

3-25-2020

Optimization simulation of Feeder Airport Runway Structure for Pollutant Discharge Control

Jiang Bo

1. *Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;;*

Yunfan Zhou

1. *Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;;*

Chenglong Li

1. *Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;;*

Zhang Hao

2. *Zhejiang University, Control Science Engineer, Hangzhou 310027, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimization simulation of Feeder Airport Runway Structure for Pollutant Discharge Control

Abstract

Abstract: Air pollutant discharge in the LTO (Landing and Take-off) cycle of the civil aviation transport is harmful to the ground personnel and the near-ground environment, which can be restrained primarily by reducing the ground taxi time. Considering the structure of the single-taxiway-single-runway in the common feeder airport, a method for calculating the aircraft ground taxi time is presented. Based on this method, an evaluation index of the pollutants is proposed and an assessment model of aircraft pollutants emission in feeder airport is established. Taking a feeder airport as an example, the taxiway crossing position with the smallest pollutant evaluation index is calculated by Matlab modelling. The validity of the model calculation results are verified by the AirTop simulation. The optimized runway exit position compared with the original one will reduce the total pollutant index of the airport by 21.7%.

Keywords

LTO cycle, pollutant emission, exit of runway, taxiing time, AirTop

Recommended Citation

Jiang Bo, Zhou Yunfan, Li Chenglong, Zhang Hao. Optimization simulation of Feeder Airport Runway Structure for Pollutant Discharge Control[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(3): 501-508.

控制污染物排放的支线机场跑滑结构优化仿真

江波¹, 周云帆¹, 李诚龙^{1*}, 张昊²

(1. 中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307; 2. 浙江大学 控制科学与工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 民航运输在 LTO(Landing and take-off)循环阶段的大气污染物排放对地面人员和近地环境危害较大, 应主要通过减少地面滑行时间进行控制。考虑支线机场常见的单跑滑结构给出飞机地面滑行时间计算方法, 基于该方法提出了污染物评价指标并建立了支线机场航空器污染物排放评估模型。以某支线机场为例, 使用 Matlab 建模计算得出污染物评价指数最小滑行道口位置。利用 AirTOP 仿真验证了模型计算结果有效性, 优化后的跑道出口位置将使该机场污染物总指数较原位置降低 21.7%。

关键词: LTO 循环; 污染物排放; 滑行道口位置; 滑行时间; AirTOP

中图分类号: V351.11 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 03-0501-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0056

Optimization simulation of Feeder Airport Runway Structure for Pollutant Discharge Control

Jiang Bo¹, Zhou Yunfan¹, Li Chenglong^{1*}, Zhang Hao²

(1. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

2. Zhejiang University, Control Science Engineer, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Air pollutant discharge in the LTO (Landing and Take-off) cycle of the civil aviation transport is harmful to the ground personnel and the near-ground environment, which can be restrained primarily by reducing the ground taxi time. Considering the structure of the single-taxiway-single-runway in the common feeder airport, a method for calculating the aircraft ground taxi time is presented. Based on this method, an evaluation index of the pollutants is proposed and an assessment model of aircraft pollutants emission in feeder airport is established. Taking a feeder airport as an example, the taxiway crossing position with the smallest pollutant evaluation index is calculated by Matlab modelling. The validity of the model calculation results are verified by the AirTOP simulation. The optimized runway exit position compared with the original one will reduce the total pollutant index of the airport by 21.7%.

Keywords: LTO cycle; pollutant emission; exit of runway; taxiing time; AirTOP

引言

支线机场通常指年旅客吞吐量占全国旅客总



收稿日期: 2019-01-03 修回日期: 2019-06-25;
基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金重点项目(U1733203), 四川省科技计划应用基础研究(19YYJC0908), 中国民航飞行学院研究生创新项目(X2018-31);
作者简介: 江波(1973-), 男, 四川广汉, 硕士, 教授, 研究方向为交通运输规划与管理。

