

文章编号: 1005-0523(2017)05-0042-07

## 基于 CDA 程序的机场噪声评估与控制研究

胡 荣, 许跃凤, 李东亚, 张军峰

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 为深入分析航空器噪声对机场周边地面和空间的影响, 基于 BADA 模型构建了航空器航迹预测模型, 基于 NPD 数据库构建了机场噪声评估模型, 对模型进行理论分析与数值仿真, 以广州白云机场 GYA 进场点为例开展了机场噪声影响实例研究, 从地面影响、空间影响、影响时间等维度量化了 CDA 程序的减噪效果。研究结果表明: 与 IAP 程序相比, CDA 程序减噪效果明显, 且减噪效果随着噪声等级的提高而提高; CDA 程序较 IAP 程序减噪的原因是较低的飞行推力和较高的飞行高度。

**关键词:** 航空运输; 减噪; BADA 模型; 持续下降进近; 噪声评估

中图分类号: X827

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.05.007

近年来, 我国航空业的快速发展, 民航机场规模不断扩大、飞机起降架次持续增多<sup>[1]</sup>, 飞机频繁起降给机场周边区域带来的噪声问题日益严重。《国务院关于促进民航业发展的若干意见》(国发[2012]24号)中明确指出: “到2020年, 我国初步形成安全、便捷、高效、绿色的现代化民用航空体系”。随着我国民航业的进一步发展, 飞机起降噪声区别于其他噪声<sup>[2]</sup>, 其与机场周边区域发展的矛盾势必愈演愈烈, 进行科学合理的噪声评估和控制势在必行。

当前, 国内外针对机场噪声问题开展了深入的研究, 取得了丰富的研究成果, 依据研究内容划分主要集中在如下两个方面:

1) 有关机场噪声评估的研究: 欧美等国研发出多种噪声评估软件, 德国的 SoundPLAN<sup>[3]</sup>, 采用扇形模型进行噪声计算, 但距离声源越远精度越差; 美国的 INM 采用综合噪声模型预测噪声, 使用广泛也具有较高精度, 但需要大量精确数据输入且成本较高; Noisemap 主要用于军事领域, 用于民用误差较大<sup>[4]</sup>。我国的机场噪声评估研究起步较晚, 相关理论研究主要集中在地面噪声评估、地面噪声分布等<sup>[5-10]</sup>, 缺少成型的噪声评估软件。另外, 进行噪声评估的前提是获得其航迹, 目前航迹预测的方法主要有两种: 一是基于混合估计理论, 如交互式多模型算法<sup>[11]</sup>, 二是基于航空器动力学及运动学模型, 利用各类机型的性能参数实现航迹预测<sup>[12]</sup>。

2) 有关机场噪声控制的研究: 按照其传播规律来看主要有控制噪声源、减少噪声传播、隔离噪声受众<sup>[13-14]</sup>等方法。作为环境友好型的进近程序, 持续下降进近 (continuous descent arrival, CDA) 在进近过程中避免平飞, 尽可能久地保持闲置推力和较高高度, 尽可能使飞机保持光洁形态, 这能够有效减少噪声能量的传播, 也使得 CDA 有三点突出优势: 缓解噪声污染、降低燃油消耗、减少废气排放。欧美等国多个机场已开展数次飞行验证并用于日常运营, 效果显著<sup>[15]</sup>。

收稿日期: 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(71401072, 71201082); 中央高校基本科研业务费专项基金(NR2014007, NS2015068); 江苏省研究生培养创新工程(SJLX16\_0118); 研究生创新基地(实验室)开放基金/(kfjj20160702)

作者简介: 胡荣(1980—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为民航可持续发展。

基于上述研究,国内外对机场噪声评估和控制研究已取得一定成果,但尚有不足,主要表现在以下两个方面:

1) 机场噪声评估方面:首先,现有研究多借助国外现成噪声预测工具进行,这本身就有两点弊端,一是国外评估软件不一定适合本国国情,二是不利于评估软件的后续改进和集成;其次,现有评估多是定性评估没有进行定量评估,结果不直观,而且主要是针对地面评估而没有考虑空间受噪声影响状况。

