

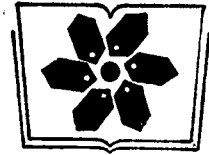


数据加载失败，请稍后重试！



数据加载失败，请稍后重试！

2105/23



中国科学院科学出版基金资助项目

大型电机的发热与冷却

丁舜年 主编

科学出版社

1992

前 言

近十几年来,世界上各主要工业国家和一部分发展中国家,工农业生产发展很快,人民生活水平迅速提高,用电量激增,促进了发电机向单机大容量飞速发展。由于各种工业用途要求电动机的力能指标极大地提高,促使电动机向高电磁负荷和细长结构发展,这些都使大型电机冷却技术不断迅速更新和发展。

近年来,发电机从单机 500MW 发展到 1500MW;汽轮发电机,二极达到 1200MW,四极达到 1550 MW;水轮发电机也达到 800 MW。除用空气、氢气进行外冷、内冷之外,还普遍地采用水内冷技术。油冷、蒸发冷也进入了实用阶段。配合机械制造技术的最新发展,特别是随着百吨级以上大锻件技术的日趋成熟,制造 2000MW 级发电机已成为可能。更大容量的单机将依靠超导技术来实现。

本书是论述大型电机发热、冷却的专著。电机的发热与冷却是一项综合性技术,也可视为一门边缘学科。这是因为一方面它要以电机学为基础,研究电机的设计、结构、材料、工艺和运行、维修等等,特别要求人们熟悉热源的产生,热量的大小和分布,以及发热、冷却对电机特性和运行、维护的影响;另一方面,它还涉及流体力学、传热学、材料腐蚀、介质物理和化学特性、机械强度、振动以及材料的其他特性等。如所周知,冷却系统的设计是电机整体设计的重要组成部分,它关系到电机能否正常和安全运行,是电机设计的关键技术之一。对大型电机,这一技术尤其重要。本书旨在全面讨论大型电机的发热与冷却技术,综述有关的基础理论和应用技术,介绍各种冷却方式在不同类型大型电机中的应用,突出介绍了科研、开发方面的重大成果和实践经验,以及发热、冷却的计算方法等等。

这类综述性科技专著在国内外是较少面世的,我想以此书奉献给电工界的同行和读者,如果此书能对大家有所帮助,这正是编著者的愿望。

本书包括十三章,主要内容分为下列几部分:第一至四章属于共同性和基础性部分的内容,包括大型电机及冷却技术的发展情况,电机发热与冷却的一般问题,流体力学与传热学原理在电机发热和冷却方面的应用。第五至十一章介绍了目前已广泛应用于大型电机的各种冷却方法,并根据各种类型电机,分别介绍和讨论了一种或几种典型系统、结构和关键零部件,介绍了发热和冷却的原理与计算方法,包括冷却系统的设计以及压头、阻力、流速、流量、温升等的计算,还论述了各种冷却方法的应用范围、优缺点和发展趋向等。第十二、十三两章对各种大型电机的发热与冷却的共性问题,如风扇和冷却器、电机发热与冷却的测量技术等进行了综合介绍。最后为附录,列出了从事大型电机研制、设计时需经常查阅的有关技术资料,也介绍了我国主要的大型电机厂和研究所的科研进展情况及所取得的科研成果。

本书的读者对象主要是从事大型电机设计、制造和研究工作的专业技术人员,以及在电厂从事安装、运行、维修等技术人员。在编写本书的过程中,力求由浅入深,尽量避免过于繁复的数学推导,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高年级学生和研究生阅读参考。

本书的编写分工为：第一至四章由魏书慈、董人麟编写；第五和第七章由李希明编写；第六章由曾文胜编写；第八章由李希明、曾文胜编写；第九章由陈季平编写；第十章由王启天编写；第十一章由顾国彪、李作之编写；第十二章由范永达编写；第十三章由曾文胜、董人麟编写。魏书慈、董人麟对本书初稿进行了审阅并提出修改建议。全书由丁舜年主编，并审查、修改、审订了全稿。付印前，董人麟对付印样进行了审订。

