



大型国际机场污染物排放量精细化核算方法探究

上海交通大学
上海市环境监测中心

2017. 11



一．研究背景

二．机场污染物排放量核算局限性

三．机场污染物排放量精细化核算方法



一．研究背景



一、研究背景

（一）民航业的快速发展

- ✈ 2011年至2015 年，我国民航业运输规模实现快速增长，运输总周转量由2011年的577.4 亿吨公里上升至2015年的851.65亿吨公里，年均复合增长10.20%

项目	2015 年度	2011 年度	年均复合增长率
运输总周转量（亿吨公里）	851.65	577.44	10.20%
旅客运输量（亿人次）	4.36	2.93	10.45%
旅客周转量（亿人公里）	7,282.60	4,537.00	12.56%
货邮运输量（万吨）	629.3	557.5	3.07%
货邮周转量（亿吨公里）	208.1	173.9	4.59%

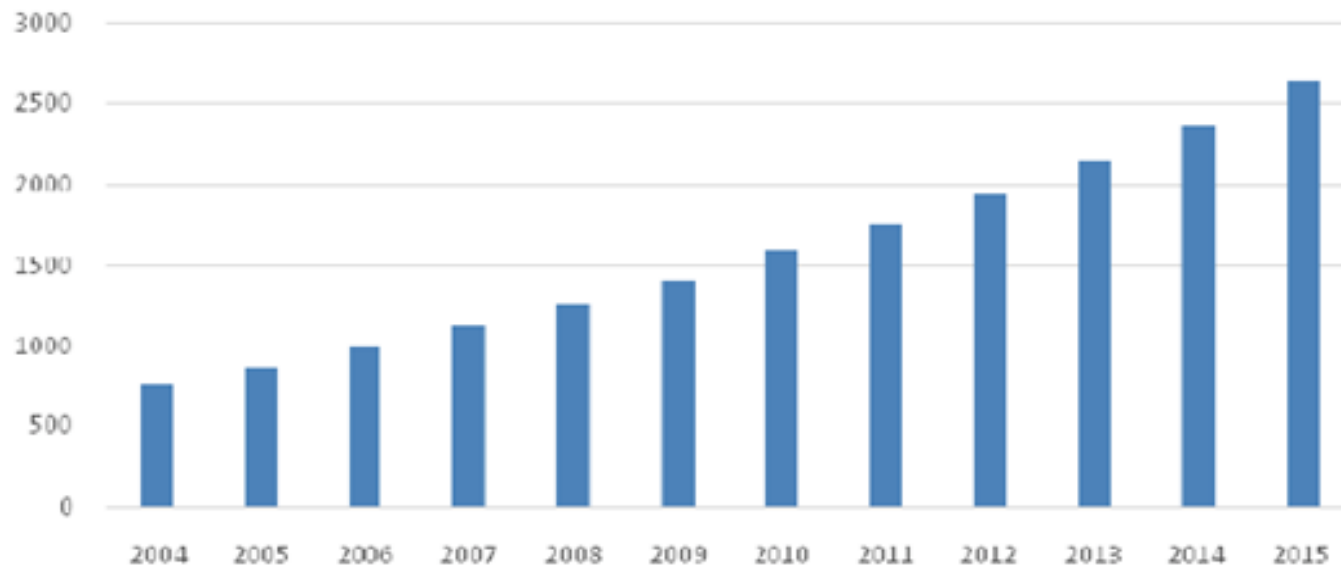
2011年与2015年我国民航业主要输运指标对比



一、研究背景

（一）民航业的快速发展

- ✈ 2015年底，我国共有定期航班航线3,326条，按重复距离计算的航线里程为786.6万公里，按不重复距离计算的航线里程为531.7万公里。定期航班国内通航城市204个



2015年，我国民航全行业运输飞机期末在册2,650 架



一、研究背景

（一）民航业的快速发展

- ✈ 据空客发布的《全球市场预测（2016）》，未来20年内亚太地区的旅客周转量将以每年5.7%的速度扩张，其全球市场份额也将从2015年的30%上升至2035年的36%，并作为全球旅客周转量最大地区与欧洲、北美进一步拉开差距



2015 至2035 年航空运输市场旅客周转量增速及市场份额变化趋势（按地区分类）



在发展最快的亚太地区中，中国国内的航空客运市场表现格外突出。目前我国民航业在旅客周转量、货邮周转量、运输总周转量等指标方面，均稳居世界第二，仅次于美国



（一）民航业的快速发展

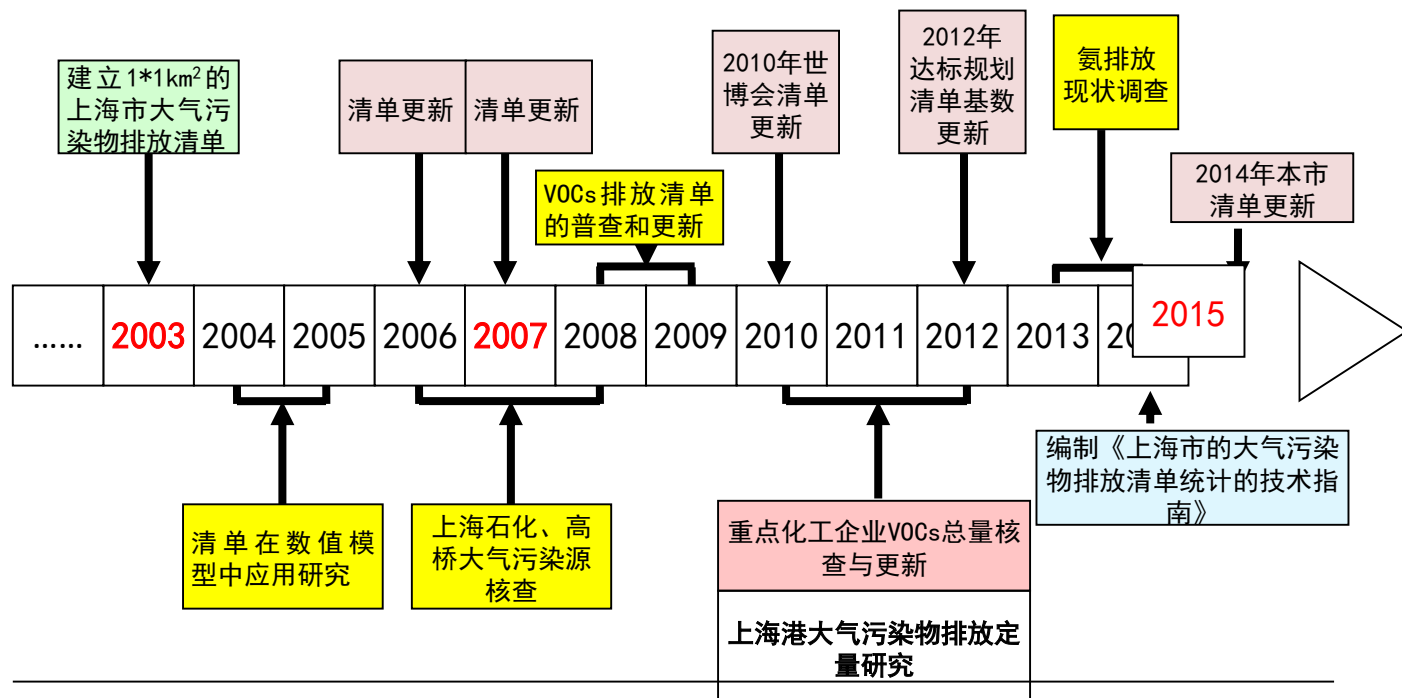
- ✈ 以上海的两个机场为例，2015年，上海浦东和虹桥国际机场全年旅客吞吐量超9900万人次；货邮吞吐量超370万吨；两机场占我国内地机场11%的旅客量，创造了内地机场29.1%的国际旅客和27.9%的地区旅客，2015年飞机起降超70万架次，各类空气污染物排放总量很大
 - ✈ 2016年，上海两大机场旅客吞吐量超过1亿人次，继英国、美国、日本之后，我国成为全世界第四个拥有年吞吐量超过1亿人次航空城市的国家，上海成为伦敦、纽约、东京、亚特兰大之后，全球亿级航空城市俱乐部的第五名成员
-



