



UNITED NATIONS
INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION



小水电技术导则 设计

第6-1部分：水力机械及水轮发电机

SHP/TG 002-6-1: 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 设计

第 6-1 部分：水力机械及水轮发电机

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	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 水轮机	1
4.1 选型的一般要求	1
4.2 额定水头选择	2
4.3 机型选择	2
4.4 反击式水轮机基本参数的选择	3
4.5 水斗式水轮机基本参数的选择	4
4.6 机组调节保证计算	5
5 水轮发电机	5
5.1 水轮发电机选型的一般要求	5
5.2 额定数据和主要参数选择	6
5.3 发电机机械结构选择	8
5.4 发电机辅助设备选择	9
6 水轮机调速系统	10
6.1 调速系统选型的基本原则	10
6.2 调速器工作容量	10
6.3 调速器的控制系统	10
7 水轮机主阀	11
7.1 主阀设置原则	11
7.2 主阀选择	11
7.3 主阀密封型式选择	12
8 水力机械辅助设备系统	12
8.1 技术供、排水系统	12
8.2 油系统	13
8.3 压缩空气系统	13
8.4 水力监测系统	13
8.5 起重设备选择	13
8.6 采暖通风	14
8.7 机修设备配置	14
9 消防系统	14
9.1 消防系统设计的一般要求	14
9.2 技术要求	14

10 厂房布置	15
10.1 基本原则	15
10.2 技术要求	15
附录 A (规范性附录) 反击式水轮机基本参数计算参考公式	16
附录 B (规范性附录) 冲击式水轮机基本参数计算参考公式	19
附录 C (规范性附录) 部分水轮机调速系统的工作容量计算参考公式	22
附录 D (资料性附录) 典型机组布置及油、气、水系统图	23

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)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 设计

第 6-1 部分:水力机械及水轮发电机

1 范围

本部分对小型水电站水力机械主、辅机设备及水轮发电机的选型设计及布置,以及采暖通风和消防系统的设计作出规定。

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。

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 水轮机

4.1 选型的一般要求

4.1.1 水轮机型式及基本参数的选择应根据水能参数、水电站枢纽布置及运行特点,从技术特性、经济指标、运行可靠性、设计制造技术水平及运输等方面,结合现场条件,经技术经济比较后选定。

4.1.2 水轮机选型应包含以下内容:

- a) 机型和装置方式;
- b) 装机台数及单机容量;
- c) 水轮机额定水头;
- d) 水轮机的轴功率、转轮直径、额定转速、额定流量、效率、吸出高度、安装高程等基本参数,对冲击式水轮机,还应选择射流直径、喷嘴数和排空高度;
- e) 合适的模型转轮,水轮机运转特性曲线;
- f) 水轮机的主要部件外形尺寸、重量及造价。

4.1.3 水轮机选型需要的基础资料应包括:

- a) 水轮机工作水头(包括最大水头、最小水头、加权平均水头);
- b) 电站引用流量;
- c) 电站装机容量;
- d) 上、下游水位;
- e) 发电输水系统参数(包括从发电进水口至电站尾水出口的所有输水系统的型式布置、长度、管径、水头损失等参数);
- f) 尾水位与流量关系曲线;

- g) 电站保证出力,必要时可提供电能加权因子;
- h) 电站在电力系统中的运行方式及水库运行调度方式;
- i) 过机水质(含过机含沙量、粒径级配、莫氏硬度、矿物成分、pH 值和水温等);
- j) 电站气象条件(含气温、水温、相对湿度等);
- k) 电站地理位置(含电站厂房海拔高程、大气压力和重力加速度)。

4.2 额定水头选择

4.2.1 额定水头的选择应根据水电站的水头变幅、水库调节特性、机组稳定运行的要求、电站在电力系统中的运行方式以及发电输水系统特性等因素综合考虑,经技术经济比较选定。

4.2.2 中高水头的水电站,额定水头宜在加权平均水头的 0.85~0.95 倍的范围内选取。

4.2.3 径流式电站,额定水头应保证电站发足装机容量。

4.2.4 水库采取“蓄清排浑”运用方式的多泥沙河流的电站,额定水头宜在加权平均水头与水库蓄水期的下限发电水头之间选取。

4.2.5 当额定水头接近最小水头时,应论证其合理性和经济性。对于水库水位变幅较小的高水头冲击式水轮机,可采用最小水头作为水轮机额定水头。

4.3 机型选择

4.3.1 水轮机的型式选择应满足下列规定:

- a) 水轮机型式应根据 4.1 的基本原则,按运行水头范围选定。常见水轮机型式及适用水头范围应满足表 1 的规定。

表 1 水轮机型式及适用水头范围

水轮机型式			适用水头范围(m)
按能量转换方式划分	按水流流向划分	按结构特征划分	
反击式	贯流式	灯泡贯流式	2~30
		轴伸贯流式	
		竖井贯流式	
		全贯流式	
	轴流式	定桨式	2~60
		转桨式	
斜流式		40~120	
混流式		25~450	
冲击式	水斗式		60~1300
	斜击式		50~250
	双击式		5~200

注:适用水头范围为通常情况下的参数,小型水轮机选型时可根据不同工程的具体情况和特殊要求,经综合比较而定。交界水头段各机型的适用水头范围可适当放宽。

- b) 对于最大水头 20 m 及以下、单机容量大于 10 MW 的径流式电站,宜优先选用贯流式。
- c) 在交界水头下有两种适用的水轮机型式时,应从技术特性参数、经济指标、运行可靠性、设计制造难度等方面,经技术经济比较后选定。

4.3.2 模型转轮的选择应满足下列要求：

- a) 宜结合选定的水轮机型式,按照电站运行水头范围进行比选,并采用成熟可靠的模型转轮,进行水轮机基本参数的技术经济比较；
- b) 应具有较高的能量及空化性能,在所有工况下均应无明显的压力脉动和空蚀。
- c) 对于多泥沙河流电站,宜选用比转速较低的模型转轮；水头变幅大的电站应选用稳定运行区宽的模型转轮；高海拔地区的电站应结合安装高程因素选用空化性能适用的模型转轮。

4.3.3 立轴和卧轴混流式及冲击式水轮机的布置方式,应结合单机容量、转轮直径,以及适合的转速和厂房布置进行综合比较,宜优先选择卧轴布置。

4.4 反击式水轮机基本参数的选择

4.4.1 反击式水轮机基本参数的选择应在确定单机容量、额定水头和模型转轮初选后进行,主要参数包括转轮直径、额定转速、额定流量、额定效率、额定功率、吸出高度、最大飞逸转速、最大水头、最小水头、设计水头、电能加权平均效率等。

4.4.2 计算得到的多个不同的参数组合方案,应结合电站厂房布置、现场实际的地形地质条件、运行水头范围及水库调节特性,并从技术特性、经济指标、运行可靠性及设计制造技术水平等方面,经技术经济比较后确定。

4.4.3 确定水轮机主要参数后,应绘制包含等效率线、等空蚀线和出力限制线的水轮机运转特性曲线。

4.4.4 水轮机可进行轴向水推力和主要部件重量的估算。

4.4.5 水轮机应具有较高的加权平均效率,运行范围应包含高效区。水轮机在工作水头范围内应整体运行工况较好,无明显振动区。

4.4.6 水轮机吸出高度和安装高程的确定应满足以下要求：

- a) 反击式水轮机的吸出高度应按各特征水头运行工况及其相应的初生空化系数 σ_i 分别进行计算。如无初生空化系数 σ_i ,可按临界空化系数乘上比值系数 $K\sigma$ 进行计算。
- b) 电站机组共用尾水池的条件下,当装机 1 台或 2 台时,宜满足一台机组在各种水头下 50% 最大出力运行时的吸出高度和相应尾水位的要求；当装机大于 2 台时,宜满足一台机组在各种水头下最大出力运行时的吸出高度和相应尾水位的要求。
- c) 确定安装高程的设计尾水位的选取应综合考虑尾水位与流量关系特性、初期发电要求、防洪要求及下游梯级电站的运行水位等因素。
- d) 水轮机安装高程应满足各种运行工况下必需的吸出高度和相应尾水位的要求,并应满足尾水管(或尾水隧洞,不含变顶高尾水洞)出口上沿的最小淹没深度不小于 0.3 m~0.5 m 的要求。
- e) 安装高程的最终选取还应结合工程实际地形地质条件、厂区枢纽布置等因素,经技术经济比较后选定。

4.4.7 混流式或定桨式水轮机的最大飞逸转速应按最大净水头和最大单位飞逸转速确定。转桨式水轮机的最大飞逸转速应按保持协联关系计算；有特殊要求时,可按协联关系破坏的情况计算。

