

燃气分析法测试燃气轮机主燃烧室 燃烧效率、气态污染物误差分析

李亚娟, 王明瑞, 韩冰, 马征, 贾琳妍
(中国航空发动机集团公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 介绍了测量燃气涡轮发动机主燃烧室燃烧效率、气态污染物排放的燃气分析系统,从取样、摆动测量方式、过程温度控制、仪器测量4方面分析了燃烧效率、气态污染物的误差。结果表明:采用混合式取样器以摆动测量方式得到的燃烧效率误差在0.21%以内,余气系数的误差在1.11%以内,气态污染物误差在2.24%以内。此外还对燃烧室不同工况下的燃烧效率和污染物组分体积分数分布进行了统计分析,确认了除较高油气比状态的燃烧效率分布较为均匀,可适当减少取样点数量外,足够的取样点数量是保证燃气分析测试结果准确性的必要条件。

关 键 词: 燃气分析; 燃烧效率; 气态污染物; 混合式取样器; 摆动测量; 误差分析

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Gas turbine primary combustor error analysis of combustion efficiency and exhaust emission using gas analysis method

LI Ya-juan, WANG Ming-rui, HAN Bing, MA Zheng, JIA Lin-yan
(Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Shengyang 110015, China)

Abstract: The gas analysis system for measurement of combustion efficiency and exhaust emissions for aero gas turbine main combustor was introduced. The measurement error on combustion efficiency and exhaust emissions were analyzed in consideration of four aspects: sampling probe error, traversing mechanism movement, sampling probe temperature control and instrument error. Results showed that by using mixed sampling probe and traversing mechanism, the measurement error for combustion efficiency was less than 0.21%, the error for air-fuel ratio and emissions was less than 1.11% and 2.24%, respectively. Combustion efficiency and emission volume fraction distribution under different combustor operational conditions were statistically analyzed. It is clear that under high power and high fuel air ratio conditions, these distributions are relatively uniform, thus it is appropriate to reduce a certain number of sampling points. Generally speaking, a large amount of sampling points is necessary to ensure the measurement accuracy of gas analysis method.

Key words: gas analysis; combustion efficiency; exhaust emission;
mixed sampling probe; swing measurement; error analysis

收稿日期: 2015-08-26

作者简介: 李亚娟(1988—),女,工程师,硕士,从事航空发动机燃气分析工作。E-mail:liyajuanhit@163.com

引用格式: 李亚娟,王明瑞,韩冰,等. 燃气分析法测试燃气轮机主燃烧室燃烧效率、气态污染物误差分析[J]. 航空动力学报,2017,32(5):1051-1057. LI Yajuan, WANG Mingrui, HAN Bing, et al. Gas turbine primary combustor error analysis of combustion efficiency and exhaust emission using gas analysis method[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1051-1057.

随着军用燃气涡轮发动机朝着大推质比发展,燃烧室排气温度越来越高,民用航空燃气轮机和工业燃气轮机的低污染物排放指标已成为其进入市场的必备条件^[1-6],燃气分析测量高温和气态污染物的能力使之成为各种类型发动机研制不可或缺的技术手段^[7-9],而燃气分析法测量燃烧室燃烧效率、气态污染物排放的误差一直鲜有深入的探讨和明确的结论.确定误差范围是合理利用试验数据的前提,而试验数据是准确判定燃烧室性能和并对其改进的基础,因此是十分必要的.

本文介绍了燃气涡轮发动机主燃烧室燃烧效率、气态污染物排放的燃气分析测试系统,并从取样、摆动测量方式、过程温度控制、仪器精度和计算方法的误差传递 4 个方面对燃气分析燃烧效率、气态污染物测量值的影响进行了分析,结果表明燃气分析是一种测量燃烧效率和气态污染物排放的准确、可靠的技术手段.

