

基于时域测试的传导骚扰分析系统

张 博¹, 徐 跃¹, 马英杰²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 研发一套基于时域测试的传导骚扰测试系统, 解决目前传导骚扰不能实时记录分析的问题; 通过进行测试系统硬件研制, 数据采集分析软件开发, 实现对传导干扰测试数据的实时采集存储、自动解压、清洗、分析以及数据管理; 实现对车辆运行过程中主回路、辅助回路、网络系统回路、车载信号系统回路等的同步测试, 研究各子系统的电磁干扰频谱特性, 分析传导干扰的传递特性。

关键词: 时域测试; 传导骚扰; 同步测试; 实时分析

Conducted Disturbance Analysis System Based on Time Domain Test

ZHANG Bo¹, XU Yue¹, MA Yingjie²

(1. CRRC Qingdao SiFang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2. China Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: A set of conducted disturbance test system based on time domain test is developed to solve the problem that conducted disturbance cannot be recorded and analyzed in real time. Through the development of test system hardware and data acquisition and analysis software, the real-time acquisition and storage, automatic decompression, cleaning, analysis and data management of conducted interference test data are realized. The synchronous test of main circuit, auxiliary circuit, network system circuit and on-board signal system circuit during vehicle operation is realized, the electromagnetic interference spectrum characteristics of each subsystem is studied, and the transmission characteristics of conducted interference is analyzed. The experimental results show that the real-time and efficiency of the test data.

Keywords: time domain test; conducted disturbance; synchronous test; real-time analysis

0 引言

随着电子技术的迅猛发展, 机车可靠性、安全性等性能要求相应的提高, 机车上装配的电力电子设备和电气设备越来越多, 机车内强电、弱电等各种信号在一个有限的空间内交织, 电磁环境愈加复杂恶劣, 例如, 高压、变频、网络通讯、微机控制等多种电子设备和电缆线束等; 既有大功率的辐射信号源, 又有高灵敏度的传感器和通讯设备, 这些电子设备的电磁性能增加了机车内电磁环境的复杂性。如果电磁环境的影响导致这些设备出现故障, 例如性能不稳定的设备在某些工况下出现死机等故障, 有的甚至不能正常工作, 导致窜车等险情, 有造成重大经济损失的隐患。^[1]

电磁兼容性是影响其性能可靠性的关键问题之一^[2], 因此获取机车重要部件电磁特性参数, 为后续客观评估机车电磁兼容状态提供了依据, 同时也为后续新机车的电磁兼容性设计的提升提供可参考的依据。

Joos 等学者提出在轨道电路信号中, 下行信号比上行信号更容易受电磁干扰的影响^[3]。Pozzobon 等指出列车底部存在很多大功率的牵引供电设备, 造成电磁环境复杂,

BTM 天线工作也会受此影响^[4]。Kroger 等指出制动控制系统结构复杂, 各种传感器遍布列车的各个位置, 电磁干扰对其影响显著, 尤其是检测周围的温度传感器和监测列车速度的速度传感器对电磁干扰的敏感度很高^[5-6]。Midya 等指出弓网离线放电产生的电磁干扰是高速铁路主要的电磁干扰源之一^[7]。

天津大学姚刚等提出了几种实用的电磁兼容技术和电磁兼容试验^[8]。河北工业大学电器研究所蒋栋等根据电磁兼容的干扰源、传播途径和敏感设备三要素分析了静态电器中电磁兼容的基本技术和具体实现方法^[9]。三峡大学文武等系统分析了电力系统的干扰源、传播途径以及抑制干扰的措施, 指出了电力系统电磁兼容今后的研究方向和难点^[10]。国电自动化研究院梁志成等分析了电快速瞬变脉冲群干扰对微机保护装置的影响, 针对微机保护装置的不同端口提出了相应的抑制措施^[11]。北京二七机车厂电气公司齐富彬等提出了消除或减弱骚扰源、阻断传播路径及增强电子装置电磁兼容能力的方案和措施^[12]。海军大连舰艇学院陆永红等给出了舰空导弹武器系统实弹射击时电磁兼容的检查内容和方法^[13]。大连理工大学的王玉峰通过分析电

收稿日期: 2022-03-31; 修回日期: 2022-05-18。

作者简介: 张 博(1984-), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事轨道车辆电磁兼容研究工作。

引用格式: 张 博, 徐 跃, 马英杰. 基于时域测试的传导骚扰分析系统[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 91-96, 109.

