

数字化空域系统发展研究

朱永文¹, 陈志杰¹, 蒲钊¹, 王家隆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: 智能空间概念及其技术体系的发展, 拓展了人们对物理时空的传统认知; 时空本质一体连续并与信息空间相互映射交叠, 二者的有机融合可进一步提升信息技术管控物理空间对象的能力。本文针对当前空中交通管理发展趋势下空域管理面临的问题与需求, 提出了数字化空域系统概念, 在物理信息融合空间构建空中交通四维时空框架, 实现了空域管理的数字化重构; 发展了一套数字化空域管理控制理论方法, 利用大规模计算技术对其运行结构与控制模式进行研究分析、计算决策、使用配置, 为在空中交通管理中实现空域与空中交通流量、交通管制自适应协同建立了理论基础。此外, 研究提出了我国数字化空域系统发展建议: 制定国家空域系统发展战略规划, 统筹实施“军民航”空管基础设施建设; 完善科技创新机制, 建设国家空域系统科技创新平台; 加强空管科技创新工作的统筹协调和资源整合, 完善科研创新发展规划。

关键词: 空中交通管理; 数字化空域; 数字网格; 精细化管理

中图分类号: TP3 **文献标识码:** A

Development of Digital Airspace System

Zhu Yongwen¹, Chen Zhijie¹, Pu Fan¹, Wang Jialong²

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

Abstract: The development of smart space and its technical system has expanded the traditional cognition of physical space-time domain. Time and space are essentially integrated and continuous, and they overlap with the information space. The organic integration of the space-time domain with the information space can enable information technology to further its control over the physical space. To address the problems of and needs for airspace management, we propose a digital airspace system and construct a four-dimensional air traffic space-time framework in a physical-information fusion space, realizing the digital reconstruction of airspace management. Furthermore, a set of control theories and methods for digital airspace management is developed. Large-scale computing technology is utilized for analyzing the operating structure and control mode of the digital airspace system, also for decision making and use configuration, thereby laying a theoretical foundation for the coordination of airspace, air traffic flow, and air traffic control. Moreover, we propose suggestions for the development of the digital airspace system in China. A national plan for airspace system development should be formulated to coordinate the civil and military air traffic infrastructure construction. The scientific and technological innovation mechanism should be improved to build an innovation platform for the national airspace system. The overall coordination and resource integration of air traffic control innovation should be strengthened to improve the research and innovation plan for airspace management.

Keywords: air traffic management; digital airspace system; digital grid; delicacy airspace management

收稿日期: 2020-11-20; 修回日期: 2021-04-01

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“国家空域资源高效利用发展战略研究”(2019-XZ-06)

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

一、前言

进入 21 世纪后，世界科技发展呈现新的态势和特征：传统学科持续发展，学科交叉融合加速，新兴学科不断涌现，前沿领域不断延伸。新一轮科技革命和产业变革为空中交通管理领域发展带来了更多可能。以智能为特征的群体性技术革命，使传统意义范畴下的不同领域技术融合再创新呈现常态化发展趋势；航空装备信息化的阶段性提升以及智能对抗时代的到来，驱使交通空域管理、战场空域管制的组织形态进行适应性调整，为新型管理理论方法和系统技术创建提供了顶层牵引。

基于网络联接、协同决策、多维时空综合等技术应用特征，建立大联接、大数据、大协同模式的空域管理创新范式，必将对静态分割管理、固定使用、容量受限、效率不高、脆弱性高的传统空域管理模式与方法带来根本性的改变，进而拓展建立空天地一体化的时空动态高效管理架构，全面提升交通空域管理、战场空域管制能力，支撑空中智能交通、智能空战管控新时代的到来 [1]。

本文从空中交通管理的发展及需求出发，梳理传统空域管理措施在当前环境下面临的系列问题，凝练空域管理新方法需研究的基础问题，由此剖析数字化空域技术的基本概念与关键技术，以期为新形势下的空域管理提供思路方法。

二、空中交通管理发展现状

(一) 空中交通管理技术发展历程

根据国际民用航空组织 (ICAO) 的定义，空中交通管理指确保航空器在所有阶段安全和高效的空基 / 地基功能系统综合，分为空中交通服务、空域管理、交通流量管理以及航空通信、导航、监视等；保障空中交通管理所需的基本要求，如防止航空器在地面或空中相撞、加速空中交通流、维护空中交通秩序等。

