

改航路径规划问题研究综述

王 瑛, 周楚涵

(空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051)

摘要 军事活动等特殊事件对飞行的影响, 极易触发大面积的空域拥堵、飞行冲突、航班延误等问题, 诱发巨大的社会经济损失, 反过来也严重影响军事训练的效益与质量。针对空域资源利用率亟待提高的现实需求, 从改航路径规划影响因素、飞行受限区划设、改航路径规划模型和优化求解方法等四个方面出发, 对缓解空域资源紧张的重要策略——改航路径规划进行了系统研究, 探讨了改航路径规划的发展沿革、研究进展以及现有方法策略的优劣, 并对集中统一协调和管理、非独立多航班改航路径规划、不确定条件下的改航路径动态规划、智能化改航路径规划等未来发展方向加以展望, 为提高空域资源利用率提供系统化方法支撑。

关键词 空域管理; 改航路径规划; 飞行受限区

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.01.001

中图分类号 V355 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)01-0001-08

A Review of Research on Route Planning of Diversion

WANG Ying, ZHOU Chuan

(Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract The impact of military activities and other special events on flight can easily trigger a large area of airspace congestion, flight conflict, flight delay and other issues, and induce huge social and economic losses, which in turn seriously affects the efficiency and quality of military training. In view of the urgent need to improve the utilization rate of airspace resources, the important strategy to alleviate the shortage of airspace resources-diversion path planning is reviewed systematically from four aspects of influencing factors of diversion path planning, flight restricted zoning, rerouting path planning model and optimization solution method. the development history, research progress and the advantages and disadvantages of the existing methods and strategies are also discussed, and it looks forward to the future development direction of centralized and unified coordination and management, non-independent multi-flight route planning, dynamic planning under uncertain conditions and intelligent route planning, so as to provide systematic support for improving the utilization rate of airspace resources.

Key words airspace management; reroute planning; flight restricted area

2019年我国民航旅客吞吐量达到13.51亿人次, 国内航空比2018年增长6.5%^[1]。随着我国经济的快速增长, 民航运输业得到了长足发展, 已成为改善国民生活、推动现代化建设的重要产业。

收稿日期: 2020-06-05

基金项目: 国家社会科学基金项目(SKJJ19060301)

作者简介: 王 瑛(1967—), 女, 陕西西安人, 教授, 研究方向: 系统工程及航路规划等。E-mail: yingwang_kgd@163.com

引用格式: 王瑛, 周楚涵. 改航路径规划问题研究综述[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(1): 1-8. WANG Ying, ZHOU Chuan. A Review of Research on Route Planning of Diversion[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2021, 22(1): 1-8.

随着民航运输业的迅猛发展,由危险天气、机械故障、航天发射、军事管制等不确定随机因素造成的航班延误、旅客滞留和空域堵塞等现象屡见不鲜,严重影响了民航运输的安全与效率,造成了重大经济损失。

当前,实战化训练和演习的频率与强度不断提升,构建安全、高效、灵活的空管运行体系,既是提升我国空域资源使用效率的现实需要,也是满足军事需求的必由之路。军事训练、军事演习必将成为影响民航飞行的重要因素,主要表现在以下几个方面:

1)空域使用需求增多导致空中交通复杂度不断提升,飞行小时和起降架次持续增长,飞行密度不断增大。随着军民航对空域使用需求的增多,空中交通复杂度不断提升,空域使用僵化、流量调控不力等制约效率提升的瓶颈效应急剧放大,需求与容量、安全与效率等矛盾日益尖锐。

2)军民航相互影响耦合效应增强。由于空域资源的有限性和共享性,必然带来军民航之间相互影响和制约,耦合效应增强。特别是军事演训任务导致的临时性空域管制,导致民航航班停飞、延误、绕飞等,空域管理面临较大的不确定性。

3)军民航管理的要求和特点不同加大了空中交通管理的难度。军民航在空域用户多样性、管控模式、管控原则等方面具有明显不同,对空域管理协同化、精细化和实时性提出了更高的要求。

传统的被动地面等待策略(ground holding policy, GHP)仅能在一定程度上保证飞行安全性,然而无法根本解决空域利用率不高的问题。因此,人们将研究重心转向改航路径规划(reroute planning, RP),且已经取得了大量的成果。

本文对改航路径规划领域现有研究成果进行分析综述,并在军事训练和军事演习频率、强度大幅提升的背景下,对改航路径规划的重点研究方向进行了预测和展望。

1 改航路径规划影响因素

危险天气是传统领域内影响改航路径规划的主要因素,由此造成的空域冲突等问题屡有发生^[2]。同时,随着我国军民融合战略的持续推进,非战争军事行动和航天发射等活动的强度和频次逐年增高,给军民航飞行安全和空域管理带来新的风险与挑战^[3]。

1.1 危险天气

危险天气主要是指雷暴、湍流、飓风、强对流和风切变等中小规模天气系统^[3]。危险天气区域根据其分布差异分为:块状区域、带状区域和散点区域。目前,针对危险天气影响下的改航路径规划研究主要包括:空域划设、单/多航班改航路径规划和空域

流量分配等问题。

Dixon 等人最早于 1993 年研究了危险天气影响下的改航路径规划问题^[4]。1999 年, Krozel 等人发现航站楼附近的恶劣天气是造成航空器延误的主要原因,并对风暴影响下的航路规划问题展开研究^[5]。孟令航等人在 2012 年将不同天气场景划分为 16 种状态,研究了对流云团状态不确定下的改航规划问题^[6]。王瑛等人在 2019 年采用栅格法对危险天气环境进行构建,将受天气因素影响的空域刻画为由一系列网格构成的复杂系统^[7]。

