

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于δ¹³C观测的大气 CO₂ 来源解析 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N₂H₄ 下 SBR 中硝化微生物特性 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO₂ 排放的综合影响 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析

韩博^{1,2}, 黄佳敏¹, 魏志强^{1*}

(1. 中国民航大学空中交通管理学院天津市空管运行规划与安全重点实验室, 天津 300300; 2. 南开大学环境科学与工程学院国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071)

摘要: 民航飞机在起飞过程中发动机推力高、耗油量大, 并且飞行高度低, 由其排放的污染物对局地空气质量和人体健康存在较大影响. 选择 B737-800 作为典型机型, 通过对飞机性能参数的模拟, 精确计算了其在全推力和减推力等多种方式下起飞离场爬升至 1 000 m 高度过程中 NO_x、CO、HC 和 SO₂ 的排放量, 并与 ICAO 基准模型估算结果进行对比. 结果表明, NO_x 是排放量最大的污染物. 其中, 全推力起飞过程 4 种污染物的排放量分别为 4.849、0.062、0.031 和 0.229 kg. 减推力起飞方式下, 选择更高的灵活温度后, NO_x 和 CO 排放量分别降低和升高, HC 和 SO₂ 排放量变化不大. 经过对比发现, ICAO 的基准排放模型, 对 4 种污染物的估算结果存在较大偏差. 与机动车相比, 单次全推力起飞过程与一辆小客车行驶 9 508 km 的 NO_x 排放量相当. 精确计算方法为准确估算机场区域飞机污染排放清单提供基础.

关键词: 机场; 起飞; 大气污染物; 排放特征; 波音 737

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4524-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201606091

Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff

HAN Bo^{1,2}, HUANG Jia-min¹, WEI Zhi-qiang^{1*}

(1. Tianjin Key Laboratory for Air Traffic Operation Planning and Safety Technology, College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: During takeoff, high engine thrust and large fuel consumption are required to produce enough power for aircraft lift-off which has more impacts on human health and environment than the other activities. Boeing 737-800 was selected as a typical type in the study. Based on simulation of aircraft performance, air pollution emissions were accurately calculated for different takeoff processes. According to the results, NO_x was the most abundant emission during takeoff. Emissions of NO_x, CO, HC, and SO₂ during takeoff with normal method were 4.849, 0.062, 0.031, 0.229 kg respectively. The assumed temperature method could be used to reduce thrust by setting an assumed temperature which was greater than actual temperature. This method resulted in decreased NO_x emission and increased CO emission. And emissions of HC and SO₂ had no significant changes. Compared with these results, the emissions calculated by ICAO emission model led to relatively large errors. And the emission level of normal takeoff method was approximately equal to the emission level of small cars traveling 9 508 km. The modified model provides the basis for the accurate estimation of the air pollution emission inventory of airport.

Key words: airport; takeoff; air pollutants; emission characteristics; B737

机场是城市的重要组成部分. 机场区域主要以飞机的起飞、着落活动为主. 民航大型客机的发动机, 以航空煤油为燃料, 燃烧后会排放 NO_x、SO₂、CO、HC (unburned hydrocarbons, 未燃碳氢化合物)、颗粒物等大气污染物. 其中, NO_x、SO₂、HC 等是大气二次气溶胶粒子的重要前体物, 对区域的能见度下降和霾的形成都有重要影响. CO、NO_x 是生成 O₃ 和形成光化学污染的最主要的前体物^[1-5]. 相对于高空巡航阶段, 飞机在机场区域飞行高度低 (1 000 m 以下), 特别是起飞过程, 发动机处于最大推力状态, 且耗油量大, 可对人体健康和城市大气环境产生更重要的影响^[6-11].

