

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.04.016

## 空中交通自主间隔管控技术研究

蔡开泉, 赵 鹏

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 空中交通自主间隔管控是通过将地面管制系统的间隔管制任务部分或全部转移到航空器端, 实现空地分布式的间隔保持与安全管控, 进而达到改善空中航行的灵活性与效率的目的, 是国际民航下一代空中交通管理系统发展的前沿技术方向。本文总结分析了空中交通自主间隔管控的国内外发展现状与技术挑战, 重点从机载飞行态势感知、机载航迹规划与控制、空中交通自主运行管控 3 方面综述了技术研究进展, 归纳了 3 方面技术的发展趋势, 并指出了未来研究的思路与方向。

**关键词:** 空中交通管理; 自主运行; 机载间隔保持; 安全管控

**中图分类号:** U8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)04-0688-12

### Key Technologies on Air Traffic Self-separation Management

CAI Kaiquan, ZHAO Peng

(School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Air traffic self-separation technology of the next generation air traffic management system is a cutting-edge direction recognized by the civil aviation community, which transfers partial or total separation maintenance tasks from ground to aircraft. The air traffic self-separation is implemented by using the distributed mechanism to facilitate flexibility and efficiency of flights. This paper reviews and analyzes the state-of-the-art and challenges of the development in this field. Three aspects of the research progress and trend are highlighted, including airborne flight situation awareness, airborne trajectory planning and controlling, and air traffic autonomous operation and control. Three trends of the technology are summarized, and directions for future research are identified.

**Key words:** air traffic management; autonomous operation; aircraft self-separation; safety management

空中交通间隔管控是利用冲突管理的手段, 确保航空器飞行全过程与其他航空器间以及与障碍物间满足安全间隔标准要求, 减小潜在飞行冲突与碰撞风险, 维护空中交通秩序, 提高空中交通运行效率。空中交通间隔管控是空中交通管理(简称“空管”)系统的核心任务。根据国际民航组织 Doc 9854《全球空中交通管理运行概念》<sup>[1]</sup>的定义, 冲突管理从时间尺度上可以分为战略冲突管理、中短期间隔保持和近距防撞。战略冲突管理是在航空器起飞前通过空域管理、飞行计划、流量管理等方式实现潜在飞行冲突的预先管理; 中短期间隔保持则

是指潜在冲突发生前数十分钟以内对航空器的计划航迹进行冲突探测与解脱, 避免航空器间以及航空器与障碍物间低于安全间隔标准; 近距防撞是指在航空器间冲突已经发生, 或者将在数十秒内存在碰撞风险的情况下采取的防撞措施, 也是冲突管理中的最后一道防线, 典型的设备有空中防撞系统(Traffic collision avoidance system, TCAS)、机载防撞系统(Airborne collision avoidance system, ACAS)等<sup>[2]</sup>。空中交通间隔管控关注的重点是战略冲突管理和中短期间隔保持。与近距防撞机制相比, 空中交通间隔管控在处理逻辑、时序预测和

收稿日期: 2021-11-16; 修订日期: 2022-03-15

通信作者: 蔡开泉, 男, 教授, E-mail: caikq@buaa.edu.cn。

引用格式: 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 Kaiquan, ZHAO Peng. Key technologies on air traffic self-separation management[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(4): 688-699.

程序变更等方面有较为明显的不同<sup>[3]</sup>。

传统的空中交通间隔管控采用以地面管制员为中心、按管制扇区进行集中式间隔管控的方式。然而随着航空运输量的持续增长,空中交通运行的复杂度逐步加大,由于管制工作负荷大、航空器飞行灵活性受限等原因,传统管控方式难以满足高复杂度空域环境下空中交通安全高效运行的需求,已成为空管系统保障能力稳步提升的关键瓶颈之一。为应对持续增长的空管保障需求,迫切需要创新空中交通间隔管控模式。美国航空无线电技术委员会(Radio Technical Commission for Aeronautics, RTCA)于1995年提出“自由飞行”的计划中,航空器自主间隔保持被认为是一个潜在可行的运行概念<sup>[4]</sup>,即通过将地面管制系统的间隔管制任务转移到由航空器与机组人员完成,让机载端承担更多的飞行冲突探测与解脱责任,实现空地分布式的自主间隔保持与安全管控,提升空中航行的灵活性和自主性。分布式自主间隔管控与传统集中式间隔管控的区别如图1所示。

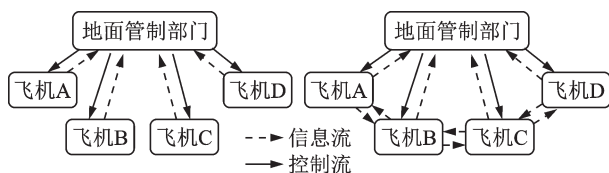


图1 分布式自主间隔管控模式(右)与传统集中式间隔管控模式(左)示意图

Fig.1 Illustration of distributed self-separation management mode and conventional centralized mode

为验证自主运行的运行概念,美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)、美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)先后启动了“安全飞行21(Safe flight 21)”“空地分布式管制运行(Distributed air/ground-traffic management, DAG-TM)”等项目<sup>[5]</sup>,欧洲空中航空局(EUROCONTROL)、荷兰国家航空实验室也先后开展了“自由航路实验方案(Free-route experimental encounter resolution, FREER)”“自主飞行(iFly)”等项目<sup>[6]</sup>。其中,iFly项目验证了自主运行条件下的空域保障容量可提升近3倍。2009年,EUROCONTROL在葡萄牙首次设立自由航路(Free route airspace, FRA),允许航空器“点对点”自主选择飞行路线,在集中式间隔管控模式下实现灵活运行。目前FRA已推广应用到欧洲的大部分空域,飞行效率提升效果明显,每天节省燃油约3 000 t。FAA于2016年在泛大西洋航路上应用尾随飞行程序(In trail procedures, ITP),利用广播式自动相关监视-接收(Automatic

dependent surveillance-broadcast in, ADS-B In)技术,后机组监视并保持与前机的安全间隔,实现尾随飞行过程中高度自主的高度层变更,以便选择更经济的巡航高度层,从而节省燃油消耗。

2020年2月,美国NASA发布了《2019战略实施规划》<sup>[7]</sup>,提出了未来15年通过航空器实施近期有限的自主运行、中期小规模自主运行、远期大规模自主运行的3个阶段,逐步实现自主运行的发展愿景。欧洲航空安全局(European Aviation Safety Agency, EASA)也发布了《1.0版人工智能路线图:从以人为中心向人工智能的过渡》<sup>[8]</sup>,提出利用人工智能、机器学习等新技术在2035年实现空中交通自主运行。