力系统中的电磁干扰源、对设备产生干扰的耦合途径,用数据挖掘中的决策树分类方法生成了一个电磁干扰预测模型,实现了一种从复杂电磁环境数据中提取信息的方法^[14]。大连海事大学王尔申等研究了一种船载终端系统的电磁兼容可靠性设计^[15]。海军工程大学卢海翔通过对数据进行挖掘分析,也一定程度地实现了对导弹系统的电磁兼容性预测^[16]。上海交通大学俞磊等对核电电磁兼容的发展和测试进行了研究,给出了有效合理的完成 AP1000 电磁兼容测试的相关措施^[17]。上海航天电子技术研究所袁企乡等解决了方舱结构系统集成的测发控系统带来电磁兼容问题,为新型运载火箭提供了方舱结构测发控系统^[18]。西南交通大学谢华君等着重从机车布线、屏蔽和接地三方面进行了优化分析^[19]。中国航空无线电电子研究所任振兴等实现了从分系统电磁干扰源、耦合路径、信号完整性和结构搭接屏蔽的电磁兼容优化设计^[20]。中航工业西安航空计算技术研究所王勃等介绍了一种典型机载电子设备在复杂电磁环境下的电磁安全性设计情况^[21]。

时域测量技术具有数字信号处理能力，在进行电磁干扰测量时，其能够实时仿真传统模拟设备的各种测量模式，如峰值检测模式、平均值检测模式、RMS 检测模式和类峰值检测模式等。同时，它还可以引入一些新的分析理念，例如相位谱、短时谱、统计评估以及基于 FFT 的时-频分析方法等。时域技术能够允许对整个信号谱内的幅度和相位信息进行并行处理，其测量时间至少可以缩短一个数量级，并且能够完成精确高效的 EMI 测量。

本文拟研制一套基于时域的传导骚扰的分布式多点同步测试系统。可同步测试主回路、辅助回路、网络系统回路、车载信号系统回路等,获得电磁干扰频谱特性,分析电磁干扰传递路径。

1 基于时域测试的传导骚扰分析系统概述

构建基于波形记录仪/示波器+测试传感器的同步测试系统,采集主机采用高性能示波器,每台机器具备4~8个采集通道,采集精度可按需配置。开发可视化好有良好人机交互界面的操作软件,自动完成数据解压、清洗、分析的过程。

2 基于时域测试的传导骚扰分析系统平台设计

2.1 平台总体结构

针对机车主回路、辅助回路、网络系统回路、车载信号系统回路电磁干扰特性数据采集管理问题,建设同步测试系统,实现电磁干扰特性数据的采集、管理、分析等工作。平台总体结构如图1所示。

根据上图，同步测试系统的主要架构如下。

1) 数据采集: 实现对车上部件的电磁干扰数据采集; 数据采集方式为通过操作波形分析仪/示波器进行数据采集; 数据采集完成后, 将对数据按照标准格式进行解析, 提取、过滤等, 为后续数据管理奠定基础;

