

高度传感器自动测试系统的设计与实现

徐元军, 高登强, 郝林, 张燕

(航空工业成都凯天电子股份有限公司, 成都 610092)

摘要: 针对高度传感器型号多、数量大的测试需求, 研制了高度传感器自动测试系统; 采用多通道 CPCI、GPIB、RS-232 和以太网等总线仪器设计标准化、模块化结构的硬件平台, 以 DLL、ActiveX、COM 等技术设计层次化、开放式的软件底层架构, 在 VC++ 环境下开发便于集成、可配置化的应用程序; 能对高度传感器全部指标 (总压、静压等) 进行测试, 得到成功应用; 整体校准, 确保了测试结果的可靠性和测试系统的使用效率; 并行测试和自动测试提高了检测效率, 降低了检测成本; 通用性、扩展性的设计理念使测试系统便于增加类似传感器的测试; 实验与应用结果表明, 测试系统能完成实时数据采集和无人值守全自动测试, 系统的可靠性高、通用性强, 测量的准确性、精度及效率显著提高。

关键词: 高度传感器; 自动测试系统; 软硬件设计

Design on Automatic Test System of Altitude Sensor

Xu Yuanjun, Gao Dengqiang, Hao Lin, Zhang Yan

(AVIC Chengdu CAIC Electronics Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

Abstract: For the testing demands of altitude sensor, an auto-test system has been designed which can automatically test different kinds of altitude sensors. The system built standardization and modularization hardware platform with many bus instrument of multi-channels such as CPCI, GPIB, RS-232 and Ethernet, designed hierarchy and open software bottom structure with technologies such as DLL, ActiveX, COM, developed application program under VC++ IDE environment which has the characteristics of convenient integration and configuration. The system can test all indexes (total press, static press etc.), and applies successfully. The system calibration ensured the reliability of testing result and the using efficiency of the test system, and the auto-test and parallel-test technology enhanced servicing efficiency and reduces servicing cost, and the design principle of universalization and expansibility resulted to conveniently extend tests for other homologous altitude sensor. The results show that the test system can complete real-time data acquisition and auto-test which do not require manual intervention, and the reliability and universalization are ensured, and also the accuracy, precision and efficiency of the measurement are significantly improved.

Keywords: altitude sensor; auto-test system; design principle

0 引言

公司是机载传感器研制和生产的骨干企业, 过去针对不同型号传感器的测试, 设计专用的测试设备和软件。由于机载传感器需要满足在不同的大气压力和温度条件下正常工作, 测试人员在测试过程中需要操作环境温度控制设备和大气压力设备设置不同的温度点和压力点, 当温度和压力达到设置值并保持一定时间后记录测试数据, 测试结束后对测试结果做出分析和判断。单只传感器测试需要占用测试人员、测试设备以及测试资源大量时间, 随着传感器型号以及产量的增加, 这种测试设备及测试方式已不能满足公司的需求。高度传感器自动测试系统的研制, 节省了测试所需人力的投入, 提高了测试设备以及测试资源的利用, 提高了传感器的测试效率。测试人员根据传感器型号连接好适配电缆, 操作自动测试系统软件, 就能一次完成多只传感器的测试。

1 高度传感器及测试需求

1.1 高度传感器的工作原理

传感器作为一种检测装置, 能感受到被测量的信息, 并能将感受到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出, 以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。机载传感器是飞控系统的基础部件, 高度传感器作为机载传感器中重要成员, 能测量飞行器所处飞行高度, 对于飞行器的安全飞行与自主控制具有十分重要的作用^[1]。公司研制的高度传感器是通过测量大气参数来测量飞行高度, 其主要功能是感受飞行器空速系统输入的大气压力信号 (包括总压、静压值等), 并将其转换成电信号输入相关控制系统的微计算机中进行处理。

