

油气比对燃气分析法燃烧效率、 气态污染物测试精度的影响

李亚娟, 王明瑞, 张宝华, 韩冰, 马征

(中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 在燃气分析单点测试偏差的基础上, 针对燃气轮机、主燃烧室及加力燃烧室目前采用的取样方式的现状, 建立了燃气分析法和流量法的油气比偏差对燃烧效率和气态污染物测试精度的影响规律。结果表明: 对于采用移位机构进行测量的主燃烧室, 流量法和燃气分析法油气比相差在 5.1% 以内时, 说明有足够的测点密度, 数据有效, 此时的燃烧效率精度优于 0.5%; 对于加力燃烧室和整机测试, 由于取样点不足, 油气比偏差较大, 燃烧效率的精度还取决于油气比和 CO 的体积分数。保证足够的取样点密度是燃气分析测试结果具有较高精度的前提。

关 键 词: 燃气分析; 燃烧效率; 气态污染物; 油气比; 偏差分析

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Influence of air-fuel ratio on accuracy of combustion efficiency and exhaust emission under gas analysis method

LI Yajuan, WANG Mingrui, ZHANG Baohua, HAN Bing, MA Zheng

(Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine (Group) Corporation of China, Shengyang 110015, China)

Abstract: Based on the gas analysis error of a single position, the influence law of the fuel-air ratio error between gas analysis and flow measurement on the testing precision of combustion efficiency and exhaust emission was founded for the current sampling mode of primary combustor, afterburner and gas turbine engine. The data were valid for primary combustor test by swing mode when fuel-air ratio error was less than 5.1% between flow measurement and gas analysis; meanwhile, the error of combustion efficiency was less than 0.5% and sampling density was considered enough. The error of fuel-air ratio of flow measurement to gas analysis was large due to less sampling density in afterburner and gas turbine engine, the precision of combustion efficiency was also affected by fuel-air ratio and the volume fraction of CO. It indicates that enough sampling density for gas analysis is necessary for high test precision.

Key words: gas analysis; combustion efficiency; exhaust emission; fuel-air; error analysis

收稿日期:2016-08-22
作者简介:李亚娟(1988—),女,工程师,硕士,从事燃气轮机燃烧室性能的试验研究。E-mail:liyajuanhit@163.com
引用格式:李亚娟,王明瑞,张宝华,等.油气比对燃气分析法燃烧效率、气态污染物测试精度的影响[J].航空动力学报,2018,33(3):557-564. LI Yajuan, WANG Mingrui, ZHANG Baohua, et al. Influence of air-fuel ratio on accuracy of combustion efficiency and exhaust emission under gas analysis method[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3):557-564.

燃气分析是测量气态污染物的标准方法,测试精度受使用环境影响小、可测量高温的特点,使其成为燃气涡轮发动机燃烧室测量燃烧效率和温度场的基本方法^[1-4]。试验数据表明燃气轮机及燃烧室出口截面的油气比和气态污染物分布极不均匀,主燃烧室在慢车状态下,燃烧效率和气态污染物的分布也很不均匀,随着油气比的增加才逐渐趋于均匀。对于整机测试,文献[5]规定的满足慢车状态流量法和燃气分析法油气比的偏差不得超过 15%、其他状态不超过 10%的要求并不能保证燃气分析测试具有较高的精度,要提高测试精度最直接的方法是增加足够多的取样点,但这通常是极不经济的。文献[6]通过对大量不同类型燃气轮机气态污染物测试数据的分析给出了其测试结果的修正系数以提高测试精度,国内还未发现开展过此类研究。

在开展燃气轮机及燃烧室的试验研究过程中,空气流量和燃油流量是比较容易获得、并具有较高测试精度的参数,计算出的油气比同样有较高的精度。因此针对发动机主燃烧室单头部试验器、全环试验器、加力燃烧室试验器和整机的燃烧效率、气态污染物测试的特点^[7-16],提出了以流量法和燃气分析法油气比的偏差作为判断取样点密度是否足够的标准,对于样气代表性不足的问题,建立了通过两种方法油气比的偏差来判断燃烧效率和气态污染物测试偏差的方法,并给出了改善燃气分析测试精度的方法。

