

ICS 29.160.40
K 55



中华人民共和国国家标准

GB/T 22140—2018/IEC 62006:2010
代替 GB/T 22140—2008

小型水轮机现场验收试验规程

Code for field acceptance test of small hydro turbines

(IEC 62006:2010, Hydraulic machines—Acceptance tests of small hydroelectric installations, IIT)

2018-05-14 发布

2018-12-01 实施



国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

https://www.sljzjxx.com
水利造价信息网

目 次

前言	VII
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义及示意图	2
3.1 术语和定义	2
3.2 水轮发电机组示意图	2
4 试验的等级和范围	3
4.1 保证的试验等级	3
4.1.1 一般要求	3
4.1.2 合同条件	5
4.2 性能保证范围	5
4.2.1 一般要求	5
4.2.2 等级 A:最大输出功率	5
4.2.3 等级 B:指数试验	5
4.2.4 等级 C:水轮机效率	5
4.2.5 损失的解释	5
4.3 试验范围	6
4.3.1 安全验收试验	6
4.3.2 试运行和可靠性试验	6
4.3.3 性能试验	6
4.3.4 试验人员能力要求	7
4.3.5 质保	7
5 试运行前的安全验收试验	8
5.1 启动前试验	8
5.2 水流关闭装置	8
5.2.1 一般性要求	8
5.2.2 进水口闸门或阀门	8
5.2.3 进水主阀	9
5.2.4 活动导叶(混流式和轴流转浆式水轮机)	9
5.2.5 针形阀和折向器(水斗式和斜击式水轮机)	10
5.3 首次开机的操作和控制	11
5.4 额定转速下的滑动轴承运行	11
5.5 空载条件下的紧急停机	11
5.6 电气保护	12
5.7 超速试验	12
5.8 飞逸试验	12
5.9 过压、紧急关闭和甩负荷试验	13

5.9.1	一般条件	13
5.9.2	导叶或喷针	14
5.9.3	水轮机进水阀门	14
5.9.4	减压阀	14
5.9.5	压力升高	14
5.10	测试参数	15
5.10.1	压力	15
5.10.2	转速	15
5.10.3	控制部件	15
6	运行和可靠性试验(试运行)	16
6.1	一般规定	16
6.2	转动部件的温度稳定性	17
6.2.1	一般要求	17
6.2.2	温度保证	17
6.3	转速控制系统	17
6.3.1	说明	17
6.3.2	不带调速器的机组运行	18
6.3.3	带有调速器的机组运行	18
6.3.4	带有中压调节器的机组运行	19
6.3.5	带有其他控制器的机组运行	19
6.3.6	在试验控制系统时的测量	19
6.4	协联关系试验	20
7	性能保证试验	20
7.1	概述	20
7.2	在不同净水头下发电机(变压器)的最大输出功率	20
7.2.1	保证值	20
7.2.2	测试仪器要求	20
7.3	指数试验	21
7.3.1	一般要求	21
7.3.2	相对流量测量	21
7.3.3	特性曲线形状控制	22
7.3.4	电站相对效率	23
7.3.5	优化协联关系	23
7.4	水轮机效率	23
7.4.1	采用绝对流量测量的水轮机效率试验	23
7.4.2	采用热力学法的效率试验	24
7.5	效率修正	24
8	结果计算与比较	26
8.1	概述	26
8.1.1	现场数据	26
8.1.2	测量值(读数)	26
8.1.3	水温的比尺效应	27

8.1.4	电站特性的平移变换	27
8.2	输出功率	27
8.2.1	电站输出功率测量	27
8.2.2	发电机输出功率测量	27
8.2.3	水轮机输出功率测量	28
8.3	水轮机相对效率	28
8.3.1	一般规定	28
8.3.2	相对流量	28
8.3.3	电站特性曲线的保证	29
8.3.4	电站相对效率	29
8.4	水轮机绝对效率	29
8.4.1	一般说明	29
8.4.2	绝对流量	30
8.4.3	电站效率的保证值与比较	30
9	误差分析	30
9.1	概述	30
9.2	系统不确定度	30
9.2.1	一般规定	30
9.2.2	典型的系统不确定度	30
9.2.3	水轮机用作流量计的系统不确定度	31
9.3	随机不确定度	32
9.3.1	单一运行工况点下的测量	32
9.3.2	对整个运行范围的测量	33
9.4	综合不确定度	34
9.4.1	一般规定	34
9.4.2	水头	35
9.4.3	输出功率	36
9.4.4	指数试验不确定度	38
9.4.5	采用绝对流量测量的效率试验	40
9.4.6	采用热力学法的效率试验	40
10	其他保证	41
10.1	空蚀	41
10.1.1	一般规定	41
10.1.2	测量方法	41
10.1.3	与规定的保证值比较	42
10.2	噪声	42
10.2.1	一般规定	42
10.2.2	测量方法	43
10.2.3	与保证值的比较	43
10.3	振动	43
10.3.1	一般规定	43
10.3.2	测试及其方法	43

10.3.3 与保证值的比较	43
附录 A (规范性附录) 术语、定义、符号和单位	45
A.1 术语和定义	45
A.1.1 说明	45
A.1.2 下标	45
A.1.3 几何术语和定义	45
A.1.4 主要物理量	46
A.1.5 水头的术语和定义	47
A.1.6 流量的术语和定义	47
A.1.7 功率的术语和定义	47
A.1.8 效率的术语和定义	48
A.1.9 不确定度的术语和定义	48
A.1.10 其他术语和定义	48
A.2 水的比能的定义	50
A.3 瞬态压力变化	50
A.4 物理数据	51
A.4.1 重力加速度和纬度、海拔高度的关系	51
A.4.2 纯水的密度	51
A.4.3 空气的密度	51
附录 B (规范性附录) 水头的测量	53
B.1 概述	53
B.2 压力测量断面的选取	53
B.2.1 一般规定	53
B.2.2 上游基准断面	54
B.2.3 下游基准断面	54
B.3 测量断面的定义	56
B.3.1 一般规定	56
B.3.2 轴流式水轮机(Kaplan turbine)水头定义	56
B.3.3 混流式水轮机(Francis turbine)水头定义	57
B.3.4 水斗式水轮机(Pelton turbine)水头定义	59
B.3.5 斜击式水轮机(Turgo turbine)水头定义	60
B.3.6 双击式水轮机(Crossflow turbine)水头定义	61
B.4 水头测量方法	62
B.4.1 一般规定	62
B.4.2 压力测量仪器	63
B.4.2.1 原级测量仪器	63
B.4.2.2 压力传感器	63
B.4.2.3 弹簧压力计	63
B.4.2.4 自由水位测量仪器	63
B.5 等级 A 测试中动水头评估	64
附录 C (规范性附录) 转速测量方法	65
C.1 旋转速度	65
F	

C.1.1 直接测量功率时转速的测量	65
C.1.2 间接测量功率时转速的测量	65
C.2 过速和飞逸转速的定义	65
附录 D (规范性附录) 输出功率测量	68
D.1 概述	68
D.2 输出功率的测量	66
D.2.1 同步发电机	66
D.2.2 异步发电机输出功率测量的间接法	67
附录 E (规范性附录) 流量测量方法	69
E.1 概述	69
E.1.1 一般条件	69
E.1.2 流量测量方法的选取	69
E.1.3 流动稳定性	70
E.1.4 泄漏、渗透和分流	70
E.2 绝对流量测量方法	70
E.2.1 一般规定	70
E.2.2 适合小水轮机的声学方法	70
E.2.3 压力时间法(Gibson 法)	71
E.3 相对流量测量	71
E.3.1 一般规定	71
E.3.2 差压方法	71
E.3.3 流量测量的二次方法	79
附录 F (资料性附录) 水电站条件	80
F.1 水电站条件列单	80
F.1.1 一般规定	80
F.1.2 需方提供的数据	80
F.1.3 合同规定水位	80
F.1.4 水质	80
F.1.5 整个过水流道可预计的水力损失	80
F.1.6 紊流条件	80
F.2 确定基准高程	81
F.3 试验仪器设备的技术要求	81
附录 G (资料性附录) 调试	82
G.1 检查清单	82
G.2 调试报告	82
附录 H (资料性附录) 性能测试效率计算	83
H.1 一般试验条件	83
H.2 需要满足的保证值	83
H.2.1 等级 A	83
H.2.2 等级 B	83
H.2.3 变压器效率	83

II.3	物理常数	84
II.4	测量条件	84
II.5	数据测量与计算	84
H.5.1	数据测量	84
H.5.2	数据计算	85
II.6	不确定度	86
H.6.1	合成不确定度	86
H.6.2	随机不确定度	86
H.6.3	随机和总不确定度	86
II.7	试验结果和保证值的比较	87
H.7.1	等级 A:发电机最大输出功率	87
H.7.2	等级 B:水轮机特性曲线形状控制	88
附录 1 (资料性附录)	协联关系试验	89
1.1	概述	89
1.2	试验程序	89
表 1	试验范围	4
表 2	最大飞逸转速(n_{max})	13
表 3	性能试验参数	20
表 4	指数流量试验方法	22
表 5	现场数据	26
表 6	满负荷工况不确定度	31
表 7	不同开度下流量的系统不确定度	32
表 8	有关保证效率的水轮机特性曲线的整体不确定度	39
表 9	图 28 中用到的数据	40
表 10	空蚀破坏限制	42
表 A.1	水的密度	51
表 E.1	流量测量方法的选择	69
表 E.2	估算压力管道系数并评估系统不确定度	76
表 II.1	电站相对效率保证	83
表 II.2	变压器数据	83
表 II.3	数据测量 (不包括所有试验)	85
表 H.4	计算结果	85

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 22140—2008《小型水轮机现场验收试验规程》，与 GB/T 22140—2008 相比，除编辑性修改外主要技术内容变化如下：

- 调整原标准第 3 章“术语、定义、符号及单位”的内容至附录 A“术语、定义、符号和单位”（见 A.1~A.4）；
- 调整原标准第 4 章中“电站条件”和“试验仪器设备的技术要求”至附录 F“水电站条件”（见 F.1~F.3）；
- 原标准第 8 章中“误差分析”独立成为第 9 章（见 9.1~9.4）；
- 原标准第 9 章中“试验结果与保证值的比较”整合调整为第 8 章的部分内容（见 8.4.3）；
- 删除了原标准第 10 章中“磨损”的内容（2008 年版的 10.1）；
- 删除了原标准第 11 章中“试验的组织”的内容（2008 年版的 11.1~11.4）；
- 删除了原标准第 12 章中“数据采集”的内容（2008 年版的 12.1~12.3）；
- 删减了原标准附录 E 中“流量测量方法”的部分内容，“绝对流量测量方法”仅保留“声学法”和“压力-时间法”两种方法（2008 年版的 E.2.1、E.2.2、E.4~E.6 和 E.8）；
- 增加了附录 G“调试”、附录 H“性能测试效率计算”和附录 I“协联关系试验”（见 G.1、G.2、H.1~H.7、I.1 和 I.2）。

本标准采用翻译法等同采用 IEC 62006:2010《水力机械—小型水轮机现场验收试验》。

本标准与 IEC 62006:2010 相比技术内容和文本结构相同，仅存在最小限度的编辑性修改：

- 修改了标准名称。

本标准由中华人民共和国水利部提出并归口。

本标准起草单位：中国水利水电科学研究院。

本标准主要起草人：张海平、孟晓超、张建光、朱雷、陈莹、马崇萍、马兵全、周秋景。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

GB/T 22140—2008。

小型水轮机现场验收试验规程

1 范围

本标准规定了小型水轮发电机组现场验收试验的内容、测量方法,以及合同保证条件的评价方法。

本标准适用于单机输出功率不大于 15 MW 和转轮直径不大于 3.0 m 的冲击式和反击式水轮发电机组(含同步或异步发电机)的现场验收试验。

本标准给出了以下内容:

a) 小型水轮机验收试验的内容,如安全验收试验、试运行试验、性能保证试验等,及可选的空化、噪声和振动试验等试验。

b) 小型水轮发电机组中的典型试验方法,并分成以下三个等级(详见表 1):

试验等级 A:	常规试验项目(仪表测量)	必选
	确定水轮发电机组的最大输出功率	
试验等级 B:	扩展试验项目	推荐
	确定水轮发电机组运行特性	
试验等级 C:	综合试验项目	可选
	确定水轮发电机组的绝对效率	

注:所有等级包括安全试验、试运行试验和可靠性试验。

c) 合同中应包含的水轮发电机性能指标,以便在各试验等级下对试验结果进行评估、计算和比较。

供方或监理负责所进行的各项试验符合标准。

本标准不涉及水轮机和各种部件的具体结构。

2 规范性引用文件

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

GB/T 9239.1—2006 机械振动 恒态(刚性)转子平衡品质要求 第 1 部分:规范与平衡允差的检验(ISO 1940 1:2003, IDT)

ISO 1580 声学 测量旋转式电动机发出的空中传播的噪音试验规程(Acoustics—Test code for the measurement of airborne noise emitted by rotating electrical machinery)

ISO 3746 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能级 反射面上方采用包围测量表面的简易方法(Acoustics—Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure—Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane)

ISO 4373 明渠水流测量 水位的测量设备(Hydrometry—Water level measuring devices)

ISO 4412(所有部分) 水力液压传动 空气噪声级检测规程(Hydraulic fluid power—Test code for determination of airborne noise levels)

ISO 5168 流体流量测量 不确定性的评估程序(Measurement of fluid flow—Procedures for the evaluation of uncertainties)

ISO 7919-5 机械振动 转动轴的机械振动评估 第 5 部分:在水电站和泵站的机械设置(Me

chanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts—Part 5; Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants)

ISO 10816-3 机械振动 非转动部分的机械振动评估 第3部分:现场测试额定功率在15 kW以上额定转速在120 r/min和15 000 r/min之间的机械(Mechanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts—Part 3; Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ)

IEC 60041:1991 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机水力性能现场验收试验(Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump turbines)

IEC 60193 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机 模型验收试验(Hydraulic turbines, storage pumps and pump turbines—Model acceptance tests)

IEC 60308 水轮机 调速系统试验国际规程(Hydraulic turbines—Testing of control systems)

IEC 60609 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机 空蚀评定(Hydraulic turbines, storage pumps and pump turbines—Cavitation pitting evaluation)

IEC 60651 声级计规范(Specification for sound level meters)

IEC 61392 水轮机调节系统规范指南(Guide to specification of hydraulic turbine control systems)

ANSI/IEEE 810 水轮机和发电机整锻轴法兰和轴摆度允许公差(Hydraulic turbine and generator integrally forged shaft couplings and shaft runout tolerances)

3 术语、定义及示意图

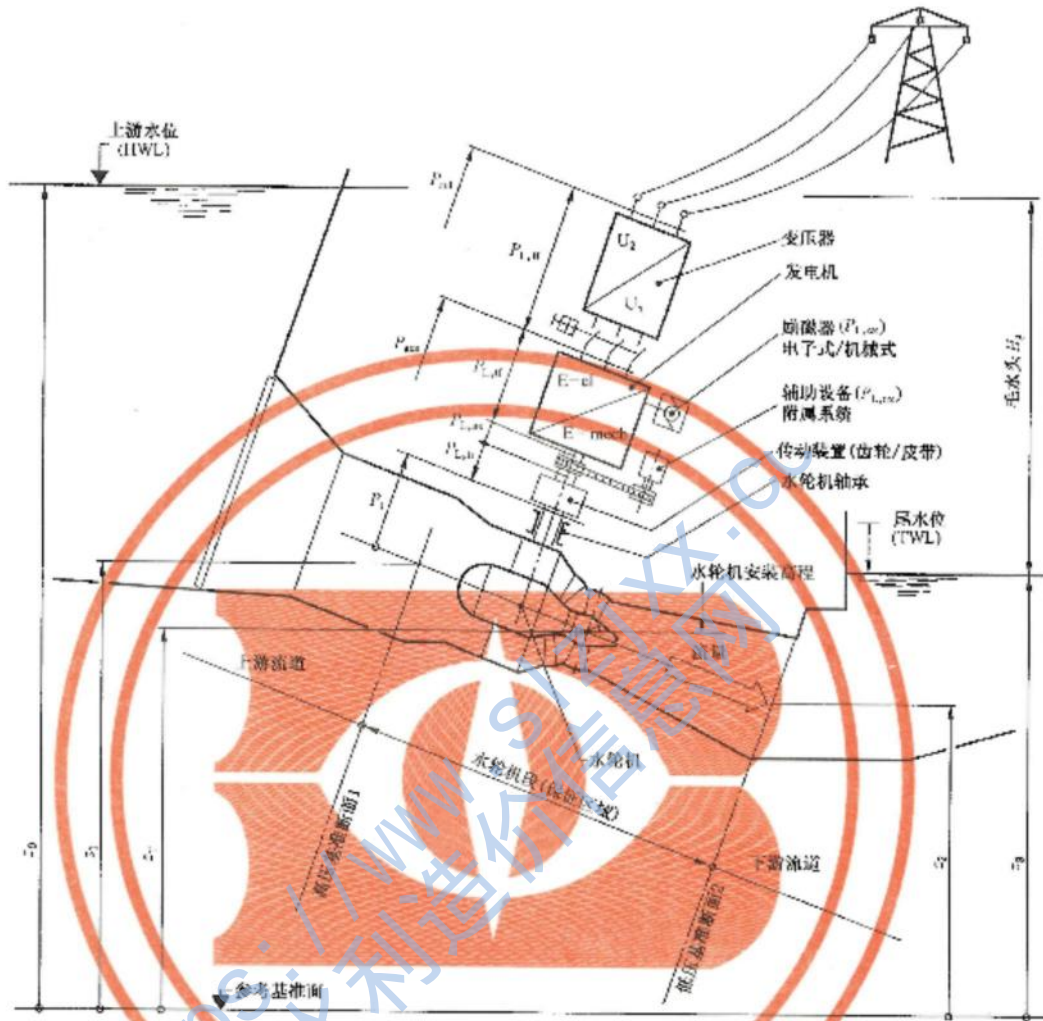
3.1 术语和定义

完整的术语和定义列表见附录A。

3.2 水轮发电机组示意图

水电站的流道由三个不同的部分组成(见图1):

- 上游流道;
- 水轮机段(在高压基准断面1与低压基准断面2之间);
- 下游流道。



注 1: 在上游渠道和下游渠道内的水力损失不应归于水轮机, 但有可能影响水轮机段的水力条件和降低水轮机的效率。当测量水轮机效率时, 仅需考虑水轮机段内的能量损失。如果无法在高压基准断面 1 和低压基准断面 2 处测量水轮机的能量, 供需双方可以商议改变测量断面的位置。

注 2: 兼管小型水轮机的高压基准断面 1 和低压基准断面 2 以及净水头和比能的定义见附录 B。

图 1 水轮发电机组示意图

4 试验的等级和范围

4.1 保证的试验等级

4.1.1 一般要求

水轮发电机组试验等级范围如表 1 所示。

表1 试验范围

A级 常规试验(按合同)		B级 扩展试验		参考条款
C级 综合试验		D级 特殊试验		
试验等级		B	B	
试运行前安全验收试验		是	是	5
启动前试验 (无水试验)	是	是	是/选择	5.1
水流关闭装置 (无水和充水试验)	是	是	是/选择	5.2
首次开机运行 (过水试验)	是	是	是/选择	5.3
额定转速下的轴承运行	是	是	是	5.4
空载条件下的紧急停机	是	是	是	5.5
电气保护	是	是	是	5.6
超速试验	是	是	是	5.7
飞逸试验	不/选择	不/选择	不/选择	5.8
过载、紧急关闭和甩负荷试验	是	是	是	5.9
运行和可靠性试验(试运行)				6
转动部件的温度稳定性	是	是	是	6.2
转速控制系统	是/选择	是/选择	是/选择	6.3
协联关系试验(双调节水轮机)	是	是	是	6.4
性能保证试验				7
a) 发电机(变压器)的最大输出功率		*		7.2
b) 指数试验				7.3
——特性曲线形状控制		是		7.3.3
——电站相对效率		是		7.3.4
——优化协联关系		*		7.3.5
d) 效率试验				7.4
——采用绝对流量测量	是	—		7.4.1
——采用热力学法	是	—		7.4.2
结果计算与比较	是	是	是	8
误差分析	是	是	是	9
其他保证				10
空蚀	是/选择	是/选择	是/选择	10.1
噪声	不/选择	不/选择	不/选择	10.2
振动	是/选择	不/选择	是/选择	10.3
注: 是:合同要求; 是/选择:通常为是,但取决于水轮机型式和现场条件; 不/选择:通常为不,但取决于水轮机型式和现场条件; —:不需要。 *:包含在其他试验中。				

4.1.2 合同条件

合同中应规定水轮机的保证值,并包括测试范围和测量仪器设备的等级,安全性测试也应始终包含在内,电站条件、水质和安装高程等条件也应详细说明(参见附录 F)。

4.2 性能保证范围

4.2.1 一般要求

所有保证值都涉及基准面 1 和 2 之间的水力流道(水轮机段)和相应的净水头。各个等级要求保证其对应的数据。

4.2.2 等级 A:最大输出功率

- a) 发电机最大输出功率,包括 4.2.5 中 a)到 d)的损失 $P_{\text{generator}} = f(H)$
- b) 变压器最大输出功率,包括 4.2.5 中 a)到 c)的损失 $P_{\text{transformer}} = f(H)$
 - 1) 输出功率-净水头曲线,见图 15;
 - 2) 流量-水轮机开度曲线,见图 B.13;
 - 3) 电气连接线图,见附录 D。

4.2.3 等级 B:指数试验

确定新投产水轮机的特性曲线,或比较电站改造前后水轮机的效率变化而进行的测试。

- a) 特性曲线形状控制 $\eta_i = f(P_i)$
 - 1) 电站预期效率曲线形状,见图 16;
 - 2) 曲线的可能偏差,见图 16;
 - 3) 测量水头和保证水头的变化大于 3%时,水轮机运行特性曲线,见图 19。

注:特性曲线形状控制(shape control)指的是确定特性曲线和水轮机相对效率。

- b) 电站相对效率 $\eta_{\text{station}} = f(P_{\text{net}})$
 - 1) 运行特性曲线,见图 19;
 - 2) 发电机损失,见附录 D;
 - 3) 电气连接线图,见附录 D。

c) 双调节水轮机协联关系优化

在净水头条件下预调节导叶开度和桨叶角度的关系,参见附录 1。

4.2.4 等级 C:水轮机效率

- a) 绝对流量测量 $\eta_i = f(P_i)$
- b) 热力学方法 $\eta_i = f(P_i)$
 - 1) 运行特性曲线,见图 19;
 - 2) 发电机损失,见附录 D;
 - 3) 电气连接线图,见附录 D。

4.2.5 损失的解释

各方应就以下机械和电气设备所致损失的解释达成一致:

- a) 水轮机轴承和附属设备；
- b) 机械能传输设备，如齿轮和传送带；
- c) 发电机，包括轴承、励磁系统、机械传动或电气连接附属设备；
- d) 机械或电气驱动附属设备；
- e) 变压器。

下列子系统和设备不在考虑范围之内：

- a) 除水设备(泥浆泵)；
- b) 临时的加热或冷却系统；
- c) 照明设备。

4.3 试验范围

4.3.1 安全验收试验

若测试结果表明机组运行不安全，则不能进行下一步的运行，直至找出存在的故障，并予以评估和修复。

4.3.2 试运行和可靠性试验

在所有的安全试验完成后，且执行的全部试验都在允许的限制范围内，可开始限时的试运行。试运行应不小于 72 h。

4.3.3 性能试验

- a) 一般试验条件要求如下：
 - 1) 测试方法：流量、功率、水头、效率、转速和损失等参数的测量和计算方法应在一般程序中阐明；
 - 2) 数据点、运行周期和读数：如图 15(A 级)、图 16(B 级)、图 18(C 级)中曲线需要的数据点最少 6 个，最好为 8 个~10 个。每个数据点从 1 个或多个运行周期中获得(见图 25 和表 H.4)。在一个运行中的测量次数取决于使用的测量方法。为了消除异常值，无论是规定时间的测量或任何基于时间的测量，都应不小于 3 个运行周期；
 - 3) 测量仪器记录数据的时间间隔对任何变量应一致；
 - 4) 小型水轮机通常由标准部件组成，应避免超出力运行。
- b) 需要满足的试验条件如下：
 - 1) 在一个运行周期中的脉动和波动(见图 22、图 23、图 24)。脉动指的是功率、水头、流量和转速等参量相对于平均值大于 1 Hz 的高频变化，通常由河道、管道、水库、压力水管和泄水管道等外围区域的水头和压力变化引起；波动是较长时间的变化或趋势；
 - 2) 功率的波动最大值应不超出其平均值的 1.5%；
 - 3) 水头(压力)的波动最大值应不超出其平均值的 0.5%；
 - 4) 转速的波动最大值应不超出其平均值的 0.5%。
- c) 试验后的检查要求如下：
 - 1) 对试验结果的初步计算应在电站现场完成，如果发现测试结果没有满足合同保证值，则在拆除仪器设备之前，按照以下步骤进行检查：

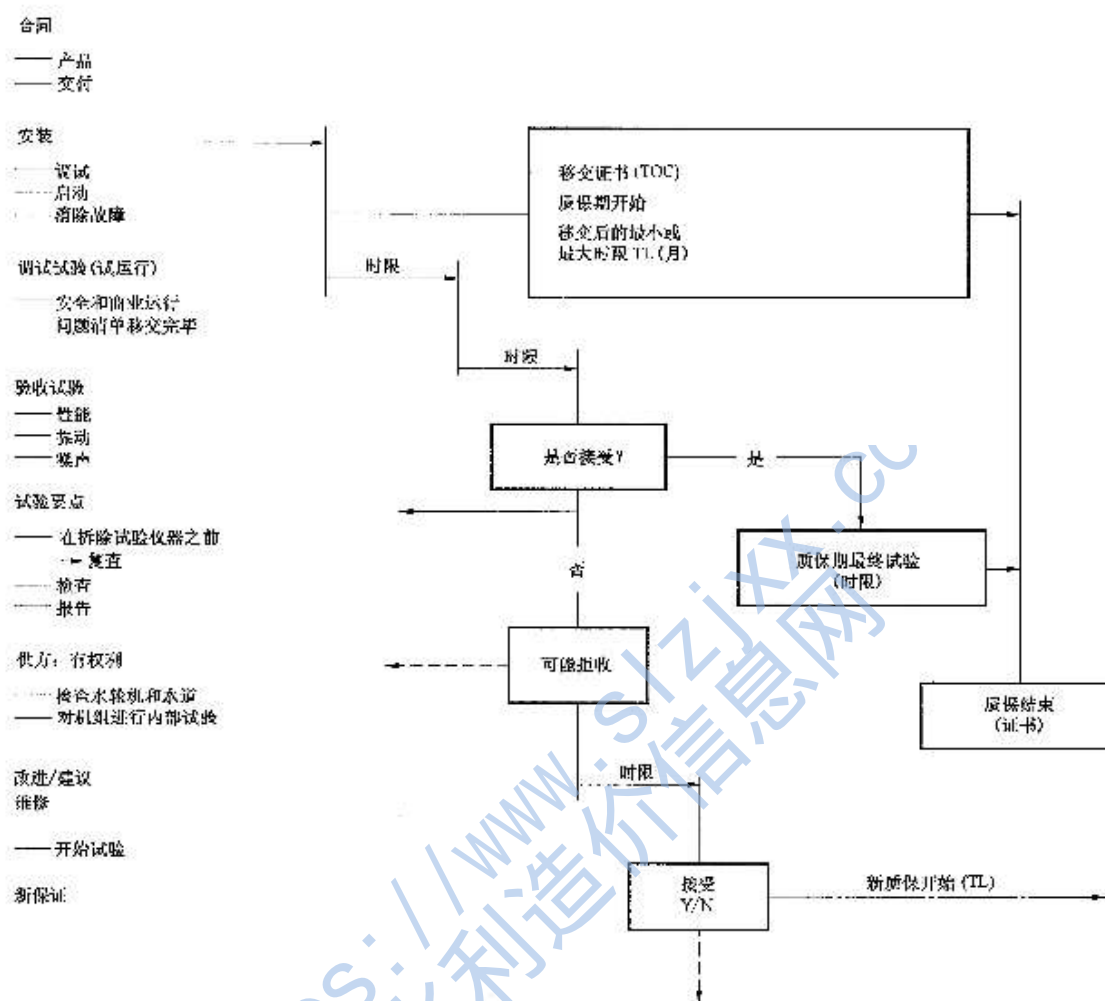
- 所有的数据有无计算错误,如果发现有误,应重新计算;
 - 所有仪器是否正确连接和标定,测量管路中是否有空气,以及是否存在不规则的脉动等;
 - 随机误差和异常值;
 - 在流道中的水力隐患,例如进口水流条件;
 - 在水轮机流道中的悬浮物,例如水草、水藻和工业垃圾等(关闭水轮机,清理水轮机和流道);
 - 基准水位;
 - 机组存在不正常的水力和(或)电气现象;
 - 在尾水管出口的气体排放;
 - 意外的振动和(或)噪声;
 - 设备的安装和流道几何尺寸:
 - 在关闭和全开位置水轮机导叶开度,检查信号偏移;
 - 双调节式水轮机的协联关系;
 - 折向器和喷针开度的协联关系;
 - 转轮几何尺寸
- 2) 完成以上全部检查后,试验方负责人应提供简要的报告说明未满足保证值的原因。此时,供方有权检查排完水后的水轮机,以及上下游流道。

4.3.4 试验人员能力要求

当执行极端工况试验时,所有试验人员的能力应能够胜任相应的岗位。A级试验可由调试工程师执行,B级和C级试验应由测试专家执行。

4.3.5 质保

水轮发电机组安装、验收和质保流程的示例如图2所示。



注: TL 是合同双方约定的时限(一般为 6 个月)。

图 2 质保期

5 试运行前的安全验收试验

5.1 启动前试验

小型水轮机形态各异、差别较大,调试试验的一般性准则参见附录 G。

5.2 水流关闭装置

5.2.1 一般性要求

要求水流关闭装置在任何情况下都能安全地关闭和切断水流,对以下控制装置宜进行仔细检查。

5.2.2 进水口闸门或阀门

进水口闸门或阀门应设计成可在任何条件下关闭,包括漏水或压力水管破裂等情况。设置的关闭

时间应避免在电站上游渠道或压力前池产生危险的浪涌或水力波动。

5.2.3 进水主阀

进水主阀的设计应保证在水轮机飞逸状态下最大流量时能够可靠关闭。关闭特性和关闭时间的选取应能够保证浪涌或水锤的效应满足调节保证计算要求。

5.2.4 活动导叶(混流式和轴流转桨式水轮机)

满流状态下,主调节装置活动导叶应能在正常和紧急事故时安全关闭。在所有可能的运行条件下应进行活动导叶的操作试验。摩擦力和水力矩宜与无水和有水开启/关闭压力的设计值相比较,载荷从空载加到满负荷再降到空载(见图3和图4)。

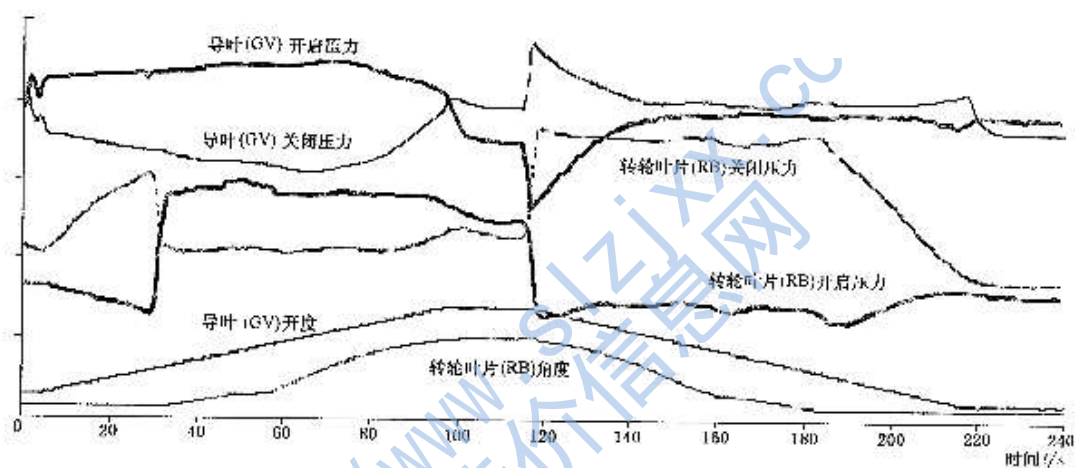
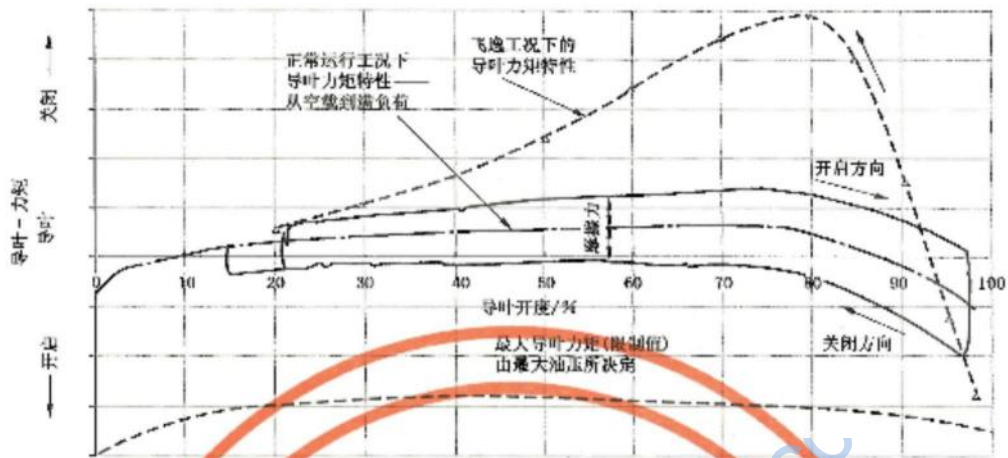