2) 机场噪声控制方面:国内现有研究对飞行程序减噪考虑不足,研究成果较少,与美欧等发达国家差距明显,亟需加强相关研究。

基于上述考虑,本文以广州白云国际机场 GYA 进场飞机为例,基于 BADA(base of aircraft data)模型构建航迹预测模型,输出预测航迹;基于 NPD(noise-power-distance)数据库构建机场噪声评估模型,对模型进行理论分析与数值仿真。基于上述理论,对标准仪表进场程序(instrument arrival procedure, IAP)进行噪声评估,生成地面噪声等值线图、三维空间噪声等值面图。采用持续下降进近程序减噪,对比分析二者在高分贝噪声影响面积、体积大小、敏感点影响时间长短,验证 CDA 程序的减噪优势并深入分析其原因。

## 1 基本模型研究

为顺利开展机场噪声评估研究,首先需要确立航空器的航迹预测模型与机场噪声评估模型。

### 1.1 航迹预测模型

BADA 航空器性能模型是由欧控与航空器制造商联合开发的分析飞行动力学的模型,可确定航空器不同阶段的性能<sup>[16]553</sup>,其主要包括全能量模型、水平运动模型、气动与推力模型。

1) 全能量模型。通过分析航空器质点受力以及势能和动能转化关系来建立模型,如式(1)所示<sup>[16]554</sup>:

$$(T-D)V_{TAS}=mg\frac{dh}{dt}+mV_{TAS}\frac{dV_{TAS}}{dt} \quad (1)$$

式中: $T$ 为推力,N; $D$ 为阻力,N; $m$ 为航空器质量,kg; $h$ 为高度,m; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $V_{TAS}$ 为航空器真空速,m/s。

2) 水平运动模型。主要描述航空器在水平方向的运动<sup>[16-17]</sup>,如式(2)所示:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{WA} &= \varphi_{wind} - \delta_{MC} \\ \psi_{WA} &= \arcsin((v_{wind}/v_{TAS})\sin\theta_{WA}) \\ v_{GS} &= v_{TAS} \cos(\varphi_{DA}) + v_{wind} \cos(\theta_{WA}) \\ \Delta d &= v_{GS}\Delta t \\ \beta_{MH} &= \delta_{MC} + \varphi_{DA} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\theta_{WA}$ 为风角,(°); $\varphi_{wind}$ 为风向,(°); $v_{wind}$ 为风速,m/s; $\delta_{MC}$ 为航线角,(°); $\Delta t$ 为预测步长,s; $v_{GS}$ 为地速,m/s; $\Delta d$ 为飞行距离,m; $\beta_{MH}$ 为航向,(°)。

3) 气动及推力模型。用以分析航空器受力情况,研究航空器的速度与下降率。其中航空器阻力可由式(3)计算,推力可根据最大爬升推力以及不同飞行阶段对应的系数计算获得。

$$D = \frac{C_D \rho V_{TAS}^2 S}{2} \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为空气密度,kg/m<sup>3</sup>; $S$ 为机翼参考面积,m<sup>2</sup>; $C_D$ 为阻力系数。

基于 BADA 航空器性能模型,可按照如下步骤开展航迹预测分析:① 设立航空器初始状态;② 依据航段性质,分别处理垂直和水平方向航迹;③ 联合性能数据,输入航迹计算模块,根据预测步长计算航迹。

### 1.2 机场噪声评估模型

机场噪声评估可按“计算飞行航迹-确定评估指标-计算 NPD 插值-修正计算结果-预测噪声值”的步骤进行<sup>[18]</sup>。其中“计算飞行航迹”可通过“航空预测模型”计算获取,其他重要过程的计算方法如下:

1) 斜距计算。预测点与噪声源的距离是决定噪声影响的关键因素之一。对预测点进行噪声预测,最重要的步骤是计算斜距。斜距  $d_p$  可表示为

$$d_p = \sqrt{l^2 + (h \cos \gamma)^2} \quad (4)$$

式中:  $l$  为预测点到地面航迹的垂直距离;  $h$  为飞行高度与预测点的高差;  $\gamma$  为飞机的爬升角。

2) NPD 数据插值。参照 NPD 数据,  $P$  可根据任意推力值以及任意距离值  $d$  获得噪声水平。

对应于斜距  $d$ , 若推力  $P$  处于  $P_i$  与  $P_{i+1}$  之间, 则噪声水平:

$$L(P) = L(P_i) + \frac{L(P_{i+1}) - L(P_i)}{P_{i+1} - P_i} \cdot (P - P_i) \quad (5)$$

