

引用格式: 王维, 雷静. 基于平均飞行航迹的 CCO 减噪效用研究[J]. 声学技术, 2022, 41(5): 724-728. [WANG Wei, LEI Jing. Study on noise reduction efficiency of CCO based on average flight path[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(5): 724-728.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.05.014

基于平均飞行航迹的 CCO 减噪效用研究

王 维, 雷 静

(中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 近年来, 通过优化飞行程序降低机场飞机噪声影响成为机场环境保护的重要研究方向。文章首先建立了基于飞机“噪声-功率-距离”数据的噪声计算模型, 介绍了平均飞行航迹以及连续爬升运行(Continuous Climb Operation, CCO)离场程序的相关理论, 最后以大型国际机场为实例, 使用飞机平均飞行航迹进行噪声预测, 运用综合噪声模型计算出噪声影响面积并绘制噪声影响等值线图, 比较了 CCO 离场相对常规的标准仪表离场(Standard Instrument Departure, SID)的降噪效果。结果表明, CCO 离场程序可有效降低机场噪声影响, 在高噪声级影响区域的降噪效果更佳。

关键词: 连续爬升运行(CCO); 平均飞行航迹; 综合噪声模型; 机场噪声

中图分类号: TB533

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-05-0724-05

Study on noise reduction efficiency of CCO based on average flight path

WANG Wei, LEI Jing

(College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300)

Abstract: In recent years, airport aircraft noise reduction by optimizing flight procedures has become an important research direction for airport environmental protection. In this paper, a noise calculation model based on aircraft "noise-power-distance" data is established, and the relevant theories of average flight path and continuous climb operation (CCO) are introduced. Finally, by taking a large international airport as an example, the aircraft average flight path is used for noise prediction, and the integrated noise model is used to calculate the noise impact area, then the noise impact contour map are drawn to compare the noise reduction effect of the CCO departure with that of the conventional standard instrument departure (SID). The results show that the CCO departure procedure can effectively reduce the impact of airport noise, and the noise reduction effect is better in high noise impact areas.

Key words: continuous climbing operation(CCO); average flight path; integrated noise model; airport noise

0 引言

随着民航运输业的快速发展, 我国飞机噪声污染问题越来越严重。近年来, 因机场飞机噪声引起的扰民纠纷屡有发生。目前, 由于我国民航运输机主要为波音、空客系列, 具有较好的噪声适航性, 从噪声源(飞机)进一步降低噪声的空间不大。而通过限制机场起降架次, 虽可降低噪声影响, 但与机场航空业务量增长的诉求相悖, 也不利于机场航空运输价值的发挥。因此, 通过改变飞机在机场的起、降方式来减少噪声影响, 一直是重要的研究方

向。机场飞行程序的变更、优化, 具有周期短、易于实施的优点。由于飞机的起飞噪声大于着陆, 因而本文主要对离场飞行程序—连续爬升运行程序(Continuous Climb Operation, CCO)的减噪效用进行研究。

国外从 20 世纪末就已开始飞行程序减噪研究。文献[1]对机场降噪方法进行梳理, 给出的降噪方法包括: 横向航迹管理以及垂直剖面管理、速度和飞机外形管理, 其中横向航迹管理包括噪声优先航线、航迹分散/集中。针对离场程序, Visser 等^[2]建立了离场航线噪声数值模型, 以便进行降噪程序优化设计。Kreth^[3]指出应用新型减噪飞行程序有利于减少噪声影响, 分别对减噪程序的主要参数(高度、推力、斜距和襟翼设置)等变量进行改变, 分析飞机进离场噪声的影响因素, 从而得到飞机降噪的新思路。在国内的研究中, 王超等^[4]以减少飞行成本

收稿日期: 2021-05-29; 修回日期: 2021-06-30

作者简介: 王维(1960—), 男, 河北丰南人, 教授, 研究方向为机场环境保护。

通信作者: 王维, E-mail: 854973011@qq.com

和降低离场程序噪声影响为目标,进行了多目标优化设计研究;钱戈^[5]以飞行程序经济性和简便性作为优化目标,以飞行程序安全性和噪声影响为约束条件,建立了飞行程序多目标优化设计模型,并使用改进的多目标蚁群算法对模型进行优化求解。吕宗平等^[6]提出了噪声最优航迹的概念,首先对不同航迹进行航迹聚类,以噪声最优航迹指导飞行程优化,为飞行程序设计提供理论依据。

