DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.07.010

空中交通智能化管理的科学与技术问题研究

朱永文[1]，陈志杰[1*]，蒲钒[1]，王琦[2]

（1. 国家空域技术重点实验室，北京 100085；2. 国家空管科技自主创新基地，北京 100028）

摘要：空中交通正呈现大流量、强耦合、高时变特点，为保障运行的顺畅、高效与安全可靠，需要发展以数字化、自主化、协同式为典型特征的空中交通智能化管理模式。本文在阐述当前及未来一段时期内空中交通管理需求背景的基础上，立足发展趋势，从交通管制、空域管理、流量控制3个方向剖析了传统空中交通管理面临的挑战，凝练了空中交通智能化管理涉及的航空器与空管基础设施相互作用机理和模式、基于可接受风险的航空器间隔空地协同控制、多要素形态非一致规则的空域运行建模优化、高密度空中交通流演化机理与拥堵传播特性等基础科学问题。研究建议，集成应用卫星互联网、大数据、数字孪生、云计算等前沿技术，从航空器、空域、管制决策、运行等方面着手构建空中交通智能化管理技术体系，从而确立新一代空中交通管理系统的技术基础。

关键词：空中交通；智能化管理；人工智能；数字化空域；空地自主协同

中图分类号：TP3　　**文献标识码：**A

Scientific and Technological Issues for the Intelligent Management of Air Traffic

Zhu Yongwen[1], Chen Zhijie[1*], Pu Fan[1], Wang Qi[2]

(1. Key Laboratory of National Airspace Technology, Beijing 100085, China; 2. Independent Innovation Base of National Air Traffic Control Technology, Beijing 100028, China)

Abstract: Air traffic is exhibiting the characteristics of large flow, strong coupling, and high time variation. To ensure its smooth, efficient, safe, and reliable operation, an intelligent model for air traffic management that features digitalization, automation, and collaboration needs to be developed. This study reviews the current and future demand for air traffic management and analyzes the challenges faced by traditional air traffic management from the aspects of traffic control, airspace management, and flow control. It also summarizes four basic scientific problems: interaction mechanism and mode between aircraft and air control infrastructure, air–ground coordinated control of aircraft intervals based on acceptable risks, airspace operation modeling and optimization considering multiple factors and based on non-uniform rules, and evolution mechanism and congestion propagation features of high-density air traffic flow. Moreover, it is suggested to integrate the application of satellite Internet, big data, digital twin, cloud computing, and other frontier technologies, and build an intelligent management technology system for air traffic from the aspects of aircraft, airspace, control decision-making, and operation, thereby laying a technical foundation for the construction of a next-generation air traffic management system.

Keywords: air traffic; intelligent management; artificial intelligence; digital airspace; air–ground autonomous cooperation

收稿日期：2022-10-27；**修回日期：**2022-12-25

通讯作者：*陈志杰，国家空域技术重点实验室研究员，中国工程院院士，研究方向为空中交通管理系统技术； E-mail: zj-chen@vip.sina.com

资助项目：中国工程院咨询项目“我国空中交通智能化发展战略研究”(2022-XBZD-04)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

空中交通管理简称“空管”，是支持经济社会发展的国家基础设施，所支撑的航空经济规模以及辐射带动量超过国内生产总值的17%；在“空天地”一体化航行体系的支撑下，组织管理国家空域资源、航空运输行业，同时服务航空制造、通用航空等战略新兴产业发展。我国航空运输发展迅速，预测2028年行业规模将居世界首位[1]。在此背景下，国家空域系统保持高密度飞行态势，对空管科技发展提出了严峻挑战：有人–无人驾驶航空器混合高密度飞行成为常态，现行管制方式难以应对，新的空管规则有待建立；空管的主导因素在于人而人工保障通常超负荷运行，低效率导致的航班延误成为社会焦点，碳排放水平居高不下，新的空管技术亟待发展；城市空中运输[2]、临近空间飞行、高频率航天发射等新需求涌现，新的空管模式以及新一代空管系统装备需要突破。

为积极应对未来超大规模航空市场的发展需求和相关的环境约束挑战，国际民用航空组织（ICAO）牵头发布了全球空中航行计划、航空系统组块升级计划；国际航空运输协会着眼于应用新技术改进航空服务，联合国际机场协会推出了新技术旅行新体验项目。在ICAO的统一发展框架下，航空强国提出了新一代航空运输系统（NextGen）、航空战略实施计划，欧洲空中交通管理总体规划、2050+机场计划、欧盟航空安全局（EASA）人工智能发展路线图等[3]；发布了城市空中交通纳入NextGen、欧洲单一天空空中交通管理项目（SESAR）等规划，描绘了空中交通智能化发展愿景，以适应未来新型航空器、智能航空器的规模化应用趋势。中国民用航空局空中交通管理局组织制定了中国民航空管现代化战略（2016年），作为中国版的NextGen、SESAR，引导开展机场运行、信息协同、容量优化、高效航迹等方向的规划建设，旨在加强全系统信息管理、气象信息服务、数字化情报管理等基础信息服务能力，完善数据链通信、综合导航、多元监视等基础设施，着重提升全阶段数字化管制、全国飞行流量管理等运行能力，逐步形成安全高效的空中交通管理体系。

值得指出的是，我国在空中交通管理智能化发展方面进行了规划和细化研究，但有关整体技术架构、具体发展路径尚未形成共识。本文在梳理空中交通管理新趋势及新需求的基础上，研判面临的新挑战，凝练智能化发展涉及的基础科学问题并提出技术研究重点，以期为智能化空中交通管理系统构建研究提供基础参考。

二、空中交通管理的新趋势、新需求与新挑战

作为空地一体航行系统的核心，空中交通管理细分为三方面：面向飞行活动实施统一监督、管理和控制的交通管制，面向结构、兼顾军/民航用空需求、统筹空域规划使用的空域管理，面向交通群服务空中交通安全有序、快捷流通的流量控制。未来的空中交通将广泛应用人工智能（AI）、大数据、云计算、传感网等新兴技术，依托空间基础设施，形成安全、高效、协同、绿色以及人享其行、物优于流的应用能力（见图1）；建立全场景数字化处理、智能化支撑的空中交通新模式，支持便捷品质的大众出行、综合立体交通体系建设，保障持续服务经济社会发展的关键能力。

