



UNITED NATIONS  
INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION



# 小水电技术导则 机组

## 第1部分：水轮机

SHP/TG 003-1: 2019



## 免责声明

本导则未经联合国正式编辑。本导则内采用的名称和资料并不代表联合国工业发展组织的秘书处关于各国、领土、城市、地区或其当局的合法地位，以及关于国土、边界的界定、或对经济体系及其发展程度等问题的任何意见和立场。例如“发达的”、“工业化的”和“发展中”等一类词汇只为方便统计，未必表示一个国家或者地区的真实发展程度。本导则中提及的公司名称或者商业产品并非联合国工业发展组织为其代言。本导则尽可能保持内容的准确性，但联合国工业发展组织及其成员国均不对使用本导则可能产生的结果承担任何责任。本导则可被自由引用或转载，但需注明出处。

© 2019 UNIDO/INSHP – 版权所有

# 小水电技术导则 机组

## 第 1 部分：水轮机

SHP/TG 003-1:2019

## 鸣谢

本导则是联合国工业发展组织（UNIDO）和国际小水电联合会（INSHP）共同合作努力的成果，约 80 名国际专家和 40 家国际机构参与了导则的编制、同行审查，并提出了具体意见和建议，使导则更具实用性和专业性。

UNIDO 和 INSHP 非常感谢许多机构在制定本导则期间作出的贡献，特别是以下国际组织：

——东南部非洲共同市场（COMESA）

——全球区域可持续能源中心网（GN-SEC），特别是西非国家经济共同体可再生能源和能源效率中心（ECREEE）、东非可再生能源和能源效率中心（EACREE）、太平洋可再生能源和能源效率中心（PCREEE）和加勒比可再生能源和能源效率中心（CCREEE）。

中国政府推动了本导则的最终定稿，对其完成具有重要意义。

以下人士为编制本导则作出了贡献，包括有价值的投入、审查和提供建设性意见：Mr. Adnan Ahmed Shawky Atwa, Mr. Adoyi John Ochigbo, Mr. Arun Kumar, Mr. Atul Sarthak, Mr. Bassey Edet Nkposong, Mr. Bernardo Calzadilla-Sarmiento, Ms. Chang Fangyuan, Mr. Chen Changjun, Ms. Chen Hongying, Mr. Chen Xiaodong, Ms. Chen Yan, Ms. Chen Yueqing, Ms. Cheng Xialei, Ms. Chileshe Kapaya Matantilo, Ms. Chileshe Mpundu Kapwepwe, Mr. Deogratias Kamweya, Mr. Dolwin Khan, Mr. Dong Guofeng, Mr. Ejaz Hussain Butt, Ms. Eva Kremere, Ms. Fang Lin, Mr. Fu Liangliang, Mr. Garaio Donald Gafiye, Mr. Guei Guillaume Fulbert Kouhie, Mr. Guo Chenguang, Mr. Guo Hongyou, Mr. Harold John Annegam, Ms. Hou ling, Mr. Hu Jianwei, Ms. Hu Xiaobo, Mr. Hu Yunchu, Mr. Huang Haiyang, Mr. Huang Zhengmin, Ms. Januka Gyawali, Mr. Jiang Songkun, Mr. K. M. Dharesan Unnithan, Mr. Kipyego Cheluget, Mr. Kolade Esan, Mr. Lamyser Castellanos Rigoberto, Mr. Li Zhiwu, Ms. Li Hui, Mr. Li Xiaoyong, Ms. Li Jingjing, Ms. Li Sa, Mr. Li Zhenggui, Ms. Liang Hong, Mr. Liang Yong, Mr. Lin Xuxin, Mr. Liu Deyou, Mr. Liu Heng, Mr. Louis Philippe Jacques Tavernier, Ms. Lu Xiaoyan, Mr. Lv Jianping, Mr. Manuel Mattiat, Mr. Martin Lugmayr, Mr. Mohamedain Seif Elnasr, Mr. Mundia Simainga, Mr. Mukayi Musarurwa, Mr. Olumide TaiwoAlade, Mr. Ou Chuanqi, Ms. Pan Meiting, Mr. Pan Weiping, Mr. Ralf Steffen Kaeser, Mr. Rudolf Hüpfel, Mr. Rui Jun, Mr. Rao Dayi, Mr. Sandeep Kher, Mr. Sergio Armando Trelles Jasso, Mr. Sindiso Ngwenga, Mr. Sidney Kilmete, Ms. Sitraka Zarasoa Rakotomahefa, Mr. Shang Zhihong, Mr. Shen Cunke, Mr. Shi Rongqing, Ms. Sanja Komadina, Mr. Tareqemtairah, Mr. Tokihiko Fujimoto, Mr. Tovoniaina Ramanantsoa Andriampaniry, Mr. Tan Xiangqing, Mr. Tong Leyi, Mr. Wang Xinliang, Mr. Wang Fuyun, Mr. Wang Baoluo, Mr. Wei Jianghui, Mr. WU Cong, Ms. Xie Lihua, Mr. Xiong Jie, Ms. Xu Jie, Ms. Xu Xiaoyan, Mr. XuWei, Mr. Yohane Mukabe, Mr. Yan Wenjiao, Mr. Yang Weijun, Ms. Yan Li, Mr. Yao Shenghong, Mr. ZengJingnian, Mr. Zhao Guojun, Mr. Zhang Min, Mr. Zhang Liansheng, Mr. Zhang Zhenzhong, Mr. Zhang Xiaowen, Ms. Zhang Yingnan, Mr. Zheng Liang, Mr. Zheng Yu, Mr. Zhou Shuhua, Ms. Zhu Mingjuan.

使用中如有其他意见和建议，欢迎提供，以便再版更新。

## 目 次

前言 .....	II
引言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 使用环境条件 .....	1
5 技术要求 .....	2
5.1 一般要求 .....	2
5.2 工作应力和安全系数 .....	2
5.3 结构设计和材料总体要求 .....	3
5.4 不同型式水轮机的特定要求 .....	4
5.5 稳态水力性能保证 .....	5
5.6 空化、空蚀和磨蚀的保证 .....	5
5.7 水轮机的稳定运行范围 .....	6
5.8 振动 .....	6
5.9 最高瞬态转速和最高、最低瞬态压力 .....	6
5.10 导叶或喷嘴的漏水量 .....	6
5.11 噪声 .....	6
5.12 可靠性指标 .....	6
6 供货范围和备品备件 .....	7
6.1 供货范围 .....	7
6.2 备品备件 .....	7
7 技术文件 .....	7
8 检验和验收 .....	7
8.1 工厂检验和试验 .....	7
8.2 验收试验 .....	10
9 铭牌、包装、运输和保管 .....	11
9.1 水轮机铭牌 .....	11
9.2 包装及运输 .....	11
9.3 保管 .....	11
10 安装、运行和维护 .....	11
10.1 安装和试运行 .....	11
10.2 运行和维护 .....	11
11 质量保证期 .....	12
附录 A (规范性附录) 反击式水轮机效率修正公式 .....	13
附录 B (规范性附录) 冲击式水轮机效率修正公式 .....	14
附录 C (规范性附录) 水轮机备品备件表 .....	17

