



国家出版基金项目

“十二五”国家重点图书出版规划项目

先进制造技术与应用前沿

DAXING QILUN FADIANJI
SHEJI ZHIZAO YU YUNXING

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



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目
先进制造技术与应用前沿

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, 2012. 1
(先进制造技术与应用前沿)
ISBN 978—7—5478—1037—8

I. ①大... II. ①汪... III. ①大型发电机: 汽轮发电
机—设计②大型发电机: 汽轮发电机—制造③大型发电机:
汽轮发电机—运行 IV. ①TM311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 215626 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上 海 科 学 技 术 出 版 社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 42 插页 4

字数 700 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978—7—5478—1037—8/TM·23

定价: 136.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内容提要

本书以大型汽轮发电机为主体,详细论述其技术发展过程、基本原理的应用以及设计、制造、运行方面的问题和解决方法。书中内容注重介绍提高设计准确性和可靠性的新理论和新的计算方法,对有关原材料、测试与监控技术的要求与应用等也进行了重点介绍。书中还搜集和介绍了国内外著名大汽轮发电机制造公司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与技术建议等,最后对我国汽轮发电机的制造技术进行了展望。

本书对从事发电机和电站设计、制造、安装运行的人员有重要参考价值和启发作用。

编撰委员会

先进制造技术与应用前沿

主 任 路甬祥

副 主 任 李蓓智 曹自强

委 员 (按姓氏笔画排序)

王庆林 石来德 包起帆 严仰光

杜宝江 李 明 李 春 李希明

何 宁 何亚飞 陈 明 阎耀保

葛江华 董丽华 舒志兵

学术专家 艾 兴 汪 耕 周勤之

出版说明

《大型汽轮发电机设计、制造与运行》一书曾由上海科学技术出版社于2000年出版,十多年来,我国电力工业包括汽轮发电机设计、制造、科研、运行各方面均有很大的发展,有关汽轮发电机设计制造的国际、国内技术标准也多有新版本,因而该书更新编写、重新出版显得十分必要了。

这次编写所引用的技术标准均为新版标准,在内容上反映了近十年来有关汽轮发电机发展的新技术和变化,同时适当增加核电、可再生能源、智能电网等内容以及气候变化与汽轮发电机发展的关系等。

改版后,本书共分十三章。第一章至第十二章所介绍的主要内容与原书基本相同,同时增加了十年来技术的进步和发展。本书全面介绍了汽轮发电机的设计制造简史、冷却方式、设计要素、电磁设计、定子结构设计、转子结构设计、励磁系统、氢油水系统、试验及监测仪表转子系统的振动、特殊运行方式等。第十三章新写了:①面临我国能源供给及应对气候变化与汽轮发电机制造的发展关系。②十年来我国电力的重要发展。③600 MW级汽轮发电机在电厂运行中发生的问题和处理措施。④转子锻件和绝缘等材料性能的进步,促进了大容量汽轮发电机的发展;高温超导材料的发展将会影响电力发展方向。

因本书的改版编写是在原书基础上更新、补充,所以原书的序、前言仍按照原书保留。

本书的编写基本上仍按原来各章节分工,即:绪论、第一章至第四章及第十二、十三章和附录由汪耕编写,第五、六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,第十一章



由梁旭彪编写,第六章中轴承部分由顾越编写。第十章因孙美珍已退休多年改由蔡忠编写。刘明慧、钟后鸿对第四章内容进行校对和补充,第十三章大部分是新写稿,曾请毛一忠、黄德书、王庭山及上海交通大学谭弗娃教授审阅提出修改意见。全书稿由汪耕、李希明主编和审定。

本书编写过程中得到上海电气电站设备有限公司发电机厂毛一忠总经理、王庭山总工程师等的大力支持,并由发电机厂赵伟、崔小健、夏涌杰、张志迅等同志协助某些章节的打字和图表电脑编排等,在此对以上多位同志表示深切的谢意。

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

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 298 GW,年发电量达 $1\,923.1\text{ TW}\cdot\text{h}$,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 0.24 kW ,世界排名第 80 位以后;年人均用电量约 $980\text{ kW}\cdot\text{h}$,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 2 TW ,大陆人口为 15.3 亿,则那时人均年用电量约为 $6\,200\text{ kW}\cdot\text{h}$ 时,也就是说我们要制造近 $1.5\sim 2.0\text{ TW}$ 发电设备,才能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國大陸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1 000 MWe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,每节都对原理做简单叙述,深入浅出。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，大部分编写工作依靠可挤出的有限假日和业余时间完成，时间太急促，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。

