

ICS 27.100
F 22
备案号: 50072-2015



中华人民共和国电力行业标准

DL / T 1427 — 2015

联合循环余热锅炉性能试验规程

Gas turbine heat recovery steam generators performance test codes
(ASME PTC 4.4—2008, Gas turbine heat recovery steam generators
performance test codes, IDT)

2015-04-02 发布

2015-09-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 III

1 目的和范围 1

 1.1 目的 1

 1.2 范围 1

 1.3 试验不确定度 1

2 规范性引用文件 2

3 术语定义、符号 2

 3.1 术语定义 2

 3.2 符号 8

 3.3 典型的试验系统图 12

4 导则 16

 4.1 概述 16

 4.2 试验计划 17

 4.3 试验前的协议 19

 4.4 试验准备 20

 4.5 试验执行 21

 4.6 试验结果的计算、分析和报告 23

5 测量仪表和测量方法 25

 5.1 概述 25

 5.2 总则 25

 5.3 温度测量 28

 5.4 压力测量 32

 5.5 流量测量 33

 5.6 液态和气态燃料的取样 35

 5.7 功率测量 36

 5.8 数据采集和处理 36

6 计算 38

 6.1 概述 38

 6.2 中间值计算 38

 6.3 采用余热锅炉能量平衡计算烟气流量 47

 6.4 采用燃气轮机能量平衡计算燃气轮机排气流量 51

 6.5 加权蒸汽流量 51

 6.6 试验工况修正到保证工况 52

7 结果报告 54

 7.1 总则 54

 7.2 摘要 55

 7.3 概述 55

 7.4 试验数据 55

7.5 数据整理、修正和结果 55

7.6 附录 55

8 不确定度分析 56

8.1 概述 56

8.2 不确定度计算 56

8.3 确定系统误差的指南 58

附录 A（资料性附录） 余热锅炉能量平衡计算算例 60

附录 B（资料性附录） 燃气轮机能量平衡计算算例 67

附录 C（资料性附录） 不确定度计算算例 75

附录 D（资料性附录） 燃料显热 96

附录 E（资料性附录） 气体焓值公式推导 98

附录 F（资料性附录） 余热锅炉热损失 104

附录 G（资料性附录） 旁路烟气挡板泄漏 107

附录 H（规范性附录） 采用燃气轮机能量平衡计算燃气轮机排气流量 108

附录 I（资料性附录） 本标准与 ASME PTC 4.4—2008 相比的结构变化对照表 110

参考文献 111

前 言

本标准使用翻译法等同采用 ASME PTC 4.4—2008《联合循环余热锅炉性能试验规程》。

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准做了下列编辑性修改：

- 单位更改，取消英制或把英制改为法定单位，全部计算公式更换为法定单位制公式，删除了 ASME PTC 4.4—2008 中 2-3 单位转换表；
- 改正了 ASME PTC 4.4—2008 中 5-2.2.4 计算第 9 步的公式和 5-2.3.3 第 7 步的公式印刷错误；
- 改正了 ASME PTC 4.4—2008 中 5-3.3 余热锅炉热损失计算公式的印刷错误；
- 删除了 ASME PTC 4.4—2008 中附录 H：不确定度计算表格；
- 增加资料性附录 I：本标准与 ASME PTC 4.4—2008 相比的结构变化对照表。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由中国电力行业联合循环发电标准化技术委员会归口。

本标准负责起草单位：西安热工研究院有限公司。

本标准参加起草单位：杭州锅炉集团股份有限公司。

本标准起草人：孟桂祥、施延洲、姚胜、王祝成、赵剑云、吴生来、刘振琪、张传彬、陈海东、孟勇、赵永坚。

本标准为首次制定。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

联合循环余热锅炉性能试验规程

1 目的和范围

1.1 目的

本标准给出了用于回收燃气轮机排气热量的余热锅炉的性能试验方法和程序,可包括补燃型余热锅炉。采用本标准提供的标准试验程序,可获得与目前工程知识和实践相一致的最高精确度的试验结果。

- 1) 本标准的目的是确定以下性能参数:
 - a) 规定工况下余热锅炉的出力;
 - b) 燃气轮机排气和补燃输入的能量;
 - c) 烟气侧压降;
 - d) 蒸汽或水侧压降。
- 2) 本标准提供将试验工况下的性能修正到规定的运行工况下的方法,确定上述所列的任一个或所有的性能参数,可用于以下目的:
 - a) 验证设备实际性能与保证性能是否相符;
 - b) 在基准工况下比较上述性能参数;
 - c) 比较不同的运行工况或运行方式;
 - d) 确定余热锅炉某个部件或受热面的特定性能;
 - e) 比较燃用不同燃料时的性能;
 - f) 确定更换设备的影响。

1.2 范围

本标准涉及的蒸汽锅炉的主要功能是回收燃气轮机排气的余热。本标准的方法也可用于以下其他余热回收装置的性能试验:

- 1) 仅加热水的余热回收装置;
- 2) 除水以外的其他工质的余热回收装置;
- 3) 除燃气轮机排气余热外的其他热气源的余热回收装置;
- 4) 可用新鲜空气燃烧的余热锅炉。

本标准不包含以下试验范围:

- 1) 主要功能不是回收燃气轮机排气余热的燃煤蒸汽锅炉;
- 2) 辅助设备,如泵和风机性能;
- 3) 除氧器性能;
- 4) 设备噪声;
- 5) 气体污染物排放;
- 6) 蒸汽纯度。

1.3 试验不确定度

本标准要求按照 ASME PTC19.1 的规定进行试验不确定度分析,详见第 8 章所述内容。试验前不确定度分析用于编制具体的试验方案,以满足约定的不确定度目标值。第 4 章和第 5 章中给出了各种机组配置和性能参数的典型试验不确定度范围。

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。

AGA Report No.8 天然气和其他有关碳氢气体的压缩系数 (Compressibility factors of natural gas and other related hydrocarbon gases)

ASME MFC-2M 封闭管道中流量测量的不确定度 (Measurement uncertainty for fluid flow in closed conduits)

ASME PTC4 锅炉性能试验规程 (Performance test code for fired steam generations)

ASME PTC6.2—2005 联合循环汽轮机性能试验规程 (Steam turbines in combined cycles)

ASME PTC19.1 测量不确定度 (Measurement uncertainty)

ASME PTC 19.2 压力仪表和装置的测量 (Pressure measurement instruments and apparatus)

ASME PTC19.3 温度测量 (Temperature measurement)

ASME PTC19.5 流量测量 (Flow measurement)

ASME PTC 22 燃气轮机性能试验规程 (Performance test code on gas turbines)

ASTM D445 透明和不透明液体动黏度试验方法 (以及动态黏度的计算) [Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity)]

ASTM D1480 用宾汉比重瓶测定黏性材料密度和相对密度 (比重) 的试验方法 [Standard test method for density and relative density (specific gravity) of viscous materials by Bingham pycnometer]

ASTM D1945 气相色谱法分析天然气的测试方法 (Test method for analysis of natural gas by gas chromatography)

ASTM D3588 气体燃料发热量、压缩系数及相对密度的计算方法 (Standard practice for calculating heat value, compressibility factor, and relative density of gaseous fuels)

ASTM D4057 石油和石油产品手工取样规程 (Standard practice for manual sampling of petroleum and petroleum products)

ASTM D4809 用弹式量热计测定液烃燃料发热量的试验方法 (Standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter)

ASTM D5287 气体燃料自动取样规程 (Standard practice for automatic sampling of gaseous fuels)

ASTM E220 用比较技术校准热电偶的试验方法 (Standard test method for calibration of thermocouples by comparison techniques)

ASTM E230 标准化热电偶用温度电动势图表 [Standard specification and temperature electromotive force (EMF) tables for standardized thermocouples]

ANSI/ISA S51.1 过程仪表术语 (Process instrumentation terminology)

GPA 2145-03 天然气工业碳氢化合物及其他化合物的物理常数 (Physical constants for hydrocarbons & other compounds of interest to the natural gas industry)

GPA 2166 气相色谱法分析天然气样品的取样方法 (Obtaining natural gas samples for analysis by gas chromatography)

IAPW-IF97 国际水和水蒸气性质学会工业用计算公式 1997

3 术语定义、符号

3.1 术语定义

3.1.1

绝对压力 absolute pressure

表压和大气压力之和，该压力值大于零。

3.1.2

酸露点 acid dew point

烟气中酸的凝结点温度。一般来说，硫酸被认为是烟气中需要确定酸露点的最关键化合物。

3.1.3

环境温度 ambient temperature

余热锅炉周围大气的温度。

3.1.4

氨水喷射格栅 ammonia injection grid

指氨水注入燃气轮机排气中的管网系统，在催化剂的作用下氨水与 NO_x 反应，生成氮气和水。

3.1.5

接近点温度 approach temperature

汽包中水的饱和温度与进入汽包的水的温度之差。

3.1.6

减温 attemperation

参见 3.1.23 过热减温。

3.1.7

辅助燃烧 auxiliary firing

在余热锅炉中进行辅助燃烧，以提升燃气轮机排气温度和增加蒸发量。

3.1.8

辅助系统 auxiliary system

采用除蒸汽或水以外的流体与燃气轮机排气进行能量交换的任何系统。这些系统包括空气加热器、空气冷却器、燃料加热器等。

3.1.9

基本负荷 base load

燃气轮机按照控制曲线运行，标称为 100% 输出功率。

3.1.10

排污 blowdown

采用蒸发器排水方式来控制水中的固体物溶解浓度。

3.1.11

燃烧器辅助空气 burner auxiliary air

燃烧器助燃用空气。

3.1.12

旁路 bypass

允许部分或全部流体绕过某些受热面的流体通道，通常正常运行时流体应流过这些受热面。

3.1.13

旁路挡板 bypass damper

用于把燃气轮机排气从余热锅炉旁路引至大气的烟气挡板。

3.1.14

出力 capacity

在给定蒸汽温度和压力下的蒸汽流量。

3.1.15

逐级排污 cascading blowdown

将高压排污水排入各低压排污水管道的排污系统。

3.1.16

CO 催化剂 CO catalyst

一种用于减少燃气轮机排气中 CO 含量的催化剂。

3.1.17

凝结水 condensate

来自凝汽器的凝结水。

3.1.18

凝汽器 condenser

用于凝结从汽轮机排出的蒸汽的容器。

3.1.19

连续排污 continuous blowdown

非间断性排放蒸发器里的水来控制固体不溶物体浓度。

3.1.20

除氧 deaeration

除去水中氧气和其他溶解的气体。

3.1.21

除氧器 deaerator

除去水中溶解气体的压力容器。

3.1.22

过热蒸汽减温器 desuperheater

温度较低的蒸汽或水与温度较高的蒸汽混合，以降低蒸汽温度的混合容器。

3.1.23

过热减温 desuperheating

通过用水或较低温度的蒸汽与过热蒸汽混合的方法来降低蒸汽的温度。

3.1.24

烟道燃烧器 duct burner

布置在烟道上的用于辅助燃烧或补燃的燃烧器系统。

3.1.25

省煤器 economizer

对引入蒸发器前的除氧给水进行加热的传热部件。

3.1.26

蒸发器 evaporator

使给水蒸发成蒸汽的传热部件。

3.1.27

给水 feedwater

进入蒸发器或省煤器的水。

3.1.28

给水加热器 feedwater heater

参见 3.1.47 预热器。

3.1.29

闪蒸 flashing

将饱和水排入较低的压力容器而产生蒸汽的过程。

3.1.30

烟气端差 gas approach temperature

传热部件进口或出口烟气温度与对应流体温度之差。

3.1.31

烟气侧静压降 gas side static pressure drop

试验边界处测量的烟气静压和大气压力之差。

3.1.32

燃气轮机发电机 gas turbine generator; GTG

燃气轮机和发电机的组合。

3.1.33

燃气轮机排气 gas turbine exhaust; GTE

燃气轮机出口排放的烟气，该烟气流过余热锅炉。

3.1.34

加热器 heater

加热除水或蒸汽外的其他流体的换热设备。

3.1.35

受热面 heating surface

暴露于加热介质（燃气轮机排气或热烟气）中，用于吸收热量并把热传递给受热介质（水、蒸汽或空气）的换热面。

3.1.36

高位发热量 higher heating value; HHV

单位质量的燃料在 15.56℃ 下燃烧，并且将燃烧后的产物冷却到 15.56℃ 时所获得的总热量。

3.1.37

整体式除氧器 integral deaerator

与低压汽包直接相连的除氧器。

3.1.38

联箱 interstage

连接传热部件的箱体。

3.1.39

低位发热量 lower heating value; LHV

燃料的高位发热量（HHV）减去燃烧产物冷却至 15.56℃ 时的汽化潜热。

3.1.40

多压余热锅炉 multiple pressure HRSG

能输出多个压力等级蒸汽的余热锅炉。

3.1.41

部分负荷 part load

燃气轮机运行工况下所产生的功率小于基本负荷。

3.1.42

分压力 partial pressure

混合气体每一种组分所产生的压力；混合气体的总压力等于各组分的分压力之和。

3.1.43

尖峰负荷 peak load

运行工况下燃气轮机发电功率达到最大值。

3.1.44

备用汽源 **pegging steam**

用于维持低压蒸汽系统中最低蒸汽压力的高压蒸汽。

3.1.45

蒸发器节点 **pinch point (evaporator)**

蒸发器烟气出口温度和汽包压力下水的饱和温度之差。

3.1.46

节点温度 **pinch temperature**

燃气轮机排气与工质之间最小的终端温差。

3.1.47

预热器 **preheater**

用于加热含氧凝结水的传热部件。

3.1.48

省煤器再循环 **economizer recirculation**

将省煤器或给水预热器出口的部分热水重新流回到其入口，以提高入口水温。

3.1.49

基准温度 **reference temperature**

所有物性均基于这个被选定的温度。

3.1.50

再热器 **reheater**

将来自汽轮机排汽后的蒸汽加热到更高温度的传热部件。

3.1.51

分离式除氧器 **remote deaerator**

与余热锅炉分开布置的除氧器。

3.1.52

饱和温度 **saturation temperature**

在给定压力下，水蒸发成蒸汽的温度。

3.1.53

选择性催化还原系统 **SCR system**

用于降低燃气轮机排气中 NO_x 含量的选择性催化还原系统。

3.1.54

单压余热锅炉 **single pressure HRSG**

仅输出单一压力蒸汽的余热锅炉。

3.1.55

烟囱 **stack**

将燃气轮机排气排放至大气的竖直通道。

3.1.56

烟囱挡板 **stack damper**

当余热锅炉停运行时，为保存热量而设置的关闭挡板。

3.1.57

标准空气组分（干空气摩尔基准） **standard air composition (dry air molar basis)**

氮气 78.084 0%，氧气 20.947 6%，氩气 0.936 5%，二氧化碳 0.031 9%。

3.1.58

标准工况 **standard conditions**

压力 101.325kPa 和温度 15.56℃时的大气环境。

3.1.59

标准气体组分名称、分子式和分子量 **standard gas compound name, symbols and molecular weights**

标准气体组分名称、分子式和分子量见表 1。

表 1 标准气体组分名称、分子式和分子量

名 称	分 子 式	分 子 量 kg/kmol
氟气	Ar	39.948 00
甲烷	CH ₄	16.047 26
乙烷	C ₂ H ₆	30.069 64
乙烯	C ₂ H ₄	28.053 76
丙烷	C ₃ H ₈	44.096 52
丙烯	C ₃ H ₆	42.080 64
异丁烷	C ₄ H ₁₀	58.123 40
正丁烷	C ₄ H ₁₀	58.123 40
丁烯	C ₄ H ₈	56.107 52
异戊烷	C ₅ H ₁₂	72.150 28
正戊烷	C ₅ H ₁₂	72.150 28
戊烯	C ₅ H ₁₀	70.134 40
己烷	C ₆ H ₁₄	86.177 16
一氧化碳	CO	28.010 40
二氧化碳	CO ₂	44.009 80
硫化氢	H ₂ S	34.081 88
氢气	H ₂	2.015 88
水	H ₂ O	18.015 28
氦气	He	4.002 60
氮气	N ₂	28.013 48
二氧化硫	SO ₂	64.064 80
氧气	O ₂	31.998 80

3.1.60

蒸汽旁路（汽轮机） **steam bypass (steam turbine)**

旁路汽轮机入口蒸汽到冷凝器或其他冷源的通道。

3.1.61

蒸汽旁路（过热器） **steam bypass (superheater)**

旁路过热器或部分过热器的通道。

3.1.62

蒸汽纯度 **steam purity**
溶解于蒸汽中的总溶解固体量（TDS）。

3.1.63

蒸汽品质 **steam quality**
汽水混合物中蒸汽的质量百分比。

3.1.64

过热度 **superheat**
蒸汽温度与相应压力下的饱和温度的差值。

3.1.65

过热蒸汽 **superheated steam**
蒸汽温度高于相应压力下的饱和温度的蒸汽。

3.1.66

过热器 **superheater**
将蒸汽加热到更高温度的传热部件。

3.1.67

补燃 **supplementary firing**
参见 3.1.7 辅助燃烧。

3.1.68

水（给水）预热器 **water preheater (feedwater)**
参见 3.1.47 预热器。

3.2 符号

本标准使用的符号见表 2。

表 2 本标准使用的符号

符 号	名 称	单 位
B	温度测量网格的系统不确定度	—
$B_{T/C}$	温度测量仪表的系统不确定度	—
B_S	温度测量空间的系统不确定度	—
B_W	加权系统不确定度	—
q	出力	kg/h
C	流出系数	—
q_1	第一种能量平衡方法得到的出力	kg/h
q_2	第二种能量平衡方法得到的出力	kg/h
q_w	加权出力	kg/h
Δq	出力差值	kg/h
d	流量元件节流孔径	m
D	管径	m
Δp_{Cor}	修正后压降	kPa

表 2 (续)

符 号	名 称	单 位
Δp_{SCor}	修正后蒸汽压降	kPa
Δp_{STest}	试验蒸汽压降	kPa
Δp_{Test}	试验压降	kPa
Δp_{WCor}	修正后水侧压降	kPa
Δp_{WTest}	试验水侧压降	kPa
g	当地重力加速度	m/s ²
h_{A}	空气焓值	kJ/kg
h_{AIN}	进口空气焓值	kJ/kg
h_{AOUT}	出口空气焓值	kJ/kg
h_{AR}	氩气的焓值	kJ/kg
h_{AS}	雾化蒸汽的焓值	kJ/kg
h_{BLD}	抽出空气的焓值	kJ/kg
h_{CO_2}	二氧化碳的焓值	kJ/kg
h_{FS}	燃料气/油显热	kJ/kg
h_{G}	烟气的焓值	kJ/kg
h_{GIN}	余热锅炉进口烟气的焓值	kJ/kg
h_{GOUT}	余热锅炉出口烟气的焓值	kJ/kg
$h_{\text{H}_2\text{O}}$	水的焓值	kJ/kg
h_i	组分 i 的焓值	kJ/kg
h_{N_2}	氮气的焓值	kJ/kg
h_{O_2}	氧气的焓值	kJ/kg
h_{SO_2}	二氧化硫的焓值	kJ/kg
HR	比湿度	—
HR_{REL}	相对湿度	%
HR_{SAT}	饱和比湿度	—
ΔH	传压管高度差	m
HV_{NET}	净发热量	kJ/kg
Δp_{c}	修正后的差压	Pa
Δp_{m}	测量的差压	Pa
L	长度	m
x_{Ar}	氩气的摩尔分数	—

表 2 (续)

符 号	名 称	单 位
x_{CO_2}	二氧化碳的摩尔分数	—
$x_{\text{H}_2\text{O}}$	水的摩尔分数	—
x_i	组分 i 的摩尔分数	—
x_{N_2}	氮气的摩尔分数	—
x_{O_2}	氧气的摩尔分数	—
x_{SO_2}	二氧化硫的摩尔分数	—
M_{AVG}	平均分子量	—
M_{FG}	燃料气的分子量	—
M_{GRef}	参考工况下的烟气平均分子量	—
M_{GTest}	试验工况下的烟气平均分子量	—
M_i	组分 i 的分子量	—
N	样本数	—
p_{ATM}	大气压力	MPa
p_{ATMRef}	参考工况下的大气压力	MPa
p_{ATMTest}	试验工况下的大气压力	MPa
p_v	水的汽化压力	MPa
p_w	水的分压力	MPa
p_1	上游的压力	MPa
Φ_{AA}	补燃空气热流量	kJ/h
Φ_{AS}	雾化蒸汽的热流量	kJ/h
Φ_{B}	压气机抽出空气的热流量	kJ/h
Φ_{DB}	烟道燃烧器热量输入	kJ/h
Φ_{F}	燃料热量输入	kJ/h
Φ_{GIN}	进入的烟气热流量	kJ/h
Φ_{GOUT}	流出的烟气热流量	kJ/h
$Q_{\text{HL}, \%}$	热损失百分数	%
Φ_{HL}	热损失	kJ/h
Φ_1	注入蒸汽或水的热流量	kJ/h
q_m	质量流量	kg/h
Φ_{p}	燃气轮机输出功率的能量	kJ/h
Φ_{WFIN}	工质进入系统的热流量	kJ/h
Φ_{WFOUT}	工质流出系统的热流量	kJ/h

表 2 (续)

符 号	名 称	单 位
Re	雷诺数	—
S_S	空间平均温度的标准偏差	°C
S_x	样本的标准偏差	—
$S_{\bar{x}}$	平均样本的标准偏差	—
S_w	加权随机不确定度	—
t	自由度为 $(N-1)$ 时的学生氏 t 分布值	—
t_{DB}	干球温度	°C
t_F	燃料温度	°C
t_G	烟气温度	°C
t_{WB}	湿球温度	°C
U	不确定度	kg/h
U_1	基于第一种能量平衡方法的不确定度	kg/h
U_2	基于第二种能量平衡方法的不确定度	kg/h
U_W	加权不确定度	kg/h
V_{FG}	标准工况下燃料气的容积流量	m ³ /h
q_A	空气流量	kg/h
q_{AA}	补燃空气流量	kg/h
q_{AC}	用于燃烧的湿空气流量	kg/h
q_{AS}	雾化蒸汽流量	kg/h
q_{BA}	平衡湿空气流量	kg/h
q_{BLD}	燃气轮机抽出空气流量	kg/h
q_{DB}	烟道燃烧器燃料流量	kg/h
q_{FG}	燃料气流量	kg/h
q_{FO}	燃油流量	kg/h
q_{GIN}	进入余热锅炉的烟气流量	kg/h
q_{GOUT}	流出余热锅炉的烟气流量	kg/h
q_{GRef}	参考工况下的烟气流量	kg/h
q_{GTest}	试验工况下的烟气流量	kg/h
q_{GTF}	燃气轮机燃料流量	kg/h
q_{SRef}	参考工况下的蒸汽流量	kg/h
q_{STest}	试验工况下的蒸汽流量	kg/h
q_{WRef}	参考工况下的水流量	kg/h
q_{WTest}	试验工况下的水流量	kg/h

表 2 (续)

符 号	名 称	单 位
w_{Ar}	氩气质量分数	—
w_C	燃油中碳的质量分数	—
w_{CO_2}	二氧化碳质量分数	—
w_{DA}	干空气的质量分数	—
w_H	燃油中氢的质量分数	—
w_{H_2O}	水的质量分数	—
w_{N_2}	氮气的质量分数	—
w_O	燃油流量	kg/h
w_{O_2}	氧气的质量分数	—
w_s	燃油中硫的质量分数	—
w_{SO_2}	二氧化硫的质量分数	—
$q_{M, Ar}$	氩气的摩尔流量	kmol/h
q_{M, CO_2}	二氧化碳的摩尔流量	kmol/h
$q_{M, FG}$	燃料气的摩尔流量	kmol/h
q_{M, H_2O}	水的摩尔流量	kmol/h
q_{M, N_2}	氮气的摩尔流量	kmol/h
q_{M, O_2}	氧气的摩尔流量	kmol/h
q_{M, SO_2}	二氧化硫的摩尔流量	kmol/h
$\Delta q_{M, O_2}$	氧气的摩尔流量变化量	kmol/h
x_k	测量数据	—
\bar{x}	数据的平均值	—
β	流量节流元件喉部直径与管道内径之比	—
Δp	差压	Pa
α	膨胀系数	—
ρ	密度	kg/m ³
ρ_{FG}	标准工况下燃料气的密度	kg/m ³
ρ_{SRef}	参考工况下的蒸汽平均密度	kg/m ³
ρ_{STest}	试验工况下的蒸汽平均密度	kg/m ³

3.3 典型的试验系统图

图 1~图 4 是一些典型的系统布置。在试验方案中宜根据具体项目给出试验系统图。这些图中进、出系统流体的符号说明见表 3。

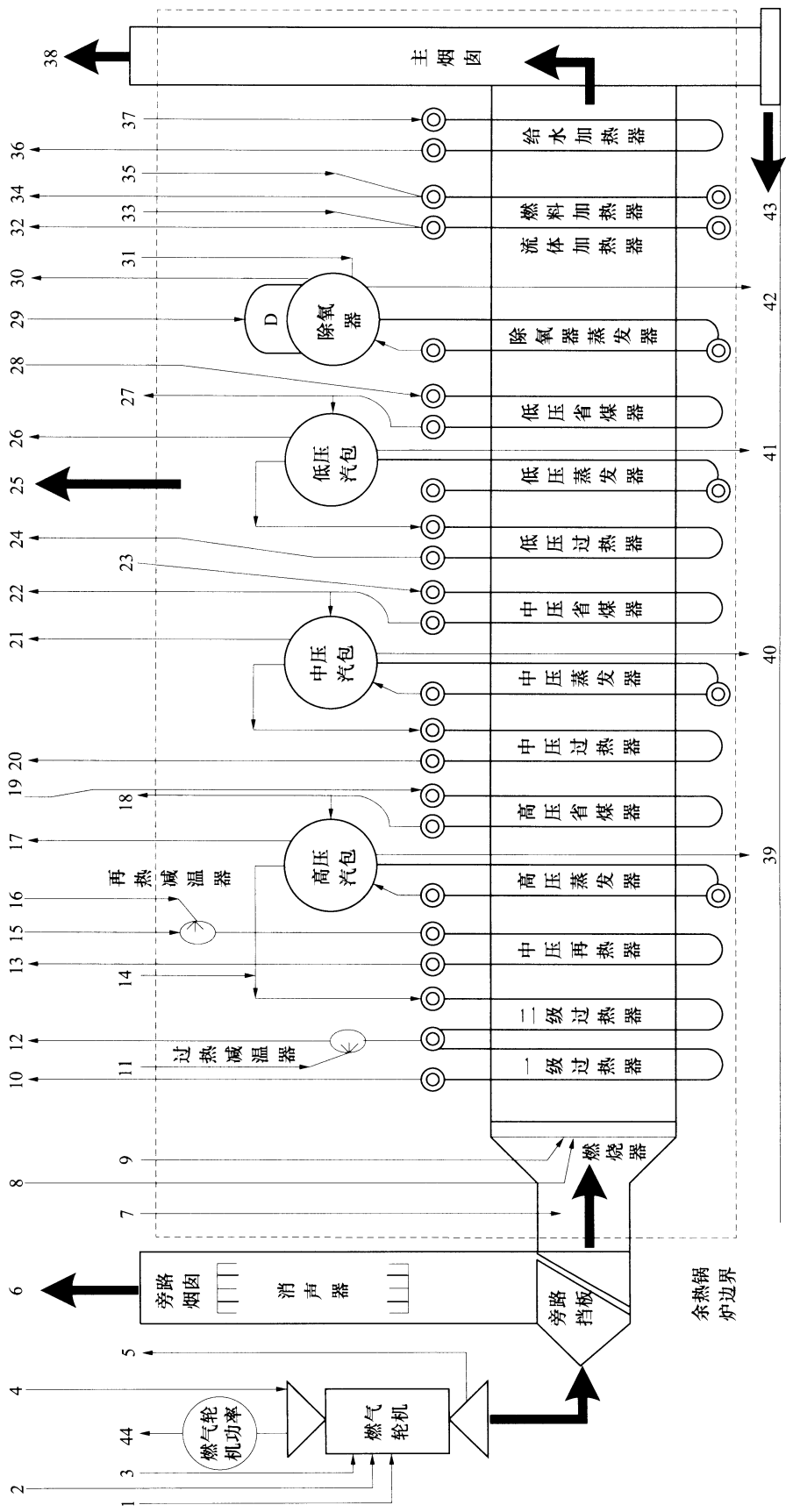


图1 典型的燃气轮机余热锅炉示意图

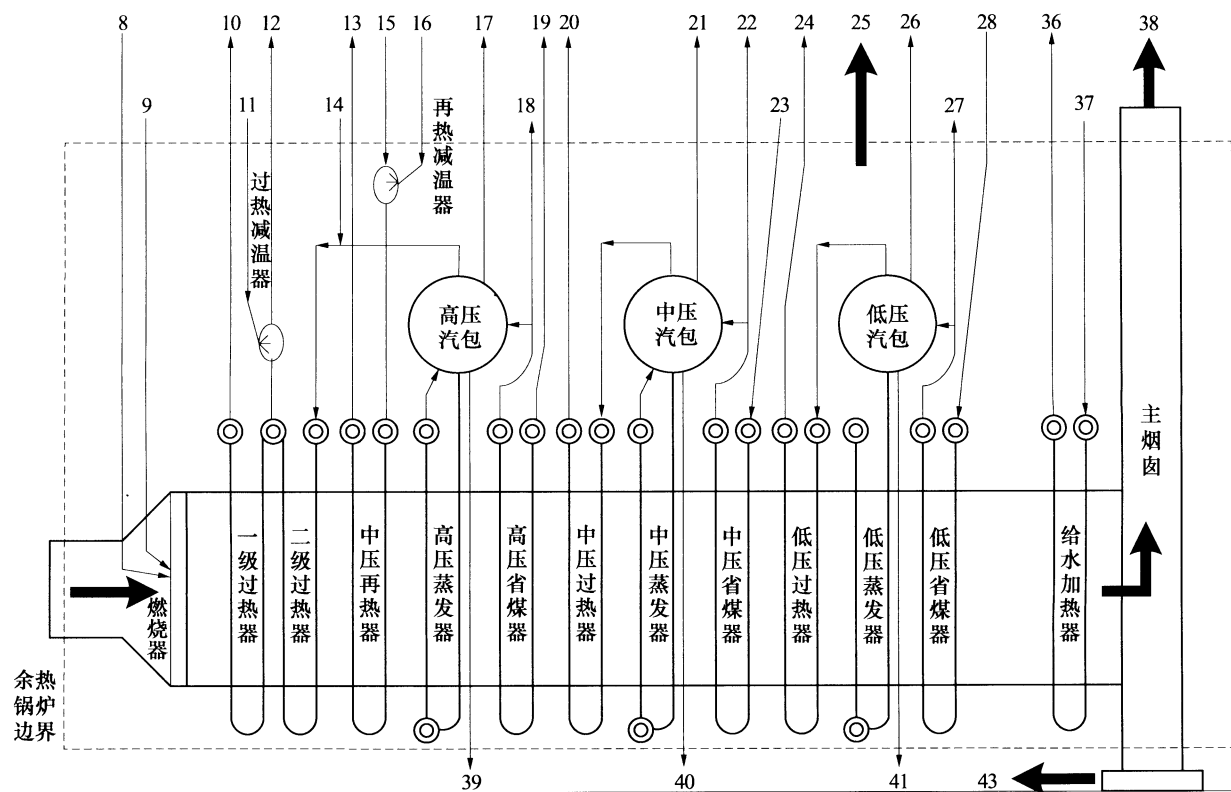


图 2 典型的三压补燃余热锅炉示意图

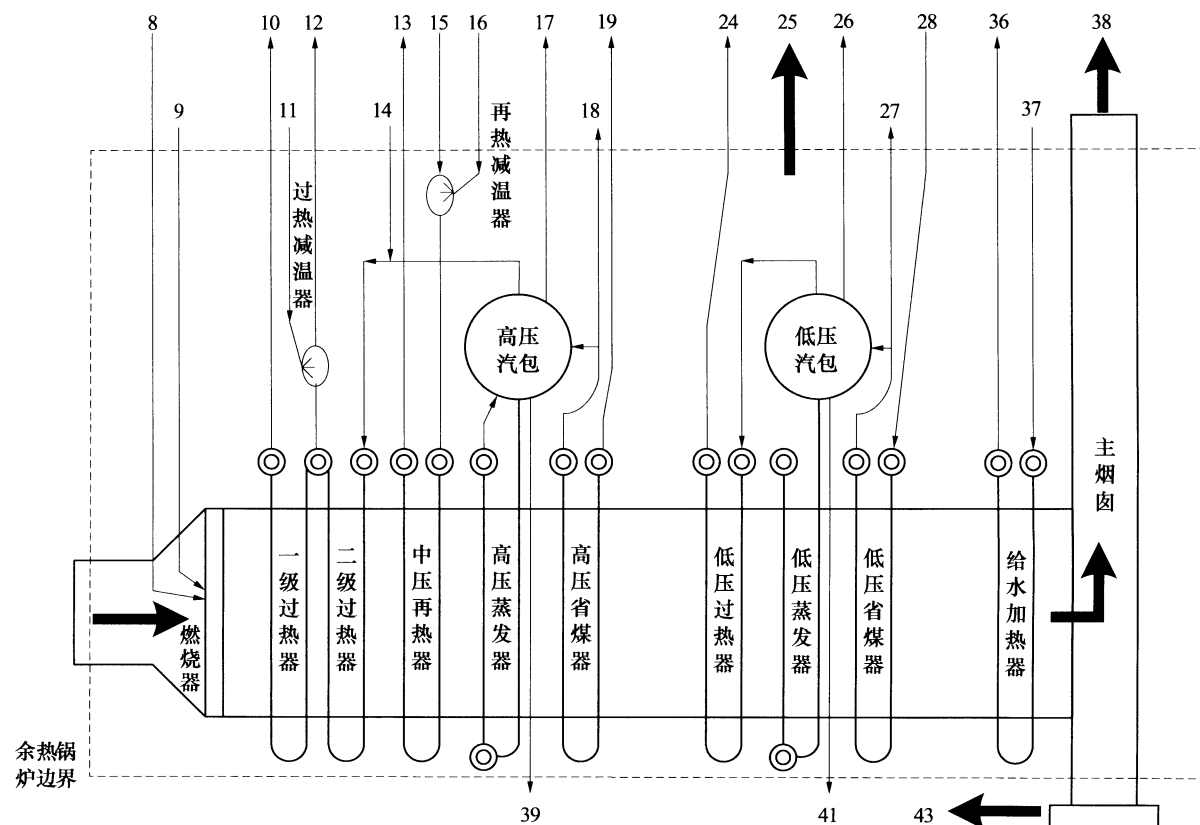


图 3 典型的带给水加热器和补燃的双压补燃余热锅炉示意图

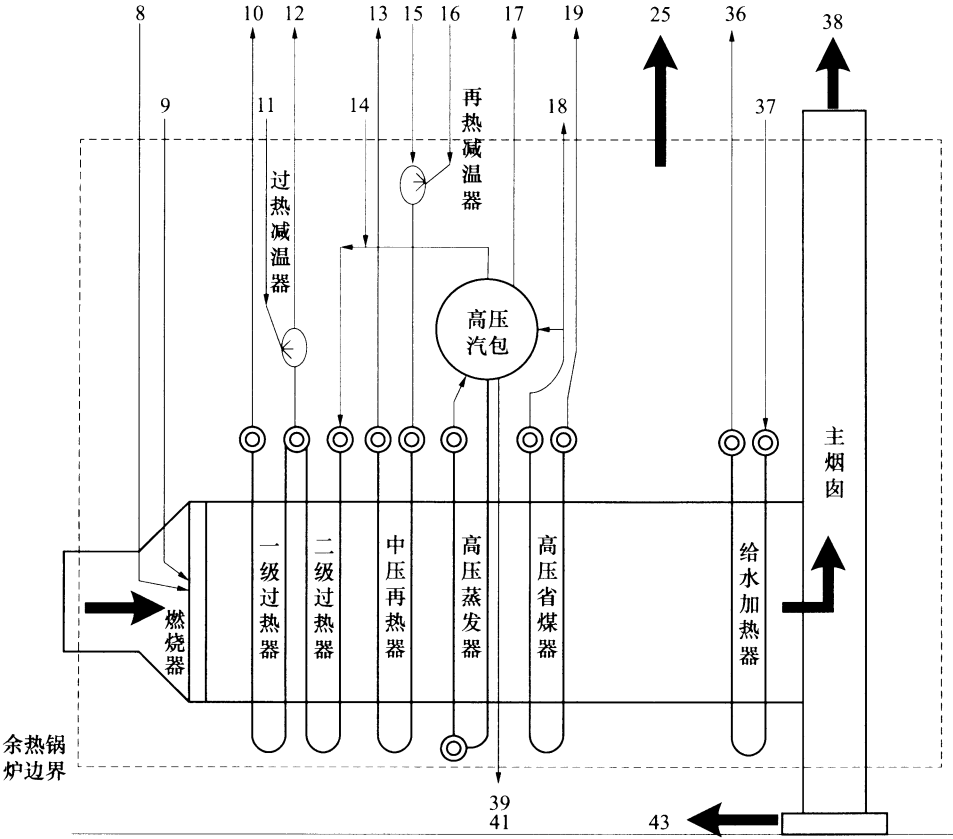


图 4 典型的带给水加热器和补燃的单压补燃余热锅炉示意图

表 3 典型试验系统图中符号说明

序 号	名 称	流 动 方 向
1	进入燃气轮机的燃料	进
2	注入燃气轮机的蒸汽	进
3	注入燃气轮机的水	进
4	进入燃气轮机燃烧空气	进
5	燃气轮机排气泄漏的烟气	出
6	旁路烟道泄漏的烟气	出
7	进入余热锅炉的燃气轮机排气	进
8	燃烧器辅助空气	进
9	辅助燃烧器燃料	进
10	高压蒸汽	出
11	高压蒸汽减温器喷水	进
12	辅助高压蒸汽	出
13	进入中压缸的热再热蒸汽	出
14	进入余热锅炉的高压辅助蒸汽	进
15	高压缸排汽进入再热器的冷再热蒸汽	进

表 3 (续)

