

· 创新与探索 ·

北京首都机场绿色滑行时间估算

杨芮, 赵焱飞

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300)

摘要:采用北京首都机场2014年实际CDM地面放行数据确定航空器的污染物排放量与离场排队飞机数量和落地滑入飞机数量的强关联性,构建包含这两个解释变量为影响因素的多元线性回归模型,用以估算几种常见机型在首都机场地面运行时的最小污染物排放量和绿色滑行时间。对比实际污染物排放量与最小污染物排放量,得出首都机场离场地面污染物排放量远远超过最小污染物排放量。

关键词:飞机;绿色滑行;污染物排放;节能减排;首都机场

中图分类号:X51 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2019)06-0060-04

Estimation of Green Taxi-out Time of the Beijing Capital International Airport

YANG Rui, ZHAO Yi-fei

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

Abstract: Using the actual CDM ground release data of Beijing Capital Airport in 2014 for determining the strong correlation between aircraft emissions and the number of departing and landing planes, this paper developed a multiple linear regression model with two explanatory variables as influencing factors in estimating the minimum pollutant discharge and green taxiing time of several common types of airplanes taxiing on the airport ground. By comparing the actual pollutant discharge with the minimum pollutant discharge, it was concluded that the ground pollutant discharge from Beijing Airport far exceeded the minimum pollutant discharge.

Key words: Airplane; Green taxi-out; Pollutant emission; Energy saving and emission reduction; Capital airport

随着航空事业的飞速发展,航空器对环境所造成的影响也日益增大。由于机场附近住宅开发量的增加和商业航空旅行的持续增长,机场周围的空气污染已经成为政府和居民关注的重点之一。何志辉等^[1]基于对广州白云国际机场噪声污染现状的分析和评价,表明飞机起落时产生的噪声污染严重影响了航线下居民的生活、学习和工作。陈九龄等^[2]分析了2016年上海虹桥机场的大气污染物监测数据,结果表明机场附近的污染物浓度始终高于各国控站点。韩博等^[3-4]提取真实航班机载飞行数据研究,结果表明与机动车相比,A320飞机的一次起飞着陆飞行中,NO_x排放量约等于1274辆小客车一天的排放量,单次全推力起飞过程与一辆小客车行驶9508 km的NO_x排放量相当。随着人们

环保意识的增强,人们对飞机的污染排放越来越关注,相关管理部门正在制定更为严格的技术标准,以减少飞机污染物排放,这为航空技术的发展带来了新的挑战。航班污染物排放是空气污染的重要来源之一,国际民航组织(ICAO)的环境保护战略目标之一就是限制或减少航空器发动机排放对当地空气质量的影响。为了适应全球绿色发展需求,急需开展对于地面阶段的绿色滑行的研究。

收稿日期:2018-08-29;修订日期:2019-11-05

基金项目:科技部国家重点研发计划基金资助项目(2016YFB0502400);国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合基金资助项目(U1633112,U1533112)

作者简介:杨芮(1994—),女,陕西西安人,在读研究生,研究方向为机场节能减排。

航班在机场地面运行时对环境的主要影响是在滑行阶段的污染物排放和噪声影响,在该研究基础上再提出改进滑行方式或优化滑行路径等方法来降低污染物排放等。

目前国外对于地面绿色滑行的相关研究有:Khadilkar 等^[5]建立了飞机地面燃油消耗模型,并结合运行数据发现了滑行时间、加速时间是影响滑行油耗的重要因素;Song 等^[6]采用 EDMS 模型评估了韩国 4 个主要机场的污染物排放量,分析得滑出阶段的排放量最大;Simaiakis 等^[7-8]分别通过优化滑行路径和推出率控制方法来达到机场地面节能减排的目的。国内在该方面研究还处于起步阶段,夏卿等^[9]和黄清风等^[10]估算了各机场地面污染物排放量,得出结论飞机大气污染物的排放量随客运量的上升逐年增长;魏志强等^[11]和孙见忠等^[12]分别估算了航班飞行各阶段的污染物排放量;李可等^[13]基于飞机发动机的排放模型,对虹桥机场航班的滑行路径提出了优化算法。

1 建立绿色滑行时间模型

想要开展基于节能减排策略的地面污染物排放研究,首先需要计算出航班在地面运营过程中污染物排放量最少的排放值,并在最小污染物排放值的基础上定义一个便于后序评估和调控工作的数值。

