

# 运载火箭电气系统 BIT 设计流程及方法研究

权 赫 张 鹏 屈 晨

(北京航天自动控制研究所 北京 100854)

**摘要:** 良好的测试性设计对运载火箭而言,可以有效地缩短发射流程,提高发射成功率,而机内测试技术(BIT)是改善系统或设备的测试性、维修性和故障诊断能力的重要途径和手段。本文以我国新一代运载火箭 XX-5 为背景,分析了运载火箭电气系统实现全面 BIT 技术的可行性,并在系统层面提出了运载火箭电气系统 BIT 设计的流程和方法。通过研究,本文旨在建立一套标准的运载火箭电气系统 BIT 设计流程,以此作为优化测试流程、缩短测试周期的依据。

**关键词:** 机内测试;运载火箭;电气系统

**中图分类号:** TP277    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Design process and method research of BIT for Launch vehicle electrical system

Quan He Zhang Peng Qu Chen

(Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

**Abstract:** For launch vehicle, great testability design can effectively shorten launch flow and increase launch success rate. BIT (build-in test) is an important technique to improve the testability, maintainability and fault diagnosis of capability performance of a system or equipment. In this paper, analysis of the feasibility of BIT for launch vehicle electrical system and the design process and method of BIT is proposed, based on the background of new generation launch vehicle XX-5. The purpose of this paper is to establish a standard set of BIT design process for launch vehicle electrical system, as the basis for Optimizing testing process and shortening the test cycle.

**Keywords:** BIT; launch vehicle; electrical system

## 1 引言

缩短测试周期、优化测试流程、提高发射成功率是我国运载火箭发射任务的目标<sup>[1]</sup>。随着智能测试技术的发展,运载火箭测试方式在近几年发生了重大革新。当前我国以 XX-5 为代表的新一代运载火箭技术发展已进入了自动化和信息化发展的关键时期,各种电子设备和机械设备在功能越来越先进的同时,系统结构变得越来越复杂,测试与维修变得极为困难,对测试性、维修性、可靠性和安全性要求越来越高。因此,提高航天装备,尤其是大型、复杂电子设备的测试性、维修性、故障检测与诊断能力成为亟待解决的核心问题<sup>[2-3]</sup>。

机内测试 BIT<sup>[4-6]</sup> (built-in test) 技术是解决复杂电子设备测试性、维修性和保障性的最成功、最有效的方法之一,是复杂装备整体设计、分系统设计、状态监测、故障诊断和维修决策等方面的关键共性技术,同时也是改善装备系

统或设备测试性与诊断能力的重要手段<sup>[7]</sup>。BIT 技术能够提高故障诊断精确性、显著地缩短诊断时间、降低维修保障成本和对维修人员的技能要求<sup>[8]</sup>,对优化运载火箭测试流程、缩短测试周期有着至关重要的意义。

本文以新一代运载火箭 XX-5 为背景,结合研制过程中的设计方法,给出了系统层面 BIT 设计流程、设计方法,为后续大型工程研制、提高航天发射的成功率、缩短运载火箭测试发射周期奠定基础。

## 2 运载火箭电气系统实现全面 BIT 的可行性分析

运载火箭电气系统实现全面 BIT,需要全面、系统地研究系统或设备的可测试性设计、故障检测与隔离技术、BIT 建模技术、BIT 降虚警技术,以及任务关键实时调度技术等内容。

以 XX-5 为代表的新一代运载火箭电气系统主要采

用总线架构,箭上设备大多为具有独立处理功能的智能设备。总线架构及智能设备的应用为全面实现电气系统 BIT 技术提供了先决条件。依靠电气系统或设备内部专设的一些子检测电路和自检测软件可以实现系统或设备自身器件工作参数的检测和故障诊断<sup>[9]</sup>。所有挂在总线上的智能设备都可作为总线的—个终端(RT),每个 RT 通过总线接口与总线连接,系统内部所有 RT 的信息交互均通过总线实现。运载火箭采用 1553B 总线构架后,挂在总线上的各终端设备内部基本配备 FPGA、DSP 等智能芯片,利用芯片的数字信息传输和—处理方式,在不增加测试设备或测试电路 BITE (built-in test equipment)的原则下,BIT 可全部或部分地通过软件来实现<sup>[10]</sup>。因此,随着总线技术和智能设备技术的发展,运载火箭电气系统实现全面 BIT 切实可行。

