

ICS 27.100

K 54

备案号: 22298-2007

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1078 — 2007

表面式凝汽器运行性能试验规程

Performance test code on steam surface condensers operation

2007-12-03 发布

2008-06-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言	....	....	.. II
1 范围			.. 1
2 规范性引用文件		....	.. 1
3 符号、单位和定义		....	.. 1
4 总则	.....		.. 3
5 测量方法和仪表			.. 7
6 结果计算			.. 15
7 试验报告			.. 23
附录 A (资料性附录) 检查清单及流程图			.. 27
附录 B (资料性附录) 性能监测			.. 31
附录 C (资料性附录) 表面式地热凝汽器		....	.. 33
附录 D (资料性附录) 气塞诊断		....	.. 34
附录 E (资料性附录) 抽气设备性能诊断			.. 36
附录 F (资料性附录) 冷却管清洁度诊断	....	....	.. 38
附录 G (资料性附录) 计算实例		....	.. 39
附录 H (资料性附录) 自动数据采集系统			.. 47
附录 I (资料性附录) 凝汽器压力不确定度分析			.. 48
附录 J (资料性附录) 海水物理性质			.. 53

前 言

本标准是根据《国家发展改革委办公厅关于印发 2007 年行业标准修订、制定计划的通知》（发改办工业〔2007〕1415 号文）的要求制定的。

凝汽器是火力发电厂凝汽式机组的关键设备，其性能直接影响机组的热经济性。为了规范凝汽器的性能考核、验收程序，提高凝汽器的性能诊断水平，使试验结果具有国际一致性，科学、公正、合理地检验凝汽器的设计、制造质量，发现运行中存在的缺陷，采取有效措施提高凝汽器运行性能，特制定本标准。

本标准的编制参考美国机械工程师协会标准 ASME PTC12.2—1998《Performance Test Code on Steam Surface Condensers》。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E、附录 F、附录 G、附录 H、附录 I、附录 J 均为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电站汽轮机标准化技术委员会归口并解释。

本标准起草单位：西安热工研究院有限公司。

本标准主要起草人：于新颖、赵毅、杨寿敏、马汀山、居文平。

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中心（北京市白广路二条一号，100761）。

表面式凝汽器运行性能试验规程

1 范围

本标准规定了表面式凝汽器性能试验的仪表选用、试验程序和试验数据处理等的基本原则和要求。

本标准适用于水冷表面式凝汽器的性能试验，不适用高于大气压力下运行的凝汽器和空冷凝汽器的性能试验。

2 规范性引用文件

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

GB/T 8117 电站汽轮机热力性能验收试验规程

GB/T 13930 水环真空泵和水环压缩机气量测定方法

3 符号、单位和定义

3.1 性能参数符号

除了标准中另有定义外，通常采用下列符号和单位。性能参数符号及定义见表 1。

表 1 性能参数符号及定义

符号	名称	说 明	单位
A	凝汽器面积	凝汽器中所有冷却管的有效外表面积，如果使用外部空气冷却器，也应计入，有效面积不包括试验时堵去的管子面积	m^2
c_f	清洁度	在相同运行条件下，旧管与新管或者清洁管（近乎新管）传热系数的比值	
c_p	比定压热容	在试验期间测定的平均温度和含盐量情况下的冷却水比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D	管子直径	冷却管直径	m
DO	溶解氧浓度	凝结水中的溶解氧量	$\mu\text{g/L}$
F	荧光	测量溶液中示踪剂的浓度，用于确定大直径管道中的流速	
g	重力加速度	在努塞尔方程中用到的常数	m/s^2
h	表面传热系数	单位时间、单位表面积、单位温差的传热量，是凝汽器性能的主要测量参数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
ΔH	压差	流量孔板两侧的压力差	kPa
j	变量		
λ	热导率	材料单位长度的传热量	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
L	长度	冷却管长度	m
LMTD	对数平均温差	凝汽器中蒸汽与冷却水间的计算对数平均温差（见第 6 章）	$^{\circ}\text{C}$
Ln	自然对数		

表 1 (续)

符号	名称	说 明	单位
m	分子量		
N	管数	冷却管数量	个
NTU	传热单元数		
n	流程数	冷却水通过凝汽器的流程数	
p	压力	流体绝对压力	kPa
Pr	普朗特数	动量扩散系数与热扩散系数之比	
Δp	压降	流体中两点间因摩擦产生的压力损失	kPa
Q	凝汽器热负荷	从蒸汽传给冷却水的热量，在凝汽器试验中通常被视为独立变量	W
SCFM	空气漏入量	在抽气系统的排气口测得漏入凝汽器的空气量（转换为标准状况 101.325kPa, 20℃）	m ³ /s
Re	雷诺数	单位容积流体的惯性力与黏性力之比	
R	热阻	传热阻力	m ² ·K/W
T	温度	冷却水、蒸汽或凝结水的温度	℃
ΔT	温差	流体中两点间的温度差	℃
U	传热系数	单位时间、单位表面积、单位温差的传热量，是凝汽器性能的主要测量参数	W/(m ² ·K)
v	冷却水流速	冷却水的平均流速，多流程凝汽器中每个流程的冷却管数量不同，流速取各流程的平均流速	m/s
w	冷却水流量	单位时间流过凝汽器的冷却水量	kg/s
W_s	蒸汽流量	单位时间进入凝汽器的蒸汽量	kg/s
μ	动力黏度	流体内部黏性剪力的强度	kg/(m·s)
ρ	密度	流体或者固体的质量与容积之比	kg/m ³

3.2 下标

性能参数符号下标及定义见表 2。

表 2 性能参数符号下标及定义

符 号	名 称	符 号	名 称	符 号	名 称	符 号	名 称
B	容积、体积	i	管子内侧	s	壳体或蒸汽	1	进口
c	清洁	m	金属	sat	饱和状态	2	出口
DO	溶解氧	o	管子外侧	T	全部	3	凝结水
F	液膜	x	低压段	v	水蒸气		
f	脏污	y	中压段	w	管壁		
G	不凝结气体	z	高压段				

3.3 上标

性能参数符号上标及定义见表 3。

表 3 性能参数符号上标及定义

符 号	说 明
*	设计工况的测量值或者计算值
+	试验工况的测量值或者计算值
0	修正到设计工况的试验值

3.4 不确定度分析符号

性能参数不确定度符号及定义见表 4。

表 4 性能参数不确定度符号及定义

符 号	说 明
Un_{p_s}	在 95%置信度下，凝汽器修正压力的总不确定度
$Un_{\Delta p_w}$	在 95%置信度下，凝汽器修正水阻的总不确定度
B_j	参数 j 的误差范围部分
F	灵敏系数方程的递归子集偏导数
S_j	参数 j 的精度指数部分
t_ν	在自由度 ν 和 95%置信度下， t 分布参数，见表 7
ν_j	参数 j 的自由度，用于计算精度指数
θ_j	参数 j 的灵敏系数

4 总则

4.1 试验约定

试验前，试验各方应对试验的技术要求进行讨论，并达成协议。当合同包括凝汽器和电厂其他主要设备，或者凝汽器合同包括影响凝汽器性能的辅助设备时，各方应商定分别进行试验，还是作为一个系统进行试验。

如果分别进行试验，每台设备的检查和试验应按照相应的标准执行，若无相应的标准，在试验之前，试验各方应对试验方法达成一致。如果使用了本标准未涵盖的试验方法，试验各方应事先达成一致，并在试验报告中详细说明。

应制订详细的试验大纲，大纲应按本标准 4.3 列出的原则和建议编写，以便减少试验操作、通信、程序执行和试验进度的不一致性。试验大纲的一些要素，如试验程序流程图和检查清单等参见附录 A。

4.2 不确定度要求

本标准对凝汽器性能参数的要求如下：

- a) 凝汽器压力的不确定度为±0.4kPa；
- b) 凝结水过冷度的不确定度为±0.1℃；
- c) 凝结水溶解氧浓度的不确定度为±1.0μg/L；
- d) 凝汽器水阻的不确定度为±2%。

在验收试验中，使用本标准推荐的程序和仪表，凝汽器压力的结果不确定度小于 0.34kPa，应进行试验后的不确定度分析。由于试验方法和仪表的不同，应按照 6.4 条的程序详细分析常规传热性能试验的不确定度，当结果不确定度小于 0.4kPa 时，认定试验为规程试验。其他性能参数的不确定度可以更直接地测量。

4.3 试验大纲

4.3.1 试验大纲说明

试验大纲应涵盖所有可能引起争议的条款，以符合试验各方事先的约定，为此，应给出书面文件详细说明试验大纲，明确试验各方责任，给出的书面文件用以指导试验结果的处理和说明。

4.3.2 范围和目的

本标准的实施将根据地点、环境、设备和各方达成的协议而变化，现场试验的范围和目的在达成一致意见后成为试验大纲的一部分，试验大纲中应明确试验负责人，并训练所有试验人员，试验负责人应具有负责此类试验所具备的知识和经验。

4.3.3 运行要求

试验大纲应包括凝汽器和影响其性能的辅助系统的运行技术要求。具体包括操作要求、性能参数清单、试验工况的运行方式、系统隔离要求、与规程要求的偏差及其产生的原因以及可能影响凝结设备运行和性能的所有其他条款（见表 5）。

表 5 规定试验工况的允许偏差

试验参数	规定试验工况下的偏差	工况稳定性要求
冷却水进口温度	$\pm 5.6^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.1^{\circ}\text{C}$
凝汽器热负荷	$\pm 5\%$	$\pm 2\%$
冷却水流量	$\pm 5\%$	$\pm 2\%$

4.3.4 验收标准

验收标准包括试验验收标准的说明和所有合同保证值的描述，建议本部分涵盖试验前的不确定度分析，未涉及或未达成一致的条款也将在此予以说明。

4.3.5 仪表清单

仪表清单包括所有测试参数、使用仪表、精度要求、校验范围、安装位置和预期值，这将有助于澄清在仪表选择过程中产生的误解，并为仪表诊断提供帮助（参见附录 A）。

4.3.6 检查清单

为了试验的顺利实施和管理，有必要建立一个按时间排序、将试验程序清楚描述的检查清单，检查清单应向使用者提供足够的信息，使其了解如何准备、操作和管理试验。仔细选择信息量，因为这一部分不涉及替代或扩充试验大纲的其他部分（参见附录 A）。

4.3.7 试验流程

试验流程图要突出本部分的所有重要事件，以便使用者准备、组织和实施试验（参见附录 A）。

4.4 试验进度

本标准不限制安装后进行验收试验的时间，因为试验所要求的冷却水进口温度仅在一年中的一定时间内满足条件，一旦达到要求的试验工况，验收试验便可进行。必须注意非设计或制造原因造成的凝汽器性能降低，如正常磨损、非正常运行或不合适的保养程序。

4.5 允许偏差

在冷却水进口温度、凝汽器热负荷和冷却水流量满足表 5 规定的偏差范围时进行试验。

4.6 运行方式

试验中凝汽器和汽轮机的常规操作方法应在协议中明确，包括稳定的主蒸汽参数、汽轮机的输出功率和冷却水流量。

4.7 试验准备

试验前，试验各方应亲自检查并熟悉与凝汽器连接的相关设备及管道，使用的仪表、仪表的校验及检查所采用的方法也应在试验前达成一致，试验各方应保证凝汽器在要求的工况下进行试验。

4.8 系统隔离

试验前, 试验各方对进、出系统的流体的测量方法应达成一致意见, 任何相关的回路, 包括影响试验结果的补水均应隔离。

4.9 不凝结气体

额外的空气漏入凝汽器会降低凝汽器性能和增大凝结水溶解氧浓度, 虽然在凝汽器传热能力计算时抽空气量没有直接计算在内, 但是空气漏入量必须在表 6 列出的限制范围内, 这将保证凝汽器的性能不被削弱以及凝结水溶解氧浓度不超标。性能试验前, 必须测量抽空气量, 以确保满足表 6 的要求, 漏空气量的测量方法应参考 GB/T 13930 的有关章节。性能试验前, 必须确定所有抽空气设备运行正常。

表 6 不凝结气体量 (空气漏入) 上限

凝汽器壳体数	进入凝汽器的排汽量 kg/s	不凝结气体量 $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
1	<12.6	0.472
	12.6~31.5	0.944
	31.5~63	1.180
	63~126	1.416
	126~252	1.770
	252~378	2.124
	378~504	2.360
2	25.2~63	1.652
	63~126	1.888
	126~252	2.832
	252~504	3.540
	504~756	4.012
	756~1008	4.720
3	94.5~378	3.540
	378~756	4.248
	756~1134	5.191
	1134~1512	6.135

4.10 管侧堵塞

表面式凝汽器进口水室的管板上常聚集异物, 甚至在冷却水经过充分过滤后也可能发生, 异物聚集导致一些冷却管完全或部分堵塞, 减少了凝汽器的有效冷却面积。建议在试验前后对管板清洁状况进行检查。

4.11 管侧污垢

试验前, 对冷却管进行充分清洗。管侧污垢的定量影响的确定方法见第 5 章。

4.12 溶解氧

4.12.1 补充水

凝汽器的补充水温度通常低于排汽温度, 其补充水总量为: 在凝结水溶解氧浓度为 $14 \mu\text{g/L}$ 时, 补充水量不大于 5% 的凝结水量; 在凝结水溶解氧浓度为 $7 \mu\text{g/L}$ 时, 补充水量不大于 3% 的凝结水量。当连续补水时, 应特殊考虑, 这种情况下凝结水溶解氧浓度的测量比较困难。

4.12.2 采样方法

如果采样位置或分析方法不同于 5.3.9 时, 试验各方应就采样位置或分析方法达成统一。

4.13 预备性试验

预备性试验的目的:

- a) 检查仪表;
- b) 培训试验人员;
- c) 对试验大纲或者试验准备过程中不明确之处进行适当调整;
- d) 检查设备隔离的情况;
- e) 确定参数在表 5 规定的偏差范围内变化。

如果预备性试验完全满足本标准的要求,而且试验各方认可,则预备性试验可以作为验收试验的一个工况。

4.14 试验工况稳定性

对于可能影响试验结果的所有参数,在试验前和试验中要尽可能保持稳定。在机组达到稳定状态之后,正式记录数据之前,应在短时间内观测和记录所有参数(见表 5)。

如果试验数据产生严重矛盾,则该工况的测量结果应全部废弃或部分废弃,为了达到试验目的,有必要重新试验。

4.15 试验持续时间

达到稳定状态之后,每个试验工况的数据采集时间通常为 1h,读数间隔不超过 5min,重要参数的采集次数不低于 13 次。

4.16 试验顺序

每一个试验工况按预先制订的试验大纲进行,进度表应提供足够的时间以保证各试验工况之间稳定条件的调整。

4.17 试验内容

4.17.1 试验要求

本标准规定了四种类型试验的概述,包括凝汽器规程试验遵循的常规程序,以及每一种试验所要求的测量参数。相关内容见第 5 章。

四种类型的试验:

- a) 传热试验;
- b) 溶解氧浓度试验;
- c) 凝结水过冷度试验;
- d) 凝汽器水阻试验。

符合本标准的凝汽器试验可以由上述全部或部分试验构成。对于非本标准的试验项目,但是有利于性能诊断的其他辅助试验,参见附录 B~附录 F。

凝汽器性能试验前,试验各方应同意:

- a) 4.3 所明确的试验大纲;
- b) 电厂运行工况,包括电厂负荷和冷却水流量在试验过程中必须保持稳定;
- c) 凝汽器的隔离(见 4.8),这一点对保证凝汽器在设计流量下运行非常重要;
- d) 试验在设计冷却水进口温度下进行,这一点将限制试验只能在一年中的特定时间内完成;
- e) 本章中明确的其他运行原则;
- f) 所用的其他设备、安装位置和测量方法,按第 5 章有关规定执行。

4.17.2 传热试验

传热试验的目的是为了确定凝汽器在试验、设计、合同保证和其他规定工况下的总体传热系数,根据总体传热系数,可以确定在设计或其他工况下的凝汽器压力。

通常不能完全在设计、合同保证或其他规定工况下进行试验。假如与额定工况的偏差在表 5 规定的范围内,凝汽器的传热试验方可进行。在这种情况下,采用第 6 章的程序将试验结果修正到设计工况,

这些修正用以确定在设计、合同保证和规定工况下维持凝汽器额定压力的能力。对于规程试验，要求进行完全修正，因而参数应认真测量。确定了冷却水流量、冷却水温升和凝汽器热负荷中的任意两项即可计算出第三项。这样将满足设备完全热平衡计算的要求，最终作为计算总体传热系数的基础。

第 6 章的修正方法以传热设备的合理运行为基础，采用对数平均温差方法确定总体传热系数，因此传热试验应测量以下参数：

- a) 凝汽器压力。凝汽器压力是设计和合同保证值的重要参数，也是一个关键的测量值，确定总体传热系数的壳侧饱和温度取决于凝汽器压力，5.3.1 列出了认可的凝汽器压力测量仪表。
- b) 冷却水进、出口温度。用冷却水进、出口温度来确定凝汽器总体传热系数，由于冷却水进口温度在凝汽器设计或合同保证条款中已明确规定，所以试验中冷却水进口温度满足 4.4 和 4.14 的有关规定是非常重要的。因为冷却水出口经常出现温度分层现象，所以测量出口温度时需特别注意。在确定出口温度的最佳测量方法之前，应认真考虑 5.3.3 的要求和凝汽器的物理特性。
- c) 冷却水流量。测量冷却水流量用于几个方面的分析。除非按 GB/T 8117 同时进行了汽轮机性能试验，否则冷却水流量以及进、出口温度的测量是确定凝汽器热负荷的首选方法，再根据热负荷确定总体传热系数。5.3.4 给出了几种确定冷却水流量的方法，在全面考虑了某种方法的要求和试验装置特性之后，再选择合适的流量测量方法。选择一个适当的测量凝汽器冷却水流量的方法是非常重要的。热负荷也可以由全面蒸汽循环的能量平衡来确定，与按照 GB/T 8117 规定进行的汽轮机全面试验同时完成，在这种情况下，计算热负荷可以不要求冷却水流量。冷却水流量也是凝汽器设计或合同保证值，它必须保持在表 5 规定的偏差内。
- d) 凝汽器清洁度。利用清洁度将测量结果修正到设计或合同保证工况下，5.3.12 描述了确定清洁度的方法，它是以计算管组中的清洁管和原样的脏污管的相对传热系数为基础的。

4.17.3 溶解氧浓度试验

凝结水溶解氧浓度是凝汽器验收的保证值，5.3.9 给出了确定溶解氧浓度的试验方法，一般希望溶解氧浓度试验与传热试验同时进行，以保证满足所有的运行要求。

试验中，合理运行抽气设备使漏入空气量维持在可接受的范围内是特别重要的，机组排汽量与不凝气体的关系见 4.9，关于抽气设备运行评估的详细指导参见附录 E。

4.17.4 凝结水过冷度试验

凝结水过冷度是凝结水温度低于凝汽器压力下对应饱和温度的差值。如果过冷度是凝汽器的设计值、合同保证值或影响整体性能计算，则必须测量，采用 5.3.10 所述的方法确定凝结水温度，并与传热试验同时进行。