Khadilkar 建立的航班地面燃油消耗模型已经发现了滑行时间是影响滑行油耗和排放最重要的因素之一,参考美国联邦航空管理局 (FAA) 为了研究航班在滑行阶段的拥堵情况,定义了在不受机场地面拥挤、天气等可能影响飞机滑行因素的干扰下,航班飞行的滑行时间为畅通滑行时间^[10]。在地面滑行模型之上加入了航班排放模型,研究规定在不受地面堵塞和天气的影响下,航班此时滑行排放的污染物为最小排放值,与该排放值对应的滑行时间为绿色滑行时间,以此为基础评价机场的排放情况和优化策略。

主要计算北京首都国际机场 2014 年 2 月—5 月的起降航班架次表。采用每架航班地面 CDM (航班协同放行决策系统) 放行数据,包括航班的航班号、注册号、计划起降时间、撤轮档时间、进停机位时间和停机位编号。撤轮档时间与实际起飞时间之差即为滑行时间。

从中国民航局适航审定司下发的民用航空器

及航空发动机型号书写指南中读取每种航空器所对应的发动机型号,再结合 ICAO 发布的发动机排放数据库中对应的发动机燃油消耗率和不同污染物的排放系数值^[11],计算不同机型的航班平均燃油消耗率和不同污染物排放系数见表 1。其中烟雾数是技术人员使用过滤器对参考发动机排放的废气样品进行评定的一个无量纲的量化烟雾排放水平的值,0~100 代表烟雾排放量逐渐变大。

表 1 常见机型排放系数

Table 1 Emission coefficient of common types of airplanes

机型	HC 排放系数 ^①	CO 排放系数 ^①	NO _x 排放系数 ^①	烟雾排放系数	燃油流量 ^②
A320	1.605	16.086 7	4.566 7	1.9	0.24
A321	0.1	10.95	5.0	2.4	0.276
A333	1.46	17.94	4.71	0.2	0.56
A343	5	30.93	4.28	1.1	0.124
B734	1.42	26.8	4.3	2.3	0.248
B738	1.931 7	25.623 3	4.436 7	1.05	0.219 7
B772	3.286 7	32.463 3	5.16	4.333	0.560 5
B788	0.38	13.93	4.957 0	0.24	0.444

①单位为 g/kg;②单位为 kg/s。

在一定的机场外部条件下,任意一架航空器在机场地面滑行阶段的污染物排放量可由公式(1)(2)计算:

$$E = \sum_i \sum_j E_{ij} \tag{1}$$

$$E_{ij} = T_i \times FB_i \times EI_{ij} \tag{2}$$

式中: T_i 表示航空器 i 的滑行时间; FB_i 表示航空器 i 的燃油消耗系数; EI_{ij} 表示航空器 i 发动机排放的污染物 j 的排放系数。

FAA 的 ASPM (航空系统性能数据库) 在统计畅通滑行时间时采用了地面离场排队飞机数量、落地滑入飞机数量与滑行时间的线性回归模型。类似地计算绿色滑行时间,首先是要建立估算绿色滑行时间的回归模型,即寻找相关性强的解释变量。

2 结果与讨论

2.1 离场排队飞机数量对污染物排放量的影响

Idris 等^[14]在先前的研究中已得出结论,离场排队飞机数量是影响航班滑行时间的重要因素,基于此讨论离场排队飞机数量是否是影响航班污染物排放量的因素。因为 FAA 的 ASPM 数据库和 Idris 等采用的离场排队飞机数量的计算方法不同,所以提出以下两种计算方法,分别统计分析与

污染物排放量的关系, 检验相关性:

$$D_1(i) = \sum_j \text{count}(j), t_{\text{out}}(j) < t_{\text{out}}(i) < t_{\text{off}}(j) \quad (3)$$

$$D_2(i) = \sum_j \text{count}(j), t_{\text{out}}(i) < t_{\text{off}}(j) < t_{\text{off}}(i) \quad (4)$$

式(3)表示针对观察的某架飞机 i , 推出时间比 i 推出时间早且起飞时间比 i 推出时间晚的飞机数量, 即航班 i 推出时, 所有在机场地面排队等候起飞的飞机总数。式(4)表示针对观察的飞机 i , 在 i 从推出到起飞过程中所有起飞的飞机数量。

根据式(3)和式(4)两种不同计算方法计算北京首都机场 2 月—5 月的地面起飞排队数和每一架 A320 飞机在滑出阶段的污染物排放量, 建立了回归模型分别如下:

$$P_1 = 0.2099D_1 + 0.3994 \quad (5)$$

$$P_2 = 0.1853D_2 + 0.4351 \quad (6)$$

根据式(5)(6)所得到的回归模型的 R^2 分别为 0.4575 和 0.8963。可以明显得出第二种计算方法与污染物排放量有更强的关联性, 发现随着地面离场排队飞机数量的增加, 场面的污染物排放量随之增加。

