

ICS 27.010

F 15

NB

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 10270—2019

地热发电机组性能验收试验规程

Performance acceptance test code on geothermal power unit

2019-11-04 发布

2020-05-01 实施

国家能源局 发布

中华人民共和国能源
行业标准
地热发电机组性能验收试验规程
NB/T 10270—2019

*

中国石化出版社出版发行
地址：北京市东城区安定门外大街 58 号
邮编：100011 电话：(010) 57512500
石化标准编辑部电话：(010) 57512453
发行部电话：(010) 57512575
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail: press@sinopec.com
北京艾普海德印刷有限公司印刷
版权专有 不得翻印

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.5 字数 38 千字
2020 年 1 月第 1 版 2020 年 1 月第 1 次印刷

*

书号：155114·1528 定价：25.00 元
(购买时请认准封面防伪标识)

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、符号和定义	1
4 导则	4
5 仪表和测量方法	10
6 试验结果的计算	13
7 结果报告	19
附录 A（资料性附录） 示踪技术	21

前 言

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。

本标准由能源行业地热能专业标准化技术委员会（NEA/TC29）提出并归口。

本标准主要起草单位：江西华电螺杆发电技术有限公司。

本标准主要参加单位：西安热工研究院有限公司、上海交通大学、中石化新星（北京）新能源研究院有限公司、中国石化工程建设公司、天津大学。

本标准主要起草人：施延洲、胡达、余岳峰、刘凤钢、赵军、王英、赵丰年、王剑波、马春红。

本标准于2019年首次发布。

地热发电机组性能验收试验规程

1 范围

本标准规定了地热发电机组热力性能验收试验的方法和程序，给出了试验的准备、实施、评估的统一规则。

本标准适用于干蒸汽、闪蒸（扩容）、全流和双工质循环等地热发电机组的热力性能验收试验。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2624 流量测量节流装置用孔板、喷嘴和文丘里管测量充满圆管的流体流量（ISO 5167（所有部分）：2003，IDT）

GB/T 8117.1—2008 汽轮机热力性能验收试验规程 第1部分：方法A—大型凝汽式汽轮机高准确度试验

GB/T 8117.3—2014 汽轮机热力性能验收试验规程 第3部分：方法C—改造汽轮机的热力性能验证试验

GB/T 28812—2012 地热发电用汽轮机规范

GB/T 30555—2014 螺杆膨胀机（组）性能验收试验规程

GB 50791—2013 地热电站设计规范

DL/T 983—2005 核电厂蒸汽湿度测量技术规范

JF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示

NB/T 10097—2018 地热能术语

NB/T 25004—2011 汽水分离再热器性能试验规程

3 术语、符号和定义

NB/T 10097、GB/T 28812、GB/T 30555和GB 50791界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1 术语

3.1.1

验收试验 acceptance test

确定新建或改建的机组是否达到合同中所规定的性能指标而进行的试验。

3.1.2

试验边界 test boundary

根据试验范围确定的热力学控制边界，用来明确所需测量的能量流以计算修正的结果。

3.1.3

规定的运行方式试验 specified operating mode test

在规定的机组运行方式下进行的试验，通过试验确定电功率和热效率。例如试验目标为在机组主调节阀全开条件下进行的试验，或者在规定的地热流体流量下进行的试验。

3.1.4

机组热耗量 unit heat consumption

单位时间内地热发电机组从外界热源所取得的热量。

3.1.5

电功率 electrical power

扣除外围励磁和非同轴主油泵所耗功率后，发电机出线端所输出的功率。

3.1.6

辅助电功率 electrical auxiliary power

非膨胀机驱动的膨胀机和发电机的辅机所耗功率。

3.1.7

净电功率 net electrical power

电功率与辅助电功率的差值。

3.1.8

单位地热流体净发电量 specific geothermal fluid net power output

单位地热流体流量的机组净电功率。

3.1.9

机组净热效率 unit net thermal efficiency

单位机组净电功率与机组热耗量之比。

3.1.10

地热尾水 geothermal waste water

经过利用后的地热水，如水气分离器、扩容器和膨胀机排出的地热水。

3.1.11

地热干蒸汽发电机组 dry steam geothermal power generation unit

直接利用地热干蒸汽推动膨胀机做功，然后将机械能转化为电能的发电机组。

3.1.12

地热闪蒸发电机组 flash geothermal power generation unit

地热流体通过闪蒸器降压产生部分低压蒸汽来推动膨胀机做功，然后将机械能转化为电能的发电机组。

3.1.13

地热双工质循环发电机组 binary cycle geothermal power generation unit

地热流体通过换热器加热低沸点工质并产生蒸汽，这些蒸汽通过朗肯循环先在膨胀机中将热能转换为机械能，然后将机械能转化为电能的发电机组。

3.1.14

地热全流发电机组 total-flow geothermal power generation unit

直接利用地热流体（含有汽水混合物）推动膨胀机做功，然后将机械能转化为电能的发电机组。

3.1.15

主要参数 primary measurement

用于计算试验结果的测量参数。

3.1.16

次要参数 secondary measurement

不用于计算试验结果，但用于确定机组运行状态的测量参数。

3.1.17

不确定度 uncertainty

对误差的数值估计。分为系统不确定度和随机不确定度两种，总不确定度是对系统不确定度和随机不确定度的合成。

3.1.18

系统不确定度 systematic uncertainty

系统误差的数值估计，按照系统误差的95%置信区来估算。

3.1.19

随机不确定度 random uncertainty

随机误差的数值估计，可通过重复测量值的分散度来计算。通常由一组试验数据的平均值的标准偏差来定量。

3.1.20

灵敏系数 sensitivity coefficient

某一参数的变化引起结果的瞬时变化率。

3.2 符号和定义

除非文中另有定义，表1中的符号和定义在本标准中使用。

表1 符号、定义和单位

符号	描述	单位
Q_{meas}	测量的机组热耗量	kJ/s
m_{in}	测量的地热流体入口流量	kg/s
m_{design}	设计的地热流体入口流量	kg/s
N_{meas}	测量的电功率	kW
N_{aux}	测量的辅助电功率	kW
N_{net}	机组净电功率，测量或计算	kW
N_{corr}	修正后净电功率	kW
h_{in}	测量的地热流体入口比焓	kJ/kg
w_{net}	测量的单位地热流体净发电量	kW·h/kg
w_{corr}	修正后单位地热流体净发电量	kW·h/kg
η_{net}	测量的机组净热效率	—
η_{corr}	修正后机组净热效率	—

3.3 保证值

3.3.1 机组净电功率

机组净电功率

$$N_{\text{net}} = N_{\text{meas}} - N_{\text{aux}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- N_{net} —— 机组净电功率，kW；
- N_{meas} —— 测量的电功率，kW；
- N_{aux} —— 测量的辅助电功率，kW。

3.3.2 单位地热流体净发电量和机组净热效率

3.3.2.1 单位地热流体净发电量

单位地热流体净发电量

$$w_{\text{net}} = \frac{N_{\text{net}}}{3600m_{\text{in}}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- w_{net} —— 测量的单位地热流体净发电量，kW·h/kg；
- N_{net} —— 机组净电功率，kW；
- m_{in} —— 测量的地热流体入口流量。

3.3.2.2 机组净热效率

机组净热效率

$$\eta_{\text{net}} = \frac{N_{\text{net}}}{Q_{\text{meas}}} \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_{\text{meas}} = m_{\text{in}} \cdot h_{\text{in}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- η_{net} —— 测量的机组净热效率；
- N_{net} —— 机组净电功率，kW；
- Q_{meas} —— 测量的机组热耗量，kJ/s；
- m_{in} —— 测量的地热流体入口流量；
- h_{in} —— 测量的地热流体入口比焓，kJ/kg。

4 导则

4.1 概述

本标准要求机组在规定的运行方式下进行试验，本标准推荐的运行方式是膨胀机主调节阀全开的运行方式。通过试验确定机组修正后净电功率和修正后机组净热效率或单位地热流体净发电量。

4.2 试验前规划

4.2.1 在设计阶段，试验各方应对试验方法，保证值定义，测点与测量仪表的数量、位置与布置，以及阀门与管道布置等达成一致。建议对一些重要的测量提供专用的连接设施，如传压管及仪表阀、法兰和温度计套管等，以使仪表安装和验收试验可在不影响正常机组运行的情况下进行。

4.2.2 为了满足本标准对测量不确定度的要求，应进行必要的试验前准备工作和采取必要的措施。在设计阶段宜达成协议，主要内容包括：

- a) 功率测量位置；
- b) 主要流量测量装置的位置及其管道布置；
- c) 确定所需隔离阀门的数量及其位置；
- d) 关键测点上所需温度套管和压力接头的数量和位置的要求；
- e) 关键测点上所需双重或多重仪表接头的数量及位置的要求；
- f) 地热流体蒸汽品质（干度）的确定方法（如果适用）。

4.3 试验前协议

参与试验各方在试验前应就如下事项达成一致：试验程序、试验目的、测量方法以及在限定必要修正量下的运行方式、试验结果的修正方法和修正曲线，以及与保证值进行比较的方法。