空中交通管理技术主要经历了 5 个阶段。①航空起始阶段，通信、监视依赖目视，导航采用信号灯、信号旗，飞行过程中完全依靠地标飞行；②自 1934 年起，无线电通信逐步得到广泛应用，承担了飞机通信、导航、监视的功能，在飞行过程中建立了程序管制模式；③ 1945—1988 年，雷达和二次

雷达逐步应用于航空领域，对于飞机的监视和管制转由雷达实施，飞机开始依靠仪表飞行；④ 1989—2012 年，全球飞行和洲际飞行兴起，卫星导航逐步在航空领域获得应用，对飞机开始实行基于数据链的数字化管制、基于卫星导航的自动相关监视，空管系统功能趋向综合化；⑤自 2013 年起，航空通信技术由窄带通信过渡至宽带通信网，导航技术从卫星导航、惯性导航向多元综合导航融合增强模式发展，监视技术也由单一雷达监视向多体制（如二次雷达、自动相关监视、多点定位等）的综合监视过渡，空域系统及其容量、可靠性、完好性、可用性得到进一步提高。

(二) 空中交通管理技术发展趋势

ICAO 在全面整合各国需求，区域导航系统 (RNAV)、所需导航性能 (RNP) 运行实践与技术标准的基础上，提出了基于性能的导航 (PBN) 新型运行概念；将航空器的机载设备能力与卫星导航及其他先进技术相结合，涵盖航路、终端区、进近着陆的所有飞行阶段，综合性提出性能要求，据此构建更为精确和安全的飞行方法、更高效的空中交通管理模式。

ICAO 为了提升航空通信和监视性能，提出了基于性能的通信和监视 (PBCS) 运行概念；建立了地面设备、传输网络、机载设备性能、管制员和机组通信交互与响应等诸多环节应用所需的通信性能 (RCP) 以及所需监视性能 (RSP) 规范，确保航空通信和监视能力满足相应要求。

在单一欧洲天空空中交通管理研究计划 (SESAR) 中，制定了 SESAR 2020 研究与创新项目框架，开展航空及其基础设施的数字化改造。该项目框架由 SESAR 联合事业组织发起，包括 29 个新型探索性项目（与无人机作业相关的人工智能 (AI)、多式联运和通用高度基准也被纳入），致力于跑道吞吐量改善、综合地面管理、机场安全网、机场管理、远程塔台等相关技术提升。

(三) 我国空域资源使用现状

我国空域面积约为 $1.007 \times 10^7 \text{ km}^2$ ；截至 2016 年 10 月底，非民航主用空域面积约为 $2.60 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，约占全国空域面积的 26%（按实际投影计算面积，航路按实际宽度计算空域面积）；民航主用空域面

积约为 $2.66 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，约占全国空域面积的 26%；两类重叠使用空域面积约为 $5.30 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，约占全国空域面积的 5%；其余未被有效利用的空域面积约为 $5.34 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，约占全国空域面积的 53%。

此外，我国从保护重要目标和飞行安全的角度考虑，划设了 2 个空中禁区、1 个临时空中禁区，19 个空中危险区、43 个临时空中危险区，199 个空中限制区；根据人工影响天气的需求，设置了超过 1.0×10^4 个对空射击和气象气球施放点。

三、空域管理传统方法面临的困境

（一）空域固定划分管理困境

传统空域管理属于基于需求和规则的规范化空域管理业务模式，主要采用空间分割的固定划分管理方式，根据航空器飞行空管准入要求，细分不同种类空域，进行有针对性的运行管理与控制 [2]；具体包括空域划设调整程序、运行保障设施建设、使用审批及对社会公众开放条件等。这种管理模式在飞行总量较少时能很好地保证各类空域使用的安全性，但随着空中交通量、飞行器种类的增加，相应运行效率快速下降。尤其是随着航空器、地面运行保障系统自动化程度的进一步提升，上述弊端更为突出：因空管设备性能达不到要求，部分飞行器被隔离或不允许进入特定空域，造成不同空域飞行密度的严重不均衡。

继续分割管理空域，既不能更大效能地发挥航空自动化技术的优势，也限制了空中交通飞行的灵活自由度。应针对飞行需求并结合最佳路径理念，将固定划分管理的空域重新整合为一体化的连续空间，动态供给空域使用，解决固定划分空域使用效率偏低的问题。

