

一种自动飞行控制系统测试系统的设计

周章勇, 王纬国, 章 宁, 胡 伟

(国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241007)

摘要: 设计了一种自动飞行控制系统的性能测试系统, 结合测试系统的软件及硬件调试工作, 优化了产品的工作逻辑和安全边界测试的流程, 解决了系统调试中的接口协议正确性、数据采集实时性与数据队列安全性等问题, 实现了被测对象的三轴给定过载、实时过载、偏航角、当前航向、ARINC429、GJB289A 等参数的全自动测试、单项自动测试、人机交互测试、自动生成测试工作记录卡等功能; 实验结果表明, 测试系统能够完成产品的实时数据采集和工作状态控制, 对比现有检测设备, 产品测试过程无须人工介入, 测量的准确性、精度及效率显著提高。

关键词: AFCS; 测试模块; 接口技术协议; 软件开发

A Design of AFCS Testing System

Zhou Zhangyong, Wang Weiguo, Zhang Ning, Hu Wei

(State Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China)

Abstract: A performance test system of AFCS was designed, combined with the software and hardware debugging work. The software flow of safety boundary testing and product's working logic were optimized and the problems of interface protocol correctness, real-time data collection and data queue security in system debugging were solved. The results show that the test system can complete real-time data acquisition and working state control of the product. Compared with the existing testing equipment, the product testing process did not require manual intervention, and also the accuracy and efficiency of the measurement were significantly improved.

Keywords: AFCS; module unit; ICD; software development

0 引言

自动飞行控制系统 (Auto Fight Control System, AFCS) 是现代战机的重要组成部分, 可有效减轻飞机员的飞行负担。为了验证自动飞行控制系统工作的正确性, 需要设计专用的检测设备对产品进行性能测试。

当前, 以计算机为信息处理中心的自动测试系统在 AFCS 的测试工程实践领域得到了广泛应用。如: 文献 [1] 设计与开发了一种多数据采集器自动监控软件; 文献 [2] 采用分布式控制系统, 上位机与下位机的形式, 设计了一种原位性能测试与检查调整的系统; 文献 [3] 采用上位机与下位机技术研制了导弹 AFCS 的自动测试系统; 文献 [4] 设计了基于 PXI 总线的 AFCS 自动测试系统。

本文提出了一种基于通用测试系统^[5-6]研制的自动飞行控制系统测试模块设计方法。

1 系统的结构与原理

自动飞行控制系统测试系统的硬件平台为 ATE 自动测试系统, 其架构如图 1 所示。该 ATE 自动测试系统以 PXI 为主, GPIB 为辅构建仪器总线架构, 集成了包括电源子系统、开关矩阵子系统、DAQ 数据采集子系统、RS422、

RS232、ARINC429、GJB289A 总线通讯子系统等众多硬件仪器资源, 通过规范的海量连接矩阵单元提供各类信号给被测系统。

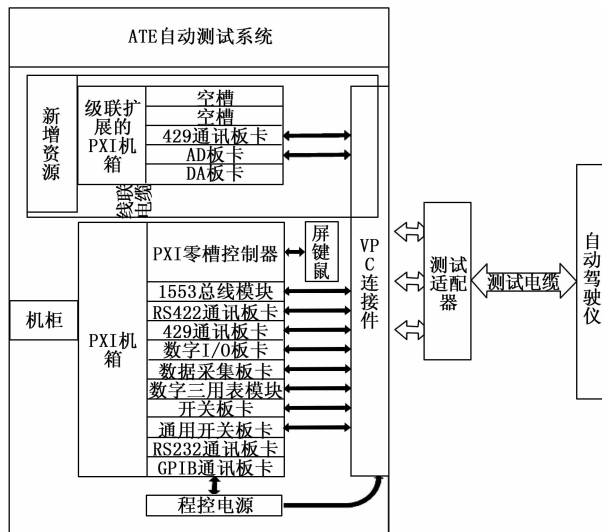


图 1 系统的硬件结构图

针对不同的测试需求, 仅需要研制相应的 TPS (包括测试程序、测试适配器、测试电缆) 即可实现部件测试需求, 节约了各类仪器资源的采购费用和系统搭建周期。

本系统基于 ATE 通用自动测试系统, 按测试需求对 ATE 硬件进行扩展, 并利用开关矩阵子系统对硬件资源进行复用, 解决测试资源不足的问题。研制了专用测试适配

