

FPGA 在线实验平台设计与在线实验方法研究

艾明晶, 杨群芳

(北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100191)

摘要:针对传统 FPGA(Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列)实验只能在本地完成的局限性,探索 MOOC(Massive Open Online Course, 大规模开放在线课程)在实验教学中的应用新模式,自主研发了 FPGA 在线实验平台。利用该平台,学生可以随时随地进行在线实验,从而突破时空限制;该平台支持以 FPGA 为核心的多门硬件类课程在线实验,使得多门课程衔接贯通,有助于培养提高学生的计算机系统能力。提出实现键盘鼠标接口在线实验和 VGA 实时显示的远程控制方法,解决了支持键盘、鼠标和 VGA 显示器的技术难题,拓展了平台功能,增加了在线实验项目的多样性和趣味性,有助于激发学生的学习兴趣和创新意识。开发的在线实验平台和在线实验方法已应用于实际教学中,并取得了很好的教学效果。

关键词:MOOC; 实验教学; FPGA 在线实验平台; 在线实验方法

中图分类号:G482; TP391.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-8829(2019)01-0019-05

doi:10.19708/j.ckjs.2019.01.004

Design of FPGA Online Experiment Platform and Research on Online Experiment Method

AI Ming-jing, YANG Qun-fang

(School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To solve the limitation that the traditional FPGA (Field Programmable Gate Array) experiments could only be done locally, a new application model of the MOOC was explored and a FPGA online experimental platform was developed independently. With this platform, students can do on-line experiments anytime and anywhere, thereby breaking through the restrictions of time and space. It supports multiple FPGA-based courses and interlinks them to each other, which helps to comprehensively improve students' capability of computer system design. At the same time, a remote control method for realizing online experiment of keyboard and mouse interface as well as VGA realtime display is proposed. In this way, the technical problems of supporting keyboard, mouse and VGA display have been solved. So it expands the functions of the platform, increases the variety and interest of the online experimental projects, and helps to stimulate students' interest in learning and innovation. The developed online experimental platform and teaching method have been applied in practical teaching and have achieved good teaching results.

Key words: MOOC; experimental teaching; FPGA online experimental platform; online experimental method

在高校人才培养中,实验教学是不可或缺的重要教学环节之一,是培养学生创新意识、深化理论知识理解、形成专业工程素养、提升实践动手能力的重要途径^[1]。

收稿日期:2018-10-16

作者简介:艾明晶(1965—),女,博士,副教授,从事 EDA 技术、数字系统设计和大学计算机的教学,研究方向为虚拟现实、视频编码、图像处理、嵌入式系统等;杨群芳(1993—),女,硕士研究生,研究方向为数字系统设计、虚拟现实。

近年来随着科学技术的进步以及人工智能的普及,数字信号处理已经变得尤为重要。尤其以 FPGA(Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列)为核心的数字信号处理电路,在不同的领域都发挥着重要的作用^[2-3]。高校计算机专业的硬件类课程一般包括数字逻辑、计算机组成原理、计算机接口与通信、计算机体系结构、嵌入式系统等课程,这些课程都有配套的实验环节。为了将多门课程的知识衔接贯通起来,现在国内外不少高校,都开发了基于 FPGA 的硬件

实验平台。一方面,使实验平台具有通用性,能够将硬件类课程贯通,实现课程之间互用;另一方面,使各课程之间在实验项目的设计上具有延续性,能体现出课程之间的衔接^[4]。然而,FPGA 实验教学通常只能在实验室里开展,受实验时间、实验场地、设备数量和实验形式等的限制,实验教学的灵活性不足,实验的延续性得不到保证,硬件设备利用率不高。因此,迫切需要一种新型实验教学模式,使得学生可以“随时、随地”开展实验,同时使昂贵的实验设备能够被充分利用,最大程度地发挥硬件设备的价值。