（二）高密度飞行复杂管制难题

空中交通密度随着航空普及化呈快速增长态势，大城市周边空域逐渐形成空中交通高密度区，传统以管制员为中心的调配控制模式难以满足需求。高密度飞行空域的安全高效管控，需要精细确定交通管制扇区结构、精准测算空域及扇区容量、精密供给空中交通空域使用；围绕空中交通流的分合关系及疏密程度，动态调整优化空域使用边界，

保持空域容量与空中交通需求的适配性，满足规定的空中交通安全等级要求；准确探测识别空中交通运行冲突，重点从战略层面、预战术和战术层面来有效化解高密度飞行冲突消解涉及的级联效应问题，综合考虑空域与交通流量一体化协同控制问题。

在战略层面灵活设计空域结构，实现空中交通运行尽量按照预先规划或飞行员意图实施，尽可能减小大范围气象扰动对交通运行的干扰，最大限度地实现空中交通高效运行控制，提高节能环保收益。对此，亟需发展新型空域管理控制模式，修正技术架构、重构技术原理、发展技术方法，实现计算机辅助生成空中交通调配控制策略，提高交通管制自动化程度与应用效能。

（三）联合作战空域管理难题

在平时，空中交通管理对象主要是受控的航空器；而联合作战空域的管理对象，除受控航空器外，还包括不受控弹道型火炮、无人驾驶航空器、运载火箭、再入飞行器、受控弹道型临近空间飞行器等。大尺度空间内复杂异构对象的空域管理是世界性难题，若处理不当将导致空中作战进程控制迟缓、空域使用冲突及空中作战管制安全事件频发，严重影响联合作战的效率与效果。

随着现代武器装备性能的提高，低空域、高边疆的联合作战管制面临严峻挑战：一方面，低空域与地表、天气影响紧密关联，航空基础设施的电磁信号覆盖不充分、地表障碍物多、地形遮蔽大，使得相关区域成为进攻突击航线的主要规划区域；另一方面，高边疆区域，尤其临近空间正日益成为航空航天装备的拓展使用区域，亟需将以临近空间为主体的高边疆纳入作战空域管理，为调配航天发射、飞行器再入、临近空间力量抵达、飞行器空间感知-避撞等提供保障。目前相关领域研究尚处于起步阶段，与现实需求存在明显差距。

四、空域管理新方法构建的基础问题

空域与交通流量的自适应协同管控是未来发展重点。无论是平时空域管理，还是战场空域管制，都需要在满足所需安全等级要求的同时，降低空中飞行或空域使用的相互干扰，提升空域使用效能

和空中交通效率 [2]。这就决定了空域管理的原理、方法、技术对于平时和战时具有共通性,通过调整相关模型方法的参数及适当的约束条件,可实现技术方法的互用。

(一) 空域管理连续性空间复杂位置关系计算

从已有研究来看,空域与交通流量自适应管理通常建立在地理空间离散网格化空域剖分的基础上:利用空域离散化方法,将连续空域细分成数量众多的基本空域体单元;单元既可作为空中交通运行数据组织管理的空间索引,也可作为空中交通位置跟踪定位的基准,还可作为各类不同需求的空域组成要素;借助基本网格空域体,实现各类功能空域的动态配置与组合。

空域离散化具有空间基准定位与计算方面的优势,构建网格空域单元、建立剖分模型、定义编码及规则,成为发展新一代空域系统的前提和基础。据此研究连续空间复杂位置关系索引建模与定义,建立适用于不同需求、平时/战时一体的网格空域单元编码规则,围绕空间位置关系的度量计算、数据组织与索引,构建与平时/战时空域管理、交通流量管理相适应的空域组织结构框架,成为领域研究的重点,也是亟待优先解决的问题。

(二) 电磁信号空域分布及可用性、完好性计算

在空域管理中,需对保障航空运行的通信导航、雷达监视等电子信息系统的空域性能分布进行有效测算,旨在确立开展空域依据性能的分级分类管理基础,为有效确定空域运行的性能等级、实施结构设计提供支撑。

然而,空域(尤其低空空域)中存在电磁信号的地形遮蔽、多径、干扰等影响,使得相同频段电磁信号受到交叠互扰、多站电磁信号面临联合定位与探测等问题与需求;同时,航空通信导航与监视的可用性、完好性指标测算等,都是建立在大量累积数据分析的基础上,通过统计样本数据才能得出结论。因此,可利用网格空域单元编码索引的数据组织模型,在网格空域剖分的基础上,分析测算电磁信号空域分布并进行可视化、统计累积数据,建立不同于常规连续空间的电磁信号计算模型,将之作为构建数字化空域系统的重要支撑方法,由此构