本书编写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

常用符号表

AS_1 ——定子线负荷(A/cm)	b_p ——径向通风时,每段定子铁心的平均宽度
$A-W$ ——磁通势或磁势(安·匝)	b_{r1} ——定子径向通风沟宽
a_1 ——每相并联支路数	b_{r2} ——转子表面散热沟宽
B ——磁通密度(T)	C_1 ——波形系数
B_0 ——齿谐波变化的振动幅值	C_A ——电机常数
B_{j1} ——定子铁心轭中的磁通密度	C_p ——极常数
B'_{j1} ——计算的定子轭磁通密度	C_w ——绕组常数
B_{z2} ——转子齿磁通密度	$D_{0.7}$ 、 $D_{0.2}$ ——分别为转子齿 0.7、0.2齿高处直径
$B_{z0.2}$ 、 $B_{z0.7}$ ——距转子齿根 0.2、0.7齿高处的磁通密度	D_2 ——转子本体直径
$B_{z1/3}$ ——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_i ——定子铁心内径
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_a ——定子铁心外径
B_δ ——气隙磁通密度。铁心一个槽距内的平均磁通密度	D_F ——定子机座外径
$B_{\delta\max}$ ——铁心体中的磁通密度幅值,亦即气隙最大磁通密度	D_K ——滑环外径、护环外径
b_{cu} ——槽部铜的宽度、线棒端接部分铜线的宽度	D_z 和 l_z ——轴颈的直径和长度
b_{n1} ——定子铁心槽宽度	D_{z1} ——定子槽底直径
b_{n2} ——转子槽宽度	E ——感应电动势
	E_0 ——空载电动势
	E_i 、 E'_i ——额定负载时内电势的标么值
	E_q ——发电机内电势
	F_{cul} ——每根定子线圈内导体的截面积

- $F_{\text{cu}2}$ ——转子线圈铜线截面积
 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
 $F_{z1/3}$ ——定子 1/3 齿高处每极内齿的截面积
 F_{δ} ——每极的气隙截面积
 f ——感应电势频率(Hz)
 f_{ko} ——短路比
 f_z ——齿脉动的频率
 G_2 ——装配后的转子质量(t)
 G_{fez} ——定子齿部质量(t)
 G_{fej} ——定子轭部的质量(t)
 H ——风扇压头(mm · H₂O)
 h_{j1} ——定子铁心轭高
 I_{j0} ——发电机空载、额定电压时的励磁电流
 I_{fa} ——对应于电枢反应磁势的励磁电流
 I_{fk} ——短路电流为额定电流值时的励磁电流
 I_{fi} ——内电势 E_i 相应的励磁电流
 I_{fN} ——负载励磁电流值
 I_{f0} ——空载额定电压时对应于气隙磁势的励磁电流
 I_{φ} 、 I ——定子相电流、电枢电流
 j_1 ——定子线圈的电流密度
 j_2 ——转子线圈的电流密度
 j_z ——涡流密度
 K 、 k'_0 ——损耗常数
 K_2 ——转子齿谐波在定子齿中产生脉动损耗的计算系数
 K_A ——电机的利用系数
 K_B ——气隙磁场的波形因数
 K_c ——卡特(Carter)系数
 K_e ——交流励磁机放大倍数
 K_d ——分布系数
 K_E ——端部附加损耗计算系数,2 极内冷电机取 0.6
 K_p ——短距系数
 K_{w1} ——定子绕组系数
 K_{w2} ——转子绕组系数
 K_{δ} ——总的气隙系数
 K_y ——极弧系数
 L ——风量(m³/s)
 L_2 ——转子水流量(m³/h)
 L_z 、 L_j ——分别为定子齿部和轭部风量
 l_{ef} ——定子铁心净长
 L_{j1} ——定子铁心轭磁路长度
 L_{z1} ——定子铁心齿高
 L_{w1} ——绕组的每匝长度
 l ——无通风沟的定子铁心长度
 l_1 和 l_{s1} ——线棒槽部长度和端部长度
 l_2 ——转子本体长度
 l_{j2} ——每极转子轭磁路长度
 l_{τ} ——定子铁心总长度
 l_{w2} ——转子线圈每匝的平均长度
 m ——定子绕组相数、每根线棒沿高度股线数



