

大型汽轮发电机 设计、制造与运行

汪耕 李希明等 编著



上海科学技术出版社

中国工程技术专著丛书

大型汽轮发电机设计、 制造与运行

汪 耕 李希明 等编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

大型汽轮发电机设计、制造与运行 / 汪耕等编著.
上海: 上海科学技术出版社, 2000.11

(中国工程技术专著丛书)

ISBN 7-5323-5611-6

I.大... II.汪... III.汽轮发电机 IV.TM311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 55190 号

上海科学技术出版社出版发行

(上海瑞金二路 450 号 邮政编码 200020)

上海新华印刷厂印刷 新华书店上海发行所经销

2000 年 11 月第 1 版 2000 年 11 月第 1 次印刷

开本 850×1168 1/32 印张 20.5 插页 4 字数 541 000

印数 1—2 000 定价: 49.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向本社出版科联系调换

序

本书内容十分丰富,以大型汽轮发电机为主体,详细论述发展过程、基本原理的应用以及设计、制造、运行等各方面的问题和解决办法,包括大机组、大电网发生的问题和解决办法及现在采用新技术后的新要求,应用基本原理可提高设计的准确性和可靠性的新理论和新的计算方法,以及对有关原材料、测试与监控技术的要求与应用等,书中对这些问题的探讨、论证的范围都很广泛。本书稿还特别重视结构设计、振动、参数计算和各种极限值的确定,因为这些内容关系到机组和电网的可靠性和稳定运行。书中搜集和介绍了国内外著名大汽轮发电机制造公司、工厂和大电网所制造及装用机组的结构型式、冷却方式、运行经验和其他重要数据及方法、建议等,这对设计、制造、运行人员有重要参考价值和启发作用,可激发他们发挥创新能力的积极性。本书对机组以及部套和零件的作用、性能,国内外标准,作了有针对性的介绍和解释,使读者了解内容,查询方便。我认为总起来说这是一本好书,出版发行后可以提高汽轮发电机工厂、电厂和电网运行人员的素质,也是一本岗位培训的好教材。

丁舜年 1999年10月21日

前 言

预计在 21 世纪(至少 2050 年前)电力仍然是最现代化的动力,是现代化技术、人民生活和新产业发展的重要物质基础。到 1999 年底中国大陆发电设备达到 298GW,年发电量达 1923.1TWh,均列世界第二位。但到 1999 年底我国人均发电设备占有量仅有 0.24kW,世界排名第 80 位以后;年人均用电量约 980kWh,仅相当于世界平均水平的 1/3。据电力部门及专家规划和预计,到 2050 年,中国大陆发电设备装机总容量如为 2TW,大陆人口为 15.3 亿,则那时人均年用电量约为 6200kWh 时,也就是说我们要制造近 1.5~2.0TW 发电设备,才能达到目前世界上中等发达国家或地区水平。

至今世界各国发电设备装机容量和发电量都主要由火力(煤炭、石油、天然气)、水力和核能三种能源组成。无论是火电或核电,都是由汽轮发电机把机械能转变成电能输送到电网上供人类使用的。从本书的附录一中可以看出中国和全世界的发电量中约 80% 是由汽轮发电机提供的,因而汽轮发电机的发展与电力及国民经济的发展有着重要密切关系。

我国电力工业自 20 世纪 80 年代起就进入大机组、高参数、大电网的阶段,目前则开始进入大区电网互联,逐步将形成全国统一联合电网,实现全国范围内资源优化配置的新阶段。随着统一调度,分级管理电网调度体系的建立,以计算机为主要手段的具有国际先进水平的调度自动化系统已开始普遍采用。大机组和大电网及其相关问题如调峰、进相运行、轴系扭振等,给汽轮发电机设计、制造带来了新的要求。

