

# 板级自动测试系统在航空电子装备中的应用

吕思璐<sup>1</sup>, 王作天<sup>1</sup>, 张明阳<sup>1</sup>, 韦志会<sup>2</sup>, 田开顺<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军第四七二四工厂, 上海 200436;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

**摘要:** 航空装备大修厂承修的机载电子装备中, 常遇到较早期设计的电路板产品, 这类产品相对而言可测性较低, 测试方案不明确且产品维修资料较少, 若遇到因电路板故障引起装备失效的情况, 维修周期较长且故障排除效果不稳定, 对维修单位而言在电路板级故障诊断带来很大困难; 国内早期板级自动测试系统的研究偏向于专板专用, 专业性较强通用性较弱, 与实际维修保障应用方面相结合的案例较少, 文章针对这一短板, 对通用性较强的板级产品自动测试系统及其在航空电子装备中的应用进行了研究, 选取故障较高的视频信号处理板为样本, 用实例阐述了如何以板级测试系统为平台, 确定了板级故障诊断设计方案, 设计了测试开发流程, 增强了维修行业对板级故障诊断技术的完备性与多样性。

**关键词:** 板级自动测试; 逆向分析; 故障诊断

## Application of Circuit Board Level Automatic Test System in Avionics Equipment

Lü Silu<sup>1</sup>, Wang Zuotian<sup>1</sup>, Zhang Mingyang<sup>1</sup>, Wei Zhihui<sup>2</sup>, Tian Kaishun<sup>2</sup>

(1. Chinese People's Liberation Army 4724 Factory, Shanghai 200436, China;

2. Beijing Aerospace Measurement and Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

**Abstract:** In the airborne electronic equipment repaired by the aviation equipment overhaul factory, it is often encountered in the early design of circuit board products, such products are relatively less measurable, the test plan is not clear and the product maintenance information is less, if encountered Due to equipment failure caused by circuit board failure, the maintenance cycle is long and the troubleshooting effect is unstable, which is very difficult for the maintenance unit to diagnose at the board level. The research on the early board-level automatic test system in China is biased towards the special board, the professionalism is weak and the versatility is weak, and there are few cases combining with the actual maintenance support application. The article is aimed at this short board and has strong versatility. The board-level product automatic test system and its application in avionics equipment were studied. The high-frequency video signal processing board was selected as a sample. The example was used to illustrate how to determine the board-level fault diagnosis based on the board-level test system. The design plan, designed the test development process, enhanced the completeness and diversity of the board-level fault diagnosis technology in the maintenance industry.

**Keywords:** board level automatic test; reverse analysis; fault diagnosis

## 0 引言

航空电子装备的服役期到了翻修时限, 各种故障也到达一个高发期, 目前基地级维修在对航空电子装备进行翻修时内场基本是将故障定位到电路板级, 在板级资料不具备或不完善的情况下, 往往是凭维修技术人员的个人经验与能力进行深入的故障定位与排除。如遇到维修人员无法定位故障排除故障, 则需要通过外送修理予以解决, 如此一来航空装备的维修周期、质量得不到有效控制, 进而就会影响部队作战任务。基于这种现状, 集成一个板级通用的自动测试系统来诊断定位板级产品的故障并将人的维修经验固化成为固定的测试程序就显得尤为重要。因此通过逆向分析航空电子装备内电路模块的工作原理, 利用一个

通用板级测试系统平台, 确定测试诊断流程、逻辑, 选取合适的测试点, 分配合理的测试资源, 来满足不同电路板的测试是一个多机种、小批量的航空装备大修厂的重要课题。

本文以故障率高发的故障样板为例, 通过利用板级自动测试系统进行故障诊断, 设计具体测试、诊断方案, 详细阐述了板级自动测试系统在航空装备维修行业中板级故障诊断的应用, 从实际应用的角度出发研究了航空电子装备板级自动化维修流程。

