

轨道扣件检测系统设计与分析

李欢, 柴晓冬, 彭乐乐, 陈兴杰

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 为了满足轨道扣件动态检测的需求, 设计了一种轨道扣件检测系统, 包括照明系统、摄像系统等并通过悬挂系统安装在转向架构架前端; 通过关键设备参数的选型计算, 设计了安装结构然后该校悬挂系统的螺栓强度, 验证其螺栓连接的可靠性; 并对整体结构采用 ANSYS Workbench 有限元分析以及实验室验证, 系统符合要求, 满足线路的检测需要。

关键词: 扣件检测系统; 系统选型; 结构设计; 静力学分析

Structure Design and Analysis of Track Fastener Inspection System

Li Huan, Chai Xiaodong, Peng Lele, Cheng Xingjie

(School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to meet the requirements of rail fastener dynamic detection, we design a track fastener inspection system, including lighting system, camera system and installed on the bogie frame through the suspension system such as the front end. According to the model selection calculation of key equipment parameters, the installation structure is designed and the bolt strength of the suspension system is checked to verify the reliability of the bolt connection. ANSYS Workbench finite element analysis and laboratory verification were carried out for the overall vehicle structure. The system met the requirements and met the detection needs of the line.

Keywords: fastener detection system; system selection; structure design; static analysis

0 引言

随着我国城市轨道交通的快速发展, 现阶段轨道交通已经成为城市建设进程中必不可少的元素, 进而轨道交通的安全问题日益凸显, 其中扣件是连接钢轨和轨枕的中间连结零件, 能够有效固定轨道间的距离, 避免钢轨的纵横向移动。扣件的缺少必然无法保障人们的出行安全, 目前人工巡检的方式已经不能满足轨道发展的需要, 为了确保地铁运营的安全, 研究设计一种轨道扣件检测系统, 具有轻量化、集成度高、维修方便、安全可靠等特点^[1], 保证高速运行轨检车能够满足扣件检修的要求。

目前国外的检测装置研究开始于 20 世纪 70 年代, 比较普遍的是美国的 VIS 轨道视频检测系统; 法国的 MGV 高速综合检测列车以及德国的 Rail Scan 和 Rail Check 系统^[2], 相比于 20 世纪 90 年代开始研究的国内, 从最开始的接触测量到现在的非接触式测量, 首先在国外轨检技术的基础上, 研发了 GJ-3 型轨检车, 之后和美国 ENSCO 公司合作完成了 XGJ-1 型轨检车, 后来分别在 1998 年和 2001 年研发引进了 GJ-4 以及 GJ-5 型轨检车, 目前我国在轨道上的轨

检测设备已经具备相对规模, 但国外的技术相对的更成熟, 自动化程度更高。所以本文提出了一种轨道扣件检测系统的设计方案并进行有限元分析以及实验室验证。

1 轨道扣件检测系统的总体方案

轨道扣件检测系统分为多个模块^[3], 主要包括: 照明系统、摄像系统、悬挂系统, 照明系统提供采集图像光源, 摄像系统是整个系统的重点, 悬挂系统起到了与车辆转向架以及主梁体连接的作用, 到目前为止, 很多扣件检测系统都是安装在轴箱上, 但其振动会影响采集图像的质量。所以为了避免上述问题, 本系统结合实际场地要求, 安装于转向架一系减震弹簧构架前端, 在复杂环境情况下能够实现扣件状态的检测, 整个扣件检测系统由线阵相机、线性光源、减震垫、机械悬挂装置等组成, 并针对系统主要设备进行参数选型, 整个设备应该易于装配以及维修, 装置整体结构如图 1 所示。

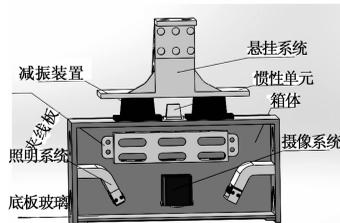


图 1 扣件检测系统基本结构

收稿日期: 2018-07-12; 修回日期: 2018-08-07。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478258); 上海市科委重点支撑项目(18030501300); 上海工程技术大学研究生科研创新项目(E309031701120)。

作者简介: 李欢(1993-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事轨道智能检测方向的研究。

通讯作者: 柴晓冬(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事通信与信息工程及故障诊断等方向的研究。

