

SHUILUNFADIANJI

JIEGOU YUNXING JIANCE YU WEIXIU

水轮发电机

结构运行监测与维修

陈锡芳 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

责任编辑 司毅兵
E-mail: syb@waterpub.com.cn



销售分类: 水 利 水 电 工 程

ISBN 978-7-5084-5339-2



9 787508 453392 >

定价: 97.00 元

水轮发电机 结构运行监测与维修

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轮发电机结构、设计与运行中的主要技术问题和要求,综述有关的基本原理和作用,讨论了国内外水轮发电机的结构形式和特点,总结了我国在水轮发电机设计制造以及运行维修方面的实践经验,提供了国内外水轮发电机设计制造和运行中一些使用数据及标准。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。

本书分3篇共21章。第1篇共14章,主要论述水轮发电机结构与设计。第2篇共3章,叙述水轮发电机和发电电动机启动、停机与运行。第3篇共4章,主要对水轮发电机的监测与维修作了叙述,并论述了水轮发电机扩容改造的原则和途径。本书还对发电机的寿命评估作了论述。另外,本书在附录中还收录了三峡水电站左岸厂房发电机简介、常用工业材料的物理性能、国内外部分大容量水轮发电机参考总图等资料。

本书主要供从事水轮发电机设计、制造、研究和电站设计、安装、运行、维修等方面的工程技术人员和管理人员查阅、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

水轮发电机结构运行监测与维修/陈锡芳编著. —北京:
中国水利水电出版社, 2008
ISBN 978-7-5084-5339-2

I. 水… II. 陈… III. ①水轮发电机—结构②水轮发电
机—维修 IV. TM312

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第023717号

书 名	水轮发电机结构运行监测与维修
作 者	陈锡芳 编著
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266(总机)、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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 35.75印张 848千字
版 次	2008年6月第1版 2008年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	97.00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



水力资源是既清洁又可再生的能源，是用于发电的优质能源。水力发电是利用江河源远流长的流量和落差形成的水的势能发电，是一次性能源直接转换成电力的物理过程，它不消耗 1m^3 水，也不污染 1m^3 水，不排放 1m^3 有害气体，也不丢弃 1kg 固体废物，是清洁的能源。水力资源的另一特点是地球上水循环不中止，江河不会枯竭，水资源是永恒的、可再生的能源。水力发电获得的电量也不消耗总的资源量。因此，世界各国都以优先开发水能资源为目标，大力发展水电。据统计，世界上有 24 个国家依靠水力发电提供国内 90% 的电力，如巴西、挪威等国；有 55 个国家水力发电占全国电力的 50% 以上，如加拿大、瑞士、瑞典等国。我国目前的水电装机容量约占全国电力的 24%，年发电量占 14.8%，与发达国家相比，还有一定的差距。

我国有众多的河流，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。经过全面的调查和勘测计算，我国水能资源理论蕴藏量约 6.94 亿 kW（不含港澳台地区），年理论发电量为 6.08 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ；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 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ；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 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。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。我国大陆虽然在 1912 年有了第一座云南石龙坝水电站（装机 500kW），但由于工业化进程的滞后，水电开发真正起步于 20 世纪的后半期。经过 50 多年的开发建设，到 2003 年全国水电总装机容量达到 9217 万 kW，约占全国电力的 24%；年发电量 2830 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，约占全国发电量的 14.8%。可见我国的水电发展速度与天然资源条件还是不相称的，也低于世界水平。因此，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 世纪的头 20 年是中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两番。国民经济的增长必然伴随着对能源电力需求的增长。2003 年底全国电力总装机已达 3.91 亿 kW，年电量为 19000 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，但由于经济快速增长，仍然出现部分地区电力供不应求，拉闸限电频繁。由此可以预测电力增长的前景广阔，到 2010 年，全国水电装机容量要达 1.8

亿 kW，占全国总装机容量的 25% 左右，水电开发程度可望达到 33% 左右；2020 年水电装机容量达到 3 亿 kW，占全国总装机容量的 30%，开发程度达到 55% 左右，才能接近发达国家水平。在此期间，全国农村水电将增加 3500 万 kW。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。

