



中华人民共和国国家标准

GB/T 14100—2009
代替 GB/T 14100—1993, GB/T 10490—1989

燃气轮机 验收试验

Gas turbines—Acceptance tests

2009-04-13 发布

2010-01-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言 Ⅲ

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 试验准备工作 3

5 试验运行条件 4

6 测量仪器和测量方法 5

7 试验方法..... 11

8 试验结果的计算..... 14

9 试验报告..... 20

前 言

本标准是对 GB/T 14100—1993《燃气轮机 验收试验》和 GB/T 10490—1989《轻型燃气轮机验收试验规范》的整合修订。

本标准与 GB/T 14100—1993、GB/T 10490—1989 相比主要变化如下：

- 将 GB/T 10490—1989 中的试验地点要求纳入了本标准(1989 年版的 5.2；本版的 4.1)；
- 将 GB/T 10490—1989 中的预运行和调整试验要求纳入了本标准(1989 年版的 5.3.5；本版的 4.5)；
- 将 GB/T 10490—1989 中的预试验和综合性试验方法等部分内容纳入了本标准(1989 年版的 8.1.3；本版的 7.2.1)。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国燃气轮机标准化技术委员会(SAC/TC 259)归口。

本标准起草单位：沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司、浙江省电力设计院、中国航空工业燃机动力(集团)公司、哈尔滨汽轮机厂有限责任公司、苏州高达热电有限公司。

本标准主要起草人：曲风蓉、沈又幸、陆培坚、吴爱中、胡星辉。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 14100—1993；
- GB/T 10490—1989。

燃气轮机 验收试验

1 范围

本标准规定了燃气轮机动力装置的验收试验方法,以确定或检验燃气轮机动力装置的功率、热效率等主要性能参数及其他性能。

本标准适用于常规燃烧系统的开式循环燃气轮机动力装置,也适用于闭式循环和半闭式循环燃气轮机动力装置。经过适当的修改也可适用于其他热源的燃气轮机动力装置。

正在研制中的燃气轮机可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 384 石油产品热值测定法

GB/T 2624.1~2624.4 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量

GB/T 8117.1~8117.2 汽轮机热力性能验收试验规程

GB/T 11369 轻型燃气轮机烟气污染物测量

GB/T 15135 燃气轮机 词汇(GB/T 15135—2002,ISO 11086:1996,MOD)

3 术语和定义

GB/T 15135 所确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

标准参考条件 standard reference condition

燃气轮机动力装置的功率、热效率、热耗率或燃料消耗率,如需按标准参考条件进行修正,则标准参考条件参见 3.1.1~3.1.4。

3.1.1

压气机进气条件 compressor intake condition

总压:101.3 kPa;

总温:15 ℃;

相对湿度:60%。

除了采用中间冷却器或蒸发冷却器外,工质湿度一般可以忽略。

具体测量部位见 6.6.3。

静压:101.3 kPa。

具体测量部位见 6.6.4。

3.1.2

透平排气条件 turbine exhaust condition

静压:101.3 kPa。

具体测量部位见 6.6.4。

3.1.3

冷却水条件 cooling water condition

工质冷却器进口水温:15 ℃。

3.1.4

空气加热器环境条件 air heater environment condition

在闭式循环中,空气加热器的环境条件为:

大气压力:101.3 kPa;

大气温度:15 ℃。

3.2

功率 power

功率可用透平联轴节处的输出功率、发电机出线端的电功率(见 8.2)或产生燃气或压缩空气(从主流道中压气机放气)的燃气轮机或燃气发生器的气功率表示。

3.3

热效率和热耗率 thermal efficiency and heat rate

计算热效率和热耗率时,不论采用何种燃料,均应按燃料的等压净比能(低热值)来计算。比能(热值)是在压力为 101.3 kPa 和温度为 15 ℃条件下的测定值。燃料温度偏离 15 ℃,其显热应当计及,见 8.2.1。

3.4

必做试验¹⁾ required test

在规定的运行条件下,用来确定功率、热耗率、热效率或燃料消耗率以及主要保护装置工作可靠性而进行的试验。

3.5

选做试验¹⁾ optimal test

经合同双方商定,认为有必要进行的试验项目。例如可以包括调速系统的特性;必做试验中未包含的其他保护装置的工作可靠性;操纵特性;振动测量²⁾;排气释放物的测定;噪声级的测定;排热及余热回收的评定等。

