

ICS 27.100

F 24

备案号: 36427-2012

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 244 — 2012

直接空冷系统性能试验规程

Performance test code on direct air-cooled system

2012-04-06 发布

2012-07-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 性能参数符号和单位规定 7

5 总则 9

6 试验测量参数及仪表 11

7 直接空冷系统性能验收试验 14

8 直接空冷系统运行性能诊断试验 25

附录 A（规范性附录） 计算数学模型 27

附录 B（资料性附录） 保证点的基准值 31

前 言

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。

本标准起草单位：西安热工研究院有限公司、双良节能系统股份有限公司。

本标准主要起草人：陈胜利、赵毅、杨寿敏、薛海君、刘晓立、李高潮、荆涛、吕凯、章治国、穆琳。

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）。

直接空冷系统性能试验规程

1 范围

本标准规定了火力发电厂直接空冷系统性能试验测点布置、仪表选用、试验程序和试验数据处理等的基本原则和要求，规定了试验条件、试验计算方法及直接空冷系统性能评价方法。

本标准适用于新建或改（扩）建的发电厂汽轮机直接空冷系统性能验收试验及运行性能试验，也适用于投运多年的汽轮机直接空冷系统运行性能试验。

2 规范性引用文件

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

GB/T 2624（所有部分） 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 [ISO 5167: 2003（所有部分），IDT]

GB 8117（所有部分） 汽轮机热力性能验收试验规程 [IEC 60953: 1990（所有部分），IDT]

GB 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准

DL/T 1078 表面式凝汽器运行性能试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

排汽参数 exhaust steam parameters

排汽参数在汽轮机出口平面或在距出口平面±0.3m 范围内，且与汽流方向垂直的平面内测量。测量平面位置见图 1。

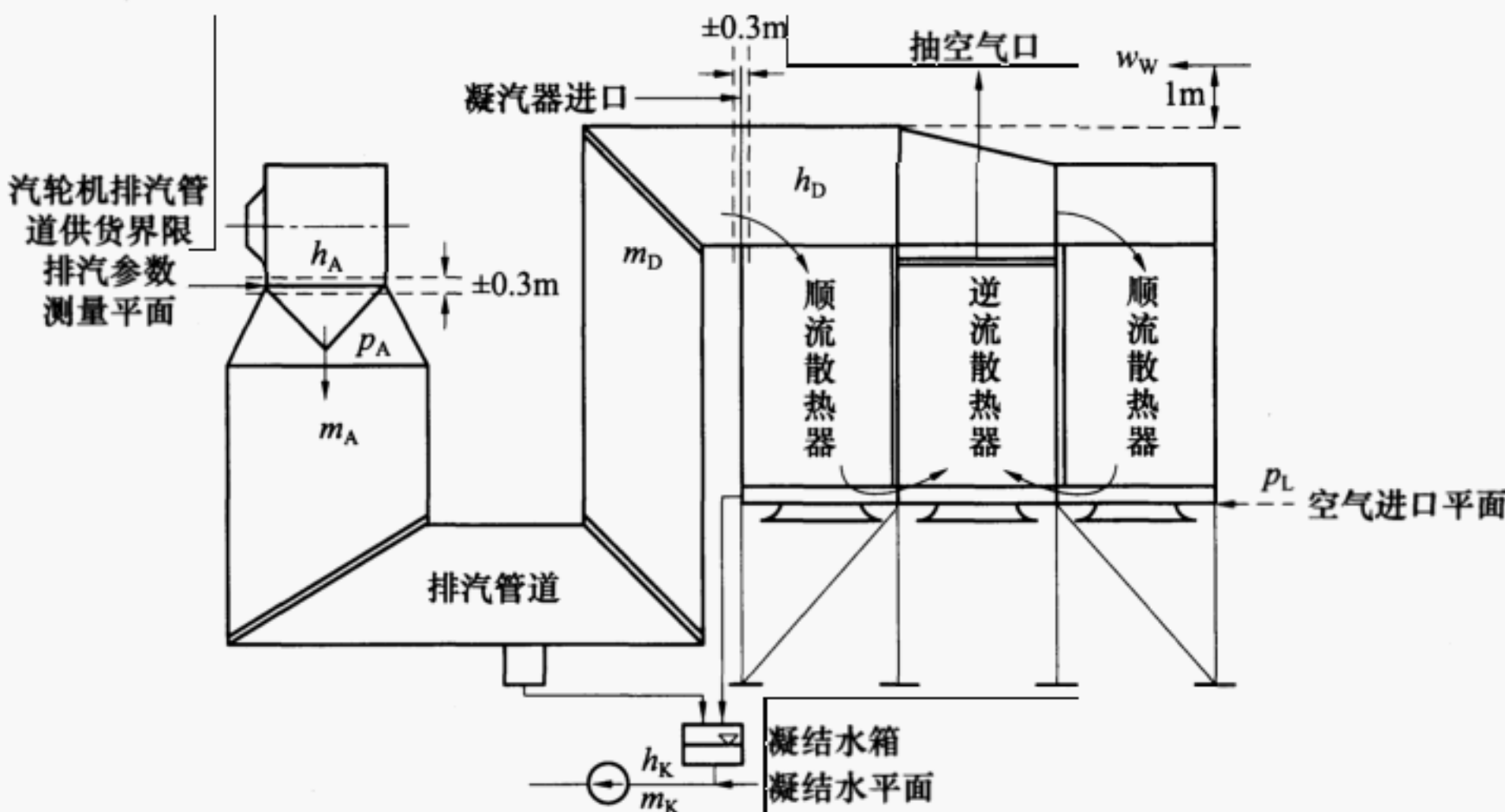


图 1 直接空冷系统

3.1.1

排汽压力 **exhaust steam pressure**
指排汽平面处的平均静压力。

3.1.2

排汽温度 **exhaust steam temperature**
指排汽压力对应的饱和温度。

3.1.3

排汽干度 **steam content of exhaust steam**
指排汽中的蒸汽所占的质量比例。

3.1.4

排汽焓 **exhaust steam enthalpy**
指排汽平面处的湿蒸汽焓。

3.2

凝汽器进汽参数 **condenser inlet steam parameters**

凝汽器进口平面在蒸汽进入第一个换热单元的上游，进汽参数在凝汽器进口平面±0.3m 范围内，且与汽流方向垂直的平面内测量。凝汽器进口平面位置见图 1。

3.2.1

凝汽器进汽压力 **condenser inlet steam pressure**
指在凝汽器进口平面处的平均静压力。

3.2.2

凝汽器进汽温度 **condenser inlet steam temperature**
指凝汽器进汽压力对应的饱和温度。

3.2.3

凝汽器进汽焓 **condenser inlet steam enthalpy**
指凝汽器进口平面处的湿蒸汽焓。

3.3

凝结水参数 **condensate parameters**

凝结水的测量平面位于凝结水箱和凝结水泵之间的管道中。凝结水参数测量平面位置见图 1。

3.3.1

凝结水温度 **condensate temperature**
指流出凝结水箱的凝结水平均温度。

3.3.2

凝结水焓 **condensate enthalpy**
指凝结水测量平面处的凝结水焓。

3.3.3

含氧量 **oxygen content**

指凝结水箱或凝结水泵进口管道中凝结水的溶解氧所占的质量比例。当规定含氧量时，需指明测量位置。

3.4

进口空气参数 **inlet air parameters**

进口空气参数的测量平面位于凝汽器空气进口横截面的换热元件安装标高处。在空气冷却的情况下，空气湿度的影响可以忽略不计。空气进口平面位置见图 1 和图 2。

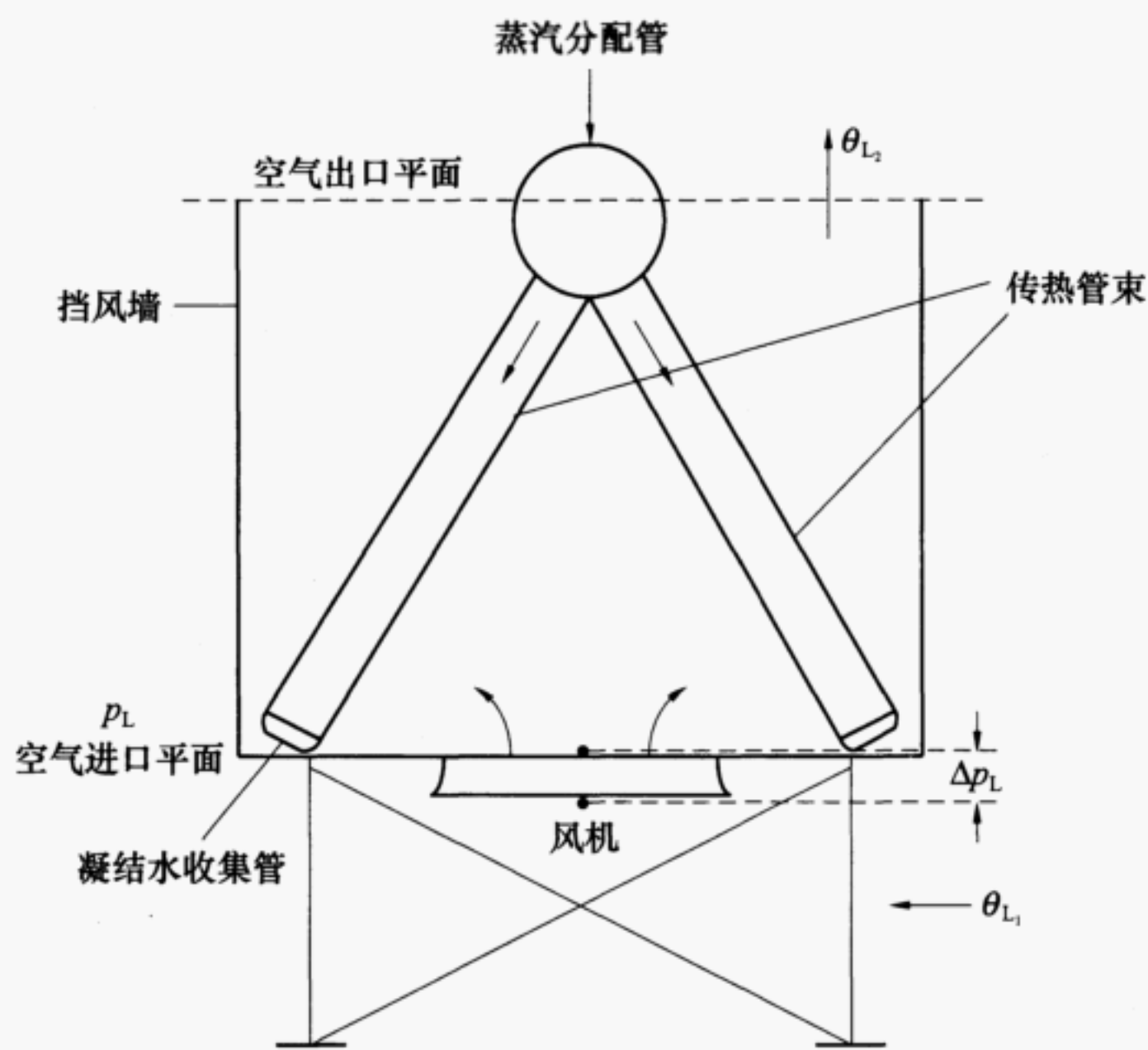


图 2 顺流凝汽器剖面

- 3.4.1
大气压力 **atmospheric pressure**
指在换热元件安装标高处测得的平均大气压力。
- 3.4.2
进口空气温度 **inlet air temperature**
指在空气进口平面处的平均冷却空气温度。
- 3.4.3
进口空气密度 **inlet air density**
指空气进口平面处的平均密度，取决于大气压力和进口空气温度。
- 3.4.4
比热容 **specific heat capacity**
由进口空气状态参数确定。
- 3.4.5
动力黏度 **dynamic viscosity**
由进口空气状态参数确定。
- 3.5
出口空气参数 **outlet air parameters**
出口空气参数的测量平面位于凝汽器上方的空气侧横断面。在空气冷却的情况下，空气湿度的影响可以忽略不计。空气出口平面位置见图 2。
- 3.5.1
出口空气温度 **outlet air temperature**
指空气出口平面处冷却空气的平均温度，取决于空气总热量。
- 3.5.2
出口空气密度 **outlet air density**
指空气出口平面处的平均密度，取决于大气压力和出口空气温度。

