

机场地勤设备排放物的分析方法

杨保华¹,滕帅^{2,3},盖永田^{2,3},刘顺利^{2,3},李昊^{2,3},霍庆龙^{1*}

1. 山东省机动车排气污染监控中心,山东 济南 250102; 2. 中国重型汽车集团有限公司,山东 济南 250102;
3. 济南汽车检测中心有限公司,山东 济南 250013

摘要:为研究机场地勤设备运行过程中产生的污染物对空气质量及环境的影响,以某国际机场为研究对象,根据主要用途将地勤设备分为17类并统计地勤设备的排放标准,提出地勤设备关键运行参数计算方法,采集实时运行数据,计算地勤设备常用运行车速、负载因子及污染物年排放并分析排放特性,探讨机场地勤设备电动化升级的可行性,对比分析将现有燃油行李车升级为符合国六排放标准的新设备与替换为纯电动行李车两种策略的经济效益、环保效益和使用便利性。研究结果表明:1)在17种类型地勤设备燃油车中,污染物年排放排名前5的地勤设备为行李车、航餐车、飞机牵引车、跑道维护车和地勤代步车,5类地勤设备的CO、HC、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀的年排放量分别占年排放总量的76.3%、80.0%、63.3%、85.3%、85.5%。2)该机场将现有行李车更换为符合国六排放标准的新设备,CO、HC、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀的年排放分别减小23.1%、15.4%、37.2%、43.2%、43.1%。3)采用电动行李车比采用国六排放标准燃油行李车的初期投入多8万元,但年度能源成本和年度维护成本的节省费用分别为16500元和357元,投资回收期约4.75a,电动行李车初期投入较高,但在整个生命周期内运营成本较低,经济效益更明显;电动化地勤设备在运行中不产生NO_x等有害物质,且产生的噪声比同功率燃油车可减小10~20dB;电动化地勤设备的人工维护成本较低且采用无级变速传动结构,有效提高地勤设备运行可靠性,降低驾驶员劳动强度。

关键词:机场地勤设备;污染物;运行数据;负载因子;电动化

中图分类号:U473.9;X701.7

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)06-0053-09

引用格式:杨保华,滕帅,盖永田,等.机场地勤设备排放物的分析方法[J].山东交通学院学报,2025,33(6):53-61.

YANG Baohua, TENG Shuai, GAI Yongtian, et al. Analysis method for emissions from airport ground support equipment[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(6): 53-61.

0 引言

我国民航运输业正处于快速发展阶段,为地区经济增长注入强劲动力,为人民生产生活带来极大便利,客运与货运需求持续增长。但民航运输业引发的环境问题日益凸显,特别是运输中排放的气体污染物已成为不容忽视的大气污染源^[1]。机场作为民航运输体系中的关键节点,其地面服务车辆、辅助动力装置以及飞机在地面运行阶段排放的污染物,是民航运输大气污染源的重要组成部分^[2]。机场排放的大气污染物主要包括CO、HC、NO_x和颗粒物(particulate matter, PM)等^[3],对机场局部环境产生直接影响,通过扩散对周边区域的大气质量形成持续影响,对居民健康构成潜在风险^[4-5]。人长期处于较高浓度大气污染环境中,尤其是NO_x、细颗粒物(如PM_{2.5})等污染物,会显著增大哮喘、慢性支气管炎、肺癌等呼吸

收稿日期:2025-08-18

基金项目:山东省重点研发计划项目(2024TSGC0440)

第一作者简介:杨保华(1982—),女,四川射洪人,工程师,主要研究方向为移动源污染防治技术及政策研究,E-mail:17763163@qq.com。

*通信作者简介:霍庆龙(1986—),男,安徽宿州人,高级工程师,主要研究方向为移动源污染防治管理政策、污染防治技术及污染物监控技术,E-mail:huoqinglong777@126.com。

系统疾病的发病概率^[6-8]。因此,在民航运输业规模持续扩大的背景下,系统评估并有效控制机场大气污染物排放,采取针对性措施逐步减少大气污染物的排放量,已成为实现区域环境可持续发展与公众健康保障的迫切任务。