成空域性能可视化研究的技术基础。

(三) 空中交通异构多源信息大数据分析挖掘

在大数据时代,智能空中交通管理技术进入了新发展阶段,需要解决从多源异构的实时海量信息中挖掘面向空中交通运行改善的信息要素、知识资源等关键问题。当前空中交通管理中的人、航空器、空域3个构成因素之间是非线性关系,存在强耦合的相互影响,兼具智能的人因特征,由此带来了检测和预测的困难。

将数据方法应用到空中交通管理,可在不能完全获取内部机理、难以建立交通流精确动力学模型的状态下,利用实际的离线与在线数据分析来理解交通规律与交通模式;在此基础上制定管理控制策略,完成空中交通运行态势的精确感知和智能化调控;最终综合航空电子、机载通信单元、智能一体化终端、人机功效协同融合等,全面实现数字化空域系统。

(四) 大规模空中运动对象战略冲突识别

空中交通位置可由空域网格单元的编码确定,也可通过地理空间的经度、纬度、高度来确定;两者是一致的,仅在定义的空间分辨率方面存在差异,只要位置精度适应研究问题的需要即可。大规模对象的空中运动冲突探测与解脱,对应于位置点的空间关系与时变过程。

在空域离散化的基础上,针对大规模复杂运动对象,构建飞行冲突或空域使用冲突快速识别算法,确保算法的有效性及鲁棒性,这是需要深入研究的问题。对飞行冲突解脱而言,级联效应化解及调配算法的有效性验证成为空中交通管理领域长期研究的一项基础性问题。当空中交通规模增加到一定程度后,这一问题的处理更为复杂,因此需要基于全新的空域组织架构来研究新型高效算法。

(五) 空域使用复杂性安全态势实时动态监测

安全等级不降低是空中交通管理、战场空域管制的核心要求,但动态监控大尺度空间的安全性、测度空中交通和空域复杂度并将之控制在规定门限内,都是尚待研究的问题。当前广泛采用动态密度、管制员工作负荷、空中交通航迹混合性程度等方式,

建立空域复杂度模型；面对战场空域管制需求，选取适当的监测指标、建立适用的复杂度模型，是待研究的重要内容。此外，鉴于安全性受诸多因素影响，明确影响指标、建立指标的主次因分析方法，也是研究难点。

（六）空域运行控制多主体协同信息可靠交换

空域灵活使用，涉及多用户主体的空域资源计划占用、（使用完毕后）快速释放以及相关信息在各用户主体之间的共享，这是盘活空域资源的核心关键。协同决策是解决这类问题的重点方向。

在空域运行协同控制的基础研究方面，需对离散网格空域单元编码之后的空域信息多主体传输共享的数据格式进行深化设计，建立基于编码的空域空间唯一标识和定位；研究对多主体之间高效协同决策发起、决策生成、决策应用以及动态调整跟踪、效果评估等内容，制定有关技术标准和协同原理方法，实现具有时效性的空域运行高效协同决策。

五、数字化空域系统

基于上述研究背景与现实需求，结合以数字化、网络化、智能化为特征的信息技术加速代际跃迁发展态势，空域管理领域的技术路线将有深刻调整。在这一背景下，我们提出了数字化空域系统概念，将为高性能计算、大数据、AI 等变革性技术在空域管理领域的应用打牢方法基础。

数字化空域系统从信息物理系统理念出发，以空域在计算机空间内的数字化建模与可视化重构为基础，围绕飞行空域的动态配置使用，将空域管理、交通管制、机场、航空器、航空单位等航空要素有效联接；建立一套体系性的计算模型方法，改善并提升空域感知、冲突识别、动态控制、信息共享的集成化与自动化水平，优化并整合空域与交通流量、空域与交通管制的协同管理效能，全面提高空中交通与作战的空域管理实时性及响应能力。

（一）数字化空域的基本理念

究其本质，数字化空域指利用数学模型，在计算机信息空间内完成对物理飞行空间的数字化重构，开展空中交通空域结构、飞行路径或者战场

空域结构、作战空间划分的计算机建模重现，实现在虚拟空间中映射管理实际对象空域使用的全生命过程。

数字化空域的发展重点有：①空域的可视化分析，在可视化空域使用状态的基础上，建立空域系统“一张图”，精准掌握全部空域的实时使用分配与建设情况，为基于一致认知的空域动态管理配置提供支撑；②空域的可度量处理，发展空域管理时空大数据技术，建立全新的空域性能、状态、评估计算方法，测度全空域的交通性能，为开展交通流量、管制及作战空域使用奠定基础；③空域的可计算决策，发展一套基于数字化空域的计算决策模型，为开展空域与交通流量、空域与交通管制的协同管理控制提供基础能力，也可支持基于模型算法的空域结构优化与运行控制。