汽轮发电机设计方法也有很大进展,如计算机与有限元等技

术的应用,使得发电机的电磁、温升等计算得以从“路”的形式发展到用“场”来做必要的详细计算。在电磁场方面的研究结果,使得大型发电机的附加损耗显著减小,冷却技术的进步加上转子锻件及护环材料的改进,使得汽轮发电机单机容量向更大容量发展,无论如何汽轮发电机的可靠性是非常重要的,设计结构都必须首先将可靠性放在首位来考虑,汽轮发电机在电站运行时的监测仪表也有很大的发展。

本书旨在讨论对大型汽轮发电机设计、制造、运行技术的主要要求,综述有关的基本原理或作用,介绍国内外汽轮发电机结构形式和分类,汽轮发电机在制造或运行过程中发生的问题和解决办法,以及发展趋势或新技术等。书中还摘引了汽轮发电机设计、运行或选用中需查阅的一些标准或参考值,以便于有关汽轮发电机设计、运行人员或教学者寻找。

本书共分十三章。第一章介绍汽轮发电机历史和现代电力系统对大型汽轮发电机的要求;第二章介绍世界制造汽轮发电机的六大技术流派和中国大陆汽轮发电机的冷却方式;第三章介绍汽轮发电机的技术规范,包括额定值和非正常工况(如调峰、进相、失磁运行等);第四章介绍汽轮发电机电磁设计方法的发展、磁路计算、空载特性短路特性和满载励磁电流的计算、损耗及效率计算等;第五、六章介绍汽轮发电机的机械结构设计;第七章介绍励磁系统的作用、发展和趋势;第八章介绍氢油水系统的特点和经验;第九章介绍试验及监测仪表和国内外新发展的监测装置;第十章介绍汽轮发电机转子振动的标准及经验;第十一章介绍汽轮发电机特殊运行,如调峰、负序、异步和进相运行等基本原理、要求和参考标准;第十二、十三章分别论述了 1000MWe 级汽轮发电机容量和转速的关系以及 21 世纪我国大型汽轮发电机制造技术展望。

本书的读者对象主要是从事电机设计、制造、研究和电站设计、安装运行、维修等工作的技术人员。在编写本书的过程中,每节都对原理作简单叙述,由深入浅。书中内容以国内外实际经验为主,同时也考虑了学校教学的需要,因此,本书也可供高等院校电

机专业老师、高年级学生和研究生阅读参考。

本书的编写分工:绪论、第一、二、三、四章及第十二、十三章由汪耕编写;第五、六章及第九章由李希明编写;第七章由陈珠夸编写;第八章和第九章中发电机在线漏氢检测装置由王镭编写;第十章由孙美珍编写;第十一章由梁旭彪编写;第六章中轴承部分由顾越、吴斌编写;李希明、赵玉、郑东平、王建辉对第四章进行了讨论、审阅和修改,李希明对绪论及第一章至第三章初稿进行了修改补充。全书由汪耕、李希明主编并修改审定了全稿。全书由丁舜年院士和上海交大李仁定教授主审。丁舜年院士已 89 岁高龄,但仍很仔细地审阅了本书的全文稿件,还亲笔写了对该书稿的意见,并同意将他意见的一部分作为本书的序。李仁定教授对本书各章节中许多问题的写法提出宝贵的意见,并仔细认真审阅,对此编写者表示衷心的感谢。

本书是 1998 年 10 月应上海科学技术出版社盛情邀请才开始编写的,由于汪耕、李希明以及其他参与编写的同志日常工作十分繁忙,大部分编写工作是依靠可挤出的有限假日和业余时间完成,时间太急促,更来不及请有关专家审阅,本书只能算是刚搭了一个架子的初稿,遗漏和错误在所难免,但希望本书仍能给读者对汽轮发电机历史和发展、设计结构、发生过的问题以及与电网的关系等有一个大致的了解,对有关标准或参考限值,可在本书中方便地查阅到。

