

一种基于LabVIEW的机载用电设备电压畸变频谱测试系统的设计

蒙科*, 李贤灵, 陈亮

广电计量检测集团股份有限公司电磁兼容检测实验室, 四川 成都

收稿日期: 2025年9月28日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年11月3日

摘要

航空电气系统包括用电设备与供电系统。飞机供电系统在现代飞机系统中至关重要, 保障着航空器飞行任务的顺利执行。随着机载用电设备数量的急剧增多, 用电设备与飞机系统间的供电兼容性问题日益突出。供电兼容性试验的试验结果成为验证机载用电设备供电兼容性是否合格的依据。本系统基于NI LabVIEW开发环境, 结合信号监测设备以及信号输出设备, 设计用于机载用电设备电压畸变频谱的自动化测试系统。该测试系统可移植性良好, 易于部署, 交互界面简洁, 能够提高测试系统的自动化水平。

关键词

供电特性, 畸变频谱, LabVIEW, 自动化

Design of a LabVIEW-Based Voltage Distortion Spectrum Testing System for Airborne Electrical Equipment

Ke Meng*, Xianling Li, Liang Chen

Electromagnetic Compatibility Testing Laboratory, Guangzhou GRG Metrology & Test Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: September 28, 2025; accepted: October 14, 2025; published: November 3, 2025

Abstract

The aviation electrical system comprises electrical equipment and power supply systems. The aircraft

*通讯作者。

文章引用: 蒙科, 李贤灵, 陈亮. 一种基于 LabVIEW 的机载用电设备电压畸变频谱测试系统的设计[J]. 建模与仿真, 2025, 14(11): 23-32. DOI: 10.12677/mos.2025.1411636

power supply system plays a crucial role in modern aircraft systems, ensuring the smooth execution of aviation mission tasks. With the rapid increase in the number of onboard electrical equipment, the issue of power supply compatibility between electrical equipment and the aircraft system has become increasingly prominent. The results of power supply compatibility tests serve as the basis for verifying whether the onboard electrical equipment meets the power supply compatibility standards. Based on the NI LabVIEW development environment, this system integrates signal monitoring equipment and signal output devices to design an automated testing system for the voltage distortion spectrum of onboard electrical equipment. This testing system boasts good portability, easy deployment, and a user-friendly interface, enabling it to enhance the automation level of the testing process.

Keywords

Power Supply Characteristics, Distortion Spectrum, LabVIEW, Automation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

飞机供电系统的质量直接影响机载用电设备的工作和寿命。航电系统作为支持航空器完成飞行任务的关键系统,具有综合显示、参数采集、通信、导航、监视、记录、维护和告警等功能[1][2]。当航空器在执行飞行任务时无法避免由于大功率设备启动而造成对电源系统的冲击,从而出现瞬时断电、电源瞬变等现象[3]。为了保障航空器的飞行安全,机载用电设备的供电兼容性需满足相关标准要求;具体体现在 GJB 181 系列军用标准和 HB 20326-2016《机载用电设备的供电适应性试验方法》。飞机供电特性从首次制定到修订一共三个版本,分别是 GJB 181-1986《飞机供电特性及对用电设备的要求》、GJB 181A-2003《飞机供电特性》、GJB 181B-2012《飞机供电特性》。GJB 181 系列标准是针对电源系统的总体要求,具体试验要求则需要按照 HB 20326-2016 的规范。

HB 20326.1-2016《机载用电设备的供电兼容性试验方法 第一部分:总则》规定了飞机供电系统的工作状态包括正常、转换、非正常、应急、发动机电启动、供电故障六个状态;每种工作状态对应不同的试验项目。以直流 28V 供电电源为例,正常工作状态包含了:LDC101 负载特性、LDC102 正常稳态电压、LDC103 电压畸变频谱、LDC104 脉动、LDC105 正常电压瞬变;转换工作状态包含了:LDC201 供电转换中断;非正常工作状态包含了:LDC301 非正常稳态电压、LDC302 非正常电压瞬变;应急工作状态包含了:LDC401 应急稳态电压;发动机电启动工作状态包含了:LDC501 启动电压瞬变;供电故障工作状态包含了:LDC601 断电、LDC602 反极性[4]。

