

# 基于虚拟仪器的电磁干扰近场测试系统设计

苟江川<sup>1</sup>, 朱峰<sup>1</sup>, 刘光辉<sup>1</sup>, 叶家全<sup>2</sup>, 杨晓嘉<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 成都 610031; 2. 中国民用航空总局第二研究所, 成都 610041)

**摘要:** 针对传统电磁干扰测试存在的环境要求苛刻、操作复杂及费用昂贵等问题, 设计了一套基于虚拟仪器的电磁干扰近场测试系统; 以近场探头和频谱仪组成系统硬件主体构架; 运用 LabWindows/CVI 平台的交互式界面设计实现测试项目统一管理, 通过 VISA 技术和 NI-DAQmx 完成频谱仪的控制和数据采集模块的设计; 进行验证测试时, 以 3 kHz 分辨率带宽的精度, 成功排查出 130 MHz 处的辐射干扰; 系统可满足非标准测试的需求, 提高测试效率, 并且开发周期短, 兼容性强, 具有一定的实用性与推广价值。

**关键词:** 电磁干扰; 近场测试; 多线程; VISA 函数; NI-DAQmx

## Design of EMI Near-Field Test System Based on Virtual Instrument

Gou Jiangchuan<sup>1</sup>, Zhu Feng<sup>1</sup>, Liu Guanghui<sup>1</sup>, Ye Jiaquan<sup>2</sup>, Yang Xiaojia<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Considering the harsh requirements for test environment, complexity of the operation and expensive cost of traditional EMI test, an EMI near-field test system is designed based on virtual instrument. The main hardware architecture is composed of near-field probe and spectrum analyzer. The system uses the design of interactive interface on LabWindows/CVI to realize the unified management of test project, and also accomplishes the control of spectrum analyzer and design of data acquisition module respectively by VISA and NI-DAQmx. With the 3 kHz RBW, system detected the radiated interference of 130 MHz successfully in verification test. System can meet the requirements of non-standard EMI test and improve the test efficiency with the superiority of short development cycle and strong compatibility. The technology and methods adopted in the system are practical and worthy of further promotion.

**Keywords:** EMI; near-field test; multi-thread; VISA function; NI-DAQmx

## 0 引言

随着电子设备向微型化和智能化方向发展以及高频器件的大量应用, 使得电子设备及其控制系统的电磁兼容问题日趋严重, 其中辐射电磁干扰是影响其电磁兼容性能的一个主要因素<sup>[1]</sup>。目前国际上对辐射电磁干扰的测试手段主要分为远场测试和近场测试<sup>[2]</sup>。其中近场测试着眼于产品预先分析检验和故障诊断, 测试设备简单操作方便, 无需特定测试场地, 并能有效定位干扰源, 判别辐射模态。这些优点使得近场测试备受关注, 国内对近场测试已有相当多的研究, 如文献 [3] 研制了一套基于球形探头的近场电场测试系统来提高高压高速电力线通信网络电磁辐射的测量精度; 而国外开发的多款近场测试系统, 如容向公司的 EMSCAN 采用具有专利技术的近场探头阵列和电子扫描方式, 能实时显示电磁场空间分布, 但价格昂贵, 技术垄断, 不利于自主开发<sup>[4]</sup>。鉴于此, 研发具有自主知识产权的近场测试系统, 对辐射电磁干扰测试有非常重要的意义。

## 1 近场测试原理

近场测试主要用于排查干扰源, 包括判别干扰源的辐射模

态和确定干扰源的位置。

辐射 EMI 噪声分为因非良好接地或接地反射电位引起的等效短直天线构成的电偶极子共模辐射噪声, 以及因没有很好控制的信号大环路引起的等效环形天线构成的磁偶极子差模辐射噪声<sup>[5]</sup>。又由电磁场与电磁波相关理论知, 近场内电偶极子发射(共模发射)以电场为主, 且, ; 磁偶极子发射(差模发射)以磁场为主, 且, ; 波阻抗, 共模发射近场内, 差模发射近场内, 即在近场区内波阻抗  $Z$  随距离  $r$  增加而减小, 则辐射以共模辐射为主; 反之, 以差模辐射为主<sup>[6]</sup>。