序 号	名 称	流 动 方 向
16	再热减温器喷水	进
17	高压饱和蒸汽输出	出
18	高压省煤器再循环	出
19	进入高压系统的给水	进
20	中压过热蒸汽	出
21	中压饱和蒸汽输出	出
22	中压省煤器再循环水	出
23	进入中压系统的给水	进
24	低压过热蒸汽	出
25	余热锅炉边界范围内的热损失	出
26	低压饱和蒸汽	出
27	低压省煤器再循环水	出
28	进入低压系统的给水	进
29	进入余热锅炉的凝结水或预热水	进
30	低压蒸汽	出
31	进入除氧器的备用蒸汽	进
32	流出传热部件的任何其他流体	出
33	流入传热部件的任何其他流体	进
34	气体燃料加热后流出余热锅炉	出
35	气体燃料进入余热锅炉加热	进
36	给水加热器出口的预热水	出
37	进入给水加热器的凝结水	进
38	余热锅炉排气至烟囱	出
39	高压汽包排污	出
40	中压汽包排污	出
41	低压汽包排污	出
42	高、中压和低压给水泵进水	出
43	排放烟气中水和其他凝结物	出
44	燃气轮机损失	出

4 导则

4.1 概述

本条款的目的是提供余热锅炉性能试验的导则，并给出性能试验规划和实施的步骤，以及评估余热

锅炉性能的方法。

本标准根据划定的余热锅炉和燃气轮机边界分别建立能量平衡方程，以烟气流量、温度和组分的形式来确定余热锅炉的主要输入热量。本标准也参照 ASME PTC22 中有关燃气轮机能量平衡方法。这些输入热流量分别用于确定余热锅炉修正后的出力，根据这些出力的不确定度采用加权方法来合成一个出力的不确定度。

本标准详述了实施试验的程序，可以满足本标准第 1 章给出的试验目的，同时保证编制出合适的试验方案和使用正确的性能计算。在本标准中详述的试验程序代表了当前用于确定余热锅炉性能的先进的工程技术经验。余热锅炉的特性和各种类型的系统设计布置会导致试验结果的不确定度与其期望值有较大差别。例如一个带补燃的余热锅炉，提高补燃率将引起中、低蒸汽流量的大幅下降，由此增大试验结果的不确定度。当遵循本标准所给出的系统配置类型进行试验时，典型的试验结果不确定度范围见表 4。由于可能潜在较大的不确定度范围，本标准要求试验各方就所需的试验结果不确定度达成协议。

表 4 典型的试验结果不确定度范围

系统配置类型	高压蒸汽流量	中压蒸汽流量	低压蒸汽流量	烟气侧压降	蒸汽和水侧压降
单压	0.70%~2.0%	—	—	99.6Pa~ 199.3Pa	4.0%~8.0%
双压	0.70%~2.0%	—	1.5%~5.0%		
三压	0.70%~2.5%	1.0%~4.0%	1.5%~7.0%		
三压，补燃再热	0.70%~1.5%	1.0%~15.0%	1.5%~15.0%		

4.2 试验计划

试验计划应在试验前编制完成。在进行试验前，试验方案应准备好并达成一致意见。试验方案应给出试验进度计划、各方的职责和实施试验的程序，并详述和澄清所有试验前达成的协议（试验前协议内容见 4.3）。

4.2.1 试验方案

在试验前应编制详细的试验方案，试验方案应经各方同意批准，方案内容应详述试验准备、执行及报告编写等内容。试验方案应体现所有合同中的要求，如试验目的、性能保证值以及各方对本标准有关解释的理解。试验方案还应澄清合同遗漏或模糊之处。

4.2.2 各方的责任

试验各方应同意本标准所要求的各自相关的责任。

指定的试验协调员应精通试验的所有技术和运行操作，并了解本标准的细节。试验协调员有责任按照试验方案进行试验。

试验各方应指定各自的代表，见证并确认试验过程符合试验方案来执行。如有必要，在试验过程中各方达成一致的试验方案的变更，试验各方的代表有权批准。

4.2.3 试验边界

一个能量系统的试验边界为一个控制体，各种进、出试验边界的流体将能量输入或输出系统。应测量输入或输出流体的能量或出力，计算其修正后的结果，并确定性能。

一般来说，不需要测量那些不通过边界的内部流体的能量或出力。然而，如果这些内部流体用于验

证运行工况或与穿过边界的流体有关，则可要求测量。

应划定具体的试验边界。图 1～图 4 显示了典型的余热锅炉系统图和通用的试验边界。这些图宜视为一般性的示意图，对于特定试验对象应专门制作。

4.2.4 要求的测量

一旦确定了试验边界，就应量化穿过边界的那些输入和输出流体的能量。一个有效的试验需要测量确定以下参数，但对某一特定的试验，可以增加或减少某些测量。

4.2.4.1 燃气轮机排气

余热锅炉的主要输入热量来自燃气轮机排气。应根据燃气轮机和余热锅炉的能量平衡，联合计算排气流量和组分。燃气轮机排气温度和烟囱出口烟气温度是总温度，各采用一组温度传感器来测量。

4.2.4.2 大气环境

应测量大气压力、干球温度及湿度或湿球温度。

4.2.4.3 水和蒸汽流体

对所有的水和蒸汽流体，应按要求确定其流量、压力、温度和品质，以确定其能量的变化。应进行足够的流量测量以确定系统内各部位的流量。一般认为，测量水流量比测量蒸汽流量更精确，因此，宜测量给水流量。直接测量蒸汽流量可能比采用测量两个给水流量之差计算得到的流量更准确。

4.2.4.4 辅助燃烧输入量

如果余热锅炉有辅助燃烧系统，则应测量燃料的流量、压力、温度和组分。同时也应确定任何进入燃烧器的空气、蒸汽和水的流量、压力和温度。

4.2.4.5 辅助系统

如果辅助系统的流体进、出试验边界，则需要确定其穿过试验边界流体的流量、压力、温度和组分，例如燃料加热器等。

4.2.4.6 烟气侧压降

因为余热锅炉烟气侧压降是关键变量之一，因此应在余热锅炉进口处测量静压。

4.2.4.7 汽水压降

如果需要，应在试验期间测量确定蒸汽和水的压降。

4.2.5 设计、施工和启动阶段考虑事项

在电厂设计阶段，宜考虑如何精确地实施余热锅炉的性能试验，包括仪表精确度要求、仪表校准和再校准的文件要求，以及试验用电厂永久性仪表的测量位置。如果电厂仪表不能满足本标准的要求，则在设计阶段应考虑安装临时仪表适当的规定。

宜考虑参与试验的人员和仪表的有关事项，例如，包括接近试验测点的安全通道，合适工具的可用性和人员的安全工作区，以及考虑高温或振动恶劣环境对仪表的潜在损坏或校准漂移的影响。

宜考虑流量元件的安装时间，避免化学清洗或蒸汽吹扫。管道设计宜提供有足够的上游和下游直管长度来满足流量的测量精度，参见 ASME PTC 19.5。

4.3 试验前的协议

在执行余热锅炉性能试验前，试验各方应就影响性能试验的具体事项达成书面协议。应达成事项如下：

- a) 验收标准。
- b) 试验结果的不确定度目标。
- c) 仪表标识号、测量项目和取样要求。
- d) 试验目的和运行方法。
- e) 试验进度表和提前通知试验各方的要求。
- f) 试验范围和试验工况数量。
- g) 如果本标准试验和整体性能试验（如 ASME PTC46）一起实施，则整体性能试验的任何特殊要求均为本试验的一部分。
- h) 试验日期，如果试验延期需要做的工作。
- i) 定义试验边界，确定在边界上的输入和输出量，并标明其测量位置。
- j) 有关试验目的和性能保证值的合同要求，以及对合同中问题的必要澄清。
- k) 试验数据接受和舍弃的准则。
- l) 稳定运行工况的要求。
- m) 修正计算方法仍适用的实际工况与参考工况的最大偏差。
- n) 试验连续运行时间、持续时间和试验次数。
- o) 燃烧用的燃料、燃料成分分析、发热量及其取样方法。
- p) 试验计算所确认使用的修正项目应与相应的试验边界一起清楚地进行描述，所需的基准、标准、软件、性能修正曲线、公式或图表等均应清楚确认。提交的文件应明确。采用的修正方法应清楚描述以确保其一致性和计算精度。
- q) 应明确不确定度分析的方法和偏差，并对试验前和试验后的不确定度分析达成协议。
- r) 测量方法应描述参数测量的频率、位置、仪表类型及精确度，并标明电厂永久性仪表和临时性试验仪表。
- s) 仪表的控制和校准程序及其要求。
- t) 应明确试验边界处试验参数的允许波动范围，例如，环境温度、进出系统的过程流体和燃料的变化（如发热量和组分），但不限于此。
- u) 气候条件及为保证工作人员安全而采取的措施。
- v) 试验所要求的设备的清洁水平。如果未进行补救措施来清洁或措施不可行，则应评估其对性能的影响程度，试验各方应就余热锅炉期望性能的修正达成协议。
- w) 如果适用，考虑性能老化修正的方法。
- x) 投运设备清单。应给出在试验过程中需要投运或在修正计算中需要考虑的电厂设备清单。
- y) 余热锅炉详细的阀门开度清单。
- z) 预备性试验和稳定时间。
 - aa) 如果需要试验分析用实验室，则应确定实验室。
 - bb) 计算及修正到参考工况的方法。
 - cc) 如果未采用 IAPWS-IF97 工业用水蒸气公式，则应就所采用的其他水蒸气物性公式达成协议。
 - dd) 试验报告的格式、内容、结论和索引。应就如何处理受热面热量偏差达成协议。下游受热面的热量取决于上游受热面实际吸收热量的大小。根据热力学第二定律观点，在吸收相同的热量下，较低压力的受热面其做功能力较小。
 - ee) 旁路挡板的泄漏率（如果适用）。

- ff) 余热锅炉和燃气轮机的各项损失。
- gg) 试验持续时间。

4.4 试验准备

应提前通知试验各方试验的准备工作，以便试验各方有时间准备试验人员、仪器设备或文件资料。宜及时提供更新信息，并且也应通知到试验参与机构和其他试验第三方。

4.4.1 试验进度表

应编制试验进度表，包括预计的试验时间、通知试验各方到现场的时间、试验计划的准备和试验结果报告的准备。

4.4.2 试验仪器

用于采集试验数据的仪表至少应与试验前不确定度分析中所确定的仪表具有相同的准确度，见本标准第5章。试验仪表可以是电厂永久仪表，也可以是临时试验仪表。

在试验前应对试验仪表进行校准，并且校准数据和校准报告可随时查阅。试验后应对这些仪表进行再次校准或检查。宜采用多重测量仪表以降低总体的试验不确定度。有关仪表及其校准要求的详细内容，参见本标准第5章。

试验前，应建立数据储存、文件保存和试验报告分发规则。试验数据、结果和报告的保存应包括考虑储存信息的年限、数据的检索和有用性等。宜确定试验数据、结果和报告的保存方式，可采用电子、磁性、纸质或其他保存方式。同时应确定这些储存信息的副本的类型和数量、保管责任人和所有权。

4.4.3 试验人员

应配备足够数量的专业试验人员，能胜任执行试验工作。试验人员应熟悉试验程序，以保证机组运行的安全性和稳定性，并满足试验准确性的要求。

4.4.4 设备检查

在进行试验前，通过检查设备和运行记录来确定设备的清洁度、运行状况和设备运行小时数。对设备的任何清洗操作应达成协议，并在试验前完成。应检查设备泄漏情况。

试验各方应有适当的机会来检查余热锅炉。通过核查确保设备及其各系统安装规范，其运行参数均在其设计范围内，并适合进行试验。

在试验开始前，准备工作应全部完成。应详细记录所确定的机组试验边界及所选择的试验方法。文字描述、图纸、图表或图片均可作为永久记录的方法。

4.4.5 预备性试验测量

正式试验即将开始前，宜进行一次预备性试验测量。根据预备性试验测量的结果，在进行正式试验前，试验各方宜对任何试验方面的变更达成协议。如果预备性试验测量满足正式试验的所有要求，则可作为一次正式试验测量。

进行预备性试验测量的原因如下：

- a) 确定设备的运行条件是否适合进行性能试验；
- b) 调整试验准备阶段不明确的需求；
- c) 检查所有试验仪表、控制和数据采集系统；
- d) 确认设备能维持稳定工况运行；
- e) 确认除试验方案中确定的试验工况外，其他试验工况不受限制；

f) 使试验人员熟悉各自的岗位。

4.4.6 修正方法文件

应编制用于计算和修正的文件，如果必要，文件中可查到算法、常数、刻度、校准修正、偏置、基准点和单位换算因子等。本条款并不要求公开专有的设计算法。

4.5 试验执行

本条款的目的是给性能试验的执行提供指南。

4.5.1 试验开始和停止及试验测量

试验协调员应负责确保在已商定的试验开始时间采集所有试验数据，并通知试验各方每一个参与人员。

4.5.1.1 试验开始准则

在每次试验开始前，应满足以下条件：

- a) 试验的运行条件、系统配置及运行方式均已符合试验方案的要求，包括以下内容：
 - 1) 稳态运行；
 - 2) 设备运行模式和控制方法；
 - 3) 机组配置，包括所需的过程流量和阀门开度情况；
 - 4) 余热锅炉的运行参数在其性能修正方法、算法或程序要求的限制范围内；
 - 5) 设备运行在允许的参数限值范围内；
 - 6) 对一组试验测试，为满足试验可重复性要求的内部调整。
- b) 稳定性：在试验开始前，余热锅炉应在试验负荷下运行足够长的时间，以表明其稳定性符合4.5.2中的准则。
- c) 数据采集：数据采集系统功能正常，试验人员就位并准备好收集样本或记录数据。

4.5.1.2 试验结束准则

当试验协调员认定整个的试验过程满足试验要求时，可宣布试验正常结束，否则，可延长试验时间或终止试验。

应检查数据记录，以确保数据的完整性。

4.5.2 试验前和试验过程中的运行方法

应编制一个试验记录日志，记录在试验过程中影响试验的任何事件、事件发生的时间和所观察到的效应。该记录日志将成为本试验永久记录资料的一部分。

在试验工况下，正常运行所需的所有设备均应投运，否则应考虑其修正。电厂内不得有任何设备非正常启动或关闭而影响出力。所有环境排放控制系统均应在正常参数范围内运行，如烟气流、进口和出口排放物浓度、pH值、固体和液体的排放浓度等。

余热锅炉设备的运行应与设计或保证条件保持一致。

应尽可能用最稳定的方式来控制过程能量（如过程蒸汽及凝结水）。如果用户不能满足其稳定性或数量要求，则可要求采用手动运行模式或将过程蒸汽及凝结水直接排放到大气。

4.5.2.1 设备运行

除非试验各方另有协议，余热锅炉应按照使用手册的规定运行在其设计特性和运行参数范围内。

如果安装了蒸发冷却器或制冷系统，则应停运。如果某一试验要求其投运，则试验不确定度将会增大。

4.5.2.2 接近设计工况

试验过程中，要求余热锅炉的运行工况尽量接近参考性能工况，以减少对出力的修正量。

4.5.2.3 排污

试验过程中，宜隔离所有的排污。如果试验需要排污，则试验不确定度将会增大。

4.5.3 试验前和试验过程中运行调整

试验过程中允许的调整有：保持设备的安全运行，维持机组的稳定运行和纠正异常的运行控制。

在试验前或试验过程中，导致设备参数超出制造厂家的运行限值、设计或安全限值或规定运行范围的任何调整均不允许。

在试验过程中，不利于主要测量参数稳定性的调整也不允许。如果在任何一次试验测量中运行参数变化超出了表 5 中规定的限值范围，且变化范围未在协议中约定，则该次试验应作废。

表 5 试验参数最大允许变化范围推荐值

变 量	测量值与平均值的偏差范围
给水流量	$\pm 2\%$
汽包压力	$\pm 2\%$ 或 68.95kPa，取大值
过热减温水流量	蒸汽流量的 $\pm 0.5\%$
燃气轮机燃料流量	$\pm 2\%$
补燃燃料流量	$\pm 2\%$
燃气轮机输出功率	$\pm 2\%$
燃气轮机排气平均温度	$\pm 5.6^{\circ}\text{C}$
省煤器入口给水温度	$\pm 2.8^{\circ}\text{C}$
过热器出口蒸汽温度	$\pm 2.8^{\circ}\text{C}$

4.5.4 修正应用

本标准的一个主要目的是获取余热锅炉修正后的出力。第 6 章详细说明了出力的计算及其必要修正的应用。由于现代多压余热锅炉的复杂性，本标准推荐采用计算机程序确定试验的余热锅炉性能，并将其修正到参考工况下。

4.5.5 试验测量持续时间

一次试验测量的持续时间应足够长，以便采集的数据能反映余热锅炉的平均性能。这包括考虑到由于控制、燃料和待测机组的运行特性而产生的测量参数的偏差。一次试验持续时间应不小于 1h。

试验协调员可根据需要决定延长试验时间。最短持续时间一般根据连续数据采集情况而定。根据试验人员数量和数据采集的方法，为了获得足够数量的测量参数的读数和达到所要求的试验不确定度，有必要延长试验时间，但试验持续时间不宜超过 2h。

4.5.6 试验测量次数

一次试验测量是指在稳定运行工况下，在一段时间内对机组进行的一组完整的数据测量。一次性能试验是指为获得设备性能特性的一系列试验测量结果的综合（平均）。一次性能试验通常至少包括两次试验测量，其中一次可以是预备性试验测量。

4.5.7 读数次数

在试验持续时间内应获得足够多的读数，以满足表 4 的总不确定度要求。对所有的电子形式的测量值至少应记录 30 组数据。对积算式仪表的读数次数没有特殊的要求，其读数不应平整或平均，详见第 5 章。

4.6 试验结果的计算、分析和报告

宜对试验期间获得的数据进行审核，一经认可，应对试验期间内的数据求平均值。

每个采用本标准的性能试验均应进行试验前和试验后的不确定度分析，分析的结果均应在协议的不确定度范围内。本标准第 6 章给出了通用的性能计算的方法。

4.6.1 剔除数据的理由

试验期间或试验完成后，在结束试验计算之前，应对试验数据进行检查，以决定是否要剔除某一时段的数据。有关数据取舍的准则参考 ASME PTC 19.1 和 ASME MFC-2M（附录 C）。宜保存试验日志，如果任何机组的扰动引起试验数据不满足表 5 中的要求，则该组试验测量的全部或部分数据应舍弃。只有当试验数据满足稳定性准则至少超过 10min 后，才认为机组已重新达到稳定。

如果在试验期间或计算过程中发现影响到试验结果的严重不一致性问题，则本次试验测量应视为全部无效，只有当影响的数据出现在试验开始或即将结束时，才可以将部分数据视为无效而弃用。如果需要，应重新进行一次试验测量以达到试验目的。弃用试验测量数据的决定应由试验各方指定代表负责做出。

试验期间，如果对任何控制系统设定值的修改而影响运行的稳定性，其值超出本标准规定的限制值，试验数据应考虑从试验结果的计算中剔除。被剔除部分的时间点应从在控制系统设定值修改的时刻开始，直到满足表 5 的稳定性准则后不小于 10min 为止。

试验结束后，宜根据 ASME PTC19.1 对所有关键测量参数进行异常数据的孤立点分析。该分析将着重指出哪些数据点宜进行审核，并尽可能在计算试验结果前予以剔除。采用改进的 Thompson Tau 方法和其他统计方法，能确定潜在的异常数据，只要经审核和工程判断这些数据点无效，则予以剔除。应当注意，剔除数据准则不宜用于采用网格测量的数据或随空间变化的数据。该准则仅宜适用于随时间变化的单点测量数据。任何剔除的数据宜在试验报告中指出。

4.6.2 测量试验的重复性

在完成了满足试验准则的第一次试验测量（可能为预备性试验测量）后，宜整理全部试验数据，计算和审查初步的结果，以确保试验结果的合理性。如果试验各方同意，可在任何一次试验测量结束后得出结论。

试验测量之间的重复性的评判准则是指，两次或多次试验测量的结果相互落入其试验测量结果的不确定度区间时的程度。满足或不满足准则的例子如图 5 所示。

如果一个或一组试验测量未能满足可重复性的准则，则宜审核所有试验测量结果，以试图解释其原因。如果没有明显的原因，能通过增大不确定度区间使之相互覆盖，从而达到可重复性；或者，再增加更多次的试验测量，不确定度区间将能直接由试验结果的随机不确定度分量计算得出。

满足可重复性准则和其他标准要求的多个试验测量结果值，应进行平均计算以确定平均结果。每一

个试验测量均应给出不确定度。

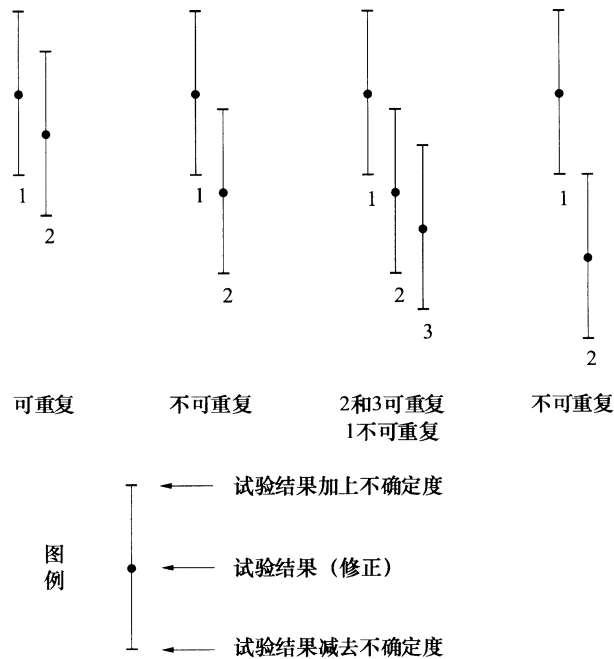


图 5 试验测量的可重复性

4.6.3 燃气轮机能量平衡与余热锅炉能量平衡计算出力的比较

由燃气轮机能量平衡得出的出力应与余热锅炉能量平衡计算得出的出力进行比较。这两种独立试验得到的出力差值应不大于每一个试验出力的不确定度的平方和的平方根，即：

$$\Delta q \leq \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \tag{1}$$

理论上，全部试验结果的 95% 落入该差值之内。为了保证试验结果具有 95% 的置信度，应满足这一要求。如果试验结果不能满足上述要求，则可能是不确定度估计过小，这时宜审核试验数据，以确定其原因。如果没有明显的原因，则不确定度区间可以增大。

4.6.4 试验不确定度

4.6.4.1 本标准提到的试验不确定度

试验不确定度估算是以 ASME PTC 19.1 中描述的概念和方法为基础的。ASME PTC 19.1 中给出了由随机误差和系统误差来估算测量不确定度的程序，以及这些误差对试验结果不确定度的影响。

本标准在下面 4 章中提到了试验的不确定度：

- a) 本标准第 4 章给出了不同类型机组的典型的不确定度。试验各方应达成试验不确定度的目标值。
- b) 本标准第 4 章规定了试验前和试验后不确定度分析的要求，以及如何在试验中运用。这些不确定度分析和误差限值在下面进行规定并讨论，也包括了对关键测量变量的恒定限值，以限制临时试验仪表的不确定度。
- c) 本标准第 5 章描述了对每个试验测量仪表的准确度要求。
- d) 本标准第 6 章和第 8 章提供了确定试验前和试验后不确定度分析结果的实用指南。

4.6.4.2 试验前和试验后不确定度分析

在试验前，应进行不确定度的分析，以便能规划出满足标准要求的试验。对每个将要用于试验计算

的测量仪表进行系统和随机误差的估算，以确定完成标准或合同规定的试验所需仪表的数量和准确度等级。

试验前不确定度分析宜用于确定每个测量所需仪表的准确度等级，以保证整个标准试验准确度要求。从简化试验和经济性考虑，对不重要的参数测量，本标准允许使用电厂仪表，甚至可以采用估计值。但是，应证明上述处理对整体试验不确定度影响很小（小于 0.05%），同时试验结果仍应满足根据标准试验设定的不确定度目标值。

试验后不确定度分析应作为标准试验的一部分来执行。试验后不确定度分析将反映试验的实际质量，以确定是否达到所要求的不确定度目标值。

4.6.5 试验报告

在试验结束后，试验各方有权得到所有原始数据的副本。应就如何分发试验数据达成协议。试验报告应包括所有影响试验执行的具体内容。

出版最终报告前，试验各方均有机会审核计算和结果。如果有任何异议，应在最终报告中注明。

试验结果宜以各试验方认可的正式文件提交。试验报告的内容在本标准的第 7 章叙述。

5 测量仪表和测量方法

5.1 概述

本条款包括了本标准规定的仪表选择、仪表不确定度、仪表测量值的校准修正。同时也包括了测量方法说明、测量系统的布置和应采取的预防措施。随着新测量技术的发展，如果证明新型测量仪表满足本标准不确定度的要求，本标准所推荐的仪表可以由新型测量仪表来代替。

对任何一个测量参数，当选用一个测量方法时，应与全部其他参数一起来综合考虑，以得到满足试验不确定度要求的试验结果。

5.2 总则

5.2.1 补充

ASME PTC19 系列标准包括了为任何设备试验所需的试验不确定度的计算指南，以及仪器仪表和测量方法的描述，包括了仪表使用说明、误差限值和误差源、量程、灵敏度和随机不确定度，以及校准方法的说明。仪表的选用宜保证满足以下要求：

- a) 达到必要的测量准确度；
- b) 选择可行的试验仪表和试验方法。

5.2.2 仪表安装位置和标识

传感器应布置于对其环境条件（如振动、温度、湿度等）影响最小的地方。传感器与数据采集设备之间的信号导线应谨慎选择和布置，以防止电子噪声信号的干扰。人工读数仪表应布置在记录人员方便准确读数的地方。所有仪表应有清晰正确的标识号。如果需要，应有仪表的校准数据表或图供方便使用。应指示记录人员读取所要求的读数精度。

5.2.3 误差源

影响试验准确性的误差源为：

- a) 仪表误差；
- b) 观测误差；

- c) 未能获取代表性样本而产生的误差;
- d) 未能将仪表安装在测量所要求的位置而产生的误差;
- e) 由于仪表灵敏度低而产生的误差;
- f) 信号原因产生的误差。

详细的误差讨论见 ASME PTC 19 系列标准。

5.2.4 仪表校准

5.2.4.1 校准定义

仪表校准是将过程参数同时施加到一台被校仪表以及一台标准衡器上,并读取两者的读数。一种方法是将被校表的输出读数调整到标准衡器读数,另一种替代方法也可以记录被校表和标准衡器的读数差,该差值用于修正被校仪表的读数。因为流量测量元件或热电偶的信号输出不容易被转换,可采用第二种方法进行校准。ASME PTC 19 系列标准提供了数据校准的应用和使用指南。

5.2.4.2 标准衡器

通常所有被校准的试验测量仪表应与可追溯的标准衡器来校准,标准衡器可追溯至国家标准、其他公认的国际标准组织的标准或公认的物理常数。所有标准衡器的校准应按照制造厂家的推荐周期来进行,或者如果用户有数据支持,可延长校准周期。这些支持的数据是历史校准数据,用于证明在所需延长的校准周期内校准的偏移量小于标准衡器的准确度值。

标准衡器的不确定度至少宜比被校仪表小 4 倍。如果标准衡器的不确定度与被校仪表的随机不确定度的综合不确定度小于仪表的准确度要求,则可采用较大不确定度的标准衡器。如果试验用被校仪表的准确度高于校准装置,则被校仪表宜只需“校准检查”,即仪表校准数据不需改变,仅确认其是否在规定的 uncertainty 范围内。

5.2.4.3 环境条件

仪表校准的环境宜与仪表实际试验测量的环境相同。应考虑所有可能影响测量的过程参数和环境条件,包括温度、压力、湿度、电磁干扰和辐射等。

5.2.4.4 仪表量程和校准点数

用于测量主要变量参数的仪表,无论是否需要将校准结果用于测量试验数据的情况,还是仪表准确度很高,可以忽略实验室校准标定值与仪表读数值之间的很小偏差对试验结果影响的情况,如果相对敏感系数和仪表不确定度的乘积大于 0.25 时,校准点数都宜至少要比校准拟合曲线的阶次多两阶。

每个仪表都要按上行和下行两种方式分别逼近测量点来校准,以尽量降低滞后效应的影响。有些仪表会带有一个机械调整装置,可在安装后改变仪表的量程范围,这时,应对试验时将使用的每一种量程范围都进行校准。

其他仪表校准点数可与校准拟合曲线的阶次数相同。如果仪表显示其滞后的影响小于所需准确度,则校准点仅需从一个方向逼近测量点来校准。

5.2.4.5 校准时间

所有参与试验计算的变量的各测量仪表,如果相对敏感系数与仪表不确定度乘积不小于总不确定度的 0.25,该试验仪表应在试验前进行校准,并在试验后校准或检查。对相对敏感系数和仪表不确定度乘积小于总不确定度的 0.25 的测量仪表,则无强制性校准的要求。对初始校准、试验期以及再次校准之间

的时间间隔没有强制性规定，但是所有的仪表宜在其正常的校准周期内（典型为 1 年）。如果临时试验热电偶采用了某一给定批次的优质热电偶丝，则可从该批次的两端各取一段用于校准。

由于流量测量装置、电流和电压互感器的特性不利于试验后校准，因此，对于流量测量装置的一次元件，可在试验后进行检查，而不必对整个流量测量装置进行复校。如果流量测量装置没有经过蒸汽吹管或化学清洗，则试验后必不检查一次元件。对于电流和电压互感器，不需要在试验后进行复校。

5.2.4.6 校准漂移

校准漂移定义为校准的差异，以读数百分数来表示。当试验后的校准表明校准漂移量小于仪表的系统不确定度时，则认为该漂移量是可以接受的，这时，试验前的校准数据用来确定试验结果的系统不确定度。有时仪表的校准漂移量是不可接受的，如果校准漂移量与标准衡器准确度的平方和开平方根后的值大于所要求的仪表的准确度，则校准漂移量是不可接受的。

仪表故障、运输、安装或拆卸均能引起校准漂移。如果发生校准漂移，则应依靠工程判断来确定初次校准正确还是复校正确，下面是一些较好的工程判断方法：

- a) 仪表从标定实验室运往试验现场直到试验结束这段时间，可在仪表可以隔离的试验前和试验后分别进行单点检查，可以查出何时出现漂移。例如，检查排空气后的压力变送器、未加负载的功率表和测温仪表的冰点。
- b) 对于多重仪表测量的场合，宜对校准漂移进行分析，以确定这些仪表中哪次校准（首次校准或复校）与其测量结果更吻合。

5.2.4.7 回路检查

所有仪表应进行回路检查。回路检查是检查仪表回路，并确认被校仪表信号通过信号调制设备正确处理和显示的过程。可通过在被校仪表端口上施加一个标准的输出信号，并观察数据采集系统（DAS）的显示值来实现。回路中的组件可以进行校准（对传感器时），也可进行检查（对信号调制设备时），后一种方法尤其适用于数字系统。

5.2.4.8 质量保证体系程序

每个试验校准实验室都应有其质量保证体系程序，该程序是一种文件记录的形式，可以从文件中能找到以下信息：

- a) 校准方案；
- b) 校准技术人员的培训；
- c) 标准衡器校准记录；
- d) 标准衡器校准计划；
- e) 仪表校准历史数据。

质量保证体系程序宜确保实验室的标准符合校准的要求，还须保证校准人员经过合格的培训，并按照正确的方法来校准。

在试验仪表校准期间，宜提供试验各方实验室设施的考察，并能让考察人员随时查阅质量保证体系程序文件。

5.2.5 现场仪表

只有当现场仪表（包括信号调制设备）能证明满足不确定度的要求时，才能使用现场仪表。例如在测量流量时，现场的所有测量仪表（压力、温度、差压或表计的脉冲信号）的数据均应获取，但现场流量的计算过程往往不够严谨，其准确度不能满足试验要求。

5.2.6 多重测量仪表

多重测量仪表是指在同一地点用两台或更多台仪表测量同一个参数。多重测量仪表应用于那些对试验不确定度有较大影响的测量参数。采用多重测量仪表可降低测量不确定度。例如，在相同位置上安装的两个独立的热电偶温度套管的温度测量为多重测量仪表，与之相比，在一个温度套管内安装两个热电偶测量元件并不是多重测量仪表。

不同位置上的其他独立测量仪表（包括现场仪表）也可以检验仪表的正确性。例如，在一个蒸汽管道上的等焓过程中，能够通过其焓值，由管道上某一点的压力和温度来验证管道上另一点的压力和温度的正确性。

5.3 温度测量

5.3.1 概述

温度通常用热电偶（TCs）、热电阻（RTDs）或玻璃水银温度计来测量。测量的温度值或者从这些装置直接读取，或者这些装置产生信号，由表计、变送器或数据记录仪读取。详细的使用和安装见 ASME PTC 19.3 和 ASTM 手册 12《热电偶和温度测量的使用手册》。

数据测量装置应在测量的环境处于热平衡状态下进行测量。对测量相对敏感系数与仪表不确定度乘积不小于 0.25 的温度测量参数，宜采用热电阻（RTDs）或带连续补偿导线的热电偶来测量。对其他温度测量场合，热电偶的补偿导线应具有相同材质和组成。ASTME 230 提供了热电偶选型的导则。热电偶导线不应与电源线平行布置，以避免可能的电磁干扰。

5.3.2 温度测量的系统不确定度

当估算温度测量的总不确定度时，试验人员宜考虑潜在的误差源，潜在的误差源和典型不确定度范围见表 6。

表 6 给出了经校准的热电偶和热电阻（RTDs）的系统不确定度。有关校准数据的应用指南见 ASME PTC 19.3。

表 6 潜在的误差源和典型不确定度范围

项 目	未经校准的系统不确定度	经校准的系统不确定度	范 围
E 型精密级热电偶	$\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 0.4\%$ ，取大值	见注	$0^{\circ}\text{C} \sim 871^{\circ}\text{C}$
E 型标准级热电偶	$\pm 1.7^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 0.5\%$ ，取大值		$0^{\circ}\text{C} \sim 871^{\circ}\text{C}$
K 型精密级热电偶	$\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 0.4\%$ ，取大值	见注	$0^{\circ}\text{C} \sim 1260^{\circ}\text{C}$
K 型标准级热电偶	$\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 0.8\%$ ，取大值		$0^{\circ}\text{C} \sim 1260^{\circ}\text{C}$
电 热 阻 测 温 装 置 （ R T D ） 可 溯 源 到 N I S T 校 准 标 准	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 0.3\%$ ，取大值	当温度小于 93.3°C 时， 0.11°C ； 当温度小于 537.8°C 时， 0.56°C ； 当温度大于 537.8°C 时， 1.11°C	小于 0°C
	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 0.8\%$ ，取大值		$0^{\circ}\text{C} \sim 93.3^{\circ}\text{C}$
	$\pm 1.3\%$		$93.3^{\circ}\text{C} \sim 204.4^{\circ}\text{C}$
	$\pm 1.8\%$		$204.4^{\circ}\text{C} \sim 298.9^{\circ}\text{C}$
	$\pm 2.3\%$		$298.9^{\circ}\text{C} \sim 398.9^{\circ}\text{C}$
	$\pm 2.8\%$		$398.9^{\circ}\text{C} \sim 498.9^{\circ}\text{C}$
	$\pm 3.3\%$		$498.9^{\circ}\text{C} \sim 593.3^{\circ}\text{C}$
	$\pm 3.8\%$		$593.3^{\circ}\text{C} \sim 704.4^{\circ}\text{C}$
玻璃管水银温度计	精度 0.5 级		
注：有关热电偶的系统不确定度，参见 ASTM E220。			

以下项目可能影响温度测量：

- a) 温度套管的位置、几何形状和设计；
- b) 温度敏感元件的设计；
- c) 校准；
- d) 堆焊（隔热/不隔热）；
- e) 流场分层；
- f) 温度网格尺寸；
- g) 温度网格位置；
- h) 连接处环境参数；
- i) 仪表的环境参数；
- j) 电磁干扰；
- k) 热传导和热辐射；
- l) 参考接点精度；
- m) 漂移；
- n) 滞后；
- o) 温度计的非线性度；
- p) 视差；
- q) 温度变送器；
- r) 数据采集系统；
- s) 流速。

5.3.3 典型应用

5.3.3.1 管道或容器内的流体温度测量

管道或容器内的流体温度通常通过安装温度套管方式来测量。温度套管就是从管壁或容器壁伸入流体中的压力密封装置。温度套管有一个内孔延伸到管子的顶端，以方便温度测量元件的插入。

温度套管内孔的尺寸宜在温度测量元件和管壁间有足够的间隙。插入温度测量元件时应小心，防止其弯曲而导致插入时遇到困难。

温度套管内孔的底部与温度测量元件顶端宜有相同的形状。在温度测量元件插入之前宜采用高压空气将内孔吹扫干净。

温度套管安装时，套管顶端宜穿过需要测量流体的边界层，宜位于流体充分混合且无温度梯度的区域。

如果在管道某一给定的位置上安装了多个温度套管，温度套管之间宜互成 $90^{\circ}\text{C}\sim 180^{\circ}\text{C}$ 的安装角，而不宜直接在一支温度套管的下游安装另一支温度套管。

在温度测量元件安装好后，宜采用弹簧加载以确保其测量元件的顶端与温度套管的底部接触紧密。

对于高准确度参数的测量场合，建议将暴露在管道或容器外的温度套管与测量元件一起进行保温处理，以最大限度地减少散热损失。

对于喷水减温后的蒸汽温度测量，应谨慎选择温度套管相对于减温水的注入点的位置，温度套管应安装在减温水与蒸汽充分混合的地方，可将温度套管安装在减温水注入点之后下游一个或一个以上弯管后的管道上。

管道内流动的蒸汽和水通常有一个大致均匀的温度分布。

温度测量方法和测量仪表的选择取决于具体的测量对象。管道中蒸汽和水的温度通常采用温度传感元件（热电阻或热电偶）插入温度套管来进行测量。有关温度测量仪表的安装见 ASME PTC 19 系列

