



中华人民共和国国家标准

GB/T 15468—2020
代替 GB/T 15468—2006

水轮机基本技术条件

Fundamental technical requirements for hydraulic turbines

2020-06-02 发布

2020-12-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 技术要求 14

5 性能保证 21

6 水轮机控制系统基本功能 23

7 供货范围和备品备件 24

8 资料与图纸 25

9 工厂检验及试验 26

10 铭牌、包装、运输及保管 29

11 安装、运行、维护及验收试验 30

附录 A（规范性附录） 反击式水轮机效率修正公式 32

附录 B（规范性附录） 冲击式水轮机效率修正公式 34

附录 C（规范性附录） 主轴相对振动位移峰-峰值推荐评价区域 37

附录 D（资料性附录） 水轮机设备基本配置的仪表 38

附录 E（资料性附录） 水轮机备品备件表 39

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 15468—2006《水轮机基本技术条件》。本标准与 GB/T 15468—2006 相比,主要技术变化如下:

- 修改和补充了术语、定义和符号,与国际标准及国内相关标准相适应(见第 3 章,2006 年版的第 3 章);
- 增加了过渡工况,对技术要求进行了细化,(见 4.2.2.3、4.2.2.5、5.4.1 和 5.9,2006 年版的 4.2.2.3、4.2.2.6、5.5.1 和 5.9);
- 修改了混流式水轮机稳定运行范围,在本标准推荐的稳定运行范围之内,水轮机可以安全稳定运行;如果要求超出运行范围,应该对机组运行条件进行研究,并进行专门的水力开发和结构设计,稳定运行范围可由供需双方商定(见 5.5.1,2006 年版的 5.4.2)。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国水轮机标准化技术委员会(SAC/TC 175)归口。

本标准起草单位:哈尔滨电机厂有限责任公司、中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司、东方电气集团东方电机有限公司、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、中国水利水电科学研究院水力机电所、哈尔滨大电机研究所、中国长江电力股份有限公司、三峡机电工程技术有限公司、中国长江三峡集团有限公司、水电水利规划设计总院、中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司、国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院、国网湖南省电力公司电力科学研究院、大唐云南发电有限公司、重庆水轮机厂有限责任公司、云南大唐国际李仙江流域水电开发有限公司。

本标准主要起草人:宫让勤、武赛波、曾明富、陈顺义、覃大清、彭忠年、钟苏、姜德政、刘洁、戴康俊、易忠有、韩伶俐、何佳、卜良锋、朱惠君、陈丁、潘罗平、吴炜、黄靖乾、张恩博、田海平、耿在明、戴江、王建明、傅之跃、王伦其、贾玉峰、黄波、刘诗琪。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 15468—1995、GB/T 15468—2006。



引 言

GB/T 15468—2006 实施以来,在我国水电机组的招标、订货、设计、制造等工作中起到了很大作用。近年来,我国水轮机的设计、制造水平有了很大提高,有关标准也发生了变化。为适应水电建设的需要,有必要对 GB/T 15468 进行修订。

本标准是水轮机产品的设计、制造依据,可供水轮机招标、订货使用。当对水轮机产品的性能、结构、运行等方面有其他特定要求时,可在供需双方签订合同的技术文件中商定。

库七七 www.kqqw.com 提供下载



水轮机基本技术条件

1 范围

本标准规定了水轮机产品设计、制造方面的性能保证、技术要求、供货范围和检验试验项目,并提出了其包装、运输、保管和安装、运行、维护应遵守的规定。

本标准适用于符合下列条件之一的水轮机产品:

- a) 额定功率为 10 MW 及以上;
- b) 混流式、冲击式水轮机,转轮公称直径 1.0 m 及以上;
- c) 轴流式、斜流式、贯流式水轮机,转轮公称直径 3.0 m 及以上。

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 191 包装储运图示标志(GB/T 191—2008,ISO 780:1997,MOD)

GB/T 2900.45 电工术语 水电站水力机械设备(GB/T 2900.45—2006,IEC/TR 61364:1999,MOD)

GB/T 3323.1 焊缝无损检测 射线检测 第1部分:X和伽玛射线的胶片技术

GB/T 8564 水轮发电机组安装技术规范

GB/T 9239.1 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(GB/T 9239.1—2006,ISO 1940-1:2003,IDT)

GB/T 9797 金属覆盖层 镍+铬和铜+镍+铬电镀层(GB/T 9797—2005,ISO 1456:2003,IDT)

GB/T 10969 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机通流部件技术条件

GB 11120 涡轮机油

GB/T 11345 焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定

GB/T 11805 水轮发电机组自动化元件(装置)及其系统基本技术条件

GB/T 15469.1 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机空蚀评定 第1部分:反击式水轮机的空蚀评定(GB/T 15469.1—2008,IEC 60609-1:2004,MOD)

GB/T 15613(所有部分) 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机模型验收试验

GB/T 17189 水力机械(水轮机、蓄能泵和水泵水轮机)振动和脉动现场测试规程(GB/T 17189—2017,IEC 60994:1991,MOD)

GB/T 19184 水斗式水轮机空蚀评定(GB/T 19184—2003,IEC 60609-2:1997,MOD)

GB/T 20043 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机水力性能现场验收试验规程(GB/T 20043—2005,IEC 60041:1991,MOD)

GB/T 28546 大中型水电机组包装、运输和保管规范

GB/T 32584 水力发电厂和蓄能泵站机组机械振动的评定

DL/T 443 水轮发电机组及其附属设备出厂检验导则

DL/T 507 水轮发电机组启动试验规程

DL/T 710 水轮机运行规程

JB/T 1270 水轮机、水轮发电机大轴锻件 技术条件

NB/T 47013.2 承压设备无损检测 第2部分:射线检测

NB/T 47013.3 承压设备无损检测 第3部分:超声检测

NB/T 47013.4 承压设备无损检测 第4部分:磁粉检测

NB/T 47013.5 承压设备无损检测 第5部分:渗透检测

NB/T 47013.10 承压设备无损检测 第10部分:衍射时差法超声检测

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)

CCH-70-4 水力机械铸钢件检验规范 (Specification for inspection of steel castings for hydraulic machines)

3 术语和定义

GB/T 2900.45 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 水电站特征水位

3.1.1

校核洪水位 **check flood level of upper pool**

$Z_{FL,max}$

水库遇到大坝的校核标准洪水时在坝前达到的最高水位。即水库在非常运用情况下,允许临时达到的最高洪水位。

注:单位为米(m)。

3.1.2

设计洪水位 **design flood level of upper pool**

$Z_{FL,d}$

水库遇到大坝的设计标准洪水时在坝前达到的最高水位。即水库在正常运用情况下,允许达到的最高水位。

注:单位为米(m)。

3.1.3

正常蓄水位 **normal pool level**

$Z_{PL,n}$

水库在正常运用情况下,为满足发电等兴利要求在供水期开始前允许蓄到的最高水位。

注:单位为米(m)。

3.1.4

死水位 **minimum operation water level**

$Z_{PL,min}$

水库在正常运用情况下,兴利调度允许消落到的最低水位。

注:单位为米(m)。

3.1.5

校核洪水尾水位(最高尾水位) **check flood(maximum) tail water level**

$Z_{TL,max}$

在水电站尾水水尺断面遇到校核洪水时,尾水出口断面处的相应水位。

注:单位为米(m)。

3.1.6

设计洪水尾水位 **design flood tail water level**

$Z_{TL,d}$

在水电站尾水水尺断面遇到设计洪水时,尾水出口断面处的相应水位。

注:单位为米(m)。

3.1.7

设计尾水位 **design tail water level**

$Z_{TL,n}$

确定水轮机安装高程所用的尾水出口断面处的水位。

注:单位为米(m)。

3.1.8

最低尾水位 **minimum tail water level**

$Z_{TL,min}$

在水电站尾水水尺断面最小流量情况下,水轮机尾水出口断面处的水位。

注:单位为米(m)。

3.2 水电站毛水头

3.2.1

最大毛水头 **maximum gross head**

$H_{g,max}$

水电站正常工作期间,进口断面的正常蓄水位和最低尾水位之差。

注:单位为米(m)。

3.2.2

最小毛水头 **minimum gross head**

$H_{g,min}$

水电站正常工作期间,进口断面的最低水位与相应的尾水出口断面的最高水位之差。即水电站上下游水位在一定组合下出现的最小水位高程差。

注:单位为米(m)。

3.3 水轮机水头

3.3.1

水轮机水头 **head**

H

水轮机做功用的有效水头,为水轮机高、低压基准断面的总单位能量。

注:单位为米(m)。

3.3.2

最大水头 **maximum head**

H_{max}

电站最大毛水头减去一台机空载运行时水头损失最小的输水系统总水头损失后的水轮机水头。

注:单位为米(m)。

3.3.3

最小水头 **minimum head**

H_{min}

电站最小毛水头减去本输水系统全部机组发该水头下最大功率时总水头损失后的水轮机水头。

注：单位为米(m)。

3.3.4

加权平均水头 **weighted average head**

H_w

在规定的电站运行范围内,考虑不同功率下运行时间的水轮机水头的加权平均值。

注：单位为米(m)。

3.3.5

设计水头 **design head**

H_d

水轮机最优效率点对应的水头。

注：单位为米(m)。

3.3.6

额定水头 **rated head**

H_r

水轮机在额定转速下,输出额定功率时所需的最小水头。

注：单位为米(m)。

3.3.7

最高瞬态压力 **maximum momentary pressure**

$p_{m \max}$

输水系统中指定部位在过渡过程工况下的最高表计压。

注：单位为帕(Pa)。

3.3.8

最低瞬态压力 **minimum momentary pressure**

$p_{m \min}$

输水系统中指定部位在过渡过程工况下的最低表计压力。

注：单位为帕(Pa)。

3.4 水轮机流量

3.4.1

水轮机流量 **turbine discharge**

Q

单位时间内通过高压基准断面的水的体积。

注：单位为立方米每秒(m^3/s)。

3.4.2

额定流量 **rated discharge**

Q_r

在额定水头、额定转速下输出额定功率时的流量。

注：单位为立方米每秒(m^3/s)。

3.4.3

空载流量 **no-load discharge**

Q_0

在额定转速下水轮发电机组输出功率为零时的流量。

注：单位为立方米每秒(m^3/s)。

3.4.4

单位流量 unit discharge

Q_{11}

在 1 m 水头下,转轮公称直径为 1 m 的水轮机流量。

注：单位为立方米每秒(m^3/s)。

3.5 水轮机转速

3.5.1

额定转速 rated speed

n_r

水轮机按电站设计选定的稳态同步转速。

注：单位为转每分(r/min)。

3.5.2

飞逸转速 runaway speed

n_{run}

水轮机处于失控状态,轴端负荷力矩为零时水轮机的稳态转速。

注：单位为转每分(r/min)。

3.5.3

最高飞逸转速 maximum runaway speed

n_{max}

在规定的运行水头范围内,水轮机处于失控状态,轴端负荷力矩为零时水轮机可能达到的最高稳态转速。

注：单位为转每分(r/min)。

3.5.4

最高瞬态飞逸转速 maximum momentary runaway speed

$n_{R \text{ max}}$

在规定的运行范围内,水轮机处于失控状态,轴端负荷力矩为零时水轮机可能达到的最高瞬态转速。

注：单位为转每分(r/min)。

3.5.5

最高瞬态过速 maximum momentary overspeed

$n_{m \text{ max}}$

在规定的运行范围内,机组突甩负荷后,导叶或折向器(偏流器)按给定的关闭规律关闭过程中机组可能达到的最高转速。

注：单位为转每分(r/min)。

3.5.6

单位转速 unit speed

n_{11}

在 1 m 水头下,转轮公称直径为 1 m 的水轮机的转速。

注：单位为转每分(r/min)。

3.5.7

比转速 specific speed

n_s

在 1 m 水头下,输出功率为 1 kW 时水轮机的转速,按式(1)计算。

$$n_s = \frac{n \times \sqrt{P}}{(H)^{\frac{5}{4}}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

n_s ——水轮机比转速,单位为米千瓦($\text{m} \cdot \text{kW}$);

n ——水轮机转速,单位为转每分(r/min);

P ——水轮机功率,单位为千瓦(kW);