但是,目前针对连续爬升运行CCO特别是其减噪效用方面的研究尚少,开展相关研究对消减机场噪声影响具有重要价值。

1 机场噪声评价模型

1.1 飞机噪声评价量

我国目前机场飞机噪声评价量为国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)推荐的计权等效连续感知噪声级 L_{WECPN} ,但美国、欧洲等多数国家采用昼夜等效声级 L_{DN} 或昼间夜等效声级 L_{DEN} 。 L_{WECPN} 虽可较好地反映噪声对人的影响(基于噪度),但指标生僻,不便理解、测量和计算,只有少数国家使用。因此,我国在修订国家机场噪声标准(征求意见稿)时采用 L_{DN} 取代了 L_{WECPN} 。 L_{DN} 的指标原理与我国《声环境质量标准》相同,提高了机场噪声标准与城市噪声标准的相容性;使用 L_{DN} 作为评价量,有利于学习借鉴其他国家在机场噪声控制方面的经验和成果。本文采用 L_{DN} 作为机场飞机噪声的评价量。

1.2 基于飞机NPD数据噪声计算模型

1.2.1 单次飞行暴露声级

单次飞行噪声计算,首先应确定飞机进离场过程中预测点与飞行航迹的垂直距离即斜距,再基于某种飞机噪声基本数据噪声(Noise)-功率(Power)-距离(Distance)(NPD)进行插值计算,最后根据实际飞行状态修正得到单架飞机的暴露声级。

(1)斜距计算

$$R = \sqrt{L^2 + (h \cos \gamma)^2} \quad (1)$$

式中: R 为预测点到飞行航迹的斜距; L 为预测点与地面投影航迹的垂直距离; h 为飞机与预测点的高差; γ 为飞机的爬升角。

(2)NPD数据插值

NPD数据是假设飞机在理想状态下平稳飞行时,在特定机型、飞行状态下,飞机噪声级与发动机推力、距离之间的函数。NPD数据根据飞机噪声

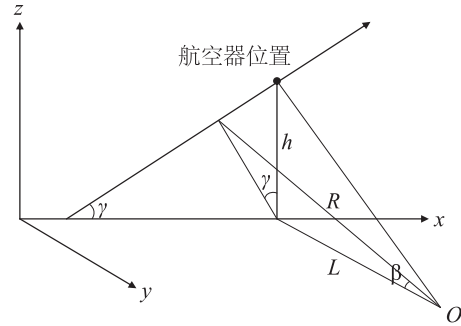


图1 斜距计算示意图

Fig.1 Schematic diagram of slope distance calculation

与性能数据库(ANP)中的噪声数据得到。

①推力插值计算

$$L_F = L_{Fi} + (L_{Fi+1} - L_{Fi}) \times \frac{(F - F_i)}{(F_{i+1} - F_i)} \quad (2)$$

②距离插值计算

$$L_R = L_{Ri} + (L_{Ri+1} - L_{Ri}) \times \frac{(\lg R - \lg R_i)}{(\lg R_{i+1} - \lg R_i)} \quad (3)$$

通过推力插值与斜距插值可以得到所需距离和推力下的噪声值。为了得到更准确的噪声值,还要进行速度、侧向衰减等方面的修正计算。

(3)噪声修正计算

单架飞机的暴露声级为

$$L_{SE} = L_{SE}(F, R) + \Delta v - \Delta L(\beta, L) \quad (4)$$

式中: $L_{SE}(F, R)$ 为发动机推力为 F 的飞机在与其斜距为 R 的地面预测点处的暴露声级; Δv 为速度修正因子; $\Delta L(\beta, L)$ 为侧向衰减修正因子。

1.2.2 预测点昼夜等效声级

昼夜等效声级是在单架次噪声暴露声级的基础上,考虑了人们在夜间的噪声敏感性,对夜间噪声给予10倍的补偿。计算公式为

$$L_{DN} = L_{SE, Avg} + 10 \cdot \lg(N_d + 10N_n) - 49.4 \quad (5)$$

式中: $L_{SE, Avg}$ 为全天内飞行活动的平均暴露声级; N_d 为昼间(6:00~22:00)的飞行架次; N_n 为夜间(22:00~次日6:00)的飞行架次。

平均暴露声级 $L_{SE, Avg}$ 计算公式为

$$L_{SE, Avg} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} 10^{0.1 \cdot L_{SEi}} \right) \quad (6)$$