2004 年底全国常规水电已开发装机容量达 1.0256 亿 kW，年发电量 3280 亿 kW·h，占全国技术可开发装机容量的 18.9%，占全国总装机容量的 23.3%；全国农村水电装机容量为 3865 万 kW。目前，全国在建（含 2005 年开工）大中型水电站共 182 座，总装机容量为 92500MW，其中大型水电站 35 座，总装机容量 70040MW，包括三峡 18600MW、溪洛渡 12600MW、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 等一批特大型水电站。

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。水轮发电机是水电设备中的主要设备，水轮发电机的发展与国民经济及电力的发展息息相关。特别是“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的出现，要求水轮发电机无论是在设计上还是在制造技术上都要有一个新的突破，以适应快速增长的电力工业需要。

我国水轮发电机制造业从 1952 年开始生产至今已有 50 多年历史了。50 多年来，我国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，逐渐形成了自己的风格和特色，产品的技术经济指标不断提高。产品的单机容量从 0.32MW 提高到 700MW，转速从 54.6r/min 提高到 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，其中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；1998 年我国与国外联合设计，合作制造了单机容量为 550MW 的二滩水电站水轮发电机组。近年来，我国在总结经验和引进技术的基础上，推进了企业独立自主，科技创新，在研制大型水轮发电机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。随后，我国独立自主地研发了三峡右岸 700MW 水轮发电机组。在技术的攻关和

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。因此，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，势在必行。近年来，东方电机股份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，在技术上和安全可靠性以及操作维护等方面都具有独特的优点，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，大大提升了大容量、高参数水轮发电机的设计制造技术。水轮发电机的运行监测技术的应用，进一步确保了发电机的运行可靠性。

本书旨在讨论和研究水轮发电机结构、设计与运行中的主要技术问题和要求，综述有关的基本原理和作用，论述国内外水轮发电机的结构型式和特点。本书结合作者 50 年来的工作实践和总结新中国成立以来在水轮发电机方面的设计制造以及运行维修方面的经验，广泛收集和摘引了国内外有关水轮发电机设计制造和运行中的一些使用数据及标准，以供设计制造和运行维修技术人员参考使用。

本书分 3 篇共 21 章。第 1 篇共 14 章，主要论述水轮发电机结构与设计。第 1 章介绍水力发电与水电站设备；第 2~4 章论述了水轮发电机的原理、基本数据和主要尺寸的确定；第 5 章专门介绍了水轮发电机的结构型式与分类；第 6~10 章分别论述了水轮发电机定子、转子和机架及轴承以及辅助装置等部分的结构特点及其设计方法；第 11、12 章论述了水轮发电机的通风冷却与发热和内冷却发电机的结构及设计特点；第 13、14 章对发电电动机和贯流式发电机的结构特点和设计要点作了论述。第 1 篇是本书的重点，其内容涉及水轮发电机的核心部分。第 2 篇共 3 章，叙述水轮发电机和发电电动机启动、停机与运行。第 15 章论述了水轮发电机和发电电动机启动前的检查和应具备的条件；第 16 章叙述了水轮发电机空载和负载所例行的各种试验；第 17 章论述水轮发电机正常、特殊和非正常工况下的运行特性及要求。第 3 篇共 4 章，主要对水轮发电机的监测与维修作了叙述，并论述了水轮发电机增容改造的原则和途径。第 18 章提出了水轮发电机使用条件和日常维护的要求；第 19 章叙述了水轮发电机离线与在线监测的要求和发电机的诊断手段；第 20 章介绍了水轮发电机检修项目及内容和要求；第 21 章论述了水轮发电机增容改造的原则

和途径与实施。并对发电机的寿命评估作了论述。

本书的读者对象主要是从事水轮发电机设计、制造、研究和电站设计、安装、运行、维修等方面的工程技术人员。在编写过程中作者考虑到部分管理人员的需要，同时考虑到专业院校的师生能对水轮发电机结构、设计和运行方面的知识有较全面的了解，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。

