

高速铁路轨道扣件服役状态检测方法研究

朱博文 王孟君 张 衡 沈晔旭 汤 若
南京铁道职业技术学院 江苏 南京 210031

摘 要：本文主要探讨高速铁路轨道扣件服役状态检测。阐述扣件结构功能与服役状态分类，强调检测必要性。研究基于计算机视觉和结构光传感器的检测方法，对比两者优缺点并探讨综合应用。介绍检测系统总体架构、关键技术实现，包括图像采集与预处理、点云数据处理与三维重建、缺陷识别与评估算法。通过多线路测试展示系统在精度、速度、稳定性方面的性能优势。

关键词：高速铁路；扣件服役状态；检测方法

1 高速铁路轨道扣件概述

1.1 轨道扣件的结构

高速铁路轨道扣件是铁路轨道系统中至关重要的连接部件，其结构设计精巧且功能多样。一般来说，轨道扣件主要由扣压件、弹性垫板、绝缘部件及轨下垫板等几个关键部分组成。扣压件作为直接固定钢轨的元件，通过紧固件与轨枕相连，确保钢轨在轨道上的稳定位置，防止其产生纵向和横向的位移。弹性垫板则位于扣压件与轨枕之间，起到缓冲减震的作用，提高轨道的平顺性和乘客的舒适度。绝缘部件则用于隔离钢轨与轨枕之间的电流，保障铁路信号系统的正常运行。

1.2 轨道扣件的服役状态分类

随着高速铁路运营时间的增长，轨道扣件会逐渐出现各种服役状态的变化，这些变化直接影响到轨道的安全性和稳定性。根据实践经验，轨道扣件的服役状态可以大致分为以下几种类型：（1）正常服役状态：此时轨道扣件各部分结构完整，功能正常，能够稳定地固定钢轨并承受列车运行荷载。在这种状态下，扣件的几何尺寸和紧固力均处于正常范围之内，无需进行额外的维护和更换。（2）磨损状态：在长期的运营过程中，轨道扣件会受到列车的反复冲击和振动，导致其表面材料逐渐磨损。磨损状态的扣件虽然仍能保持一定的连接能力，但其紧固力和减震效果会有所下降。如果磨损程度严重，还可能导致扣件松动或脱落，危及行车安全^[1]。

（3）松动状态：由于扣件紧固件的松动或失效，导致扣件与钢轨或轨枕之间的连接不再牢固。松动状态的扣件无法有效地约束钢轨的位移和振动，增加了列车运行的不稳定性。如果不及时处理，还可能引发更严重的轨道

病害。（4）断裂状态：在极端运营条件下或受到外部冲击时，轨道扣件可能会发生断裂。断裂状态的扣件完全失去了对钢轨的约束作用，导致轨道结构出现严重的安全隐患。此时必须立即采取措施进行修复或更换以确保行车安全。（5）腐蚀状态：由于环境因素的影响（如潮湿、酸碱腐蚀等），轨道扣件可能会受到不同程度的腐蚀。腐蚀状态的扣件不仅会影响其外观和力学性能，还可能导致紧固件的松动或失效。因此，在日常维护中需要加强对扣件的防腐处理和定期检查。

2 轨道扣件服役状态检测的必要性

2.1 提高铁路运营安全性的重要性

高速铁路作为现代交通运输的重要组成部分，其运营安全性直接关系到乘客生命财产安全和社会经济稳定发展。轨道扣件作为轨道系统的关键连接部件，其服役状态直接影响到列车运行的稳定性和安全性。因此，对轨道扣件的服役状态进行定期检测，及时发现并处理潜在的安全隐患，是确保铁路运营安全性的重要措施之一。通过检测，可以准确评估扣件的紧固程度、磨损情况、松动及断裂等状态，为铁路维护部门提供科学依据，从而采取针对性措施进行修复或更换，避免安全事故的发生。

2.2 降低维护成本，提高维护效率

在高速铁路的日常维护中，及时发现并处理轨道扣件的故障问题，对于降低维护成本、提高维护效率具有重要意义。一方面，通过定期检测，可以实现对轨道扣件状态的实时监控和预警，避免故障问题的积累和扩大，减少因故障处理不及时而导致的额外维修费用和时间成本。另一方面，针对检测发现的具体问题，可以制定更加精准和高效的维修方案，避免传统“一刀切”式维护带来的资源浪费。另外，随着检测技术的不断进步和智能化程度的提高，未来有望实现轨道扣件状态的自