在编写本书的过程中，曾参阅了不少已发表的著作和资料，其中主要的已列在各章末的参考文献中，以便读者进一步查阅。

在开始编写本书时，中国科学院学部委员褚应璜，哈尔滨电机厂副总工程师沈从龙、张弘夏，东方电机厂总工程师饶芳权、副总工程师朱仁堪，上海电机厂总工程师孟庆元和副总工程师姜承谟，华中工学院林金铭教授，哈尔滨大电机研究所所长陆忠麒、副总工程师张为杰，北京重型电机厂总工程师钱振蒙等曾对本书的内容和体系提出宝贵的意见和建议，在编写过程中又给予了大力支持。清华大学陈丕璋教授、上海电机厂副总工程师汪耕、中国科学院电工研究所高级工程师朱维衡等曾分别对本书部分章节进行审阅和评议。在此对以上各位同志表示深切的谢意。本书的编写得到哈尔滨电机厂、哈尔滨大电机研究所、上海电机厂、上海电机厂研究所、东方电机厂、四川东方大电机研究所、北京重型电机厂、中国科学院电工研究所等单位的大力支持，在此谨向这些单位表示衷心的感谢。由于我们的水平有限，加之审稿、定稿的时间比较仓促，书中难免还会有一些缺点和错误，恳切希望读者提出宝贵意见。

丁舜年

1991年5月

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是研究和介绍大型电机发热与冷却问题的专著。书中系统总结了国内外大型电机发热与冷却的现状与研究成果,着重反映了我国近年来在这一领域里所取得的最新研究成果。

全书共十三章。第一、二章系统地介绍了国内外大型电机及与之相应的冷却技术的发展和进步。第三、四章分别介绍了流体动力学与传热学原理在电机发热与通风、冷却方面的应用及计算方法。第五至十一章根据所应用的不同介质,介绍了在各种类型大型电机的发热与通风冷却方面,特别是我国在水冷和其他方式冷却方面的应用情况和研究成果。第十二、十三章综合介绍了风扇、冷却器和电机发热与冷却的测量技术。书末列有附录,介绍了研制和设计大型电机的一些基本数据和可供查阅的有关资料,对我国大型电机厂和从事大型电机设计研究的有关研究所也作了介绍。

本书主要供从事电机研制、设计、制造的科技人员阅读,也可供在电厂从事安装、运行、维修等方面的技术人员,以及电机专业的研究生、高等院校与专科学校教师和高年级学生参考。

大型电机的发热与冷却

丁舜年 主编

责任编辑 范铁夫

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1992 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
1992 年 7 月第一次印刷 印张: 40 1/2 插页: 2
印数: 1—1 500 字数: 935 000

ISBN 7-03-002131-2/TM·22

定价: 32.20 元

目 录

前言

第一章 冷却技术与大型电机的发展	1
1.1 大型电机冷却技术的重要性	1
1.2 大型电机冷却技术的发展历史与现状	4
1.2.1 汽轮发电机	4
1.2.2 水轮发电机	8
1.2.3 大型交、直流电机	10
1.3 电机冷却方式适用范围的划分	14
参考文献	16
第二章 电机发热与冷却的基本问题	18
2.1 电机的热源——损耗及其分布	18
2.1.1 电机中各种损耗的分布比例	22
2.2 电机的温升极限	24
2.3 各种冷却介质的性能和冷却特点	24
2.3.1 气体冷却介质	25
2.3.2 液体冷却介质	27
2.3.3 水流动摩擦引起的铜线磨损	29
2.3.4 水冷转子绕组中的离心水压	30
2.3.5 蒸发冷却所用介质	31
2.4 冷却方式对电机技术参数的影响	31
2.4.1 空气和氢冷汽轮发电机的对比	32
2.4.2 氢冷与液(水)冷的技术参数	36
2.4.3 水轮发电机不同冷却方式的技术经济性能	38
2.5 电机发热对电工材料的影响	43
2.5.1 电机发热与绝缘寿命	43
2.5.2 电机发热与金属强度和硬度的关系	44
2.6 环境温度对大型电机温升的影响	45
2.7 海拔高度对大型电机温升的影响	54
参考文献	57
第三章 流体力学基本原理及其在电机中的应用	58
3.1 流体的主要物理性质	58
3.1.1 重度与密度	58
3.1.2 流体的粘性	60
3.1.3 流体的比热	63
3.2 流体力学的一些基本概念	65

