

文章编号: 1000-8055(2023)10-2501-15

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210673

飞机排放对机场周边环境的影响研究

曹惠玲, 晏嘉伟, 匡家骏, 李玉铭
(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘 要: 为真实有效地评估航空排放污染物对机场及其周边环境的影响, 构建了多因素融合下的飞机 LTO(landing and take-off, 起飞降落着陆)循环排放污染物扩散评估模型。依据机载 QAR(quick access recorder, 快速存取记录器)数据中表征发动机实际运行的诸多参数, 准确获取污染物排放量, 进而确定实时排放源强; 建立飞行坐标系, 结合飞机实际运行状况及机场周边环境因素对 Gaussian puff 模型进行修正。依据飞机不同飞行阶段下排放污染物质量浓度分布, 确定了污染物扩散趋势, 进而完成: ①排放污染物扩散质量浓度超标地理范围确定; ②排放污染物对常见区域影响分析; ③多架次飞机排放污染物叠加扩散影响分析; ④排放污染物质量浓度监测点设置。通过计算得出装配 GE90-115B 型发动机的 B777-300ER 飞机 LTO 循环中排放污染物扩散峰值质量浓度主要集中在 26.05~576 mg/m³ 范围内, 进近阶段污染物排放高度集中在 446.49~593.67 m, 下风向污染物质量浓度超标地理范围为 0~647 m; 起飞爬升阶段污染物排放高度集中在起飞前期 1.34~96.03 m, 下风向污染物质量浓度超标地理范围为 0~127 m。下风向管制区域 647~1 000 m 污染物扩散质量浓度未超标, 但对环境造成的影响不可忽视。

关键词: LTO 循环; QAR 数据; Gaussian puff 模型; 评估模型; 影响范围

中图分类号: V235.1; X51

文献标志码: A

Research on impact of aircraft emissions on surrounding environment of airports

CAO Huiling, YAN Jiawei, KUANG Jiajun, LI Yuming

(School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to truly and effectively assess the impact of aviation pollutants on the airport and its surrounding environment, an aircraft LTO (landing and take-off) cyclic pollutant emission diffusion evaluation model under multi-factor fusion was constructed. According to the parameters characterizing the actual operation of the engine in the airborne QAR (quick access recorder) data, the pollutant emissions can be accurately obtained, and then the real-time emission source strength can be determined; the flight coordinate system was established, and the actual operating conditions of the aircraft were combined. The surrounding environmental factors of the airport amended the Gaussian puff model. According to the distribution of pollutant emission concentration in different flight stages of the aircraft, the pollutant diffusion trend was determined, and then: (1) the geographic range of the emission pollutant diffusion concentration exceeding the standard was determined; (2) the impact of the emission pollutants on common areas was analyzed; (3) the impact of superposition and diffusion of pollutants discharged by multiple aircraft was analyzed; (4) monitoring points for the concentration of discharged pollutants were

收稿日期: 2021-11-26

基金项目: 中国民航大学开放基金(000031020102)

作者简介: 曹惠玲(1962—), 女, 教授, 博士, 研究领域为发动机故障诊断、状态监控、性能分析。E-mail: hlcao@cauc.edu.cn

通信作者: 晏嘉伟(1995—), 男, 硕士生, 研究方向为发动机性能分析与排放适航。E-mail: yjw980205@sina.com

引用格式: 曹惠玲, 晏嘉伟, 匡家骏, 等. 飞机排放对机场周边环境的影响研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(10): 2501-2515. CAO Huiling, YAN Jiawei, KUANG Jiajun, et al. Research on impact of aircraft emissions on surrounding environment of airports[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(10): 2501-2515.

set. Through calculation, it was concluded that the peak concentration of emission pollutants in the LTO cycle of the B777-300ER aircraft equipped with GE90-115B engines was mainly concentrated in the range of 26.05—576 mg/m³, and the pollutant emission height in the approach stage was concentrated in the range of 446.49—593.67 m, the geographical range of pollutant concentrations in the downwind direction exceeding the standard was 0—647 m; the pollutant emission height in the take-off and climbing stage was concentrated in the early stage of take-off at 1.34—96.03 m, and the pollutant concentration in the downwind direction exceeded the standard geographical range of 0—127 m. The pollutant diffusion concentration of 647—1 000 m in the downwind control area did not exceed the standard, but the impact on the environment cannot be ignored.

Keywords: LTO cycle; QAR data; Gaussian puff model; evaluation model; scope of influence

民用航空发动机在运行过程中,主要会产生以 NO_x、CO、HC、SO₂ 为主的气态污染物和以黑碳为主的颗粒污染物,其对环境的影响主要包括机场区域的环境空气质量和全球范围的气候变化^[1]。随着社会经济愈发活跃,航空运输量大幅提升,在近地点的飞机 LTO 循环中产生的排放污染物对人员健康、机场及其周边环境的危害愈加严重^[2-5]。2020 年底,我国境内授权颁证的运输机场数量达到 241 个,仅年货邮吞吐量达 10 000 t 以上机场就有 59 个^[6],《新时代民航强国建设行动纲要》提出 2035 年我国运输机场数量将达到 450 个^[7]。由此可见,亟需准确有效的评估机场航空排放及扩散的分布规律,同时确立机场附近污染物质量浓度(下文简称浓度)监测点,掌握机场排放实际情况,进而采取相应措施减少航空排放对人员及周边环境的危害。

研究飞机污染物排放、扩散特性是探究飞机排放对机场及周边环境的影响、评估机场空气质量的必要步骤。目前国内针对机场污染物浓度实际分布及监测研究较少,研究人员普遍依据国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)排放数据库给定的统计飞行数据结合排放扩散模型进行排放量计算与扩散浓度数值模拟^[8]。为了进一步准确评估排放污染的影响,一些学者开始结合实际飞行数据进行更加精准的航空排放计算。Van Pham 等^[9]针对澳大利亚的基础航迹数据,建立了精度为 1 英尺(30.48 cm)的四维排放数据库清单;Owen 等^[10]估算了 2050 年全球航空活动所造成的污染物排放量;韩博等^[11]针对一次航班全航段飞行全过程大气污染物排放特征进行了研究。作者所在课题组利用机载 QAR 数据,结合欧洲学者提出的 P3-T3 方法,对污染物基准排放指数进行修正,完成了对飞机全航段污染物

排放量的计算与分析,为进一步的扩散模拟打下了基础^[12-14]。

目前国内外广泛应用于污染物扩散模拟的主要模型有:Euler 模型、Gaussian 模型和 Lagrange 模型。Das 等^[15]利用层状湍流中色散的 Lagrange 模型进行了机场环境中大气污染物的预测;Barrett 等^[16]建立了机场飞机气流的三维整体 Gaussian plume 模型,对当地空气质量受到污染物影响进行了分析;Hsu 等^[17]开发了回归模型,使用线性混合模型对中等规模机场内航空活动与 UFP(ultrafine particles,超细颗粒物)浓度之间的关系进行了拟合;韩博等^[18]基于 Gaussian 模型,针对飞机排气特点,建立了飞机 LTO 循环排放污染影响评估耦合模型;作者所在课题组基于机载 QAR 数据,应用 Gaussian puff 模型建立了单架次颗粒污染物 LTO 循环排放及扩散特性评估模型^[19-20]。

评估机场空气质量,讨论飞机排放对机场及其周边环境的影响,关键在于选取能够充分表征航空器排放特性与运行特征的评估模型,用以提高飞机排放污染物扩散模拟精度及分析的准确性。针对现有模型存在的选取数据时效性、全面性、完整性不足,研究污染物不全面,模型修正不充分等因素,本研究基于机载 QAR 数据建立飞机 LTO 循环排放全污染物计算模型,将得到的实时排放源强输入到融合了大气环境修正因素(烟气抬升高度、下垫面反射效应等)与飞机运行特征(飞行速度、不同飞行阶段航迹角)的 Gaussian puff 修正模型中,得到单架次 LTO 循环排放全污染物实时扩散评估模型。真实有效地确定飞机排放污染物扩散浓度超标地理范围,系统分析常见影响区域;并考虑到机场飞机起降活动频繁,多架次航班运行使排放污染物叠加,进一步研究航班叠加的数量对排放污染物扩散浓度的影响;最终合理地设置机场污染物浓度监测点。

1 建立污染物排放扩散评估模型

1.1 排放扩散评估模型建立流程

民航发动机在运行期间, 排放污染物主要受到发动机燃油质量流量(下文简称燃油流量, fuel flow, FF)、运行时间(time in mode, TIM)与排放指数(emission index, EI)的影响^[8]。在飞行过程中, 不同航线不同类型发动机实际运行参数、运行工况不同, 燃油流量、运行时间与 ICAO 给定的基