（一）运行场景从单一运输航行转向多元异构飞行

1. 绿色智能的空中交通自主化飞行

随着智能态势感知、自主飞行控制、电推进及清洁能源等技术趋于成熟，空中飞行朝着智能自主方向发展。罗兰·贝格国际管理咨询公司预测，2050年全球将有9.8×10^4架智能航空器用于空中出租、机场班车、城际航班等服务。智能航空器依据申报的飞行计划，自主进行态势感知；按照空域使用状态、周边飞行态势以及气象情况，自主进行飞行路径规划；在最佳路径条件下自适应调整飞行状态，以实现与其他航空器、航路航线网络、航空基础设施、空管系统、地面车辆之间的一体化协同管理。

2. 安全便捷的空管个性化定制服务

根据EASA预测[3]，到2050年欧洲需要保障2.5×10^8架次航空飞行，航空器类型包括有人驾驶航空器、形态各异的无人驾驶航空器；运行场景涵盖中高空客货运输、低空空中城铁、空中出租、城市物流、集中监控、战场中继、边防巡逻等。航空器起飞/降落形式多样，飞行速度及剖面分布不均，

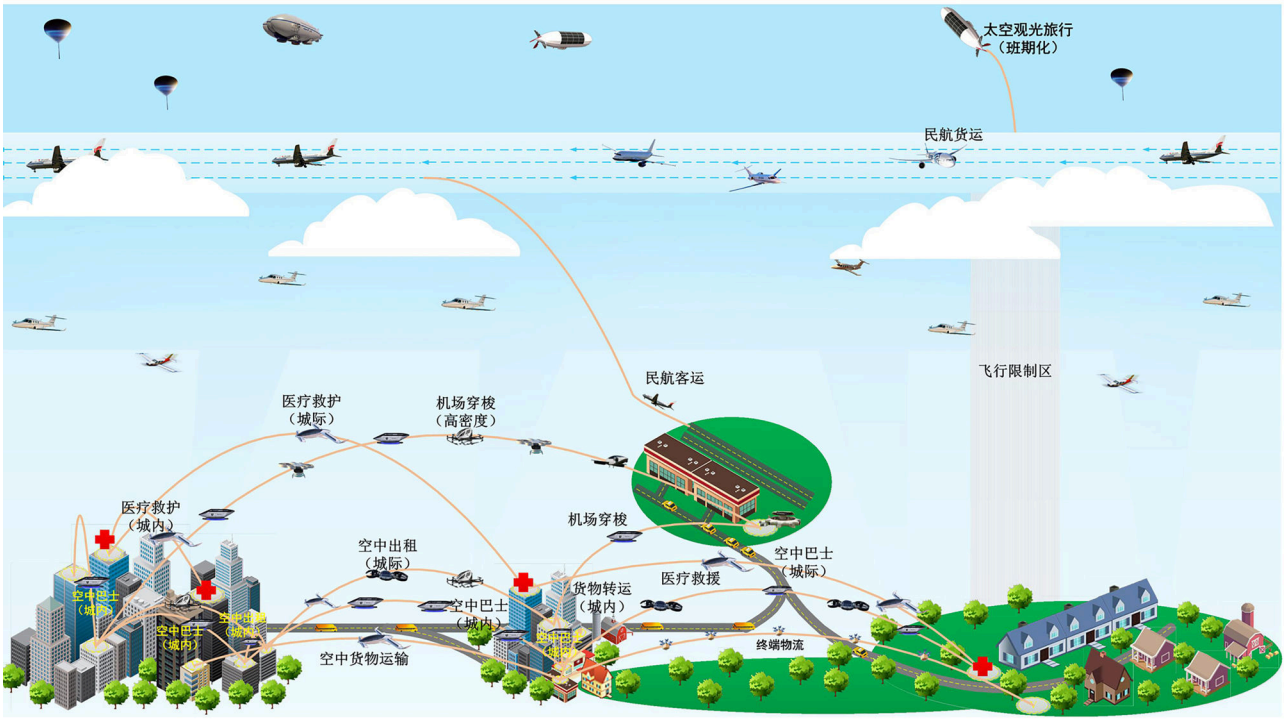

图1　空中交通智能化运行概念场景

空域保持和被监视能力差异明显；空中交通用户类型多样，如个人、物流运营企业、航空公司、数据服务商等。面向多元化用空需求，应综合运用状态全面感知、多智能体协同决策[4]、基于数据驱动的交通智能控制与调度等技术，优化空中交通服务流程；提供不同等级、形式、内容，体现差异化与个性化的服务，提升人员与货物运输的流畅性以及服务保障的可靠性；最终构建空中交通出行智能化服务体系[4]，具备协同联动、动态优化、精准调控能力。

3. 耦合交织的空天飞行器跨域运行

临近空间飞行器特别是可重复使用空天往返载具的发展，使得临近空间飞行频次明显增加；中高空有人/无人共域运行趋势明显，无人机应用向诸多领域深入拓展；低空城市空中交通业态孕育，空中出租、空中巴士、空中物流所需的载人/载货飞行穿梭[5]。例如，2030年前美国商业临近空间飞行的航班数量将为660架/年，约有4×10^4架低空物流无人机提供5×10^8次快递服务、2.3×10^4架城市无人机提供7.4×10^8人次载客飞行[5]；2035年欧洲城市空中交通方面，150 m以下超低空无人机飞行量将超过3.5×10^8 h，飞行距离达1.7×10^{10} km[6]。在从低空到临近空间的广阔空域内，随着航空器飞行在空间上向超低空、远边疆延伸，在应用上向多样化场景、复杂运行转变，多尺度、多维度、全方位的空中交通管理“挖潜增效”亟待开展。

（二）空中交通管理应满足传统与未来相叠加的复合需求

1. 高集成度空管基础设施的建设及运行

通过空中与地面道路、轨道、水运交通的一体设计，构建线上线下融合集成、全流程引导、无感化出行、零距离换乘、精准快捷中转、投送无缝衔接的综合立体交通运输体系，是我国综合立体交通规划的核心内容。聚焦到空中交通管理，即建设“空天地”一体化的通信、导航、监视、传感器网络基础设施，集空域、性能、气象、飞行情报于一体的数字化网络环境；按照统一、兼容的数据交换标准和运行规范，形成以空中交通信息中心为分布式节点，向外辐射至飞机、机场、设施等终端并确保互联互通，多要素融合、可视化感知、一体化协同的空管运行新模式。