（二）数字化空域系统的关键技术

1. 数字网格空域离散建模技术与编码体系

当前，面向空域管理的空间位置基准多采用平面地图，既可在平面地图上切分出规则或不规则的区域，也可根据航路航线网与飞行空域结构进行平面地图分区。依据飞行密度，分析大尺度范围的空中交通流源端与目的端，研究交通航迹与飞行路径的数据挖掘、地图匹配、航迹模式识别等，为开展基于交通流量管理的空域优化与配置提供支持。然而，实际空中交通都是分层并在立体空间内进行的，空域管理仅以平面位置进行空间划分使用，与现实情况有所脱节，难以针对高密度飞行进行高效的空域动态管理。对此，需要从全空域和全球视角，开展数字网格空域离散建模，剖分网格基本空域体；针对空域管理的需求特点，建立一套基于数字网格空域的编码体系（见图 1）。数字空域的离散建模过程，涉及空域结构剖分与属性表达、交通特征提取、航迹数据飞行挖掘三方面。其中，数字网格空域剖分可静态或动态划分为具有特定大小的网格基本空域体，体现了递归特性、空间位置关系隐含特性。

划分网格基本空域体的难点在于，高空骨干航路、中低空进离场衔接航线、支线与机场飞行程序以及其他特殊使用空域、军事空域等不同属性参数均需反映在网格中。如果网格基本空域体尺寸过大，则划分的区域可能包含过多的空域属性和特性；在

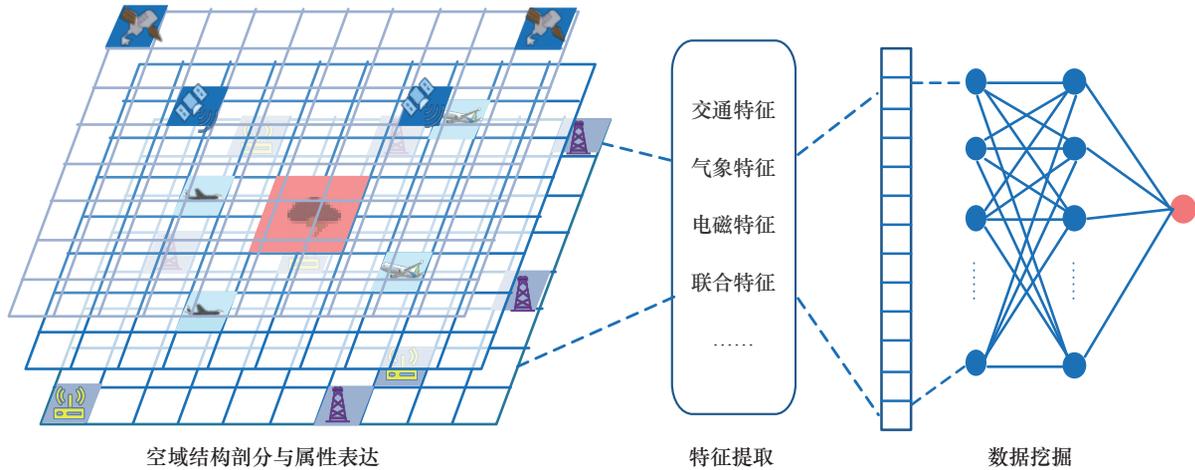


图 1 空域离散建模技术与编码示意图

同一网格中包含过多的空中交通或飞行信息，不同空域飞行状态可能会混淆，导致网格基本空域体无法较为真实地反映网格内的空中交通与飞行状态。如果网格尺寸过小，飞机航迹数据的采样过程会出现连续航迹的偏移或跳跃问题，还可能在一些时间段中出现多数网格内航迹样本严重不足的现象，从而导致计算效率快速下降。因此，数字网格空域离散建模核心在于，通过理论分析确定在空域管理的不同应用中所采用的网格尺度，尺度容限范围等，体现问题解决效果与计算效率之间的平衡 [3]。