## 前 言

联合国工业发展组织(UNIDO)是旨在促进全球包容和可持续工业发展(ISID)的联合国专门机构。为联合国和各国未来 15 年可持续发展提供框架的《2030 年可持续发展议程》和联合国可持续发展目标,已将 ISID 列为其可持续发展的三大支柱之一。能源对经济、社会发展和提高生活质量不可或缺,UNIDO 的 ISID 任务明确将支持建立可持续能源体系。过去 20 年里,国际社会对能源的关注和讨论越来越多,扶贫、环境风险和气候变化等问题正成为焦点。

国际小水电联合会(INSHP)是一个协调和促进全球小水电发展的国际组织,各区域、次区域和国家对口单位、相关机构、公共单位和企业自愿加入,以社会效益为其主要目标。INSHP 旨在通过发达国家、发展中国家和国际组织间的三方经济技术合作促进全球小水电发展,为广大发展中国家的农村提供环保、负担得起、充足的能源,从而增加就业机会、改善生态环境、减少贫困、提高农村生活文化水平和经济发展水平。

UNIDO 和 INSHP 自 2010 年起合作编制的《世界小水电发展报告》显示,全球对小水电的需求和其发展程度并不匹配,技术缺乏是大多数国家发展小水电的主要障碍之一。UNIDO 和 INSHP 决定基于成功发展经验并通过全球专家合作,共同编制《小水电技术导则》(简称导则)以满足各成员国的需求。

本导则根据 ISO/IEC 指令第二部分(详见 [www.iso.org/directives](http://www.iso.org/directives))的编制规则起草。

提请注意,本导则中的一些内容可能涉及专利权问题。UNIDO 和 INSHP 不负责识别任何此类专利权问题。

## 引 言

小水电是广泛认可的解决偏远农村地区电气化问题的重要可再生能源。尽管欧洲、北美、南美和中国等大多数国家都拥有很高的装机容量,但许多发展中国家受到许多因素的阻碍(包括缺乏全球认可的小水电好案例或标准),仍有大量小水电资源未得到开发。

本导则将通过应用全球现有的专门知识和最佳实践,解决目前缺乏适用于小型水电站的技术导则的问题,让各国利用这些达成共识的导则来支持他们目前的政策、技术和生态环境。对于机构和技术能力有限的国家,将夯实他们发展小水电的知识基础,从而制定鼓励小水电发展的优惠政策和吸引更多的小水电投资,以促进国家经济发展。本导则对所有国家都是有益的,特别是在技术知识比较缺乏的国家中分享经验和最佳实践。

本导则适用于装机容量 30 MW 及以下的小型水电站,可作为小型水电站规划、设计、建设和管理的技术性指导文件。

- 《小水电技术导则 术语》给出了小型水电站常用的专业技术术语和定义。
- 《小水电技术导则 设计》给出了小型水电站设计的基本技术要求、方法学和程序,专业涵盖了电站选址规划、水文、工程地质、工程布置、动能计算、水工、机电设备选型、施工、工程造价估算、经济评价、投资、社会与环境评价等。
- 《小水电技术导则 机组》对小型水电站水轮机、发电机、调速系统、励磁系统、主阀和监控保护及直流电源系统设备提出了具体的技术要求。
- 《小水电技术导则 施工》对小型水电站施工技术提出了规范性指导意见。
- 《小水电技术导则 管理》对小型水电站项目管理、运行维护、技术改造和工程验收等技术方面提出了规范性指导意见。

# 小水电技术导则 机组

## 第 1 部分:水轮机

### 1 范围

本部分规定了小型水轮机产品的技术要求、主要部件结构和材料要求、供货范围、备品备件、技术文件、检验与验收、包装、运输、贮存、安装、运行与维护的基本要求。

本文件适用于下列条件下的小型水轮机：

- a) 单机容量为 10 MW 以下；
- b) 混流式、冲击式水轮机,转轮公称直径 1.0 m 以下；
- c) 轴流式、斜流式、贯流式水轮机,转轮公称直径 3.3 m 以下。

### 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)适用于本文件。

ISO 780 包装、储运图示标志

ISO 1940-1 刚性转子平衡品质许用不平衡的确定

ISO 10816-5 水力发电设备和蓄能泵旋转轴机械振动评定

IEC 60193 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机模型验收试验

IEC 60308 水轮机调速系统试验规程

IEC 60545 水轮机验收、运行和维护导则

IEC 60609-1 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机空蚀评定 第 1 部分:反击式水轮机的评定

IEC 60609-2 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机空蚀评定 第 2 部分:水斗式水轮机的评定

IEC 60994 水力机械振动与脉动现场测量导则

IEC61116 小型水电站机电设备安装导则

IEC 61364 水电站机械术语

IEC 62006 小型水轮机现场验收试验规程

CCH-70-3 水力机械铸钢件检验规范

SHP/TG 001 小水电技术导则 术语和定义

### 3 术语和定义

IEC TR 61364 和 SHP/TG 001 界定的术语和定义适用于本文件。

### 4 使用环境条件

本文规定水轮机的运行适用于一般水质情况。若水中含有明显的化学腐蚀性物质或泥沙等固体物质或含气量超过一般水质时,则由供需双方另行协商。

注:当水中含有少量泥沙或磨损强度不大时,可以认为是一般水质。

## 5 技术要求

### 5.1 一般要求

5.1.1 水轮机设计应根据水电站的基本参数及特点优选水轮机主要参数,能够保证水轮机安全可靠、稳定高效运行。所选的水轮机转轮宜经过模型试验,并有较完整的试验资料;水轮机原型和模型效率的换算按附录 A 和附录 B 进行,并应考虑工艺和异型部件的修正。

5.1.2 水轮机结构设计应符合水电站厂房布置要求,综合考虑发电机、调速器、进水阀之间的关系,并满足巡视、检修方便的要求,运输条件符合电站实际情况。

5.1.3 结构强度计算应留有安全余量,在各种工况下,包括甩负荷,水轮机各部件不得产生共振和有害变形。

5.1.4 水轮机通流部件应符合 IEC 60193 的原型要求。

5.1.5 转轮和飞轮应做静平衡试验,应符合 ISO 1940-1 标准中 G6.3 级的要求。

5.1.6 水轮机在各种工况运行时,其稀油导轴承金属轴瓦的温度最高不应超过 70 °C,油温的最高温度不超过 65 °C;弹性金属塑料瓦最高温度不应超过 55 °C,油温的最高温度不超过 50 °C。