2. 海量复杂空管数据信息的管理及应用

空中交通管理的动/静态数据蕴含着历史经验、

当前现状、未来预测的潜在信息，具有体量庞大、时效不一、异构多源等特点。为适应差异化、多样性的未来空中交通新模式发展要求，空管业务各方需依照业务流程、支撑条件、职责要求，针对相应的数据信息管理与应用开展弹性调整、敏捷适变、有效聚合。通过飞行器、信息系统、管理运行中数据信息的流转、共享与应用，为高密度飞行条件下航空器的风险评估[7]、协同引导、冲突精准探测与智能解脱[8]等业务需求提供跨层级/跨部门/跨系统的同场景感知、一体化管理、无缝隙衔接解决方案。

3. 新一代空管运行概念的迅速推广与实施

随着航空器性能的提升，以雷达与程序管制为主体的传统空管运行模式逐渐不能满足应用需求，表现为航班延误与取消现象越来越严重、航空碳排放量越来越高。相应地，以数字化、智能化、自主协同为特点的第四代空中交通管理运行模式逐步成型：① 建设数字化空管系统，支持多元用户的用空按需适配，开展空域资源定量化调度、容流自适应匹配、运行精细化控制；② 发展智能化决策技术，突破人在回路的空管能力上限，开展空管大数据分析处理、结构化知识图谱建立、最优决策模型求解；③ 提升自主协同水平，突破地面集中式空管模式的局限性，构建分布式态势感知、风险研判、协同决策能力，实现末端逻辑闭环。

（三）传统空中交通管理面临的诸多挑战

1. 交通管制模式转变

当前的交通管制以人与人之间的话音通信为主要手段，将管制员的决策意图传递给飞行员，进行冲突消解与交通引导。这种点对点的指挥模式难以适应多种强耦合约束并存的无冲突交通航迹运行需求。推动交通管制模式从飞行员–管制员意图交互转向基于数据链的自主意图协商，建立机载航电与地面管制站之间、机器对机器的空地自主意图协商决策模式，才能为大幅提升交通管制运行效率提供支撑。

2. 空域管理模式转变

当前的空域管理依据长期积累的历史数据进行统计，开展战略层面的几何结构规划与优化调整，导致空域固定使用、利用率受限，难以满足未来强时变的空中交通态势演化需求。推动空域管理模式从固定划分管理使用转向基于性能的柔性变结构管理，扩展空域管理模型维度；从航空器角度建立基于性能的所需空域基础模型，才能为实现空域变结构柔性使用筑牢基础。

3. 流量控制模式转变

当前的流量控制采用人在回路、以地面分散节点为中心的控制模式，难以应对未来大流量交通流全局优化调控“一控就死、一放就堵”的症结问题。推动流量控制模式从处置操作依赖地面且人在回路转向基于航迹协同的智慧调配，建立以航迹为基础、空域与流量协同的一体化决策模式，才能为解决高密度、异质化飞行流量的精细调控难题提供支持（见图2）。

三、空中交通智能化管理的基础科学问题

为了适应空中交通管理发展的新趋势，亟需转变以人为中心、地面集中式的空中交通粗放管理旧模式，尽快实现自主化、智能化、自动化的空中航行管控体系升级。构建新一代空中交通智能化管理技术体系，核心关键在于以空地协同空中交通自主决策为代表的基础科学领域，突出表现在4个基础问题。

（一）航空器与空管基础设施相互作用机理和模式问题

明确航空基础设施服务性能的分布规律，是提高复杂环境与高密度飞行条件下航空运输系统整体性能的先决条件，也是航空运输领域的热点研究问题。相关研究的基本思路为：在实时可靠的全时空交通运行数据的基础上，叠加航空运输通信、导航、监视的空管性能保障要素并进行定向增强；利用传感器、物联网、云计算、大数据、数字孪生等新兴技术，在信息空间内开展航空器自主安全控制、航空器–空管基础设施相互作用机理的数字化重构；实现人–航空器–空管基础设施在同一情景下的一体化集成管理，为空中交通管理新概念、新技术、新标准提供充分的验证条件。

（二）基于可接受风险的航空器间隔空地协同控制问题

交通态势涵盖多个认知层面，如物理域飞行动

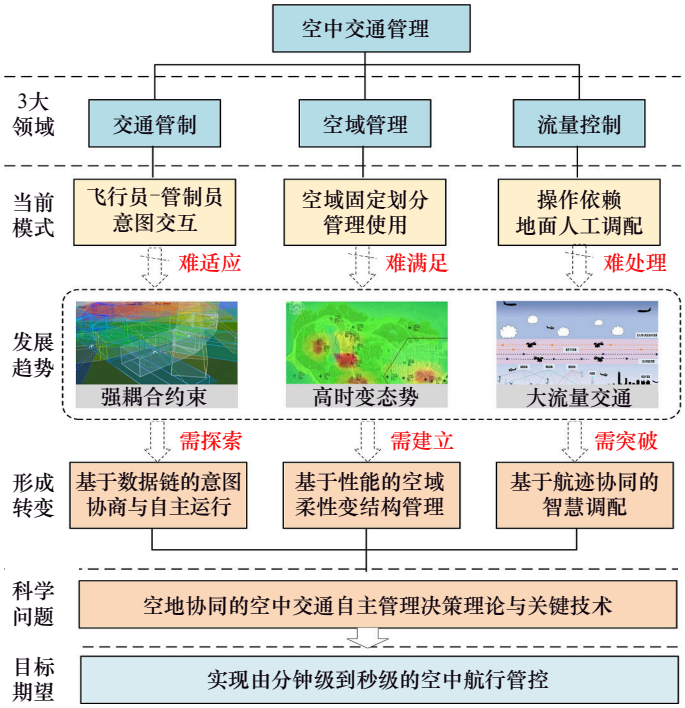

图2　空中交通智能化总体架构图

态、信息域演化趋势、认知域交通复杂性等。开展交通态势综合感知与安全风险综合监测，拓展交通管制决策弹性适用的对象范围，对管制系统装备自动化能力等级提升具有重要意义。基于可接受风险的航空器间隔空地协同控制，表现为基于数据链构建空地航迹协商与同步机制，实时融合并处理来自传感器网络的多来源、多维度、多模态、动/静态的空管数据，形成空中交通多尺度、多粒度、多角度的态势在线刻画与演化预测能力；发展面向机场、终端区、航路的交通航迹间隔动态控制与冲突解脱决策方法，形成支持航迹运行的空地协同管制新模式。

