

航空发动机排气污染物控制与适航符合性研究

邹杰* 颜颜

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 基于民用航空活动对环境排放污染占比快速增长的现状, 结合民用航空领域排放物相关政策的历史沿革和背景, 展望了发动机排放物政策的发展趋势, 研究表明由于 NO_x 危害较大且很难控制, 国际民航组织(简称 ICAO)和美国联邦航空局(简称 FAA)对 NO_x 的要求日趋严格, 而对 HC、CO 和烟的排放要求基本没有变化。同时介绍了低污染燃烧技术发展概况, 分析了排气污染物的生成机理和主要影响因素以及改善措施, 基于污染物生成机理及控制原理阐述了富油和贫油燃烧的污染排放控制方法。最后对飞机排放适航符合性验证方法进行了介绍, 提出了基于发动机台架试验的 LTO 循环中气态排放污染物和烟尘的测量程序和计算分析方法, 该测量程序和计算分析方法能较准确地评估航空发动机运行过程中的排气污染物水平, 可以推广应用到航空发动机和大型燃气轮机的排放评估和预测。

关键词: 民用航空发动机; 排放; 燃烧室; 适航

中图分类号: V211.74

文献标识码: A

OSID:



0 引言

随着环保意识的加强, 人们对民航飞机排放污染的关注程度也越来越高。据统计, 民用航空活动排放已占人类温室气体排放总量的 5%, 且这一比例仍在快速增加, 而商用飞机的排放污染主要来源于飞机的动力装置, 所以研制更加环保的发动机也成为各发动机供应商的目标。为保护环境, 国际民航组织制定了一系列的民用飞机新的排放指标, 对航空发动机的设计与制造提出了更高的要求。因此有必要充分了解排放规定及动力装置排放水平的发展脉络, 合理权衡好两者的关系, 研究民用航空发动机排气污染物的适航符合性验证和分析方法将有助于新型环保飞机的研制。

航空发动机排放物一般包括烟和气态排放物, 气态排放物包括未燃烧的碳氢化物(简称 HC)、一氧化碳(简称 CO)和氮氧化物(简称 NO_x)^[1-2]。

发动机低功率状态下燃料的不充分燃烧是未燃碳氢(简称 UHC)和 CO 产生的主要原因。CO 会降低人体红细胞运输氧气的的能力, 高浓度 CO 可导致窒息甚至死亡。UHC 不仅有毒, 还是发生光化学反应的主要成分。 NO_x 主要是在高功率状态下大气中的氮与氧化学反应产生。直接危害人体健康, 同时是光化学烟雾和酸雨的主要形成因素。空中的氮氧化物的排放主要来源于航空飞行。在从地面到 12 km 高度以下的大气平流层, 是民航客机的飞行空间, 航空发动机排放的氮氧化物中的二氧化氮会分解成一氧化氮和氧原子, 氧原子与大气中的氧气反应会形成臭氧。高浓度的臭氧会导致呼吸系统疾病、视力损坏、头痛以及过敏。尾流烟尘加剧低空大气污染, 在机场附近的烟尘排放严重影响工作人员和当地居民的身体健康, 易诱发肺部疾病。对于军机而言, 排气烟尘作为凝结核与水蒸汽凝结形成尾流污染带极易暴露航迹, 极大削弱了军机的隐身能力^[3-5]。

* 通信作者. E-mail: zoujie1@comac.cc

引用格式: 邹杰, 颜颜. 航空发动机排气污染物控制与适航符合性研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(4):90-95. ZOU J, YAN Y. Study on control of exhaust pollutants and airworthiness compliance of Aeroengine[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2021(4):90-95(in Chinese).