5.1.7 反击式水轮机尾水管出口断面的最高点应有不小于 300 mm 的淹没深度。

5.1.8 水轮机及其附属设备需进行压力试验的部件,均应按试验压力在厂内进行试验。

- a) 强度耐压试验,试验压力应为设计压力(包括升压)的 1.5 倍,但最低压力不得小于 0.4 MPa,持续稳压 15 min。受压部件不得产生有害变形和渗漏等异常现象。反击式水轮机的金属蜗壳和冲击式水轮机的配水管水压试验可根据合同要求进行;
- b) 严密性耐压试验,试验压力应为 1.25 倍的实际工作压力,保压 30 min,应无渗漏现象;
- c) 严密性试验,试验压力为实际工作压力,保压 8 h,应无渗漏现象;
- d) 冷却器试验,试验压力宜为 2 倍的实际工作压力,但不得低于 0.4 MPa。保压 60 min,应无渗漏现象。

5.1.9 水轮机自动化元件及其调速系统应满足机组的开机、正常运行、正常停机和紧急停机的要求,设置必要的检测保护装置、信号发送装置,在机组出现异常状况时能及时发出信号或停机。

### 5.2 工作应力和安全系数

5.2.1 水轮机所有部件的工作应力不得超过规定的许用应力。其中正常工况条件下采用经典公式计算的断面应力不大于表 1 规定的许用应力,特殊工况条件下采用经典公式计算的断面应力不大于材料屈服极限的 2/3。

5.2.2 对于承受剪切和扭转力矩的零部件,铸铁的最大剪应力不得超过 21 MPa,其他黑色金属最大剪应力不得超过许用拉应力的 70%,其中机组主轴和导叶轴的最大剪应力不得超过许用应力的 60%。

5.2.3 当要求有预应力时,螺栓、螺杆和连杆等零部件均应进行预应力处理,零部件的预应力不得超过材料屈服强度的 7/8。螺栓的荷载不应小于连接部分设计荷载的 2 倍。

5.2.4 由有限元方法得到的应力分析结果,局部应力值可超出上述许用应力值,并且在正常工况条件下最大应力不得超过材料屈服强度的 2/3,特殊工况条件下最大应力不得超过材料的屈服强度。

5.2.5 混流式和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,转轮各部位最大应力不应超过材料屈服极限的 1/5;在最高飞逸转速时,最大应力不应超过材料屈服极限的 2/5。冲击式转轮在预期的最大荷载条件下正常运行时,转轮各部位最大应力不应超过材料屈服极限的 1/18,并应进行疲劳强度核算。

表 1 部件正常运行工况许用应力

单位:MPa

材料名称	许用应力	
	拉应力	压应力
灰铸铁	U.T.S/10	70
碳素铸钢和合金铸钢	U.T.S/5 或 Y.S/3	U.T.S/5 或 Y.S/3
碳钢锻件	Y.S/3	Y.S/3
主要受力部件的碳素钢板	U.T.S/4	U.T.S/4
高应力部件的高强度钢板	Y.S/3	Y.S/3
其他材料	U.T.S/5 或 Y.S/3	U.T.S/5 或 Y.S/3
注 1: U.T.S 为强度极限; 注 2: Y.S 为屈服极限。		

5.2.6 主轴最大复合应力  $S_{max}$  [见公式(1)] 不应超过材料屈服极限的 1/4。

$$S_{max} = (S^2 + 3T^2)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

S —— 由于水力、动载荷和静载荷引起的轴向应力和弯曲应力的总和;

T —— 水轮机最大功率时的扭转切应力。

按式(1)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极限的 2/5, 且水轮机在最大出力时主轴扭转切应力不应超过 42 MPa。横轴贯流式水轮机主轴应进行疲劳强度核算。

5.3 结构设计和材料总体要求

5.3.1 水轮机主要结构部件在所有预期的工况下, 应有足够的强度和刚度, 结构设计应便于拆装、维修, 易损部件应便于检查、更换。

5.3.2 水轮机结构设计应保证在不拆卸发电机转子、定子、转轮和主轴等主要部件的情况下更换下列零部件:

- a) 水轮机导轴瓦及冷却器、主轴工作密封;
- b) 反击式水轮机接力器密封件及活塞环、导水机构传动部件及保护元件, 转桨式水轮机桨叶密封件;
- c) 卧轴水轮机的尾水弯管、导轴瓦及冷却器、主轴工作密封、导水机构及传动部件与保护元件;
- d) 冲击式水轮机的喷管、折向器。

5.3.3 水轮机标准零部件应保证其通用性, 主要配合件应能互换。

5.3.4 反击式水轮机的导水机构应设置导叶破断保护装置和导叶最大开度限位装置。导叶保护装置能自动报警。

5.3.5 立式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。

5.3.6 反击式水轮机顶盖应设置可靠的排水设施; 排水所用的水位控制和信号装置应可靠。

5.3.7 水轮机应设置防飞逸设施。水轮机允许在最高飞逸转速下持续运行 5 min, 并保证水轮机转动部件不产生有害变形。

5.3.8 立式水轮机进水阀后的蜗壳进口段顶部应设置可靠的自动补气、排气装置。

5.3.9 混流式水轮机、轴流式水轮机、贯流式水轮机和转轮直径在 1.4 m 及以上的水轮机尾水管内宜设置进人门, 进人门直径不宜小于 500 mm。验水阀应设置在进人门下侧。

5.3.10 水轮机材质应具有良好的抗疲劳、抗空蚀、抗磨损及与水电站水质条件相适应的耐腐蚀性能,水轮机的转轮和其他易空蚀、易磨损部件应采用抗空蚀、抗磨损的材料制造或采取必要的保护措施。如采用堆焊不锈钢防护措施时,加工后的不锈钢厚度不应小于 2 mm。

5.3.11 水轮机主要部件的重要焊缝应进行 100% 超声波无损探伤检查;对应力高的部件或有怀疑的部位可用射线或超声波衍射法探伤进行复核。

#### 5.4 不同型式水轮机的特定要求

##### 5.4.1 混流式水轮机

5.4.1.1 水轮机转轮宜采用铸焊结构,叶片可为铸件或模压成型。叶片翼型宜采用数控加工。

5.4.1.2 转轮叶片数应与模型相同,过流表面应光滑,转轮表面型线应与模型相似。

5.4.1.3 转轮应采用抗空蚀及抗磨蚀性能和焊接性能良好的材料,转轮可采用全不锈钢或不锈钢叶片与合金钢上冠、下环组焊制造。

5.4.1.4 蜗壳应符合下列要求:

- a) 在运输条件许可的情况下,座环与金属蜗壳应在制造厂内焊接或铸造成整体,整体运至水电站。若金属蜗壳尺寸超过运输条件,应分成几节,在制造厂内预装合格后分节运至水电站工地组装,运输过程中应做好防变形措施。
- b) 立轴水轮机金属蜗壳的强度设计应在不考虑混凝土联合受力的条件下,保证能承受在最大水头下产生的最大压力(包括水锤压力)所产生的应力。
- c) 卧轴的水轮机蜗壳与座环应在制造厂内焊接(或铸造)成整体,顶部应设置排气装置。
- d) 组装后的金属蜗壳过流表面应平滑,并按规定进行无损探伤检查或水压试验。