尽管国际上针对空中交通自主间隔管控已开展了大量的研究与应用验证工作,然而尚未在真正意义上实现应用,仍存在诸多问题亟待逐一解决<sup>[9]</sup>。典型问题包括:(1)以航空器自身传感器为主的空域态势感知方式,难以完备、准确地识别空中飞行威胁;航空器自主间隔保持难以确保飞行安全;多源多粒度威胁数据可信融合与风险预测是首先需要解决的问题。(2)受运行环境、设备性能和人为因素等不确定性因素影响,自主化的空中交通系统将是一个非确定性的复杂自适应系统,实际运行中间隔管控的鲁棒性难以确保。尤其对于航空器机载飞行航迹的实时规划与控制,面临着不确定性环境下机载飞行航迹无冲突鲁棒规控的问题。(3)空中交通自主间隔管控技术的应用,将使得未来空中交通运行呈现出分布式、集中式和混合式等多模式间隔管控,特别是在航空器机载能力和地面系统差异化的环境下,如何实现多模式混合运行的高性能管控,是亟待解决的又一项技术挑战。

针对上述问题和挑战,本文将从机载飞行态势感知、机载飞行航迹规划与控制、空中交通自主运行管控3方面的技术展开综述,梳理归纳空中交通自主间隔管控技术的研究进展,总结3方面技术的研究热点与发展趋势,并分析未来研究的思路与方向。

## 1 机载飞行态势感知技术

机载飞行态势感知是空中交通自主间隔管控的首要前提。航空器飞行态势主要包括空域内飞行冲突、碰撞风险等交通态势信息,以及气象、地形等环境态势信息。机载飞行态势感知需要采集获取上述飞行安全态势相关信息,并针对飞行威胁进行准确的风险评估与影响分析。

### 1.1 机载交通与环境态势感知

在空中交通态势感知方面,机载航空监视系统装备技术发展相对成熟,特别是针对短期近距的交

通态势感知,以第一代空中防撞系统 TCAS I 为代表的机载防撞系统可探测航空器垂直距离 2 133~3 048 m,水平半径 28~74 km 以内的空域范围,当有邻机接近时,会提前 40 s 告警,并向飞行员提供邻机的高度和位置等信息,感知范围如图 2 所示。近年来,随着 TCAS 系统的不断升级,现有的 TCAS II 系统支持语音冲突告警并提供垂直方位的避撞建议。然而,TCAS 的框架设计是基于确定型模型,未考虑环境动态、飞行员操作行为等不确定性因素的影响。为了提高机载防撞系统的鲁棒性,FAA 开始研制升级版的 TCAS—ACAS X<sup>[10]</sup>。ACAS X 将避撞问题建模为局部观测马尔科夫过程,并利用动态规划方法求解避撞策略,避撞策略以查找表的形式储存于机载设备中,并根据具体情形输出避撞建议。此外,为了进一步扩展航空器态势感知的范围,多款支持航空器中远距态势监视的系统也随之出现。以机载 ADS-B IN 为代表的广域监视系统能够实现以本机为中心,半径约 240 km 范围内的探测,同时接收其他航空器及地面监视服务设备发送的交通态势信息<sup>[11]</sup>。

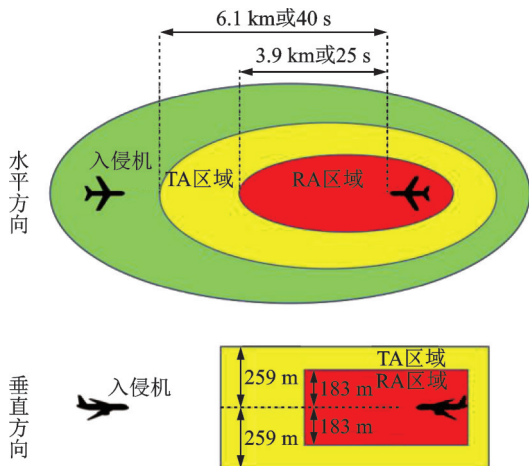


图2 TCAS感知范围示意图

Fig.2 Illustration of TCAS protection volume

除了对监视范围的扩展外,部分研究者重点关注如何实现更为准确化、精细化的冲突感知。Jemie等<sup>[12]</sup>通过确定性的速度障碍(Velocity obstacle, VO)几何模型,预估给定时间内两机的相对运动趋势来感知冲突态势;为提升冲突探测的准确性,Hao等<sup>[13]</sup>分析了基于航迹的运行(Trajectory based operation, TBO)场景下飞行员意图的不确定性对于航空器飞行轨迹预测的影响,建立了时空可达域概率模型。

在机载气象态势感知上,目前主要依靠机载天气多普勒雷达,典型产品有德国 HENSOLDT 公司的 PrecISR 和美国 Collins 宇航公司的 TWR-850,但机载天气雷达探测范围和能力有限,为此美国国家海洋与大气管理局(National Ocean-

ic and Atmospheric Administration, NOAA) 和 FAA 联合推出座舱天气增强感知系统(Next generation weather radar, NEXRAD),将全美 160 座高分辨率 S 波段多普勒天气雷达采集的信息经过处理后通过地空数据链上传至座舱。在针对危险天气威胁气象因素识别与跟踪研究上,Shah 等<sup>[14]</sup>为解决雷暴虚假合并问题,提出一种用于雷暴探测和跟踪的算法,该算法能够自动计算合适的雷暴单体探测阈值,进而准确识别雷暴簇中的雷暴单体,更好地探测初生雷暴。Wang 等<sup>[15]</sup>为了准确、快速地预测二维平面的风切变,提出一种利用机载气象雷达识别不同高度水平风切变区域的区域增长算法,使风切变的识别精度、识别速度及剪切线连续性得以提升。

在地形态势感知方面,1972 年加拿大工程师开发了地面迫近告警系统(Ground proximity warning system, GPWS)<sup>[16]</sup>该系统可从飞机起飞开始到降落地面为止,持续监视飞机的离地高度,利用无线电高度表获得离地高度,并预测飞机的飞行趋势,当发现存在危险时将以图像与语音方式警告飞行员采取避险措施。随着数字地图技术、GPS 精确定位和导航技术的发展,美国 Honeywell 公司<sup>[17]</sup>开发了地形感知与告警系统(Terrain awareness warning system, TAWS),在近地告警系统的基础上增加了前视功能和地形感知功能。为了进一步提升机载地形感知的精度,近年来也有研究者利用探测系统采集的地形数据开展地形感知算法的研究。张永<sup>[18]</sup>基于数字高程地图(Digital elevation model, DEM)数据采用扫描填充算法快速生成彩色的动态地形图,实现飞行全过程地形的全面感知和威胁告警。

然而,为了满足航空器飞行态势全面感知的需求,传统的孤立式机载态势信息处理方式逐渐被多元信息融合处理技术所取代。从 20 世纪末开始,美国 Collins 公司、Honeywell 公司等开始研发机载综合监视系统(Integrated surveillance system, ISS)、航空器环境监测系统(Aircraft environmental surveillance system, AESS)等,在一定程度上实现了机载分布式态势数据的融合,已应用于空客 A350、A380 等类型的客机。此外,驾驶舱交通信息显示系统(Cockpit display of traffic information, CDTI)<sup>[19]</sup>也可为航空器飞行提供可视化综合态势信息。

## 1.2 机载飞行威胁评估与影响分析

飞行威胁评估是指航空器周边其他航空器或气象条件、地形等态势对航空器自身威胁程度的分析、判别与估计。现有飞行威胁评估相关的研究工作主要分为评估模型建立和评估指标选择 2 个方面。针对飞行威胁评估模型可从航空器实际的运

