

水轮发电机组

改造扩容与优化运行

陈锡芳 编著

SHUILUN FADIAN JIZU
GAIZAO ZENGRONG YU YOUHUA YUNXING



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水轮发电机组 改造扩容与优化运行

陈锡芳 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书旨在讨论和研究水电站水轮发电机组改造增容的主要技术问题和要求。对水轮发电机组改造增容的具体方法和操作程序进行了论述,并对水电站机组的经济和优化运行也作了相关的论述。

本书共分15章。第1章叙述我国的水力资源和发电设备制造概况以及机组改造增容潜力。第2~5章介绍水轮机和发电机的特性、参数与结构。第6章论述水轮发电机通风冷却与发热。第7章主要论述发电机关键部件加工制造工艺。第8、9章对水轮发电机组改造增容的原则和条件以及对发电机的检测、试验与寿命评估作了论述。第10、11章论述水轮发电机组改造增容途径和改造后的试验、核算与鉴定。第12、13章专门论述水轮机和发电机的改造增容,并介绍了发电机采用蒸发冷却增容的思路和方法。第14、15章论述水电站机组的运行和故障,并对机组的经济和优化运行也作了论述。

本书内容新颖,言简意赅,图文并茂,深入浅出,具有很强的实用性。可供水电站(电厂)和机组制造厂以及水电站设计部门从事设计、制造、运行、检修及安装等方面的工程技术人员与管理
人员查阅、使用。也可供大中专院校相关专业的师生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

水轮发电机组改造增容与优化运行 / 陈锡芳编著

— 北京:中国水利水电出版社,2010.1

ISBN 978-7-5084-7083-2

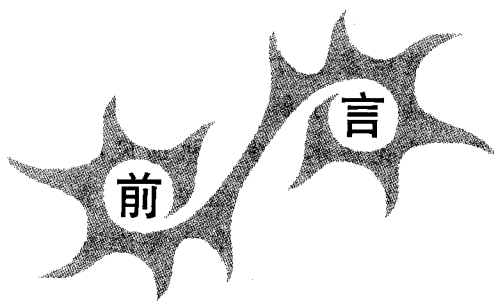
I. ①水… II. ①陈… III. ①水轮发电机—机组—改造②水轮发电机—机组—运行 IV. ①TM312

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第232982号

书 名	水轮发电机组改造增容与优化运行
作 者	陈锡芳 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 12.5印张 296千字
版 次	2010年1月第1版 2010年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



水力资源是清洁、可再生能源，也是用于发电的优质能源。在当前全球气候变暖影响人类生存的问题上，能源的供应和安全是国家和民生最关注的问题。呼吁采用清洁能源、绿色能源、可再生的能源，减少有害排放物已成为减少环境污染的主要途径。水力发电作为开发利用最早、开发技术比较成熟的全球能源量最大的可再生能源，正在被人们重视和得到有效利用。

水力资源的有效利用主要包括：开发尚未利用的水电资源，兴建新的水力发电厂；对已建成的电厂的水轮发电机组进行现代化改造、修复、扩容和利用现代科学技术，使水力资源得到更充分、更有效的利用。

编写本书的目的是为了更好地利用水力资源，充分发挥现有水电站（电厂）的效益，采用现代科学技术和新材料、新结构，对老水电站（电厂）进行改造扩容，充分发挥老水电站（电厂）的作用。为我国能源的持续发展提供保证。

据有关资料统计，自中华人民共和国成立至1996年在6~100MW的水电机组共投产634台约13580MW。其中，容量8~20MW的机组约占54.5%。特别在改革开放以来，水电装机容量有了更大的发展，到2006年底水电机组投产容量已达1.3亿多kW。为机组的改造扩容提供了很大的空间。小水电作为水电机组技术改造的另一股潜力，我国目前拥有小水电站4.3万多座，大多数建于20世纪70~80年代，经过几十年运行，这些小水电站的设备都需要改造。由此可见，中华人民共和国成立60年来，我国水电设备的发展给水电机组的改造扩容带来了巨大的潜力。

本书旨在讨论和研究水电站水轮发电机组改造扩容的主要技术问题和要求。并对水电站机组的经济和优化运行也作了论述。结合笔者50年来的工作实践和总结中华人民共和国成立以来在水电站水轮发电机组方面的设计制造以及改造扩容方面的经验，对水轮发电机组改造扩容的具体方法和操作程序进行了论述。本书还广泛收集了国内外水轮发电机组改造扩容的有关资料，为了能更好地进行水轮发电机组的改造，书中对水轮机和发电机的结构作了介绍。