2 轨道扣件检测装置的设计

在设计整套扣件检测系统当中, 各个部分都是相互联系协调作用, 不存在孤立的个体, 我们综合轨道现场的环

境以及测试的要求^[4], 进行摄像系统、照明系统等关键设备的选型和可行性分析, 最终搭建成一个整体。

2.1 相机的选型

CCD 相机按照传感器芯片的结构不同分为线阵相机和面阵相机, 线阵相机的传感器只有一行感光元素, 特点是高扫描频率和高分辨率, 面阵相机可以获取图像二维信息, 但是所占用的空间较大, 会导致使用过程中会降低图像采集和存储的速度, 在价格上同等条件的线阵相机也是低于面阵相机, 因此在要求高分辨率的情况下, 线阵相机更适合本轨道扣件检测系统。图像采集的速率假设为 v (km/h), 图像的精度要求设置为 0.5 mm, 计算参数如下:

$$W = 250 + 100 \times 2 = 450 \text{ mm} \quad (1)$$

拍摄视场需要覆盖钢轨两侧扣件以及部分轨枕, 视野设计精度 0.5 mm, 则相机的像素数计算如下:

$$N = 450 \div 0.5 = 900(\text{Pixel}) \quad (2)$$

所以至少选择分辨率大于 1024 (pixel) 的相机。

线扫描速率与车速以及图像精度有关:

$$L = \frac{v \times 1 \times 1000}{0.5 \times 3600} = 0.55 v(\text{kHz}) \quad (3)$$

得到了线阵相机最重要的两个参数。除此之外还需要考虑图像的颜色和相机的输出接口形式, 可以综合相机性能选出合适的线阵相机。

2.2 镜头的选型

镜头按焦距是否可以调节分为定焦和变焦两大类, 根据实际环境情况, 定焦的成像往往好于变焦, 并且我们根据系统指标的要求, 该摄像系统用于高速运动下拍摄物体, 安装高度是一定的, 不需要进行视场的变换, 所以我们在本系统当中选择定焦镜头, 我们对镜头的相关参数进行计算:

在轨道扣件图像采集系统当中, 线阵 CCD 相机的拍摄视场大约 450 mm, 其焦距计算公式:

$$f = \frac{w}{W} \times L \quad (4)$$

其中: f 为焦距; w 为相机成像面尺寸; W 为视野; L 为相机最大工作距离。

根据实际环境最大工作距离约 500 mm, 假设相机的像素尺寸为 10 μm , 由公式计算相机焦距:

$$f = \frac{w}{W} \times L = \frac{2048 \times 10 \div 1000}{450} \times 500 = 22.76 \text{ mm} \quad (5)$$

搜索资料, 最终我们选择焦距为 25 mm 的定焦镜头, 型号 23HR2541C。

2.3 光源系统的选型

由于拍摄情况照明严重不足, 如果不采用主动打光会导致图像处理平台无法正常运行, 所以需要在图像采集端安装照明设备, 照明系统可以选择持续性照明或者频闪照明, 但是由于地铁线路光线较为复杂, 虽然频闪光源在一定程度上能够减少能耗, 但是从检测的效果来讲还是需要采用持续照明。本系统采用激光照明, 采用两侧打光的方式对地铁扣件进行照射, 进行图像的收集。

光源可以弱化外部光照对扣件检测的影响, 并且绝大部分检测时间都是在夜晚, 所以要采用主动照明方式, 参照照明系统简化模型如图 2 所示。

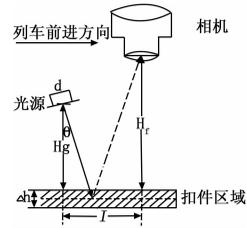


图 2 照明系统模型

其中: d 代表光源的总宽度, Δh 为扣件区域高度, θ 为光线的入射角, 有效光带最低点与扣件区域上表面的距离为 H_g , 相机感光区域与区域上表面的距离为 H_r , 有效光带最低点与相机感光区域最远处的投影之间的距离为 l 。其中 l 由三部分组成, 所以:

$$l = (H_g + H_r + \Delta h) \cdot \tan\theta \quad (6)$$

在确定相机型号时, 光线的入射角就被确定下来了, 相机感光区域与上表面距离在 50~60 cm 之间, 可以根据实际情况进行调节。

激光光源的波长要和选择相机的光谱响应性相匹配, 波长为 650 mm。

2.4 减振橡胶的选型

在实际的检测过程中, 会有振动的冲击, 我们需要减振器进行冲击防护, 设计减振器最重要的是确定两个参数, 刚度和阻尼比, 其中阻尼比由材料本身决定无法改变(在合理范围内发生小变化), 结合扣件检测系统的实际需求, 减振器的固有频率要在运行的条件下尽可能的小并且避开外部的激励频率, 橡胶减振器的本征频率大约为 20 Hz, 这套系统采用一对橡胶减振器对称安装, 整体重量包括相机、光源、箱体等质量大约 40 kg, 根据减振原理:

$$K_d = (2\pi f_n)^2 M \quad (7)$$

其中: f_n 为橡胶减振器本征频率; K_d 为动刚度; M 为承受载荷。

在设计过程当中一般选用静刚度, 动刚度与静刚度的比值 n 大于 1, 一般在 1.2~1.5 之间, 我们选取 1.3, 所以最终静刚度:

$$K_s = \frac{(2\pi f_n)^2 \cdot M}{n} = \frac{(2 \times 3.14 \times 20)^2 \times 40}{1.3} = 485.40 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (8)$$

在减振器默认均匀受载的情况下求得每个减振器静刚度为 242.7 $\frac{\text{N}}{\text{mm}}$, 能够极大地减少轨道扣件检测过程当中的振动。

3 轨道扣件检测系统的结构设计

整个扣件检测系统满足相机拍摄高度距扣件 500 mm, 整体结构采用拼焊栓接形式, 系统关于轨道中心线对称。并且可以在恶劣天气比如雨雪、暴风下进行非接触性检测,

并将拍摄的图片立即反馈与软件中进行判断为维修提供便利。主梁体中包括各传感器安装, 悬挂系统连接车体转向架为主要载体, 重点设计主梁体和悬挂系统的结构^[5]。

3.1 梁体的设计

检测梁体是安装传感器的载体, 材质选用 Q345E 钢板, 要求可以承受 -40° 的低温, 能够保证设备之间稳固, 并且设备本身也具有抗击冲击的能力, 通过柔性套管外包不锈钢保护管对布线进行保护, 在安装及连接环节考虑安全余量, 设计多级安全保护^[6]。其中为减轻整体梁体质量, 两边开减重孔, 总体梁体成密封箱体, 防止灰尘进入, 顶部预留传感器的安装孔便于拆装传感器底部安装玻璃进行封底, 既可以进行拍摄又保护设备, 减重孔四周用防尘罩挡住。最后在整体梁的外表面进行喷涂防潮、防水并且不易脱落的油漆, 可以使设备使用寿命延长, 防止被腐蚀氧化。

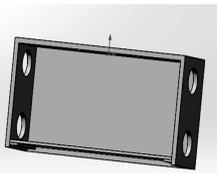


图 3 扣件检测系统梁体

3.2 悬挂系统设计

悬挂系统在设计过程中, 可能出现结构体悬出面过大, 在这样的情况下结构本身的连接面所能承受的载荷有限, 所以则在两侧的公共垂直面上安装加强筋, 增强悬挂系统的强度, 下方安装橡胶减震器, 主要是为了减少高速检测时由于轨道不平顺带来的振动与冲击, 之间安装用来微调梁体与轨面之间高度的调整垫片, 在悬挂系统与构架连接处开 6 个螺栓孔^[7-9]。悬挂系统如图 4 所示。

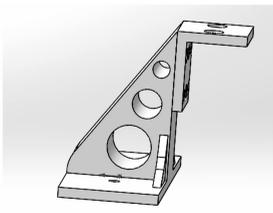


图 4 悬挂系统

4 轨道扣件检测系统的强度分析

4.1 悬挂系统与车体构架连接螺栓强度分析

轨道扣件检测系统的总质量约 50 kg, 空气的阻力 P 忽略不计, 在整个轨道检测车实际运行中, 系统会受到冲击加速度的影响, 这个加速度大概是重力加速度的 15 倍左右, 所以悬挂系统和车体构架之间的最大作用力为:

$$\sum F_{\max} = M \times 16g \approx 50 \times 160 = 8000 \text{ N} \quad (9)$$