3.2.1	连续性方程式	65
3.2.2	伯努利方程及其应用	66
3.2.3	帕斯卡定律和压力连接器	67
3.3	管内流动的型态及其特征	67
3.3.1	水力直径	68
3.3.2	流动附面层和温度(热)附面层	68
3.3.3	流动起始段和热起始段	69
3.4	沿程阻力和沿程阻力系数(流体摩擦阻力系数)	72
3.5	局部阻力和局部阻力系数	76
3.5.1	局部阻力系数汇编	76
3.5.2	管束阻力(交流电机中光滑管束冷却器用的管束)	92
3.5.3	旋转体内的流动阻力系数	94
3.6	研究流体运动和热传递的两种方法	96
3.6.1	数学解析法	96
3.6.2	相似方法和相似准则	98
3.7	电机通风模型的研究	103
3.7.1	(空气)通风模型的特点	103
3.7.2	电机通风模型的设计	104
3.7.3	模型动力相似的实现和参数换算	105
3.7.4	水模型的一些特点	106
3.7.5	局部模拟	107
3.8	热虹吸(压力)效应	110
3.9	电机通风系统(流体网络)的计算方法	112
3.9.1	通风系统的组成和简单风路计算	112
3.9.2	等效风路的迭代逼近计算	116
3.9.3	用电子计算机解流体网络	119
3.9.4	多支路分流回路的解算方法	128
	参考文献	135
第四章	传热学原理及其在电机中的应用	136
4.1	热传导和傅里叶定律	136
4.1.1	导热系数	137
4.1.2	平面壁导热	144
4.1.3	圆筒壁导热	146
4.2	对流传热交换和牛顿放热定律	147
4.2.1	自然对流放热	147
4.2.2	管内强迫流动的放热	149
4.3	热辐射和斯蒂芬-玻耳兹曼定律	149
4.4	综合热传递	150
4.4.1	平面壁的稳定传热	150
4.4.2	圆筒壁传热	151
4.4.3	肋化壁和肋化管传热	152

4.4.4	长杆传热	153
4.4.5	有限长杆传热	155
4.5	传热热阻	155
4.6	接触热阻	156
4.7	具有内部热源的物体一维导热数值解析	157
4.7.1	铜排的轴向导热	157
4.7.2	具有内部热源的圆柱体,从外表面散热时的温度分布	159
4.7.3	具有内部热源圆筒体的温度分布	159
4.8	电机各部分的放热系数	162
4.8.1	自然放热	162
4.8.2	旋转柱(筒)表面的放热系数	163
4.8.3	平面壁放热	164
4.8.4	空气掠过圆筒(柱)面时的放热系数	165
4.8.5	管内流动放热	165
4.8.6	定子槽口副槽的放热系数	166
4.8.7	径向通风沟内的放热系数	166
4.8.8	电机气隙放热系数	168
4.8.9	环状沟的放热系数	168
4.8.10	旋转管道内的放热系数	169
4.8.11	同步电机转子磁极线圈的放热系数	170
4.8.12	定、转子绕组端部放热系数	171
4.8.13	直流电机各部分的放热系数	171
4.8.14	其他一些部件的放热系数	173
4.9	电机温升计算的常规方法——热等效线路法	173
4.10	电机定子温度分布的数学解析	176
4.10.1	不考虑铜与铁之间的热交换时的定子线圈温度分布	177
4.10.2	考虑铜与铁之间热交换时的定子线圈温度分布	180
4.10.3	考虑铜与铁之间的热交换,但把铁心内圆也当成整体相连(即认为定子是全封闭槽)	183
4.11	电子计算机在电机热计算中的应用	185
4.11.1	差分法的应用	185
4.11.2	二维稳定导热的数值解法	189
4.12	电机的不稳定温升	196
4.12.1	一个均质发热体的不稳定温升	196
4.12.2	两个均质发热体(铜和铁)的不稳定温升	199
4.13	不稳定导热	203
	参考文献	208
第五章	采用空气冷却的汽轮发电机	209
5.1	我国空气冷却汽轮发电机(简称空冷汽轮发电机)发展简史和主要特点	209
5.2	空冷汽轮发电机的通风系统	211
5.2.1	概述	211