近几年来,以开放性、互动性、个性化为特征的大规模开放在线课程(Massive Open Online Course, MOOC)在国内外得到快速发展,并引发了全球教育界对传统教育模式的反思和变革。但是,现有的 MOOC 平台提供的开放课程大多为理论课程,而涉及真实实验操作的实验类课程还很少。研究 MOOC 环境下开放共享的实验教学的解决方法,不仅对于实验教学本身在教育模式变革中的发展有重要的意义,对于辅助线上理论课程的教学也有着非常重要的作用^[5]。

为此,一些高校和科研机构开始探索:如何将真实的硬件设备联入网络,同时利用 MOOC 的巨大优势,为广大学习者提供一个可以随时随地进行实验的开放式、真实的实验环境,从而实现真正的在线实验教学。近几年来,人们开发研制出各种 FPGA 在线实验系统^[4,6-14],建立了 FPGA 远程实验室,使得 FPGA 在线实验成为可能,从而有效克服实验教学受场地和时间约束的缺陷,激励学生自主学习和自主研究。

然而,现有的 FPGA 在线实验平台通常只提供按键和拨码开关等常规的输入设备以及 LED 和数码管等常规的输出设备。由于结构和技术的局限性,并没有提供键盘鼠标接口和 VGA(Video Graphics Array,视频图像阵列)接口,也没有考虑对键盘鼠标接口和 VGA 显示在线实验的支持。学生无法开展使用鼠标或键盘进行实验操作的在线实验,无法实时观看 VGA 显示,也就无法通过在线实验掌握键盘鼠标接口标准和 VGA 显示器标准的工作原理和设计方法;同时,这在很大程度上限制了在线实验项目的种类,降低了实验教学的多样性和趣味性。

1 FPGA 在线实验平台设计

1.1 FPGA 在线实验平台简介

北京航空航天大学计算机学院自 2014 年以来,以“任何人、任何时间、任何地点、多种设备”开展实践性学习为目标,积极探索 MOOC 在线教育在实验教学中的应用新模式,为学生提供不受时空限制的在线实验环境,自主研发了“基于 FPGA 的硬件类课程在线实验

平台”(简称 FPGA 在线实验平台)。该平台支持以 FPGA 为核心的多门硬件类课程在线实验,能够提供实验目标文件的远程下载、硬件设备远程操控、实验设计在线调试、实验结果实时反馈和自动评测等功能。并在北航学堂上建设了《计算机组成实验》、《计算机 EDA 设计》等 MOOC 课程,将 FPGA 在线实验平台嵌入其中,使得学生可以随时随地进行在线实验,从而突破了传统硬件类实验课程在时间、空间和形式上的限制,将实验教学场所从象牙塔尖延伸到学生宿舍、图书馆乃至地球上网络能访问的任一地点。

1.2 FPGA 在线实验平台的结构

FPGA 在线实验平台的整体架构如图 1 所示。

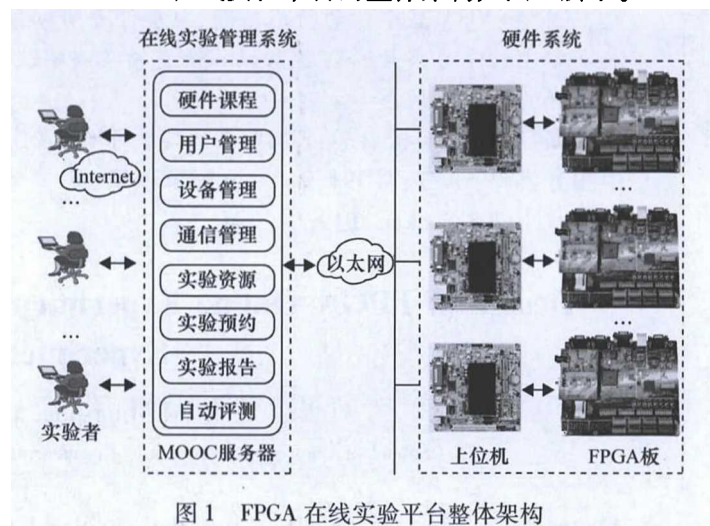


图 1 FPGA 在线实验平台整体架构

整个平台由硬件系统和软件系统两部分组成。其中,硬件系统主要包括上位机和 FPGA 板。

上位机采用 M58 工控板,M58 采用 Intel 低功耗 Atom 系列处理器。上位机主要有 3 个功能:①接收实验者在客户端上传的目标文件;②接收实验者在客户端发送的指令;③接收 FPGA 板上的 LED、数码管等输出设备的信号状态。

