

军用飞机惯导导航系统抗干扰能力提升策略探讨

彭 鹏 王佳伟 李胜国

石家庄海山航空电子科技有限公司, 河北 石家庄 050200

[摘要]现在战争中的电磁情况变得非常复杂, 军用飞机使用的惯性导航系统抵抗各种干扰的能力遇到了很大困难。这篇研究想要仔细讨论如何让机载惯导系统在遇到高强度干扰或者新型干扰时, 表现得更加稳定可靠。文章首先简单说明了惯性导航系统的基本工作原理和主要组成部分, 然后详细分析了在复杂电磁环境下, 惯导系统会遇到哪些主要干扰类型, 这些干扰会对导航的精确度造成什么样的危害。接着, 文章把目前惯导系统已经使用的一些抗干扰方法列出来, 清楚指出这些方法在面对高强度干扰或新型干扰时存在哪些不足之处。为了弥补这些不足, 文章从系统设计、关键技术开发、战术应用这三个方面, 提出了全面完整的提升方案。在系统设计这一块, 特别强调要通过结合多种传感器形成统一的整体结构, 同时配备冗余备份系统, 这样可以大大提高系统的容错能力, 还可以考虑选择和改进那些具有很强抗干扰能力的核心惯性元件。在关键技术方面, 重点研究如何优化自适应滤波算法和信息融合算法, 如何开发抗欺骗的信息加密方式, 以及如何在时间和空间两个维度上进行综合的抗干扰处理。在战术应用方面, 建议改变任务飞行的具体路线和时间安排, 灵活调整不同的导航运行模式, 还要加强对战场电磁频谱的统一管理和协调配合。

[关键词]军用飞机; 惯性导航系统; 抗干扰; 组合导航; 电磁环境

DOI: 10.33142/sca.v9i7.20023

中图分类号: V249

文献标识码: A

Exploration on Strategies for Enhancing the Anti Interference Capability of Military Aircraft Inertial Navigation Systems

PENG Peng, WANG Jiawei, LI Shengguo

Shijiazhuang Haishan Aviation Electronics Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050200, China

Abstract: The electromagnetic situation in war has become very complex, and the ability of inertial navigation systems used by military aircraft to resist various interferences has encountered great difficulties. This study aims to carefully discuss how to make airborne inertial navigation systems more stable and reliable in the face of high-intensity interference or new types of interference. The article first briefly explains the basic working principle and main components of inertial navigation systems, and then analyzes in detail the main types of interference that inertial navigation systems will encounter in complex electromagnetic environments, and what kind of harm these interferences will cause to the accuracy of navigation. Next, the article lists some anti-interference methods currently used in inertial navigation systems and clearly points out their shortcomings when facing high-intensity interference or new types of interference. In order to make up for these shortcomings, the article proposes a comprehensive and complete improvement plan from three aspects: system design, key technology development, and tactical application. In terms of system design, it is particularly emphasized to form a unified overall structure by combining multiple sensors and equipping redundant backup systems, which can greatly improve the system's fault tolerance. It is also possible to consider selecting and improving core inertial components with strong anti-interference capabilities. In terms of key technologies, the focus is on researching how to optimize adaptive filtering algorithms and information fusion algorithms, how to develop anti spoofing information encryption methods, and how to perform comprehensive anti-interference processing in both time and space dimensions. In terms of tactical application, it is recommended to change the specific route and time arrangement of mission flights, flexibly adjust different navigation operation modes, and strengthen the unified management and coordination of the battlefield electromagnetic spectrum.

Keywords: military aircraft; inertial navigation system; anti-interference; integrated navigation; electromagnetic environment

引言

信息化智能化战场中,制信息权成为核心争夺焦点,复杂强对抗电磁环境对各类军用电子设备形成严苛考验。惯性导航作为军机自主定位、精准打击与飞行安全的核心支撑,其抗干扰性能直接决定作战平台的生存能力与任务效能。面对日趋复杂的高强度电磁干扰、欺骗式诱扰与高能毁伤干扰,传统惯导系统易出现定位精度骤降、运行失稳甚至功能失效的问题,现有单一防护技术已难以适配未来激烈空战的严苛要求。本文聚焦这一行业刚需,深入剖析电磁干扰的作用机理与现有防护方案的短板,从系统顶层设计、核心技术突破、实战场景适配多维度出发,构建一套全链条的惯导抗干扰优化方案,助力军机在复杂电磁环境下保持稳定导航能力,保障作战任务顺利落地。