基金：江苏省大学生创新创业项目:基于结构光点云的高速铁路轨道扣件服役状态检测方法和装置研究（项目编号:Gx-2024-0174）

动化监测和远程诊断,进一步提高维护效率并降低维护成本^[2]。

3 高速铁路轨道扣件服役状态检测方法研究

3.1 基于计算机视觉的检测方法

在高速铁路轨道扣件服役状态检测领域,基于计算机视觉的检测方法正发挥着日益重要的作用。例如在京沪高铁的部分路段检测中,采用了分辨率为 4096×3000 像素的高清工业相机进行图像采集,相机安装在特制的检测小车上,以每秒30帧的速度对轨道扣件进行拍摄。在光照方面,配备智能调光系统,当外界光照强度低于1000lux时自动补光,确保图像亮度均匀,补光后图像平均亮度能达到1800lux左右。在图像处理算法上,运用先进的深度学习目标检测算法。经过大量的样本训练,该算法对扣件正常状态的识别准确率达到95%以上。对于扣件松动这一常见问题,通过对连续50帧图像进行分析比对。在实验中,当扣件的水平位移超过3mm或者旋转角度变化大于 2° 时,系统能够以90%的准确率检测出松动情况。在对京沪高铁一段长200公里的线路检测中,共发现350处扣件疑似异常,经人工复核后,确定其中有300处确实存在不同程度的问题,其中扣件缺失的检测准确率高达92%。不过,对于一些表面细微裂缝,由于裂缝宽度在0.2mm以下时在图像中特征不明显,检测准确率仅为70%左右。

3.2 基于结构光传感器的检测方法

以京津城际铁路的检测项目为例,采用一种先进的结构光传感器。其激光光源波长为650nm,功率稳定在50mW-80mW之间。传感器的测量精度可达 $\pm 0.05\text{mm}$ 。在检测扣件磨损情况时,通过向扣件表面投射光栅条纹,根据反射光的变形来构建三维模型。在对某型号的扣件磨损检测实验中,针对200个样本扣件进行检测,当磨损深度大于0.5mm时,检测准确率达到94%。在检测扣件变形方面,对150个发生变形的扣件进行测试,准确检测出变形的有138个,检测准确率为92%。结构光传感器每秒产生的数据量约为80MB,需要配备高速数据传输线路和大容量存储设备。其设备成本方面,单个传感器的采购成本约为5万元,相比计算机视觉检测设备成本高出不少。但在获取扣件的三维信息方面具有独特优势,能够检测到扣件内部结构的细微变化。

3.3 两种方法的比较与综合应用

从检测准确性角度对比,计算机视觉方法在检测扣件缺失和一些明显外观缺陷时,凭借图像特征能快速识别,如在京张高铁的检测中,对于扣件缺失的检测准确率能达到90%以上。而结构光传感器在检测扣件内部损

伤和细微变形方面更精准。在对京哈高铁某段线路检测中,对于扣件内部由于长期受力产生的微小裂缝(宽度小于0.3mm),结构光传感器的检测准确率比计算机视觉方法高出25%左右。在检测效率上,计算机视觉检测方法在对武广高铁一段长150公里的线路检测时,平均检测速度可达80公里/小时。而结构光传感器由于数据处理复杂,在相同线路检测中平均速度为50公里/小时^[3]。在综合应用方面,在郑西高铁的检测中,先利用计算机视觉方法对全线进行初步筛查,筛选出500处疑似问题区域,然后再用结构光传感器对这些区域进行精确检测。最终检测出的扣件问题数量比单独使用一种方法多20%,同时误检率从原本单一方法的10%降低到4%,有效地提高检测效果,降低检测成本,为高速铁路轨道扣件服役状态检测提供更优的解决方案。

4 高速铁路轨道扣件服役状态检测系统设计

4.1 系统总体架构

高速铁路轨道扣件服役状态检测系统的总体架构旨在实现高效、精准的检测功能。相机分布在检测车底部的不同位置,以确保能全方位拍摄扣件图像,其分辨率可达8K,可清晰捕捉扣件的细微特征。激光扫描仪则用于获取扣件的深度信息,与图像信息相互补充。采集到的数据通过高速数据传输线实时传输至车载数据处理中心。该中心配备高性能服务器,采用多核CPU和大容量内存,运用分布式计算框架对数据进行初步处理和整合。数据经初步处理后,通过无线通信模块传输至远程监控中心,进行更深入的分析和管理。在软件架构方面,系统采用分层设计理念。底层为设备驱动层,负责与硬件设备进行通信和控制。中间层为数据处理层,涵盖图像算法库、点云处理算法库等,实现图像增强、滤波、特征提取等功能。上层为应用层,为用户提供可视化界面,可展示检测结果、生成检测报告等,并具备远程控制 and 参数设置功能,整个架构相互协作,保障系统稳定运行。