1 样气代表性的判断方法

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油气比、燃烧效率、燃烧温度以及污染物排放等参数的一种测量方法^[17]。以测量燃烧效率为目的时,一般测量 CO、CO₂ 和 UHC(未燃碳氢)共 3 种组分,在测量气态污染物时,增加 NO_x 组分的测量。燃气分析系统测试偏差主要来源于取样器、过程温度控制、仪器精度和计算方法等,文献[18]中已给出单一位置的燃气分析系统测量偏差,但在实际应用中,由于被测截面面积大或者不便使用移位装置,样气的代表性不足经常是最大的偏差来源^[19]。

取样点密度决定了样气是否能真实反映被测

量截面的参数平均值,对燃烧效率和气态污染物的测试精度有重要影响,但由于无法直接判断样气是否能真实反映被测截面参数的平均值,需要确定一个基准参数作为判断取样点密度是否足够的标准。在燃烧试验器中空气流量和燃油流量是基本测量参数,利用这两个参数可以计算出燃烧室出口截面的平均油气比;燃气分析通过测量燃烧室出口截面各取样位置的油气比,通过计算也可以得到截面的平均油气比;比较两种方法油气比偏差的大小可作为判断取样点密度是否足够的一种方法。

首先对燃烧试验器上通过空气流量和燃油流量测量值计算得到的油气比偏差进行分析,流量法油气比的计算公式为

$$R_{fa} = \frac{G_f}{G_a} \tag{1}$$

式中 G_f 为燃油流量, G_a 为空气流量。

对式(1)求偏导数,并除以式(1),可得

$$\frac{dR_{fa}}{R_{fa}} = \frac{dG_f}{G_f} - \frac{dG_a}{G_a} \tag{2}$$

式(2)表明流量法油气比的相对偏差是空气流量相对偏差与燃油流量相对偏差之差。燃烧试验器的空气流量的测试偏差一般为±1.5%,燃油流量的测试偏差为±1%,对流量计标定的结果显示,在 15%满量程以下流量范围进行测量时,空气流量计的测试精度下降为测量值的±2.5%,燃油流量计的测试精度下降为测量值的±1.5%。低于 15%满量程的空气和燃油流量范围一般对应于燃烧室的慢车状态,因此可以确定慢车状态下流量法油气比的偏差为±4%,其他状态的偏差为±2.5%,文献[18]给出了燃气分析法在单一取样位置的油气比测试偏差为±1.1%,因此可以判定样气具有代表性,即取样点密度足够的原则为:在慢车状态流量法油气比和燃气分析法油气比的偏差为±5.1%,其他状态的偏差为±3.6%。

2 燃气分析法截面平均油气比计算

燃气分析是一种点测试技术,式(3)和式(4)为依据单点的燃气组分计算余气系数和燃烧效率的方法^[18]。

$$\eta = 1 - \frac{0.473\varphi_{CO,dry} + 0.404\varphi_{H_2,dry} + 1.34\varphi_{CH_4,dry} + 0.151\varphi_{NO_2,dry}}{\varphi_{CO_2,dry} + \varphi_{CO,dry} + \varphi_{CH_4,dry}} \tag{3}$$

$$\alpha = \frac{0.1397(1 + 0.5\varphi_{CO_2,dry} - 1.5\varphi_{H_2,dry} - 1.5\varphi_{CH_4,dry} + 0.5\varphi_{NO_2,dry})}{\varphi_{CO_2,dry} + \varphi_{CO,dry} + \varphi_{CH_4,dry}} \tag{4}$$

式中 $\varphi_{i, \text{dry}}$ 为燃气组分的干基体积分数。公式是在假定了进口空气未被污染, 燃油的氢碳摩尔比为 2, 燃料的热值为 42 650 kJ/kg, 空气中不含二氧化碳的前提下推导出来的。

已知单点的燃气组分数据, 需要通过计算得到被测截面的平均油气比才能与流量法油气比进行比较, 在此设定了取样点按等环面积布置的前提条件。

首先对 3 种利用各点组分数据计算燃烧室出口截面平均油气比方法的合理性进行分析。截面平均油气比的第 1 种计算方法是先利用式(4), 根据各点燃气组分的体积分数计算出余气系数, 再利用式(5)和式(6)计算出截面的平均余气系数和平均油气比。式中 L_0 为单位质量燃油燃烧所需的空气质量, 约为 14.7。这种算法的偏差主要来自于式(5), 在计算过程中假定了燃烧室出口截面燃油浓度是均匀分布的。