标准。

饱和蒸汽温度可由汽包压力来确定。过热蒸汽温度的测量应尽量靠近过热器或再热器出口或各自的终端处，以尽量减少热损失引起的误差。给水温度的测量应尽量靠近省煤器入口或锅炉入口处。

5.3.3.2 烟道中燃烧产物的温度测量

流经烟道的空气和烟气的流速、温度和成分通常都不均匀，尤其在燃气轮机排气口或靠近流场干扰源附近，例如弯头或过渡段。通常采用增加测量点来降低温度的不确定度。为了补偿温度分层的影响和获得具有代表性的平均值，应在垂直于流体流动方向的平面上布置多点测量。测量截面宜远离烟道的弯头、收缩或扩张处。各热电偶应单独进行读数，而不应合在一起产生单一的读数。

当测量区域内烟气流动的平均速度高于 30.5m/s 时，宜按照速度效应对烟气温度的读数进行调整，公式为：

$$t_c = t + t_v = t + v^2 / (2 \cdot J \cdot c_p) \quad (2)$$

式中：

- t_c ——总温度，℃；
- t ——实测温度，℃；
- v ——烟气速度，m/s；
- J ——热当量， $1000\text{kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{kJ} \cdot \text{s}^2)$ ；
- c_p ——比定压热容， $\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ ；
- t_v ——动态温度，℃。

本标准要求独立测量的温度有：

- a) 根据 ASME PTC 22 要求，燃气轮机出口处的排气温度；
- b) 本标准中所述的余热锅炉入口温度。

一般来说，烟道内压力较低或为负压，因此不需要安装温度套管，将足够长的铠装或非铠装热电偶固定在余热锅炉预留孔或试验架上就可满足测量要求。

所需测点的数量可由试验方法来确定，也可根据所要测量管道的截面上的温度变化大小以及所要求的平均温度值的最大不确定度来确定。平均温度的总不确定度受各单个仪表的不确定度、参与平均值计算的点数、温度梯度以及读数波动的影响。试验各方宜尽量选择靠近燃气轮机和余热锅炉接口处来测量余热锅炉入口温度。烟囱处温度的测量平面离任何障碍物或过渡段的距离宜至少为 2 倍烟囱的直径。余热锅炉入口和烟囱处推荐温度测点数量见表 7。

表 7 余热锅炉入口和烟囱处推荐温度测量点数

测 量 位 置	轴 向 排 气	侧 向 排 气
余热锅炉入口	每 2.32m ² 布置 1 个	每 2.32m ² 布置 1 个
	至少 12 个测量点	至少 18 个测量点
	最多 36 个测量点	最多 36 个测量点
烟囱	一般来说，当余热锅炉出口气流混合均匀时，布置 12 个测量点将能满足要求	

对于圆形烟道，温度测点可径向布置在两个互成 90° 角的烟道上。沿每一个直径方向的测点间隔，根据测量点位于各相等面积形心来确定。

对于正方形或矩形烟道，宜采用与上述相同的方法，根据测点位于各相等面积的形心来确定。等面积区的纵横比宜为 0.67~1.333。

5.3.3.3 入口空气温度

干球温度是燃气轮机进口处（在蒸发冷却器或制冷系统的上游）空气的静态温度，温度传感器的安装位置应避开阳光或其他辐射源，而且应有连续稳定的空气流过感应元件。虽然并不要求，但仍可使用下述的机械蒸发式干湿球温度计。如果使用这种干湿球温度计，则不宜在感应元件上放置棉芯（测量湿球温度时有这个要求）。如果流过感应元件的空气流速小于 7.6m/s，则要求对感应元件加导流板以将滞流的影响降至最小。试验时蒸发冷却器或制冷系统宜停运以降低试验不确定度，否则，在燃气轮机能量平衡计算时，试验不确定度会增加。

5.3.3.4 进口空气含水量

燃气轮机进口空气中的含水量可由测量的绝热湿球温度或相对湿度来确定。含水量的测量位置应靠近入口空气干球温度的测量点附近，从而为确定空气物性提供了基准。可接受用于测量含水量的仪表说明如下：

- a) 湿球温度。热力学上的湿球温度是指空气被绝热冷却到饱和状态时的温度。湿球温度能由一个正确设计的机械蒸发式干湿球温度计的测量值推算出来。干湿球温度计的工作过程并非是一个绝热饱和的过程，而是一个在湿球感应元件上同时有热量和质量交换的过程。在大多数情况下，干湿球温度计获得的温度与热力学湿球温度极其接近。然而，干湿球温度计不宜在温度低于 4.4℃ 且相对湿度小于 15% 的场合下使用。

使用机械蒸发式干湿球温度计有以下特征：

- 1) 感应元件应避免阳光直射，并遮挡与干球温度不同的其他任何物体表面。如果测点暴露于阳光下，感应元件应使用一个双层遮光板来遮阳，并使空气从感应元件和双层壁面的间隙中流过。
- 2) 感应元件应悬空在空气气流中，并且不得与遮光板壁面接触。
- 3) 感应元件应使用干净的吸水棉芯包裹起来，吸水棉芯从一个蒸馏水容器内吸水以保持湿润。
- 4) 空气流过感应元件的速度应在 4.1m/s~6.1m/s 之间的某个恒定流速。
- 5) 流过感应元件周围的空气不得被带风扇电动机或其他热源加热。
- 6) 干湿球温度计的测量位置宜至少离地面 1.5m，且距离植被和水面不宜小于 1.5m。
- b) 冷镜露点湿度计。露点温度是指湿空气在某一环境压力和比湿度下的饱和温度。冷镜露点湿度计使用冷却镜来检测露点。空气流过被冷却的镜面并开始产生汽雾，安装在镜面上的温度感应元件测量其表面温度。可以采用手动测量，也可用自动控制镜面温度的商用仪表测定冷凝状态的起始点，并读出温度值。

使用露点湿度计的优点是：

- 1) 能使用各种已知含水量的样本气体来进行比对校准。
- 2) 能测量包括低于冰点的全范围大气环境下的露点温度。
- c) 相对湿度计。薄膜式电容和聚合物电阻传感器可直接测量相对湿度，其测量的不确定度与传感器的类型和设计有关。通常相对湿度在 0%~90% 之间时，不确定度大约为量程的 $\pm 1\%$ ~ $\pm 2\%$ 。当测量的相对湿度大于 90% 时，不确定度会增大。这类仪表的准确性依赖于校准的正确性。

使用相对湿度计的优点：

- 1) 能使用各种已知含水量的样本气体来进行比对校准。
- 2) 能测量包括低于冰点的全范围大气环境下的露点温度。

5.4 压力测量

5.4.1 概述

本条款给出了压力测量的方法和有关注意事项。如需获得额外的指导和要求，参见 ASME PTC 19.2 中的压力测量。

5.4.2 压力测量的系统不确定度

压力测量系统的准确度等级和总不确定度应满足试验前不确定度分析中总体试验不确定度要求，见表 8。当估算某一压力测量的系统不确定度时，试验人员宜考虑下列潜在的误差源：

- a) 水柱高差；
- b) 压力计流体的密度；
- c) 传感器处的大气环境；
- d) 表计处的大气环境；
- e) 滞后效应；
- f) 电磁干扰；
- g) 数据采集；
- h) 漂移；
- i) 变送器的非线性；
- j) 视差；
- k) 压力表、气压计、传感器或变送器型号；
- l) 校准；
- m) 取压点位置、几何形状、流场影响；
- n) 探头设计；
- o) 测量点数和位置。

表 8 潜在的压力测量仪表的系统不确定度限值

仪表类型	系统不确定度限值
压力表	
试验级（0.25 级）	量程的 $\pm 0.25\%$
标准级（1.0 级）	量程的 $\pm 1\%$
气压计	± 0.5 刻度
传感器和变送器	
高精度级（0.1 级）	量程的 $\pm 0.23\%$
标准级（0.25 级）	量程的 $\pm 0.32\%$
空盒气压表	$\pm 0.17\text{kPa}$
注 1：除非另有规定，所有系统不确定度限值为读数的百分比。 注 2：压力测量仪表的适用范围，参见 ASME PTC 19.2。	

5.4.3 空气和烟气的静压和差压

测量余热锅炉进口处烟道静压用来确定机组烟气侧压降。如果烟气压降不是定义为余热锅炉进口与

大气之间的压差,则应采用差压变送器或气压计来测量。余热锅炉进口烟气压力属于静压测量。通过设备部件的压降宜采用差压装置来测量,而不宜采用两个独立的压力表进行测量。测量结果宜根据相同测量截面上的四个独立的压力测量结果的平均值来得出。

压力应采用压力表、气压计或变送器来测量。这些装置的输出信号可人工读取,也可由表计和数据记录仪来读取。有关压力测量技术的更多信息见 ASME PTC 19.2。

5.4.4 蒸汽和水的静压和差压

为了确定蒸汽和水管道的流体流量和焓值,需要测量管道中蒸汽和水的静压以得到汽水的热力特性,同时获得修正后的结果。再热器压降测量应采用差压测量装置,而不是采用两个独立的压力测量仪表来确定。

5.4.4.1 测量方法

压力测量仪表的安装应遵循 ASME PTC 19.2 中的指南。

5.4.4.2 安装

如果测量仪表用于烟气侧参数的测量,则传压管道宜倾斜向上至测量仪表,这可避免由于传压管道内的湿汽凝结成水而带来的误差。

测量蒸汽、水或其他液体时,差压变送器的传压管道宜向下倾斜直至仪表。测量蒸汽时的传压管道宜水平引出 0.61m 后再向下倾斜至测量仪表,这样能保证传压管道内垂直段充满流体。

流量测量元件宜安装在水平管道上。当差压仪表测量一个安装在垂直蒸汽或水管道上的流量元件的差压时,差压测量值应对不同取压口的传压管高差和流体压头变化值进行修正。对垂直安装的管道差压测量值的修正公式如下:

对向上流动的情况:

$$\Delta p_c = \Delta p_m + (\rho_{\text{sen}} - \rho_{\text{fluid}})g\Delta H \quad (3)$$

对向下流动的情况:

$$\Delta p_c = \Delta p_m - (\rho_{\text{sen}} - \rho_{\text{fluid}})g\Delta H \quad (4)$$

式中:

Δp_c ——修正后差压, Pa;

Δp_m ——测量差压, Pa;

ΔH ——传压管高度差, m;

ρ_{sen} ——传压管内的液体密度, kg/m³;

ρ_{fluid} ——测量管道内的流体密度, kg/m³;

g ——当地重力加速度 (≈ 9.80665), m/s²。

5.4.5 大气压力

大气压力用来确定当地的大气环境。

测量大气压力的最好位置是在燃气轮机空气进口附近的试验场地,采用气压计来测量。

5.5 流量测量

5.5.1 概述

本标准推荐使用根据 ASME PTC 19.5 中规定的并经过实验室校准过的文丘里、流量孔板或流量喷嘴,来测量余热锅炉各压力等级进水流量或蒸汽流量,以及补燃燃料的流量。因为蒸汽流量根据水流量

来确定，为了修正汽包中水容积变化的影响，在每次试验测量的开始和试验结束时，应确定所有汽包的储水量。

5.5.2 流量计

在大多数电厂，通常采用差压装置（流量孔板、喷嘴和文丘里管）进行流量测量，也是与本标准推荐和讨论测量装置的准确度等级相同。如果能证明与本标准有相同或是更好准确度等级的其他类型的流量测量装置，则也可使用。本标准规定的流量测量最大允许的不确定度见表 9。

表 9 流量测量最大允许的不确定度

测 量 参 数	系统不确定度限值 ^a
高压蒸汽流量	±0.5%
中压蒸汽流量	±1.0%
低压蒸汽流量	±1.0%
补燃燃料流量	±0.75%
注：流量测量装置的适用范围，参见 ASME PTC 19.5。	
^a 除非另有规定，所有的系统不确定度限值指读数的百分比。	

5.5.2.1 遵守标准要求

需要强调的是，流量装置应严格按照 ASME PTC 19.5 要求来设计、制造和安装，同时流量的计算也应按该标准执行。

在机组启动程序中，蒸汽吹管期间应确保提供旁路管，以避免损伤流量测量装置。在蒸汽吹管期间存放时，流量测量装置应加盖，以防环境中的水分和灰尘对其造成损坏。

应特别注意电厂的设计规范，应确保所有用于本标准试验的电厂流量计能满足这些要求。

5.5.2.2 电厂设计注意事项

有多种流量测量装置的组合能满足本标准的不确定度要求。在电厂设计阶段，尽早考虑试验的各种要求是非常重要的，通过优化设计和全面考虑，使试验不确定度不超出本标准的限制。

电厂设计阶段应按照 ASME PTC 19.5 的要求，考虑主要流量的测量位置。

水或蒸汽流量测量装置可在余热锅炉制造商的供货范围。使用水侧流量测量装置避免了调试运行期间蒸汽冲击而损坏测量装置的问题。流量测量系统的设计需考虑运行时需要用到的减温喷水、减温流体和燃料加热等流量的测量。

基于余热锅炉质量平衡得到的流量宜采用设计不确定度分析的结果。

再热蒸汽流量能采用高压缸入口蒸汽流量减去高压缸轴封漏汽量来得到，参见 ASME PTC 6.2。

5.5.2.3 流量计算

流量计算应按照 ASME PTC 19.5 执行。

5.5.2.4 流量计的准确度及其他特性

对于直接测量或者计算得到余热锅炉各压力等级流量的流量计，或者使用满足表 9 要求的其他替代流量计，本标准都要求应强制进行校准。如果同一流量计的每组流量测量结果的差异大于测量不确定度，

则需要调查原因。

在 ASME PTC 19.5 中, 详细给出了对每种类型差压流量计的实验室校准数据的拟合曲线方法。对于实际雷诺数大于实验室校准范围雷诺数的情况, 也给出了其校准曲线外推的方法。

5.5.2.5 流量计选型

由于流量计选择的复杂性, 本标准不能包括这些内容。本标准的使用者可参考 ASME PTC 19.5 获取更多信息。

5.5.2.6 能量和质量平衡计算

某些流量测量, 如过热减温水 and 再热减温水流量, 可通过能量平衡方法计算得到。当流量相对较小时, 能量平衡方法将是首选方法。当流量较大或有水冲刷下游热电偶时, 可首选直接测量方法。

5.5.3 空气和烟气

穿过余热锅炉边界的燃气轮机总排放烟气质量流量应采用能量平衡方法来计算。本标准要求使用燃气轮机能量平衡和余热锅炉能量平衡来计算排放的烟气流量, 两种计算方法的讨论分别见 6.3 和 6.4。燃气轮机能量平衡所需的燃气轮机部分的测量见 ASME PTC 22 中的第 4 章。宜采用 ASME PTC 22 标准作为燃气轮机能量平衡测量的依据。

5.5.4 液态燃料

如果采用燃烧液态燃料的烟道式燃烧器, 则应确定液态燃料的流量。有关燃烧液态燃料燃气轮机的燃料流量测量, 参考 ASME PTC 22 和 ASME PTC 19.5。

液态燃料流量的测量可采用符合 ASME PTC 19.5 标准安装的流量孔板来测量, 也可采用正位移流量计或涡轮流量计等来测量, 但需在试验时预计的雷诺数运行范围内进行校准。对于容积式流量计, 燃料的温度也应准确地测量, 以确保流量计算正确。如果流量测量误差不大于 0.75%, 则其他类型的流量计或未校准的流量计也允许使用。液态燃料流量的密度参考 ASTM D 1480, 液态燃料的黏度参考 ASTM D 445。

5.5.5 气态燃料

如果采用燃烧气态燃料的烟道式燃烧器, 则应确定气态燃料的流量。

气态燃料流量的测量要求采用文丘里、流量孔板、流量喷嘴或涡轮流量计。对流量孔板、文丘里或喷嘴流量计的安装指南和计算方法, 参见 ASME PTC 19.5。对差压式流量计, 应采用差压变送器来测量压降, 其输出信号能通过人工读数或由数据采集系统读出。气体的密度应遵循 AGA Report No.8 中详述的方法和程序来确定。线性流量计应在期望的工作压力下进行校准以减少测量误差。如果流量测量误差能保证小于 0.75%, 则也可使用未经校准的流量计。

5.6 液态和气态燃料的取样

5.6.1 概述

在性能试验期间, 宜按照 ASTM D 4057 或 ASTM D 5287 中描述的方法提取具有代表性的液态燃料的样品。

5.6.2 取样的测量系统不确定度

估计某个取样过程的不确定度时, 试验工程师宜考虑以下潜在的误差源, 以下所列的误差源并非适

用所有的测量项目，可能还有其他误差源未列入：

- a) 取样的地点和几何形状；
- b) 取样点的数量和位置；
- c) 取样位置处的大气环境；
- d) 燃料及其变化；
- e) 样品处理和保存；
- f) 试验的持续时间；
- g) 获取的样品数量。

一个样品的系统不确定度估算是综合了样品获取、取样位置和气流均匀性的系统不确定度极限。

5.6.3 液体或气体取样的方法

宜按照 GPA 2166 标准，采用正确的取样方法和取样设备来获得液体或气体的样品。当采用直通式容器法取样时，容器内的重碳氢化合物会出现浓缩现象，本标准推荐采用真空取样瓶的取样方法。如果所供气体成分一致性好，宜至少取三个样品（试验开始、中间和结束）。如果气体成分一致性不能确定，则宜取五个等时间间隔的样品。如果试验前确认在线气体光谱分析仪表准确度满足要求，并且通过送有限的样品（每次试验一个样品）的实验室分析确认其不确定度在 $\pm 0.4\%$ （发热量），则可使用在线气体光谱分析仪的结果。试验期间的备份样品也宜提取，以防止试验时色谱仪出现故障。

一个样品的系统不确定度估算是综合了样品获取、取样位置和气流均匀性的系统不确定度极限。

5.6.4 燃料分析

5.6.4.1 概述

本标准要求采用最新方法和程序来分析样品。选择分析实验室时，试验各方宜选择具有检验资质的实验室。

5.6.4.2 燃料分析的系统不确定度

针对样品燃料分析的系统不确定度估计，ASTM 提供了不同实验室之间比对的系统不确定度估计指南。另外，参照样品可从 NIST 获取，并与试样一起送至实验室分析。对气态燃料分析，ASME PTC 22 给出了期望的系统不确定度为 $\pm 0.4\%$ （发热量）的参考值。

5.6.5 燃料分析的方法

气态燃料分析宜采用依据 ASTM D 1945 标准的气相色谱分析仪。高位发热量按照本标准 6.2.4 进行计算。液态燃料发热量宜依据 ASTM D 4809 标准，采用弹式量热计来确定。

5.7 功率测量

采用燃气轮机能量平衡确定排气流量时需要测量功率。燃气轮机输出功率的测量方法见 ASME PTC 22。

5.8 数据采集和处理

5.8.1 数据采集和计算系统

为了使数据采集系统的不确定度小于量程的 0.01%，模数转换器的位数应为 14 位以上。

5.8.1.1 数据采集系统

数据采集系统宜设计成能接受多个测量仪表的输入信号，并且能够在 1min~2min 内对所有的仪表进行数据取样，获得机组在相同工况下所有必要的的数据。系统宜能在 2min 内采集、储存和报告结果。数据应全部带时间标签。

5.8.1.2 数据计算

数据的整理和计算见 6.1.2 的内容。

5.8.2 数据管理

5.8.2.1 数据储存

由仪表输入的信号宜储存起来，以便在试验后使用新的仪表校准结果对其进行修正。如果是在试验现场进行修正处理，则宜同时储存每个仪表的以工程单位表示的数据和修正后的结果。在离开试验工地前，所有的试验数据宜储存在可移动媒介中，以防设备损坏和运输过程中数据丢失。

5.8.2.2 人工采集数据

大多数试验程序都需要对某些数据采用人工方式采集。数据记录单宜注明数据点、试验现场位置、日期、时间、数据采集仪、采集次数和所采集的数据。

5.8.2.3 数据分发

在离开试验现场前，试验各方宜获取以工程单位表示的数据和所有人工采集的数据。

5.8.3 数据采集系统的构建

5.8.3.1 数据采集系统硬件设计

随着计算机技术的发展，数据采集系统的配置也很灵活。可由中央处理器或电厂多位置的分布式处理器组成。

每个测量回路都应设计成可以单独进行校准的回路，能够单独对其进行连续性检查和供电，以便在系统初始化过程中确定故障位置。

每个仪表的信号线宜设计成带有屏蔽的外层，且屏蔽线的一端应接地以消除感应电流。

5.8.3.2 数据采集系统的校准

当考虑某个测量的准确度时，应考虑整个测量回路的准确度，包括测量仪表和信号调制回路或过程的准确度。理想情况下，仪表校准时，宜将仪表均按照试验实际接入数据采集系统的位置上进行校准。如果无法实现，宜将测量回路的每一设备分别进行单独校准，包括测量回路的电流电压源和电阻。

如果在试验前没有进行回路校准，则试验各方宜允许使用一台信号发生器对测量回路进行点检，以确定测量回路的综合不确定度没有超出期望值范围。

5.8.3.3 使用现有电厂测量仪表和控制系统

本标准并不禁止在性能试验时采用电厂测量仪表和控制系统进行测量，但应满足本条款的要求。应注意以下几个方面：

- 1) 典型电厂的测量和控制系统并不采用严格的方法进行流量计算，而往往采用带补偿系数的流量

比例关系式来计算流量，流量计算宜根据本标准 5.5 的规定。

- 2) 通常电厂测量系统没有自动校准值修正的功能，有些仪表如热电偶的输出就不能进行修正，因此，需要对输出进行校准修正。
- 3) 某些电厂的系统不允许仪表信号在调制前进行显示或储存，为了能检查信号在调制和计算过程中的误差，应能调用原始数据。
- 4) 分散控制系统一般只报告参数的变化或储存那些超出设定阈限的参数值，这时应将阈值调整到足够小，以便在试验期间所有送到分散控制系统的数据都能被读取和存储。

6 计算

6.1 概述

6.1.1 总论

计算的目的是为了确定修正后的出力、烟气侧压降和蒸汽侧压降。为了预测试验条件下的性能值，应确定燃气轮机排气流量和组分。本标准的方法是分别采用燃气轮机和余热锅炉的能量平衡来获得燃气轮机排气流量，然后用不确定度加权计算来将这两种结果综合以得到一个期望值，该值用于预测试验条件下的性能值。

主要通过余热锅炉能量平衡的计算方法来获得燃气轮机排气流量和组分。为了计算燃气轮机排气组分，需要得到足够的燃气轮机数据，以确定排气的焓值。如果试验中投运了烟道式燃烧器，则在计算中还应考虑排气组分变化和输入热流量的变化。

当测量得到燃料流量和注入水或蒸汽参数，唯一的未知量是燃气轮机的空气流量。燃气轮机排气的总放热量等于工质吸收的热量加上热损失。为了确定进入和离开余热锅炉的烟气组分，将进入燃气轮机的空气分成两部分：燃烧消耗空气部分和平衡空气部分。燃烧消耗空气部分包括燃料燃烧、注入水或蒸汽、补燃空气和雾化蒸汽等后的变化，可以计算得到这部分的流量和组分；平衡空气部分仅仅是湿空气。总的余热锅炉输入热量等于进入和离开余热锅炉的烟气焓值与各自烟气量的乘积之差。

利用计算得到烟气流量及组分，以及其他测量数据后，试验条件下余热锅炉的预期出力就能确定。预期出力可与试验出力进行比较，也能用于将试验出力修正到保证条件下。

6.1.2 数据整理

试验结束，当所有的数据和记录处理完成后，宜仔细地检查并确认参数波动是否超出了允许的变化范围。如果试验记录的数据或者试验结果存在不一致性，则可要求重做部分或者全部试验以达到试验目的。

宜按照 ASME PTC 19.1 的要求剔除异常的试验数据，其余数据宜取平均值用于计算来确定设备的性能。

6.2 中间值计算

6.2.1 空气组分计算

6.2.1.1 总则

假设进口干空气组分的摩尔组分取自 NASA 报告 1311 (Gordon 1982)，如下：

氮气：78.084 0%；

氧气：20.947 6%；

氩气：0.936 5%；

二氧化碳：0.031 9%；

合计：100.000%。

燃气轮机进口干空气组分经大气湿度和大气压力修正后，得到进口空气各组分的质量分数和摩尔流量。湿度依据美国供暖、制冷和空调工程师协会的基础数据手册来计算。

6.2.1.2 所需的数据

所需数据包括空气流量，kg/h；大气压力，MPa；干球温度，℃；湿球温度，℃；或者相对湿度，%。

6.2.1.3 计算步骤

第 1 步：如果已知干球温度和湿球温度，则采用以下公式计算湿球温度下水或冰的汽化压力：

$$\ln(p_v) = C_1 / t_R + C_2 + C_3 t_R + C_4 t_R^2 + C_5 t_R^3 + C_6 t_R^4 + C_7 \ln(t_R) \quad (5)$$

$$t_R = 1.8 \times t_{WB} + 491.67$$

式中：

t_{WB} ——湿球温度，℃；

p_v ——汽化压力，MPa。

当温度范围为-100℃～0℃时，冰的汽化压力公式常数为：

$$C_1 = -1.021\,416\,5 \times 10^4$$

$$C_2 = -9.870\,232\,8$$

$$C_3 = -5.376\,579\,4 \times 10^{-3}$$

$$C_4 = -1.920\,237\,7 \times 10^{-7}$$

$$C_5 = -3.557\,583\,2 \times 10^{-10}$$

$$C_6 = -9.034\,468\,8 \times 10^{-14}$$

$$C_7 = -4.163\,501\,9$$

当温度范围为 0℃～200℃时，水的汽化压力公式常数为：

$$C_1 = -1.044\,039\,7 \times 10^4$$

$$C_2 = -16.271\,64$$

$$C_3 = -2.702\,235\,5 \times 10^{-2}$$

$$C_4 = 1.289\,036 \times 10^{-5}$$

$$C_5 = -2.478\,068\,1 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = 0$$

$$C_7 = 6.545\,967\,3$$

转入第 4 步。

第 2 步：如果已知干球温度和相对湿度，则将干球温度代入第 1 步中的公式来计算汽化压力，空气中水的分压力为汽化压力乘以相对湿度再除以 100，计算公式为：

$$p_w = p_v HR_{REL} / 100 \quad (6)$$

第 3 步：干空气的质量分数由大气压力减去空气中水的分压再除以大气压力计算得到，公式为：

$$w_{DA} = (p_{ATM} - p_w) / p_{ATM} \quad (7)$$

比湿度由干空气的质量分数的倒数减 1 后，再乘以水的分子量除以干空气的分子量计算得到，公式为：

$$HR = (1/w_{DA} - 1) \times 18.015\,28 / 28.965\,18 \quad (8)$$

转入第 7 步。

第 4 步：饱和比湿度由大气压力和汽化压力采用下面公式计算得到：

$$HR_{SAT} = \frac{0.62198 \times 1.0039 \times p_v}{p_{ATM} - 1.0039 \times p_v} \quad (9)$$

第 5 步：实际比湿度由饱和比湿度、湿球温度和干球温度采用下面公式计算得到：

$$HR = \frac{(1075.208 - 1.0008 t_{WB}) HR_{SAT} - 0.432(t_{DB} - t_{WB})}{1075.208 + 0.7992 t_{DB} - 1.8 t_{WB}} \quad (10)$$

第 6 步：干空气的质量分数由实际比湿度采用下面公式计算得到：

$$w_{DA} = \frac{18.01528}{28.9651785HR + 18.01528} \quad (11)$$

第 7 步：计算湿空气组分的摩尔分数

干空气的质量分数乘以干空气摩尔分数等于实际空气组分的摩尔分数：

$$\text{氮气摩尔分数} = x_{N_2} = 0.780840 \times w_{DA}$$

$$\text{氧气摩尔分数} = x_{O_2} = 0.209476 \times w_{DA}$$

$$\text{氩气摩尔分数} = x_{Ar} = 0.009365 \times w_{DA}$$

$$\text{二氧化碳摩尔分数} = x_{CO_2} = 0.000319 \times w_{DA}$$

水的摩尔分数由 1 减去干空气的质量分数得到：

$$\text{水的摩尔分数} = x_{H_2O} = 1.0 - w_{DA}$$

空气中的二氧化硫的组分为 0：

$$\text{二氧化硫摩尔分数} = x_{SO_2} = 0.0$$

第 8 步：采用下面公式计算湿空气平均分子量：

$$M_{AVG} = 28.01348x_{N_2} + 31.9988x_{O_2} + 44.0098x_{CO_2} + 18.01528x_{H_2O} + 39.948x_{Ar} + 64.0648x_{SO_2} \quad (12)$$

第 9 步：湿空气中各组分的摩尔流量等于各组分的摩尔分数乘以空气流量，再除以空气平均分子量：

$$\text{氮气的摩尔流量} = q_{M, N_2} = x_{N_2} \times q_A / M_{AVG}$$

$$\text{氧气的摩尔流量} = q_{M, O_2} = x_{O_2} \times q_A / M_{AVG}$$

$$\text{二氧化碳的摩尔流量} = q_{M, CO_2} = x_{CO_2} \times q_A / M_{AVG}$$

$$\text{水的摩尔流量} = q_{M, H_2O} = x_{H_2O} \times q_A / M_{AVG}$$

$$\text{氩气的摩尔流量} = q_{M, Ar} = x_{Ar} \times q_A / M_{AVG}$$

$$\text{二氧化硫的摩尔流量} = q_{M, SO_2} = x_{SO_2} \times q_A / M_{AVG}$$

第 10 步：湿空气中各组分的质质量分数等于各组分的摩尔分数乘以其分子量，再除以空气平均分子量：

$$\text{氮气的质质量分数} = w_{N_2} = 28.01348 \times x_{N_2} / M_{AVG}$$

$$\text{氧气的质质量分数} = w_{O_2} = 31.9988 \times x_{O_2} / M_{AVG}$$

$$\text{二氧化碳质质量分数} = w_{CO_2} = 44.0098 \times x_{CO_2} / M_{AVG}$$

$$\text{水质质量分数} = w_{H_2O} = 18.01528 \times x_{H_2O} / M_{AVG}$$

$$\text{氩水质质量分数} = w_{Ar} = 39.948 \times x_{Ar} / M_{AVG}$$

$$\text{二氧化硫质质量分数} = w_{SO_2} = 64.0648 \times x_{SO_2} / M_{AVG}$$

6.2.2 燃烧燃料气而引起的摩尔流量的变化

6.2.2.1 总则

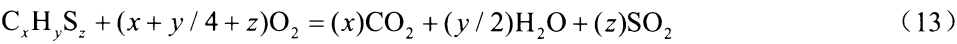
本条款用于确定燃料气中各组分在完全化学燃烧下引起空气或烟气流中各组分的摩尔流量的变化。

6.2.2.2 所需要的数据

- a) 燃料气流量 (kg/h); 或燃料气容积流量 [m³/h (标准状态)] 和密度 (kg/m³)
- b) 燃料气各组分的摩尔分数。

6.2.2.3 燃烧率表

表 10 给出了每摩尔燃料气组分燃烧引起的空气组分摩尔流量变化的比率。燃料气中的任何惰性组分按照摩尔比 1:1 直接归入燃烧产物中, 例如氮气或二氧化碳。表中的数值按照以下通用的单位摩尔燃料气组分的氧化反应方程式得到:



因为氧化反应过程消耗了氧气, 因此氧气的系数应为负值。

表 10 每摩尔燃料组分燃烧引起的空气组分摩尔流量变化的比率

燃料气组分	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O	Ar	SO ₂
CH ₄	0	-2	1	2	0	0
C ₂ H ₆	0	-3.5	2	3	0	0
C ₂ H ₄	0	-3	2	2	0	0
C ₃ H ₈	0	-5	3	4	0	0
C ₃ H ₆	0	-4.5	3	3	0	0
C ₄ H ₁₀	0	-6.5	4	5	0	0
C ₄ H ₈	0	-6	4	4	0	0
C ₅ H ₁₂	0	-8	5	6	0	0
C ₅ H ₁₀	0	-7.5	5	5	0	0
C ₆ H ₁₄	0	-9.5	6	7	0	0
N ₂	1	0	0	0	0	0
CO	0	-0.5	1	0	0	0
CO ₂	0	0	1	0	0	0
H ₂ O ₂	0	0	0	1	0	0
H ₂	0	-0.5	0	1	0	0
H ₂ S	0	-1.5	0	1	0	1
He	0	0	0	0	0	0
O ₂	0	1	0	0	0	0
Ar	0	0	0	0	1	0

6.2.2.4 计算步骤

第 1 步: 燃料气的平均分子量等于各燃料气组分的摩尔分数与其分子量乘积的代数和。一些典型组分的分子量见第 3 章。

$$M_{FG} = \sum (x_i \times M_i) \quad (14)$$

第2步：燃料气摩尔流量等于燃料气质量流量除以燃料气平均分子量：

$$q_{M, FG} = \frac{q_{FG}}{M_{FG}} \quad (15)$$

有时，燃料气流量以标准工况下的容积流量（m³/h）表示，这时，燃料气摩尔流量由以下公式计算：

$$q_{M, FG} = \frac{V_{FG} \rho_{FG}}{M_{FG}} \quad (16)$$

标准工况定义为压力 101.325kPa 和温度 15.56℃时的环境工况。

第3步：计算氮气摩尔流量的变化量。由燃料气摩尔流量乘以燃料气中氮气的摩尔分数得到。

第4步：计算氧气摩尔流量的变化量。由所有燃料气组分燃烧引起氧气摩尔流量的变化量之和得到。各燃料气组分引起氧气摩尔流量的变化量等于燃料气摩尔流量、该燃料气组分的摩尔分数和该燃料气组分氧气燃烧率的乘积。

第5步：计算二氧化碳摩尔流量的变化量。由所有燃料气组分燃烧引起二氧化碳摩尔流量的变化量之和得到。各燃料气组分引起二氧化碳摩尔流量的变化量等于燃料气摩尔流量、该燃料气组分的摩尔分数和该燃料气组分二氧化碳燃烧率的乘积。

第6步：计算水摩尔流量的变化量。由所有燃料气组分燃烧引起水摩尔流量的变化量之和得到。各燃料气组分引起水摩尔流量的变化量等于燃料气摩尔流量、该燃料气组分的摩尔分数和该燃料气组分水燃烧率的乘积。

第7步：计算氩气摩尔流量的变化量。由燃料气摩尔流量乘以燃料气中氩气的摩尔分数得到。

第8步：计算二氧化硫摩尔流量的变化量。由所有燃料气组分燃烧引起二氧化硫摩尔流量的变化量之和得到。各燃料气组分引起二氧化硫摩尔流量的变化量等于燃料气摩尔流量、该燃料气组分的摩尔分数和该燃料气组分二氧化硫燃烧率的乘积。

第9步：用于燃烧的干空气流量为第4步中计算的氧气摩尔流量的变化量除以干空气中的氧气摩尔分数，再乘以干空气分子量。用于燃烧的湿空气流量为用于燃烧的干空气流量乘以 1 加空气的比湿度之和：

$$q_{AC} = \frac{\Delta q_{M, O_2}}{0.209476} \times 28.9651785 \times (1 + HR) \quad (17)$$

6.2.3 燃烧燃油引起的摩尔流量变化

6.2.3.1 概述

本条款用于确定燃油中各组分在完全化学燃烧下引起空气或烟气流中各组分的摩尔流量的变化。

6.2.3.2 所需的数据

- a) 燃油流量，kg/h；
- b) 燃油各元素的质量分数。

6.2.3.3 计算步骤

第1步：计算氮气摩尔流量的变化量。等于燃油流量乘以燃油中氮的质量分数，再除以 28.01348。

第2步：计算氧气摩尔流量的变化量。等于氧气质量分数除以 31.9988，再分别减去碳的质量分数除以 12.011，减去氢的质量分数除以 4.03176，减去硫的质量分数除以 32.066 后，所得结果再乘以燃油流量。

$$\Delta q_{M, O_2} = (w_O / 31.998\,8 - w_C / 12.011 - w_H / 4.317\,6 - w_S / 32.06\,6) \times q_{FO} \tag{18}$$

- 第 3 步：计算二氧化碳摩尔流量的变化量。等于燃油流量乘以燃油中的碳的质量分数再除以 12.011。
- 第 4 步：计算水摩尔流量的变化量。等于燃油流量乘以燃油中氢的质量分数再除以 2.015 88。
- 第 5 步：燃烧过程氩气摩尔流量没有发生改变。
- 第 6 步：计算二氧化硫摩尔流量的变化量。等于燃油流量乘以燃油中硫的质量分数再除以 32.066。
- 第 7 步：用于燃烧的干空气质量为第 2 步中氧气摩尔流量的变化量除以干空气中氧气的摩尔分数再乘以干空气分子量。用于燃烧的湿空气流量为用于燃烧的干空气流量乘以 1 加空气的比湿度之和。计算方法见式（17）。

6.2.4 燃料气发热量

6.2.4.1 概述

计算中所采用得燃烧热量均为低位发热量，不要将低位发热量与包含水的汽化潜热的高位发热量相混淆。燃料气的发热量是根据燃料气组分数据计算得出。

6.2.4.2 所需的数据

- a) 燃料气组分的摩尔分数；
- b) 燃料气温度，℃。

6.2.4.3 燃料气组分的发热量表

表 11 取自 ASTM D 3588-98，并在 GPA2145-03 标准的基础上依据 ASTM D 3588 表 1 中的表注 A 进行了更新。应采用这些标准的最新版本。丁烯、戊烯、己烷的发热量为各种同分异构体发热量的平均值。发热量的基准为 0.101 325MPa，15.56℃。

表 11 燃料气组分的发热量

组分名称	分子式	分子量 kg/kmol	燃烧低位发热量（LHV） MJ/kg
甲烷	CH ₄	16.042 76	50.016 0
乙烷	C ₂ H ₆	30.069 64	47.524 8
乙烯	C ₂ H ₄	28.053 76	47.166 6
丙烷	C ₃ H ₈	44.096 52	46.340 9
丙烯	C ₃ H ₆	42.086 40	45.771 0
异丁烷	C ₄ H ₁₀	58.123 40	45.559 4
正丁烷	C ₄ H ₁₀	58.123 40	45.726 8
丁烯（平均）	C ₄ H ₈	56.107 52	45.240 7
异戊烷	C ₅ H ₁₂	72.150 28	45.254 7
正戊烷	C ₅ H ₁₂	72.150 28	45.352 3
戊烯（平均）	C ₅ H ₁₀	70.134 40	44.956 9
己烷（平均）	C ₆ H ₁₄	86.177 16	45.015 1