按照世界各主要航空国家制定的标准大气模型, 大气的温度、密度和压强随高度按固定规律变化^[2]。通过测量大气压强数值, 带入标准气压—高度公式^[3]:

$$H = \frac{T_b}{\beta} \left[\left(\frac{P_H}{P_b} \right)^{-\beta/g_n} - 1 \right] + H_b \quad (1)$$

即可计算出高度信号。式中, P_H 为高度 H 下的大气压力, β 为温度垂直变化率 ($\beta = \frac{dT}{dH}$), g_n 为重力加速度, R

收稿日期: 2020-03-02; 修回日期: 2020-04-03。

作者简介: 徐元军(1977-), 男, 四川成都人, 硕士, 工程师, 主要从事电子设备自动测试系统和软件设计方向的研究。

为空气专用气体常数, T_b 、 H_b 、 P_b 为高度分层中相应层的大气温度、标准气压高度和气压的下限值, 这些参数均可通过相关文献或资料获取。

1.2 测试需求

公司研制的高度传感器, 主要是硅压阻式压力传感器, 该种类型的传感器具有灵敏度、集成度、综合精度、可靠性高的特点, 并且性能稳定、体积小、质量轻、方便使用。根据不同飞行器及机载系统的需要, 可集成后续处理模块实现数字信号输出, 也可以集成温度传感器、加速度传感器等实现多种功能, 从而实现了公司高度传感器的系列化和多种型号。

高度传感器工作在不同的大气压力和温度条件下, 研制过程中的调试, 交付前的验收测试和使用过程中的校验, 都需要对其在不同温度和压力条件下的输出参数进行测试和分析, 且不同型号传感器的功能和测试指标具有差异性。高度传感器在测试过程中, 需要连接大气压力设备, 并放入环境温度控制设备, 当大气压力和环境温度达到一定值的时候均需保持一定的时间。因此, 单只传感器测试所占用人力和测试资源的时间周期长, 过去的测试设备能测试的型号以及数量有限。

针对该类传感器型号多, 产量大, 不同型号功能和测试指标具有差异性, 测试温度点和压力点多, 测试周期长的状况, 急需开发新的测试系统。高度传感器自动测试系统的成功研制, 实现了无人值守全自动测试和并行测试, 并能测试多种型号传感器, 大大节省测试所需投入的人力、物力和时间, 提高了测试效率。

2 系统及软硬件设计

2.1 系统架构

高度传感器自动测试系统在工控计算机下采用多通道 CPCI 总线、GPIB 总线、RS-232 总线和以太网络标准接口仪器, 设计具有模块化结构的通用硬件测试平台, 在 VC++ 和 SQL Server 数据库开发环境下设计层次化、模块化的软件体系结构。整个系统采用开放的体系架构, 使系统的维护、更改, 以及对类似传感器的测试和测试数量的扩展极其方便, 系统架构如图 1 所示。测试系统的物理层由仪器资源、仪器总线、测试计算机、公共测试接口组成; 软件层由仪器控制模块和系统应用程序集组成; 信息交换层由被测信号定义、仪器设备定义、被测传感器、测试适配接口、测试配置、测试过程配置、测试结果描述、测试诊断信息定义等元素组成。

2.2 硬件平台设计

系统硬件平台由通用测试平台、专用设备和辅助设备组成。通用测试平台包括工控机、CPCI 总线系统、RS-232 总线模块、LAN 总线仪器、通用测试接口 ICA (interface connect adapter) 以及系统校准机构等; 专用设备主要是测试线缆 ITA (interface test adapter), 各型号传感器均配有专用的 ITA; 辅助设备主要包括大气压力控制设备和环境温度控制设备等。整个硬件平台, 除了 ICA/ITA 和大

