

基于3D视觉技术的运输皮带表面缺陷检测研究

芦建文¹, 陈智辉², 赵楠¹, 曹玮亮³, 鲍刚枫³, 杨盼盼³, 代东明³

- 内蒙古新联信息产业有限公司, 内蒙古 包头 014010;
- 内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢炼铁厂, 内蒙古 包头 014010;
- 北京中远通科技有限公司, 北京 102206)

摘要: 文章针对矿山、冶金等行业中运输皮带常见的撕裂、表面划伤、边缘破损、物料异物等问题, 提出了采用3D视觉技术检测的方法, 详细论述了基于3D视觉技术检测运输皮带表面缺陷的技术原理、检测算法, 并叙述了适用于高粉尘作业环境的视觉图像采集装置的设计及安装方式。运输皮带表面劣化趋势及撕裂检测系统适用于钢铁冶金、港口等大宗散装物料输送作业场景, 目前在钢铁企业已经运行两年, 期间及时准确地检测到运输皮带表面的划伤, 避免了故障进一步扩大, 取得了良好的效果。

关键词: 运输皮带; 表面劣化趋势检测; 撕裂检测; 3D视觉技术; 数字图像处理

中图分类号: TK08

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)05-0082-07

Research on Detection of Surface Defects for Travelling Belt Based on 3D Vision Technology

Lu Jianwen¹, Chen Zhihui², Zhao Nan¹, Cao Weiliang³,
Bao Gangfeng³, Yang Panpan³, Dai Dongming³

(1. Inner Mongolia Xinlian Information Industry Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China;

2. Rare Earth Steel Iron-making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China;

3. Beijing Zhongyuantong Science and Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: In the paper, it is proposed the method of detecting such problems as tearing, surface tears, edge damages and foreign matters of materials for travelling belt adopting 3D vision technology in such industries as mining and metallurgy, elaborated the technical principles and detection algorithms of detecting surface defects for travelling belt based on 3D vision technology as well as described the design and installation way of visual image acquisition device suitable for dusty working environment. The detection system of surface deterioration trend and tearing for travelling belt is suitable for such operation environments of transporting large-scale bulk material as steel metallurgy and ports. It has been in operations in steel enterprises for two years, during which the surface tears of travelling belt are detected timely and accurately so that

收稿日期: 2025-08-21

基金项目: 内蒙古自治区重点研发和成果转化项目(2022YFHH0124)。

作者简介: 芦建文(1969-), 男, 山西省朔州市人, 硕士, 正高级工程师, 现从事计算机与自动化工作。

further expansion of faults is avoided and good effects are achieved.

Key words: travelling belt; detection of surface deterioration trend; detection of tearing; 3D vision technology; digital image processing

皮带输送机是钢铁、矿山、火电等大型企业在生产过程中运输煤炭、矿石、铁精矿等散粒物料的主要设备。输送机运行速度快、距离长,如果对皮带运行状态检测不及时,极易发生撕裂等生产设备事故。一旦发生撕裂,在几分钟内就会造成数十米甚至数百米的皮带损坏或者全部毁坏,造成价值数十万元甚至上百万元的经济损失,而且会影响正常生产过程,给企业造成巨大的直接和间接经济损失。

大型制造企业皮带数量多、长度大、环境恶劣,单靠人工巡检无法做到全方位、全时段覆盖。即使设置了监控相机,也可能因为照明、视角等原因难以检测到多种类型的故障,例如皮带上表面(工作面)、下表面(非工作面)的缺陷由于物料遮挡和视角所限难以拍摄。此外,皮带通常安装了机械式的检测装置,出现严重的跑偏、撕裂等故障时被皮带触碰后输出紧急停机信号防止事故扩大^[1],但无法在事故萌芽阶段提供预警。

对数量众多的皮带进行自动化、智能化故障检测与预警,既要达到更好的检测效果,还要考虑增设大量硬件带来的成本。本文提出的皮带缺陷检测系统安装在重点皮带的关键部位,使用3D相机与智能检测算法检测皮带上、下表面的缺陷,根据缺陷的尺寸与深度进行量化分级,存储缺陷的各项参数并发送给上级控制系统。该系统能够对皮带表面的缺陷进行全天候、大范围的自动化检测,改善现场作业人员的工作环境,减轻劳动强度,降低事故率,减小因皮带损坏以及影响生产带来的直接和间接经济损失,提高相关企业的生产效率与经济效益。

