

基于 ATML 的机载电子系统原位测试系统设计是实现

姜 晨, 宋 帆

(航空工业直升机设计研究所, 江西 景德镇 333001)

摘要: 针对直升机机载电子系统在执行任务过程中故障检测和隔离困难, 外场维修保障效率低下, 且缺乏快速有效故障检测工具现状的问题, 设计了基于 ATML 标准的机载电子系统原位测试系统; 阐述了原位测试系统的基本组成、工作原理、硬件结构、软件架构和测试电缆转接设计方法, 以某型机载配电系统为案例进行原位测试需求分析及测试方案设计; 利用基于 ATML 标准的测试软件平台 SGTS 进行原位测试程序开发, 并将该方法应用至某型直升机原位测试系统研制; 经实际验证, 该原位测试系统的使用大幅提升了机载电子系统的故障检测与隔离率指标, 为直升机外场排故提供了有效便捷的手段, 提高了外场维护效率。

关键词: 机载电子系统; 故障检测和隔离; ATML; 原位测试

Design and Implementation of In-situ Testing System for Airborne Electronic Systems Based on ATML

JIANG Chen, SONG Fan

(China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China)

Abstract: During performing tasks, helicopter airborne electronic systems have problems such as difficulty of fault detection and isolation, low efficiency of on-site maintenance and support, and lacking of effective fault-detection tools, an in-situ testing system for airborne electronic system is designed based on automated test Markup language (ATML). It describes the basic composition, working principle, hardware structure, software architecture and cable switching design method of the in-situ testing system. Taking an airborne power distribution system as a case study to design the in-situ testing requirements analysis and test plan. After that, the ATML standard is used to develop the development method of test programs based on the testing software platform SGTS. Furthermore, this method is applied to the in-situ testing system development for a certain type of helicopter. After practical verification, the in-situ testing system has significantly improved the fault detection and isolation indicators of airborne electronic systems, and providing an effective and convenient means for helicopter field troubleshooting, on which improves the efficiency of field-maintenance.

Keywords: airborne electronic systems; fault detection and isolation; automated test markup language; in-situ testing

0 引言

现代直升机机载电子设备种类繁多, 集成化程度高, 信号交联复杂, 在作战性能不断提升的同时也伴随着故障检测隔离困难、维修耗时等诸多问题^[1-3]。尤其在外场复杂的环境下, 缺少便捷有效的故障检测工具、维护效率低下等维修保障问题更为突出^[4-5]。虽然现代先进直升机航电设备的 BIT (Built-in Test) 检测率指标高达 90%, 同时又配有健康与使用监控系统 (HUMS, health and usage monitoring system) 进行状态监控, 大大减少了直升机的排故与修理时间^[6-7]。但是, 重要机载电子设备如任务系统、导航系统、配电系统等仍存在许多 BIT 无法检测和 BIT 检测但无法隔离的故障^[8-10]。

在两级维修体系下, 由于部队在外场缺少有效的外部检测途径, 采用传统排故方式如串件维修虽然能隔离出部

分外场故障, 但此方式排故耗时, 尤其是对一些可达性差或采用安装架固定的机载设备进行排故。此外, 串件维修率的上升且会显著增加劳动负荷, 降低外场可更换单元 (LRU, line replaceable unit) 寿命, 严重影响任务完好性^[11]。若对每个机载电子系统都配备专检工具, 会造成直升机保障系统费用高昂且规模庞大, 不利用在外场的使用, 这些弊端将导致无法响应现代战争对航空武器装备后勤保障效率提出的高要求^[12]。因此, 研制一种针对直升机机载电子系统外场故障检测与隔离的通用测试系统显得尤为重要^[13]。该通用测试系统具有小型化、通用化的特点, 实现对多个机载电子系统外场故障的快速检测与定位。此外, 该原位测试系统还具备测试程序集 (TPS, test program set) 可跨平台移植、平台仪器资源可互换等特征, 在外场测试过程中能应对各种突发状况, 这对提高机载电子系统

收稿日期: 2023-07-24; 修回日期: 2023-09-07。

作者简介: 姜 晨 (1993-), 男, 硕士研究生, 工程师。

引用格式: 姜 晨, 宋 帆. 基于 ATML 的机载电子系统原位测试系统设计及实现[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 79-84, 91.