近场测试系统一般由近场探头和频谱仪构成, 由近场探头检测空间电磁场, 频谱仪给出信号频谱分量。由于近场测试没有纯净的电磁环境, 测试时可以先测空间信号以此作为背景场, 一旦测试系统开机测试, 进行频谱扫描时, 超过背景场的信号, 即可作为疑似干扰频点, 然后以此频点为中心频率进行多点空间扫描, 得出此频率点的空间分布, 从而定位干扰源。

## 2 硬件构架

近场测试系统主要由近场探头、放大/衰减器、频谱仪、触发开关、高速数据采集卡、USB-GPIB 卡和 PC 组成(见图 1)。

### 2.1 近场探头

根据干扰源辐射模态的不同, 近场探头分为电场探头和磁场探头组。电场探头呈杆状, 相当于极子天线, 当探头接近辐射源时, 电场探头与电场成电容耦合, 可检测空间电场信号; 磁场探头呈环状, 基于法拉第电磁感应定律(一个闭合导体环的输出电压与穿过这个环的总磁通量的时间变化率成正比)来

收稿日期: 2014-05-07; 修回日期: 2014-06-19。

基金项目: 民航科技创新引导资金项目(14014J0340029)。

作者简介: 苟江川(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事电磁兼容与测试方向的研究。

朱峰(1963-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电磁兼容与环境评估方向的研究。

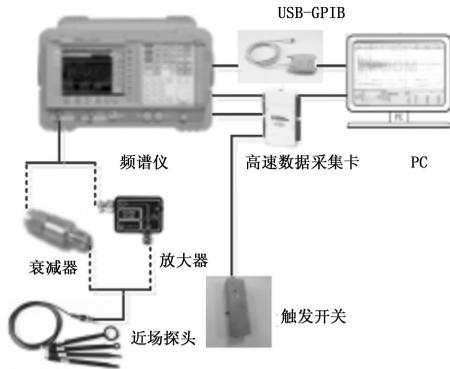


图 1 近场测试系统硬件组成

检测空间磁场信号。

## 2.2 放大器/衰减器

由于空间场信号的复杂性,特别是局部空间的过强信号会导致频谱仪的损坏,因此测试前先用场强计进行环境测试,决定是否选用放大器或者衰减器。

## 2.3 触发开关

为了测试操作简便快捷,系统创新式地采用两种触发方式:内触发和外触发。内触发由系统软件控制数据采集;外触发由触发开关发出脉冲信号直接控制数据采集卡进行采集,可实现单人操作,而不需要拿着近场探头,又要操控 PC 软件,方便了现场测试,提高测试效率。

## 2.4 频谱仪

频谱仪主要对输入信号的频谱成分进行分析和显示,但就频谱仪本身而言,经 ADC 变换存储在 MEMORY 的点数很少(401 点/span),远不能满足系统需求,故采取频谱仪外输出方式。利用 USB-GPIB 卡连接到 PC 机,可通过软件控制频谱仪;高速数据卡连接到 PC 可实现数据采集。

频谱仪采用外输出方式时,AUX VIDEO OUT(辅助视频输出)与高速数据卡采集卡的 AI0 连接,提供一个 0~1 V 的模拟电压信号(频谱仪数模转换之前),高速数据卡直接进行数模转换,这样采集到的数据点数能达到 10 万以上,可极大提高系统的分辨率。

## 3 软件设计

### 3.1 开发平台及软件流程

系统软件基于虚拟仪器原理,以 LabWindows/CVI 为软件开发平台。在该平台下设计系统具有以下优点:第一,用户可通过交互式界面进行测试参数的设置,减少测试准备时间;第二,丰富的库函数与指令集,使系统编程更加方便,如通过 VISA 函数库与 SCPI 命令对频谱仪进行控制;第三,多线程技术可以使系统运行更加流畅,数据采集更加准确。