2) 测试数据管理: 提供对装备测试数据的管理, 包括

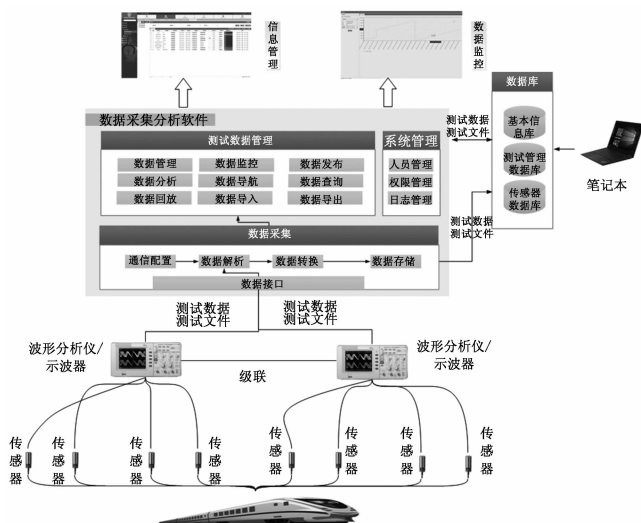


图1 基于时域测试的传导骚扰分析系统平台设计总体结构

测试数据的管理、浏览、发布、导入导出、判读、快速查询等功能；

3) 系统管理：提供对系统使用人员、权限、操作日志等信息内容的管理。

2.2 系统组成

同步测试系统组成如图 2 所示。

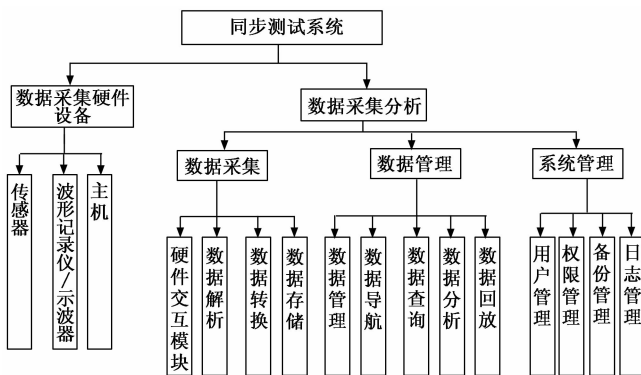


图 2 系统组成

2.3 网络拓扑

在列车的主回路、辅助回路、网络系统回路、车载信号系统回路等部件上部署传感器,通过笔记本来控制波形分析仪/示波器进行数据采集,采集完成后,进行数据的解码、压缩、存储。技术人员可通过笔记本进行数据访问,进行数据后续的分析。同时,笔记本数据可导出给其他终端系统,进行数据分析。系统的网络拓扑结构如图3所示。

3 基于时域测试的传导骚扰分析系统设计

3.1 数据采集硬件系统组成

同步测试系统由便携终端计算机、以太网交换机、示波记录仪、交流电流探头等组成。

3.2 数据采集分析软件

3.2.1 数据采集软件

数据采集软件可实现通过硬件驱动与波形记录仪/示波

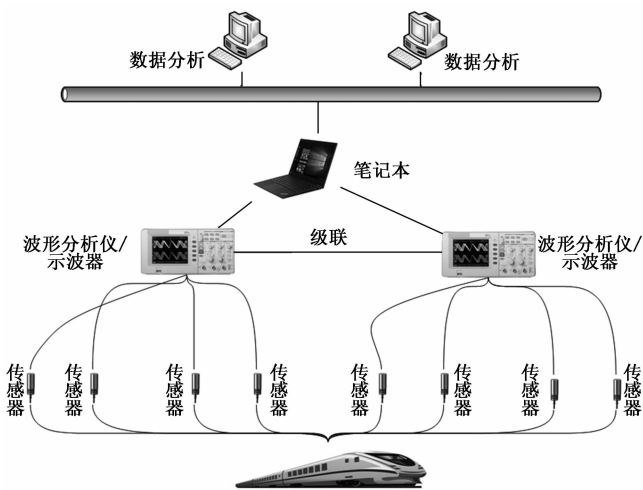


图 3 网络拓扑

器进行通信，采集波形记录仪/示波器数据，可支持对最大 30 MHz 频率范围内的测试信号的采样，同时采用预置流程进行采集数据的自动化解码、转换、清洗、存储等内容。数据采集软件的总体架构如图 4 所示。

