

战术导弹控制系统 BIT 设计方法

刘仁浩¹, 李 然¹, 段宇婷¹, 姜云涛¹, 夏金秀²

(1. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854; 2. 航天科工空间系统总体部, 北京 100854)

摘要: 战术导弹控制系统测试是其研制、生产和交付使用阶段的重要环节, 为了快速便捷地完成对控制系统功能性能指标测试, 及时检测和隔离故障, 保证导弹安全、准时发射, 根据新一代导弹控制系统设计特点, 重点针对导弹交付后使用阶段测试需求, 提出一种分布式与集中式相结合的机内测试 (BIT) 方案, 详细给出了单机分布式 BIT 和系统集中式 BIT 的设计方法, 该方法在无外部设备辅助测试的条件下可覆盖控制系统所有硬件资源, 实现控制系统工作状态和工作性能的快速评估, 为导弹或运载火箭控制系统测试性设计提供参考。

关键词: 战术导弹; 控制系统; 使用阶段; 机内测试

Built-in-Test Design Method for a Tactical Missile Control System

LIU Renhao¹, LI Ran¹, DUAN Yuting¹, JANG Yuntao¹, XIA Jinxiu²

(1. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China;

2. CASIC Space Engineering Development Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract: Control system testing is a key link of design, production and usage of tactical missile. In order to obtain quickly the performance indicator of control system and detect faulty equipment, based on distributed-centralized architecture, a method of new hybrid built in test (BIT) is proposed. A typical hybrid BIT design scheme which combines hardware and testing methods is provided. This scheme was mainly applied in service stage. The test can verify and cover all the hardware of control system without the additional equipment. The design method can be used to improve the test ability of missile weapons and launch vehicle.

Keywords: tactical missile; control system; service stage; built-in test

0 引言

在战术导弹研制和使用过程中, 除了保证系统飞行过程各环节的高可靠性外, 还必须保证导弹在发射前功能正常、性能良好, 保证安全、准时发射, 需要导弹控制系统具有良好的测试性^[1]。当前部队每装备一型导弹, 就需要配套相应的地面辅助测试设备, 需要在技术阵地通过单机单元测试、分系统测试和总检查测试等一系列测试工作来判断导弹控制系统的健康状况。在发射阵地还需进行大量射前检查以确保任务可靠性, 存在测试程序时间长, 工序冗繁, 部队勤务工作量大, 保障成本高等诸多问题, 严重制约导弹武器系统快速反应能力的提升^[2]。能否及时检测和隔离

故障, 保证导弹安全、准时发射将直接影响导弹武器装备的效能, 机内测试 (Built-In Test, BIT) 是解决此类问题的有效途径, 还是实现系统故障容错、重构的基础^[3-9]。BIT 是指系统、设备内部提供的检测、隔离故障的自动测试能力, 是联机检测技术的新发展^[10]。

新一代导弹控制系统大量采用集成电路、微处理器技术以及总线通信技术, 为实现 BIT 设计奠定了坚实的基础。根据新一代导弹控制系统设计特点, 在少量增加甚至不增加弹上设备资源开销的前提下, 提出一种分布式与集中式相结合的 BIT 测试方法, 该测试方案仅利用导弹控制系统弹上已有资源, 在无外部设备辅助测试的条件下覆盖控制系统所有硬件资

收稿日期:2021-06-07; 修回日期:2021-07-21。

基金项目:国防科技重点实验室基金(6142501200110)。

作者简介:刘仁浩(1981-),男,四川江油人,博士研究生,高级工程师,主要从事飞行器控制系统方向的研究。

引用格式:刘仁浩,李 然,段宇婷,等. 战术导弹控制系统 BIT 设计方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1):135-140.