准值有所差异, 污染物排放指数、烟团排放高度和排放时间等也会随着飞行工况时刻变化, 进而影响不同飞行轨迹下污染物排放源强。故本文依据单架次不同机型机载 QAR 数据中表征发动机实际运行的诸多参数结合 P3-T3 和形成氧化方法, 准确获取 LTO 阶段污染物排放量, 以此确定实时排放源强; 引入大气参数、下垫面反射效应和烟气抬升高度等因素对 Gaussian puff 模型进行修正, 进而开展污染物扩散评估。评估流程如图 1 所示。

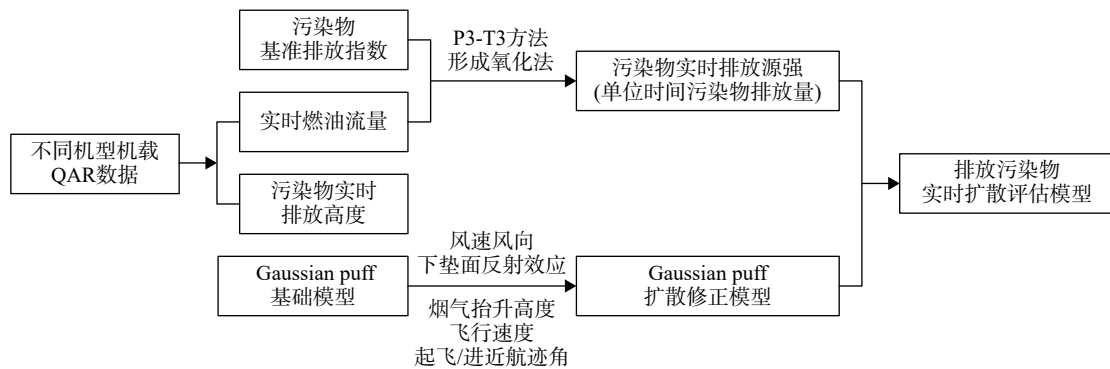


图 1 LTO 阶段排放污染物扩散评估流程图

Fig. 1 Flow chart of assessment of diffusion of pollutants discharged in LTO stage

1.2 飞机 LTO 循环飞行坐标系

排放污染物扩散引用 Gaussian puff 模型, 其适用地理坐标系建立在飞机飞行 LTO 循环阶段内。ICAO 合格审定中所采用的 LTO 循环指: 机场海拔 3 000 英尺(914.4 m)以内空域, 包含: 进近(approach)、慢车滑行(taxi/idle)、起飞(take-off)和爬升(climb)阶段^[8]。

飞行坐标系建立中, 为方便计算研究, 简化飞

行阶段, 将起飞和爬升段合并, 具体如图 2 所示。图中: 坐标原点分阶段设置, 进近段为 C 点(进近段起始点在机场平面的投影点), 滑行段为 B 点(进近接地点), 起飞爬升段为 A 点(起飞离地点)。Y 轴平行于飞行跑道, 应用右手定则, X 轴垂直于飞行跑道, Z 轴垂直于 XOY 平面。 α 为起飞航迹角, β 为进近航迹角(rad), 且均会由于不同机型、不同飞行轨迹、不同运行状况等因素发生变化。

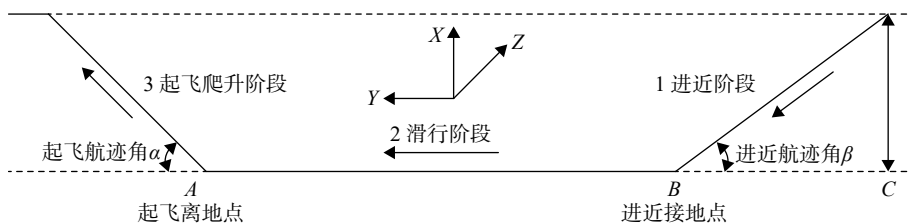


图 2 LTO 循环飞行坐标系

Fig. 2 LTO cyclic flight coordinate system

1.3 污染物排放模型建立及其修正

1.3.1 污染物排放指数修正

发动机排放污染物中, 气态污染物 SO_2 只与燃油消耗量成正比关系, 与其他发动机性能参数无关, 不需要对其排放指数修正^[8]。 NO_x 、HC 和

CO 的排放与发动机性能相关, 须结合发动机实时运行状况和周边环境参数对排放数据库中给定基准状态下的排放指数进行修正。

对排放指数进行修正之前, 根据飞行高度、飞行马赫数、低压转子转速、油门杆解算器角度

等参数对飞行阶段进行精准划分,确定飞机在不同航段中具体的飞行时间和燃油消耗量。进而依据 ICAO 排放数据库中对应的各分阶段基准排放指数,采用 P3-T3 方法对其进行修正,获得与实际飞行阶段相对应的实时排放指数。

P3-T3 方法结合发动机实时运行状态,通过真实的燃烧室入口压力 p_3 、油气比(fuel air ratio, FAR)得到每一瞬态的排放指数,详细计算过程参见文献 [12-14]。

颗粒污染物(particulate matter, PM)主要以非挥发性黑碳颗粒物(black carbon, BC)为主,主要采用形成氧化方法对其排放指数进行修正。形成氧化方法是基于传统燃料燃烧的发动机,为了兼顾到发动机性能和外界环境对燃料燃烧及对污染物排放的影响,引入考虑燃烧品质的空燃比(air fuel ratio, AFR)以及反映发动机燃烧性能的燃烧室主燃区温度 T_b ,最终得到颗粒污染物排放指数,具体计算过程参见文献 [19-20]。

1.3.2 污染物排放源强

选择 QAR 数据中不同飞行航段任意瞬时下的燃油流量,结合对应航段排放指数即可得到单位时间内第 i 类污染物排放量 Q_i ,如式(1)所示;进而求得对应时刻下污染物的排放总量 Q ,即为对应的排放源强,如式(2)所示。

$$Q_i = F_f \cdot I_{e,i} \quad (1)$$

$$Q = n \cdot \sum_{i=\text{SO}_2, \text{NO}_x, \text{HC}, \text{CO}, \text{PM}} Q_i \quad (2)$$

式中 n 为待研飞机的发动机台数; $I_{e,i}$ 为第 i 类污染物的排放指数; F_f 为燃油流量, kg/s。

1.4 污染物扩散模型建立及其修正

发动机每一瞬时排放出的污染物“烟团”在大气中是自由扩散的,且由 Gaussian puff 模型建立标准可知,烟团中气态和颗粒污染物扩散趋势均适用于此模型。以独立“排放烟团”中心为扩散基础点,在无风无界的理想状态下,根据正态分布假设可得到任意空间点 (x, y, z) 处的污染物扩散浓度为

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (3)$$

式中 $C(x, y, z)$ 表示实时排放源强为 Q (mg/s) 的烟团在点 (x, y, z) 处的扩散浓度, mg/m³; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分

别代表烟团在 x 、 y 、 z 方向上的扩散系数,其数值与大气状况(大气稳定度)和地面环境条件密切相关。

当前确定大气稳定度等级的常用方法为 Pasquill-Gifford 模型^[21]。首先综合观测点太阳倾角、观测时间、当地经度和纬度确定太阳高度角,其次结合对应时间观测点云量确定太阳辐射等级,进而结合观测点地面风速确定大气稳定度。根据确定的大气稳定度,引用修正过的“布里吉斯扩散系数^[22]”,确定 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 数值,具体计算过程参见文献 [13]。

1.4.1 基础模型修正

基础模型中,仅考虑了包含大气参数中与大气稳定度相关的影响因素,不能真实有效地模拟出烟团在大气中扩散效果。故而加入以下相关影响因素依次对模型进行修正。

1) 风速、风向

中国气象局提供的气象数据是当地风速为近地面 10 m 高度处的基准数据,不同高度排放的烟团经历的风速有所差异,故而在数值模拟时采用幂指数函数对基准风速数值进行修正,以获取对应高度的风速,见式(4)。

$$u = u_r \left(\frac{H_s}{H_{sr}} \right)^\chi \quad (4)$$

式中 u 为烟团排放高度处风速, u_r 为基准风速, m/s; H_s 为烟团排放高度, H_{sr} 为近地面 10 m 处高度, m; χ 由大气稳定度决定。故而 t 时刻下,源强为 Q 的烟团在风速为 u , 风向与 Y 轴夹角为 θ 时,经过坐标变换后扩散模型为