4.4.8 水轮机转轮直径计算应按照公式(1)进行。

$$D_1 = \sqrt{\frac{N_g}{9.81 Q'_1 H_{sj}^{1.5} \eta_T \eta_g}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

D_1 ——转轮公称直径, m；

N_g ——发电机额定功率, kW；

Q'_1 ——额定工况下的单位流量, m^3/s ；

η_T ——原型水轮机效率；

η_g ——发电机额定效率。

4.4.9 额定转速计算应按照公式(2)进行。

$$n_r = \frac{n'_1 \sqrt{H_{pj}}}{D_1} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

n_r ——额定转速, r/min;

n'_1 ——单位转速, r/min;

对混流式水轮机按 $(1 \sim 1.05)n'_{10}$ 选取, 对高比转速轴流式水轮机 $1.1n'_{10}$ 选取。

n'_{10} ——最优单位转速, r/min;

H_{pj} ——加权平均水头, m。

4.4.10 水轮机额定流量 Q_r 、吸出高度 H_s 、安装高程 ∇ 及反击式水轮机的效率修正计算参考公式见附录 A。

4.5 水斗式水轮机基本参数的选择

4.5.1 水斗式水轮机基本参数的选择应在确定单机容量、额定水头和模型转轮初选后进行, 主要参数包括额定水头、额定转速、额定流量、额定功率、节圆直径、射流直径、转轮直径与射流直径的比值 (m 值)、水斗数、额定效率、最大水头、最小水头、设计水头、飞逸转速、排出高度等。水轮机基本参数的选择应经技术经济比较后确定。

4.5.2 确定水轮机主要参数后, 应绘制包含水轮机出力限制线、等效率线的水轮机运转特性曲线。

4.5.3 水斗式水轮机基本参数的计算可采用固定比转速法, 利用模型综合特性曲线进行参数换算, 也可采用变比转速法进行。

4.5.4 水斗式水轮机的喷嘴数量一般采用 1、2、4 个, 喷嘴数量选择时应考虑喷嘴的布置, 避免射流互相干涉。

4.5.5 水斗数选择时应避免射流漏斗现象, 同时应兼顾水斗的布置和加工。

4.5.6 对于多喷嘴水轮机, 其射流夹角应避免为相邻水斗夹角的整数倍。

4.5.7 为保证水轮机具有较高的效率, m 值宜在 10~20 范围内选取, m 值选取时应考虑转轮的制造方式和水斗的强度, 高水头宜取大值、低水头宜取小值。

4.5.8 水轮机单位流量计算时, 应考虑真机和模型水轮机 m 值的不同, 其单位流量可按式(3)进行换算。

$$Q''_1 = (m/m_M)^2 \times Q'_1 \dots\dots\dots (3)$$

式中：

Q''_1 ——模型水轮机单位流量, m^3/s ;

Q'_1 ——真机单位流量, m^3/s ;

m ——真机 m 值;

m_M ——模型水轮机 m 值。

4.5.9 水斗式可不作修正。当水轮机 m 值超出 10~20 范围时, 可考虑 0.5% 左右的负修正。

4.5.10 水轮机运行范围应包含高效区。

4.5.11 水斗式水轮机最大单位飞逸转速可取 75 r/min; 最大飞逸转速按最大水头工况确定。

4.5.12 水斗式水轮机的排空高度的选择应保证水轮机安全稳定运行, 避开尾水涌浪的影响, 在电站最高尾水位和任何发电工况下尾水渠应保持足够的通气高度。

4.5.13 排出高度应为转轮节圆直径 $(1 \sim 1.5)D_1$, 卧轴机组取小值, 立轴机组取大值; 在确定排出高度时, 应保证必要的通气高度, 通气高度宜不小于 300 mm。

4.5.14 转轮直径和 m 值计算应按照公式(4)和公式(5)进行。

$$D_1 = \frac{(39 \sim 40) \sqrt{H_{sj}}}{n_r} \dots\dots\dots(4)$$

$$m = \frac{D_1}{d_0} \dots\dots\dots(5)$$

式中：

D_1 ——水斗的节圆直径，m；

m ——转轮直径与射流直径的比值； m 值宜在 10~20 范围内。低水头宜取小值，高水头宜取大值。

4.5.15 水斗式水轮机射流直径 d_0 、额定转速 n_r 、喷嘴直径 d_p 及水斗数 Z_1 估算、排空高度 h_p 及安装高程 ∇ 等计算参考公式见附录 B。

4.5.16 斜击式水轮机基本参数的选择可参照本节要求进行。

4.6 机组调节保证计算

4.6.1 水轮机调节保证计算应根据电站的电气主接线方式及电网要求、电站输水系统型式和参数、水轮发电机组特性及参数、运行工况等因素进行。

4.6.2 具有分岔压力钢管的水电站，机组最大转速升高率和蜗壳末端最大压力升高率，应根据连接于总压力钢管上的机组台数和电气主接线方式，按可能同时甩负荷的机组台数进行计算。

4.6.3 对于发电输水系统较简单的小型水电站，调节保证计算可按经验公式计算，可采用数值计算法或解析法；输水系统复杂的电站应采用计算机仿真计算。

4.6.4 轴流式及贯流式机组可设置二段关闭装置。

4.6.5 无调压设施的水轮机输水系统的水流惯性时间常数 T_w 不应大于 4 s；反击式机组惯性时间常数 T_a 不应小于 4 s，冲击式机组惯性时间常数 T_a 不应小于 2 s；比值 T_w/T_a 不宜大于 0.4，对于 T_w/T_a 大于 0.4 时，可进行小波动时的引水系统和机组稳定性计算。

4.6.6 轴流式及贯流式机组计算转速升高率时宜计入水流惯性矩的影响，调节保证计算应包括反水锤压力。

4.6.7 机组甩负荷时的最大转速升高率保证值，应按以下不同情况选取：

- a) 当机组容量占电力系统总容量的比重较大，或担负调频任务时，宜小于 50%；
- b) 当机组容量占电力系统总容量的比重不大，或不担负调频任务时，宜小于 60%~65%；
- c) 贯流式机组最大转速升高率宜小于 65%；
- d) 冲击式机组最大转速升高率宜小于 30%。

4.6.8 机组甩负荷的蜗壳末端(贯流式机组活动导叶前)最大压力升高率保证值，按以下情况选取：

- a) 额定水头小于 20 m，宜为 70%~100%；
- b) 额定水头在 20 m~40 m 时，宜为 70%~50%；
- c) 额定水头在 40 m~100 m 时，宜为 50%~30%；
- d) 额定水头在 100 m~300 m 时，宜为 30%~25%；
- e) 额定水头大于 300 m，宜小于 25%。

4.6.9 机组突增或突减负荷时，压力输水系统全线各断面最高点处的最小压力不应低于 0.02 MPa，不得出现负压脱流现象。

4.6.10 甩负荷时，尾水管进口断面的最大真空保证值不应大于 0.08 MPa。

5 水轮发电机

5.1 水轮发电机选型的一般要求

5.1.1 水轮发电机的选型主要是根据选定的水轮机型式和参数以及电力系统的要求，配合水轮机选型

确定的机组出力、转速及机组结构和布置形式等参数进行技术经济比较后选定。

5.1.2 水轮发电机选型应包含以下内容：

- a) 发电机额定功率/视在功率(P_r/S_r)；
- b) 发电机额定电压(U_r)；
- c) 额定转速(n_r)；
- d) 额定频率(f_r)；
- e) 功率因数($\cos\Phi$)；
- f) 绝缘等级；
- g) 励磁方式；
- h) 发电机通风冷却形式；
- i) 发电机转动惯量(GD^2)；
- j) 估算水轮发电机的主要设备的外形尺寸、重量及造价。

5.1.3 水轮发电机选型主要应依据下列因素：

- a) 水轮机特性确定功率和转速；
- b) 电力系统要求确定电压和功率因数；
- c) 水电站调节保证计算和电力系统的要求确定发电机转动惯量；
- d) 综合情况确定发电机的结构形式。

5.2 额定数据和主要参数选择

5.2.1 发电机功率应满足下列要求：

- a) 满足发电机功率与水轮机出力的关系：
 - 1) 直联机组：发电机额定功率等于水轮机额定出力乘以发电机效率；
 - 2) 增速机组：发电机额定功率等于水轮机额定出力乘以增速机构效率再乘以发电机效率。
- b) 发电机额定功率优先选择系列(MW)：
0.5,0.63,0.8,1.0,1.25,1.6,2.0,2.5,3.2,4.0,5.0,6.3,8.0,10.0