行环境入手,设计多种基于不同威胁程度划分的目标威胁估计方法。孔尚萍<sup>[20]</sup>为解决传统威胁评估方法主观性强、赋权方法单一的问题,提出基于层次分析法与熵权法的威胁评估方法,建立组合赋权模型,进一步提升防空作战场景下入侵机冲突风险评估的可信度;在威胁评估过程中,影响威胁评估的因素往往具有不确定性,有些属性值甚至无法直接获取。为此,赵焜飞等<sup>[21]</sup>对属性值进行模糊化处理,基于模糊层次分析法(Fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)和模糊综合评价法评价了航路交通态势;周源等<sup>[22]</sup>在目标威胁评估中引入了目标威胁意图评估,并建立基于贝叶斯网络的不确定性目标威胁评估模型,使得评估结果更为合理;Alam等<sup>[23]</sup>提出集成飞行冲突探测方法,针对不同飞行冲突探测方法在不同场景中的探测能力不同的问题,首先采用遗传算法产生复杂冲突场景,再利用数据挖掘手段识别冲突探测算法误检或漏检的冲突模式,然后在某一冲突模式下选择对该模式冲突识别准确率最高的算法。

在评估指标选择方面,目前的研究主要是基于单一交通安全态势要素的分析,指标的分类较为多样且不成体系。邱启伦<sup>[24]</sup>从通航领域复杂低空环境的特点出发,借助NetLogo平台仿真复杂低空多种航空器混合飞行环境,根据“冲突数”“冲突避让行为比”“汇聚迫近程度”及“平均速度改变量”等指标对混合飞行的态势进行特性分析。Calvo-Fernández等<sup>[25]</sup>通过对飞行冲突和管制员解脱指令等数据进行分析,将航空器冲突分成不同类别,并对管制员的指令进行聚类,从而建立冲突-解脱指令的对应关系。

飞行威胁影响分析则是针对飞行威胁影响较大的目标重新设计间隔标准,从而实现可靠的自主

间隔保持。传统的安全间隔设计方法主要是针对集中式管制环境下的空域运行提出的,以 20 世纪 60 年代的 Reich 模型<sup>[26]</sup>为代表,其主要思想是通过建立碰撞模板和临近层对平行航路进行基于固定距离阈值的纵向、侧向和垂直方向的安全间隔设计,并通过大规模的碰撞实验来验证间隔参数设计的合理性。近年来研究者在安全间隔的设计中引入了多元随机因素,以满足未来空域更为精细化、高效化的运行需求。张兆宁等<sup>[27]</sup>利用贝叶斯网络方法对自由飞行场景下的碰撞风险进行了研究,根据自由飞行的特点,建立了改进的 Event 碰撞风险计算模型,确定了航空器间的最小安全间距。Weibel等<sup>[28]</sup>将 well-clear 阈值作为无人机间隔标准设计的参考,根据国际民航组织对间隔标准的定义,基于目标安全水平推导出 well-clear 的边界值。Mosquera-Benitez等<sup>[29]</sup>综合考虑航空器速度误差、导航监视设备固有的定位误差、人为干预场景下的通信和机动响应延时以及尾流扰动等因素,设计了由 4 层缓冲边界构成的最小化动态安全保护区。Yang等<sup>[30]</sup>采用基于场景方法建立了航迹的概率可达集模型,并用于冲突探测与解脱。Mullins等<sup>[31]</sup>提出了可应用于无人机机载感知与规避技术(Sense and avoid, SAA)系统的动态间隔阈值,考虑入侵机机动性能,用基于时间的阈值代替基于距离的阈值标准,实现了较为保守的间隔设计。NASA的Munoz等<sup>[32]</sup>根据 TCAS II 冲突解脱过程中基于水平方向不同的时间度量,提出了支持有/无人航空器混合运行空域的间隔保持 well-clear 模型,在保证飞行安全的前提下有效提升空域的容量和效率。

机载飞行态势监视典型技术手段归纳对比如表 1 所示。

表 1 机载飞行态势监视典型技术手段归纳对比

Table 1 Comparison of classical airborne airspace-situation-awareness technologies

态势类型	设备/算法	监视范围	航空器类型	设备类型	评估方法
交通态势	机载雷达 <sup>[33,13]</sup>	周边 28~74 km	有人机	机载设备	—
	ADS-B <sup>[11]</sup>	周边 240 km	有人机	机载设备	—
	Jenie等 <sup>[12]</sup>	500 m 以内	无人机	—	—
	Hao等 <sup>[13]</sup>	296 km	有人机	—	—
	孔尚萍 <sup>[20]</sup>	296 km	有人机	地面设备	层次分析法+熵权法
	赵焜飞等 <sup>[21]</sup>	—	有人机	地面设备	模糊层次分析法+模糊综合评价法
	周源等 <sup>[22]</sup>	185 km	—	地面设备	贝叶斯网络
	张兆宁等 <sup>[27]</sup>	28 km	有人机	—	贝叶斯网络
	Yang等 <sup>[30]</sup>	280 km	有人机	机载设备	概率可达集
	Mullins等 <sup>[31]</sup>	—	无人机	—	动态保护区
环境态势	Shah等 <sup>[14]</sup>	370 km	—	地面雷达	—
	Wang等 <sup>[15]</sup>	148 km	有人机	机载雷达	—
	张永 <sup>[18]</sup>	37 km	有人机	机载设备	—
	GPWS <sup>[16]</sup>	离地高度	有人机	机载设备	—
	TAWS <sup>[17]</sup>	前视+离地	有人机	机载设备	—

## 2 机载飞行航迹规划与控制技术

机载飞行航迹规划与冲突解脱是空中交通自主间隔管控的核心。为了从机载端实现多时间跨度的自主间隔保持,不仅需要针对长期或全航段航空器运行进行航迹规划,提升全局运行效率,也需要针对短期或中短期航空器进行航迹的实时重新规划,通过冲突解脱避免潜在冲突,确保飞行安全。

### 2.1 飞行航迹规划

机载飞行航迹规划主要通过机载飞行管理系统(Flight management system, FMS)实现。飞行员可通过FMS接口输入包括起飞机场、航路点、目的机场等参数的飞行计划,进而由FMS从数据库中提取信息,进行从爬升阶段到进近阶段的航迹规划<sup>[34]</sup>。在航迹规划方法研究方面,Chaloulos等<sup>[35]</sup>采用以机载控制为主,地面信息输入为辅的思路,采用人工势场和自动控制结合的方法,在势场中应用导航功能从而实现在机载端的分布式短期无冲突规划,并通过地面模型预测控制器为航空器提供中期的航空器航迹规划。Asadi等<sup>[36]</sup>基于VO模型,通过在局部决策中协调其他主体的目标来消除航空器之间的优先级,并提高了协同分布式控制的性能。Zhao等<sup>[37]</sup>提出了利用Dijkstra算法和启发式迭代搜索算法的垂向协同航迹规划方法,综合考虑多种威胁因素规划安全飞行航迹,并进一步扩展到水平航迹规划<sup>[38]</sup>。Erzberger等<sup>[39]</sup>提出了考虑水平航向角限制的无冲突航迹规划方法。Pallottino等<sup>[40]</sup>采用了混合整数规划优化冲突解脱航迹的方法,Schouwenaars等<sup>[41]</sup>进一步将该方法改进为非中心方式。Christodoulou等<sup>[42]</sup>利用混合整数非线性规划方法,联合优化控制水平航向角与飞行速度,进而得到无冲突航迹。Lehouillier等<sup>[43]</sup>将不确定性引入到确定性模型中,并将无冲突航迹规划问题建模为最大团最小权值问题,并利用混合整数规划求解。