一、研究背景

(二) 大气污染防治需求

- ✈ 根据环保部《关于开展源排放清单编制试点工作的通知》（环办[2015]14号），陆续有多个城市相继编制了大气污染源排放清单，并开展了一系列排放因子本地化工作，包括化石固定燃烧源、重点行业的VOCs排放企业为主的工艺过程源、以机动车、船舶和非道路移动机械为主的移动源等，民航业的发展带来的环境影响也越来越引起关注。





二．机场污染物排放量核算局限性



(一) 飞机污染物排放量计算局限

✈ 环保部颁布的《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》方法有一定局限局限：
不分机型、不考虑LTO各阶段飞机污染物排放差别、不考虑飞机在机场各运行阶段实际运行时间

3.3 民航飞机

对于民航飞机排放量，大气污染物排放量计算方法如下：

$$E = (C_{LTO} \times EF) \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中，E为民航飞机的CO、HC、NO_x、PM_{2.5}和PM₁₀排放量，单位为吨；C_{LTO}为民航飞机起飞着陆循环次数，单位为次；EF为排放系数，单位为千克/LTO。

✈ A380一个LTO污染物排放量与ARJ21排放量一样??

4.2.3 民航飞机

民航飞机排放系数见表12。

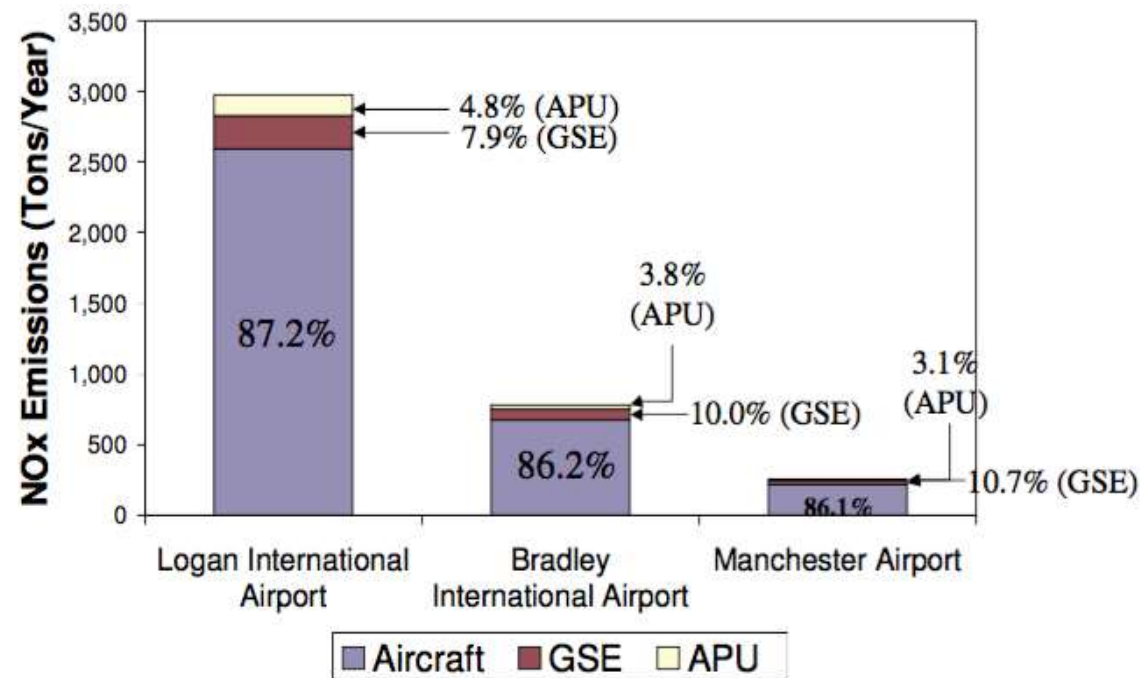
表12 基于LTO方法的民航飞机排放系数(kg/LTO)

	PM ₁₀	PM _{2.5}	HC	NO _x	CO
民航运输飞机 LTO	0.54	0.53	2.68	16.29	9.14



(二) 未考虑机场地面保障机械 (GSE) 污染物排放量

- ✈ 通常将机场污染物排放源类分为：飞机、飞机辅助动力设施 (APU)、机场地面保障设备 (GSE)、燃料设备 (fuel facilities) 以及固定排放源等 (固定排放源、燃料设备等包含在整个上海市的清单中)
- ✈ 机场地面保障设备是仅次于飞机排放的第二大污染排放源



