

某型直升机高可靠集成式通用自动测试系统的研制

李燕^{1,2}, 王海涛¹, 敬宏², 敬敏², 赵书艺²

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016; 2. 成都国营锦江机器厂, 成都 610043)

摘要: **目的** 研制某型直升机电子产品通用自动测试系统, 通过自动检测快速隔离各系统电子产品故障, 加快故障修复, 保障装备的完好率。**方法** 在充分分析故障损伤原因、类型、影响以及各系统电子产品测试需求、测试信号、性能特征的基础上, 利用国内外先进的自动测试技术、总线技术、虚拟仪器技术、面向信号的软件架构及编程语言技术等, 完成通用自动测试系统软硬件平台的设计与开发。**结果** 采用 VXI、GPIB、1553B、LAN 等多种总线仪器, 在满足测试需求的前提下, 减小了自动测试系统的体积。采用虚拟仪器技术, 实现了测试程序与硬件资源的无关性, 使用面向信号的 ATLAS 语言编写测试程序, 方便移植, 提高了测试程序的开发效率。**结论** 通过长时间的使用验证, 该自动测试系统可完成某型直升机各系统电子产品的功能检查、性能检测及服役故障隔离, 通用性、集成性、可靠性、耐久性、操作性强, 还有一定机动性, 适用于各种地面环境装备保障任务。

关键词: 集成; 可靠性; 自动测试设备; 机载电子产品; 故障隔离; 地面保障

中图分类号: V216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)05-0104-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.05.015

Development of Highly Reliable Integrated GATS for a Certain Helicopter

LI Yan^{1,2}, WANG Hai-tao¹, JING Hong², JING Min², ZHAO Shu-yi²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, China;
2. Chengdu State-owned Jinjiang Machinery Factory, Chengdu 610043, China)

ABSTRACT: The repair factory has developed a universal automatic test system (GATS) for the electronics in a certain type of helicopter, which can automatically detect and quickly isolate the failures of electronics of various systems, speed up the repair of failures, and ensure the completion rate of equipment. Based on the comprehensive analysis of the causes, types and effects of failures, as well as the test requirements, test signals and performance characteristics of the electronics, the hardware platform of GATS was designed and developed by the advanced automatic test technology, bus technology, virtual instrument technology, signal-oriented software architecture and programming language etc. in China and abroad. VXI, GPIB, 1553B and LAN bus instruments were adopted to reduce the volume of GATS on the premise of meeting the test requirements. Virtual instrument technology was used to achieve the independence between the test program and hardware resources. The signal-oriented ATLAS

收稿日期: 2023-03-14; 修订日期: 2023-05-06

Received: 2023-03-14; Revised: 2023-05-06

作者简介: 李燕 (1989—), 女。

Biography: LI Yan (1989-), Female.

引文格式: 李燕, 王海涛, 敬宏, 等. 某型直升机高可靠集成式通用自动测试系统的研制[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 104-110.

LI Yan, WANG Hai-tao, JING Hong, et al. Development of Highly Reliable Integrated GATS for a Certain Helicopter[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 104-110.

language was applied to write the test programs, which made the test programs easy to be transferred. Thus, the development efficiency of test programs was improved. Long-term application verifies that the GATS can complete the function inspection, performance detection and service failure isolation of various electronics of the helicopter. It is universal, reliable, durable and easy to operate and has certain maneuverability and is suitable for equipment support in ground environment.

KEY WORDS: universal; integrated; reliable; automatic test system; airborne electronics; failure isolation; ground support

某型直升机为修理工厂正在试修的某型国产机, 其上装载的电子产品按功能可分为 7 个系统: 综合任务处理系统、通信导航识别系统、组合导航系统、自动飞行控制系统、电气系统、武器系统和电子自卫系统。各系统间交联的信号多, 共享的资源多, 每个系统下有 3~10 个外场可更换单元 (LRU), LRU 数量多, 大部分是性能先进、集成度高的新型数字化产品。在直升机服役过程中, 电子产品易受高温、低温、盐雾、湿热、淋雨、震动、冲击等服役环境影响, 引发共振、死机、性能劣化、功能失常等故障, 使直升机的作战效能降低, 影响作训任务完成, 给电子产品的维护和保障带来了挑战^[1-3]。直升机机载电子产品的修理离不开检测设备, 根据国内外装备保障经验, 若针对每个型号的 LRU 研制一套专用测试设备, 不仅前期研发投入巨大, 后期维护费用也很高昂, 并且存在通用仪器资源不可复用, 无法替换, 测试程序集 (TPS) 不可移植^[4-5]的缺点。