4.17.5 凝汽器水阻试验

为了确保循环水泵系统的性能，凝汽器水阻应在设计范围内。凝汽器水阻是冷却水进口法兰到冷却水出口法兰间的差值，建议在传热试验的同时测量凝汽器水阻，测量方法见 5.3.8，按照第 6 章给出的程序把实际流量下的凝汽器水阻修正到额定流量。

5 测量方法和仪表

5.1 基本要求

本章描述了凝汽器性能试验规程要求的仪表及其使用方法。如果这些仪表和技术不能完全满足凝汽器的所有试验项目，可根据第 4 章所述的程序确定仪表和测量方法。

在选择、加工、安装、校验和操作仪表前，应认真阅读本标准的相关内容和要求。

选择合适的测量方法，其标准是每个测量参数都达到要求的精度。本标准不排除此处未作介绍的其他先进测量技术和方法的使用，要求这个方法也能达到 4.2 的精度要求，参见附录 G。

自动数据采集系统的技术要求参见附录 H。

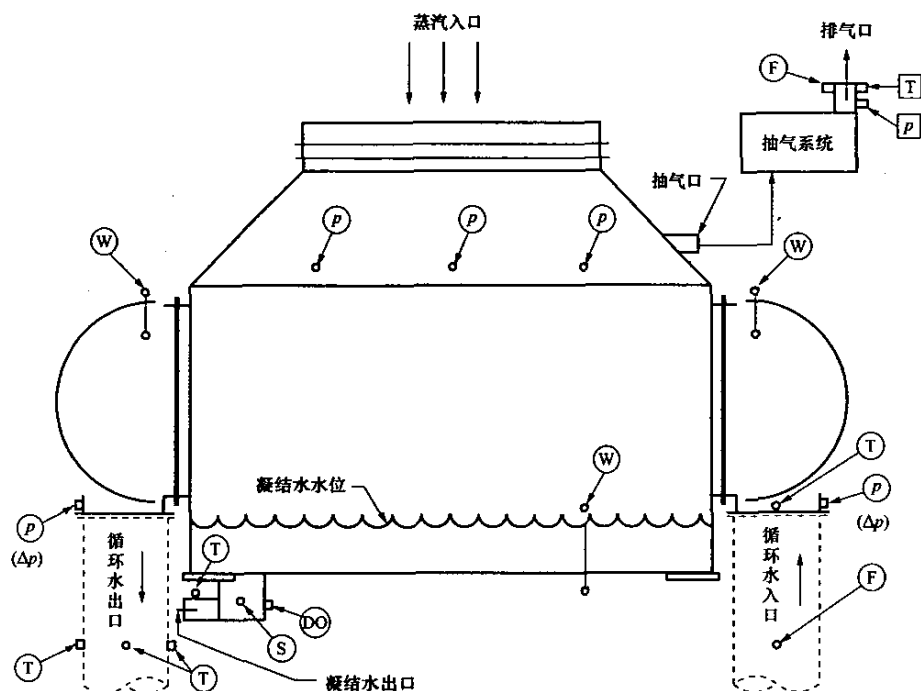
凝汽器试验准备工作要结合凝汽器相关设备的设计、安装情况进行，对已有的系统进行改装来满足

所要求的测量可能费用很高，而且时间长，甚至不可能实现。

5.2 测点位置

5.2.1 单压表面式凝汽器

图1所示为凝汽器的测点位置，用以获得单流程、单压表面式凝汽器所要求的性能数据，综合考虑凝汽器的内部设计和外部管路的布置，实际测点位置由试验各方确定。在凝汽器内部带有元件的测点，如网笼探头和热电偶套管，它们的布置应避开凝汽器的内部支撑结构和部件。如果水室内部表面有保护层或衬里，则所有水室内试验元件的连接应在工厂安装完成，现场安装试验元件时要对保护层和衬里进行现场修复。



F—流量测点；T—温度测点；○—性能试验接头；W—水位测点；
DO—溶解氧测点；□—辅助试验接头；p—压力测点；S—盐度测点

图1 凝汽器试验测点图

5.2.2 多压表面式凝汽器

多流程和多压表面式凝汽器的性能试验测点及位置见图1，但需要考虑以下几点：

- 单壳多压凝汽器要求在各凝结区的各冷却管束上方增加压力测点，每一个凝结区的性能可以按照5.3.3测量最终出水温度，并根据第5章所述的各区温升比例来准确评价。
- 多壳多压凝汽器还要求在多压凝汽器各壳体的冷却水进口、出口增加压力和温度测点，在多压凝汽器壳体之间不长的冷却水连接管内其水温可能存在分层，因此应按照5.3.2给出的方法测量中压或高压壳体的冷却水进口温度的平均值。

5.2.3 双流程表面式凝汽器

测点布置与单压凝汽器基本相同，但为了确定第二个流程管束的污垢，要求测量返回水室的冷却水进口温度。

5.3 测量项目和仪表

5.3.1 凝汽器压力

5.3.1.1 测量位置

在每一组管束上方0.3m~0.9m的位置测量凝汽器压力。管束应被认为是与单个进口水室相连的所

有管子。对于多壳多压凝汽器，各壳体中的每组管束至少有三个测点。对于单壳多压凝汽器，各压力室中的每组管束至少有两个压力测点。如果一组管束安装在其他管束的上部，则只需对最上部的管束设置测点。每一组管束要求三个测点时，将按管束长度的四分之一作为间隔布置测点（如图 1 所示）；每一组管束要求两个测点时，将按管束长度的三分之一作为间隔布置测点。不论哪一种情况，测点的横向位置应靠近管束横向的实际中点位置，测点所在区域应注意避开由于凝汽器喉部干扰形成的高速汽流区或局部分离区的影响。

5.3.1.2 一次传压元件

对于壁面平行于汽流方向的排汽通道，壁面取压孔可以布置在排汽通道内，其分布应遵循前面给出的按长度分布的原则。壁面取压孔应符合压力测量的要求，特别注意确保取压口附近的流体不被干扰，且取压口光滑和无毛刺。

在不适宜采用壁面取压孔的情况下，可根据 5.3.1.1 的原则，在排汽通道内部安装网笼探头或导流板。网笼探头的结构如图 2 所示，安装角度为与汽流方向成 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。导流板的结构如图 3 所示，它将引导汽流平行于导流板流动，传压管要符合压力测量的基本要求，确保所有管件和连接无泄漏，而且管路要尽可能按最短的实际路线连接，从一次传感元件到测压装置的传压管要连续向上倾斜。传压管通气设施应能排除管道内的积水，安装表计应免受过大的振动。

每一个压力测点都可连接专门的压力测量装置，也可用总管将一个单独的测量装置连接到多个测点上。应保证各测点到总管间的真空严密性，并且排除积水。总管不能同时将几个压力测点连接到一个测压装置上测得平均压力读数。

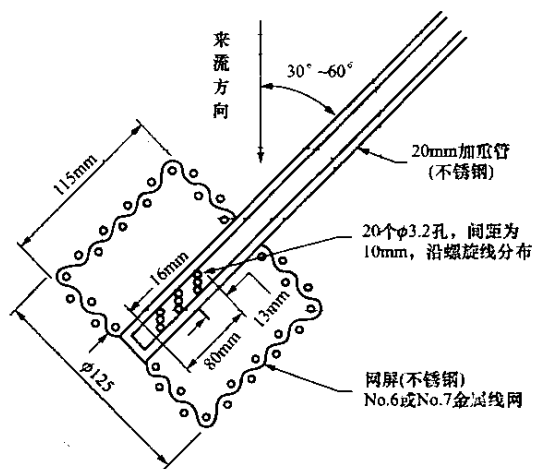


图 2 网笼探头

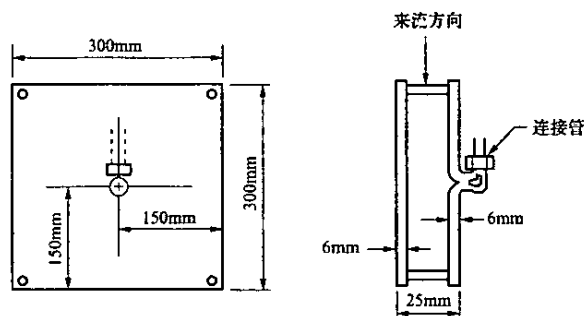


图 3 导流板静压测针

5.3.1.3 压力测量

压力测量的最大不确定度为 $\pm 0.34\text{kPa}$ ，宜使用 0.1 精度等级的绝压变送器。

5.3.2 冷却水进口温度

5.3.2.1 测点位置

凝汽器冷却水进口的均匀性一般良好，因此在每一根冷却水进口管上通常只需要一个测温元件。测量位置关系到冷却水的充分混合，多点测量时应遵循 5.3.3 所述的程序。可以将测温装置直接插入流体中进行测量，或者从热电偶套管中测量，套管至少插入流体 0.15m 的深度（管径小于 0.3m 时套管插入深度不超过管子中心）。如果用套管，套管必须清洁，且套管内充注导热性能稳定的液体，如乙二醇，以减少与环境的热交换。

如果采用单点测量，可以选择在进口管或进口水室。

5.3.2.2 仪表

应使用精度等级至少为 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 的标准表计来校验进口温度测量元件，能够达到要求精度等级的几种仪表都适合凝汽器试验，如电阻温度计、热电偶、热敏电阻和玻璃液柱温度计等。

如果使用玻璃液柱温度计，应是带刻度杆全浸入型。温度计必须能清楚地读到 0.05°C ，温度计应与其他热源隔绝。试验前后都应检查温度计，并确认其处于良好的物理状态。

在通常的冷却水温度范围内建议使用 E 形热电偶，从测量端到热电偶读出端必须用连续导线连接。以避免由于接点处发热导致电动势引起的误差。

推荐使用 100Ω 的铂电阻温度计，在 0°C 以下具有大于 1000Ω 额定阻抗的任何热敏电阻均可使用，对于电阻温度计和热敏电阻，可以任选三线制或四线制测量。尽管三线制也可以满足测量精度，但是推荐使用四线制。如果采用三线制，所有的电阻温度计应用连续导线连接到测量装置上，以避免接触阻抗引起的误差。四线制或热敏电阻不存在这一要求。

5.3.2.3 校验

所有的温度测量元件都应根据相关可溯源标准校验到 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之内，如果使用热电偶或三线制电阻温度计，导线应校验，在预期的温度范围内至少应取五个校验点。

5.3.3 冷却水出口温度

由于管束传热的不均匀引起冷却水出口温度分布的不均匀，所以出口温度的测量相对进口温度困难得多。

如果可能，在远离凝汽器的下游位置测量冷却水的出口温度，因为在那里冷却水能充分混合、温度均匀。测点位置应满足以下条件：试验机组流出的冷却水没有与其他流量混合，从出水管到环境中的散热损失小于凝汽器热负荷的 0.2%，确定冷却水出口温度不存在分层现象。在一个垂直截面至少有五个温度测点，并保证其温度差小于 0.1°C 或小于凝汽器进出口平均温升的 1%。试验中测量温度可以采取将传感器直接插入流体或如 5.3.2 所述的用热电偶套管的方式进行测量。

如果不能找到一个可以接受的、混合充分的下游位置，那么可以根据每一个出口管上合适的温度测量点的分布来确定。如果测量栅格最少由 6 个点但不超过 18 个测点组成，则每 0.139m^2 的管道通流面积上应有一个温度测点。这些点应位于等面积的中心，最后以相等权重求得算术平均值。对于圆形管道，测量应沿着最少 3 个直径方向，并且直径等间隔交叉，且在同心圆周上，并符合等面积要求。对于矩形管道，可以采用任何适当的等面积位置排列。

5.3.4 冷却水流量

直接测量冷却水流量以分析凝汽器水阻、计算冷却水流速和确定凝汽器热负荷。在大型电站凝汽器冷却水系统常用的大管道中，下列冷却水流量的测量方法满足本标准的要求，按标准测量时可以达到 $\pm 1\% \sim \pm 2\%$ 的不确定度：

- a) 流速法；
- b) 示踪稀释法；

- c) 差压法;
- d) 超声波法;
- e) 能量平衡法。

本章列出了应用这些方法测量冷却水流量的注意事项，冷却水流量的测量应和传热试验同时进行。

5.3.4.1 测速法

测速法适用于测量大管道中的流量，在大管道中传感器的尺寸不影响被测流量。可以使用满足精度要求的所有测速仪，但建议使用 Fechheimer 和 Keil 皮托静压型传感器以及插入型的光纤激光多普勒测速仪 (LDV)。如果使用 Fechheimer 传感器，建议使用有方向传感能力的探针来测定局部的流量角，流量角也是冷却水流速的决定因素之一。如果使用 LDV，它必须是可定向的，用来测定轴向速度分量。

在试验前后，必须按标准检查和校验皮托静压型传感器和除 LDV 外的其他测速仪，使它们的不确定度在±1%范围内。试验后，若经过检查发现传感器没有任何的损坏，则不再校验。如果试验前和试验后的校验偏差超过 1%，则必须分析原因。校验应覆盖预期测量速度下的雷诺数（基于探针直径）。对于一个 LDV 传感器，在试验前后应按标准来校验 LDV 的电子处理设备。

皮托静压型测量设备的差压测量装置在试验前后必须校验，要求精度至少在最大允许差压的±0.25%范围之内。只要能满足规定的精度要求，机械量具、压力计和电子差压传感器都可以使用。

在试验中应该定期检查速度探针是否完好。如果损坏，则在上次检查后测量的所有数据都必须用另一校验过的探针重新测量。基于这个原因，建议在试验中准备至少两个校验过的探针。

在特定的流动情况下，速度探针可能产生振动。除 LDV 外的其他测速仪如果发现这样的振动，应排除振动的起因，并且在严重振动时测得的数据应视为无效。探针振动表现为：探针轻微移动时探针裸露部分的物理振动和间歇性压力脉动振动急剧增加。

测量位置要求，在测点上游和下游有足够的直管段（上游 10D，下游 5D，D 为被测管道外径）。测量截面的分布点是在至少 3 个间隔交叉的直径上。点的位置应遵循加权概念，每个直径上至少有 10 个测点。图 4 给出了一个可行的断面测点的例子。

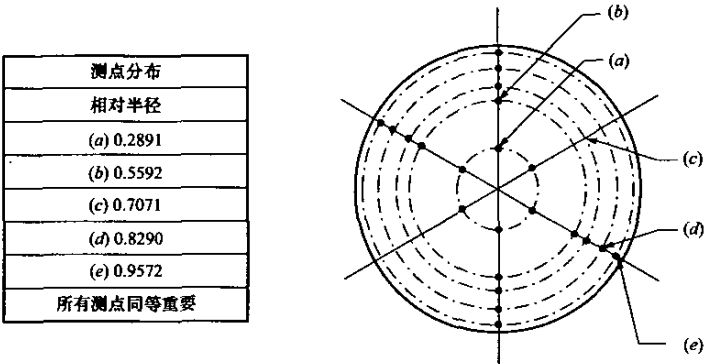


图 4 推荐的速度测定位置

5.3.4.2 示踪稀释法

示踪稀释法适用于测定大管道中的流量。如果采用这种方法，则试验各方应在执行的细节上达成一致的意见，给出遵循的准则。

对示踪剂的主要要求是在有机物和无机物的内表面具有最小的吸附能力。任何染料只要守恒（不被吸附和无其他机械损耗）就可以使用，这项技术最近常采用若丹明 WT 荧光染料作为示踪剂。利用标准化的精密荧光计来测量染料的浓度。

被测流体不应含有任何浓度的化学试剂和淤泥，因为化学试剂和淤泥会影响示踪剂的识别。在试验前，应停止采样点之前对水的化学处理。在闭式冷却水系统中，长时间没有清洗的冷却水系统应进行化

学清洗，因为氯对若丹明染料有影响。

为了准确测量流量，示踪剂和冷却水必须完全混合。在通常情况下，虽然存在如泵、弯管、阀门和喷嘴等引起的流动扰动有助于混合，但是在示踪剂注入点和采样点之间至少仍有 100 倍的管子直径的距离。试验前，对在采样断面沿同一直径的 9 个等间隔的采样点分别取样，检验各点的浓度是否相同，允许 $\pm 1\%$ 的误差，以此来判断采样断面的示踪剂和冷却水是否完全混合。这应在凝汽器试验的冷却水流量的 $\pm 25\%$ 偏差范围之内检验。

只要能确保注入的染料在采样点上像上述那样完全混合，则可以通过汇流管或一个单独的注入点来注入染料。

在采集确定流量的数据之前，染料浓度应恒定。因此，在采样断面必须对示踪物浓度连续不断地监测。

试验时必须注意确保在染料注入点和采样点之间没有外来流量的进入和内部流量的漏出，因为即使小流量的流入或流出也无法计量这部分流量，从而导致较大的测量误差，但在染料完全混合点和采样点之间的流量流出并不会影响流量的测量结果。

必须预防注入的染料回流到注入点。对于不稳定流动，如有潮水变化的海湾，在试验之前，必须测量以确认不存在染料的回流。在闭式冷却水循环中，也应确认试验前注入的所有染料完全混合，并完全溶于冷却水系统中。通常，完全的混合大约需要 5 个循环周期（循环周期是指冷却水系统中冷却水的总容积除以冷却水流量）。

示踪剂的注入位置和采样位置可以同时于凝汽器的冷却水入口侧和出口侧。在这种情况下，连续采样或者定时采样也是可行的。如果注入点和采样点分别在凝汽器的两侧，要特别注意对受温度影响的浓度进行修正。对于定时采样，首选的方法是在分析之前，把定时采集的样品放置在常温下；对于连续采样，可以测量注入点和采样点处的温度，把仪表指示值修正到常温条件下来完成温度补偿。对若丹明 WT 染料，可以按照式（1）进行温度修正：

$$F_s = F e^{-0.0486(T_s - T)} \quad (1)$$

式中：

F_s ——标准温度 T_s 下的荧光；

F ——在温度 T 下测得的荧光。

试验前后，示踪剂的注入仪表必须用注入流量进行校验，注入率的不确定度在 $\pm 0.5\%$ 的范围内。

试验前后，荧光计（或者其他浓度测量仪表）必须校验，校验至少要使用 3 种标准浓度溶液，仪表的不确定度不能超过 $\pm 1\%$ 。

建议在试验中，定期校验示踪剂注入器和荧光计，以确保数据精度。

5.3.4.3 差压法

符合本标准要求的差压装置有节流孔板和流量喷嘴等。差压法常用于小型凝汽器的流量测量，即冷却水入口管道的直径小于 0.91m 的凝汽器。

差压装置应按照其技术要求进行安装，特别是上游和下游的管长、流量元件的构造和安装以及测压管分接头的位置和安装。在试验前后，流量元件和其上游的任何流量调节设备必须作为一个整体进行校验，不确定度在 $\pm 1\%$ 的范围之内。试验后检查发现，没有任何损坏和不存在任何可能影响流量测量精度的沉积物，则试验后可以不再进行校验。如果试验前后的校验发现其精度偏差超过 1%，则应仔细分析其原因。