5.2.2	通风系统的分类	211
5.2.3	国产主要系列产品通风结构的特点及其他	213
5.2.4	空冷汽轮发电机的改进措施	220
5.3	空冷汽轮发电机的通风计算及温升计算	222
5.3.1	电机总风量及其通风损耗	222
5.3.2	通风计算实例	225
5.3.3	空冷汽轮发电机的热计算	237
5.4	空冷汽轮发电机的发展趋向	248
	参考文献	249
第六章	采用氢气冷却的汽轮发电机	250
6.1	氢冷汽轮发电机的特点	250
6.1.1	氢冷电机的温升	250
6.1.2	氢冷电机的通风损耗	251
6.1.3	氢冷电机中绝缘的寿命	253
6.1.4	氢冷电机机座防爆结构和密封	253
6.2	氢气表面冷却(氢外冷)	255
6.3	氢气直接冷却(氢内冷)	256
6.3.1	定子氢内冷及通风结构	257
6.3.2	转子氢内冷及常见的转子氢内冷系统	258
6.3.3	气隙取气斜流通风转子氢内冷系统及结构	259
6.3.4	气隙取气斜流冷却系统的特点	263
6.3.5	气隙取气、横向风沟转子内冷通风系统	263
6.3.6	槽底副槽气体冷却系统	265
6.3.7	转子轴向进气式内部气体冷却系统	266
6.3.8	转子绕组端部的冷却	268
6.3.9	气隙隔板的应用	269
6.4	全部采用氢气冷却的汽轮发电机(全氢冷汽轮发电机)	274
6.5	氢内冷电机的通风计算	276
6.5.1	定子绕组的通风计算	276
6.5.2	转子绕组的通风计算	277
6.6	氢内冷电机的热计算	279
6.6.1	定子线圈的温升	279
6.6.2	转子线圈的温升	281
	参考文献	281
第七章	采用水冷却的汽轮发电机	282
7.1	概论	282
7.2	定子线圈水冷的主要结构和特点	282
7.2.1	定子线圈用水冷却	282
7.2.2	定子线圈的水路系统	284
7.2.3	水内冷定子线圈用的联接元件	286
7.3	转子励磁绕组用水冷却	288