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x - ut \sin \theta)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y - ut \cos \theta)^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (5)$$

2) 下垫面反射效应

由于烟团并非是在无界空间自由扩散,近地面时须考虑下垫面反射效应。有界情况下,坐标系的取法与上述不同,坐标原点不与烟团中心重合,直接取在烟团中心的水平投影点,如图 3 所示。根据假设,下垫面对排放源气体起全反射作用,可采用像源法处理,实源和像源两部分的贡献之和为其在任一点处的浓度值。

其中, 实源的贡献为

$$C_1(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x - ut \sin \theta)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y - ut \cos \theta)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z - H)^2}{\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (6)$$

像源的贡献为

$$C_2(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x - ut \sin \theta)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y - ut \cos \theta)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z + H)^2}{\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (7)$$

故而 t 时刻下, 源强为 Q 的烟团在风速为 u , 风向与 Y 轴夹角为 θ 时, 经过下垫面反射效应后扩散模型为

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{(x - ut \sin \theta)^2}{2\sigma_x^2} \right] \exp \left[-\frac{(y - ut \cos \theta)^2}{2\sigma_y^2} \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (8)$$

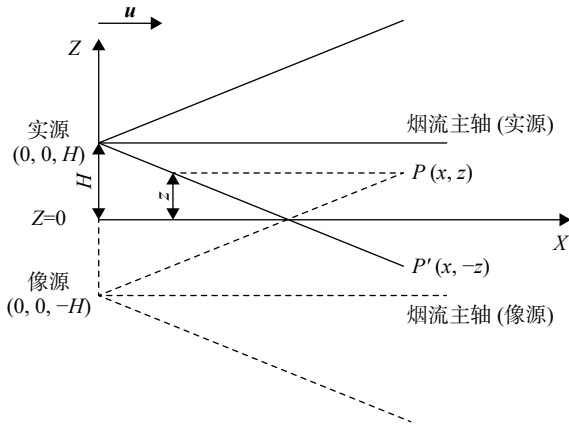


图 3 下垫面反射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reflection of underlying surface

3) 烟气抬升高度

污染物排放烟团受到尾喷管给予的初始动量(决定于烟气出口流速 V_s 和尾喷管内径 D), 并且由于排气温度而产生的浮力作用(决定于排气温度 T_s 和周边环境大气 T_a 之间的温差), 最终导致烟

气具有一定的抬升高度。故而, 独立烟团的有效源高 H 为烟团实时排放高度 H_s 与烟气抬升高度 ΔH 之和(固定源中 H 为对应定值, 移动源中 H 变化为与时间相关的函数)。

$$H = H_s + \Delta H \quad (9)$$

式中 ΔH 可结合飞机实时飞行姿态及烟团排放特征对霍兰德经验公式(式(10))进行修正得到^[17]:

$$\Delta H = \frac{V_s D}{u} \left(1.5 + 2.7 \frac{T_s - T_a}{T_s} D \right) \quad (10)$$

$$\Delta H = \frac{V_s \sin a \cdot D \sin a}{u} \left(1.5 + 2.7 \frac{T_s - T_a}{T_s} D \sin a \right) \quad (11)$$

式中 a 为飞机迎角(翼弦与机身前进方向之间的夹角, rad)。

1.4.2 修正后的固定源连续扩散模型

经过上述修正, 建立排放源连续扩散模型。单位时间 Δt 内单烟团排放量为 $q(t)$, $q(t)\Delta t$ 表示单烟团瞬时排放源强。 t 时刻点 (x, y, z) 处的污染物浓度为

$$C(x, y, z, t, H) = \frac{q(t) \Delta t}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{(x - ut \sin \theta)^2}{2\sigma_x^2} \right] \exp \left[-\frac{(y - ut \cos \theta)^2}{2\sigma_y^2} \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (12)$$

在不同阶段的污染物排放总时间 $T(s)$ 时段内, 点 (x, y, z) 处连续排放烟团叠加浓度为

$$C(x, y, z, T, H) = \int_0^T \frac{q(t)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{[x - u(T-t) \sin \theta]^2}{2\sigma_x^2} \right\} \exp \left\{ -\frac{[y - u(T-t) \cos \theta]^2}{2\sigma_y^2} \right\} \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} dt \quad (13)$$

1.4.3 单架次移动源连续扩散模型

考虑到烟团在实际飞行中的位移,加入飞行速度 $v(\text{m/s})$ 与不同飞行阶段的航迹角 $\phi(^{\circ})$ 后,沿

飞机前进方向位移可视为与 t 相关的函数 $vt\cos\phi$,铅垂方向 H 变化可视为与 t 相关的函数 $vt\sin\phi$,进而得到单架次移动源连续扩散模型:

$$C(x, y, z, T, H) = \int_0^T \frac{q(t)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{[x - u(T-t) \sin \theta]^2}{2\sigma_x^2} \right\} \cdot \exp \left\{ -\frac{[y - u(T-t) \cos \theta - vt \cos \phi]^2}{2\sigma_y^2} \right\} \left\{ \exp \left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} dt \quad (14)$$

式中 ϕ 在进近阶段为 β ,滑翔阶段为 0 ,起飞爬升阶段为 α 。

1.4.4 多架次移动源连续扩散模型

考虑到航班密集起飞时的排放叠加影响,为

了更加真实完整的模拟机场环境的污染物扩散情况,结合不同架次飞行时间间隔,构建多架次移动排放源扩散模型,观察不同飞行阶段的污染物叠加扩散效果。

$$C(x, y, z, T, H) = \sum_{\varphi=0}^n \int_0^{T+\varphi \cdot \Delta T} \frac{q(t_{\varphi})}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{[x - u_{\varphi}(T + \varphi \cdot \Delta T - t_{\varphi}) \sin \theta_{\varphi}]^2}{2\sigma_x^2} \right\} \cdot \exp \left\{ -\frac{[y - u_{\varphi}(T + \varphi \cdot \Delta T - t_{\varphi}) \cos \theta_{\varphi} - v_{\varphi} t_{\varphi} \cos \phi_{\varphi}]^2}{2\sigma_y^2} \right\} \left\{ \exp \left[-\frac{(z-H_{\varphi})^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z+H_{\varphi})^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} dt_{\varphi} \quad (15)$$

式中 φ 为飞机架次。

这样,在污染物排放扩散评估模型中,加入了大气参数、下垫面反射效应、烟气抬升高度、飞机实际运行参数以及多架次移动排放源叠加等影响,可以更加真实地反映机场污染物扩散问题,为寻求合理的污染物浓度监测点提供理论依据。

2 案例分析

2.1 飞机基本参数

选择执行飞行任务:从海口美兰国际机场(ICAO代码:ZJHK)出发先后经停天津滨海国际机场(ICAO代码:ZBTJ,跑道走向:西北-东南)飞往哈尔滨太平国际机场(ICAO代码:ZYHB)的B777-300ER(发动机型号:GE90-115B)与B777-200(发动机型号:PW4077D)机载QAR数据中采集所需的发动机实际运行相关性能参数,采样时间间隔选择1s。ICAO数据库中给定两种机型LTO阶段基准参数见表1、表2^[23]。

2.2 污染物浓度限值标准

本文确定污染物是否达到充分扩散,不再对周边环境人员造成严重危害的原则是:污染物扩散浓度降至环境空气质量的浓度限值之下。环境空气质量标准是机场空气质量评估的重要指标和参考文件,我国现实行的环境空气质量标准为2012年由环境保护部与国家质量监督检验检疫总局联合发布的GB 3095-2012文件^[24],于2016年1月1日起在全国实施。该标准规定了不同种类环境空气功能区的污染物浓度限值,机场属于工业区划分为二类区,不同种类污染物具体的浓度限值见表3所示。

2.3 飞机实际运行参数及污染物排放源强的确定

两种机型机载QAR数据内LTO循环各阶段运行参数见表4。根据文中第1.3节中建立的污染物排放模型,结合机载QAR数据,计算得到两种不同机型的污染物实时排放源强,如图4所示(图中白线间隔开LTO循环中非连续飞行阶段)。

表 1 GE90-115B 型发动机基准参数

Table 1 GE90-115B engine benchmark parameters

飞行阶段	推力等级/%	燃油流量/(kg/s)	空燃比 ARF	发烟指数 SN	气态污染物基准排放指数/(g/kg)			
					NO _x	HC	CO	SO ₂
起飞	100	4.69	45	4.10	50.34	0.04	0.08	3.87
爬升	85	3.67	51	2.50	35.98	0.03	0.07	3.87
进近	30	1.13	83	1.45	16.50	0.06	1.98	3.87
滑翔	7	0.38	106	0.87	5.19	4.24	39.11	3.87