但目前, 关于我国民航飞行活动的污染排放研

究很少^[12-18]. 其中, 仅有夏卿等^[12]、黄清凤等^[13]对我国机场区域飞机活动排放的大气污染物进行过研究, 并且在研究中多使用国际民航组织 (ICAO) 的基准排放模型. 该模型是基于固定的飞行参数及排放指数进行估算. 而实际运行中, 随着起飞高度的变化, 空气密度、温度也将改变, 进而导致飞行参数和排放指数的变化. 并且基准模型所使用的飞行时

收稿日期: 2016-06-14; 修订日期: 2016-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21407174); 天津市应用基础与前沿技术研究计划项目 (14JQCQNJC08100); 中央高校基本科研业务费专项 (3122016A012, ZXH2012C003, 3122016D025); 中国民航大学科研启动基金项目 (2012QD03X)

作者简介: 韩博 (1982 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为大气环境、民航环境管理, E-mail: hanbo@live.com

* 通讯联系人, E-mail: weizhiqia@sina.com

间是基于 70 年代机型起降时间统计而来,与当前使用的主流机型飞行时间差异大,导致估算结果存在较大偏差^[17-19].

当前,我国内地运行的飞机以客机为主. 截止 2014 年,客机的总架数为 2 198 架. 其中,波音 737-800 (B737-800) 是数量最高的机型,达 686 架,比例超过 30%^[20]. 在北上广深机场中 B737 系列机型的起降数量约在 40% 左右^[21]. 因此,本研究选择了 B737-800 机型作为典型机型,模拟其在多种不同起飞方式下的飞行参数,并对每一飞行时刻的排放指数进行修正,精确计算起飞离场(飞至 1 000 m 高度)过程的污染物排放量,并与 ICAO 基准排放模型的估算结果进行对比,以期制定民航机场污染物排放清单和民航节能减排提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 飞机发动机基准排放模型

ICAO 基准模型将飞机在机场区域的起降活动,分为起飞、爬升、进近着陆及滑行等 4 个飞行阶段,称 LTO 循环. 这个过程中大气污染物排放量,依据下式进行估算,即基准排放模型^[17].

$$E_j = \sum_{i=1}^4 nt_i FF_i EI_{ji} \quad (1)$$

式中, E_j 为 j 类污染物的排放量,kg; n 为发动机台数,台; t_i 为第 i 个飞行阶段的飞行时间,s; FF_i 为第 i 飞行阶段下的单发燃油流量,kg·s⁻¹; EI_{ji} 为污染物 j 在第 i 飞行阶段的排放指数,g·kg⁻¹.

根据 ICAO 规定,商业发动机厂商为了取得生产合格证,需在海平面国际标准大气(International Standard Atmosphere, ISA)的基准条件下,对发动机处于 100%、85%、30% 和 7% 额定推力时(对应起飞、爬升、进近着陆及滑行阶段),CO、HC、NO_x 等污染物的排放进行台架实验,测量计算各种基准排放数据,如排放指数 EI(emission index, 燃烧单位燃油的污染物排放量)、燃油流量 FF(fuel flow, 单位时间耗油量)等.

以此为基础,形成了 ICAO 的发动机排放数据库(Engine Emission Data Bank, EEDB)^[22]. 对于 B737-800 机型常见的选装发动机型号为 CFM56-7B26,在 EEDB 数据库中对应的基准排放数据如表 1. 目前大型涡扇飞机大多数使用 JET A-1 型号航空煤油,具有国际统一标准,含硫量相对稳定,因此 SO₂ 排放指数采用文献[23]中数据.

表 1 CFM56-7B26 发动机基准排放数据

Table 1 Standard emission parameters of CFM56-7B26

飞行阶段	单发燃油流量 /kg·s ⁻¹	运行时间 /min	基准排放指数/g·kg ⁻¹			
			NO _x	HC	CO	SO ₂
起飞	1.221	0.70	28.80	0.10	0.20	1.00
爬升	0.999	2.20	22.50	0.10	0.60	1.00
进近着陆	0.338	4.0	10.80	0.10	1.60	1.00
滑行	0.113	26.0	4.70	1.90	18.80	1.00

1.2 真实飞行参数模拟

飞机起飞过程是指从跑道头开始,起飞滑跑并爬升至离地面 1 000 m 的飞行过程. 真实条件下,起飞方式包括全推力正常起飞和减推力起飞. 正常起飞时,飞机发动机推力为最大推力状态. 而当飞机重量较低时,可以使用略小的推力起飞,即减推力起飞. 灵活温度方法是当前大型民航飞机最常见的减推力起飞方式,即在发动机设置中选择一个更高的温度参数,来减小发动机的推力^[24]. 通过减推力起飞,可以延长发动机部件寿命、提高运行可靠性,并降低发动机噪音,目前已广泛推广使用该起飞方式.

