

Mechanical and Power Engineering

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



SHUILUNJI
YUANLI YU YUNXING

水轮机 原理与运行

于波 肖惠民 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Mechanical and Power Engineering



参考文献

- [1] 刘大德主编. 水轮机. 第三版. 北京: 水利电力出版社, 1997.
- [2] 季敏林, 郑国柱主编. 水轮机. 第二版. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [3] 武汉水利电力学院主编. 水轮机 (上册). 北京: 电力工业出版社, 1980.
- [4] 华水水利学院主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [5] 华水水利学院主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [6] 华水水利学院主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [7] 华水水利学院主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [8] 华水水利学院主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [9] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [10] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [11] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [12] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [13] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [14] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [15] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [16] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [17] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [18] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [19] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [20] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [21] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [22] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [23] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [24] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [25] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [26] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [27] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [28] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [29] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [30] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [31] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [32] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [33] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [34] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [35] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [36] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [37] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [38] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [39] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [40] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [41] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [42] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [43] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [44] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [45] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [46] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [47] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [48] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [49] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [50] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [51] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [52] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [53] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [54] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [55] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [56] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [57] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [58] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [59] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [60] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [61] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [62] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [63] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [64] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [65] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [66] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [67] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [68] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [69] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [70] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [71] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [72] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [73] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [74] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [75] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [76] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [77] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [78] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [79] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [80] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [81] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [82] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [83] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [84] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [85] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [86] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [87] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [88] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [89] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [90] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [91] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [92] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [93] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [94] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [95] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [96] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [97] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [98] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [99] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.
- [100] 梅相彦主编. 水轮机. 北京: 水利电力出版社, 1980.

SHUILUNJI YUANLI YU YUNXING 水轮机 原理与运行

于波 肖惠民 编
郑源 主审

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第130750号

中国电力出版社出版
(北京三里河路8号 100044 http://jc.cepp.com.cn)
编辑: 中国电力出版社
地址: 北京市三里河路8号
电话: 010-63411111

2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷
16开本 889mm×1267mm 32印张 287千字
定价: 37.50元

举报电话

本书封面贴有防伪标签, 凡无此标签者均非本社出版
版权所有 侵权必究



中国电力出版社

http://jc.cepp.com.cn



内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书全面介绍了水轮机（包括冲击式水轮机、贯流式水轮机、水泵水轮机）的工作原理，水轮机的主要过流部件及其水力设计，不同类型水轮机的工作特性和选型设计，对水轮机空蚀和泥沙磨损、水力机组水力过渡过程、水轮机运行稳定性等作了专题阐述。本书引入了水利水电和能源动力学科领域相关前沿课题的研究成果，和最新 IEC 和国家标准规范的专业术语和物理量符号定义，介绍了水轮机内部流动数值模拟的基本理论 and 应用成果。

本书可作为水利水电、能源动力类等专业的本科生教材，也可供其他相关专业的师生和工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

水轮机原理与运行/于波, 肖惠民编. —北京: 中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-6021-8

I. 水... II. ①于... ②肖... III. ①水轮机—理论—高等学校—教材②水轮机运行—高等学校—教材 IV. TK730

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 130750 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 1 月第一版 2008 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.25 印张 567 千字

定价 37.20 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

为适应我国现代化建设快速发展对人才的需求,近几年高等学校在不断调整和设置学科专业,努力拓宽专业口径,相应专业课程的教学学时和教学内容也有较大变化。本书介绍了国内外的重大水电工程以及水电设备设计、制造和运行的最新进展;反映水利水电和能源动力学科领域相关前沿课题的研究成果;引入了最新 IEC 和国家标准规范的专业术语和物理量符号定义。

本书全面阐述了水轮机的工作原理,水轮机的主要过流部件及其水力设计,不同类型水轮机的工作特性和选型设计。对水轮机空蚀和泥沙磨损、水力机组水力过渡过程、水轮机运行稳定性等重大问题还作了较详细、深入的介绍。本书以较大篇幅介绍了水轮机内部流动数值模拟的基本理论和应用成果。

全书共分 16 章,第 5~10、12~15 章由武汉大学动力与机械学院于波编写,第 1~4、11、16 章由武汉大学动力与机械学院肖惠民编写。全书由于波统稿。本书由河海大学郑源认真审阅并提出宝贵意见,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处,恳请使用本教材的师生和其他读者批评指正。

