

文章编号:1671-1637(2012)02-0053-09

航空发动机污染物排放量估算方法

孙见忠, 左洪福, 刘鹏鹏, 付 宇

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:借助发动机性能模型,研究了发动机性能退化对氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、未燃碳氢化合物(UHC)与碳烟颗粒(Soot)排放的影响,提出了基于飞行参数与发动机性能模型的污染物排放总量估算方法。利用ICAO排放数据拟合得到发动机地面状态下的参考排放指数,利用相对法模型得到飞行状态下的排放指数,根据航班飞行参数和发动机性能模型估算航班污染物排放总量。研究表明:性能退化对污染物的排放指数影响较大,仅考虑进对燃油消耗量的影响,性能退化对 NO_x 排放总量的影响较小,但会引起CO、UHC与Soot排放总量的上升。执行中短途航班的双发民航飞机的 NO_x 排放总量最高约为100 kg,其次为CO,约为20 kg,而UHC和Soot的排放总量较低,小于1 kg。老化发动机的CO、UHC与Soot的排放总量增加约为10%,而 NO_x 排放总量增加约为2%。

关键词:航空发动机; 污染物排放; 排放指数估算; 性能退化; 性能模型

中图分类号:V231.25

文献标志码:A

Estimation method of aeroengine pollution emissions

SUN Jian-zhong, ZUO Hong-fu, LIU Peng-peng, FU Yu

(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: On the basis of engine performance model, the effects of performance deterioration on engine pollution emissions, such as NO_x , CO, UHC and Soot, were studied, and an estimation method of total emissions in flight based on flight parameters and engine performance model was proposed. By fitting ICAO emission data, the reference emission indices of engine under ground condition were obtained, the emission indices in flight were calculated by using the reference emission model, and the total emissions in flight were calculated based on flight parameters and engine performance model. Study result shows that engine performance deterioration has great effects on the emission indices. When considering the impact of fuel flow, the performance deterioration has less impact on NO_x emission, but makes the total emissions of CO, UHC and Soot increase. For a modern turbo fan engine in a middle range flight, the total emission of NO_x is about 100 kg, CO about 20 kg, and both UHC and Soot less than 1 kg. Engine performance deterioration results in an increase of about 10% for the total emissions of CO, UHC and Soot, but about 2% for NO_x . 4 tabs, 15 figs, 15 refs.

Key words: aeroengine; pollution emission; emission index estimation; performance deterioration; performance model

Author resumes: SUN Jian-zhong(1982-), male, doctoral student, +86-25-84895772, sunjianzhong@

收稿日期:2011-11-20

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助基金项目(60939003)

作者简介:孙见忠(1982-),男,山东青岛人,南京航空航天大学工学博士研究生,从事航空发动机研究。

导师简介:左洪福(1959-),男,湖南茶陵人,南京航空航天大学教授,工学博士。

nuaa.edu.cn; ZUO Hong-fu(1959-), male, professor, PhD, +86-25-84891098, rms@nuaa.edu.cn.

0 引 言

航空发动机污染物排放所引起的环境问题正受到人们越来越多的关注,研究污染物排放总量估算方法也变得日益重要。航空发动机排放的污染物主要包括氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、未燃碳氢化合物(UHC)与碳烟颗粒(Soot)等,这些物质除对机场周边环境与公共健康造成严重危害外,飞机在高空飞行中所排放的污染物更容易导致温室效应和气候的变化,因此,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)以及各国适航当局对民航发动机的污染物排放作了一系列强制性的规定。行业内对发动机尾气排放的重视程度已经上升到与安全性、经济性与可靠性同等重要的高度,在不断提高发动机性能,降低耗油率的同时,必须同时降低发动机的污染物排放,以满足日趋严格的适航要求^[1]。

发动机污染物排放量的估算是发动机排放控制 and 环境影响评估的基础,其相关研究成果可以为发动机设计改进与运行优化提供决策辅助。现有的排放标准体系以飞机的着陆起飞循环(Landing-Take Off, LTO)为基础,对航空器在机场附近的排放做出了规定,而对于飞机高空巡航时的排放没有明确规定,但鉴于高空排放的危害性,ICAO 正在考虑把对高空排放的控制也纳入到新的适航体系中。ICAO 规定了飞机在标准 LTO 的起飞、爬升、进场和地面滑行阶段 CO、UHC、 NO_x 与 Soot 四种污染物的排放标准。在进行发动机适航取证时必须提供标准 LTO 排放数据,ICAO 收集这些数据并建立了民航发动机排放数据库。但如前所述,一方面,这些数据是基于标准 LTO 计算的,仅仅反映了发动机在地面与机场附近空域的排放情况,对于占大部分时间的高空巡航状态却没有涉及;另一方面,这些数据来源于发动机适航取证,通常是新发动机在地面试车台上获得,没有考虑实际运行条件下发动机性能退化等因素对尾气排放的影响。

航班各阶段污染物排放指数估算方法主要包括两大类:一种是直接法,即通过分析发动机尾气污染物的生成机理,借助发动机的热力循环参数,计算各种污染物的排放指数^[2-4]。这种直接估算方法需要建立在燃烧化学反应动力学的基础之上,由于计算过程涉及燃烧室设计参数与燃油雾化特性等数据,建