图3 导叶和转轮叶片接力器操作力测量(轴流式水轮机)

导叶的关闭特性和关闭时间宜由减少过压(水击)和过速的不利影响来确定。最不利的情况在紧急停车或者甩负荷期间发生。

对双调节轴流转桨式或灯泡式水轮机运行中产生的过速,可通过增大转轮叶片角度来调控(见图3)。在这种情况下应记录转轮叶片接力器的开启和关闭压力,以便计算摩擦力和水力矩,并与设计值比较。



注：本图中的导叶力矩特性代表的是一类典型的设计，不同导叶的特性曲线(开启或关闭)由导叶的形状和型线所确定。

图4 导叶关闭特性评估

5.2.5 针形阀和折向器(水斗式和斜击式水轮机)

满流状态下,主调节装置喷针应能在正常和在紧急事故时关闭。折向器(如果安装)也应设计能拦截满流,在某些系统中折向器也可用做调节装置。摩擦力和水力矩宜与无水和有水开启/关闭压力的设计值相比较,载荷从空载加到满负荷再降到空载(见图5)。

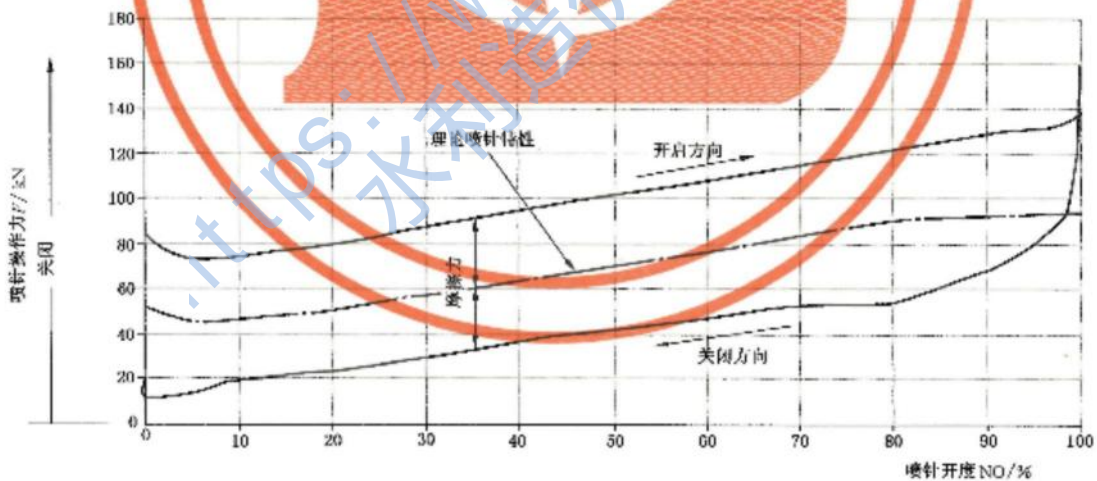


图5 喷针接力器操作力

喷针的关闭特性和关闭时间一般由减少过压(水击)来确定,而折向器用于控制过速(见 5.5 和 5.7)。

如安装凸轮来控制喷针和折向器的相互协联关系,应对该关系在没有任何折向器射流干扰情况下进行验证,以得到机组安全过速值。

注:为了确定正确的喷针行程/调速器行程/折向器位置关系,对每个协联关系都进行验证。

5.3 首次开机的操作和控制

如果全部启动前的试验满足要求,调试工程师决定机组可启动。在首次开机时,如果观察或听到任何非正常现象应当立即停机,尤其应注意非正常的噪声、刮蹭等现象。见图 6。

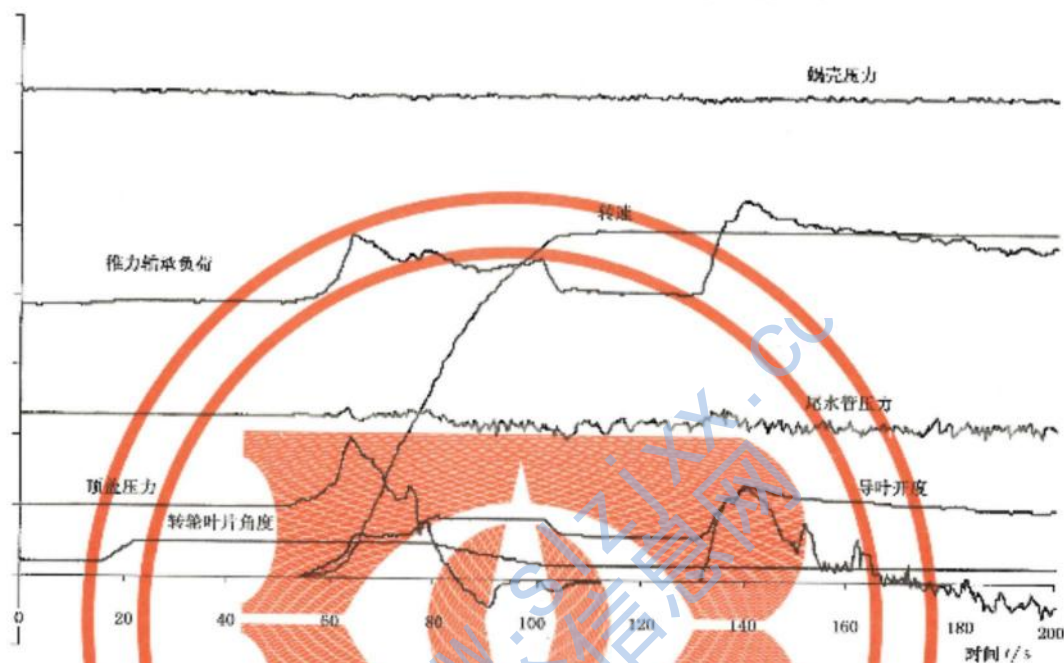


图 6 自动启动-同步-空载试验(轴流式水轮机)

5.4 额定转速下的滑动轴承运行

转速应逐级增加到额定值,各级所需的时间应事先由各方商定。长时间在低速条件下运行会造成水轮机滑动轴承损坏,最低转速应由供方确定。

在各个转速下验收水轮机的指标应由供方代表和试车工程师决定,该指标可能是所有轴承维持足够时间后达到稳定条件的最终温度值,或是仅仅判断是否存在内部摩擦。

如果任何部位的温度过高或增加过快,机组应立即停机,及时研究并消除造成此现象的原因。应实时监控润滑系统的状况,如果在油中观察到水或泡沫,应找出并消除其引起的原因。在滑动轴承运行期间也可测试其他控制设备。此时可检查调速系统的运行状况是否正常,当其运行正常时可用来操作机组。

除非供方有具体要求,上述检查不需特定仪器,只需电站正常安装或安装期间使用的仪器即可(如千分尺比较器检测轴承同心度)。振动测试只需要在合同有要求的情况下才进行。

5.5 空载条件下的紧急停机

水轮机组不宜在空载额定转速条件下长时间运行。紧急停机试验应测量导叶(或喷针)的关闭时间、操作水压或电流等,测量值宜与设计值进行比较。

应测量停机所需时间和流道中的压力。已安装制动器的,应检验制动器是否能够正常操作,见图 7。

5.6 电气保护

对于并网的小型水轮发电机组,应设置电气保护,防止事故跳闸对发电机安全性的影响。电气事故可能发生在发电机上,也可能发生在电网中。当电网进行检修时,保护装置应保证发电机可脱离电网。

电气保护系统的通用元件是继电器,用来监测低电压及过电压,监测低频或超频,以及监测频率的变化率。当地电网调度人员应详细规定继电保护器的要求和验收试验的性质。

在机械试验得到满意结果后,电气保护试验应根据合同条件进行。在试验中应严格遵守制造商的要求。

注:电气保护试验通常在所有电气设备与电网连接及并网送电之前完成。

验收试验通常应包括事故时(在试验期间进行模拟),电流断路器动作时间与动作顺序的试验。一旦检测到故障,应记录电气保护试验的结果。

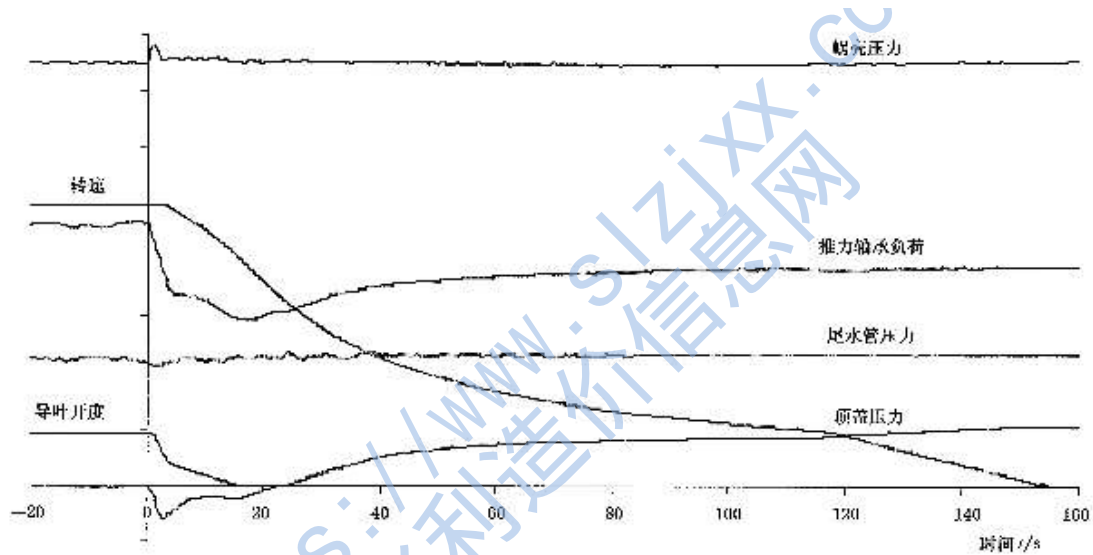


图7 空载紧急停机试验(轴流式水轮机)

5.7 超速试验

超速试验应在手动控制下缓慢增加水轮机的转速,应对每一个设定的转速点都进行检测。对于轴流转浆式或灯泡式水轮机,还应检查转轮叶片接力器的工作情况。

5.8 飞逸试验

水轮机可进行全部的飞逸转速试验,特别是在有稳态飞逸保证要求的情况下。稳态飞逸试验应仅在合同中有明确规定时才进行。如果进行此项试验,各方应进行深入的分析 and 评估,并考虑可能出现的各种危险。

所有的飞逸试验应有时间的限制。对于各种型式的水轮机,飞逸试验应涉及最坏的情况,即所有关闭调节装置在全开位置失灵。不同型式水轮机的预期最大飞逸转速见表2。若飞逸试验后振动水平上升,应调查原因并进行处理。

表2 最大飞逸转速(n_{max})

水轮机型式	n_{max}/n_r %
混流式水轮机	160~210
水斗式和斜击式水轮机	200
双击式水轮机	190~230
轴流定桨(包含调桨)式水轮机	200
轴流转桨式水轮机	300~360
灯泡贯流式水轮机	400~360

注1: 对于轴流转桨式水轮机,此转速是在活动导叶固定在全开位置且转轮未按照协联而关闭时获得的。
注2: n_r 表示额定转速。

飞逸试验应按图8所示进行,稳定飞逸转速的时间应限制在一个双方同意的值之内。飞逸保证值是对最大保证水头条件而言,实际的飞逸试验应在试验允许的合适水头下进行。

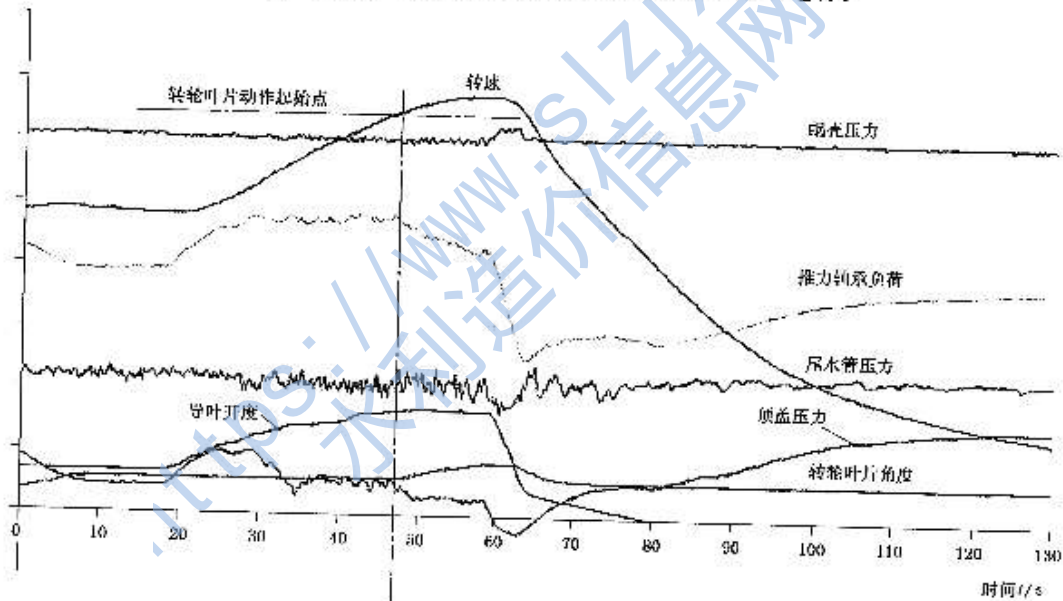


图8 飞逸试验(轴流式水轮机)

5.9 过压、紧急关闭和甩负荷试验

5.9.1 一般条件

负荷应分级逐步增加到最大值。在增大负荷过程中,对每级负荷在稳定状况下应反复进行观察和测量,并检验水轮机的运行稳定性。在允许带的负荷条件下,应对水轮发电机组每一级负荷进行甩负荷试验(通常为1/4、1/2、3/4和4/4的额定负荷)。若重新调整了调速器参数,所有受调整影响的试验都应重做。

水轮发电机组可能会经受不同形式的甩负荷运行,包括紧急关闭(电气或机械事故)、正常停机和正

常关闭返回(或不返回)到空载的运行。应首先进行紧急关闭试验,确保安全。

试验顺序应包括在保证运行范围内的最不利条件,即从导叶全开、部分开度(带有减压阀)或低负荷状态甩负荷。如果电站的几台机组共用一个引水系统,最不利情况可能出现在所有机组同时关闭断流装置瞬间,而不是同时甩负荷。

图 9、图 10、图 11 和图 12 给出了紧急关闭的示例。

5.9.2 导叶或喷嘴

应测量导叶或喷嘴的关闭时间、操作水压或电流,并将其与设计值比较。

5.9.3 水轮机进水阀门

若水轮机进水阀门是唯一将水轮机和水路分开的设备,试验应在水轮机满流量状态下测试阀门的操作。

注:这是一个有潜在危险性的试验,应在满流量的 1/3、1/2、2/3 逐步进行测试。

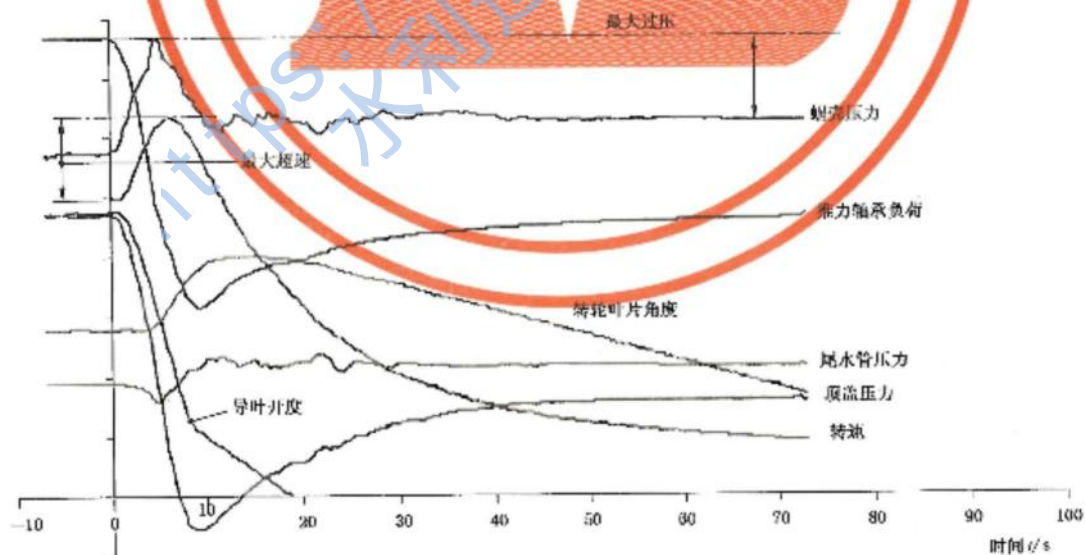
5.9.4 减压阀

若水轮机安装有减压阀,应测试调压阀不能打开时,水轮机在所有情况下都能以正确的方式关闭。

5.9.5 压力升高

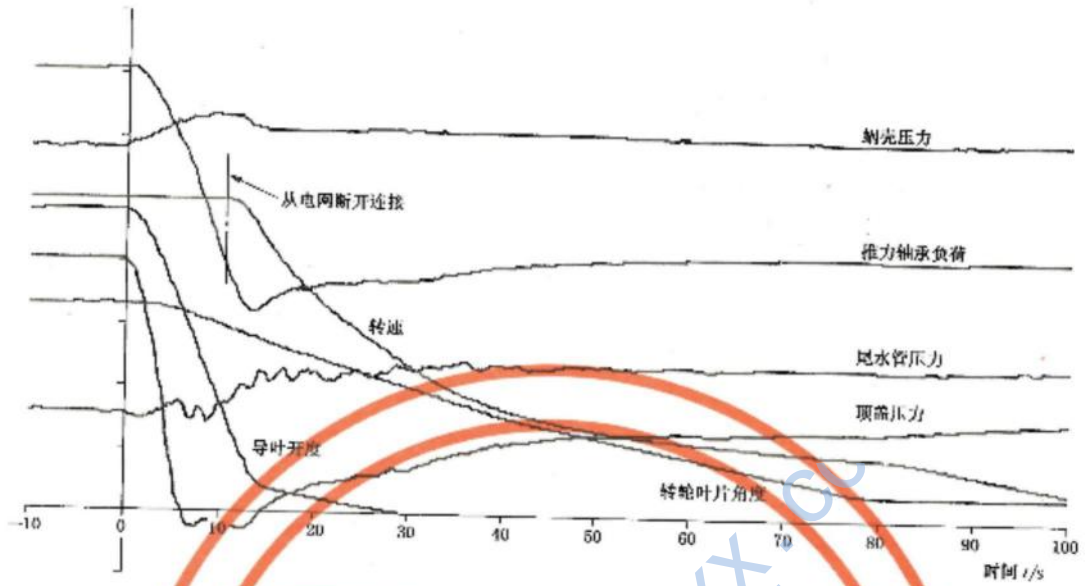
图 11 中曲线表明在实际的现场试验中,因导叶关闭而导致的压力升高的结果。这种叠加的脉动来源于转轮转动和其他水动力学现象,如空化或水力共振等。正常情况下,小型水轮发电机组的平均压力值应与保证值相比较。

当脉动很大时,如图 11 和图 12 中列出的曲线可用于找到由于水力瞬变引起的最大压力。绘制高频信号包络的方法应得到委托方的同意,并在试验报告中详细说明,避免产生歧义。本例中在计算最大压力之前采用了低速滤波(可滤除高频信号,去除了约一半的噪声带)。



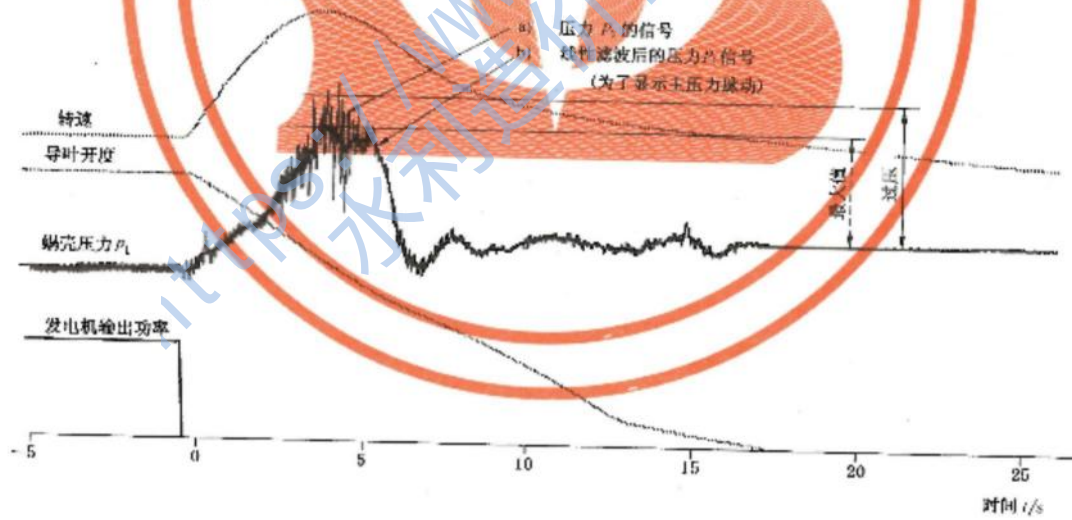
注:水轮机关闭并立刻从电网分离,此过程由调速器控制(轴流式水轮机)。

图 9 电气故障导致的紧急关闭



注：水轮机关闭并在空载时从电网分离，此过程由调速器控制。

图 10 机械故障导致的紧急关闭



注：水轮机关闭并立刻从电网分离，关闭时间与特性由孔口控制。本例为混流式水轮机压力脉动实例。

图 11 调速器故障导致的紧急关闭

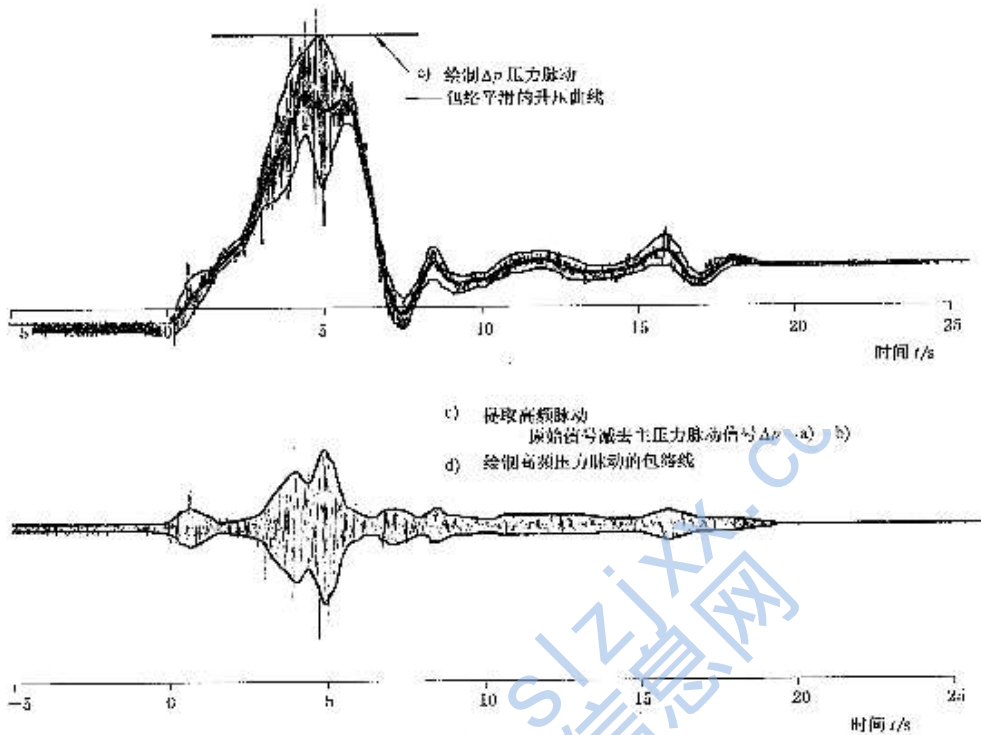


图 12 最大过压估计

5.10 测试参数

5.10.1 压力

压力测量应利用安放于水轮机进出口并靠近上下游压力基准断面(见附录 B)的测压孔进行测量。

如果上游管道的最大压力很重要,宜在进水阀门上游同一横截面上互成 90° 布置 4 个测压孔,测压孔宜采用钢管连接到环形多支管上,压力传感器直接和多支管相连。测压孔、多支管等尺寸应符合 B.4.1 的要求。

推荐使用压力传感器进行压力测量,这样瞬时压力(包括过压和欠压)可以得到良好的记录。所用的仪器的响应时间应与所测量的压力脉动频率相适应,且传感器应布置在靠近测压孔处。

5.10.2 转速

转速应采用测速仪或调速器信号测量。

5.10.3 控制部件

控制部件(导叶、叶片或喷针和折向器)的运动量应采用调速器信号或位移传感器记录。

6 运行和可靠性试验(试运行)

6.1 一般规定

水轮发电机组应进行试运行,以便在整个运行负荷范围内进行必要的调整。

全套设备的连续试运行应设有限制时间,供需双方协商确定机组的试运行事件。
试运行试验的每一个项目都运行成功后,应该接受试运行试验结果。

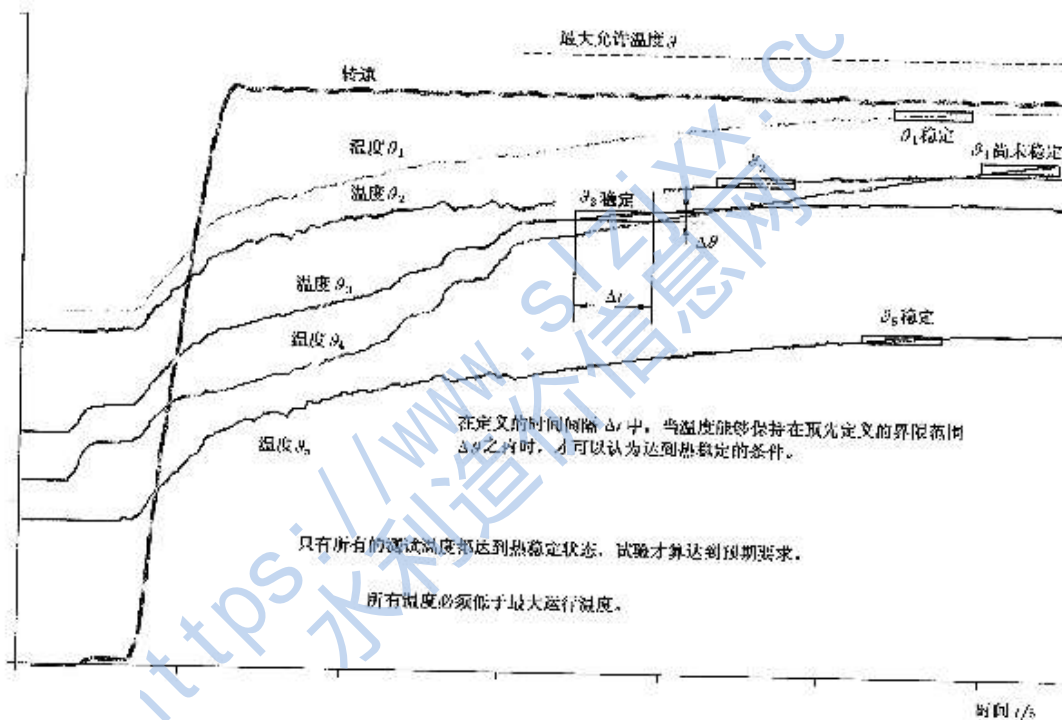
6.2 转动部件的温度稳定性

6.2.1 一般要求

小型水轮发电机组应运行在极端条件下以检验轴承和发电机定子铁芯的温度值及稳定性。径向轴承、推力轴承、发电机铁芯的温度以及其他所有可能存在温升的环路或机械部件均应检验。

6.2.2 温度保证

温度上升和绝对温度值应与合同规定或双方约定的最大允许值相比较,图 13 给出了不同温度稳定值的典型记录。



注:在试验期间,环境空气和冷却水的温度不得高于合同规定值,如果高于规定值,所有责任方应决定怎样调整,在各方都同意的安全界限范围内,可提出更高的最大温度界限。

图 13 从空载到稳定状况的温度稳定性记录

6.3 转速控制系统

6.3.1 说明

转速控制系统可能是下述不同控制方式的组合:

- 转速依靠电网频率确定而不能调整;
- 调速器;
- 电压调节器,调节交流发电机的励磁;

- d) 水位控制器,维持进口和出口的水位;
- e) 负荷管理控制器,维持设定的输出功率;
- f) 电力负荷调节器,消耗发电机多余输出功率。

6.3.2 不带调速器的机组运行

当转速高于同步转速的1%~2%范围之内时,异步发电机可直接连接到电网上,控制系统应能承受并网时出现的冲击电流。

当同步的频率和电压都保持在电网限制范围之内时,小型同步发电机可不用调速器直接连接到固定电网中。

6.3.3 带有调速器的机组运行

- a) 一般说明如下:
 - 1) 试验的性质将根据调速器的作用和所需要的精度而变化;
 - 2) 如果希望调速器提供稳定运行,在合同中应说明可接受的频率变化范围;
 - 3) 用不带外部负荷的变速试验来调整调速器,以达稳定运行。试验应证明当控制装置迅速开启或关闭时,转速在一个转速变化周期范围内返回到设定点;
 - 4) 图 14 给出了一个响应良好的范例。如果需要调速器进行更完整的研究,可参考 IEC 61362 中的规定,以及参考 IEC 60398 进行试验。

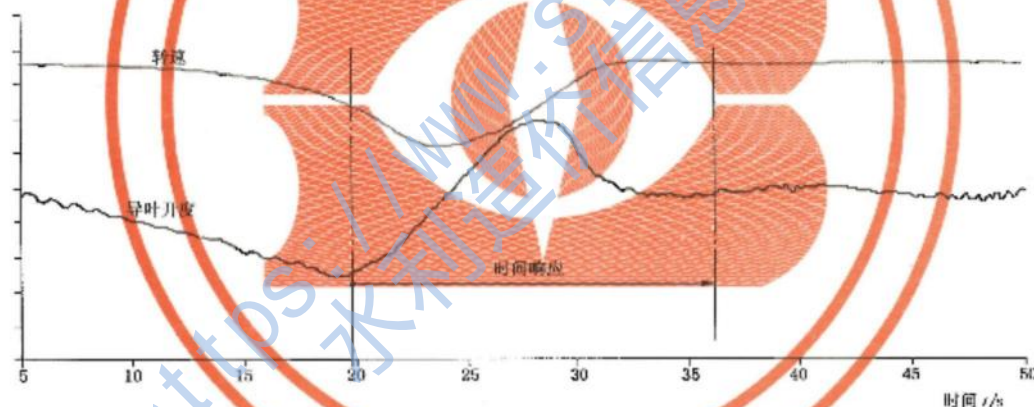


图 14 空载时调速器的检查

- b) 小型水轮机配置调速器可能由于下述一个或几个原因:
 - 1) 同步的需要

当小型水轮机需要连接到大电网时采用此模式。调速器可借助于功率或开度给定装置通过永态转差回路增加水轮机负载或转换到其他控制系统,例如水位控制。调速器应在合适的时间内控制水轮机转速完成同步,或按合同要求。同步完成后,调速器应自动转换到合适的运行模式。如果延迟可能引发电网频率控制和水轮机调速器冲突,那么转换的时间非常重要。
 - 2) 独立系统频率控制

小型水轮机在一个独立电网中改变负荷而不引起大的频率波动可能是有困难的。合同中应说明所预期的负荷大小和类型,以及可接受的频率偏差。

由单一水轮发电机组供电所构成的电网,在合同中应约定将负荷分级以便增加负荷和启动机组。

3) 在与柴油发电机并联时频率稳定性

一个小型地方电网可能包含水轮机和其他原动机,例如柴油发电机。合同中应说明对所提供的小型水轮发电机组所期望的作用。水轮机提供稳定频率的能力取决于与其他发电机容量的相对大小,以及它的响应速度。调速器应通过试验来证明在合同规定的频率偏差内能够满足所预期的负荷变化。

6.3.4 带有电压调节器的机组运行

当发电机参与控制电网中的无功功率时,需要使用电压调节器。通过调整同步发电机的励磁来维持电压或功率因数在给定范围内。在带负荷试验和甩负荷试验中应测量并记录电压或功率因数。电压调节器保持电压稳定的能力取决于供给电网的其他发电机,合同中应规定验收范围。

异步发电机可能有一个调整机组功率因数的控制装置,通常采用额外电容的形式。

6.3.5 带有其他控制器的机组运行

6.3.5.1 水位控制器

通过控制水轮机的流量保持水头或尾水水位。应在整个运行范围内调节流量以确定控制器能否稳定运行。如果有两台或更多的水轮发电机组,或具有多喷嘴的机组连接到相同的供水管路上,应设有总水流管理系统来控制水轮机的开启和关闭,以维持上游水位。如果在合同中规定了运行保证值,应进行水位变化的测量。

