

高等学校试用教材

现代电机设计

上海交通大学 程福秀 主编
华中理工大学 林金铭

机械工业出版社

高等学校试用教材

现代电机设计

主编	上海交通大学	程福秀
	华中理工大学	林金铭
主审	华中理工大学	林金铭
协编	华中理工大学	唐孝镐
	上海交通大学	顾其善
		陈立人
		姜秀梅
		汪永德
		赵蒙疆
	哈尔滨电工学院	何珪
		张奕黄
	合肥工业大学	汪国强



机械工业出版社

(京) 新登字054号

本书共十四章。前八章为基础部分,包括对电机结构的要求和结构的新发展;交直流绕组联接分析法、三相波绕组接法和某些特殊绕组以及绕组设计CAD分析;饱和电机的磁路计算方法;参数计算的 能量法;换向电路的网络分析法;通风冷却系统及某些新型冷却方式;电机温升计算的热网络法和 CAD;电机噪声计算方法及噪声控制。后六章涉及设计方面一些主要问题,如某些尺寸变化规律;感应电动机电磁分析程序与软件编制;电机优化设计;电磁场数值计算前后处理;电机计算机绘图等。

本书力图反映国内外新技术新成就,希望能提高专业教学质量和水平,使读者赶上时代脉搏。

本书可供电机专业本科学士、研究生作为教材或教学参考书,也可供从事电机设计、科研以及有关的电工技术人员学习、参考使用。

现 代 电 机 设 计

上海交通大学 程福秀
华中理工大学 林金铭 主编

*

责任编辑:任锐贞 版式设计:胡金瑛

封面设计:郭景云 责任校对:熊天荣

责任印制:路琳

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 33·字数 811 千字

1993年5月北京第1版·1993年5月北京第1次印刷

印数 0 001—2 250·定价:8.80元

*

ISBN 7-111-03546-1/TM·443 (课)

前 言

本书是根据1982年10月在武汉华中理工大学召开的第一次电工技术类教材编审委员会电机分组会议的提议和1983年在杭州浙江大学召开的第二次会议的决议编写的一本教学参考用书。1984年初在上海交通大学由程福秀主持讨论了编写大纲并进行初步分工。在编写过程中,于1986年3月和1988年7月又在上海交通大学两次审议了大纲和调整部分内容并对编写人员进行了调整。

本书共分十四章。前八章为电机设计的基础理论,包括:总体结构设计,结构设计的原则与步骤及电机结构的新发展;交、直流绕组的基础、三相波绕组的接法和某些新型交流绕组以及其设计的CAD分析;磁路计算的新方法;参数计算的能量法;换向电路的网络分析法;通风冷却系统及其计算;电机稳态、暂态发热计算与等效热路法(包括CAD分析);电机的噪声与控制。后六章包括电机设计主要尺寸及某些设计规律;电机电磁设计CAD的有关基础知识、感应电动机的电磁分析程序与软件编制、电机优化设计以及电磁场数值计算的前后处理和电机的计算机绘图。本书力图反映国际国内电机领域的新技术和新的研究成果,例如波纹钢板机座和箱式结构与直流电机隐极化;直流双叠绕组,交流绕组槽号相位图,无槽气隙绕组;磁路计算中齿饱和与轭饱和对气隙磁场分布的影响、相应的磁位差计算;广泛地介绍计算机在电机设计计算中的应用等等,作到理论尽量符合实际,以求提高专业的教学质量和水平,使学生专业知识赶上时代的脉搏。

本书不独设有有关损耗计算的章节,而仅在参数一章中涉及涡流附加铜损耗计算理论。因为编者认为铜耗计算比较简单,无须讨论;其它如铁损耗、机械损耗和杂散损耗的计算准确度一般不高。经验表明,这些损耗与其进行并不准确的计算,不如依靠对已有试验数据的分析、推论和统计平均,其结果反而更为可信。当然,当缺乏任何经验数据时,也可以依据现有出版的有关电机设计图书中公式,进行粗略估计,一旦做出样机或产品,即应修正。

本书阐述清楚,理论推导严格,文字通顺,可供本科学生、研究生学习参考,也可供电机设计人员和有关的电工技术人员参考使用。

本书原由上海交通大学程福秀一人任主编,华中理工大学林金铭任主审。后因程福秀出国,由本人推荐,报高等工业学校电机专业教学指导委员会批准,增加林金铭兼任主编。在程福秀初步审定的前五章书稿基础上,林金铭对其余各章进行了审编以及全书的统一和定稿工作。由于编写多次易手,使本书未能与读者及早见面,编者殊感歉疚。

