

复杂空域下航管系统的流量管理策略与动态优化

王 磊 赵义宁

四川九洲电器集团有限责任公司 四川 绵阳 621000

摘 要：针对复杂空域多扰动耦合引发的交通拥堵、管控滞后、资源利用率低等问题，本文剖析空域流量扰动特性与传统管控模式短板，融合注意力机制与LSTM网络构建流量预测模型，搭建多目标动态优化模型，结合混合智能算法求解。设计分层分级管控策略，适配多类复杂空域场景，经仿真验证，该策略可有效降低航班延误、规避运行风险、提升空域资源利用率，为空管智能化管控提供技术支撑。

关键词：复杂空域；航管系统；流量管理策略；动态优化

引言：随着民航运输业高速发展，空域交通流量持续攀升，扇区交叉、气象扰动、临时管制等复杂场景频发，传统静态航管模式难以适配动态流量变化，易引发拥堵、延误及飞行冲突，制约空域运行效能。为破解多扰动耦合下的流量管控难题，本文立足复杂空域运行特性，构建动态优化模型与全流程管控策略，通过仿真实验验证方案可行性，旨在提升空管运行的安全性、高效性与协同性。

1 复杂空域航管流量管理基础理论与特性分析

1.1 复杂空域与空中交通流量核心概念

(1) 复杂空域定义与分类：复杂空域指空域结构、运行环境或交通需求呈现显著非线性耦合特征的空域单元，典型类别包括扇区交叉空域（多扇区边界汇聚节点）、航路密集空域（主干航路交叉重叠区域）、受限空域（禁航/限制区周边）、气象扰动空域（局地天气高频突变区域），其核心特征体现为容量动态时变与运行约束强耦合。(2) 空中交通流量核心指标：流量密度（单位时间通过截面航空器架次）、空域容量（安全运行阈值上限）、航班延误率（实际/计划时间偏差）、扇区负荷（管制员工作负荷量化）、移交冲突率（相邻扇区移交航空器间隔违例频次），五类指标构成流量态势感知的基础参量体系。(3) 航管流量管理核心内涵：遵循“事前预判（战略/预战术阶段流量规划）—事中调控（战术时段动态调配）—事后优化（运行复盘与参数修正）”全流程管控逻辑，旨在实现需求与容量的动态适配^[1]。

1.2 复杂空域交通流量扰动特性分析

(1) 静态扰动因素：包括空域结构固有局限（固定限制区划设）、扇区划分非均衡（边界设计不合理）、航路交叉重叠（物理结构冲突点）、设备运行性能局限（监视/通信覆盖盲区），构成流量波动的固有背景

场。(2) 动态扰动因素：涵盖突发气象灾害（雷暴/风切变）、临时空域管制（军事活动/重大保障）、航班动态随机增减（计划外调时/取消）、航空器运行性能差异（机型速度/高度性能分化），诱发流量实时偏离。(3) 多扰动耦合下的流量拥堵传导机制：多源扰动经时空叠加形成“扰动聚集—局部容量骤降—延误累积—溢出传导—全域扩散”的级联演变规律，呈现非线性放大效应。

1.3 传统航管流量管理模式及局限性

(1) 传统静态流量管控模式：依赖固定扇区容量配置（经验阈值）、定时流量放行（固定时间窗）、人工干预调度（经验决策为主），难以适应复杂空域动态时变特征。(2) 常规动态管控手段：临时限流（源头发射间隔控制）、改航（绕飞受限区）、延误管控（地面等待/机坪延误）等策略多呈碎片化应用，缺乏全局协同优化机制。(3) 复杂空域下传统模式的核心短板：适配性差（固定模型难以刻画动态容量）、响应滞后（扰动识别与措施下发延迟）、资源利用率低（容量余量闲置与需求积压并存）、协同性不足（扇区/区域间信息壁垒导致管控孤岛），亟需引入智能化流量管理新范式。

2 复杂空域下航管系统的流量动态优化模型构建

2.1 流量优化问题建模基础

(1) 建模基本假设：设定空域运行规则假设（航路结构固定、管制移交协议明确，空域使用优先级按既定规范执行）、航班运行约束假设（各机型性能参数已知且确定，飞行计划完整并已提交审核）、环境扰动边界假设（气象数据可实时获取且预报精度在可用范围内，各类扰动影响范围可量化表征），上述假设为模型提供确定性输入边界，确保问题可形式化描述。(2) 优化目标设定：构建以最小化航班总延误时间、最大化空域资源利用效率、最低化飞行冲突风险为核心的多目标函数体系。三项目标采用加权归一化方法融合为综合效能指

