

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.02.018

基于改进 ARS 方法的复飞程序多目标优化

李亚飞, 赵 瑞

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300)

摘要: 针对目前复飞模式所带来的突出的噪声影响与燃油消耗问题, 选取天津滨海国际机场双跑道独立平行仪表进近模式作为研究场景, 通过结合现有基于性能的导航(Performance-based navigation, PBN)程序及飞机性能参数, 在保障运行安全与绿色发展的条件下开展程序优化研究。首先, 基于前文优化后的 PBN 进近程序重新设定复飞参数。其次, 采用改进的 ARS(Aircraft reinjection system)智能方法对现有复飞程序进行优化, 期间考虑复杂的飞机序列与运行速度变化等情况, 以规划三维 Dubins 路径作为新复飞程序。最后, 从噪声、油耗、安全间隔的多维评估角度, 对新程序的优化效果进行评估和验证。结果表明, 新程序在保障飞行安全的前提下, 可最大限度降低复飞阶段的噪声影响与燃油消耗, 提升运行效率; 对比优化前后的噪声影响范围、燃油消耗、运行距离及时间, 优化效果显著, 且优化后程序符合运行安全标准。

关键词: 基于性能的导航; 改进 ARS; 噪音影响; 燃油消耗; 多目标优化

中图分类号: V2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2026)02-0425-09

Multi-objective Optimization of Missed Approach Procedure Based on an Improved ARS Method

LI Yafei, ZHAO Rui

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University, Tianjin 300300, China)

Abstract: To address the prominent issues of noise pollution and fuel consumption during aircraft go-around phases, this paper selects the dual-runway independent parallel instrument approach pattern at Tianjin Binhai International Airport as the research scenario. By developing a complex aircraft sequencing model that incorporates speed variations and controller coordination factors, and by integrating existing performance-based navigation (PBN) procedures with aircraft performance parameters, an optimization analysis is conducted. First, missed approach parameters are redefined based on previously optimized PBN approach procedures. Second, an improved aircraft reinjection system(ARS) intelligent method is employed to refine the existing missed approach procedure, planning three-dimensional Dubins paths as the new missed approach procedure. Finally, a multidimensional evaluation model encompassing noise, fuel consumption, and safety separation is constructed to validate the optimization effectiveness of the proposed procedures. The results demonstrate that the new procedure maximizes noise reduction and fuel savings during the missed approach phase while ensuring flight safety, thereby improving overall operational efficiency. Comparisons of noise impact zones, fuel consumption, operational distance, and time before and after optimization show significant improvements with the optimized procedures meeting all operational safety standards.

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122024055); 天津市民航能源环境与绿色发展工程研究中心开放基金(NYHJ2023-KF-02); 教育部人文社会科学研究一般项目(21YJCZH075); 天津市自然科学基金联合基金面上项目(25JCLMJC00530)。

收稿日期: 2025-09-12; **修订日期:** 2025-12-02

通信作者: 李亚飞, 男, 教授, 硕士生导师, E-mail: commissioner@126.com。

引用格式: 李亚飞, 赵瑞. 基于改进 ARS 方法的复飞程序多目标优化[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(2): 425-433. LI Yafei, ZHAO Rui. Multi-objective optimization of missed approach procedure based on an improved ARS method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2026, 58(2): 425-433.

Key words: performance-based navigation (PBN); improved aircraft reinjection system (ARS); noise impact; fuel consumption; multi-objective optimization

民用航空器凭借速度快、灵活性高、舒适安全等显著优势,已成为人们日常出行中不可或缺的重要交通工具。飞行程序是飞机从起飞到着陆全流程中,基于空域结构、地形环境、机场设施等,制定的标准化操作规范与航路规则,其核心是把“看不见的空域”变成“有规则的路线”,在飞机运行的各个阶段均有应遵循的飞行程序,高效的飞行程序能够为飞机运行效率与安全性提供重要保障。基于先前数据^[1],基于性能的导航(Performance-based navigation, PBN)具有更高的准确性、安全性、灵活性以及更小的环境影响,已在全球范围内广泛使用。PBN程序在中国的应用已取得显著进展,应用多个地区和机场。

飞机噪声是机场运行中需重点关注的问题,其对机场周边居民生活及生态环境均存在直接影响^[2]。中国民用航空局颁布了一系列的机场噪声标准规范性文件^[3-4],飞机噪声的相关法规也愈发严格与完善。此外,飞机的燃油消耗也是运行过程中需重点考量的因素之一。燃油成本往往占到航空公司运营成本的20%~30%。大量燃油消耗还会导致CO₂等气体过量排放^[5],对环境产生不利影响。

近年来,众多学者围绕不同目标,对PBN飞行程序各阶段展开了大量优化研究。Prats等^[6]综合考虑飞行噪声与飞行轨迹,以客机成本函数(考虑油耗与飞行时间)与目标函数(真实与理想的噪声烦恼值)为双目标,设计了多目标降噪飞行程序优化方法,并以赫罗纳机场为例,用不同机型的最佳轨迹设计降噪程序。结果表明,这些最佳轨迹有效降低了噪声干扰。Filippone^[7]对进近程序的优化侧重于3个概念:增大下滑梯度、位移着陆、与连续下降,以A320-211为测试机型,噪声评估指标选用与本文相同的EPNL指标,得出在为飞机下降提供不同下滑梯度与不同大小的位移着陆时,更陡峭的着陆轨迹能够有效降低对机场周围选定区域的噪声影响。Casado等^[8]提出了一种新颖的改进复飞程序的ARS(Aircraft reinjection system, ARS)方法。以国外马拉加机场单跑道为实验场景,在飞机最后进近程序段时,该方法在处于进近与进场过程的各架飞机之间找到合适间隙,计算出回注点;再借助三维Dubins路径使得飞机运行到回注点重新进近。ARS方法较传统进近复飞程序有较大提升。2022年与2023年,研究人员比较了ARS复飞方式与传统复飞方式^[9-10],结果表明,优化后的复飞