参加本书编写的有:哈尔滨电工学院何珽和张奕黄(第十章、十一章和十四章);上海交通大学顾其善(第三章、第九章),陈立人(第四章、第五章),姜秀梅(第十三章),任永德和赵蒙疆(第十二章);华中理工大学唐孝镐(第一章、第二章);合肥工业大学汪国强(第六、第七和第八等章)。

由于编者学识限制,难免有失误或不当之处,尚祈广大读者不吝批评指正,不胜感激之至。宝贵意见请寄主编或逕寄各章编写人员。

编者

1992年5月

目 录

前 言

第一章 电机结构设计概论 1

第一节 结构设计的基本内容、原则和方法 1

一、电机结构设计的基本内容 1

二、结构设计的基本原则 1

三、结构设计的一般方法 2

第二节 电机的总体结构设计 2

一、电机的结构型式 2

二、电机的防护型式 4

三、电机的冷却系统通论 7

四、运行方式等诸因素对电机结构的影响 10

第三节 波纹钢板机座和箱式结构电机 18

一、波纹钢板机座电机 18

二、箱式结构电机 22

第四节 直流电机机座结构的发展 24

一、外形的多样化 24

二、材料冲片化 24

三、定子隐极化 24

参考文献 25

第二章 电枢绕组 26

第一节 直流电枢绕组 26

一、单叠绕组 26

二、复叠绕组 30

三、复波绕组 36

四、均压联接 38

第二节 交流电枢绕组的一般问题 43

一、槽号相位图 44

二、每极每相分数槽绕组 46

第三节 波式绕组及其联接 53

一、三相双层整数槽波绕组的联接 54

二、三相分数槽波绕组的联接 57

三、用方格图确定双层波绕组的联接 59

第四节 六相绕组和三角形—星形混合绕组 60

一、六相双星形绕组 60

二、三角形—星形混合绕组 64

第五节 变极绕组 66

一、反向法的单绕组变极 67

二、换相法变极的特点 75

第六节 交流电枢绕组三相槽号分配及磁动势谐波分析的计算机辅助设计 76

一、三相槽号分配的数学模型 76

二、三相绕组磁动势的表达式 77

三、绕组设计程序框图 77

四、交流电枢绕组计算机辅助设计源程序 78

第七节 电枢绕组设计原则和基本内容 84

一、直流电枢绕组设计——型式选择及参数确定 84

二、交流电枢绕组设计 86

第八节 无槽电枢绕组 87

参考文献 89

第三章 磁路计算 90

第一节 概述 90

第二节 空气隙磁位差 92

一、具有光滑表面电枢的电机气隙磁场和计算极弧系数 93

二、开槽电机的气隙磁场和卡特系数 105

三、气隙边缘磁场和电枢计算长度 109

第三节 齿磁通密度和齿磁位差 113

一、齿磁通密度 113

二、齿磁位差 115

第四节 轭磁位差 121

一、极轭 121

二、齿轭 122

第五节 极磁位差及漏磁 126

一、极磁位差 126

二、极漏磁系数 127

第六节 饱和电机的气隙磁场 127

一、齿部饱和的感应电机 127

二、轭部饱和的感应电机 130

三、齿部饱和的直流电机 136

IV

第七节 空载励磁电流和空载特性.....	136	三、换向极气隙磁密的确定.....	201
一、感应电动势和气隙磁通.....	137	四、换向极绕组磁动势的确定.....	202
二、气隙磁场的特征系数和气隙最大磁密.....	137	第五节 由整流电源供电时直流电动机的换向特点和改善换向的措施.....	204
三、部分磁位差和励磁电势.....	137	参考文献.....	206
四、空载励磁电流和空载特性.....	138	第六章 电机通风冷却系统及其计算.....	207
参考文献.....	139	第一节 概述.....	207
第四章 参数计算.....	141	第二节 冷却系统的主要类型.....	208
第一节 概述.....	141	一、空气冷却系统.....	208
第二节 主电感和漏磁电感.....	141	二、氢气冷却电机.....	210
一、主电感和谐波漏磁电感.....	141	三、水冷电机.....	212
二、槽部漏磁电感.....	145	四、油冷电机.....	212
三、齿顶漏磁电感.....	154	五、热管冷却原理及其在电机中的应用概述.....	214
四、绕组端部漏磁电感.....	155	第三节 流体运动的基本物理性质.....	215
五、电感的标么值.....	156	一、伯努利方程.....	216
第三节 感应电机的参数.....	158	二、流体的流动状态.....	217
一、电压方程和等效电路.....	158	三、管道的流阻.....	218
二、笼型转子绕组的漏磁电感和电阻.....	160	四、风路中风阻的串、并联.....	220
第四节 同步电机的参数.....	162	第四节 通风冷却系统中流体的压力及电机中压力的产生.....	221