吞吐量的比例小于 0.2%的非枢纽性机场^[1]。随着我国民航业快速增长, 民航支线机场建设发展迅速, 近 10 年新增的支线机场数量就超过 80 个, 但支线机场在快速发展的同时, 也给周边环境带来了巨大的压力。航空器所产生的污染物与地面交通所产生的污染物在空间和地面上有很大差异, 一架 B737-800 单次全推力起飞的氮氧化物(NO_x排

<http://www.china-simulation.com>

• 501 •

放量与一辆小客车行驶 9 508 km 的排放量相当^[2]。因此研究和估算航空器起降所产生的排放物的种类和数量对减少机场周边大气污染有很大帮助,评价航空器地面污染对寻求解决办法和改善措施具有很好的参考价值。

LTO 循环即飞机起降,国际民航组织(ICAO)规定,一个 LTO 循环包括起飞、爬升、进近和滑行共 4 个工作状态^[3]。虽然航空器的污染物主要集中在巡航阶段,但 LTO 循环由于高度低,耗时长等特点,所排放污染物对人体与近地空间危害最大。飞机发动机排放的颗粒物(PM),大多分布于纳米级粒径段,主要为 PM_{2.5}^[4],为了对机场的污染物排放进行计算,目前大多数研究主要是基于发动机的合格证审定数据的 ICAO 建立的 LTO 循环基准排放模型^[5]和 FOA(Fruit fly optimization algorithm)方法^[6]。Carslaw 等^[7-9]指出,排放指数 EI、耗油量等参数与实际起飞重量、飞行高度、大气环境密切相关。韩博等^[8]综合考虑了排放指数 EI 和燃油流量 FF 之间的关系通过对飞行性能参数的模拟,计算污染物的排放量并与 ICAO 的估算结果进行了对比。为评价污染物在航空器运行中的应用, Cook 等^[10]研究了不同污染物之间的权重关系,提出了涵盖排放成本的动态成本指数。为了减少航空器污染物的排放, Adacher 等^[11-12]提出了考虑排放物的滑行路线优化。张文秀^[13]估算了不同阶段的污染物排放量,提出针对性改善各阶段的发动机动力设置与运行时间。

航空器起飞阶段发动机燃油充分燃烧,氮氧化物 NO_x 产生最多,其他污染物相对比例较小。爬升阶段较起飞阶段而言,NO_x 排放量略微减少,其它污染物排放量大幅增加。进近阶段与起飞阶段相比,一氧化碳(CO)的比例显著上升。而滑行阶段,氮氧化物的比例下降,CO 成了主要污染物,燃油燃烧效率较低,燃烧很不充分,所以产生了大量的 CO 和碳氢化物(HC),而此阶段是飞机离地面最近的阶段,对人体危害最大,一直以来都是 ICAO 和相关组织研究的重点^[14]。

支线机场的跑滑结构通常可分为两种,一种是具有快速脱离道的跑滑结构,其主要用于运营成熟的支线机场,另一种是只有单一滑行道口的跑滑结构,该跑滑结构主要用于非枢纽城市的新建机场,该结构出于控制成本等考虑,普遍存在设计不合理等问题^[15-16],第 1 种结构主要考虑提升跑道容量和增加运行效率,而采用第 2 种的机场由于流量较少,限制因素较少,在结构优化提升上有较大空间,因此本文着重考虑第 2 种跑滑结构的污染物排放问题。本文分析了该跑滑结构下航空器起飞、爬升、进近、着陆各阶段污染物的排放特征,充分考虑了滑行道口位置对十种常见机型起飞着陆过程中的滑行时间的影响,建立了支线机场航空器污染物排放评估模型,采用 Matlab 编程完成了模型计算,并通过 AirTop 快实时仿真软件对建立的模型进行了仿真验证,仿真结果显示,本文所建立的模型能有效的模拟现实航空器地面运行阶段的污染物排放问题。