5.3.4.4 超声波法

在所有的管道中，特别是大管道，流量测量可以采用多通道超声波测量法。对所有规格的管子，至少可以给出四个等价的测量方式。要求在测点上游和下游有足够的直管段（上游 10D，下游 3D，D 为被测管道外径），试验前后，必须在零流量的条件下检查测量仪表，以确保合适和准确的测量。

因为冷却水中的淤泥和其他微粒或气泡的出现对超声波方法测量有不利影响，所以在测量系统安装

之前必须确保水源足够清洁。

因为超声波测量系统的安装比较困难和昂贵，建议在冷却水系统的设计和施工阶段就做好在冷却水管中安装超声波测量系统的准备。

5.3.4.5 能量平衡法

利用能量平衡法进行汽轮发电机组的能量平衡计算，是为了确定汽轮机的低压缸排向凝汽器的热负荷。如 4.17.2 中 c) 所述，冷却水流量即由凝汽器热负荷和冷却水进、出口的温度差决定，这种方法的优点是能直接确定凝汽器的热负荷。

必须按照 GB/T 8117 规定的汽轮机试验要求用能量平衡法确定凝汽器热负荷。由于试验的复杂性，建议凝汽器试验和汽轮机试验同时进行。凝汽器热负荷的整体不确定度取决于热力循环、试验程序和使用仪表等诸多因素。

5.3.5 不凝结气体流量

应用已验证过的准确方法测量不凝结气体流量。本标准建议把节流孔板安装在抽气器出口或其附近测量不凝结气体流量。节流孔板必须满足 GB/T 13930 的技术要求，如果遵循了所有规定的安装标准，则孔板流量计不需要校验。特别注意，确保孔板的上游和下游有足够长度的直管段，正确地定位和安装压力计接口，差压计的传压管道要有合适的直径，并且从压力表到孔板连续向下倾斜，以避免水聚集。排气压力和温度可以在节流孔板的任意一侧测得。

在试验前后，必须对差压仪表、静压量具和温度测量仪表进行校验。连接孔板的差压仪表的校验不确定度为 $\pm 1\%$ 预计孔板差压；静压量具的校验不确定度为 $\pm 6.89\text{kPa}$ ；温度测量仪表的校验不确定度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

按照 GB/T 13930 给出的通过孔板的气体流量计算式确定气体的流量。假定通过孔板的流量由饱和气体组成，确定气体的物理性质，如膨胀系数、密度和黏度。气体流量计算也可参照附录 E。

5.3.6 热井水位

在凝汽器的热井中必须设置观察孔，并有刻度等级不大于 2cm 的标尺。试验过程中必须监测和保持凝汽器的热井水位在设计范围内。

5.3.7 水室水位

试验中应一直监测水室水位，确保所有的水室均被充满水。使用有效的方法检验并确保凝汽器水室充满水。

5.3.8 水室压降

用差压计测量进口和出口水室间连接管的压力降。在凝汽器的每个流程中至少有一个差压计。试验前后，差压计必须进行校验，其精度应在 $\pm 1\%$ 的最大预计压差范围内。机械量具和电子差压计都可以使用，不推荐使用水银压力计。

5.3.9 溶解氧浓度

下面给出了测量凝结水溶解氧浓度的方法。在测量之前，试验工况应满足本标准 4.12 的要求。

5.3.9.1 采样

应在添加任何化学除氧药品之前，在凝结水泵之前，且尽量靠近热井出口处，用泵汲取含溶解氧的凝结水样品（见图 1）。防止任何气体沿着采样管路从热井出口管道进入凝结泵，每个运行的热井出口都要进行采样测量。

采样的管头应伸入凝汽器的出口管内 0.1m 或 1/4 管径，取两个值的较小者。在采样管头和溶解氧探测仪之间用金属导管连接，溶解氧探测仪和采样泵之间同样也用金属导管连接。为了减少泵的压头，水泵溢出的水流应返回真空状态下的凝汽器。

5.3.9.2 采样条件

对于连续氧量分析仪，应在设备生产商建议的流速和温度下进行采样。在试验中，应保持流速和温度恒定。

如果要用传送管把样品传送较远的距离, 传送管设计的最小流速为 1.5m/s~1.8m/s。

在试验之前, 应用足够的时间对采样管路和设备进行清洗, 以赶走水中的气泡或气穴。

5.3.9.3 氧量分析

建议采用便携式或在线氧量分析仪。使用仪表的检测极限小于 1000 μ g/L, 最大误差为 $\pm 1.0\mu$ g/L。

试验前后必须对仪表进行校验。如果校验采用大气中的氧, 分析人员必须给予足够的时间使分析仪中的氧和凝结水溶解氧达到平衡。

建议在试验前用湿化学技术来检验分析仪表。

如果氧量传感器被凝结水中的杂质污染, 建议采用滴定分析法。按照 5.3.9.1 给出的方法在采样泵的出口进行采样。

5.3.10 凝结水温

按照 5.3.2 给出的一般程序测量凝结水温, 温度测点设置在凝结泵的上游。

5.3.11 凝结水含盐量

采用电导率方法来测定凝结水的含盐浓度。

5.3.12 清洁度

本标准要确定凝汽器清洁度, 以便将试验的凝汽器总体传热系数修正到设计和合同保证条件下。清洁度试验要测量几组两相邻管的出口水温, 其中每组试验管为两根, 一根管子经过清洁或更换, 其状态如新管一样, 而另一根管子维持原来的脏污状态。测得出口水温后, 可以将两根试验管的热导率进行对比, 从而得出管束的污垢热阻。

5.3.12.1 测点位置

进行清洁度试验的管组数为管束中管子总数的 1/2000, 但各管束不得少于 4 组, 且不多于 16 组, 选出的管组宜位于管束的形心处。不宜选取管束边缘处的 3 排作为试验管组, 这是由于该处管子处于非正常工况。无论凝汽器是单流程、双流程, 还是多背压的, 根据管子数目选取的管组数都应相同。

5.3.12.2 试验工况和测量

如有可能, 清洁度试验应和凝汽器的传热试验同时进行, 或者在其前后很短的时间内进行。除了冷却水出口温度, 还要求测量冷却水流量、冷却水进口温度和凝汽器压力。测量、校验、试验条件和参数的偏差都必须遵循本章和表 5 列出的相关要求。一个试验工况要求在 30min 内至少测得四组数据。

5.3.12.3 出口温度测点安装

在每根管子的出口应安装温度传感器, 要求传感器对管子的阻塞最小, 且可以准确地测得出口水温。传感器安装应牢靠, 具有良好的防水性, 能承受水流冲蚀和冷却水的出口温度。温度传感器的导线在出口管板的管孔中间固定牢靠, 从采样管引出。

壳侧隔开的双流程或多压凝汽器中, 应测量每个流程后的试验管组的入口水温, 测量方法和冷却水出口温度的测量一样。

设备安装位置的可选方式很多, 这里只给出把传感器固定在管板上的一般要求:

- 如果冷却管伸出管板外有足够长度, 可以利用塑料套管, 参见附录 D;
- 只要传感器能伸到流体中, 允许把传感器直接固定在管板上;
- 如果凝汽器堵管率小于 5%, 则允许把足够小的物体固定在管内, 以固定传感器。

5.3.12.4 冷却管温升

按照本章给出的程序测量清洁度试验中的冷却管温升, 可用电阻温度计或者热电偶来测量, 但其温度测量系统本身的不确定度应不大于 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。使用热电偶时, 建议直接使用温差测量仪表。如果用电阻温度计, 建议将测量冷却管进口温度和出口温度的一对电阻温度计作为一体进行校验, 以减小校验误差对两个电阻温度计之间温差的影响。在清洁度试验前后, 如果进口水温偏差小于 2.8°C , 而冷却水进、出口温差超出允许范围, 则必须校验温度测量仪表。在清洁度试验之后, 应检查所有仪表的连接管, 确保它们足够清洁, 没有任何堵塞和不存在任何可能影响试验结果的因素 (管子的脏污除外)。

6 结果计算

6.1 本章给出了标准规定的各种凝汽器性能试验结果的计算公式。对于单流程和双流程的凝汽器，计算包括传热系数、设计工况的修正、污垢热阻、凝结水过冷度、凝结水溶解氧浓度、凝汽器水阻、不凝结气体流量和测量的不确定度。多压凝汽器基本方程一样，但性能判断稍有不同，如 6.3.9 所述。

6.2 基本传热关系

6.2.1 凝汽器热负荷

按照式 (2) 计算凝汽器热负荷：

$$Q^+ = w^+ c_p^+ (T_2^+ - T_1^+) \quad (2)$$

6.2.2 总体传热系数

按照式 (3) 计算试验工况的总体传热系数：

$$U^+ = \frac{Q^+}{A_o \text{LMTD}^+} \quad (3)$$

$$\text{LMTD}^+ = \frac{T_2^+ - T_1^+}{\ln \left(\frac{T_s^+ - T_1^+}{T_s^+ - T_2^+} \right)} \quad (4)$$

对应于压力 p_s^+ 的饱和蒸汽温度 T_s^+ 由水蒸气表查得。

6.2.3 管壁热阻

按照式 (5) 计算管壁热阻：

$$R_m^+ = \frac{D_o}{2k_m^+} \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) \quad (5)$$

6.2.4 管侧热阻

按照 Rabas-Crane 法计算管侧热阻，见式 (6)：

$$R_i^+ = \left[0.0158 \frac{k^+}{D_i} (Re^+)^{0.835} (Pr^+)^{0.462} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$Re^+ = \frac{\rho^+ v^+ D_i}{\mu^+} \quad (7)$$

$$Pr^+ = \frac{c_p^+ \mu^+}{k^+} \quad (8)$$

冷却水的物性参数根据平均水温 T_B^+ 查得，按照式 (9) 确定 T_B^+ ：

$$T_B^+ = 0.5 (T_2^+ + T_1^+) \quad (9)$$

6.2.5 污垢热阻

通过相邻管束的对比试验来确定污垢热阻。对 j 对管束，污垢热阻 R_f 由式 (10) 确定：

$$R_f^+ = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j R_{f,i}^+ \quad (10)$$

式中管束 i 的污垢热阻见式 (11)：

$$R_{f,i}^+ = \frac{A_o}{nw^+c_p^+} \left[\frac{1}{\ln \left(\frac{T_s^+ - T_{1f,i}^+}{T_s^+ - T_{2f,i}^+} \right)} - \frac{1}{\ln \left(\frac{T_s^+ - T_{1c,i}^+}{T_s^+ - T_{2c,i}^+} \right)} \right] \quad (11)$$

6.2.6 壳侧热阻

按照式 (12) 计算试验工况的壳侧热阻:

$$R_s^+ = \frac{1}{U^+} - R_m^+ - R_i^+ \left(\frac{D_o}{D_i} \right) - R_f^+ \quad (12)$$

6.3 凝汽器压力偏差结果计算

6.3.1 由于试验工况与设计工况不可能完全相同, 因此将凝汽器压力的测量值与设计值进行比较是没有意义的, 所以要将试验结果从试验工况修正到设计工况。遵循的修正程序是计算出传热阻力, 求出在试验工况下和设计工况下的差值, 然后利用差值来计算修正后的总体传热系数和修正到设计工况的凝汽器压力。

设计工况是由厂家给定的。用 6.2 给出的程序来处理计算值, 但不包括原始数据, 用设计值替换试验值。

6.3.2 管壁热阻

管壁热阻是个常量, 仅取决于壁厚和材料, 则有:

$$R_m^* = R_m^+ \quad (13)$$

6.3.3 管侧热阻

按式 (14) 计算设计工况的管侧热阻:

$$R_i^* = \left[0.0158 \frac{k^*}{D_i} (Re^*)^{0.835} (Pr^*)^{0.462} \right]^{-1} \quad (14)$$

$$Re^* = \frac{\rho^* v^* D_i}{\mu^*} \quad (15)$$

$$Pr^* = \frac{c_p \mu}{k} \quad (16)$$

冷却水的物性参数根据平均水温 T_B^* 查得, 按照式 (17) 确定 T_B^* :

$$T_B^* = 0.5(T_2^* + T_1^*) \quad (17)$$

6.3.4 污垢热阻

厂家给出的设计数据中, 通常以清洁度来表示脏污系数。如果设计工况的凝汽器压力基于清洁度 1.0, 则设计的污垢热阻 R_f^* 为 0。按照式 (18) 计算污垢热阻:

$$R_f^* = \frac{(1 - c_f^*)}{U^*} \quad (18)$$

$$U^* = \frac{Q^*}{A_o \text{LMTD}^*} \quad (19)$$

$$\text{LMTD}^* = \frac{T_2^* - T_1^*}{\ln \left(\frac{T_s^* - T_1^*}{T_s^* - T_2^*} \right)} \quad (20)$$

对应压力 p_s^* 的饱和蒸汽温度 T_s^* 由水蒸气表查得。

6.3.5 壳侧热阻

壳侧凝结传热是表面式凝汽器计算中最复杂的一项。对于不同凝结情况的膜层散热系数，需要建立相关的努塞尔式。对于不同的凝结状况，需要根据相应的壳侧和管侧的几何结构和冷凝条件确定不同的传热系数。6.2.6 确定的壳侧热阻的试验值是以试验计算的总体传热系数和其他热阻计算值的总和之间的差值为基础的。

为了将试验工况的壳侧热阻修正到设计工况，设计工况和试验工况下的凝结液膜温度差的一些计算公式需要进行修正。这需要在工况限制范围之外进行修正，不能估算。用于水平管束出口侧的膜层凝结的努塞尔式如式 (21) 所示：

$$h_s = 0.95 \left(\frac{k^3 \rho^2 g L}{\mu W_s / N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

$$R_s = \frac{1}{h_s} \quad (22)$$

因此

$$R_s^0 = R_s^+ \frac{h_s^*}{h_s^+} \quad (23)$$

把式 (21) 代入式 (23)，则

$$R_s^0 = R_s^+ \left(\frac{W_s^+}{W_s^*} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu^+}{\mu^*} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{k^*}{k^+} \right) \left(\frac{\rho^*}{\rho^+} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (24)$$

如果不能测得试验工况下的蒸汽流量 W_s^+ ，则用表达式 Q^+/Q^* 代替 W_s^+/W_s^* 。物性参数根据凝结液膜的平均温度查得。平均温度可以由式 (25) 近似求得：

$$T_F^* = T_s^* - 0.2 \text{LMTD}^* \quad (25)$$

$$T_F^+ = T_s^+ - 0.2 \text{LMTD}^+ \quad (26)$$

6.3.6 总体传热系数

按照式 (27) 计算修正到设计工况下的总体传热系数：

$$U^0 = \frac{1}{R_m^* + R_i^* \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + R_t^* + R_s^0} \quad (27)$$

6.3.7 凝汽器压力修正

按照式 (28) 计算修正到设计工况下的凝汽器压力：

$$\text{NTU}^0 = \frac{U^0 A_o}{c_p^* w^*} \quad (28)$$

$$T_s^0 = \frac{T_2^* - T_1^* e^{-\text{NTU}^0}}{1 - e^{-\text{NTU}^0}} \quad (29)$$

蒸汽温度 T_s^0 对应的压力 p_s^0 即为修正后的凝汽器压力，由水蒸气表查得。

6.3.8 结果评定

按式 (30) 计算凝汽器修正压力和凝汽器设计压力的差值：

$$\Delta p_s = p_s^* - p_s^0 \quad (30)$$

如果差值不小于 0，则凝汽器的性能达到设计要求，是合格的；如果差值小于 0，则凝汽器的性能

没有达到设计要求，是不合格的。

6.3.9 多压凝汽器

6.3.9.1 两种多压凝汽器

对各压力室分别计算以评价多压凝汽器。多压凝汽器有两种型式：多壳多压凝汽器（见图 5）和单壳多压凝汽器（见图 6）。

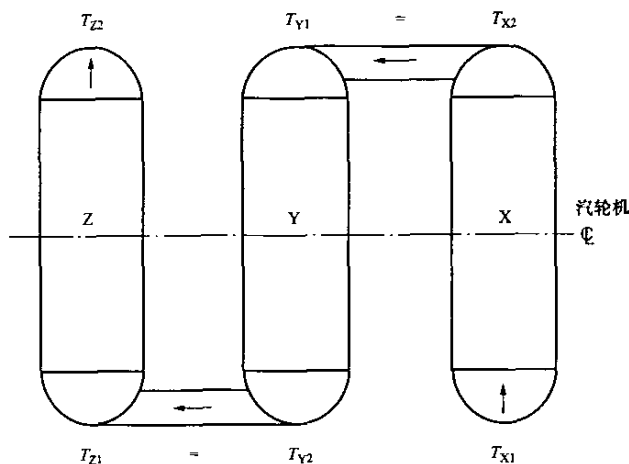


图 5 多壳多压凝汽器

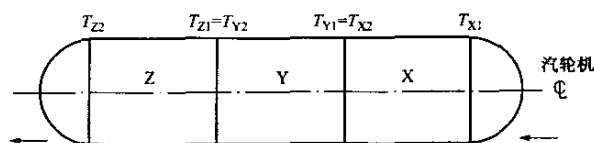


图 6 单壳多压凝汽器

6.3.9.2 凝汽器热负荷

假定汽轮机的排汽平均分配到多压凝汽器的各压力室，而其他主要的蒸汽热负荷排向某一特定的压力室，如给水泵小汽轮机的排汽，则计算值应与对应压力室的热负荷相加。

在多压凝汽器中，不易直接测得各压力室之间冷却水的温度，可以通过假设每个压力室的温升正比于热负荷来估算压力室之间的温度。计算过程见式 (31)：

$$\Delta t(\text{测量}) = \Delta T_x + \Delta T_y + \Delta T_z \quad (31)$$

$$\Delta T_x = (\Delta t) \left(\frac{Q_x}{Q} \right) \quad (32)$$

$$\Delta T_y = (\Delta t) \left(\frac{Q_y}{Q} \right) \quad (33)$$

$$\Delta T_z = (\Delta t) \left(\frac{Q_z}{Q} \right) \quad (34)$$

上面给出的是三压凝汽器的计算式，但计算方法也适用于双压凝汽器。

6.3.9.3 总体传热系数

用 6.2.2 给出的方法计算每个压力室在试验工况下的总体传热系数。

6.3.9.4 管壁热阻

用 6.2.3 给出的方法计算管壁热阻。

6.3.9.5 管侧热阻

用 6.2.4 给出的方法计算管侧热阻。

6.3.9.6 污垢热阻

同单压凝汽器的计算方法一样,通过相邻管子的比较试验来确定污垢热阻。对 j 对管束,可由式 (35) ~ 式 (37) 确定每一压力室的污垢热阻 R_f :

$$R_{tx} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j R_{tx,i} \quad (35)$$

$$R_{ty} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j R_{ty,i} \quad (36)$$

$$R_{tz} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j R_{tz,i} \quad (37)$$