### 3 电气系统 BIT 设计步骤

在系统 BIT 设计中,首先应分析是否具备 BIT 技术应用的平台,如果箭上电气系统或设备采用数字信息和—处理方式,可充分利用设备内部智能芯片的功能并结合软件,在不增加 BITE 的原则下,实现 BIT。如果系统或—单机设备基本为模拟器件,则不具备 BIT 技术应用条件,例如我国现役运载火箭由于研制年代较早,设备相对落后,基本不具备 BIT 技术应用条件。在满足 BIT 技术—应用的前提下还需视具体情况具体分析。如果为了—实现 BIT 而需要增加大量的 BITE,则—般不应采用 BIT。另外,BIT 的应用和 BITE 的存在不应影响系统和—设备有关的功能及性能指标,也不应降低系统和—设备的安全性及可靠性。

其次,在上述两个条件具备的基础上开展运载火箭电气系统 BIT 技术设计。在进行系统 BIT 详细的软硬件设计前,系统 BIT 设计应首先进行系统、分系统以及较复杂的单机级产品的测试性总体设计和—工作的规划。

最后,在系统 BIT 设计中,采用故障检测率、故障隔离率、虚警率等指标来度量 BIT 的好坏<sup>[11]</sup>。

### 4 电气系统 BIT 详细设计流程及方法

整个系统 BIT 研制流程包含以下几方面内容:确定系统 BIT 功能及工作模式、确定 BIT 测试等级和程度、权衡系统 BIT/BITE 软件和硬件、设计合理的系统 BIT 方案、选取适合的测试点与测试项、BIT 方案性能评价,具体设计流程如图 1 所示。

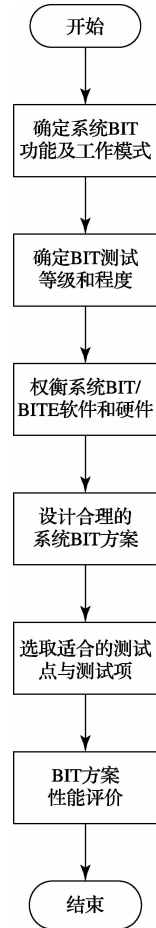


图 1 系统 BIT 详细设计流程

#### 4.1 确定系统 BIT 功能及工作模式

系统 BIT 主要有以下 3 种功能:

- 1) 系统监测功能:监测系统关键参数;
- 2) 系统检查功能:检查系统功能、性能是否正常,对故障进行诊断;
- 3) 故障隔离功能:依据系统设计指标或使用要求将故障隔离到单机级或更低(板卡级)。

依据系统设计的特点和使用要求,BIT 主要包含以下 3 种模式:

- 1) 工作中 BIT:对系统工作时的关键功能特性进行实时监测与记录并将结果及时反馈给系统;
- 2) 工作前 BIT:主要用于检查系统在工作前的功能与性能是否正常;

3)工作后 BIT:主要用于系统工作完成后的维修检测,通过数据判读确定系统工作性能,并进一步隔离故障。运载火箭由于其工作特性,一般只有前两种 BIT 工作模式。

#### 4.2 确定 BIT 测试等级和程度

系统、分系统和单机甚至单板级产品都可以设置 BIT,底层 BIT 信息供顶层 BIT 进行分析诊断,系统 BIT 信息是单机或单板 BIT 信息的集合。一个好的系统 BIT 方案必须是以底层 BIT 提供的 BIT 信息为基础,逐层进行信息汇总并对其进行诊断,因此系统 BIT 的测试覆盖性就取决于底层 BIT 设计的程度。为满足全系统 BIT 测试覆盖性的要求,需依据设计要求划分不同层次系统 BIT 设计功能,进而使方案具备系统检测与故障隔离的功能。