模计算比较困难,且模型通常只适用于某一特定燃烧室。但这一类模型对于理解污染物的生成机理与改进燃烧室设计以降低污染物排放具有重要意义。另一种是相对法,即借助已知的发动机在地面各推力状态下的污染物的排放指数(如 ICAO 公布的发动机污染物排放数据)来估计发动机在各种实际工况下的排放指数。这种方法基于飞机高空与地面排放指数之比取决于 2 种工作状态下的某些关键的热力学参数的比值^[5-6],这些关键参数通常是与燃烧相关的各种热力学参数,特别是燃烧室入口处总温度(T_3)和总压力(P_3),因此,这些方法又称为 P_3 - T_3 方法。但某些与燃烧相关的参数(如燃烧室火焰温度与主燃区当量比等)无法直接测量^[6],需借助发动机性能模型来计算。另外一种相对法是燃油流量法^[7-8],这类方法仅需要知道外界大气压力与温度和实际的燃油流量即可估算整个航班中的发动机污染物排放量,由于方法简单,容易实现,因而被广泛采用,但无法考虑性能退化等实际运行条件对排放的影响。

国内学者也开展了相关研究:夏卿等基于 ICAO 公布的发动机排放数据,对中国民航机场飞机起飞着陆循环的污染物排放量进行了估算^[9];黄勇等采用燃油流量法对中国上空 NO_x 排放物分布进行了研究^[10-11];魏志强等根据实际的飞行参数,借助燃油流量法对航班各阶段的污染物排放量进行了估算^[12]。国内较少见基于污染物生成机理的直接估算方法与 P_3 - T_3 方法的研究。

目前,大多数污染物排放估算方法直接以 ICAO 数据为基础,在估算发动机的污染物排放总量时没有考虑发动机老化与外界大气条件对排放指数的影响。而实际上发动机污染物排放指数除与推力大小密切相关外,还与实际的飞行条件(如飞行速度、外界大气温度与压力等)与发动机自身状况(如发动机老化与故障等)有关。采用 P_3 - T_3 方法建立发动机污染物排放指数与发动机内部流场参数的关系,不需要太多的发动机设计参数,建模相对容易,因此,可以借助这类模型来分析实际运行条件,如发动机性能退化与飞行条件等因素,对污染物排放的影响^[5]。鉴于发动机尾气污染物排放对环境的影响与适航条例对此的规定,在中国大力发展大飞机与商用发动机项目的背景下,进一步深入研究发动机污染物生成机理与排放量的估算方法

具有重要意义。本文以 P_3-T_3 排放指数估算模型为基础,研究发动机性能退化对尾气污染物排放的影响,以及实际运行条件下污染物排放总量的估算方法。

1 发动机污染物排放指数估算

本文借助相对法模型(P_3-T_3 排放指数估算模型)估算发动机在实际运行条件下的污染物排放指

数。相对法的基本思想是飞机高空排放指数与地面参考排放指数之比取决于发动机 2 种工作状态下的某些关键热力学参数的比值^[6]。本节首先根据 ICAO 公布的发动机在地面试车台上 4 种推力等级的污染物排放数据(CFM56-5B3/3 发动机处于地面试车台上的排放数据见表 1),拟合得到发动机在地面状态任意推力下的参考排放指数,然后采用相对法模型估算发动机在高空飞行状态下的排放指数。

表 1 排放审定数据

Tab. 1 Emission certification data

发动机工作状态	推力/%	工作时间/min	燃油流量/(kg·s ⁻¹)	排放指数/(g·kg ⁻¹)			冒烟数
				UHC	CO	NO _x	
起飞	100	0.7	1.46	0.048	0.543	30.904	15.98
爬升	85	2.2	1.15	0.023	0.251	21.828	13.38
进近	30	4.0	0.36	0.045	2.144	9.557	2.11
滑行	7	26.0	0.11	1.097	25.588	4.601	2.05

1.1 NO_x 排放指数估算模型

NO_x 主要在主燃区的高温火焰区内生成,与主燃区温度、燃烧室进口温度、燃烧室压力、燃油雾化质量与停留时间有关,其中燃气在高温区的停留时间对 NO_x 的生成有重要影响。本文采用文献^[6]中的 NO_x 计算模型,其排放指数 E_1 为

$$E_1 = E_{1,r} \left(\frac{P_3}{P_{3,r}} \right)^{0.5} \left(\frac{T_{3,r}}{T_3} \right)^{0.5} \left(\frac{T_{1,r}}{T_1} \right)^{1.5} \cdot \exp[38\,000(1/T_{2,r} - 1/T_2)] \quad (1)$$

$$T_1 = 0.5(T_2 + T_3)$$

$$T_2 = RT(\varphi) + (1 - R)T_4$$

$$E_{1,r} = d \left(\frac{P_3}{T_3} \right)^{0.5} T_1^{-1.5} e^{-38\,000/T_2} = d\lambda$$

式中: d 借助 ICAO 数据拟合得到,见图 1; T_1 、 T_2 分别为主燃区和火焰温度;带下标“r”的变量为对应变量在地面参考状态下的参考值; T_4 为主燃区的当量比恰好为 1 时的温度;而 $T(\varphi)$ 为当量比为 φ 时的