作者长期从事水轮发电机设计制造工作，曾负责和担任过国内外重大水电站发电机的设计，为了很好地总结经验，数年前就设想能编著一本技术人员得心应手的水轮发电机方面的科技书，能为水电建设战线上的同仁们做件好事，是作者最大的心愿。经过数年的耕耘，这本书终于面世了。在这里首先要感谢我国水电建设战线上的老前辈、老专家和东方电机股份有限公司的历届领导及设计部门的全体同仁们多年来对作者的支持和帮助。同时也要感谢全国有关水电建设单位的大力支持。

本书由陈锡芳编著，另外，刘光玉和陈晖两位同志也参加了部分工作。

由于作者的水平 and 经验有限，书中错误与不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作者

2008年1月

常用符号表

AS ——定子线负荷	G_{Cu} ——铜剪切弹性系数
a_1 ——空心铜线孔高度	G_{Fe} ——钢剪切弹性系数
a_{Cu} ——每股实心铜线高度	g ——重力加速度
a_{Cu1} ——每股空心铜线高度	H ——储能常数
a_f ——转子铜线高度	H_j ——单位惯性常数
B_δ ——气隙磁通密度	h_n ——定子槽高
b_1 ——定子铜线宽度	h_m ——磁极极身高度
b_f ——转子铜线宽度	h_{min} ——最小油膜厚度
b_M ——定子槽内铜宽	h_p ——磁极极靴高度
b_m ——磁极极身宽度	I_N ——额定电流
b_n ——定子槽宽	I_{fN} ——额定励磁电流
b_p ——磁极极靴宽度	I_2 ——负序电流
C ——定子导体股数	J_1 ——定子绕组电流密度
C_A ——电机常数	J_2 ——转子绕组电流密度
C_p ——空气比热	J_E ——定子绕组等效电流密度
C_v ——空气热容量	K_A ——利用系数
D ——大轴外径/滑环直径	K_c ——短路比
D_0 ——大轴内径	k_m ——摩擦系数
D_1 ——轴承内径	k_y ——飞逸系数
D_2 ——轴承外径	K_w ——绕组系数
D_a ——定子铁心外径	K_ϕ ——磁场波形系数
D_i ——定子铁心内径	L_e ——股线空换位长度
D_j ——定子机座外径	L_H ——定子线棒直线部分换位长度
D_{ji} ——定子机座中环板内径	L_w ——转子绕组每匝平均长度
D_p ——转子外径	l_i ——定子铁心长度
d ——空心铜线内孔的流体水力直径	l_{Fe} ——定子铁心净长度
E ——绕组相电势/气隙电势	M_a ——发电机原动转（力）矩
E_0 ——激磁电势/内电势	M_c ——阻力矩
e_c ——导体内瞬时电势	M_d ——短路力矩
F ——推力总负荷	M_m ——最大转矩
F_C ——径向力	M_N ——额定转（扭）矩
F_T ——切向力	M_s ——稳定力矩
F_{Cu2} ——转子绕组截面积	M_t ——倾倒地矩
f ——额定频率/挠度	m ——电机相数

n_D ——启动电机同步转速
 n_N ——额定转速
 n_p ——分离转速
 n_r ——开始制动转速
 n_t ——同步转速
 n_y ——飞逸转速
 P ——电机极对数/推力负荷
 P_m ——最大功率/电磁功率
 P_N ——额定功率
 P_s ——发电机容量
 p ——轴瓦单位压力/空气压力
 p_{cu} ——定子基本铜耗
 p_e ——转子铜（励磁）耗
 p_d, p_f ——附加损耗
 p_{Fe} ——基本（空载）铁耗
 p_v ——通风损耗
 Q ——油量/（水）流量
 Q_0 ——电机总风量/总流量
 q ——每极每相槽数
 R ——绝缘电阻
 Re ——雷诺数
 R_t —— $t^{\circ}\text{C}$ 时绝缘电阻
 S_N ——额定容量/视在功率
 S_n ——每槽导体数
 S_j ——极限滑差
 T ——计算转矩/断水持续时间
 T_{mec} ——惯性时间常数
 t_1 ——定子齿距
 t_2 ——阻尼绕组节距
 t_H ——绕组换位节距
 U_N ——额定电压
 U_i ——匝间电压
 v_2 ——转子周速
 w ——每相绕组串联匝数
 w_2 ——磁极线圈匝数
 x ——发电机电抗
 x_d ——直轴同步电抗
 x'_d ——直轴瞬变电抗