1 测试系统简介

燃气分析是通过取样装置把燃气引入测量仪器进行成分分析,再利用燃气成分数据计算燃烧效率、余气系数、燃烧温度以及污染物排放等参数的一种测量方法.图 1 为燃烧效率、气态污染物测试系统布置图,一般采用混合式取样器,如图 2 所示,取样器的取样孔按等环面积分布,各取样管结构相似,长度略有不同,在进口压力相同的情况下,可保证各管内样气流量^[10-12]相差不大于 1%,以确保取样的代表性.

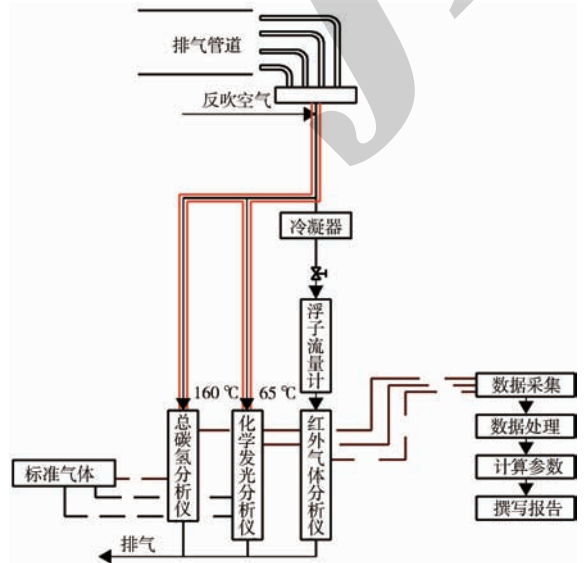


图 1 燃烧效率、气态污染物测试系统图
Fig. 1 Testing system diagram of combustion efficiency and exhaust emission

取样器安装于测量段的移位机构上,试验过程中移位机构摆动一周实现燃烧室整个出口截面上燃气的采集.摆动测试方式如图 3 所示.

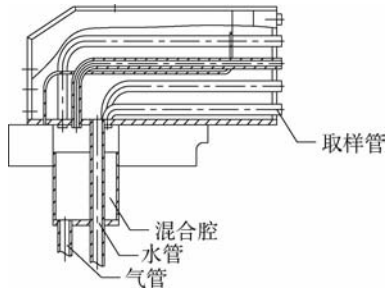


图 2 燃气取样器结构
Fig. 2 Structure of gas sampling probe

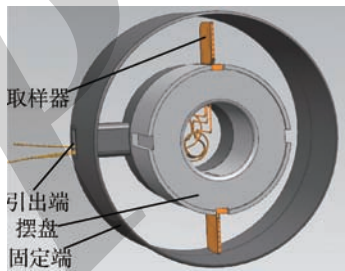


图 3 移位机构及取样器安装示意图
Fig. 3 Installation diagram of shift mechanism and sampling probe

2 燃烧效率、气态污染物误差分析

燃气分析法通过测量燃气组分来计算余气系数、燃烧效率及气态污染物排放指数.燃气组分体积分数的测量值影响因素较多,主要有取样器结构型式、摆动测量方式、过程温度控制、仪器的精度^[13]等.混合式取样器由于各取样孔进样量不均匀而引起的混合误差,使用前应进行流量分配试验.通过电伴热保温管基本可以实现样气温度的精确控制.高性能的分析仪器可以保证仪器线性偏差、24 h 内漂移偏差和输出信号波动偏差在 1% 以内.

2.1 取样器结构型式对测试结果的影响

试验数据表明主燃烧室出口压力的偏差范围为 $\pm 1\%$,基本属于均匀压力场.混合式取样器各取样管的结构相似,保证样气在各取样管内压力损失几乎相等,后置的混合器最大程度的避免了相互之间的干扰,保证了各取样管在进口压力相等的情况下流量相等.取样器进口压力在一定范围内的增加或减小,样气流量随之成比例的增加或减小,具有自适应性.

