

文章编号:1674-8190(2020)01-122-10

# 自动飞行控制计算机通用自动测试平台设计

韩建辉,张芬,杜永良

(航空工业第一飞机设计研究院 飞控系统设计研究所,西安 710089)

**摘要:** 自动飞行控制计算机故障时飞机自带系统级自检模块只能将故障定位在自动飞控计算机,地勤人员需要将整个自动飞行控制计算机返回给供应商进行检测维修,这一过程耗时较长会降低飞机的完好出勤率,为解决该问题设计通用自动测试平台。通过分析自动飞行控制计算机的外部交联关系确定通用自动测试平台需要进行仿真的接口及功能模块;通用自动测试技术平台的硬件平台基于通用标准仪器总线架构,软件平台基于标准自动测试标记语言描述,实现硬件仪器资源的自由扩展和各软件模块的相互独立以及不依赖于硬件和操作系统的可移植性;根据自动飞行控制计算机的接口、功能及组成架构设计检测自动飞行控制计算机各个功能模块的测试方法和测试流程,使用自动测试标记语言将其编译成计算机可运行的测试程序集。该平台在试用中测试效果较好,可以实现故障模块的快速定位,缩短维修时间。

**关键词:** 自动飞行计算机;自动测试技术;自动测试标记语言;PXI 总线;HB 6096 总线

中图分类号: V249

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.01.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## The Design of General Automatic Testing Platform for Automatic Flight Control Computer

HAN Jianhui, ZHANG Fen, DU Yongliang

(Flight Control System Design Research Institute, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** The built-in test of the aircraft can identify the fault on the automatic flight control computer when the automatic flight control computer is in failure. The ground crew deliver the automatic flight control computer to supplier for testing and maintenance, which is wasting time and ineffective, so the general automatic testing platform is designed. The interface and function modules, which need to be simulated are identified by the general automatic testing platform through researching the interface relationship of the automatic flight control computer. The hardware platform of the general automatic testing technology based on general standard instrument bus architecture, and the software platform based on standard automatic test makeup language(ATML) description to realize the hardware free extension, software independence, and portability independent of hardware and operating system. According to the interface, function and composition architecture design of automatic flight control computer, the test methods and test flow of each functional module are designed, and compiled into the operational test assemble with ATML. The platform is of good effect on trial, can realize fast locating of fault module, and shorten the maintenance time.

**Key words:** automatic flight control computer; automatic test technology; automatic test makeup language; PXI bus; HB 6096 bus

收稿日期:2019-01-29; 修回日期:2019-03-19

通信作者:韩建辉,1093312324@qq.com

引用格式:韩建辉,张芬,杜永良.自动飞行控制计算机通用自动测试平台设计[J].航空工程进展,2020,11(1):122-131.

HAN Jianhui, ZHANG Fen, DU Yongliang. The design of general automatic testing platform for automatic flight control computer[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(1): 122-131. (in Chinese)

## 0 引言

长时间的飞行对飞行员的体力、精力及飞行安全带来了严重的挑战,对远航程的大型飞机而言更为严重。自动飞行控制系统将飞行员从耗时耗力巡航阶段的常规飞行操纵中解放出来,使飞行员将主要精力集中于影响飞行安全的起飞着陆阶段及特殊空情的处置之上。因此确保自动飞行控制系统的正常工作以及及时在地面排除故障缺陷就显得尤为重要。自动飞行控制计算机是自动飞行控制系统的核心部件,主要完成自动飞行控制律的实时解算、航姿信号,飞行管理指令的接口输入、三轴偏转指令、三轴飞行指引指令的接口输出,多余度的表决监控及故障隔离等功能<sup>[1]</sup>。自动飞行控制计算机使用超大规模集成电路、技术密集复杂,使用通用仪表和专用测试仪器在地面完成故障检测定位费时费力而且对地勤人员的技术能力提出了很大的挑战,自动检测技术可以快速高效完成故障测试定位<sup>[2]</sup>。

国内外科技人员对自动测试技术进行了相应的研究,李宏伟等<sup>[3]</sup>研究了基于 VMIC 和 VXI 总线的自动测试技术平台,辅助设计人员快速完成控制系统的双“V”设计,但不适用于成熟产品的故障诊断测试;段江涛等<sup>[4]</sup>研究了飞控计算机的自检测方法,却只能将故障定位于部件级,无法定位于部件的某一功能模块;杨尧等<sup>[5]</sup>介绍了基于 LabVIEW 的飞控计算机测试系统设计,主要介绍了使用 LabVIEW 设计测试系统的原理,没有说明自动测试技术的实现方法;苏圣阳<sup>[6]</sup>研究侧重于飞控计算机的测试设备硬件设计与实现,主要用于设计开发阶段;虞健飞等<sup>[7]</sup>研究了动态仿真激励模型技术并将其应用于飞控计算机的测试系统设计中,缺少自动故障诊断功能;张丹涛等<sup>[8]</sup>研究了基于系统需求数据库技术的 BIT 自测试技术,BIT 自测试技术集成于被测计算机内部无法定位功能模块故障;J. Tong 等<sup>[9]</sup>研究了新一代航空自动测试技术模型,侧重于理论技术研究;D. Cheij<sup>[10]</sup>研究了利用 IVI(Interchangeable Virtual Instrument)技术来提高测试系统的性能,侧重于研究 IVI 技术;M. Courtois 等<sup>[11]</sup>研究了新一代法国战机的综合诊断技术,侧重于测试结果的综合处理;刘洋等<sup>[12]</sup>研究