目前国内外机场排放的相关研究多聚焦于飞机排放,较少考虑机场地勤设备排放的影响^[9-10]。夏卿^[11]指出飞机在机场起降循环(landing and take-off cycle, LTO)中污染物排放量的决定性因素在于机型、发动机类型及飞机各工况模式的运行时长。曹惠玲等^[12-13]通过修正 Gaussian Puff 模型分析飞机在 LTO 阶段颗粒物的排放及扩散规律,并指出飞机排放对机场周边环境的影响。黄清凤等^[14]借鉴区域移动污染源核算方法,分析广州白云国际机场飞机大气污染物排放水平。徐冉等^[15]引入大气探测数据,优化 LTO 阶段排放测算方法,建立首都国际机场飞机排放污染物清单。Turgut 等^[16]分析土耳其国内航线飞机在 LTO 阶段的燃油使用效率及污染物生成规律,并与国际通用的飞机起降排放模型对比验证。Zhang 等^[17]将飞机实际飞行轨迹数据引入研究体系,构建飞机排放动态模型,分析不同机场间 NO_x、PM 等污染物排放量产生差异的主要原因。Rogers 等^[18]采用便携式采样设备实时监测大推力涡轮、涡轴发动机在不同功率工况下的颗粒物排放,计算得到不同功率工况下的排放因子。Khou 等^[19]针对商用飞机近场尾迹的形成机制开展计算流体力学仿真研究,探究燃油含硫量对尾迹特性的影响规律。周子航等^[20]根据机场 LTO 循环数与地勤设备运行情况,对京津冀机场群、成都双流国际机场开展污染物排放研究,建立大气污染物排放清单,分析得到污染物时空分布特征。国内外学者多聚焦于飞机发动机的排放问题,对机场地勤设备污染物排放研究较少,关于机场地勤设备污染物排放系统性分类及排放分析方法研究处于初步阶段。

机场地勤设备污染物排放是机场污染物总排放的重要组成部分,对周边环境的影响较大,不同类别地勤设备的排放特征与分担率尚不明确,难以制定精准的减排策略和管理措施。本文根据机场地勤设备排放管理的实际需求,系统开展机场地勤设备污染物排放分类体系与排放分析方法的探索性研究,并以某国际机场为实例,定量分析该机场地勤设备的污染物排放情况,为后续机场地勤设备排放清单及相关政策的制定提供数据支撑,有助于推动机场区域空气质量精准治理与绿色低碳发展,为实现民航运输与环境可持续性协同发展提供理论依据。

1 机场地勤设备分类及排放计算方法

1.1 机场地勤设备分类

机场地勤设备指部署于机场,专门服务于飞机地面运转、旅客服务、货物处理及日常运营的各类专用机器、车辆和设施。机场地勤设备在飞机起飞、着陆、维护等流程提供支持,加速航班过站周转,提高机场处理能力,保障机场安全、高效、有序运行^[21]。调研分析山东省内多个机场的地勤设备,根据用途将机场地勤设备分为 17 类,如表 1 所示。

表 1 机场地勤设备类型及主要用途

编号	类型	主要用途
1	飞机引导车	引导飞机从降落跑道滑行至指定停机位
2	传送带车	传输旅客行李及散装货物上、下飞机货舱
3	升降台车	集装大型货物上、下飞机货舱
4	行李车	运送旅客行李至候机楼或货站
5	地面电源车	为飞机提供电源,在飞机辅助动力装置出现故障或维修时使用
6	地面气源车	为飞机提供气源,在飞机辅助动力装置出现故障或维修时使用
7	污水车	转运飞机机舱内污水

表1(续)

编号	类型	主要用途
8	清水车	为飞机提供清洁饮用水
9	航油车(罐式/泵式)	为飞机提供燃油
10	航餐车	为飞机提供餐食
11	除冰车	为飞机机身、机翼表面除霜、除雪及除冰
12	飞机牵引车	飞机无动力状态下,牵引飞机进入机库、停机位或维修区
13	驱鸟车	驱离机场空域内的鸟群,防止鸟群撞击飞机
14	机场消防车	机场应急消防救援车辆
15	跑道维护车	机场飞机跑道检查及维修车辆
16	地勤代步车	小型地面保障人员摆渡转运车辆
17	地勤巴士	大型地面保障人员摆渡转运车辆