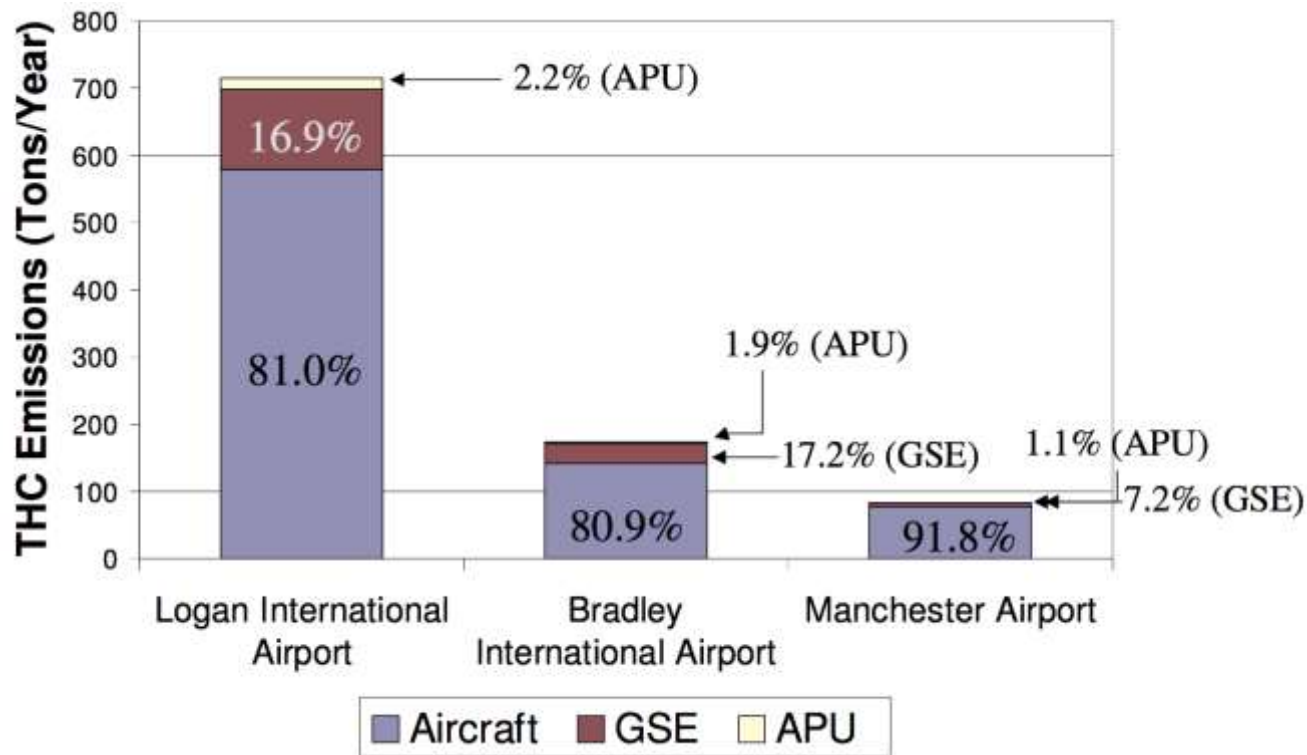
飞机 机场地面保障设备 飞机辅助力设施



二、机场污染物排放量核算局限性

(三) 未考虑飞机辅助动力装置 (APU) 污染物排放量

- ✈ 根据文献调研，飞机辅助动力装置的排放仅次飞机及机场地面保障设备的排放量



飞机 机场地面保障设备 飞机辅助动力装置



三．机场污染物排放量精细化核算方法



三、机场污染物排放量精细化核算方法

(一) 机场地面保障设备污染物排放量

美国联邦航空管理局FAA对于机场地面保障设备（Ground Support Equipment, GSE）污染排放量推荐了两种计算方法：

(1) 基于飞机/登机口分配GSE的方法(Aircraft/Gate GSE Assignment Option)：

- ✈ 该方法基于一架飞机或一个登机口，确定服务一架飞机所有的地面保障设备类型和数量，根据不同的设备的排放因子、额定功率和负载系数以及工作时间获得服务一架飞机的所有地面保障设备的的排放量，然后根据航班架次得到机场内所有保障设备的排放总量

$$m_{p,a} = \sum E_{p,g} P_g L_g t_{a,g}$$

where

$m_{p,a}$ = the mass (in grams) of pollutant, p , emitted from all GSE assigned to aircraft 排放量

A_a = the set of GSE assigned to aircraft, a 分配给飞机的保障机械组

$E_{p,g}$ = the emission factor for pollutant, p (in grams per horsepower-hour) for GSE, g 排放因子

P_g = the rated power (in brake horsepower) of GSE, g 额定功率

L_g = the load factor (unitless) of GSE, g 负载系数

$t_{a,g}$ = for aircraft a , the number of hours GSE operates during one operation 服务一架飞机用时



（一）机场地面保障设备污染物排放量

(2) 基于GSE数量分类方法(GSE Population-Based Option):

$$m_{p,g} = E_{p,g} P_g L_g N_g t_g$$

where

$m_{p,g}$ = the mass (in grams) of pollutant, p , emitted annually from GSE, g 排放量

$E_{p,g}$ = the emission factor for pollutant, p (in grams per horsepower-hour), for GSE, g 排放因子

P_g = the rated power (in brake horsepower) of GSE, g 额定功率

L_g = the load factor (unitless) of GSE, g 负载系数

N_g = the population of GSE, g (number of units included in the study) 机场地面保障设备数量

t_g = the time (in hours) that each unit of the population of GSE, g , operates annually

每一台地面保障设备工作小时数（通常以年计h/y）

✈ 考虑到上海浦东和虹桥国际机场的规模、起降飞机数量、不同机型所需的GSE差异性等，基于GES数量分类的方法更符合上海两个机场的运行，



（一）机场地面保障设备污染物排放量

机场地面保障设备排放因子E (g/kW · h)

- ✈ 排放因子E跟地面保障机械的燃料（动力）类型（柴油、汽油、天然气、电力、太阳能）有关
- ✈ 美国联邦航空管理局FAA研发的EDMS模型中有相关机场保障设备的负载系数、各类地面保障设备，CO、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀以及SO₂等污染物的排放因子等数据
- ✈ 美国联邦环保署EPA研发的NONROAD模型中也包含一些地面保障设备的，CO、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀以及SO₂污染物排放数据

额定功率P (kW) 和负载系数L (%)

- ✈ 负载系数L是设备的平均负载 (kW) 和额定功率 (kW) 的比值
- ✈ 额定功率P和负载系数L与地面保障设备的类型相关

机场地面保障设备运行时间 (h/y)



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（一）机场地面保障设备污染物排放量

机场地面保障设备数量 N

✈ 机场地面保障设备按功能分类

- Providing ground power and air conditioning to an aircraft; 为飞机提供动力和空调的设备
- Moving an aircraft (e.g., out of a gate, to/from maintenance); 飞机牵引设备
- Servicing an aircraft between flights (e.g., replenishing supplies, deicing, etc.); 航班间的服务设备 (补给、除冰等)
- Loading/unloading passengers; 装卸乘客
- Loading and unloading baggage and cargo; and 装卸物资
- Servicing the airport's ramps, runways, and other areas (e.g., snow removal and lawn maintenance equipment). 机场舷梯、跑道及其他区域服务



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（一）机场地面保障设备污染物排放量

机场地面保障设备数量N

✈ 机场常见的地面保障设备

机场常见保障设备有：行李牵引车、传送车、飞机牵引车、平台车、客梯车、摆渡车、电源车、气源车、加油车、空调车、除冰车及扫雪车等

Category	Category Description	GSE	GSE Description	Category	Category Description	GSE	GSE Description	Category	Category Description	GSE	GSE Description
Ground power/air conditioning	Used to help start the engines, operate instruments and provide the passenger comfort (e.g., lighting, air conditioning) while an aircraft is on the ground.		Vehicle with a built-in engine which, when aircraft engines are started, provides air for the initial rotation of large engines.	Baggage/cargo handling	Passenger baggage/cargo must be transferred between gates and from gate to gate. Cargo-only aircraft typically have one or more large doors to facilitate loading/unloading of goods.		Most recognizable type of GSE airport. These vehicles are used to transport baggage, mail, and cargo between an aircraft and the air terminal and/or processing facilities.				Used to flush aircraft lavatory systems. Small commuter and regional aircraft used for short flights may not be equipped with on-board lavatories.
			Mobile generators that provide power parked aircraft when an aircraft's engines are not in use. Typically not used when an airport has gas power systems (i.e., 400 Hertz (Hz)). Can all be used to start aircraft engines.				Used to load and unload baggage cargo into/from an aircraft.				These trucks provide drinkable water to an aircraft.
			Also referred to as air carts, these units provide conditioned (i.e., cooled and heated) air to ventilate parked aircraft. At some larger airports, individual packaged assemblies or centralized electrical-powered pre-conditioned air (PCA) systems are used.				Used to load and unload the cargo aircraft that is within a certain pallet.				Two methods are used to fuel aircraft. The first dispenses fuel from a fuel truck/hunter directly to an aircraft's tank(s). The second method of dispensing fuel is used at airports with underground fueling systems and employs hydrant truck/carts as "connectors" between the underground fueling system and aircraft.
Aircraft movement	Although an aircraft's engines are capable of moving an aircraft in reverse, this is not typically done for aircraft with jet engines due to the resulting "jet blast" that would occur at the back of the aircraft. For this reason, and others, pushback tug/tractors are used to maneuver aircraft away from (i.e., out of) gates.		Used to move an aircraft out of a gate when a pilot is given clearance to taxi a runway. May also be used to move aircraft to various locations on an air (e.g., maintenance hangar). There are two types of pushback tug/tractors: (1) conventional and (2) towbarless. Conventional tugs use towbars that are connected to an aircraft's nose wheel. Towbarless tractors sit atop the nose wheel and lift it off the ground.				Used to load and unload cargo primarily used to move cargo from airport location to another.				Used at airports with underground fueling systems. Flush and clean hydrant pits.
			Typically owned and operated by airlines and companies that specialize airline catering (e.g., preparing and supplying packaged food). Services provided include removal of animal food/drink and loading of these items for the next flight.				Cargo is moved primarily by it within airport cargo handling facilities.				Various types of vehicles are used to provide aircraft maintenance services. These vehicles are used by airport and airline employees to travel between maintenance facilities and an aircraft in need of repair.
Aircraft service	Aircraft service activities include replenishing supplies and aircraft refueling.						At larger airports, there has been a trend to move baggage between concourse collection areas and the concourse collection area terminal baggage claim area via conveyor systems. Installation of conveyor systems can significantly reduce the run time for baggage and reduce the number of baggage at an airport.				Vehicles that are used to transport, heat, and spray deicing fluid on an aircraft prior to departure.



