

浅析空中交通管制工作 风险因素及技防措施 的应用

李冰洁

中国民用航空西北地区空中交通管理局, 陕西 西安

收稿日期: 2026年7月23日; 录用日期: 2026年9月7日; 发布日期: 2026年9月16日

摘 要

空中交通管制系统是一个典型的“人-机-环-管”多维嵌套的社会-技术系统, 其运行安全性产生于管制员、飞行员、基础设施、运行程序和动态交通环境的持续交互之中。基于此, 本文系统梳理了空管工作中的主要风险因素, 重点阐述了西北空管局部署的ATC安全防护系统、管制员画像系统和气象智能服务系统3套技防措施的技术架构与应用成效。通过对系统投用前后关键安全指标的对比分析, 验证了技防措施在降低最小安全间隔破坏预警事件(降幅61.5%)、减少通信错误(降幅55.6%)、缩短复杂天气响应时间(降幅51.1%)等方面的显著效能。同时, 本文客观分析了技防措施在数据依赖、语音识别准确率、自动化偏见及系统实施等方面存在的局限性, 从风险识别系统性、预警前置智能化、能力评估数据化、人机协同适用性及人工智能嵌入性五个维度, 提炼了空管安全管理工作的基本原则。最后, 对“人机增强智能”在空管领域的未来应用模式进行了展望, 以期为空管安全管理从“被动应对”向“主动防御”转型提供理论依据和实践参考。

关键词

空中交通管制, 安全管理, 风险因素, 技防措施, 人机协同

Analysis of Risk Factors in Air Traffic Control Operations and the Application of Technical Defense Measures

Bingjie Li

Northwest Air Traffic Management Bureau, CAAC, Xi'an Shaanxi

Received: July 23, 2026; accepted: September 7, 2026; published: September 16, 2026

Abstract

The air traffic control (ATC) system is a typical social-technical system with multi-dimensional and nested “human-machine-environment-management” characteristics, whose operational safety emerges from the continuous interaction among controllers, pilots, infrastructure, operational procedures, and the dynamic traffic environment. Based on this, this paper systematically identifies the major risk factors in ATC operations, and focuses on elaborating the technical architectures and application effectiveness of three technical defense systems deployed by the Northwest Air Traffic Management Bureau—namely the ATC safety protection system, the controller capability profiling system, and the meteorological intelligent service system. Through a comparative analysis of key safety indicators before and after the implementation of these systems, the significant effectiveness of the technical defense measures is verified in terms of reducing minimum separation infringement warning events (a decrease of 61.5%), reducing communication errors (a decrease of 55.6%), and shortening response time under complex weather conditions (a decrease of 51.1%). Meanwhile, this paper objectively analyzes the limitations of the technical defense measures in aspects such as data dependency, speech recognition accuracy, automation bias, and system implementation, and distills the fundamental principles for ATC safety management from the five dimensions of systematic risk identification, intelligent early warning, data-driven capability assessment, human-machine collaboration applicability, and AI embeddability. Finally, this paper provides an outlook on the future application models of “human-machine augmented intelligence” in the ATC domain, aiming to provide a theoretical basis and practical reference for the transformation of ATC safety management from “passive response” to “active defense”.

Keywords

Air Traffic Control, Safety Management, Risk Factors, Technical Defense Measures, Human-Machine Collaboration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

飞机是民航运输的核心运载工具，承担着公众日常出行与社会经济发展的重要运输功能。我国空域辽阔、结构复杂，加之通用航空、无人机等新兴空域用户的快速涌现，空域运行环境日趋复杂，安全运行压力持续加大，在此背景下，确保航空器安全、有序、高效运行，始终是民航行业管理的根本目标。空中交通管制工作的运行模式可概括为：管制员借助航管雷达等监视设备，实时获取航空器的位置、高度、航向等动态信息，并依据既定的飞行规则和间隔标准，通过地空通信链路向机组发布管制指令，飞行员接收指令后执行相应的机动操作，完成从计划到执行的飞行闭环。由此可见，空管运行的安全性是一个多要素协同的系统性结果——它产生于管制员、飞行员、基础设施、运行程序和动态交通环境的持续交互之中，这种“人-机-环-管”多维嵌套的特征，决定了空管安全管理的复杂性和系统性。现阶段，面对持续增长的航班流量、日益复杂的空域环境以及频繁出现的极端天气等现实挑战，空管运行面临着容量与安全双重压力，空管系统如何在保障运行安全的前提下提升工作效能，已成为亟待解决的关键问题。

空中交通管制工作运行环境复杂，风险因素繁多且相互交织。在人为层面，管制员在高信息密度、强时间压力的工作场景中，面临情景意识衰退、指令发布错误或延迟等风险；在设备层面，航管雷达探

测盲区、航迹信息定位偏差、自动化系统告警失效、地空通话信号中断或受干扰等问题直接威胁指令传递的可靠性；在环境层面，复杂天气、空域结构限制及通航活动等外部因素进一步增加了运行的不确定性；上述风险因素并非孤立存在，任一环节的疏漏均可能在特定条件下下级联放大，最终演变为不安全事件。本文将聚焦研究空中交通管制工作中的主要风险因素，从人为因素、设备因素、环境因素和管理因素等四个维度开展危险源识别；分析西北空管现用 ATC 安全防护系统、管制员画像识别系统、气象智能服务系统等技防措施技术架构，对比技防措施应用成效，最后对技防措施的局限性和未来发展方向进行讨论，以为空管安全管理管制从“被动应对”向“主动防御”转型提供理论依据和实践参考。