程序噪声影响更小、污染排放更低。Gu等^[11]通过精准控制飞机到达时间和飞行情况,为改进ARS方法提供智能化的支持。谢春生等^[12]针对一发失效情况,结合空气动力学与空客性能工程师软件(Performance engineer's program, PEP)模型,设计优化了一发失效复飞应急程序。Khattak等^[13]基于机器学习预测的方法对复飞程序的影响因素与情况进行研究,使用机器学习预测复飞情况的发生。Dancila等^[14]以B737-400机型进行飞机复飞的研究,考虑了4个案例,对应4个导航剖面,从油耗和污染排放的角度分别进行复飞的成本进行比对。

综上,针对复飞程序的研究大多基于特定情况和成本对复飞程序进行评估,较少文献研究复飞程序的改进优化。本文聚焦复飞程序优化,基于优化后的PBN进近程序^[15],进一步优化复飞程序。研究场景选取更为复杂的天津滨海国际机场双跑道独立平行仪表进近模式。采用ARS智能方法,并加以改进,构建涵盖噪声、油耗及安全间隔的多维评估方法。综合考虑更复杂的多机序列与速度变化等因素,开展双跑道复飞程序优化研究。本文研究具有以下创新:(1)将改进ARS复飞方式应用于更为复杂的双跑道独立平行仪表进近场景;(2)设置更复杂的多机序列,并考虑了速度变化;(3)考虑多机复飞情况(双跑道飞机序列中各跑道第1架处于降落过程的飞机执行复飞);(4)建立包含噪声影响、燃油消耗以及安全间隔的多维评估方法,替代传统的仅以安全为核心的模型。

1 问题描述

1.1 研究场景描述

本文研究场景选择天津滨海国际机场,该机场作为京津冀地区重要的航空枢纽,具有强大的旅客吞吐量和货物运输能力。目前,该机场共有两条跑道投入运营,分别为RWY16L/34R、RWY16R/34L,拥有T1与T2两座航站楼,能够接纳大量的航班旅客。

天津滨海国际机场目前使用隔离平行运行模式,隔离平行运行模式下的不同跑道“各司其职”,受限于跑道功能固定化,容易造成资源闲置。相比之下,独立平行仪表进近模式下的不同跑道可同时进行进近和起飞,且路径独立,互不交叉,能够极大提升机场运行容量与效率、减少航班延误与地面等待时间、优化空域资源利用率^[16]。独立平行仪表进近模式是未来天津滨海国际机场即将实施的运行模式。

本文选择天津滨海国际机场双跑道独立平行仪表进近模式作为研究场景,进行程序优化研究(后续对程序图已加以改进,调整至适用于独立平行仪表进近模式)。程序优化部分基于RWY16L与RWY16R的PBN标准仪表进近程序,程序示意图如文献[17]所示。

1.2 研究约束条件

根针对本文研究,特提出以下约束:(1)鉴于本

文研究是针对程序优化,因此假设飞机严格按照既定程序运行,暂不考虑飞机偏航问题;(2)飞机气动特性与动力模型参数均采用理想状态下的预设理论值;(3)忽略燃油消耗导致的飞机重量变化;(4)考虑飞机速度变化,采用定加速度,运行速度根据实际运行数据进行设定。