编者

2007 年 5 月

目 录

前言	8.8
1 绪论	1
1.1 水力发电与水轮机	1
1.2 水轮机的工作参数	2
1.3 水轮机的主要类型及结构	6
1.4 水轮机产品型号	13
1.5 现代水轮机的发展	16
习题与思考题	23
2 反击式水轮机工作原理及特性	24
2.1 水流在转轮中的运动	24
2.2 水轮机基本方程式	29
2.3 水轮机的最优工况与非最优工况	32
2.4 水轮机能量损失与效率	36
习题与思考题	38
3 水轮机的空化和空蚀	39
3.1 水轮机的空化和空蚀	39
3.2 水轮机的空化、空蚀类型及空蚀评定	43
3.3 反击式水轮机的空化系数	50
3.4 水轮机的吸出高度与安装高程	52
3.5 空腔空化对水轮机运行稳定性的影响	56
3.6 水轮机的超空化	58
习题与思考题	60
4 水轮机的相似理论	61
4.1 水轮机的相似条件	61
4.2 水轮机的相似律及单位参数	62
4.3 水轮机比转速	66
4.4 效率换算与单位参数修正	68
4.5 水轮机型谱	70
习题与思考题	73
5 水轮机的模型试验与原型试验	74
5.1 水轮机的模型试验	74
5.2 水轮机模型能量试验	76
5.3 水轮机模型空化试验	84
5.4 高水头水力试验台简介	88
5.5 水轮机的原型试验	89

5.6	水轮机装置过渡过程现场试验	96
	习题与思考题	100
6	水轮机蜗壳	101
6.1	蜗壳中的水流运动规律	101
6.2	蜗壳的形式及主要参数的选择	102
6.3	金属蜗壳的水力计算	106
6.4	混凝土蜗壳的水力计算	110
6.5	座环的结构及水力计算	112
	习题与思考题	115
7	水轮机导水机构	116
7.1	导水机构的工作原理	116
7.2	径向式导水机构的结构	117
7.3	导水机构的传动系统	118
7.4	导叶装配	119
7.5	径向式导水机构的几何参数	120
7.6	导叶机构中的水力损失	123
7.7	导水机构受力分析和传动计算	125
	习题与思考题	128
8	水轮机转轮	129
8.1	反击式水轮机转轮的工作原理	129
8.2	混流式水轮机转轮的水力设计概述	131
8.3	混流式水轮机转轮几何参数	133
8.4	混流式水轮机的轴向力	136
8.5	轴流式水轮机转轮的水力设计概述	138
8.6	轴流式转轮的几何参数	140
8.7	轴流式水轮机的轴向力特性	142
8.8	新型转轮的设计研究	143
	习题与思考题	145
9	水轮机尾水管	147
9.1	尾水管的工作原理及作用	147
9.2	尾水管的基本类型	150
9.3	尾水管中的水流运动及水力损失	150
9.4	尾水管的设计	154
9.5	窄高型尾水管设计	159
	习题与思考题	162
10	冲击式水轮机	163
10.1	冲击式水轮机概述	163
10.2	切击式水轮机工作原理及参数	171
10.3	切击式水轮机的特性	177
10.4	切击式水轮机的主要参数选择	190

习题与思考题	192
11 贯流式水轮机	193
11.1 贯流式水轮发电机组形式	193
11.2 贯流式水轮发电机组的发展概况	195
11.3 灯泡贯流式机组的工作特性	197
11.4 贯流式水轮机的选型	201
习题与思考题	210
12 水泵水轮机	211
12.1 抽水蓄能电站与水泵水轮机	211
12.2 叶片式水力机械的四象限特性	217
12.3 水泵水轮机的工作原理	223
12.4 水泵水轮机的选型设计	226
12.5 水泵水轮机的运行	231
习题与思考题	235
13 水轮机的特性曲线	236
13.1 水轮机特性曲线的类型	236
13.2 水轮机的线性特性曲线	236
13.3 水轮机的模型综合特性曲线	239
13.4 水轮机模型综合特性曲线的绘制	243
13.5 水轮机运转综合特性曲线及其绘制	246
习题与思考题	251
14 水轮机的选型设计	252
14.1 概述	252
14.2 水轮机选型设计的内容、要求和所需资料	252
14.3 水轮机选型设计的基本方法	254
14.4 水电站和水轮机的特征水头	255
14.5 机组台数的选择	256
14.6 水轮机形式的选择	257
14.7 按比转速选择水轮机	262
14.8 反击式水轮机基本参数的计算	266
14.9 水轮机选型设计算例	270
14.10 反击式水轮机的安装高程	273
14.11 不同选型方案的分析比较	275
14.12 计算机辅助水轮机选型设计	277
习题与思考题	279
15 水轮机运行	280
15.1 提高水轮机运行水平的技术经济意义	280
15.2 水力机组过渡过程	281
15.3 水轮机空蚀	295
15.4 水轮机泥沙磨损	300