H ——水轮机水头,单位为米(m)。

3.5.8

额定比转速 rated specific speed

n_{sr}

按额定工况参数计算得出的比转速。

注:单位为米千瓦($\text{m} \cdot \text{kW}$)。

3.5.9

最优比转速 optimum specific speed

n_{sd}

按水轮机额定功率、额定转速和设计水头计算得出的比转速。

注:单位为米千瓦($\text{m} \cdot \text{kW}$)。

3.6 水轮机功率

3.6.1

水轮机输入功率 turbine input power

P_h

通过高压基准断面的水流所具有的水力功率。

注:单位为瓦(W)。

3.6.2

转轮输出功率 runner output power

P_m

转轮与轴连接处传递的机械功率。

注:单位为瓦(W)。

3.6.3

水轮机机械功率损失 turbine mechanical power loss

P_{lm}

转动部件与固定部件之间因机械摩擦损失的功率。分为三部分:导轴承、推力轴承(按推力负荷比例分担的部分)和主轴密封损失的机械功率。

注:单位为瓦(W)。

3.6.4

水轮机输出功率 turbine output power

P

主轴输出的机械功率,为转轮输出功率扣除水轮机机械功率损失(P_{lm})后的功率($P = P_m - P_{lm}$)。简称水轮机功率。

注:单位为瓦(W)。

3.6.5

额定功率 **rated power**

P_r

在额定水头和额定转速下水轮机能够连续发出的功率,通常为电站设计或合同规定的水轮机铭牌功率。

注:单位为瓦(W)。

3.6.6

最优工况功率 **optimum operating condition power**

P_{opt}

在最优工况下运行时水轮机的功率。

注:单位为瓦(W)。

3.6.7

水轮机最大功率 **turbine Maximum power**

P_{max}

在规定的运行水头范围内,电站设计或合同规定的最大功率。

注:单位为瓦(W)。

3.6.8

单位功率 **unit power**

P_{11}

在1 m水头下,转轮公称直径为1 m的水轮机功率。

注:单位为瓦(W)。

3.7 水轮机效率

3.7.1

水力效率 **hydraulic efficiency**

η_h

转轮输出功率与水轮机输入功率之比 ($\eta_h = P_m / P_h$)。

3.7.2

机械效率 **mechanical efficiency**

η_m

水轮机输出功率与转轮输出功率之比 ($\eta_m = P / P_m$)。

3.7.3

水轮机效率 **turbine efficiency**

η

水轮机输出功率与其输入功率的比值,按式(2)计算。

$$\eta = (P / P_m) \times (P_m / P_h) = P / P_h = \eta_m \times \eta_h \dots\dots\dots (2)$$

3.7.4

加权平均效率 **weighted average efficiency**

η_w

在规定的运行范围,不同水头发出不同功率时的水轮机效率的加权平均值,按式(3)计算。

$$\eta_w = (W_1 \eta_1 + W_2 \eta_2 + W_3 \eta_3 + \dots) / \Sigma W_i = (\Sigma W_i \eta_i) / \Sigma W_i \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 W_i ——根据电站运行特点确定的水轮机在不同水头、不同功率运行的历时或所能发出电能的权重系数， $\sum W_i = 100$ ，见表 1；
 η_i ——水轮机在各个加权点对应的效率。

表 1 W_i 值

H m	P_r 或 P 相应水头下保证发出的最大功率 kW				
	X_1	X_2
H_1	×	×	×	×	×
H_2	×	×	×	×	×
...	×	×	×	×	×
...	×	×	×	×	×
...	×	×	×	×	×
注 1: H_1 、 H_2 、...为不同的水轮机水头， X_1 、 X_2 、...为额定功率的百分比或相应水头下保证发出的最大功率的百分比。					
注 2: × 为不同水头下不同功率时的加权因子。					

3.7.5

最优效率 optimum efficiency

η_{opt}
水轮机最优工况点对应的效率，即水轮机效率的最大值。

3.8 流道主要尺寸

3.8.1 转轮公称直径

3.8.1.1

(混流式水轮机)转轮公称直径 (Francis turbine)runner nominal diameter

D_1 或 D_2

- a) 转轮叶片进水边正面和下环相交处的直径。见图 1a)中 D_1 ；
- b) 转轮叶片出水边正面和下环相交处的直径。见图 1a)中 D_2 。

注 1: 效率修正采用 D_2 ，其余宜采用 D_1 。
注 2: 单位为米(m)。

3.8.1.2

(轴流式、斜流式和贯流式水轮机)转轮公称直径 (Kaplan、Deriaz and bulb turbine) runner nominal diameter

D_1

转轮叶片轴线处转轮室的内径。见图 1b)、c)和 d)。
注 1: 对于轴流定桨式水轮机，转轮公称直径指水轮机叶片外缘圆柱形转轮室的内径；对于斜流定桨式水轮机，转轮公称直径指水轮机叶片出水边缘对应的转轮室的内径。
注 2: 单位为米(m)。

3.8.1.3

(冲击式水轮机)转轮公称直径 (impulse turbine) runner nominal diameter

D_1

转轮与射流中心线相切的节圆直径。见图 1e)。

注：单位为米(m)。

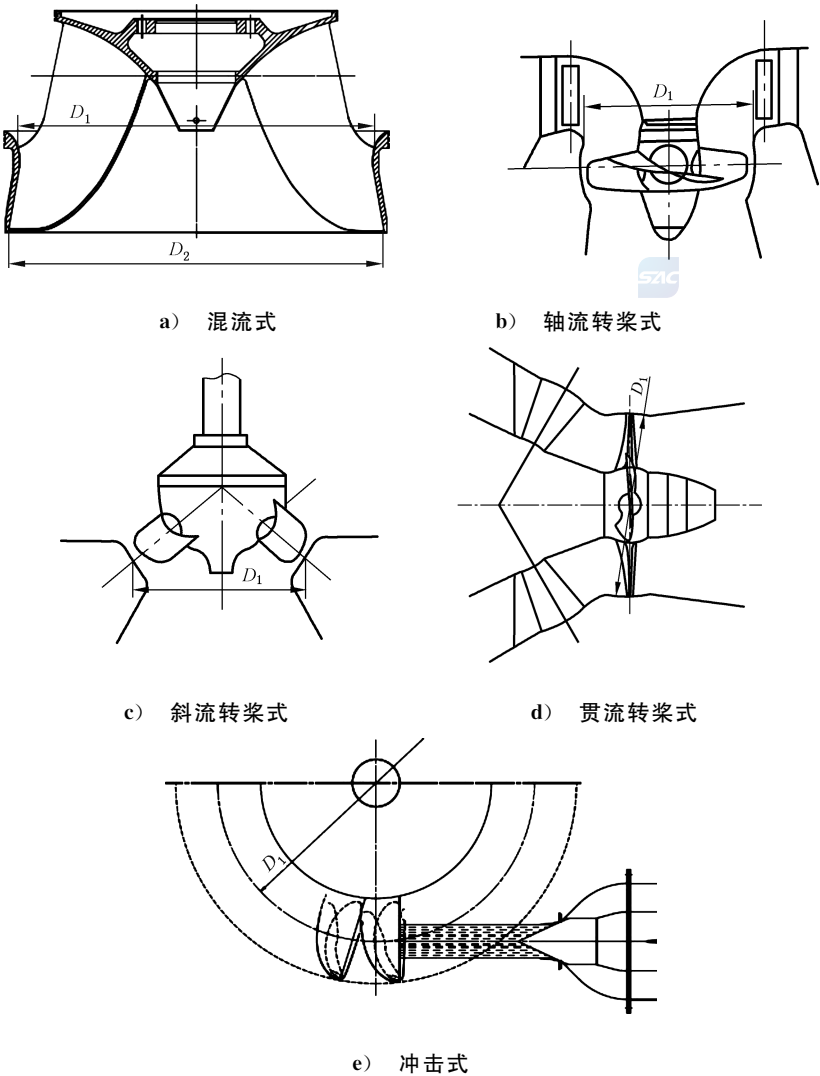


图 1 水轮机转轮公称直径示意

3.8.2

导叶开度 guide vane opening

a_0

相邻导叶中间断面之间的最短距离。

注：单位为毫米(mm)。

3.8.3

导叶转角 guide vane rotating angle

γ

从导叶全关位置开始,导叶转动的角度。

注：单位为度(°)。

3.8.4

叶片转角 **blade angle**

ϕ

转轮叶片从设计规定的位置开始绕其轴线转动的角度。

注：单位为度(°)。

3.8.5

喷针行程 **needle stroke**

s

喷针从全关到开启方向移动的距离。

注：单位为毫米(mm)。

3.9 空化、空蚀、磨损

3.9.1

空化 **cavitation**

在流道中水流局部压力下降到接近气化压力时，水中气核发展成长为气泡，然后在局部压力增高到气化压力以上时这些气泡发生溃灭的过程。

注：空化为气泡的积聚、流动、分裂、溃灭过程的总称。

3.9.2

空蚀 **cavitation erosion**

由于空化造成的过流表面的材料损坏。

3.9.3

泥沙磨损 **sand abrasion**

因水流携带泥沙引起的水轮机通流部件表面的材料损失。

3.9.4

磨蚀 **combined cavitation erosion and abrasion**

在含沙水流条件下，水轮机通流部件表面由泥沙磨损与空蚀联合作用所造成的材料损失。

3.9.5

空化基准面 **cavitation reference level**

工程上确定空化系数所采用的基准面。

注：对于立轴混流式水轮机为导叶中心线的高程；对于立轴轴流转桨式水轮机为转轮叶片轴线处的高程；对于立轴轴流定桨式水轮机为转轮叶片出水边外缘处的高程；对于立轴斜流转桨式水轮机为转轮叶片轴线与转轮叶片外缘交点处的高程；对于立轴斜流定桨式水轮机为转轮叶片出水边外缘处的高程；对于卧轴或斜轴反击式水轮机为转轮叶片最高点处的高程。对贯流机组水轮机也可取转轮室最高点以下 $0.25D_1$ 高程。

3.9.6

水轮机空化系数 **cavitation coefficient of hydraulic turbine**

σ

表征水轮机空化发生条件和性能的无量纲系数。

3.9.7

初生空化系数 **incipient cavitation coefficient**

σ_i

- 在混流式水轮机模型试验中，由目测观察到转轮三个叶片同时出现气泡时的最大空化系数；
- 在轴流和贯流式水轮机模型试验中，由目测观察到转轮一个叶片表面上出现气泡时的最大空化系数。

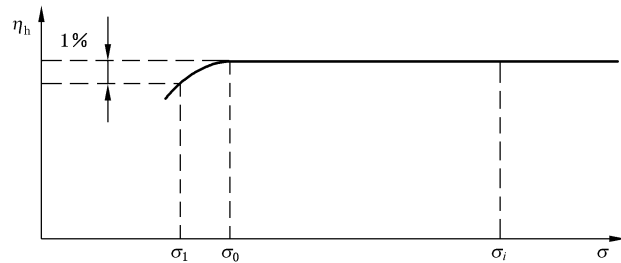
3.9.8

临界空化系数 critical cavitation coefficient

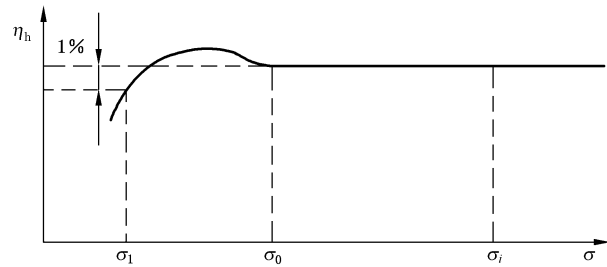
σ_c

与规定的效率下降值相联系的空化系数。

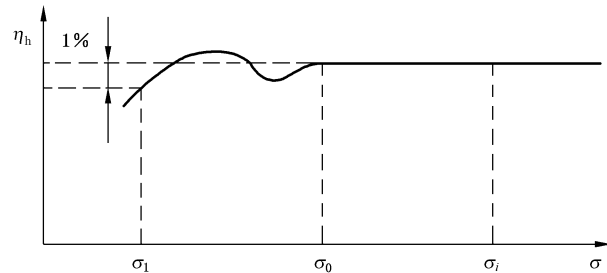
注：可以取 $\sigma_1 \leq \sigma_c \leq \sigma_0$ 。其中 σ_1 为效率下降 1% 时的空化系数， σ_0 为效率开始下降时的空化系数，见图 2。