6.3.5.2 带有功率管理控制器的机组运行

功率管理控制器维持发电机的功率输出稳定。控制器应在整个允许的运行范围内以稳定的方式运行。电压和水头的变化将影响其控制,应在合同中规定发电机允许的功率输出变化范围。如果在合同中规定了运行保证值,应从设置点开始测量负荷的变化。

6.3.5.3 带有电力负荷调节器的机组运行

电力负荷调节器用于独立系统中,用来保证发电机的输出功率维持在恒定值,多余的电能通过电阻器消耗来适应系统负载的变化。电阻利用发热消耗多余的功率,应保证电阻工作在供方规定的温度范围内。在带负荷试验和甩负荷试验期间应监测调节器的运行温度。当切换负荷时,负荷调节器可能发射无线电频率干扰,如果在合同中规定了运行条件,应测量发射能级。

6.3.6 在试验控制系统时的测量

水轮发电机组的稳定性应在整个运行范围内进行试验,如果观察到频率、电压或功率有不稳定现象,应进行下述项目的测量:

- a) 接片器的所有位置;
- b) 电网频率或水轮机转速;
- c) 发电机母线电压;
- d) 有功与无功功率或定子电流;
- e) 上下游水位;
- f) 水轮机进出口压力。

如果在合同中规定了运行条件,那么应规定允许的变化量和电网频率或电压的允许变化范围。

6.4 协联关系试验

协联关系试验的目的如下：

- 取得双调节轴流转浆式或灯泡式水轮机最高效率，见 7.3.5；
 - 关联水斗式或斜击式水轮机的喷针和折向器的运动关系。
- 应在水轮机整个运行范围内测试协联关系。

7 性能保证试验

7.1 概述

性能试验的目的是验证在 4.2 所列出的主要性能保证的合同保证值，验证试验应在合同规定的电站现场条件下进行。水轮机和水轮发电机组性能(效率)按照表 3 中的参数评估。

表 3 性能试验参数

等级		测量参数
A,B,C	H	水轮机保证范围内高压压水断面 1 和 2 之间的净水头，测量评估其绝对值
A,B,C	$P_{gen}(P_s)$ P_{net}	发电机输出功率(变压器输入)和变压器输出功率，直接测量绝对值
B,C	Q_b	1,2 断面间的流量，测量其指数相对值
C	Q, η	流量或效率，用初级方法测量绝对值

注：强烈建议进行 A 等级的初步试验，如果在分析试验结果之后对水轮机性能仍有怀疑，可使用更精确的仪器进行进一步试验。

试验开始前，水电机组应处在商业运行的状态下。

试验需要取得以下数据或图表：

- 运行特性曲线，需标注运行和空化限制线，并列出不问水头的额定数据；
- 最大输出功率(P_s 、 P_{gen} 和 P_{net}) 净水头的关系图，见图 15；
- 物理、几何和地理数据，见 8.1.2 和表 5；
- 流道中的水头损失与流量或输出功率的函数关系；
- 发电机、变压器和辅助设备(机械或电气)中的损失；
- 流量图表，表示流量(Q)与开度(导叶或针阀)、净水头的函数关系，用于计算速度水头，见图 B.18。

7.2 在不同净水头下发电机(变压器)的最大输出功率

7.2.1 保证值

发电机(变压器)最大输出功率的保证值应等于或大于考虑了系统和随机误差的测量值和评估值。对此保证值，参考水头是水轮机保证范围断面 1 和断面 2 之间的净水头。

7.2.2 测试仪器要求

试验宜使用仪表设备，测试仪表的精度等级应满足要求。应谨慎地确定水头测量断面，参考附录

B. 若合同约定了罚款或奖励条款,应使用具有检定证书的精密仪器。

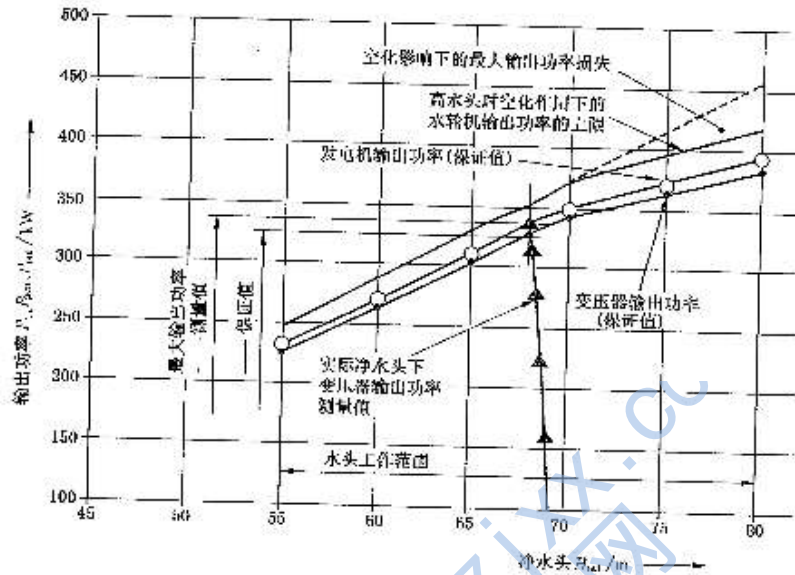


图 15 最大输出功率(实际净水头下的输出功率测量值与保证值的比较流程)

7.3 指数试验

7.3.1 一般要求

指数试验可用于下述任何目的:

- 单独确定运行特性曲线形态和水轮机相对效率(形状控制),或同时确定电站的上述参数;
- 在水轮机改造时评估机组性能的变化。此时应注意改型可能会影响测量断面的流态;
- 评估由于尾水位和/或净水头改变引起的空化状况变化而造成的机组性能的变化;
- 优化单台或多台机组的年发电量;
- 监测整个保证范围内的流量(在运行的流量和净水头范围内);
- 确定转轮桨叶角度与活动导叶开度之间协联关系,优化双调节机组的运行;
- 作为性能试验的一部分,用来完善流量测量的初级方法,可基于以下目的:
 - 在现场验收试验期间提供补充试验数据,插值计算由初级方法得到的数据;
 - 用于指数流量试验和初级试验方法测得的数据的互校;
 - 通过测量在某些运行点的水轮机绝对效率,得到(永久性厂房)流量测量设备的标定数据。

7.3.2 相对流量测量

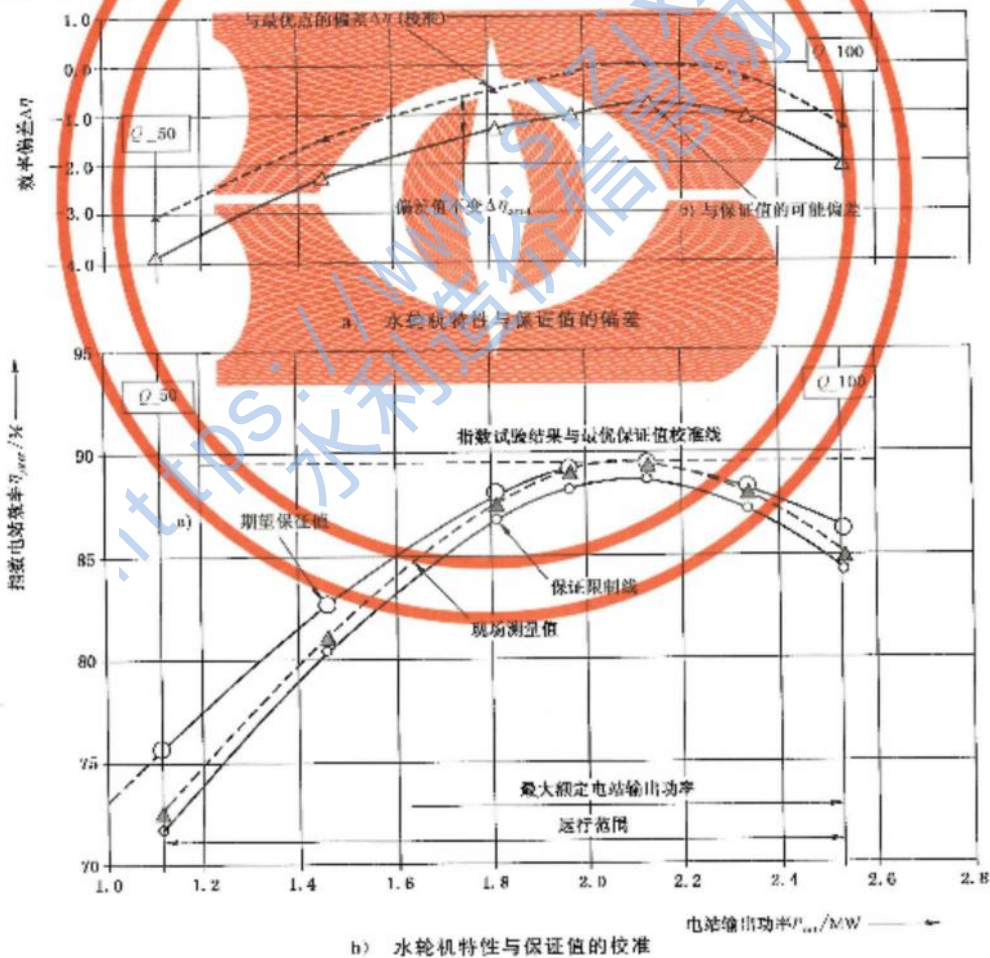
指数试验是基于流量的相对测量方法,可能会用到表 4 中的某个方法。通常假设流量与压差的平方根近似成比例。

表 4 指数流量试验方法

装置	在最大负载下的一般压差范围 Δp kPa
压差试验方法	
全蜗壳 (Winter-Kennedy)	10~40
贯流式水轮机 (灯泡贯流式、竖井贯流式)	10~30
收缩管道 (鞋形管道)	10~40
滞止压力探针	15~60
流量指示仪表	
简易流量测量方法	
水斗式水轮机和斜击式水轮机上的指针行程	

7.3.3 特性曲线形状控制

图 16 中表示的在允许偏差范围(系统误差)内水轮机运行特性的形状是如何变化,该偏差可表述为水轮机输出功率或流量的函数。



注: 图中 Q_{100} 表示满流量, Q_{50} 表示 50% 的满流量。

图 16 水轮机特性曲线和保证值的对比

7.3.4 电站相对效率

指数试验可确定水轮机或水电站的相对效率,试验结果给出实际条件下的电站效率曲线。电站效率曲线可用于优化所有机组的联调控制以获得最大年发电量。图 17 表示的是为了优化运行而获得最大年发电量,第 2 台水轮发电机组开启或停机的组合运行切换区。

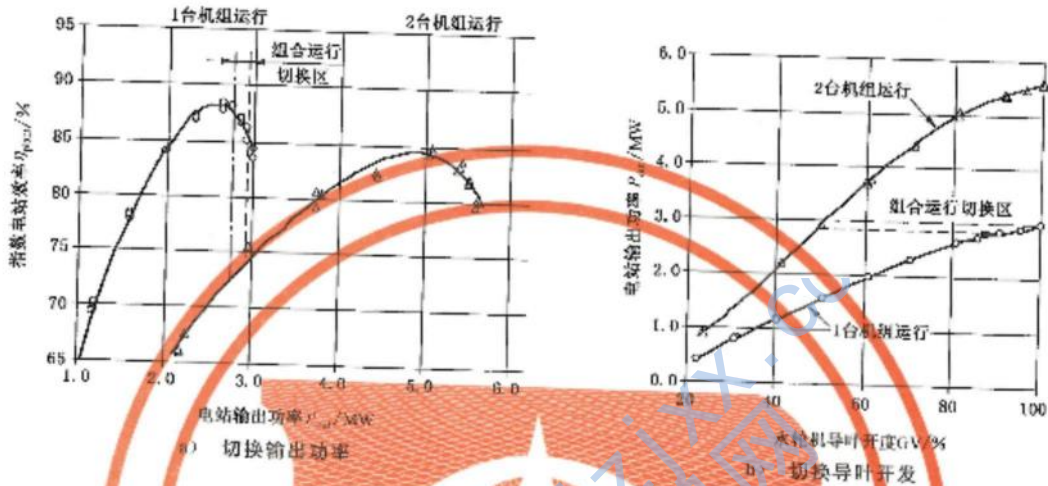


图 17 2 台水轮机最优组合运行切换区示例

7.3.5 优化协联关系

水轮机模型试验所确定的协联关系与原型机组测试值相比可能会有高达 6% 的最优导叶开度偏差。如果模型试验的结果与现场测试得到的经验值相符,在整个运行范围内相对于最优运行条件下的不确定度为 0~2%。另外还有运动学误差(透水器信号显示的叶片角度)。

该偏差主要来源于:

- 原型和模型之间的比尺效应;
- 原型和模型之间不同的入流条件;
- 采用最优电站效率代替了最优水轮机效率。

与指数试验类似,采用合适的程序来验证双调节水轮发电机组(轴流转桨式或灯泡式)的协联关系,试验的目的是为了关联导叶开度和桨叶角度之间的关系以得到机组的最优特性。通常,最优关联随着水头变化,如果电站是设计在非常宽的水头范围内运行(如水头变化超过总水头的 5%),还应确定桨叶、导叶和水头之间的 3 维协联关系。试验应在额定水头范围内进行,其他不同水头的的数据可参考模型试验结果,更多的细节见附录 1。

7.4 水轮机效率

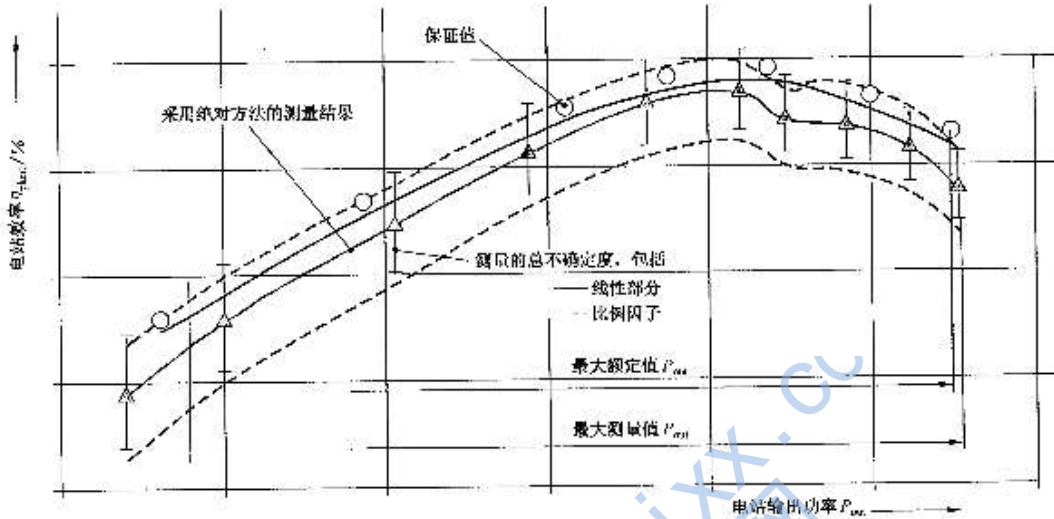
7.4.1 采用绝对流量测量的水轮机效率试验

选用满足规定要求的测量方法,确保按期望的精度完成水电站流量测量。所有相关的各方应在电站早期设计阶段选择流量测量方法,否则可能会增加试验成本,甚至不可能实现。宜同时确定指数试验的方法。

采用绝对流量测量的保证效率试验可用于以下目的:

- 在电站装置条件下测量整个保证范围内运行的水轮机或机组的绝对效率,并与保证值比较;
- 确定水轮机或机组的最大输出功率;

- c) 验证或标定(灌溉或饮用供水系统中)能量回收水轮机(泵做水轮机运行)的流量,此时水轮机作为流量计使用。



注:在图 18 中,误差带以一条垂直而不是椭圆形式的线表示,这样的简化宜用在小型水电设备上。采用椭圆表示的更精确的误差带请参考 IEC 60041。

图 18 效率试验(水轮机效率保证值与原型试验结果的比较,包含了总不确定度)

7.4.2 采用热力学法的效率试验

在水轮机中,所有没有转换成机械能的水力能量变换成热量,意味着在水轮机出口的水温稍高于进口。在水轮机进口和出口间增加的温度 ΔT 可根据式(1)进行估算:

$$\Delta T = H(1 - \eta) / 426 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- ΔT —— 水温升高值,单位为开尔文(K);
- H —— 水头,单位为米(m);
- η —— 水轮机效率,无量纲数值。

采用这种方法计算水轮机的效率时并不需要测量流量。温度测量仪的精度和灵敏度应在 0.001 K 以内。流量可根据水头、功率和效率通过间接计算得到。此方法的详细说明见 IEC 60041。

7.5 效率修正

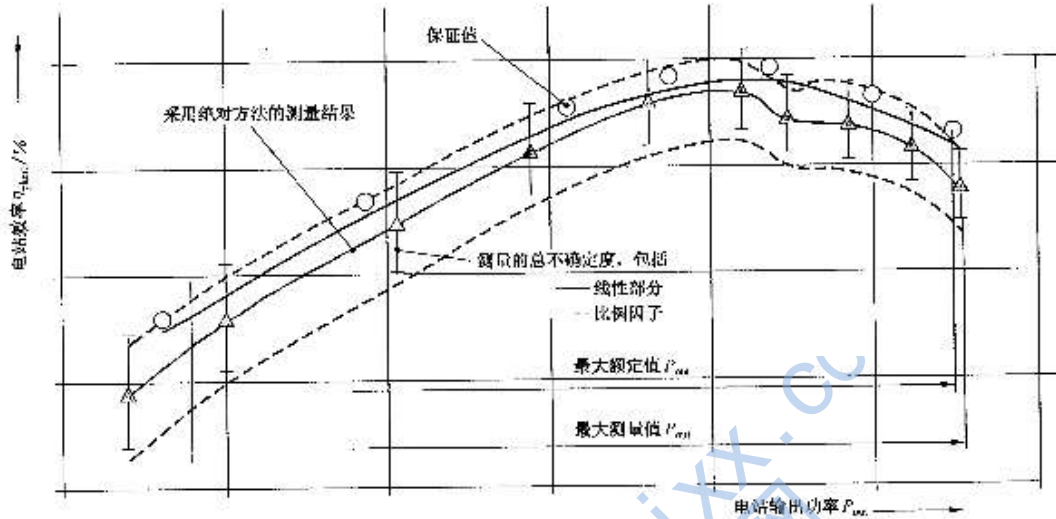
如果测得的净水头与保证水头略有偏差时,水轮机的输出功率和流量可用 3.2.3 和 8.4.2 中的公式修正,允许误差范围也已给出。

当测得净水头和保证水头有很大误差时,可利用模型曲线进行调整,调整只可以在双方都同意的条件下才能进行。

图 19 表示的是在定水头下给出保证值,因水头损失造成测量水头变化的的典型示例,效率可用下述方法修正:

- a) 在模型曲线上绘出测量点;
- b) 找出测量点和保证点的效率偏差;
- c) 在测量效率加减偏差值。

- c) 验证或标定(灌溉或饮用供水系统中)能量回收水轮机(泵做水轮机运行)的流量,此时水轮机作为流量计使用。



注:在图 18 中,误差带以一条垂直而不是椭圆形式的线表示,这样的简化宜用在小型水电设备上。采用椭圆表示的更精确的误差带请参考 IEC 60041。

图 18 效率试验(水轮机效率保证值与原型试验结果的比较,包含了总不确定度)

7.4.2 采用热力学法的效率试验

在水轮机中,所有没有转换成机械能的水力能量变换成热量,意味着在水轮机出口的水温稍高于进口。在水轮机进口和出口间增加的温度 ΔT 可根据式(1)进行估算:

$$\Delta T = H(1 - \eta) / 426 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

ΔT ——水温升高值,单位为开尔文(K);

H ——水头,单位为米(m);

η ——水轮机效率,无量纲数值。

采用这种方法计算水轮机的效率时并不需要测量流量。温度测量仪的精度和灵敏度应在 0.001 K 以内。流量可根据水头、功率和效率通过间接计算得到。此方法的详细说明见 IEC 60041。

7.5 效率修正

如果测得的净水头与保证水头略有偏差时,水轮机的输出功率和流量可用 3.2.3 和 8.4.2 中的公式修正,允许误差范围也已给出。

当测得净水头和保证水头有很大误差时,可利用模型曲线进行调整,调整只可以在双方都同意的条件下才能进行。

图 19 表示的是在定水头下给出保证值,因水头损失造成测量水头变化的的典型示例,效率可用下述方法修正:

- a) 在模型曲线上绘出测量点;
- b) 找出测量点和保证点的效率偏差;
- c) 在测量效率加减偏差值。

8 结果计算与比较

8.1 概述

8.1.1 现场数据

试验开始前,需要准备以下数据。

表 5 现场数据

	物理特性	示例	
a	水温	θ_w	3.0 °C
b	水轮机层和尾水泵道混凝土墙周围空气温度(热力学法)	θ_A	18.0 °C
		θ_C	— °C
c	重力加速度	g	9.806 m/s ²
	纬度	φ	48 degree
	海平面上高度 $z = (z_1 + z_2)/2$ 计算值,见 A.4.1	z	102 m
d	水密度,见 A.4.2	ρ	1000.4 kg/m ³
e	绝对压力 p_1	p_1	1.010 bar
	高压基准断面的面积,见附录 B	A_1	0.503 m ²
	低压基准断面的面积	A_2	1.431 m ²
f	地理高程:		
	水轮机安装高程	z_T	45.70 m
	高压测量断面的参考水位	$z'_{1,1}$	44.37 m
	低压测量断面的参考水位	$z'_{2,1}$	46.02 m
	对于有空化要求的反击式水轮机:		
	尾水管出口高程	$z'_{1,2}$	42.35 m
	最低允许尾水高程		
	——最小流量时	$z'_{2,2}$	42.70 m
	——最大流量时	$z'_{2,1}$	43.20 m
	对于有补气要求的冲击式水轮机:		
最大流量时的最小尾水位	$z'_{2,1}$	— m	
最大预期渠道/河流水位	$z'_{2,2}$	— m	
其他资料			
上游水库无排泄时的最高水位	$z_{3,max}$	160.80 m	
上游水库无排泄时的最低水位	$z_{3,min}$	152.20 m	

注:对所有测量等级,比较(零流量时)仪表的读数和(根据上游水位和尾水位计算出的)静水头。

8.1.2 测量值(读数)

作为试验的成果,试验结果应制成以导叶开度或喷嘴开度为横坐标的曲线图。试验出现任何错误的读数可能意味着水轮机需要调整、或者测试设备出现故障。在做出变动前剔除的任何数据都应保存以备参考。

拆除任何仪器仪表前应完成所有试验记录,并仔细进行错误检查。任何值得怀疑的读数误差应根据标准离散准则进行检验,见 IEC 60041。结果还应确定试验是否在允许的运行范围以内。应采用每台仪器利用试验前后半定曲线的平均值,加上零点漂移,来修正所有数据的平均值。

推荐:在水轮机输出功率 70%~90%之间进行预试验以检验仪器设备及信号稳定性。

8.1.3 水温的比尺效应

如果现场水温与模型试验水温不同且温差超过 5℃时,可依据 IEC 60193 进行比尺效应修正。

8.1.4 电站特性的平移变换

水轮发电机组可能具有超出供方所保证最大功率的运行能力,如果买方同意,供方可重新设定新的输出功率。新特性曲线的建立,可参考图 20 将原始特性曲线转换为新的最大试验功率,特性曲线上的每个点都增大相同的百分比,但是功率变换的极限不能超过额定功率的 10%。新确定的输出功率应作为其他保证值的参考,如最大瞬时过速、最大/最小瞬态压力、飞逸转速和空蚀等。



图 20 性能曲线的平移变换

8.2 输出功率

8.2.1 电站输出功率测量

a) 直接通过变压器的电压互感器(PT)和电流互感器(CT)测量: $P_{out,M} \times (1 - f_{P_{out}}) \geq P_{out,sp}$

b) 间接通过发电机的电压互感器和电流互感器测量:

$$(P_{gm,M} - P_{L,vt} - P_{L,ct}) \times (1 + f_{P_{gm}}) \geq P_{out,sp} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$f_{P_{gm}}$ ——输出功率总不确定度,是误差 $e_{(P_{gm,M})}$, $e_{(L,vt)}$ 和 $e_{(L,ct)}$ 的函数,见 9.4.3.1。

8.2.2 发电机输出功率测量

a) 直接通过发电机的电压互感器和电流互感器测量:

$$P_{gm,M} \times (1 + f_{P_{gm}}) \geq P_{gm,sp} \quad \dots\dots\dots (3)$$

b) 间接通过变压器的电压互感器和电流互感器测量:

$$(P_{\text{out},M} + P_{\text{L,UT}} + P_{\text{L,CT}}) \times (1 + f_{CP}) \geq P_{\text{gen,sp}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

f_{CP} ——输出功率总不确定度,是误差 $e_{(P_{\text{out},M})}$ 、 $e_{(P_{\text{L,UT}})}$ 和 $e_{(P_{\text{L,CT}})}$ 的函数,见 9.4.3.2。

8.2.3 水轮机输出功率测量

水轮机输出功率通常通过间接测量发电机输出功率加上发电机损失来确定:

$$(P_{\text{gen,M}} + P_{\text{L,gen}}) \times (1 - f_{CP}) \geq P_{\text{gen,sp}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

f_{CP} ——输出功率总不确定度,是误差 $e_{(P_{\text{gen,M}})}$ 和 $e_{(P_{\text{L,gen}})}$ 的函数,见 9.4.3.3。

必要时,用下列公式将水轮机输出功率测量值 P_r 转换到额定的保证水头下:

$$\text{若 } 1.03 \geq \left(\frac{H_g}{H}\right)^{1.5} \geq 0.97, \text{ 则 } P_{L,r} = P_r \left(\frac{H_g}{H}\right)^{1.5} \quad \dots\dots\dots (5a)$$

8.3 水轮机相对效率

8.3.1 一般规定

用式(5)计算水轮机相对效率 $\eta_{r,w}$:

$$\eta_{r,w} = \frac{P_r}{H \cdot g \cdot \rho \cdot Q_{r,w}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

P_r ——水轮机输出功率,见 8.2.3;

$Q_{r,w}$ ——相对流量,见 8.3.2;

H ——净水头,见 B.5。

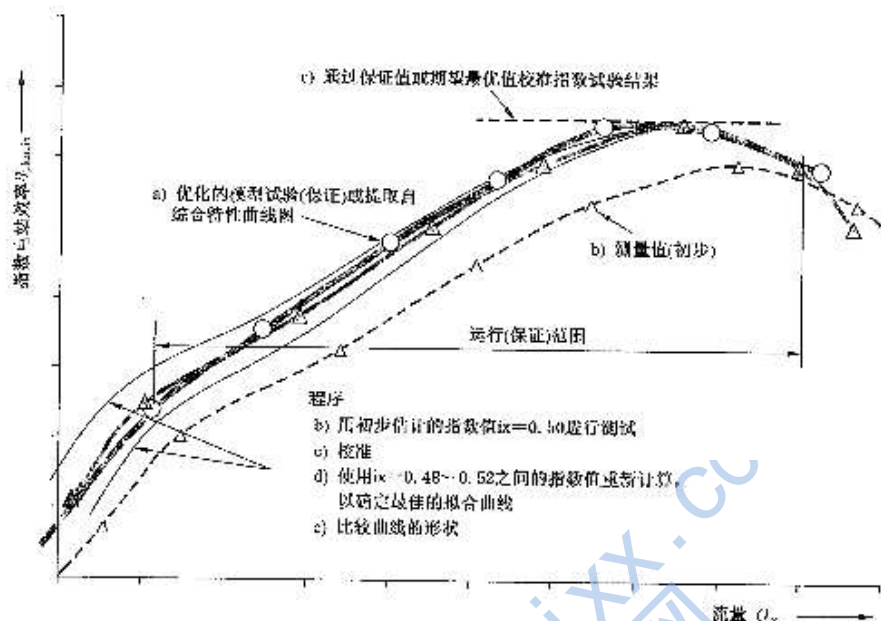
8.3.2 相对流量

相对流量可采用温特-肯尼迪法(Winter-Kennedy method)或其他指数方法进行测量。如果流量不能使用绝对方法进行率定,可利用运行特性曲线图进行调整。系数 k 和指数 x 按下述方法确定:

a) 水轮机在最优工况点的最优相对测量效率与最优预期效率对应一致。采用压差法的相对流量测量用式(7)计算:

$$Q_{r,w} = k \times \sqrt{\Delta p} \quad \text{或} \quad Q_{r,w} = k \times \Delta p^x \quad \dots\dots\dots (7)$$

b) 如果相对流量 $Q_{r,w}$ 与压力差 Δp 的平方根关系不准确,可采用指数 x 调节曲线的形状, x 应在 0.48~0.52 的范围内,即相对于最优点 60% 流量时,效率的变化存在大约 ±2% 的差异。

图 21 系数 K 和指数 x 的变换对水轮机相对效率的影响

8.3.3 电站特性曲线的保证

采用下述步骤比较保证效率曲线和指数试验结果,见图 21。

- a) 根据测试结果绘制水轮机相对效率与相对流量 $Q_{rel,n}$ 的关系曲线,如果有必要,用式(8)将测量的相对流量转换到保证水头条件下:

$$Q_{rel,n} = Q_{rel} \left(\frac{H_{guar}}{H} \right)^{0.5} \quad \dots\dots\dots (8)$$

- b) 根据合同保证值绘制保证效率曲线(或从运行特性曲线上提取);
 c) 依据 9.4.4 评估不确定度;
 d) 向效率曲线增加总不确定度,确立总不确定度带宽;
 e) 分析保证效率曲线的位置,如果整个保证范围内出线都在不确定度带宽之内,则满足保证要求。

如果没有达到保证值,供需双方应协商确定其他的控制水轮机特性曲线的方法,宜提前在合同中规定备用的方法,如绝对效率测试法等。

注:由于缺少效率数据,指数试验一般不用于计算罚款。温特-当尼试验受到进口流动条件的影响较大,尤其是用于不完全填充的情况时,例如多机组的不同负载分布的情况。

8.3.4 电站相对效率

该结果给出了电站的效率曲线,包含了电站内的所有损失。结果也可用来优化电站内水轮机功率分配,且对于改造的电站可分析改造后电厂的年发电量。

$$\eta_{站} = \frac{P_{out}}{H_p \times g \times \rho \times Q_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (9)$$

8.4 水轮机绝对效率

8.4.1 一般说明

在水轮机绝对流量测量的基础上,采用式(10)估算水轮机的绝对效率:

$$\eta_c = \frac{P_c}{H \times g \times \rho \times Q} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (10)$$

如果采用热力学方法测量,请参考 7.4.2。

8.4.2 绝对流量

通过绘制开度下的绝对流量曲线来检查错误。可同时进行指数试验,对测量的数据进行插值来减少绝对流量测量点。可根据 Q 与 Q_n 或 Q 与 $\log(\Delta p)$ 曲线图辨别结果中的谬误。

通常情况下,随着水轮机输出功率的增加水头呈现下降的趋势,测量水头与额定保证水头下的流量,在 $1.03 \geq (H_{sp}/H)^{0.9} \geq 0.97$ 的条件下可按式(11)进行换算:

$$Q_w = Q \times (H_{sp}/H)^{0.9} \quad \dots\dots\dots (11)$$

如果水头超出了上述限制范围,可在双方协商一致的前提下通过模型综合特性曲线得到修正系数,见 7.5。

8.4.3 电站效率的保证值与比较

以测量的效率 η 作为纵坐标,以对应的换算到额定水头(和转速)下的水轮机输出功率 P_c 或流量 Q 横坐标,绘制带有误差带的效率曲线。若保证值是以一个或多个单独试验点,或一条曲线给出的,如果在指定水头下,保证值在规定的范围内位于总不确定度带宽的上限之下,则满足保证值。

