

现代飞机测试性详细设计方法研究

崔广宇

(中航工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 测试性详细设计是现代飞机顶层测试性设计的后续工作, 根据现有飞机设计体系的构成, 分飞机级、系统级、机载设备级 3 个层次论述了飞机测试性详细设计的方法; 从综合诊断设计、故障信息显示以及故障告警 3 个方面阐述了飞机级测试性详细设计的内容; 提炼了系统级测试性详细设计工作的组成, 针对航电系统给出了通用、典型的测试性详细设计方法—基于模块测试与维护总线的边界扫描技术; 详细论述了成品测试性详细设计, 即 BIT 设计的准则及具体内容; 论文的工作紧密结合在研型号的实际需求, 有很好的工程实用价值。

关键词: 测试性; 详细设计; 综合诊断; 模块测试与维护总线; BIT

Detailed Testability Design Method and Technique for Modern Airplane

Cui Guangyu

(AVIC the First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: For testability design of modern airplane systems, program should be detailed further based on top level testability design. According to the aircraft system, detailed testability design includes three levels, which are airplane level, system level and equipment level. For the airplane level, integrated diagnosis, fault message display and report are described. For system level, a typical universal technique, i. e., module test and maintenance bus (MTM-Bus) based boundary scan is proposed. Bus configuration and hierarchy test structure are given. For product level, BIT design guide line and detailed content are set forth. This paper is proposed based on the requirement and engineering practice of airplane being developed, which may be helpful for airplane testability design.

Keywords: testability; detail design; integrated diagnosis; MTM-Bus; BIT

0 引言

近年来, 飞机设计技术取得了很大发展, 飞机系统复杂度大幅增加、高度综合化, 测试性设计需求随着对象的变化发生了转移。以往的测试性设计理念越来越难以满足现代飞机的系统测试性设计要求^[1]。作者在文献 [2] 中根据现代飞机测试性设计的需求给出了飞机测试性设计的通用流程, 论述了飞机测试性顶层设计的方法及综合诊断设计的组成和各部分具体内容。

顶层设计工作完成后, 就需要进行测试性详细设计。详细设计是飞机整体测试性及综合诊断设计工作的核心环节, 是实现顶层测试性设计思路的重要过程^[3-5]。本文将进一步结合在研型号的工程实际, 阐述测试性详细设计的具体方法和技术。

1 测试性详细设计的内容

现代飞机测试性详细设计的主要内容分为飞机级、功能系统级和机载设备级测试性设计^[1], 这样的分法也是考虑到现有飞机设计体系的构成。因此测试性详细设计工作就包括如下 3 个部分:

- 1) 飞机级综合诊断的详细设计;
- 2) 系统级诊断或 BITE (内嵌测试设备) 的详细设计;
- 3) 成品 BIT (内嵌测试) 的详细设计。

这 3 个部分有机地衔接起来, 共同形成飞机测试性的详细设计, 与飞机工程研制阶段的各个阶段同步进行。然后, 就可以进行试制, 形成试验件; 将 3 个部分的试验件进行逐级地综合试验, 确定设计结果的正确性。

2 飞机级测试性详细设计

飞机级测试性详细设计是在诊断总方案和测试性设计模型的基础上, 对要实现的综合诊断软件以及宿主机进行定义和选型, 同时对系统测试性设计提出详细设计要求。具体内容包括:

- 1) 由模型导出综合诊断策略作为详细设计输入;
- 2) 定义软件架构、接口关系等;
- 3) 对宿主机硬件进行选型;
- 4) 详细定义信号传输;
- 5) 对显示、控制装置进行选型;
- 6) 按照维护操作程序 MOP 和分配的诊断要求分别对各系统提出测试性详细设计要求, 包括诊断覆盖范围要求、检测过程要求、检测结果要求、检测控制要求、检测显示要求、检测存储要求、检测传输要求、地面辅助设备要求等;
- 7) 协调各测试性设计对象系统确定接口。