虽然试验项目多,但试验过程中的测试布置较为简单,仅需将可编程电源的电源输出连接至机载用电设备的电源输入即可,配套性设备按照产品交联情况连接即可。每种试验项目对产品的考核目标是不相同的,以飞机供电系统在正常工作状态的试验项目为例:负载特性主要关注的是机上不同用电设备对挂在同一汇流条上的其他设备是否会产生影响;正常稳态电压是为了验证产品在规定的稳态电压下用电设备是否能够正常工作;电压畸变频谱的测试目的是模拟飞机上由于发电机、配电系统设备和负载综合影响产生的主要电压畸变频率分量是否会对用电设备产生影响;脉动试验是用于检验用电设备在周期性的脉动电压下是否仍具有保持其功能的能力;正常电压瞬变是模拟产品在工作状态下,产品是否会受到

由于负载切换或其他原因而造成的瞬态电压突变的影响。

不同的试验项目对应着不同的电压干扰源类型；若能够开发设计出一种在不更换供电电源的情况下便能够实现电压可调输出的可编程电源，能够极大程度上提高试验效率。针对 LDC101 以及 LDC102 试验项目，该项目不涉及环路反馈与控制，仅需要仪器的仪表直接测量。针对 LDC103 以及 LDC104 试验项目，该项目需依靠信号源与监测设备的相互配合才能实现该功能；因此开发设计出 LDC103 电压畸变频谱测试系统是开发脉动试验测量系统的基石。此外，由于 HB 20326.8-2016 属于航空机载设备的专用规范，因此在目前商业化之中仅有少数的测试设备厂家能够提供该软件。然而仅仅购置软件是无法满足机载设备厂家的测试需求，并且这样的一套完整设备价格不菲，因此本软件的成功开发针对于研究机构的科研人员应用前景突出。

基于上述分析，本文从电压畸变频谱的测试目的、需求立足，通过 LabVIEW 开发环境，设计一套能够用于机载用电设备电压畸变频谱测试的系统；同时节省测试成本，满足大多数机载用电设备研发人员对产品供电兼容性的摸底测试需求。

2. 电压畸变频谱测试系统框架

实现框架

依据 HB 20326.8-2016 机载用电设备的供电适应性试验方法第 8 部分：直流 28 V 之中 LDC103 电压畸变频谱试验系统典型配置 II (图 1) 可知供电兼容性试验需要变频电源、电压表、频谱分析仪、校准的阻性负载以及激励设备和监测设备。变频电源用于提供满足表 1 所示的单频正弦畸变信号；电压表用于监测被试设备端的电源电压；频谱分析仪用于验证被试设备端电源信号的畸变信号。根据表 1 可知，电压畸变频谱的测试频点分别为 10 Hz、25 Hz、50 Hz、60 Hz、250 Hz、1000 Hz、1700 Hz、2000 Hz、5000 Hz、6500 Hz 以及 10,000 Hz，上述频点对应的畸变信号幅值分别为 0.1 V、0.158 V、0.223 V、0.245 V、0.5 V、1.0 V、1.0 V、1.0 V、1.0 V、0.769 V、0.5 V。