1.2 排放计算方法

机场地勤设备5种主要排放污染物为CO、NO_x、HC、PM_{2.5}和PM₁₀。根据机场地勤设备主要用途是否用于道路行驶分为道路车辆和非道路车辆。对于道路车辆,采用文献[22]提供的方法计算道路车辆主要排放污染物的年排放

$$E_r = 10^{-6} \sum_i (P_i f_i \varphi_i \gamma_i \lambda_i \theta_i S_i) ,$$

式中: i 为道路车辆类型数; P_i 为第*i*类道路车辆的保有量; f_i 为第*i*类道路车辆的基准排放系数,g/km; φ_i 为第*i*类道路车辆环境修正因子; γ_i 为第*i*类道路车辆速度修正因子; λ_i 为第*i*类道路车辆劣化修正因子; θ_i 为第*i*类道路车辆负载因子,即实际功率与额定功率之比; S_i 为第*i*类道路车辆的年均行驶里程,km。

采用文献[23]提供的方法计算非道路车辆主要排放污染物的年排放

$$E_{nr} = 10^{-6} \sum_j \sum_k \sum_n (P_{j,k,n} G_{j,k,n} \theta_{j,k,n} h_{j,k,n} f_{j,k,n}) ,$$

式中: j 为非道路车辆类型数; k 为排放阶段; n 为功率段; $P_{j,k,n}$ 为非道路车辆保有量; $G_{j,k,n}$ 为非道路车辆额定功率,kW; $\theta_{j,k,n}$ 为非道路车辆负载因子,即实际功率与额定功率之比; $h_{j,k,n}$ 为非道路车辆年使用时间,h; $f_{j,k,n}$ 为非道路车辆排放污染物的排放系数,即机动车在单位时间内以单位功率工作所产生的比排放,g/(kW·h)。

1.3 关键运行参数计算方法

计算道路车辆和非道路车辆污染物排放时,车速和负载是关键运行参数,与车辆的应用场景密切相关。目前符合国家第六阶段机动车污染物排放标准(以下简称国六排放标准)的机场地勤设备均已安装车载终端,能通过控制器局域网(controller area network, CAN)与车辆的控制系统进行数据交互,获得地勤设备的实时运行数据,并将运行数据通过无线传输方式发送至监管平台。处于其他阶段排放标准的地勤设备均已安装车载数据采集装置,需人工采集车速、负载等运行参数。为准确表征地勤设备在复杂工况下的典型运行状态,避免统计分析车速、负载等数据时采用算术平均计算带来偏差,本研究采用加权核密度估计(weighted kernel density estimation, WKDE)方法识别地勤设备常用运行车速,并采用时间加权平均方法计算平均负载因子。

1.3.1 车速

地勤设备工作过程中,车速实时变化,通过计算车速概率密度分布函数的众数确定机场地勤设备常用运行车速,作为计算地勤设备污染物排放的运行参数,不能采用简单的算术平均值计算车速。定义采集的车速数据序列为 $v_m (m = 1, 2, \dots, N, N$ 为车速数据采集点总数)。各车速数据采集点的时间权重

$$w_m = \Delta T_m / \sum_{m=1}^N \Delta t_m,$$

式中 ΔT_m 为每个车速数据采集点对应的持续时间, $\sum w_m = 1$ 。

采用高斯核函数对车速分布进行加权核密度估计, 得到任意车速 v 对应的概率密度函数

$$f_h(v) = \sum_{m=1}^N w_m \frac{1}{h\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(v-v_m)^2}{2h^2}\right],$$

式中: h 为带宽, $h = 0.9 \min(\sigma, Z_{\text{IQR}}/1.34) N^{-1/5}$, 其中, Z_{IQR} 为四分位距, 用于衡量数据的离散程度, km/h; σ 为车速数据序列的标准差。

概率密度函数 $f_h(v)$ 取得最大值的车速为机场地勤设备的常用运行车速

$$v_{\text{Typical}} = \operatorname{argmax}[f_h(v)].$$

1.3.2 负载因子

负载因子指发动机实际输出功率与额定功率之比。发动机瞬时输出功率的数值可由实时采集的发动机转矩的数值 T_{iqm} 和转速的数值 n_m 计算得到, 瞬时负载因子

$$\theta_m = T_{\text{iqm}} n_m / (9\,550 P_{\text{rated}}),$$

式中 P_{rated} 为额定功率的数值。

地勤设备在不同工况下运行时间不同, 采用时间加权平均法计算各类地勤设备的负载因子

$$\theta = \sum_{m=1}^N (\theta_m \Delta T_m) / \sum_{m=1}^N \Delta T_m.$$

地勤设备实际作业工况复杂多变, 其运行状态始终处于动态调整过程中, 某类型地勤设备日常运行过程的实时车速及转矩运行数据如图 1 所示。由图 1 可知: 地勤设备运行过程中转矩响应频繁波动, 车速随之发生相应变化, 波动现象在起步及加速阶段表现明显, 多次出现转矩峰值, 对应车速起伏明显。

