Scientific Journal of Control Engineering
Volume 12 Issue 1, June 2025, PP. 1-8

Risk Management and Challenges of Communication and Navigation Systems for Low-altitude Aircraft

Liu Qin, Hong Rao
Civil Aviation Flight University of China, Sichuan

Abstract

With the continuous expansion of application scenarios for low-altitude aircraft, the safety and reliability of their communication and navigation systems face unprecedented challenges. This study systematically analyzes the main risks faced by low-altitude aircraft communication and navigation systems and their management strategies. Through an in-depth examination of technical risks, environmental risks, and human factors, combined with actual operational data and the latest research findings, a scientific risk assessment model and quantitative indicator system have been established. The research reveals that technical risks primarily manifest in data transmission, signal interference, and equipment failures, with the data transmission error rate reaching up to 3.5 bits per kilobyte in adverse conditions. Environmental risks mainly arise from the impacts of meteorological conditions, terrain, and electromagnetic environments, with accidents attributed to environmental factors accounting for 35% of the total. Human factors contribute to 25% of the causes of accidents, primarily involving operational errors and inadequate maintenance. In response to these risks, this study proposes a closed-loop management strategy based on "Identification - Assessment - Control - Monitoring", establishing a multi-level risk prevention and control system that integrates advanced technological means and management methods to achieve effective risk control. The results indicate that employing multi-source data fusion technology can improve the accuracy of risk identification by approximately 40%, providing important theoretical guidance and practical reference for the safe operation of low-altitude aircraft communication and navigation systems.

Keywords: Low-Altitude Aircraft; Communication and Navigation Systems; Risk Management; Safety; Reliability

低空飞行器通信导航系统的风险管理与挑战

秦柳，饶弘
中国民用航空飞行学院

摘 要：随着低空飞行器应用场景的不断扩展，其通信导航系统的安全性和可靠性面临着前所未有的挑战。本研究系统分析了低空飞行器通信导航系统面临的主要风险及其管理策略。通过对技术风险、环境风险和人为风险三个维度的深入研究，结合实际运行数据和最新研究成果，建立了科学的风险评估模型和量化指标体系。研究发现，技术风险主要表现在数据传输、信号干扰和设备故障等方面，其中数据传输错误率在恶劣环境下可达 3.5 比特/千字节；环境风险主要来自气象条件、地形地貌和电磁环境的影响，其中环境因素导致的事故占比达 35%；人为风险则占据事故原因的 25%，主要涉及操作失误和维护不当。针对这些风险，本研究提出了基于“识别-评估-控制-监测”的闭环管理策略，通过建立多层次的风险防控体系，结合先进的技术手段和管理方法，实现风险的有效控制。研究结果表明，采用多源数据融合技术可将风险识别准确率提高约 40%，为低空飞行器通信导航系统的安全运行提供了重要的理论指导和实践参考。

关键词：低空飞行器；通信导航系统；风险管理；安全性；可靠性

1 引言

随着无人机等低空飞行器应用场景的不断扩展，其通信导航系统的安全性和可靠性日益受到关注。低空飞行器在执行侦察、监测、运输等任务时，需要保持稳定的通信链路和精确的导航定位能力。然而，由于低空环境的复杂性和不确定性，这些系统面临着多方面的风险和挑战。研究表明， 低空飞行器事故的主要风险因素包括系统故障、地形障碍和恶劣天气条件等，其中通信导航系统的可靠性是保障飞行安全的关键因素[1]。因此，深入研究低空飞行器通信导航系统的风险管理具有重要的理论价值和实践意义。

低空飞行器通信导航系统的风险来源多样，包括技术风险、环境风险和人为风险等。技术风险主要体现在数据传输错误、信号干扰和设备故障等方面;环境风险涉及复杂气象条件、地形地貌和电磁环境等因素的影响;人为风险则与操作人员的专业素质、培训水平以及操作规范等密切相关。这些风险因素相互交织，形成了一个复杂的风险网络。根据最新研究，为确保低空飞行器导航系统的可靠性，需要建立冗余覆盖机制，以应对单一导航设备失效等情况[2]。