5.4.1.5 混流式水轮机可设置减轻振动的自然补气装置,或采取强迫补气等措施。

##### 5.4.2 轴流式水轮机

5.4.2.1 水轮机转轮叶片翼型宜采用数控加工,叶片数应与模型相同,过流表面应光滑,转轮表面型线应与模型相似。

5.4.2.2 转轮应采用抗空蚀及抗磨蚀性能和焊接性能良好的材料,转轮叶片和转轮室的喉管部分宜采用不锈钢制造。

5.4.2.3 轴流转桨式水轮机转轮叶片的密封宜为耐油耐压材料。转轮及转轮叶片宜采用专用工具吊装,不宜在叶片上开吊孔。

5.4.2.4 转桨式机组转轮室内表面应采用球面结构或半球面结构,定桨式机组转轮室可采用圆筒结构,转轮室或尾水管适当位置应开设进人门。

5.4.2.5 转轮叶片的操作机构应动作灵活,协联装置应准确可靠。不允许水通过转轮密封进入转轮体的供油腔内。

5.4.2.6 定桨式水轮机可设置减轻振动的自然补气装置,或采取强迫补气等措施。

5.4.2.7 轴流式水轮机应有防抬机措施。

##### 5.4.3 贯流式水轮机

5.4.3.1 转轮采用悬臂结构时应考虑主轴挠度的影响。

5.4.3.2 转轮叶片的操作机构应动作灵活,协联装置应准确可靠。不允许水通过转轮密封进入转轮体的供油腔内。

5.4.3.3 内、外导水环的分瓣面应涂密封胶或安装密封条。

5.4.3.4 贯流式水轮机转轮室后应设置伸缩法兰,伸缩长度不应小于 10 mm。

5.4.3.5 灯泡贯流式水轮机应设置重锤防飞逸保护装置。

5.4.3.6 轴伸贯流式水轮机进水管在靠近灯泡体附近的顶部应设进人孔,供装、卸及维修灯泡体内的部件时使用。

#### 5.4.4 水斗式、斜击式水轮机

5.4.4.1 转轮、喷嘴的易磨蚀部位和喷针应采用抗蚀耐磨的材料制造。

5.4.4.2 转轮宜采用整体铸造、铸焊结构或整体锻造,并应进行必要的热处理和探伤检查。在运行期间,需方应定期检查水斗裂纹,投运后应在 500 h 内进行初次检查。

5.4.4.3 机壳上宜采取隔音或消音措施。

5.4.4.4 机组甩负荷时,折向器应能自动迅速折水。

5.4.4.5 水斗式水轮机可根据需要设置反向制动喷嘴。

5.4.4.6 排出高度和通气高度应能满足水轮机安全稳定运行要求。

5.4.4.7 机壳应有较好的抗振性能。

5.4.4.8 进水管和喷嘴应进行水压试验。

#### 5.4.5 双击式水轮机

5.4.5.1 转轮应安全可靠,按疲劳强度进行设计,不应产生裂纹。

5.4.5.2 在机架上应设有调整尾水管中水位的补气阀。

5.4.5.3 控制导水机构采用手、电动操作的,应设置可靠的限位开关。电机应有防过载保护装置。设有可靠的手、电动切换装置,保证在手动操作时电机应断电。

5.4.5.4 排出高度应能满足水轮机安全稳定运行的要求,并且效率不受影响。

### 5.5 稳态水力性能保证

#### 5.5.1 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。

#### 5.5.2 水轮机效率保证

应保证水轮机的最优效率、运行水头范围内的加权平均效率和其他特定工况点的效率。

#### 5.5.3 水轮机的最大飞逸转速保证

水轮机的最大飞逸转速保证应满足:

- a) 混流式和定桨式水轮机应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,可由供需双方商定;
- b) 冲击式水轮机应取最大水头和最大喷嘴开度下所产生的飞逸转速;
- c) 转桨式水轮机应取水轮机导叶与转轮叶片协联条件下,在运行水头范围内所产生的最大飞逸转速。在特殊情况下,经供需双方商定,可按协联关系遭到破坏,在运行水头范围内所产生的最大飞逸转速保证。

### 5.6 空化、空蚀和磨蚀的保证

5.6.1 应对水轮机的空化性能做出保证。

5.6.2 反击式水轮机在一般水质条件下的空蚀损坏保证应符合 IEC 60609-1 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 IEC 60609-2 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。

5.6.3 当流道中含沙量较大时,水轮机磨蚀可根据过机流速、泥沙含量、泥沙特性及水电站运行条件等确定,由供需双方商定。

## 5.7 水轮机的稳定运行范围

5.7.1 水轮机在空载情况下应能稳定地运行。

5.7.2 在规定的最大和最小水头范围内,水轮机应在表 2 所列功率范围内稳定运行。

表 2 保证功率范围

水轮机型式	相应水头下的机组保证功率范围(%)
混流式	(45~100)
定桨式	(75~100)
转桨式	(35~100)
冲击式	(25~100)

注:对于混流式水轮机,如在保证运行范围内出现强振,应采取相应措施或避振运行。

## 5.8 振动

5.8.1 在各种运行工况下(包括甩负荷),水轮机各部件不应产生共振和有害变形。

5.8.2 在稳定的运行范围内,水轮机振动评价按 ISO 10816-5 进行。测量方法按 IEC 60994 执行。

5.8.3 在正常运行工况下,主轴相对振动(摆度)应不超过轴承总间隙的 75%。

5.8.4 水轮发电机组轴系的临界转速应由水轮机和水轮发电机供方分别计算确定,轴系的第一阶临界转速应不小于最大飞逸转速的 120%。

## 5.9 最高瞬态转速和最高、最低瞬态压力

机组甩全部或部分负荷时,蜗壳内压力升高值、尾水管内压力降低值和水轮机转速升高值不应超过设计值。

## 5.10 导叶或喷嘴的漏水量

5.10.1 在额定水头下,圆柱式新导水机构漏水量不应大于水轮机额定流量的 3%。圆锥式新导水机构漏水量不应大于水轮机额定流量的 4%。

5.10.2 冲击式水轮机新喷嘴在全关时不应漏水。

## 5.11 噪声

水轮机正常运行时,在水轮机机坑地板上方 1 m 处所测得的噪声不应大于 90 dB(A),在距尾水管进人门 1 m 处所测得的噪声不应大于 95 dB(A),冲击式水轮机机壳上方 1 m 处所测得的噪声不应大于 90 dB(A),贯流水轮机转轮室周围 1 m 内所测得的噪声不应大于 90 dB(A)。

## 5.12 可靠性指标

在一般水质条件下,水轮机应具有以下可靠性指标:

- a) 可利用率不小于 99%;

b) 水轮机平均寿命不少于 35 年。

## 6 供货范围和备品备件

### 6.1 供货范围

6.1.1 水轮机:从与发电机轴连接的法兰盘开始。包括转轮、主轴、轴承、主轴密封、机壳、座环(管形座)、转轮室、导水机构、金属蜗壳及延伸段、机坑里衬、尾水锥管、排水装置及其他配套设备等;