系统软件主要实现的功能包括系统参数的设定、频谱仪的控制、数据采集与处理、频谱图与数据的保存。为了提高系统性能,采用多线程技术,将界面响应当作主程序,数据采集处理当作次线程。软件流程如图 2 所示。

### 3.2 多线程应用

LabWindows /CVI 提供了两种在次线程中运行代码的高级机制,分别是线程池(thread pools)和异步定时器(asynchronous times);线程池适用于需要不连续地执行或在循环中

执行的任务,而异步定时器适用于在固定时间间隔内执行的任务<sup>[7]</sup>。本系统采用线程池的方式来创建次线程。主程序通过调用 Utility Library 库中 CmtScheduleThreadPoolFunction 函数,把想要在次线程中执行的函数名传递给它,根据配置和状态的不同,线程池或者创建一个新的线程或者使用一个现成的空闲线程来运行你所指定的函数<sup>[8]</sup>。而主程序调用完后立即返回执行其他的程序代码而无须等待次线程的执行。进行多线程编程时必须要注意数据保护,如全局变量,动态变量等。主程序界面响用来进行测试参数的设置,而次线程数据采集处理进行数据采集及后续的处理分析,访问变量不冲突,故而不涉及数据保护部分。以下给出本系统创建次线程的程序代码:

```
CmtScheduleThreadPoolFunction (DEFAULT_THREAD_POOL_HANDLE, RunSpaceScan, (void *)index, &threadid);
```

第一个参数表示选用哪一个线程池调度函数,这里使用缺省的线程池;第二个参数是需要在线程中运行的函数,这里是空间扫描函数;第三个参数是线程函数在执行过程中需要接收的数据;第四个参数是线程函数的 ID 号。

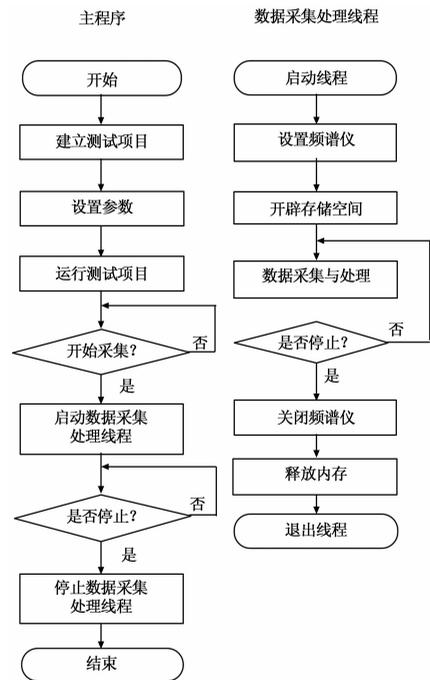


图 2 系统软件流程图

### 3.3 参数设置模块

该模块主要完成系统测试前的准备工作,可同时创建多个测试项目,及每个项目中对各个测试参数的设置,实现测试项目的统一管理,减少测试过程中的操作步骤,可极大提高工作效率。该模块中对各种测试参数的配置主要分为两部分:项目的参数设置和各扫描方式的参数设置。

项目的参数设置主要分为天线参数、幅度调整参数和设备参数三部分。天线参数设置用来配置测试选用的天线型号及其对应

天线系数文件;幅度调整参数设置可以根据测试情况选择是否使用前置放大器与衰减器及相应分贝数;设备参数设置主要是仪器连接方面的参数,如 GPIB 卡的地址、数据采集卡的设备号、自校准和是否采用外部触发。

系统主要分为两种扫描方式：频谱扫描与空间扫描。频谱扫描模式下需要对测试参数（起止频率、分辨率带宽和参考电平）及显示参数（幅度范围、单位和峰值标记等）进行设置；空间扫描则还需要对空间扫描探头阵列进行设置。

### 3.4 频谱仪控制模块

本系统采用 GPIB 线缆连接频谱仪与 PC 机，来实现硬件连接，通过 VISA 库函数，发送 SCPI 命令来实现频谱仪的控制。

VISA (Virtual Instrumentation Software Architecture, 虚拟仪器软件体系) 是标准化的 I/O 函数库及其相关规范的总称，有如下特点<sup>[9]</sup>：