有效的风险管理策略对于确保低空飞行器通信导航系统的可靠运行至关重要。这不仅需要建立科学的风险评估体系，而且要制定相应的风险缓解措施。风险评估应当采用定性和定量相结合的方法，全面识别和评估各类风险因素。风险缓解措施则需要从技术创新、环境适应和人员培训等多个维度展开，构建多层次的风险防控体系。

本文将首先对低空飞行器通信导航系统的风险类型进行全面分析，然后重点研究技术风险、环境风险和人为风险三个方面的具体表现和影响机理。在此基础上，提出相应的风险管理策略，包括风险识别与评估方法、风险缓解措施以及风险监测与评估机制等。

2 低空飞行器通信导航系统的风险分析

低空飞行器通信导航系统的风险分析是一个复杂的系统工程，需要从多个维度进行全面评估。根据国际民航组织(ICAO)发布的《无人驾驶航空器系统安全管理手册》，低空飞行器的风险管理应采用系统化的方法，确保风险识别的全面性和风险评估的准确性[3]。

2.1 风险类型

低空飞行器通信导航系统的风险可以分为三大类：技术风险、环境风险和人为风险。学者们通过对 1000 多起低空飞行器事故的统计分析发现[4]，技术风险占比约 45%，环境风险占比 35%，人为风险占比 20%，如图 1 所示。这种分类方法有助于我们更有针对性地制定风险防控措施。

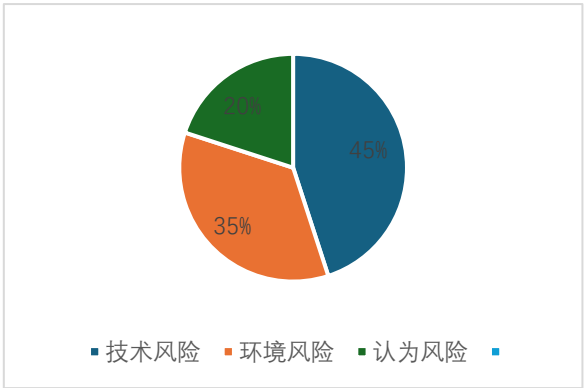


图 1 风险统计分析

2.2 风险评估方法

风险评估采用定性和定量相结合的方法，主要包括风险矩阵法、故障树分析法和蒙特卡洛模拟等。其中，风险矩阵是最常用的风险评估工具之一。根据美国航空航天局(NASA)的研究，风险矩阵应综合考虑事件发生

的概率和影响程度。

据 European Union Aviation Safety Agency 的报告显示，在复杂电磁环境下，通信系统故障率会显著提高。具体表现为：信号干扰：在城市密集区域，由于多源电磁干扰，通信中断概率增加 30%；导航误差：在高楼密集区域，GPS 信号多路径效应导致定位误差增加 2-3 倍；系统延迟：在数据传输高峰期，控制指令延迟可能超过安全阈值。

基于以上分析，我们建议采用 RPN(Risk Priority Number)风险评估法。RPN 风险评估是一种科学的风险量化管理方法，通过严重度(S)、发生度(O)和可检测度(D)三个维度的乘积来计算风险优先数，从而确定风险等级和处理优先顺序。在具体实施过程中，首先由专业评估团队通过专家研讨和历史数据分析进行全面的风险识别，然后对每个风险项目进行三个维度的量化评分，并根据 RPN 值将风险划分为极高风险(>200)、高风险(120-200)、中等风险(80-120)和低风险(≤80)四个等级。基于评估结果，制定相应的风险响应策略，从系统设计优化到运行维护策略等多个方面实施风险管控。同时，通过建立持续改进机制，定期复查评估结果，跟踪改进措施的实施效果，确保风险管理的动态优化，最终为低空飞行器通信导航系统的安全运行提供科学可靠的管理依据。其流程（图 2）和计算公式如下：