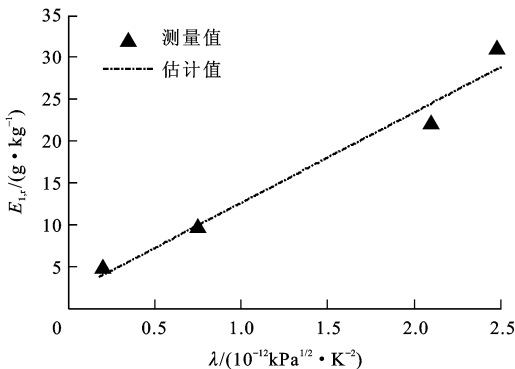


图 1 NO_x 参考排放指数

Fig. 1 NO_x reference emission index

主燃区温度; R 为权重因子,一般取值为 0.25^[6]。

1.2 CO 和 UHC 排放指数估算模型

CO 和 UHC 均为燃油不完全燃烧的产物。CO 是碳氢化合物氧化反应的中间产物。UHC 主要由燃烧室出口未完全燃烧的燃油颗粒、燃油蒸气与燃烧过程中裂解的小分子燃油组成。CO 和 UHC 的排放指数(E_2 、 E_3)计算模型为^[6]

$$E_2/E_3 = (E_{2,r}/E_{3,r}) \left(\frac{T_3}{T_{3,r}} \frac{P_{3,r}}{P_3} \right)^{0.4} \quad (2)$$

$$E_{2,r}/E_{3,r} = a\theta^2 + b\theta + c$$

$$\theta = \frac{w_{\text{Air}}}{P_3^{1.8} e^{T_3/300}}$$

式中: w_{Air} 为空气流量; a 、 b 、 c 为排放参数,借助 ICAO 数据拟合得到。

发动机在地面静止状态下的 CO 和 UHC 参考排放指数随 θ 的变化趋势分别见图 2、3。

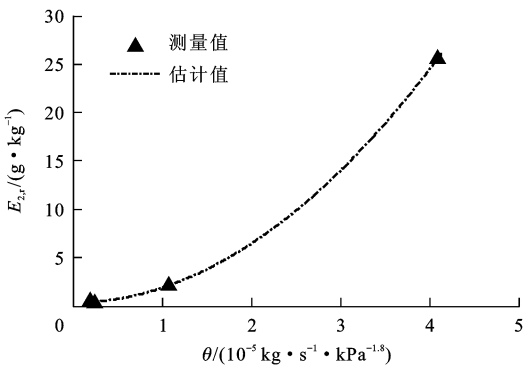


图 2 CO 参考排放指数

Fig. 2 CO reference emission index

1.3 Soot 排放浓度估算模型

Soot 是燃烧过程中的一种不平衡产物,实际上

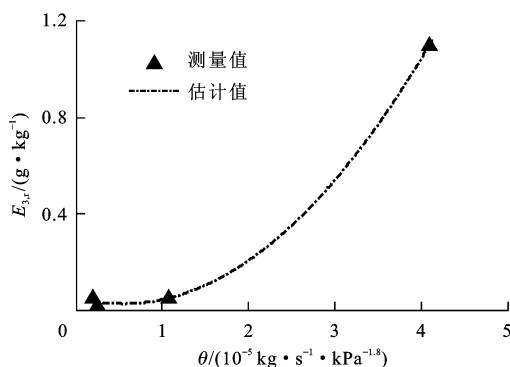


图3 UHC 参考排放指数

Fig. 3 UHC reference emission index

是燃烧室主燃区内的碳烟粒子的生成与随后的高温区中氧化 2 个过程的综合结果,碳烟粒子的生成和氧化机理比较复杂,依靠化学反应动力学尚不能充分解释。燃烧室内碳烟粒子的生成与燃油类型、燃烧室压力、主燃区油气比与燃油的雾化质量等有关。目前,ICAO 对于发动机排气冒烟的控制依靠美国汽车工程师协会(SAE)推荐的一种冒烟表示单位——冒烟数。本文借助 ICAO 公布的冒烟数 S 来估算 Soot 的排放浓度,第 1 步需要根据已有的数据,建立发动机 S 与 Soot 浓度的对应关系。Hurley 针对 CFM56-5C2 型发动机得到了 Soot 浓度 C_{Soot} 与 S 的对应函数关系式^[6]

$$C_{\text{Soot}} = 4.05 \times 10^{-6} S^4 - 3.01 \times 10^{-4} S^3 + 8.17 \times 10^{-3} S^2 + 6.32 \times 10^{-2} S - 9.44 \times 10^{-12} \quad (3)$$

在缺乏相关数据的情况下,依据 ICAO 公布的 CFM56-5B3 型发动机的排气冒烟数,采用式(3)来估计 CFM56-5B3 型发动机在地面静止状态下 4 种推力等级的 Soot 参考排放浓度,分别为 2.135 2、1.720 2、0.166 0、0.166 0 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在实际飞行条件下,Soot 排放浓度(C_s)可根据以下模型来估算^[6]

$$C_s = C_{s,r} \left(\frac{P}{P_r} \right)^{2.5} \left(\frac{P_3}{P_{3,r}} \right)^{2.5} \frac{\exp(-20\,000/T_2)}{\exp(-20\,000/T_{2,r})} \quad (4)$$

$$C_{s,r} = \alpha T_3^2 + \beta T_3 + \gamma$$

式中:参数 α 、 β 、 γ 借助 Soot 参考排放浓度数据拟合得到。

地面静止状态下 Soot 排放浓度随燃烧室进口温度 T_3 的变化关系见图 4。

以 ICAO 公布的发动机在地面试车时的参考排放数据为基础,借助发动机性能模型得到实际运行条件下相关热力学参数与上述 4 种发动机污染物排放指数的估算模型,可估算发动机在实际运行条件下的污染物排放指数,进而可以研究发动机性能退化

