

水轮机设计手册

(水轮发电机组设计手册第一部分)

哈尔滨大电机研究所编著

机械工业出版社

(内部发行)

统一书号: 15033·(内) 669

定 价: 2.70 元

水 轮 机 设 计 手 册

(水轮发电机组设计手册第一部分)

哈尔滨大电机研究所编



机 械 工 业 出 版 社

本手册为水轮发电机组设计手册的第一部分,总结建国以来水轮机设计和制造经验,重点介绍大、中型水轮机的设计原则和设计方法,提供了各型水轮机基本参数选择、调节保证计算、典型结构和系列尺寸、主要零部件的强度计算和制造工艺、材料选用等所需的各种图表、曲线、计算公式和数据。对于和水轮机配套的辅助设备、进口阀门也作了相应的介绍,对于调速器、油压设备和自动化元件作了概要介绍。

本手册供有关设计、制造、安装、运行部门、有关大专院校和科研部门参考使用。

水 轮 机 设 计 手 册
(水轮发电机组设计手册第一部分)
哈尔滨大电机研究所编
(内 部 发 行)

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可出字第117号)

上海商务印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 34 1/4·插页 1·字数 864千字

1976年11月上海第一版·1976年11月上海第一次印刷

印数 00,001—10,000·定价 2.70元

统一书号: 15033·(内)669

前 言

在伟大领袖毛主席和中国共产党的英明领导下,二十多年来,我国水力发电设备制造工业从无到有,从小到大,从解放初期只能生产单机几百千瓦的发电设备到现在可以成套供应单机容量为几十万千瓦的水电机组,发展速度之快充分显示了我国社会主义制度的优越性。特别是无产阶级文化大革命以来,在毛主席无产阶级革命路线的指引下,国民经济飞跃发展,全国各地大、中、小型水电站如雨后春笋般地涌现出来,发电设备的制造能力成倍地增长,工人阶级登上上层建筑舞台,技术队伍迅速成长壮大。为适应新形势需要,总结建国以来水力发电设备的设计制造经验,加强标准化、系列化、通用化,提高产品质量,促进生产科研,多、快、好、省地发展我国水电设备制造事业,我们编写了这部“水轮发电机组设计手册”,供有关设计、制造、安装、运行部门、有关大专院校和科研部门参考使用。

手册分三部分:第一部分为水轮机设计手册,第二部分为水轮发电机设计手册,第三部分为调速器、油压设备、自动化元件设计手册。这次出版的是“水轮机设计手册”,其余两部分将陆续出版。

本手册主要介绍大、中型机组的设计原则和设计方法,对小型机组也可参照使用。为了提高产品设计的工艺性,对关键性工艺也有所论述。

手册的选材立足于国内的生产和科研实践,着重总结和推荐比较成熟的经验,同时遵照毛主席“洋为中用”的教导,也参考了一些国外的设计资料。为了加强手册的实用性,技术数据和图表占有较大的篇幅,文字叙述尽量从简。遵照毛主席关于调查研究和要认真总结经验的教导,在手册编写过程中曾去有关制造厂、水电站和科研单位调查研究,收集资料和征求意见,有四十多个单位提供了许多宝贵的资料和意见,给手册编写创造了有利条件,对于这些有关单位的热情帮助和大力支持,在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限,缺点和错误在所难免,望同志们批评指正。