源, 实现对控制系统工作状态和工作性能的评估, 发现并定位故障, 辅助决策导弹是否可以投入战备和作战使用。

1 BIT 功能、组成及基本原理

BIT 技术是依靠其内部专设的自检测电路和自检测软件, 来完成系统自身工作参数检测、故障诊断与隔离的一种综合能力, BIT 系统结构如图 1 所示^[11-13]。

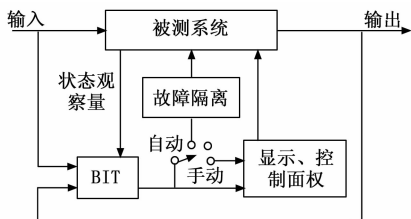


图 1 BIT 系统结构图

BIT 结构从总体上可分为分布式和集中式两种结构。分布式 BIT 结构是指分系统或设备设计有各自的故障检测和隔离功能, 并根据其测试结果, 利用归纳法来判断系统是否正常; 集中式 BIT 重点针对分布式 BIT 不覆盖项, 由系统中央处理器收集各状态信息, 并利用系统级测试与诊断功能判断系统是否处于正常状态^[14-15]。根据系统特点和使用模式, BIT 使用模式又可分为加电 BIT、启动 BIT、周期 BIT 和连续 BIT^[16]。加电 BIT 主要在系统执行任务前快速检测装备是否正常, 能否投入正常使用, 给出通过或不通过的指示。启动 BIT 用于执行专项测试, 主要用于检测系统关键功能特性和隔离系统级故障。周期 BIT 和连续 BIT 是在系统执行任务过程中连续地或周期性地监测装备各组成部分的工作状况, 特别是对影响安全和任务关键的部件, 主要用于系统故障隔离和系统工作性能评估。

2 控制系统组成及 BIT 总体方案

以常规两级战术导弹为例, 控制系统主要由飞控计算机、捷联惯性测量组合、雷达导引头、控制电池以及各级段伺服机构和总线电缆网等组成, 如图 2 所示。

各单机均按功能采用模块化设计, 内部集成的微处理器为分布式 BIT 设计提供了软硬件资源。各单机通过弹上总线实现互联互通, 其中飞控计算机既是飞行控制中心, 也是系统测试控制中心, 便于集中式

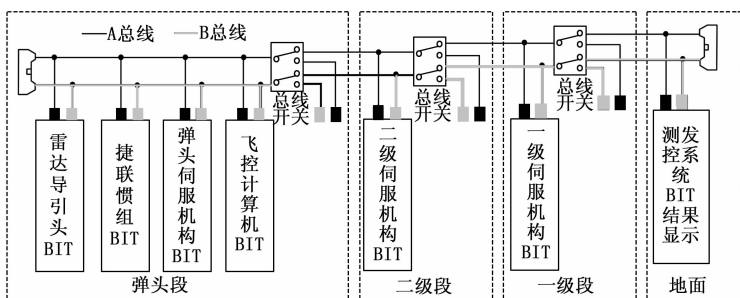


图 2 两级常规战术导弹控制系统组成框图

BIT 设计。据此将控制系统 BIT 基本结构分为针对各单机检测的分布式 BIT 和以飞控计算机为中心对系统进行综合诊断的集中式 BIT 两个层级。

基于控制系统分布式和集中式 BIT 架构, 导弹交付用户后的测试可分为技术阵地测试和发射阵地测试两大阶段, 技术阵地测试要求在动态激励下对控制系统功能、技术参数、工作程序、动作协调性进行综合检查确认。为使导弹经常处于良好战备可用状态, 需要在技术阵地对导弹进行定期的、不定期的或预防性的测试, 只有技术阵地测试合格的导弹才转入发射阵地。发射阵地测试只对系统重要单机功能进行检查, 要求测试快速、连续、自动, 测试项目作为发控流程的一部分。仍以常规两级战术导弹为例, 针对上述典型使用阶段测试需求, 采用分布式与集中式相结合的 BIT 测试架构, 控制系统 BIT 模式及工作原理如表 1 所示。

导弹使用阶段控制系统 BIT 工作流程如图 3 所示, 导弹交付入库后, 在原位按需求进行开机自检和功能测试, 测试过程中监测单机和系统功能参数, 以确认导弹状态, 对需要维修的导弹则转入维修程序。BIT 项目可根据需要单选或多选, 测试开关的接通与断开可通过测发控软件界面选择。当接到发射任务后, 导弹机动至发射阵地, 起竖前进行开机自检, 自检流程融入发射流程, 如发现故障则转入维修程序。导弹点火起飞后启动单机及系统功能参数监测 BIT, 经遥测实时记录并下传, 用于导弹性能评估。