国外自动测试技术发展领先于国内, 美军在 20 世纪 80 年代经过各军种独立研发后, 于 1996 年启动了下一代自动测试 (NxTest) 计划, 旨在降低自动测试系统 (ATS) 的使用维护费用, 提高互操作能力, 实现被测对象 (UUT) 全寿命周期内的测试诊断信息共享, 提高测试效率和准确性。NxTest 工作组针对自动测试设备 (ATE)、测试接口适配器 (TUA)、TPS 和 UUT 等几个 ATS 主要组成部分, 定义了 24 个关键接口, 建立了即插即用 (VXI Plug & Play, VPP)、可互换虚拟仪器 (Interchangeable Virtual Instrument, IVI)、虚拟仪器软件结构 (Virtual Instrument Software Architecture, VISA)、广域测试环境 (A Broad-Based Environment for Test, ABBET)、自动测试标注语言 (Automatic Test Markup Language, ATML) 等软硬件标准^[6-9], 为通用 ATS 的开发与研制奠定了基础。

国内军用 ATS 在测试需求的推动下, 也有一定发展。如文献[10]介绍了基于 PXI 总线的通用导航设备检测平台; 文献[11]介绍了某型制导武器通用自动测试系统; 文献[12]介绍了飞机飞行控制系统通用测试平台; 文献[13]介绍了多型雷达通用自动测试系统。这些 ATS 设计时, 均采用了测试总线技术^[14-15]、虚拟仪器技术^[16-17]、面向信号的仪器控制技术和编程语言^[18-19]等, 但从文献可知, 他们的测试范围仅限于某一类电子产品, 如某型导航设备、某型制导武器、飞行控制系统、雷达等, 在设备通用化上始终没有突破。

由于直升机修理工厂承修各类机载电子产品, 所有电子产品均需相应的测试设备, 由于维修时机的不确定性, 专用 ATS 有被长期闲置的可能, ATS 长期闲置会影响使用寿命, 也占用维护成本^[20]。本文所述通用自动测试设备 (GATS) 在综合运用先进技术的基础上, 极大地扩展了测试范围, 涵盖了修理工厂对某型直升机七大系统不同种类不同型号 LRU 的测试需求, 并延伸到其他机型的同系列电子产品, 真正实现了 ATS 的通用化、小型化、高集成性、可扩展性、高可靠性和故障诊断的稳定性, 提高了该型直升机的现役保障及返厂维修效率。

1 测试需求分析

修理工厂立足某型直升机, 通过广泛调研和充分论证, 结合自身实际情况, 提出了 42 个 LRU 的检测需求。研制 GATS 需以自动方式完成所有 LRU 的离位检测, 包括功能检查和主要性能测试, 对故障进行隔离, 对测试数据进行存储和回放, 自动识别 TUA 和 LRU, 防止安装错误, GATS 具有自检能力, 可生成测试报告并进行报告的管理和输出。通过对每个被测对象的测试需求进行汇总分析, 得出激励/测试信号类型有电压电流、总线信号、开关量、射频信号、模拟信号、音频信号、视频信号等, 再根据激励/测试信号的指标, 选择满足要求的激励/测试仪器。

2 GATS 总体架构设计

GATS 总体架构如图 1 所示。硬件部分主要由测控计算机、仪器资源、TUA、连接电缆等组成。测控计算机是人机交互的工具, 是 GATS 的控制核心, 主要完成仪器资源的配置、管理和控制, 运行测试程序, 管理测试数据。仪器资源是 GATS 的硬件主体, 完成所有激励与测试任务, 包含了 VXI、GPIB、1553B、LAN 等多总线仪器, ICA 阵列接口组件及 ITA 测试接口组件等。VXI 总线仪器由 VXI 零槽控制器、VXI 总线仪器、VXI 开关板卡组成。仪器资源的输入输出引脚通过导线与 ICA 阵列接口的各信号孔直接相连^[21]。TUA 通过箱体后侧的 ITA 测试接口组件与仪器资源的 ICA 阵列接口组件连接, 低频测试信号通过箱体前面板上的航插接口与 UUT 连接, 射频信号通过射频电缆从测试仪器连接到 UUT。