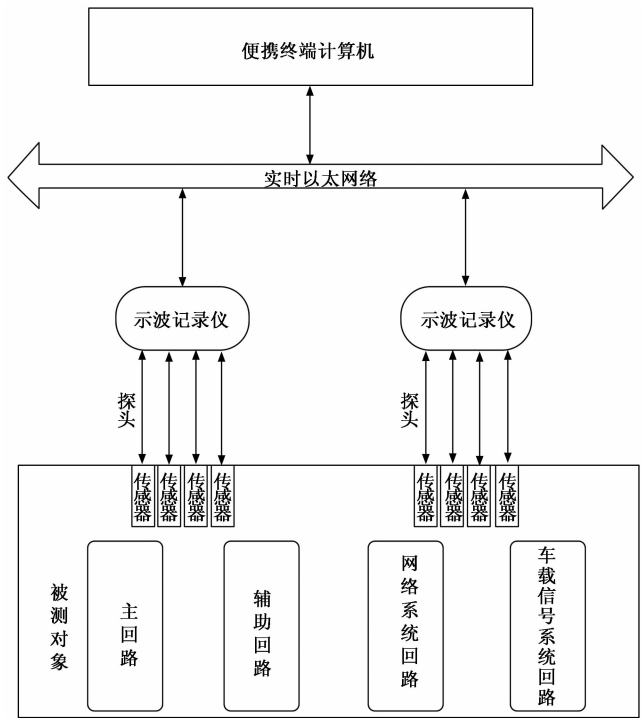


图 4 硬件系统总体结构框图

根据图 4，数据采集根据通信配置文件进行数据内容的采集，采集完成后，对数据帧内容进行解析，生成原始数据，对原始数据进行转换、处理、运算，得到有效数据，存入实时数据库中，同时，数据采集功能提供数据查询接口，供数据管理系统进行数据提取、分析。

数据采集的功能组成包括通信配置管理、数据通信、数据解析、数据预处理、数据转换、数据存储等。

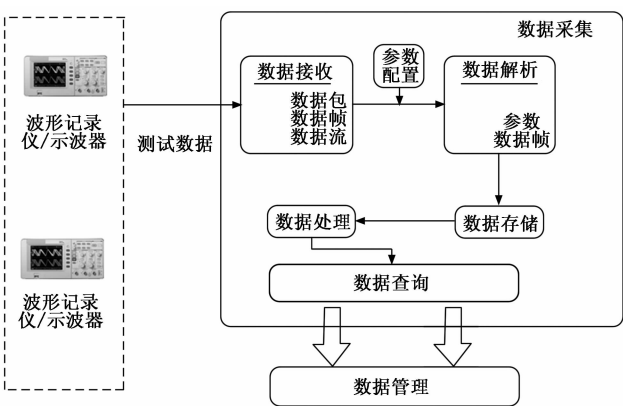


图 5 数据采集软件总体架构

1) 通信配置管理。

通信配置管理功能包括基础参数配置、量纲配置、校准信息配置等内容。其中，基础参数配置实现对不同采集设备以及传感器数据的管理以及通信参数的配置；量纲配置实现对采集数据的计算量纲配置；校准信息配置实现对原数据内容的校准算法。

另一方面，通信配置可设置波形记录仪的采集参数，比如采集通道、采集频率、触发条件、幅度等内容。

2) 数据通信。

数据通信主要通过驱动程序对波形记录仪/示波器进行数据采集，采集时根据已设置的参数进行数据采集。

对于示波记录仪设备，由于其采样频率高，且存储的数据量较大，在本系统中，主要采用将示波记录仪中的数据文件进行提取，通过网络传输到笔记本中，进行离线处理。

而对于示波器设备，若采样率为 500 k/s~1 M/s，那么 1 s 中数据量为 51.2~102.4 万 Byte，那么如果软件采样率为 1 Hz，那么 1 s 内需要处理的数据量将达到 51.2~102.4 万 Byte，对于如此大数据量的数据，软件可进行实时采集，但是无法实时在波形显示上同时显示如此多的数据。若要进行波形数据的实时显示，只能进行数据采样（比如平均采样），从 51.2~102.4 万 Byte 提取 1 000 个数据进行波形显示，此时可能造成波形显示无法反映数据变化的情况。示波器设备采样率越低，波形数据显示越能真实反映数据变化情况。