在技术阵地原位运行开机自检和系统功能测试, 测试过程中对单机和系统的功能参数进行了监测, 测试过程可在无外部测试设备辅助条件下覆盖控制系统所有硬件资源, 实现对导弹工作状态和工作性能的评估, 发现并定位故障, 决策导弹是否可以投入战备和作战使用。

表1 导弹控制系统 BIT 模式及工作原理

功能	模式	结构	测试原理
开机自检	加电 BIT	分布式 BIT	控制系统加电后各单机自动运行 BIT, 在飞控计算机控制下对单机功能自动进行故障检测与诊断, 对单机能否用于飞行控制给出通过或不通过指示, 并将检测结果存储在单机内部 RAM 中供飞控计算机读取。
单机功能参数监测	周期 BIT	分布式 BIT	控制系统工作过程中各单机以一定周期对单机工作指示信号、工作电压、工作电流等表征单机状态的信息进行在线周期性检测和隔离故障, 以监测系统的关键功能特性。上述周期 BIT 不影响系统工作, 检测结果存储在单机内部 RAM 中供飞控计算机读取。
系统功能参数监测	连续 BIT	集中式 BIT	控制系统运行过程中飞控计算机记录系统工作特征点参数、指令及单机响应信息, 并发送至遥测装置或地面测发控计算机记录, 供事后进行导弹性能评估分析。
系统功能测试	启动 BIT	集中式 BIT	根据任务需要由人工在测发控计算机上选择启动火工通路检查、电磁阀通路检查、通信总线、制导系统检查、姿控系统检查、安全自毁系统检查等集中式 BIT, 在飞控计算机控制下完成系统级测试。

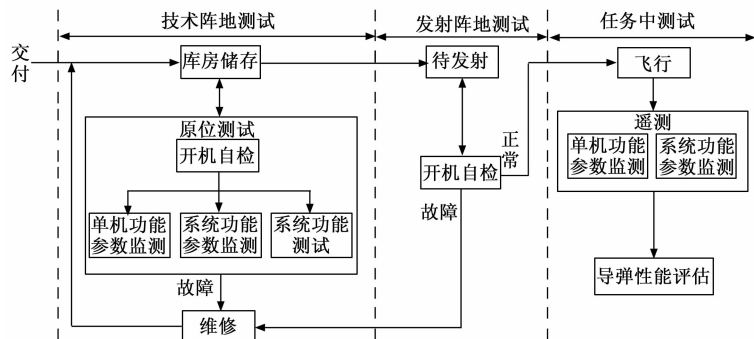


图3 战术导弹使用阶段控制系统 BIT 工作流程

3 控制系统 BIT 设计方法

3.1 控制系统单机分布式 BIT 设计

控制系统各单机主要由功能部件和信号处理与控制电路两大部分组成, 其中各单机信号处理与控制电

路技术路线类似, 主要由各类 DSP、FPGA、A/D 采样电路、D/A 转换电路、总线数据通信接口模块和电源模块等组成, BIT 设计时通常根据各模块特点进行故障建模得出故障树, 根据故障树设计针对性的 BIT 检测算法^[17]。根据控制系统单机设计特点, 对于此类电路采用下述方法实现 BIT 测试。

1) 自闭环测试: 利用各功能模块内 DSP、FPGA 等数字器件运算控制资源, 在电路内部设置握手及状态查询程序自检和互检程序, 完成数字信号处理电路的自闭环测试。

2) 模拟电路回绕测试: 在电路中设置电子开关或继电器等支持电路, 采用信号回绕方式实现 D/A 输出与 A/D 采样电路互检, 同时完成电源模块输出特性检测。

3) 工作状态在线监测: 利用信号处理电路信息采集通道对单机工作指示信号、工作电压、电流等表征单机工作状态的信息进行在线周期性监测。对于雷达导引头、捷联惯性测量组合和伺服机构等单机的功能部组件, 可结合单机具体功能利用单机或自然环境提供的测试激励实现 BIT 测试。