3.6

测点位置命名法 test point position nomenclature

3.6.1

简单循环 simple cycle

简单循环测点位置命名,按图 1 示例用数字表示。

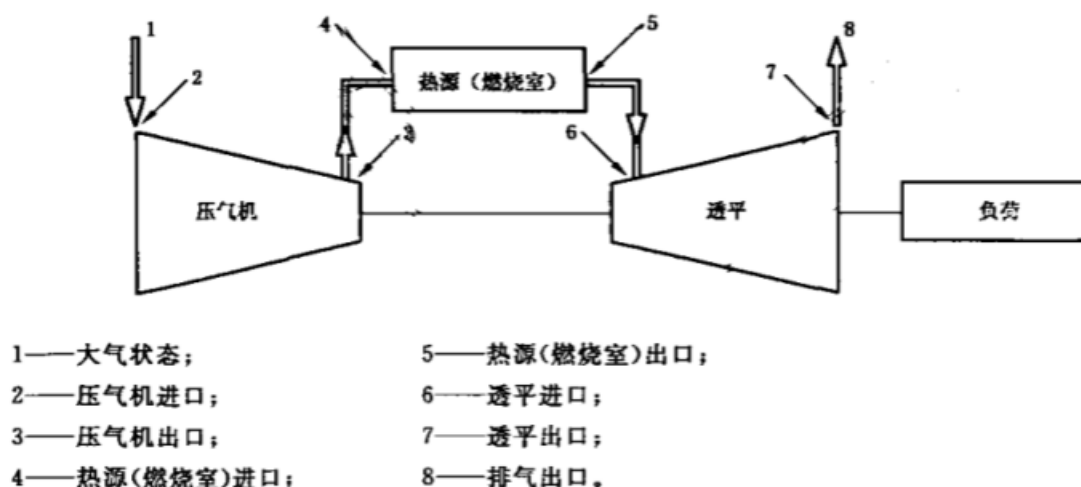


图 1 简单循环测点位置命名示例

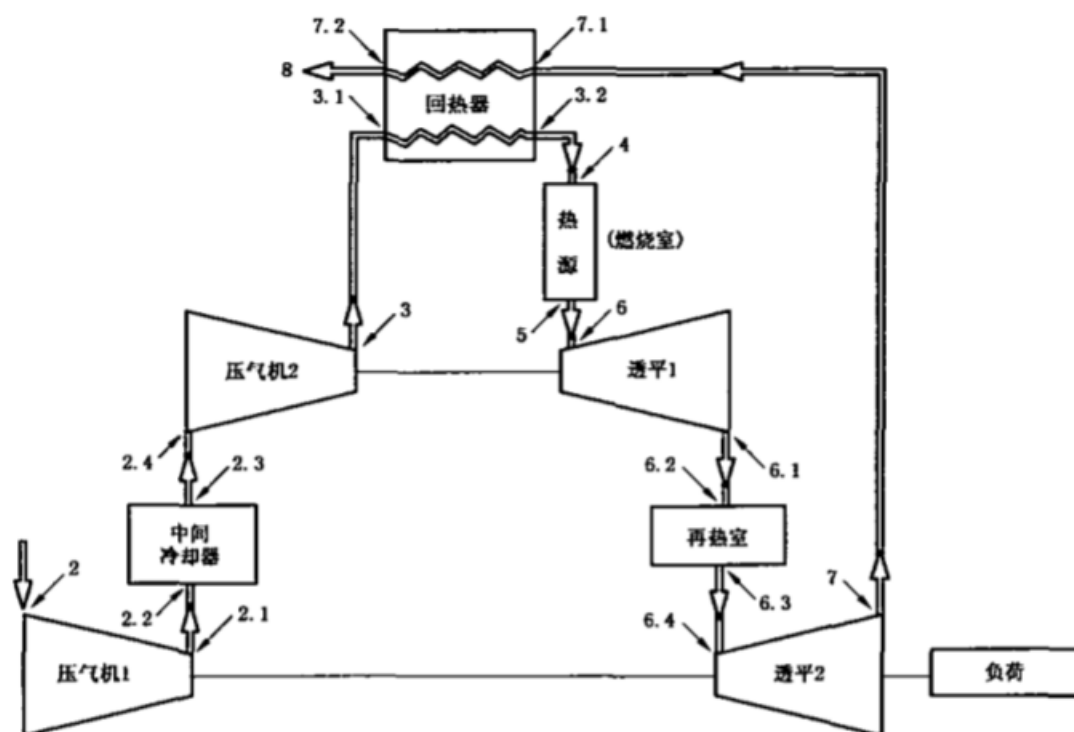
1) 在制造厂或在现场所进行的试验项目的划分,由合同双方商定。

2) 对于航空派生型燃气轮机,此项为必做试验。

3.6.2

复杂循环 complex cycle

复杂循环测点位置命名按图 2 示例用数字表示(其他类型的复杂循环以此类推)。



- | | |
|-------------------|-------------------|
| 2.1——第一台压气机出口； | 6.1——第一台透平出口； |
| 2.2——中间冷却器进口； | 6.2——再热室进口； |
| 2.3——中间冷却器出口； | 6.3——再热室出口； |
| 2.4——第二台压气机进口； | 6.4——第二台透平进口； |
| 3.1——回热器进口(工质加热)； | 7.1——回热器进口(排气放热)； |
| 3.2——回热器出口； | 7.2——回热器出口(排气放热)。 |

图 2 复杂循环测点位置命名示例

注 1: 复杂循环中若压气机和透平均为两台,而且还使用中间冷却器和再热室,测点位置的数字符号见图 2。

注 2: 如果测点位置采用其他命名法时,在合同中应另加说明。

3.7

流体种类命名 fluid type denomination

循环中各部分流体种类用下列字母表示:

- f——燃料；
- g——通过热源(燃烧室)加热的气体；
- a——空气(或其他工质)；
- w——水；
- b——润滑油。

例如:燃烧室进口燃料温度记为 T_{f1} 。

4 试验准备工作

4.1 按合同双方协议,燃气轮机验收试验,可在运行现场进行,亦可在制造厂的试验台进行。

4.2 除非双方另有协议,验收试验通常应在安装阶段结束之后(对在运行现场试验而言)或装配完成

后(对在制造厂试验而言),通常由制造厂执行,无论如何该试验应在3个月内执行。燃气轮机在试验前应按制造厂规定进行检验和清洁。

4.3 如果为了旁通某个部件而安装了管道,或者为了某种用途提供放气,则应调整上述管道上的所有阀门,使之符合保证条款上所规定的条件。

4.4 为了计算或其他特殊的试验目的所需要的燃气轮机各零部件的尺寸和结构参数,应在试验前进行测定并记录下来。

应当将试验时燃气轮机辅机铭牌上的编号和数据记录下来,以便确认。

4.5 对于航空派生型燃气轮机,验收试验前,燃气轮机或整个动力装置应按制造厂要求进行磨合运转,调整各附件,以保证燃气轮机的协调性和稳定性。

4.6 为了以下目的,可以进行预试验。

4.6.1 确定燃气轮机及有关设备是否适宜于进行验收试验。

4.6.2 检查测试仪器。

4.6.3 熟悉试验做法。

在进行预试验之后,经合同双方同意,预试验可以承认为验收试验。

5 试验运行条件

5.1 通则

5.1.1 应尽可能使试验条件接近标准参考条件或购货合同规定的条件。在整个试验过程中所用的燃料,应是保证条款规定的燃料,或是在性质上基本接近保证书规定的燃料,否则合同双方应就试验所用燃料和试验结果的解释事先达成协议。

5.1.2 在采用双燃料系统的装置中,热效率试验可以仅用一种燃料来进行,但应经合同双方达成协议。

5.1.3 燃气轮机的控制整定值应在试验前调定。对于不适合于燃气轮机正常运行的特殊调整,合同双方应达成书面协议。

5.1.4 试验观测记录应使用指定的表格,成为原始记录。观测记录应写明年、月、日和读数时间,并应经观测者签字后才能生效。原始记录和记录图表应当能复制,例如复印或照相,不允许重抄。

合同双方应各拥有一套全部的未经修正的原始仪表读数记录和记录图表。

5.1.5 在试验进行的过程中或试验后,对已观测到的数据进行分析或解释时,如果发现有明显的矛盾,以致影响试验结果的有效性,应经合同双方商定,用各种合理的方法去减小或消除矛盾。如未能达成协议,则试车或试验无效。

5.2 运行条件

5.2.1 某些试验,例如确定功率、热耗率、振动测量、余热回收的评定和噪声级的测定等项试验,应在稳态条件下进行。

5.2.2 燃气轮机应在达到稳态条件以后进行试验,当与试验项目有关的主要参数处于稳定时,就认为稳态已建立。如果连续监测表明,在合同双方所商定的时间间隔内,读数不超过5.2.3和表1所允许的最大变动量,则认为已达到稳态。

表1 在运行条件下的最大允许变动量*

序号	变 量	每次试验的任何一次读数与报告给出的平均运行值之偏差
1	输出轴转速	$\pm 1\%$
2	试验现场大气压力	$\pm 1\%$
3	压气机进口处工质温度	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
4	液体燃料的比能[总比能(高热值)和净比能]	$\pm 2\%$

表 1 (续)

序号	变 量	每次试验的任何一次读数与报告给出的平均运行值之偏差
5	气体燃料的比能(用连续量热计得到的总比能和净比能) ^b	±2%
6	气体燃料的供气压力	±1%(平均绝对压力)
7	燃料的供给温度 ^b	±3℃
8	排气压力	±1%(平均绝对压力)
9	工质进口压力	±1%(平均绝对压力)
10	冷却介质进口温度 ^c	±3℃
11	冷却介质温升 ^c	±2℃
12	透平排气温度	±2℃
^a 对于作为船用动力装置的燃气轮机,如果在船舶交接期间作验收试验,双方可商定专门的运行条件。 ^b 除天然气以外的其他气体燃料的最大允许变动范围应事先商定。 ^c 适用于采用预冷器和中间冷却器的复杂循环。		

5.2.3 在任何条件下确定额定性能时,为了求出功率和效率的数值,试验应连续进行 3 次。每次试验持续时间不少于 5 min,不超过 20 min(即总时间不少于 15 min,不超过 60 min)。如果用称量法测量燃料流量,为了获得足够的精度,试验时间可超过 20 min。

在测试期间,取读数时应保持负荷稳定在±1%以内。如果做不到这一点,每做一次测定时至少在上述规定时间范围内取 5 组读数,并将结果取平均值。当负荷的最大波动超过±2%时,只有经过合同双方商定后才能接受该次试验。

在整个试验期间内,每种运行状态的每个观测值与报告给出的平均运行值偏差不应超过表 1 所示的偏差范围,否则应由合同双方达成书面协议。

注:如果被测值是快速变化和不规则的,则应使用适当的仪表进行测量。若要求用每组观测数据去计算某个结果,再对结果取平均值,则必须用同一时间的读数。如果观测的目的是用和或差来确定变化率,则必须记录观测的准确时间。

6 测量仪器和测量方法

6.1 通则

本章对进行燃气轮机动力装置和部件试验所用的仪器、测量方法及预防措施作了说明和规定。本章中未规定的其他仪器及测量方法的使用,应由合同双方另行商定。

6.2 必做试验所需的仪器和设备

- 测量燃气轮机输出功率的仪器设备;
- 测量燃气轮机燃料消耗值或输入热量的仪器设备;
- 测定燃料的比能、密度、成分及灰分的仪器设备(也可取样后在双方商定的试验室内进行测定);
- 测定燃气轮机各适当的压力和压差的压力计或压力表(对性能计算有影响的压力测量,使用液体压力计或较为精密的仪器);
- 气压计和湿度计;
- 间接测量透平进口燃气温度的仪器(闭式循环的燃气轮机除外);
- 测定压气机进气温度的仪器;
- 测定计量油箱中燃油温度和冷却器中循环水温度的温度计;
- 转速指示器和电子式转速表;