哈尔滨大电机研究所

一九七五年六月

目 录

前 言

第一章 总论	1
第一节 水轮机的分类与牌号	1
第二节 各型水轮机的性能与使用范围	2
第三节 水轮机组的布置型式	4
第四节 各型水轮机的结构特点与装配系统	7
一、混流式水轮机的结构特点	7
二、轴流式水轮机的结构特点	10
三、斜流式水轮机的结构特点	15
四、贯流式水轮机的结构特点	15
五、水斗式水轮机的结构特点	15
六、混流式水轮机和轴流式水轮机的装配系统	19
第二章 水轮机基本概念	20
第一节 水轮机的基本方程式	20
第二节 水轮机的相似关系	21
第三节 水轮机的汽蚀	23
第四节 水轮机的比转速	25
第三章 反击式水轮机暂行系列型谱	29
第一节 转轮型谱参数	29
一、大、中型轴流式转轮型谱参数	29
二、大、中型混流式转轮型谱参数	32
三、中、小型轴流式、混流式转轮型谱参数	51
第二节 转轮直径尺寸系列	51
第四章 大、中型水轮机基本工作参数的计算和选择	52
第一节 水轮机的基本工作参数	52
第二节 水轮机综合特性曲线简述	54
第三节 安装高程、吸出高度和汽蚀损坏评定	56
第四节 水轮机的效率及效率修正	58
第五节 水轮机的工作特性曲线和运转特性曲线	60
第六节 飞逸转速计算	63
第七节 轴向推力的计算	66
第八节 反击式水轮机基本参数的选择	67
一、原始数据	67
二、选择转轮型号	67
三、设计单位流量 Q_1 的选择	67
四、转轮直径 D_1 的计算	67

五、转速 n 的计算	68
六、保证功率和保证效率	68
七、水轮机设备数据一览表	69
第九节 水斗式水轮机基本参数的选择	69
一、水轮机流量	70
二、射流直径 d_0	71
三、确定 D_1/d_0	71
四、水轮机转速 n	71
五、功率与效率	71
六、飞逸转速	72
七、水轮机的水平中心线至尾水位距离 A	72
八、喷嘴数 Z_0 的确定	72
九、水斗数目 Z_1 的确定	72
十、水斗和喷嘴的尺寸与射流直径的关系	73
十一、引水管、导水肘管及其曲率半径	73
十二、转轮室的尺寸	74
第五章 调节保证计算	75
第一节 水锤压力变化 ζ 的计算	75
一、压力波传播速度 a	75
二、管路特性特征值	75
三、直接水锤和间接水锤	76
四、直线关闭规律时的水锤	77
第二节 速率上升 β 的计算	79
第三节 调节保证计算标准	82
第六章 蜗壳与座环	84
第一节 蜗壳的分类及其流速系数选择	84
一、蜗壳的分类	84
二、蜗壳的流速系数选择	84
第二节 混凝土蜗壳的水力设计	87
一、蜗壳包角 φ 的选择	87
二、混凝土蜗壳进口断面形状的选择	87
三、蜗形部分的水力计算	88
第三节 金属蜗壳的水力设计	89
一、与座环蝶形边相切或相接的金属蜗壳水力设计	89
二、与无蝶形边座环连接的钢板焊接蜗壳水力设计	92
三、与座环以圆弧相切的铸造蜗壳水力设计	93
第四节 金属蜗壳强度计算与材料选用	94
一、强度计算	94
二、蜗壳的应力分布	97
三、金属蜗壳的材料及其许用应力	97
第五节 蜗壳的结构与制造要求	98

一、混凝土蜗壳	98
二、金属蜗壳的结构与制造要求	99
第六节 座环的结构型式和尺寸系列	101
一、结构型式	101
二、尺寸系列	104
三、座环的制造要求	105
第七节 座环固定导叶的水力设计	106
一、与金属蜗壳连接的座环固定导叶的水力设计	106
二、与混凝土蜗壳连接的座环固定导叶的水力设计	107
三、包角为 180° 的混凝土蜗壳非蜗形部分固定导叶进口角推荐值	108
第八节 座环强度计算	109
一、混凝土蜗壳的座环强度计算	109
二、金属蜗壳的座环强度计算	113
第七章 尾水管、转轮室及其他埋入部件	117
第一节 尾水管的选择及其里衬的结构设计	117
一、尾水管的选择	117
二、尾水管里衬的结构	122
第二节 转轮室、基础环的结构设计	124
一、转轮室的结构与尺寸	124
二、基础环的结构设计	125
第三节 机坑里衬及地板装置	126
一、机坑里衬	126
二、地板装置	126
第八章 导水机构	130
第一节 导水机构的分类与要求	130
一、圆柱式导水机构	130
二、圆锥式导水机构	132
三、径向式导水机构	132
第二节 导水机构的装配系列及公差选择	132
一、导水机构系列尺寸	132
二、导水机构的排水系统	132
三、导水机构的零件公差与配合间隙	134
第三节 导叶	135
一、导叶的叶形和系列尺寸	135
二、导叶布置图	135
三、导叶的结构、系列尺寸和轴颈选择	145
四、导叶的密封结构	148
五、导叶的强度计算	149
第四节 导叶套筒	154
一、导叶套筒的结构和系列	154
二、套筒强度计算	154
第五节 导叶止推装置	156