2. 空中交通管制工作的主要风险因素

安全管理工作的核心在于风险管理，包括风险识别、风险评估与风险控制等三个环节。国内外有关安全管理也做了大量的研究，在安全管理模型层面，Reason 提出的瑞士奶酪模型[1] (Swiss Cheese Model) 认为，事故并非由单一失效引起，而是多层防御体系中的漏洞在特定条件下串联贯通所致，模型中，每一层防御(如组织管理、技术保障、人员操作)都像一片奶酪，存在不同程度的“孔洞”(即隐患或失效)，当各层孔洞在特定时刻形成贯通路径时，事故即发生，该模型突出了组织和管理层在事故中的系统性作用，该模型为理解空管系统中“人员-设备-环境-管理”各层面风险的累积效应提供了经典分析框架。Frank Hawkins 完善的 SHELL 模型[2]指出，人为差错的根源不在于“人”本身，而在于“人”与系统中其他要素(软件、硬件、环境、他人)之间的界面不匹配。Erik Hollnagel 提出两种安全理念的区分[3]：Safety-I 是传统的消极防御型安全观——通过识别失败原因并最小化其后果来保障安全；Safety-II 则是积极促进型安全观——通过分析并推广“什么做得好”来提升安全绩效。Dekker 提出的新理性主义模型[4] (New Rationalism)强调，应从系统整体视角理解人为差错，而非将责任简单归咎于个体。国际民航组织(ICAO)在《安全管理手册》[5]中系统阐述了安全管理体系(SMS)的核心理念，将危险源识别、风险评估与风险控制作为安全管理的三大支柱。傅贵提出的系统性事故致因模型 24Model [6]，以组织为分析主体，将事故原因划分为事件、事故、安全等基本概念，并从个人安全行为、安全能力、组织安全管理体系三个层面进行分类定义和解释。在空管安全管理风险研究方面，朱金惠[7]系统梳理了民航空中交通管理运行中的不安全因素，强调多因素耦合是导致事故征候的主要特征，通过对空管运行全流程的深入分析，指出不安全因素并非孤立存在，而是各子系统(人、机、环、管)之间的交互失效在特定条件下串联贯通所致，具有显著的多源性、耦合性与跨层级传播特征，为决策者、从业者和研究者提供了全面的不安全因素认知框架。陈钢[8]分析了无线电干扰对空管通信安全的影响及其应对策略，指出了民航无线电系统面临干扰源识别困难、频谱资源紧张、设备老化等多重挑战，无线电干扰不仅直接导致管制指令无法正常传递，还可能诱发飞行员与管制员之间的信息误判，进而影响飞行安全，提出了分级保护措施和多部门协同监测机制，并建议探索人工智能等前沿技术在民航无线电干扰监测与预警领域的应用，以提升无线电安全保障能力。张丹[9]对空中交通管制服务隐患排查及分级方法进行了深入研究，提出了基于风险矩阵的隐患分级标准，构建了四级隐患评价等级(I 级~IV 级)，并引入云模型进行定量评估，通过期望值、熵和超熵三个数字特征处理隐患评估中的模糊性和随机性，采用专家群决策方法提升评估准确性，并通过案例分析验证了该方法具有良好的可行性和适用性，为空管隐患治理从定性判断走向定量评估提供了科学工具。郭奕言[10]聚焦复杂气象条件下的管制指挥策略与风险管控，系统分析了雷雨、结冰、颠簸、低能见度、台风等复杂天气对管制工作的多重影响，指出复杂天气不仅直接改变航空器的飞行轨迹和性能，更会显著增加管制员的工作负荷和认知压力，诱发“错、忘、漏”等不安全行为，在此基础上，提出了“天气实况要更新、各项工作要主动、管制预案留余度、管制协调要规范、多方协作要配合、信息通报要及时、有效管理控风险”等一系列管制工作要点，强调在复杂天气条件下应建立前瞻性的风险管控机制，

通过提前制定绕飞方案和应急预案来前移安全防线。瞿珏茹[11]采用扎根理论结合模糊 DEMATEL-ISM-MICMAC 组合建模方法,系统识别了民航空管系统持续安全的 26 个影响因素,从中提炼出危险源管控与隐患排查治理、持续改进的安全技防手段等 6 个关键因素,并构建了分层递接模型,将影响因素划分为直接因素、中间因素和根本因素,提出了促进持续安全的 9 条建议。赵乐强[12]从通导运行风险管理的实践视角出发,结合湖南空管分局等单位通导岗位优化及新技术应用推广的实际经验,系统论述了关键设备隐患排查治理、设备分等级运行质量管理、岗位人员资质能力排查以及基于语音识别等新技术的管制防护手段在风险管理中的应用成效。上述研究分别从宏观系统建模与微观现场实践两个层面,共同印证了“技防手段的持续改进”与“危险源的系统化管控”是空管安全管理的核心着力点,为本文从“人员、设备、环境、管理”四个维度风险识别到技防系统应用的分析形成了紧密的理论基础和实践支撑。

本文识别出空中交通管制工作主要风险因素如图 1 所示。

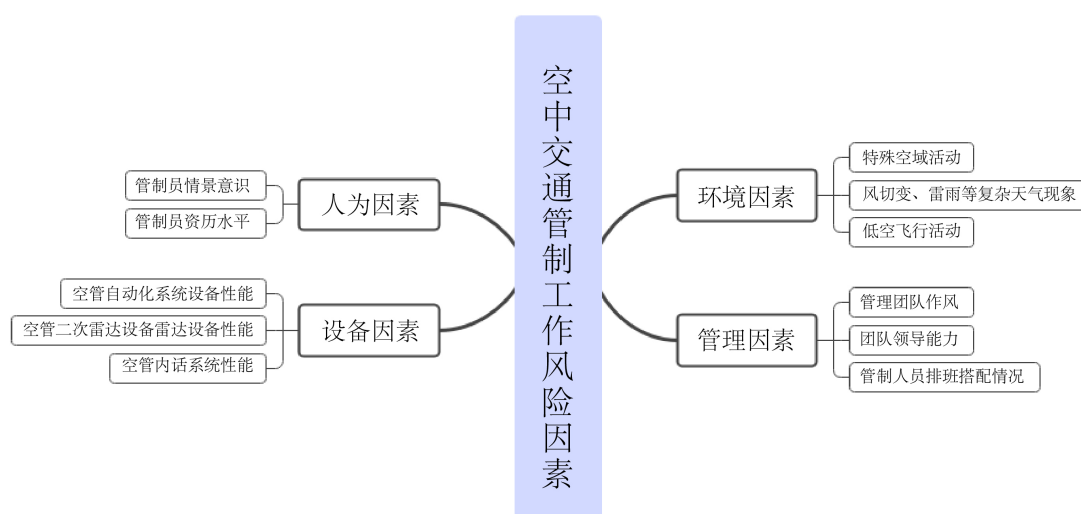


Figure 1. Risk factors in air traffic control operations
图 1. 空中交通管制工作风险因素

2.1. 人为因素

人为因素是空管安全风险的核心来源。管制员在高信息密度、强时间压力的环境中工作,需要持续保持情景意识进行态势感知、冲突判断和指令发布,认知负荷常年处于较高水平。以往典型案例表明,错误的管制指令、指令发布延迟、风险判断不足、注意力分散和信息混淆等,是导致不安全事件的关键因果节点。