FPGA 板是实验的硬件载体,它包括实验 FPGA 和主控 FPGA(分别采用 Xilinx 公司的 Spartan6 系列 FPGA 芯片 XC6SLX100-2FGG676C 和 XC6SLX16-2FTG256C),还有输入设备(通用按键开关,拨码开关)和输出设备(LED,7 段数码管),以及一些外设接口(如 UART 串口,VGA 接口,PS/2 接口,蜂鸣器等)。每个实验所生成的编程目标文件都下载到实验 FPGA 中运行。主控 FPGA 是上位机与实验 FPGA 之间的桥梁,一方面,模拟输入设备产生实际激励信号发送至实验 FPGA;另一方面,实时采集 FPGA 板上所有输出设备和外设接口输出的信号,并传至上位机。

软件系统提供在线实验服务和设备控制管理功能,包括在线实验管理系统和上位机控制软件。在线实验管理系统部署在 MOOC 服务器上,上位机控制软

件部署于上位机中,它们协同完成实验者在 MOOC 平台上对实验设备的远端操控。

实验者所使用的终端称为用户前端。用户前端采用 SaaS(Software-as-a-service,软件即服务)的软件应用模式,用户(实验者)无需安装客户端软件,即可通过 Web 界面使用在线实验管理系统。

2 在线实验方法研究

2.1 实现键盘鼠标接口在线实验的远程控制方法

2.1.1 键盘和鼠标接口简介

键盘和鼠标是实现人机交互的重要输入设备。键盘、鼠标的接口形式因主机而异,过去的计算机都采用 PS/2 接口,而现在的 PC 机、笔记本电脑大多已用 USB 接口替代了 PS/2 接口,目前普遍使用 USB 接口的键盘鼠标。但是,仍有一部分 PS/2 接口的设备在使用,尤其是在军用加固设备领域,可长距离传输数据的优势使得 PS/2 接口广泛应用于军用加固计算机、服务器等设备。

此外,由于 PS/2 通信协议简单、容易理解和实现,所以特别适于作为教学内容学习和掌握;而 USB 通信协议相对要复杂得多,并不适合开展教学。故在 FPGA 实验中,PS/2 键盘鼠标接口实验常常被作为一类实验项目,通过此类实验,使学生了解双向同步串行通信协议的一般原理,进而掌握其设计方法。

PS/2 通信协议是一种双向同步串行通信协议。PS/2 键盘/鼠标可以发送数据到主机,而主机也可以发送数据到 PS/2 键盘/鼠标。主机一般指与 PS/2 设备相连的计算机。本文中,主机即实验 FPGA,实验者将电路的目标文件下载到实验 FPGA 中,从而产生实验的控制逻辑。

2.1.2 键盘鼠标接口在线实验方法主要思路

为了利用客户端的通用键盘或鼠标(不限于 PS/2 键盘或鼠标)进行在线实验操作,笔者提出一种远程控制方法,实现基于 FPGA 在线实验平台的 PS/2 键盘鼠标接口在线实验。

简单来说,通用键盘或鼠标产生的数据经历了用户前端—服务器—上位机—主控 FPGA—实验 FPGA 的通信过程,其中涉及了相应的编码转换和解码。该方法的基本思路如下:

(1) 用户前端捕获键盘事件或鼠标事件并进行编码转换。

实验者操作与终端相连的通用键盘或鼠标进行实验,用户前端实时捕捉键盘事件或鼠标事件,并进行编码转换,得到相应的 PS/2 键盘数据或 PS/2 鼠标数据(统称为 PS/2 数据)。

(2) 用户前端将 PS/2 数据打包后经服务器发送

给上位机。

用户前端根据服务器与上位机之间的通信协议,对 PS/2 数据按照约定的格式打包得到 PS/2 数据包,并将 PS/2 数据包通过 Websocket 发送给 MOOC 服务器;MOOC 服务器再转发给上位机。

