

航空发动机排气污染物排放适航审定方法研究

张天刚¹, 侯晓云²

1. 中国民航大学航空自动化学院, 天津 300300
2. 中国民航大学机场学院, 天津 300300

摘要 为解决中国民用航空发动机测试数据处理方式中的技术难点,使符合飞机发动机排气污染物的适航审定标准,参考国际民航组织(ICAO)颁布的“飞机发动机排放”条例采集污染物气体样本数据。基于ICAO标准的起飞着陆(LTO)循环概念,采用ICAO计算方法和美国车辆工程师协会(SAE)航空建议操作规程(ARP)计算方法得出航空发动机NO_x排放指数。根据中国民航规章34部(CCAR-34),验证得出航空发动机JT3D-7的NO_x排放符合现行的适航标准。

关键词 NO_x排放;LTO循环;适航

中图分类号 V239

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.04.010

Airworthiness Certification Method for Gas Turbine Engine Emissions

ZHANG Tiangang¹, HOU Xiaoyun²

1. College of Aeronautical Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China
2. College of Airport, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract With the growing awareness of the importance of the environmental protection, a certification for nitrogen oxide emission becomes more and more stringent. The certification of airworthiness is necessary before the aircraft enters into a commercial operation. The requirement of the airworthiness is the basic regulation guarantee for the aircraft safe flight, so it is necessary to study the airworthiness certification method for gas turbine engine emissions. In order to solve the technical difficulty in dealing with the gas turbine engine emission test data, to meet the requirement in the airworthiness certification standard for engine emissions, the "Aircraft Engine Emissions" promulgated by the convention of International Civil Aviation Organization (ICAO), is used to compile the pollutant gas sample data. The calculation of NO_x emission index from aircraft is carried out by using Aerospace Recommended Practice (ARP) of Society of Automotive Engineers (SAE) and the ICAO method based on the ICAO standard LTO cycle. JT3D-7 NO_x emissions are compatible with the existing regulatory standards according to China Civil Aviation Regulations (CCAR-34).

Keywords NO_x emission; LTO cycle; airworthiness

0 引言

随着环保和健康意识的不断增强,人类对民航发动机污染排放,特别是氮氧化物(NO_x)的排放要求越来越严格。国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)对民用航空发动机的排放污染物制定了排放标准,并要求在规定的期限内执行。中国虽然制定了污染物的排放审定标准,但没有制定航空污染物排放的计算方式,只是说具体实行标准需符合ICAO计算准则。为解决中国民用航空发动机测试数据

处理方式中的技术难点,使飞机发动机排气污染物的适航审定标准,本文采用美国车辆工程师协会(Society of Automotive Engineers, SAE)航空建议操作规程(Aerospace Recommended Practice, ARP)矩阵审定方法,并与ICAO审定方法进行比较。

1 航空发动机NO_x污染物的标准

为控制民用航空发动机对环境和气候变化造成的影响,ICAO下属机构航空环境保护委员会(CEAP)于1981年颁布

收稿日期:2011-10-25;修回日期:2012-01-10

作者简介:张天刚,讲师,研究方向为机械电子,电子信箱:zhangsky_777@163.com

了《航空发动机的排放》标准,该标准主要考虑发动机起飞着陆(LTO)循环(起飞、爬升、慢车和进场)阶段,其中涉及民用航空发动机的排放污染为冒烟、CO、NO_x和碳氢化合物(HC),该标准主要考虑发动机LTO循环(起飞、爬升、慢车和进场)阶段。排气污染参数定义为LTO循环期间排放污染物的量与发动机额定推力之比,用 $D_p/F_{z\infty}$ 来表示,即

$$D_p/F_{z\infty} = \sum W_{ij}EI_{ij}/F_{z\infty}$$

其中, D_p 为发动机在LTO循环某阶段排放污染物的总量,g; W_{ij} 为LTO循环某阶段的燃油流量,g/s; EI_{ij} 为LTO循环某阶段某污染物的排放指数; t_j 为LTO循环某阶段的运行时间,s;具体运行时间由ICAO规定^[1]; $F_{z\infty}$ 为该发动机额定推力,kN。

作亚音速飞机发动机在LTO循环中的功率和状态工作时间规定见表1。其中, $F_{z\infty}$ 为在海平面(International Standard Atmosphere,ISA)静止状态民用航空发动机不喷水以正常工作状态起飞时可用的最大功率或额定推力。

表1 航空发动机的LTO循环

Table 1 LTO cycle of aircraft

工作状态	发动机额定功率	发动机测试时间/min
慢车	7% $F_{z\infty}$	26
进近	30% $F_{z\infty}$	4
爬升	85% $F_{z\infty}$	2.2
起飞	100% $F_{z\infty}$	0.7