飞机级测试性详细设计可以分为综合诊断、故障信息综合显示以及故障告警 3 个部分。

2.1 飞机级综合诊断的详细设计

飞机综合诊断设计是对飞机整体工作状态 (包括飞机的性能参数状态) 进行监控 (主要是通过现有的状态监控所得到的结果——驾驶舱效应 FDE), 进行综合诊断模型设计去关联状态监控参数, 将模型的推理算法形成程序, 嵌入到中央测试系统的处理机中; 同时, 中央测试系统还应具备故障信息综合显示的驱动功能、以及控制地面测试检查的功能。具体包括以下几个部分:

- 1) 定义所有采集的飞机状态信息;
- 2) 定义需采集的 FDE 信息;
- 3) 通过模型形成综合诊断策略;
- 4) 定义中央测试系统主处理机所有对外的接口 (接口描

收稿日期: 2014-03-18; 修回日期: 2014-05-06。

作者简介: 崔广宇 (1967-), 男, 西安人, 高工, 主要从事飞机测试性设计、中央维护系统研制、PHM 技术等方向的研究。

述文件 IDD)；

- 5) 定义综合诊断程序或软件的所有环境参数；
- 6) 硬件选型；
- 7) 底层驱动，用于驱动硬件显示和控制；
- 8) 信息存储数据库的建立；
- 9) 定义与维修保障的接口建立。

2.2 故障信息综合显示的详细设计

根据维护操作程序，细化、完善故障信息的综合显示。显示的信息主要有：

- 1) 系统构型信息：通过各个机电类系统设备的符号、连接关系线段的显示，来反映机电类系统的动态结构信息，其状态随着系统状态的变化而变化；
- 2) 故障信息：通过改变机电类系统设备显示符号的颜色来显示该设备的故障状态，颜色与故障等级一致；
- 3) 数据显示：在系统构型画面的适当之处显示相应的参数，参数显示应直观明了，可以是数字形式也可以是表盘或刻度等形式；
- 4) 人机交互界面显示，以有利于地面维护时提示检查的步骤。

2.3 故障告警的详细设计

测试性设计应完成故障检测的告警。中央测试系统给出确定的故障信息，配合中央告警系统完成故障告警的判断，并将故障告警信息报告给飞机使用人员。根据故障告警的级别，进行相应的灯光告警、语音告警、显示告警、故障数据保存及特殊的告警动作，从而恰如其分地提醒飞行员、维护人员或任务机组人员注意飞机的状态以及进行应急处置。

根据故障告警的重要程度，将飞机的故障告警分为危险级、警告级（含专用语音和通用语音）、注意级和维护级 4 大类。

在进行故障告警的同时，中央测试系统应将故障信息进行保存，以便于日后维护使用。

3 系统级测试性详细设计

3.1 系统级测试性详细设计的内容

系统测试性详细设计是按照系统测试性设计方案、系统测试性设计模型以及飞机诊断对系统的设计要求，实现以下工作：

- 1) 根据系统级测试性设计模型导出的诊断策略作为详细设计输入；
- 2) 定义需监控的状态信号；
- 3) 选取合适的满足技术指标的高可靠性的传感器；
- 4) 进行传感器布局定义；
- 5) 对系统内部测试性信号进行详细定义；
- 6) 进行测试点布局的连线设计；
- 7) 定义软件架构以及与上/下位机的接口关系；
- 8) 确定与飞机级综合诊断的接口关系；
- 9) 对成品测试性设计提出详细设计要求。

系统测试性设计的实现往往都是通过状态监控完成的，类似于成品的在线周期 BIT^[2-5]。这需要由系统测试性设计模型形成诊断策略，然后软件化。

3.2 系统级测试性设计技术

系统级测试性设计通常采用状态监控的方法，而随着电子技术模块化发展，使航电系统在测试性设计时能够采用基于底层的方法。

3.2.1 边界扫描技术

边界扫描技术最早是应用于集成电路的测试性结构设计方法，该技术采用很少的电路引脚解决了复杂电路的测试问题，为模块化程度高且分布式 BIT 难以实现的系统提供了一种测试性设计实现方法^[6-7]。霍尼韦尔公司和罗克韦尔-柯林斯公司等国外主要航电集成商与提供商均将边界扫描技术作为航电系统测试性设计的核心和基础，该技术已经用于波音 Boeing-777 的 AIMS（飞机信息管理系统）、DTU（数据传输系统）等关键系统和模块。