1 皮带表面常见缺陷与检测方法

皮带常见的故障有跑偏、异物、打滑、堆料、撕裂、着火等^[2],进一步细分还包括表面磨损、表面划伤、边缘破损、物料异物、托辊卡滞等。上述几种故障存在一定的关联性,例如工作表面的磨损与划伤如果不加处理,可能导致撕裂;大块或尖锐的异物可能直接造成皮带撕裂;跑偏可能引起皮带边缘破损;皮带与主动轮之间的打滑、皮带与托辊之间的摩擦都会引起发热,甚至引起火灾。

传统的跑偏检测方法通常在托辊支架两侧设置

接触式传感器,皮带跑偏严重时触碰传感器引发报警;或者在皮带上方安装工业相机,运用适当算法检测皮带两侧边缘的位置,超过一定范围则认定为跑偏^[3]。打滑检测主要依靠监控牵引电机的工作状态。火灾检测主要依靠烟雾报警器或者热成像仪^[4],也可使用气味传感器。

撕裂检测的方法较多,机械式撕裂报警装置是在贴近皮带下表面设置钢丝,两端带有力学传感器^[5]。一旦皮带表面出现较严重的撕裂,翘起的部位触碰钢丝产生报警信号。此类检测装置无法检测较小的撕裂与穿孔以及皮带工作表面(上表面)的磨损与划伤。

使用视觉手段检测撕裂通常采用图像特征分析^[6]或投射结构光方式,前者对皮带表面图像的纹理特征进行分析,后者在皮带下表面投射单线激光^[7],遇到撕裂部位则激光线出现转折与突变,从图像上寻找这些激光线的异常位置。由于皮带运行速度快,通常采用线阵相机^[8]或者高速面阵相机^[9]。

皮带表面的划伤、撕裂、穿孔具有明显的凹凸特征,非常适于使用3D视觉技术检测。相比于结构光的方式,3D相机的优势在于能够定量测量缺陷部位的尺寸。

2 检测系统的组成

根据上节对皮带各种故障的分析,本文优先检测危害程度较大的皮带表面划伤与撕裂,采用扫描式^[10]3D相机提高检测精度,并增加彩色相机检测皮带表面的磨损情况,由检测软件对故障情况进行识别、统计、上传。

检测设备的安装位置如图1所示,皮带有上下2个表面,至少需要2套检测设备。三托辊支撑的皮带横截面呈倒梯形,下表面受到张力作用拉开微小裂缝,而且不受物料遮挡,因此对下表面进行撕裂检测的效率较高。下表面检测设备安装在下料斗之后的位置,此处皮带受到物料下落的冲击,以及物料中尖锐异物的磨损和刺穿,皮带容易发生撕裂,及时报警可防止故障扩大。