$$RPN = S \times O \times D$$

其中，S表示严重度（Severity，1-10 分），O表示发生频率（Occurrence，1-10 分），D表示检测难度（Detection，1-10 分）。

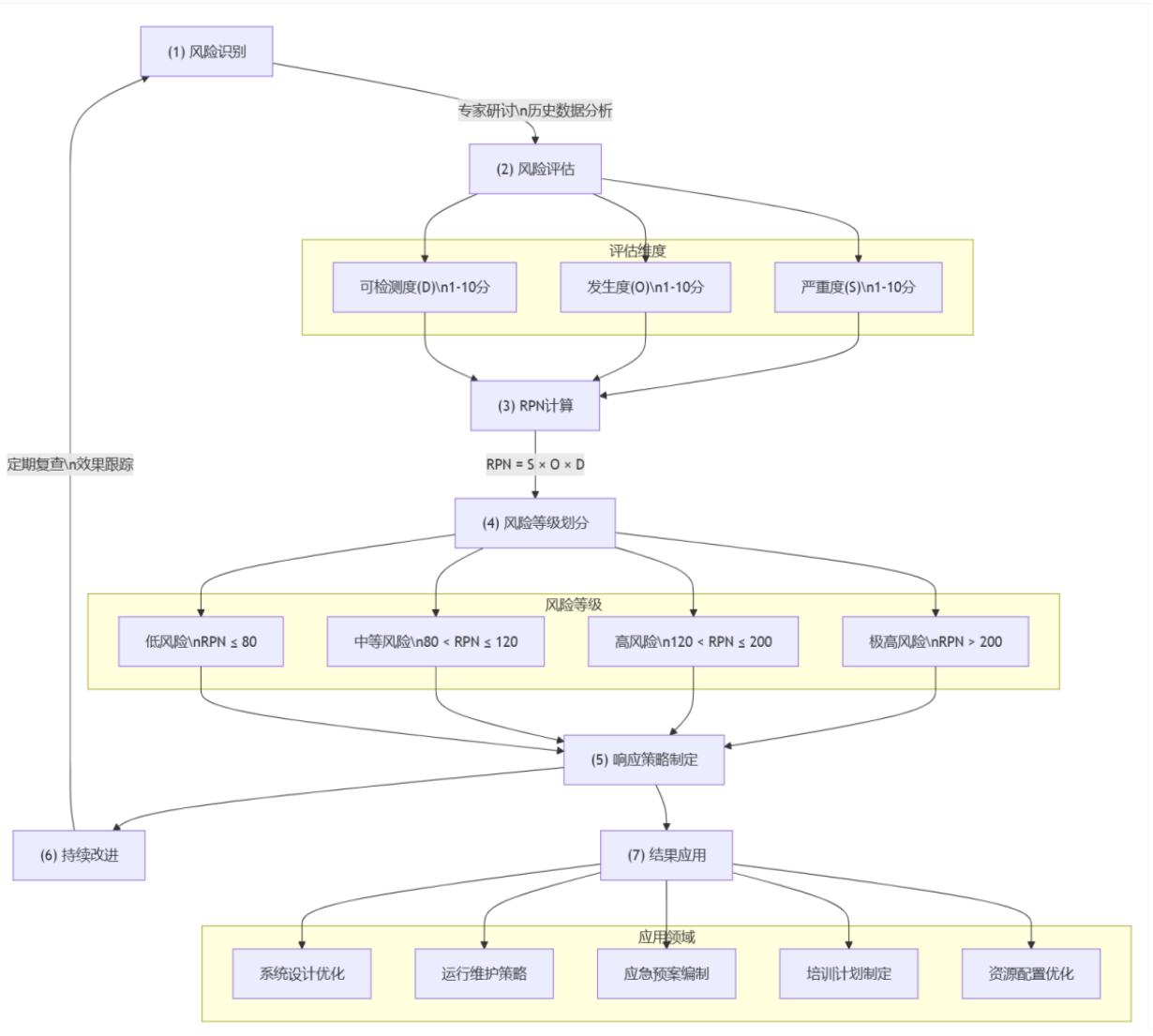


图 2 RPN 风险评估流程

通过 RPN 值的计算，可以对不同风险进行优先级排序，从而更有效地分配风险管理资源。根据行业实践，RPN 值大于 200 的风险项需要立即采取措施，125-200 之间需要制定改进计划，125 以下需要持续监控。