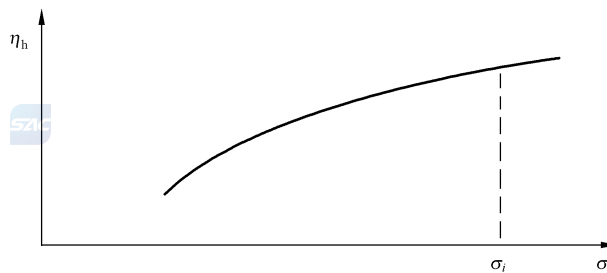
a) 空化系数的第一种取法



b) 空化系数的第二种取法



c) 空化系数的第三种取法



d) 空化系数的第四种取法

图 2 σ_0 、 σ_1 、 σ_i 空化系数的确定

3.9.9

吸出高度 suction head

H_s

水轮机空化基准面至尾水位的高程差。

注：单位为米(m)。

3.9.10

电站空化系数 plant cavitation coefficient

σ_p

在电站运行条件下的空化系数,按式(4)计算。

$$\sigma_p = \frac{p_a / (\rho g) - p_v / (\rho g) - H_s}{H} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

p_a ——水轮机安装高程处的大气压,单位为帕(Pa);

p_v ——水轮机安装高程处平均水温下的汽化压力,单位为帕(Pa);

H_s ——水轮机吸出高度,单位为米(m);

H ——水轮机水头,单位为米(m);

ρ ——水的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

g ——重力加速度,单位为米每二次方秒(m/s^2)。

3.9.11

允许吸出高度 permissible suction head

$H_{\text{sp}}^{\text{er}}$

满足反击式水轮机空化和其他性能要求所需的最大吸出高度。

注：单位为米(m)。

3.9.12

排出高度 discharge height

H_{sd}

立轴冲击式为转轮水平中心线到设计尾水位的高度;卧轴冲击式为转轮节圆直径最低点到设计尾水位的高度。

注：单位为米(m)。

3.9.13

安装高程 setting elevation

Z

水轮机安装时作为基准的某一水平面的海拔高程。

注 1: 立轴反击式水轮机安装时的基准为导水机构水平中心高程;立轴冲击式水轮机安装时的基准为喷嘴中心高程;卧轴水轮机安装时的基准为主轴中心高程。

注 2: 单位为米(m)。

3.10 水轮机试验

3.10.1

模型试验 model test

为预测原型水轮机性能而利用模型水轮机进行的试验。

3.10.2

模型验收试验 model acceptance test

由需方见证、为验证水轮机性能是否达到合同保证和有关标准而进行的模型试验。

3.10.3

比尺 scale ratio

原型转轮公称直径与模型转轮公称直径的比值。

3.10.4

模型综合特性曲线 model hill chart diagram

以单位转速和单位流量为纵横坐标,表示模型水轮机效率等性能的等值曲线。

3.10.5

运转特性曲线 prototype performance curve

绘在以水头和输出功率、水头和流量为纵横坐标系统内,表示在某一转轮直径和额定转速下,原型水轮机的性能(如效率、输出功率、吸出高度、压力脉动等)的等值曲线及功率限制线。

3.11 压力脉动

3.11.1

压力脉动 pressure fluctuation

在选定时间间隔 Δt 内水体压力相对于平均值的往复变化。

3.11.2

压力脉动峰峰值 peak-peak value of pressure fluctuation

ΔH

流道中某特定测点时域压力脉动最大值与最小值的代数差。

注:单位为米(m)。

3.11.3

压力脉动相对值 relative value of pressure fluctuation

$\Delta H / H$

流道中某特定测点时域压力的混频峰峰值与该测量水头之比。见图 3。

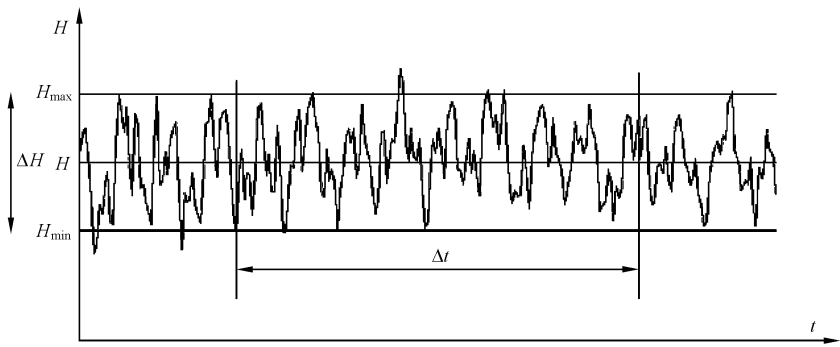


图 3 压力脉动的确定

3.11.4

压力脉动均方根值 root-mean-square value of pressure fluctuation

$(\Delta H / H)_{\text{rms}}$

流道中某特定测点压力脉动平方的平均值的平方根,按式(5)计算。

$$\left(\frac{\Delta H}{H}\right)_{\text{rms}} = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_i - H}{H} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (5)$$

3.11.5

叶道涡 channel vortex

在部分负荷下,发生在混流式水轮机转轮叶片之间流道内的涡流。

3.11.6

叶道涡初生线 initial channel vortex

在电站空化系数下,随着工况的变化,在混流式模型转轮出口同时观测到3个叶道内可见涡流时,相应工况点的连线。

3.11.7

叶道涡发展线 developing channel vortex

在电站空化系数下,随着工况的变化,在混流式模型转轮出口同时观测到全部叶道内可见涡流时,相应工况点的连线。

3.11.8

卡门涡列 Karman vortex street

在一定条件下的定常来流绕过某些物体时,物体两侧周期性地释放出旋转方向相反、排列规则的双列线涡。

4 技术要求

4.1 一般要求

4.1.1 水轮机的设计、制造应根据水电站的特点和基本参数优选水轮机的型式和主要参数,保证水轮机安全、可靠、稳定、高效运行。

4.1.2 水轮机的设计应考虑到水电站厂房布置、安装、运行检修、运输条件、制造能力的要求,以及与水轮发电机、调速器、筒形阀、进水阀等的相互关系。

4.1.3 水轮机产品的技术要求应包括下列水电站参数:

- 校核洪水位,单位为米(m);
- 设计洪水位,单位为米(m);
- 正常蓄水位,单位为米(m);
- 死水位,单位为米(m);
- 校核洪水尾水位(最高尾水位),单位为米(m);
- 设计洪水尾水位,单位为米(m);
- 设计尾水位,单位为米(m);
- 最低尾水位,单位为米(m);
- 尾水位和流量关系曲线;
- 最大毛水头,单位为米(m);
- 最小毛水头,单位为米(m);
- 额定水头,单位为米(m);
- 加权平均水头,单位为米(m);
- 加权因子;
- 过机水质(含沙量、粒径级配、矿物成分、水中含气量、pH值、水温等);
- 气象条件(多年平均气温、极端最高气温、极端最低气温、多年平均相对湿度等);
- 地震设防烈度下相应的地震加速度;
- 运行特点及要求(如调峰、调频、调相以及年平均起停次数等);
- 引水系统参数;

- 台数；
- 单机功率,单位为瓦(W)；
- 单机最大功率,单位为瓦(W)(若有)；
- 水轮机安装高程,单位为米(m)；
- 重力加速度,单位为米每二次方秒(m/s^2)；
- 电网频率,单位为赫兹(Hz)。

4.1.4 水轮机设计应给出其型式、布置方式、型号和以下基本参数：

- 最大水头,单位为米(m)；
- 最小水头,单位为米(m)；
- 额定水头,单位为米(m)；
- 设计水头,单位为米(m)；
- 额定转速,单位为转每分(r/min)；
- 最高飞逸转速,单位为转每分(r/min)；
- 最高瞬态飞逸转速,单位为转每分(r/min)；
- 协联工况最高飞逸转速(适用于双调机组),单位为转每分(r/min)；
- 额定比转速,单位为米千瓦($\text{m} \cdot \text{kW}$)；
- 额定流量,单位为立方米每秒(m^3/s)；
- 额定功率,单位为瓦(W)；
- 最优工况时的功率,单位为瓦(W)；
- 最大功率(若有),单位为瓦(W)；
- 加权平均效率；
- 额定点效率；
- 最优效率；
- 输出最大功率时的最小水头,单位为米(m)(若有)；
- 输出最大功率时的流量,单位为立方米每秒(m^3/s)(若有)；
- 转轮公称直径 D_1 或 D_2 ,单位为米(m)；
- 导叶开度或转角,单位为毫米(mm)或度($^\circ$)；
- 转轮叶片转角范围(适用于轴流式、斜流式和贯流式可调桨水轮机),单位为度($^\circ$)；
- 允许吸出高度(适用于反击式水轮机),单位为米(m)；
- 临界空化系数(适用于反击式水轮机)；
- 初生空化系数(适用于反击式水轮机)；
- 电站空化系数(适用于反击式水轮机)；
- 最高瞬态压力,单位为帕(Pa)；
- 最低瞬态压力,单位为帕(Pa)；
- 最高瞬态过速,单位为转每分(r/min)；
- 射流直径(适用于冲击式水轮机),单位为毫米(mm)；
- 喷针行程(适用于冲击式水轮机),单位为毫米(mm)；
- 每个转轮的喷嘴数(适用于冲击式水轮机)；
- 高度(适用于冲击式水轮机),单位为米(m)；
- 转动惯量,单位为千克平方米($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)；
- 转轮估算质量,单位为千克(kg)；
- 主轴估算质量,单位为千克(kg)；
- 筒形阀总估算质量,单位为千克(kg)(若有)；

——水轮机估算总质量,单位为千克(kg)。

4.1.5 水轮机设计还应给出下列技术文件:

- 模型综合特性曲线;
- 原型运转特性曲线;
- 水轮机模型飞逸特性曲线;
- 导叶开度与接力器行程关系曲线;
- 空载流量与水头关系曲线、空载流量与接力器行程关系曲线;
- 技术保证值(详见第5章);
- 过渡过程计算报告;
- 水轮机基础荷载;
- 水轮机各主要部件的结构和材料说明及现场安装说明;
- 水轮机主要部件的刚强度计算和疲劳分析报告;
- 水轮机各大件的运输、起重限制尺寸和质量;
- 与水轮机配套的调速器、油压装置、自动化系统及筒形阀、进水阀的技术规范和要求(若有);
- 水轮机各大部件运输要求、现场仓储要求;
- 其他技术要求。

4.1.6 反击式水轮机的效率修正按附录 A 中的公式进行修正;冲击式水轮机的效率一般不修正,若需修正则按照附录 B 进行。

4.2 主要部件的结构和材料

4.2.1 结构设计的一般要求

4.2.1.1 水轮机通流部件应符合 GB/T 10969 的要求。

4.2.1.2 水轮机流道的形状和尺寸应结合水电站厂房布置进行设计。

4.2.1.3 反击式水轮机宜在通流部分的适当部位,设置用相对效率法测量相对流量和压力脉动的测点,其位置应与模型相似。

4.2.1.4 水轮机结构应做到便于拆装、维修,方便易损部件的检查和更换。水轮机应保证在不拆卸发电机转子、定子和水轮机转轮、主轴等部件的情况下更换下列零部件:

- a) 水轮机导轴承瓦、冷却器和主轴密封;
- b) 反击式水轮机导水机构接力器的密封及活塞环(组合密封圈及导向带)、传动部件、导叶中轴径密封件及保护元件;
- c) 转桨式水轮机应能在不拆卸转轮叶片的情况下更换转轮叶片的密封零件;
- d) 冲击式水轮机的喷嘴口及折向器或偏流器等;
- e) 对于多泥沙的电站,对水轮机拆修有特殊要求时,按供需双方商定的技术协议或技术条款执行。

4.2.1.5 立轴水轮机轴向间隙应保证在发电机顶转子时转动部分能上抬到所需要的高度。

4.2.1.6 水轮机标准零部件应保证其通用性。如采用摩擦传递扭矩的转轮,以及喷嘴、喷针应能互换。

4.2.1.7 水轮机在最高飞逸转速下允许持续运行时间应不小于配套发电机允许的飞逸时间,并保证水轮机转动部件不产生有害变形且不会引起碰撞及损坏。应设置防止水轮机超过允许飞逸时间的设施。

4.2.1.8 混流式和冲击式水轮机转轮宜采用不锈钢材料制造,轴流式和贯流式水轮机叶片宜采用不锈钢材料制造。水轮机的其他易空蚀部件宜采用抗空蚀材料制造或采取必要的防护措施。若易空蚀部位堆焊不锈钢时,加工后的不锈钢层厚度不应小于 5 mm。

