

航空电子系统故障管理研究

孙楠 徐一帆 杨晨
西安爱生技术集团有限公司 陕西 西安 710065

摘要：航空电子系统是保障飞机安全稳定运行的核心，其故障易引发严重安全隐患，完善故障管理体系至关重要。本文围绕航空电子系统故障管理展开研究，阐述系统构成与故障分类，深入分析故障诊断、隔离定位、容错恢复核心技术，构建全生命周期故障管理体系与机制。通过优化技术方案、完善管理架构，提升故障处置效率与系统可靠性，为航空电子系统故障管理提供技术支撑与实践参考，助力航空运营安全水平提升。

关键词：航空电子系统故障；诊断技术；隔离定位技术；容错恢复；故障管理

引言：随着航空工业向智能化、精细化发展，航空电子系统复杂度不断提升，导航、通信等核心子系统的故障易影响飞行安全，故障管理成为保障航空运营的关键环节。当前航空电子系统故障存在诊断精度不足、恢复效率偏低、管理体系不完善等问题，严重制约系统可靠性。基于此，本文聚焦航空电子系统故障管理，系统研究相关技术与管理机制，为解决实际故障管理难题、提升系统运行安全性提供可行路径。

1 航空电子系统相关基础理论

1.1 航空电子系统的构成与功能

航空电子系统由多个核心子系统协同组成，支撑飞机飞行、导航、通信及任务执行全流程。其核心构成包括导航子系统、通信子系统、显示控制子系统、任务计算机子系统及接口子系统，各子系统通过标准化总线连接，实现数据互通与功能联动。系统核心功能涵盖飞行状态监测、精准导航定位、空地/空空通信、任务数据处理及故障预警，是保障飞机安全、高效、稳定运行的关键，直接影响飞行安全与任务完成质量，广泛应用于民用航空、军用航空等各类机型。

1.2 航空电子系统故障定义与分类

航空电子系统故障是指系统或其组成部分偏离正常工作状态，导致功能下降、失效或异常的现象，其发生会直接影响系统性能，严重时可能引发飞行安全事故。

根据故障产生的根源，可分为三类：硬件故障，如传感器损坏、电路板短路、连接器接触不良等，多由设备老化、环境干扰导致；软件故障，如程序漏洞、算法错误、数据传输异常等，与开发缺陷、系统兼容性相关；接口故障，指各子系统间数据交互接口异常，导致信号丢失、延迟或误传，影响系统协同工作。

1.3 故障管理的定义与核心流程

航空电子系统故障管理是指通过一系列技术与管理手段，对系统故障进行全面监测、诊断、隔离、处理及恢复的全过程，核心目标是最大限度降低故障影响，保障系统持续稳定运行，提升飞行安全性。其核心流程主要包括三个环节：故障监测，通过传感器、监测模块实时采集系统运行数据，识别异常信号；故障诊断与隔离，分析异常数据，确定故障类型、位置及严重程度，将故障范围缩小至具体模块；故障处理与恢复，采取容错、修复或替换措施，使系统恢复正常工作状态，同时记录故障信息，为后续故障预防提供依据^[1]。

2 航空电子系统故障诊断、隔离与定位技术研究

2.1 航空电子系统故障诊断技术研究

为清晰梳理航空电子系统故障诊断的核心技术体系，明确各类诊断技术的原理、实现方式及应用特性，现将基于模型、数据驱动及混合诊断三种核心技术的关键要点整理如下表所示。

表1 航空电子系统故障诊断核心技术要点表

诊断技术类型	核心原理	关键技术与实现方式	适用场景与性能指标
基于模型的诊断技术	以航空电子系统精准数学模型为核心，通过对比系统实际运行参数与模型理论参数的偏差量，完成故障识别与初步判定，核心是利用模型残差分析捕捉故障特征。	1. 搭建导航、通信等核心子系统的非线性状态方程，确保模型与实际系统的一致性； 2. 采用卡尔曼滤波算法修正运行参数偏差，提升数据准确性； 3. 通过模型残差（residuals）分析，定位故障异常源，完成初步故障归类。	适用场景：航空电子系统硬件故障初步诊断，涵盖传感器、电路板等核心硬件异常筛查；性能指标：可覆盖80%以上典型故障场景，残差识别精度 ≤ 5%，具备高效初步诊断能力。

