

声级计电性能自动检定系统的设计与实现

叶俊浩¹, 王英¹, 桑帅军²

(1. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 杭州 310018;

2. 浙江省计量科学研究院, 杭州 310018)

摘要: 目前人们对噪声污染越来越重视, 送检的声级计日益增多, 传统的手动检定方式的效率已经很难应付, 因此提出设计一款基于 LabVIEW 软件平台的声级计自动检定系统, 以实现声级计的自动检定; 系统依据 JJG188—2017《声级计检定规程》设计, 通过控制标准信号源 (KeySight33520B) 和程控精密衰减器生成标准检点信号传输到声级计电信号输入端, 声级计响应后将检定结果返回给系统, 文章介绍了系统的设计方案; 经过实验, 系统可测量声级计频率范围 10 Hz~20 kHz, 声压级动态范围 110 dB; 在实际应用中能很好的完成仪器自动控制、数据采集、数据分析处理、检定原始数据记录报告生成等自动化检定工作, 提高了声级计检定的工作效率、减少人为误差确保了检定结果的准确可靠。

关键词: LabVIEW; 声级计; 自动检定

Design and Implementation of Automatic Verification System for Electrical Performance of Sound Level Meter

YE Junhao¹, WANG Ying¹, SANG Shuaijun²

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Institute of Metrology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: At present, people pay more attention to noise pollution and more sound level meters are sent for inspection. The efficiency of traditional manual verification method is difficult to cope with. Therefore, an automatic verification system of sound level meter based on LabVIEW software platform is proposed to realize the automatic verification of sound level meter. The system is designed according to JJG188—2017 “Verification Regulation of Sound Level Meter”, By controlling the standard function signal generator (KeySight 33520B) and program-controlled precision attenuator to generate the checkpoint signal and transmit it to the electrical signal input terminal of the sound level meter. After the sound level meter responds to the response, the test results are returned to the system, this paper introduces the design scheme of the system. Through the experiment, the system can measure the frequency range of sound level meter from 10 Hz to 20 kHz, and the dynamic range of sound pressure level is 110 dB. In practical application, the system can complete the automatic verification of instrument automatic control, data acquisition, data analysis and processing, and verification of original data record, which improves the work efficiency of sound level meter verification, reduces human error, and ensures the accuracy and reliability of verification results.

Keywords: LabVIEW; Sound Level meter; automatic verification

0 引言

声级计作为测量和评估噪声水平的最常见的仪器使用场所广泛^[1], 在环境保护、劳动卫生、科研教学和工业企业等领域都可以见到, 其准确性直接影响了被测产品的噪声显示大小, 工作场所噪声是否合格, 环境噪声是否超过限定值, 科研数据的可信度等^[2]。

声级计的检定工作依据国家颁布的 JJG 188—2017《声级计检定规程》进行^[3], 一般检定声级计所需要操作的仪器包括有声校准器、标准传声器、测量放大器、正弦信号

发生器、猝发音发生器、高精密度衰减器等, 因为检定标准器构成复杂, 配置型号、各环节精度不同, 以致当前国内具有声级计检定能力的实验室其声级计的检定大部分依然是手工检定, 检定过程繁琐, 工作效率低。在人们对噪声污染越来越重视的大环境下, 送检的声级计日益增多, 省级计量院检定任务繁重, 传统的作业方式已经很难应付^[4], 因此迫切需要一套声级计自动检定系统, 以减轻检定人员的工作量, 提高检定效率和准确度。

现有自动检定方法例如有: 万江基于 STM32 单片机设计了多功能声级计校准系统^[5], 限于单片机处理能力和储

收稿日期: 2020-11-23; 修回日期: 2021-01-13。

基金项目: 浙江省市场监督管理局一般科研项目(20190305)。

作者简介: 叶俊浩(1997-), 男, 浙江丽水人, 硕士研究生, 主要从事智能仪器控制和自动化方向的研究。

王英(1964-), 女, 浙江杭州人, 教授, 主要从事计量与测试技术与虚拟仪器在工程检测中的应用方向的研究。

引用格式: 叶俊浩, 王英, 桑帅军. 声级计电性能自动检定系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 25-30.