1 民用航空发动机排放指标

民用航空发动机的排放标准是由国际民航组织(简称 ICAO)颁布的,具体文件内容位于 ICAO 的附录 16 的第二卷,其主要针对民用飞机动力装置的氮氧化物 NO_x 、碳氢化物 HC,一氧化碳 CO 和烟雾 smoke 的排放量进行限制。各国按照 ICAO 的标准,结合本国国情均制定了相关政策,如 FAA 颁布了 FAR-34 部对航空器发动机排放物进行适航审定规定。

排放限制条款由 1986 年开始实施,称为 CAEP/1 阶段,到 2015 年,已经开始执行 CAEP/8 阶段。CAEP 成立以来数次会议制定的标准(包括 CAEP/2、CAEP/4、CAEP/6 和 CAEP/8),对 NO_x 的要求日趋严格,而对 HC、CO 和烟的排放要求基本没有变化,这也是由于 NO_x 危害较大且很难控制。在上述排放标准中,自 CAEP/2 开始的污染物排放要求比较高,以总压比在 30~40、推力大于 89 kN 的大型发动机来为例,CAEP/2 标准所要求的 NO_x 排放量比 CAEP/1 低 20%,CAEP/4 标准的 NO_x 排放要求比 CAEP/2 的标准下降了约 16%,CAEP/6 标准的 NO_x 排放要求比 CAEP/4 的规定值要低 12%,而对于最新生效的 CAEP/8 标准来讲,其 NO_x 排放要求要比 CAEP/6 的规定值还要低 15%, NO_x 排放要求趋势见图 1。HC、CO 和烟的排放要求始终停留在 CAEP/1 阶段^[6],如图 2 和表 1 所示。

表 1 UHC 和 CO 排放指标

排放项目	排放指标/ $\text{g} \cdot \text{kN}^{-1}$
未燃碳氢(UHC)	≤ 19.6
一氧化碳(CO)	≤ 118

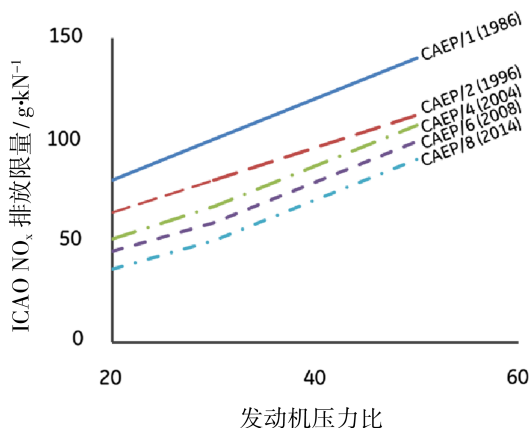


图 1 国际民航组织 NO_x 排放规定

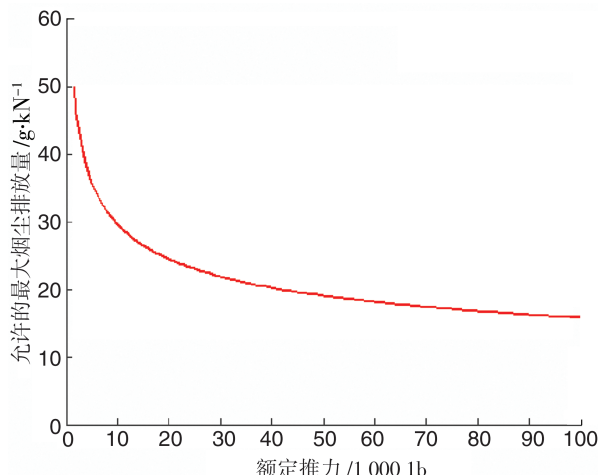


图 2 烟尘排放规定

2 发动机排气污染物控制技术

2.1 污染物生成原理

1) NO_x

排气中的 NO_x 主要是指 NO 和二氧化氮(简称 NO_2)。产生方式主要有 4 种:实际燃烧过程中,由于高温环境下空气中的氮(简称 N)与氧的反应形成的 NO 称之为热力 NO(Thermal NO);在燃料不含氮的情况下,在燃烧环境中所有不属于热力 NO 形成机理而产生的 NO,称为瞬发 NO(Prompt NO);在燃料含有机氮的情况下,在燃烧情况下形成的 NO 称为燃料 NO(Fuel NO);另外,在高压情况下,NO 可由先生成的 N_2O 转变而来。在发动机燃烧室的出口,由上述机理形成的 NO 有相当一部分氧化成了 NO_2 ^[6]。