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i}{n} \tag{5}$$

$$R_{\text{fa}} = \frac{1}{\bar{\alpha} L_0} \tag{6}$$

$$\overline{R_{\text{fa}}} = \frac{\overline{\varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}}} + \overline{\varphi_{\text{CO}, \text{dry}}} + \overline{\varphi_{\text{CH}_4, \text{dry}}}}{0.1397(1 + 0.5 \overline{\varphi_{\text{CO}_2, \text{dry}}} - 1.5 \overline{\varphi_{\text{H}_2, \text{dry}}} - 1.5 \overline{\varphi_{\text{CH}_4, \text{dry}}} + 0.5 \overline{\varphi_{\text{NO}_2, \text{dry}}}) L_0} \tag{10}$$

由于 3 种方法在计算过程中都利用了一些假设, 需要对假设的合理性进行分析以确保计算结果具有较高的精度。大量燃烧室出口温度分布的数据表明, 燃烧室出口温度是很不均匀的, 其温度分布系数(OTDF)经常高于 0.25, 温度分布不均匀的实质是油气比分布的不均匀。为分析燃烧室出口截面的燃气流量的分布, 采用数值计算方法获得的燃烧室出口截面轴向速度分量与密度的乘积如图 1 所示。计算结果表明燃气质量流量场除很小的区域外, 其他区域的流量基本相同, 说明出口截面燃气流量分布均匀的假设更接近实际情况。另外由于燃气中燃油的占比很小, 其分布的不均匀对燃气分布的均匀性影响很小, 可以确定在燃烧室出口截面空气流量的分布也是很均匀的, 因此第 2 种和第 3 种方法计算得到的截面平均油气比应该是非常接近的。

表 1 为根据同一截面各点的燃气成分数据, 分别使用以上 3 种方法计算出的油气比的对比, 偏差 1(E_1)、偏差 2(E_2)分别为油气比 1($R_{\text{fa}1}$)、油气比 2 相对油气比 3 的相对偏差。可以看出: 油气比 2($R_{\text{fa}2}$)和油气比 3($R_{\text{fa}3}$)只有很小的偏差; 在油气比较小时, 油气比 1 与油气比 3 偏差较大, 随

截面平均油气比的第 2 种计算方法也是先计算各点的余气系数, 然后用式(7)计算各点的油气比, 再用式(8)计算出截面的平均油气比。这种计算方法假定了燃烧室出口截面空气流量是均匀分布的。

$$R_{\text{fai}} = \frac{1}{\alpha_i L_0} \tag{7}$$

$$\overline{R_{\text{fa}}} = \frac{\sum R_{\text{fai}}}{n} \tag{8}$$

截面平均油气比的第 3 种计算方法是先用式(9)式计算燃烧室出口截面燃气组分的平均值 $\overline{\varphi_i}$, 再利用由式(4)式和式(6)导出的式(10)计算出截面的平均油气比。这种计算方法假定了燃烧室出口截面燃气流量是均匀分布的。

$$\overline{\varphi_i} = \frac{\sum_{j=1}^n \varphi_{i,j}}{n} \tag{9}$$

式中下标 i, j 为不同的组分、取样点, n 为取样点的总数。

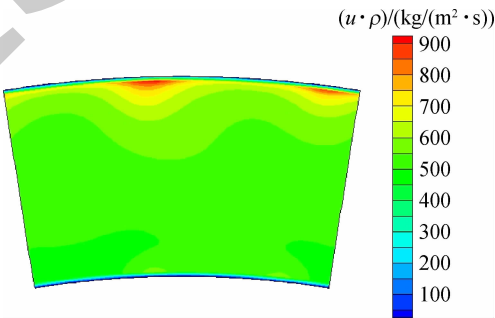


图 1 轴向速度分量与密度乘积的分布
Fig. 1 Distribution of product of axial velocity and density

表 1 3 种方法平均油气比计算结果对比
Table 1 Result of fuel-air ratio of three kinds of method

序号	$R_{\text{fa}1}$	$R_{\text{fa}2}$	$R_{\text{fa}3}$	$E_1 / \%$	$E_2 / \%$
1	0.014841	0.015275	0.015278	-2.86	0.02
2	0.018248	0.018739	0.018741	-2.63	0.01
3	0.019089	0.020355	0.020346	-6.18	-0.05
4	0.022279	0.022887	0.022891	-2.68	0.02
5	0.023884	0.024135	0.024142	-1.07	0.03
6	0.028559	0.028788	0.028795	-0.82	0.03
7	0.030361	0.030630	0.030639	-0.90	0.03