存能力, 检定项目不完全, 检定对象有限; 华南理工大学何卓斌设计的一套基于 LabVIEW 的声级计检定系统已经做得较完备, 虽然不需要检测员在手动的操作信号发生器, 但是还是需要人工进行读数以及操作声级计, 检测员用肉眼观察很容易出现错误, 该系统只是将繁琐的按键简化, 并没有真正的达到自动化^[6]; 杭州爱华仪器有限公司钱利军开发的一套声级计频率计权项目的检定系统^[7], 虽然提高了检定的效率, 但仅能检定频率计权项目, 还有很多其他检定项目没有覆盖。云南国防区域计量站朱德寿^[8]提出一种基于 PULSE 系统的声级计检定系统, 是目前自动化程度最高、检测能力覆盖声级计种类最多的自动检定系统, 但是该系统的价格非常的昂贵难以推广应用。

综上所述, 声级计的自动检定还远远不能达到计量部门的需求, 本文拟基于虚拟仪器技术设计声级计自动检定系统, 使其完成标准设备和声级计的自动控制 and 检定数据采集、数据分析处理、合格判定、检定数据记录、检定原始记录报告自动生成等工作, 提升声级计自动检定能力, 提高声级计计量效率, 减少人为误差。

1 系统组成和原理

1.1 系统组成

根据日常送检声级计数量的实际情况, 本文检定对象选用杭州爱华仪器有限公司 AWA5661 系列声级计。系统硬件由工控计算机、标准信号源 (KeySight33520B)、程控精密衰减器及待检声级计组成, 主要硬件指标如表 1 所示。以多串口工控计算机为控制核心, 采用数据总线结构, 实现对标准仪器和待检声级计的同步控制。

表 1 系统硬件指标

设备名称	测试调节范围	不确定度/ 最大允许误差
标准信号源 KeySight33520B	正弦信号: 10 Hz~200 kHz; 猝发音信号: 0~100s;	幅频特性 MPE: ±0.2 dB; 持续时间 MPE: ±1.0%;
程控精密衰减器	频率范围: 0 Hz~50 kHz; 衰减范围: 0~119.99 dB;	±0.05 dB;
待检声级计	频率范围 10 Hz~20 kHz; 声压级动态范围 110 dB;	1 级; 2 级

1.2 工作原理

声级计自动检定的实现需要满足两个条件: 1) 控制标准信号源输出标准待检信号幅值、频率以及波形的自动调节, 但限于标准信号源幅值动态范围限制, 需要增加精密衰减器以满足对声级计部分检定项目的需求; 2) 声级计的控制和响应的读取。

如图 1 所示, 程控精密衰减器与标准信号源

(KeySight33520B) 以及待检声级计通过 BNC 电缆相连接, 再分别通过数据传输线连接至工控计算机实现通讯。

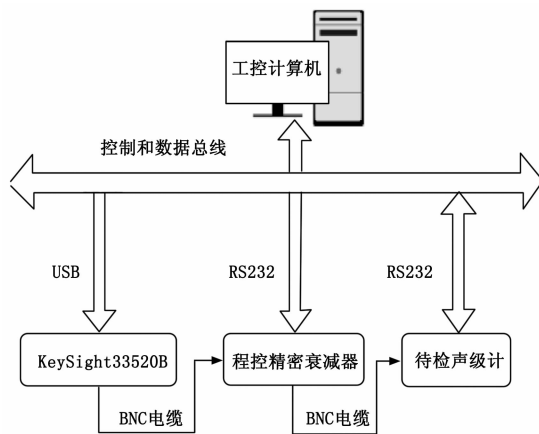


图 1 硬件连接示意图

自动检定系统通过串口按照声级计检定规程要求对标准设备触发以产生待检定标准信号, 通过 BNC 电缆把标准信号发送到声级计。声级计接收到信号后, 等到示数稳定以后将数据通过串口发送回自动检定系统。自动检定系统在接收到返回数据以后先对数据进行解码, 再依据规程中的要求进行分析、处理和显示, 重复上述操作, 直到获得最后一个检定结果。系统同共包含了声级计检定的六个项目分别为频率计权 (电信号)、自噪声、级线性、时间计权、1 kHz 处的频率计权、单个猝发音响应, 共计 40 多个检定点。