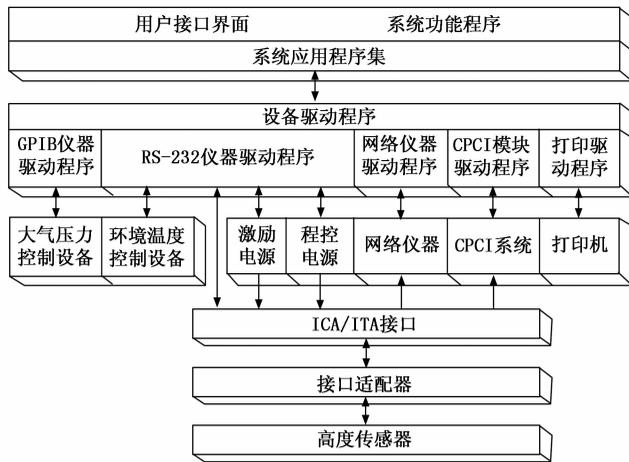


图 1 系统架构

气压力控制设备为公司自己研制, 其余设备、仪器和模块均选用市场成熟、接口标准的产品, 提高了硬件的通用性、可靠性、维护性, 同时也降低了研制周期和成本。系统硬件平台结构如图 2 所示。

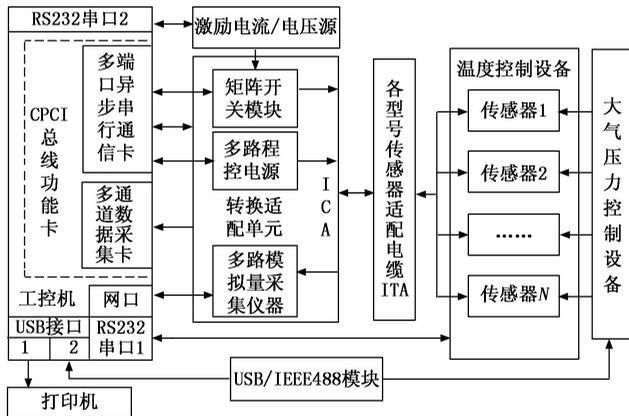


图 2 系统主要硬件结构

ICA 为系统测试资源按照一定规则分类排布的对外接口, 将系统所有的测试资源都引到 ICA 上, 测试资源不直接与被测对象相连, 而是通过 ITA 对测试资源进行调理、再分配后连接至不同的被测传感器, 实现了资源的优化配置。这样的接口设计, 实现了对新型号传感器测试的扩展需求, 对于新型号传感器的测试, 只需要设计 ITA, 并将型号信息、接口信息和测试信息录入数据库, 测试软件通过读取数据库获取和使用。

为防止操作人员因连接错误带来的危害, 对每种型号传感器的 ITA 进行防插错设计, 主要措施包括: 对每种型号的 ITA 进行标识, 使之与传感器型号一一对应起来; 在每种型号的 ITA 内放置不同阻值的适配电阻, 并将该阻值与与之对应的传感器型号输入数据库, 测试软件在建立测试连接时检测适配电阻, 若型号与阻值不匹配进行报警提示, 并断开连接。

2.3 软件架构设计

系统软件基于层次化、模块化设计思想, 部分组件采

用构件技术, 使得功能模块易于修改替换, 提高了系统集成的灵活性和复用度, 方便系统维护升级^[4]。采用 DLL, ActiveX, COM 等软件技术组建, 各个软件模块间有良好的接口, 使系统的实现灵活方便。系统软件采用 Visual C++ 进行开发^[5], 以 SQL Server 作为配置数据管理系统, 整个系统软件由主控软件、系统自检软件、系统自校软件、传感器测试软件、系统管理软件、传感器软件加载软件和测试报告打印软件组成。系统软件架构如图 3 所示。