表 2 PW4077D 型发动机基准参数
Table 2 Benchmark parameters of PW4077D engine

飞行阶段	推力等级/%	燃油流量/(kg/s)	空燃比 ARF	发烟指数 SN	气态污染物基准排放指数/(g/kg)		
					NOx	HC	CO
起飞	100	3.172	45	4.9	44.68	0.02	0.29
爬升	85	2.562	51	2.57	34.05	0.02	0.34
进近	30	0.892	83	0.66	11.63	0.04	0.86
滑行	7	0.310	106	0.34	3.81	2.82	24.8

注: SO₂ 受 GB6537-2006 规定, 按照航空煤油中含硫量最大限值 0.2%, 作为燃油含硫量数据, 假定硫组分经过完全燃烧之后, 96.7% 转化为 SO₂ 进行计算^[25]。

表 3 污染物浓度限值
Table 3 Pollutant concentration limits

序号	污染物种类	平均时间	浓度限制(二级)
1	SO ₂ /(μg/m ³)	1 小时平均	500
		日平均	150
2	NOx/(μg/m ³)	1 小时平均	250
		日平均	100
3	CO/(mg/m ³)	1 小时平均	10
		日平均	4
4	HC/(mg/m ³)	1 小时平均	15
		日平均	6
5	PM _{2.5} /(μg/m ³)	1 小时平均	200
		日平均	75
总和/(mg/m ³)		1 小时平均	25.95
		日平均	10.325

注: HC 的 1 小时平均浓度限值和日平均浓度限值及 PM_{2.5} 的 1 小时平均限值在文件中并未给出, 本文根据浓度限值设定方法等比例估算其数值; 由于不同种类污染物是同时排出, 互相掺杂, 故而本文在根据浓度限值进行研究时, 选定的浓度限值为 5 种污染物浓度限值总和。

由表 4 可见, 两种机型在 LTO 循环阶段运行参数较为相近, 燃油流量在 0.252~4.862 kg/s 范围内波动, 且波动幅值较大, 起飞爬升阶段均值远高于进近阶段, 滑行阶段各项数值均为最低,

此时的污染物排放源强也最低, 如图 4 所示。实时排放源强变化趋势较为相近, 但 GE90-115B 型作为目前功率最大的商用发动机, 整体推力和燃油流量要多于 PW4077D 型发动机, 结合式(1)和式(2)可知两种机型的实时排放源强存在较大差异。

2.4 排放污染物扩散模拟

机场实时气象参数如下: 近地面 10 m 高度处风速为 3.8 m/s; 风向为 220°(地理坐标系), 垂直跑道、平行于飞行坐标系 X 轴; 总云量为 5~7, 低云量≤4; 大气稳定度为 D。根据两架飞机不同航段的实际飞行时间, 结合污染物在大气中扩散速率低、短时间内扩散浓度差异小的特点, 划分不同的观测时间, 观测面根据亚洲人体呼吸带平均高度选择离地 1.42 m, 进行单架次飞机(B777-300ER)的排放污染物叠加扩散模拟。

2.4.1 进近阶段

进近阶段, 选择观测时间 T=0 s 时开始, 每 10 s 观测一次, 直至 324 s 结束(观测时间起点为进近阶段初始时刻, 74 s 时飞机进入 LTO 循环高度, 观测时间终点为飞机完成进近着陆), 观察随着扩散时间增加, 观测面高度处排放污染物扩散效果变化趋势。不同观测时刻峰值浓度分布如图 5(a) 所示, 观测时段(0~297 s)峰值浓度随时

表 4 GE90-115B、PW4077D 型发动机 LTO 循环各阶段特征参数
Table 4 Characteristic parameters of each stage of the LTO cycle of GE90-115B and PW4077D engines

飞行阶段	推力设置/%		工作时间/s		燃油流量/(kg/s)	
	GE90-115B	PW4077D	GE90-115B	PW4077D	GE90-115B	PW4077D
起飞	23~104	22~103	54	61	3.576~4.862	3.458~4.762
爬升	93~105	91~105	106	112	3.157~4.596	3.043~4.496
进近	27~68	26~67	324	295	0.697~1.853	0.627~1.803
滑行	7~22	7~25	1918	1 606	0.296~0.465	0.252~0.475

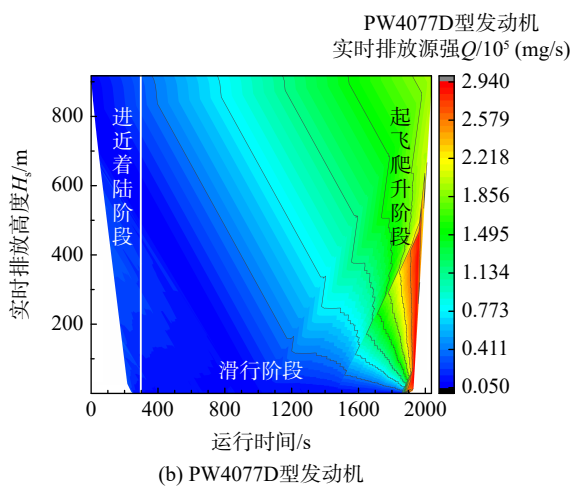
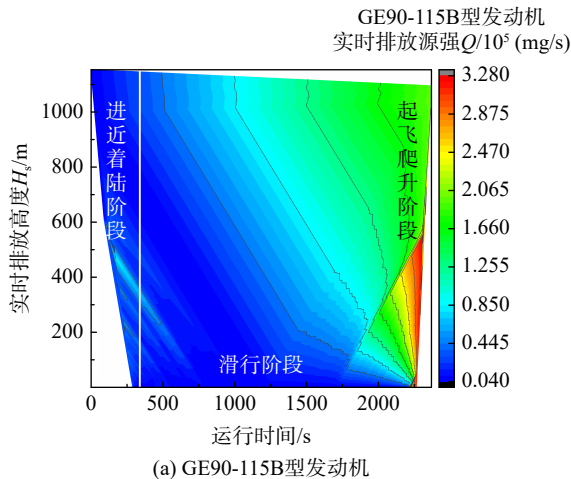


图 4 LTO 循环实时排放源强

Fig. 4 Real-time emission source intensity of LTO cycle

间、位置的分布如图 5(b)所示。分布效果图选择地理影响范围最大的 $T=214$ s 时观测结果作为代表,如图 6 所示。

进近阶段,烟团排放高度持续降低,到达观测面的对应扩散时间也随之减少,烟团在大气湍流与自然风的共同作用下扩散。如图 5(a)所示:①不同观测时刻下同一架次污染物浓度由于扩散时间和高度变化等因素影响导致数值差异较大,故而在完整观测时段内峰值浓度呈现出先增大后减小的趋势;②观测时段 135~297 s 内,由于烟团受到排放源强、扩散时间、高度变化等因素影响,下风向不同位置处出现峰值浓度严重超标的情况。

图 5(b)中观测时刻终点为 297 s,该时刻下,观测面高度处对应的污染物扩散浓度峰值低于环境浓度标准限值。结合图 4 及图 5(b)可知:进近阶段超标的浓度峰值点主要出现在下风向 0~647 m 范围内,对应的观测时刻主要为 135~297 s,浓度范围主要为 26.05~427.5 mg/m^3 ,其烟团排放高度主要集中在 446~593 m 范围内。上述地理