本书编制过程中得到上海汽轮发电机有限公司刘广康、程永富副总裁、黄德书总师、工程部邱家训和袁建华副部长以及设计处顾守录处长等的大力支持,并由公司里许多同志协助描图打字等,在此对以上多位同志表示深切的谢意。

汪 耕 李希明 1999 年 11 月

常用符号表

AS_1 ——定子线负荷(A/cm)	b_{r2} ——转子表面散热沟宽
AW ——磁通势(A·匝)	C_1 ——波形系数
a_1 ——每相并联支路数	C_A ——电机常数
B ——磁通密度(T)	C_p ——极常数
B_0 ——齿谐波变化的振动幅值	C_w ——绕组常数
B_{j1} ——定子铁心轭中的磁通密度	D_{07} 、 D_{02} ——分别为转子齿 0.7、0.2 齿高处直径
B'_{j1} ——计算的定子轭磁通密度	D_2 ——转子本体直径
B_{z2} ——转子齿磁通密度	D_1 ——定子铁心内径
$B_{z0.2}$ 、 $B_{z0.7}$ ——距转子齿根 0.2、0.7 齿高处的磁通密度	D_a ——定子铁心外径
$B_{z1/3}$ 、 B_{j1} ——相应于定子齿部离定 子内径 1/3 槽高处和 轭部的磁通密度	D_F ——定子机座外径
B'_{zx} 、 B_{zx} 和 B_{nx} ——相应于齿视在、齿 实际和槽部的磁 通密度	D_K ——滑环外径、护环外径
B_δ ——气隙磁通密度。铁心一个槽距 内的平均磁通密度	D_z 和 l_z ——轴颈的直径和长度
$B_{\delta max}$ ——铁心体中的磁通密度幅值， 亦即气隙最大磁通密度	D_{z1} ——定子槽底直径
b_{cu} ——槽部铜的宽度、线棒端接部分 铜线的宽度	E ——感应电动势
b_{n1} ——定子铁心槽宽度	E_0 ——空载电动势
b_{n2} ——转子槽宽	E_i 、 E'_i ——额定负载时内电势的标 么值
b_p ——定子铁心段的平均宽度	E_q ——发电机内电势
b_{r1} ——定子径向通风沟宽	F_{cu1} ——每根导体的截面积
	F_{cu2} ——转子铜线截面积
	F_{j1} ——定子铁心轭磁通流经的截面 积
	F_{j2} ——转子轭的截面积
	F_{nx} ——相应的槽截面
	$F_{z0.7}$ 、 $F_{z0.2}$ ——转子距齿根 0.2、0.7

齿高处的截面积	K_e ——交流励磁机放大倍数
$F_{z1/3}$ ——定子 1/3 齿高处每极内齿的截面积	K_d ——分布系数
F_δ ——每极的气隙截面积	K_E ——端部附加损耗计算系数, 2 极内冷电机取 0.6
f ——感应电势频率(Hz)	K_p ——短距系数
f_{ko} ——短路比	K_{w1} ——定子绕组系数
f_z ——齿脉动的频率	K_{w2} ——转子绕组系数
G_2 ——装配后的转子质量(t)	K_δ ——总的气隙系数
G_{fez} ——定子齿部质量(t)	K_Y ——极弧系数
G_{fej} ——定子轭部的质量(t)	L ——风量(m^3/s)
H ——风扇压头($mm \cdot H_2O$)	L_2 ——转子水流量(m^3/h)
h_{j1} ——定子铁心轭高	L_z, L_j ——分别为定子齿部和轭部风量
I_{j0} ——发电机空载、额定电压时的励磁电流	l_{ef} ——定子铁心净长
I_{fa} ——对应于电枢反应磁势的励磁电流	L_{j1} ——定子铁心轭磁路长度
I_{fk} ——短路电流为额定电流值时的励磁电流	L_{Z1} ——定子铁心齿高
I_{fi} ——内电势 E_i 相应的励磁电流	L_{w1} ——绕组的每匝长度
I_{fN} ——负载励磁电流值	l ——无通风沟的定子铁心长度
I_{f0} ——空载额定电压时对应于气隙磁势的励磁电流	l_1 和 l_{s1} ——线棒槽部长度和端部长
I_φ, I ——定子相电流、电枢电流	度
j_1 ——定子线圈的电流密度	l_2 ——转子本体长度
j_2 ——转子线圈的电流密度	l_{j2} ——每极转子轭磁路长度
j_z ——涡流密度	l_t ——定子铁心总长度
K, k'_0 ——损耗常数	l_{w2} ——转子线圈每匝的平均长度
K_2 ——转子齿谐波在定子齿中产生脉动损耗的计算系数	m ——定子绕组相数、每根线棒沿度股线数
K_A ——电机的利用系数	n_N ——转子额定转速
K_B ——气隙磁场的波形因数	n_{nz}' ——转子每极大齿上轴向通风道数目
K_c ——卡特(Carter)系数	n_{r1} ——定子径向通风沟数
	P ——发电机电磁功率
	P_b ——自水泵作用的压力, 等于出水

