

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201702022



进离场航线网络环境影响 优化研究进展

田勇, 殷润泽, 万莉莉

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 综述航迹数据分析和航线规划设计等对进离场航线网络环境影响的研究方法. 航线路径设计规划是在借鉴二维路径规划的基础上, 通过应用不同的启发式算法, 搜索到满足条件的最优航线路径; 通过进离场航线网络的次序优化原则, 可实现航线网的全局优化. 最后, 针对进离场航线网络环境影响的研究现状, 提出应增加对航空器飞行性能分析、考虑航空排放和航空噪声对居民密集区的影响等几点建议与展望.

关键词: 进离场航线网络; 航迹数据分析; 航线规划设计; 航空排放; 航空噪声

中图分类号: V 355; X 506 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)02-0251-06

Optimization Research Progress on Environmental Impact of Arrival and Departure Route Network

TIAN Yong, YIN Runze, WAN Lili

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: This paper summarized the research on environment influence of arrival and departure routes network in the methods of track data analysis and route planning and design. Basing on 2D route planning, the design of arrival and departure routes used different heuristic algorithms and searched for the optimal route path. Besides, the design can realize the global optimization of routes network, by the principle of the optimal orders. According to the recent researches about the influence of arrival and departure routes network to environment, this paper put forward some suggestions and prospects about the analysis of aircraft flight performance, the impact of aviation emissions and aviation noise on residential areas.

Keywords: arrival and departure routers network; track data analysis; routes planning and design; air emissions; aviation noise

终端区是机场飞行区和航路间的重要衔接区域, 由于其具有交通流密集多变、航线结构错综复杂、运行模式多种并存的特点, 导致空域拥堵或航班延误, 更造成了恶劣的环境影响, 引起人们的高度重视. 据联合国政府间气候变化专门委员会统计, 目前交通运输化石燃料消耗中 13% 是由航空运输所消耗的^[1], 而航空运输排放的氧化氮(NO_x)、一氧化碳(CO)和颗粒物(PM)等有毒物质主要集中在航空器的起降阶段^[2]. 从中国民航飞机 NO_x 排放分布中可以看出: 垂直高度上 1 000 m 的 NO_x 排放量最大^[3]. 这些低空排放的有毒物质严重威胁着人类健康. 除此之外, 航空噪声也严重地干扰着终端区内居民的正常生活. 又因终端区进离场航线往往经过人口密集的城市上空, 所以航空环境影响尤为凸出. 航空运输业

收稿日期: 2017-02-14

通信作者: 田勇(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事空中交通管理的研究. E-mail: tianyong@nuaa.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61671237); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(KFJJ20160705)

是交通运输业的核心,我国还会继续扩大民用机场的数量和规模,因此,对终端区环境影响的研究就显得十分重要.本文综述了近几年国内外对终端区进离场航线网络环境影响的优化研究方法和进展.

1 航空环境影响的研究对象

终端区内航空器环境影响主要考虑的是航空排放影响和航空噪声影响,航空器环境影响与高度层的关系,如图 1 所示.图 1 中: h 为高度.目前,航空排放和航空噪声都有着一套成熟完备的测算体系,但是,针对航空环境影响的终端区进离场航线网络优化方法的研究却处在起步阶段.

1.1 航空排放

航空排放是指航空燃油在燃烧室与空气混合燃烧后排出的各种物质.其中,终端区内的航空排放物主要分为温室效应气体二氧化碳(CO₂)、水蒸气(H₂O)和有毒气体氮氧化物(NO_x)、物烃(HC)等.因为低空排放中的 CO₂ 多数被地面吸收,对环境影响不大.但是,NO_x, SO_x, HC 等有毒物质会对近地面空气质量产生影响,并损害周边人群健康,所以研究它们的排放量和分布情况非常重要.

20 世纪 80 年代,美国联邦航空总署(FAA)开发了 EDMS(emissions and dispersion modeling system),并将系统中的排放模型和扩散模型作为机场建设项目大气环境影响的标准评价模型.2015 年 5 月,EDMS 由 AEDT(aviation environmental design tool)系统代替. AEDT 中的排放模型和扩散模型是在原有模型上进行了总结和补充,可以进行飞行区域内混合高度层下多个航空器的排放物质计算和扩散分布评估.目前, AEDT 是 FAA 官方认可关于航空排放和气体扩散的标准评估工具.