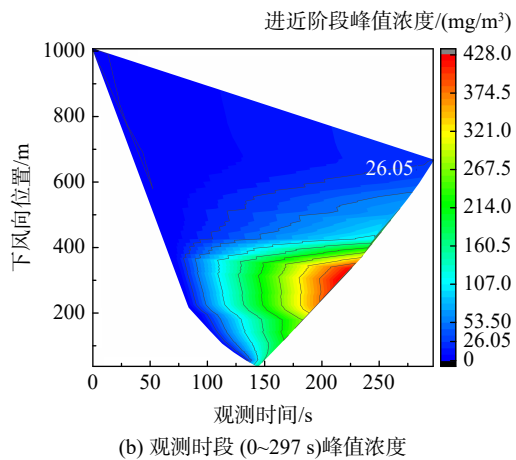
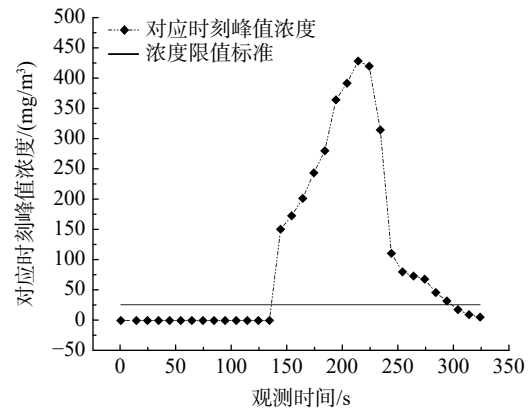
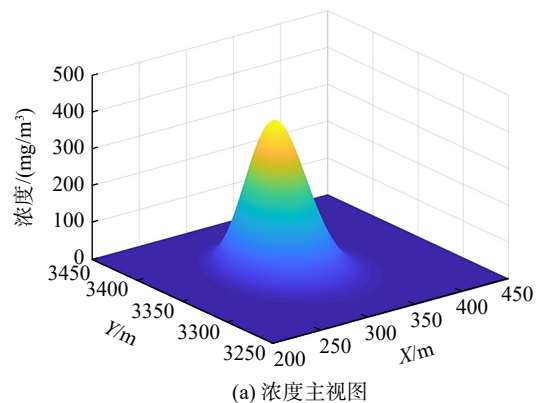
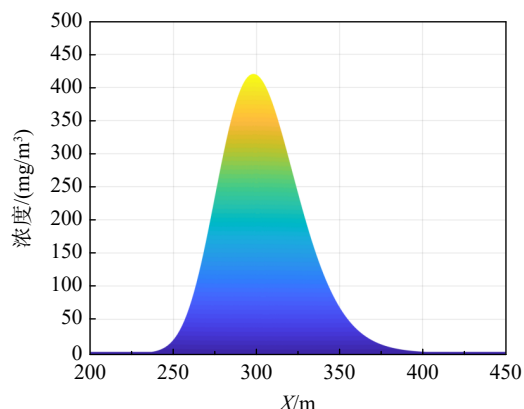


图 5 进近阶段不同观测时刻、观测时段内污染物扩散峰值浓度分布图

Fig. 5 Distribution of pollutant diffusion peak concentration at different observation times and observation periods during approach phase

影响范围属于近机场跑道区域,空勤人员、地面服务人员、机场相关保障人员长时间高频率在此范围内活动,航空公司机务维修中心、货运中心等航空相关企业单位常驻于此。此区域除进出港旅客之外,人员密集度低,但活动频繁且区域较为集中,排放污染物扩散对相关人员的健康影响仍不可忽视。





(b) 浓度侧视图

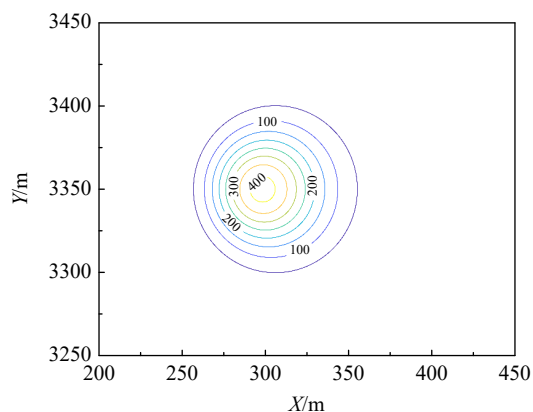
(c) 浓度等值线图 (单位: mg/m^3)图 6 $T=214$ s 时扩散叠加浓度分布Fig. 6 Diffusion stack concentration distribution at $T=214$ s

图 6 是图 5(a) 中峰值浓度最大时刻下排放污染物扩散浓度地理位置分布图, 对应观测时刻为 214 s, 浓度峰值点出现在下风向 295 m 处。此时刻虽然烟团排放源强较小, 但距离观测面高度较近, 污染物未及时扩散, 使得观测面监测到污染物浓度峰值达到最大的 $427.5 \text{ mg}/\text{m}^3$, 其地理影响范围主要集中在下风向 200~350 m 内。

2.4.2 滑行阶段

滑行阶段, 飞机运行时间均在 1 600 s 以上, 选择观测时间 T 为 100、200、400、800、1 600 s (观测时间起点为飞机滑行阶段初始时刻, 观测时间终点为飞机起飞加速阶段初始时刻), 观察随着扩散时间增加, 扩散效果变化趋势, 不同观测时刻峰值浓度分布如图 7 所示 (图中相应点数值表示对应观测时刻下的污染物扩散峰值浓度及观测面浓度峰值地理坐标)。

滑行阶段烟团排放高度不发生变化, 扩散受到最大影响因素是风速、风向。如图 7 可见: 滑行阶段污染物扩散影响地理范围较为分散, 随着

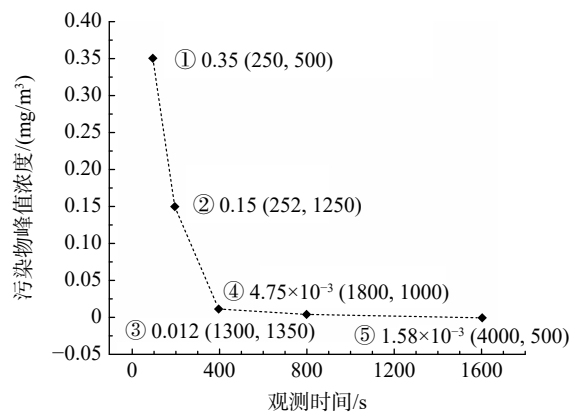


图 7 滑行阶段污染物扩散峰值浓度分布图

Fig. 7 Distribution of pollutant diffusion peak concentration during taxiing stage

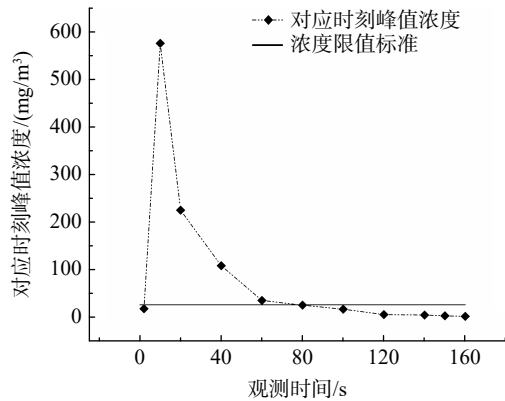
扩散时间增加, 下风向浓度峰值出现的位置也越来越远, 扩散浓度也随之逐渐降低, 且整个阶段中污染物扩散浓度远低于标准限值, 对环境污染影响较小, 可不作深入讨论。

2.4.3 起飞爬升阶段

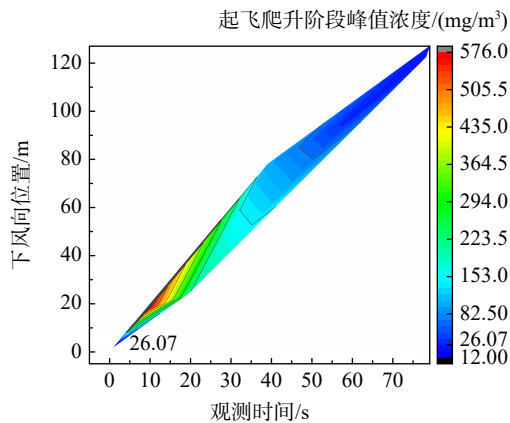
起飞爬升阶段, 飞机运行时间短, 爬升高度变化较大, 选择观测时间 T 为 1、10、20、..., 160 s, 观测时间 20 s 之后每间隔 20 s 观测一次 (观测时间起点为起飞阶段初始时刻, 观测时间终点为飞机进入 LTO 循环高度), 观察随着扩散时间增加, 观测面高度处排放烟团扩散效果变化趋势。不同观测时刻峰值浓度分布如图 8(a) 所示, 观测时段 (1~79 s) 峰值浓度随时间、位置的分布如图 8(b) 所示。分布效果图选择地理影响范围最大的 $T=10$ s 时观测结果作为代表, 如图 9 所示。

起飞爬升阶段, 烟团排放高度较低, 受到大气湍流和自然风共同作用影响较小。图 8 中: ①排放污染物经过一定时间的扩散之后, 近地面的峰值浓度变化趋势与进近阶段相似, 不同观测时刻下同一架次污染物浓度由于扩散时间和源强高度变化等因素影响导致数值差异较大, 同样在完整观测时段内观测面高度处的峰值浓度呈现出先增大后减小的趋势; ②飞机起飞离地, 发动机全功率输出, 推力达到最大值, 相应烟团排放源强较大, 排放高度较低, 且扩散还不充分, 故阶段前期 (1~79 s) 观测面高度处的污染物扩散浓度短时间内严重超标。