4.2.1.9 水轮机室顶部宜设置起吊设施。

- 4.2.1.10 进行轴系计算时,转轮的质量不平衡量按 GB/T 9239.1 中的 G6.3 级计算。
- 4.2.1.11 转轮应做静平衡试验,静平衡后转轮的质量不平衡量应符合 GB/T 9239.1 中的 G6.3 级的要求。
- 4.2.1.12 水轮机在各种运行工况时,其稀油润滑的导轴承的巴氏合金轴瓦最高温度不应超过 70℃;卧轴水轮机的径向推力轴承轴瓦最高温度不超过 70℃。油的最高温度不超过 60℃。
- 4.2.1.13 反击式水轮机导叶的水力矩在全开附近至空载开口附近间宜有自关闭趋势;导水机构应设可靠的保护装置(如剪断销、摩擦副、限位块等),防止导叶破坏及事故扩大;限位块的设计应具有足够的刚度,宜设置缓冲垫;采用摩擦装置和剪断销联合作用的保护装置,剪断销的破断力不宜小于 1.5 倍的接力器额定操作力作用于剪断销上的力;在全关位置宜设液压和手动锁定装置,在全开位置宜设手动锁定装置。
- 4.2.1.14 活动止漏环与之相应的固定止漏环之间宜有硬度差异。
- 4.2.1.15 水轮机的顶盖排水设备宜一用一备,必要时可一用两备。立轴水轮机的顶盖具备自流排水条件的应设置足够大的自流排水通道。
- 4.2.1.16 反击式水轮机金属蜗壳及座环设计应按单独承受设计压力(蜗壳内的最高瞬态压力)设计。采用混凝土蜗壳的座环设计中应考虑由座环支撑的混凝土重量和其他垂直负荷。冲击式水轮机配水环管设计应按单独承受设计压力(配水环管内的最高瞬态压力)设计。
- 4.2.1.17 卧轴水轮机的蜗壳顶部应设置排气、补气装置。
- 4.2.1.18 水轮机应设置进人门,蜗壳上的进人门不宜小于 $\phi 600$ mm,高水头水轮机蜗壳宜采用内开式进人门,尾水管上进人门尺寸不宜小于 $\phi 600$ mm 或 600 mm \times 600 mm,采用方形进人门时,应防止四角应力集中开裂;进人门的下侧应设验水阀。在进人门处,应进行补强。进人门的位置、数量、尺寸由供需双方商定。
- 4.2.1.19 立轴反击式水轮机尾水管内应设置易于拆装的、有足够承载能力的、轻型检修平台。
- 4.2.1.20 当有调相运行要求时应设置调相压水进排气装置及降低转轮小间隙部位温度的冷却装置。
- 4.2.1.21 水轮机及其辅助设备需进行耐压试验的部件除需在工地组焊的部分外,均需按试验压力在厂内进行耐压试验,耐压试验的压力不宜小于设计压力的 1.3 倍,试压时间应持续稳压 30 min。受压部件不得产生有害变形和渗漏等异常现象。
- 4.2.1.22 反击式水轮机的金属蜗壳和冲击式水轮机的配水管可根据合同要求进行耐压试验。

4.2.2 工作应力和安全系数

- 4.2.2.1 水轮机结构设计中应进行安全性能分析,对经受交变应力、振动或冲击力的零部件,设计时应留有足够的安全余量。在所有预期的工况下,都应具有足够的刚度和强度。
- 4.2.2.2 部件的工作应力可采用经典公式解析计算,也可采用有限元法分析计算,对结构复杂的重要部件宜采用有限元法分析计算。
- 4.2.2.3 水轮机部件的工作应力应按工况分别考核,分为正常工况、过渡工况和特殊工况,其中正常工况是指机组正常工作状态下所发生的各种载荷工况,包括停机、空载、发电、调相等;过渡工况是启动过程、停机过程、甩负荷过程;特殊工况是指打压试验、飞逸、导叶卡阻、导叶保护装置破坏、地震等。
- 4.2.2.4 所有部件的工作应力应不超过规定的许用应力。除转轮和主轴外,其余部件正常工况和过渡工况下采用经典公式计算的断面应力应不大于表 2 规定的许用应力,特殊工况下采用经典公式计算的断面应力应不大于材料屈服强度的 2/3。
- 4.2.2.5 对于承受剪切和扭转力矩的零部件,铸铁的最大剪应力应不超过 21 MPa,其他黑色金属最大剪应力不得超过许用拉应力的 70%,但其中导叶轴的最大剪应力不得超过许用应力的 60%。

表 2 部件正常工况和过渡工况许用应力 单位为兆帕

材料名称	许用应力	
	拉应力	压应力
灰铸铁和球墨铸铁	抗拉强度的 1/10	70
碳素铸钢和合金铸钢	抗拉强度的 1/5 且屈服强度的 1/3	抗拉强度的 1/5 且屈服强度的 1/3
碳钢锻件	屈服强度的 1/3	屈服强度的 1/3
合金钢锻件	抗拉强度的 1/5 且屈服强度的 1/3	抗拉强度的 1/5 且屈服强度的 1/3
主要受力部件的碳素钢板	抗拉强度的 1/4	抗拉强度的 1/4
高强度钢板(抗拉强度≥440 MPa)	屈服强度的 1/3	屈服强度的 1/3
其他材料	抗拉强度的 1/5 且屈服强度的 1/3	抗拉强度的 1/5 且屈服强度的 1/3

4.2.2.6 当无预应力要求时,在正常工况和过渡工况下,由工作载荷引起的螺栓的应力不大于螺栓材料屈服强度的 1/3。

4.2.2.7 除另有规定外,当要求有预应力时,预紧力应不小于正常工况和过渡工况下连接对象的最大工作荷载折算到螺栓轴向荷载的 2.0 倍,螺栓的工作综合应力在正常工况和过渡工况下不大于螺栓材料屈服强度的 2/3,在特殊工况下不大于螺栓材料屈服强度的 4/5。螺栓预紧过程中最大综合应力不得超过材料屈服强度的 7/8,且各螺栓之间的预紧力测量值偏差不得超过设计值的±5%。对顶盖和座环把合螺栓的预紧力取值按机组水头范围划分,在正常工况和过渡工况下应不小于表 3。

表 3 顶盖和座环把合螺栓的预紧力取值

机组最大水头(H_{\max}) m	$H_{\max} < 50$	$50 \leq H_{\max} < 100$	$100 \leq H_{\max} < 300$	$300 \leq H_{\max} < 500$	$500 \leq H_{\max} < 700$
螺栓预紧力与最大工作荷载的倍数	3.8	3.3	2.8	2.3	2.0

4.2.2.8 由有限元方法得到的应力分析,应给出应力分布,宜指出局部应力的部位云图,并提取出部件的平均应力和局部应力,在正常工况和过渡工况下非应力集中处的平均应力不大于表 2 规定的许用应力,局部应力(在考虑过渡圆角情况下有限元的计算结果)不得超过材料屈服强度的 2/3,特殊工况下局部最大应力不得超过材料的屈服强度。对承受交变应力的零部件,应进行疲劳强度核算。

4.2.2.9 混流式水轮机转轮叶片在预期的最大荷载条件下正常运行时,叶片最大应力不应超过材料屈服强度的 1/5;转桨式水轮机转轮叶片在预期的最大荷载条件下正常运行时,叶片最大应力不应超过材料屈服强度的 1/4;在最高飞逸转速时,转轮叶片最大应力不应超过材料屈服强度的 2/5。冲击式转轮在预期的最大荷载条件下正常运行时,用经典公式解析计算转轮各部位最大应力不应超过材料屈服强度的 1/18,用有限元法计算的转轮各部位最大应力不应超过材料屈服强度的 1/9,并应进行疲劳强度核算。

4.2.2.10 主轴最大复合应力 S_{\max} 的定义为: $S_{\max} = (S^2 + 3T^2)^{1/2}$,其值不应超过材料屈服强度的 1/4。式中, S 为由于水力和静载荷引起的轴向应力和弯曲应力的总和; T 为水轮机最大功率时的扭转切应力。按上式计算出最大复合应力 S_{\max} 并计入应力集中后出现的最大应力不应超过材料屈服强度的 2/5。且水轮机在最大功率时主轴扭转切应力不应超过材料屈服强度的 1/6。卧轴水轮机主轴应进行疲劳强度核算。

4.2.3 材料和制造要求

4.2.3.1 水轮机主要结构部件的铸锻件应符合 CCH-70-4 及 JB/T 1270 或合同规定的相应标准。重要铸锻件应有需方代表参加验收。上述标准中认为是重大缺陷的缺陷处理应征得需方同意。

4.2.3.2 经过考试合格并持有证书的焊接人员才能担任主要部件的焊接工作。主要部件的主要受力焊缝应进行 100% 的无损探伤。焊缝检查应符合 GB/T 3323.1、GB/T 11345、NB/T 47013.2、NB/T 47013.3、NB/T 47013.4、NB/T 47013.5、NB/T 47013.10 或合同规定的相应标准。

4.2.3.3 水轮机设备表面应有防锈涂层。并应规定：

- a) 表面处理的要求；
- b) 对漆及其他防护保护方法和其使用说明；
- c) 发运前和在工地时的使用要求；
- d) 涂层数；
- e) 每层膜厚和总厚；
- f) 质量检查和质量控制规定。

对装饰性电镀层应符合 GB/T 9797 的规定。

4.2.3.4 凡是与水接触的紧固件均应采用防锈或耐腐蚀的材料制造或采取相应措施。

4.2.3.5 采用巴氏合金的轴瓦,其与瓦基的结合情况应进行 100% 超声波检查,接触面应不小于 95%,且单个脱壳面积不大于 1%;表面用渗透法探伤应无超标缺陷。

4.3 不同型式水轮机的特定要求

4.3.1 混流式水轮机

4.3.1.1 为保证水电站的安全、稳定、高效运行和转轮等过流部件的寿命,水轮机不宜在保证范围外运行。

4.3.1.2 水轮机在保证范围内运行时,水力激振频率与转轮、活动导叶、顶盖、底环和固定导叶等主要过流部件的固有频率应至少错开 10% 以上。

4.3.1.3 中高水头水轮机可采用从顶盖引取上止漏环的漏水,作为机组冷却用水备用水源。

4.3.1.4 高水头、高转速水轮机结构设计应考虑减少抬机的可能性,应有防抬机措施。

4.3.1.5 水轮机宜设置自然补气装置,或采取其他提高机组运行稳定性的措施。

4.3.1.6 转轮叶片可为铸件或模压成型,叶片宜采用数控加工;水轮机转轮宜采用组焊结构。

4.3.1.7 联轴螺栓的预紧力宜不小于 3 倍的正常工况下最大工作载荷。

4.3.1.8 大型转轮的设计、安装应考虑在各种工况下的下沉量。

4.3.1.9 带筒形阀的机组应考虑筒形阀动水关闭对相关部件的特殊要求。

4.3.2 轴流式水轮机

4.3.2.1 转轮室应具有足够的刚度,与叶片外缘转动对应部位及其他易空蚀部位宜采用不锈钢制作或堆焊不锈钢。

4.3.2.2 应设置可靠的防抬机措施和止推装置。

4.3.2.3 转轮叶片上不宜开吊孔。

4.3.2.4 转轮叶片的外缘宜设置裙边。转轮叶片外缘与转轮室之间的单边间隙宜不大于 $0.1\% D_1$ 、不小于 $0.05\% D_1$ 。

4.3.2.5 转轮叶片的操作机构应动作灵活。协联装置应准确可靠。转轮叶片密封试验时应不漏油,不允许水通过转轮密封进入转轮体内。

- 4.3.2.6 定桨式水轮机应设置减轻振动的自然补气装置,或采取其他措施。
- 4.3.2.7 轴流式水轮机应设置紧急停机时的自然补气装置。
- 4.3.2.8 转桨式水轮机的受油器及其装配部件应有绝缘材料与发电机所有联接处隔开以防止产生轴电流。
- 4.3.2.9 大型转轮的设计、安装应考虑在各种工况下的下沉量。
- 4.3.2.10 转轮叶片、活动导叶、顶盖、底环和固定导叶等主要过流部件的固有频率应与水力激振频率至少错频 10% 以上。
- 4.3.2.11 联轴螺栓的预紧力宜不小于 3 倍的最大工作载荷。