15.5	水轮机运行稳定性	303
	习题与思考题	310
16	水轮机内部流动的数值模拟	311
16.1	水轮机数值模拟技术的进展	311
16.2	数值模拟的基本过程	314
16.3	水轮机三维定常紊流计算及性能预测	315
16.4	水轮机三维非定常紊流计算及压力脉动预测	322
16.5	总结与展望	327
	习题与思考题	327
	附录 A 反击式水轮机型谱参数表	328
	附录 B 冲击式水轮机型谱参数表	331
	附录 C 转轮综合特性曲线	335
	附录 D 水电机组甩负荷过渡过程数值仿真程序代码	356
	参考文献	363

1 绪 论

1.1 水力发电与水轮机

水力资源是清洁、无污染、可永续利用、不会枯竭、成本低、效益高、对生态环境影响最小的能源。我国水力资源十分丰富,根据国家发展和改革委员会于2005年11月发布的全国水力资源复查成果,我国大陆水力资源理论蕴藏量为6.94亿kW,年发电量为6.08万亿kW·h(按8750h运行时间计);技术可开发量为5.42亿kW,相应年发电量为2.47万亿kW·h,居世界第一位。

自然界河流所蕴藏的水力资源(水流能量)的大小取决于流量和落差这两个要素。在天然状态下,河段落差是沿河分散的,流量是多变的,它们构成的能量在流动中消耗了。为把河流中蕴藏的水力资源加以利用,就必须采取一系列的技术措施,将分散的落差集中起来形成可资利用的水头,并对天然的流量加以控制和调节,就可以利用水流的能量发电(图1-1)。

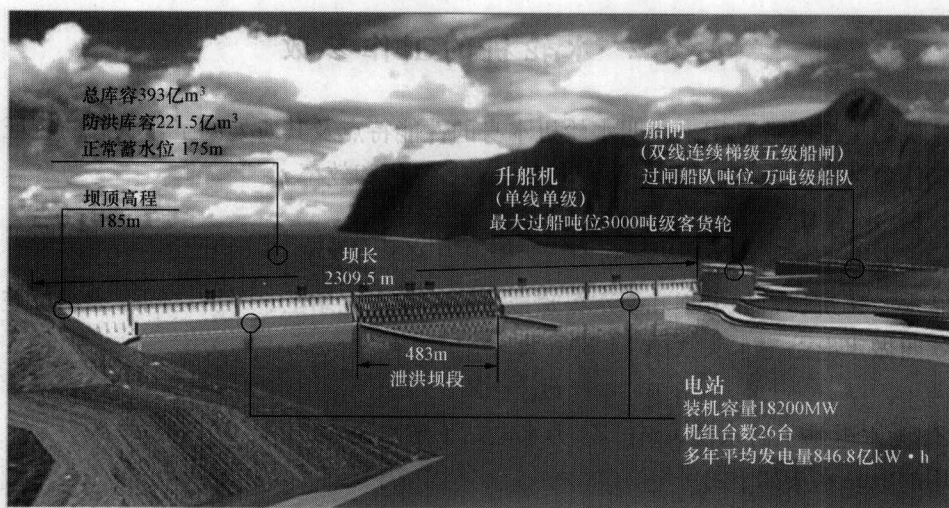


图1-1 三峡工程示意图

通过在河流上筑坝,抬高上游水位,形成一定的落差,并通过引水管道将水流引入水力机械,驱动水力机械旋转,这样,水流的能量就转换成了旋转的机械能(图1-1)。若旋转的水力机械再带动发电机旋转,那么发电机便将旋转的机械能转换成了电能,这就是水力发电的基本过程(图1-2)。

这种将水流能量转换成旋转机械能的水力机械称为水轮机,它主要利用水流的动能和压能做功,并带动发电机旋转以产生电能,是水电站的主要动力设备。水轮机和发电机构成水轮发电机组,其中水轮机是原动机。水轮机是当今原动机中效率最高、使用寿命很长的。

