

激光式自动化检测钢轨波磨装置研究

朱朝刚, 尧辉明, 高利君

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 针对目前机械式轨道波磨测量普遍精度不高, 使用条件限制较多等缺点, 研发了激光式自动化检测钢轨波磨装置; 该装置主要采用非接触式激光传感器进行检测, 采用步进电机带动传感器扫描钢轨表面, 数据传输采用单片机结合 WiFi 上传给上位机, 使用 C# 编写的上位机程序对数据进行采集分析处理; 经过多个现场测试, 设备能够稳定、准确地采集钢轨波磨数据, 并且具有采集速度快, 设备移动方便, 钢轨波磨的检测效率高优点。

关键词: 钢轨波磨; 激光传感器; 步进电机; 自动化

Automatic Inspection Device of Corrugation Based on Laser

Zhu Chaogang, Yao Huiming, Gao Lijun

(College of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the current mechanical track wave measurement. There are many disadvantages such as limited conditions of use. A laser automatic detecting rail wave grinding device is developed. This device mainly uses the non-contact laser sensor to detect, uses the step motor to drive the sensor to scan the rail surface, and transmits the data to the upper computer by the single-chip microcomputer combined with WiFi. The PC program written by C# is used to collect and analyze the data. After many field tests, the equipment can collect rail wave grinding data stably and accurately, and it has the characteristics of fast acquisition speed, convenient equipment movement, high detection efficiency of rail wave mill and so on.

Keywords: corrugation; laser sensor; stepper motor; automation

0 引言

钢轨波浪形磨耗(以下简称波磨)是指铁路钢轨在经过车体多次通过后, 钢轨轨面出现形似波浪且具有一定规律的磨损现象。磨损长度(波长)主要集中在 50~200 mm, 最大磨损深度(波深)达到了 1.37 mm^[1]。随着我国铁路里程和车辆运行时速的不断增加, 波磨现象越来越多。经过国内外研究显示对钢轨波磨早期的预防和打磨等处理, 可以很大程度上降低钢轨进一步的磨损以及对车体的损害。

目前国内外大多波磨检测仪器测量方式可分为接触式测量和非接触式测量^[2]。机械式钢轨磨损测量仪有: 英国道比研究中心的钢轨断面测量仪, 使用测量探头直接接触钢轨表面得到磨损数据; 德国 VOGE 公司研发的 SKM1 轨头磨耗检测装置, 该设备借助探针对钢轨表面进行扫描并将探针轨迹绘制在图纸上^[3]。非接触式测量有: 奥地利格拉兹公司研制的手持电子测量仪, 通过钢轨上方传感器扫

描钢轨得到钢轨表面磨耗数据; 瑞士 ELAG ELECTRONIC AG 公司研制的激光便携轨道检测仪^[4]。

为了精确快速获得钢轨波磨数据, 研制了自动化便携式波磨测量仪, 并对上海地铁二号线部分路段进行了实际测量分析。本研究装置检测时放置于钢轨上, 主要采用非接触式激光测距传感器进行钢轨轨面扫描, 使用步进电机带动传感器循环扫描轨面。数据传输使用 WIFI 建立上位机与下位机的通信, 使用 C# 开发了相应的软件, 对采集数据进行分析处理。检测装置结构简单, 方便携带, 可靠性好, 自动化程度高, 能够精确反应钢轨波磨实际数据。

1 激光测量波磨基本方法与原理

弦测法主要应用于高精度检测, 随着检测传感器精度的提高, 弦测法更广泛地应用于钢轨磨损检测。其原理如图 1 所示。将仪器纵向放于钢轨上, 以仪器两侧的连线作为弦, 通过中间传感器测量弦到钢轨的距离作为钢轨磨损测量值。当传感器测点到仪器两侧距离相等时 ($a=b$), 则称之为等弦测量; 其间距不等时 ($a \neq b$), 称之为不等弦测量^[5]。

本设备检测方法为不等弦测量, 如图 1 所示, 设测量弦长为 L , 在仪器下方安装激光位移传感器。假设钢轨的纵向不平顺为 $x(t)$, 仪器实际测量值为 $y(t)$, 则 $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间的关系可表达为:

$$y(t) = x(t) - \frac{1}{2} \left[x\left(t - \frac{L}{2}\right) + x\left(t + \frac{L}{2}\right) \right] \quad (1)$$