x''_d ——直轴超瞬变电抗
 x_p ——波梯尔电抗
 x_{sd} ——定子绕组端部漏抗
 y ——合成节距
 y_1 ——第一节距
 y_2 ——第二节距
 Z ——定子槽数/电机总风阻
 Z_0 ——零序电抗/单元电机槽数
 Z_1 ——正序电抗
 Z_2 ——负序阻抗
 Z_c ——空气冷却器风阻
 Z_p ——压头元件内阻
 Z_s ——定子风沟风阻
 α ——散热系数
 α_1 ——电角度
 α_p ——极弧系数/压力比
 β ——应力增大系数
 δ ——功率角/发电机气隙
 δ_i ——主绝缘厚度
 $\delta_{\min}$ ——最小气隙
 ξ_i ——风阻系数
 ξ_w ——转子支架入口风阻系数
 η ——效率/压头系数
 θ ——运行功率角/水温升
 θ_{Cu1} ——定子绕组温升
 θ_{Cu2} ——转子绕组温升
 λ ——主要尺寸比
 λ_i ——定子绕组传热系数
 μ ——导磁系数
 μ' ——相对导磁系数
 μ_0 ——动力粘度
 ρ ——空气（水）密度/电阻系数
 σ_i ——密集系数
 σ_t ——拉应力
 τ ——电机极距
 τ_l ——剪应力
 ϕ ——每极磁通
 Ω ——机械角速度

目 录

前言

常用符号表

第1篇 水轮发电机结构与设计的目录

第1章 水力发电	1
1.1 概述	1
1.2 水力发电	2
1.2.1 水能及其转换	2
1.2.2 水力发电及其特点	3
1.3 水电站及其设备	4
1.3.1 水电站的分类	4
1.3.2 水电站厂房	5
1.3.3 水电站设备	5
第2章 水轮发电机工作原理	7
2.1 概述	7
2.2 电机基本工作原理	7
2.2.1 电机磁路	8
2.2.2 水轮发电机的工作原理	8
2.3 水轮发电机励磁系统	9
2.3.1 励磁系统的基本结构	9
2.3.2 励磁方式	10
第3章 水轮发电机的基本技术数据	12
3.1 规格数据	12
3.1.1 额定容量 (S_N)	12
3.1.2 额定电压 (U_N)	12
3.1.3 额定功率因数 ($\cos\varphi_N$)	12
3.1.4 额定转速 (n_N) 和飞逸转速 (n_y)	13
3.2 电磁参数	14

3.2.1 直轴瞬变电抗 X'_d 和直轴超瞬变电抗 X''_d	14
3.2.2 短路比 K_c	15
3.3 机械参数	15
3.3.1 飞轮力矩 (GD^2)	15
3.3.2 机械(惯性)时间常数 (T_{mec}) 和储能常数 (H)	16
第4章 水轮发电机主要尺寸与经济性	17
4.1 发电机主要尺寸与额定功率及转速的关系	17
4.2 水轮发电机主要尺寸比与尺寸的确定	18
4.2.1 主要尺寸比	18
4.2.2 主要尺寸的确定	18
第5章 水轮发电机结构型式与分类	20
5.1 水轮发电机结构型式	20
5.2 水轮发电机的分类	20
5.2.1 立式与卧式	20
5.2.2 空冷与内冷	21
5.2.3 常规与非常规	21
5.3 水轮发电机总体布置	22
5.3.1 卧式机组轴承布置	22
5.3.2 立式机组轴承布置	23
5.4 悬式和伞(半伞)式结构的判断与稳定性	29
5.4.1 悬式和伞(半伞)式结构的判断	29
5.4.2 全伞式机组稳定性	30
第6章 定子	31
6.1 概述	31
6.2 定子机座	31
6.2.1 机座结构类型	32
6.2.2 机座结构设计	32
6.3 定子铁心	39
6.3.1 铁心冲片	39
6.3.2 通风槽片	44
6.3.3 铁心固定	47
6.3.4 铁心设计	53
6.4 定子绕组	60
6.4.1 绕组的构成原则	60
6.4.2 绕组的基本要求	60
6.4.3 绕组型式及选择	61
6.4.4 绕组换位	63