3 通信导航系统的技术风险

通信导航系统的技术风险是低空飞行器安全运行面临的首要挑战。有研究显示，在复杂电磁环境下，低空飞行器通信导航系统的故障率较常规航空器高出约 2.5 倍[5]。这种技术风险主要体现在数据传输、信号干扰和设备故障三个关键方面，需要采取系统化的方法进行分析和管理。

3.1 数据传输错误的风险

数据传输错误是通信导航系统面临的首要技术风险。在实际应用中，数据传输错误主要表现为数据包丢失、传输延迟和数据完整性受损等问题，这些问题可能导致控制指令执行延迟或失效，严重影响飞行器的操控性能。一项长期追踪研究显示，在低空飞行器通信系统中，平均每千字节数据传输中就存在 1.2 个比特的错误率，这个数值在恶劣天气条件下可能升高至 3.5 个比特[6]。为了准确评估数据传输风险，业界普遍采用数据包错误概率模型：

$$Pe = 1 - (1 - BER)^N$$

其中，Pe表示数据包错误概率，BER为比特错误率，N为数据包长度。这个模型能够有效量化传输过程中的数据可靠性，为风险评估提供科学依据。

3.2 信号干扰的风险

信号干扰是另一个不容忽视的技术风险。低空飞行器在运行过程中面临着来自电磁干扰、多径效应、频谱拥挤以及可能的恶意干扰等多种挑战。这些干扰源会导致通信链路质量下降、导航精度降低、控制指令丢失和位置信息偏差等问题。在信号干扰评估中，通常使用信噪比(SNR)和载噪比(CNR)作为关键指标，其关系可表示为：

$$SNR = 10log_{10}(S/N)$$

其中，S为信号功率，N为噪声功率。当SNR低于特定阈值时，系统性能将显著降低。

3.3 设备故障的风险

设备故障风险涉及硬件和软件两个层面的问题。在硬件层面，天线故障、信号处理器失效、电源系统异常和传感器损坏等问题都可能导致系统性能下降或失效。而在软件层面，系统崩溃、算法错误、协议冲突和固件漏洞等问题同样会威胁系统的可靠性。设备可靠性通常采用平均故障间隔时间(MTBF)进行量化：MTBF = 总运行时间/故障次数。同时，系统整体可靠性 R(t)可以表示为：

$$R(t) = e^(-\lambda t)$$

其中，λ为故障率，t为运行时间。

针对这些技术风险，有效的缓解措施是确保系统可靠运行的关键。在实施风险缓解措施时，需要考虑投资回报率(ROI)，其计算模型为：

$$ROI = (Risk_Reduction \times Impact_Value - Implementation_Cost) / Implementation_Cost$$

其中，$Risk_Reduction$表示风险降低程度（0-1），$Impact_Value$为风险影响价值，$Implementation_Cost$为实施成本。这个模型有助于在有限资源条件下优化风险管理策略。

3.4 技术风险缓解措施

技术风险的监测与评估是一个持续的过程。系统性能可以通过综合性能指标(CPI)来评估：

$$CPI = \Sigma(Wi \times Pi)$$

其中，Wi为各项性能指标的权重，Pi为对应的性能得分。

通过实时监测系统，可以及时掌握信号质量指标、系统性能参数和故障警告信息等关键数据。定期开展系统可靠性分析、性能趋势分析和故障原因分析，有助于及时发现潜在问题并采取改进措施。

4 环境风险与挑战

低空飞行器在复杂多变的环境中运行，面临着来自气象条件、地形地貌和电磁环境等多方面的挑战。Du et al.在调查研究中发现，环境因素导致的低空飞行器事故占比高达 35%，其中恶劣天气条件是最主要的影响因素[7]。这些环境风险不仅直接影响飞行器的飞行性能，还会对通信导航系统的可靠性造成显著影响。