1 LTO 污染物问题描述

LTO 循环的 4 个工作状态由于各工作状态所需推力不同,发动机的工作状态不同,具体参数如表 1 所示。

表 1 LTO 循环发动机状态
Tab. 1 Aircraft engine conditions of LTO cycle

飞行阶段	起飞	爬升	进近	滑行
发动机工作状态	T/O	C/O	APP	IDLE
最大推力等级/%	100	85	30	7

LTO 循环主要位于机场终端区混合高度层(1 000 m)以下的空域,是航空器距地表最近的阶段,因此排放的污染物对人体危害很大。该阶段对当地空气质量影响较严重的 3 种主要气体污染物主要为 HC、CO 和 NO_x,其它污染物如 SO₂ 由于航空燃油质量的不断提高,含硫量也越来越低,且排放量不随推力产生变化,故本文中不予以研究。CO₂ 和水蒸气的主要影响是在高空引起

凝结尾迹, 对环境影响较小, 同时本文着重考虑低空区域, 故不予以研究。

如图 1, 以中小机场支线飞机常见的 CFM56-5A1 型发动机为例分析航班各阶段的污染物排放。虽然不同型号发动机污染物具体排放量不同, 但排放规律是一样的: 起飞阶段, 发动机处于 100% 推力设置下工作, 高转速状态, 燃油充分, 氮氧化物产生最多, 其他污染物相对比例较小; 爬升阶段, 发动机处于高转速状态, 较起飞阶段而言, 除了 NO_x 排放量略微减少外, 其它污染物排放量都大幅增加; 进近阶段发动机处于较低转速状态, CO 的比例显著上升, 但 NO_x 仍然最多。滑行阶段发动机处于低转速状态, 燃油燃烧效率较低, 燃烧不充分, 因此产生了大量的 CO 和 HC , NO_x 比例下降, CO 成为主要污染物, 此阶段是航空器离地面最近的阶段, 污染物对人体危害最大, 应重点考虑此阶段的污染物排放。

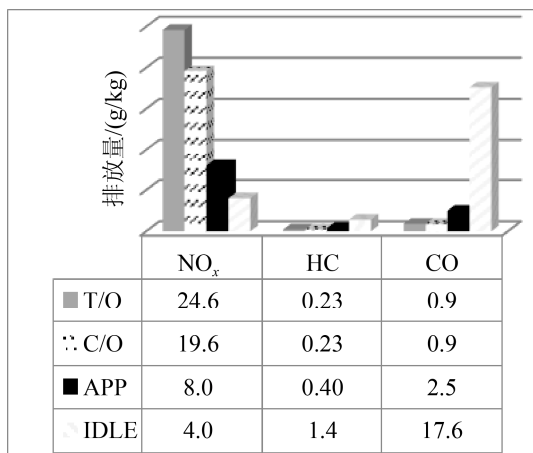


图 1 CFM56-5A1 型发动机各阶段污染物排放量

Fig. 1 Pollutant emission of CFM56-5A1 engine at various stages

由于支线机场的建设投资较少, 跑道、滑行道路布局相对简单, 尤其是部分机场缺少快速脱离道, 会造成飞机在跑道上滑行的时间大大增加。而航空器起飞过程中, 发动机处于 TO/GA 状态下的污染物排放量主要与发动机类型和离场程序有关, 与跑道出口位置相关度较小, 其用时相对固定, 如需要进行优化, 应考虑多方面因素并与空

中交通流量管理部门协商沟通, 故在机场建设规划中应重点考虑航空器的地面滑行时间并进行优化^[17-19]。

2 航空器污染物排放评估模型

为了综合考虑不同机型排放污染物的数量与种类之间的关系, 本文选取了 14 种典型发动机数据作为统计值, 基于发动机 3 项污染物指标的均值和标准差进行数据的标准化。转化函数为:

$$x^* = \frac{x_0 - \min(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\max(x_1, x_2, \dots, x_n) - \min(x_1, x_2, \dots, x_n)} \times (0.9 - 0.1) + 0.1 \quad (1)$$

以滑行时发动机状态 IDLE 下的 HC 为例, 其归一化计算结果如表 2 所示。

表 2 HC 污染指数归一化计算

Tab. 2 Pollution index normalized calculation of HC

机型	发动机型号	HC	归一化系数
A319	CFM56-5A4	1.750	0.387
A320	CFM56-5A1	1.400	0.326
A330	CFM56-5C2	1.400	0.326
B737-800	CFM56-3-C1	1.420	0.329
B747B	JT9D-7R4G2	1.550	0.352
B747-400P	PW4056	0.660	0.197
B777	GE90-90B	2.770	0.565
MD-90	V2525-D5	0.105	0.100
B738	CFM56-7	3.100	0.623
E145	AE3007A	2.510	0.520
CRJ	CF34-3B	4.690	0.900