式中: L_{SEi} 为第 i 次飞行活动的暴露声级; N' 为一日内所有飞行架次即昼间架次与夜间架次之和($N_d + N_n$)。

1.3 噪声影响分析工具

本文采用的飞机噪声影响分析工具为综合噪声模型(Integrated Noise Model, INM)。INM是由美国

联邦航空局 FAA 支持开发的基于 SAE AIR 1845 算法的机场噪声分析软件^[7]。软件可根据飞机特定离场模式、推力设置、机场条件、声源-接收者几何关系和气象参数等相关因素,借助噪声-推力-距离(NPD)关系来计算飞机噪声影响。INM 综合考虑了机场条件、飞机性能、机型组合、飞行架次、飞行路径、飞行时段,是目前世界上机场噪声分析应用最广的计算工具^[8]。

2 平均飞行航迹和连续爬升运行

2.1 平均飞行航迹

2.1.1 概念

航迹^[9-10]是飞机的实际飞行轨迹,须遵循飞行程序。但是由于飞行员驾驶的行为习惯、驾驶水平不一,使得即使执行同一飞行程序,实际航迹也会有所不同。在进行飞机噪声预测时,首先需要获得飞机的航迹等相关信息。通常,都是使用标称航迹作为计算依据。但在实际飞行中,飞机的真实航迹与标称航迹往往差别大。为了保证航空噪声预测的准确性,本文采用基于飞机性能统计数据确定的平均飞行航迹,与飞机真实航迹相近,因而得到的噪声预测结果更为准确。

2.1.2 确定方法

平均飞行航迹与标称航迹计算的主要区别是爬升梯度和转弯速度。

(1) 转弯半径确定

① 指示空速确定

标称航迹使用的速度一般基于安全考虑,预留

了较大的空间,与真实速度往往有较大区别。为了保证噪声预测的准确性,预测航迹要与飞机真实航迹尽量保持一致,特别对于离场转弯程序,可以使用基于飞机性能的统计速度数据来确定平均飞行航迹。基于飞机性能的统计数据与飞机的真实飞行速度之间误差更小,更有利于转弯半径确定的准确性。平均飞行航迹使用的基于性能的统计速度数据如表 1 所示。

② 真空速确定

真空速通常利用空速换算因子(K)进行计算:真空速 V_{TA} = 仪表速度 V_{IA} × 空速转换因子 K 。

③ 转弯坡度确定

在指定高度转弯时,不同高度转弯要求的转弯坡度角也不同,具体如下:使用 15° 的坡度直至高度为 305 m(1 000 ft);高于 915 m(3 000 ft)时使用 25° 的坡度;为了避免不同的转弯坡度对转弯半径的形成造成影响,在 305 m(1 000 ft)-915 m(3 000 ft)之间使用 20° 的坡度;同样也可根据表 1 得到。

④ 计算转弯半径

转弯率以及转弯半径计算公式为

$$R = 6\,355 \frac{\alpha}{\pi v} \quad (7)$$

$$r = \frac{v}{20\pi R} \quad (8)$$

式中: R 为转弯率; v 为真空速; α 为转弯坡度; r 为转弯半径; π 取 3.141 6。

根据以上步骤进行计算,可以利用离场航图中的标称航迹数据得到平均飞行航迹的航迹信息,进而利用 INM 进行噪声计算。

表 1 基于飞机性能的统计速度
Table 1 Statistical speeds based on aircraft performance

距 DER 的 距离/km	跑道以上的 高度/m	速度/ (km·h ⁻¹)	转弯坡度/ (°)	距 DER 的 距离/km	跑道以上的 高度/m	速度/ (km·h ⁻¹)	转弯坡度/ (°)
1.9(1)	130(425)	356(192)	15	25.9(15)	1 815(5 953)	491(265)	25
3.7(2)	259(850)	370(200)	15	27.8(16)	1 945(6 379)	493(266)	25
5.6(3)	389(1 275)	387(209)	20	29.6(17)	2 074(6 804)	494(267)	25
7.4(4)	518(1 700)	404(218)	20	31.5(18)	2 204(7 229)	498(269)	25
9.3(5)	648(2 125)	424(229)	20	33.3(19)	2 334(7 655)	502(271)	25
11.1(6)	777(2 550)	441(238)	20	35.2(20)	2 463(8 080)	504(272)	25
13(7)	907(2 976)	452(244)	20	37(21)	2 593(8 505)	511(276)	25
14.8(8)	1 037(3 401)	459(248)	25	38.9(22)	2 723(8 931)	515(278)	25
16.7(9)	1 167(3 827)	467(252)	25	40.7(23)	2 852(9 356)	519(280)	25
18.5(10)	1 296(4 252)	472(255)	25	42.6(24)	2 982(9 781)	524(283)	25
20.4(11)	1 476(4 677)	478(258)	25	44.4(25)	3 112(10 210)	526(284)	25
22.2(12)	1 556(5 103)	483(261)	25	46.3(26)	3 241(10 633)	530(286)	25
24.1(13)	1 685(5 528)	487(263)	25				