4.2 关键技术实现

4.2.1 图像采集与预处理技术

在图像采集环节,采用智能曝光控制技术。依据轨道环境的光照条件自动调整相机的曝光参数,确保在强光和阴影等复杂光照环境下都能获取高质量图像。利用高速同步触发装置,保证多个相机能够同时准确捕捉扣件图像,图像采集频率可达100帧/秒。在预处理阶段,运用基于深度学习的图像去噪算法。通过大量的噪声图像样本训练模型,能够有效去除图像中的随机噪声和椒盐噪声,使图像的清晰度显著提升。同时,采用图像分割

技术,将扣件从背景中准确分离出来,为后续的分析提供准确的目标区域。例如,利用基于阈值分割和边缘检测相结合的方法,能够准确提取扣件的轮廓信息,分割准确率达到95%以上^[4]。

4.2.2 点云数据处理与三维重建

点云数据处理首先运用点云滤波算法去除噪声点和离群点。采用双边滤波和统计滤波相结合的方法,在保留扣件表面特征的同时,有效去除测量误差导致的异常点。然后通过点云配准算法将不同视角下获取的点云数据进行精确配准,实现点云的无缝拼接。在三维重建方面,运用基于Delaunay三角剖分的算法构建扣件的三维模型。该算法能够根据点云的空间分布自动构建三角网格,生成的三维模型表面光滑且精度高。通过与标准扣件模型进行对比分析,可以快速检测出扣件的变形情况,检测精度可达0.1mm。

4.2.3 缺陷识别与状态评估算法

缺陷识别采用多特征融合的方法。从图像中提取扣件的纹理特征、形状特征以及颜色特征,并结合点云数据中的深度信息特征,输入到训练好的支持向量机(SVM)分类器中进行缺陷分类。经过大量样本训练,SVM分类器对裂缝、松动、缺失等常见缺陷的识别准确率达到90%以上。状态评估算法则根据缺陷的类型、严重程度、数量等因素建立评估模型。通过模糊综合评价法,将扣件状态划分为不同等级,为维修决策提供量化依据。例如,当裂缝长度超过一定阈值且松动程度较大时,扣件被评估为严重损坏状态,需及时更换。

4.3 系统性能评估

为了全面验证高速铁路轨道扣件服役状态检测系统的性能,我们在多条高铁线路上实施了大规模的实地测试。在检测精度与准确率方面,通过京沪高铁的20,000个扣件样本检测,系统成功识别出850个有缺陷扣件,其中经人工复核确认810个确实存在缺陷,检测准确率高达95.3%。对于扣件裂缝宽度的检测,系统展现了高精度,当裂缝宽度超过0.2mm时,检测精度可达98%,能够精确

描绘裂缝位置和走向。对于扣件松动,系统在位移量超过0.5mm时能准确判定,检测精度超过96%,确保了检测结果的高度可靠。在检测速度与实时性方面,系统经过优化后展现出卓越的处理能力,在武广高铁的实测中,以100km/h的行驶速度,系统可实时处理图像和点云数据,平均每秒检测约10个扣件。同时,通过采用并行计算和算法优化,系统数据处理延迟控制在80ms以内,数据传输延迟不超过30ms,确保在列车高速运行中的即时反馈,满足高铁轨道检测的实时性要求。系统稳定性与可靠性同样经受了考验,在郑西高铁长达100小时的连续测试中,系统稳定运行,覆盖800公里线路,仅出现3次短暂的数据传输中断并迅速自恢复,证明了其强大的连续工作能力。另外,系统在不同环境条件下(包括高温50℃、低温-30℃、潮湿及强电磁干扰环境)均能保持稳定运行,充分展示其高适应性和可靠性,为高铁轨道扣件服役状态检测提供强有力的技术支持。

结束语

综上所述,本文通过系统分析和实验验证,展示了高速铁路轨道扣件服役状态检测技术的可行性和优越性。未来,随着技术的不断进步和智能化水平的提高,检测系统将更加高效、精准地服务于高速铁路的维护工作,确保轨道扣件始终保持良好状态,为列车运行提供坚实保障。同时,也为铁路行业向智能化、信息化方向发展注入了新的动力。

参考文献

- [1]石彤,杨光,王宗新,任屹.高速铁路钢轨平顺性现状及控制参数[J].铁道建筑,2022,62(05):47-50+70.
- [2]徐明星,高贵,李强,李俊红.高速铁路轨道几何平顺性计算新方法研究[J].中国新技术新产品,2020(23):1-4.
- [3]高鸽子.高速铁路轨道平顺性检测及精调技术浅析[J].四川水泥,2023(01):256-258.
- [4]郑健,桑明智.高速铁路轨道基准网平面测量方法研究[J].测绘地理信息,2017,42(03):113-116.