为了评价各典型停机位的综合污染情况, 设置综合评价污染情况函数 Y :

$$Y = \sum_{m=1}^{365} \sum_{a=1}^n \sum_{t=1}^3 (x_{E_n, t}^* \times fuel_{n, p}) \quad (2)$$

式中: m 为使用主着陆方向跑道的天数, 则使用次着陆方向跑道的天数为 $365-m$ 天; n 为第 m 天第 n 架航班; E_n 为第 n 架航班所采用的发动机类型; $x_{E_n, t}^*$ 为第 n 架航班所采用的发动机所排放的污染物归一化系数, $t=1, 2, 3$ 分别对应的是 NO_x , HC 和 CO 三种污染物; $fuel_{E_n, p}$ 为第 n 架航班到达停机位 p 所需油耗。滑行状态下, 发动机处于 IDLE 状态, 该状态下, 同种发动机油耗是以滑行时间

为自变量的函数。

$$fuel_{n,p} = T_{taxi} \eta_n \quad (3)$$

式中：总滑行时间 $T_{taxi} = \sum_{i=0}^6 t_i$ ， η_n 为航空器 n 的单位燃油消耗量。下节将重点讨论滑行时间的计算。

3 停机位污染指数计算模型

3.1 着陆滑行时间计算模型

以左端跑道头为例，根据跑道出口位置距跑道头距离 L' 与进场航空器减速至冲程结束时距跑道头距离 D_L 的不同将跑道运行模式分为两种：

在运行模式一下(即 $L' \geq D_L$)，如图 2，航班可直接由滑行道脱离，其滑行时间可分为：

(1) 以最大滑行速度 V_{max} 滑行至转弯

$$t_1 = (L_1 - D_L) / V_{turn} \quad (4)$$

(2) 航空器以转弯速度 V_{turn} 转弯脱离跑道

时间：

$$t_2 = R\theta / V_{turn}, \theta = 90^\circ \quad (5)$$

(3) 滑行至脱离道时间，其可分为两种情况：

①航空器有充分的加减速距离，即 $L' \geq L_{need}$ ，

其中

$$L_{need} = (V_{max}^2 - V_{turn}^2) / 2a^+ + (V_{max}^2 - V_{turn}^2) / 2a^- \quad (6)$$

所需时间可分为用于加减速的时间 t_{need} 和以

V_{max} 匀速滑行的时间 t_{even} ：

$$t_{need} = (V_{max} - V_{turn}) / a^+ + (V_{max} - V_{turn}) / a^- \quad (7)$$

$$t_{even} = (L' - L_{need}) / V_{max} \quad (8)$$

$$t_3 = t_{need} + t_{even} \quad (9)$$

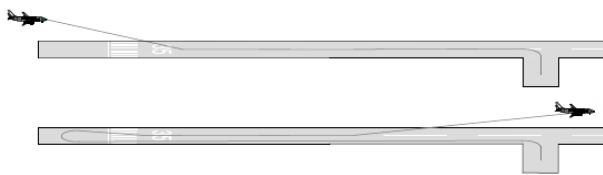


图 2 跑道运行模式 1
Fig. 2 Runway operation mode 1

②航空器没有充分的加减速距离，即 $L' < L_{need}$ ，由于滑行时间受加速度 a^+ , a^- , L' , L_{need} 等多种因素的影响，且如准确以最大加(减)速度进行运行，实际运行中若受到偶然因素的影响，容

易出现在跑道出口位置速度过大，故可将模型简化为以加速度 $\pm \min(a^+, a^-)$ 进行运动，滑行时间：

$$t_3 = 2 \times \frac{\sqrt{aL' + V_{turn}^2} - V_{turn}}{|\min(a^+, a^-)|} \quad (10)$$