第六节 导叶轴颈密封及其轴套	158
一、导叶轴颈密封	158
二、导叶轴套	160
第七节 导叶的传动机构设计	163
一、叉头传动机构	163
二、耳柄传动机构	176
第八节 导水机构的环形部件设计	182
一、底环的结构设计	182
二、控制环的结构设计与强度计算	184
三、顶盖和支持盖的结构设计与强度计算	189
四、推力轴承支架结构与强度计算	200
第九章 导叶操作油压计算与接力器设计	204
第一节 接力器的布置形式及其选择	204
第二节 导叶操作油压的计算	206
一、导叶上的作用力矩	206
二、接力器操作油压计算	211
三、接力器操作油压实测结果	212
第三节 导水机构接力器系列	214
第四节 接力器零部件强度计算	217
一、接力器缸	217
二、接力器后缸盖	219
三、接力器前缸盖	220
四、导管	221
五、锁锭缸	222
六、活塞杆	222
七、活塞环	223
第十章 混流式转轮	224
第一节 混流式转轮的流道尺寸	224
第二节 混流式转轮的典型结构与系列尺寸	225
一、典型结构	225
二、系列尺寸	227
第三节 止漏装置、减压装置、泄水锥	232
一、止漏装置设计	232
二、减压装置结构	236
三、泄水锥结构	236
第四节 转轮的分瓣结构与焊接结构	237
一、分瓣结构	237
二、焊接结构	238
第五节 混流式转轮的材料和抗汽蚀、泥沙磨损措施	240
第六节 混流式转轮的制造要求	241
一、转轮铸件的技术要求	241

二、加工要求	242
三、混流式转轮的平衡要求	242
第七节 混流式转轮的强度估算	244
一、下环应力估算	244
二、上冠应力估算	246
三、上冠分瓣面连接件强度计算	247
四、转轮重心计算	248
第十一章 轴流式与斜流式转轮	250
第一节 轴流式转轮的流道尺寸	250
第二节 轴流式转轮结构	250
一、轴流定桨式转轮	250
二、轴流转桨式转轮	252
三、转桨式转轮主要部件结构设计	255
第三节 接力器容量与操作油压计算	267
一、转轮叶片上的水流作用力和力矩	267
二、作用在转轮叶片上的摩擦力矩	272
三、转轮叶片的操作力矩和接力器操作油压计算	276
第四节 转桨式转轮主要部件的制造要求	281
第五节 转桨式转轮主要部件强度计算	283
一、叶片	283
二、转轮体	285
三、活塞	289
四、接力器缸	290
五、接力器缸盖	290
六、操作杆	291
七、操作架	291
八、导向键	292
九、连杆	292
十、转臂及转臂销	293
十一、叶片枢轴、卡环及轴套	294
十二、叶片固定螺钉	296
十三、叶片密封零件	297
第六节 斜流式转轮	299
一、转轮结构	299
二、转轮叶片操作机构的运动原理及受力分析	300
三、叶片操作力和接力器容量计算	302
第十二章 主轴与操作油管	308
第一节 主轴的结构与标准系列	308
第二节 主轴强度与扭转振动计算	320
一、基本数据	320
二、轴身应力计算	321
三、厚壁轴法兰与轴身联接处应力计算	321