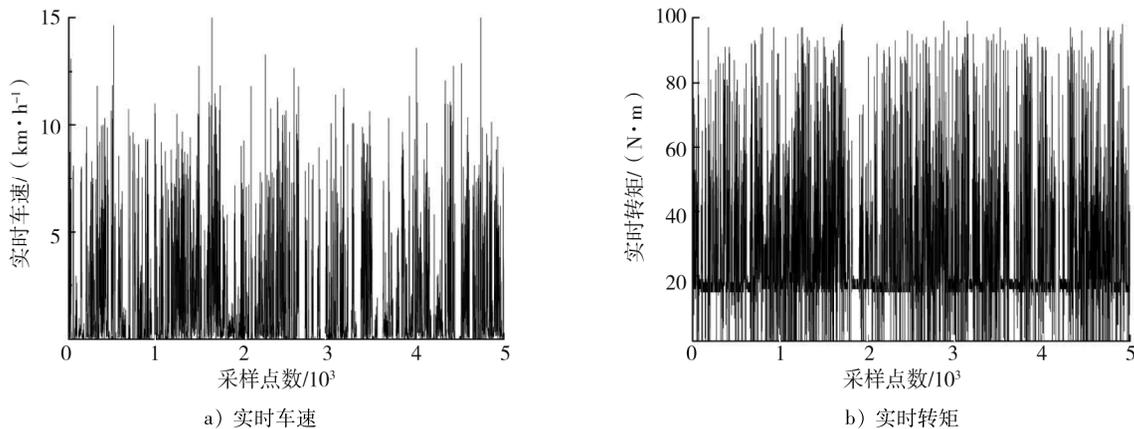


图 1 机场地勤设备实时车速及转矩运行数据

根据采集的 17 种类型机场地勤设备实时运行数据计算得到各类地勤设备的负载因子及车速, 如图 2 所示, 由图 2 可知: 机场内各类地勤设备的车速分布范围为 12~30 km/h, 以低速运行为主; 负载因子分布范围为 0.27~0.71, 大部分小于 0.60, 负载因子较小, 地勤设备发动机工作效率较低。可见, 各类地勤设备因工作场景限制, 运行状态未处于工作效率最佳阶段, 可定制适应机场工作场景的燃油车地勤设备, 使其运行状态处于工作效率最佳阶段, 降低污染物排放。

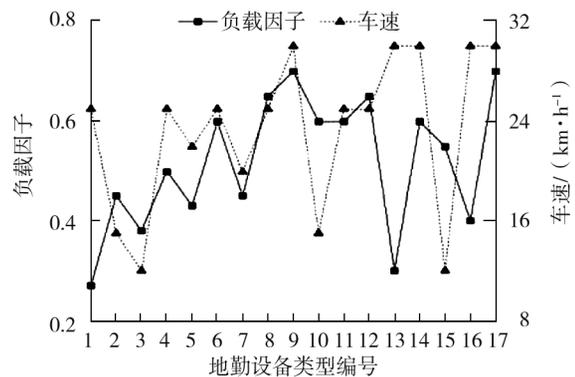


图 2 机场地勤设备负载因子及车速

2 机场地勤设备排放计算实例分析

2.1 机场地勤设备总排放

以某国际机场为研究对象,该机场地勤设备总保有量为241辆,以动力类型分类统计,柴油车164辆,占比68.0%,数量最多;汽油车26辆,占比10.8%,数量最少;电动车51辆,占比21.2%,已具有一定应用规模。进一步对190辆燃油车按道路与非道路用途分类统计,非道路柴油车数量最多,共102辆,占燃油车总数的53.7%;道路柴油车为62辆,占燃油车总数的32.6%;道路汽油车24辆,占燃油车总数的12.6%;非道路汽油车数量较少,仅2辆,占燃油车总数的1.1%。由地勤设备的分类统计结果可知,该机场的地勤作业高度依赖柴油车,特别是非道路柴油车,此类设备是排放管控和清洁化替代的重点类型。