本书共分15章。第1章叙述我国的水力资源和发电设备制造概况以及机组改造增容潜力。第2~5章介绍水轮机和发电机的特性、参数与结构。目的是让读者在了解水轮机和发电机的基础上,更好地进行机组改造方案决策。第6章论述水轮发电机通风冷却与发热。水电机组改造增容通风冷却是关键,为了确保增容机组安全可靠运行。本章对发电机的通风系统以及发热与冷却作了论述。第7章主要论述发电机关键部件加工制造工艺。为一些水电站在改造过程中部分零部件需要自己制作时作为参考使用。第8、9章对水轮发电机组改造增容的原则和条件以及对发电机的检测、试验与寿命评估作了论述。第10、11章论述水轮发电机组改造增容途径和改造后的试验、核算与鉴定。重点对水轮机和发电机增容的可行性提出了具体方向。并对机组改造后如何核算及鉴定提供了方法。第12、13章专门论述水轮机和发电机的改造增容。并提出了水轮机改造增容的要求和方向以及改造中的具体参数要求;发电机部分,提出改造增容应考虑的问题和改造增容的主要思路。还专门介绍发电机采用蒸发冷却增容的思路和方法。在这两章内提供了有关改造增容的实例和具体实施的程序。这两章是本书的重点。第14、15章论述水电站机组的运行和要求以及运行中常见的故障并对机组的经济和优化运行也作了相应论述。

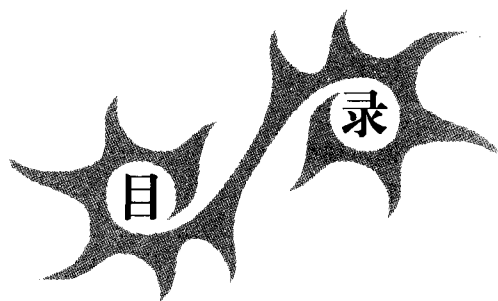
本书的读者对象主要是水电站(电厂)和机组制造厂以及水电站设计部门从事设计、制造、运行、检修和安装等方面的工程技术人员。在编写过程中笔者考虑到部分管理人员的需要,同时考虑到相关专业院校的师生能对水电站水轮发电机组的改造增容有所了解,便于今后工作的需要,对各章节中的内容由浅入深加以叙述。

笔者长期从事水轮发电机设计制造,曾负责和担任过国内外重大水电站发电机的设计。同时负责和担任过国内部分水电站的改造增容机组方案论证和改造工作。为了很好地总结经验,能为水电建设战线上的同仁们提供一本有关水电站水轮发电机组改造增容方面的书,供广大读者在水电站(电厂)的改造增容工作中发挥作用,是笔者最大的心愿,在本书的编写过程中,刘光玉同志参加了部分有关工作。要感谢我国水电建设战线上的老前辈、老专家和东方电机有限公司的历届领导及设计部门的全体同仁们多年来对笔者的支持和帮助。同时,也要感谢全国有关水电建设单位的大力支持。

由于笔者的水平和经验所限,书中错误与不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

陈锡芳

2009年5月



前言

第1章 概述	1
1.1 水力资源状况	1
1.2 水电开发与发展	1
1.3 水电设备研制	2
1.4 水电机组改造增容潜力	3
第2章 水轮机主要特性与参数	4
2.1 水轮机基本参数	4
2.2 水轮机的相似准则	5
2.3 比转速	5
2.4 水轮机的汽蚀特性和吸出高度	6
2.5 水轮机特性曲线	6
2.6 水轮机的飞逸特性	8
第3章 水轮机及其辅助设备	9
3.1 水轮机的主要组成	9
3.2 水轮机的分类	9
3.3 水轮机结构	12
3.4 水轮机辅助设备	16
第4章 水轮发电机主要参数、尺寸与电磁负荷	17
4.1 概述	17
4.2 水轮发电机规格参数	17
4.3 水轮发电机主要尺寸与电磁负荷	18
4.4 水轮发电机电磁和机械参数	21
第5章 水轮发电机及其辅助制置	23
5.1 水轮发电机结构型式	23
5.2 水轮发电机的分类	23