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2018-12-06。

基金项目: 十三五国家重点研发计划子课题 (2016YFC0802500); 基于互联网+技术的激光检测波磨测量研究 (E3-0903-18-01338)。

作者简介: 朱朝刚(1994-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事轨道检测与维护方向的研究。

尧辉明(1980-), 男, 上海人, 博士, 副教授, 主要从事轨道车辆轮轨关系动力学及钢轨打磨修复技术方向的研究。

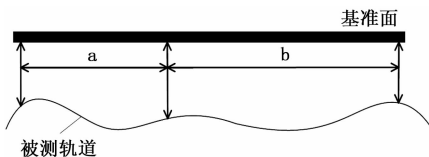


图 1 弦测法测量原理图

式 (1) 中, t 是传感器在检测仪器上运行的距离。

将式 (1) 中实际值与测量值关系式进行傅里叶变换, 得:

$$Y(\Omega) = H(\Omega) \cdot X(\Omega) = (1 - \cos(\pi L / \lambda)) \cdot X(\Omega) \quad (2)$$

式 (2) 中, $H(\Omega)$ 是频率传递函数, Ω 是空间角频率, λ 是钢轨波磨的实际长度, L 是基于弦测法的检测仪器弦长。

波磨评估方法对样本取均方根, 均方根 (RMS) 常用于大样本采样数据处理, 也被称为样本有效值, 目前在钢轨表面磨耗评价中大量应用。由于一定长度内采集到的钢轨波磨数据样本过大, 对样本取均方根处理后可以更精确地反应该区段内钢轨波磨的实际磨损程度。设采样点 $i=1, 2, 3 \dots n$, 各样本点所对应的波磨纵向磨耗为 $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$, 则可通过式 1 计算出该区段钢轨磨耗程度 X_{RMS} 。

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2}{N}} \quad (3)$$

通过式 (3) 算出钢轨磨耗程度 X_{RMS} , 将其与 ISO-3095:2005 C (E) 标准中规定的钢轨轨面理想平整度标准值比较, 可得出该区段钢轨的实际磨耗严重程度。这种钢轨磨耗评价方法目前主要应用于基于弦测法的钢轨波磨检测仪器上, 对检测仪器的传感器精度要求比较高。

设备传感器精度为 $10 \mu\text{m}$, 可测出约一米范围内单条钢轨波磨曲线, 并对波磨数据进行分析。图 2 为波磨测量设备原理图。测量设备平放于钢轨之上, 纵梁 AB 需与钢轨 CD 保持大致平行, 带有同步轮的同步带在步进电机的驱动下带动传感器在钢轨上水平移动, 同时编码器接收水平移动所产生的脉冲将其发送给单片机采集板, 使用增量式编码器输出方波脉冲进行空间等距离采样控制, 采样步长为 5 mm 。

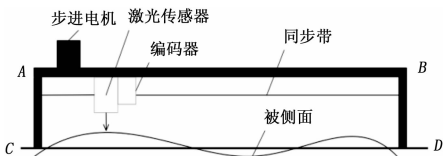


图 2 波磨测量设备原理图

传感器检测的波磨数据以模拟量的方式输出, 模拟量与采样距离呈线性比例关系, 如图 3 所示, 通过单片机读取传感器采集数据。

为了将上述测量方法应用于实际测量, 研制了图 4 所示的波磨测量设备 (专利号: ZL 2017 2 1425380.9)。设备主体由纵梁组成, 还包括滑动杆、定位脚改、限位钉、滑

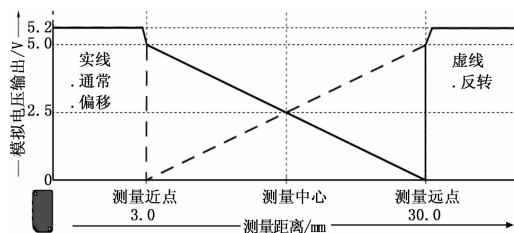


图 3 模拟量与采样距离线性关系

块, 滑动杆固定在左右侧架之间, 滑块用于安放编码器和传感器; 定位脚改固定在左右侧架之上, 限位钉位于定位脚改的螺孔之中, 用于固定检测装置和改变位置; 还包括采集板, 计算机等组成^[6]。



图 4 波磨测量仪机械结构图

装置使用前需调节限位钉位置, 使传感器激光束对准钢轨中央, 并将设备固定于钢轨上, 防止仪器采集过程中, 意外的触碰导致设备晃动从而产生误差; 然后将放置传感器的滑块推到一端, 按下启动按钮, 传感器在步进电机带动下匀速移动。为避免传感器重复测量, 使用编码器输出脉冲作为控制信号, 达到传感器移动与数据采集同步的效果。钢轨波磨数据通过单片机采集板发送到上位机, 由软件系统将磨损数据生成波磨曲线图。

