

惯性基准法在地铁轨道检测中的应用

曹志^{1,2}, 高洪清³, 王威⁴, 刘华云²

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 南京 210000; 2. 南京航空航天大学 经济管理学院, 南京 210016;
3. 南京轨道交通产业发展有限公司, 南京 210000; 4. 成都唐源电气股份有限公司, 成都 610000)

摘要: 地铁的使用寿命与地铁轨道的损耗状况有关, 及时地发现轨道问题, 并加以修复可以有效提高地铁使用寿命; 为了提升城市地铁的使用寿命, 研究构建了一个基于惯性基准法的地铁轨道波磨损耗检测系统; 该系统以惯性基准法为核心, 配合加速度计, 及检测车辆, 对地铁轨道的波磨损耗情况进行检测; 结果显示, 惯性基准法的检测标准差, 总是低于弦测法的检测标准差, 检测长度为 400 m 时, 弦测法的检测标准差为 0.79 mm, 而惯性标准法的检测标准差为 0.72 mm; 基于惯性基准法的检测系统的检测结果与实际情况基本一致; 研究构建的地铁轨道波磨损耗检测系统的检测成本更低, 且检测精度符合实际应用需求。

关键词: 惯性基准法; 地铁轨道检测; 波磨损耗; 弦测法; 加速度计

Application of Inertial Reference Method in Metro Track Detection

CAO Zhi^{1,2}, GAO Hongqing³, WANG Wei⁴, LIU Huayun²

(1. CRRC Nanjing Puzhen Rolling Stock Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

2. School of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

3. Nanjing Rail Transit Industry Development Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

4. Chengdu Tangyuan Electric Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: The service life of subways is related to the loss of subway tracks. It can effectively improve the service life of subways to detect and repair track problems in time. In order to improve the service life of urban subways, a subway track wave wear and tear detection system based on the inertial reference method is studied and constructed. The system takes the inertial reference method as the core, cooperates with accelerometers, detects vehicles, and detects the wear and tear of subway tracks. The results show that the detection standard deviation of the inertial reference method is always lower than that of the string measurement method. The detection standard deviation of the string measurement method is 0.79 mm with the detection length of 400 mm, but the detection standard deviation of the inertial standard method is 0.72 mm. The detection results of the detection system based on the inertial reference method are basically consistent with the actual results. It is lower that the detection cost of the subway track wear and tear detection system constructed through the research, and the detection accuracy meets practical application requirements.

Keywords: inertial reference method; metro track inspection; wave wear loss; string measurement method; accelerometer

0 引言

我国是一个拥有庞大的人口基数的发展中国家, 每年的人口流动规模都非常大。尤其在每年的春节期间, 巨大的人口流动需求使得我国的铁路交通得到迅速发展。自 1905 年由中国铁路之父詹天佑先生修建的京张铁路起, 我国的铁路里程已达到 15.49 万公里, 位居世界第二^[1-2]。随着城市化进程的加速, 城市规模的扩大以及绿色、低碳的发展理念, 城市交通方式也发生了深刻的变革, 从私家车为主导转变为公共交通为主。惯性基准法是常见的轨道检测方法, 文献 [3] 为了提高轨道的检测效率, 设计了一种非接触式轨道检测系统, 实时检测轨道状态, 该系统通过惯性测量单元, 计算列车与轨道之间的运动姿态, 与正常运动姿态进行对比, 从而检测轨道损耗状态, 该方法对轨

道的平顺问题检测精度较高, 但面对波磨损耗时, 检测精度较低。文献 [4] 为了研究轨道高低不平顺对轨道的影响, 构建了一个检测模型, 并采用惯性基准法对轨道高低不平顺进行检测分析, 结果显示, 从时域角度分析时, 扣件刚度, 路基支承刚度和轨枕间距对高低不平顺影响较小, 该方法主要在于分析轨道不平顺的影响。文献 [5] 为了解静态及动态下, 轨道不平顺之间的关系, 提出了基于惯性基准法的虚拟轨道检测方法, 结果显示, 动态和静态不规则性之间存在明显的线性关系, 作者分析了轨道不平顺之间的关系, 但轨道检测是采用的虚拟检测, 精度较低。文献 [6] 为了提高轨道检测效率, 及检测精度, 提出了一种利用无人机进行摄影测量的方法, 结果显示该方法检测位置精度较高, 负荷实验预期。该作者提出的方法, 仅可检测轨道位置, 无法对轨道本身的波磨损耗进行检测。随

收稿日期: 2023-08-02; 修回日期: 2023-08-24。

作者简介: 曹志 (1982-), 男, 大学本科, 高级工程师。

通讯作者: 刘华云 (1984-), 男, 大学本科, 助理工程师。

引用格式: 曹志, 高洪清, 王威, 等. 惯性基准法在地铁轨道检测中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(2): 99-104.