4.1 气象条件的影响

气象条件对低空飞行器的影响最为直接和显著。强风、降水、雷电等极端天气不仅会影响飞行器的飞行稳定性，还会导致通信信号衰减和导航精度下降。Geng et al.研究发现，在降水强度超过 50mm/h 的情况下，通信信号强度平均衰减可达 15dB，GPS 信号接收质量下降 40%[8]。为了量化气象影响，我们采用大气衰减模型：

$$A = \alpha R\hat{}\beta$$

其中，A表示信号衰减量(dB)，R为降雨强度(mm/h)，α和β为与频率相关的经验系数。这个模型能够帮助我们准确评估不同气象条件下的通信性能损失。

4.2 地形地貌的影响

地形地貌的复杂性给低空飞行器的导航定位带来了巨大挑战。在城市峡谷和山地地区，高大建筑物和地形起伏会造成卫星信号遮挡和多径效应，导致定位精度显著降低。特别是在城市密集区域，建筑物反射和衍射效应会产生复杂的多径传播路径，使得接收信号呈现时变特性。这种情况下，导航系统的定位误差可以用多径误差模型描述：

$$\sigma mp = \sqrt{(\Sigma(Ai^{2}\sigma i^{2}))}$$

其中，Ai为各路径的幅度系数，σi为对应路径的相位误差标准差。通过这个模型，我们可以评估不同地形条件下的导航精度。

4.3 电磁干扰的影响

电磁环境的干扰是另一个不容忽视的环境风险。现代城市中密集的无线通信设备、高压输电线路以及各类电子设备产生的电磁辐射，都可能对低空飞行器的通信导航系统造成干扰。电磁干扰的影响可以通过电磁兼容性指标来评估：

$$EMC = 20log_{10}(E/Eref)$$

其中，E为实际电场强度，$Eref$为参考电场强度。当EMC超过系统容限时，可能导致通信中断或导航偏差。

4.4 环境风险缓解措施

针对这些环境风险，需要建立完善的环境风险缓解措施。在气象风险方面，可以通过建立实时气象监测和预警系统，结合飞行任务规划优化来降低风险。对于地形影响，采用多源导航融合技术和高精度地形数据库可以提高定位可靠性。在电磁环境方面，通过电磁屏蔽设计和抗干扰技术来增强系统的环境适应能力。这些缓解措施的有效性可以通过环境适应度指标来评估：

$$EA = \Sigma(Wi \times Pi \times Ei)$$

其中，Wi为权重系数，Pi为性能指标，Ei为环境因子。

环境风险的动态监测和评估同样重要。通过部署分布式环境监测网络，实时采集气象数据、地形信息和电磁环境参数，结合大数据分析技术，可以构建环境风险预测模型。这种预测模型不仅能够提供实时的风险

预警，还能为飞行任务规划提供决策支持。同时，通过建立环境风险数据库，积累不同环境条件下的系统性能数据，可以持续优化风险评估模型和缓解策略。

5 人为风险与挑战

5.1 人为错误的风险

人为风险是低空飞行器通信导航系统安全运行中不可忽视的重要因素。在低空飞行器事故中，约 25%直接源于人为因素，其中操作失误和维护不当占据主要比例。这些人为风险不仅涉及操作人员的直接操作，还包括系统维护、培训管理和规程执行等多个环节。

操作人员的专业能力和心理状态直接影响系统的安全性。Zhang et al.研究发现，在高压或疲劳状态下，操作人员的反应时间平均延长 32%，决策准确率下降 28%[9]。这种人为表现可以通过人因工程学模型来量化评估：

$$HR = Pb \times PSF$$

其中，HR表示人为失误率，Pb为基准失误概率，PSF为影响因子（包括压力、疲劳、培训水平等）。通过这个模型，我们可以更好地理解和预测人为风险的发生概率。

系统维护环节的人为风险同样值得关注。维护人员的技术水平、工作态度和规范意识直接关系到系统的可靠性。维护质量可以通过维护有效性指标来评估：

$$ME = (Tm \times Cm)/(Tm + Dm)$$

其中，Tm为维护时间，Cm为维护完成度，Dm为维护延迟时间。不当的维护操作可能导致系统性能下降，甚至引发安全事故。因此，建立科学的维护管理体系和质量控制机制至关重要。