标,权重系数依据实时运行态势进行动态调整,实现安全性与经济性的动态平衡,避免单一目标优化引发的系统性偏差^[2]。(3)约束条件界定:模型需严格满足空域容量约束(各扇区单位时间最大承载架次不超过安全阈值)、飞行间隔约束(同航路及交叉航路航空器间保持规定水平与垂直安全间隔)、扇区负荷约束(管制员工作负荷不超过可承受上限)、管制规则约束(高度层配备标准、移交高度与移交程序等现行规范),上述条件共同构成可行解空间的基本边界。

2.2 复杂空域流量动态预测模型

(1)多源数据融合:构建涵盖ADS-B实时航迹数据、雷达监测数据、气象格点预报数据、历史运行统计数据及航班计划数据等多源异构信息的统一融合框架,采用时空对齐与特征提取技术,经数据清洗与归一化处理形成高置信度的流量态势感知数据集,为预测模型提供可靠输入。(2)时序流量预测算法:引入基于长短期记忆网络与注意力机制融合的动态流量时序预测模型,有效捕捉空域扰动下的非线性流量演化特征与长程依赖关系,实现未来15分钟、30分钟、60分钟三个关键时间尺度的扇区流量滚动预测,预测精度较传统时序模型显著提升。(3)拥堵风险预判机制:基于预测流量与动态运行容量的偏差分析,构建短时(分钟级)突发性拥堵预警与中长时(小时级)趋势性拥堵风险评估的双层级预警体系,输出风险等级、空间位置指向及可能持续时间,为前瞻性管控决策提供可靠信息支撑。

2.3 多目标流量动态优化模型搭建

(1)空域扇区动态适配模型:依据实时流量分布态势与预测趋势,建立扇区边界动态调整策略与负荷均衡分配算法,通过扇区开合操作、边界平移、高度层重新配置等手段,实现空域容量资源与交通流量需求的时空动态匹配,缓解局部过热问题。(2)航班流调度优化模型:构建以航班起飞时刻动态调整、飞行航迹重规划、移交序列优化排序为决策变量的多维度调度优化模型,采用滚动时域优化策略,在扰动发生后的有限时间窗口内快速生成最优调配方案,兼顾调控效果与计算效率。(3)多区域协同优化模型:建立跨扇区、跨区域流量调度冲突的系统性识别与消解机制,通过区域间协同决策与信息共享框架,实现上下游扇区容量资源的有效匹配与流量有序衔接,有效避免局部优化引发的次生拥堵,保障复杂空域全域流量的均衡高效运行^[3]。

2.4 优化模型算法求解

(1)智能优化算法选型:对比分析改进遗传算法(全局搜索能力强、适配离散与连续混合变量)与模拟退火

算法(局部寻优精度高、收敛特性稳定)在复杂空域多约束流量优化问题中的适用性,设计混合编码策略充分发挥两者互补优势,提升算法对复杂约束的综合处理能力。(2)算法流程优化:设计自适应交叉变异算子与动态降温调度策略,引入精英保留机制保证最优解不丢失,结合并行计算架构加速大规模优化求解过程,显著提升多目标、多约束复杂场景下模型的求解效率与帕累托解集质量。(3)模型有效性校验:从算法收敛性(迭代曲线平滑度与收敛代数评估)、稳定性(多次独立运行解集方差分析)和适配性(不同拥堵等级场景下可行解生成成功率)三个维度开展系统性验证,确保模型在多样化复杂运行场景中具备可靠的应用效能与泛化能力。

3 复杂空域下航管系统的流量动态管理策略与仿真验证

3.1 分层分级流量动态管理策略体系

(1)事前预防性管控策略:基于历史运行规律挖掘与实时预测数据驱动,开展空域容量精细化预评估与运行瓶颈超前识别,对航班计划实施前置优化调整(涵盖时刻资源合理分配、航路选择预协调及备降方案预规划),构建多层级风险提前规避机制,在战略与预战术阶段奠定有序运行基础,最大限度减少被动调控需求。(2)事中实时调控策略:依托实时空域态势感知与短时预测结果,综合运用动态限流(基于容量余量自适应调整间隔)、智能改航(结合气象与拥堵态势动态规划替代航路)、扇区负荷转移(跨越扇区边界实施动态负荷再分配)、多席位协同管控(联合态势研判与协同决策)等技术手段,实现各类扰动条件下的快速响应与流量动态重配,确保系统运行平稳过渡。(3)事后复盘优化策略:对全运行周期数据进行系统化复盘分析,精准定位拥堵时空分布特征与管控措施有效性差异,将经验知识转化为策略参数调整依据与规则优化建议,构建“评估诊断—反馈修正—迭代提升”的闭环优化机制,实现管理策略体系的持续演进与智能化升级。