卧轴水轮机还应包括进水弯管及法兰、飞轮及飞轮罩、制动装置;冲击式水轮机应包括配水管、机壳、喷嘴、喷针及喷针移动机构、折向器等。

6.1.2 压力引水设备:从水电站引水钢管末端至水轮机蜗壳进口的连接短管,凑合节及其法兰和连接螺栓、伸缩节、伸缩节连接法兰等,可由供需双方商定。

6.1.3 水力监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、真空等仪表和有关盘柜,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、液压元件、气压元件,行程信号器、测速装置和供需双方签订的订货合同规定的各种变送器,以及机坑内各元件与设备的连接电缆(供至机坑端子箱)。具体自动化要求可由供需双方商定。

6.1.4 管路及其配件:成套设备中各单项设备之间所需的油管、气管、水管、连接件和支架等。竖轴反击式水轮机的非成套设备供至设备的第一对法兰处或接力器法兰处,并提供成对法兰。贯流式水轮机的非成套设备供至水轮机进人孔外 1 米处和接力器法兰处,并提供成对法兰。

6.1.5 应提供安装和检修所需的专用工具、特殊工具。

### 6.2 备品备件

水轮机备品备件的项目和数量按照附录 C 中表 C.1、C.2、C.3、C.4 规定执行,或由供需双方在合同中规定。

## 7 技术文件

供方向需方提交必要的技术文件,主要包括:

- a) 水轮机及其辅助设备布置图、基础图和埋件图,最大件尺寸、最重件重量。
- b) 水轮机的总装图,蜗壳、尾水管的单线图,各水轮机部件的装配图,水轮机及其辅助设备的管路布置图。
- c) 水轮机的模型综合特性曲线和运转特性曲线图、导叶开口或转角或喷嘴开度与接力器行程关系图。
- d) 有关水轮机及其辅助设备在水电站工地组装布置和焊接的图纸资料。
- e) 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。
- f) 水轮机安装、使用、维护说明书、出厂检验报告和合格证、交货明细表等。

## 8 检验和验收

### 8.1 工厂检验和试验

8.1.1 水轮机主要部件在制造过程中需方可参加的检验和试验项目如下:

- a) 各主要部件的几何尺寸、型线、加工精度、表面粗糙度及其互换性的检查、试验；
- b) 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、发电机不在同一供方制造时,轴线检查由发电机厂负责进行；
- c) 转轮组装和静平衡试验；
- d) 各承压部件的耐压试验、密封试验；
- e) 水轮机主要部件的重要焊缝 100%超声波无损探伤检查。对应力高的部件或有怀疑的部位可用射线探伤进行复核；
- f) 按照 IEC 60193 原型要求对通流部件进行检查；
- g) 反击式水轮机导水机构预装,导叶间隙检查；
- h) 反击式水轮机金属蜗壳和冲击式水轮机的配水管的水压试验(可根据需要进行)。

8.1.2 水轮机所有零件应按图纸要求进行检验和/或试验,标准件采购应进行合格供方评定。

8.1.3 设备组合面应光洁无毛刺。合缝间隙用 0.05 mm 塞尺检查,应不能通过;组合螺栓及销钉周围不应有间隙。

8.1.4 部件的装配应配合标记。多台机组在安装时,每台机组应用标有同一系列标号的部件进行装配。同类部件或测点在组装记录里的顺序编号,对固定部件,应从+Y 开始,顺时针编号(从水轮发电机端视,下同)。

8.1.5 设备容器进行煤油渗漏试验时,至少保持 4 h,应无渗漏现象。容器作完渗漏试验后一般不宜再拆卸。

8.1.6 水轮机各部件均应按设计图纸要求在供方工厂进行表面预处理和涂漆防护;需要在水电站工地喷涂表面漆的部件(包括水电站工地焊缝)应按设计要求进行,其涂层应均匀、无起泡、无皱纹,颜色应一致。

8.1.7 蜗壳焊接应符合下列要求:

- a) 各节间、蜗壳与座环连接的对接焊缝间隙一般为 2 mm~4 mm,过流面错牙不应超过板厚的 10%,但纵缝最大错牙不应大于 2 mm,环缝最大错牙不应大于 3 mm;
- b) 坡口局部间隙超过 5 mm 处,其长度不超过焊缝长度 10%,允许在坡口处作堆焊处理;
- c) 焊缝外观检查应符合表 3 的规定;

表 3 水轮机蜗壳焊缝外观检查

单位:mm

序号	项目		允许缺陷尺寸
1	裂纹		不允许
2	表面夹渣		不允许
3	咬边		深度不超过 0.5,连续长度不超过 100,两侧咬边累计长度不大于 10%全长焊缝
4	未焊满		不允许
5	表面气孔		不允许
6	焊缝余高 $\Delta h$	手工焊	0~2.5
		埋弧焊	0~4
7	对接焊缝宽度	手工焊	盖过每边坡口宽度 2~4,且平滑过渡
		埋弧焊	盖过每边坡口宽度 2~7,且平滑过渡
8	飞溅		清除干净
9	焊瘤		不允许

d) 无法做耐压试验的蜗壳,焊缝应进行无损探伤检验包括超声波和射线检查。

8.1.8 转轮静平衡试验应符合下列要求:

- a) 静平衡工具应与转轮同心,偏差不大于 0.07 mm,支持座水平偏差不应大于 0.02 mm/m;
- b) 采用钢球、镜板式平衡法时,静平衡工具的灵敏度,应符合表 4 的要求:

表 4 水轮机转轮球面中心到转轮重心距离

单位:mm

转轮质量 $t$ /(kg)	最大距离	最小距离
$t < 5\ 000$	40	20
$5\ 000 \leq t < 10\ 000$	50	30
$10\ 000 \leq t < 50\ 000$	60	40

8.1.9 转桨式水轮机转轮叶片操作试验和严密性耐压试验应符合下列要求:

- a) 试验用油的油质应合格,油温不应低于 5 °C;
- b) 在最大试验压力下保持 16 h;
- c) 在试验过程中,每小时操作叶片全行程开关(2~3)次;
- d) 各组合缝不应有渗漏现象,单个叶片密封装置在加与未加试验压力情况下的漏油限量均不应超过 5 mL/h;
- e) 转轮接力器动作应平稳,开启和关闭的最低油压一般不大于额定工作压力的 15%;
- f) 绘制转轮接力器行程与叶片转角的关系曲线。

8.1.10 密封间隙应符合表 5、表 6 和表 7 的要求:

表 5 混流式转轮与顶盖和底环(止漏环)、轴流式和贯流式叶片与转轮室之间的单边间隙

单位:mm

转轮直径 $D_1$ /(mm)		间隙值			允许偏差值
		$H \leq 35$ /(m)	$35 < H \leq 100$ /(m)	$H > 100$ /(m)	
混流式	$D_1 \leq 420$	0.5	0.4	0.4	±0.1
	$420 < D_1 \leq 840$	0.6	0.6	0.4	±0.1
	$840 < D_1 \leq 1\ 200$	$(0.04 \sim 0.08) \% D_1$			
	$D_1 > 1\ 200$	$(0.04 \sim 0.07) \% D_1$			
轴流式、贯流式	$D_1 \leq 1\ 000$	$(0.08 \sim 0.135) \% D_1$			
	$1\ 000 < D_1 \leq 2\ 000$	$(0.07 \sim 0.125) \% D_1$			
	$D_1 > 2\ 000$	$(0.05 \sim 0.1) \% D_1$			