4.3.3 贯流式水轮机

- 4.3.3.1 转轮采用悬臂结构时应考虑主轴挠度的影响。
- 4.3.3.2 转轮叶片外缘与转轮室之间的单边间隙宜不大于 $0.1\% D_1$ 、不小于 $0.065\% D_1$ 。
- 4.3.3.3 转轮室应具有足够的刚度防止振动超标,设计时应考虑转轮的轴向位移。与叶片外缘对应部位及其他转轮室的易空蚀部位宜采用不锈钢制作或堆焊不锈钢。转轮室的固有频率应与转轮叶片的过流频率至少错开 10%。
- 4.3.3.4 径向导轴承宜设有高压油润滑顶起装置。
- 4.3.3.5 转轮叶片的操作机构应动作灵活。协联装置应准确可靠。转轮叶片密封试验时应不漏油,不允许水通过转轮密封进入转轮体的供油腔内。如转轮体内充油,油压应高于转轮体外的水压。
- 4.3.3.6 转轮室与尾水管里衬之间应设有伸缩节。
- 4.3.3.7 转轮室上不宜设置进人门。
- 4.3.3.8 为防止飞逸,应设置关闭导叶的重锤。
- 4.3.3.9 内、外配水环的分瓣面和接合面应安装密封条或涂密封胶。
- 4.3.3.10 主轴连轴螺栓应考虑在水中工作并承受交变应力的影响,其预紧力宜不小于 3 倍的最大工作载荷。
- 4.3.3.11 应对整机进行动态响应分析,以防引起共振。

4.3.4 冲击式水轮机

- 4.3.4.1 应能在不拆卸发电机的情况下装拆更换冲击式水轮机的转轮。
- 4.3.4.2 应对转轮进行动态响应分析,以避免共振。
- 4.3.4.3 转轮应安全可靠,按疲劳强度进行设计,并按 CCH-70-4 或合同规定的标准探伤。在运行期间,还应定期检查水斗裂纹。投运后宜在运行 500 h 内进行初次检查。
- 4.3.4.4 联轴螺栓的预紧力宜不小于 3 倍的最大工作载荷。
- 4.3.4.5 喷嘴的易磨蚀部位和喷针应采用抗蚀耐磨的材料制造。
- 4.3.4.6 每个喷嘴应有单独的操作接力器。各喷嘴应有单独的行程指示,折向器应有位置指示。
- 4.3.4.7 机壳上宜采取必要的隔音或消音措施。
- 4.3.4.8 冲击式水轮机机坑内的稳水栅应有足够的强度和刚度,并采取防腐措施,以便于水轮机转轮、喷嘴等的拆装和检修。
- 4.3.4.9 多喷嘴冲击式水轮机调速系统应能根据系统负荷,按预定程序自动投入或切除喷嘴的运行数目,保证机组稳定高效率运行,切换过程应平稳。并在喷嘴切换和负荷增减的全过程中水轮机应调节正常,机组振动、摆度在允许范围内。全部喷嘴同时工作时各射流间应无干扰。
- 4.3.4.10 冲击式水轮机的排出高度应能满足水轮机安全稳定运行和效率不受影响。在最高尾水位时,尾水渠水面以上应有足够的通气高度。机壳上应装设必要的补气装置。
- 4.3.4.11 电站尾水位变幅很大时,冲击式水轮机安装高程允许低于汛期最高运行尾水位。但应设有压低机壳内水位的压缩空气系统。

5 性能保证

5.1 保证期

产品的保证期为自水轮机投入商业运行之日起两年,或从最后一批货物交货之日起三年,以先到期为准。

5.2 稳态水力性能

5.2.1 水轮机稳态水力性能保证(即功率、效率和飞逸转速)按模型试验结果验证,或采用现场试验进行验证。除另有规定外,模型试验按 GB/T 15613 进行,现场试验按 GB/T 20043 进行,其中效率修正换算参见附录 A 或附录 B。

5.2.2 水轮机功率保证

应保证水轮机在额定水头下的额定功率及在最大水头、加权平均水头、最小水头和其他特定水头下的功率。

5.2.3 水轮机效率保证

应保证运行水头范围内水轮机的最高效率、加权平均效率或其他特定工况点的效率。

5.2.4 水轮机的最高飞逸转速保证

5.2.4.1 混流式和定桨式水轮机取最大水头和导叶最大开度下所产生的飞逸转速;在特殊情况下,可经供需双方商定。

5.2.4.2 转桨式水轮机应按水轮机导叶与转轮叶片协联和非协联条件下,在运行水头范围内所产生的最高飞逸转速分别保证。

5.2.4.3 冲击式水轮机取最大水头和最大喷嘴行程下产生的飞逸转速。

5.3 空化、空蚀和磨蚀的保证

5.3.1 应对水轮机的空化系数做出保证。

5.3.2 反击式水轮机在一般水质条件下的空蚀损坏保证应符合 GB/T 15469.1 的规定。冲击式水轮机在一般水质条件下的空蚀损坏保证应符合 GB/T 19184 的规定。需方应保留保证期内的运行记录,运行记录中至少应有水头、功率、运行时间和相应尾水位的数据。

5.3.3 当水中含沙量较大时,应对水轮机的磨蚀损坏做出保证。其保证值可根据过机流速、泥沙含量、泥沙特性及电站运行条件等,由需方和供方商定。

5.4 振动

5.4.1 在正常工况和过渡工况下,水轮机各部件不应产生共振和有害变形。

5.4.2 在保证的稳定运行范围内,立轴水轮机顶盖以及卧轴水轮机轴承座的垂直方向和水平方向的振动值,应不大于表 4 的规定值。测量方法按 GB/T 32584 执行。

表 4 振动允许值

项目	振动允许值(峰-峰值)			
	μm			
	额定转速(n_r)			
	r/min			
	$n_r \leq 100$	$100 < n_r \leq 250$	$250 < n_r \leq 375$	$375 < n_r \leq 750$
立轴机组顶盖水平振动	90	70	50	30

表 4 (续)

项目	振动允许值(峰-峰值)			
	μm			
	额定转速(n_r) r/min			
	$n_r \leq 100$	$100 < n_r \leq 250$	$250 < n_r \leq 375$	$375 < n_r \leq 750$
立轴机组顶盖垂直振动	110	90	60	30
灯泡贯流式水轮机轴承座的径向振动	120	100	100	100
卧轴机组水轮机轴承座的水平振动(不含灯泡贯流式)	120	100	100	100
卧轴机组水轮机轴承座的垂直振动(不含灯泡贯流式)	110	90	70	50

5.4.3 在保证的稳定运行范围内正常运行时,主轴相对振动(摆度)应不大于附录 C 中所规定的 B 区上限线。


5.4.4 在空载工况下,主轴相对振动(摆度)应不大于轴承冷态间隙的 70%。

5.4.5 水轮发电机组轴系的临界转速应由水轮机和发电机供方分别计算后确定,轴系的第一阶临界转速应不小于最高瞬态飞逸转速的 120%。

5.5 水轮机的稳定运行范围

5.5.1 在 4.1.4 规定的最大和最小水头范围内,水轮机稳定运行的功率范围按表 5。实际稳定运行范围可根据现场实测稳定性情况进行适当调整。对于混流式水轮机,可能在保证的水轮机稳定运行范围内会出现异常振动或强振区,应避振运行或采取相应减振措施。

表 5 水轮机稳定运行功率范围

水轮机 型式	转轮直径	水轮机稳定运行功率范围 %	
		额定水头及额定水头以下	额定水头以上
 混流式	转轮直径 $D_1 < 6.0 \text{ m}$	$[(45 \sim 50) \sim 100]$ 相应水头下最大功率	$[(45 \sim 50) \times (H_i / H_r)^{1.5} \sim 100] P_r$
	转轮直径 $D_1 \geq 6.0 \text{ m}$	$[(50 \sim 55) \sim 100]$ 相应水头下最大功率	$[(50 \sim 55) \times (H_i / H_r)^{1.5} \sim 100] P_r$
定桨式	(75~100) 相应水头下最大功率		
转桨式	(35~100) 相应水头下最大功率		
冲击式	(25~100) 相应水头下最大功率(两喷嘴及以下)		
	(15~100) 相应水头下最大功率(两喷嘴以上)		
注： H_i 为大于额定水头的运行水头。			

5.5.2 在 5.5.1 规定的运行范围内机组运行时,轴系的摆度及部件振动同时满足 5.4.2 和 5.4.3 要求。

5.5.3 原型水轮机在 5.5.1 所规定的水轮机稳定运行范围内,应对混流式水轮机尾水管内的压力脉动的混频峰-峰值或均方根值做出保证,取值按照 GB/T 17189。

在电站空化系数下测取尾水管压力脉动混频峰-峰值,在最大水头与最小水头之比小于 1.6 时,其保证值宜不大于相应运行水头的 2%~11%,低比转速取小值,高比转速取大值;原型水轮机尾水管进口下游侧压力脉动峰-峰值宜不大于 10 m 水柱。

5.5.4 应根据模型试验对叶道涡、叶片进水边正背面空化、卡门涡列及其他可能影响稳定性的水力现象的观察结果,对原型机组的运行稳定性进行评估。

5.6 最高瞬态过速和最高、最低瞬态压力

机组甩全部或部分负荷时,蜗壳内最高压力值、尾水管内最高压力值及最低压力值和机组过速最大值不应超过设计值。

5.7 导叶或喷嘴的漏水量

5.7.1 在额定水头下,新投运的机组,圆柱式布置的导叶漏水量不应大于水轮机额定流量的 0.3%,圆锥式布置的导叶漏水量不应大于水轮机额定流量的 0.4%。

5.7.2 冲击式水轮机新喷嘴在全关时不应漏水。

5.8 噪声

水轮机在稳定运行范围内正常运行时,冲击式水轮机机壳上方 1 m 处所测得的噪声不应大于 85 dB(A);贯流式水轮机转轮室周围 1 m 内所测得的噪声不应大于 90 dB(A);其他型式的机组在水轮机机坑地板上方 1 m 处所测得的噪声不应大于 95 dB(A),在距尾水管进入门 1 m 处所测得的噪声不应大于 95 dB(A)。

5.9 水推力



应对反击式水轮机在正常工况和过渡工况下的最大正向水推力和最大反向水推力作出保证。

5.10 转轮裂纹保证

供方应在转轮设计制造过程中采取防止裂纹的措施,保证产品质量。水轮机在稳定运行范围内运行,在合同规定的保证期内保证转轮不产生裂纹。

5.11 可靠性指标

在一般水质条件下,新投运的水轮机应具有以下可靠性指标:

水轮机大修间隔期不少于 5 年。

水轮机使用寿命不少于 40 年。

6 水轮机控制系统基本功能

6.1 水轮机设备配备的仪表(参见附录 D),宜安装在专门的盘柜上。

6.2 水轮机自动化元件及系统应符合 GB/T 11805 中的有关规定。

如水轮机要实现计算机监控并要求监测振动和蠕动时由供需双方商定并提供成组调节的接口。

6.3 水轮机自动控制系统应能安全可靠地实现以下基本功能:

- a) 开机和停机。
- b) 在系统中处于备用状态,随时可以启动投入。
- c) 从发电转调相或由调相转发电运行(当有调相要求时)。
- d) 当运行中发生故障能及时发出信号、警报或停机。
- e) 凡由计算机控制的水电站各机组应能实现成组调节。水轮机应能自动保持在给定的负荷范围内稳定高效率运行;冲击式水轮机投入的喷嘴的数量应能自动切换,轴流式、斜流式和贯流式可调桨叶水轮机的导叶开度与转轮叶片转角保持协联,并保持在稳定和高效率运行。

6.4 发生(但不限于)下列情况之一时,水轮机应能自动事故或紧急停机:

- a) 转速超过过速保护值;
- b) 压油罐内油压低于事故低油压或压力罐油位降于事故低油位;
- c) 导轴承温度超过允许值时;
- d) 水润滑导轴承的润滑水中断时;
- e) 机组突然发生异常振动、摆度;
- f) 在运行中控制电源消失时;
- g) 水润滑的接触式主轴密封润滑水中断时;
- h) 其他紧急事故停机信号。