与进水的水离心力之差	X_T ——变压器电抗
P_e ——发电机电磁功率	X_s ——定子绕组端部漏抗
P_{Fe} ——材料单位重量的铁耗	Z ——混合气体中的氢气成分
P_h ——单位材料磁滞损耗	Z_1 ——发电机定子槽数
P_H ——所采用的氢压	Z_2 ——转子槽数
P_{HO} ——电机中正常氢压	Z_2' ——转子槽分度数
P_N ——视在额定功率	α_2 ——每极线圈并联支路数
p ——极对数	α_{cu} ——导线高度
$R_{2(75)}$ ——75°C 时转子每对极绕组电阻	α_i ——气隙磁场的计算极弧系数
S_{n1} ——定子每槽导体数	β ——短矩系数
S_{n2} ——转子每槽有效导体数	β_i ——电阻线性系数
T_{amb} ——环境气体温度	δ_i ——气隙的计算长度
T_B ——风扇处热风温度	δ ——气隙的实际长度
T_m ——灭磁时间	δ' ——虚拟的气隙
T_e ——交流励磁机时间常数	Δ ——表示透入深度
t_1 ——定子槽距、定子铁心表面齿距	γ ——铜的电导率
t_2 ——转子外径的齿距	γ ——混合气体相对空气的比重
t_{r2} ——转子表面散热沟距	γ ——转子线槽数 Z_2 与槽分度数 Z_2' 之比
t_v ——已知谐波的极矩	γ ——电导率
U_N ——发电机端额定电压(V)	η ——发电机效率(当用空气冷却时)
U_s ——受端母线电压(V)	η_H ——发电机效率(当用氢气冷却时)
U_ϕ ——发电机相电压(V)	η_l ——励磁机的效率
V, V_H ——分别为空气、氢气冷却时冷却气体的消耗量	η_v ——风扇效率
V_E ——励磁电压上升率	θ_a 和 θ_{aH} ——电机中冷却气体总温升
V_{RS} ——转子槽底处周速	θ_v ——风扇冷却空气温升
v ——谐波的次数	λ ——油粘度
W_1 ——定子绕组每相串联匝数	Λ ——槽漏磁导
X_p ——保梯电抗	μ ——电刷在滑环上的滑动摩擦系数,通常在 0.10~0.25 之间
X_p' ——等效电抗	μ_0 ——空气磁导率, $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^6 \text{H/m}$
X_L ——线路电抗	

