

基于 EDMS 模型的航空器大气污染物的排放计算分析

罗雯莉¹, 白伟伟¹, 武文飞²

(1. 内蒙古工业大学航空学院, 内蒙古自治区呼和浩特市 010051;

2. 呼和浩特机场公司, 内蒙古自治区呼和浩特市 010020)

摘 要: 文章针对航空器运行阶段造成的机场区域环境大气污染现象, 阐释了基于飞行计划的航空器污染物排放模型及线源扩散模型计算方法, 给出航空器排放大气污染物的减排措施, 包括机型组合比例调整、减少航空器地面运行时间、改变下滑角及进近阶段飞行时间, 同时应用 EDMS 模型计算并分析其污染物排放量的变化情况。结果表明, 通过使用减排措施, 航空器排放的大气污染物均呈减少趋势, 验证了减排措施的有效性。

关键词: 航空器排放; 减排措施; 起飞着陆循环; 排放与扩散模型系统; 下滑角

中图分类号: X51

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.06.007

Emission Calculation and Analysis of Air Pollutants from Aircraft Based on EDMS Model

LUO Wenli¹, BAI Weiwei¹, WU Wenfei²

(1. College of Aviation, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Hohhot Baita International Airport, Hohhot 010020, China)

Abstract: Emissions during aircraft operation will cause the air pollution of the regional environment of the airport. The aircraft pollutant emission model based on the flight plan and the calculation method of the line source diffusion model are clarified. Emission reduction measures of air pollutants include the adjustment of the aircraft type, reducing the aircraft ground operation time, changing the glide angle and the approach flight time. Based on the EDMS model, the changes in pollutant emissions are calculated and analyzed. The results show that air pollutants from the aircraft decrease by using the emission reduction measure, thus verifying its effectiveness.

Keywords: Aircraft Emissions; Emission Reduction Measures; Land and Take-off; Emissions and Dispersion Modeling System; Glide Angle

CLC number: X51

自从民用航空工业出现以来, CO₂ 排放每年都在增长, 即使燃油效率在提高, 运输高需求仍会导致 CO₂ 排放上升。近年来, 中国的碳排量增长率最高为 8%, 亚洲其他国家是 5%, 欧洲经合组织每年也以 3% 持续增长, 北美以 2% 的速率增长^[1]。2013 年, 国际民用航空组织 International Civil Aviation Organization(ICAO)大会通过了一项决议, 即制定一个全球市场机制, 以减少航空排放, 并在 2016 年 ICAO 大会上作出决定, 将从 2020 年起实施。ICAO 第 39 届会议上提出, 到 2045 年国际航空运输量将增加 3.3 倍。2015 年国际航空消耗的燃料约为

1.6 亿 t, 预计到 2045 年, 燃油消耗量将比 2015 年增加 2.2 ~ 3.1 倍; 其中, NO_x 排放量约从 18 万 t 增至 44 万 t 到 80 万 t 不等, 颗粒物排放量从 2015 年约 1 243 增加到 3 572 t^[2]。2013 年, ICAO 建立了第一个合作伙伴关系, 以发展与欧洲联盟执行计划, 联合援助国际二氧化碳减排能力建设项目, 主要目标是支持制定志愿行动计划、开办航空公司收集数据的环境系统 Air Environment System(AES)、建立排放清单和监测航空二氧化碳排放量以及实施减少航空排放的措施。截至 2019 年 11 月, 117 个成员国已向 ICAO 递交了《国家行动计划》

收稿日期: 2020-04-20

基金项目: 内蒙古工业大学科学研究项目(ZY201905)

作者简介: 罗雯莉(1993-), 女, 硕士、助教。研究方向: 机场环境保护。E-mail: 852014702@qq.com

引用格式: 罗雯莉, 白伟伟, 武文飞. 基于 EDMS 模型的航空器大气污染物的排放计算分析[J]. 环境保护科学, 2020, 46(6): 39-43.