7 供货范围和备品备件

7.1 供货范围

7.1.1 混流式水轮机包括尾水管金属里衬、金属蜗壳及蜗壳延伸段(如有)、座环、基础环、导水机构、推力轴承支架(如有)、筒形阀系统(如有)、转轮、水轮机轴、水导轴承、工作密封、检修密封、机坑里衬、零部件之间的连接件、机坑照明装置、补气系统、人行踏板和扶手、尾水管内轻便检修平台、排水设备及其他配套设备等。

7.1.2 轴流式和斜流式水轮机包括金属尾水管里衬、金属蜗壳及蜗壳延伸段(如有)、座环、转轮室、导水机构、推力轴承支架(如有)、转轮、水轮机轴、受油器及操作油管(如有)、水导轴承、工作密封、检修密封、机坑里衬、零部件之间的连接件、机坑照明装置、补气系统、人行踏板和扶手、尾水管内轻便检修平台、排水设备及其他配套设备等。

7.1.3 贯流式水轮机包括金属尾水管里衬、伸缩节、管形座、转轮室、导水机构、转轮、主轴、受油器及操作油管、水导轴承、工作密封、检修密封、零部件之间的连接件、人行踏板和扶手、排水设备及其他配套设备等。

7.1.4 冲击式水轮机包括尾水坑金属里衬、稳水栅、配水环管、机壳、机壳盖、喷嘴(含喷嘴口环、喷嘴口、喷管、喷针、喷针接力器、保护罩等)、偏流器或折向器、偏流器或折向器接力器、转轮、主轴、导轴承、补气系统、机坑里衬、零部件之间的连接件、机坑照明装置、排水设备及其他配套设备等。

7.1.5 水力观测仪表和自动化元件:包括水轮机及其辅助设备在运行中需要监测的各种压力、温度、真空、流量、转速、振动、摆度仪表和有关盘柜。油、气、水管路上为满足自动控制的各种差压信号计、液位信号计、示流信号器或流量变送器、温度信号器;各种液压元件、气压元件、电器控制元件、保护元件、行程信号器、测速装置和合同规定的各种变送器。

7.1.6 管路及其配件:合同范围内部件或合同设备之间所有的所需的油管、气管、水管、主轴密封供水设备、连接件和支架等。

7.1.7 安装和检修所需的专用工具、特殊工具。

7.1.8 原型水轮机验收试验所需的仪表和设备由供需双方商定。

7.1.9 调速器、油压装置、漏油装置及进水阀(包括配套设备)等的供货范围另定。

7.2 供货界面

7.2.1 发电机侧:水轮机轴及与发电机相连接的螺栓、螺母、保护罩(也可由发电机供货方提供)。

7.2.2 土建侧:供货至设备基础板、垫板、锚固螺栓和基础螺栓,锚筋、千斤顶等全部预埋件。

7.2.3 压力钢管侧:从电厂引水钢管末端或进水阀下游侧至水轮机蜗壳进口的连接短管、凑合节、伸缩节、伸缩节连接法兰和连接螺栓等(如有),由供需双方商定。

7.2.4 尾水管侧:尾水管金属里衬末端,包括尾水隔墩金属鼻端(如有)。

7.2.5 测量系统:测量的管路(包括测头及测压管)、电缆及电缆管供货从测点至仪表、所规定的仪表盘、控制柜和端子箱。

7.2.6 自动化元件侧:合同范围内所有各自动化元件与设备的联接电缆,供至机坑端子箱。

7.2.7 与其他供货商的供货界面:立轴反击式水轮机供至机坑外设备的第一对法兰处或接力器法兰处,并提供成对法兰和紧固件。贯流式水轮机供至水轮机进入孔外 1 m 处和接力器法兰处,并提供成对法兰。

7.3 备品、备件

水轮机备品备件的项目和数量参照附录 E 中表 E1、E2、E3、E4 选择,并应在供需双方合同中规定。

8 资料与图纸

8.1 交付时间和数量

供方向需方提交图纸资料,交付时间和数量在合同中规定。并向需方和电站设计单位提供合同中规定的最终图纸资料的电子文件。

8.2 主要项目

8.2.1 水轮机及其辅助设备布置图、调节保证计算报告。

8.2.2 水轮机的总装图、水轮机流道单线图、各水轮机部件的组装图和易损部件的加工图、水轮机及其辅助设备的管路布置图、基础图和埋件图等。

8.2.3 水轮机的模型综合特性曲线。

对于混流式水轮机还应表示出导叶开口、空化系数的等值线。在电站空化系数已确定时,还可表示出尾水管的等压力脉动线、叶片进水边正背面脱流初生空化线、叶道涡初生线和叶道涡发展线等。

对于定桨式水轮机还应表示出导叶开口、空化系数的等值线。在电站空化系数已确定时,还可表示出尾水管等压力脉动线。

对于导叶和桨叶双调节的水轮机还应表示出协联工况下导叶开口、叶片转角和空化系数的等值线以及各叶片转角下的综合特性曲线和单位轴向水推力曲线。

对于冲击式水轮机还应表示出喷针行程的等值线。对于特定电站应表示出运行范围。

综合特性曲线的公称直径宜采用 D_1 。

8.2.4 运转特性曲线。

对于混流式和定桨式水轮机,还应表示出导叶开口及稳定运行区等。

对于导叶和桨叶双调节的水轮机,还应表示出导叶开口、叶片转角以及运行区域等。

对于冲击式水轮机,还应表示出喷针行程以及运行区域等。

8.2.5 导叶开口或转角或喷嘴行程与接力器行程关系图、基础受力资料、水轮机的其他重要计算报告等。

8.2.6 有关水轮机及其辅助设备在工地布置、组装、焊接和加工的工艺流程、图纸和资料。

8.2.7 控制及监测:各种盘柜和自动化设备的安装和布置图;水轮机自动化操作和油、气、水的系统图;水轮机测量仪表配置图等。

8.2.8 产品设计说明书,安装、运行、使用、维护说明书,自动控制设备调试记录,产品检查及试验记录,主要部件的材料合格证明书,交货明细表等。

9 工厂检验及试验

9.1 应对水轮机各主要部件提供出厂合格证明文件、材料化学成分、机械性能报告。并应根据合同规定的检验项目进行检验,并向需方提供有关文件。合同中无明确规定时,按 DL/T 443 执行。

9.2 水轮机预装按合同或技术协议执行。对不能或难于在供方车间内进行预装的水轮机有关部件,经供方和需方协商一致后,可移到现场按 GB/T 8564 并参照供方的有关规定进行,由供方负责技术指导。

9.3 水轮机轴与发电机轴采用铰孔联接结构的轴线检查。水轮机、发电机不在同一厂制造时,轴线检查由发电机厂负责进行,或者合同中另行规定。

9.4 水轮机主要部件在制造过程中的检验和试验项目如表 6、表 7、表 8 和表 9 所示,需方参加检查试验的项目按合同规定执行。

表 6 混流式水轮机工厂质量检查、装配和试验项目表

序号	名称	材料检验				制造过程与最终检验				耐压及 取样试验	其他检验 项目及备注
		力学 性能	化学 成分	无损 检测	硬度 试验	无损 检测	外观 检查	尺寸 检查	动作 试验		
1	转轮	√	√	√	√	√	√ *	√ *			叶型、表面粗糙度检查及静平衡
2	主轴	√	√	√		√	√ *	√ *		钻孔取样	法兰间平行度、同心度、主轴法兰垂直度 *
3	联轴螺栓、顶盖螺栓、进人门螺栓	√	√	√			√ *	√ *			
4	导轴承	√				√	√	√			
5	主轴密封	√						√			局部装配 *
6	顶盖	√				√ *	√ *	√ *			
7	底环	√				√ *	√ *	√ *			
8	活动导叶	√	√	√	√	√	√ *	√ *			
9	活动导叶操作机构	√	√			√	√		√ *		导水机构预装,动作试验 *
10	导叶保护装置	√					√			破断检查 *	摩擦装置预紧力矩试验(如有) *
11	座环	√	√	√		√ *	√ *	√ *			
12	蜗壳	√				√	√	√			
13	尾水管里衬						√	√			
14	接力器	√					√ *		√ *	耐压	
15	补气阀、电磁阀、液位信号器、示流信号器等								√		动作、性能试验检查
注 1:“√”为厂内试验项目。 注 2:“*”为需方到工厂见证和检查的项目。 注 3:分瓣转轮部分项目的最终检查和静平衡在现场进行。											

表 7 轴流式水轮机工厂质量检查、装配和试验项目表

序号	名称	材料检验				制造过程与最终检验				耐压及 取样试验	其他检验 项目及备注
		力学 性能	化学 成分	无损 检测	硬度 试验	无损 检测	外观 检查	尺寸 检查	动作 试验		
1	桨叶	√	√	√	√	√	√ *	√ *			叶型及表面粗糙度 检查
2	轮毂	√	√	√	√	√	√ *	√ *			
3	桨叶操作机构	√	√	√			√ *	√ *			
4	受油器本体	√					√				
5	操作油管	√					√			耐压 *	
6	转轮装配							√ *	√ *	耐压 *	静平衡、漏油及桨叶 转角
7	主轴	√	√	√		√	√ *	√ *		钻孔取样	法兰间平行度、同心 度、主轴法兰垂直度 *
8	联轴螺栓、顶盖螺栓、 进入门螺栓	√	√	√			√ *	√ *			
9	导轴承	√		√			√	√			
10	主轴密封	√						√			局部装配 *
11	转轮室上环	√					√ *	√ *			
12	转轮室中、下环	√					√ *	√ *			
13	顶盖	√				√ *	√ *	√ *			
14	支持盖	√				√ *	√ *	√ *			
15	底环	√				√	√	√			
16	活动导叶	√	√	√	√	√	√ *	√ *			
17	活动导叶操作机构	√	√			√	√		√ *		导水机构预装,动作试 验 *
18	导叶保护装置	√					√			破断检查 *	摩擦装置预紧力矩试 验(如有) *
19	座环	√	√	√		√ *	√ *	√ *			
20	接力器	√					√ *		√ *	耐压	
21	补气阀、电磁阀、液位 信号器、示流信号器等								√		动作性能试验检查
注 1: “√”为厂内试验项目。 注 2: “*”为需方到工厂见证和检查的项目。											

表 8 贯流式水轮机工厂质量检查、装配和试验项目表

序号	名称	材料检验				制造过程与最终检验				耐压及 取样试验	其他检验 项目及备注
		力学 性能	化学 成分	无损 检测	硬度 试验	无损 检测	外观 检查	尺寸 检查	动作 试验		
1	桨叶	√	√	√	√	√	√ *	√ *			叶型及表面粗糙度 检查
2	轮毂	√	√	√	√	√	√ *	√ *			
3	桨叶操作机构	√	√	√			√ *	√ *			
4	受油器本体	√					√				
5	操作油管	√					√			耐压 *	
6	转轮装配							√ *	√ *	耐压 *	静平衡、漏油及桨叶 转角
7	主轴	√	√	√		√	√ *	√ *		钻孔取样	法兰间平行度、同心 度、主轴法兰垂直度 *
8	联轴螺栓	√	√	√			√ *	√ *			
9	径向轴承	√		√			√	√			
10	主轴密封	√						√			局部装配 *
11	转轮室	√					√ *	√ *			
12	内配水环	√				√ *	√ *	√ *			
13	外配水环	√				√ *	√ *	√ *			
14	导流锥	√				√	√	√			
15	活动导叶	√	√	√	√	√	√ *	√ *			
16	活动导叶操作机构	√	√			√	√		√ *		导水机构预装, 动作试 验 *
17	导叶保护装置	√					√				
18	管形座	√	√	√		√ *	√ *	√ *			
19	接力器	√					√ *		√ *	耐压	
20	电磁阀、液位信号器、 示流信号器等								√		动作性能试验检查
注 1: “√”为厂内试验项目。 注 2: “*”为需方到工厂见证和检查的项目。											

表 9 冲击式水轮机工厂质量检查、装配和试验项目表

序号	名称	材料检验				制造过程与最终检验				耐压及 取样试验	其他检验 项目及备注
		力学 性能	化学 成分	无损 检测	硬度 试验	无损 检测	外观 检查	尺寸 检查	动作 试验		
1	转轮	√	√	√	√	√	√ *	√ *			叶型、表面粗糙度检查 及静平衡
2	主轴	√	√	√		√	√ *	√ *		钻孔取样	法兰间平行度、同心 度、主轴法兰垂直度 *
3	联轴螺栓	√	√	√		√	√ *	√ *			
4	导轴承	√		√			√	√			
5	喷嘴	√	√	√		√	√ *	√ *			
6	喷针装配	√	√			√ *	√ *	√ *		耐压	动作试验 *
7	折向器	√	√	√		√	√	√			
8	配水环管	√	√	√		√	√	√			
9	机壳						√	√			
10	接力器	√					√ *		√ *	耐压	
11	补气阀、电磁阀、液位 信号器、示流信号器等								√		动作、性能试验检查
注 1：“√”为厂内试验项目。											
注 2：“*”为需方到工厂见证和检查的项目。											