在多壳多压凝汽器中,可以通过测得每个压力室的冷却水出口温度来计算污垢热阻。对于单壳式多压凝汽器,不能直接测得压力室之间的冷却水温,但可以按照 6.3.9.2 所述方法求出温度。公式如下:

$$Q = Q_x + Q_y + Q_z \quad (38)$$

$$\Delta t_{fi}(\text{测量}) = \Delta T_{fx,i} + \Delta T_{fy,i} + \Delta T_{fz,i} \quad (39)$$

$$\Delta T_{fx,i} = (\Delta t_{fi}) \left(\frac{Q_x}{Q} \right) \quad (40)$$

$$\Delta T_{fy,i} = (\Delta t_{fi}) \left(\frac{Q_y}{Q} \right) \quad (41)$$

$$\Delta T_{fz,i} = (\Delta t_{fi}) \left(\frac{Q_z}{Q} \right) \quad (42)$$

$$T_{f2,i} = t_1 + \Delta T_{fx,i} \quad (43)$$

$$T_{f3,i} = t_{f2,i} + \Delta T_{fy,i} \quad (44)$$

$$T_{f4,i} = t_{f3,i} + \Delta T_{fz,i} \quad (45)$$

$$\Delta t_{ci}(\text{测量}) = \Delta T_{cx,i} + \Delta T_{cy,i} + \Delta T_{cz,i} \quad (46)$$

$$\Delta T_{cx,i} = (\Delta t_{ci}) \left(\frac{Q_x}{Q} \right) \quad (47)$$

$$\Delta T_{cy,i} = (\Delta t_{ci}) \left(\frac{Q_y}{Q} \right) \quad (48)$$

$$\Delta T_{cz,i} = (\Delta t_{ci}) \left(\frac{Q_z}{Q} \right) \quad (49)$$

$$T_{c2,i} = t_1 + \Delta T_{cx,i} \quad (50)$$

$$T_{c3,i} = t_{c2,i} + \Delta T_{cy,i} \quad (51)$$

$$T_{c4,i} = t_{c3,i} + \Delta T_{cz,i} \quad (52)$$

$$R_{t,x,i} = \left(\frac{A_x}{wc_p} \right) \left[\frac{1}{\ln \left(\frac{T_{s,x} - T_l}{T_{s,x} - T_{t2,i}} \right)} - \frac{1}{\ln \left(\frac{T_{s,x} - T_l}{T_{s,x} - T_{c2,i}} \right)} \right] \quad (53)$$

$$R_{t,y,i} = \left(\frac{A_y}{wc_p} \right) \left[\frac{1}{\ln \left(\frac{T_{s,y} - T_{t2,i}}{T_{s,y} - T_{t3,i}} \right)} - \frac{1}{\ln \left(\frac{T_{s,y} - T_{c2,i}}{T_{s,y} - T_{c3,i}} \right)} \right] \quad (54)$$

$$R_{t,z,i} = \left(\frac{A_z}{wc_p} \right) \left[\frac{1}{\ln \left(\frac{T_{s,z} - T_{t3,i}}{T_{s,z} - T_{t4,i}} \right)} - \frac{1}{\ln \left(\frac{T_{s,z} - T_{c3,i}}{T_{s,z} - T_{c4,i}} \right)} \right] \quad (55)$$

式中下标 4 对应的是高压侧的出口。

6.3.9.7 壳侧热阻

每个压力室的壳侧热阻的计算同 6.2.6。

6.3.9.8 凝汽器压力偏差结果计算

各压力室的压力偏差结果计算方法和 6.3 给出的单压凝汽器的计算方法相同。可以用 6.3.9.2 所述的方法来近似估算压力室之间的冷却水温度。

6.4 其他参数偏差结果计算

6.4.1 凝汽器水阻的验收准则

试验测得的凝汽器水阻因试验工况和设计工况的冷却水流量不同而作如下修正，见式 (56)：

$$\Delta p_w^0 = \Delta p_w^+ \left(\frac{w^*}{w^+} \right)^{1.8} \quad (56)$$

如果计算的凝汽器水阻小于或等于设计值，则凝汽器的性能达到设计要求，是合格的；反之凝汽器的性能达不到设计要求，是不合格的。

6.4.2 凝结水过冷度的验收准则

凝结水过冷度的验收准则见式 (57)：

$$\Delta T_s^+ = T_s^+ - T_j^+ \quad (57)$$

如果试验工况下计算出的凝结水过冷度不大于设计值，则凝汽器的性能达到设计要求，是合格的；如果大于设计值，则凝汽器的性能状况达不到设计要求，是不合格的。

6.4.3 溶解氧浓度的验收准则

在规定的时间内，在各凝结水管的出口测量溶解氧浓度，并对不同时刻的测量值取平均，以确定溶解氧浓度的试验值。如果任何一根管出口的平均值大于设计值，则凝汽器的性能达不到设计值，是不合格的。

6.5 不确定度分析

6.5.1 为了确定按照本标准进行的试验是否满足 4.2 规定的 uncertainty 要求，必须对存在试验测量不确定度的试验结果进行 uncertainty 分析，这是试验计算不可缺少的一部分。这部分给出了根据试验中单个测量参数的 uncertainty 计算结果 uncertainty 的程序。

6.5.2 凝汽器修正压力的 uncertainty

修正到设计工况的凝汽器压力 uncertainty 的计算见式 (58)：

$$Un_{p_i^0} = \sqrt{B_{p_i^0}^2 + \left(t_v S_{p_i^0} \right)^2} \quad (58)$$

$$B_{p_0}^2 = (\Theta_{w_1^+} B_{w_1^+})^2 + (\Theta_{w_2^+} B_{w_2^+})^2 + (\Theta_{p_1^+} B_{p_1^+})^2 + (\Theta_{T_1^+} B_{T_1^+})^2 + (\Theta_{T_2^+} B_{T_2^+})^2 + (\Theta_{T_{12}^+} B_{T_{12}^+})^2 + (\Theta_{T_{21}^+} B_{T_{21}^+})^2 + (\Theta_{T_{1c}^+} B_{T_{1c}^+})^2 + (\Theta_{T_{2c}^+} B_{T_{2c}^+})^2 \quad (59)$$

$$S_{p_0}^2 = (\Theta_{w_1^+} S_{w_1^+})^2 + (\Theta_{w_2^+} S_{w_2^+})^2 + (\Theta_{p_1^+} S_{p_1^+})^2 + (\Theta_{T_1^+} S_{T_1^+})^2 + (\Theta_{T_2^+} S_{T_2^+})^2 + (\Theta_{T_{12}^+} S_{T_{12}^+})^2 + (\Theta_{T_{21}^+} S_{T_{21}^+})^2 + (\Theta_{T_{1c}^+} S_{T_{1c}^+})^2 + (\Theta_{T_{2c}^+} S_{T_{2c}^+})^2 \quad (60)$$

t 分布 t_v 是自由度的函数。表 7 给出了 t 的值, 如果观测值的个数大于 30, 可以认为 $t=2.0$ 。 t 分布把标准偏差转换成置信度为 95% 的置信区间。

表 7 95% 置信度下 t 分布 t_v 表

自由度	t	自由度	t	自由度	t
1	12.706	11	2.201	21	2.080
2	4.303	12	2.179	22	2.074
3	3.182	13	2.160	23	2.069
4	2.776	14	2.145	24	2.064
5	2.571	15	2.131	25	2.060
6	2.447	16	2.120	26	2.056
7	2.365	17	2.110	27	2.052
8	2.306	18	2.101	28	2.048
9	2.262	19	2.093	29	2.045
10	2.228	20	2.086	30 及以上	2.000

注: 表中给出了 t 值, 95% 置信度下的置信区间是 $[-t, +t]$ 。

6.5.3 灵敏系数

通过式 (61) ~ 式 (78) 中的任何一种方法可以确定 6.5.2 中提到的灵敏系数 Θ 。

个别仪表由单个扰动引起的不确定度采用中心差分法分析, 即使用给出的数据简化程序和方程, 取试验平均值计算出结果, 然后使用相同的方程系统地计算由于每个输入试验参数的微小变化导致最终试验结果的变化。设计工况下的凝汽器压力、凝结水过冷度、溶解氧浓度和凝汽器水阻等都是规程试验的目标结果。对于特定的参数, 灵敏系数为扰动参数的变化量和输出值的变化量之比。

灵敏系数还可以通过分析结果计算式的偏微分方程得到。以下是用来计算各个灵敏系数的方程。在推导这些灵敏系数的方程中, 假设条件是, 与测量参数误差对试验整体不确定度的影响相比, 测量参数误差对流体和蒸汽性质 (热容量、密度、黏度等) 的计算误差影响都很小。因此, 可以忽略流体性质误差对灵敏系数的影响。

排汽量灵敏系数见式 (61):

$$\Theta_{w_1^+} = \frac{F_1 F_2 R_0^0}{3W_1^+} \quad (61)$$

$$F_1 = 0.05031 e^{0.04925 T_1^0} \quad (62)$$

$$F_2 = \frac{(T_2^* - T_1^*) \text{NTU}^0 U^0 e^{-\text{NTU}^0}}{(1 - e^{-\text{NTU}^0})^2} \quad (63)$$

冷却水流量灵敏系数见式 (64):

$$\Theta_{w^*} = \frac{F_1 F_2 R_s^0}{R_s^*} \left[\frac{-1/U^* + 0.835 R_1^* (D_o/D_i) + R_2^*}{w^*} \right] \quad (64)$$

冷却水进口温度灵敏系数见式 (65):

$$\Theta_{T_1^*} = \frac{F_1 F_2 R_s^0}{R_s^*} \frac{w^* c_p^+}{(U^*)^2 (T_s^* - T_1^*) A_o} \quad (65)$$

冷却水出口温度灵敏系数见式 (66):

$$\Theta_{T_2^*} = -\frac{F_1 F_2 R_s^0}{R_s^*} \frac{w c_p}{(U^*)^2 (T_s^* - T_2^*) A_o} \quad (66)$$

凝汽器压力灵敏系数见式 (67):

$$\Theta_{P_s} = \frac{F_1 F_2 F_3 R_s^0}{R_s^*} \left\{ \frac{w^* c_p^+ (T_2^* - T_1^*)}{(U^*)^2 A_o (T_s^* - T_1^*) (T_s^* - T_2^*)} \right. \\ \left. - \frac{A_o}{w^* c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \left[\frac{(\text{LMTD}_{ti}^*)^2}{(T_{2fi}^* - T_{1fi}^*) (T_s^* - T_{1fi}^*) (T_s^* - T_{2fi}^*)} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{(\text{LMTD}_{ci}^*)^2}{(T_{2ci}^* - T_{1ci}^*) (T_s^* - T_{1ci}^*) (T_s^* - T_{2ci}^*)} \right] \right\} \quad (67)$$

$$F_3 = \frac{1}{0.05031 e^{0.04925 T_1^*}} \quad (68)$$

脏污管的进口水温灵敏系数见式 (69):

$$\Theta_{T_{1i}^*} = -\frac{F_1 F_2 R_s^0 A_o}{R_s^* w^* c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^* - T_{1fi}^+}{T_s^* - T_{2fi}^+} \right)^2 (T_s^* - T_{1fi}^*)} \quad (69)$$

脏污管的出口水温灵敏系数见式 (70):

$$\Theta_{T_{2i}^*} = \frac{F_1 F_2 R_s^0 A_o}{R_s^* w^* c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^* - T_{1fi}^+}{T_s^* - T_{2fi}^+} \right)^2 (T_s^* - T_{2fi}^*)} \quad (70)$$

清洁管的进口水温灵敏系数见式 (71):

$$\Theta_{T_{1c}^*} = \frac{F_1 F_2 R_s^0 A_o}{R_s^* w^* c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^* - T_{1ci}^+}{T_s^* - T_{2ci}^+} \right)^2 (T_s^* - T_{1ci}^*)} \quad (71)$$

清洁管的出口水温灵敏系数见式 (72):

$$\Theta_{T_{2c}^*} = -\frac{F_1 F_2 R_s^0 A_o}{R_s^* w^* c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^* - T_{1ci}^+}{T_s^* - T_{2ci}^+} \right)^2 (T_s^* - T_{2ci}^*)} \quad (72)$$

6.5.4 凝汽器水阻的不确定度

修正到设计工况下的凝汽器水阻不确定度的计算见式 (73):

$$Un_{\Delta p_w^0} = \sqrt{B_{\Delta p_w^0}^2 + (t_v S_{\Delta p_w^0})^2} \quad (73)$$

$$B_{\Delta p_w^0}^2 = (\Theta_{\Delta p_w^+} B_{\Delta p_w^+})^2 + (\Theta_{w^+} B_{w^+})^2 \quad (74)$$

$$S_{\Delta p_w^0}^2 = (\Theta_{\Delta p_w^+} S_{\Delta p_w^+})^2 + (\Theta_{w^+} S_{w^+})^2 \quad (75)$$

$$\Theta_{\Delta p_w^+} = \frac{\Delta p_w^0}{\Delta p_w^+} \quad (76)$$

$$\Theta_{w^+} = -\frac{1.8 \times \Delta p_w^0}{w^+} \quad (77)$$

6.5.5 凝结水过冷度的不确定度

凝结水过冷度的不确定度计算见式 (78):

$$Un_{\Delta T_c^+} = \sqrt{B_{\Delta T_c^+}^2 + (t_v S_{\Delta T_c^+})^2} \quad (78)$$

$$S_{\Delta T_c^+}^2 = (\Theta_{T_c^+} S_{T_c^+})^2 + (\Theta_{T_j^+} S_{T_j^+})^2 \quad (79)$$

式中 B , t_v 和 S 在 3.4 中已定义; 灵敏系数 $\Theta_{T_c^+} = 1.0$, $\Theta_{T_j^+} = -1.0$ 。

6.5.6 凝结水溶解氧浓度的不确定度

凝结水溶解氧浓度的不确定度计算见式 (80):

$$Un_{DO_2}^2 = \sqrt{B_{DO_2}^2 + (t_v S_{DO_2})^2} \quad (80)$$

式中 B , t_v 和 S 在 3.4 的表 4 中已定义, 直接由溶解氧浓度测量仪表和读数个数确定。

凝汽器性能计算和凝汽器压力不确定度分析参见附录 G 与附录 I。性能计算中所用的海水特性参见附录 J。

7 试验报告

7.1 报告的构成

7.1.1 试验目的

本条给出进行试验的原因和试验要达到的目的。

7.1.2 结论

本条是试验结论的叙述, 包括设备是否达到预期的性能, 通过不确定度分析、评价试验的总体质量。

7.1.3 试验设备情况

本条应说明试验凝汽器的以下基本信息:

- a) 安装地点;
- b) 所属电厂;
- c) 所属机组;
- d) 制造厂;
- e) 序列号。

7.1.4 试验设备描述

本条对设备进行详细的描述, 使试验报告的读者也可以重复所有的分析, 并独自判断试验结果。设备描述应该包括以下信息:

- a) 凝汽器的形式;
- b) 流程数;
- c) 凝汽器的结构图;
- d) 性能参数;
- e) 有效面积;
- f) 汽轮机的排汽口法兰到凝汽器进口法兰的距离;
- g) 凝汽器进口的通流面积;
- h) 凝汽器安装后的运行时间;
- i) 最后一次清洗至今的时间;
- j) 清洗方法;
- k) 每一流程中的管数;
- l) 管子的有效长度;
- m) 管子的外径;
- n) 管子的内径或者壁厚;
- o) 管子的材料;
- p) 试验时的堵管数;
- q) 管板布置图;
- r) 系统结构 (开式或者闭式);
- s) 冷却水源;
- t) 循环水泵概况;
- u) 凝结水泵概况;
- v) 冷却水系统的总体概况。

7.1.5 试验装置概况

本条对试验设备进行详细的描述, 以便对试验数据进行整理和分析, 包括简图、照片和图纸, 具体内容如下:

- a) 凝汽器压力测量位置;
- b) 凝汽器压力的一次测量装置;
- c) 凝汽器进口温度测点;
- d) 排汽温度测点;
- e) 冷却水流量的测量方法、细节和仪表;
- f) 不凝结气体流量测量说明;
- g) 热井水位的测量方法;
- h) 水室水位的测量方法;
- i) 水室压降的测量位置;
- j) 凝结水溶解氧浓度的测量方法和位置;
- k) 清洁度试验测量的管子位置。

7.1.6 讨论

本条是对试验相关背景资料的讨论, 包括如下部分:

- a) 设备的运行历史, 包括故障、检修和改造;
- b) 在试验之前或之后达成的协定, 这会影响试验的进行和结果的分析;
- c) 详细描述试验之前的检查及检查得出的结论。

7.1.7 试验数据

本条应列出整理后的数据清单 (精确的仪表读数和用法定单位表示的试验平均值), 包括试验结果

计算小结。

7.1.8 修正到设计工况的试验数据

本条应列出标准规定的合同保证工况的试验结果。如果需要，还应提供试验结果表格以及制造厂给出的性能曲线。

7.1.9 不确定度分析

报告还应包括每个试验工况的不确定度分析。

7.1.10 附录

试验报告应包括如下附录。

- a) 实例计算。对一个试验工况的数据进行实例计算，计算过程应足够详细，使读者对其他的试验工况能够重复计算。
- b) 仪表清单。应包括试验中用到的所有仪表，每个仪表包括：
 - 1) 制造厂；
 - 2) 型号；
 - 3) 序列号；
 - 4) 运行条件；
 - 5) 规定的精度；
 - 6) 修正系数。
- c) 人员名单。应该列出所有实际参加设计、施工、分析和试验报告的人员名单，并标明其联系方式和在试验中的职责。
- d) 不确定度分析实例计算。对一次试验数据进行实例计算，计算过程应足够详细，使读者对其他的试验工况能够重复计算。

7.1.11 数据整理

在试验完成之后，必须尽快提供给试验各方以下信息：

- a) 试验日志记录。
- b) 所有手抄数据的复印件。
- c) 所有整理后数据的复印件。
- d) 计算机记录：
 - 1) 以试验各方认可的格式给出计算机数据；
 - 2) 如果数据在整理时需要压缩，则解压软件和数据应包括在内。

7.2 数据报告

- a) 总述：
 - 1) 试验工况数；
 - 2) 日期；
 - 3) 时间。
- b) 凝汽器压力：每组管束的每一个测点的压力记录。
- c) 冷却水含盐量和化学性质。
- d) 冷却水进口温度：每个冷却水进口温度测点的测量记录。
- e) 冷却水出口温度：每根冷却水管道上各温度测点的测量记录。
- f) 凝结水温度：每根凝结水管道的每个温度测点的温度记录。
- g) 冷却水流量：
 - 1) 测速法：测量截面上每个测点测得的速度记录。
 - 2) 超声波法：测量每种测量方式的流速和平均流速。
 - 3) 示踪稀释法：测量采样水温、本底荧光、标准荧光和冷却水的荧光。

- 4) 差压法: 表计测得的差压。
- 5) 能量平衡法: 根据 GB/T 8117 计算凝汽器能量平衡的所有数据。
- h) 水室压降。
- i) 热井水位读数。
- j) 水室水位读数。
- k) 不凝结气体流量:
 - 1) 通过节流孔板的压降;
 - 2) 流体温度;
 - 3) 流体静压。
- l) 清洁度评价:
 - 1) 样管位置;
 - 2) 样管进口温度;
 - 3) 样管出口温度。
- m) 凝结水溶解氧浓度。
- n) 凝结水过冷度。
- o) 凝汽器水阻。
- p) 数值结论: 这里包括对测量性能与要求性能进行比对, 分析单个参数的不确定度和试验的总体不确定度。