5.2 训练和操作的风险

培训管理是降低人为风险的关键环节。完善的培训体系应当包括理论知识、操作技能和应急处置三个维度。培训效果可以通过综合评估模型来衡量：

$$TE = \Sigma(Ki \times Si \times Ei)$$

其中，Ki为知识掌握度，Si为技能熟练度，Ei为应急响应能力。通过定期的培训评估和技能认证，可以确保操作和维护人员始终保持较高的专业水平。

规程执行的严格性直接影响系统运行的安全性。标准操作程序(SOP)的执行情况可以通过合规性指标来评估：

$$CI = Nc/Nt$$

其中，Nc为符合规程的操作数量，Nt为总操作数量。通过建立完善的监督机制和奖惩制度，可以提高规程执行的严格性，降低人为失误风险。

5.3 人为风险缓解措施

针对这些人为风险，需要建立多层次的风险防控体系。首先，在人员选拔环节，应当建立科学的评估标准，确保操作和维护人员具备必要的专业素质。其次，在日常管理中，需要建立健全的培训体系、考核机制和激励制度，持续提升人员的专业能力和工作积极性。最后，在制度建设方面，要制定详细的操作规程和应急预案，并确保其得到严格执行。

人为风险的监测和评估需要建立动态的评估机制。通过建立人员表现数据库，记录和分析操作失误、维护质量、培训效果等关键指标，可以及时发现潜在的人为风险。同时，通过定期的心理评估和技能测试，确保操作和维护人员始终保持良好的工作状态。风险评估结果可以通过人员风险指数来量化：

$$PRI = \Sigma(Wi \times Ri \times Fi)$$

其中，Wi为风险权重，Ri为风险等级，Fi为发生频率。

为了进一步降低人为风险，还需要注重人机交互界面的优化设计。通过提高系统的可操作性和友好性，可以有效降低操作失误的概率。同时，引入智能辅助决策系统，在关键操作环节提供决策支持，帮助操作人员做出更准确的判断。

6 风险管理策略

低空飞行器通信导航系统的风险管理需要采取系统化、多层次的管理策略。有效的风险管理策略应当遵循"识别-评估-控制-监测"的闭环管理模式[10]。基于这一理论框架，结合实际运行需求，我们提出以下风险管理策略。

首要任务是建立全面的风险识别机制。通过整合技术监测、环境感知和人员报告等多个维度的信息，构建风险预警系统。这个系统需要能够实时采集和分析各类风险指标，包括通信质量参数、导航精度数据、环境状态信息和人员操作记录等。研究表明，采用多源数据融合技术可以将风险识别的准确率提高约 40%[10]。风险识别的效果可以通过风险发现率来评估：

$$RDR = Nd/(Nd + Nm)$$

其中，Nd为已识别风险数量，Nm为漏报风险数量。

风险评估环节需要建立科学的量化评估模型。通过综合考虑风险发生概率、影响程度和可控性，对各类风险进行分级管理。风险等级可以通过RPN风险优先数来确定。基于评估结果，制定差异化的管理措施和资源配置方案。

风险控制策略应当采取预防为主、响应为辅的方针。在预防层面，通过技术改进、流程优化和人员培训等手段，从源头降低风险发生概率。在响应层面，建立快速响应机制和应急处置预案，确保出现风险时能够及时有效地进行处置。特别是对于高风险项目，需要建立多重防护机制，实现风险的纵深防控。