ρ ——电刷对滑环表面的单位压力	σ_h ——材料的磁滞的单位损耗
ρ ——电阻率	σ_e ——材料的涡流的单位损耗
ρ_t ——温度 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻率	Φ ——每极气隙磁通(Wb)
ρ_0 ——起始温度 $t_0^\circ\text{C}$ 时的电阻率	$\Phi(r)$ ——转子磁场高次谐波在定子 表面产生损耗的计算系数
ρ_{H_2} ——纯氢密度	σ_h ——材料常数,随所用材料品种而 定
ρ_{air} ——空气密度	Φ_i ——内电势 E_i 相应的每极磁通
ρ_{mix} ——氢气在 98.5% 纯度下的密度	Φ_{Si} ——转子漏磁通
$\Sigma b_{n2} \sin \alpha$ ——转子一个极下所有线槽 宽的投影和	Ψ ——励磁电动势 E_0 和电枢电流 I 之间相位差(角度)
$\Sigma \sin \alpha$ ——转子每厘米槽宽在横轴的 投影总和	
τ, τ_1 ——极距	

绪 论

国民经济的发展,人民生活水平的提高,都离不开电能,电能可以方便地转化成机械能、热能、磁能、光能、化学能等。一个国家或地区的经济发展水平与其电气化程度相适应^[1]。1949年我国发电设备总装机容量只有1.85GW,年发电量4.3TW·h,分别居世界第21位和25位。到1999年底中国发电设备总装机容量和年发电量分别比1949年增长了161倍和287倍。全国还有近10个无电县,近6000万人口没有用上电,电力供需矛盾并没有根本解决。

从1996年下半年开始,全国发电量增长速度有所减缓,1997年我国发电量增长约为5%,1998年发电量增长仅2%,部分地区,电供过于求。这是与我国用电结构及工业调整有关,并非电力供应已真正满足。另外大部分电网的调峰能力不强,高峰时段仍然要拉闸限电,局部地区仍然存在缺电现象。1994年我国工业用电量占总用量76.68%^[2],居民生活年人均用电量仅73kW·h,远低于我们所处发展阶段所需要的水平^[3]。中国和美、俄、日、加等国发电设备装机容量和发电量见附录1-1,可以看出美、加、日等发达国家人均发电设备占有量为2~3kW,人均年用电量9~20MW·h,我国目前人均发电设备及发电量占有量,与之相差10倍以上;与我国香港、台湾省相比也相差5倍以上(香港1998年发电设备装机总容量为11.255GW,年发电量36.39TW·h,人口600余万。台湾省1998年装机总容量达32.634GW,年发电量142.96TW·h,人口约2300万)。

人均装机容量代表国家或地区电力发展水平,一般说与其经济发展水平和人民生活水平成正比。人均用电量与人均经济产值基本成正比。1998年底我国各地区发电设备装机容量、发电量、人

口和人均经济产值(GDP)^[4]见附录 1-2,人均生活用电量与家庭电气化程度有关。从用电结构来看,随着经济的发展,产业结构变化趋势是第三产业用电比例增加,特别是一些新型的高新技术产业的发展以及节电技术的实施影响着用电结构变化。消费结构变化的趋势是生活用电比例的增加。

据电力部门及专家规划和预计可知^{[5][6]},到达 2050 年,我国发电设备装机总容量如为 2TW,见附录 1-3,中国人口为 15.3 亿,则到那时人均年用电量约为 $6.2\text{GW} \cdot \text{h}$,人均生活用电量约为 $1240\text{kW} \cdot \text{h}$,也仅相当于 80 年代中期联邦德国、前苏联、法国、英国和 90 年代末香港特区、台湾省人均用电水平。即在 21 世纪前 50 年,我们须制造近 $1.5 \sim 2.0\text{TW}$ 发电设备,才能达到目前世界上中等发达国家或地区水平。