2.2 落地滑入飞机数量对污染物排放量的影响

飞机在机场地面的污染物排放与滑行时间紧密相关, 而航班的滑行时间受制于机场地面运行情况, 根据机场的运营过程可知当机场场面的容量不仅有起飞容量, 降落容量对机场的运行也十分重要。故而可以推断落地滑入的飞机数量与滑出的航班污染物排放也存在相关性。根据目前对落地滑入飞机数量的研究, 采用不同的计算方法, 见式(7)(8)(9)。

$$A_1(i) = \sum_j \text{count}(j), t_{\text{out}}(i) < t_{\text{on}}(j) < t_{\text{off}}(i) \quad (7)$$

$$A_2(i) = \sum_j \text{count}(j), t_{\text{out}}(i) < t_{\text{in}}(j) < t_{\text{off}}(i) \quad (8)$$

$$A_3(i) = \sum_j \text{count}(j), t_{\text{out}}(i) < t_{\text{on}}(j) \text{ 且 } t_{\text{out}}(j) < t_{\text{off}}(i) \quad (9)$$

同机场地面起飞飞机排队数类似, 式(7)中的定义为在飞机 i 推出至起飞过程中所有落地的飞机数量, 而式(8)的定义为飞机 i 推出至起飞过程中所有到达停机位的飞机数量, 式(9)表示为以上

两者的交集。通过线性回归分析可得, A_1 、 A_2 、 A_3 都与航班排放有较强的关联性, 其中根据式(7)所得到的回归模型的 R^2 最大, 为 0.9189。由此可见, 第一种计算方法与机场地面飞机排放的污染物的相关性最高。综上得出结论, 机场地面航班的污染物排放量与地面起飞的飞机数量和落地滑入的飞机数量都有较强的关联性。

2.3 建立绿色滑行时间回归模型

对于地面起飞的飞机数量和落地滑入的飞机数量分别采用上文中关联性最强的 D_2 和 A_1 定义, 运用北京首都国际机场 2014 年 2 月—5 月地面实际数据, 建立 A320 飞机的污染物排放量的改进回归模型:

$$P = 1.006729 + 0.183507D_2 + 0.218166A_1 \quad (10)$$

从多元线性回归模型的系数可以看出, 地面起飞排队的飞机和落地滑行的飞机对污染物排放量的影响相差不大。式(10)中表示每增加一个起飞排队的飞机, 一架 A320 飞机的污染物排放量相应增加 0.18 kg, 每增加一个落地的飞机, 一架 A320 飞机的排放量相应增加 0.22 kg。该多元线性回归模型的 R^2 较之前得到明显提升, 达到了 0.96, 高于 2.1 和 2.2 节中的任何一个回归模型。

对几款常用机型分别进行回归性分析, 可得到每类机型污染物排放量的线性回归模型, 如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 当场面畅通无阻塞并且无重要天气影响, 即回归模型中的 D 和 A 都为 0 时, 空客 321 的最小污染物排放值最低, 即最环保。空客 343 是高载客远途四发飞机, 故而场面最小污染物排放值最高。

表 2 常见机型污染物排放量回归模型
Table 2 Regression model of pollutant discharge of common types of aircraft

机型	回归模型	R^2
A320	$P = 1.006729 + 0.183507D + 0.218166A$	0.960624
A321	$P = 0.570218 + 0.171482D + 0.174227A$	0.928537
A333	$P = 2.551846 + 0.450403D + 0.564346A$	0.908355
A343	$P = 3.895299 + 0.536337D + 0.944663A$	0.92288
B734	$P = 3.1798 + 0.208489D + 0.315789A$	0.776457
B738	$P = 0.91942 + 0.273488D + 0.276208A$	0.917124
B772	$P = 2.712066 + 0.799676D + 1.050703A$	0.906764
B788	$P = 0.885461 + 0.319821D + 0.361553A$	0.946608