表 11 (续)

组分名称	分子式	分子量 kg/kmol	燃烧低位发热量 (LHV) MJ/kg
氮气	N ₂	28.013 48	0
一氧化碳	CO	28.010 40	10.099 5
二氧化碳	CO ₂	44.009 80	0
水	H ₂ O	18.015 28	0
硫化氢	H ₂ S	34.081 88	15.198 1
氢气	H ₂	2.015 88	119.942 5
氦气	He	4.002 60	0
氧气	O ₂	31.998 80	0
氩气	Ar	39.948 00	0

6.2.4.4 计算步骤

第 1 步：计算燃料气分子量。等于各燃料气组分的摩尔分数与其分子量的乘积之和。

第 2 步：计算各燃料气组分的发热量份额。等于该燃料气组分的摩尔分数、分子量和燃烧发热量的乘积，再除以燃料气分子量。

第 3 步：计算燃料气的理想发热量。等于所有燃料气组分的发热量份额之和。

第 4 步：计算燃料气的显热。式 (19) 用于计算燃料气的显热，适用于天然气。但对非标准燃料气，尤其是含有氢的燃料气，需要采用不同的计算方法。见资料性附件 D。

$$h_{\text{FS}} = t_{\text{F}}^2 / 626.307 + 2.112 5 t_{\text{F}} - 33.194 \quad (19)$$

式中：

t_{F} ——燃料气温度，℃。

第 5 步：燃料气的净发热量是燃料气的理想发热量和燃料气显热之和。

6.2.5 燃油发热量

6.2.5.1 总则

计算中所采用得燃烧热量均为低位发热量，不要将低位发热量与包含水的汽化潜热的高位发热量相混淆。燃油的发热量是依据 ASTM D 4809 弹式量热计试验来确定。

6.2.5.2 所需的数据

燃油的理想发热量，kJ/kg。

燃油温度，℃。

6.2.5.3 计算

第 1 步：采用式 (20) 计算燃油的显热。公式取自 Perry 的《化学工程手册》，第七版，第 10 页～27 页。见资料性附录 D。

$$h_{\text{FS}} = t_{\text{F}}^2 / 548.28 + 1.810 7 t_{\text{F}} - 28.63 \quad (20)$$

第 2 步：燃油净发热量是燃油理想发热量和燃油显热之和。

6.2.6 气体焓值

6.2.6.1 总则

气体焓值为气流中各组分的焓值的质量加权值。各组分的焓值由 NASA 拟合公式（参见 NASA/TP-2002-211556，2002 年 9 月）推导得出。

6.2.6.2 所需的数据

- a) 气体温度，℃；
- b) 气体中各组分的质质量分数。

6.2.6.3 焓值计算公式中的系数

气体中每种组分的焓值是气体温度的函数。由每种组分的焓值公式计算给出两种范围内的系数，以 1000K（726.85℃）为界分为两个温度范围，系数见表 12。

$$h_i = -A_1 / T + A_2 \ln(T) + A_3 T + A_4 T^2 + A_5 T^3 + A_6 T^4 + A_7 T^5 - A_8 \quad (21)$$

式中：

h_i —— 气体中第 i 组分的焓值，kJ/kg；

T —— 气体的温度，K；

$A_1 \sim A_8$ —— 每种组分焓值公式中的系数。

表 12 各组分焓值公式中的系数

温度范围, K	组分	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
200~1000	N_2	$6.560\,487\,5 \times 10^3$	$-1.133\,337\,6 \times 10^2$	1.805 385 6	$-1.266\,007\,9 \times 10^{-3}$	$1.369\,898\,5 \times 10^{-6}$	$-7.142\,453\,0 \times 10^{-10}$	$1.495\,721\,3 \times 10^{-13}$	$-2.207\,96 \times 10^2$
1000~6000		$1.744\,358\,3 \times 10^5$	$-6.646\,197\,5 \times 10^2$	1.800 699 3	$-9.111\,438\,9 \times 10^{-5}$	$1.475\,917\,7 \times 10^{-8}$	$-1.426\,967\,1 \times 10^{-12}$	$6.303\,862\,0 \times 10^{-18}$	$-3.818\,50 \times 10^3$
200~1000	O_2	$-8.900\,921\,7 \times 10^3$	$1.259\,436\,0 \times 10^2$	$2.907\,617\,7 \times 10^{-1}$	$5.578\,581\,9 \times 10^{-4}$	$-5.921\,105\,9 \times 10^{-8}$	$-1.314\,373\,7 \times 10^{-10}$	$5.399\,645\,4 \times 10^{-14}$	$8.725\,69 \times 10^2$
1000~6000		$-2.696\,961\,9 \times 10^5$	$6.092\,764\,4 \times 10^2$	$4.728\,358\,6 \times 10^{-1}$	$1.647\,176\,1 \times 10^{-4}$	$-1.895\,145\,4 \times 10^{-8}$	$1.334\,086\,9 \times 10^{-12}$	$-4.257\,951\,2 \times 10^{-17}$	$4.380\,03 \times 10^3$
200~1000	CO_2	$9.339\,808\,9 \times 10^3$	$-1.183\,450\,3 \times 10^2$	1.001 630 3	$2.365\,169\,5 \times 10^{-4}$	$-1.339\,675\,1 \times 10^{-8}$	$-3.632\,084\,5 \times 10^{-11}$	$1.076\,752\,7 \times 10^{-14}$	$-3.944\,83 \times 10^2$
1000~6000		$2.223\,580\,3 \times 10^4$	$-3.379\,480\,5 \times 10^2$	1.566 478 9	$-8.712\,440\,4 \times 10^{-6}$	$3.053\,250\,1 \times 10^{-10}$	$-8.931\,697\,5 \times 10^{-14}$	$2.391\,808\,7 \times 10^{-17}$	$-1.565\,53 \times 10^3$
200~1000	H_2O	$-1.822\,084\,4 \times 10^4$	$2.656\,416\,3 \times 10^2$	$4.300\,414\,0 \times 10^{-1}$	$1.666\,732\,9 \times 10^{-3}$	$-1.129\,592\,3 \times 10^{-6}$	$5.717\,196\,5 \times 10^{-10}$	$-1.234\,057\,4 \times 10^{-13}$	$1.807\,71 \times 10^3$
1000~6000		$4.776\,659\,5 \times 10^5$	$-1.113\,521\,8 \times 10^3$	2.144 298 3	$5.289\,077\,6 \times 10^{-4}$	$-1.051\,790\,4 \times 10^{-7}$	$1.087\,638\,8 \times 10^{-11}$	$-4.451\,302\,6 \times 10^{-16}$	$-7.052\,14 \times 10^3$
200~1000	Ar	0	0	$5.203\,333\,1 \times 10^{-1}$	0	0	0	0	$1.502\,25 \times 10^2$
1000~6000		4.184 600 5	$-1.247\,272\,4 \times 10^{-2}$	$5.203\,477\,5 \times 10^{-1}$	$-4.154\,488\,0 \times 10^{-9}$	$8.361\,907\,4 \times 10^{-13}$	$-9.464\,948\,0 \times 10^{-17}$	$4.489\,753\,6 \times 10^{-21}$	$1.501\,46 \times 10^2$
200~1000	SO_2	$-6.892\,667\,9 \times 10^3$	$1.179\,784\,6 \times 10^2$	$-3.058\,887\,5 \times 10^{-1}$	$1.430\,520\,9 \times 10^{-3}$	$-1.086\,204\,6 \times 10^{-6}$	$4.692\,696\,9 \times 10^{-10}$	$-8.745\,086\,6 \times 10^{-14}$	$7.001\,43 \times 10^2$
1000~6000		$-1.463\,505\,9 \times 10^4$	$-1.071\,018\,4 \times 10^2$	$9.884\,645\,2 \times 10^{-1}$	$-1.297\,412\,1 \times 10^{-5}$	$2.446\,717\,4 \times 10^{-9}$	$-1.769\,719\,0 \times 10^{-13}$	$7.575\,006\,6 \times 10^{-18}$	$-2.893\,93 \times 10^2$

6.2.6.4 计算步骤

第1步：计算在给定温度及其对应公式系数下的各气体组分的焓值。

第2步：气体焓值是各组分的焓值与其质量分数乘积之和。

$$h_G = w_{N_2} h_{N_2} + w_{O_2} h_{O_2} + w_{CO_2} h_{CO_2} + w_{H_2O} h_{H_2O} + w_{A_r} h_{A_r} + w_{SO_2} h_{SO_2} \quad (22)$$

6.2.7 燃气轮机排气组成

6.2.7.1 总则

为了计算排气的焓值，应确定燃气轮机排气组成。燃气轮机排气气体的组分由燃气轮机入口空气、注入蒸汽或水以及燃料燃烧而引起的组分变化量来确定。

6.2.7.2 所需的数据

- a) 空气流量，kg/h；
- b) 注入蒸汽或水的流量，kg/h；
- c) 燃料流量，kg/h；
- d) 空气摩尔流量，kmol/h（见 6.2.1.3 第 9 步）；
- e) 摩尔流量的变化量，kmol/h（燃料气见 6.2.2.4 中第 3 步和第 8 步，燃油见 6.2.3.3 中第 1 步和第 6 步）。

6.2.7.3 计算步骤

第1步：计算注入蒸汽或水的摩尔流量。等于注入蒸汽或水的流量除以 18.015 28。

第2步：计算氮气摩尔流量。等于空气中氮气摩尔流量与燃料燃烧引起氮气摩尔流量的变化量之和。

第3步：计算氧气摩尔流量。等于空气中氧气的摩尔流量与燃料燃烧引起氧气摩尔流量的变化量之和。

第4步：计算二氧化碳摩尔流量。等于空气中二氧化碳的摩尔流量与燃料燃烧引起二氧化碳摩尔流量的变化量之和。

第5步：计算水摩尔流量。等于空气中水的摩尔流量与燃料燃烧引起水摩尔流量的变化量及注入的蒸汽或水的摩尔流量之和。

第6步：计算氩气摩尔流量。等于空气中氩气的摩尔流量。

第7步：计算二氧化硫摩尔流量。等于空气中二氧化硫的摩尔流量与燃料燃烧引起二氧化硫摩尔流量的变化量之和。

第8步：计算燃气轮机排气总质量流量。等于空气流量、燃料流量和注入蒸汽或水的流量之和。

第9步：计算燃气轮机排气各组分的质量分数。各排气组分的质量分数为该组分的摩尔流量乘以该组分的分子量再除以燃气轮机排气总质量流量。

6.2.8 采用热平衡方法计算过热减温水流量

6.2.8.1 总则

减温水流量宜直接使用流量计进行测量。另一个可替代的方法是通过热平衡来确定减温水流量。需要注意的是，由于减温水喷水处的温度可能与减温水源水温有很大的不同，因此减温水温度测量位置应靠近减温水喷水点。

假定给水流量测量装置后没有排污及其他抽汽，则认为流过过热减温器的蒸汽流量等于给水流量。

6.2.8.2 所需的数据

- a) 喷水前的蒸汽温度, $^{\circ}\text{C}$;
- b) 喷水后的蒸汽温度, $^{\circ}\text{C}$;
- c) 喷水处的蒸汽压力, MPa ;
- d) 减温水温度, $^{\circ}\text{C}$;
- e) 减温水压力, MPa ;
- f) 给水流量, kg/h 。

6.2.8.3 计算步骤

第1步: 根据减温器喷水前的蒸汽压力和温度, 计算减温器前的蒸汽焓值。

第2步: 根据减温器喷水后的蒸汽压力和温度, 计算减温器后的蒸汽焓值。

第3步: 根据减温水的压力和温度, 计算减温水焓值。

第4步: 减温水流量等于给水流量乘以减温水前后蒸汽焓值差, 再除以减温水后蒸汽焓值与减温水焓值之差。

6.2.9 采用热平衡方法计算抽出流体的流量

6.2.9.1 总则

任何通过试验边界的流量均宜采用直接测量法来确定。替代方法是通过热平衡来确定, 但该方法尽可能不要采用。例如, 从系统抽出的热水经外部热交换器来预热燃料气, 当所有进出热交换器的温度、压力、燃料气流量等参数均已知时, 则抽出热水流量可以计算得出。

6.2.9.2 所需的数据

- a) 进水温度, $^{\circ}\text{C}$;
- b) 出水温度, $^{\circ}\text{C}$;
- c) 进水压力, MPa ;
- d) 出水压力, MPa ;
- e) 被加热工质的流量, kg/h ;
- f) 被加热工质的进口温度, $^{\circ}\text{C}$;
- g) 被加热工质的出口温度, $^{\circ}\text{C}$;
- h) 被加热工质的比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

6.2.9.3 计算

第1步: 根据进、出水的压力和温度计算进、出水的焓值。

第2步: 热交换器换热流量为被加热工质的流量乘以该工质的比定压热容乘以该工质的进、出口温差。

第3步: 抽出水流量等于热交换器换热流量除以进水焓值和出水焓值之差。

6.3 采用余热锅炉能量平衡计算烟气流量

6.3.1 余热锅炉烟气流量计算

6.3.1.1 总则

余热锅炉的烟气流量由能量平衡确定。进入余热锅炉的能量与燃气轮机排气能量、任何烟道式燃烧

器输入的能量和进入余热锅炉的工质能量有关。流出余热锅炉的能量与余热锅炉排出的烟气能量、离开余热锅炉的工质能量和热损失有关。能量平衡公式为：

$$\Phi_{\text{GIN}} + \Phi_{\text{DB}} + \Phi_{\text{AA}} + \Phi_{\text{AS}} + \Phi_{\text{WFIN}} = \Phi_{\text{GOUT}} + \Phi_{\text{WFOUT}} + \Phi_{\text{HL}} \quad (23)$$

除进、出余热锅炉烟气的热量外，公式中其他各项均可确定。进、出余热锅炉烟气的热量分别为烟气流量乘以进、出烟气的焓值。烟气流量为进入燃气轮机的空气流量、燃气轮机燃料流量和所有注入蒸汽或水的流量之和，因此，空气流量为唯一的未测量未知变量。

烟气进、出余热锅炉的热量分为两部分：一部分为燃料燃烧产物流的热量和和其他补入的物质流携带的热量；另一部分为用于热量平衡的过量空气流所携带的热量。对于燃料燃烧产物流部分，进入余热锅炉的燃烧后烟气流量和组分是基于燃气轮机燃料完全燃烧、所有注入蒸汽或水，以及任何加入该燃烧产物中的烟道式燃烧器的物质流来确定的，因此，得到烟气出口的流量和组分，也能得到进、出余热锅炉的烟气所携带的热量。

平衡空气流的组分与湿空气相同，能够计算出进、出余热锅炉的焓值，因此，平衡空气流量能直接计算得到。进入余热锅炉烟气流量是平衡空气流量和燃烧后烟气流量之和。计算的基准温度为 15.56℃。

6.3.1.2 所需的数据

- a) 大气环境
 - 1) 湿球温度，℃；或者相对湿度，%；
 - 2) 干球温度，℃；
 - 3) 大气压力，MPa。
- b) 燃气轮机
 - 1) 燃料流量，kg/h，或燃料气容积流量 [m³/h (标准状态)] 和密度 (kg/m³)；
 - 2) 燃料组分；
 - 3) 注入蒸汽或水的流量，kg/h。
- c) 工质携带的能量，kJ/h
- d) 余热锅炉
 - 1) 进口烟气温度，℃；
 - 2) 出口烟气温度，℃；
 - 3) 热损失，kJ/h。
- e) 烟道式燃烧器
 - 1) 燃料流量，kg/h；
 - 2) 燃料温度，℃；
 - 3) 燃料组分；
 - 4) 燃料发热量 (油)，kJ/kg；
 - 5) 雾化蒸汽流量，kg/h；
 - 6) 雾化蒸汽焓值，kJ/kg；
 - 7) 补燃空气流量，kg/h；
 - 8) 补燃空气温度，℃。

6.3.1.3 计算步骤

计算过程包括一系列步骤，其中一些步骤涉及其他章节的计算内容。

第 1 步：进口空气组分根据大气环境参数来计算，见 6.2.1 所述。

第 2 步：燃气轮机燃料燃烧而引起的摩尔流量的变化量，燃料气和燃油分别根据 6.2.2 和 6.2.3 所述

方法进行计算。同时燃烧所需的湿空气流量也可计算得出。

第3步：如果有烟道式燃烧器，燃料燃烧引起的摩尔流量的变化量，燃料气和燃油分别根据6.2.2和6.2.3所述方法进行计算。同时燃烧所需的湿空气流量也可计算得出。

第4步：如果有烟道式燃烧器，燃料发热量包括燃料显热，燃料气和燃油分别根据6.2.4和6.2.5所述方法进行计算。

第5步：进口烟气组分的确定采用第2步和第3步中确定的燃烧所需的总湿空气流量，再加上从第2步得到的燃气轮机燃料燃烧而引起的摩尔流量的变化量。进口烟气组分的确定还应考虑注入燃气轮机的蒸汽或水的摩尔流量。同时进口烟气组分的质量分数就能计算得到，计算方法见6.2.7所述。余热锅炉进口燃烧后烟气流量等于燃烧所需的总湿空气流量、燃气轮机燃料流量和所有注入燃气轮机的蒸汽或水流量之和。

第6步：余热锅炉进口烟气焓值由第5步得到的进口烟气组分的质量分数和余热锅炉进口烟气温度来确定，计算方法见6.2.6所述。

第7步：如果有烟道式燃烧器，转入第8步。否则，余热锅炉出口烟气焓值由第5步得到的与进口烟气相同烟气组分的质量分数和余热锅炉烟气出口温度来确定，计算方法见6.2.6所述，转至第11步。

第8步：余热锅炉出口烟气组分由第5步中确定的燃气轮机排汽摩尔流量，再加上从第3步得出的烟道式燃烧器燃料燃烧而引起的摩尔流量的变化量来计算。余热锅炉出口烟气摩尔流量也应包括与燃烧器运行有关的空气或蒸汽的摩尔流量。同时烟气组分的质量分数就可确定，计算方法见6.3.2所述。

第9步：余热锅炉出口烟气焓值由第8步得到的烟气组分的质量分数和余热锅炉出口烟气温度计算得出，计算方法见6.2.6所述。

第10步：任何注入烟气流中的能量，如补燃空气或雾化蒸汽的能量均应计算在内，可通过该气流的质量流量乘以焓值来计算。在给定空气温度下，空气焓值由第1步确定的进口空气组分，并根据6.2.6所述方法来计算。雾化蒸汽的焓值为该蒸汽焓值减去2530.07kJ/kg（在15.56℃下从水蒸气表查取的饱和蒸汽焓值），目的是调整蒸汽焓值至基准温度下。燃料和注入气流的质量流量应加到燃料燃烧烟气流的质量流量中。

第11步：能量平衡公式应包含工质携带的能量。理论上的余热锅炉边界定义见3.3，工质携带的能量为工质流量乘以焓值。进入余热锅炉边界的工质能量为负值，离开余热锅炉边界的工质能量为正值。通常这些工质是水，采用ASME水蒸气表来确定工质的焓值。有时这些工质的流量不能直接测量，可根据热平衡方法来确定，计算方法见6.2.8和6.2.9。

第12步：余热锅炉的热损失。估算方法见6.3.3。

第13步：根据余热锅炉热平衡方程，平衡空气流量是唯一的未知变量，能直接由式(24)计算得到：

$$\begin{aligned} q_{BA} h_{AIN} + q_{GIN} h_{GIN} + q_{DB} HV_{NET} + q_{AA} h_A + q_{AS} h_{AS} + \Phi_{WFIN} \\ = \Phi_{WFOUT} + \Phi_{HL} + (q_{GIN} + q_{DB} + q_{AA} + q_{AS}) h_{GOUT} + q_{BA} h_{AOUT} \end{aligned} \quad (24)$$

第14步：余热锅炉进口烟气流量为第13步得到的平衡空气流量和第5步得到的余热锅炉进口燃烧后烟气流量之和。

第15步：余热锅炉进口平衡空气的各组分的摩尔流量由平衡空气流量乘以6.2.1.3第7步得到的该组分的摩尔分数，再除以6.2.1.3第8步得到的空气平均分子量计算得出。余热锅炉进口各组分的总摩尔流量等于该组分燃烧后烟气摩尔流量与该组分平衡空气摩尔流量之和。各组分的摩尔分数等于该组分的总摩尔流量除以所有组分的总摩尔流量之和。

6.3.2 烟道式燃烧器燃烧后的排气组成

6.3.2.1 概述

为了获得余热锅炉出口烟气焓值，应确定烟道式燃烧器后的烟气组分。该烟气组分与燃气轮机排气、

烟道式燃烧器入口物质流和由于烟道式燃烧器燃料燃烧引起的烟气组分变化量有关。

6.3.2.2 所需数据

- a) 燃气轮机排气流量, kg/h;
- b) 雾化蒸汽流量, kg/h;
- c) 补燃空气流量, kg/h;
- d) 空气分子量 (见 6.2.1.3 第 8 步);
- e) 烟道式燃烧器燃料流量, kg/h; 或燃料气容积流量 [m^3/h (标准状态)] 和密度 (kg/m^3);
- f) 烟气摩尔流量, kmol/h (见 6.2.7.3 第 2 步至第 7 步);
- g) 空气摩尔分数 (见 6.2.1.3 第 7 步);
- h) 摩尔流量的变化量, kmol/h (见 6.2.2.4 第 3 步~第 8 步, 以及 6.2.3.3 第 1 步~第 6 步)。

6.3.2.3 计算步骤

第 1 步: 雾化蒸汽的摩尔流量为雾化蒸汽流量除以 18.015 28。

第 2 步: 氮气的摩尔流量为燃气轮机排气中的氮气的摩尔流量, 加上燃料燃烧引起的氮气的摩尔流量的变化量, 再加上补燃空气流量乘以空气中氮气的摩尔分数除以空气分子量。

第 3 步: 氧气的摩尔流量为燃气轮机排气中的氧气的摩尔流量, 加上燃料燃烧引起的氧气的摩尔流量的变化量, 再加上补燃空气流量乘以空气中氧气摩尔分数除以空气分子量。

第 4 步: 二氧化碳的摩尔流量为燃气轮机排气中的二氧化碳的摩尔流量, 加上燃料燃烧引起的二氧化碳的摩尔流量的变化量, 再加上补燃空气流量乘以空气中二氧化碳摩尔分数除以空气分子量。

第 5 步: 水的摩尔流量为燃气轮机排气中的水的摩尔流量, 加上燃料燃烧引起的水的摩尔流量的变化量, 加上雾化蒸汽摩尔流量, 再加上补燃空气流量乘以空气中水摩尔分数除以空气分子量。

第 6 步: 氩气的摩尔流量为燃气轮机排气中的氩气的摩尔流量, 加上补燃空气流量乘以空气中氩气摩尔分数除以空气分子量。

第 7 步: 二氧化硫的摩尔流量为燃气轮机排气中的二氧化硫的摩尔流量, 加上燃料燃烧产生二氧化硫的摩尔流量的变化量。

第 8 步: 烟道式燃烧器出口排气流量等于燃气轮机排气流量, 加上烟道式燃烧器燃料流量, 加上补燃空气流量, 再加上雾化蒸汽流量。

第 9 步: 计算烟道式燃烧器燃烧后排气组分的质量分数。烟道式燃烧器燃烧后排气各组分的质量分数为该组分的摩尔流量乘以该组分的分子量, 再除以烟道式燃烧器排气总的的质量流量。

6.3.3 余热锅炉热损失

余热锅炉的热损失由余热锅炉侧进行估算, 是燃气轮机排气热量的函数。试验不确定度分析时通常不保证提供详细的计算。本标准给出的热损失计算公式是针对典型的余热锅炉, 对特殊的余热锅炉, 需要额外的计算内容, 详细计算见资料性附录 F。

热损失近似公式为:

$$Q_{\text{HL},\%} = -1.175 \times 10^{-10} \left(\frac{\Phi_{\text{GIN}}}{10^6} \right)^3 + 7.933 \times 10^{-7} \left(\frac{\Phi_{\text{GIN}}}{10^6} \right)^2 - 1.5734 \times 10^{-3} \left(\frac{\Phi_{\text{GIN}}}{10^6} \right) + 1.24 \quad (25)$$

$$\Phi_{\text{HL}} = (\Phi_{\text{GM}} - \Phi_{\text{GOUT}}) Q_{\text{HL},\%} / 100 \quad (26)$$

上述估算公式是根据基本负荷下运行的不带补燃余热锅炉得到。采用该公式用于带补燃的余热锅炉的热损失估算影响不大, 上述公式中的热量输入只考虑燃气轮机排气热量。公式适用的输入排气热流量范围为: $1.055 \times 10^8 \text{ kJ/h} \sim 1.583 \times 10^9 \text{ kJ/h}$ 。如果超出该范围时, 参考资料性附录 F 方法进行估算。

6.4 采用燃气轮机能量平衡计算燃气轮机排气流量

排气流量由燃气轮机能量平衡来计算确定。进入燃气轮机系统的能量有燃料、空气和注入蒸汽/水的能量。流出燃气轮机系统的能量有燃气轮机的排气能量、产生的电能、压气机抽汽能量和热损失。

根据燃气轮机能量平衡方程：

$$\Phi_{\text{GIN}} + \Phi_{\text{F}} + \Phi_{\text{I}} = \Phi_{\text{P}} + \Phi_{\text{HLL}} + \Phi_{\text{GOUT}} + \Phi_{\text{B}} \quad (27)$$

式(27)中，除排气流量有关的热量外，其他各项都均已定量。而排气流量中的未知部分是进入燃气轮机的空气流量。将烟气进、出燃气轮机的热量分为两部分：一部分为燃料燃烧产物流和其他注入物质流携带的热量；另一部分为平衡空气流携带的热量。对于燃料燃烧产物流部分，进入燃气轮机的空气流量是基于燃气轮机燃料完全燃烧计算得到。燃气轮机出口烟气的流量和组分的计算，根据注入物质流、压气机抽出空气、燃料流量及其组分对燃气轮机进口空气流的影响来确定。同时也能得到进、出燃气轮机的气流所携带的热量。

平衡空气流的组分与湿空气相同，能够计算出进、出燃气轮机的湿空气焓值，因此，平衡空气流量能直接计算得到。进入余热锅炉的烟气流量是进入余热锅炉的平衡空气流量和燃烧后烟气流量之和。烟气成分由烟气出口的上述两部分气流组分的摩尔流量来确定。计算方法见附录 H。

6.5 加权蒸汽流量

6.5.1 总则

采用几种方法得到的蒸汽流量需要计算出一个平均值。例如，利用燃气轮机能量平衡和余热锅炉能量平衡来获得两个蒸汽流量，其平均值应采用以各自流量不确定度为函数的加权平均值。

6.5.2 所需的数据

- a) q_1 : 蒸汽流量 1;
- b) U_1 : 不确定度 1;
- c) B_1 : 系统不确定度 1;
- d) S_1 : 随机不确定度 1;
- e) q_2 : 蒸汽流量 2;
- f) U_2 : 不确定度 2;
- g) B_2 : 系统不确定度 2;
- h) S_2 : 随机不确定度 2。

6.5.3 计算步骤

第 1 步：蒸汽流量 1 的权重：等于蒸汽流量 2 的不确定度的平方除以蒸汽流量 1 不确定度与蒸汽流量 2 不确定度的平方和。

$$W_1 = \frac{U_2^2}{U_1^2 + U_2^2} \quad (28)$$

第 2 步：蒸汽流量 2 的权重：等于蒸汽流量 1 的不确定度的平方除以蒸汽流量 1 不确定度与蒸汽流量 2 不确定度的平方和。

$$W_2 = \frac{U_1^2}{U_1^2 + U_2^2} \quad (29)$$

第 3 步：加权系统不确定度：等于每个蒸汽流量的权重与其系统不确定度的乘积的平方和的平方根。

$$B_w = \sqrt{(W_1 B_1)^2 + (W_2 B_2)^2} \quad (30)$$

第4步：加权随机不确定度：等于每个蒸汽流量的权重与其随机不确定度的乘积的平方和的平方根。

$$S_w = \sqrt{(W_1 S_1)^2 + (W_2 S_2)^2} \quad (31)$$

第5步：加权蒸汽流量：等于每个蒸汽流量的权重与其蒸汽流量的乘积之和。

$$q_w = W_1 q_1 + W_2 q_2 \quad (32)$$

第6步：加权蒸汽流量的不确定度：等于加权系统不确定度的平方加上两倍的加权随机不确定度的平方和的平方根。

$$U_w = \sqrt{B_w^2 + (2S_w)^2} \quad (33)$$

注意，如果加权蒸汽流量的不确定度大于其中任何单个蒸汽流量的不确定度，则最小的单个蒸汽流量不确定度值作为整体的不确定度，并且这个最小不确定度试验得到的蒸汽流量作为整体试验的蒸汽流量。当燃气轮机和余热锅炉同时进行试验时，采用两种热平衡方法可以综合计算得到加权蒸汽流量的不确定度，也可作为一种替代方法。

6.6 试验工况修正到保证工况

6.6.1 过热蒸汽流量的修正

为了将试验蒸汽流量与预测的蒸汽流量进行比较，应根据过热蒸汽出口温度来修正试验蒸汽流量。过热器吸热量的差异将引起蒸发器有用能不同，过热蒸汽流量修正的目的并不是与预测的蒸汽温度进行比较而修正蒸汽温度，而只是为了在相同的能量基准上来调整蒸汽流量。

过剩蒸汽能量等于测量的蒸汽流量乘以测量的蒸汽出口焓值与预测蒸汽出口焓值的差值。蒸汽流量的修正量为过剩蒸汽能量除以在相同压力下预测的蒸汽出口焓值与给水进口焓值的差值。这个修正应在进行基准工况修正之前完成。

6.6.2 出力

当性能试验完成后，能通过能量平衡计算出烟气流量及其组分，能够预测试验条件下余热锅炉的蒸汽出力（流量和温度）。蒸汽出力预测值是基于对余热锅炉原始设计的全部影响因素得出的，影响因素宜包括：

- a) 烟气流量；
- b) 烟气温度；
- c) 烟气组分；
- d) 烟道式燃烧器输入热量；
- e) 各压力等级的给水进口温度；
- f) 各压力等级的蒸汽或水的出口压力。

预测的蒸汽流量和温度将与实际试验测量值进行比较，可用两种方法预测出力。第一种是采用一组修正曲线的方法，这组修正曲线反映了各性能影响参数对各压力等级蒸汽的流量和温度的影响。对蒸汽流量和温度的影响可表示为乘法修正系数或绝对差值修正量；对采用乘法修正系数的场合，修正后的结果为所有性能影响参数的修正系数与基准流量或基准温度相乘；对采用绝对差值修正的场合，修正后的结果为基准值加上所有影响因素的修正量。修正后的蒸汽流量或温度表示在试验工况下的预测值。对于多压余热锅炉，不推荐采用这种方法。

另一种方法是采用余热锅炉受热面组成的传热计算模型，该计算模型能够预测试验工况下的蒸汽出力。计算机模型的优点是能同时考虑全部影响性能的参数，并且也能考虑到各种影响参数之间的相互影

响。对性能影响参数与原规定的工况有较大差别的场合，计算机模型具有较高的准确度。

一旦得出试验工况下的出力预测值，即能与相应的试验测量值进行比较，测量值宜采用本标准 6.5 所描述的不确定度加权值，并假设试验测量值与预测值的比值等于真实值与基准值的比值。

6.6.3 烟道式燃烧器燃料流量

烟道式燃烧器燃料流量修正是一个特殊的修正例子。为了获得确定的蒸汽流量，需要对烟道式燃烧器的燃料流量进行调节。应清楚在试验期间对燃料流量的调节是为了得到预先设定的蒸汽流量。预测的燃料流量需依靠余热锅炉的所有相关原始设计参数，这些相关性能参数包括：

- a) 烟气流量；
- b) 烟气温度；
- c) 烟气组分；
- d) 各压力等级的蒸汽温度和流量；
- e) 各压力等级的给水进口温度；
- f) 各压力等级的蒸汽或水出口压力。

修正曲线是一组反映每个性能参数对烟道式燃烧器燃料流量影响的修正曲线。参数对燃料流量的影响修正可以采用乘法修正或绝对差值方法。对采用乘法修正系数场合，修正后的结果为所有性能影响参数的修正系数与基准燃料流量相乘；对绝对差值的修正情况，修正后的结果为基准燃料流量加上所有影响因素的修正量。燃料流量的修正结果表示试验条件下燃料流量的预测值。对于多压余热锅炉，不推荐采用这种方法。

另一种方法是采用余热锅炉受热面组成的传热计算模型。该计算模型能够根据任何一组性能参数预测燃料流量。其优点是能同时考虑全部性能影响参数，并且也可以考虑性能影响参数之间的相互影响。计算机模型可以对偏离原规定的工况引起较大修正的情况时获得更好的结果。

一旦得出试验工况下燃料流量预测值，即能与相应的试验测量值进行比较。测量值宜采用本标准 6.5 所描述的不确定度加权值。并假设试验测量值与预测值的比值与真实值与基准值的比值相同。

6.6.4 烟气侧压降

6.6.4.1 总则

烟气压降是燃气轮机排气流量和烟气密度的函数，因此需要对这些参数进行修正。烟气密度是烟气流经余热锅炉的烟气温度、烟气组分和烟气压力的函数。在试验工况下，最准确预测烟气压降的方法是利用计算机模型来计算或者进行详细的手工计算。除此之外，下述方法可以采用。但该方法的假设条件是流过余热锅炉的烟气平均温度与基准工况相同。如果两者差别较大时，则该方法不宜使用，例如投运和停运烟道燃烧器的差异场合。

6.6.4.2 所需的数据

- a) 燃气轮机排气流量，kg/h；
- b) 燃气轮机排气分子量；
- c) 大气压力，MPa；
- d) 烟气压降，kPa。

6.6.4.3 计算

修正后的烟气压降等于试验测量的烟气压降乘以基准工况与试验工况燃气轮机排气流量之比的平方，再乘以试验工况下的大气压力与基准工况大气压力之比，再乘以试验工况与基准工况燃气轮机排气分子量之比。大气压力约等于余热锅炉的平均烟气压力。

$$\Delta p_{\text{Cor}} = \Delta p_{\text{Test}} (q_{\text{GRef}} / q_{\text{GTest}})^2 (p_{\text{ATMTest}} / p_{\text{ATMRef}}) (M_{\text{GTest}} / M_{\text{GRef}}) \quad (34)$$

上述修正计算所使用的烟气流量是根据燃气轮机和余热锅炉能量平衡计算得到,修正后的烟气压降也采用本标准 6.5 描述的加权方法来计算平均值。

6.6.5 蒸汽侧压降

6.6.5.1 总则

汽水侧压降在余热锅炉设计中并不是一个重要的参数。蒸汽或水侧压降是蒸汽或水流量及其密度的函数,因此需要对这些参数进行修正。其中密度是流过余热锅炉工质的温度和压力的函数。在试验工况下,最准确预测压降的方法是利用计算机模型来计算或者进行详细的手工计算。特别是适合受到喷水减温流量影响的管式过热器的压降和抽汽或补汽对受热面压降有重要影响的场合。除此之外,下述方法可以采用。但该方法的假设条件是流过余热锅炉的蒸汽或给水的平均温度与基准工况相同。

再热器与过热器的计算方法类似。下面的计算并不适用所有场合,例如强制循环蒸发器或省煤器出口存在两相流等特殊场合,所用的计算方法超出本标准的范围。

6.6.5.2 所需的数据

需要提供下列试验工况和基准工况的数据:

- a) 过热蒸汽各受热面管段和管道的压降, MPa;
- b) 过热蒸汽各受热面管段出口压力, MPa;
- c) 过热蒸汽各受热面管段进口压力, MPa;
- d) 过热器出口蒸汽温度, °C;
- e) 过热器进口蒸汽温度, °C;
- f) 各省煤器各受热面管段和管道的压降, MPa;
- g) 蒸汽和水的流量, kg/h。

6.6.5.3 计算步骤

第 1 步: 过热蒸汽平均密度由过热蒸汽进、出口的平均温度和平均压力查蒸汽表得出,可以分别得到试验工况和基准工况的蒸汽密度。

第 2 步: 过热蒸汽压降与蒸汽流量的平方成正比,与蒸汽的平均密度成反比。修正后过热蒸汽受热面管段的压降为试验压降乘以基准蒸汽流量与试验蒸汽流量比值的平方,再乘以试验工况与基准工况密度的比值。

$$\Delta p_{\text{SCor}} = \Delta p_{\text{STest}} (q_{\text{SRef}} / q_{\text{STest}})^2 (\rho_{\text{STest}} / \rho_{\text{SRef}}) \quad (35)$$

第 3 步: 修正后的省煤器管内压降为试验压降乘以基准水流量与试验水流量比值的平方:

$$\Delta p_{\text{WCor}} = \Delta p_{\text{WTest}} (q_{\text{WRef}} / q_{\text{WTest}})^2 \quad (36)$$

第 4 步: 总修正后压降为修正后蒸汽侧部分的压降加水侧部分的压降。

7 结果报告

7.1 总则

报告应按格式清楚地陈述试验前的协议和观察数据、计算和结果。试验报告应有足够的信息证明已达到所有的试验目的。

封面应包含报告编号、报告日期、试验日期、试验名称、地点、业主、买方、余热锅炉制造商和余热锅炉标识（编号和服务）。

目录内容应包含以下主要章，必要时可包括节。

7.2 摘要

摘要应为一单页，给出试验目的、实际试验结果、修正试验结果、保证值要求、结论和试验不确定度。还应包括一项声明，确认修正后的试验结果的正确性，并且试验后不确定度值在协议的不确定度允许范围之内。

7.3 概述

概述应包括以下内容：

- a) 余热锅炉的描述，包括余热锅炉的铭牌数据和试验中涉及的辅助设备；
- b) 本次试验的目的，即验证性能保证值或确定特定工况下的性能；
- c) 描述试验时余热锅炉、测量仪表和辅助设备已运行时间和状态，包括可能影响试验结果的任何事项；
- d) 描述自初始投运起，余热锅炉和辅助设备运行历史，包括可能影响试验结果的任何事项。