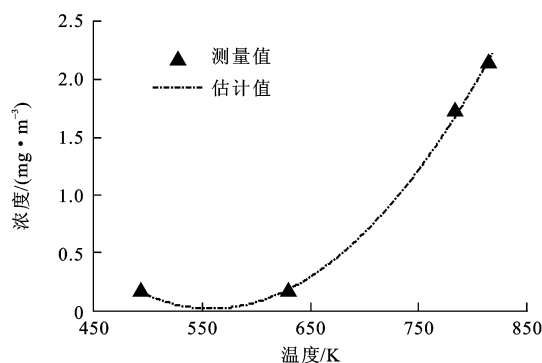


图4 Soot 参考排放浓度

Fig. 4 Soot reference emission concentration

对污染物排放的影响,以及估算实际飞行条件下发动机污染物排放总量。

2 性能退化对污染物排放的影响

在实践中,随着使用时间的累积发动机性能发生缓慢退化,在同样的外界条件和发动机推力需求下,相比于新发动机,老化的发动机内部流场参数发生变化,如燃油消耗率上升,涡轮进口处与尾气排气温度升高等,这不仅会导致燃油成本的上升,还会加速热端部件的寿命损耗,最终影响发动机使用的经济性,甚至安全性。另一方面,排气污染物的生成与发动机内部流场参数密切相关,如燃烧室压力的上升会导致 Soot 生成速率上升,因此,发动机性能衰退会引起内部流场参数变化,进而对污染物排放产生影响。

2.1 涡扇发动机性能仿真模型

本文借助相对法模型估算发动机在各种工况下的污染物排放指数的一个基础就是发动机性能仿真模型,在给定的外界飞行条件,即飞行高度、马赫数与推力需求时,能够借助性能模型计算发动机内部流场参数。但发动机性能模型为发动机制造商的重要资产,通常无法获得。在发动机部件特性缺乏的情况下,可根据特定发动机的公开数据和信息,借助相似级别的(如压比、额定推力与涵道比等)通用化的一般涡扇发动机部件特性,通过自适应建模技术,建立满足一定精度要求的特定发动机的性能仿真模型。自适应建模是通过不断调整各部件特性的耦合系数,使发动机性能模型的预测值与实测性能数据相匹配^[13-14]。本文以 CFM56-5B3 型发动机为对象,借助 ICAO 公布的此型号发动机相关性能数据,通过修正一般的涡扇发动机的部件特性,使性能模型的预测值与实测数据相匹配(图 5 为燃油流量的

性能模型预测值与实际测量值的对比),并以此性能仿真模型为基础研究实际运行条件对污染物排放的影响与污染物排放总量的估算方法。

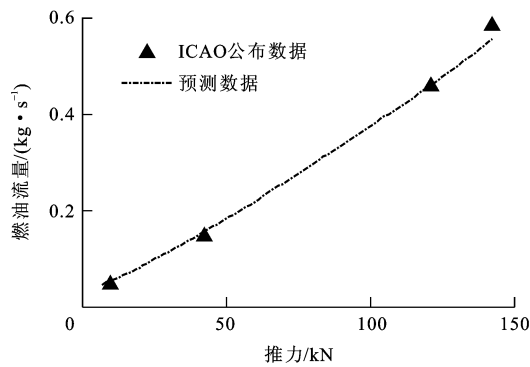


图 5 实测燃油流量与性能模型预测值对比

Fig. 5 Comparison of real fuel flow and its prediction value

2.2 发动机性能退化仿真

引起发动机性能衰退的机制非常复杂,不同的单元体部件的衰退机制不同,但最终会引起各单元体部件效率与流量参数的变化,这反映在发动机部件特性图上就是部件效率和流量偏离设计值,因此,在发动机性能仿真试验中,可以通过设定各个单元体部件的流量和效率的偏移量的不同组合来模拟发动机不同的退化模式和程度,借助发动机性能模型,可以研究不同部件衰退对发动机整机性能与污染物排放的影响。在地面最大推力状态下,不同部件退化对发动机热力学参数的影响见表 2, F_{an} 为风扇, LPC 为低压压气机, HPC 为高压压气机, HPT 为高压涡轮, LPT 为低压涡轮, E 为部件效率变化量, F 为部件流量变化量, ΔP_3 为进口压力变化量, ΔT_3 为进口温度变化量, ΔW_f 为燃油流量 W_f 的变化量。

表 2 部件退化对发动机热力学参数的影响

Tab. 2 Effects of part degradations on engine thermodynamics parameters

部件	$E/\%$	$F/\%$	$\Delta P_3/\text{kPa}$	$\Delta T_3/\text{K}$	$\Delta W_f/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$
Fan	-2	-2	33.2	2.1	0.013
LPC	-2	-2	-21.6	3.6	0.010
HPC	-2	-2	-6.7	6.8	0.015
HPT	-2	2	-81.4	-8.9	0.027
LPT	-2	2	31.9	5.7	0.025

2.3 发动机性能退化对污染物排放的影响

参考排放指数是新发动机在地面静止状态下的污染物排放量的估计,性能退化引起发动机内部热力学参数的变化,最终会引起污染物排放指数的变化。发动机使用中高压转子工作环境最恶劣,承受载荷最大,性能退化较明显,因此,本文重点研究高