（三）多要素形态非一致规则的空域运行建模优化问题

当前的空域运行研究多采用经典的简化建模方法，即根据航空器交通行为与空域运行的基本规律，提取并保留影响较大的若干要素，通过数值模拟方式进行系统重构；以概率分布的形式对交通随机性进行建模，以模糊隶属度函数抽象管制员行为的不确定性与环境因子。上述方法可对空域运行场景进行一定程度上的降维还原，但无法反映未来空中交通的高密度特性，因而需对空域进行更高维度的量化评估、立体设计、精细管控。多尺度空间（机场+终端区+高空航路网）、多尺度时间（以年为单位的战略管理+以小时为单位的预战术规划+以分钟为单位的战术控制）的高维时空变量与通信、导航、监视、气象等因素相叠加，使得数据驱动、非一致规则的空域动态建模问题成为全时空交通管理优化的前提和基础。

（四）高密度空中交通流演化机理与拥堵传播特性问题

大规模对象的交通运行具有强的耦合关联、嵌套影响、级联传导等特性。深入理解交通拥堵形成的内在机理、复杂交通涌现现象的生成原理，进而导出交通运行稳定性的非一致性判别准则，是高密度交通流量控制方向的热点研究问题。相关研究有助于提升高密度航班流量全局精细调度智能决策水平，基本思路为：对空中交通流进行非线性动力学建模分析，明晰交通需求变化规律与航路网几何构型间的作用机理；探明外在环境不可抗扰动、内部结构不稳定条件下的交通流运行平稳度、恢复时间、传播范围等因素，支持开展飞行流量多主体分布式协同管理。

四、空中交通智能化管理的技术研究重点

构建空中交通智能化管理技术体系，是解决上述基础科学问题的客观路径，主要涉及航空器、空域、管制决策、运行四方面。

（一）智能互联航空器技术

传统的空中交通管理以地面管制中心为核心节点，结合通信、导航、监视等基础设施，对管制范围内的用空对象进行集中式管理；航空器作为被管理方，技术发展侧重于单体机能提升，突出表现在飞行器总体方案、航空发动机、先进复合材料等方面。空中交通运输总量不断增长，新型航空器也带来更为复杂的用空需求；构建以“智能互联航空器自主飞行”为核心，星–空–地紧密互联、空地协同的新型空中交通运行模式，也使航空器在空中交通管理中的角色不再局限于末端被动接收节点，成为打破空中交通智能化发展瓶颈的要素。借助卫星互联网的的通信优势，将显著提升航空器互联互通能力与智能化水平。例如，航空器承担传感器的角色，实时共享当前所处位置的气象信息、向航空公司实时传输自身机械系统故障信息；承担执行器的角色，对未来一段时间内的四维航迹进行精准预测、对可能遭遇的风险气象进行研判[9]；承担控制器的角色，参与空中交通管制的协议与商定。

突破智能互联航空器技术，以下方面是研究重点。① 基于多层网络、空地一致的空中交通态势感知研究。依托移动通信网络、低轨卫星网络、地面互联网等基础设施，发展空事卫星双向通信、大规模卫星组网高速通信等技术，提供全域覆盖的实时回传、多元丰富的空中飞行相关信息，实现卫星–航空器–地面间的同步互联。从航空器机载航电系统、地面数字化管制系统角度着手，在实时/定时数据信息交互的基础上，应用多元异构数据聚合处理与智能认知算法，构建完整透明、空地一致、实时更新的空中交通精准空域图像刻画能力，解决空中交通监视有“态”无“势”问题。② 基于空地态势共享的协同交通自主运行模式研究。空中交通“无约束”“自主运行”的前提是飞行过程中无冲突的航迹规划以及精准可控的航迹跟踪控制，需要航空器具备实时精准碰撞风险识别、末端协同避让、自主间隔保持、智能协同决策等能力。重点突破不完备信息条件下的定位与导航重构技术，基于一致时间基准的多源信息融合处理来实现卫星拒止或低卫星导航受限条件下的精确制导。优先发展非一致规则的高密度交通控制、面向共域运行的异构航空器飞行间隔保持、基于飞行环境精准感知的交通群自主协同运行等技术[10]。构建星–空–地紧密联接的航空器信息网络、态势一致感知条件下的空地一体协商基础环境，为空中交通管理智能化发展提供技术支撑（见图3）。

（二）低空数字空域管理技术

低空经济源于航空大众化的发展需求、新兴技术的成熟应用，是具备改变未来城市规划、城乡关系的潜力产业；市区到远郊的民航机场摆渡、空中出租车、邻近城市航班等应用，将是打开城市空中运输市场的重要方式。随着无人机产业的快速发展，低空飞行的航空器比例构成变化明显，无人机数量已多于有人机。不同于高空，低空空域与地形地貌紧密相连，环境结构、障碍物分布成为低空飞行的重要关注因素；低空处于大气活动频繁区域，低空气象变化随机性大，对目视飞行安全构成严重影响。现行的空管通信、导航、监视技术手段，很难用于低空目标；以飞行服务站为中心、服务有人机为主、自成体系的空管方式，难以应对低空复杂多样的交通管理需求[10]。为适应未来低空高密度有人/无人混合、城市空中运输、多型异构航空器的发展，需以低空飞行空间在数字信息空间上的映射与重构为基础，基于所需性能的低空空域管理技术支持[11]，构建面向新经济业态的低空空中交通管理新体系（见图4），为实现城乡一体、低空“自由飞行”确立理论基础[12]。

突破低空数字空域管理技术，以下方面是研究重点。① 低空空域的多维度数字优化设计方法研究。搭建多维度基础数字架构，涵盖时空框架、性能与气象等，对建/构筑物、障碍物、可用通信导航监视资源、低空飞行状态信息、风与温度信息等进行结构化表征与管理；发展基于网格空域体的低空空域与交通活动状态描述方法，将低空空域资源作为类似地面道路的交通资源，进行一体化结构设计与优化配置[7]。② 低空运行的多层级安全风险评估技术研究。未来低空空域必然采用分层管理模式，对大批量、高密度无人机的运行进行高效组织