4.4 试验边界和测量参数

4.4.1 试验边界

4.4.1.1 试验边界确定了用于计算和修正试验结果所需测量的能量流。参与计算的所有输入和输出能量流都应以其通过边界的点为参考来进行测量。在边界内的参数可不必测量，除非其用于确认运行条件或用于计算试验边界处的参数。

4.4.1.2 试验边界宜包括系统的所有设备，但是对具体的试验目的，可采取不同的试验边界。

4.4.1.3 对一些特殊的试验，规定的试验边界应由试验各方共同确认。典型试验边界：

- a) 通用地热发电机组试验边界，见图 1；
- b) 地热干蒸汽发电机组试验边界，见图 2；
- c) 地热闪蒸发电机组试验边界，见图 3；
- d) 地热双工质循环地热发电机组试验边界，见图 4。

注：图中，用于计算和修正试验结果所需测量的能量流用实线表示。不参与试验结果的能量流用虚线表示。

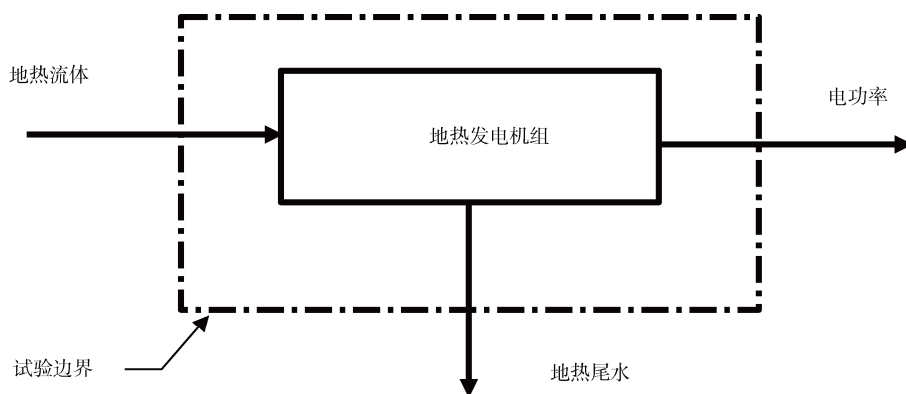


图 1 通用地热发电机组试验边界

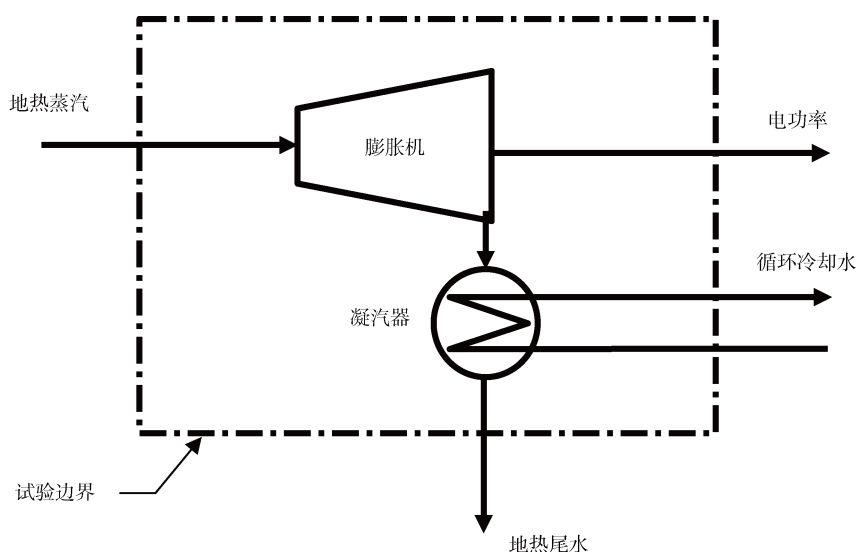


图 2 地热干蒸汽发电机组试验边界

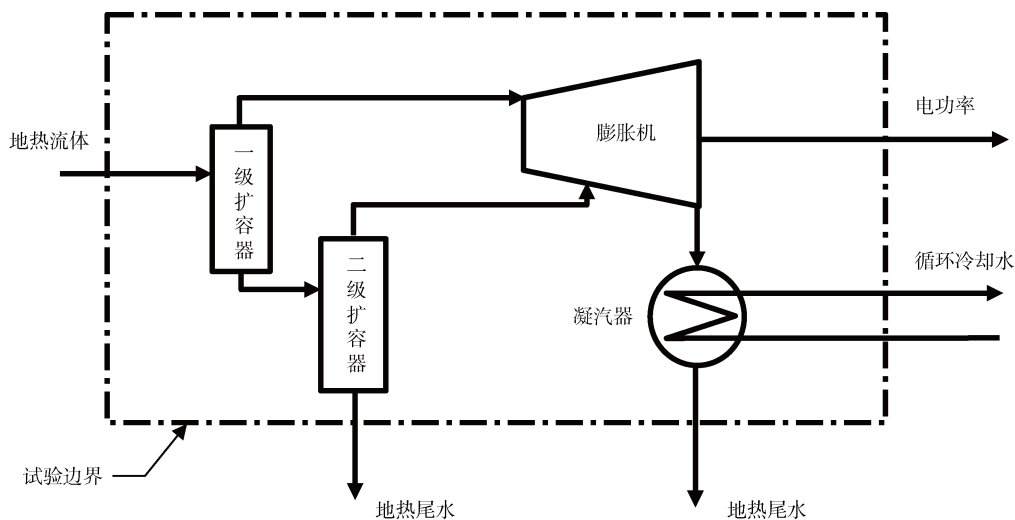


图 3 地热闪蒸发电机组试验边界

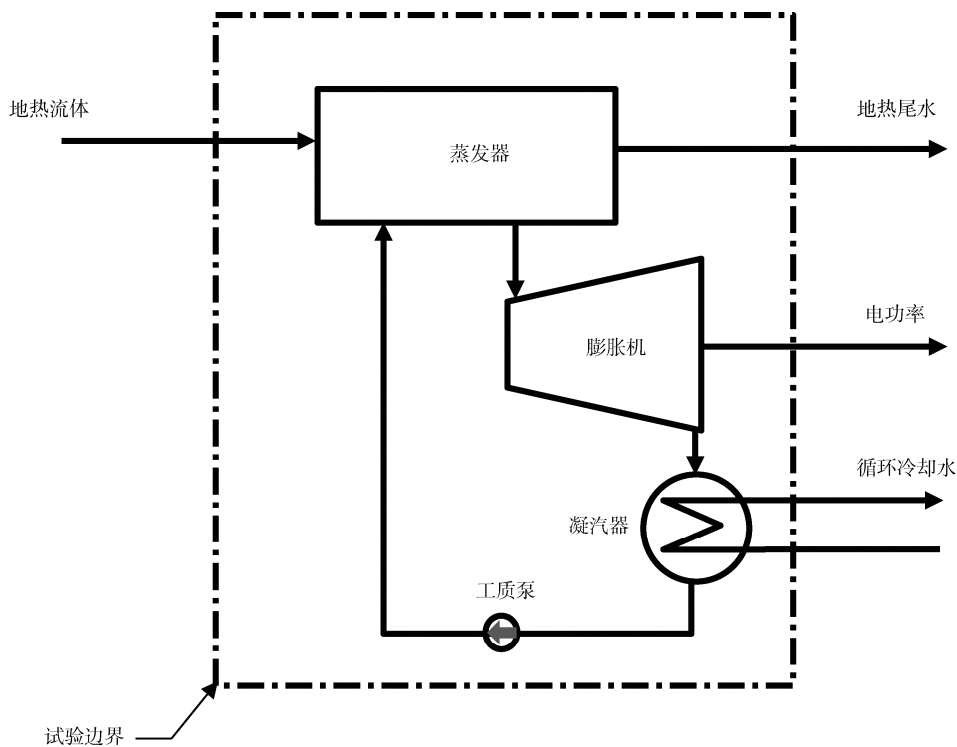


图 4 地热双工质循环发电机组试验边界

4.4.2 主要测量参数及变量

4.4.2.1 机组热耗量

在试验边界处测量地热流体的压力、温度（或干度）和流量，来确定地热发电机组热耗量，计算见式（4）。如果有更好的测量点，且该测点处的流体参数与边界点上的相同，或如果可以精确地修正到规定的试验边界点上，则也可将实际测量点布置在试验边界点的上游或下游。

4.4.2.2 净电功率

净电功率宜在试验边界上直接测量，或可通过测量发电机端的电功率再扣除辅助电功率得到。电气参数的测量方法见5.7。

4.4.2.3 冷端参数

冷端参数测量应根据试验系统的边界条件来确定：

- a) 对于开式循环冷却系统，测量进入试验边界的循环水温度和流量；
- b) 对于蒸发式和干式冷却系统，测量冷却系统进口处的空气参数（即大气压力、干球温度和湿球温度，如适用）；
- c) 当试验边界不包括排热系统（凝汽器）时，测量膨胀机排汽压力。