压转子性能衰退对污染物排放的影响。假设部件效率每下降 1%,相应的流量也会下降或上升 1%,分别模拟高压压气机衰退、涡轮部件衰退以及两者同时衰退对各种污染物排放的影响,仿真试验见表 3。在实践中,尾气排气温度 EGT 温升是衡量在役发动机整机性能退化的一个重要指标,因此,表 3 中同时给出了各种衰退模式下发动机起飞 EGT 温升 ΔT_E ,以便对其性能衰退程度有一个定量的认识 and 比较。

表 3 高压转子性能衰退模拟

Tab. 3 Degradation simulation of high pressure rotor

部件	退化程度	1	2	3	4	5	6
HPC	$F/\%$	-1	-2	-3	-4	-5	-6
	$E/\%$	-1	-2	-3	-4	-5	-6
	$\Delta T_E/\text{K}$	5.6	9.1	12.8	16.8	20.9	25.3
HPT	$F/\%$	1	2	3	4	5	6
	$E/\%$	-1	-2	-3	-4	-5	-6
	$\Delta T_E/\text{K}$	9.6	21.0	34.0	48.0	63.0	79.5
HPC+HPT	$F/\%$	± 1	± 2	± 3	± 4	—	—
	$E/\%$	-1	-2	-3	-4	—	—
	$\Delta T_E/\text{K}$	15.7	34.7	56.5	80.3	—	—

发动机性能退化对各种污染物排放指数的影响见图 6~9。发动机在不同功率状态下的各种污染物的排放指数变化较大,在大功率状态下, NO_x 和 Soot 排放比较大,因此,选择大功率状态下分析性能退化对 NO_x 和 Soot 排放的影响。图 6、7 分别为 80% 额定推力下(起飞爬升阶段), NO_x 排放指数与 Soot 排放浓度随部件性能退化的变化趋势。由图 6 可见,在大功率状态下,涡轮部件的性能退化会引起 NO_x 排放指数的快速下降,性能衰退严重时引起 NO_x 排放指数下降高达 20%,而压气机衰退对 NO_x 排放的影响较小。当两者同时发生衰退时,对 NO_x 排放指数的影响更加明显,性能衰退严重时引

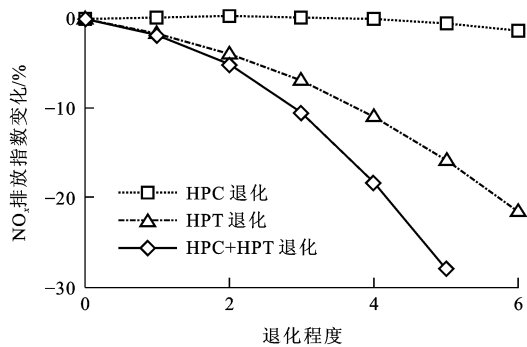
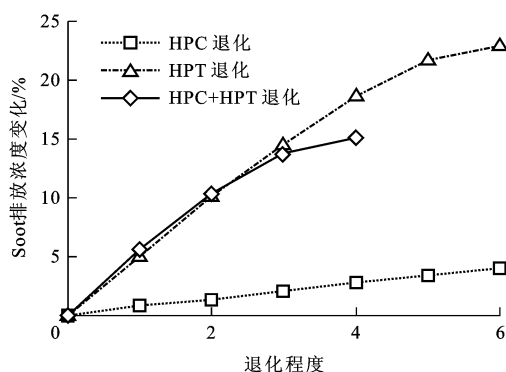
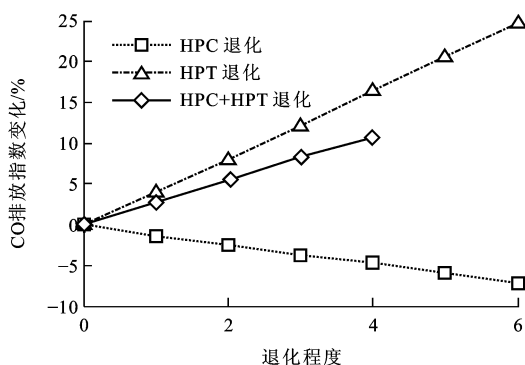
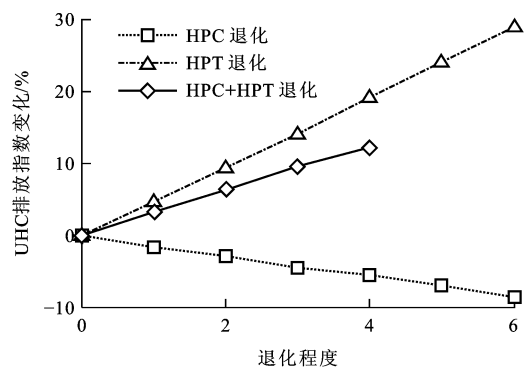


图 6 性能退化对 E_1 的影响

Fig. 6 Effect of degradation on E_1

图7 性能退化对 C_s 的影响Fig. 7 Effect of degradation on C_s 图8 性能退化对 E_2 的影响Fig. 8 Effect of degradation on E_2 图9 性能退化对 E_3 的影响Fig. 9 Effect of degradation on E_3

起 NO_x 排放指数下降高达 30%。图 7 为 Soot 排放浓度随着各部件的性能退化呈现上升的趋势,其中压气机性能退化引起 Soot 排放浓度轻微升高,而高压涡轮性能退化对 Soot 排放的影响非常明显,性能衰退严重时引起 Soot 排放浓度上升 20% 以上。当两者同时发生衰退引起 Soot 排放浓度的变化趋势与涡轮部件退化引起的变化趋势类似。由图 6 可见,发动机单个部件或整机性能退化对 NO_x 排放指数的影响趋势类似,即均引起 NO_x 排放指数的下降,但影响程度不同;同样,图 7 显示发动机单个部

