

电能质量在线校准系统设计

张 静, 周兴广, 刘 芳, 王 萌

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: 针对电能质量分析仪在传统校准过程中遇到的校准项目和校准点多、耗时长、操作人员需要全程操作和手工记录数据容易产生人为误差等问题, 设计了电能质量在线自动校准系统; 该系统以 LabVIEW 2012 为软件开发平台, Fluke 6100B 为标准信号源, 计算机和标准信号源之间通过 NI USB 转 GPIB 连接, 采用 VISA 函数、SCPI 标准命令和功能完善的状态机架构, 可实现自动控制标准源的输出, 完成可多种厂家、多种型号电能质量分析仪被校准设备的信号采集和显示, 并可一键生成报告; 程序采用模块化设计, 降低了不同功能代码之间的耦合度, 当设备或用户需求发生变化时, 可以方便地完成软件的更新和升级; 电能质量在线校准系统大大减少了由于人工操作所带来的误差, 提高了校准的准确性和效率, 节约了人员和时间成本。

关键词: 电能质量; 自动校准; 虚拟仪器; 准确性和效率

Design of Power Quality Online Calibration System

Zhang Jing, Zhou Xingguang, Liu Fang, Wang Meng

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The online power quality automatic calibration system is designed for the problems that the power quality analyzer encounters many calibration items and calibration points in the traditional calibration process, takes a long time, the operator needs to operate the whole process, and the error caused by the manual recording of data. This system uses LabVIEW 2012 as the software development platform and Fluke 6100B as the standard signal source. The computer and the standard signal source are connected through NI USB to GPIB. The program is designed uses virtual instrument software architecture (VISA) functions and standard command for programmable instruments (SCPI) standard order and fully functional state machine architecture to automatically control the output of the standard source. Complete the signal acquisition and display of the calibrated equipment of various manufacturers and models of power quality analyzers, and generate reports with one click. The program adopts a modular design, which reduces the coupling between different functional codes. When equipment or user requirements change, software updates and upgrades can be easily completed. The power quality online calibration system greatly reduces errors caused by manual operation, improves calibration accuracy and efficiency, and saves personnel and time costs.

Keywords: power quality, automatic calibration, virtual instrument, accuracy and efficiency

0 引言

现代工业飞速发展, 随之而来的电力系统的非线性冲击负荷也大量涌入, 引发了诸如谐波失真、噪音、闪变等问题, 电能质量问题逐渐引起广泛关注。为了有效监测和分析电网运行参数, 改善电网的电能质量, 保证供电系统安全和电网稳定运行, 各种类型的电能质量分析仪被广泛投入使用。根据国家的仪器使用规范, 电能质量分析仪的校准是保证电能质量分析仪测量结果准确可靠的前提^[1-2]。

目前, 我国绝大多数的电能质量分析仪计量检定机构仍旧采用传统校准方式, 因为自动化程度低, 计量人员需要手工操作标准源, 记录被校准设备的数据, 工作量大, 耗时长, 有时难免出现人为操作的误差和错误, 特别是如 Fluke1760 等设备还需要保存数据后再导出数据、分析结果, 不但繁琐, 而且还给校准工作带来不必要的麻烦。因此, 研究电能质量分析仪自动校准技术, 设计与研发一种

低成本、多功能、自动化程度高和性能好的校准系统, 具有积极的社会意义和广阔的市场前景^[3-5]。

针对现有校准工作中存在的问题, 设计了电能质量在线自动校准系统, 只需要用户对所需要校准的项目、校准点数及具体参数进行设置, 点击开始校准, 系统自动完成对标准源的设置输出、待电能质量分析仪输出稳定后采集数据, 电能质量分析仪的校准数据的在线显示、自动完成合格与否的判定, 待校准结束后, 可一键生成校准报告。大大减少由于人工操作所带来的误差, 提高校准的准确性和效率, 在电能质量计量领域有着重要的应用价值。