2) 冒烟(smoke)

排气冒烟(smoke),按照 ICAO 的定义,是排气污染中的含碳物质,能够阻挡光的传播。燃烧室的排气冒烟是主燃区内形成的碳烟(soot)以及在随后的高温区中被氧化后的一个结果。

3) CO

排气中的 CO 由燃烧温度和富氧程度两个因素决定。在低功率情况下,燃烧区温度低,将会有大量的 CO 产生,这是 CO 未完全氧化导致的。在燃烧区很富油情况下,同样会产生大量 CO,原因是 CO_2 将会分解成 CO。

4) 未燃碳氢(简称 UHC)

UHC 源自于发动机燃烧室中未充分反应的碳氢化合物,以燃油蒸气和燃油的小分子裂解产物甲

烷或乙炔的形式排出大气。从 UHC 形成的机理来看,更主要受物理因素的控制。

2.2 发动机减排技术

1) 抑制 CO 和 HC 的排放

影响涡轮发动机 CO 和 HC 排放的因素基本相同,这是因为 HC 和 CO 的产生机制相近。主要减排方法有以下几种:(1)采用技术手段如分区燃烧缩减主燃区空间,改善发动机低功率运行时燃油雾化率;(2)采用空气雾化喷射技术取代传统压力喷嘴来提升燃油雾化率;(3)通过提高主燃区长度来延长燃烧停留时间,使燃烧更充分;(4)减少气膜冷却空气量;(5)调整燃烧室内主燃区和值班燃烧区的空气量,优化主燃区的油气比接近于最优值^[7]。

2) 控制 NO_x 的生成

缩短油气在高温区的驻留时间同时降低燃烧区的温度是降低 NO_x 排放的基本思路。具体措施有:(1)缩短油气驻留时间,即控制气体在高温燃烧区的驻留时间尽可能短。通常采用缩短燃烧室长度同时增大主燃区气流速度来实现最小驻留时间,从而抑制 NO_x 生成;(2)采用贫油燃烧技术,通过降低主燃区温度,可有效降低 NO_x 生成,且燃烧区的当量比越贫越能降低 NO_x 的排放,当然,其下限是贫油熄火极限;(3)在贫油燃烧环境下,提高油气混合程度和燃油雾化率,保证均匀燃烧,消除燃烧室局部高温区或过热点,可以有效降低 NO_x 生成。

3) 降低排气烟尘

降低排气烟尘的关键在于优化燃烧室设计和燃料优选两方面,主要减排措施有以下两点:(1)优化燃烧室设计,防止产生局部富油区,随着技术发展,传统的压力雾化喷嘴逐渐被空气雾化喷嘴取代,能极大提高燃油雾化效率,这不仅可降低烟尘排放,对 HC,CO 和 NO_x 的减排同样有利。此外,为防止局部富油燃烧,主燃区一般采用贫油设计或化学当量比设计;(2)采用发烟指数低的燃料,燃油中芳香烃等大分子含量越多,燃烧过程中裂解成未燃烧的小分子燃油颗粒越多,发动机排气冒烟随之增加。所以,需选用低芳香烃油料或者补充合适的添加剂。这样可以减弱碳结焦同时利于进一步氧化燃烧,从而减弱发动机排气冒烟。

目前最主要的三种低污染燃烧技术分别是贫油预混预蒸发燃烧(LPP)、贫油直接混合燃烧(LDM)以及富油燃烧-淬熄-贫油燃烧技术(RQL)。普惠公司

以 RQL 技术为基础发展了 TALON 燃烧室,罗罗公司研发了第二阶段燃烧室和第五阶段燃烧室,而霍尼韦尔研发了 SABER 燃烧室,GE 公司基于贫油燃烧技术研发并投入应用的双环预混旋流器(TAPS)燃烧室^[8-10]。以上低排放燃烧技术的应用,为符合 ICAO 排放标准的发动机研制提供了坚实的技术基础。