水轮机和水泵水轮机作为水电站的心脏,其运行情况的好坏决定了整个电站的经济效

益,甚至关系到电力系统的稳定运行。

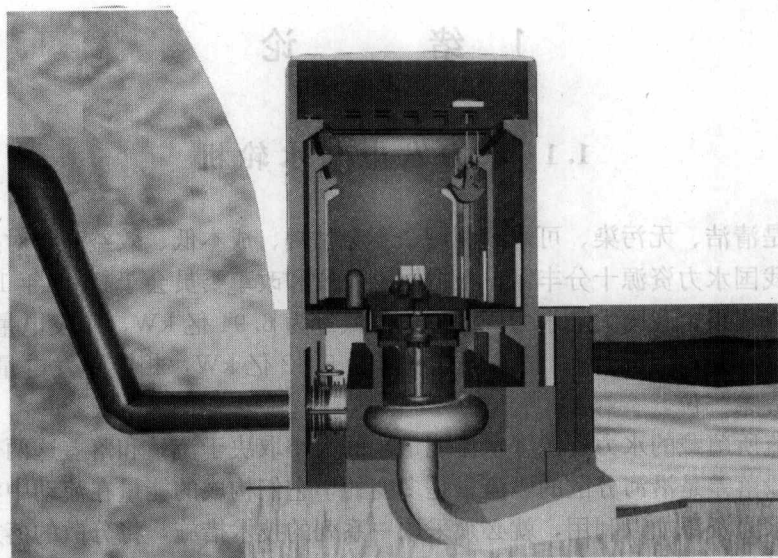


图 1-2 水电站厂房剖视图

1.2 水轮机的工作参数

水轮机的工作参数是用来表明水轮机本身的性能特点及其所处的工作状态的特征值。最基本的工作参数有水头 H 、流量 Q 、转速 n 、功率 P 和效率 η 。

1.2.1 水头 H

一、水电站毛水头 H_g (水电站上、下游水位的高程差)

依靠水工建筑物,如大坝和引水渠道或管道,在水电站上、下游之间形成水位差,这个水位差就叫做水电站毛水头(图 1-3),即

$$H_g = Z_u - Z_d \quad (1-1)$$

式中: Z_u 为水电站上游水位, m; Z_d 为水电站下游水位, m。

常用的电站水头如下:

(1) 电站最大水头 $H_{g\max}$ 。电站最大水头为水电站上、下游水位在一定组合下出现的最大水位高程差。

(2) 电站最小水头 $H_{g\min}$ 。电站最小水头为水电站上、下游水位在一定组合下出现的最小水位高程差。

二、水轮机水头 H

水轮机水头 H 指水轮机做功用的有效水头,为水轮机进、出口断面的总单位能量差,也称为净水头。

水电站毛水头并非完全为水轮机所利用,因为水流在进入水轮机之前流经引水建筑物(如图 1-3 中的引水道)时,损失掉一部分水头。这样,真正作用在水轮机上的水头应该是水轮机进口断面 I—I 和尾水管出口断面 II—II 的单位重量水流的能量差值,即水轮机水

规定的最大功率时所需的最小水头。

对冲击式水轮机(图1-4),水轮机工作水头定义为喷嘴进口断面与射流中心线跟转轮节圆相切处单位水流能量之差

$$\text{单喷嘴} \quad H = \left(Z_1 + a + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - Z_2 \quad (1-5)$$

$$\text{双喷嘴} \quad H = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} (Z_1 + a - Z_2) + \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} (Z_1 + a - Z'_2) + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \quad (1-6)$$

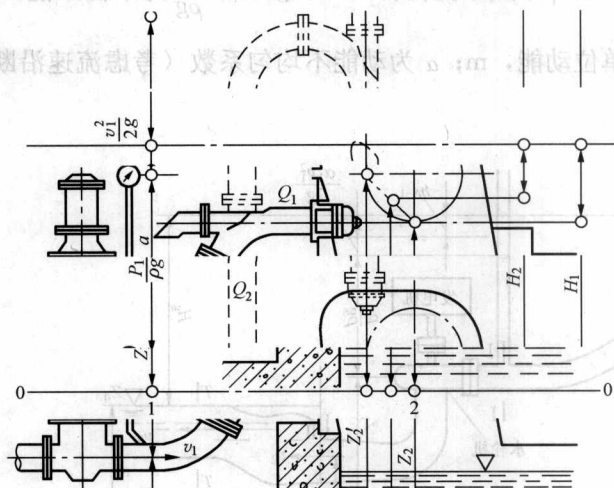


图 1-4 水斗式水轮机工作水头

1.2.2 流量 Q

单位时间内通过水轮机进口测量断面的水的体积,用符号 Q 表示,通常采用米³/秒 (m^3/s) 为单位。

常用的水轮机流量如下。

(1) 额定流量 Q_r 。额定流量为水轮机在额定水头、额定转速下输出额定功率所需的流量。

(2) 水轮机输出最大功率的流量 $Q_{p\max}$ 。水轮机输出最大功率的流量为水轮机输出设计规定的最大功率时所需的最小水头下的流量。

(3) 水轮机空载流量 Q_0 。水轮机空载流量为水轮机在额定转速下空载运行时的流量。

1.2.3 转速 n

水轮机转轮在单位时间内旋转的次数,称为水轮机转速,用符号 n 表示,通常采用转/分 (r/min) 为单位。一般情况下,水轮机的主轴与发电机主轴是直接连接的,所以水轮机的转速与发电机的转速相同。

