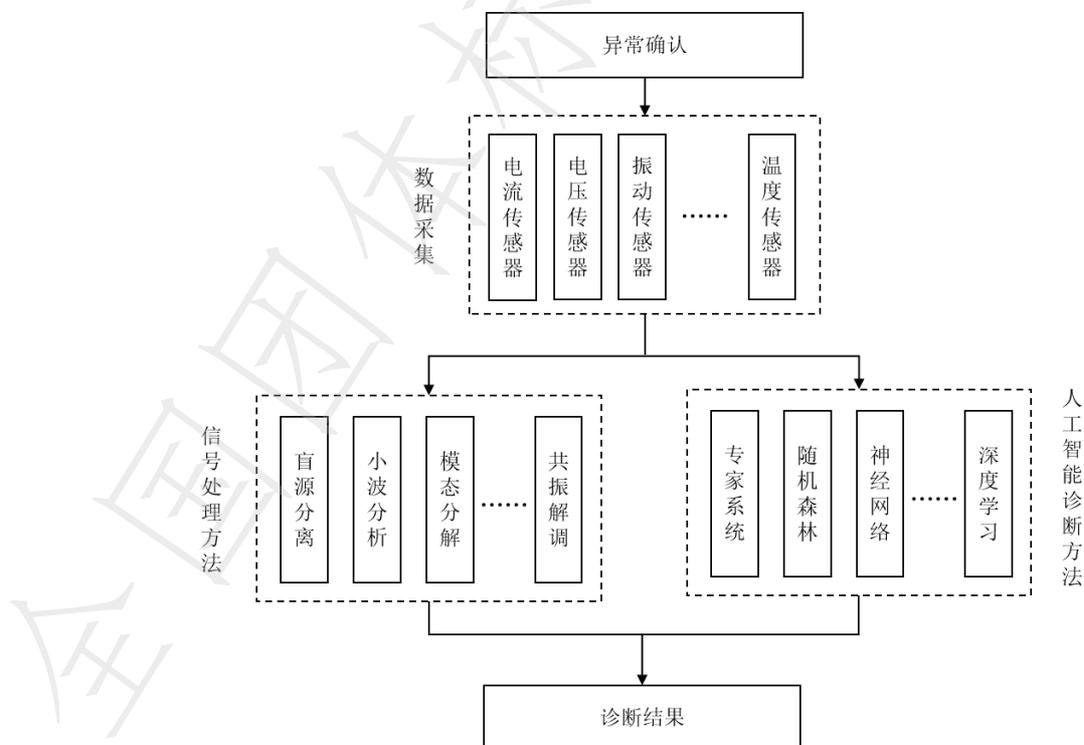


图 2 皮带输送机挂轨机器人离线故障诊断流程

7.2 离线测试

7.2.1 如皮带输送机能单轴独立运动，宜采用单轴测试方法，将皮带输送机的各轴置于原点位置，单轴运行，采集测试数据，并宜利用图 2 中的诊断流程，进行报警部件的故障诊断。

7.2.2 如皮带输送机不能单轴独立运动，宜选用特定工况或实际作业工况测试，采集测试数据，并利用图 2 中的诊断流程，进行报警部件的故障诊断。

7.3 离线诊断

7.3.1 信号处理方法

信号在幅值、相位和频率上会与故障存在映射关系。信号处理方法宜符合 GB/T 29716.1—2013 中 7.4 和 7.5 的要求，信号处理方法宜采用包络分析、谱分析法、小波分析等。

7.3.2 有人工智能辅助的诊断方法

人工智能辅助的诊断方法宜符合 GB/T 22394.1—2015 中 6.3.4 和 6.3.8 的要求，并宜扩展选用基于深度学习的诊断方法；其中深度学习网络模型的建立方法参见附录 B。

基于深度学习的诊断模型宜采用如下流程：

- a) 模型构建：选择深度学习模型。如：CNN、循环神经网络（Recurrent Neural Network, RNN）和长短时记忆网络（Long Short-Term Memory, LSTM）等来构建诊断模型；
- b) 模型训练：使用标记好的数据集对模型进行训练，使模型能够学习到机器状态与故障类型之间的映射关系；
- c) 模型评估：通过交叉验证等方法评估模型的诊断性能，包括准确率、召回率、F1 分数等指标；
- d) 模型应用：将训练好的模型应用于实际的机器状态监测与诊断中，对新的监测数据进行实时诊断，输出诊断结论。