将数字网格空域作为空中交通运行数据分析的时空位置基准，实现海量飞机航迹数据的运用转变：由匹配到航路航线与飞行空域的传统方式，切换至基于网格的统计分析数值计算，从而不依赖于矢量复杂航路航线与飞行空域地图；由此利用飞行实时与历史航迹数据，高效准确地识别空中交通拥堵情况并对航迹预测时间进行可信估计。基于此，在构建数字网格空域模型的同时，围绕空中交通管理的时空大数据问题，研究建立数字网格空域编码体系、数据管理技术架构，为快速开展空域数值计算提供支撑。通过数字网格空域的空中交通数据管理并进行数据挖掘分析，可为开展空域优化配置、动态管理、运行控制等提供决策支撑，为基于电子信息新技术的应用、新型数字化空域系统奠定理论基础。

相关技术要点主要包括三方面。①数字网格空域中的空中交通运行状态判别，以网格内特定时间段的空中交通航迹数据为对象，建立交通运行状态

指标，通过聚类方法对空中交通运行状态和特性进行剖析，掌握不同时间、空间、航路航线、飞行空域结构下的交通运行状态。②数字网格空域中的空中交通拥堵识别，解析网格所包含的交通运行状态，构建网格静态与动态交通特征模型，形成基于数字网格空域的空中交通时空运行场景，准确识别交通拥堵状态。③数字网格空域中的空中交通航迹预测，提取交通起始点与终止点之间的有效路径，通过网格集合表征航路航线与飞行路径，利用交通历史大数据分析结论及可能性，进一步建立空中交通航迹的可信预测、网格到达时间估计等。

2. 数字网格空域优化配置模型算法

在传统上，空中交通管理优化问题主要涉及交通流量优化、机场终端区进离场排序、空域结构与交通路径配置优化等。对这些优化问题的研究，较多采用最优化理论与方法、现代优化技术、AI 优化算法等；然而相关研究仍未建立基于完整体系且具有拓展性的方法，难以应对空中交通飞行全过程的优化需求。此外，空中交通管理优化多为 NP-Hard 类问题，大多利用启发式方法在解空间内进行搜索以寻求次优解。建立数字网格空域后，可将空中交通优化、空域配置、交通路径设计等转换为在离散数字网格空间内的搜索与组合优化问题，从而为最优化理论方法、智能优化算法等在空域管理中的应用提供了可能性 [4]。数字网格空域的优化配置过程（见图 2）如下：首先在特定网格内按照飞入、飞出两种模式对交通流分类；然后评价各空域网格内的管制工作负荷、经济指标等，区分标识需要优

化的网格空域；最后通过寻优计算来优化配置空域网格。

相关研究内容主要包括四方面。①机场终端区航线结构设计优化问题，依据机场飞行量与测算所得空域容量的比对结果，利用网格空域本身的时空基准对空中交通进行间隔处理，依据交通流的方向需求，实施路径优化分析与计算；确定高效的空中交通路径优化终端区航线网络结构，减少飞机在终端区内滞留时间，缓解地面延误，减轻管制员工作负荷，提高终端区空域容量和飞行安全与效率。②管制扇区结构设计优化问题，基于数字网格空域的聚合方法，参照空中交通运行历史数据分析结果，将管制负荷分布到网格空域；依据管制负荷均衡性、航路航线结构，实施优化设计的寻优计算与分析并获得问题的优化解。③大尺度空间范围的航路航线网结构优化，涉及空中交通运行的全局性，核心是综合考虑空中禁区、限制区、危险区以及军事空域、航路空域之间存在的交通耦合因素，构建包含空中交通需求、空域容量、飞行时空分布均衡性、飞行非直线系数、经济节约与环保、航空器飞行性能等参数在内的优化模型并进行复杂问题求解；需要进一步考虑航路航线网络结构的稳定性、随机交通流在网络上流动的通畅性、抗气象或设施故障的扰动能力等，将全局空中交通运行的安全风险、流量、流率分布到网格空域中，设计优化目标函数及优化参数，开展空中交通大尺度空间运行仿真分析，形成问题分析结论和方案。④作战空域配置优化，战时空域中存在多种非受控类导弹、火炮、电磁干扰等，根据作战需求来动态优化并调配非受控类武器与受控类航空器之间的空域冲突，成为技术挑战；通过数字网格空域的时空位置基准控制，