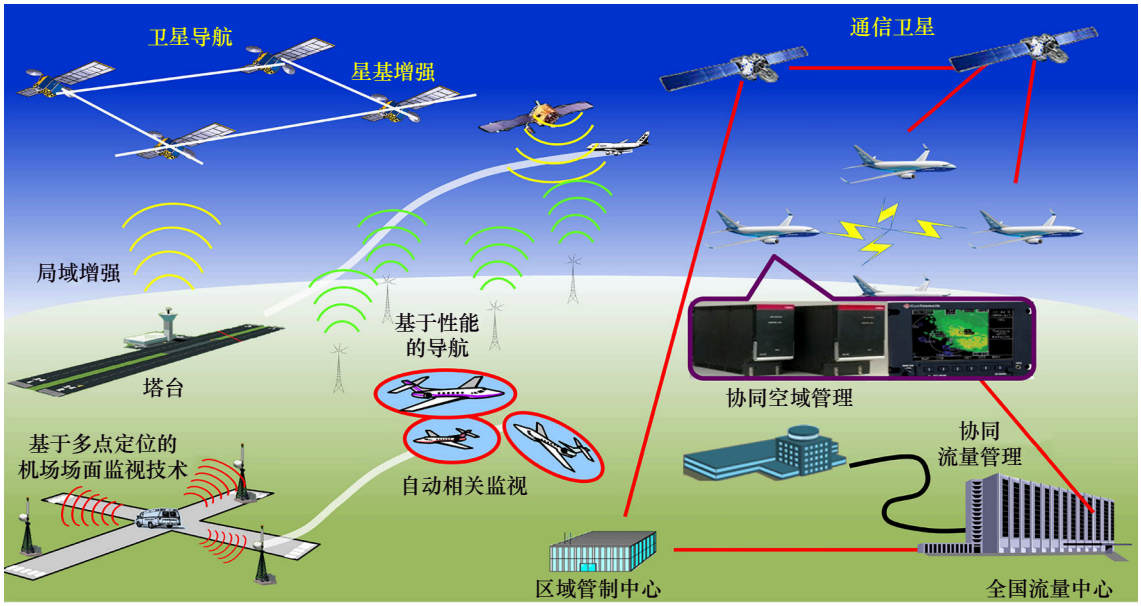

图3　航空器智能互联示意图

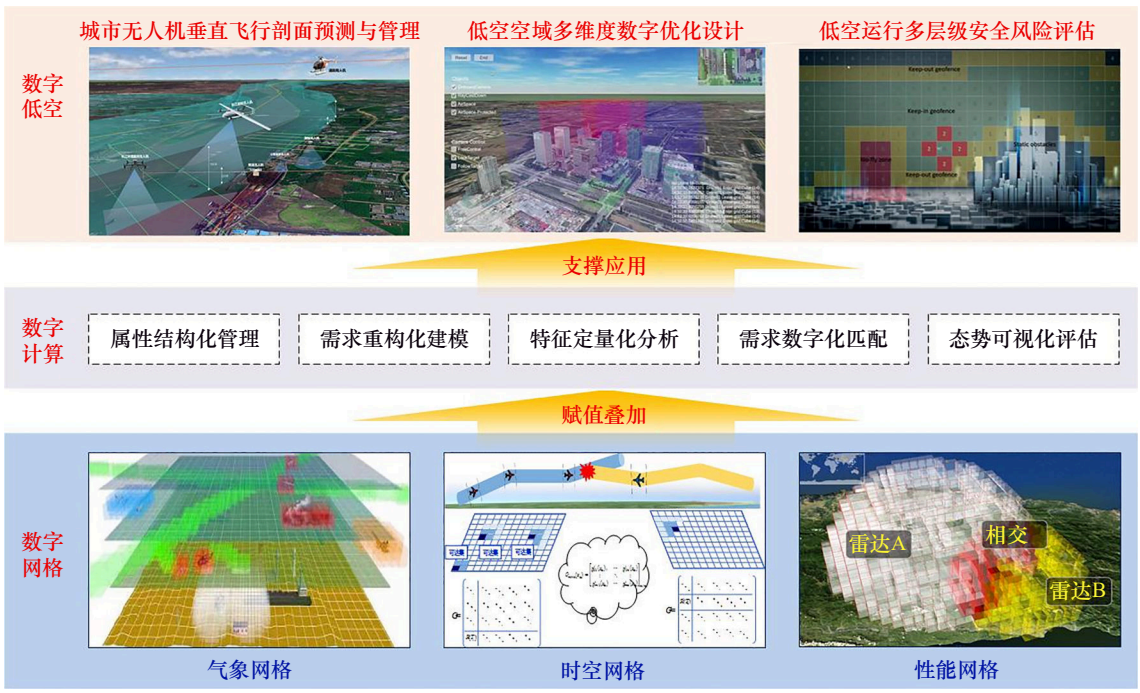

图4　低空数字空域管理示意图

与安全管理，成为相关空管的核心问题[13]。在低空飞行安全间隔标准制定方面，建立基于数字网格的安全风险表征模型，覆盖有人机与无人机、无人机与无人机、小型航空器与楼宇障碍物、低空航空器与地面车辆/人群等应用对象；发展基于交通复杂度、设备性能的融合运行安全风险评估与监控关键技术，标定各类场景、不同保障条件下飞行安全间隔的最低标准值，支持建立基于风险的低空空中交通监管规则体系。③ 城市无人机垂直飞行剖面预测与管理方法研究[14]。建立城市无人机数字孪生环境，覆盖局域态势感知、全要素表达、协同计算、分布式运行场景；建立基于实际数据的飞行剖面预测模型，与基于历史航迹数据的聚类分析相结合，形成飞行轨迹序列并拟合各类无人机的飞行高度和

距离，实时动态生成无人机（后续的）飞行剖面；形成城市无人机低空飞行剖面分析、行为预测、风险智能判断能力，支持开展基于飞行剖面预测的城市无人机管理[15]。

（三）基于大数据的分布式智能协同决策技术

随着经济社会发展，有关决策理论与方法变化显著，如从静态决策到动态决策、从集中式决策到多主体协同决策、从基于经验的人工分析决策到基于量化计算的自主决策。在以大数据为代表的信息技术引领下，数据密集型科学发展成为继实验科学、理论科学、计算科学之后的新科学范式。目前，基于大数据的智能协同决策是决策应用的研究热点。空中交通运输是信息化程度和运行复杂度均较高的领域，随着民用航空、军事航空、通用航空的发展，尤其是无人机飞行、临近空间往返飞行趋于频繁，空中交通态势认知及预测的复杂度显著增加。利用大数据、智能决策的技术优势，挖掘并分析空中交通历史积累的大量数字资产所蕴藏的经验知识与内在联系，抽取重要节点与关联数据集，形成结构化的知识体系，从而为现实问题求解、未来最优判断提供可信依据。构建从数据到知识、从知识到决策的空中交通大数据智能计算范式，形成基于数据的多主体智能协同决策新方法，满足不确定性、动态性、全局性、关联性等客观需求，支持提升空中交通态势综合认知与智能决策能力。