续表：

诊断技术类型	核心原理	关键技术与实现方式	适用场景与性能指标
基于数据驱动的 诊断技术	依托航空电子系统实时采集的多维度运行数据，通过机器学习算法构建故障诊断模型，无需依赖系统精确数学模型，通过数据特征匹配实现隐性故障精准识别。	1. 采集飞行过程中电压、电流、信号频率、数据传输延迟等多维度运行数据，构建故障数据集； 2. 采用BP神经网络、支持向量机（SVM）等算法完成数据训练与异常特征提取； 3.搭建实时数据监测模块，实现故障特征实时匹配与识别。	适用场景：复杂子系统隐性故障诊断，可有效识别软件漏洞、接口数据传输异常、参数漂移等隐性问题；性能指标：诊断响应时间 ≤ 100ms，故障识别准确率 ≥ 92%，适配复杂航空电子系统运行场景。
混合诊断技术	融合基于模型与数据驱动诊断技术的优势，采用“模型粗定位+数据精验证”的组合策略，弥补单一诊断技术的局限性，提升复杂故障诊断精度与可靠性。	1. 预设故障偏差阈值，建立阈值触发机制； 2. 通过基于模型的诊断技术锁定故障大致范围，降低数据处理量； 3.触发数据驱动诊断模块，细化故障特征，完成精准诊断；4.构建协同联动机制，实现两种技术的无缝衔接与互补。	适用场景：航空电子系统复杂故障场景，包括多模块联动故障、软硬件协同故障等；性能指标：诊断准确率 ≥ 95%，故障定位偏差 ≤ 1个部件级，满足航空电子系统高可靠性、高精度的诊断要求。

2.2 航空电子系统故障隔离与定位技术

故障隔离与定位是故障管理的关键环节，核心是将诊断出的故障范围缩小至具体模块或部件，为故障处理提供精准依据，核心技术要点如下：（1）故障隔离技术。采用分层隔离策略，按照“系统—子系统—模块—部件”的层级，逐步缩小故障范围。硬件层面，通过总线隔离技术，切断故障子系统与其他子系统的信号连接，避免故障传播；软件层面，采用模块化隔离机制，停止故障模块的运行，启动冗余模块替代，同时记录故障模块的运行日志。实际操作中，需依托系统冗余设计，确保隔离过程不影响系统核心功能的正常运行。（2）故障定位技术。分为硬件定位与软件定位两类，硬件定位采用在线测试技术，通过内置测试（BIT）模块，对传感器、电路板等部

件进行实时检测，输出故障代码，精准定位故障部件；软件定位通过日志分析、断点调试等方式，排查程序运行异常的具体位置，针对接口故障，采用信号链路测试技术，定位数据传输异常的接口节点。（3）定位精度优化技术。针对复杂故障定位偏差较大的问题，采用多源信息融合技术，整合多个传感器的检测数据，通过加权平均算法修正定位偏差，将定位精度提升至部件级。建立故障定位数据库，存储典型故障的定位特征与位置信息，通过对比匹配，缩短定位时间，确保故障定位响应时间不超过500ms，满足航空电子系统故障快速处理的实际需求。如下图（图1）呈现了航空电子系统故障隔离与定位的核心技术体系，直观展示分层隔离策略、软硬件定位方法及精度优化措施，助力快速理解故障管理关键环节^[2]。



图1 航空电子故障隔离—定位核心技术图解

3 航空电子系统故障容错与恢复机制研究

3.1 故障容错技术原理与架构设计

航空电子故障容错技术以冗余备份、协同联动为核心，依托故障冗余与失效转移机制，通过冗余替换故障部件、遏制故障扩散，结合冗余部署、实时监测、快速切换协同运行，保障核心功能连续稳定。采用软硬件与信息一体化冗余架构：硬件冷热备份搭配、关键部件热备；软件双版本运行+节点校验；信息依靠校验码、重复传输保证数据可靠，各模块经总线联动，实现故障快速响应、无缝切换。

3.2 故障隔离与系统重构策略

结合故障定位结果，核心是快速隔离与平稳重构。快速隔离采用分层模式，先隔离故障子系统再锁定故障模块，通过总线切断、模块断电等方式防止故障传播，隔离响应时间控制在300ms内。系统重构采用动态算法，结合运行状态与故障等级，自动调整模块联动逻辑，用冗余模块替换故障模块，重构时优先保障导航、通信等核心功能。重构完成后，通过实时参数监测、功能测试验证系统稳定性，避免二次故障。