常用的水轮机转速如下:

(1) 额定转速 n_r 。额定转速为水轮机按电站设计选定的稳态同步转速。

(2) 飞逸转速 n_{run} 。飞逸转速为轴端负荷力矩为零时水轮机可能达到的最高稳态转速。

(3) 最高瞬态转速 n_{mmax} 。最高瞬态转速为在过渡过程下达到的最高转速。

1.2.4 功率 P 与效率 η

一、水轮机输入功率 P_h

水轮机输入功率 P_h 为通过水轮机的水流所具有的水力功率,通常以千瓦 (kW) 为单位,按下式计算

$$P_h = \rho g Q H = 9.81 Q H (\text{kW}) \quad (1-7)$$

二、转轮输出功率 P_m

转轮输出功率 P_m 为转轮与轴连接处传递的机械功率。

三、水轮机机械功率损失 P_{lm}

水轮机机械功率损失 P_{lm} 为水轮机导轴承推力轴承(按推力负荷比例分担的部分)和主

轴密封中损失的机械功率。

四、水轮机功率 P

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

通过水轮机的水流所具有的水力功率并不能全部被水轮机利用,这是因为有一部分能量被消耗于水力损失、容积损失和机械损失等,所以水轮机从主轴轴端输出的功率 P 小于 P_h 。

五、水轮机效率 η

水轮机功率 P 与其输入功率 P_h 的比值称为水轮机的效率,即

$$\eta = \frac{P}{P_h} \times 100\% \quad (1-8)$$

效率是表明水轮机对水流能量的有效利用程度,是一个无量纲的物理量,用百分数表示。

根据效率定义及式 (1-7), 水轮机功率的计算公式为

$$P = P_h \eta = 9.81QH\eta (\text{kW}) \quad (1-9)$$

水轮机将水流的能量转换成水轮机轴端的功率,产生旋转力矩 M ,用来克服发电机的阻力矩,并以角速度 ω 旋转。水轮机功率 P 、旋转力矩 M 和角速度 ω 之间有如下关系

$$P = M\omega = M2\pi n/60 (\text{W}) \quad (1-10)$$

式中: M 为水轮机轴上的旋转力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; n 为水轮机转速, r/min ; ω 为水轮机旋转角速度, rad/s 。

以上 H 、 Q 、 n 、 P 、 η 等参数统称为水轮机的“基本工作参数”。对于不同的水轮机,这些参数的数值不同;即使是同一水轮机,在不同的工作状态下,这些参数的数值也会发生变化,但各参数的变化遵循一定的变化规律(用水轮机特性曲线表示)。这些参数中,在正常工作状态下, n 很少变化; Q 通过水轮机的调节机构加以控制;只有功率 P 及水头取决于外部因素,功率大小取决于电力系统的要求, H 的大小取决于水电站上、下游水位的变化。因此, P 、 H 构成了水轮机的主要工作条件,成为水轮机的主要工作参数,至于 Q , 则随 P 、 H 的变化而变化 [见式 (1-7)]。

【例 1-1】 某水轮机在设计工况下,上游水位 $Z_u = 63\text{m}$,下游水位 $Z_d = 44.4\text{m}$,流量 $Q = 825\text{m}^3/\text{s}$,发电机效率 $\eta_g = 96.8\%$,水轮机效率 $\eta = 92\%$ 。如忽略引水建筑物的水头损失,试求水轮机输入功率、水轮机功率和机组功率。

解: 由式 (1-4) 知,水轮机工作水头 $H = H_g - \Delta h_{A-I}$, 而 $\Delta h_{A-I} = 0$, 所以

$$H = Z_u - Z_d = 63 - 44.4 = 18.6 (\text{m})$$

由式 (1-5), 水轮机的输入功率

$$P_h = 9.81QH = 9.81 \times 825 \times 18.6 = 150500 (\text{kW})$$

由式 (1-7), 水轮机的功率

$$P = P_h \eta = 150500 \times 92\% = 138460 (\text{kW})$$

而机组功率

$$P_g = P\eta_g = 138460 \times 96.8\% = 134029.28 (\text{kW})$$

1.3 水轮机的主要类型及结构

1.3.1 水轮机的类型

水流能量的形式有位能（位置势能）、压能（压力势能）和动能，根据转轮转换水流能量形式的不同，现代水轮机可划分为反击式和冲击式两大类型。

反击式水轮机转轮利用水流的位能、压能和动能做功，水流流经这种水轮机时充满整个转轮流道，转轮叶片受到水流的作用力，这一作用力的产生是因为压力水流绕流转轮叶片时，其压能和动能发生了变化（变小了），其中又主要是通过转换压能而获得水轮机的机械能。