3.6

质量流量 **mass flows**

3.6.1

排汽质量流量 **exhaust steam mass flows**

指通过排汽平面的湿蒸汽的总质量流量。

3.6.2

凝汽器质量流量 **condenser mass flows**

指通过凝汽器进口平面的湿蒸汽的总质量流量。

3.6.3

凝结水质量流量 **condensate mass flow**

指凝结水泵出口的质量流量。

3.6.4

泄漏空气流量 **leakage air mass flow**

指空气抽出设备所连接的入口管内所有不凝结气体(包括流程中产生的气体)的质量流量。

3.6.5

空气质量流量 **air mass flow**

指冷却空气的总质量流量。

3.7

空气侧其他参数 **other air-end parameters**

3.7.1

环境风速 **wind velocity**

指在凝汽器上边缘以上 1m 处未扰动的环境空气的平均流速。

3.7.2

空气体积流量 **volumetric air flow**

指风机出口的空气体积流量。正常的正压布置结构，空气体积流量由空气质量流量和进口空气密度计算得到

$$\dot{V}_L = \frac{\dot{m}_L}{\rho_{L_1}} \tag{1}$$

3.7.3

静压升 **static pressure rise**

指空气通过风机增压的值，以便克服冷却空气通过凝汽器上游和下游以及换热管束间的流动阻力。

3.7.4

风机轴功率 **fan driving power**

指电动机输入给风机的功率。

3.7.5

风机静压效率 **static fan efficiency**

指冷却空气通过风机获得的静压有效功率与风机轴功率的比值。

$$\eta_v = \frac{V_L \Delta p_L}{P_L} \tag{2}$$

3.8

传热参数 **heat transfer parameters**

3.8.1

凝汽器热交换面积 **condenser heat exchange surface**

指凝汽器中冷却空气所接触的所有传热元件的面积总和, 不包括蒸汽管道和其他与凝汽器相连管道的面积。

3.8.2

凝汽器热流量 condenser heat flow

指凝汽器传给环境冷却空气的总热流量, 它由蒸汽侧和凝结水侧的能量平衡求出。凝汽器热流量是流向凝汽器的排汽焓与凝结水箱出口的凝结水焓之差。计算公式为

$$\dot{Q} = \dot{m}_A (h_A - h_K) \quad (3)$$

或者

$$\dot{Q} = c_{pL} \dot{m}_L \Phi \Delta \theta_1 \quad (4)$$

或者

$$\dot{Q} = KA \Delta \theta_m \quad (5)$$

3.8.3

对数平均温差 logarithmic mean temperature difference

指蒸汽侧和空气侧之间温降平均值, 该值对传热有决定性的影响。

对于等温凝结

$$\Delta \theta_m = \frac{\dot{Q}}{KA} \quad (6)$$

如果温度已知, 则

$$\Delta \theta_m = \frac{\theta_{L_2} - \theta_{L_1}}{\ln \left(\frac{\theta_D - \theta_{L_1}}{\theta_D - \theta_{L_2}} \right)} \quad (7)$$

3.8.4

传热系数 heat transmission coefficient

指一个平均值, 用流经热交换表面的凝汽器热流量和对数平均温差求得。

$$K = \frac{\dot{Q}}{A \Delta \theta_m} \quad (8)$$

使用空气侧参数, 则用下列公式

$$K = \frac{c_{pL} \dot{m}_L NTU}{A} \quad (9)$$

采用管子和翅片的传热系数平均值和管壁热阻计算

$$K = \alpha_{L,eff} \left[1 + \frac{R_F + \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_{wd}}{\lambda_{wd}} \right) \frac{A}{A_i}}{\frac{1}{\alpha_{L,eff}}} \right]^{-1} \quad (10)$$

3.8.5

进口温差 inlet temperature difference

指凝汽器进口温度和进口空气温度之差。计算公式为

$$\Delta \theta_1 = \theta_D - \theta_{L_1} \quad (11)$$

3.8.6

传热单元数 number of heat transfer units

指冷却空气温度相对于对数平均温差的变化。计算公式为

$$NTU = \frac{\theta_{L_2} - \theta_{L_1}}{\Delta\theta_m} \tag{12}$$

也可以使用下列关系式计算

$$NTU = \frac{KA}{c_{pL} \dot{m}_L} \tag{13}$$

3.8.7

性能特性 **performance characteristic**

指冷却空气温度相对进口温差的变化。计算公式为

$$\Phi = \frac{\theta_{L_2} - \theta_{L_1}}{\Delta\theta_1} \tag{14}$$

也可使用通用关系式计算

$$\Phi = NTU \frac{\Delta\theta_m}{\Delta\theta_1} \tag{15}$$

特别对于等温凝结，关系式为

$$\Phi = 1 - e^{-NTU} \tag{16}$$

3.8.8

空气侧传热系数 **air-end heat transfer coefficient**

指在热交换器表面传递热量的平均值，它取决于翅片管的类型和几何形状，并且与翅片的实际效率有关。

3.8.9

凝汽器蒸汽侧热交换面积 **condenser steam-end heat exchange surface**

指凝汽器中和湿蒸汽接触的所有传热元件的面积总和，不包括蒸汽管道和其他与凝汽器相连管道的面积。

3.8.10

蒸汽侧传热系数 **steam-end heat transfer coefficient**

指在热交换器蒸汽侧表面传递热量的平均值。

3.8.11

管壁厚度 **tube wall thickness**

计算管壁热阻时需要用管壁厚度。为了简化，可以使用制造厂出厂时提供的管壁厚度。

3.8.12

管壁热导率 **thermal conductivity of the tube wall**

指管壁材料的热传导系数。

3.9

凝结水过冷度 **condensate subcooling temperature**

指排汽温度与凝结水温度的差值。计算公式

$$\Delta\theta_U = \theta_A - \theta_K \tag{17}$$

当规定采用凝汽器进汽温度时，应用式（18）计算

$$\Delta\theta_U = \theta_D - \theta_K \tag{18}$$

3.10

污垢热阻 **fouling**

由于热交换表面的污染，污垢降低了凝汽器性能。凝汽器蒸汽侧的污垢实际上可以忽略不计。通常，

污垢层沉积在空气侧外表面，但它对传热效果影响很小。但是，污垢层使翅片管空气侧进口处的通流截面减小，导致空气流动压力损失增加，使冷却空气质量流量减小，汽轮机排汽压力增大。

4 性能参数符号和单位规定

4.1 性能参数符号和单位

性能参数除标准中另有定义外，通常采用表 1 中的符号和单位。

表 1 性能参数符号和单位

符 号	单 位	名 称
a		安托尼公式中使用的常数
A	m^2	空气侧热交换面积
b		安托尼公式中使用的常数
c		安托尼公式中使用的常数
c_{pL}	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	空气比热容
h_A	kJ/kg	排汽焓
h_D	kJ/kg	凝汽器进汽焓
h_K	kJ/kg	凝结水焓
K	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	传热系数
\dot{m}_A	kg/s	排汽质量流量
\dot{m}_D	kg/s	凝汽器质量流量
\dot{m}_K	kg/s	凝结水质量流量
\dot{m}_L	kg/s	空气质量流量
\dot{m}_{LL}	kg/s	泄漏空气质量流量
m_K		K 特性指数
n		空气侧阻力定律指数
NTU		传热单元数
p_A	kPa	排汽压力
p_D	kPa	凝汽器进汽压力
p_L	hPa	大气压力
P_L	kW	风机轴功率
p_s	kPa	蒸汽饱和压力
Δp_L	Pa	静压升
f	Hz	风机频率
\dot{Q}	kW	凝汽器热流量
r	J/kg	凝结热
R_F	$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$	污垢热阻
Re		空气侧雷诺数

表 1（续）

符 号	单 位	名 称
s_{Wd}	m	管壁厚度
v_{m}	m^3/kg	平均蒸汽比体积
v''	m^3/kg	凝结水比体积
v'	m^3/kg	汽相比体积
\dot{V}_{L}	m^3/s	空气体积流量
w_{W}	m/s	环境风速
χ_{A}	kg/kg	排汽干度
χ_{O_2}	kg/kg	含氧量
α_i	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	蒸汽侧传热系数
$\alpha_{\text{L,eff}}$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	空气侧传热系数
χ		辅助值
Φ		性能特性
Γ		辅助值
η_{V}		风机静压效率
λ_{wd}	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	管壁热导率
θ_{A}	$^{\circ}\text{C}$	排汽温度
θ_{D}	$^{\circ}\text{C}$	凝汽器进汽温度
θ_{K}	$^{\circ}\text{C}$	凝结水温度
θ_{L_1}	$^{\circ}\text{C}$	进口空气温度
θ_{L_2}	$^{\circ}\text{C}$	出口空气温度
$\Delta\theta_{\text{l}}$	K	进口温差
$\Delta\theta_{\text{m}}$	K	对数平均温差
$\Delta\theta_{\text{U}}$	K	凝结水过冷度
ρ_{L_1}	kg/m^3	进口空气密度
ρ_{L_2}	kg/m^3	出口空气密度
η_{L}	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	动力黏度
Ω		辅助值（压力比）
ξ		排汽质量流量修正系数
$\Delta\xi$		排汽质量流量测量不确定度

4.2 性能参数符号下标定义

性能参数符号下标定义见表 2。

表 2 性能参数符号下标定义

符 号	名 称
G	保证点
m	排汽管中的平均值
V	保证状态的比较值
数字	修正的顺序数
无下标	任何运行点

5 总则

5.1 试验约定

5.1.1 试验各方应对试验要求达成明确的协议

进行性能验收试验时，当直接空冷系统合同包括本标准未涵盖的其他辅助设备的性能保证值时，这类设备的检测和试验应按照相关的标准实施。如果没有适用的规程，试验各方应事先就测量和计算方法达成书面协议，并在试验报告中详细说明。如果偏离试验规程规定的程序，也应在试验报告中详细说明。