若保证值是以加权效率给出的,在指定水头下,利用总不确定度带宽上限,在同一点处的平均效率计算值超出平均效率保证值,则满足保证值。

9 误差分析

9.1 概述

当比较试验结果与保证值时,应以适当的方式考虑其不确定度。不确定度仅涉及测量本身,而不涉及被测试设备的性能或质量。

在本标准中,“误差”定义为两倍的估计标准偏差值,如实际误差的评估值不超过两倍标准偏差值,则其具有 95% 的置信度(参考 ISO 5168)。

注: e_x 是数值 x 绝对不确定度(误差),二者具有相同的单位; $f_x = e_x/x$ 是对应的相对不确定度,没有单位,一般以百分数的形式表示。

9.2 系统不确定度

9.2.1 一般规定

试验的不确定度受到试验仪器设备和试验方法的影响。部分负荷下的系统不确定度要高于满负荷工况,特别是流量和功率等参数。

9.2.2 典型的系统不确定度

在 95% 置信度下,满负荷工况典型的不确定度见表 6。

表6 满负荷工况不确定度

方法	常规工况下的典型不确定度
速度-面积 方法	
• 流速仪法	
—— 明渠	$f_Q = \pm 1.5\%$
—— 直径大于或等于 1 m 封闭管路	$f_Q = \pm 1.3\%$
• 毕托管 ^a	$f_Q = \pm 2.0\%$
压力-时间 方法	
• 均匀横断面	$f_Q = \pm 1.2\%$
• 非均匀横断面	$f_Q = \pm 1.7\%$
超声波 (声学) 方法 (条件允许)	
• 便携式仪器	$f_Q = \pm 2.5\%$
• 两交叉平面, 四通道	$f_Q = \pm 1.5\%$
• 四交叉平面, 四通道	$f_Q = \pm 1.0\%$
容积计量法	$f_Q = \pm 1.5\%$
电磁流量计	$f_Q = \pm 1.5\%$
压力测量 (f_p) (见图 27)	
• 弹簧压力计 (现场校准)	$f_p = \pm 0.5\%$
• 传感器	$f_p = \pm 0.2\%$
• 活塞压力计	$f_p = \pm 0.1\%$
• 自由水位 (见图 26)	见 B.4.2.4
发电机输出功率 (f_{gen}) ^b	
• 仪表测量 (CT 和 PT 的等级为 0.5%)	
—— 同步发电机	$f_{gen} = \pm 1.5\%$
—— 异步发电机	$f_{gen} = \pm 1.8\%$
• 功率分析仪	$f_{gen} = \pm 0.5\%$
转速	$f_n = \pm 0.05\%$
机械传动效率	$f_{e,m} = \pm 0.20\%$
变压器效率	$f_{e,t} = \pm 0.10\%$
注: 其他测量方法的系统不确定度可参考 IEC 60041。	
^a 精度取决于毕托管和安装断面的数量, 以及管路直径和预期的流速分布。	
^b 取决于确定发电机损失所采用的方法; 假如采用大电流电的分流器, f_{gen} 可能会增加; 反之, 采用精确的现代电子设备, f_{gen} 可能会很小。	

9.2.3 水轮机用作流量计的系统不确定度

水轮机用于供水或灌溉系统中能量回收时 (水泵作水轮机运行), 可作为流量计使用。预期的系统不确定度如表 7 所示。

表 7 不同开度下流量的系统不确定度

条 件	Q ₅₀	Q ₁₀₀
不校准	$f_o = \pm 7.0\%$	$f_o = \pm 5.0\%$
用基于保证特性曲线图表的指数试验校准	$f_o = \pm 3.5\%$	$f_o = \pm 2.5\%$
用绝对试验方法校准	$f_o = \pm 2.1\%$	$f_o = \pm 1.5\%$

9.3 随机不确定度

9.3.1 单一运行工况点下的测量

9.3.1.1 随机现象

仅适用于其运行条件能够在试验期间维持不变的情况。测量的不确定度受测量系统的性能和测试量的变化等因素的共同影响,并直接表现为离散的测试结果。

与系统不确定度不同,试验中可通过增加被测量在相同运行条件下的测量次数来减少随机不确定度,最低应不少于 2 次。如果采用流速仪测量流量,每一工况点的运行时间至少应能分割成三个均等独立的读数时间段。

9.3.1.2 周期性现象

仅适用于测量值表现为连续地波动或脉动现象。典型的周期现象见图 22。典型值如水击导致的蜗壳的输入压力脉动,脉动的能量对于水轮机效率会产生影响。

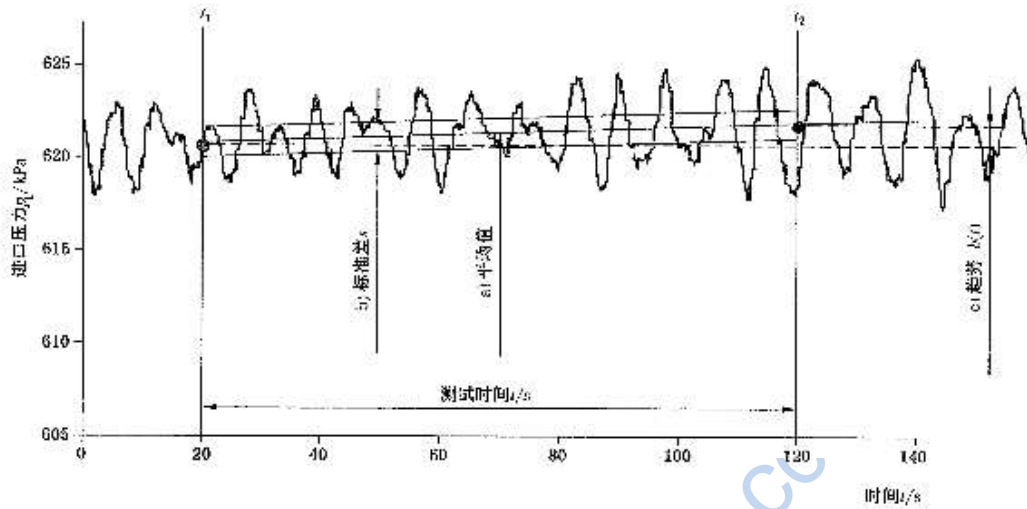
9.3.1.3 标准偏差和趋势计算

标准偏差 $s(y)$ 是测量值与平均值离差平方的均方根,很难准确地知道其精确值,需要利用测量数据进行评估。对于 y 进行 n 次独立的测量, y 的标准偏差估计值表示为:

$$s(y) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

趋势 $b(t)$ 通常并不直接影响水轮机效率,它可显示具有较好的稳定条件,可用式(13)计算:

$$b(t) = \frac{n \sum ty - (\sum t)(\sum y)}{n \sum y^2 - (\sum y)^2} \quad \dots\dots\dots (13)$$



示例

测试时间	$t_2 - t_1$	= 100s
平均值	\bar{p}_1	= 621.3 kPa
最大值	p_{1max}	= 624.8 kPa
最小值	p_{1min}	= 617.7 kPa
标准差	$s(y)$	= 1.6 kPa
趋势	$h(t)$	= 0.04 kPa/min

压力脉动的随机不确定度： $f_{p1,u} = 1.5 \times 100 / 621.3 = 0.26\%$

注：对大部分小水电机组，用此方法计算随机不确定度能得到足够精确的结果。更精确严格的方法可参考 IEC 60041。

图 22 单一运行工况点的随机不确定度计算(压力钢管压力波动实例)

9.3.2 对整个运行范围的测量

9.3.2.1 异常值

选择和定义离群点的实用方法是以线性和/或对数坐标方式绘制有波动的数据(流量、压力、功率及压差)与稳定值(活动导叶开度、喷针行程)的关系图,见图 23。

9.3.2.2 曲线拟合

测量的参数,例如全部运行范围内的水头、流量以及输出功率等,通常希望通过变换获得变量与相关工况参数之间的函数关系,通过光滑的曲线来拟合试验数据点即可以得到与这些参数相关的估算公式。对于采集得到的 x 和 y 数据,通过假设和拟合可能形成许多不同的光滑曲线,宜限于选择一阶、二阶或三阶多项式,并且这种选择取决于数据之间的相关关系,例如,水力损失通常采用二阶多项式。拟合曲线不必通过所有测量数据点,拟合光滑的曲线的优劣取决于采集数据的数量和试验方法,见图 24。

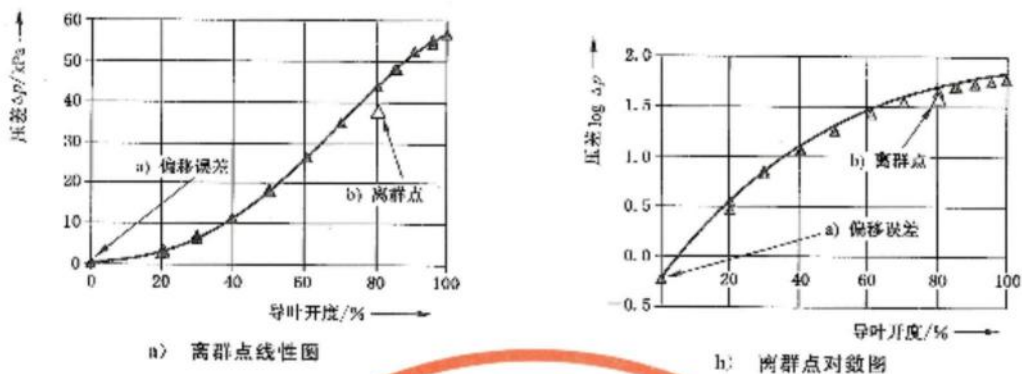


图 23 离群点的确定：通过将相同数据分别标绘在线性和对数坐标图上找出偏移误差和读数误差

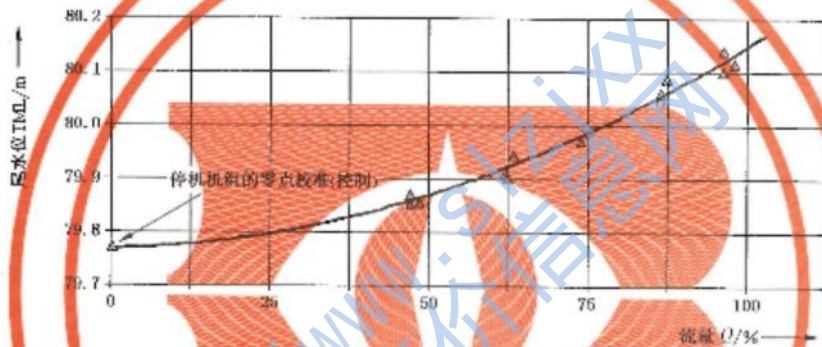


图 24 二阶函数拟合散点实例

9.3.2.3 不连续性

应参考如图 25 所示的方法来处理数据点：不连续位置两侧的数据点应分别处理，并且将各个拟合曲线段光滑地连接起来。

注：试验数据组经常表现出不连续性，这种现象不容易通过数学的方法来解释，也不用拟合的方法来拟合。

9.4 综合不确定度

9.4.1 一般规定

测试量 x 的总测量不确定度采用系统误差 ($f_{s,m}$) 和随机误差 ($f_{r,m}$) 的均方根来计算：

$$f_x = \sqrt{f_{s,m}^2 + f_{r,m}^2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

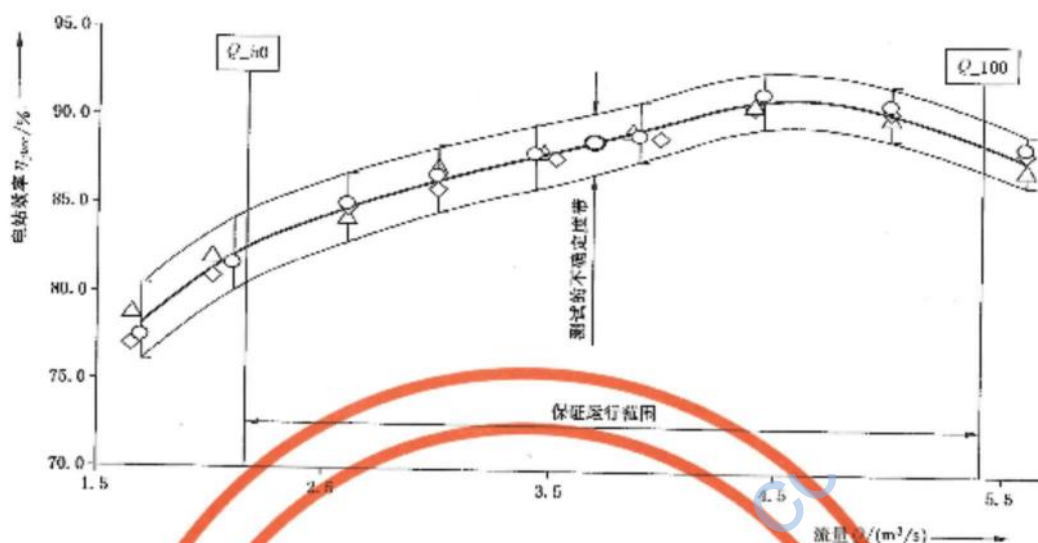


图 25 相邻段分别光滑拟合散点

9.4.2 水头

9.4.2.1 自由水位的水头测量

水头的测量不确定度是水轮机进口、出口处测量结果的系统和随机不确定度的合成,可能由于进口处风力和波浪的扰动、出口流量所引起。若有异常的水头脉动,个体误差需要记录下来并作评估。

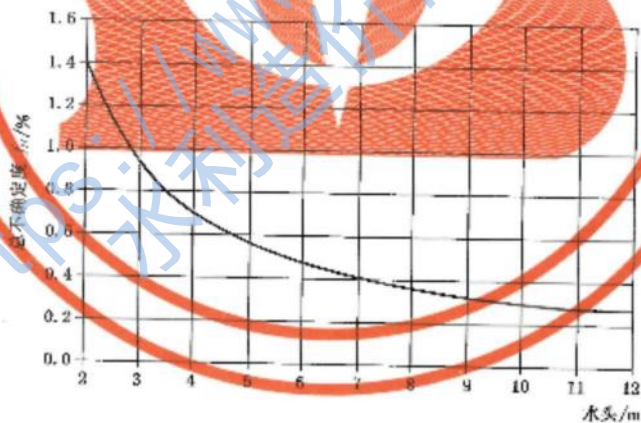


图 26 低水头水轮机自由水位下的水头总不确定度

7 m 毛水头水头测量总不确定度计算实例:

高压侧压力传感器读数是 4.00 m, 安装基准面是 3.45 m, 得出水位 7.45 m。尾水管仪表读数 0.45 m, 直接得出尾水位 0.45 m。

1) 高压侧水位测量的系统不确定度:

- 传感器制造不确定度 1.0.15%
- 传感器读数误差 $4.00 \times 0.0015 = \pm 0.006 \text{ m}$
- 安装基准面误差 $\pm 0.010 \text{ m}$

2) 尾水侧水位测量的系统不确定度:

- 2) 安装基准面误差 ± 0.010 m
- 3) 合成系统不确定度

$$f_{H_{p,sys}} = \frac{\sqrt{0.008^2 + 0.010^2 + 0.010^2}}{3.99 + 3.45 - 0.45} \times 100\% = \pm 0.22\% \quad \dots\dots\dots(15)$$

- 4) 水位测量的随机不确定度:
 - 高压侧测量误差 ± 0.10 m
 - 低压侧测量误差 ± 0.20 m

- 5) 合成随机不确定度

$$f_{H_{p,r}} = \frac{\sqrt{0.010^2 + 0.020^2}}{4.00 + 3.45 - 0.45} \times 100\% = \pm 0.32\% \quad \dots\dots\dots(16)$$

- 6) 毛水头的总不确定度

$$f_{H_{p,m}} = \sqrt{f_{H_{p,sys}}^2 + f_{H_{p,r}}^2} = \sqrt{0.22\%^2 + 0.32\%^2} = \pm 0.39\% \quad \dots\dots\dots(17)$$

注：合成不确定度的公式参见 II.6。

9.4.2.2 在封闭管道中的水头测量

在封闭管道中通常采用压力传感器测量水头，系统不确定度从数据表中得到且应不超过 0.15%。其他的不确定度来源有管路直径、流动分布和流速等，其中影响最大的是流速。封闭管道中流速对总不确定度的影响见图 27。

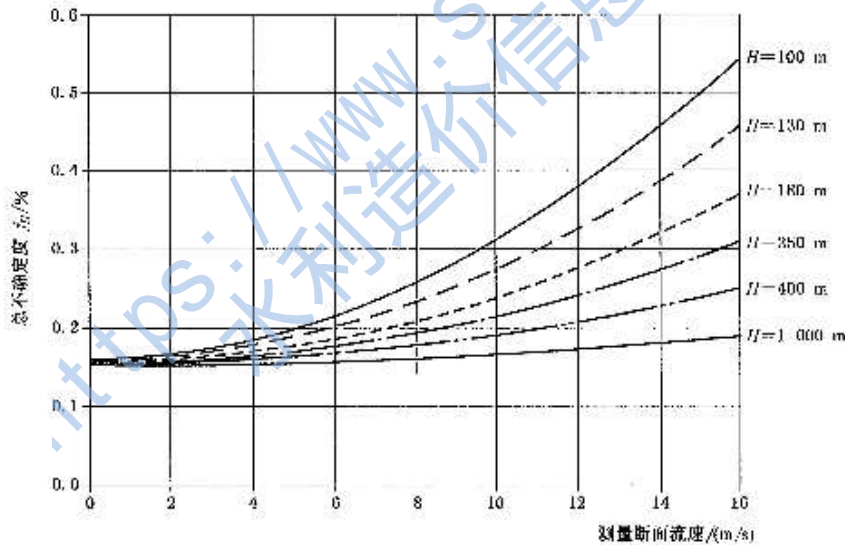


图 27 封闭管道中的水头总不确定度

9.4.3 输出功率

9.4.3.1 电站输出功率的不确定度

电站输出功率的总不确定度通过变压器或发电机的测量进行评估，方法如下：

- 1) 直接通过变压器测量

电站总输出功率是变压器输出功率和辅助设备的功率之和；

- 变压器输出功率的系统不确定度

$$f_{P_{\text{gen,sys}}} = \sqrt{f_{\text{WR}}^2 + f_{\text{TR}}^2 + f_{\text{CR}}^2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

—— 电站输出功率的总不确定度

$$f_{\text{CR}} = \sqrt{f_{P_{\text{gen,sys}}}^2 + f_{P_{\text{gen,cr}}}^2} \quad \dots\dots\dots (19)$$

2) 间接通过发电机端口测量

—— 发电机输出功率的系统不确定度

$$f_{P_{\text{gen,sys}}} = \sqrt{f_{\text{WR}}^2 + f_{\text{TR}}^2 + f_{\text{CR}}^2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

—— 发电机输出功率的总不确定度

$$f_{P_{\text{gen}}} = \sqrt{f_{P_{\text{gen,sys}}}^2 + f_{P_{\text{gen,cr}}}^2} \quad \dots\dots\dots (21)$$

—— 发电机输出功率的测量误差

$$e_{P_{\text{gen}}} = P_{\text{gen}} \times f_{P_{\text{gen}}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

—— 变压器损失测量的测量误差

$$e_{L_{\text{tr}}} = P_{L_{\text{tr}}} \times f_{L_{\text{tr}}} \quad \dots\dots\dots (23)$$

—— 辅助设备损失测量的误差

$$e_{L_{\text{ax}}} = P_{L_{\text{ax}}} \times f_{L_{\text{ax}}} \quad \dots\dots\dots (24)$$

—— 电站输出功率的总不确定度

$$f_{\text{CR}} = \frac{\sqrt{e_{P_{\text{gen}}}^2 + e_{L_{\text{tr}}}^2 + e_{L_{\text{ax}}}^2}}{P_{L_{\text{tr}}} + P_{L_{\text{ax}}}} \quad \dots\dots\dots (25)$$

注：合成不确定度的公式参见 11.6。

9.4.3.2 发电机输出功率的不确定度

发电机输出功率的总不确定度通过变压器或发电机的测量进行评估，方法如下：

1) 直接通过变压器端口测量

—— 变压器输出功率的系统不确定度

$$f_{P_{\text{gen,sys}}} = \sqrt{f_{\text{WR}}^2 + f_{\text{TR}}^2 + f_{\text{CR}}^2} \quad \dots\dots\dots (26)$$

—— 电站输出功率的总不确定度

$$f_{P_{\text{out}}} = \sqrt{f_{P_{\text{gen,sys}}}^2 + f_{P_{\text{gen,out}}}^2} \quad \dots\dots\dots (27)$$

—— 变压器输出功率的测量误差

$$e_{P_{\text{out}}} = P_{\text{out}} \times f_{P_{\text{out}}} \quad \dots\dots\dots (28)$$

—— 变压器损失测量的测量误差

$$e_{L_{\text{tr}}} = P_{L_{\text{tr}}} \times f_{L_{\text{tr}}} \quad \dots\dots\dots (29)$$

—— 辅助设备损失测量的误差

$$e_{L_{\text{ax}}} = P_{L_{\text{ax}}} \times f_{L_{\text{ax}}} \quad \dots\dots\dots (30)$$

—— 发电机输出功率的总不确定度

$$f_{\text{CR}} = \frac{\sqrt{e_{P_{\text{out}}}^2 + e_{L_{\text{tr}}}^2 + e_{L_{\text{ax}}}^2}}{P_{L_{\text{tr}}} + P_{L_{\text{ax}}}} \quad \dots\dots\dots (31)$$

2) 通过发电机端口直接测量

—— 发电机输出功率的不确定度

$$f_{P_{\text{gen,sys}}} = \sqrt{f_{\text{WR}}^2 + f_{\text{TR}}^2 + f_{\text{CR}}^2} \quad \dots\dots\dots (32)$$

—— 发电机输出功率的总不确定度

$$f_{\text{CR}} = \sqrt{f_{P_{\text{gen,sys}}}^2 + f_{P_{\text{gen,cr}}}^2} \quad \dots\dots\dots (33)$$

9.4.3.3 水轮机输出功率的不确定度

水轮机输出功率一般通过测试发电机输出功率加上发电机损失间接得到,其总不确定度的评估方法如下:

1) 通过发电机端口直接测量

——发电机输出功率的系统不确定度

$$f_{P_{gen,sys}} = \sqrt{f_{WH}^2 + f_{PT}^2 + f_{CT}^2} \dots\dots\dots (34)$$

——发电机输出功率的总不确定度

$$f_{P_{gen}} = \sqrt{f_{P_{gen,sys}}^2 + f_{P_{gen,sa}}^2} \dots\dots\dots (35)$$

——发电机输出功率的测量误差

$$e_{P_{gen}} = P_{gen} \times f_{P_{gen}} \dots\dots\dots (36)$$

——发电机损失的测量误差

$$e_{L_{gen}} = P_{L_{gen}} \times f_{L_{gen}} \dots\dots\dots (37)$$

——水轮机输出功率的总不确定度

$$f_{P_{wt}} = \frac{\sqrt{e_{P_{gen}}^2 + e_{L_{gen}}^2}}{P_{gen} + P_{L_{gen}}} \dots\dots\dots (38)$$

2) 水轮机输出功率总不确定度计算示例

假设在发电机端口测量输出功率。

发电机输出功率系统不确定度:

——能量计(2或3瓦特表法)

$$f_{WH} = \pm 0.20\%$$

——电压互感器(PT)

$$f_{PT} = \pm 0.30\%$$

——电流互感器(CT)

$$f_{CT} = \pm 0.30\%$$

系统不确定度: $f_{P_{gen,sys}} = \sqrt{0.20\%^2 + 0.30\%^2 + 0.30\%^2} = \pm 0.47\%$

功率测量的随机不确定度: $f_{P_{gen,sa}} = \pm 0.40\%$

发电机输出功率的总不确定度: $f_{P_{gen}} = \sqrt{0.47\%^2 + 0.40\%^2} = \pm 0.62\%$

发电机输出功率测量值: $P_{meas} = 3\ 011\ \text{kW}$

发电机输出功率测量误差: $e_{P_{gen}} = 3\ 011 \times 0.006\ 2 = 18.7\ \text{kW}$

发电机输出损失测量值(出厂试验): $P_{L_{gen}} = 120\ \text{kW}$

发电机损失测量不确定度: $f_{L_{gen}} = \pm 10\%$

发电机损失测量误差: $e_{L_{gen}} = 120 \times 0.1 = 12\ \text{kW}$

水轮机输出功率总不确定度: $f_{P_{wt}} = \pm \frac{\sqrt{18.7^2 + 12^2}}{3\ 011 + 120} \times 100\% = \pm 0.71\%$

9.4.4 指数试验不确定度

9.4.4.1 特性曲线(形状控制)的不确定度

通过移动预期水轮机最优效率点得到的相对评估值,确定水轮机流量。原型测量值换算为保证值应参考下列数值:

——水头 f_H :净水头不确定度。

——功率 f_{P_s} :水轮机轴功率不确定度。

——流量 $f_{Q_{in}}$:流量通过变换模型试验特性曲线图得到,并调整至水轮机预期最优效率点的校准线。

——效率 f_{η} :测量值和保证值的偏差包括了总不确定度 $\Delta\eta$ 。

表 8 中所示不确定度值可以在 50% 最大流量处取得。

表 8 有关保证效率的水轮机特性曲线的整体不确定度

类型/位置	水轮机类型	方法	压差 $\Delta p/\text{kPa}$	Q_{50} $\Delta\eta/\%$	Const. $\Delta\eta_{\text{rate}}/\%$
不完全蜗壳	轴流式水轮机	温特-肯尼迪法	3~8	-3.5	-0.7
完全蜗壳	轴流式水轮机	温特-肯尼迪法	15~25	-3.0	-0.7
灯泡/竖井/贯流混流式	轴流式水轮机	指数方法	15~30	-2.5	-0.7
蜗壳	混流式水轮机	温特-肯尼迪法	20~30	-2.5	-0.5
配水环	水斗式水轮机	指数方法	>25	-2.0	-0.5
锥管	所有类型水轮机	指数方法	>40	-2.0	-0.5

注：在保证范围内需要确定一个常数不确定度带。
 $\Delta f_{\eta} = -0.5\% \sim -0.7\%$ 。

9.4.4.2 测量前后的不确定度

如果指数试验用来比较水轮机改造前后的特性和/或最大输出功率,应考虑系统和随机不确定度。

- 水头 f_H 试验前后用相同的基准;
- 功率 $f_{P,1}$ 发电机功率测量用相同的电流互感器和电压互感器;
- 流量 $f_{Q,1}$ 系数之和应在测试前确定,测试后也采用相同系数;
- 效率 $f_{\eta,1}$ 应比较改造后水轮机 $\Delta\eta$ 的差值。

9.4.4.3 指数流量测量的总预期不确定度评估

- 1) 系统不确定度的来源如下:
 - 信号偏移,由设备零点误差(电气和机械滞后)和管道中空气引起;
 - 压差 Δp 的比例信号误差,由线性仪表误差引起;
 - 流量的比例误差,由测量断面局部流速改变引起;
 - 对应于流速的动水头。

当在电站改造中采用指数试验时,应维护好改造前后的测量条件,位置、表面、孔口半径和测压孔管接头长度应保持一致,避免产生系统不确定度。

指数方法的流量测量与压差的测量范围、可能出现的零流量的偏移等因素有关,应在试验前评估系统不确定度。

注:系统不确定度会随着压差的降低而增大。

- 2) 随机不确定度的来源如下:
 - 压差的脉动。
 - 水轮机开度的稳定性。

指数方法的流量测量与压差的测量范围、可能出现的零流量的偏移等因素有关。

注:在多数情况下,随机不确定度随着压差的减小而增大。

- 3) 总不确定度要求如下:

图 28 给出了指数法流量测量总不确定度随压差变化的规律,图中的总不确定度包含了系统不确定度和随机不确定度,通过下列公式计算:

$$f_{Q,11} = \sqrt{f_{Q,11,sys}^2 + f_{Q,11,rand}^2} \dots\dots\dots (39)$$

表 9 列出了绘制图 28 的数据, 不确定度曲线 $f_{Q, tot}$ 与单次指数流量测量值。在比较电站改造前后的测试结果时, 可能会出现更高的总不确定度。

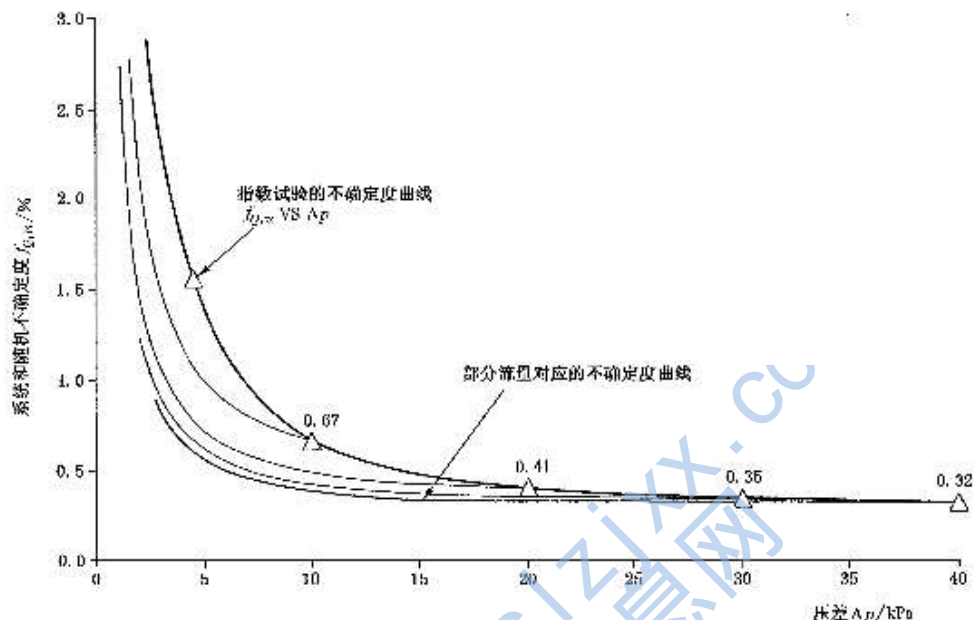


图 28 压差范围内指数法流量测量总不确定度评估

表 9 图 28 中用到的数据

Δp kPa	$f_{Q, index}$ %		Q_100 single	Q_100 pre + post
	$f_{Q, index}$ %	$f_{Q, tot}$ %	$f_{Q, ex}$ %	$f_{Q, tot}$ %
5.00	0.95	1.24	1.56	2.21
10.00	0.45	0.50	0.67	0.95
20.00	0.27	0.31	0.41	0.58
30.00	0.21	0.28	0.35	0.49
40.00	0.17	0.27	0.32	0.45

9.4.5 采用绝对流量测量的效率试验

水轮机效率依赖于评估各个分量(水头 f_H 、流量 f_Q 、功率 $f_{P, net}$), 并且按下述公式通过计算来确定水轮机效率的不确定度:

$$f_{\eta, tot} = \sqrt{f_{P, net}^2 + f_Q^2 + f_H^2} \quad \dots \dots \dots (40)$$

9.4.6 采用热力学法的效率试验

该方法是一种直接测量水轮机效率的方法, 评估的不确定度反向依赖于水头(如低水头条件下 $f_{\eta, tot} = \pm 1.0\%$)。详情请参见 IEC 60041:1991 中的 A.2 和 A.3。

10 其他保证

10.1 空蚀

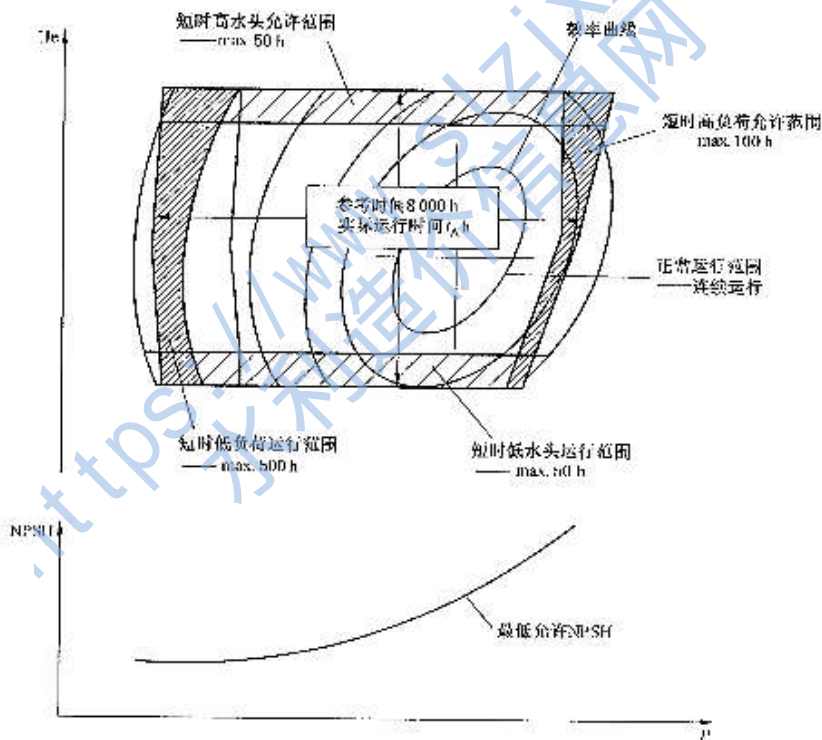
10.1.1 一般规定

合同中应规定出持续运行和短时运行的水头和净正吸出水头(NPSH)的范围,图 29 给出了一个典型的反击式水轮机的例子。在保证期结束前应评估空蚀破坏的情况,供方有权在一个合理的运行期后对机组进行检查,判断是否需要采取改进措施。应记录在保证期内的运行参数(运行时间、功率、水头、尾水位等),以便确定机组是否正常运行。

空蚀保证通常仅包括纯粹由清水中的空化点所造成的空蚀坑破坏,不包括以下原因造成的破坏:

- 水中悬浮物导致的磨损或侵蚀;
- 水中化学特性导致的腐蚀;
- 磨损或腐蚀引起的空蚀坑。

如果材料是特选的、或者是具有抗磨损或抗化学腐蚀涂层的,空蚀保证应包括这种类型的破坏,详情请参考 IEC 60609。



说明: 评估空蚀破坏时,短时运行的允许运行时间由 $t_A/8000$ h 制定, t_A 是实际运行时间。如果水头范围波动超过 $\pm 5\%$, 可选用不同的 NPSH 曲线。

图 29 运行范围和空蚀控制

10.1.2 测量方法

在保证期结束前,供需双方应共同确定空蚀坑深度大于 0.5 mm 的所有区域。在不确定度不超过

10%的情况下应进行下列测量:

- 每个空蚀坑区域的面积 a (cm^2): 这些区域可用合适的颜色绘出, 并在计算前描绘到不易被损坏的纸上。
- 每个空蚀坑区域的最大深度 s (mm): 可将深度计配合安装未破坏区域上的初始模板进行测量。