突破基于大数据的分布式智能协同决策技术，以下方面是研究重点（见图 5）。① 基于多元异构数据的态势综合评估与预测研究。围绕算法增强的异构信息处理、知识驱动的事件关联推理、人机融合的态势聚焦生成、平行仿真的局势推演预测等方向，发展基于数字孪生的机场群 – 终端区 – 航路航线交通运行态势全景感知、面向空域配置优化的交通复杂度演化预测、基于 AI 的意图识别与风险自动研判等技术。② 流量与空域数据驱动的智能匹配技术研究。针对空中交通流量、空域容量等典型的多主体参与、全域数据驱动的智能调控决策问题，探索构建云 – 边 – 端协同的技术体系架构，利用分布式 AI 对多层级（全国 – 区域 – 机场）、多时段（战略 – 预战术 – 战术）飞行流量进行评估、预测和预警；建立包括空管、机场、空域用户在内的多方协同决策机制，通过协同决策解决飞行流量与空域容量的全局最优适配管理问题。③ 面向智能机场的机坪车 – 机 – 路混合交通群智能优化方法研究。支持机坪车辆、无人机、航空器协同感知与自主避让，实现基于机器决策的机坪保障资源动态配置、作业车辆 / 无人机最优动态调度、场面滑行路径动态规划、场面灯光引导智能控制、多端联运资源智能协同调度[16]。④ 面向航空器的健康监测与智能预判方法研究。针对航空器机载航电系统，发展群智

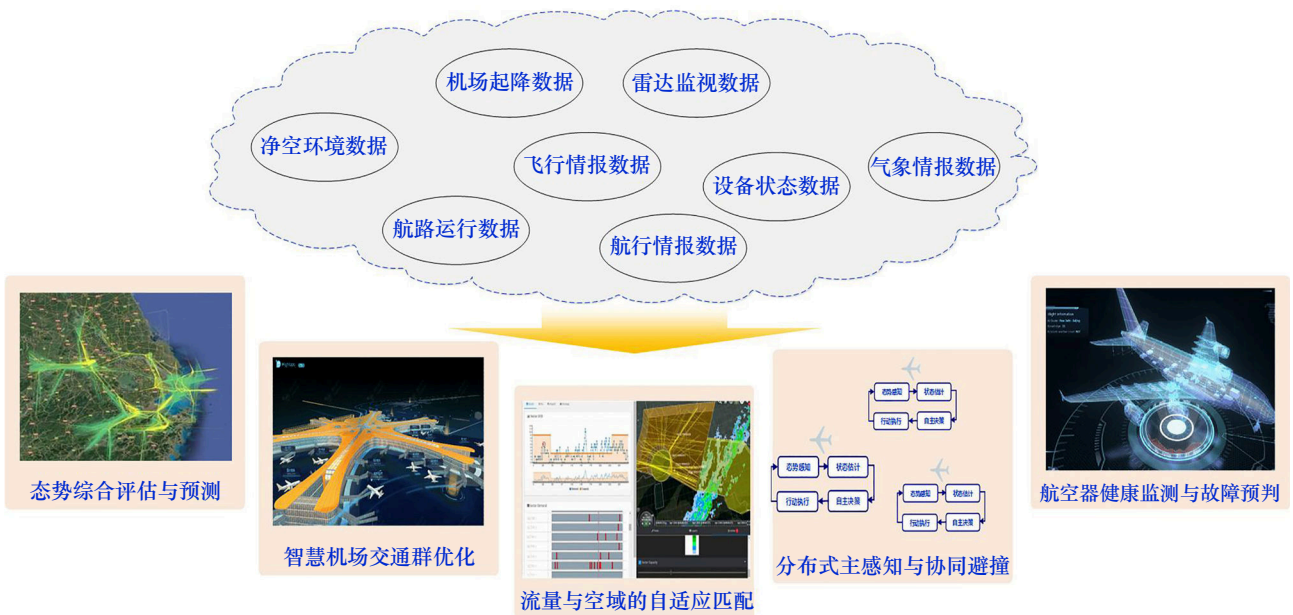

图 5　基于大数据的多主体智能协同决策技术

能协同感知技术，实现航空器健康状态的自主深度认知。针对地面运行控制中心，采用数字孪生技术重构航空器全息健康态势评估与预测能力，支持运行控制部门实施全维度、高沉浸感的航空器健康监控[17]。⑤ 基于云–边–端的航空器自主感知与协同避撞技术研究。应用云平台、物联网等技术，发挥云端数据与计算支撑末端载体方面的高精度感知、协同避撞能力，支持边–端智能体单元基于一致场景并通过协同决策来解决混合交通系统的交通管控问题。

（四）基于航迹的智能代理监督技术

基于航迹运行综合数据通信、卫星导航、综合监视、协同决策等方面的技术突破，在航空器、航空公司、管制部门之间建立基于一致认知的空地协同空中交通运行控制环境。在航空器起飞至降落的全过程中，利用数据链等通信方式，通过航迹规划与更新、航迹预测与优化、航迹协商与执行，开展四维航迹动态信息的实时共享、协商与维护，实现飞行活动全过程“可见、可控、可达”。基于航迹运行以“门对门”“机器对机器”方式，将自动化技术及算法引入空管全流程，降低因人工参与而带来的精细化与复杂度限制，增强航空器飞行交通管控与空域使用的可预测性、安全性、灵活性，驱动管制运行从“人在回路中”并以人为主的传统模式转向“人在回路上”的智能代理监督新模式。