5.1.2 试验测量区域

本标准中所述直接空冷系统包括排汽管道、排汽装置、空冷凝汽器、凝结水箱及空冷风机等，试验测量区域见图 1～图 3。

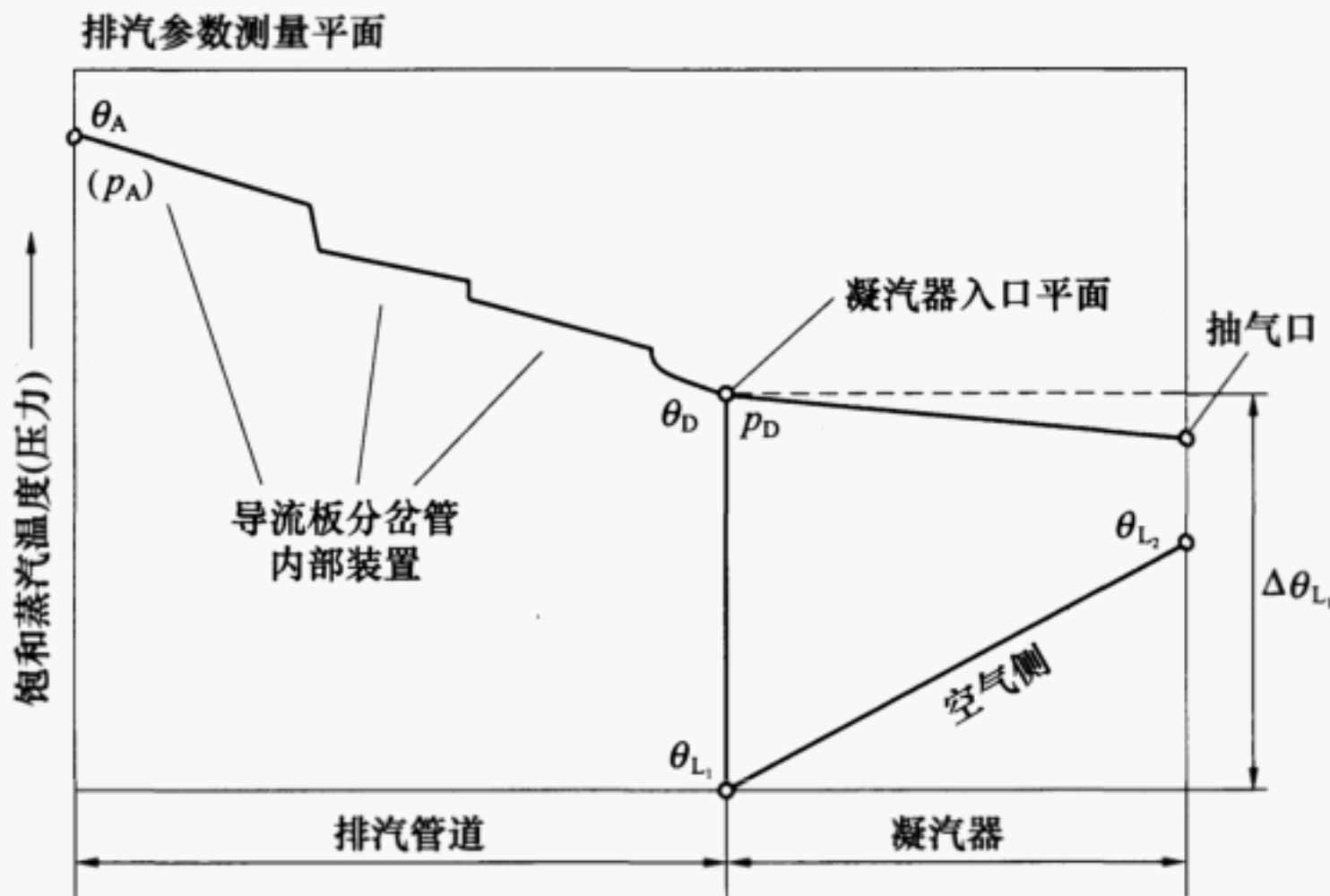


图 3 空冷凝汽器流程温度分布

5.1.3 试验运行方式

应在试验前就试验时直接空冷系统的运行方式达成协议。进行性能验收试验时，应根据空冷系统技术协议规定的风机运行方式运行。

5.2 试验大纲及要求

5.2.1 规定

试验前，应根据试验规程编制试验大纲，试验大纲应经过试验各方同意，如果有异议，应协商一致。试验大纲应涵盖所有可能引起争议的条款，以寻求试验各方达成一致。试验大纲应用来指导试验过程、试验结果的处理和说明。

5.2.2 范围和目的

应根据地点、环境条件、设备状态和各方签订的协议确定现场试验范围和目的，试验大纲要明确规

定试验范围和目的。

5.2.3 性能指标

应包括空冷系统性能指标的说明和空冷系统设计性能，对于验收试验应包括合同承诺或者合同保证值的描述、保证值的评价方法。

5.2.4 试验仪表

试验大纲中应列出详细的试验仪表，包括所有测试参数、使用仪表、精度要求、校验范围、校验有效期、安装位置。

5.2.5 试验条件

试验大纲应明确规定试验条件，验收试验还要依据设备协议和合同的要求确定试验条件。试验条件包括环境条件、设备状态、运行方式、验收试验时间等内容。

5.2.6 系统隔离清单

应根据试验范围和目的，以及试验规程，列出试验中需要隔离的系统名称、隔离方法、隔离阀门的名称和编号。

5.2.7 试验工况及试验方法

应论述具体的试验工况、试验方法，包括试验步骤、试验程序、运行操作、参数调整等具体过程，以及数据处理、试验计算方法。

5.2.8 试验组织机构

试验组织机构应包括参加试验人员、试验指挥人员、技术负责人员、试验操作人员等名单，列明试验人员的详细工作内容。

5.2.9 试验计划

结合试验现场情况，应列出试验计划、试验进度、试验负荷申请单，包括仪表安装日期、试验测量系统调试时间、试验时间。

5.2.10 试验持续时间

在稳定运行状态下，每一个试验工况应进行持续 1h 以上的试验。根据测量设备的需要，试验时间可以延长到 2h。测量时段在 20min 范围内所获取的数据要进行评估，而且这期间测得的数据不得超过允许偏差。

5.2.11 试验数据

试验进行或计算时，如果检查到记录的数据前后不一致，则该次试验数据应部分或全部作废。如果需要，应重复试验。

5.3 试验准备

5.3.1 检查

试验前，试验各方应检查并熟悉与直接空冷系统连接的相关设备及管道，直接空冷系统及其辅助设备应处于正常运行状态；试验仪表应满足要求。

5.3.2 试验运行

试验时，直接空冷系统应处于设计规定的运行工况。

5.3.3 预备性试验

正式试验前应进行预备性试验，其主要目的为：

- a) 检查所有试验仪表应正常工作；
- b) 培训试验人员，使试验人员熟悉试验程序，掌握各参数测量方法；
- c) 检验试验程序和试验过程的正确性；
- d) 系统应工作正常，满足试验条件；
- e) 若预备性试验发现问题，正式试验中应做必要调整。

5.3.4 真空系统严密性试验

进行空冷系统性能试验前，应进行真空系统严密性试验，以便确定泄漏的空气量是否影响空冷系统性能及性能试验时真空泵的运行数量。

进行真空系统严密性试验时，要停真空泵，根据相应的试验标准进行。

6 试验测量参数及仪表

6.1 试验参数测量及试验测点布置

6.1.1 试验参数

为了评价空冷系统的性能，根据试验目的，要求通过测量或计算获取以下参数：

- a) 排汽压力；
- b) 进汽压力；
- c) 排汽温度（用于比较）；
- d) 进汽温度（用于比较）；
- e) 排汽干度；
- f) 大气压力；
- g) 进口空气温度；
- h) 出口空气温度；
- i) 环境风速和风向；
- j) 环境温度；
- k) 凝结水质量流量；
- l) 排汽质量流量；
- m) 凝结水温度；
- n) 凝结水箱水位；
- o) 空冷风机电动机端功率；
- p) 空冷风机频率；
- q) 空冷岛噪声。

6.1.2 参数测量

6.1.2.1 排汽压力、排汽温度

验收试验时应测量排汽压力。测点的数量应取决于凝汽器的尺寸，工业汽轮机不应该少于 2 个测点，电站汽轮机每个流道不应少于 4 个测点。

测量位置及布置见图 1。测点不应布置在由内部结构形成的扰动区域，测点安装方法及一次元件应符合 GB 8117 的规定。

应配备适当的排汽温度测量接口用于运行测量及需要时的试验测量。温度测点的布置应靠近压力测点。

6.1.2.2 进汽压力、进汽温度

验收试验可不测量进汽压力。但是，如果进行性能诊断试验，可在进汽平面测量进汽压力、进汽温度，测量的进汽温度应与进汽压力比较。

6.1.2.3 排汽干度

当汽轮机排汽状态处于湿蒸汽范围内时，测量温度和压力不足以确定膨胀终点。为了获得空冷凝汽器排放到环境中的热负荷，应确定排汽干度。可采取下列方法确定排汽干度：

- a) 基于平衡法确定。当验收试验包括整个汽轮机全面热力系统的测量时，可以获得充分的测量数据，根据平衡法能够确定汽轮机排汽干度，汽轮机全面热力系统试验应符合 GB 8117 的规定。但是，如果只做空冷系统试验，就需要测量许多参数来获得过程的完全平衡，此时排汽干度可

以用 b) 和 c) 中所述的方法之一确定。

- b) 基于膨胀曲线确定。排汽干度可以从汽轮机的膨胀曲线上确定。膨胀曲线数据可以从汽轮机制造商的设计规范和资料中获取；如果有合适的测点可用（应不在湿蒸汽区），通过测量压力和温度也可得到膨胀曲线数据。如果使用膨胀曲线，汽轮机出口损失就应加以考虑。
- c) 测量排汽干度。排汽干度可以通过适当的方法测量，测量时应考虑壁上流动的凝结水。

6.1.2.4 大气压力

大气压力在空冷凝汽器附近测量，并通过波尔兹曼（Boltzmann）气压公式换算到换热元件安装标高处的大气压力。大气压力只需要一个测点。计算公式为

$$p_w = p_M \left(\frac{288 - 0.0065 H_w}{288 - 0.0065 H_M} \right)^{5.255} \tag{19}$$

式中：

- p_w —— 换算位置大气压力，hPa；
- p_M —— 测量位置大气压力，hPa；
- H_w —— 换算位置高度，m；
- H_M —— 测量位置高度，m。

6.1.2.5 环境温度

环境温度应在空冷岛下面、低于空冷平台高度一半的位置测量，在空冷岛四周布置 4 个以上的测点。测点不应布置在有热辐射的位置，应采取遮阳措施，防止阳光照射。

6.1.2.6 进口空气温度

应有足够数量的测点测量进口空气温度，其数量应能测量温度的横向分布情况；根据现场情况，相邻两测点的间距应为 5m~20m。应采取措施，以保证测量不受热辐射的影响。

应根据不同试验目的和设备性能，选用不同位置的温度。在进行性能验收试验时，除非用户与供货商签订的技术协议中有规定，否则，应按照下列方法测量进口空气温度：

- a) 如果进行空冷岛散热器性能试验，进口空气温度应在空冷风机出口与散热器进口平面之间测量，测点具体布置应在风机桥架下方 0.3m~0.5m 处，靠近风机导风筒，避免齿轮箱散热影响。
- b) 如果进行空冷系统性能试验，进口空气温度和环境温度差值应在 0.3℃ 以内，进口空气温度可在空冷风机出口与散热器进口平面之间测量，测点具体布置应在风机桥架下方 0.3m~0.5m 处。
- c) 如果进行空冷系统性能试验，进口空气温度和环境温度差值大于 0.3℃，进口空气温度在空冷风机入口测量。如果风机进风筒位置高度小于 10m，则温度测点布置在高度的 1/2 处；如果风机进风筒位置高度大于 10m，则温度测点布置在高度的 1/4 和 3/4 两个平面处。