2 系统软件

声级计自动检定系统的实现除了硬件之间的连接通讯, 更重要的是软件功能的实现。LabVIEW 作为一款图形化的编程软件^[9], 与一般的文本编程语言有很大的区别, 内部集成了大量简易且功能强大的工具包, 是计量测试领域的有力开发工具, 能够很好地完成仪器控制以及数据采集, 实现检定规程所规定的检定流程^[10]。

2.1 系统软件总体设计

系统软件主要分为 3 层, 最上层为主程序, 中间层为功能模块, 底部驱动层为仪器控制驱动、消息队列传输驱动^[8]。整体程序结构如图 2 所示。

1) 初始化设置模块, 主要实现各仪器串口配置、待检声级计基本信息和检定地点环境条件录入、检定项目的选择等。

2) 数据处理显示模块, 主要实现声级计反馈数据的误差判断以及数据在系统主界面的显示。

3) 数据采集模块, 主要是对信号发生器、程控精密衰减器、声级计的控制, 以复现检定规程中各个检定项目的流程。

4) 报告生成模块, 主要实现检定结果写入 Excel 原始

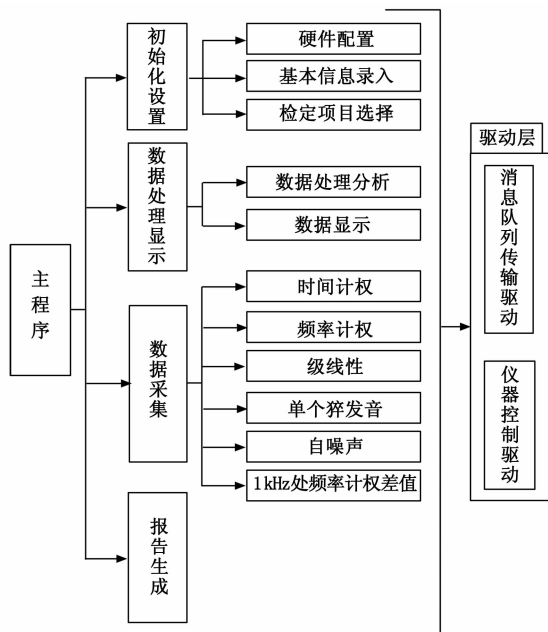


图 2 系统软件总体结构示意图

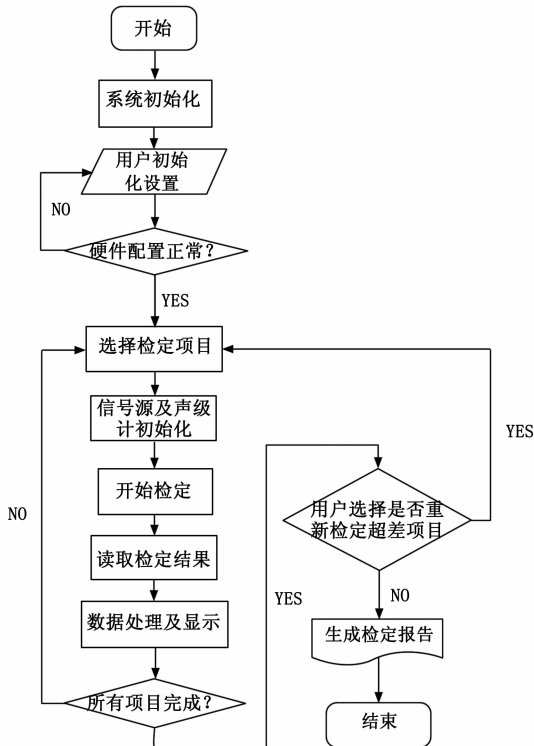


图 3 系统软件流程图

数据记录报告中。

程序运行的流程如图 3 所示，程序开始运行后先配置好通讯串口，然后发送命令测试仪器设备与工控计算机之间的通讯是否正常，等待测试通讯正常以后开始按照检定规程规定的检定项目逐个进行检定，与此同时，每检定完一个项目对数据进行处理分析，判断是否合格，显示在程序主界面上。在所有检定项目完成以后，若存在不合格的项目，工作人员可以选择重新检测该项目，以提高系统的容错率，最后保存数据生成检定报告。

2.2 主程序

编写完成软件界面如图 4 所示，在系统运行前，检定人员先在程序前面板上配置好仪器设备的通讯串口，输入声级计的基本信息以及实验室环境条件。然后选择所需要检定的项目，点击开始检定按钮，系统开始检定，此时开始检定按钮和保存按钮会被禁用，防止检定人员误触。每检定完一个项目，结果会显示在右侧表格中并且判断该结果是否合格，便于检定人员查看。

本系统主要实现数据采集、处理、显示以及保存等自动化控制流程，是典型的面向过程的设计，但是各个过程运行并不同步，为提高运行效率，系统主程序采用异步多循环的“生产者/消费者”设计模式，通过消息队列(Message Queue)作为数据缓冲区^[11]，将采集、处理、显示及保存分开处理，消息队列完成模块之间的数据交互，使各个模块之间的耦合降低，减少模块之间的依赖，以提高程序的执行效率。