四、薄壁轴法兰与轴身联接处应力计算	322
五、轴流式水轮机转轮盖与主轴法兰合一结构的应力计算	325
六、主轴联轴螺钉及螺帽应力计算	326
七、主轴扭转振动计算	328
八、主轴横向振动计算	334
第三节 主轴的材质与制造要求	334
一、材质要求	334
二、制造要求	335
第四节 操作油管的结构和尺寸系列	336
第五节 操作油管的计算	339
第十三章 轴承及密封装置	343
第一节 轴承型式及使用条件	343
第二节 水润滑橡胶轴承	345
一、系列尺寸	345
二、水润滑轴承计算	345
第三节 稀油润滑筒式轴承	355
一、主要结构尺寸的确定	355
二、承载能力与上油量计算	360
三、冷却装置与热计算	362
四、稀油润滑筒式轴承系列尺寸	366
第四节 稀油润滑油浸式分块瓦轴承	367
一、结构要求和主要尺寸选择	367
二、分块瓦轴承计算	369
三、运行机组的分块瓦轴承结构参数	370
第五节 轴承主要件材质与制造要求	370
第六节 密封装置	371
一、密封装置型式及使用条件	371
二、橡胶平板密封	373
三、端面密封	374
四、水泵密封	376
五、检修密封	377
第十四章 水斗式水轮机	378
第一节 水斗式水轮机的布置型式	378
第二节 转轮	380
一、转轮的结构与材料	380
二、水斗的受力与强度计算	381
三、轮辐与轮毂的强度计算	383
第三节 喷管	385
一、喷管结构	385
二、作用在喷针头上的力及其平衡	386
三、喷针接力器操作容量计算	389

第四节 双重调节机构	389
一、概述	390
二、结构	390
三、机构运动图的绘制	390
第五节 折向器	394
一、型式	394
二、作用在折向器上的力	394
第六节 机壳与管道	395
一、机壳	395
二、引水钢管及其布置	396
三、三叉管	397
第七节 制动喷嘴	397
第十五章 水轮机的辅助装置	399
第一节 混流式水轮机的补气装置	399
一、补气装置的作用	399
二、补气方式与补气位置	399
三、补气量与补气孔口尺寸选择	401
四、尾水管补气装置的设计	401
五、主轴中心孔补气装置	402
第二节 其他辅助设备	403
一、真空破坏阀	403
二、空气阀	404
三、排水阀	404
四、射流泵	406
五、漏油箱	407
六、滤水器	408
第十六章 调速系统及管路布置	409
第一节 调速器	409
一、机械液压式调速器	409
二、电气液压调速器	417
第二节 油压设备	425
一、油压设备结构简述	425
二、YS-A 型油压设备的系列	426
第三节 自动化系统	429
一、对机组实现自动化的要求	429
二、混流式与轴流式水轮机的自动化系统	429
三、水轮机的自动化元件	429
第四节 调速器的选择	448
一、接力器关闭速度计算	448
二、调速器选择	450
第五节 油压设备的选择	451

一、基本假定	451
二、油压设备容量估算	452
三、事故低压紧急停机压力信号器的压力整定值	453
第六节 凸轮设计	453
一、协联关系曲线 $\varphi=f(a_0)$ 的绘制	453
二、凸轮转角 β 与滚轮行程 S_y 的关系曲线的确定	455
三、各种水头下凸轮断面形状的绘制	457
四、凸轮的结构图	458
第七节 受油器	458
一、结构简要说明	460
二、主要结构形式与参考尺寸	460
第八节 回复机构	465
第九节 调速系统管路布置	471
第十节 水、气管路布置	472
一、橡胶轴承润滑水管路	472
二、稀油润滑轴承冷却水和轴承密封水管路	474
三、调相管路	474
四、仪表测量管路	474
第十七章 水轮机进水管路上的阀门	475
第一节 阀门的功用及装设位置	475
一、阀门的装设位置	475
二、阀门的型式及使用范围	475
三、对阀门的基本要求与设备布置	481
第二节 蝴蝶阀	481
一、蝴蝶阀直径的选择	483
二、立轴和卧轴蝴蝶阀的比较	483
三、阀体	484
四、活门、阀轴和轴承	484
五、密封装置	487
六、水压试验和漏水试验	489
第三节 球阀	491
一、阀体与活门	491
二、密封装置	492
第四节 活门操作机构的种类	493
一、手动或电动操作机构	493
二、液压操作机构	493
第五节 蝴蝶阀和球阀活门上的作用力和力矩计算	496
一、静水压力和力矩	496
二、动水压力和力矩	496
三、摩擦力和摩擦力矩	500
四、活门的操作力矩	500