对于危险天气的改航路径规划研究目前已经比较成熟,但还存在一些问题亟待解决,主要表现为现有改航路径规划方法主要是针对常见情形建立一般模型,未能针对不同天气类型和相应分布形状设计针对性模型,对复杂不确定因素影响下的改航路径规划研究较少。

1.2 非战争军事行动

随着军事科技的不断发展和国际局势的政治需求,非战争军事行动对空域资源的需求逐步提高。特别是近年来,自然灾害频发,应急救援给空域使用带来大量的不确定性;随着军机的升级换代和数量激增,新型装备的出现和愈发频繁的军事训练和演习造成了军民航飞行冲突增多;同时军事训练的空域范围逐渐扩展,训练时间大幅增加,使得民航可用资源变少,造成空中交通拥挤,最终导致空域资源分配不均等问题越来越突出。

在非战争军事行动过程中,对空域的优先使用按任务进行调配,即遵循“军事优先”的原则^[8],为保证任务的顺利进行,在非战争军事行动过程中,会适当调整民航的起飞降落时间来保证军事任务优先执行。如何实施改航路径规划,尽可能保证飞行安全和效率,实现双赢成为当前的研究热点。

欧洲航行安全组织和欧洲民航委员会(european civil aviation commission, ECAC)的军民双方代表在 1994 年共同提出“灵活使用空域(flexible use of airspace, FUA)”概念,目的是使空域不再分为军用或者民用,使空域资源高效利用^[9-10]。和治伟在 2012 年将常规非战争军事行动对空域影响的形式概括为抗震救灾、打击恐怖主义和演习等几类,研究了在此影响因素下的空域管制问题^[11]。郭方月在 2018 年研究了军事演习背景下的空域飞行受限区划分问题,提出针对军事演习的改航路径规划策略^[12]。

非战争军事行动对于飞行安全的影响相比天气因素具有预测性更强的特点。因为非战争军事行动的时间和空域位置等信息是明确的,因此可以定量对军民航飞行活动进行预先精准规划。

1.3 航天发射活动

航天发射活动与非战争军事行动对飞行安全的

影响具有相似性,主要表现为:出现和消失的突发性、状态变化具有较大的不确定性。相比极端天气因素,该类活动的发射位置、占用空域和时间跨度等信息都是已知的,但因其自身运行状态具有一定的不确定性,其脱落物及残骸的运动状态也存在一定的随机性,因此导致空域占用情况较为复杂。目前,针对航天发射活动影响下的改航路径规划研究较少,但是其本质属于动态改航路径规划问题。

当前,改航路径规划研究主要是针对危险天气的影响而展开,但对于非战争军事行动和航天发射等活动影响下的改航路径规划研究相对较少,特别是随着军民融合战略的持续推进,非传统领域内的复杂不确定因素和风险不断加大,许多带有明显特征的非战争军事行动和航空航天活动给军民航飞行安全带来新的挑战。因此,如何从全局角度实现改航路径的一体规划,最大程度满足各类航空器的飞行需求,兼顾航空器飞行安全和运行成本将具有重大的现实意义。

2 飞行受限区划设

飞行受限区指当航路或空域受危险天气、导航设备故障、军事活动或流量控制等影响而无法正常使用,为保障民航航班安全临时划定的空域^[13],根据飞行受限区所确定的区域是否随时间变化或移动,可将飞行受限区分为静态飞行受限区(static flight forbidden area, SFFA)和动态飞行受限区(dynamic flight forbidden area, DFFA)^[5]。飞行受限区划设是指综合考虑相关空域内危险天气、非战争军事活动、航天发射活动等实际影响因素以及空中飞行流量、空域资源容量、突发特殊情况、承载饱和度和等要素,对航班的流量加以一定限制^[7]。飞行受限区的合理划设是改航路径规划的关键和基础。划设方法包括直接划设法、预测划设法、军事受限区划设法,前两种主要针对危险天气,后一种既可用于非战争军事行动,也可用于航天发射活动。其中,直接划设法属于静态飞行受限区划设策略,通常运用于静态路径规划模型中,而预测划设法和军事受限区划设法属于动态飞行受限区划设方法范畴,一般运用于动态路径规划模型中。

2.1 直接划设法

直接划设法是指以多普勒回波效应为基础,通过实时探测和分析相关数据,进行飞行受限区划设的方法^[14]。对于危险天气影响飞行受限区划设的研究已取得一些成果,如美国联邦航空管理局(federal aviation administration, FAA)空中交通管理单元(traffic management unit, TMU)系统以提供的

气象雷达回波图和短期预报为基础,对极端天气影响范围进行分析和确定。McCrea 等人提出根据美国国家环境预报中心(national centers for environmental prediction, NCEP)的预测模型得出相关数据,对影响飞行的各类危险天气离散化,建立概率网的概念^[15];王莉莉等则统一用椭圆来简化威胁区域边界,建立了威胁概率模型^[13];还将现实空域场景抽象于栅格中,利用“栅格理论”进行实时动态环境建模,该方法主要适用于动态路径规划^[16]。

2.2 预测划设法

预测划设法主要是指根据天气预报、起降时刻、空域流量等信息,对未来某飞行受限区域进行预测划设的方法^[17]。该方法适用于不能直接获取实时信息或要对未来进行规划等情况,具体可分为平移划设法、外推划设法、近似椭圆划设法、Graham 划设法和马尔科夫预测等。