2.1.1 取样器各取样管的流量配比

要尽可能达到各取样管的等流量取样,主要

可通过以下 3 点实现:一是通过严格的机械加工工艺如入口磨圆、去毛刺等来保证取样管相同的进口损失;二是通过控制各取样管长度、取样管内燃气速度来保证各管的压力损失相差不大;三是保证一定的样气总流量,避免某一取样管出口相对高压在混合腔内形成高压区而使其他管内燃气无法流出,带来误差。

为计算各取样管的流量配比关系,选取目前设计的极具代表性的两个取样器为例,一个是工作于高温高压燃烧室环境下的大尺寸 7 点混合式取样器,另外一个是中压环境下的小尺寸 5 点混合式取样器,表 1 为两种取样器的工作工况,图 4 为计算的取样器各取样管流量与平均流量的比例图。

表 1 两种取样器的工作工况

Table 1 Working condition of two kinds of sampling probe		
参数	7 点混合取样器	5 点混合取样器
上游压力/ 10^5 Pa	22	5
下游压力/ 10^5 Pa	10	1.5
下游管流量/(L/min)	50	5
下游管流速/(m/s)	20.98	6.63

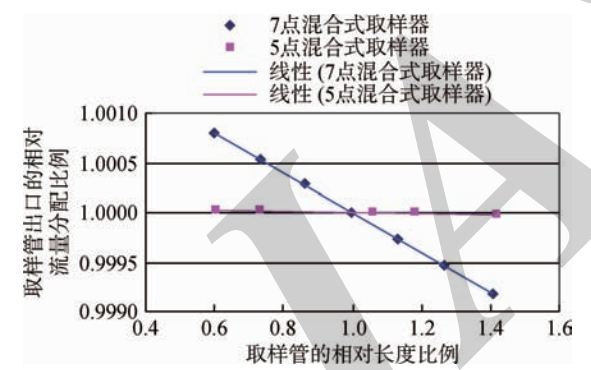


图 4 两种取样器各取样管流量与平均流量的比例
Fig. 4 Ratio between sampling tube flow and average flow of two kinds of sampling probe

表 2 为采用 5 点非混合式取样器得到的各点 CO_2 组分的 5 组数据,表 3 为分别按 5 点和 7

点混合式取样器各取样管的流量分配关系计算得到的 5 点 CO_2 组分体积分数的混合值与平均值的对比。从表中数据可以看出,混合式取样器的取样误差在 0.01% 以内。取样器的取样误差与取样下游的流量、取样管的长度控制有直接关系,经统计计算,控制取样管路下游气体流速在 100 m/s 内,混合式取样器径向取样误差可控制在 1‰ 以内。

表 2 CO_2 体积分数数据

Table 2 Data of CO_2 volume fraction					
序号	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点
1	5.616	5.215	5.173	5.146	3.865
2	6.070	6.234	5.833	5.966	6.157
3	6.492	5.925	5.226	6.626	6.528
4	6.121	6.890	6.709	5.031	4.014
5	5.348	6.139	6.263	4.286	3.369

2.1.2 取样器的骤冷效果

一个合格的取样器要求进入取样器的高温燃气能快速降温至 500℃ 以下,使化学反应停止,保证取样的准确性。经换热计算,目前设计的取样器,均能实现高温燃气进入取样器内 20 mm 达到骤冷效果。以 5 点混合式取样器为例,取样器内水流量为 0.44 kg/s,冷却水温升为 56℃,应用 $\phi 4\times 1$ 的燃气取样管,2000℃ 的燃气进入取样器内 18 mm 便被冷却到 280℃。

2.2 取样器点密度影响和摆动测量方式影响

2.2.1 取样点密度的影响

燃烧室出口截面各点燃气组分布是不均匀场,为了得到真实的分布数据,需要足够多的采样点,根据试验经验,每平方厘米面积上至少分布 0.5 点才能满足要求。根据燃烧室腔道高度的不同,目前设计的取样器为径向 5~7 点混合式取样器,点间距为 10 mm,随移位机构摆动的过程中实现至少 600 点的采集。