- j) 带同步信号系统的主时钟(若不能提供,则可用同步表或同步钟);
- k) 测定燃气轮机排气温度的测试仪器;
- l) 测振仪器³⁾。

6.3 功率测量

6.3.1 机械功率的测量

6.3.1.1 扭矩测量

为了计算燃气轮机的轴端输出功率需要测得输出的扭矩。6.3.1.1.1或6.3.1.1.2所述设备均可用来进行扭矩测量。

6.3.1.1.1 吸收式测功器(机械式、电气式、水力式或组合式)

所用测功器量程的选择,要求在任何转速下,最小测量扭矩至少为该测功器正常最大扭矩的20%。

吸收式测功器在结构上应当使冷却流体在一个通过轴线的平面内流入和流出测功器,以免切向速度分量对扭矩测量产生影响。应采取措施预防外部风阻的影响。各种外部连接软管、接线不应应对测功器产生切向的阻力。

采用减震器来衰减测功器的摆动时,应预先确认减震器对两个方向的阻力相等。

测功器测量臂有效半径的测量误差不得超过 $\pm 0.1\%$ (制造厂的合格证可作为充分的依据)。

使用测功器时,应预先在增加和减少负荷两个方向上用经过检定的砝码来校准测力装置,正负误差不应超过试验中要读出的最大负荷的0.1%。如果增负荷和减负荷的读数差在最大试验负荷的0.3%以内时,应取其平均值作为标定值。

验收试验前后均要仔细检查测功器,并测定出测量臂的不平衡量。

若测功器在使用过程中出现负荷周期性波动(例如由其内部水的作用所形成)或某些共振状态(使扭矩指示值产生超过 $\pm 2\%$ 的脉动)这类无规则不稳定现象,则认为试验结果不符合要求。

6.3.1.1.2 转轴扭矩计

每组试验前,应对转轴扭矩计进行标定。如果所采用的扭矩计系统受到温度的影响,在试验后,应按试验中所经受的温度重新加以标定,标定时,扭矩指示装置应处于从试验前到试验结束后的整个测定过程中未受干扰的状态。

对转轴扭矩计进行标定时,必须单向地增加负荷,直到超过最大试验负荷,然后再单向地减少负荷。当增负荷与减负荷读数差不超过最大试验负荷的1.0%时,应取其平均值作为标定值。

应当以足够多的次数读取测功器的读数,以使所有读数平均值与交替读数的平均值(奇次读数和偶次读数的平均值)相差不大于0.2%。

6.3.1.2 转速测量

- a) 为了试验转速的初始整定及监视试验期间燃气轮机转速的恒定性,可采用指示式转速表。
- b) 多轴燃气轮机每根轴都应装备一个转速指示装置。
- c) 试验时为了监测转速恒定性,建议采用电子脉冲计数式转速表进行读数显示和记录。
- d) 对于所有转速测量都应使用直接驱动(无滑动)式或非接触式转速表。手持式转速表可能产生滑动,不宜采用。
- e) 当平均转速影响试验结果时,应使用直接驱动(无滑动)的积分式转速计数器。计数器的精度应使平均转速的误差不超过 $\pm 0.25\%$ 。
- f) 凡在试验中采用电子频率计来测量转速,以确定功率和效率时,应以足够多的次数取读数,使全部读数的平均值与交替读数的平均值相差不大于0.25%。

6.3.2 电功率的测量

发电机出线端电功率的测量按GB/T 8117的规定进行。

3) 用于航空派生型燃气轮机。

6.3.3 其他情况下的功率测量

当功率不是以电的形式输出,且又无法在轴上测量时(例如直接驱动泵、压缩机等),可参照适当的用于被驱动机械进行试验的标准测量功率,但需经合同双方共同商定。

6.3.4 用热力学计算法确定输出功率

当不能用上述方法(6.3.1~6.3.3)测量输出功率,且功率最大误差允许在±5%内时,在限定的条件下可根据工质的质量流量、空气和燃气的温度、热耗、轴承摩擦损失以及机组向周围的散热损失的测量值来计算输出功率。

在负荷设备上,因下列原因不能进行实际测量时,可采用热力学计算法:

- a) 对负荷设备的工质性质不完全了解;
- b) 负荷设备上温升太小,无法测出;
- c) 负荷设备上有几股流体流动或多次抽取等情况。

热力学计算法见 8.6。

6.3.5 燃气发生器的排气功率测量

测定燃气发生器的排气功率时,可在满负荷下用喷嘴或等效孔口来代替动力透平。燃气发生器的排气功率是指从被测的发生器出口状态(总温、总压)等熵膨胀到外界大气压力所产生的功率。

6.4 燃料测量

6.4.1 液体燃料的测量

6.4.1.1 液体燃料的特性

6.4.1.1.1 液体燃料特性的测定应包括密度、比能、黏度(需要时)和温度(需要加热时)。燃料取样方法应由合同双方商定。

6.4.1.1.2 密度可用液体比重计或直接称重法测得。

6.4.1.1.3 比能可由下述方法取得:

- a) 等容总比能和等容净比能的确定按 GB/T 384 的规定进行,然后计算出燃料等压净比能,比能的确定应在合同双方认可的实验室进行。
- b) 如果不能按 GB/T 384 的规定测定,经合同双方同意可利用图 3 曲线按测得的密度查出等压净比能。此法精度与燃料性质有关,其精度约为±1%。

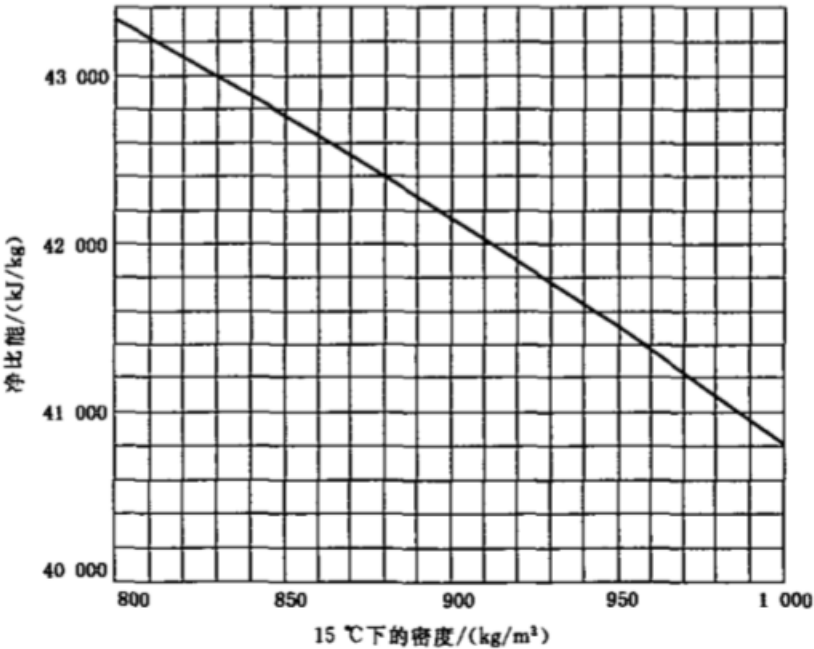


图 3 液体燃料净比能与密度的关系

c) 燃料温度偏离 15℃时,应按 3.3 进行显热修正。在未进行专门测量的情况下,可按不同油类分别作下列修正:

- 轻油:当 20℃时黏度小于 $9.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,偏离 15℃,每升高(降低)1℃,比能增加(减少)1.88 kJ/kg;
- 轻燃油:当 20℃的黏度小于 $49 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,偏离 15℃,每升高(降低)1℃,比能增加(减少)1.76 kJ/kg;
- 中燃油:当 50℃的黏度小于 $110 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,偏离 15℃,每升高(降低)1℃,比能增加(减少)1.63 kJ/kg;
- 重燃油或特重燃油:当 50℃的黏度小于 $380 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 时,偏离 15℃,每升高(降低)1℃,比能增加(减少)1.59 kJ/kg。

6.4.1.2 液体燃料流量的测量

6.4.1.2.1 为了确定燃气轮机的热耗率,必须准确地测量实际供给燃气轮机的燃料量,如燃料调节阀或燃油喷嘴的回油及泄漏量不回到测量装置出口管道内,则应测量并予以扣除。

6.4.1.2.2 流量测量可采用喷嘴、孔板、文丘里流量计、液体流量计或直接称重方式进行。孔板喷嘴的制造、安装与使用按 GB/T 2624 的规定进行,其他应按有关标准的规定。