3.1.1 雷达导引头 BIT

雷达导引头普遍采用数字阵列体制, 主要由天线单元、综合射频单元和信号处理单元组成, 如图 4 所示。

雷达导引头 BIT 测试的核心是发射和接收通道测试, 利用雷达导引头自身工作特点对雷达 T/R 组件进行轮替测试, 一次测试只开一个 T/R 组件的发射通道, 发射信号经回波信号选择网络分配到其余 T/R 组件的接收支路, 获取每个接收信号的幅度值和相位值参数, 按此方式对雷达全部 T/R 组件进行遍历测试后即可判定发射通道和接收通道是否正常, 同时可达到对雷达导引头天线单元、综合射频单元和信号处理单元进行功能检测的目的。

3.1.2 捷联惯性测量组合 BIT

捷联惯性测量组合主要由 3 只加速度计、3 只陀螺、I/F 电路板、陀螺控制电路、数据采集处理电路以及框架控制及测角电路组成, 如图 5 所示。

静基座环境下利用当地重力加速度 g_0 和地球自转角速度 ω_e (取 $15.04^\circ/\text{h}$) 为激励, 获取惯组陀螺和加速度计在一定时间 ΔT 内输出值, 建立下述关系式:

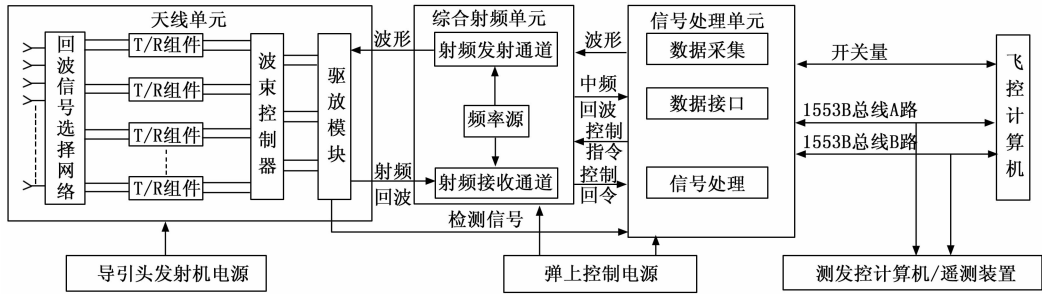


图 4 雷达导引头系统 BIT 组成框图

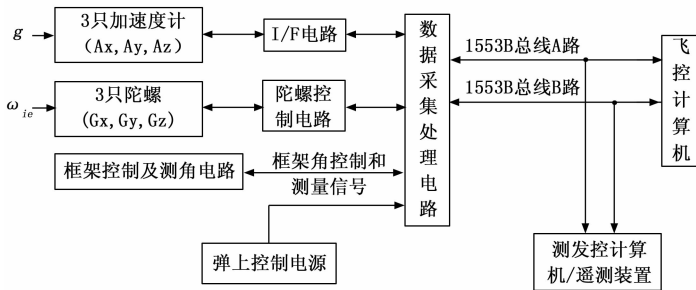


图 5 捷联惯性测量组合 BIT 组成框图

$$\begin{cases} A_g = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \\ G_g = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} g_0 - \Delta g \leq A_g \leq g_0 + \Delta g \\ \omega_{ie} - \Delta \omega \leq G_g \leq \omega_{ie} + \Delta \omega \end{cases} \quad (2)$$

$A_{i=x,y,z}$ 、 $G_{i=x,y,z}$ 分别是惯组 x, y, z 三轴捷联加速度计和陀螺在 ΔT 内的输出均值, Δg 、 $\Delta \omega$ 分别是加速度通道和角速率通道合格门限值。此外, 对于三自惯组可通过转动其内部框架获得姿态激励, 对 $A_{i=x,y,z}$ 和 $G_{i=x,y,z}$ 输出极性进行测试, 依据上述方法可判断捷联惯性测量组合功能是否正常可用。