1.2 航空噪声

噪声是发声体做无规则振动时发出的声音,若长期作用于人的中枢神经系统,容易导致精神错乱,甚至死亡.航空噪声主要具有以下特点:声压级高、低频噪声突出、影响范围广、噪声影响时空间断性大和累加性强.国内外普遍采用的基本噪声评价模型有如下几类:声压和声压级、A 声级和最大 A 声级、声暴露级 SEL、感觉噪声级 PNL、有效感觉噪声级 EPNL 和等效连续声级.我国参照国际民航组织(ICAO)推荐的指标计权等效连续感觉噪声级(WECPNL)作为噪声指标,该指标考虑了噪声的频谱特性和持续时间.

20 世纪 70 年代,FAA 结合 SAE AIR 1845 标准,开发了 INM(integrated noise model)噪声评估系统.该系统通过使用 NPD(noise-power-distance)数据进行噪声值评估.1998 年,FAA 开发了 NIRS(noise integrated routing system)程序,用于评价航线或飞行程序的噪声影响.随后, AEDT 总结了 INM 和 NIRS 中已有的噪声评价方法,并补充了多个噪声评价模型. FAA 在 2012 年发出声明, AEDT 将取代 NIRS 进行空域和飞行程序噪声评估.在 2015 年 5 月,FAA 宣布使用 AEDT 取代 INM.

1.3 终端区进离场航线网络

终端区进离场航线网络是由终端区内多条进离场航线组成的网络模型,其模型优化的基础是三维空间路径规划问题.结构良好的终端区进离场航线网络可以从根本上减少飞行冲突、缩短飞行里程、降低排放、缩小噪声影响范围等,从而提高安全裕度、降低运行成本和缓解航空器环境影响.在设计进离场航线时,安全可靠是必须遵循的首要原则,经济合理是在安全基础上力争实现的原则,而降低环境影响是更高层次的追求.

终端区进离场航线网络研究首先是从飞行程序设计入手的,研究人员设计了连续下降进近(CDA)、下降剖面优化(OPD)、延迟下降进近(DDA)、连续爬升(CCL)等飞行程序.随后,通过借鉴二维路径规划方法,研究人员逐步实现了终端区空域内的三维进离场航线网络规划.目前研究中,不同的进

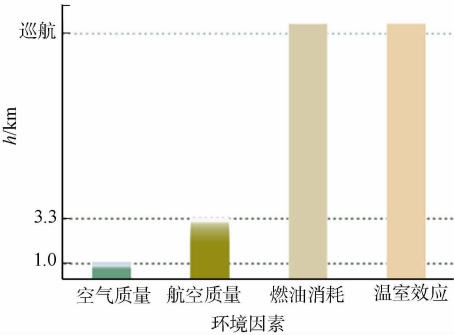


图 1 航空器环境影响与高度层的关系
Fig.1 Comparison of environmental impact under different flight level

离场航线优化方法间最主要的区别在于应用不同启发式算法,如蚁群算法、A* 算法、人工神经网络算法等,以搜索满足目标条件的最优航线路径. 为了进一步提高进离场航线路径搜索效率,研究人员又提出了基于概略图的路径规划方法、基于栅格的路径规划方法和基于类比的路径规划方法等. 在单条航线路径规划的基础上,通过航线优先级划分,以实现航线网络全局优化.

2 航空环境影响的研究方法

近年来,国内外研究多集中在终端区进离场航线网络的研究方法上. 研究方法主要包括历史数据分析和规划仿真评估. 相比而言,航空排放和航空噪声的研究较为成熟. AEDT 是 FAA 提出用于评估航空排放和航空噪声的标准工具.

2.1 航空排放研究方法

国内外关于航空排放的研究方法归纳起来主要有模型分析、取样分析和其他分析. 模型分析是通过公式计算以获取航空排放. 取样分析是通过实际取样测量获取航空排放,并与计算结果对比. 其他分析则是对公式计算和实际测量间的误差进行分析.

2.1.1 模型分析 由于 AEDT 是 FAA 在 2015 年提出的航空环境分析评估标准工具,所以,之前研究航空排放时用得较多的模型仍是 EDMS 中的排放模型.