n_N ——转子额定转速	V_E ——励磁电压上升率
n_{n2}' ——转子每极大齿上轴向通风道数目	V_{RS} ——转子槽底处周速
n_{r1} ——定子径向通风沟数	v ——谐波的次数
P ——发电机电磁功率	W_1 ——定子绕组每相串联匝数
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_p ——保梯电抗
P_e ——发电机电磁功率	X_p' ——等效电抗
P_{Fe} ——材料单位重量的铁耗	X_L ——线路电抗
P_h ——单位材料磁滞损耗	X_T ——变压器电抗
P_H ——所采用的氢压	X_s ——定子绕组端部漏抗
P_{H0} ——电机中正常氢压	Z ——混合气体中的氢气成分
P_N ——视在额定功率	Z_1 ——发电机定子槽数
p ——极对数	Z_2 ——转子槽数
$R_{2(75)}$ ——75℃时转子每对极绕组电阻	Z_2' ——转子槽分度数
S_{n1} ——定子每槽导体数	α_2 ——每极线圈并联支路数
S_{n2} ——转子每槽有效导体数	α_{cu} ——导线高度
T_{amb} ——环境气体温度	α_i ——气隙磁场的计算极弧系数
T_B ——风扇处热风温度	β ——短矩系数
T_m ——灭磁时间	β_1 ——电阻线性系数
T_e ——交流励磁机时间常数	δ_i ——气隙的计算长度
t_1 ——定子槽距、定子铁心内表面齿距	δ ——气隙的实际长度
t_2 ——转子外径的齿距	δ' ——虚拟的气隙
t_{r2} ——转子表面散热沟距	Δ ——表示透入深度
t_v ——已知谐波的极矩	γ ——铜的电导率
U_N ——发电机端额定电压(V)	γ ——混合气体相对空气的比重
U_s ——受端母线电压(V)	γ ——转子线槽数 Z_2 与槽分度数 Z_2' 之比
U_Φ ——发电机相电压(V)	γ ——电导率
V, V_H ——分别为空气、氢气冷却时冷却气体的消耗量	η ——发电机效率(当用空气冷却时)
	η_H ——发电机效率(当用氢气冷却时)
	η_i ——励磁机的效率
	η_v ——风扇效率

θ_a 和 θ_{aH} ——电机中冷却气体总温升

θ_v ——风扇冷却空气温升

λ ——油黏度

Λ ——槽漏磁导

μ ——电刷在滑环上的滑动摩擦系数,通常在 0.10~0.25 之间

μ_0 ——空气磁导率, $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^6$ H/m

ρ ——电刷对滑环表面的单位压力

ρ ——电阻率

ρ_t ——温度 t °C 时的电阻率

ρ_0 ——起始温度 t_0 °C 时的电阻率

ρ_{H_2} ——纯氢密度

ρ_{air} ——空气密度

ρ_{max} ——氢气在 98.5% 纯度下的密度

$\sum b_{n2} \sin \alpha$ ——转子一个极下所有线

槽宽的投影和

$\sum_{\sin \alpha}$ ——转子每厘米槽宽在横轴的投影总和

τ 、 τ_1 ——极距

σ_h ——材料的磁滞的单位损耗

σ_e ——材料的涡流的单位损耗

Φ ——每极气隙磁通(Wb)

$\Phi(r)$ ——转子磁场高次谐波在定子表面产生损耗的计算系数

σ_h ——材料常数,随所用材料品种而定

Φ_i ——内电势 E_i 相应的每极磁通

Φ_{Si} ——转子漏磁通

Ψ ——发电机内电势 E_q 和电枢电流 I 之间相位差(角度)

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

8

一、汽轮发电机历史简介	8
二、中国汽轮发电机制造技术的发展	13
三、现代电力系统对大型汽轮发电机的要求	26
(一) 对汽轮发电机组轴系自然扭振频率的要求	27
(二) 大机组承受电网振荡冲击能力	31
(三) 大机组应具备承受高压线路单相重合闸的能力	32
(四) 大机组应具备承受误并列的能力	33
(五) 汽轮发电机组的频率变化能力	34
(六) 汽轮发电机组的快关问题	34
(七) 大机组应具备吸收无功功率的能力	34
(八) 大机组应具备需要的调峰能力	35
(九) 大机组失磁异步运行能力	35
(十) 工程设计上要考虑的问题	37

第二章 汽轮发电机的冷却方式

41

一、汽轮发电机冷却方式的基本概念	41
------------------------	----

(一) 汽轮发电机冷却技术的重要性	41
(二) 绝缘寿命与电机温升极限	42
(三) 金属性能与温度极限	45
(四) 冷却介质的性能和特点	46
二、汽轮发电机冷却方式的发展	49
三、世界各大公司汽轮发电机采用的冷却方式	51
(一) 美国 GE(奇异)公司发电机的冷却方式	51
(二) 美国西屋公司(Westinghouse co.)(派系)发电机 的冷却方式	55
(三) ABB 公司发电机的冷却方式	60
(四) 德国西门子(Siemens)公司汽轮发电机的冷却方式	64
(五) 俄罗斯“电力”工厂、新西伯利亚重型电机厂汽轮发电机 的冷却方式	67
(六) 法国阿尔斯通(Alsthom)公司汽轮发电机的冷却方式	72
四、中国汽轮发电机的冷却方式	76
(一) 上海电机厂(现上海发电机厂)汽轮发电机的冷却方式	76
(二) 哈尔滨电机厂(哈尔滨电机责任有限公司)汽轮发电机的 冷却方式	82
(三) 东方电机厂(东方电机股份有限公司)汽轮发电机的冷却 方式	84
(四) 北京重型电机厂汽轮发电机的冷却方式	84

第三章 汽轮发电机的设计要素

86

一、汽轮发电机设计技术要求规范	86
(一) 功率与最大容量	86
(二) 电压	87
(三) 功率因数 $\cos \varphi$	88
(四) 频率	88
(五) 短路比 f_{k0}	90
(六) 电抗	91
(七) 寿命	98