5.2.2 发电机电压应满足下列要求：

- a) 满足国家的电网要求；
- b) 额定电压的选择应考虑额定电流取值范围,额定电流的计算应按照式(6)进行：

$$I_r = \frac{1\ 000P_r}{\sqrt{3}U_r \cos\varphi} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- I_r —— 额定电流, A；
- P_r —— 额定功率, MW；
- U_r —— 额定电压, V；
- $\cos\varphi$ —— 功率因数。

5.2.3 发电机功率因素应满足下列要求：

- a) 额定功率因数在满足电网要求的条件下,可选择 0.8~0.92(滞后)；
- b) 发电机在额定功率下允许进相运行；
- c) 在系统允许的条件下功率因数尽量选择较大值,电站靠近负荷中心选择较小值,输电距离远时选择较大值。

5.2.4 发电机同步转速应满足下列要求：

- a) 发电机的同步转速由水轮机选型确定,并按照式(7)计算：

$$n_r = \frac{60f_r}{p} \dots\dots\dots(7)$$

式中:

n_r ——同步转速,r/min;

f_r ——电网频率,Hz;

p ——磁极对数,2p 为极数。

b) 常规发电机同步转速见表 2。

表 2 同步发电机可选转速表

极数 2p	4	6	8	10	12	14	16	(18)	20	(22)	24
n_r (50 Hz)	1 500	1 000	750	600	500	428.6	375	(333.3)	300	(272.7)	250
n_r (60 Hz)	1 800	1 200	900	720	600	514.3	450	(400)	360	(327.3)	300
极数 2p	(26)	28	30	32	(34)	(36)	40	42	(44)	48	(50)
n_r (50 Hz)	(230.8)	214.3	200	187.5	(176.5)	(166.7)	150	142.9	(136.4)	125	(120)
n_r (60 Hz)	(276.9)	257.1	240	225.0	(211.8)	(200)	180	171.4	(163.6)	150	(144)
极数 2p	(52)	56	60	64	(66)	(68)	70	(72)	(78)	80	...
n_r (50 Hz)	(115.4)	107.1	100	93.8	(90.9)	(88.2)	85.7	(83.3)	(76.9)	75	...
n_r (60 Hz)	(138.5)	128.6	120	112.5	(109.1)	(105.9)	102.9	(100)	(92.3)	90	...

注: 无括号转速为推荐转速,必要时可选择括号内转速。

c) 机组转速判断系数计算应按照公式(8)进行,转速判断系数应按照表 3 的规定:

$$K_n = P_r (10^{-3} n_r)^3 \dots\dots\dots(8)$$

式中:

K_n ——转速判断系数;

P_r ——额定功率,MW;

n_r ——额定转速,r/min。

表 3 转速判断系数表

K_n	$K_n \leq 0.01$	$0.01 < K_n \leq 0.15$	$0.15 < K_n \leq 2$	$2 < K_n \leq 4$ 立式 $n_r \geq 1\ 000$ 卧式 $n_r \geq 1\ 500$	$K_n > 4$
转速判断系数	超低转速	低转速	中转速	高转速	超高转速

注: 机组不宜选择超低转速和超高转速,必须选择超高转速时应进行详细技术评估。

5.2.5 发电机功率与效率关系宜满足表 4 的要求。

表 4 出力与效率关系表

P (MW)	$0.5 < P \leq 1.0$	$1.0 < P \leq 2.0$	$2.0 < P \leq 5.0$	$5.0 < P \leq 10$
效率(%)	90~94.5	90~95.5	92~96	93~96.5

5.2.6 发电机绝缘等级应选 F 级。在高海拔情况下及环境空气温度特殊的情况下应进行温升修正。

5.2.7 转动惯量应满足下列要求:

- a) 机械时间常数计算应按照(9)进行,取值范围满足 5 的规定。

$$T_{mec} = 2.74GD^2 (10^{-3}n_r)^2 / P_r \dots\dots\dots(9)$$

式中:

- T_{mec} —— 机械时间常数;
- GD^2 —— 转动惯量, $t \cdot m^2$;
- n_r —— 额定转速, r/min ;
- P_r —— 额定功率, MW 。

表 5 T_{mec} 取值范围

$n_r (r/min)$	$1\ 500 \leq n_r \leq 1\ 000$	$750 \leq n_r \leq 428.6$	$375 \leq n_r \leq 200$	$n_r < 200$
$T_{mec} (s)$	2~3.5	2.5~5	3~6	3.5~6.5
注: 低速发电机和大功率发电机可选表 5 中较高值, 高速发电机和小功率发电机选低值。				

- b) 增加转动惯量的方法应满足下列要求:

- 1) 少量提高可采用增加转子较大回转直径部分重量实现;
- 2) 较大提高转动惯量时可采用加大定子铁芯外径的方法;
- 3) 卧式机组可按照表 6 的规定, 采用加装飞轮的方法增加转动惯量。

表 6 加装飞轮可增加的转动惯量

$n_r (r/min)$	1 500	1 000	750	600、500	≤ 428.6
$GD^2 (tm^2)$	0.2~0.7	0.3~1.4	0.5~3	0.75~4.5	1~6
注: 大功率发电机取高值, 小功率发电机取小值。					

- c) 机组转动惯量的确定应满足下列要求:

- 1) 机组需要的转动惯量由电站水力系统调保计算确定。
- 2) 发电机转动惯量取值应合理, 需要较高转动惯量时, 应综合考虑对发电机尺寸、外形、效率、稳定性、重量等因素的影响。

5.2.8 发电机短路比取值范围应满足表 7 的规定。小网运行机组宜选高值, 低速机组宜选高值, 高速机组宜选低值。

表 7 功率因数与短路比取值表

功率因数(滞后)	0.8	0.85	0.9
短路比	0.9~1.0	0.95~1.05	1.0~1.1

5.3 发电机机械结构选择

5.3.1 定子铁芯外径的选择应按照下列方式:

- a) 常用定子铁芯外径: 740、850、990、1 180、1 430、1 730、2 150、2 600、2 860、3 250、3 300、3 600、3 850、4 250、4 650、5 000、5 500、6 000 等;
- b) 常规定子铁芯外径估算可以按公式(10)进行:

$$D \approx 1\,500 \left(\frac{P_r^{1.25}}{n_r^{kd}} \right)^{0.25} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

D —— 定子铁芯外径初算直径, mm;

P_r —— 额定功率, MW;

n_r —— 额定转速, r/min;

K_d —— 取值系数: 超低转速 1.3, 低转速 1.4, 其他转速 1.5。

c) 立式反击式机组可按式(11) 估算定子铁芯外径:

$$D \approx K_s D_1 \left(1 + \frac{2.7}{2P} \right) \dots\dots\dots (11)$$

式中:

D_1 —— 转轮直径, mm;

K_s —— 在轴流式水轮机时取 1.35, 混流式时取 1.45;

$2P$ —— 发电机极数。

d) 发电机按式(10)估算 D 值, 立轴反击式水轮发电机组考虑顶盖从定子内径整体吊出时按式(11)估算另一个 D 值, 比较后取大值, 并选择相近的定子铁芯外径;

e) 卧式机组宜选择较小的定子铁芯外径以降低机组中心高。

5.3.2 轴承应满足下列要求:

- a) 每台水轮发电机至少装设两个轴承, 轴承由制造厂根据负载情况选用。
- b) 滚动轴承适用于卧轴定子铁芯外径 990 mm 及以下的两支点、三支点、四支点发电机组, 以及立轴定子铁芯外径 1 180 mm 及以下且不承受水轮机转动部分重量和轴向水推力的发电机组。
- c) 滑动轴承适用于所有发电机。
- d) 除卧轴冲击式机组只装有两个径向轴承外, 其他类型的水轮发电机组应至少装设一个推力轴承。

5.4 发电机辅助设备选择

5.4.1 发电机的冷却方式应为空气冷却, 通风方式可采用密闭循环, 管道通风, 开启式三种:

- a) 密闭循环: 冷却发电机后的热空气经空气冷却器冷却后再密闭输回发电机, 适用于所有类型发电机。卧式密闭循环发电机空冷器可以布置在机坑内, 发电机侧面或顶部。
- b) 管道通风: 直接轴向进风的普通管道通风结构和从机坑内吸气的密闭管道通风结构两种形式。
- c) 开敞式通风: 在厂房内取空气冷却发电机后热空气直接排放在厂房内。
- d) 不同通风方式适用范围可参考表 8。功率重叠范围内的发电机应根据不同环境温度进行选取。