随着基于四维航迹运行概念(4D TBO)的提出,机载航迹规划对所需到达时间(Required time of arrival, RTA)有了更精细的要求,Ramasamy等<sup>[44]</sup>提出了以四维航迹为基础的下一代飞行管理系统(Next generation flight management system, NG-FMS)航迹规划方法。该方法使NG-FMS与地面四维航迹规划系统实现系统间充分的互操作,能够产生一族四维航迹,对应于航空导航服务商以及航空公司运行中心协调的一系列权值参数。对于不同的运行任务,NG-FMS将采用伪谱以及加权的方法产生优化的航迹。

### 2.2 飞行冲突解脱

飞行冲突解脱是指航空器或地面管制中心在发现空域内存在潜在冲突时,执行一系列避免飞行冲突的操作<sup>[45]</sup>。冲突解脱按照建模方法可分为确定型模型和概率型模型。在自主间隔管控的运行框架下,冲突解脱的模型框架可以分为分布式和集中-分布式<sup>[46]</sup>。

针对确定型冲突解脱问题,Gai等<sup>[47]</sup>采用基于碰撞边界的冲突探测方法,提出了使用非线性动态逆导航方法实现航空器的冲突解脱,该方法可适用于初始角度和速度多元的多航空器冲突解脱问题。Hwang等<sup>[48]</sup>提出了基于规则的多航空器冲突解脱方法,该方法考虑了对位置、航向、速度和异步操作等因素,具有针对不确定性变化的鲁棒性。

针对概率型冲突解脱问题,Ong等<sup>[49]</sup>将冲突解脱问题描述为多智能体马尔可夫随机决策过程(Multi-agent markov decision process, MMDP),并考虑了航空器动力学、环境因素和飞行员反应等不确定性问题,通过将MMDP分解为容易处理的子问题对模型进行求解,从而实现了一种鲁棒的多航空器冲突解脱方法。Lauderdale等<sup>[50]</sup>将冲突概率转化为飞行延误,作为冲突规划目标函数中的罚函数进行求解,该方法求解简便,适用于两飞行器间的无冲突规划局部优化。Paielli等<sup>[51]</sup>提出了利用概率模型和坐标转换以计算机间冲突概率的方法,并进一步提出冲突解脱策略。Kochenderfer等<sup>[52]</sup>利用雷达数据训练了动态贝叶斯网络实现了飞行航迹预测,进而采用马尔科夫蒙特卡洛方法<sup>[53]</sup>实现对冲突概率的预测。

针对分布式的冲突解脱问题,Durand<sup>[54]</sup>对传统分布式最优交互冲突避免(Optimal receiptacle conflict avoidance, ORCA)控制方法进行修改,使其适用于速度控制受限的航空器并进行大规模控制。Yang等<sup>[55]</sup>采用蒙特卡洛决策树对无人航空器(Unmanned aerial vehicle, UAV)进行分布式的航迹规划,并可识别合作/非合作机群。为实现分布式冲突解脱的高效计算,近年来越来越多的学者利用强化学习来解决分布式冲突解脱问题。Yang等<sup>[56]</sup>利用基于模型的强化学习方法提出了接近最优的无冲突控制策略,该方法可在多维连续空间中利用最优策略寻找理论上接近最优的策略,并实时对航空器进行航迹控制。Zhao等<sup>[57]</sup>使用卷积神经网络(Convolutional neural network, CNN)结合深度强化学习网络将空域VO图像作为输入进行训练,解决了强化学习只能针对特定数量入侵机训练解脱策略的问题。Wang等<sup>[58]</sup>考虑航空器转弯半

径等实际飞行条件建立了相适应的强化学习模型,通过智能体针对多冲突场景生成航空器响应机动,并应用 AC(Actor-critic)算法提高了计算效率,最终实现求解时间减少至 200 ms 以内的效果。Shi

等<sup>[59]</sup>针对有/无人航空器混合空域融合的分布式冲突解脱方法,其特点是先构建了针对异质航空器的动态保护区,然后应用 VO 模型求其可用的速度和方向角,如图 3 所示。

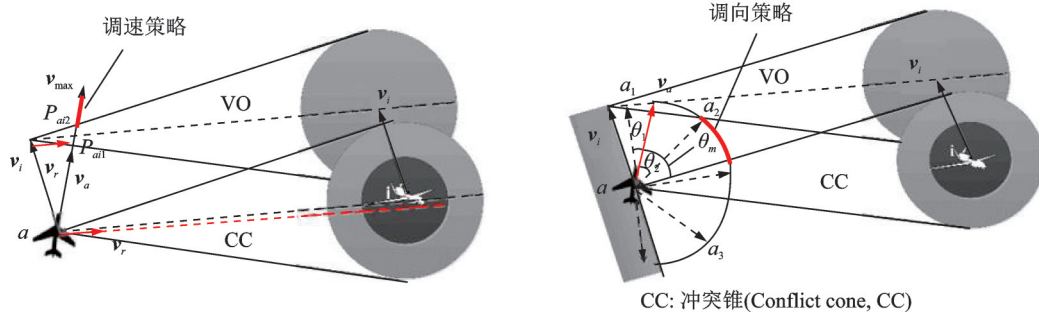


图 3 VO 锥模型

Fig.3 VO cone model

单纯的分布式冲突解脱方法由于缺少全局信息往往难以实施最优解脱策略,集中-分布式的冲突解脱方法利用集中式考虑全局状态,再利用分布式进行求解,可以实现接近最优解脱效果的策略。Liu 等<sup>[60]</sup>提出了一种基于图网络的冲突解脱方法,以调整最少数量的关键冲突航空器为约束目标,同时保证全局无冲突情况。Chaloulos 等<sup>[61]</sup>采用以机载控制为主,地面信息输入为辅的思路,利用人工势场和自动控制的方法,

在势场中应用导航功能从而实现在机载端的分布式短期无冲突规控,并通过地面模型预测控制器为航空器提供中期的航空器航迹规划。集中-分布式的冲突解脱方法是从完全集中式向完全分布式的过渡方法,其可以在考虑集中式的全局优化角度的基础上,利用分布式计算提升计算效率。