5.3	水轮发电机总体布置	24
5.4	定子	29
5.5	转子	51
5.6	推力轴承	74
5.7	导轴承	86
5.8	机架	89
5.9	辅助装置	93
第6章	水轮发电机通风冷却与发热	103
6.1	概述	103
6.2	水轮发电机通风系统	103
6.3	水轮发电机发热与冷却	109
6.4	水轮发电机冷却	111
第7章	水轮发电机主要零部件制造工艺概述	115
7.1	主要零部件工艺过程	115
7.2	关键零部件制造工艺	116
7.3	关键零部件装配(制造)工艺	125
第8章	水轮发电机组改造增容目标、原则及条件	132
8.1	改造增容目标	132
8.2	改造增容原则	133
8.3	改造增容基本条件	133
第9章	水轮发电机改造增容前评估	134
9.1	水轮发电机改造增容前检测	134
9.2	水轮发电机的使用寿命期	135
9.3	水轮发电机状况评估	137
第10章	水轮发电机组改造增容途径	138
10.1	机组改造增容可行性	138
10.2	机组改造增容主要途径	139
第11章	水轮发电机改造增容后核算、试验及鉴定	141
11.1	改造增容后核算	141
11.2	改造增容后真机试验	142
11.3	改造增容后机组鉴定	143
第12章	水轮机改造增容概述	144
12.1	水电站水轮机运行中出现的问题	144
12.2	水轮机改造增容要求及方式	145
12.3	水轮机改造增容	146

第 13 章 水轮发电机改造增容 150

13.1 影响水电站水轮发电机运行和出力的因素 150

13.2 发电机改造增容应考虑的主要问题 152

13.3 水轮发电机改造设计 153

13.4 水轮发电机改造增容 157

13.5 水轮发电机改造增容实例 163

13.6 蒸发冷却改造增容 166

13.7 水轮发电机组改造增容实施 170

第 14 章 水轮发电机组运行及故障 179

14.1 水轮发电机正常运行 179

14.2 水轮发电机特殊运行 181

14.3 水轮发电机组运行中常见的故障 181

第 15 章 水电站机组经济与优化运行 183

15.1 水电站运行 183

15.2 水轮发电机组经济与优化运行意义 184

15.3 水轮发电机组经济与优化运行准则 184

15.4 水轮发电机组的经济与优化运行 185

参考文献 189

第 1 章 概 述

1.1 水力资源状况

1.1.1 水力资源蕴藏量

水力资源作为可再生的清洁能源，是能源的重要组成部分。

中国有众多的河流，地理和气候特征形成了丰富的水能资源。因此，我国是世界上水力资源丰富的国家之一，人均占有量为世界人均占有量的 55.1%。经过全面的复查和勘测计算，我国大陆水能资源理论蕴藏量在 10MW 以上的河流约 3886 条，水力资源理论蕴藏量约 6.94 亿 kW，年理论发电量为 6.08 万亿 kW·h，技术可开发装机容量为 5.42 亿 kW，技术可开发年发电量为 2.47 万亿 kW·h，经济可开发装机容量约 4.02 亿 kW，经济可开发年发电量为 1.75 万亿 kW·h。小水电是适合农村特点的清洁能源。据 2005 年对农村水电资源的调查，全国农村可开发水电资源为 1.28 亿 kW。从水力资源的复查结果表明，我国水力资源无论理论蕴藏量、技术可开发装机容量，还是经济可开发装机容量及已建和在建水电站容量均居世界首位，中国水电富甲天下。

水力资源是中国能源的主要组成部分，大力发展水电能源是保障未来中国能源供应的重要举措之一，水机组的改造增容是持续发展我国水电能源的重要途径。

1.1.2 水力资源开发现状

欧美发达国家是开发水力资源较早的国家，在 20 世纪 50~60 年代水力资源的开发已达 70% 左右。我国由于工业化进程滞后，水电开发真正起步始于 20 世纪的后半期。经过 50 多年的建设，到 2006 年底全国水电总装机容量达到 13029.22 万 kW，约占总容量的 20.89%。从我国水力资源较丰富的西部地区开发状况看也是远远不能满足要求的，据报道至 2006 年底西藏自治区按已建的水电站装机容量核算，其水力资源开发不到 5%；四川、云南和贵州三省分别为 22.6%、10% 和 28.2%。可见水力资源开发速度与天然资源条件还是不相称的，也是低于世界水平。由此可知在今后 15~20 年内水力资源开发任务艰巨。

预测到 2010 年和 2020 年全国水电装机容量有望达到 1.9 亿 kW 和 3 亿 kW，水力资源开发程度将分别达到 35% 和 55.4%，将逐步达到发达国家水平。