## 1 板级自动测试系统结构及原理

数模混合电路故障诊断系统组成及功能如图 1 所示。系统集成电路板测试诊断维修所需的测试资源、通道控制装置、软件系统和支持结构, 总体组成框架如图 1 所示。

## 2 系统硬件设计

板级自动测试系统硬件设计的功能联系和控制关系如

收稿日期: 2019-12-08; 修回日期: 2020-04-01。

作者简介: 吕思璐(1988-), 女, 四川遂宁人, 硕士, 工程师, 主要从事航空电子装备测试技术方向的研究。

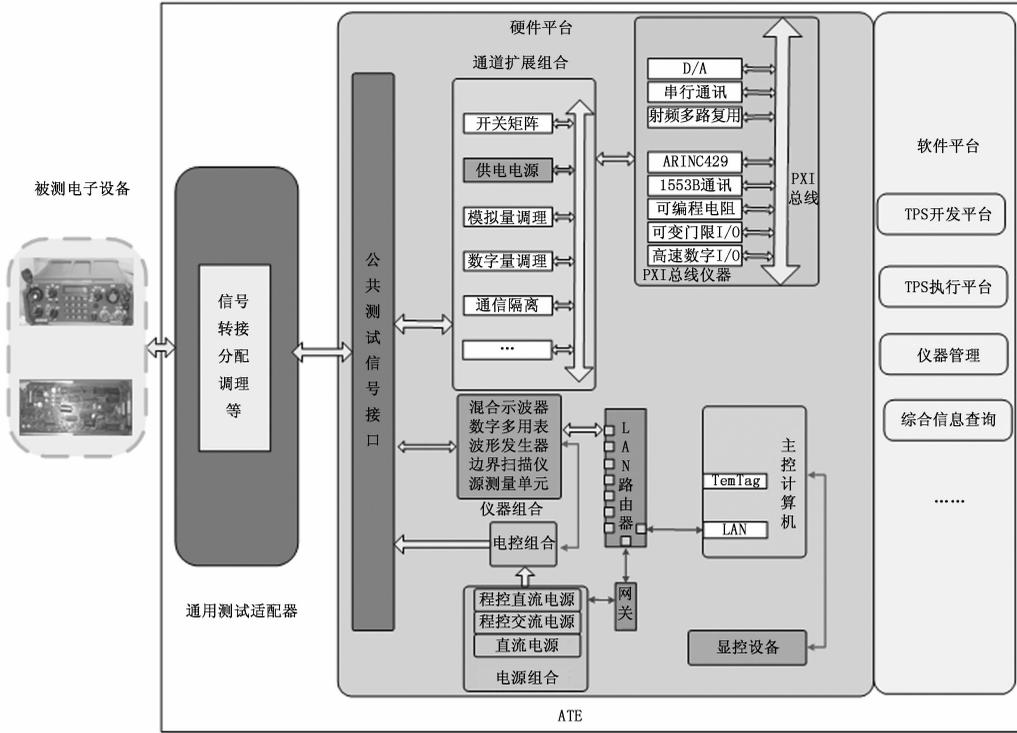


图 1 板级自动测试系统总体组成框图

### 3 系统软件设计

#### 3.1 测试程序开发平台

电路板种类复杂多样，不同的电路板具有不同特征，所以不同电路板的检测方法也不同，为满足系统通用性的设计要求自动测试系统尽可能多的提供不同信号量和器件的测试方法，但对于具体的控制测试设备对被测对象什么引脚施加什么激励，机器是不知道的，还需要测试人员自定义开发测试软件，计算机通过执行测试软件，控制测试设备对被测件施加激励，并分析采集回的信号特征，从而判断被测电路板是否故障。所以测试系统提供了资源建模工具包括对被测对象、适配

器、测试电缆、测试流程和故障诊断流程进行建模，即面向信号的建模方式。

图 2 所示。板级自动测试系统以 PXI 总线仪器为核心，以 LAN/GPIB 总线仪器为中频测试资源，由 PXI 仪器模块提供被测电子装备测试所需的主要测试和控制资源。主控计算机通过上位机的自动测试软件控制测试设备的仪器资源及测试程序 (TP) 的执行。公共测试信号接口 ICA 为测试

器、测试电缆、测试流程和故障诊断流程进行建模，即面向信号的建模方式。

测试程序开发平台采用北京航天测控公司成熟框架软件平台 Vite3.3，该测试程序开发平台实现信号、被测对象、适配器、测试站、测试仪器、测试流程等软硬件资源的定义与描述，构建关于测试对象的测试策略描述、UUT 定义、适配器定义、测试站描述、仪器能力描述等部件和系统的 XML 文件，能开发测试流程文件以及故障诊断文件，生成测试配置文件，形成 TPS 测试源代码。测试开发环境具备测试程序的编译调试功能，编译生成 TP 程序，进行测试程序的调试操作。同时测试程序开发平台能够实现测试程序的移植管理工作。包括测试策略开发、测试资源开发、测试程序调试和 TP 移植管理 4 个大功能模块，被测对象建模、适配器建模、测试电缆建模、测试流程建模、故障诊断建模、测试站建模、测试仪器建模、测试程序编译调试和导入/发布 ATML 源包 9 个子功能模块。