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-01-22。

基金项目: 安徽省科技重大专项 (18030901058)。

作者简介: 周章勇 (1975-), 男, 安徽肥东人, 硕士, 高工, 主要从事飞行控制系统的维修与测试技术方向的研究。

器对系统的硬件资源进行必要的调理和连接。测试软件完成适配器所使用的硬件资源的驱动设置、参数控制,完成系统的测试流程开发。

2 系统的硬件设计与选型

2.1 硬件需求

对被测对象的接口类型进行统计,需要的测试资源如下:

直流 27 V, 消耗电流不大于 4 A;

交流 115 V, 消耗电流不大于 0.5 A;

I/O 输出通道不少于 35 路;

I/O 输入通道不少于 40 路;

A/D 输入通道不少于 33 路;

D/A 输入通道不少于 11 路;

旋变信号输出 1 路, 输入 1 路

ARINC429 输出 5 路, 输入 4 路;

GJB289A 通道 1 路。

2.2 硬件选型

2.2.1 级联机箱

自动测试系统硬件平台采用 PXI-1045 机箱, 零槽控制器为 PXI-8109。机箱级联除了需要新增一台从机箱箱外, 还需配置一块主机通讯卡、一块从机通讯卡及级联电缆。

综合考虑扩展性和经济性, 选择 PXIe-1073 机箱, 该机箱为 5 槽 (2 个 PXIe 插槽、3 个混合插槽)、250MB/s 总线带宽背板, 并集成了 MXI-Express 控制器, 同时附带了一块 ExpressCard-8360 主机通讯卡和一根级联电缆, 与 ATE 原有的 PXI 机箱和零槽控制器可以构成一套完整的机箱级联系统。

2.2.2 模拟量仿真卡

根据测试需求, 模拟量仿真卡选用 PXI-6723。PXI-6723 是一块 13 位、32 路 AO 通道、800kS/s 更新速率的模拟输出板卡, 可以满足激励响应、信号仿真、波形生成及执行器激励等多项应用需求。另外, 板卡还提供了 8 路 5V TTL/CMOS 数字 I/O 线、2 路 24 位 20MHz 计数器/定时器, 具备数字触发和外部时钟功能。

2.2.3 模拟量采集卡

模拟量采集卡选用 PXI-6259。该板卡是一块 16 位、32 路 AI 通道、1.25MS/s 采样速率的多功能 I/O 板卡, 该板卡还带有 48 路 DIO、4 路 AO 通道。

2.2.4 ARINC429 通讯卡

ARINC429 通讯卡选用 CAV-A429-PMCB 系列总线通讯板卡, 该板卡是一款标准的 PMC 子卡规格的总线适配卡, 最多支持 34 个 429 通道, 每个通道可由软件配置成接收和 (或) 发送, 可满足 429 总线的通讯、测试和数据分析等应用需求。

2.3 测试适配器设计

基于 ATE 自动测试系统硬件平台实现产品测试功能,

降低了专项检测设备的构建复杂度, 测试适配器设计成为了主要的硬件设计工作。测试适配器的主要功能是实现信号资源的引用、复用、调理等。

2.3.1 防差错设计

ATE 自动测试系统的设计架构可以简化为 “1 套硬件平台 + 多套测试模块”, 其中测试模块包括适配器、程序和电缆。由于不同适配器的资源引用、电气布线情况不同, 为确保三者一一对应, 防止程序调用的资源与适配器不一致而造成意外。在测试适配器设计时, 定义了一个适配器的识别电阻, 如图 2。