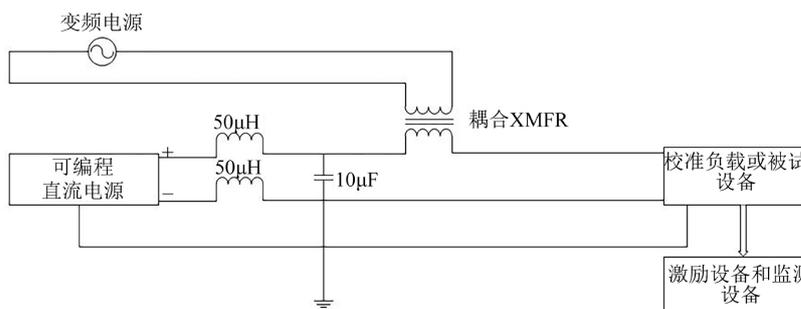


Figure 1. Typical configuration II for voltage distortion spectrum testing system

图 1. 电压畸变频谱试验系统典型配置 II

Table 1. Test conditions for voltage distortion spectrum in HB 20326.8-2016

表 1. HB 20326.8-2016 中电压畸变频谱试验条件

试验条件	畸变频率(Hz)	畸变幅值(方均根值) (V)	持续时间(min)
A	10	0.100	5
B	25	0.158	5
C	50	0.223	5
D	60	0.245	5

续表

E	250	0.500	5
F	1000	1.000	5
G	1700	1.000	5
H	2000	1.000	5
I	5000	1.000	5
J	6500	0.769	5
K	10,000	0.500	5

根据电压畸变频谱试验系统典型配置图可知,测试系统需具备有变频电源、电压表、频谱分析仪或具有相同功能的仪器。由于试验中输出的畸变频率为单频正弦信号,因此测试系统中的变频电源使用 Keysight 33500B Series 波形发生器代替;电压表以及频谱分析仪的信号监测功能可使用示波器进行代替;校准的阻性负载可直接使用精密无感负载进行代替。通过上述分析并结合图 1 所示的试验系统典型配置,可设计出如图 2 所示的测试系统构建方案。

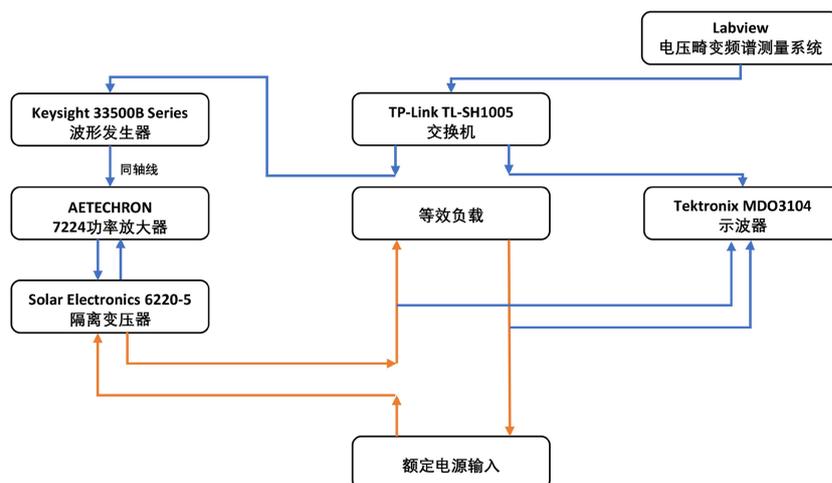


Figure 2. Design block diagram of the testing system
图 2. 测试系统设计框图

该方案涵盖额定电源输入、等效负载、Tektronix MDO3104 示波器、Keysight 33500B Series 波形发生器、AETECHRON 7224 功率放大器、Solar Electronics 6220-5 隔离变压器以及 TP-Link TL-SH1005 交换机。