6.1.2.7 出口空气温度

一般不测量出口空气温度。如果需要测量，则应在空气出口平面处测量，确定出口空气温度平均值。根据现场情况，相邻两测点的间距应为 5m~20m。应采取措施，以保证测量不受热辐射的影响。

6.1.2.8 环境风速和风向

空冷凝汽器性能受环境风速的影响。当环境风速大时，空气静压增加，风机输送的空气容积显著减小。环境风速（ w_w ）为凝汽器上边缘上方 1m 处（ H_w ）的风速（见图 1）；测量环境风速不应受其他因素影响，如风机作用的空气质量流量、建筑物等。环境风速（ w_M ）应在至少距地面 10m 以上（ H_M ），且在不受干扰的条件下测量；建议在锅炉房顶测量，同时测量风向。

应用公式：

$$w_w = w_M \left(\frac{H_w}{H_M} \right)^{0.2} \quad (20)$$

根据测量值计算出凝汽器上方 H_w 处的环境风速。

6.1.2.9 凝结水质量流量

凝结水质量流量在凝结水泵出口测量。流入凝结水箱的疏水，例如来自轴封加热器和低压加热器的疏水，通过测量（或者平衡法）确定。凝结水箱的水位在试验过程中进行测量。

6.1.2.10 凝结水温度

凝结水温度是凝结水箱出口凝结水平均温度，测量位置应为凝结水箱热井出口管道。每根管道布置一个测点。

6.1.2.11 排汽质量流量

排汽质量流量应通过汽轮机全面热力系统试验计算确定，或通过凝结水箱的流量平衡确定。

当通过凝结水箱流量平衡计算排汽质量流量时，流入凝结水箱的疏水，通过测量或加热器热量平衡计算，此时应测量加热器的相关参数。

6.1.2.12 风机电动机端功率

风机电动机端功率指电动机终端的耗功，在电动机控制中心测量，而且从控制柜到电动机终端的电缆损失应从测得的功率中扣除。当保证值的规定不同时，例如所给出的保证功率是风机轴功率，就需要考虑电动机效率和齿轮箱效率。

6.1.2.13 风机频率

风机频率指风机电动机输入频率，在电动机控制中心测量。

6.1.2.14 含氧量

在凝结水泵上游真空侧采样。如果补水进水管和凝结水箱相连，测量期间应关闭补水。当保证的含氧量包含补水时，应分别进行测量。

6.1.2.15 噪声测量

根据厂家保证空冷岛噪声的相关规定，在规定的位置，用便携式噪声测量仪进行测量，测量位置不少于 5 个，5 个位置点均匀分布，每个点至少测量 3 次，计算平均噪声值。

测量时，要求环境噪声尽量小，必要时在环境噪声小的夜间进行测量。测量时，关闭锅炉和汽轮机侧噪声较大的排汽、排污门（如锅炉连排、除氧器排氧门等），空冷岛风机为 100% 转速。如果噪声不超过保证值，则不再进行测量；如果不能有效隔离环境噪声，噪声超出保证值，则降低空冷岛所有风机转速到 50% 额定转速以下，测量噪声值作为环境噪声，再调节风机为 100% 额定转速，测量噪声值，计算空冷岛噪声时，扣除环境噪声影响。

噪声测量应符合 GB 12348 的规定。

6.2 试验仪表

6.2.1 一般规定

试验主要测量参数是温度、压力和压差的测量。为了保证测量精度，必须使用指定的测量仪表。

所有试验测量仪表应经过省级以上计量单位校验合格，且在校验有效期内。

6.2.2 温度测量仪表

测量排汽温度、凝结水温度、进口空气温度、出口空气温度和环境温度等用四线 A 级铂电阻温度计（Pt100）。其他在凝汽器外围边界的监视温度的测量仪器应符合相应标准。

6.2.3 压力和压差测量仪表

压力和压差用压力传感器测量。排汽压力表管内径至少为 12mm，且越短越好，表管应布置合理，不能产生积水，以防堵塞。

选择传感器时，应注意以下几点：

- a) 压差用差压变送器测量;
- b) 排汽压力用绝压变送器测量;
- c) 当使用相对压力传感器时 (特别是测量排汽压力), 测量仪器标高处的大气压力是基准压力, 应包含在计算中。

6.2.4 凝结水质量流量测量仪表

凝结水质量流量用喷嘴或孔板装置测量。喷嘴或孔板装置的设计和布置应符合 GB/T 2624 的规定。流量装置不应布置在负压区。

6.2.5 风机电动机端功率及频率测量仪表

空冷风机电动机端功率及频率用功率表连接到控制柜的电动机进线上测量, 功率表精度不低于 0.5 级。

6.2.6 环境风速测量仪表

环境风速用杯形风速仪测量。

7 直接空冷系统性能验收试验

7.1 目的

直接空冷系统性能验收试验的目的是验证空冷系统的实际性能是否达到供货商所保证的性能。因此, 测量结果应与性能保证值进行比较。

7.2 试验条件

7.2.1 一般规定

如果不满足试验条件, 要求进行试验, 应经过试验各方协商同意, 并认可试验结果。

7.2.2 验收试验时间

验收试验宜在空冷系统投运后 6 个月内进行。当边界条件在某种程度上偏离保证点 (如环境温度), 以致不能保证试验结果精度时, 应经试验各方协商同意, 验收试验可以推迟到较晚的日期。

7.2.3 试验工况参数要求

验收试验工况, 运行参数应尽可能接近设计值。

- a) 进口空气温度与设计值允许偏差为 $\pm 10^{\circ}\text{C}$, 且进口空气温度应不小于 5°C ;
- b) 凝结水质量流量与设计值允许偏差为 $\pm 10\%$;
- c) 空冷风机运行频率与设计值允许偏差为 $\pm 1\text{Hz}$ 。

在上述偏差范围内进行试验, 试验结果就可以达到认可的精度。

各参数试验测量结果为试验工况有效时间内的算术平均值。

在特殊情况下, 如果偏差超过上述范围, 试验各方应对运行条件偏离产生的影响达成一致意见。

7.2.4 空冷系统辅助设备

直接空冷系统的辅助设备, 如抽气装置和凝结水泵等, 应正常运行, 并且符合性能规范的要求。

7.2.5 系统隔离

凡是不能测量其质量流量的进出凝汽器的其他管道, 试验中应能有效隔离其流量。在质量流量既不能隔离, 又不能测量的情况下, 由此对试验精度产生的影响, 试验各方应达成一致意见。

7.2.6 真空系统严密性

汽轮机组真空系统严密性应良好, 真空严密性试验结果是排汽压力上升速率不大于 $200\text{Pa}/\text{min}$ 。若真空严密性指标大于 $200\text{Pa}/\text{min}$, 试验各方应协商, 增开真空泵进行验收试验。

当机组配置 3 台真空泵时, 应按照下列试验方法确定增开真空泵的运行数量。当机组配置不同数量真空泵, 也应按照此原则确定真空泵的运行数量。

试验时环境风速小于 $3\text{m}/\text{s}$, 环境温度试验期间没有变化, 空冷风机固定转速运行。

- a) 在维持汽轮机主蒸汽和再热蒸汽参数稳定不变、高压进汽调节阀门开度不变的条件下, 增开一

台真空泵，2 台真空泵运行 10min，在空冷凝汽器进风温度不变的情况下，如果机组真空和功率比 1 台真空泵运行没有变化，则进行性能试验时，运行 2 台真空泵。

- b) 如果运行 2 台真空泵 10min 后，比 1 台真空泵运行时机组真空提高，或机组功率增加，则运行 3 台真空泵 10min。
- c) 如果运行 3 台真空泵 10min 后，比 2 台真空泵运行时机组真空和汽轮机功率没有变化，则进行性能验收试验时，运行 3 台真空泵。
- d) 如果运行 3 台真空泵 10min，比 2 台真空泵运行时机组真空提高，或机组功率增加，则不能进行空冷系统性能试验。应该对机组真空系统进行查漏、堵漏，真空严密性达到试验要求后，再进行空冷系统性能试验。如果用户和供货商同意进行验收试验，则试验时运行 3 台真空泵；如果验收试验结果为空冷系统性能达到保证值，则可认为空冷系统性能合格；如果验收试验结果为空冷系统性能未达到保证值，则不能得出空冷系统性能不合格的结论，待真空严密性达到试验要求后，重新进行空冷系统性能验收试验。

7.2.7 凝汽器清洁

凝汽器内外冷却表面，特别是空气侧的外表面应清洁。试验前，试验各方对凝汽器清洁程度进行检查，并取得供货商认可，否则应彻底清理干净。

7.2.8 环境风速

每一试验工况有效时间内，空冷凝汽器上边缘上方 1m 处的平均环境风速不能超过 5m/s，超过 10m/s 的峰值 1h 内发生次数不能超过 20 次。

7.2.9 气候条件

验收试验应在无雪、无雨的干燥天气下进行，环境温度不能低于 5℃。

7.2.10 设备运行

验收试验只能在设备处于完好状态下进行。如果在试验过程中出现故障，试验应立即停止，并进行故障消除。

根据用户与供货商签订的技术协议确定空冷风机运行方式。

7.3 验收试验过程

7.3.1 试验时间

每一试验工况在稳定运行状态下，具有至少连续 1h 的有效时间，有效时间内的试验数据不得超过允许偏差。

7.3.2 数据采集频率

环境风速 1min 记录一次，记录风速、风向。

每个试验工况，每台风机电动机参数测量一次，每台电动机记录至少 3 组数据，取平均值。记录电压、电流、频率、功率等参数。测量电动机参数时，同时记录大气压力和进气温度，计算试验工况的电动机功率时，对大气压力和进气温度加以修正。

使用电子数据记录仪测量数据，记录间隔应为 20s。所有在试验工况内的测量数据，记录间隔不超过 5min。

7.3.3 边界条件波动

每一工况试验过程中，边界条件应保持不变，允许偏差为：

- a) 凝结水质量流量：±1%；
- b) 进口空气温度：±1.0℃；
- c) 空冷风机运行频率：±0.2Hz。

试验期间，满足下列条件：

- a) 机组负荷控制值不能改变，机组负荷和参数稳定；
- b) 泵不能启动或停止；

- c) 风机的运行状态不能改变;
- d) 阀门不能动作。

7.4 试验数据处理

7.4.1 一般规定

通过试验测量，每个参数可得到一定数量的有效测量数据，分两步对这些数据进行计算处理：

- a) 从有效数据中确定每个参数的平均值和相关的测量不确定度；
- b) 由参数测量值及其测量不确定度计算测量结果和结果的不确定度。

由于所有测量仪表均经过校验合格，因此不需要再对测量值进行修正。

7.4.2 基本概念

7.4.2.1 参数真值

测量的目的是要确定测量参数的真值。每个测点从 n 个数据记录中得到一系列测量值 (x_i)。一个测点测得的值的完整定义是一个算术平均值，见式 (21)。

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i \tag{21}$$

参数的真值是平均值加上测量不确定度 u ：

$$X = \bar{x} \pm u \tag{22}$$

7.4.2.2 偏差

所测参数的真值和近似值 \bar{x} 之间的偏差由以下两部分组成：

- a) 系统偏差。

测量过程中系统偏差大小和方向不变。测量期间参数的波动，与系统偏差一样具有相同的影响，达到本标准 7.3.3 中所述试验要求，在试验中这个影响可以忽略不计。

不确定的系统偏差 (u_s)，例如校验仪表的标准仪器的不确定度引起的偏差，或利用试验经验、另一测量方法而导致测量断面上所测值的不规则性引起的偏差。应用统计方法而不能由各自的测量值来确定这些偏差。