1.3 程序优化方法描述

复飞程序优化方法流程图如图 1 所示。

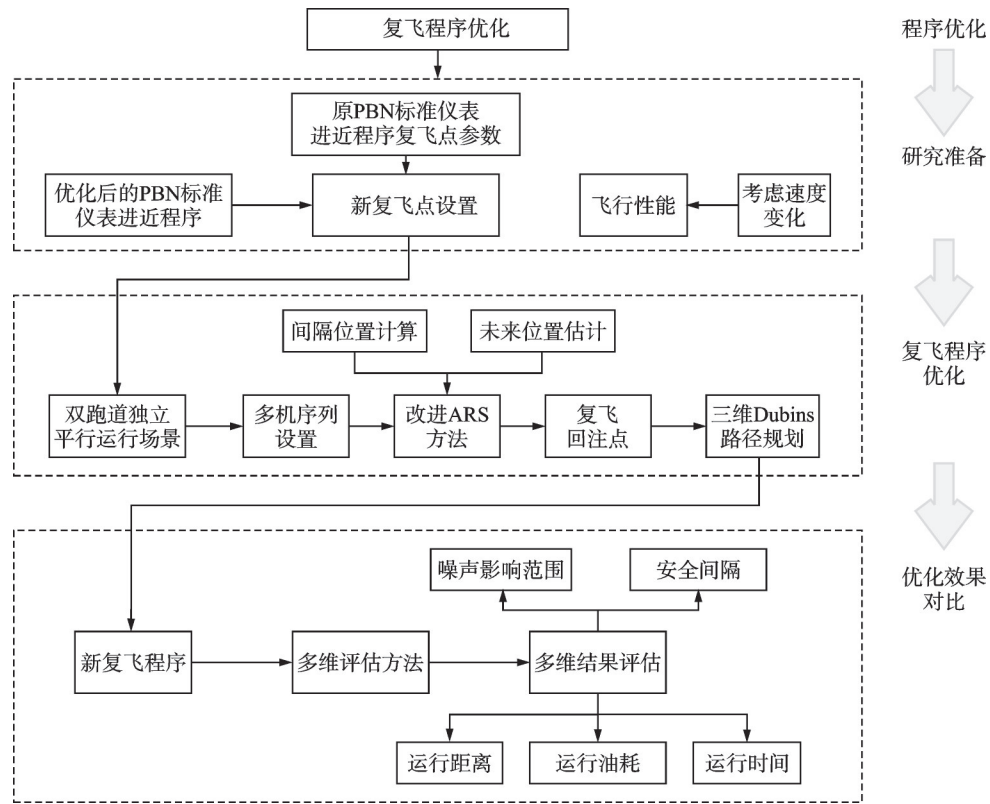


图 1 复飞程序优化方法流程图

Fig.1 Flow chart of missed approach procedure optimization method

图 1 中研究方法流程如下:基于前文方法优化后的PBN进近程序,以 60 m 的决断高度,设置新复飞点;同时将程序进行可视化处理,并应用于天津滨海国际机场双跑道独立平行仪表进近运行场景;采用改进ARS方法,设置复杂的多机序列,并考虑速度变化;根据飞机间隔计算、复飞回注点位置估计、未来位置估计等,通过迭代算法找到回注点;规划三维Dubins路径到回注点作为新复飞程序,使得需复飞的飞机能够重新回到飞机序列中进近降落;最后使用多维评估方法对优化后的复飞程序进行评估。

2 程序优化方法与模型

2.1 改进ARS方法

本文采用改进ARS方法使得飞机复飞重新插入到进近序列中,而非传统复飞程序重新飞回起始

进近定位点(Initial approach fix, IAF)以重新进近。

飞机通过进场程序到达IAF点后,开始飞机进近过程,标志着巡航过程的结束。IAF点到中间进近定位点(Intermediate fix, IF)之间的程序段称为起始进近段。IF点到最后进近定位点(Final approach fix, FAF)为中间进近段,在该段飞机高度下降至适合的中间高度,同时对准跑道。从FAF点至飞机平稳着陆为最后进近航段,此时飞机大多在导航设备辅助下执行着陆操作。在一些突发状况下,例如,环境变化、设备故障、进近姿态与参数异常、指挥变更等,飞机无法安全着陆,可执行复飞操作。传统复飞程序需要在决断高度之前执行复飞操作:增加推力至复飞功率,调整飞行姿态,脱离进近程序,爬升至程序规定高度后,转弯爬升向等待程序,等待重新进近指令,飞到IAF点重新进近(RWY16R与RWY16L共用一条复飞程序,均转

弯爬升至 TJ970 加入等待程序)。

原 ARS 方法^[8]与传统复飞程序的区别在于,飞机无需再飞到等待程序重新进近,可以通过查找后续飞机之间间隔,寻找满足安全要求的间隔点(后续称为 G 点),再通过未来位置估计算法,多次迭代,寻求回注点,使飞机直接插回到回注点重新完成降落过程^[10]。该步骤意为,在确定飞机和 G 点位置后,使用未来位置估计算法,找到一个未来位置点 G' (位于复飞飞机与 G 点之间程序段内),使得飞机复飞爬升;并将飞机与 G 点以三维 Dubins 路径到达 G' 点的总距离差和时间差控制在很小误差范围内。该过程需要多次迭代来实现。原 ARS 方法见文献[8]。

ARS 是一种智能且通用的方法,在不同场景下可以快速找到一条新的复飞路径。本文在原 ARS 方法上进行改进,使用爬升到定高度转弯取代直接转弯,以满足本文场景的运行需求。改进后的 ARS 方法如图 2 所示,爬升指定高度到 16R-TP 后执行转弯复飞。

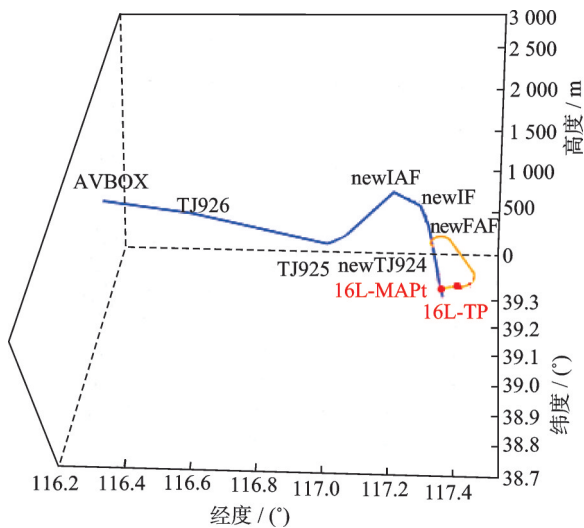


图 2 改进 ARS 方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of improved ARS method

2.2 多维评估方法

2.2.1 油耗计算模型

本文选择 BADA (Base of aircraft data) 油耗模型,依靠推力 P 与飞机性能计算燃料消耗。推力 P 计算方式如式(1)表示,完整模型与参数参考文献[18]。

$$P = D + \left(\frac{mgv_h}{V} + mv_1 \right) \quad (1)$$

式中: D 为空气阻力; m 为质量; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; v_h 为垂直速度; V 为真空速度; v_1 为水平速度。