件或整机性能退化对 Soot 排放浓度的影响趋势也一致,即均引起 Soot 排放浓度的上升,但影响程度不同。

在低功率状态下,UHC 与 CO 的排放比较大,因此,选择低功率状态分析性能退化对 UHC 和 CO 排放的影响。图 8、9 为 7% 额定推力下(地面滑行/慢车阶段),CO 与 UHC 排放指数随部件性能退化的变化趋势。CO 和 UHC 均为不完全燃烧的产物,生成条件类似,因此,性能退化对 CO 和 UHC 排放指数的影响趋势类似。在图 8 中,压气机衰退引起 CO 排放指数下降,性能退化严重时 CO 排放指数下降高达 10%;而涡轮部件退化则引起排放指数的上升,退化严重时引起排放指数上升高达 25%;当两者同时退化时仍然引起 CO 排放指数的上升,但上升幅度相对较小。对 UHC 排放指数的分析可得到同样的结论(图 9)。

由以上分析可得,在大功率状态下, NO_x 的排放指数随发动机整机性能退化而下降,其他污染物排放则随性能退化呈上升趋势。相对于压气机,涡轮部件性能退化对各种污染排放指数的影响更加明显。这意味着相对于新的发动机,老化的发动机的 NO_x 的排放指数会降低,而其他污染物排放指数会上升。如果进一步考虑性能退化对燃油消耗的影响,在执行同一航班任务时,老化的发动机因燃油消耗的上升会进一步增加 CO、UHC 与 Soot 的排放总量,在一定程度上抵消了因性能退化而引起的 NO_x 排放总量的降低。Platt 等依据实测发动机排放数据研究了性能衰退对 NO_x 排放的影响,在起飞爬升状态(大功率状态)下发动机 NO_x 排放指数随着使用时间的增加呈下降趋势^[15],这与本文计算结果相吻合。国内外公开发表的文献中很少有相关性性能退化对其他污染物排放影响的试验数据,有待进一步验证和解释。

3 实际运行条件下污染物排放量估算

根据实际的航班计划(如飞行距离、巡航高度、速度、商务载荷及携带的燃油质量等)和飞行动力学模型计算航班各阶段对发动机的推力需求,利用发动机性能模型,根据实际的推力需求、飞行速度与外界大气条件(包括高度和标准大气温度偏差)计算发动机内部流场参数,借助排放指数估算模型估算实际飞行条件下的各种污染物的排放指数,根据实际的燃油消耗率估算整个航班的污染物排放总量,计算方法见图 10。借助发动机性能模型,不仅可以根

据实际的飞行条件来估算排放总量,而且可以考虑发动机的老化对尾气排放的影响,使得估算结果更加接近实际情况。

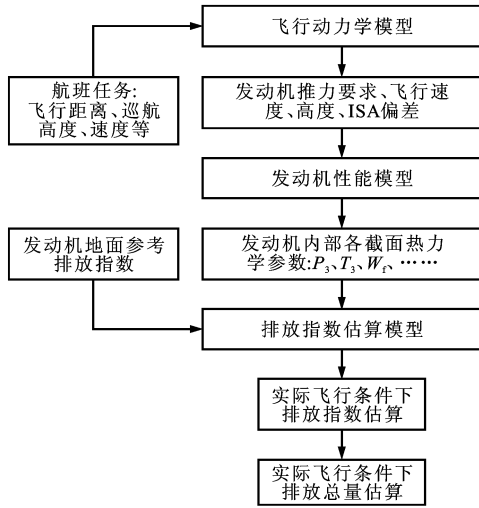


图10 污染物排放总量估算方法

Fig. 10 Estimation method of total pollution emissions

3.1 飞行性能参数计算

按照给定的航班任务计划,依据飞行动力学模型可计算飞机在整个航班各阶段的飞行性能数据。某一典型航班飞行距离为1 500 km;巡航高度为11 km,巡航速度为0.78 Ma,ISA的值为0,各阶段的飞行参数及对发动机(2台)推力需求分别见图11、12。