7.4 试验数据

试验数据应包含实际测量和观察的汇总，完整地描述试验日期和时间、试验和测量方法等，包括任何有别于试验前协议或未在本标准中规定之处。

7.5 数据整理、修正和结果

数据整理、修正和结果应包括以下内容：

- a) 描述最终试验数据整理方法和试验数据整理；
- b) 未修正的试验结果，包括给出实际试验工况下的性能计算过程；
- c) 修正后的试验结果，包括计算过程、影响因素或用于将实际试验结果修正到规定（或保证）运行工况的方法；
- d) 试验后的不确定度分析；
- e) 对试验过程、试验结果和结论的讨论，包括试验观察和有别于相关协议或本标准方法的描述，以及对这些差别的处理。

7.6 附录

附录宜包括以下内容：

- a) 试验前协议及对试验前协议的修改内容；
- b) 试验前和试验后的不确定度分析；
- c) 试验需要验证的设计值和性能指标；
- d) 描述用于试验的所有临时试验仪器仪表的测量布置图或所需的数据；
- e) 所用仪表的校准方法和试验中使用的仪表标定数据，包含相应批准者的签名；
- f) 试验原始数据；
- g) 试验负责、执行、见证和认定试验结果的人员名单，含有所属机构和职务；
- h) 为一个独立和完整的报告提供所需的所有其他支持信息。

8 不确定度分析

8.1 概述

- a) 不确定度分析提供了对测量值的系统不确定度和随机不确定度的数值估计，在给定的某一适当的置信水平下，合成测量值的总不确定度。测量不确定度分析应用目的如下：
 - 1) 确定主要误差源以及对试验结果的影响程度，估计它们的限值和不确定度；
 - 2) 便于测量结果之间的比较；
 - 3) 有利于选择经济有效和合适的试验测量仪表和方案；
 - 4) 减少做出错误决策的风险；
 - 5) 证明是否符合各方协议的规定。
- b) 本条款介绍了用于试验前和试验后不确定度分析的分析方法，特别强调以下内容：
 - 1) 如何确定各个独立的随机不确定度及其合成；
 - 2) 如何合成各个独立的系统不确定度；
 - 3) 如何合成随机不确定度和系统不确定度；
 - 4) 如何计算试验结果的不确定度。

有关不确定度的其他更多信息见 ASME PTC 19.1 试验不确定度。

试验前不确定度分析对制订试验计划有极大的帮助。试验各方能利用试验前不确定度分析来帮助达成成本标准第 4 章中所要求的大多数协议。根据各测量参数对试验结果不确定度预期的影响程度，确定仪表数量和型号、读数次数、网格测量点的数量以及燃料取样次数等。

试验前细致的不确定度分析能帮助控制试验成本，通过保证读数次数或最少要求的取样次数，以达到目标不确定度的要求，并且指出某些测量没有必要或不经济。

8.2 不确定度计算

8.2.1 试验前和试验后的不确定度计算

8.2.2 中给出的不确定度的计算方法，均适用于试验前和试验后的不确定度计算。当进行试验前不确定度计算时，由于还没有试验测量结果，可使用设计值替代进行计算。可通过对设备运行状态的初步观察或者根据以前的经验进行估算随机不确定度。

8.2.2 不确定度计算程序

8.2.2.1 完成不确定度分析所需的下列要求：

- a) 燃气轮发电机组的能量平衡计算方法（见资料性附录 H）；
- b) 余热锅炉的能量平衡计算方法（见第 6 章）；
- c) 能用来确定各个测量参数对最终结果影响的敏感系数计算机程序。

8.2.2.2 下面的程序用于计算不确定度。每个试验结果均要计算出两个不确定度，试验结果包括高压蒸汽出力、中压蒸汽出力、低压蒸汽出力、烟气侧压降和再热器压降。一是采用余热锅炉能量平衡的方法得出的结果，另一是采用燃气轮机能量平衡的方法得出的结果。每一不确定度计算都给出敏感系数计算表和不确定度计算表。

a) 敏感系数计算表（见资料性附录 C）。

- 1) 对每一测量参数进行不确定度计算。在敏感系数计算表中的“测量参数”一栏里填入所有测量参数值，这些参数用于估算试验结果或用于特定的能量平衡方法计算试验结果；
- 2) 在“平均值”一列里填入性能试验中得到的每一个测量参数的平均值；

- 3) 根据所选的能量平衡计算方法,由所有的试验数据平均值计算出排气流量,该排气流量用于预测计算模型中,并获得试验结果的基准值;
 - 4) 敏感系数计算按照 ASME PTC 19.1 给出的解析方法或数值方法来确定,特别应遵循其中 7.2 条和 10.5.4.1 条中有关敏感系数的计算规定。在“微增量”一列填入微增量值,微增量宜足够大以便预测模型的计算结果有明显的变化;
 - 5) 在“参数新值”一列中填入由平均值与微增量之和得到的计算新值;
 - 6) 仅使用其中的一个参数新值,其余均使用测量值的平均值,代入相应的能量平衡方程中计算出新的排气流量,并将结果填入“参数新值下的新排气流量”;
 - 7) 仅使用其中的一个参数新值以及上面 f) 中计算得到的排气流量,其余均使用测量值平均值,计算出修正后的性能结果,即高压蒸汽流量、中压蒸汽流量、低压蒸汽流量、烟气侧压降和再热器压降等。如果将测量参数(如排气温度)作为预测计算模型的一个输入,为了得到新的试验结果,排气流量和参数新值发生了变化,记录修正后的性能结果在“新的排气流量下新蒸汽流量”一列中;
 - 8) 根据新的计算结果减去基准计算结果再除以该测量值的微增量,该值填入“绝对敏感系数”一列中;
 - 9) 根据绝对敏感系数乘以该参数的测量值平均值除以计算结果的基准值,该值填入“相对敏感系数”一列中;
 - 10) 对每一个测量参数,重复上面 f) 至 i) 同样的计算。
- b) 不确定度计算表(见资料性附录 C)。
- 1) 在不确定度计算表中,“参数”“平均值”和“绝对敏感系数”栏中填入与敏感系数计算表对应栏中的相同内容。但是当不确定度计算表内的测量参数与所要计算不确定度的试验结果是同一个参数时,填入表中该参数的“绝对敏感系数”栏中的值应为 1 减去敏感系数表中的值。参见资料性附录 C 算例,简单归纳如下:
 - (1) 基于余热锅炉能量平衡计算出高压蒸汽流量不确定度;
 - (2) 敏感系数计算表:高压蒸汽流量(或给水)绝对敏感系数等于 0.790 1;
 - (3) 不确定度计算表:高压蒸汽流量(或给水)绝对敏感系数等于 0.209 9。
 - 2) 将每一测量参数样本的标准偏差填入“样本偏差”一列中,该标准偏差是根据该测量值的全部数据点计算得到,即计算每个测量值与全部数据的平均值之差的平方和除以样本数减 1 后,再开平方根。计算公式如下:

$$S_x = \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{(x_k - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (37)$$

- 3) 在“样本数”一列中填入各测量参数的样本数。
- 4) 采用下面公式计算样本偏差的平均值,并填入“平均样本偏差”一列中:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{S_x^2}{N}} \quad (38)$$

- 5) 自由度为样本数减 1,在“自由度”一栏填入自由度数。
- 6) 计算绝对敏感系数与样本偏差的平均值的乘积,该值为随机不确定度指标,将结果填入“随机不确定度指标”一列中。
- 7) 计算总体自由度,即绝对敏感系数与平均样本偏差乘积的四次方,再除以自由度,将结果填入“总体自由度”一列中。
- 8) 将“随机不确定度指标”一列中的数值除以计算结果的基准值乘以 100%,结果填入“随机不确定度”一列中。该值越大表示对随机不确定度的影响越大。

- 9) 将测量参数的系统不确定度填入“参数的系统不确定度”一列中,其单位与测量参数相同。系统不确定度的估计值根据该参数所采用的测量方法来确定,估计系统不确定度指南见第5章。计算示例见资料性附录C。对于确定独立的测量不确定度的计算,参考ASME PTC 19.5和ASME PTC 4有关资料。
- 10) 计算绝对敏感系数与参数的系统不确定度的乘积,结果填入“系统不确定度指标”(B6×B9)一列中。
- 11) 将“系统不确定度指标”一列中的值除以计算结果的基准值,再乘以100%,结果填入“系统不确定度%”一列中。该值越大表示对系统不确定度的影响越大。
- 12) 对“随机不确定度指标”一列中各值求平方和的平方根,结果填入“随机不确定度”一格。
- 13) 将“随机不确定度”一格的数值除以“总体自由度”一列中全部数据之和,结果填入“随机不确定度的自由度”。
- 14) 在“学生氏 t 分布值”一格填入2。该值是根据系统不确定度和随机不确定度两部分自由度的综合。
- 15) 对“系统不确定度指标”一列中各值求平方和的平方根,结果填入“基于95%置信度的系统不确定度”一格。
- 16) 计算结果的总不确定度,即“基于95%置信度的系统不确定度”的平方加上2倍的“随机不确定度”的平方,其结果再开平方根。
- 17) “总不确定度,%”为计算结果的总不确定度除以计算结果的基准值。
- 18) 根据6.5,综合余热锅炉和燃气轮机能量平衡的方法结果,计算试验结果的加权平均值。

在敏感系数计算表中,在新的排气流量下计算出一个新的试验结果时[见8.2.2.2a) 7)],排气组分宜由试验数据的平均值来确定,单个测量参数的扰动将引起排气组分发生微小的变化,该变化在新的试验计算中可忽略不计。

8.3 确定系统误差的指南

系统误差是误差中“固有”的组成部分。系统误差是指采取了所有可消除误差的合理方法(例如仪表校准)后却仍然存在的那部分误差。系统误差的一个基本特点是不能直接由试验数据来确定,因此,系统误差总是需要进行估算。有时,通过基于试验数据或试验期间的参数观察得出的模型来获得系统误差,但其仍然是一个估算值。系统误差另一个基本特点是,在一个特定试验的测量系统、工艺过程和环境工况下,系统误差有唯一的值。

本条款给出了在系统误差估算和数学处理时的某些需要遵循的强制性规定,也为估算系统误差值提供了指南和一些模型。本标准的使用者可自由地采纳、修改或拒绝本条款中所述的任何估算系统误差的计算模型,只要试验各方同意一个合适的替代计算方法即可。

8.3.1 一般规则

本标准采用的系统误差有以下特性:

- a) 系统误差应由试验各方同意;
- b) 系统误差宜基于95%的置信度来估算,不应采用系统误差的最大可能值;
- c) 如果试验各方认为存在单侧的或非对称的系统误差,则需要参考ASME PTC 19.1有关单侧的或非对称的系统误差的处理方法。

虽然在任一测量或结果中的实际系统误差为定值,但是系统误差的估算值仍为一个随机变值。本标准规定系统误差应采用“根-和-平方”的方法来计算。

一般来说,试验前和试验后的不确定度分析均采用相同的系统误差。如果试验各方同意,根据对试

验期间的试验工况参数的观察，可允许减少一个或多个测量参数的系统误差或适当增加一个或多个测量参数的系统误差。

8.3.2 由仪表产生的测量参数的系统误差

任何测量均存在许多仪表系统误差源，包括一次测量元件、主传感器、变送器、放大器、模数转换器、记录仪、仪表漂移和环境。仪表系统误差的一般信息可查阅以下文件：ASME 性能试验规程、ASME MFC、ISA 标准 ANSI/ISA S51.1。本条款提供了合成这些基本系统误差的一般准则和规则。

如果对仪表回路的一部分或整个仪表回路进行了标定，并且校准数据纳入试验数据，则系统误差应减少至校准时的不确定度。

8.3.3 燃气轮机排气温度和余热锅炉烟囱排烟温度的系统误差

燃气轮机排气温度和余热锅炉烟囱排烟温度的不确定度由两部分组成：随机不确定度和系统不确定度。

排烟温度的随机不确定度部分是根据试验时间段内测量值相对于平均排气温度的变化大小来确定。计算方法与流量、温度和压力的随机不确定度类似。

排烟温度的系统不确定度部分需考虑包括所用试验热电偶的仪表系统不确定度和测点空间位置不同的空间系统不确定度。热电偶的系统不确定度与所用热电偶的类型、变送器和补偿导线等有关。对于测量温度为 593.3℃ 的 K 型热电偶，仪表系统不确定度大约为 6.1℃ 或者读数的 1%。空间位置不同的空间系统不确定度根据不同位置上的温度测量值的变化进行估计，估算公式如下：

$$B_s = \frac{tS_s}{\sqrt{N}} \quad (39)$$

式中：

B_s ——空间系统不确定度；

S_s ——不同空间位置测量平均温度的标准偏差；

t ——学生氏 t 分布值，自由度为 $N-1$ ；

N ——样本数。

燃气轮机排气温度或余热锅炉烟囱排烟温度的系统不确定度可用下式计算：

$$B = \sqrt{B_{T/C}^2 + B_s^2} \quad (40)$$

式中：

B ——温度测量网格的系统不确定度；

$B_{T/C}$ ——温度测量仪表的系统不确定度；

B_s ——温度测量空间的系统不确定度。

附 录 A
(资料性附录)
余热锅炉能量平衡计算算例

热量计算汇总表见表 A.1。

表 A.1 热量计算汇总表

项 目	流量 kg/h	焓值 kJ/kg	热流量 kJ/s	备 注
用于燃烧的空气+燃气轮机燃料+ 注入蒸汽或水	656 583	734.00	-133 870	
补燃燃料	0	0.00	0	
补燃空气	0	0.00	0	
雾化蒸汽 ^a	0	0.00	0	
烟囱出口排气	656 583	169.01	30 824	
工质流体吸热量			222 148	见表 A.3
热损失			667	
总平衡湿空气热量			119 769	以上各项之和
平衡空气焓值变化量, kJ/kg	481.06			=入口空气焓值(表 A.11) - 出口空气焓值(表 A.12)
平衡空气流量, kg/h	896 295			=总平衡湿空气热量/平衡空气 焓值变化量×3600
注: 热量正为出系统, 负为进系统。				
^a 雾化蒸汽焓值=蒸汽焓值-基准温度下蒸汽的焓值 (2530.07kJ/kg)。				

空气组分计算见表 A.2。

表 A.2 空气组分计算

项 目	符 号	单 位	数 值		备 注
大气压力	p_{atm}	MPa	0.098 6		
湿球温度	t_{wb}	℃	18.06		
干球温度	t_{db}	℃	21.11		
相对湿度	HR_{REL}	%			
不同温度范围汽化压力公 式的常数			温度<0℃	温度>0℃	公式见 6.2.1.3
	C1		$-1.021\ 42 \times 10^4$	$-1.044\ 04 \times 10^4$	
	C2		-9.870 2	$-1.627\ 2 \times 10^1$	
	C3		$-5.376\ 58 \times 10^{-3}$	$-2.702\ 24 \times 10^{-2}$	
	C4		$1.920\ 24 \times 10^{-7}$	$1.289\ 04 \times 10^{-5}$	
	C5		$3.557\ 58 \times 10^{-10}$	$-2.478\ 07 \times 10^{-9}$	

表 A.2 (续)

项 目	符 号	单 位	数 值		备 注	
	C_6		$-9.034\ 47\times 10^{-14}$	0		
	C_7		4.163 50	6.545 97		
a) 相对湿度已知时						
温度	t_R				$t_R=1.8\times t_{db}+491.67$, 代入公式计算 p_v	
汽化压力	p_v	MPa				
空气中的水蒸气的分压力	p_w	MPa			$RH\times p_v$	
干空气的质量分数	w_{DA}				$(p_{atm}-p_w)/p_{atm}$	
比湿度	HR				$(1/w_{DA}-1)\times 18.015\ 28/28.965\ 18$	
b) 湿球温度已知时						
温度	t_R		524.17		$t_R=1.8\times t_{wb}+491.67$, 代入公式计算 p_v	
汽化压力	p_v	MPa	0.002 07			
计算饱和比湿度	HR_{sat}		0.013 402		见式 (9)	
计算实际比湿度	HR		0.012 125		见式 (10)	
计算干空气的质量分数	w_{DA}		0.980 88		见式 (11)	
空气组分计算						
湿空气组分	符号	计算公式	空气摩尔分数	分子量	空气摩尔分数×分子量	空气质量分数
氮气	N_2	$0.780\ 84\times w_{DA}$	0.765 9	28.013 48	21.455 8	0.746 1
氧气	O_2	$0.209\ 476\times w_{DA}$	0.205 5	31.998 80	6.574 8	0.228 6
二氧化碳	CO_2	$0.000\ 319\times w_{DA}$	0.000 3	44.009 80	0.013 8	0.000 5
水	H_2O	$1-w_{DA}$	0.019 1	18.015 28	0.344 5	0.012 0
氩气	Ar	$0.009\ 365\times w_{DA}$	0.009 2	39.948 00	0.367 0	0.012 8
湿空气分子量	M_{AVG}	28.755 8				

工质流体吸热量计算见表 A.3。

表 A.3 工质流体吸热量计算

名 称	状态 ^a	温度 ℃	压力 MPa	焓值 kJ/kg	流量(正为出, 负为进) kg/h	热流量 kJ/s
高压给水入口	0	156.1	10.68	664.72	-189 810	-35 047
高压减温水	0	156.1	10.68	664.72	-6582	-1215
高压蒸汽	1	538.9	9.49	3 477.63	196 392	189 716
冷再热蒸汽	1	330.0	2.10	3 091.57	-194 138	-166 719
再热减温水	0	191.7	2.20	815.37	-572	-129

表 A.3 (续)

名 称	状态 ^a	温度 ℃	压力 MPa	焓值 kJ/kg	流量(正为出, 负为进) kg/h	热流量 kJ/s
热再热蒸汽	1	540.6	1.89	3557.77	194 709	192 425
中压给水入口	0	152.2	2.34	642.88	-68 910	-12 306
中压给水抽出	0	191.7	2.20	815.37	35 453	8030
中压蒸汽出口	1	317.8	2.17	3061.70	33 457	28 454
低压蒸汽出口	1	318.3	0.36	3105.71	25 787	22 246
低压给水入口	0	110.0	0.52	461.59	-25 787	-3306
工质吸热量总和						222 148

^a 0 代表水, 1 代表蒸汽。

燃料气燃烧引起摩尔流量变化计算见表 A.4、表 A.5。

表 A.4 燃料气燃烧引起摩尔流量变化计算 (1)

名称	分子式	摩尔分数	分子量	C2×C3	N ₂ 燃烧率	N ₂ (*)/C5	O ₂ 燃烧率	O ₂ (*)×C7	CO ₂ 燃烧率	CO ₂ (*)/C9	H ₂ O 燃烧率	H ₂ O (*)×C11	Ar 燃烧率	Ar (*)×C13	SO ₂ 燃烧率	SO ₂ (*)×C15
		C2			C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
甲烷	CH ₄	0.950 0	16.042 76	15.241	0	0	-2	-3927	1	1963	2	3927	0	0	0	0
乙烷	C ₂ H ₆	0.030 0	30.069 64	0.902	0	0	-3.5	-217	2	124	3	186	0	0	0	0
乙烯	C ₂ H ₄	0.000 0	28.053 76	0.000	0	0	-3	0	2	0	2	0	0	0	0	0
丙烷	C ₃ H ₈	0.000 0	44.096 52	0.000	0	0	-5	0	3	0	4	0	0	0	0	0
丙烯	C ₃ H ₆	0.000 0	42.080 64	0.000	0	0	-4.5	0	3	0	3	0	0	0	0	0
异丁烷	C ₄ H ₁₀	0.000 0	58.123 40	0.000	0	0	-6.5	0	4	0	5	0	0	0	0	0
正丁烷	C ₄ H ₁₀	0.000 0	58.123 40	0.000	0	0	-6.5	0	4	0	5	0	0	0	0	0
丁烯	C ₄ H ₈	0.000 0	56.107 52	0.000	0	0	-6	0	4	0	4	0	0	0	0	0
异戊烷	C ₅ H ₁₂	0.000 0	72.150 28	0.000	0	0	-8	0	5	0	6	0	0	0	0	0
正戊烷	C ₅ H ₁₂	0.000 0	72.150 28	0.000	0	0	-8	0	5	0	6	0	0	0	0	0
戊烯	C ₅ H ₁₀	0.000 0	70.134 40	0.000	0	0	-7.5	0	5	0	5	0	0	0	0	0
己烷	C ₆ H ₁₄	0.000 0	86.177 16	0.000	0	0	-9.5	0	6	0	7	0	0	0	0	0
氮气	N ₂	0.010 0	28.013 48	0.280	1	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
一氧化碳	CO	0.000 0	28.010 40	0.000	0	0	-0.5	0	1	0	0	0	0	0	0	0
二氧化碳	CO ₂	0.010 0	44.009 80	0.440	0	0	0	0	1	21	0	0	0	0	0	0
水	H ₂ O	0.000 0	18.015 28	0.000	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
硫化氢	H ₂ S	0.000 0	34.081 88	0.000	0	0	-1.5	0	0	0	1	0	0	0	1	0
氢气	H ₂	0.000 0	2.015 88	0.000	0	0	-0.5	0	0	0	1	0	0	0	0	0
氦气	He	0.000 0	4.002 60	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
氧气	O ₂	0.000 0	31.998 80	0.000	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
氩气	Ar	0.000 0	39.948 00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

注: (*) = 燃料气组分摩尔分数×燃料气流量/燃料气平均分子量。

表 A.5 燃料气燃烧引起摩尔流量变化计算 (2)

项 目	符 号	单 位	数 值	备 注
燃料气流量		kg/h	34 850	输入
燃料气平均分子量		kg/kmol	16.863	表 A.4 中 C4 列之和, 见式 (14)
燃烧引起 N ₂ 摩尔流量变化		kmol/h	21	表 A.4 中 C6 列之和
燃烧引起 O ₂ 摩尔流量变化		kmol/h	-4144	表 A.4 中 C8 列之和
燃烧引起 CO ₂ 摩尔流量变化		kmol/h	2108	表 A.4 中 C10 列之和
燃烧引起 H ₂ O 摩尔流量变化		kmol/h	4113	表 A.4 中 C12 列之和
燃烧引起 Ar 摩尔流量变化		kmol/h	0	表 A.4 中 C14 列之和
燃烧引起 SO ₂ 摩尔流量变化		kmol/h	0	表 A.4 中 C16 列之和
干空气流量	q_{AD}	kg/h	572 961	$= -(\text{燃烧引起 O}_2 \text{ 摩尔流量变化}) \times 28.965\ 1785/0.209\ 476$
修正系数	k		1.012 125	$= 1 + HR$
燃气轮机燃烧用湿空气的流量	q_{AC}	kg/h	579 908	$= k \times q_{AD}$

余热锅炉入口烟气组分计算见表 A.6、表 A.7。

表 A.6 余热锅炉入口烟气组分计算 (1)

项 目	单 位	数 据	备 注
烟道燃烧器燃料燃烧空气流量	kg/h	0	
燃气轮机燃烧用湿空气的流量	kg/h	579 908	见表 A.5
空气平均分子量	kg/kmol	28.755 8	见表 A.2
燃气轮机燃料流量	kg/h	34 850	见表 A.5
水或蒸汽注入流量	kg/h	41 825	
平衡空气流量	kg/h	896 295	见表 A.1

表 A.7 余热锅炉入口烟气组分计算 (2)

名称	分子式	空气摩尔分数	空气各组分的摩尔流量 ^a kmol/h	燃烧引起的摩尔流量 改变(由表 A.5) kmol/h	注入蒸汽或水的摩尔流量 ^b kmol/h	生成物的摩尔流量 kmol/h	分子量 kg/kmol	质量流量 kg/h	烟气质量分数	平衡空气摩尔流量 ^c kmol/h	总摩尔流量 kmol/h	烟气摩尔分数
氮气	N ₂	0.765 9	15 446	21	0	15 466	28.013 5	433 270	0.659 89	23 873	39 339	0.705 57
氧气	O ₂	0.205 5	4144	-4144	0	0	31.998 8	0	0.000 00	6404	6404	0.114 87
二氧化碳	CO ₂	0.000 3	6	2108	0	2114	44.009 8	93 050	0.141 72	10	2124	0.038 10

表 A.7 (续)

名称	分子式	空气摩尔分数	空气各组分的摩尔流量 ^a kmol/h	燃烧引起的摩尔流量改变(由表 A.5) kmol/h	注入蒸汽或水的摩尔流量 ^b kmol/h	生成物的摩尔流量 kmol/h	分子量 kg/kmol	质量流量 kg/h	烟气质量分数	平衡空气摩尔流量 ^c kmol/h	总摩尔流量 kmol/h	烟气摩尔分数
水	H ₂ O	0.019 1	386	4113	2322	6820	18.015 3	122 863	0.187 12	596	7416	0.133 01
氩气	Ar	0.009 2	185	0	0	185	39.948 0	7400	0.011 27	286	472	0.008 46
二氧化硫	SO ₂	0.000 0	0	0	0	0	64.064 8	0	0.000 00	0	0	0.000 00
小计						24 586		656 583			55 755	1.000 00
<p>^a 空气各组分的摩尔流量等于空气各组分的摩尔分数乘以烟道燃烧器燃料燃烧空气流量和燃气轮机燃料燃烧空气流量之和,再除以空气平均分子量;</p> <p>^b 注入蒸汽或水的摩尔流量等于水或蒸汽流量除以 18.015 28;</p> <p>^c 平衡空气摩尔流量等于平衡空气流量乘以摩尔分数,再除以空气平均分子量。</p>												

燃气轮机排气流量为表 A.7 中各生成物的质量流量之和,再加上表 A.6 中的平衡空气流量,得到 1 552 878kg/h。

余热锅炉入口、出口烟气焓值计算见表 A.8、表 A.9。

表 A.8 余热锅炉入口烟气焓值计算

入口烟气温度: 879.26K (606.11℃)

基准温度: 288.71K (15.56℃)

烟气组分	分子式	烟气质量分数	组分比焓 kJ/kg	焓值 kJ/kg
氮气	N ₂	0.659 9	636.603	420.1
氧气	O ₂	0.000 0	587.845	0.0
二氧化碳	CO ₂	0.141 7	619.983	87.9
水	H ₂ O	0.187 1	1189.505	222.6
氩气	Ar	0.011 3	307.286	3.5
二氧化硫	SO ₂	0.000 0	440.627	0.0
入口烟气焓值				734.00

表 A.9 余热锅炉出口烟气焓值计算

出口烟气温度: 432.59K (159.44℃)

基准温度: 288.71K (15.56℃)

烟气组分	分子式	烟气质量分数	组分比焓 kJ/kg	焓值 kJ/kg
氮气	N ₂	0.659 9	149.956	98.954
氧气	O ₂	0.000 0	134.063	0.000

表 A.9 (续)

烟气组分	分子式	烟气质量分数	组分比焓 kJ/kg	焓值 kJ/kg
二氧化碳	CO ₂	0.141 7	129.933	18.414
水	H ₂ O	0.187 1	271.459	50.797
氩气	Ar	0.011 3	74.870	0.844
二氧化硫	SO ₂	0.000 0	94.453	0.000
出口烟气焓值				169.01

组分比焓计算公式：

$$h_i = -A_1 / T + A_2 \ln(T) + A_3 T + A_4 T^2 + A_5 T^3 + A_6 T^4 + A_7 T^5 - A_8$$

式中：

h_i —— 烟气组分 i 的比焓，kJ/kg；

T —— 烟气温度，K；

$A_1 \sim A_8$ —— 公式常数，见第 6 章。

余热锅炉出口烟气的组分计算见表 A.10。

表 A.10 余热锅炉出口烟气的组分计算

注入水或蒸汽的流量：0kg/h

烟道式燃烧器燃料流量：0kg/h

补燃空气流量：0kg/h

烟气组分	分子式	摩尔流量 (见表 A.7) kmol/h	燃烧后摩 尔流量 变化 kmol/h	注入水或 蒸汽摩尔 流量 ^a kmol/h	补燃空气 摩尔流量 kmol/h	生成物的 摩尔流量 ^b kmol/h	分子量 kg/kmol	质量流量 ^c kg/h	出口烟气 质量分数
氮气	N ₂	15 466	0	0	0	15 466	28.013 48	433 270	0.659 9
氧气	O ₂	0	0	0	0	0	31.999	0	0.000 0
二氧化碳	CO ₂	2114	0	0	0	2114	44.010	93 050	0.141 7
水	H ₂ O	6820	0	0	0	6820	18.015	122 863	0.187 1
氩气	Ar	185	0	0	0	185	39.948	7400	0.011 3
二氧化硫	SO ₂	0	0	0	0	0	64.064 80	0	0.000 0
^a 注入水或蒸汽摩尔流量等于注入水或蒸汽流量除以 18.015 28； ^b 生成物的摩尔流量等于各组分的摩尔流量、燃烧后摩尔流量变化、注入水或蒸汽摩尔流量和补燃空气摩尔流量之和； ^c 质量流量等于生成物的摩尔流量乘以分子量。									

余热锅炉出口烟气流量为各组分质量流量之和，即 656 583kg/h。

余热锅炉入口、出口以及基准温度下空气焓值计算见表 A.11～表 A.13。

表 A.11 余热锅炉入口空气焓值计算

入口空气温度：606.11℃

名称	分子式	空气质量分数	组分比焓 kJ/kg	焓值 kJ/kg
氮气	N ₂	0.746 14	636.603	474.99
氧气	O ₂	0.228 64	587.845	134.41
二氧化碳	CO ₂	0.000 48	619.983	0.30
水	H ₂ O	0.011 98	1189.505	14.25
氩气	Ar	0.012 76	307.286	3.92
二氧化硫	SO ₂	0.000 00	440.627	0.00
入口空气焓值				627.868

表 A.12 余热锅炉出口空气焓值计算

出口空气温度：159.44℃

名称	分子式	空气质量分数	组分比焓 kJ/kg	焓值 kJ/kg
氮气	N ₂	0.746 14	149.956	111.89
氧气	O ₂	0.228 64	134.063	30.65
二氧化碳	CO ₂	0.000 48	129.933	0.06
水	H ₂ O	0.011 98	271.459	3.25
氩气	Ar	0.012 76	74.870	0.96
二氧化硫	SO ₂	0.000 00	94.453	0.00
出口空气焓值				146.810

表 A.13 基准温度下空气焓值计算

基准空气温度：15.56℃

名称	分子式	空气质量分数	组分比焓 kJ/kg	焓值 kJ/kg
氮气	N ₂	0.746 14	0.000	0.00
氧气	O ₂	0.228 64	0.000	0.00
二氧化碳	CO ₂	0.000 48	0.000	0.00
水	H ₂ O	0.011 98	0.000	0.00
氩气	Ar	0.012 76	0.000	0.00
二氧化硫	SO ₂	0.000 00	0.000	0.00
基准温度下空气焓值				0.000

附录 B
(资料性附录)
燃气轮机能量平衡计算算例

热量计算汇总表见表 B.1。

表 B.1 热量计算汇总表

项 目	流量 kg/h	焓值 kJ/kg	热流量 kJ/s	备 注
燃烧用湿空气	579 908	5.64	908	
燃料气	34 850	47 977.34	464 447	
注入水或蒸汽 ^a	41 825	460.70	5352	
压气机抽出空气	0	0.00	0	
燃烧产物+注入水或蒸汽	656 583	734.00	-133 870	见表 B.6 和表 B.7
输出功率			-172 385	
热损失			-9665	
总平衡湿空气热量			154 788	以上各项之和
平衡空气焓值变化量, kJ/kg	622.23			=燃气轮机排气处空气焓值（见表 B.10）— 压气机入口处空气焓值（见表 B.8）
平衡空气流量, kg/h	895 545			=总平衡湿空气热量/ 平衡空气焓值变化 × 3600
注：热量正为进系统，负为出系统。				
^a 焓值等于蒸汽或水焓值减去基准温度下的焓值（2530.07kJ/kg）。				

空气组分计算见表 B.2。

表 B.2 空气组分计算

项 目	符号	单位	数 值		备 注
大气压力	p_{atm}	MPa	0.098 6		
湿球温度	t_{wb}	℃	18.06		
干球温度	t_{db}	℃	21.11		
相对湿度	HR_{REL}	%			
不同温度范围汽化压力公式的常数			温度 < 0℃	温度 > 0℃	公式见 6.2.1.3
	$C1$		$-1.021\ 42 \times 10^4$	$-1.044\ 04 \times 10^4$	
	$C2$		-9.870 2	$-1.627\ 2 \times 10^1$	

表 B.2 (续)

项 目	符号	单位	数 值		备 注	
	C3		$-5.376\ 58 \times 10^{-3}$	$-2.702\ 24 \times 10^{-2}$		
	C4		$1.920\ 24 \times 10^{-7}$	$1.289\ 04 \times 10^{-5}$		
	C5		$3.557\ 58 \times 10^{-10}$	$-2.478\ 07 \times 10^{-9}$		
	C6		$-9.034\ 47 \times 10^{-14}$	0.000 00		
	C7		4.163 50	6.545 97		
a) 相对湿度已知时计算						
温度	t_R				$t_R=1.8 \times t_{db}+491.67$, 代入公式计算 p_v	
汽化压力	p_v	MPa				
空气中的水蒸汽的分压力	p_w	MPa			$HR_{REL} \times p_v$	
干空气的质量分数	w_{DA}				$(p_{atm}-p_w) / p_{atm}$	
比湿度	HR				$(1/w_{DA}-1) \times$ 18.015 28/28.965 18	
b) 湿球温度已知时计算						
温度	t_R		524.17		$t_R=1.8 \times t_{wb}+491.67$, 代入公式计算 p_v	
汽化压力	p_v	MPa	0.002 07			
计算饱和比湿度	HR_{sat}		0.013 402		见式 (9)	
计算实际比湿度	HR		0.012 125		见式 (10)	
计算干空气含汽率:	w_{DA}		0.980 88		见式 (11)	
空气组分计算						
湿空气组分	符号	计算公式	空气摩尔分数	分子量	空气摩尔分 数×分子量	空气质量分数
氮气	N ₂	$0.780\ 84 \times w_{DA}$	0.765 9	28.013 48	21.455 8	0.746 1
氧气	O ₂	$0.209\ 476 \times w_{DA}$	0.205 5	31.998 80	6.574 8	0.228 6
二氧化碳	CO ₂	$0.000\ 319 \times w_{DA}$	0.000 3	44.009 80	0.013 8	0.000 5
水	H ₂ O	$1-w_{DA}$	0.019 1	18.015 28	0.344 5	0.012 0
氩气	Ar	$0.009\ 365 \times w_{DA}$	0.009 2	39.948 00	0.367 0	0.012 8
湿空气分子量	M _{AVG}	28.755 8				

燃料气燃烧引起摩尔流量变化计算见表 B.3。

表 B.3 燃料气燃烧引起摩尔流量变化计算

名称	分子式	摩尔 分数	分子量	C2× C3	N ₂ 燃 烧率	N ₂ (*) /C5	O ₂ 燃 烧 率	O ₂ (*) ×C7	CO ₂ 燃 烧 率	CO ₂ (*) /C9	H ₂ O 燃 烧 率	H ₂ O (*) ×C11	Ar 燃 烧率	Ar (*) ×C13	SO ₂ 燃 烧 率	SO ₂ (*) ×C15
		C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
甲烷	CH ₄	0.950 0	16.042 76	15.241	0	0	-2	-3927	1	1963	2	3927	0	0	0	0
乙烷	C ₂ H ₆	0.030 0	30.069 64	0.902	0	0	-3.5	-217	2	124	3	186	0	0	0	0
乙烯	C ₂ H ₄	0.000 0	28.053 76	0.000	0	0	-3	0	2	0	2	0	0	0	0	0
丙烷	C ₃ H ₈	0.000 0	44.096 52	0.000	0	0	-5	0	3	0	4	0	0	0	0	0
丙烯	C ₃ H ₆	0.000 0	42.080 64	0.000	0	0	-4.5	0	3	0	3	0	0	0	0	0
异丁烷	C ₄ H ₁₀	0.000 0	58.123 40	0.000	0	0	-6.5	0	4	0	5	0	0	0	0	0
正丁烷	C ₄ H ₁₀	0.000 0	58.123 40	0.000	0	0	-6.5	0	4	0	5	0	0	0	0	0
丁烯	C ₄ H ₈	0.000 0	56.107 52	0.000	0	0	-6	0	4	0	4	0	0	0	0	0
异戊烷	C ₅ H ₁₂	0.000 0	72.150 28	0.000	0	0	-8	0	5	0	6	0	0	0	0	0
正戊烷	C ₅ H ₁₂	0.000 0	72.150 28	0.000	0	0	-8	0	5	0	6	0	0	0	0	0
戊烯	C ₅ H ₁₀	0.000 0	70.134 40	0.000	0	0	-7.5	0	5	0	5	0	0	0	0	0
己烷	C ₆ H ₁₄	0.000 0	86.177 16	0.000	0	0	-9.5	0	6	0	7	0	0	0	0	0
氮气	N ₂	0.010 0	28.013 48	0.280	1	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
一氧化碳	CO	0.000 0	28.010 40	0.000	0	0	-0.5	0	1	0	0	0	0	0	0	0
二氧化碳	CO ₂	0.010 0	44.009 80	0.440	0	0	0	0	1	21	0	0	0	0	0	0
水	H ₂ O	0.000 0	18.015 28	0.000	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
硫化氢	H ₂ S	0.000 0	34.081 88	0.000	0	0	-1.5	0	0	0	1	0	0	0	1	0
氢气	H ₂	0.000 0	2.015 88	0.000	0	0	-0.5	0	0	0	1	0	0	0	0	0
氦气	He	0.000 0	4.002 60	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
氧气	O ₂	0.000 0	31.998 80	0.000	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
氩气	Ar	0.000 0	39.948 00	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

