

# 基于故障树的机载航电系统智能自动测试方法研究

陈 健 宁亚锋 吴 边

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723000

**摘 要：**机载航电系统功能模块高度集成，故障传导路径隐蔽，传统固定流程测试难以覆盖动态工况下的隐性缺陷。本文围绕故障树逻辑与智能自动测试的深度融合展开研究，从航电系统故障树模型搭建入手，依托最小割集驱动测试任务智能拆解与分层规划，重构具备自主适配能力的自动化测试流程。同时引入故障智能识别与多层级筛查机制，弱化人工干预对测试精度的干扰。结合标准化管控与适配性优化策略，构建覆盖测试全链路的智能化方法体系，为航电系统测试作业向精细化、自动化方向推进提供技术支撑。

**关键词：**机载航电系统；故障树；智能自动测试；测试策略生成；故障定位

**引言：**机载航电系统运行环境动态多变，模块间故障传导隐蔽且关联复杂，传统静态化、固定流程的测试手段在多模块交联场景下暴露出覆盖率不足、灵活性偏弱等问题。故障树作为梳理系统故障逻辑关系的有效工具，能够逐层拆解故障诱因与传导路径，为测试工作提供清晰的逻辑指引。围绕故障树搭建智能自动测试方法，将故障逻辑与测试流程深度耦合，对于提升航电系统故障排查精度与测试作业效率具有较强的工程参考价值。

## 1 机载航电系统测试基础体系分析

### 1.1 机载航电系统结构组成与运行特征

机载航电系统为飞行器搭载的综合性电子信息作业平台，整合多类功能单元支撑整机飞行控制与任务执行。系统组成包含数据传输单元、任务处理单元、感知采集单元与机载控制单元，各功能单元相互联动完成飞行数据采集、信息运算与指令传输工作<sup>[1]</sup>。整体装配形式呈现高度集成化特征，机载电子设备排布紧凑，模块之间的信号交互链路繁琐复杂。设备长期处于高速飞行带来的动态工况环境中，外部飞行姿态与空域环境变化都会对电子部件工作状态产生影响。系统运行全程维持高频信号交互状态，各类数据输送与指令交互保持连续不间断的运转形式。各功能模块运行状态相互关联，单一单元出现运行波动会逐层传递至整体系统，影响航电作业的整体稳定性。

### 1.2 机载航电系统常规测试体系架构

机载航电系统常规测试体系采用分层化搭建形式，整体结构由硬件测试载体、数据传输链路、测试控制程序、数据处理单元共同构成。硬件测试载体直接对接机

载各类电子设备，完成原始信号采集与设备运行状态捕捉。数据传输链路搭建测试设备与航电系统之间的信息互通通道，保障测试数据传输的稳定与连贯。测试控制程序统筹整体测试流程，管控测试步骤的推进节奏与作业执行标准。数据处理单元负责分类整理采集得到的原始数据，为测试工作开展提供数据支撑。整体架构依托固定测试流程搭建，层级划分相对固化，功能拓展空间有限，难以适配多样化的航电测试作业需求。

### 1.3 传统航电系统测试运行模式

传统航电系统测试作业依托固定流程体系开展，所有测试步骤按照预设程序依次推进执行。测试作业聚焦单一设备或独立功能单元的状态检测，整体检测模式偏向静态稳态检测。测试流程开展需要搭配大量人工操作，人工干预环节贯穿测试准备、设备对接与状态核对多个阶段。数据采集与状态判定严格依照固有程序标准执行，测试运行逻辑保持固定不变的模式。测试作业仅针对预设项目开展状态排查，无法结合航电系统实时运行状态调整测试范围与检测内容，作业灵活程度偏低。

### 1.4 现有航电测试体系存在的缺陷

现有航电测试体系运行逻辑固化性较强，测试项目排布模式缺乏灵活调整空间，难以适配航电系统复杂多变的动态运行工况。静态检测模式只能识别显性设备异常，无法捕捉系统动态运行过程中产生的隐性运行偏差，测试覆盖维度存在明显局限。测试架构整体拓展性能偏弱，无法匹配航电设备迭代升级后的结构形式与功能逻辑。大量人工参与环节会引入人为操作偏差，降低测试作业的精细度与准确性。固化的单一测试逻辑无法应对多模块交联引发的复杂故障，对关联性运行问题的

识别能力存在明显短板。

## 2 故障树与智能自动测试适配体系构建

### 2.1 故障树基础理论与结构逻辑

故障树是用于梳理系统故障关联关系的逻辑分析工具,依托层级化逻辑结构拆解系统故障的产生来源与传导关系。结构设置划分顶层故障事件、中间故障事件与底层故障诱因,通过层级拆分梳理设备故障的内在关联关系。逻辑运算方式可以梳理不同故障诱因的组合形式,区分单一诱因与多诱因耦合引发的系统异常。结构逻辑遵循从整体到局部的拆解思路,逐层细化系统故障的对应触发源头。工具核心应用价值体现在故障逻辑梳理与故障层级拆分,能够梳理复杂电子系统内部繁琐的故障传导关系,为针对性检测工作提供逻辑支撑。