1.2 水电开发与发展

21 世纪我国水电建设潜力巨大。“十一五”规划要求全面贯彻落实科学发展观，立足

节约资源保护环境推动发展。21 世纪的前 20 年是我国经济社会发展的重要战略机遇期, 到 2020 年中国将实现经济翻倍。国民经济的增长必然伴随着对能源电力需求的增长。2006 年底全国电力总装机已达 6.23 亿 kW, 其中水电为 1.3 亿 kW, 占总容量的 20.89%。由于经济的快速增长, 仍然出现部分地区电力供应不足。由此可以预测电力增长的前景宽广, 到 2010 年, 全国水电装机容量有望达 1.9 亿 kW, 2020 年水电装机容量达到 3 亿 kW。在此期间, 全国农村水电将增加 3500 万 kW 左右。由此可见“十一五”期间和未来 15 年, 水电作为可再生清洁能源, 其开发具有广阔前景, 这是我国经济发展目标和新的经济发展方式所要求的, 也是我国能源构成与能源开发技术状况决定的。

在已开发的 1 亿多 kW 的水电装机中, 有约 4000 多万 kW 属于单站容量 5 万 kW 以下的小水电站, 超过 4000 余座。小水电资源丰富, 为解决广大农村和偏远山区等大电网难以波及的地区用电起到了积极有效的作用, 代替了部分燃煤电源, 保护了环境。由于小水电投资分散、私人和集体投资者多, 技术和设备相对简单, 建设周期短, 是不可忽视的可再生能源。国家已将小水电列入可再生能源的优惠政策扶植之列。

单机容量 5 万 kW 以上的大中型水电站是我国水电主力, 经过 50 多年的开发建设, 已建成 230 余座, 其中百万 kW 级以上的水电站约 25 座, 50 万 kW 以上的 40 余座。奠定了我国水电开发领域各专业的完整基础。我国已有能力开发各类水电站及其装备的研制。目前, 全国在建大中型水电站约 182 座, 总装机容量为 92500MW, 其中大型水电站 35 座, 总装机容量 70040MW, 其中包括三峡 22400MW、溪洛渡 12600MW、向家坝 6400MW、龙滩 4200MW、小湾 4200MW、拉西瓦 4200MW、瀑布沟 3600MW、锦屏一级 3600MW、构皮滩 3000MW、水布垭 1840MW、彭水 1750MW、公伯峡 1500MW 等特大型水电站。

1.3 水电设备研制

装备制造业是国民经济持续发展的基础, 而水电设备的设计制造水平更是一个国家重大装备工业水平的综合体现。随着电力建设的快速发展, 水电设备设计制造任务也更加繁重。水轮发电机组是水电设备中的主要设备, 水轮发电机组的发展与国民经济及电力的发展息息相关。特别“十一五”期间和未来 15 年, 一大批大容量、高参数的水轮发电机组的出现, 要求水电设备无论在设计和制造技术上都要有一个新的突破, 以适应电力工业快速增长的需求。

我国水电设备制造业从 1952 年开始生产至今已有 50 多年历史了。50 多年以来, 在加强研究开发的基础上, 积极吸取国外的先进经验, 不断创新, 逐渐形成了我国自己的风格和特色, 产品的技术经济指标不断提高。在独立自主、自力更生方针的指引下, 我国水电设备制造获得了迅速发展。产品的单机容量从 0.32MW 到 700MW, 转速自 54.6r/min 到 1000r/min 的成套水力发电设备。先后为国内外几百座大中型水电站设计制造了水电设备。1952 年先后试制成功了 800kW 和 3000kW 水轮发电机组, 1959 年新安江水电站 7.25 万 kW 水轮发电机组制造成功, 标志着我国水电设备制造达到了相当水平。

随着电力工业的不断发展, 许多大中型水电站相继建设, 要求制造部门生产更大的水

电设备。特别是为长江葛洲坝水电站研制的 170MW 水轮发电机组是目前世界上转轮直径最大的低水头立轴转桨式机组，至今仍为世界之冠，该机组 1983 年荣获全国优秀产品“金龙奖”，1985 年荣获国家科学技术进步特等奖，长江葛洲坝水电站及其设备的建成，标志着我国水电设备制造已步入一个新的里程碑；在此基础上，1998 年研制成功了单机容量为 400MW 的李家峡机组和单机容量为 550MW 的二滩机组。

近年来，在总结经验和技术引进的基础上，进一步推动了企业独立自主，科技创新，在研制大型水轮发电机组方面有了长足的进步，特别是通过三峡 700MW 机组技术引进，合作生产，为我国设计制造特大型水电机组创造了条件。独立自主研发了三峡右岸 700MW 水轮发电机组。在关键技术的攻关和掌握方面，特大容量水轮发电机的冷却技术是关键，它直接影响特大型水轮发电机的研制。三峡左岸 700MW 水轮发电机的冷却技术主要是依靠引进国外技术，选用了水内冷却技术，也是国外公司掌握的优势技术。为了适应研制特大型水轮发电机的需要，建立起我国自己的冷却技术研究与发展，势在必行。东方电机有限公司在大型水轮发电机的冷却技术上与中国科学院电工研究所合作研发了具有自主知识产权的蒸发冷却水轮发电机技术，该技术与国外一些公司掌握的水内冷却技术相比具有先进性，无论在技术上和安全可靠以及操作维护等方面都有它独特的优点。也是我国大型水轮发电机冷却的核心技术。在水轮发电机的基础理论和应用技术方面：如计算机和有限元等技术的应用，使得水轮发电机的电磁、机械以及温升等计算从“路”的概念发展到用“场”来分析。发电机的通风冷却和推力轴承技术的发展，给大容量、高参数水轮发电机组的设计制造得以快速提升。水轮发电机组的运行监测技术的应用，也进一步保证了发电机运行的可靠性。