冲击式水轮机转轮只利用水流动能做功，这类水轮机是靠高速水流冲击转轮而做功的。水流自水库、压力前池经引水钢管进入水轮机的进水管，然后通过喷嘴，形成一股高速射流，射向转轮圆周的叶片上，水流将其具有的能量（水头）传递给转轮，推动转轮旋转。

在冲击式水轮机中，水并没有充满整个转轮室，在转轮室中有自由表面，即转轮室内是处在大气压力下的。从喷嘴射出的射流也是处在大气压力下的自由射流，故这种水轮机是通过水流动能的转化而获得水轮机的机械能的。

必须指出，把水轮机划分为反击式和冲击式两大类型，是根据水流能量转换的特征来划分的，并不是根据是利用了作用力，还是反作用力来划分的。因为不管是“反击式”还是“冲击式”水轮机，它们都是按力学上的作用力与反作用力大小相等、方向相反的规律工作的。也就是说，水流流经水轮机转轮叶片时，叶片对水流有一个作用力，反过来水流对叶片也有一个大小相等、方向相反的作用力。显然，把这两种水轮机叫做“反击式”和“冲击式”是不够确切的，因沿用已久，已成为习惯称呼。

根据转轮内水流运动特征和水轮机的结构特征，上述两类水轮机又可分为如下若干种类型。

反击式	混流式 (HL)	
	轴流式 (ZL)	轴流定桨式 (ZD) 轴流转桨式 (ZZ)
	斜流式 (XL)	斜流定桨式 (XD) 斜流转桨式 (XZ)
	贯流式 (GL)	贯流定桨式 (GD) 贯流转桨式 (GZ)
冲击式	水斗式 (切击式) (CJ)	
	斜击式 (XJ)	
	双击式 (SJ)	

1.3.2 各种类型水轮机的特点

一、混流式水轮机

混流式水轮机水流径向流入、轴向流出转轮（图 1-5），又称为法兰西斯式水轮机（Francis Turbine）式法兰西斯。

特点：①应用水头范围广泛；②结构简单，运行可靠；③效率高。

混流式水轮机是现代应用最广泛的水轮机之一，适用水头为 50~700m。

二、轴流式水轮机

轴流式水轮机水流轴向流进、流出转轮(图 1-6)。根据转轮叶片在运行中能否转动,又可分为轴流定桨式和轴流转桨式两种。

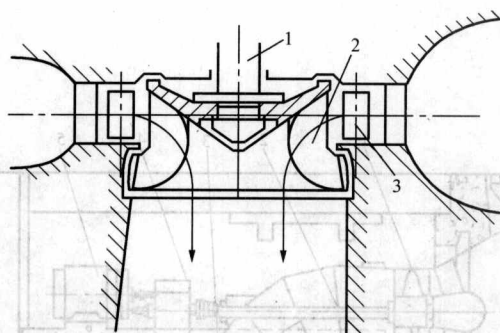


图 1-5 混流式水轮机

1—主轴; 2—叶片; 3—导叶

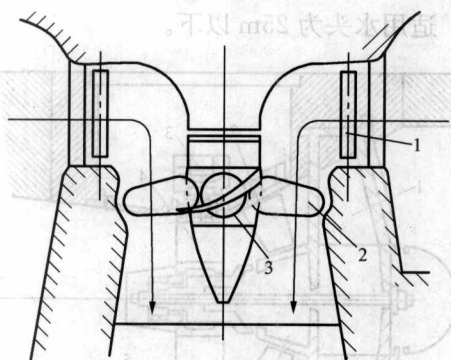


图 1-6 轴流式水轮机

1—导叶; 2—叶片; 3—轮毂

(一) 轴流定桨式水轮机

轴流定桨式水轮机转轮叶片不可调或停机可调。

特点: ①结构简单; ②偏离设计工况时效率会急剧下降。

一般用于功率不大及水头变化幅度较小的电站。适用水头为 3~50m。

(二) 轴流转桨式水轮机

轴流转桨式水轮机转轮叶片可与导叶协联调节, 又称为卡普兰(Kaplan)式水轮机。

特点: ①由于实现了叶片与导叶的协联调节, 高效率区范围宽; ②因需有转动叶片的操作机构, 结构较复杂。

适用水头为 3~80m。

三、斜流式水轮机

斜流式水轮机水流以倾斜于主轴的方向进、出转轮(图 1-7)。

特点: ①由于实现了转轮叶片与导叶的协联调节, 有高的效率区。②由于叶片轴线和水轮机轴线斜交, 因而, 与轴流式相比能装设较多的叶片(轴流式 4~8 片, 斜流式 8~12 片), 提高了应用水头。③结构较复杂。