1 军用飞机惯导系统概述及其面临的主要干扰

1.1 机载惯导系统的工作原理与组成

机载惯性导航系统属于一种依靠牛顿力学基本规律来运作的独立导航设备,主要思路就是利用加速度计和陀螺仪这两种传感器,随时测量飞行器受到的加速度和角速度变化情况,然后把这些数据输入到导航计算机里面进行计算处理,最后得出飞行器当前的速度、位置以及朝向的具体数值,完全不需要依靠外界环境或者额外的信息作为参考依据^[1]。整个系统通常包括惯性测量单元、导航计算机还有各种连接接口。惯性测量单元占据着非常重要的地位,内部装设了陀螺仪和加速度计这两种关键部件。陀螺仪专门用来监测飞行器绕三个轴线转动的角度变化状况,这样就能清楚知道飞行器目前处于什么样的姿态。加速度计负责探测飞行器沿着三个轴线移动时产生的速度变化,经过适当的坐标转换和减去重力影响之后,就可以得到真实且没有被干扰过的运动速度数据。导航计算机担当着整个系统的核心作用,需要承担起编写并执行各种导航相关算法的任务,还要完成启动初期对准工作、收集各种相关数据、修正可能出现的误差以及最终给出导航结果等一系列具体操作,最后把计算出来的精确导航数据传递出来供人们使用。

1.2 复杂电磁环境下的主要干扰类型与影响

现在战场上电磁环境变得特别复杂,军用飞机惯导系统会遇到两种不同类型的干扰问题,一种是无心之失造成的干扰,另一种是有计划有目的的恶意干扰。无心之失造成的干扰通常来源于飞机本身以及附近飞机携带的各种

电子设备,比如雷达和通信设备释放出来的电磁波,这些电磁波容易通过某种连接方式影响到惯导系统里面的敏感电路,导致传感器输出的数据带上额外的噪声或者发生位置偏差。有计划有目的的恶意干扰相对来说更加危险,主要分为两种类型,一种叫做压制式干扰,另一种叫做欺骗式干扰。压制式干扰的主要想法是让惯导系统周围环境里的电磁杂音变得更强烈,特别是针对一些内部装有精密电子元件的惯性传感器,比如微机电系统这类产品,这种做法很容易造成信号与背景噪声之间的比例失衡,最终使得测量出来的结果不够准确。欺骗式干扰则显得非常隐蔽,具体做法是往导航计算机或者外部的数据传输通道中塞进一些假的电磁信号,或者干脆修改掉原本应该传递过来的重要数据,这样做很容易误导计算出的位置和方向判断结果,最终危及飞行的安全保障以及任务的顺利完成。

2 军用飞机惯导系统抗干扰现状与主要问题

2.1 现有机载惯导系统的抗干扰措施

军用飞机惯性导航装置遇到复杂电磁环境带来的各种困难,已经采取了很多种防止干扰的方法。从硬件这一块来看,主要是依靠屏蔽技术和滤波技术来进行保护。对于惯性测量单元这样的重要部件,设计的时候会把屏蔽做得特别严密,这样就能有效减少外部电磁波带来的干扰影响^[2]。在一些重要的电路中,电源线路和信号传输线路都会装上滤波设备,用来阻挡掉那些容易造成的传导干扰和高频率噪声问题。从整个系统的设计角度来看,普遍选择使用多种导航方式一起配合的方式,最常见的一种就是把惯性导航和全球卫星导航系统结合起来。这种方式可以利用卫星传回来的信息来进行必要的调整,用来减少由于惯性导航导致的累积误差问题,一旦卫星信号受到干扰或者出现故障,系统就会切换到只用惯性导航的方式继续运行,这样就能在时间上让系统的稳定性得到一定的提高。不少迭代升级后的先进导航系统,还会配套轻量化的多源信息一致性校验机制,对不同传感器输出的观测数据开展交叉比对核验,一旦识别出某一路数据存在异常偏差,便会立即触发数据链路的熔断机制,主动剔除故障数据源,从源头阻断错误信息向后续融合环节传导,避免因单路数据失准拉低整个系统的运行精度与稳定性,在不显著增加算力负载的前提下,大幅提升复杂工况下系统的容错能力。如图1所示。