(3) 上位机解析 PS/2 数据包,将 PS/2 数据发送给主控 FPGA。

上位机接收到 PS/2 数据包后,根据预设通信协议对 PS/2 数据包进行解析,得到 PS/2 数据,并将 PS/2 数据通过串口发送给主控 FPGA。

(4) 主控 FPGA 将 PS/2 键盘数据或鼠标数据发送给实验 FPGA。

主控 FPGA 中的键盘接口控制模块和鼠标接口控制模块对 PS/2 数据进行识别,区分其到底是键盘数据还是鼠标数据,然后将相应的数据通过模拟 PS/2 键盘接口和 PS/2 鼠标接口的 4 个特定引脚(PS/2 键盘的数据线和时钟线、PS/2 鼠标的的数据线和时钟线)分别发送至实验 FPGA 相应的 4 个特定引脚,从而使下载到实验 FPGA 中的目标文件产生相应的输出,完成实验。

2.2 实现 VGA 显示在线实验的远程控制方法

2.2.1 VGA 显示原理介绍

VGA 是 IBM 在 1987 年推出的一种视频传输标准,其具有分辨率高、显示速率快、颜色丰富等优点,在彩色显示器领域得到了广泛的应用。VGA 标准一直沿用至今,现在的液晶显示器也都兼容 VGA 标准。

采用 VGA 标准的显示器通过 VGA 接口与计算机内部的显卡相连。VGA 接口通常为 D 形三排 15 针接口。显示器只接受模拟信号输入,其中最重要的信号包含 R、G、B(红、绿、蓝)三原色信号和 HSYNC(行同步信号)、VSYNC(场同步信号)控制信号。

VGA 是一种使用模拟信号的视频传输标准,颜色信号 R、G、B 均为模拟信号,用红、绿、蓝这 3 种颜色可以随意配出自然界中的大部分颜色,因此采用 VGA 标准能够提供绚丽多彩的颜色。但在某些应用场合,并不需要显示彩色高分辨率的图像,如超市、车站、机场等公共场所的广告宣传和提示信息显示,工厂车间生产过程中的操作信息显示等。这时可以简单地采用数字量代替模拟量作为颜色信号 R、G、B,则能够显示的最大颜色数只有 $2^3 = 8$ 色,但 8 种颜色足矣。故在一些嵌入式系统中,广泛采用 VGA 进行图像显示,可以使得系统结构简单,降低成本,易于设计。

FPGA 拥有丰富的硬件资源,可重配置能力强,保密性好,是嵌入式设计的主流平台之一^[15]。故在嵌入式系统中,人们基于 FPGA 设计出各种图像采集与 VGA 显示系统^[16],甚至是视频采集、实时视频跟踪系统^[17]等。其中一个关键部分是设计 VGA 显示接口控

制电路,产生相应的 RGB 信号和控制信号,然后通过 VGA 接口将这些信号传输到显示设备中,从而使显示器显示各种图像。在 FPGA 教学中,VGA 显示接口控制电路设计往往是必不可少的重要内容之一。

2.2.2 VGA 显示在线实验方法主要思路

在线下实验中,实验者可以通过 VGA 线缆直接将一个 VGA 显示器与 FPGA 板上的 VGA 接口相连,从而显示图像。但是,做在线实验时,实验者是无法看到远程 VGA 显示器上的画面的;而且,VGA 显示器的输出信号并不是简单的电平或脉冲信号,而是具有一定时序关系的多个信号,数据量巨大,直接传输根本无法保证实时性。因此,需要考虑如何将 VGA 显示器的画面实时回传给客户端,借用实验者的显示器复现实验产生的图像画面。