适用水头为 40~200m。

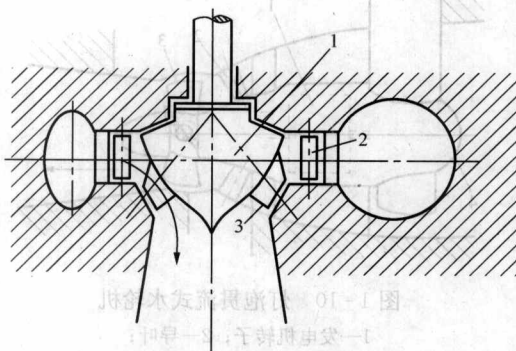


图 1-7 斜流式水轮机

1—轮毂; 2—导叶; 3—转轮叶片

四、贯流式水轮机

贯流式水轮机是过流通道呈直线(或 S 形)布置的轴流式水轮机。根据贯流式水轮机与其发电机传动方式的不同, 可分为全贯流式和半贯流式两类。

全贯流式的发电机转子直接装在转轮叶片外缘上(图 1-8), 这种贯流式具有结构简单、轴向尺寸小等优点, 但是由于转子外缘线速度大, 密封十分困难, 目前很少采用。

半贯流式包括灯泡贯流式、轴伸式和竖井式三种类型(图 1-9~图 1-11)。

目前使用最广泛的是灯泡贯流式，其发电机置于流道中灯泡体内。其特点是：①效率高（进水呈直线，出水为直锥形尾水管）；②过流能力大，比转速 n_s 高；③结构紧凑；④制造要求高，运行、检修不便。