注：(*) = 燃料气组分摩尔分数 × 燃料气流量 / 燃料气平均分子量。

燃料气燃烧引起摩尔流量变化计算结果见表 B.4。

表 B.4 燃料气燃烧引起摩尔流量变化计算结果

项 目	符号	单位	数值	备 注
燃料气流量		kg/h	34 850	输入
燃料气平均分子量		kg/kmol	16.863	表 B.3 中 C4 列之和, 见式 (14)
燃烧引起 N ₂ 摩尔流量变化		kmol/h	21	表 B.3 中 C6 列之和
燃烧引起 O ₂ 摩尔流量变化		kmol/h	-4144	表 B.3 中 C8 列之和
燃烧引起 CO ₂ 摩尔流量变化		kmol/h	2108	表 B.3 中 C10 列之和
燃烧引起 H ₂ O 摩尔流量变化		kmol/h	4113	表 B.3 中 C12 列之和
燃烧引起 Ar 摩尔流量变化		kmol/h	0	表 B.3 中 C14 列之和
燃烧引起 SO ₂ 摩尔流量变化		kmol/h	0	表 B.3 中 C16 列之和
干空气流量	q_{AD}	kg/h	572 961	$= -(\text{燃烧引起 O}_2 \text{ 摩尔流量变化}) \times 28.965 \ 178 \ 5/0.209 \ 476$
修正系数	k		1.012 125	$= 1 + HR$
燃气轮机燃烧用湿空气的流量	q_{AC}	kg/h	579 908	$= k \times q_{AD}$

烟气组分计算见表 B.5、表 B.6。

表 B.5 烟气组分计算 (1)

项 目	单 位	数 据	备 注
燃烧用湿空气流量	kg/h	579 908	由表 B.4
平衡空气流量	kg/h	895 545	由表 B.1
湿空气平均分子量	kg/kmol	28.755 8	由表 B.2
注入水或蒸汽流量	kg/h	41 825	

表 B.6 烟气组分计算 (2)

名称	分子式	空气摩尔分数	空气各组分摩尔流量 ^a kmol/h	燃烧引起的摩尔流量改变 (由表 B.4) kmol/h	注入蒸汽或水的摩尔流量 ^b kmol/h	生成物的摩尔流量 kmol/h	分子量 kg/kmol	质量流量 kg/h	烟气质量分数	平衡空气摩尔流量 ^c kmol/h	总摩尔流量 kmol/h	烟气摩尔分数	干烟气摩尔分数
氮气	N ₂	0.765 9	15 446	21	0	15 466	28.013 48	433 270	0.659 89	23 853	39 319	0.705 54	0.813 83
氧气	O ₂	0.205 5	4144	-4144	0	0	31.998 80	0	0.000 00	6399	6399	0.114 82	0.132 45
二氧化碳	CO ₂	0.000 3	6	2108	0	2114	44.009 80	93 050	0.141 72	10	2124	0.038 11	0.043 96
水	H ₂ O	0.019 1	386	4113	2322	6820	18.015 28	122 863	0.187 12	596	7415	0.133 06	
氩气	Ar	0.009 2	185	0	0	185	39.948 00	7400	0.011 27	286	471	0.008 46	0.009 76
二氧化硫	SO ₂	0.000 0	0	0	0	0	64.064 80	0	0.000 00	0	0	0.000 00	0.000 00

表 B.6 (续)

名称	分子式	空气摩尔分数	空气各组分的摩尔流量 ^a kmol/h	燃烧引起的摩尔流量改变 (由表 B.4) kmol/h	注入蒸汽或水的摩尔流量 ^b kmol/h	生成物的摩尔流量 kmol/h	分子量 kg/kmol	质量流量 kg/h	烟气质量分数	平衡空气摩尔流量 ^c kmol/h	总摩尔流量 kmol/h	烟气摩尔分数	干烟气摩尔分数
小计						24 586		656 583			55 729		
<p>^a 空气各组分的摩尔流量等于空气各组分的摩尔分数乘以烟道燃烧器燃料燃烧空气流量和燃气轮机燃料燃烧空气流量之和, 再除以空气平均分子量;</p> <p>^b 注入蒸汽或水的摩尔流量等于水或蒸汽流量除以 18.015 28;</p> <p>^c 平衡空气摩尔流量等于平衡空气流量乘以摩尔分数, 再除以空气平均分子量。</p>													

燃气轮机排气流量为表 B.6 中各生成物的质量流量之和, 再加上表 B.5 中的平衡空气流量, 得到 1 552 878kg/h。

燃气轮机排气焓值计算见表 B.7。

表 B.7 燃气轮机排气焓值计算

烟气温度: 879.26K (606.11℃)

基准温度: 288.71K (15.56℃)

烟气组分	分子式	烟气质量分数	组分比焓 kJ/kg	焓值 kJ/kg
氮气	N ₂	0.659 9	636.603	420.1
氧气	O ₂	0.000 0	587.845	0.0
二氧化碳	CO ₂	0.141 7	619.983	87.9
水	H ₂ O	0.187 1	1189.505	222.6
氩气	Ar	0.011 3	307.286	3.5
二氧化硫	SO ₂	0.000 0	440.627	0.0
烟气焓值				734.00

组分比焓计算公式:

$$h_i = -A_1/T + A_2 \ln(T) + A_3T + A_4T^2 + A_5T^3 + A_6T^4 + A_7T^5 - A_8$$

式中:

h_i ——烟气组分 i 的比焓, kJ/kg;

T ——烟气温度, K;

$A_1 \sim A_8$ ——公式常数, 见第 6 章。

压气机入口处、压气机抽出及燃气轮机排气处空气焓值计算见表 B.8~表 B.10。

表 B.8 压气机入口处空气焓值计算

压气机入口处空气温度：21.11℃

名 称	分子式	空气质量分数	组分比焓 kJ/kg	焓值 kJ/kg
氮气	N ₂	0.746 14	5.775	4.31
氧气	O ₂	0.228 64	5.095	1.16
二氧化碳	CO ₂	0.000 48	4.649	0.00
水	H ₂ O	0.011 98	10.349	0.12
氩气	Ar	0.012 76	2.891	0.04
二氧化硫	SO ₂	0.000 00	3.434	0.00
空气焓值				5.637

表 B.9 压气机抽出空气焓值计算

压气机抽出空气温度：15.56℃

名 称	分子式	空气质量分数	组分比焓 kJ/kg	焓值 kJ/kg
氮气	N ₂	0.746 14	0.000	0.00
氧气	O ₂	0.228 64	0.000	0.00
二氧化碳	CO ₂	0.000 48	0.000	0.00
水	H ₂ O	0.011 98	0.000	0.00
氩气	Ar	0.012 76	0.000	0.00
二氧化硫	SO ₂	0.000 00	0.000	0.00
空气焓值				0.00

表 B.10 燃气轮机排气处空气焓值计算

燃气轮机排气处空气温度：606.11℃

名 称	分子式	空气质量分数	组分比焓 kJ/kg	焓值 kJ/kg
氮气	N ₂	0.746 14	636.603	474.99
氧气	O ₂	0.228 64	587.845	134.41
二氧化碳	CO ₂	0.000 48	619.983	0.30
水	H ₂ O	0.011 98	1189.505	14.25
氩气	Ar	0.012 76	307.286	3.92
二氧化硫	SO ₂	0.000 00	440.627	0.00
空气焓值				627.868

燃料气发热量计算及其结果见表 B.11、表 B.12。

表 B.11 燃料气发热量计算

燃料气温度: 115.00℃

组分	分子式	燃料摩尔 分数	分子量 kg/kmol	K2×K3	燃料质量 分数	燃烧发热量 (低位) kJ/kg	K5×K6	燃烧发热量 (高位) kJ/kg	K5×K8
		K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
甲烷	CH ₄	0.950 0	16.042 76	15.241	0.903 8	50 016.0	45 204	55 572.8	50 226
乙烷	C ₂ H ₆	0.030 0	30.069 64	0.902	0.053 5	47 524.8	2542	51 948.9	2779
乙烯	C ₂ H ₄	0.000 0	28.053 76	0.000	0.000 0	47 166.6	0	50 334.6	0
丙烷	C ₃ H ₈	0.000 0	44.096 52	0.000	0.000 0	46 340.9	0	50 367.2	0
丙烯	C ₃ H ₆	0.000 0	42.080 64	0.000	0.000 0	45 771.0	0	48 936.7	0
异丁烷	C ₄ H ₁₀	0.000 0	58.123 40	0.000	0.000 0	45 559.4	0	49 385.6	0
正丁烷	C ₄ H ₁₀	0.000 0	58.123 40	0.000	0.000 0	45 726.8	0	49 543.8	0
丁烯	C ₄ H ₈	0.000 0	56.107 52	0.000	0.000 0	45 240.7	0	48 406.4	0
异戊烷	C ₅ H ₁₂	0.000 0	72.150 28	0.000	0.000 0	45 254.7	0	48 948.3	0
正戊烷	C ₅ H ₁₂	0.000 0	72.150 28	0.000	0.000 0	45 352.3	0	49 043.7	0
戊烯	C ₅ H ₁₀	0.000 0	70.134 40	0.000	0.000 0	44 956.9	0	48 127.3	0
己烷	C ₆ H ₁₄	0.000 0	86.177 16	0.000	0.000 0	45 015.1	0	48 622.7	0
氮气	N ₂	0.010 0	28.013 48	0.280	0.016 6	0.0	0	0.0	0
一氧化碳	CO	0.000 0	28.010 40	0.000	0.000 0	10 099.5	0	10 099.5	0
二氧化碳	CO ₂	0.010 0	44.009 80	0.440	0.026 1	0.0	0	0.0	0
水	H ₂ O	0.000 0	18.015 28	0.000	0.000 0	0.0	0	2465.1	0
硫化氢	H ₂ S	0.000 0	34.081 88	0.000	0.000 0	15 198.1	0	16 500.2	0
氢气	H ₂	0.000 0	2.015 88	0.000	0.000 0	119 942.5	0	141 937.2	0
氦气	He	0.000 0	4.002 60	0.000	0.000 0	0.0	0	0.0	0
氧气	O ₂	0.000 0	31.998 80	0.000	0.000 0	0.0	0	0.0	0
氩气	Ar	0.000 0	39.948 00	0.000	0.000 0	0.0	0	0.0	0
小计				16.863			47 746		53 005

表 B.12 燃料气发热量计算结果

项 目	单位	数据	备 注
燃料气低位发热量	kJ/kg	47 746	由表 B.10
燃料气显热	kJ/kg	231	式 (19)
净发热量	kJ/kg	47 977	低位发热量+燃料气显热
注: 高位发热量在任何计算中都不使用。			

燃料油发热量计算见表 B.13。

表 B.13 燃料油发热量计算

项 目	单 位	数 据	备 注
燃油低位发热量输入	kJ/kg	0	
燃油显热	kJ/kg	0	式 (20)
净发热量	kJ/kg	0	低位发热量+燃油显热

附 录 C
(资料性附录)
不 确 定 度 计 算 算 例

C.1 高压蒸汽流量不确定度

表 C.1 为综合了燃气轮机热平衡和余热锅炉热平衡计算的高压蒸汽流量及其不确定度。

表 C.1 综合了燃气轮机热平衡和余热锅炉热平衡计算的高压蒸汽流量及其不确定度

项 目	单位	燃气轮机热平衡	余热锅炉热平衡	加权值
高压蒸汽流量	kg/h	196 392	196 392	
高压蒸汽流量不确定度		1.72%	0.80%	
权重		0.18	0.82	
系统不确定度	kg/h	3166	1502	1357
随机不确定度	kg/h	592	238	222
总不确定度	kg/h			1428
高压蒸汽流量加权值	kg/h			196 392
总不确定度加权值				0.73%

高压蒸汽流量敏感系数和不确定度计算表（采用燃气轮机热平衡确定高压蒸汽流量）见表 C.2、表 C.3。

表 C.2 高压蒸汽流量敏感系数计算表（采用燃气轮机热平衡确定高压蒸汽流量）

高压蒸汽流量基准值：196 392kg/h

敏感系数计算用参数的变化百分比 1.00								
测量参数	单位	平均值	微增量 ^b	参数新值	参数新值 ^a 下的新排 气流量 kg/h	新排气流 量下新蒸 汽流量 kg/h	绝对敏感 系数	相对敏感 系数 %
环境干球温度	℃	21.11	0.39	21.50	1 557 219	196 395	9.33	0.002
环境湿球温度	℃	18.06	0.36	18.41	1 556 447	196 319	-202.53	-0.037
大气压力	MPa	0.098 6	0.001	0.099 6	1 557 180	196 411	19 322	0.010
燃气轮机入口温度	℃	21.11	0.39	21.50	1 558 003	196 515	316.09	0.063
燃气轮机燃料流量	kg/h	34 850	348	35 198	1 583 154	199 647	9.34	1.658
燃气轮机燃料温度	℃	126.11	1.44	127.55	1 557 211	196 414	15.76	0.012
燃机燃料低位 发热量	kJ/kg	47 762.1	478	48 239.7	1 583 667	199 711	6.95	1.690
燃机注入蒸汽流量	kg/h	41 825	418	42 243	1 556 960	196 384	-0.02	-0.004
燃机注入蒸汽温度	℃	286.11	3.04	289.15	1 557 499	196 451	19.55	0.030

表 C.2 (续)

测量参数	单位	平均值	微增量 ^b	参数新值	参数新值 ^a 下的新排 气流量 kg/h	新排气流 量下新蒸 汽流量 kg/h	绝对敏感 系数	相对敏感 系数 %
燃机注入蒸汽压力	MPa	1.94	0.019	1.96	1 556 965	196 384	-373.27	-0.004
燃气轮机输出功率	MW	172.500	1.73	174.225	1 547 171	195 162	-712.60	-0.626
燃气轮机热损失	kW	9671	96.71	9768	1 556 447	196 319	-0.750 4	-0.037
燃气轮机排气温度	℃	606.11	6.24	612.35	1 538 562	196 366	-4.14	-0.013
高压蒸汽流量	kg/h	196 392	-1964	194 428	1 557 007	194 428	1.00	-1.000
高压给水温度	℃	156.11	1.74	157.85	1 557 007	196 389	-1.30	-0.001
高压蒸汽温度	℃	538.89	-5.57	533.32	1 557 007	197 601	-217.24	0.616
高压蒸汽压力	MPa	9.39	0.09	9.48	1 557 007	196 266	-1342.81	-0.064
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 137	-1941	192 196	1 557 007	196 369	0.01	-0.012
冷再热蒸汽温度	℃	330.00	3.48	333.48	1 557 007	196 681	83.21	0.147
热再热蒸汽压力	MPa	1.79	0.018	1.81	1 557 007	196 389	-151.82	-0.001
热再热蒸汽温度	℃	540.56	-5.58	534.97	1 557 007	194 183	395.64	-1.125
中压给水温度	℃	152.22	1.70	153.92	1 557 007	196 385	-3.74	-0.003
中压给水抽出货量	kg/h	35 453	355	35 807	1 557 007	196 394	0.01	0.001
中压给水抽出温度	℃	191.67	2.09	193.76	1 557 007	196 394	1.08	0.001
中压蒸汽流量	kg/h	33 457	335	33 792	1 557 007	196 361	-0.09	-0.016
中压蒸汽温度	℃	317.78	3.36	321.13	1 557 007	196 378	-4.19	-0.007
中压蒸汽压力	MPa	2.08	0.021	2.10	1 557 007	196 386	-262.28	-0.003
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	258	26 045	1 557 007	196 376	-0.06	-0.008
低压蒸汽温度	℃	318.33	3.36	321.69	1 557 007	196 386	-1.62	-0.003
低压蒸汽压力	MPa	0.262	0.003	0.265	1 557 007	196 389	-1038.76	-0.001
低压给水温度	℃	110.00	1.28	111.28	1 557 007	196 389	-1.77	-0.001
^a 参数新值是由平均值的变化百分比计算得到,用来获得“参数新值下的新排气流量”,“参数新值下的新排气流量”输入到计算机仿真程序; ^b ASME PTC 4.4 原文温度单位采用°F,为了使变化后参数新值与原文相同,表中温度的“微增量”已不是原文中平均值的 1%。								

表 C.3 高压蒸汽流量不确定度计算表(采用燃气轮机热平衡确定高压蒸汽流量)

高压蒸汽流量基准值: 196 392kg/h

测量参数	单位	平均值	样本偏差	样本数	平均样本偏差	自由度	绝对敏感系数	随机不确定度指标	总体自由度	参数的系统不确定度	系统不确定度指标	随机不确定度 %	系统不确定度 %
环境干球温度	℃	21.11	0.61	12	0.18	11	9.33	1.65	6.67×10^{-1}	0.56	5.18	0.00	0.00

表 C.3 (续)

测量参数	单位	平均值	样本偏差	样本数	平均样本偏差	自由度	绝对敏感系数	随机不确定度指标	总体自由度	参数的系统不确定度	系统不确定度指标	随机不确定度 %	系统不确定度 %
环境湿球温度	℃	18.06	0.61	12	0.18	11	-202.53	-35.73	1.48×10^5	0.56	-112.52	-0.02	-0.06
大气压力	MPa	0.098 6	0.000 3	12	0.00	11	19 322.34	1.65	6.80×10^{-1}	0.00	4.80	0.00	0.00
燃气轮机入口温度	℃	21.11	0.61	12	0.18	11	316.09	55.76	8.79×10^5	0.56	175.60	0.03	0.09
燃气轮机燃料流量	kg/h	34 850	209	30	38.18	29	9.34	356.62	5.58×10^8	174	1627.74	0.18	0.83
燃气轮机燃料温度	℃	126.11	1.61	30	0.29	29	15.76	4.64	1.59×10	2.22	35.03	0.00	0.02
燃机燃料低位发热量	kJ/kg	47 762.1	69.8	3	40.29	2	6.95	279.99	3.07×10^9	191.0	1327.75	0.14	0.68
燃机注入蒸汽流量	kg/h	41 825	251	30	45.82	29	-0.02	-0.84	1.76×10^{-2}	418	-7.71	0.00	0.00
燃机注入蒸汽温度	℃	286.11	1.61	30	0.29	29	19.55	5.75	3.77×10	2.78	54.31	0.00	0.03
燃机注入蒸汽压力	MPa	1.94	0.02	30	0.00	29	-373.27	-1.36	1.19×10^{-1}	0.02	-7.26	0.00	0.00
燃气轮机输出功率	MW	172.500	1.04	30	0.19	29	-712.60	-135.31	1.16×10^7	0.69	-491.69	-0.07	-0.25
燃气轮机热损失	kW	9671	0.00	30	0.00	29	-0.75	0.00	0.00	2418	-1814.37	0.00	-0.92
燃气轮机排气温度	℃	606.11	1.61	30	0.29	29	-4.14	-1.22	7.61×10^{-2}	6.11	-25.33	0.00	-0.01
高压蒸汽流量	kg/h	196 392	1768	30	322.71	29	1.00	322.73	3.74×10^8	982	982.04	0.16	0.50
高压给水温度	℃	156.11	1.61	30	0.29	29	-1.30	-0.38	7.47×10^{-4}	1.11	-1.45	0.00	0.00
高压蒸汽温度	℃	538.89	1.61	30	0.29	29	-217.24	-63.90	5.75×10^5	2.23	-483.71	-0.03	-0.25
高压蒸汽压力	MPa	9.39	0.02	30	0.00	29	-1342.81	-4.90	1.99×10	0.04	-50.44	0.00	-0.03

表 C.3 (续)

测量参数	单位	平均值	样本偏差	样本数	平均样本偏差	自由度	绝对敏感系数	随机不确定度指标	总体自由度	参数的系统不确定度	系统不确定度指标	随机不确定度 %	系统不确定度 %
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 137	1747	30	319.01	29	0.01	3.73	6.65	1165	13.61	0.00	0.01
冷再热蒸汽温度	℃	330.00	1.61	30	0.29	29	83.21	24.48	1.24×10^4	2.61	217.04	0.01	0.11
热再热蒸汽压力	MPa	1.79	0.02	30	0.00	29	-151.82	-0.55	3.25×10^{-3}	0.01	-1.09	0.00	0.00
热再热蒸汽温度	℃	540.56	1.61	30	0.29	29	395.64	116.38	6.33×10^6	2.23	883.60	0.06	0.45
中压给水温度	℃	152.22	1.61	30	0.29	29	-3.74	-1.10	5.03×10^{-2}	2.22	-8.30	0.00	0.00
中压给水抽出流量	kg/h	35 453	319	30	58.22	29	0.01	0.37	6.63×10^{-4}	355	2.27	0.00	0.00
中压给水抽出温度	℃	191.67	1.61	30	0.29	29	1.08	0.32	3.55×10^{-4}	2.22	2.41	0.00	0.00
中压蒸汽流量	kg/h	33 457	301	30	54.98	29	-0.09	-5.07	2.28×10	335	-30.84	0.00	-0.02
中压蒸汽温度	℃	317.78	1.61	30	0.29	29	-4.19	-1.23	7.96×10^{-2}	1.34	-5.62	0.00	0.00
中压蒸汽压力	MPa	2.08	0.02	30	0.00	29	-262.28	-0.96	2.90×10^{-2}	0.01	-2.18	0.00	0.00
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	232	30	42.37	29	-0.06	-2.53	1.42	258	-15.42	0.00	-0.01
低压蒸汽温度	℃	318.33	1.61	30	0.29	29	-1.62	-0.48	1.78×10^{-3}	1.34	-2.18	0.00	0.00
低压蒸汽压力	MPa	0.262	0.02	30	0.00	29	-1038.76	-3.79	7.13	0.00	-1.09	0.00	0.00
低压给水温度	℃	110.00	1.61	30	0.29	29	-1.77	-0.52	2.56×10^{-3}	2.22	-3.94	0.00	0.00

高压蒸汽流量不确定度（采用燃气轮机热平衡确定高压蒸汽流量）见表 C.4。

表 C.4 高压蒸汽流量不确定度（采用燃气轮机热平衡确定高压蒸汽流量）

项 目	单 位	数 值
随机不确定度	kg/h	592
随机不确定度的自由度		30.58

表 C.4 (续)

项 目	单 位	数 值
学生氏 t 分布值		2.00
基于 95%置信度的系统不确定度	kg/h	3166
总不确定度	kg/h	3381
总不确定度		1.72%

高压蒸汽流量敏感系数和不确定度计算表(采用余热锅炉平衡确定高压蒸汽流量)见表 C.5、表 C.6。

表 C.5 高压蒸汽流量敏感系数计算表(采用余热锅炉热平衡确定高压蒸汽流量)

高压蒸汽流量基准值: 196 392kg/h

敏感系数计算用参数的变化百分比 1.00								
测量参数	单位	平均值	微增量 ^b	参数新值	参数新值 ^a 下的新排 气流量	新排气流量 下的新蒸汽 流量	绝对敏感 系数	相对敏感 系数 %
环境干球温度	℃	21.11	0.39	21.50	1 557 223	196 416	62.98	0.012
环境湿球温度	℃	18.06	0.36	18.41	1 556 392	196 312	-222.79	-0.041
大气压力	MPa	0.098 6	0.001 0	0.099 6	1 557 183	196 453	61 647.46	0.031
燃气轮机燃料流量	kg/h	34 850	348	35 198	1 583 456	196 295	-0.28	-0.049
燃气轮机注入蒸汽 流量	kg/h	41 825	418	42 243	1 556 626	196 341	-0.12	-0.026
燃气轮机排气温度	℃	606.11	6.24	612.35	1 533 222	195 706	-109.86	-0.349
余热锅炉出口温度	℃	159.44	1.77	161.22	1 563 350	197 180	444.83	0.401
余热锅炉热损失	kW	666	6.66	673	1 557 058	196 396	0.61	0.002
高压蒸汽流量	kg/h	196 392	-1964	194 428	1 545 457	194 840	0.790	-0.790
高压给水温度	℃	156.11	1.74	157.85	1 554 071	196 023	-211.81	-0.188
高压蒸汽温度	℃	538.89	-5.57	533.32	1 551 379	196 819	-76.68	0.217
高压蒸汽压力	MPa	9.39	0.09	9.48	1 556 603	196 226	-1767.87	-0.085
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 137	-1941	192 196	1 555 115	196 132	0.13	-0.132
冷再热蒸汽温度	℃	330.0	3.48	333.5	1 553 785	196 279	-32.35	-0.057
热再热蒸汽压力	MPa	1.79	0.02	1.81	1 556 936	196 380	-632.58	-0.006
热再热蒸汽温度	℃	540.56	-5.58	534.97	1 552 010	193 561	507.02	-1.441
中压给水温度	℃	152.22	1.70	153.92	1 555 938	196 229	-95.52	-0.083
中压给水抽出流量	kg/h	35 453	355	35 807	1 557 135	196 385	-0.02	-0.003
中压给水抽出温度	℃	191.67	2.09	193.76	1 557 704	196 482	42.88	0.046
中压蒸汽流量	kg/h	33 457	335	33 792	1 558 700	196 570	0.53	0.091
中压蒸汽温度	℃	317.78	3.36	321.13	1 557 546	196 446	16.22	0.028
中压蒸汽压力	MPa	2.08	0.02	2.10	1 556 970	196 383	-437.13	-0.005
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	258	26 045	1 558 429	196 538	0.57	0.075

表 C.5 (续)

测量参数	单位	平均值	微增量 ^b	参数新值	参数新值 ^a 下的新排气流量	新排气流量 下的新蒸汽流量	绝对敏感 系数	相对敏感 系数 %
低压蒸汽温度	℃	318.33	3.36	321.69	1 557 375	196 453	18.35	0.031
低压蒸汽压力	MPa	0.262	0.00	0.265	1 557 004	196 370	-8310.06	-0.011
低压给水温度	℃	110.00	1.28	111.28	1 556 729	196 355	-29.11	-0.019
^a 参数新值是由平均值的变化百分比计算得到,用来获得“参数新值下的新排气流量”,“参数新值下的新排气流量”输入到计算机仿真程序; ^b ASME PTC 4.4 原文温度单位采用°F,所以为了使变化后参数新值与原文相同,表中温度的“微增量”已不是原文中平均值的1%。								

表 C.6 高压蒸汽流量不确定度计算表(采用余热锅炉热平衡确定高压蒸汽流量)

高压蒸汽流量基准值: 196 392kg/h

测量参数	单位	平均值	样本 偏差	样本 本数	平均样 本偏差	自由 度	绝对敏感 系数	随机不 确定度 指标	总体 自由度	参数的 系统不 确定度	系统不 确定度 指标	随机 不确定 度 %	系统 不确定 度 %
环境干球温度	℃	21.11	0.61	12	0.18	11	62.98	11.11	1.39×10^3	0.56	34.99	0.01	0.01
环境湿球温度	℃	18.06	0.61	12	0.18	11	-222.79	-39.30	2.17×10^5	0.56	-123.77	-0.02	-0.03
大气压力	MPa	0.098 6	0.000 3	12	0.00	11	61 647	5.28	7.04×10	0.000 2	15.30	0.00	0.00
燃气轮机燃料流量	kg/h	34 850	209	30	38.18	29	-0.28	-10.63	4.41×10^2	174	-48.54	-0.01	-0.01
燃机注入蒸汽流量	kg/h	41 825	251	30	45.82	29	-0.12	-5.52	3.19×10	418	-50.35	0.00	-0.01
燃气轮机排气温度	℃	606.11	1.61	30	0.29	29	-109.86	-32.31	3.76×10^4	5.00	-549.28	-0.02	-0.13
余热锅炉出口温度	℃	159.44	1.61	30	0.29	29	444.83	130.85	1.01×10^7	1.39	617.82	0.07	0.14
余热锅炉热损失	kW	666	0.0	1	0.00	1	0.61	0.00	0.00	333	204.12	0.00	0.50
高压蒸汽流量	kg/h	196 392	1768	30	322.71	29	0.209 9	67.73	7.26×10^5	982	206.09	0.03	0.05
高压给水温度	℃	156.11	1.61	30	0.29	29	-211.81	-62.30	5.20×10^5	1.11	-235.35	-0.03	-0.05
高压蒸汽温度	℃	538.89	1.61	30	0.29	29	-76.68	-22.55	8.92×10^3	2.23	-170.73	-0.01	-0.04
高压蒸汽压力	MPa	9.39	0.02	30	0.00	29	-1767.87	-6.45	5.98×10	0.037 6	-66.41	0.00	-0.02

表 C.6 (续)

测量参数	单位	平均值	样本偏差	样本数	平均样本偏差	自由度	绝对敏感系数	随机不确定度指标	总体自由度	参数的系统不确定度	系统不确定度指标	随机不确定度 %	系统不确定度 %
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 137	1747	30	319.01	29	0.13	42.63	1.14×10^5	1165	155.68	0.02	0.04
冷再热蒸汽温度	℃	330.0	1.61	30	0.29	29	-32.35	-9.51	2.83×10^2	1.39	-45.01	0.00	-0.01
热再热蒸汽压力	MPa	1.79	0.02	30	0.00	29	-632.58	-2.31	9.81×10^{-1}	0.007 2	-4.54	0.00	0.00
热再热蒸汽温度	℃	540.56	1.61	30	0.29	29	507.02	149.14	1.71×10^7	2.23	1132.35	0.08	0.26
中压给水温度	℃	152.22	1.61	30	0.29	29	-95.52	-28.10	2.15×10^4	1.11	-106.13	-0.01	-0.02
中压给水抽出流量	kg/h	35 453	319	30	58.22	29	-0.02	-1.12	5.37×10^{-2}	355	-6.80	0.00	0.00
中压给水抽出温度	℃	191.67	1.61	30	0.29	29	42.88	12.61	8.73×10^2	1.11	47.65	0.01	0.01
中压蒸汽流量	kg/h	33 457	301	30	54.98	29	0.53	29.37	2.56×10^4	335	178.72	0.01	0.04
中压蒸汽温度	℃	317.78	1.61	30	0.29	29	16.22	4.77	1.79×10	1.34	21.77	0.00	0.01
中压蒸汽压力	MPa	2.08	0.02	30	0.00	29	-437.13	-1.60	2.24×10^{-1}	0.008 3	-3.63	0.00	0.00
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	232	30	42.37	29	0.57	24.07	1.16×10^4	258	146.51	0.01	0.03
低压蒸汽温度	℃	318.33	1.61	30	0.29	29	18.35	5.40	2.93×10	1.34	24.68	0.00	0.01
低压蒸汽压力	MPa	0.262	0.02	30	0.00	29	-8310.06	-30.34	2.92×10^4	0.001 0	-8.71	-0.02	0.00
低压给水温度	℃	110.00	1.61	30	0.29	29	-29.11	-8.56	1.85×10^2	1.11	-32.34	0.00	-0.01

高压蒸汽流量不确定度（采用余热锅炉热平衡确定高压蒸汽流量）见表 C.7。

表 C.7 高压蒸汽流量不确定度（采用余热锅炉热平衡确定高压蒸汽流量）

项 目	单 位	数 值
随机不确定度	kg/h	238
随机不确定度的自由度		111.0

表 C.7 (续)

项 目	单 位	数 值
学生氏 t 分布值		2.0
基于 95%置信度的系统不确定度	kg/h	1502
总不确定度	kg/h	1576
总不确定度		0.802%

C.2 中压蒸汽流量不确定度

表 C.8 为综合了燃气轮机热平衡和余热锅炉热平衡计算的中压蒸汽流量及其不确定度。

表 C.8 综合了燃气轮机热平衡和余热锅炉热平衡计算的中压蒸汽流量及其不确定度

项 目	单位	燃气轮机热平衡	余热锅炉热平衡	加权值
蒸汽流量	kg/h	33 458	33 458	
中压蒸汽流量不确定度		3.42%	1.74%	
权重		0.21	0.79	
系统不确定度	kg/h	1036	563	496
随机不确定度	kg/h	244	73	77
总不确定度	kg/h			519
中压蒸汽流量加权值	kg/h			33 458
总不确定度加权值				1.551%

中压蒸汽流量敏感系数和不确定度计算表（采用燃气轮机热平衡确定中压蒸汽流量）见表 C.9、表 C.10。

表 C.9 中压蒸汽流量敏感系数计算表（采用燃气轮机热平衡确定中压蒸汽流量）

中压蒸汽流量基准值：33 457kg/h

敏感系数计算用参数的变化百分比 1.00								
测量参数	单位	平均值	微增量 ^b	参数新值	参数新值 ^a 下的新排 气流量 kg/h	新排气流 量下的新 蒸汽流量 kg/h	绝对敏感 系数	相对敏感 系数 %
环境干球温度	℃	21.11	0.39	21.50	1 557 219	33 461	11.66	0.014
环境湿球温度	℃	18.06	0.36	18.42	1 556 447	33 443	-37.68	-0.041
大气压力	MPa	0.098 6	0.001 0	0.099 6	1 557 180	33 460	2819.48	0.008
燃气轮机入口温度	℃	21.11	0.39	21.50	1 558 003	33 478	53.65	0.062
燃气轮机燃料流量	kg/h	34 850	348	35 198	1 583 154	34 032	1.65	1.719
燃气轮机燃料温度	℃	126.11	1.44	127.56	1 557 211	33 460	2.20	0.009

表 C.9 (续)

测量参数	单位	平均值	微增量 ^b	参数新值	参数新值 ^a 下的新排 气流量 kg/h	新排气流 量下的新 蒸汽流量 kg/h	绝对敏感 系数	相对敏感 系数 %
燃机燃料低位 发热量	kJ/kg	47 762.1	476.8	48 238.9	1 583 667	34 043	1.23	1.753
燃机注入蒸汽流量	kg/h	41 825	418	42 243	1 556 960	33 455	-0.01	-0.007
燃机注入蒸汽温度	℃	286.11	3.06	289.17	1 557 499	33 466	3.12	0.028
燃机注入蒸汽压力	MPa	1.944 3	0.019 3	1.963 6	1 556 965	33 455	-117.48	-0.007
燃气轮机输出功率	MW	172.5	1.7	174.2	1 547 171	33 240	-127.81	-0.649
燃气轮机热损失	kW	9671	96.71	9768	1 556 447	33 443	-0.14	-0.041
燃气轮机排气温度	℃	606.11	6.11	612.22	1 538 562	33 021	-71.26	-1.302
高压蒸汽流量	kg/h	196 392	-1964	194 428	1 557 007	34 763	-0.66	3.903
高压给水温度	℃	156.11	1.72	157.83	1 557 007	33 506	28.44	0.146
高压蒸汽温度	℃	538.89	-5.56	533.33	1 557 007	33 737	-50.38	0.836
高压蒸汽压力	MPa	9.390 7	0.094 5	9.485 1	1 557 007	33 618	1709.53	0.483
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 137	-1941	192 196	1 557 007	33 446	0.01	-0.033
冷再热蒸汽温度	℃	330.00	3.50	333.50	1 557 007	33 412	-12.70	-0.133
热再热蒸汽压力	MPa	1.793	0.017 9	1.811	1 557 007	33 456	-50.61	-0.003
热再热蒸汽温度	℃	540.56	-5.56	535.00	1 557 007	33 577	-21.64	0.359
中压给水温度	℃	152.22	1.72	153.94	1 557 007	33 503	26.60	0.137
中压给水抽出流量	kg/h	35 453	355	35 807	1 557 007	33 610	0.43	0.457
中压给水抽出温度	℃	191.67	2.11	193.78	1 557 007	33 610	72.41	0.457
中压蒸汽流量	kg/h	33 457	335	33 792	1 557 007	33 792	1.00	1.001
中压蒸汽温度	℃	317.78	3.33	321.11	1 557 007	33 360	-28.98	-0.289
中压蒸汽压力	MPa	2.075	0.020 7	2.096	1 557 007	33 274	-8859.45	-0.548
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	257	26 044	1 557 007	33 428	-0.11	-0.085
低压蒸汽温度	℃	318.33	3.33	321.67	1 557 007	33 375	-24.63	-0.245
低压蒸汽压力	MPa	0.262	0.002 8	0.265	1 557 007	33 455	-822.35	-0.007
低压给水温度	℃	110.00	1.28	111.28	1 557 007	33 456	-1.06	-0.004
^a 参数新值是由平均值的变化百分比计算得到, 用来获得“参数新值下的新排气流量”, “参数新值下的新排气流量”输入到计算机仿真程序; ^b ASME PTC 4.4 原文温度单位采用°F, 所以为了使变化后参数新值与原文相同, 表中温度的“微增量”已不是原文中平均值的1%。								

表 C.10 中压蒸汽流量不确定度计算表（采用燃气轮机热平衡确定中压蒸汽流量）

中压蒸汽流量基准值：33 457kg/h

测量参数	单位	平均值	样本偏差	样本数	平均样本偏差	自由度	绝对敏感系数	随机不确定度指标	总体自由度	参数的系统不确定度	系统不确定度指标	随机不确定度 %	系统不确定度 %
环境干球温度	℃	21.11	0.61	12	0.18	11	11.66	2.06	1.63	0.56	6.48	0.003	0.009
环境湿球温度	℃	18.06	0.61	12	0.18	11	-37.68	-6.65	1.78×10^2	0.56	-20.94	-0.009	-0.028
大气压力	MPa	0.098 6	0.000 3	12	0.00	11	2819.48	0.24	3.08×10^{-4}	0.000 2	0.70	0.000	0.001
燃气轮机入口温度	℃	21.11	0.61	12	0.18	11	53.65	9.47	7.30×10^2	0.56	29.81	0.013	0.040
燃气轮机燃料流量	kg/h	34 850	209	30	38.18	29	1.65	63.03	5.44×10^5	174	287.69	0.085	0.390
燃气轮机燃料温度	℃	126.11	1.61	30	0.29	29	2.20	0.65	6.03×10^{-3}	2.22	4.88	0.001	0.007
燃机燃料低位发热量	kJ/kg	47 762.1	69.8	3	40.29	2	1.23	49.55	3.01×10^6	191.0	234.99	0.067	0.319
燃机注入蒸汽流量	kg/h	41 825	251	30	45.82	29	-0.01	-0.25	1.31×10^{-4}	418	-2.27	0.000	-0.003
燃机注入蒸汽温度	℃	286.11	1.61	30	0.29	29	3.12	0.92	2.44×10^{-2}	2.78	8.66	0.001	0.012
燃机注入蒸汽压力	MPa	1.944 3	0.020	30	0.00	29	-117.48	-0.43	1.17×10^{-3}	0.019 4	-2.28	-0.001	-0.003
燃气轮机输出功率	MW	172.5	1.04	30	0.19	29	-127.81	-24.27	1.20×10^4	0.69	-88.19	-0.033	-0.120
燃气轮机热损失	kW	9671	0.0	30	0.00	29	-0.14	0.00	0.00	2418	-340.19	0.000	0.250
燃气轮机排气温度	℃	606.11	1.61	30	0.29	29	-71.26	-20.96	6.65×10^3	6.11	-435.45	-0.028	-0.590
高压蒸汽流量	kg/h	196 392	1768	30	322.70	29	-0.66	-214.56	7.31×10^7	982	-652.90	-0.291	-0.885
高压给水温度	℃	156.11	1.61	30	0.29	29	28.44	8.37	1.69×10^2	1.11	31.61	0.011	0.043