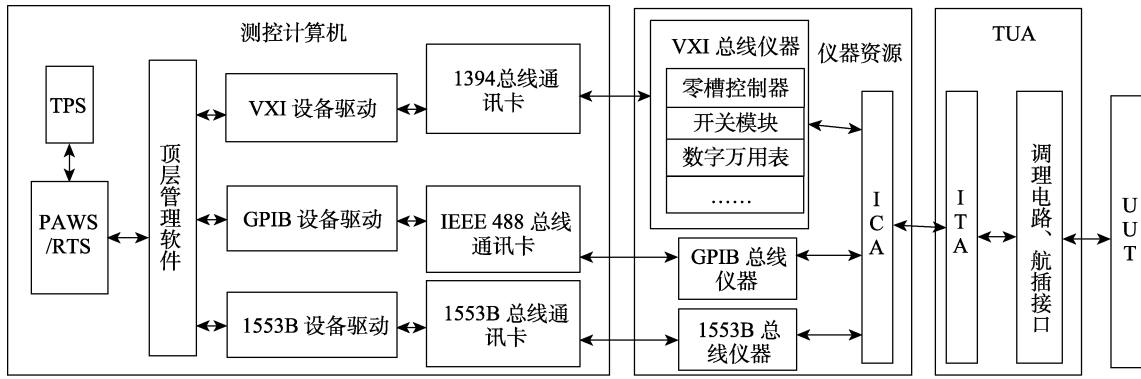


图1 GATS 总体架构
Fig.1 Overall architecture of GATS

测控计算机与仪器资源的连接通过安装相应的总线通讯卡及设备驱动完成，与 VXI 零槽控制器通讯需安装 1394 总线通讯卡，与 GPIB 测试仪器通讯需安装 IEEE488 总线通讯卡，与 1553B 测试仪器通讯需安装 1553B 总线通讯卡。计算机软件需安装 VISA 库、ACCESS 数据库，配置所有仪器资源的底层驱动、TP 运行环境组件和顶层管理软件。

3 系统硬件设计

GATS 需完成各系统 UUT 的测试，综合分析每一项 UUT 的测试需求后，确定需配置的仪器资源有：电源模块、开关模块、A/D、D/A、数字 I/O、总线仿真器、可编程电阻、数字万用表、频率计、任意波形发生器、射频信号发生器、频谱分析仪、功率计、无线电综测仪、数字示波器、视频信号监视器、专用模拟负载等。所有仪器设备使用 4 个标准机柜安装，如图 2 所示。机柜左右侧壁开有信号接口，仪器设备的电源、信号集中到 Hypertac 公司的 H 系列连接器上，通过电缆在机柜之间连接，最终汇集到 ICA 上。

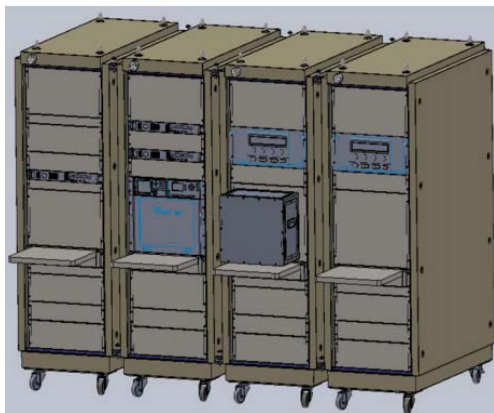


图2 GATS 外形
Fig.2 Outline of GATS

3.1 仪器资源选型

为了保证测试系统的性能，并且最大程度地减少

仪器自身的体积，测试资源选型时遵循以下原则：1) 优先选用 VXI 或 PXI 模块仪器，突出系统的通用性、小型化和模块化；2) 优先采用主流货架产品，考虑到后期维护的便捷性、成本高低、技术成熟度等，部分仪器采用国产化产品；3) 所选测试资源的技术指标满足 UUT 的要求，准确度高于被测信号准确度的 3 倍。按照以上原则，GATS 选用的仪器资源有 VXI 总线仪器、LAN 总线仪器等，具体见表 1。