选择不同的起飞方式,飞行参数不同. 并且随着起飞爬升过程,高度升高,温度、气压发生变化,每一时刻的飞行参数也发生改变,最终影响污染排放量. 通过飞机制造商的飞机性能软件,可以准确

计算不同条件下的飞行参数. 因此,本研究使用波音公司 BCOP(Boeing Climbout Program) 软件,计算飞机的起飞离场参数,包括起飞各个时刻点上的地面距离、几何高度、气压高度、温度、马赫数、燃油流量、总推力等. 软件所选计算条件为飞机型号: B737-800; 发动机型号: CFM56-7B26; 外界温度: 20℃; 起飞方式: 全推力正常起飞和减推力起飞(灵活温度: 30、40、50、60℃).

1.3 排放指数修正方法

在排放的污染物中,SO₂ 只与耗油消耗量成正比,与其他参数无关,排放指数 EI 不需修正. 而对于 NO_x、CO 和 HC 等污染物的实际排放指数,需要根据燃油流量、飞行高度、空气密度等参数的改变而进行修正. 因此为精确计算排放量,则需要考虑不同时刻的飞行参数、外接大气环境条件的影响.

参考 ICAO 的 BM2(Boeing Method 2)模型^[25],首先需要将 BCOP 计算得到的飞机某时刻的实际燃油流量 W_f 换算成基准条件 (ISA、0m) 下的修正燃油流量 F_{F0} ,即:

$$F_{F0} = \frac{W_f}{\delta} \theta^{3.8} \exp(0.2 M^2) \quad (2)$$

式中, W_f 为 BCOP 软件计算实际燃油流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; δ 为外界温度与 ISA、海平面的压强 P_0 之比,无量纲; θ 为外界温度与 288 K 之比,无量纲; M 为飞行马赫数大小,无量纲.

由表 1 可知,不同飞行阶段(发动机不同推力),当燃油流量改变后,排放指数也发生改变.因此,对表 1 中的燃油流量与基准排放指数进行分段线性拟合.再将式(2)计算出的修正燃油流量 F_{F0} 代入计算,即可获得出各污染物在当前燃油流量下的基准排放指数 EI_0 .最后,使用式(3)用于 HC 和 CO、式(4)用于 NO_x ,将基准排放指数转换为考虑实际飞行参数和大气环境条件影响的修正后的实际排放指数,用于排放量估算.

$$EI_j = EI_{j0} \frac{\theta^{3.3}}{\delta^{1.02}} \quad (3)$$

$$EI_j = EI_{j0} \frac{\delta^{0.51}}{\theta^{1.65}} \exp \left[19.0 \left(0.0063 - \frac{0.622 \phi P_v}{P - \phi P_v} \right) \right] \quad (4)$$

式中, j 为污染物种类; EI_j 为污染物 j 的实际排放指数, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; EI_{j0} 为污染物 j 的基准排放指数, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; ϕ 为大气相对湿度,%; P_v 为饱和蒸气压, Pa.

1.4 排放量计算及软件实现

通过运行 BCOP 软件,得到每一时刻的飞机起飞离场飞行参数,然后将其作为污染物排放量计算软件的输入源.通过调用研究组开发的污染物排放量计算软件,可实现对每一时刻各种污染物的排放指数、排放量的实时计算,以及全部起飞离场阶段污染物排放总量的积分计算.

计算软件依据文中的计算模型,采用 Visual C 工具进行开发,实现对污染物排放量的计算,主要功能包括:BCOP 性能软件结算结果加载、ICAO 基准排放数据加载、排放指数修正、排放量计算及结果输出等模块.计算软件界面如图 1 所示.