对应于推力  $P$ , 若斜距  $d$  处于  $d_i$  和  $d_{i+1}$  之间, 则噪声水平:

$$L(d) = L(d_i) + \frac{L(d_{i+1}) - L(d_i)}{\lg d_{i+1} - \lg d_i} \cdot (\lg d - \lg d_i) \quad (6)$$

若斜距  $d$  超出了斜距-噪声特性曲线范围, 则可通过内插值或外插值求得。

3) 修正计算。依据 ECAC/CEAC Doc29, 单架飞机的有效感觉噪声级修正计算公式如下:

$$L_{EPN} = L_{EPN}(P, d) + \Delta v - \Lambda(\beta, l) + \Delta_I(\varphi) + \Delta L + \Delta \phi \quad (7)$$

式中:  $\Delta v$  为速度修正因子;  $\Lambda(\beta, l)$  为侧向衰减修正因子;  $\Delta_I(\varphi)$  为引擎安装修正因子;  $\Delta L$  为起跑点后侧点修正因子;  $\Delta \phi$  为转弯修正因子。

此外, 根据《机场周围飞机噪声环境标准》(GB 9660-88) 和 NPD 数据库现有评估指标, 本文采用有效感觉噪声级 ( $L_{EPN}$ ) 为单事件噪声评估指标。

## 2 评估结果分析

本文选用 B767-300 机型以广州白云机场 GYA 方向进场为例进行噪声评估与控制, GYA 方向进场距离为 62.10 km, 程序起终航路点为 GYA 与 AGVOS, 其中 IAP 程序与 CDA 程序重要航路点信息如表 1 所示。评估 IAP 程序对地面与空间的噪声影响状况, 采用 CDA 程序减噪, 量化减噪效果, 并分析减噪原因。

表 1 IAP&CDA 程序航路点信息  
Tab.1 Way point information of IAP and CDA procedure

航路点	GYA		GG443		AGVOS	
经度/(°)	112.485 0		112.725 3		113.0817	
纬度/(°)	23.071 6		23.069 7		23.066 6	
地面距离/km	62.10		42.77		0	
飞行程序	IAP	CDA	IAP	CDA	IAP	CDA
高度/m	3 891.17	3 900.00	3 000.00	3 235.32	1 800.00	1 833.00
真空速/(m/s)	174.03	173.41	149.75	167.57	120.81	108.81
校准空速/(m/s)	145.00	144.41	130.00	144.07	110.99	118.68
温度/K	262.86	262.80	268.65	267.12	276.45	276.24
推力/N	31 256.58	31 236.46	33 293.79	3 275.50	36 051.78	35 975.71

### 2.1 地面影响分析

根据本文第 1 章理论, 将有效感觉噪声级 ( $L_{EPN}$ ) 作为噪声级单位, 采用 Matlab 编程, 得到 IAP 程序与 CDA 程序在 GYA 进场方向地面噪声等值线图, 如图 1(a), 图 1(b) 所示, 其中: 相同色块代表相同等级噪声, 颜色由浅入深表示噪声级的增加, 对应关系由右侧 colorbar 给出。计算可得 IAP 程序与 CDA 程序在 70, 65, 60, 55 dB 以上噪声面积, 作差计算可得 CDA 程序较 IAP 程序减少面积及百分比, 如表 2 所示, 根据结果可知 CDA 程序较 IAP 程序地面减噪性能较好, 且随着噪声等级的增加减噪效果越明显。

表 2 CDA 程序地面减噪效果  
Tab.2 Noise abatement effect on the ground of CDA procedure

噪声值/dB	IAP 程序影响面积/km <sup>2</sup>	CDA 程序影响面积/km <sup>2</sup>	减少面积/km <sup>2</sup>	减少百分比/%
>70	34.84	12.37	22.47	64.50
>65	228.56	108.09	120.47	52.71
>60	612.49	498.94	113.55	18.54
>55	1 191.51	1 097.37	94.14	7.90

