

水轮发电机电磁 与计算

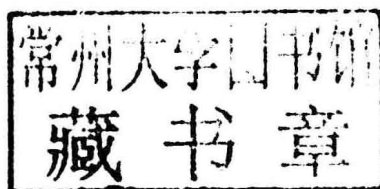
陈锡芳 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水轮发电机电磁 与计算

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电磁与计算的主要技术问题和要求。论述了水轮发电机电磁设计中基本原理和计算方法及特点。总结了我国多年来在水轮发电机电磁设计方面的实践经验。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。

本书共分十六章。第一章概论主要论述水轮发电机的基本结构和电磁与计算的任务及要求。第二章论述水轮发电机主要尺寸的选择及其考虑因素。第三、四章论述水轮发电机定子、转子电磁设计与计算的要素和确定的方法。第五、六章论述水轮发电机磁路和负载磁势的计算。第七、八、九章对水轮发电机的电磁参数和时间常数以及损耗与效率的计算方法作了叙述。第十、十一章专门论述绕组的磁势及其谐波和定子铁芯电磁振动的关系,并提供了定子铁芯电磁振动的计算方法。第十二章论述影响水轮发电机电压波形畸变的因素及其计算方法。第十三、十四章介绍短路电流、短路作用力和短路扭矩的计算以及水轮发电机的电气试验。第十五章提供了水轮发电机外形尺寸和重量的经验估算方法。第十六章电磁计算程序及实例。本书在附录内还提供了部分大型水轮发电机的主要技术参数和电磁设计时使用的槽数表等资料供读者参考。

本书主要供从事水轮发电机设计、制造、研究和水电站设计、运行、检修和安装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

水轮发电机电磁与计算 / 陈锡芳编著. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2011. 10
ISBN 978-7-5084-9118-9

I. ①水… II. ①陈… III. ①水轮发电机—电磁计算
IV. ①TM312

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第216767号

书 名	水轮发电机电磁与计算
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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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 21.5印张 510千字
版 次	2011年10月第1版 2011年10月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

作者简介



陈锡芳，1938年生，教授级高级工程师。历任东方电机股份有限公司总设计师，1991年国务院批准为享受政府特殊津贴专家。

从事水轮发电机设计制造工作50多年来，先后负责国内外重大产品设计14余项；同时进行水轮发电机电磁设计与研究；负责和承担国家科技攻关项目多项。对水轮机发电机研究倾注了毕生心血。担任葛洲坝（170MW）发电机主任设计，项目获国家科技进步特等奖、“葛洲坝推力轴承研究”获成都市科技进步二等奖；主持“50MW蒸发冷却水轮发电机研制”项目获中科院科技进步一等奖；负责“李家峡400MW蒸发冷却水轮发电机研制”项目获国家科技进步二等奖。参与三峡机组研究与论证获国家重大装备办公室颁发表彰奖。

1993年起先后负责二滩、三峡等机组的技术引进及图纸审批工作，以及贯流式机组的研制。近年进行小湾、拉西瓦、溪洛渡、向家坝和锦屏及1000MW级等大型水轮发电机组的可行性论证。被三峡开发总公司技术委员会聘为机电技术专家参与三峡机组重大技术问题研讨和决策。

曾赴加拿大、德国、法国、俄罗斯、美国等10余国进行水电考察和技术研讨。2003年起为抽水蓄能机组技术引进专家组成员，参与技术引进及项目合作。

主要著作有：编著《水轮发电机结构运行监测与维修》（2008），编著《水轮发电机组改造增容与优化运行》（2010），编著《水力发电技术与工程》（2010）。

E-mail: chenxifa@sina.com.cn

前 言

能源是人类社会存在与发展的基石。人们在日常的生产和生活中，都离不开对能源的利用，对电力能源的利用更是当今社会须臾不可缺的。

在 21 世纪，中国经济社会发展面临水资源、能源、粮食、环境等方面的重大挑战。大力发展水电，对于解决好上述制约经济社会发展的重大问题，实现可持续发展具有重要的战略意义。

水能是蕴藏在江河中的宝贵能源。江河的水流来自于大自然中的降水，是天赐的资源，而且年年长流不息。修建水电站，利用江河的水流发电，不会消耗和污染水流本身，仅是将水流中蕴藏的能量转化为电能输送出去，供人类使用。同时，水库调节径流、绿化大地，使人与自然和谐发展。

水力资源是清洁的、又可再生的能源，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。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。