了飞机飞行控制系统通用测试平台设计和实现,侧重于飞控系统级的测试验证,机载设备级的故障无法检测。自动飞行控制计算机故障时可以利用自动飞行控制系统级的自检测(Building in Test,简称 BIT)模块配合飞机级的中央维护系统定位并上报地勤人员,但是自动飞行控制计算机返回生产厂家进行检测维修周期过长会极大地降低飞机的完好出勤率。自动飞行控制计算机通常采用基于背板总线的多板卡功能模块设计,如果使用测试系统将故障定位到某个功能模块,地勤和生产厂家可以快速实现功能模块的更换进而实现自动飞行控制计算机的修复,维修时间的缩短可以提高飞机的完好出勤率。

本文设计基于仪器总线架构的硬件平台以及满足标准化要求的软件平台,利用自动测试标记语言(Automatic Test Makeup Language,简称 ATML)将测试方法和流程编译成测试程序集,并下载到测试工作站,通过自动测试平台向自动飞行控制计算机施加激励并对响应进行测试诊断,将自动飞行控制计算机的故障定位于其内部的某一功能模块,从而实现自动飞行控制计算机的自动测试。

## 1 自动飞行控制计算机的组成与交联关系

自动飞行控制计算机通过 HB 6096、AFDX 总线接收航电系统发送的大气数据、惯性导航数据、无线电高度等飞行姿态参数和飞行管理系统的引导模式、偏航距、偏航角、速度差等引导数据,同时发送自动飞行控制系统的工作模态、状态、飞行参数至航电综合显示和飞参事故记录仪;自动飞行控制板通过 HB 6096 总线设定自动飞控的导航、自动飞行、飞行指引等模式和纵向、横航向的目标控制指令;自动飞行控制计算机利用 HB 6096 总线发送油门控制指令以实现发动机的推力控制;自动飞行控制计算机利用 1553B 总线发送三轴偏转指令和三轴指引指令到电传飞行控制系统控制舵面偏转进而实现飞机的俯仰、滚转、偏航运动;多余度的自动飞行控制计算机之间利用交叉数据链实现计算机之间的余度表决、监控、同步等通信。自动飞行控制计算机的交联关系如图 1 所示。

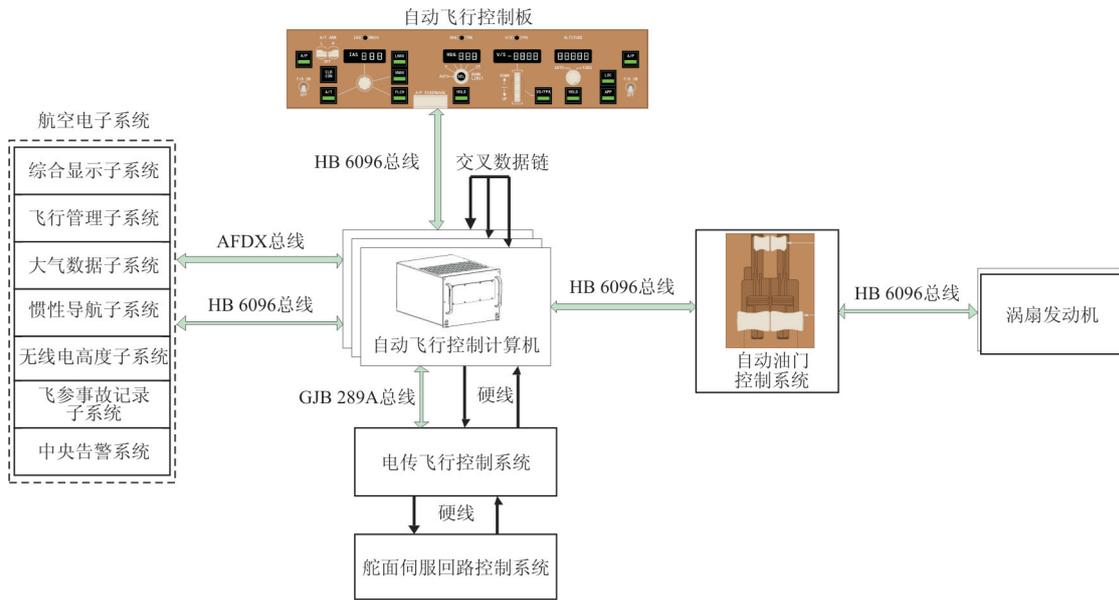


图 1 自动飞行控制计算机交联关系

Fig. 1 The relationship of automatic flight control computer

自动飞行控制计算机采用多板卡功能模块设计,利用背板总线实现各功能模块之间的通信,多功能板卡通常包括:负责计算机控制和控制律计算的 CPU 板、多路总线接口板、模拟信号接口板、电源模块转换板、告警/扩展板、背板等组成。每个板卡为独立的功能模块可实现插拔更换,其结构如图 2 所示。本文设计的通用自动测试系统的目的是将故障定位到自动飞行控制计算机的板卡功能模块级别,计算机的供应商和地勤维护人员可以快速实现板卡功能模块的供应和计算机修复,从而提高飞机的完好出勤率。