在运行模式二下(即 $L' < D_L$)，如图 3，降落航空器需要在跑道上进行 180° 转弯，然后才能脱离，其滑行阶段可分为：

(1) 航空器滑行掉头时间：

$$t_1 = R\theta / V_{turn}, \theta = 180^\circ \quad (11)$$

(2) 滑行至脱离道时间，滑行时间也可分为 2 种情况：

①航空器有充分的加减速距离，即 $L' \geq L_{need}$ ， t_2 分为用于加减速的时间 t_{need} 和以 V_{max} 匀速滑行的时间 t_{even}

$$t_2 = t_{need} + t_{even} \quad (12)$$

②航空器没有充分的加减速距离，即 $L' < L_{need}$ ，滑行时间

$$t_2 = 2 \times \frac{\sqrt{aL' + V_{turn}^2} - V_{turn}}{|\min(a^+, a^-)|} \quad (13)$$

(3) 航空器滑行转弯脱离跑道时间：

$$t_3 = R\theta / V_{turn}, \theta = 90^\circ \quad (14)$$

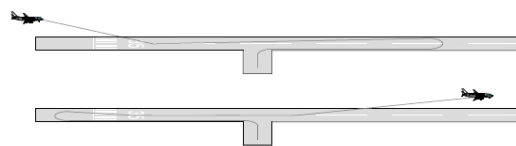


图 3 跑道运行模式 2
Fig. 3 Runway operation mode 2

3.2 起飞滑行时间计算模型

2 种跑道运行模式航班离场的滑行模式相同，可分为 3 步：

(1) 以 V_{turn} 转弯时间：

$$t_4 = R\theta / V_{turn}, \theta = 90^\circ \quad (15)$$

(2) 滑行至脱离道时间，滑行时间可分为 2 种情况计算：

①航空器有充分的加减速距离，即 $L' \geq L_{need}$ ， t_5 分为加减速时间和以 V_{max} 滑行时间，即

$$t_5 = t_{\text{need}} + t_{\text{even}} \quad (16)$$

② 航空器没有充分的加减速距离, 即 $L' < L_{\text{need}}$, 滑行时间:

$$t_5 = 2 \times \frac{\sqrt{aL' + V_{\text{turn}}^2} - V_{\text{turn}}}{|\min(a^+, a^-)|} \quad (17)$$

(3) 如图 4 所示, 航空器在跑道掉头坪航空器滑行掉头时间:

$$t_6 = (R\theta_1 + L_{\text{deflection}} + R\theta_2) / V_{\text{turn}} \quad (18)$$

式中: $\theta_1 = 90^\circ$, $\theta_2 = 180^\circ$ 。由于跑道的两头均可用于起降, 若使用模型跑道的另一条跑道, 则使用 $L_{\text{runway}} - L'$ 替代上文中模型中的 L' 即可。

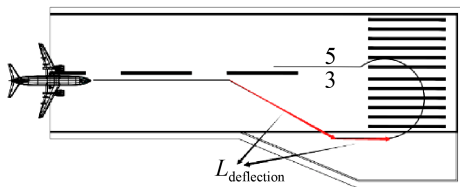


图 4 跑道掉头坪示意图

Fig. 4 Schematic diagram of turning apron

4 仿真与结果分析

为了计算各机型滑行时间, 运用 Matlab 编程进行计算。设滑行道距跑道头长度从 0 m 变化到 2 600 m, 步长为 5 m, 图 5 为当 L' 变化时, B737-800 起飞、降落过程滑行时长以及总跑道占用时长的变化趋势。

为验证本模型的准确性, 使用民航业内广泛认可的 AirTop 软件对模型进行验证。由于该软件不能使用数学模型的自变量进行连续验证, 故分

别在跑道两端 6 个位置设置 6 个典型出口位置和停机位, 分别命名为停机位 1~6, 以 B737-800 为例对两端跑道的 2 种运行模式分别进行验证, 如图 6 所示。

将滑行时间模型与 AirTop 仿真模型运行数据对比, 最终结果如表 3, 平均误差为 1.99%, 均方误差 3.83 s, 方均根值 1.96 s, 可见本文所建立的模型具有较高的精确度。