着油气比的增加,主要是燃油流量的增加,使得燃油的分布趋向均匀,油气比 1 与油气比 3 的偏差逐渐减小,可以断定在燃烧室出口截面燃气和空气的流量分布均匀的假设是合理的。下文中截面平均油气比的计算均采用第 3 种方法。

3 燃烧效率、气态污染物与油气比的关联

确定了流量法油气比和燃气分析法油气比的偏差小于规定值作为数据有效性的一般原则,还需要对出口截面面积很大或者由于条件限制而导致取样点数量不足,不能满足数据有效性原则的整机和加力燃烧室的燃烧效率和气态污染物测试偏差进行判断。燃气分析法油气比、燃烧效率和

气态污染物都是燃气成分的函数,通过建立燃烧效率、气态污染物与油气比的关系式,即可利用油气比的偏差来确定燃烧效率和气态污染物测量值的偏差。

忽略 H_2 和 NO_2 的影响,对式(10)进行简化得到式(11),对式(3)进行简化得到由燃气组分平均值表示的燃烧效率计算方法,如式(12),计算 CO、UHC 和 NO_x 排放指数的式(13)~式(15)引自文献[18]。利用式(11)~式(15)建立燃烧效率、CO 排放指数、未燃碳氢 UHC 排放指数和 NO_x 排放指数与油气比的关联式如式(16)~式(19)。对式(16)~式(19)进行求导,进而推导出燃烧效率、气态污染物的相对偏差与油气比相对偏差的关系式(20)~式(23)。

$$\overline{R_{fa}} = \frac{\overline{\varphi_{CO_2, dry}} + \overline{\varphi_{CO, dry}} + \overline{\varphi_{CH_4, dry}}}{0.1397(1 + 0.5 \overline{\varphi_{CO_2, dry}} - 1.5 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}) L_0} \quad (11)$$

$$\overline{\eta} = 1 - \frac{0.473 \overline{\varphi_{CO, dry}} + 1.34 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}}{\overline{\varphi_{CO_2, dry}} + \overline{\varphi_{CO, dry}} + \overline{\varphi_{CH_4, dry}}} \quad (12)$$

$$\overline{I_{e, CO}} = \frac{1996.65 \overline{\varphi_{CO, dry}}}{\overline{\varphi_{CO_2, dry}} + \overline{\varphi_{CO, dry}} + \overline{\varphi_{CH_4, dry}}} \quad (13)$$

$$\overline{I_{e, UHC}} = \frac{1143.72 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}}{\overline{\varphi_{CO_2, dry}} + \overline{\varphi_{CO, dry}} + \overline{\varphi_{CH_4, dry}}} \quad (14)$$

$$\overline{I_{e, NOx}} = \frac{3279.32 \overline{\varphi_{NOx, dry}}}{\overline{\varphi_{CO_2, dry}} + \overline{\varphi_{CO, dry}} + \overline{\varphi_{CH_4, dry}}} \quad (15)$$

$$\overline{\eta} = 1 - \frac{0.473 \overline{\varphi_{CO, dry}} + 1.34 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}}{0.1397(1 + 0.5 \overline{\varphi_{CO_2, dry}} - 1.5 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}) L_0 \overline{R_{fa}}} \quad (16)$$

$$\overline{I_{e, CO}} = \frac{1996.65 \overline{\varphi_{CO, dry}}}{0.1397(1 + 0.5 \overline{\varphi_{CO_2, dry}} - 1.5 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}) L_0 \overline{R_{fa}}} \quad (17)$$

$$\overline{I_{e, UHC}} = \frac{1143.72 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}}{0.1397(1 + 0.5 \overline{\varphi_{CO_2, dry}} - 1.5 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}) L_0 \overline{R_{fa}}} \quad (18)$$

$$\overline{I_{e, NOx}} = \frac{3279.32 \overline{\varphi_{NOx, dry}}}{0.1397(1 + 0.5 \overline{\varphi_{CO_2, dry}} - 1.5 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}) L_0 \overline{R_{fa}}} \quad (19)$$

$$\frac{d\overline{\eta}/d\overline{R_{fa}}}{\overline{\eta}/\overline{R_{fa}}} = \frac{3.39 \overline{\varphi_{CO, dry}} + 9.59 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}}{(1 + 0.5 \overline{\varphi_{CO_2, dry}} - 1.5 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}) L_0 \overline{R_{fa}} - 3.39 \overline{\varphi_{CO, dry}} - 9.59 \overline{\varphi_{CH_4, dry}}} \quad (20)$$

$$\frac{d\overline{I_{e, CO}}}{\overline{I_{e, CO}}} = -\frac{d\overline{R_{fa}}}{\overline{R_{fa}}} \quad (21)$$

$$\frac{d\overline{I_{e, UHC}}}{\overline{I_{e, UHC}}} = -\frac{d\overline{R_{fa}}}{\overline{R_{fa}}} \quad (22)$$

$$\frac{d\overline{I_{e, NOx}}}{\overline{I_{e, NOx}}} = -\frac{d\overline{R_{fa}}}{\overline{R_{fa}}} \quad (23)$$