着各种铁路交通及城市轨道交通的增加,轨道体系的检测维护成为了一个新的挑战。尤其是轨道波磨——钢轨上出现的波浪状不平整现象,它是轨道使用过程中的主要损伤类型。为了对这一损伤进行有效的检测,首先需要深入理解地铁轨道波磨的形成原因和其分类。因此,本研究旨在深入研究地铁轨道波磨的基本特征,并基于惯性基准法设计了一个专门的地铁轨道波磨检测系统,期望为城市轨道交通的维护提供更为先进的技术支持。

1 基于惯性基准法的地铁轨道波磨检测研究

1.1 地铁轨道波磨研究

轨道的波磨损耗是一种无法避免的轨道损伤,早期的轨道波磨检测是通过工人手工逐点测量,该方式无论是检测效率,还是检测精准度,都非常低下。若波磨损耗发现较晚,将会导致轨道打磨修复变得十分困难,若打磨修复不到位,就将轨道投入使用,将会导致轨道损耗进一步加剧,最终导致整条轨道废弃,造成非常大的成本损耗及资源浪费。城市轨道交通的修建成本极高,若因轨道波磨损耗导致地铁线路废弃,将对当地城市的经济发展等方面造成极大的损失,因此,及时地检测发现轨道损耗状况,并加以改善,可以有效地延长地铁轨道的使用寿命。轨道的波磨损耗,可根据磨损的类型、波形的波长、波长确定机制及轨道损伤机制进行分类^[7-8]。按照轨道损伤机制,可将波磨损耗划分为 6 种:波谷塑性变形、塑性弯曲、滚动接触疲劳、波谷纵向振动磨耗、横向振动磨耗及波谷磨耗^[9-10]。我国城市轨道交通的波磨损耗中,波磨波长在 50~350 mm 之间,最大波深为 1.37 mm,且主要发生在曲线段。轨道的波磨损耗分为开始阶段及发展阶段,开始阶段是指刚开始出现的阶段,发展阶段是指轨道波磨损耗不断加剧的过程,发展阶段中,轨道的波磨损耗与轮轨之间的相互作用会相互促进并形成循环,如图 1 所示^[11-12]。

这些振动又会进一步导致轨道平面更加粗糙,更加粗糙的平面又会增加轮轨之间的振动,如此反复循环,就形成了轨道的波磨损耗^[15-16]; 2) 自激振动理论,在列车运行的过程中,由于某些特定因素或轨道的固有特性,导致轮轨之间产生了自激振动,从而导致了波磨损耗的产生^[17-18]; 3) 接触疲劳理论,发生在载荷过重或列车重复接触次数较多的轨道轨头表面损伤,该损伤的表现形式较多,包括裂纹、表面凹陷、分层剥落等,这些轨道损伤对轨道的波磨损耗有极大的促进作用^[19-20]。由于波磨损耗具有随机性,因此,需要通过数值法来计算,在实际工程中,最常用的傅里叶变换是快速傅里叶变换,在使用快速傅里叶变换时,数据的采样数必须为 2^n 个,若该要求无法满足,就需要在信号的末端增加一个 0,再假设 $x(t)$ 为时域函数,采样时间间隔为 Δt ,那么快速傅里叶变换如式 (1) 所示:

$$X(f) = \sum_{n=1}^{m-1} x_n(f) \quad (1)$$

式中, f 为参数, N 为采样点个数。时域分析主要用于,分析波磨损耗的波深随着轨道使用里程的变化而变化,虽然轨道波磨损耗的深度是随机变量,无法预知,但可以通过在轨道中不断地采样,并将其在轨道中的长度表示出来,就可以采用时域分析对其进行分析,在此过程中,还可以获得轨道波磨损耗的最大值、平均值及方差等数据,工作人员也可以根据时域分析数据,快速定位发生轨道波磨损耗的路段,并进行轨道的维护工作。粗糙度水平分析,是根据轨道波磨损耗的均方根值大小来进行判断的,假设轨道波磨损耗分析中,采样点为 i ,每个对应点的波磨损耗的深度为 x_i ,那么均方根可通过式 (2) 计算获得:

$$X_{RMN} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2)$$

式中, X_{RMN} 为均方根。利用该公式计算获得轨道的粗糙度水平后,将其与国家规定的轨道表面粗糙度标准值相比较,即可获得该段轨道的粗糙度水平,该分析方式常用于惯性基准法的检测方法中,对检测精度的要求较高。