2.2 空间影响分析

现有研究多以噪声等值线进行噪声影响范围的评估,忽略了在高度的变化下,飞机噪声影响的差异性,本节结合高度变量,绘制噪声等值面图,对飞机噪声在空间范围内的影响进行量化,评估 CDA 程序的减噪效果。

本文将高度上限设置为 400 m(1 312.34 ft),考虑到广州超过最大高度的建筑物仅 3 座,400 m 可覆盖绝大多数建筑,具有科学性和合理性。得到 IAP 程序与 CDA 程序进场噪声三维等值面如图 2、图 3 所示。计算可得 IAP 程序与 CDA 程序在 70,65,60,55 dB 以上噪声体积,作差计算得到 CDA 程序较 IAP 程序减少体积及百分比(400 m 高度),如表 3 所示,各噪声等级减噪效果明显,减噪效果随噪声等级提高而越发显著。

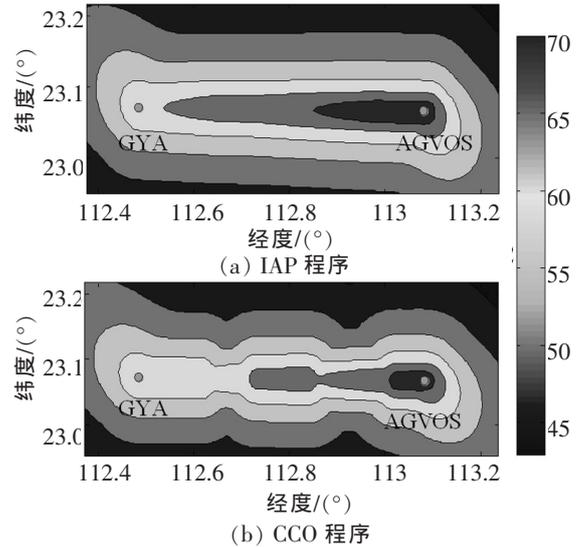


图 1 IAP 程序和 CDA 程序噪声等值线图  
Fig.1 Noise contour of IAP and CDA procedure

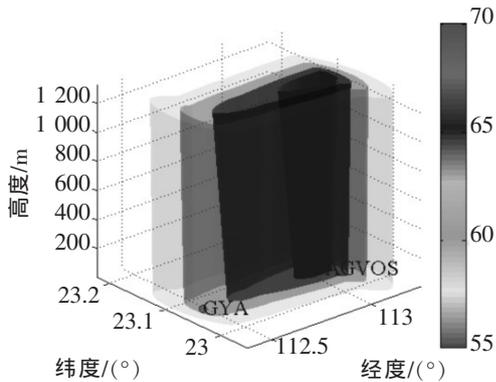


图 2 IAP 程序噪声等值面  
Fig.2 Noise equivalent surface of IAP procedure

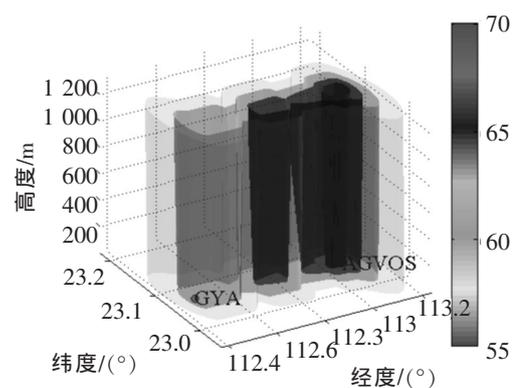


图 3 CDA 程序噪声等值面  
Fig.3 Noise equivalent surface of CDA procedure

表 3 CDA 程序空间减噪效果  
Tab.3 Space noise abatement effect of CDA procedure

噪声值/dB	IAP 程序影响体积/km <sup>3</sup>	CDA 程序影响体积/km <sup>3</sup>	减少体积/km <sup>3</sup>	减少百分比/%
>70	21.42	7.96	13.46	62.84
>65	104.04	55.16	48.88	46.98
>60	253.13	210.96	42.17	16.87
>55	482.20	445.34	36.86	7.64