EDMS 模型中航空器污染气体排放量计算为

$$E_{i,m} = n_a F_{a,e,m} E_{e,m,i} t_{m,a}.$$

上式中: $E_{i,m}$ 为 m 工作模式下 t 时间内的污染物 i 排放量; n_a 为 a 类型航空器发动机数量; $F_{a,e,m}$ 为 a 类型航空器安装 e 类型发动机时在 m 工作模式下的燃油消耗速率; $E_{e,m,i}$ 为 e 类型发动机在 m 工作模式下污染物 i 的排放指数; $t_{m,a}$ 为 a 类型航空器在 m 工作模式下的时间.

常用机型配备典型发动机的各气体排放指数,如表 1 所示. 表 1 中: EI_{HC} , EI_{CO} , EI_{NO_x} 为 HC, CO, NO_x 的排放指数.

表 1 常用机型气体排放指数
Tab. 1 Gas emission index of common aircraft type

工作模式	B737			A320			A340			B747		
	CFM56-7B26			CFM56-5A1			CFM56-5C4			PW4056		
	EI_{HC}	EI_{CO}	EI_{NO_x}	EI_{HC}	EI_{CO}	EI_{NO_x}	EI_{HC}	EI_{CO}	EI_{NO_x}	EI_{HC}	EI_{CO}	EI_{NO_x}
起飞	0.10	0.20	28.80	0.23	0.9	24.6	0.008	1.00	37.67	0.06	0.44	28.1
爬升	0.10	0.60	22.50	0.23	0.9	19.6	0.008	0.85	29.05	0.01	0.57	22.9
下降	0.10	1.60	10.80	0.40	2.5	8.0	0.065	1.40	10.67	0.13	2.00	11.6
滑行	1.90	18.80	4.70	1.40	17.6	4.0	5.000	30.93	4.28	1.92	21.86	4.8

樊守彬等^[2]研究发现,通过引入 EDMS 模型,CO 和 VOCs 在滑行模式下排放量最大, NO_x 在起飞阶段排放较多,而 PM10 的排放则主要集中在起飞和滑行阶段. 夏卿等^[4]通过使用 EDMS 模型发现,我国飞机污染物排放主要集中在华东与中南地区占据了排放总量的 60%.

2.1.2 取样分析 研究人员一般在机场附近对污染物进行取样,从而更准确地描述污染物扩散和质量浓度分布情况. 由于世界各地气候条件和气象要素不同,加上各地飞机场使用的发动机类型各异,所以通过模拟输出的结果与实际情况检测出的结果会有所差别. 例如,在实地取样分析后, Schürmann 等^[5]发现有些引擎的排放清单比 ICAO 公布的数据高,而有些引擎的排放量则低于公布的排放清单. 因此,各地想得到更准确的排放量计算,还需要更精确的实地取样数据.

2.1.3 其他分析 排放物的分布和扩散情况受环境气象条件影响较大. 例如,湿润空气会加速污染物的湿沉积,太阳辐射强度和风速会改变空气对流,从而影响污染物分布. 所以,其他影响因素不可避免地会对污染物的分布和扩散造成严重影响,造成模型计算和实际测量结果出现差异.

2.2 航空噪声研究方法

国内外关于航空噪声的研究方法归纳起来主要有模型分析和取样分析. 模型分析是通过公式计算以获取各点位的噪声级. 取样分析是通过实际测量获取航空噪声级,并与计算结果对比. 其他分析则是

从观感知上分析噪声影响.

2.2.1 模型分析 AEDT 是 FAA 在 INM 模型基础上提出的航空环境分析评估标准工具,即噪声测算模型. INM 噪声评估体系包含了多个噪声评价指标和计算公式,如表 2 所示.