目前已经有 IEEE1149.1、1149.4、1149.5、1149.6 等多个标准用于支持边界扫描测试性设计技术的实现^[8]。其中 1149.1 支持电路板级的测试要求，适用于成品；而 1149.5 是模块测试与维护总线（MTM-Bus）标准，为系统级的边界扫描测试提供了解决方法，实现了测试由芯片级、板级到系统级的飞跃。

3.2.2 MTM 总线结构

MTM 总线能将不同设计者设计的模块综合为可测试和维护的分系统，是用于航电系统测试、诊断及维护的工业标准底板总线。其结构如图 1 所示。

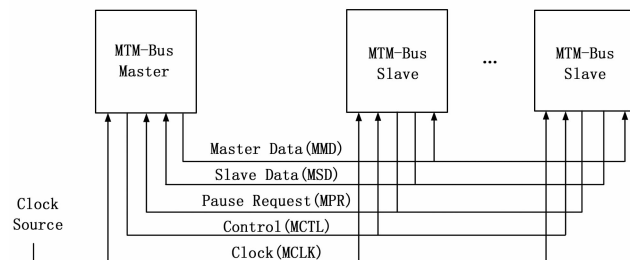


图 1 MTM 总线结构

MTM 总线由 MCTL（控制信号线）、MMD（主模块数据信号线）、MSD（从模块数据信号线）、MCLK（时钟信号线）和 MPR（请求暂停信号线）组成。主、从模块间的通信以信息包为单位传送。

MTM 总线的主要功能有：

- 1) 模块测试：生产时对模块进行测试以定位到故障元件。
- 2) 子系统检测：对子系统内部的模块进行离线测试，或者测试子系统内部模块之间的互连测试。
- 3) 子系统诊断：做在线诊断，记录监测到的故障，起始自测试，重构子系统资源以及其它诊断功能。
- 4) 软/硬件的开发：利用低层的监测/控制技术访问模块和子系统的状态。

3.2.3 基于 MTM 总线的航电系统测试架构

采用单独的测试与维护总线（即 MTM 总线）可以独立于被测系统功能和资源，使“检察机关”与“被检查对象”之间保持相对的独立性，保证测试的标准和规范。随着现代飞机航电系统模块化程度的提升，综合式的航电系统架构中通常在各个子系统使用 MTM-bus 配合相应的控制数据总线进行工作，如图 2 所示。

模块测试与维护总线的主要好处是实现和支持层次化的维护架构。这样可以保证测试性设计达到可接受的维修最低层次。元器件是电路板的一部分，电路板是模块的一部分，模块是子系统的一部分。这样就形成了一个从上到下的层次性结构：子系统、模块（电路板）、元器件。如图 3 所示。