表 3 两种配比方式得到的 CO_2 体积分数取样误差

Table 3 Sampling error of CO_2 volume fraction of two kinds of distribution ways					
序号	CO_2 体积分数			误差 1/%	误差 2/%
	5 点平均值	5 点取样器计算值	7 点取样器计算值		
1	5.00300	5.00299	5.00271	-0.0001	0.0058
2	6.05200	6.05200	6.05200	0	0.0001
3	6.15943	6.15943	6.15943	0	-0.0015
4	5.75305	5.75304	5.75305	-0.0002	0.0091
5	5.08088	5.08086	5.08088	-0.0003	0.0100

注:表中误差 1 表示 5 点取样器计算值与 5 点平均值之间的误差,误差 2 是指 7 点取样器计算值与 5 点平均值之间的误差。

移位机构有匀速摆动和摆停的方式,匀速摆动移位机构旋转一周需要 4 min 左右,设置采集频率为 1 Hz,可实现燃烧室出口截面 1 000 点以上的数据采集.摆停的方式为移位机构每摆动 3° 停止实现一次数据采集,摆动一周实现周向 120 个位置、径向至少 5 点共至少 600 点的数据采集.

采用混合式取样器以匀速摆动测量方式测量燃烧室燃烧效率,其统计值见表 4.

$\Delta_{\max}$ 为周向效率的最大值较平均值的最大偏差.从表中可以看出,油气比为 0.011(慢车状态)燃烧室效率周向分布不均匀,与平均周向燃烧效率的最大偏差为 3.52%,而在油气比 0.023 和 0.027 状态,最大偏差分别为 0.22% 和 0.03%.

表 5 氮氧化物排放数据
Table 5 Exhaust emission data of NOx

序号	油气比	体积分数最大值/ 10^{-6}	体积分数最小值/ 10^{-6}	体积分数周向平均/ 10^{-6}	$\Delta_{\max}/\%$
1	0.0113	54.90	9.80	24.2	127.1
2	0.0241	292.50	180.19	231.2	26.5
3	0.0288	427.00	290.25	374.2	22.4
4	0.0291	471.13	326.00	384.7	22.5
5	0.0306	442.13	326.13	365.7	20.9

从表 5 可以看出,氮氧化物排放值在各状态下的偏差在 20.9%~127.1%之间,要保证较高的测量精度必须满足足够的测点密度.

2.2.2 摆动测量方式的影响

采用摆动测量方式时,燃气从取样器进口到达分析仪器需要 5~10 s 时间,分析仪器经过 3~5 s 的响应时间得到燃气体积分数,较移位机构位置总体滞后 8~15 s,实际试验时,根据试验工况,移位机构开始转动等待 10~15 s 后,开始数据采集,移位机构停止转动等待 10~15 s 后,停止数据采集,以消除滞后带来的影响.试验时移位机构摆动速度不宜过快,以免采样覆盖面不完全带来误差.

2.3 过程温度控制对测试结果的影响

采用非分光型红外分析仪测量一氧化碳和二氧化碳的体积分数,采用化学发光分析仪测量氮氧化物的体积分数,采用总碳氢分析仪测量未燃碳氢的体积分数.样气由取样器取出,经一段不长于 25 m 的保温管路进入测试仪器,进入化学发光分析仪的样气温度保持在 $(65\pm 15)^{\circ}\text{C}$,进入总碳氢分析仪的样气温度保持在 $(160\pm 15)^{\circ}\text{C}$ ^[14-16].非分光型红外分析仪测量得到的是干基体积分数,在样气进入仪器前,需用冷凝器将样气冷却到

因此可以确定除慢车状态外,燃烧效率的空间分布是较为均匀的,因此可适当减少测点的数量.

表 4 燃烧室出口截面燃烧效率分布
Table 4 Combustion efficiency distribution of combustor outlet surface

序号	油气比	周向平均效率/%	$\Delta_{\max}/\%$
1	0.011	94.255	3.52
2	0.023	99.353	0.22
3	0.027	99.981	0.03

以氮氧化物排放为例来分析混合式取样器取样点密度对气态污染物排放的测试精度影响.表 5 为氮氧化物排放数据沿周向的统计值.