- b) 随机偏差 (u_z)。

由于试验对象和测量仪表本身在测量过程中受其特性影响而随机波动产生的偏差。测量数据的随机变化可以用统计方法通过标准偏差的经验公式 (23) 确定

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{23}$$

通常假设，测量数据为正态分布，标准偏差经验值代表实际标准偏差的估计值，则测量数据的随机偏差可由式 (24) 得到

$$u_z = \frac{t}{\sqrt{n}} s \tag{24}$$

系数 t 是根据 Student- t 分布，而且考虑到有限数量的试验对象对测量不确定度的影响。在技术领域，通常可信度为 95%。当测量参数超过 30 个记录数据时 ($n>30$)，系数 t 的相对误差可假设最大为 2%

$$t_{95} = 2$$

如果测量参数只有最少的 12 个记录数据 ($n=12$)，那么

$$t_{95} = 2.18$$

7.4.2.3 随机偏差和系统偏差影响因素

随机偏差和系统偏差可能由下列因素引起：

- a) 仪表校验不确定度；
- b) 数据记录不理想；

- c) 测量方法有缺陷;
- d) 人为因素。

个别值的随机偏差和系统偏差可用平方和分别计算, 见式 (25)

$$u_z = \sqrt{\sum_{k=1}^r u_{z,k}^2} \quad (25)$$

是计算由 r 引起的随机偏差公式。

与平均值 \bar{x} 一起表述的测量不确定度可由系统偏差和随机偏差计算确定, 见式 (26)

$$u = \sqrt{u_s^2 + u_z^2} \quad (26)$$

这里假设系统测量偏差通常为正态分布值, 对系统偏差很难确定可信度, 按保守估计, 可以假设可信度为 100%。

7.4.3 测量不确定度扩展

大多数情况, 测量结果 Y 不能通过直接测量确定, 更多的是由 m 个输入值 \bar{x} , 应用求值函数 F

$$y = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) \quad (27)$$

和一个相应的结果不确定度 (u) 确定

$$Y = y \pm u \quad (28)$$

输入值可以是测量值或求值函数的参数, 通常, 两者都有一个不确定度 u 。当输入值不关联, 即它们是彼此独立的, 那么可以用高斯扩展定律, 根据输入值的不确定度 u_j , 求出测量结果的不确定度 u , 即

$$u = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial F}{\partial x_j} \right)^2 u_j^2} \quad (29)$$

7.4.4 非均匀场的测量

因为排汽管道中复杂的流动状态, 必须由 m 个测量值 \bar{p}_j 确定凝汽器压力。假设测量值具有大的试验标准偏差, 几乎不能代表凝汽器压力。这样便需要求加权平均值

$$p_D = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{\bar{p}_j}{s_j^2}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{s_j^2}} \quad (30)$$

但式 (30) 与式 (27) 的意义不同, 不能当作是一个求值公式, 否则, 结果的不确定度将被大大低估。假设在 m 个测点测得的值也是正态分布的, 那么对测量值可以计算出试验标准偏差, 公式如下

$$s = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\bar{p}_j - p_D)^2} \quad (31)$$

同样, 在一个参数测量过程中, 测量结果的随机偏差是

$$u_z = \frac{t_{95}}{\sqrt{m}} s \quad (32)$$

通常, 由于 $m < 30$, 则系数 t 可以由式 (33) 近似求出

$$t_{95} = e^{\frac{0.242+0.498m}{1-0.740m}} \quad (33)$$

式中 $2 \leq m \leq 10^5$ 。用式 (32) 可一起估算出两种不同类型的结果偏差:

- a) 每个测量值 \bar{p}_j 的随机偏差以加权形式 $1/s_j^2$ 表示;

b) 由于累积误差引起的系统偏差用式 (31) 表示试验标准偏差。

通常，后一种偏差对结果的不确定度起主要作用。当进一步假定凝汽器压力 p_D 的系统偏差 u_s (对应测量值 $\overline{p_j}$ 的偏差) 时，结果的不确定度由式 (34) 求出

$$u_{p_D} = \sqrt{u_z^2 + u_s^2} \tag{34}$$

例如，假定凝汽器压力在 $m=4$ 个测点测量，每个测点测量了 $n=12$ 个值。由于校验不确定度引起的每个压力值 $\overline{p_j}$ 的系统偏差假定为 $u_s=0.05\text{kPa}$ ，测量结果见表 3。

表 3 测 量 结 果				kPa
测量点 j	1	2	3	4
数据记录 p_{ij}	6.409	6.418	6.649	6.6
	6.579	6.551	6.819	6.712
	6.648	6.605	6.888	6.757
	6.604	6.57	6.844	6.728
	6.626	6.588	6.866	6.743
	6.394	6.406	6.634	6.59
	6.527	6.511	6.767	6.678
	6.515	6.502	6.755	6.67
	6.404	6.415	6.644	6.598
	6.674	6.626	6.914	6.775
	6.595	6.564	6.835	6.723
	6.540	6.521	6.78	6.687
测量值 $\overline{p_j}$	6.543	6.523	6.783	6.688
试验标准偏差 s_j	0.097	0.076	0.097	0.064

凝汽器压力加权平均值如下

$$p_D = \frac{\frac{6.543}{0.097^2} + \frac{6.523}{0.076^2} + \frac{6.783}{0.097^2} + \frac{6.688}{0.064^2}}{\frac{1}{0.097^2} + \frac{1}{0.076^2} + \frac{1}{0.097^2} + \frac{1}{0.064^2}} = 6.634 \text{ (kPa)}$$

其标准偏差为

$$s = \sqrt{\frac{1}{4-1}[(6.634-6.534)^2 + \cdots + (6.634-6.688)^2]} = 0.123 \text{ (kPa)}$$

随机偏差为

$$u_z = \frac{3.13}{\sqrt{4}} \times 0.123 = 0.192 \text{ (kPa)}$$

最终结果的不确定度为

$$u_{p_D} = \sqrt{0.192^2 + 0.05^2} = 0.198 \text{ (kPa)}$$

因此，测量结果为

$$p_D = (6.634 \pm 0.198) \text{ kPa}$$

7.5 与保证性能参数比较

7.5.1 概述

根据空冷系统技术协议，如果凝汽器的冷却表面是清洁的，那么当满足协议规定的运行条件时，就可以凝结所要求的排汽质量流量。

根据合同，供货商提供一份性能图表或几份性能图表，据此图表在验收试验测量范围内可得出空冷系统的性能。如果验收试验条件偏离规定的保证性能所需的条件，则应借助性能图表和修正公式对测量结果进行修正。修正目的在于：如果试验能在协议规定的条件下进行，所保证的性能数据是否在允许范围内。

当测量结果换算到协议规定条件下（应考虑测量和性能图表读数的不确定度）的排汽质量流量达到或超过排汽质量流量的保证值时，应认为性能达到保证值。只有当结果的不确定度导致保证值超出范围时，才认为保证值没有达到。

7.5.2 通过性能图表换算

供货商应提供带有以下三项基本可变参数的空冷系统专用性能图表（见图 4）。

- a) 排汽压力（如果合同或技术协议上有规定，则可为凝汽器进口压力）；
- b) 凝汽器热流量或排汽质量流量；
- c) 进口空气温度。

同时，其他（辅助）参数也要保持在设计条件，尤其是将排汽中蒸汽含量保持在设计条件。辅助参数的影响需要分别确定。结合性能图表和修正公式验证是否符合设计条件，供货商可以提供更多的性能图表用于变化的辅助参数。

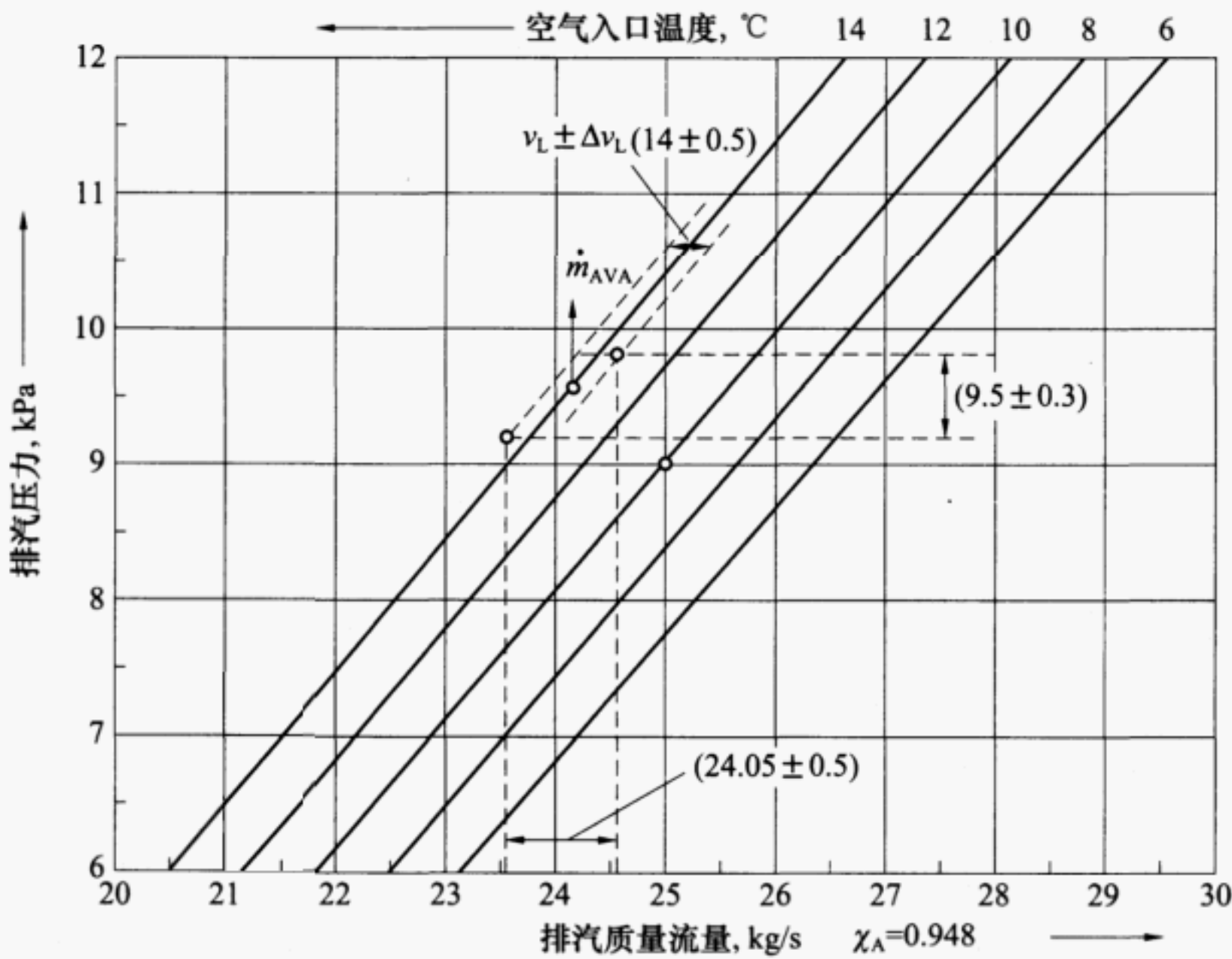


图 4 空冷凝汽器性能图表

7.5.3 修正公式

7.5.3.1 假设条件

未在性能图表中显示的辅助参数的影响借助近似公式加以考虑。假设所有参数都满足边界条件要求，则运行参数的变化作为单个参数变化的影响考虑，蒸汽质量流量的总修正系数为各个修正系数的乘积。为了方便计算，需要一定的假设条件，如果所有参数都满足边界条件要求，则假设条件对计算结果影响很小。假设条件如下：