附录 A
(资料性附录)
检查清单及流程图

A.1 为指导本标准的使用者选择仪表和准备试验，给出下面的试验程序流程图和检查清单。这些附录适用于专项需要，但是不能替代试验大纲、仪表清单、必要的校正方法或者其他已达成的试验程序。

附录不应该限制和约束使用者，如果需要更详尽的试验大纲，则需要试验各方提供包含所有重要部分在内的文件。本附录给出了这个大纲的开头部分。仪表清单参见表 A.1。

表 A.1 仪 表 清 单

测试参数	使用仪表	预期精度	校验范围	安装位置	预期值

A 2 检查清单

- 确定全面的试验范围，详细统计需要测量的参数。
- 选择最具成本效益的仪表和方法来进行参数测量。
- 试验之前，对测量参数进行不确定度分析。
- 按照合理的顺序安装仪表。先安装压力仪表，在它们各自的安装位置对仪表进行校验，并对环境的改变进行补偿。
- 在测温仪表安装之前，必须对它们进行通电校验，包括补偿导线和供电传感器。
- 按照逻辑顺序安装测温仪表。把补偿导线延伸到数据采集系统。
- 检查数据采集系统的运行，包括对测量参数的稳定性检查。
- 对安装过程进行检查，确保没有断路或存在缺陷的接地回路。
- 当所有的通路都正常工作时（当使用数据采集系统时），方可进行压力校验。
- 检查所有的现场表计（热电偶、量计、传感器等）是否工作正常，如有必要可进行适当的校验。
- 确保所有的校验都有详细的记录，并达到标准要求。
- 在校验之后，记录运行工况下的所有压力、流量和温度以检查测量的可行性。
- 对测量仪表、采集系统和相关的硬件出现的问题进行改正。
- 在达到协议要求的工况后，进行预备性试验。检查所有平均值的有效性（最长 1h）。
- 如果所有的仪表功能满足性能试验的要求，通知运行部门调整到试验工况。
- 试验之前，确保试验系统隔离。

- 如果需要同时进行单独的冷却水流量试验，则需要试验各方做好协调。
- 认真考虑试验必需的附加回路的隔离。
- 为试验各方和运行班组准备一份试验时间表，包括开始和停止的时间、机组负荷和蒸汽流量、运行要求和其他任何与凝汽器运行相关的信息。
- 按照试验时间表进行试验。
- 为达到试验的要求和目标对时间表可进行必要的改变，但应对改变记录在案。

A.3 试验程序流程见图 A.1，凝汽器试验仪表选择见图 A.2 和图 A.3。

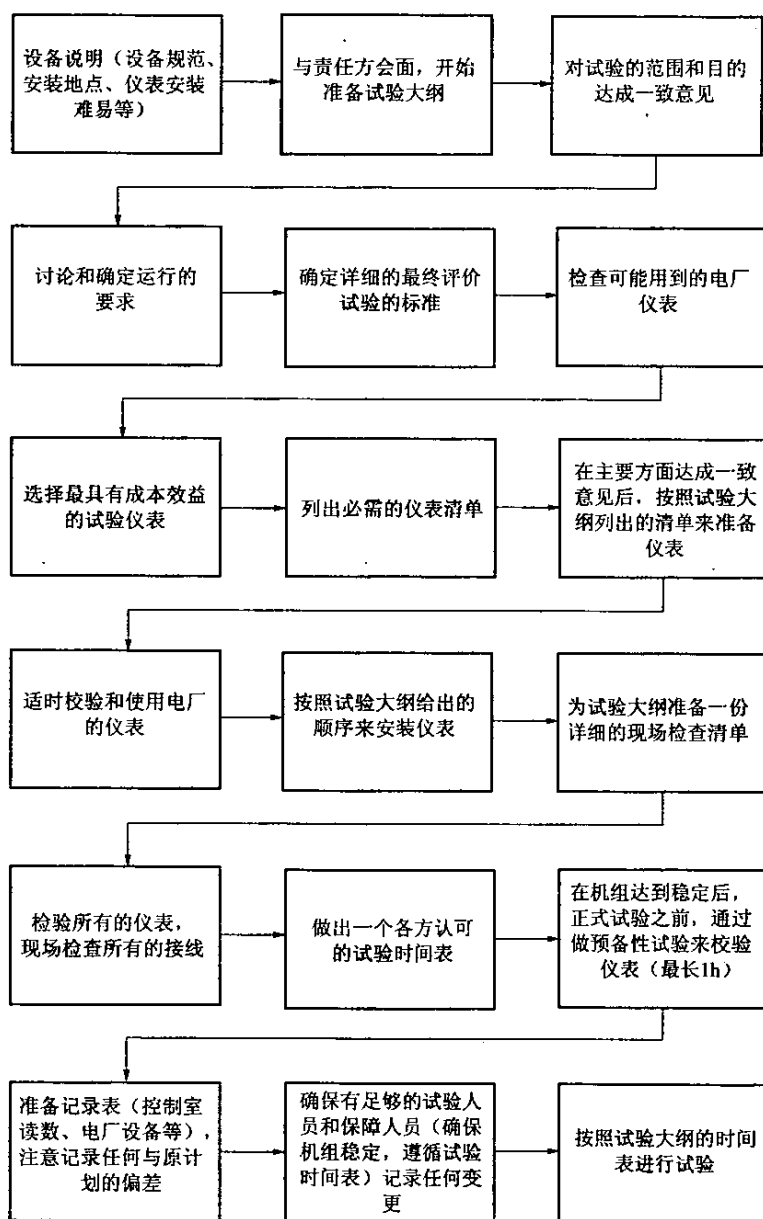


图 A.1 试验程序流程图

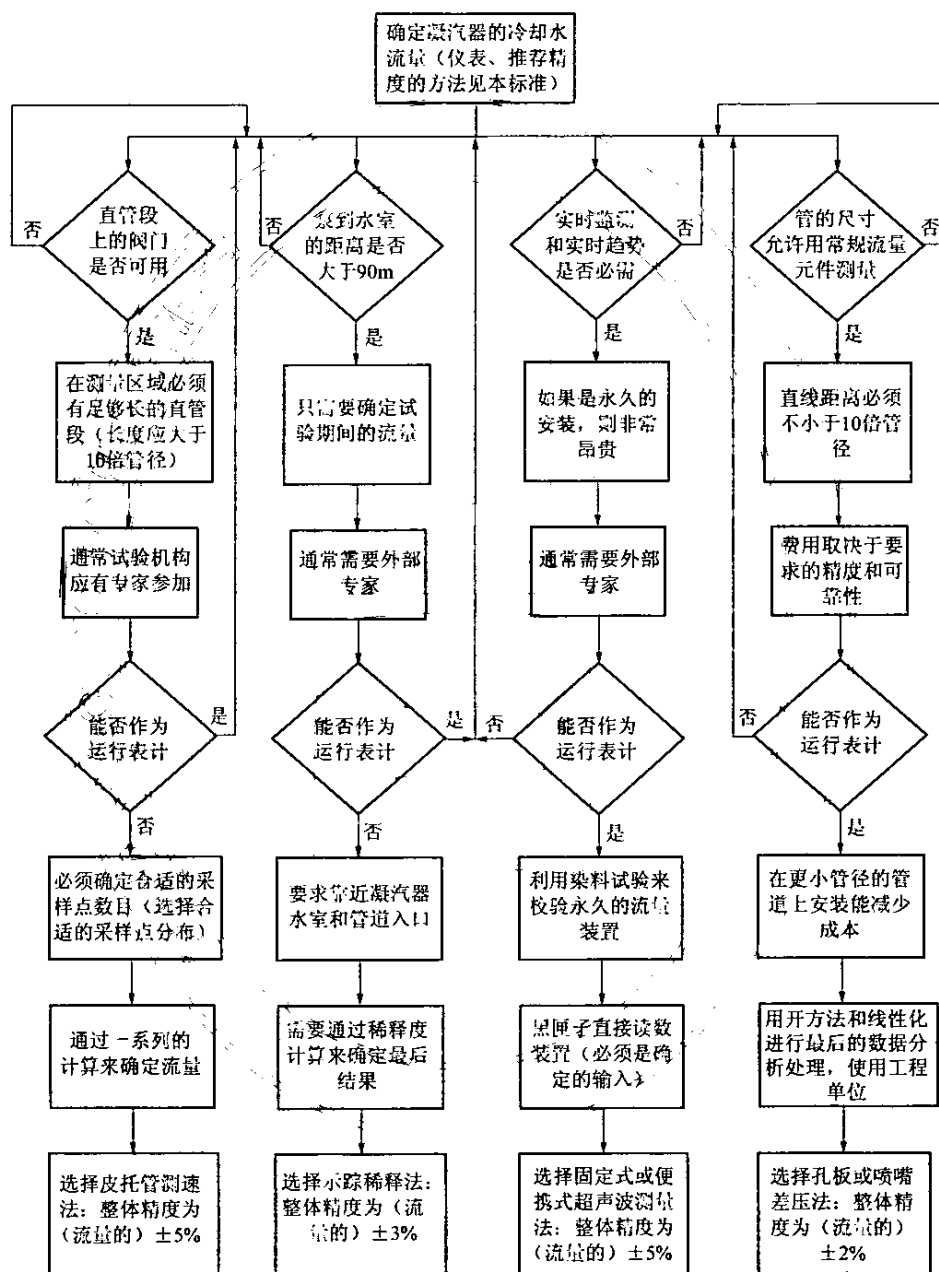


图 A 2 凝汽器试验仪表选择

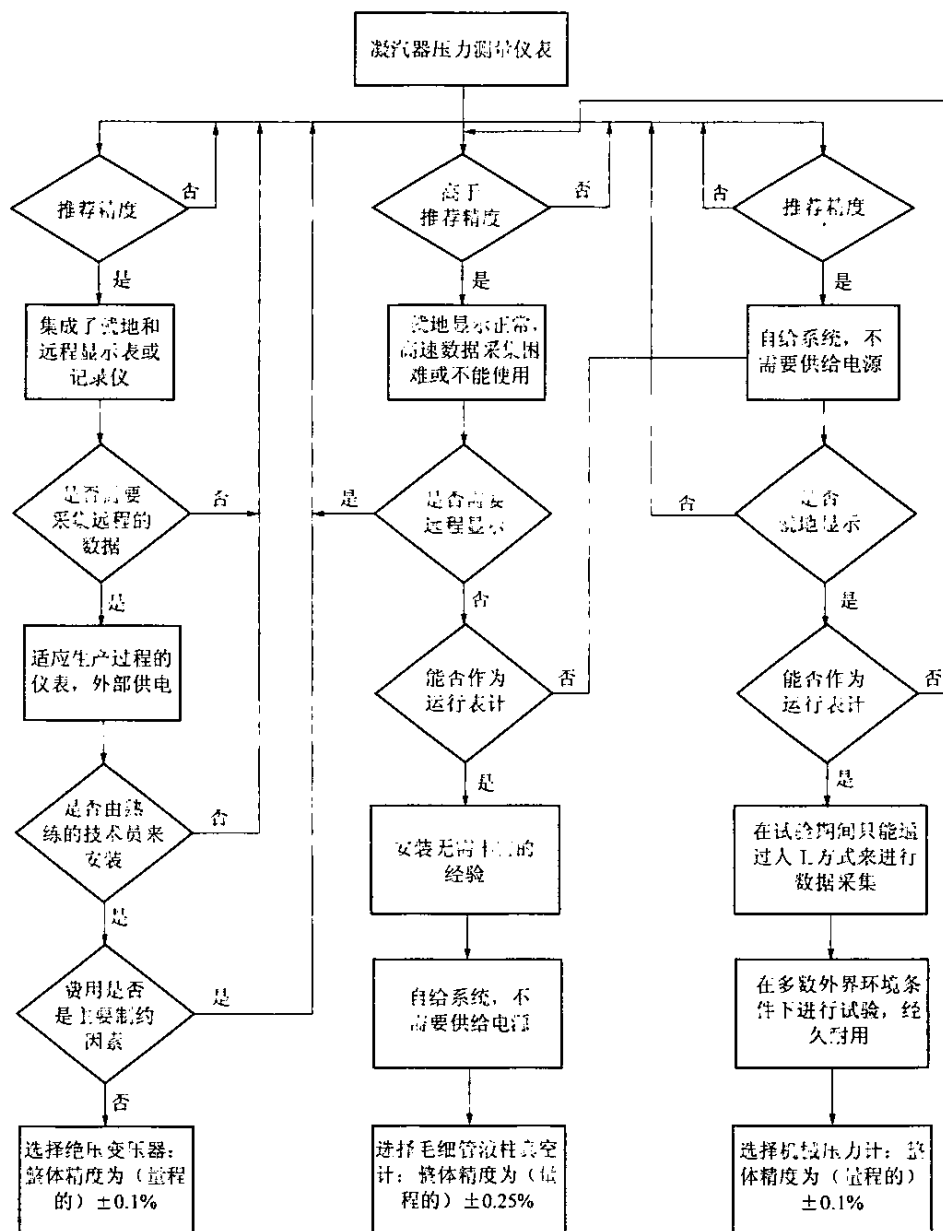


图 A 3 凝汽器试验仪表选择

附 录 B

(资料性附录)

性 能 监 测

B.1 引言

标准的主体部分主要介绍的是验收试验,本附录介绍对运行的凝汽器进行趋势评估和性能评价。性能检测中对仪表精度不像验收试验那样有严格的要求,其监测计划的重点、结构和数据不同于验收试验。相关的测量和重复性是关键,如果数据可以在相同的运行工况下再现,通常可以通过对那些数据分析确定性能水平的修正系数。

以下是凝汽器性能监测试验的注意事项。

B.2 性能监测试验构成

性能监测可由定期试验延伸到实时在线的试验。性能监测试验的实施在不同的电厂之间区别较大,它取决于电厂的需要、经济性和资源,包括凝汽器性能、仪表操作方法和数据采集分析方法。

是否采用对凝汽器性能进行定期监测、连续监测或两者结合的监测方式是重要的决策。连续监测的主要优点有:可以及时获得发生变化的时间和当时的外部条件,以便及时地做出操作和维修的响应;可以通过急剧变化的初期征兆来预测情况;可以连续地评估凝汽器对发电厂和成本的影响。但是,既要考虑到连续监测的固定设备的高昂购置费用和维修费用,又要考虑定期监测的重复装配费用和数据采集,综合考虑后选择一个最佳方案。同时也要认识到越复杂和越可靠的性能监测所需要的设备数量越多。

B.3 需要监测的参数

常规的监测参数清单在试验大纲中已给出,这里特别强调对下列参数进行监测:

- a) 凝汽器端差;
- b) 凝汽器压力;
- c) 冷却水流量;
- d) 冷却水温升;
- e) 凝汽器水阻;
- f) 凝汽器清洁度;
- g) 漏入的空气量;
- h) 凝结水过冷度。

B.4 监测测量

标准的主体部分给出了验收试验的测量要求,只要上述的传感器能在工况变化时传回足够精度的测量值,其测量要求可适当放宽,但仍能满足性能监测。测量参数的具体要求见表 B.1。

表 B 1 测量参数技术要求

测 量 参 数	规 程 要 求	监测参数与注意事项
冷却水流量	示踪稀释法、测速法等	水泵曲线/相对动压头、热平衡、校验过的流量仪表、水室进出口压降
冷却水出口温度	横断面,完全倾斜	热电偶套管、部分倾斜、与温度横断面相关的热电偶套管

表 B.1 (续)

测 量 参 数	规 程 要 求	监测参数与注意事项
冷却管清洁度	邻管测量	水室压降、水室出口压力、要求的背压、出口温度分布、端差
凝汽器压力	压力变送器	正确的位置, 仪表校验
温度	电阻温度计	正确的位置, 仪表校验
漏入的空气量	流量计	同规程规定或连续监测型仪表

关于上面所述有以下几点需要注意。电厂安装的流量测量设备多数达不到一次流量测量装置的精度要求, 包括冷却水流量测量装置、给水流量测量装置和文丘里喷嘴。在精密试验中必须校验电厂的一次元件以保证流量监测正确, 例如与水泵动压头相关的水室出口压降或在之前的示踪稀释试验用到的皮托静压管。关于压力和温度测量仪表, 参照本标准的仪表选择的章节, 也需要采用一些新的仪表来完成试验。另外, 为了提高监测水平, 在读数之前使用快速自动清洗装置来清洁传压管, 在冷却水出口加装比热电偶精度更高的温度测量仪表。

B.5 计算

参数趋势的详细计算请参照本标准第 6 章。建议把所有的变量绘制成与时间、冷却水进口温度和发电量相关的曲线。把设计的传热系数、清洁度、冷却水流量和漏入空气量相关的数据标准化, 以设计状态为基准点, 如清洁管子, 绘出管束压降与出口水室压降的比率曲线来诊断污垢的增加。

通过检查统计数据的变化以及冷却水进口温度、电厂发电量和冷却水流量的符合度来检查数据的有效性, 数据必须准确、一致和可靠, 根据试验人员的经验和监测的目的可适当进行修正。

附 录 C
(资料性附录)
表面式地热凝汽器

C.1 概要

汽轮机排出的地热蒸汽中含有比常规机组排汽大得多的不凝结气体量。由于化学和机械的原因，地热机组排汽中的不凝结气体和流体在凝汽器管子外表面易产生脏污和锈蚀。因为本标准没有提出凝汽器管子外表面脏污对性能的影响，要求在评估地热凝汽器性能时要特别小心。这样，建议多加一个测点来监测从汽轮机排出的不凝结气体的流量和组分。另外，必须测定汽轮机排汽的品质，并与凝汽器设计规定的蒸汽品质进行详细的对比。

C.2 性能试验测点

表面式地热凝汽器的性能试验测点和测点的位置与本标准中图 1 所示相同。

必须测量不凝结气体的流量，并且与规定的设计流量相比较。如果与设计流量偏差较大，则可能对排气系统产生不良影响，从而影响凝汽器的性能。

C.3 准则

因为表面式地热凝汽器的应用非常少，只有少量可靠的性能数据和设计信息供参考。基于这个原因，建议买方和生产厂家应对地热凝汽器的任何性能指标达成一致意见，投运后试验各方对此也要达成一致意见。

附录 D
(资料性附录)
气塞诊断

D.1 引言

气塞(空气附面层)试验方法使用热电偶来确定气塞区域。管束的空气边界层有较高的气体摩尔分子数。空气边界层的温度接近冷却水的进口温度,并且使空气边界层区域内的冷却水温升有很大降低。因此,准确地测量管子温升,可以确定空气边界层的位置和范围。

D.2 试验对象

气塞有以下一种或几种征兆:

- a) 漏入的空气量超过管束中除气系统的处理能力;
- b) 由于抽出的空气携带过多的蒸汽,减弱了抽气设备的除气能力;
- c) 管束周围没有足够的空间让蒸汽进入管束周围各个部位,也不能充分渗透于管束之中;
- d) 非设计的运行工况,如低负荷运行和启动;
- e) 由于设计和制造的缺陷或设备故障,蒸汽旁路进入抽气设备;
- f) 热井水位过高,阻止蒸汽进入管束底部;
- g) 除气系统(在除气区和抽气设备之间的区域和管子)过大的压降;
- h) 无效的除气区设计。

气塞试验的主要目的是确定气塞的出现和对满负荷时的气塞范围进行量化,其次是确定在运行一台或两台真空泵后气塞的范围和排气性能,包括在不同负荷和不同空气漏入速度下开启一台或两台抽气器后的气塞范围和排气性能。

D.3 试验方法、设备和使用仪表的描述

使用 1.6mm 直径的 E 形热电偶,位于管子均匀分布区,用柔韧性好的护罩包装好,并要求隔热,安装时热电偶热端在所选管子的流体的出口,这样就可以确定气塞区域。出口处热电偶要辅以尼龙或塑料承口再安装(见图 D.1)。可以利用套环把热电偶附在管板上,并以“P”形夹具和/或环氧树脂连到水室的连接处。可同时采用几个方法以安装热电偶。

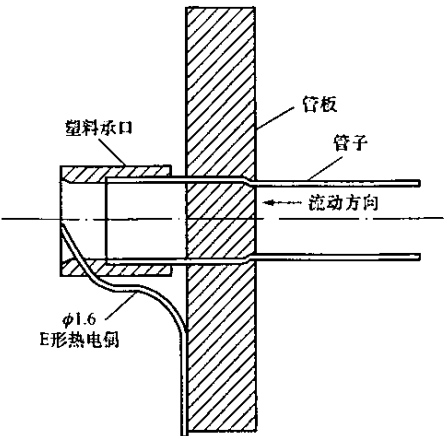


图 D.1 管子出口温度测量

要求热电偶测量精度在 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ 以内。在均匀分布区安装热电偶，要求每 100 根管子至少安装一支热电偶。在空气冷却区，要求每 50 根管子至少安装一支热电偶。在同一管束的水室进口处也安装一支热电偶。这就给出了温升测量的参照点。在水室进口处还要安装另一支热电偶来测量入口水温。如果在管束的全管长内都充满气塞，这将导致三个管组没有温升。同样，气塞经常沿着管束长度不规则地分布，这样就可能导致管内冷却水温升比预期有较大的降低。

附录 E
(资料性附录)
抽气设备性能诊断

E.1 概要

抽气设备应能在各种流量工况下,维持正常的空气漏入量和冷却水温度,保证凝汽器性能。抽气设备可以是射汽抽气器、液环真空泵或两者的结合(常称为混合系统)。抽气设备必须具有跟踪凝汽器超出力运行的能力。

E.2 射汽抽气器

射汽抽气器的运行原理是把流动蒸汽的压力能转化为喷嘴的动能,用高速喷射的蒸汽带走不凝结气体,然后一起被抽出。最后得到的蒸汽和空气的混合物进入扩散装置,这里将动能转化成压能,所以抽气器出口的混合物压力大于抽气的压力。

单级抽气器的压缩度不足,把两级或多级抽气器串联布置将获得理想的凝汽器抽气压力。在每一级之间布置有冷却器,以凝结来自上游抽气器的工作蒸汽负荷。

E.2.1 性能参数

影响射汽抽气器性能的参数如下:

- a) 抽气压力和温度;
- b) 出口压力和系统背压;
- c) 工作蒸汽压力、温度和湿度;
- d) 汽-气流量;
- e) 中间冷却器/后冷却器的冷却水进口温度;
- f) 中间冷却器/后冷却器的冷却水流量。

E.2.2 关键测量

评价射汽抽气器性能的关键测量参数如下:

- a) 抽气压力和温度;
- b) 工作蒸汽的压力和温度;
- c) 汽-气流量;
- d) 中间冷却器的冷却水进口温度和流量。

E.3 液环真空泵

液环真空泵是旋转容积泵的一种特殊形式,利用液体作为主要元件来压缩不凝结气体。可利用泵壳内侧和安装叶片叶轮之间的相对偏心所产生的液环进行压缩。

当叶轮旋转时,由于叶轮的偏心布置使得动叶室一会儿接近注满液体,一会儿部分排空,容积成周期性变化。空间容积的往复变化使得相邻两叶片之间起活塞作用。

泵壳内的一部分工作液体随气体连续地排出以带走运行时产生的热量。

E.3.1 性能参数

影响真空泵性能的参数如下:

- a) 抽气压力和温度;
- b) 出口压力、背压和空气系统;
- c) 转速;

- d) 抽气功率;
- e) 密封水的流量和温度;
- f) 冷却水流量和温度;
- g) 汽-气流量。

E 3 2 关键测量

评价真空泵性能的主要测量参数如下:

- a) 抽气压力和温度;
- b) 密封水的流量和温度;
- c) 冷却水流量和温度;
- d) 汽-气流量。

E 4 汽-气混合物的排出

凝汽器排气管的汽-气混合物的状态对凝汽器性能计算的影响很小, 然而对排气设备的性能有显著的影响, 并且大量混合物蒸汽蒸发到空气中的现象是凝汽器出现故障的征兆。

如果凝汽器排气管的混合物温度不低于凝汽器的冷却水出口温度, 则表明抽气器的蒸汽负荷增大, 这将对排气设备的性能产生不利影响。

通过精确测量汽-气混合物在凝汽器排气管的压力和温度, 以确定其排出凝汽器的状态。

可以通过式 (E.1) 计算不凝结气体中的饱和蒸汽含量:

$$W_v = \frac{m_v}{m_G} \frac{p_v}{p_T - p_v} \quad (\text{E.1})$$

式中:

W_v ——单位质量不凝结气体中的蒸汽质量;

m_v ——水蒸气的分子量;

m_G ——不凝结气体的分子量;

p_T ——凝汽器排气口处混合物的总压力, kPa;

p_v ——与凝汽器排气口处混合物温度对应的蒸汽分压力, kPa。

对水蒸气和空气的混合物, 蒸汽的分子量为 18, 空气的分子量为 29, 则

$$W_v = 0.62 \frac{p_v}{p_T - p_v} \quad (\text{E.2})$$

E.5 漏入的空气量

除沸水堆外, 可以在射汽抽气器系统的后冷却器出口和液环真空泵系统的气水分离器出口测量排气量来确定漏入的空气量。

对于流出系数为 0.607 的法兰连接的节流孔板, 可利用式 (E.3) 计算漏入的空气量:

$$\text{SCFM}_{\text{dry air}} = 61.68 d^2 \frac{p_T - p_v}{T + 273.15} \sqrt{\frac{\Delta H}{\rho (1 - \beta^4)}} \quad (\text{E.3})$$

式中:

ρ ——实际工况下的空气密度, kg/m^3 ;

d ——节流件的孔径, m;

ΔH ——差压, kPa;

β ——节流件的孔径/上游管道内径, m;

p_T ——混合物的总压力, kPa;

p_v ——混合物中水蒸气的分压力, kPa;

T ——混合物温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

附 录 F
(资料性附录)
冷却管清洁度诊断

在对管子进行清洁前后,利用热传导测量装置测量单根管子的传热系数以获得清洁度。热传导测量装置是用来测量凝汽器单根采样管传热系数的试验设备,可用来测量热负荷、进口温度、出口温度、冷却水流量和最小的有效表面积。根据设备的设计,许多方法可以用来模拟从常规蒸汽到高温蒸汽的温度变化,这些测量方法也可以用来测量采样管的总体传热系数。

这种方法需要从凝汽器中达成协议的区域取出管子,仔细研究、选择试验管子。如果试验管子的脏污程度高于平均水平,则试验得出的清洁度偏小;反之,管子的脏污程度低于平均水平,则试验得出的清洁度偏大,这将导致错误的结果。例如:在生成钙垢的情况下,钙垢很快地在进口端和出口端之间形成,因此在取出选好的管子后,插入认可的热传导试验设备,测量管子的多个部分,然后取平均值,则可以减小这种误差。

必须确保污垢保留在管壁上,以获得具有代表性的试验结果。

在模拟蒸汽温度时,如果管子还在设备里,并且达到稳定状态,则利用式(F.1)计算:

$$U = \frac{wc_p}{A} \left(\ln \frac{T_s - T_1}{T_s - T_2} \right) \quad (\text{F.1})$$

在可接受的试验工况下完成试验后,计算出具有代表性的传热系数 U_f 后,将管子从测量设备中取出,进行酸洗。在酸洗完成之后,重复试验以获得清洁管子的传热系数 U_c 。

清洁度是脏污管的传热系数和清洁管的传热系数之比,即 U_f/U_c 。

一些设备允许利用三个测量阶段来确定管子的材料、内表面污垢和外表面污垢的传热阻力,以全面绘出在各处传热能力的变化。先测量管子在初始条件下的传热系数,然后把管子从测量设备中取出,对外表面进行清洁(必须注意不能破坏内表面的脏污状态),测得第二个传热系数,管子在初始条件下的传热系数和仅外表面清洁后的传热系数的差值就是由外表面污垢的热阻造成的。再把管子从测量设备中取出,再对内表面进行清洁,测量得到第三个传热系数。这种方法计算的清洁管传热系数与标准规定的热阻求和法计算出的新管的传热系数相差不大。测量设备的试验重复率对这一系列试验是至关重要的,当前的测量设备显示的重复率为量程的 $\pm 3\%$ 。

附 录 G
(资料性附录)
计 算 实 例

本附录举例说明了表面式凝汽器热力性能试验的计算, 计算以单流程凝汽器为基础。表 G.1 给出了凝汽器的设计参数。表 G.2 概述了试验过程中采集到的数据。表 G.3 给出了设计和试验工况下冷却水和蒸汽的性质。表 G.4 给出了清洁度试验的数据和计算, 清洁度试验必须与凝汽器试验同时进行。

本例遵循第 6 章的计算程序。

表 G.1 凝汽器设计参数

名 称	单 位	数 值	名 称	单 位	数 值
型式		单 压	冷却水流通面积	m ²	8.12
流程数		1	冷却水进口温度	℃	18.3
管子数	个	26550	冷却水出口温度	℃	27.0
管子材质		90/10 CU/NI	冷却水流量	kg/s	17640
管子热导率	W/(m·K)	45	清洁度	%	85
管子外径	m	22.225×10^{-3}	凝汽器压力	kPa	5.09
壁厚	m	1.2446×10^{-3}	凝汽器热负荷	W	6.4165×10^8
有效长度	m	12.002	凝汽器水阻	kPa	43.27
管子外表面积	m ²	22247	凝结水流量	kg/s	280

表 G.2 试 验 数 据

名 称	测 点	平均值	读数个数	标准偏差
冷却水进口温度 ℃	1	23.9	60	0.0833
	2	23.8	60	0.0794
	平均	23.8		
冷却水出口温度 ℃	1	34.7	60	0.264
	2	33.5	60	0.296
	3	32.1	60	0.209
	4	30.7	60	0.329
	5	34.0	60	0.372
	6	33.4	60	0.184
	7	31.9	60	0.253
	8	30.6	60	0.182
	平均	32.6		
冷却水流量 m ³ /s		18.574	12	0.133*
凝汽器压力 kPa	1	6.84	60	0.352
	2	6.81	60	0.296
	3	6.81	60	0.256
	4	6.77	60	0.282
	5	6.61	60	0.374
	6	6.77	60	0.334
	7	6.70	60	0.263

表 G.2 (续)

名 称	测 点	平均值	读数个数	标准偏差
凝汽器压力 kPa	8	6.77	60	0.289
	9	6.81	60	0.183
	10	6.74	60	0.147
	11	6.84	60	0.227
	12	6.77	60	0.282
	平均	6.77		
凝结水流量 kg/s		304	5	2.39
凝汽器水阻 kPa		46.85	12	1.04

注：冷却水平均流量用皮托管来测量；标准偏差基于管子中心点处皮托管的 12 个读数。

G.1 基本传热关系

G.1.1 凝汽器热负荷

按照式 (G1) 计算试验工况下的凝汽器热负荷：

$$Q^+ = w^+ c_p^+ (T_2^+ - T_1^+) = 6.8033 \times 10^8 \text{ (W)} \quad (\text{G1})$$
$$w^+ = 18.574 \text{ (m}^3/\text{s)} \times 996 \text{ (kg/m}^3\text{)} = 18499.7 \text{ (kg/s)}$$

G.1.2 总体传热系数

按式 (G2) 计算试验工况下的总体传热系数：

$$U^+ = \frac{Q^+}{A_o \text{LMTD}^+} = 3208.07 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]} \quad (\text{G2})$$

$$\text{LMTD}^+ = \frac{T_2^+ - T_1^+}{\ln \left(\frac{T_s^+ - T_1^+}{T_s^+ - T_2^+} \right)} = 9.5 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (\text{G3})$$

$$T_s^+ = f\{p_s^+\} = 38.4 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

由水蒸气表查得。

表 G.3 蒸汽和冷却水的性质

项 目		设 计	试 验
凝汽器的蒸汽性质	凝汽器压力 kPa	5.09	6.77
	凝汽器压力对应的饱和温度 ℃	33.2	38.4
	密度 kg/m ³	0.0361	0.0472
冷却水性质	冷却水平均温度 ℃	22.7	28.2
	比热 J/kg · K	4181	4179

表 G.3 (续)

项 目	设 计	试 验
冷却水性质	导热系数 W/(m ² ·K)	0.604
	黏度, kg/(m·s)	9.344×10 ⁻⁴
	密度, kg/m ³	998
		996

G.1.3 管壁热阻

管壁热阻按式 (G4) 计算:

$$R_m^+ = \frac{D_o}{2k_m} \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) = 0.000029333 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)} \quad (\text{G4})$$

G.1.4 管侧热阻

按照 Rabas-Crane 公式计算管侧热阻, 公式如下:

$$R_i^+ = \left[0.0158 \frac{k^+}{D_i} (Re^+)^{0.835} (Pr^+)^{0.462} \right]^{-1} = 0.00010190 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)} \quad (\text{G5})$$

$$Re^+ = \frac{\rho^+ v^+ D_i}{\mu^+} = 54468.6$$

$$Pr^+ = \frac{c_p^+ \mu^+}{k^+} = 5.6369$$

表 G.4 污垢热阻试验

管 组	T_t ℃	T_k ℃	T_f ℃	T_c ℃	R_f m ² ·K/W
1	23.8	38.4	33.3	33.9	3.242×10 ⁻⁵
2	23.8	38.4	33.5	34.3	3.618×10 ⁻⁵
3	23.8	38.4	33.5	34.3	3.861×10 ⁻⁵
4	23.8	38.4	33.3	34.1	4.000×10 ⁻⁵
5	23.8	38.4	33.1	34.0	4.368×10 ⁻⁵
6	23.8	38.4	33.0	33.9	4.709×10 ⁻⁵
7	23.8	38.4	33.7	34.4	3.288×10 ⁻⁵
8	23.8	38.4	33.8	34.4	2.996×10 ⁻⁵
9	23.8	38.4	33.5	34.4	4.101×10 ⁻⁵
10	23.8	38.4	33.3	34.3	4.697×10 ⁻⁵
11	23.8	38.4	33.1	34.0	4.664×10 ⁻⁵
12	23.8	38.4	33.0	33.9	4.452×10 ⁻⁵
13	23.8	38.4	33.1	34.0	4.664×10 ⁻⁵
14	23.8	38.4	32.9	33.9	5.011×10 ⁻⁵

G.1.5 污垢热阻

按照 6.2.5 完成的污垢热阻计算结果如表 G4 所示, 得到的污垢热阻为:

$$R_f^+ = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} R_{f,i}^+ = 0.000041194 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)} \quad (\text{G6})$$

G.1.6 壳侧热阻

按照式 (G7) 确定试验工况下的壳侧热阻:

$$R_s^* = \frac{1}{U^*} - R_m^* - R_i^* \left(\frac{D_o}{D_i} \right) - R_f^* = 0.00012643 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)} \quad (\text{G7})$$

G.2 凝汽器压力偏差结果计算

G.2.1 管壁热阻

管壁热阻是个常量, 仅取决于壁厚和材料, 则有:

$$R_m^0 = R_m^* = 0.000029333 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)} \quad (\text{G8})$$

G.2.2 管侧热阻

按式 (G9) 计算在设计工况下的管侧热阻:

$$R_i^* = \left[0.0158 \frac{k^*}{D_i} (Re^*)^{0.835} (Pr^*)^{0.462} \right]^{-1} = 0.00011181 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)} \quad (\text{G9})$$

$$Re^* = \frac{\rho^* v^* D_i}{\mu^*} = 45883.4$$

$$Pr^* = \frac{c_p \mu}{k^*} = 6.4681$$

G.2.3 污垢热阻

设计工况的污垢热阻由设计工况的清洁度确定, 计算如下:

$$R_f^* = \frac{1 - c_f^*}{U^*} = 0.000051603 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)} \quad (\text{G10})$$

$$U^* = \frac{Q^*}{A_o \text{LMTD}^*} = 2906.79 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]} \quad (\text{G11})$$

$$\text{LMTD}^* = \frac{T_2^* - T_1^*}{\ln \left(\frac{T_s^* - T_1^*}{T_s^* - T_2^*} \right)} = 9.9 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (\text{G12})$$

由水蒸气表查得:

$$T_s^* = f\{p_s^*\} = 33.2 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

G.2.4 壳侧热阻

修正到设计工况的壳侧热阻的确定如下:

1. 设计工况下的冷凝液膜温度为:

$$T_F^* = T_s^* - 0.2 \text{LMTD}^* = 31.2 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (\text{G13})$$

2. 试验工况下的冷凝液膜温度为:

$$T_F^+ = T_s^+ - 0.2 \text{LMTD}^+ = 36.5 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (\text{G14})$$

3. 设计工况和试验工况下凝结水的物理性质分别由 T_F^* 和 T_F^+ 确定, 则修正后的壳侧热阻为:

$$R_s^0 = R_s^* \left(\frac{W_s^+}{W_s^*} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_1^+}{\mu_1^*} \right)^{1/3} \left(\frac{k_1^*}{k_1^+} \right) \left(\frac{\rho_1^*}{\rho_1^+} \right)^{2/3} = 0.00012408 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)} \quad (\text{G15})$$

G.2.5 总体传热系数

修正到设计工况的总体传热系数计算如下：

$$R_i^0 = R_i^* = 0.00011181 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)} \quad (\text{G16})$$

$$R_f^0 = R_f^* = 0.000051603 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)} \quad (\text{G17})$$

$$U^0 = \frac{1}{R_m^0 + R_i^0 \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + R_f^0 + R_s^0} = 3021.75 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]} \quad (\text{G18})$$

G.2.6 效能—传热单元数法

修正到设计工况的凝汽器压力的计算如下：

$$\text{NTU}^0 = \frac{U^0 A_o}{c_p w^*} = 0.91149 \quad (\text{G19})$$

$$T_s^0 = \frac{T_2^* - T_1^* e^{-\text{NTU}^0}}{1 - e^{-\text{NTU}^0}} = 32.85 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (\text{G20})$$