(State Action Plans)^[3]。国际上,目前有不同的减排策略可供选择,包括发展先进的飞机机体、发动机或替代燃料技术、制定新的政策和标准(如 CO₂ 排放认证标准)与修改操作技术规程。新技术、可持续喷气燃料和相关政策都可以被用于减排措施中。据我国民航 2019 年行业统计数据,与 2005 年相比民航吨公里油耗下降 16.2%; CO₂ 排放量减少约 26.7 万 t; 机场能源使用中,电力、太阳能、天然气等占比达 84.4%^[4]。可以看出,我国民航业在节能减排方面取得了一定的成绩,但针对机场大气污染排放的统计工作还处于初步阶段且尚未公布,尤其对航空器大气污染物的排放与扩散现状研究不足。从全国民航机场来看,仅北京大兴国际机场对航空器大气环境影响做出过研究,但尚未提出用于减少排放的全面、有效的技术措施。本文基于航空器大气污染物排放与扩散模型,给出减排措施、计算其减排成效,同时依据机场不同的运行模式给出建议。

1 航空器大气污染物排放与扩散模型

依据 ICAO 规定的一个标准起飞着陆循环 Land and Take-Off (LTO 循环)包含航空器运行的 4 个阶段,分别是起飞(take-off)、爬升(climb-out)、进近(approach)及滑行(taxi in/taxi out)。假设某类型航空器某一种污染物一周大气污染物排放量为 E_t ^[5] 见式(1)。

$$E_t = \sum_u \sum_v E_{u,v} \quad (1)$$

式(1)中: u 表示航空器排放大气污染物的类型; v 表示发动机的工作模式,即 LTO 循环的四阶段; $E_{u,v}$ 表示某种污染物的总量, kg, 可由式(2)得出。

$$E_{u,v} = \sum_p \sum_q n_p s_{p,q} F_{p,q,v} E_{p,q,u,v} t_{v,p} \quad (2)$$

式(2)中: p 表示航空器类型; q 表示发动机类型; n_p 表示发动机数量, 台; $s_{p,q}$ 表示 LTO 循环数, 该值与机场起降架次有关; $F_{p,q,v}$ 表示燃油消耗率, kg/s, $E_{p,q,u,v}$ 表示排放因子, g/kg, 二者均由 ICAO 公布的排放数据库查得; $t_{v,p}$ 表示持续时间, s。

本文使用线源扩散模型计算时,由于存在烟羽下洗现象,导致污染物浓度不仅存在竖向分量,还存在水平分量^[6]。因此,某位置的污染物扩散浓度

计算见式(3)。

$$C_r(x_r, y_r, z_r) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\bar{u}\sigma_{zs}} F_y \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\langle \exp \left[-\frac{(z - h_{es} - 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2} \right] \right\rangle + \left\langle \exp \left[-\frac{(z + h_{es} - 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2} \right] \right\rangle \quad (3)$$

式(3)中: C_r 表示 r 处污染物浓度, mg/m³; Q 表示污染物的排放量, mg; $\bar{u}$ 为风速的均值, mg/s; σ_{zs} 表示竖向扩散浓度, mg/m³; h_{es} 表示污染源高度, m; z_{ieff} 表示混合高度的有效值, m; F_y 表示侧向分布函数。

2 航空器大气污染物减排措施

航空器大气污染物排放的影响因素可归纳为内部因素与外部因素,内部因素包括航空器自身结构的改良、发动机结构的调整、清洁燃料的使用等;外部因素包括航空器使用方式优化、运力优化及运行程序的优化等。以下针对外部因素提出减排措施。

排放与扩散模型系统(EDMS)是美国环境保护署与美国联邦航空管理局共同开发的一款计算机场区域大气环境的软件,目前全球各个机场的区域环境影响预测评价工作基本都依托于 EDMS 系统。本文利用 EDMS 模型系统计算实施减排措施前后污染物的排放总量,对比说明减排措施的有效性。

2.1 机型组合比例调整

机型组合比例调整,即为实现机场区域大气污染物的减排效果,使用排放量较低的机型取代排放量较高的机型的减排措施。本文在取代过程中,将航空器发动机数量、所属分类、载客量、航程、最大起飞质量等影响因素纳入,选取排放量较小的机型作取代调整。综合以上,调整污染物排放量较大的机型占比至 90%,得到各类污染物在调整机型比例后的变化情况,以 PM_{2.5} 为例说明调整方式,见表 1、2。

通过将 B737-800 与 B757-200、A321-200 与 B767-300、A330-300 与 B777-300 的机型组合比例调整为原机型的 90% 及 10%,可得到 PM_{2.5} 的减少占比分别为 13%、1.3% 及 19.4%。表 2 为机型组合比例调整后各类污染物的排放总量,可以看出,

氮氧化物(NO_x)减少比例最多,减少了 1.21%,二氧化碳(CO_2)减少比例为 0.83%。同时,表中也存在机型组合调整模式对各别污染物并非呈现减少效果的现象,如非甲烷总烃 Non-methane Hydrocarbon