4 航空发动机排放符合性验证方法

4.1 LTO 循环

ICAO 和 CCAR 规定的发动机排放试验是地面台架试验,是模拟在高度低于 3 000 ft 的机场附近,进行标准的飞机起落循环(LTO)操作,标准 LTO 循环是模拟飞机从高空降落至地面又重新复飞至高空的一个连续工作过程,ICAO 规定的一个标准的 LTO 循环包含 4 个工作状态,即慢车、进近、起飞和爬升。标准 LTO 循环场景如图 3 所示。

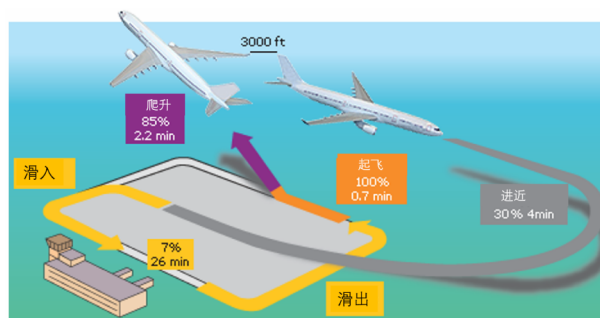


图 3 国际民航组织规定的 LTO 循环

发动机排气污染程度用 D_p/F_∞ 来定义,为 LTO 循环期间排放污染物的量与发动机额定推力之比,即:

$$D_p/F_\infty = \sum W_{fj} EI_j t_j / F_\infty \quad (1)$$

其中, D_p 、 W_{fj} 、 EI_j 、 t_j 、 F_∞ 分别为 LTO 循环某阶段排放污染总量、燃油流量、排放污染指数、运行时间和发动机额定功率。飞机发动机在标准 LTO 循环中各运行剖面的功率等级和运行时间规定如表 2 所示。 F_∞ 指在标准海平面(ISA)民用航空发动机以静止状态正常起飞时可用的最大功率或额定推力。

表 2 航空发动机 LTO 循环

工作状态	发动机额定功率	测试时间/min
慢车	7% F_∞	26
进近	30% F_∞	4
爬升	85% F_∞	2.2
起飞	100% F_∞	0.7

4.2 颗粒排放物烟雾(Smoke)符合性验证方法

颗粒排放物烟雾(Smoke)规定是排气污染物中的能够阻挡光学传播的含碳物质。烟雾排放测量的结果表达为发烟指数(Smoke Number),发烟指数计算是测量通过燃气的滤纸上的绝对反射率 R_s 以及干净滤纸上的绝对反射率 R_w 得到的。计算公式如下:

$$SN' = 100 \left(1 - \frac{R_s}{R_w} \right) \quad (2)$$

烟雾排放测量系统如图4所示,从设定状态的发动机喷管排气中通过探针采集样气,经过保温管路后送入到测试部分,测试部分分为两个管路系统,一个用于旁通,一个用于在规定的时间内通过规定流量的样气。测量受到烟雾污染的滤纸反射率采用反射率计,应满足美国国家标准协会(ANSI)对于漫反射密度的 No. PH2. 17/1977 标准。因为与通过单位面积的样气质量 W/A 有函数关系,上述的实测值需要换算到一个标准的单位面积上的样气质量 W/A ,该数值是 16.2 kg/m^2 。最后得到的数值是按照 ICAO 规定的发烟指数 SN 。