图 8(b) 中观测时刻终点为 79 s, 该时刻下, 对应的污染物扩散浓度峰值低于环境浓度标准限值。



(a) 不同观测时刻峰值浓度



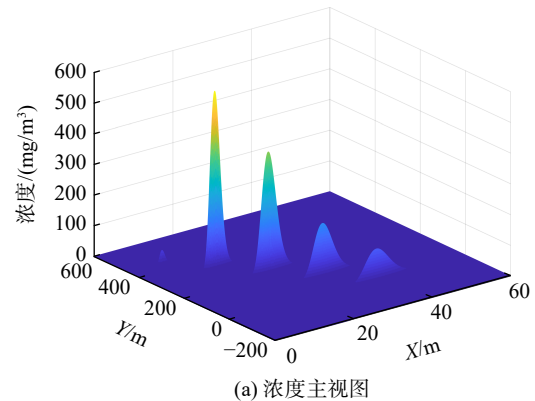
(b) 观测时段 (1~79 s) 峰值浓度

图 8 起飞爬升阶段不同观测时刻、观测时段内污染物扩散峰值浓度分布图

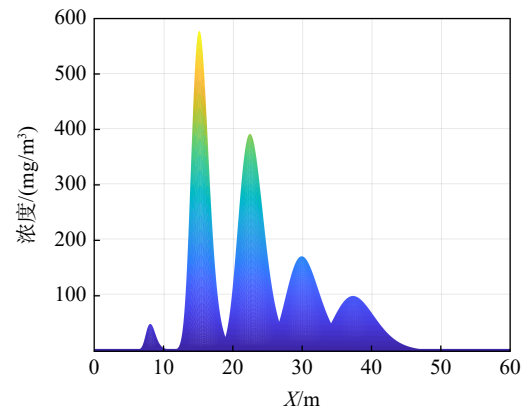
Fig. 8 Distribution of pollutant diffusion peak concentration at different observation times and observation periods during take-off and climb

结合图 4 及图 8(b) 可知: 起飞爬升阶段超标的浓度峰值点主要出现在下风向 0~127 m 范围内, 对应的观测时刻主要为 1~79 s, 浓度范围主要为 26~576 mg/m³, 其污染物排放高度主要集中在 0~96 m 范围内。上述地理影响范围属于跑道严管区域, 仅有空勤人员、机场相关保障人员特定时间内在此范围活动, 但扩散浓度严重超标的排放污染物对其健康存在严重威胁。

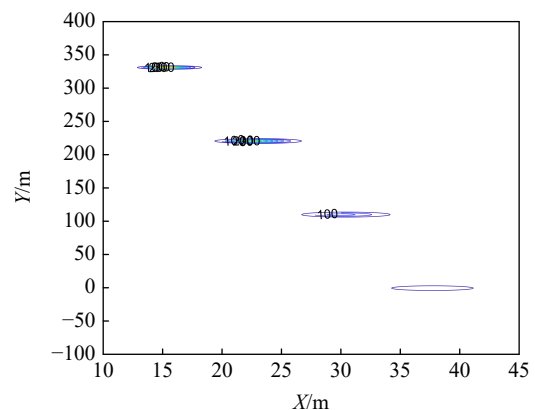
图 9 是图 8(a) 中峰值浓度最大时刻下排放污染物扩散浓度地理位置分布图, 对应观测时刻为 10 s, 浓度峰值点出现在下风向 15 m 处。该时刻高功率、大推力下的排放烟团对应排放高度较低, 受大气湍流和自然风的共同作用小, 导致扩散峰值浓度达到 576 mg/m³。起飞爬升阶段不同于进近及滑行阶段, 排放污染物扩散之后在观测面监测到的影响范围较小, 主要集中在下风向 50 m 范围内。



(a) 浓度主视图



(b) 浓度侧视图

(c) 浓度等值线图 (单位: mg/m³)图 9 $T=10$ s 时扩散叠加浓度分布Fig. 9 Diffusion stacking concentration distribution at $T=10$ s

本节中, 依据实际数据结合 MATLAB 软件进行模拟, 呈现出不同飞行阶段的排放污染物扩散趋势, 指明不同飞行阶段中在观测面高度处污染物扩散浓度超标时段及下风向影响区域, 进而讨论污染物影响范围, 为后续考虑排放叠加影响、合理确定污染物浓度监测点提供依据。

3 污染物排放叠加分析

根据天津滨海国际机场年度整体吞吐量, 计算出单日进近阶段架次平均间隔时间 $\Delta T=180$ s, 起飞爬升阶段架次平均间隔时间 $\Delta T=150$ s。为了

研究可能出现的叠加影响最大的污染物扩散情况, 选择目前国内最为繁忙的首都国际机场单日离到港峰值数据进行对比, 其进近阶段架次最小间隔时间 $\Delta T=103$ s, 起飞爬升阶段架次最小间隔时间 $\Delta T=60$ s(滑行阶段排放污染物扩散浓度远低于浓度限值标准, 本节不进行叠加讨论)。初步选择文中第 2.1 节中介绍的有典型代表的前后经停同一跑道的 B777-300ER 与 B777-200 两架飞机飞行数据, 依照上述不同飞行阶段的不同间隔时间进行架次叠加后的污染物排放扩散分析, 进而讨论多架次排放在观测面高度处扩散叠加造成的影响。

3.1 进近阶段架次叠加

进近阶段, 选择平均间隔时间 $\Delta T=180$ s, 观测时间 $T=0$ s 时开始, 每 10 s 观测一次, 直至 434 s 结束(观测时段起点为前一架次进近阶段初始时刻, 74 s 时前一架次飞机进入 LTO 循环高度, 经过 180 s, 后一架次在 254 s 时进入 LTO 循环高度, 终点为后一架次接地时刻); 选择最小间隔时间 $\Delta T=103$ s, 观测时段: $T=0$ s 时开始, 每 10 s 观测一次, 直至 357 s 结束(观测时段起点为前一架次进近阶段初始时刻, 74 s 时前一架次飞机进入 LTO 循环高度, 经过 103 s, 后一架次在 177 s 时进入 LTO 循环高度, 终点为后一架次接地时刻)。观察随着扩散时间增加, 多架次叠加扩散效果变化趋势。不同间隔时间下不同观测时刻污染物叠加扩散峰值浓度分布如图 10 所示。

如图 10 所示: ①两架次排放污染物经过一定时间的扩散之后, 不同观测时刻下近地面的峰值浓度变化趋势相似; ②选择平均间隔时间进行排放叠加之后, 叠加段峰值浓度低于环境浓度标准限值, 而选择最小间隔时间进行排放叠加之后, 叠加段峰值浓度远大于环境浓度标准限值, 且叠加段峰值浓度较对应时刻下单架次排放污染物扩散浓度有一定的升高; ③与单架次排放相比, 不

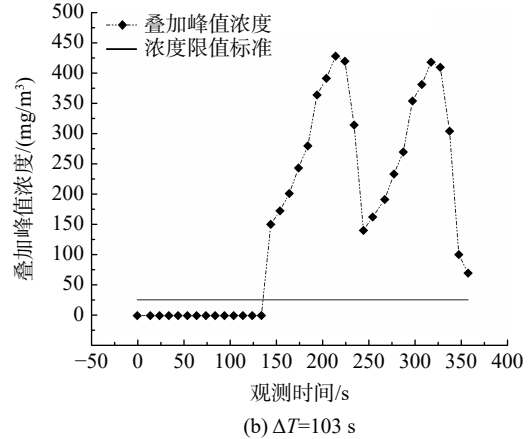
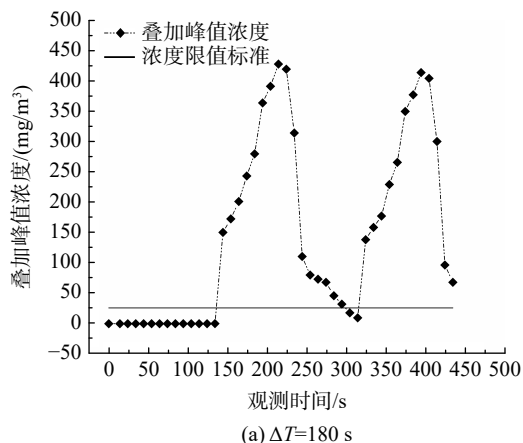