4.5 试验计划

4.5.1 试验前应准备一个详细的试验计划，列出所有试验执行的项目，并给出详细的试验方案。试验计划宜包括试验时间表、内容名称、试验团队的职责说明、试验方案和结果报告。

4.5.2 应制定一个试验时间表。试验时间表宜包括：事件顺序、预期测试时间、通知试验人员、试验准备和执行，以及结果报告的准备。

4.5.3 应确定负责试验的试验团队。试验团队宜包括：数据采集、采样和分析所需的测试人员，以及支持试验准备和试验执行所需人员，例如供应商代表、用户、见证方和第三方检测机构人员等。根据试验要求，指定执行试验的负责人。试验负责人负责与试验各方的协调和沟通。试验负责人还应准备好所有试验活动的全部记录表。试验负责人与机组运行人员协调所需运行条件的设置。

4.6 试验前准备

4.6.1 机组状况

4.6.1.1 应确认地热发电机组、换热器和凝汽器（若在保证值之列）都处于良好状况。还应确认换热器、凝汽器、管道和阀门的泄漏均已消除。

4.6.1.2 卖方应有机会检查机组状况，必要时也可由卖方自行进行测量。对发现的任何缺陷，均应以消除。

4.6.1.3 机组的状况宜在试验前通过阀全开时的电功率检查性试验来确定。如果试验中发现与设计值有较大的无法解释的差异，则可对膨胀机的主机进行检查和分析来确定缺陷的所在。

4.6.2 换热器状况

4.6.2.1 对于双工质循环地热发电机组的性能试验，如果保证值包括蒸发器和预热器的性能，那么它们应是清洁，而且系统经检测有良好的气密性。否则，卖方应在其标书中说明计算整体性能指标时采用的换热器数量和配置、换热器的端差和各换热器之间的压降。有关各方就此类事项应达成一致。

4.6.2.2 换热器的状况可通过打开水室或测量端差来检查。在有结垢的情况下，买方可要求卖方在验收试验前予以清洗，或者试验各方也可商定一个合适的修正方法。

4.6.3 凝汽器状况

4.6.3.1 如果保证值包括凝汽器的性能，而且是以冷却水流量和温度为条件时，则凝汽器应是清洁，而且系统经检测有良好的气密性。

4.6.3.2 凝汽器的状况可通过打开水室或测量端差来检查，在有结垢的情况下，买方可要求卖方在验收试验前予以清洗，或者试验各方也可商定一个合适的修正方法。

4.6.4 系统的隔离

对试验过程需要隔离的设备以及实现隔离的方法宜达成一致，在试验报告中应说明系统的隔离情况。

4.6.5 进口滤网的清洁度

如有必要，应在试验前清理地热发电机组进口滤网，否则，试验各方也可商定一个合适的修正方法。

4.6.6 测量设备的检查

应对所有测量设备的状况及其适用性进行检查，以确认测量仪表、安装位置及安装方式是否符合有关要求，所有这些检查结果都应记录在试验报告中。

4.7 试验运行方式

4.7.1 试验期间，机组的运行方式应与试验目标相一致，并作为修正方法的基础。修正系数以及修正曲线的绘制受机组运行方式的影响。

4.7.2 机组电功率保证值试验宜在调节阀全开条件下进行。如果保证值是在给定的调节阀开度下给出，则试验宜在此给定的调节阀开度下进行。

4.8 验收试验

4.8.1 试验工况的稳定

4.8.1.1 所有试验开始之前应有一段稳定运行时间，其持续稳定时间由试验各方商定。

4.8.1.2 凡是会影响到试验结果的任何条件，应在试验开始前尽量使其接近稳定，而且在整个试验过程中保持在表 2 所规定的允许波动变化范围内。

4.8.2 试验工况的最大偏差与波动

除非试验各方另有协议，在任一试验过程中，运行工况的最大允许偏差与波动均不宜超过表 2 中所给的限值。

4.8.3 试验的持续时间和读数频率

4.8.3.1 试验所需的持续时间取决于运行工况的稳定程度和试验数据的采集频率。建议验收试验的持续时间为 1h，试验持续时间也可根据协议缩短，但不得少于 45min。

4.8.3.2 流量差压测量装置宜每半分钟读数一次。对输出电功率，如无积算式的功率表，读数间隔不宜超过 1min。主要压力和温度读数间隔不宜大于 5min。在波动情况下，为了获得具有代表性的平均值，尤其是流量计的读数，宜采用较短的读数间隔或较长的试验持续时间。

表 2 运行工况的最大允许偏差与波动

参数	试验平均值与规定值之间的最大允许偏差	相对于试验平均值的最大允许快速波动（见注）
地热流体的压力	未加限定 ^a	绝对压力的±2%
地热流体的温度	未加限定 ^a	±4K
地热流体的流量	未加限定	±2%
冷端 1：冷却塔或空冷器包含在试验边界内时的空气参数	湿球温度：±14℃ 干球温度：±17℃	—

表 2 (续)

参数	试验平均值与规定值之间的最大允许偏差	相对于试验平均值的最大允许快速波动 (见注)
冷端 2: 冷却塔或空冷器不包含在试验边界内, 或凝汽器不包含在试验边界内时的凝汽器压力	凝汽器压力变化引起的发电设备电功率的变化, 不得超过制造商允许的范围	绝对压力的 2%
电功率	未加限定, 不得超过发电设备制造商允许的范围	±2%
注: 快速波动指其波动频率为读数频率二倍以上的频率。		
^a 在任何情况下, 地热流体的压力、温度不应超过制造厂允许的压力和温度变化范围。		

4.8.4 积算式仪表的读数

4.8.4.1 流量差压测量装置宜每半分钟读数一次。对输出电功率, 如无积算式的功率表, 读数间隔不宜超过 1min。主要压力和温度读数间隔不宜大于 5min。在波动情况下, 为了获得具有代表性的平均值, 尤其是流量计的读数, 宜采用较短的读数间隔或较长的试验持续时间。

4.8.4.2 所有的积算式测量仪表都宜同时读数, 有关的指示仪表也宜同时或接近同时读数。

4.8.4.3 建议在试验过程中, 以相等的时间间隔同时对所有的积算式仪表进行读数, 若有需要, 在试验结束后, 可进行试验一致性的检查, 还可调整试验取值的时间范围。

4.8.4.4 如果所有运行条件保持不变, 所有观测值宜在预定的试验时间之前一段时间就开始记录, 并在预定试验结束时刻之后再延续记录一段时间。

4.8.5 试验记录

每位观测人员都应如实记录自己所观测到的值。试验后, 试验各方均应立即收到一份完整的试验记录复印件。

4.8.6 初步计算

在试验结束后应立即进行试验结果及修正值的初步计算, 以便确定测量数据的有效性。

4.8.7 试验的一致性

4.8.7.1 正式验收试验宜进行重复试验, 同一试验工况点的两次试验数据, 当修正到相同的运行条件下, 若两次试验结果之间的差别大于 0.5%, 就应认为试验结果不一致。

4.8.7.2 如果在某一试验或一系列试验的计算过程中发现了严重的不一致现象, 除非另有协议, 该试验或一系列试验应全部或部分作废。

4.8.7.3 如果对验收试验结果不满意, 那么应给卖方提供机会进行设备改进, 并由其出资重做验收试验。如果协议的任一方有证据对试验结果有怀疑, 也可要求重做试验。

4.8.7.4 如果卖方由于其责任范围的原因, 在验收试验后对机组做过改造, 致使保证值可能不再在合理的范围内, 买方可要求重做验收试验。

4.9 试验不确定度

4.9.1 本标准规定可接受的最大允许试验不确定度: 修正后净电功率的不确定度为 ±1.0%; 修正后净热效率或单位地热流体发电量的不确定度为 ±1.5%。

4.9.2 应在试验前进行不确定度的分析，以确定期望的试验不确定度水平。试验后也应进行不确定度分析以确认试验有效。如果试验后的不确定度值大于所要求的最大允许值，则试验无效。

5 仪表和测量方法

5.1 通则

5.1.1 测量分类

参数可分为主要参数或次要参数。主要参数用于计算试验结果，典型的主要参数有：地热发电机组入口地热流体参数、电功率和排汽压力。次要参数主要用于确认所要求的试验条件是否满足。应根据具体热力循环，由试验不确定度分析来确定主要参数测量的项目和测量仪表的精度等级。