6.4.1.2.3 所用流量测量装置在使用前都应进行校准或标定,以保证最大误差小于燃气轮机最大燃油流量的±0.5%。

6.4.1.2.4 当使用已校准测量精度为±0.5%的容积测量箱时,应使测量箱的形状有利于减少测量时间的误差。

6.4.1.2.5 称重箱系统应自由地放在中心轴上,不受任何诸如设计不当或放置不当的管道连接部件可能施加的外力约束。使用前应对称重箱加上已知的重量进行标定,绘制出增负荷和减负荷曲线,试验前对两条曲线的任何差别必须查明原因,作出解释。测量的最大误差应小于最大燃油流量的±0.5%。

6.4.1.2.6 当使用精度符合要求的正排量式或叶轮式液体流量计时,被测燃料的黏度应处于液体流量计制造厂所规定的范围内。

6.4.2 气体燃料的测量

6.4.2.1 气体燃料的特性

6.4.2.1.1 气体燃料特性的测定应包括密度、比能、含尘量(需要时)和温度。

6.4.2.1.2 根据合同双方的协议,密度与比能可以由计算得到,或者取自气体燃料供应单位的记录,记录的日期和时间必须与试验日期和时间一致。应在试验报告中详细写明所用数值的依据。

对于组成成分不断变化的高炉煤气、炼油厂的石油气及其他气体燃料,在试验期间应增加取样次数,使其在取平均值后能得到有代表性的气体比能,建议在整个试验期间使用连续记录式量热计与密度计。

利用气体燃料各组成成分的等压净比能和它们所占的比例,通过计算可以确定气体燃料的净比能。也可以使用有足够准确度的容克式量热计或其他类型的量热计进行测量。

所用确定比能的方法应由合同双方预先商定。在任何情况下,应根据 3.3 对偏离 15℃的燃料显热进行修正。

6.4.2.1.3 某些气体燃料(例如高炉煤气)的含尘量影响到燃气质量流量测定,因此不可忽视,应予测量。含尘量测量方法由合同双方听取专家意见后商定。

6.4.2.2 气体燃料流量的测量

6.4.2.2.1 流量测量可用正排量容积式流量计、叶轮式流量计、孔板、喷嘴及文丘里流量计进行测量。孔板和喷嘴的制造、安装和使用应按 GB/T 2624 的规定进行。其他应按有关标准的规定。

6.4.2.2.2 所用流量测量装置使用前均应校准,使其误差在燃气轮机燃料最大流量的±1.0%之内。

6.4.2.2.3 对含尘量较高的气体燃料,应注意到含尘量对流量测量所产生的误差。宜采用正排量容积式流量计测量流量。

6.4.3 固体燃料的测量

固体燃料的测量(特别是对于闭式循环装置)应使用适当的标准。

6.5 温度测量

6.5.1 测量仪器

测量用仪器使用前应逐个进行校准。直接测温用仪器建议采用:

- a) 水银温度计;
- b) 带电位计的热电偶或类似的仪器;
- c) 电阻温度计。

当总温和静温相差超过 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,应采用总温式温度计或用普通温度计,但对所测数值应进行修正。

6.5.2 压气机进气温度

压气机进气温度测量最大误差不超过 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。所用测温仪表的灵敏度为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

至少使用两个温度计,按 6.6.3 的规定,在两个位置上测量,取平均值。若不在规定的位置上测量,则合同双方应就如何进行修正达成协议。

6.5.3 透平排气温度

6.5.3.1 测量透平排气温度仪器的灵敏度为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6.5.3.2 位于透平排气法兰到测量部位之间的气缸和管道应进行绝热保温。

6.5.3.3 测点位置的选择应使速度梯度和温度梯度为最小。传感器应放在各等分面积的中心。至少用 4 个测点读数的平均值作为排气温度。闭式循环燃气轮机用两个测点即可。若因实际需要,测点必须位于或靠近透平排气法兰处,为了保证足够的精度,必须用 4 个以上的传感器。合同双方应就传感器的数量和安装位置达成协议。

6.5.3.4 当温度传感器受到比燃气温度高 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温部件的热辐射时,应对每一个传感器加以遮热,以减少热辐射引起的测量误差。

6.5.4 透平进气温度

除闭式循环这类特殊情况之外,直接测量十分困难,应采用 8.7 中所规定的间接测量方法来确定透平的进口平均温度。对闭式循环燃气轮机用两个测点即可。

6.5.5 燃烧室进口空气温度

当有必要测定燃烧室进口空气平均总温并估算燃烧室温升时(见 8.7),其温度测量方法根据燃烧室结构确定。测量时应采取遮热措施以减少热辐射引起的测量误差。

6.5.6 燃料温度

在控制体入口处测量燃料温度,在有燃料回流的情况下,还要在控制体出口处测量(见 8.6.1 及图 4)。

6.5.7 其他温度

在必做试验中,为了间接求出机械输出功率,需要测量从滑油冷却器、中间冷却器或抽气口处带走的热量。其温度测量和流量测量的精度应保证放热计算的最大误差在 10% 以内。

选做试验如需测量这些温度,应由合同双方商定测量精度和测量方法。

6.6 压力测量

6.6.1 测量仪器的要求

压力测量应使用液体压力计(U 形管式、单管式等)、静重仪、弹簧管式压力计或其他弹性类型压力计,以及经过校准的压力传感器。

弹簧管式压力计或其他弹性压力计应用静重仪校准。

使用 U 形管式、单管式压力计应注意刻度的精度,管内径在 10 mm 之内应注意毛细现象。

各种压力计的连接管应确保在工作条件下无泄漏或堵塞。

如果压力有波动,应当在连接管中装有适当阻尼。

6.6.2 大气压力

可以用最大误差不超过 33.33 Pa 的适当仪器测量大气压力。压力计应安放在试验场地的稳定环境中。

若经合同双方商定使用当地气象站报告的测量值,则应进行高度修正。

6.6.3 压气机进气压力

压气机进气压力是指压气机进口处(压气机法兰处或进气喇叭口处)的总压。总压是大气压、压力表静压和动压的代数和。

用测量静压所在截面的平均速度来计算动压,平均速度是根据该截面的面积和相应的流量计算出。

测点所在部位的平均流速在 20 m/s 以下,可取一个静压测点,流速在 20 m/s 以上,在垂直于流线的截面上尽可能对称地取 4 个测点,将其算术平均值作为静压,应当用液体压力计来进行这些静压的测量。

静压测孔应与导管壁或机壳垂直,内侧孔口边缘不得倒角,且不得有毛刺,靠近测量部位的壁面应是平滑而又平行的。当壁面凹凸不平,形状不规则时,应使用静压管。

直接进行总压测量时,应当考虑总压的分布情况,以便提高总压平均值的精度。

当没有进气管道、消声器及进气过滤器时,大气压力即为压气机进口空气压力。

对于闭式循环燃气轮机,测量压气机进口压力的做法与测量压气机出口所规定的做法是相同的(见 6.6.5)。

6.6.4 透平排气压力

透平排气压力是指透平排气法兰处(采用回热循环则为回热器出口法兰处)的静压。

测量透平排气压力的方法与测量压气机进气压力的方法相同,应取 4 个测点测量数值的算术平均值作为静压,这 4 个测点在所测截面上应尽可能地对称布置。

如果未采用排气管道和排气消声器,则应取大气压力作为排气静压。

在被选定的测量截面上,如果存在着高的速度梯度和压力梯度,则选用的测量方法要确保所获得的值代表加权的平均压力,也可以考虑相对周围大气压力,推算出排气压力。

6.6.5 压气机出口压力和透平进口压力

如果用间接方法确定透平进气温度,则必须测量压气机出口或透平进口处压力。

应取 4 个测点测量值的算术平均值作为静压,这 4 个测量点在压气机排气截面或透平进口截面上的布置要尽可能地对称。应当根据在相应截面上所估算的平均速度来计算动压。

6.7 流量测量

6.7.1 工质流量

在必做试验中,当采用热力学计算方法来确定燃气轮机输出功率时,需测量工质的流量。工质流量可用孔板或喷嘴来测量,孔板和喷嘴的制造、安装与使用应按 GB/T 2624 的规定进行。