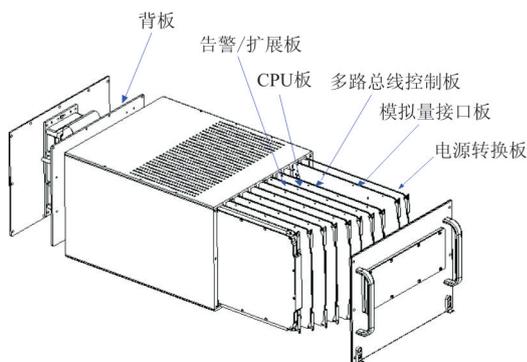


图 2 自动飞行控制计算机结构图

Fig. 2 The framework of automatic flight control computer

## 2 基于标准化体系的通用软硬件自动测试平台设计

自动测试系统若要实现通用化,硬件交联应满足绝大多数控制器的接口需求,软件平台和测试程序集具备可移植性且与硬件平台无关,同时需要具备可扩展性,以确保被测设备升级后自动测试系统依然可用;飞机上不同的控制计算机可以仅仅通过改变接口适配器和测试算法而实现计算机的测试。为实现该目标,需要设计一个开放的基于标准化体系的自动测试系统架构,相关软硬件要素及各要素之间的信息交换接口满足标准化体系,使用满足 IEEE 标准的面向信号的 ATML 描述。

自动测试系统平台满足 IEEE 标准化体系,测试仪器信息满足 IEEE 1671.2,测试工作站信息满足 IEEE 1671.6,实时系统信息满足 IEEE 1671,测试过程信息满足 IEEE 1671.1,故障诊断信息满足 IEEE 1232,测试适配器信息满足 IEEE 1671.5,被测设备信息满足 IEEE 1671.3,测试结果信息满足 IEEE 1636.1。使用标准化体系可以改善自动测试系统全生命周期内的信息流复用,减少更换硬件平台时自动测试软件的更改成本,增强测试仪器

的互操作和互换性,便于自动测试系统的升级。

自动测试系统的总体架构如图 3 所示。测试工作站通过 PXI、PXIe、GPIB 总线连接测试仪器,其组成为基础测试仪器和专业测试仪器,基础测试仪器包括程控电源和通用测试仪表,专业测试仪器包括总线信号、模拟信号、离散信号及其他专业测

试模块。测试仪器通过接口适配器实现与被测设备的信号交联,测试控制计算机利用以太网实现测试结果显示及测试过程控制;软件平台完成测试程序开发和测试执行,并对测试结果进行故障诊断,给出测试结论。

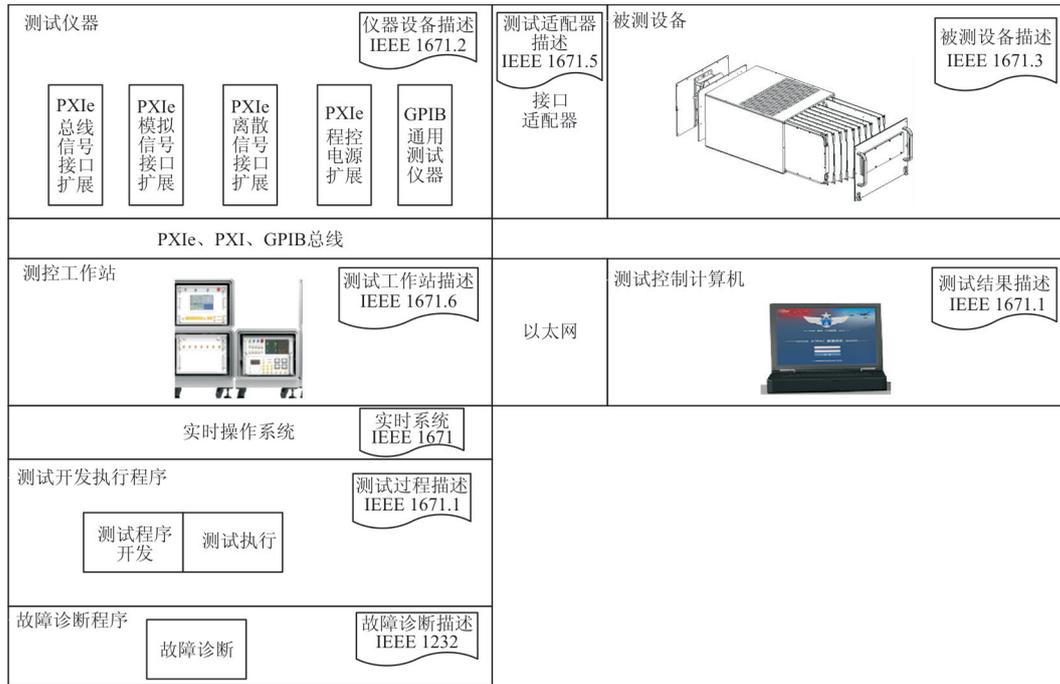


图 3 基于标准化体系的自动测试系统总体架构

Fig. 3 The overall framework of automatic test system based on standardization

### 2.1 通用自动测试平台硬件设计

通用自动测试系统的硬件平台建立在基于 PXIe、PXI、GPIB 总线控制测试仪器的实时测控工作站之上。PXI 是美国国家仪器(NI)公司于 1997 年发布了一种全新的开放性、模块化仪器总线。PXI 是 PCI(Peripheral Component Interconnect)在仪器领域的扩展(PXI eXtensions for Instrumentation),它将 Compact PCI 规范定义的 PCI 总线技术发展成适合于试验、测量与数据采集场合应用的机械、电气和软件规范,从而形成了新的虚拟仪器体系结构<sup>[13]</sup>。PXI 总线引入 PXI Express 技术显著提升了总线带宽形成了新的 PXIe 总线。GPIB(General Purpose Interface Bus)通用接口总