外场故障检测隔离能力有着重要意义^[14-15]。

相较于 GPIB 和 VXI 总线技术，采用 PXI 总线技术进行测试设备研制，成本更低，且设备硬件资源占用的空间更少，且具有小型化和易维护等优势，符合直升机外场保障设备要求。本文将基于 PXI 总线技术构建原位测试系统的硬件平台，设计了平台的基本架构和仪器通讯方式^[16-17]。

在 TPS 开发方面，采用基于 ATML (automated test markup language, 即 IEEE 1671) 标准进行程序开发，可实现测试程序 (TP, test program) 和系统仪器资源的可互换，能够大大地缩短 TP 的开发周期，降低研发成本，能够快速响应复杂多变的测试需求。ATML 标准是电气与电子工程师协会 (IEEE) 于 2002 年提出了一种新的面向信号的自动测试标记语言标准，规定了一种信息交换格式，其中包含了测试配置、测试描述、适配器、测试站、仪器描述、被测对象 (UUT, unit under test) 描述和测试结果描述等自动测试系统 (ATS, automatic test system) 所需信息。

目前国内自研符合 ATML 标准的测试软件有 GPTS、SGTS、SCATS 等，其中广州航新研发的 SGTS 软件采用了 STD (signal and test definition) 标准信号库构建、基于模型的 TP 运行引擎技术、故障诊断技术等多种先进测试技术^[18]，且软件内置的信号模型丰富，能满足现代直升机机载电子系统复杂的测试需求。因该原位测试系统将 SGTS 作为系统的软件开发环境，进行 TPS 设计与开发。系统将测试信号作为联系测试需求和仪器测试能力的纽带和桥梁，实现了 TPS 的可移植和硬件仪器资源的可互换^[19-20]。

1 原位测试系统总体设计

1.1 系统组成及工作原理

原位测试系统主要由 3 个主要部分构成：硬件平台、软件平台和 TPS，测试系统的总体架构和工作原理如图 1 所示。

测试系统基于 PXI 总线技术，以主控计算机为核心，实现信号的采集和分析。系统中的各类资源都被引出至面板测试接口中，并通过测试电缆与被测机载电子系统相连。软件平台主要由自动测试软件和故障诊断模型组成，测试软件是标准的开发、调试集成平台，具备测试仪器、测试平台和 TP 开发功能。故障诊断模型基于 IEEE 1232 标准，主要描述 TP 和故障模式之间的关系。

如图 2 所示，原位测试系统通过测试电缆与机载电子系统连接，手持终端 (PMA, portable maintenance aids instrument pack) 为人机交互终端，通过 LAN 总线与测试系统连接。测试时使用人员操作 PMA，选择并运行相应的 TP。TP 将调用测试系统中相应测试资源完成对机上电子