3.3 故障恢复技术与流程优化

构建系统化故障恢复体系，分为硬件与软件恢复：硬件采用部件替换、模块复位，软件采用程序重启、漏洞修复、数据恢复，结合冗余备份实现快速恢复。流程优化后明确“故障确认—恢复启动—恢复执行—验证验收”四步，取消冗余校验，恢复时间缩短至1s内；针对不同故障预设方案，提升响应效率。恢复过程设状态监测节点，实时反馈进度，若出现异常自动切换备用方案，保障恢复平稳，降低对系统运行的影响。

4 航空电子系统故障管理体系与机制构建

4.1 故障管理组织架构与职责划分

结合航空电子系统研发、运维、运营全生命周期管理需求，构建分层分级、权责清晰的故障管理组织架构，明确各主体职责与协同机制，核心要点如下：（1）组织架构设计。采用“决策层-执行层-支撑层”三级架构，决策层由航空运营单位技术负责人、系统研发主管组成，统筹故障管理整体规划；执行层涵盖研发团队、运维团队、运营监控团队，负责故障全流程处置；支撑层包括质量检测部门、备件管理部门，提供技术与资源支撑。（2）职责划分。研发团队负责故障根源分析、系统设计优化及容错机制完善；运维团队负责故障实时处置、设备巡检及系统维护；运营监控团队负责故障预警、信息上报及流程衔接；质量检测部门负责故障复盘审核、管理流程监督；备件管理部门负责故障维修备件储备与调配。（3）协同机制。建立跨部门定期沟通机制，每月召开故障管理协调

会，同步故障处置情况；明确各部门对接人员，确保故障信息快速传递，避免职责交叉或遗漏。

4.2 故障管理流程标准化设计

梳理航空电子系统故障全流程，制定标准化管理流程，明确各环节操作规范、时限要求与责任主体，确保故障处置有序高效，要点如下：（1）故障预警环节。依托系统监测模块，设定分级预警阈值，预警信息按严重程度分为一般、较重、紧急三级，分别由对应层级人员接收处置，预警响应时限不超过10分钟。（2）故障报告环节。明确报告主体、内容与时限，故障发生后，发现人员需在5分钟内提交书面报告，注明故障现象、发生时间、影响范围，确保信息真实完整。（3）故障处置环节。根据故障等级制定处置方案，一般故障由运维团队现场处置，较重及紧急故障由决策层统筹，联合研发、运维团队协同处置，处置时限按故障等级明确。（4）故障复盘环节。故障处置完成后，3个工作日内由质量检测部门牵头，组织相关部门开展复盘，分析故障原因、处置不足，形成复盘报告，同步优化管理流程。

4.3 故障管理绩效评价体系建设

围绕故障管理核心目标，构建科学可量化的绩效评价体系，明确评价方法与优化策略，要点如下：（1）核心评价指标。选取四项核心指标，均明确量化标准：故障诊断准确率 $\geq 95\%$ 、故障预测精度 $\geq 90\%$ 、故障恢复时间 ≤ 1 秒、年度故障发生率同比下降10%以上。（2）评价方法。采用定量与定性结合的方式，定量指标通过系统运行数据统计得出，定性指标结合各部门履职情况、流程执行规范性综合评分，每月开展一次常规评价，每季度开展一次全面评价。（3）优化策略。建立评价结果反馈机制，针对评价中发现的短板，如处置效率偏低、预警精度不足等，制定专项优化方案；将评价结果与岗位绩效考核挂钩，推动故障管理水平持续提升。

结束语：本文围绕航空电子系统故障管理展开全面研究，完成了基础理论梳理、核心技术分析、容错恢复机制设计及管理体系构建，有效解决了故障诊断、隔离定位、管理标准化等关键问题。研究成果贴合航空运营实际，可直接应用于航空电子系统故障管理实践。后续可结合新型航空电子技术发展，进一步优化诊断算法与管理机制，持续提升故障管理的智能化水平，为航空电子系统安全稳定运行提供更有力的保障。

参考文献

- [1]陈伟红.综合航空电子系统故障管理研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022(2):88-91.
- [2]段海军,张峰.航空电子系统平台故障诊断技术的研究[J].航空计算技术,2022,52(3):100-104.