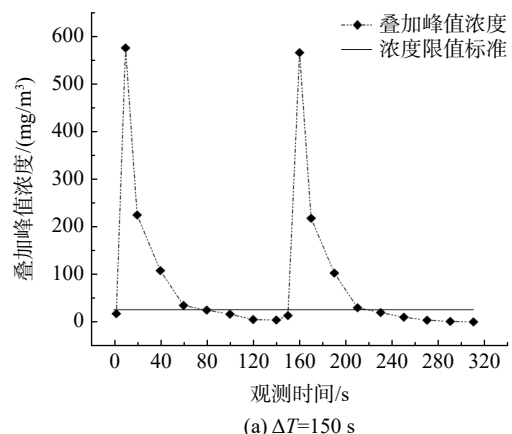
图 10 进近阶段不同间隔时间下污染物叠加扩散峰值浓度分布图

Fig. 10 Distribution of peak concentration of pollutants superimposed diffusion at different intervals during approach phase

同时间间隔叠加之后的浓度虽较单架次排放有所提高, 但由于扩散快、叠加时间短, 叠加时段的峰值浓度数值远低于单架次排放的最大峰值, 说明进近阶段架次叠加造成的影响远低于单架次最大峰值浓度下的影响。

3.2 起飞爬升阶段架次叠加

起飞爬升阶段, 选择平均间隔时间 $\Delta T=150$ s, 观测时间 T 为 1, 10, 20, ..., 310 s, 观测时间 20 s 之后每间隔 20 s 观测一次(观测时段起点为前一架次起飞阶段初始时刻, 后一架次在 150 s 之后起飞, 终点为后一架次离开 LTO 循环高度); 选择最小间隔时间 $\Delta T=60$ s, 观测时间 T 为 1, 10, 20, ..., 220 s, 观测时间 20 s 之后每间隔 20 s 观测一次(观测时段起点为前一架次起飞阶段初始时刻, 后一架次在 60 s 之后起飞, 终点为后一架次离开 LTO 循环高度)。观察随着扩散时间增加, 多架次叠加扩散效果变化趋势, 不同间隔时间下不同观测时刻峰值浓度分布如图 11 所示。



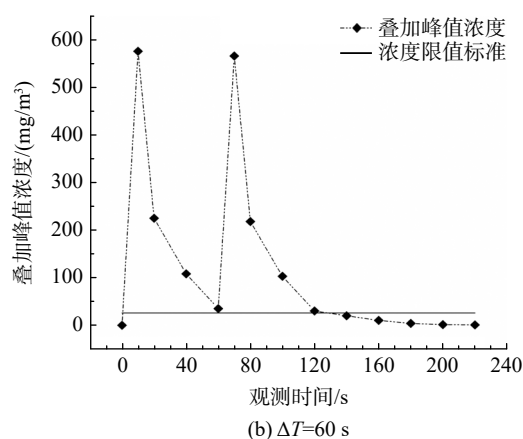


图 11 起飞爬升阶段不同间隔时间下污染物叠加扩散峰值浓度分布图

Fig. 11 Distribution of peak concentration of pollutants superimposed diffusion at different intervals during take-off and climb phase

图 11 中: ①两架次排放污染物经过一定时间的扩散之后, 近地面的峰值浓度变化趋势相似; ②选择平均间隔时间进行架次叠加之后, 叠加段峰值浓度低于环境浓度标准限值, 而选择最小间隔时间进行架次叠加之后, 与进近阶段不同的是, 叠加段峰值浓度略大于环境浓度标准限值, 同样叠加段峰值浓度较对应时刻下单架次排放扩散浓度有一定的升高; ③不同时间间隔叠加之后的浓度峰值数值均远低于单架次排放的浓度最大峰值, 说明起飞爬升阶段架次叠加造成的影响同样远低于单架次最大峰值浓度下的影响。

本节通过对前后停落于同一跑道的两架次飞机排放污染物进行平均与最小时间间隔下的叠加扩散模拟, 发现多架次排放污染物在叠加时段内较单架次扩散浓度会有所升高, 但对环境造成的影响远低于单架次在排放峰值时的影响。此结果说明在考虑机场规模、气象条件、当日客流量、是否有重大事件等因素影响的实际情况中, 评估飞机排放对机场周边环境的影响、编制机场污染物排放清单时可仅考虑不同时段下单架次排放的影响, 不必考虑架次叠加所带来的影响, 从而可

以简化污染物排放扩散计算, 为污染物监测点布设提供更为客观的指导。

通过计算模拟及图 10、图 11 不同阶段不同间隔时间下污染物叠加扩散峰值浓度分布图可知, 不同型号发动机排放污染物扩散浓度分布将存在地理影响范围、影响时长、峰值浓度出现位置和数值大小等的差异, 但污染物扩散浓度变化趋势相同。据此, 可以推测判定本文提出的方法、模型所得的分析结论对于其他型号发动机同样适用。

4 污染物监测点设计方案

为检验污染物扩散模拟的结果, 也为进一步探究航空排放污染物扩散对地面人群的影响, 以天津滨海国际机场为例, 结合依据实际数据经扩散模拟得到的结果与机场及其周边环境的特点设计污染物浓度监测方案, 以期为日后的实地监测及验证工作提供有效的理论依据。

通过制定地方大气污染物排放标准的技术方法(GB/T13201-91)中计算公式法^[26], 结合机场实际布局及附近环境状况, 得到机场附近的排放源有害气体扩散稀释等效半径为 600 m, 即为卫生防护距离。此范围内包含机场集团公司为不同航空公司、机场不同部门等特殊组织设立工作活动区域, 航空排放对其下属的维修机库、车辆停放区域等相关常驻单位中人员健康存在严重的威胁。结合前文计算得出的飞机排放对机场及其周边环境污染物浓度超标的主要影响范围(0~647 m), 考虑到机场其他污染源(潜在污染源包括: 辅助动力装置、地面保障设备、地面交通工具和其他固定源等)、机场及其周边设施对污染物扩散的影响等, 对上述影响区域进行适当调整, 加入其他排放源影响系数, 可将重点考查范围扩大至机场跑道下风向 0~780 m 范围。

综合一般性测量选址计划^[8]与污染物扩散考虑范围, 布设依据与监测点设置方案见表 5 及图 12 所示。

表 5 监测点布设依据

Table 5 Basis for layout of monitoring points

范围	监测点	布设依据
机场跑道下风向 0~127 m	区域 I 号	受飞机起飞爬升阶段排放污染物影响最为严重区域, 污染物扩散浓度最高可达 576 mg/m ³ , 受其他排放影响较小, 此处监测点可在跑道下风向提供飞机起飞爬升阶段最佳的污染物扩散监测数据

续表		
范围	监测点	布设依据
机场跑道下 风向 127~647 m	区域Ⅱ号	跑道下风向 127~289 m(跑道下风向 289 m 处为机场边界)范围,无其他主要排放源,空勤人员、地面服务人员、机场相关保障人员长时间高频率在此范围内活动,污染物扩散浓度范围为 107~413 mg/m ³ ,可用于监测无阻挡物影响下的排放污染物自由扩散浓度,提供良好的检验数据。此区域内有机场道路,在监测飞机排放扩散情况时注意避开辅助动力设备、地面保障设备和地面交通工具等的影响
	区域Ⅲ号	跑道下风向 289~647 m 范围,仍处于飞机排放扩散主要影响区域,污染物扩散浓度范围为 26.05~427.5 mg/m ³ 。此区域内含中国民航大学校园、航空公司机务维修中心、货运中心、汽修厂及航空相关企业单位等,人员活动密集且范围较为集中,航空排放污染对此区域常驻人员健康存在严重威胁,其数据能够确定航空排放污染等级。此区域监测注意选择合理时段、地点,避开社会车辆、锅炉等污染源影响
机场跑道下 风向 647~780 m	区域Ⅴ号	跑道下风向 647~780 m 范围,污染物扩散浓度低于环境标准限值,在 0.82~25.95 mg/m ³ 范围。此区域靠近西北侧有中国邮政等极少数单位,东南侧建筑物增多,并有学校、航企等相关常驻单位,能够提供建筑物影响下的污染物扩散对比数据。此区域监测同样需要注意时段、地点选择,避开其他污染源影响
机场跑道上 风向航站楼区域	1、2 号	分别为:上风向距离跑道最近的 544 m 处廊桥位置、700 m 处航站楼位置,若风向发生改变,则处于污染物扩散监测范围之内,扩散浓度在浓度限值标准附近。此区域离到港旅客、接机人员、机组工作人员活动频繁,也可提供无障碍物影响下的污染物自由扩散数据。此处监测会受到机场其他潜在污染源影响,注意监测时段的选择