除合同中另有规定, 机组空蚀的最大总体深度 S (mm) 是单个最大深度 s 的最大值。

可计算总空蚀体积: $V = \sum \{0.5 \times (0.1 \times s) \times a\}$

10.1.3 与规定的保证值比较

除非合同中另有规定, 不锈钢旋转部件的空蚀坑不能超出表 10 中给出的数值。

表 10 空蚀破坏限制

水轮机类型	水斗式水轮机 斜击式水轮机	混流式水轮机 轴流式水轮机	双击式水轮机
深度/ mm	$S \leq 2 \times t_A / 8\,000 \times B^{0.2}$	$S \leq 4 \times t_A / 8\,000 \times D^{0.1}$	$S \leq 4 \times t_A / 8\,000 \times D^{0.1}$
体积/ cm^3	$V \leq 20 \times t_A / 8\,000 \times B^2$	$V \leq 20 \times t_A / 8\,000 \times D^2$	$V \leq 20 \times t_A / 8\,000 \times D \times L$

D (m) 指混流式、轴流式、双击式水轮机的转轮出口直径。
 B (m) 指水斗式、斜击式水轮机等的水斗宽度。
 L (m) 指双击式水轮机的转轮长度。
 t_A 指保证期内的实际运行时间。

转轮/叶轮叶片空蚀体积应不超过 k 倍的整个转轮的保证值, 其中 Z 是转轮叶片数 (不计分流叶片或水斗数), $k = 2.0$ 。

对所有非转动部件, 空蚀坑深度应不超过转动部件给定值。轴流式水轮机的空蚀体积应不超过转动部件给定值; 其他所有反击式水轮机和冲击式水轮机, 空蚀体积不应超过转动部件给定值的 0.5 倍。

10.2 噪声

10.2.1 一般规定

水电机组的噪声来源于以下几种不同方式:

- 发电机噪声: 主要来自风机叶片和空冷系统, 强烈的噪声也可能来自于定子铁芯、外壳等的共振。
- 水轮机噪声: 主要来源于转轮中的能量转换过程。噪声可能由于水轮机中效率过低产生的, 高水头混流式水轮机是个例外, 噪声主要是由于固定导叶、活动导叶和转轮进口处的流动干涉产生的。噪声也可能在尾水管中, 由转轮出口的空化涡带所产生, 涡带有时会引起更大的噪声水平和压力脉动。
- 齿轮传动 (如果有的话), 液压油泵和其他小型设备。

噪声主要在水电站厂房内部产生, 对于水斗式和斜击式水轮机, 由于开放式出口管路下的气流, 有时噪声也在水电站厂房外部产生。甩负荷期间噪声也会显著增加。

供方应详细说明水电机组产生的预期噪声, 电站工程设计时还应考虑外部噪声, 确保满足当地法规的要求。

10.2.2 测量方法

噪声应采用已标定的声级计进行测量,声级计采用 A 加权的平均模式滤波。声级计的标定精度应达到 ± 1 dB(A) 以内,且应根据 IEC 60651(类型 1)或其他相关标准(如 ISO 1680、ISO 3746、ISO 4412)选择标准化设备进行标定。

测量水轮发电机组噪声的参考表面是包围声源(机器)的最小假想表面(六面体、圆柱体等)或是双方同意的其他平面,且终止于反射平面(楼板、墙等)。测量点应布置在离参考表面 1 m 对应的 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 网格的节点上。

测量自由场内的声源发射,应从测量值中减去任何环境、背景噪声和墙壁反射的影响。

10.2.3 与保证值的比较

水轮发电机组产生的声压噪声不应超过合同或当地法规规定的水平,正常运行中噪声应低于 93 dB(A)。

10.3 振动

10.3.1 一般规定

水轮发电机组的振动一般有以下三种情况:

- a) 通道中的压力脉动或振动,通常由水力不平衡、共担现象或尾水管补气不当所引起;
- b) 轴系振动,通常由机械或水力不平衡所引起;
- c) 非旋转部件振动(如轴承室),通常旋转部件振动所引起共振而产生。

为减小过度振动的风险和本着负责任的态度,除合同中另有要求,应采取以下措施:

- a) 供方应提出对于水轮机座安装基础的要求;
- b) 供方有权查看水轮机组上下游的水道的相关图纸和参数,确保稳定或瞬态运行条件下在机组和其他部件间不会产生共振或相互作用;
- c) 所有转动部件在最高转速时应满足 GB/T 9235.1—2006 中的平衡等级 G 0.3,包括在最大设计水头的轴联飞逸转速;
- d) 装配的旋转轴和法兰应有跳动公差,不超过 ANSI/IEEE 810 的规定范围;
- e) 在所有额定负荷条件下,轴和转动部件应正安装于推力轴承正方向上。在任何工况条件下,除轴承面之外应避免固定部分和转动部分的机械接触。

10.3.2 测试及其方法

作为常规验收工作的一部分,通道中压力脉动产生的振动应在验收试验期间采用压力记录器或数据记录器进行测量。

除非合同中有规定或者任何一方提出,旋转部件和非旋转部件的振动一般不进行验收。如果需要测量,应按照以下规定实施:

- a) 转轴的振动,由两个安装在靠近轴承位置成 90° 角的非接触式位移传感器测量,测试轴的相对或/和绝对位移;
- b) 非转动部件振动,由一组布置在轴承座、机架或其他待测试部位的加速度传感器或振动速度传感器测量,测试在三个主要方向上进行。

10.3.3 与保证值的比较

10.3.3.1 一般要求

图 29 中给出的常规连续运行区域,振动水平应不超过以下给出的数值,合同中另有规定的除外。

在短时运行区域,包括开机和关机,振动的允许值可增大。除此以外的区域,包括非协联运行、甩负荷和飞逸转速,振动应不危及机组包括基础和引水管的安全或机械稳定性。

10.3.3.2 压力脉动

通常在恒定负荷条件下,蜗壳或压力管道中压力脉动的测量结果以均方根值(RMS)表示。对于蜗壳和压力管道中的压力脉动,单调节水轮机通常比在双调节水轮机要高,这是运行在部分负荷区(<50%额定负荷)的低水头水轮机需要面临的特殊问题。

任何情况下,压力脉动值应不超过合同规定的限定值,作为指导,压力脉动值应尽可能在以下限定范围内:

- 常规运行区域为净水头的 0.5%;
- 临时运行区域为净水头的 1.5%;
- 运行在部分负荷区(<50%负荷)的低水头水轮机为净水头的 5%。

如果需要,可进行峰-峰值脉动测试,以便进一步进行疲劳分析。

注1:反击式水轮机尾水管中的压力脉动可能会高于压力管,只有在尾水管承受结构损伤或有证据显示功率或振动改变时尾水管中的压力脉动才具有重要性。

注2:国内一般采用97%置信率的峰-峰值。

10.3.3.3 转轴的振动

在正常运行区域内,机组应遵照 ISO 7919-5 的 B 级规定。轴的径向移动从 0 到峰值进行测量,且在任意恒定载荷条件下不应超过轴承径向间隙的 60%。

10.3.3.4 非旋转部件的振动

考虑到相关机组群,1 MW 以上的油或油脂润滑的动压轴承机组在正常稳定运行区域内应遵照 ISO 10816-5 B 级的规定;1 MW 以下的水润滑轴承的机组在正常稳定运行区域内应遵照 B 级的规定;采用滚珠轴承的机组在正常稳定运行区域内应遵照 ISO 10816-3 B 级的规定。

较小的非转动部件,如吊物孔盖板,共振现象不应产生噪声。

附录 A
(规范性附录)
术语、定义、符号和单位

A.1 术语和定义

A.1.1 说明

下列术语、定义、符号和单位应用于本文件。
本标准采用国际单位制(SI)。

A.1.2 下标

序号	术语	定义/描述	符号
A.1.2.1	上游过水通道 Upstream water passage	闸门前后的进口断面,通常没有一个确定的截面积	0
A.1.2.2	高压基准断面 High pressure reference section	确定高压侧的起始断面(或高程),见图 1 如果合同规定,也可以在机组过水阀门的上游,见图 B.1	1
A.1.2.3	高压测量断面 High pressure measuring section	测压管所在断面应尽可能与高压基准断面 1 一致,否则其测量值应换算到高压基准断面 1	1', 1''
A.1.2.4	低压基准断面 Low pressure reference section	确定低压侧的起始断面(或高程)	2
A.1.2.5	低压测量断面 Low pressure measuring section	测压管所在断面应尽可能与低压基准断面 2 一致,否则其测量值应换算到低压基准断面 2	2', 2''
A.1.2.6	下游过水通道 Downstream water passage	尾水管后的出口断面,通常没有一个确定的截面积	3
A.1.2.7	规定值符号 Specified symbol	符号表示的量值,如转速、流量等,亦代表其他保证的量值	sp
A.1.2.8	测量值符号 Measurement symbol	符号表示试验中参数的测量值	M
A.1.2.9	变换(额定)符号 Transposed(Rated) symbol	符号表示换算到保证条件下(额定)通过计算得到的量值	R
A.1.2.10	加权符号 Weighted symbol	按照规定的权值得出的计算值	w
A.1.2.11	指数 Index	与指数试验相关	ix

A.1.3 几何术语和定义

序号	术语	定义/描述	符号	单位
A.1.3.1	面积 Area	垂直于来流方向的过流净面积	A	m ²

序号	术语	定义/描述	符号	单位
A.1.3.2	导叶开度 Opening of guide vane	导叶转动角度;	α	$^{\circ}$
		导叶背面出水边上给定点至相邻导叶体之间的最短距离;	a_u	mm
		接力器行程百分数	GV	%
A.1.3.3	喷嘴开度 Opening of nozzle	从关闭位置开始测得的喷嘴平均行程	s NO	mm %
A.1.3.4	转轮叶片角度 Opening of runner blade	从给定位置测得的转轮叶片平均角度	β RB	$^{\circ}$ %
A.1.3.5	高程 Elevation	系统中某一点位于规定的参考基准面(通常指平均海平面)以上的高程	z	m
A.1.3.6	水轮机基准高程 Turbine reference elevation	在水轮机中所规定的某一点到参考基准面的高程	z_1	m

A.1.4 主要物理量

序号	术语	定义/描述	符号	单位
A.1.4.1	质量 Mass	$m = \rho V$	m	kg
A.1.4.2	重力加速度 Gravity acceleration	试验当地 g 的值, 是纬度和海拔高度的函数	g	m/s^2
A.1.4.3	温度 Temperature	热力学温度	Θ	K
		摄氏温度 ($t = \Theta - 273.15$)	θ	$^{\circ}C$
A.1.4.4	密度 Density	单位体积的质量	ρ	kg/m^3
A.1.4.5	运动粘度 Kinematic viscosity	动力粘度与密度的比值	ν	m^2/s
A.1.4.6	平均速度 Mean velocity	流量除以面积	v	m/s
A.1.4.7	转速 Rotation speed	单位时间旋转的圈数	n	1/min
A.1.4.8	瞬时超速 Momentary overspeed	机组在规定的突然甩负荷中的调速器设定产生的最高转速	n_{os}	1/min
A.1.4.9	最大瞬时超速 Maximum momentary overspeed	在最不利的瞬态工况下产生的瞬时超速 (在某些情况下最大瞬时转速超过最大稳态飞逸转速)	$n_{os,max}$	1/min
A.1.4.10	最大稳态飞逸转速 Maximum runaway speed at steady state	在最大水头下, 发电机甩负荷或与电网解列发生的暂态过程波动消失后, 喷针或导叶或转轮叶片所处的位置恰使转速达到最大值的转速	n_{rs}	1/min
A.1.4.11	最终转速 Final speed	水轮机在所有暂态过程波动消失后的稳态转速	n_f	1/min
A.1.4.12	绝对压力 Absolute pressure	以完全真空为参考测量的流体静压力	p_{abs}	Pa
A.1.4.13	环境压力 Ambient pressure	周围空气的绝对压力	p_{amb}	Pa
A.1.4.14	表计压力 Gauge pressure	流体的绝对静压力与测量地点当时的环境压力之差: $p = p_{abs} - p_{amb}$	p	Pa

A.1.5 水头的术语和定义

序号	术语	定义/描述	符号	单位
A.1.5.1	水的比能 Specific hydraulic energy of water	单位质量水所具有的机械能	E_e	J/kg
A.1.5.2	总水头 Total head	$h_{tot} = e/g$	h_{tot}	m
A.1.5.3	动水头 Kinetic head	$h_{kin} = v^2/2g$	h_{kin}	m
A.1.5.4	静水头 Static head	在某测量/基准断面上: $h_{st} = h_{st1} - h_{st2}$ 两断面之间: $H_{st} = h_{st1} - h_{st2}$	h_{st} H_{st}	m
A.1.5.5	毛水头 Gross head	水电站上游水位与尾水位之差。 $H_g = HWL - TWL, H_g = (e_0 - e_1)/g$	H_g	m
A.1.5.6	净水头 Net head	$H = (e_1 - e_2)/g$	H	m
A.1.5.7	额定水头 Rated head	设计工况下的净水头	H_R	m
A.1.5.8	水头差 Head difference	以水面为基准的静水头	h'	m
A.1.5.9	流道损失 Water passage losses	水轮机上游与尾流损失	h_{li}	m
A.1.5.10	净正吸出比能 Net positive suction specific energy	断面2的绝对比能减去水轮机基准面处的汽化压力比能,公式见 IEC 60193	NPSE	J/kg
A.1.5.11	净正吸出水头 Net positive suction head	$NPSH = NPSE/g$	NPSH	m

* 国内的定义为:水轮机在额定转速下,输出额定功率时的最小净水头。

A.1.6 流量的术语和定义

序号	术语	定义/描述	符号	单位
A.1.6.1	流量 Discharge	单位时间流过系统任一断面水的体积	Q	m^3/s
A.1.6.2	额定流量 Rated discharge	设计工况下的流量	Q_R	m^3/s
A.1.6.3	指数流量 Index discharge	指数试验中的流量 $Q_x = k \Delta p^x, k \rightarrow$ 系数, $x \rightarrow$ 指数	Q_x	m^3/s

* 国内的定义为:水轮机在额定水头、额定转速下,输出额定功率时的流量。

A.1.7 功率的术语和定义

序号	术语	定义/描述	符号	单位
A.1.7.1	水轮机输入功率 Hydraulic power	水轮机进口水流可产生电能的水力功率。 $P_h = gH(\rho Q)$	P_h	W
A.1.7.2	水轮机输出功率 Mechanical power output	水轮机主轴输出的功率	P_m	W
A.1.7.3	额定功率 Rated power	设计工况下的输出功率	P_R	W

序号	术语	定义/描述	符号	单位
A.1.7.4	发电机输出功率 Generator power output	发电机输出出口处测得的输出功率(直接测量)	P_{gen}	W
A.1.7.5	电站输出功率 Plant power output	水电站的电能输出(通过 P_{gen} 间接测量或通过 P_{out} 直接测量)	P_{plm}	W
A.1.7.6	传动装置功率损失 Losses of transmission	传动装置上的机械损失(齿轮/皮带)	P_{loss}	W
A.1.7.7	辅助设备功率损失 Losses of auxiliary devices	了系统中的损失(辅助设备内损失和由于轴向力产生的推力轴承的部分损失)	P_{aux}	W
A.1.7.8	发电机功率损失 Losses of generator	发电机的内群损失,包括轴承损失	$P_{L,gen}$	W
A.1.7.9	变压器功率损失 Losses of transformer	变压器输入端与输出端的功率差	$P_{L,t}$	W
A.1.7.10	励磁机功率损失 Losses of exciter	与外部电气连接或机械驱动下的励磁损失	$P_{L,ex}$	W

* 国内的定义为:在额定水头和额定转速下,水轮机能够连续发出的功率。

A.1.8 效率的术语和定义

序号	术语	定义/描述	符号	单位
A.1.8.1	水轮机效率 Turbine efficiency	指数 $\eta_{rel} = P_1 / (H \cdot g \cdot \rho \cdot Q_s)$ 绝对 $\eta_r = P_1 / (H_t \cdot g \cdot \rho \cdot Q)$	η_{rel} η_r	
A.1.8.2	发电机效率 Generator efficiency	$\eta_{gen} = P_{gen} / (P_{plm} + P_{L,gen})$	η_{gen}	
A.1.8.3	电站效率 Plant efficiency	指数 $\eta_{plm} = P_{plm} / (H_t \cdot g \cdot \rho \cdot Q_s)$ 绝对 $\eta_{plm} = P_{plm} / (H_t \cdot g \cdot \rho \cdot Q)$	η_{plm} η_{plm}	
A.1.8.4	变压器效率 Transformer efficiency		η_t	
A.1.8.5	传动(齿轮)效率 Transmission (gear) efficiency	$\eta_g = (P_{plm} + P_{loss}) / P_1$	η_g	—

A.1.9 不确定度的术语和定义

序号	术语	定义/描述	符号
A.1.9.1	被测量数值的绝对误差(不确定度) Absolute error (uncertainty) in the value x of a measured quantity		e_x
A.1.9.2	被测量的数值 Value of measured quantity		x
A.1.9.3	相对误差(不确定度) Relative error (uncertainty)		$f_x = e_x / x$
A.1.9.4	系统不确定度 system uncertainty		$f_{s,m}$
A.1.9.5	随机不确定度 Random uncertainty		$f_{r,m}$

序号	术语	定义/描述	符号
A.1.9.6	输出功率的总不确定度,包括功率和水头的系统和随机误差 Overall uncertainty in power output including system and random errors of power and head	水轮机输出功率(轴功率)	f_{p_s}
A.1.9.7		发电机输出功率(母线)	$f_{p_{gen}}$
A.1.9.8		水轮发电机组输出功率(输电线路)	$f_{p_{line}}$
A.1.9.9		计算功率中的相对不确定度	f_{cov}
A.1.9.10	效率的总不确定度,包括系统和随机误差 Overall uncertainty in the value of efficiency including system and random errors	水轮机效率, 绝对	f_{η_a}
A.1.9.11		水轮机效率, 热力学方法	$f_{\eta_{th}}$
A.1.9.12		水轮机效率, 指数试验	$f_{\eta_{ind}}$
A.1.9.13		电站效率, 指数试验	$f_{\eta_{sta}}$
A.1.9.14	水头的不确定度 Uncertainty of head value	压力测量	f_h
A.1.9.15		净水头	f_{h_0}
A.1.9.16	流量的不确定度 Uncertainty of discharge	绝对流量	f_Q
A.1.9.17		指数流量	$f_{Q_{ind}}$
A.1.9.18	由于直接驱动或连接部件产生的不确定度 Uncertainty caused by direct driven or connected components	发电机损失	f_{loss_g}
A.1.9.19		机械传动装置损失	f_{loss_m}
A.1.9.20		变压器损失	f_{loss_t}
A.1.9.21	功率测量仪器产生的系统不确定度 System uncertainty caused by power measurement instrument	电能表(瓦特时计)	f_{mi}
A.1.9.22		电压互感器	f_{vi}
A.1.9.23		电流互感器	f_{ci}
A.1.9.24		计时器	f_t

A.1.10 其他术语和定义

序号	定义/描述	符号
A.1.10.1	电压互感器 Potential voltage transformer	PT
A.1.10.2	电流互感器 Current transformer	CT
A.1.10.3	功率因数 Power factor	$\cos\phi$
A.1.10.4	上游水位 Head water level	HWL
A.1.10.5	尾水位 Tail water level	TWL

A.2 水的比能的定义

根据伯努利方程,沿流管的水能守恒可写成以下三种形式:

1	E	— 单位质量的能量	$= v^2/2 + p/\rho + gz$	量纲: $\text{Nm/kg} = \text{m}^2/\text{s}^2 = \text{J/kg}$
2	H	— 单位重量的能量	$= v^2/(2g) + p/(\rho g) + z$	量纲: $\text{Nm/N} = \text{m}$
3	p_{tot}	— 单位体积的能量	$= \rho v^2/2 + p + \rho g z$	量纲: $\text{Nm/m}^3 = \text{N/m}^3$

这三种形式是等价的,可无任何精度损失地用于任何计算。这三种形式都可以采用术语“比水能”来表达。

第一个方程对应于 IEC 60041 中的定义,在这种形式中术语 E 指的是总比水能。根据 IEC 60041,式中各单项指的是:

- $v^2/2$ 运动比能 (specific kinetic energy);
- p/ρ 压力比能 (specific pressure energy);
- gz 位置比能 (specific potential energy)。

第二个方程主要用于小水电机组,目的是为了简化程序并避免错误。这种形式中,“水的比能”的各单项分别为:

- $v^2/(2g)$ 运动水头或速度水头 (kinetic energy head or velocity head);
- $p/(\rho g)$ 压力水头 (pressure head);
- z 位置水头 (geodetic head or height)。

根据 IEC 60041,总比水能的计算公式为 $E = gH$ 。

A.3 瞬态压力变化

最大最小压力是指在最不利的瞬时工况下的瞬态压力,一般出现在最大水头和/或最大流量工况。图 A.1 中表示出来最大压力 p_{max} ,图 A.2 中表示出了最小压力 p_{min} 。

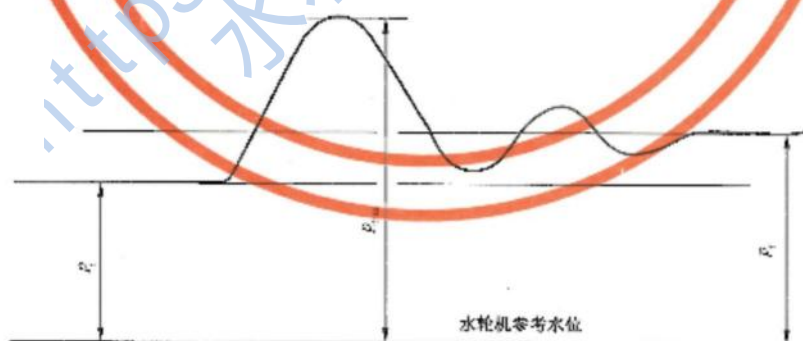


图 A.1 突然甩负荷时水轮机高压基准断面上的瞬时压力脉动

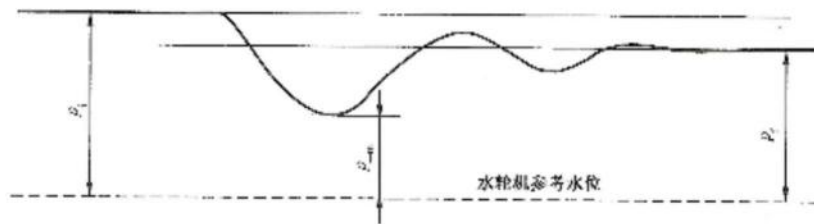


图 A.2 突然接受负载时水轮机高压基准断面上的瞬时压力脉动

注：曲线表示的不是高频压力脉动（主要由转轮旋转和其他力学现象引起的），如何处理这种由更高高频脉动引起的压力脉动请见 5.8 和图 11、图 12。

A.4 物理数据

A.4.1 重力加速度和纬度、海拔高度的关系

重力加速度 g 的国际标准值是 9.806 m/s^2 。

重力加速度可采用式 (A.1) 计算：

$$g = 9.7803 \times (1 - 0.0054 \sin^2 \varphi) - 3 \times 10^{-6} z \quad \text{.....(A.1)}$$

式中：

φ ——纬度，单位为度(°)；

z ——海拔高度，单位为米(m)。

A.4.2 纯水的密度

需要使用 Herbst 和 Rogener 的公式(见 IEC 50011)计算纯水的密度值，将这些值制成表 A.1，中间值由线性插值得到。对数值计算，可使用足够精度的简单公式，如 Weber 公式。

表 A.1 水的密度

温度 ℃	绝对压力 10^5 Pa					
	1	10	20	50	100	150
0	999.8	1 000.3	1 000.8	1 002.3	1 004.8	1 007.3
5	999.9	1 000.4	1 000.9	1 002.4	1 004.8	1 007.2
10	999.7	1 000.1	1 000.6	1 002.0	1 004.4	1 006.7
15	999.1	999.5	1 000.0	1 001.4	1 003.7	1 005.9
20	998.2	998.6	999.1	1 000.4	1 002.7	1 004.9
25	997.0	997.4	997.9	999.2	1 001.5	1 003.7
30	995.7	995.1	995.6	997.8	1 000.0	1 002.2
35	994.0	994.4	994.9	996.2	998.4	1 000.5
40	992.2	992.6	993.1	994.4	996.5	998.7

A.4.3 空气的密度

空气密度采用式(A.2)计算：

$$f_a = \frac{p_{abs}}{\theta} \times 3.4837 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

p_{abs} ——绝对压力,单位为帕(Pa);

θ ——绝对温度,单位为开尔文(K)。

<http://www.sljzjxx.com>
水利造价信息网

附录 B
(规范性附录)
水头的测量

B.1 概述

本标准中,术语净水头 H 、毛水头 H_x 、总水头 H_{tot} 和静水头 H_{stn} 主要用于表示能量和压力。

如果有必要,比水能 e 根据 $e = gH$ 计算。

水轮机净水头 H 按式(B.1)计算:

$$H_{net} = \frac{(p_{tot1} - p_{tot2})}{\rho g} + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2g} + (z_1 - z_2) \quad \text{.....(B.1)}$$

环境压力 p_{amb} 在断面 1 和断面 2 之间变化很小,对小型水轮机的影响可忽略。与之相同, g 或 ρ 的平均值变化也可忽略。参考海拔高度采用水轮机安装高程 z_T , 代入 $p = p_{stn} - p_{amb}$ 后净水头的式(B.2)可简化为:

$$H_{net} = \frac{(p_1 - p_2)}{\rho g} + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2g} + (z_1 - z_2) \quad \text{.....(B.2)}$$

B.2 压力测量断面的选取

B.2.1 一般规定

净水头是水轮机的主要参数,在任何水轮机的项目测试中都应测量。若计算水轮机的净水头,应确定高低压参考断面的水头或它们的差值。

测量断面应仔细选择,并经过双方协商同意,以获得光滑一致的流态。不应将测量断面选择在肘管、阀门或其他外部流动干扰部件附近,以避免速度紊乱。测量断面所在的平面应垂直于流动的主流方向,断面的面积需要用于平均流速的计算,应便于测量。

条件允许,测量断面 1' 和 1'' 应与参考基准断面重合,见图 B.1。如果无法实现,应经过双方协商确定合适的方法以将数据修正到基准面。水头差的估算可基于理论知识和实践经验。

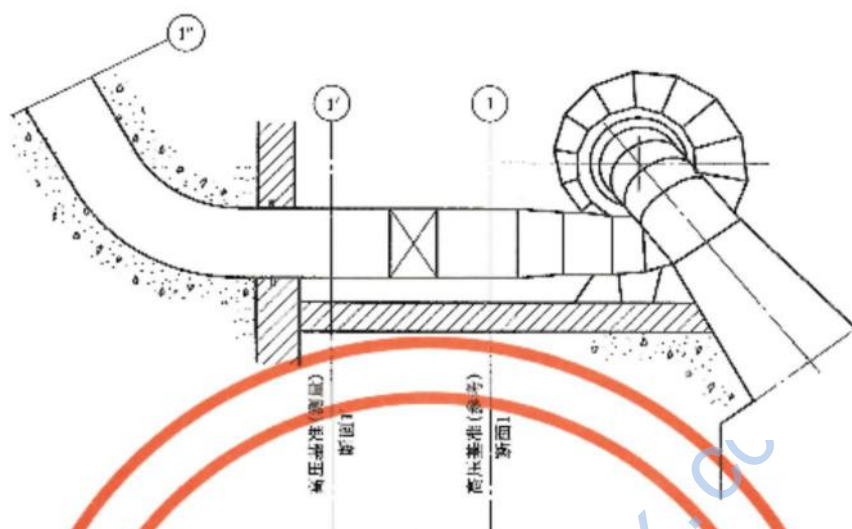


图 B.1 高压基准断面和测量断面

B.2.2 上游基准断面

理想的上游参考基准断面应位于水轮机进口(蜗壳或喷嘴)上游2倍进口直径处的直管段截面上,管路可略有收敛或发散。如果各方同意,考虑到关闭装置的损失,保证基准断面可从水轮机进口的断面1移动到为1'。

B.2.3 下游基准断面

a) 冲击式水轮机

冲击式水轮机下游基准断面应是射流与转轮理论接触点高度的平均位置。假设水轮机机壳内的压力与大气压力相等。如果水轮机有加压或减压的情况,应进行修正。

b) 反击式水轮机

图 B.2 给出的是尾水测量基准断面的例子,图 B.5 给出的是考虑尾水竖井中速度的例子。此外,如果具备合适的测量条件,还可将测量断面选择在尾水管上,见图 B.3。不管是哪种情况,速度水头应采用尾水管出口断面上的平均速度计算。如果各方同意,考虑到尾水管出口损失,保证的基准断面可从尾水管出口断面移动到尾水位平面上。

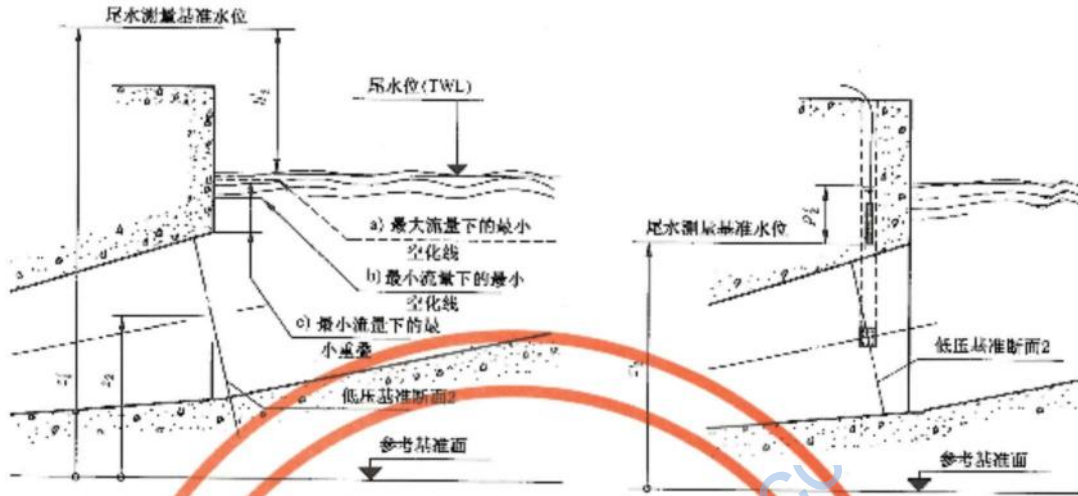


图 B.2 尾水处测量断面

图 B.3 尾水管测量断面

B.3 测量断面的定义

B.3.1 一般规定

推荐的计算 H 的方法是分别绘制 $h_{1.0}$ 、 $h_{2.0}$ 和流量的曲线，如图 B.1 所示。 $h_{1.0}$ 、 $h_{2.0}$ 的异常值的控制和误差估计应分开进行。采用这种方法可允许检查任何 HWL 和 TWL 限制条件。