BADA 油耗模型有两种模式,所处高度不同,

瞬时油耗 F_i 计算方式不同,具体计算为

$$\eta = C_{f1} \left(1 + \frac{V}{C_{f2}} \right) \quad (2)$$

$$F_i = \begin{cases} F_{\text{nom}} = P\eta & 0 \leq h \leq 2000 \text{ m} \\ F_{\text{min}} = C_{f3} \left(1 - \frac{H_p}{C_{f4}} \right) & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: η 为特定燃油流量; h 为飞行高度; C_{f1} 、 C_{f2} 、 C_{f3} 、 C_{f4} 均为已知常数; H_p 为地理高度。

2.2.2 噪声评估模型

本文采用 ECAC (European civil aviation conference) 噪音模型^[19-21]。该模型基于飞机噪声和性能 (Aircraft noise and performance, ANP) 数据库与噪声-推力-距离 (Noise power distance, NPD) 插值计算噪声值,可准确比较优化前后程序的噪声影响。

在飞机实际运行中,设置一个观测点, h 为飞机位置距离地面投影的高度, γ 为飞机爬升角, l 为观测点到飞机地面投影的距离。根据飞机的飞行航线和地面轨迹,可以得到飞机距离观测点的斜距 d_p 。具体运行方式与计算模型见文献[19]。

噪声级常用指标包括有效感知噪声级 (Effective perceived noise level, EPNL)、最大声压级 (LA_{MAX})、声音暴露水平 (Sound exposure level, SEL) (均以 dB 为单位),可按需选用。本文选取 EPNL 为噪声级指标^[22],单架飞机的 EPNL 指标记为 L_{EPN} 。通过式(1)可得 P ,在计算得到 d_p 后,利用 NPD 噪声数据表可得出 L_{EPN} ,其中可能包含 3 种情况 (P 和 d_p 正好处于交界处、在数据范围内和在数据范围外),不同情况下对应的 L_{EPN} 计算方式不同。具体 NPD 数据表与 L_{EPN} 计算模型见文献[21]。

在获取 L_{EPN} 后,仍需对其进行多次修正,得到最终单架飞机的有效感知噪声级 $L_{\text{EPN, seg}}$ 如下

$$L_{\text{EPN, seg}} = L_{\text{EPN}} + \Delta v - \Lambda(\beta, l) + \Delta_l(\varphi) + \Delta L + \Delta \phi \quad (4)$$

式中: Δv 为持续时间校正, $\Lambda(\beta, l)$ 为侧向衰减修正因子; $\Delta_l(\varphi)$ 为引擎安装修正; ΔL 为航段修正; $\Delta \phi$ 为转弯修正(各修正参数具体可参阅文献[21])。

2.2.3 间隔评估

本文间隔评估主要考虑各飞机之间水平与垂直间隔。在实验过程中,各架飞机均为动态运行,通过实时计算各飞机之间的水平距离与垂直距离,使其不小于最低安全水平^[16],以保障运行安全。结果评估时以各实时距离值作为安全评估标准。

2.3 三维 Dubins 规划方法

三维 Dubins 规划方法^[23]是将二维 Dubins 规划

理论扩展到三维空间的规划方法,核心是在满足物理约束(如最小转弯半径)的前提下,生成平滑、最优的空间路径。三维 Dubins 因路径长度最优、计算效率高、平滑性好、可扩展性强等优点,被广泛应用于寻找最短路径的研究中。在 PBN 程序的设计中使用 RF(RADIUS ARC TO A FIX)航段。RF 航段为定圆心与转弯半径设计的程序路径,与 Dubins 路径具有较强的适配性。因此本文采用三维 Dubins 路径规划方法,具有较强的实用性与可飞性,能够实现本文研究的实际运行。

通过改进 ARS 方法,寻找回注点后,以规划三维 Dubins 路径计算新复飞路径,实现对传统复飞程序的优化调整。

三维 Dubins 路径需要同时考虑水平与垂直方向的运行,因此更加复杂。大体可分为 6 种 LSL、LSR、LRL、RSL、RSR、RLR,其中 L 表示左转、S 表示直行、R 表示右转。最常用的是 LSL 与 RSR,也是本文所使用的两种三维 Dubins 规划方法。

LSL 三维 Dubins 规划方法(含高度变化)为:飞机在满足物理约束条件下,首先进行左转操作;待转弯完成后,进行直线爬升/下降,运行一定距离,再次左转,由左转圆弧-直线-左转圆弧组成。LSL 三维 Dubins 规划方法如图 3 所示。

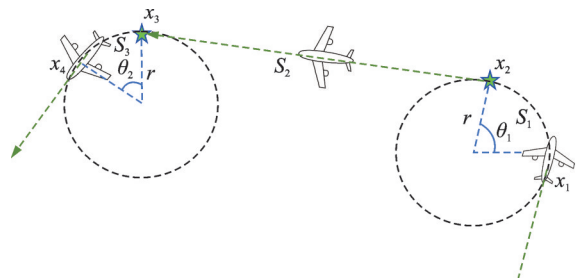


图 3 LSL 三维 Dubins 规划方法示意图

Fig.3 Schematic diagram of LSL three-dimensional Dubins planning method

图 3 中的 LSL 轨迹两次转弯角度分别为 θ_1 与 θ_2 ,运行路径长度分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 ,飞机先从 x_1 位置开始转弯,于 x_2 转弯结束,开始直线爬升/下降,于 x_3 再次开始转弯,于 x_4 结束转弯过程。两次转弯均使用最小转弯半径 r ,使得运行路径最短且平滑。