利用网格空域的离散特性，将不同种类管制对象控制在不同网格空域内，对网格空域进行动态组合控制以实现作战空域的优化配置。

3. 数字网格空域精细管理与协同控制方法

空中交通正由低密度向高密度发展，时空分布的不均衡性愈发明显；新型航空器，如小型喷气机、无人机、商业运载火箭、临机空间飞行器等的用空需求不断增加，简单依靠对空中交通流的限控量处理这一传统做法已不再适用。亟需构建管理更为精细的自适应空域系统，采用协同控制方法，将航空参与者一体化集成运行；建立更为先进的模型算法并用于决策分析，支持提升空中交通管理的鲁棒性和动态特性。

数字网格空域，将空域冲突控制从连续航迹方程组求解问题转换为离散数字网格空间的概率预测控制计算问题，为大规模对象的协同控制提供了可能性。开展微观空域体的航迹预测与宏观交通流量分布的一体化管理，构建基于网格的交通流量管理方法，为空域的精细控制提供先决条件，为改变空域固定划设管理提供重要支撑；实现基于网格基准的管制引导、空域告警、目标指示能力，发展基于网格的空域管理指令机载航行系统 [5]。数字网格空域精细管理与协同控制过程（见图 3），首先按照当前空域划分方式来评估分析空域流量密度，然后以网格的形式进行流量密集程度表征，再依据数字空域的编码体系将流量分配到数字网格空域中；实现网格方式的空域调配使用，缓解空域流量集中问题。

开发基于数字网格空域的空中交通管理模型，离不开运筹学、制导与控制，系统工程、天气预测、软件工程等学科的支撑，涉及新算法构建、计算机仿真技术应用等。传统上对交通流量管理的研究，

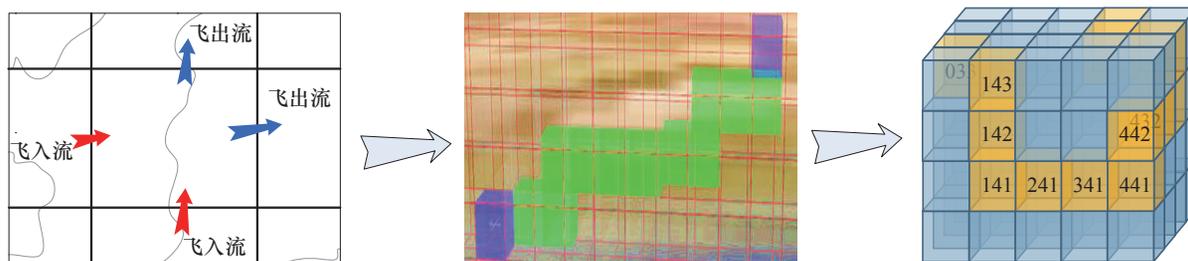


图 2 数字网格空域优化配置示意图

集中于开发飞机运行的开环调度策略；系统中的每一架飞机在所有时刻的位置，都需要通过求解大规模整数规划模型获得。这类做法很难刻画高密度飞机调度问题（万架次/天），一般不易处理系统中的不确定性；以天气影响（驱动调度计划持续调整的最大干扰源）为典型，提前数小时对天气进行精确预报才能满足开环交通流量管理需要，而这超出了天气预报技术的发展水平。

聚合流量模型（也称欧拉模型）可用于交通流量管理协同决策框架的制定。美国国家空域系统已在理论层面验证了欧拉模型的应用可行性。欧拉模型表明，空中交通管理方法与随机网络控制之间具有很强的相似性，对空域系统进行离散化，将连续交通流模型（流体模型）转变为离散的状态方程模型；无需采用偏微分方程描述空中交通流的流动状态，在不失问题本质特性的前提下，建立简化的问题求解策略。

相关研究内容主要包括四方面。①建立基于网格的交通流量模型，引入数字网格的空域关系解耦方法，对大规模交通流量管理优化问题进行降维处理，通过网格的链接关系建立交通路径，优化空域资源使用。②基于网格的空域动态管理，通过模型优化计算来组织数字网格并映射到物理飞行空域，实现对空域的动态网格化管理与资源调配。③基于网格的空域运行控制，数字网格既是飞行的基本空域体，也是飞行空间位置的参考基准，可作为飞行控制的空域边界，通过模型优化计算来联合处理数字网格空域与航空器飞行航迹，实现空域与交通管制的协同。④基于网格的作战空域协同控制，与平时空中交通管理类似，战时在增加非受控类对象空域使用管理的基础上，通过模型优化计算为作战空域高效运行决策提供支撑，防止空中相撞、误击误