据有关部门的规划和预测：在“十一五”和未来 15~20 年期间，水力发电作为可再生清洁能源，其开发具有广阔前景，必将给水电设备制造的发展带来新的飞跃，也为水电机组的改造增容提供良好的条件。

1.4 水电机组改造增容潜力

水电能源作为可再生能源，进行水电机组的改造增容，为水电能源可持续发展创造了条件。中华人民共和国成立以来，在水电开发方面得到了很大的发展。据有关资料统计，自中华人民共和国成立至 1996 年在 6~100MW 的水电机组共投产 634 台约 13580MW。其中容量在 8~20MW 的机组约占 54.5%；分布地区在浙江、福建、广东、广西、湖南、四川和云南等省（自治区），装机容量约占 62.1%。容量超过 100MW 的机组更有一大批。特别改革开放以来，水电装机的快速发展，截止到 2006 年底，水电机组投产容量已达 1.3 亿 kW，为机组的改造增容提供了更大空间。我国拥有小水电站 4.3 万多座，大多数建于 20 世纪七八十年代，经过几十年运行，这些小水电站设备也需要改造更新。因此，小水电也是水电机组技术改造的另一股潜力，由此可见，发电设备的快速发展给水电机组的改造增容带来巨大潜力。

第2章 水轮机主要特性与参数

2.1 水轮机基本参数

由于各电站的地理条件不同,所以电站的选择与电站中所用的机组选择常随着自然条件的不同而不同。在进行机组选型时,就要考虑机组的有关技术特性和参数。下面简单介绍这些特性和参数对机组选型的影响。

(1) 水轮机的功率和效率。水轮机在单位时间内从主轴上输出的功率称为水轮机的功率。一般用 N 表示,单位为 kW。

水流中所含有的能量并不是全部都能转换为机械能。往往由于阻力、摩擦、漏水等而使部分水能被消耗掉。效率就是水轮机的输出与输入之间的能量比,用百分比表示。现代大型水轮机的效率已经超过了 94%。

(2) 水头。在流体力学中水头的定义是:单位重量流体所具有的能量。水电站上、下游的水位差称为水电站的装置水头。这个水头并不能全部被水轮机利用,其中一部分被水电站的建筑物的阻力所消耗。真正为水轮机所利用的水头应是水轮机进口处断面与尾水渠处断面之间的单位重量流体能量差,即所谓水轮机工作水头,通常用 H 表示,单位为 m。

(3) 流量。单位时间内通过的水量称为流量,用 Q 表示,单位为 m^3/s 。

输入到水轮机的功率与工作水头及通过水轮机的流量的关系为

$$\text{输入功率} = 9.81 \times \text{工作水头} \times \text{流量} \quad (2-1)$$

水轮机的输出功率为

$$\text{输出功率} = 9.81 \times \text{工作水头} \times \text{流量} \times \text{水轮机效率} \quad (2-2)$$

(4) 转速。水轮机的转速用 n 表示,单位为 r/min 。因近代水轮机通常都是直接与水轮发电机连接的,所以水轮机的额定转速必须符合发电机同步转速的要求。我国电网采用的标准频率为 $f=50\text{Hz}$,当发电机的磁极对数为 p 时,它的同步转速为

