

# 航电设备通用检测维护台的设计

田宇<sup>1</sup>, 马跃<sup>1</sup>, 江静<sup>2</sup>, 张博<sup>3</sup>

(1. 海军驻天津八三五七所 军事代表室, 天津 300308; 2. 中航飞机股份有限公司, 西安 710089;  
3. 天津津航计算技术研究所 天津市航空电子综合显示控制重点实验室, 天津 300308)

**摘要:** 为了适应机载武器装备系统的多样化以及通用性要求, 搭建了基于 PXI 总线的航电设备通用检测维护台, 在系统架构、硬件设计以及软件开发等各方面进行了通用性设计; 该航电设备通用检测维护台基于 PXI 构架, 挂装不同种类的适配器, 操作通用平台上的人机接口, 可满足多种设备的检测、测试任务; 航电设备通用检测维护台在一个机柜内实现了人机交互操作, 大功率、高精度、多种类通用电源及 PXI 智能测试平台等的高度集成; 该通用平台具有良好的通用性和扩展性, 适用多种机型、多种航电设备; 通用平台已在某型航电设备的检测维护中完成了工程验证, 系统性能稳定, 适用性强, 可实现多种航电设备的检测维护工作, 也可推广至海军舰艇、兵器车载装备等。

**关键词:** 通用测试; PXI; NI; 维护检测

## Design of General Inspection Maintenance Platform on Avionics Device

Tian Yu<sup>1</sup>, Ma Yue<sup>1</sup>, Jiang Jing<sup>2</sup>, Zhang Bo<sup>3</sup>

(1. Navy's resident office in 8357 Research Institute, Tianjin 300308, China; 2. Avic Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089, China; 3. Tianjin Jinhang Computing Technology Research Institute, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** In order to accommodate the diversification and universality of the airborne weapon equipment system, a general inspection maintenance platform on avionics device is built. The system architecture, the hardware design, the software development, etc. are designed on foundation of universality. The general platform is architected based on PXI. Mounting different adapters, through the man-machine interface on the general platform, the inspection and testing tasks of various devices are satisfied. The general inspection maintenance platform on avionics device realizes human-computer interaction within an equipment cabinet, highly integrates the high-power high-precision polytype general power supply, the PXI intelligent test platform, etc. The general platform has good universality and augmentability, suitable for various aircraft type and various avionics device. The general platform has been verified on some avionics device. The system has stable performance and high applicability, which can realize the inspection and maintenance of various avionics devices and popularize to naval vessels, vehicle-mounted weapon equipment, etc.

**Keywords:** general test; PXI; NI; maintenance & test

## 0 引言

随着机载武器装备系统的多样化、智能化, 作为机载武器系统信息采集、处理与控制中心的航电设备产品种类繁多、技术复杂, 对其检测、维护的通用性、操作使用简便性和经济性等的要求越来越高<sup>[1]</sup>。传统测试设备分别针对空航、海航及陆航等不同应用场合设计, 不同机型或各类机载设备测试系统种类繁多, 测试设备具有局限性, 造成资源浪费。现有的自动测试设备(简称 ATE)<sup>[2-3]</sup>设备量庞大, 造价高, 无法大批量装备部队。因此, 迫切需要一种功能集成多种测试设备甚至可替代 ATE 的高集成度通用检测维护设备。

在此背景下, 设计了一个航电设备通用检测维护台(以下简称通用平台), 通用平台是基于 PXI 技术<sup>[4-5]</sup>构成高度集成的柔性测试系统, 具有系统集成化程度高、测试资源丰富、可检测设备种类多、体积小、造价低等明显优势。通用平台加挂相应适配器, 适用多种机型、多种航电设备。

通用平台采用虚拟仪器思想, 在一个机柜内实现了人机交互, PXI 智能测试平台, 大功率、高精度、多种类通用电源等的高度集成。采用综合化、通用化、模块化设计思想, 系统易于扩展或升级。

## 1 总体设计

### 1.1 主要功能

- 1) 完成模拟信号、开关量、脉冲信号、RS232/RS 422/RS 485 串行总线、HB6096 总线、GJB289A 总线和 PAL/VGA/LVDS 视频等信号激励、采集与测试;
- 2) 对测试资源及测试过程的管理与控制;
- 3) 具有显示器、周边键、键盘、鼠标和操作开关或按钮等人机接口, 可实现系统加/断电、测试模式选择、测试流程控制等功能;
- 4) 挂装不同种类的适配器, 可满足多种被测件的检测、测试任务;
- 5) 具有适配器识别功能;
- 6) 对测试结果文件进行管理;
- 7) 与库管中心联网;
- 8) 具有可扩展能力。