2 结果与分析

2.1 起飞离场过程飞行参数模拟

全推力及多种减推力起飞方式下的全发(双



图 1 污染物排放量计算软件

Fig. 1 User interface of Aircraft emission calculation software

发)推力情况见图 2.全推力正常起飞条件下,发动机的推力最高.而在采取了减推力起飞过程中,选取的灵活温度越高,发动机推力越低.在大约 360 m 高度时,所有起飞方式下的发动机设置,将由起飞推力改为最大爬升推力(maximum climb thrust, MCL),推力值发生了一定改变.对于全推力起飞方式,在此高度推力会降低.而对于 40、50 和 60°C 等 3 种减推力起飞方式,此时改为 MCL 推力后,推力值相应增大.之后,所有起飞方式推力值保持一致.并且,随着气压高度的升高,由于空气密度的减小,发动机推力下降,因此所有起飞方式下的推力也均呈减小趋势.

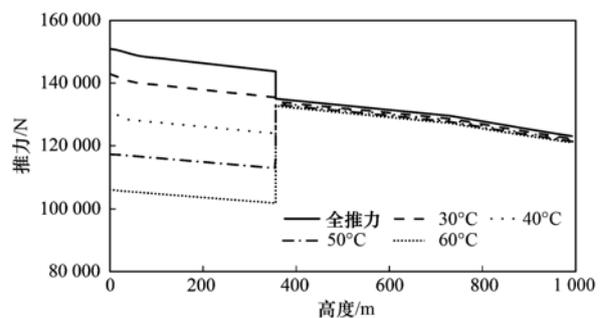


图 2 不同起飞方式下的发动机推力对比

Fig. 2 Engine thrust level of different takeoff processes

燃油流量是与飞机总耗油量和污染排放量相关的重要飞行参数.不同起飞方式下,飞机全发燃油流量随高度变化,见图 3.从中可知,在全推力方式下,发动机的燃油流量值最高,表明单位时间的耗油量最大.减推力起飞方式下,随着选取的灵活温度值越高,燃油流量值越低.并且随高度升高,燃油流量呈下降趋势.在 350m 高度左右趋于一致.这种趋势,与发动机推力的变化趋势基本一致(图 2).

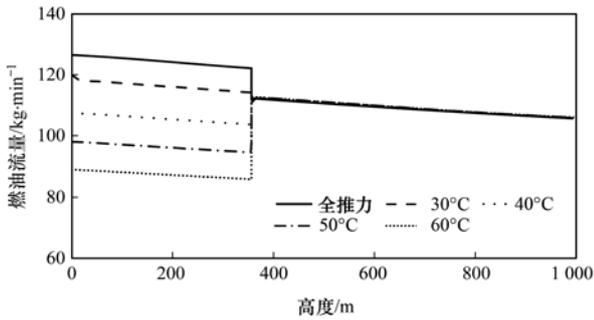


图3 不同起飞方式下全发燃油流量变化对比

Fig. 3 Engine fuel flow level of different takeoff processes

2.2 飞行剖面 and 耗油计算

选择不同的起飞方式,发动机推力不同,则起飞过程的飞行剖面不同,爬升到相同高度的总飞行时间不同.不同起飞方式下,爬升至1 000 m高度的飞行剖面计算如图4所示.飞机起飞的垂直剖面,随着选取灵活温度的升高而降低,爬升坡度角减小.其主要原因是由于灵活温度越高、起飞实际推力就越小,从而影响到飞机的爬升能力.因此在其他条件一定时,飞机采取更高的灵活温度减推力起飞时,飞机的起飞离场到相同高度的飞行时间延长.

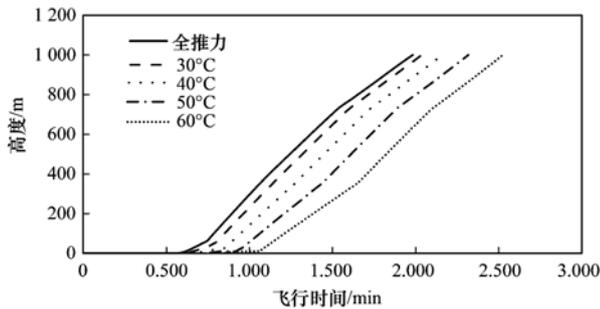


图4 不同起飞方式下的离场剖面

Fig. 4 Vertical flight profiles of different takeoff processes

不同方式下完成起飞(爬升至1 000 m高度)的总飞行时间和耗油量分析,见表2.根据计算结果,虽然在选取了更高的灵活温度后,发动机的推力和燃油流量值都降低,但由于飞行时间的延长,导致飞机耗油量的增加.采用全推力起飞时,飞至1 000 m高度所用时间最短,约为1.980 min;耗油量最低,约为229 kg.采取了减推力方式后,选取的灵活温度越高,起飞离场时间越长.如在选择60°C灵活温度起飞时的离场飞行时间较全推力起飞方式延长约27.6%,耗油量约增加12 kg.