对于示波记录仪以及示波器设备，采集完成都可将数据文件存储在指定的存储路径下，之后进行离线分析。

3) 数据解析。

数据解析模块在处理每帧数据时，按照先后顺序可以分为两个阶段：准备阶段和解码阶段。

准备阶段：首先从配置文件中读取帧格式的配置信息，包括帧计数的位置等；然后读取参数数据表中的所有帧参数的基本信息、位置信息、处理信息；最后根据参数的位置信息建立参数解码时使用的帧索引表，该表以帧计数作为索引，每个索引对应一个动态数组，数组中存放了该帧

所包含参数的参数指针。

解码阶段：当收到一帧源码时，首先根据帧计数的位置从源码中获得帧计数；然后找到该帧计数的索引表；最后根据索引表依次取出该帧中的参数信息，根据参数的位置信息获取参数源码，根据参数的处理信息，将源码转化为工程值（包括类型转换和量纲转换）。

4) 数据预处理。

在数据采集过程中，在受到传感器、转换器传输过程中的干扰，使得数据中经常出现异常跳变。因此，数据预处理主要是针对异常跳变进行剔除野值处理或数据拟合。

5) 数据转换。

数据转换模块根据参数定义中的处理方法对原始参数数值进行处理，得到参数的工程量数据。处理方法包括直读、列表、曲线、公式以及表达式等。

6) 数据存储。

测试数据收集转换后，根据不同数据形式，比如实时数据、文件数据，进行测试数据的存储。

对于实时数据，存入相应的数据库中，在数据库的建立过程中，可建立多级测试数据的索引机制，比如测试数据索引、测试日期索引、测试项目索引等，通过多级索引机制可实现快速数据查询。

索引是海量信息资源快速查找的一种有效的手段，数据存储系统主要利用 Hash 索引或树索引进行全局索引设计。其中，Hash 索引通过散列模式进行数据的索引管，树索引通过树结构方式进行数据索引的建立。

另一方面，对于测试数据，也可采用 NOSQL 数据库或内存数据库，建立测试数据的键值对，从而提高海量测试数据的查询性能。

3.2.2 数据管理

数据管理功能实现试验数据的快速查询、定位和查询结果导出。对结构化数据和非结构化数据进行统一搜索查询，支持数据项树状浏览，单项参数检索、多项参数的组合查询、多表检索、全文检索等，系统还提供多种数据导航方式包括关键字查询、组合查询和模糊查询、允许用户根据一个或多个对象属性进行查询，支持数据视图查询，支持全文搜索，支持多次试验的参数数据对比、分析查询。

数据管理实现测试数据的管理、浏览、快速查询、回放、数据分析等。

1) 提供测试数据的导航能力，可采用测试任务、测试项目等数据组织模式进行组织；

2) 提供测试数据的查询功能，可通过数据检索功能来实现方便高效的管控数据管理功能；

3) 提供测试数据浏览和回放功能，选择测试过程中采集的结构化参数数据，进行数据回放，并通过可视化方式进行数据的曲线展示等。

数据导航实现对数据的树形导航功能，用户能够迅速准确的定位到所选大类或某一个具体的数据对象。树形导航能对系统内的各类数据进行导航定位，数据分类关联非

常清晰，比如数据的从属关系在树中很清楚的展现，用户可以自定义数据结构树，该树上可以挂接各类数据信息。树形结构的数据导航功能支持用户自定义，无限层次化。

数据分析可以实现数据的 FFT 分析、滤波分析、最大值、最小值分析，原始数据截取，图形化显示等功能。快速傅立叶变换 FFT 是离散傅立叶变换的快速算法，可以将一个信号变换到频域。针对滤波分析功能，选择两种滤波类型：FIR 有限冲击相应滤波（矩形窗，汉宁窗，海明窗等）、和 IIR 无限冲击相应滤波（贝塞尔，巴特沃斯，切比雪夫）；可以设置 4 种响应类型：低通、高通、带通、带阻；可以选择滤波性能指标，包括指定阶数、采样频率、截止频率，通带最大衰减、阻带最小衰减。支持对数据的常用数据分析方法，具体如下：分析数据的平均值、均方差、标准差、相对误差（最大误差、最小误差）等；分析数据的最大值、最小值；数据分析后的结果可进行显示，在显示过程中，可通过不同图形方式进行数据展示。