1.2 基于惯性基准法的轨道波磨检测系统

惯性基准法是一种常用的轨道波磨检测方法,该方法实现成本低,检测过程简单。惯性基准法是指通过加速度计的安装,收集列车轴箱加速度。若轨道刚度足以承受列车重量而不产生形变,那么列车轴箱在垂直方向上的运动曲线,就与轨道表面在垂直方向上的波磨曲线,因此,将加速度计收集到的加速度进行处理,即可获得轨道的波磨损耗值。在收集列车轴箱加速度时,若列车一对车轮产生的垂向位移为 $x(l)$,位移过程中的加速度为 $a(l)$,那么列车在轨道上行驶过程中,轴箱在垂直方向上的加速度的计算如式 (3) 所示:

$$a(l) = \frac{d^2 x(l)}{dt^2} \quad (3)$$

若列车运行过程中,车轮在垂直方向上的位移为 d_w ,轴箱的加速度为 a_w ,那么根据式 (3) 可知,轨道波磨损耗的

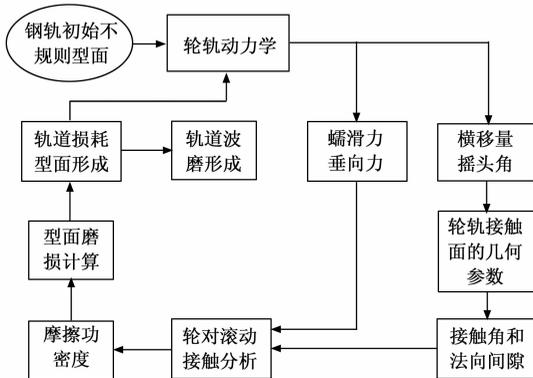


图 1 轨道波磨损耗与轮轨相互作用的循环

轨道波磨损耗是轮轨之间的相互作用导致的,但轨道磨损的具体成因并没有较为明确的理论,目前主流的成因包括反馈振动理论、自激振动理论、基础疲劳理论^[13-14]。

1) 反馈振动理论,由于轨道在投入运行之初,轮轨接触面就不平顺,使得在使用之初,轮轨之间就有振动形成,而

计算见式 (4):

$$d_w = \iint a_w dt^2 + c_1 t + c_2 \quad (4)$$

式中, c_1, c_2 为积分常数。基于惯性基准法的轨道波磨损耗检测系统中, 包括了各种信号的放大、滤波等操作。基于惯性基准法的轨道波磨损耗检测方法的数据处理流程分为 4 个部分: 第一部分是数据信号的采集输入, 该部分的数据信号指检测列车左右两个轴箱的加速度, 该数据由加速度计获得; 第二部分为模拟调理部分, 该部分中含有两个模块, 分别是模拟滤波器及 A/D 采样; 第三部分是数字处理部分, 该部分包括 5 个模块, 分别是去偏滤波模块、数值积分模块、数字高通滤波模块、数据库及数据储存模块; 最后一个部分是数据可视化部分, 该部分可将最后得到的轨道波磨损耗的波形显示出来, 在进行数据处理时, 由第一部分的两个加速度计将收集数据输入模拟滤波器中进行预处理, 再通过 A/D 采样模块, 之后进入去偏滤波模块进行处理, 去偏滤波模块将处理后的数据送至数值积分模块, 进行积分处理, 将积分处理的结果输入数字高通滤波模块进行最后的处理, 数字高通滤波器处理结束后, 会将数据存入数据存储模块及数据库中, 经过上述处理后, 将结果输入数据可视化模块, 即可得到轨道波磨损耗的波形, 其处理流程如图 2 所示。

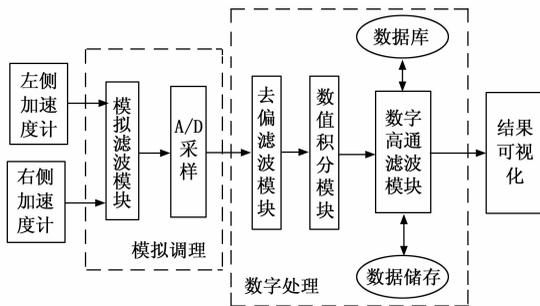


图 2 基于惯性基准法的轨道波磨损耗检测数据处理流程

从图 2 中可以知道, 检测系统的数字处理部分包括去偏滤波、数字积分及数字高通滤波, 去偏滤波是为了去除检测过程中出现的直流偏量, 数字积分处理则是为了获得轨道波磨损耗值, 数字高通滤波则是为了截取波长范围内的信号。在检测列车的转向轴箱中安装加速度计时, 无法保证加速度计完全垂直于轨轮接触面, 因此, 难免在测量过程中出现加速度轴的偏移; 除此之外, 收集到的原始信号中, 还存在低频部分, 该部分的存在易引起积分过程中, 出现积分饱和的情况, 因此, 需要去偏滤波器进行处理, 去偏滤波器的函数表达式如公式 (5):