由于上下2层皮带之间的空间非常狭窄,3D相

机工作距离受限,因此对于宽度较大的皮带,需要在皮带左右两侧各安装 1 台 3D 相机,前后错开 1 个托辊间距,从下向上拍摄,如图 2 所示。下表面检测设

备由线激光 3D 相机、防护壳体^[11]、除尘装置、支架组成。

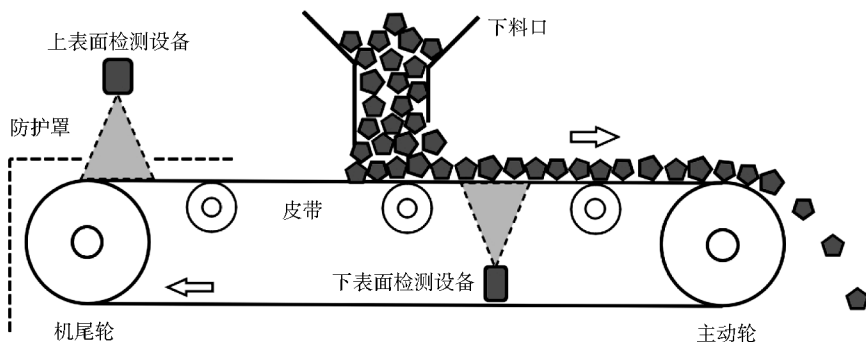


图 1 检测设备的安装位置

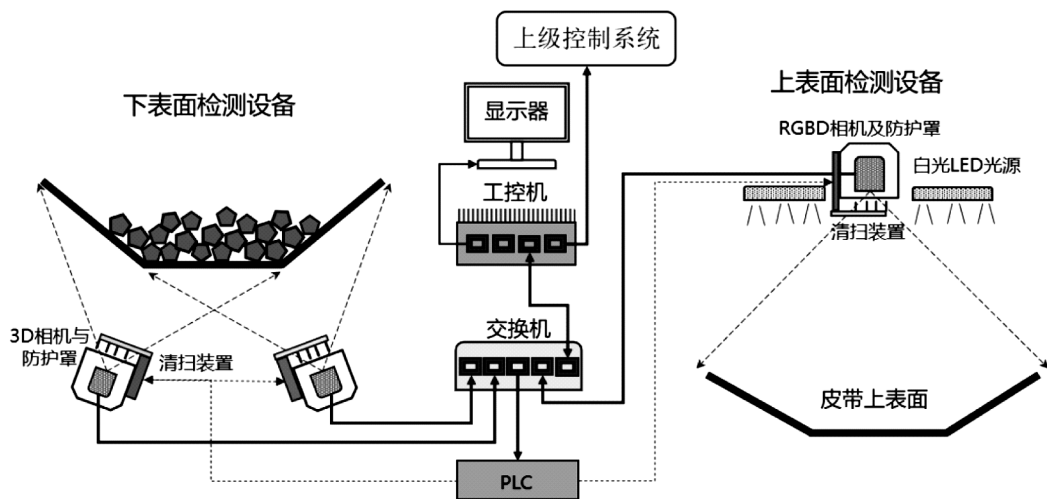


图 2 检测设备的组成

皮带的上表面(工作面)直接接触物料,容易出现磨损与划伤,且大部分皮带被物料覆盖无法以视觉手段检测,因此在没有物料覆盖且空间较为宽敞的机尾轮附近安装上表面检测设备,只需 1 台相机即可检测整个皮带宽度。上表面检测设备由智能 RGBD 相机(3D 相机增设彩色摄像头)、防护壳体、除尘装置^[12]、平面 LED 光源、支架组成。增加彩色摄像头与 LED 光源的目的在于拍摄皮带上表面的磨损与划伤,这些缺陷的凹凸特征较小,不易被 3D 相机识别,却在普通图像中具有丰富的纹理信息。

3 皮带缺陷检测算法

3.1 3D 相机原理

所有 3D 相机与普通相机最大的区别是能够测量物体与相机沿光轴方向的垂直距离,即深度。皮带表面若存在划伤和撕裂,意味着其与周围的正常表面存在明显的深度差异,其边缘具有较大的深度变化率。通过 3D 相机检测皮带表面的深度差异及深度变化率,即可准确识别皮带表面的划伤与撕裂。

本系统选用的 3D 相机采用单线激光扫描原理,内部有 2 个黑白相机构成双目立体视觉结构,如

图3所示。中间位置安装激光器,在被测物体上投射单线激光作为附加的纹理信息。左相机和右相机对称布置在激光器左右两侧, O_L 为左相机的光心, O_R 为右相机的光心, f 为相机的焦距, D 为两相机光心的距离,单线激光与两相机光心连线垂直; A_L 、 B_L 和 A_R 、 B_R 分别为物体 A、B 在左右相机上的成像点; H_A 、 H_B 分别为物体 A、B 到3D相机的距离(即深度)。

由此可见,被测物体表面的高低差异导致激光线在相机成像面的投影位置发生变化,根据小孔成像原理,越近的物体其成像点距离相机光轴越远,通过相机内部存储的标定数据能够测算出物体 A、B 的真实深度。