收稿日期: 2017-05-12; 修回日期: 2017-05-27。

作者简介: 田宇(1984-), 男, 河北滦南人, 硕士, 工程师, 主要从事装备质量监督方面的研究。

### 1.2 总体架构

通用平台加挂相应适配器构成航电设备通用检测维护台，在适配器端级联被测件，操作通用平台上的人机接口，完成对航电设备单台件测试、老炼等工作。通用平台主要由机柜、综控箱、带 20 个周边键的 17 ~ 液晶显示器、鼠标键盘托架、接口扩展单元、PXI 系统、VPC9025 接收器、电源、精密二次电源和适配器等部分组成，总体架构如图 1 所示。

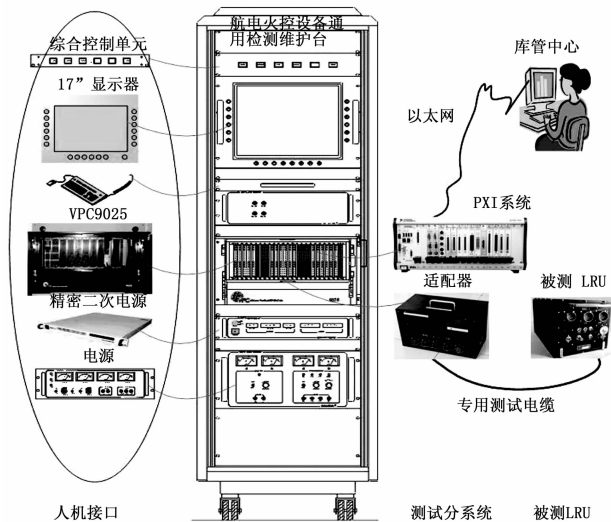


图 1 通用平台架构示意图

通用平台经适配器完成对航电设备单台件的测试功能，通用平台具有通用激励和采集资源，适配器完成通用平台与被测件之间的信号调理。利用通用平台测试程序可自动或手动完成对航电设备的测试及老炼任务，测试流程结束后给出被测设备完好性结论，实时记录在本地，同时可将测试结果上报库管中心，方便航电设备的集中统一管理。也可从库管中心下载库存清单或测试、老炼任务清单等信息，按任务清单完成测试、老炼任务。

PXI 系统具备自检能力，结合软件实现对 PXI 系统主机模块及其它各种功能模块自检操作。所有模块自检全部正常时自动进入主流程界面，如果有模块自检故障，则弹出自检结果界面，提示故障模块信息。

通用平台通过 VPC9025 接收器连接至各型适配器，适配器与被测件通过专用电缆进行连接。适配器完成通用平台与被测件之间的信号调理、分配和转换。适配器还具有对被测件的自动识别能力，以确保被测件安全。

操作人员只要在通用平台上根据被测件型号换装相应的适配器就可以自动完成对各种航电设备的检测及老炼工作。

## 2 硬件设计

### 2.1 PXI 系统

PXI 系统包括机箱、电源模块、主机模块等 13 种功能模块和 3 个用于扩展功能的备用插槽，硬件结构如图 2 所示。

1) 机箱：机箱选用 NI 公司<sup>[6]</sup> 的 PXI 标准机箱 PXI-1045，该机箱结合高性能 18 槽位 PXI 背板和高输出功率电源，并对结构进行了优化设计，有良好的兼容性和可用性，并提供了先进的时序同步功能。

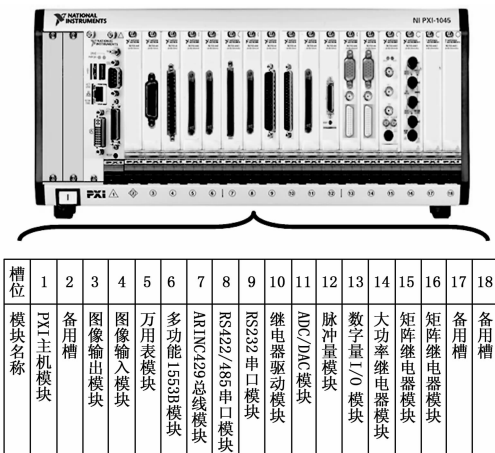


图 2 PXI 系统构成示意图

2) PXI 主机模块：选用通用货架产品 NI PXI-8109 2.66 GHz 双核 PXI 嵌入式控制器<sup>[7]</sup>，采用了 2.66 GHz 双核 Intel Core i7-620M 处理器，适用于 PXI 和 CompactPCI 系统。PXI-1045 机箱结合 PXI-8109 主机板，提供了一个紧凑的、高性价比、基于 PC 技术的测试和控制应用程序的平台。