从式(21)~式(23)可以看出,气态污染物排放指数相对偏差等于油气比相对偏差,要减小气

态污染物排放指数的相对偏差只能采取减小油气比相对偏差的方法。

下面分别分析主燃和加力燃烧室燃烧效率的相对偏差。主燃烧室在慢车状态下,CO 和 UHC 的体积分数较大,且在大多数情况下未燃碳氢 UHC 的体积分数小于 CO 的体积分数,因此用 CO 的体积分数替换 UHC 的体积分数,式(20)简化为式(24),对于主燃其他状态和加力各状态的 UHC 体积分数基本为零,式(20)简化为式(25)如下:

$$\frac{d\bar{\eta}}{\bar{\eta}} \bigg/ \frac{dR_{fa}}{R_{fa}} = \frac{12.98 \overline{\varphi_{CO,dry}}}{L_0 \overline{R_{fa}}} \quad (24)$$

$$\frac{d\bar{\eta}}{\bar{\eta}} \bigg/ \frac{dR_{fa}}{R_{fa}} = \frac{3.39 \overline{\varphi_{CO,dry}}}{L_0 \overline{R_{fa}} - 3.39 \overline{\varphi_{CO,dry}}} \quad (25)$$

图 2 为以油气比和 CO 的体积分数为变量绘制的主燃烧室燃烧效率相对偏差与油气比相对偏差比值随油气比和 CO 的体积分数变化的规律。其中油气比为 0.01 时,曲线按式(24)绘制,其余曲线按式(25)绘制。图 3 为按式(25)绘制的加力燃烧室燃烧效率相对偏差与油气比相对偏差比值随油气比和 CO 的体积分数变化的规律。

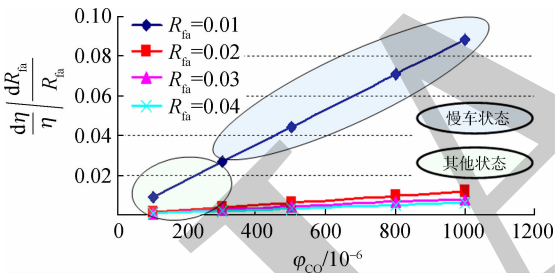


图 2 主燃烧室燃烧效率偏差与油气比偏差的比值随油气比和 CO 的体积分数的变化

Fig.2 Ratio of combustion efficiency error and fuel-air ratio error varies with fuel-air ratio and volume fraction of CO in primary combustor

从图 2 和图 3 可以看出

- 1) 在油气比相同时,燃烧效率偏差与油气比偏差比值随着 CO 的体积分数增大而增大。
- 2) 在 CO 的体积分数相同时,燃烧效率偏差与油气比偏差比值随着油气比增大而减小。

图 2 还表明,对于主燃烧室其油气比较小时,如油气比为 0.01 时,燃烧效率相对偏差与油气比相对偏差比值较大,当油气比大于 0.02 时,燃烧效率相对偏差与油气比相对偏差比值在 0.02 以下,即使取样点密度不足导致两种方法获得油气比的偏差高达 50%,此时引起的燃烧效率偏差也小于 1%。

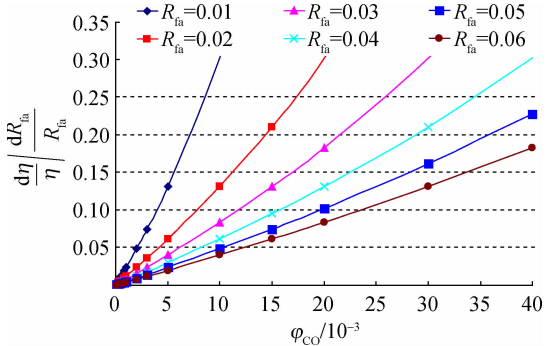


图 3 加力燃烧室燃烧效率相对偏差与油气比相对偏差随油气比和 CO 的体积分数的变化

Fig.3 Ratio of combustion efficiency error and fuel-air ratio error varies with fuel-air ratio and volume fraction of CO in afterburner