图 2 中所示相关设备已经满足电压畸变频谱测试系统的硬件要求;然而仅含有硬件是无法构建出测试系统的,因此利用 LabVIEW 开发对应的软件系统成为必要条件。由于多个硬件之间的通信是通过以太网实现的,计算机与波形发生器或示波器之间是不能够直接进行通信控制的,因此需借助 NI LabVIEW 的虚拟仪器驱动(NI VISA)将示波器、波形信号发生器通过设备串口与测试系统相连接。此外,示波器、信号发生器仪器均只涵盖一个网口,开发电压畸变测试系统的计算机同样也只具备一个网口,因此需要使用交换机组建局域网,实现多仪器之间的互联互通。为了实现多仪器之间的互相通信,局域网内的三个仪器的 IP 地址需要保持网络地址、子网地址、主机地址一致,主机内部具体地址可不相同。因此,将计算机、示波器、信号发生器的地址分别设置为 192.168.0.254、192.0.168.0.253、192.168.0.252;仪器 IP 地址保持在同一网段之后,便可利用 G 语言开发 LDC103 电压畸变频谱测试系统[5]。

图 3 为电压畸变频谱的校准过程框图,图 4 为电压畸变频谱的测试过程框图。测试系统校准前需要

在界面之中输入对应的畸变电压校准值，随后便开始校准。校准开启时，测试系统设置信号源为指定输出正弦信号的频率(f_1)以及幅值(a_1)，当波形发生器注入到校准负载上的电压达到校准电压时，该频点的电压校准已完成，校准幅值会写入校准文件之中；随后测试系统控制信号源输出下一个畸变信号的频率(f_2)以及幅值(a_2)，按照与上一个频点校准同样的要求校准该频点，直至所有频率校准完成；校准完成之后，测试系统会在相应的文件之中写入实际校准的电压幅值以供测试系统调用。

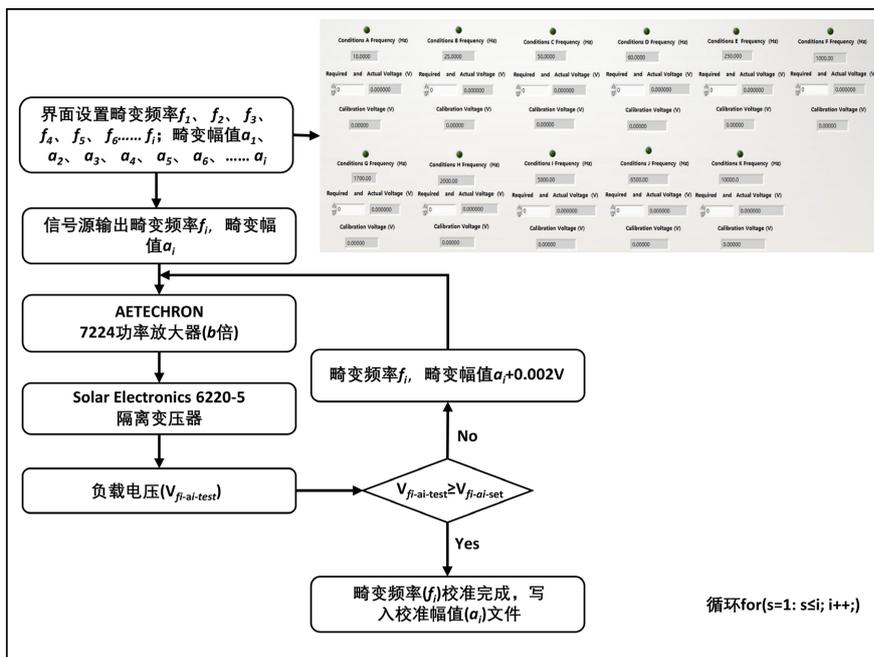


Figure 3. Logical block diagram of the testing system (calibration process)
图 3. 测试系统逻辑框图(校准过程)