3.2 适配器

适配器是测试系统与 UUT 之间的连接机构，根据 UUT 的测试需求，在 TUA 内实现激励源、测量仪器、调理电路、TUA 面板航插接口之间的连接。TUA 的设计遵循以下原则：1) 配置识别电阻作为识别代码，以便 TP 判断 TUA 是否连接正确，防止因误接造成 UUT 损坏；2) 尽量减少 TUA 的数量，根据测试需求分析，实现多个 UUT 共享 1 个 TUA；3) 对信号进行预处理，保证经其输出的激励信号满足 UUT 的激励需求，经其输入的测试信号符合 TP 的采集需求。适配器通过 ICA 和 ITA 接口与测试系统连接，ICA 接口为仪器资源的输入输出接口，ITA 接口为适配器接口。ITA 接口固定于每个适配器的箱体后侧，绝缘模块和插孔与 ICA 一一对应，ICA 通过机械锁紧装置固定 ITA。为了方便 GATS 的计量和自检，保证系统的测量精度和正常运行，GATS 还设计了平台自检用 TUA 和计量用 TUA。

4 系统软件设计

4.1 软件平台

GATS 软件系统主要由计算机操作系统、TP 开发环境、TPS、仪器驱动、人机交互客户端、数据库组成。测控计算机采用 Windows XP 操作系统。

TP 开发环境采用美国 TYX 公司的 PAWS Developers Studio。PAWS 是一款专门用于自动测试系统的软件平台，具有分层次的软件体系结构，使用面向信号的 ATLAS 语言开发 TP。PAWS 包括 3 个部分：

表 1 GATS 仪器资源
Tab.1 Instrument resources of GATS

序号	仪器名称	型号	数量	总线类型
1	VXI 机箱	1261B	2	VXI
2	VXI 控制器	E8491B	2	VXI
3	开关控制器	Opt.01T	3	VXI
4	大功率电源开关	1260-22	1	VXI
5	高密度矩阵开关	1260-45A	2	VXI
6	C 型开关	E1442A	2	VXI
7	射频开关	E1472A	1	VXI
8	数字万用表	E1412A	1	VXI
9	A/D	SC53413	1	VXI
10	D/A	SC53201	1	VXI
11	DIO	SC53406	2	VXI
12	ARINC429 总线仿真器	AXI429-16(429)	1	VXI
13	串口总线仿真器	SC53452Z	4	VXI
14	频率计	SC53124	1	VXI
15	任意波形发生器	SC53202	1	VXI
16	射频信号发生器	E8257D	1	LAN
17	数字示波器	MS05054B	1	LAN
18	程控直流电源 1	N5747A	1	LAN
19	程控直流电源 2	N5765A	1	LAN
20	程控直流电源 3	N6752A	2	LAN
21	程控直流电源 4	N6743B	2	LAN
22	三相程控信号源	PSA2202A	1	串口
23	无线电通讯 综合测试仪	IFR8800SX	1	LAN
24	VPC9025	/	1	无总线

1) PAWS/TRD 流程图编辑工具, 用于编辑测试策略流程图, 开发平台可将流程图自动转化, 生成测试代码, 代替人工编写代码; 2) PAWS/TPS 测试程序开发工具, 用于编写、编译、调试、仿真 TP; 3) PAWS/RTS 运行时系统, 提供人工和自动测试功能, 执行和接收由 PAWS/TPS 生成的代码和数据, 驱动仪器进行测试, 记录测试结果^[22]。

仪器驱动层是软件平台的最底层, 直接控制系统仪器资源。区别于传统仪器, 模块化仪器依赖于计算机软件的控制, 开发 TP 之前需要完成仪器驱动的安装。

人机交互客户端是顶层管理软件, 采用 Microsoft Visual C++ 进行开发。由于 PAWS/RTS 运行环境比较单一, 人机界面过于简单, 不具有测试系统信息的管理功能, 且只有英文版, 不便于操作人员使用, 因此需要开发一个人机交互客户端。利用 COM、ActiveX 等接口技术对 TP 运行环境组件, ACCESS 数据库进行调用^[23], 控制硬件资源完成测试任务, 显示测试结果, 实现测试数据的管理和查询, 用户权限的管理等。