(NMHC)、挥发性有机化合物 Volatile Organic Compounds (VOC)。因而,针对以 CO 、 CO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 及 NO_x 大气污染物排放为主的机场,减排措施建议采用调整机型组合比例的方式。

表 1 调整机型比例后颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 的减少占比

航空器 型号	发动机 数量/个	所属分 类	载客量 /人	最大起飞 质量/kg	航程 /km	年均起降 架次/架	$\text{PM}_{2.5}$ 排放 量/t	$\text{PM}_{2.5}$ 排放 总量/t	$\text{PM}_{2.5}$ 排放 总量/-90%	减少比例 /%
B737-800	2	D	162	75 976	5 370	70 409	2.5	3.5	3.0	13.0
B757-200	2	D	192	115 000	6 320	11 060	1.0			
A321-200	2	D	186	93 500	5 600	32 193	5.3	5.9	5.5	1.3
B767-300	2	D	218	158 760	9 700	3 614	0.6			
A330-300	2	E	300	230 000	11 300	17 301	1.1	1.7	1.4	19.4
B777-300	2	E	368	297 550	11 135	2 774	0.6			

表 2 机型组合比例调整后各类污染物排放总量 t

污染物种类	初始值	调整90%	减少占比/%
CO_2	592 141.02	587 226.25	0.83
CO	3 427.22	3 401.52	0.75
NO_x	2 160.39	2 134.25	1.21
SO_x	231.13	229.28	0.80
$\text{PM}_{2.5}$	25.35	25.22	0.50
PM_{10}	25.50	25.37	0.50
VOC	422.43	423.27	-0.20
NMHC	423.70	423.78	-0.02
THC	350.38	350.45	-0.02
TOG	426.30	426.39	-0.02

2.2 减少航空器地面运行时间

航空器地面交通堵塞导致滑行阶段运行时间增加,致使航空器污染物排放量极具增加。依据 ICAO 的规定:一个标准 LTO 循环滑行阶段运行时间为 26 min。在欧洲,滑行阶段时间占据各状态总运行时间的 10%~30%。在我国,LTO 循环的进近阶段、起飞阶段、爬升阶段的运行时间仅占总时间的 20.5%,而滑行阶段的时间占总时间的 79.5%。以北京首都国际机场为例,航空滑行时间在繁忙小时已超过 30 min^[7]。航空器 LTO 循环各运行状态的平均持续时间见表 3^[8]。

基于以上数据,在计算污染物排放量时,将 LTO 循环的滑行阶段运行时间分别设定为 30 min、26 min。若我国大型繁忙机场以 ICAO 规定的标

准 LTO 循环时间为参照,采用减少地面滑行阶段运行时间至一个标准 LTO 循环的措施,航空器大气污染物的排放量将减少。广州白云国际机场航空器滑行阶段运行时间分别为 30 min、26 min 的各类大气污染物排放的计算结果见表 4。

表 3 航空器起降循环各运行状态的平均持续时间

运行状态	持续时间/min	所占比例/%
take-off	1.2	3.7
climb out	2.0	6.1
approach	3.5	10.7
taxi in/taxi out	26.0	79.5

表 4 白云机场不同时间污染物排放量 t

污染物	滑行阶段运行时间/min		减少占比/%
	30	26	
CO_2	592 141.02	471 344.25	20.4
CO	3 427.22	2 474.45	27.8
THC	350.38	250.17	28.6
NMHC	423.70	307.61	27.4
VOC	422.43	307.11	27.3
TOG	426.30	310.35	27.2
NO_x	2 160.39	2 009.16	7.0
SO_x	231.13	186.29	19.4
PM_{10}	25.50	22.57	11.5
$\text{PM}_{2.5}$	25.35	22.41	11.6

表 4 可见,减少航空器地面运行时间可有效降低大气污染物排放。其中,总碳氢化合物 Total

Hydrocarbon(THC)、CO、NMHC、VOC、总有机气体 Total Organic Gas(TOG)、CO₂ 的排放量减少最多,分别减少了 28.6%、27.8%、27.4%、27.3%、27.2% 及 20.4%, SO_x、PM_{2.5}、PM₁₀ 减少程度居于其中,分别减少了 19.4%、11.6%、11.5%, NO_x 减少比例最少为 7%。因此,该措施可被应用于机场大气污染减排工作中。