10 铭牌、包装、运输及保管

10.1 水轮机铭牌

水轮机铭牌内容应包括：

- a) 产品名称；
- b) 国家名称；
- c) 供方名称；
- d) 本标准编号或技术条件编号；
- e) 供方出品编号；
- f) 产品型号；
- g) 最大水头；
- h) 额定水头；
- i) 最小水头；
- j) 额定功率；
- k) 最大功率；
- l) 额定流量；
- m) 额定转速；
- n) 飞逸转速；



o) 出厂日期。

10.2 包装及运输

10.2.1 水轮机及其供货范围内的零部件、备件、备品,应检验合格后才能装箱运输。

10.2.2 水轮机部件的包装尺寸和重量,应满足从工厂到电站的运输条件。

10.2.3 水轮机及其辅助设备的包装运输应符合 GB/T 191 和 GB/T 28546 的规定,并按设备的不同要求 and 运输方式采取防雨、防潮、防震、防霉、防冻、防盐雾等措施。

10.2.4 包装箱中应有产品出厂证明书、技术文件及图纸。装箱单开列的名称、数量应与箱内实物和图纸编号相符合。装箱单应装在箱内的防腐盒(袋)内。

10.2.5 供方每次发运的件数、箱数、编号、发运时间、车次等,应在发运的同时通知收货单位。设备运到工地后,开箱检查时,需方和供方的代表应共同参加,如发现有损坏、错发、缺件等问题,由需方代表通知供方查找原因并尽快采取补救措施。

10.3 保管

10.3.1 水轮机的各加工工件须妥善保管,不得随意叠放。

10.3.2 水轮机的各加工件运抵工地拆箱后,应遮盖,不得日晒雨淋。

10.3.3 橡胶、塑料、尼龙制品应防止直接受日光照射,并不得置于炉子或其他取暖设备附近 1.5 m 处的地方,还应防止油类对橡胶的污损。橡胶制品、填料等应存放在干燥通风的仓库内。

10.3.4 电子电器产品、自动化元件(装置)或仪表应存放在温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度不大于 90%、无酸、无碱、无盐及无腐蚀性、无爆炸性气体和无强电磁场作用、不受灰尘和雨雪侵蚀的库房内。

10.3.5 供方从发货之日起至工地验收止,在正常的储运和吊装条件下应保证一年内不致因包装不善而引起产品的锈蚀、长霉、损坏和降低精度等。

11 安装、运行、维护及验收试验

11.1 安装和试运行

11.1.1 水轮机的安装和试运行应符合 GB/T 8564 和 DL/T 507 的要求。

11.1.2 电站引水系统第一次充水前应彻底清除引水系统及水轮机过流部件中的杂物,严防异物对水轮机造成损害。

11.1.3 试运行前应用油对调速系统各管道进行反复循环清洗,然后更换为符合 GB 11120 规定的油试运行。

11.1.4 一般情况下试运行持续时间为带负荷连续运行 72 h。验收合格后由需方签署初步验收证书。

11.2 运行与维护

水轮机运行与维护应符合 DL/T 710 和供方提供的水轮机安装运行维护说明书的要求。

11.3 验收试验

11.3.1 原型水轮机性能验收试验主要试验项目如下:

- a) 水轮机功率试验;
- b) 水轮机效率试验(按合同要求进行);
- c) 相对效率试验(按合同要求进行)。对转桨式水轮机宜用于修正导叶开口与叶片转角间的协联关系;
- d) 甩负荷试验;

- e) 包括振动、摆度、压力脉动、噪声的稳定性试验(按合同要求进行);
- f) 空蚀和磨蚀保证验证(反击式水轮机按 GB/T 15469.1 执行、冲击式水轮机按 GB/T 19184 执行);
- g) 飞逸转速试验(宜不进行,如需试验,各有关方应对试验的风险进行评估,并事先达成专门协议)。

11.3.2 现场验收由需方选择一台或多台机组在设备保证期内进行。

11.3.3 水轮机保证期满、各项技术保证满足合同要求后,由需方签署最终验收证明。



附 录 A

(规范性附录)

反击式水轮机效率修正公式

A.1 第一种方法

混流式见式(A.1):

$$\Delta\eta = K \times (1 - \eta_{\max}) \times \left[1 - \left(\frac{D_m}{D_p} \right)^{0.2} \right] \dots\dots\dots (A.1)$$

轴流式见式(A.2):

$$\Delta\eta = K \times (1 - \eta_{\max}) \times \left[0.7 - 0.7 \left(\frac{D_m}{D_p} \right)^{0.2} \times \left(\frac{H_m}{H_p} \right)^{0.1} \right] \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

 η_{\max} ——模型水轮机的最优效率; K ——系数, $K=0.5\sim0.7$ (改造机组取小值,新机组取大值); D_m ——模型水轮机转轮公称直径,单位为米(m); D_p ——原型水轮机转轮公称直径,单位为米(m); H_m ——模型水轮机试验水头,单位为米(m); H_p ——原型水轮机水头,单位为米(m)。

A.2 第二种方法

IEC 60193 推荐的反击式水轮机效率修正计算公式如式(A.3)和式(A.4)所示。

$$\Delta\eta_h = \delta_{\text{ref}} \left[\left(\frac{Re_{\text{uref}}}{Re_{\text{um}}} \right)^{0.16} - \left(\frac{Re_{\text{uref}}}{Re_{\text{up}}} \right)^{0.16} \right] \dots\dots\dots (A.3)$$

$$\delta_{\text{ref}} = \frac{1 - \eta_{\text{hoptm}}}{\left(\frac{Re_{\text{uref}}}{Re_{\text{uoptm}}} \right)^{0.16} + \frac{1 - V_{\text{ref}}}{V_{\text{ref}}}} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

 $\Delta\eta_h$ ——模型效率换算为原型效率的修正值; δ_{ref} ——标称的可换算为原型效率的修正值; Re_{uref} ——标准的雷诺数; Re_{um} ——计算点模型雷诺数; Re_{up} ——计算点原型雷诺数; Re_{uoptm} ——模型最优效率点雷诺数; η_{hoptm} ——模型最优效率; V_{ref} ——标准的损失分布系数(轴流转桨、斜流转桨和贯流转桨式水轮机取 0.8,混流和轴流定桨、斜流定桨和贯流定桨式水轮机取 0.7)。

A.3 第三种方法

对过去已有的模型试验曲线且已换算到标准雷诺数的模型试验资料,建议按式(A.5)~式(A.7)

计算。

$$\Delta\eta_h = (1 - \eta_{hoptm}) \times V_m \times \left[1 - \left(\frac{Re_{um}}{Re_{up}} \right)^{0.16} \right] \dots\dots\dots (A.5)$$

$$V_m = V_{optm} = V_{ref} \dots\dots\dots (A.6)$$

$$Re_{um} = Re_{uref} = 7 \times 10^6 \dots\dots\dots (A.7)$$

式中：

- V_m ——模型的损失分布系数(轴流转桨、斜流转桨和贯流转桨式水轮机取 0.8，混流和轴流定桨、斜流定桨和贯流定桨式水轮机取 0.7)；
- V_{optm} ——模型最优效率点的损失分布系数。



附 录 B

(规范性附录)

冲击式水轮机效率修正公式

冲击式水轮机效率修正见式(B.1)~式(B.6)。

$$\Delta\eta_h = \eta_{hp} - \eta_{hm} = \Delta\eta_{Fr} + \Delta\eta_{We} + \Delta\eta_{Re} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

$$\Delta\eta_h = \eta_{hp} - \eta_{hm} = 5.7 \times \Phi_B^2 \times (1 - C_{Fr}^{0.3}) + 1.95 \times 10^{-6} \times \frac{C_{We} - 1}{\Phi_B^2} + 10^{-8} \times \frac{(C_{Re} - 1)^2}{\Phi_B^2} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

其中:

$$\Phi_B = \frac{4Q_p}{Z_0 \times \pi \times (2g_p H_p)^{\frac{1}{2}} \times B_p^2} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

$$C_{Fr} = \frac{Fr_p}{Fr_m} = \left(\frac{g_p \times H_p}{g_m \times H_m} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{B_m}{B_p} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{g_m}{g_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

$$C_{We} = \frac{We_p}{We_m} = \left(\frac{g_p \times H_p}{g_m \times H_m} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{B_p}{B_m} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{\sigma_m^*}{\sigma_p^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

$$C_{Re} = \frac{Re_p}{Re_m} = \left(\frac{g_p \times H_p}{g_m \times H_m} \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{B_p}{B_m} \times \frac{\gamma_m}{\gamma_p} \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

式中:

Φ_B ——流量系数;

Q_p ——原型流量,单位为立方米每秒(m^3/s);

Z_0 ——喷嘴数;

g_p ——电站现场重力加速度,单位为米每二次方秒(m/s^2);

g_m ——实验室重力加速度,单位为米每二次方秒(m/s^2);

H_p ——原型水头,单位为米(m);

H_m ——模型试验水头,单位为米(m);

B_p ——原型水斗宽度,单位为米(m);

B_m ——模型水斗宽度,单位为米(m);

ρ_p ——原型运行时水的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

ρ_m ——实验时水的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

σ_p^* ——原型运行时水的表面张力,单位为焦平方米($J \cdot m^2$),见表 B.1;

σ_m^* ——实验时水的表面张力,单位为焦平方米($J \cdot m^2$),见表 B.1;

γ_p ——原型运行时水的黏性系数,单位为平方米每秒(m^2/s);

γ_m ——实验时水的黏性系数,单位为平方米每秒(m^2/s)。

表 B.1 不同水温下水的表面张力

温度(θ) ℃	表面张力(σ^*) $\text{J} \cdot \text{m}^2$
5	0.074 9
10	0.074 2
15	0.073 5
20	0.072 8
25	0.072 0
30	0.071 2
35	0.069 6