### 2.3 影响时间分析

不同功能区的人群对噪声敏感程度不同,学校、医院、住宅区的人群对噪声承受能力更弱,因此从起点 GYA 至终点 AGVOS,选取肇庆市第三人民医院、白坭华立医院、金沙中学、罗村中心小学四处为噪声敏感点,如图 4 所示,根据本文第 1 章理论可计算噪声敏感点噪声数据变化,CDA 程序较 IAP 程序在各噪声敏感点减噪效果如表 4 所示。



图 4 GYA 至 AGVOS 间噪声敏感点

Fig.4 Noise sensitive point from GYA to AGVOS

表 4 CDA 程序减噪时间

Tab.4 Noise abatement time of CDA procedure

敏感点	噪声区间/dB	IAP 程序/s	CDA 程序/s	减少时间/s	减少百分比/%
肇庆市第三 人民医院	>65	8	0	8	100.00
	>60	90	78	12	13.33
	>55	134	118	16	11.94
白坭华立医院	>65	54	52	2	3.70
	>60	130	126	4	3.07
	>55	216	210	6	2.78
金沙中学	>70	34	0	34	100.00
	>65	82	62	20	24.39
	>60	142	132	10	7.04
	>55	250	242	8	3.20
罗村中心小学	>70	44	30	14	31.82
	>65	120	114	6	5.00
	>60	136	128	8	5.82
	>55	180	163	17	9.44

通过分析广州白云机场 GYA 进场点噪声数据可得出如下结论:

- 1) 与 IAP 程序相比,CDA 程序减噪效果明显;
- 2) 随着噪声等级的提高,CDA 程序的地面及空间减噪效果越明显;
- 3) CDA 程序在各噪声敏感点减噪效果明显。

### 2.4 影响原因分析

由 NPD 数据可知,影响噪声的两大因素分别是推力和斜距,而影响斜距的两个因素分别是水平距离和高度,由于 IAP 程序与 CDA 程序地面轨迹相同,所以影响 IAP 程序和 CDA 程序噪声的两个直接因素就是推力和高度。图 5(a),图 5(b)分别是 IAP 程序与 CDA 程序的推力和高度变化对比图,这里的横坐标“Distance”是指飞机距起始进近定位点(AGVOS)距离。

由图5(a)可知在距离相同情况下CDA程序推力始终低于IAP程序推力;由图5(b)可知在距离相同情况下CDA程序飞行高度始终高于IAP程序高度,由于IAP程序与CDA程序地面轨迹相同,故CDA程序斜距始终大于IAP程序斜距。根据B767-300机型NPD数据可知,在相同斜距下,推力越小噪声值越小;同样,在相同推力下,斜距越大噪声值越小。在整个进场过程中CDA程序推力始终小于IAP程序推力,CDA程序斜距始终大于IAP程序斜距,故CDA程序与IAP程序相比能够明显减少噪声。

### 3 结论

基于BADA模型构建了航空器航迹预测模型,基于NPD数据库构建机场噪声评估模型,分析了IAP程序在地面和空间的噪声影响范围,通过CDA程序减噪,并从地面、空间、时间等维度详细分析了CDA程序的减噪效果,最后从推力和高度两个角度深入分析了CDA的减噪原因。

以广州白云机场GYA进场点为例进行减噪研究,结果表明:①与IAP程序相比,CDA程序减噪效果明显,且减噪效果随着噪声等级的提高而提高;②CDA程序较IAP程序减噪的原因是较低的飞行推力和较高的飞行高度。