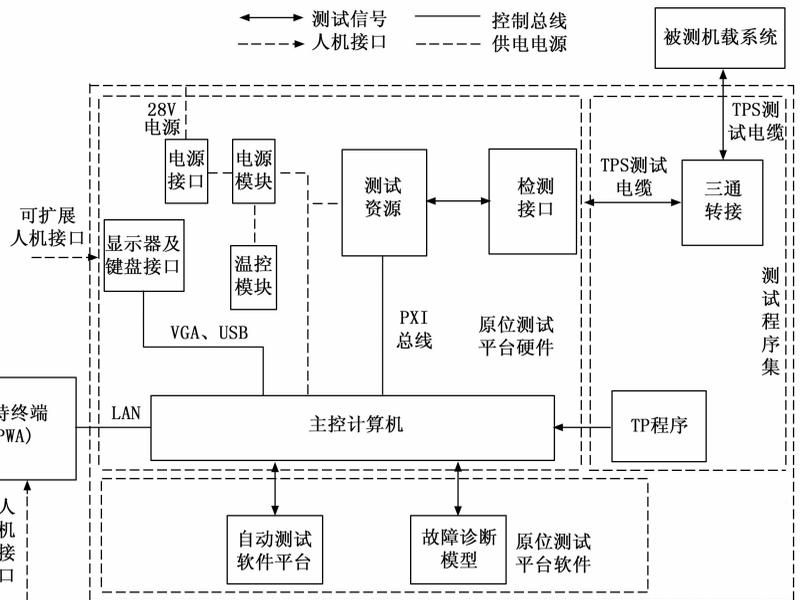


图 1 原位测试系统总体架构及工作原理

系统信号的检测，并与预先设定的期望值进行对比。测试结束后，测试系统将故障定位至机上电子设备。



图 2 原位测试示意图

1.2 原位测试转接电缆设计

TPS 由原位测试电缆和 TP 组成。测试线缆主要用于测试系统与 UUT 之间的电气连接，须依据 UUT 测试信号的实际测试需求进行分类设计，分为直连和三通两种设计连接方式。

在外场原位检测过程中，为了保证测试时机载电子系统不断电、不拆件，且不影响 UUT 与其交联系统间的正常通信。如图 3 所示，将 UUT 与机上交联的信号分为监测信号和非检测信号，非监测信号保持原有直连方式。需要监测的信号需测试电缆须采取三通方式进行转接，具体实现方式为将该路信号引入原位测试系统的矩阵开关中，其中机上交联系统信号线分别连接机上端信号接口和原位测试系统矩阵开关的 MU_ 接口，UUT 端信号线连接设备端信

号接口和原位测试系统矩阵开关的 SS_ 接口。通过开关系统的切换, 原位测试系统可实时监测 UUT 和机上交联系统之间的信号, 且不影响机上交联系统间的正常通信。

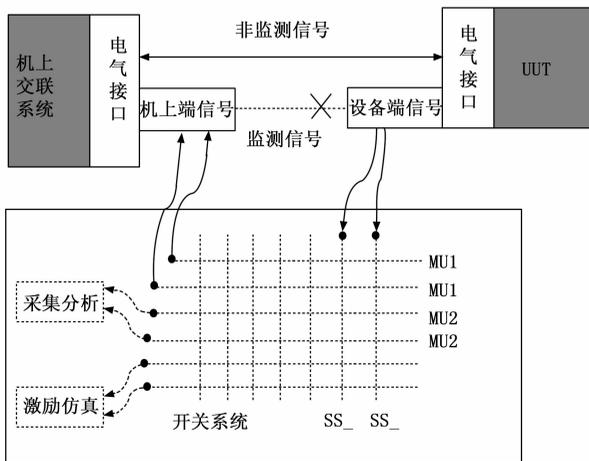


图 3 三通电缆转接原理图

为了满足测试电缆的防差错设计要求, 在电缆三端(机上海端、UUT 端、测试系统端)都设计有相应标识。同时, 每根电缆内部都设计有唯一阻值的识别电阻, 保证了原位测试电缆的使用无误。电缆内部导线依据测试信号的抗干扰能力需求不同选用单芯线、单芯屏蔽线、双绞屏蔽线或同轴线。

1.3 测试系统硬件设计

硬件平台主要由主机箱、电源模块、测试接口和温控模块 4 个部分组成。如图 4 所示, 主机箱中包含主控计算机、PXI 模块化测试仪器(测试类仪器、激励源仪器、开关模块等)、内部总线等。其中 PXI 模块化仪器包含数字万用表、示波器、信号发生器等激励源类仪器、总线通讯仪器和开关。

硬件平台基于 PXI、RS485 总线, 以主控计算机为核心控制, 将测试资源输入输出通道集中连接至系统面板上的测试接口。负责人机交互的电源接口、VGA 接口、网络接