图 3 还表明,加力燃烧室相对于主燃烧室,油气比的相对偏差对燃烧效率的相对偏差有更大的影响。

4 燃烧试验器燃烧效率、污染物测试精度

依据式(24)和式(25),针对各种试验器常用的取样方式,结合各种燃烧室不同工况,以流量法油气比为基准,用燃气分析油气比与流量法油气比的偏差、CO 和 UHC 的体积分数确定燃烧效率的相对偏差。

4.1 主燃烧室单头部试验器

图 4 为单头部试验器常用的燃烧室出口截面的固定式取样方式,采用四只混合式取样器,每只取样器有 5 个取样孔,按等环面积布置,取样器固定安装在燃烧室出口测量段上,截面阻塞比约为 33%,取样点密度为 0.21/cm²。

表 2 为单头部燃烧室以图 4 所示的测量方式

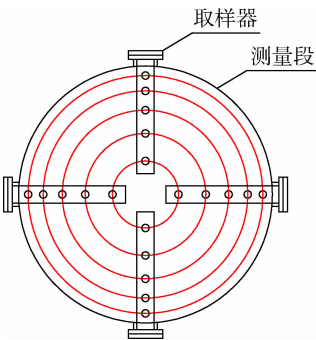


图 4 单头部燃烧室取样器安装示意图

Fig.4 Chart of sampling probe installing in single head circular combustor

表 2 单头部燃烧室的油气比、燃烧效率偏差

Table 2 Fuel-air ratio error and combustion efficiency error of single head combustor

序 号	流量法 油气比	燃气分 析法油 气比	油气比 相对 偏差/%	CO 的 体积分 数/ 10^{-6}	CH ₄ 的 体积分 数/ 10^{-6}	效率 偏差/%
1	0.0107	0.0092	-13.6	1042.2	1614.4	-1.8
2	0.0160	0.0134	-16.3	1537.8	1976.4	-1.9
3	0.0163	0.0138	-15.1	1887.1	1859.8	-1.7
4	0.0235	0.0218	-7.3	1303.2	1129.5	-0.3
5	0.0248	0.0235	-5.3	1009.8	1259.2	-0.2
6	0.0302	0.0279	-7.7	317.1	958.1	-0.2

获得的油气比和燃气成分数据,以及依据式(24)和式(25)计算的燃烧效率的偏差。从表 2 可以看出燃气分析油气比与流量法油气比偏差最高达 16.3%,燃烧效率的相对偏差达 1.9%。其原因是取样点密度不足,被测样气不能真实表征燃烧室出口截面的平均参数。此外,截面的阻塞比高,取样器对燃气的流动产生较大的扰动,也会导致测试的精度下降。

由于气态污染物排放指数的相对偏差等于油气比的相对偏差,固定式取样方式通常导致气态污染物排放指数的测量值存在很大的偏差,通常有两种方式改善单头部燃烧室气态污染物排放的测试精度,一是采用移位式机构,在不增加阻塞比的情况下增加取样点密度,同时满足燃烧效率和气态污染物的测量要求;二是将测量截面放在距离燃烧室出口截面较远的下游,高温燃气经过充分的混合,变得比较均匀,但在此截面,只能用于测量气态污染物的排放,测量燃烧效率是不恰当的。

4.2 主燃烧室扇形和全环试验器

扇形或全环试验器通常采用移位式测量方式,如图 5,取样器视试验件腔道高度径向布置 5~7 点,采用移位机构沿周向以匀速运动的方式增加测点,转动 180°所需时间约为 5 min,数据总采集点达到 2800~3920,测点密度大于 2 个/cm² 以上,可保证取样具有足够的代表性。因而测试具有很高的精度,适合所有燃烧室性能参数的测试。

表 3 是某全环燃烧室试验件采用两只取样器以移位式方式测得的流量法油气比与燃气分析法油气比的对比和燃烧效率偏差。从表中数据可以看出,所有状态下燃气分析油气比与流量法油气