5.1.2 测量仪表

经过校准的试验专用仪表或永久安装的现场仪表都可以使用。如果使用永久安装的现场仪表，建议检查整个仪表测量系统。

5.1.3 仪表验证和校准

主要参数应使用经校准的试验仪表进行测量。校准环境宜尽可能与试验期间仪表的工作环境一致，可以通过将仪表安装在可调节的环境中。有些仪表可能需要试验后复校。

5.2 压力测量

5.2.1 压力测点

如果流体流动较均匀，只需要布置1个点来测量，否则，需要布置几个点来测量。

5.2.2 压力测量仪表

5.2.2.1 推荐使用经校准的压力变送器。

5.2.2.2 绝对压力变送器宜用于测量压力小于或等于大气压力的场合。绝对压力变送器也可用于测量高于大气压力的场合。大气压力宜采用绝对压力变送器测量。

5.2.2.3 表压变送器只可用于测量高于大气压力的场合。

5.2.2.4 差压变送器主要用于测量由差压确定流量的场合。

5.2.2.5 其他设备比如静重式压力计、试验用弹簧管压力表或水银压力计也可用于测量压力。但应明确使用这些仪表的不确定度和校准要求。

5.2.3 取压孔和传压管

5.2.3.1 取压孔宜与管道内壁垂直。内孔口边缘应是尖锐直角且无毛刺，在至少2倍孔径长度内，孔应笔直且孔径不变。取压孔的内径宜在6mm~12mm。

5.2.3.2 除非仪表和取压口位于同一高度，否则连接管应连续倾斜向上或向下，避免形成水柱或汽柱。如果仪表在取压点之上，可通过在取压点处设置密封环使传压管内充满水。但是对于低于大气压的测点，仪表位于取压口上方时，应采取排气措施，避免凝结水聚积在取压管中产生静压头的情况。

5.2.4 大气压力

建议用高准确度的绝对压力变送器或者膜式压力表来测量。

5.2.5 排汽压力测量

应测量膨胀机排汽口处的平均静压力。测量建议如下：

- a) 可在凝汽器的任何平面选择测点，除非另有规定；
- b) 如果各方同意，壁面取压也可使用；
- c) 由于凝汽器布置或者其他原因而不能使用壁面取压时，可安装比如网笼探头或导流板等内部装置。具体参见 GB/T 8117.1 第 5.5.3 节；
- d) 推荐在排汽环形面积中每 1.5m^2 设置一个测点。总数量最少 2 个，最多 8 个；
- e) 如果使用均压管，应使用尺寸足够大的均压管以避免回流影响；
- f) 推荐使用低量程绝压变送器来测量；
- g) 不推荐使用测量温度来获得排汽压力的方法；
- h) 传压管宜满足第 5.2.3 节的要求。注意保证传压管可以自排污，以免因传压管内少量积水而产生误差。试验期间可使用可控的低流量空气吹扫装置来清除传压管中的积水。

5.2.6 不确定度的要求

5.2.6.1 主要压力测量仪表的系统不确定度应不大于 0.3%。大气压力测量仪表的系统不确定度应不大于 0.1%。

5.2.6.2 次要压力可使用任何类型的压力变送器或等效仪表来测量。

5.3 温度测量

5.3.1 温度测点

温度测点应布置在温度均匀分布且尽可能靠近相应压力测点下游的位置。不应将温度套管安装在流动死区。对试验结果有直接影响的温度测点，应在测点附近的不同位置上进行多点测量，取平均后作为流体的温度。

5.3.2 温度测量仪表

5.3.2.1 可使用热电阻、热电偶温度计作为温度测量仪表。

5.3.2.2 对于较高温度和高准确度的温度测量，建议如下：

- a) 采用经校准的热电阻连同校准过的数字电压表；
- b) 采用经校准的精密级热电偶连同经校准的数字电压表。当要求高准确度测量时，建议采用连续补偿导线。应准确测量冷端温度。如果可能，可使用冰以保持冷端温度恒定。

5.3.3 不确定度的要求

5.3.3.1 主要温度测量仪表的不确定度要求：当测量温度低于 100°C 时，仪表系统不确定度应不大于 0.3°C ；当测量温度高于 100°C 时，仪表系统不确定度应不大于 0.6°C 。

5.3.3.2 次要温度测量仪表系统不确定度不宜大于 4.0°C 。

5.4 空气湿度测量

5.4.1 空气湿度测点

应在接近环境干球或湿球温度条件下进行测量，以确定空气中水分含量，并以此作为确定空气性质

的基础。

5.4.2 湿度测量仪表

推荐的湿度测量仪表有：相对湿度传感器、干湿球湿度计以及冷镜露点仪。

5.4.3 不确定度的要求

湿度测量仪表的系统不确定度不应大于2%。

5.5 流量测量

5.5.1 流量测量装置

5.5.1.1 宜根据不同应用场合选用合适的流量测量装置。流量测量装置包括：差压式流量计（孔板，喷嘴和文丘里管，参见 GB/T 2624）、质量流量计（科里奥利流量计）、超声波流量计和机械式流量计（涡轮和容积式流量计）。在选择最合适的流量测量装置时，应考虑经济性、应用性和不确定度等因素。表 3 给出了不同流体类型的流量测量装置的使用建议，建议分为：推荐、可接受和不推荐。

5.5.1.2 测量湿蒸汽流量和湿度，推荐采用示踪剂技术的测量方法（参见附录 A）。

表 3 不同流体类型的流量测量装置的使用建议

流体类型	差压式流量计(孔板、喷嘴和文丘里管)	质量流量计(科里奥利)	超声波流量计	机械式流量计(涡轮和容积式)	示踪剂技术
水 ^a	推荐	推荐	可接受	可接受	可接受
蒸汽	推荐	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐
两相混合物	不推荐	不推荐	不推荐	不推荐	推荐

^a 对于管径小于 76.2mm 的水流量测量，推荐使用涡轮或容积式流量计。

5.5.2 不确定度的要求

除非另外规定，主要流量测量装置的系统不确定度应不大于0.75%。

5.6 湿蒸汽湿度测量

5.6.1 如果地热蒸汽在量热计中产生可测出的过热度的条件下，可采用节流量热计测量湿蒸汽湿度。否则，宜采用电加热量热计测量湿蒸汽湿度。如果管道中湿蒸汽水分含量不均匀，难以获得具有代表性的样品，则需要采用其他测量方法，试验各方应达成一致。

5.6.2 推荐采用示踪剂技术测量湿度的方法。一般考虑采用钠、锂、钾和铯盐作为示踪剂。放射性示踪剂应采用半衰期较短的同位素，如 ²⁴Na；非放射性示踪剂可选取 LiOH、Cs₂CO₃、LiNO₃ 等。示踪剂浓度测量仪表采用质谱分析仪或原子吸收光谱仪，仪表测量精度为 0.1μg/L。采用稀释法的示踪技术参见附录 A。

5.7 电气参数测量

5.7.1 电功率的测量

5.7.1.1 对于中线直接接地（地面）或四线制的三相发电机，机组电功率应采用三功率表法测量。

5.7.1.2 对于中线通过电阻、电抗或变压器加电阻接地（地面）的三相发电机，机组电功率可采用两

功率表法，但推荐使用三功率表法测量。

5.7.1.3 采用电度表测量时，应按一定时间间隔（推荐至少每隔 5min）读取电度表读数。任何情况下功率表都可用来代替电度表。便携或永久安装的仪表均可使用。单相或多相仪表或功率分析仪均可使用。

5.7.1.4 电气仪表的连接

电气仪表的连接要求如下：

- a) 仪用互感器应接在尽可能靠近发电机出线端子上，而且处在电能进、出发电机回路的任何外部连接的发电机侧；
- b) 从仪表接出的各组导线编成辫子形状以消除电感的影响，其长度至少 1 m。最好检查仪表导线以及其他干扰源对整个表计布置区是否有干扰磁场；
- c) 只要可能，互感器的校准应与试验时同样的仪器和导线阻抗下进行；
- d) 选择电压回路中导线的横截面时，应考虑到导线的长度、电压互感器以及回路中保险丝电阻的影响。

5.7.2 仪表互感器

5.7.2.1 宜采用试验专用的、合适规格和准确度的仪用电流互感器和电压互感器。等效于试验期间仪表和导线的负载条件所用的变比和相角修正值，应由覆盖电流、电压试验值范围的公认的校准方法得到。对于仪用互感器，除了试验仪表和导线外，不应有其他负载，否则，应证实其负载未超过允许值。

5.7.2.2 当使用数字功率分析仪时，如果回路负载对全部试验都相同，则电流互感器和电压互感器负载不用修正。当高阻抗功率分析仪接入试验电流互感器和电压互感器时，可加适当的负载到回路中。

5.7.3 不确定的要求

5.7.3.1 主要电压应使用系统不确定度不大于 0.3% 的电流互感器（计量型）测量。主要电流应使用系统不确定度不大于 0.3% 的电流互感器（计量型）测量。

5.7.3.2 主要电功率应使用系统不确定度不大于 0.2% 的功率表测量。次要电功率应使用系统不确定度不大于 0.5% 的功率表测量。

6 试验结果的计算

6.1 计算前的准备

试验结果计算之前，应在整个读数期间选取一段时间段作为正式试验时间段，不能少于 4.8.3 所规定的试验持续时间。在选定的时间段内，运行工况与保证工况的参数偏差应满足表 2 的规定，所有仪表的读数都应有效。