口、USB 接口、接地接口等连接至系统面板上专属接口, 测试接口将预留空间以供后续扩展使用。主机箱中 1553B 仪器配有专用测试接口, 其余模块化仪器的输入输出直接与硬件平台通用测试接口相连。此外, PMA 通过 LAN 和 VGA 接口与测控计算机相连, 实现对原位测试系统的资源控制与画面显示。

外部输入给平台的 220 V 交流电源首先通过电源适配器转为 28 V 直流电源, 再通过 ATX 电源转换为 ±12 V、+5 V、+3.3 V, 通过连接器引致主机箱背板和温控模块, 作为机箱内部控制器、各类仪器工作电源。

温控模块主要由温控板、传感器、加热器和通风组件组成。温控模块实时采集机箱内温度, 通过特定算法控制加热组件加热与通风组件散热, 实现对机箱内温度的实时调节, 为机箱内仪器模块营造出适宜的工作环境, 使得原位测试系统在外场严寒恶劣的环境下仍可以正常持续工作。

2 测试系统软件结构

2.1 测试软件平台概述

SGTS 软件以测试诊断为核心, 支持 IEEE1641、IEEE 1671 等标准, 是一套通用、标准、完整的自动测试系统控制软件平台。

SGTS 软件为测试系统内各仪器构建了符合 IEEE 1641 标准的信号接口, 通过建立虚拟测试资源, 利用面向信号驱动实现对测试系统内各仪器资源的具体调用。在测试运行过程中, SGTS 软件通过自带的测试运行引擎自动分析系统内仪器的信号能力和 TP 中的测试信号需求, 并进行资源自动分配。以采用 ATML 标准的 XML 测试数据为基础, 自动完成测试代码的执行和物理仪器资源的调用, 进而实现整个测试任务。SGTS 软件以测试信号需求与物理资源匹配为核心, 对整个测试系统内的仪器资源进行分配、调用、控制。

SGTS 软件平台为编写、调试各 TP 模块提供了工程集成环境, 用户在工作区中编辑测试配置 TC 文件, 测试描述中记录了信号需求、测试流程走向、测试数据判断和被测对象的相关信息, 与仪器资源无关。

如图 5 所示, TC 文件中节点 Test-edUUTs 包含被测系统 UUT 描述文件, 描述了被测设备的 ID、生产厂商、引脚等信息; 节点 TestEquipment 包括测试电缆 WL 文件, 记录了电缆的连线关系; 节点 TestProgramElements 包含了测试描述 TD 文件, 描述了测试流程中所有的测试方法、测试动作、期望值等, 是 TC 文件的核心部分; 节点 Additional-Resources 包含了原位测试电缆的识别电阻信息。SGTS 软件根据用户建立的 ATML 标准测试描述文档, 解析生成面向信号的测试代码, 实现了 TP 的跨平台移植, 提高了 TP 的扩展性和维护性。