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（一）机场地面保障设备污染物排放量

机场地面保障设备数量N

地面保障设备类型	数量	占设备总数比例
GSE Type	No. of GSE	Percentage of Fleet
Air Conditioners/Heaters	312	3.1%
Air Start Units	160	1.6%
Aircraft Tractors/Tugs	705	7.0%
Belt Loaders	1,102	11.0%
Baggage Tugs	2,575	25.7%
Buses	69	0.7%
Cars/Pickups/Vans/SUVs	1,132	11.3%
Carts	330	3.3%
Cargo Loaders	281	2.8%
Cabin Service/Catering Trucks	320	3.2%
Deicing Trucks	399	4.0%
Forklifts	314	3.1%
Fuel Trucks	151	1.5%
Ground Power Units/Generators/GPU-ACs	487	4.9%
Hydrant Carts/Hydrant Trucks	62	0.6%
Lavatory Carts/Lavatory Trucks	177	1.8%
Light Carts	111	1.1%
Lifts	344	3.4%
Maintenance Trucks	56	0.6%
Other	843	8.4%
Passenger Stairs	95	0.9%
Total	10,025	100.0%

机场场内保障
设备数量及百
分比统计



三、机场污染物排放量精细化核算方法

(一) 机场地面保障设备污染物排放量

机场地面保障设备数量N

地面保障设备类型 总量 柴油 电力 汽油 液化石油气 天然气 太阳能 未知

GSE Type	Total	Fuel Type Percentage by GSE Type						
		Diesel ^a	Electric	Gasoline	LPG	NG	Solar	Unk ^b
Baggage Tugs/Cargo Tugs	2,575	15.4%	16.7%	52.7%	2.8%	0.0%	0.0%	12.3%
Cars/Pickups/SUVs/Vans	1,132	4.9%	0.5%	83.9%	0.1%	0.1%	0.0%	10.5%
Belt Loaders	1,102	25.0%	14.7%	44.6%	0.5%	0.4%	0.0%	14.8%
Other	843	52.2%	4.0%	28.4%	1.5%	0.2%	0.0%	13.6%
Aircraft Tractors/Tugs	705	67.7%	11.1%	8.2%	0.0%	0.0%	0.0%	13.0%
Generators/GPUs/GPU-ACs	487	61.0%	9.9%	7.2%	0.0%	0.2%	0.0%	21.8%
Deicing Trucks	399	64.7%	0.8%	26.6%	0.0%	0.0%	0.0%	8.0%
Lifts	344	21.8%	26.2%	26.7%	5.5%	0.0%	0.0%	19.8%
Carts	330	1.2%	77.6%	5.5%	0.9%	0.0%	0.0%	14.8%
Cabin Service/Catering Trucks	320	52.2%	0.3%	15.3%	0.0%	0.0%	0.0%	32.2%
Forklifts	314	12.7%	8.6%	13.7%	44.9%	0.0%	0.0%	20.1%
Air Conditioners/Heaters	312	76.3%	2.6%	11.5%	0.0%	0.0%	0.0%	9.6%
Cargo Loaders	281	78.6%	0.4%	7.5%	0.4%	0.0%	0.0%	13.2%
Lavatory Trucks/Lavatory Carts	177	17.5%	7.9%	59.9%	0.0%	0.6%	0.0%	14.1%
Air Start Units	160	71.9%	0.6%	2.5%	0.0%	0.0%	0.0%	25.0%
Fuel Trucks	151	64.9%	2.0%	8.6%	0.0%	0.0%	0.0%	24.5%
Light Carts/Light Stands	111	64.9%	1.8%	7.2%	0.0%	0.0%	9.0%	17.1%
Passenger Stairs	95	31.6%	1.1%	42.1%	1.1%	0.0%	0.0%	24.2%
Buses	69	21.7%	0.0%	7.2%	0.0%	55.1%	0.0%	15.9%
Hydrant Carts/Hydrant Trucks	62	61.3%	0.0%	22.6%	0.0%	0.0%	0.0%	16.1%
Maintenance Trucks	56	28.6%	0.0%	44.6%	0.0%	0.0%	0.0%	26.8%
Surveyed GSE Average	10,025	33.5%	11.6%	37.0%	2.6%	0.5%	0.1%	14.7%

机场场内保障
设备按燃料类
型分类数量及
百分比统计



三、机场污染物排放量精细化核算方法

(一) 机场地面保障设备污染物排放量

✈ 基于GSE数量分类方法(GSE Population-Based Option):

$$m_{p,g} = E_{p,g} P_g L_g N_g t_g$$

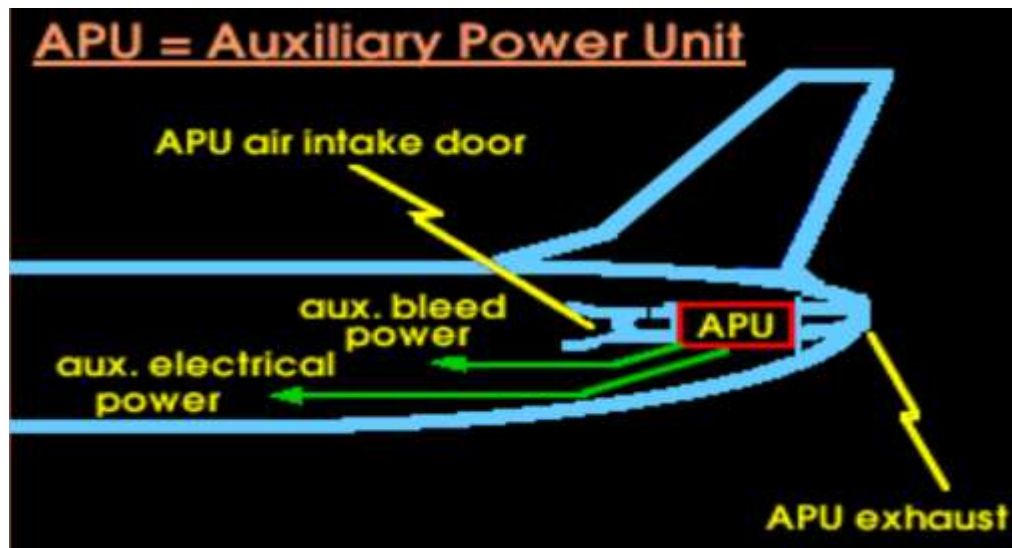
where

- $m_{p,g}$ = the mass (in grams) of pollutant, p , emitted annually from GSE, g 排放量
 $E_{p,g}$ = the emission factor for pollutant, p (in grams per horsepower-hour), for GSE, g 排放因子
 P_g = the rated power (in brake horsepower) of GSE, g 额定功率
 L_g = the load factor (unitless) of GSE, g 负载系数
 N_g = the population of GSE, g (number of units included in the study) 机场地面保障设备数量
 t_g = the time (in hours) that each unit of the population of GSE, g , operates annually
 每一台地面保障设备工作小时数（通常以年计h/y）