- a) 空气侧假设条件。除进口空气密度外，假设空气的所有物质特性均为常数，且适用理想气体公

式，由风机特性变化和静压增加引起空气质量流量的变化可忽略不计。与保证点比较时，风机静态效率和机械损失认为不变。

- b) 蒸汽侧假设条件。除排汽中蒸汽比体积和蒸汽含量外，蒸汽的相关物质特性保持不变，且理想气体公式适用于汽相。排汽管道中的压力损失仅取决于排汽质量流量和平均蒸汽比体积，总阻力系数保持不变，且任何动态部分忽略不计。凝汽器中蒸汽侧的传热系数保持不变。
- c) 凝结过程假设条件。如果排汽完全凝结，则在凝汽器进口压力下的传热为等温传热。任何抽出的不凝结气体及夹带的蒸汽可忽略不计。空气侧的热阻是传热过程的主要热阻。

以下修正公式的推导参见附录 A。

7.5.3.2 排汽中蒸汽含量的修正

将附录 A 中式 (A.3) 简化为焓差的变化式 (A.5)，所有其他系数均等于 1。这样设计条件下的相对排汽质量流量为

$$\xi_1 = \frac{\dot{m}_{AV}}{\dot{m}_A} = \frac{\chi_A}{\chi_{AG}} \tag{35}$$

通常，排汽蒸汽含量是一个近似值，不直接通过测量确定。因此，修正系数的测量不确定度等于 0，即

$$\Delta \xi_1 = 0$$

7.5.3.3 大气压力的修正

应用附录 A 中式 (A.7)，将大气压力的变化引入到空气密度中，然后引入到性能特性中 [见式 (A.18)]。风机在额定转速下，假设空气体积流量比为 1，则大气压力修正系数为

$$\xi_2 = \frac{\dot{m}_{AV}}{\dot{m}_A} = \left(\frac{\rho_{L1}}{\rho_{LG}} \right)^{-1} \left(\frac{\Phi}{\Phi_G} \right)^{-1} \tag{36}$$

得到

$$\xi_2 = \left[\left(\frac{p_L}{p_{LG}} \right) (1 - \Gamma) + \Gamma \left(\frac{p_L}{p_{LG}} \right)^{m_K} \right]^{-1} \tag{37}$$

当供货商没有规定 m_K 时， $m_K \approx 0.45$ 作为近似值使用。修正系数的不确定度 $\Delta \xi_2$ 通过大气压力的上下限直接由式 (37) 确定。

7.5.3.4 风机频率修正

风机运行频率变化影响风机驱动功率，风机驱动功率的变化影响空气体积流量 [见式 (A.20)] 和性能特性 [见式 (A.18)]。将式 (A.3) 简化，得到风机频率修正系数

$$\xi_3 = \frac{\dot{m}_{AV}}{\dot{m}_A} = \left(\frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_{LG}} \right)^{-1} \left(\frac{\Phi}{\Phi_G} \right)^{-1} \tag{38}$$

对于稳定的体积流量可用式 (A.20) 和式 (A.6) 推导出入口空气温度和大气压力对风机驱动功率的影响。在设计条件及设计频率下，风机驱动功率为

$$P_{LV} = \left[\left(\frac{p_{LG}}{p_L} \right) \left(\frac{273.15 + \theta_{L1}}{273.15 + \theta_{LG}} \right) \right]^{1-n} \left(\frac{f_G}{f} \right)^3 P_L \tag{39}$$

因此

$$\xi_3 = \left(\frac{f}{f_G} \right)^{\frac{-3}{3-n}} \left[(1 - \Gamma) + \Gamma \left(\frac{f}{f_G} \right)^{\frac{3m_K-3}{3-n}} \right]^{-1} \tag{40}$$

当供货商没有规定 n 时, $n \approx 0.33$ 作为近似值使用。修正系数的不确定度 $\Delta\xi_3$, 通过风机频率的上下限直接由式 (40) 确定。

7.5.3.5 排汽压力和进口空气温度修正

基本参数, 即排汽压力和进口空气温度的影响, 在供货商的性能图表 (见图 4) 中已做了描述, 利用性能图表可求出所测得的入口空气温度 θ_{L_1} 和排汽压力 p_A 对应的排汽质量流量 \dot{m}_{AVA} (适用于 χ_{AG} 、 p_{LG} 和 P_{LG})。此外, 在标示的区域中, 其拐点由 p_A 和 θ_{L_1} 的测量不确定度确定。该区域的最大对角斜线决定 \dot{m}_{AVA} 的不确定度。由此得到排汽压力和进口空气温度的修正系数

$$\xi_4 = \frac{\dot{m}_{AG}}{\dot{m}_{AVA} \pm \Delta\dot{m}_{AVA}} \quad (41)$$

如果假定 $\Delta\dot{m}_{AVA} = 0$, 修正系数不确定度 $\Delta\xi_4$ 可以由排汽质量流量的上下限直接通过式 (41) 确定。

7.5.3.6 排汽质量流量比较值的试验不确定度

设计条件下排汽质量流量的比较值为

$$\dot{m}_{AV} = \dot{m}_A \xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4 \quad (42)$$

比较值的不确定度为

$$\Delta\dot{m}_{AV} = \sqrt{\left(\frac{\partial\dot{m}_{AV}}{\partial\dot{m}_A}\right)^2 \Delta\dot{m}_A^2 + \left(\frac{\partial\dot{m}_{AV}}{\partial\xi_1}\right)^2 \Delta\xi_1^2 + \left(\frac{\partial\dot{m}_{AV}}{\partial\xi_2}\right)^2 \Delta\xi_2^2 + \left(\frac{\partial\dot{m}_{AV}}{\partial\xi_3}\right)^2 \Delta\xi_3^2 + \left(\frac{\partial\dot{m}_{AV}}{\partial\xi_4}\right)^2 \Delta\xi_4^2} \quad (43)$$

差值 $\Delta\dot{m}_A$ 、 $\Delta\xi_1$ 、 $\Delta\xi_2$ 、 $\Delta\xi_3$ 和 $\Delta\xi_4$ 可由试验边界条件得到, 根据式 (42) 导数为

$$\frac{\partial\dot{m}_{AV}}{\partial\dot{m}_A} = \xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4 \quad (44)$$

$$\frac{\partial\dot{m}_{AV}}{\partial\xi_1} = \dot{m}_A \xi_2 \xi_3 \xi_4 \quad (45)$$

$$\frac{\partial\dot{m}_{AV}}{\partial\xi_2} = \dot{m}_A \xi_1 \xi_3 \xi_4 \quad (46)$$

$$\frac{\partial\dot{m}_{AV}}{\partial\xi_3} = \dot{m}_A \xi_1 \xi_2 \xi_4 \quad (47)$$

$$\frac{\partial\dot{m}_{AV}}{\partial\xi_4} = \dot{m}_A \xi_1 \xi_2 \xi_3 \quad (48)$$

7.5.3.7 排汽质量流量换算为排汽压力

根据设计条件下的排汽质量流量, 由附录 A 中式 (A.38), 可计算出设计条件下能达到的排汽压力。计算中要求的水饱和系数 (安托尼系数) 在附录 B 中给出。

$$\frac{p_{AV}}{p_{AG}} \cong \left(\frac{\Omega}{\Omega^2 + 2\Omega - 1} \right) \cdot \frac{\frac{\dot{m}_{AG}}{\dot{m}_{AV}} - 1 + \chi}{\chi} + \sqrt{\left(\frac{\Omega}{\Omega^2 + 2\Omega - 1} \cdot \frac{\frac{\dot{m}_{AG}}{\dot{m}_{AV}} - 1 + \chi}{\chi} \right)^2 - \left[\frac{\left(\frac{\dot{m}_{AG}}{\dot{m}_{AV}} \right)^2 (1 - \Omega^2)}{\Omega^2 + 2\Omega - 1} \right]} \quad (49)$$

式中辅助参数 Ω 和 χ 用附录 A 中的公式计算。

如果 $p_{AV} \leq p_{AG}$, 则认为空冷系统性能达到保证值。

7.5.4 凝结水过冷度

凝结水过冷却过程与运行参数有关, 状态非常复杂。因此, 不可能将该过程修正到设计条件而无大的误差, 除非另有协议, 否则在验收试验工况中所测得的过冷度应作为验证保证值的依据。

7.5.5 含氧量

验收凝结水含氧量指标时，试验测量工况应满足下列边界条件：

- a) 凝汽器热流量在 85%~105%设计值范围内；
- b) 排汽压力不低于设计值；
- c) 热井中凝结水位以下位置不允许空气漏入；
- d) 真空系统严密性指标不大于 200Pa/min。

7.5.6 算例

如图 4 所示，空冷凝汽器设计数据如下：

大气压力	$p_{LG}=1013\text{hPa}$
进口空气温度	$\theta_{L_1G}=10^{\circ}\text{C}$
出口空气温度	$\theta_{L_2G}=28.9^{\circ}\text{C}$
风机驱动功率	$P_{LG}=180\text{kW}$
风机频率	$f_G=50\text{Hz}$
排汽压力	$p_{AG}=9\text{kPa}$
排汽质量流量	$\dot{m}_{AG}=25\text{kg/s}$
排汽干度	$\chi_{AG}=0.948\text{kg/kg}$
凝结热	$r_G=2397.9\text{kJ/kg}$
热交换面积	$A=92\,520\text{m}^2$
传热系数	$K_G=32.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
用于计算的指数和辅助值	

$$m_k=0.45$$
$$n=0.33$$

试验数据：

大气压力	$p_L=(990\pm5)\text{hPa}$
进口空气温度	$\theta_{L_1}=(14\pm0.5)^{\circ}\text{C}$
风机轴功率	$P_L=(164\pm10)\text{kW}$
风机频率	$f=(49.6\pm0.1)\text{Hz}$
排汽压力	$p_A=(9.5\pm0.3)\text{kPa}$
排汽质量流量	$\dot{m}_A=(24\pm0.5)\text{kg/s}$
排汽干度	$\chi_A=0.93\text{kg/kg}$

(排汽干度为近似值，不包括任何测量不确定度)

基准值

$$\Delta\theta_{mG}=\frac{\dot{Q}_G}{K_G\cdot A}=\frac{25\times0.948\times2397.9\times10^3}{32.5\times92\,520}=18.9\text{ (K)}$$
$$NTU_G=\frac{\theta_{L_2G}-\theta_{L_1G}}{\Delta\theta_{mG}}=\frac{28.9-10}{18.9}=1.0$$
$$\Gamma=\frac{NTU_G}{e^{NTU_G}}=\frac{1.0}{e^{1.0}-1}=0.581977$$