2.2 连续爬升运行

根据ICAO文件DOC9993定义,连续爬升运行(CCO)是一种飞机操作技术,基于空域设计、飞行程序设计和一定的空中交通管制放行许可,根据飞机性能优化飞行剖面,使飞机能够在整个爬升过程中以设定的最佳速度和发动机推力达到初始巡航高度从而减少燃油消耗和污染物排放。虽然实行CCO的初始目的是通过飞行程序的优化减少飞机在飞行过程中的燃油消耗和污染物排放,但事实上此举对消减机场飞机噪声影响也有一定效果^[1]。CCO实施了飞行推力、高度的优化,其与标准仪表离场程序(Standard Instrument Departure, SID)相比的剖面如图2所示。

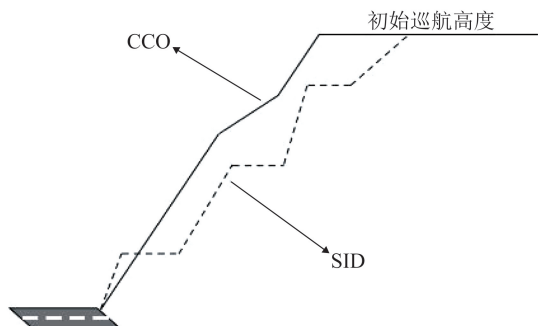


图2 SID与CCO的飞行剖面
Fig.2 Flight profiles for SID and CCO

由图2中的飞行剖面可知,与SID相比,CCO减少了平飞阶段,实现快速爬升,使噪声源尽快升高,达到节能降噪的效果。

3 减噪效用评估分析

选取国内某大型机场的主要离场方向,其主要机型为B737-700、B737-800、A320-211。下面利用INM分别对执行SID程序和CCO程序的机场噪声进行预测计算。

3.1 噪声影响面积

利用INM模型计算,分别得到标准仪表离场程序SID和连续爬升运行程序CCO在不同噪声级下的噪声影响面积,如表2所示。

由表2可知,CCO与SID相比,在各声级范围均获得明显的减噪效果。 L_{DN} 大于55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 dB的影响区域面积分别减少了21.16%、20.78%、19.85%、19.67%、25.70%、28.03%、23.47%。其中, L_{DN} 大于75, 80, 85 dB的影响区域面积减少较多,减噪效果尤为显著。

表2 SID与CCO离场程序的噪声影响面积对比

Table 2 Comparison of the areas affected by noise in SID and CCO departure procedures

昼夜等效声级 L_{DN}/dB	SID	CCO	减少面积/%
55	25.202	19.868	21.16
60	10.11	8.009	20.78
65	4.454	3.57	19.85
70	1.561	1.254	19.67
75	0.646	0.48	25.7
80	0.289	0.208	28.03
85	0.098	0.075	23.47

3.2 噪声影响区域形状

设置 L_{DN} 在55~85 dB范围内,每间隔5 dB输出一条噪声等值线, SID程序和CCO程序的噪声等值线结果如图3和图4所示。

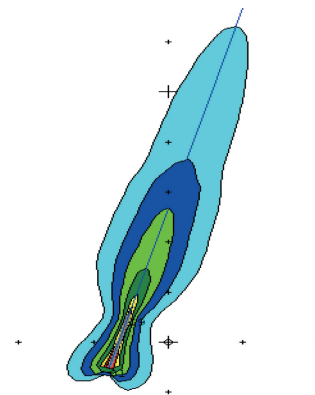


图3 SID程序噪声等值线图
Fig.3 Noise contour map of SID departure procedure

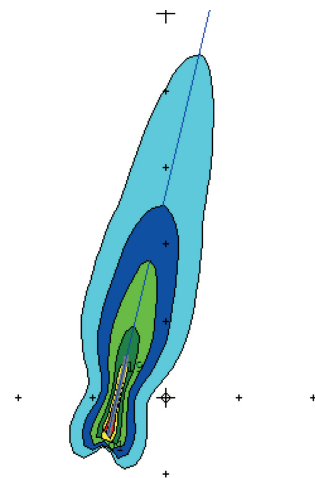


图4 CCO程序噪声等值线图
Fig.4 Noise contour map of CCO departure procedure

比较可知,当 $L_{DN}<80$ dB时, SID和CCO的噪声等值线形状相似,当 $L_{DN}>80$ dB时,噪声等值线发生了较大变化,CCO的高噪声区域面积显著减少。随着飞行高度的增加,噪声影响区域逐渐变大。