ICAO 基准模型使用2.900 min作为起飞离场总飞行时间,超过全推力正常起飞时间46.5%.并且基准模型以固定的燃油流量计算油耗,没有考虑

此参数随高度的变化,估算的耗油量达366 kg.相比本研究通过飞机性能模型计算的各种起飞过程精确耗油量,偏差均超过50%.

表2 不同起飞方式的飞行时间及耗油量分析¹⁾

Table 2 Flight time and fuel consumption analysis for different takeoff processes

起飞方式	飞行时间 /min	延时率 /%	耗油量 /kg	油量相对偏差 /%
全推力	1.980	—	229	59.8
30°C	2.036	2.8	230	59.1
40°C	2.162	9.2	232	57.8
50°C	2.318	17.1	235	55.7
60°C	2.526	27.6	241	51.9
ICAO 模型	2.900	46.5	366	—

1) 延时率指不同方式的起飞飞行时间相对于全推力起飞时间的延长率;油量相对偏差指 ICAO 基准模型估算油量与当前起飞方式下精确计算耗油量的相对偏差;“—”指计算基准数据

2.3 排放指数修正结果

经过计算,不同起飞方式下,CO、NO_x和HC的排放指数EI随飞行参数及高度的变化情况,见图5.

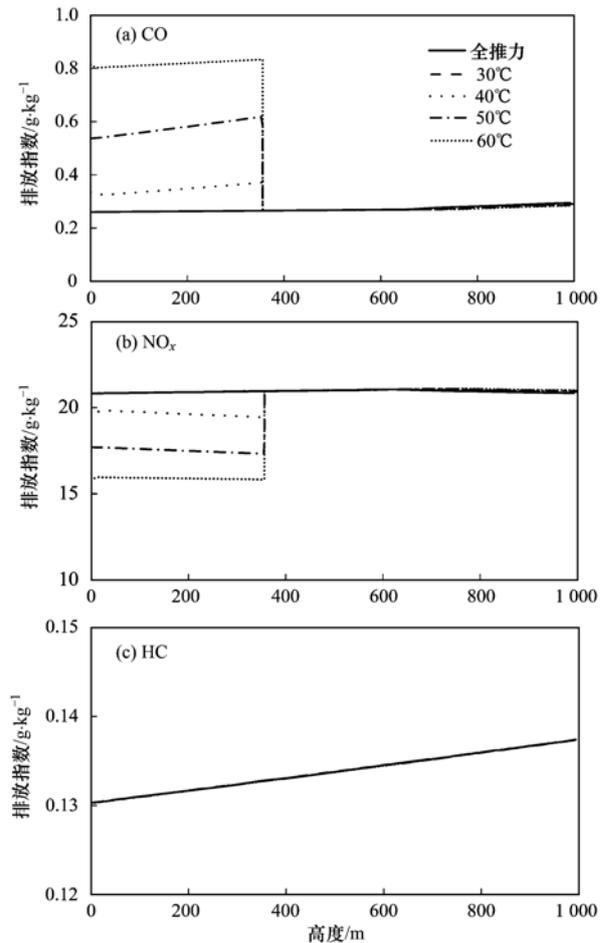


图5 CO、NO_x和HC排放指数修正结果

Fig. 5 Corrected emission indexes of CO, NO_x, HC

CO 的排放指数,在正常推力条件下,随高度增高略有升高.而在减推力方式下,采取的灵活温度越高,排放指数 EI 越高.推力减小,导致燃料燃烧不充分,CO 的排放指数增加.选择灵活温度 60℃ 起飞时,初始阶段 CO 的排放指数达最高,约为 0.80 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.在 360 m 高度附近,所有起飞方式下的推力均转换为 MCL 推力,排放指数趋于一致.