通过测试与维护总线架构的沟通，可以实现以前难以实现的测试任务。例如，如果需要测试航电系统中任意 LRM（外

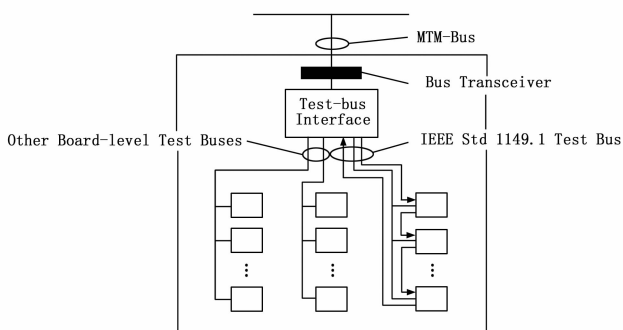


图 2 系统内部模块测试结构

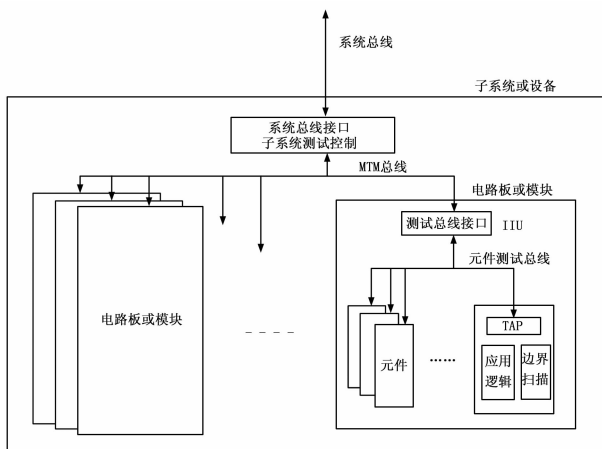


图 3 分级测试策略

场可更换模块)的任意功能,控制模块只需要通过测试维护总线发送一个标准的控制命令到指定功能模块,该功能模块就会启动相应的自测试功能,并将测试结果返回给系统。

使用边界扫描测试软件开发环境中的 TPG(测试脚本生成软件)开发出来的测试向量是边界扫描测试的主控软件,通常是嵌入在系统的主控模块中的。

4 成品级测试性详细设计

成品测试性的详细设计是按照系统对成品提出的测试性详细设计要求进行 BIT 设计,包括上电 BIT、后台周期 BIT、启动或维护 BIT 设计等。

4.1 成品 BIT 详细设计要求的提出

成品 BIT 设计应按照系统对成品提出的 BIT 要求实现自我诊断,通过系统一级测试性设计实现统一的诊断。

为此,系统应根据其测试性设计方案以及系统的测试性设计模型,提出对成品 BIT 的设计要求,包括如下:

- 1) 成品 BIT 的定性与定量要求;
- 2) 成品 BIT 的测试、诊断过程要求;
- 3) 成品 BIT 的可观测性和可控制性要求;
- 4) 成品 BIT 的接口要求;
- 5) 成品 BIT 的存储要求等。

4.2 成品 BIT 的详细设计内容

成品测试性详细设计包括:

- 1) 根据成品的测试性设计需求对 3 种 BIT 进行分配;
- 2) 由上电到待机状态需检测参数的确定,上电 BIT 的详

细设计;

3) 周期或后台动态状态监控参数的确定以及周期 BIT 的详细设计;

4) 维护或启动 BIT 的详细设计,包括激励的确定、检测环路的确

定;

5) 与系统边界关系的确定,包括显示输出、控制响应等;

6) 传输信息格式及接口的详细设计。

由于成品的 BIT 设计是由成品厂完成的。为此,主机单位为约束成品厂进行 BIT 设计的规范性,必须提出一系列的测试性设计准则。包括两个方面:成品 BIT 的设计准则、成品固有测试性设计准则。成品厂依据测试性设计模型进行 BIT 设计或固有测试性设计。

4.3 成品测试性设计准则

成品 BIT 设计应遵循如下准则:

1) 尽可能采用软件 BIT 技术,实现设备的测试和监控,这可有效地简化硬件,方便今后的修正和扩充;

2) 各模块实现测试性设计的硬件部分不应超过该模块硬件的 10%;

3) 尽量避免测试性电路硬件的损坏对模块功能的影响;

4) 应尽量利用模块自身的电路硬件实现模块的测试性设计;

5) 设备内各模块的故障检测均通过模块内驻留的测试程序和/或有关硬件完成。

成品进行固有测试性设计是为了可测,但测试、诊断的完成是需要上一级系统或飞机测试性设计(如中央测试系统)来完成的。成品固有测试性设计应遵循如下准则:

采用二级测试方式:第一级测试(外场级测试),进行成品的固有测试性设计,利用机载中央维护系统实现故障检测,其故障隔离到 LRU(外场可更换组件);第二级测试(内场级测试),利用通用 ATE 与其配合实现故障检测,其故障隔离到 SRU(内场可更换组件)。

4.4 成品 BIT 的详细设计

成品测试性设计通常是指嵌入式 BIT 设计和固有测试性设计。对于一个具体的成品 BIT,究其原理,也是通过状态监控进行测试和诊断。譬如说超短波电台收发机的 BIT 设计,通常其内部的 BIT 电路通常是将正常功能电路需要监测的信号耦合或分流出来,然后对其进行监控和比较,一旦所监控的信号超标,根据诊断策略,进行故障的判别和隔离。

成品 BIT 详细设计的指导思想是,合理设置测试点,在尽可能少地引出测试线条件下,实现其测试性设计指标要求。

成品通过固有测试性详细设计,使其能够通过外场检测设备或 ATE 进行故障的确认,并将故障隔离到 SRU。

为此,成品 BIT 的详细设计应关注以下内容:

1) 成品 BIT 电路的详细设计:成品内部 BIT 电路应按照测试性设计准则,使 BIT 电路尽量独立于功能电路;同时,合理规划 BIT,使之能尽量覆盖所有的故障模式。成品 BIT 电路的详细设计可与正常功能电路一同设计;在同一份设计文件中表达。

2) 成品 BIT 的可观测性和可控性的考虑:成品 BIT 可观测性和可控性是指要与成品所属系统保持通信联系,通过所属系统下发测试命令启动成品的 BIT 功能工作,测试完毕,上报测试、诊断结果。因此,成品应制定接口描述文件,确定传输的显示和控制信息。

时间。在监测节点程序的各关键部分打上时间标记，进行重复性试验，得到系统各阶段的工作时间如表 1。

表 1 各标记事件及工作时间

监测节点		各标记事件的工作时间		
事件	描述	包长度:49(byte)		
S1	应用层 ADC 转换开始	S1-S2 ADC 时间: 1.78(ms)	S2-S4 数据封装 时间: 1.68(ms)	S1-S5 总工作 时间: 11.06(ms)
S2	应用层 ADC 结束			
S3	ADC 数据存入 message_t 结构中			
S4	应用层 send 命令	S4-S5 无线发送 时间: 7.6(ms)		
S5	应用层 send 事件触发			

从上述的计算可知，监测节点一次采样发送周期的平均时间为 11.06 ms。

考虑到 MAC 层的随机回退机制，故实际的监测节点工作时间取为：

$$T_w = 11.06 \text{ ms} + 9.92 \text{ ms} = 20.98 \text{ ms} \quad (3)$$

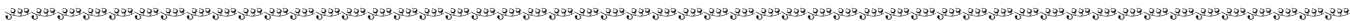
其中：9.92 ms 为随机回退的最大延迟时间，当然这种工作时间计算方法是相当保守的，因为 11.06 ms 中已包含了部分随机回退时间，但是一定的工作时间余量保证了传感器数据的可靠传输。同时，考虑到无线射频芯片 RF230 的休眠激活时间为 1.1 ms，为了可靠地传输数据，将此激活时间也一起并入到系统反应时间中，故：

$$T_w = 20.98 \text{ ms} + 1.1 \text{ ms} = 22.08 \text{ ms} \quad (4)$$

$$T_{s1} = T_{\alpha} - T_w = 1\ 000 \text{ ms} - 22.08 \text{ ms} = 977.92 \text{ ms} \quad (5)$$

则在一小时内，整体功耗为：

$$[(T_w \times 14\text{mA} + T_{sd} \times 7.5\mu\text{A}) + (T_w \times 16.5\text{mA} + T_{sl} \times 20\text{nA})] \times 3\ 600\text{s} = 2\ 436.493 \text{ mAs} = 0.676\ 8 \text{ mAh}$$



(上接第 2382 页)