到目前为止世界各国发电设备和发电量主要还是由火力发电(包括燃煤、燃油、天然气)、核电和水电组成,近年来正在积极开展利用风能、太阳能等其他能源的发电设备工作。电力的发展建筑在能源供应的基础上,我国水利资源居世界第一位,能用于发电的在 $0.3 \sim 0.378\text{TW}$ 之间,中国火力发电将来主要依靠煤炭和天然气供应,我国电力发展除了加快开采煤炭和开发天然气,发展核电和开发风力、太阳能、地热等其他能源外,还需要大力节能和减少环境污染。为满足 21 世纪我国国民经济发展和人民生活提高所需的电力和电力应用,从电机制造方面来讲需要发展高效率的发电设备和用电设备,还需要发展新能源所需的发电设备,开发新材料、新结构、新工艺,制造出新品种的电机。无论是火电或是核电,都是由汽轮发电机把机械能转变成电能输送到电网上供人类使用的。从附录 1-1 可以看出我国和全世界的发电量约 80%是由汽轮发电机提供的,因而汽轮发电机的发展与国民经济的发展有着密切关系。

在 20 世纪 70 年代以前,汽轮发电机设计已考虑能够承受二相、三相突然短路故障和承受不平衡负荷及具有异步运行能力等。由于当时机组容量小、功率低、转矩小、轴系短,汽轮发电机设计上

容易满足运行的要求,所以未把汽轮发电机组与电网联系起来研究各种运行和故障工况。但是现代电力系统是由大机组和大电网组成,汽轮发电机单机容量越来越大,电流也越来越大,开关的性能对操作影响极大,由于开关不能同时三相分开,引起因发电机转子上有很大负序电流而损坏发电机转子的事故已有多起发生。

现代电厂设计大多数发电机定子出线通过封闭母线直接与主变压器相连接,但是大型核电站在发电机与主变压器之间往往需装设断路器和避雷器,这就引起发电机可能承受的冲击电压以及对开关和避雷器的技术要求问题。

现代电力系统要求发电机具有单相重合闸、 120° 或 180° 错相合闸、失磁、失步、进相运行等非额定工况运行的能力,其中绝大部分电网扰动可能引起发电机组扭振,可能对机组产生很大的损害。

在 20 世纪 90 年代,我国的华东、华中、华北、西北、广东、广西等几个大电网装机容量均已超过 20GW 以上,100MW 以上的大型机组容量也已占到 40% 以上,电力部门已正在研究长江三峡电站建成后的全国电网联网。我国电力工业已进入大电力系统、大机组时代,而且趋势是电网和机组容量还要向大容量发展。电力系统的安全可靠运行,关系到国民经济的稳定发展和人民生活。而大型发电机组则是电力系统的核心,两者是相互影响相互依存的。除要求大型发电机本身应有较高的可靠性外,还需要具有适应大电力系统要求的性能,在不影响发电机组寿命和可靠性的基础上,发电机组的运行方式应尽可能地满足电力系统运行的需要。这里应强调的是一方面要照顾到电力系统的安全运行,另一方面也不能任意牺牲发电机组的可靠性或寿命去支持电力系统。

1970 年 12 月 9 日美国 Mohave 电厂 1 台 GE 公司制造的 790MW 双轴机组突然在汽轮发电机转子滑环引线处断裂,修复后不到一年于 1971 年再次发生同样损坏,引起全世界关注。大电网与大机组的相关问题,据不完全资料统计,自 1969 年以来近 30 年中,国内外因电网与发电机组之间谐振,或发电机在非正常运行方式下运行,造成机组损伤事故 30 多起,见附录二。这些事故涉及

的机组单机容量为 50MW 以上的火电机组到 900MW 的核电机组,在美、英、法、德、俄、日等工业国家及我国都曾发生过。因此,20 世纪 80 年代世界各国对发展大电网与大机组提出了许多问题。例如,目前大机组能否承受大电网实际可能发生的冲击?作为大机组应该规定可以承受哪些冲击?电网应该避免出现哪些冲击?电网应该采取哪些技术措施以保证大机组的可靠运行?大机组又应采取哪些技术措施以保证电网的经济与安全稳定运行。

1989 年 3 月能源部在北京召开了“协调大电网与大机组技术政策讨论会”,电力部门及汽轮发电机组制造部门专家 80 余人参与会议。会议交流了世界上出现的若干大电网与大机组关连问题,并提出了相应的研究课题。