1 系统构成及原理

自动校准系统的组成包括: 标准源, 被校准设备和计算机。如图 1 所示, 上位机计算机, 是系统的指挥控制中心。在线自动校准系统软件负责输入校准项目和校准点信息, 软件自动控制标准源发送校准信号, 待被校准设备的输出数据稳定后自动采集, 自动显示校准结果。待完成校准过程, 一键生成校准报告。计算机和标准源 Fluke6100B 之间通过 NI USB 转 GPIB 连接, 被校准设备因为涉及型号较多, 要根据不同型号确定连接方式 (网口和串口通

收稿日期: 2020-02-11; 修回日期: 2020-03-26。

作者简介: 张 静(1984-), 女, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事测控技术与系统集成方面的研究。

讯) 等。

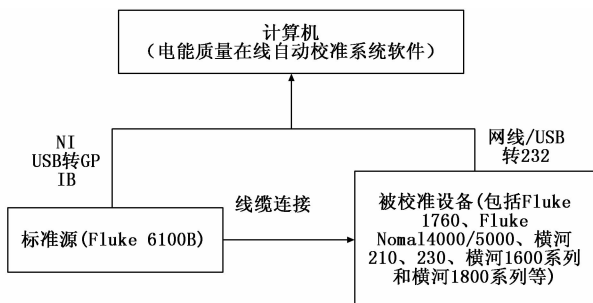


图 1 校准系统构成

当标准源和被校准设备线缆连接完毕后，可按照图 2 所示的软件流程进行校准。打开软件后，按照校准规范的要求，输入被校准设备的信息，设置校准源和被校准设备的地址信息，进行连接，如果设备连接不成功，则检查设备地址信息设置是否正确或线缆连接是否完好，再次进行连接，如果连接成功，则让标准源输出 2 V 电压进行自检。自检完成后，按照校准项目和校准点进行参数设置，设置完成后，点击校准按钮后，按照校准设置控制标准源输出，待校准设备信号输出稳定后采集校准值，接下来判断是否为最后一个校准点，如果不是，继续标准信号源输出，采集被校准设备校准值，直到最后一个校准点结束校准过程。校准过程可在界面实时显示。校准完成后，可一键生成校准报告。

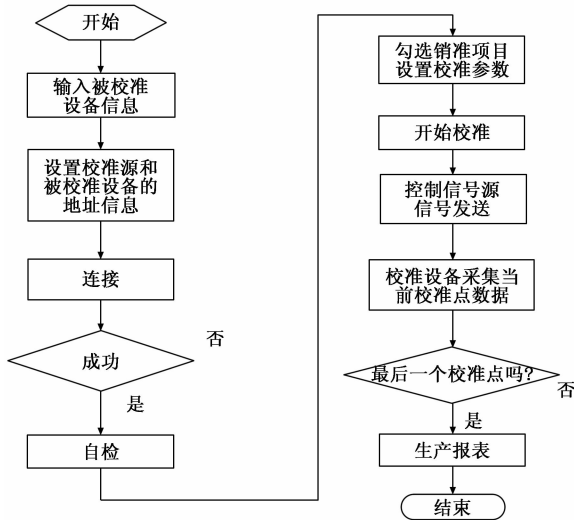


图 2 自动校准软件流程图

2 软件实现

LabVIEW 是 NI 公司推出的一种基于图形化的编程语言，其界面简洁，功能强大，在自动测试测量领域应用广泛。借助虚拟仪器软件体系 (virtual instruments software architecture, VISA) 组件中的仪器编程标准 I/O API，可控制 GPIB、串口、USB、以太网等接口仪器，并根据使用仪器的类型调用相应的驱动程序。而且目前大多数主流的