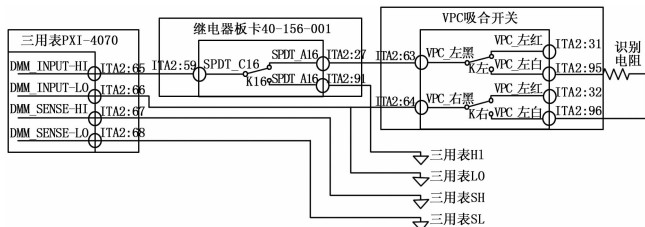


图 2 识别电阻线路

数字三用表模块通过 1 个继电器开关的常闭通路连接到 VPC 吸合开关的两端, VPC 吸合开关是 2 个安装在 G12 信号阵列接口上的机械开关, 当适配器与阵列接口对接时, 吸合开关动作。

2.3.2 激励信号的设计

根据产品接口定义, AFCS 测试适配器中的激励设计主要包括以下信号类型: 离散量激励、模拟量激励、旋变信号、ARINC429 信号、GJB289A 总线信号。

2.3.2.1 离散量激励

AFCS 涉及的离散量有 3 种电气格式: 27V/开、5V/开、地/开。检测设备通常利用数字 IO 或离散 IO 装置, 通过提拉电阻、隔离光耦等调理电路来进行仿真。以 27V/开为例的示意如图 3。

2.3.2.2 模拟量激励

模拟量激励信号主要是电压量信号的仿真, 均需要在电路上串联电阻进行调理。相关的电气连线如图 3 所示。

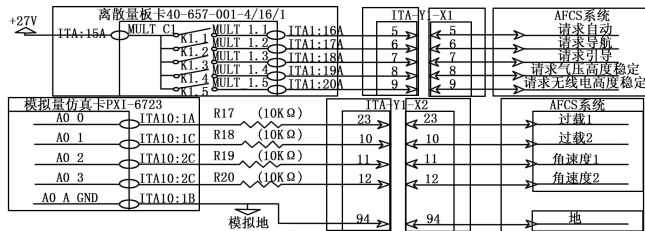


图 3 离散量和模拟电压量输出仿真

2.3.2.3 旋变信号激励

旋变信号又称轴角信号、正余弦信号、角度信号、角度解算信号, 是飞机机载电子设备中常见的一种电气信号类型, 用于传递与角度有关的飞机状态参数, 如航向角、偏转角等。它一般由解算器 (Resolver), 也叫旋转变压器

生成。解算器由定子和转子组成, 是一个能绕轴旋转的变压器, 其工作原理与普通的变压器完全相同, 它的定子绕组相当于变压器的原边线圈 (激磁线圈), 而转子绕组就相当于普通变压器的副边线圈。相关的电气连线如图 4 所示。

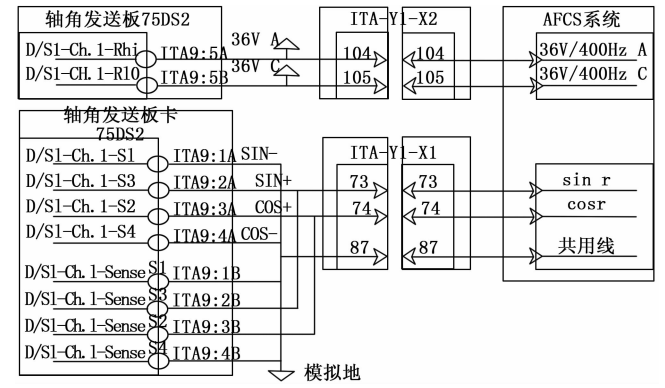


图 4 旋变信号仿真示意图

2.3.3 信号采集设计

根据产品接口定义, AFCS 测试适配器中的信号采集设计主要包括以下信号类型: 离散量、模拟量、旋变信号、ARINC429 信号。

2.3.3.1 离散量采集

AFCS 涉及的离散量输出信号有 2 种电气格式: 27 V/开、地/开。利用 PXI-6511 离散 IO 卡进行直接采集。该 IO 卡的采集逻辑为当 Px.y 端与 Px.COM 端存在大于 11 V 以上的压差时, 板卡认为 Px.y 端为逻辑高, Px.y 端与 Px.COM 端存在小于 5 V 以下的压差时, 板卡认为 Px.y 端为逻辑低。因此, 通过将 Px.COM 端连接至“电源地”或“+27 V”, 即可采集 AFCS 输出的“27 V/开”和“地/开”2 种离散信号, 以 27 V/开为例说明如图 5 所示。对于离散信号有负载指标的, 利用相应的功率电阻进行仿真。