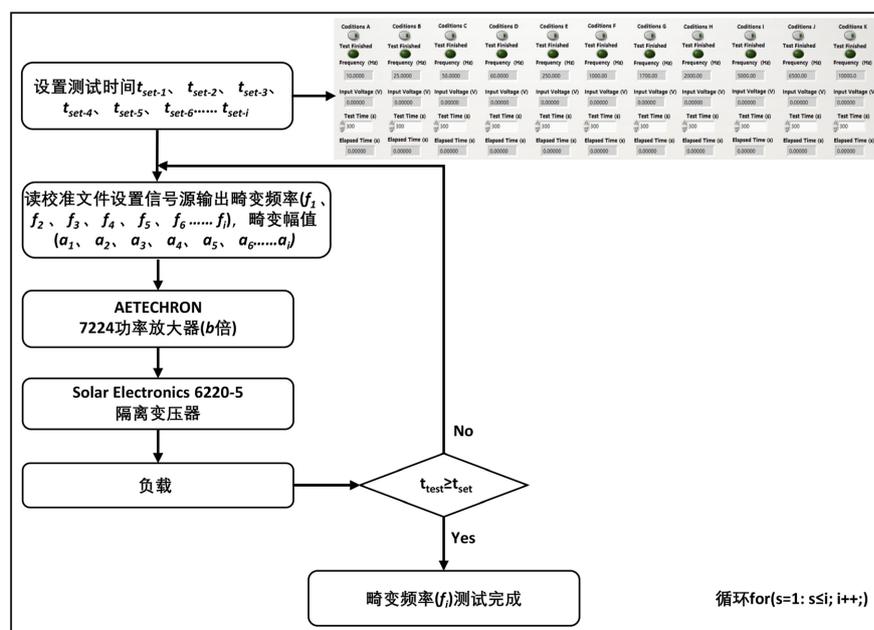


Figure 4. Logical block diagram of the testing system (testing process)
图 4. 测试系统逻辑框图(测试过程)

测试系统校准过程生成的校准数据文件，在测试过程之中的作用不言而喻。系统开始测试时，程序自动获取校准数据并将校准数据输出到系统之上；测试开始前需按照标准设定每个畸变频率的测试时间，即(t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 、 $t_6...t_i$)；当程序计时时间已大于等于设定时间时，该频点测试便测试完成。程序将转移至下一个频点的测试，直至要求的所有频点测试完成。

3. 电压畸变频谱测试系统实现

为了实现图 3 中单个畸变频率(f_i)电压幅值(a_i)的校准，图 5 进行了程序的开发与设计。首先控制信号源的输出从 0 mV 开始，依次步进 2 mV 调整信号源的输出，直到示波器监测到负载上电压数值已达到校准电压数值为止；上述要求可利用循环结构与比较结构实现。校准完成后系统将信号源的电压值写入校准数据的表格之中，用于后续调用。

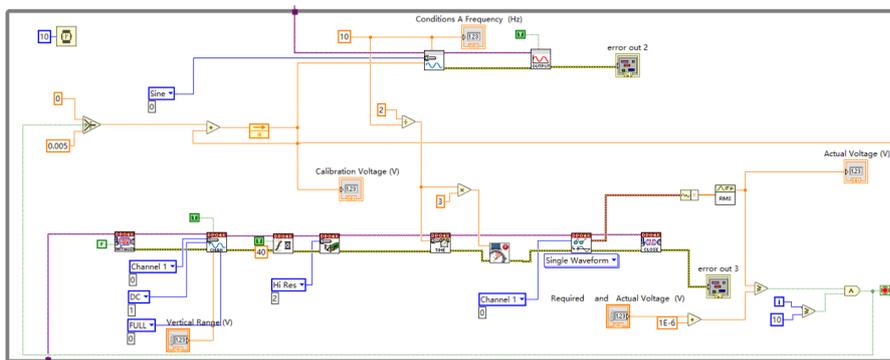


Figure 5. Source program diagram (calibration process)
图 5. 源程序图(校准过程)