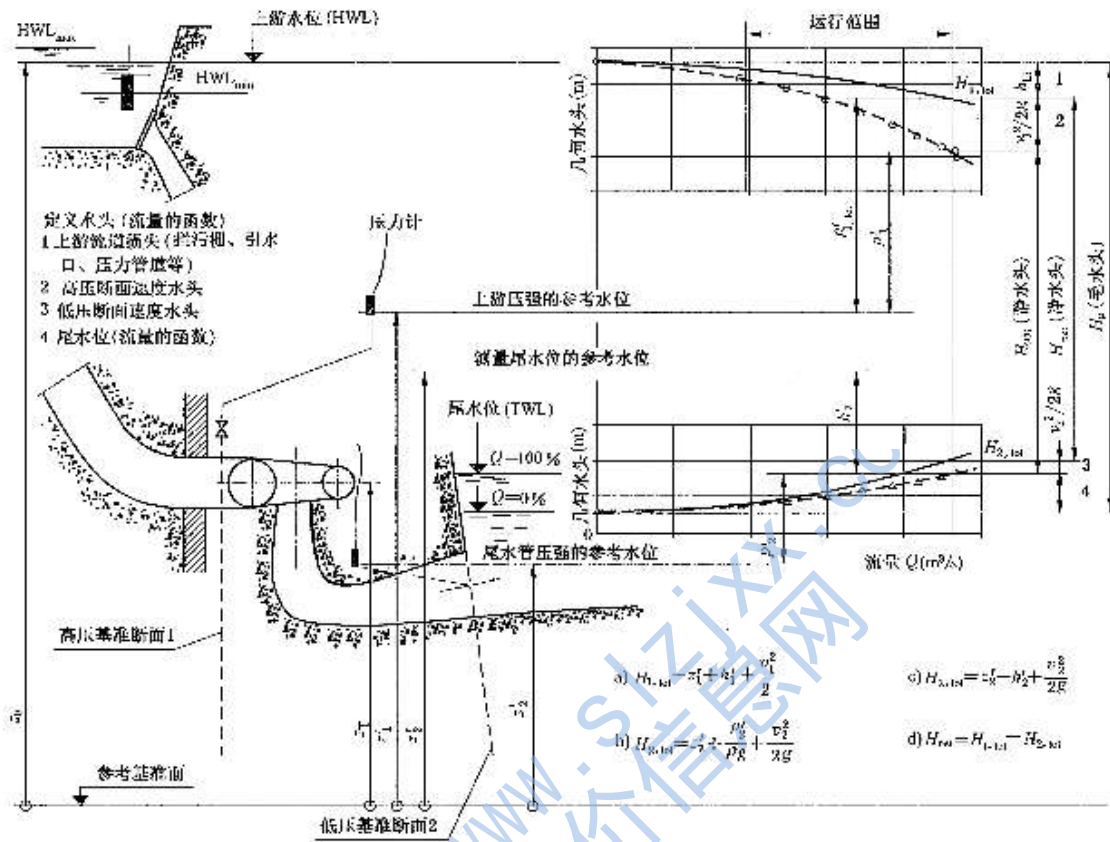


图 B.4 测量断面的定义

B.3.2 轴流式水轮机(Kaplan turbine)水头定义

轴流式水轮机水头定义见图 B.5 和图 B.6。

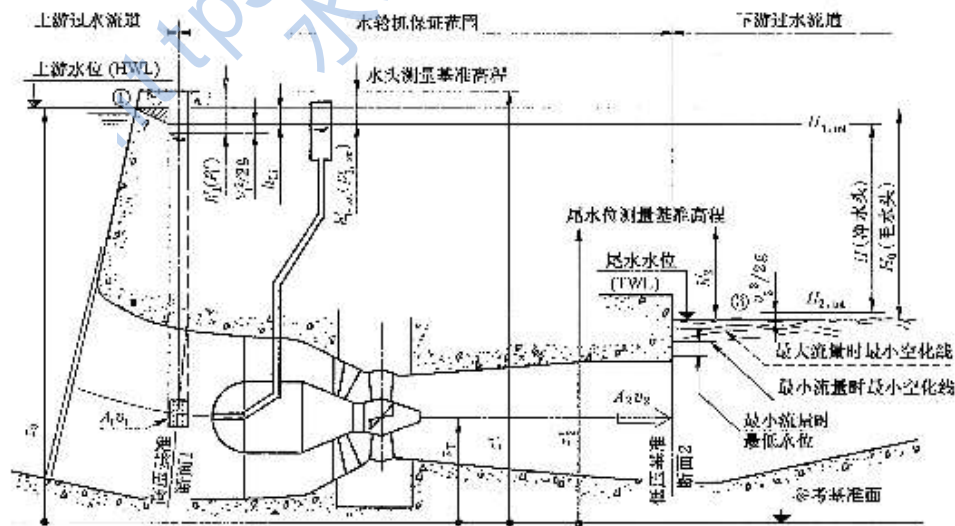


图 B.5 贯流转桨式水轮机水头定义

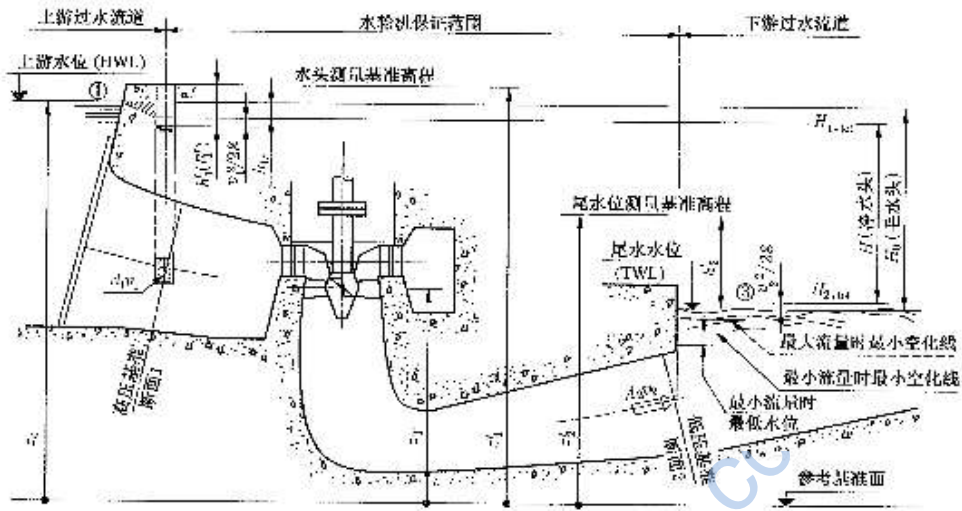


图 B.6 立式轴流式水轮机水头定义

B.3.3 混流式水轮机 (Francis turbine) 水头定义

混流式水轮机水头定义见图 B.7、图 B.8、图 B.9、图 B.10。

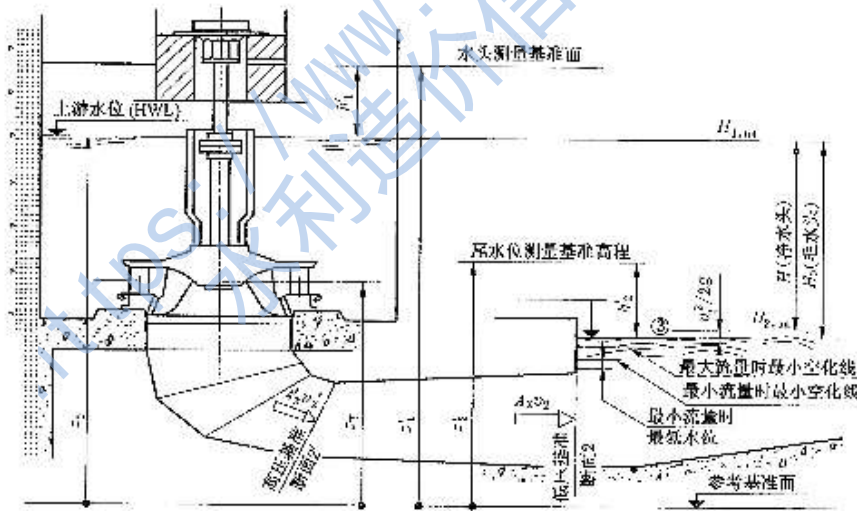


图 B.7 立式开敞式混流水轮机水头定义

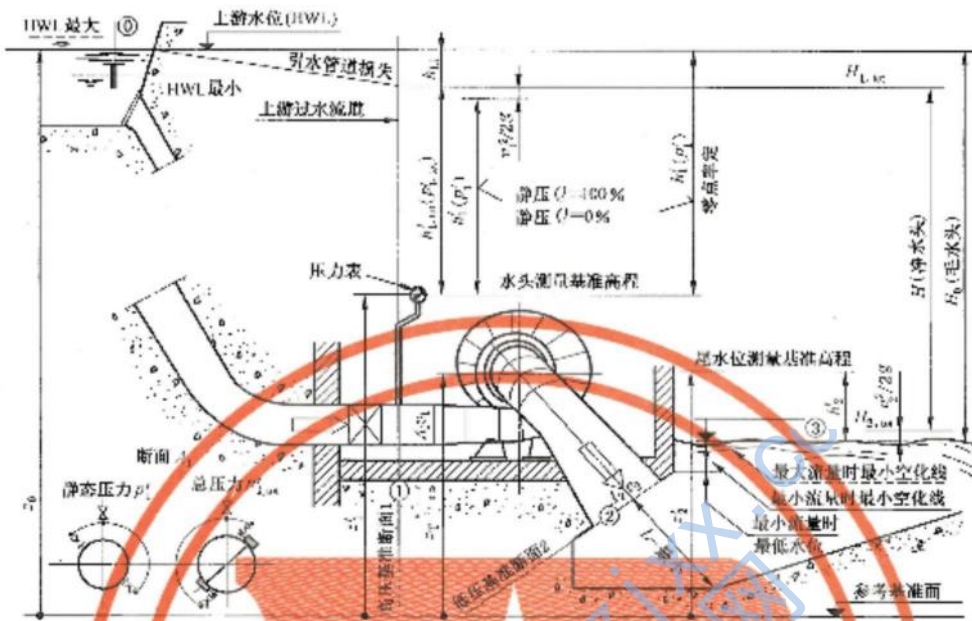


图 B.8 卧式混流式水轮机水头定义

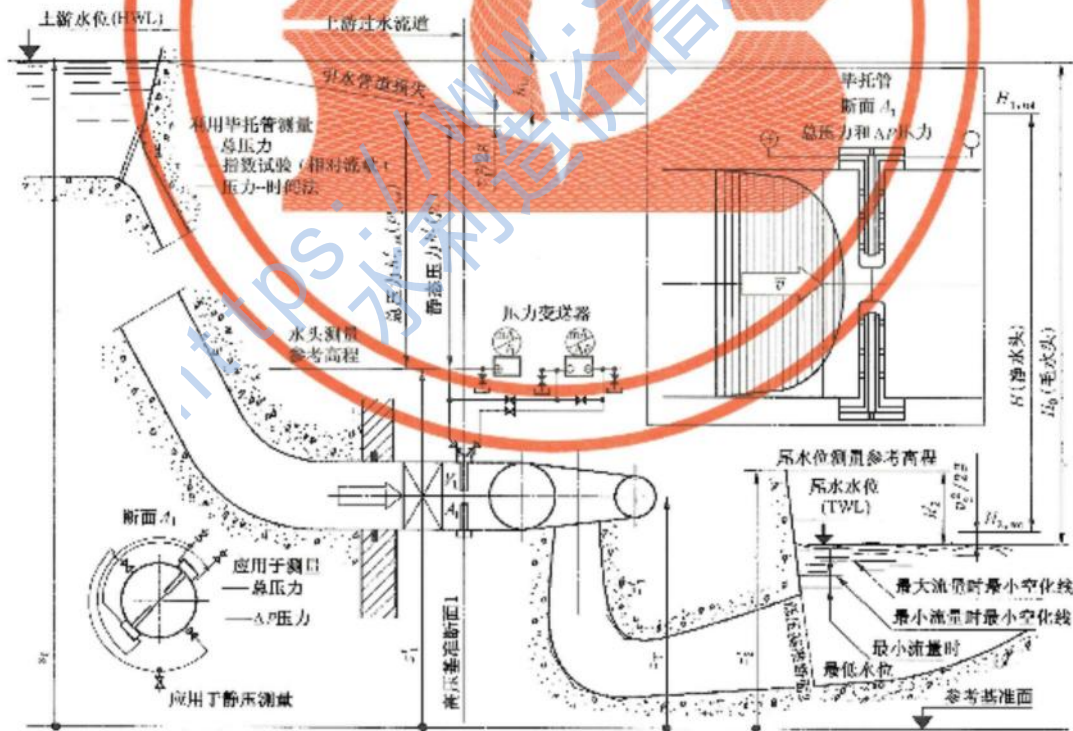


图 B.9 立式混流式水轮机水头定义(用毕托管)

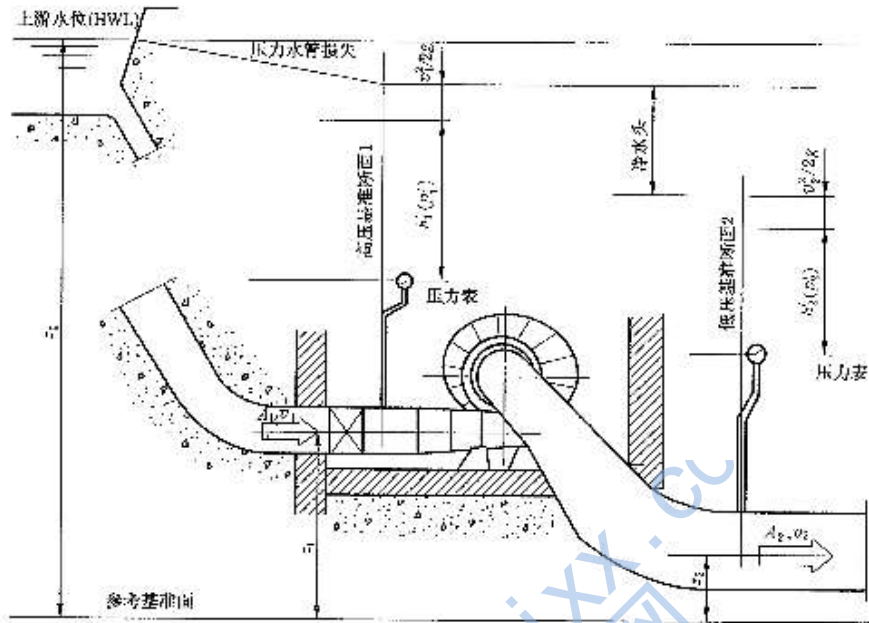


图 B.10 卧式混流式水轮机水头定义(低压侧测压力)

B.3.4 水斗式水轮机(Pelton turbine)水头定义

水斗式水轮机的水头定义见图 B.11 和图 B.12。

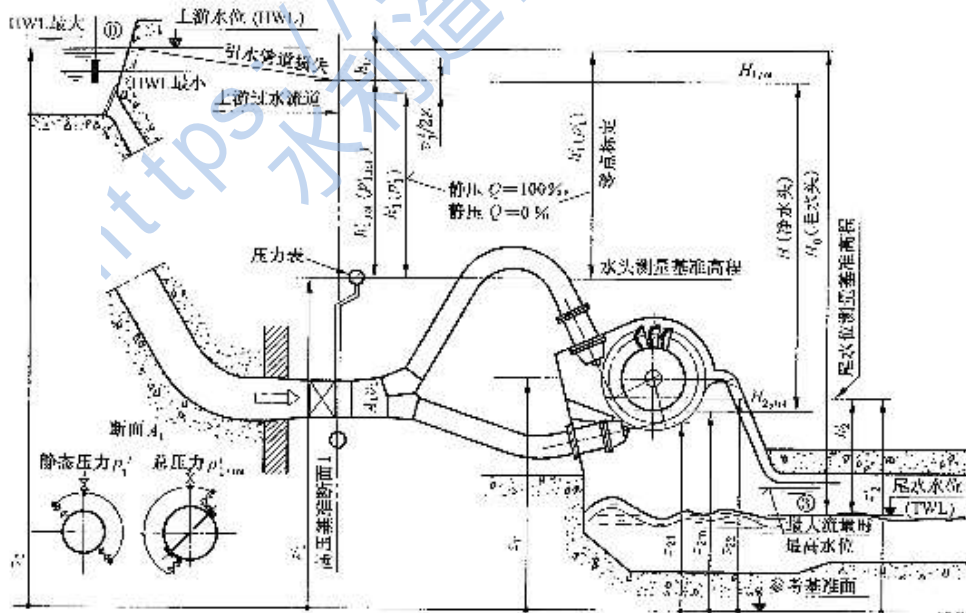


图 B.11 卧式水斗式水轮机水头定义

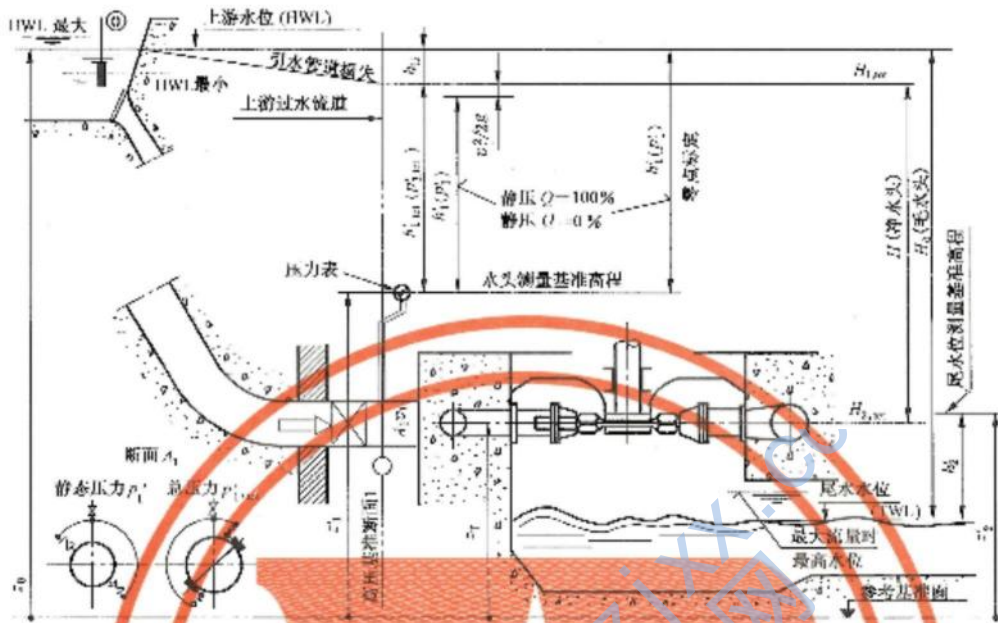


图 B.12 立式水斗式水轮机水头定义

B.3.5 斜击式水轮机 (Turgo turbine) 水头定义

斜击式水轮机水头定义见图 B.13 和图 B.14。

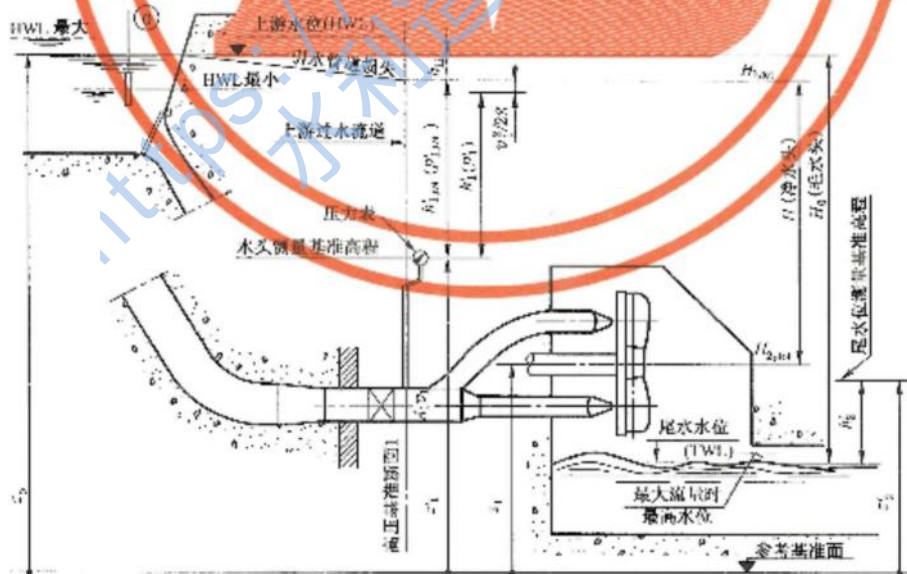


图 B.13 卧式斜击式水轮机水头定义

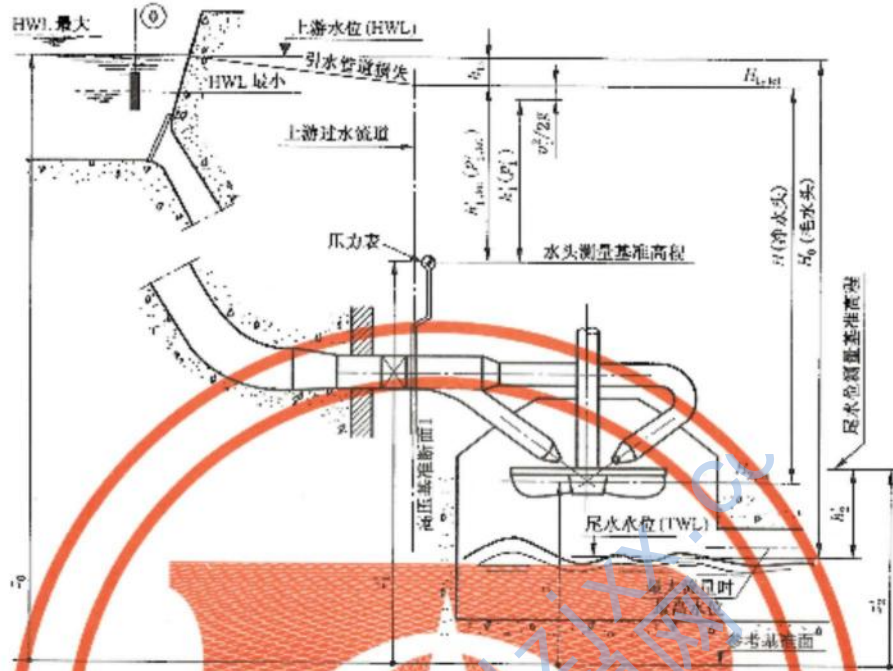


图 B.14 立式斜击式水轮机水头定义

B.3.6 双击式水轮机(CrossFlow turbine)水头定义

双击式水轮机水头定义见图 B.15 和图 B.16。

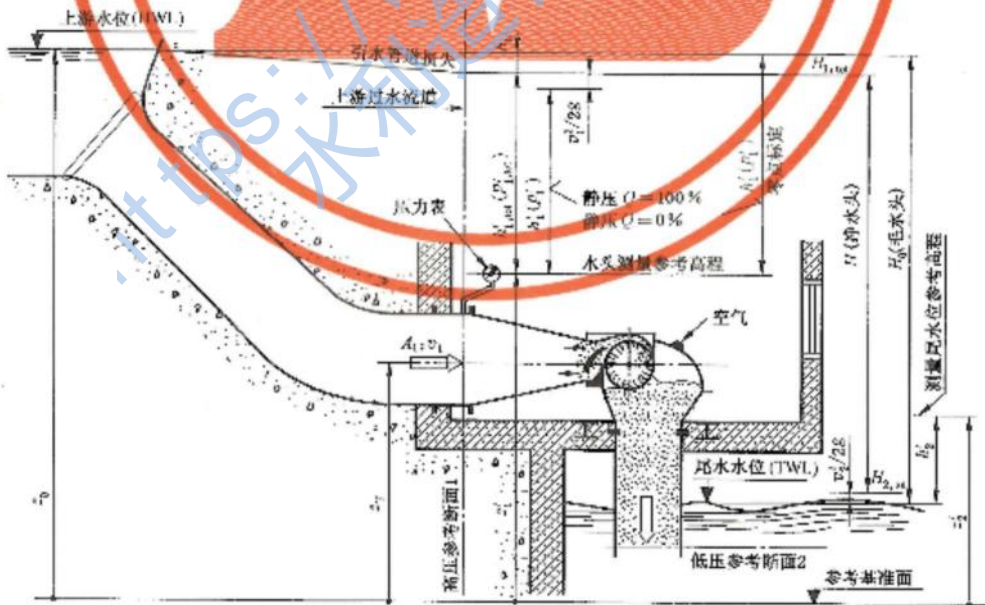


图 B.15 卧式双击式水轮机水头定义(A型带尾水管)

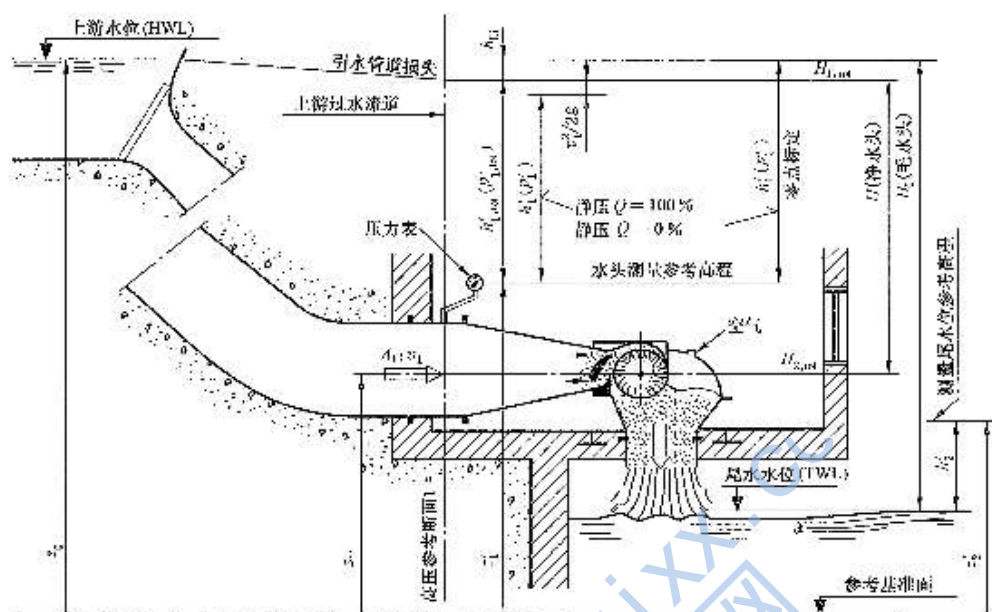


图 B.16 卧式双击式水轮机水头定义(D型不带尾水管)

B.4 水头测量方法

B.4.1 一般规定

在理想的条件下,一个测量断面应布置 4 个不锈钢静压测压孔,测压孔中心线应与测量管路中心线垂直,安装时应注意图 B.17 中的一般规定。测压孔的圆柱形孔径应为 3 mm~5 mm,边缘应有半径 $r \leq d/4$ 的圆角与流道光滑连接。其深度 l 至少为其直径的两倍。如果测量断面管壁较薄,则应在管壁背面上装一凸台,以保证测压孔深度。

测压孔应与内管壁齐平,并去掉所有毛刺和凹凸不平处。测压孔不应涂任何油漆,并清除每一个测压孔底部的污垢。

每个测压孔通过独立的阀门连接到集流管或环形集流管,连接管的断面直径应至少是测压孔直径的两倍。在正常试验条件下,开始进行测量前,依次打开阀门单独测量每个测压孔的压力。测得的压力数据需要满足以下条件才可以被接受:

- 每个测压孔的压力与该测量断面 4 个测压孔的压力的算术平均值的偏差不大于水轮机净水头的 0.5% 或不大于该测量断面流速水头的 20%;
- 如果超出上述限制范围且故障无法排除,双方应达成协议,包括去除故障的测压孔,或另选测量断面,或接受该误差。

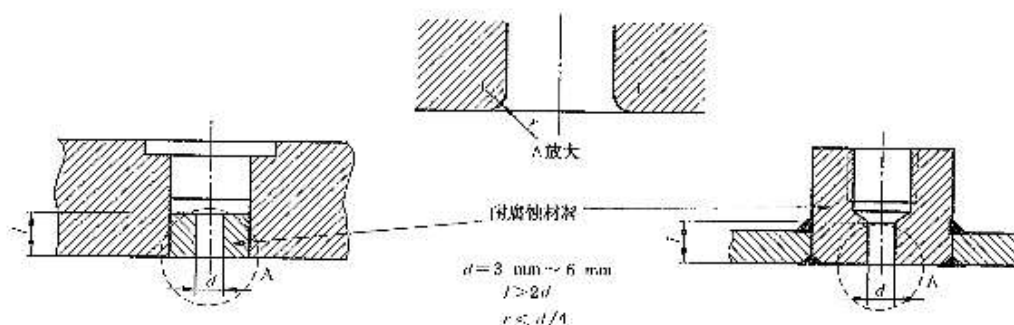


图 B.17 静压测压孔的规定

B.4.2 压力测量仪器

B.4.2.1 原级测量仪器

液柱压力计和重力压力计可作为原级测量仪器,重力压力计可作为压力标定装置。

B.4.2.2 压力传感器

压力传感器是一种把压力信号转变为电信号的机电装置。应根据待测压力的范围选择相应量程的压力传感器。

使用压力传感器的优点是:

- 容易与计算机数据采集系统连接;
- 测压孔内流体静止,因而提供压力迅速而准确的响应;
- 容易取得压力或压差脉动的平均值;
- 使用普通的电子设备就可记录瞬时压力。

压力传感器应具有下列特性:

- 足够的标定稳定性;
- 高重复性,滞后可忽略不计;
- 零点漂移小和热灵敏度低;
- 传感器应有效地标定。

差压传感器有很多种类,可通过其测量的信号直接得到下式的值: $(p_1 - p_2)/\rho g + (z_1 - z_2)$ 。需要注意以下问题:

- 仪表测量:若两个测量断面面积不同用压差传感器会产生误差;
- 验收试验:不能确定可能的压力变化来源。

B.4.2.3 弹簧压力计

根据待测压力的大小选择相应量程的弹簧压力计。如果压力计具有足够的精度,且在最优测量范围内(通常为满量程的60%~100%)使用,并进行有效的标定,则经双方协商后可采用这种压力计。

注:弹簧压力计是利用普通或螺旋形的环形管或膜片的机械变形来指示压力。

B.4.2.4 自由水位测量仪器

为确定自由水位而选择的测量断面应满足下列条件:

- 水面应平稳且无干扰。应避免使断面处的流速受弯段和其他特殊地形的影响;

b) 用于确定平均流速的断面面积应能精确确定,并易于测量。

自由水位通常由仪器测量参考水位 z_R 测得,测量方法包括:

- a) 板式水位计;
- b) 针形或钩形水位计;
- c) 浮子水位计;
- d) 水位尺;
- e) 超声波传感器。

以上方法只适用于容易接近的自由水位的测量,如果测量断面不易接近则可选用下列测量方法:

- a) 液柱压力计;
- b) 浸入式压力传感器;
- c) 用压缩空气测量(气泡装置)。

注:有关设计和使用水位测量装置的要求,参考标准 ISO 4375。

B.5 等级 A 测试中动水头评估

水轮机理论流量可根据导叶或喷针开度用图 B.18 所示的模型数据得到。流量可从曲线中估算出,并用于计算参考断面上的速度。

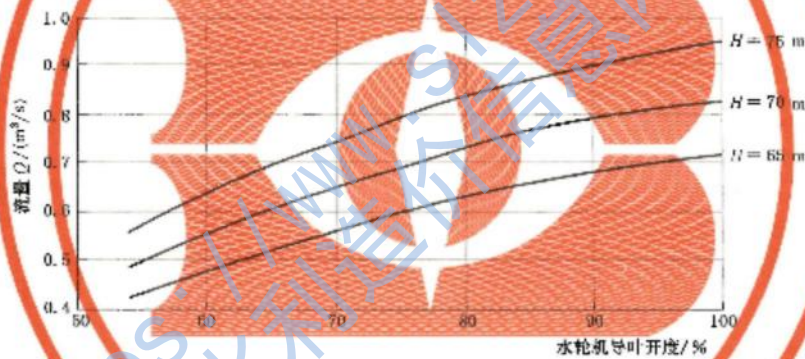


图 B.18 示例:与导叶开度对应的流量

附录 C
(规范性附录)
转速测量方法

C.1 旋转速度

C.1.1 直接测量功率时转速的测量

当功率用直接法来测量时,转速的测量应采用经过标定的转速计或电子计数器,且在与水轮机主轴没有任何滑移的情况下进行。

C.1.2 间接测量功率时转速的测量

同步电机的转速可用配电盘上的频率表在下列条件下允许测量:

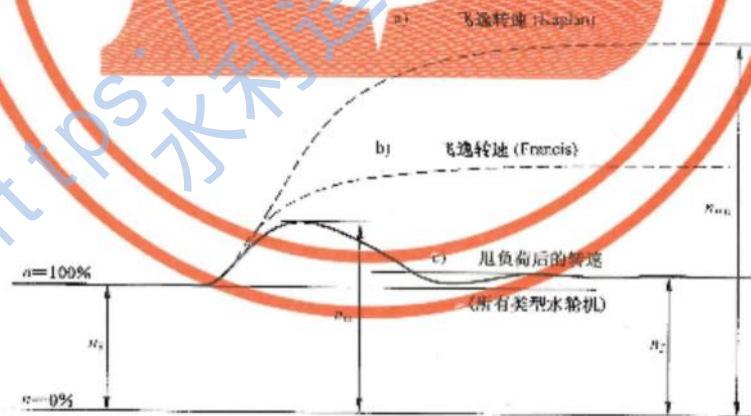
- 系统负荷应稳定;
- 频率表应采用适当的精密仪表进行校验。

异步电机的转速测量可按 IEC 60041:1991 中 13.3 有关条款进行。

C.2 过速和飞逸转速的定义

C.2.1 过速:机组在调速器设定规定的突然甩负荷中产生的最高瞬态转速,见图 C.1 中的 n_m 。

C.2.2 飞逸转速:在给定的水头和开度(导叶、蝶阀)和/或转轮叶片角度下,发电机从负载或电网中脱离且无励磁情况下,机组达到的最高稳态转速,见图 C.1 中的 n_{∞} 。



说明:

- a), b) ——关闭装置不动作时的飞逸转速;
- c) ——突然甩负荷期间的水轮机转速变化曲线。

图 C.1 水轮机过速和飞逸转速

附录 D
(规范性附录)
输出功率测量

D.1 概述

电能输出功率通常在发电机端口或在变压器上测量。

水轮机的输出功率用发电机和齿轮增速箱(如果安装)效率的试验数据计算得到。水轮机输出功率也可以采用扭矩仪直接测量,但是这种方法用的较少。

发电机的功率损失可通过发电机的功率来确定。发电机的功率损失包含几种组成部分,包括常数部分,和负荷成二阶多项式函数的部分,可通过高精度的差值计算得到。图 D.1 给出了这些功率损失的示例。