测试仪器和数据采集设备都有专门的 LabVIEW 驱动程序，相对于其他编程语言来说 LabVIEW 控制这些设备更加便捷^[6-8]。根据实际情况，本系统被校准的设备，如 Fluke1760, Fluke Noma 4000/5000, 横河 210、230 和 1600/1800 系列设备厂家都提供了 LabVIEW 驱动程序库。充分考虑后，采用 LabVIEW2012 平台进行软件的开发。

考虑到需要校准的质量分析仪厂家和型号较多，而且技术日新月异，会不断有新的厂家和新型号的电能质量分析仪产品研发出来，需要进行校准，所以程序在与被校准设备交互方面采用了可编程仪器标准命令 (standard commands for programmable instruments SCPI: ASCII 码命令字符串的标准) 于仪器编程^[9-11]。SCPI 命令的纵向兼容、横向兼容和功能兼容特性，使得可以采用相同的命令和参数来控制具有相同功能的仪器，提高了校准程序的扩展性。

2.1 软件结构设计

电能质量在线校准软件主要包括仪器信息录入、自检、校准配置、校准和校准报告生成等部分，操作人员设置好校准项目和校准参数后，可由软件自动完成校准过程，用户也可以实时地对校准数据进行监控和存储。软件主界面如图 3 所示。

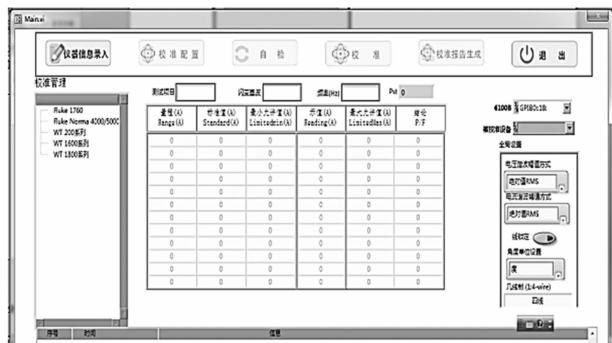


图 3 电能质量在线校准主界面

1) 仪器信息录入：仪器信息录入部分主要完成被校准仪器的基本信息设置，仪器类型包括 Fluke1760、Fluke Noma 4000/5000、WT 200 系列，WT1600 系列和 WT1800 系列。

2) 自检：设置校准源和被校准设备的 IP 地址，连接设备，连接成功后，进行自检，检查被校准设备及校准源的连接是否正确，校准源输出和被校准设备的采集是否正常。

3) 校准配置：校准配置界面主要完成被校准设备需要校准项目及各个校准项目的校准参数的设置。可点击全选按钮，勾选所有校准项目，包括直流电压、直流电流、交流电压、交流电流、交流功率、谐波电压、谐波电流、频率、电能和闪变，如部分勾选，则可选择所需的校准项目，当前设置的模板自动保存。

4) 校准：点击校准按钮，按照校准设置逐点完成被校准设备所有项目的校准。

5) 校准报告生成：校准报告生成，主要是完成被校准

设备所有项目下校准点的校准报告生成, 方便用户。

2.2 关键技术及实现

2.2.1 状态机架构

程序中所用的状态机架构是一套功能强大的开发架构, 具有如下优点:

- 1) 采用多线程技术将程序分成多个线程并行运行, 合理利用系统资源, 结构清晰明确, 便于功能扩展。
- 2) 降低不同功能代码之间的耦合度, 高度模块化, 便于代码的阅读与维护。
- 3) 保证系统的可扩展性、可重用性及维护性等。
- 4) 当现场或用户需求发生变化时, 能方便地完成软件的更新和升级。
- 5) 每一个功能都在独立分支完成, 对于开发人员不需要花费太多时间就能很好地完成一个复杂的功能。

在 LabVIEW 中, 状态机结构使得程序中多个事件彼此之间的逻辑关系更加的清晰明了, 事件之间的处理更加简单。基本状态机是由 while 循环 + case 结构构成的, while 循环保持状态机连续运行; case 条件结构对每一个状态都配备一个分支进行判断, 控制状态机的跳转^[11]。另外在一个完整的状态机中, 一般还会提供初始化状态, 在初始化状态中对程序中的变量等进行初始化工作。本状态机在 LabVIEW 基本状态机的基础上, 进行了架构的改造和丰富, 设计的 LabVIEW 状态机结构如图 4 所示。