弗劳德数的影响见图 B.1, 韦伯数的影响见图 B.2, 雷诺数的影响见图 B.3。

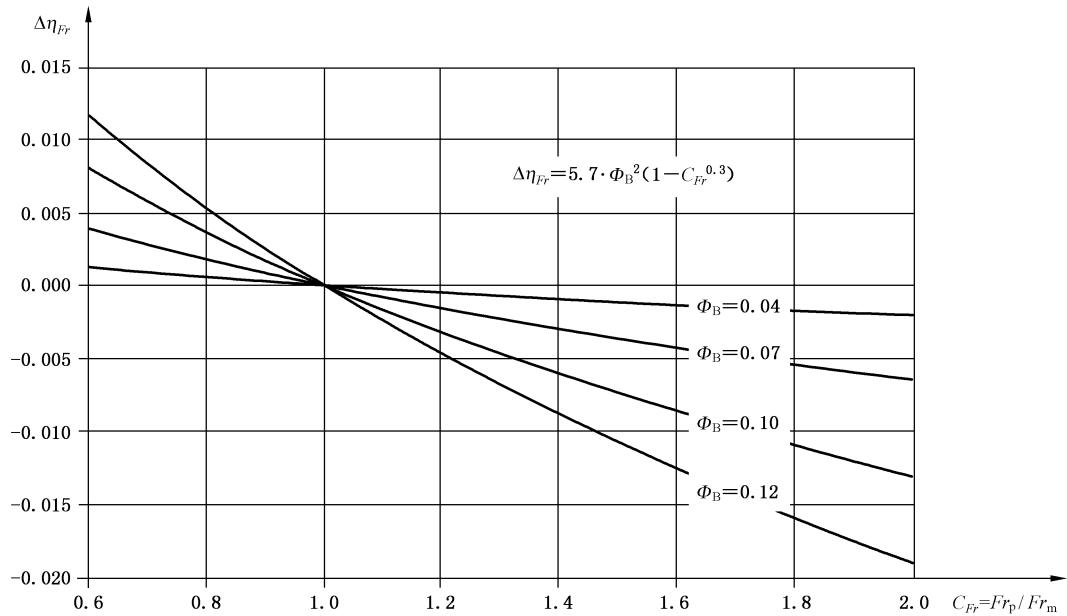


图 B.1 弗劳德数的影响



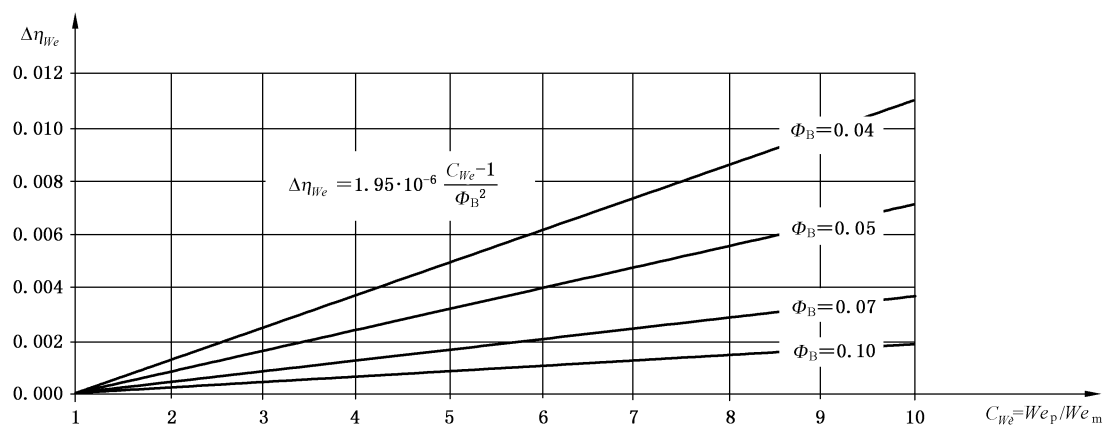


图 B.2 韦伯数的影响

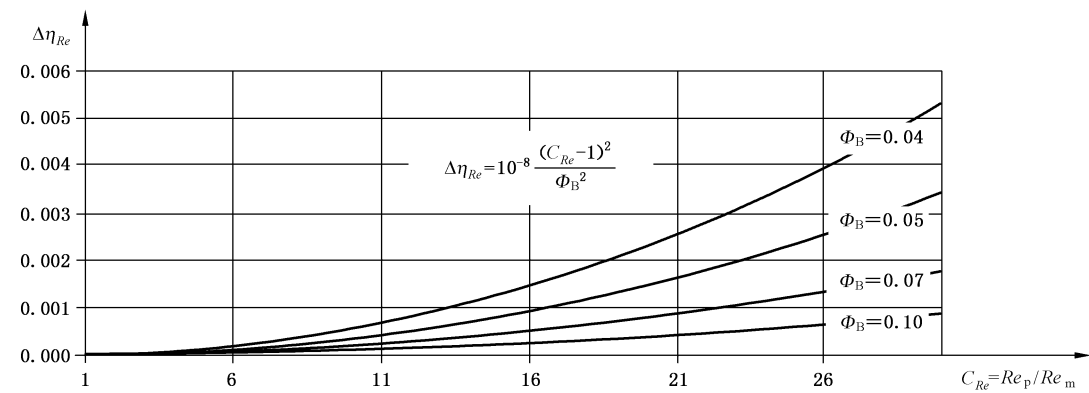


图 B.3 雷诺数的影响



附录 C
(规范性附录)

主轴相对振动位移峰-峰值推荐评价区域

主轴相对振动位移峰-峰值推荐评价区域见图 C.1。

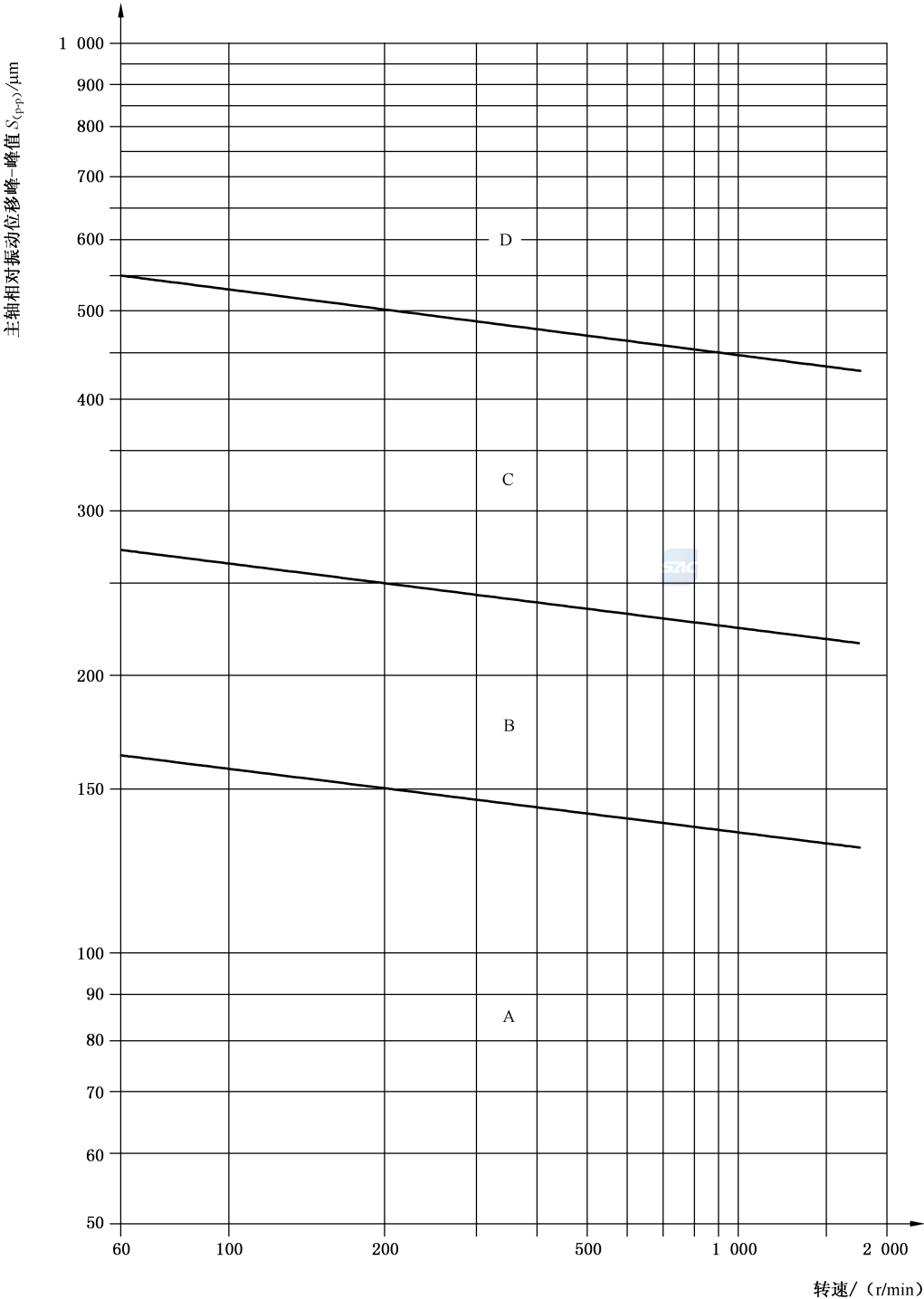


图 C.1 主轴相对振动位移峰-峰值推荐评价区域

附 录 D

(资料性附录)

水轮机设备基本配置的仪表

水轮机设备基本配置的仪表如表 D.1 所示。

表 D.1 水轮机设备基本配置的仪表

仪 表 名 称	混流式	轴流式	冲击式	贯流式
水轮机进口压力表(钢管或蜗壳压力)	√	√	√	√
活动导叶后转轮进口前压力表	√	√		√
★上止漏环后压力表	√			
★下密封腔压力表	√			
机壳真空压力表			√	
尾水管进口真空压力表	√	√		√
尾水管出口压力表	√	√		√
主轴密封水压力表	√	√		√
★水轮机差压流量计	√	√	√	√
★水轮机振动监测仪	√	√	√	√
★主轴摆度监测仪	√	√	√	√
导轴承温度计	√	√	√	√
导轴承冷却水或水导轴承润滑水压力表	√	√	√	√
★抬机数字显示记录表	√	√		
注 1: 表中带★号项目是否提供由供需双方商定。未列项目也由供需双方另行商定。				
注 2: 表中带√号项目是基本配置,未列项目由供需双方另行商定。				

附 录 E
(资料性附录)
水轮机备品备件表

水轮机备品备件如表 E.1～表 E.4 所示。

表 E.1 混流式水轮机备品、备件

序号	备品、备件名称	单位	数 量			备 注
			1～2 台机	3～4 台机	5 台 以上	
1	导叶上、中、下轴套	套	1/2	1	2	
2	导叶密封圈	套	每台机一台套			
3	导叶销(导叶分半键)	套	1/3	1/2	1	
4	导叶剪断销(拉断螺栓)	套	1/2	1	2	
5	导叶连杆轴套	套	1/4	1/2	1	
6	主轴工作密封件	套	每台机一台套			
7	主轴检修密封件	套	每台机一台套			
8	水导轴瓦	套	1	1	2	
9	接力器活塞环或组合密封	套	1	1	2	
10	接力器固定密封圈	套	1	1	2	
11	顶盖、底环抗磨板	套	1	1	1	过流面留加工余量
12	弹 簧	套	1	1	2	
13	上下固定止漏环	套	1	2	3	

表 E.2 轴流式水轮机备品、备件

序号	备品、备件名称	单位	数 量			备 注
			1～2 台机	3～4 台机	5 台 以上	
1	导叶上、中、下轴套	套	1/2	1	2	
2	导叶密封圈	套	每台机一台套			
3	导叶销(导叶分半键)	套	1/3	1/2	1	
4	导叶剪断销(拉断螺栓)	套	1/2	1	2	
5	导叶连杆轴套	套	1/4	1/2	1	
6	主轴工作密封件	套	每台机一台套			
7	主轴检修密封件	套	每台机一台套			
8	水导轴瓦	套	1	1	2	
9	水导轴承甩油盘	套	1	1	1	若有

表 E.2 (续)

序号	备品、备件名称	单位	数 量			备 注
			1~2 台机	3~4 台机	5 台 以上	
10	接力器活塞环或组合密封	套	1	1	2	
11	接力器固定密封圈	套	1	1	2	
12	各类弹簧	套	1	1	2	
13	拾机抗磨环	套	1	1	1	
14	转轮叶片密封	套	每台机一台套			
15	转轮叶片枢轴密封压板	套	每台机一台套			
16	受油器轴套	套	2	2	3	
17	受油器浮动瓦	套	2	2	3	

表 E.3 灯泡贯流式水轮机备品、备件

序号	备品、备件名称	单位	数 量			备 注
			1~2 台机	3~4 台机	5 台 以上	
1	导叶上、下轴套	套	1/2	1	2	
2	导叶密封圈	套	每台机一台套			
3	导叶销(导叶分半键)	套	1/3	1/2	1	
4	导叶保护装置	套	1/2	1	2	
5	导叶连杆轴套	套	1/4	1/2	1	
6	主轴工作密封件	套	每台机一台套			
7	主轴检修密封件	套	每台机一台套			
8	水导径向轴瓦	套	1	1	2	
9	接力器活塞环	套	1	1	2	
10	接力器固定密封圈	套	1	1	2	
11	各类弹簧	套	1	1	2	
12	转轮叶片密封圈	套	每台机一台套			
13	转轮叶片枢轴密封压板	套	每台机一台套			
14	受油器轴套	套	2	2	3	
15	受油器浮动瓦	套	2	2	3	

表 E.4 冲击式水轮机备品、备件

序号	备品、备件名称	单位	数 量			备 注
			1~2 台机	3~4 台机	5 台 以上	
1	喷嘴口	套	每台一台套			
2	喷针头	套	每台一台套			
3	喷针杆轴套	套	1	2	3	
4	折向器刀板	套	1	1	2	
5	接力器活塞环	套	每台一台套			
6	接力器固定密封圈	套	每台一台套			
7	制动喷嘴操作阀	套	1	1	1	
8	导轴瓦	套	1	1	1	

该附录中表 E.1～表 E.4 为水轮机备品、备件的基本配置表。备品、备件也可由供需双方另行商定。