表 2 INM 噪声评估体系的噪声指标
Tab. 2 Noise index of INM noise evaluation system

指标	指标名称	计算公式
L_{Aeq}	等效连续 A 声级	$L_{Aeq} = 10 \times \lg[\frac{1}{t_{eq}} \int_0^{t_{eq}} 10^{L_A(t)/10} dt]$
L_{DEN}	日夜噪声级	$L_{DEN} = 10 \times \lg\{\frac{1}{24}[12 \times 10^{L_D/10} + 4 \times 10^{L_E+5}/10 + 8 \times 10^{(L_N+10)/10}]\}$
L_{DN}	日夜平均噪声级	$L_{DN} = 10 \times \lg\{\frac{1}{24} \times [15 \times 10^{L_D/10} + 9 \times 10^{(L_N+10)/10}]\}$
NEF	噪声暴露预报	$NEF = 10 \times \lg \sum_i \sum_j 10^{NEF_{i,j}/10}$ $NEF_{i,j} = L_{EPN_{i,j}} + 10 \times \lg(n_{D_{i,j}} + 16.67n_{N_{i,j}}) - 88$
ANEF	澳洲噪声暴露预报	$ANEF = 10 \times \lg \sum_i \sum_j 10^{ANEF_{i,j}/10}$ $ANEF_{i,j} = L_{EPN_{i,j}} + 10 \times \lg(n_{D_{i,j}} + 4n_{N_{i,j}}) - 88$
B	噪声暴露指数	$B = 20 \times \lg \sum_i [n \times 10^{L_P/15}] - 157$
WECPNL	计权等效连续感觉噪声级	$WECPNL = 10 \times \lg(\frac{1}{n} \times \sum_i 10^{L_i/10}) + 10 \times \lg N - 27$

周宁^[6]采用 WECPNL 噪声指标,计算并绘制萧山机场 2005 年噪声等值线图.

2.2.2 取样分析 研究人员一般在机场附近或航线覆盖区域内安装测噪仪,从而准确地测量不同时间段内的噪声值. 由于噪声传播中会受到物体阻碍,噪声级会被削弱,因而测量结果也会有所差异.

2.2.3 其他分析 噪声值可以通过测量工具进行客观评价,噪声影响强度却是受人体主观感知判断的. 在综合考虑机场航空噪声客观评价量和居民主观反应的基础上,杨尚文^[7]建立了机场航空噪声对居民影响的二级模糊综合评价模型. 此外,我国城市区域环境噪声评价量和室内允许噪声标准采用的是等效声级 L_{eq} ,所以应同时考虑使用两种噪声评价模型.

2.3 终端区进离场航线网络研究方法

终端区进离场航线大多是基于机场布局、导航设施和限制区进行的人工设计,不但设计效率不高,且设计方案合理性缺乏科学验证. 对进离场航线进行三维空间的路径规划可以有效兼顾安全性、经济性和环保性等设计目标,并实现航线网络的总体优化. 国内外的研究方法归纳起来主要包括历史航迹数据分析、终端区航线网络设计,以及试飞检验.

2.3.1 航迹数据分析 我国仍非常缺乏基于实际运行航迹数据的终端区航线分析评估研究,而国外针对历史数据的分析研究开展较早. 早期研究人员多聚焦于飞行程序优化,Kershaw 等^[8]分析了希斯罗机场 210 架进场航班的飞行剖面,结果表明:成功使用 CDA 程序可以有效降低航空排放和噪声影响. Cao 等^[9]采用整数线性规划方法求解无冲突 CDA 剖面,并选取纽约机场来验证 CDA 程序相比阶梯进近的好处. 为了获得 CDA 程序的最佳下降顶点,Stell 等^[10]分析部分机型的下降轨迹数据,在给定的推力和阻力模型下,可以准确计算出最佳下降顶点的位置. 随着导航精度逐渐提高,大型繁忙终端区内配备了基于性能导航(PBN). 为了验证 PBN 程序对航空环境影响的增益,Bronsvoot 等^[11]分析了里约热内卢国际机场在应用 PBN 程序下的实际航迹数据,结果表明:PBN 程序可减小噪声影响区域,同时减少油耗和排放. 另外,Muller 等^[12]以西雅图机场为例进行分析,结果表明:区域导航(RNVA/RNP)程序相比传统进场程序最多可节省约 40% 的燃油消耗. Jean-Marie 等^[13]分析了在 3.3 km 以下,航空器以小推力/小阻力的方式进近,结果表明:小推力进近可降低碳排放约 35%. 为了对比不同地区应用连续下降运行(CDO)后不同的环境影响改善,Terry 等^[14]对巴黎和纽约进行了分析,结果表明:导致环境改善的因素是交通流密度和飞行路径. 因此,终端区内的交通流密度和进离场航线路径是造成航空环境影响的关键因素.