中国有众多的河流，地理和气候特征形成了丰富的水力资源，总的蕴藏量居世界首位，这是一笔十分巨大且宝贵的物质财富。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%。经过全面的调查和勘测计算，我国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。

中国大陆虽然在 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。经过近 60 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 kW·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。“十二五”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。为实现 2020 年前节能减排的目标，我国还需要在 2015 年前开工建设约 1 亿 kW 水电装机容量，到 2020 年水电装机

容量达到 3.8 亿 kW，其中抽水蓄能电站装机容量 5000 万 kW。为此，需要尽快开展研究，科学规划，明确“十二五”规划期间每年水电开工、投产的项目和规模，抓紧开工建设一批大型水电项目。可见“十二五”规划期间，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。

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“十二五”规划期间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“十二五”规划期间，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 年开始生产至今已近 60 年历史了。60 年来，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。制造了单机容量从 0.32MW 到 800MW，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，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，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，之后小湾、拉西瓦、溪洛渡、向家坝和锦屏等一大批大型水轮发电机组先后建成发电，自主研发三峡右岸 700MW 水轮发电机组。目前正在研究论证 1000MW 级特大型水轮发电机组。

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，使大容量、高参数水轮发电机的设计制造技术得到提升。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电磁与计算的主要技术问题和要求，论述了水轮发电机电磁设计中基本原理和计算方法及特点，总结了我国多年来在水轮发电机电磁设计方面的实践经验。本书还广泛收集了国内外水轮发电机电磁设计与计算方面的有关资料。为了能更好地让读者消化论述的电磁原理和公式，采用列举一些实例进行计算和解释，为了便于读者阅读，书中还提供了近 200 幅插图。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。

本书共分十六章。第一章概论主要论述水轮发电机的基本结构和电磁与计算的任务及要求。第二章论述水轮发电机主要尺寸的选择及其考虑因素。第三、四章论述水轮发电机定子、转子电磁设计与计算的要素和确定的方法。第五、六章论述水轮发电机磁路和负载磁势的计算。第七、八、九章对水轮发电机的电磁参数和时间常数以及损耗与效率的计算方法作了叙述。第十、十一章专门论述绕组的磁势及其谐波和定子铁芯电磁振动的关系,并提供了定子铁芯电磁振动的计算方法。第十二章论述影响水轮发电机电压波形畸变的因素及其计算方法。第十三、十四章介绍短路电流、短路作用力和短路扭矩的计算以及水轮发电机的电气试验。第十五章提供了水轮发电机外形尺寸和重量的经验估算方法。第十六章电磁计算程序及实例。本书在附录内还提供了部分大型水轮发电机的主要技术参数和电磁设计时使用的槽数表等资料,供读者参考。

本书主要供从事水轮发电机设计、制造、研究和水电站设计、运行、检修和安装等方面的工程技术人员查阅、使用。在编写过程中作者考虑到部分管理人员的需要,同时也考虑到专业院校的师生能对水轮发电机电磁设计与计算方面的知识有较全面的了解,便于今后工作的需要,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,曾负责和担任过国内外重大水电站发电机的设计、并长期从事电磁设计与研究方面的工作。自2008年作者编著的《水轮发电机结构运行监测与维修》一书出版后,许多同仁们希望能在水轮发电机电磁与计算方面编写一本书,供大家阅读使用。为了达到这个目的和很好地总结经验,因此设想编著一本能使技术人员得心应手的水轮发电机电磁与计算方面的书,为水电建设战线上的同仁们做件好事,是作者最大的心愿。经过几年的耕耘,这本书终于诞生了。在这里首先要感谢我国水电建设战线上的老前辈、老专家和东方电气集团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。