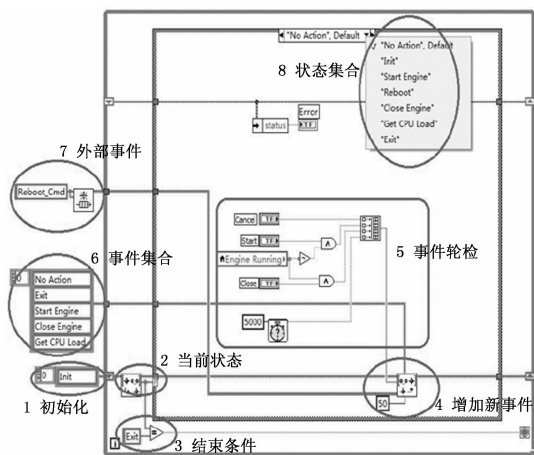


图 4 状态机架构

- 1) 初始化, 状态机的入口, 程序开始后, 首先进入 Init 分支, 可以将程序相关的变量等初始化工作放在本分支完成。
- 2) 当前状态, 当前程序要跳转的分支。
- 3) 结束条件, while 循环结束的条件。
- 4) 增加新事件, 可通过 5 事件轮检和 7 外部事件两种方式增加新的事件。
- 5) 事件轮检, 将轮检结果组成一维布尔数组输入增加新事件 VI, 该 VI 如图 5 所示。

事件轮检和事件集合除 No Action 外一一对应, 增加新事件 VI 可以将布尔为真的事件分拣出来, 增加到新的事件

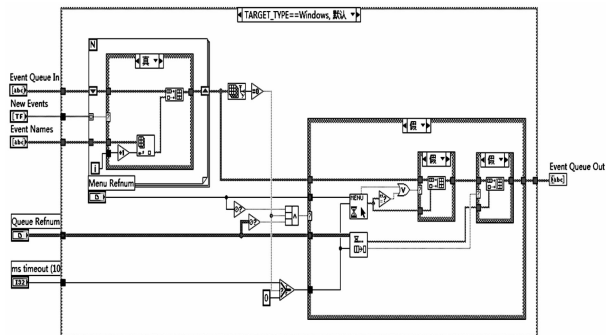


图 5 增加新事件代码

集合中。

6) 事件集合, 与事件轮检配合使用, 是事件轮检对应的事件分支名称。

7) 外部事件, 通过队列的方式, 可以将其他 VI 的触发的事件引入该状态机, 使得该程序相应代码的执行。

8) 状态集合, 状态机中所有状态分支, 可根据需要增加删减。

此外, 该状态机的 Start Engine 分支, 主要实现本程序中多个线程的同时开启, 合理利用系统资源。Close Engine 分支关闭多个线程。在该程序中, 数据采集、存储、显示可分为 3 个引擎, 并行执行。外部事件部分也是该状态机的特别之处, 完美解决了普通状态机只能由自身事件和按钮状态触发, 而无法接收外部触发指令的难题。

2.2.2 自动校准

电能质量在线校准程序设计中的一个关键问题就是如何实现多种校准项目下的多个校准点的自动校准工作。这其中包括校准源 Fluke 6100B 的各种项目的程序设计及实现, 各种校准设备的校准点数据采集以及校准源及被校准设备之间校准信号发送后校准设备校准点采集之间的配合等。自动校准过程的详细步骤如图 6 所示。