RSR 轨迹与 LSL 轨迹原理相同,仅转弯方向不同。

3 案例分析

3.1 研究准备

本文选取天津滨海国际机场双跑道独立平行仪表进近场景。使用文献[15]中的方法对天津滨海国际机场双跑道的 PBN 进近程序进行优化,

获得优化后的双跑道 PBN 进近程序,并将优化后的 PBN 进近程序与双跑道进离场 PBN 程序进行可视化,如图 4 所示。根据文件规定^[16],独立平行仪表进近模式下,相邻跑道的复飞程序扩散角不小于 30° (本文选取为 30°),RWY16R 复飞初始爬升段爬升到 200 m 高度后转弯复飞,RWY16L 复飞初始爬升段爬升到 260 m 高度后转弯复飞。

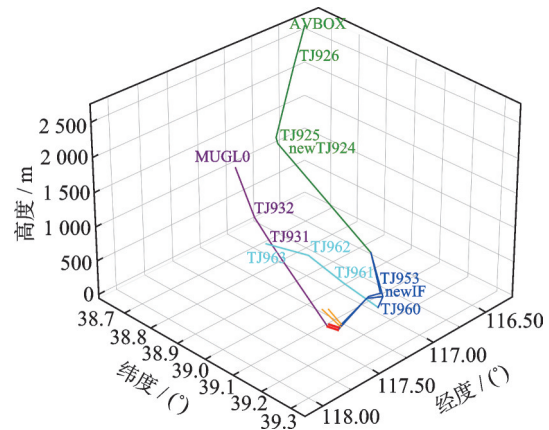


图 4 PBN 飞行程序总示意图

Fig.4 General schematic diagram of PBN flight procedure

图 4 中各关键程序点信息见表 1。

表 1 关键程序点

Table 1 Critical procedure point

关键程序点	经度/(°)	纬度/(°)	高度/m
AVBOX	116.378	38.647 8	2 700
TJ926	116.624	38.705 8	2 400
TJ925	117.013	38.795	1 800
newTJ924	117.062	38.820 6	1 800
newIAF(16R-IAF)	117.194	39.200 1	1 100
TJ953(16R-IF)	117.261 8	39.259 2	700
16R-FAF	117.281 8	39.227 3	600
TJ963	117.816 6	39.083	1 500
TJ962	117.493	39.1	100
TJ961	117.454 1	39.204 1	900
TJ960(16L-IAF)	117.391 7	39.3	700
newIF(16L-IF)	117.279	39.274 2	700
16L-FAF	117.307	39.229 7	600
TJ931	117.468 3	38.97	900
TJ932	117.705 2	38.997 7	1 600
MUGLO	118.034 4	39.070 3	2 700

本文研究选用 B737-800 机型,它是一款适用于中短程航线的喷气式客机,是全球范围内最常见的机型之一,具有广泛的代表性,机型具体参数见文献[24]。

文献[16]对独立平行仪表进近模式的运行做出了新的调整,规定各机水平间隔不得小于 5 600 m 或垂直间隔不得小于 300 m,以保障飞机在降落阶

段的运行安全。本文根据文件规范,设置较为紧密情况下(即设置飞机间水平间隔约 6 500 m,进场阶段由于速度较大,飞机间水平间隔会相应增加)的复杂飞机序列,分别于双跑道的两条进场程序与进近程序上设置飞机序列,用于后续仿真实验。

本考虑飞机运行过程中的速度变化,单位为 kt,在各运行阶段分别采用固定加速度的形式使飞机匀减速/加速,各运行阶段速度范围如表 2 所示。

表 2 各阶段飞机运行速度

Table 2 Aircraft operating speed for each stage

运行阶段	速度/kt	运行阶段	速度/kt
进场阶段	250~200	初始进近阶段	200~180
中间进近阶段	180~160	最后进近阶段(执行复飞)	160
复飞阶段	160~200~160	降落阶段	160~90

3.2 仿真实验

使用上述准备数据进行仿真实验,获得天津滨海国际机场优化后的 PBN 程序,并使用第 2 节所述方法设置飞机序列,如图 5 所示。

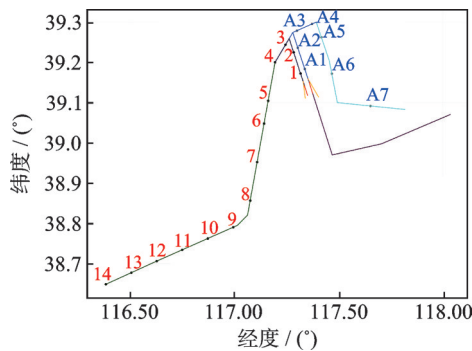


图 5 飞机序列示意图

Fig.5 Schematic diagram of aircraft sequence

如图 5 所示,分别在两跑道的 PBN 进场及进近程序上设置飞机序列,序号 1 到 14 的飞机在 RWY16R 进近降落,序号 A1 到 A7 的飞机在 RWY16L 进近降落,其中飞机 6 在相邻跑道降落,通过插入到飞机 A7 之前,能够满足安全间隔标准实施降落操作。由于西南方向进场飞机数量较多,因此设置飞机数量也相对较多,间距更为紧密。

本文假设多机复飞:飞机 1 与飞机 A1 均需要复飞。为飞机 1 与飞机 A1 在相应序列中寻找合适 G 点,G 点位置距离其当前序列中的前机与后机的间隔均满足文件安全要求。通过计算,在飞机 5 与飞机 6 之间为飞机 1 找到合适的 G 点(G_1),在飞机 A6 与飞机 A7 之间找到合适的 G 点(G_2)。将两机的 G 点位置(G_1 和 G_2)分别进行可视化,如图 6 和 7 所示。