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{3000}{p} \quad (2-3)$$

根据水轮发电机极对数不同,可得到一系列同步转速值,机组的额定转速就从这些同步转速中选取。

(5) 转轮直径。转轮直径是水轮机中最重要的几何特征尺寸,通常用 D_1 表示。不同型式的水轮机转轮的标称直径 D_1 其标注的位置也是不同的。

2.2 水轮机的相似准则

对一台水轮机除必须保证结构、工艺、材料、强度、刚度等各方面的合理性外，更主要的是必须保证水力性能的合理。所以水轮机的设计包括水力设计和结构设计两部分。水轮机水力设计任务和目的是要发挥水能的最大作用。一方面，由于水在水轮机中的流动情况十分复杂，只靠理论计算是不能圆满地完成水力设计任务的；另一方面，目前水轮机的尺寸也做得很大，加上水电站条件的限制，要通过水电站现场测试来全面地确定水轮机水力性能，也较难做到。所以一般都采用从模型试验研究入手并与理论计算相结合的方法。水轮机的模型试验就是水力设计的科学依据。但是模型并不是原型水轮机，因此，必须找出模型与原型水轮机相互关系的规律性。通过科学实验得知，模型水轮机与原型水轮机之间有着许多相似性。把这些共同点归纳起来，找出其中规律便得到水轮机的相似规律。遵照这些准则就可以从模型试验的结果推导出原型水轮机的各项特性。水轮机的相似准则也是模型试验研究的理论基础。

水轮机的相似准则是根据流体力学的相似原理而得来的。为了使模型水轮机的试验结果能够代表原型水轮机的真实情况，一般遵循 3 个条件：几何相似、运动相似、动力相似。

直接利用上述 3 个条件来判断模型与原型相似与否显然不方便，如果能利用上面讲过的水轮机基本参数 N 、 H 、 Q 、 D_1 、 n 有关的某些量来表达出相似条件，那么应用时就会简便得多。因此需要介绍 3 个概念：

- (1) 单位转速。转轮直径为 1m 的水轮机，在水头为 1m 时的转速，用 n'_1 表示。
- (2) 单位流量。转轮直径为 1m 的水轮机，在水头为 1m 时通过转轮的流量，用 Q'_1 表示。
- (3) 单位功率。转轮直径为 1m 的水轮机，在水头为 1m 时所发出的功率，用 N'_1 表示。

上述 3 个概念量分别与水轮机基本参数 N 、 H 、 Q 、 D_1 、 n 之间存在着一定的关系。

在满足上述 3 个相似条件时，模型水轮机与原型水轮机的单位转速、单位流量、单位功率分别等于某个常数。根据这个规律，就可以把从同一个模型水轮机上所获得的试验数据用来判别几何形状相似但是直径尺寸不同的各个水轮机的技术特性。

把几何形状相似、尺寸大小不同的水轮机（转轮）归并在一起，就形成了水轮机（转轮）的系列。把各种水轮机系列归并在一起，经过编制就形成水轮机型谱。

2.3 比转速

开始设计一台水轮机时，往往只给出了功率 N 、水头 H 和转速 n 等。水轮机转轮直径 D_1 尚待选定。因此，如果能再进一步用这些已知数据来表达几何相似的水轮机在相似工作条件下的判别数，则会更方便。它就是水轮机的比转速，用 n_s 来表示。几何相似的水轮机在相似的工作条件下，它们的比转速相等。对同一系列水轮机如果只计效率最高时

的比转速值,那么同一系列内的水轮机就只具有一个比转速值。所以,比转速是表征该系列水轮机的一个重要参数。具体说明在有效水头 1m , 发出功率为 1kW (HP) 时,具有某个尺寸的水轮机的转速值就是该水轮机的比转速。如编号为 220 的水轮机,它的比转速为 221。亦即有效水头为 1m , 具有某个尺寸的该水轮机发出功率为 1kW (HP) 时,其转速就是 221r/min 。由分析可知,转轮的尺寸随着比转速的增高而减小。所以,现代的水轮机发展的一个方面就是倾向于采取高比转速的转轮。

2.4 水轮机的汽蚀特性和吸出高度

汽蚀是水轮机的一个重要特性,也是一个较复杂的问题。本书不做详细叙述,仅做一般概念性介绍。

(1) 汽蚀现象和汽蚀破坏。一般水电站水库的平均水温为 20°C 左右,此时水的饱和蒸汽压力相当于 0.24m 水柱。如果水轮机中某处水流压力达到 0.24m 水柱,那么此处的水就会汽化,放出大量气泡。气泡随着流水被带到高压区时,气泡内的水蒸汽将因压力增高又凝结为水。同时,气泡周围的水在高压作用下,以高速向气泡中心撞击,致使气泡破裂或使水流相互碰撞。在气泡产生和再凝结过程中所引起的一系列物理现象,称为汽蚀现象。若在金属表面附近发生汽蚀现象,上述的碰撞便会直接作用于金属表面,造成金属表面呈海绵状的机械破坏。这种现象称为汽蚀破坏。

(2) 汽蚀系数和吸出高度。汽蚀系数是表示水轮机转轮汽蚀性能的一个系数,通常用 σ 来表示。吸出高度是水轮机转轮中心与水电站下游水面之间的高度差,通常用 H_s 表示。由分析得知,当水轮机的汽蚀系数 σ 越大,吸出高度 H_s 就越小,装机就越深,厂房开挖量就越大,电站造价就越高。反之, σ 越小, H_s 越大,开挖量就越小,造价就越低。