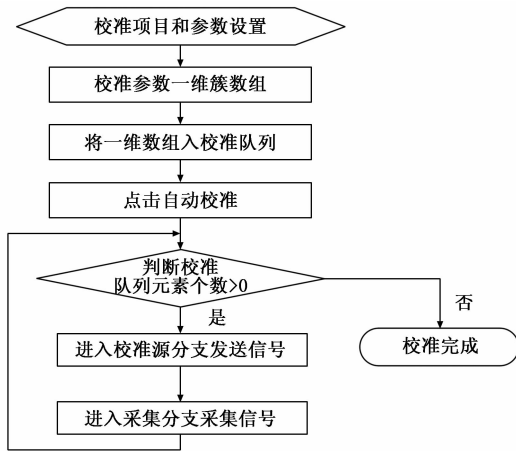


图 6 自动校准流程

校准源各种信号的自动设置, 包括直流电压、直流电流、交流电压、交流电流、交流功率, 谐波电压、谐波电流、频率、电能和闪变, 其程序界面如图 7 所示。

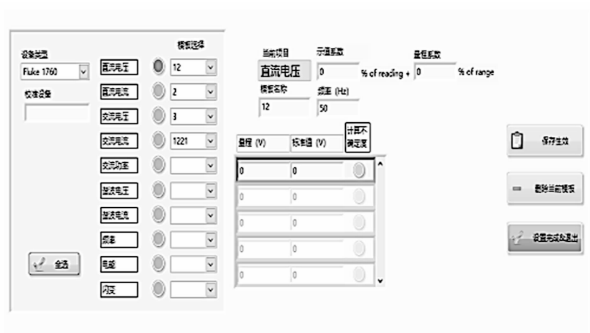


图 7 校准配置

校准配置模块将本次校准需要进行的校准项目和校准参数设置好后，程序负责将设置好的项目和校准信息按照单点信号源参数簇 {设备类型, 校准设备, 通道数, 校准项目, 参数一, 参数二, 参数三, 参数四, 不确定度} 进行统一处理, 具体信息如表 1 所示, 打包成一维簇数组, 名称为参数上传。

在校准参数设置点击确定后, 进入队列事件分支, 将一维簇数组 > 参数上传的校准信息入队列, 如图 8 所示, 等待操作人员点击自动校准时使用。当点击自动校准后, 在状态机的事件轮检中判断校准信息队列元素个数是否大于零, 如果有元素则进入 Fluke 6100B 状态分支, 根据本次校准设置的校准信息将校准信号源 Fluke 6100B 的信号发送出去, 每次进入图 9 所示的程序, 按照单点信号源参数簇 > 校准项目 {直流电压、直流电流、交流电压、交流电流、交流功率、谐波电压、谐波电流、频率、电能和闪变}, 选择进入相应的分支, 根据参数一、参数二、参数三和参数四和不确定度参数, 如表 1 所示, 完成校准源信号具体参数的输出。

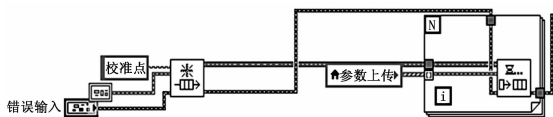


图 8 校准信息入队列

表 1 校准参数信息表

参数	直流交流/电压电流	谐波	频率	电能	闪变
一	电压值	含量	频率值	电压	深度
二	电流值	次数	—	电流	变化次数
三	PF 值	基波	—	时间	基波
四	频率	频率	—	PF 值	频率

校准信号发送成功后, 自动进入 DAQ 数据采集分支, 采集被校准设备的数据, 采集完成后, 进行数据的显示和存储。下一步进入 No Action 分支, 继续判断校准参数队列元素个数, 直至校准参数就队列元素均完成校准, 确定本次自动校准所有项目下的所有点完成。