事实上在此前发电机组制造部门和电力部门就已开始对有关问题进行研究。“七五”国家科技攻关曾以编号 75-50-02-03 对 300MW、600MW 汽轮发电机组组织了科技攻关。其中电网扰动对汽轮发电机的影响(如单相重合闸及误同期对汽轮发电机的影响)、失步振荡对汽轮发电机的影响、国产化 300/600MW 汽轮发电机失磁后异步运行研究、汽门快关过程中的机组扭振响应、次同步振荡研究等课题早已完成并通过了专家鉴定。“八五”及“九五”期间电力部门和制造部门又列了若干有关大机组大电网相关的课题进行研究。但是现在看来有些课题需要进一步深入研究,如连云港俄罗斯准备提供的核电 1000MW 全速汽轮发电机技术规范中写有发电机不允许非同期合闸、不允许失磁、失步(东北电力设计院编制)。而西屋公司也规定大型汽轮发电机不允许失磁滑极运行,又例如关于汽轮发电机进相运行能力,IEC34-3 及国标都规定了汽轮发电机从额定功率因数到欠励功率因数 0.95 进相运行的功率范围图,但 1990 年巴黎大电网会议,有篇论文认为大容量汽轮发电机进相运行能力应缩小。

其他特殊运行如错相合闸、突然短路等等,有的进口机组规定了允许的次数,但各制造厂提供的允许能力又颇有出入,且都未提出这些规定的确切依据。我们认为大电网、大机组相关问题通过近

20 年来的研究,有的已经比较明确并列出标准,有的还需进一步深入研究。无论如何,已经提出和发生的问题,在汽轮发电机设计、制造中和电网建设中应设法考虑解决的措施。近 30 年来由于新材料的采用,使大型汽轮发电机在设计、制造方面为适应电网的要求做的改进进展很大。本书汇总了目前世界上及我国已经认识到的问题及相应的对策,列入下列各章节。

参 考 文 献

- [1] 谢松林. 国家电力公司要为经济增长 8% 多作贡献. 中国电力报, 1998
- [2] 李京文, 冉莹. 电力与发展——中国 2000 年达到小康社会与 2010 年富裕小康社会的用电水平研究. 社会科学文献出版社, 1996
- [3] 姚愉芳专家访谈录. 电力要适当超前发展. 中国电力报, 1998
- [4] 中国科学院可持续发展研究组. 1999 年中国可持续发展战略报告. 北京: 科学出版社, 1999
- [5] 严陆光. 我国 21 世纪电力新技术发展的展望. 世界科技(院士论坛特号), 1996
- [6] 姚福生. 超临界机组在中国发展前景剖析. 当代电工科技发展论文集, 1995

目 录

常用符号表	1
绪论	1
第一章 汽轮发电机设计制造简史	1
一、汽轮发电机历史简介	1
二、我国汽轮发电机制造技术的发展	6
三、现代电力系统对大型汽轮发电机的要求	11
(一) 对汽轮发电机组轴系自然扭振频率的要求	12
(二) 大机组承受电网振荡冲击能力	17
(三) 大机组应具备承受高压线路单相重合闸的能力	18
(四) 大机组应具备承受误并列的能力	19
(五) 汽轮发电机组的频率变化能力	20
(六) 汽轮发电机组的快关问题	20
(七) 大机组应具备吸收无功功率的能力	20
(八) 大机组应具备需要的调峰能力	21
(九) 大机组失磁异步运行能力	21
(十) 工程设计上要考虑的问题	23
第二章 汽轮发电机的冷却方式	27
一、汽轮发电机冷却方式的基本概念	27
(一) 汽轮发电机冷却技术的重要性	27
(二) 绝缘寿命与电机温升极限	29
(三) 金属性能与温度极限	30
(四) 冷却介质的性能和特点	32