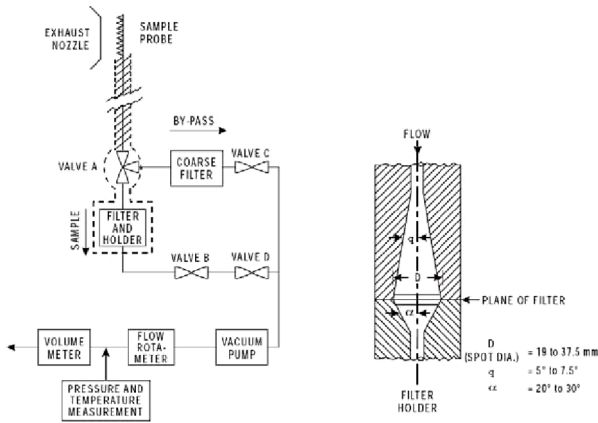


图4 烟雾排放测量系统

4.3 气态污染物评估方法符合性验证方法

在发动机试车台架上,在 ICAO 规定 LTO 循环中由燃气分析采样得到每个运行模式下的气态污染物(HC、CO 和 NO_x) 体积浓度,燃气成分分析系统的配置如图5所示,从设定状态的发动机喷管排气中通过探针采集样气。

按照推荐的计算方法,计算出排放物指数 EI (Emission Index):

$$EI_p = \frac{\text{发动机排出的某种污染物成分 } p \text{ 的质量, } g}{\text{发动机燃油消耗量, } kg}$$

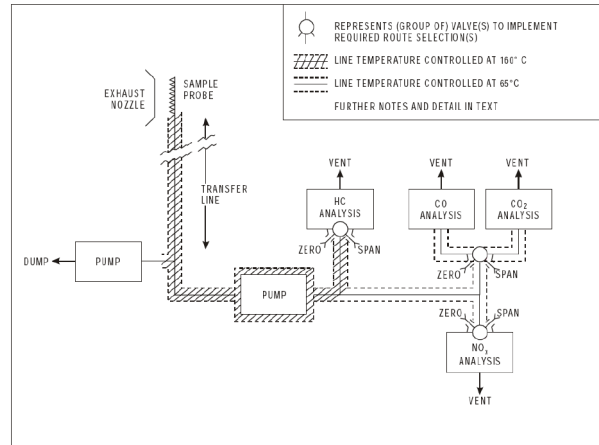


图5 气态污染物采样系统

$$EI(\text{CO}) = \left(\frac{[\text{CO}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]}} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{CO}}}{M_c + (n/m)M_H} \right) (1 + T(P_0/m))$$

$$EI(\text{HC}) = \left(\frac{[\text{HC}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]}} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{HC}}}{M_c + (n/m)M_H} \right) (1 + T(P_0/m))$$

$$EI(\text{NO}_x) = \left(\frac{[\text{NO}_x]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]}} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{NO}_x}}{M_c + (n/m)M_H} \right) (1 + T(P_0/m))$$

$$\text{Air/fuel} = \left(\frac{10^3 M_{\text{AIR}}}{M_c + (n/m)M_H} \right) (P_0/m)$$

其中 $P_0/m = \frac{2Z - (n/m)}{4(1 + h - |TZ/2|)}$

$$Z = \left(\frac{2 - [\text{CO}] - (|2/x| - |y/2x|)[\text{HC}] + [\text{NO}_x]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]}} \right)$$

式(3)中,[]中的内容指排气中测得的某成分体积浓度, M 是分子量, T 是大气中 CO_2 浓度, h 为环境大气的湿度, n/m 是航空煤油中的氢/碳质量比, x,y 是样气中碳氢化合物的碳原子和氢原子数目。一般来讲,发动机试车的大气条件不会参考大气条件,因此将获得的排放物指数 EI 换算到标准海平面大气条件下,需要将上述测得的 EI 值乘以一个修正系数 K 。

将换算到标准大气条件下的排放物指数,进一

步按照 ICAO 规定的起飞着陆循环进行计算,得到标准海平面(ISA)起飞时航空发动机额定推力情况下单位推力(kN)的污染排放值,即 $LTO_Emission$, 单位是 g/kN。计算如下式:

$$LTO_Emission(g/kN) = \frac{D_p}{F_\infty} = \frac{\sum_i^n EI_{m,i} \dot{m}_{mf,i} T_{m,i}}{F_\infty} \quad (4)$$

式(4)描述了每个规定的 LTO 运行阶段下,相应的功率模式下污染排放指数,乘以每个模式的燃油消耗量和运行时间,即可得出每个模式下按照质量计量的污染排放量,将每个模式下的污染排放质量加在一起,除以标准海平面静态起飞时的额定推力,即得到 ICAO 规定的污染排放量 $LTO_Emission$ 。