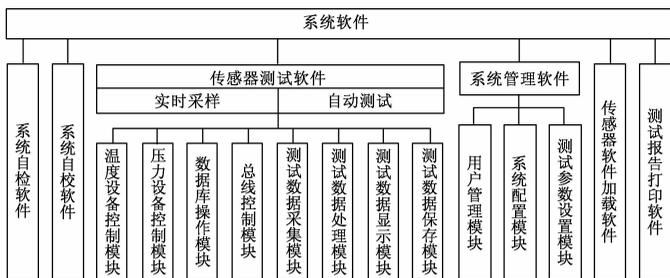


图 3 系统软件架构

系统主控软件是各功能软件的统一接口, 实现对系统功能的管理和调用; 系统自检软件的功能是检测系统仪器设备工作是否正常, 以及系统接口和通道连接是否正常, 并报告检测结果, 主要用于系统硬件故障排查; 系统自校软件实现对测试系统的整体校准, 以及传感器测试参数的修正; 加载软件实现对各型传感器嵌入式软件的加载; 测试报告打印软件用于管理测试数据, 并将测试数据写入测试报告、打印报告或报告上传; 系统管理软件实现对系统用户权限和使用安全性的管理, 系统硬件资源、测试资源等相关参数的配置管理, 以及传感器测试参数、测试流程等相关参数的配置管理; 传感器测试软件实现对各型号传感器的研制调试和验收测试, 包括温度设备控制、压力设备控制、数据库操作、各总线的管理、测试数据采集处理、测试数据的保存等功能模块。

3 主要测试问题的解决

3.1 多型号测试

多型号测试就是要实现测试系统的通用性, 提高测试系统的使用效率, 使测试系统能测试多种型号的传感器。公司研制的高度传感器有的输出模拟量信号, 有的输出数字量信号, 有的集成了其他功能, 通过分析不同型号传感器测试指标的差异性, 以及考虑到测试型号可能增加的需求, 通过硬件和软件进行解决。

1) 硬件方面: 首先测试系统要能测试各型传感器的所有参数, 系统需要集成所有测试资源, 每个测试资源的操作函数均封装在独立的 DLL 文件中, 针对各型传感器在测试中对测试资源使用的不同, 通过测试软件读取数据库中该型传感器的配置信息进行处理。比如, 针对某型号传感器的测试, 测试软件启动的时候需要打开和控制其相关的测试资源, 测试软件只需调用成员函数 `OpenEquip`, 函数格式如下:

`OpenEquip (A, B);`

式中, A 表示被测传感器型号, B 有两种状态即打开/关闭, 函数通过型号 A 查找数据库中其所需测量仪器, 并调用仪器对应 DLL 中函数, 根据 B 的状态将仪器一一打开/关闭。其次需要解决不同型号传感器与测试系统连接接口的互通性, 采用 ICA/ITA 技术设计系统接口, ICA 提供测试系统所有测试资源的共同接口, ITA 实现测试资源的分配以及不同型号传感器的转接。

2) 软件方面: 需要解决不同传感器测试软件的共性和个性问题。首先, 测试软件中各功能模块相互独立, 接口清晰, 测试软件在处理相关功能的时候, 通过读取该型传感器在数据库中的配置信息, 对该模块进行参数传递, 从而实现该型传感器的相关功能。其次, 对于测试软件界面中输入/输出参数控件, 按钮及其响应事件等, 采用配置参数动态生成软件的设计方法^[6], 测试软件启动时通过读取数据库中不同型号传感器的测试参数、界面参数、ICD 参数等动态生成对应型号传感器的测试软件。

3.2 并行测试

高度传感器测试周期长、数量大, 为了提高测效率, 需要提高测试系统的测试吞吐量, 使测试系统在一次测试中能测试多只同型号的传感器, 解决此需求采用了并行测试技术^[7]。

1) 硬件方面: 各测试数据采集模块和仪器, 选用市场成熟的具有标准接口的多通道产品, 使得系统硬件维护、升级方便, 确保了系统的稳定性和可靠性; 环境温度控制设备选择大容量的设备, 大气压力控制设备采用公司自主研制且使用成熟的多通道压力输出设备。

2) 软件方面: 利用 VC++ 面向对象的开发技术, 将传感器的测试软件构建为类, 该类中封装了传感器测试相关的变量和函数, 根据被测对象数量建立多个测试对象, 通过主测试软件把这些测试对象生成传感器测试软件界面。对于不同测试任务的调度, 不同测试通道数据的接收、处理、显示等, 通过主测试软件的多进程或多线程实现。各被测对象对测试资源通道的使用在数据库中进行配置, 测试软件对测试对象的操作通过通道号区别, 比如接收传感器输出数据函数 `Receive`, 函数格式如下:

`Receive (A, B, C);`

式中, A 表示被测传感器型号, B 表示传感器编号, C 表示信号种类, 测试软件在接收传感器输出数据的时候, 通过 A 和 B 在数据库中找到通道号, 通过 C 调用对应仪器 DLL 中该通道的接收功能函数, 并对数据进行相应处理。

3.3 系统校准

校准是确保测试设备和仪器性能可靠的重要手段, 自动测试系统以系统为整体进行工作, 不同的测试方式以及系统传输电缆、适配接口等环节对最终的测试结果都可能产生影响, 因此对测试系统的校准采用在站 (on station) 校准方式, 将测试系统作为一个完整的单元进行校准, 满足现场校准的需要^[8]。

1) 系统校准过程:

图 4 为测试系统的校准过程, 上级计量实验室用测量标准对自动测试系统激励电源进行检定或校准, 操作人员使用校准合格的激励电源对自动测试系统进行激励输入, 积累多次系统校准所得的数据并存入数据库, 再次校准的时候, 根据统计控制模型对数据库中历史校准数据进行分析, 判断测试系统量值是否受控, 如果受控则可将校准数据用于修正传感器测试结果, 否则需进行问题溯源。

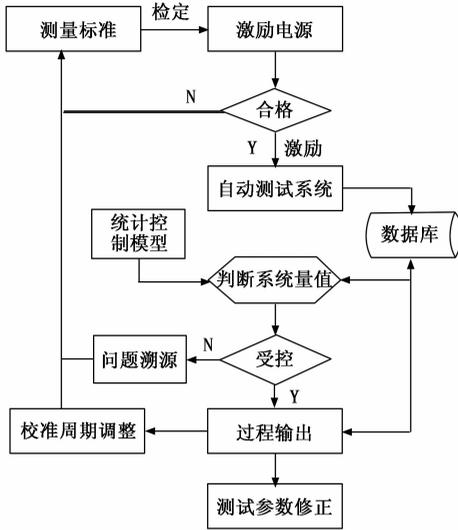


图 4 系统校准控制过程

2) 确定校准周期:

自动测试系统集成了许多商用总线模块和仪器, 厂家规定的校准周期各不相同, 如果采用固定校准周期的计量方式进行校准, 容易造成不足计量或过剩计量, 不足计量将导致测试系统的状态恶化, 影响测试结果, 过剩计量将会增加停机时间, 影响工作效率, 增加计量成本。考虑到仪器厂家的建议、使用情况等因素, 根据工程经验确定初始校准周期, 选择激励电源的校准周期为初始校准周期^[9]。在一个校准周期内, 对于不断积累的校准数据, 采用控制图进行统计分析^[10], 根据测量值的变化趋势延长或缩短校准与检定周期。

3) 利用校准结果:

就是利用系统校准数据补偿和修正传感器测试结果, 消除测试系统本身所带来的偏差。校准是针对测试系统的每个通道进行, 并且在测量范围内对多个测试点进行校准。校准点的多少即校准区间划分的大小, 须确保在每个区间内系统对不同的输入和输出满足线性变化的关系, 因此采用线性插值法, 其函数关系为:

$$Y_{nj} = a_{nj}X_{nj} + b_{nj} \quad (2)$$

式中, Y_{nj} 表示 n 通道 j 校准区间测试系统的测试结果, X_{nj} 表示 n 通道 j 校准区间测试系统的输入值, 即被测传感器的输出值, 因此经修正后的测试结果为:

$$X_{nj} = \frac{1}{a_{nj}}(Y_{nj} - b_{nj}) \quad (3)$$

其中:

$$a_{nj} = \frac{y_{n(i+1)} - y_n}{x_{n(i+1)} - x_n} \quad (4)$$

$$b_{nj} = \frac{y_n x_{n(i+1)} - y_{n(i+1)} x_n}{x_{n(i+1)} - x_n} \quad (5)$$

式中, x 为校准时激励电源对测试系统的输入值, y 为测试系统对 x 的测试值; i 为校准点, 其最大值为测试系统在测量范围内所选取的校准点个数, 其值通过 Y 在 y 所在的 j 区间确定。