当不可能使用孔板或喷嘴测量流量时,经合同双方商定,可采用动压管(毕托管)或其他已校准的设备,得出该测量截面上详细的流速分布,以计算流量。所用压力测量设备的精度应在压差读数的 $\pm 0.5\%$ 之内。

当要得到燃气轮机中不能测量部位的质量流量时,可借助于其他截面的流量测量来确定,但应考虑工质的放气和漏气、冷却用抽气、燃料输入量和其他介质的流量,按流量平衡进行计算。

6.7.2 燃料流量

见 6.4.1.2 和 6.4.2.2。

6.7.3 其他流量

若需测量冷却介质、润滑油以及其他流量时,可用下列方法来进行测量:

- a) 喷嘴或孔板;
- b) 正排量式流量计;

- c) 缺口堰法;
- d) 经商定的其他方法(如直接称重法、容积法等)。

6.8 与调节系统、噪声等有关的测量

见第7章试验方法。

7 试验方法

7.1 必做试验

7.1.1 功率的确定

按6.3的规定测量功率,单独驱动的辅机所吸收的功率应按8.2.1加以考虑。

7.1.2 热效率、热耗率或燃料消耗率的确定

见6.3、6.4和8.3。

7.1.3 主要的保护装置

7.1.3.1 超速保护装置

在验收试验期间,不允许调整超速保护装置。当燃气轮机空载运行时,可以测定超速保护装置的动作转速。调整调速器的整定值或联动装置,使燃气轮机从额定转速缓慢地增加到足够高时就可以实现这一点。转速的升高应控制在每5 s不大于额定转速的1%。转速测量的最大误差不超过±0.25%。

进行超速试验时,应采取预防措施,以保证燃气轮机转速不超过制造厂规定的最大安全转速。

7.1.3.2 熄火保护装置

燃气轮机如果采用熄火保护装置,由于熄火保护装置的类型不同,无法规定通用的试验方法。若采用直接观测火焰的装置,则可人为地去遮断火焰的照射。

7.2 选做试验

7.2.1 预试验及综合性试验

7.2.1.1 在制造厂的试验台上或运行现场进行。如果机组由于试验台的限制,根据双方协议,可采用下列形式进行,并可作为验收试验的组成部分。

- a) 只试燃气发生器;
- b) 改变或降低负荷条件;
- c) 在燃气轮机或在燃气轮机动力装置验收试验前进行。

7.2.1.2 包括预试验、选做试验在内,验收试验的时间不应少于72 h。

综合性试验应按供方的试车大纲进行。试验时间应在20 h~72 h范围内,由供方和需方协商决定。如果双方同意,可以把选做试验的时间视为综合性试验的一部分。

7.2.1.3 综合性试验大纲的主要内容

应根据实际使用的负荷情况来制定综合性试验的功率分配、变负荷情况和起动次数。大纲主要内容应包括:

- a) 不少于1/2时间的额定状态运转;
- b) 短时间的最大状态运转;
- c) 空载至最大状态的变状态试验;
- d) 部分负荷、轻负荷的持续时间可以缩短直至取消;
- e) 必不可少的起动、停车及加减速次数。

7.2.2 调节系统

7.2.2.1 恒速调节

进行试验时,对调速器只作初始调整,使燃气轮机能在额定输出功率下,达到额定转速,在这种状态下,根据合同双方协议,可进行下列试验项目中的一项或多项:

- a) 机组在空载情况下,用手控或遥控方式,调整转速给定值(或同步器),测量机组空载稳定转速

的最高值和最低值。

b) 瞬态和稳态的转速变化：

甩负荷试验是在规定运行条件下，燃气轮机以额定转速带额定负荷时，突然甩掉满负荷后，测定瞬态飞升转速最高值和回复稳定后的稳定时间。如各方同意，该试验可在部分负荷下进行，而结果可推到满负荷。转速不等率是稳态转速增量占额定转速的百分比。瞬态飞升转速最高值可用额定转速的百分比表示。

突然增加负荷试验时（这样的负荷在试验前需由双方商定同意），应测定瞬态最低转速和回复稳定后的稳态转速及稳定时间。

稳定时间是指从突甩或突增负荷瞬时起，到转速离新的稳态转速不大于 0.5% 时的时间间隔。对甩负荷会导致超速保护起作用而使燃气轮机停车的航空派生型燃气轮机机组，经供需双方协商同意此项试验可不进行。

c) 死区：当输入信号变化后，在执行机构不产生随动反应的一个区域称为死区。

7.2.2.2 变速调节

变速调节可确定下列各项：

- a) 在 7.2.2.2 b) 中给出的运行范围内，包括空负荷转速的若干转速给定值状态下，考核转速调节系统的一般稳定性。稳定性是指负荷或转速不会由于调节系统内部原因而引起持续的摆动和波动。
- b) 机组在适当的负荷下，以手控或遥控方式进行调节，测定被调转速的最高值和最低值。
- c) 在空载条件下，当燃料控制系统的给定值或气体燃料调节阀开度突然由慢车位置移动到额定转速位置时，测定被调转速超过额定转速的最大瞬态增量。
- d) 当燃料调节系统或气体燃料调节阀突然从稳态额定输出功率额定转速位置移动到慢车无负荷位置时，测定被调转速降到慢车无负荷转速之下的最大瞬态减小量。
- e) 死区〔见 7.2.2.1 c)〕。

7.2.2.3 多轴燃气轮机发电装置的转速调节

多轴燃气轮机发电装置的每一负荷改变，会引起燃气发生器的转速变化，从而引起动力透平和连接负荷的瞬态转速变化，这些变化应限制在一定的范围内。各方均应遵守防止机组事故性超速或转速过低的规定。

7.2.2.4 温度控制

对于有温度控制的装置，应检验其有效性。即燃气轮机在规定负荷下对排气温度或透平进气温度及其他温度的规定限值加以验证。

7.2.3 保护装置

7.2.3.1 滑油压力过低

燃气轮机运行时，人为地使传感器感受油压降低信号，就可以对整个滑油系统进行试验。或者，对于由主轴驱动的油泵，可通过将燃气轮机的转速降低，以减小输出油压，使其达到保护装置动作压力。为了达到较低的报警、跳闸油压，有可能需要限制相应的辅助油泵的自动启动。

7.2.3.2 滑油温度过高

试验中，采用控制滑油冷却的方法，使滑油温度达到动作温度。或者，利用外部手段向探头加热的方法去增高温度，直到实际整定的保护装置动作温度，就可以对整个系统进行试验。

7.2.3.3 轴承金属温度过高

因为测量温度的方法不同，所以不可能作详细规定。可以通过送入使得保护装置动作的信号，或是取出探头，利用外部手段向探头加热的方法去增高温度，直到实际整定的保护装置动作温度为止。若不可能这样做，可把整定值降低到实际工作温度，以检验保护装置动作，在采用此方法时，保护装置实际原整定温度下的动作，应在单独的试验台上验证。

7.2.3.4 燃料供给压力

可以通过调整燃料供给压力,达到跳闸所需的压力。

7.2.3.5 透平超温

因为测量温度的方法不同,所以不可能作详细规定。最好用气动信号或电压信号模拟温度的增加来做此试验。若不可能这样做,把整定值降低到实际工作温度,以检验保护装置动作,在采用此方法时,保护装置实际原整定温度下的动作,应在单独的试验台上验证。

7.2.4 操纵特性

7.2.4.1 起动程序

为了测定起动程序,要求记录起动过程中出现重要情况的准确时间。无论是手动起动或自动起动,合同双方均应事先对起动过程中所出现的重要情况的记录方法达成协议。起动试验记录应包括出现重要情况的时间和转速,这些重要情况诸如:初始起动信号、点火、起动机脱扣,以及达到空载转速。

7.2.4.2 起动可靠性

起动可靠性用连续起动成功次数来判断。起动次数可由合同双方商定。但是根据机组用途需特别重视起动可靠性时,连续起动成功 10 次就认为具有起动可靠性。应按照所提供的操作说明书进行起动。机组现场调试期间内连续成功起动次数也可作起动可靠性的累计次数。

起动可靠性试验记录:连续起动次数,哪些是成功的,并表明出现的重要情况。

另外,在可能情况下应包括停机后长期的放置再行起动以及刚停机后立即再行起动。

7.2.4.3 特种起动特性

按照合同的协议,起动特性试验还可包括以下试验中的一项或多项:

- a) 无电源起动:不用外部电源起动;
- b) 远距离起动:即借助于电缆、微波或载波电流起动;
- c) 应急起动;
- d) 带负荷起动;
- e) 双燃料机组切换燃料起动;
- f) 测定所需的起动功率;
- g) 确定最低自持转速;
- h) 测定起动燃料消耗量。

7.2.4.4 正常加载

按操作说明书的规定,进行 2 次~5 次加载能力和可靠性的试验,其中至少有一次是从冷态起动,这些试验可以记作 7.2.4.2 中成功起动的次数。

7.2.4.5 起动和加载过程

双方应商定起动和加载过程应包括下列哪些阶段:

- a) 准备时间;
- b) 起动和清吹次数;
- c) 点火和加速至全速(空载);
- d) 同步;
- e) 按正常加载率加载到基本负荷;
- f) 按快速加载率加载到基本负荷。

7.2.5 振动

试验方法应经合同双方同意,尤其是关于下列各点:

- a) 测量位置与方向,轴承座或轴振动位移;
- b) 测量仪器:用测量位移、速度和加速度的传感器。

7.2.6 排放物

按照公认的或合同双方同意的办法,进行排气释放物的测定。

注:对于航空派生型燃气轮机,按 GB/T 11369 规定的标准和方法进行试验。

7.2.7 排气的质量流量和排气温度

评定余热回收时可以按照 6.7 通过直接测量空气流量和燃料流量来确定排气的质量流量,也可以用间接方法来确定(见 8.6),按 6.5.3 测定透平排气温度。

7.2.8 噪声级

测试方法,特别是关于下列各点,应经合同双方同意。

- 测点位置;
- 测量仪器;
- 背景噪声影响的修正。

7.2.9 排热

测定排热的试验应按照合同双方商定的方法进行。

排热是指通过辐射、对流、冷却水、排气等方式,从燃气轮机向周围环境散热。在某些情况下,测定排放热量的总量、冷却介质的温升和冷却介质的排放温度是有重要意义的。

8 试验结果的计算

8.1 通则

按试验结果计算功率和热效率时,应取每次连续测试期间仪表观测数据的平均值或积分值。但事前应按本标准的要求对仪器设备等予以校正。

8.2 输出功率

8.2.1 净机械功率

8.2.1.1 在功率输出端测量扭矩,测量的轴端输出功率的计算见公式(1):

$$P_g = M\omega \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- P_g ——测量的轴端输出功率,单位为千瓦(kW);
- M ——扭矩,单位为千牛米(kN·m);
- ω ——角速度,等于 $2\pi n/60$,单位为弧度每秒(rad/s);
- n ——转速,单位为转每分(r/min)。

式(1)中的转速与扭矩应按 6.3 规定测量。净机械功率由测量的轴端输出功率经修正后得到。对于不由机组驱动,但为机组运行所必须的设备和由机组驱动但与机组运行无关的设备,其所需功率应分别予以增减修正,以求得净机械功率。机组正常运行时不连续工作的辅机(如起动用的空气压缩机、辅助滑油泵等)所需功率,修正时不予以考虑。但闭式循环燃气轮机中的充气压机,应考虑它所消耗的功率。

由电动机驱动的辅机,其功率应以电动机的输入电功率计算。由其他动力装置驱动的辅机,则以其净输出功率计算。

对测量的轴端输出功率的增减修正,可参照下例进行。

8.2.1.2 扣除的功率(即机组运行所需,但不由机组本身驱动的辅机功率)如:

- a) 燃料泵、主滑油泵和水泵等;
- b) 压缩机,例如闭式循环的充气压缩机或开式循环的增压压缩机;
- c) 气体燃料增压压缩机或雾化空气压缩机;
- d) 冷却风扇或冷却塔;
- e) 加热燃料的外部功率。

8.2.1.3 增加的功率(即与机组运行无关,又由机组本身供给的功率)如:

- a) 燃气轮机抽气,供应电厂辅助供气或化工流程所需的供气;
- b) 辅助发电机;
- c) 机械的或液压的辅助传动。

8.2.2 净电功率

发电机组的测量的电功率应在发电机的出线端测量,如果从配电盘处测量,则应加上从出线端到配电盘之间的电缆损失或其他损失。

如果发电机的励磁机和冷却风扇由其他动力驱动,则应从测量的电功率中扣除这两项功率后再按8.2.1的规定予以增减修正以求得净电功率。

8.2.3 净电功率换算为净机械功率

如果燃气轮机通过齿轮箱驱动发电机时,则输出轴端的净机械功率等于净电功率除以发电机效率和齿轮箱效率。利用制造厂提供的性能资料可以确定不同负荷与相应的功率因数下的发电机效率以及齿轮箱效率。根据这些资料绘制出发电机效率和齿轮箱效率随输出电功率变化的曲线。

如果没有发电机性能资料,则发电机的各项损失可参考公认的有关资料计算得出。

8.3 耗热量、热效率及热耗率

8.3.1 耗热量

计算见公式(2):

$$\begin{aligned} q_r &= m_r(Q_{bo} + h_{fu} - h_o)/\tau \\ &= m(Q_{bo} + h_{fu} - h_o) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

- q_r ——单位时间耗热量,单位为千焦每秒(kJ/s);
- τ ——测量持续时间,单位为秒(s);
- m_r ——在 τ 时间内消耗的燃料,单位为千克(kg);
- m ——燃料消耗值, $m = m_r/\tau$, 单位为千克每秒(kg/s);
- Q_{bo} ——燃料在 15℃时的等压净比能,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- h_{fu} ——在 T_{fu} 温度下进入燃烧室的燃料比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- h_o ——在 15℃时燃烧的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

8.3.2 热效率

对应于净机械功率的热效率计算见公式(3):

$$\eta = P/q_r \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

- η ——热效率;
- P ——净机械功率,单位为千瓦(kW)。

8.3.3 热耗率

计算见公式(4):

$$q_p = q_r/P = 1/\eta \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

- q_p ——热耗率,单位为千瓦热量/千瓦功率。

8.4 按参考条件修正试验结果

8.4.1 修正试验结果的必要性

燃气轮机最理想的试验条件应当是 3.1 规定的标准参考条件,但通常不可能做到,试验经常在其他条件下进行。为了便于比较各种试验条件下的功率和热效率,对试验结果必须按参考条件(标准参考条件或其他规定条件)作出修正。

8.4.2 试验的基本方法

燃气轮机在实际的压气机进气条件下运行时,使其气动状态与它在参考条件下以额定工况运行时的气动状态相同(即满足运行工况相似原理)。这样压气机和透平的运行都不会偏离其效率曲线图上的相应于参考条件下额定工况点。为了模拟这种条件,如果压气机进气温度低于参考值,则实际的排气温度和转速也将低于参考值。

与此相反,若压气机进气温度高于参考值,则试验进行时排气温度和转速也必然高于参考值。因此,从实际观点出发,试验应尽量在压气机进气温度不大于参考值的外界条件下进行。例如,当气温较高时,试验应安排在夜间进行。

上述方法有时并不适用,例如恒速机组(见 8.4.4)。

8.4.3 变转速燃气轮机试验结果的修正

8.4.3.1 输出轴试验转速的确定按公式(5):

$$n_t = n_0 \sqrt{\theta} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:

n_t ——试验转速,单位为转每分(r/min);

n_0 ——参考转速,单位为转每分(r/min);

θ ——试验时外界绝对温度与参考条件下外界绝对温度的比值。

8.4.3.2 试验温度(特定的控制温度,如透平进、排气温度)的确定按公式(6):

$$T_t = T \cdot \theta \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

T_t ——试验时的燃气温度,单位为开尔文(K);

T ——参考条件下规定的燃气温度,单位为开尔文(K)。

8.4.3.3 机组按公式(5)和公式(6)计算出的试验转速和温度下运行时得出净机械功率 P_t 后,再按公式(7)修正:

$$P_e = P_t / (\delta \sqrt{\theta}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中:

P_e ——按参考条件修正后的净机械功率,单位为千瓦(kW);

P_t ——试验条件下的净机械功率,单位为千瓦(kW);