数据库采用 ACCESS 数据库, 用于存储顶层管理

软件运行时的各类信息, 包括 UUT 信息表、TP 信息表、测试报告信息表、用户信息表、日志信息表。

4.2 仪器驱动设计

驱动程序是由仪器厂商封装好的相对独立的功能函数集合, 但不同厂商提供的仪器, 驱动没有统一标准。因此, 为了实现 TPS 可移植和仪器可互换性, TPS 不能直接调用厂商提供的仪器驱动, 须对厂商提供的仪器驱动进行二次封装。

首先在 PAWS 平台中完成设备库 DDB、开关库 WDB、适配器库 ITA 的配置。设备库 DDB 用于对各种仪器设备进行描述, 描述内容由设备名称、连接端口、功能、能力范围、宏动作语句等部分组成。然后依据对仪器设备的描述, 开发设备驱动程序生成单个设备驱动程序的包装文件, 该包装文件与 TPS 以及 WDB、ITA 等数据文件配合即可驱动设备完成动作。

虚拟仪器关键技术在于 VISA 控制技术, VISA 是 VXI plug&play 联盟制定的 I/O 接口软件标准及其规范的总称, 其提供统一的设备资源管理、操作和使用机制, 具有与硬件结构无关的特点^[24]。无论仪器资源使用串口还是 VXI、PXI、LXI、GPIB 等总线接口, 都具有相同的操作函数。它提供仪器编程的标准 I/O 函数库, 计算机通过它来控制仪器。

4.3 测试程序设计

在 PAWS 平台中, 为每一个 UUT 开发对应的 TP。由于 TP 与仪器无关, 因此可由多名开发人员在不同计算机上并行脱机仿真调试。TP 分别仿真调试完成后, 编译生成对应可执行的 dll 文件^[25], 由 GATS 的顶层管理软件进行加载运行。TP 主程序 XX-MAIN 流程如图 3 所示, 主要完成测试程序的流程管理, 对其他模块进行调用, 以及测试基本信息的获取、显示和存储。

为了实现 GATS 的自检功能以及方便后期维护计量, 还开发了自检 TP 和计量 TP。开发人员可以根据 UUT 的检测需求及 GATS 的冗余量情况新增或删减 TP, 保证 GATS 的开放性。

5 试验与验收

该型直升机通用自动测试系统最终完成了 7 个系统 42 个不同型号 LRU 的检测任务, 均使用合格产品完成了验收。以综合任务处理机为例, 其测试过程: 打开顶层管理软件, 用户登录, 在目录下选择待测 LRU 的名称、型号, 本系统可对 3 个型号的综合任务处理机的性能进行检测, 选择对应 LRU 的型号, 点击左下角的“加载”按钮, 将该型号综合任务处理机 TP 导入 RTS 服务器, 然后点击“运行”, TP 在 RTS 服务器中运行时的信息显示在测试过程信息显示框中, 操作界面如图 4 所示。