2.3.3.2 模拟量采集

采用 2 种方式, 一种是利用 PXI-6259 模拟量采集板卡直接采集, 具体如图 5 所示。

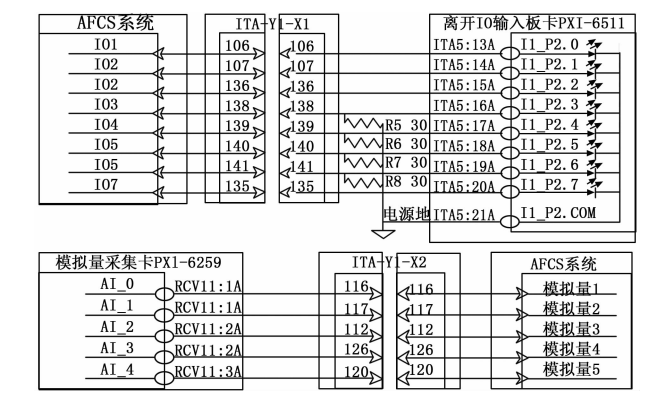


图 5 模拟量采集卡电气连线

2.4 选型与设计过程中需要注意的方面

2.4.1 ARINC429 通讯卡的选型

在进行 ARINC429 通讯卡的选型时, 需特别注意, 由于

协议规定的标准传输速率主要是 12.5 Kb/s 低速和 100 Kb/s 高速 2 种, 而 AFCS 中采用的传输速率为 48 Kb/s, 因此选型时需要着重考察通讯卡是否支持传输速率可设定为 48 Kb/s。

2.4.2 防差错的设计

在进行防差错电路设计时, 应查询以往开发的适配器所选配的识别电阻值, 识别电阻的取值原则是“各不相同、间隔值大于误差范围”。如间隔值太小, 则有可能识别电阻阻值会重叠。建议按不小于 1K 的等间隔进行识别电阻值的选配。对于 1 个适配器带多个测试电缆或测试多种产品的情况, 也可采用上述方式进行电缆识别电阻的设计。

2.4.3 旋变信号电气连线的设计

设计旋变信号的电气连线时, 主要有以下三个注意点: 1. 发送装置与接收装置的激励电压极性应一致, 否则角度信号在传递和解算时会出现异常; 2. 板卡信号代号与实际正弦弦信号的对应关系: S1 对应 Sin-, S3 对应 Sin+, S2 对应 Cos+, S4 对应 Cos-; 3. 轴角发送板卡带有“Sense”端, 通过与相应的信号端连接, 可确保信号输出的准确和精度, 而轴角发送板卡若不连“Sense”端, 则无法正常给定信号。

3 系统的软件设计

3.1 项目框架设计

建立了软件工程项目, 新建测试程序的项目框架如下: TPS_KF_6.c: 主模块 C 文件。用于程序的进入、退出, 自动测试流程框架建立, 多线程框架建立, 主界面控件元素回调函数框架建立及部分功能函数实现。TPS_KF_6.uir: 面板文件。软件人机界面, 提供用于用户操作、数据显示、状态指示的虚拟仪器控件。MyDefines.h: 自定义头文件。提供了程序使用到的全局变量、buffer 结构、总线数据结构预定义、功能函数预定义等。