螺栓的选择必须是高强度的也就是 8.8 级以上的螺栓, 这里选择 12.9 级的 M20 螺栓, 一共 6 个所以每个螺栓承受的最大工作剪力 1333 N。

螺栓杆与固定支座的挤压强度为:

$$\sigma_p = \frac{F}{d_0 \times L_{\min}} = \frac{1333}{20 \times 30} = 2.22 \text{ MPa} \quad (10)$$

螺栓杆的固定支座的剪切强度为:

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi}{4} d_0^2 \times \frac{\pi}{4} \times 20^2} = \frac{1333}{\frac{\pi}{4} \times 20^2} = 4.25 \text{ MPa} \quad (11)$$

其中: F 为螺栓受到的工作剪力; d_0 为螺栓剪切面的直径 (可以取螺栓孔的直径); L_{\min} 为螺栓杆与孔壁挤压面的最小厚度 (mm)。

许用切应力、许用挤压应力安全系数 S_τ 、 S_p 均取为 6.8, 那么得出螺栓的许用切应力和许用挤压应力均为 137 MPa, 所以螺栓的强度足够。

4.2 悬挂系统与梁体双头螺栓连接强度分析

去除吊臂的部分剩余的质量大概 40 kg, 同理 15 倍的加速度冲击也就是 6400 N, 我们一共选用两个螺栓, 每个螺栓最大承受 3200 N, 这两个螺栓受力的方向和重力方向相同, 受到拉伸力作用, 所以双头螺栓杆的拉伸强度为:

$$\sigma = \frac{F}{\frac{\pi}{4} d_0^2} = \frac{3200}{\frac{\pi}{4} \times 20^2} = 20.38 \text{ MPa} \quad (12)$$

其中: F 为螺栓受到的工作剪力; d_0 为双头螺栓的直径 (mm)。

我们选用的双头螺柱的材料为 40Cr, 这种材料的屈服强度是 785 MPa, 算出拉伸的强度远远小于屈服强度, 所以强度符合要求可以使用。

5 轨道扣件检测系统的有限元分析与实验室验证

5.1 扣件检测系统结构有限元分析

整个流程包括将建立好的三维模型构成的有限元模型导入分析系统当中, 之后对材料进行设置, 划分网格, 施加载荷和约束条件, 通过内置的求解器进行求解分析^[10-12]。

首先将 SolidWorks 软件中绘制的轨道检测系统三维模型导入 Workbench 中, 进行网格划分, 模型必须简化才能节约分析的时间^[13-15], 这个模型主要包括吊臂、减震橡胶、主梁体, 为了简化分析吊臂和主梁体都是加载 Q345E 钢板材料, 分析检测设备在工作过程中的受力和变形情况我们认为与车体连接部分添加为固定约束, 冲击加速度取最大, 大约重力加速度的 15 倍, 利用 meshing 模块划分网格, 最终得到个 13307 个单元, 33053 个节点, 如图 5 所示。

图 6 和图 7 分别是扣件检测系统受到工作载荷下的应变以及应力云图, 由图 6 可知, 变形由两边向中间逐步增大, 根据图中的标识和数据可以发现最大等效变形量为 1.3464 mm 左右, 变形量在可以承受的范围之内, 所以认为该结构可以保证正常巡检, 根据图 7 可以发现最大等效应力为 0.247 Mpa, 主要分布在底板玻璃附近, 查相关资料, 玻璃的屈服强度 1.6~2.3 GPa, 最大等效应力没有超过所用材料的屈服强度, 符合系统要求。