本书编写过程中,刘光玉同志参加了部分工作,表示感谢。

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

编著者

2011年6月

常用符号表

AS——定子电（线）负荷	f_{ip} ——极频频率
a ——定子实心铜线高度/每相支路数	g ——重力加速度
a' ——定子实心铜线绝缘后高度	H ——储能常数
a_2 ——转子铜线高度	h_n ——定子槽高
B_δ ——气隙磁通密度	h_m ——磁极极身高度
b ——定子实心铜线宽度	h_p ——磁极极靴高度
b' ——定子实心铜线绝缘后宽度	I_N ——额定电流
b_2 ——转子铜线宽度	I_{fN} ——额定励磁电流
b_m ——磁极极身宽度	I_2 ——负序电流
b_n ——定子槽宽	I_s ——槽电流
b_p ——磁极极靴宽度	i_k ——短路电流
C ——定子导体股数	i_y ——冲击电流
C_A ——电机常数	j_1 ——定子绕组电流密度
C_a ——空气比热	j_2 ——转子绕组电流密度
C_w ——水比热	K ——极化系数
D_a ——定子铁芯外径	k ——比例系数
D_i ——定子铁芯内径	K_A ——利用系数
D_{ji} ——定子机座内径	K_c ——短路比
D_p ——转子直径	K_d ——动力系数
E ——绕组相电势/气隙电势	k_s ——饱和系数/槽口系数
E_0 ——激磁电势/内电势	k_y ——飞逸系数/短距系数
e_c ——导体内瞬时电势	k_q ——分布系数
e_v ——空载线电压波形畸变率	k_w ——绕组系数
F_{ad} ——电枢反应磁势	k_δ ——气隙系数
F_0 ——空载磁势	k_ϕ ——磁场波形系数
F_{fN} ——额定励磁磁势	k_λ ——极靴磁通系数
F'_t ——过励负载磁势	L ——电感
F''_t ——欠励负载磁势	l_t ——定子铁芯长度
f_c ——固有频率	l_{Fe} ——定子铁芯净长度
f_N ——额定频率	M ——力波节点对数
f_{zp} ——转频频率	M_N ——额定转（扭）矩

m ——电机相数	w_2 ——磁极线圈匝数
n_N ——额定转速	x ——发电机电抗
n_B ——每极阻尼条数	x_d ——直轴同步电抗
n_1 ——同步转速	x_q ——交轴同步电抗
n_y ——飞逸转速	x'_d ——直轴瞬变电抗
P ——电机极对数	x''_d ——直轴超瞬变电抗
P_N ——额定功率	x_p ——波梯尔电抗
P_{Cu1} ——定子基本铜耗	x_l ——定子绕组漏抗
P_{ed} ——定子齿压板及边缘铁芯段内杂散损耗	x_{ad} ——直轴电枢反应电抗
P_j ——定子轭部损耗	x_{ads} ——直轴电枢反应电抗饱和值
P_z ——定子齿部损耗	x_{aq} ——交轴电枢反应电抗
P_{c0} ——阻尼绕组中杂散损耗	X_f ——励磁绕组总电抗
P_{p0} ——极靴表面损耗	W_{Fe} ——铁耗在定子内缘的单位热负荷
P_{Fe} ——空载总铁耗	W_{Cu} ——铜耗在定子内缘的单位热负荷
P_F ——定子绕组涡流和环流损耗	W_i ——铜耗在线圈表面的单位热负荷
P_{s3} ——三次谐波引起杂散损耗	W_{Cu2} ——励磁损耗在线圈表面的单位热负荷
P_{pz} ——齿谐波引起极靴表面和阻尼绕组中杂散损耗	Y ——合成节距
P_k ——总短路损耗	y_1 ——第一节距
P_f ——励磁损耗	y_2 ——第二节距
P_v ——通风损耗	Z ——定子槽数/电机总阻抗
P_R ——总机损耗	α (α_p)——极弧系数
P_S ——总杂散损耗	δ ——发电机电气隙长度
Q_w ——水量	δ_i ——主绝缘厚度
q ——每极每相槽数	$\delta_{\min}$ ——最小气隙
R ——绝缘电阻	η ——效率
R_p ——极弧半径	$\Delta\theta_{lav}$ ——定子绕组对空气平均温升
R_t —— $t^\circ\text{C}$ 时绝缘电阻	$\Delta\theta_2$ ——励磁绕组对空气的温升
S_N ——额定容量/视在功率	$\Delta\theta_{Fe}$ ——铁芯对空气的温升
S_n ——每槽导体数	$\Delta\theta_i$ ——线圈绝缘体温降
T ——计算转矩	$\Delta\theta_s$ ——线圈端部表面对空气的温升
T_{mec} ——惯性时间常数	$\Delta\theta_{1\max}$ ——定子线圈有效部分对空气的最高温升
t_1 ——定子齿距	λ ——主要尺寸比
t_2 ——阻尼绕组节距	λ_r/λ_s ——磁导波
U_N ——额定电压	μ ——导磁系数
v_N ——额定周速	ρ ——空气(水)密度/电阻系数
v_2 ——转子周速	τ ——极距
v_y ——飞逸时周速	ϕ ——每极磁通
w ——定子绕组每相串联匝数	Ω ——机械角速度