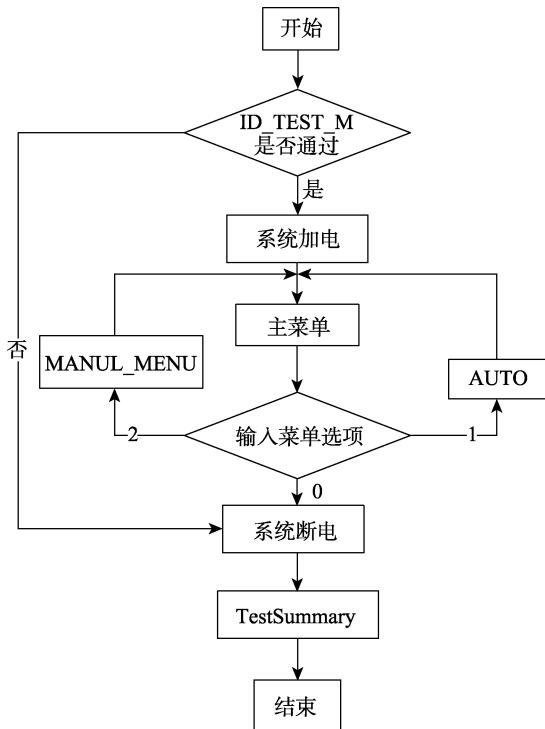


图3 主程序执行流程
Fig.3 Main program execution flow

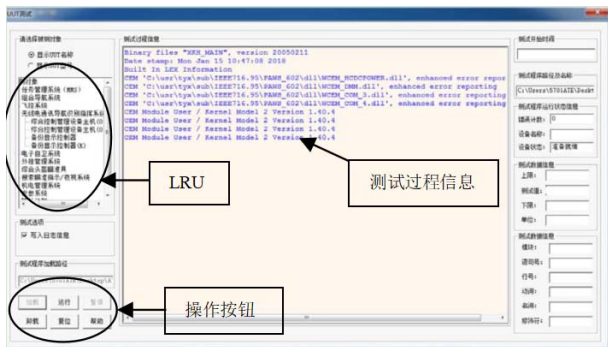


图4 测试操作界面
Fig.4 Operating interface for testing

根据测试界面的提示，安装 TUA、UUT，连接测试电缆，点击确认后，程序将依次进行 TUA 识别电阻、LRU 研制单位识别电阻、LRU 识别电阻测试。若识别电阻测试通过，程序将开始初始化和上电，上电过程是 RTS 根据 TP 中的上电程序代码从 ATLAS 设备库中分配电源资源，调用该资源的底层驱动与平台电源通讯执行对应动作。上电后回读电源电压，以同样的方法调用数字万用表测量综合任务处理机电压输出引脚。供电正常后，测试界面显示主菜单，如图 5 所示。

测试方法可以选择自动测试或者选项测试，操作者输入数字 1，程序按照测试项顺序进行自动测试。测试完成后，输出测试报告，给出测试结论，期间无需任何操作，实现测试自动化，有效减少了人为差错。当需确认综合任务处理机某 1 项或几项功能、性能的

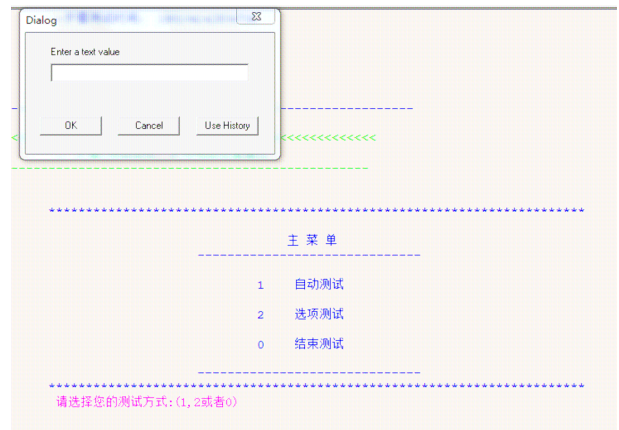


图5 主菜单显示
Fig.5 Main menu

好坏时，操作者可输入数字 2，进入单个测试项选择菜单，选择需要测试的项目。如需退出，选择数字 0，结束测试。

目前该系统已实际应用于修理工厂的维修保障任务，经过长期大量的试验验证，该系统能够可靠稳定地完成该型直升机各系统机载电子产品的功能检查、性能测试以及故障隔离工作，各激励与测量仪器按时计量，未发现损坏或性能下降的情况。

6 结语

ATS 是直升机机载电子产品地面维修保障的必要设备，本文充分体会通用 ATS 的设计思想，借鉴国外先进技术及国内测试设备的研发经验，研制的 GTAS 最大限度地涵盖了某型直升机及其他机型目前已知的相近型号机载电子产品测试需求，测试总线、机箱槽位留有余量，可继续扩展。硬件方面尽量复用资源，减少了仪器设备的数量和体积，具有一定的机动性，能适应测试环境变化。TP 采用统一的框架结构和开发语言，通用功能的程序模块可复用，减小了 TP 的故障概率，系统可靠性高。人机界面简易，操作性好。测试过程自动化，无需人工干预，极大地提高了测试效率和准确度。综上所述，该直升机通用自动测试系统，真正意义上实现了自动测试系统的通用化、小型化、高集成性、可扩展性、高可靠性以及故障诊断的稳定性，可有效提高该型直升机机载电子产品的维修保障效率，相较于传统自动测试设备，使用频率更高，使用期限更长，节约了全寿命周期成本，具有良好的推广应用前景。