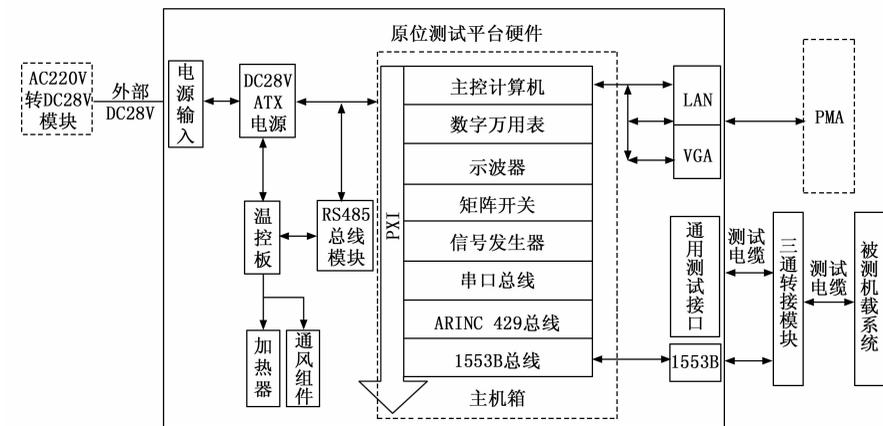


图 4 测试系统硬件结构及组成

```

- <tc:TestConfiguration xmlns:tc="urn:IEEE-
1671.4:2009.03:TestConfiguration" uuid="d316b16a-ae09-
4206-b49c-605e438f10b2" xsi:schemaLocation="urn:IEEE-
1671.4:2009.03:TestConfiguration TestConfiguration.xsd"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-
instance" xmlns:c="urn:IEEE-1671:2009.03:Common">
  <tc:ConfigurationManager cageCode="V1.0.0"
  name="XXX"/>
+ <tc:TestedUUTs>
+ <tc:TestEquipment>
+ <tc:TestProgramElements>
+ <tc:AdditionalResources>
</tc:TestConfiguration>

```

图 5 基于 ATML 标准的测试描述

2.2 软件平台架构

SGTS 软件将测试信号作为联系系统测试需求和仪器测试能力的中间媒介，将两者关联起来。测试需求不具体指向具体物理仪器，只要仪器的测试能力满足测试需求即可，进而实现了 TP 的可移植和测试仪器的可互换。SGTS 软件平台从功能上分为开发管理平台和执行管理平台。开发管理平台负责 TPS 开发、测试环境描述和 TPS 调试，执行管理平台主要负责提供 TPS 管理、测试程序运行、测试数据管理、综合数据查询等功能。在 SGTS 软件中，依据 IEEE-1641 和 IEEE-1671 标准进行 TPS 开发。TPS 只与 UUT 有关，不用对测试系统中的仪器能力、通道等信息进行描述，保证了 TPS 的可移植性。

SGTS 软件采用层次化体系架构，如图 6 所示，从顶向下分为用户交互层、数据交互层、运行期解析执行层和仪器驱动层。最顶层为用户交互层，包括开发管理平台和执行管理平台，为用户提供了交互式的开发工具，可编辑相关测试信息，同时还具备系统控制、数据分析、故障诊断等功能；第二层为数据交互层，以 XML 格式文件为信息载体完成测试信息的交互；第三层为运行期解析执行层，该

层主要对数据交互层传递的 XML 数据文件进行解析，解析内容包含测试项目、测试动作，测试信号、资源匹配路径等；最底层为仪器驱动层，运行期解析执行层中的驱动调用模块通过面向信号仪器驱动调用仪器底层驱动（IVI 驱动、VISA 驱动、SCPI 驱动等），进而实现整个测试过程资源控制。

3 测试需求分析

3.1 故障模式分析

作为直升机机上重要的电气综合管理系统，配电系统通过总线接收并解析来自飞控系统的指令，进行全机负载的供电通断控制。同时，配电系统还负责采集电源系统和各负载实时信息，对各负载需求功率与电源系统供给功率进行合理调度与分配。

本文以配电系统为例，阐述机载电子系统原位 TP 测试需求分析、方案设计与 TPS 开发的步骤流程。如图 7 所示，配电系统与机上交联信号包括 RS422 总线、1553B 总线、离散量、28 V 电压输入和负载输出。机上 BIT 测试能对离散量采集功能进行检测隔离，此外，在进行配电系统测试前，需先判断机上对其供电是否正常。因此，配电系统原位测试需求为 28 V 电压输入测试、RS422 总线测试、1553B 总线测试、离散量输出测试和负载输出测试。

3.2 原位测试方案

结合配电系统测试需求分析与对外信号交联图，明确各测试模块内容及连接形式。

1) 28 V 电压输入测试：将原位测试系统中的万用表与系统内部矩阵开关连接，检测机上输入给配电系统的 28 V 工作电压。测试时需保持配电系统不断电，故采用三通转接形式，将 28 V 电压接入到原位测试系统的矩阵开关中。