4℃左右,除去水分,然后再自然升温.4℃时样气还含有微量水分,会对一氧化碳、二氧化碳的测量值有略微影响,可利用式(1)进行修正,式中 p_s 为 4℃时的饱和蒸气压.

$$C_r = C_m p / (p - p_s) \tag{1}$$

2.4 仪器测试精度和计算方法误差

液体燃料在空气中燃烧的过程化学反应方程式为

$$\text{CHn} + r_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{air}}(\varphi_{\text{O}_2,\text{air}} + \varphi_{\text{N}_2,\text{air}} + \varphi_{\text{CO}_2,\text{air}} + h) = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CO}} + n_{\text{CH}_4} + n_{\text{H}_2} + n_{\text{NO}} + n_{\text{NO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} \tag{2}$$

式中 $r_{\text{H}_2\text{O}}$ 为乳化油中水与燃油的摩尔比; n_{air} 为每摩尔燃料燃烧所对应的空气摩尔数; $\varphi_{\text{O}_2,\text{air}}$, $\varphi_{\text{N}_2,\text{air}}$, $\varphi_{\text{CO}_2,\text{air}}$ 分别为空气中氧气、氮气、二氧化碳体积分数; h 为空气的摩尔含湿量; n_i 为燃气中 i 组分的摩尔数.

燃气分析法测试余气系数、燃烧效率及气态污染物排放只需测试 H_2 , CO_2 , CO , THC , NOx 的体积分数,其他生产物通过计算得到.试验采用间接加热方式,燃油氢碳比简化为 2,无喷水,燃料低热值为 42 650 kJ/kg,忽略空气中二氧化碳的影响,这部分简化对误差分析的影响很小,几乎为

零. 余气系数、燃烧效率、气态污染物排放指数可用 式(3)~式(7)式表示, φ_{dry} 为气体的干基体积分数.

$$\alpha = \frac{0.1397(1 + 0.5\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} - 1.5\varphi_{\text{H}_2,\text{dry}} - 1.5\varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}} + 0.5\varphi_{\text{NO}_2,\text{dry}})}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (3)$$

$$\eta = 1 - \frac{0.473\varphi_{\text{CO},\text{dry}} + 0.404\varphi_{\text{H}_2,\text{dry}} + 1.34\varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}} + 0.151\varphi_{\text{NO}_2,\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (4)$$

$$I_{\text{e,CO}} = \frac{1996.65\varphi_{\text{CO},\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (5)$$

$$I_{\text{e,THC}} = \frac{1143.72\varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (6)$$

$$I_{\text{e,NOx}} = \frac{3279.32\varphi_{\text{NOx},\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (7)$$

2.4.1 H₂ 测量值引起的误差

由 H₂ 测量值引起的误差公式如下:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{-1.5\Delta\varphi_{\text{H}_2,\text{dry}}}{1 + 0.5\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} - 1.5\varphi_{\text{H}_2,\text{dry}} - 1.5\varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}} + 0.5\varphi_{\text{NO}_2,\text{dry}}} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = -\frac{0.404\Delta\varphi_{\text{H}_2,\text{dry}}}{0.527\varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} - 0.404\varphi_{\text{H}_2,\text{dry}} - 0.34\varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}} - 0.151\varphi_{\text{NO}_2,\text{dry}}} \quad (9)$$

燃烧室内氢气的体积分数通常低于 5×10^{-5} , 因此余气系数相对误差小于 0.0075%, 在燃烧室的绝大部分工况下, 二氧化碳的体积分数大于 2%, 燃烧效率的相对误差小于 0.1%, 不测量氢气对测试精度的影响很小.