由水蒸气表查得：

$$p_s^0 = f\{T_s^0\} = 4.99 \text{ (kPa)}$$

G.2.7 结果评定

按下式计算凝汽器修正压力和凝汽器设计压力的差值：

$$\Delta p_s = p_s^* - p_s^0 = 5.09 - 4.99 = 0.10 \text{ (kPa)} \quad (\text{G21})$$

因此，凝汽器的实际性能要比设计稍好。

G.3 凝汽器水阻偏差结果计算

由于试验和设计的冷却水流量不相同，需要对试验测得的凝汽器水阻作如下修正：

$$\Delta p_w^0 = \Delta p_w^* \left(\frac{w^*}{w^*} \right)^{1.8} = 43.00 \text{ (kPa)} \quad (\text{G22})$$

因此，修正后的凝汽器水阻要比设计值小 0.27kPa。

G.4 不确定度分析

G.4.1 凝汽器修正压力的不确定度

G.4.1.1 灵敏系数

把设计值和试验值带入 6.5 给出的公式中计算灵敏系数。

蒸汽流量的灵敏系数：

$$\Theta_{w_i^*} = \frac{F_1 F_2 R_s^0}{3 W_s^*} = 9.2915 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{kPa}}{\text{kg/s}} \right) \quad (\text{G23})$$

$$F_1 = 0.05031 e^{0.04925 T_i^0} = 0.2536 \text{ (kPa/}^\circ\text{C)} \quad (\text{G24})$$

$$F_2 = \frac{(T_2^* - T_1^*) \text{NTU}^0 U^0 e^{-\text{NTU}^0}}{(1 - e^{-\text{NTU}^0})^2} = 26925.516 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (\text{G25})$$

冷却水流量的灵敏系数：

$$\begin{aligned} \Theta_{w^*} &= \frac{F_1 F_2 R_s^0}{R_s^*} \left[\frac{-1/U^* + 0.835 R_i^* (D_o/D_i) + R_f^*}{w^*} \right] \\ &= -6.3292 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{kPa}}{\text{kg/s}} \right) \end{aligned} \quad (\text{G26})$$

冷却水进口温度的灵敏系数:

$$\Theta_{T_1^+} = \frac{F_1 F_2 R_s^0}{R_s^+} \frac{w^+ c_p^+}{(U^+)^2 (T_s^+ - T_1^+) A_0} = 0.1550 \text{ (kPa/}^\circ\text{C)} \quad (\text{G27})$$

冷却水出口温度的灵敏系数:

$$\Theta_{T_2^+} = -\frac{F_1 F_2 R_s^0}{R_s^+} \frac{w^+ c_p^+}{(U^+)^2 (T_s^+ - T_2^+) A_0} = -0.3902 \text{ (kPa/}^\circ\text{C)} \quad (\text{G28})$$

凝汽器压力的灵敏系数:

$$\begin{aligned} \Theta_{P_s} = & \frac{F_1 F_2 F_3 R_s^0}{R_s^+} \left\{ \frac{w^+ c_p^+ (T_2^+ - T_1^+)}{(U^+)^2 A_0 (T_s^+ - T_1^+) (T_s^+ - T_2^+)} \right. \\ & - \frac{A_0}{w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \left[\frac{(\text{LMTD}_{f,i}^+)^2}{(T_{2,f,i}^+ - T_{1,f,i}^+) (T_s^+ - T_{1,f,i}^+) (T_s^+ - T_{2,f,i}^+)} \right. \\ & \left. \left. - \frac{(\text{LMTD}_{c,i}^+)^2}{(T_{2,c,i}^+ - T_{1,c,i}^+) (T_s^+ - T_{1,c,i}^+) (T_s^+ - T_{2,c,i}^+)} \right] \right\} \\ & = 0.6706 \text{ (kPa/kPa)} \end{aligned} \quad (\text{G29})$$

$$F_3 = \frac{1}{0.05031 e^{0.04925 T_s^+}} = 2.9992 \text{ (}^\circ\text{C/kPa)} \quad (\text{G30})$$

脏污管的进口水温的灵敏系数:

$$\begin{aligned} \Theta_{T_{1,i}^+} = & -\frac{F_1 F_2 R_s^0 A_0}{R_s^+ w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1,f,i}^+}{T_s^+ - T_{2,f,i}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{1,f,i}^+)} \\ & = -0.1216 \text{ (kPa/}^\circ\text{C)} \end{aligned} \quad (\text{G31})$$

脏污管的出口水温的灵敏系数:

$$\begin{aligned} \Theta_{T_{2,i}^+} = & \frac{F_1 F_2 R_s^0 A_0}{R_s^+ w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1,f,i}^+}{T_s^+ - T_{2,f,i}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{2,f,i}^+)} \\ & = 0.3452 \text{ (kPa/}^\circ\text{C)} \end{aligned} \quad (\text{G32})$$

清洁管的进口水温的灵敏系数:

$$\begin{aligned} \Theta_{T_{1,e}^+} = & \frac{F_1 F_2 R_s^0 A_0}{R_s^+ w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1,c,i}^+}{T_s^+ - T_{2,c,i}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{1,c,i}^+)} \\ & = 0.0879 \text{ (kPa/}^\circ\text{C)} \end{aligned} \quad (\text{G33})$$

清洁管的出口水温的灵敏系数:

$$\begin{aligned} \Theta_{T_{2,e}^+} = & -\frac{F_1 F_2 R_s^0 A_0}{R_s^+ w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1,c,i}^+}{T_s^+ - T_{2,c,i}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{2,c,i}^+)} \\ & = -0.2999 \text{ (kPa/}^\circ\text{C)} \end{aligned} \quad (\text{G34})$$

G.4.1.2 误差范围和精度指数

按照 ASME PTC 19.1 《Measurement Uncertainty》中给出的方法来确定每个测量参数的误差范围和精度指数。虽然表 G5 给出的值对按照本标准完成的试验很有代表性,但这只是一个例子,实际的值必须通过具体的试验来确定,其值取决于凝汽器的设计、使用的仪表和试验工况。这个例子的误差范围和

精度指数见表 G.5。

表 G.5 误差范围和精度指数示例

被 测 参 数	灵 敏 系 数	误 差 范 围	精 度 指 数
蒸汽流量 W_s^+	9.2915×10^{-4} kPa/(kg/s)	$\pm 7.6 \text{ kg/s}$ ($\pm 2.5\%$)	$\pm 0.638 \text{ kg/s}$ ($\pm 0.21\%$)
冷却水流量 w^+	-6.3292×10^{-5} kPa/(kg/s)	$\pm 647 \text{ kg/s}$ ($\pm 3.5\%$)	$\pm 70 \text{ kg/s}$ ($\pm 0.38\%$)
冷却水进口温度 T_{1f}^+	$0.1550 \text{ kPa/}^\circ\text{C}$	$\pm 0.11^\circ\text{C}$	$\pm 0.012^\circ\text{C}$
冷却水出口温度 T_{2f}^+	$-0.3902 \text{ kPa/}^\circ\text{C}$	$\pm 0.28^\circ\text{C}$	$\pm 0.036^\circ\text{C}$
凝汽器压力 p_s^+	0.6706 kPa/kPa	$\pm 0.34 \text{ kPa}$	$\pm 0.045 \text{ kPa}$
脏污管的进口水温 T_{1f}^+	$-0.1216 \text{ kPa/}^\circ\text{C}$	$\pm 0.11^\circ\text{C}$	$\pm 0.012^\circ\text{C}$
脏污管的出口水温 T_{2f}^+	$0.3452 \text{ kPa/}^\circ\text{C}$	$\pm 0.42^\circ\text{C}$	$\pm 0.050^\circ\text{C}$
清洁管的进口水温 T_{1c}^+	$0.0879 \text{ kPa/}^\circ\text{C}$	$\pm 0.11^\circ\text{C}$	$\pm 0.012^\circ\text{C}$
清洁管的出口水温 T_{2c}^+	$-0.2999 \text{ kPa/}^\circ\text{C}$	$\pm 0.42^\circ\text{C}$	$\pm 0.050^\circ\text{C}$

注：不确定度相关术语的中英文对照：误差范围——Bias limit；精度指数——Precision index。

G 4.1.3 结果不确定度

修正到设计工况的凝汽器压力的不确定度的计算式如下：

误差范围部分：

$$\begin{aligned}
 B_{p_s^+}^2 &= (\Theta_{w_s^+} B_{w_s^+})^2 + (\Theta_{w^+} B_{w^+})^2 + (\Theta_{p_s^+} B_{p_s^+})^2 \\
 &\quad + (\Theta_{T_{1f}^+} B_{T_{1f}^+})^2 + (\Theta_{T_{2f}^+} B_{T_{2f}^+})^2 + (\Theta_{T_{1f}^+} B_{T_{1f}^+})^2 \\
 &\quad + (\Theta_{T_{2f}^+} B_{T_{2f}^+})^2 + (\Theta_{T_{1c}^+} B_{T_{1c}^+})^2 + (\Theta_{T_{2c}^+} B_{T_{2c}^+})^2 \\
 &= 0.1031 \text{ (kPa)}^2 \\
 B_{p_s^+} &= \pm 0.321 \text{ (kPa)}
 \end{aligned} \tag{G.35}$$

精度指数部分：

$$\begin{aligned}
 S_{p_s^+}^2 &= (\Theta_{w_s^+} S_{w_s^+})^2 + (\Theta_{w^+} S_{w^+})^2 + (\Theta_{p_s^+} S_{p_s^+})^2 \\
 &\quad + (\Theta_{T_{1f}^+} S_{T_{1f}^+})^2 + (\Theta_{T_{2f}^+} S_{T_{2f}^+})^2 + (\Theta_{T_{1f}^+} S_{T_{1f}^+})^2 \\
 &\quad + (\Theta_{T_{2f}^+} S_{T_{2f}^+})^2 + (\Theta_{T_{1c}^+} S_{T_{1c}^+})^2 + (\Theta_{T_{2c}^+} S_{T_{2c}^+})^2 \\
 &= 1.657 \text{E} - 03 \text{ (kPa)}^2 \\
 S_{p_s^+} &= \pm 0.041 \text{ (kPa)}
 \end{aligned} \tag{G.36}$$

总不确定度：

基于表 G.2 给出的每个测量参数的读数个数，其有效自由度大于 30，因此可以由表 7 查得学生式分布的 t 值为 2.00。总不确定度确定如下：

$$Un_{p_s^+} = \sqrt{B_{p_s^+}^2 + (t_v S_{p_s^+})^2} = \pm 0.331 \text{ (kPa)} \tag{G.37}$$

G 4.2 凝汽器水阻的不确定度

修正到设计工况下的凝汽器水阻的计算式如下：

$$\Theta_{\Delta p_w^0} = \frac{\Delta p_w^0}{\Delta p_w^+} = 0.9179 \text{ (kPa/kPa)} \quad (\text{G38})$$

灵敏系数如下:

$$\Theta_{w^+} = -\frac{1.8 \times \Delta p_w^0}{w^+} = -4.1843 \times 10^{-3} \left(\frac{\text{kPa}}{\text{kg/s}} \right) \quad (\text{G39})$$

误差范围和精度指数的计算如下:

$$B_{\Delta p_w^0} = \sqrt{(\Theta_{\Delta p_w^0} B_{\Delta p_w^+})^2 + (\Theta_{w^+} B_{w^+})^2} = \pm 2.763 \text{ (kPa)} \quad (\text{G40})$$

$$S_{\Delta p_w^0} = \sqrt{(\Theta_{\Delta p_w^0} S_{\Delta p_w^+})^2 + (\Theta_{w^+} S_{w^+})^2} = \pm 0.316 \text{ (kPa)} \quad (\text{G41})$$

冷却水流量和凝汽器水阻的自由度均为 11, 按照 ASME PTC 19.1 中给出的 Welch-Satterthwaite 公式, 有效自由度见表 G6。

表 G.6 有效自由度

参 数	$\times S$	$(\times S)^2$	$(\times S)^4/11$
压降	0.9179×0.13	0.014	1.843×10^{-5}
流量	$4.1843 \text{E-}03 \times 70$	0.086	6.691×10^{-4}

$$\text{有效自由度} = (0.014 + 0.086)^2 / (1.843 \times 10^{-5} + 6.691 \times 10^{-4}) \approx 14$$

95%的置信水平下自由度为 14 的学生式分布 t 值为 2.145, 所以总不确定度计算如下:

$$Un_{\Delta p_w^0} = \sqrt{(2.6731)^2 + (2.145 \times 0.316)^2} = \pm 2.84 \text{ (kPa)} \quad (\text{G42})$$

附 录 H
(资料性附录)
自 动 数 据 采 集 系 统

本附录为使用自动数据采集系统(DAS)提供指导。DAS 可以提高数据采集和分析水平,并可以完成以下工作:

- a) 同时读出并记录所有采样点的数据。
- b) 数据的采样频率大于第 4 章描述的系统。
- c) 在数据的采集时间内,同时进行测量,如第 4 章描述的那样。
- d) 采集到的数据的精度高于 5.3 所给出的精度。

基于计算机的便携式 DAS 集成了现代传感技术和可靠的模拟数字转换装置,能够实现上述目标。

DAS 还具有以下优点:

- a) 减小其外形以方便携带。
- b) 灵活的网络以分析传感器和拦截错误。
- c) 对超出范围的数值进行标记,并发出警报。
- d) 图示数据变化趋势和图示结果。
- e) 大量数据存储,并且易于数据检索。
- f) 便于展开计算和输出数据供第三方进行热力学模型分析。

DAS 具有手动数据采集系统无法替代的优势,例如:

- a) 以非常高的频率进行实时数据采集。
- b) 减少数据记录人员。
- c) 减少数据记录的错误。
- d) 迅速完成试验工况和结果的确认,这将有效预防重复试验和减少开支。

附录 I
(资料性附录)
凝汽器压力不确定度分析

I.1 说明

将试验测量值按照 6.2~6.4 给出的计算方法来确定凝汽器性能试验的结果,即修正到设计工况的凝汽器压力和凝汽器水阻。按照 ASME PTC 19.1 《Measurement Uncertainty》,通过泰勒级数展开把测量参数的误差估计传递到结果的不确定度。误差范围和精度指数是单独传递的,它们在不确定度分析的最后一步又合成为总不确定度。因为灵敏系数把每个测量参数的误差和结果的总误差联系起来,所以需要把灵敏系数展开后才能把单个测量参数的不确定度传递到结果不确定度中去。我们可以通过中心差分法和解析法来展开公式。通过结果计算公式的偏微分来确定 6.5.3 的灵敏系数。本附录给出了凝汽器压力灵敏系数的推导过程。

6.4 给出了试验的其他目标参数的灵敏系数,例如可以直接测得的凝汽器水阻。

I.2 修正的凝汽器压力的灵敏系数

修正的凝汽器压力是以下独立测量参数的函数:

$$p_s^0 = f\{W_s^+, w^+, T_1^+, T_2^+, p_s^+, T_{1,fi}^+, T_{2,fi}^+, T_{1,ci}^+, T_{2,ci}^+\}$$

通过泰勒级数展开,得到式 (I.1):

$$\begin{aligned} B_{p_s^0}^2 = & \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial W_s^+} \right)^2 B_{W_s^+}^2 + \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial w^+} \right)^2 B_{w^+}^2 + \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial T_1^+} \right)^2 B_{T_1^+}^2 \\ & + \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial T_2^+} \right)^2 B_{T_2^+}^2 + \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial p_s^+} \right)^2 B_{p_s^+}^2 + \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial T_{1,fi}^+} \right)^2 B_{T_{1,fi}^+}^2 \\ & + \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial T_{2,fi}^+} \right)^2 B_{T_{2,fi}^+}^2 + \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial T_{1,ci}^+} \right)^2 B_{T_{1,ci}^+}^2 + \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial T_{2,ci}^+} \right)^2 B_{T_{2,ci}^+}^2 \end{aligned} \quad (I.1)$$

$$B_{p_s^0} = dp_s^0 \quad (I.2)$$

$$B_{W_s^+} = dW_s^+ \quad (I.3)$$

上述两式均为各参数测量值的误差范围。

把式 (I.1) 中的误差范围 B_j 替换为精度指数 S_j , 则可以得到精度指数的传递方程。

本标准的 6.2 和 6.3 的计算过程给出了一系列的方程。这些方程可以合并为一个独立的方程,但这样会涉及很多的求导方程,因而先确定所有方程的偏导数,并通过链式法则联系起来。灵敏系数展开要用到 6.2 和 6.3 的公式,并以微分的形式重新给出。

$$p_s^0 = f\{T_s^0\} \quad (I.4)$$

$$T_s^0 = \frac{T_2^* - T_1^* e^{-NTU^0}}{1 - e^{-NTU^0}} \quad (I.5)$$

$$NTU^0 = \frac{U^0 A_0}{c_p^* w^*} \quad (I.6)$$

$$U^0 = \frac{1}{R_m^0 + R_i^0 \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + R_f^0 + R_s^0} \quad (I.7)$$

$$R_s^0 = R_s^* \left(\frac{W_s^*}{W_s^*} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu^*}{\mu^*} \right)^{1/3} \left(\frac{k^*}{k^*} \right) \left(\frac{\rho^*}{\rho^*} \right)^{2/3} \quad (I.8)$$

$$R_s^* = \frac{1}{U^*} - R_m^* - R_i^* \left(\frac{D_o}{D_i} \right) - R_f^* \quad (I.9)$$

$$\frac{1}{U^*} = \frac{A_o}{w^* c_p^* \ln \left(\frac{T_s^* - T_{1,i}^*}{T_s^* - T_{2,i}^*} \right)} \quad (I.10)$$

$$R_i^* = \frac{\mu^{+0.373}}{0.0158 k^{+0.538} c_p^{+0.462}} D_i^{0.165} w^{+0.835} \quad (I.11)$$

$$R_f^* = \frac{A_o}{w^* c_p^*} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \left(\frac{1}{\ln \frac{T_s^* - T_{1,i}^*}{T_s^* - T_{2,i}^*}} - \frac{1}{\ln \frac{T_s^* - T_{1,e,i}^*}{T_s^* - T_{2,e,i}^*}} \right) \quad (I.12)$$

从式 (I.4) 开始将偏导数展开, 在 0℃~65.6℃ 范围内饱和压力的偏导数如下:

$$\begin{aligned} dp_s^0 &= \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial T_s^0} \right) dT_s^0 \\ \frac{\partial p_s^0}{\partial T_s^0} &= \frac{\Delta p_s^0}{\Delta T_s^0} = F_1 = 0.05031 e^{0.04925 T_s^0} \text{ (kPa/℃)} \end{aligned} \quad (I.13)$$

然后, 由式 (I.5) 得:

$$dT_s^0 = \left(\frac{\partial T_s^0}{\partial NTU^0} \right) dNTU^0 \quad (I.14)$$

$$\frac{\partial T_s^0}{\partial NTU^0} = \frac{T_2^* - T_s^0}{1 - e^{-NTU^0}} \quad (I.15)$$

(注意 T_1^* 和 T_2^* 是确定的设计值, 因此其偏导数为 0)