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（二）飞机辅助动力装置（APU）污染物排放量



Hamilton Sundstrand
APS 3200 APU for A320 family



Hamilton Sundstrand APS
500R APU for ERJ 135/140/145



Honeywell 36-150CX APU for
Do328





（二）飞机辅助动力装置（APU）污染物排放量

飞机辅助动力装置（APU）是耦合到发电机的小型燃气涡轮发动机，主要有以下作用

- ✈ 当飞机在地面的时候为飞机提供电能（115V， 400Hz）
- ✈ 当飞机在地面的时候向环境控制系统（空调）供气
- ✈ 启动飞机主发动机的时候，APU提供发动机点火之前转起来的动力
- ✈ 在飞行过程中，作为飞行的电力和液压后备系统

与飞机主发动机不同，没有专门机构对APU进行排放认证，制造商通常将APU排放率信息视为专有，因此，公开可用的用于APU污染物排放量核算的数据较少。Emissions mass = time-in-mode x fuel flow x EI, for each mode and each emissions species



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（二）飞机辅助动力装置（APU）污染物排放量

✈ 飞机辅助动力装置（APU）污染物排放量核算方法：

$$\text{Emissions mass} = \text{Time}_{\text{Mode}} \times \text{Fuel Flow}_{\text{Mode}} \times \text{Emission Index}_{\text{Mode}},$$

✈ APU各不同工作状态的用时 $\text{Time}_{\text{Mode}}$

✈ APU的工作可分为三个状态：

✈ Start up (No load) 启动（空载）

✈ Normal running (maximum environmental control system (ECS)
正常运行（最大环境控制系统（ECS）

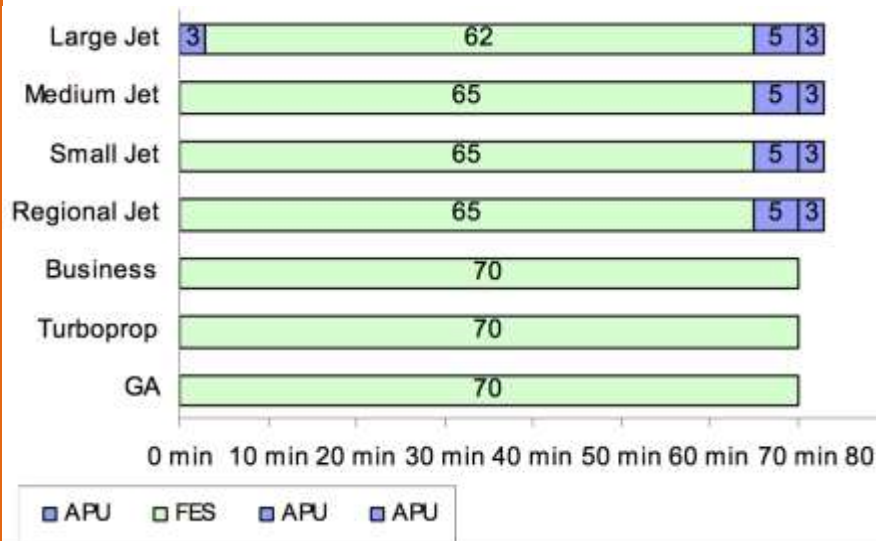
✈ High load (main engine start) 高负载（主机启动）



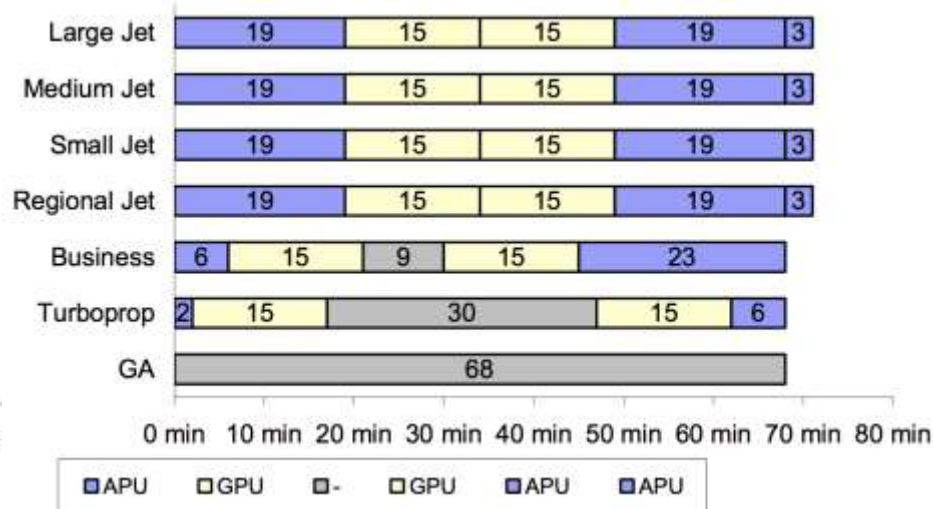
（二）飞机辅助动力装置（APU）污染物排放量

✈ APU各不同工作状态的用时 $Time_{Mode}$

✈ 每架飞机APU总的运行时间跟机场的状况相关，如机场固定供电设施、供电车运行情况、飞机停机位及飞机活动情况、机型等相关



✈ 停机位靠近通过廊桥连接的候机楼，使用固定供电设备及APU条件下，APU的运转时间



✈ 停机位远离候机楼，主要通过APU及地面供电设备供电条件下，APU的运转时间



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（二）飞机辅助动力装置（APU）污染物排放量

✈ APU各不同工作状态的用时 $Time_{Mode}$

✈ APU的工作可分为三个状态：Start up (No load) 启动（空载），Normal running (maximum environmental control system (ECS) 正常运行（最大环境控制系统（ECS），High load (main engine start) 高负载（主机启动）

Activity	Mode	Two-engine aircraft	Four-engine aircraft
APU start-up and stabilization	Start-up	3 minutes	3 minutes
Aircraft preparation, crew and passenger boarding	Normal running	Total pre-departure running time — 3.6 minutes	Total pre-departure running time — 5.3 minutes
Main engine start	High load	35 seconds	140 seconds
Passenger disembarkation and aircraft shutdown	Normal running	15 minutes (default) or as measured	15 minutes (default) or as measured



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（二）飞机辅助动力装置（APU）污染物排放量

✈ 燃油速率 $Fuel\ Flow_{Mode}$

✈ 燃油速率跟机型所匹配的APU类型及APU的工作模式相关

APU fuel group	Start-up No load (kg/h)	Normal running Maximum ECS (kg/h)	High load Main engine start (kg/h)
Business jets/regional jets (seats < 100)	50	90	105
Smaller (100 ≤ seats < 200), newer types	75	100	125
Smaller (100 ≤ seats < 200), older types	80	110	140
Mid-range (200 ≤ seats < 300), all types	105	180	200
Larger (300 ≤ seats), older types	205	300	345
Larger (300 ≤ seats), newer types	170	235	315