3.2 典型复杂空域场景专项管控策略

(1)密集航路交叉空域流量管控策略:针对交叉点冲突风险高发与多向流量汇聚的突出矛盾,设计分层分类冲突解脱预案与间隔动态调整方案,通过航向偏置、高度层精细分配、穿越次序动态优化等手段,有效降低交叉点瞬时汇聚压力与冲突概率,保障高密度运行条件下的航班有序安全通过,同时建立冲突风险的滚动监测与预警触发机制,确保管控介入的及时性与精准性。(2)气象扰动空域流量管控策略:面向雷暴、风切变、大雾等恶劣天气条件,构建动态改航规划机制与容量动

态降级/恢复响应流程,依据气象演化趋势与空域可用性时空变化,实现流量调配措施的渐进式触发、梯度调整与有序撤销,最大程度削减气象因素引发的运行震荡与次生拥堵,同时设计容量恢复期的过渡调配方案,防止解除限制后引发二次积压^[4]。(3)临时受限空域流量管控策略:针对军事活动、重大保障等临时空域限制事件,设计受限区域流量分流机制与空域资源临时重构方案,通过航路替代、高度层重新配置、扇区功能临时调整等手段,在严格约束条件下维持系统基本通行能力与运行连续性,并建立受限状态解除后的流量平滑恢复机制,保障系统从受限到常态的平稳过渡。

3.3 仿真实验设计与结果分析

(1)仿真场景搭建:选取具有代表性的典型复杂空域(如某区域主干航路交叉扇区群)作为仿真验证对象,设计常规运行场景(常态流量与标准气象)、拥堵演化场景(高峰流量叠加局部受限)及突发扰动场景(突发恶劣气象与临时管制复合作用)三类代表性工况,全面覆盖不同运行态势与复杂程度,确保验证结论的普适性。(2)仿真参数设置:系统录入空域结构数据(航路网络拓扑、扇区边界划分及高度层配置)、航班流量数据(飞行计划与实际运行时刻)、环境扰动数据(气象格点预报、临时限制区动态信息)、管制约束参数(间隔标准、容量安全阈值及负荷上限)等核心输入,确保仿真环境具备充分的真实性与可信度,参数取值均源于实际运行数据统计结果^[5]。(3)仿真结果对比:将本文提出的优化策略体系与传统管控模式在同一场景集合下开展对照仿真,从航班平均延误时间、拥堵持续时空范围、空域容量利用率、冲突告警频次及改航成功率等多维度进行定量对比分析,结合统计显著性检验,系统验证本文策略在各类复杂场景下较传统模式的综合效能优势与适应性差异,明确策略的适用边界与提升空间。

3.4 策略应用效果评估

(1)效率指标评估:系统统计空域资源利用率的提

升幅度、航班准点率的改善比例以及单位时间通行架次的增益效果,量化分析策略体系在运行效率维度的实际贡献水平,并分场景呈现效率提升的差异性特征。(2)安全指标评估:全面监测飞行冲突率的变化趋势、管制员工作负荷指数的分布特征以及运行风险事件的发生频次,综合评价策略在扰动条件下对运行安全保障水平的实际提升作用,验证安全与效率目标的协同优化效果。

(3)综合效益分析:统筹安全裕度、运行效率与调控成本(含改航里程增量、延误经济成本及管制额外工作投入)三方因素,采用多属性综合评估模型,对策略体系的全场景适应性、经济合理性及工程可推广性进行系统评判,形成兼顾安全底线、运行效率与实施成本的最优平衡方案,为实际空管系统的工程化应用与部署提供可靠决策依据。

结束语

本文围绕复杂空域流量管控难题,系统完成机理分析、模型构建、策略设计与仿真验证,形成了事前预防、事中调控、事后优化的闭环动态流量管理体系。所提方法有效解决了传统管控模式资源利用率低、响应速度慢等问题,可适配多类复杂空域运行场景。后续将进一步优化智能算法性能,提升极端扰动场景适配能力,推动航管流量动态优化技术的实际工程落地应用。

参考文献

- [1]张军,李海飞.复杂受限空域下空中交通流量动态调度优化策略[J].航空学报,2023,44(07):312-323.
- [2]王超,刘思远.基于动态容量感知的空域交通流量精细化管理方法[J].交通运输工程学报,2024,24(02):189-198.
- [3]陈嘉铭,周洁敏.高密度复杂空域航管流量协同优化控制研究[J].南京航空航天大学学报,2022,54(05):812-819.
- [4]杨磊.不确定性空域环境下空中交通流量动态管控策略[J].飞行力学,2023,41(09):76-82.
- [5]吴宇轩.复杂空域结构下航管系统流量调度优化仿真分析[J].民航学报,2025,11(03):98-102.