2.3 采用连续下降进近程序

采用连续下降进近程序(CDA)是在进近阶段使航空器保持不变的飞行姿态,以固定下滑角着陆。相比传统程序,CDA 进近程序的优点是可以通过优化航空器航行路径的手段,缩减航空器的飞行时间,进一步降低燃油消耗量,最终获得减排成效。为实现 CDA 进近程序减排的目的,可采用以下 2 种方式,分别是改变下滑角及航空器最后进近航段的运行时间。

2.3.1 改变下滑角 依据式 4 可知,进近阶段,发动机的推力随下滑角增加而减小^[9] 见式(4)。因此,为进一步降低燃油消耗量,实现减排成效,可通过增大下滑角的方式。

$$\tan \theta = \frac{D-P}{W} = \frac{1}{K} - \frac{P}{W} \quad (4)$$

式(4)中: θ 表示下滑角; D 表示航空器所受阻力, N; P 表示发动机推力, N; W 表示航空器质量, kg; K 表示比例系数。

选取下滑角分别为 3° 及 4°, 得出结果见表 5。

表 5 不同下滑角排放各类污染物总量 t

污染物	3°下滑角	4°下滑角	减少占比/%
CO ₂	592 131.10	589 704.52	0.41
CO	2 851.49	2 838.04	0.47
THC	347.51	346.18	0.38
NMHC	401.80	399.78	0.50
VOC	399.71	398.59	0.28
TOG	401.80	399.78	0.50
NO _x	2 023.50	2 017.03	0.32
SO _x	219.81	218.91	0.41
PM ₁₀	16.04	16.04	0.04
PM _{2.5}	16.04	16.04	0.04
燃油量	187 680.22	186 911.10	0.41

由此得出,通过调整下滑角为 4° 后,大气污染物排放量均降低。其中, TOG 及 NMHC 的减少量

最多, CO 的减少量居于其次, CO₂、SO_x 减少量亦较多, 颗粒物 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 减少量最少, 均为 0.04%。因此,对于不以 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 排放为主的机场,可通过改变下滑角降低航空器大气污染物的排放量,实现机场减排的成效。

2.3.2 改变进近阶段飞行时间 区域导航 Regional Navigation(RNAV)是一种允许航空器在导航覆盖范围内沿给定航路点所构成的航迹飞行的导航方法。RNAV 技术在操作过程中允许在任何空域中导航,而无需地面辅助工具。1998 年 4 月,欧洲提出精确区域导航 Precision-RNAV(P-RNAV)的概念,它是 RNAV 的升级,通过在机场区域向量群中获取起飞与到达、中转与经停的所有航空器的航迹,得到全部向量路径的中值,形成 pRNAV 路线。研究显示,采用 pRNAV 路线得出航空器在最后进近阶段可以节省 1 min 的飞行时间^[10]。

由公式 2 可以得出,特定机型特定污染物的排放量与该运行阶段的持续时间变化一致。也就是说,若要求得改变进近阶段飞行时间后不同污染物的排放量,仅需确定运行时间的变化比率,即是各类污染物排放量的变化比率。利用式 5、6 计算改变后污染物的排放量及航空器运行各阶段排放量减少占比,见表 6。

表 6 调整后 LTO 阶段排放各类污染物总量

污染物	调整前/t	调整后/t	减少占比/%
CO ₂	592 141.02	579 232.35	2.18
CO	3 427.22	3 424.82	0.07
THC	350.38	350.06	0.09
NMHC	423.70	423.36	0.08
VOC	422.43	422.09	0.08
TOG	426.30	425.96	0.08
NO _x	2 160.39	2 064.04	4.46
SO _x	231.13	226.32	2.08
PM ₁₀	25.50	25.07	1.69
PM _{2.5}	25.35	24.92	1.70

$$k_j = \frac{t_j - 1}{t_j} \quad (5)$$

$$E_i = \sum k_i E_{ij} \quad (6)$$

式(5~6)中: t_j 表示进近持续时间, min; k_j 表示时间因子; E_{ij} 表示在特定发动机工作模式下污染物

的排放量, kg; E_i 表示污染物的排放总量, kg。

上述结果反映采用精确区域导航系统后, 污染物的排放量均降低。其中, NO_x 排放减少量最多, CO_2 排放量减少 2.18%, $\text{PM}_{2.5}$ 的减少占比为 1.7%。因此, 改变进近阶段飞行时间可以降低航空器大气污染物排放, 最终实现实现机场减排。