以西南地区某机场年航班计划中的机型为蓝本, 使用该机场的一年的航班数据计算年运行总污染物排放指数与跑道出口距跑道头距离的关系。该机场主要运行机型为 A320 与 B737, 同时运行有 A319, E145 等机型, 两端跑道使用比例为 10:1。最终对 3 种典型污染物和总的污染物排放指数的计算结果如图 7~8 所示。

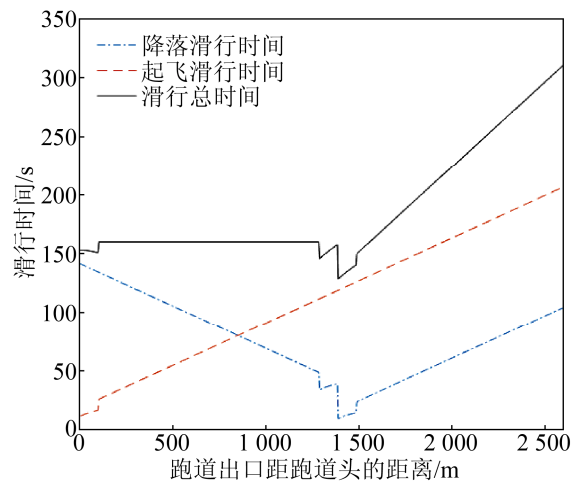


图 5 起降过程及总跑道的滑行时长的变化趋势

Fig. 5 Variation trend of taxiing time in taking off and landing phase and total runway taxiing time

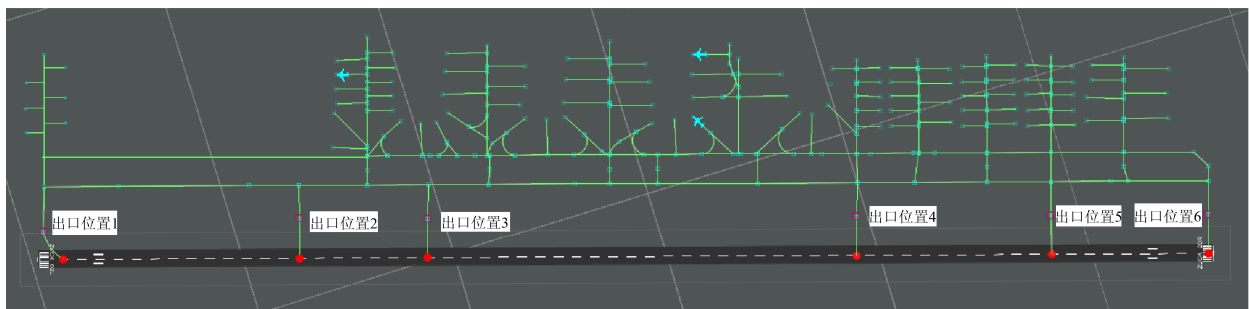


图 6 AirTop 地面滑行仿真模型

Fig. 6 AirTop ground sliding simulation model

表 3 地面滑行时间数学模型与 AirTop 仿真模型运行数据对比误差分析
Tab. 3 Comparison and error analysis of running data between mathematical model and AirTop simulation model

出口位置	状态	本文模型 滑行时间/s	AirTop 滑行时间/s	误差/%	出口位置	状态	本文模型 滑行时间/s	AirTop 滑行时间/s	误差/%
1	着陆	141	143	1.40	4	着陆	145	147	1.36
1	起飞	11	12	8.30	4	起飞	10	12	16.7
2	着陆	34	36	5.56	5	着陆	45	47	4.26
2	起飞	112	113	0.89	5	起飞	105	108	1.8
3	着陆	16	15	6.67	6	着陆	24	23	4.3
3	起飞	120	123	2.43	6	起飞	122	124	1.6