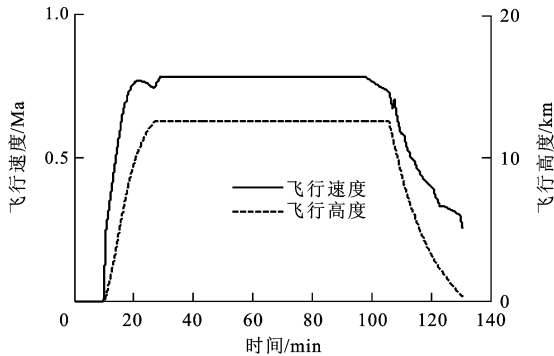


图11 航班飞行速度与高度

Fig. 11 Flight speed and altitude

3.2 发动机性能参数计算

根据发动机推力需求与外界条件,即飞行速度、高度与标准大气温度偏差,借助发动机性能模型可计算航班各阶段发动机内部热力学参数,燃烧室进口处参数的变化见图13。

3.3 航班各阶段污染物排放指数与总量估算

已知航班各阶段发动机内部相关的热力学参数与各种污染物的参考排放指数,可根据第1节所述方法来估算发动机在航班各个阶段的排放指数。

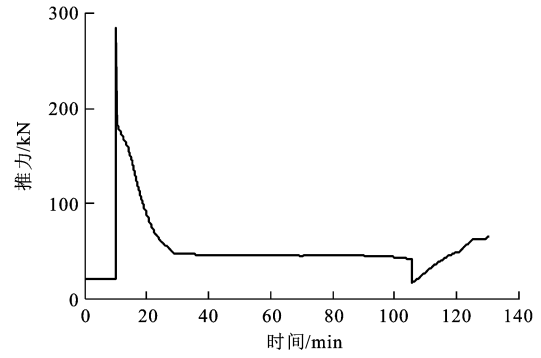


图12 发动机推力需求

Fig. 12 Required engine thrust

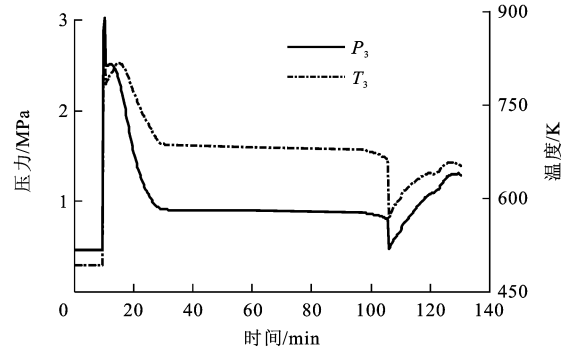


图13 燃烧室进口温度和压力

Fig. 13 Total pressure and temperature at inlet of combustion chamber

图14、15为航班各阶段各种污染物的排放指数与相同条件下老化的发动机(HPC和HPT同时退化,退化程度为2,见表3)的排放指数(图中虚线)。由图14、15可见, NO_x 排放指数和Soot浓度在飞机起飞时达到了峰值,而UHC和CO排放指数则在地面慢车状态最高。发动机性能退化造成CO、UHC与Soot排放指数的上升,而对 NO_x 的影响比较复杂。在大功率状态下,如起飞爬升阶段,性能退化引起 NO_x 排放指数减小,而在小功率状态,如巡航、进近与地面滑行状态, NO_x 排放指数上升。

已知航班各阶段的污染物排放指数,可根据实际的燃油消耗量进一步估算整个航班中污染物 k 的排放总量 T_k 为

$$T_k = n \sum_{i=1}^N W_f(i) E_k(i) \quad (5)$$

式中: $W_f(i)$ 为第 i 时刻或时间步长的燃油流量; $E_k(i)$ 为第 i 时刻的第 k 种污染物排放指数(k 为1、2、3分别代表 NO_x 、CO和UHC); n 为发动机台数。

Soot的排放总量 T_s 为

$$T_s = n \sum_{i=1}^N W_E(i) C_s(i) \quad (6)$$

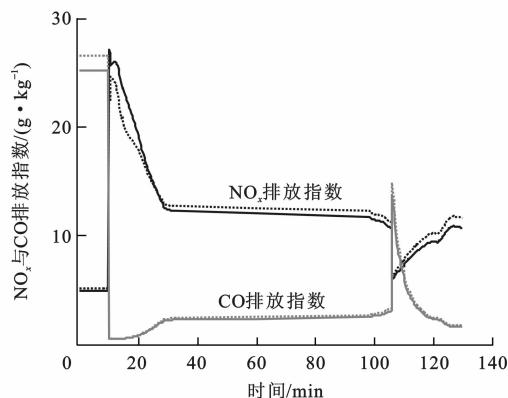
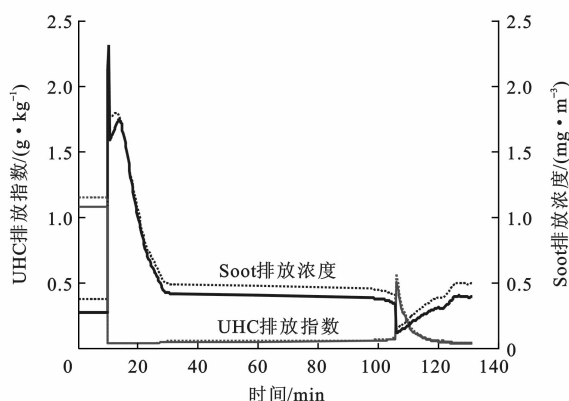
图 14 NO_x 和 CO 排放指数Fig. 14 NO_x and CO emission indices

图 15 UHC 排放指数和 Soot 排放浓度

Fig. 15 UHC emission index and Soot emission concentration

式中: $W_E(i)$ 为第 i 时刻或时间步长的尾气排放总量, 根据发动机性能参数计算得出; $C_s(i)$ 为第 i 时刻的 Soot 浓度。

表 4 数据给出了双发民航飞机执行一典型的中短途航班任务, 各种污染物排放总量的一组估算值。NO_x 排放总量最高, 约为 100 kg, 其次为 CO, UHC 和 Soot 的排放总量非常低, 小于 1 kg。性能退化对 CO、UHC 与 Soot 的排放总量影响较大, 一方面是由于性能衰退导致这些污染物的排放指数升高, 另一方面性能衰退同时导致燃油消耗的上升, 2 个因素的综合作用将导致排放总量上升。而性能退化对 NO_x 排放指数的影响比较复杂, 体现在大功率状态下, 性能退化导致 NO_x 排放指数下降, 而在小功率状态下, 性能退化则引起 NO_x 的排放指数升高。考虑性能退化对燃油消耗率的影响, 各种因素相互抵消, 最终发动机性能退化对 NO_x 的排放总量的影响不大。中等程度的性能退化 (HPC 和 HPT 同时退化, 退化程度为 2) 导致 CO、UHC 与 Soot 的排放总量上升约为 10%, 而 NO_x 排放总量仅上升