表 8 不同通风方式适用范围

通风方式	开敞式通风	普通管道通风	密闭管道通风	密闭循环通风
功率 P_r (MW)	~1.0	0.8~3.2	2.5~6.3	3.2~

5.4.2 采用滑动轴承的水轮发电机组宜装设机械制动装置, 带反喷制动的冲击式机组可不设置机械制动。机械制动应满足下列要求:

- a) 机械制动装置的制动介质宜选用 0.7 MPa 压缩空气, 也可使用减压的调速器压力油作制动介质。

- b) 制动瓦应采用无石棉环保材料。
- c) 立轴发电机机械制动装置中,压力油应能顶起机组转动部件并在任意位置安全锁定,活塞直径大于 100 mm 的制动器应采用油气分离结构。

5.4.3 应按国家消防规范选择电站及发电机的灭火方式。

5.4.4 发电机应根据不同的环境湿度及机组容量确定是否装设除湿装置。除湿装置可采用电加热器和除湿机。采用电加热器时应保证机坑内空气温度高于环境温度 5 K,同时不能有局部高温损伤绝缘。

6 水轮机调速系统

6.1 调速系统选型的基本原则

6.1.1 调速系统应能在所有运行工况下,可靠地控制机组,并能按调节保证计算要求的时间开、停机。

6.1.2 对存在孤网运行可能的机组应配置全自动微机调速系统,能够在与系统解列时确保电站设备和用户用电安全。

6.1.3 对于无调频任务及故障时无需保证厂用电的小型 and 微型机组,可选用电动操作器或液压操作器,但应确保故障时机组能安全可靠停机。对于无直流操作电源的电站,所选操作器应具有失电动作的紧急停机装置。

6.1.4 对于带有调压阀控制功能的调速器,调压阀的控制应采用液压联动。

6.1.5 宜采用高油压(10 MPa 及以上)囊式蓄能器的结构型式,并宜采用外置接力器的结构型式。

6.1.6 应满足自动调节及远方控制的各项要求,并可手动操作,满足机组调试、启动、事故及检修过程中的需要。

6.2 调速器工作容量

6.2.1 调速器工作容量的选择应保证机组在最大水头、最大流量情况下能够可靠地控制,并能按调节保证计算要求的时间开、停机,调速器工作容量应经计算并留有一定裕量。

6.2.2 中小型混流式及轴流定桨式水轮机控制系统的工作容量可按公式(12)计算:

$$A = KQ \sqrt{H_{\max} D_1} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

- A ——接力器工作容量, N·m;
- K ——系数,取值范围:250~300;
- Q ——机组额定流量, m³/s;
- H_{max} ——最大水头, m;
- D₁ ——水轮机转轮直径, m。

6.2.3 冲击式水轮机、转桨式水轮机、轴伸贯流式和灯泡贯流式水轮机调速系统的工作容量计算参考公式见附录 C。

6.3 调速器的控制系统

6.3.1 调速器的控制系统宜采用单微机系统,并联 PID 结构。

6.3.2 宜采用先进成熟的硬件及配套的电子元器件,硬件宜采用可编程控制器(PLC)或单片机。并应配置与计算机监控系统的通讯接口。

6.3.3 调速器的控制系统应具备以下基本辅助功能:频率跟踪(或快速并网)、故障检测及处理、人工失灵区、无扰动手自动切换、辅助试验、部分容错功能等。

7 水轮机主阀

7.1 主阀设置原则

7.1.1 对于由一根压力输水总管分岔供给几台水轮机的小型水电站,在每台水轮机前应设置主阀。

7.1.2 对于压力管道较短的坝后式水电站单元输水系统、径流式或河床式水电站的低水头单元输水系统,水轮机前可不设置主阀。

7.2 主阀选择

7.2.1 水轮机主阀的选择应根据电站水头、最高瞬态压力、水轮机额定流量、蜗壳进口直径及泥沙特性,从技术、经济和运行安全可靠等方面综合分析后选定。

7.2.2 主阀选型应包含以下内容:

- a) 主阀型式;
- b) 主阀设计压力、公称直径;
- c) 主阀操作方式;
- d) 主阀密封型式;
- e) 旁通阀型式及直径;
- f) 主阀开启和关闭时间。

7.2.3 主阀选型应需要下列基础资料:

- a) 电站最大静水头、主阀处最高瞬态压力;
- b) 水轮机额定流量;
- c) 蜗壳进口直径;
- d) 过机泥沙含量及特性;
- e) 引水系统长度及排空时间。

7.2.4 主阀型式选择应满足下列要求:

- a) 水轮机主阀型式可有蝴蝶阀、球阀和闸阀。最大水头低于 250 m 时宜选用蝴蝶阀;最大水头高于 250 m(含 250 m)时宜选用球阀或闸阀。用作水轮机主阀的蝴蝶阀应采用偏心型结构,阀体上应标有指示水流方向的箭头;球阀应选用全通路固定式球阀,宜采用卧轴布置;闸阀应选用全通路式结构,阀轴应采用垂直安装。
- b) 水轮机主阀应能动水关闭,其关闭时间不应超过机组在最大飞逸转速下持续运行允许的时间。主阀还应在其两侧的压力差不大于 30%最大静水压的范围内,均能正常开启,且不产生有害振动。

7.2.5 主阀基本参数选择应满足下列要求:

- a) 主阀设计压力为最高瞬态压力,单位为 MPa。
- b) 蝴蝶阀公称直径可按公式(13)、(14)计算:

$$D_f = \frac{D_0}{\sqrt{\alpha}} \dots\dots\dots(13)$$

$$\alpha = 1 - 0.0687 \sqrt[3]{H_{\max}} \dots\dots\dots(14)$$

式中:

D_f ——蝴蝶阀直径,m;

- D_0 ——蜗壳进口断面直径, m;
- α ——与水头有关的系数;
- H_{max} ——电站最大静水头, m。

c) 主阀操作方式应满足的要求如下:

- 1) 主阀的操作方式可采用手动、液压驱动和电动操作等方式。对按无人值班(少人值守)设计的水电站,主阀应采用电动或液压驱动的方式;
- 2) 采用液压驱动的主阀,主要有重锤式和蓄能器式两种。重锤式液控装置应采用油泵供油的油压开启,采用重锤关闭,配置蓄能器用于液压系统保压;蓄能器式应采用蓄能器的油压开启和关闭,配置油泵用于维持蓄能器压力。液压驱动的主阀应设置检修用的手动机械锁定装置;
- 3) 手动阀门应设置明显的指示关闭方向的箭头。

d) 旁通阀型式选择及直径应满足下列要求:

- 1) 旁通阀可采用直通阀或角阀。中低水头宜采用直通阀,高水头宜采用角阀;
- 2) 旁通阀的过水能力应大于导叶漏水量,其公称直径不应小于10%的主阀公称直径;
- 3) 对于含沙量大和水头较高的,旁通阀直径可按式(15)初步计算:

$$D_p = (0.29 \sim 0.33) \sqrt{\frac{Q_{sj}}{\sqrt{H_{sj}}}} \dots\dots\dots (15)$$

式中:

- Q_{sj} ——水轮机设计流量, m^3/s ;
- H_{sj} ——水轮机设计水头, m。

e) 主阀开启和关闭时间可调范围宜为 60 s~120 s。主阀在动水中的关闭时间不应超过机组在最大飞逸转速下的允许运行时间。

7.3 主阀密封型式选择

在中低水头和水流含沙量大时,主阀密封型式宜采用橡胶软密封;在高水头和水流含沙量小时,主阀密封型式宜采用金属硬密封。轴端密封可采用整圈的实心橡胶密封。

8 水力机械辅助设备系统

8.1 技术供、排水系统

8.1.1 水源的选择应根据用水设备对水量、水压、水温及水质的要求,结合电站的具体条件合理选定。水源可取自水库、压力钢管、电站尾水或其他水源。

8.1.2 技术供水方式应根据电站的水头范围确定:

- a) 当最小水头小于 15 m 时,宜采用水泵供水方式;
- b) 净水头在 15 m~100 m 时,宜采用自流或自流减压供水方式;
- c) 净水头大于 100 m 时,宜采用自流减压或其他供水方式。