线最早是由美国 HP 公司提出,是最早的仪器总线,现已成为计算机和仪器间的标准通讯协议<sup>[14]</sup>。通用测试仪器一般采用 GPIB 总线与计算机进行通信。

通用自动测试系统的硬件平台架构如图 4 所示,主要包括:人机交互测试控制计算机、实时测控工作站、基于标准总线的程控通用仪器、程控直流 28 V 电源、HB 6096 总线接口板、GJB 289A 总线接口板、AFDX 总线接口板、AD/DA 接口板以及相关的扩展接口板卡和接口适配器。人机交互计算机选用普通非实时 HP 工作站,运行 64 位 Windows 操作系统,通过 TCP/IP 协议的局域网实现测试程序和测试控制指令的下载以及接收实时测控工作站的测试结果。实时测控工作站选用研华

工控机,运行 Vxworks 实时操作系统,测控工作站实时运行测试程序。基于 PXIe、PXI、GPIB 总线的测试仪器资源用于仿真模拟自动飞行控制计算机的外部交联接口信号,程控 28 V 电源模拟计算机的多路直流 28 V 供电电源,程控通用仪器可以实现单个或者多个信号的测量、监控。HB 6096、GJB 289A、AFDX 总线接口板用以仿真航电系统、电传飞控系统、自动油门控制系统和自动飞行控制板等外部交联设备系统的通信信号。AD/DA 接口板实现模拟量、离散量等硬线信号的仿真。其他测试仪器和专用测试设备可以通过 PXIe、PXI、GPIB 总线扩展到测试系统之中。接口适配器一端使用和机载电缆及电连接器插头一样的电缆和插头连接于自动飞行控制计算机,接口适配器另一端依据计算机的各种类型交联信号的通道数连接到基于 PXIe、PXI、GPIB 总线的测试仪器资源上,同时接口适配器还有信号隔离、调理和调制的作用。通用自动测试系统的硬件平台实物如图 5 所示。

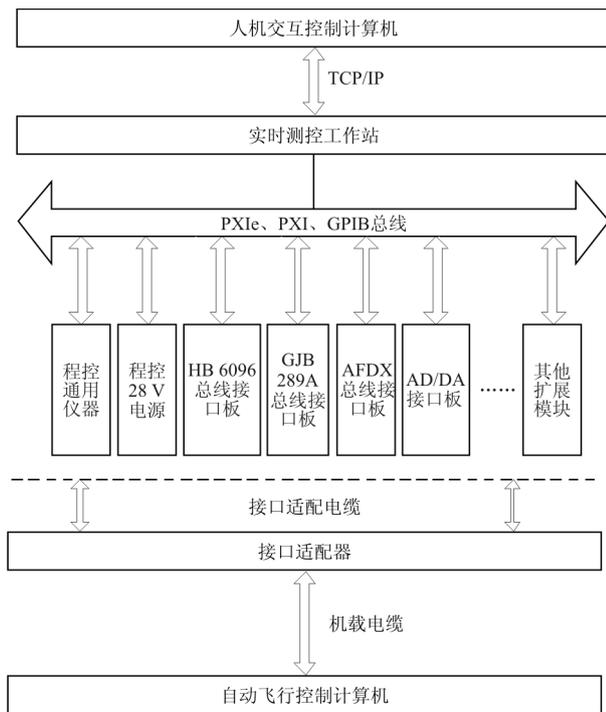


图 4 自动测试系统硬件架构

Fig. 4 The hardware architecture of automatic test system



图 5 自动测试系统硬件实物

Fig. 5 The material object of automatic test system

## 2.2 通用自动测试平台软件设计

通用自动测试系统的软件平台包括开发管理平台、执行管理平台、测试运行引擎和驱动控制等组成,软件架构如图 6 所示。

开发管理平台包括测试程序开发环境、系统集成环境和系统管理组成,测试程序开发环境主要完成被测设备、测试电缆、接口适配器和故障诊断库的信息描述,能够支持 ATML 测试程序的开发和兼容 ATLAS 测试程序的导入,主要应用于被测设备的研制单位。系统集成环境主要提供给测试平台研制厂商,完成测试平台内测试资源(测控工作站、测试仪器)的描述和驱动开发、测试平台接口描述、测试平台内部连线开发。测试软件采用满足 IEEE 1641 及 IEEE 1671 标准的 ATML 语言进行开发和描述,面向信号测试程序只与被测设备有关,与测试硬件环境无关,从根本上保证了测试软件的可移植性。

执行管理平台测试程序的运行环境,运行在实时测控计算机之中。执行管理平台通过 COM 接口与测试运行引擎交互,实现管理、调度和运行编译过的测试程序。结合故障模型进行被测设备的故障测试、诊断和定位。执行管理平台支持测试程序进行全面自动测试和部分选项测试,同时具备型号管理、用户管理和测试平台自检、计量的功能。控制板卡进行接口交联信号仿真模拟的驱动程序由板卡生产厂家提供或者在已有驱动程序的基础上进行二次开发实现。