管制指挥席位通常由两位管制员配合工作,同一时间监控 10 余架飞机的飞行轨迹,一人主要负责对空指挥,另一人则承担协调、监控和提醒职责,形成了“双保险”机制。但是在出现积雨云、雷暴、风切变等复杂天气时,航空器须绕路飞行,相关空域内的航空器飞行航线需临时调整,较既定飞行计划存在变化,在此期间,若管制员对相似航班号飞机识别错误、对飞行高度及速度判断偏差、发布指令不清晰等,将增加航空器飞行间隔小于规定距离的风险,人为引起飞行差错。

2.2. 设备因素

空管系统高度依赖自动化设备,设备的可靠性与告警功能的完备性直接影响安全水平。管制员通过

自动化系统显示出的航空器代码、飞行航向、速度等信息判断航空器飞行轨迹，利用话音交换设备发布指令，合理安排航空器飞行间隔，确保飞行安全。管制员指挥工作中涉及的部分安全生产关键设备风险因素有：

1) 空管自动化系统设备：空管自动化系统采用主/备运行的模式，某地主用自动化系统设备使用年限较长，硬件设备响应慢、故障率高且部分关键备件已停产，为避免安全事故发生，需定期切换主备自动化系统运行。在不影响航班运行的情况下，某地组织开展了主备自动化系统切换工作，期间出现了部分航迹信息无法同步更新的情况，严重影响管制工作的可靠性。

2) 空管二次雷达：雷达天线转速异常，信号方位偏移、航迹扭曲等常见故障，引起目标方位的偏差，影响航迹信息的准确性。

3) 内话系统：音频信号在内话系统、传输设备和 VHF 电台之间传递过程中配置不当，导致发射信号丢失的问题；管制员或飞行员按下发话键(PTT)后按键弹不回，长时间占用频率，导致其他所有人无法在该频率正常通信的问题，均影响管制指令的正常发布，威胁航空安全。

2.3. 环境因素

空管运行环境复杂多变，气象条件、空域结构、通航活动等外部因素构成重要的风险源。复杂天气如风切变、雷雨、低能见度等，不仅影响航空器飞行效能，也增加管制员的调配难度。特殊活动空域的限制和释放，要求管制员在动态变化中重新组织交通流，突发情况下的协调工作量显著增加。

因天气现象在航空安全中为不可控、可预测因素，复杂天气现象突发性强、破坏力大，部分机场探测设备配置不够全面，致使部分复杂天气现象无法及时准确预测。

2.4. 管理因素

管理因素直接影响管制员的工作状态和工作流程，好的管理团队引导着好的工作作风和工作质量，起到凝心聚力的重要作用。因管制员专注力要求高、工作强度大，日常工作中采用 2 小时轮换制，就现场管理人员而言，及时掌握管制员的工作状态尤为重要，合理调配工作搭档、安排工作时间等能够及时规避风险因素，提高管制工作安全效能。

3. 空管安全技防措施的应用

面对多维风险因素，传统“人盯人”的管控模式已难以为继。安全防护措施的核心价值在于通过技术手段将风险识别与预警前置，辅助管制员决策，弥补人为判断的局限。安全防护系统的应用也正从单一告警向“人机协同、数据驱动”的智能防护体系演进。目前，西北空管局已建成 ATC 安全防护系统、管制能力画像系统、气象智能服务系统等辅助设施，协助提高空中交通管制服务质量，提升空管安全保障水平。

3.1. 空管 ATC 安全防护系统的架构及应用

现阶段，受特殊活动、复杂天气等因素影响，西北管制区域内航空器飞行规则日益复杂，管制员发布指令的难度及数量，待协调事项增多，增加了管制员的工作负荷，影响了工作效能。为进一步减轻管制员工作期间人为引起的差错，西北空管局组织建设了 ATC (Air Traffic Control)安全防护系统，在管制员进行航空器指挥过程中，为管制员提供各类告警和提醒信息，给管制工作建立安全冗余[13]。系统的主要功能和应用效果如下。

3.1.1. ATC 安全防护系统架构

该系统整合主备自动化系统飞行航迹、主备内话系统管制语音等数据，具备管制指令冲突告警、相

似航班号告警、冲突连线提醒、语音识别等功能(如图 2 所示)。其中,最核心的管制指令冲突告警功能可以根据管制指令高度(CFL, Command Flight Level)提前预判潜在飞行冲突并进行预告警,为管制员提供宝贵的反应和调配时间,通过技防的手段有效降低管制人员在高强度管制工作中出现“漏、忘、错”不当指令的概率,减少不安全事件的发生。

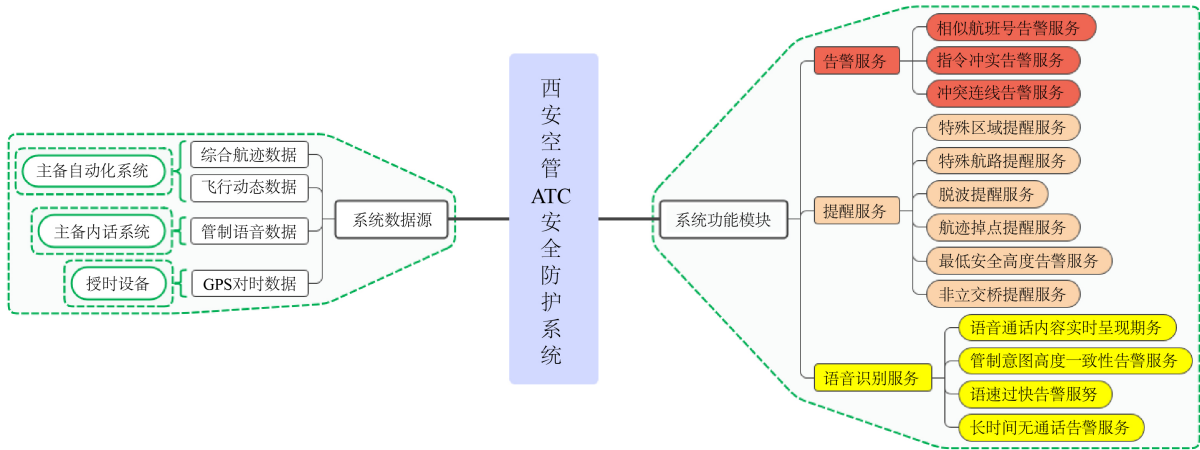


Figure 2. System architecture and functional schematic diagram of the Xi'an ATC safety protection system
图 2. 西安空管 ATC 安全防护系统架构及功能示意图

