

# 城市轨道交通列车平稳性无线监测系统研发与验证测试

陆 静

(上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海//高级工程师)

**摘 要** 城市轨道交通列车平稳性无线监测系统可对列车的平稳性和舒适性进行实时监测, 为便携式列车平稳性测试设备。该系统将信号采集、分析和传输模块进行一体化设计, 减小了采集系统的整体尺寸; 采用无线通信技术消除了传统测试过程中的布线走线流程, 简化了现场安装步骤。介绍了该系统的设计方案和工作流程。在实车测试验证中, 对该系统与既有有线设备测得的列车平稳性指标进行对比分析。结果表明: 列车平稳性无线监测系统的测试设备, 工作稳定可靠, 安装方便快捷, 能够准确测量并显示列车的平稳性。

**关键词** 城市轨道交通; 列车; 平稳性; 无线监测系统

**中图分类号** U270.7

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2020.07.042

## Development and Verification Test of Wireless Monitoring System for Urban Rail Transit Train Stability

LU Jing

**Abstract** The wireless monitoring system for urban rail transit train stability is a transportable compact train stability testing equipment, it can monitor the train stability and comfort in real time. The signal acquisition, analysis and transmission modules of which are designed with integrated structure, in order to reduce the overall volume of the system. Wireless communication technology is adopted to avoid the intricate cable arrangement during conventional measurement process, and simplify the installation procedure on site. In this paper, the design scheme and work flow of the system are introduced. In the real vehicle test and verification, the train stability indexes measured by the designed system and the existing wired equipment are compared and analyzed. The results show that the test equipment of the train stability wireless monitoring system is steady and reliable with convenient installation, accurate measurement and good exhibition of train stability.

**Key words** urban rail transit; train; stability; wireless monitoring system

**Author's address** Technical Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China

## 0 引言

随着人们生活水平的提高和环保意识的增强, 列车车内噪声和列车平稳性问题已经成为城市轨道交通运营单位关注的提高服务品质的热点问题。列车平稳性指标常用于表示车辆振动对乘客舒适度的影响, 是国内外学者的研究热点<sup>[1-5]</sup>。乘坐的舒适性是反映乘客在旅途中的疲劳程度的综合性生理指标, 在影响舒适度的诸多因素中, 振动是持续存在的主导因素。目前我国用于评价轨道车辆动力学性能的规范为 GB 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》, 其中对车辆运行平稳性评价采用的就是平稳性指标<sup>[2]</sup>。

列车平稳性与车辆状态、线路状况、轨道结构及不平顺等因素相关。在不打扰乘客出行的同时, 高效、简便地检测列车振动情况, 测量、计算列车平稳性指标, 可以更好地研究车辆安全性指标, 提高乘坐舒适性。同时也能为测试评估车辆性能、轨道不平顺、轨道偏差等问题提供数据并进行相关性分析。文献[6]通过对某新建地铁线路试运行阶段横向平稳性测试异常问题进行分析, 确定轨向异常是导致列车平稳性异常的原因, 并对轨向进行针对性精调及整治。文献[7]以列车平稳性为评价指标, 通过极差和方差分析方法, 确定影响列车运行平稳性因素的重要性次序, 提出高速铁路路涵过渡段最佳设计方案。文献[8]通过对北京地铁1号线车辆运行平稳性进行测试, 对比分析了进口、国产空气弹簧对车辆平稳性的影响。

文献[9-11]介绍了不同种类的列车平稳性测试仪器。目前测量列车平稳性的非车载设备多为有线设备, 长线缆增加了设备布设的复杂程度, 很难在不打扰旅客出行的同时对列车的平稳性进行测试。长线缆同时会带来信号的衰减, 如对一整列车

的多个车厢同时进行平稳性指标的监测,需要布设 3~6 套传统有线测试设备,设备需求量和布置难度都非常大。为解决上述矛盾和需求,本课题开发集成一套适用于城市轨道交通列车的无线监测系统,进行列车平稳性指标的监测。

## 1 列车平稳性无线监测系统方案设计

列车平稳性无线监测系统分为振动采集终端、

网关及中继、服务器或其他数据接收、存贮和处理模块三个部分,其工作流程如图 1 所示。自主研发的振动采集终端由微控制芯片、传感器模块、无线通信及 GPS(全球定位系统)模块和电源管理模块组成。该终端具备三向加速度数据采集功能,数字式输出,16 位数字精度,传输方式为 Wi-Fi 协议无线传输。该终端可通过网关直接与上位机进行通信,无需另配采集仪。