表 C.10 (续)

测量参数	单位	平均值	样本偏差	样本数	平均样本偏差	自由度	绝对敏感系数	随机不确定度指标	总体自由度	参数的系统不确定度	系统不确定度指标	随机不确定度 %	系统不确定度 %
高压蒸汽温度	℃	538.89	1.61	30	0.29	29	-50.38	-14.82	1.66×10^3	2.23	-112.17	-0.020	-0.152
高压蒸汽压力	MPa	9.390 7	0.02	30	0.00	29	1709.53	6.24	5.23×10	0.037 6	64.21	0.008	0.087
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 137	1747	30	319.00	29	0.01	1.79	3.53×10^{-1}	1165	6.53	0.002	0.009
冷再热蒸汽温度	℃	330.00	1.61	30	0.29	29	-12.70	-3.74	6.72	2.61	-33.13	-0.005	-0.045
热再热蒸汽压力	MPa	1.793	0.02	30	0.00	29	-50.61	-0.18	4.02×10^{-5}	0.007 2	-0.36	0.000	0.000
热再热蒸汽温度	℃	540.56	1.61	30	0.29	29	-21.64	-6.36	5.66×10	2.23	-48.32	-0.009	-0.066
中压给水温度	℃	152.22	1.61	30	0.29	29	26.60	7.82	1.29×10^2	2.22	59.11	0.011	0.080
中压给水抽出流量	kg/h	35 453	319	30	58.22	29	0.43	25.09	1.37×10^4	355	152.78	0.034	0.207
中压给水抽出温度	℃	191.67	1.61	30	0.29	29	72.41	21.30	7.10×10^3	2.22	160.91	0.029	0.218
中压蒸汽流量	kg/h	33 457	301	30	54.98	29	1.00	54.98	3.15×10^5	335	334.57	0.075	0.454
中压蒸汽温度	℃	317.78	1.61	30	0.29	29	-28.98	-8.53	1.82×10^2	1.34	-38.90	-0.012	-0.053
中压蒸汽压力	MPa	2.075	0.02	30	0.00	29	-8859	-32.34	3.77×10^4	0.008 3	-73.54	-0.044	-0.100
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	232	30	42.37	29	-0.11	-4.71	1.69×10	258	-28.65	-0.006	-0.039
低压蒸汽温度	℃	318.33	1.61	30	0.29	29	-24.63	-7.24	9.50×10	1.34	-33.11	-0.010	-0.045
低压蒸汽压力	MPa	0.262	0.02	30	0.00	29	-822.35	-3.00	2.80	0.001 0	-0.86	-0.004	-0.001
低压给水温度	℃	110.00	1.61	30	0.29	29	-1.06	-0.31	3.32×10^{-4}	2.22	-2.37	0.000	-0.003

中压蒸汽流量不确定度（采用燃气轮机热平衡确定中压蒸汽流量）见表 C.11。

表 C.11 中压蒸汽流量不确定度（采用燃气轮机热平衡确定中压蒸汽流量）

项 目	单 位	数 值
随机不确定度	kg/h	244
随机不确定度的自由度		45.8
学生氏 t 分布值		2.00
基于 95%置信度的系统不确定度	kg/h	1036
总不确定度	kg/h	1145
总不确定度		3.42%

中压蒸汽流量敏感系数和不确定度计算表（采用余热锅炉热平衡确定中压蒸汽流量）见表 C.12、表 C.13。

表 C.12 中压蒸汽流量敏感系数计算表（采用余热锅炉热平衡确定中压蒸汽流量）

中压蒸汽流量基准值：33 457kg/h

敏感系数计算用参数的变化百分比 1.00								
测量参数	单位	平均值	微增量 ^a	参数新值	参数新值 ^b 下的新排 气流量	新排气流 量下的 新蒸汽 流量	绝对敏感 系数	相对敏感 系数
环境干球温度	℃	21.11	0.39	21.50	1 557 250	33 461	9.33	0.011
环境湿球温度	℃	18.06	0.36	18.42	1 556 419	33 443	-41.45	-0.045
大气压力	MPa	0.098 6	0.001	0.099 6	1 557 211	33 460	2819.53	0.008
燃气轮机燃料流量	kg/h	34 851	348	35 199	1 583 484	33 439	-0.05	-0.054
燃机注入蒸汽流量	kg/h	41 826	418	42 244	1 556 654	33 448	-0.02	-0.028
燃气轮机排气温度	℃	606.11	6.11	612.22	1 533 249	32 908	-89.89	-1.642
余热锅炉出口温度	℃	159.44	1.78	161.22	1 563 378	33 596	77.82	0.414
余热锅炉热损失	kW	666	6.65	673	1 557 085	33 457	-0.07	-0.001
高压蒸汽流量	kg/h	196 395	-1964	194 431	1 545 485	33 520	-0.03	0.187
高压给水温度	℃	156.11	1.72	157.83	1 554 098	33 442	-8.95	-0.046
高压蒸汽温度	℃	538.89	-5.56	533.33	1 551 406	33 618	-28.90	0.480
高压蒸汽压力	MPa	9.391	0.094	9.485	1 556 631	33 609	1603.91	0.453
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 141	-1941	192 199	1 555 142	33 405	0.03	-0.157
冷再热蒸汽温度	℃	330.00	3.50	333.50	1 553 812	33 342	-33.05	-0.346
热再热蒸汽压力	MPa	1.793	0.018	1.811	1 556 964	33 455	-126.52	-0.007
热再热蒸汽温度	℃	540.56	-5.56	535.00	1 552 038	33 468	-1.88	0.031
中压给水温度	℃	152.22	1.72	153.94	1 555 965	33 481	13.43	0.069
中压给水抽出流量	kg/h	35 453	355	35 808	1 557 163	33 451	-0.02	-0.020
中压给水抽出温度	℃	191.67	2.11	193.78	1 557 732	33 620	77.14	0.487
中压蒸汽流量	kg/h	33 458	335	33 792	1 558 727	33 518	0.180 2	0.180

表 C.12 (续)

测量参数	单位	平均值	微增量 ^a	参数新值	参数新值 ^b 下的新排气流量	新排气流量下的新蒸汽流量	绝对敏感系数	相对敏感系数
中压蒸汽温度	℃	317.78	3.33	321.11	1 557 573	33 382	-22.59	-0.225
中压蒸汽压力	MPa	2.075	0.021	2.096	1 556 998	33 273	-8903.46	-0.550
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	257	26 044	1 558 456	33 471	0.05	0.039
低压蒸汽温度	℃	318.33	3.33	321.67	1 557 403	33 380	-23.27	-0.232
低压蒸汽压力	MPa	0.262	0.003	0.265	1 557 031	33 457	-328.95	-0.003
低压给水温度	℃	110.00	1.28	111.28	1 556 756	33 450	-5.68	-0.022
^a 参数新值是由平均值的变化百分比计算得到, 用来获得“参数新值下的新排气流量”, “参数新值下的新排气流量”输入到计算机仿真程序; ^b ASME PTC 4.4 原文温度单位采用°F, 所以为了使变化后参数新值与原文相同, 表中温度的“微增量”已不是原文中平均值的 1%。								

表 C.13 中压蒸汽流量不确定度计算表 (采用余热锅炉热平衡确定中压蒸汽流量)

中压蒸汽流量基准值: 33 457kg/h

测量参数	单位	平均值	样本偏差	样本数	平均样本偏差	自由度	绝对敏感系数	随机不确定度指标	总体自由度	参数的系统不确定度	系统不确定度指标	随机不确定度 %	系统不确定度 %
环境干球温度	℃	21.11	0.61	12	0.18	11	9.33	1.65	6.68×10^{-1}	0.56	5.18	0.002	0.007
环境湿球温度	℃	18.06	0.61	12	0.18	11	-41.45	-7.31	2.60×10^2	0.56	-23.03	-0.010	-0.031
大气压力	MPa	0.098 6	0.00	12	0.00	11	2819.53	0.24	3.08×10^{-4}	0.000 2	0.70	0.000	0.001
燃气轮机燃料流量	kg/h	34 851	209	30	38.18	29	-0.05	-1.99	5.39×10^{-1}	174	-9.08	-0.003	-0.012
燃机注入蒸汽流量	kg/h	41 826	251	30	45.82	29	-0.02	-1.04	4.09×10^{-2}	418	-9.53	-0.001	-0.013
燃气轮机排气温度	℃	606.11	1.61	30	0.29	29	-89.89	-26.44	1.69×10^4	5.00	-449.44	-0.036	-0.609
余热锅炉出口温度	℃	159.44	1.61	30	0.29	29	77.82	22.89	9.47×10^3	1.39	108.08	0.031	0.147
余热锅炉热损失	kW	666	0.0	1	0.00	1	-0.07	0.00	0.00	333	-22.72	0.000	0.500
高压蒸汽流量	kg/h	196 395	1768	30	322.70	29	-0.03	-10.28	3.86×10^2	982	-31.30	-0.014	-0.042
高压给水温度	℃	156.11	1.61	30	0.29	29	-8.95	-2.63	1.66	1.11	-9.95	-0.004	-0.013

表 C.13 (续)

测量参数	单位	平均值	样本偏差	样本数	平均样本偏差	自由度	绝对敏感系数	随机不确定度指标	总体自由度	参数的系统不确定度	系统不确定度指标	随机不确定度 %	系统不确定度 %
高压蒸汽温度	℃	538.89	1.61	30	0.29	29	-28.90	-8.50	1.80×10^2	2.23	-64.36	-0.012	-0.087
高压蒸汽压力	MPa	9.391	0.02	30	0.00	29	1603.91	5.86	4.05×10	0.037 6	60.25	0.008	0.082
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 141	1747	30	319.00	29	0.03	8.65	1.93×10^2	1165	31.57	0.012	0.043
冷再热蒸汽温度	℃	330.00	1.61	30	0.29	29	-33.05	-9.72	3.08×10^2	1.39	-45.99	-0.013	-0.062
热再热蒸汽压力	MPa	1.793	0.02	30	0.00	29	-126.52	-0.46	1.57×10^{-3}	0.007 2	-0.91	-0.001	-0.001
热再热蒸汽温度	℃	540.56	1.61	30	0.29	29	-1.88	-0.55	3.21×10^{-3}	2.23	-4.19	-0.001	-0.006
中压给水温度	℃	152.22	1.61	30	0.29	29	13.43	3.95	8.40	1.11	14.92	0.005	0.020
中压给水抽出流量	kg/h	35 453	319	30	58.22	29	-0.02	-1.12	5.36×10^{-2}	355	-6.80	-0.002	-0.009
中压给水抽出温度	℃	191.67	1.61	30	0.29	29	77.14	22.69	9.14×10^3	1.11	85.71	0.031	0.116
中压蒸汽流量	kg/h	33 458	301	30	54.98	29	0.819 8	45.07	1.42×10^5	335	274.27	0.061	0.372
中压蒸汽温度	℃	317.78	1.61	30	0.29	29	-22.59	-6.64	6.72×10	1.34	-30.32	-0.009	-0.041
中压蒸汽压力	MPa	2.075	0.02	30	0.00	29	-8903.46	-32.50	3.85×10^4	0.008 3	-73.91	-0.044	-0.100
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	232	30	42.37	29	0.05	2.17	7.61×10^{-1}	258	13.19	0.003	0.018
低压蒸汽温度	℃	318.33	1.61	30	0.29	29	-23.27	-6.84	7.57×10	1.34	-31.28	-0.009	-0.042
低压蒸汽压力	MPa	0.262	0.02	30	0.00	29	-328.95	-1.20	7.17×10^{-2}	0.001 0	-0.34	-0.002	0.000
低压给水温度	℃	110.00	1.61	30	0.29	29	-5.68	-1.67	2.69×10^{-1}	1.11	-6.31	-0.002	-0.009

中压蒸汽流量不确定度（采用余热锅炉热平衡确定中压蒸汽流量）见表 C.14。

表 C.14 中压蒸汽流量不确定度 (采用余热锅炉热平衡确定中压蒸汽流量)

项 目	单 位	数 值
随机不确定度	kg/h	73
随机不确定度的自由度		134
学生氏 t 分布值		2
基于 95%置信度的系统不确定度	kg/h	563
总不确定度	kg/h	582
总不确定度		1.74%

C.3 低压蒸汽流量不确定度

表 C.15 为综合了燃气轮机热平衡和余热锅炉热平衡计算的低压蒸汽流量及其不确定度。

表 C.15 综合了燃气轮机热平衡和余热锅炉热平衡计算的低压蒸汽流量及其不确定度

项 目	单位	燃气轮机热平衡	余热锅炉热平衡	加权值
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	25 787	
低压蒸汽流量不确定度		3.59%	2.27%	
权重		0.285	0.715	
系统不确定度	kg/h	856	553	465
随机不确定度	kg/h	176	94	84
总不确定度	kg/h			494
低压蒸汽流量加权值	kg/h			25 787
总不确定度加权值				1.916%

低压蒸汽流量敏感系数和不确定度计算表 (采用燃气轮机热平衡确定低压蒸汽流量) 见表 C.16、表 C.17。

表 C.16 低压蒸汽流量敏感系数计算表 (采用燃气轮机热平衡确定低压蒸汽流量)

低压蒸汽流量基准值: 25 787kg/h

敏感系数计算用参数的变化百分比 1.00								
测量参数	单位	平均值	微增量 ^b	参数新值	参数新值 ^a 下的新排 气流量 kg/h	新排气流 量下的新 蒸汽流量 kg/h	绝对敏感 系数	相对敏感 系数 %
环境干球温度	℃	21.11	0.39	21.50	1 557 247	25 793	15.16	0.023
环境湿球温度	℃	18.06	0.36	18.42	1 556 475	25 779	-23.87	-0.033
大气压力	MPa	0.098 6	0.001	0.099 6	1 557 208	25 791	4229.30	0.016
燃气轮机入口 温度	℃	21.11	0.39	21.50	1 558 031	25 806	47.82	0.072

表 C.16 (续)

测量参数	单位	平均值	微增量 ^b	参数新值	参数新值 ^a 下的新排 气流量 kg/h	新排气流 量下的新 蒸汽流量 kg/h	绝对敏感 系数	相对敏感 系数 %
燃气轮机燃料 流量	kg/h	34 851	348	35 199	1 583 181	26 244	1.31	1.773
燃气轮机燃料 温度	℃	126.11	1.44	127.56	1 557 238	25 792	3.14	0.018
燃机燃料低位 发热量	kJ/kg	47 762	476.8	48 239	1 583 695	26 253	0.98	1.808
燃机注入蒸汽 流量	kg/h	41 826	418	42 244	1 556 988	25 788	0.00	0.002
燃机注入蒸汽 温度	℃	286.11	3.06	289.17	1 557 527	25 797	3.12	0.037
燃机注入蒸汽 压力	MPa	1.94	0.019	1.96	1 556 993	25 788	23.50	0.002
燃气轮机输出 功率	MW	172.50	1.7	174.20	1 547 199	25 618	-99.79	-0.658
燃气轮机热损失	kW	9671	96.71	9768	1 556 475	25 779	-0.09	-0.033
燃气轮机排气 温度	℃	606.11	6.11	612.22	1 538 589	25 445	-56.04	-1.328
高压蒸汽流量	kg/h	196 395	-1964	194 431	1 557 035	26 507	-0.37	2.790
高压给水温度	℃	156.11	1.72	157.83	1 557 035	26 213	247.31	1.652
高压蒸汽温度	℃	538.89	-5.56	533.33	1 557 035	25 964	-31.76	0.684
高压蒸汽压力	MPa	9.39	0.094	9.49	1 557 035	25 812	259.31	0.095
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 141	-1941	192 199	1 557 035	25 783	0.00	-0.018
冷再热蒸汽温度	℃	330.00	3.50	333.50	1 557 035	25 760	-7.65	-0.104
热再热蒸汽压力	MPa	1.793	0.018	1.811	1 557 035	25 789	75.91	0.005
热再热蒸汽温度	℃	540.56	-5.56	535.00	1 557 035	25 877	-16.25	0.350
中压给水温度	℃	152.22	1.72	153.94	1 557 035	25 885	56.63	0.378
中压给水抽出流量	kg/h	35 453	355	35 808	1 557 035	25 557	-0.65	-0.892
中压给水抽出温度	℃	191.67	2.11	193.78	1 557 035	25 557	-108.94	-0.892
中压蒸汽流量	kg/h	33 458	335	33 792	1 557 035	25 527	-0.78	-1.008
中压蒸汽温度	℃	317.78	3.33	321.11	1 557 035	25 782	-1.63	-0.021
中压蒸汽压力	MPa	2.075	0.021	2.096	1 557 035	25 908	5855.23	0.470
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	257	26 044	1 557 035	26 044	1.00	0.997
低压蒸汽温度	℃	318.33	3.33	321.67	1 557 035	25 778	-2.86	-0.037
^a 参数新值是由平均值的变化百分比计算得到, 用来获得“参数新值下的新排气流量”, “参数新值下的新排气流量”输入到计算机仿真程序;								
^b ASME PTC 4.4 原文温度单位采用°F, 所以为了使变化后参数新值与原文相同, 表中温度的“微增量”已不是原文中平均值的 1%。								

表 C.17 低压蒸汽流量不确定度计算表（采用燃气轮机热平衡确定低压蒸汽流量）

低压蒸汽流量基准值：25 787kg/h

测量参数	单位	平均值	样本偏差	样本数	平均样本偏差	自由度	绝对敏感系数	随机不确定度指标	总体自由度	参数的系统不确定度	系统不确定度指标	随机不确定度 %	系统不确定度 %
环境干球温度	℃	21.11	0.61	12	0.18	11	15.16	2.67	4.65	0.56	8.42	0.005	0.015
环境湿球温度	℃	18.06	0.61	12	0.18	11	-23.87	-4.21	2.86×10	0.56	-13.26	-0.007	-0.023
大气压力	MPa	0.098 6	0.00	12	0.00	11	4229.30	0.36	1.56×10^{-3}	0.000 2	1.05	0.001	0.002
燃气轮机入口温度	℃	21.11	0.61	12	0.18	11	47.82	8.44	4.61×10^2	0.56	26.57	0.015	0.047
燃气轮机燃料流量	kg/h	34 851	209	30	38.18	29	1.31	50.11	2.17×10^5	174	228.71	0.088	0.402
燃气轮机燃料温度	℃	126.11	1.61	30	0.29	29	3.14	0.92	2.51×10^{-2}	2.22	6.98	0.002	0.012
燃机燃料低位发热量	kJ/kg	47 762	69.8	3	40.29	2	0.98	39.40	1.20×10^6	191.0	186.83	0.069	0.329
燃机注入蒸汽流量	kg/h	41 826	251	30	45.82	29	0.00	0.05	2.10×10^{-7}	418	0.45	0.000	0.001
燃机注入蒸汽温度	℃	286.11	1.61	30	0.29	29	3.12	0.92	2.44×10^{-2}	2.78	8.66	0.002	0.015
燃机注入蒸汽压力	MPa	1.94	0.02	30	0.00	29	23.50	0.09	1.87×10^{-6}	0.019 4	0.46	0.000	0.001
燃气轮机输出功率	MW	172.50	1.04	30	0.19	29	-99.79	-18.95	4.45×10^3	0.69	-68.86	-0.033	-0.121
燃气轮机热损失	kW	9671	0.0	30	0.00	29	-0.09	0.00	0.00	2418	-215.46	0.000	0.250
燃气轮机排气温度	℃	606.11	1.61	30	0.29	29	-56.04	-16.48	2.55×10^3	6.11	-342.47	-0.029	-0.602
高压蒸汽流量	kg/h	196 395	1768	30	322.71	29	-0.37	-118.20	6.73×10^6	982	-359.68	-0.208	-0.633
高压给水温度	℃	156.11	1.61	30	0.29	29	247.31	72.75	9.66×10^5	1.11	274.79	0.128	0.483

表 C.17 (续)

测量参数	单位	平均值	样本偏差	样本数	平均样本偏差	自由度	绝对敏感系数	随机不确定度指标	总体自由度	参数的系统不确定度	系统不确定度指标	随机不确定度 %	系统不确定度 %
高压蒸汽温度	℃	538.89	1.61	30	0.29	29	-31.76	-9.34	2.63×10^2	2.23	-70.72	-0.016	-0.124
高压蒸汽压力	MPa	9.39	0.02	30	0.00	29	259.31	0.95	2.77×10^{-2}	0.037 6	9.74	0.002	0.017
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 141	1747	30	319.01	29	0.00	0.75	1.06×10^{-2}	1165	2.72	0.001	0.005
冷再热蒸汽温度	℃	330.00	1.61	30	0.29	29	-7.65	-2.25	8.82×10^{-1}	2.61	-19.94	-0.004	-0.035
热再热蒸汽压力	MPa	1.793	0.02	30	0.00	29	75.91	0.28	2.03×10^{-4}	0.007 2	0.54	0.000	0.001
热再热蒸汽温度	℃	540.56	1.61	30	0.29	29	-16.25	-4.78	1.80×10	2.23	-36.29	-0.008	-0.064
中压给水温度	℃	152.22	1.61	30	0.29	29	56.63	16.66	2.65×10^3	2.22	125.84	0.029	0.221
中压给水抽出流量	kg/h	35 453	319	30	58.22	29	-0.65	-37.75	7.00×10^4	355	-229.86	-0.066	-0.404
中压给水抽出温度	℃	191.67	1.61	30	0.29	29	-108.94	-32.04	3.64×10^4	2.22	-242.08	-0.056	-0.426
中压蒸汽流量	kg/h	33 458	301	30	54.98	29	-0.78	-42.68	1.14×10^5	335	-259.77	-0.075	-0.457
中压蒸汽温度	℃	317.78	1.61	30	0.29	29	-1.63	-0.48	1.84×10^{-3}	1.34	-2.19	-0.001	-0.004
中压蒸汽压力	MPa	2.075	0.02	30	0.00	29	5855.23	21.37	7.20×10^3	0.008 3	48.61	0.038	0.085
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	232	30	42.37	29	1.00	42.37	1.11×10^5	258	257.87	0.075	0.454
低压蒸汽温度	℃	318.33	1.61	30	0.29	29	-2.86	-0.84	1.72×10^{-2}	1.34	-3.84	-0.001	-0.007
低压蒸汽压力	MPa	0.262	0.02	30	0.00	29	328.95	1.20	7.17×10^{-2}	0.001 0	0.34	0.002	0.001
低压给水温度	℃	110.0	1.61	30	0.29	29	0.71	0.21	6.56×10^{-5}	2.22	1.58	0.000	0.003

低压蒸汽流量不确定度（采用燃气轮机热平衡确定低压蒸汽流量）见表 C.18。

表 C.18 低压蒸汽流量不确定度（采用燃气轮机热平衡确定低压蒸汽流量）

项 目	单 位	数 值
随机不确定度	kg/h	176
随机不确定度的自由度		101.4
学生氏 t 分布值		2.00
基于 95%置信度的系统不确定度	kg/h	856
总不确定度	kg/h	925
总不确定度		3.59%

低压蒸汽流量敏感系数和不确定度计算表（采用余热锅炉热平衡确定低压蒸汽流量）见表 C.19、表 C.20。

表 C.19 低压蒸汽流量敏感系数计算表（采用余热锅炉热平衡确定低压蒸汽流量）

低压蒸汽流量基准值：25 787kg/h

敏感系数计算用参数的变化百分比 1.00								
测量参数	单位	平均值	微增量 ^b	参数新值	参数新值 ^a 下的新排 气流量	新排气流 量下的 新蒸汽 流量	绝对敏感 系数	相对敏感 系数 %
环境干球温度	℃	21.11	0.39	21.50	1 557 250	25 792	12.83	0.019
环境湿球温度	℃	18.06	0.36	18.42	1 556 419	25 778	-26.38	-0.037
大气压力	MPa	0.098 6	0.001	0.099 6	1 557 211	25 791	4229.30	0.016
燃气轮机燃料流量	kg/h	34 851	348	35 199	1 583 484	25 775	-0.04	-0.047
燃机注入蒸汽流量	kg/h	41 826	418	42 244	1 556 654	25 782	-0.01	-0.021
燃气轮机排气温度	℃	606.11	6.11	612.22	1 533 249	25 354	-70.89	-1.680
余热锅炉出口温度	℃	159.44	1.78	161.22	1 563 378	25 899	62.77	0.433
余热锅炉热损失	kW	666	6.65	673	1 557 085	25 789	0.27	0.007
高压蒸汽流量	kg/h	196 395	-1964	194 431	1 545 485	25 764	0.011 5	-0.088
高压给水温度	℃	156.11	1.72	157.83	1 554 098	26 161	217.29	1.451
高压蒸汽温度	℃	538.89	-5.56	533.33	1 551 406	25 869	-14.70	0.317
高压蒸汽压力	MPa	9.39	0.09	9.49	1 556 631	25 804	182.48	0.067
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 141	-1941	192 199	1 555 142	25 750	0.02	-0.144
冷再热蒸汽温度	℃	330.00	3.50	333.50	1 553 812	25 704	-23.72	-0.322
热再热蒸汽压力	MPa	1.793	0.02	1.811	1 556 964	25 787	0.00	0.000
热再热蒸汽温度	℃	540.56	-5.56	535.00	1 552 038	25 790	-0.57	0.012
中压给水温度	℃	152.22	1.72	153.94	1 555 965	25 867	46.35	0.310
中压给水抽出流量	kg/h	35 453	355	35 808	1 557 163	25 786	0.00	-0.005
中压给水抽出温度	℃	191.67	2.11	193.78	1 557 732	25 578	-99.27	-0.813
中压蒸汽流量	kg/h	33 458	335	33 792	1 558 727	25 622	-0.49	-0.642

表 C.19 (续)

测量参数	单位	平均值	微增量 ^b	参数新值	参数新值 ^a 下的新排 气流量	新排气流 量下的 新蒸汽 流量	绝对敏感 系数	相对敏感 系数 %
中压蒸汽温度	℃	317.78	3.33	321.11	1 557 573	25 792	1.36	0.018
中压蒸汽压力	MPa	2.075	0.02	2.096	1 556 998	25 908	5833.30	0.468
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	257	26 044	1 558 456	25 803	0.06	0.060
低压蒸汽温度	℃	318.33	3.33	321.67	1 557 403	25 783	-1.22	-0.016
低压蒸汽压力	MPa	0.262	0.00	0.265	1 557 031	25 789	657.89	0.007
^a 参数新值是由平均值的变化百分比计算得到,用来获得“参数新值下的新排气流量”,“参数新值下的新排气流量”输入到计算机仿真程序; ^b ASME PTC 4.4 原文温度单位采用°F,所以为了使变化后参数新值与原文相同,表中温度的“微增量”已不是原文中平均值的1%。								

表 C.20 低压蒸汽流量不确定度计算表(采用余热锅炉热平衡确定低压蒸汽流量)

低压蒸汽流量基准值: 25 787kg/h

测量参数	单位	平均值	样本 偏差	样 本 数	平均样 本偏差	自 由 度	绝对敏 感系数	随机不 确定度 指标	总体 自由度	参数的 系统不 确定度	系统不 确定度 指标	随机不 确定度 %	系统不 确定度 %
环境干球 温度	℃	21.11	0.61	12	0.18	11	12.83	2.26	2.39	0.56	7.13	0.004	0.013
环境湿球 温度	℃	18.06	0.61	12	0.18	11	-26.38	-4.65	4.26×10	0.56	-14.65	-0.008	-0.026
大气压力	MPa	0.098 6	0.00	12	0.00	11	4229.30	0.36	1.56×10 ⁻³	0.000 2	1.05	0.001	0.002
燃气轮机 燃料流量	kg/h	34 851	209	30	38.18	29	-0.04	-1.34	1.12×10 ⁻¹	174	-6.13	-0.002	-0.011
燃机注入 蒸汽流量	kg/h	41 826	251	30	45.82	29	-0.01	-0.60	4.36×10 ⁻³	418	-5.44	-0.001	-0.010
燃气轮机 排气温度	℃	606.11	1.61	30	0.29	29	-70.89	-20.85	6.52×10 ³	5.00	-354.43	-0.037	-0.623
余热锅炉 出口温度	℃	159.44	1.61	30	0.29	29	62.77	18.46	4.01×10 ³	1.39	87.18	0.032	0.153
余热锅炉 热损失	kW	666	0.0	1	0.00	1	0.27	0.00	0.00	333	90.88	0.000	0.500
高压蒸汽 流量	kg/h	196 395	1768	30	322.71	29	0.01	3.73	6.65	982	11.34	0.007	0.020
高压给水 温度	℃	156.11	1.61	30	0.29	29	217.29	63.91	5.75×10 ⁵	1.11	241.43	0.112	0.425
高压蒸汽 温度	℃	538.89	1.61	30	0.29	29	-14.70	-4.32	1.20×10	2.23	-32.72	-0.008	-0.058
高压蒸汽 压力	MPa	9.39	0.02	30	0.00	29	182.48	0.67	6.79×10 ⁻³	0.037 6	6.85	0.001	0.012

表 C.20 (续)

测量参数	单位	平均值	样本偏差	样本数	平均样本偏差	自由度	绝对敏感系数	随机不确定度指标	总体自由度	参数的系统不确定度	系统不确定度指标	随机不确定度 %	系统不确定度 %
冷再热蒸汽流量	kg/h	194 141	1747	30	319.01	29	0.02	6.11	4.81×10	1165	22.32	0.011	0.039
冷再热蒸汽温度	℃	330.00	1.61	30	0.29	29	-23.72	-6.98	8.17×10	1.39	-33.01	-0.012	-0.058
热再热蒸汽压力	MPa	1.793	0.02	30	0.00	29	0.00	0.00	0.00	0.007 2	0.00	0.000	0.000
热再热蒸汽温度	℃	540.56	1.61	30	0.29	29	-0.57	-0.17	2.75×10^{-5}	2.23	-1.28	0.000	-0.002
中压给水温度	℃	152.22	1.61	30	0.29	29	46.35	13.64	1.19×10^3	1.11	51.51	0.024	0.091
中压给水抽出流量	kg/h	35 453	319	30	58.22	29	0.00	-0.22	8.58×10^{-5}	355	-1.36	0.000	-0.002
中压给水抽出温度	℃	191.67	1.61	30	0.29	29	-99.27	-29.20	2.51×10^4	1.11	-110.30	-0.051	-0.194
中压蒸汽流量	kg/h	33 458	301	30	54.98	29	-0.49	-27.19	1.88×10^4	335	-165.47	-0.048	-0.291
中压蒸汽温度	℃	317.78	1.61	30	0.29	29	1.36	0.40	8.85×10^{-4}	1.34	1.83	0.001	0.003
中压蒸汽压力	MPa	2.075	0.02	30	0.00	29	5833.30	21.29	7.09×10^3	0.008 3	48.42	0.037	0.085
低压蒸汽流量	kg/h	25 787	232	30	42.37	29	0.940 0	39.83	8.68×10^4	258	242.41	0.070	0.426
低压蒸汽温度	℃	318.33	1.61	30	0.29	29	-1.22	-0.36	5.81×10^{-4}	1.34	-1.65	-0.001	-0.003
低压蒸汽压力	MPa	0.262	0.02	30	0.00	29	657.89	2.40	1.15	0.001 0	0.69	0.004	0.001
低压给水温度	℃	110.00	1.61	30	0.29	29	-2.48	-0.73	9.84×10^{-3}	1.11	-2.76	-0.001	-0.005

低压蒸汽流量不确定度（采用余热锅炉热平衡确定低压蒸汽流量）见表 C.21。

表 C.21 低压蒸汽流量不确定度（采用余热锅炉热平衡确定低压蒸汽流量）

项 目	单 位	数 值
随机不确定度	kg/h	94
随机不确定度的自由度		107.6
学生氏 <i>t</i> 分布值		2.0
基于 95%置信度的系统不确定度	kg/h	553
总不确定度	kg/h	584
总不确定度		2.27%

附录 D
(资料性附录)
燃料显热

D.1 概述

燃料的显热对余热锅炉性能试验影响较小，因此本标准采用了一种修改后的方法来计算燃料显热。如果燃料气成分与美国管道天然气成分有明显差别，则需要采用更严谨的燃料气显热计算方法。在基准温度为 15.56℃时，已推导出一个简化的近似燃料显热公式，可用于计算给定的燃料温度时的显热，用于确定燃料的净输入热量。这些推导公式适用于其组分主要由碳氢化合物组成的大部分燃油和天然气。如果燃料气中存在小量的氢气，会引起结果很大差别。

D.2 燃油

燃油的比定压热容可从参考文献 [1] 中得到。比定压热容由平均温度除以燃料的密度来计算。例如，2 号燃油为一种典型的燃油，假设其密度为 865.376kg/m³。而当 1 号和 6 号燃油的密度分别为 825.077kg/m³ 和 986.072kg/m³ 时，将引起显热误差分别为+2.4%和-6.3%。

$$c_p = \frac{53.277\,05 + 0.107\,243t}{\sqrt{\rho}}$$

式中：

c_p —— 燃油比定压热容，kJ/ (kg · K)；

t —— 燃油温度，℃；

ρ —— 燃油密度，kg/m³。

燃油的显热由燃油比定压热容乘以燃油温度与基准温度（15.56℃）之差来计算：

$$h_{FS} = c_p \times (t - 15.56)$$

公式进一步简化为：

$$h_{FS} = t^2/548.28 + 1.810\,7t - 28.63 \quad (\text{D.1})$$

另一种燃油显热的替代方法见参考文献[2]的介绍，该计算需要已知燃料的 API 重力值，因此并不推荐使用此法来计算。

D.3 燃料气

燃料气的显热是其温度、压力和组分的函数。在推导过程中做了以下假设：

- a) 燃料气中甲烷和乙烷的容积百分比分别为 92%和 8%；
- b) 燃料气压力为 0.689MPa。

定压力的假设见表 D.1 说明，计算源于参考文献[3]。在很大压力范围内，甲烷的比定压热容变化很小。表 D.1 也显示丙烷和乙烷的比定压热容很接近。因此，非甲烷的组成部分均为乙烷的假设也是可以接受的。故任意假设燃料气中甲烷的容积百分比为 92%和平均燃料气压力为 0.689MPa 来进行下列计算。

表 D.1 温度为 51.1℃时的比定压热容

压 力	MPa	0.101	0.689	2.068
甲烷比定压热容	kJ/ (kg · K)	2.294	2.322	2.393

表 D.1 (续)

乙烷比定压热容	kJ/(kg·K)		1.937	
丙烷比定压热容	kJ/(kg·K)		1.932	

以质量分数为权重来计算燃气的比定压热容, 因此, 将体积分数转换为质量分数:

$$w_{\text{CH}_4} = 0.92 \times 16 / (0.92 \times 16 + 0.08 \times 30) = 0.86$$

$$w_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0.08 \times 30 / (0.92 \times 16 + 0.08 \times 30) = 0.14$$

式中:

w_{CH_4} —— 甲烷质量分数;

$w_{\text{C}_2\text{H}_6}$ —— 乙烷质量分数。

混合燃料气比定压热容可通过纯甲烷比定压热容修正系数来计算:

$$F = (0.86 \times 0.5556 + 0.14 \times 0.4633) / 0.5556 = 0.9767$$

式中:

F —— 纯甲烷比定压热容修正系数。

甲烷的比定压热容与温度的关系由参考文献 [3] 确定, 并由表 D.2 给出。

表 D.2 甲烷在压力为 0.689MPa 时的比定压热容

平均温度	℃	0.0	51.1	102.2	153.3	204.4
甲烷比定压热容	kJ/(kg·K)	2.173	2.326	2.492	2.664	2.840

可以发现, 在该温度范围内, 能采用线性来精确地拟合比定压热容公式:

$$c_p = 2.1645 + 0.0032734t \quad (\text{误差范围} +0.27\% \sim -0.37\%)$$

对非纯甲烷混合燃料气, 该拟合公式乘以纯甲烷比定压热容修正系数后, 公式变为:

$$c_p = 2.1141 + 0.003197t$$

燃料气的显热由燃料气比定压热容乘以燃料气温度与基准温度 (15.56℃) 之差得到, 即:

$$h_{\text{FS}} = c_p \times (t - 15.56) = \left(2.1125 + \frac{t + 15.56}{+626.308} \right) \times (t - 15.56)$$

简化为:

$$h_{\text{FS}} = t^2 / 626.308 + 2.1125t - 33.257 \quad (\text{D.2})$$

举例: 燃料气温度为 148.89℃ 时, 采用该公式计算显热为 316.67kJ/kg。当燃料气的低位热值为 46520kJ/kg 时, 该显热使净热值增大 0.7%。

附录 E
(资料性附录)
气体焓值公式推导

本附录给出了气体焓值公式的推导方法。如果 NASA 颁布新的气体焓值公式，则本标准的气体焓值公式也应相应进行更新，但推导方法相同。根据 JANAF 数据的 NASA 气体焓值计算公式中的常数。NASA/TP-2002-211556，计算各气体组分的热力特性的 NASA Glen 系数（2002 年 9 月发布，2003 年 1 月 29 日修订）。NASA 公式和系数（见表 E.1）：

$$(h_i - h_i^0) / RT = -A_1 / T^2 + A_2 \ln(T) / T + A_3 + A_4 T / 2 + A_5 T^2 / 3 + A_6 T^3 / 4 + A_7 T^4 / 5 \quad (\text{E.1})$$

式中：

- T ——气体温度，K；
- h_i ——气体温度下，气体组分 i 的焓值，kJ/kg；
- h_i^0 ——基准温度（15.56℃）下，气体组分 i 的焓值，kJ/kg；
- R ——气体常数，8.314 51 kJ/（kg·mol·K）。