### 2.2 故障树与航电测试的适配逻辑

航电系统模块交联复杂、故障传导隐蔽的运行特点,需要针对性的逻辑工具支撑测试工作开展。故障树的层级拆解模式可以匹配航电系统分层架构特征,对应拆解各功能模块的故障诱因与传导路径。测试工作可以依托故障树梳理的故障逻辑,改变传统无序化、固定化的检测模式。故障树梳理得到的故障关联关系能够指引测试项目排布,让测试流程贴合航电系统真实故障发生规律。逻辑适配可以弱化传统测试的盲目性,提升测试工作对隐性故障与关联故障的排查能力,贴合航电系统动态运行检测的实际需求。

### 2.3 智能自动测试整体设计思路

智能自动测试设计围绕航电系统复杂故障检测需求展开,结合故障树逻辑体系搭建自动化测试运行框架。设计工作突破传统固定流程的测试局限,依托故障逻辑关系搭建可动态适配的测试流程<sup>[2]</sup>。整体设计侧重实现测试流程的自主调控与故障靶向检测,弱化人工操作干预占比。设计过程兼顾航电系统各类模块的运行差异,适配不同功能单元的故障检测需求。依托逻辑模型搭建数据联动测试机制,让测试动作与系统故障逻辑形成深度匹配,构建具备自主适配能力的智能化测试模式。

### 2.4 航电系统智能测试设计准则

航电系统智能测试设计遵循逻辑匹配准则,所有测试流程设计贴合航电系统结构布局与故障传导规律。设计工作遵循适配性准则,测试功能可以覆盖航电系统各类常规故障与耦合性故障。智能化设计坚持稳定运行准则,保障自动化测试流程连续推进,不会对航电设备正常运行造成干扰。设计过程兼顾通用性与专项性,既适配整体系统的批量测试作业,也可以完成单一模块的精

细化故障检测。准则约束可以规范智能测试体系的搭建方向,保障测试架构的合理性与实用性。

## 3 基于故障树的智能自动测试方法设计

### 3.1 航电系统故障树模型搭建方式

航电系统故障树模型搭建依托航电设备功能架构与故障传导规律开展,以系统功能失效状态为核心搭建层级逻辑结构。全面梳理航电系统各功能模块的失效形式,筛选各类故障事件对应的关联诱因,完成故障信息的系统性整合。按照层级递减的排布逻辑划分故障事件层级,明确顶层失效状态、中层传播节点与底层故障诱因的对应关系。依托标准逻辑运算关系搭建故障事件之间的关联链路,梳理单因素故障与多因素耦合故障的形成逻辑。结合航电系统交联运行的结构特点补齐隐性故障传导链路,完善模型内部的逻辑架构,让模型贴合航电系统真实运行故障的产生规律。

### 3.2 测试任务智能拆解与分层规划

测试任务智能拆解依托故障树层级逻辑开展,对整体航电系统测试任务进行精细化拆分处理。针对故障树梳理的各类故障节点,匹配对应的检测内容与作业范围,拆分出适配不同模块的细分测试任务。结合航电系统功能层级完成测试任务的分层排布,划分系统级测试、模块级测试与单元级测试的作业内容。依据故障传导的优先级排布测试顺序,优先排布高关联、高影响的故障检测任务。分层规划模式可以打破传统整体测试的粗放作业形式,实现测试任务的精准分配与有序排布,提升测试作业的精细程度。

### 3.3 自动化测试流程智能化设计

自动化测试流程智能化设计依托故障树逻辑框架重构传统固化测试流程,构建具备自主适配能力的测试作业链路。结合拆解完成的细分测试任务,搭建模块化自动化测试流程,实现不同测试任务的自主切换与衔接。融入智能调控逻辑,让测试流程可以根据前期检测状态调整后续测试内容与运行节奏。优化测试流程内部的数据交互逻辑,打通测试设备与航电系统的数据传输通道,实现测试数据的实时采集与动态更新。全新流程设计弱化固定程序的束缚,适配航电系统不同工况下的测试作业需求。

### 3.4 航电故障智能识别与筛查机制

航电故障智能识别与筛查机制依托故障树逻辑阈值搭建,建立适配航电设备运行参数的故障判别标准。针对显性故障与隐性故障的不同特征,设置差异化数据筛查维度,捕捉设备运行过程中的参数异常波动。依托自