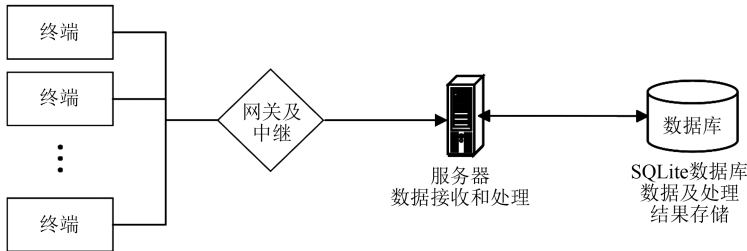


图 1 列车平稳性无线监测系统工作流程图

终端采集物理量为振动加速度,采集参数可根据测试需要进行调整。振动加速度量程支持  $\pm 2\text{ g}$ 、 $\pm 4\text{ g}$ 、 $\pm 8\text{ g}$ 、 $\pm 16\text{ g}$ (其中  $g=9.8\text{ m/s}^2$ )多档切换,采样频率支持 12.5 Hz、25 Hz、50 Hz、100 Hz、200 Hz 多档切换。

列车平稳性无线监测系统可在局域网内工作,亦可在广域网工作。若网关不与广域网相连,且服务器与终端在同一局域网内,则通过配置服务器上上位机和终端参数,可使该系统进入局域网工作模式,数据直接上传到服务器;若配置相关的数据处理模块,则可实时将结果存储在 SQLite 数据库。SQLite 是一款轻型数据库,占用资源低,无需安装和管理配置,储存在单一磁盘文件中。若网关与广域网相连,则通过相关配置系统可进入广域网工作模式,服务器采用云服务器或者具有公网 IP 的物理服务器,设备通过公网将数据直接传输给服务器上的上位机程序,并存储到 SQLite 数据库中;通过配置相关的数据处理模块,可实现实时数据处理与结果输出。

列车平稳性无线监测系统兼容多种供电模式。终端和网关以及中继模块均可采用配套的大容量锂电池供电,在 24 h 不间断连续工作模式下,可实现 7~10 d 的在线工作;同时,终端和网关及中继模块,也可使用市电供电,满足长期在线使用需求。其中,终端兼容 5.5~12.0 V 宽电压输入,网关和中继为 12.0 V 输入。

## 2 实车测试验证

### 2.1 无线通信测试

在试验列车上进行列车平稳性监测设备无线通信能力实车状态模拟,在 6 节编组列车的第 3 节车厢中部放置网关,在每节车厢测点位置放置采集终端。在进行平稳性指标测试时,测点位于距转向架中心 100 mm 的地板面上,加速度所记频谱范围为 0.5~40.0 Hz。依据采样定理,设备采样频率为 200 Hz 时,可满足平稳性测试要求。在局域无线网络状态下进行实车验证,将设备采样频率从低到高进行设置,测试频率达到 200 Hz 时,信号传输一直保持正常,数据无丢包现象,信号同步性满足测试需求。

### 2.2 平稳性指标验证

依据 GB 5599—1985 第 5.3.1 节中多种频率分量时的合成平稳性指标  $W$  进行验证。

$$W = \sqrt[10]{\sum_{i=1}^N W_i^{10}} \tag{1}$$

其中,

$$W_i = 7.08 \sqrt[10]{\frac{A_i^3}{f_i} F(f_i)} \tag{2}$$

式中:

$A_i$ ——振动波形进行傅里叶分析后在频率  $f_i$  的振动加速度幅值;

$F(f_i)$ ——频率修正系数,如表 1 所示。

表 1 频率修正系数		
振动类型	$f_i/\text{Hz}$	修正系数
垂向振动	$0.5 < \cdot \leq 5.9$	$0.325 f^2$
	$5.9 < \cdot \leq 20.0$	$400 f^2$
	$> 20.0$	1
横向振动	$0.5 < \cdot \leq 5.4$	$0.8 f^2$
	$5.4 < \cdot \leq 26.0$	$650 f^2$
	$> 26.0$	1