3 结论

1) 阐释了基于飞行计划的航空器污染物排放模型及线源扩散模型计算方法。

2) 本研究提出多种减排技术措施, 包括机型组合比例调整、减少航空器地面运行时间、改变下滑角及进近阶段飞行时间, 并应用 EDMS 模型分析其污染物排放量的减少占比。对于以 CO 、 CO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 及 NO_x 大气污染物排放为主的机场, 可在满足运量的前提下调整机型组合比例; 繁忙机场可考虑采用减少航空器地面运行时间的方式; 使用连续下降进近程序可被应用到任何机场; 以上措施可依据机场不同运行模式相互组合。

参考文献

- [1] RAMESH AGARWAL, 刘莉 (译). 绿色航空 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.
- [2] International Civil Aviation Organization. Trends in Local Air Quality [EB/OL]. https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LAQ_Trends.aspx.
- [3] International Civil Aviation Organization. 2019 Environmental Report. [EB/OL] [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20(1).pdf).
- [4] 中国民用航空局. 2019 年民航行业发展统计公报 [N]. 中国民航报, 2019-06. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/>.
- [5] 宋利生. 基于 ICAO 起降模型的中国机场飞机排污计算研究 [J]. 中国民航大学学报, 2013, 31(6): 46-48.
- [6] VENKATRAM A, STRIMAITIS D, DICRISTOFARO D. A semiempirical model to estimate vertical dispersion of elevated releases in the stable boundary layer [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1984, 18(5): 923-928.
- [7] 谭惠卓. 绿色民航 [M]. 北京: 中国民航出版社, 2013.
- [8] 李可, 李政. 考虑飞机排放的滑行线路优化 [J]. 交通节能与环保, 2009(3): 45-48.
- [9] 王大海, 杨俊, 余江. 飞行原理 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
- [10] WILSON I, HAFNER F. Benefit assessment of using continuous descent approaches at Atlanta [C]//24th Digital Avionics Systems Conference, Washington DC, 2005.
- 氧化碳排放因子发布, 温室气体排放报送进程加快 [EB/OL]. (2014-10-27) [2020-05-18]. <http://hbxh.dg.gd.cn/plus/view.php?aid=639>.
- [27] 环境保护部中国-东盟环境保护合作中心, 菜鸟网络科技有限公司. 电商物流绿色发展 2017 年度报告 [R]. 北京: 环境保护部中国-东盟环境保护合作中心, 2017. 12.
- [28] 张鹤丰, 叶兴南, 成天涛, 等. 中国地区农作物秸秆燃烧排放大气污染物模拟及 GIS 分析 [C]//中国化学会第 26 届学术年会环境化学分会论文集. 北京, 2008.
- [29] 梁传志, 侯隆澍. 既有建筑节能改造: 进展. 成效. 建议 [J]. 建设科技, 2014, 011: 11-14.
- [30] 兰格钢铁网. 2016 是值得铭记的去产能元年 [EB/OL]. (2016-08-24) [2020-05-26]. https://www.sohu.com/a/111892565_465222.
- [31] 华夏时报. 两会雾霾原因终于搞清了: “河北起码要淘汰 4 千万吨钢铁” [EB/OL]. (2019-03-07) [2020-05-16]. <http://dy.163.com/v2/article/detail/E9LEVAFV0512D03F.html>.
- [32] 互联网. 分析: 河北省碳减排基本格局及对策 [EB/OL]. (2014-06-19) [2020-05-16]. <http://www.chinairn.com/news/20140619/11435312.shtml>.

(上接第 26 页)

- [20] 中国质量认证中心. 中国电网企业温室气体排放核算方法与报告指南 (试行) 解析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社. 2017: 33-34.
- [21] 中国质量认证中心. 中国发电生产企业温室气体排放核算方法与报告指南 (试行) 解析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社. 2017: 63-64.
- [22] 中国质量认证中心. 中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南 (试行) 解析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社. 2017: 66-69.
- [23] 中国质量认证中心. 中国水泥企业温室气体排放核算方法与报告指南 (试行) 解析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社. 2017: 71-73.
- [24] 中国质量认证中心. 中国平板玻璃生产企业温室气体排放核算方法与报告指南 (试行) 解析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社. 2017: 69-72.
- [25] HENDRIKS C, WORRELL E, JAGER D D, et al. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry [R]. Netherland: International Energy Agency(IEA). 2002.
- [26] 东莞市环境科学学会. 2011 年和 2012 年中国区域电网平均二