2) RS422 总线测试：配电系统通过 RS422 总线分别和机上飞控系统、发电机控制器交联。在测试时需保持机上系统和配电系统间的正常通信。故将 RS422 总线信号通过三通形式全部引入测试系统中 RS422 总线仪器的接收端，由测试系统对配电系统与机上系统间 RS422 总线信号进行实时监控。

3) 1553B 总线测试：配电系统通过 1553B 总线和 HUMS 系统交联，考虑到 1553B 总线的特殊性（不适合做三通形式），测试时需和机上断开。1553B 总线测试电缆一端与原位测试系统中 1553B 专用测试接口连接，另一端与配电系统 1553B 信号接口连接。同时，1553B 总线直接耦合传输距离只有 30 cm，不满足原位测试需要，故测试电缆中需接入耦合器。

4) 离散量输出测试：配电系统对机上系统输出的离散量信号为地/开信号。由于测试系统中没有配置离散量 I/O 仪器板卡，

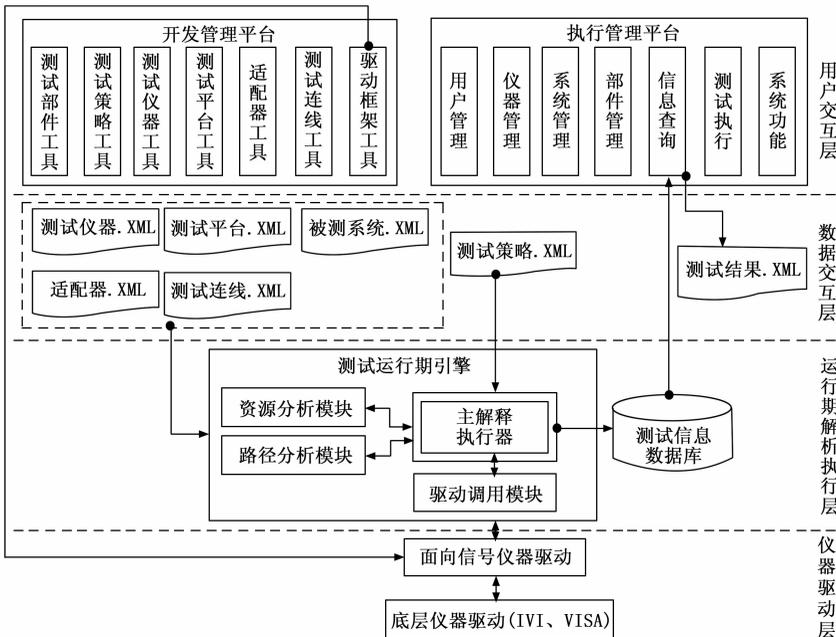


图 6 SGTS 软件架构框图

测试时将机上交联系统断开后引入机上 28 V 电压,电缆中间串一个 10 kΩ 的上拉电阻并将该路信号引入测试系统矩阵开关,将地/开离散量转为电压模拟量,通过万用表测量。

5) 负载输出测试:由于在外场环境条件有限,只对配电系统负载输出通道是否有输出进行测试,不对其输出性能进行测试。故测试时将配电系统与机上负载断开,接入平台矩阵开关系统,只通过万用表测量配电系统输出的电压是否满足要求。