- (1) VISA 是当前所有仪器接口类型功能函数的超集，为仪器工业的仪器驱动程序开发提供了接口标准；
- (2) 接口无关性，可以利用 VISA 中同样的操作来与各仪器进行联系，而不必考虑具体的接口类型；
- (3) 平台无关性，使 VISA 程序与操作系统和具体的编程语言无关。

SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) 语言为所有仪器仪表提供了一个广泛兼容的编程和数据使用环境，通过使用标准化的编程信息、仪器响应和数据格式来保证编程环境的兼容性，从而大大缩短了对自动测试设备编写程序所需时间<sup>[10]</sup>。这里给出本系统中部分运用 VISA 函数库传送 SCPI 命令的控制程序：

```

/* 声明频谱仪 SA */
static ViSession SAsession;
static ViSession SAid;
/* 打开资源管理器会话通道和器件会话通道 */
viOpenDefaultRM(&SAsession);
viOpen(SAsession, mainParaConfig.sGPIB, VI_NULL, VI_NULL,
&SAid);
/* 仪器通信,命令传输 */
viPrintf(SAid, "RST/n"); //对频谱仪进行复位
viPrintf(SAid, "CF %9.3lf MHz/n", SpaceNodeSetup[dataindex].centfre); //对频谱仪的中心频率进行设置
viPrintf(SAid, ";UNIT:POWer DBM/n"); //设置频谱仪 Y 轴单位
viQueryf(SAid, "ST? /n", "%lf", Sweeptime); //获取频谱仪扫描时间
/* 关闭与频谱仪的通信 */
viClose(SAid);

```

### 3.5 数据采集处理模块

该模块主要在次线程中执行，通过数据采集卡完成对频谱仪输出模拟信号的采集，并将采集到的数据进行修正（幅度、放大衰减，天线系数，测量单位等），最后对实时数据显示及保存。

#### 3.5.1 数据采集

在 LabWindows/CVI 中，可以直接调用 NI-DAQmx Library 中的函数对数据采集卡进行访问与控制，不仅极大提高了软件开发效率，而且使数据采集性能更优。利用 NI-DAQmx 对数据采集卡操控的主要程序如下：

```

/* 数据采集卡配置 */
DAQmxCreateTask("", &taskHandle); //创建 DAQ 任务
DAQmxCreateAIVoltageChan(taskHandle, chan, "", DAQmx_Val_Cfg_Default, min, max, DAQmx_Val_Volts, NULL); //创建模拟电压输入通道

```

```

DAQmxCfgSampClkTiming(taskHandle, "", rate, DAQmx_Val_Rising, DAQmx_Val_FiniteSamps, sampsPerChan + dataoffset); //设置采样时钟

```

```

DAQmxGetTaskAttribute(taskHandle, DAQmx_Task_NumChans, &numChannels);
/* 启动采集任务 */
DAQmxStartTask(taskHandle);
/* 读取采样数据 */
DAQmxReadAnalogF64(taskHandle, -1, 100, DAQmx_Val_GroupByChannel, rawdata, (sampsPerChan + dataoffset) * numChannels, &numRead, NULL);
/* 结束采集任务 */
DAQmxClearTask(taskHandle);

```

#### 3.5.2 数据处理

信号幅度的修正：从频谱仪的 AUX VIDEO OUT 接口采集到幅值为 0~1 V 的电压信号不能直接用于后续处理。信号电压幅值与频谱仪波形的纵坐标成正比，又频谱仪的显示范围为 100 dB，故信号需要以 1:100 放大，从而转换成真实数据并且单位为 dB；当系统参数设置中，设置了最大参考电平，则数据还需要进行修正，总修正公式如下：

$$data = data \times 100 + \text{参考电平} - 100 \quad (1)$$

天线系数的修正：不同天线，不同频率下天线系数不同，时间久了，还需要对天线系数进行校正。因此，设计时对每一种天线都建立了对应的 dat 文件，并在文件中写入了对应的各频率修正值。系统直接读取 dat 文件即可实现天线系数的调用，当天线系数改变时，只需对 dat 文件进行修改即可，提高了系统兼容性。