$$R(z) = \frac{(1 - \omega_d)(1 - z^{-1})}{1 - (1 - \omega_d)z^{-1}} \quad (5)$$

式中, z 为变量, ω_d 为参数, 可决定滤波器的衰减特性及带宽。基于惯性基准检测法的检测原理, 对滤波器处理过后的加速信号进行连续两次数字积分, 即可获得轨道波磨损耗值, 牛顿-科茨法是一种常用的数字积分方法, 该方法

使用差值多项式进行积分, 辛普森法是该方法的一种, 研究采用该方法对数据信号进行积分处理, 该方法中, 每个采样点之间的属性特征之间的关系如公式 (6) 所示:

$$s(n) = s(n-1) + \frac{T_n}{12}[5a(n) + 8a - a(n-2)] \quad (6)$$

式中, $s(n)$ 表示每个采样点的加速度值对应的积分值。式 (6) 的传递函数如式 (7) 所示:

$$H(z) = \frac{T_n(5 + 8z^{-1} - z^{-2})}{12(1 - z^{-1})} \quad (7)$$

式中, $H(z)$ 表示传递函数。由式 (6) 可知, 当 $z = 1$ 时, 函数 $H(z)$ 出现极点, 极点的出现会导致积分时出现积分饱和的现象。在经过两次积分处理后, 数据信号中, 已经包含了其他波长的信号信息, 再采用数字高通滤波器, 对积分后得到的信号数据进行处理, 即可对波长范围内的信号进行截取操作, 并通过该操作提高轨道波磨损耗的检测精准度, 数字高通滤波器是由低通滤波器及一个全通滤波器组成的, 研究选取的低通滤波器为三阶低通滤波器, 该滤波器的函数表达式见式 (8):

$$U(z) = \left(\frac{1}{k} \left(\frac{1 - z^{-k}}{1 - z^{-1}} \right) \right)^3 \quad (8)$$

式中, $U(z)$ 为三阶低通滤波器函数, k 为滤波器参数, 可根据实验需求, 选取特定范围的波长。再通过全通滤波器减去低通滤波器, 即可获得高通滤波器, 如式 (9) 所示:

$$V(z) = U_{AP} - U(z) \quad (9)$$

式中, $V(z)$ 为高通滤波器函数, U_{AP} 为全通滤波器函数。由于研究设计的轨道波磨损耗检测系统与原检测系统有所不同, 因此, 需要重新设计检测中的各种硬件及电路设施。研究构建的检测系统中, 加速传感器选择非常重要。由于列车轴箱的加速度测量范围较大, 因此, 加速度计必须具有良好的线性度, 电容式微加速度计的成本较低、稳定性较高, 且其信号读取复杂的缺点, 可通过增加一个信号调理板进行改进, 因此, 研究采用电容式加速度计, 作为检测列车轴箱加速度测量仪。Model2012 是该种类额加速度计中较为常见的一种, 该加速度计输出阻抗低, 接线简单便捷, 但该加速度计的输出信号为差分信号, 需要对该型号进行转换, 才能成为检测系统可以接收并处理的信号。通常使用减法器, 作为电压信号的转变仪, 减法器通常是通过仪表放大器实现的。结合 Model2012 加速度计的信号特点, 及检测系统中的电压情况, 研究以 AD8250 芯片, 作为信号转换芯片, 该型号芯片的功能如图 3 所示。

AD8250 是一种可编程的仪表放大器, 该放大器具有以下 5 个特点: 1) 尺寸小巧, 可以安装在大多数系统中, 而不影响系统的功能; 2) 电压使用范围较宽, 对系统要求更低; 3) 可自主编程, 提高放大器性能; 4) 在直流电中具有高共模抑制比的同时, 还具有低增益漂移; 5) 在交流电中建立时间短, 功耗低。检测系统在对采样信号进行处理时, 需要采样频率是最大信号频率的两倍及以上, 才不会造成信号中信息的缺失, 一般会将采样频率, 定为信号最大频率的 5~10 倍。在研究设计的检测系统中, 只需要指