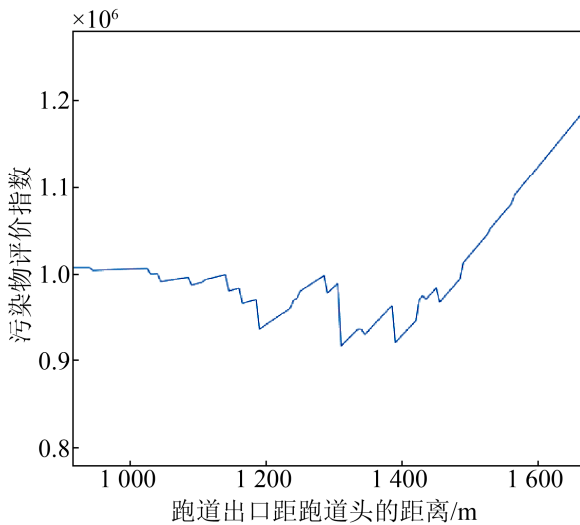


图 7 污染物排放指数随 L' 变化情况(局部)

Fig. 7 Pollutant index following the change of L' (local graph)

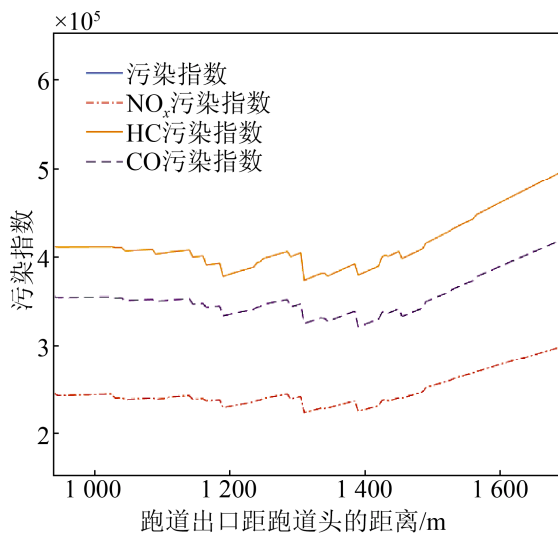


图 8 3 种典型污染物指数随 L' 变化情况

Fig. 8 Three typical pollutant indexes following with change of L'

综合考虑 3 种污染物的影响程度, 最终可得污染物影响程度最低的跑道位置是位于跑道头距离 1 320 m 的位置, 其污染物指数 917 489, 而该机场原停机位处于距离跑道头 1 900 m 的位置, 该位置下的污染物排放指数为 1 171 893, 本文所求得位置可将指数降低 21.7%, 同时 NO_x 、HC 和 CO 的污染指数分别降低了 22.9%, 22.3% 和 19.9%。因此本文所建的模型具有一定的实际意义和操作价值。

5 结论

通过分析 LTO 各阶段大气污染物排放特征, 本文提出了应着重考虑通过减少地面滑行时间以控制污染物近地空间排放。通过建立支线机场滑行时间模型。利用 Matlab 计算滑行道口位置对多种机型滑行时间的影响并应用 AirTop 仿真软件对比验证。设置污染物评价指标并以此建立支线机场航空器污染物排放评估模型。所建立的模型综合考虑了 3 种主要排放污染物的影响, 机场常用机型种类及运行量, 各机型发动机油耗及污染物排放量, 两端跑道使用频率, 滑行路线选择等因素, 由此得出污染物评价指数随滑行道位置变化的情况, 推求出污染物评价指数最小的滑行道口位置。在模型推广上可通过改变机型种类、年运行量、两端跑道使用比例等数据将模型应用于其他支线机场设计与建设规划中。在今后的研究方向的选择上, 拟基于本文模型, 对航空器在机动区和机坪内部的运动进行细化研究, 考虑航空器在场面不同区域的滑行速度的差异和调整特性, 从而实现 A-SMGCS

(先进的机场场面活动引导与控制系统)中的场面运行精细控制。

参考文献:

- [1] 李飞行, 宋一鑫, 张权. 我国支线机场现状分析及对策研究[J]. 交通运输研究, 2018, 4(4): 61-68.
Li Feixing, Song Yixin, Zhang Quan. Status Analysis and Countermeasures of Civil Feeder Airports in China [J]. Transport Research, 2018, 4(4): 61-68.
- [2] 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.
Han Bo, Huang Jiamin, Wei Zhiqiang. Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff[J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4524-4530.
- [3] 邢志伟, 徐铭怡, 罗晓, 等. 飞机滑行路径仿真与优化研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(2): 323-331.
Xing Zhiwei, Xu Mingyi, Luo Xiao, et al. Simulation and Optimization of Aircraft Sliding Path[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(2): 323-331.
- [4] Adacher L, Flamini M, Romano E. Airport Ground Movement Problem: Minimization of Delay and Pollution Emission[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2018, 19(12): 3830-3839.
- [5] 韩博, 刘雅婷, 陈鑫, 等. 民航飞机起飞过程细粒子排放特征[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1620-1627.
Han Bo, Liu Yating, Chen Xin, et al. Fine particles emission characterization of civil aviation aircraft during takeoff[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1620-1627.
- [6] 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, 54.
Song Lisheng. Emission calculation of Chinese airports based on ICAO LTO model[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013, 31(6): 46-48, 54.
- [7] Carslaw David C, Ropkins Karl, Laxen Duncan, et al. Near-field commercial aircraft contribution to nitrogen oxides by engine, aircraft type, and airline by individual plume sampling[J]. Environmental science & technology (S0013-936X), 2008, 42(6): 1871-1876.
- [8] 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.
Han Bo, Liu Yating, Tan Hongzhi, et al. Emission characterization of civil aviation aircraft during a whole flight[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(12): 4492-4502.
- [9] 魏志强, 刁华智, 韩博. 民用飞机巡航阶段污染物排放量计算研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(19): 122-127.
Wei Zhiqiang, Diao Huazhi, Han Bo. Research on Calculating of Aircraft Pollution Emissions in Cruise Phase [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(19): 122-127.
- [10] Andrew Cook, Graham Tanner, Victoria Williams, et al. Dynamic cost indexing managing airline delay costs[J]. Journal of Air Transport Management (S0969-6997), 2010, 15(1): 26-35.
- [11] Adacher L, Flamini M. Aircraft Ground Routing and Scheduling Optimization[C]// Uksim-amss International Conference on Computer Modelling & Simulation. NW Washington, DC United State: IEEE, 2015: 345-350.
- [12] 邢志伟, 徐铭怡, 罗晓, 等. 离港飞机滑行路径优化与仿真[J]. 中国民航大学学报, 2018, 36(4): 1-5.
Xing Zhiwei, Xu Mingyi, Luo Xiao, et al. Optimization and simulation of departure aircraft taxiing path[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2018, 36(4): 1-5.
- [13] 张文秀. 机场飞机起降阶段污染物排放量估算探究[J]. 产业与科技论坛, 2016(20): 69.
Zhang Wenxiu. Study on the estimation of pollutant emission in the take-off and landing stage of airport aircraft[J]. Industrial & Science Tribune, 2016(20): 69.
- [14] ICAO. ICAO Aircraft Engine Emissions Databank [EB/OL]. (2012-07-01)[2019-01-03].<http://www.caa.co.uk>.
- [15] 康瑞, 杨凯. 考虑跑滑结构的机场跑道容量评估模型[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2016, 53(2): 319-325.
Kang Rui, Yang Kai. Runway capacity evaluation with considering of runway and taxiway instruction[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2016, 53(2): 319-325.
- [16] 康瑞, 杨凯. 民航支线机场跑道容量评估模型设计与仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(3): 32-36.
Kang Rui, Yang Kai. Design and Simulation of Runway Capacity Estimation Model for Feeder Airports[J].

- Computer Simulation, 2016, 33(3): 32-36
- [17] Mori R. Aircraft Ground-Taxiing Model for Congested Airport Using Cellular Automata[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2013, 14(1): 180-188.
- [18] 罗杰. 机坪活动目标运行冲突控制理论与仿真验证[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2018.
- Luo Jie. The Conflict Control Theory and Simulation Verification of the Apron Activity Target[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2018.
- [19] Yang L, Yin S, Han K, et al. Fundamental diagrams of airport surface traffic: Models and applications[J]. Transportation Research Part B: Methodological (S0191-2615), 2017, 106: 29-51.