当然,本文仅从理论上研究了CDA程序在地面和空间的减噪效果,对真机试验的实证分析仍需进一步研究。

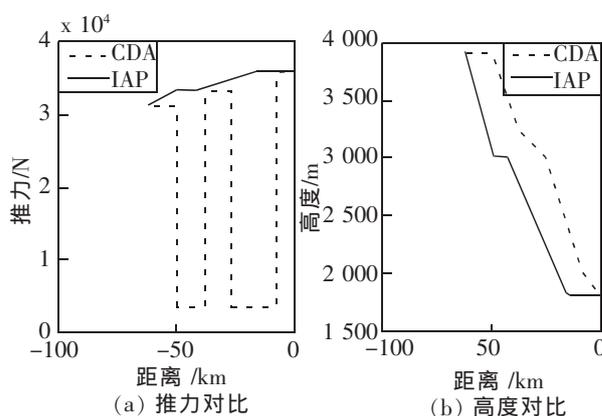


图5 推力和高度对比

Fig.5 Comparison of thrust and altitude

### 参考文献:

- [1] 冯社苗. 基于灰色 Verhulst 模型的民航远期货运量预测研究[J]. 华东交通大学学报, 2013, 39(3): 61-64.
- [2] 孙维娜, 李莉, 罗雁云. 轨道交通列车不同运行速度下噪声特性对比研究[J]. 华东交通大学学报, 2014, 40(2): 32-36.
- [3] BRAUNSTEIN. SoundPLAN user's manual[R]. Backnang: SoundPLAN GmbH, 2015: 1-600.
- [4] JEFFREY R O, GREGG G F, JOHN M G. Integrated noise model (INM) version 6.0 technical manual[R]. Washington D C: Federal Aviation Administration, 2002: 1-53.
- [5] 杜继涛. 机场噪声预测模型及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [6] 周宁. 机场噪声预测与控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [7] 沈颖, 陈荣生, 谢实海. 飞机噪声评价体系研究[J]. 公路交通科技, 2000, 4(4): 73-76.
- [8] 杜浩, 袁捷. 基于 GIS 的机场噪声评价系统[J]. 计算机工程, 2009, 5(5): 262-264.
- [9] 丁文婷. 机场噪声监测点分布模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [10] 杜继涛, 张育平, 徐涛. 一种 BP 神经网络机场噪声预测模型[J]. 计算机工程与应用, 2013, 9(8): 236-239.
- [11] HWANG I. Air traffic surveillance and control using hybrid estimation and protocol-based conflict resolution[D]. Stanford: Stanford University, 2003.
- [12] 王超, 郭九霞, 沈志鹏. 基于基本飞行模型的 4D 航迹预测方法[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(2): 295-300.
- [13] JOHN E R, MARYAM K. Benefits of continuous descent operations in high-density terminal airspace under scheduling constraints[R]. Washington D C: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010.

- [14] 李东亚,胡荣,江超,等. 基于改进灰色B型关联度的低噪声飞机选型[J]. 噪声与振动控制,2015,35(6):131-134+144.
- [15] 李东亚,胡荣,张军峰,等. 航空器持续下降进近技术的发展现状与展望[J]. 航空计算技术,2016,46(5):131-134.
- [16] 张军峰,蒋海行,武晓光,等. 基于BADA及航空器意图的四维航迹预测[J]. 西南交通大学学报,2014,49(3):553-558.
- [17] EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTER. Model accuracy summary report for the base of aircraft data (BADA)[R]. Bretigny:EEC,2012.
- [18] EUROPEAN CIVIL AVIATION CONFERENCE. Report on standard method of computing noise contours around civil airports [S]. Paris:European Civil Aviation Conference,2005.

## Research on Airport Noise Evaluation and Control Based on Continuous Descent Arrival

Hu Rong, Xu Yuefeng, Li Dongya, Zhang Junfeng

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To investigate the influence of aircraft noise on the ground and space, the aircraft trajectory prediction model based on BADA model was established and airport noise evaluation model was formulated based on NPD database. Theoretical analysis and numerical simulation were provided to study the influence of airport noise and quantify the CDA procedure noise abatement effect from the view of ground influence, space influence, influence time based on GYA arrival point of Guangzhou Baiyun International Airport. The results show that compared with the IAP procedure, the CDA procedure has a more significant effect on noise abatement, especially with the increase of the noise level, which results from lower thrust and higher flight altitude.

**Key words:** air transportation; noise abatement; BADA model; continuous descent arrival; noise evaluation

(责任编辑 刘棉玲)