突破基于航迹的智能代理监督技术，以下方面是研究重点（见图6）。① 面向全域无冲突航迹管理的智能代理监督技术研究。发展面向空管、航空公司、机场运行主体的知识表示框架、协同决策与控制等技术，构建群体智能空间的服务体系结构，支持飞行前自主四维航迹协同规划与放行，飞行中面向大规模四维航迹集的空中交通态势评估、预测及自主决策[18]。建立全球空中交通流量管理平台，研究洲际飞行四维航迹预测、控制算法与模型，超大规模航迹高效协同的多智能体模型及高效算法，支持基于全球四维航迹的协同管理。② 基于航迹的无人机群协同运行技术研究。从基于多智能体的航迹协同控制、基于四维航迹的无人机自主间隔保持等方面着手，将无人机纳入对象管理节点[19]；以感知复杂环境下多智能体、执行航迹运行为出发点，研究多智能体任务系统的运行原理，提升多智能体防撞编队鲁棒控制、基于事件驱动的防碰撞多智能体编队控制、基于自适应动态规划的多智能体航迹优化控制技术。发展协作多智能体强化学习算法，设计速度调解算法，实现多无人机飞行冲突解脱任务的自主决策；研究拟合算法、一致性编队算法、多无人机协同精细化作业控制方法，实现角色切换与协调避撞机制[20]。③ 基于航迹运行的智能空中交通管理研究。针对空域结构网络下的容量动态，发展四维飞行时的调解策略、路径重规划决策方法。在无人机自主间隔保持方面，应用基于自主运行、航迹运行的新一代空中交通管理运行模态，发展基于数字孪生的区域无人机运行态势全景感知、面向交通复杂性的空域协同优化、基于四维航迹的空域场面交通一体化管理[21]等技术，提升四维航迹精准

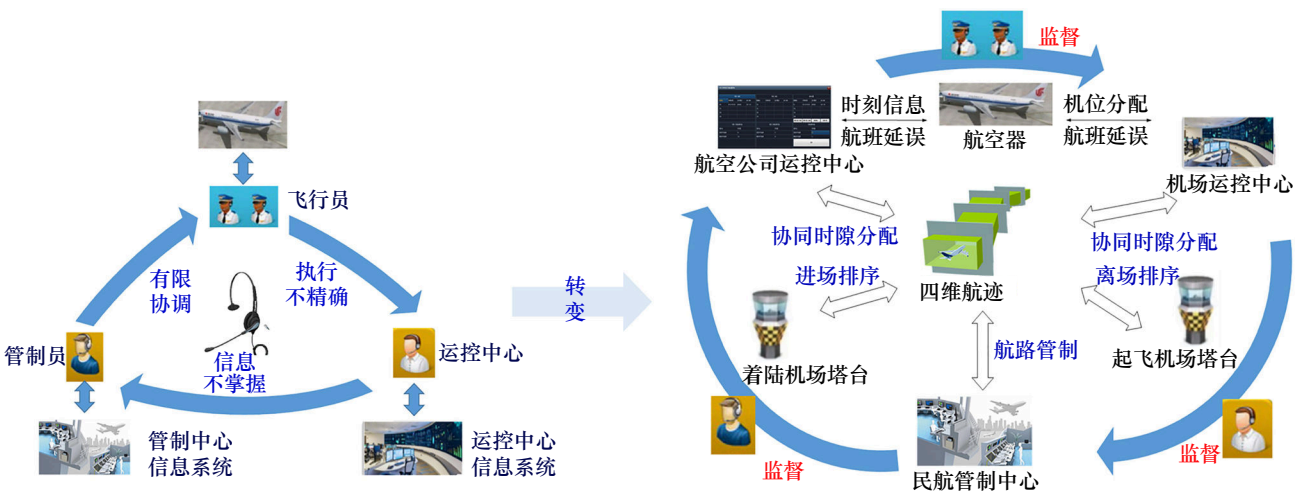

图6　基于航迹的智能代理监督示意图

预测、动态尾流间隔监测与动态缩减、机载自主间隔管理[22]、空地协同间隔管理、航空气象精细化预报等的水平。

五、结语

本文着眼未来空中交通管理系统升级需求，梳理了传统空中交通管理在3个细分方向上亟待推进的转变，论证提出了空中航行空管新体系构建对应的基础科学问题，进一步研判了空中交通智能化管理技术架构及其重点研究方向。空中交通智能化管理领域的研究工作在国内外均处于起步阶段，一些研究尚处理论探索阶段，甚至部分方向存在理论空白；如能在变局之中抓住契机，适时甚至超前布局关键技术攻关，或将占据先发优势，获得未来空管国际标准制定方面的主动权，争取空中交通国际事务协商方面的话语权。

为此建议从四方面着手布局：① 采取技术研发行动，基于AI革新空管系统，提升空域分层治理能力[23]；② 围绕“先进空中运输”布局专项，着力解决自动驾驶、智慧座舱、高能量电池、软件化航电、数字化交通管制等瓶颈环节的关键技术；③ 研究城市低空空域开放的政策举措，适度开展区域性、城乡一体的通用航空与无人机监管设施建设，解决先进空中交通模式涉及的空域资源使用问题；④ 制定基于先进空中交通模式的通用航空发展规划，提出数字低空系统发展路线图和能力生成阶段步骤，覆盖行业监管、空域管理、飞行服务、交通规划、治安管理等环节，促进先进空中运输设施发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: October 27, 2022; **Revised date:** December 25, 2022

Corresponding author: Chen Zhijie is a research fellow from Key Laboratory of National Airspace Technology, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is air traffic management system technology. Email: zj-chen@vip.sina.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Intelligent Development of Air Traffic in China” (2022-XBZD-04)

参考文献

[1] International Air Transport Association. Annual review 2021 [EB/OL]. (2022-01-15)[2022-08-15]. https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2021.pdf.

[2] 王翔宇. 城市空中交通市场发展前景分析 [J]. 航空动力, 2019 (4): 18–21.
Wang X Y. The future of urban air mobility market [J]. Aerospace Power, 2019 (4): 18–21.

[3] European Aviation Safety Agency. Notice of proposed amendment 2014-01: Carriage of special categories of passengers (SCPs). (2011-01-01) [2022-07-03]. https://www. easa. europa. eu/sites/default/files/dfu/NPA%202014-01.pdf.

[4] 李诚龙, 屈文秋, 李彦冬, 等. 面向eVTOL航空器的城市空中运输交通管理综述 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 35–54.
Li C L, Qu W Q, Li Y D, et al. Overview of traffic management of urban air mobility(UAM) with eVTOL aircraft [J]. Joural of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 35–54.