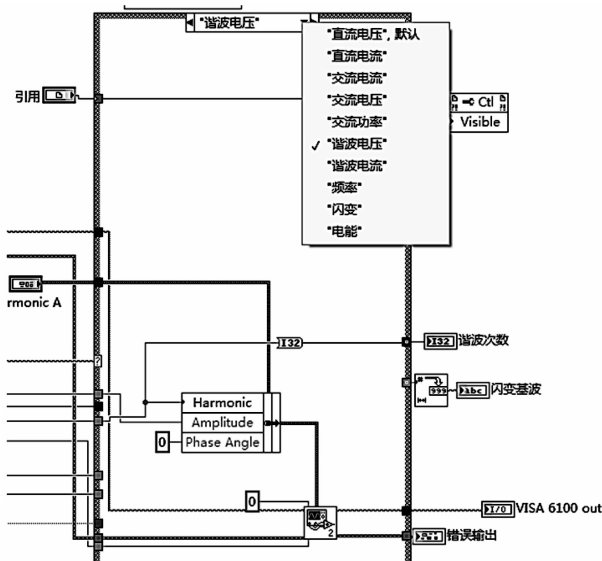


图 9 校准源信号发送

3 结果测试

在北京航天计量测试技术研究所, 对电能质量在线校准系统进行了比对验证, 被校的电能质量分析仪为 Fluke 公司生产的 1760 型电能质量分析仪, 以交流电压、交流功率、谐波电流、频率和闪变为例, 校准结果显示在表 2、表 3、表 4、表 5 和表 6 中。

表 2 交流电 ($f=40$ Hz) 在线校准结果

量程 /V	标准值 /V	最小允许值 /V	示值 /V	最大允许值 /V	结论 P/F
380	50	49.57	49.993 2	50.43	合格/P
220	10	9.77	9.999 18	10.23	合格/P
110	30	29.86	29.987 7	30.14	合格/P
50	20	19.93	19.989 2	20.07	合格/P
110	30	29.86	29.988 3	30.14	合格/P

表 3 交流功率 (W): Sinewave, $f=60$ Hz 在线校准结果

量程 /W	标准值 /W	最小允许值 /W	示值 /W	最大允许值 /W	结论 P/F	PF 值
10	1	0.945	1.005 16	1.055	合格/P	60

表 4 谐波电流 ($f=50$ Hz) 在线校准结果

基波电流	谐波含量/%	谐波次数	示值
5	5	2	4.916 014
5	5	5	4.958 866

表 5 频率在线校准结果

标准值/Hz	/	/	显示值/Hz
60	0	0	60.003 3
50	0	0	50.002 2

表 6 闪变, 基波=230 V, $f=50$ Hz 在线校准结果

$\Delta V/V/\%$	CPM	标准 Pst	显示 Pst
5.44	39	6.011 05	6.081 4
5.44	2	2.461 54	2.473 96

4 结束语

为了解决电能质量分析仪在传统校准过程中遇到的校准项目和校准点多、耗时长、操作人员需要全程操作和手工记录数据容易产生人为误差等问题, 本文通过对电能质量在线校准系统关键技术的分析与解决方案的提出, 实现了电能质量分析仪在线自动校准。目前该系统已完成多次校准检测任务, 与人工校准相比, 在线校准系统具备以下优势:

1) 操作简单, 界面友好, 在人工完成仪器设备连接后, 点击校准启动按钮后, 即可实现数据自动记录和报告自动生成, 不仅降低了人工成本, 而且工作效率大幅度提高;

2) 系统采用在线校准数据, 无需人工干预即可自动完成数据合格与否的判定, 避免了由于人工操作所带来的误差, 大幅提高校准工作的准确性;

3) 自动校准系统稳定性好, 可兼容多种厂家、多种型号电能质量分析仪的被校数据, 具有较高的实用性。

参考文献:

[1] Bucci G, Fiorucci E, Ciancetta F, et al. Embedded power and

energy measurement system based on an analog multiplier [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2013, 62 (8): 2248 - 2257.

[2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 1028—2006 电能质量测试分析仪检定规程 [S]. 2006, 12, 17.