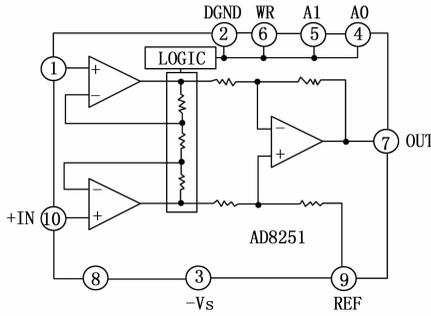


图 3 信号转换芯片 AD8250 的功能框图

定范围内的信号信息，因此，还需要对指定范围内的信号频率进行抗混叠滤波操作，该操作是采用低通滤波器，对采样信号频率进行处理，去除高于评价采样频率的部分。MAX291 滤波器是巴特沃斯滤波器中的一种，具有开关电容式结构，具有该结构的滤波器需要一个时钟作为电路驱动器，且该时钟的频率应是截止频率的 100 倍。驱动时钟也分为内部及外部两种，其中外部时钟的安装方式便捷，结构简单，仅需外接一个电容即可，由于接线简单，因此在出现故障时，可以及时修复。但该滤波器易受外界电磁干扰，在安装时应注意以下几点：1) 在布线时，需要预留一块无线路的地方作为滤波器的安装地，以减少底线对滤波器的干扰；2) 加强滤波器电源，该措施可以有效减少电源纹波；3) 滤波器需要单独供电，并且与检测系统的电源隔离开；4) 需要将时钟信号与信号传输线进行隔离，避免产生干扰。

2 检测系统仿真实验分析

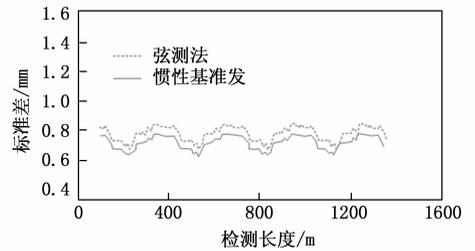
为了对研究构建的基于惯性基准法轨道波磨损耗检测系统进行验证，在 SIMPACK 软件上进行了仿真模拟实验。SIMPACK 软件是一种机械动力学仿真软件，包含了许多专业模块及样机系统。研究基于此软件，构建了检测车辆模型，其中部分关键参数如表 1 所示。

为了验证研究设计的基于惯性基准法的轨道波磨损耗检测系统的有效性，研究将其与基于弦测法的检测系统进行了对比，结果如图 4 所示。

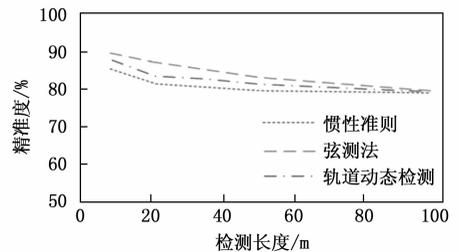
图 4 (a) 为两种检测系统在不同检测长度下的检测标准差对比结果，可以看到，两种检测方法的检测结果标准差值的走向基本一致，但惯性基准法的检测标准差，略小于弦测法的检测标准差，检测长度为 400 m 时，弦测法的检测标准差为 0.79 mm，而惯性标准法的检测标准差为 0.72 mm，检测长度为 850 m 时，两种方法的检测标准差基本相等。图 4 (b) 为两种检测系统在不同的检测长度下的检测精度度，可以看到，随着检测轨道长度的增加，检测精度在不断下降，检测轨道长度为 10 m 时，基于弦测法的检测系统的检测精度为 89.3%，基于惯性基准法的检测系统的检测精度为 85.6%，检测轨道长度为 20 m 时，基于弦测法的检测系统的检测精度为 86.4%，基于惯性基准法的

表 1 检测车辆建模参数

| 类别 | 部件 | 参数 | 单位 |
|---------|----------|---------|--------------------|
| 惯性参数 | 车体 | 22.100 | t |
| | 构架 | 3.590 | t |
| | 侧滚转动惯量 | 23.121 | t * m ² |
| | 点头转动惯量 | 943.053 | t * m ² |
| | 摇头转动惯量 | 941.046 | t * m ² |
| 结构参数 | 轮对 | 1.528 | t |
| | 车辆定距 | 12 550 | mm |
| | 轴距 | 2 100 | mm |
| | 重心距地面高度 | 1 700 | mm |
| | 轴箱弹簧横向间距 | 1 920 | mm |
| | 重心与弹簧距离 | 197 | mm |
| 转向架悬挂参数 | 车轮滚动圆直径 | 850 | mm |
| | 空气弹簧横向阻尼 | 29.00 | kN * s/m |
| | 牵引拉杆纵向刚度 | 16.30 | MN/m |
| | 轴箱弹簧纵向刚度 | 6.41 | MN/m |
| | 空气弹簧垂向刚度 | 0.48 | MN/m |
| | 空气弹簧垂向阻尼 | 62.00 | kN * s/m |
| | 牵引装置垂向刚度 | 41.0 | MN/m |