图 6 和图 7 中, G_1 坐标为(117.141 1°,39.047 9°,1 380.74 m), G_2 坐标为(117.486 4°,39.117 7°,

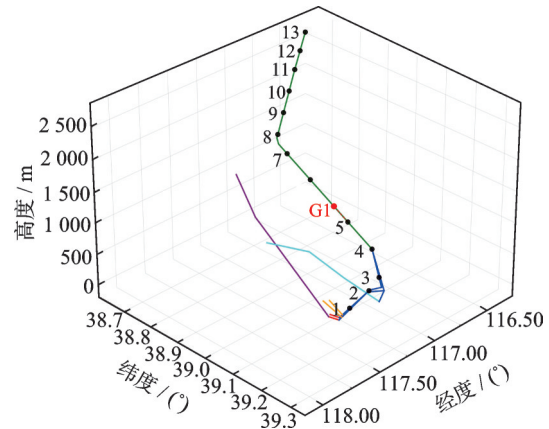


图 6 RWY16R 进场进近程序 G_1 位置示意图

Fig.6 Schematic diagram of the G_1 position in RWY16R arrival and approach procedure

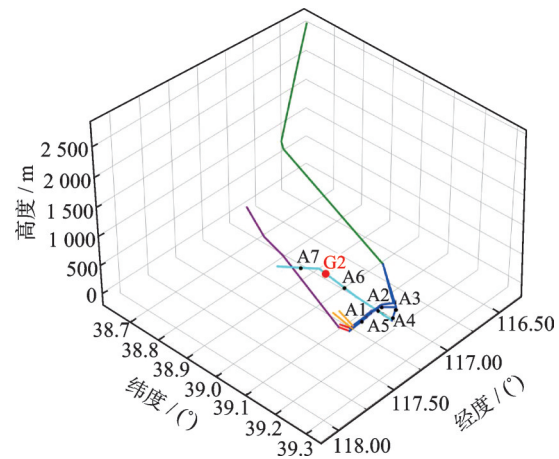


图 7 RWY16L 进场进近程序 G_2 位置示意图

Fig.7 Schematic diagram of G_2 position in RWY16L arrival and approach procedure

1 065.9 m)。找到 G_1 与 G_2 后,使用未来位置估计算法与三维 Dubins 规划方法,经过多次迭代,获得飞机 1 与飞机 A1 在各自 PBN 进近程序上的回注点与复飞程序,如图 8 所示。

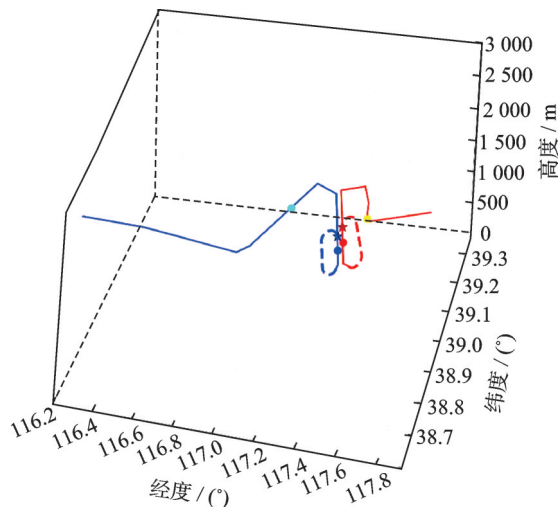


图 8 新复飞程序总示意图

Fig.8 General schematic diagram of new missed approach procedure

图 8 中,蓝色部分为 RWY16R 程序,红色部分为 RWY16L 程序,浅蓝色点为 G_1 初始位置,橙色点为 G_2 初始位置,深蓝色五角星为飞机 1 回注点,深红色五角星为飞机 A1 回注点,蓝色和红色圆点分别表示飞机 1 与飞机 A1 初始位置,虚线为新复飞程序路径。具体数据在图 8 中进行标注。部分程序段可能存在水平距离较近情况,但相互之间高度差较大,后续会使用间隔进行安全评估。

3.3 结果评估

计算两跑道优化前后程序的运行油耗、距离和时间(从进场到降落全程),如表 3 所示。

表 3 优化前后运行数据对比

Table 3 Comparison of operational data before and after optimization

优化效果对比	运行油耗/kg	运行时间/min	运行距离/km	运行总油耗/kg
RWY16R 新复飞程序	2 142.10	30.53	169.65	3 715.43
RWY16L 新复飞程序	1 573.33	22.28	123.80	
RWY16R 原复飞程序	3 823.79	54.55	303.10	6 958.52
RWY16L 原复飞程序	3 134.73	44.59	247.74	

根据表 3 中的结果, RWY16R 原复飞程序运行油耗为 3 823.79 kg,运行时间为 54.55 min; RWY16R 新复飞程序运行油耗为 2 142.1 kg,运行时间为 30.53 min,运行油耗降低 43.98%,运行时间缩短 44.03%。RWY16L 原复飞程序运行油耗为 3 134.73 kg,运行时间为 44.59 min; RWY16L 新复飞程序运行油耗为 1 573.33 kg,运行时间为 22.28 min,运行油耗降低 49.81%,运行时间缩短 50.03%。总体来看,原复飞程序总油耗为 6 958.52 kg,新复飞程序总油耗为 3 715.43 kg,运行油耗总体降低了 46.6%。通过数据对比,可见复飞程序优化后的运行油耗与时间具有较大提升。