3.1.2. ATC 安全防护系统主要模块

1) 数据处理子系统

数据处理子系统实现对 ATC 安全防护辅助系统中各类数据的前置处理和融合处理,为系统功能的实现提供准确、可靠的数据支持。数据处理子系统主要包含:

① 数据前置处理模块

对飞行航迹、管制语音等数据进行清洗、集成、变换等预处理,将原始的、低可用性、异构的数据转换为具备准确性、及时性、可用性和一致性的有效数据。根据标准数据协议对飞行动态数据、综合航迹数据、管制语音数据和 GPS 信号进行解析及异常处理。

② 数据融合处理模块

在前置处理基础上,对综合航迹数据、飞行动态数据和管制语音数据进行有效融合,对融合数据进行存储管理等其他操作,为功能模块提供可靠的数据保障与支持。

2) 冲突类告警计算子系统功能

冲突类告警计算子系统为 ATC 安全防护辅助系统的核心模块,获取融合数据中的有用信息并提取数据间的关联,实现不安全事件的避免与检测,提升管制人员工作过程中的安全效能、保障航班运行安全。冲突类告警计算子系统按照功能分为指令冲突告警、相似航班号告警和冲突连线告警三个主要模块。主要模块的功能如下:

① 指令冲突告警模块

指令冲突告警模块采用指令冲突检测算法,结合管制人员指挥工作过程中发出的管制指令与被指挥的航班未来航迹进行模拟推演,运用冲突检测模型识别指令中的潜在冲突,若模型的输入数据满足判定为冲突的条件,则返回冲突告警提示。当管制输入的指令高度有冲突时,系统会在接收到自动化系统外送的指令高度数据后实时产生告警。

② 相似航班号告警模块

相似航班号告警模块采用相似航班号匹配算法，建立相似航班号识别模型，设置特定阈值，对当前系统中存在的多条实时航班号数据进行识别判断，若其相似度大于特定阈值，模型会返回判定为相似航班号的告警提示。

③ 冲突连线告警模块

冲突连线告警模块实时关注空域中所有航班之间的垂直与水平间隔，当两航班间隔满足冲突连线条件时，系统会自动连线提醒管制员当前管辖扇区内有冲突连线的航班，以避免因航班间隔过小而产生影响航班安全运行的事件。

3) 提醒类告警计算子系统

提醒类告警计算子系统是为防止管制人员“错、忘、漏”导致不安全事件出现的重要辅助工具。提醒类告警计算子系统主要包含非立交桥提醒、最低安全高度告警、航班掉点提醒、脱波提醒、特殊区域提醒和特殊航路提醒等功能。

① 最低安全高度预警模块

最低安全高度预警模块通过对航班实际地速、航向和下降率实时探测，预判航班的运行轨迹，结合雷达最低引导高度图，在管制指令高度下达及执行过程中，对航班可能突破最低安全高度的情况进行提醒。

② 脱波提醒模块

系统设置移交区域，在管制区域并且航班属于管制状态，没有标注“[”或“]”，则进行“未标注”告警；在非管制区域并且航班属于脱波状态，标注“[”或“]”，则进行“未脱波”告警。

③ 航班掉点提醒模块

航班掉点提醒模块可对管制范围内的航班运行状态进行实时监控，当某个航班信号消失后，在该航班掉点的位置将航班号进行高亮显示，提醒管制员注意该航班的后续状态。

④ 非立交桥提醒模块

对于立交桥区域，对于每条航线可预设立交桥高度校验区，使用该航线的航班需要在校验区内完成预设 CFL 高度改变，当航班在出校验区时，若航班实际 CFL 高度与规定 CFL 高度不符合，系统发出告警，提醒管制人员。

⑤ 特殊区域提醒模块

当航空器进入禁飞区、危险区、限制区等特殊区域时，对航空器进行告警提醒，管制员根据当前空域及需要动态调整特殊区域情况发布指令。如有军方穿越活动时，当航班距离穿越地带水平间隔小于预设间隔，垂直高度间隔有趋势小于最小间隔时进行告警提示。

⑥ 特殊航路提醒模块

航空器进入管制空域时，系统检测航空器报文信息，匹配目的机场和航路信息，当满足告警配置的目的机场和航路信息时，系统要发出告警提醒，提示管制人员该条航班为特殊航路航班。

4) 数据回放分析子系统

在系统的使用过程中，各种告警数据对空管运行安全的影响是非常重要的，数据分析对管制工作具有重要作用，对管制过程态势的掌握、管制人员工作评估、事件调查以及管制不安全案例的教学等具有重要意义，为指导或改进管制工作提供了有效的工具和手段。

5) 告警显示子系统

告警显示子系统是将雷达信息、告警信息及配置信息进行显示的系统，该系统接收航班数据、告警数据，在前台以图表的形式将配置信息、航班信息和告警数据呈现给管制人员。

席位终端接收告警信息,根据告警内容,在雷达显示区将告警航班进行连线并高亮处理;在告警详情区弹出告警详情窗口,包含告警的详细信息。告警的呈现方式是以图形和声音两种形式同时告警,防止管制人员疏漏告警信息。

6) 监视及控制子系统

监视及控制子系统是对系统的设备和终端硬件、各个运行子系统进行监视和控制。监控显示模块负责收集或主动检测系统内的软硬件运行状态,出现异常情况时通过颜色和声音提醒维护人员,对设备和终端上运行的主要程序进行停止和重启操作,保存监控和操作日志。监控代理软件主要负责收集本机的硬件信息上报给监控显示软件,执行监控显示软件发送的控制命令。通信中间件主要负责在监控代理和监控显示软件之间传递消息。

7) 语音识别处理子系统

① 语音通话内容实时呈现功能模块

基于人工智能语音识别技术的管制语音识别子系统,将管制席位的对话实时识别成文本,以对话形式直观展示在系统界面上,辅助管制安全指挥,提升管制运行效率。具体功能有:

接收包含音频数据矩阵的数据片段,然后进入中英文判别引擎进行中英文识别。对于识别为中文的音频使用中文识别引擎进行识别,反之则用英文识别引擎进行识别。将语音识别出的空管通话文字信息解析成空管指令,分析通话角色(管制员或飞行员),提取指令意图(上升、下降、调速、转向、偏置等)和参数(高度、速度、偏置等),并将其归类到预设场景中,最终将管制员与飞行员的通话内容按照通话的先后顺序以文字方式实时呈现,呈现内容主要有:航班号、管制意图、管制指令高度及相关频率等,为区分上下行,对管制员与飞行员语音内容分两侧显示。

② 管制意图高度一致性告警模块

管制意图高度一致性告警功能是针对管制员和飞行员陆空高度指令相关通话的语义进行的一致性监控校验功能,在管制和飞行员完成指令发送接收过程中,系统对整体过程的指令进行检测,对其中的指令要素进行一致性检测,同时提取管制员在自动化系统中输入的指令高度和机组选择的飞机拨码高度进行全面检测,如果发现不一致的情况,则发出告警。

③ 长时间无通话告警模块

长时间无通话告警模块主要监控当前扇区所管辖的所有航班的通话状态,当某个航班静默时间过长则会产生告警,提醒管制员不要遗忘该航班。静默时长的设置以该扇区管辖航班的数量为依据进行动态更新。

④ 频率不一致提示模块

频率不一致提示模块主要是监控管制员和飞行员通话上下行内容,提取通话中关于频率的关键词,将频率关键词进行比对,当发现上下行频率关键词不一致时,系统发出告警提醒。

⑤ 语速过快告警功能模块

过快的语速会导致机组听不清指令,会造成较大的安全隐患。语速过快检测提醒,可对管制员语速进行实时计算分析,当超过阈值时便进行提醒,有助于管制员及时调整自己的语速至正常范围,确保管制安全。

3.1.3. ATC 安全防护系统应用

ATC 安全防护系统于 2024 年 6 月投入使用,西北空管要求管制员在发布高度指令前在自动化系统标注 CFL,由 ATC 安全防护系统计算相邻航空器的潜在冲突,前移风险防控工作,减轻管制员的工作量,降低管制员“错、忘、漏”情景下引起工作差错的概率。为进一步量化评估 ATC 安全防护系统的实际效能,本文对系统投用前后各 12 个月的安全运行数据进行了对比分析,如图 3 所示。

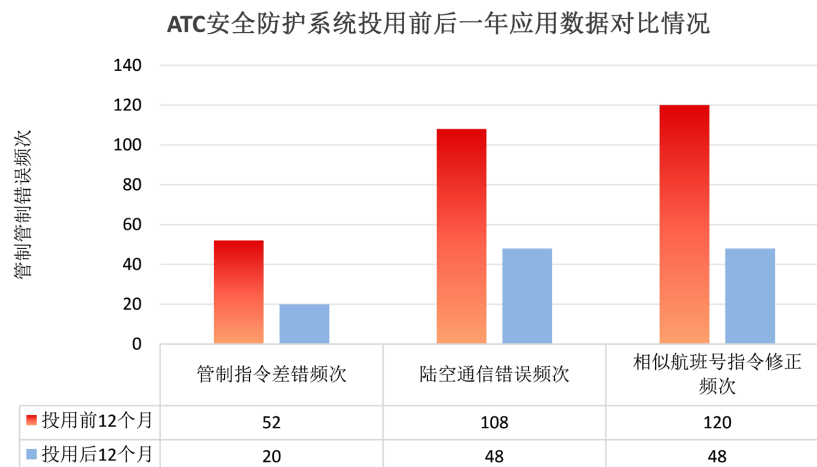


Figure 3. Comparison of application effectiveness before and after the implementation of the ATC safety protection system (one-year period)

图 3. ATC 安全防护系统投用前后一年应用效果对比

统计结果显示：在系统投用前 12 个月内，管制责任区内因指令差错(高度、航向错误)引发的最小安全间隔破坏预警事件共计 52 起，平均每月 4.3 起；系统投用后 12 个月内，该数字下降至 20 起，平均每月 1.6 起，降幅达 61.5%。同期，陆空通信错误(含频率占用失误、频率混淆、关键指令复诵不一致等)月均发生频次从系统投用前的 9 次/月下降至投用后的 4 次/月，降幅为 55.6%。此外，在相似航班号混淆方面，系统投用后因相似航班号识别错误导致的修正性指令频次从月均 10 次降至 4 次，降幅达 60%。上述数据表明，ATC 安全防护系统在冲突预警前置、指令一致性校验和相似航班号识别等核心功能上发挥了显著作用，有效降低了不安全事件的发生概率。同时也需要指出的是，ATC 安全防护系统投用后，管制员同期强化了培训工作、优化了运行流程，上述管理措施的协同推进亦对安全绩效的提升作出了贡献。这一现象恰恰印证了空管安全管理风险因素具有多维嵌套、多重联动的特征——技防措施与管理改进并非各自孤立，而是互为补充、共同作用于安全产出。

ATC 安全防护辅助系统作为管制指挥运行的技防支撑，在识别并消除潜在飞行冲突、协助管制员及时制定应急方案、对指令差错进行实时预警等方面发挥了重要作用，为空管安全指挥争取了宝贵的处置时间窗口，有效降低了安全差错率，提升了空管安全保障能力。

3.2. 管制员画像系统的主要架构及应用

空中交通管制工作适应航班量快速增长是一个系统发展的问题，空管工作的主线任务之一是持续打造一支具备高水平的空管保障人员队伍。在大数据、互联网+技术蓬勃发展的社会背景下，科学必需数据，而量化是科学的标志；当前，管制人员能力水平的评估成果主要为经验型定性分析，存在一定的主观性；且管理者对管制运行状况不能实施有效监测，很难及时了解发现管制员工作状态的变化以及潜在的安全风险。未来空中交通管制运行安全管理工作必将基于客观量化数据对管制员能力准确、清晰的判断与掌握，方能实现指挥能力数据的精细化、智能化管理。