由图2可知,相较于SID程序,CCO程序在离场加速爬升阶段减少了飞机的平飞段,使飞机及时提高飞行高度,把地面噪声尽快转化为空中噪声;同时执行CCO程序时飞机在爬升中采用低阻力构形和低发动机推力等设置,使飞机在气动性能和发动机性能等方面也尽可能减少噪声影响。

4 结 论

本文通过研究得到以下几个结论:

(1) 飞机实施CCO是一种有效的机场运行减噪措施,能在不限制机场飞机运行架次情况下消减机场飞机噪声影响。

(2) CCO与SID相比,在各声级范围均获得明显的减噪效果。 L_{DN} 大于55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 dB的影响区域面积分别减少了21.16%、20.78%、19.85%、19.67%、25.70%、28.03%和23.47%。

(3) 对于高噪声影响区域(L_{DN} 大于75, 80, 85 dB)CCO的减噪效果更好。

(4) CCO的减噪效果主要源于飞机及时提高飞行高度,把地面噪声尽早转化为空中噪声;以及飞机在爬升中采用低阻力构形和低发动机推力设置。

(5) 国内已有部分机场实施CCO运行,安全性已得到验证,因此具有噪声困扰的民用机场可考虑推广使用。

参 考 文 献

- [1] ASCENT. ANALYTICAL APPROACH FOR QUANTIFYING NOISE FROM ADVANCED OPERATIONAL PROCEDURES, ASCENT Project 023[EB/OL]. <https://ascent.aero/project/rotorcraft-noise-abatement-procedures-development/>, 2020-01-02.
- [2] VISSER H G, WIJNEN R A A. Optimization of noise abatement departure trajectories[J]. *Journal of Aircraft*, 2001, 38(4): 620-627.
- [3] KRETH S. Approach and departure procedure variations to reduce and redistribute noise[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference. Boston, MA. Reston, Virginia: AIAA, 2013: 5170.
- [4] 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.
WANG Chao, WANG Fei. Multi-objective intelligent optimization of noise abatement departure trajectory[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(1): 147-153.
- [5] 钱戈. 飞行程序优化设计关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
QIAN Ge. Research on key technology in optimal design of flight procedures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [6] 吕宗平, 陈雪蕊, 徐涛. 基于噪声最优航迹的飞行程序优化方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(8): 1458-1464.
LV Zongping, CHEN Xuerui, XU Tao. Flight procedure optimization method based on the noise optimal flight track[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2016, 44(8): 1458-1464.
- [7] 丁文婷, 徐涛, 杨国庆. 单个飞机噪声事件最小顶点覆盖模型的机场噪声监测点分布方法[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(3): 166-170.
DING Wenting, XU Tao, YANG Guoqing. Locating of airport noise monitoring points based on minimum vertex cover model of single aircraft noise event[J]. *Noise and Vibration Control*, 2012, 32(3): 166-170.
- [8] Integrated Noise Model (INM) Version 7.0 User's Guide[Z]. Washington: The Federal Aviation Administration Office of Environment and Energy, 2007.
- [9] KHARDI S. Aircraft flight path optimization-the Hamilton-Jacobi-Bellman considerations [J]. *Applied Mathematical Sciences*, 2012, 6(25): 1221-1249.
- [10] 吕宗平, 李永祥, 徐涛. 面向机场噪声预测的多噪声因素航迹聚类[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(12): 3349-3354.
LYU Zongping, LI Yongxiang, XU Tao. Multi-noise factors flight tracks clustering for airport noise prediction[J]. *Computer Engineering and Design*, 2015, 36(12): 3349-3354.
- [11] WHITE K, ARNTZEN M, WALKER F, et al. Noise annoyance caused by continuous descent approaches compared to regular descent procedures[J]. *Applied Acoustics*, 2017, 125: 194-198.