目 录

前言

常用符号表

第一章 概论	1
第一节 概述	1
第二节 水轮发电机基本参数	3
第三节 水轮发电机基本结构	6
第四节 水轮发电机电磁与发热冷却	26
第五节 水轮发电机电磁与计算的任务和要求	26
第二章 主要尺寸	28
第一节 主要尺寸与电磁功率的关系	28
第二节 主要尺寸比与主要尺寸确定因素	29
第三节 极距 (τ) 与主要尺寸关系	30
第四节 定子电 (线) 负荷 AS	32
第五节 磁负荷 B_p	33
第六节 电磁负荷的匹配	33
第三章 定子电磁设计	34
第一节 定子槽数选择	34
第二节 定子绕组	36
第三节 定子铁芯及槽型	45
第四章 转子电磁设计	48
第一节 气隙长度	48
第二节 磁极冲片尺寸	49
第三节 阻尼绕组	51
第四节 励磁绕组 (磁极线圈)	53
第五章 磁路计算	60
第一节 磁路计算基本原理	60
第二节 电机磁路用的磁性材料	61
第三节 每极磁通	63
第四节 空气隙磁位降与磁通密度	64

第五节	齿部磁位降与磁通密度	66
第六节	定子轭部磁位降与磁通密度	69
第七节	转子磁极及轭部磁位降与磁通密度	71
第八节	空载特性曲线（饱和曲线）	72
第六章	负载磁势	75
第一节	瑞典电工联合会法（瑞典图法）	75
第二节	保梯图法	77
第七章	参数与时间常数	79
第一节	标么值概念	79
第二节	绕组电阻	80
第三节	绕组电抗	81
第四节	水轮发电机等值电路图	85
第五节	稳态电抗 x_d 、 x_q 和 x_p	86
第六节	暂态电抗 x'_d 、 x''_d 、 x''_q	88
第七节	挤流效应对电机参数的影响	89
第八节	饱和对电机参数的影响	89
第九节	时间常数	90
第八章	损耗与效率	92
第一节	概述	92
第二节	基本铁损耗	92
第三节	空载时铁芯中的附加损耗	94
第四节	电气损耗	96
第五节	负载时的附加损耗	96
第六节	机械损耗	100
第七节	效率	101
第九章	通风、发热与冷却	103
第一节	水轮发电机通风系统概述	103
第二节	水轮发电机冷却方式	104
第三节	水轮发电机发热计算	107
第四节	考虑负序电流影响时励磁绕组和阻尼绕组的温升计算	114
第十章	绕组的磁势与谐波	118
第一节	概述	118
第二节	导体的安导、磁势和磁场	118
第三节	单根导体的安导波和磁势波	120
第四节	单根线圈的安导波和磁势波	122
第五节	用矢量法分析绕组磁势	124

第六节	三相合成磁势波形图	127
第七节	绕组磁势的谐波分析	129
第八节	用复数方法计算分布系数	138
第九节	用谐波形式表示的相绕组磁势和三相绕组合成磁势表达式	142
第十节	分数槽绕组磁势谐波	149
第十一章	磁势谐波与定子铁芯电磁振动	165
第一节	谐波磁场引起定子铁芯电磁振动的原理	165
第二节	水轮发电机振动类型	167
第三节	磁势谐波引起定子铁芯电磁振动的主要因素	168
第四节	定子绕组磁势次(分数)谐波引起的力波节点对数	170
第五节	定子绕组磁势次(分数)谐波引起铁芯振动计算及实例	172
第六节	转子偏心在并联支路内环流引起定子铁芯振动	182
第七节	转子不圆引起的低频振动	184
第八节	定子不圆引起铁芯振动	185
第十二章	电势及电压波形	187
第一节	概述	187
第二节	单个线圈中感应电势	187
第三节	一个相绕组中感应电势	188
第四节	绕组中的磁势和电势的相似性	189
第五节	电势波形中齿谐波	190
第六节	阻尼绕组对发电机电势波形的影响	197
第七节	对电势波形中齿谐波和脉振谐波的几点结论	201
第八节	空载电压波形畸变率和电话谐波因数(THF)的计算	202
第十三章	短路电流、短路作用力和短路扭矩	207
第一节	发电机端短路的短路电流	207
第二节	励磁绕组和阻尼绕组中的电流	209
第三节	短路消除后电压的恢复	210
第四节	不对称短路时的过电压	210
第五节	发电机出线端短路时绕组中的作用力	211
第六节	水轮发电机端短路时的扭矩	216
第七节	内部短路	217
第十四章	试验	223
第一节	水轮发电机试验项目	223
第二节	水轮发电机试验用标准	225
第三节	绝缘性能试验	226
第四节	绕组直流电阻的测量	230