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（二）飞机辅助动力装置（APU）污染物排放量

✈ APU排放因子 $Emission\ Index_{Mode}$

✈ APU排放因子跟飞机匹配的APU型号相关

Aircraft	APU	Aircraft	APU	Aircraft	APU
A300-600	GTCP331-200ER (143 HP)	B777-300	GTCP331-500 (143 HP)	DHC-7	GTCP 36 (80HP)
A300-600C	GTCP 660 (300 HP)	BAC-111-100	GTCP85-129 (200 HP)	DHC-8	GTCP 36 (80HP)
A300-600F	GTCP 660 (300 HP)	BAC-111-200	GTCP 36 (80HP)	DHC-8-100	GTCP 36 (80HP)
A300-600R	GTCP 660 (300 HP)	BAC-111-300	GTCP 36 (80HP)	DHC-8-200	GTCP 36 (80HP)
A300B	TSCP700-4B (142 HP)	BAC-111-400	GTCP 36 (80HP)	DHC-8-300	GTCP 36 (80HP)
A300-B2-100	TSCP700-4B (142 HP)	BAC-111-400F	GTCP 36 (80HP)	DHC-8-400	GTCP 36 (80HP)
A300-B2-200	TSCP700-4B (142 HP)	Bae ATP	GTCP 85 (200 HP)	DIAMOND 300	GTCP 36 (80HP)
A300-B4	TSCP700-4B (142 HP)	BAE146	GTCP 36 (80HP)	DO 328	GTCP 36-150[]
A300-B4-100	TSCP700-4B (142 HP)	BAE146-100	GTCP 36-100	EMB-110KQ1	GTCP 36 (80HP)
A300-B4-200	TSCP700-4B (142 HP)	BAE146-200	GTCP 36-100	EMB-120	GTCP 36-150[]
A300-B4-606R	GTCP 660 (300 HP)	BAE146-300	GTCP 36-150[]	EMB-145	GTCP 36 (80HP)
A300-B4-622R	GTCP 660 (300 HP)	BAE146-RJ	GTCP 36 (80HP)	EMBRAER	GTCP 36-150[]
A300-C4-200	GTCP 660 (300 HP)	BEECHJET 400	GTCP 36 (80HP)	F-27 SERIES	GTCP30-54
A300-F4-200	GTCP 660 (300 HP)	BEECHJET 400A	GTCP 36 (80HP)	F-28-1000	GTCP 36-4A
A310	GTCP331-200ER (143 HP)	BH-C99	GTCP 36 (80HP)	F-28-1000C	GTCP 36 (80HP)
A310-200	GTCP 85 (200 HP)	Bombardier Global Exp	GTCP 85 (200 HP)	F-28-2000	GTCP 36 (80HP)
A310-200C	GTCP 85 (200 HP)	Canadair Reg-100	GTCP 36-150[RR]	F-28-3000	GTCP 36 (80HP)
A310-200F	GTCP 85 (200 HP)	Canadair Reg-700	GTCP 85 (200 HP)	F-28-3000C	GTCP 36 (80HP)
A310-300	GTCP 85 (200 HP)	Caravelle-10	GTCP 660 (300 HP)	F-28-4000	GTCP 36 (80HP)
A310-304	GTCP 85 (200 HP)	Caravelle-12	GTCP 660 (300 HP)	F-28-4000/6000	GTCP 36 (80HP)
A319	GTCP 36-300 (80HP)	CITATION I	GTCP 36 (80HP)	F-70-100	GTCP 85 (200 HP)

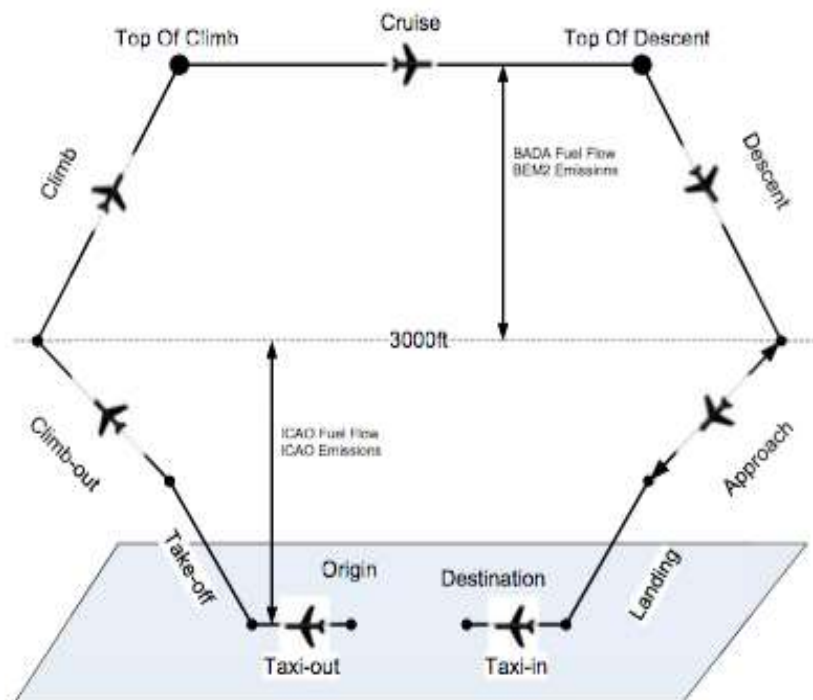
Aircraft Group	APU	CO (g/kg)	HC (g/kg)	NOx (g/kg)
Large Jets	GTCP660-4	8.44	0.25	5.39
Medium Jets	GTCP331-350	2.74	0.31	9.80
	GTCP36-150[R]	6.12	0.84	5.59
Small Jets	GTCP36-300	2.04	0.18	10.18
	GTCP85-129	17.68	1.13	4.63
Regional Jets	GTCP36-150[R]	6.12	0.84	5.59
Business Jets	GTCP36-150[R][R]	7.51	0.86	5.55
Turboprop	GTCP36-150[R][R]	7.51	0.86	5.55



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（三）机场飞机污染物排放量核算

- ✈ 飞行通常被分为两个部分：LTO循环部分以及巡航部分，LTO循环被ICAO定义为在3000ft（914米）以下的工作模式，包括进近、滑行、起飞和爬升，而3000ft大约是大氣混合层高度，大氣混合层会随气象的不同而变化，飞机在大气混合层以上飞行对当地地面环境空气质量影响可忽略。





三、机场污染物排放量精细化核算方法

（三）机场飞机污染物排放量核算

政府间气候变化专门委员会，The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)，推荐两种飞机排放清单的编制方法：

- ✈ Tier 1：仅仅基于燃油的消耗的方法
- ✈ Tier 2：基于燃油的消耗和LTO循环次数的方法

Tier 1 方法不考虑飞机在机场区域各阶段的污染物排放差异，因此准确性相对Tier 2 较差，为尽可能提高污染物排放量核算准确度，



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（三）机场飞机污染物排放量核算

✈ 同一机型一个LTO循环排放量的计算：

$$E_{i,m} = \sum_j n_j F_{j,m} EI_{i,j,m} t_{j,m}$$

$E_{i,m}$ 为飞机污染气体 i 在 m 工作模式下的排放量, g;

n_j 为 j 型飞机的发动机数量, 台;

$F_{j,m}$ 为 j 型飞机在 m 模式下的燃油消耗率, kg/s;

$EI_{i,j,m}$ 为 j 型飞机在 m 模式下污染物 i 的排放因子, g/kg;

$t_{j,m}$ 为 j 型飞机在 m 模式下的工作时间, s;