8.1.3 技术供水系统应能自动操作。

8.1.4 水轮机主轴密封用水宜设备用水源,且备用水源应能自动投入。

8.1.5 当采用水泵供水方式时,应设置备用水泵。

8.1.6 技术供水系统应设置滤水器。滤水器清污时,系统供水不应中断。轴承润滑水、主轴密封用水的水质应满足机组用水的要求。

8.1.7 机组检修排水和厂内渗漏排水宜分别设置排水系统。排水泵应满足下列要求:

a) 机组检修排水泵宜设置两台,其总排水量应能保证在 4 h~6 h 内,排除一台机组检修总排水量。

b) 厂内渗漏集水井排水泵应不少于两台,其中一台备用,排水泵应随集水井水位变化自动控制。

8.1.8 厂区室外排水应自成系统,不应将其引入厂内集水井或集水廊道。

8.1.9 电站渗漏排水未经处理不宜直接排入河道。

8.2 油系统

8.2.1 电站可根据需要设置透平油系统,配置油处理及储油设备。电站可不设绝缘油系统。

8.2.2 透平油油罐的容积应满足贮油、检修换油和油净化等要求。透平油罐的容积宜为容量最大的 1 台机组用油量的 110%。

8.2.3 油处理设备应包括油泵和净油设备,其品种、容量和台数可根据电站用电量确定。

8.2.4 梯级水电站或水电站群宜设置中心油务系统。中心油务系统应设置贮油、油处理和油净化设备。设有中心油务系统的电站,油系统应简化配置。

8.3 压缩空气系统

8.3.1 电站厂房内可根据需要设置中压和低压压缩空气系统。

8.3.2 供油压装置充气的中压空气压缩系统的压力,应根据油压装置的额定工作压力确定,其空气压缩机应设 2 台,1 台工作,1 台备用,并应设置贮气罐。贮气罐的容积可按压力油罐的运行补气量确定。贮气罐额定工作压力宜高于压力油罐额定工作压力 0.2 MPa~0.3 MPa。贮气罐上应设安全阀、压力表和排污阀。

8.3.3 机组制动、检修维护和水轮机主轴围带密封应的低压空气压缩系统的压力应为 0.7 MPa~0.8 MPa, 机组制动用气应满足下列要求:

a) 机组制动用气宜设置专用贮气罐及专用供气管道。

b) 机组制动用气贮气罐的总容积应按同时制动的机组台数的总耗气量确定。

c) 空气压缩机的容量应按同时制动的机组耗气量和恢复贮气罐工作压力的时间确定,恢复贮气罐工作压力的时间可取 10 min~15 min。

d) 机组制动用气应有备用空气压缩机或其他备用气源。

8.3.4 空气压缩机额定工作压力宜高于贮气罐额定工作压力 0.1 MPa~0.2 MPa。

8.4 水力监测系统

8.4.1 水力监测系统应满足水轮发电机组安全可靠经济运行、自动控制的要求。

8.4.2 电站宜设置上游水位、下游水位、调压室水位、电站水头、拦污栅前后压差、水库水温等;机组宜设置蜗壳进口压力、顶盖压力、尾水管进口压力、尾水管出口压力以及机组冷却水压力等常规量测项目,根据需要也可设置机组过流流量、水轮机压力脉动、机组效率、机组振动、机组摆度、尾水管压力(真空)等选择性测量项目。

8.4.3 水力监测系统应结合电站的自动化监控系统,进行设计布置。

8.5 起重设备选择

8.5.1 电站主厂房应设置起重机或其他起重设备。起重机可选择单小车、双小车桥式起重机。额定起重量应按吊运最重件和起吊工具的总重量,并参照起重机系列的标准起重量确定。起重机的跨度可按起重机标准跨度选取。起重机的提升高度和速度应满足机组安装和检修的要求。

8.5.2 设有 GIS 室的电站宜设置 GIS 室安装检修用的起重机。

8.6 采暖通风

- 8.6.1 电站的采暖通风方式应根据当地气象条件、厂房型式及各生产场所对空气参数的要求确定。
- 8.6.2 地面式厂房的主机间、安装间和副厂房的通风方式宜采用自然通风。当自然通风达不到室内空气参数要求时,可采用自然与机械联合通风、机械通风、局部空气调节等方式。
- 8.6.3 发电机采用管道式通风时,其热风应引至厂房外。
- 8.6.4 油罐室和油处理室应分别设置单独的通风系统。通风系统的排风口应高出屋顶 1.5 m。
- 8.6.5 GIS室换气次数应为 8 次/h,吸风口应设置在房间下部。
- 8.6.6 主、副厂房的室内温度低于 5 °C 时,应设置采暖装置。
- 8.6.7 坝底廊道应设置必要的通风设施。

8.7 机修设备配置

- 8.7.1 机修设备可根据机电设备检修内容、对外交通、外厂协作加工条件等因素配置。
- 8.7.2 梯级水电站和水电站群宜设置中心修配厂。

9 消防系统

9.1 消防系统设计的一般要求

- 9.1.1 电站及机组设备的消防系统应遵循国家的消防规范。
- 9.1.2 电站宜划分建筑物的火灾危险性类别及耐火等级。

9.2 技术要求

- 9.2.1 厂区内消防车道宽不宜小于 4.0 m,并宜与厂内交通道路合用。尽头式消防车道应设置回车场。
- 9.2.2 电站主、副厂房的安全疏散出口不应少于两个。发电机层及以下各层,室内最远工作地点到该层最近的安全疏散出口的距离不宜超过 60 m。
- 9.2.3 单台油容量超过 1 000 kg 的油浸主变压器及其他充油设备应设 100% 贮油坑,或 20% 贮油坑和公共贮油池。
- 9.2.4 电力电缆及控制电缆应分层敷设。分层敷设的电缆层间应采用耐火极限不小于 0.5 h 的隔板分隔。
- 9.2.5 电缆隧道及沟道每 100 m 应设置一个防火分隔物,穿墙应采取封堵和分隔措施。
- 9.2.6 单机容量不小于 12.5 MV·A 的水轮发电机组应设置水喷雾或 CO₂ 喷雾自动灭火系统,单台容量不小于 12.5 MV·A 的室内油浸主变压器应设置水喷雾等自动灭火系统。
- 9.2.7 厂房应设排烟设施,并应与厂内通风系统结合。
- 9.2.8 厂区消防给水水源可采用天然水源自流、专用消防水池、消防水泵供水等,消防给水可与生活、生产供水系统合并。供水水质、水压、水量应满足消防给水的要求。
- 9.2.9 消防设备应按二级负荷供电,并采用单独的供电回路。消防控制设备应设在中央控制室内。采用消防水泵供水时,宜在消火栓箱中设置消防水泵启动装置。
- 9.2.10 厂房的疏散通道、楼梯间、出口、消防水泵房等部位应设置应急照明及疏散指示标志。
- 9.2.11 电站应设火灾自动报警装置。

10 厂房布置

10.1 基本原则

水力机械设备和电气设备宜分区布置。主厂房机组段的长度和宽度应根据机组及流道、调速器、油压装置、主阀、电气盘柜等尺寸,并结合安装、检修、运行、交通及土建设计等要求确定。主厂房宽度还应满足起重机吊运部件和主阀所需尺寸的要求。厂房布置应充分考虑生态流量及环境保护、绿色开发的综合要求。

10.2 技术要求

10.2.1 主厂房起吊高度应满足下列要求:

- a) 发电机转子连轴整体吊运的要求;
- b) 水轮机连轴套装及整体吊运的要求;
- c) 如需要,可考虑主变压器进厂检修的要求;
- d) 应满足灯泡贯流式机组导水机构等部件翻身的要求;
- e) 起重机吊运部件与固定物之间的距离,垂直方向不应小于 0.3 m,水平方向不应小于 0.4 m。

10.2.2 安装间的面积应根据 1 台机组扩大性检修的需要确定,机组主要部件应布置在起重机吊钩工作范围线之内,并应满足下列要求:

- a) 满足安装及大修过程中吊运大件次序的要求;
- b) 机组大件之间、机组大件与墙(柱)和固定设备之间的净距为 0.8 m~1.0 m;
- c) 满足车辆进厂装卸的要求;
- d) 透平油室可设在厂房内,绝缘油罐宜设在厂房外,油处理室应布置在油罐室附近;
- e) 其他辅助机械的布置应便于设备的安装、运行及检修维护。

10.2.3 典型机组布置及油、气、水系统图参见图 D.1~图 D.7。

附录 A

(规范性附录)

反击式水轮机基本参数计算参考公式

A.1 额定流量计算

$$Q_r = Q'_{1r} D_1^2 \sqrt{H_r} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

- Q_r —— 额定流量, m^3/s ;
- Q'_{1r} —— 额定工况下的单位流量, m^3/s ;
- H_r —— 额定水头, m ;
- D_1 —— 转轮公称直径, m 。

A.2 吸出高度计算及水轮机安装高程的确定

A.2.1 吸出高度计算见式(A.2)

$$H_s \leq 10 - \frac{\nabla}{900} - K_\sigma \sigma_m H \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