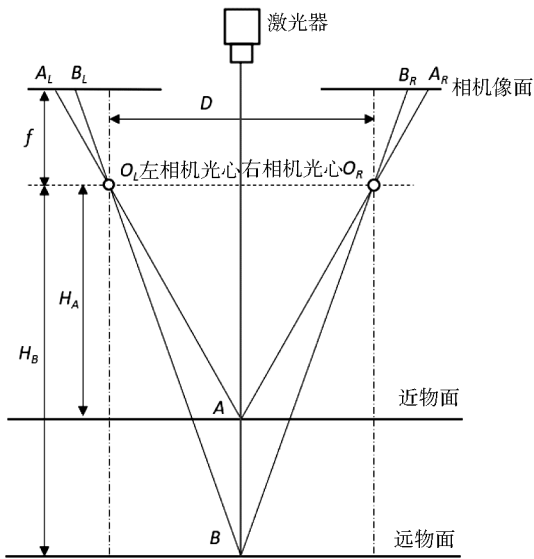


图3 双目3D相机的测距原理

单次拍摄只能得到激光线位置的深度信息,需要借助相机与物体的相对运动拍摄整个物体表面,这种原理的相机非常适合检测高差起伏较小但是高速、匀速运动的皮带表面。

在某应用场景中,相机帧率设为1 000 Hz,皮带标称速度为2.0 m/s,因此沿皮带长度方向的空间分辨率为2.0 mm。左右两相机的分辨率为1 536 × 2 048,3D相机输出激光线上每个像素点的3D坐标,每拍摄1次能获得激光线上最多二千多个点的 x 、 y 、 z 坐标,左右两相机的原始图像如图4所示。由软件控制每输出1 000行截取1次成为独立的3D点云数据,覆盖皮带长度2.0 m的一段,数据容量约40 MB,依次发送给算法模块处理。

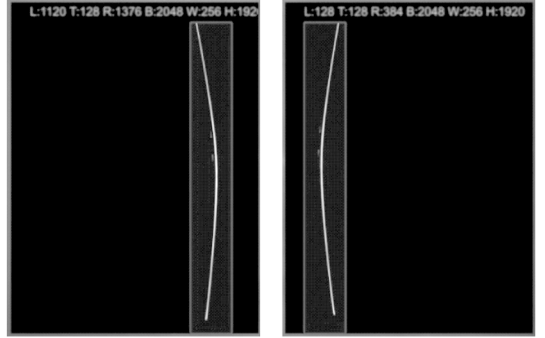


图4 3D相机拍摄的皮带激光线原始图像

3.2 3D数据投影为二维图像

由于皮带表面呈略带弯曲的长条矩形,凸凹变化平缓,不存在遮挡与重叠情况,数据点分布均匀,需要检测的划伤、撕裂表现为局部的不平顺,如图5所示。

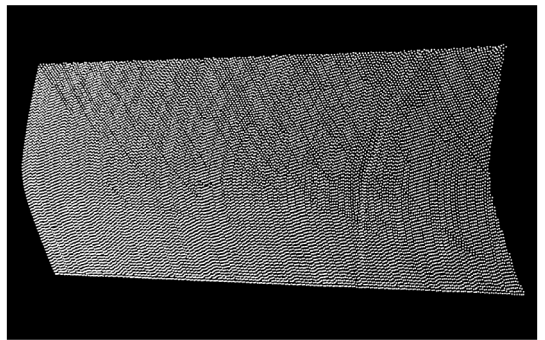


图5 皮带表面的3D点云像

为了提高运算速度,将输入的3D点云^[13]数据投影为二维灰度图像。具体过程为以每个数据点的 x 坐标作为图像像素的列坐标,以 y 坐标作为图像像素的行坐标,以 z 坐标为灰度值,构成二维深度分布图,并对深度分布图每个像素点分别求沿 x 、 y 轴的偏导数,计算深度变化率即梯度^[14]分布图。后续的算法步骤将围绕深度分布图与梯度分布图开展。