配电系统测试交联信号如图 7 所示。

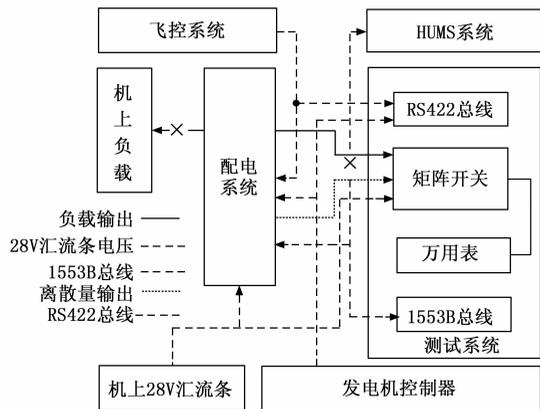


图 7 配电系统测试信号交联图

4 TP 设计

为了提高在外场对机载配电系统测试和故障定位效率,并考虑实际测试需求,将原位 TP 分为自动测试和手动测试两部分。自动测试模块执行后,无需进行其它操作,测试结束后将自动显示测试结果并定位故障。手动测试为辅助测试,并设计有用户操作界面,通过图像方式更直观的显示测试结果。

4.1 自动 TP 开发

TP 描述配电系统的所有测试项目及测试流程信息,面向信号的 TP 中只包含与 UUT 有关的测试信息,不包含测试系统信息。TP 开发人员只需关注 UUT 的基本信息、引脚定义、测试项目与测试电缆,无需关注具体测试资源设置及调用。TP 通过 XML 文件为数据载体,实现了在不同测试系统间的跨硬件平台移植。开发流程如图 8 所示。

1) 系统文件配置:在 TP 开发前需在 SGTS 平台配置面向信号的仪器驱动和平台 TS 文件,配置完成后可查看平台的外部接口引脚定义和各仪器资源的测试能力描述。

2) UUT 描述文件 (UUT.xml) 编写:在 UUT 描述文件中对配电系统的系统组成、功能、研制厂家、引脚、端口号等信息进行编写,“端口”是 ATML 中的一个虚拟概念,通过端口的连接来描述信号的路径,一个端口可以对应一个或多个实际引脚;建立起引脚与端口号之间的对应关系。

3) 测试电缆文件 (WL.xml) 编写:WL 文件用于描述

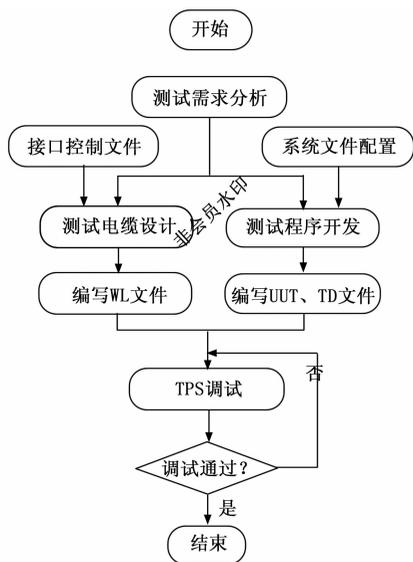


图 8 TPS 开发流程图

测试系统内部及测试系统与 UUT 端口号间的连接关系。机上系统 (飞控系统、汇流条、HUMS 系统、发电机控制器) 只作为激励源,在测试过程中无需进行程序控制。因此,机上端连线只需按照接线表在电缆中进行加工,无需在程序中设计。

4) 测试描述文件 (TD.xml) 编写:TD 开发分为测试集、模块,测试动作 3 个层次,测试动作是 TD 开发的最小单位,是系统进行信号操作、流程控制等测试任务的最小执行元素。依据原位测试需求分析,配电系统 TP 包含 28 V 电压输入测试、RS422 总线测试、1553B 总线测试、离散量输出测试和负载输出测试,开发过程中涉及到的测试动作见表 1。

表 1 测试动作类型

序号	名称	描述	动作类型
1	Setup	设置信号及属性	信号操作
2	Change	修改信号属性值	
3	Connect	连接信号、UUT 端口短接	
4	Disconnect	断开信号、断开 UUT 短接	
5	Read	读取信号测量值	流程控制
6	Reset	复位并释放已设置的信号	
7	WaitFor	延时	
8	Repeat	循环	其它动作
9	Conditional	条件跳转	
10	CallProgram	调用外部算法 (DLL)	