6.2 计算过程

6.2.1 仪表读数平均值的计算

在选定的时间段内，计算每一测量仪表读数的平均值，通常取算术平均值。对于流量测量装置的差压读数，宜采用读数平方根的算术平均值。

6.2.2 平均值的修正和换算

由读数的平均值换算到所需单位的计算值时，应对仪表引起的所有影响进行修正，这些修正包括：

- a) 仪表常数和零位修正；
- b) 校准修正；
- c) 仪表读数的基准值（如大气压力，环境温度）；
- d) 任何附加影响（如水柱）。

6.2.3 测量数据的检查

6.2.3.1 相容性检查

对测量数据如压力、温度和流量，在平均值计算之后应做一次彻底检查，检查有无严重的错误、不符物理定律和总体不相容的现象。如果有重大偏差，其原因和范围又不明，则该次试验应全部或部分重做。为了澄清事实，应做适当的附加测量。对那些明显不正确的仪表读数应予以删除。经试验有关各方商定，这些数据可由其它仪表的读数代替，或用适当的计算或估算值代替。

6.2.3.2 多重测量的数据处理

当同一参数由数台相互独立的仪表测得时，通常采用算术平均值。

6.2.3.3 泄漏检查

在试验前，应尽可能发现系统泄漏并将其消除。如果任何已发现的泄漏不能消除，其流量应测量或者估算。凡引起工质损失的不明泄漏量，如果需要考虑，也应估计其流量及其泄漏地点。

6.2.4 工质的热力学特性

6.2.4.1 蒸汽和水的热力学特性表或程序，应由买卖双方协商并且在合同中规定。推荐采用由国际水和蒸汽性质协会 1997 年发布的水和蒸汽热力性能的工业用公式（IAPWS-IF97）或由 IAPWS-IF97 导出的表和图。

6.2.4.2 低沸点工质的热力学特性表或程序，应说明所用的图、表源于化工手册名称和版本。

6.2.5 性能保证值计算

地热发电机组性能指标应按保证值的定义（见3.3）进行计算。为了保持较小的修正量，在试验过程中，运行工况应尽可能接近规定的保证工况。如果有任何运行工况偏离保证工况，试验结果在与保证值比较之前应进行修正。

6.3 结果的修正

6.3.1 机组净电功率的修正

6.3.1.1 修正公式

当试验工况偏离保证工况时，所有影响机组功率的试验边界参数都应修正。

修正后机组净电功率为：

$$N_{\text{corr}} = \frac{N_{\text{net}}}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

N_{corr} —— 修正后机组净电功率；

N_{net} —— 测量机组净电功率；

K_1 —— 地热流体入口压力的功率修正系数；

- K_2 ——地热流体入口温度的功率修正系数；
 K_3 ——地热流体入口干度的功率修正系数（对汽水两相地热流体）；
 K_4 ——冷源参数的功率修正系数；
 K_5 ——辅助电功率的功率修正系数；
 K_6 ——发电机功率因数的功率修正系数；
 K_7 ——地热流体不凝气体含量的功率修正系数。

如果运行方式影响机组功率，也应进行修正。如：当采用主调节阀全开工况的运行方式试验时，如果机组主调节阀未全开，则应对阀门开度偏离设计值进行修正。

6.3.1.2 修正系数说明

- a) 入口压力、入口温度和入口干度修正：
 ——如果地热流体是单相热水，只需要使用入口温度修正系数，则 $K_1=1$ 和 $K_3=1$ 。
 ——如果地热流体是过热蒸汽，需要使用入口压力和入口温度修正系数，则 $K_3=1$ 。
 ——如果地热流体是汽水两相流，或者使用入口压力和入口干度修正系数，则 $K_2=1$ ；或者使用入口温度和入口干度修正系数，则 $K_1=1$ 。
- b) 冷源参数修正：
 ——如果冷却塔或空冷式凝汽器包含在试验边界内，则需对冷却塔或空冷式凝汽器进口空气参数进行修正。对于干式冷却塔或空冷式凝汽器，进口空气修正参数是干球温度和大气压力，这时冷源参数修正系数等于干球温度修正系数和大气压力修正系数的乘积。对于湿式冷却塔，进口空气参数是湿球温度和大气压力，也可以使用湿度和干球温度代替湿球温度，这时冷源参数修正系数等于湿球温度修正系数和大气压力修正系数的乘积。典型机组试验边界和测点图见图 5。
 ——如果冷却塔或空冷式凝汽器不包含在试验边界内，则根据测得的循环水温度和流量进行修正，这时冷源参数修正系数等于循环水温度修正系数和循环水流量修正系数的乘积。典型机组试验边界和测点图见图 6。
 ——如果凝汽器不包含在试验边界内，则根据测得的膨胀机排汽压力进行修正。典型机组试验边界和测点图见图 7。
- c) 辅助电功率的修正：
 辅助电功率修正是针对在试验条件下的非设计辅助电功率的修正，用于补偿不规则、周期性、间歇性或偏离设计的辅助电功率对结果的影响。
- d) 发电机功率因数的修正：
 发电机的输出应修正到设计功率因数下。

6.3.2 单位地热流体净发电量和机组净热功率的修正

修正后机组净电功率由式（5）计算得到，当采用主调节阀全开工况的运行方式试验时，修正后单位地热流体净发电量

$$W_{\text{corr}} = \frac{N_{\text{corr}}}{3600m_{\text{in}}} \dots\dots\dots (6)$$

修正后机组净热效率

$$\eta_{\text{corr}} = \frac{N_{\text{corr}}}{Q_{\text{meas}}} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- w_{corr} ——修正后单位地热流体净发电量, kW·h/kg;
- N_{corr} ——修正后机组净电功率, kW;
- m_{in} ——测量的和设计的地热流体入口流量, kg/s;
- η_{corr} ——修正后机组净热效率;
- Q_{meas} ——测量的机组热耗量, kJ/s。

6.4 与保证值的比较

- 6.4.1 系统边界参数和运行方式等条件应清楚地予以定义, 并形成规定的保证工况。
- 6.4.2 修正后的试验结果与保证值进行比较。

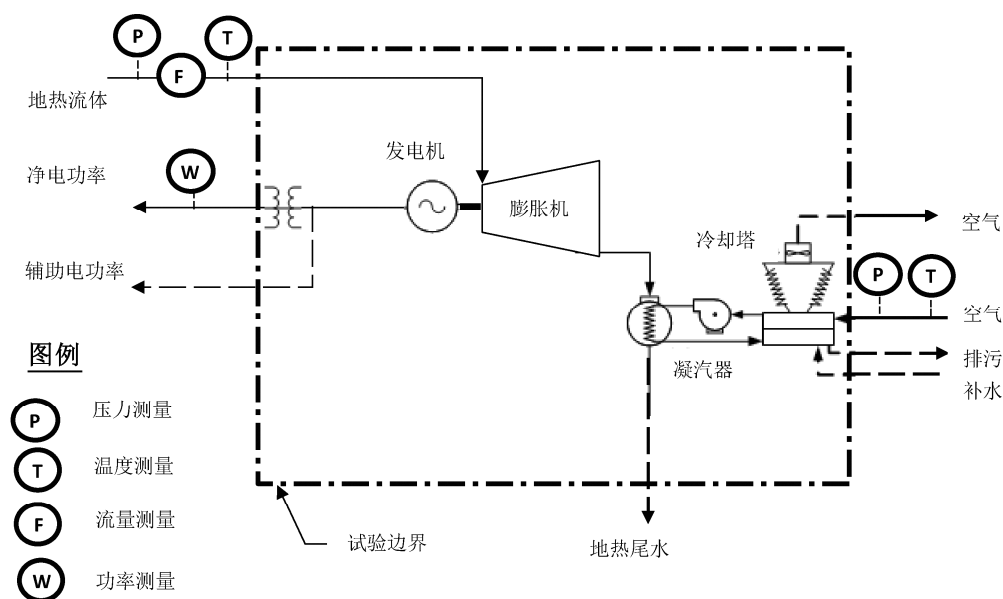


图5 典型试验边界和主要测点 (冷却塔包含在试验边界内)

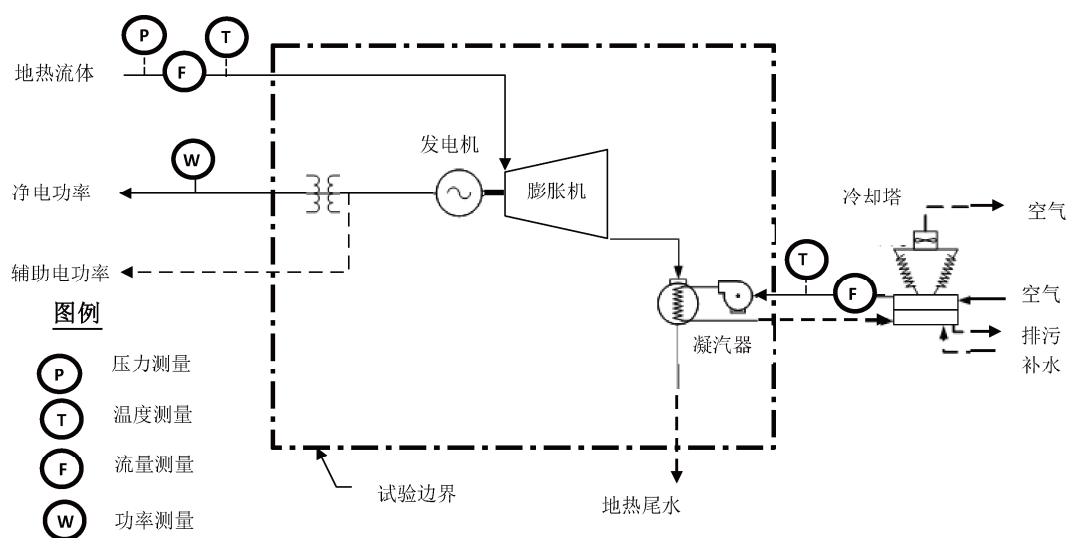


图6 典型试验边界和主要测点 (冷却塔不包含在试验边界内)