(a) 检测标准差对比



(b) 检测精度对比

图 4 基于惯性基准法的检测系统与基于弦测法的检测系统的结果对比

检测系统的检测精度为 81.2%，检测轨道长度为 50 m 时，基于弦测法的检测系统的检测精度为 82.1%，基于惯性基准法的检测系统的检测精度为 79.8%，检测轨道长度为 100 m 时，基于弦测法的检测系统的检测精度为 81.32%，基于惯性基准法的检测系统的检测精度为 79.5%。基于惯性基准法的检测系统的检测精度较低，但成本也更低。确定了基于惯性基准法的轨道波磨检测方法的有效性后，研究在曲线半径为 400 m 的轨道上，添加了一定程度的波磨损耗，并对轨道的波磨损耗数据进行处理，得到该波磨损耗下的轨道功率谱密度，并以上述数据对研究构建的检测

系统进行检验,检验结果如图5所示。

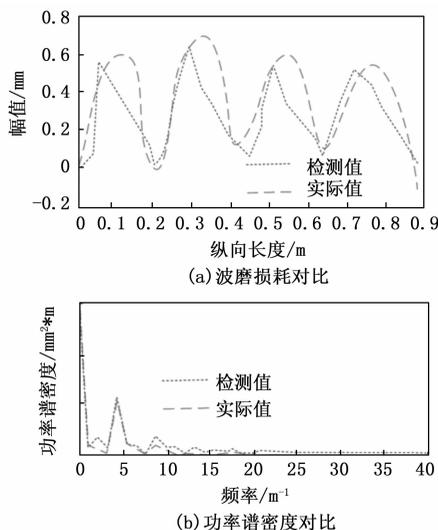


图5 轨道波磨检测系统的检验结果

图5(a)为轨道波磨损耗的检测值与实际值的对比结果,可以看到,检测值与实际值的趋势基本一致,但具体误差较大。实际值在0.1、0.3、0.55、0.77 m处均为波峰,其中,0.1 m处波峰幅值为0.602 3 mm,0.3 m处的波峰幅值为0.681 2 mm,0.55 m处的波峰幅值为0.598 3 mm,0.77 m处的波峰幅值为0.576 3 mm,实际轨道波磨损耗的最大波深为0.681 2 mm,最小波深为0.576 3 mm,平均波深为0.557 0 mm。地铁轨道的实际波磨损耗,在随着纵向长度的增加而减小,轨道纵向长度在0.3 m时,轨道波磨损耗波深达到最大值。检测情况则在0.08、0.3、0.52、0.75 m处达到轨道波磨损耗峰值,其中,0.08 m处的幅值为0.572 1 mm,0.3 m处的幅值为0.583 8,0.52 m处的幅值为0.563 4 mm,0.75 m处的幅值为0.564 8 mm,检测轨道波磨损耗的最大波深为0.583 8 mm,最小波深为0.563 4 mm,平均波深为0.486 3 mm。研究设计的检测系统的轨道波磨损耗数据,略低于实际的轨道波磨损耗数据。图5(b)为实际情况与检测数据的轨道波磨损耗功率谱密度对比结果,可以看到,实际情况下,功率谱密度图中存在两处明显的波峰,分别是频率为0处及频率为 4.784 m^{-1} 两处,其中,频率为0处波峰是由于轨道波磨损耗波形的数据均值,在线性条件中不为0造成的,该处对应的功率谱密度为 $0.300\text{ mm}^2 \cdot \text{m}$ 。频率为 4.784 m^{-1} 处的波峰对应的功率谱密度为 $0.106\text{ mm}^2 \cdot \text{m}$ 。除上述两个明显的波峰外,在频率为 9.384 m^{-1} 处,该频率位置下的功率谱密度较小,不具有参考价值,由上述数据可知,轨道波磨损耗的实际波长为209 mm。检测情况中可以看到频率在 20 m^{-1} 以后,与实际情况基本一致,在此之前也与实际情况极其相似,仅在频率为 $10\sim 20\text{ m}^{-1}$ 之间,检测频率波动较大,与实际值不符。检测数据中,两处明显波峰分别在频率为0及频率为 4.830 m^{-1} 处,检测情况中除两处明显波峰外,也存

