

DOI:10. 3969/j. issn. 1674 - 1951. 2019. 07. 002

燃气内燃机排气流量和排气能量估算方法

Estimation method for exhaust gas flow and energy of gas
internal combustion engine

童航,李国敏,王宝玉,阮慧锋,孙亮
TONG Hang, LI Guomin, WANG Baoyu, RUAN Huifeng, SUN Liang

(华电电力科学研究院有限公司,杭州 310030)
(Huadian Electric Power Research Institute Company Limited,
Hangzhou 310030, China)

摘 要:针对燃气内燃机出口排气流量和排气能量难以测量的问题,提出了碳平衡法和氧平衡法两种估算方法。以某分布式能源燃气内燃机测试数据为例,对影响其估算精度的各个因素进行分析,得出结论:估算精度主要受烟气成分、天然气流量、CH₄ 含量影响;在烟气成分测量误差相同的情况下,采用碳平衡法估算排气流量和排气能量的误差较氧平衡法小。

关键词:燃气内燃机;排气流量;排气能量;碳平衡法;氧平衡法;精度

中图分类号:TK 31 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951(2019)07 - 0006 - 04

Abstract: According to the limitations in measuring exhaust gas flow and energy, two estimation methods, namely carbon balance method and oxygen balance method, are introduced. Taking performance test results of a distributed energy internal combustion gas engine as example, all the factors influencing estimation precision are analyzed. The analysis shows that flue gas components, natural gas flow and CH₄ content are the major influencing factors. Error of exhaust flow and exhaust energy estimated by carbon balance method is smaller than that by oxygen balance method with the same smoke component measurement error.

Keywords: gas internal combustion engine; exhaust gas flow; exhaust gas energy; carbon balance method; oxygen balance method; precision

0 引言

天然气分布式能源具有综合能效高、清洁环保、就近供应等优点,近年来,随着人们节能环保意识的不断增强,以燃气内燃机为原动机的分布式能源得到越来越多的应用。燃气内燃机排气流量和排气能量是污染物排放总量统计和余热利用设备(溴化锂吸收式制冷机、余热锅炉等)能效测试过程中的关键参数。ASME PTC4. 4—2008 和 ASME PTC22—2005 标准介绍了燃气轮机热平衡和余热锅炉热平衡两种估算燃气轮机排气流量的方法,通过联立燃气轮机或余热锅炉物质守恒和能量守恒方程,解出过量空气系数,进而求出排气流量和排气成分。但该方法计算过程复杂,计算结果的准确度受余热锅炉散热

损失和燃气轮机各项损失(发电机损失、传动装置损失、固定损失等)的预估精度影响较大^[1-5]。

本文根据元素守恒原理,对天然气在内燃机中的燃烧过程进行简化,提出了碳平衡法和氧平衡法两种燃气内燃机排气流量和排气能量估算方法。

1 理想燃烧过程

天然气是一种多组分混合气体,主要成分为烷烃,其中甲烷占绝大多数,此外还含有 H₂S、CO₂、N₂、H₂O(气态)以及 Ar 等惰性气体。假设天然气(C_{n1}H_{n2}O_{n3}S_{n4}N_{n5}Ar_{n6})和标准干空气 Air_{dry}(各组分摩尔分数为: $x(N_2) = 78.084\%$, $x(O_2) = 20.9476\%$, $x(Ar) = 0.9365\%$, $x(CO_2) = 0.0319\%$)在内燃机内完全燃烧,过量空气系数为 1,空气和燃料中的 N₂、H₂O(气态)以及 Ar 等惰性气体不发生化学反应,燃烧产物只有 H₂O(气态)和 CO₂,燃烧化学反应方程式可简化为

$$\text{C}_{n_1}\text{H}_{n_2}\text{O}_{n_3}\text{S}_{n_4}\text{N}_{n_5}\text{Ar}_{n_6} + \frac{\left(\frac{n_2}{4} + n_1 + n_4 - \frac{n_3}{2}\right)}{0.209476}\text{Air}_{\text{dry}} = \left(\frac{n_2}{2}\right)\text{H}_2\text{O} + \left(\frac{n_1}{2} + \frac{\left(\frac{n_2}{4} + \frac{n_1}{2} + n_4\right)}{0.209476} \times 0.0319\%\right)\text{CO}_2 + \left(\frac{n_5}{2} + \frac{\left(\frac{n_2}{4} + \frac{n_1}{2} + n_4\right)}{0.209476} \times 78.084\%\right)\text{N}_2 + n_4\text{SO}_2 + \left(n_6 + \frac{\left(\frac{n_2}{4} + \frac{n_1}{2} + n_4\right)}{0.209476} \times 0.9365\%\right)\text{Ar}, \quad (1)$$