7.3.1	转子励磁绕组用水冷却的特点	288
7.3.2	水冷转子的水路系统	290
7.3.3	水冷转子的主要构件及其特点	291
7.4	水冷汽轮发电机的特殊要求及有关特性分析	295
7.4.1	水质问题	295
7.5	水冷电机的金属腐蚀	300
7.6	水冷线圈流阻及水冷转子绕组内水的流动	303
7.6.1	水冷线圈的流阻计算	303
7.6.2	水冷转子绕组内部水的流动	305
7.7	水冷线圈的温升计算	309
7.7.1	稳态情况下水冷线圈的温升计算	309
7.7.2	水冷线圈不稳定温升的计算	314
7.8	水冷定子线圈和转子线圈水流支路长度的选择	317
7.9	定、转子线圈水冷,铁心空冷,或简称水-水-空冷却的汽轮发电机	318
7.9.1	水-水-空汽轮发电机的基本特点	318
7.9.2	双水内冷汽轮发电机典型结构	321
7.9.3	水-水-空汽轮发电机的适用范围	322
7.9.4	采用空气冷却铁心及其结构件的通风系统	324
7.9.5	定子端部发热的改善	327
7.9.6	水-水-空冷却的汽轮发电机定子铁心的热计算	331
7.9.7	定子齿压指的损耗和温升	342
7.10	全水冷(或全液体冷却)汽轮发电机的发展	343
7.10.1	概述	343
7.10.2	全水冷汽轮发电机的典型结构	344
7.10.3	全水冷电机定子铁心和端部的冷却方法	351
7.10.4	全水冷电机的展望	352
	参考文献	354
第八章	采用水、氢冷却及油、氢和油、水冷却的汽轮发电机	355
8.1	采用两种介质冷却同一台电机	355
8.2	采用水-氢冷却的汽轮发电机——水-氢-氢冷却的汽轮发电机	355
8.2.1	水-氢-氢汽轮发电机发展概况	355
8.2.2	水-氢-氢汽轮发电机的特点	356
8.2.3	水-氢-氢汽轮发电机的结构	357
8.2.4	气隙取气斜流通风转子氢内冷系统	358
8.2.5	采用转子槽底副槽径向交替通风氢内冷系统的汽轮发电机	359
8.2.6	采用横向密集沟通风氢内冷系统的汽轮发电机	360
8.2.7	应用气隙隔板的水、氢、氢汽轮发电机	361
8.3	采用水、氢冷却的汽轮发电机——水-水-氢汽轮发电机	362
8.3.1	水-水-氢汽轮发电机的特点和发展概况	362
8.3.2	水-水-氢汽轮发电机的典型设计简介	364
8.3.3	水-水-氢汽轮发电机的试验研究	367

8.4 汽轮发电机采用油、水或油、氢冷却	375
8.4.1 概述	375
8.4.2 油、氢冷汽轮发电机	375
8.5 油、水冷汽轮发电机	378
参考文献	380
第九章 水轮发电机的发热与冷却	381
9.1 典型的水轮发电机通风系统	381
9.1.1 通风系统的分类	381
9.1.2 国内外水轮发电机典型通风系统风路图	382
9.1.3 典型通风系统风路简介	383
9.2 水轮发电机通风系统的主要问题	385
9.2.1 定子有效段风沟风速沿轴向的分配	385
9.2.2 上、下端环孔或侧孔的设置对端部线圈的冷却作用及对端腔压头的影响	387
9.2.3 转子支架寄生涡流的形成及支架盖板的设计	388
9.2.4 定子机架水平挡风板的设置及其作用	391
9.3 水轮发电机风扇的配置及无风扇通风系统	392
9.3.1 风扇的配置及其作用	392
9.3.2 无风扇运行的可行性及其条件	394
9.3.3 无风扇通风系统实例	395
9.4 水轮发电机的通风损耗	396
9.4.1 通风损耗的形成	396
9.4.2 通风损耗的计算	397
9.4.3 用水力模型研究水轮发电机的通风损耗	399
9.5 水轮发电机的通风计算	401
9.5.1 通风计算的目的	401
9.5.2 电机产生风量的简易计算	402
9.5.3 总压头、总风量的详细计算——图解法	406
9.5.4 图解法计算实例	417
9.6 水轮发电机的热计算	425
9.6.1 水轮发电机的热源	425
9.6.2 典型通风系统方式下损耗热的导散	426
9.6.3 简化热计算	427
9.6.4 热等值线路图解法计算电机的温升	430
9.6.5 改善电机温升的途径	440
9.6.6 改进发热不均匀性的措施	442
9.6.7 汇流排的发热与冷却	443
9.7 全水冷式水轮发电机	445
9.7.1 水冷式水轮发电机的主要特点	445
9.7.2 水冷式水轮发电机的主要结构	447
9.7.3 水冷式水轮发电机定子的流量与热计算	454
9.7.4 水内冷水轮发电机运行情况实测	457