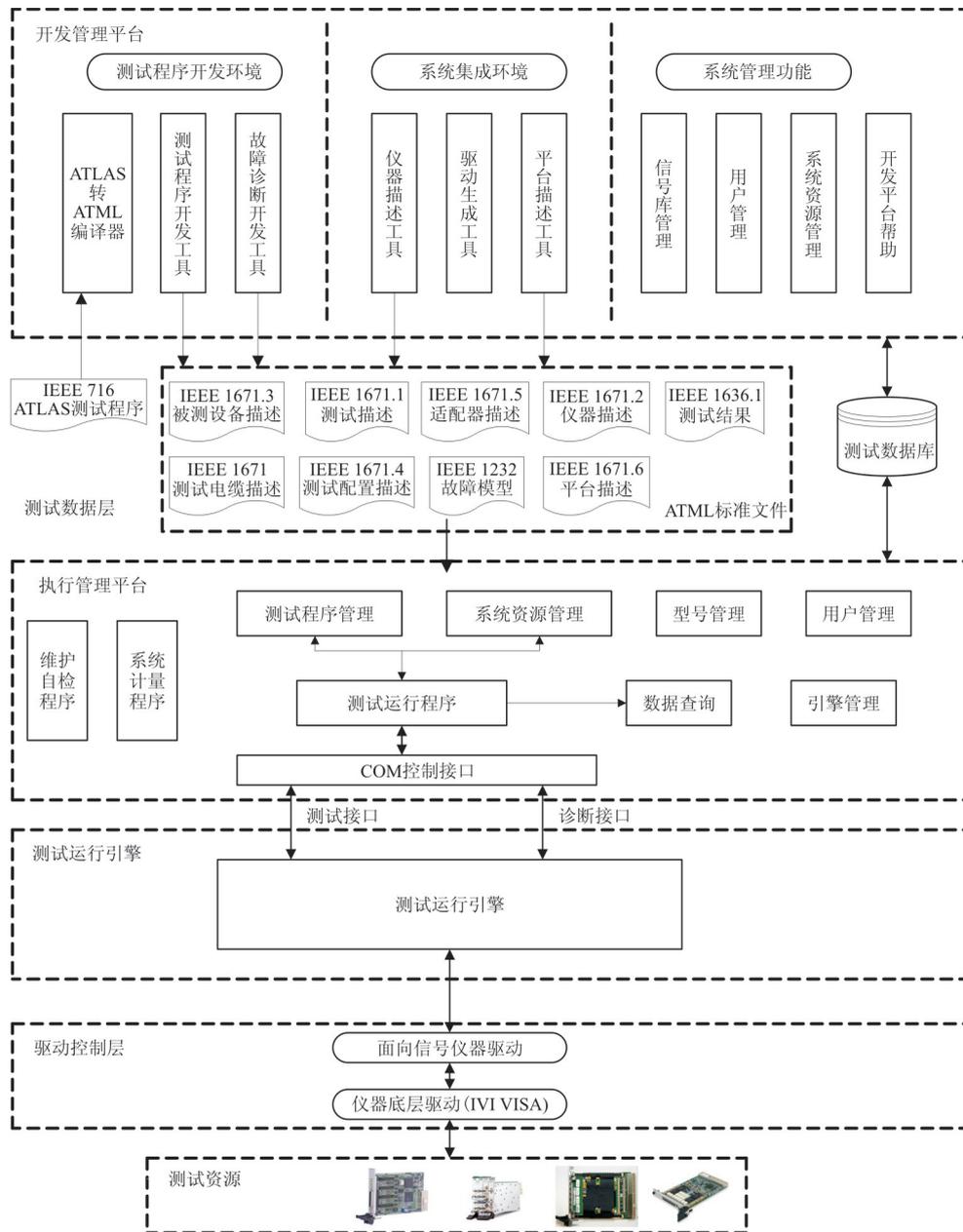


图 6 自动测试系统软件架构

Fig. 6 The software architecture of automatic test system

### 3 自动飞行控制计算机测试方法流程和测试程序集设计

#### 3.1 测试方法流程

自动飞行控制计算机的测试方法、内容、流程设计基于计算机的架构组成和交联关系。测试方法要求测试原理正确、简明有效<sup>[15]</sup>。测试内容要求覆盖计算机的所有功能模块<sup>[16]</sup>。测试流程分为全自动测试流程和选项单独测试功能。测试流程

和测试内容如图 7 所示,可以看出:测试开始后首先识别自动飞行控制计算机的型号和硬件编号,通过计算机的针脚阻抗测试初步排除计算机内部的线路故障,之后执行测试开始准备,其主要内容为计算机加电启动引导,确保计算机启动过程中不会出现硬件自检错误而无法启动计算机,同时确保计算机交联仿真设备返回设备正常的仿真信号,计算机启动后自检正常同时系统工作在正常模态;测试开始前,地勤人员可以选择进行全自动测试或者选