主程序如图 5 所示。主要包括以下 5 个循环：

1) UI 事件处理，消息的“生产者”，是捕捉用户在前面板按钮动作事件生成消息的事件处理循环，并将生成的



图 4 软件主界面

消息写入消息队列。

2) 消息处理循环，从事件处理循环接收处理消息并通过消息队列发送响应消息至其他的消息处理循环(MHL)。

3) 采集数据循环，连续响应数据的 MHL，采集到响应数据解码处理以后写入消息队列，分别发送至记录数据循环以及显示数据循环。

4) 记录数据循环，连续记录响应数据的 MHL，从消息队列中获取响应数据并记录。

5) 显示数据循环，用采集数据显示的 MHL。从消息队列获取到响应数据，分析判断是否超差后显示在程序主界面上。

各个循环通过消息队列传递消息，保证各自的独立性以及消息的连续性，有效的防止了用户指令和数据的丢失，

保证在程序运行过程中数据的同步性与完整性。

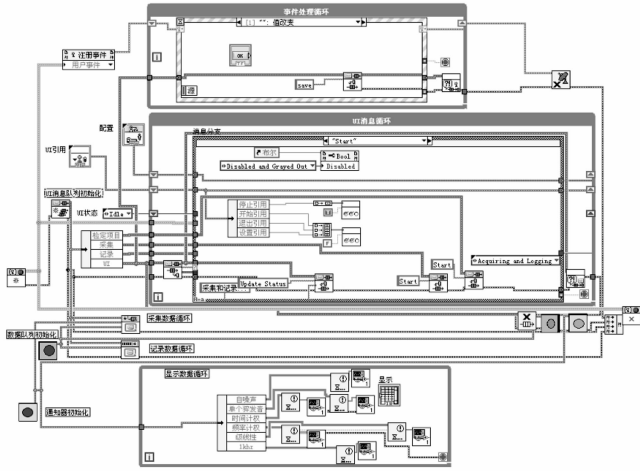


图 5 主程序框图

2.3 数据采集模块

数据采集模块主要是通过对标准信号源、程控精密衰减器和待检声级计的控制复现声级计检定规程中的流程。

系统按照声级计检定规程所要求的 6 个检定项目分别建立独立的功能模块，通过队列状态机实现。根据检定规程，不同的检定项目对声级计的模式、初始显示声压级以及输入信号的幅值、频率、波形都有不同的要求，在检定开始时先要将声级计调至相应的模式，然后调节输入信号使声级计达到所要求的声压级后开始检定，重复上述步骤，逐一测试各个检定点，直至所有检定点都完成。图 6 为检定单个项目的基本流程，例如单个猝发音响应项目一个检定点的流程为“先用标准信号源产生一个 4 kHz 的正弦信号，使程控精密衰减器衰减器衰减幅度调节为 0 dB；调节输入信号幅值使待检声级计显示声压级为测量上限以下 3 dB，然后标准信号源发出 4 kHz 的猝发音信号，将声级计设定至相应档位，读取声级计响应数据，取这个变化过程中的最大值与相应稳态正弦信号的显示声级的差值即为单个猝发音响应的结果。”

2.4 报告生成模块