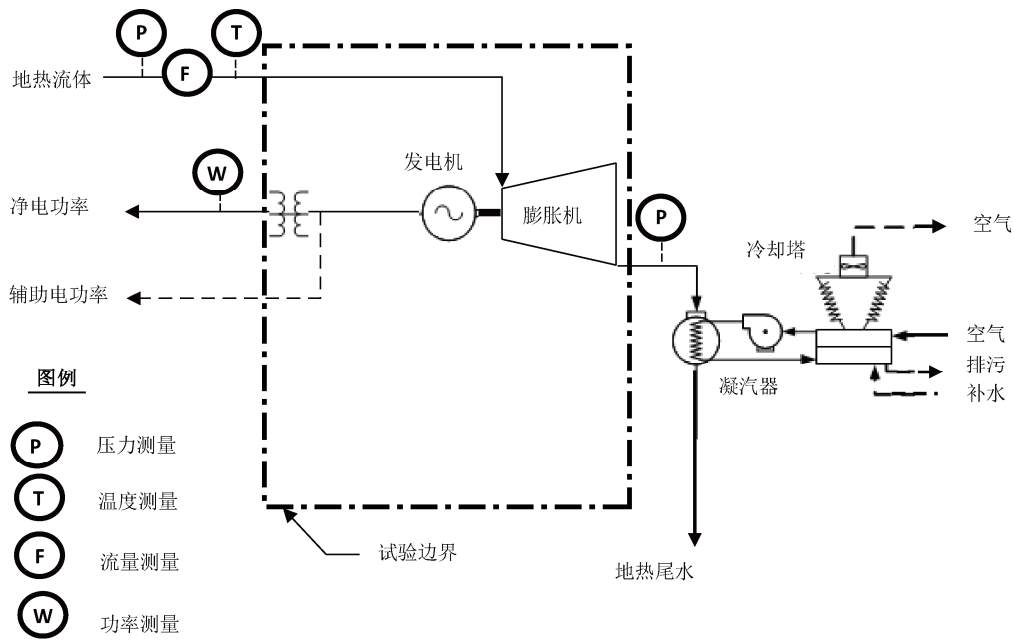


图7 典型试验边界和主要测点（凝汽器不包含在试验边界内）

6.5 试验不确定度

6.5.1 本标准提供了机组净电功率和单位地热流体净发电量的不确定度分析方法。本标准要求以95%的置信水平来报告不确定度。当使用本标准时，该不确定度分析程序作为试验前、后不确定度计算的依据。

6.5.2 机组修正后净电功率不确定度

对于地热流体为过热蒸汽，不凝气体含量忽略不计，凝汽器不包含在试验边界内的地热发电机组时，公式（5）简化为：

$$N_{\text{corr}} = \frac{N_{\text{net}}}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6} \dots\dots\dots (8)$$

依据JJF 1059.1，修正后净电功率不确定度

$$U_{N_{\text{corr}}} = \sqrt{B_{N_{\text{corr}}}^2 + (t_{v,95} S_{N_{\text{corr}}})^2} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

- $B_{N_{\text{corr}}}$ —— 修正后净电功率的系统不确定度；
- $S_{N_{\text{corr}}}$ —— 修正后净电功率的随机不确定度；
- $t_{v,95}$ —— 在自由度 v 和95%置信水平下的 t 值。

分别由下式计算：

$$B_{N_{\text{corr}}}^2 = (\theta_{N_{\text{net}}} B_{N_{\text{net}}})^2 + (\theta_{p_{\text{in}}} B_{p_{\text{in}}})^2 + (\theta_{t_{\text{in}}} B_{t_{\text{in}}})^2 + (\theta_{p_k} B_{p_k})^2 + (\theta_{N_{\text{aux}}} B_{N_{\text{aux}}})^2 + (\theta_{p_r} B_{p_r})^2 \dots\dots\dots (10)$$

$$S_{N_{\text{corr}}}^2 = (\theta_{N_{\text{net}}} S_{N_{\text{net}}})^2 + (\theta_{p_{\text{in}}} S_{p_{\text{in}}})^2 + (\theta_{t_{\text{in}}} S_{t_{\text{in}}})^2 + (\theta_{p_k} S_{p_k})^2 + (\theta_{N_{\text{aux}}} S_{N_{\text{aux}}})^2 + (\theta_{p_r} S_{p_r})^2 \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- p_{in} —— 地热流体入口压力；

- t_{in} —— 地热流体入口温度；
- p_k —— 膨胀机排汽压力；
- N_{aux} —— 辅助电功率；
- p_f —— 发电机功率因数；
- $B_{N_{net}}$ —— 净电功率测量的系统不确定度；
- $B_{p_{in}}$ —— 地热流体入口压力测量的系统不确定度；
- $B_{t_{in}}$ —— 地热流体入口温度测量的系统不确定度；
- B_{p_k} —— 膨胀机排汽压力测量的系统不确定度；
- $B_{N_{aux}}$ —— 辅助电功率测量的系统不确定度；
- B_{p_f} —— 发电机功率因数测量的系统不确定度；
- $S_{N_{net}}$ —— 净电功率测量的随机不确定度；
- $S_{p_{in}}$ —— 地热流体入口压力测量的随机不确定度；
- $S_{t_{in}}$ —— 地热流体入口温度测量的随机不确定度；
- S_{p_k} —— 膨胀机排汽压力测量的随机不确定度；
- $S_{N_{aux}}$ —— 辅助电功率测量的随机不确定度；
- S_{p_f} —— 发电机功率因数测量的随机不确定度；
- $\theta_{N_{net}}$ —— 净电功率对修正后净电功率的灵敏系数；
- $\theta_{p_{in}}$ —— 地热流体入口压力对修正后净电功率的灵敏系数；
- $\theta_{t_{in}}$ —— 地热流体入口温度对修正后净电功率的灵敏系数；
- θ_{p_k} —— 膨胀机排汽压力对修正后净电功率的灵敏系数；
- $\theta_{N_{aux}}$ —— 辅助电功率对修正后净电功率的灵敏系数；
- θ_{p_f} —— 发电机功率因数对修正后净电功率的灵敏系数。

灵敏系数计算如下：

$$\theta_{N_{net}} = \frac{\partial N_{corr}}{\partial N_{net}}, \theta_{p_{in}} = \frac{\partial N_{corr}}{\partial p_{in}}, \theta_{t_{in}} = \frac{\partial N_{corr}}{\partial t_{in}}$$

$$\theta_{p_k} = \frac{\partial N_{corr}}{\partial p_k}, \theta_{N_{aux}} = \frac{\partial N_{corr}}{\partial N_{aux}}, \theta_{p_f} = \frac{\partial N_{corr}}{\partial p_f}$$

6.5.3 修正后单位地热流体净发电量不确定度

对于地热流体为过热蒸汽，不凝气体含量忽略不计，凝汽器不包含在试验边界内的地热发电机组，修正后单位地热流体净发电量计算见公式（6）。

依据JJF 1059.1，修正后单位地热流体净发电量的总不确定度为：

$$U_{w_{corr}} = \sqrt{B_{w_{corr}}^2 + (t_{v,95} S_{w_{corr}})^2} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

- $B_{w_{corr}}$ —— 单位地热流体净发电量的系统不确定度；
- $S_{w_{corr}}$ —— 单位地热流体净发电量的随机不确定度；
- $t_{v,95}$ —— 在自由度 v 和95%置信水平下的 t 值。

分别由下式计算：

$$B_{w_{\text{corr}}}^2 = (\theta_{N_{\text{corr}}} B_{N_{\text{corr}}})^2 + (\theta_{m_{\text{in}}} B_{m_{\text{in}}})^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$S_{w_{\text{corr}}}^2 = (\theta_{N_{\text{corr}}} S_{N_{\text{corr}}})^2 + (\theta_{m_{\text{in}}} S_{m_{\text{in}}})^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- $B_{N_{\text{corr}}}$ —— 修正后机组净电功率的系统不确定度；
- $B_{m_{\text{in}}}$ —— 地热流体入口流量测量的系统不确定度；
- $S_{N_{\text{corr}}}$ —— 修正后机组净电功率随机不确定度；
- $S_{m_{\text{in}}}$ —— 和地热流体入口流量测量的随机不确定度。
- $\theta_{N_{\text{corr}}}$ —— 修正后净电功率的灵敏系数；
- $\theta_{m_{\text{in}}}$ —— 地热流体流量对修正后单位地热流体净发电量的灵敏系数。