[5] 张洪海, 邹依原, 张启钱, 等. 未来城市空中交通管理研究综述 [J]. 航空学报, 2021, 42(7): 024638.
Zhang H H, Zou Y Y, Zhang Q Q, et al. Future urban air mobility nanagement: Review [J]. Acta Aeronautica et Astronatutica Sinica, 2021, 42(7): 02463.

[6] 吕人力. 全球民用无人机融入空域战略与我国对策 [J]. 中国民用航空, 2021 (6): 6–10.
Lyu R L. The strategy of integrating civil UAS into airspace in the world and China’s countermeasures [J]. China Civil Aviation, 2021 (6): 6–10.

[7] 刘继新, 江灏, 董欣放, 等. 基于空中交通密度的进场航班动态协同排序方法 [J]. 航空学报, 2020, 41(7): 323717.
Liu J X, Jiang H, Dong X F, et al. Dynamic collaborative sequencing method for arrival flights based on air tracffic density [J]. Acta Aeronautica et Astronatutica Sinica, 2020, 41(7): 323717.

[8] 陈雨童, 胡明华, 杨磊, 等. 受限航路空域自主航迹规划与冲突管理技术 [J]. 航空学报, 2020, 41(9): 324045.
Chen Y T, Hu M H, Yang L, et al. Autonomous trajector planning and conflict management technology in restricted air space [J]. Acta Aeronautica et Astronatutica Sinica, 2020, 41(9): 324045.

[9] 李安醌, 李诚龙, 武丁杰. 结合跳点引导的无人机随机搜索避撞决策方法 [J]. 航空学报, 2020, 41(8): 323726.
Li A T, Li C L, Wu D J. Collision avoid ancedecision method for UAVs inrandom search combined with jumppoint guidance [J]. Acta Aeronautica et Astronatutica Sinica, 2020, 41(8): 323726.

[10] 张同荣, 魏志强, 时统宇, 等. 基于SPO的空地协同运行模式设计 [J]. 中国民航大学学报, 2020, 38(6): 12–17.
Zhang T R, Wei Z Q, Shi T Y, et al. Air-ground cooperation mode design based on SPO [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2020, 38(6): 12–17.

[11] 朱晓辉, 朱永文, 王家隆, 等. 低空空域管理与飞行服务保障 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2022.
Zhu X H, Zhu Y W, Wang J L, et al. Low altitude airspace management and flight service support [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2022.

[12] 全权, 李刚, 柏艺琴, 等. 低空无人机交通管理概览与建议 [J]. 航空学报, 2020, 41(1): 023238.
Quan Q, Li G, Bai Y Q, et al. Low altitude UAV traffic management:introductory overview and proposal [J]. Acta Aeronautica et Astronatutica Sinica, 2020, 41(1): 023238.

[13] 张泽京, 张曙光, 柳旭, 等. 无人机系统安全目标水平预估方法 [J]. 航空动力学报, 2018, 33(4): 1017–1024.
Zhang Z J, Zhang S G, Liu X, et al. Estimated method of target level of safety for unmanned aircraft system [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(4): 1017–1024.

[14] 赵嶷飞, 郑雨欣. 城市物流无人机飞行任务剖面构建与优化 [J]. 飞行力学, 2021, 39(3): 54–67.
Zhao Y F, Zheng Y X. Construction and optimization of flight mission profile of urban logistics UAV [J]. Flight Dynamics, 2021, 39(3): 54–67.

[15] 胡莘婷, 吴宇. 面向城市飞行安全的无人机离散型多路径规划方法 [J]. 航空学报, 2021, 42(6): 324383.
Hu X T, Wu Y. Risk-based discrete multi-path planning method of UAVs in urban environments [J]. Acta Aeronautica et Astronatutica Sinica, 2021, 42(6): 324383.

[16] 任新惠, 岳一笛, 尹晓丽, 等. 无人机车辆组合物流配送路径规划探讨 [J]. 飞行力学, 2020, 38(2): 88–94.
Ren X H, Yue Y D, Yin X L, et al. Theoretical discussion on the logistics route planning problem of UAV and vehicle combination [J]. Flight Dynamics, 2020, 38(2): 88–94.

[17] 侯立国, 张春晓, 刘翠, 等. 面向民用飞机运行的健康管理系统设计 [J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2020, 42(3): 233–238.
Hou L G, Zhang C X, Liu C, et al. Design of health management system for civil aircraft operation [J]. Journal of WuhanUniversity of Technology(Information & Management Engineering), 2020, 42 (3): 233–238.

[18] 刘杰, 张军峰, 朱海波, 等. 基于计划到达时刻的四维航迹规划 [J]. 航空计算技术, 2016, 46(4): 44–47.
Liu J, Zhang J F, Zhu H B, et al. Four-dimension trajectory planning based on scheduled time of arrival [J]. Aeronatutical Computing Technique, 2016, 46(4): 44–47.

[19] 梁星星, 冯旸赫, 马扬多, 等. 多Agent深度强化学习综述 [J]. 自动化学报, 2020, 46(12): 2537–2557.
Liang X X, Feng Y H, Ma Y D, et al. Deep multi-agent reinforcement learning: A survey [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(12): 2537–2557.

[20] 孙长银, 穆朝絮. 多智能体深度强化学习的若干关键科学问题 [J]. 自动化学报, 2020, 46(7): 1301–1312.
Sun C Y, Mu C X. Important scientific problems of multi-agent deep reinforcement learning [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46 (7): 1301–1312.

[21] 丁强, 陶伟明. 无人机协同四维航迹规划的改进Tau-H策略 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(7): 1398–1405.
Ding Q, Tao W M. Improved Tau-H strategy for four-dimensional cooperative route planning of multi-UAVs [J]. Joural of Zhejiang University(Engineering Science), 2018, 52(7): 1398–1405.

[22] 蔡开泉, 赵鹏. 空中交通自主间隔管控技术研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(4): 688–699.
Cai K Q, Zhao P. Key technologies on air traffic self-separation management [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(4): 688–699.

[23] 陈志杰, 汤锦辉, 王冲, 等. 人工智能赋能空域系统, 提升空域分层治理能力 [J]. 航空学报, 2021, 42(4): 525018.
Chen Z J, Tang J H, Wang C, et al. Using artificial intelligengce in airspace system to improve airspace hierarchical governance capability [J]. Acta Aeronautica et Astronatutica Sinica, 2021, 42(4): 525018.