9.8 采用半水冷冷却方式的水轮发电机	458
9.8.1 半水冷方式的涵意	458
9.8.2 转子强迫空冷的结构	459
9.8.3 转子内部强迫通风的流量和热计算	462
9.9 贯流式水轮发电机的发热与冷却	464
9.9.1 概述	464
9.9.2 灯泡式水轮发电机的特点	465
9.9.3 灯泡式电机的冷却系统	468
9.9.4 灯泡式电机采用水内冷冷却方式	474
参考文献	475
第十章 大型交、直流电机和调相机的发热与冷却	476
10.1 交流电机的冷却	476
10.1.1 大型同步电动机的通风冷却	476
10.1.2 大型凸极同步电机的通风冷却	477
10.1.3 内部强迫通风在凸极电机中的应用	479
10.2 大型异步电机的通风冷却	482
10.2.1 典型通风系统	482
10.2.2 风路的合理组合型式	484
10.3 同步调相机的通风冷却	486
10.3.1 调相机冷却方式的选择	486
10.3.2 空气冷却的同步调相机	487
10.3.3 氢气冷却的同步调相机	487
10.3.4 空冷或氢冷调相机转子绕组的冷却方式	488
10.3.5 调相机的损耗与温升	488
10.4 直流电机的冷却	491
10.4.1 直流电机的冷却方式	491
10.4.2 直流电机的通风系统	492
10.4.3 通风系统计算要点	494
10.4.4 通风温升检测系统	499
参考文献	499
第十一章 蒸发冷却及其在电机中的应用	500
11.1 蒸发冷却的原理	500
11.1.1 一般概念与分类	500
11.2 管道内冷式蒸发冷却	500
11.2.1 管道内冷式蒸发冷却的基本原理	500
11.2.2 管内蒸发冷却的汽液两相流动	503
11.2.3 管内蒸发冷却循环计算	510
11.3 浸润式蒸发冷却	512
11.3.1 浸润式蒸发冷却原理	512
11.3.2 浸润式蒸发冷却的传热问题	513
11.3.3 浸润式蒸发冷却的绝缘	516

11.4	转子开放式管道型蒸发冷却	517
11.5	蒸发冷却介质	519
11.6	蒸发冷却电机的冷凝器	521
11.7	蒸发冷却电机的展望	525
11.7.1	国外研究蒸发冷却电机的概况	525
11.7.2	我国研究蒸发冷却电机的概况	528
11.7.3	初步技术经济分析与发展前景展望	529
	参考文献	530
第十二章	风扇和冷却器	532
12.1	风扇	532
12.1.1	常规离心式风扇	532
12.1.2	高压离心式风扇	542
12.1.3	轴流式风扇	545
12.2	冷却器	559
12.2.1	冷却器热交换过程的理论分析	559
12.2.2	冷却器的设计与计算方法	563
12.2.3	空气冷却器的主要参数和几种典型结构	567
12.2.4	浑水冷却器散热系数的实验研究	576
12.2.5	气体-气体冷却器	578
	参考文献	580
第十三章	电机发热与冷却的测量技术	581
13.1	温度的概念和测量	581
13.1.1	玻璃管液体温度计	582
13.1.2	电阻型温度计	582
13.1.3	热电偶温度计	584
13.1.4	红外线温度测量仪	585
13.2	风速(风量)测量	587
13.2.1	测速管	588
13.2.2	叶轮式风速计	590
13.2.3	热电式风速仪	591
13.2.4	热量流量计	593
13.3	微压测量	594
13.3.1	补偿式微压计	595
13.3.2	倾斜式微压计	596
13.4	电机转子温度的测量	597
13.4.1	转子线圈平均温度的测量	597
13.4.2	转子温度信号的滑环引出	598
13.4.3	转子温度信号的无接触引出	601
13.5	带电测量定子线圈温度	603
13.5.1	带电测量定子线圈平均温度	603
13.5.2	带电测量定子线圈局部温度	605