图 12 监测点设置

Fig. 12 Monitoring point settings

5 结 论

论文依据机载 QAR 数据,结合飞机实际运行状况及机场周围环境因素对 Gaussian puff 模型进行修正,模拟出单架次 LTO 循环中不同飞行阶段

排放污染物扩散浓度分布情况,并详细讨论了污染物扩散影响区域及多架次叠加影响,提出相应的监测点布设方案。能够为评估飞机排放对机场周边环境影响提供合理可靠的理论依据,具体结

论如下:

1) LTO 循环中: 进近阶段, 飞机飞行 214 s 后, 下风向 302 m 处污染物扩散峰值浓度达到 427.5 mg/m^3 , 严重超出浓度限值标准; 滑行阶段, 污染物扩散峰值浓度持续降低, 1 600 s 之后, 下风向 4 000 m 处污染物扩散峰值浓度仅为 $1.58 \times 10^{-3} \text{ mg/m}^3$, 远低于环境标准限值; 起飞爬升阶段, 发动机运行参数变化幅值大, 起飞 10 s 左右, 下风向 18 m 处污染物扩散峰值浓度达到 576 mg/m^3 , 浓度严重超标。

2) 结合实际飞行数据进行排放污染物扩散模拟发现, 飞机排放污染对机场周边环境地理污染物浓度超标的影响区域主要集中在下风向 0~647 m 范围内, 进近阶段污染物影响范围较大, 起飞爬升阶段污染物扩散影响范围较为集中, 滑行阶段几乎不构成污染。

3) 多架次排放污染物叠加对机场及其周边区域影响较小, 远低于单架次最大峰值浓度下的影响, 此结果可为飞机排放对机场周围环境评估、机场污染物排放清单的制定提供指导。

4) 通过对天津滨海国际机场周边环境排放模拟的结果可知: 跑道下风向 0~289 m 范围内, 污染物扩散浓度严重超标, 此区域仅有机场相关工作人员活动, 为减轻对人员健康影响, 依据污染物扩散速度快的特点, 建议不要在飞机起飞、进近时段活动, 并及时佩戴口罩、做好个人防护; 跑道下风向 289~647 m 范围内, 污染物扩散浓度仍处于超标范围, 此区域内有学校、航企等常驻单位, 人员活动密集, 对人员健康存在一定威胁, 建议做好长期保护; 跑道下风向 647~780 m 范围内, 此区域污染物扩散浓度已降至浓度限值标准之下, 可正常活动。建议相关部门及时为浓度超标范围内人员设立相关保护措施。

以上排放模拟结果为日后的实地监测及验证工作提供较为全面的理论依据, 并可为民用机场环境质量评估提供基础。

参考文献:

- [1] 张弛, 林宇震, 徐华胜, 等. 民用航空发动机低排放燃烧室技术发展现状及水平[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 332-350.
ZHANG Chi, LIN Yuzhen, XU Huasheng, et al. Development status and level of low emissions combustor technologies for civil aero-engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 332-350. (in Chinese)
- [2] CHOI W, HU Shishan, HE Meilu, et al. Neighborhood-scale air quality impacts of emissions from motor vehicles and aircraft[J]. Atmospheric Environment, 2013, 80: 310-321.
- [3] FAJERSZTAJN L, GUIMARÃES M T, DUIM E, et al. Health effects of pollution on the residential population near a Brazilian Airport: a perspective based on literature review[J]. Journal of Transport & Health, 2019, 14: 100565.
- [4] VIANA M, QUEROL X, ALASTUEY A, et al. Characterising exposure to PM aerosols for an epidemiological study[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(7): 1552-1568.
- [5] KAN Haidong, LONDON S J, CHEN Guohai, et al. Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China[J]. Environment International, 2007, 33(3): 376-384.
- [6] 中国民用航空局. 2020年民航机场生产统计公报[R]. 北京: 中国民用航空局发展计划司, 2021.
- [7] 邓海超. 我国支线机场高质量发展问题探析[J]. 民航管理, 2021(3): 44-47.
DENG Haichao. Analysis on the high-quality development of regional airports in China[J]. Civil Aviation Management, 2021(3): 44-47. (in Chinese)
- [8] International Civil Aviation Organization. Airport air quality manual [R]. Montreal, US: International Civil Aviation Organization, 2011.
- [9] VAN PHAM V, TANG Jiangjun, ALAM S, et al. Aviation emission inventory development and analysis[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(12): 1738-1753.
- [10] OWEN B, LEE D S, LIM L. Flying into the future: aviation emissions scenarios to 2050[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(7): 2255-2260.
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 曹惠玲, 汤鑫豪, 苗佳禾. 基于 P_3-T_3 方法的飞机 LTO 阶段氮氧化物排放量计算与分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4235-4241.
CAO Huiling, TANG Xinhao, MIAO Jiahe. Calculation and analysis of nitrogen oxide emission from airplane LTO stage based on P_3-T_3 method[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(12): 4235-4241. (in Chinese)
- [13] 汤鑫豪. 基于 Gaussian puff 模型的航空器排放扩散特性研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2020: 35-48.
TANG Xinhao. Research on aircraft emission and diffusion characteristics based on Gaussian puff model [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020: 35-48. (in Chinese)
- [14] 曹惠玲, 晏嘉伟, 李玉铭. 结合 QAR 数据的全航段排放估算及其对飞行成本的影响研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4439-4448.
CAO Huiling, YAN Jiawei, LI Yuming. Research on emission estimation of full flight segments combined with QAR Data and its impact on flight cost[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(11): 4439-4448. (in Chinese)
- [15] DAS S K, DURBIN P A. Prediction of atmospheric dispersion of pollutants in an airport environment[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(6): 1328-1341.
- [16] BARRETT S R H, BRITTER R E, WAITZ I A. Impact of aircraft plume dynamics on airport local air quality[J]. Atmospheric Environment, 2013, 74: 247-258.
- [17] HSU H H, ADAMKIEWICZ G, ANDRES HOUSEMAN E, et al. The relationship between aviation activities and ultrafine particulate matter concentrations near a mid-sized airport[J]. Atmospheric

- Environment, 2012, 50: 328-337.
- [18] 韩博, 孔魏凯, 谭宏志, 等. 飞机LTO排放影响评估耦合模型研究与应用[J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2409-2417.
HAN Bo, KONG Weikai, TAN Hongzhi, et al. A coupling model and its application on impact assessment of the aircraft emissions during LTO cycle[J]. China Environmental Science, 2020, 40(6): 2409-2417. (in Chinese)
- [19] 李玉铭. 飞机全航段PM排放特性与扩散模型优化研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2021: 23-24.
LI Yuming. Study on PM emission characteristics and diffusion model optimization of aircraft in the whole flight segment[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021: 23-24. (in Chinese)
- [20] 曹惠玲, 李玉铭, 晏嘉伟, 等. 基于修正Gaussian Puff模型的飞机LTO循环PM_{2.5}排放及扩散特性研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 352-361.
CAO Huiling, LI Yuming, YAN Jiawei, et al. Research on PM_{2.5} emission and diffusion characteristics of aircraft LTO cycle based on modified Gaussian Puff model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(3): 352-361. (in Chinese)
- [21] SEIGNEUR C, PAI P, TOMBACH I, et al. Modeling of potential power plant plume impacts on Dallas-Fort Worth visibility[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, 50(5): 835-848.
- [22] PORTÉ-AGEL F, PAHLOW M, MENEVEAU C, et al. Atmospheric stability effect on subgrid-scale physics for large-eddy simulation[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(9/10): 1085-1102.
- [23] International Civil Aviation Organization. Engine exhaust emissions data bank[R]. International Civil Aviation Organization Doc 9646-AN/943, 2013.
- [24] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 3095-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [25] WAYSON R L, FLEMING G G, IOVINELLI R. Methodology to estimate particulate matter emissions from certified commercial aircraft engines[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2009, 59(1): 91-100.
- [26] 邹味莲, 于苏俊. 环境影响评价中大气环境防护距离和卫生防护距离的探讨[J]. 青海环境, 2013, 23(1): 23-25, 43.
ZOU Weilian, YU Sujun. Discussion on atmospheric environmental protection distance and health protection distance in environmental impact assessment[J]. Journal of Qinghai Environment, 2013, 23(1): 23-25, 43. (in Chinese)

(编辑: 秦理曼)