3) 多功能 1553B 模块：选用 Alta 公司的 CPCIC3-1553，该模块需要叠加在 3U 或 6U 的 PMC 载板上使用，采用了 2 通道多功能方式，可支持 RT、MT、BC 多功能同时工作，并支持同时模拟 32 路 RT 的功能。

4) ARINC429 总线模块：选用 Alta 公司的 CPCIC3-A429 接口卡，依托 Alta API 软件支持该模块可编码和解码 ARINC 429 通讯的各类 Label/Word 信息。

5) RS232 串口模块：采用 NI PXI-8430/8，可进行 1 Mbit/s 高速通信，支持 8 路串行接口。能以 57bps 至 1Mbps 的可变波特率进行数据传输，对于非标准波特率可达 1% 精度，标准波特率下可达 0.01% 精度。借助高性能 DMA 引擎，不仅能实现高数据处理能力，而且对 CPU 占用最小。具有使用超线程与多处理器的强大能力。

6) RS422/485 串口模块：采用 NI PXI-8431/8，可进行 3 Mb/s 高速通信，支持 8 路串行接口。对于非标准波特率精度可达 1%，标准波特率精度可达 0.01%。借助高性能的 DMA 引擎，可实现高数据处理能力，而且 CPU 占用很低，特别适用于多个串行端口同步通信的应用。

7) 数字量 I/O 模块：采用 NI PXI-6515，是用于 PCI、PXI 或 CompactPCI 机箱的 30 V 组隔离数据采集 (DAQ) 设备。包含用于漏极电流的 32 条数字输入线和 32 条数字输出线，1 个看门狗定时器，数字滤波，以及可编程加电状态。

8) 继电器驱动模块：采用 NI PXI-2567，是 64 通道的外部继电器驱动模块，采用漏极开路门输出 (OD 门)，可驱动多种类型的外部继电器。当现有继电器模块或测试系统的电流和电压水平无法满足继电器的要求时，可以提供高电压、高电流的继电器驱动。通过连接外部电源，PXI-2567 的每个通道可以提供 50 V 或者 600 mA 的驱动能力，如果不通过外部电源供电，PXI-2567 可以从 PXI 背板的 5 V 电压上最大可达到 1.25 A 的电流，或者从 12 V 电压上最大可达到 500 mA 的电流。

9) 大功率继电器模块：采用 NI PXI-2564，提供 5 A 负

载电流, 有 16 个独立的单刀单掷继电器, 具有低接触电阻和高隔离电压, 具有过高温保护, 能够保证在继电器的开关频率范围内, 控制整板的功耗。

10) 矩阵继电器模块: 采用 NI PXI-2503, 可作为多路复用器或矩阵开关使用。可切换 60 VDC 或 30 V<sub>rm</sub> 的信号。对于低压测量 (如热电偶信号), 具有精确测量所需要的低温漂。

11) ADC/DAC 模块: 采用 NI PXI-6229, 是低成本多功能的数据采集卡 (DAQ)。最多可支持 80 个模拟输入, 48 个数字 I/O 线, 4 个模拟输出, 两个计数器/定时器, 数字触发。

12) 万用表模块: 采用 NI PXI-4065 6 位半数字万用表, 主要用于电压、电流和电阻测量或二极管测试。

13) 脉冲量模块: 由于目前市场上无合适的货架产品可以选择, 需要自己研制 PXI-C403 脉冲量模块, 实现 1 Hz~10 MHz 脉冲量信号的输出和采集功能。该模块包括 32 路脉冲量采集和 32 路脉冲量输出, 采用数字频率合成技术, 可实现脉冲频率的连续可调, 脉冲量计数器可级联。

脉冲量输入通道采用 32 位寄存器, 可工作在计数器或频率计模式; 采用数字频率合成可输出 1 Hz~10 MHz 脉冲, 输出频率通过软件设定; 脉冲量采集可工作在计数器模式或频率计模式, 频率计采样间隔可设定。