#### 4.3 权衡系统 BIT/BITE 软件和硬件

BIT 设计通常包括软件 BIT 设计和硬件 BIT 设计<sup>[9]</sup>。软件 BIT 是利用被测对象内部的 DSP、FPGA 等微处理器结合软件编程实现的。其突出优点是:产品基本无需增加额外测试电路,减少了因额外测试电路故障导致的虚警问题。而硬件 BIT 是通过增加额外测试电路来实现单机或系统的 BIT 功能,能够在软件 BIT 不适用时发挥作用。由于运载火箭电气系统飞行可靠性指标要求苛刻,为避免因增加额外测试电路导致产品本身可靠性指标下降以及虚警等问题,通常采用软件 BIT 设计方式。

#### 4.4 设计合理的系统 BIT 方案

虽然系统 BIT 可以设计成在系统级、分系统级或单机级、电路板或模块级进行测试,但考虑到运载火箭发射前测试需保证测试的全面性,因此通常将 BIT 放在模块级进行测试,避免系统冗余设计带来的测试不全面问题。单机 BIT 设计为所有模块 BIT 的集合,而系统 BIT 为所有单机 BIT 的集合。

系统 BIT 可以是分布式的,也可以是集中式的。图 2 所示系统是分布式 BIT,主要是在分系统的电路板(模块)级进行测试,系统 BIT 测试结果为各个电路板(模块)BIT 测试结果的集合。由于每个电路板(模块)均进行 BIT 测试,系统测试结果显示故障,可以很快进行故障定位,最大限度的降低故障隔离的模糊度。尤其是运载火箭电气系统采用 1553B 总线架构后,所有设备均作为总线上的一个站点,每个站点将测试结果通过总线提供给箭载计算机,箭载计算机根据各站点发送来的测试结果进行统计分析,并将测试结果返回至地面计算机供测试人员进行判读分析。

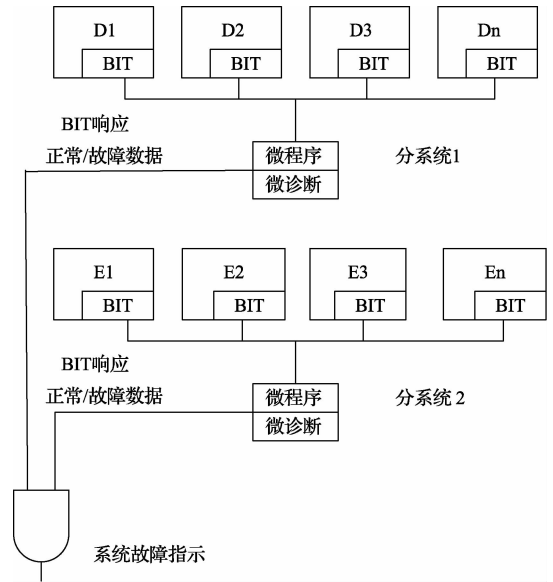


图 2 分布式 BIT 示意图

#### 4.5 选取适合的测试项与测试点

##### 4.5.1 测试项目的选择

测试项目及参数的选择是测试性设计的一项重要内容,是使系统或单机具有良好测试性的重要保证。航天型号产品的系统 BIT 测试点与测试项的选择应依据功能及性能指标要求,以及测试性大纲、维修性大纲和安全性大纲的要求,合理确定测试内容,测试项目及测试参数,以满足系统或设备在研制和使用阶段不同级别的检测和维护。

BIT 测试项目与测试点选择应根据航天产品不同产品层次分级考虑。对 BIT 测试,选择的测试项目和测试点应能满足对系统或单机的功能及性能测试、故障检测和故障隔离的要求,系统 BIT 的故障隔离应隔离到组成系统的设备,而单机 BIT 的故障隔离通常到单机内部板卡或模块。

##### 4.5.2 测试点的选择

测试项目确定后需要正确的选择测试点,以保证系统或单机 BIT 具有良好的可测试性。测试点应能对系统或设备进行功能测试和性能检测,便于故障检测与隔离,使校准、修理、拆卸、更换易于进行并与其维修和保障计划相一致。根据系统功能进行 FMEA 分析,列出系统层面可能会出现故障模式,具体测试点的选取还是根据各单机内部电路板或模块的功能并结合电路原理图或信号流向图建立故障树。根据信号流向来建立的故障树,每个节点就是实际电路的节点,但节点上所传递的信息不是实际电路中的信号而是故障信息。

