

# 数字孪生技术助力民航空中交通管理

史磊

广州白云国际机场股份有限公司运行控制中心 广东 广州 510000

**摘要：**数字孪生技术通过构建物理机场与虚拟数字机场的双向交互融合体系，为民航空中交通管理提供全要素、全流程、全场景的智能化支撑。该技术依托高精度建模、物联网感知与大数据分析，实现航班运行态势实时推演、机位资源智能分配、滑行路径优化及冲突预警，有效提升空域资源利用率与地面保障效率，助力构建空地一体化的协同运行决策中枢。

**关键词：**数字孪生技术；民航空中交通管理；关键技术；典型应用

引言：随着全球民航业快速发展，空中交通流量持续增长，传统空管模式面临空域资源紧张、协同效率不足等挑战。数字孪生技术通过构建物理空域与虚拟镜像的实时映射系统，能够精准模拟航班运行态势、动态优化管制指令，并提前预判冲突风险。这一技术为破解空管系统“信息孤岛”难题、提升空域容量利用率提供了创新路径，正成为推动民航空管向智能化、协同化转型的核心驱动力。

## 1 数字孪生技术赋能空管的理论基础

### 1.1 数字孪生核心内涵与五维模型

(1) 数字孪生的核心在于物理实体、虚拟模型、孪生数据、服务及交互连接的动态耦合。物理实体涵盖空管领域的航空器、机场跑道、雷达站等各类设施设备；虚拟模型是对物理实体的精准数字化复刻；孪生数据整合多维度信息形成数据支撑；服务依托模型与数据提供空管决策等支撑；交互连接则保障虚实两端实时联动，实现数据双向流通与动态适配。(2) 其核心特征体现为虚实同步、迭代优化与全生命周期映射。虚实同步确保虚拟模型与物理实体状态实时一致；迭代优化依托数据反馈持续完善模型精度与服务能力；全生命周期映射则覆盖空管设施从规划建设到运维报废、航班从起飞到降落的完整流程。

### 1.2 空管领域的技术适配性分析

(1) 契合空管多源数据融合需求，能够整合雷达监测数据、ADS-B航班定位数据、气象观测数据及航班调度信息等，打破数据孤岛，为空管决策提供全面数据支撑。(2) 适配高精度仿真与实时决策需求，通过精准虚拟建模实现航班运行场景仿真推演，提前预判潜在冲突，助力空管人员快速制定最优调度方案。(3) 匹配跨部门协同与资源动态调配需求，打通空管、机场、航空公司等多部门信息链路，实现空域资源、机场设施等动

态优化配置，提升运行效率<sup>[1]</sup>。

### 1.3 数字孪生与传统空管系统的对比优势

(1) 实现从“被动响应”到“主动预判”的范式转变。传统空管多在冲突发生后被动处置，数字孪生依托实时数据与仿真推演，可提前识别航班运行风险，主动规避冲突，提升运行安全性。(2) 实现从单一系统优化到全局协同的效能提升。传统空管优化多局限于单一环节或系统，数字孪生能够统筹空管全链条要素，实现空域、航班、设施等全局协同优化，大幅提升整体运行效能。

## 2 数字孪生技术在民航空中交通管理中的关键技术

### 2.1 数据采集与融合技术

(1) 物联网(IoT)传感器部署。围绕空管核心要素构建全域感知网络，在航空器上部姿态传感器、发动机状态传感器、气象传感器等，实时捕获飞行姿态、动力参数、机舱环境等核心数据；在地面设备端，对跑道灯光系统、塔台通信设备、导航雷达等关键设施安装状态监测传感器，保障地面保障系统稳定运行；在环境参数感知方面，整合机场周边气象站、空域气象雷达、能见度传感器等数据资源，精准获取风速、风向、降水、能见度等影响飞行安全的环境信息<sup>[2]</sup>。(2) 多源异构数据清洗与标准化处理。空管系统采集的数据存在来源分散、格式异构、质量参差不齐等问题，需通过专业技术进行处理。数据清洗环节重点剔除异常值、缺失值和重复数据，采用统计分析、机器学习等方法修复数据偏差，保障数据准确性；标准化处理则针对不同类型数据制定统一规范，如对航空器数据采用ARINC429标准格式转换，对气象数据按照WMO标准进行规整，实现多源数据在格式、语义、时空基准上的统一，为后续数据融合与应用奠定基础。