14) 图像输出模块: 采用自己研制的 PXI-C202 图像输出模块, 实现视频信号 (AV、VGA、LVDS) 的输出功能, 与 PXI 总线的主板配合, 将所需的视频或图像信号输出到前面板各端口。采用高速 DSP 处理器进行视频信息的处理和显示, 外部视频信号可直接连接在模块的 AV、VGA 或 LVDS 接口上。

15) 图像输入模块: 采用自己研制的 PXI-C203 图像输入模块, 与 PXI 主板和显示设备配合, 实现视频信号 (AV、VGA、LVDS) 的采集、压缩、存储, 并可在显示设备上显示。采用高速 DSP 处理器进行视频采集和压缩, 外部视频信号可根据种类直接连接在模块的 AV、VGA 或 LVDS 接口上。

16) 备用插槽: 系统预留了 3 个备用插槽可用于扩展检测功能, 如加入光纤通道航空电子环境 (FC-AE) 模块可完成航空电子环境 (FC-AE) 功能测试, 而加入光纤通道音视频 (FC-AV) 模块又可完成光纤通道音视频 (FC-AV) 功能测试。

该通用平台也可增加一个带屏蔽隔离的独立机箱单元以实现对抗电设备中雷达、电子对抗等射频设备的测试功能。

## 2.2 VPC9025 接收器

VPC9025 接收器是专用于虚拟仪器测试设备使用的快速挂接适配器或被测设备的面板产品, 电缆组件的一端连接 PXI 系统中对应模块插头, 另一端与 VPC9025 发送器对应接口用于直接挂装 VPC 9025 发送器。VPC9025 可以根据需要调整连接器模块, 连接器模块可以混合使用, 以适应不同的信号连接要求。VPC9025 接收器与 PXI 系统的连接形式如图 3 所示。

## 2.3 适配器识别信号

采用 NI PXI-2564 大功率继电器模块第 1、2 路继电器在识别时刻由软件控制通断, NI PXI-4065 万用表模块测量每个适配器内设置的规定电阻值, 由软件算法自动实现适配器识

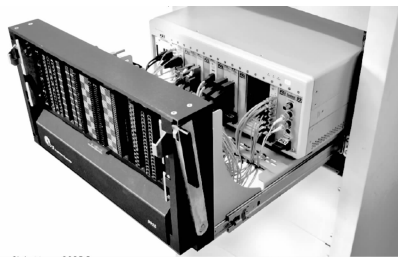


图 3 VPC9025 接收器与 PXI 系统的连接形式示意图

别, 只有当挂装的适配器与通用平台启动流程对应时, 测试流程才会顺利进行, 确保了通用平台、适配器及被测件的设备安全。

## 3 软件设计

### 3.1 软件平台结构设计

通用平台调度、管理软件主要实现身份验证登录、操作员管理、设备自检、接口模块测试用例管理、测试机型配置、机型测试用例管理、测试用例面板与库管中心信息交互等功能。用户登录后的管理流程如图 4 所示。

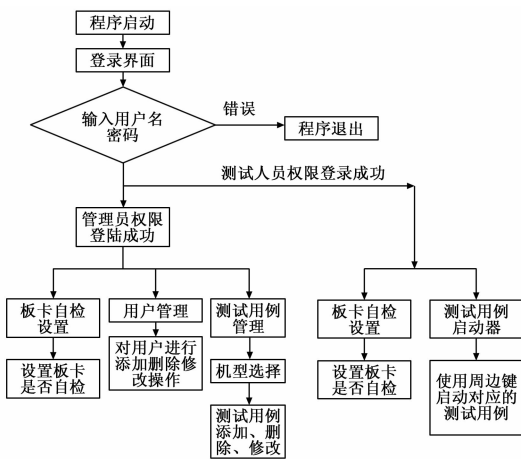


图 4 管理流程示意图

#### 3.1.1 身份验证登录和操作员管理模块

用户启动软件后首先出现登录窗口, 输入具有管理员权限的用户名和密码后才可以进行操作员管理、添加/删除测试用例等操作。普通的操作人员登录后直接进入测试用例面板, 所有登录信息 (包括日期、时间、用户名、用户 ID 等) 将存储在本地数据库中。