2 波磨检测系统设计

2.1 硬件设计

本设备采用以 STM32C8T6 为芯片的采集板, 采集板上嵌入 WIFI 芯片与上位机进行数据传输。对传感器模拟量进行采集, 其中步进电机驱动脉冲由单片机定时器 T1 的 pwm 波提供脉冲输出, 同时为了提高检测速度和步数的精度, 单片机定时器 T3 对编码器输出脉冲进行捕获来控制定时器 T1 的脉冲输出, 保证设备的同步等间距采样。图 5 是硬件系统总体结构框图。

如果步进电机运行时以 T_L 转矩带动负载, 启动频率为 f_2 , 则步进电机的启动频率必须小于步进电机正常运转时的频率 f_2 , 如图 6 所示, 再将启动时的低频 f_1 通过增加步进脉冲频率的方式加速到正常运行时的频率 f_2 , 由于步进电机的负载转矩在正常运行时维持不变, 其电磁转矩降低。

因此正常运行转矩与负载转矩 $T_M - T_L$ 之差减小, 步进电机从启动到正常运行期间的加速由 $T_M - T_L$ 决定。在步进电机进入稳定运行之后, 其转矩需要保持在启动转矩和失步转矩之间, 即 $f_1 < f_2 < f_s$ 。

步进电机在正常运行时, 维持最大转矩运行一定时间, 之后以停机频率 f_2 减速直到步进电机停转。若在步进电机启动加速过程中, 转矩和速度呈线性关系, 形成梯形加速

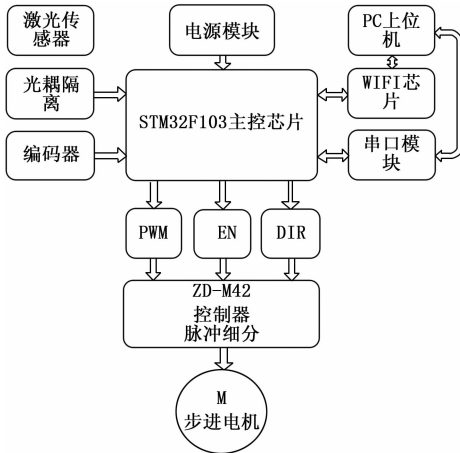


图 5 硬件系统总体结构框图

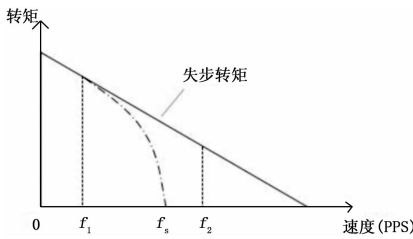


图 6 加速特性

曲线；若步进电机转矩和其转轴运行速度关系呈 S 型曲线，则形成 S 型加速曲线。同理，步进电机在减速时与加速过程相同。梯形与 X 轴所包围的面积等于步进电机走的总步数。

若步进电机步距角设为 θ_s ，步进电机启动时的加速时间设为 t_0 ， T_a 是加速时的负载转矩：

$$T_a = J \frac{\theta_s \pi (f_2 - f_1)}{180 t_0} \quad (4)$$

$$T = SF (T_a + T_L) \quad (5)$$

式 (4) 和 (5) 中，SF 是步进电机正常运行时的安全系数，一般在 1.3~2 之间，通过式 (4) 和 (5) 可计算出步进电机在额定工作状态下所能输出的最大转矩 T 。本设备所需的动态拉力约在 8 N，选择 35HB27 型电机，扭矩为 10 N/cm，满足设备所需要的动态拉力。

2.2 数据传输方式

激光传感器采集钢轨磨损数据以模拟量输出到单片机，再由 ADC 采集发送到 WIFI 芯片。WIFI 与上位机的通讯使用透传模式，芯片使用 ESP8266，在通信之前使用 ESP8266 的 AT 指令集对检测仪器进行相关配置，使单片机与上位机进入可通信状态，使用 AT+CWMODE=1 指令进入 STATION 模式连接 WIFI；并通过 TCP/IP 通信将数据通过 WIFI 发送到上位机。

在 WIFI 到上位机的连续数据传输过程中使用循环缓冲区即队列 FIFO，遵循先入先出的数据进出方式。将 WIFI 发送到上位机的数据存入缓冲区，同时将缓冲区已存入的