NO_x 排放指数,在全推力起飞方式下,随着高度变化较小.当在采用减推力起飞方式后,选取的灵活温度升高,排放指数 EI 值降低.初始阶段,全推力起飞 NO_x 的排放指数最低,约为 20.83 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.灵活温度 60℃ 起飞时,排放指数最低,约为 15.70 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

HC 排放指数 EI,在各种起飞方式下,差异较小.并且,伴随起飞高度的变化,排放指数的变化也较小,约为 0.13 ~ 0.14 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.4 污染物排放量

NO_x 、 SO_2 、CO 和 HC 等污染物在不同起飞方式下的排放量见图 6.结果显示,各种方式起飞离场过程, NO_x 均是排放量最大的污染物.全推力起飞离场过程,大约排放 4.849 kg.而在减推力方式下,选取更高的灵活温度, NO_x 的排放量在逐渐减少.选择灵活温度 40、50、60℃ 时的排放量分别是 4.661、4.426、4.310 kg.灵活温度 60℃ 时为起飞离场方式中排放最低,相比全推力起飞排放量减少约 11%.

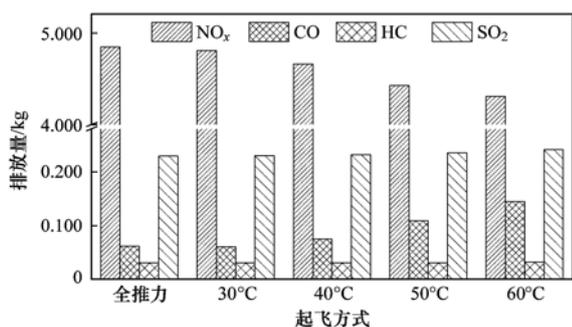


图 6 不同起飞方式下污染物排放量

Fig. 6 Air pollutant emissions of different takeoff processes

CO 在全推力起飞时起飞的排放量最低,约为 0.062 kg.此时发动机处于满负荷状态,燃油燃烧充分.在选取了更高的灵活温度减推力起飞时,CO 排放量升高.40、50、60℃ 时的排放量分别是全推力下的 1.20、1.76 和 2.34 倍.

SO_2 由于排放指数 EI 不随推力发生变化,因此排放量的变化主要受到耗油量的影响.全推力起飞下耗油量最少, SO_2 的排放量最低,约为 0.229 kg.

灵活温度 60℃ 时耗油量最大, SO_2 的排放量也最高,为 0.241 kg.变化幅度较小.

各起飞方式下 HC 排放量计算结果的差异也不明显.其中,除灵活温度 60℃ 方式下,排放量为 0.032 kg,全推力及其他灵活温度下,均为 0.031 kg.此情况与 HC 的排放指数在不同起飞方式下及飞行高度的变化下幅度小有关.

3 讨论

3.1 与 ICAO 基准模型估算结果对比

对于 B737-800 机型,ICAO 基准模型估算起飞过程大气污染物的排放结果,与本研究使用修正模型的精确排放量计算结果的相对偏差见表 3.对比可发现,如使用 ICAO 基准模型进行估算,污染物排放量存在较大的偏差.

表 3 ICAO 基准模型估算结果与修正模型估算精确结果的相对偏差/%

起飞方式	Table 3 Relative deviation of results calculated by ICAO standard model and modified model/%			
	相对偏差			
	NO_x	CO	HC	SO_2
全推力	31.5	15.7	-28.6	-60.0
30℃	30.9	14.3	-28.6	-59.3
40℃	28.7	30.3	-28.6	-57.9
50℃	24.9	52.0	-28.6	-55.9
60℃	22.9	63.9	-24.6	-52.0

其中,ICAO 估算 NO_x 排放量为 3.322 kg.此结果将各方式下起飞过程的 NO_x 排放量,低估约 31.5% ~ 22.9%.ICAO 模型对 CO 的估算结果为 0.052 kg,将 CO 排放量低估约为 15.7% ~ 63.9%.使用 ICAO 模型估算 SO_2 的排放量为 0.366 kg,此数据将各起飞方式下 SO_2 排放量高估 60.0% ~ 52.0%.各起飞方式下 HC 被高估约 28.6% ~ 24.6%.