2.2.1 平移划设法

平移划设法由美国学者 Bokadia 和 Valasek 于 2001 年提出^[14],是最早的动态飞行受限区划设法,考虑危险天气动态移动的情况下对受影响空域进行划设。

通常认为雷达回波强度不小于 41 dBZ 的区域为受影响空域。假设经历时间 ΔT ,由雷暴移动速率 v 及方向计算 $t + \Delta T$ 时刻的区域范围,其基本原理如图 1 所示。该方法的意义在于将气象回波雷达运用于空域划设,着重考虑雷暴天气移动方向,但未考虑速度的瞬时性和雷暴区域形状的不确定性,不适用于长时间或剧烈变化危险天气情况。

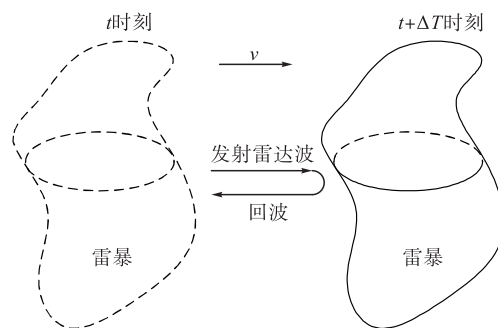


图 1 平移划设法示意图

2.2.2 外推划设法

外推划设法以美国对流天气预报提供数据为基础,将极端环境或危险天气影响区域边界外推,得到未来某时刻的受影响区域边界^[18]。Prete 等人将天气系统表示为若干反射率测量或预测的网格,通过插值产生天气的连续表示,建立随时间变化的天气系统^[19];Sauer 以雷达图像数据为基础,提取危险天气相关信息,根据传统凸包生成原理划设飞行受限区^[20]。谢春生等人假设危险天气以恒定速度移动,从移动方向、边界形状和不确定因素三方面进行划

设^[21];孟令航等人根据云团位置和移动速度测量不确定性和客观存在误差,建立了雷暴云团状态转移矩阵^[6]。

外推划设法充分利用了天气预报结果,能够及时准确地预测短期影响飞行安全的危险天气区域边界。但该方法受限于国家天气预报系统,且外推距离具有较大的主观性和不确定性,划设精度较低。

2.2.3 近似椭圆划设法

近似椭圆划设法由宋柯和胡明华于 2002 年提出^[22],该方法将云团形状抽象为 3 个相互交叠的椭圆,通过对椭圆集合形态变化的研究来进行危险天气影响区域划设。之后,王莉莉等人提出了改进的几何圆切法,用其规划出临时航线,绕过危险区^[23];王兴隆等人利用最小面积椭圆方法进行划设,并设置了精确度、偏差度等 4 个评估指标^[24];周娟等人考虑高度层的变化,提出基于椭圆的飞行受限区划设方法^[25],更具有现实意义和实用性。

近似椭圆划设法的优点在于:应用椭圆描述危险区域边界简单明了,可减少参数数量。其不足之处在于:未充分考虑受限区域的形状变化,主观性较强,天气划设类型较单一。

2.2.4 Graham 算法划设法

Graham 算法最初用于求解平面点集的凸壳。该方法基于边界点位置信息,通过循环和迭代淘汰非凸多边形边界点,同时更新区域边界,最终得到凸多边形静态飞行受限区^[26]。2010 年,谢春生等以 Graham 多边形求解算法为基础,给出了初始飞行受限区划设方法,并考虑边界变化和不确定因素的影响,提出动态飞行受限区的划设方法^[27],其缺点是仅描述了某时刻的静态受限区。

2.2.5 马尔科夫预测

2001 年,Nilim A 等在马尔科夫预测模型基础上,将受危险天气影响区域像素化、离散化,以影响区域面积为依据进行预测分析^[28]。2007 年,戴玲等人用马尔科夫链对极端环境和危险天气建模,提出多航空器(多机)改航路径规划模型^[29]。马尔科夫预测法仅仅适用于雷暴等危险天气,通用性较差。可以看出,目前研究主要集中在极端环境或危险天气影响下的飞行受限区划设,对军事演习、训练等随机因素影响下的飞行受限区划设还没有形成系统的方法。

2.3 军事限飞区划设法

近年来,军事飞行训练呈现出高强度、高频率、近实战的特点,空域使用需求增强。传统的军事限飞区划设法由于其改航策略使用率较低,已不再适应新常态的发展,如何科学合理划设军事限飞区成为研究的热点。军事限飞区也称“三区”空域(three areas airspace, TAA),是指为了开展军事训练、保

证飞行安全而设置的危险区、限制区和禁飞区,“三区”空域划设示意图如图 2 所示。

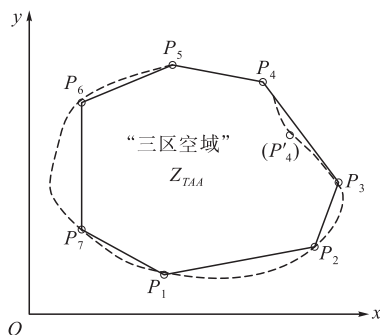


图2 “三区”空域划设示意图

$P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为空管相关部门报告的边界点,利用 Graham 迭代算法对其进行扫描,求出凸多边形的“三区”空域 Z_{TAA} ,如图中实线边界区域所示。

郭方月等人研究了军事演习下的航班动态改航路径,利用平移划设法划设“三区”空域^[12];陈金良等人则研究了非战争军事行动下的飞行受限区的划设,利用 Graham 算法划设“三区”空域^[8]。