数据采用列表方式进行集中展示，通过测试数据历史列表、测试数据当前列表方式进行数据展示。数据结果显示的一个重要方面为对数据波形的显示，数据波形显示包括对数据波形的操作以及对数据波形的检索。

按照不同信息对测试数据进行统计，可以按照图表的形式进行在线显示和生成文档。

3.2.3 系统管理

系统管理包括用户管理、备份管理、权限管理、日志管理等功能。

用户管理实现对组织机构及人员的管理，按照部门组织机构模型，在组织机构下可建立人员信息档案，对所有机构人员进行管理。

系统可对涉及的文件、记录等信息进行备份。系统提供安全的备份机制，以保障系统的稳定运行。系统可定期提醒用户进行数据备份。备份管理包括数据库优化、备份管理、数据恢复等功能。

角色权限是信息管理系统的基本信息组成部分，系统需根据公司、实验室人员、职位实际管理情况，设置不同的角色，每个角色可以具有不同的操作权限。通过建立角色与实际人员职位的对应关系，实现对业务流转、操作权限的统一管理。系统不同用户角色的权限均可自定义。系统可对不同角色（权限不同）的使用人员推送审核、处理通知等。

日志管理的主要功能是对所有用户的日志进行查询和对业务日志、应用日志、操作系统日志的分类管理。

4 基于时域测试的传导骚扰分析系统关键技术

4.1 频谱数据压缩技术

频谱监测数据真实记录各频段的电平信息，管理人员通过对这些数据的分析，得到频率的使用情况、发现异常信号等，如果丢失了数据中的任何一段信息，在分析过程中都会出现偏差。因此必须做到保持数据在压缩及解压缩过程中的无失真。因此需采用无损压缩算法对频谱数据进

行压缩。

Huffman 算法、字典压缩算法的代表 LZ77 算法及其改进算法 LZW 算法等是 3 种可选取的统计压缩算法, 对比 3 种不同的压缩方法, 可进行分析比较, 确定电磁频谱数据的适合压缩方法。

比如采用 20 MHz 带宽的示波器进行数据采样, 采样频率为 2 kHz, 数据点共有 10 000 点, 对于上述数据进行压缩对比后, 显示为如表 1。

表 1 算法对比表格

算法	数据压缩比/%
Huffman	46
LZ77	35
LZW	29

从表 1 中的结果可见, LZW 算法可以实现最高的压缩率, 更加适合本系统中使用的频谱数据文件。

4.2 数据预处理技术

数据预处理主要涉及对于测试采集数据的自动化清洗过程, 主要的过程包括数据处理、数据清洗、数据转换等内容。

1) 数据处理。

(1) 模拟式分析。对时间和幅值都连续的时间历程信号采用各种模拟技术进行分析, 如模拟滤波、模拟示波、模拟频率计、信号分析仪等。

(2) 数字式分析。对模拟信号经过时间上离散化和幅值上量化后的数字信号进行的分析如频谱分析、数字滤波、平稳数据分析、数据模型预测等。

针对电磁干扰数据特点, 在本项目中可采用模拟式或数字式方式对数据进行处理。

2) 数据清洗。

在实际运行数据中, 由于受到很多干扰因素如恶劣的外界环境影响, 因而在运行数据中存在着普遍的非平稳噪声数据等现象。为了改善数据质量, 节约处理时间, 需要对获取的数据进行预处理。针对本项目数据, 拟合计算拟采用最小二乘法, 野值剔除拟采用 3σ 法。

3) 数据转换。

数据转换模块根据参数定义中的处理方法对原始参数数值进行处理, 得到参数的工程量数据。处理方法包括直读、列表、曲线、公式以及表达式等。

在数据转换过程中, 可安装预先制定的转换流程进行数据转换。

4.3 数据分析技术

对于电磁频谱, 可采用 FFT 分析、滤波分析、最大值、最小值分析等分析方法进行分析。FFT 是一种 DFT 的高效算法, 可分为按时间抽取算法和按频率抽取算法, 在本项目中, 提供基础的 FFT 方法进行数据分析。对于滤波分析, 提供两种滤波类型: FIR 有限冲击相应滤波(矩形窗, 汉宁窗, 海明窗等)和 IIR 无限冲击相应滤波(贝塞尔, 巴