灵敏系数计算如下：

$$\theta_{N_{\text{corr}}} = \frac{\partial w_{\text{corr}}}{\partial N_{\text{corr}}} = \frac{1}{3600 m_{\text{in}}}$$

$$\theta_{m_{\text{in}}} = \frac{\partial w_{\text{corr}}}{\partial m_{\text{in}}} = \frac{w_{\text{corr}}}{m_{\text{in}}}$$

式中：

m_{in} —— 地热流体入口流量。

对于单相或两相地热流体，或不凝气体含量较高，或排热系统边界与上述不同时，需要修改不确定度计算公式。

7 结果报告

7.1 一般要求

试验报告应简明扼要地提供与试验相关的所有文件和信息。

7.2 摘要

摘要应对试验进行简洁的概述。包括提供以下信息：

- a) 试验背景信息，如工程名称、地点、日期和时间；
- b) 业主和识别信息；
- c) 机组类型，循环和运行方式；
- d) 参加和负责试验的各方；
- e) 试验目的和范围；
- f) 试验结果摘要和试验结论，包括不确定度；
- g) 与合同保证值的比较；
- h) 与参加试验各方达成协议的试验要求的偏差。

7.3 概述

本部分宜至少包括下面的基本信息：

- a) 设备运行历史和投入商业运行的日期（如果有必要的话）；
- b) 试验的设备及其附属设备的描述；

- c) 试验边界和试验热力循环系统图;
- d) 参加试验各方代表的名单;
- e) 在摘要中没有包括的试验前协议;
- f) 试验目的。

7.4 测量仪表

本部分应包括所有用于试验仪表的详细说明,包括下面的仪表信息:

- a) 试验测量仪表的表格,包括类型、制造厂家、型号和准确度等级;
- b) 试验测量仪表的测量位置,连接和标识号等描述;
- c) 试验测量仪表的校准文件;
- d) 备用仪表的标识;
- e) 数据的采集方法,例如临时性或永久性的数据采集系统或手工记录;
- f) 所用数据采集系统的描述。

7.5 计算和结果

计算和结果部分应包括所有用于试验结果和不确定度分析的假设、数据整理、计算、修正和分析的详细说明。所需信息的清单如下:

- a) 用于计算试验结果的所有公式;
- b) 为计算结果需要整理的的数据,以及其他没有包括在这些数据中的运行参数表;
- c) 从数据整理开始的详细试验结果计算过程;
- d) 根据可用数据对主要流量的详细计算,如果需要的话,还包括中间的计算结果;
- e) 直接引用的标准转换、科学常数和特性信息;
- f) 因异常值或其他原因而删除数据,对此提供信息和计算的支持;
- g) 试验的重复性。

7.6 结论

结论部分应给出最终的试验结果,以及与保证值的比较结论。

7.7 附录

附录部分宜给出不适合放在试验报告正文中的其他信息。包括但不只限于下面的信息:

- a) 原始数据表格和数据采集系统打印的原始数据的复印件;
- b) 用于试验结果计算的修正曲线的复印件;
- c) 试验期间的必要的运行数据;
- d) 阀门操作清单和其他表明所需试验配置和运行方式的文件的复印件;
- e) 实验室给出的测量仪表的校准报告和生产商的合格证书。

附录 A (资料性附录) 示踪技术

为了确定湿蒸汽的流量和湿度，并获得湿蒸汽焓值，推荐采用稀释法的示踪技术（见GB/T 8117.1和GB/T 8117.3）。

A.1 方法

采用稀释法的示踪技术主要有凝结法和恒量注入法。可采用放射性或非放射性示踪剂。

A.1.1 凝结法

溶解在湿蒸汽水相中的示踪剂浓度为 c_w ，当蒸汽全部凝结成水之后，凝结水中的示踪剂浓度为 c_{cnd} ，这两个浓度值之间的关系如下：

$$m_w \cdot c_w = m_{cnd} \cdot c_{cnd} \quad \text{..... (A.1)}$$

式中：

m_w —— 湿蒸汽中水相的流量；

m_{cnd} —— 湿蒸汽全部凝结成水的流量。

从试验测得凝结前后示踪剂的浓度，计算蒸汽湿度 W 公式如下：

$$W = \frac{m_w}{m_{cnd}} = \frac{c_{cnd}}{c_w} \quad \text{..... (A.2)}$$

蒸汽干度 (x)：

$$x = 1 - W \quad \text{..... (A.3)}$$

A.1.2 恒量注入法

将浓度为 c_{inj} 的水溶性示踪剂以一恒定的流量 m_{inj} 注入到需要测定湿度的湿蒸汽中。在注入点的下游经充分混合之后，测得湿蒸汽水相中的示踪剂浓度为 c_w ，示踪剂质量平衡公式如下：

$$m_w \cdot c_0 + m_{inj} \cdot c_{inj} = (m_w + m_{inj} + \Delta m_w) \cdot c_w \quad \text{..... (A.4)}$$

或

$$m_w = \frac{m_{inj} \cdot (c_{inj} - c_w) - \Delta m_w}{c_w - c_0} \quad \text{..... (A.5)}$$

式中：

m_w —— 取样点处湿蒸汽中水相的流量；

c_0 —— 在注入之前由于自然存在造成其在取样点处水相中示踪剂的初始浓度（背景浓度）；

Δm_w —— 湿蒸汽中水相的流量变化（因注入冷的示踪剂溶液而引起蒸汽的凝结）。

公式（A.4）的先决条件是示踪剂溶于水相中而不溶于汽相中。由于即使在注入截面的上游，水流中仍通常具有一定的示踪剂背景浓度，所以公式（A.5）中考虑了示踪剂背景浓度和湿蒸汽中水相的流量变化。

实际应用时，通常， $c_w \ll c_{inj}$ ， $c_0 \ll c_w$ ， $\Delta m_w \ll m_w$ 。

因而，公式 (A.5) 简化为：

$$m_w = m_{inj} \cdot \frac{c_{inj}}{c_w} \dots\dots\dots (A.6)$$

作为节流装置的替代流量测量装置，恒量注入示踪方法能用于单相水（液体）流量的精密测量。通过采用放射性示踪剂，能达到±0.2%的测量不确定度。经比较证实，示踪测量的结果与由校正过的节流装置所获得的结果非常吻合。

示踪剂通常是连续注入，每次试验前要用经过校准的孔板来测量其流量 m_{inj} 。孔板只应在校准范围内使用，因此， m_{inj} 的测量不确定度一般约为±0.1%。

A.2 确定扩容分离器入口湿蒸汽的湿度和焓值

扩容分离器入口湿蒸汽水相流量 m_w 采用恒量注入法测量确定。通过测量扩容分离器分离后水中的示踪浓度 c_L ，由示踪剂质量平衡计算出分离后水的流量 m_L ，则由扩容分离器的质量和能量平衡计算扩容分离器入口湿蒸汽的湿度和焓值。扩容分离器入口湿蒸汽的湿度和焓值测量计算示意图见图A.1。

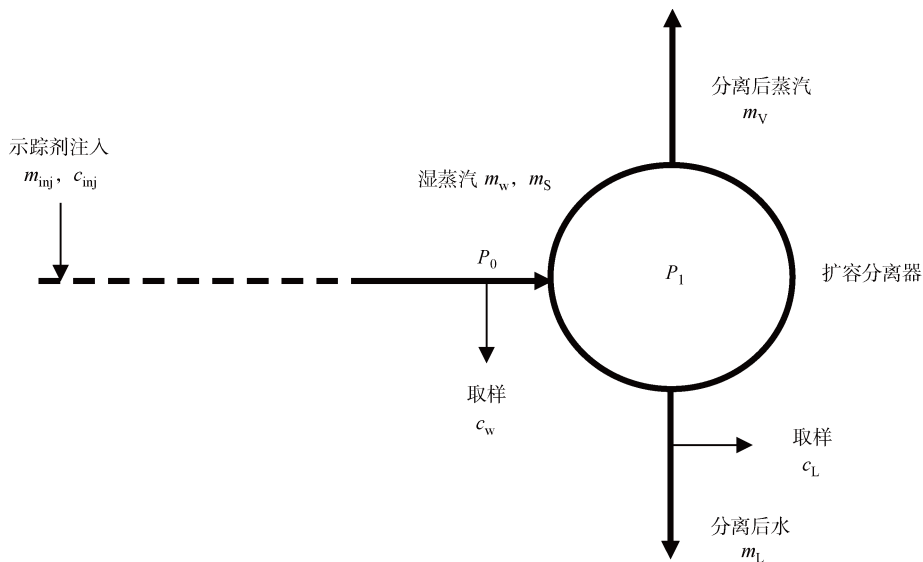


图 A.1 扩容分离器入口湿蒸汽的湿度和焓值测量计算示意图

根据扩容分离器示踪剂质量平衡，分离后水的流量公式：

$$m_L = m_w \cdot \frac{c_w}{c_L} \dots\dots\dots (A.7)$$

式中：

- m_w —— 扩容分离器入口处湿蒸汽中水相的流量；
- c_w —— 扩容分离器入口处湿蒸汽中水相的示踪剂浓度；
- m_L —— 扩容分离器分离后水的流量；
- c_L —— 扩容分离器分离后水的示踪剂浓度。