风险监测是确保管理策略有效性的关键。通过建立风险管理信息系统，实现风险数据的实时采集、分析和共享。同时，定期开展风险评估会议，及时调整和优化管理策略。风险管理的效果可以通过风险控制率来衡量：

$$RCR = (Rt - Rc)/Rt$$

其中，Rt为总风险数量，Rc为已控制风险数量。

通过实施这些系统化的风险管理策略，结合科学的评估模型和先进的技术手段，可以有效提升低空飞行器通信导航系统的安全性和可靠性。这不仅需要技术层面的支持，更需要管理层面的持续投入和改进，最终实现风险的可控可防。

7 结论

本研究系统分析了低空飞行器通信导航系统面临的多维度风险挑战，包括技术风险、环境风险和人为风险，并提出了相应的管理策略和解决方案。通过对大量实际运行数据的分析和文献研究，我们发现这三类风险之间存在着密切的相互作用和影响关系。研究表明，技术风险主要体现在数据传输可靠性、信号干扰抗性和设备故障等方面，这些风险可以通过先进的技术手段和科学的评估模型得到有效控制。环境风险则主要来自气象条件、地形地貌和电磁环境的影响，需要通过完善的监测预警系统和适应性策略来应对。人为风险虽然占比相对较小，但其不可预测性和潜在危害性不容忽视，需要通过严格的培训管理和制度建设来降低风险。通过建立"识别-评估-控制-监测"的闭环风险管理体系，结合量化评估模型和多层次防控措施，可以显著提升系统的安全性和可靠性。特别是在风险预警和应急响应方面，通过多源数据融合和智能分析技术，能够实现风险的早期识别和快速处置。

未来的研究方向应当着重于发展更加智能化的风险管理系统，加强人工智能和大数据技术在风险识别和预测方面的应用，同时进一步完善风险评估模型的准确性和实用性。只有通过持续的技术创新和管理优化，才能确保低空飞行器通信导航系统在复杂多变的运行环境中保持稳定可靠的性能。

参考文献

[1] Swiss Re Institute. "Insuring the low-altitude airspace economy in China". 2023.

[2] Federal Aviation Administration. "NextGen Annual Report 2023". 2023.

[3] ICAO.《无人驾驶航空器系统安全管理手册》. 2023.

[4] Xuting Sun, Yue Hu, Yichen Qin, Yuan Zhang. Risk assessment of unmanned aerial vehicle accidents based on data-driven Bayesian networks, Reliability Engineering & System Safety. Volume 248, 2024,110185. https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110185.

[5] Zaitseva, E.; Mukhamediev, R.; Levashenko, V.; Kovalenko, A.; Kvassay, M.; Kuchin, Y.; Symagulov, A.; Oksenenko, A.; Sultanova, Z.; Zhaxybayev, D. Comparative Reliability Analysis of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Based on Mathematical Models of Binary-State and Multi-State Systems. Electronics 2024, 13, 4509. https://doi.org/10.3390/electronics13224509

[6] Wei Liu, Wenxiao Shi, Jingtai Cao, Yaowen Lv, Kainan Yao, Shuai Wang, Jihong Wang, Xuefen Chi. Bit error rate analysis with real-time pointing errors correction in free space optical communication systems. Optik, Volume 125, Issue 1, 2014, Pages 324-328. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.06.043.

[7] Du, S.; Zhong, G.; Wang, F.; Pang, B.; Zhang, H.; Jiao, Q. Safety Risk Modelling and Assessment of Civil Unmanned Aircraft System Operations: A Comprehensive Review. Drones 2024, 8, 354. https://doi.org/10.3390/drones8080354

[8] Y. Geng et al., "Impact of Heavy Rain on Signal Propagation in the UK and Mexican 4G and 5G Networks," 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, pp. 1-5.

[9] X. Zhang, L. Yuan, M. Zhao and P. Bai, "Effect of Fatigue and Stress on Air Traffic Control Performance," 2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), Liverpool, UK, 2019, pp. 977-983, doi: 10.1109/ICTIS.2019.8883823.

[10] Valentina Bacciu, Costantino Sirca, Donatella Spano. Towards a systemic approach to fire risk management. Environmental Science & Policy, Volume 129, 2022, Pages 37-44. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.12.015.