#### 3.1.2 设备自检模块

软件启动后首先对 PXI 通用测试机箱中的硬件模块进行自检操作, 然后向操作员报告当前硬件模块的工作状态是否正常, 操作人员可以在软件界面上看到硬件模块是否可用的信息。

管理程序界面分为菜单栏、快捷按钮栏、板卡或机型选择窗口、测试用例显示窗口、属性窗口和操作记录输出窗口。

在模块或机型选择窗口点击某个硬件模块后, 属性窗口中将显示该模块的技术指标、工作环境等信息, 同时在测试用例显示窗口中将显示目前该模块可用的 DEMO 测试用例。此外, 操作人员也可以自行选择需要自检的模块进行测试,

### 3.1.3 接口模块测试用例管理模块

软件默认添加 PXI 机箱内的所有模块的单板测试用例，用户可以调用单板测试用例程序验证模块功能或进行实际的测试操作，也可以自行编写单板测试用例程序并注册到单板测试用例管理模块中。当从设备列表中选择某个硬件模块后，测试用例显示窗口中将显示对应该模块的已注册的测试用例程序，属性窗口可提供该测试用例的相关信息，如测试内容、硬件环境要求、操作步骤等信息，运行该测试用例可进行实际的信号输出或数据采集测试。

### 3.1.4 测试机型配置模块

软件提供测试机型管理界面，操作员可以向系统注册新的测试机型，软件将保存该机型的所有配置信息。测试机型页面用于保存和显示用户注册的一个或多个该机型相关的测试用例。

### 3.1.5 机型测试用例管理模块

软件启动进入某机型测试页面后，可以向该页面添加一个或多个用户自己编写的测试用例程序，可以包含该用例的使用信息，例如该测试用例程序的测试内容、操作方法和注意事项等重要信息。

### 3.1.6 测试用例面板模块

该模块用于显示及调用用户在用例管理模块中添加的测试用例，每个测试用例以按钮的形式出现的面板的两侧，可以使用通用测试平台的周边键快捷地调用测试用例程序。普通操作人员登录后将默认进入该模块。

### 3.1.7 库管中心远程信息交互模块

软件可以通过以太网与远程库管中心上运行的测试任务管理程序进行通讯，库管中心服务器上可以预先存放各种测试计划，并与测试用例管理程序统一网络传输接口，软件可以从该服务器的测试任务管理程序读取测试计划，并根据实际的测试环境启动测试用例完成该测试任务。最后，当测试完成后，软件可以向库管中心服务器报告测试结果，实现测试计划、测试数据、测试结果的统一管理。

## 3.2 软件编程与实现

通用平台开发软件提供基于 Windows XP 操作系统、LabVIEW2011 集成化图形程序和 VC 开发环境、利用模块驱动程序开发应用软件。

通用检测维护台调度管理软件根目录下，应包括如下文件：

- 1) 驱动：WinIo. sys
- 2) 动态库：ADT \_ L0.dll, ADT \_ L1.dll, LibC202.dll, LibC203.dll, LibC403.dll, LibConvert.dll, msado15.dll, nidaq32.dll, niswitch\_32.dll, sqlite3.dll, Tcpip.dll, WinIo.dll
- 3) 配置文件：PXL.ini, Adapter1.ini, Adapter2.ini, Adapter3.ini
- 4) 数据库文件：userInfo.db
- 5) 图片文件：PL - wp3.bmp, sunflower.bmp, turtle.bmp, main.jpg
- 6) 册序号为名的文件夹：如“100100”，“203303”

本系统内主要采用了 NI 公司的标准 PXI 模块，其提供的驱动程序均按照 VISA 标准提供了驱动程序接口，Alta DT 公司提供的 1553B 和 Arinc429 模块均提供了 Labview 和 LabWindows/CVI 的驱动函数，所有货架产品满足 PXI 系统的使