通常测试点及测试项目如下:

#### 1) DSP 内部寄存器的查询验证

软件读取使用 DSP 内部寄存器,并与期望值进行比较,检查这些寄存器是否已经正确设置。

#### 2) 总线协议芯片的寄存器和 RAM 读写检测

读出总线协议芯片配置好的寄存器与期望值进行比较。向 RAM 空间写入 0xAAAA、0x5555 等字节,然后再读出进行比较。

#### 3) 继电器初始状态检测

读出所有继电器开关状态,判断是否所有的继电器开关处于关断状态。

#### 4) 二次电源电压状态检测

测试单机内部所有二次电源电压,并判别电源电压范围是否在阈值范围内。

#### 5) 485 总线通道检测

对每个周期内,485 总线接收到的帧数据个数和正确性进行检测。

#### 6) 诸元验证

对单机内部读入的诸元参数与 FLASH 内部烧写的诸元进行比较验证。

#### 7) CPU 定点、浮点运算功能进行测试

### 4.6 BIT 方案性能评价

在系统 BIT 设计中,采用虚警率、故障检测率、故障隔离率等指标来衡量 BIT 方案的好坏。上述 3 个指标需结合具体 BIT 设计方案进行评估。

## 5 结 论

缩短发射周期,提高航天发射的成功率与竞争力是我国航天发射任务的总要求和总目标。解决这一问题不能仅局限于简化测试项目、优化现有的测试发射流程等方面,从测试方式的革新入手将会带来更加显著的效果。目前新一代运载火箭 XX-5、XX-7 电气系统均采用了 BIT 技术,但均未形成标准的 BIT 设计流程与设计方法。本文通过研究运载火箭电气系统 BIT 设计流程及方法,建立了一套标准的系统层面 BIT 设计流程及方法,提高了系统设计的合理性,对于优化测试流程、缩短运载火箭测试周期有着至关重要的意义。

## 参考文献

- [1] 梁晓朋,蔡远文,伯伟. 基于 BIT 技术的运载火箭测试系统研究[J]. 航天控制,2010,28(6): 81-84.
- [2] 陈希祥,邱静,刘冠军. 装备系统 BIT 权衡分析与选择技术研究[J]. 仪器仪表学报,2011,32(09): 2079-2086.
- [3] 兰超,王婧琼. BIT 技术在星载电子设备的应用[J]. 空间控制技术与应用,2015(1):50-54.
- [4] 孙金明,潘红兵,周晶晶,等. 智能 BIT 降虚警技术[J]. 电子设计工程,2015(2):19-21.
- [5] 董妍,程俊强. 飞行控制计算机中的 BIT 技术及其测试方法[J]. 航空计算技术,2013,43(2): 103-105.
- [6] 黄运来,梁玉英,张芳. 智能 BIT 故障诊断技术与实现[J]. 火力与指挥控制,2011,36(2): 174-176.
- [7] 马存宝,王彦文,史浩山,等. 机载电子设备 BIT 优化设计技术研究[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(9):2276-2279.
- [8] 张孝虎,朱明红,徐百荣,等. 空空导弹测试设备故障诊断仪器研究与开发[J]. 弹箭与制导学报,2004,24(4):235-237.
- [9] 许东升,左东广,赵东伟,等. 基于 BIT 的导弹测试技术研究[J]. 现代计算机,2011(17):67-70.
- [10] 伯伟,蔡远文. 箭上控制系统总线化结构与自检测[J]. 电子测量与仪器学报,2008,22(增刊2): 166-168.
- [11] 田心宇,张小林,吴海涛,等. 机载计算机 BIT 虚警及解决策略研究[J]. 西北工业大学学报,2011(3): 400-404.

## 作者简介

权赫,工学博士,工程师,主要研究方向是箭上控制系统综合设计、电磁兼容。

E-mail:quanhe-3547@163.com

张鹏,工学博士,工程师,主要研究方向是箭上控制系统综合设计、航天器制导与控制。

屈晨,工学硕士,工程师,主要研究方向是箭上控制系统综合设计、产品化工程。