借助 LabVIEW 的 Report Generation 工具包，将检点地点环境条件等检定基本信息和检定结果录入原始数据记录报告 Excel 模板中。调用 Excel 的一般流程为新建报表，数据写入报表，保存报表至文件，处置报表。在工作人员在前面板点击“保存”键以后，数据采集循环通过消息队列将检定结果以数组的形式传输至该模块，图 7 为检定数据写入报表过程，将检定数据数组的值索引出来后通过队列状态机分别写入模板中所指定的单元格。

2.5 驱动层

2.5.1 仪器控制驱动

仪器设备的驱动有以下两种：

- 1) 标准信号源和待检声级计的控制基于 LabVIEW

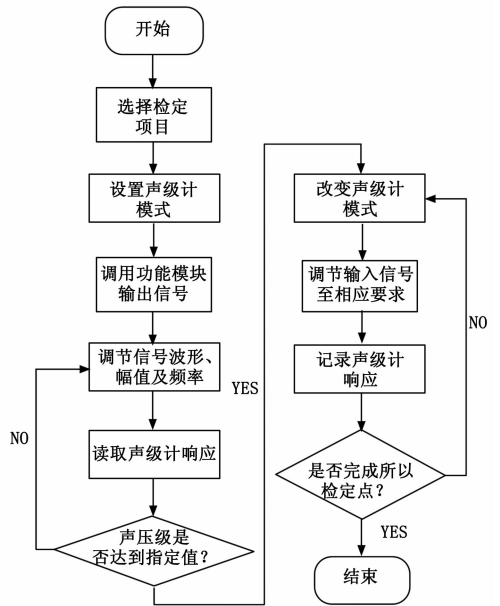


图 6 单个检定项目运行流程图

中的 VISA (virtual instruments software architecture) 库函数。通过 VISA 用户能与大多数仪器总线连接，无论底层是何种硬件接口，用户只需要面对统一的编程接口 VISA。

程序中所使用的 VISA 函数是：VISA 配置串口、VISA 写入、VISA 读取和 VISA 关闭。应用 VISA 写入函数将控制标准信号源、待检声级计的指令通过串口发送至仪器设备，设备接收命令后解析，然后做出相应的响应；应用 VISA 读取函数将声级计响应数据通过 RS232 串口发送至系统，VISA 读取函数调用时需要设置好读取缓冲区的字节数，不确定仪器返回多少字节的数据时，在读取过程可能会引发数据过量溢出或者超时等待，导致程序出错，因此在读取前加入“Bytes at Port”串口属性节点，这个属性节点能够读取当前串口缓冲区有多少字节数，然后将它的输出端连接到 VISA 读取函数的“读取字节数”这个输入端上，这样缓冲区有多少个字节的数据就读回多少，不会有数据溢出和超时等待。图 6 为读取一个声级计响应数据的基本程序，经过测试，在写入读取指令后，需加一个 100 ms 的延时，给声级计一个响应时间，再读取响应数据，以保证读取无误。完成读取后调用 VISA 关闭函数，释放通