在一个不明显之处,由于不具有参考意义,因此不做讨论,由上述数据可知,检测结果的波长为207 mm。

3 结束语

地铁已经是我国主要的城市交通手段之一,地铁寿命与地铁轨道波磨损耗息息相关,为了提升城市地铁的使用寿命,研究构建了基于惯性基准法的轨道波磨损耗检测系统,该系统通过对列车的轴箱加速度进行测量以获得轨道的波磨损耗情况,研究构建的系统采用Model2012系列加速度计作为测量设备,并采用AD8250作为信号处理设备。结果显示,基于惯性基准法的检测系统的成本花费,是基于弦测法的检测系统的成本的83%。基于惯性基准法的检测系统的检测最大波深为0.583 8 mm,相较于实际值,降低了14.3%,检测评价波深为0.486 3,相较于实际值,降低了12.7%,检测数据波长为207 mm,相较于实际波长,降低了0.96%。研究构建的基于关系基准法的检测系统的检测成本更低,且其检测精度满足实际使用所需,但研究构建的检测系统的检测精度仅刚好满足实际应用所需,误差仍处于较高水平,仍待改进。

参考文献:

- [1] 伍川辉,李俊青,杨磊,等.基于惯性基准法的非接触式轨道不平顺检测系统[J].中国测试,2023,49(3):128-134.
- [2] 陈仕明,侯智雄,王昊,等.轨道几何动态惯性测量误差评估方法[J].铁道建筑,2022,62(5):36-41.
- [3] 伍川辉,李俊青,杨磊,等.基于惯性基准法的非接触式轨道不平顺检测系统[J].中国测试,2023,49(3):128-134.
- [4] 刘堂辉,刘锦辉,冯青松,等.基于惯性基准法的轨道高低不平顺影响分析[J].都市快轨交通,2022,35(2):117-123.
- [5] GAO T, CONG J, WANG P, et al. Vertical track irregularity analysis of high-speed railways on simply-supported beam bridges based on the virtual track inspection method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2021, 235(3): 328-338.
- [6] GHASSOUN Y, GERKE M, KHEDAR Y, et al. Implementation and validation of a high accuracy UAV-photogrammetry based rail track inspection system [J]. Remote Sensing, 2021, 13(3): 384-405.
- [7] 程朝阳,李颖,刘正毅,等.轨道质量指数检测一致性分析[J].中国铁路,2020(10):105-109.
- [8] 李浩然,侯智雄,刘伶萍,等.基于惯性基准法的轨道短波不平顺检测系统[J].铁道建筑,2019,59(6):105-108.
- [9] 张华鹏,徐梦楠,吴蔚,等.砂轮端面打磨技术治理钢轨波磨的建模与仿真[J].铁道建筑,2023,63(5):28-33.
- [10] 王玮,庞婷婷.基于数据挖掘的城市轨道交通信息安全检测[J].微型电脑应用,2022,38(2):113-115.
- [11] 滕云,刘宏立,马子曦,等.基于2D位移激光传感器的钢轨波磨动态检测方法[J].传感器与微系统,2023,42(5):121-125.

- [12] CHUBYKALO A, ESPINOZA A, KULIGIN V, et al. Ether and equivalence of inertial frames of reference [J]. International Journal of Engineering Technologies and Management Research, 2020, 6 (7): 156-166.
- [13] 董庆仑, 尧辉明, 翟宇波. 基于点线结合的空间波磨检测方法 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (5): 177-181.
- [14] 漆伟, 刘美, 程桂, 等. 小半径曲线科隆蛋扣件区段钢轨波磨成因研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2023, 42 (4): 32-39.
- [15] FANG X, THOMPSON T A, HIRATA C M. The population of eccentric binary black holes: implications for MHz gravitational-wave experiments [J]. The Astrophysical Journal, 2019, 875 (1): 75-84.
- [16] 王志强, 雷震宇. 基于轮轨黏滑特性的地铁线路波磨趋势分析 [J]. 北京交通大学学报, 2023, 47 (1): 17-25.
- [17] 钱舒月, 何庆, 高天赐, 等. 地铁曲线段参数对钢轨波磨影响分析与打磨周期评估 [J]. 北京交通大学学报, 2023, 47 (1): 26-34.
- [18] 张大鑫, 李莉, 张云飞. 基于地铁车内噪声控制的钢轨打磨限值研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (3): 160-165.
- [19] 林川淇, 陈帅, 吴磊, 等. 高速铁路钢轨波磨对弹条疲劳寿命的影响 [J]. 铁道建筑, 2023, 63 (2): 12-16.
- [20] 牛道安, 魏子龙, 孙宪夫, 等. 小半径曲线钢轨波磨激扰下列车车内振动噪声特性 [J]. 交通运输工程学报, 2023, 23 (1): 143-155.