表 6 水轮机导叶与顶盖和底环间的总间隙(2 A)

单位:mm

转轮直径 $D_1$ /(mm)	间隙值 A				
	$b_0/D_1 \geq 0.35$	$b_0/D_1 \geq 0.25$	$b_0/D_1 \geq 0.2$	$b_0/D_1 \geq 0.12$	$b_0/D_1 \geq 0.1$
$D_1 \leq 420$	0.20~0.50	0.15~0.35	0.10~0.28	0.06~0.22	0.05~0.20
$420 < D_1 \leq 840$	0.25~0.60	0.18~0.45	0.12~0.35	0.08~0.28	0.06~0.23
$D_1 > 840$	0.30~0.75	0.22~0.55	0.15~0.40	0.12~0.35	0.10~0.30

注 1: 表中未列者,导叶上、下端总间隙可取导叶高度( $b_0$ )的(0.1~0.2)%。

注 2: 导叶上、下端面设有密封装置时,按图纸要求。

表 7 水轮机导叶全关时的立面间隙

单位: mm

$b_0/D_1$	$b_0/D_1 \geq 0.35$	$0.35 > b_0/D_1 > 0.2$	$b_0/D_1 \leq 0.2$
允许局部间隙	0.15	0.10	0.08
<p><sup>a</sup> 注 1: 导叶全关时, 允许在导叶高度的 1/4 范围内, 存在不大于上表给定的局部间隙, 其余范围用 0.05 mm 塞尺检查时, 均不应通过。</p> <p><sup>b</sup> 注 2: 导叶立面设有密封装置时, 其间隙不大于 0.15 mm, 密封条装入后立面应无间隙。</p> <p><sup>c</sup> 注 3: 贯流式导叶立面间隙允许局部最大不超过 0.25 mm, 其长度不超过导叶高度的 25%。</p>			

## 8.1.11 轴瓦应符合下列要求:

- 橡胶轴瓦表面应平整、无裂纹及脱壳等缺陷; 巴氏合金轴瓦应无密集气孔、裂纹、硬点及脱壳等缺陷, 瓦面粗糙度应小于  $0.8 \mu\text{m}$  的要求;
- 橡胶瓦和金属筒式瓦应与轴试装, 总间隙应符合设计要求。每端最大与最小总间隙之差及同一方位的上下端总间隙之差, 均不应大于实测平均总间隙的 10%;
- 金属筒式瓦符合 a)、b) 两项要求时, 可不再研刮; 分块瓦按设计要求确定是否研刮;
- 轴瓦研刮后, 瓦面接触应均匀。每平方厘米面积上至少有 (2~3) 个接触点; 每块瓦的局部不接触面积, 每处不应大于 5%, 其总和不应超过轴瓦总面积的 15%。

## 8.1.12 轴承应符合下列要求:

- 稀油轴承油箱, 不允许漏油, 一般应按 8.1.5 作煤油渗漏试验;
- 轴承冷却器应作耐压试验。

## 8.1.13 空气围带在装配前, 通 0.05 MPa 的压缩空气, 在水中作漏气试验, 应无漏气现象。

8.1.14 冲击式水轮机在供方工厂预装时, 引水管路的进口中心线与机组坐标线的距离偏差不应大于进口直径的  $\pm 0.2\%$ 。分瓣组合的机壳应符合 8.1.3, 对于没有密封或不加垫的组合面, 应涂密封胶。对于立式机组, 焊接在机壳上的各喷嘴法兰, 高程应一致, 其高差不应大于 1 mm; 各法兰垂直度不应大于  $0.3 \text{ mm/m}$ , 与机组坐标基准线的距离应符合设计要求。

8.1.15 冲击式水轮机喷嘴、接力器应在供方制造厂作严密性耐压试验。喷嘴和接力器组装后, 在 16% 额定压力的作用下, 喷针及接力器的动作应灵活。在接力器关闭腔通入额定压力油, 喷针头与喷嘴口应无间隙。喷针的接力器为内置式接力器时, 应检查油、水混合排污腔的漏油、漏水情况, 不得渗漏。

## 8.1.16 喷嘴的组装应符合下列要求:

- 喷嘴中心线应与转轮节圆相切, 径向偏差不应大于  $\pm 0.2\% D_1$  ( $D_1$  为转轮节圆直径), 与水斗分水刃的轴向偏差不应大于  $\pm 0.5\% W$  ( $W$  为水斗内侧的最大宽度); 如上述偏差小于  $\pm 1 \text{ mm}$  时, 取  $\pm 1 \text{ mm}$ ;
- 折向器中心与喷嘴中心偏差, 一般不大于 4 mm;
- 缓冲弹簧压缩长度对设计值的偏差, 不应超过  $\pm 1 \text{ mm}$ ;
- 各喷嘴的喷针行程的同步偏差, 不应大于设计行程的 2%;
- 反向制动喷嘴中心线的轴向和径向偏差不应大于  $\pm 5 \text{ mm}$ 。

## 8.2 验收试验

水轮机的水力性能验收试验应符合 IEC 62006 的要求。试运行持续时间宜为带负荷连续运行 72 h, 验收合格后由需方签署初步验收证书, 开始商业运行, 同时计算质量保证期。水轮机质量保证期满、各项技术保证满足供需双方签订的订货合同要求后, 由需方签署最终验收证明。

## 9 铭牌、包装、运输和保管

### 9.1 水轮机铭牌

铭牌的制作材料及刻划方法应能保证其上的字迹在设备的整个使用时期内不易磨灭,水轮机铭牌内容应包括下列内容:

- a) 名称、型号、产品编号;
- b) 最大水头、额定水头、最小水头;
- c) 额定流量;
- d) 最大功率、额定功率;
- e) 额定转速、飞逸转速;
- f) 制造厂名、出厂年月等。

### 9.2 包装及运输

9.2.1 水轮机及其供货范围内的零部件、备品备件等应经制造厂检验合格才能出厂,并附有证明产品合格的文件。

9.2.2 水轮机部件的包装尺寸和重量,应满足从供方工厂到水电站的运输条件。

9.2.3 水轮机及其辅助设备的包装运输应符合 ISO 780 的规定,并按设备的不同要求和运输方式采取防雨、防潮、防振、防霉、防冻、防盐雾等措施。

9.2.4 包装箱中应有产品合格证、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。

### 9.3 保管

9.3.1 水轮机的各加工工件、备品备件、附属设备应妥善保管,不得随意叠放。

9.3.2 水轮机的各加工件运抵水电站工地拆箱后,应防潮防湿,不得露天放置。

9.3.3 橡胶、塑料、尼龙制品应防止直接受日光照射,并不得置于加热、取暖设备附近 1.5 m 内的地方,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。