2.4.2 THC 测量值引起的误差

航空煤油燃烧产生的燃气中二氧化碳的体积分数不大于 15%, 对余气系数及燃烧效率、气态污染物排放指数的相对误差进行简化, 公式如下:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{1.1963\Delta\varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = -\frac{1.34\Delta\varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta I_{\text{e,CO}}}{I_{\text{e,CO}}} = -\frac{\Delta\varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (12)$$

$$\frac{\Delta I_{\text{e,NOx}}}{I_{\text{e,NOx}}} = -\frac{\Delta\varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (13)$$

$$\frac{\Delta I_{\text{e,THC}}}{I_{\text{e,THC}}} = \frac{(\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}})\Delta\varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}}{(\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}})\varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (14)$$

试验在慢车状态下, 二氧化碳的体积分数一般在 2% 左右, 未燃碳氢体积分数小于 10^{-3} , 总碳氢分析仪的误差为 2%, 余气系数相对误差小于 0.12%, 燃烧效率相对误差小于 0.14%, 一氧化碳、氮氧化物和未燃碳氢排放指数相对误差分别小于 0.1%, 0.1% 和 2%. 其他状态未燃碳氢测量

值小于 10^{-5} , 而二氧化碳体积分数增大使未燃碳氢对余气系数、燃烧效率和污染物排放的误差小于慢车状态误差.

2.4.3 CO 测量值引起的误差

由 CO 测量值引起的误差公式如下:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = -\frac{\Delta\varphi_{\text{CO},\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (15)$$

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = -\frac{0.473\Delta\varphi_{\text{CO},\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (16)$$

$$\frac{\Delta I_{\text{e,CO}}}{I_{\text{e,CO}}} = \frac{(\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}})\Delta\varphi_{\text{CO},\text{dry}}}{(\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}})\varphi_{\text{CO},\text{dry}}} \quad (17)$$

$$\frac{\Delta I_{\text{e,NOx}}}{I_{\text{e,NOx}}} = -\frac{\Delta\varphi_{\text{CO},\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (18)$$

$$\frac{\Delta I_{\text{e,THC}}}{I_{\text{e,THC}}} = -\frac{\Delta\varphi_{\text{CO},\text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}}} \quad (19)$$

慢车状态, 一氧化碳的体积分数在 10^{-3} 以下仪器精度为 1%, CO 测量值对余气系数产生相对误差小于 0.05%, 燃烧效率相对误差小于 0.024%, 一氧化碳、氮氧化物和未燃碳氢排放指数误差分别小于 1%, 0.05% 和 0.05%. 其他状态一氧化碳体积分数小于慢车状态, 而二氧化碳体积分数增大使一氧化碳对余气系数、燃烧效率和污染物排放的误差远小于慢车状态误差.

2.4.4 CO₂ 测量值引起的误差

由 CO₂ 测量值引起的误差公式如下:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = -\frac{\Delta\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}}}{(\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}} + \varphi_{\text{CO},\text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4,\text{dry}})(1 + 0.5\varphi_{\text{CO}_2,\text{dry}})} \quad (20)$$

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{(0.473 \varphi_{\text{CO}, \text{dry}} + 0.404 \varphi_{\text{H}_2, \text{dry}} + 1.34 \varphi_{\text{CH}_4, \text{dry}} + 0.151 \varphi_{\text{NO}_2, \text{dry}}) \Delta \varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}}}{(\varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}} + \varphi_{\text{CO}, \text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4, \text{dry}}) \varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}}}$$

(21)

$$\frac{\Delta I_{\text{e}, \text{CO}}}{I_{\text{e}, \text{CO}}} = - \frac{\Delta \varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}} + \varphi_{\text{CO}, \text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4, \text{dry}}}$$

(22)

$$\frac{\Delta I_{\text{e}, \text{NOx}}}{I_{\text{e}, \text{NOx}}} = - \frac{\Delta \varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}} + \varphi_{\text{CO}, \text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4, \text{dry}}}$$

(23)

$$\frac{\Delta I_{\text{e}, \text{THC}}}{I_{\text{e}, \text{THC}}} = - \frac{\Delta \varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}}}{\varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}} + \varphi_{\text{CO}, \text{dry}} + \varphi_{\text{CH}_4, \text{dry}}}$$

(24)