(上接第 98 页)

从图 6 中可以直观地看出, 3 个系统的平均漏检率分别为 3.7%、3.1% 和 0.3%, 平均误检率分别为 3.2%、3.2% 和 0.5%。综合上述 3 种场景下的实验结果, 可以看出优化设计基于动态模拟技术的混合动力车辆发动机电控单元检测系统的漏检率和误检率始终低于两种传统方法, 通过纵向对比, 发现优化设计系统在 3 种发动机运行场景下的漏检率和误检率未发生明显波动, 由此说明优化设计方法具有良好的运行稳定性能。

4 结束语

在节能环保的大背景下, 混合动力车辆的市场占比与应用范围逐渐扩大, 逐渐成为主流车辆形式。电控单元是混合动力车辆发动机的重要组成部分, 直接决定了发动机的工作效率, 从而影响混合动力车辆的行驶性能。在此次研究中, 通过动态模拟技术的应用, 设计并开发了一套软硬件相结合的混合动力车辆发动机电控单元检测系统, 从实验结果中可以看出, 优化设计系统具有良好的检测功能, 能够适应发动机的不同运行状态, 因此具有较高的应用价值。然而此次系统测试实验未对电控单元故障位置检测性能进行测试, 因此在投入使用之前还需对实验数据加以补充。

参考文献:

- [1] 张爱云, 王吉华, 高崑, 等. 基于机器视觉的 VVT 发动机转子缺陷检测系统设计 [J]. 工程设计学报, 2021, 28 (6): 776-784.
- [2] 张呈宇. 基于大数据的拖拉机发动机故障检测系统设计 [J]. 农机化研究, 2022, 44 (6): 257-260.
- [3] 蔡舒好, 闫子砚. 基于改进 YOLOv4 的航空发动机小目标损伤检测研究 [J]. 航空动力学报, 2023, 38 (2): 445-452.
- [4] 杨松, 于爱兵, 孙磊. 汽车发动机 EGR 冷却器气密性检测设备设计 [J]. 机械设计与研究, 2022, 38 (6): 168-172.
- [5] 华泽锋, 潘孟春, 陈棣湘, 等. 发动机叶片微缺陷自动检测系统的设计 [J]. 中国测试, 2021, 47 (10): 109-113.
- [6] 吴玉洋, 李宁宁, 薛薇, 等. 改进 PSO 优化 LSSVM 的液体火箭发动机故障检测 [J]. 计算机仿真, 2020, 37 (5): 49-54.
- [7] 韩二锋. 柴油发动机性能监测系统的可视化设计 [J]. 农机化研究, 2023, 45 (2): 246-250.
- [8] 王浩, 刘佳, 施亚中, 等. 主动红外热像技术在航空发动机叶片缺陷检测中的研究和应用进展 [J]. 激光与红外, 2021, 51 (12): 1554-1562.
- [9] 孙芸, 张洪信, 赵清海, 等. 永磁活塞机械电力发动机电力结构集成设计优化 [J]. 内燃机工程, 2021, 42 (6): 45-51.
- [10] 廖达海, 殷明帅, 罗宏斌, 等. 基于耦合去噪算法的航空发动机中 Si₃N₄ 圆柱滚子表面缺陷的检测方法 [J]. 兵工学报, 2022, 43 (1): 190-198.
- [11] 左延红, 左承基, 方继根. 基于分数阶积分的发动机在线检测数据融合技术 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (2): 644-650.
- [12] 李彬, 汪诚, 吴静, 等. 改进 YOLOv4 算法的航空发动机部件表面缺陷检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (14): 414-423.
- [13] 谢宏斌, 蒋兆杰, 刘轩铭, 等. 电控汽油喷油器开启延迟时间检测方法研究 [J]. 车用发动机, 2021 (6): 82-89.
- [14] 余志伟, 郭迎清. 涡轴发动机分布式控制系统传感器故障诊断技术 [J]. 推进技术, 2022, 43 (4): 318-325.
- [15] 尹晋平, 王选择, 翟中生. 便捷的车辆发动机转速测量系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2022 (12): 80-83.
- [16] 王宏伟, 王倩玉, 韩杰, 等. 基于观测器的车辆电子稳定控制系统执行器故障重构 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (3): 313-320.
- [17] 夏真新, 吴长水, 王海峰. 天然气发动机氧传感器驱动及故障诊断策略设计 [J]. 传感技术学报, 2021, 34 (11): 1427-1432.
- [18] 谭海, 廖戈剑, 王仁波, 等. 核辐射智能检测车控制系统设计 [J]. 核电子学与探测技术, 2021, 41 (2): 315-320.
- [19] 刘平, 姚宇, 刘阳, 等. 电动汽车电液复合制动协调控制方法 [J]. 机械设计与制造, 2023 (4): 251-256.
- [20] 周瑞敏, 郭富民, 岳雪亭, 等. 考虑输出量化的控制系统传感器故障检测 [J]. 控制工程, 2022, 29 (2): 362-367.