5.2 轨道扣件检测系统实验室验证

实验室模拟环境下车速为 $\frac{20 \text{ km}}{h}$, 根据选型要求选用

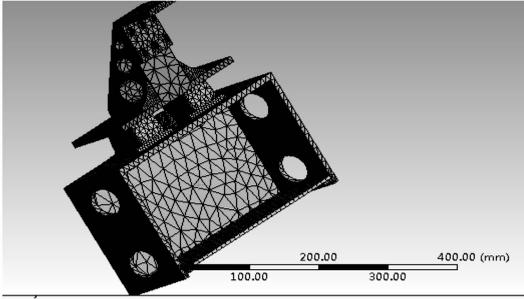


图 5 扣件检测系统网格划分图

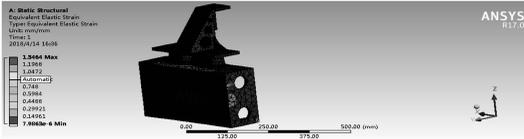


图 6 扣件检测系统车载结构应变云图

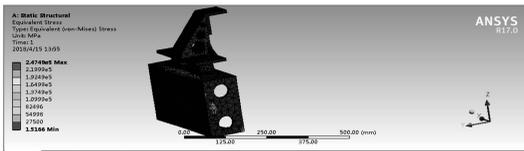


图 7 扣件检测系统车载结构应力云图

线阵相机和 IMU 进行试验。来验证光源效果对整体系统的影响。所以我们分别对 H_f 与 l 进行控制变量实验，相机和光源可以确定实验固定参数，变量的实验取值如表 1 所示，成像结果如图 8、9 所示。

表 1 控制变量实验取值

实验序号	不变量	变量取值/mm
1	H_g, l	$H_f = 550$
		$H_f = 600$
		$H_f = 650$
2	H_g, H_f	$l = 93$
		$l = 98$
		$l = 103$

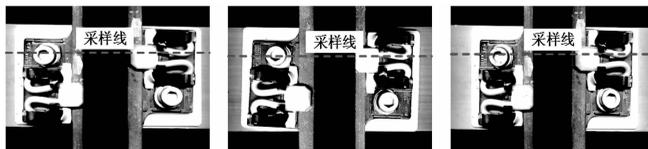


图 8 改变 H_f 的成像效果图

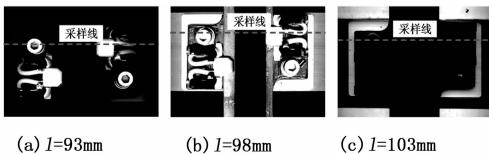


图 9 改变 l 的成像效果图

变对成像影响则比较明显，因此在实际调节过程中，控制 l 的大小，即可使线阵相机获得较好的摄像环境。

为了验证检测系统的性能，利用摄像系统拍摄到的扣件状态输入到检测系统，通过图像采集端进行拍摄扣件的图像，在短时间内反复进行 50 次拍摄，得到扣件拍摄图像，如图 10 所示。



图 10 系统采集扣件图像实例

像素距离可以通过坐标变换转换为扣件表面离相机表面距离，所以可以通过判断特征距离与设定像素距离为 904.5 mm 的差值大小来判断扣件处于扣紧还是非扣紧状态，系统选定误差偏离 20 mm 为未扣紧扣件，试验结果显示扣件编号为 123455 的扣件特征距离为 1078 mm 左右，偏离较大，故为未扣紧扣件，标记红色，单独存储。因此可以得出结论扣件检测系统设计可以满足设计要求。

6 结论

通过对轨道车辆整体环境的测量与研究，设计了轨道扣件检测系统。重点对关键设备的相关参数进行详细分析与计算，在此基础上结合车辆自身结构特点，设计主梁体和悬挂系统的结构，校核悬挂系统的螺栓强度，验证是满足强度要求的，可以安全使用，通过有限元分析，得到轨道扣件车载检测系统具有良好的稳定性和刚度，最后在实验室进行模拟运行试验，重点验证系统光源照明效果影响因素以及整体系统的检测可行性。为轨道扣件图像的采集提供了有效的参考。

参考文献:

- [1] 彭昭云, 李颖, 魏世斌. 运营动车组加装轨道检测系统方案研究 [J]. 中国铁路, 2017 (3): 55-58.
- [2] 舒丛丛. 高速轨道检测系统关键技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [3] 魏世斌, 李颖, 赵延峰, 等. GJ-6 型轨道检测系统的设计与研制 [J]. 铁道建筑, 2012 (2): 97-100.
- [4] 朱磊. 基于线阵 CCD 相机的轨道图像采集系统设计 [D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [5] 周劲松, 陆正刚, 杨国栋. 安全综合检测车轨道检查梁结构设计研究 [J]. 中国铁道科学. 2001 (12): 13-16.
- [6] 黎绍鑫. 线阵 CCD 工业相机数据采集系统设计与研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.