机载冲突探测与解脱典型算法归纳对比如表 2 所示。

表 2 机载冲突解脱典型算法归纳对比

Table 2 Comparison of classical airborne conflict resolution methods

模型	探测/解脱	方法	作用时间	模型	维度	对象
Gai 等 <sup>[47]</sup>	探测+解脱	非线性动态逆导航方法	中短期	确定	水平	双机
Hwang 等 <sup>[48]</sup>	解脱	基于规则	中短期	概率	水平	多机
Ong 等 <sup>[49]</sup>	解脱	马尔可夫决策	短期	概率	水平	多机
Lauderdale 等 <sup>[50]</sup>	探测		中期	概率	水平+垂直	双机
Pailli 等 <sup>[51]</sup>	探测+解脱	坐标转换	短期	概率	水平	双机
Kochenderfer 等 <sup>[52]</sup>	探测	动态贝叶斯网络+马尔科夫蒙特卡罗	短期	概率	垂直	双机
Durand 等 <sup>[54]</sup>	探测+解脱	CSORCA	短期	确定	水平	多机
Yang 等 <sup>[55]</sup>	探测+解脱	蒙特卡罗搜索树	短期	确定	水平	多机
Yang 等 <sup>[56]</sup>	探测+解脱	强化学习	短期	确定	水平	双机
Zhao 等 <sup>[57]</sup>	探测+解脱	基于知识的强化学习	中短期	确定	水平	多机
Wang 等 <sup>[58]</sup>	探测+解脱	强化学习	短期	确定	水平	多机
Shi 等 <sup>[59]</sup>	探测+解脱	速度障碍锥	短期	确定	水平	多机
Liu 等 <sup>[60]</sup>	解脱	图网络	中期	确定	水平	多机
Chaloulos 等 <sup>[61]</sup>	探测+解脱		中短期	确定	水平	多机

### 3 空中交通自主运行管控技术

空中交通自主运行管控是从系统全局层面,对指定空域范围内的所有运行航空器(具备自主间隔保持能力和不具备自主间隔保持能力),采用集中式、分布式或混合式间隔管控方式,对空域内的飞行流进行综合管控。根据间隔管控模式的区别,可分

为自上而下的集中式管控、自下而上的分布式管控以及综合两种管控方式的混合式管控根据;根据空域运行场景的差异,可分为包括自由航路、尾随飞行、终端区进离场管理等场景下的自主运行管控。

集中管控模式多以地面管制系统为主导,侧重全空域内的整体效率与安全性。Durand 等<sup>[62]</sup>采用

集中管控方式解决了法国空域巡航阶段航空器间的飞行冲突问题,考虑到大规模组合优化问题的全局求解难度,航空器采用较为简单的解脱机动方式。在 Durand 等工作的基础上, Hu 等<sup>[63]</sup>引入航向、速度、高度层变更的三维机动方式,给出了航空器在全局解脱机动代价最小时的最优无冲突机动策略。然而,为确保解的时效性,多机场景下的集中管控策略的求解往往仅能得到局部最优解或者次优可行解。 Pallottino 等<sup>[64]</sup>后续通过借助 CPLEX 优化器得到全局最优解,但模型只能推广应用至 17 架航空器的飞行场景。综上,集中式优化管控在航空器数量较少时可以取得理想结果,随着场景内航空器数量的增多,难以保证在有限时间内为所有航空器生成最优无冲突解。

分布式管控模式利用机间信息交互,其中由个体间相互协调保持间距的多智能体系统 (Multi-agent system, MAS) 技术得到了广泛应用。 Hill 等<sup>[65]</sup>较早地将 MAS 协作机制应用到自由飞行航空器的无冲突机动航向生成过程,为多机间分布式冲突解脱策略研究提供了新的发展思路,但在三维空间的应用还有待研究。石文先<sup>[66]</sup>在三维空间中,以充分考虑各个航空器智能体的目标意图为基础,得出各航空器均能接受且整体效应最优的冲突解脱策略。考虑到传统的分布式算法对航空器间的态势共享与通信资源的条件有着较高要求,基于弱通信(即不要求场景内的所有航空器间均存在态势共享)的多智能体集群控制模型得到广泛应用,具体方法包括领航-跟随法<sup>[67]</sup>、一致性理论方法<sup>[68]</sup>等。 Kuriki 等<sup>[68]</sup>将一致性协同编队控制算法与基于人工势场的避撞控制算法相结合,在自由航路飞行的航空器可在一致性控制律作用下,利用邻近航空器状态信息到达指定位置并保持预期的安全间隔。综上,分布式优化管控具有机动性强、适应度

高、求解迅速的优势,但对于航空器间的协调机制有着较高的要求,在多航空器协同过程中容易引发二次冲突,严重影响管控的稳定性。

此外,考虑到复杂高密度运行场景下,单一的集中式管控时效性不足并且分布式控制稳定性难以保障,为兼顾管控策略的科学性和时效性,部分学者提出了集中管控指挥与个体分布机动的混合式控制模式。 Zhang 等<sup>[69]</sup>在分析航空器冲突关联关系的基础上,设计了基于协同进化的集中式分布式混合冲突解脱框架,在接近实时的情况下可有效地获得最优解。肖宗豪等<sup>[70]</sup>结合集中式与分布式两种控制方式提出了无人航空器集群混合式控制机制,仿真实验对分布式、集中式与混合式 3 种控制进行对比仿真,结果表明基于混合式控制的集群在飞行可控性、跟随性、一致性以及降低通信负载等方面具有明显优势,验证了混合式控制方法的有效性。汤新民等<sup>[71]</sup>针对航路序贯飞行场景前机减速情况下两航空器的间隔保持问题,并且在考虑航路飞行存在的随机扰动因素的条件下,提出了基于滚动时域控制的航向角调整和真空速调整的混合间隔保持策略。

为科学选择管控方式,学者们进一步针对同一场景下不同管控方式间的性能差异开展了研究。孙樊荣等<sup>[72]</sup>建立了大流量条件下分布式管控系统和集中式管控系统的安全性计算模型,结果显示在大流量时分布式管控系统的安全性低于集中式管控系统。Xue<sup>[73]</sup>针对城市空中交通系统中无人航空器冲突解脱的方式选择,对集中式、统一规则的分布式和混合式 3 种运行管控模式进行了建模和分析,重点考察了 3 种管控方式下通信和状态信息监视偏差对整体安全、效率等性能指标的影响。

自主运行管控典型算法按场景分类进行归纳对比如表 3 所示。

表 3 自主运行管控典型算法归纳对比

Table 3 Comparison of classical autonomous operation management methods

场景	模型	方法	模式	确定/随机	维度	优化类型
自由航路	Hill 等 <sup>[65]</sup>	满意度博弈论	分布式	确定	水平	
	石文先 <sup>[66]</sup>	多智能体系统协商机制	分布式	确定	水平+垂直	
	Liu 等 <sup>[67]</sup>	领航-跟随法	分布式	随机	水平+垂直	全局
	Kuriki 等 <sup>[68]</sup>	一致性法	分布式	确定	水平	全局
	Zhang 等 <sup>[69]</sup>	协同进化	混合式	确定	水平	全局
	肖宗豪等 <sup>[70]</sup>	混合式控制	混合式	确定	水平	
	汤新民等 <sup>[71]</sup>	滚动时域控制	分布式	随机	水平	
多场景	Durand 等 <sup>[62]</sup>	遗传算法	集中式	随机	水平	局部
	Hu 等 <sup>[63]</sup>	优化近似机制	集中式	确定	水平+垂直	局部
	Pallottino 等 <sup>[64]</sup>	混合整数规划	集中式	确定	水平	全局