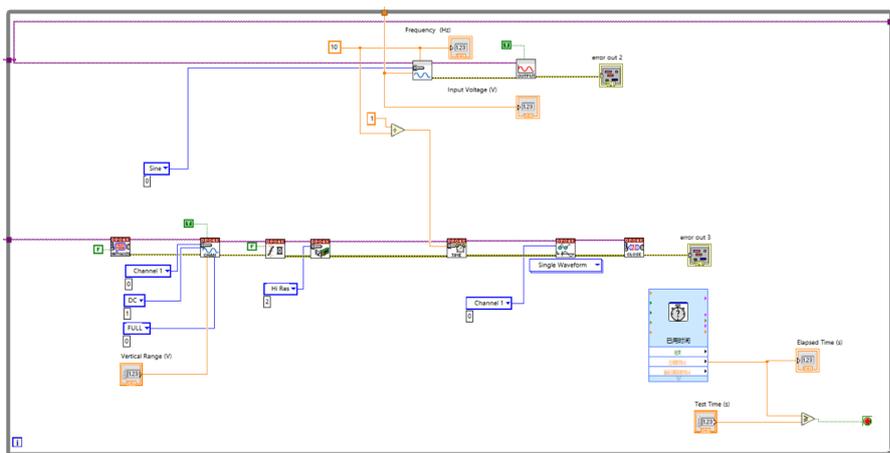


Figure 6. Source program diagram (testing process)
图 6. 源程序图(测试过程)

图 6 为经过校准之后的测试过程部分程序。测试开始时首先从指定路径下的校准数据之中读取校准数据之中的校准电压值，随后将自动设置信号发生器的输出频率以及输出幅值；由于标准之中明确了测试时间的要求，因此需要利用循环结构将测试时间与产品实际测试的时间作对比，在满足条件的情况下有条件地终止程序的运行。

图 5、图 6 所示的程序为图 3、图 4 所指的逻辑框图的具体表现形式。至此，电压畸变频谱测试系统已设计完成，为了实现该系统的良好可移植性，需要使用 LabVIEW 软件自带的应用程序封装模块，将整

个测试系统部署到对应的计算机之上即可开展使用。



Figure 7. Testing process (10 Hz, 52 mV)

图 7. 测试过程(10 Hz, 52 mV)



Figure 8. Testing process (10 Hz, 54 mV)

图 8. 测试过程(10 Hz, 54 mV)



Figure 9. Testing process (10 Hz, 56 mV)

图 9. 测试过程(10 Hz, 56 mV)

图 7 为信号发生器与功率放大器运行时的工作界面，如图 2 中测试系统框图所示：信号源输出经功率放大器随后耦至隔离变压器之上。图中信号源输出正弦信号的幅值及频率为(10 Hz, 52 mV)。由于目前信号源输出电压还未达到对应的校准系统之中要求的电压值，因此信号源以设计的 2 mV 电压逐渐步进

增加。如图 8 以及图 9 所示，信号源在频率不变的情况下，幅值逐渐增加为 54 mV、56 mV。

图 10 为运行该电压畸变系统的计算机以及配套的交换机以及示波器、耦合变压器、2 Ω 的等效精密负载。示波器之上显示的为信号源经功率放大器放大后的信号。图 11 为上位机的软件运行界面，软件运行完成之后会提示校准已完成并将校准的数据信息写入对应的 Excel 文件之中。