3.1.3 伺服机构 BIT

伺服机构由伺服控制器和机电作动器组成, BIT 原理如图 6 所示。

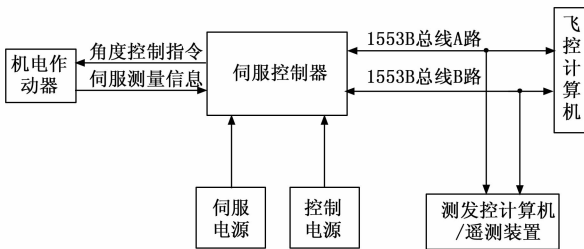


图 6 伺服机构 BIT 组成框图

伺服控制器根据飞控计算机发出的角度指令驱动机电作动器动作, 使得导弹气动舵面或发动机喷管按

给定的角度偏转。根据这一特点, 在空间给定一个特定位置, 伺服控制器运行自测试程序驱动电机转动舵偏向该位置, 判断测量角位置与设计角度之差是否符合设计判断门限, 据此判断伺服机构工作状态是否正常。

3.2 控制系统集中式 BIT 设计

控制系统火工品控制通路、电磁阀控制通路、通信总线等设备未嵌入微处理器, 不具备单机自检功能, 制导系统、姿态控制以及安全自毁系统功能等无法通过单机 BIT 测试覆盖, 需要由系统飞控计算机来收集各状态信息, 利用系统级测试与诊断功能判断系统是否处于正常状态。

1) 火工品通路测试:

以 n 路火工品 H1、H2……Hn 为例, 测试电路如图 7 所示。测试激励恒流源、测控开关 KA1、KA2 均设置在飞控计算机 BIT 专用测试模块内, K1……Kn 为弹上火工品时序控制开关, 上述开关均受飞控计算机控制。

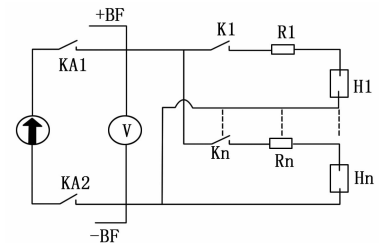


图 7 火工品通路 BIT 组成框图

测试时, KA1、KA2 先闭合, 再依次闭合 K1……Kn, 飞控计算机 A/D 采样电路实时记录 +BF、-BF 母线间的电压, 恒流源输出电流 I 远小于火工品安全电流, 据此可测量计算得到各通道限流电阻 R_n 、火工品阻值和线缆电阻的控制回路总阻值, 根据回路总阻值可判断火工品是否连接好, 确保无漏接。此外, 通过比较分析时序控制开关闭合前后回路总阻值变化情况辨识火工品时序通路有无误接通, 避

免±BF 母线上电后发生时序误启动等安全隐患。

2) 电磁阀控制通路测试: 以 n 路电磁阀 DC1、DC2……DC n 为例, 对电磁阀控制通路的 BIT 测试实现方式与火工品通路测试类似, 测试电路如图 8 所示, 所不同的是依据电磁阀特性选用了恒压源作为测试激励, 恒压源、测控开关 KV1、KV2 和取样电阻 R0 串联在电磁阀控制回路中。

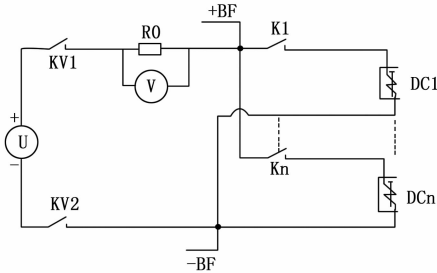


图 8 电磁阀通路 BIT 组成框图

测试时, KV1、KV2 先闭合, 再依次闭合 K1……K n , 飞控计算机 A/D 采样电路实时记录取样电阻 R0 两端的电压, 从而获得电磁阀接通过程电流变化趋势, 以此分析判断电磁阀是否工作, 同时对电磁阀控制通道的连接状态进行实时测试。