δ ——试验时压气机进气绝对压力与参考条件下压气机进气绝对压力的比值。

注:公式(7)假设工质的热力性质与压气机进气温度无关,这虽不严格,但由此产生的误差在本标准要求的限度之内。

8.4.3.4 如果按公式(7)算出的修正后的功率 P_e 等于或大于规定的功率值(包括各种修正,假如考虑排气背压做的适当修正)时,则燃气轮机功率就达到了规定要求。

8.4.3.5 热效率可按公式(8)计算:

$$\eta_t = P_t / [m_m (Q_{to} + h_{tt} - h_o)] \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中:

m_m ——试验时测得的燃料消耗值,单位为千克每秒(kg/s)。

注:式(8)假定,由于试验条件与参考条件工况相似,因此热效率可以不必修正。

8.4.3.6 排气背压与参考条件不同时,合同双方在试验前应就输出功率和热效率的修正与计算达成协议。

试验前,合同双方还应就所采用的曲线和修正方法达成书面协议。

8.4.4 恒速燃气轮机试验结果修正

对于驱动发电机或其他恒速运行的情况,通常不可能满足运行工况相似的条件,所以,对输出功率和热效率的修正比较复杂。只要压气机进口条件与参考条件不相同,燃气轮机就是在非设计工况下运

行。所以应尽可能使试验在参考条件下进行。如果做不到这一点,就应根据适当的修正曲线来修正试验结果。

试验前,合同双方还应就所采用的曲线和修正方法达成书面协议。

8.4.5 湿度影响

除采用中间冷却和蒸发冷却器之外,湿度的变化对燃气轮机的输出功率、燃料消耗值和温度的影响是可以忽略不计的。但在热平衡计算中如果不考虑湿度的影响就会引起很大的误差,因此,试验前应就考虑湿度影响的修正方法达成协议。

8.5 试验结果的整理

按 5.2.3 规定的方法得出的功率和效率值并进行修正后再取平均值。对于变转速燃气轮机,为了确定不同转速下最大输出功率和热效率,则应先绘出以输出转速为参变量的效率对净机械功率的变化曲线,由此得出热效率对最大输出功率作为转速函数的曲线。

8.6 确定输出功率的间接方法

8.6.1 控制体和热平衡方程式

当输出功率通过热力学的计算方法确定时,首先必须设想一个包括燃气轮机在内的合适的“控制体”(见图 4),并对其列出热平衡方程式。该“控制体”的取法应便于确定进入和离开“控制体”的所有热量和能量的参数。输出功率是这些参数中的一项,利用热平衡方程式和其他已知数据可计算得出。

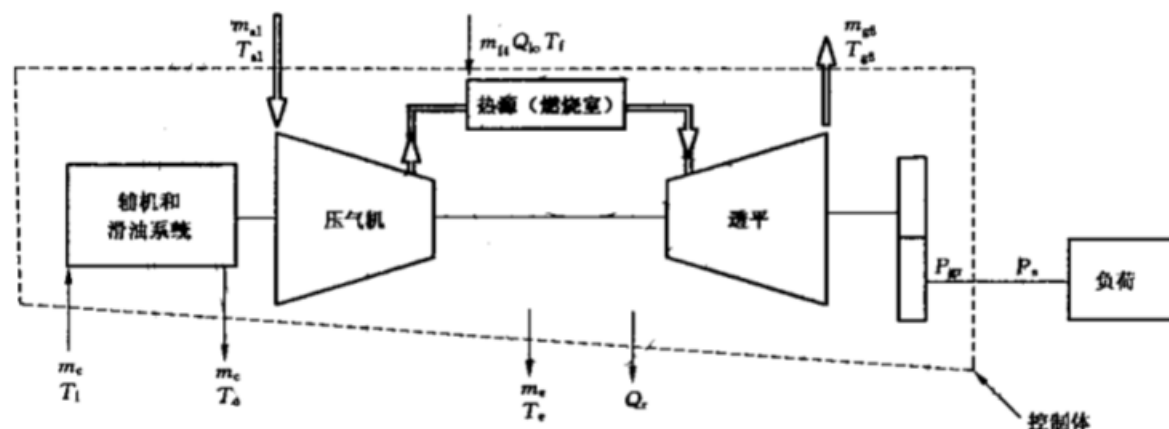


图 4 控制体的范围

控制体的热平衡方程见公式(9):

$$m_{a1}(h_{a1} - h_{a0}) + m_{fk} Q_{ko} \eta_{fc} + m_{fk}(h_{fk} - h_0) = m_{gs}(h_{gs} - h_{g0}) + m_e(h_{ex} - h_{e0}) + Q_r + Q_m + P_s \quad (9)$$

式中:

m_{a1} ——进入压气机的空气流量,单位为千克每秒(kg/s);

m_{fk} ——进入控制体的燃料供给量,单位为千克每秒(kg/s);

m_{gs} ——透平排气流量,单位为千克每秒(kg/s);

m_e ——气封等泄漏和抽气的流量,单位为千克每秒(kg/s);

h_{a1} ——在温度 T_{a1} 下进入压气机的空气比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

h_{a0} ——在标准参考温度下空气的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

h_{ex} ——在温度 T_e 下泄漏空气比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

h_{gs} ——在温度 T_{gs} 时透平排气比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

h_{g0} ——在标准参考温度下燃气的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

Q_r ——控制体的辐射和对流引起的单位时间热量损失,单位为千焦每秒(kJ/s);

Q_m ——机械损失(见 8.6.7),单位为千瓦(kW);

P_s ——输出轴供给负载的功率,单位为千瓦(kW);

η_{tc} ——燃烧效率(见 8.6.8);

T_{a1} ——按质量平均的压气机进气温度,等于 $1/m_{a1} \times \int T_{a1} dm_{a1}$,单位为开尔文(K);

T_{g3} ——按质量平均的透平排气温度,等于 $1/m_{g3} \times \int T_{g3} dm_{g3}$,单位为开尔文(K)。

注:如有必要,在计算空气或燃气的比焓时,应考虑湿度的影响(见 8.4.5)。

8.6.2 排气流量的间接确定[见公式(10)]

$$m_{g3} = m_{a1} + m_{f4} - m_e \quad \dots\dots\dots (10)$$

8.6.3 主要参数的确定和功率误差的估计

公式(9)和公式(10)中的主要参数按第 6 章规定的方法确定。由于输出功率通常是耗热量的 $1/3 \sim 1/5$, 所以,输出功率的预期误差(以输出功率的百分数表示)不可能小于耗热量预期误差(以耗热量的百分数表示)的 3 倍~5 倍。

8.6.4 次要项目数值的限制

对于热平衡方程式(9)中的次要项目(Q_r, m_e, Q_m)的数值应予限制(见 8.6.5~8.6.7)。当这些项目的数值超过限定值时,为了保证间接确定功率的总精度,应设法改善测量方法。

8.6.5 辐射和对流散热损失的估计

方程式(9)中的 Q_r 为辐射和对流散热损失。应当用暴露表面的平均温度和周围的外界空气温度估算,这些损失不应超过耗热量的 2%。

8.6.6 泄漏量的估计

空气和燃气的泄漏应予以测量或可靠地估算。泄漏包括油箱上油气分离器的通放气、轴端气封漏气不与排出滑油及透平排气相混合的供冷却和密封用的空气,以及气缸接合面的泄漏等。这些经过估算或测量得到的泄漏量的总和,不应超过压气机进口空气量的 1%。

小型燃气轮机(特别是带有再生式回热器的小型燃气轮机)的空气或燃气的泄漏量,以及驱动回热器所消耗的功率,其数量较大,值得重视。外部泄漏量可能超过 1%,计算时应充分注意。

8.6.7 机械损失和辅机功率损失的估计

这两项损失只包括离开“控制体”的能量。许多燃气轮机装置只要求测量出冷油器带走的热量 Q_m , 计算见公式(11):

$$Q_m = m_e C_{pe} (T_o - T_i) \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中:

m_e ——流过冷油器的冷却介质流量,单位为千克每秒(kg/s);

$T_o - T_i$ ——冷却介质通过冷油器后的温升,单位为开尔文(K);