测试程序开发平台采用面向信号的流程开发模式，面向信号的测试技术其核心是将信号、仪器设备、信号连接关系抽象成与硬件资源无关的定义层，用户根据被测对象的实际测试需求对所测的信号特征进行描述，对此定义层进行修改，调换仪器设备，经过编译处理完成资源映射，形成统一的、完整的测试流程。通过面向信号的描述，来定义具有某种特征的虚拟信号，其包括信号通路的建立、撤销及状态检测，建立抽象的“虚拟开关”，进而实现任何单元部分的改变及重构都不影响系统的设计运行。在系

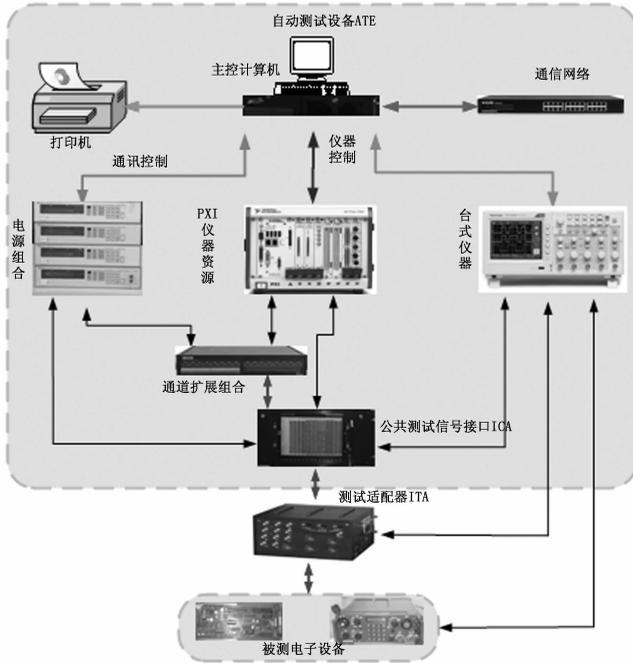


图 2 板级自动测试系统硬件功能联系与控制关系图

统运行时通过数据驱动, 将所有的映射关系都实例化, 完成“虚”转实的转变。测试系统环境内部层次图如图 3 所示。



图 3 测试程序开发平台

### 3.2 测试策略开发

根据实际测试策略的开发的需求, 板级自动测试系统具有全方位的硬件定义与资源描述功能, 以便于搭建起满足测试需求的 ATE 系统与硬件连接链路, 并且通过树形连线视图将平台直观地表示出来, 如图 4 所示。

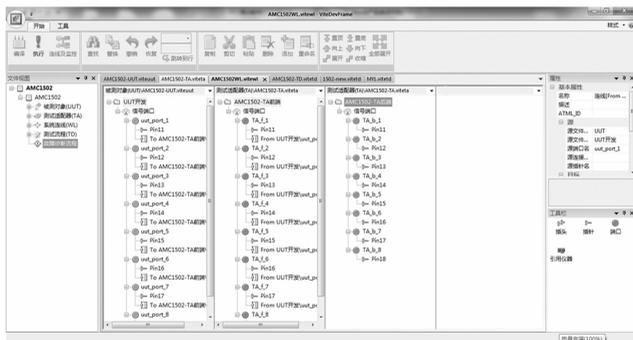


图 4 测试策略连线图

故障诊断流程用以完成复杂系统的故障模型建模。智能化的专家知识生成工具以框架表示法为主, 结合故障隔离模型和故障隔离节点等知识表示方法为用户提供了完整的表示和描述针对对象的故障模型和专家诊断知识。

故障诊断建模主要以 IEEE1232 标准为基础, 根据测试需求, 采用可视化建模方法, 实现故障树、D 矩阵等故障诊断模型的构建, 用于测试过程中对 UUT 等测试对象的故障分析、故障定位。可利用专家知识生成平台描述被测对象诊断知识, 绑定 TPS 文件作为样本输入信息, 生成领域知识库和诊断提取规则, 供故障分析使用, 如图 5 所示。