表 E.1 NASA Glen 系数

温度范围	组分	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	b_1
200K~1000K	N ₂	2.210 371 5×10 ⁴	-3.818 461 8×10 ²	6.082 738 4	-8.530 914 4×10 ⁻³	1.384 646 2×10 ⁻⁵	-9.625 793 6×10 ⁻⁹	2.519 705 8×10 ⁻¹²	7.108 460 9×10 ²
1000K~6000K		5.877 124 1×10 ⁵	-2.239 249 1×10 ³	6.066 949 2	-6.139 685 5×10 ⁻⁴	1.491 806 7×10 ⁻⁷	-1.923 105 5×10 ⁻¹¹	1.061 954 4×10 ⁻¹⁶	1.283 210 4×10 ⁴
200K~1000K	O ₂	-3.425 563 4×10 ⁴	4.847 001 1×10 ²	1.119 011 0	4.293 889 2×10 ⁻³	-6.836 300 1×10 ⁻⁷	-2.023 372 7×10 ⁻⁹	1.039 040 0×10 ⁻¹²	-3.391 454 9×10 ³
1000K~6000K		-1.037 939 0×10 ⁶	2.344 830 3×10 ³	1.819 732 0	1.267 847 6×10 ⁻³	-2.188 068 0×10 ⁻⁷	2.053 719 6×10 ⁻¹¹	-8.193 467 1×10 ⁻¹⁶	-1.689 010 9×10 ⁴
200K~1000K	CO ₂	4.943 650 5×10 ⁴	-6.264 116 0×10 ²	5.301 725 2	2.503 813 8×10 ⁻³	-2.127 308 7×10 ⁻⁷	-7.689 988 8×10 ⁻¹⁰	2.849 677 8×10 ⁻¹³	-4.528 198 4×10 ⁻⁴
1000K~6000K		1.176 962 4×10 ⁵	-1.788 791 5×10 ³	8.291 523 2	-9.223 156 8×10 ⁻⁵	4.848 343 8×10 ⁻⁹	-1.891 053 3×10 ⁻¹²	6.330 036 6×10 ⁻¹⁶	-3.908 350 6×10 ⁴

表 E.1 (续)

温度范围	组分	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	b_1
200K~1000K	H ₂ O	$-3.947\ 960\ 8 \times 10^4$	$5.755\ 731\ 0 \times 10^2$	$9.317\ 826\ 5 \times 10^{-1}$	$7.222\ 712\ 9 \times 10^{-3}$	$-7.342\ 557\ 4 \times 10^{-6}$	$4.955\ 043\ 5 \times 10^{-9}$	$-1.336\ 933\ 2 \times 10^{-12}$	$-3.303\ 974\ 3 \times 10^4$
1000K~6000K		$1.034\ 972\ 1 \times 10^6$	$-2.412\ 698\ 6 \times 10^3$	$4.646\ 110\ 8$	$2.291\ 998\ 3 \times 10^{-3}$	$-6.836\ 830\ 5 \times 10^{-7}$	$9.426\ 468\ 9 \times 10^{-11}$	$-4.822\ 380\ 5 \times 10^{-15}$	$-1.384\ 286\ 5 \times 10^4$
200K~1000K	Ar	$0.000\ 000\ 0$	$0.000\ 000\ 0$	$2.500\ 000\ 0$	$0.000\ 000\ 0$	$0.000\ 000\ 0$	$0.000\ 000\ 0$	$0.000\ 000\ 0$	$-7.453\ 750\ 0 \times 10^2$
1000K~6000K		$2.010\ 538\ 5 \times 10$	$-5.992\ 660\ 6 \times 10^{-2}$	$2.500\ 069\ 4$	$-3.992\ 141\ 2 \times 10^{-8}$	$1.205\ 271\ 8 \times 10^{-11}$	$-1.819\ 016\ 4 \times 10^{-15}$	$1.078\ 576\ 4 \times 10^{-19}$	$-7.449\ 939\ 6 \times 10^2$
200K~1000K	SO ₂	$-5.310\ 842\ 1 \times 10^4$	$9.090\ 311\ 7 \times 10^2$	$-2.356\ 891\ 2$	$2.204\ 449\ 9 \times 10^{-2}$	$-2.510\ 781\ 5 \times 10^{-5}$	$1.446\ 300\ 5 \times 10^{-8}$	$-3.369\ 070\ 9 \times 10^{-12}$	$-4.113\ 752\ 0 \times 10^4$
1000K~6000K		$-1.127\ 640\ 1 \times 10^5$	$-8.252\ 261\ 4 \times 10^2$	$7.616\ 178\ 6$	$-1.999\ 327\ 6 \times 10^{-4}$	$5.655\ 631\ 4 \times 10^{-8}$	$-5.454\ 316\ 6 \times 10^{-12}$	$2.918\ 294\ 1 \times 10^{-16}$	$-2.714\ 867\ 2 \times 10^3$

NASA 系数乘以气体常数 R , 除以分子量后, 得到下列公式和系数 (见表 E.2):

$$(h_1 - h_1^0) / T = -A_1' / T^2 + A_2' \ln(T) / T + A_3' + A_4' T / 2 + A_5' T^2 / 3 + A_6' T^3 / 4 + A_7' T^4 / 5 \quad (\text{E.2})$$

表 E.2 式 (E.2) 中的系数

温度范围	组分	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	b_1
200K~1000K	N ₂	$6.560\ 487\ 5 \times 10^3$	$-1.133\ 337\ 6 \times 10^2$	$1.805\ 385\ 6$	$-2.532\ 015\ 9 \times 10^{-3}$	$4.109\ 695\ 6 \times 10^{-6}$	$-2.856\ 981\ 2 \times 10^{-9}$	$7.478\ 606\ 4 \times 10^{-13}$	$2.109\ 824\ 9 \times 10^2$
1000K~6000K		$1.744\ 358\ 3 \times 10^5$	$-6.646\ 197\ 5 \times 10^2$	$1.800\ 699\ 3$	$-1.822\ 287\ 8 \times 10^{-4}$	$4.427\ 753\ 0 \times 10^{-8}$	$-5.707\ 868\ 3 \times 10^{-12}$	$3.151\ 931\ 0 \times 10^{-17}$	$3.808\ 629\ 4 \times 10^3$
200K~1000K	O ₂	$-8.900\ 921\ 7 \times 10^3$	$1.259\ 436\ 0 \times 10^2$	$2.907\ 617\ 7 \times 10^{-1}$	$1.115\ 716\ 4 \times 10^{-3}$	$-1.776\ 331\ 8 \times 10^{-7}$	$-5.257\ 494\ 8 \times 10^{-10}$	$2.699\ 822\ 7 \times 10^{-13}$	$-8.812\ 294\ 8 \times 10^2$

表 E.2 (续)

温度范围	组分	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	b_1
1000K~ 6000K	O ₂	$-2.696\ 961\ 9 \times 10^5$	$6.092\ 764\ 4 \times 10^2$	$4.728\ 358\ 6 \times 10^{-1}$	$3.294\ 352\ 1 \times 10^{-4}$	$-5.685\ 436\ 1 \times 10^{-8}$	$5.336\ 347\ 6 \times 10^{-12}$	$-2.128\ 975\ 6 \times 10^{-16}$	$-4.388\ 695\ 2 \times 10^3$
200K~ 1000K	CO ₂	$9.339\ 808\ 9 \times 10^3$	$-1.183\ 450\ 3 \times 10^2$	1.001 630 3	$4.730\ 338\ 9 \times 10^{-4}$	$-4.019\ 025\ 4 \times 10^{-8}$	$-1.452\ 833\ 8 \times 10^{-10}$	$5.383\ 763\ 6 \times 10^{-14}$	$-8.554\ 914\ 5 \times 10^{-5}$
1000K~ 6000K		$2.223\ 580\ 3 \times 10^4$	$-3.379\ 480\ 5 \times 10^2$	1.566 478 9	$-1.742\ 488\ 1 \times 10^{-5}$	$9.159\ 750\ 3 \times 10^{-10}$	$-3.572\ 679\ 0 \times 10^{-13}$	$1.195\ 904\ 4 \times 10^{-16}$	$-7.383\ 864\ 9 \times 10^3$
200K~ 1000K	H ₂ O	$-1.822\ 084\ 4 \times 10^4$	$2.656\ 416\ 3 \times 10^2$	$4.300\ 414\ 0 \times 10^{-1}$	$3.333\ 465\ 7 \times 10^{-3}$	$-3.388\ 777\ 0 \times 10^{-6}$	$2.286\ 878\ 6 \times 10^{-9}$	$-6.170\ 287\ 0 \times 10^{-13}$	$-1.524\ 868\ 2 \times 10^4$
1000K~ 6000K		$4.776\ 659\ 5 \times 10^5$	$-1.113\ 521\ 8 \times 10^3$	2.144 298 3	$1.057\ 815\ 5 \times 10^{-3}$	$-3.155\ 371\ 2 \times 10^{-7}$	$4.350\ 555\ 2 \times 10^{-11}$	$-2.225\ 651\ 3 \times 10^{-15}$	$-6.388\ 834\ 4 \times 10^3$
200K~ 1000K	Ar	0.000 000 0	0.000 000 0	$5.203\ 333\ 1 \times 10^{-1}$	0.000 000 0	0.000 000 0	0.000 000 0	0.000 000 0	$-1.551\ 373\ 8 \times 10^2$
1000K~ 6000K		4.184 600 5	$-1.247\ 272\ 4 \times 10^{-2}$	$5.203\ 477\ 5 \times 10^{-1}$	$-8.308\ 976\ 1 \times 10^{-9}$	$2.508\ 572\ 2 \times 10^{-12}$	$-3.785\ 979\ 2 \times 10^{-16}$	$2.244\ 876\ 8 \times 10^{-20}$	$-1.550\ 580\ 7 \times 10^2$
200K~ 1000K	SO ₂	$-6.892\ 667\ 9 \times 10^3$	$1.179\ 784\ 6 \times 10^2$	$-3.058\ 887\ 5 \times 10^{-1}$	$2.861\ 041\ 7 \times 10^{-3}$	$-3.258\ 613\ 7 \times 10^{-6}$	$1.877\ 078\ 8 \times 10^{-9}$	$-4.372\ 543\ 3 \times 10^{-13}$	$-5.339\ 026\ 4 \times 10^3$
1000K~ 6000K		$-1.463\ 505\ 9 \times 10^4$	$-1.071\ 018\ 4 \times 10^2$	$9.884\ 645\ 2 \times 10^{-1}$	$-2.594\ 824\ 1 \times 10^{-5}$	$7.340\ 152\ 2 \times 10^{-9}$	$-7.078\ 876\ 1 \times 10^{-13}$	$3.787\ 503\ 3 \times 10^{-17}$	$-3.523\ 486\ 1 \times 10^2$

上述公式两边乘以温度 T , 整理后得到下列公式和系数 (见表 E.3):

$$(h_1 - h_1^0) = -A_1 / T + A_2 \ln(T) + A_3 T + A_4 T^2 + A_5 T^3 + A_6 T^4 + A_7 T^5 \quad (\text{E.3})$$

表 E.3 式 (E.3) 中的系数

温度范围	组分	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	b_1
200K~ 1000K	N ₂	$6.560\,487\,5 \times 10^3$	$-1.133\,337\,6 \times 10^2$	1.805 385 6	$-1.266\,007\,9 \times 10^{-3}$	$1.369\,898\,5 \times 10^{-6}$	$-7.142\,453\,0 \times 10^{-10}$	$1.495\,721\,3 \times 10^{-13}$	$2.109\,824\,9 \times 10^2$
1000K~ 6000K		$1.744\,358\,3 \times 10^5$	$-6.646\,197\,5 \times 10^2$	1.800 699 3	$-9.111\,438\,9 \times 10^{-5}$	$1.475\,917\,7 \times 10^{-8}$	$-1.426\,967\,1 \times 10^{-12}$	$6.303\,862\,0 \times 10^{-18}$	$3.808\,629\,4 \times 10^3$
200K~ 1000K	O ₂	$-8.900\,921\,7 \times 10^3$	$1.259\,436\,0 \times 10^2$	$2.907\,617\,7 \times 10^{-1}$	$5.578\,581\,9 \times 10^{-4}$	$-5.921\,105\,9 \times 10^{-8}$	$-1.314\,373\,7 \times 10^{-10}$	$5.399\,645\,4 \times 10^{-14}$	$-8.812\,294\,8 \times 10^2$
1000K~ 6000K		$-2.696\,961\,9 \times 10^5$	$6.092\,764\,4 \times 10^2$	$4.728\,358\,6 \times 10^{-1}$	$1.647\,176\,1 \times 10^{-4}$	$-1.895\,145\,4 \times 10^{-8}$	$1.334\,086\,9 \times 10^{-12}$	$-4.257\,951\,2 \times 10^{-17}$	$-4.388\,695\,2 \times 10^3$
200K~ 1000K	CO ₂	$9.339\,808\,9 \times 10^3$	$-1.183\,450\,3 \times 10^2$	1.001 630 3	$2.365\,169\,5 \times 10^{-4}$	$-1.339\,675\,1 \times 10^{-8}$	$-3.632\,084\,5 \times 10^{-11}$	$1.076\,752\,7 \times 10^{-14}$	$-8.554\,914\,5 \times 10^5$
1000K~ 6000K		$2.223\,580\,3 \times 10^4$	$-3.379\,480\,5 \times 10^2$	1.566 478 9	$-8.712\,440\,4 \times 10^{-6}$	$3.053\,250\,1 \times 10^{-10}$	$-8.931\,697\,5 \times 10^{-14}$	$2.391\,808\,7 \times 10^{-17}$	$-7.383\,864\,9 \times 10^3$
200K~ 1000K	H ₂ O	$-1.822\,084\,4 \times 10^4$	$2.656\,416\,3 \times 10^2$	$4.300\,414\,0 \times 10^{-1}$	$1.666\,732\,9 \times 10^{-3}$	$-1.129\,592\,3 \times 10^{-6}$	$5.717\,196\,5 \times 10^{-10}$	$-1.234\,057\,4 \times 10^{-13}$	$-1.524\,868\,2 \times 10^4$
1000K~ 6000K		$4.776\,659\,5 \times 10^5$	$-1.113\,521\,8 \times 10^3$	2.144 298 3	$5.289\,077\,6 \times 10^{-4}$	$-1.051\,790\,4 \times 10^{-7}$	$1.087\,638\,8 \times 10^{-11}$	$-4.451\,302\,6 \times 10^{-16}$	$-6.388\,834\,4 \times 10^3$
200K~ 1000K	Ar	0.000 000 0	0.000 000 0	$5.203\,333\,1 \times 10^{-1}$	0.000 000 0	0.000 000 0	0.000 000 0	0.000 000 0	$-1.551\,373\,8 \times 10^2$
1000K~ 6000K		4.184 600 5	$-1.247\,272\,4 \times 10^{-2}$	$5.203\,477\,5 \times 10^{-1}$	$-4.154\,488\,0 \times 10^{-9}$	$8.361\,907\,4 \times 10^{-13}$	$-9.464\,948\,0 \times 10^{-17}$	$4.489\,753\,6 \times 10^{-21}$	$-1.550\,580\,7 \times 10^2$
200K~ 1000K	SO ₂	$-6.89\,2667\,9 \times 10^3$	$1.179\,784\,6 \times 10^2$	$-3.058\,887\,5 \times 10^{-1}$	$1.430\,520\,9 \times 10^{-3}$	$-1.086\,204\,6 \times 10^{-6}$	$4.692\,696\,9 \times 10^{-10}$	$-8.745\,086\,6 \times 10^{-14}$	$-5.339\,026\,4 \times 10^3$
1000K~ 6000K		$-1.463\,505\,9 \times 10^4$	$-1.071\,018\,4 \times 10^2$	$9.884\,645\,2 \times 10^{-1}$	$-1.297\,412\,1 \times 10^{-5}$	$2.446\,717\,4 \times 10^{-9}$	$-1.769\,719\,0 \times 10^{-13}$	$7.575\,006\,6 \times 10^{-18}$	$-3.523\,486\,1 \times 10^2$

令全部温度范围内, 气体各组分焓值公式为:

$$h_i = -A_1 / T + A_2 \ln(T) + A_3 T + A_4 T^2 + A_5 T^3 + A_6 T^4 + A_7 T^5 - A_8 \quad (\text{E.4})$$

当 $T=288.71\text{K}$ (15.56°C) 时, 由公式:

$$(h_i - h_i^0) = -A_1 / T + A_2 \ln(T) + A_3 T + A_4 T^2 + A_5 T^3 + A_6 T^4 + A_7 T^5 = 0 \quad (\text{E.5})$$

在低温范围 ($T \leq 1000\text{K}$) 时, 得到各组分焓值公式中的 A_8 (即, $A_8 = -h_i^0$), 见表 E.4。

表 E.4 在低温范围 ($T \leq 1000\text{K}$) 时, 各组分焓值公式中的 A_8

组分	A_8
N_2	$-2.207\,96 \times 10^2$
O_2	$8.725\,69 \times 10^2$
CO_2	$-3.944\,83 \times 10^2$
H_2O	$1.807\,71 \times 10^3$
Ar	$1.502\,25 \times 10^2$
SO_2	$7.001\,43 \times 10^2$

当 $T=1000\text{K}$ (726.85°C) 时, 采用有 A_8 项的式 (E.4) 和低温范围的系数, 计算焓值 h_1 ;

当 $T=1000\text{K}$ (726.85°C) 时, 采用无 A_8 项的式 (E.4) 和高温范围的系数, 计算焓值 h_2 。

在高温范围 ($T > 1000\text{K}$) 时, 公式中的系数 A_8 值为上述计算焓值之差 ($h_2 - h_1$), 见表 E.5。

表 E.5 在高温范围 ($T > 1000\text{K}$) 时, 各组分焓值公式中的 A_8

温度范围	组分	低温范围焓值 h_1	高温范围焓值 h_2	高温范围公式系数 A_8
200K~1000K	N_2	$7.759\,568\,6 \times 10^2$		
1000K~6000K			$-3.042\,543\,0 \times 10^3$	$-3.818\,500 \times 10^3$
200K~1000K	O_2	$7.182\,873\,2 \times 10^2$		
1000K~6000K			$5.098\,322\,2 \times 10^3$	$4.380\,035 \times 10^3$
200K~1000K	CO_2	$7.668\,415\,6 \times 10^2$		
1000K~6000K			$-7.986\,918\,4 \times 10^2$	$-1.565\,533 \times 10^3$
200K~1000K	H_2O	$1.460\,994\,4 \times 10^3$		
1000K~6000K			$-5.591\,143\,5 \times 10^3$	$-7.052\,138 \times 10^3$
200K~1000K	Ar	$3.701\,078\,8 \times 10^2$		
1000K~6000K			$5.202\,540\,0 \times 10^2$	$1.501\,461 \times 10^2$
200K~1000K	SO_2	$5.419\,623\,0 \times 10^2$		
1000K~6000K			$2.525\,694\,7 \times 10^2$	$-2.893\,928 \times 10^2$

基准温度为 288.71K (15.56°C) 时的各气体组分焓值计算公式:

$$h_i = -A_1 / T + A_2 \ln(T) + A_3 T + A_4 T^2 + A_5 T^3 + A_6 T^4 + A_7 T^5 - A_8 \quad (\text{E.6})$$

各组分焓值公式中的系数见表 E.6。

表 E.6 各组分焓值公式中的系数

温度 范围	组分	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	温度 288.71K 时焓值	温度 1000K 时 焓值
200K~ 1000K	N ₂	6.560 487 5 $\times 10^3$	-1.133 337 6 $\times 10^2$	1.805 385 6	-1.266 007 9 $\times 10^{-3}$	1.369 898 5 $\times 10^{-6}$	-7.142 453 0 $\times 10^{-10}$	1.495 721 3 $\times 10^{-13}$	-2.207 96 $\times 10^2$	0.000 0	775.956 86
1000K~ 6000K		1.744 358 3 $\times 10^5$	-6.646 197 5 $\times 10^2$	1.800 699 3	-9.111 438 9 $\times 10^{-5}$	1.475 917 7 $\times 10^{-8}$	-1.426 967 1 $\times 10^{-12}$	6.303 862 0 $\times 10^{-18}$	-3.818 50 $\times 10^3$		775.956 86
200K~ 1000K	O ₂	-8.900 921 7 $\times 10^3$	1.259 436 0 $\times 10^2$	2.907 617 7 $\times 10^{-1}$	5.578 581 9 $\times 10^{-4}$	-5.921 105 9 $\times 10^{-8}$	-1.314 373 7 $\times 10^{-10}$	5.399 645 4 $\times 10^{-14}$	8.725 69 $\times 10^2$	0.000 0	718.287 31
1000K~ 6000K		-2.696 961 9 $\times 10^5$	6.092 764 4 $\times 10^2$	4.728 358 6 $\times 10^{-1}$	1.647 176 1 $\times 10^{-4}$	-1.895 145 4 $\times 10^{-8}$	1.334 086 9 $\times 10^{-12}$	-4.257 951 2 $\times 10^{-17}$	4.380 03 $\times 10^3$		718.287 31
200K~ 1000K	CO ₂	9.339 808 9 $\times 10^3$	-1.183 450 3 $\times 10^2$	1.001 630 3	2.365 169 5 $\times 10^{-4}$	-1.339 675 1 $\times 10^{-8}$	-3.632 084 5 $\times 10^{-11}$	1.076 752 7 $\times 10^{-14}$	-3.944 83 $\times 10^2$	0.000 0	766.841 56
1000K~ 6000K		2.223 580 3 $\times 10^4$	-3.379 480 5 $\times 10^2$	1.566 478 9	-8.712 440 4 $\times 10^{-6}$	3.053 250 1 $\times 10^{-10}$	-8.931 697 5 $\times 10^{-14}$	2.391 808 7 $\times 10^{-17}$	-1.565 53 $\times 10^3$		766.841 56
200K~ 1000K	H ₂ O	-1.822 084 4 $\times 10^4$	2.656 416 3 $\times 10^2$	4.300 414 0 $\times 10^{-1}$	1.666 732 9 $\times 10^{-3}$	-1.129 592 3 $\times 10^{-6}$	5.717 196 5 $\times 10^{-10}$	-1.234 057 4 $\times 10^{-13}$	1.807 71 $\times 10^3$	0.000 0	1460.994 4
1000K~ 6000K		4.776 659 5 $\times 10^5$	-1.113 521 8 $\times 10^3$	2.144 298 3	5.289 077 6 $\times 10^{-4}$	-1.051 790 4 $\times 10^{-7}$	1.087 638 8 $\times 10^{-11}$	-4.451 302 6 $\times 10^{-16}$	-7.052 14 $\times 10^3$		1460.994 4
200K~ 1000K	Ar	0.000 000 0	0.000 000 0	5.203 333 1 $\times 10^{-1}$	0.000 000 0	0.000 000 0	0.000 000 0	0.000 000 0	1.502 25 $\times 10^2$	0.000 0	370.107 88
1000K~ 6000K		4.184 600 5	-1.247 272 4 $\times 10^{-2}$	5.203 477 5 $\times 10^{-1}$	-4.154 488 0 $\times 10^{-9}$	8.361 907 4 $\times 10^{-13}$	-9.464 948 0 $\times 10^{-17}$	4.489 753 6 $\times 10^{-21}$	1.501 46 $\times 10^2$		370.107 88
200K~ 1000K	SO ₂	-6.892 667 9 $\times 10^3$	1.179 784 6 $\times 10^2$	-3.058 887 5 $\times 10^{-1}$	1.430 520 9 $\times 10^{-3}$	-1.086 204 6 $\times 10^{-6}$	4.692 696 9 $\times 10^{-10}$	-8.745 086 6 $\times 10^{-14}$	7.001 43 $\times 10^2$	0.000 0	541.962 3
1000K~ 6000K		-1.463 505 9 $\times 10^4$	-1.071 018 4 $\times 10^2$	9.884 645 2 $\times 10^{-1}$	-1.297 412 1 $\times 10^{-5}$	2.446 717 4 $\times 10^{-9}$	-1.769 719 0 $\times 10^{-13}$	7.575 006 6 $\times 10^{-18}$	-2.893 93 $\times 10^2$		541.962 3

附 录 F
(资料性附录)
余热锅炉热损失

有保温隔热层的表面热损失受大气环境的影响不大。保温隔热层的散热热流密度由保温隔热层设计情况来估算。F.1.1 给出一个计算示例。

F.1 有保温隔热层的热损失设计标准

- a) 当保温隔热层外壁温度为 60℃, 在大气温度为 26.67℃和无风环境下, 散热热流密度计算值为:

$$q = 0.3489 \text{ kW/m}^2$$

如果在大气温度降到-1.1℃和无风环境下, 散热热流密度计算值为:

$$q = 0.3618 \text{ kW/m}^2$$

- b) 当大气温度为-1.1℃, 风速为 4.47m/s 时, 散热热流密度计算值为:

$$q = 0.3722 \text{ kW/m}^2$$

保温隔热层的热损失能够用保温隔热层的散热热流密度设计值乘以保温隔热层外表面积来估计出来。由于余热锅炉冷端的最小隔热厚度可以控制, 因此由此估算的热损失值会高于期望的热损失值, 但是由于管道和汽包的热损失较大, 这两部分热损失会相互抵消。

F.2 无保温隔热层的热损失

对于无保温隔热层的锅炉外壳或烟囱处的热损失, 应依次考虑烟气传热至炉壁, 再由炉壁传热至大气的热量。对于烟气在圆柱体内紊流流动场合, 烟气传热至内壁的传热量由 Dittus Bolder 方程计算:

$$\frac{h_i d}{k} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (\text{F.1})$$

式中:

h_i ——传热系数, kW/(m²·K);

d ——烟囱内径, m;

k ——烟气热导率, kW/(m·K);

Re ——雷诺数, 无量纲;

Pr ——普朗特数, 无量纲。

上述方程进一步整理为:

$$h_i = C \frac{W^{0.8}}{d^{1.8}} \times \frac{c_p^{0.4} k^{0.6}}{\mu^{0.4}} \quad (\text{F.2})$$

式中:

C ——常数;

W ——烟气流量, kg/s;

d ——烟囱内径, m;

c_p ——烟气比定压热容, kJ/(kg·K);

μ ——烟气黏度, Pa·s。

假设燃机排气组分为:

氮气: 75.6%;

氧气：13.5%；

二氧化碳：3.5%；

水：6.5%；

氩气：0.9%。

该排气的物理特性由表 F.1 得到，并对式 (F.2) 中的部分内容进行线性化处理。

令 $P = \frac{c_p^{0.4} k^{0.6}}{\mu^{0.4}}$ ，与烟气温度关系经线性化处理后得：

$$P = 0.134\,76 + \frac{t}{8519} \quad (\text{F.3})$$

表 F.1 线性化处理后结果比较

烟气温度	比定压热容	烟气动力黏度	烟气热导率	P	线性拟合值	误差
T	c_p	μ	k	$c_p^{0.4} k^{0.6} / \mu^{0.4}$	式 (F.3)	
℃	kJ/(kg·K)	Pa·s	kW/(m·K)			%
37.78	1.021 6	1.873×10^{-5}	2.561×10^{-5}	0.137 96	0.139 2	0.89
93.33	1.040 4	2.092×10^{-5}	3.011×10^{-5}	0.146 52	0.145 7	-0.55
148.89	1.056 7	2.303×10^{-5}	3.426×10^{-5}	0.153 31	0.152 2	-0.71
204.44	1.071 8	2.509×10^{-5}	3.824×10^{-5}	0.159 13	0.158 8	-0.23
260.00	1.086 1	2.708×10^{-5}	4.205×10^{-5}	0.164 26	0.165 3	0.61

将式 (F.3) 代入式 (F.2) 得：

$$h_i = C \frac{W^{0.8}}{d^{1.8}} \left(0.134\,76 + \frac{t}{8519} \right) \quad (\text{F.4})$$

常数 C 值为：

$$C = 0.023 \times (4 / 3.141\,59)^{0.8} = 0.027\,9 \quad (\text{F.5})$$

因此，无保温隔热的外壳或烟囱的传热系数计算公式为：

$$h_i = \frac{W^{0.8}}{d^{1.8}} \left(0.003\,76 + \frac{t}{305\,308} \right) \quad (\text{F.6})$$

由外壁传热至大气环境的热流密度由以下两个方程来确定：

$$q_c = 0.001\,947 \times (t_c - t_A)^{1.25} \times (1 + 251.42 \times v)^{0.5} \quad (\text{F.7})$$

$$q_r = 5.67 \times 10^{-8} \varepsilon [(t_c + 273)^4 - (t_A + 273)^4] \quad (\text{F.8})$$

式中：

q_c —— 对流换热热流密度，kW/m²；

q_r —— 辐射换热热流密度，kW/m²；

ε —— 外壁材料黑度，取 0.8；

t_c —— 外壁温度，℃；

t_A —— 大气温度，℃；

v —— 风速，m/s。

烟气传热至内壁的热流密度等于外壁传热至大气环境的热流密度，即：

$$q = h_i(t_G - t_c) = q_c + q_r \quad (\text{F.9})$$

式中:

q ——总换热热流密度, kW/m²;

t_G ——烟气温度, °C。

总换热热流密度可由迭代方法求解, 总热损失等于总换热热流密度乘以无保温隔热的外壳面积。

附 录 G
(资料性附录)
旁路烟气挡板泄漏

G.1 概述

旁路烟气挡板在电力工业中作为隔离、调节和分流烟气之用。在燃气轮机联合循环应用场合，旁路挡板用于隔离旁路烟道，在燃气轮机单循环运行方式时，隔离排烟进入余热锅炉。在这种应用场合时，旁路挡板位于高温和高烟气流量的燃气轮机排气口。除非旁路挡板经常定期检修和运行的烟气温度均匀，否则存在密封损坏以及构架和导叶变形的现象。

G.2 挡板泄漏

由于燃气轮机启停频繁，因此挡板经受很大的温度变化。这种冷热交变循环会引起挡板构架和导叶片或轮盘变形损坏直至泄漏。挡板制造商能提供密封空气系统来加压四周构架与导叶片或轮盘之间接触点上的沟槽。该密封空气能维持燃气轮机侧的空气压力高于排气压力，而产生所谓的密封空气内漏而不是排气泄漏的情况。

G.3 泄漏率

无论旁路烟气挡板是否有密封空气系统，其泄漏率都很难准确估计。对于新投运的挡板，制造商会给出一个无密封空气系统的泄漏率，但泄漏率会随着冷热交变循环而逐渐增大。在初始运行阶段，具有密封空气系统的新挡板可能泄漏率为零，但经过多个冷热交变循环后会出现轻微的泄漏。

对无密封空气系统的挡板，挡板泄漏意味着烟气外泄，将引起烟气流过余热锅炉流量减少；对有密封空气系统的挡板，挡板泄漏意味着密封用空气漏入烟气流中，将引起烟气温度下降。无论哪种情况，安装了挡板均将影响性能试验的结果。用户应与挡板制造商一起来解决与挡板泄漏率有关的所有问题。

如果采用密封空气系统，应调整好密封空气压力，使其稍高于燃气轮机排气压力，使得空气漏入烟气流对余热锅炉性能影响可以忽略不计。如果没有采用密封空气系统，目前尚未知其他准确的方法来估计烟气泄漏率。

附录 H

(规范性附录)

采用燃气轮机能量平衡计算燃气轮机排气流量

H.1 总则

本附录采用燃气轮机热平衡方法来计算燃气轮机排气流量和组分。为了计算得到燃气轮机排气组分，进而能够确定排气焓值，需要知道燃气轮机的运行数据。

当燃气轮机燃料流量、空气抽出流量和注入流流量确定时，通过燃气轮机的空气流量是唯一未知变量。为了确定离开燃气轮机的排气组分，将空气流分成两部分，用于燃烧的空气部分和平衡空气部分。用于燃烧的空气部分包括燃料燃烧和注入蒸汽或者水的各种变化，因此，可以计算得到这股空气的流量和组分；平衡空气部分仅是湿空气。

排气流量由燃气轮机的能量平衡来确定。进入燃气轮机系统的能量有燃料、空气和注入流体的能量。

离开燃气轮机系统的能量有燃气轮机排汽的热量、电输出功率、抽出空气的热量和热损失。只有平衡空气流量是未知变量，因此平衡空气流量能直接求出。一旦确定了平衡空气流量，排气流量和组分均能计算出来，见图 H.1。

计算的基准温度为 15.56℃。

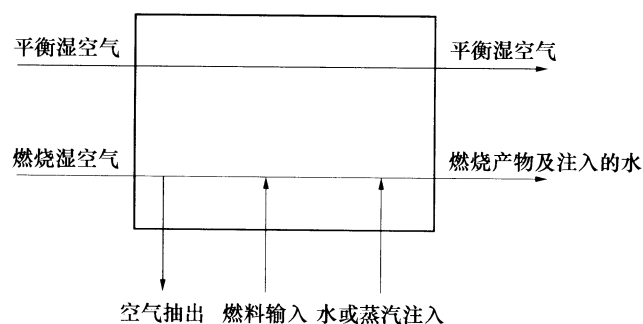


图 H.1 排气流量

H.2 所需的数据

注意，空气的温度和湿度参数应是压气机入口处空气的特性参数。

a) 大气环境。

湿球温度，℃；

干球温度，℃。

b) 大气压力，MPa；或相对湿度，%。

c) 燃气轮机数据。

1) 燃料流量，kg/h；或燃料气容积流量 [m³/h (标态)] 和密度 (kg/m³)。

2) 燃料组分。

3) 燃料热值 (油)，kJ/kg。

4) 注入蒸汽或水流量，kg/h。

5) 注入蒸汽或水温度，℃。

6) 注入蒸汽或水压力，MPa。

7) 注入流体的状态 (液态或汽态)。

- 8) 燃气轮机排气出口温度, °C。
- 9) 燃气轮机热损失, kJ/h。
- 10) 输出功率, kW。
- 11) 抽出空气流量, kg/h。
- 12) 抽出空气温度, °C。

H.3 计算步骤

计算包括一系列步骤, 其中许多步骤已包含在本标准其他章节的计算中。

第 1 步: 燃气轮机入口空气组分由大气环境来确定, 见 6.2.1。

第 2 步: 由于燃气轮机燃料的燃烧而引起摩尔流量的变化。燃料气按照 6.2.2 方法来计算; 燃料油按照 6.2.3 方法来计算。

第 3 步: 按照 6.2.6 中计算方法, 采用第 1 步得到的空气组分和给定的干球温度, 计算燃气轮机入口空气焓值。抽出空气的焓值使用相同的空气组分和给定的抽出空气的温度来计算。平衡空气出口的焓值也同样使用相同的空气组分和燃气轮机排气出口温度来计算。

第 4 步: 采用第 1 步确定的用于燃烧总的湿空气摩尔流量, 并加上第 2 步得出的由于燃气轮机燃料的燃烧而引起摩尔流量的变化, 计算燃气轮机排气组分。燃气轮机排气摩尔流量也应包括注入到燃气轮机中的蒸汽或水的摩尔流量。然后计算燃气轮机排气组分的质量分数。计算描述见 6.2.5。

第 5 步: 按照 6.2.6 中计算方法, 根据第 4 步确定的排气组分质量分数和已知的燃气轮机排气出口温度, 计算出燃气轮机的排气焓值。

第 6 步: 燃气轮机燃料热值以及包括燃料显热的计算方法, 对燃料气见 6.2.4, 对燃料油见 6.2.5。

第 7 步: 注入燃气轮机的蒸汽或水的焓值由压力、温度和状态(液态或气态)确定的蒸汽焓值减去 2530.07 kJ/kg (在 15.56°C 下从水蒸气表查取的饱和蒸汽焓值), 得到调整至基准温度下的焓值。

第 8 步: 燃气轮机输出功率的能量由输出功率(单位为 kW)乘以 3600 确定。

第 9 步: 燃气轮机热损失计算方法见 H.4

第 10 步: 根据燃气轮机的输入能量等于输出能量关系, 在下面的热平衡方程中, 平衡空气流量是唯一的未知变量, 可以直接求出:

$$\begin{aligned} & (q_{BA} + q_{BLD} + q_{AC})h_{AIN} + q_{INJ}h_{INJ} + q_{GTF}HV_{NET} \\ & = \Phi_P + \Phi_{HL} + q_{BLD}h_{BLD} + (q_{AC} + q_{INJ} + q_{GTF})h_{GOUT} + q_{BA}h_{AOUT} \end{aligned} \quad (H.1)$$

第 11 步: 燃气轮机总排气流量为第 10 步得到的平衡空气流量加上燃烧用空气入口流量, 再加上注入的蒸汽或水的流量和燃气轮机燃料流量。

第 12 步: 入口的平衡空气组分摩尔流量等于平衡空气流量除以 6.2.1.3 中的第 8 步得到的空气分子量, 再乘以 6.2.1.3 中的第 9 步得到的空气各组分的摩尔分数。燃烧后的烟气组分摩尔流量加到平衡空气组分摩尔流量得到总入口组分摩尔流量。入口的各组分摩尔分数是该组分的摩尔流量除以所有组分的摩尔流量之和。

H.4 燃气轮机各种热损失

燃气轮机热损失是可变损失和固定损失之和。可变损失包括发电机损失, 可由发电机效率曲线估算。固定损失是润滑油热损失及其他不变损失。这些损失应由燃气轮机制造商提供。在实际应用中, 一些损失可以量化。

附 录 I
(资料性附录)

本标准与 ASME PTC 4.4—2008 相比的结构变化对照表

本标准与 ASME PTC 4.4—2008 相比在结构上有所调整，具体章条编号对照情况见表 I.1。

表 I.1 本标准与 ASME PTC 4.4—2008 的章条编号对照情况

本标准章条编号	对应 ASME PTC 4.4—2008 标准章条编号
1	1
2	—
3.1~3.2	2-1~2-2
—	2-3
3.3	2-4
4	3
5	4
6	5
7	6
8	7
附录 A (资料性附录)	附录 A
附录 B (规范性附录)	附录 B
附录 C (资料性附录)	附录 C
附录 D (资料性附录)	附录 D
附录 E (资料性附录)	附录 E
附录 F (资料性附录)	附录 F
附录 G (资料性附录)	附录 G
—	附录 H
附录 H (规范性附录)	附录 I
附录 I (资料性附录)	—

参 考 文 献

- [1] Perry's, Chemical Engineering Handbook 6th Edition, Eq. 9-12.
 - [2] "STEAM", B&W 40th ed., P9~18.
 - [3] Reid, Prausnitz, and Poling, "The Properties of Liquids and Gases", McGraw Hill, 1987.
-