## 4 现状总结与研究展望

从上述综述可以看出,围绕空中交通自主间隔管控技术,国内外已开展了大量的研究工作,形成了较为丰富的理论与技术研究成果,但仍未完全解决空中交通自主间隔管控实际应用中的挑战性问题。

### 4.1 现状总结

(1)机载空域态势感知逐步由传统各类态势信息的独立探测、分离感知向协同感知、态势融合的方向发展,飞行威胁评估由传统的单维度定性分析向多维度定量评估的方向发展,安全间隔标准则由传统集中管控模式下的静态固定间隔向动态自适应间隔的方向发展。但目前机载飞行态势感知仍存在各要素信息融合程度低、威胁评估可信度不足等问题,且应对多元威胁场景下航空器自主间隔保持与安全飞行,安全间隔自主管控的适应性和灵活性有待提高。因此,机载安全态势可信感知与动态安全间隔设计将是该领域重要的研究方向。

(2)机载飞行航迹规划逐步由单机空间三维规划向包括到达时间在内的多机时空四维规划的方向发展,机载飞行冲突解脱则由确定性条件下的短期冲突解脱向考虑不确定性影响的中长期解脱方向发展。空地分布式的自主间隔管控对机载航迹规划与冲突解脱的能力提出了更高的要求,为确保空中交通自主运行安全高效的目标,特别是应对实际运行环境中不确定性影响,需要重点解决机载四维飞行航迹的实时无冲突鲁棒规划与控制的问题。

(3)空中交通运行管控手段逐步由单一管控模式向适应场景需要的多管控模式混合的方向发展,管控的内涵将在间隔管控的基础上,更关注个体层面间隔管控与整体飞行流同步控制的结合。因此,空中交通自主运行管控不仅需要满足飞行无冲突、安全间隔保持等安全性能要求,还需要考虑效率、容量等整体空域运行效能指标。然而目前空中交通自主运行管控缺乏不同运行场景、不同飞行流密度下综合性能的评估方法,特别是针对多场景下多模式间隔管控的混合运行。因此,跨模式融合运行的高性能管控技术将是该领域重要的研究方向。

### 4.2 问题分析与可能思路

(1)多源多粒度威胁数据可信融合与风险预测

由于机载飞行威胁识别依赖于民航飞机机载的 TCAS、气象雷达等的近距离监视手段,以及 ADS-B IN、ADS-R、TIS-B、FIS-B 等中远距离监视手段,多源监视数据的时空基准、分辨率、尺度各

异,多元监视的目标位置、速度置信度也参差不齐,如何对多源多粒度威胁数据进行融合处理,实现高置信度的飞行威胁估计是空中交通自主间隔管控中面临的难题。同时,航空器飞行的高动态性、飞行威胁的多元化和空域环境的多样化,飞行威胁导致的航空器间冲突风险随时间变化复杂,在受限的机载计算资源条件下,对复杂时变风险进行演化判定与准确预测更加剧了这一问题的复杂程度。

针对机载多源多粒度威胁数据可信融合与风险预测的问题,可尝试“关联校准、增量预测、动态包络”的思路加以解决,即通过机载多源监视数据的跨尺度点迹关联、时空校准、融合优选等方法,实现监视数据的可信融合与飞行威胁识别,并利用短期更新结合长期记忆的方法进行飞行威胁演变的增量式态势预测,进而针对威胁目标及其风险构建航空器动态自适应的安全边界包络。同时,采用有效的地空、空空通信或监视手段,感知获取周边空域邻近飞机的意图是实现飞行威胁与风险准确估计的重要途径,也是未来研究的一个方向。

(2)不确定性条件下多机四维航迹的快速鲁棒规划与控制

由于空域运行环境的动态性、机载能力的差异性、运行场景的多样性,使得机载航迹规划与控制受到诸多不确定性因素的影响,特别是在恶劣天气、突发冲突系统故障等突发事件的情况下,如何设计出具备一定不确定性适应能力的机载四维航迹规划与冲突解脱方法以实现机载鲁棒规划,是需要解决的一个关键问题。同时,面向未来 TBO 运行,航空器飞行航迹规划需在传统空间三维规划基础上考虑到达时间要求实现时空四维航迹规划,实现传统短期的局部冲突解脱向中期的广域冲突解脱的转变,然而机载四维航迹规划与解脱计算复杂度急剧增大,不确定性条件下多机四维航迹的快速鲁棒规划与控制面临巨大挑战。

针对不确定性条件下多机飞行航迹实时鲁棒规划的问题,可尝试“置信表征、四维可达、自主学习”的思路加以解决,即先从理论上研究不确定性条件下飞行航迹规划策略适应性的置信表征方法,利用该方法指导计算给定概率约束下飞行航迹时空四维可达空间,进一步采用线下自主学习、线上实时计算的强化学习框架,高效设计给定概率约束下高适应性的四维航迹鲁棒规划策略。

(3)多间隔管控模式下混合飞行流的高效协同管控

在高密度飞行流的复杂运行环境下,空域内航空器运行空间受限,分布式、集中式和混合式多模式间隔管控并行存在,空中交通运行管控如何保证



全局性能,如何适应动态运行需求,是实际运行中面临的共性问题。同时,考虑到未来有人航空器、无人航空器等异质航空器的混合飞行,混合飞行流运行管控的复杂性势必加大,如何在兼顾间隔保持安全的同时,实现多间隔管控模式下复杂飞行流的高效协同管控,是需要解决的又一问题。

针对多间隔管控模式下混合飞行流的高效协同管控的问题,可尝试“场景驱动、性能适配、一致控制”的思路加以解决,即根据空中交通运行的典型场景需求和特点,开展基于间隔管控模式性能的空中交通运行管控技术研究,针对多模式混合运行以一致性控制为基础开展跨模式融合运行的高性能管控方法研究。此外,未来空地系统、航空器之间实现充分的互联互通,相关航空器主体之间如何通过共享意图甚至是四维航迹实现态势的一致性共享,进而支撑运行的一致性管控,也是未来研究工作的一个重要方向。