3.4 无人值守全自动测试

无人值守全自动测试就是测试过程启动后, 在没有人员参与的情况下, 测试系统根据预先设置好的测试流程自动完成测试, 这种测试方式降低了对人力资源的占用, 也避免了因人员误操作带来的测试错误, 使得测试结果客观、可靠。传感器测试软件包含实时采样测试和自动验收测试, 实时采样测试根据操作人员设置的温度值和压力值, 实现对传感器输出参数的接收、处理和显示, 主要用于传感器调试。自动验收测试实现了无人值守全自动测试, 根据各型传感器验收测试大纲规定的测试流程, 系统自动设置压力值和温度值, 并对保温和保压时间自动计时, 自动对传感器处于不同温度点和压力点下的输出参数进行接收、处理、显示和保存, 并对输出参数的合理性进行判断, 对测试结果进行报告。操作人员只要连接好被测对象的适配电缆和大气压力输入接口, 放入温度控制设备, 启动该型传感器的测试软件, 点击“开始自动测试”按钮, 即可完成测试。自动测试流程如图 5 所示, 主要设计思想如下:

1) 测试流程可配置化: 不同型号传感器验收测试大纲的差异性决定了其测试流程的不同, 测试软件通过数据库控制测试流程^[11]。与自动测试流程控制相关信息包括保温时间、保压时间、温度点、压力点等, 这些信息均保存在数据库中, 在自动测试过程中, 测试程序通过读取该型传感器在数据库中的这些信息实现测试流程的控制。

2) 安全性设计: 对于无人值守全自动测试, 测试过程的安全性是要重点考虑的因素, 要把测试过程中可能出现的问题或故障以及采取的安全措施考虑到, 避免因无人及时处理而引发事故。自动测试系统的设计中, 对于温度设备、压力设备接口的访问和控制, 以及自动测试流程的控制均在独立的线程中处理; 对测试流程中的每个操作状态和结果进行实时显示, 当测试遇到故障不能执行下去时, 系统将会做出提示和告警, 断开传感器电源, 关闭相关测试仪器和设备, 退出自动测试相关线程。