慢车状态 CO₂ 体积分数最小,仪器的测量精度优于 1%,对余气系数产生的误差小于 1%,燃

烧效率误差决定于仪器精度和燃气中的一氧化碳、未燃碳氢的总和与二氧化碳的体积分数比,根据燃气中一氧化碳和二氧化碳体积分数的极端情况可得出燃烧效率的精度优于 0.1%。一氧化碳、氮氧化物和未燃碳氢排放指数误差取决于二氧化碳分析仪的精度,不大于 1%。

2.4.5 NO_x 测量值引起的误差

由 NO_x 测量值引起的误差公式如下:

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = - \frac{0.5 \Delta \varphi_{\text{NO}_2, \text{dry}}}{1 + 0.5 \varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}} - 1.5 \varphi_{\text{H}_2, \text{dry}} - 1.5 \varphi_{\text{CH}_4, \text{dry}} + 0.5 \varphi_{\text{NO}_2, \text{dry}}}$$

(25)

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = - \frac{0.151 \Delta \varphi_{\text{NO}_2, \text{dry}}}{0.527 \varphi_{\text{CO}, \text{dry}} + \varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}} - 0.404 \varphi_{\text{H}_2, \text{dry}} - 0.34 \varphi_{\text{CH}_4, \text{dry}} - 0.151 \varphi_{\text{NO}_2, \text{dry}}}$$

(26)

$$\frac{\Delta I_{\text{e}, \text{NOx}}}{I_{\text{e}, \text{NOx}}} = \frac{\Delta \varphi_{\text{NO}_2, \text{dry}}}{\varphi_{\text{NO}_2, \text{dry}}}$$

(27)

氮氧化物在慢车状态下体积分数低于 5×10⁻⁵,对燃烧效率和余气系数的影响小于 0.005%,在较高状态下体积分数可达 5×10⁻⁴,测试仪器精度为 1%,其引起的余气系数和燃烧效率误差为同样不大于 0.005%,氮氧化物排放指数误差为 1%。

综上,各组份测量偏差对各性能参数(用 ζ 表示)的最大误差可用式(28)^[17]表示,计算得余气系数的误差不大于 1.1%,燃烧效率的误差不大于 0.18%,一氧化碳、氮氧化物和未燃碳氢的排放指数误差分别不大于 1.42%,1.42%和 2.24%。

$$\Delta \zeta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta \xi_i^2}$$

(28)

2.5 误差分析小结

综上所述,燃烧效率、气态污染物的误差主要由取样误差和计算误差决定,总误差同样用式(28)计算结果如表 6 所示。

表 6 燃烧效率、余气系数、排放总误差
Table 6 Total error of combustion efficiency, excess air coefficient and exhaust emission

参数	取样误差/%	仪器精度及计算误差/%	总误差/%
余气系数	≤1	≤1.10	≤1.11
燃烧效率	≤1	≤0.18	≤0.21
CO 排放	≤1	≤1.42	≤1.42
NO _x 排放	≤1	≤1.42	≤1.42
THC 排放	≤1	≤2.24	≤2.24

烧室燃烧效率、气态污染物时,余气系数、燃烧效率、一氧化碳、氮氧化物和未燃碳氢的排放指数误差分别不大于 1.11%,0.21%,1.42%,1.42%,2.24%。

3 试验验证

流量法油气比是通过测量燃烧室进口燃油流量和空气流量计算得到的,燃油流量采用涡轮流量计测得,精度为±0.5%,空气流量采用流量孔板测量,试验前流量孔板用临界流文丘里喷嘴校准,空气流量的测量误差小于 1%,流量法余气系数的最大误差是 1.5%,与流量法余气系数测量值进行比对,可进一步佐证燃气分析测试余气系数结果的可信性。

燃气分析法采用混合式取样器以摆动测量方式随移位机构摆动的过程中收集样气,可以得到燃烧室出口截面代表性样气。

表 7 是燃气分析法计算余气系数与流量法计算余气系数的对比,从表 7 中的数据可看出,燃气分析法得到的余气系数和流量法得到的余气系数

表 7 余气系数的对比
Table 7 Comparison of excess air coefficient

序号	分析方法		相对误差/%
	流量法	燃气分析	
1	2.432	2.445	0.54
2	2.434	2.450	0.67
3	2.436	2.453	0.69
4	2.433	2.455	0.92
5	2.543	2.571	1.10
6	2.539	2.562	0.90

当采用混合式取样器以摆动测量方式测量燃

的相对误差基本在 1% 左右,证实了混合式取样器取样的代表性和燃气分析法得到的测试数据的准确性.