数据取出进行处理，循环缓冲区的工作方式如图 7 所示。从缓冲区头部输入数据，到达缓冲区尾部时，新数据从头部再输入到缓冲区，数据在缓冲区中的一个位置以块的形式输出，而头部输入的数据从缓冲区的另一个位置开始存放。这样，当数据输入速度与数据输出速度相等时，未读取的数据就不会被新数据覆盖。当连续快速采集数据时，循环缓冲区的使用使得数据不会在传输过程中丢失^[8]。

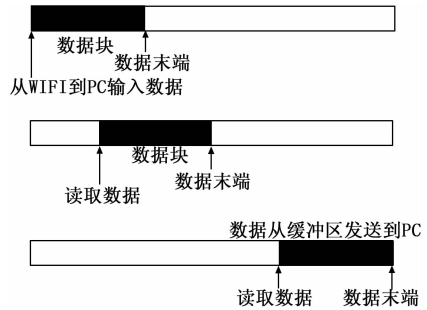


图 7 循环缓冲区工作方式图

由于传感器采集速度较快，会对单个点重复测量，为提高数据精度。因此，在程序中使用 TRIMMEAN 函数对 ADC 每次采集到的 7 个数据进行去最大值和最小值取平均值的处理方法。

2.3 软件系统

软件系统使用 visualstudio 作为开发环境，进行 C# 窗体应用软件开发。软件系统主要由波磨数据采集、波磨数据处理和波磨曲线图显示子系统三大部分组成^[9]。数据采集模块通过激光传感器进行数据实时采集，通过单片机 WiFi 通信网络系统后，经过算法处理，显示钢轨波磨数据，并在显示界面显示磨损曲线图，采集到的数据可存储到电脑指定位置。

测量显示子系统给用户提供了一个测量和管理文件的人际交互界面，将波峰、波谷、峰峰值、峰峰距等数据向用户展示，可进行平滑滤波和带通滤波，并且支持用户对数据的计算和分析。该操作界面十分友好，提供丰富的操作菜单、视图信息、标定操作和波磨评估分析。图 8 为测量界面。

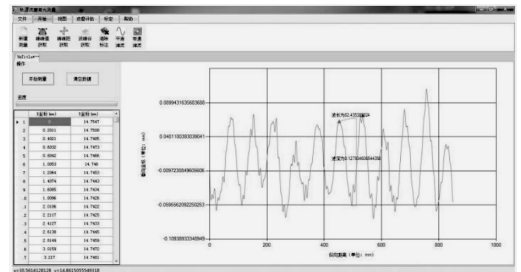


图 8 软件测量界面

软件编程方法主要流程：首先创建一个 winform 窗体用于 PC 端和下位机的 tcpip 通信，再创建一个 winform 窗

体用于生成波磨曲线图, 在 tabcontrol 控件中存放各个功能界面, 实现新建测量以及对历史数据的查看、数据测量、波磨评估、设备标定等功能。通过 tcpip 通信发送采集指令给下位机并获取采集到的波磨数据, 将数据显示在 winform 界面, 采用相应的算法对数据进行处理, 得到波磨数据的各项指标, 最终实现对波磨数据的检测与评估。图 9 是软件实现流程图。

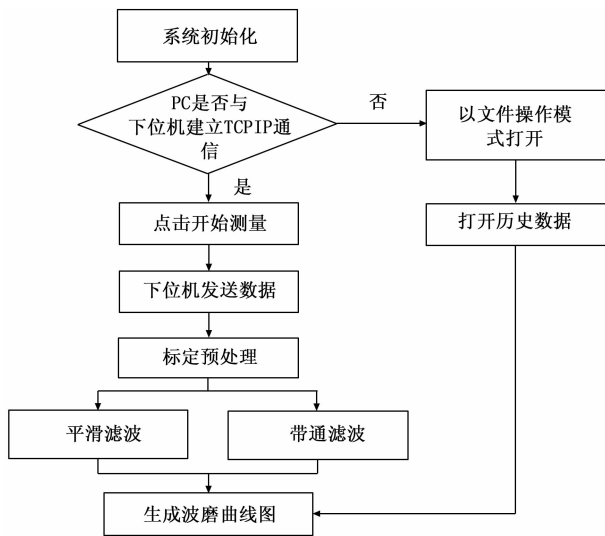


图 9 软件实现流程图

3 波磨的测量与分析

对上海虹桥站至徐泾东区间进行车厢振动测试, 车辆在上海虹桥站驶出后 40~55 s 区间内振动和噪声较大, 并在 48 s 左右出现了轮轨刺耳啸叫声, 此时的振动幅度也较大。图 10 为振动全局频谱分析, 可见振动的主要频率成分分布在 100~300 Hz 左右。其中车厢振动和噪声较大区域的振动频率为 100~200 Hz, 即第一个峰值附近。出现轮轨刺耳啸叫区域的振动频率大约为 300 Hz, 即第 2 个峰值附近。