XIV

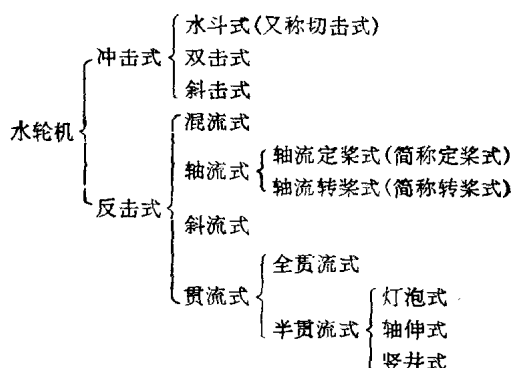
第六节 蝶阀和球阀活门操作接力器直径的计算	501
一、导管式接力器	501
二、摇摆式接力器	504
三、确定操作阀门接力器直径的简易方法	506
第七节 阀门主要部件的强度计算	506
一、蝶阀阀体	506
二、蝶阀活门	506
三、球阀阀体	508
四、球阀活门	511
第八节 阀门的附件	512
一、旁通阀	512
二、伸缩节	515
第九节 阀门的液压操作系统	517
一、蝶阀的液压操作系统	517
二、球阀的液压操作系统	517
附 录	519
一、水轮机主要零部件及应用螺钉许用应力	519
二、水轮机通用技术条件	523
三、水轮机的重量估算	529

第一章 总 论

第一节 水轮机的分类与牌号

水轮机是一种将水能转换为转轮旋转能量的机器。利用这种机器带动发电机，使转轮的旋转能量变为电能，这就是水轮发电机组。

现代水轮机，按其水流作用原理和结构特征，可分为两类，一类为仅利用水流动能的称冲击式水轮机；另一类为同时利用水流动能和势能的称反击式水轮机。属于这两类的各种型式水轮机简列于下：



除了上列各机型外，随着蓄能电站的发展，出现了可逆式水轮机。常见的可逆式水轮机也有混流式、斜流式和轴流式三种。

水轮机的牌号由三部分代号组成，每一部分之间以“-”分开，如 I-II-III。第 I 部分由汉语拼音字母和阿拉伯数字组成，拼音字母表示水轮机型式，阿拉伯数字表示转轮型号，一律用统一规定的比速代号，对于未入型谱的转轮，则采用带有单位代号的序号。第 II 部分由二个汉语拼音字母组成，第一个字母表示水轮机主轴布置型式，第二个字母表示引水室特征。第 III 部分表示转轮的标称直径(厘米)。各种型式水轮机的代表符号见表 1-1，主轴布置型式及引水室特征的代表符号见表 1-2。

表 1-1

水 轮 机 型 式	代 表 符 号
混流式水轮机	HL
斜流式水轮机	XL
轴流转桨式水轮机	ZZ
轴流定桨式水轮机	ZD
贯流转桨式水轮机	GZ
贯流定桨式水轮机	GD
水斗式水轮机	CJ
斜击式水轮机	XJ
双击式水轮机	SJ

表 1-2

名 称	代 表 符 号	名 称	代 表 符 号
立 轴	L	明 槽	M
卧 轴	W	罐 式	G
金 属 蜗 壳	J	竖 井 式	S
混 凝 土 蜗 壳	H	虹 吸 式	X
灯 泡 式	P	轴 伸 式	Z

可逆式水轮机在水轮机型式代表符号前加“N”表示可逆。

牌号的第 III 部分对于冲击式水轮机有特殊要求, 具体表示方法为:

水轮机标称直径
作用在每一个转轮上的射流数目 $\times$ 射流直径

牌号示例:

- 1) HL220-LJ-550 表示混流式水轮机, 转轮型号为 220, 立轴、金属蜗壳, 转轮直径为 550 厘米。
- 2) ZZ560-LH-800 表示轴流转桨式水轮机, 转轮型号为 560, 立轴、混凝土蜗壳, 转轮直径为 800 厘米。
- 3) XLN 200-LJ-300 表示斜流可逆式水轮机, 转轮型号为 200, 立轴、金属蜗壳, 转轮直径为 300 厘米。
- 4) GD 600-WP-250 表示贯流定桨式水轮机, 转轮型号为 600, 卧轴、灯泡式引水, 转轮直径为 250 厘米。
- 5) 2CJ 30-W- $\frac{120}{2 \times 10}$ 表示一根轴上具有二个转轮的水斗式水轮机, 转轮型号为 30, 卧轴, 转轮节圆直径为 120 厘米, 每个转轮具有 2 个喷嘴, 射流直径为 10 厘米。

第二节 各型水轮机的性能与使用范围

水斗式水轮机可以适应很高的水头, 这种水轮机装机高程高, 因此电站开挖量小, 维护方便, 并且在低负荷运行时效率较高。水斗式水轮机的比转速范围一般为 $n_s = 5 \sim 35$, 适用水头可高达 700 米以上。

混流式水轮机的应用很广, 它与冲击式水轮机比较, 具有比转速高, 机组尺寸小, 造价低, 水头可以全部利用以及满载时效率高(约比水斗式水轮机高 2%) 等优点, 所以近期向高水头发展。其缺点是低负荷时效率低, 维修和更换磨损零件不如冲击式方便。混流式水轮机的比转速范围一般为 $n_s = 50 \sim 300$, 使用水头为 $H = 30 \sim 700$ 米。

轴流转桨式水轮机近年来有很大发展, 使用也很广。它的特点是比转速高, 在水头、容量相同条件下, 其转速约为混流式水轮机的两倍, 因此机组尺寸可以缩小。另一个特点是转轮叶片与导水机构协联动作, 平均效率较混流式水轮机高, 尤其在低负荷区更为明显。因此它适用于低水头电站或水头和负荷变化较大的电站。但是随着使用水头提高, 其过流能力受到限制, 并且由于它的汽蚀系数较大, 开挖量增加, 制造工艺也较复杂, 所以水头大于 50~80 米时采用较少。目前它的比转速范围一般为 $n_s = 200 \sim 850$, 使用水头 $H = 3 \sim 80$ 米。