- H_s —— 吸出高度, m ;
- K_σ —— 装置空化系数与模型空化系数之比值;
- σ_m —— 水轮机模型空化系数;
- H —— 水轮机水头, m ;

一般可按额定水头计算,对轴流式水轮机还应对最小水头,对混流式水轮机还应对最大水头及相对应的 σ_m 进行核算。

A.2.2 立轴混流式水轮机安装高程计算见式(A.3)

$$\nabla = \nabla_w + H_s + \frac{b_0}{2} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

- ∇ —— 安装高程, m ;
- ∇_w —— 尾水位, m ;
- b_0 —— 导叶高度, m 。

A.2.3 立轴轴流式水轮机安装高程计算见式(A.4)

$$\nabla = \nabla_w + H_s + x D_1 \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

- x —— 轴流式水轮机高度系数。

A.2.4 卧轴反击式水轮机安装高程计算见式(A.5)

$$\nabla = \nabla_w + H_s - \frac{D_1}{2} \dots\dots\dots (A.5)$$

A.3 反击式水轮机效率及其修正计算

A.3.1 原型水轮机效率计算见式(A.6)、(A.7)

$$\eta_T = \eta_M + \Delta\eta \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

$$\Delta\eta = \eta_{Tmax} - \eta_{Mmax} \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

式中：

- η_M ——模型水轮机效率；
- $\Delta\eta$ ——水轮机效率修正值；
- η_{Tmax} ——原型水轮机最高效率；
- η_{Mmax} ——模型水轮机最高效率。

水轮机的效率修正除了按照下述 A.3.2~A.3.4 所列的参考公式计算外,尚应考虑原型水轮机与模型水轮机之间的异形部件、工艺偏差引起的修正。当转轮直径小于 1 m 时应负修正。

A.3.2 水轮机效率修正第一种方法,见式(A.8)(A.9)

混流式：

$$\Delta\eta = K(1 - \eta_{Mmax}) \left[1 - \left(\frac{D_{1M}}{D_1} \right)^{0.2} \right] \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

轴流式：

$$\Delta\eta = K(1 - \eta_{Mmax}) \left[0.7 - 0.7 \left(\frac{D_{1M}}{D_1} \right)^{0.2} \left(\frac{H_M}{H_P} \right)^{0.1} \right] \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

式中：

- K ——系数, $K=0.5\sim 0.7$ (改造机组取小值,新机组取大值)；
- D_{1M} ——模型水轮机转轮直径,m；
- H_M ——模型水轮机试验水头,m；
- H_P ——原型水轮机水头,m。

A.3.3 水轮机效率修正第二种方法,见式(A.10)(A.11)

IEC 60193 推荐的反击式水轮机效率修正计算公式：

$$\Delta\eta_b = \delta_{ref} \left[\left(\frac{Re_{uref}}{Re_{um}} \right)^{0.16} - \left(\frac{Re_{uref}}{Re_{up}} \right)^{0.16} \right] \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

$$\delta_{ref} = \frac{1 - \eta_{boptm}}{\left(\frac{Re_{uref}}{Re_{uoptm}} \right)^{0.16} + \frac{1 - V_{ref}}{V_{ref}}} \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

式中：

- $\Delta\eta_b$ ——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_{boptm} ——模型最优效率；
- V_{ref} ——标准的损失分布系数(转桨式取 0.8,混流式和定桨式取 0.7)。

A.3.4 水轮机效率修正第三种方法

对已有的模型试验曲线,注明雷诺数和水温的模型试验资料,可按式(A.12~14)计算：

$$\Delta\eta_b = (1 - \eta_{boptm}) V_m \left[1 - \left(\frac{Re_{um}}{Re_{up}} \right)^{0.16} \right] \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

$$V_m = V_{optm} = V_{ref} \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

$$Re_{um} = Re_{uref} = 7 \times 10^6 \quad \dots\dots\dots (A.14)$$

式中:

- V_m ——模型的损失分布系数;
- V_{optm} ——模型最优效率点的损失分布系数。

A.4 额定功率计算

$$N_{Tr} = 9.81Q_r H_r \eta_{Tr} \quad \dots\dots\dots (A.15)$$

式中:

- N_{Tr} ——水轮机额定功率, kW;
- η_{Tr} ——额定工况原型水轮机效率。

A.5 最大飞逸转速计算

混流式或者定桨式水轮机的最大飞逸转速应按最大水头和最大单位转速确定。转桨式水轮机的最大飞逸转速应按保持协联关系计算;有特殊要求时,可按协联关系破坏的情况计算。

$$n_{fmax} = n'_{1fmax} \frac{\sqrt{H_{max}}}{D_1} \quad \dots\dots\dots (A.16)$$

式中:

- n_{fmax} ——最大飞逸转速, r/min;
- n'_{1fmax} ——最大单位飞逸转速, r/min;
- H_{max} ——最大水头, m;

A.6 轴向水推力估算

$$P_z = K_z \frac{\pi}{4} D_1^2 H_{max} \text{ (kN)} \quad \dots\dots\dots (A.17)$$

式中:

- P_z ——轴向水推力, kN;
- K_z ——轴向水推力系数, 由相关实验参数获得。

附录 B

(规范性附录)

冲击式水轮机基本参数计算参考公式

B.1 射流直径计算

$$d_0 = 545 \sqrt{\frac{Q_{sj}}{K_p Z_0 \sqrt{H_{sj}}}} \dots\dots\dots (B.1)$$

$$Q_{sj} = \frac{N_f}{9.81 H_{sj} \eta_T \eta_f} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

- d_0 —— 射流直径, mm;
- Q_{sj} —— 设计工况下的水轮机流量, m^3/s ;
- K_p —— 转轮个数;
- Z_0 —— 每个转轮的喷嘴数;
- η_T —— 设计工况下的原型水轮机效率;
- η_f —— 发电机效率。

B.2 额定转速计算

$$n_r = \frac{n_s H_{sj}^{1.25}}{\sqrt{N_{Tr}}} = \frac{n_s H_{sj}^{1.25}}{\sqrt{K_p Z_0 N_1}} = \frac{n_{s1} H_{sj}^{1.25}}{\sqrt{N_1}} \dots\dots\dots (B.3)$$

$$n_{s1} = \frac{n_s}{\sqrt{K_p Z_0}} \dots\dots\dots (B.4)$$

$$N_1 = \frac{N_{Tr}}{K_p Z_0} \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

- n_s —— 水轮机的比转速, $m \cdot kW$;
- n_{s1} —— 单喷嘴的比转速, $m \cdot kW$;
- N_1 —— 单个喷嘴出力, kW。

B.3 转轮直径和 m 值计算

$$D_1 = \frac{(39 \sim 40) \sqrt{H_{sj}}}{n_r} \dots\dots\dots (B.6)$$

$$m = \frac{D_1}{d_0} \dots\dots\dots (B.7)$$

式中:

- D_1 —— 水斗的节圆直径, m;
 - m —— 转轮直径与射流直径的比值, 无量纲;
- 为了保证水轮机能有较高的效率, m 值宜在 10~20 范围内。小值适用于低水头, 大值适用于高

水头。

B.4 喷嘴直径及水斗数估算

$$d_p = (1.15 \sim 1.25)d_0 \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

$$Z_1 = 6.67 \sqrt{\frac{D_1}{d_0}} \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

式中：

d_p ——喷嘴直径，mm；

Z_1 ——水斗数。

B.5 排空高度计算

B.5.1 排空高度是使水斗式水轮机全安稳定运行，避开负荷变化时的涌浪、保证通风、防止因尾水渠中的涡流及水流飞溅而造成能量损失所必需的高度。

B.5.2 在确定排出高度时，应保证必要的通风高度，一般通风高度不宜小于 400 mm。

B.5.3 排空高度计算，参考式(B.10)

$$h_p = (1.0 \sim 1.5)D_1 \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

式中：

h_p ——排空高度，立轴机组取大值，卧轴机组取小值，单位为毫米(m)。

B.6 安装高程计算

B.6.1 安装高程应根据发电的最高尾水位确定，在任何发电工况下尾水渠宜保持足够的排空高度。

B.6.2 对立轴水斗式水轮机

$$\nabla = \nabla_{wm} + h_p \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

式中：

∇_{wm} ——最高尾水位，m。

B.6.3 对卧轴水斗式水轮机

$$\nabla = \nabla_{wm} + h_p + \frac{D_1}{2} \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