## 5 结 论

空中交通自主间隔管控是国际民航界普遍认同的下一代空中交通管理系统发展的前沿技术方向。本文从机载飞行态势感知、机载航迹规划与控制、空中交通自主运行管控3个方面对空中交通自主间隔管控的研究工作进行综述,总结归纳了国内外技术研究现状与问题挑战,梳理分析了3方面技术的发展趋势,提出了未来的重点方向与研究思路,为相关领域研究人员开展空中交通自主间隔管控新技术的研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] International Civil Aviation Organization. Global air traffic management operational concept[EB/OL]. (2005-05-02). [https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9854\\_cons\\_en\[1\].pdf](https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9854_cons_en[1].pdf).
- [2] KOCHENDERFER M J, HOLLAND J E, CHRYSANTHACOPOULOS J P. Next-generation airborne collision avoidance system[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2012, 19(1): 17-33.
- [3] SCOTT M G, JACQUELINE A D, ANTHONY J M, et al. Air traffic controller performance and workload under mature free flight: Conflict detection and resolution of aircraft self-separation[J]. *The International Journal of Aviation Psychology*, 2001, 11(1): 71-93.
- [4] FORCE R T. Final report of RTCA task force 3: Free flight implementation[M]. Washington DC, USA: RTCA Inc., 1995.
- [5] PREVOT T, BATTISTE V, PALMER E, et al. Air traffic concept utilizing 4D trajectories and airborne separation assistance[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Austin, USA: AIAA, 2003: 5770.
- [6] BLOM H, BAKKER B. Can airborne self-separation safely accommodate very high en-route traffic demand? [C]//Proceedings of the 12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and the 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Indianapolis, USA: AIAA, 2012: 5415.
- [7] SHIN J. NASA aeronautics: Strategic implementation plan: NASA NP-2017 - 01-2352-HQ[R]. [S.l.]: NASA, 2017.
- [8] European Aviation Safety Agency. AI roadmap: A human-centric approach to AI in aviation [EB/OL]. [2020-03-09]. <http://easa.europa.eu/domains/research-innovation/ai>.
- [9] National Research Council. Autonomy research for civil aviation: Toward a new era of flight[M]. USA: National Academies Press, 2014.
- [10] KOCHENDERFER M J, CHRYSANTHACOPOULOS J P. Robust airborne collision avoidance through dynamic programming[R]. Massachusetts Institute of Technology. Lexington, USA: 2011.
- [11] 李坤龙. 基于ADS-B在空中交通管理实际应用的研究[J]. *民航学报*, 2021, 5(3): 4.  
LI Kunlong. Research on the Application of ADS-B in Air Traffic Management [J]. *Journal of Civil Aviation*, 2021, 5(3): 4.
- [12] JENIE Y I, VAN KAMPEN E J, ELLERBROEK J, et al. Taxonomy of conflict detection and resolution approaches for unmanned aerial vehicle in an integrated airspace[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 18(3): 558-567.
- [13] HAO S, ZHANG Y, CHENG S, et al. Probabilistic multi-aircraft conflict detection approach for trajectory-based operation[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 95: 698-712.
- [14] SHAH S, NOTARPIETRO R, BRANCA M. Storm identification, tracking and forecasting using high-resolution images of short-range x-band radar[J]. *Atmosphere*, 2015, 6(5): 579-606.
- [15] WANG L, WEI M, YANG T. An advanced algorithm for recognizing wind shear using airborne Doppler weather radar[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 229(14): 2547-2558.
- [16] 李永. 民航基础知识教程[M]. 北京: 中国民航出版社, 2005.

- LI Yong. Basic knowledge of civil aviation tutorial [M]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2005.
- [17] ANDERSON T, JONES W, BEAMON K. Design and implementation of TAWS for rotary wing aircraft [C]//Proceedings of 2011 Aerospace Conference. Big Sky, USA: IEEE, 2011: 1-7.
- [18] 张永. 基于数字高程地图(DEM)的便携式地形感知系统关键技术的研究与实现[D]. 绵阳:中国民用航空飞行学院, 2016.
- ZHANG Yong. Research and implementation of key technologies of portable terrain sensing system based on digital elevation map (DEM)[D]. Mianyang: Civil Aviation Flight University of China, 2016.
- [19] WICKENS C D, WARD J. Cockpit displays of traffic and weather information: Effects of 3D perspective versus 2D coplanar rendering and database integration [J]. The International Journal of Aerospace Psychology, 2017, 27(1/2): 44-56.
- [20] 孔尚萍. 基于多源信息融合的目标航迹估计与威胁评估[D]. 北京:中国航天科技集团公司, 2018.
- KONG Shangping. Target track estimation and threat assessment based on multi-source information fusion [D]. Beijing: China Aerospace Science and Technology Corporation, 2018.
- [21] 赵巍飞, 史永亮. 基于模糊综合评价的航路交通态势评估[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(1): 5-8.
- ZHAO Yifei, SHI Yongliang. Airway traffic situation assessment based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(1): 5-8.
- [22] 周源, 燕军, 孙媛, 等. 基于贝叶斯网络的要地防空目标威胁评估模型[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(5): 467-472.
- ZHOU Yuan, YAN Jun, SUN Yuan, et al. A threat assessment model for air defense targets in important areas based on bayesian networks[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2015, 30(5): 467-472.
- [23] ALAM S, SHAFI K, ABBASS H A, et al. An ensemble approach for conflict detection in free flight by data mining[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2009, 17(3): 298-317.
- [24] 邱启伦. 复杂低空飞行态势安全性分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- QIU Qilun. Safety analysis of complex low-altitude flight situation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [25] CALVO-FERNÁNDEZ E, PEREZ-SANZ L, CORDERO-GARCÍA J M, et al. Conflict-free trajectory planning based on a data-driven conflict-resolution model[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(3): 615-627.
- [26] REICH P G. Analysis of long-range air traffic systems: Separation standards[J]. The Journal of Navigation, 1966, 19(3): 331-347.
- [27] 张兆宁, 梁玉文. 自由飞行下基于贝叶斯网络的碰撞风险研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(9): 40-45.
- ZHANG Zhaoning, LIANG Yuwen. Research on collision risk based on bayesian network in free flight[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(9): 40-45.
- [28] WEIBEL R, EDWARDS M, FERNANDES C. Establishing a risk-based separation standard for unmanned aircraft self-separation[C]//Proceedings of the 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Virginia Beach, USA: AIAA, 2011: 6921.
- [29] MOSQUERA-BENITEZ D, GROSKREUTZ A, FUCKE L. Separation minima model: How changes in contributing factors could affect current standards [C]//Proceedings of USA & Europe 8th ATM R&D Seminar.[S.l.]:[s.n.], 2009.
- [30] YANG Y, ZHANG J, CAI K Q, et al. Multi-aircraft conflict detection and resolution based on probabilistic reach sets[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 25(1): 309-316.
- [31] MULLINS M, HOLMAN M W, FOERSTER K M, et al. Dynamic separation thresholds for a small airborne sense and avoid system[C]//Proceedings of AIAA Infotech@ Aerospace (I@A) Conference. Boston, USA: AIAA, 2013: 5148.
- [32] MUNOZ C, NARKAWICZ A, CHAMBERLAIN J, et al. A family of well-clear boundary models for the integration of UAS in the NAS [C]//Proceedings of the 14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta, USA: AIAA, 2014: 2412.
- [33] KUCHAR J K, YANG L C. A review of conflict detection and resolution modeling methods[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2000, 1(4): 179-189.
- [34] MILLER S. Contribution of flight systems to performance-based navigation[J]. Aero Magazine, 2009(34): 21-28.
- [35] CHALOULOS G, ROUSSOS G, LYGEROS J, et al. Ground assisted conflict resolution in self-separation airspace[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Honolulu, USA: AIAA, 2008: 6967.