ICAO陆续颁布的发动机排放标准有1986、1993、1996和2004年的生效的CEAP1、CEAP2、CEAP4和CEAP6标准。因NO_x排放对环境的污染越来越严重^[2],标准中对NO_x的规定日趋严格,CEAP2、CEAP4和CEAP6标准相对于前1个标准,分别降低20%、16.5%和12%。NO_x排放规定值^[3]分别为

$$NO_x = 40 + 2.0\pi_{z\infty} \quad (\text{CEAP1})$$

$$NO_x = 32 + 2.0\pi_{z\infty} \quad (\text{CEAP2})$$

对发动机总压比 $\pi_{z\infty} \geq 30$ 和额定推力 $F_{z\infty} > 89\text{kN}$ 的发动机,有

$$NO_x = 7 + 2.0\pi_{z\infty} \quad (\text{CEAP4})$$

$$NO_x = -1.04 + 2.0\pi_{z\infty} \quad (\text{CEAP6})$$

中国民用航空局对作亚音速航空器上的所有涡扇和涡喷发动机排放NO_x污染物的规定值为:2002年4月19日及其后制造的额定输出等于或大于26.7kN(6000磅)的民用航空发动机NO_x污染物排放值不得超过 $(32 + 1.6r_{PR})\text{g/kN}$,其中 r_{PR} 为发动机额定压力比^[4]。

2 航空发动机排气污染物排放计算

2.1 计算原理

LTO循环是飞机从高空降落至机场又重新起飞至高空的一个封闭工作过程,ICAO规定一个理想的LTO循环包括4个工作状态,即进近、起飞、慢车和爬升。LTO循环^[5]过程见图1。

2.2 测量数据

在北京维修基地,对机号为670-786的JT3D-7航空发

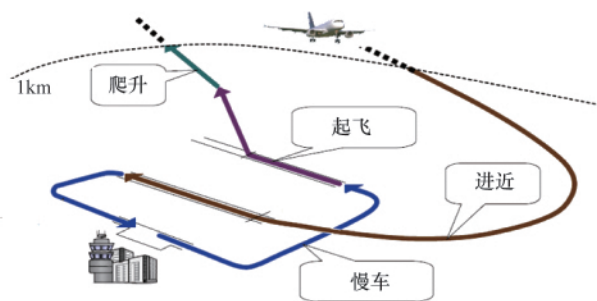


图1 LTO循环过程

Fig. 1 LTO Cycle

动机进行排气污染测量^[6],所得的不同工况下污染物排放量如表2所示;在该实测中所用的航空煤油为Jet-A,其分子式为C₁₁H₂₂O_{0.0004}N₀S_{0.0012};发动机进口空气组成如表3所示。

表2 发动机不同工况下的排放测量数据

Table 2 Measured data of engine at different operation conditions

状态额定推力	燃油量/(kg·h ⁻¹)	CO体积分/10 ⁻⁶	NO _x 体积分/10 ⁻⁶	NO体积分/10 ⁻⁶	HC体积分/10 ⁻⁶	CO ₂ 体积分/10 ⁻²
慢车 7% $F_{z\infty}$	551	641	5	3	1450	1.4
进近 30% $F_{z\infty}$	1470	163	24	12.8	210	1.95
爬升 85% $F_{z\infty}$	4001	30	75	70	150	2.8
起飞 100% $F_{z\infty}$	4902	19	107	103	100	3.1

表3 发动机进口空气组成

Table 3 Air constitution of engine inlet

空气组成	数值
O ₂ 在空气中的物质的量分数 $R(\text{O}_2)$	0.20948
N ₂ 在空气中的物质的量分数 $S(\text{N}_2)$	0.79020
CO ₂ 在空气中的物质的量分数 $T(\text{CO}_2)$	0.00032
CH ₄ 在空气中的物质的量分数 $U(\text{CH}_4)$	0
H ₂ O在空气中的物质的量分数 $h(\text{H}_2\text{O})$	0.00883

以上所测量的数据精度必须按标准进行校验。根据美国环境保护局的标准ARP-1256A^[7]的规定,对计算得出的油气比(ARP)^[8]与所测的发动机上空气流量之比,大功率(起飞状态)时二者误差在10%以内为合格。计算所得与实测的油气比(AFR)数据见表4,其中空气流量是指核心发动机的空气

表4 发动机气量油量测量值与计算值的比较

Table 4 Comparisons of measure and calculation values of engine air flow and fuel flow

指标	数值
状态推力	100% $F_{z\infty}$
燃油流量/(kg·s ⁻¹)	1.3617
空气流量/(kg·s ⁻¹)	90.55
实测油气比	66.50
计算油气比	65.42
计算油气比与实测油气比误差/%	1.624