参考文献:

[1] 吕宝, 胡毅. 航空电子设备环境适应性评价技术浅谈 [J]. 科技与创新, 2020(9): 96-97.
LYU Bao, HU Yi. Discussion on Environmental Adapta-

- bility Evaluation Technology of Avionics Equipment[J]. Science and Technology & Innovation, 2020(9): 96-97.
- [2] 景博,李龙腾,胡家兴.耦合环境应力下电子设备焊点退化试验研究[J].强度与环境,2020,47(1):55-63.
JING Bo, LI Long-teng, HU Jia-xing. Degradation Experiment Study on Solder Joint of Electronic Equipment under Coupling Stress[J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(1): 55-63.
- [3] 祝耀昌,常文君,傅耘.武器装备环境适应性与环境工程[J].装备环境工程,2005,2(1):14-19.
ZHU Yao-chang, CHANG Wen-jun, FU Yun. Environmental Suitability of Weapons and Environmental Engineering[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(1): 14-19.
- [4] 陈波,孔凡立,牟弘.基于STD和ATML标准的面向信号软件[J].测控技术,2018,37(6):43-46.
CHEN Bo, KONG Fan-li, MU Hong. Signal-Oriented Software for ATS Platform Based on STD and ATML[J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(6): 43-46.
- [5] 刘世军,杨瑞青.机载电子设备通用自动测试系统研究与实现[J].现代电子技术,2009,32(6):178-181.
LIU Shi-jun, YANG Rui-qing. Investigation and Realization of General Purpose Automatic Test System for Airborne Equipment[J]. Modern Electronics Technique, 2009, 32(6): 178-181.
- [6] 严乐,司斌,张从霞,等.美军自动测试系统的现代化发展综述[J].航空兵器,2016,23(2):71-76.
YAN Le, SI Bin, ZHANG Cong-xia, et al. Review of the Modernization of American Military ATS[J]. Aero Weaponry, 2016, 23(2): 71-76.
- [7] 于劲松,李行善.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,2005,13(1):1-3.
YU Jin-song, LI Xing-shan. Architecture and Key Technologies of Next Generation Automatic Test System[J]. Computer Automated Measurement & Control, 2005, 13(1): 1-3.
- [8] 招华.美军未来自动测试系统的关键技术[J].IT时代周刊,2014(z2):248-251.
ZHAO Hua. Key Technologies of Future Automatic Test System of American Military[J]. IT Time Weekly, 2014(z2): 248-251.
- [9] 于功敬.军用ATE/ATS基本型系统设计分析[J].计算机自动测量与控制,2000,8(1):5-7.
YU Gong-jing. Design Analysis of the Military ATE/ATS Basic Model System[J]. Computer Automated Measurement & Control, 2000, 8(1): 5-7.
- [10] 王传刚,王珍珍,张庆磊,等.基于PXI总线的通用导航设备检测平台设计[J].电子设计工程,2016,24(18):69-71.
WANG Chuan-gang, WANG Zhen-zhen, ZHANG Qing-lei, et al. A Design of Testing Platform of General Navigation Equipment Based on PXI[J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(18): 69-71.
- [11] 刘鹏飞,谢森,姚玉山,等.某型制导武器通用自动测试系统方案设计[J].计算机测量与控制,2017,25(6):95-99.
LIU Peng-fei, XIE Sen, YAO Yu-shan, et al. Scheme Design of the General Automatic Testing System for a Kind of Guided Weapon[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(6): 95-99.
- [12] 刘洋,陈雪峰,韩泉泉.飞机飞行控制系统通用测试平台设计和实现[J].电子设计工程,2016,24(24):5-8.
LIU Yang, CHEN Xue-feng, HAN Quan-quan. Design and Implementation of Flight Control System Universal Test Platform[J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(24): 5-8.
- [13] 龚意敏.多型雷达通用自动测试系统的设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
GONG Yi-min. The Design and Implementation of Various General Automatic Test System for Radar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [14] 张荣,王珏,周继昆,等.总线类测试系统的技术现状及发展方向[J].装备环境工程,2016,13(5):151-159.
ZHANG Rong, WANG Jue, ZHOU Ji-kun, et al. Technique Status and Development Direction of Bus-Type Test System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 151-159.
- [15] 朱利文,于雷,金传喜.测试总线的发展与展望[J].现代防御技术,2019,47(1):151-161.
ZHU Li-wen, YU Lei, JIN Chuan-xi. Review and Outlook of Test Bus[J]. Modern Defence Technology, 2019, 47(1): 151-161.
- [16] 张大弛.虚拟电子测量仪器集成系统基础架构的研究与设计[D].长春:吉林大学,2017.
ZHANG Da-chi. The Basic Architecture's Research and Design of the Virtual Electronic Measurement Instrument Integrated System[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [17] 杜占龙,谭业双.自动测试系统软件平台的设计与实现[J].测控技术,2012,31(4):96-99.
DU Zhan-long, TAN Ye-shuang. Design and Realization of ATS Software System[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(4): 96-99.
- [18] 张杰.面向信号的仪器控制技术研究及实现[D].成都:电子科技大学,2014.
ZHANG Jie. Research and Realization on Signal-Oriented Instrumental Control Technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [19] 梁炎.信号和测试描述标准IEEE1641研究及其TSF和TPL工程实现[D].成都:电子科技大学,2017.
LIANG Yan. Research and Implementation on TSF and TPL in Signal and Test Description Standard IEEE1641[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [20] 徐卓,陈德军,宋帆,等.直升机电子设备ATS通用硬件平台设计[C]//2017年航空智能装备与试验测试技术学术年会论文集.武汉:中国航空工业技术装备工程协会,2017.
XU Zhuo, CHEN De-jun, SONG Fan, et al. Design of