- [36] ASADI F, RICHARDS A. Cooperative conflict resolution by velocity obstacle method[C]//Proceedings of 2014 UKACC International Conference on Control (CONTROL). Loughborough, UK: IEEE, 2014: 640-645.
- [37] ZHAO P, WANG W, YING L, et al. Online multiple-aircraft collision avoidance method[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2020, 43(8): 1456-1472.
- [38] ZHAO P, ERZBERGER H, LIU Y. Multiple-aircraft-conflict resolution under uncertainties[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2021, 44(11): 2031-2049.
- [39] ERZBERGER H, HEERE K. Algorithm and operational concept for resolving short-range conflicts[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2010, 224(2): 225-243.
- [40] PALLOTTINO L, FERON E M, BICCHI A. Conflict resolution problems for air traffic management systems solved with mixed integer programming[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, 3(1): 3-11.
- [41] SCHOUWENAARS T, HOW J, FERON E. Decentralized cooperative trajectory planning of multiple aircraft with hard safety guarantees[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Providence, USA: AIAA, 2004: 5141.
- [42] CHRISTODOULOU M, COSTOULAKIS C. Non-linear mixed integer programming for aircraft collision avoidance in free flight[C]//Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2004: 327-330.
- [43] LEHOULLIER T, NASRI M I, SOUMIS F, et al. Solving the air conflict resolution problem under uncertainty using an iterative biobjective mixed integer programming approach[J]. *Transportation Science*, 2017, 51(4): 1242-1258.
- [44] RAMASAMY S, SABATINI R, GARDI A G, et al. Novel flight management system for real-time 4-dimensional trajectory based operations[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference. Boston, USA: AIAA, 2013: 4763.
- [45] International Civil Aviation Organization. Secretary general airborne collision avoidance system (ACAS) manual[M]. USA: International Civil Aviation Organization, 2012.
- [46] BROOKER P. Airborne separation assurance systems: Towards a work programme to prove safety[J]. *Safety Science*, 2004, 42(8): 723-754.
- [47] GAI W D, ZHANG N, LIU J, et al. Improved non-linear dynamic inverse Guidance-based collision avoidance for UAVs[C]//Proceedings of 2017 29th Chinese Control and Decision Conference(CCDC). Chongqing, China: IEEE, 2017: 6777-6782.
- [48] HWANG I, KIM J, TOMLIN C. Protocol-based conflict resolution for air traffic control[J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 2007, 15(1): 1-34.
- [49] ONG H Y, KOCHENDERFER M J. Markov decision process-based distributed conflict resolution for drone air traffic management[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, 40(1): 69-80.
- [50] LAUDERDALE T. Probabilistic conflict detection for robust detection and resolution[C]//Proceedings of the 12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and the 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Indianapolis, USA: AIAA, 2012: 5643.
- [51] PAIELLI R A, ERZBERGER H. Conflict probability estimation for free flight[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1997, 20(3): 588-596.
- [52] KOCHENDERFER M J, EDWARDS M W M, ESPINDLE L P, et al. Airspace encounter models for estimating collision risk[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(2): 487-499.
- [53] BARRATT S T, KOCHENDERFER M J, BOYD S P. Learning probabilistic trajectory models of aircraft in terminal airspace from position data[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 20(9): 3536-3545.
- [54] DURAND N. Constant speed optimal reciprocal collision avoidance[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 96: 366-379.
- [55] YANG X, WEI P. Scalable multi-agent computational guidance with separation assurance for autonomous urban air mobility[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2020, 43(8): 1473-1486.
- [56] YANG J, YIN D, XIE H. A reinforcement learning based UAVS air collision avoidance[C]//Proceedings of the 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. St. Petersburg, Russia: [s.n.], 2014.
- [57] ZHAO P, LIU Y. Physics informed deep reinforcement learning for aircraft conflict resolution[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7): 8288-8901.
- [58] WANG Z, LI H, WANG J, et al. Deep reinforcement learning based conflict detection and resolution in

- air traffic control[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(6): 1041-1047.
- [59] SHI K, CAI K, LIU Z, et al. A distributed conflict detection and resolution method for unmanned aircraft systems operation in integrated airspace[C]//Proceedings of 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC). San Antonio, USA: IEEE, 2020: 1-9.
- [60] LIU Z, CAI K, XIE J, et al. A network-based conflict resolution approach for UAV operations in dense nonsegregated airspace[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2021(5/6): 212-232.
- [61] CHALOULOS G, ROUSSOS G, LYGEROS J, et al. Ground assisted conflict resolution in self-separation airspace[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Honolulu, USA: AIAA, 2008: 6967.
- [62] DURAND N, ALLIOT J M, CHANSOU O. Optimal resolution of en route conflicts[C]//Proceedings of the 1st USA/Europe Seminar.[S.l.]:[s.n.], 1997.
- [63] HU J, PRANDINI M, SASTRY S. Optimal coordinated maneuvers for three-dimensional aircraft conflict resolution[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2002, 25(5): 888-900.
- [64] PALLOTTINO L, FERON E M, BICCHI A. Conflict resolution problems for air traffic management systems solved with mixed integer programming[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(1): 3-11.
- [65] HILL J C, JOHNSON F R, ARCHIBALD J K, et al. A cooperative multi-agent approach to free flight[C]//Proceedings of the 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems.[S.l.]:ACM, 2005: 1083-1090.
- [66] 石文先. 基于MAS协商机制的冲突解脱研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.  
SHI Wenxian. Research on conflict resolution based on MAS negotiation mechanism[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [67] LIU H, MENG Q, PENG F, et al. Heterogeneous formation control of multiple UAVs with limited-input leader via reinforcement learning[J]. Neurocomputing, 2020, 412: 63-71.
- [68] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Formation control with collision avoidance for a multi-UAV system using decentralized MPC and consensus-based control[J]. SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 2015, 8(4): 285-294.
- [69] ZHANG X J, GUAN X M, HWANG I, et al. A hybrid distributed-centralized conflict resolution approach for multi-aircraft based on cooperative co-evolutionary[J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(12): 1-16.
- [70] 肖宗豪,张鹏,迟文升,等. 基于Agent与元胞自动机的无人机集群混合式控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(11): 2344-2359.  
XIAO Zonghao, ZHANG Peng, CHI Wensheng, et al. Hybrid control of UAV cluster based on Agent and cellular automata[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(11): 2344-2359.
- [71] 汤新民,郑鹏程. 航路序贯飞行条件下的航空器自主间隔控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(6): 742-748.  
TANG Xinmin, ZHENG Pengcheng. Aircraft autonomous separation control under route sequential flight condition[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(6): 742-748.
- [72] 孙樊荣,韩松臣. 大交通流量条件下分布式空管系统安全性分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2007, 5(4): 127-131.  
SUN Fanrong, HAN Songchen. Safety analysis of distributed air traffic control system under heavy traffic flow conditions[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2007, 5(4): 127-131.
- [73] XUE M. Urban air mobility conflict resolution: Centralized or decentralized? [C]//Proceedings of AIAA Aviation 2020 Forum.[S.l.]: AIAA, 2020.

(编辑:张蓓)