对于大中型机组, 上述三种型式水轮机在国内的使用范围概括地表示于图 1-1 中。

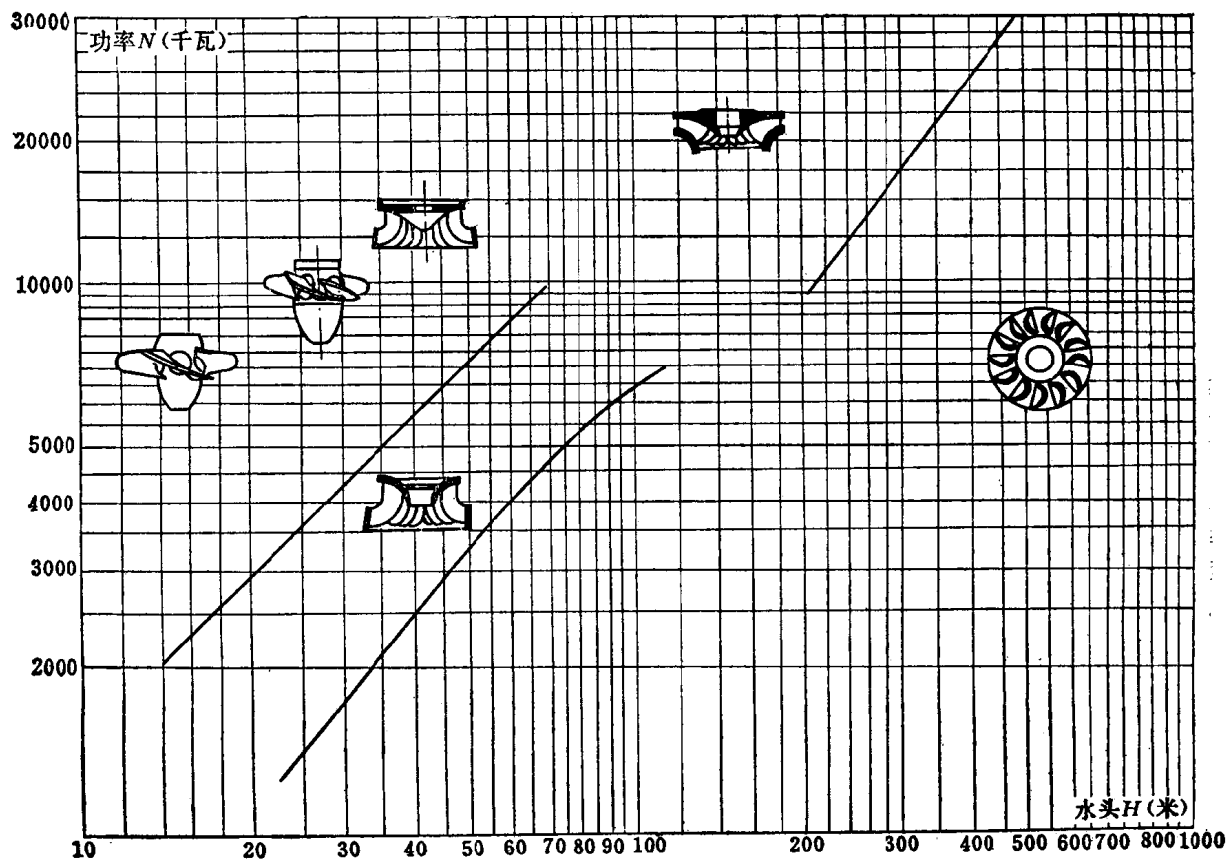


图 1-1 轴流式、混流式、水斗式水轮机使用范围

轴流定桨式水轮机，大型的在国内生产不多。它的特点是结构简单容易制造，此外，由于叶片固定，轮毂比小，较转桨式转轮的过流能力有所提高，汽蚀性能有所改善。但是定桨式水轮机不能适应水头和负荷变化大的电站，因此在水头较稳定，担负基荷运行或多机组运行电站采用是适宜的。目前使用的定桨式水轮机比转速范围约 $n_s = 250 \sim 700$ ，一般使用水头 $H = 3 \sim 50$ 米。

斜流式水轮机是近期发展起来的新机型。与混流式水轮机比较，它有较高的能量指标，效率高，对水头负荷的适应性好。与轴流式水轮机比较，汽蚀系数较小，效率也略高。其主要缺点是制造工艺复杂。目前这种水轮机的使用水头一般 $H = 40 \sim 120$ 米，比转速为 $n_s = 100 \sim 350$ 。

贯流式水轮机适用于低水头电站，使用水头为 $H = 2 \sim 30$ 米。这种机型卧式布置在坝体或基墩里面，不需要单独的厂房，同时，贯流式水轮机采用直锥吸水管，比采用一般肘形吸水管的轴流式水轮机具有更高的效率和过流能力，目前国内对这种机型的水轮机生产尚不多。

可逆式水泵水轮机在荷峰高时可发电，在负荷低时作水泵运行蓄能。近年来随着电力事业的发展，电力系统容量增大，系统中火电与原子能电站比重增加，由于调峰的需要，可逆式机组获得极大的发展，特别是大容量高扬程的混流式水泵水轮机发展尤为迅速，国外生产甚多。

图 1-2 是各型水轮机的工作特性示意图。