依据 GB 5599—1985 进行列车平稳性测量,将测试数据经过 A/D(模拟信号/数字信号)转换并计算,得到地板振动加速度时间历程离散数据 $A_i$ 。将 $\{A_i\}$ 进行 FFT(快速傅里叶)变换,得到各离散频率 $f_i$ 对应的幅值。因为不同的频率对应不同的修正系数,因此计算中首先确定频率,根据频率范围按照表 1 计算相应的修正系数后,根据式(2)和式(1)即可计算得到平稳性指标。

为模拟列车真实条件运营工况,选取地铁正线列车,测试列车 ATO(列车自动运行)方式运行时的平稳性。以某地铁线路 A、B 两区间的数据为例进行分析,列车平稳性指标对比图如图 2~3 所示。

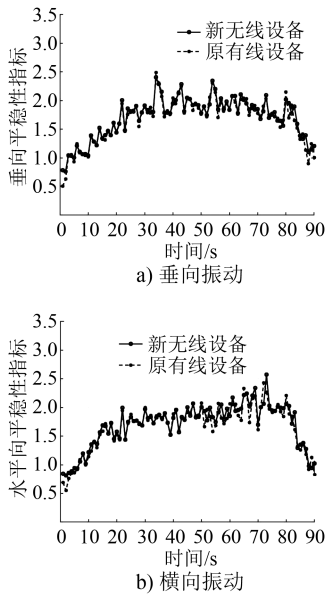


图 2 列车平稳性指标对比图(A 区间)

由图 2~3 可见中:列车运行过程中,新无线设备和原有线设备在性能指标上吻合度很高,两者的测试结果是一致的;与列车运行过程中的其他时刻相比,在列车刚起动和接近停车的 2~3 s 中,车厢地板加速度的量级偏小,新无线设备和原有线设备测试计算出的列车平稳性指标有少许差别。

经实车测试验证,列车平稳性无线监测系统的

无线通信能量和各项功能指标均满足地铁列车平

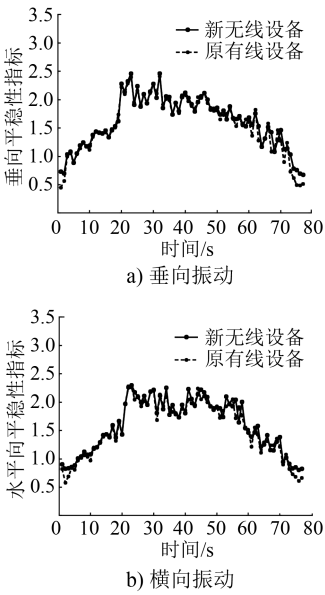


图 3 列车平稳性指标对比图(B 区间)

稳性监测需求。与传统有线系统相比,该系统安装方便快捷,极大地增加了测试设备的适用性。在测试阶段,该系统性能良好,工作稳定。监测设备的长期稳定性和耐久性需要进一步跟踪评估。

参考文献

[1] 朱剑月,朱良光,周劲松,等.地铁车辆运行舒适度与平稳性评价[J].城市轨道交通研究,2007(6): 28.

[2] 倪纯双,王悦明.浅析平稳性指标和舒适度指标[J].铁道机车车辆,2003(6): 1.

[3] 张学铭,谢晓波,杨少彬.铁道车辆平稳性指标对比分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2011,29(5): 661.

[4] 俞展猷.铁道车辆舒适性评价方法的发展与研究现状[J].铁道车辆,2004(3): 1.

[5] 万里翔,许明恒.铁道车辆运行平稳性评价方法的研究[J].铁道机车车辆,2001(1): 8.

[6] 王进,李克飞,吴宗臻,等.基于轮轨动态测试的地铁列车运行平稳性异常问题分析[J].城市轨道交通研究,2019(12): 149.

[7] 王辉煌,沈宇鹏.以列车平稳性优化 CRTS I 板式无砟轨道下路涵过渡段的研究[J].铁道建筑技术,2016(11): 51.

[8] 程海涛,孔军,黄宪.地铁车辆运行平稳性测试[J].城市轨道交通研究,2006(11): 31.

[9] 任利惠,赵青平.基于虚拟仪器技术的铁道车辆平稳性测量仪[J].仪表技术,2000(6): 14.

[10] 柳晓静.基于 SoC 的便携式列车平稳性舒适度检测仪的设计与实现[D].成都:西南交通大学,2012.

[11] 莫莉,喻洪平,何欣.便携式列车舒适度与平稳性测试仪的设计与实现[J].工具技术,2017(8): 109.

(收稿日期:2020-03-06)