B.7 额定比转速计算

$$n_{sr} = \frac{n_r \sqrt{N_{Tr}}}{H_r^{5/4}} \quad \dots\dots\dots (B.13)$$

式中：

n_{sr} ——额定比转速，m · kW。

B.8 最大飞逸转速计算

$$n_{fmax} = \frac{70 \sqrt{H_{max}}}{D_1} \quad \dots\dots\dots (B.14)$$

式中：

$n_{f\max}$ ——最大飞逸转速，r/min。

B.9 额定功率计算

$$N_{Tr} = 9.81Q_r H_r \eta_{Tr} \dots\dots\dots (B.15)$$

式中：

N_{Tr} ——水轮机额定功率，kW；

η_{Tr} ——额定工况原型水轮机效率。

附录 C

(规范性附录)

部分水轮机调速系统的工作容量计算参考公式

C.1 冲击式水轮机

冲击式水轮机调速系统的工作容量计算,见式(C.1)、(C.2)

$$A_{nz} = 10Z(d_0 + \frac{d_0^2 H_{max}}{6000}) \dots\dots\dots (C.1)$$

$$A_{de} = 11 \times 10^{-3} d_0^3 H_{max} Z \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

- A_{nz} ——喷针接力器的工作容量, N·m;
- Z ——喷嘴数;
- d_0 ——保证流量(或出力)的射流直径, cm;
- H_{max} ——最大水头, m;
- A_{de} ——折向器接力器的工作容量, N·m;

C.2 转桨式水轮机

转桨式水轮机调速系统的工作容量计算,见式(C.3)、(C.4)

$$A_{ga} = K_1 Q \sqrt{H_{max} D_1} \dots\dots\dots (C.3)$$

$$A_{ru} = K_2 \varphi H_{max} D_1^3 \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

- A_{ga} ——导叶接力器工作容量, N·m;
 - K_1 ——系数,取值范围:250~300;
 - Q ——机组额定流量, m³/s;
 - H_{max} ——最大水头, m;
 - D_1 ——水轮机转轮直径, m;
 - A_{ru} ——桨叶接力器工作容量, N·m;
 - K_2 ——系数;
 - φ ——桨叶两极限位置之间的转角,单位为弧度;
- 当轮叶片数 $Z=4$ 时, $K_2=8.0$; $Z=5$ 时, $K_2=8.5$; $Z=6$ 时, $K_2=9.0$ 。

C.3 轴伸贯流式和灯泡贯流式水轮机

轴伸贯流式和灯泡贯流式水轮机调速系统的工作容量计算,见式(C.5)

$$A = 400Q \sqrt{H_{max} D_1} \dots\dots\dots (C.5)$$

式中:

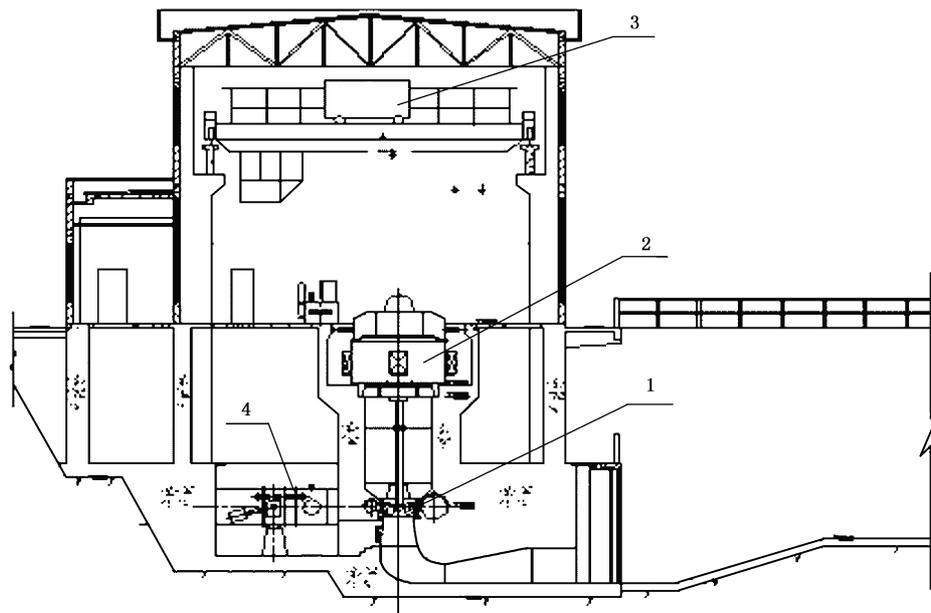
- A ——接力器工作容量, N·m;
- Q ——机组额定流量, m³/s;
- H_{max} ——最大水头, m;
- D_1 ——水轮机转轮直径, m。

附录 D

(资料性附录)

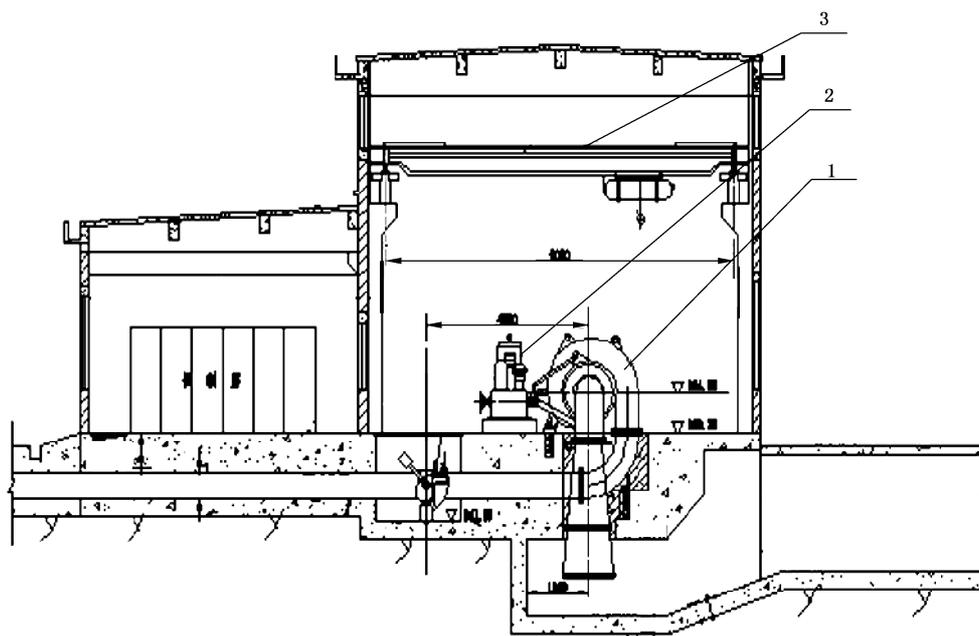
典型机组布置及油、气、水系统图

D.1 典型立轴及卧轴机组布置形式：



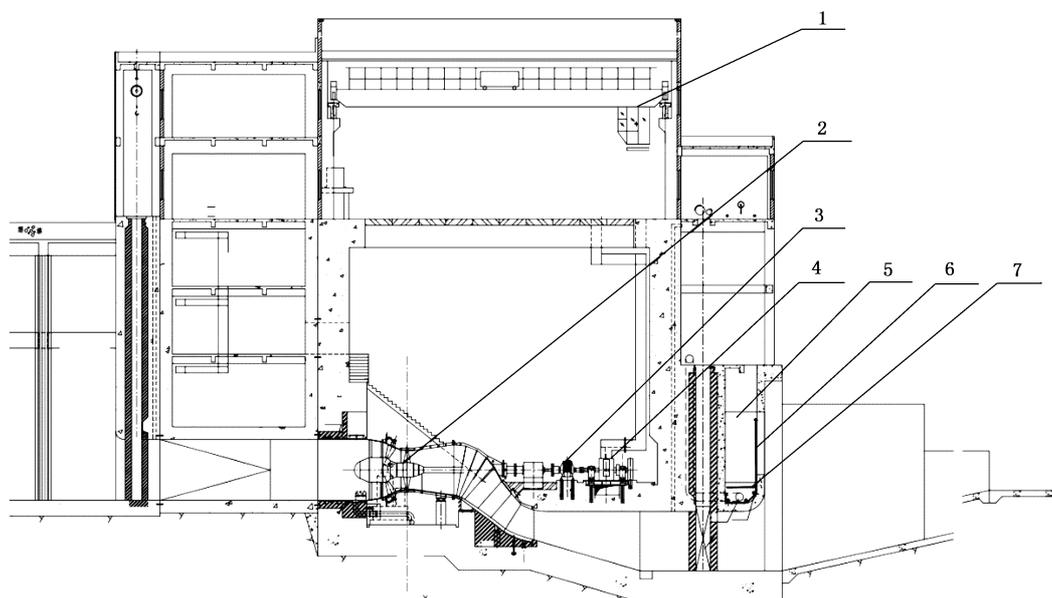
- 1——水轮机；
- 2——发电机；
- 3——桥式起重机；
- 4——主阀。

