

机载多模式导航系统容错技术及可靠性研究

刘文琴 李宗和 冯嘉昕
陕西飞机工业有限责任公司
DOI:10.32629/etd.v7i1.22247

[摘要] 机载多模式导航系统以硬件与软件的双重冗余架构作为容错基础,其就是通过多源信息融合和动态权重分配,把故障条件下的导航精度给稳住,再配合系统重构与误差自适应补偿来增强恢复能力。可靠性评估方面,构建了涵盖多维度指标的评估体系,既用逻辑建模也靠故障数据分析,同时着重考察容错性能与可靠性之间的内在关联,以及复杂工况下可靠性的衰减规律。基于这些分析,再通过容错算法的轻量化处理、模式切换的优化设计、抗干扰协同策略以及长期稳定性维护等手段,最终实现系统可靠性的整体提升。

[关键词] 机载多模式导航系统; 可靠性评估体系; 可靠性优化; 性能提升方法

中图分类号: V249.3 文献标识码: A

Research on Fault-Tolerant Technologies and Reliability of Airborne Multi-Mode Navigation Systems

Wenqin Liu Zonghe Li Jiaxin Feng
Shaanxi Aircraft Industry Co., Ltd.

[Abstract] Airborne multi-mode navigation systems use a dual-redundancy architecture incorporating both hardware and software as the foundation for fault tolerance. Through multi-source information fusion and dynamic weight allocation, the systems maintain navigation accuracy under fault conditions, while system reconfiguration and adaptive error compensation enhance recovery capabilities. In terms of reliability assessment, a multidimensional evaluation system is established by combining logical modeling with fault data analysis, with particular emphasis on the intrinsic relationship between fault tolerance and reliability and the degradation patterns of reliability under complex operating conditions. Based on these analyses, overall system reliability is improved through lightweight fault-tolerant algorithms, optimized mode-switching design, coordinated anti-interference strategies, and long-term stability maintenance.

[Key words] airborne multi-mode navigation systems; reliability assessment system; reliability optimization; performance improvement methods

引言

机载多模式导航系统在复杂使用环境下面临着硬件失效、信号异常与环境干扰等多重威胁,其容错设计与可靠性评估成为确保任务安全性的关键支撑。围绕系统容错能力提升这一主线,从硬件与软件冗余配置、多源信息融合、系统重构及误差补偿等方面构建核心容错技术体系。在此基础上,建立涵盖指标设计、建模方法、故障数据分析与工况影响的可靠性评估框架。进一步从算法轻量化、模式切换、抗干扰协同及长期稳定性维护等角度提出性能优化方法,形成较为完整的系统可靠性保障方案。

1 机载多模式导航系统核心容错技术研究

1.1 硬件冗余容错技术原理与实现方式

硬件冗余容错技术,是靠并行部署多个物理通道来预防单点失效。实现上通常采用同构型冗余配置,也就是在同一导航系统内装多套功能完全一致的硬件模块,这些模块同时接收相同外部信号并独立解算。系统通过表决机制对多路输出做一致性判别,一旦某通道输出偏离预设阈值,就认定该通道故障并立即隔离。如此一来,剩余正常通道继续承担导航解算任务,保障系统输出的连续性与稳定性。硬件冗余要真正有效,关键在于通道间的独立性设计,涉及供电隔离、信号传输路径分离,以及散热结构独立等工程措施。

1.2 软件冗余容错技术设计与应用

软件冗余容错技术,实质上是借助算法层面的多重逻辑来强化系统对异常数据的抗干扰能力。设计思路,通常开发多套

独立编写的导航解算程序, 这些程序在同一硬件平台上并行跑着, 各自采用略有差别的计算流程或数据校验策略。系统会对多版本软件的输出结果做交叉比对, 一旦发现显著偏离, 就按照事先设定的置信度指标, 挑出可信版本的结果作为输出依据^[1]。软件冗余的另一体现, 在于异常检测模块的部署——该模块实时盯着导航数据的合理性, 比如信号跳变率、数值边界范围, 还有时间序列上的连续性特征。一旦逮到异常数据, 系统便自动切换到备用计算逻辑, 或者回溯历史有效状态做推测修正。

1.3 多模式导航信息容错融合算法

多模式导航信息容错融合算法致力于解决不同导航源在故障条件下的信息一致性问题。该算法首先对各导航子系统的输出数据进行质量评估, 评估指标包括信号稳定性、噪声水平和历史精度表现等。基于评估结果, 算法动态调整各子系统在融合计算中的权重分配, 对于质量下降的系统给予较低的融合权重, 对于质量正常的系统保持较高权重。在融合过程中, 算法引入一致性检验机制, 用以剔除与其他子系统偏差过大的异常测量值, 避免单一故障源污染整体导航解算结果。融合算法还考虑不同导航模式之间的互补特性, 当某一种导航方式因信号衰减而精度降低时, 算法自动增大其他导航方式的贡献比例。