此背景下，西北空管局组织建设了管制能力画像系统，整合综合航迹数据、飞行计划数据、管制语音数据、告警信息数据、开合扇数据、管制员资质水平文件、工作时长、指挥架次、应急处置情况等信息，结合管制运行标准和规则形成的数据指标，通过指标加权和分类，对管制员个人进行能力画像，量化管制员资历信息、通话质量、特殊保障服务质量及身心状态等指标，便于管理层快速全面了解和掌握管制员具体工作表现、优缺点、改进方面等，为排班、培训、绩效评比提供可靠参考数据，优化管制员工

作排班、改进培训计划等，增强管制队伍能力建设，提升空管工作服务水平。
系统架构示意图如图 4 所示。

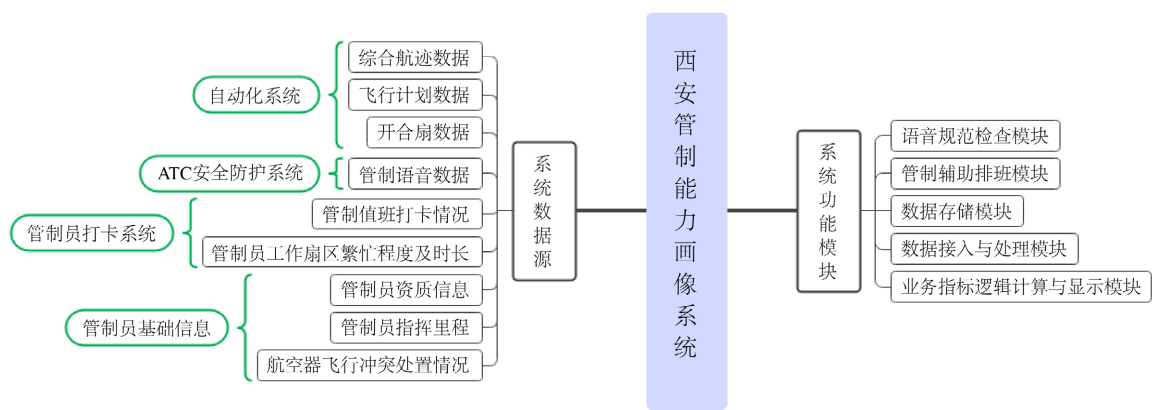


Figure 4. Architecture and functional schematic diagram of the Xi'an controller capability profiling system
图 4. 西安管制能力画像系统架构及功能示意图

空管业务管理部门利用该系统每月定期开展陆空通话质量分析监测及评估工作。基于语音规范检查模块中的关键字识别与检测功能，系统可自动复查管制工作场景，分析陆空通话的合规性，为持续改进通话质量提供可靠的数据基础。

系统自 2024 年底上线运行以来，每月自动筛查全部管制通话记录，并进行关键字分类分析研究，大大解决了人工统计分析效率滞后、数据易混淆的弊端。本文利用该系统分析了 2025 年 2 月管制陆空对话约 80 余万条语音数据，其中：管制对空指令中“立即”关键字共出现 30 次，经逐条场景复核确认，有效运行场景为 15 次，大部分“立即”指令的应用与雷雨天气绕飞指挥有关，个别场景涉及临时空域活动及跑道运行调整，均属正常的管制调配措施，暂未发现违规使用情形。针对未正确进行场景应用的关键字指令，管理部门逐一溯源分析原因，并要求一线人员加强现场管理，同步开展管制通话质量提升专项工作，监督改进管制员的不规范指令习惯，提高陆空通话质量。同时，对比分析了系统投运后 3 个月的关键字使用频次，如图 5 所示。

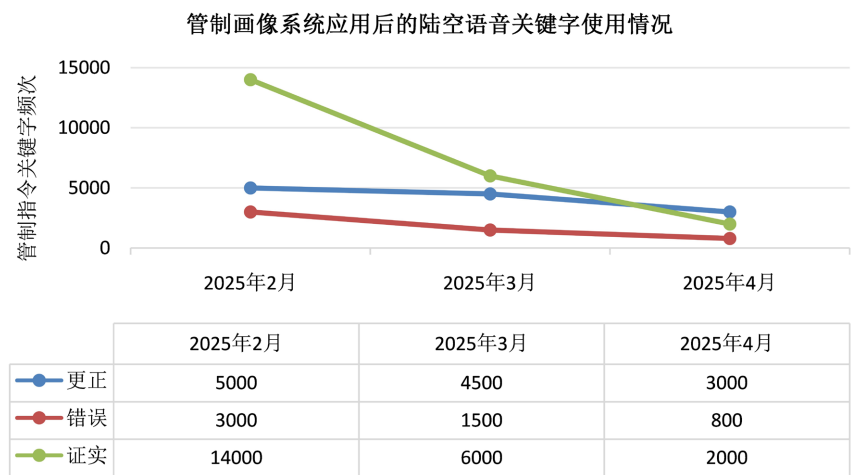


Figure 5. Usage of key words in radiotelephony communications after the implementation of the controller capability profiling system
图 5. 管制画像系统应用后的陆空语音关键字使用情况

图中数据表明,管制通话规范性、机组复诵准确性和陆空通信有效性整体有所提升。管制能力画像系统通过对管制员能力准确、清晰的判断与掌握,实现指挥能力数据的精细化、智能化管理,充分利用大数据,进行空管运行数据挖掘和分析,实现“用数据说话、用数据管理、用数据决策、用数据创新”,将管制能力评价工作从经验型转变为数据型,为空中交通管制服务水平的提升,提供技术支持手段,开启智慧空管的新篇章。

3.3. 气象智能服务系统的架构及应用

在高密度、大流量、有限空域的航空运行环境中,危险天气现象对航班安全性、正常性的影响越来越突出,对气象预报服务质量提出了更高的要求。为进一步提升气象服务精细化管理水平,西北空管局组织建设了航空气象智能服务系统。系统重点针对管制用户工作需求,实现了飞行航迹信息和气象信息的融合,增强了管制用户对气象产品的理解与运用能力,有效协助管制用户快速、准确地建立天气情景、降低管制员工作负荷。气象智能服务系统的数据源及主要功能模块如图6所示。