2.3.2 航线规划仿真评估 终端区进离场航线网络优化的基础是三维空间的路径规划问题示意图,如

图 2 所示。早在本世纪初,张永芳等^[15] 在空射巡航导弹实时轨迹优化,无人机回避危险航迹规划^[16-17] 和机器人动态移动路径规划等诸多方面取得了丰硕的研究成果. 通过使用模拟退火算法,Xue 等^[18] 对终端区二维航线网络路径进行了优化设计,结果表明:优化后的进离场航线可以有效降低燃油消耗和航空排放. 王超等^[19] 对西安咸阳机场 05L 跑道起降航线进行研究时,提出了 3D 进离场航线的优化方法. 在航线垂直剖面优化时,提出了基于核密度估计的 3D 航线垂直剖面优化方法,实现了基于路径最短的进离场航线网络优化. 核密度估计法是通过分析历史航迹数据而得到轨迹概率密度,以确定最优的下降航迹垂直剖面. 此后,王超等^[20] 还提出 3 种启发式搜索规则,使用动态领域搜索方法来改进 Xue 等所用的模拟退火算法,并设计了基于模糊理论的离场轨迹降噪优化方法. 贺超男等^[21] 也提出了基于 A* 算法的进离场航线网络规划方法. 在借鉴上述启发式搜索规则的基础上,文献[22-23]设计危险天气下的进离场航线网络多目标优化方案,采用可视图理论,大幅度减小了终端区内的搜索空域. 相比之下,核密度估计法是通过分析历史航迹数据而得到轨迹概率密度,并以此确定最优的下降航迹垂直剖面. 改进后的蚁群算法、模拟退火算法和 A* 算法在水平和垂直剖面内均采用空间搜索获取最优进离场航线路径.

此外,在优化终端区与航路航线网络衔接时,国外研究人员提出了构建终端区内智能化过渡区的策略. 随后,智能化终端过渡区策略逐步演变为扩展终端区策略,万莉莉等^[24] 提出了一种扩展终端区下的进离场资源分配优化策略,如图 2 所示. 通过分散延误航班,该策略可有效提高终端区运行效率,并减小燃油消耗和污染气体排放. Sidiropoulos 等^[25] 通过对终端区边界进离场点进行聚类分析,明确了终端区边界上最佳进离场点. 少数国外研究人员对优化后的进离场航线网络进行了试飞验证.

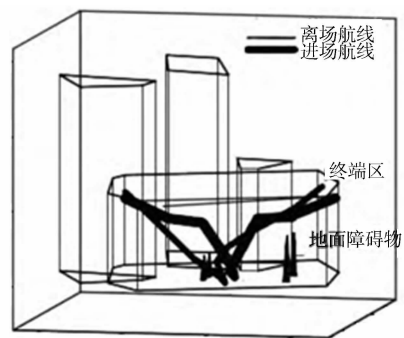


图 2 终端区进离场航线示意图
Fig. 2 Arrival and departure routes network in terminal area

3 结论

近年来,终端区内航空环境影响因其危害性较大而受到社会各界的广泛关注. 终端区航空环境影响主要包括了航空排放和航空噪声,AEDT 是目前准确测算航空排放和航空噪声影响的标准工具. AEDT 对 EDMS 和 INM 系统进行了总结和补充,可以进行飞行区域内混合高度层下多个航空器的排放物定量计算、噪声影响范围评估,以及空气质量评估.

优化后的进离场航线网络可以有效降低环境影响,其研究方法主要包括航迹数据分析、终端区航线网络设计和试飞检验. 在目前航线网络设计中,研究人员提出了多种优化进离场航线路径的智能算法. 相比之下,改进后的蚁群算法可以更加准确、高效地搜索最优进离场航线路径. 但是,研究中缺乏对终端区居民密集区和气象条件的考虑. 进离场航线优先级划分是解决多条进离场航线交汇的有效方法,但是,其标准过于简单. 进离场航线网络优化方案中多以飞行路径最短作为优化目标,少部分研究人员考虑了离场航线爬升阶段的噪声影响. 因此,针对进离场航线网络环境影响研究现状,提出以下 3 点建议与展望.

- 1) 未来研究中应以减少航空排放和航空噪声影响范围作为进离场航线路径优化目标,同时,考虑航空排放和航空噪声对居民密集区的影响. 降低航空环境影响是未来进离场航线优化研究的重点.
- 2) 应补充终端区进离场航线优先级划分标准,并使用层次分析法(AHP)对优先级标准进行权重决策分析,以提高决策的科学性.
- 3) 结合终端区与区域耦合运行,深入分析终端区、航路等空域资源的分配优化及终端区进离场航线与跑道构型间的关联.