1.4 故障状态下系统重构容错机制

故障状态下系统重构容错机制, 就是当系统检测到不可恢复的硬件或软件故障时, 得赶紧调整系统架构, 把基本导航功能保住。该机制主要由故障诊断和重构决策两大模块组成, 诊断模块负责判定故障类型和严重程度, 决策模块则根据预设的系统资源分布来制定重构方案。重构操作涉及任务迁移和功能降级两个方向: 任务迁移就是把故障模块的计算任务甩给其他冗余模块, 功能降级则是关掉部分非核心辅助功能, 省出计算资源来确保基本的定位和授时能力。重构全程要维持关键导航参数的连续输出, 不能因为重构搞出数据中断或跳变。重构机制还会记下故障前后的系统状态信息, 方便之后做维护诊断和系统恢复。

1.5 导航误差自适应补偿容错技术

导航误差自适应补偿容错技术, 就是针对系统运行过程中因环境变化或器件老化而出现的累积性误差, 进行动态修正。该技术先构建一个误差预测模型, 用来估计当前时刻可能存在的系统偏差, 而模型参数则依据最新导航输出与参考基准之间的差异来做在线调整。一旦系统检测到误差增长率超出正常范围, 自适应补偿模块便会主动调整补偿系数, 并将修正量叠加到原始导航输出上, 以此压制误差的发散趋势^[2]。在补偿过程中, 系统会持续监视修正后的导航精度, 如果修正效果不够理想, 就继续调整补偿策略, 直到精度恢复到允许的区间之内。这种自适应做法的优势在于, 即便缺乏外部基准校正, 系统也能依靠自身对误差演变规律的跟踪, 来延长高精度导航服务的可用时段, 从而切实提升整体的容错水平。

2 机载多模式导航系统可靠性评估体系构建

2.1 可靠性评估核心指标体系设计

可靠性评估的首要任务是定出一套能够全面反映系统运行质量的关键度量标准。这套指标体系得覆盖系统从启动到关机全过程中的多个维度, 像任务完成成功率、无故障持续运行时间、故障检测的灵敏度, 以及故障发生后恢复到正常工作状态所需的时间长度, 都要纳入进来。设计时还要把瞬时性故障和永久性故障分开处理, 毕竟两者对系统的影响方式和严重程度存在明显差别。指标体系需要同时兼顾整体系统和内部子模块两个层面, 这样既能在不同系统之间做横向比较, 也能在单个系统内部纵向查找薄弱环节。每一项指标都应配套明确的采集手段和计算规则, 避免不同评估人员得出不一致、不可比的结论。

2.2 系统可靠性建模基本方法

可靠性建模是将系统物理架构和功能逻辑转化为可进行数学分析的形式化表达。基本建模思路是从系统顶层功能出发, 逐层分解为各个子任务模块, 再依据模块之间的依赖关系构建出串联或并联逻辑结构图。这种结构模型能够清晰展示单一模块失效如何经由路径传播最终影响系统输出。另一种建模方式是基于状态转移的观点, 将系统视为在不同健康等级之间跳转的实体, 每次跳转的概率由各部件的失效率和修复率共同决定。建模过程中必须明确定义系统成功完成任务的边界条件, 并将那些对整体结果影响不大的次要因素合理简化, 以此突出主要失效模式的贡献^[3]。

2.3 基于故障数据的可靠性分析模型

在获取足够数量的实际故障发生记录之后, 就需要运用专门的分析模型来处理这些数据并提炼有用信息。这类模型以故障发生的时间戳和故障类型编码作为基础输入, 通过统计推断手段估计系统的失效率曲线和平均寿命等关键参数。分析模型能够自动识别数据中的早期失效期、偶然失效期和耗损失效期, 从而判断系统当前处在寿命周期中的哪一个阶段。模型还具备趋势预警功能, 一旦故障间隔时间呈现持续缩短的迹象, 系统就会发出可靠性下滑的警报。随着新故障数据的不断加入, 模型参数通过在线学习方式持续更新, 使得分析结论始终反映系统的最新健康状态。

2.4 系统容错性能与可靠性关联分析

容错性能的强弱不能简单等同于可靠性的高低, 这两者之间其实存在相互制约的复杂关系。容错机制靠故障掩盖和快速恢复来延长系统有效工作时间, 但引入容错模块本身也会增加硬件数量和软件逻辑复杂度, 其就是会带来新的潜在失效来源。关联分析重点看容错覆盖率和故障恢复速度这两个核心指标, 研究它们对整体任务成功概率的具体影响。结果通常表明, 容错覆盖率处在中等水平时, 可靠性提升最明显; 再往上堆冗余资源, 效益就会逐步递减。弄明白这种权衡关系, 有助于确定容错设计的合理边界, 防止过度冗余造成资源浪费和新增风险。

2.5 复杂工况下系统可靠性衰减规律

在温度剧烈变化、持续机械振动、供电波动或强电磁场等恶劣条件下, 系统可靠性下降的速度和形态与常温静置工况差别非常明显。衰减规律通常会呈现前期缓慢退化、中期加速

恶化、后期急剧崩溃三个阶段,每个阶段的主导失效机理并不完全相同。复杂工况对系统各组成部分的影响并不完全均匀,有些工况组合会同时对多个关键器件施加应力,形成叠加放大效应^[4]。把衰减规律做系统性研究,就可以摸清系统在不同工况强度下的可用期限,并找出对可靠性影响最突出的工况参数组合,为后续限制使用条件和制定维护周期提供量化依据。