排汽干度修正系数

$$\xi_1=\frac{\chi_A}{\chi_{AG}}=\frac{0.93}{0.948}=0.98101$$

排汽干度修正系数的不确定度 $\Delta\xi_1=0$ 。

大气压力修正系数

$$\xi_2 = \left[\left(\frac{990 \pm 5}{1013} \right) \times (1 - 0.581\ 977) + 0.581\ 977 \times \left(\frac{990 \pm 5}{1013} \right)^{0.45} \right]^{-1}$$
$$\xi_2 = 1.015\ 7 \pm 0.003\ 5$$

即大气压力修正系数的不确定度 $\Delta \xi_2 = 0.003\ 5$ 。

修正到设计条件下风机驱动功率

$$P_{LV} = \left[\left(\frac{1013}{990} \right) \times \left(\frac{273.15 + 14}{273.15 + 10} \right) \right]^{1-0.33} \times \left(\frac{50}{49.6} \right)^3 \times (164 \pm 10) = (172.2 \pm 10.5) \text{ kW}$$

风机频率修正系数

$$\frac{P_{LV}}{P_L} = \left[\left(\frac{1013}{990} \right) \times \left(\frac{273.15 + 14}{273.15 + 10} \right) \right]^{1-0.33} = 1.025\ 1$$
$$\frac{f}{f_C} = \frac{49.6 \pm 0.1}{50} = 0.992\ 0 \pm 0.002\ 0$$
$$\xi_3 = (0.992 \pm 0.002)^{(-3/2.67)} \times [(1 - 0.581\ 977) + 0.581\ 977 \times (0.992 \pm 0.002)^{(-1.65/2.67)}]^{-2}$$
$$\xi_3 = 1.006\ 2 \pm 0.001\ 5$$

即风机频率修正系数的不确定度 $\Delta \xi_3 = 0.001\ 5$ 。

排汽压力和进口空气温度修正系数:

排汽压力和进口空气温度修正系数由图 4 求出。根据试验工况测量的排汽压力和进口空气温度数值及测量不确定度, 在性能曲线上画出测量范围, 读出排汽质量流量的最大范围值:

$$p_A = (9.5 \pm 0.3) \text{ kPa}$$
$$\theta_{L_1} = (14 \pm 0.5) \text{ }^\circ\text{C}$$

该范围两条对角线中较大者的读数为

$$\dot{m}_{AV} = (24.05 \pm 0.50) \text{ kg/s}$$

则

$$\xi_4 = \frac{25.00}{24.05 \pm 0.50} = 1.039\ 5 \pm 0.020\ 8$$

即排汽压力和进口空气温度修正系数的不确定度 $\Delta \xi_4 = 0.020\ 8$ 。

设计条件下的实际排汽质量流量

$$\dot{m}_{AV} = 24.0 \times 0.981\ 01 \times 1.015\ 7 \times 1.006\ 2 \times 1.039\ 5 = 25.013 \text{ (kg/s)}$$

排汽质量流量的试验测量不确定度

$$\Delta \dot{m}_{AV} = \sqrt{1.042\ 2^2 \times 0.50^2 + 0 + 24.626^2 \times 0.003\ 5^2 + 24.858^2 \times 0.001\ 5^2 + 24.062^2 \times 0.020\ 8^2}$$
$$= 0.531 \text{ (kg/s)}$$

因此, 排汽质量流量的试验结果

$$\dot{m}_{AV} = (25.013 \pm 0.531) \text{ kg/s}$$

在允许范围内 (保证值为 25.0kg/s)。

将排汽质量流量转换为排汽压力

$$\Phi_G = 1.0 - e^{-1.0} = 0.632\ 121$$
$$\theta_{DG} = 10 + \frac{28.9 - 10}{0.632\ 121} = 39.899 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$p_{DG} = e^{\frac{23.308\ 417 - \frac{3888.11}{229.95 + 39.9}}{}} = 7.332\text{kPa}$$

$$\Omega = \frac{9}{7.332} = 1.227\ 496$$

$$\chi = \frac{(229.95 + 39.9)^2}{3888.11 \times (39.9 - 10)} = 0.626\ 376$$

排汽质量流量比 $\frac{\dot{m}_{AG}}{\dot{m}_{AV}} = \frac{25}{25.013} = 0.999\ 480$

排汽压力比 $\frac{p_{AV}}{p_{AG}} \cong 0.414\ 107 + \sqrt{0.414\ 107^2 - (-0.170\ 92)} = 0.999\ 26$

设计条件下汽轮机排汽压力为

$$p_{AV} = 0.999\ 26 \times 9 = 8.993\text{kPa}$$

7.6 空冷系统性能验收试验结论

针对用户与供货商签订的空冷系统技术协议和合同规定的考核指标，根据验收试验结果，编写空冷系统性能验收试验结论。通常验收试验结论包括以下几方面内容：

- a) 热力性能。当修正到设计条件下的各试验工况排汽质量流量 \dot{m}_{AV} 达到或超过排汽质量流量的保证值，或者排汽质量流量的保证值在试验结果不确定度范围内，且排汽质量流量转换的排汽压力 p_{AV} 不大于排汽压力保证值时，则认为空冷系统及其设备运行性能指标达到规定值；否则认为空冷系统及其设备运行性能指标未达到规定值。
- b) 空冷风机能耗。根据空冷系统技术协议规定的考核指标，试验工况空冷风机（电动机）总功率修正到设计条件下，在设计值的±3%范围内为达到规定值；否则未达到规定值。
- c) 空冷岛噪声。按照技术协议规定的位置考核噪声。

根据本标准 6.1.2.15 的要求，每个位置点噪声值为数次测量结果的算术平均值，测量的 5 个位置点噪声，用式（50）计算出噪声平均值作为考核依据，即：

$$L_{AV} = 10\lg \left[\left(\frac{1}{N_j} \right) \cdot \sum_{n=1}^{N_j} 10^{0.1 L_{At}} \right] \tag{50}$$

式中：

- L_{AV} ——空冷岛噪声，dB；
- N_j ——测量位置数目；
- L_{At} ——在不同测量位置的测试结果，dB。

7.7 验收试验报告

试验报告应包含下列内容：

- a) 任务来源。
- b) 试验范围。
- c) 试验目的。
- d) 试验内容及试验工况。
- e) 试验标准。
- f) 空冷系统设计性能参数。
- g) 试验参加单位和试验人员及试验时间。
- h) 试验、计算及性能评价方法。包括试验测点的布置、采用的仪表，试验条件，试验要求，设备状态，试验计算方法，性能评价参数及评价方法。

如果试验不满足规程规定，注明试验各方协商一致的最终结果，以及达成的试验协议、约定事项。

- i) 试验过程。
- j) 试验数据及计算结果。
- k) 试验验收结论。
- l) 试验分析。

对试验中发现的设备问题、运行问题进行分析；如果验收试验结果没有达到性能保证值，应分析原因及存在的问题，供用户和供货商参考。

8 直接空冷系统运行性能诊断试验

8.1 目的

运行性能诊断试验目的是评价空冷系统性能状态，诊断设备及运行存在的问题，提出改进建议，提高空冷系统运行性能，使空冷系统经济运行。

8.2 试验条件

8.2.1 空冷系统辅助设备

直接空冷系统的辅助设备，如抽气装置和凝结水泵等，应正常运行，并且符合性能规范的要求。

8.2.2 凝汽器隔离

凡是不能测量或计算其质量流量的进出凝汽器的其他管道，应进行隔离。

8.2.3 真空系统严密性

汽轮机组真空系统严密性应良好，真空严密性试验结果不大于 200Pa/min，若大于 200Pa/min，则增开真空泵进行试验。

8.2.4 凝汽器清洁

凝汽器内、外冷却表面，特别是空气侧的外表面应清洁。

8.2.5 环境风速

在每一试验工况的有效时间内，空冷凝汽器上边缘上方 1m 处的平均环境风速不能超过 5m/s，超过 10m/s 的峰值 1h 内发生次数不能超过 20 次。

8.2.6 气候条件

试验应在无雪、无雨的干燥天气下进行。

8.3 试验过程

试验时间、数据采集等试验过程应满足本标准 7.3 的要求。

8.4 计算和评价

8.4.1 数据真实性检查

对试验结果进行计算之前，应检查测量数据是否真实可靠。

8.4.2 平均值和可信度范围

按照本标准 7.4 的规定，确定测量参数平均值和不确定度。

8.4.3 空冷系统试验计算和评价

空冷系统性能分析及诊断，一方面与设计值进行比较，另一方面与以往试验结果和运行性能进行比较分析，诊断空冷系统性能变化的原因。

根据空冷系统试验数据计算下列性能参数，并进行分析评价、性能诊断。

- a) 真空严密性；
- b) 排汽压力；
- c) 风机功率；
- d) 迎面风速（冷却风量）；
- e) 传热系数；
- f) 排汽阻力；

g) 凝结水过冷度。

8.5 诊断试验报告

试验报告应包含下列内容：

- a) 任务来源；
- b) 试验目的；
- c) 试验内容及试验工况；
- d) 试验标准；
- e) 空冷系统设计性能参数；
- f) 试验、计算及性能评价方法，包括试验测点的布置、采用的仪表，试验条件，试验要求，设备状态，试验计算方法，性能评价参数及评价方法；
- g) 试验过程；
- h) 试验数据及计算结果；
- i) 试验分析；
- j) 试验结论。

试验报告要论述清楚空冷系统运行的性能状态，与设计性能的差距，并进行趋势分析、相关性分析；诊断存在的问题及原因；从设备、运行、检修维护等方面提出改进可行性及改进方案，供用户参考。

附 录 A

(规范性附录)

计 算 数 学 模 型

A.1 总则

用于确定辅助参数影响的数学模型中, 计算比较的排汽量, 即保证条件下的实际排汽量。任何工况的空冷凝汽器热流量与保证状态下的热流量进行比较时, 根据式 (3)

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_G} = \left(\frac{h_A - h_K}{h_{AG} - h_{KG}} \right) \left(\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_{AG}} \right) \quad (\text{A.1})$$

根据式 (4)

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_G} = \left(\frac{\rho_{L_1}}{\rho_{L_1G}} \right) \left(\frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_{LG}} \right) \left(\frac{\Phi}{\Phi_G} \right) \left(\frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_{1G}} \right) \quad (\text{A.2})$$

由式 (A.1) 和式 (A.2) 得到

$$\frac{\dot{m}_{AG}}{\dot{m}_A} = \left(\frac{h_A - h_K}{h_{AG} - h_{KG}} \right) \left(\frac{\rho_{L_1G}}{\rho_{L_1}} \right) \left(\frac{\dot{V}_{LG}}{\dot{V}_L} \right) \left(\frac{\Phi_G}{\Phi} \right) \left(\frac{\Delta\theta_{1G}}{\Delta\theta_1} \right) \quad (\text{A.3})$$

式 (A.3) 是关键公式, 可用来进行所有参数的修正。该公式可确定任何参数变化对排汽质量流量的影响, 并可定量的评价空冷系统性能。为了该公式的计算, 需要确定各参数对公式中相关值的影响。