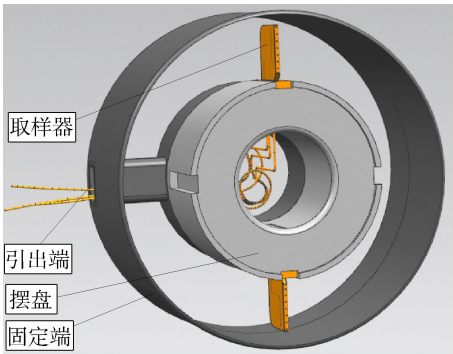


图 5 移位机构及取样器安装示意图

Fig. 5 Chart of swing plate and sampling probe installation

表 3 全环燃烧室的油气比、燃烧效率的偏差

Table 3 Fuel-air ratio error and combustion efficiency error of annular combustor

序 号	流量法 油气比	燃气分 析法油 气比	油气比 相对偏 差/%	CO 的 体积分 数/ 10^{-6}	效率 偏差/%
1	0.01160	0.01137	2.07	704.0	0.11
2	0.02376	0.02410	-1.41	15.9	0
3	0.02839	0.02876	-1.29	8.65	0
4	0.02871	0.02906	-1.21	7.26	0
5	0.03025	0.03059	-1.13	8.88	0

比的偏差均较小,说明取样具有代表性,试验数据能真实的表征燃烧室出口截面性能,由油气比相对偏差推导出的燃烧效率相对偏差也很小,说明在取样点密度足够的情况下,即不少于 2 个点/cm²,燃烧效率和气态污染物测量结果具有很高的精度。

4.3 加力燃烧室和整机

在进行加力燃烧室和整机的气态污染物和燃烧效率测试时,由于被测面积很大,满足 2 个点/cm² 以上的测点密度是极不经济的,一般参照 HB6117-1987 采用固定测量方式,在尾喷口安装 2~4 只取样器,收集 10~40 点的样气,如果两种方法获得的油气比在慢车状态大于 15%,其他状态大于 10%,应使取样器沿周向转动以增加测点^[15]。下面利用测试数据来分析加力燃烧室和整机燃烧效率的相对偏差,表 4 和表 5 分别为某型号加力燃烧室和某型号整机采用固定测量方式得到的流量法油气比与燃气分析油气比的数据。

从表 4 中数据来看,采用固定取样方式,燃气分析法油气比和流量法油气比差别很大,最高偏

差达 58.2%,燃烧效率最大偏差达 7.7%,在 CO 的体积分数较低时,燃烧效率偏差较小。

表 5 为是未开加力燃烧室发动机的流量法油气比和燃气分析法油气比的对比(表中 N_{2r} 为高压转子等效换算转速),虽然油气比的偏差最高达 53.9%,但由于 CO 的体积分数最高只有 155×10^{-6} ,其最大效率偏差为 0.266%。

表 4 加力燃烧室油气比、燃烧效率偏差
Table 4 Fuel-air ratio error combustion efficiency
error of afterburner

序号	流量法 油气比	燃气分 析法油 气比	油气比 相对偏 差/%	CO 的 体积分 数/ 10^{-6}	效率 偏差/%
1	0.0269	0.0345	28.3	695.2	0.13
2	0.0355	0.0413	16.3	11545.3	1.13
3	0.0399	0.0618	55	8512.6	1.81
4	0.0433	0.0634	46.4	20232.1	3.69
5	0.0455	0.0720	58.2	36398.4	7.70

表 5 整机的油气比、燃烧效率偏差
Table 5 Fuel-air ratio error combustion efficiency
error of engine

工况	流量法 油气比	燃气分 析法油 气比	油气比 相对偏 差/%	CO 的 体积分 数/ 10^{-6}	效率 偏差/%
地面慢车	0.0159	0.0073	53.9	155	0.266
$N_{2r}=82\%$	0.0156	0.0123	21.0	72	0.028
75%最大 连续	0.0210	0.0106	49.5	14	0.015
最大连续	0.0232	0.0126	45.6	15	0.013
中间 (训练)	0.0240	0.0138	42.6	19	0.014
中间 (作战)	0.0268	0.0143	46.8	15.5	0.012

4.4 小 结

对于各类燃烧室及整机的燃气分析测试,其截面被测参数的分布特性与取样点密度都对取样代表性有重大影响。被测截面的参数分布越均匀,获得具有代表性的样气所需的取样点数量越少。对于主燃烧室,随着油气比的增加,燃油分布特性趋于改善,在同样取样点数量的情况下,其测试精度提高。