总的来说,针对危险天气等影响下的飞行受限区的划设方法较多,研究已较为成熟,且逐渐由静态飞行受限区向动态飞行受限区发展,而对于军事活动等因素影响下的飞行受限区划设则研究甚少。

3 改航路径规划模型

飞行受限区的划设是改航路径规划模型建立的基础,改航活动通常在划设空域范围内开展,而改航路径规划模型的建立是整个改航过程的核心。根据飞行受限区状态和改航实施时机,改航路径规划模型通常可分为静态路径规划(飞行前改航)模型与动态路径规划(实时改航)模型两类。

3.1 静态路径规划

静态路径规划即飞行前路径规划,是指在航班起飞之前对划静态飞行受限区进行预测划设,并在环境信息和相关要素完全确定并事先已知的前提下进行的路径规划^[30],通常划设完成后航路相关信息不再改变。该方法主要从空间描述的角度切入,典型模型有可视图模型和网格模型等。

3.1.1 可视图模型

作为一种路径规划方法,可视图法最早由 Lozano 等针对机器人路径规划问题提出^[31]。可视图法将飞机视为一点并将飞行受限区视为平面内多边形,然后连接起点、目标点以及多边形的各个顶点,要求所有连线与任何飞行受限区都不相交。可视图法对改航路径建模后,常用几何方法规划改航飞行路径。Sridhar 等对多边形改航路径规划方法展开

了研究^[32];王飞等又在多边形飞行受限区的基础上结合了 Maklink 图和遗传算法调整已有路径规划^[33],Maklink 图是基于蚁群算法进行路径规划时用到的一种二维空间模型,其本质是提供路径规划关键点,帮助优化静态改航路径。

可视图法便于实操、对简单问题处理快速,但在考虑飞行受限区动态变化时,更新算法复杂。由于路径通常靠近飞行受限区顶点和边缘,该模型缺乏灵活性。

3.1.2 网格模型

改航路径规划的网格模型是将飞行空间划分为为互不重叠的网格单元,根据飞行受限区是否占据网格对网格进行赋值,然后运用搜索算法在起飞机场和目标机场间搜索规避受限区的最短飞行路径,其基本形式如图 3 所示。其中, Z_{TAA} 表示“三区空域”, Z_{EA} 表示极端环境空域。

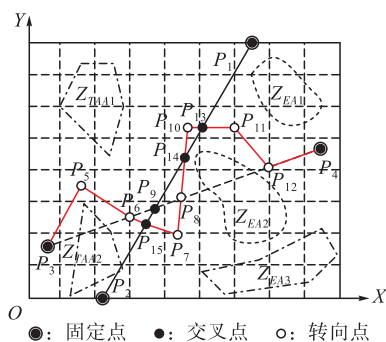


图 3 网格模型示意图

该方法由 Dixon 等在 1993 年提出^[4],该模型一经提出,便得到了广泛的应用。例如, Krozel 等在网格法的基础上,对相邻网格的连接度进行拓展,提高了航线规划的灵活性和搜索范围^[17];高政等在对天气无规律变化引起的改航研究过程中,也采用了网格化方法,规划临时改航航线,能快速有效利用空域资源^[34]。

网格模型可以方便的量化飞行受限区,但当网格数量较大时,算法空间冗余度较大。另外,网格的单元大小衡量标准不好把握,网格单元大小选取关系着规划路径的精确程度,单元越小,模型精确度越高,但同时占用计算资源也越多。

3.2 动态路径规划

现实中,飞行受限区受到多种突发情况的影响,以军事行动、极端气象条件为代表的危险因素是造成飞机改航的重要因素。动态路径规划即实时路径规划,是指依托航班起飞后实时探测到的动态飞行受限区,通过实时获取环境随机信息和空域要素并加以分析决策的即时路径规划^[30]。在动态路径规划中,航路可根据环境的变化实时加以调整,相比传统静态路径规划,更具灵活性、稳定性和实用性,应对突发或未知空情的能力更强。因此,动态的实时

路径规划模型长期以来受到关注,其研究方向大致可以分为网络流模型和 Markov 链模型两类。

3.2.1 网络流模型

网络流模型是将航路点划分到多个阶段中,网络中相邻两个节点之间的连线为航路,进行动态规划各段航路的模型。航路的容量值会因恶劣天气、导航设备失效、军事事件等特殊情况下发生变化,当航段容量为 0 时,航段不产生任何影响,节点之间的状态实时动态变化。

网络流模型在改航路径规划中得到了广泛应用。宋柯以总损失最小为目标提出了基于网络流模型的动态路径规划方法^[27];Taylor 在传统单一路径改航规划的基础上,利用网络优化方法建立了能够规避危险天气的改航路径模型,改进了动态生成改航航路的方法^[35]。Evans 建立了若干动态改航路径网络模型并利用现有路径信息对其可行性进行分析论证,使规划结果更为精确^[36]。网络流模型将改航路径规划转化为一般的动态规划问题,结合各种启发式算法,在解决动态飞行受限区情况下的问题时显示出良好的适用性。

3.2.2 Markov 链模型

受军事行动、天气等时变不确定性因素影响,在实时改航路径规划时,飞行受限区的位置在不断变化,为在飞行受限区的位置动态变化下进行路径规划,现有研究普遍采用 Markov 链模型。其基本思想是对飞行受限区变化建立 Markov 链模型,进而通过状态转移概率,实时规划改航路径。Christine 利用 Markov 链对雷暴云团的时变特性进行描述,建立了动态改航模型^[37];孟令航等考虑了流云团动态边界的外推误差,针对在不确定气象条件,构造一种基于 Markov 链的单机动态改航模型,结合遗传算法求解,取得良好的改航效果^[6]。