A.2 焓差比

焓差比为

$$\frac{h_A - h_K}{h_{AG} - h_{KG}} = \left(\frac{r}{r_G} \right) \left(\frac{\chi_A - 0}{\chi_{AG} - 0} \right) \quad (\text{A.4})$$

排汽的凝结热只与排汽压力有关, 而排汽压力的变化已经包含在性能曲线中; 因此, 该变化将保持在设计条件下。需要修正的是排汽干度

$$\frac{h_A - h_K}{h_{AG} - h_{KG}} = \frac{\chi_A}{\chi_{AG}} \quad (\text{A.5})$$

A.3 进口空气密度比

由理想气体公式求出进口空气密度比

$$\frac{\rho_{L_1G}}{\rho_{L_1}} = \left(\frac{p_{LG}}{p_L} \right) \left(\frac{273.15 + \theta_{L_1}}{273.15 + \theta_{L_1G}} \right) \quad (\text{A.6})$$

由于进口空气温度已经包含在性能曲线中, 因此只要考虑大气压力变化对空气密度的影响, 即

$$\frac{\rho_{L_1G}}{\rho_{L_1}} = \frac{p_{LG}}{p_L} \quad (\text{A.7})$$

A.4 性能特性比

空气侧辅助参数变化影响性能特性。在等温凝结状态下, 根据式 (16), 得到

$$\frac{\Phi}{\Phi_G} = \left(\frac{1 - e^{-NTU}}{1 - e^{-NTU_G}} \right) = 1 + \frac{1 - e^{-(NTU - NTU_G)}}{e^{NTU_G} - 1} \tag{A.8}$$

当 $\delta < 1$ 时，指数函数可以用线性排列的形式表示

$$1 - e^{-\delta} \cong \delta \tag{A.9}$$

式 (A.9) 的剩余误差为 $1/2\delta^2$ 。因此

$$\frac{\Phi}{\Phi_G} \cong 1 - \frac{NTU_G}{e^{NTU_G} - 1} + \frac{NTU_G}{e^{NTU_G} - 1} \left(\frac{NTU}{NTU_G} \right) \tag{A.10}$$

如果各值恒定，定义

$$\Gamma \equiv \frac{NTU_G}{e^{NTU_G} - 1} \tag{A.11}$$

则性能特性是传热单元数相对变化的线性函数。由式 (1) 和式 (13) 得到

$$\frac{NTU}{NTU_G} = \left(\frac{K}{K_G} \right) \left(\frac{\rho_{L,G}}{\rho_{L_1}} \right) \left(\frac{\dot{V}_{LG}}{\dot{V}_L} \right) \tag{A.12}$$

为了求解，需要确定传热系数的变化。由于传热系数接近空气侧传热系数，因此，首先应考虑空气侧传热系数的变化。在外界空气有冷却作用的区域，且考虑到翅片效率的变化，可以应用势能定律，该定律与空气侧雷诺数 (Re) 有关

$$\alpha_{L,\text{eff}} \sim Re^m \sim (\rho_{L_1} \dot{V}_L)^m \tag{A.13}$$

因此，传热系数近似于取决雷诺数的大小

$$K \sim Re^{m_K} \tag{A.14}$$

其中

$$m_K \equiv m \left(\frac{K_G}{\alpha_{L,\text{eff},G}} \right) \tag{A.15}$$

因此，传热系数为

$$\frac{K}{K_G} = \left(\frac{\rho_{L_1} \dot{V}_L}{\rho_{L,G} \dot{V}_{LG}} \right)^{m_K} \tag{A.16}$$

则传热单元数为

$$\frac{NTU}{NTU_G} \cong \left(\frac{\rho_{L,G}}{\rho_{L_1}} \right)^{(1-m_K)} \left(\frac{\dot{V}_{LG}}{\dot{V}_L} \right)^{(1-m_K)} \tag{A.17}$$

根据式 (A.10)、式 (A.11) 和式 (A.17) 得到工作特性

$$\frac{\Phi}{\Phi_G} \cong 1 - \Gamma + \Gamma \left(\frac{\rho_{L,G}}{\rho_{L_1}} \right)^{(1-m_K)} \left(\frac{\dot{V}_{LG}}{\dot{V}_L} \right)^{(1-m_K)} \tag{A.18}$$

A.5 空气体积流量比

空气体积流量取决于风机的性能，当风机偏离设计性能较小时，风量与风机转速成正比。如果假设风机静压效率是常数，则空气体积流量就可以利用式 (2) 直接用风机驱动功率表示。因此，可计算静压升

$$\Delta p_L \sim Re^{-n} \sim \rho_{L_1} \dot{V}_L^2 \sim \rho_{L_1}^{(1-n)} \dot{V}_L^{(2-n)} \tag{A.19}$$

这里，空气黏度的变化忽略不计。将式 (A.19) 代入式 (2)，则可得

$$\frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_{LG}} \cong \left(\frac{\rho_{L_1}}{\rho_{L_1G}} \right)^{\frac{n-1}{3-n}} \left(\frac{p_L}{p_{LG}} \right)^{\frac{1}{3-n}} \quad (\text{A.20})$$

A.6 进口温差比

如果进口空气温度保持不变，则进口温差比仅取决于凝汽器的进口状态。此时，通过蒸汽压力曲线将温度和压力联系在一起

$$\ln[p_s(\theta)] = a - \frac{b}{(\theta + c)} \quad (\text{A.21})$$

为了简化计算，将式 (A.21) 两边线性化，左侧近似为

$$\ln[p_s] \cong \ln[p_{SG}] + \frac{p_s - p_{SG}}{p_{SG}} \quad (\text{A.22})$$

右侧近似为

$$a - \frac{b}{(\theta + c)} \cong \ln[p_{SG}] + b \frac{\theta - \theta_G}{(\theta_G + c)^2} \quad (\text{A.23})$$

当偏离设计条件较小时，应用下列关系式

$$p_s \cong p_{SG} \left[1 + b \cdot \frac{\theta - \theta_G}{(\theta_G + c)^2} \right] \quad (\text{A.24})$$

因此，进口温差比为

$$\frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_{1G}} \cong 1 + \left(\frac{p_D}{p_{DG}} - 1 \right) \cdot \frac{(\theta_G + c)^2}{b(\theta_{DG} - \theta_{L_1G})^2} \quad (\text{A.25})$$

由于凝汽器进口压力是通过排汽管道与排汽压力相连的，而排汽压力是基本参数，因此进口压力就已经包含在性能曲线中，并且式 (A.26) 适用于辅助参数的变化，即

$$\frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_{1G}} \cong 1 \quad (\text{A.26})$$

辅助参数的影响可借助上述数值确定。

A.7 排汽压力

假定所有基本参数和辅助参数都满足设计条件，而排汽质量流量不同。为了计算排汽压力，需要确定蒸汽侧压力损失（见图 3）。如果蒸汽的总阻力系数为常数，则适用下列关系

$$p_A - p_D \sim V_m \dot{m}_A^2 \quad (\text{A.27})$$

其中，湿蒸汽的平均比体积，当其近似值是在排汽管道中的蒸汽平均压力下求取时，主要取决于汽相的体积，即

$$V_m = \chi_A V_m'' + (1 - \chi_A) V_m' \approx \chi_A V_m'' \quad (\text{A.28})$$

应用理想气体公式，且排汽管中无温度变化时

$$p_m V_m'' \cong \text{常数} \quad (\text{A.29})$$

及

$$p_m \cong \frac{1}{2}(p_A + p_D) \quad (\text{A.30})$$

这里，相对压力变化为

$$\left(\frac{p_A - p_D}{p_{AG} - p_{DG}}\right) \cong \left(\frac{\chi_A}{A_{AG}}\right) \frac{1}{2} (p_{AG} + p_{DG}) \left(\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_{AG}}\right)^2 \tag{A.31}$$

当排汽中的蒸汽含量保持不变时，凝汽器进口压力为

$$p_D \cong \sqrt{p_A^2 - (p_{AG}^2 - p_{DG}^2) \left(\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_{AG}}\right)^2} \tag{A.32}$$

定义 Ω 为

$$\Omega = \frac{p_{AG}}{p_{DG}} \tag{A.33}$$

则

$$\frac{p_D}{p_{DG}} \cong \frac{(1 - \Omega^2)}{2\Omega} \left(\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_{AG}}\right)^2 \left(\frac{p_A}{p_{AG}}\right)^{-1} + \frac{(\Omega^2 - 1 + 2\Omega)}{2\Omega} \left(\frac{p_A}{p_{AG}}\right) \tag{A.34}$$

定义

$$\chi \equiv \frac{(\theta_{DG} + C)^2}{b(\theta_{DG} - \theta_{L,G})} \tag{A.35}$$

由式 (A.25) 得

$$\frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_{IG}} \cong (1 - \chi) + \chi \frac{(1 - \Omega^2)}{2\Omega} \left(\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_{AG}}\right)^2 \left(\frac{p_A}{p_{AG}}\right)^{-1} + \chi \frac{(\Omega^2 - 1 + 2\Omega)}{2\Omega} \left(\frac{p_A}{p_{AG}}\right) \tag{A.36}$$

这样，式 (A.3) 简化为

$$\frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_{IG}} = \frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_{AG}} \tag{A.37}$$

由式 (A.36) 和式 (A.37) 得

$$\frac{p_A}{p_{AG}} \cong \left(\frac{\Omega}{\Omega^2 + 2\Omega - 1}\right) \times \frac{\frac{\dot{m}_{AG}}{\dot{m}_A} - 1 + \chi}{\chi} + \sqrt{\left(\frac{\Omega}{\Omega^2 + 2\Omega - 1} \times \frac{\frac{\dot{m}_{AG}}{\dot{m}_A} - 1 + \chi}{\chi}\right)^2 - \left[\frac{\left(\frac{\dot{m}_{AG}}{\dot{m}_A}\right)^2 \times (1 - \Omega^2)}{\Omega^2 + 2\Omega - 1}\right]} \tag{A.38}$$

该公式完全满足保证性能的条件。当所有其他参数满足保证条件时，式 (A.38) 可以由排汽质量流量的变化近似求出排汽压力。

附录 B
(资料性附录)
保证点的基准值

B.1 基准值

进行数值计算时，需要保证点的基准值，可以由已知参数求出

$$\Delta\theta_{mG} = \dot{Q}_G / (K_G \cdot A) \tag{B.1}$$

$$NTU_G = \frac{\theta_{L_2G} - \theta_{L_1G}}{\Delta\theta_{mG}} \tag{B.2}$$

$$\Phi_G = 1 - e^{-NTU_G} \tag{B.3}$$

$$\theta_{DG} = \theta_{L_1G} + \frac{\theta_{L_2G} - \theta_{L_1G}}{\Phi_G} \tag{B.4}$$

$$p_{DG} = \exp\left[a - \frac{b}{(\theta_{DG} + C)}\right] \tag{B.5}$$

B.2 常数

在用于水的安托尼公式中，应用以下常数

$$a=23.308\,417$$

$$b=3888.11$$

$$c=229.95$$

中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
直接空冷系统性能试验规程
DL/T 244 — 2012

*

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京九天众诚印刷有限公司印刷

*

2012 年 7 月第一版 2012 年 7 月北京第一次印刷
880 毫米×1230 毫米 16 开本 2.25 印张 62 千字
印数 0001—3000 册

*

统一书号 155123 • 960 定价 19.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究