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

9.3.5 供方从发货之日起至水电站工地验收止,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。

## 10 安装、运行和维护

### 10.1 安装和试运行

10.1.1 水轮机的安装和试运行应符合 IEC 61116 和 IEC 62006 的要求。

10.1.2 水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。

10.1.3 试运行前应用油对油路系统各管道进行反复循环清洗,然后更换为设计规定的新油试运行。

### 10.2 运行和维护

水轮机运行应符合 IEC 60545 和供方提供的产品使用维护说明书的规定。

## 11 质量保证期

在正确地保管、安装和使用条件下,产品的质量保证期为自投入 72 h 试运行之日起 1 年,或从最后一批货物交货之日起 2 年,以先到期为准。质量保证期内如因制造质量引起的设备损坏或不能正常工作,供方应无偿修理或更换。

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:

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

轴流式:

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

式中:

- $\eta_{\max}$  —— 模型水轮机的最优效率;
- $K$  —— 系数,  $K=0.5\sim 0.7$ (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, m;
- $D_p$  —— 原型水轮机转轮公称直径, m;
- $H_m$  —— 模型水轮机试验水头, m;
- $H_p$  —— 原型水轮机水头, 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:

$$\Delta\eta_h = \delta_{\text{ref}} \left[ \left( \frac{R_{\text{euref}}}{R_{\text{eum}}} \right)^{0.16} - \left( \frac{R_{\text{euref}}}{R_{\text{eup}}} \right)^{0.16} \right] \dots\dots\dots (A.3)$$

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

式中:

- $\Delta\eta_h$  —— 模型效率换算为原型效率的修正值;
- $\delta_{\text{ref}}$  —— 标称的可换算为原型效率的修正值;
- $R_{\text{euref}}$  —— 标准的雷诺数;
- $R_{\text{eum}}$  —— 计算点模型雷诺数;
- $R_{\text{eup}}$  —— 计算点原型雷诺数;
- $R_{\text{euoptm}}$  —— 模型最优效率点雷诺数;
- $\eta_{\text{hoptm}}$  —— 模型最优效率;
- $V_{\text{ref}}$  —— 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和注明雷诺数和水温的模型试验资料,建议按下式计算:

$$\Delta\eta_h = (1 - \eta_{\text{hoptm}}) \times V_m \times \left[ 1 - \left( \frac{R_{\text{eum}}}{R_{\text{eup}}} \right)^{0.16} \right] \dots\dots\dots (A.5)$$

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

$$R_{\text{eum}} = R_{\text{euref}} = 7 \times 10^6 \dots\dots\dots (A.7)$$

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);
- $V_{\text{optm}}$  —— 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

B.1 冲击式水轮机效率修正公式：

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

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

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

$$C_{Fr} = \frac{F_{rp}}{F_{rm}} = \left( \frac{g_p \times H_p}{g_m \times H_m} \right)^{1/2} \times \left( \frac{B_m}{B_p} \right)^{1/2} \times \left( \frac{g_m}{g_p} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (B.4)$$

$$C_{we} = \frac{W_{ep}}{W_{em}} = \left( \frac{g_p \times H_p}{g_m \times H_m} \right)^{1/2} \times \left( \frac{B_p}{B_m} \right)^{1/2} \times \left( \frac{\rho_p}{\rho_m} \right)^{1/2} \times \left( \frac{\sigma_m^*}{\sigma_p^*} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (B.5)$$

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

式中：

$\Phi_B$  —— 流量系数；

$Q_p$  —— 原型流量,  $m^3/s$ ；

$Z_0$  —— 喷嘴数；

$g_p$  —— 电站现场重力加速度；

$g_m$  —— 实验室重力加速度；

$H_p$  —— 原型水头,  $m$ ；

$H_m$  —— 模型试验水头,  $m$ ；

$B_p$  —— 原型水斗宽度,  $m$ ；

$B_m$  —— 模型水斗宽度,  $m$ ；

$\rho_p$  —— 原型运行时水的密度,  $kg/m^3$ ；

$\rho_m$  —— 实验时水的密度,  $kg/m^3$ ；

$\sigma_p^*$  —— 原型运行时水的表面张力,  $J \cdot m^2$ ；

$\sigma_m^*$  —— 实验时水的表面张力,  $J \cdot m^2$ ；

$\gamma_p$  —— 原型运行时水的粘性系数,  $m^2/s$ ；

$\gamma_m$  —— 实验时水的粘性系数,  $m^2/s$ 。

表 B.1 不同水温下水的表面张力

温度 $\theta$ °C	表面张力 $\sigma^*$ J · m <sup>2</sup>
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