该模型对天气因素造成的受限区的动态建模效果很好,但也存在着转移概率设定对结果影响较大的问题,尤其是对军事行动这种人为因素,目前的 Markov 链预测的准确性难以保证,还需要进一步深入研究。

4 改航路径规划求解方法

改航路径规划效果不仅与模型结构有关,同时还和算法密切相关。合理选择算法对上述改航路径规划模型进行求解是实现有效改航的关键,稳准快的求解算法能够使求解的结果更加符合改航路径的现实需要。改航路径规划的求解算法主要可以分为三类典型的方法:几何法、人工势场法和智能优化算法。

4.1 几何法

几何法是使用纯粹几何学理论求解改航路径规

划,在求解改航路径规划过程中,不会涉及到使用编程技术求解,是求解改航路径规划早期的算法,几何法改航示意图如图 4 所示。

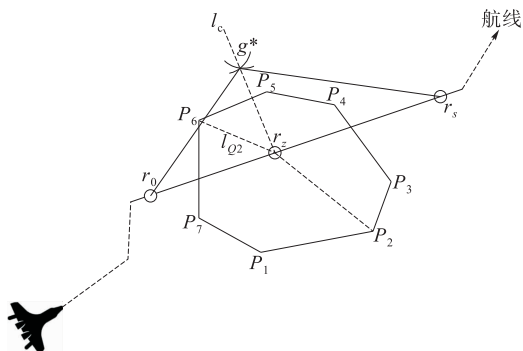


图 4 几何法改航示意图

基本程序如下:

Step 1 确定航班原航线与受限区的交汇点,及两者的交点 r_z 。

Step 2 确定改航起点 r_0 和改航终点 r_s 。

Step 3 以直线 $r_0 r_s$ 为界对军事限飞区边界点进行分区,形成点集 Q_1 、 Q_2 。

Step 4 分别计算 Q_1 、 Q_2 中各边界点到 r_z 的距离平均值 $\bar{L}_1$ 、 $\bar{L}_2$,比较 $\bar{L}_1$ 和 $\bar{L}_2$ 的大小。若 $\bar{L}_1 < \bar{L}_2$,则在 Q_1 一侧进行改航;若 $\bar{L}_1 > \bar{L}_2$,则在 Q_2 一侧进行改航。其中 $\bar{L}_1$ 和 $\bar{L}_2$ 由下式给出:

$$\bar{L}_1 = \frac{\sum_{j=m_1}^{n_1} P_j r_z}{n_1 - m_1}, (P_{m_1}, P_{m_1+1}, \dots, P_{n_1} \in Q_1) \quad (1)$$

$$\bar{L}_2 = \frac{\sum_{j=m_2}^{n_2} P_j r_z}{n_2 - m_2}, (P_{m_2}, P_{m_2+1}, \dots, P_{n_2} \in Q_2) \quad (2)$$

王鑫等通过扩展危险区范围,基于改进几何算法设计改航策略^[38];李雄等考虑了改航飞行中的空中交通管制程序和航空器性能,基于几何算法提出改航策略^[39];郭方月等针对民航飞机航路飞行过程中遇到重大军事活动而需要实时改航的情况,划设军事演习下的飞行受限区,基于几何算法提出改航策略^[12]。

4.2 人工势场法

人工势场法是一种虚拟势场法,基本思想是将飞机的运动视作人造势场中运动,目标点对飞机施加引力,中间点对飞机施加斥力,通过求合力控制飞机的运动。徐肖豪等建立了基于人工势场算法的单机动态任务改航路径规划模型^[40]。王兴隆等针对多机执行任务,提出基于改进人工势场法的多机改航路径规划^[41];张兆宁等将目标点与障碍物的距离以及航空器与受限区的运动速度考虑在内,分别建

立了基于改进人工势场法和动态人工势场法的规划模型^[42-43];王飞等将人工势场法和人工鱼群算法进行结合,提出了基于人工势场-人工鱼群算法的改航路径规划^[44]。

4.3 智能优化方法

改航路径规划算法逐渐从简单几何法发展到基于程序和机器计算的智能优化算法求解,计算结果精度和收敛速度均有大幅度提升,同时改航路径规划所得结果和方案更加合理。典型改航路径智能优化算法包括粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)、蚁群算法(ant colony optimization, ACO)、遗传算法(genetic algorithm, GA)、第三代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-III)等。

4.3.1 粒子群求解改航路径规划

粒子群算法模拟自然界鸟群的生物特性,用于处理实际优化问题。崔莉薇等针对多机飞行冲突解脱问题,利用遗传算法改进粒子群提出基于遗传粒子群改航算法^[45];杜实等针对改航中存在的多目标问题,提出基于改进多目标粒子群算法的改航算法^[46];陈天培等针对三维路径规划问题,提出基于模糊逻辑粒子群改航算法^[47]。

4.3.2 蚁群求解改航路径规划

蚁群算法通过蚂蚁个体识别那些经过路径周围蚂蚁留下信息素浓度的强弱程度寻优,达到目标位置。吴文政等综合改航偏离度和改航新增改点数目等改航因素,利用面积度量改进蚁群算法^[48];陈世欢等在原有蚁群算法基础上,对蚂蚁移动时采用约束规则建立个体解,最后得到蚁群算法优化^[49];向征等引入人工势场法,改进启发信息因子,以提高模型路径搜索的有效性^[50]。