约为 2%。

表 4 发动机污染物排放总量

Tab. 4 Total pollution emissions of engines

排放量与油耗		新发动机	老化的发动机	变化量/%
污染物排放总量/ kg	NO _x	92.45	94.42	2.1
	CO	16.32	18.18	10.2
	UHC	0.50	0.56	11.6
	Soot	0.37	0.41	12.2
总油耗/kg		6 610.2	6 829.0	3.3

4 结 语

飞机巡航速度、高度与发动机的老化等因素均会影响飞机尾气污染物的排放量, 综合考虑这些因素估算飞机在实际运行条件下的污染物排放量, 是优化飞机运营, 降低燃油消耗和污染物排放的基础。本文借助相对法排放指数估算模型, 研究了发动机性能退化对污染物排放的影响, 以及实际运行条件下污染物的排放总量的估算方法。发动机性能退化对 NO_x 的排放总量的影响不大, 但会引起其他污染物排放指数或浓度的上升, 加上燃油消耗率的上升这一因素, 2 种因素综合作用最终导致污染物排放总量的增加。若考虑实际运行条件下发动机的老化等因素, 现行方法 (不考虑发动机老化对污染物排放的影响) 对 CO、UHC 与 Soot 的排放总量的估算过于保守, 而对 NO_x 排放总量的估算比较接近实际情况。

参考文献:

References:

- [1] 赵坚行. 民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 986-996.
ZHAO Jian-xing. Pollutant emission and development of low-emission combustion technology for civil aero engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 986-996. (in Chinese)
- [2] RIZK N K, MONGIA H C. Semi-analytical correlations for NO_x, CO, and UHC emissions[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(3): 612-619.
- [3] LEFEBVRE A H. The role of fuel preparation in low-emission combustion[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995, 117(4): 617-654.
- [4] SHAKARYANTS S A, VAN BUIJTENEN J P, VISSER W P J, et al. A generic approach to aero-engine exhaust emission simulation[C] // AIAA. The Proceedings of the XVII International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE) 2005. Reston: AIAA, 2005: 1-13.
- [5] TSALAVOUTAS A, KELAIDIS M, THOMA N, et al. Correlations adaptation for optimal emissions prediction[C] // ASME. ASME Turbo Expo 2007; Power for Land, Sea, and Air. Montreal: ASME, 2007: 545-555.

- [6] DÖPELHEUER A, LECHT M. Influence of engine performance on emission characteristics[C] // RTO. Gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels. Lisbon: RTO MP-14, 1998: 1-11.
- [7] MARTIN R L, ONCINA C A, ZEEBEN J P. A simplified method for estimating aircraft engine emissions[R]. Hague: ASME, 1994.
- [8] BAUGHUM S L, TRITZ T G, HENDERSON S C, et al. Scheduled civil aircraft emissions inventories for 1992: data-base development and analysis[R]. Virginia: NASA, 1996.
- [9] 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. XIA Qing, ZUO Hong-fu, YANG Jun-li. Evaluation of LTO cycle emissions from aircraft in China's civil aviation airports[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(7): 1469-1474. (in Chinese)
- [10] 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 Yong, ZHOU Gui-lin, WU Shou-sheng. A preliminary investigation on the inventory of NO_x emitted from CAAC flights over China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(2): 179-182. (in Chinese)
- [11] 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 Yong, WU Dong-yin, WANG Jin-tao, 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. (in Chinese)
- [12] 魏志强,王超. 航班飞行各阶段污染物排放量估算方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(6): 48-52. WEI Zhi-qiang, WANG Chao. Estimating method of pollution emissions for scheduled flight in different phases[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(6): 48-52. (in Chinese)
- [13] STAMATIS A, MATHIOUDAKIS K, PAPAILIOU K D. Adaptive simulation of gas turbine performance[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1990, 112(2): 168-175.
- [14] KURZKE J, RIEGLER C. A new compressor map scaling procedure for preliminary conceptional design of gas turbines[C] // ASME. ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air. Munich: ASME, 2000: 1-7.
- [15] PLATT M, NORSTER E R. Time degradation factors for turbine engine exhaust emissions: volume 1, program description and results[R]. Cambridge: Federal Aviation Administration, 1979.

《建筑科学与工程学报》约稿函

尊敬的各位专家:

《建筑科学与工程学报》是由教育部主管、长安大学和中国土木工程学会主办的面向国内外公开发行的学术期刊。自2005年更名以来,《建筑科学与工程学报》得到了各位专家的大力支持,使期刊得到了快速发展,鉴于《建筑科学与工程学报》还有很大的发展空间,为了进一步提高期刊的学术质量和影响力,特向各位专家约稿。

《建筑科学与工程学报》目前的优势包括:

- (1)《中文核心期刊要目总览》刊源。
- (2)中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)刊源。
- (3)不收取版面费。
- (4)发表周期短。
- (5)对学术质量高、有重大项目支持的论文优先发表。
- (6)刊登综述类文章。
- (7)可同期刊登同一主题的系列成果。

希望各位专家能继续支持我刊,积极投稿。

投稿邮箱:jzxb@chd.edu.cn 电话:(029)82334397 联系人:宋庆国

《建筑科学与工程学报》编辑部