8 诊断结果

诊断结论宜包括但不限于符合以下要求：

- a) 明确性：诊断结论应明确指出故障的类型、位置；
- b) 量化指标：宜提供量化指标来表示故障的程度，如故障概率、故障影响程度等严重程度等信息。附录 C 给出了皮带输送机挂轨机器人故障严重程度分级参考；
- c) 利用图表、图像等手段，直观展示故障特征、诊断结果等。
- d) 诊断报告至少宜包含但不限于以下内容：
- e) 基本信息：包括被诊断对象的名称、型号、编号等基本信息；
- f) 诊断目的与方法：说明本次诊断的目的、采用的诊断方法（包括基于深度学习的诊断方法）及其原理；
- g) 数据采集与处理：描述数据采集的过程、方法，以及数据预处理的步骤和结果；
- h) 诊断过程：概述基于深度学习的诊断方法的具体实施步骤，包括模型的选择、训练、验证等；
- i) 诊断结论：根据诊断结果，明确指出故障的类型、位置、严重程度等信息，并提供必要的量化指标和可视化表示；
- j) 处理建议：基于诊断结论，提出相应的处理建议，包括维修、更换部件、调整运行参数等；
- k) 附录：包括相关数据、图表、图像等辅助材料，以便验证诊断结论的准确性。

附 录 A

(资料性)

皮带输送机挂轨机器人技术要求

A.1 作业条件要求

皮带输送机挂轨机器人的作业条件宜符合下列要求：

- 安全作业环境：作业区域没有危险物品或障碍物，提供必要的安全防护设施，如安全护栏、紧急停止按钮等；
- 挂轨系统：具备良好的稳定性，承载能力大于 60kg，确保机器人在挂轨上平稳移动。定期检查挂轨系统的状态，确保其运行正常；
- 电源要求：提供稳定的电源供应，以满足机器人系统的功率需求，充电时间小于 2h，保证续航时间大于等于 8h。
- 通信要求：确保通信设备的带宽和稳定性，通信时延小于 40ms，上行速率大于等于 200Mbps，以支持机器人与监控系统之间的实时数据传输；
- 工作环境温度：保持在-10℃到+40℃之间，避免极端高温或低温影响设备运行。
- 设备表面温度：在正常运行条件下，设备（如托辊、驱动滚筒等）表面温度不超过 60℃。
- 负载系数：输送机的负载系数应控制在额定负荷的 80%以下，以防止过载引起高温。
- 带速控制：带速应根据物料性质合理设置，一般情况下控制在 1.5m/s 到 3.5m/s 之间，避免过快运行产生过多摩擦热。

A.2 作业性能要求

在使用说明书规定的作业速度和符合A.1规定的作业条件下，皮带输送机挂轨机器人作业性能指标宜符合表1的规定。

表 A.1 作业性能参考指标

项 目	参 考 指 标
平均诊断响应时间/(s/故障)	≥30
故障诊断准确率/%	≥93
覆盖长度/m	≥200
作业温度/℃	≤80
检测温度/℃	-20~80
无故障运行时间/h	≥500
状态检测频率/(采样次数/s)	≥10

A.3 性能要求

A.3.1 皮带输送机挂轨机器人宜配备独立的行走制动装置，能够在制动时保持稳定，制动距离不宜超过1m，并且不宜有后轮跳起的情况发生。

A.3.2 皮带输送机挂轨机器人宜配备独立的驻车制动装置，能够可靠锁定，即使在20%的干硬纵向坡道上也能够牢固停放。

A.3.3 皮带输送机挂轨机器人宜配备风扇和冷却装置，在高温环境中，增加通风和冷却措施，降低设备温度；局部通风系统，对重点区域进行局部降温和通风，防止高温和烟雾聚集。

