

飞机发动机排气污染物的测量

刘高恩, 王华芳, 吕 品, 王志平

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 参考国际民航组织(ICAO)颁布的“飞机发动机排放”条例的规定,设计并建立了民用航空发动机排气污染物测量系统,采用自行推算的样气成分“干基”向“湿基”转换的修正公式,编写排放物 EI 的计算程序。在民航维修基地(AMECO 公司)的试车台对二台 JT3D-7 型发动机进行排气污染物的实测,测出的各类污染物的排放指数 EI_{CO} , EI_{HC} , EI_{NOx} 及冒烟数 SN ,并与 JT3D-7 型发动机公布的数据进行对比,测量系统的精度按标准规定用燃气分析测出的气油比与发动机实测的气油比进行比较小于 10%~15% 的均属于合格,本研究的系统的测量值与发动机所测的总气油量之比的误差在 3% 左右,证明此测量系统和测量技术切实可行。

关键词: 航空、航天推进系统; 排放污染; 测试技术; 燃烧

中图分类号: V228.7

文献标识码: A

Gas Turbine Engine Emissions Measurement

LIU Gao-en, WANG Hua-fang, LU Pin, WANG Zhi-ping

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: With reference to "Aircraft Engine Emissions" promulgated by the convention on International Civil Aviation, we designed an emission measuring system. Emissions of two JT3D-7 gas turbine engines were measured by means of the system on the test rig of AMECO company. The measured Emissions Index EI_{CO} , EI_{HC} , EI_{NOx} and SN of these two engines were compared with the JT3D-7 typical EI data. The accuracy of this system is about 3%, which was much better than the ICA's requirement (10%~15%). In the analytical formulations for the EI and AFR parameters of the convention, assumptions were made that all concentration measurements were of the "wet sample". In our practice, the CO_2 , CO and NOx concentration measurements were made on a "dry" basis. So we derived the corrected formulations for EI and AFR calculations of these engines. The data of experiments were varied in a quite wide range to prove that the sampling and measurement system is acceptable in engineering.

Key words: aerospace propulsion system; emissions; measurement; combustion

1 引言

国际上对于飞机发动机的排放污染物都制定了排放的标准,并在规定期限内要执行。我国虽然没有规定排放的控制标准,但航空工业部也制定

了二个测量程序规范,HB6117-87《航空燃气涡轮发动机气态污染物的连续取样测量程序规范》和 HB-6116-87《航空燃气涡轮发动机排气冒烟测量规范》。但在具体的发动机上尚未测量过。本研究的目的是解决我国民用航空发动机研制中测量发

收稿日期: 2002-05-21; 修订日期: 2002-09-12

作者简介: 刘高恩(1939-),男,江苏苏州人,北京航空航天大学能源与动力工程学院教授,博士生导师,主要从事航空发动机燃烧及污染排放研究。

动机排放污染物的技术难点, 以及确定测试方法和测试数据的处理, 以符合飞机发动机排气污染物的测量标准。

2 实验

2.1 取样感头及取样系统

取样感头设计成十字交叉型, 混合式取样, 取样点为 12 点, 每个象限不少于 3 点, 按等面积螺旋形分布。取样小孔的直径按在小孔处压降占取样总压降的 80% 为准, 经计算小孔直径 $\Phi=1$ mm, 取样管直径 $\Phi=10$ mm。

取样感头放置在距排气喷口 0.5 倍喷口直径处。取样系统见图 1。取样感头出口到碳氢分析仪前的管路采用自动控温保温装置, 保温在 $160^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 。冒烟取样管路在过滤夹头前保温在 $75^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 管路在到一氧化碳、二氧化碳和氮氧化物

分析仪前的管路采用自动控温保温装置, 保温在 $160^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 。冒烟取样管路在过滤夹头前保温在 $75^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 管路在到一氧化碳、二氧化碳和氮氧化物