j 为飞机类型

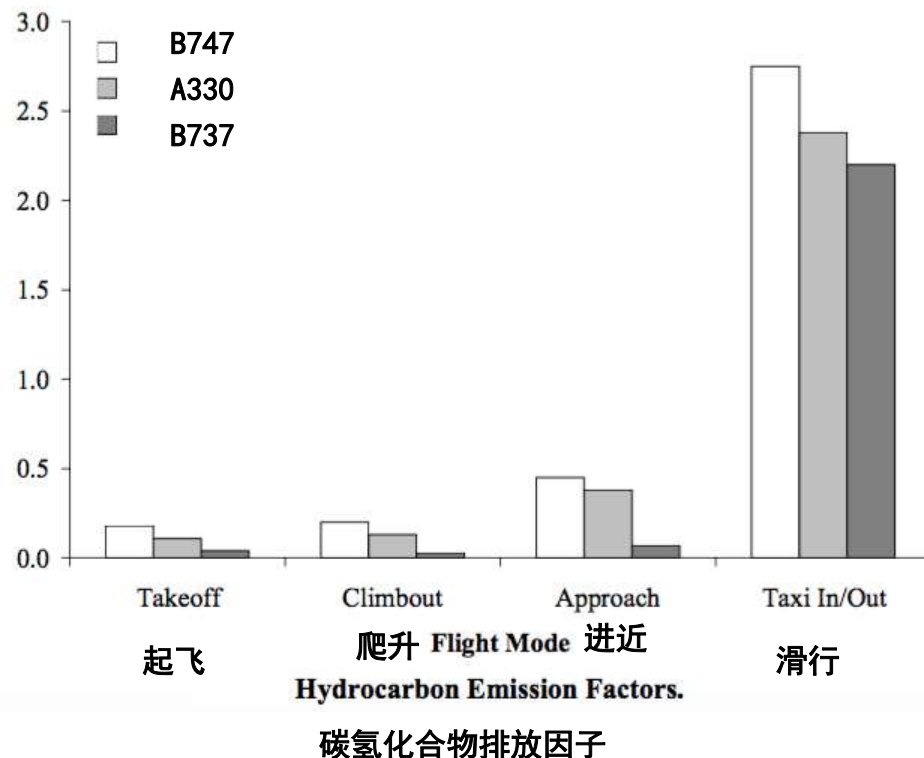


三、机场污染物排放量精细化核算方法

（三）机场飞机污染物排放量核算

✈ 排放因子 $EI_{i,j,m}$:

- ✈ 在对飞机制造商充分调研的基础上，明确不同类型引擎在不同操作模式下的排放因子；结合LTO周期中各操作模式下的飞行时间和研究区域范围内飞机实际的活动特征，建立大型国际机场飞机排放因子数据库





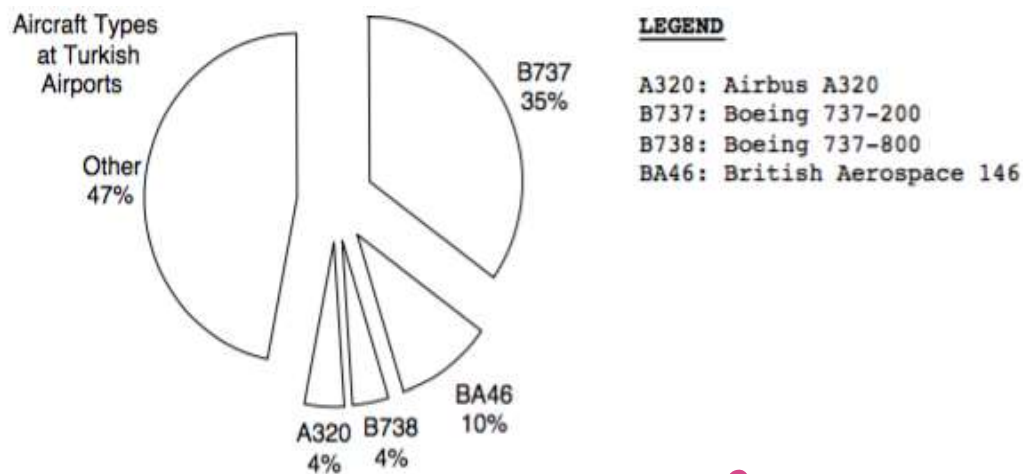
三、机场污染物排放量精细化核算方法

(三) 机场飞机污染物排放量核算

✈ 排放因子数据库的建立 $EI_{i,j,m}$ ：

(1) 机场飞机类型的统计

✈ 收集整理中国民航局以及大型国际机场的2016年进出港航空器的相关信息，结合其他相关资料，统计大型国际机场常见机型及其起降总架次和比例。



(2) 机场不同型号飞机的发动机数量 n_j 分类统计

✈ 按飞机类型如B737、A380分类统计发动机的数量



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（三）机场飞机污染物排放量核算

✈ 排放因子数据库的建立 $EI_{i,j,m}$ ：

（3）机场飞机污染物CO、NOX、HC排放因子数据库的建立

- ✈ ICAO推荐的发动机排放数据库中有飞机在各工作模式下航空器的燃油消耗速率和污染物排放数值。
- ✈ 但由于飞机的制造时间不同，飞机的发动机匹配并不固定，一种型号飞机可能对应多种型号发动机。利用航空器与发动机匹配数据，结合ICAO提供的发动机排放数据库中相对应的燃油消耗速率和污染物排放数据，对同一机型的不同发动机组进行加权平均，得到机场不同类型飞机的排放因子数据库

Typ	Cycle	Fuel Flow (g/kg)	HC(g/kg)	CO (g/kg)	NOX (g/kg)
B737	Approach				
	Taxi				
	Take-off				
	Climb				
A320	Approach				
	Taxi				
	Take-off				
	Climb				



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（三）机场飞机污染物排放量核算

✈ 排放因子数据库的建立 $EI_{i,j,m}$:

（4） $PM_{2.5}$ 排放因子

✈ 颗粒物排放情况复杂，燃油不完全燃烧会产生颗粒物，高推力运行时，由于高油耗也会导致很高的PM排放。飞机发动机的颗粒物直接测量非常困难，导致颗粒物排放测试数据很不完善，仅仅很少一部分型号的发动机有可靠而详细的可见排气冒烟数据，ICAO数据库中不包含 $PM_{2.5}$

A. 中国珠江三角洲 $PM_{2.5}$ 排放系数 $0.279g \cdot kg^{-1}$ ，不考虑飞机各模式下的差异

B. 排放量也可通过美国航空局（FAA）联合美国空军在上世纪八十年代开始研制的一个复杂的机场排放和扩散计算模型EDMS（Emissions and Dispersion Modeling System）来确定。

C. 美国联邦航空管理局制定了一个用冒烟数据及燃料流量速率计算 $PM_{2.5}$ 排放因子的方法 $EI = 0.6 \times (SN)^{1.8} \times (FF)$

其中EI是每秒排放的 $PM_{2.5}$ 的排放系数，SN为烟数，FF为燃料流量速率，单位为kg/s



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（三）机场飞机污染物排放量核算

✈ 排放因子数据库的建立 $EI_{i,j,m}$ ：

（5）SO₂排放因子

✈ ICAO数据库中的污染成分包括HC、CO、NO_x，不包含SO₂，在评价硫的排放时，通常假定燃油中的硫在燃烧过程中全部与氧结合产生SO₂，因此SO₂的排放依赖于燃油成分，其排放系数与发动机性能无关