为此,提出一种 VGA 远程显示控制方法,实现 VGA 信号采集和压缩、本地分发推流以及在线实时播放。VGA 信号的转换和传送过程如图 2 所示。

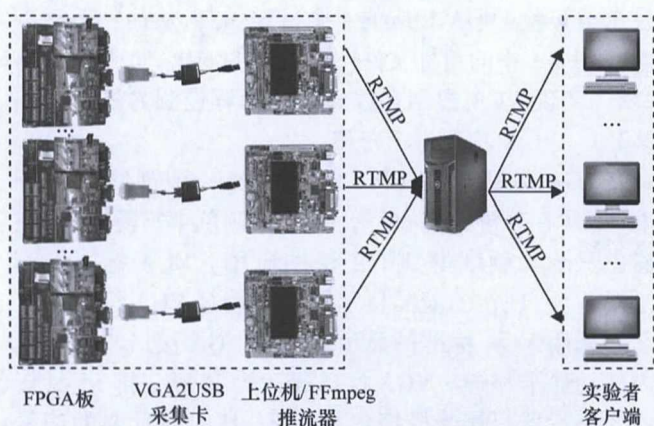


图2 VGA信号的转换和传送过程

该方法的关键是采用VGA2USB视频采集卡将VGA模拟信号转换为压缩的视频流,再通过网络进行传送。VGA2USB视频采集卡是外置VGA信号采集盒,它能够实时捕获计算机或嵌入式系统输出的VGA模拟信号;并将其转换成数字信号;再编码成视频流,通过USB2.0接口回传到计算机或嵌入式系统中。

VGA信号的转换和传送过程具体如下:

(1) VGA2USB视频采集卡对FPGA板输出的VGA模拟信号进行实时采集、压缩,转换成flv(Flash-Video)格式的视频流。

flv是现在非常流行的流媒体格式,由于其视频文件体积小、封装播放简单等特点,使其很适合在网上应用;此外,由于当前浏览器与Flash Player紧密结合,使得网页播放flv视频轻而易举,这也是flv流行的原因之一。flv视频格式是Adobe公司设计开发的,目前已经免费开放。

flv格式文件是一个二进制文件,包括文件头(Flv

Header)和文件体(Flv Body)两部分,其中文件体由一系列的Tag及Tag Size对组成。Tag又可以分成3类:audio、video、script,分别代表音频流、视频流和脚本流(关键字或者文件信息之类)。

(2) 通过视频采集卡与上位机相连的USB线将flv视频流传送到上位机,上位机上运行的FFmpeg推流器接收视频流数据。

实时流媒体编码工具FFmpeg是一套可以用来记录、转换数字音频、视频,并将其转化为流的开源计算机程序。它提供了录制、转换以及流化音视频的完整解决方案。FFmpeg从视频采集卡处获取视频流数据,并设置相关参数(VGA2USB采集卡的设备ID,SRS服务器IP地址,上位机的ID)。

(3) FFmpeg推流器将视频数据以RTMP(Real Time Messaging Protocol,实时消息协议)流的形式推送到SRS(Simple-RTMP-Server)流媒体服务器端;SRS服务器搜集来自多个上位机推送的视频流,并根据用户请求提供正确的视频流供用户访问。

RTMP是一种进行实时数据通信的网络协议,主要用来在Flash/AIR(Adobe Integrated Runtime,Adobe集成运行环境)平台与支持RTMP协议的流媒体/交互服务器之间进行音视频和数据通信。

RTMP协议规定,播放一个流媒体有两个步骤:①建立一个网络连接(NetConnection);②建立一个网络流(NetStream)。其中,网络连接代表服务器端应用程序和客户端之间基础的连通关系。网络流代表发送多媒体数据的通道。服务器与客户端之间只能建立一个网络连接,但是基于该连接可以创建很多网络流。

播放一个RTMP协议的流媒体具体需要以下几个环节:握手、建立连接、建立流、播放。RTMP连接都是以握手作为开始的。建立连接阶段用于建立客户端与服务器之间的“网络连接”;建立流阶段则用于建立客户端与服务器之间的“网络流”;播放阶段用于传输视音频数据。