6.4.5 绕组绝缘	70
6.4.6 绕组设计	76
6.5 定子装配	89
6.5.1 绕组连接	89
6.5.2 绕组固定	106
6.5.3 铜环引线	113
6.5.4 定子基础部件	121
第7章 转子	124
7.1 转子结构特点与要求	124
7.2 磁极	125
7.2.1 磁极固定	126
7.2.2 磁极铁心	127
7.2.3 磁极线圈	134
7.2.4 阻尼绕组	145
7.2.5 垫板与弹簧	151
7.2.6 磁极键	151
7.2.7 磁极部分计算	152
7.3 转子体	162
7.3.1 整体结构转子体	162
7.3.2 组合结构转子体	163
7.3.3 转子磁轭与支架配合紧量	186
7.4 风扇	187
7.4.1 风扇结构要求	187
7.4.2 风扇结构和类型	187
7.5 轴	195
7.5.1 轴基本要求及其受力	195
7.5.2 轴结构及其连接	196
7.5.3 轴尺寸确定及计算	198
7.6 滑环与电刷装置	204
7.6.1 滑环	204
7.6.2 电刷装置	207
第8章 轴承	209
8.1 轴承分类	209
8.2 卧式电机轴承	209
8.2.1 座式滑动轴承结构型式及尺寸确定	209
8.2.2 座式滑动轴承油润滑方式	210
8.2.3 润滑方式及润滑油选择	211

8.2.4 座式滑动轴承承载及计算	211
8.3 立式电机轴承	212
8.3.1 推力轴承	212
8.3.2 导轴承	236
8.4 轴承油循环冷却系统	241
8.4.1 推力轴承油循环冷却系统	241
8.4.2 导轴承油循环冷却系统	250
8.5 轴承油密封	251
8.5.1 油槽盖密封	251
8.5.2 挡油管密封	252
8.6 轴承高压油顶起装置	254
8.6.1 工作原理	255
8.6.2 油室压力和油量	255
8.6.3 油室直径和油膜厚度	257
8.6.4 环形油室和多油室	258
8.6.5 油泵压力选择	258
8.6.6 高压油顶起计算	258
8.7 轴承润滑计算	260
8.7.1 推力轴承润滑计算	260
8.7.2 导轴承润滑计算	263
8.8 轴承用润滑油	264
8.9 油冷却器	266
8.9.1 油冷却器类型	266
8.9.2 油冷却器结构及其要求	267
8.10 轴电流	268
第9章 机架	270
9.1 机架受力及其要求	270
9.1.1 机架受力	270
9.1.2 机架结构要求	270
9.2 机架结构型式	271
9.2.1 辐射型机架	271
9.2.2 井字形机架	272
9.2.3 桥型机架	272
9.2.4 斜支臂机架	272
9.2.5 多边形机架	273
9.2.6 三角(△)环形机架	273
9.3 机架主要结构部件	275