2.5 水轮机特性曲线

水轮机特性曲线主要包括水轮机模型综合特性曲线和水轮机运行综合特性曲线。

(1) 水轮机模型综合特性曲线。该曲线主要把从模型试验中所取得的数据汇总起来绘成图表就得到了水轮机模型综合特性曲线见图 2-1。

根据水轮机相似准则,同一系列的水轮机在相似工作条件下,单位转速 n'_1 和单位流量 Q'_1 都是常数。反之,一定的 n'_1 和 Q'_1 值代表着该系列水轮机运行的工作条件,一般称为运行工况。模型综合特性曲线就是以 n'_1 、 Q'_1 为纵、横坐标轴绘制成的曲线。每一对 n'_1 和 Q'_1 值代表着水轮机的一个运行工况。因此,某系列水轮机的运行工况范围究竟多大?水轮机在任一工况下工作时,它的效率值、汽蚀系数值究竟等于多少?可从模型综合特性曲线上查得。

(2) 水轮机运行综合特性曲线。尽管模型水轮机模拟得十分好,但是它相比于原型水轮机毕竟还有尺寸大小的差别。它的效率值也就不会相等(因为能量的损耗不可能完全按尺寸比例变化),而原型水轮机的效率常要高于模型。所以,必须按一定方法予以修正,

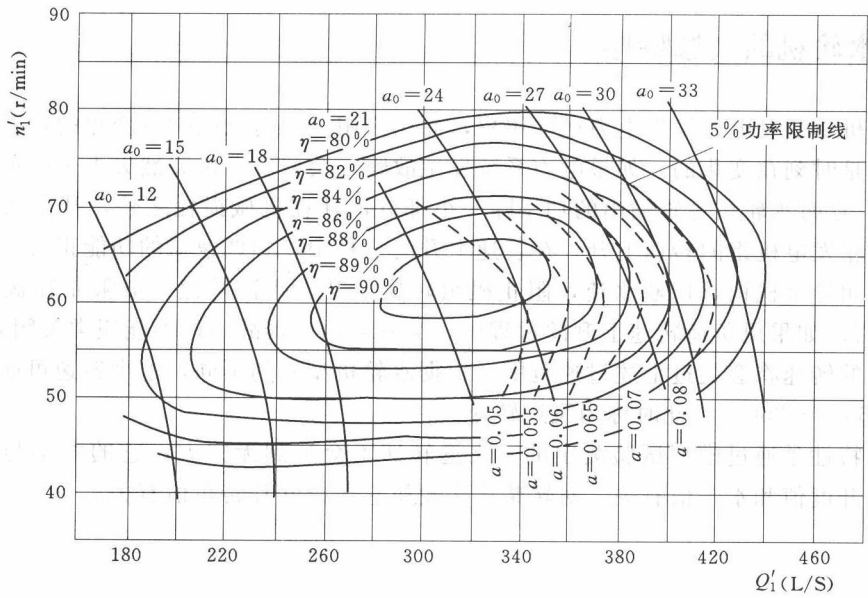


图 2-1 水轮机模型综合特性曲线

而且应在事先做好。其次，用于实际的水轮机的转速 n 虽已确定，但在运行中水头 H 和功率 N 是不定的。此时，如以 H 、 N 来表示运行工况尤为方便。所以针对某台实际应用的水轮机，绘制出它的运行综合特性曲线将是非常有益和必要的。运行综合特性曲线是以 H 、 N 为纵、横坐标绘制成的曲线。它是根据模型综合特性曲线和水轮机的基本参数，经过换算并予以必要的修正而做出的，见图 2-2。