4.2 手动 TP 开发

4.2.1 工程组成

手动 TP 工程在创建自动测试 TPS 项目时自动生成,测试项目均在 Tps.prj 工程内实现。手动测试 TP 测试项目源程序通过 CVI 软件编译完成后生成 TPS.dll 动态链接库,SGTS 软件通过调用 TPS.dll 动态链接库实现手动测试。

Tps. prj 工程框架见表 2。

表 2 手动 TP 工程组成

序号	文件名称	文件内容	备注
1	Common. h	公共方法接口声明	头文件
2	DataChanged. h	总线信号解析接口声明	
3	ManualTest. h	手动测试 TPS 调用接口声明	
4	Tps. h	系统软件调用接口声明	
5	TpsManualPanel. h	手动测试面板变量及函数声明	
6	Tps. c	TP(手动测试)测试项目源程序	资源文件
7	TpsCommon. c	手动测试程序公用方法集合源程序	
8	TpsManualPanel. uir	手动测试用户界面	用户界面文件
9	Common. lib	公共方法静态库	静态链接库
10	DataChanged_No. lib	总线信号解析静态链接库	
11	ManualTest. lib	手动测试 TPS 调用接口静态库	

4.2.2 界面设计

用户界面设计从测试项目出发，自顶向下设计。依据配电系统的故障模式，将手动测试分为总线故障测试和模拟量故障测试两大类，总线故障测试包含 RS422 和 1553B 总线通信测试，模拟量故障测试包含 28 V 电压测试、离散量输出测试和负载输出测试，每一类的测试方法和步骤相同，集成在一个界面内实现。当启动监测后，测试系统接收到的总线信息和采集的模拟量值将显示在用户界面，间隔 5 秒实时更新。

在模拟量故障监控界面，若采集值在设定期望值范围之内时，该数据值显示为绿色，表明 UUT 该通道信号输出正常，反之数据值显示为红色，表明 UUT 该通道故障。手动 TP 用户界面如图 9 和图 10。



图 9 手动 TP 用户界面 (总线故障检测)

5 结果与分析

参考上述配电系统原位测试需求分析、方案设计与 TP



图 10 手动 TP 用户界面 (模拟量故障检测)

开发的流程，进行某型直升机原位测试系统设计。该型原位测试系统具备机载配电系统、HUMS 系统、机电管理系统、导航系统、任务系统、夜视系统的外场故障检测隔离功能。如表 3 所示，经试飞院使用验证，综合运用该原位测试系统后，这些机载电子系统的故障检测率 (FDR, Fault Detect Rate) 提升至 93% 以上，故障隔离率 (FIR, Fault Isolation Rate) 提升至 97% 以上，故障检测与隔离效果基本能替代庞大的专检设备集群，但在研制周期、成本、测试效率等指标上远远优于专检设备。

表 3 测试性指标对照表

序号	系统名称	FDR	FDR
1	配电系统	82%→95%	90%→97%
2	机电管理系统	78%→96%	91%→98%
3	导航系统	95%→99%	92%→99%
4	夜视系统	96%→100%	93%→100%
5	HUMS 系统	92%→98%	95%→98%
6	任务系统	93%→97%	93%→97%

此外，该型原位测试系统体积小，移动便捷且通用化程度高。当测试系统的硬件仪器资源出现故障后，通过运行自检程序即可快速将故障定位至单个仪器资源，并更换上同类型仪器即可满足使用要求，十分便于用户后期进行测试系统的维护。通过在外场使用表明，基于本文所述方法设计的机载电子系统原位测试系统具备易携带、操作便捷、效率高等优点，满足外场使用需要，为直升机外场排故提供了有效便捷的手段。

6 结束语

针对现代直升机机载电子系统外场故障检测和隔离困难等问题，设计了原位测试系统及其具体实现方法。利用 PXI 总线技术构建了测试系统的硬件平台，基于 SGTS 软件平台进行 TPS 的设计开发。其中，三通转接电缆的设计实现了测试时机载电子系统不下电、不拆件。面向信号的

(下转第 91 页)