燃烧效率相对偏差远小于油气比的相对偏差,其影响的程度与燃烧室的油气比和燃气中 CO 的体积分数有关。气态污染物排放指数的相对偏差等于气态污染物的相对偏差。

对于主燃烧室出口截面的燃气分析测试,应采用移位机构增加取样点来保证测试精度。对于加力燃烧室或者整机测试,由于出口截面很大,采取增加取样点的方法是不现实的,为提高测试精度文献[6]提供了一种数据修正方法,它是在对大量不同类型发动机排放测试数据分析的基础上,针对各类型发动机给出了不同的污染分布物形状系数和排放修正系数,可有效改进测试数据的精度,国内也应在借鉴此标准的基础上,对积累的各类型发动机排放数据开展研究和分析,获得各种污染物排放指数的修正系数,以提高整机污染物排放的测试精度。

5 结 论

- 1) 确定了流量法油气比和燃气分析法油气比的偏差在慢车状态下小于 5.1%、其他状态小于 3.6%时,取样点密度能满足燃气分析测试要求,具有较高的测试精度。
- 2) 建立了用油气比偏差来判断燃烧效率和气态污染物偏差的方法。燃烧效率偏差与油气比偏差的比值随着 CO 和 UHC 的体积分数增加而增加,随油气比减小而增加,燃烧效率偏差基本低于油气比偏差一个数量级;气态污染物的偏差等于油气比的偏差。
- 3) 指出取样点密度不足是燃气分析测试偏差的最大来源,给出了保证主燃烧室燃气分析测试精度的取样方法的建议,给出了改善加力燃烧室和整机测试精度的建议。

参考文献:

[1] PENG Yunhui,LIN Yuzhen,XU Quanhong. Experimental investigation of the pattern factor and LBO of high temperature rise combustor[R]. International Symposium on Air Breathing Engines,ISABE 2007-1185,2007.

[2] HE Yongpan,HAN Lei,LI Lihan. Analysis of the error in liquid-fuel ramjet combustion efficiency calculation[R]. AIAA-2012-5831,2012.

[3] JAMES D. Research on miniature gas analysis systems [R]. Cleveland:Lewis Research Center,1974.

[4] BAHR D W. Technology for the design of high temperature rise combustors[R]. AIAA 85-1292,1985.

[5] 王华芳,吴寿生. 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:HB6117-1987[S]. 北京:北京航空

学院,1987;3-21.

[6] Society of Automotive Engineers. Gas turbine emission probe factors;SAE AIR 4068B-2012[S]. Wasington; Society of Automotive Engineers (SAE) International,2012.

[7] MARCHIONNA N R. Effect of inlet-air humidity on the formation of oxides of nitrogen in a gas-turbine combustor [R]. Cleveland;Lewis Research Center,1973.

[8] GREBMAN J,ROBERT D. Forecast of jet engine exhaust emissions for future high altitude commercial aircraft[R]. Cleveland;Lewis Research Center,1974.

[9] DENG A M,YU S Z,CHENG X R. Analysis of the error of ramjet combustion performance test[R]. Urumchi; the 2nd Ramjet Academic Communication Conference,2007.

[10] MELLOR A M. Design of modern turbine combustor[M]. New York;Academic Press,1990.

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

[12] LI Guoqiang,GUTMARK E J. Combustion characteristics of a multiple swirl spray combustor [R]. AIAA-2003-0489,2003.

[13] WILLAMSON R C,STANFORTH C M. Measurement of jet engine combustion temperature by the use of thermocouples and gas analysis[J]. Society of Automotive Engineers (SAE) Technical Paper 690433,1969.

[14] 胡正义,江义军,赵清杰,等. 航空发动机设计手册:第 9 册 主燃烧室[M]. 北京:航空工业出版社,2000.

[15] 张洪飏,李志广,陈浚,等. 航空发动机设计手册:第 11 册 加力燃烧室[M]. 北京:航空工业出版社,2001.

[16] TURNS S R. 燃烧学导论:概念与应用[M]. 2 版. 姚强,李水清,王宇,译. 北京:清华大学出版社,2009.

[17] 王明瑞,肖阳,韩冰,等. 航空燃气涡轮发动机燃气分析测试及计算方法[J]. 航空动力学报,2015,30(11):2568-2574.

WANG Mingrui,XIAO Yang,HAN Bing,et al. Gas analysis test and calculation method of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(11):2568-2574. (in Chinese)

[18] 李亚娟,王明瑞,韩冰,等. 燃气分析法测试燃气涡轮发动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. Research on aeroengine primary combustor error analysis of combustion efficiency and exhaust emission using gas analysis method[J]. Journal of Aerospace Power,2017,32(5):1051-1057. (in Chinese)

(编辑:叶 青)