(4) 当目标文件烧录到FPGA中后,实验者单击客户端实验界面上方的“VGA显示”按钮,实验界面将弹出一个显示器窗口,显示实验者所设计的VGA画面。

最终,客户端通过Internet访问流媒体服务器,使用基于Flash技术的播放器(如Adobe Flash Player)即可实时播放视频,从而实现FPGA在线实验平台的远程VGA显示。

3 在线实验平台应用

基于FPGA在线实验平台可以支持多门课程。目前,FPGA在线实验平台配置了40套设备(系统规模还可以根据需求随时扩充),在各门课程运行期间,能

够 7 × 24 h 为学生提供在线实验服务,部分实验环节还可通过互联网面向全球开放运行,以实现优质实验教学资源的开放共享。平台已多轮次在笔者所在学校的《计算机组成实验》、《计算机 EDA 设计》和《数字系统设计》课程中使用,实现了多门硬件课程的在线实验教学,与课内实验起到了很好的互补作用,形成了一种线下实验和线上实验相结合的实验教学新模式。

笔者开发了对抗性弹球游戏在线实验,该实验项目在《数字系统设计》课程中被作为大作业选题使用。学生在离开实验室后,在任何时候,可以在宿舍、图书馆或者有网络的任何地方,通过连接于终端上的通用键盘和鼠标,操纵显示在实验界面中的游戏界面上的挡板,远程进行实验,来验证设计的正确性,从而保证了实验的连贯性,显著提高了学生的学习效率。

为了验证所提出方法的有效性,结合对抗性弹球游戏在线实验,对在线实验平台的性能进行了测试。测试环境配置如表 1 所示。

表 1 测试环境详细配置

环境类型	环境名称	环境参数
硬件环境	笔记本电脑	操作系统:Windows 7
		CPU: Intel Core i3 M 350 @2. 27GHz
		显卡: ATI Mobility Radeon HD 5650 内存: 4GB
软件环境	开发平台	Visual Studio Code 1. 19
	开发语言	JavaScript

使用 JavaScript 语言在 Visual Studio Code 平台上编写脚本,捕捉实验者的键盘/鼠标被触发的时间点以及客户端实验界面收到 SRS 服务器传回的视频图像的时间点。通过多次测试可以发现,从按下键盘/鼠标至实验界面的 VGA 画面发生响应的时间,即全过程时延,平均低于 700 ms。

分析可知,当实验者希望通过键盘/鼠标控制游戏画面中的挡板,在键盘或鼠标按下时,键盘或鼠标产生的数据经历了用户前端—MOOC 服务器—上位机—主控 FPGA—实验 FPGA 的通信过程。由于字符指令所占带宽较小,故该传输过程对带宽没有限制,时延为毫秒级。

由于实验者的“对抗性弹球游戏在线实验”目标文件已经远程上传、下载到实验 FPGA 中,所以该目标文件会自动运行,产生预定的逻辑,随时响应键盘/鼠标操作,使游戏画面中的挡板上移或下移。则实验 FPGA 产生的 VGA 信号经历了实验 FPGA—VGA2USB 采集卡—上位机/FFmpeg 推流器—SRS 服务器—用户前端的通信过程。

上述数据回传过程的主要时延在于 VGA2USB 进行编码的过程,即由 VGA 信号转换为 flv 格式视频流的过程。最终,小巧的 flv 格式视频流传输到 SRS 服

务器,服务器再传送给客户端界面进行播放。实验者只需单击客户端实验界面上方的“VGA 显示”按钮,实验界面将弹出一个显示器窗口,刷新显示实验者所设计的 VGA 画面。

实验平台使用的 VGA2USB 采集卡为科伍 KW520 采集卡,其最大采样率为 230 Mpixels/s。若适应 640 × 480 的视频模式,根据其官方数据,其刷新率在典型应用下为 10 次/s;而在 640 × 480 的分辨率下,WinXP 的刷新率(每秒钟填充图像的帧数)为 28. 0 f/s,因此可以实现实时刷新。故整体时延在线实验的过程中是可以接受的。

学生在完成“对抗性弹球游戏在线实验”时,充分发挥其想象力,对设计进行优化、改进和创新,有效提升了其系统设计能力和自主设计能力,培养了创新精神,取得了很好的教学效果。