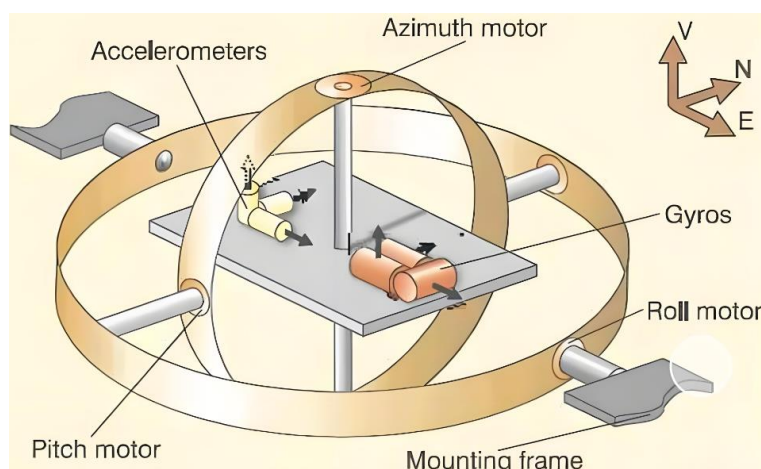


图1 惯导系统示意图

2.2 当前抗干扰能力存在的不足与挑战

虽然已经采取了防护措施,但是当前惯导系统的应对高强度、智能化的新型干扰时仍然显示出明显缺陷和严重困难。常规的硬抗方法依靠屏蔽和滤波来处理问题,遇到频谱范围非常广、功率特别大的压制式干扰或者针对某个特定频率和协议设计的各种灵活干扰时,效果就会变得很差,系统很容易因为前级设备出现过载或者参数设置出错而导致定位精度大幅下降,甚至完全无法正常工作。使用卫星导航的方式结合惯导技术的模式存在很大的弱点,假如卫星信号因为受到欺骗或者遭到压制而无法正常使用,系统就会直接变成只有惯导功能的部分,定位误差会随时间推移不断累积,很难达到长时间执行高精度军事任务的要求。当前的信息融合算法大多停留在采用固定的参数或者静态设计,没有考虑到干扰种类和强度随时变化的情况,所以遇到复杂的干扰环境时,系统的容错能力和重新调整的能力显得不够强。整个系统的多个传感器之间协作配合以及根据情况做出智能判断的能力比较弱,没有办法很好地利用雷达、天文观测和地形数据这些辅助手段,在受到干扰的情况下完成准确的导航定位和持续稳定运行的任务。

3 提升抗干扰能力的系统设计层面措施

3.1 多传感器深度融合与冗余备份架构

从系统架构的角度出发来增强抗干扰能力,关键点就是要彻底摆脱对单一导航来源的过分依赖。搭建一个多传感器深度融合以及冗余备份的整体架构,成为达成这个目标的核心方法。这个架构会把惯性导航系统跟全球卫星导航系统、天文导航、地形匹配、视觉导航这些不同的导航传感器连接起来,组成一个信息可以互相补充的混合导航网络。在遇到强烈电磁干扰的情况时,如果某种导航信息,

比如卫星导航信号突然受到干扰或者遭到欺骗,系统就会依靠其他独立的导航来源提供的数据来进行信息整合和状态估算,这样就能保证导航的精确度仍然维持在一个合理范围内^[3]。这样的信息整合方式跟单纯的简单拼凑不一样,它特别关注在算法上做出最优化或者最稳健的估计,比如使用容错联邦滤波算法来对各种导航传感器的数据进行加权融合处理,还会实时监控每种导航子系统的可靠性,一旦发现某个导航子系统出现问题就马上把它排除掉。另外,在物理结构上做冗余备份的设计显得非常重要,比如专门配备了多套惯性测量单元作为备用方案。如果主用的惯性测量单元因为受到干扰而性能明显下降,整个系统会马上启动备用的惯性测量单元,或者当多个惯性测量单元给出的数据出现矛盾的时候,系统会组织大家一起投票决定最终采用哪一种数据,这样就大大提高了系统的稳定性和抗风险能力。

3.2 高抗干扰惯性元器件的选用与加固

提高惯导系统自身硬抗干扰能力,需要从核心惯性元器件的选型与加固着手。在器件选用上,应当首要选用对电磁环境无敏感或内在抗干扰性能突出的技术路径。相对于传统机电式陀螺,以激光陀螺和光纤陀螺为代表的固态光学陀螺,由于其工作原理依托光学效应,本质上对电磁场干扰具备更好的抵抗力。使用石英振梁或者微机电系统技术的加速度计,它们的抗电磁干扰性能也优于某些传统类型。对于已经选定的惯性元器件开展针对性电磁加固是必不可少的环节。这涵盖在器件级和模块级实施有效的屏蔽、滤波与接地措施。使用高性能的导电密封外壳对整个惯性测量单元进行全面电磁屏蔽,阻断外部干扰的侵入路径。在传感器供电和信号输出线上配置多级滤波器,以削弱传导干扰。改进印制电路板的布局与接地设计,减少内