该机场的地勤设备燃油车中非道路车辆为104辆,占燃油车总数的54.7%;道路车辆为86辆,占燃油车总数的45.3%。地勤设备燃油车所处国一至国六排放标准阶段的分布特征显著,如表2所示。由表2可知:地勤设备燃油车中非道路车辆主要分布在国三、国四排放标准阶段,共72辆,占非道路车辆的69.2%,无符合国五及以上排放标准阶段的非道路车辆;道路车辆主要分布在国四、国五排放标准阶段,共65辆,占道路车辆的75.6%,无低于国二排放标准阶段的道路车辆;符合国五及以上排放标准的地勤设备燃油车仅32辆,占燃油车总数的16.8%,可见该机场在降低排放方面仍需改进。

表2 不同排放标准下的机场地勤设备数量

排放标准	机场地勤设备数/辆		排放标准	机场地勤设备数/辆	
	非道路车辆	道路车辆		非道路车辆	道路车辆
国一	13	0	国四	44	38
国二	19	3	国五	0	27
国三	28	13	国六	0	5

计量17种类型机场地勤设备中燃油车的CO、HC、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀的年排放,如表3所示。由表3可知:行李车、航餐车、飞机牵引车、跑道维护车和地勤代步车是污染物年排放排名前5的地勤设备类型,5种地勤设备类型的CO、HC、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀的年排放为30.2、2.2、6.7、2.1、2.0 t,分别占CO、HC、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀的年排放总量的76.3%、80.0%、63.3%、85.3%、85.5%。行李车因高频次短途往返、频繁启停及低速行驶,发动机常处于低效高耗状态,导致污染物排放量较大。航餐车除行驶外,其冷藏系统需持续工作,燃油消耗大,导致污染物排放量较大。飞机牵引车运行负荷高,尤其在起步阶段燃油燃烧不充分^[24],导致污染物排放量较大。跑道维护车需同时驱动多种作业装置,发动机持续高负荷运行,且作业强度大,导致污染物排放量较大。地勤代步车因24 h不间断运行,年均里程高,且处于长时间怠速工况,发动机空转导致燃油效率低,单位时间排放量高,产生的污染物排放量较大。

表3 机场地勤设备各类污染物年排放

机场地勤设备类型	污染物年排放/t				
	CO	HC	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀
飞机引导车	2.048	0.170	0.111	0.009	0.010
传送带车	2.957	0.331	0.604	0.352	0.352
升降台车	19.479	1.341	5.435	1.412	1.400
行李车	162.381	17.604	24.990	18.565	18.565
地面电源车	8.401	0.440	1.826	0.453	0.448

表3(续)

机场地勤设备类型	污染物年排放/t				
	CO	HC	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀
地面气源车	0.705	0.039	0.100	0.041	0.041
污水车	2.441	0.761	3.675	0.144	0.159
清水车	4.674	0.227	1.426	0.234	0.226
航油车(罐式/泵式)	73.733	0.927	23.546	0.696	0.400
航餐车	140.210	8.845	36.136	9.018	8.871
除冰车	1.485	0.110	3.003	0.051	0.057
飞机牵引车	111.823	4.277	24.604	4.627	4.545
驱鸟车	0.910	0.264	1.214	0.060	0.066
机场消防车	10.037	0.407	6.434	0.149	0.164
跑道维护车	37.108	1.083	10.602	1.226	1.057
地勤代步车	29.497	3.667	10.115	0.401	0.445
地勤巴士	1.199	0.192	2.336	0.079	0.087

2.2 典型地勤设备排放特性

分析不同机场地勤设备的年排放,除运行工况客观因素影响外,设备排放性能落后是加剧污染物排放的核心因素。非道路车辆中行李车的数量在机场地勤设备中占比较低,但污染物年排放最高。行李车的污染物排放阶段全部处于国一、国二排放标准。行李车共16辆,其中,6辆处于国一排放阶段,10辆处于国二排放阶段。国一及国二排放标准是我国早期实施的机动车污染物排放限值标准,比现行的机动车污染物排放限值标准要求相对较低,早期生产的机动车污染物排放量较大。

提高机场地勤设备的污染物排放标准,是实现减排目标的关键路径。采用符合高排放标准的新设备替换低排放标准的现有设备,借助先进的发动机燃烧技术和尾气后处理系统,可大幅降低污染物排放。该机场将现有行李车更换为符合国六排放标准的新设备,CO、HC、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀的年排放分别降低23.1%、15.4%、37.2%、43.2%、43.1%。如对处于低排放标准的机场地勤设备进行电动化改造,能彻底消除地勤设备在使用过程中产生的NO_x排放物,减少颗粒物等有害物质的排放,降低设备运行过程中的噪音污染,符合机场绿色低碳发展的总体方向。