项单独测试;测试完成后生成程序指定格式的测试结果报告。

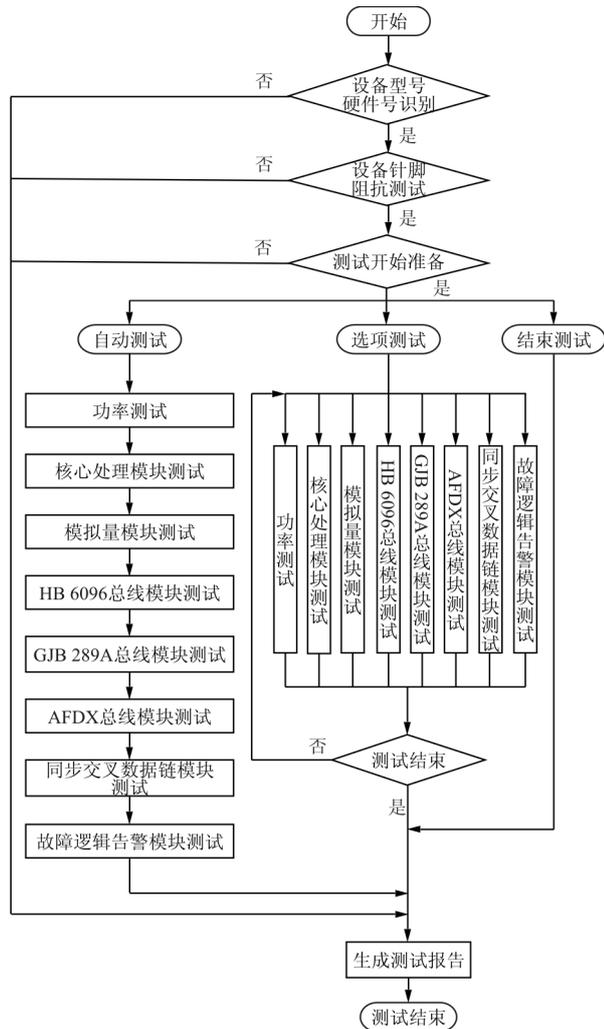


图 7 自动飞行控制计算机测试流程

Fig. 7 The test flow of automatic flight control computer

自动飞行控制计算机由于交联设备较多和多余度配置导致计算机内部的功能模块较多,因此依据内场可更换功能模块分项逐一进行测试,测试分为功率测试、核心处理器模块测试、模拟量模块测试、HB 6096 信号模块测试、GJB 289A 信号模块测试、AFDX 信号模块测试、多余度同步交叉多数数据链通信模块测试以及逻辑告警模块测试等。由于篇幅所限本文仅对测试开始准备和 HB 6096 信号模块测试的方法进行介绍。自动飞行控制计算机的测试开始准备如表 1 所示,步骤 1~3 确保计算机通过硬件自检正常启动,步骤 4~8 确保计算机启动后自动飞控系统能工作在正常模态。测控计算机通过自动飞行控制计算机的监控串口接收端发送测试激励信号,在自动飞行控制计算机的多个 HB 6096 总线发送端接收并处理 HB 6096 信号,利用 label 号和数据内容及有效性校验确认自动飞行控制计算机计算机的 429 总线发送功能正常,具体方法如表 2 所示,可以看出:利用自动飞行控制计算机 HB 6096 总线接收测控计算机仿真的指示空速、马赫数、气压高度、迎角、侧滑角、惯导、无线电高度等航姿信号,在自动飞行控制计算机的监控串口发送端接收处理数据,判断自动飞行控制计算机接收到的 HB 6096 总线数据和测控计算机发送的是否一致。HB 6096 总线模块的信号发送回绕自检功能的测试方法类似本文不再赘述。

表 1 自动飞行控制计算机测试开始准备

Table 1 Test initiation preparation of automatic flight control computer

步骤	执行内容	实现方法
1	禁止看门狗	引脚 A-E14 和 B-E19 短接
2	设置计算机机箱识别号	引脚 B-H4 和 B-109 短接
3	计算机加电启动	引脚高端 B-110 和低端 B-109 施加 28 V 直流电
4	关闭燃调阀监控	引脚 C-5 和 C-14 短接
5	断开控制积分	引脚 B-D1 和 B-109 短接
6	GJB 289A 总线电传系统自检正常	电传系统上报状态正常代码
7	HB 6096 总线航电航姿自检正常	航电设备上报状态正常代码
8	AFDX 总线航电综合显示自检正常	航电综合显示上报状态正常代码

表 2 自动飞行控制计算机 HB 6096 总线模块接收功能测试

Table 2 Receiving function test of HB 6096 bus module of automatic flight control computer

步骤	动作类型	内 容	描 述
1	施加激励	校验:奇校验,发送次数:1,数据:7FFFFFF5A	发送大气机数据
2	施加激励	校验:奇校验,发送次数:1,数据:000000A5	发送惯导数据
3	施加激励	校验:奇校验,发送次数:1,数据:35555578	发送无线电高度数据
4	施加激励	校验:奇校验,发送次数:1,数据:4AAAAA87	飞行管理引导数据
5	施加激励	校验:奇校验,发送次数:1,数据:00001234	组合导航航姿数据
6	测量	监控串口发送端测量	检测计算机接收到的 429 总线数据
7	数据处理	解析 label 号、校验位	检测数据状态是否正确
8	数据处理	解析数据	检测数据是否满足精度要求

### 3.2 测试程序集设计

程序开发人员依据编制好的覆盖自动飞行控制计算机功能模块的全部测试方法、流程设计测试程序集和故障诊断模型库,基于 IEEE 标准将自动飞行控制计算机的测试方法流程编写成使用 XML 语言的测试程序集,同时使用 ATML 语言代码完成被测设备描述、接口适配器描述、测试仪器描述、测控工作站描述、故障诊断模型描述以及测试结果