用要求，对于 3 类自研模块，按照 PXI 规范要求开发适合系统使用的驱动程序。例如：

图像输出 PXI-C202 库函数：LibC202.dll 接口函数：

- 1) int32\_t \_ \_cdecl PXIC202\_StartDisplay (char RSC-Name [], uint32\_t Mode, uintptr\_t \* VISA) 提供获取设备句柄并显示图片的功能。
- 2) int32\_t \_ \_cdecl PXIC202\_StopDisplay (uintptr\_t \* VISA) 提供停止采集关闭设备的功能。
- 3) int32\_t \_ \_cdecl PXIC202\_ShowUp (uintptr\_t \* VISA, uint8\_t Y\_Data [], uint8\_t U\_Data [], uint8\_t V\_Data [], int32\_t \* len) 提供输出一帧数据并显示的功能。
- 4) int32\_t \_ \_cdecl ReadBMPImage (char PathName [], uint8\_t ImageBuffer [], int32\_t \* BufferLen, int16\_t \* BufferRows, int16\_t \* BufferCols) 提供读取 BMP 文件，获取 Buffer 长度，图片像素点的行数列数，以及数据信息指针的功能。
- 5) extern " C" \_ \_declspec (dllexport) bool BMP2YUV\_24bit (BYTE \* buf\_image, int bufLen, BYTE \* buf\_Y, BYTE \* buf\_U, BYTE \* buf\_V, int yLen) 提供将 BMP 文件中读出的数据转换成一维数组 YUV 的功能。

## 4 试验结果与分析

航电设备通用检测维护台已交付用户产品多套，应用在多个航电设备测试系统中。完成了高低温贮存试验、高低温工作试验、连续加电工作试验。操作温度满足 0℃~+55℃，存储温度不小于-20℃~70℃范围，可满足系统使用要求。且通用平台满足可靠性指标：平均无故障时间最低可接受值 MTBF≥500 h；设计目标值 MTBF ≥1 000 h。表 1 给出了某型号库存航材的检测维护报告。

表 1 库存航材检测维护报告

项次	测试参数	标准值	测试值	结论
1	115VA 相电压	+115V±5V	116.280V	合格
2	115VB 相电压	+115V±5V	116.340V	合格
3	115VC 相电压	+115V±5V	116.080V	合格
4	115VA 相电流	≤0.5A	0.297A	合格
5	115VB 相电流	≤0.5A	0.188A	合格
6	115VC 相电流	≤0.5A	0.262A	合格
7	自检结果	正常	正常	合格

各用户的试用表明火控设备通用检测维护台满足技术指标，测试资源完善丰富，测试接口合理，人机操作、显示界面友好，通用性强，工作性能稳定可靠，能满足航材仓库对库存火控设备老炼、检测的需要，且升级和拓展性良好，推广应用广泛。

## 5 结论

本航电设备通用检测维护台，基于商用货架产品 (COTS) 技术，可适应多种机型、多种航电设备。在一个机柜内实现了人机交互，PXI 智能测试资源及各种通用电源等的一体化设计，具有高智能性、高可靠性及良好的升级和扩展性。该通用平台可匹配多种专用测试适配器，实现数百种航电设备自动测试、故障排查定位及模拟老炼等任务，满足部队地

(下转第 313 页)

另外需要一个 2.5 V 的参考电压，为了尽量使输入电压信号更精准，本文选择德州仪器出品的 TPS76150 线性稳压芯片作为电源以及选择同样是德州仪器出品的 LM4128 芯片负责提供 2.5 V 的参考电压输出。由信号发生器提供时钟信号输入，结合反相器芯片 NC7S04 提供反向时钟信号输入。其他的测试设备还包括数字示波器、直流稳压电源以及 33533A 系列任意波形发生器。

因为运算放大器的开环增益比较大，所以在测试的时候，运算放大电路都按照负反馈的电路形式连接。本文所进行的实验主要是对运算放大器进行瞬态测试，一旦瞬态测试结果显示性能良好，就能够说明本文所设计的运放可以正常工作。因为本文所设计运放主要是应用在低频水声信号的采集当中，所以测试频率设定为 100 Hz，运放的双端输入信号为幅值 50 mV 且相位相反的正弦波信号，输出负载电路为 10 MΩ 的电阻与 15 pF 电容的并联电路。

本文所设计的运放采用的时钟信号是由任意波形发生器输出的，同时利用反相器产生输出另一路大小相等、相位相反的时钟信号。根据要求设置时钟频率为 10 MHz。设置输入偏置电压为 2.5 V，最终运算放大器的测试出实验结果。

从实验结果当中可以看出，在建立时间测试曲线测试当中电路一端的电压信号有些不稳定，推断是因为时钟输入信号是信号发生器产生之后通过了一个反相器才引入的，所以就导致了测试电路两端信号的差异。表 3 为运放工作性能的测试结果。