动化采集的运行数据完成故障特征匹配,区分常规运行波动与实质性故障状态。搭建多层级筛查模式,完成初步数据筛查、故障特征匹配、关联故障核验的递进式作业。该机制可以自主完成航电系统故障排查工作,减少人工判别干预,提升故障筛查的精准程度与作业效率。

#### 4 智能自动测试方法应用管控与优化

##### 4.1 智能测试流程标准化管控方式

智能自动测试依托自动化程序完成航电设备检测作业,流程运行的统一性直接决定多批次测试作业的稳定程度<sup>[3]</sup>。标准化管控围绕智能测试全作业链路建立统一规范体系,覆盖设备对接调试、信号传输校验、自动化程序运行、多任务切换衔接以及测试收尾归档的全部环节。作业开展统一航电设备端口对接标准,规范信号接入形式与线路布置方式,减少接触不稳定带来的信号波动问题。数据采集阶段统一采样规范与读取标准,让不同测试时段获取的参数信息保持一致状态。程序运行阶段明确各类操作的执行标准,规范测试任务启停与工况切换的运行逻辑。统一航电系统不同功能模块的测试执行细则,消除人为操作差异带来的作业偏差。整套管控模式可以稳定智能测试的运行状态,提升航电系统自动化检测作业的整体规范性与作业精度。

##### 4.2 测试数据规范化处理模式

航电智能测试开展过程会持续生成大量设备运行参数与工况数据,现场测试环境存在的各类干扰因素会让原始数据掺杂无效信息,无法直接用于故障分析与状态研判。规范化数据处理模式建立完善的数据净化与整理流程,依次完成原始数据筛选、干扰信息剔除、有效数据分类归档的完整工序。结合航电系统动态运行的工况特点区分正常参数浮动与异常参数变化,保留具备分析价值的有效数据内容。按照模块属性、测试类别、参数维度建立结构化归档标准,让各类测试数据实现有序分类存储。规范数据传输与后台存储的运行链路,规避数据丢失、错乱、覆盖等问题的出现。稳定规范的数据处理流程可以持续提升测试数据洁净度,为智能测试逻辑迭代与设备状态研判提供可靠的数据基础。

##### 4.3 智能测试方法适配性优化策略

航电系统硬件结构与功能模式会随飞行器技术升级持续更新,空域复杂工况也会不断改变设备实际运行环境,固定化的测试逻辑难以长期适配多样化检测场景。适配性优化针对智能测试核心逻辑开展多角度升级调

整,贴合航电设备迭代规律优化检测体系。依据不同功能模块的运行特征与失效特点,调整智能测试的数据采集维度与参数判别阈值,适配各模块专属的运行属性。针对交联耦合引发的复杂故障与隐蔽性故障,优化测试任务排布逻辑,增设多层级交叉检测环节,提升复杂故障的识别能力。持续更新故障特征储备内容,收录设备升级后出现的新型故障表现,补齐原有测试体系存在的识别盲区。动态优化自动化测试调控逻辑,拓展测试场景适配范围,贴合航电系统长期技术迭代的发展趋势。

##### 4.4 航电测试体系长效优化路径

航电智能测试体系的完善属于持续性迭代过程,单次优化调整无法适配航电设备长期更新的技术需求,需要搭建长效迭代路径维持体系先进性。依托日常测试积累的海量运行数据,持续梳理想能测试流程存在的识别短板与场景适配不足,明确阶段性优化方向。结合航电系统架构升级节奏,逐步拓展智能测试的功能覆盖范围,增设适配全新硬件结构与功能逻辑的测试模块。持续打磨故障树逻辑架构,优化故障层级拆分与逻辑运算方式,提升故障溯源定位的精准程度。逐步细化各测试环节的管控细则,完善流程管控与数据处理的标准化体系。持续迭代故障识别与筛查逻辑,让智能测试体系保持动态升级状态,适配飞行器航电系统长期运维检测的专业需求。

#### 结束语

机载航电系统智能自动测试的推进,依赖故障树逻辑与自动化技术的深度协同。从故障树模型搭建到测试任务智能拆解,从自动化流程重构到故障智能识别,各环节相互配合构成完整的智能化测试链路。标准化管控与适配性优化的持续跟进,保障了测试体系在长期运行中保持稳定与先进。长效迭代路径的搭建,则为测试方法的持续演进提供了制度支撑。故障树驱动的智能自动测试方法,能够切实贴合航电系统复杂工况下的精细化检测需求。

#### 参考文献

- [1] 郭晓光,钱宏文,李星辉,等.航空机载智能接触器自动测试平台设计[J].工业仪表与自动化装置,2023(5):12-15,20.
- [2] 张涵中,王强,陈子钰.机载航空电子系统测试平台的设计与实现[J].中国信息界,2025(4):234-236.
- [3] 刘勇.机载设备自动化测试中应用系统的研究[J].中国设备工程,2022(21):150-152.