A. PM_{2.5}排放量可通过环保部颁布的《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》确定

B. 根据Kalivoda的MEET计划中，SO₂的排放取值 $1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

C. 中国珠江三角洲不同机型的SO₂排放系数

D. SO₂排放量也可通过美国航空局（FAA）联合美国空军在上世纪八十年代开始研制的一个复杂的机场排放和扩散计算模型EDMS（Emissions and Dispersion Modeling System）来确定

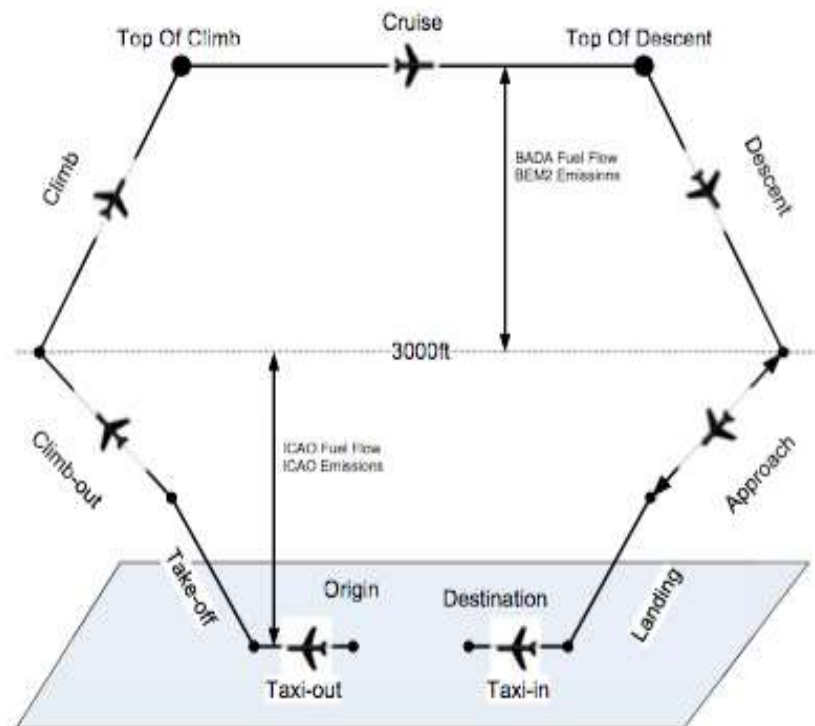
E. 其他文献调研数据，参考其他机场的有关SO₂数据



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（三）机场飞机污染物排放量核算

- ✈ 飞行通常被分为两个部分：LTO循环部分以及巡航部分，LTO循环被ICAO定义为在3000ft（914米）以下的工作模式，包括进近、滑行、起飞和爬升，而3000ft大约是大氣混合层高度，大氣混合层会随气象的不同而变化，飞机在大氣混合层以上飞行对当地地面环境空气质量影响可忽略。





三、机场污染物排放量精细化核算方法

（三）机场飞机污染物排放量核算

- ✈ 在明确机场飞机排放因子数据库的基础上，确定各类航空器的燃油消耗速率和不同工作模式下工作时间，完成机场飞机污染物排放清单核算

（1）不同机型在不同工作模式下工作时间的确定 $t_{j,m}$

- A. 飞机在不同模式工作时间取决于飞机类型、本地气象条件以及机场条件
 - B. 进近和爬升的持续时间很大程度上取决于机场气象条件。在空气模型区域内，飞机工作时间长短由区域逆温层的厚度决定。逆温层厚度即大区混合层高度，混合层高度的确定影响进近和爬升时间
 - C. 滑行/慢车时间均取决于机场跑道、地面交通量以及机场特定的工作程序
 - D. 起飞阶段，高度变化相当标准，一般不会随着地点和飞机类别的改变而改变
-



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（三）机场飞机污染物排放量核算

（1）不同机型在不同工作模式下工作时间的确定 $t_{j,m}$

- ✈ ICAO规定了标准LT0循环不同工作模式下发动机推力设置和工作时间，LT0循环不同工作模式下，发动机推力不一样，各工作模式持续时间不一样，因此每个工作模式的燃油消耗和污染物排放量也不一样，不同类型飞机的发动机推力不一致，燃油排放速率及污染物排放因子也不一致



三、机场污染物排放量精细化核算方法

(三) 机场飞机污染物排放量核算

(1) 不同机型在不同工作模式下工作时间的确定 $t_{j,m}$

ICAO标准LTO循环机推力设置和工作时间

Operating phase	Time-in-mode (minutes)		Thrust setting (percentage of rated thrust)
Approach	4.0		30
Taxi and ground idle	26	7.0 (in) 19.0 (out)	7
Take-off	0.7		100
Climb	2.2		85

机场航班的LTO各阶段的实际运行时间由机场空管部分记录提供



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（三）机场飞机污染物排放量核算

（2）机场不同型飞机在 m 模式下的燃油消耗率 $F_{j,m}$ (kg/s) 统计

- ✈ ICAO推荐的发动机排放数据库中有飞机在各工作模式下航空器的燃油消耗率数值
- ✈ 但由于飞机的制造时间不同，所属航空公司不同，飞机的发动机匹配并不固定，一种型号飞机可能对应多种型号发动机。利用航空器与发动机匹配数据，结合ICAO提供的发动机排放数据库中相对应的燃油消耗和污染物排放数据，对同一机型的不同发动机组进行加权平均，不同机型的不同模式下燃油消耗率

Type↕	Cycle↕	Fuel Flow Rate↕
B737↕	Approach↕	↕
	Taxi↕	↕
	Take -off↕	↕
	<u>Climb</u> ↕	↕



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（四）机场飞机排放清单的建立

（3）排放清单的建立

$$E_{i,m} = \sum_j n_j F_{j,m} EI_{i,j,m} t_{j,m}$$

$E_{i,m}$ 为飞机污染气体 i 在 m 工作模式下的排放量, g;

n_j 为 j 型飞机的发动机数量, 台;

$F_{j,m}$ 为 j 型飞机在 m 模式下的燃油消耗率, kg/s;

$EI_{i,j,m}$ 为 j 型飞机在 m 模式下污染物 i 的排放因子, g/kg;

$t_{j,m}$ 为 j 型飞机在 m 模式下的工作时间, s;

j 为飞机类型



（四）机场区域大气污染管理策略研究

- ✈ 进行机场区域大气污染减排技术及监管策略的研究；明确机场区域污染物的排放特征，以及机场飞机的排放情况进行大气污染管控策略研究。

（1）机场地面保障机械污染控制策略

- ✈ 基于设备自身的途径：使用基础设施或硬件系统作为GSE的替代品，比如用集中输送带式行李分配和运输系统，以取代行李拖船和皮带装载机；在常规燃料GSE上使用附加污染控制装置；在常规燃料GSE上使用先进的燃料燃烧技术
 - ✈ 基于设备运行和维护的途径：限制地面保障机械的空转时间；对设备进行有规律的维护以减少运行过程中的故障
-



三、机场污染物排放量精细化核算方法

（四）机场区域大气污染管理策略研究

（1）机场地面保障机械污染控制策略

- ✈ 基于替代燃料的途径：使用太阳能、电动、天然气等燃料车替代传统的柴油、汽油燃料车

应用 LPG 和 CNG 燃料后污染物削减比例

污染物	液化石油气 LPG	压缩天然气 CNG	液化石油气 LPG	压缩天然气 CNG
	与汽油机比较		与柴油机相比	
HC	-50% ~ -65%	-65% ~ -75%	+95% ~ +140%	+30% ~ +60%
CO		-40% ~ -50%		+4 000% ~ +5 000%
NO _x		-20% ~ -25%		-75% ~ -80%
PM		-20%		-95%
CO ₂	-15%	-20%	-5% ~ +15%	-10% ~ +10%

- ✈ 其他途径：通过对过度排放污染物的地面保障设备收税，欧洲多个机场已经实施；承租人租赁协议，将减排目标纳入租户租赁协议，即将减排目标纳入与航空公司的协议，如苏黎世机场



(四) 机场区域大气污染管理策略研究

(2) 减少APU的排放

- ✈ 通过优化管理，合理安排飞机停机位置，使用固定供电系统（FES, Fixes Energy System）、地面电力设备（GPU, Ground Power Unit）及空气供应设备（ACU, Air Climate Unit）替代APU的使用，减少污染物的排放

(3) 优化LTO各阶段的时间安排

- ✈ 通过优化LTO各阶段的时间，特别是滑行阶段的时间来减少污染物的排放，飞机污染物排放总量的50%以上是在飞机LTO的滑行阶段产生的，因此，从机场大气污染物减排的角度，根据不同机型，合理优化飞机滑行线路，缩短飞机在机场内的滑行时间对改善机场区域空气质量具有重要意义

(4) 机场区域大气污染监管策略

- ✈ 根据研究内容1-4，系统掌握机场区域空气污染现状，参考国内外城市大气污染治理有效措施，提出机场区域大气污染长效控制及监管对策
-



Thank You For Your Attention !