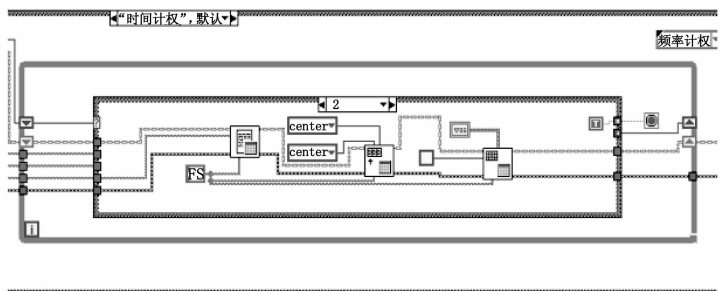


图 7 数据写入报表部分程序框图

讯的串口资源。通过声级计响应读取 VI 读取声级计的响应之后, 由正则表达式对响应数据解码, 提取所需要的数据, 入消息队列, 等待进一步的处理。

2) 程控精密衰减器的控制程序由 VC 语言编写, 生成动态链接库 (DLL, dynamic link library) 通过 LabVIEW 中的 ActiveX 接口调用。动态链接库 DLL 中包含了两块内容: 一是 DllGetClassObject, DllCanUnloadNow, DllRegisterServer, DllUnregisterServer 四个函数完成一个进程内的 COM (component object model) 组件, 实现与工控计算机的连接通讯; 二是工控计算机控制程控精密衰减器内部数字 IO 控制卡, 切换电阻网络以改变函数信号幅值衰减幅度的方法。

在工控计算机注册好 DllRegisterServer 后, 应用 ActiveX 接口调用动态链接库中封装好的方法^[12]。图 8 为 LabVIEW 调用动态链接库的基本程序, 先打开自动化引用写入动态链接库的引用句柄, 接着调用动态链接库中的方法, 最后关闭自动化引用, 释放 ActiveX 接口资源。

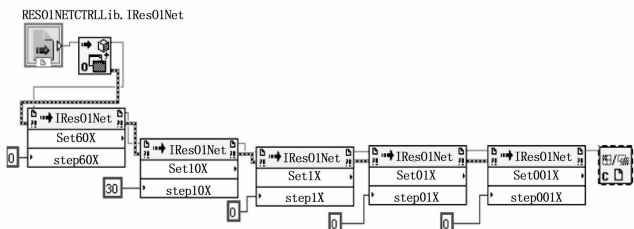


图 8 调用动态链接库基本程序

2.5.2 消息队列传输驱动

消息队列是本系统各个模块之间数据传递的核心方式。系统中包含有多个队列, 包括用户前面板事件消息发送消息至“事件处理循环的队列; 事件处理循环发送消息至采集数据循环与记录数据循环的队列; 采集数据循环发送消息至数据记录循环与显示数据循环的队列。

自动检定系统创建一个消息队列的方式如图 9 所示, 分别对每个队列的数据类型进行定义, 本系统有字符串和数组两种类型的队列, 用一个空的字符串或者数组连接至“元素数据类型”端即可定义消息队列数据类型。在创建完队列之后, 在“队列输出端”创建引用, 各个循环通过消息队列引用句柄访问特定的队列完成消息入队列与消息出队列的动作。消息队列是整个系统的“血管”, 实现了在多个 VI 之间或者同一 VI 种不同线程之间任务交互执行和数据交换。



图 9 消息队列创建

3 实验结果与分析

系统是将原有标准仪器的控制和数据读取、分析处理由手动变成自动, 从检定原理上看并不会影响检定结果的不确定度。

为了验证, 对送检的 AWA5661 型声级计进行检定实验比较, 分别用自动检定系统和人工检定进行 10 次检定, 记录各个检定项目的结果, 其中单个猝发音响应的测量平均值如表 2 所示, 结果差别不大, 具有良好的一致性。计算出两个方式各自的 A 类不确定度, 如表 3 所示, 检定规程所要求的最大 A 类不确定度为 0.30。