描述等。ATML 语言详细定义了约束、规则及各组成部分之间的关系,通过多个 ATML 模式定义将测试程序集的相关部分尽可能分离并保持信息的独立性,使测试程序可以不依赖于硬件平台和操作系统,从而实现跨平台的重载和移植。自动飞行控制计算机进行全项目自动测试验收的测试结果及软件测试界面图如图 8~图 9 所示。

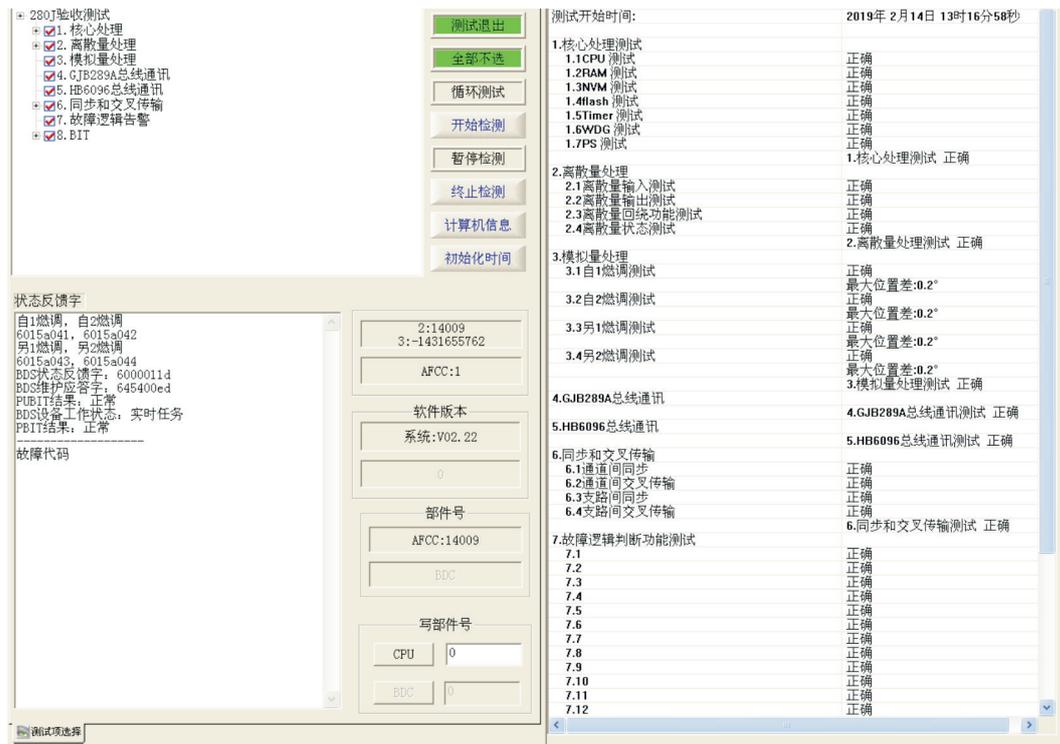


图 8 自动飞行控制计算机全项目自动测试核心功能模块检测结果

Fig. 8 The results of core function module of automatic testing for automatic flight control computer



图 9 自动飞行控制计算机全项目自动测试故障逻辑和 BIT 检测结果

Fig. 9 The results of fault logic and BIT of automatic testing for automatic flight control computer

## 4 结束语

针对飞机自动检测系统只能定位到机载设备级别,设计了自动飞行控制计算机通用自动测试平台将故障进一步定位于自动飞行控制计算机的功能模块之上,用户在试用测试中快速实现了自动飞行控制计算机自动测试并高效的将故障定位于计算机的功能模块,缩短了自动飞行控制计算机的维修时间。通用自动测试硬件平台易于扩展,软件模块相互独立具有可移植性,通过更改测试方法和测试流程可以快速实现其他机载计算机的自动测试。

### 参考文献

- [1] 章卫国, 李爱军. 现代飞行控制系统设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 136.  
ZHANG Weiguo, LI Aijun. The design of modern flight control system[M]. Xi'an: Northwest Industry University Press 2009: 136. (in Chinese)
- [2] 倪玲, 张琦, 郭霞. 自动测试技术发展综述[J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(13): 46-49.  
NI Ling, ZHANG Qi, GUO Xia. The summary of development of automatic testing technology[J]. Information of China's Manufacturing Industry, 2007, 36(13): 46-49. (in Chinese)
- [3] 李宏伟, 马秋. 基于 VMIC 和 VXI 分布式导弹自动测试平台[J]. 航空计算技术, 2016, 46(3): 5-7.  
LI Hongwei, MA Qiu. Design of distributed missile automatic test platform on VMIC network and VXI bus[J]. Aeronautical Computing Technique, 2016, 46(3): 5-7. (in Chinese)
- [4] 段江涛, 陈怀民, 喻戈. 机载飞控计算机机内自检方法的研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(8): 1807-1809.  
DUAN Jiangtao, CHEN Huaimin, YU Ge. Research of BIT methods for airborne primary flight control computer [J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(8): 1807-1809. (in Chinese)
- [5] 杨尧, 王民刚, 赵岳楼. 基于 LabVIEW 的飞控计算机测试系统设计[J]. 电子测量技术, 2016, 32(9): 96-99.  
YANG Yao, WANG Mingang, ZHAO Yuelou. Design of test system for flight control computer based on LabVIEW [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 32(9): 96-99. (in Chinese)
- [6] 苏圣阳. 飞控计算机测试设备的设计与实现[J]. 价值工程, 2016, 18(3): 178-180.  
SU Shengyang. Design and implementation of the flight control computer test equipment [J]. Value Engineering, 2016, 18(3): 178-180. (in Chinese)
- [7] 虞健飞, 钟季龙, 邵帅. 基于动态仿真激励模型的飞控计算机测试系统设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11): 178-182.  
YU Jianfei, ZHONG Jilong, SHAO Shuai. The design of the test verification system for flig control computer based