$$n_1 = x(\text{CH}_4) + 2x(\text{C}_2\text{H}_6) + 3x(\text{C}_3\text{H}_8) + 4x(\text{C}_4\text{H}_{10}) + 5x(\text{C}_5\text{H}_{12}) + 6x(\text{C}_6\text{H}_{14}) + x(\text{CO}_2), \quad (2)$$

$$n_2 = 4x(\text{CH}_4) + 6x(\text{C}_2\text{H}_6) + 8x(\text{C}_3\text{H}_8) + 10x(\text{C}_4\text{H}_{10}) + 12x(\text{C}_5\text{H}_{12}) + 14x(\text{C}_6\text{H}_{14}) + 2x(\text{H}_2\text{O}), \quad (3)$$

$$n_3 = 2x(\text{CO}_2) + x(\text{H}_2\text{O}) + 2x(\text{O}_2), \quad (4)$$

$$n_4 = x(\text{H}_2\text{S}), \quad (5)$$

$$n_5 = 2x(\text{N}_2), \quad (6)$$

$$n_6 = x(\text{Ar}), \quad (7)$$

式中: $x(i)$ 为天然气中组分*i*的摩尔分数。

2 实际燃烧过程

天然气在内燃机中的燃烧过程较为复杂,燃烧产物除了 H_2O (气态) 和 CO_2 之外,还有少量 NO , NO_2 , SO_2 , SO_3 以及 CO 。实际燃烧过程中,天然气燃烧所需空气含有一定水分,并且过量空气系数一般在 2 左右。

由湿空气带入的水蒸气质量 $m_{\text{H}_2\text{O},\text{in}}$ 表示为

$$m_{\text{H}_2\text{O},\text{in}} = m_{\text{air,dry}} \times d, \quad (8)$$

式中: $m_{\text{air,dry}}$ 为干空气质量; d 为空气含湿量,g/kg。

则湿空气质量 $m_{\text{air,wet}}$ 表示为

$$m_{\text{air,wet}} = m_{\text{air,dry}} \times \left(1 + \frac{d}{1000}\right). \quad (9)$$

因此,当过量空气系数为 α 时,考虑入口空气中含湿量,则式(1)转化为

$$\text{C}_{n_1}\text{H}_{n_2}\text{O}_{n_3}\text{S}_{n_4}\text{N}_{n_5}\text{Ar}_{n_6} + (\alpha \times n_{\text{air}})\text{Air}_{\text{wet}} = c_1\text{H}_2\text{O} + c_2\text{CO}_2 + c_3\text{N}_2 + c_4\text{SO}_2 + c_5\text{Ar} + c_6\text{O}_2 \quad (10)$$

其中

$$c_1 = \frac{n_2}{2} + \alpha\left(\frac{n_2}{4} + \frac{n_1}{2} + n_4 - n_3\right) \times 7.68d, \quad (11)$$

$$c_2 = \frac{n_1}{2} + \alpha\left(\frac{n_2}{4} + \frac{n_1}{2} + n_4\right) \times 0.0015, \quad (12)$$

$$c_3 = \frac{n_5}{2} + \alpha\left(\frac{n_2}{4} + \frac{n_1}{2} + n_4\right) \times 3.7270, \quad (13)$$

$$c_4 = n_4, \quad (14)$$

$$c_5 = n_6 + \alpha\left(\frac{n_2}{4} + \frac{n_1}{2} + n_4\right) \times 0.0447, \quad (15)$$

$$c_6 = (\alpha - 1) \times \left(\frac{n_2}{4} + \frac{n_1}{2} + n_4 - n_3\right), \quad (16)$$