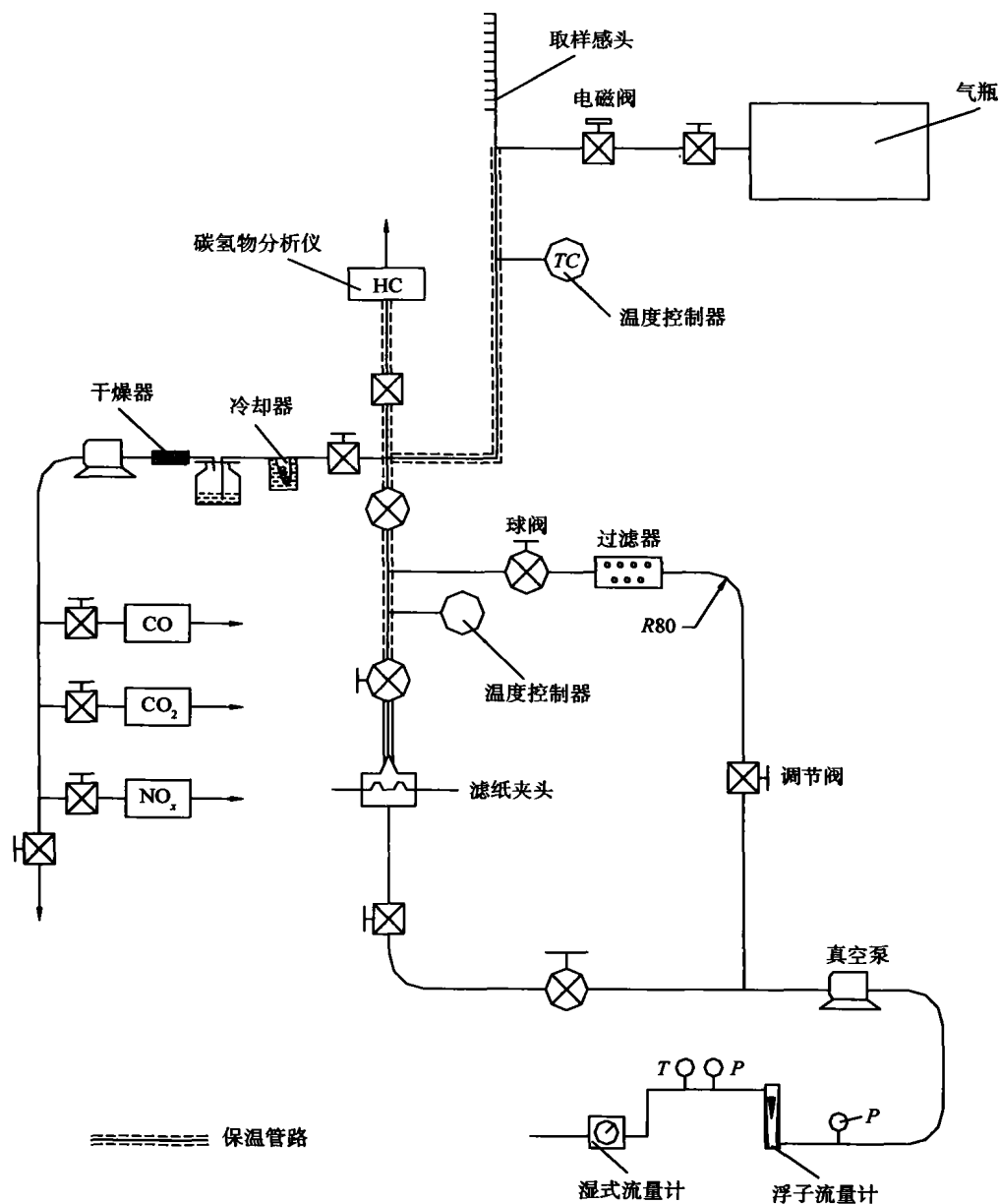


图 1 取样系统简图

Fig. 1 Scheme of measurement system

物等分析仪前,样气经过冷却、除水、干燥后由真空泵抽取送入仪器分析。

HC 分析仪采用美国贝克曼 402 型火焰离子检测的碳氢分析仪,CO 和 CO₂ 的测量采用国产 QGS-08 型非分散性红外分析仪。NO_x 的分析采用日本理研公司生产的 RS-325L 型化学发光检测氮氧化物分析仪。真空泵为国产无油薄膜式真空泵。在发动机启动过程中为了避免燃油污染取样管路装了倒吹气系统,用冷气瓶供气,电磁活门控制。到达取样状态时就切断倒吹气路,由真空泵抽取样气。

2.2 排气指数 EI, 排放率和 D_p 的计算

国际民航组织为了计算排污标准,规定了以下三个参数:

(1) EI 定义为每公斤燃油中各种污染物的克数。

“湿基”浓度 = $k \times$ “干基”浓度”

$$k = \frac{4 + \frac{n}{m} T + \left(\frac{n}{m} T - 2h \right) \left\{ [\text{NO}_2] - \frac{2}{x} [\text{HC}] \right\} + (2 + h) [\text{HC}] \left(\frac{y}{x} - \frac{n}{m} \right)}{(2 + h) \left\{ \frac{n}{m} [\text{CO}_2]_d + [\text{CO}]_d + 2 \right\} - \left(\frac{n}{m} T - 2h \right) \{ 1 - [\text{CO}]_d \}}$$

式中:

[] 代表排气中各组分的容积浓度,湿基。

m 和 n 为燃油中分子常数,由燃油技术条件确定,例如 C_nH_m。

x 和 y 为排气中碳氢化合物的分子常数,C_x-H_y 可以取 $x=1, y=4$ 。因为碳氢化合物通常折合为 CH₄ 计算。

$$k' = \frac{4 + \frac{n}{m} T + \left(\frac{n}{m} T - 2h \right) \left(\frac{2}{x} \right) [\text{HC}] + (2 + h) [\text{HC}] \left(\frac{y}{x} - \frac{n}{m} \right)}{(2 + h) \left\{ \frac{n}{m} [\text{CO}_2]_d + [\text{CO}]_d + 2 \right\} - \left(\frac{n}{m} T - 2h \right) \{ 1 + [\text{NO}_2]_d - [\text{CO}]_d \}}$$

此公式已经编入航空部标 HB6117-87^[2]。

3 试验结果

在北京民航维修基地,对 2 台 JT3D-7 型发动机进行排气污染物实测,机号为 670-785,670-786,试验数据见表 1。

将数据输入程序计算,得出结果见表 2。

此试验结果与国际上公布的 JT3D-7 型发动机典型的排气率进行了对比,数据见表 3。

二台发动机测得的排放率与公布的 JT3D-7 型的典型数据对比,大部分数据相接近,差别较大的是 HC 排放物,除了在慢车时数据接近,其余三种状态均大大高于公布的数据。CO 的数据在大

(2) 排放率 = $EI \times$ 燃油流量 / (g/s)。

(3) D_p 指发动机在一个起飞着落循环期间所排放的各种污染物的总量。起飞着落循环所耗的时间由国际民航组织规定^[1]。

发动机在某一状态下的排放量采用 EI 参数或排放率。而作为整台发动机的排放标准采用 D_p 值。

根据文献[1]中 10 个化学平衡方程式自行编制的计算程序,计算出 EI_{CO}, EI_{NO}, EI_{NO_x}, EI_{HC} 及气油比 A/F 等参数,由于原始公式中使用的成分均为真实情况(含水蒸汽的容积浓度)称“湿基”,而实测中某些气体成分由于测试仪器的限制必须除去水分称为“干基”,因此计算中必须将“干基”成分修正到“湿基”。国际标准规定采用的仪器中 CO 和 CO₂ 必须除水,测出的为“干基”,HC 和 NO_x 测出为“湿基”,根据文献[1]给出。

T 为进口干空气中二氧化碳的摩尔数,等于 0.00032。

H 为进口空气的湿度,取 $H=0.00629$ 。

[]_d 代表排气中各组分的容积浓度,干基。

本文测量所采用的仪器测出的组分中 HC 成分为“湿基”外 CO, CO₂ 和 NO_x 均为“干基”无参考公式,必须自行推导修正系数 k' , 结果如下:

状态下也有增加,这可能与发动机内喷嘴雾化质量变差有关,当然相应的燃烧效率也下降了。经查此二台发动机为 1973 年 11 月 6 日出厂。由普惠公司交波音公司所用,在西南航空公司服役时间长了,因此效率变差是切合实际的。

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(EPA)的标准 ARP-1256A^[3]的规定,以在排气中测出的污染物的数据,用文献[2]中气油比的计算公式所得出的 AFR 与发动机上所测的空气流量之比,二者误差在大功率(起飞状态)时,应在 10% 以内为合格。现将计算所得与实测的 AFR 数据列于表 4,其中空气量是指核心发动机的空气量。

表 1 JT3D-7 型发动机不同工况下的排放测量数据

Table 1 Measured data of JT3D-7 Engine at different operation condition

机 号	状态额定 推力/%	修正功率 L_b	燃油量/ (kg/h)	CO 10^{-6}m	NO _x 10^{-6}m	NO 10^{-6}m	HC 10^{-6}m	CO ₂ /%
670-785	慢车 7	1070	498	645	5	1	1200	1.4
	进场 30	5700	1376	165	20	10	385	1.95
	爬升 85	16472	3970	36	76	72	210	2.9
	起飞 100	19258	4786	27	103	100	120	3.1
670-786	慢车 7	1030	551	641	6	3	1450	1.4
	进场 30	5600	1470	163	24	12.8	210	1.95
	爬升 85	16264	4001	30	75	70	150	2.8
	起飞 100	19238	4902	19	107	103	100	3.1