ECAC 噪声模型可以通过推力与斜距获得噪声值,同理,绘制噪声曲线,获得推力与噪声值可以反向推出距离,该距离即为噪声影响范围(考虑高度对噪声的衰减)。本文噪声比较从噪声影响范围角度进行评估,如图 9 和 10 所示。图 9 为双跑道独立平行运行下使用传统复飞程序的噪声影响范围,总影响区域面积为 1 882.76 km²,图 10 为双跑道独立平行运行下每条跑道单独复飞程序的噪声影响范围,总影响区域面积为 1 661.4 km²。总影响区域减小了 11.7%,相应的各噪声等级所影响区域也有所减少。采用独立平行运行模式,每条

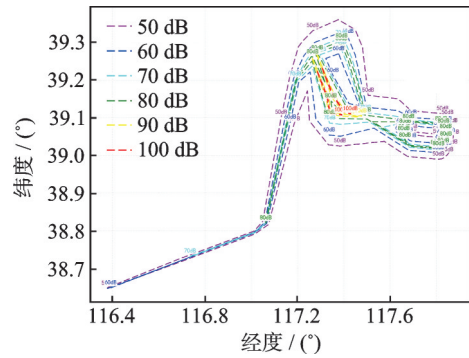


图 9 优化前噪声影响区域

Fig.9 Pre-optimization noise-affected area

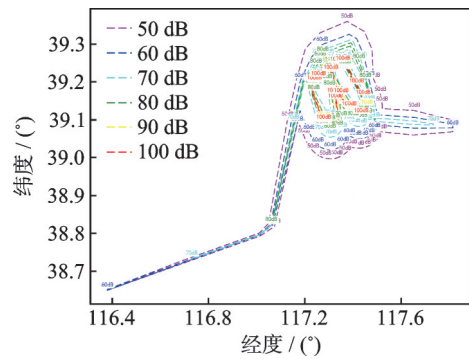


图 10 优化后噪声影响区域

Fig.10 Post-optimization noise-affected area

跑道使用单独的复飞程序,不存在互相影响,在降低噪声影响范围的同时,大大提升空域利用率与运行效率。

安全评估从各飞机在动态运行过程相互之间的最小水平间隔与最小垂直间隔角度进行。本文记录下飞机 1 与飞机 A1 在运行起始到结束期间与所有飞机之间的水平间隔与垂直间隔,并取最小值,将其绘制成折线图,如图 11 和 12 所示。图 11 和 12 展示飞机 1 与飞机 A1 在动态运行期间与各机的最小水平距离和垂直距离,并标注距离最近的飞机。飞机 1 与飞机 A1 在运行过程中与各机的最

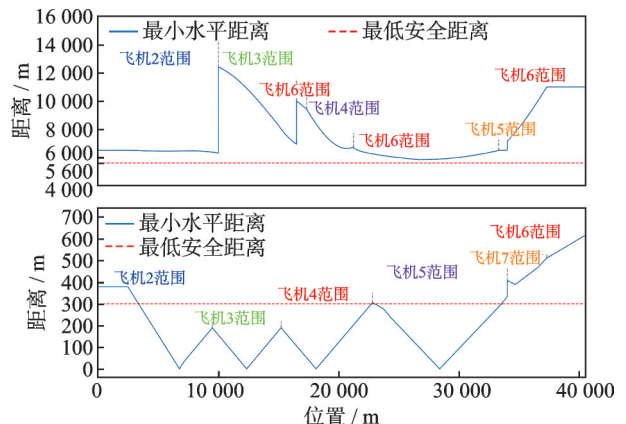


图 11 飞机 1 最小水平间隔与垂直间隔示意图

Fig.11 Schematic diagram of minimum horizontal and vertical separation for aircraft 1

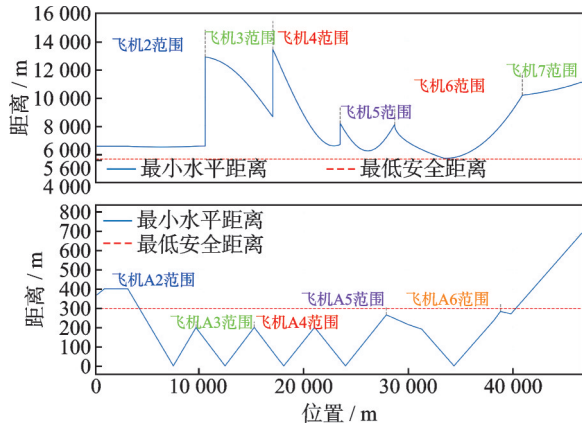


图 12 飞机 A1 最小水平间隔与垂直间隔示意图

Fig.12 Schematic diagram of minimum horizontal and vertical separation for aircraft A1

小水平距离均小于文件规定的 5 600 m,符合安全标准。垂直距离反复增降是由于两机均爬升复飞,其余飞机进近着陆,会出现最小垂直距离为 0 的时刻。根据安全间隔评估原则,在水平方向和垂直方向上有一个距离符合安全标准即视为运行不存在安全风险。

4 结 论

本研究基于文献[15]方法获得 PBN 进近程序初步优化结果,满足运行安全标准且与相近机场 PBN 程序之间无相互影响;再根据优化结果,结合飞机飞行性能与运行参数,采用改进 ARS 方法与三维 Dubins 规划方法对复飞程序进行优化,并应用到更加复杂的双跑道独立平行仪表进近模式。研究考虑多机复飞的复杂场景,设置更加紧密的飞机序列,考虑飞机的速度变化因素,并使用多维评估方法对优化效果进行评估比对。优化后的复飞程序在满足运行标准和运行安全的同时,能够大幅度降低噪声影响、燃油消耗和运行时间,节约了经济成本,提高了运行效率与环保效益。