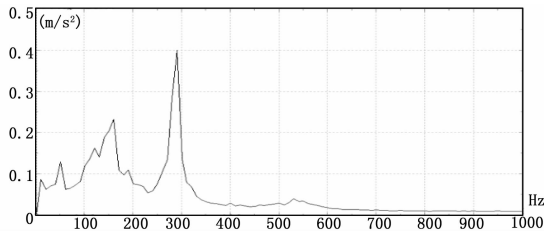


图 10 上海虹桥站至徐泾东区间车厢振动全局频谱分析

对打磨现场情况进行了打磨前的查看和测量, 发现曲线外轨有波磨, 波深约 0.2 mm, 波长约 50~70 mm。如图 11 所示。从动力学角度来说, 当列车经过大波深和繁忙路段时, 列车会对自身车体和轨道产生很大的冲击能量。这种冲击时间越久对铁路列车系统损伤越严重。

将滤波结果与标准波磨损检测谱进行比较, 得到各频带的个数和百分比如表 1 所示。由表 1 可知, 在 30~

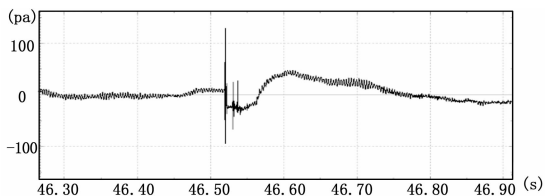


图 11 上海虹桥站至徐泾东区间啸叫噪声局部波形

1 000 mm 波段中, 100 mm 波段的波磨损值最高, 因此该波段磨削波的主要波长为 30~100 mm。

表 1 每个频带内超限数量和百分比

波长范围	10~30mm	30~100mm	100~300mm	300~1000mm
超限个数	896	3548	450	674
超限百分比	1.60	28.53	4.75	5.32

利用 Matlab 将检测数据与标准值比较得到 6 个不同检测弦长下波磨的曲线图, 如图 12 所示。

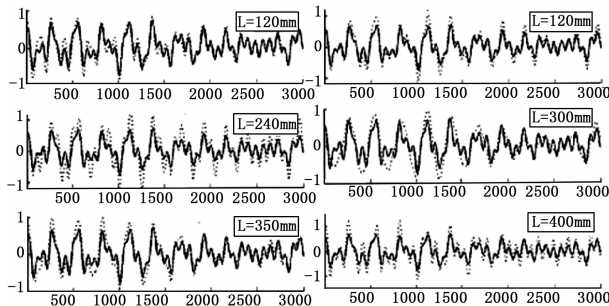


图 12 不同弦长下检测数据和构造波磨轨道数据对比图

由图 10 可知, 由于弦测法的传递函数不恒等于 1 的原因, 根据实际波磨数据所模拟得到的检测数据曲线图和所构造的钢轨磨耗数据有相应的差距。为了比较不同检测弦长下实际波磨检测数据和构造的波磨数据之间的区别。取出实际波磨检测数据和构造的波磨数据的误差最大值 max 和平均值 α 以及标准值 σ 对检测仪器在不同检测弦长下衡量, 如表 2 所示。

表 2 不同检测弦长下实际检测值和模拟值误差表

检测弦长	误差最大值 max	误差平均值 α	误差标准值 σ
$L=120\text{mm}$	0.069	0.043	0.054
$L=200\text{mm}$	0.074	0.051	0.063
$L=240\text{mm}$	0.105	0.073	0.083
$L=300\text{mm}$	0.071	0.057	0.069
$L=350\text{mm}$	0.054	0.039	0.047
$L=400\text{mm}$	0.089	0.067	0.071

由表分析可知在检测弦长等于 350 mm 时实际检测值和模拟值的各项误差均为最小值, 因此当 $L=350\text{mm}$ 时检测仪器精度最高。

检测装置精度为 10 μm , 为便于分析将测量结果精确到