### 2.2 高精度建模与仿真技术

(1) 基于BIM+GIS的机场三维场景构建。融合建筑

信息模型(BIM)与地理信息系统(GIS)技术,实现机场全域场景的精细化建模。利用BIM技术对航站楼、跑道、滑行道、停机位等建筑设施进行三维参数化建模,精准还原设施内部结构与构件信息;结合GIS技术整合机场周边地形、地貌、交通路网等地理空间信息,构建涵盖空中、地面、地下的全维度机场三维场景。通过两者融合,实现场景模型的空间精准定位与多维度信息关联,为机场运行调度、设施维护等提供直观的可视化支撑。(2)飞行器动态行为建模与气动仿真。基于航空器设计参数、飞行手册数据及实时飞行数据,构建高精度飞行器动态行为模型,精准复刻航空器在不同飞行阶段(起飞、巡航、降落)的运动特性、动力响应及操控逻辑。结合计算流体力学(CFD)技术开展气动仿真,模拟不同气象条件、飞行姿态下的气流分布与气动载荷变化,预判航空器在复杂环境下的飞行状态变化。通过动态建模与气动仿真的结合,可实现对飞行过程的精准模拟,为飞行安全预警、飞行路径优化等提供技术支撑。

### 2.3 实时交互与反馈控制技术

(1)数字孪生体与物理实体的双向数据链路。构建低延迟、高可靠的双向通信链路,实现数字孪生体与航空器、地面设备、导航系统等物理实体的实时数据交互。一方面,物理实体的实时运行数据通过5G、卫星通信等技术高速传输至数字孪生系统,驱动虚拟模型同步更新;另一方面,数字孪生系统的优化决策、控制指令通过链路反向传输至物理实体,实现对空管设施、飞行状态的精准调控。链路采用冗余设计与数据加密技术,保障数据传输的稳定性与安全性<sup>[3]</sup>。(2)基于AI的异常检测与自修复机制。依托人工智能技术构建智能监测模型,对数字孪生体映射的实时运行数据进行持续分析,精准识别航空器故障隐患、地面设备异常、通信链路中断等风险问题。针对可自动修复的轻微异常,系统自动生成修复指令并通过反馈链路下发至物理实体,实现故障的快速处置;对于严重异常,及时发出预警信号并推送最优处置方案,辅助工作人员快速响应,最大限度降低故障对空管运行的影响。

### 2.4 智能决策支持技术

(1)机位分配、滑行路径规划的优化算法。结合机场实时运行数据(航班到达时间、旅客流量、地面车辆调度)与历史数据,构建多目标优化模型,采用遗传算法、粒子群优化等智能算法,实现机位分配的高效匹配与滑行路径的最优规划。机位分配优化以缩短旅客中转时间、减少地面设备调度冲突为目标,滑行路径规划则重点规避拥堵路段、缩短滑行时间,提升机场地面运行

效率。(2)应急场景下的资源调度仿真推演。针对航班延误、恶劣天气、设备故障等应急场景,基于数字孪生平台构建仿真推演模型,模拟不同应急处置方案下的资源调度效果。通过对救援车辆、地勤人员、备用设备等资源的动态配置仿真,预判方案的实施效率与潜在风险,为工作人员提供最优应急决策方案。同时,可通过仿真推演开展应急演练,提升工作人员的应急处置能力,保障空管系统在突发情况下的平稳运行<sup>[4]</sup>。

## 3 数字孪生赋能民航空中交通管理典型应用

### 3.1 机场运行协同管理

以广州白云机场数字孪生系统为典型实践,该系统通过全域数字化映射实现机场运行各环节的协同联动,大幅提升运行效率与管控精度。(1)飞行区态势感知。构建覆盖飞行区全域的数字孪生场景,整合航空器ADS-B数据、地面车辆GPS定位、廊桥状态传感器等多源数据,实现航空器滑行、停靠,地面保障车辆调度,廊桥对接等状态的实时可视化监控。系统可自动标记异常行为,如车辆偏离路线、廊桥对接超时等,为调度人员提供精准决策依据,规避运行冲突。(2)机位智能分配与航班靠桥率提升至85%。基于数字孪生平台的历史运行数据与实时航班信息,通过智能算法动态优化机位分配方案,综合匹配航班机型、旅客流量、地面保障能力等要素。借助系统仿真推演验证方案可行性,有效减少机位冲突,将航班靠桥率提升至85%,显著提升旅客出行体验与地面保障效率。(3)虚实同步的应急演练与资源调度。在数字孪生场景中复刻极端天气、设备故障等应急场景,开展虚实同步的应急演练。通过仿真推演不同调度方案的实施效果,优化救援车辆、地勤人员、备用设备的调配路径与响应时序,提升应急处置的科学性与高效性,降低突发事件对运行的影响。