表 2 单个猝发音响应项目自动检定与人工检定结果平均值对比

猝发音持续时间/ms	猝发音响应/dB			
	自动检定		人工检定	
	$L_{AFmax} - L_A$	$L_{ASmax} - L_A$	$L_{AFmax} - L_A$	$L_{ASmax} - L_A$
200	-1.02	-7.02	-1.03	-7.03
2	-18.06	-27.01	-18.04	-27.02
0.25	-27.03	/	-27.02	/

表 3 单个猝发音响应项目自动检定与人工检定结果不确定度对比

猝发音持续时间/ms	不确定度			
	自动检定系统		人工检定	
	$L_{AFmax} - L_A$	$L_{ASmax} - L_A$	$L_{AFmax} - L_A$	$L_{ASmax} - L_A$
200	0.052	0.058	0.063	0.045
2	0.048	0.046	0.059	0.049
0.25	0.064	/	0.071	/

实验结果表明, 使用自动检定系统对声级计进行检定, 测量不确定度符合检定规程中所要求的, 且和人工检定基本一致; 同时自动检定系统减少了人工读数时所产生的误差, 使工作人员摆脱繁琐的按键操作, 且在检定过程中对结果进行分析处理, 减少了后期数据处理的时间。通过本系统检定一台声级计的时间平均为 10 min, 而人工检定一台声级计平均需要 30 min, 效率提高了 3 倍。

4 结束语

目前本系统已经投入应用, 在 AWA5661 系列声级计电性能检定实践中稳定、可靠, 这套系统可以完成声级计 6 项复杂的检定项目, 减少在人工读数时产生的误差, 且可以使检定人员脱离繁琐的仪器按键操作和分析处理检定结果的工作, 保证检定工作的准确性和时效性, 极大提高了检定效率。

后续工作可以基于此扩展声级计声性能自动检定功能; 增加不同厂家不同型号的声级计检定能力; 发挥计算机大数据存储与处理优势, 基于被检声级计的历史检定数据, 提炼声级计关键技术指标, 为声级计生命周期维护, 为声

级计的技术进步以及计量校准更新提供参考。

参考文献:

[1] 钟波, 孙庆生, 王雪晶, 等. 声级计频率计权特性自动检定系统研究与实现 [J]. 电声技术, 2010, 34 (5): 37-40.

[2] 童宪. 环境噪声监测终端在线计量研究 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2013.

[3] JJG 188-2017. 声级计检定规程 [S]. 全国声学计量技术委员会, 2002.

[4] 孙庆生. 基于 PXI 总线技术的声级计自动检定系统 [D]. 北京: 北京化工大学, 2011.

[5] 万江. 基于 STM32F407 的多功能声级计校准系统设计 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.

[6] 何卓斌. 基于 LabVIEW 的声级计校准系统的设计与实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.

[7] 金晖, 何洁. 声级计自动检定系统设计 [J]. 仪器仪表学报, 2006 (s2): 1503-1504.

[8] 朱德寿. 基于 PULSE 系统的声级计自动检定测试系统 [J]. 电声技术, 2006 (9): 67-69.

[9] 李林超, 徐文龙, 徐冰俏. 基于 LabVIEW 的心电监护仪自动检定系统的研发 [J]. 计算机应用与软件, 2018, 35 (8): 128-132.

[10] 柯伟, 王宝珠, 郭志涛. 管道电位采集仪自动校准系统的研制 [J]. 电测与仪表, 2021 (4): 184-188.

[11] 林仕立, 丘东元, 张波, 等. 基于 LabVIEW 的电源监控平台设计与实现 [J]. 电测与仪表, 2011, 48 (3): 50-53.

[12] 宋广东, 王昌, 王金玉, 等. 基于 DLL 技术和 COM 组件技术实现 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程 [J]. 计算机应用与软件, 2013, 30 (1): 287-289.