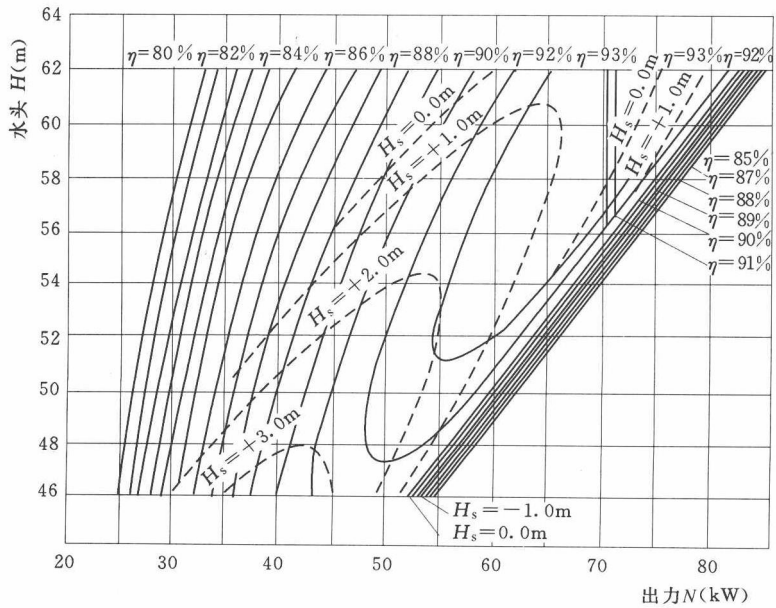


图 2-2 水轮机运行综合特性曲线

2.6 水轮机的飞逸特性

水轮机带动发电机发出电力送往用户，而用户用电的情况是时刻变化的，所以发电机的负荷也是时刻在变化的。如果电力系统发生故障，会使发电机突然失去全部负荷（统称甩负荷）。这时水轮机主轴输出的功率除一小部分消耗在机械损耗之外，其余大部分功率将驱使水轮发电机组的转速上升。在转速上升的过程中，如调速器的功能正常，它就迅速作用，关闭导水机构，切断水流，阻止机组转速上升。此种转速一般限制在额定转速的140%左右。如果甩负荷转速上升的过程中，又发生调速器故障，不能正常关闭导水机构，这时机组的转速将会超过上述过速范围。根据水轮机型式的不同，这个转速可能达到额定转速的165%~260%，此时称为飞逸转速。

飞逸特性是通过模型试验测定的。飞逸转速不会达到无穷大，它的大小与水轮机型式、导叶开度值和水头值有关。对转桨式水轮机它还与叶片转角值有关。

第3章 水轮机及其辅助设备

在论述水电机组改造增容前,应对水电站的水轮机结构做简单了解,以方便对改造方案的决策。本章专门对水电站的水轮机结构做一般性介绍,仅供读者参考。

3.1 水轮机的主要组成

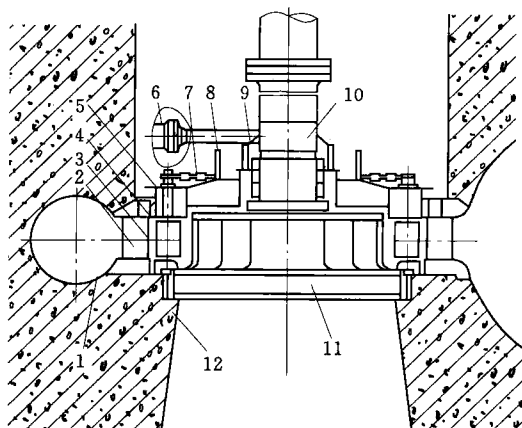


图 3-1 混流式水轮机的总体布置图
1—蜗壳; 2—座环; 3—底环; 4—导叶; 5—顶盖;
6—接力器; 7—传动机构; 8—控制环; 9—轴承; 10—主轴; 11—转轮; 12—尾水管

水轮机是一种以水力为动力的原动机。利用水力推动水轮机旋转,再带动发电机发电。图 3-1 为一台混流式水轮机的总体布置图,水轮机有转动和固定两大部分。

(1) 转动部分。主要部件是转轮和主轴。转轮是水轮机的关键部件,它直接关系到水轮机性能。

(2) 固定部分。主要是埋入部分和导水机构等。埋入部分的主要部件是蜗壳和座环。因为它们都埋在电站的混凝土基础内,所以称为埋入部分。蜗壳是水轮机的引水部件,它的外形像一个蜗牛的外壳。座环则是承受整个水轮发电机组重量的支承部件。导水机构部分所包括的部件较多,主要有顶盖、底环、导叶及控制机构等。

3.2 水轮机的分类

水轮机的种类很多,在第 3.1 节介绍的是其中一种,称为混流式水轮机。按水力作用原理,水轮机可分为两大类,即冲击型和反击型。根据水流流经水轮机的方向及转轮结构上的特征,这两大类水轮机又可分为多种型式,见图 3-2。

3.2.1 冲击型水轮机

贮存在高处的水含有一定的位能。见图 3-3,把具有

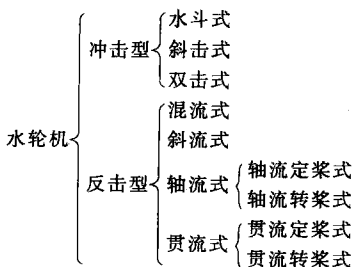


图 3-2 水轮机分类示意图