适用水头为 25m 以下。

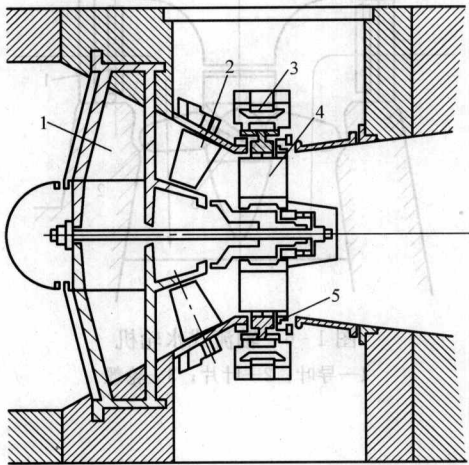


图 1-8 全贯流式水轮机

1—支承；2—导叶；3—发电机定子；
4—轮叶；5—发电机转子

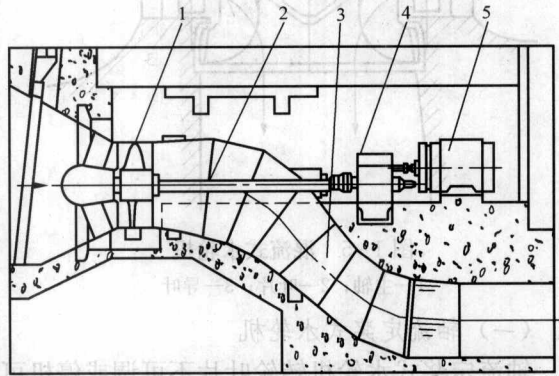


图 1-9 轴伸贯流式水轮机

1—转轮；2—水轮机主轴；3—尾水管；
4—齿轮传动装置；5—发电机

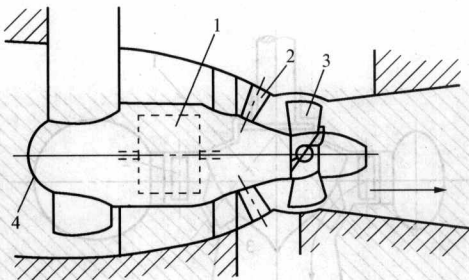


图 1-10 灯泡贯流式水轮机

1—发电机转子；2—导叶；
3—转轮叶片；4—灯泡体

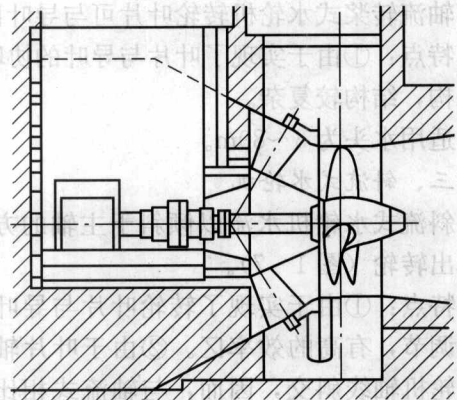


图 1-11 竖井贯流式水轮机

五、水斗式水轮机

水斗式水轮机的转轮叶片呈斗形，射流中心线与转轮节圆相切 [图 1-12 (a)]，又称为培尔顿 (Pelton) 水轮机。

特点：①应用水头较高；②结构简单；③不受空蚀条件限制。

适用水头为 40~1770m。

六、斜击式水轮机

斜击式水轮机喷嘴出来的射流，沿着与转轮旋转平面成某一角度（通过约为 22.5° ）的

方向冲击转轮斗叶 [图 1-12 (b)]。

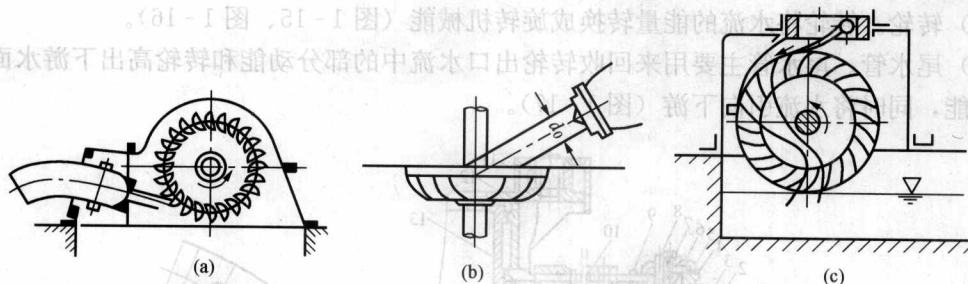


图 1-12 冲击式水轮机

(a) 水斗式；(b) 斜击式；(c) 双击式

斜击式水轮机效率较低，应用水头范围为 50~400m，适用于中小型电站。

七、双击式水轮机

双击式水轮机喷嘴出来的射流首先从转轮外周冲击部分叶片，落到转轮的内部，然后再一次从内周冲击部分叶片 [图 1-12 (c)]。

双击式水轮机效率低，只适用于小型电站，适用水头为 10~150m。

八、可逆式水泵水轮机

水泵水轮机既可作为水轮机，又可作为水泵使用，主要应用于抽水蓄能电站，有混流式、轴流式和斜流式三种类型，其中混流式应用最为广泛，结构与同类水轮机相似。

抽水蓄能电站与普通水电站不同，它有上、下两个水库。当电力系统夜间有剩余电力时，将下水库的水抽至上水库储存；在电力尖峰负荷时，则利用上水库的水发电。

适用水头范围：①混流式为 80~600m；②斜流式为 100~120m；③贯流式为 25m 以下。

1.3.3 反击式水轮机的构造

一、反击式水轮机的过流部件

反击式水轮机共有四个过流部件，功能如下。

(1) 引水部件。引水部件由蜗壳和座环 (图 1-13) 组成，作用是将水流均匀而轴对称地引入转轮前的导水机构，并使水流具有一定的速度环量；座环还承担机组的轴向载荷，并把载荷传递给混凝土基础。

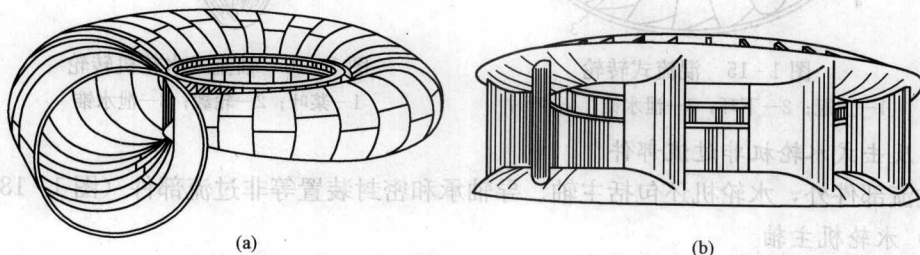


图 1-13 蜗壳和座环

(a) 蜗壳；(b) 座环