4.3.3 遗传算法求解改航路径规划

遗传算法是根据大自然中生物体进化规律而设计提出的。蒋昕等以最短改航距离、最小转弯角、最少转弯点为优化目标建立改航路径规划模型,采用遗传算法求解^[18];王帝等以改航绕飞路径长度最短为目标,利用遗传算法进行改航路径规划^[51]。

4.3.4 NSGA-III 求解改航路径规划

第三代非支配排序遗传算法 NSGA-III 是根据印度 Deb 提出的基于自然选择学说和遗传生物学原理的智能化遗传算法,这两者也是各类遗传算法的思想基础。NSGA-III 算法保留和延续了 NSGA 算法的非支配排序思想和 NSGA-II 算法的精英策略,在这个基础上提出了基于参考点距离的选择策略,通过求解个体到参考点之间的距离来进行选择种群的更新。王瑛等针对现有改航路径规划模型未考虑多机改航时的关联效应等问题,提出了基于两

阶段分析的改航路径规划模型,并利用 NSGA 算法完成模型求解^[7];郑煜坤等建立基于节点移动、融合、分解的航路点布局策略,并利用 NSGA 算法完成模型求解^[52]。

综上所述,几何法求解改航路径规划属于早期改航算法,其计算速度、求解精度、自适应性均较差。人工势场法具有快速实时的运动控制的优点,规划出的路径比较平滑且安全。智能优化算法的规划效率更高,其中粒子群算法(PSO)和遗传算法(GA)相比,其收敛速度快,但规划路径容易陷入局部最优;蚁群算法(ACO)收敛速度较慢,但自适应性好;遗传算法求解精度相对较高;NSGA-III 算法属于当前智能改航算法研究前沿和热点,与传统遗传算法相比,规划结果更精确,自适应性好,且收敛速度较快。各改航路径规划优化算法对比结果如表 1 所示。

表 1 改航路径规划算法对比					
指标	几何法	PSO	ACO	GA	NSGA-III
收敛速度	慢	快	较慢	一般	较快
求解精度	差	较好	较差	一般	好
自适应性	弱	一般	较强	软弱	强

5 研究展望

飞行训练和演习等军事活动日渐频繁,军民航飞行冲突将成为改航路径规划的重要影响因素。同时空中交通复杂度提升、军民航影响耦合效应增强、空中交通管理难度加大。未来可围绕以下 4 个方面对改航路径规划开展研究:

5.1 建立集中统一的协调和管理中心

当前民航和军航空管体系处于相对独立的状态,缺乏相互之间的统筹和协调,这种模式无疑降低了体系运行效率和空域资源利用率。

未来可考虑在军民航之间建立集中统一的协调和管理中心,对空管机构进行结构和系统调整,对军民航具有一致性的部门实行垂直管理运行一体化,统一管理、统一调度、协同运行。目前,军民航发生飞行冲突,需要分别向军民双方空管部门协调,这种解决机制效率低下,而通过集中统一的协调和管理中心进行调度规划则只需要由该中心集中统筹,打破传统空管机制,克服运行管理分散问题,优化资源配置和整合,减小军民航之间的“隔阂”和运行机制差异,增强军民航的兼容性和协调性。

5.2 非独立多航班改航路径规划问题

目前,改航路径规划建模大多围绕单航班进行,主要做法是通过增设单航班改航点(除起始机场外的航路点),实现各航班的改航路径规划。其假设和前提是空域中的各航班之间是相互独立、互不影响的。

在空域使用需求增多、空中交通复杂度提升的背景下,航班间相关性越来越强。若将终端区、扇区、航路点等视作节点,航路、航线等视作连边,可以组成空域运行的空中交通网络,单个航班的改航很有可能通过空中交通网络传导至其他航班,影响其他航班的路径计划。因此,未来应围绕非独立多航班情况下的改航路径规划问题,重点对耦合机理、延迟影响规模、规划模型、优化算法等开展研究。

5.3 不确定条件下的改航路径动态规划问题

改航路径规划面临较大的不确定性,现阶段的研究主要围绕“预先”或“事前”处理机制进行,即在发生飞行冲突或进入威胁区域之前,就提前做好航路的重新选择。临时空域管制或突发状况下的改航路径规划研究较少。

当前,空中实战化、实弹化军事演训活动不断增多,除例行性任务外,还存在临时性、突发性等训练或空情处置任务,军民航之间的影响耦合效应增强。在紧急情况或突发空情等不确定条件下动态规划改航路径,实施改航策略,也是未来改航路径规划的研究重点。

5.4 智能化改航路径规划方法研究

航班改航路径规划向协同化、精细化方向发展,对改航路径规划的实时性要求很高。改航路径规划的协同化和精细化必然导致模型参数增多、规模增大,呈现多目标、多层次、非线性等特征,模型求解面临“维数爆炸”困难,模型推广和应用面临很大的困难。

近年来,深度强化学习、机器学习等最新智能优化算法和思想层出不穷,为实时改航路径规划问题的“又快又好”求解提供了可能,未来应加快最新优化算法在改航路径规划问题中的应用,为模型推广应用奠定基础。

随着改航路径规划问题研究的不断深入,理论和方法体系将不断建立和完善,作为空域管理的重要手段,智能化改航路径规划必将推动军民空域管理水平持续改进提升。

参考文献

[1] 闵梓. 聚焦《2019 年民航行业发展统计公报》[J]. 空运商务,2020,19(6):5.

[2] 张璐,李顺晴. 自由飞行环境下的危险天气改航策略[J]. 中国科技信息,2019,12(20):34-35.