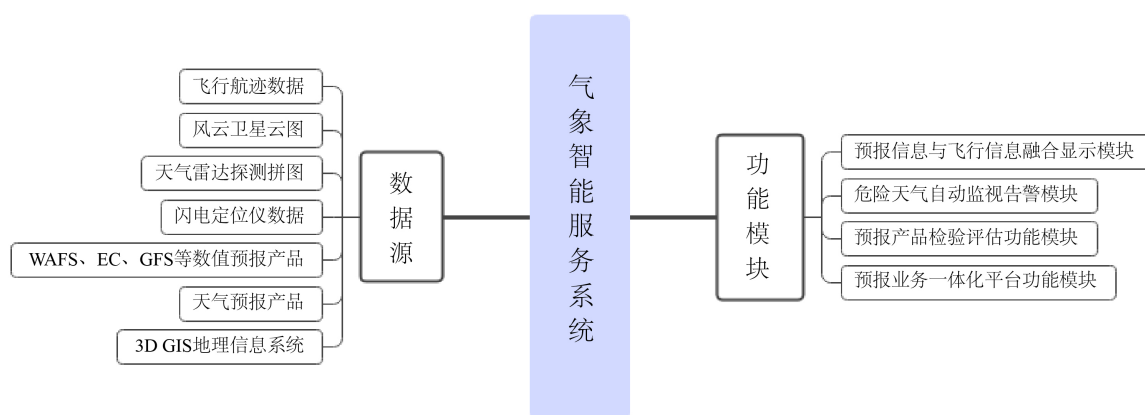


Figure 6. Architecture and functional schematic diagram of the meteorological intelligent service system

图6. 气象智能服务系统架构及功能示意图

气象智能服务系统自投用以来,获得了管制员的一致认可与积极反馈。该系统能够实时融合显示飞行航迹与气象信息,结合数值预报产品,对雷暴、云团等天气现象的演变趋势进行动态预测,在复杂气象条件下为管制指挥提供直观、及时的决策支持,显著增强了管制员对天气情景的掌控能力。

以雷雨天气绕飞场景为例,系统投用前,管制员从接收天气警报到完成所辖扇区内全部受影响航班绕飞方案的制定及首轮指令发布,平均耗时约4.5分钟;系统投用后,得益于航迹-气象信息融合显示与云团走势预测功能的支撑,该平均响应时间缩短至2.2分钟,降幅达51.1%。同期,因天气因素引发的航班间隔小于最小安全距离的预警事件,系统投用前12个月共发生16起,投用后12个月降至7起,降幅达56.3%。

气象智能服务系统核心功能是通过深度融合航空器飞行航迹、地理位置、卫星云图及数值预报等多源气象信息,匹配管制指挥习惯,以分层叠加的方式直观呈现航路航线的天气态势,使管制员能够在复杂天气条件下提前掌握天气演变趋势,及早制定绕飞方案与应急预案,从而有效降低天气因素对飞行安全的负面影响,提升空管运行的安全裕度与保障效能。

4. 空管技防措施的局限性及改进方向

第三章的实践数据表明,3套技防系统在冲突预警、能力评估和气象决策等环节发挥了实质性作用。

但技防系统的有效性建立在“人机协同”的合理边界之上——技术不能替代管制员的专业判断，亦无法消除所有运行不确定性。正视技防措施的局限性及伴生风险，既是安全管理客观性的基本要求，也是推动“人机增强智能”健康发展的认识论前提。

4.1. 技防措施的技术局限

在基础数据方面，ATC 安全防护系统的冲突告警高度依赖自动化系统外送的 CFL 输入数据，若管制员未及时或准确地在自动化系统中标注 CFL，系统将无法进行有效的冲突预判，存在“输入错误导致输出失效”的风险。在语音识别方面，应对非标准陆空通话术语、带口音英语通信以及复杂背景噪声时，系统识别准确率会显著下降；在雷雨等强电磁干扰环境下，语音识别准确率约从正常状态下的 92% 下降至 78%，对管制意图高度一致性告警的可靠性产生一定影响。在底层算法方面，冲突检测模型基于预设的冲突阈值进行判断，难以覆盖所有运行场景的多样性。例如，某些特殊机动飞行(如训练飞行、试飞)的飞行剖面超出常规模型假设，可能导致误告警或漏告警。系统运行数据显示，ATC 安全防护系统的误告警率约为 7.3%，即在产生的所有告警中约每 14 条即有 1 条为虚警。虽然这一比例在可接受范围内，但频繁的误告警仍可能影响管制员对系统告警的信任度和响应速度。

4.2. 自动化依赖与技能退化风险

技防系统的广泛应用带来了一种隐性风险——“自动化偏见”，即管制员过度依赖系统输出，削弱自身的情景判断和主动监控能力。当系统长时间无告警时，管制员可能产生“安全无忧”的心理惯性，放松对运行态势的主动扫描和预判，一旦系统失效或出现漏告警，将面临更为被动的局面。此外，长期依赖语音识别和 CFL 自动校验功能，可能导致管制员在系统离线或故障情境下的手工指令复核能力下降，即“技能退化”(skill degradation)。对此，西北空管局采取了针对性措施：一是定期组织无技防系统支持下的模拟机应急训练，强制管制员在“裸机”环境下完成复杂冲突调配，以保持管制人员预判冲突技能；二是在运行规程中明确“系统告警仅为辅助参考，管制员须对最终指令负全部责任”的原则，从制度层面防止自动化依赖习惯的蔓延。

4.3. 系统实施过程中的挑战

在系统建设与部署过程中，面临的主要挑战包括：

- 1) 数据融合的复杂性——3 套系统需对接自动化系统、内话系统、雷达数据、气象数据等多个异构数据源，数据格式、更新频率和接口协议各异，集成难度大；
- 2) 管制员的接受度与适应性——部分资深管制员初期对系统告警持抵触态度，认为频繁的告警干扰了正常的指挥节奏，需通过多次宣贯和培训逐步建立信任；
- 3) 系统升级切换期间的风险——在主/备系统切换或新功能上线期间，出现航迹数据同步延迟或告警功能临时关闭的情况，技防措施准确性降低，需配套制定严格的操作规程和应急预案，确保过渡期间的安全裕度不低于系统投用前水平。