### 3.2 航班全流程预测与优化

深圳国际航空枢纽依托数字孪生技术,实现航班全流程的精准预测与资源动态调配,助力枢纽高效运转。(1)基于数字孪生的航班起降时间预测。整合航空器实时运行数据、机场运行状态、空域气象条件等多维度信息,构建航班起降时间预测模型。通过数字孪生系统模拟不同因素对航班运行的影响,精准预测航班实际起降时间,预测误差较传统方法降低30%以上,为后续保障环节预留充足准备时间。(2)地面交通资源的动态调配。基于航班预测数据与实时旅客流量,对摆渡车、行李转盘等地面交通资源实施动态调配。数字孪生系统可实时监控资源使用状态,当出现航班延误、旅客拥堵等情况时,自动调整摆渡车发车频次、优化行李转盘分配方

案,实现资源供给与运行需求的精准匹配,减少旅客等待时间。

### 3.3 空域安全与容量提升

针对东南沿海空域繁忙的特点,借助数字孪生技术开展流量模拟与协同管控,提升空域运行安全与容量。

(1) 数字孪生驱动的空域冲突预警与规避。构建东南沿海空域数字孪生模型,实时映射航空器飞行轨迹、速度、高度等关键数据。通过仿真模拟航空器飞行态势,提前预判潜在的空域冲突风险,生成最优规避路径并推送至空管调度中心与航空器机组,实现冲突的提前预警与主动规避,提升空域运行安全。(2) 军民航空域协同使用的仿真验证。在数字孪生平台中构建军民航空域协同运行场景,模拟不同空域划设方案、飞行航线规划下的运行效果。通过仿真验证方案的可行性与安全性,优化军民航空域资源配置,提升空域整体利用率,缓解繁忙空域的运行压力。

### 3.4 设备预测性维护与能效管理

以罗尔斯·罗伊斯公司航空发动机健康监测实践为代表,数字孪生技术实现设备全生命周期的智能化维护与能效优化。(1) 通过传感器数据预测剩余使用寿命(RUL)。在航空发动机关键部件部署海量传感器,实时采集温度、压力、振动等运行数据,传输至数字孪生模型。基于大数据分析机器学习算法,精准评估发动机健康状态,预测剩余使用寿命(RUL),提前识别潜在故障隐患。(2) 减少非计划停机时间与维护成本。依托剩余使用寿命预测结果,制定个性化的预测性维护方案,将传统事后维修、定期维修转变为精准的预知维修。此举可有效减少非计划停机时间,降低维护成本,经实践验证,发动机非计划维修率降低40%以上,维护成本节约25%左右,同时提升发动机运行能效与可靠性。

## 4 数字孪生在民航空交通管理应用中的挑战与对策建议

### 4.1 主要挑战

(1) 数据安全与隐私保护。空管数字孪生应用涉及海量敏感数据,如航班轨迹、机场运行数据等,此类数据若泄露或被滥用,将威胁航空安全与公共利益,如何实现数据脱敏处理、保障传输与存储安全,成为核心难题。(2) 跨系统标准不统一。当前空管领域存在多系统

壁垒,尤其是军用与民用空管在数据协议、技术规范上差异显著,导致多源数据难以高效融合,数字孪生模型的全域映射与协同运行受阻。(3) 高端人才短缺与复合型技术团队培养。数字孪生技术融合空管业务、大数据、人工智能等多领域知识,目前兼具空管实操经验与数字技术能力的复合型人才稀缺,制约技术落地与迭代升级。

### 4.2 对策建议

(1) 构建国家级空管数字孪生数据共享平台。依托国家层面统筹规划,建立数据安全规范,集成数据脱敏、加密传输等技术,实现跨区域、跨部门数据安全共享,打破数据壁垒。(2) 推动国际标准制定与军民融合技术攻关。牵头联合国内外相关机构制定统一的技术标准与数据协议,深化军民协同攻关,推动军用先进技术向民用转化,实现空管系统标准协同。(3) 加强产学研合作培养“空管+数字孪生”跨界人才。推动高校、科研院所与空管企业共建实训基地,开设跨界专业课程,定向培养兼具业务素养与技术能力的复合型人才,夯实人才支撑。

### 结束语

数字孪生技术以其强大的数据融合与动态模拟能力,为民航空交通管理开辟了智能化新维度。它不仅重构了空管系统的决策逻辑,更通过虚实交互实现风险预判与资源优化,为应对日益复杂的空域环境提供了坚实技术支撑。展望未来,随着数字孪生与AI、5G等技术的深度融合,民航空管将迈向全要素感知、全流程自主的智慧化新阶段,为全球航空运输业的高质量发展注入持久动能。

### 参考文献

- [1]高中秋.分析我国民航空交通管理问题及改进措施[J].中国航班,2021,(18):81-82.
- [2]杜岸洲.民航空管安全管理中的人为因素问题探讨[J].军民两用技术与产品,2020,(12):102-105.
- [3]高振亭.网络安全技术在民航空管信息系统中应用的研究[J].电子世界,2022,(19):76-78.
- [4]刘佳伟.民航空交通管理运行过程中的不安全因素探究[J].科技资讯,2020,17(05):118-120.