2.3 典型地勤设备电动化效益

为评估机场地勤设备实施电动化升级的可行性,选取行李车作为分析对象,对比分析将现有行李车升级为符合国六排放标准的新设备与采用纯电动行李车替换现有行李车两种策略的综合效益。

常用机场行李车的发动机平均功率约为50 kW,日平均使用时间约7 h。市场价格方面,采购符合国六排放标准的燃油行李车的价格约为12万元,纯电动行李车的价格约为20万元。为全面评价两种策略的综合效益,从经济效益、环保效益及使用便利性等三方面进行对比分析。

2.3.1 经济效益

经济效益是机场地勤设备升级决策的首要因素,根据机场地勤设备运营数据及生产厂家提供的维护数据,开展运营成本核算。年度能源成本节省费用

$$S_{\text{energy}} = (C_{f,\text{km}} - C_{e,\text{km}})D_{\text{daily}}D_{\text{annual}},$$

式中: $C_{f,\text{km}}$ 为燃油行李车单位里程能源成本,元/km; $C_{e,\text{km}}$ 为电动行李车单位里程能源成本,元/km; D_{daily} 为燃油行李车/电动行李车平均工作里程,km/d; D_{annual} 为燃油行李车/电动行李车年均工作时间,d。

年度维护成本节省费用

$$S_{\text{maintenance}} = (C_{f,\text{hr}} - C_{e,\text{hr}})H_{\text{daily}}D_{\text{annual}},$$

式中: $C_{f,hr}$ 为燃油车维护成本,元/h; $C_{e,hr}$ 为电动车维护成本,元/h; H_{daily} 为燃油行李车/电动行李车平均工作时间,h/d。

估算年度能源成本节省费用,根据机场运营数据,燃油行李车、纯电动行李车的能源成本分别约为1.8、0.7元/km,燃油行李车/电动行李车的平均工作里程约为50 km/d,年均工作时间约为300 d,电动行李车比燃油行李车的年度能源成本节省费用为16 500元。根据燃油行李车、电动行李车生产厂家提供的维护数据,燃油行李车、电动行李车的维护成本分别约为0.25元/h和0.08元/h,燃油行李车/电动行李车的平均工作时间约为7 h/d,年均工作时间约为300 d,采用电动行李车比采用燃油行李车的年度维护成本节省费用为357元。采用电动行李车比采用燃油行李车的年度总节省费用为年度能源成本节省费用与年度维护成本节省费用之和,即16 857元,投资回收期约为4.75 a。考虑新能源设备购置补贴、充电设施建设补贴等配套政策,投资回收期进一步缩短。电动行李车初期投入较高,但整个生命周期内运营成本较低,从长远看,采用纯电动行李车替换现有行李车策略的经济效益更明显。

2.3.2 环保效益

环保效益是驱动机场地勤设备电动化转型的根本动力,电动化地勤设备在运行中彻底消除 NO_x 排放物,减少颗粒物等有害物质的排放,显著改善航站楼、廊桥等密闭区域的空气质量,直接保障工作人员与旅客健康。电动化地勤设备存在电网、电池等环节的污染物间接排放,随着国家能源结构清洁化转型,电网、电池等环节的污染物排放持续下降,电动化地勤设备全生命周期的环保优势显著。

机场可采取自建光伏发电站、采购“绿电”等措施,实现地勤设备作业期间全程零碳化,降低污染物排放。电动化地勤设备运行过程中产生的噪声比同功率燃油车降低10~20 dB,有助于营造宁静舒适的候机环境,提高机场服务品质,有效保护地勤工作人员的听力健康,减少对周边社区的噪声干扰。

2.3.3 使用便利性

电动化地勤设备因省去发动机、变速箱、进气管、排气管等机械部件,机械结构较简单,故障率及维护需求较低,无需更换机油、火花塞等周期性耗材,日常维保工作主要集中在传动系统、“三电”系统(电动车核心技术的3个关键子系统,即电池、电机、电控系统)的常规检查,零部件更换与人工维护成本降低,有效提高地勤设备运行可靠性。燃油车地勤设备存在因发动机故障导致停机且维修时间较长的问题,电动化地勤设备则不存在此类问题,能保障地勤作业按时完成。