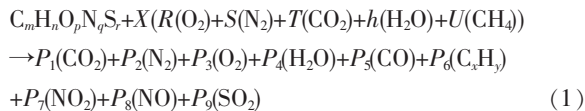
流量。

可见,通过测出燃气成分进而计算所得的气油比与实测汽油比非常接近,误差不超过 2%,小于标准规定的误差范围,这表明整个取样系统具有代表性,测量技术可行。

2.3 计算方法

2.3.1 基于 SAE ARP 的计算方法

根据 SAE ARP 计算方法,1mol 航油在航空发动机燃烧室内进行燃烧时,其化学反应表达式^[9]可简写为



式中, $P_1 \sim P_9$ 分别是 CO_2 、 N_2 、 O_2 、 H_2O 、 CO 、 $C_x H_y$ 、 NO_2 、 NO 和 SO_2 的物质的量; X 为 1mol 燃油消耗空气的量。

根据式(1)得出碳原子平衡为

$$m + X(T + U) = P_1 + P_5 + xP_6 \quad (2)$$

同理,可得氢原子、氧原子、氮原子和硫原子平衡分别为

$$n + (2h + 4U)X = 2P_4 + yP_6 \quad (3)$$

$$p + (2R + 2T + h)X = 2P_1 + 2P_3 + P_4 + P_5 + 2P_7 + P_8 + 2P_9 \quad (4)$$

$$q + 2SX = 2P_2 + P_7 + P_8 \quad (5)$$

$$r = P_9 \quad (6)$$

燃烧产物中 CO_2 物质的量与燃烧产物总物质的量之比为

$$P_1 = P_T(CO_2) \quad (7)$$

同理可得 CO 、 $C_x H_y$ 、 NO_x 、 NO 、 H_2O 物质的量与燃烧产物总物质的量之比为

$$P_5 = P_T(CO) \quad (8)$$

$$xP_6 = P_T(C_x H_y) \quad (9)$$

$$P_7 + P_8 = P_T(NO_x) \quad (10)$$

$$P_8 = P_T(NO) \quad (11)$$

$$P_4 = P_T(H_2O) \quad (12)$$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 \quad (13)$$

综合上述公式得到测量数据矩阵 A 和燃油各原子数矩阵 B , 见表 5。

表 5 矩阵 A 和矩阵 B

Table 5 Matrix A and matrix B

公式	矩阵 A											矩阵 B
	P_T	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	X	常数
(2)	0	1	0	0	0	1	x	0	0	0	$-T-U$	m
(3)	0	0	0	0	2	0	y	0	0	0	$-2h-4U$	n
(4)	0	2	0	2	1	1	0	2	1	2	$-2R-2T-h$	p
(5)	0	0	2	0	0	0	0	1	1	0	$-2S$	q
(6)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	r
(7)	$[CO_2]$	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(8)	$[CO]$	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
(9)	$[C_x H_y]$	0	0	0	0	0	$-x$	0	0	0	0	0
(10)	$[NO_2]$	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0
(11)	$[NO]$	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
(13)	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0

根据 SAE ARP 规定, $C_x H_y$ 中 $x=1, y=2$ 。采用工程软件分别对慢车、进近、爬升和起飞状态进行计算。将慢车状态相关数据代入矩阵 A 和矩阵 B , 得到仿真矩阵 C , 见图 2。

矩阵 C 中数据代表每千克燃油产生的污染物质量, g/kg, 0.0014g/kg 和 0.0021g/kg 分别代表的是每千克燃油产生 NO_2 和 NO 质量^[9]。因此, NO_x 在慢车状态下的排放指数 EI 为

$$EI_{NO_x (idle)} = (P_7 + P_8) \frac{M_{NO_x} \times 10^3}{m \times M_C + n \times M_H} = 1.0436 \text{g/kg}$$

式中, $M_{NO_2} = 46.008 \text{g}$; $M_C = 12.011 \text{g}$; $M_H = 1.008 \text{g}$ 。

同理可得 NO_x 在进近、爬升和起飞状态下 NO_x 排放指数为

$$EI_{NO_x (approach)} = 4.0254 \text{g/kg}$$

$$EI_{NO_x (climb)} = 8.8261 \text{g/kg}$$

1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	-3.2000e-04	1	11	1	697.2334
2	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	-0.0177	2	22	2	9.7613
3	0	2	0	2	1	1	0	2	1	2	-0.4284	3	4.0000e-05	3	541.2443
4	0	0	2	0	0	0	0	1	1	0	-1.5804	4	0	4	128.7193
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	0.0012	5	16.0460
6	0.0140	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	6	0.4469
7	6.4100e-04	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	7	0	7	1.0110
8	0.0015	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	8	0	8	0.0014
9	5.0000e-06	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	9	0	9	0.0021
10	3.0000e-06	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	10	0	10	0.0012
11	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	11	0	11	684.9482