2.4 估计绿色滑行时间

基于2.4中建立的多元线性回归模型估计绿色滑行时间,针对某架飞机*i*,当地面起飞排队数和落地滑入的飞机数都为0时,即没有起飞排队的飞机和落地滑行的飞机对飞机*i*的运行产生影响,回归线性模型在Y轴上的截距即为航班滑出过程中最小污染物排放值,与该排放值对应的滑行时间即为绿色滑行时间,可以估算出在首都国际机场地面不同机型的绿色滑行时间。空客常见机型A320、A321、A333、A343的绿色滑行时间分别为3.14 min、2.15 min、3.15 min、3.26 min,波音常见机型B738、B772、B788的绿色滑行时间分别为2.32 min、1.97 min、1.73 min。而波音734由于所分配的停机多为最远区的816和817停机位,推出滑行时间过长,故而导致绿色滑行时间也长达6.571 min。对比分析北京首都国际机场2014年2月—5月的离场地面污染物实际排放量与最小排放量见图1。由图1可见,可以明显评估得出北京机场地面污染物排放量远超出最小污染物排放量。

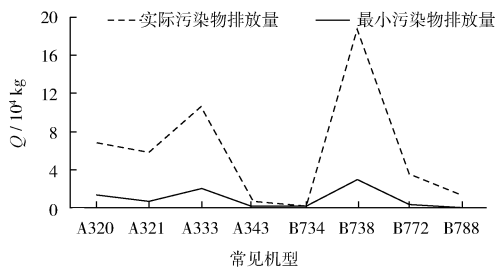


图1 实际污染物排放量与最小污染物排放量

Fig.1 Actual pollutant discharge and minimum pollutant discharge

3 结语

对航班在首都国际机场地面的污染物排放量进行计算与分析,首先建立多个回归模型确定污染物排放量与起飞排队飞机数和落地滑入飞机数的强关联性。其中,起飞排队的飞机数计算方法选用了针对某架飞机*i*推出到起飞过程中其他起飞的飞机数量,落地滑入飞机数选用计算方法为针对某架飞机*i*推出到起飞过程中所有落地的飞机数量,与航班*i*的污染物排放关联性最大。继而改进了包含这两个解释变量为影响因素的多元线性回归模型,基于该模型估算在北京首都国际机场地面的

不同机型的绿色滑行时间和最小污染物排放值。例如空客320的绿色滑行时间为3.14 min,滑行阶段的最小污染物排放值为1.01 kg。波音738的绿色滑行时间为2.32 min,滑行阶段的最小污染物排放值为0.92 kg。在绿色滑行时间的基础上对比了北京机场地面污染物的实际排放和最小污染物排放值,得出北京机场地面污染物排放量远超出最小排放值,未来我国民航机场尤其是大型枢纽机场急需采取相关节能减排的策略。

[参考文献]

- [1] 何志辉,陈灿,朱大明.广州白云国际机场噪声污染评价[J].环境监测管理与技术,2004,16(1):26-28.
- [2] 陈九龄,仇欣,潘骏,等.上海虹桥机场大气污染特征分析[J].环境监测管理与技术,2018,30(6):39-43.
- [3] 韩博,刘雅婷,谭宏志,等.一次航班飞行全过程大气污染物排放特征[J].环境科学学报,2017,37(12):4492-4502.
- [4] 韩博,黄佳敏,魏志强.民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析[J].环境科学,2016,37(12):4524-4530.
- [5] KHADILKAR H, BALAKRISHNAN H. Estimation of aircraft taxi fuel burn using flight data recorder archives[J]. Transportation Research Part D, 2012, 17(7):532-537.
- [6] SONG S K, SHON Z H. Emissions of greenhouse gases and air pollutants from commercial aircraft at international airports in Korea[J]. Atmospheric Environment, 2012, 61:148-158.
- [7] SIMAIKRIS I, BALAKRISHNAN H. Impact of congestion on taxi times, fuel burn, and emissions at major airports[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010(2184):22-30.
- [8] SIMAIKRIS I, KHADILKAR H, BALAKRISHNAN H, et al. Demonstration of reduced airport congestion through pushback rate control[J]. Transportation Research Part A, 2011, 66:251-267.
- [9] 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.
- [10] 黄清风,陈桂浓,胡丹心,等.广州白云国际机场飞机大气污染物排放分析[J].环境监测管理与技术,2014,26(3):57-59.
- [11] 魏志强,王超.航班飞行各阶段污染物排放量估算方法[J].交通运输工程学报,2010,10(6):48-52.
- [12] 孙见忠,左洪福,刘鹏鹏,等.航空发动机污染物排放量估算[J].交通运输工程学报,2012,12(2):53-61.
- [13] 李可,李政.考虑飞机排放的滑行路线优化[J].交通节能与环保,2009,3:44-47.
- [14] IDRIS H R, DELCAIRE B, ANAGNOSTAKIS I, et al. Identification of Flow Constraint and Control Points in Departure Operations at Airport Systems[C]//AIAA. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. New York: AIAA, 1998.