部电路间的互相串扰。针对特别关键的部位,可以考虑采用冗余传感元件和差分测量技术来共模抑制干扰。借助挑选高抗干扰器件并配合严谨的电磁兼容性设计与加固,可以有效减少核心传感器遭受外界电磁环境干扰的程度,为整个导航系统在复杂电磁环境下稳定工作筑牢扎实的硬件基础。

4 提升抗干扰能力的关键技术应用做法

4.1 自适应滤波与信息融合算法优化

为了应对那些繁杂又变化无常的干扰环境,一定要对导航系统的内部信息处理关键部分,也就是滤波和融合的算法进行改进和调整。传统的卡尔曼滤波方法,在模型完全匹配的情况下表现得非常好,但一旦遇到干扰导致噪声分布发生变化的情况,就会出现不稳定的问题^[4]。所以需要深入研究并且实际应用一些可以自动调整的滤波算法,比如根据新出现的数据流来更新或者根据协方差的具体特点来进行调整的自适应卡尔曼滤波方式,让滤波系统能够在运行过程中随时发现并修正噪声的分布情况,从而大大提高滤波的稳定性和可靠性。在信息融合方面,要从过去那种简单的数据拼接方式,发展到更加复杂的决策层面以及特征层面的深度融合,还要加入一些智能计算方法来帮助处理来自不同来源的导航信息,比如惯性测量、卫星定位、天文观测等,通过这些方法合理分配各方面的权重,并且做出合理的判断,有效识别并排除那些不靠谱的数据,确保最终融合出来的导航信息,在面对于干扰环境的时候能够一直保持稳定并且拥有很高的精确度。

4.2 导航信息的加密与抗欺骗技术

导航信息加密目的是保护信号完整性和可信度,防止敌人偷听或者修改信号。对外部信号比如卫星导航的辅助信息,必须使用导航电文加密认证方法,确保接收到的信号来自合法来源并且没有添加虚假内容。对于惯性导航系统的内部部分,主要保护与外部设备的连接通道和数据传输路径,防止通过数据通道改变惯导系统的参数或者发送错误指令。防欺骗技术重点放在信号上面,采用加密伪码结构、复杂的信号调制方法,加上接收设备检查信号质量、多个相关器一致性验证等手段,快速发现并且清除欺骗干扰,确保导航传感器输入的数据干净并且值得信赖。

4.3 时域与空域联合抗干扰处理方法

单一的时域或者空域滤波方式面对高强度、智能化的干扰时通常效果不佳。时域与空域联合处理技术,依靠充分利用信号在时间和空间维度上的特征差异,能够更加高效地分离干扰和期望信号。在时域方面,可以采用自适应滤波技术来抑制与导航信号频谱重叠的窄带干扰。在空域

方面,则利用机载多天线阵列构成的自适应波束,在干扰到来的方向形成零陷,并且提高增益指向期望的导航卫星方向。关键点是设计高效的联合优化算法,实时估算干扰的空时参数,动态调节滤波器的权系数,实现对多个干扰源的协同抑制,从而在复杂的干扰环境中最大程度地保障导航信号的可用性。

5 提升抗干扰能力的战术使用与保障对策

5.1 基于任务规划的飞行剖面优化

飞行剖面的优化设计是为了让惯导系统抵抗干扰能力变得更好而提前采取的一种重要方法。依靠任务规划系统,需要仔细研究和分析与任务区域有关的电磁环境的具体特点,然后根据这些特点来合理安排飞行路线和飞行高度。如果遇到已经知道或者预测到会有很强的干扰情况,就应该提前调整飞行高度,尽量飞得更低一些,或者利用周围的山川河流等自然地形成来遮挡干扰源,从而大大降低被外界信号干扰的可能性^[5]。在制定飞行计划的时候,还要特别关注把那些对导航至关重要的更新时刻安排到电磁环境比较干净的地方或者是干扰影响比较小的空域里面去。采用这样的方法,可以在任务开始之前就很好地减少惯导系统受到强烈且持续性干扰的风险,同时也为整个系统继续提供稳定的导航支持创造了非常有利的飞行环境和保障条件。如表 1 所示。