参考文献:

[1] 樊守彬. 美国机场大气污染物控制途径及效果[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(3): 40-43.
[2] 樊守彬, 聂磊, 李雪峰. 应用 EDMS 模型建立机场大气污染物排放清单[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(4): 93-96.

- [3] 黄勇,吴冬莺,王金涛. 中国上空民航飞机 NO_x 排放分布再探[J]. 北京航空航天大学学报,2001,27(3):289-292.
- [4] 夏卿,左洪福,杨军利. 中国民航机场飞机起飞着陆(LTO)循环排放量估算[J]. 环境科学学报,2008,28(7):1469-1474.
- [5] SCHÜRMANN G,SCHFER A K,JAHN C,*et al.* The impact of NO_x , CO and VOC emissions on the air quality of Zurich Airport[J]. Atmospheric Environment,2007,41(1):103-118.
- [6] 周宁. 机场噪声预测与控制技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2002:18-24.
- [7] 杨尚文. 机场航空噪声影响评价及控制研究[D]. 天津:中国民航大学,2008:21-23.
- [8] KERSHAW A D,RHODES D P,SMITH N A. The influence of ATC in approach noise abatement[C]//3rd USA/Europe Air Traffic Management R and D Seminar. Napoli:NATS,2000:1-8.
- [9] CAO Y,KOTEGAWA T,POST J. Evaluation of continuous descent approach as a standard terminal airspace operation[C]//9th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. Berlin:NATS,2011:1-10.
- [10] STELL L. Prediction of top of descent location for idle-thrust descents[C]//9th USA/Europe Air Traffic Management R and D Seminar. Berlin:NATS,2011:1-10.
- [11] BRONSVOORT J,MCDONALD G,POTTS R,*et al.* Enhanced descent wind forecast for aircraft[C]//9th USA/Europe Air Traffic Management R and D Seminar. Berlin:NATS,2011:1-10.
- [12] MULLER D,UDAY P,MARAIK B. Evaluation of the potential environmental benefits of RNAV/RNP arrival procedures[C]//11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conferences. Virginia Beach:AIAA,2011:1-18.
- [13] JEAN-MARIE D,REYNOLDS T G,HANSMAN R J. Fuel burn and emissions reduction potential of low power/low drag approaches[C]//11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conferences. Virginia Beach:AIAA,2011:1-11.
- [14] THOMPSON T,MILLER B,MURPHY C,*et al.* Environmental impacts of continuous-descent operations in paris and new york regions[C]//10th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. Chicago:NATS,2013:1-11.
- [15] 张永芳,张安,张志禹. 战术飞行路径规划算法[J]. 交通运输工程学报,2006,6(4):84-87.
- [16] ZHENG Changwen,LI Lei,XU Fanjiang,*et al.* Evolutionary route planner for unmanned air vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics,2005,21(4):609-620.
- [17] MCLAIN T,BEARD R. Trajectory planning for coordinated rendezvous of unmanned air vehicles[J]. Fire Control and Command Control,2013,34(2):1247-1254.
- [18] XUE Min,ATKINS E M. Terminal area trajectory optimization using simulated annealing[C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Nevada:Reno,2006:1473-1483.
- [19] 王超,贺超男,刘宏志. 终端区进离场航线网络 3D 优化方法[J]. 科学技术与工程,2014,14(11):81-85.
- [20] 王超,王飞. 离场航迹降噪优化设计的多目标智能方法[J]. 西南交通大学学报,2013,48(1):147-153.
- [21] 贺超男,王超,姜玉芹. 基于改进 A^* 算法的进离场航线网络 3D 规划[J]. 航空计算技术,2014,44(1):45-47.
- [22] 刘宏志,王超,贺超男. 危险天气下进离场航线网络优化[J]. 科学技术与工程,2014,14(8):83-89.
- [23] WANG Chao,HE Chaonan. Three-dimensional planning of arrival and departure route network based on improved ant-colony algorithm[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2015,32(6):654-664.
- [24] 万莉莉,胡明华,田勇,等. 终端区进离场资源分配优化模型[J]. 交通运输工程学报,2016,16(2):109-117.
- [25] SIDIROPOULOS S,MAJUMDAR A,HAN K,*et al.* A framework for the classification and prioritization of arrival and departure routes in multi-airport systems terminal manoeuvring areas[C]//15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conferences. Dallas:AIAA,2015:30-31.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)