由于在线实验打破时空限制,学生开展实验的方式更加灵活,投入实验的时间明显增加,实验学习效果有显著提升。

4 结束语

采用一体化设计的 FPGA 在线实验平台,保证了线上实验和线下实验的实验设备的一致性,能够显著提高学生的学习效率;平台同时具有一台多用、输入设备和输出设备丰富、普适性强等特点。所提出的实现键盘鼠标接口在线实验和 VGA 实时显示的远程控制方法,扩展了现有 FPGA 在线实验平台的功能,极大地丰富了实验的种类,增加了实验的趣味性。

笔者开发的在线实验平台和在线实验方法已被应用于实际教学中,并取得了很好的教学效果。实践表明,借助于这个平台,学生可以开发更多有趣的游戏或者复杂的系统,从而进一步激发学习兴趣,有利于学生开展自主学习、自主设计和创新。

参考文献:

[1] 张菊芳,沈秀,杨殷伟. 高校实践教学质量管理平台的构建与实践[J]. 实验技术与管理,2014,31(2):172-173.
[2] 李家成,沈艳霞,周琦,等. 基于 FPGA 的数字式大气电场仪的设计与实现[J]. 测控技术,2017,36(3):107-110.
[3] 翟学明,杨磊,杨亮. 基于 FPGA 的 GPS 同步授时与守时方案设计与实现[J]. 测控技术,2016,35(5):153-156.
[4] 张彦航,刘宏伟,陈惠鹏,等. 基于 FPGA 的硬件类课程远程虚拟实验平台[J]. 实验技术与管理,2017,34(1):16-20.
[5] 孙青,艾明晶,曹庆华. MOOC 环境下开放共享的实验教学研究[J]. 实验技术与管理,2014,31(8):192-195.
[6] El-Medany W M. FPGA remote laboratory for hardware e-learning course [C]//2008 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering. 2008:106-109.

(下转第 28 页)

- ① 打开测试台电源总开关,指示灯处于点亮状态;
- ② 启动进入上位机测试程序,在电源与万用表通信前,按提示打开电源和万用表的开关,并确认适配器箱前面板的开关处于打开状态;
- ③ 在设备内部器件自检完成后,将设备与产品用检测电缆连接,并确保连接牢靠;
- ④ 在识别到对应的配电装置后,将待测飞机配电装置与接触器箱前面板进行连接,进行装置的检测。

4.3 测试结果

飞机配电装置各项测试标准如表 2 所示。

表 2 飞机配电装置测试台电气性能测试标准

测试项目	测试标准
自保开关、熔断器和直通线导通性	电阻 $< 2\Omega$ (含所在线路电阻)
二极管压降	压降 $< 1V$
继电器/接触器线圈电阻	$6\Omega < \text{电阻} < 7k\Omega$ (含所在线路电阻)
继电器/接触器吸合/释放电压	直流: 吸合电压 $< 15V$; 释放电压 $< 5V$; 交流: 吸合电压 $< 100V$; 释放电压 $< 30V$;
继电器触点电阻	电阻 $< 2\Omega$ (含所在线路电阻)
直流自保开关自动断开时间	断开时间 $< 15s$
交流自保开关自动断开时间	断开时间 $< 25s$

从图 7、图 8 中可以看出,装置继电器/接触器吸合电压在 $8.0 \sim 13.0 V$,释放电压在 $1.0 \sim 3.0 V$ 范围内,直流自保开关自动断开时间测试在 $0 \sim 15 s$ 范围内,符合表 2 测试标准。