第五节	定子铁损试验	231
第六节	电气特性试验	234
第七节	参数测定	238
第八节	运行性能试验	255
第十五章	外型尺寸和重量估算	263
第一节	概述	263
第二节	发电机主要外形尺寸的估算	263
第三节	发电机重量估算	268
第十六章	电磁计算程序及实例	270
第一节	概述	270
第二节	计算程序及实例	270
附录一	部分水轮发电机（500MVA 以上）电机利用系数	310
附录二	部分大容量（500MVA 以上）发电机主要技术数据	311
附录三	不同转速下的可选支路数	313
附录四	不同容量、电压、支路数与槽电流的关系	314
附录五	充电容量核算	315
附录六	调相容量核算	317
附录七	槽数表	319
参考文献		330

第一章 概 论

第一节 概 述

能源是可以直接或通过转换提供人类所需的有用能的资源。人类利用自己体力以外的能源是从用火开始的。世界上一切形式的能源的初始来源是核聚变、核裂变、放射线源以及太阳系行星的运行。太阳的热核反应释放出极其巨大的能量。射到地球大气层的辐射能量为 174000TW/a。这种辐射实际上为地球和太空提供了用之不竭的能源。太阳的热效应产生风能、水能和海洋能，煤炭、石油和天然气等化石燃料，也是间接来自太阳能。生物质是植物通过光合作用吸收的太阳能。太阳系行星的运行产生潮汐能。

水力（能）资源是重要的能源资源，更是重要的环境资源。我国水能资源富甲天下。在我国国土上的河川众多，大江大河源远流长。河流流域面积在 100km² 以上的河流有 5 万多条，河川多年平均年径流总量达 2.71 万亿 m³。长江、黄河发源于青藏高原，落差分别为 5400m 和 4830m；雅鲁藏布江、澜沧江、怒江的落差均在 4000m 以上；其余还有许多河流，如大渡河、雅砻江、岷江、珠江、红河等，其落差也多在 2000m 以上。河川丰沛的径流量和巨大的落差，构成了我国十分丰富的水力资源。

水力资源作为可再生的清洁能源，是能源资源的重要组成部分，我国水能资源丰富，在能源平衡和能源可持续发展中占有重要的地位。表 1-1 列出了我国在 2005 年进行水力资源复查的结果。

表 1-1 2005 年水力资源复查结果

项 目		数 值
理论蕴藏量	平均功率 (MW)	694400
技术可开发量	水电站数量 (座)	13286+28/2
	装机容量 (MW)	541640
	年发电量 (亿 kW·h)	24740
经济可开发量	水电站数量 (座)	11653+27/2
	装机容量 (MW)	401795
	年发电量 (亿 kW·h)	17534
已正可开发量	水电站数量 (座)	6053+4/2
	装机容量 (MW)	130980
	年发电量 (亿 kW·h)	5259

注 本表统计范围为理论蕴藏量 10MW 及以上河流和这些河流上单站装机容量 0.5MW 及以上水电站，不含港澳台地区。



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。中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%。可见水力资源开发速度与天然资源条件还是不相称的,也是低于世界水平的。由此可知,在今后 15~20 年内水力资源开发任务艰巨。

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电力能源需求的增长。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 2020 年水电装机容量有望达到 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,“十二五”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。

单机容量 5 万 kW 以上的大中型水电站是中国水电主力,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。中国已有能力开发各类水电站及其装备。目前,全国已建成或在建的大中型水电站约 182 座,总装机容量为 92500MW,其中大型水电站 35 座,总装机容量 70040MW,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。

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“十二五”规划期间和未来 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上,还是在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,制造了单机容量从 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 年从试制 800kW 和 3000kW 水轮发电机组开始,先后完成了新安江水电站 7.25 万 kW 等机组,其中为长江葛洲坝水电站研制成功的 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。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又有了长足的进步，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开发，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。这也是我国大型水轮发电机冷却的核心技术。同时，在三峡右岸电厂，我国也研制出 700MW 级的全空冷水轮发电机，为大容量发电机选用全空冷技术创造了条件。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“十二五”规划和未来 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。