AutoTest.c: 自动测试文件。提供全部自动测试功能单元的具体实现。

ManualTest.c: 手动测试 C 文件。控件操作回调函数的具体实现、数据采集处理线程的具体实现等。

3.2 功能模块设计

测试软件的功能实现是软件设计的核心, 测试软件各功能模块关系如图 6 所示。

3.2.1 主界面

主界面即程序运行时的人机界面, 所有的用户操作及测试信息的显示均在这个界面上。

3.2.2 硬件控制模块

硬件控制模块用于对测试软件调用的硬件资源进行控制, 包含电源系统、开关系统、总线通讯系统、模拟量信号收发系统、离散数字量采集系统等。

3.2.3 自动测试模块

自动测试模块主要包含自动测试流程控制、功能单元测试与结果判读、测试结果记录与读取等功能。

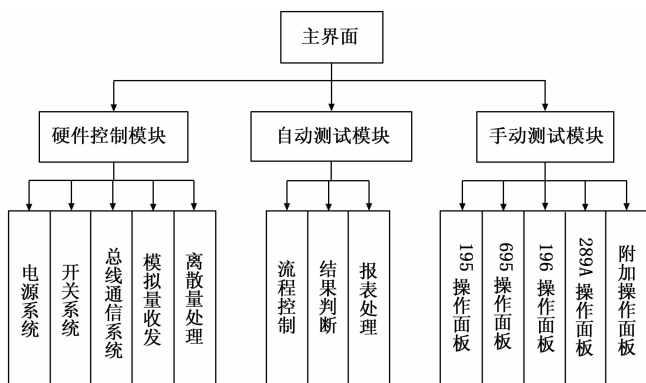


图 6 测试软件各功能模块关系图

3.2.3.1 自动测试流程控制

自动测试流程控制模块主要建立自动测试的整体框架结构，控制自动测试功能单元项选择及测试流程跳转控制等。

测试需求中的所有测试单元项目以 INI 文件的方式进行存储，测试程序初始化时，流程控制模块自动调入所有测试单元项目，以测试项目树的方式提供用户选择，用户选择完成后，形成测试项目清单数组提供给自动测试线程，自动测试开始时，测试线程根据测试清单建立调用列表和总循环控制列表，根据循环控制次数和调用列表，逐项调用功能单元测试函数进行产品测试和结果判读，全部完成后调用测试结果记录模块进行结果的格式化存储。

3.2.3.2 功能单元测试

软件提供了与每一项测试需求相对应的功能单元测试内容。各单元组织结构基本一致，按实现步骤可分为：

测试信息建立：显示当前正在进行的测试项目的序号、名称，测试结果指标值、要求等信息。

测试操作：根据测试需求内容，对相应的硬件进行操作（开关操作、总线信号发送……）

数据采集：对指定信号进行数据采集和计算。

3.2.3.3 结果判读

根据预设的理论值范围和要求对数据采集步骤的结果进行显示和判读，提供合格或不合格的结论。为了减少判读的代码量，设计时对结果判读的类型进行了分类。根据测试需求，可以分为两个大类：第一类为数值边界型，主要为数值型的理论值及其上下有效边界；第二类为状态判读型，主要为判断各种状态量是否满足指标。由此，设计了 2 种通用判读函数分别进行处理：

第一类处理函数原型为：

Int TestResultOutput _ 1 (int rownow, double testvalue, double lilunvalue, double minlimit, double maxlimit);

该函数内部通过简单数学运算判断采集值是否在标准值的上下边界范围之内。

第二类处理函数原型为：

Int TestResultOutput _ 2 (int rownow, char lilun [], char shiji []);

此类结果的理论值以字符串形式进行处理，测试结果也进行字符串标准化，通过比较字符串是否相符的方式进行结果判断。

3.2.3.4 报表处理

该模块负责在自动测试结束后，将所有的测试数据以 Excel 文件形式在指定位置进行存储。

3.2.4 手动测试模块

手动测试模块模拟了手动测试设备的界面，提供了全部的用户控件。用户通过操纵虚拟仪器控件来对产品进行直接控制，读取测试结果，自行进行相应判断。

手动测试面板包括五个测试面板。手动测试模块以虚拟仪器控件操作的方式提供了底层硬件控制接口，在用户层，用户无需关心底层硬件控制的具体细节，只需按操作手动设备的方法操作即可。