在驾驶体验方面,电动化地勤设备多采用无级变速传动结构,操作简便,加、减速平顺,无换挡顿挫感,有效降低驾驶员劳动强度,提高工作舒适度和效率。电动化地勤设备普遍配备制动能量回收功能,若在机场运行时频繁启停,制动时将部分动能转化为电能储存至电池,进一步提高续航能力和能源利用效率。

3 结论

为研究机场地勤设备的污染物排放,以某国际机场为例,对地勤设备分类,提出关键运行参数计算方法,采集实时运行数据,计算地勤设备常用运行车速及负载因子,求解地勤设备燃油车的CO、HC、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 年排放,研究典型地勤设备排放特性及电动化效益。

1)该国际机场的地勤设备燃油车符合国五及以上排放标准的地勤设备燃油车仅32辆,占燃油车总数的16.8%。在17种类型地勤设备燃油车中,污染物年排放排名前5的地勤设备为行李车、航餐车、飞机牵引车、跑道维护车和地勤代步车,5类地勤设备的CO、HC、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的年排放分别占年排放总量的76.3%、80.0%、63.3%、85.3%、85.5%。

2)分析典型地勤设备排放特性。行李车全部处于国一及国二排放标准阶段,导致污染物年排放较大。采用符合高排放标准的新设备替换低排放标准的现有设备,借助先进的发动机燃烧技术和尾气后处理系统,可大幅降低污染物排放。该机场将现有行李车更换为符合国六排放标准的新设备,CO、HC、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的年排放分别减小23.1%、15.4%、37.2%、43.2%、43.1%。

3)分析典型地勤设备电动化效益。对比分析将现有行李车升级为符合国六排放标准的新设备与替换为纯电动行李车两种策略的经济效益、环保效益和使用便利性,采用电动行李车比采用国六排放标准燃油行李车的初期投入多8万元,但年度能源成本和年度维护成本节省费用分别为16500元和357元,投资回收期约4.75a。电动行李车初期投入较高,但在整个生命周期内运营成本较低,从长远看,采用纯电动行李车替换现有燃油行李车策略的经济效益更明显;电动化地勤设备在运行中彻底消除 NO_x 排放物,减少颗粒物等有害物质的排放,产生的噪声比同功率燃油车降低10~20dB;电动化地勤设备的人工维护成本较低且采用无级变速结构,有效提高地勤设备运行可靠性,降低驾驶员劳动强度。

参考文献:

- [1] LIU Z, DENG Z, DAVIS S J, et al. Monitoring global carbon emissions in 2021[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(4):217-219.
- [2] 张田, 田勇. 中国民航飞机大气污染物和碳排放清单估算[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(10):5614-5623.
- [3] PHOENIX D, KHODAYARI A, WUEBBLES D, et al. Aviation impact on air quality present day and mid-century simulated in the Community Atmosphere Model (CAM)[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 196:125-132.
- [4] 储燕萍. 上海浦东国际机场飞机尾气排放对机场附近空气质量的影响[J]. *环境监控与预警*, 2013, 5(4):50-52.
- [5] 李洪. 中国道路移动源大气污染物和碳排放协同控制途径研究[D]. 北京:华北电力大学, 2023.
- [6] 陈思旭. 重庆市新能源汽车替代使用的健康收益价值评估[D]. 昆明:云南大学, 2019.
- [7] 单丽, 江飞, 贺晓婧, 等. 中国道路交通源大气污染的健康影响评估[J]. *中国环境管理*, 2018, 10(5):59-64.
- [8] WU R S, ZHONG L J, HUANG X L, et al. Temporal variations in ambient particulate matter reduction associated short-term mortality risks in Guangzhou, China: a time-series analysis (2006—2016)[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645:491-498.
- [9] 韩博, 王立婕, 赵芸婷, 等. 郑州新郑国际机场本地化排放因子与排放清单[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(9):419-429.
- [10] MASIOL M, HARRISON R M. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: a review[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 95:409-455.
- [11] 夏卿. 飞机发动机排放对机场大气环境影响评估研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
- [12] 曹惠玲, 李玉铭, 晏嘉伟, 等. 基于修正 Gaussian Puff 模型的飞机 LTO 循环 $\text{PM}_{2.5}$ 排放及扩散特性研究[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(3):352-361.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 徐冉, 郎建垒, 杨孝文, 等. 首都国际机场飞机排放清单的建立[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(8):2554-2560.
- [16] TURGUT E T, CAVCAR M, USANMAZ O, et al. Investigating actual landing and takeoff operations for time-in-mode, fuel and emissions parameters on domestic routes in Turkey [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 53:249-262.
- [17] ZHANG J R, ZHANG S J, ZHANG X L, et al. Developing a high-resolution emission inventory of China's aviation sector using real-world flight trajectory data[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(9):5743-5752.
- [18] ROGERS F, ARNOTT P, ZIELINSKA B, et al. Real-time measurements of jet aircraft engine exhaust[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2005, 55(5):583-593.
- [19] KHOU J C, GHEDHAÏFI W, VANCASSEL X, et al. CFD simulation of contrail formation in the near field of a commercial aircraft: effect of fuel sulfur content[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2017, 26(6):585-596.
- [20] 周子航, 陆成伟, 谭钦文, 等. 成都双流国际机场大气污染物排放清单与时空分布特征[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(3):75-83.
- [21] UR RAHMAN E Z, AKBAR F. Aircraft ground support equipment: a framework for maintenance strategies[J]. *Modern Applied Science*, 2023, 17(2):5539.