9.3.1	中心体	275
9.3.2	支臂	275
9.3.3	合缝板	277
9.4	千斤顶	277
9.4.1	千斤顶受力	277
9.4.2	千斤顶结构	278
9.5	机架尺寸的选择与计算	279
9.5.1	机架尺寸选择	279
9.5.2	负重机架挠度、刚度和应力计算	279
第 10 章	辅助装置	283
10.1	灭火装置	283
10.1.1	灭火方式	283
10.1.2	水灭火系统	285
10.1.3	水灭火系统设计	286
10.1.4	不同灭火系统应用	286
10.2	制动装置（系统）	287
10.2.1	制动方式	287
10.2.2	制动系统	288
10.2.3	制动器	289
10.2.4	不同制动方式应用	292
10.2.5	制动器计算	292
10.3	测温装置	294
10.3.1	测温部位和测温数量	294
10.3.2	测温元件	294
10.3.3	测温系统	297
10.4	油、水管路系统	298
10.5	轴电流监测装置	298
10.6	粉尘收集装置	299
10.7	空间加热装置	299
第 11 章	通风冷却与发热	300
11.1	通风系统	300
11.1.1	通风系统分类	300
11.1.2	立式水轮发电机典型通风系统风路结构	305
11.1.3	水轮发电机通风系统论述	306
11.1.4	水轮发电机通风计算	318
11.2	冷却与发热计算	323
11.2.1	水轮发电机冷却方式	323

11.2.2 水轮发电机发热计算	325
11.3 空气冷却器及暖风装置	331
11.3.1 空气冷却器	331
11.3.2 暖风装置	338
第 12 章 内冷却水轮发电机	341
12.1 极限容量与冷却方式	341
12.2 内冷却水轮发电机	343
12.2.1 内冷（水冷）却水轮发电机的经济性	343
12.2.2 内冷（水冷）却水轮发电机的设计特点	344
12.2.3 水内冷水轮发电机	346
12.2.4 蒸发冷却水轮发电机	361
12.3 水轮发电机转子绕组强迫通风冷却	367
12.3.1 转子绕组散热冷却的主要途径	367
12.3.2 转子绕组强迫通风冷却结构	367
12.3.3 转子绕组强迫通风冷却计算	370
第 13 章 发电电动机	372
13.1 抽水蓄能电站	372
13.2 发电电动机特点	375
13.2.1 双向旋转	375
13.2.2 频繁启、停	375
13.2.3 专门启动措施	375
13.2.4 复杂过渡过程	375
13.2.5 制造难度大	375
13.3 发电电动机结构	376
13.3.1 总体布置	376
13.3.2 定子	376
13.3.3 转子	378
13.3.4 推力轴承	379
13.4 通风冷却系统	382
13.4.1 带有风机的轴—径向通风系统	382
13.4.2 磁轭径向通风系统	384
13.5 可变速发电电动机	384
13.5.1 变极式变速发电电动机	384
13.5.2 可调式变速发电电动机	386
13.6 发电电动机启动方式	388
13.6.1 选择启动方式的因素	388
13.6.2 启动方式	389

13.6.3	启动方式综合比较	397
13.7	发电电动机启动与停机	397
13.7.1	发电工况的启动与停机	397
13.7.2	电动机（水泵）工况的启动与启动试验	398
13.8	抽水蓄能机组工况转换	400
13.8.1	抽水蓄能机组工况转换种类	400
13.8.2	抽水蓄能机组工况转换	401
第 14 章	贯流式水轮发电机	403
14.1	贯流式水电站	403
14.1.1	贯流式水电站的类型	403
14.1.2	贯流式水电站特点	405
14.1.3	贯流式水轮发电机发展概况	406
14.2	灯泡贯流式水轮发电机主要技术问题	408
14.2.1	灯泡比	408
14.2.2	发电机额定电压	409
14.2.3	发电机功率因数	409
14.2.4	通风冷却	409
14.2.5	飞轮力矩 (GD^2) 和惯性时间常数 (T_{mec})	409
14.3	灯泡贯流式水轮发电机结构	410
14.3.1	总体布置	410
14.3.2	定子	414
14.3.3	转子	417
14.3.4	轴承	417
14.3.5	锥体	420
14.3.6	灯泡头	420
14.3.7	辅助装置	421
14.4	灯泡贯流式水轮发电机通风冷却	421
14.4.1	通风方式	422
14.4.2	冷却形式	423
14.4.3	冷却结构	426
14.4.4	风机和冷却器布置	428
14.4.5	增压冷却	429
14.4.6	水内冷却结构	429
14.5	二次循环冷却与冷却套	430
14.5.1	二次循环冷却	430
14.5.2	冷却套	431
14.5.3	冷却套散热及计算	431