(a) 矩阵 A
(a) Matrix A

(b) 矩阵 B
(b) Matrix B

(c) 运行结果
矩阵 C

图 2 慢车状态下矩阵 A—矩阵 C

Fig. 2 Matrix A—matrix C under idle state

$$EI_{NO_x(\text{takeoff})}=11.3904\text{g/kg}$$

根据 ICAO 数据库查得 JT3D-7 的最大推力为 85.4kN, $r_{\text{PH}}=18.76$ 。得到

$$D_p/F_x=\sum W_j EI_{tj}/F_x=30.33\text{g/kN}$$

中国民航局规定 NO_x 排放不得大于 $(32+1.6 \times 18.76)=62.016\text{g/kN}$, 所以该发动机排放的 NO_x 符合适航审定要求。

2.3.2 基于 ICAO 的计算方法

根据 ICAO 《航空发动机的排放》标准规定的 C_xH_y 中的 $x=1, y=4$, 在起飞状态下

$$Z=\frac{2-[CO]-\left(\frac{2}{x}-\frac{1}{y}\right)[HC]+[NO_2]}{[CO_2]+[CO]+[HC]}=64.269$$

$$EI_{NO_x(\text{takeoff})}=\frac{[NO_x]}{[CO_2]+[CO]+[HC]} \frac{10^3 M_{NO_x}}{M_C+(n/m)M_H} \left[1+T\left(\frac{2Z-n/m}{4(1+h-TZ/2)}\right)\right]=11.3299\text{g/kg}$$

式中, $[]$ 为排气中各组分的容积浓度; T 为 CO_2 在空气中的物质的量分数。

同理可得在进近、爬升和慢车状态下 NO_x 排放指数 EI 分别为

$$EI_{NO_x(\text{approach})}=4.0247\text{g/kg}$$

$$EI_{NO_x(\text{climb})}=8.8275\text{g/kg}$$

$$EI_{NO_x(\text{idle})}=1.0395\text{g/kg}$$

表 6 基于 SAE ARP 和 ICAO 计算方式的 NO_x 排放指数比较
Table 6 Comparisons of NO_x emission index data based on SAE ARP and ICAO

状态推力	计算方式	$EI_{NO_x}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$
慢车 $7\%F_x$	ICAO	1.0395
	SAE ARP	1.0436
进近 $30\%F_x$	ICAO	4.0247
	SAE ARP	4.0254
爬升 $85\%F_x$	ICAO	8.8275
	SAE ARP	8.8261
起飞 $100\%F_x$	ICAO	11.3299
	SAE ARP	11.3904

比较基于 SAE ARP 与 ICAO 计算方式得到的 NO_x 排放指数, 结果见表 6。

3 结论

(1) 本文采用的测量数据切实可行, 取样系统测量精度在 2% 以内。

(2) 本文采用 SAE ARP 和 ICAO 2 种计算方式, 在相同状态下的 NO_x 排放指数 EI 计算值相差较小, 这表明 2 种计算方式都是可行的。

参考文献 (References)

- [1] International Civil Aviation Organization. Aircraft engine emission[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 1981.
- [2] 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 Jianxing. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(6): 986-996.
- [3] Mongia H C. TAPS A4th generation propulsion combustor technology for low emissions[R]. AIAA 2003-2657, 2003.
- [4] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 34 部[M]. 北京: 中国民用航空局, 2002.
Civil Aviation Administration of China. CCAR-34 [M]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2002.
- [5] Kristin R. Aircraft emissions[R]. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, AIAA 2003-0102, 2003.
- [6] 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(2): 348-352.
Liu Gaoen, Wang Huafang, Lu Pin, et al. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(2): 348-352.
- [7] Society of Automotive Engineers. Procedure for the continuous sampling and measurement of gaseous emission from aircraft turbine engines[R]. Washington DC: Society of Automotive Engineers, 2006.
- [8] International Civil Aviation Organization. Annex 16-Environmental protection-Volume II Aircraft engine emissions [R]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 1993.
- [9] Society of Automotive Engineers. Procedure for the analysis and evaluation of gaseous emission from aircraft turbine engines [R]. Washington DC: Society of Automotive Engineers, 2004.

(责任编辑 孙秀云, 代丽)



《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目发表图书评论文章, 被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主, 兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容。欢迎投稿, 择优刊登。每篇书评以 2100 字左右为宜, 需配书影, 并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑: 陈广仁, 投稿邮箱: chenguangren@cast.org.cn。