[3] 吴文浩,张学军,顾博,等. 基于军民融合的全局飞行流量协同优化方法[J]. 北京航空航天大学学报,2018,44(9):143-149.

[4] DIXON M,WEINER G. Automated Aircraft Routing Through Weather-Impacted Airspace [C]//Vienna, VA: Fifth International Conference on Aviation Weather

- Systems, 1993; 295-298.
- [5] KROZEL J, WEIDNER T, HUNTER G. Terminal Area Guidance Incorporating Heavy Weather [C]// Guidance, Navigation & Control Conference. Nanjing: [s. n.], 1997; 32-39.
- [6] 孟令航, 徐肖豪, 李善梅, 等. 不确定强对流天气下动态改航路径规划[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(4): 686-691.
- [7] 王瑛, 郑煜坤, 姚岷, 等. 危险天气下改航路径网络规划[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(6): 1309-1315.
- [8] 陈金良, 郭方月. 非战争军事行动下飞行受限区的划设方法[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 283-2287.
- [9] 苏兰根, 周毅洲. 始终坚持安全发展、和谐发展、科学发展——新中国民航空管 60 年发展的启示[J]. 中国民用航空, 2009(10): 17-19.
- [10] 张慧丽. 空域灵活使用策略生成系统研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 2(7): 12-19.
- [11] HE Z W. On The Traffic and Transportation Control for Non-War Military Operations[J]. Traffic Engineering & Technology for National Defense, 2012, 10(1): 1-4.
- [12] 郭方月, 陈金良. 军事演习下民航航班动态改航路径规划[J]. 航空计算技术, 2018, 48(1): 70-73.
- [13] 王莉莉, 周娟. 突发天气条件下航空器改变高度的改航模型和算法研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7): 106-110.
- [14] BOKADIA S, VALASEK J. Severe Weather Avoidance Using Informed Heuristic Search [J]. AIAA, 2001, 19(1): 4232-4241.
- [15] MCCREA M V, SHERALI H D, TRANI A A. A Probabilistic Framework for Weather-based Rerouting and Delay Estimations Within An Airspace Planning Model [J]. Transportation Research Part C, 2008, 16(4): 410-431.
- [16] 王莉莉, 杨惠东, 周娟. 基于改进蚁群算法的改航策略问题研究[J]. 中国民航大学学报, 2016, 34(1): 15-18.
- [17] KROZEL J, PENNY S, PRETE J, et al. Automated Route Generation for Avoiding Deterministic Weather in Transition Airspace[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2007, 30(1): 144-153.
- [18] 蒋昕, 胡明华, 张颖, 等. 基于飞行受限区划设的航班改航研究[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(3): 60-67.
- [19] PRETE J. Aircraft Routing in The Presence of Hazardous Weather[D]. New York: State University of New York at Stony Brook, 2007, 22(11): 274-281.
- [20] SAUER, HAUF T, SAKIEW L, et al. On the Identification of Weather Avoidance Routes in the Terminal Maneuvering Area of Hong Kong. International Airport [J]. Journal of Zhejiang University-science A, 2016, 17(3): 171-185.
- [21] 谢春生, 李雄. 危险天气影响航路飞行区域的划设及评估[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(10): 47-52.
- [22] 宋柯. 空中交通流量管理改航策略初步研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 6(4): 77-84.
- [23] 王莉莉, 杨惠东. 飞行冲突条件下基于几何算法的改航策略研究[J]. 飞行力学, 2012, 30(5): 466-469.
- [24] 王兴隆, 徐肖豪, 李慧. 改航策略中雷暴飞行受限区划设方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(10): 2906-2910.
- [25] 王莉莉, 周娟. 动态突发天气下同高度层改航模型和算法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(5): 86-90.
- [26] 吴文周, 李利番, 王结臣. 平面点集凸包 Graham 算法的改进[J]. 测绘科学, 2010, 35(6): 123-125.
- [27] 谢春生, 李雄. 危险天气影响航路飞行区域的划设及评估[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(10): 47-52.
- [28] NILIM A, EL GHAOU L, DUONG V, et al. Trajectory-based Air Traffic Management (tb-atm) under Weather Uncertainty [C]// Proceedings of the 4th USA, Europe Air Traffic Management R&D Seminar. New York: [s. n.], 2001: 10-19.
- [29] 戴玲, 夏学知. 基于 Markov 天气模型的流量管理改航策略[J]. 舰船电子工程, 2007, 27(4): 57-59.
- [30] 李雄. 飞行危险天气下的航班改航路径规划研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 7(8): 47-53.
- [31] LOZANO P, WESLEY T, MICHAEL A. An Algorithm for Planning Collision-free Paths among Polyhedral Obstacles [J]. Communications of the ACM, 1979, 22(10): 560-570.
- [32] SRIDHAR B, CHATTERJI G B, GRABBE S, et al. Integration of Traffic Flow Management Decisions [C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Monterey, Cal: [s. n.], 2002: 1-9.
- [33] 王飞, 王红勇. 基于 Maklink 图和遗传算法的改航路径规划方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(5): 154-160.
- [34] 高政, 胡明华. 动态空域下的实时改航策略[C]// 科学技术部全国智能运输系统协调领导小组办公室. 第四届中国智能交通年会. 青岛, 2008: 418-423.
- [35] TAYLOR C, WANKE C. Improved Dynamic Generation of Operationally-acceptable Reroutes Using Network Optimization [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2011, 34(4): 961-975.
- [36] EVANS A D, SRIDHAR B, MCNALLY D. Improving operational Acceptability of Dynamic Weather Routes Through Analysis of Commonly Use Routings [C]// AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference. Virginia: AIAA, 2016: 1-18.
- [37] CHRISTINE T, CRAIG W. Improved Dynamic Generation of Operationally-acceptable Reroutes Using Network Optimization [C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Boston: AIAA, 2010: 961-975.
- [38] 王鑫, 王莉莉. 基于改进几何算法的扩散危险区改航策略研究[J]. 航空计算技术, 2015, 45(4): 71-73.
- [39] 李雄, 徐肖豪, 朱承元, 等. 基于几何算法的空中交通改航路径规划[J]. 系统工程, 2008, 28(8): 37-40.