### 3.3 测试资源开发

测试站资源建模主要是定义测试站资源的信号类型、被测参数和对应的预定义资源, 根据 ATML 的规定, 定义的测试站资源将用于搭建测试流程。

测试站资源是某种特定类型的资源, 其定义了

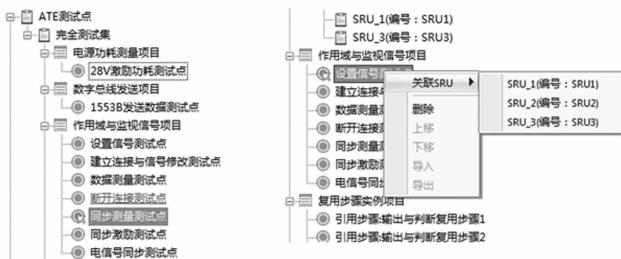


图 5 故障诊断图

测试设备外部端口与测试主体之间的连接或连接集, 以及测试被测主体的特定功能需要的行为。可以将一个适配器资源映射到一个测试站资源, 也可以将一个测试仪器的特定功能映射到一个测试站资源, 一个测试仪器可以对应多个测试站资源。

测试仪器建模主要是用于描述测试工程中用到的仪器。仪器的建立比较复杂, 除了仪器基本信息定义以外, 还包括驱动、资源、能力、开关元素的配置。

### 3.4 测试程序调试

测试程序调试是一个集成的测试调度程序, 依靠“运行环境引擎”提供 TPS 流程运行支持, 由测试配置管理、TPS 编译处理、测试信号与硬件资源自动映射和测试运行控制等组成, 其功能组成结构如图 6 所示。

测试程序调试实现对测试 ATML 源代码进行编译, 生成发布运行平台可执行的测试程序, 并提供调试的功能, 供开发过程进行调试操作。

测试程序调试采用图形或文本方式对测试程序进行联机及脱机调试, 具备断点调试、单步运行、运行出错原因提示、帮助信息等功能。

### 3.5 TP 移植管理

软件平台需要支持对测试程序的移植, 因此需要能够对外发布符合规定的测试 ATML 源代码, 同时支持相应的 ATML 源代码导入, 软件平台通过“导入 AMTL 源程序包”和“发布 AMTL 源程序包”实现 TP 移植功能。发布与导入的 ATML 源代码需要支持加解密操作, 如图 7 所示。

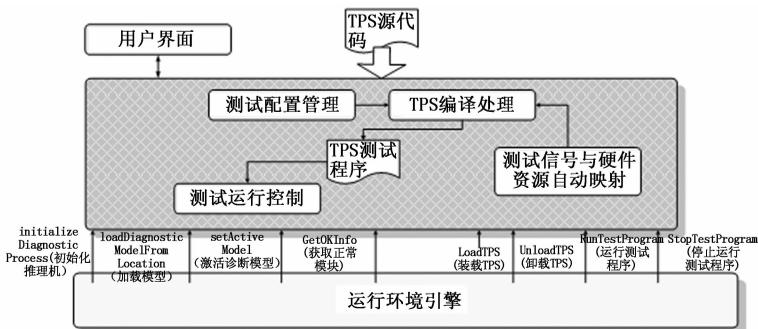


图 6 测试程序调试业务流程



图 7 TP 移植功能结构图

### 4 板级自动测试系统应用试验及结果

#### 4.1 应用试验总体思路

板级自动测试系统的被测对象是不同类别的电路板，为了使系统的具备通用性，就需要按功能特征来分类分析各种类型的电路板。电路板的信号大致可分为数字量、模拟量和离散量 3 种，板级自动测试系统在测试对被测对象进行时，一定要能够向电路板输出各种激励信号，并且保证被测电路板的响应信号能被采集到。

电路板的层次结构模型及相互间的关系如图 8 所示。

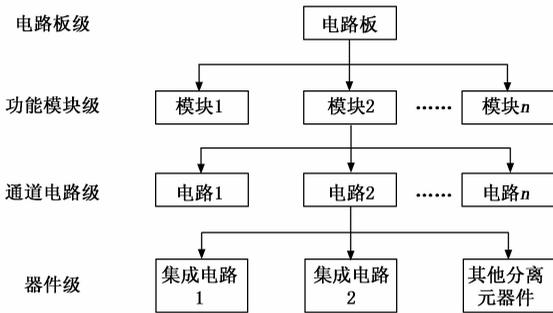


图 8 电路板的层次结构模型

板级自动测试系统测试方法以及故障诊断的思路是按照图 8 的结构模型所示，先对电路板进行通电检测，如果电路板测试过程中出现故障则按测试顺序检测各电路功能模块，直至检测到故障功能模块，然后针对故障功能模块展开下一级故障诊断，直至将故障定位到最小的可更换单元及元器件或通道电路。