式中: n_{air} 为完全燃烧 1 摩尔天然气所需空气的摩尔数,可通过化验天然气成分并利用式(2)—(7) 计算得出; Air_{wet} 为标准湿空气。

3 排气流量和排气能量计算

根据式(10)可以得出 1 摩尔天然气燃烧后烟气各成分干、湿基状态的摩尔分数,见表 1。

表 1 干、湿基状态下烟气各成分摩尔分数

Tab.1 Molar ration of exhaust gas components in dry and wet base

状态	$x(\text{H}_2\text{O})$	$x(\text{CO}_2)$	$x(\text{N}_2)$	$x(\text{SO}_2)$	$x(\text{Ar})$	$x(\text{O}_2)$
湿基	$\frac{c_1}{\sum_{i=1}^6 c_i}$	$\frac{c_2}{\sum_{i=1}^6 c_i}$	$\frac{c_3}{\sum_{i=1}^6 c_i}$	$\frac{c_4}{\sum_{i=1}^6 c_i}$	$\frac{c_5}{\sum_{i=1}^6 c_i}$	$\frac{c_6}{\sum_{i=1}^6 c_i}$
干基		$\frac{c_2}{\sum_{i=2}^6 c_i}$	$\frac{c_3}{\sum_{i=2}^6 c_i}$	$\frac{c_4}{\sum_{i=2}^6 c_i}$	$\frac{c_5}{\sum_{i=2}^6 c_i}$	$\frac{c_6}{\sum_{i=2}^6 c_i}$

烟气成分测量时,一般 CO_2 采用红外法测量, O_2 采用顺磁法测量。烟气中水蒸气会吸收一部分红外辐射,对 CO_2 测量结果产生正干扰,同时水蒸气作为逆磁性气体也会对 O_2 测量产生负干扰。因此,烟气必须经冷凝干燥后才能进入烟气分析仪进行测量,得到的 CO_2 和 O_2 体积分数均为干基体积分数。

碳平衡法和氧平衡法是利用烟气分析仪测得 CO_2 或 O_2 的干基体积分数,代入表 2 计算得到 CO_2 或 O_2 的湿基体积分数,再代入式(11)—(17),求出过量空气系数、排气流量和排气能量。

根据烟道的尺寸,按照 GB 10184—2015《电站锅炉性能试验规程》附录 B^[6] 介绍的网格法多次多点测量 CO_2 或 O_2 的体积分数(干基),取算术平均值得到 CO_2 或 O_2 的干基体积分数,代入表 1 即可求出过量空气系数 α 和干、湿基状态下烟气各成分的摩尔分数。

燃气内燃机排气湿基质量流量

$$q_{m,\text{out}} = q_{m,\text{air,in}} + q_{m,\text{fuel}} \quad (18)$$

式中: $q_{m,\text{air,in}}$ 为入口空气质量流量; $q_{m,\text{fuel}}$ 为天然气质量流量。

内燃机排气比焓等于其中各组分比焓的质量加

权平均,将某一组分的摩尔流量与对应组分的相对分子质量的乘积除以燃烧产物的总质量流量,即可求出燃烧产物各组分的质质量分数。因此,内燃机排气比焓可表示为

$$h_{out} = \sum w(i)h_{Ti}, \tag{19}$$

式中: $w(i)$ 为排气中*i*组分的质量分数; h_{Ti} 为排气中*i*组分在温度*T*下的比焓,可通过查表或 Thermal – Build 函数计算得出^[7]。

内燃机排气能量 P_{out} 可表示为

$$P_{out} = h_{out} \times q_{m,out} \circ \tag{20}$$

4 算例分析

某天然气分布式能源项目主机和余热利用设备分别为内燃机和烟气热水型溴化锂制冷机组,内燃机额定功率为 3 300 kW。内燃机满负荷时,经网格法多次测量取平均值,测得内燃机排气中 CO₂ 体积分数为 5.2%, O₂ 体积分数为 11.2%。天然气平均分子式为 C_{1.0393} H_{3.9974} O_{0.0318} N_{0.0232},天然气流量为 830.69 m³/h(标态),性能测试数据见表 2,内燃机排气成分和排气比焓计算结果见表 3。

表 2 性能测试数据

Tab.2 Performance test data

参数	单位	数值
内燃机功率	kW	3 300
相对湿度	%	42.114
<i>d</i>	g/kg	13.8
<i>n</i> _{air} (干基)	mol	9.732
内燃机排气温度	℃	404
天然气流量(标态)	m ³ /h	830.69
CO ₂ 实测体积分数	%	5.2
O ₂ 实测体积分数	%	11.2

因此,采用氧平衡法计算得到内燃机排气流量为 5 637.10 g/s,排气比焓为 388.92 kJ/kg,排气能量为 2 192.39 kW;采用碳平衡法计算得到的内燃机排气流量为 5 591.65 g/s,排气比焓为 388.92 kJ/kg,排气能量为 2 234.75 kW。