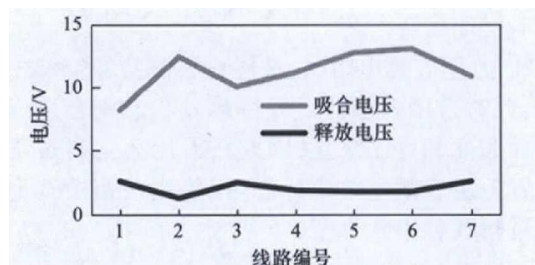


图 7 被测配电装置继电器/接触器吸合/释放电压测试结果

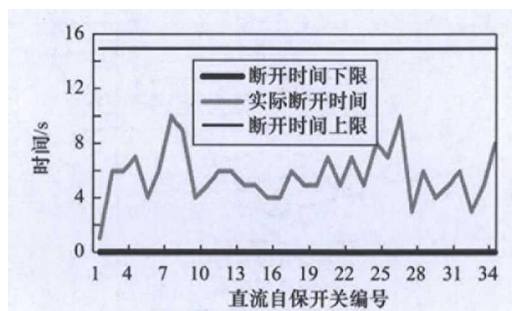


图 8 被测配电装置直流自保开关自动断开时间测试结果

5 结束语

为满足飞机多种配电装置各种电气性能测试的需要,通过上位机软件的开发,研制上位机软件自动控制的综合测试台,并对配电装置进行实际测试,测试结果表明其有效性,使该系列飞机配电装置的定期检测工作更加便利。

参考文献:

- [1] 陈丽. 飞机配电技术浅析[J]. 技术与市场, 2018, 25(6).
- [2] 郎建才. 关于低压断路器短路分断能力检测的验证方法的探讨[J]. 低压电器, 2009(17): 53-54.
- [3] 吴明星. 民用飞机供电系统设计[J]. 技术与市场, 2015, 22(11): 7-9.
- [4] 张杰, 杜含杰. 飞机常规配电装置电压降要求及其控制方法研究[J]. 天津科技, 2016, 43(9): 59-62.
- [5] 尹梅莉. 飞机二次配电管理装置 (SPDA) 自动测试系统设计[C]//2015 航空试验测试技术学术交流会论文集. 2015: 4.
- [6] 张晓斌, 石海平, 陈艳, 等. 基于 LabVIEW 的飞机二次配电管理装置 (SPDA) 测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(4): 763-769.
- [7] 杨光, 杨波. 无人机电气配电主控制盒自动测试系统的研制[J]. 测控技术, 2009, 28(4): 35-38.
- [8] 潘庆国, 李金猛, 阚艳, 等. 一种飞机电路板自动测试系统的研制[J]. 测控技术, 2018, 37(5): 109-117.

(上接第 23 页)

- [7] Toyoda Y, Koike N, Li Y. An FPGA-based remote laboratory: Implementing semi-automatic experiments in the hybrid cloud[C]//2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation. 2016, 24-29.
- [8] 黄帅, 刘瑞通, 李茜铭, 等. 一种 C/S 网络的 FPGA/CPLD 实验系统设计[J]. 电子技术, 2011(2): 12-14.
- [9] 孙丹, 黄亚玲, 吴明星. 基于虚拟仪器的 FPGA 实验平台设计[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(4): 329-330.
- [10] 杨龙军, 陆洪毅. 基于云计算平台的计算机硬件远程实验室实现. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(22).
- [11] 崔贯勋. 基于云计算技术的 MOOC 实践教学平台[J]. 实验室研究与探索, 2015(8): 119-123.

- [12] 文卉, 常晟, 蔡志强. FPGA 实验虚拟仿真平台建设的研究[J]. 电子技术与软件工程, 2016(2): 86-87.
- [13] 崔贯勋. 基于 FPGA 的在线硬件实践教学平台的设计[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(4): 153-156.
- [14] Zhang Y X, Chen Y, Ma X J, et al. Remote FPGA lab platform for computer system curriculum[C]//Proceedings of the ACM Turing 50th Celebration Conference-China. 2017.
- [15] 郑争兵. 基于 DSP Builder 的 FIR 数字滤波器设计与验证[J]. 陕西理工学院学报: 自然科学版, 2013, 29(2).
- [16] 杜宗展, 王振河, 冯迎春. 基于 FPGA 的 VGA 图像显示系统的设计[J]. 现代电子技术, 2015, 38(16): 95-99.
- [17] 刘紫燕, 冯亮, 祁佳. 一种基于 FPGA 的实时视频跟踪系统硬件平台设计[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(7).

□