3.3 深度图与梯度图处理算法

第1步检测皮带表面的穿孔。3D相机对透空的部位无法成像,在深度图中表现为零值,其边缘位置的梯度值很大。

第2步检测皮带跑偏。主要针对安装于机尾轮附近的上表面检测设备,此处皮带左右边缘的位置不受物料多少的影响。而下表面检测设备附近的皮

带,当物料较少或没有物料时向上浮起数十厘米,每个 3D 相机只能拍到皮带单侧边缘,无法可靠检测跑偏。由于机尾轮附近皮带高低基本无变化,在 3D 相机配置参数中设置最大深度可有效滤除皮带之外的数据,可靠地得到皮带边缘位置^[15],与标定参数进行比较即可获得皮带跑偏情况。

第 3 步检测皮带具有明显凹凸表面的裂口等。首先对深度图进行中值滤波得到平滑图,蒙版尺寸应大于需要检测的最小裂口宽度。深度图减去平滑图,差值较大的区域为皮带表面的凹陷部位;平滑图减去深度图,差值较大的区域为皮带表面的凸起部位。其次对梯度图进行阈值分割,选出梯度值较大的区域,也代表了皮带表面不平整的部位。将上述计算得到的所有缺陷部位分离为单独的缺陷区域。

第 4 步缺陷分级。根据现场需求,按照缺陷的外形尺寸和最大深度降序分为 A、B、C 三个等级。对上一步计算得到的各个缺陷区域逐一计算,若深

度大于 A 级深度标准,且长度或宽度大于 A 级长度标准则归入 A 级缺陷;深度大于 B 级深度标准,且长度或宽度大于 B 级长度标准则归入 B 级缺陷;其余的归入 C 级缺陷。穿孔一律归入 A 级缺陷。

第 5 步寻找皮带接头。该步骤的目的是对检测出的缺陷进行定位。皮带接头^[16]一般有机械接头、热熔接头、冷熔接头等几种形式。在本应用场景中,皮带接头采用热熔和分层搭接形式,该种接头的点云数据具有明显的纹理特征,接头处呈现一条宽度几厘米的斜向直线,且皮带上下表面的接头倾斜方向一致。皮带长达数百米,检测系统找到缺陷之后必须告知维修人员缺陷在什么位置。由于皮带运行速度基本恒定,本系统利用皮带的接头作为沿皮带方向的定位基点。如果皮带存在多个接头,则以最后检测到的接头为基点。利用接头定位缺陷位置的原理如图 6 所示。

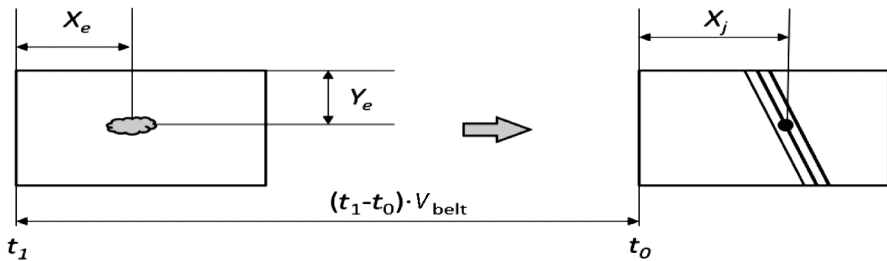


图 6 以皮带接头定位缺陷的 x 坐标

图中 V_{belt} 为皮带速度, X_e 为缺陷在该组数据中的相对 x 坐标, Y_e 为缺陷在该组数据中的相对 y 坐标; X_j 为皮带接头在该组数据中的相对 x 坐标。

每一组点云数据都带有时间戳。若 t_0 时刻算法从深度图中识别到皮带接头,并返回接头在该组数据的 x 坐标 x_j ,则上层调用软件记录当前时间作为 t_0 。若 t_1 时刻算法从后续的数据中检出缺陷,并返回缺陷的相对 x 坐标 x_e 、相对 y 坐标 y_e ,则缺陷与接头的距离 L 即绝对 x 坐标为:

$$L = X_j - X_e + (t_1 - t_0) \cdot V_{belt} \quad (1)$$

如果算法再次识别到接头,则软件重新记录当前时间作为 t_0 。

接头的倾斜线条在傅里叶变换后的频域图中具有明显的角度特征,提取该部位并进行反傅里叶变换能够获得接头所在的区域。

第 6 步缺陷参数统计、输出、显示。算法对每组

3D 数据处理完毕之后,统计每个缺陷的绝对 x 坐标、相对 y 坐标、沿 x 轴长度、沿 y 轴长度、最大深度、分类等级,并在深度分布图上以红色框绘制 A 级缺陷,以黄色框绘制 B 级缺陷,以蓝色框绘制 C 级缺陷。这些数据由皮带检测软件进行归类、存储并根据需要进行显示。

3.4 彩色图像处理算法

安装在机尾轮附近的 RGBD 相机能够输出彩色图像,借助 2 组高亮度平面 LED 光源的照明,相机允许设置极短的曝光时间,对运行速度为 2.0 m/s 的皮带能够获得清晰的图像。

皮带表面没有彩色信息可利用,将彩色图变换为灰度图进行后续处理:

$$\text{gray} = 0.299 \times \text{red} + 0.587 \times \text{green} + 0.114 \times \text{blue} \quad (2)$$

由于 LED 光源照明角度以及相机防护玻璃内

部反光等原因,灰度图上存在局部亮斑与黑斑。这些不均匀的背景不利于纹理特征的提取,因此需要进行照度均匀性标定与校正。选用较大的蒙版窗口计算多组灰度图的平均图像,再求图像灰度均值 Mean 并生成一幅灰度值全部为 Mean 的均值图像,然后除以平均图像得到均匀性校正模板^[17]图像并保存。之后每次获得的灰度图像与模板相乘得到均匀图像,其灰度分布更为均匀,减少了照明不均匀对识别皮带表面磨损与划伤的干扰。

使用动态阈值方法分割图像中代表磨损与划伤的区,并使用形态学方法去除面积过小的部分并统计其总面积,最终向上级调用软件返回损伤区域占图像面积的比例。皮带上表面的彩色图像还可采用其他图像分析手段进行处理,限于篇幅不再赘述。

4 除尘装置的设计

皮带运行时周围存在大量粉尘,对于采用视觉手段尤其是镜头朝上的检测设备而言,缺少除尘装置将无法工作。根据实地测试的结果,下表面检测设备如果不带除尘装置,经过8~12小时,防护玻璃表面即被粉尘完全覆盖而不能输出3D数据。因此除尘装置的有效性与可靠性直接关系皮带缺陷检测系统的成败。

既有文献中涉及的视觉类皮带检测设备的除尘装置,大体可分为毛刷清扫与气动吹扫2类。毛刷清扫装置类似汽车风挡玻璃的雨刷,使用电动机、气缸等驱动毛刷执行圆弧或直线运动扫除防护玻璃表面的灰尘,个别的增设喷水机构增强清扫效果。此类装置的优点是清扫力度大,清扫频率和时间便于计算机控制;缺点是清扫时毛刷遮挡视野造成数据中断,结构复杂,自身可能因积灰而动作不畅。

气动吹扫装置则在防护玻璃附近安装鸭嘴形喷气嘴,通入压缩空气,定期或连续吹扫除尘。此类装置的优点是吹扫过程对相机成像无干扰,结构简单;缺点是气源中夹带的水、油可能造成污染,清扫力度不足。

结合上述两类除尘机构的特点,积尘严重的下表面检测设备每台安装了1套毛刷除尘机构外加1套气动吹扫机构。3D相机安装在密封壳体内,上表面为一整块平板防护玻璃,毛刷除尘机构由伺服电机带动多层毛刷在防护玻璃表面进行往复式清扫,清扫频率与单次运行时间由软件通过PLC进行控制,这套机构用于积尘严重的情况,清扫时3D相机

停止采集数据。气动吹扫装置通过电磁阀、过滤器将外界引入的压缩空气输入3根任意可弯的气管,对准防护玻璃上的2个光学镜头与激光器的位置进行吹扫,用于日常清理积尘,与毛刷动作不发生干涉。除尘机构之上另安装一块防尘罩,减少直接落到防护玻璃上的灰尘量。不易积尘的上表面检测设备仅安装1套毛刷除尘机构。