5 算例分析

5.1 大气湿度对结果的影响

上文算例中过量空气系数为 2.185、含湿量为 1.9946 g/kg 时,烟气中 H₂O 的质量分数为 6.86%,空气带入的 H₂O 的质量分数为 1.36%,对出口烟气而言,这部分 H₂O 的质量分数仅为 1.32%,占比相对较小,可以忽略,或使用设计值替代。

5.2 天然气不完全燃烧对结果的影响

天然气在燃烧过程中会有少量 NO_x(大部分为

表 3 碳平衡法和氧平衡法计算结果

Tab.3 Results calculated by carbon balance method and oxygen balance method

参数	单位	碳平衡法	氧平衡法
过量空气系数		2.185	2.228
排气流量	g/s	5 637.10	5 591.65
<i>x</i> (H ₂ O) _{wet}	%	10.910	10.747
<i>x</i> (CO ₂) _{wet}	%	4.633	4.547
<i>x</i> (N ₂) _{wet}	%	72.966	73.030
<i>x</i> (Ar) _{wet}	%	0.875	0.876
<i>x</i> (O ₂) _{wet}	%	10.616	10.800
<i>w</i> (H ₂ O)	%	6.866	6.866
<i>w</i> (CO ₂)	%	7.126	7.126
<i>w</i> (N ₂)	%	71.424	71.424
<i>w</i> (Ar)	%	1.224	1.224
<i>w</i> (O ₂)	%	13.361	13.361
<i>h</i> _{out}	kJ/kg	388.92	388.92
排气能量	kW	2 192.39	2 234.75

NO)和 CO 生成,内燃机排放的烟气中 NO_x 的摩尔分数约为 0.025%,CO 的体积分数约为 0.03%,对排气中 O₂ 和 CO₂ 的体积分数影响较小,可以忽略。

5.3 CO₂ 和 O₂ 测量精度对结果的影响

CO₂ 和 O₂ 测量的精度直接决定排气流量和排气比焓的准确性,实际测量过程中内燃机负荷变化、烟气混合不均匀均会造成 CO₂ 和 O₂ 实测结果存在偏差。GB/T 8190.2—2011 中 7.4.3 要求气体排放物体积分数测量的准确度为读数值的 ±5%。假定 CO₂ 和 O₂ 测量误差在读数值 ±5% 范围内变化,采用碳平衡法和氧平衡法估算排气流量和排气能量的误差如图 1、图 2 所示。在 CO₂ 和 O₂ 相对测量误差相同的情况下,采用碳平衡法估算的内燃机排气流量和排气能量比采用氧平衡法误差较小。