(上接第 15 页)

- (5) 采用最低激光能量最低为 120 pJ (对应 LET 值为 $(5 \pm 1.25) \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) 时芯片发生单粒子锁定;
- (6) 拆除电路板, 更换测试芯片, 重复 (2) ~ (5) 试验过程;
- (7) 关闭激光器, 试验结束。

3.3 试验结果

对计算机主板电路典型部组件进行了典型故障模式分析, 分析元器件失效对典型部组件的影响, 本次试验共分析典型故障模式 3 个, 具体见表 2。

表 2 典型部组件故障模式分析

故障模式	故障原因	故障影响	注入类型	检测方法
FPGA 可恢复模块存储功能异常	FPGA 单个 bit 位发生翻转	存储区及逻辑区部分存储数据出错, 可用 ECC 程序纠正	脉冲激光故障注入	内场测试
FPGA 不可恢复模块存储功能异常	FPGA 多个 bit 位发生翻转	存储区及逻辑区部分存储数据出错, ECC 程序无法纠正	脉冲激光故障注入	内场测试
FPGA 模块停止工作	FPGA 局部工作单元微门锁	局部功能模块工作电流上升, 系统无法正常工作	脉冲激光故障注入	内场测试

利用脉冲激光单粒子效应试验装置进行故障注入, 采用激光背面辐照试验方法, 在 230 pJ (对应 LET 值为 $(10 \pm 2.5) \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) 能量以上, 成功实现了典型故障模式单位翻转、多位翻转及功能失效等多种故障模式的准确复现, 分析了由芯片自身缺陷引起的特定工作状态下的典型故障模式。利用脉冲激光成像定位的优势, 对其进行不同模块的故障触发, 并分别探测各模块的故障敏感性规律。

4 结束语

针对集成电路故障注入实际需求, 本文研究了基于单粒子效应的非接触式故障注入技术, 并进行了试验验证分析, 充分说明了该方法的可行性。该技术所具有的试验时间短、成本低、可多次复现等优势, 是疲劳试验方法所无法实现的, 故障真实的复现优势是软件模拟方法所无法达到的。半侵入式激光探针装备故障注入技术可精确定位装备内部薄弱部位并指导其优化设计。

参考文献:

[1] 陈然, 连光耀, 等. 加速退化试验改进的故障模式影响及危害性分析 [J]. 西安电子科技大学学报 (自然科学版), 2017, 44 (3): 164-169.

[2] 颜世刚, 齐亚峰. 测试性验证试验的故障注入方法优化研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (4): 97-101.

[3] 姜显光, 封国强, 等. FPGA 单粒子效应的脉冲激光试验方法研究 [J]. 原子能科学技术, 2012, 46 (s): 582-586.

[4] 马英起, 封国强, 等. 脉冲激光试验评估模拟电路单粒子效应 [J]. 信息与电子工程, 2012, 10 (5): 633-638.

[5] 王艳军, 姜婷婷, 张峻玮. 面向 FPGA 的故障注入测试技术研究 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2018, 40 (4): 60-62.

[6] 刘宇翔, 张志刚, 等. 超大规模 FPGA 的单粒子效应脉冲激光测试方法 [J]. 微电子学, 2018, 48 (4): 548-554.

[7] 马英起. 单粒子效应的脉冲激光试验研究 [D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2011.

[8] 上官士鹏, 封国强, 等. 脉冲激光模拟 SRAM 器件单粒子翻转效应的试验方法研究 [J]. 原子能科学技术, 2013, 47 (11): 2137-2141.

[9] 王德坤, 曹洲, 等. 脉冲激光背照射单粒子效应实验研究 [J]. 原子能科学技术, 2011, 45 (7): 884-887.

[10] 张晨光, 安恒, 等. 脉冲激光模拟单粒子效应研究 [J]. 核技术, 2020, 43 (4): 58-63.