5 结束语

本文基于3D视觉检测技术研发了散装物料皮带输送机皮带撕裂及表面划伤缺陷检测系统。文中所述的皮带缺陷检测系统以投射单线激光线的3D相机作为主要检测工具,检测速度快,受环境影响小,皮带表面缺陷的尺寸与深度能够量化分析;检测皮带上表面时增设彩色相机和LED光源,能够检测程度较轻的磨损、划伤等缺陷,弥补了3D相机的不足;缺陷沿皮带方向的位置利用皮带接头作为定位基点;除尘装置功能全面,在正常情况使用气动吹扫确保检测设备工作不中断,当积尘严重时使用毛刷强力清扫,清扫频率与时间等能够自动进行远程控制;采用多台3D相机共同检测皮带的上下两个表面,皮带表面完全覆盖无盲点;能够检测皮带跑偏、磨损、撕裂等缺陷,能够对缺陷外形尺寸和深度进行量化,同时也能够给出皮带缺陷相对于皮带接头的坐标位置等。研制的图像采集装置能够很好地适应冶金企业输送大宗原燃料场景,具有很强的实用性。研发的运输皮带检测系统已经应用于国内某大型钢铁企业,并准确检测到了物料对皮带表面造成的划伤,避免了缺陷进一步扩大造成更大损失的可能。

参 考 文 献

- [1] 直国荣. 矿用皮带运输机故障检测方案设计[J]. 中国金属通报, 2020(10): 71-72.
- [2] 王志强. 皮带运输机故障及其检测方式的分析与应用[J]. 能源与节能, 2020(6): 189-190.
- [3] 吴伟龙, 张达鑫, 魏青阳, 等. 基于深度学习的皮带运输机异常检测[J]. 机电技术, 2024(2): 17-20.
- [4] 姜宝. 煤矿皮带运输系统异常状态特征量的识别与检测探讨[J]. 自动化应用, 2020(4): 122-123.
- [5] 高飞. 煤矿皮带输送机自动检测系统的研究

- 与设计[J]. 电子技术与软件工程,2022(10):130-133.
- [6] 潘岩. 基于多传感器融合的皮带纵向撕裂检测系统研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2022,40(5):65-68.
- [7] 顾凯,陈伟,汪大春. 输煤皮带机皮带撕裂检测装置的设计[J]. 设备管理与维修,2010(5):34-37.
- [8] 赵志斌,陈洪良,房勇. 输煤皮带撕裂检测装置的研制与应用[J]. 东北电力技术,2011(10):50-52.
- [9] 王福斌,孙海洋,TU Paul. 边缘扩展的皮带撕裂支持向量机视觉检测[J]. 中国机械工程,2019,30(4):455-460.
- [10] 李海滨,张春明,张元正,等. 线激光辅助的皮带撕裂视觉检测方法[J]. 光学技术,2011,37(4):466-470.
- [11] 孙轶群. 皮带撕裂缺陷检测中应用机器视觉的研究[J]. 电脑编程技巧与维护,2023(4):141-143,176.
- [12] 杨友良,吴志鹏,陈波. 基于 DSP 的红外皮带撕裂图像特征提取检测[J]. 现代电子技术,2022,45(12):125-129.
- [13] 王晨宇,王高飞,刘小虎,等. 基于机器视觉的 PLC 自动化皮带智能检测系统[J]. 设备管理与维修,2024(4):161-164.
- [14] 项熙亮. 基于机器视觉的矿用皮带输送机故障智能检测系统[J]. 煤矿现代化,2020(5):212-215.
- [15] 程月,尚学文,王福平,等. 皮带撕裂的视觉检测[J]. 机械工程与自动化,2018(3):132-137.
- [16] 吉日格勒,刘畅. 一种 3D 点云数据转换 2D 图像的皮带质量检测算法[J]. 山东煤炭科技,2023,41(3):205-207.
- [17] 芦建文,赵楠. 声音识别技术在设备故障检测中的应用研究[J]. 包钢科技,2022,48(3):86-89.