- and Center Correlation Filters for Visual Tracking with Aspect Ratio Variation[C]//The IEEE International Conference on Computer Vision, Venice, Italy: IEEE, 2017: 2001-2009.
- [9] GUO Q, FENG W, CHEN Z. Effects of Blur and Deblurring to Visual Object Tracking[Z]. ArXiv preprint 2019:1908.07904.
- [10] WANG M, LIU Y, HUANG Z. Large Margin Object Tracking with Circulant Feature Maps[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2017: 4021-4029.
- [11] KIANI G H, FAGG A, LUCEY S. Learning Background-Aware Correlation Filters for Visual Tracking[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. [S. l.]: IEEE, 2017: 1135-1143.
- [12] 库涛,毕笃彦,杨源,等. 尺度目标的频域核回归跟踪研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2016,17(2): 76-81.
- [13] DANELLJAN M, HAGER G, KHAN F S. Discriminative Scale Space Tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 39(8): 1561-1575.
- [14] 褚芦涛. 基于边框回归的尺度自适应视觉目标跟踪[D]. 深圳:中国科学院深圳先进技术研究院,2019.
- [15] KART U, LUKEZIC A, KRISTAN M. Object Tracking by Reconstruction with View-Specific Discriminative Correlation Filters[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2019: 1339-1348.
- [16] MA C, HUANG J B, YANG X K, et al. Hierarchical Convolutional Features for Visual Tracking[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. [S. l.]: IEEE, 2015: 3074-3082.
- [17] WANG X, HOU Z Q, YU W S, et al. Online Scale Adaptive Visual Tracking Based on Multilayer Convolutional Features[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(1): 146-158.
- [18] WU Y, LIM J, YANG M H. Object Tracking Benchmark[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1834-1848.
- [19] BERTINETTO L, VALMADRE J, GOLODETZ S. Staple: Complementary Learners for Real-Time Tracking[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2016: 1401-1409.
- [20] MA C, YANG X K, ZHANG C Y et al. Long-Term Correlation Tracking [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2015: 5388-5396.
- [21] ZHANG J M, MA S G, SCLAROF S. MEEM: Robust Tracking via Multiple Experts Using Entropy Minimization[C]//European Conference on Computer Vision. [S. l.]: Springer, 2014: 188-203.
- [22] WANG Q, GAO J, XING J, et al. Defnet: Discriminant Correlation Filters Network for Visual Tracking [Z]. ArXiv preprint 2017:1704.04057.
- [23] QI Y K, ZHANG S P, QIN L, et al. Hedged Deep Tracking[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2016: 4303-4311.
- [24] 瑚琦,李锐,张薇. 具有旋转特性的目标跟踪算法[J]. 光学学报,2020,40(17):146-153.

(编辑:徐敏)

(上接第8页)

- [40] 徐肖豪,李成功,赵巍飞,等. 基于人工势场算法的改航路径规划[J]. 交通运输工程学报,2009,17(6): 64-68.
- [41] 王兴隆,徐肖豪,冯江然. 基于改进人工势场法的多机改航路径规划[J]. 飞行力学,2013,31(4):381-384.
- [42] 张兆宁,赵召娜. 基于改进人工势场法的多机动态改航路径规划[J]. 武汉理工大学学报,2015,37(2): 44-49.
- [43] 张兆宁,赵召娜. 基于动态人工势场法的多机改航路径规划研究[J]. 航空计算技术,2015,45(1):1-4,9.
- [44] 王飞,李成功,徐肖豪. 基于人工势场-人工鱼群算法的改航路径规划[J]. 航空计算技术,2011,41(2):5-9.
- [45] 崔莉薇. 基于遗传粒子群算法的多机飞行冲突解脱研究[D]. 重庆:重庆大学,2012:117-125.
- [46] 杜实,王俊凯,任景瑞. 基于改进多目标粒子群算法的航空器改航研究[J]. 安全与环境学报,2020,20(1):177-185.
- [47] 陈天培,王玉惠,吴庆宪,等. 基于模糊逻辑粒子群算法的三维路径规划[J]. 电光与控制,2020,27(6):1-5.
- [48] 吴文政. 基于蚁群算法的改航路径规划研究与应用[D]. 重庆:重庆大学,2012:77-84.
- [49] 陈世欢,李毅. 基于改进蚁群算法的改航路径规划[J]. 计算机技术与发展,2015,25(2):54-59.
- [50] 向征,张文奇,张文军. 雷暴天气下基于多航空器冲突避让的路径规划[J]. 中国安全科学学报,2019,29(8):151-156.
- [51] 王帝. 基于 Maklink 图与遗传算法的动态改航策略研究[J]. 航空计算技术,2019,49(1):54-57.
- [52] 郑煜坤,王瑛,李超,等. 基于航路点布局的多目标网络结构优化方法[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(1):1-9.

(编辑:张建业)