表 1 飞行剖面优化效果研究

对比维度	优化前基准状态	任务规划优化后实测效果
飞行剖面与航路模式	3000m 高度直线巡航	150m 贴地绕障机动, 导航更新点前移至干扰区边缘
强干扰暴露时长	全程受干扰 120s	暴露时长缩短至 25s, 降幅达 79.2%
惯导位置误差表现	受干扰后位置误差发散至 45m	全程位置误差 RMSE 控制在 8.5m 以内, 精度提升 81.1%
综合验证结论	无主动抗干扰规划, 误差发散明显	有效降低惯导累积误差, 导航抗干扰鲁棒性大幅提升

5.2 组合导航模式动态切换策略

单一的导航方式在复杂战斗环境中容易受到攻击破坏。为了提高系统的稳定性和可靠性,必须在战术应用过程中实现多种导航方式的智能自动切换调整。系统需要具备实时监测和评估可用导航传感器是否正常以及信号可信度的能力,并根据事先制定好的规则或者人工智能决策算法,在当前主要使用的导航设备出现故障或精度大幅度下降的时候,自动切换到备用方案,比如使用天文导航、地形匹配或者依靠惯性导航计算当前位置。切换到备用方案时,需要全面分析当前任务的具体情况、面临的威胁严重程度以及各个备用方案的实际性能表现,确保最终提供

的导航结果能够保持连续并且过渡平滑。这样的灵活切换方法可以让飞机在面对敌方断续或者局部范围的干扰时,依然能够维持最基本的导航功能,从而保障整个飞行过程的安全顺畅。

5.3 战场电磁频谱管理协同

提高抗干扰能力不应该仅仅依靠平台自身的技术改进,还要加入到一个整体性的战场电磁频谱管理方案里面去。飞行平台需要跟地面指挥控制中心以及附近正在战斗的其他部队建立起频谱情况的协同观察和信息共享的机制。通过接收实时更新的战场电磁频谱状况地图,飞机上的电子设备能够提前发现某些特定频率区域出现的干扰危险,并且给选择导航方式提供有用的参考意见。整个作战体系可以根据任务的重要程度,在关键时刻和重要空域合理安排并且保护好用于导航的频率资源,也可以使用主动攻击或者发出假信号的方式来抵抗敌人制造出来的干扰来源。这样的整体性管理方式会让每架飞机单独抵抗干扰的能力变成整个作战体系所提供支持下的全面防御能力,从而在一个更大的范围里面更好地改善飞机进行导航时的电磁环境条件。

6 结束语

直面越来越严峻复杂的电磁威胁,提高军用飞机惯性导航系统的抗干扰能力已经成为保证作战效能和飞行安全的关键课题。本文全面研究了机载惯导系统遭遇的干扰类型以及当前措施存在的不足之处,从系统设计、关键技术、战术运用这三个方面建立了全面的能力提升策略框架。

单独的技术改进很难解决各种各样的干扰问题,必须坚持整体发展的思路。应该特别重视惯性元器件本身的抗干扰能力的提高,深入研究多种导航信息的智能化融合和自适应处理方法,并且加强导航系统与战机任务系统、战场电磁频谱管理系统的密切配合。还要加大在高强度对抗环境中针对新型干扰的模拟试验和实际演练工作,持续检验和完善各种策略的实际效果。依靠技术革新、系统优化和战术创新这三方面的合力推动,最终建立起抗干扰能力强、可靠性高的新一代机载导航体系,这样就能为军用飞机在复杂电磁环境中争夺制导控制权、圆满完成任务提供可靠有力的导航支持,为国防现代化建设提供重要帮助。

[参考文献]

- [1]燕中山,宋渊博.军用飞机维护管理系统的设计与实现[J].电子制作,2021,29(4):94-95.
- [2]王小阳,李骏,赵琛.军用飞机惯性导航技术的发展[J].中国军转民,2021(17):31-33.
- [3]孙华丽,张政治.北斗卫星导航系统地面部分抗干扰策略分析[J].导航定位学报,2023,11(5):128-132.
- [4]张海越,韩戈白,廖佳鑫,等.军用飞机维修知识平台设计[J].电子质量,2023(6):6-9.
- [5]费兴通,杨振华,高磊,等.基于 PDCA 的军用飞机系统管路设计质量提升实践探索[J].航空标准化与质量,2023(4):49-52.

作者简介:彭鹏(1987—),男,汉族,湖南长沙人,本科,研究方向为导航专业。