为了便于手动测试和自动测试调用，所有的控件均采用统一的形式进行硬件调用封装，每个面板的所有控件统一组成一个结构体，便于记录控件状态或控件数值。

3.3 主要模块介绍

自动飞行控制系统对外的系统多，工作逻辑复杂，按相关的设计文件，需要调试的参数为 20 个大类 421 个测试项，1522 个逻辑测试步骤。测试模块调试前，需要对提供给 AF-CS 的仿真信号进行初始化，即按信号规定的电气格式，逐项确认测试模块与产品交联信号的测试初始化状态，经验证分析，确定相关参数的初始值。

现就其中的安全边界检测、数据采集为例进行介绍。

3.3.1 安全边界检测

自动飞行控制涉及飞行安全，在产品的设计中考虑了参数的多种安全边界，在测试中对这些参数均需要一一测试，设计了统一的测试流程，如图 7 所示。

该方法有以下几个优点：

- (1) 统一的测试流程，精简了测试流程；
- (2) 测试模块的调试效率高。

3.3.2 独立数据采集线

为保证数据采集的实时性，数据采集必须单独使用线程。本软件共规划了 4 个独立的数据采集线程，分别用于模拟量采集、离散状态量采集、429 总线数据采集和 GJB 289A 总线数据采集。前 3 项数据采集线程使用多线程方式实现，为保证数据不在存储和读取时发生冲突，分别为每个线程使用专门的数据安全队列，操作流程如图 7 所示。

3.4 主要技术难点及解决措施

3.4.1 测试失败的处理

由于测试流程长，测试数据量大，所使用的硬件模块多，测试过程可能会因为各种不可预测的原因导致测试失败，为此专门设计了测试失败流程进行失败状况的处理，主要可以分成 3 种情况：硬件异常、软件异常或工作原理异常。

硬件异常或软件异常都是属于测试模块研制故障，包括线路连接错误和代码编写错误。当上述 2 种测试失败的原因

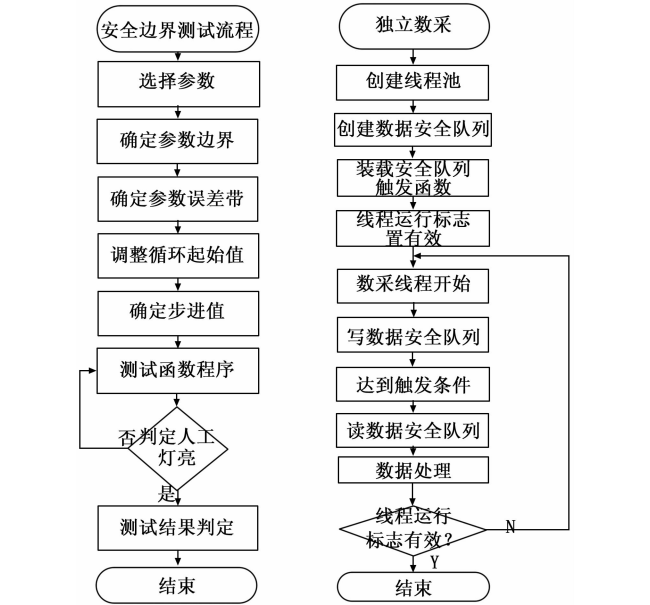


图 7 安全边界与独立数采线程

都排除后, 产品仍未响应正确的信号, 则需要从产品的工作原理进行分析。

3.4.2 接口协议研究

自动飞行控制系统与机上的多个系统实现信号交联, 特别是与航电系统的接口技术协议复杂, 在借鉴了文献^[7]所提的局部验证技术和文献^[8]所提的基于扰动法的全局搜索技术的的研究基础上, 开展了产品的接口技术协议和通讯协议调试分析工作, 摸清了产品的技术特点, 验证了产品的接口关系。