A.3.4 喷水灭火系统在检测到火灾时，能够自动启动喷水装置进行灭火；气体灭火系统，用于特殊区域的灭火，如配电室等，避免水的使用。

A.3.5 皮带输送机挂轨机器人的动态环境噪声宜不大于95 dB，确保周围人员的听力不受损害。

A.4 环保要求

皮带输送机挂轨机器人污染物排放参考HJ 1014的规定。

附录 B (资料性) 一种深度学习网络模型的建立方式

B.1 深度学习网络模型的选择

皮带输送机挂轨机器人故障诊断的神经网络模型宜采用卷积神经网络,其建模流程包括卷积层、激活函数、池化层、连接层等的建立以及训练。

B.2 神经网络模型的建立

考虑到皮带输送机挂轨机器人主机在处于不同故障模式下的振动信号产生的低频和低频信息有明显的区别,大卷积核会着重提取信号的短时高频特征,小卷积核则主要获取信号的全局信息即低频特征,因此宜采取以下建模方式:

- 采用3个卷积层、3个全连接层、3个池化层;
- 采用由一层大卷积核和三层小卷积核堆叠而成的一维卷积核;
- 损失函数采用交叉熵损失函数;
- 优化函数采用自适应动量的随机优化算法;
- 激活函数采用整流线性单元;
- 池化层采用最大池化的方法。

采用上述方式建立的卷积层、全连接层以及网络整体结构。

B.3 预训练模型的构建及训练

针对皮带输送机的故障特征,采用一次训练所抓取的数据样本数量宜设置为 32、学习率为 0.001 的超参数值进行模型训练,并采用误差反向传播机制对所建立的卷积神经网络进行训练,使其准确率达到 95%以上。

构建域自适应结构的域分类器,将目标域与源域数据随机按 1:1比例混合构建数据集,若目标域数据过少可适当提高源域数据比例至 1.3:1。添加源域数据标签为0,目标域数据标签为1,添加领域类型标签以后,源域数据包含故障类型和领域类型共两种标签,目标域数据仅有领域类型标签。串联特征提取网络、自适应层与域分类器网络来训练域分类器,使其判别精度到50%左右。

附 录 C
(资料性)
机器人故障严重程度分级方式

关于皮带输送机挂轨机器人故障严重程度，定义了分级方案（L1-L5），参考了机器人智能化分级框架和工业设备故障管理实践，该分级标准结合了设备运行安全要求与机器人智能化分级方法论。对于故障的严重程度描述宜采用如下分级方式：

- a) L1（轻微故障）：
 - 特征：不影响设备正常运行，仅需观察记录；
 - 示例：单个传感器数据偶发漂移、非关键部位轻微异响；
 - 处理要求：24小时内记录并纳入周期性维护计划。
- b) L2（一般故障）：
 - 特征：引起局部性能下降，需计划性维修；
 - 示例：输送带跑偏量 $<5\%$ 、托辊轻微磨损；
 - 处理要求：72小时内安排停机检修。
- c) L3（中度故障）：
 - 特征：导致功能部分失效，需紧急干预；
 - 示例：关键传感器持续失效、驱动电机温度超限；
 - 处理要求：立即启动备用设备切换，8小时内修复。
- d) L4（严重故障）：
 - 特征：系统主要功能丧失，存在安全风险；
 - 示例：输送带撕裂 $>10\text{cm}$ 、控制系统通信中断；
 - 处理要求：触发急停装置，2小时内应急响应。
- e) L5（灾难性故障）：
 - 特征：可能引发人身伤害或重大财产损失；
 - 示例：机械结构断裂、电气系统短路起火；
 - 处理要求：立即执行安全联锁，启动事故应急预案。

参 考 文 献

- [1] GB/T 35721—2017 输电线路分布式故障诊断系统
 - [2] GB/T 39005—2020 工业机器人视觉集成系统通用技术要求
 - [3] GB/T 39129—2020 机床数控系统 故障诊断与维修规范
 - [4] GB/Z 43065.2—2023 机器人 工业机器人系统的安全设计 第2部分：手动装载/卸载工作站
 - [5] DL/T 337—2010 给煤机故障诊断及煤仓自动疏松装置
 - [6] HJ 1014—2020 非道路柴油移动机械污染物排放控制技术要求
 - [7] DB50/T 1393—2023 电梯永磁同步驱动主机故障诊断导则
-