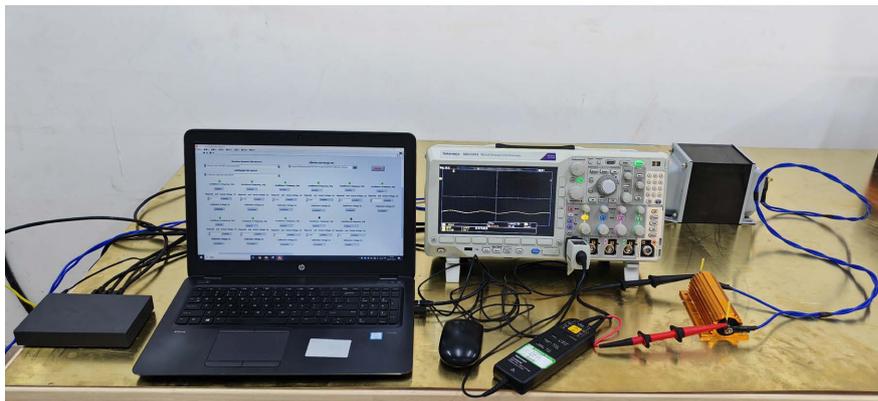


Figure 10. Test configuration diagram
图 10. 测试过程配置图

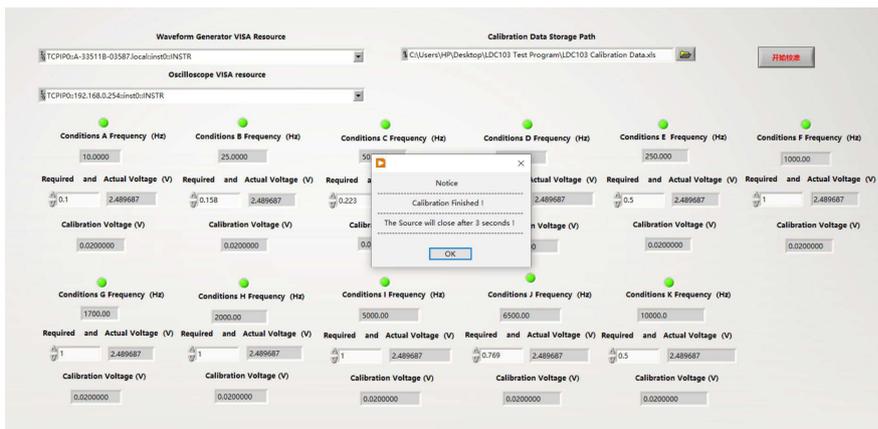


Figure 11. System test completion interface
图 11. 系统测试完成界面

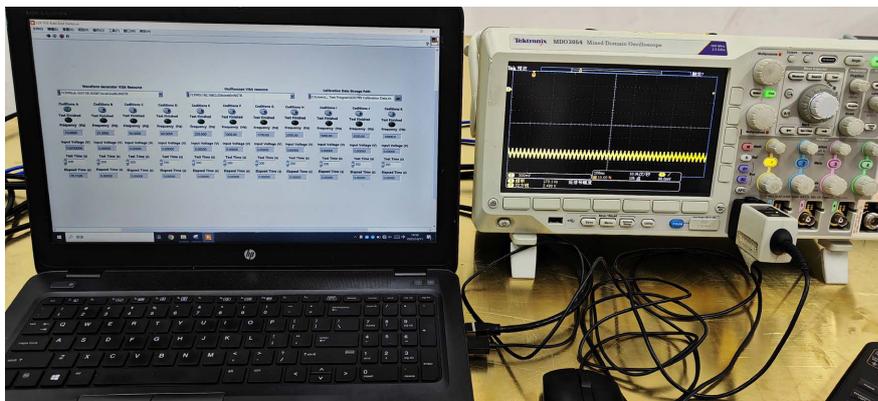


Figure 12. Testing program interface
图 12. 测试程序界面

图 12 为校准程序完成之后, 开始测试的界面。软件自动调用校准数据添加到图 13、图 14 的 Input Voltage 之中, 随后开始计时 5 min 测试时间。图 13、图 14 分别是程序在测试了 31.4135 ms 和 91.5613 ms 之后的上位机界面。当计时完成 5 min 之后, 程序自动停止输出完成 Conditions A 的测试, 其他测试条件分别点击输出即可。