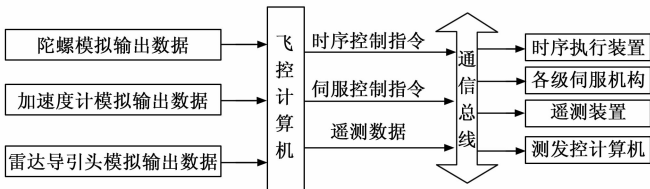


图 9 制导系统 BIT 组成框图

3) 通信总线测试: 以两级导弹为例, 全弹使用 A、B 两路 1553B 总线通信, 全弹有弹地、一二级和头体 3 个分离面, 每个分离面均设置了总线切换开关。导弹飞行过程中, 在各级段分离前控制相应分离面总线开关完成 1553B 总线由接通下一级状态切换至接通本级匹配电阻, 实现控制总线转级。为实现总线通信功能和转级功能测试, 在飞控计算机中设置测试程序, 分别通过 A、B 两路总线逐个检测总线上各站点的自检结果, 以此测试总线通信功能。再顺序切换各转级总线开关, 通过地面测发控显控计算机监听总线数据判断总线开关切换功能是否正常。

4) 制导系统测试: 飞控计算机测试程序根据标准弹道向制导模块发送模拟飞行环境的加速度、角速度和末制导探测信息, 飞控计算机执行飞行程序, 测

发控系统计算机通过总线监听和记录伺服控制指令、时序控制指令和遥测数据, 以验证制导系统正确性。

5) 姿控系统测试: 姿控系统测试是检查姿态控制系统的静、动态参数是否符合规定的技术要求, 通路极性是否正确, 测试原理如图 10 所示。

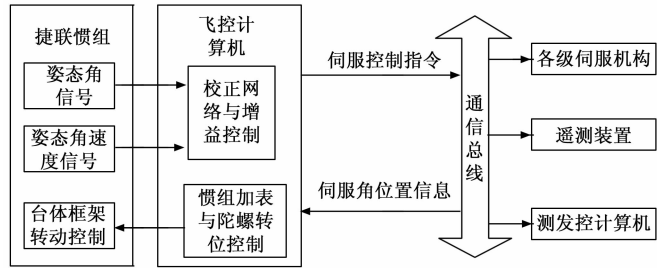


图 10 姿态控制系统 BIT 组成框图

静、动态特性测试是指对姿态敏感装置和校正网络增益控制环节的静态和动态性能测试, 通路极性测试的目的是检查姿态控制系统各组成仪器之间的通路和极性是否正常, 把系统隐性故障充分激发出来, 以在短时间内确认系统控制功能的正确性^[18-19]。校正网络增益控制环节主要由算法软件实现, 其性能由设计状态确定, 导弹交付后可免测试, 系统重点考虑通路极性 BIT 设计。测试时控制惯组内台体转动, 给出姿态角和姿态角速度信号, 测发控计算机记录伺服机构控制指令和舵或喷管摆动位置, 以此判断偏航、俯仰和滚动三个通道的极性是否正常。

6) 安全自毁功能测试: 与系统极性测试类似, 控制惯组内台体转动, 先后模拟弹体的偏航角和俯仰角超过允许的角度范围, 测发控计算机记录飞控计算机发出的自毁指令, 以此判断偏航、俯仰通道的安全自毁是否正常。

4 结束语

导弹控制系统 BIT 设计是系统顶层设计, 其主要设计内容主要包括单机级分布式 BIT 设计和系统级集中式 BIT 设计两个层次。根据导弹控制系统特点, 给出了控制系统中主要单机和系统的 BIT 设计方法及工程实施方案, 在不使用地面辅助测试设备的前提下, 以最小的硬件软件开销实现了 BIT 自测试, 实现了导弹技术准备测试和射前检查的自测试功能, 可有效提高部队的生存能力和机动作战能力, 为导弹或运载火箭控制系统测试性、维修性、保障性以及故障容错与重构设计提供技术参考。

参考文献:

- [1] 夏克寒, 牟建华, 暴飞虎, 等. 导弹测试流程优化系统设计及实现 [J]. 导弹与航天运载技术, 2012, 318 (2): 43-44.
- [2] 徐利明, 史文森, 王瑞臣. 弹道导弹快速测试与发射控制技术探究 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40 (10): 63-66.
- [3] 杜 丹, 王 凯, 催生保. 电子信息装备综合保障技术与保障性设计 [J]. 无线电工程, 2020, 50 (12): 1087-1091.
- [4] 王志红, 李雪思, 李锁兰, 等. 一种导弹武器 IBIT 系统设计及数据处理方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2020, 374 (3): 27-28.
- [5] 王少萍. 大型飞机机载系统预测与健康关键管理关键技术 [J]. 航空学报, 2014, 35 (6): 1460-1471.
- [6] 刘少伟, 郑文荣. BIT 技术发展与应用研究 [J]. 理论与方法, 2011, 30 (5): 23-25.
- [7] DREE R, YOUNG N. Role of BIT in support system maintenance and availability [J]. IEEE A&E system magazine, 2004 (8): 482-483.
- [8] SHI J Y, LI J Z, SHI M. Method of automated BIT false alarms simulation based on EDA [C] //Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on. Beijing: IEEE Press, 2011: 1449-1453.
- [9] JEFFEY SMITY. Built in Test—Coverage and Diagnostics [J]. 978-1-4244-4981-1/09/2009 IEEE.
- [10] 谢永成, 董今朝, 李光升, 等. 机内测试技术综述 (上接第 134 页)
- [18] BECHLILOULIS C P, ROVITHAKIS G A. Prescribed performance adaptive control for multi-input multi-output affine in the control nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55 (5): 1220-1226.
- [19] YANG M, LI G, WANG S, et al. Prescribed performance control scheme for fixed trim reentry vehicle with actuator input and power constraints [J]. Aerospace and Technology, 2020, 104: 105972.
- [20] GUO G, LI D. Adaptive sliding mode control of vehicular platoons with prescribed tracking performance [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68 (8): 7511-7520.
- [21] 胡剑波, 王应洋, 刘炳琪, 等. 非仿射纯反馈系统自适应神经网络快速预设性能控制 [J]. 控制理论与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (3): 550-553.
- [11] 杨 鹏, 吕克洪, 张 勇, 等. 智能 BIT 技术发展分析 [C] // 中国航空测控技术年会大会, 北京, 2020, 11 (1-5).
- [12] 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.
- [13] WANG Z Y, MA W D, XIONG G Z. A Complex Electronics System Built-in-Test based on Time-Triggered CAN Bus [C] //8th International Conference in Electronic Measurement and Instruments, 2007: 947-950.
- [14] 何 丽, 陈 波. 嵌入式测试在航空电子设备中的设计与实现 [J]. 航空科学技术, 2020, 31 (9): 59-64.
- [15] 杨 鹏, 吕克洪, 张 勇等. 智能 BIT 技术发展分析 [C] // 中国航空测控技术年会大会, 北京, 2020, 11 (1-5).
- [16] 邱 静, 刘冠军, 杨 鹏, 等. 装备测试性建模与设计技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 273-293.
- [17] 田心宇, 姚 英. 一种新型 BIT 技术在机载计算机设计中的应用研究 [J]. 微电子学与计算机, 2019, 36 (4): 29-32.
- [18] LIU AI-LI. Fault diagnosis of certain missile based on dynamic test [C] //The third International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2007: 351-357.
- [19] 胡昌华, 马清亮, 郑建飞. 导弹测试与发射控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [20] 胡昌华, 马清亮, 郑建飞. 导弹测试与发射控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [21] 胡昌华, 马清亮, 郑建飞. 导弹测试与发射控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [22] SONG C, LIU L, FENG G, et al. Coverage control for heterogeneous mobile sensor networks with bounded position measurement errors [J]. Automatica, 2020, 120: 109118.
- [23] MAHBOUBI H, VAEZI M, LABEAU F. Distributed deployment algorithms in a network of nonidentical mobile sensors subject to location estimation error [C] // SENSORS, 2014 IEEE, 2014: 1795-1798.
- [24] 刘金琨. 智能控制 (第 4 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [25] GUO X G, WANG J L, LIAO F, et al. CNN-based distributed adaptive control for vehicle-following platoon with input saturation [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19 (10): 3121-3132.