本文构建了一种面向复杂双跑道场景的复飞程序优化方法与思路,该方法为智能方法,可适用于不同机场场景,能够快速得出优化结果,大幅减轻管制调配压力。在未来的工作中,有待进一步结合气象数据,考虑更加丰富的影响因素;应用于更新颖的场景;进行多机型的适配性验证研究;采用更加丰富的模型与算法,对 PBN 程序进一步优化,为智慧空域建设提供更精细化的技术支持。

参考文献:

[1] TIAN Y, WAN L, CHEN C, et al. Safety assessment method of performance-based navigation airspace planning[J]. Journal of Traffic and Transportation En-

gineering, 2015, 5(2): 338-345.

- [2] EINICKE K, KENNEDY J. Predicting airport noise impact to 2040: Traffic growth and technology uptake [J]. Applied Acoustics, 2025, 227: 110229.
- [3] 中国民用航空局,生态环境部,自然资源部,国家市场监督管理总局.民用运输机场周围区域民用航空器噪声污染防治行动方案(2024—2027年)[M].北京:中国民用航空局,2024.
- [4] 中国民用航空局.航空器噪声测量和评估:MH/T 6128—2024[S].北京:中国民用航空局,2024.
- [5] SEYMOUR K, HELD M, GEORGES G, et al. Fuel estimation in air transportation: Modeling global fuel consumption for commercial aviation[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 88: 102528.
- [6] PRATS X, PUIG V, QUEVEDO J. A multi-objective optimization strategy for designing aircraft noise abatement procedures. Case study at Girona airport [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011, 16(1): 31-41.
- [7] FILIPPONE A. Options for aircraft noise reduction on arrival and landing[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 60: 31-38.
- [8] CASADO R, LÓPEZ-LAGO M, SERNA J, et al. Enhanced missed approach procedure based on aircraft reinjection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(6): 4149-4170.
- [9] CARMONA M, CASADO R, BERMÚDEZ A, et al. Fuel savings through missed approach maneuvers based on aircraft reinjection[EB/OL]. (2022-07-11). <http://https://arxiv.org/abs/2207.03262>.
- [10] CASADO R, BERMÚDEZ A, HERNÁNDEZ-ORALLO E, et al. Pollution and noise reduction through missed approach maneuvers based on aircraft reinjection[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 114: 103574.
- [11] GU J W, TANG X M, HONG W J, et al. Real-time optimization of short-term flight profiles to control time of arrival[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 84: 1164-1174.
- [12] 谢春生,戴玉洁.基于 PEP 的飞机一发失效复飞应急程序优化[J].中国民航大学学报,2018,36(3): 7-10.
XIE Chunsheng, DAI Yujie. OEI missed approach emergency procedure optimization based on PEP[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2018, 36(3): 7-10.
- [13] KHATTAK A, CHAN P W, CHEN F, et al. Missed approach, a safety-critical go-around procedure in aviation: Prediction based on machine learning-ensemble imbalance learning[J]. Advances in Meteorolo-

- gy, 2023, 2023(1): 9119521.
- [14] DANCILA R, BOTEZ R, FORD S. Fuel burn and emissions evaluation for a missed approach procedure performed by a B737-400[J]. *The Aeronautical Journal*, 2014, 118(1209): 1329-1348.
- [15] 李亚飞,赵瑞.基于噪音与油耗的超音速客机进近程序优化研究[J/OL].*航空学报*: 1-10 [2025-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20250509.1400.002.html>.
LI Yafei, ZHAO Rui. Optimization of supersonic passenger aircraft approach procedure based on noise and fuel consumption. [J/OL]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1-10 [2025-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20250509.1400.002.html>.
- [16] 中华人民共和国交通运输部.平行跑道同时仪表运行管理规定[M].北京:交通运输部,2023.
- [17] eAIP. RWY01 PBN standard instrument approach program chart[EB/OL]. (2025-09-01) [2025-03-03]. <http://www.eaipchina.cn/#/eAIP>.
- [18] NUIC A, POLES D, MOUILLET V. BADA: An advanced aircraft performance model for present and future ATM systems[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2010, 24(10): 850-866.
- [19] European Civil Aviation Conference. Report on standard method of computing noise contours around civil airports: ECAC-CEAC Doc 29[R]. [S.l.]: ECAC, 1997.
- [20] PRETTO M, GIANNATTASIO P, DE GENNARO M. Mixed analysis-synthesis approach for estimating airport noise from civil air traffic[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 106: 103248.
- [21] FENG H, ZHOU Y D, ZENG W L, et al. A physics-based PSO-BPNN model for civil aircraft noise assessment[J]. *Applied Acoustics*, 2024, 221: 109992.
- [22] AUDRIN T, APPARICIO P, SÉGUIN A M. Aircraft noise and environmental equity in Montréal: A comparison of noise indicators and an analysis of the impacts of COVID-19[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 106: 103274.
- [23] HAGHIGHI H, DELAHAYE D, ASADI D. Performance-based emergency landing trajectory planning applying meta-heuristic and Dubins paths[J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 117: 108453.
- [24] QIAN F F. Fuel consumption analysis based on power system of B737-800 aircraft[C]//*Proceedings of 2023 International Conference on Power Communication Computing and Networking Technologies*. Wuhan, China: ACM, 2023: 1-4.

(编辑:张蓓)