[3] 何 伟. 电能质量分析仪表的检测与校准 [D]. 保定: 华北电力大学, 2009.

[4] 吴 禹. 电能质量分析仪自动校准技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.

[5] 王 玲, 徐柏榆, 李 珂, 等. 电能质量监测装置全自动校准系统设计与应用 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (1): 95 - 99.

[6] 石劭毅, 王晓东, 吴海益, 等. 一种电能质量分析仪自动校准系统方法的研究 [J]. 工业计量, 2015, 25 (6): 57 - 59.

[7] 李 刚, 林 凌. LabVIEW 易学易用的计算机图形化编程语言 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.

[8] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

[9] Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI), version 1999. 0. [S]. USA, 1999.

[10] 何 伟, 蔡 维, 王建伟, 等. 基于虚拟仪器技术的电能质量分析仪校准检测系统设计与应用 [J]. 电网技术, 2010, 34 (1): 84 - 89.

[11] 聂 影, 冯向军, 廖 瑛, 等. 基于 LabVIEW 的状态机模型研究 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (9): 1166 - 1171.

(上接第 250 页)

干扰的情况下最大时延为 497 ms, 而无干扰情况下仅为 39 ms。对于最大连续丢包, 仅同频干扰会造成长时间通信中断。从丢包率看, 同频干扰情况下达到了 24.56%, 且相应的最大中断时间为 17.7 s, 已经无法正常通信; 邻频率干扰情况下丢包率提高了 3.62%, 最大中断时间为 400 ms, 对通信性能有较大的影响。从结果中可以看到, 在运营公司不采取相应措施的情况下, 城市轨道交通中铺设民用 WLAN 和 LTE 网络可能影响 CBTC 的数据传输, 因此在开通前有必要进行干扰测试。

5 结束语

该城市轨道交通车地无线通信系统性能评估平台首先利用半实物仿真, 构建无线通信系统和干扰环境; 然后模拟真实的 CBTC 下的数据仿真, 对车地无线通信数据在不同干扰场景和不同切换频率的场景下进行了传输时延、丢包率等指标的测量, 定量分析了无线通信系统的性能。在测试示例中显示, 该平台对车地无线通信系统在干扰场景下的性能劣于非干扰场景; 从结果看, 该平台能够评估城市轨道交通的车地无线通信系统在不同场景下的性能, 对城市轨道交通的车地无线通信系统的建设和运营具有重要的意义。

参考文献:

[1] 汪希时. 基于通信技术的列车控制技术 [J]. 中国铁路, 2001 (8): 9 - 11, 4.

[2] 李红君, 钟章队. 基于无线的列车控制系统 [J]. 铁道通信信号, 2002, 38 (1): 36 - 39.

[3] 郑燕燕, 张双健. 上海城市轨道交通民用通信系统的规划与实现 [J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13 (8): 94 - 97.

[4] 张 泓, 黄秀章, 周 杭. 深圳地铁民用通信系统的构建和经营实践 [J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15 (5): 4 - 7.

[5] 付 强. 地铁民用通信系统建设方案研究 [J]. 铁道通信信号, 2014, 50 (1): 77 - 80.

[6] 严 方. 基于实验测试的 WLAN 与 TD-LTE 之间干扰情况分析 [J]. 移动通信, 2016, 40 (16): 57 - 60.

[7] 章丽飞, 王德东, 王 锐. TD-LTE 与 WLAN 干扰测试分析案例 [J]. 邮电设计技术, 2015 (4): 19 - 24.

[8] 岳开栋. GSM (DCS) /TD/WLAN/LTE 多网合路对室内分布系统的干扰研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.

[9] 姜连青. 轨道交通无线通信系统的引入与场强覆盖分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2010, 07 (6): 61 - 65.

[10] 米根锁, 罗耀云, 孔德龙. 基于 CBTC 地铁隧道车地无线通信的建模与仿真 [J]. 计算机工程与应用, 2013, 49 (18): 249 - 252.