单位的换算：在电磁干扰测量中，常用不同单位表述测量值的大小。系统采用 3 个分贝单位： $dB\mu V$ ,  $dBm$ ,  $dB\mu V/dBm$ ，对应  $(U, P, E/H)$ 。考虑放大器和衰减器增益  $G_{dB}$  和线缆损耗  $L_{dB}$ ，换算公式如下 ( $AF$  为修正后天线系数)：

$$P_{dBm} = U_{dB\mu V} - G_{dB} - 107 + L_{dB} \quad (2)$$

$$E_{dB\mu V/m} = U_{dB\mu V} - G_{dB} + AF + L_{dB} \quad (3)$$

## 4 实验结果与分析

本测试系统于国产某机型飞机上进行了测试验证。采用全向电场探头在飞机内部精密电子仪器间排查电磁干扰源。

通过现场实际测试，在 128~132 MHz（分辨率带宽设为 3 kHz）频段内发现了明显的辐射干扰，频率为 130 MHz，幅度为 33.22，其频谱如图 3 所示。该干扰源来自飞机的某窄带天线的辐射发射，这与实际相符。

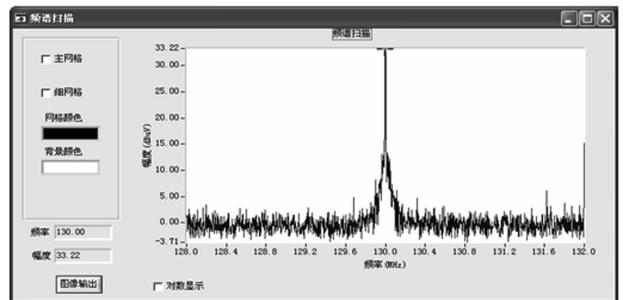


图 3 128~132 (3 kHz) 频谱图

测试引擎: 负责调用 ScanWorks Interconnect 模块, 执行 RunAction, 读取内部互联结果整理后, 返回给测试逻辑管理, 测试逻辑管理通过比较连线的正确状态而找出有问题的连线。

数据库: SQLite 是开源嵌入数据库, 引用广泛, 其 api 类似一般的 RDBMS, 支持 SQL 语言, 方便维护数据。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 线缆测试验证

基于边界扫描的线缆测试设备共提供了 640 个测试点, 能够测试出线缆的开路、短路等故障。验证步骤如下。

步骤 1: 自动探测出线缆的正确连接关系。

步骤 2: 将被测机箱 A 插槽的 A68 脚和 B 插槽的 C68 脚短路后, 测试结果如图 6 所示。

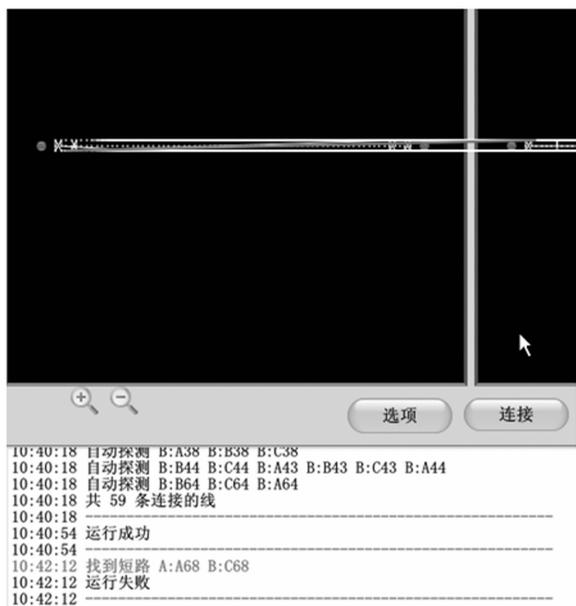


图 6 判断出错误的连线

### 4.2 试验结果分析

通过反复试验, 均能够在短时间内查找出错误连线的具体位置, 大大节约了人工测试的时间成本。由四片可编程逻辑芯片组成的扫描链路性能稳定, 较短的链路避免了相互的干扰; 软件部分执行的测试逻辑管理功能, 能够准确隔离出错误的位置。通过试验表明了基于边界扫描技术的线缆测试设备定位故障准确, 耗时短, 能够满足大量线缆测试的需要。