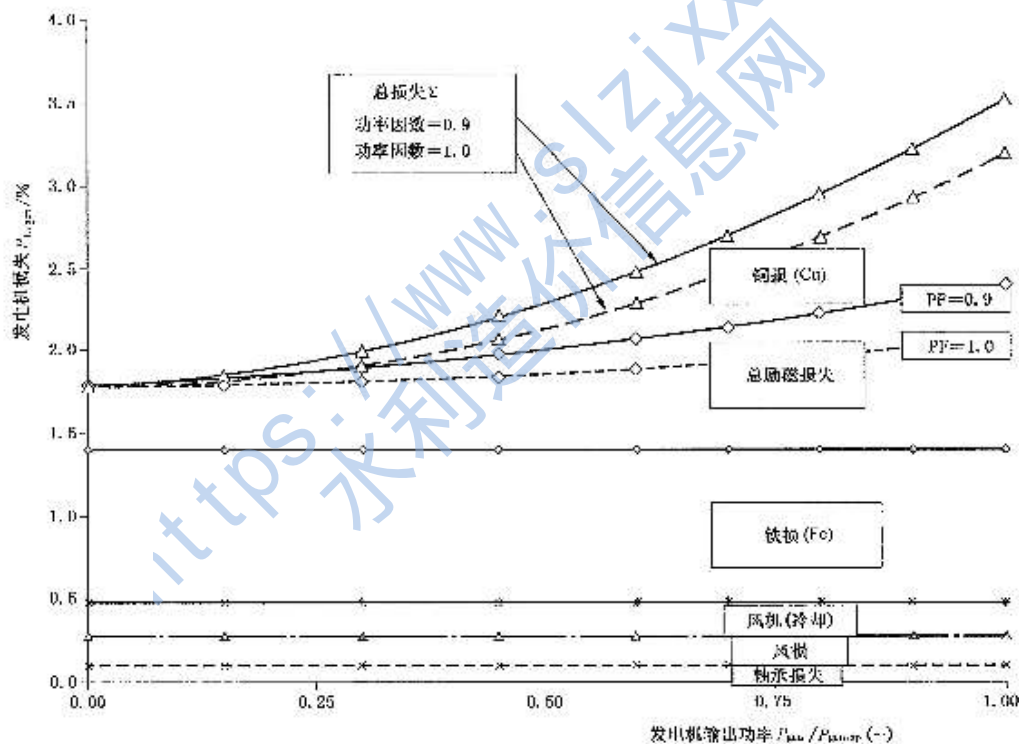


图 D.1 同步发电机的典型功率损失

D.2 输出功率的测量

D.2.1 同步发电机

如果现场条件允许,发电机应在规定电压和 $\cos\phi = 1.0$ 的功率因数下运行。假如发电机不在规定电压或功率因数下运行,则在计算发电机输出功率和损失时应考虑适当修正。

功率应采用功率表或者功率分析仪进行测量。图 D.3 和图 D.4 给出了双瓦特表法和三瓦特表法的功率分析仪的安装方法。试验读数的数量取决于试验的持续时间和负荷的波动。应记录足够的读数，确保在试验过程中给出正确的输出功率平均值。

用于试验的仪器和仪用互感器应在安装前遵照试验各方均能接受的标准进行标定。在验收试验中使用的仪用互感器应按实际试验条件下所施加负载量进行试验，以确定其变比和相位角偏离，在验收试验前应确定有效的修正值。

如果损失应计算的话，可用下式计算：

$$P_{1\infty} = P_a \frac{1 - \eta_{\text{res}}}{\eta_{\text{res}}} \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

D.2.2 异步发电机输出功率测量的间接法

测量、连接和评估方法与同步发电机相同，应注意以下几点：

- 在整个保证值范围内测量功率因数(见图 D.2)，并与保证值比较；
- 测量转速，因为它随着输出功率变化。

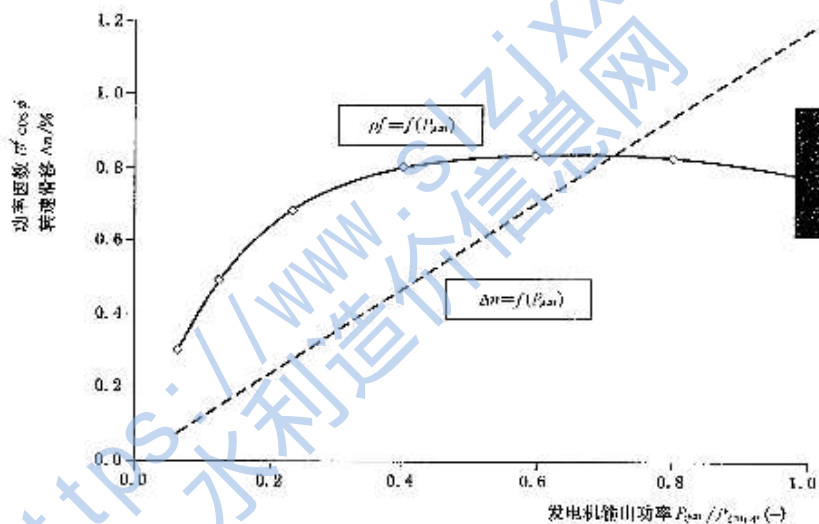


图 D.2 异步发电机典型功率因数和转差与发电机输出功率的关系

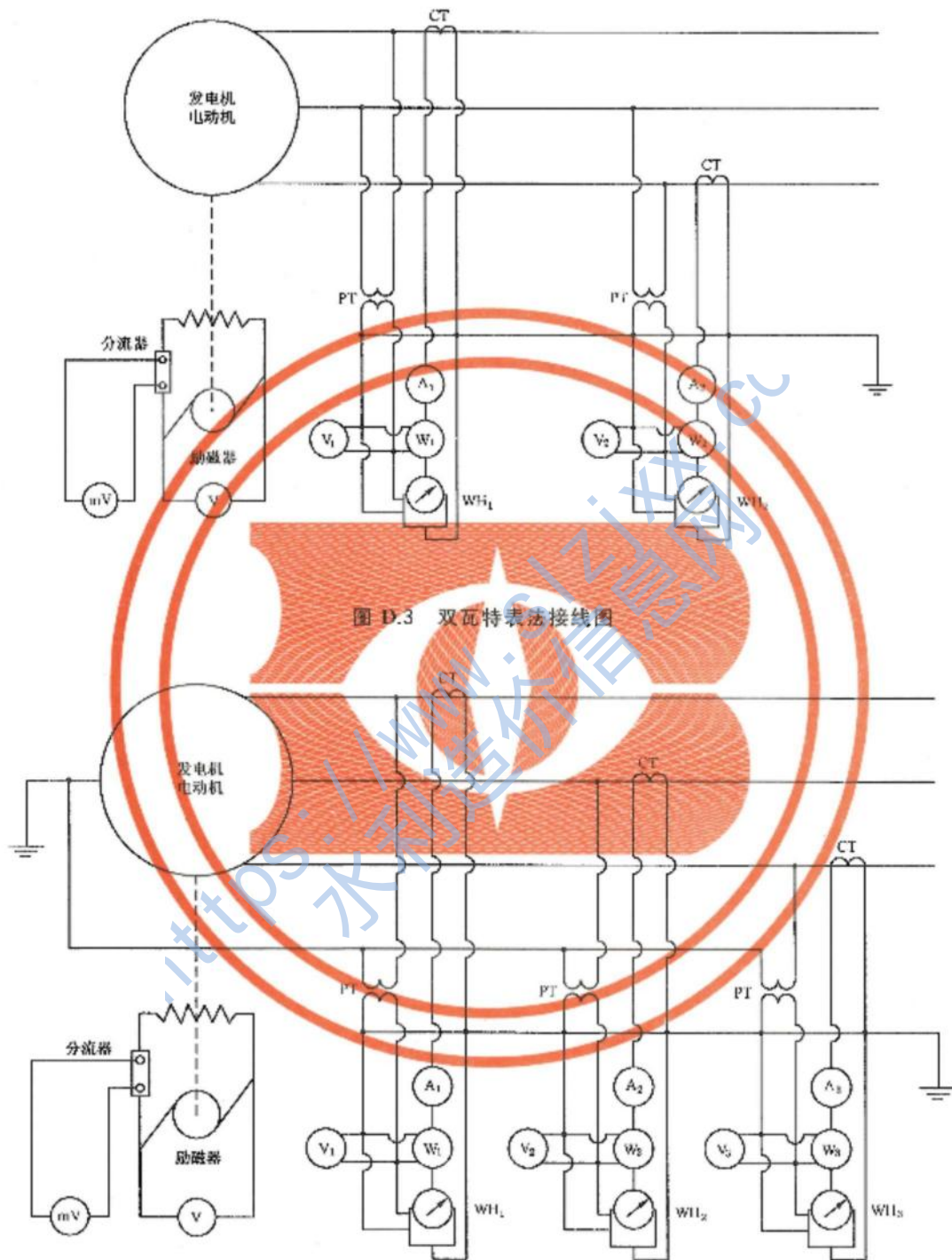


图 D.3 双瓦特表法接线图

图 D.4 三瓦特表法接线图

附录 E
(规范性附录)
流量测量方法

E.1 概述

E.1.1 一般条件

如果所选流量测量方法的要求能够得到满足,则水电站流量的测量应在规定的精度下完成。应考虑各方利益,在电站设计时应考虑流量测量方法的选择,并促使在设计和建设中满足试验条件的要求。

E.1.2 流量测量方法的选择

表 E.1 中给出了不同流量测量方法的要求和限制条件。条件的偏离将会影响测量的精度。

表 E.1 流量测量方法的选择

方法	管路条件	试验准备
速度面积法	封闭管道 $v > 0.4 \text{ m/s}$ 流速仪 $v > 1.0 \text{ m/s}$ 皮托管 $D > 1.4 \text{ m}$ 和 $d > 14$ 直管 $L/D > 20$ 明渠 $v > 0.4 \text{ m/s}$ 浮标流速仪 $H > 0.8 \text{ m}$ 和 $H/d > 8$ 直管 $L > 3.5 \text{ m}$	流速仪安装孔
压力时间法	$\rho \cdot Q \cdot (dL/A) > 50 \text{ kPa/s}$ 测量断面间的封闭管道 上游 $L/D > 10$ $\Delta L \cdot v > 50 \text{ m}^2/\text{s}$ $\Delta L > 10 \text{ m}$	测压孔
声学法(单通道)	$v > 1.5 \text{ m/s}$, $D > 0.8 \text{ m}$ 直管: 上游 $L/D > 10$	传感器的安装面
声学法(四通道)	直管: 下游 $L/D > 3$	传感器的安装孔
电学法	直管: 上游 $L/D > 10$	法兰接头
容积表法	无条件	定容容器 导流板
热力学法 (间接流量测量)	水头 $> 100 \text{ m}$	探针的安装孔 测温度分布的设备

表 E.1 (续)

方法	管路条件		试验准备
A: 压力水管面积	d : 转轮直径	D : 压力水管直径	
H : 明渠深度	L : 管路长度	Q : 流量	
w : 平均速度	ΔL : 测量断面间距离		
注 1: 7.4.2 中提及效率所用的热力学法可用于计算流量。 注 2: 电磁流量计在安装到管路之前应在实验室中进行标定。 注 3: 可采用一种简单的单道超声测速法, 见 E.2.2。			

E.1.3 流动稳定性

每一个测程中, 只有在流动稳定时流量测量才是有效的。如果发电机功率、净水头和机组转速是缓慢变化的, 即可认为水流是稳定的, 此时需要绘制流量值与时间的关系曲线, 以评估可能存在的脉动特性和程度。

E.1.4 泄漏、渗透和分流

测量断面与相应的基准断面之间应避免存在水流的泄漏、渗透或分流。否则, 应对渗入或漏出的流量以适当的精确度进行单独测量。

如果在测量断面和相应基准断面之间有自由水面(比如, 调压井), 应考虑由于水面波动而引起的测量断面和相应基准断面之间的流量差。

E.2 绝对流量测量方法

E.2.1 一般规定

国际电工委员会标准 IEC 60041 及 ISO 标准等对多种绝对流量测量方法进行了详细的描述, 给出最适合于小水轮机流量测量的方法。

E.2.2 适合小水轮机的声学方法

适用于小水轮机的更简易的声学测量方法如图 E.1 所示。单通道的布置不应用于 C 级验收试验。简化的超声测量技术应经双方同意后才能在验收试验中使用。

采用简化方法的测量精度低于四通双平面的流量计测量。便携式(Strap on types)方法可用于 B 级试验, 应严格遵守操作规范。若想获得精确的试验结果, 需在管路上安装传感器。

超声波流量计在使用前最好按标准 IEC 60193 中描述的原级测量方法进行标定, 标定用的管路系统条件应与流量计工作条件相同。如果超声波流量计永久安装在试验装备上, 应尽可能定期对它进行标定。

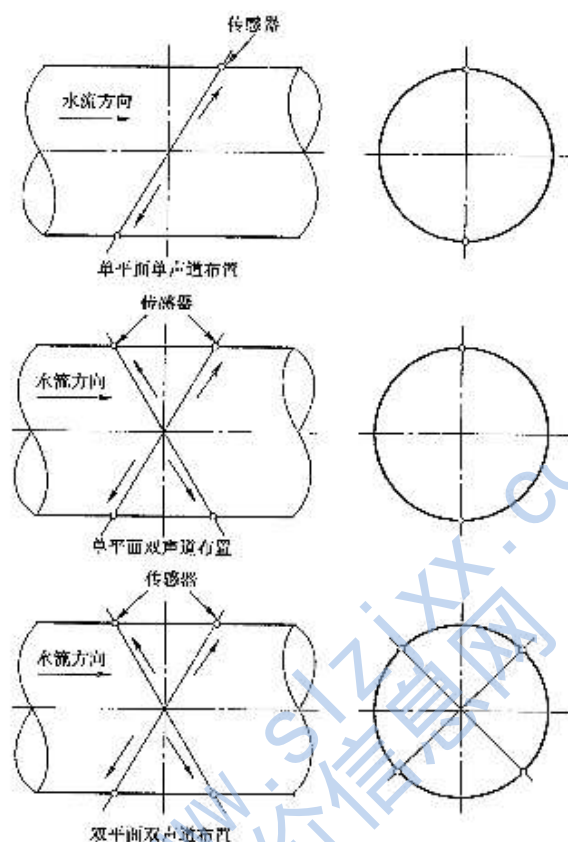


图 E.1 声学传感器的典型布置(小型水轮机)

E.2.3 压力-时间法(Gibson 法)

E.2.3.1 一般要求

压力-时间法是一种经济的、间接测量封闭管道中流量的方法,一般布置如图 E.2。在管道上仔细选择两个断面并设置测压孔,当导叶(或针阀)关闭时测量两个断面之间的压力差,则初始的流量可以通过压力-时间图计算得到,见图 E.3 和图 E.5。在试验前,应按照如下的方法评估试验条件的有效性:

- 在试验之前应排干水轮机和压力管道中的水,冲刷并对所有仪表的管道进行加压试验,以检查所有仪器设备均正常工作且没有发生泄漏。应测量压力管路的几何尺寸,除了表 E.1 中的要求以外,关闭的水轮机内的泄漏量应小于额定流量的 5%;
- 在肘管或者不均匀管路下游,在运行过程中每一个测量断面的压力测点都应与独立的传感器进行比对。管道可以有均匀的断面或不均匀的断面,由于均匀断面的系统和随机误差小于非均匀断面的情况,因此在均匀断面情况下压力-时间法可以用于相对较短的直管条件。在不容易获得均匀测量断面的情况下,若想获得精确的结果,需加长非均匀管路。

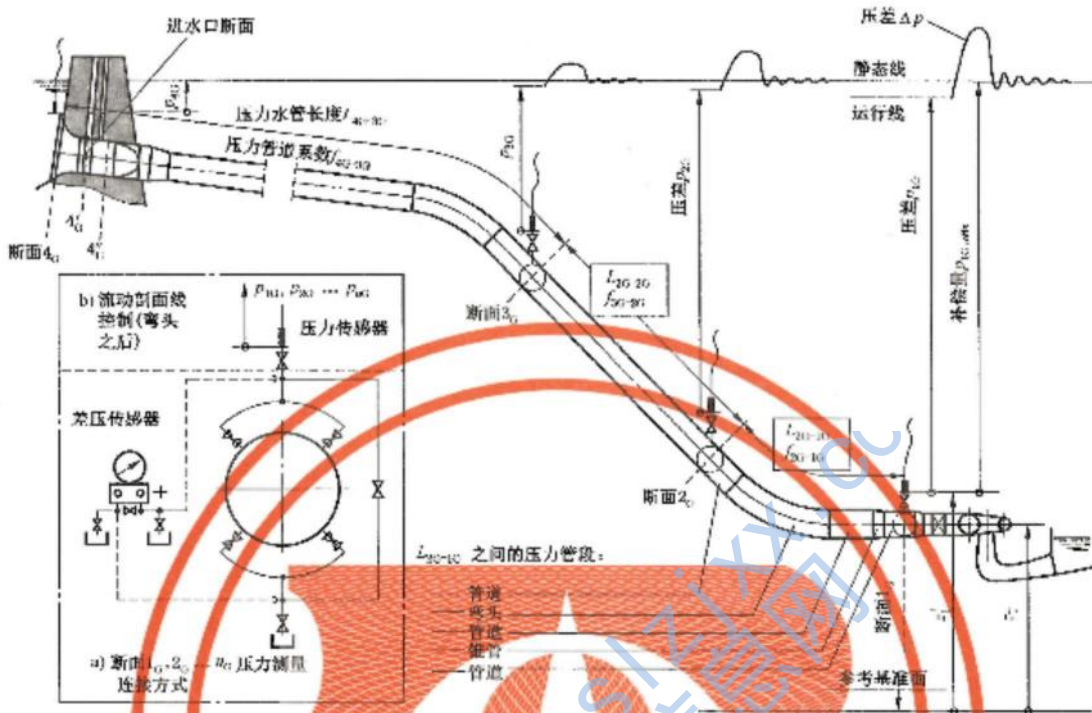


图 E.2 压力时间法的布置

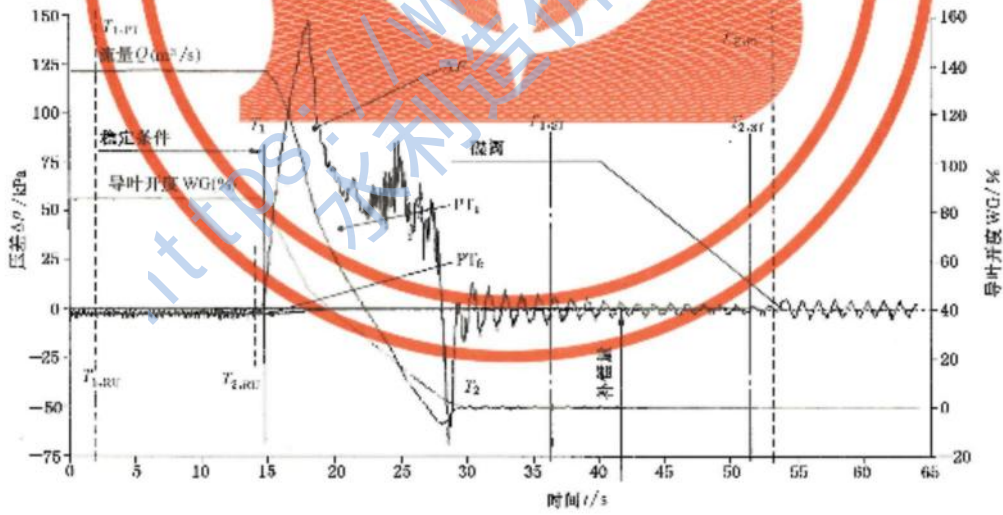


图 E.3 均匀管道采用压力时间法测量示例

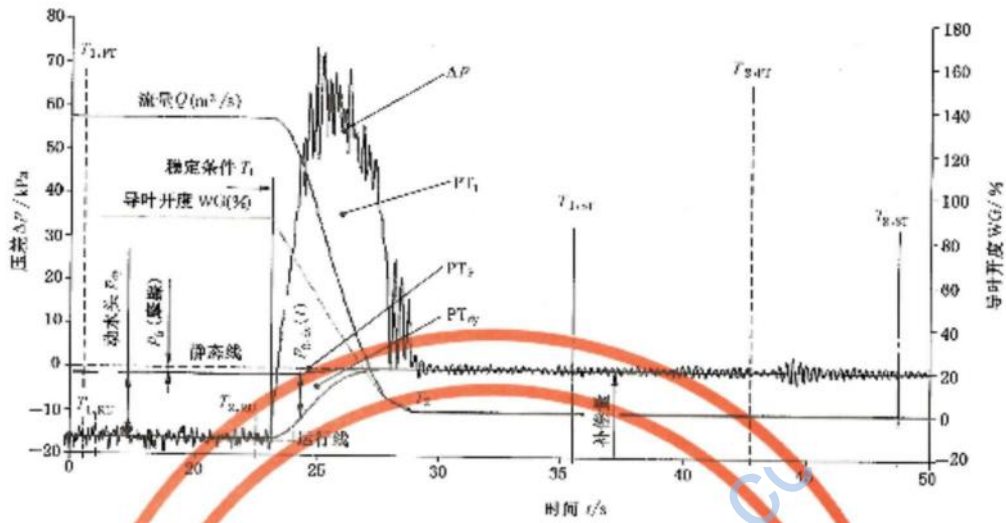


图 E.4 非均匀管道采用压力时间法测量示例

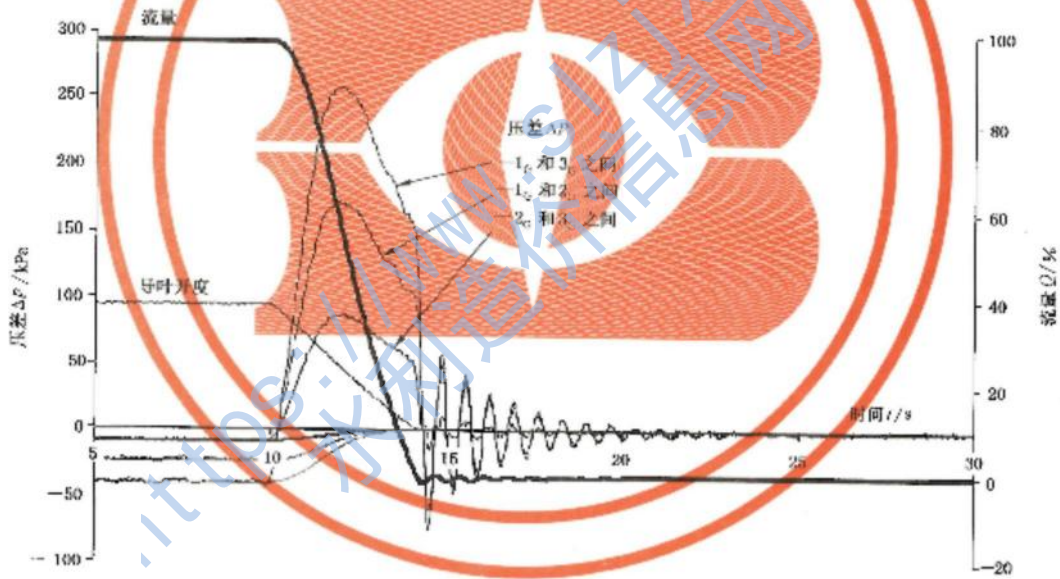


图 E.5 同时具有均匀和非均匀管道截面的利用压力时间法测量示例

E.2.3.2 理论基础

压力-时间法由诺曼·R·吉布森(Norman R.Gibson)于1920年基于伯努利方程(Bernoulli equation)而提出。假设忽略摩擦力且流动不可压缩,可以写出管道中两个断面之间的关系方程:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} - \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + \int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} \times ds$$

对于均匀断面的管路,方程可以变形为: $\frac{p_2 - p_1}{\rho} = \frac{\Delta p}{\rho} = - \int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} \times ds = - L_{2c-1c} \times \frac{\partial v}{\partial t}$

$$\text{积分得到: } \int_{t=T_1}^{t=T_2} \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right) dt = -L_{z_0-z_1} \times \int_{v=v_1}^{v_2} dv$$

$$\text{或者: } \int_{t=T_1}^{T_2} \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right) dt = -L_{z_0-z_1} \times (v_{T_1} - v_{T_2})$$

式中:

v_{T_1}, v_{T_2} —— 在时间 T_1 和 T_2 任意测量断面上的速度;

$L_{z_0-z_1}$ —— 断面 z_0 和 z_1 间的长度。

测量断面 z_0 和 z_1 间的压差随时间的变化。如果假设在导叶关闭前水轮机做稳定运行,且在完全关闭以后水流速度 v_{T_2} 为 0,那么在关闭前 T_1 时刻的初始流量为:

$$Q_{T_1} = v_{T_1} \times A = \frac{A}{L_{z_0-z_1} \times \rho} \times \int \Delta p \times dt \quad \text{.....(E.1)}$$

实际测量时,上式应修正后使用。

在 T_2 时刻之后可能有泄漏流量 Q_{T_2} 通过关闭设备,这部分流量应加到评估的流量值 Q_{T_1} 中。

在测量断面之间有摩擦力损失系数:

$$\frac{p_f}{\rho} = \xi \times \frac{v(t)^2}{2} \quad \text{.....(E.2)}$$

式中:

$v(t)$ 是 t 时间的速度;

ξ 是损失系数。

将以上的修正代入式(E.1)后,得到均匀断面管路中压力时间的方程如下:

$$Q_{T_1} = \frac{\bar{A}}{L_{z_0-z_1} \times \rho} \times \int (\Delta p + p_f) \times dt + Q_{T_2} \quad \text{.....(E.3)}$$

式中:

\bar{A} 是断面 z_0 和 z_1 之间的平均面积。

压力管道因数 $f_{z_0-z_1}$ 是压力管路的几何关系,对于均匀断面管路可以根据下式计算:

$$f_{z_0-z_1} = \frac{L_{z_0-z_1}}{\bar{A}}$$

将压力管道因数代入式(E.3),得到均匀断面管路的方程:

$$Q_{T_1} = \frac{1}{f_{z_0-z_1} \times \rho} \times \int (\Delta p + p_f) \times dt + Q_{T_2}$$

考虑到关闭前的状态是稳定的,积分应从时刻 $T_{1,PT}$ 开始至 $T_{2,PT}$ 以,积分形式的压力时间关系为:

$$PT = \int_{T_{1,PT}}^{T_{2,PT}} (\Delta p + p_f) \times dt$$

流量通过以下公式计算: $Q = \frac{PT}{f_{z_0-z_1} \times \rho} + Q_{T_2}$

对于非均匀管道可以采用类似的表达式计算管道因数:

$$f_{z_0-z_1} = \int \frac{dL_i}{A_i} \quad \text{或者} \quad f_{z_0-z_1} = \sum \left(\frac{L_i}{A_i} \right)$$

式中:

—— A_i 是子断面面积;

—— L_i 是子断面的中心线长度。

计算非均匀压力管的管道系数的例子见表 E.2。

对于非均匀断面,断面之间的动水头差(dynamic head difference)应包含在 p_f 项中,因此式(E.2)可化为:

$$\frac{P_2}{\rho} = \xi \times \frac{v_1(t)^2}{2} + \frac{v_2^2(t) - v_1^2(t)}{2}$$

$v_1(t)$ 和 $v_2(t)$ 是 t 时刻断面 1₁ 和 2₁ 的速度,由下式给出:

$$v_1(t) = \frac{Q(t) + Q_{r2}}{A_{11}}$$

$$v_2(t) = \frac{Q(t) + Q_{r2}}{A_{21}}$$

E.2.3.3 泄漏流量的计算

若关闭设备(导叶或喷嘴)密封不严,需测量泄漏流量。一旦水轮机闸门关闭就可按如下方法测量:

- 关闭进水泵,测量水头随时间的变化;
- 关闭水轮机进水阀门,根据吉布森积分计算流量。

若水轮机需要在闸门关闭后保持同步转速运行,则泄漏流量可由模型试验结果评估得到。

注:导叶泄漏可以通过测量导叶间隙确定总泄漏面积,并以此计算泄漏流量。泄漏流动的速度为:

$$Q_{l2} = 0.1 \times \text{area} \times \sqrt{2gH}, \text{ 式中 } H \text{ 是通过导叶的水头。}$$

E.2.3.4 系统不确定度的评定

流量测量的系统不确定度可用以下列出的方法进行评定。如果评定在试验前进行,试验各方可选择接受或拒绝此方法。

系统不确定度评定需要以下参数:

- 压力管道因数评估(见表 E.2);
 - PT 预期计算: $PT = Q \times f_{L/A} \times \rho$;
 - 测量断面间摩擦损失和动水头,从压力水管设计计算中得到的;
 - 在关闭过程中,最大压力上升的第一近似值可估算为 $\Delta p_{max} = PT/t_{sh} \times 2.3$ 。
- 测量断面位置可以在这个过程中确定。要求如下:

a) 几何尺寸

压力管道的几何尺寸从合格的设计图纸中得到。长度在中心线上测量得到,如果断面不均匀则管径取平均直径。 L/A 的系统不确定度是测量断面间长度之和。

对于不同的断面,推荐管道因数如下:

- 喇叭口: $f_{L/A} = \pm 5\%$ 到 20%
- 管道由矩形变圆形: $f_{L/A} = \pm 1.0\%$
- 弯头: $f_{L/A} = \pm 1.0\%$
- 圆锥管: $f_{L/A} = \pm 0.5\%$
- 直管: $f_{L/A} = \pm 0.3\%$

每个子段的相对不确定度用下式计算:

$$\Delta f_{max} = \frac{\Delta L/A}{\sum(L/A)} f_{at/A}$$

表 E.2 给出了系统不确定度的计算过程。

$$f_{total} = \pm 0.65\%$$

这种评估在所有测量断面间做出。

b) 稳态条件的 L/A

- 静态线(零点校准);
- 在试验前后都应通过补偿进行零点校准,每次试验之后应比较补偿量;
- 零压力处得系统不确定度 $f_{sh} = 0.15\%$;

- 以压力变化表达瞬变线 $f_{\text{瞬}} = 0.35\%$ 。
- c) 瞬态条件的(关闭过程)
- 流动分布(flow profile)的改变；
- 从 $T_{1,PT}$ 到 $T_{2,PT}$ 积分得到压力时间图；
- 压力噪声、滤波、设置积分边界 $f_{\text{IT}} = 0.3\%$ 。
- d) 动水头的不确定度

动水头 p_{dyn} 对压差 Δp_{max} 的比率。这主要是由阀门关闭时流动分布的变化所引起,对结果会有很大影响。

假设 p_{dyn} 占到压差 Δp_{max} 的 20%, 那么 $f_{\text{dyn}} = 1.0\%$
 $\Delta p_{\text{max}} = 72 \text{ kPa}$ 且 $p_{\text{dyn}} = 14 \text{ kPa}$ $f_{\text{dyn}} = \pm 0.97\%$

- e) 摩擦水头的不确定度

摩擦水头 p_{fr} 对压差 Δp_{max} 的比率。
 假设 p_{fr} 占到压差 Δp_{max} 的 20%, 那么 $f_{\text{fr}} = 1.0\%$
 $\Delta p_{\text{max}} = 72 \text{ kPa}$ 且 $p_{\text{fr}} = 4 \text{ kPa}$ $f_{\text{fr}} = \pm 0.28\%$

- f) 压力传感器和数采系统(分辨率 $\geq 16 \text{ bit}$)

线性度、磁滞、低热漂移和动态特性 $f_{\text{lin}} = \pm 0.10\%$

- g) 关闭后的导叶泄漏 $f_{\text{leak}} = \pm 0.20\%$

采用压力时间法测量流量的期望不确定度为:

$$f_{\text{Q}} = \sqrt{0.65^2 + 0.15^2 + 0.35^2 + 0.8^2 + 0.97^2 + 0.28^2 + 0.1^2 + 0.2^2} = 1.51\%$$

在测量以后可以用真实数据重复这个过程。

表 B.2 估算压力管道系数并评估系统不确定度

测量断面	子段	压力管道参数			压力管道参数		不确定度	
		ΔL	L_{eq}	A	$\Delta L/A$	$\Sigma L/A$	绝对值	相对值
		m	m	m ²	1/m	1/m	L/A	
						%	%	
1 ₀		0.00	0.00			0.00		
	管道	1.50	1.50	2.54	0.39	0.59	0.3	0.03
	集管	0.80	2.30	2.84	0.28	0.87	0.5	0.03
	管道	3.19	5.49	3.14	1.01	1.68	0.3	0.06
	肘管	7.85	13.34	3.14	2.50	4.38	1.0	0.18
	管路	2.55	15.89	3.14	0.81	5.20	0.3	0.05
2 ₀	管路	18.49	18.49	3.14	5.88	5.88	0.3	0.30
		从 1 ₀ 断面到 2 ₀ 断面		$f_{\text{fr}} = 5.195$	$f_{\text{dyn}} = 0.86$			
3 ₀	管路	4.14	4.14	3.14	1.32	1.32	0.3	0.01
		从 1 ₀ 断面到 3 ₀ 断面		$f_{\text{fr}} = 5.884$	$f_{\text{dyn}} = 0.86$			
	肘管	6.65	10.80	3.14	2.12	3.44	1.0	0.06
	管路	90.00	100.80	3.14	28.65	32.08	0.3	0.26
	辅管	1.40	102.20	4.03	0.35	32.43	0.5	0.03
	管路	1.46	103.66	4.91	0.30	32.73	0.3	0.00
	管路/方管	1.75	105.41	4.91	0.36	33.09	2.0	0.02
	方管	2.10	107.51	6.25	0.34	33.42	1.0	0.01
	喇叭口	1.70	109.21	8.04	0.21	33.63	20.0	0.13
4 ₀			从 1 ₀ 断面到 2 ₀ 断面		$f_{\text{fr}} = 33.633$	$f_{\text{dyn}} = 0.49$		