参考文献	605
附录一 两种单位制的换算	607
1.1 常用基本物理量的换算	607
1.2 压力和应力的单位换算	607
1.3 功、能量和热量的单位换算	608
1.4 传热系数的单位换算	608
1.5 导热系数的单位换算	608
1.6 运动粘度的单位换算	608
1.7 动力粘度的单位换算	608
附录二 国际冷却方式 (IC) 冷却回路	609
2.1 第一位数字的具体含义	609
2.2 第二位数字的具体含义	610
附录三 电机温升极限	612
3.1 用空气冷却的电机的温升限值 (K) (按国家标准 GB-755-81)	612
3.2 用氢气间接冷却(外冷)的电机的温升限值(K)(按国家标准GB-755-81)	613
3.3 直接冷却(内冷)的电机及其冷却介质的温升限值 (K) (按国家标准 GB-755-81)	614
3.4 我国绝缘材料分类及其极限温度	615
3.5 IEC-TC2 (80 年修订稿)空气间接冷却的电机温升极限值(K)	615
附录四 由铜电阻变化求温度变化 $f = \frac{r_h}{r_c} = \frac{235 + t_h}{235 + t_c}$	617
附录五 电机常用材料的热膨胀系数	618
附录六 国内外大型及巨型汽轮发电机一览表	619
6.1 国内外大型汽轮发电机主要技术数据表	619
6.2 国外已制成的巨型汽轮发电机一览表	622
附录七 国内外大型水冷和水、空冷水轮发电机一览表	623
附录八 全国主要大型电机厂和研究所简介	626
8.1 哈尔滨电机厂简介	626
8.2 哈尔滨大电机研究所简介	626
8.3 上海电机厂简介	627
8.4 上海电机厂研究所简介	628
8.5 东方电机厂简介	628
8.6 四川东方大电机研究所简介	629
8.7 北京重型电机厂简介	629
8.8 中国科学院电工研究所电机(特种)研究室简介	630

第一章 冷却技术与大型电机的发展

1.1 大型电机冷却技术的重要性

本书研究大型电机（对于这一名称我们不准备给予严格的定义；主要指容量在 10 MW 以上的各种发电机，12.5MVA 以上的调相机，1MW 或转子直径大于 1m 的各种交、直流电机）的发热和冷却问题。

大型发电机是电网的主要装备之一，是电能的直接生产者；大型电动机则是现代工业最基本的动力设备，是电能重要的消费者。显然，大型电机的发展是与整个国民经济，特别是和电力工业的发展紧密联系着的。

从电力生产、电网运行、管理的经济性和供电质量来看，电网中主力机组的单机容量应与电网总容量维持一定比例，例如 6—8%，电网越大，主力机组单机容量也应越大。换句话说，只有具备了大容量机组，才能建设现代化大电网。近 30 年来，许多国家的电力生产都以 6—10 年翻一番的速度迅速增长。1985 年，我国电力生产已达 406.5TWh，总装机容量达到 86000MW，这一飞速发展过程也反映着单机容量不断增大的过程。

目前，在国外容量超过 1000MW 的汽轮发电机和容量大达 700MW 的水轮发电机均已制成并投网运行，这对进一步扩大电力生产创造了有利条件。但单机容量增大给电机设计和制造带来一系列新课题，电机冷却便是其中突出的一个。

电机设计的基本规律说明，单机容量越大，其经济性能越好，而单机容量增大，主要依靠冷却技术的改进。图 1.1-1 示出了不同冷却方式汽轮发电机的电机常数，图 1.1-2 给出了两极 50Hz 汽轮发电机的材料消耗率 G 随容量增大而下降的情况。图中各段曲线清楚