表 3 运放具体测试结果

参数	增益	单位增益带宽	供电电流	功耗	-3dB 频率	输出电压范围
符号	Gain/dB	GBW/MHz	IO/mA	PD/mW	f-3dB/kHz	VOMR/V
典型值	42	128	1.25	5.25	36	1.2-3.8

由运放工作性能的测试结果我们能够看出，测试结果完全符合预期的设计目标，只是输出电压信号的范围有一定的减小，其他的工作性能基本稳定，能够达到设计要求。本文所设计的面向 MEMS 加速度传感器的集成运放中，引用了许多的电流与电压偏置，但是基于电阻设计的自偏置电压存在着精度不高、功耗大、占用芯片面积大等问题，因此，计划下一步，设计更高精度的带隙基准电路来改进此项不足。

## 4 结束语

面向 MEMS 加速度传感器信号输出电路设计。本文主要对三运放仪表放大器进行了研究，并使用 Cadence 软件及

CSMC 0.5 μm 工艺模型对仪表放大器电路模型从仿真层面上进行了设计和研究。其中主要包括电路结构的选择、运算放大器电路的设计与仿真、仪表放大器电路的设计与仿真以及各电路的版图设计与验证。另外，本文所设计的仪表放大器有一个非常重要的特点就是增益可调<sup>[12]</sup>，它由增益可调电阻 R<sub>g</sub> 决定。

从仿真结果以及测试参数来看，所设计的仪表放大器基本满足设计要求，尤其是共模抑制比这一衡量放大器性能的重要参数。待进一步完成高精度加速度传感器的读出电路芯片级设计之后，我们将拥有完全自主知识产权的集成化电容式微硅加速度传感器芯片。同时，我们自主开发的纳机电水听器<sup>[13-15]</sup>中也将应用我们本文中的实验成果代替从国外进口的产品。

## 参考文献：

- [1] 崔利平. 仪表放大器电路设计 [J]. 现代电子技术, 2009, 32 (11): 87-89.
- [2] 赵素梅, 刘诗斌, 崔智军. 一种恒跨导满幅 CMOS 运算放大器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (5): 1161-1163.
- [3] 王雅丽. 神经桥集成电路的设计 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [4] 张文杰. MEMS 加速度传感器读出电路设计 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- [5] 刘孟良. 全差分电容式传感的 CMOS 读出电路设计与实现 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
- [6] 官泳华. 基于 MEMS 的电容式传感器信号调理电路设计 [J]. 电子器件, 2016, 39 (3): 551-557.
- [7] 刘珍超. 低功耗硅探测器前端读出电路设计与性能分析 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [8] 王岳生. 硅微电容式加速度传感器检测电路研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [9] 杨宏. 基于 CMOS 工艺的高性能电流模仪表放大器的设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [10] Adolpho Garcia. 单电源仪表放大器 [J]. 电子设计技术, 2000 (11).
- [11] 徐代果. 数模混合集成电路的防静电保护 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [12] 杨文凯. 6-18 GHz 小功率增益可调放大器设计技术研究 [D]. 电子科技大学, 2016.
- [13] 赵鹏, 张国军, 刘源, 等. 纳机电矢量水听器耐压结构设计 [J]. 传感技术学报, 2014 (5): 610-615.
- [14] 张勇, 文丰, 单彦虎, 等. 矢量水听器微弱信号调理电路设计 [J]. 科学技术与工, 2015, (32): 147-151.
- [15] 王立, 刘文怡, 张国军. 仿生矢量水听器水下监测记录装置 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (1): 33-35.

(上接第 304 页)

面维修站及库房实际需求。该通用平台不仅适用空军、海军航空兵及陆军航空兵装备，也可推广应用于海军舰艇、兵器车载装备等众多测试应用场合。

## 参考文献：

- [1] 朱旖, 杜建军. 国外军用电子自动测试系统发展综述 [J]. 电子测量技术, 2008, 31 (8): 1-3.
- [2] 李行善, 等. ATS (自动测试系统) 及 ATE 技术 [J]. 测试仪器,

- [3] 于劲松等. 下一代自动测试系统体系结构与关键技术 [J]. 计算机测量与控制, 2005.
- [4] PXI 技术及其应用 [J]. 电子产品世界, 2004, 12.
- [5] PXI 技术指南 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 7.
- [6] NI: 与全新 PXI 技术接轨 [J]. 电子产品世界, 2004, 15.
- [7] 高性能 1.26 GHz 嵌入式控制器 NI8171 系列 [J]. 仪表技术, 2002, 2.