## 5 结论

测试设备解决了人工测试效率低下的问题, 为维修和调试工作提供了支持, 具有一定的应用和推广价值。

边界扫描测试技术一般主要用于板级测试中, 本文将其应用到机箱线缆的通断测试中, 是边界扫描测试技术的一种扩展应用, 为其更加深入的应用提供了一种参考。

### 参考文献:

- [1] 蔡 军, 张 婵. 基于工控机的航空电缆测试系统 [J]. 工业控制计算机, 2007, 20 (5): 46-47.
- [2] 胡振强, 崔艳丽. 多芯线缆快速测试技术分析 [J]. 计算机与网络, 2011, 11: 41-43.
- [3] 宋 光, 邓卫东. 线缆测试仪在机箱测试中的应用 [J]. 仪器与应用, 2007, 27: 39-43.
- [4] 李 洋, 杨华中. 基于边界扫描技术的电路板测试研究 [D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [5] 于德伟. 基于边界扫描的数字系统可测试性设计研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [6] 潘小龙. 基于边界扫描技术的测试系统的研究与应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [7] 何庆佳. 雷达电路板故障诊断系统的边界扫描模块的软件设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [8] 陈 星, 黄考利, 连光耀, 等. 从 1149.1 标准到 1149.7 标准分析边界扫描技术的发展 [J]. 计算机测量与控制, 2009 (8): 1460-1462.

(上接第 18 页)

## 5 结论

本文采用近场探头和频谱仪的方案, 完成了电磁干扰近场测试系统的设计。硬件上采用近场探头组, 可以实现不同测试环境的需求, 频谱仪的外输出方式及对应修正处理, 提高了系统测试精度, 触发开关的引入方便现场测试, 提高了测试效率; 软件上结合虚拟仪器的多线程思想、VISA 技术和 NI-DAQmx 库函数实现仪器通讯和数据采集, 简化了编程, 并具有通用性。该近场测试系统摆脱了电磁干扰测试的环境限制, 简化了测试工作流程, 提高了测试效率, 并且开发周期短, 目前已交付成都飞机设计研究所, 成功排查出某飞机系统间电磁干扰源。

### 参考文献:

- [1] 马伟明, 孟 进. 独立电力系统及其电力电子装置的电磁兼容 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 颜 伟. 复杂电子系统辐射 EMI 噪声机理分析与抑制 [J]. 中国

电机工程学报, 2013, 33 (15): 173-180.

- [3] 张东卫, 邢 悦, 崔 翔. 电力线通信网络电磁辐射近场测量系统 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (12): 117-121.
- [4] 区健昌. 电磁兼容性设计与预测仪器的现状 [J]. 电气技术, 2005 (12): 38-44.
- [5] 赵 阳, 封志明, 等. 电磁兼容测试方法与工程应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [6] 赵 阳, 颜 伟, 赵 波, 等. 电路辐射干扰机理诊断与特性估计 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (10): 6-13.
- [7] 习郑虎, 年夫顺, 梁胜利. 基于 LabWindows/CVI 的 USB 总线微波功率计软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (1): 213-215.
- [8] 谭秀萍, 吴晓辉, 范蟠果, 等. LabWindows/CVI 多线程技术在电负载系统中的应用 [J]. 测控技术, 2011, 30 (8): 79-82.
- [9] 王学伟, 张未未, 赵 勇. USB-GPIB 控制器及 VISA 函数库的设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22 (3): 87-92.
- [10] 薛文琪, 翟正军. 基于虚拟仪器的电源测试系统设计与实现 [J]. 计算机工程与设计, 2010, 31 (6): 30-34.