图 D.1 立式机组发电厂横剖面图



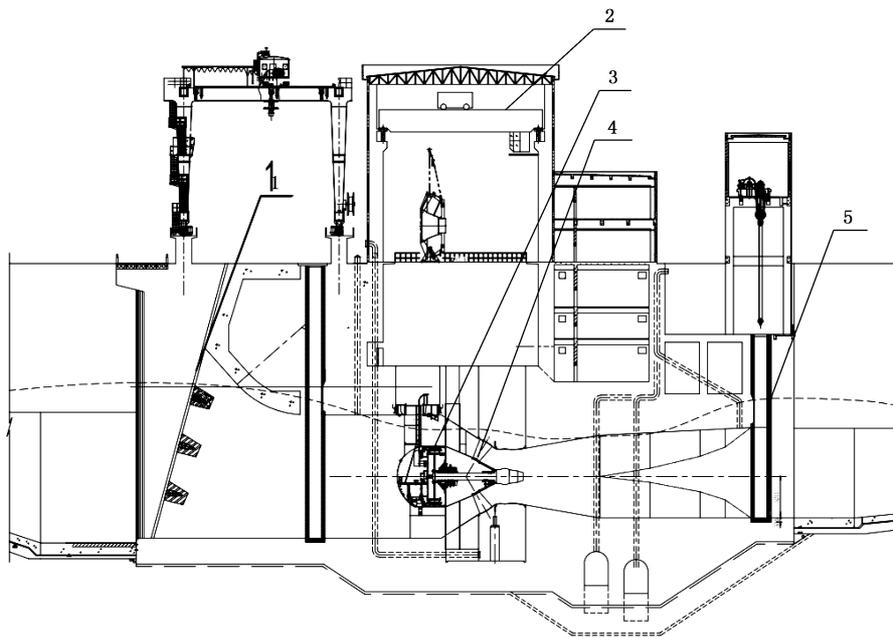
- 1——水轮机；
- 2——调速器；
- 3——桥式起重机。

图 D.2 卧式机组发电厂横剖面图



- 1——桥式起重机；
- 2——水轮机；
- 3——增速器；
- 4——发电机；
- 5——尾水引鱼箱；
- 6——帘式调节堰；
- 7——消能网。

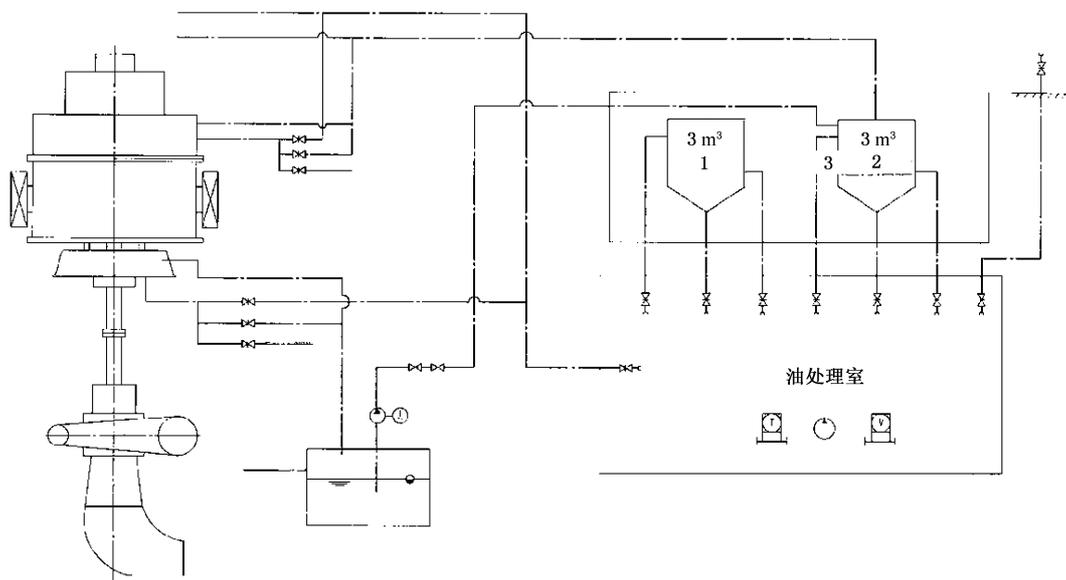
图 D.3 轴伸贯流式机组发电厂横剖面图



- | | |
|-----------|------------|
| 1——拦污栅； | 4——水轮机； |
| 2——桥式起重机； | 5——快速事故闸门。 |
| 3——发电机； | |

图 D.4 灯泡贯流式机组发电厂横剖面图

D.2 典型油、气、水系统图：



- | |
|----------|
| 1——净油罐； |
| 2——运行油罐； |
| 3——油处理室。 |

图 D.5 透平油系统原理图

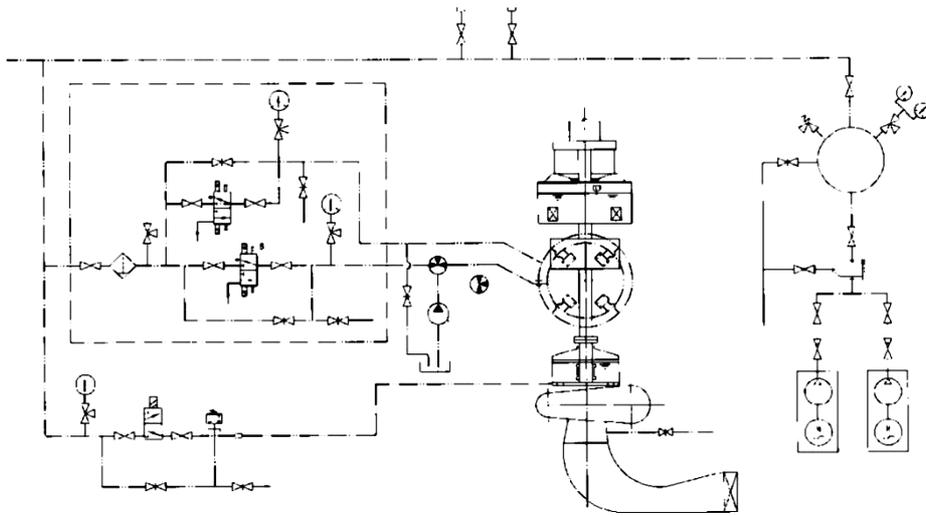


图 D.6 低压压缩空气系统原理图

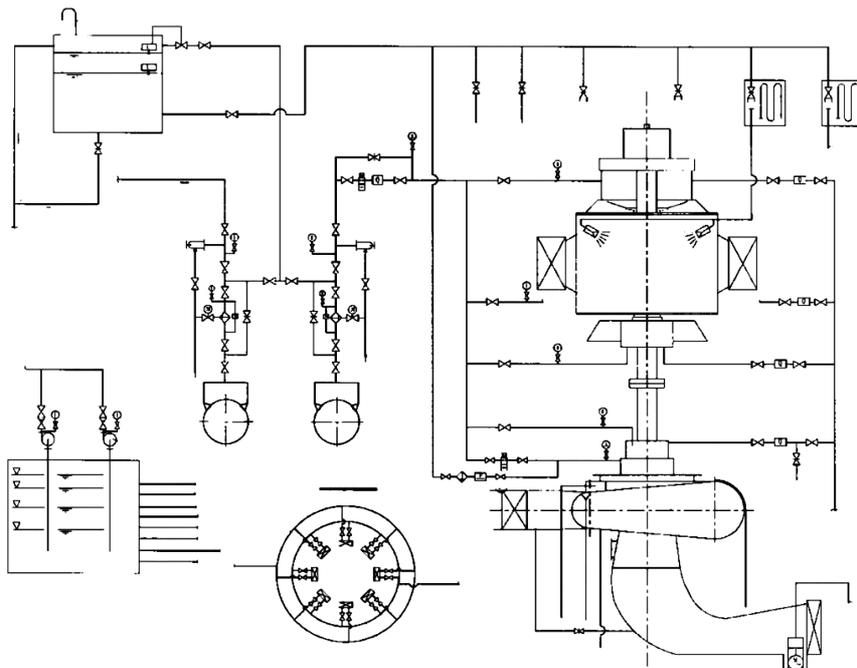


图 D.7 技术供排水系统原理图



**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
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
www.inshp.org