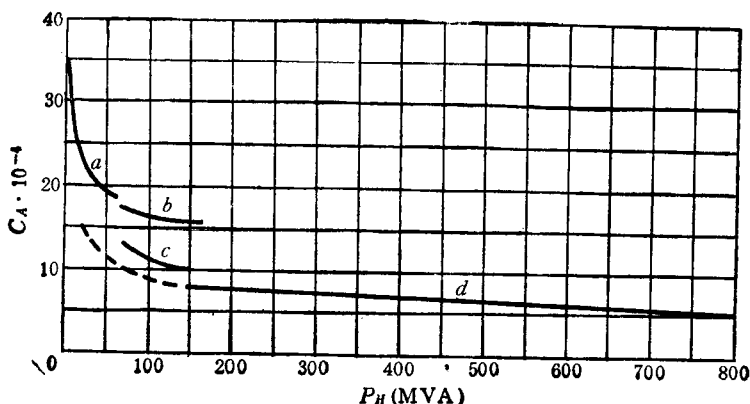


图 1.1-1 不同冷却方式的汽轮发电机的电机常数

a——空气冷却；b——氢外冷；c——定子氢外冷，转子氢内冷；d——定子水冷，转子氢内冷

1) TWh——国际单位制中的太瓦时， $1\text{TWh} = 10 \times 10^9 \text{kWh}$ 。

地表明,冷却方式的改进与材料消耗形成鲜明的对应关系。

图 1.1-3 给出了不同容量的水轮发电机单位成本变化的规律——容量越大, 单位成本越低。

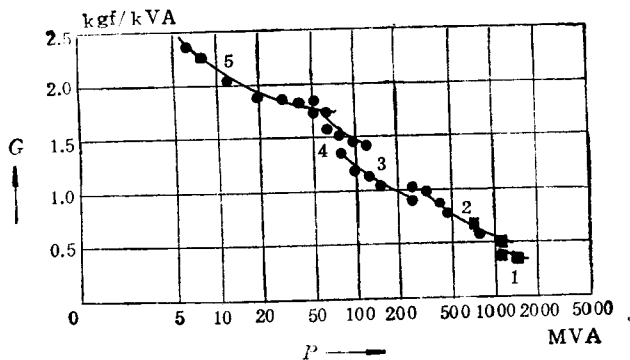


图 1.1-2 历年来的汽轮发电机材料消耗率变化
●——已制; ■——在制; G——材料利用率; P——单机容量(MVA).
1——定转子水冷; 2——定转子氢内冷; 3——转子氢内冷;
4——氢外冷; 5——空冷

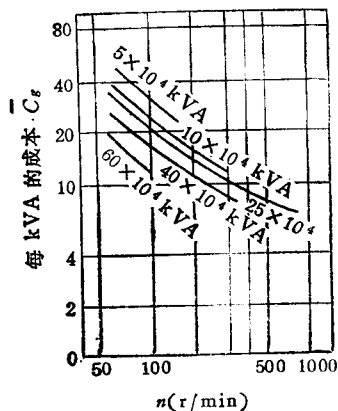


图 1.1-3 水轮发电机单位容量的成本与转速关系

由电机中的相似定律可知,当转速 n , 磁密 B , 电流密度 j 均不变时,可推导出如下关系:

功率 $P \propto EI$ (1.1-1)

电势 $E \propto WB_s S_F$ (1.1-2)

电流 $I \propto j S_{Cu}$ (1.1-3)

所以

$$P \propto B_s j S_F S_{Cu} \propto l^4 \tag{1.1-4}$$

式中 S_F, S_{Cu} ——铁和铜的截面积; l ——线性尺寸。

在上述条件下,电机的材料消耗 M ,成本 C 和电机损耗 $\sum P$ 均与 l^3 成正比,即

$$\left. \begin{aligned} M &\propto l^3 \\ C &\propto l^3 \\ \sum P &\propto l^3 \end{aligned} \right\} \tag{1.1-5}$$

亦即

$$\frac{M}{P} \propto \frac{C}{P} \propto \frac{\sum P}{P} \propto \frac{l^3}{l^4} \tag{1.1-6}$$

式(1.1-6)说明,电机功率越大,相对说来越经济。当然,单机容量越大,电机的发热将严重起来了,成为限制容量增长的主要障碍。由于损耗与 l^3 成正比,而散热面积只与 l^2 成正比,可见,即使维持原有的电磁负荷,并且几何尺寸可以无限制地按比例增大,而电机容量增大后它的热负荷和温升仍然会以更大的比例增长。

因为

$$\sum P \propto l^3$$

及