由式 (I.6) 得:

$$dNTU^0 = \left(\frac{\partial NTU^0}{\partial U^0} \right) dU^0 \quad (I.16)$$

$$\frac{\partial NTU^0}{\partial U^0} = \frac{NTU^0}{U^0} \quad (I.17)$$

(注意 A_o , c_p^* 和 w^* 是确定的设计值, 因此其偏导数为 0)

由式 (I.7) 得:

$$dU^0 = \left(\frac{\partial U^0}{\partial R_s^0} \right) dR_s^0 \quad (I.18)$$

$$\frac{\partial U^0}{\partial R_s^0} = -(U^0)^2 \quad (I.19)$$

(注意 R_m^0 , R_i^0 和 R_f^0 是确定的设计值, 因此其偏导数为 0)

用链式法则把这些项联系起来, 则有:

$$F_2 = \left(\frac{\partial T_s^0}{\partial R_s^0} \right) = \left(\frac{\partial T_s^0}{\partial NTU^0} \right) \left(\frac{\partial NTU^0}{\partial U^0} \right) \left(\frac{\partial U^0}{\partial R_s^0} \right)$$

$$F_2 = \frac{(T_2^* - T_1^*) NTU^0 U^0 e^{-NTU^0}}{(1 - e^{-NTU^0})^2} \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{I.20})$$

由式 (I.8) 得:

$$(\text{d}R_s^0)^2 = \left(\frac{\partial R_s^0}{\partial R_s^+} \right)^2 (\text{d}R_s^+)^2 + \left(\frac{\partial R_s^0}{\partial W_s^+} \right)^2 (\text{d}W_s^+)^2 \quad (\text{I.21})$$

$$\frac{\partial R_s^0}{\partial R_s^+} = \frac{R_s^0}{R_s^+} \quad (\text{I.22})$$

$$\frac{\partial R_s^0}{\partial W_s^+} = \frac{R_s^0}{3 W_s^+} \left(\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}}{\text{kg/s}} \right) \quad (\text{I.23})$$

设计的排汽量是一个确定的设计值, 因此其偏导数为 0。修正工况和试验工况的冷却水和蒸汽的物性参数是不确定的, 但是这些物性参数的偏导数对测量参数灵敏系数计算的影响是可以忽略的。从而, 可以假定这些偏导数等于 0 以简化不确定度分析。

至此, 试验测得排汽量的灵敏系数的偏导数计算已经完成。由于

$$B_{w_s^+} = \text{d}W_s^+$$

$$S_{w_s^+} = \text{d}W_s^+$$

因此, 联合式 (I.13)、式 (I.20) 和式 (I.23) 有:

$$\Theta_{w_s^+} = \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial T_s^0} \right) \left(\frac{\partial T_s^0}{\partial R_s^0} \right) \left(\frac{\partial R_s^0}{\partial W_s^+} \right) \quad (\text{I.24})$$

或

$$\Theta_{w_s^+} = \frac{F_1 F_2 R_s^0}{3 W_s^+} \left(\frac{\text{kPa}}{\text{kg/s}} \right)$$

其他测量参数的灵敏系数的偏导数计算从式 (I.9) 开始, 则有:

$$(\text{d}R_s^+)^2 = \left(\frac{\partial R_s^+}{\partial w^+} \right)^2 \text{d}w^{+2} + \left(\frac{\partial R_s^+}{\partial T_1^+} \right)^2 \text{d}T_1^{+2} + \left(\frac{\partial R_s^+}{\partial T_2^+} \right)^2 \text{d}T_2^{+2}$$

$$+ \left(\frac{\partial R_s^+}{\partial T_s^+} \right)^2 \text{d}T_s^{+2} + \left(\frac{\partial R_s^+}{\partial T_{1,fi}^+} \right)^2 \text{d}T_{1,fi}^{+2} + \left(\frac{\partial R_s^+}{\partial T_{2,fi}^+} \right)^2 \text{d}T_{2,fi}^{+2}$$

$$+ \left(\frac{\partial R_s^+}{\partial T_{1,ci}^+} \right)^2 \text{d}T_{1,ci}^{+2} + \left(\frac{\partial R_s^+}{\partial T_{2,ci}^+} \right)^2 \text{d}T_{2,ci}^{+2} \quad (\text{I.25})$$

把式 (I.10) ~ 式 (I.12) 代入式 (I.9), 则得到的方程可以计算式 (I.25) 的每个偏导数项。这些偏导数和灵敏系数的计算结果如下。

冷却水流量的灵敏系数:

$$\frac{\partial R_s^+}{\partial w^+} = \frac{-1/U^+ + 0.835 R_s^+ (D_o/D_i) + R_t^+}{w^+} \quad (\text{I.26})$$

联合上式和式 (I.13)、式 (I.20)、式 (I.22) 得到式 (I.27):

$$\Theta_{w_s^+} = \left(\frac{\partial p_s^0}{\partial T_s^0} \right) \left(\frac{\partial T_s^0}{\partial R_s^0} \right) \left(\frac{\partial R_s^0}{\partial R_s^+} \right) \left[\left(\frac{\partial R_s^+}{\partial U^+} \frac{\partial U^+}{\partial w^+} \right) + \left(\frac{\partial R_s^+}{\partial R_t^+} \frac{\partial R_t^+}{\partial w^+} \right) + \left(\frac{\partial R_s^+}{\partial R_i^+} \frac{\partial R_i^+}{\partial w^+} \right) \right] \quad (\text{I.27})$$

即

$$\Theta_{w^+} = \frac{F_1 F_2 R_s^0}{R_s^+} \frac{-1/U^+ + 0.835 R_s^+ (D_o/D_i) + R_i^+}{w^+} \left(\frac{\text{kPa}}{\text{kg/s}} \right) \quad (\text{I.28})$$

冷却水进口温度的灵敏系数:

$$\frac{\partial R_s^+}{\partial T_1^+} = \frac{w^+ c_p^+}{(U^+)^2 (T_s^+ - T_1^+) A_o}$$

运用式 (I.27), 并联立式 (I.13)、式 (I.20) 和式 (I.22), 得:

$$\Theta_{T_1^+} = \frac{F_1 F_2 R_s^0}{R_s^+} \frac{w^+ c_p^+}{(U^+)^2 (T_s^+ - T_1^+) A_o} (\text{kPa}/^\circ\text{C}) \quad (\text{I.29})$$

冷却水出口温度的灵敏系数:

$$\frac{\partial R_s^+}{\partial T_2^+} = -\frac{w^+ c_p^+}{(U^+)^2 (T_s^+ - T_2^+) A_o}$$

运用式 (I.27), 并联立式 (I.13)、式 (I.20) 和式 (I.22), 得:

$$\Theta_{T_2^+} = -\frac{F_1 F_2 R_s^0}{R_s^+} \frac{w^+ c_p^+}{(U^+)^2 (T_s^+ - T_2^+) A_o} (\text{kPa}/^\circ\text{C}) \quad (\text{I.30})$$

凝汽器压力的灵敏系数:

$$\frac{\partial R_s^+}{\partial T_s^+} = \left\{ \frac{w^+ c_p^+ (T_2^+ - T_1^+)}{(U^+)^2 A_o (T_s^+ - T_1^+) (T_s^+ - T_2^+)} - \frac{A_o}{w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \left[\frac{(\text{LMTD}_{fi}^+)^2}{(T_{2fi}^+ - T_{1fi}^+) (T_s^+ - T_{1fi}^+) (T_s^+ - T_{2fi}^+)} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{(\text{LMTD}_{ci}^+)^2}{(T_{2ci}^+ - T_{1ci}^+) (T_s^+ - T_{1ci}^+) (T_s^+ - T_{2ci}^+)} \right] \right\}$$

由式 (I.13) 得:

$$\frac{\partial T_s^+}{\partial p_s^+} = F_3 = \frac{1}{0.05031 e^{0.04925 T_s^+}}$$

然后运用式 (I.27), 并联合式 (I.13)、式 (I.20) 和式 (I.22), 得:

$$\Theta_{p_s^+} = \frac{F_1 F_2 F_3 R_s^0}{R_s^+} \left\{ \frac{w^+ c_p^+ (T_2^+ - T_1^+)}{(U^+)^2 A_o (T_s^+ - T_1^+) (T_s^+ - T_2^+)} - \frac{A_o}{w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \left[\frac{(\text{LMTD}_{fi}^+)^2}{(T_{2fi}^+ - T_{1fi}^+) (T_s^+ - T_{1fi}^+) (T_s^+ - T_{2fi}^+)} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{(\text{LMTD}_{ci}^+)^2}{(T_{2ci}^+ - T_{1ci}^+) (T_s^+ - T_{1ci}^+) (T_s^+ - T_{2ci}^+)} \right] \right\} (\text{kPa}/\text{kPa}) \quad (\text{I.31})$$

脏污管进口水温的灵敏系数:

$$\frac{\partial R_s^+}{\partial T_{1f}^+} = -\frac{A_o}{w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1fi}^+}{T_s^+ - T_{2fi}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{1fi}^+)}$$

运用式 (I.27), 并联立式 (I.13)、式 (I.20) 和式 (I.22), 得:

$$\Theta_{T_{1f}^+} = -\frac{F_1 F_2 R_s^0 A_o}{R_s^+ w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1fi}^+}{T_s^+ - T_{2fi}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{1fi}^+)} (\text{kPa}/^\circ\text{C}) \quad (\text{I.32})$$

脏污管出口水温的灵敏系数:

$$\frac{\partial R_s^+}{\partial T_{2f}^+} = \frac{A_0}{w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1f,i}^+}{T_s^+ - T_{2f,i}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{2f,i}^+)}$$

运用式 (I.27), 并联立式 (I.13)、式 (I.20) 和式 (I.22), 得:

$$\Theta_{T_{2f}} = \frac{F_1 F_2 R_s^0 A_0}{R_s^+ w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1f,i}^+}{T_s^+ - T_{2f,i}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{2f,i}^+)} \quad (\text{kPa}/^\circ\text{C}) \quad (\text{I.33})$$

清洁管进口水温的灵敏系数:

$$\frac{\partial R_s^+}{\partial T_{1,c}^+} = \frac{A_0}{w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1,c,i}^+}{T_s^+ - T_{2,c,i}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{1,c,i}^+)}$$

运用式 (I.27), 并联立式 (I.13)、式 (I.20) 和式 (I.22), 得:

$$\Theta_{T_{1,c}} = \frac{F_1 F_2 R_s^0 A_0}{R_s^+ w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1,c,i}^+}{T_s^+ - T_{2,c,i}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{1,c,i}^+)} \quad (\text{kPa}/^\circ\text{C}) \quad (\text{I.34})$$

清洁管出口水温的灵敏系数:

$$\frac{\partial R_s^+}{\partial T_{2,c}^+} = -\frac{A_0}{w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1,c,i}^+}{T_s^+ - T_{2,c,i}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{2,c,i}^+)}$$

运用式 (I.27), 并联立式 (I.13)、式 (I.20) 和式 (I.22), 得:

$$\Theta_{T_{2,c}} = -\frac{F_1 F_2 R_s^0 A_0}{R_s^+ w^+ c_p^+} \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \frac{1}{\left(\ln \frac{T_s^+ - T_{1,c,i}^+}{T_s^+ - T_{2,c,i}^+} \right)^2 (T_s^+ - T_{2,c,i}^+)} \quad (\text{kPa}/^\circ\text{C}) \quad (\text{I.35})$$

I.3 凝汽器水阻的灵敏系数

修正的凝汽器水阻计算如下:

$$\Delta p_w^0 = \Delta p_w^+ \left(\frac{w^*}{w^+} \right)^{1.8}$$

利用泰勒级数展开得到式 (I.36):

$$B_{\Delta p_w^0}^2 = \left(\frac{\partial \Delta p_w^0}{\partial \Delta p_w^+} \right)^2 B_{\Delta p_w^+}^2 + \left(\frac{\partial \Delta p_w^0}{\partial w^+} \right)^2 B_{w^+}^2 \quad (\text{I.36})$$

把式 (I.36) 中的误差范围 B_j 替换为精度指数 S_j , 可以得到精度指数的传递方程。

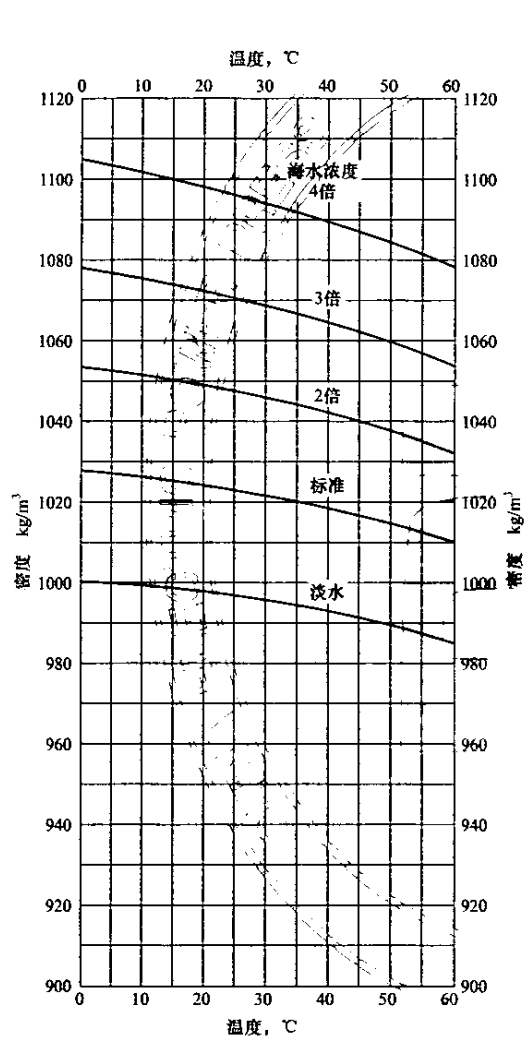
灵敏系数计算如下:

$$\Theta_{\Delta p_w^+} = \frac{\partial \Delta p_w^0}{\partial \Delta p_w^+} = \frac{\Delta p_w^0}{\Delta p_w^+} \quad (\text{kPa}/\text{kPa}) \quad (\text{I.37})$$

$$\Theta_{w^+} = \frac{\partial \Delta p_w^0}{\partial w^+} = -\frac{1.8 \Delta p_w^0}{w^+} \left(\frac{\text{kPa}}{\text{kg/s}} \right) \quad (\text{I.38})$$

附录 J
(资料性附录)
海水物理性质

J.1 海水的物理性质见图 J.1~图 J.4。



注：本图用到的海水标准浓度为 34.483‰。
图 J.1 海水的密度

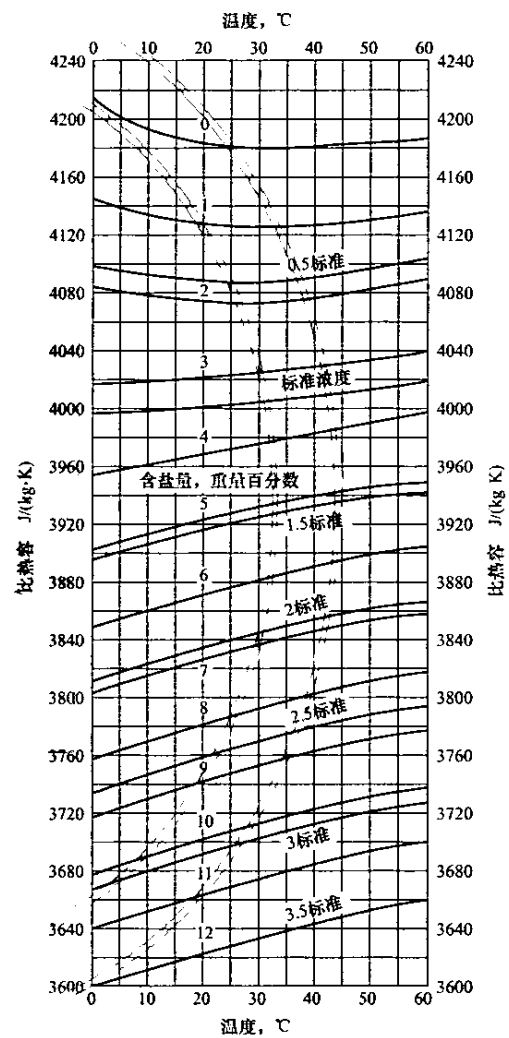
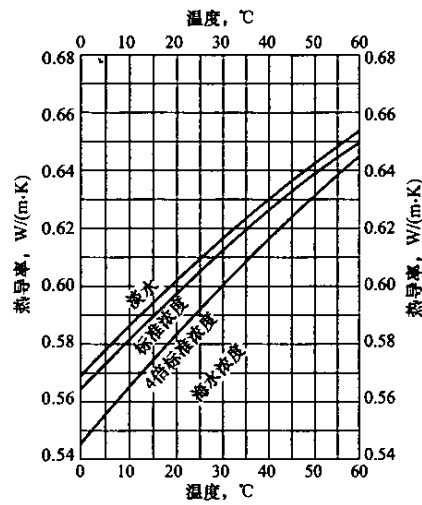


图 J.2 海水的比热容



注：本图用到的海水标准浓度为 34.483‰。

图 J.3 海水的热导率

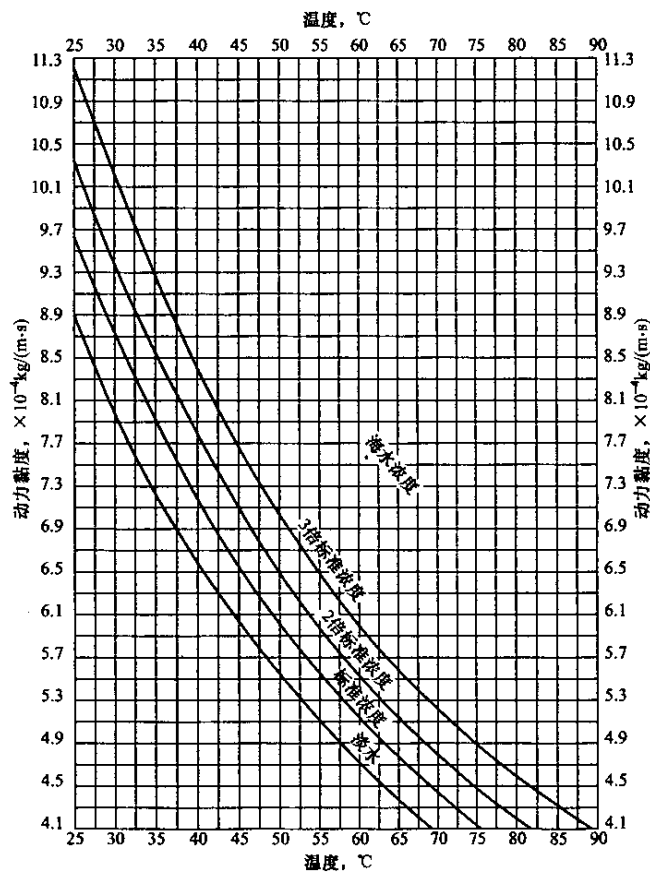


图 J.4 海水的动力黏度