#### 4.2 应用试验流程设计

##### 4.2.1 测试需求分析

通过逆测分析故障样板的电路原理图，梳理样板原理框图如图 9 所示。

故障样板的主要功能是部附件进行射击等重要事件时，产生相应的视频标记信号。该电路板主要由电压转换电路、光耦隔离电路、视频分离电路、视频选择电路、视频开关电路、总线接口电路组成。各功能电路功能原理如下：

- 1) 电压转换电路，主要将系统输入的 +28 V 转换为 +5 V、-5 V 输出，给板上其他功能电路及其元器件供电；
- 2) 光耦隔离电路 1~4 的功能是将输入的离散量控制信号转换为单片机可识别的数字量信号；
- 3) 光耦隔离电路 5~10 的功能是将单片机输出的控制信号转换为外部电路可识别的离散量信号；
- 4) 视频分离电路、视频选择电路、视频开关电路在单

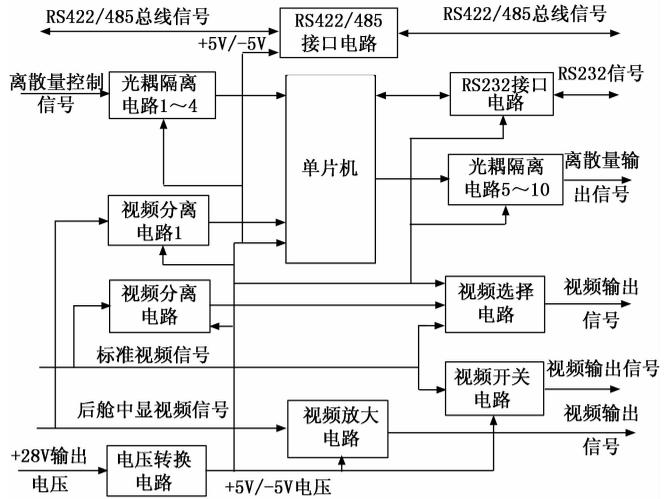


图 9 样板原理框图

片机控制信号的作用下对输入的视频信号进行处理，然后放大输出；

5) 总线接口电路主要包括 RS232 接口电路和 RS422/485 接口电路，完成单片机与外部设备的通讯；

6) 单片机作为电路板的控制核心，实现板件的标记功能。

##### 4.2.2 测试诊断流程设计

通过对样板原理分析和测试需求分析，提出样板的测试程序集 (TPS) 与诊断设计方案，以对样板电路板进行功能测试和故障诊断。

样板主要由电压转换电路、光耦隔离电路、视频分离电路、视频选择电路、视频开关电路、总线接口电路组成，因此在功能测试时，除了测试端口连接器输出外，还需要单独对每组电路的功能进行监测，此时需要使用辅助探笔进行测试。

测试诊断步骤如下：

- 1) 在对样板加电测试前，需要对样板的电源正端和地端进行检测，确定电源正端和地端之间不短路；目测样板是否有断线等明显故障，从外观上检查电路板上的元器件是否存在烧糊、发黑等故障，如果存在上述故障，则需要排除故障后再进行测试；
- 2) 如果样板的电源端和外观无故障，则安装适配板；
- 3) 在确定适配板无问题后，需要安装样板并对电路板加电静态测试，测量电路板的供电电源是否正确；
- 4) 样板静态测试正常，则可以进行电路板的功能测试；
- 5) 在功能测试结束后，如果存在故障，则进入诊断测试，诊断结束后，关闭仪器，关闭电源，提示测试结束；如果没有故障，则直接关闭仪器和电源，结束测试。