4 实验结果与分析

依据被测对象的产品规范, 先后针对五套被测对象对每一测试项目按规定的技术要求、测试方法、误差范围、合格判据等要求逐项的进行试验验证, 分别进行多次测试, 结果表明系统的可重复性好, 精度满足测试要求, 测试功能完整。实现的主要技术参数如表 1 所示。

5 结束语

研制的自动测试模块满足俄制和国产两型 AFCS 的测试。实现了对维修工艺规定的所有性能的自动检测能力, 提

表 1 主要技术参数

参数名称	测试结果
I/O 输出通道	地检测到 0, 高检测到 1
I/O 输入通道	地检测到 0, 高检测到 1
A/D 输入通道	误差不大于 5mV
D/A 输入通道	误差不大于 5mV
旋变信号	误差不大于 0.001°
ARINC429	测试 48kb/s 速率正常
GJB289A	通信正常, 协议解析正常

高了测量的准确性和精度, 与原俄罗斯人工测试设备相比, 测试效率提高了 30 倍。

该项目通过系统的实物验证及试用, 能够满足系统设定的功能要求, 性能指标经验证符合设计要求, 具有良好的经济效益和较高的军事意义。

参考文献:

[1] 郑 锐, 付雷杰, 刘振涛, 等. 基于 LabVIEW 的多数据采集器自动监控软件设计与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (6): 107-111.

[2] 于建立, 高艳丽. 某型飞机 AFCS 测试系统的研制 [J]. 电子设计工程, 2015, 23 (6): 146-148.

[3] 谢 侃, 吉亚平. 某导弹 AFCS 的自动测试系统实现 [J]. 自动化仪表, 2017, 38 (6): 75-78.

[4] 何 浩, 李 刚. 某型号导弹 AFCS 测试系统设计 [J]. 测控技术, 2012, 31 (12): 131-134.

[5] 黄晓晴, 梁晓芬, 郑永龙, 等. 通用 ATE 软件开发平台研究与设计 [J]. 测控技术, 2013, 32 (3): 55-58.

[6] 黄 皓, 方 媛, 尹禄高. 基于数据库的飞行器通用测试平台设计 [J]. 自动化与仪表, 2015, 30 (6): 59-63.

[7] 罗运虎, 章 宁, 阚 艳, 等. 1553B 总线信号接口定义反求技术——局部验证技术 [J]. 测控技术, 2013, 32 (7): 105-109.

[8] 罗运虎, 阚 艳, 章 宁, 等. 1553B 总线信号接口定义反求技术——全局搜索技术 [J]. 测控技术, 2013, 32 (5): 12-17.

[9] 张万君, 李静阳, 牛敏杰, 等. 坦克火控系统故障的多线程数据采集方法 [J]. 兵器装备工程学报, 2016, 36 (11): 44-48.

[10] 刘克亚, 刘经宇, 杨 峰, 等. 基于 1553B 总线三冗余飞行控制系统设计与可靠性研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018 26 (1): 119-123.

(上接第 44 页)

[7] Pang H, Yin Q, Ding Y, et al. Research on the detecting technology of DC crosstalk with impedance [A]. Proceedings of The 2016 2nd International Conference on Energy Equipment Science and Engineering (ICEESE 2016) [C]. Guangzhou, 2017: 301-305.

[8] 雷 兴, 潘学萍, 孙 彬, 等. 电缆分布电容对出口继电器动作的影响分析及应对措施 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (15): 170-175.

[9] 王友兵, 吴杰长, 郭朝有. 船舶集控系统直流电源网络绝缘检

测技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (4): 756-758.

[10] 钱伟康, 李鹏飞, 张金燕. 医疗供电系统绝缘电阻交流脉冲变频测量 [J]. 测控技术, 2016, 35 (10): 10-12.

[11] 黄 晶, 朱 武. 基于双平衡桥探测直流系统接地故障检测的新方法 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (8): 75-79.

[12] DL/T 1392-2014, 直流电源系统绝缘监测装置技术条件 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.