3.2 与机动车排放情况对比

为了考察 B737-800 单次起飞过程(由地面滑跑爬升至 1 000 m),对环境空气的影响,选取起飞过程排放量最大的 NO_x 与机动车的排放进行对比.根据现有研究数据^[26],排量 2.0 L 以下的汽油小客车,以平均行驶速度 40 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 条件,一辆车 NO_x 综合排放因子为 0.51 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$.并以珠三角地区调查结果,此类型小客车日均行驶里程约 68 km,估算小客车 NO_x 日排放量约为 34.5 g.依据此数据,机场区域的 B737-800 飞机一次全推力正常起飞过程, NO_x 排放量约等于一辆小客车行驶 9 508 km,或相

当于 140 辆小客车 1 d 的排放量。

根据统计^[21]2016 年 4 月北京首都、广州白云两机场, B737 系列机型单日起飞数量分别为 311 和 203 架次。在起飞过程中, 排放的 NO_x 相当于 4.37 万辆和 2.85 万辆小客车的单日排放量。

4 结论

(1) 模拟计算了 B737-800 所有起飞方式, 在起飞高度、飞行参数变化后的精确燃油流量 FF、排放指数 EI 及飞行时间, 并获得耗油量, 作为污染排放计算的基础数据。其中, 全推力起飞时间最短, 耗油量最低。选择更高的灵活温度减推力起飞后, 时间延长, 耗油量增加; 同时排放指数 CO 升高、 NO_x 降低, HC 略有升高。而使用 ICAO 基准模型估算耗油量偏高 50% 以上。

(2) NO_x 是起飞过程排放量最大的污染物。全推力起飞过程, NO_x 、CO、HC 和 SO_2 的排放量分别为 4.849、0.062、0.031 和 0.229 kg。减推力起飞方式下, 选择的灵活温度升高, NO_x 、CO 排放量分别降低、升高。HC 和 SO_2 变化不大。60℃ 减推力时 4 种污染物排放量分别为 4.310、0.145、0.032 和 0.241 kg。

(3) 相比本文的精确计算, ICAO 基准模型中飞行时间较长, 估算耗油量过高, 并且没有对高度变化后排放指数进行修正。因此, 基准模型的污染物排放量估算结果中, NO_x 和 CO 排放量偏低, HC 和 SO_2 排放量偏高, 均存在较大偏差。

(4) 与机动车相比, B737-800 机型单次全推力起飞过程的 NO_x 排放量, 相当于一辆排量 2.0 L 以下小客车行驶 9508 km, 或约等于 140 辆小客车 1 d 的排放量, 显示出对空气质量存在一定影响。

参考文献:

- [1] 曹国良, 安心琴, 周春红, 等. 中国区域反应性气体排放源清单[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(7): 900-906.
Cao G L, An X Q, Zhou C H, *et al.* Emission inventory of air pollutants in China[J]. China Environmental Science, 2010, **30**(7): 900-906.
- [2] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 NO 、 NO_2 和 O_3 浓度变化的相关性分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 706-711.
An J L, Wang Y S, Li X, *et al.* Analysis of the relationship between NO , NO_2 and O_3 concentrations in Beijing [J]. Environmental Science, 2007, **28**(4): 706-711.
- [3] 段青春, 彭艳春, 谭吉华, 等. 北京市冬季灰霾期 NMHCs 空间分布特征研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4552-4557.
Duan J C, Peng Y C, Tan J H, *et al.* Spatial distribution characteristics of NMHCs during winter haze in Beijing [J]. Environmental Science, 2013, **34**(12): 4552-4557.
- [4] 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 等. 重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 820-829.
Xu P, Hao Q J, Ji D S, *et al.* Observation of atmospheric pollutants in the urban area of Beibei district, Chongqing [J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 820-829.
- [5] 潘月鹏, 王跃思, 胡波, 等. 北京奥运时段河北香河大气污染观测研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 1-9.
Pan Y P, Wang Y S, Hu B, *et al.* Observation on atmospheric pollution in Xianghe during Beijing 2008 Olympic Games [J]. Environmental Science, 2010, **31**(1): 1-9.
- [6] 陶俊, 柴发合, 高健, 等. 16 届亚运会期间广州城区 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分特征及其对霾天气的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 409-415.
Tao J, Chai F H, Gao J, *et al.* Characterization of chemical compositions in $\text{PM}_{2.5}$ and its impact on hazy weather during 16th Asian Games in Guangzhou [J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 409-415.
- [7] Choi W, Hu S S, He M L, *et al.* Neighborhood-scale air quality impacts of emissions from motor vehicles and aircraft [J]. Atmospheric Environment, 2013, **80**: 310-321.
- [8] Pope C A. Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: biologic mechanisms and who's at risk? [J]. Environmental Health Perspectives, 2000, **108**(S4): 713-723.
- [9] 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.
- [10] Kan H D, London S J, Chen G H, *et al.* Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China [J]. Environment International, 2007, **33**(3): 376-384.
- [11] Finkelstein M M, Jerrett M, Sears M R. Environmental inequality and circulatory disease mortality gradients [J]. Journal of Epidemiology & Community Health, 2005, **59**(6): 481-487.
- [12] 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.
Xiao Q, Zuo H F, Yang J L. Evaluation of LTO cycle emissions from air craft in China's Civil Aviation Airports [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(7): 1469-1474.
- [13] 黄清凤, 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.
Huang Q F, Chen G N, Hu D X, *et al.* Analysis of the airplane emission of atmospheric pollutants in Guangzhou Baiyun international airport [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2014, **26**(3): 57-59.
- [14] 何吉成. 30 年来中国民航运输行业的大气污染物排放 [J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 1-7.
He J C. Air pollutant emissions of aircraft in China in recent 30 years [J]. Environmental Science, 2012, **33**(1): 1-7.
- [15] 黄勇, 周桂林, 吴寿生. 中国上空民航飞机 NO_x 排放量及其分布初探 [J]. 环境科学学报, 2000, **20**(2): 179-182.
Huang Y, Zhou G L, Wu S S. A preliminary investigation on the inventory of NO_x emitted from CAAC flights over China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, **20**(2): 179-182.
- [16] 黄勇, 吴冬莺, 王金涛, 等. 中国上空民航飞机 NO_x 排放分

- 布再探[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, **27**(3): 289-292.
- Huang Y, Wu D Y, Wang J T, *et al.* Further assessment of the NO_x emission from CAAC Fleet over China [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, **27**(3): 289-292.
- [17] 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): 1671-1815.
- Wei Z Q, Diao H Z, Han B. Research on calculating of aircraft pollution emissions in cruise phase[J]. Science Technology and Engineering, 2014, **14**(19): 1671-1815.
- [18] 李娜, 魏志强. 飞机 QAR 数据的空气污染物排放量计算研究[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(1): 159-163.
- Li N, Wei Z Q. Calculating aircraft pollution emissions based on QAR Data[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **38**(1): 159-163.
- [19] Airport Air Quality Manual [R]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2011. 38-39.
- [20] 民航资源网. 2014 中国内地飞机运营情况报告[EB/OL]. <http://news.carnoc.com/list/299/299027.html>
- [21] Flightaware网. 航班跟踪[EB/OL]. <http://flightaware.com/>
- [22] Exhaust emission data bank [R]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 1995.
- [23] Kalivoda M T, Kudrna M. Methodologies for estimating emissions from air traffic: future emissions [R]. Vienna: Perchtoldsdorf-Veinna, 1997.
- [24] 陈治怀. 飞机性能工程[M]. 北京: 中国民航出版社, 1993. 115-116.
- [25] Fuglestvedt J S, Shine K P, Berntsen T, *et al.* Transport impacts on atmosphere and climate: metrics [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(37): 4648-4677.
- [26] 廖瀚博, 余志, 周兵, 等. 广州市机动车尾气排放特征研究[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(1): 134-138.
- Liao H B, Yu Z, Zhou B, *et al.* Characteristics of motor vehicle exhaust emission in Guangzhou [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(1): 134-138.

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行