C_{pe} ——冷却介质的比热,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

这项损失不能精确测量,故不能超过耗热量的 2%。

注:在 8.6.5~8.6.7 中,规定限值的目的在于用间接方法确定功率时可获得足够的精度。

8.6.8 燃烧效率 η_{tc} 的确定

η_{tc} 一般可取为 0.99,或根据相似的燃气轮机燃烧室的试验结果取值。如果方程式(9)中所用的燃烧效率低于 0.98,则应测量排气的化学组成成分。

8.6.9 比焓的确定

空气或燃气的比焓,可以从公认的燃气热力性质表⁴⁾中查得。某些选做试验项目可能要求对比焓作附加修正,以考虑高湿度或燃料的特殊化学成分的影响。

8.6.10 功率修正

用 8.6 得出的输出功率可不按 8.2.1 所述方法进行增减修正。因为有关增减量应在热平衡方程(9)中统一考虑。

4) 如吴仲华著“燃气热力性质表”和 J. H. Mkeenan 和 J. Kaye 编制的“燃气表”等。

8.6.11 负载为压缩机时输出功率的确定

这时,燃气轮机的功率可用被驱动的压缩机的热平衡确定,热平衡方程如公式(12):

$$P_s = m_i(h_{g0} - h_{gi}) + Q_{rc} + Q_{mc} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中:

P_s ——输出轴供给负载的功率,单位为千瓦(kW);

m_i ——负载压缩机的进气量,单位为千克每秒(kg/s);

h_{gi} ——进入负载压缩机的气体在温度和压力分别为 T_{gi} 和 P_{gi} 时的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

h_{g0} ——离开负载压缩机的气体在温度和压力分别为 T_{g0} 和 P_{g0} 时的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

Q_{rc} ——负载压缩机气缸辐射和对流单位时间散热损失,单位为千焦每秒(kJ/s);

Q_{mc} ——负载压缩机的机械损失,若使用变速器,则不包括变速器的损失在内,单位为千瓦(kW)。

式中各项参数可按压缩机或鼓、引风机的有关试验规范给出的方法确定。

8.6.12 分轴燃气轮机输出功率的确定

对于分轴燃气轮机,其输出功率若不能从驱动负载的热平衡计算中求得时,则可根据测得的动力透平的燃气流量及其进出口温度用式(13)计算得出:

$$P_s = m_{gt}(h_{g5.2} - h_{gt}) - Q_{rt} - Q_{mt} \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中:

P_s ——输出轴供给负载的功率,单位为千瓦(kW);

m_{gt} ——动力透平出口燃气流量,单位为千克每秒(kg/s);

$h_{g5.2}$ ——在温度 $T_{g5.2}$ 下动力透平进口燃气的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

h_{gt} ——在温度 T_{gt} 下动力透平出口燃气的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

Q_{rt} ——动力透平外壳在温度 $T_{g5.2}$ 和 T_{gt} 两个测点间的辐射和对流单位时间散热损失,单位为千焦每秒(kJ/s);

Q_{mt} ——动力透平的机械损失,若使用变速器则应包括变速器机械损失在内,单位为千瓦(kW)。

必要时可按 8.2.1 规定作出增减修正,以求出净机械功率。

8.7 透平进气温度

8.7.1 利用燃烧室(包括与其相连的管路)热平衡方程可确定透平进气温度的参考值,见公式(14)。

$$m_{a4}(h_{a4} - h_{a0}) + m_{f4}Q_{fo}\eta_{fc} + m_{f4}(h_{f4} - h_0) = m_{g5}(h_{g5} - h_{g0}) + Q_{rc} \quad \dots\dots\dots(14)$$

式中:

m_{g5} ——透平进口的燃气流量,单位为千克每秒(kg/s);

$$m_{g5} = m_{a4} + m_{f4}$$

m_{a4} ——燃烧室进口的空气流量,单位为千克每秒(kg/s);

h_{a4} ——在温度 T_{a4} 下,燃烧室进口空气的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

h_{g5} ——在温度 T_{g5} 下,透平进口燃气比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

Q_{rc} ——燃烧室辐射和对流单位时间散热损失,单位为千焦每秒(kJ/s)。

简化的热平衡方程(14),假定燃烧室进口质量流量等于压气机进口质量流量,即:

$$m_{a2} = m_{a3} = m_{a4}$$

$$m_{g5} = m_{g6} = m_{gt}$$

$$\text{则 } h_{g5} = h_{g6}$$

式中质量流量 m_{f4} 、 m_{a4} 、 m_{g5} 和温度 T_{a4} 、 T_{f4} 应直接测量得出。根据燃烧效率 η_{fc} ,并估算出燃烧室散热损失 Q_{rc} ,则可按上式计算出 h_{g5} ,从而根据“燃气热力性质表”便可确定透平进气温度控制参考值 T_{g6} 。

8.7.2 如果不能直接测得空气或燃气的质量流量,可用测得的输出轴供给负荷的功率代替式(9)中的 P_s 间接计算流量,然后再按 8.7.1 给出的方法计算透平进气温度的参考值。

8.7.3 对分轴燃气轮机的燃气发生器部分,其压气机透平的燃气进口温度可根据压气机及其透平之间

的功率平衡来确定,其方程式为式(15):

$$m_{a1}(h_{a3} - h_{a1}) = m_{g5}(h_{g5} - h_{g5.1}) - Q_{\text{mct}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

式中:

h_{a3} ——在温度 T_{a3} 下压气机出口空气的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

m_{g5} ——透平进口的燃气流量,单位为千克每秒(kg/s);

$$m_{g5} = m_{a1} + m_{f4} - m_e$$

$h_{g5.1}$ ——在温度 $T_{g5.1}$ 下压气机透平出口燃气的比焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

Q_{mct} ——压气机和压气机透平的机械损失,单位为千瓦(kW)。

由式(15)整理得到式(16):

$$h_{g5} = [(h_{a3} - h_{a1}) + Q_{\text{mct}}/m_{a1}]/[1 + (m_{f4} - m_e)/m_{a1}] + h_{g5.1} \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中: h_{a1} 、 h_{a3} 、 $h_{g5.1}$ 分别由直接测得的对应的温度查表确定,对于 $(m_{f4} - m_e)/m_{a1}$ 与 Q_{mct}/m_{a1} 两项,只取一次近似就够了。求出 h_{g5} 再按燃气热力性质表查得压气机透平进气温度参考值 T_{g5} 。

8.7.4 其他方法

8.7.4.1 空气或燃气流量还可采用其他方法间接确定。例如通过燃料或燃气成分的分析数据取得空气和燃料的流量比。但为了使排气分析具有所要求的精度,应注意选择可靠的分析方法。

8.7.4.2 在某些情况下,只要合同双方对透平(多变或等熵)效率达成协议,就可根据透平进、出口的压力测量值及透平排气温度的测量值来确定透平的进气温度的参考值。

8.7.4.3 也可通过测量透平总功率(轴端功率加压气机消耗功率),然后将相应的温差与测得的排气平均温度相加,得出透平进气温度的参考值。

9 试验报告

试验报告应提供足够的资料,证明试验的全部目的已经达到。试验报告形式应包括下列诸方面。

9.1 首页应包含:

- a) 报告编号;
- b) 试验名称(如果有分报告,应附总试验报告名称);
- c) 试验日期;
- d) 试验地点;
- e) 合同号、买方和卖方的名称;
- f) 制造厂名称、燃气轮机牌号和机组标记;
- g) 用户;
- h) 试验负责单位和负责人;
- i) 试验报告编写人及所在单位名称;
- j) 试验报告编写日期。

9.2 目次页应列出报告内容细目序号、标题和所在页次。

9.3 摘要应简要地陈述试验目的、结果和结论。

9.4 试验报告的详细内容包括下列资料:

- a) 试验目的、合同规定的试验项目及其他具体内容;
- b) 循环的说明或示意图;
- c) 产品主要性能保证值;
- d) 如属可行,对机组从初次起动以来的运行情况作简要说明;
- e) 试验现场主要设备布置及测点位置说明;
- f) 测试仪器和设备的精度等级和校准曲线说明;
- g) 扼要说明有关的测量和观测的情况;

- h) 合同双方专门商定的允许偏差、误差；
 - i) 如果试验条件与规定条件不同,需要按规定条件进行修正,并给出修正结果；
 - j) 扼要指出计算方法；
 - k) 试验结果的表格和曲线；
 - l) 讨论试验结果和结论。
-

www.bzxz.net

免费标准下载网