4 实验结果与分析

4.1 测试精度实验及分析

测试精度实验以某型高度传感器的测试作为实验对象, 实验对象的挑选以测试参数足够多作为选择的条件, 并行

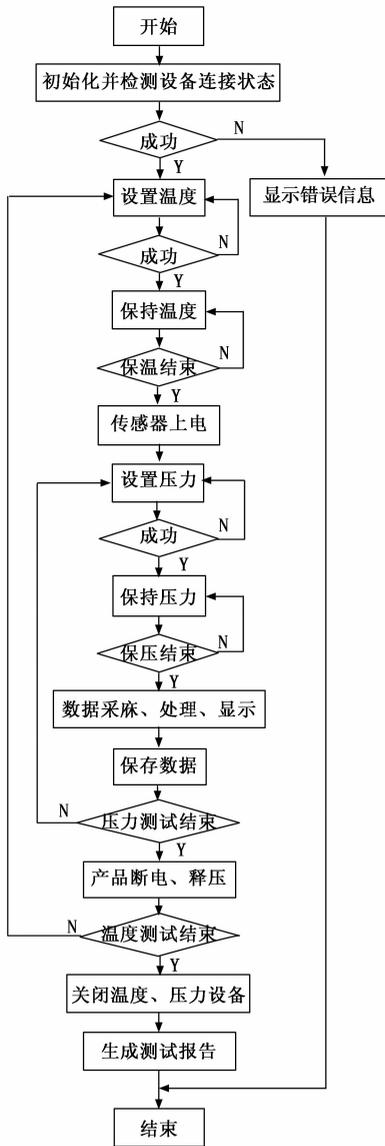


图 5 自动测试流程

测试数量配置为 8 只。随机选取某只传感器作为测试对象, 在 0~5 V 的电压范围内, 任意选取三个测试点, 以直流稳压电源作为测试系统的输入, 观察测试软件界面并记录测试数据, 测量参数、输入值和测试值见表 1。分析表 1 中各参数的测试结果, 测试系统对于三个测试点的测试误差均在 ±0.25% FS 即 ±12.5 mV 范围内, 实验结果达到了高度传感器自动测试系统的设计需求和目标。

4.2 应用效果分析

高度传感器自动测试系统自研制完成后, 顺利通过了各项验证实验和鉴定, 并且已完成了多型高度传感器的验证测试。该自动测试系统体现了较好的使用性能和应用效果, 系统各项性能包括用户管理、数据解析、精度误差处理、故障分析、设备通讯、配置管理、测试流程配置、自动化测试、数据存储与管理等均工作正常, 满足系统的设计需求和目标。

表 1 各参数测试结果

输入值/V	测量参数	测试值/V	绝对误差/V
0.15	Pt1	0.143	-0.007
	Pt2	0.144	-0.006
	Ps1	0.145	-0.005
	Ps2	0.157	0.007
	VT	0.160	0.010
2.50	Pt1	2.495	-0.005
	Pt2	2.503	0.003
	Ps1	2.506	0.006
	Ps2	2.495	-0.005
	VT	2.508	0.008
4.96	Pt1	4.956	-0.004
	Pt2	4.966	0.006
	Ps1	4.953	-0.007
	Ps2	4.967	0.007
	VT	4.951	-0.009

5 结束语

高度传感器自动测试系统已在公司多型传感器的研制和生产中成功应用, 实践表明高度传感器自动测试系统可靠性高, 通用性强, 操作方便, 大大节约了人力资源和测试成本, 提高了传感器的测试效率, 并具有对类似传感器较强的扩展能力。高度传感器自动测试系统的成功研制和应用, 也为公司其他非传感器机载系统和产品自动测试系统的设计积累了宝贵的经验。

参考文献:

- [1] 魏成巍, 陈冬, 焦中科, 等. 高度传感器在无人直升机上的应用及故障分析 [J]. 现代电子技术, 2013, 36 (6): 35-37.
- [2] 杨炳尉. 标准大气的参数的公式表示 [J]. 宇航学报, 1983 (1): 83-85.
- [3] 袁智荣, 王文襄. 硅压阻式压力传感器的一种温度补偿方法及应用 [J]. 传感器技术, 1998, 17 (3): 25-27.
- [4] 沈震, 戴英侠, 杨江平. 自动测试设备软件平台通用性的研究与设计 [J]. 计算机工程与应用, 2005, 9: 229-232.
- [5] 刘锐宁, 梁水, 宋坤. Visual C++ 开发技术大全 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [6] 阙正宇, 赵雷, 杨季文. 软件界面动态生成及可视化调整的设计与实现 [J]. 微机发展, 2005, 15 (8): 23-26.
- [7] 宋扬, 王清海. 并行测试技术工程化应用研究 [J]. 航空兵器, 2017, 2: 65-70.
- [8] 高占宝, 梁旭, 李行善. ATE 系统校准技术研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2005, 19 (2): 1-5.
- [9] 孙群, 孟晓凤, 郑伟. 自动测试系统视情保障方法研究 [J]. 测试技术学报, 2008, 22 (1): 24-30.
- [10] 赵海鹰. 自动测试系统自校准与统计控制分析 [J]. 计量技术, 2018, 6: 40-42.
- [11] 李永军, 马力元. 采用数据库控制测试流程的自动测试系统 [J]. 自动化与仪表, 2003, 1: 68-69.