第二节 水轮发电机基本参数

一、规格数据

(1) 额定容量 (S_N)。水轮发电机的额定容量通常在招标文件或技术协议中已作明确规定，常用兆伏安 (MVA) 或千伏安 (kVA) 表示。在确定水轮发电机的额定容量时首先应考虑水电站水能的综合利用，以保证系统正常供电，从机组的经济性出发，对大型水轮发电机还应该考虑其运输条件和制造的可能性。此外，设定发电机额定容量时，还要考虑机组运行调度的灵活性以及检修和电站布置方便等因素。额定容量是发电机电磁设计中最基本的数据。

(2) 额定电压 (U_N)。额定电压是一个综合性参数，它与机组容量、转速、冷却方式、合理的槽电流以及发电机电压配电装置和主变压器的选择等都有密切的关系。

对发电机本身来说，在其容量、转速、并联支路数、槽数不变的情况下，选择高电压不仅消耗较多的有效材料和绝缘材料，而且使发电机定子铁芯长度增长，给制造、运输和安装带来困难。此外，高的电压将使定子线圈的防晕问题更为复杂化。

从电机的经济性考虑，应尽量选择较低的电压，但过低的电压将造成发电机电流增大，从而增加绕组连接线、铜环引线及发电机与变压器之间的连接母线的自身电能损失及发热，同时给主变压器及电站电气设备的设计制造带来困难。

总之，发电机额定电压的选取应从发电机电磁设计的合理性、经济性及电站配套设备制造的可能性等因素，予以综合考虑后才能最终确定。



按照 GB156, 不同发电机容量与电压的关系可参照表 1-2。

表 1-2 发电机额定容量与额定电压的关系

额定容量 S_N (MVA)	额定电压 U_N (kV)
20 以下	6.3 及以下
20~80	10.5
70~150	13.8
130~300	15.75
300 以上	18 及以上

(3) 额定功率因数 ($\cos\phi_N$)。发电机的功率因数是发电机的额定有功功率 P_N (kW) 与额定容量 S_N (kVA) 的比值:

$$\cos\phi_N = \frac{P_N}{S_N}$$

发电机额定功率因数的确定与电厂接入电力系统的方式, 采用的电压等级, 送电的距离, 系统中无功配置与平衡以及发电机造价等因素有关。总之, 在满足电力系统

要求的前提下应尽量降低发电机本身的造价, 节省电站的投资。

从发电机本身来说, 在输出有功功率一定的条件下, 提高发电机有效材料的利用率, 减轻发电机重量和提高发电机的效率及部分性能参数以及降低发电机的投资来看, 发电机功率因数越高越有利。但是在决定发电机的功率因数时, 还应考虑其对系统稳定性的影响。一般认为, 功率因数降低, 对系统的稳定性有利, 但是随着无功调节手段的日益完善和采取相应的措施, 以及远距离超高压输电线路对地电容增大, 大量的充电功率迫使发电机的功率因数提高, 以降低发电机的功率因数来增强系统的稳定性, 已失去了实际意义。此外, 水电站的输电方式和电力系统的无功平衡以及地方负荷对发电机功率因数的要求等, 这些都将直接影响发电机功率因数的选择。发电机电磁设计时, 一般要对发电机不同的功率因数作一比较, 特别对大容量发电机更为重要。

(4) 额定转速 (n_N)。发电机的额定转速是根据水轮机的转轮型式、工作水头、流量以及效率等因素来确定的。就发电机本身而言, 其额定转速的选择主要与发电机的额定电压、并联支路数、合理的槽电流以及发电机的冷却方式密切相关。因此, 发电机电磁设计时为了满足电磁与结构的更合理性, 需采用几种可能的额定转速进行分析比较后最终确定。

(5) 飞逸转速 (n_Y)。当水轮发电机组在最高水头下运行而突然甩去负荷, 如果水轮机的调速系统及其他保护装置都失灵, 导水机构发生故障致使导叶开度在最大位置, 在此种工况下机组达到的最高转速称为飞逸转速。

飞逸转速通常与水轮机转轮的型式和最高水头有关, 飞逸转速与额定转速之比值称为飞逸系数 (K_Y), 不同型式水轮机的飞逸系数如下:

混流式水轮机	1.65~1.8
冲击式水轮机	1.85
转桨式水轮机当保持协联关系时	1.9~2.2
转桨式水轮机当破坏协联关系时	2.4~2.6

注: 转桨式水轮机转轮叶片可以随着负荷变化与导水机构协联动作, 使水轮机保持在高效率下运行。

二、电磁参数

(1) 直轴瞬变电抗 (x_d')。发电机直轴瞬变电抗 (x_d') 值对电力系统的稳定有较大影