上述挑战的经验表明，技防系统的成功应用不仅在于技术本身的先进性，更在于“技术 - 人 - 组织”三者的协同适配。

5. 结论与展望

本文围绕“空管风险因素识别与技防措施效能评估”这一核心问题，从人员、设备、环境、管理四个维度系统梳理了空中交通管制工作中的主要风险因素，并重点分析了 ATC 安全防护系统、管制员画像系统和气象智能服务系统 3 套技防措施的技术架构、应用成效及局限性。通过对系统部署前后关键安全指

标的对比,验证了上述技防措施在降低最小安全间隔破坏预警事件、减少通信错误、缩短复杂天气响应时间等方面的显著效能,将定性结论转化为有数据支撑的科学论证。基于此,本文可将空管安全管理工作提炼出以下几个原则。

5.1. 风险识别的系统性原则

空管风险具有多源性、耦合性和跨层级传播特征,任何单一维度的风险分析均不充分。主动防御体系应建立覆盖“人-机-环-管”全要素的常态化危险源识别机制,并通过数字化手段将隐患排查结果转化为可量化的风险矩阵,实现风险的动态分级管理。

5.2. 预警前置的智能化原则

传统安全管理重心在于事后调查和被动应对,而主动防御的核心在于将风险识别与预警关口前移。ATC 安全防护系统中的指令冲突告警功能即体现了这一原则——在管制员发出指令的同时即进行冲突推演和预告警,而非等到间隔已被破坏后才触发告警。这一转变将安全防线从事后补救前移至事前预防,是“被动应对”向“主动防御”转型的关键技术路径。

5.3. 能力评估的数据化原则

管制员能力画像系统的建设实践表明,人员能力评估从经验定性向数据定量转变,是提升安全管理精细度的必由之路。通过构建涵盖资质、技能、心理、疲劳等多维度的量化指标体系,管理者能够在排班、培训、绩效等管理决策中获得客观依据,避免因主观判断导致的人员配置失误。

5.4. 人机协同的适用性原则

技防系统是辅助工具而非替代品。主动防御体系应坚持“机器辅助判断、人工复核确认”的协同模式,同时通过制度设计和定期训练来防范自动化偏见和技能退化风险。系统功能设计阶段应充分考虑管制员的认知习惯和 workflows,避免“为技术而技术”的堆砌,确保人机界面的友好性和告警信息的可理解性。

5.5. 人工智能的嵌入性原则

结合当前人工智能发展趋势,空管工作模式的演进方向正从传统的“人操控工具”向“人机协同智能”转变,但也绝非简单的“机器替代人”。在这一模式下,空管需时刻跟进 AI 研究成果,帮助管制员从繁重的重复性劳动中解放出来,使其专注于关键决策。空管领域的智能化在国际上已进入从理论到实战验证的关键阶段,如英国“蓝鸟计划”(Project Bluebird)利用数字孪生技术创建英国空域的虚拟副本,用于训练 AI 智能体(AI agents)在模拟扇区中自主进行管制决策,并为此设计了全球首个正式评估 AI 管制绩效的框架“Machine Basic”,由资深管制员对 AI 的表现进行考核。欧洲“HAVEN”项目旨在构建一个结合 AI、云计算和服务架构的未来空管平台,并探索“数字管制员”(digital ATCO)概念——由 AI 自主执行常规任务,同时确保人类始终处于监控和干预的关键环节。中国民航局 2025 年也发布了关于推动“人工智能+民航”高质量发展的实施意见¹,系统性地规划了“人工智能+空管”的应用场景,并将“人工智能+安全”和“人工智能+运行”置于优先地位,重点聚焦于空管风险预警、应急响应、管制指挥与容量调控等领域的智能化升级,为从“被动应对”向“主动防御”的安全管理模式转型提供坚实的技术支撑。

¹https://www.caac.gov.cn/big5/www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/SYZCFBJD/202512/P020251202401406451206.pdf

未来空管领域还需加大几个方面的发展：一是加强大数据处理及应用技术的研究，实现能够从海量历史运行数据中自主提取冲突模式和风险特征，实现告警模型的持续迭代优化；二是从“单系统智能”向“多系统协同智能”发展，将 ATC 安全防护、管制员画像、气象服务等多套技防系统通过统一的数据平台实现信息共享和联动告警，如气象智能服务系统预测到雷暴路径后自动触发 ATC 系统对受影响扇区的冲突概率，进行预计算；三是从“辅助告警”向“辅助决策”升级，未来技防系统不仅告诉管制员“存在冲突风险”，还将基于机器学习算法提供“建议应急方案”（如建议高度层、偏置距离等），由管制员进行最终判断和确认，真正实现“人机协同、各擅其长”的理想模式。

空中交通管制工作的风险管控是一项长期工作，技防措施的有效应用为安全管理模式转型提供了有力的技术支撑，但技术本身并非终点。唯有将技术手段与制度建设、人员培训、文化塑造有机结合，方能在航班流量持续增长和运行环境日益复杂的背景下，持续夯实空管安全根基，为民航高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] Reason, J. (1990) Human Error. Cambridge University Press.
- [2] Hawkins, F.H. (1993) Human Factors in Flight. Ashgate.
- [3] Hollnagel, E. (2014) Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management. Ashgate.
- [4] Dekker, S. (2014) The Field Guide to Understanding ‘Human Error’. 3rd Edition, Ashgate Publishing.
- [5] 国际民用航空组织(ICAO). 安全管理手册(Doc9859) [M]. 蒙特利尔: ICAO, 2018.
- [6] 傅贵. 安全管理学——事故预防的行为控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [7] 朱金惠. 民航空中交通管理运行过程中的不安全因素探究[J]. 中国航务周刊, 2024(21): 78-81.
- [8] 陈钢. 浅析空中交通管制的无线电安全与挑战[J]. 上海信息化, 2025(9): 6-9.
- [9] 张丹. 空中交通管制服务隐患排查及分级研究[D]: [硕士学位论文]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2025.
- [10] 郭奕言. 复杂气象条件下民航空中交通管制指挥策略与风险管控分析[C]//北京市朝阳区国际绿色经济协会. 新业态·新市场·新动能——“绿色经济创新与重塑”会议文集(5). 2025: 7-9.
- [11] 瞿琬茹. 民航空管系统持续安全关键影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2024.
- [12] 赵乐强. 民用航空 A 空管公司运行风险管理优化研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2025.
- [13] 梁武. 西北空管进近 ATC 安全防护辅助系统的设计及应用[J]. 计算机科学与应用, 2022, 12(9): 2137-2145.