表 2 据测量的污染排放的计算结果

Table 2 Computation result based on the measured emission data

状 态 额定推力/%	$EI_{\text{HC}}/(\text{g/kg})$		$EI_{\text{CO}}/(\text{g/kg})$		$EI_{\text{NO}}/(\text{g/kg})$		$EI_{\text{NO}_x}/(\text{g/kg})$		气油比 AFR	
	785	786	785	786	785	786	785	786	785	786
7	89.97	106.96	82.85	81.03	0.138	0.41	1.06	1.25	133.40	131.29
30	22.87	12.59	16.69	16.15	1.08	1.43	3.33	4.03	105.56	106.57
85	6.37	8.59	2.15	2.49	5.39	5.34	8.84	8.63	75.13	72.38
100	3.85	4.62	1.23	1.75	7.17	6.95	11.42	10.98	68.07	68.00

表 3 测量的 EI 值与典型值的比较

Table 3 Comparison of measured and typical issued data

状态/%	机 号	HC	CO	NO _x
7	670-785	12.45	11.46	0.147
	670-786	16.37	12.40	0.19
	JT3D-7 典型	15.70	17.74	0.28
30	670-785	8.74	6.38	1.27
	670-786	5.14	6.80	1.65
	JT3D-7 典型	0.81	7.85	2.06
85	670-785	7.02	2.37	9.75
	670-786	9.55	2.77	9.59
	JT3D-7 典型	0.41	1.96	9.90
100	670-785	5.12	1.64	15.19
	670-786	6.29	2.38	14.95
	JT3D-7 典型	0.63	1.13	15.93

表 4 AFR 据污染排放及发动机气量油量测量计算的比较

Table 4 AFR Comparison of based on emission data and engine air flow rate and fuel flow rate data

状态(额定推力/%)	燃油量/(kg/s)	空气量/(kg/s)	气油比	计算气油比	误差/%
7	0.153	20.424	133.49	131.29	1.65
85	1.1114	84.777	76.28	75.13	1.51
100	1.3617	90.55	66.50	68.07	-2.36

由数据可见测出燃气成分计算所得的气油比与发动机实测的气油比非常接近,误差最大不超过 3%,比标准规定的误差范围要小。证明整个取样系统具有代表性,测量技术和计算程序是切实可行的。

4 排放指数两种计算的对比

除了由计算程序直接计算 EI 外,工程上通常用近似公式计算 EI ,部标 HB6117-87 中也采用这种公式:

$$EI_{CO} \cong \frac{28011 [CO]}{(M_C + \alpha M_H) \{ [CO] + [CO_2] + [HC] - T \}}$$

$$EI_{NO} \cong \frac{30017 [NO]}{(M_C + \alpha M_H) \{ [CO] + [CO_2] + [HC] - T \}}$$

$$EI_{NO_2} \cong \frac{46006 [NO_2]}{(M_C + \alpha M_H) \{ [CO] + [CO_2] + [HC] - T \}}$$

$$EI_{HC} \cong \frac{16043 [HC]}{(M_C + \alpha M_H) \{ [CO] + [CO_2] + [HC] - T \}}$$

$$AFR \cong \left(\frac{M_{AIR}}{M_C + \alpha M_H} \right) \left\{ \frac{1 - \left(\frac{\alpha}{4} \right) [CO] + [CO_2] + [HC]}{(1 + h) \{ [CO] + [CO] + [CO_2] + [HC] - T \}} \right\}$$

$$\eta \cong 100 - (0.0224 EI_{CO} + 0.1108 EI_{HC})^{[4]}$$

式中: M_C 为碳的原子量; M_H 为氢的原子量; α 为 n/m ; M_{AIR} 为干空气分子量。

用工程近似公式与程序计算数据相比误差小于 1%,大部分数据小于 0.2%,可见一般情况采用工程近似公式不会引起很大偏差。

5 结 论

(1) 本文所建立的取样系统和取样技术切实可行,测量精度在 $\pm 3\%$ 内,比较先进。

(2) 自行推算的“干基”成分向“湿基”转换的修正系数 k 适合于采用测量“干基”的 NO_x 分析仪,有实用价值。

(3) 编制的排气污染指数的计算程序是实用

有效的。

参考文献:

- [1] International Civil Aviation Organization, Aircraft Engine Emission [Z]. U. S. A. International Civil Aviation Organization, 1981.
- [2] 中华人民共和国航空工业部. 航空燃气涡轮发动机气态污染物的连续取样及测量程序规范[Z]. HB-6117-87.
- [3] Procedure For the Continuous Sampling And Measurement of Gaseous Emission From Aircraft Turbine Engines[R]. ARP 1256A SAE, 1981.
- [4] Zaccardi V A, etc. Problems in Gas Turbine Engine Emission Measurement[R]. Pratt Whitney Aircraft Group, AIAA 83-20.