- ATS Universal Hardware Platform for Helicopter Airborne Electronic Equipment[J]. 2017 Annual Meeting of Aviation Intelligent Equipment and Test Technology. Wuhan: China Aviation Industries Technology Equipment Engineering Association, 2017.
- [21] 王凯, 陈德军, 宋帆, 等. 基于 PAWS 的航空电子系统通用自动检测设备设计[J]. 电子技术与软件工程, 2020(2): 103-106.
- WANG Kai, CHEN De-jun, SONG Fan, et al. Design of General Automatic Test Equipment for Avionics System Based on PAWS[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(2): 103-106.
- [22] 耿福明. 面向信号的 ATS 仪器控制模块与 TPS 生成工具的实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- GENG Fu-ming. Implementation of Instrument Controlling-Module and TPS Generation-Tool in Signal-Oriented ATS[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [23] 王凯, 陈德军, 范光华, 等. 基于 MFC 的航空电子系统综合自动检测设备客户端软件设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(2): 126-130.
- WANG Kai, CHEN De-jun, FAN Guang-hua, et al. Design and Implementation of Client Software for Integrated Automatic Test Equipment Software of Avionics System Based on MFC[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(2): 126-130.
- [24] 杨心宇, 章国宝, 柴继涛, 等. 基于 VISA 库的电源测试系统的设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2014, 27(5): 55-56.
- YANG Xin-yu, ZHANG Guo-bao, CHAI Ji-tao, et al. Design and Implementaion of Power Auto-Testing System Based on VISA[J]. Industrial Control Computer, 2014, 27(5): 55-56.
- [25] 张强, 黄家成, 赵文俊, 等. 某型机载通信对抗设备自动测试系统设计与实现[J]. 测控技术, 2021, 40(12): 51-58.
- ZHANG Qiang, HUANG Jia-cheng, ZHAO Wen-jun, et al. Design and Implementation of an Automatic Test System for a Certain Type of Airborne Communication Countermeasure Equipment[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(12): 51-58.

责任编辑: 刘世忠