样板测试与诊断 TPS 设计方案的总体框图如图 10 所示。

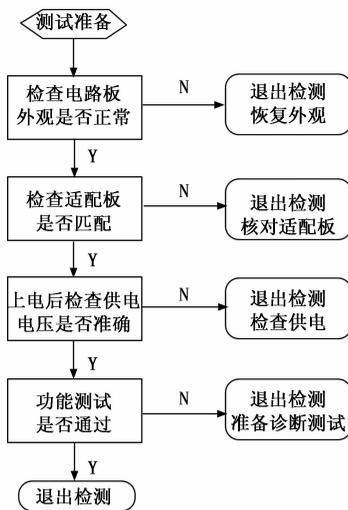


图 10 样板测试与诊断 TPS 设计方案的总体框图

#### 4.2.3 单元电路功能测试方案

以电路板的视频分离电路为例, 视频分离电路主要由视频同步分离芯片 LM188、外围电阻/电容组成, 根据用途不同, 主要分以下 2 类电路: 视频分离电路 1、视频分离电路 2。

视频分离电路 1 如图 11 所示, 将输入的中显视频信号转换为 3 类视频输出, 输入给后续单片机。

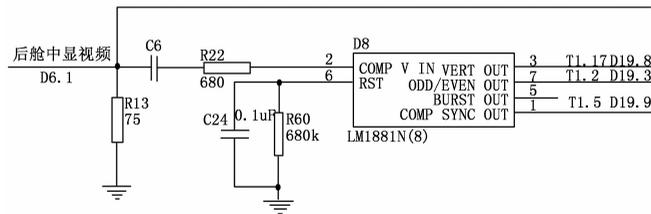


图 11 视频分离电路 1 原理图

视频分离电路 1 的故障模式统计如表 1 所示。

表 1 视频分离电路 1 故障模式

序号	故障点	故障模式	
1	T1.17、T1.2、T1.5	开路	参数偏移
2	D8.2	开路	参数偏移
3	C6.1	开路	参数偏移

根据测试点的输出特性, 各测试点可采用数字示波器采集。

视频分离电路 2 如图 12 所示, 将输入的视频信号转换为一类视频输出, 输入给后续视频开关电路。

视频分离电路的故障模式统计如表 2 所示。

根据测试点的输出特性, 各测试点可采用数字示波器采集。

#### 4.2.4 单元电路测试诊断流程方案

单元电路的测试主要基于功能电路的输出端作为测试

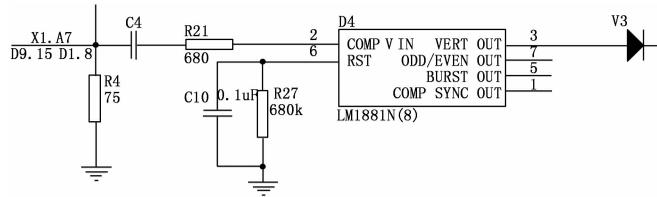


图 12 视频分离电路 2 原理图

表 2 视频分离电路 2 故障模式

序号	故障点	故障模式	
1	V3. —	开路	参数偏移
2	D4.2	开路	参数偏移
3	C4.1	开路	参数偏移

点。使用信号发生器及矩阵开关在功能电路的输入端 X1.A7 施加一个复合视频信号, 采集功能电路输出端信号。若采集的输出信号在预期范围内, 则判断该功能电路测试正常, 反之则给出单元电路故障的结论。

#### 4.2.5 器件级测试诊断流程方案

器件级测试诊断流程的开发目的是将故障定位于元器件。该部分流程的开发主要在功能电路测试流程的基础上开发。不同的是, 该部分流程执行的前提是所属功能电路输出故障, 根据故障给一个判断指令, 依次测试所有节点, 逐个排除各个器件的状态, 进而将故障定位于器件。

#### 4.3 应用检测结果

运行设计好的测试程序, 能通过测试报告直观的帮助维修技术人员定位产品故障。

### 5 结束语

本文通过对板级自动测试系统进行总体介绍, 并通过实际案例对该系统的应用流程进行了规范, 增强了对电路板的测试与故障诊断效率, 降低了对航空电子装备维修技术人员的技能要求, 将传统的利用仪器对电路板进行测试与故障诊断的流程, 包括电路分析的过程都集成在前端的测试诊断流程设计开发当中, 方便后端维修作业过程中故障的定位与排除, 由过去的排故周期不定性转变为维修周期可控, 缩短了航空电子装备的维修周期。同时方案设计过程中产生的测试方案、诊断方案都集中留存于该系统的数据库, 随着后续应用的累积, 能完善各种类型电路板板级测试诊断的数据信息, 便于形成板级测试的专家数据库, 改变了依赖于维修技术人员的经验而进行故障诊断的现状。

#### 参考文献:

[1] 南王绪. 飞机机载计算机的电路分析与测试 (第 1 版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.