4 结 论

1) 燃气分析测试燃气涡轮发动机主燃烧室燃烧效率、气态污染物的误差分别在 0. 21%, 2. 24% 以内.

2) 合理的混合式取样结构、足够的测点密度是保证燃烧效率和污染物测试精度的前提条件. 在测量非慢车状态下的燃烧效率时,适当减少取样点数量,也可保证较高的测量精度.

参考文献:

[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 Jianxing. Commercial engine emissions and low emission combustion technology trends[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 986-996. (in Chinese)

[2] 金捷, 岳明. 燃气涡轮发动机低污染燃烧室的发展趋势及思考[R]. 广东 深圳: 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会学术年会, 2007.

[3] 金如山, 索建秦. 民用飞机低污染发动机研发策略[R]. 广东 深圳: 中国航空学会第 7 届动力年会, 2010.

[4] 蒋波, 何小民, 金义, 等. 基于驻涡稳定的 RQL 燃烧室排放性能的试验研究[R]. 广东 深圳: 中国航空学会 2010 年第 7 届动力年会, 2010.

[5] 王铮钧, 索建秦, 黎明, 等. 基于贫油预混蒸发(LPP)的多点喷射低污染燃烧室头部方案研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13: 10309-10416.
WANG Zhengjun, SUO Jianqin, LI Ming. Multi-point injection polluting combustion head scheme based on lean premixed evaporation[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(34): 10309-10416. (in Chinese)

[6] 刘强, 索建秦, 梁红侠, 等. 直混燃烧与 LPP 组合燃烧室数值研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(11): 2448-2454.
LIU Qiang, SUO Jianqin, LIANG Hongxia. LPP combina-

tion with straight mixed combustion chamber numerical study[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(11): 2448-2454. (in Chinese)

[7] 刘高恩, 王华芳. 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.
LIU Gaoen, WANG Huafang. Gas turbine engine emissions measurement[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(3): 348-352. (in Chinese)

[8] 林宇震, 许宏全, 刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[9] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 宇航出版社, 1988.

[10] Colket M B. Internal aerodynamics of gas sampling probes[J]. Combustion and Flame, 1982, 44(1): 3-14.

[11] 郑必可, 陈立红. 高焓超声速气体取样分析[J]. 航空动力学报, 2006, 21(6): 967-971.
ZHENG Bike, CHEN Lihong. High enthaipy supersonic gas sampling and analysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(6): 967-971. (in Chinese)

[12] 林然, 陈立红. 直联式超燃实验台超声速燃气取样分析[J]. 实验流体力学, 2006, 20(1): 67-71.
LIN Ran, CHEN Lihong. Direct-scrumjet bench supersonic gas sampling and analysis[J]. Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(1): 67-71. (in Chinese)

[13] 王明瑞. 航空燃气涡轮发动机燃气分析测试及计算方法[R]. 沈阳: 沈阳发动机研究所, 2013.

[14] 中华人民共和国工业和信息化部. HB6117-1987 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[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987: 1-19.

[15] 中华人民共和国国家标准化管理委员会. GB/T 11369-2008 轻型燃气轮机烟气污染物测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-9.

[16] 王明瑞, 刘春宇. 航空发动机气态污染物及冒烟的测量[J]. 航空发动机, 2008, 34(1): 35-37.
WANG Mingrui, LIU Chunyu. Measurement of Gaseous pollutant and smoke from an aeroengine[J]. Aeroengine, 2008, 34(1): 35-37. (in Chinese)

[17] 吴石林, 张纪. 误差分析与数据处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

(编辑: 王碧琚)