特沃斯, 切比雪夫)。

5 基于时域测试的传导骚扰分析系统实现

5.1 系统实现

该系统实现传导类骚扰信号测试以及传导类骚扰多点同步测试, 可以实时查看数据波形, 具有滤波、数据处理等后处理功能, 可以为现车故障分析提供数据支撑。

该系统在主回路、辅助回路、网络系统回路、车载信号系统回路等部件上部署传感器, 进行电磁干扰特性数据的采集; 通过便携终端计算机、以太网交换机、示波记录仪、交流电流探头构建测试系统; 采集主机采用高性能波形记录仪/示波器, 每台机器具备 4~8 个采集通道, 采样率可按需配置。

采集主机可通过高性能波形记录仪/示波器, 进行实时数据采集, 可对示波记录仪一次测试过程的数据进行记录和分析, 自动完成数据解压、清洗、分析, 提供 FFT、滤波、最大值、最小值等数据分析手段, 允许用户进行原始数据截取, 可进行图形化实时显示数据, 提供测试数据存储功能, 可进行历次试验测试数据的存储, 提供测试数据管理能力, 可实现对历史试验测试数据的查询; 可通过搭建的同步测试系统, 基于示波器或波形记录仪进行电磁传导骚扰测试, 实现同步测试功能。

基于时域测试的传导骚扰分析系统界面如图 6 所示。

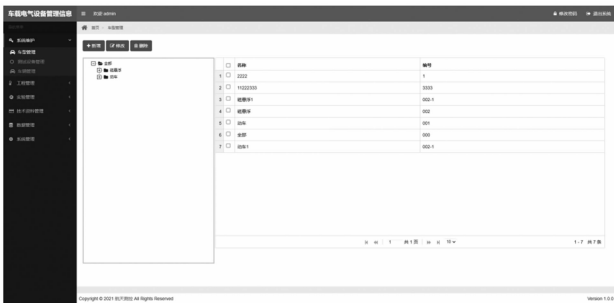


图 6 基于时域测试的传导骚扰分析系统界面

5.2 系统测试

通过示波记录仪进行数据采集, 生成 .csv 格式的数据文件, 将数据文件上传至便携终端计算机, 该系统是部署在该计算机上的, 运行软件, 维护车型、车辆、测试设备等基础信息, 建立工程, 进行采集参数和通道参数的设置, 设置完成这些基本信息之后, 进行数据分析。

数据分析方法有基础、FFT、巴特沃斯、FIR、IIR 等分析方法。该分析是集成了 FFT、巴特沃斯、FIR、IIR 等算法模块, 通过系统自动调用这些算法模块实现相应的分析功能。

数据分析结果展示如图 7~11 所示。

5.3 测试总结

针对现有条件下机车传导骚扰特性的分析, 设计了一套基于时域的传导骚扰分析系统。其中, 软件运行在本地计算机上, 通过网络传输实现数据文件的实时传输, 解决了人工作业时数据拷贝不便的问题, 基于 FFT、巴特沃斯、