伤，提升空域资源使用效率。

六、对策建议

（一）制定国家空域系统发展规划，统筹实施“军民航”空管基础设施建设

建议以国家空域系统建设为牵引，把握国家空天基础设施发展趋势，稳步提升现有空管设施的保障能力；适时制定国家空域系统发展规划，明晰阶段划分及发展目标；部署实施重大科技项目，针对北斗卫星导航、高/低轨卫星通信的空管应用需求，精准提升我国新一代空管设施技术水平、国际标准制定能力。

协调并统筹“军民航”空管设施建设，加强总体规划的实施力度，摸清当前“军民航”空管设施建设、运行存在的问题；注重民用技术在军航领域的应用推广，促进军航空管设施的技术升级与能力提升，适应未来统一管制的发展趋势。

（二）完善科技创新环境，建设国家空域系统科技创新平台

建议研究制定空管系统的国产化政策体系，设立空管科技创新基金，建设空管科技创新平台，开展重大科研项目的论证与实施、新技术准入测试等。增强领域技术实力，逐步提升我国在国际空管标准制定方面的话语权；制定军机空管适航审定规范，对照国际标准，加快构建军民应用结合的空管技术体系。

梳理空管设施建设的自主可控攻关重点，降低关键技术与产品“断供”风险。建议设立国家空域系统基础研究专项，支持建立空管自主可控装备体系；设立无人机空域安全进入技术攻关专项，促进

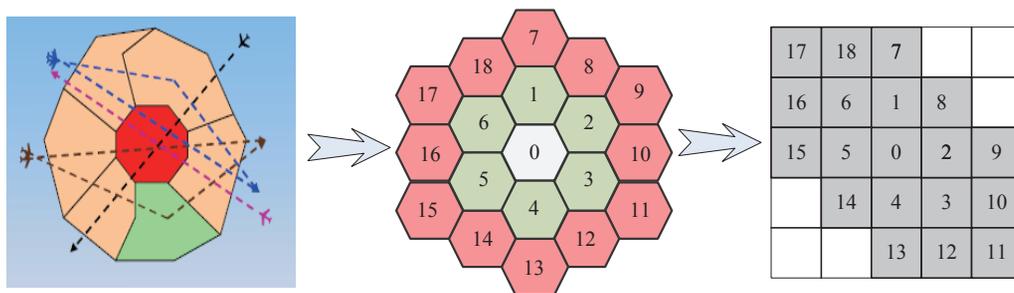


图3 数字网格空域精细管理与协同控制示意图

无人机产业健康发展；开展数字化空域系统建设，制定技术发展路线，全面提升我国空域系统容量，尽快解决空域资源使用紧张问题。

（三）加强空管科技创新工作的统筹协调和资源整合，完善科研创新发展规划

建议从技术政策、人员配置、产品开发、方案实施等方面完善相关管理机制，协调运行单位参与科研产品的需求分析、技术开发、试验验证、示范运行等各个环节，加强科研成果应用转化。

加强空管科技创新的政策支持力度，建立多元化、多渠道的科技投入机制，合理保持空管科研资源的投入力度；鼓励建立组合型科研资金投入与管理模式，提升科研产出效率。优化空管人才结构和职业发展路径，可利用科研成果推广产生的效益，激励科研机构、科技人员深化工作，形成良性循环。

参考文献

- [1] 朱永文, 陈志杰, 唐治理. 空域管理概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Zhu Y W, Chen Z J, Tang Z L. An introduction to airspace management [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [2] 陈志杰. 空域管理理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Chen Z J. Theory and method of airspace management [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [3] 朱永文, 蒲钊. 空域空间网格标识原理及应用 [EB/OL]. (2020-11-16)[2020-11-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20201116.1730.002.html>.
Zhu Y W, Pu F. Principle and application of spatial grid identification [EB/OL]. (2020-11-16)[2020-11-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20201116.1730.002.html>.
- [4] 朱永文. 数字空域技术与离散数值计算原理研究综述 [J]. 通信与计算技术, 2018, 38(1): 2-12.
Zhu Y W. Review of research on digital airspace technology and principles of discrete numerical computation [J]. Journal of Communication and Computing Technology, 2018, 38(1): 2-12.
- [5] 朱永文, 谢华, 王长春. 空域数值计算与优化方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Zhu Y W, Xie H, Wang C C. Numerical calculation and optimization of airspace [M]. Beijing: Science Press, 2020.