- [22] 中华人民共和国环境保护部. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. (2014-12-31) [2025-08-10]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587831090.pdf>.
- [23] 中华人民共和国环境保护部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. (2014-12-31) [2025-08-10]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587960717.pdf>.
- [24] CARSLAW D C, WILLIAMS M L, TATE J E, et al. The importance of high vehicle power for passenger car emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 68:8-16.

Analysis method for emissions from airport ground support equipment

YANG Baohua¹, TENG Shuai^{2,3}, GAI Yongtian^{2,3},
LIU Shunli^{2,3}, LI Hao^{2,3}, HUO Qinglong^{1*}

1. Shandong Motor Vehicle Exhaust Pollution Monitoring Center, Jinan 250102, China;

2. China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Jinan 250102, China;

3. Jinan Automotive Testing Center Co., Ltd., Jinan 250013, China

Abstract: To investigate the impact of pollutants generated from the operation of airport ground support equipment (GSE) on air quality and the environment, taking an international airport as the research object, ground support equipment is classified into 17 categories according to their primary purposes, and the emission standards of ground support equipment are statistically analyzed. A calculation method for key operating parameters of ground support equipment is proposed, real-time operational data are collected, and the commonly used operating speeds, load factors, and annual pollutant emissions of ground support equipment are calculated to analyze emission characteristics. The feasibility of electrification upgrade for airport ground support equipment is explored, and a comparative analysis is conducted on the economic benefits, environmental benefits, and operational convenience of two strategies: upgrading existing baggage carts to new equipment complying with China's National VI Emission Standard versus replacing them with pure electric baggage carts. The research results indicate: 1) Among the 17 types of fuel-powered ground support equipment, the top 5 ground support equipment in terms of annual pollutant emissions are baggage carts, catering trucks, aircraft tow tractors, runway maintenance vehicles, and ground support shuttle vehicles. The annual emissions of CO, HC, NO_x, PM_{2.5}, and PM₁₀ from these 5 types of ground support equipment account for 76.3%, 80.0%, 63.3%, 85.3%, and 85.5% of the total annual emissions, respectively. 2) When the airport replaces existing baggage carts with new equipment complying with China's National VI Emission Standard, the annual emissions of CO, HC, NO_x, PM_{2.5}, and PM₁₀ are reduced by 23.1%, 15.4%, 37.2%, 43.2%, and 43.1%, respectively. 3) The initial investment for electric baggage carts is 80 000 yuan more than that for China's National VI Emission Standard fuel baggage carts, but the annual energy cost savings and annual maintenance cost savings are 16 500 yuan and 357 yuan, respectively, with a payback period of approximately 4.75 years. Electric baggage carts have higher initial investment but lower operating costs throughout their entire lifecycle, demonstrating more significant economic benefits. Electric ground support equipment does not produce harmful substances such as NO_x during operation, and the noise generated is 10-20 dB lower than fuel vehicles of the same power. Electric ground support equipment has lower manual maintenance costs and adopts continuously variable transmission structure, improving the operational reliability of ground support equipment and reducing driver labor intensity.

Keywords: airport ground support equipment; pollutant; operational data; load factor; electrification

(责任编辑:边文超)