图 7 基础分析

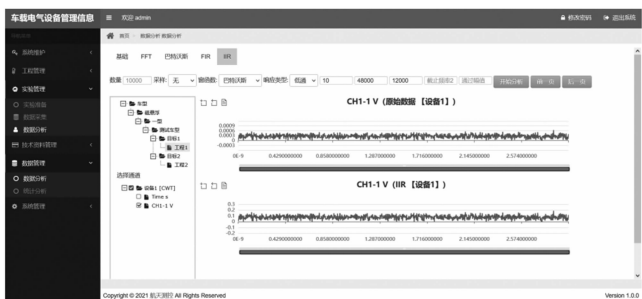


图 11 IIR 分析

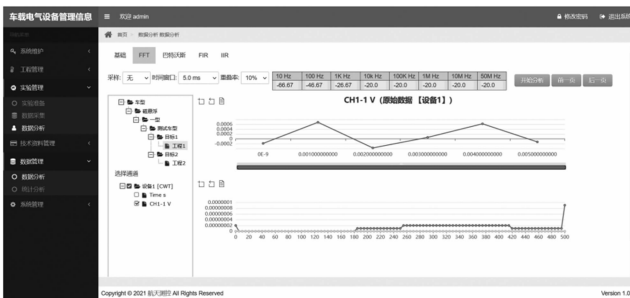


图 8 FFT 分析

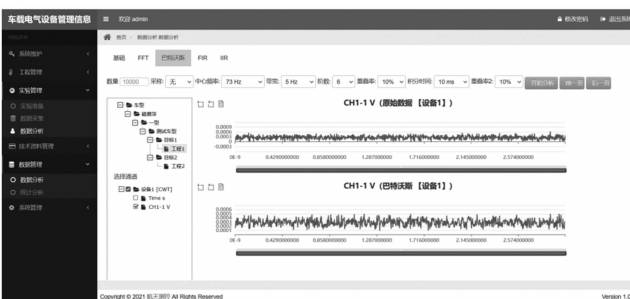


图 9 巴特沃斯分析



图 10 FIR 分析

FIR、IIR 等算法模块进行数据的分析，通过集成图像控件绘制分析后的曲线图，解决了人工作业分析效率低下的问题，该系统与机车测试作业完美配合，提高了整体的作业效率。经过实际运行测试，软件与示波记录仪通信稳定，算法计算效率高，图像加载快捷，数据解析显示正确，测试结果达到了本文预期设定的目标。

6 结束语

本文实现了一种基于时域测试的传导骚扰分析系统，

用于实现同步测试主回路、辅助回路、网络系统回路、车载信号系统回路等，获得电磁干扰频谱特性，分析电磁干扰传递路径。

实现了电磁干扰频谱特性的频谱特性、传递路径的研究工作，采用分布式多点同步测试技术，在机上部分分系统回路部署传感器，进行多路信号的同步采集。

实现了测试数据的实时化、自动化解压、清洗、分析，降低对技术人员要求，使技术人员关注其专业方向的事情，提高数据分析的效率。

实现了测试数据的集中管理，将历次试验过程中的电磁测试数据进行收集整理，将测试数据作为一种资产进行有效组织管理，提升了数据管理的效率。

参考文献:

- [1] 刘玉文, 王立德. 内燃机车电气设计中的电磁兼容性 [J]. 铁道机车车辆, 2000 (4): 37-39, 5.
- [2] 熊明彬, 廖忠文. 电磁兼容技术在 SDA1 型交流传动内燃机车中的应用 [J]. 技术与市场, 2015, 22 (1): 5-7, 12.
- [3] JOOS G, KAPILA R, FRIEM R, et al. Electromagnetic interference issues in the specification of AC and DC propulsion systems for light rail vehicles [C] // Railroad Conference, 1998, Page (s): 41-47.
- [4] POZZOBON P, AMENDOLARA A, VITTORINI B, et al. Electromagnetic compatibility of advanced rail transport signaling [C] // Proceedings of the World Congress on Railway Research (WCRR), Edinburgh, UK, October, pp. 1250-1263. 2003.
- [5] KROGER U, GRAUTSTUCK H, WIRTH W, et al. Electromagnetic or permanent-magnetic rail brake [P]. US08/836064, 1999-01-26.
- [6] ADLY A A, ABD-EL-HAFIZ S K, et al. Speed-Range-Based Optimization of Nonlinear Electromagnetic Braking Systems [C] // IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43 (6): 2606-2608.
- [7] MIDYA S, BORMANN D, LARSSON A, et al. Understanding pantograph arcing in electrified railways-influence of various parameters [C] // EMC 2008. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2008. Page (s): 1-6.
- [8] 姚刚, 贺家李, 王钢, 等. 电力系统自动化设备的电磁兼容技术 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12 (4): 52-57.

(下转第 109 页)