E.2.3.5 测量步骤

测量断面 l_0 的压力传感器应安装在关闭装置上游。传感器安装高度应参考水轮机中心线进行测量。

注：关闭装置通常是导叶或喷针。若可能，应延长关闭时间以减小压力脉动（水锤）。

连好测量设备以后，测量步骤如下：

- 设定数据的采样率为 50~100 数据点/秒。在整个关闭过程中应采集 250 个~1 000 个数据。应当在导叶（或喷针）关闭前至少 20 s 开始采集数据，并持续到完全关闭 20 s 之后；
- 在每个测量断面，应分别仔细冲洗管连接以检查其功能，并排出空气；
- 机组停机后，应检查导叶或接力器的关闭位置；
- 从所有测压孔处（ p_{m1} 、 p_{m2} 、 p_{m3} ...）获取读数，以保证管道中没有大的压力波动；
- 每个测量断面都应基于 p_{G1} 确定静态线，做出每个测压孔的理论位准点（补偿）；
- 如果吉布森方法用于指数标定，需要至少两个流量值。每个流量点都应从两到三次关机中产生。由于压力脉动在最优输出功率处通常较低，所以在此工况会得到较好结果。部分载荷处的标定应点应避免涡带区；
- 缓慢开启水轮机，持续增加载荷到要求值；
- 调速器应设定到开度限位（不是在负载或转速控制条件下）；
- 在压力水管道中的条件稳定后关闭水轮机；
- 水轮机可保持与电网连接，控制导叶在正常速度下关闭，而不是甩负荷。若采取这种方法，反向功率继电器将暂时停止工作，发电机作为发动机短时运行；
- 测量结束后进行传感器标定，见 d)。

E.2.3.6 流量计算

在计算机中记录并处理传感器测得的压差。可用电脑的计算程序确定运行线（动水头和摩擦水头）、静态线和压力随时间的积分图。

可对结果进行滤波，减小噪声或高频成分。采用平均滤波器的方法，应谨慎使用低通滤波器（实际很少使用）。

如果同时进行不同断面测量，可通过计算不同组合的结果进行交叉检查，见图 E.5。

可采用专门的程序处理最后的积分结果。计算方法、以及所用公式的详细描述应随压力时间图一起给出。报告还应包括包含了所有测量断面和了段图纸的压力管道因数评估，见表 E.2。

E.3 相对流量测量

E.3.1 一般规定

测试中使用绝对流量测量技术并不绝对必要的，相对流量测量足以满足 B 级测试的要求。指效流量是通过压差测量或者二次流量测量方法计算得到。

E.3.2 差压方法

有速度变化的管道中，相对流量可通过测量两个断面间的压差计算得出。最简单情况是采用收缩管道，比如水轮机进水阀上游，如图 E.6 所示。

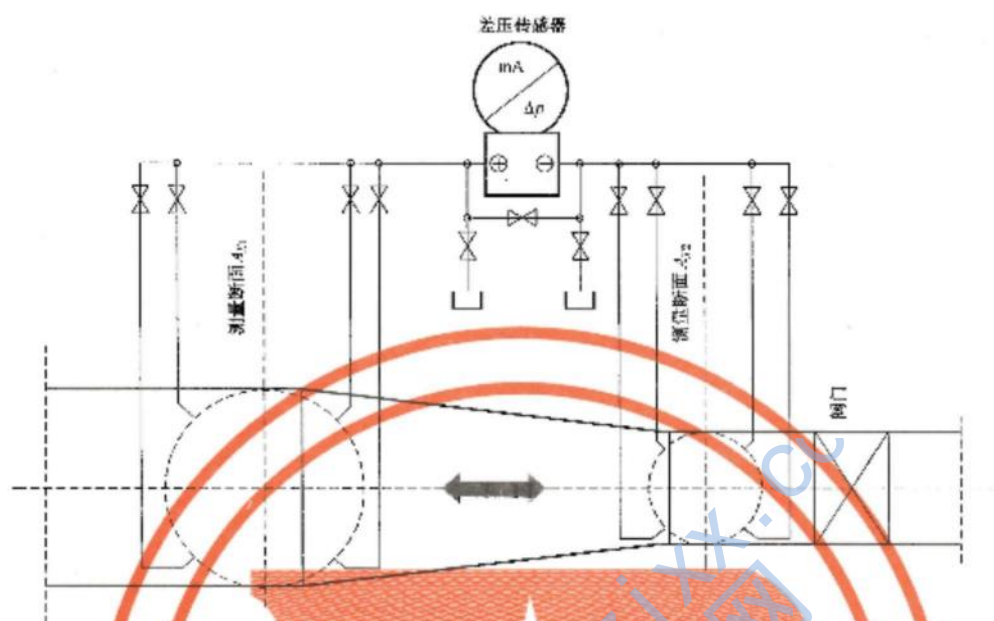


图 E.6 差压法测流量测压孔的布置

灯泡贯流式水轮机的指数流量可用压差法测量,测压孔布置如图 E.7 所示。

高压测压孔布置在灯泡体的流动停滞点;低压测压孔直接布置在导叶上游壁上,且使导叶达到最大开度时预留足够空间,测压孔应远离导叶进水边有足够距离。

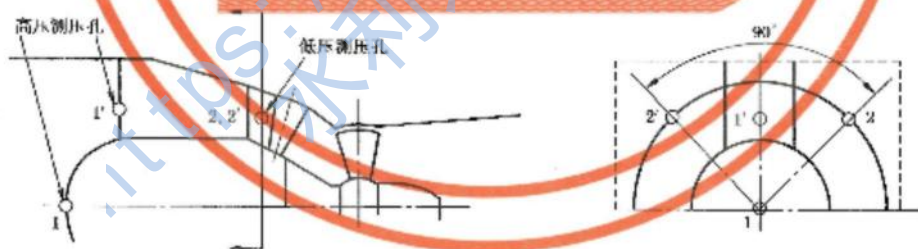


图 E.7 灯泡贯流式机组中差压法测流量测压孔的布置

水轮机蜗壳中的指数流量可用温特-肯尼迪法测量,测压孔布置如图 E.8 所示。

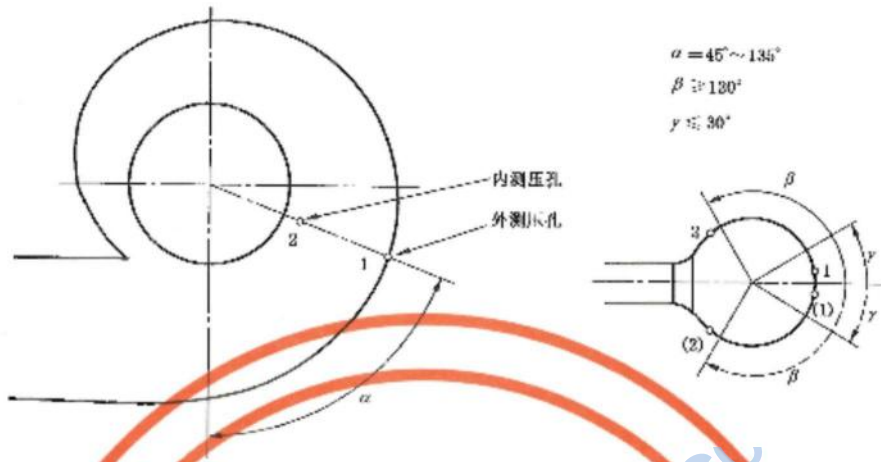


图 F.8 温特-肯尼迪法测金属蜗壳水轮机流量测压孔的布置

E.3.3 流量测量的二次方法

喷嘴行程和流量间的关系可用于水斗式和斜击式水轮机。假如流量/行程特性曲线已在相应的水轮机模型测试中得到,即可用于指数流量测量。在测试中应保证喷嘴、喷嘴、支撑导叶是清洁且完好无损的。

附录 F
(资料性附录)
水电站条件

F.1 水电站条件列单

F.1.1 一般规定

为了电站设计和投标的目的,需方应提供作为保证基础的各种数据和参数。上下游过水流动道通常由需方负责,且应与供方达成一致,并应需要数据列单。

F.1.2 需方提供的数据

- a) 最高/最低/额定上游水库水位;
- b) 最高/最低/额定下游水位;
- c) 可利用的水能:
 - 额定水头和额定流量;
 - 水头流量线(年平均流量历时曲线)。

F.1.3 合同规定水位

- a) 水轮机安装高程;
- b) 防止空化产生的最小允许尾水位;
- c) 尾水管出口的淹没深度;
- d) 尾水管出口至尾水明渠的最小距离;
- e) 允许通风的最高自由尾水位。

F.1.4 水质

- a) 每立方米水中含泥沙/悬浮颗粒的重量(磨损),单位:kg/m³;
- b) 悬浮物(草、水藻、工业垃圾等);
- c) 化学成分;
- d) 水温。

F.1.5 整个过水流动道可预计的水力损失

- a) 引水系统;
- b) 进水口;
- c) 拦污栅;
- d) 压力管道、进水主阀;
- e) 下游过水流动道。

F.1.6 来流条件

在上下游流动道中任何有干扰的流速分布都会对水轮机的效率和装置性能产生明显的影响。因此,在设计流动道时,水轮机高压基准断面 1 和低压基准断面 2 之间的流速分布应符合水轮机供方的要求。特

别是针对低水头水电站的水轮机。

F.2 确定基准高程

由需方确定基准高程,且需要提供以下参数:

- 水轮机安装高程 z_1 ;
- 压力水管进口参考高程 z'_0 ;
- 水轮机进口高压测量参考高程 z'_1 ;
- 水轮机出口低压测量参考高程 z'_2 ;
- 防止空化产生的最小控制尾水位 $z'_{2.1}$;
- 允许通风的最大控制尾水位(水斗式和斜击式) $z'_{2.2}$ 。

F.3 试验仪器设备的技术要求

仪器设备应正确地选择,并适用于下列试验:

- 试运行期间试验:对于测量压力、温度和转速所使用仪表盘和外委商业仪器仪表的精度应小于 $\pm 1\%$;
- 验收试验:对于罚款性测量,参与验收试验的各方应对最大允许测量的不确定度取得一致意见。测量的系统不确定度通过不确定度分析确定,见 3.2。

附录 G

(资料性附录)

调 试

G.1 检查清单

下列清单列出的项目应包含在调试试验中：

- a) 检查所有水力管路并消除任何无关物体，检验所有的测量断面是否处于合适的状态，测压孔是否可用于将来的测量；
- b) 检查备用电源(AC/DC)和电池；
- c) 对所有润滑循环进行压力测试，检查油和油脂的油位、滤油器和过滤系统的情况，检查所有油脂和油路循环是否操作正常；
- d) 检查压力油装置、水力关闭阀、泄压阀和流量控制装置是否运行正常；
- e) 对调速器系统进行压力测试，检查油位、滤油器和过滤系统的情况；
- f) 检查保护装置，如油位、温度报警、调节延时(需要时)；
- g) 测量若干位置的轴承和密封之间的间隙；检查注油系统(如果有)；标定导叶(和/或针阀、转轮叶片、折向器)，包括它们的机械关系；检查相对间隙；
- h) 调整控制单元的无水开关时间(如导叶、针阀、转轮叶片、折向器、泄压阀等)，以及无水运行时的命令信号死区；
- i) 调整主阀或闸的无水开关时间(当不需要水运行时)；
- j) 检查冷却、排水和泵循环，应检查主厂房排水系统；
- k) 检查检修孔是否正确锁上；
- l) 检查启动和关闭时序、人工和自动状态；
- m) 测试电控制和保护回路；
- n) 检查机组刹车系统的操作是否正常。

注：以上检查清单不是详尽清单，可能会有额外的检查或核实项目。

G.2 调试报告

在调试结束之后(见第 5 章、第 6 章)，调试工程师应提供包括以下要点的报告：

- a) 进行的所有几何尺寸测量；
- b) 机组跳闸报警、锁定时间的所有设定值；
- c) 关闭(冷却)设备孔口的所有设定值；
- d) 所有的测试结果，包括：
 - 瞬态压力变化；
 - 过载；
 - 轴承温度；
 - 切断装置的关闭时间；
- e) 所有改进机组操作所需要的图表。

附录 H
(资料性附录)
性能测试效率计算

11.1 一般试验条件

下面的计算示例给出了配备了同步发电机的卧式混流式水轮机等级 A 和等级 B 测试的典型流程。

等级 A 最大输出功率试验

等级 B 温特-肯尼迪法指数试验

11.2 需要满足的保证值

H.2.1 等级 A

在额定净水头 115 m 下,100% 导叶开度时,在功率因数($\cos\phi$)为 1.0 时的最大电站输出功率应不小于 2 870 kW。

H.2.2 等级 B

指数试验结果应表明,在 115 m 额定净水头下机组性能特征的测试值与保证特性曲线一致,相对于保证值的允许偏差(包含了系统和随机不确定度)的特性曲线数据的如表 H.1 所示。

表 H.1 电站相对效率保证

功率 %	额定净水头下的保证性能		允许偏差 $\Delta\eta$ %
	P kW	η_{rel} %	
25	718	84.7	-2.0
50	1 435	77.7	-1.5
75	2 153	85.9	-1.0
87.5	2 511	87.5	-0.8
95	2 727	86.0	-1.5
100	2 870	81.2	-2.0

H.2.3 变压器效率

建议的变压器效率如表 H.2,与变压器损失有关的总不确定度是 10%。

表 H.2 变压器数据

功率 %	P_{em} kW	η_{a} %
25	775	97.7
50	1 550	98.60
75	2 325	98.90

表 H.2 (续)

功率 %	P_{out} kW	η_{G} %
87.5	2 713	98.95
95	2 943	99.00
100	3 100	99.00

H.3 物理常数

常用的物理常数(现场数据)见表 5。

H.4 测量条件

以下测量条件应得到满足：

- 水轮机类型和仪器安装参考图 B.8；
- 在测试之前试验电控信号标定导叶开度,包括闭合和打开的状态；
- 停机时进行零点标定；
- 1号机组和2号机组单独进行测试；
- 试验8个导叶开度,每个开度进行3次独立测量；
- 输出功率在发电机出线端采用三瓦特表法测量,参考图 D.4；
- 功率因数 $\cos\phi$ 自动设为 1.0；
- 没有辅助设备损失, $P_{\text{Loss}}=0$ ；
- 使用毕托管标定数据表,公式 $Q_{\text{ix}}=k \times \Delta p^{\text{ix}}$ 中指数 ix 在 $0.49 < \text{ix} < 0.51$ 的范围变化。指数取为 0.51,对应的系数 k 设为 0.13。

H.5 数据测量与计算

H.5.1 数据测量

以下数据需要测量,表 H.3 给出了数据测量的示例。

- GV —— 导叶开度的电信号；
- P_{gen} —— 发电机出线端的输出功率；
- Δp —— 毕托管测得的压力差,见图 B.9；
- p'_{total} —— 直接从毕托管测得的总压；
- h'_{t} —— 通过安装在尾水上的仪表盘测量测得。

表 H.3 数据测量 (不包括所有试验)

序号		1	2	3	4	5
试验	时间	GV	P_{gen}	Δp	$p'_{1,me}$	h'_2
		%	MW	mbar	kPa	m
zero	10:17	0.0	0.000	0.0	1 134.4	3.30
1a	10:44	22.3	0.428	51.0	1 132.4	3.24
1b	10:47	22.3	0.428	54.2	1 132.4	3.23
1c	10:49	22.3	0.427	54.2	1 132.3	3.24
2a	10:53	31.0	0.840	93.5	1 130.7	3.24
试验 2b 至 7c 的数据略						
8a	11:54	100.0	2.966	615.1	1 112.9	3.06
8b	11:58	100.0	2.988	616.8	1 112.2	3.07
8c	11:58	100.0	2.990	612.3	1 112.3	3.09

H.5.2 数据计算

表 H.4 的例子给出了根据表 H.3 的测量数据计算得到的结果。

计算得到的测试流量应根据保证流量进行标定,以便指数试验曲线和保证效率曲线在最优效率点对应,因此指数试验的比例系数调整为 $k=0.1216$ 。

以试验 8(b)为例,计算如下:

6	Q_{in}		$=0.1216 \times 616.8^{0.51}$	$=3.220 \text{ m}^3/\text{s}$
7	v_1	$=Q_{in}/A_1$	$=3.220/0.503$	$=6.40 \text{ m/s}$
8	v_2	$=Q_{in}/A_2$	$=3.220/1.431$	$=2.25 \text{ m/s}$
9	$h_{1,me}$	$=z'_1 + p'_{1,me}/\rho g$	$=44.37 + 1 112.2/9.808 6$	$=157.76 \text{ m}$
10	$h'_{2,me}$	$=z'_2 - H'_2 + v_2^2/2g$	$=46.02 - 3.07 + 2.25^2/(2 \times 9.808 6)$	$=43.21 \text{ m}$
11	H	$=h_{1,me} - h'_{2,me}$	$=157.76 - 43.21$	$=114.55 \text{ m}$

根据表 H.2,在试验输出功率下变压器效率为 99.0%。

12	$P_{L,0}$		$=2.988 \times 0.01$	$=0.030 \text{ MW}$
13	P_{out}	$=P_{gen} - P_{L,0} - P_{L,0.9}$	$=2.988 - 0.030 - 0$	$=2.958 \text{ MW}$
14	η_{ann}	$=P_{out} \times 10^3 / (H \times g \times \rho \times Q_{in})$	$=2.958 \times 10^3 / (114.55 \times 9.808 6 \times 1 000.4 \times 3.220)$	$=81.72\%$

表 H.4 计算结果

序号		6	7	8	9	10	11	12	13	14
试验	时间	Q_{in}	v_1	v_2	$h_{1,me}$	$h'_{2,me}$	H	$P_{L,0}$	P_{out}	η_{ann}
		m^3/s	m/s	m/s	m	m	m	MW	MW	$\%$
zero	10:17	0.000	0.00	0.00	160.02	42.72	117.30	0.000	0.000	
1a	10:44	0.903	1.80	0.63	159.82	42.80	117.02	0.013	0.415	40.03
1b	10:47	0.932	1.85	0.65	159.82	42.81	117.01	0.013	0.415	38.81
1c	10:49	0.932	1.85	0.55	159.81	42.80	117.01	0.013	0.414	36.72

表 H.4 (续)

序号	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
试验	时间	Q_{th} m ³ /s	v_1 m/s	v_2 m/s	$h_{1,th}$ m	$h_{2,th}$ m	H m	$P_{L,th}$ MW	P_{th} MW	η_{th} %
2a	19:53	1.250	2.45	0.86	159.55	42.82	115.83	0.019	0.821	58.21
8a	11:54	3.216	6.39	2.25	157.83	43.22	114.61	0.030	2.936	81.19
8b	11:58	3.220	6.40	2.25	157.78	43.21	114.55	0.030	2.958	81.72
8c	11:59	3.208	6.38	2.24	157.80	43.19	114.61	0.030	2.960	82.04

H.6 不确定度

H.6.1 合成不确定度

以下规则用于确定合成不确定度：

$$a) \quad \eta = \frac{P}{\rho R H Q}$$

$$b) \quad H = \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2g}$$

$$c) \quad P_R = P_L \left(\frac{H_R}{H} \right)^{1.5}$$

$$\text{确立: } f_{\eta} = \sqrt{f_p^2 + f_H^2 + f_Q^2}$$

$$\text{确立: } f_H = \frac{e_H}{H} = \frac{\sqrt{e_p^2 + e_v^2}}{H} \quad \text{其中 } e_v = \frac{v}{g} f_{v^2}$$

$$\text{确立: } f_{P,R} = \sqrt{f_{P,L}^2 + (1.5 f_H)^2}$$

H.6.2 随机不确定度

每次试验运行时采集的数据用于计算随机不确定度和绘制趋势图(见 9.3.1)。如果随机不确定度大于 0.1%，试验应重做。水头和功率的随机不确定度假定为 0.1%。

H.6.3 随机和总不确定度

H.6.3.1 水头

从图 27 中得到的计算传感器测量上游压力的总不确定度如下(包括了速度分量的不确定度)：

$$\text{上游压力读数} \quad H_{1,th} = 112.27/9.8086 = 113.4 \text{ m}$$

$$\text{对于 } v = 6.4 \text{ m/s 且 } H = 113.4 \text{ m} \quad f_{H_{1,th}} = \pm 0.22\%$$

$$\text{上游压力读数误差} \quad e_{H_{1,th}} = 113.4 \times 0.22\% = 0.249 \text{ m}$$

计算用压力表测量下游压力的总不确定度与 9.4.2.1 中的不确定度类似：

$$\text{安装基准高程的误差} \quad e_{z_2} = \pm 0.010 \text{ m}$$

$$\text{压力表的误差} \quad e_{H_2} = \pm 0.012 \text{ m}$$

已经计入下游速度水头的误差。

注：在本例中，由于使用毕托管进行压力测量，因此不需要考虑上游的速度水头，因为在测压点的流速为 0。

$$\text{指数流量的总不确定度(见图 28)} \quad f_{Q,th} = \pm 0.32\%$$

$$\text{速度水头分量的误差} \quad e_{v,th} = \frac{v^2}{g} f_{v^2}$$

$$\text{速度水头的误差} \quad e_{z,th} = \frac{2.25^2}{9.8086} \times 0.0032 = \pm 0.0016 \text{ m}$$

水头测量的总不确定度

$$f_u = \frac{\sqrt{0.249^2 + 0.010^2 + 0.020^2 + 0.0016^2}}{157.76 - 43.21} = \pm 0.22\%$$

H.6.3.2 输出功率

水电站的输出功率通过测量发电机出线端的功率间接计算得到,从发电机输出功率中减去变压器的损失就是输出功率,不包含辅助设备的损失。

测量发电机输出功率的系统不确定度

— 数字功率表(功率分析仪)	$f_{PM} = \pm 0.20\%$
— 电压互感器	$f_{VT} = \pm 0.30\%$
— 电流互感器	$f_{CT} = \pm 0.30\%$

发电机输出功率的系统不确定度 $f_{P,gen,sp} = \pm \sqrt{0.0020^2 + 0.0030^2 + 0.0030^2} = \pm 0.47\%$

发电机输出功率的随机不确定度 $f_{P,gen,ra} = \pm 0.10\%$

发电机输出功率的总不确定度 $f_{P,gen} = \pm \sqrt{0.0047^2 + 0.0010^2} = \pm 0.48\%$

发电机输出功率的测量值 $P_{gen} = 2988 \text{ kW}$

发电机输出功率的测量误差 $e_{P,gen} = 2988 \times 0.0048 = 14.3 \text{ kW}$

变压器损失 $P_{trans} = 30 \text{ kW}$

变压器损失计算的总不确定度 $f_{L,t} = \pm 0.33\%$

变压器损失的计算误差 $e_{L,t} = 30 \times 0.1 = 3.0 \text{ kW}$

电站输出功率的总不确定度 $f_{P,meas} = \pm \frac{\sqrt{e_{P,gen}^2 + e_{L,t}^2}}{P_{gen} - P_{trans} - P_{L,t}}$
 $= \frac{\sqrt{14.3^2 + 3.0^2}}{2988 - 30} = \pm 0.49\%$

输出功率应换算到额定水头,参考 8.2.3,以确保值对比,因此电站输出功率的总不确定度还应包括水头的测量不确定度。

电站输出功率的总不确定度 $f_{P,meas,R} = \pm \sqrt{f_{P,meas}^2 + (1.5 \times f_H)^2}$
 $= \pm \sqrt{0.0049^2 + (1.5 \times 0.0022)^2} = \pm 0.59\%$

II.7 试验结果和保证值的比较

II.7.1 等级 A: 发电机最大输出功率

试验 Sa 到 8c 测得的平均电站输出功率和平均净水头为: $H = 114.59 \text{ m}$ $P_{out,av} = 2.952 \text{ MW}$

将测量结果换算到额定水头下: $H = 115.00 \text{ m}$ $P_{out,R} = 2.967 \text{ MW}$

额定水头下电站保证输出功率: $H = 115.00 \text{ m}$ $P_{meas,R} = 2.870 \text{ MW}$

结论:

- 测量得到的输出功率比规定的保证值高 +3.4%;

- 电厂装置输出功率的测量不确定度是±0.56%；
- 最大发电机输出功率满足保证要求。

H.7.2 等级 B: 水轮机特性曲线形状控制

从 1a 到 8c 的测试结果和保证值数据对比绘制成图(见图 H.1), 保证值数据来自实际测量水头下水轮机特性曲线(见图 19)。

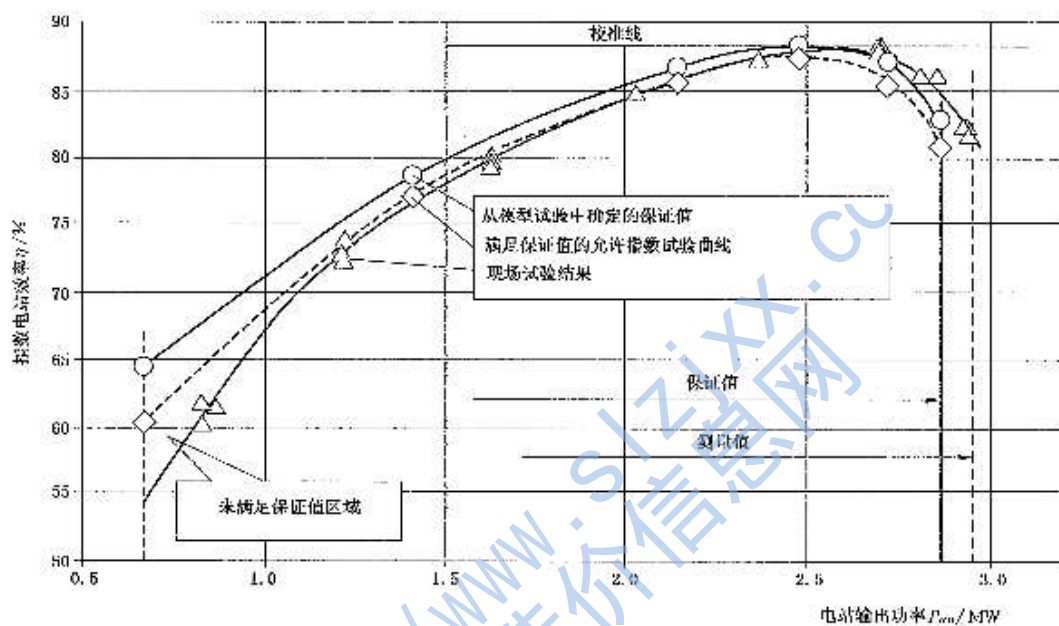


图 H.1 相对效率测量值和保证值的比较

满负荷工况的曲线形状说明水轮机的性能比预期的要好, 在部分负荷工况测量值小于保证值。

将保证值变化±3%(见 8.1.4 和图 20), 曲线的大部分可到达保证值。如果满负荷时的增益能够弥补部分负荷的损失, 则可认为满足了保证, 这需要得到双方的一致同意。

附录 I
(资料性附录)
协联关系试验

I.1 概述

对于双调节水轮机,需要采用一套合适的程序(类似于指数试验)来验证其协联关系。本试验的目的是关联导叶开度和转轮叶片角度之间的关系,以获得机组的最佳性能。

一般情况下,最优的协联关系随着水头而变化。如果电站是设计在较宽的运行水头范围之内,那么需要三维协联关系(转轮叶片角度、导叶开度和水头)。

协联关系由模型试验的结果确立,应在现场试验中检验,因为模型试验往往不具备现场的人流条件。

I.2 试验程序

试验应依照以下程序进行:

- a) 机组应开机运行直到所有温度记录仪器显示温度达到稳定时才能开始测量;
- b) 主要的程序是:设定转轮叶片角度,并逐步调整导叶角度,可得到单个桨叶角的相对效率曲线,如图 I.1;
- c) 在开始试验之前,应按照下列步骤调节测量指数流量的差压传感器:
 - 设定水轮机至 75% P_{max} 出力工况点,测量 P_{m} 和 H 的绝对值;
 - 根据输出功率和水头的运行特性曲线确定指数流量 Q_{m} ,确定系数和指数;
- d) 试验应在固定的时间间隔内进行,方法如下:
 - 设定水轮机第一个转轮叶片角度,如 $RB=20\%$ 且 $GV=37\%$,协联工况;
 - 调整调速器至辅助控制,人工分别调整导叶和桨叶角的位置;
 - 减少导叶开度 6% 至 $GV=31\%$,非协联工况;
 - 重复上述过程 5 次~7 次,直至桨叶曲线达到最优;
 - 达到水力稳定状态;
 - 进行需要的测量并记录;
 - 增大导叶开度至下一个位置,即增加 2% 至 $GV=33\%$;
- e) 重复步骤 d) 测量 6 个~8 个转轮叶片角度,方法如下:
 - 调整调速器至自动控制,协联;
 - 设定转轮叶片至下一个角度,如 30%。

在试验完成后,调速器应返回至自动控制状态。

转轮桨叶角度和导叶开度的最佳协联应是效率线峰值的包络线,见图 I.1。

对于桨叶开度 $RB=55\%$,对应于导叶开度 $GV_{\text{opt}}=62\%$ 。

利用现场测试结果调整其他试验水头的模型预期值,可建立新的三维协联关系 $GV=f(RB, H)$,见图 I.2。

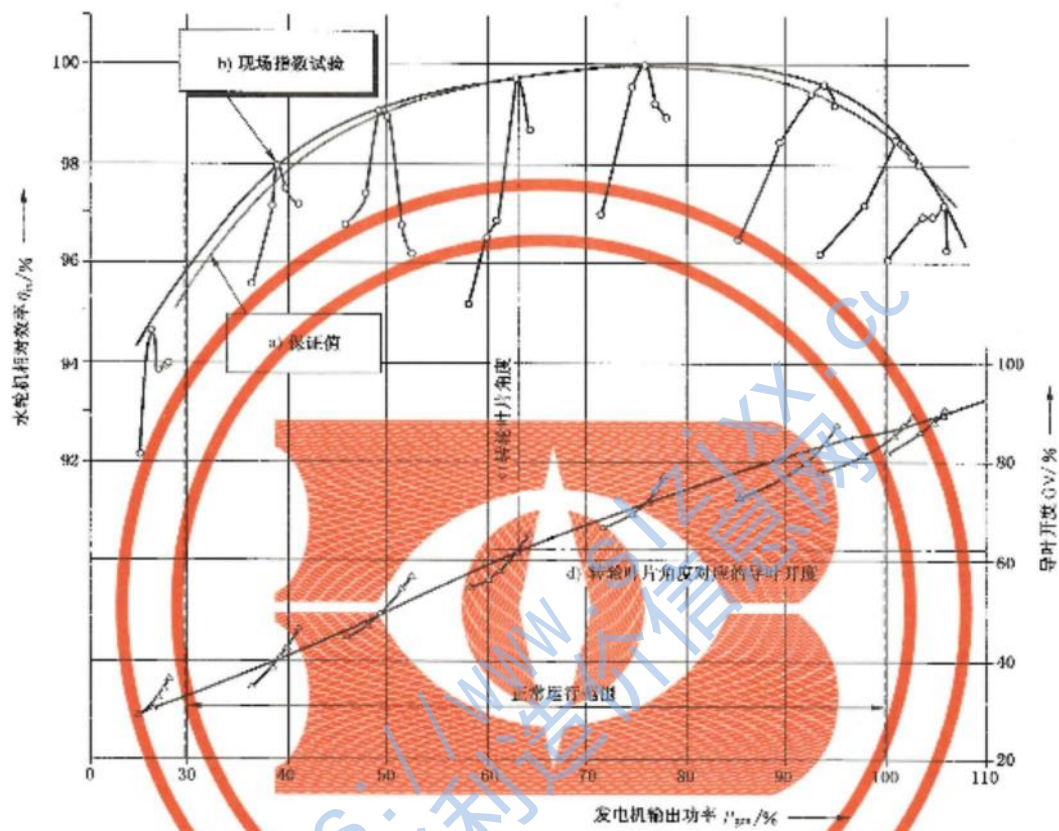


图 1.1 优化效率的指数测量

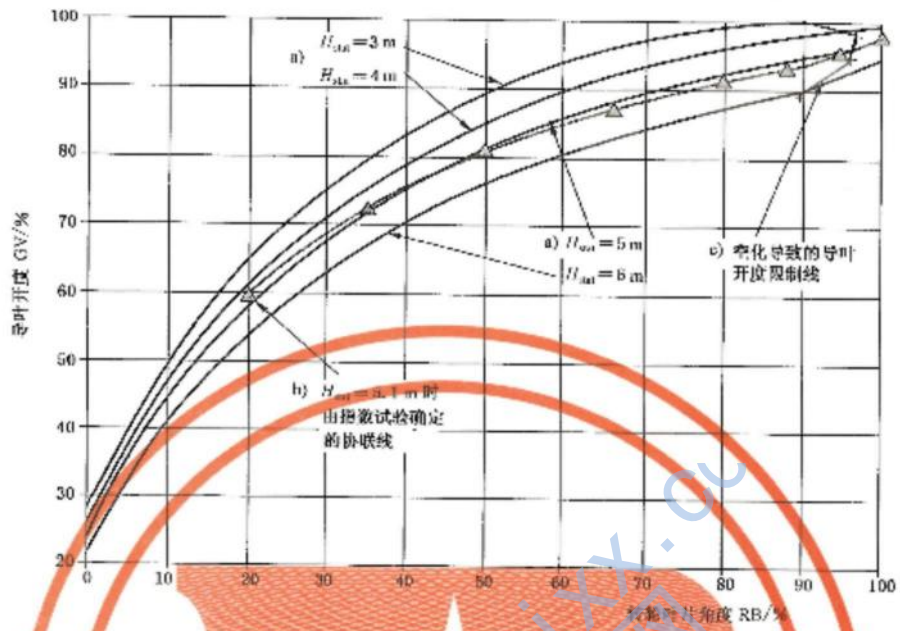


图 1.2 三维协联关系