假设扩容分离器没有质量和能量损失，且汽水分离效率100%，根据质量平衡和能量平衡，列出以下公式：

$$m_w + m_s = m_L + m_v \dots\dots\dots (A.8)$$

$$m_w \cdot h_w + m_s \cdot h_s = m_L \cdot h_L + m_v \cdot h_v \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

式中：

m_s —— 扩容分离器入口处湿蒸汽中汽相的流量；

m_v —— 扩容分离器分离后蒸汽的流量；

h_w —— 扩容分离器入口处压力 P_0 下饱和水焓；

h_s —— 扩容分离器入口处压力 P_0 下干饱和蒸汽焓；

h_L —— 扩容分离器压力 P_1 下饱和水焓；

h_v —— 扩容分离器压力 P_1 下干饱和蒸汽焓。

根据式 (A.8) 和式 (A.9)，计算扩容分离器入口处湿蒸汽中汽相的流量，得到入口湿蒸汽的湿度和焓值。

A.3 确定凝汽式地热发电机组入口湿蒸汽的湿度和焓值

凝汽式地热发电机组入口湿蒸汽中水相流量 m_w 采用恒量注入法测量确定，见式 (A.6)。假设地热蒸汽经过地热发电机组没有泄漏损失，蒸汽全部经凝汽器凝结成水。由凝结法，通过测量凝汽器出口凝结水的示踪浓度 c_{cnd} ，计算出入口湿蒸汽的湿度，见式 (A.2)。凝汽式地热发电机组入口湿蒸汽的湿度和焓值测量计算示意图见图A.2。

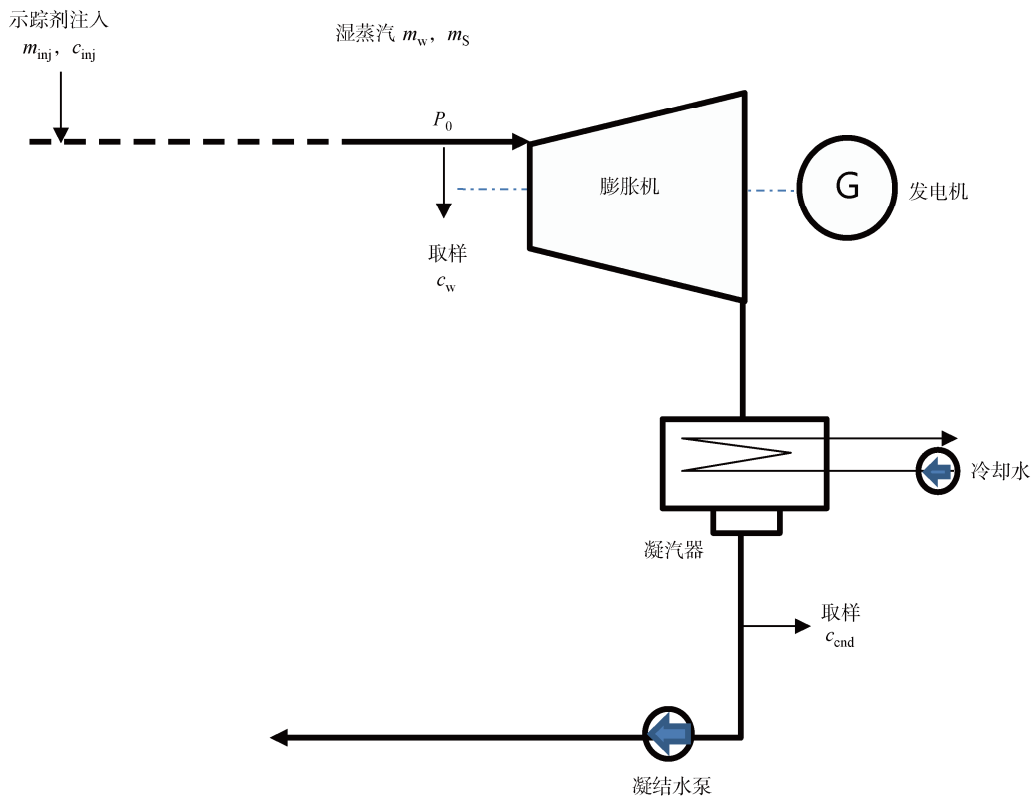


图 A.2 凝汽式地热发电机组入口湿蒸汽的湿度和焓值测量计算示意图

A.4 两个界面之间的蒸汽湿度关系

如果两个截面的蒸汽流速和压力不同，则蒸汽湿度也会有所差别。已知截面1处的蒸汽湿度，如果

忽略两个截面之间的散热损失，建立能量平衡，可得到截面2处的蒸汽湿度与截面1处的蒸汽湿度存在如下关系：

$$W_2 = \frac{1}{h_{w_2} - h_{s_2}} \left[W_1 \cdot (h_{w_1} - h_{s_1}) + h_{s_1} - h_{s_2} + \frac{1}{2} V_1^2 - \frac{1}{2} V_2^2 \right] \dots\dots\dots (A.10)$$

式中：

W_1 —— 截面1处的蒸汽湿度；

W_2 —— 截面2处的蒸汽湿度；

h_{w_1} ， h_{w_2} —— 截面1处、截面2处的饱和水比焓；

h_{s_1} ， h_{s_2} —— 截面1处、截面2处的干饱和蒸汽比焓；

V_1 、 V_2 —— 截面1处、截面2处的湿蒸汽流速。

A.5 不确定度

对于放射性和非放射性的示踪剂，流量测量的不确定度在0.2%~1.0%的范围内。中等测量准确度水平的测量装置（包括所有影响因素在内）不确定度能够达到0.5%~1.0%。随着费用的增加，测量不确定度可达到0.2%（参见GB/T 8117.3）。

因此，采用示踪剂技术测量流量，不确定度将与未校正的孔板相同或更好。

A.6 安装条件

示踪剂有放射性示踪剂和非放射性示踪剂。放射性示踪剂比非放射性示踪剂有更高溶解度的优点，即测量时需要极少量的示踪剂。而非放射性示踪剂不需要运输和装卸的管理授权。应根据各种特定情况决定使用哪一种类型的示踪剂。

示踪剂注入点可以在任何有小量水流存在的位置。而取样点，特别要求示踪剂与水要充分混合的位置，即管道截面上的浓度差不大于0.1%。充分混合的距离是雷诺数、管道阻力和注入类型（单壁注入、单中心注入和沿圆周的多点注入）的函数。对直管管壁单点注入和管道截面上的浓度差为0.1%时，充分混合距离的参考值如下：

对单相水（液体）流：150D~300D；

对汽水两相流：30D~80D。

注：D=管道内径。

所给范围基于不同雷诺数（影响较小）和不同的管道阻力的结果。管道布置情况诸如管弯头、阀门、泵等通常会大大减小所要求的混合距离。

如果即使考虑了管子的布置情况仍达不到充分混合距离，则可采用沿管道四周的多点注入来代替管壁单点注入的方式。

另一个保证示踪测量成功的关键是选择合适的取样速度，即：

——为了获得良好的测量准确度（试样和注入流量的瞬时对应），取样速度宜尽可能高。

——样品宜只从水中获取，且不应包含蒸汽（在两相流体的情况下）。这就确立了取样速度的上限。

根据测点情况，取样速度应调整到最高允许值。由于该值不能预先算出，故宜对每个测点及其连接点要进行验证测量。

然而，在取样点上不可能检出是否有蒸汽进入水中，因为取样管通过冷却器时蒸汽已凝结。如果

取自两相流体的样品仅包含液体，则不管取样速度是多少，其浓度将保持不变。如果样品开始混入蒸汽，则浓度将因蒸汽凝结而下降，曲线变成不连续，称之为“断点”。应确定两相流管道所有试样的断点。

A.7 示踪剂的应用

为了确定汽或水的流量，通常使用孔板或喷嘴进行测量。根据不确定度的要求，可对其进行校准或做成标准流量测量装置。然而，这些装置要求在试验之前已安装在循环系统中，并满足较高的安装条件。对于地热发电应用，特别是对于两相地热流体，使用孔板或喷嘴进行测量，不确定度经常不能满足，而应使用示踪技术来测量。

示踪技术适用于测量：

- a) 凝结水流量；
- b) 给水流量；
- c) 疏水流量；
- d) 喷水流量；
- e) 抽汽流量；
- f) 扩容分离器入口湿蒸汽的湿度和焓值；
- g) 地热发电机组入口湿蒸汽的湿度和焓值。

在要求高准确度的单相流管路中，推荐采用孔板/喷嘴和示踪剂技术的组合测量方式。