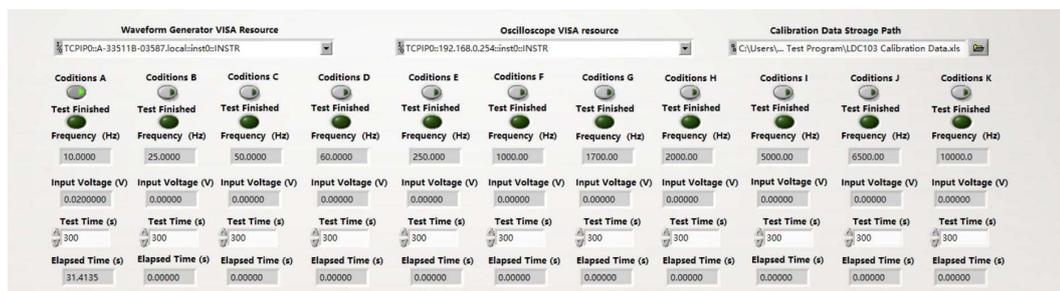


Figure 13. Conditions A testing process (elapsed time: 31.4135 s)

图 13. Conditions A 测试过程(经过时间: 31.4135 s)

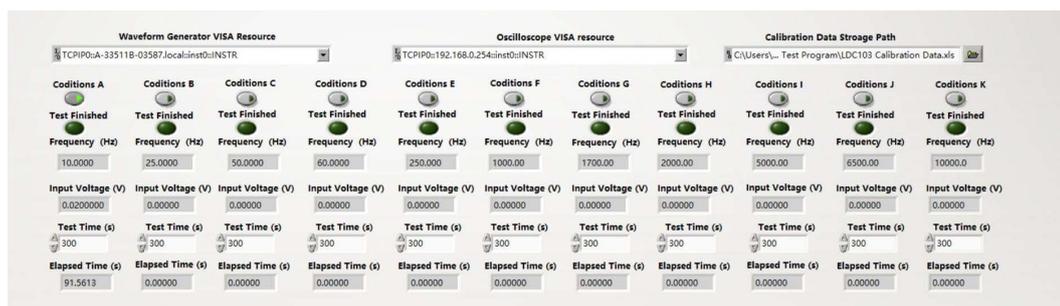


Figure 14. Conditions A testing process (elapsed time: 91.5613 ms)

图 14. Conditions A 测试过程(经过时间: 91.5613 ms)

通过软件与硬件的配合, 文中基于 LabVIEW 的电压畸变频谱测试系统是可实现的。依据相关标准的要求, LDC103 测试系统开发完善之后, 可在此基础上调节信号源的输出方法最终实现完成 LDC104 电压脉动的供电兼容性测试系统的开发。

4. 结论

本文通过 NI LabVIEW 软件环境设计一种用于车载用电设备电压畸变频谱的测试系统。该系统可通过网络交换机控制示波器以及信号发生器, 通过仪器间互相通信进而实现测试系统的校准以及测试过程。该系统软件界面清晰, 能够成功完成 HB 20326.8-2016 之中电压畸变频谱测试。由于车载设备的供电电压并非仅局限于直流 28 V, 因此本系统也可延伸到直流 270 V 以及直流 540 V 的机载设备的电源特性的测试之中。在后续的系统开发之中还需要不断提高软件的界面 UI 设计以及软件功能的拓展, 最终实现将整个机载设备供电特性测试要求完全囊括。

致 谢

感谢广电计量检测集团股份有限公司为本测试系统设计过程之中提供的测试仪器仪表。

参考文献

- [1] 马晓晨, 葛声, 相英. 一种通用飞机航电系统的综合处理机设计[J]. 电子技术, 2023, 52(3): 64-66.

- [2] 王文健, 王建强. 飞机直流供电特性测试系统畸变频谱参数校准方法[J]. 计测技术, 2018, 38(2):42-46.
- [3] 高唤梅. 机载用电设备供电兼容性设计与实现[J]. 科技与产业, 2021, 21(1): 209-213.
- [4] 中国航空工业集团. 机载用电设备的供电适应性方法[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2016.
- [5] 苏娟, 郑国昆, 张帆, 等. 基于 LabVIEW 图形化编程语言的软件架构设计方法研究[J]. 工程建设与设计, 2016(18): 196-197+200.