5 结论

本文对 ICAO 的发动机排放物相关政策进行了梳理分析,研究了发动机排放物相关政策的背景与历史沿革,展望了发动机排放物政策的发展趋势,同时对发动机减排技术和飞机排放适航符合性验证方法进行了介绍,形成以下结论:

1)近年来,民航业对航空器发动机排放物排放水平的关注日益提高,尤其是对 NO_x 的排放要求更是日趋严格,发动机制造商需对低排放燃烧技术进行持续攻关以适应未来规章要求;

2)低排放燃烧室的设计需要遵循燃烧的基本原理,也要兼顾满足发动机的基本性能要求。可以通过贫油预混预蒸发技术(LPP)、RQL、分级燃烧等技术来对发动机排放和性能做一个适当的平衡;

3)本文介绍的基于 LTO 循环的民用航空发动机排放符合性验证程序和计算方法包含气态污染物评估和颗粒排放物的评估两部分,可以通过发动机台架试验中分析采样得到每个运行模式下的气态污染物(HC、CO 和 NO_x)体积浓度和颗粒污染物浓度,计算得出相应的功率模式下污染排放指数,乘以每个模式的燃油消耗量和运行时间,即可得出 ICAO

规定的污染排放量 $LTO_Emission$ 。该方法合理有效,已被广泛用于航空发动机排放符合性验证,并可以推广至燃气轮机排放水平评估。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 涡轮发动机飞机燃油排泄和排气排出物规定:CCAR-34[S]. 北京:中国民用航空局, 2002.
- [2] International Civil Aviation Organization. Annex 16-Environmental Protection; Volume II Aircraft Engine Emissions[R]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2010.
- [3] 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.
- [4] 刘高恩,王华芳,吕品,等. 飞机发动机排气污染物的测量[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 348-352.
- [5] 李杰. 富油燃烧-猝熄-贫油燃烧燃烧室技术分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(2): 51-53.
- [6] 许全宏,张弛,林宇震. ICAO 最新民机排放目标对我国低污染燃烧室发展的影响[J]. 国际航空, 2009(8): 72-73.
- [7] K RYPDAL. Aircraft Emissions[R]. [S. l.]: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, 2003.
- [8] 李杰. 先进低氮氧化物排放燃烧室技术分析[J]. 航空科学技术, 2010, 21(4): 11-13.
- [9] 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.
- [10] 李迎春,郑光华. 航空燃气涡轮发动机氢燃料研究历史和低污染燃烧技术发展[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3): 572-577.

作者简介

邹杰 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机发动机系统集成设计。E-mail: zoujie1@comac.cc

颜颜 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机发动机系统集成设计。E-mail: yanyan@comac.cc

Study on control of exhaust pollutants and airworthiness compliance of Aeroengine

ZOU Jie* YAN Yan

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Based on the rapid growth of the environmental emissions caused by civil aviation activities combined with the background and history of the policies related to engine emissions, this paper looks forward to the development trend of the engine emissions policy. The research shows that the requirements of NO_x in ICAO and FAA are becoming more stringent due to the greater harm and difficult control of NO_x , while the emission requirements for HC, CO and smoke have remained basically unchanged. At the same time, the development of low-pollution combustion technology was introduced, the generation mechanism of exhaust pollutants, main influencing factors and improvement measures were analyzed, and the emission control methods of oil-rich and oil-poor combustion were expounded based on the pollutant generation and control principles. Finally, the verification method of aircraft emission airworthiness was introduced. The measurement procedure and calculation analysis method of gaseous emission pollutant and fume emission in LTO cycle based on engine bench test were proposed. The measurement program and calculation analysis method can accurately evaluate the level of exhaust pollutants of aero-engines during operation and can be applied to the emission assessment and prediction of aero-engines and large gas turbines.

Keywords: civil engine; emission; combustor; airworthiness

* Corresponding author. E-mail: zoujie1@comac.cc