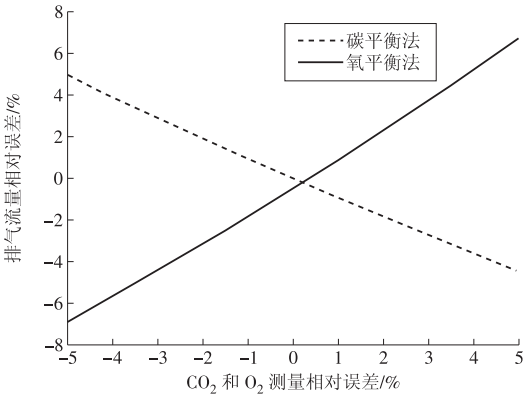


图 1 CO₂ 和 O₂ 测量相对误差对排气流量的影响

Fig.1 Influence on exhaust gas flow brought by relative error of CO₂ and O₂

5.4 天然气流量测量偏差对结果的影响

天然气流量测量偏差主要影响完全燃烧理论空

气量,各燃烧产物的质量分数不变,可近似认为烟气比焓不变。因此,排气总比焓偏差正比于天然气流量测量偏差,且灵敏度系数为 1。

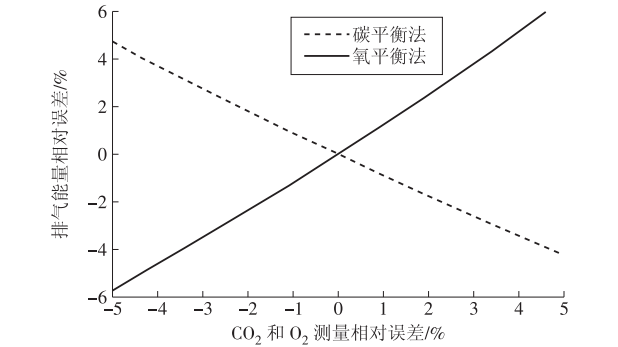


图 2 CO₂ 和 O₂ 测量相对误差对排气能量的影响

Fig.2 Influence on exhaust gas energy brought by relative error of CO₂ and O₂

5.5 CH₄ 测量误差对结果的影响

天然气平均分子式 $C_{n1}H_{n2}O_{n3}S_{n4}N_{n5}Ar_{n6}$ 中 n_1, n_2 等系数由 CH₄ 等烷烃气体的摩尔分数或体积分数确定。天然气主要成分为 CH₄, CH₄ 的测量误差对平均分子式影响最大。假定 CH₄ 的测量误差为 1.0%, 由图 3 可知, 排气流量和排气能量的测量误差超过 0.8%。

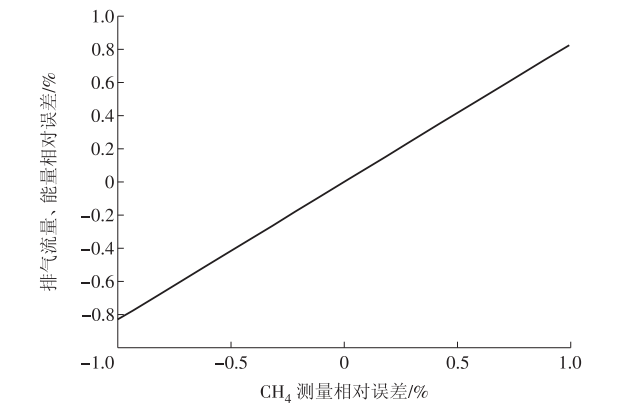


图 3 CH₄ 测量相对误差对排气流量及排气能量的影响

Fig.3 Influence of relative error of CH₄ on exhaust gas flow and energy

6 结论

- (1) 无论采用碳平衡法还是氧平衡法, 均可较为准确地计算出内燃机排气流量和排气能量。
- (2) 排气流量和排气能量计算精度主要取决于烟气成分、天然气流量和 CH₄ 含量 3 个分量。
- (3) 在相同的烟气成分测量误差下, 采用碳平衡法估算排气流量和排气能量的误差较氧平衡法小。因此在测量过程中应严格按照网格法多点测量, 并应尽可能保持内燃机负荷波动稳定, 测量管路密封良好, 以提高测量精度。

参考文献:

[1] Gas turbine heat recovery steam generators: Performance test code: ASME PTC4. 4—2008 [S].

[2] Performance test code on gas turbines: ASME PTC22—2005 [S].

[3] Calculating heat value, compressibility factor, and relative density of gaseous fuels: ASTM D3588—2011 [S].

[4] 往复式内燃机 排放测量 第一部分: 气体和颗粒排放物的试验台测量: GB/T 8190. 1—2010 [S].

[5] 赵永坚, 赵杰, 常经纬. 燃气轮机排气流量测试方法选择 [J]. 热力发电, 2015 (9): 52—56.

[6] 电站锅炉性能试验规程: GB/T 10184—2015 [S].

[7] 阎维平, 董静兰. 增压富氧煤燃烧烟气焓值计算方法的研究 [J]. 华北电力大学学报, 2010, 37 (1): 1—4.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

童航 (1987—), 男, 浙江衢州人, 工程师, 工学硕士, 从事燃机、分布式能源性能测试评估研究 (E-mail: tonghang1987@163.com)。

(上接第 5 页)

[12] 董永军, 郭景富, 徐明奇, 等. 中小型独立风电机组电传动偏航控制与实现 [J]. 太阳能学报, 2012, 33 (6): 1030—1036.

[13] 马东. 激光雷达测风仪在风电机组偏航误差测试中的应用研究 [J]. 应用能源技术, 2015 (11): 5—7.

[14] 杨伟新, 宋鹏, 白恺, 等. 基于机舱式激光雷达测风仪的风电机组偏航控制偏差测试方法 [J]. 华北电力技术, 2016 (7): 59—63.

[15] 岳红轩, 许明, 卢晓光. 风电机组静态偏航误差的分析

与研究 [J]. 机械制造, 2017, 55 (2): 73—76.

[16] 张伟, 雷阳, 张中泉. 风电机组偏航校正分析方法研究 [J]. 华电技术, 2017, 39 (4): 71—73, 80.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

徐金晖 (1996—), 女, 湖北黄冈人, 在读硕士研究生, 从事风电机组偏航系统优化控制方面的研究 (E-mail: 982591750@qq.com)。