3 机载多模式导航系统可靠性优化与性能提升方法

3.1 容错算法轻量化与高效化优化

机载环境对计算资源和存储容量的限制较为严格,容错算法必须在不削弱防护能力的前提下削减自身开销。轻量化处理着重简化故障检测逻辑中的重复性校验环节,同时缩减用于记录历史状态的数据缓冲区尺寸。高效化改进则着眼于调整算法内部的计算顺序,将那些可提前执行的预处理步骤与实时决策步骤分离开来,避免在关键时间窗口内堆叠过多运算任务。不同飞行阶段对容错强度的需求存在差异,算法据此动态切换精细与简化的运行模式,以此实现资源利用的最优化。经过精简之后的容错模块占用更少的处理周期,使得整个导航系统能够将更多算力集中于核心定位解算任务。

3.2 多导航模式切换可靠性优化策略

导航模式切换过程中的可靠性问题主要表现在切换决策的准确性和输出数据的平稳性两个方面。为了提升决策准确度,系统在判断是否切换到新模式之前必须同时核查三项指标,即新模式的信号可用程度、数据输出的波动幅度以及该模式在最近时段内的连续稳定时长,三项全部满足要求才允许执行切换。为了保障输出平稳,在切换期间引入短暂的重叠工作区间,新旧两个模式同时输出导航参数,系统按照随时间变化的权重比例将两者合成为最终的输出值。一旦新模式切入后暴露出任何不稳定迹象,快速回退通道立即生效,系统能够在极短时间内切回先前的工作模式。

3.3 系统抗干扰与容错能力协同提升方法

抗干扰功能和容错功能在传统架构中各自独立运作,这种分离模式在处理同时受到外部干扰和内部故障的复杂情形时存在明显的协调不足。协同提升的基本思路是在两个功能模块之间架设双向数据传输链路,抗干扰模块将实时采集的电磁环境参数持续传递给容错模块,帮助后者准确区分干扰引起的信号波动与硬件本身产生的永久性偏差^[5]。容错模块在完成故障性质判定之后也将结果反馈给抗干扰模块,抗干扰模块据此调整滤波强度和抑制带宽,使其更有针对性地应对当前的干扰形态。

两个模块通过这种信息共享和行动协调,实现了防护效果的整体增强。

3.4 长期运行状态下系统稳定性优化机制

系统在长时间连续工作中面临的稳定性威胁来自硬件和软件两个层面。硬件方面表现为器件参数随温度循环和时间累积而产生的缓慢漂移,软件方面则体现为内存碎片化、堆栈溢出风险增大以及变量初始值偏移等问题。针对硬件退化,系统周期性地执行关键节点电压和频率的在线校验,将实测值与初始基准进行比对并做适当修正。针对软件老化,系统按固定间隔实施内存区域的重组和闲置句柄的回收,同时复位那些长期运行后可能积累误差的内部计数器。系统还保存了各主要模块的性能历史记录,一旦识别出持续向某一方向变化的趋势,就主动调整对应的控制参数予以补偿,使系统输出始终保持平稳。

4 结束语

机载多模式导航系统的容错设计与可靠性保障,是一项贯穿硬件架构、软件逻辑、信息融合与系统重构的系统性工程。对硬件冗余、软件容错、融合算法以及自适应补偿等核心技术进行深入研究,就为系统稳定运行奠定了基础。可靠性评估体系的建立,则为量化分析系统健康状态和故障演化规律提供了有效工具。在这个基础上推进的各项优化工作,进一步提升了系统在资源受限和复杂工况下的整体性能。上述成果合起来,构成了从基础防护到评估验证再到性能增强的完整技术链条,为导航系统在严苛条件下持续可靠运行提供了有力支撑。

参考文献

- [1]刘帅,程俊强,康晓东.先进机载安全关键系统容错设计技术研究[J].航空计算技术,2025,55(4):108-114.
- [2]徐金全,郭宏,张秦岭,等.基于冗余和容错技术的高可靠机载智能配电系统设计[J].航空学报,2011,32(11):2117-2123.
- [3]彭鹏,王佳伟,李胜国.军用飞机惯导导航系统抗干扰能力提升策略探讨[J].智能城市应用,2026,9(7):95-99.
- [4]崔西宁,叶宏,张亚棣,等.基于GSM技术的AICPS容错重构与安全管理研究[J].微电子学与计算机,2007,24(6):104-108.
- [5]宗军耀,郑智明,张琛.基于RNP运行的机载综合导航系统的架构和功能分析研究[J].中国高新技术企业,2014,(25):7-8.

作者简介:

刘文琴(1976--),女,汉族,陕西人,本科,高级工程师,研究方向:综合保障和保障性。