- on dynamic simulation model[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(11): 178-182. (in Chinese)
- [8] 张丹涛, 张随良, 杨东红. 基于系统需求数据库的 BIT 自动测试技术[J]. *系统仿真学报*, 2015, 22(1): 220-223. ZHANG Dantao, ZHANG Suiliang, YANG Donghong. Automatic BIT test technique of system requirement database[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 22(1): 220-223. (in Chinese)
- [9] TONG J, CAI Y W. Modeling of new generation aerospace automatic test system architecture[C]// *Proceeding of 9th International Symposium on Test and Measurement*. Seattle: IEEE, 2011: 1-7.
- [10] CHEIJ D. Using interchangeable virtual instrument (IVI) drivers to increase test system performance[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2001, 16(7): 1-8.
- [11] COURTOIS M, POUILLY J. Integrated diagnostic for New French Fighter[C]// *The 2001 IEEE Systems Readiness Technology Conference*. Dayton: IEEE, 1992: 1-6.
- [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 Xuefeng, HAN Quanquan. Design and implementation of general test platform for aircraft flight control system[J]. *Electronic Design Engineering*, 2016, 24(24): 5-8. (in Chinese)
- [13] 梁祥, 封吉平, 安学军. 基于 PXI 总线的高速数据采集模块设计[J]. *兵工自动化*, 2007, 6(1): 72-73. LIANG Xiang, FENG Jiping, AN Xuejun. Design of high speed data acquisition module based on PXI bus[J]. *Automatic Measurement and Control*, 2007, 6(1): 72-73. (in Chinese)
- [14] 许诚昕, 吴启满, 杨小雪. GPIB 接口控制器的研究[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2007, 9(3): 34-37. XU Chengxin, WU Qiman, YANG Xiaoxue. A study of GPIB control method based on the INT4882[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2007, 9(3): 34-37. (in Chinese)
- [15] 王鼎博. 自动测试系统软件平台的设计与实现探析[J]. *信息与电脑*, 2014, 9(3): 61-62. WANG Dingbo. The design of software platform of automatic testing system[J]. *Information and Computer*, 2014, 9(3): 61-62. (in Chinese)
- [16] 黄晓晴, 梁晓芬, 郑永龙. 通用 ATS 软件开发平台研究与设计[J]. *自动化仪表*, 2013, 34(3): 55-58. HUANG Xiaoping, LIANG Xiaofen, ZHENG Yonglong. Research and design of universal ATS software developing platform[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2013, 34(3): 55-58. (in Chinese)

#### 作者简介:

韩建辉(1987—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞控电子设计。

张 芬(1986—),女,学士,工程师。主要研究方向:飞控电子设计。

杜永良(1979—),男,博士,研究员。主要研究方向:飞控电子设计。

(编辑:丛艳娟)

#### (上接第 108 页)

- An experimental investigation of coaxial rotors hub drag characteristics[C]// *The 34th China Helicopter Annual Forum*. Shenzhen: CHDS, 2018: 1-8. (in Chinese)
- [9] 龙海斌, 吴裕平. 共轴式直升机桨毂阻力特性计算研究[J]. *直升机技术*, 2018(3): 1-5. LONG Haibin, WU Yuping. Calculation and research on drag characteristics of coaxial helicopter hub[J]. *Helicopter Technique*, 2018(3): 1-5. (in Chinese)
- [10] WAKE B E, HAGEN E, OCHS S S, et al. Assessment of helicopter hub drag prediction with an unstructured flow solver[C]// *Proceedings of American Helicopter Society 65th Annual Forum*. Texas Grapevine, USA: United Technologies Research Center, 2009: 1-10.
- [11] OCHS S S, MATALANIS C G, WAKE B E. Evaluation of helios CFD tool set for faired rotor-hub drag prediction [C]// *Proceedings of American Helicopter Society 67th Annual Forum*. Virginia Beach, USA: United Technologies Research Center, 2011: 1-6.
- [12] 曾伟, 林永峰, 黄水林, 等. 共轴双旋翼桨毂减阻初步分析研究[J]. *直升机技术*, 2014(4): 14-18. ZENG Wei, LIN Yongfeng, HUANG Shuilin, et al. Preliminary analytical study on drag reduction of coaxial rotors [J]. *Helicopter Technique*, 2014(4): 14-18. (in Chinese)
- [13] 龙海斌, 吴裕平, 朱仁森. 共轴式双旋翼直升机桨毂减阻设计方法研究[J]. *直升机技术*, 2017(2): 22-26. LONG Haibin, WU Yuping, ZHU Renmiao. Study on drag reduction design method of coaxial twin rotor helicopter Hub [J]. *Helicopter Technique*, 2017(2): 22-26. (in Chinese)

#### 作者简介:

龙海斌(1989—),男,硕士,工程师。主要研究方向:直升机气动设计、试验和 CFD 流场计算等。

吴裕平(1978—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:直升机气动设计、试验和载荷计算等。

(编辑:丛艳娟)