3) 存储 BIT 数据：成品检测到故障后，可上报所属系统或中央测试系统，并将故障编码存储到成品掉电保护存储器中。在部队级或中间级维护时，可借助主机提供的便携式辅助维护设备 (PMA) 显示或下载故障信息。

5 结束语

根据现代飞机测试性设计的需求，分飞机级、系统级、机载设备级 3 个层次论述了测试性详细设计的方法。对系统级测试性设计的核心技术，即基于模块测试与维护总线的边界扫描技术，给出了系统架构和分层测试策略。这部分工作完成后，就可以进行试制与试验工作，迭代顶层设计及更改详细设计，直至满足测试性设计的总体要求。

监测节点采用的电池容量为 3 000 mAh 时，整个系统的工作时间为 $t = 3\ 000 / 0.676\ 8 = 4\ 432$ 小时，即可连续工作 $4\ 432 / 24 = 184$ 天。

5 结束语

该可燃气体监测系统以无线传感网络和安卓系统平台为基础，能对可燃气体泄露的情况进行实时监测和报警，且具有体积小、成本低、功耗低、布设简单、功能易扩展的优点，特别适用于监控区域范围小而分散场所。该系统已完成实验室模型开发和测试，效果良好。下一阶段会根据实际情况进行实地测试，并实现移动监控终端与手机的整合，借助安卓系统平台，通过相应的功能软件和通用型信号接收器的设计，将移动监控终端的功能移植到智能手机上，借助安卓手机的普遍性进一步降低成本。

参考文献：

- [1] 王湘云, 董大波. 基于短距离无线/有线通信的燃气监测报警系统 [J]. 电子技术应用, 2013, 39 (7): 83-87.
- [2] 万国峰. 基于专家系统的煤矿安全监测监控系统 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (10): 1424-1426.
- [3] 王 睿, 余有灵. 基于 MSP430 单片机的城市燃气监测系统设计 [J]. 微型机与应用, 2013, 32 (4): 30-32.
- [4] Culler D. Tiny OS [EB/OL]. (2013. 05. 12). <http://www.tinyos.net>.
- [5] Hill J, Szewczyk R, Woo A, et al. Architectural support for programming languages and operating systems [M]. 2000: 93-104.
- [6] Gay D, Levis P. nesC 1. 1 语言参考手册 [M]. 2003, 5.
- [7] Kernighan B W, Ritchie D M. C 语言程序设计 (第二版) [M]. NJ: Prentice Hall, 1988.
- [8] 潘 浩, 董齐芬, 张贵军. 无线传感器网络操作系统 TinyOS [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [9] Levis P. message_t [EB/OL]. (2013. 05. 12). <http://www.tinyos.net/tinyos-2.1.0/doc/html/tep111.html>.
- [10] 张建阳, 赵祥模. 基于多接口无线传感节点的油罐车监测系统 [J]. 测控技术, 2012, 31 (10): 25-28.
- [11] 武仁杰. 基于 ZigBee 的矿井监测节能系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (7): 1818-1820.

参考文献：

- [1] GJB 2547-95 装备测试性大纲 [S]. 国防科学技术委员会, 1995.
- [2] 崔广宇, 等. 现代飞机顶层测试性及综合诊断设计方法 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (12): 3181-3184.
- [3] 石君友. 测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [4] 林典雄, 李 岩, 张 勇. 航空装备综合诊断的现状与发展设想 [J]. 航空工程进展, 2011, 2 (3): 349-354.
- [5] 连光耀, 黄考利, 等. 装备测试性设计与维修诊断一体化关键技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (1): 1-4.
- [6] 刘九州, 王 健. 边界扫描测试技术发展综述 [J]. 电光与控制, 2013, 20 (2): 46-50.
- [7] 刘晓斌, 管壮根, 等. 基于边界扫描技术的复杂电子设备系统级测试研究 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (2): 1795-1798.
- [8] 陈 星, 黄考利, 等. 从 1149.1 标准到 1149.7 标准分析边界扫描技术的发展 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (8): 1460-1463.