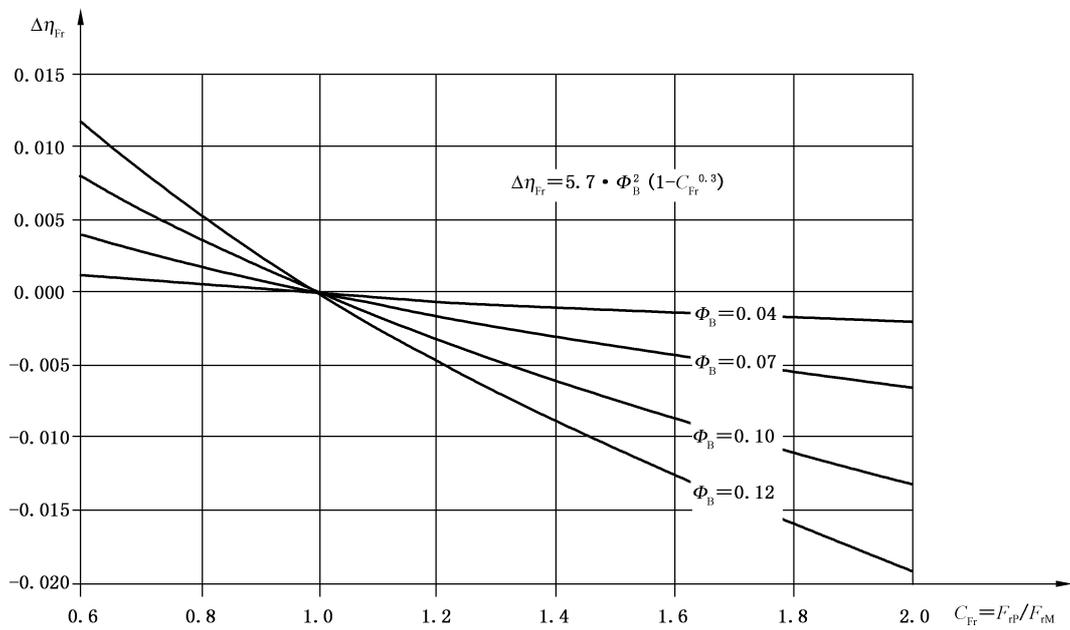


图 B.1 佛汝德数的影响

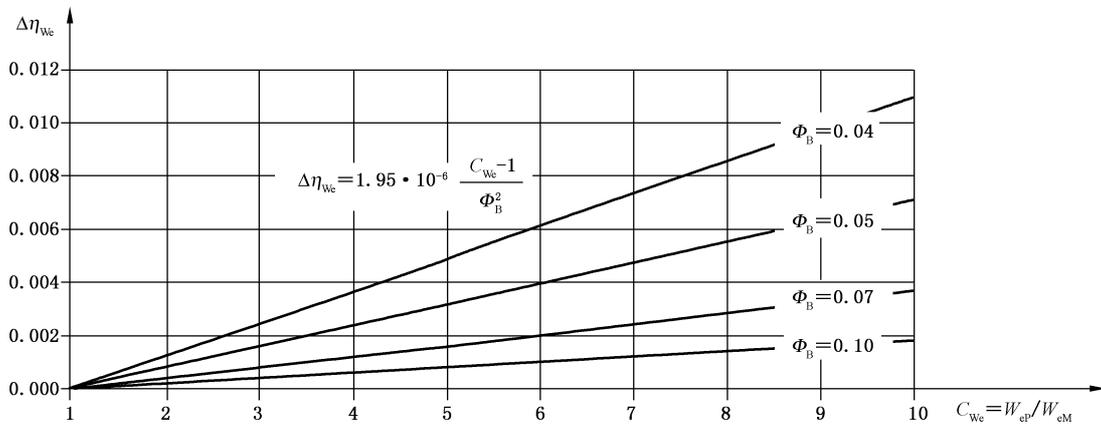


图 B.2 韦伯数的影响

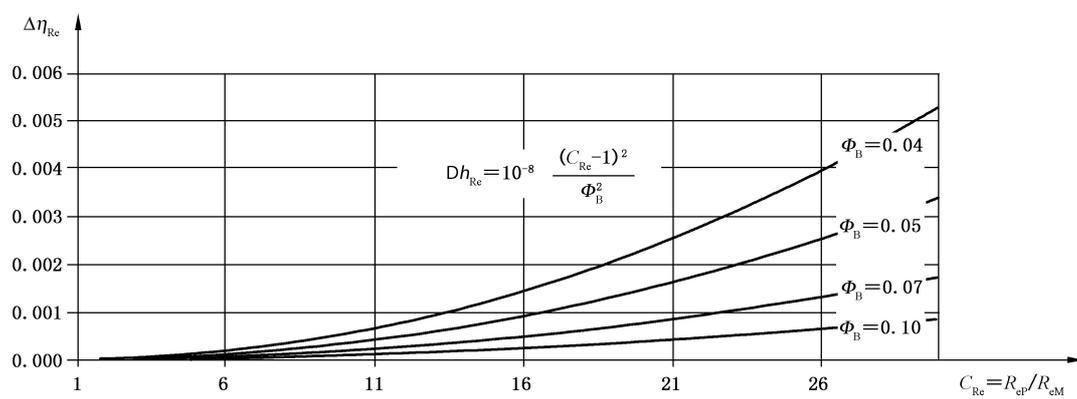


图 B.3 雷诺数的影响

**附录 C**  
(规范性附录)  
**水轮机备品备件表**

表 C.1 混流式水轮机备品备件

单位:套

序号	备品备件名称	数量			备注
		1~2 台机	3~4 台机	5台 以上	
1	导叶上、中、下轴套	1/2	1	2	
2	导叶密封圈	每台机一套			
3	导叶分半键	1/3	1/2	1	
4	导叶剪断销(拉断螺栓)	1/2	1	2	
5	导叶连杆轴套	1/4	1/2	1	
6	主轴工作密封件	每台机一套			
7	主轴检修密封件	每台机一套			
8	接力器活塞环或活塞密封件	1	1	2	
9	接力器固定密封圈	1	1	2	
10	弹簧	1	1	2	
11	水导轴承瓦	1	1	2	
12	推力轴承瓦	1	1	2	只对卧式机组
13	制动块	1	1	2	只对卧式机组

表 C.2 轴流式水轮机备品备件

单位:套

序号	备品备件名称	数量			备注
		1~2 台机	3~4 台机	5台 以上	
1	导叶上、中、下轴套	1/2	1	2	
2	导叶密封圈	每台机一套			
3	导叶分半键	1/3	1/2	1	
4	导叶剪断销(拉断螺栓)	1/2	1	2	
5	导叶连杆轴套	1/4	1/2	1	
6	主轴工作密封件	每台机一套			
7	主轴检修密封件	每台机一套			
8	接力器活塞环或活塞密封件	1	1	2	

表 C.2 (续)

单位:套

序号	备品备件名称	数量			备注
		1~2 台机	3~4 台机	5台 以上	
9	接力器固定密封圈	1	1	2	
10	各类弹簧	1	1	2	
11	转轮叶片密封	每台机一套			
12	受油器轴套	2	2	3	
13	受油器浮动瓦	2	2	3	
14	导轴瓦	1	1	1	

表 C.3 贯流式水轮机备品备件

单位:套

序号	备品备件名称	数量			备注
		1~2 台机	3~4 台机	5台 以上	
1	导叶上、下轴套	1/2	1	2	
2	导叶密封圈	每台机一套			
3	导叶分半键	1/3	1/2	1	
4	导叶保护装置	1/2	1	2	
5	导叶连杆轴套	1/4	1/2	1	
6	主轴工作密封件	每台机一套			
7	主轴检修密封件	每台机一套			
8	接力器活塞环或活塞密封件	1	1	2	
9	接力器固定密封圈	1	1	2	
10	各类弹簧	1	1	2	
11	转轮叶片密封圈	每台机一套			
12	受油器轴套	2	2	3	
13	受油器浮动瓦	2	2	3	
14	水导轴承瓦	1	1	2	
15	推力轴承瓦	1	1	2	

表 C.4 冲击式水轮机备品备件

单位:套

序号	备品备件名称	数量			备注
		1~2 台机	3~4 台机	5台 以上	
1	喷针杆密封件	每台一套			
2	喷嘴衬环	每台一套			
3	喷针杆轴套	1	2	3	
4	接力器活塞环或活塞密封件	每台一套			
5	接力器固定密封圈	每台一套			
6	折向器刀板	1			
7	导轴瓦或滚动轴承	1			



**UNITED NATIONS  
INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION**

Vienna International Centre  
P.O. Box 300 · 1400 Vienna · Austria  
Tel.: (+43-1) 26026-0  
E-mail: [info@unido.org](mailto:info@unido.org)  
[www.unido.org](http://www.unido.org)



**INTERNATIONAL NETWORK  
ON SMALL HYDROPOWER**

136 Nanshan Road  
Hangzhou · 310002 · P.R.China  
Tel.: (+86-571)87132793  
E-mail: [secretariat@inshp.org](mailto:secretariat@inshp.org)  
[www.inshp.org](http://www.inshp.org)