一、电压方程和等效电路.....	162	一、流体的压力.....	221
二、励磁绕组的漏磁电感和电阻.....	164	二、压力损失与电机中压力的产生概述.....	222
三、直轴阻尼绕组的漏磁电感和电阻.....	166	第五节 冷却系统所需冷却介质的单位时间流量及其合理分布.....	223
四、交轴阻尼绕组的漏磁电感和电阻.....	168	第六节 风扇.....	223
第五节 挤流型绕组的参数.....	169	一、概述.....	223
一、矩形槽绕组参数的解析计算.....	170	二、轴流式风扇的外特性.....	225
二、非矩形槽笼型转子绕组参数的数值计算.....	179	三、电机中使用的轴流式风扇尺寸的确定.....	226
参考文献.....	183	四、离心式风扇产生的风压及风扇设计要点.....	228
第五章 换向计算.....	184	五、风扇的联合运行.....	231
第一节 概述.....	184	六、中小型感应电动机的合理通风冷却系统与节能风扇探讨.....	232
第二节 换向过程.....	184	参考文献.....	235
一、换向周期.....	184	第七章 电机发热与温升计算.....	236
二、换向区宽度.....	185	第一节 概述.....	236
三、换向元件中的电流.....	186	第二节 电机的允许温升限度.....	237
四、电刷接触电压降.....	187	第三节 传热的基本定律.....	239
第三节 换向电流和电刷接触电压降计算.....	188	一、概述.....	239
一、换向电路的电压方程.....	188	二、热传导定律.....	239
二、电压方程的求解.....	190		
三、电刷接触电压降和换向性能评估.....	194		
第四节 换向的工程计算.....	195		
一、电抗电动势计算.....	195		
二、旋转电动势计算.....	199		

三、表面散热与影响散热能力的因素	241	一、概述	287
四、牛顿散热公式和散热系数	241	二、电机的通风噪声	287
第四节 电机的稳定温升计算	242	三、电机的轴承噪声	288
一、电机中的温度分布	242	四、电刷—换向器噪声	291
二、电机温升的一般计算方法概述	244	五、转子不平衡引起的噪声	291
三、用热路法计算电机的平均温升	245	第五节 电机电磁噪声的控制	292
第五节 大型水轮发电机定子温度场		一、增大气隙	292
CAD	252	二、降低两极电机的脉动噪声	293
一、计算区域与等效热回路	252	三、斜槽	294
二、热阻计算	254	四、定子绕组采用并联支路	295
三、边界条件的确定	254	五、降低电机外表面的动态振幅	296
四、网格损耗计算	255	六、降低声辐射效率	297
五、节点温度数学模型的建立与求解	256	第六节 电机机械性噪声的抑制	298
第六节 汽轮发电机间接冷却转子三维温度场计算	257	一、电机轴承噪声的降低	298
一、计算方法	257	二、电刷—换向器噪声的降低	299
二、三维等效热路	257	三、转子不平衡噪声的降低	299
三、方程组的建立和求解	261	四、空气动力噪声的控制	300
第七节 交流电动机起动时的温升计算	261	参考文献	303
一、概述	261	第九章 电机设计原理	304
二、交流电动机的起动	262	第一节 电机设计基本公式	304
三、起动时起动绕组的发热能量	262	一、圆柱式电机	304
四、起动时间	264	二、盘式电机	306
五、起动绕组温升	264	第二节 电机的几何相似定律	309
第八节 电机的发热及冷却过程	266	一、材料利用、效率和热负荷	310
一、电机作为均质发热体的发热方程	266	二、电参数和性能指标	311
二、电机作为均质物体的冷却方程	267	第三节 电磁负荷的选择	311
参考文献	269	一、乘积 AB_δ	312
第八章 电机的噪声及其控制	270	二、乘积 Aj 和比值 A/j	313
第一节 概述	270	三、比值 A/B_δ	316
第二节 电机噪声研究的基础知识	271	四、最佳气隙磁密 $B_{\delta opt}$	317
一、声压与声压级	271	第四节 几何尺寸比的选择	319
二、声压级的叠加	272	一、主要尺寸比 l_a/D	319
三、声强与声功率, 声强级与声功率级	273	二、相对气隙长度 δ/D	320
四、响度级与响度	274	三、等效导体的相对厚度 Δ_a/D	321
五、计权声级	275	四、槽形尺寸的优化	321
六、噪声评价曲线	276	第五节 盘式电机的设计特点	322
第三节 三相笼型感应电动机电磁噪声		一、电枢直径比	322
计算	276	二、磁路尺寸的优化	324
一、第一种计算方法	277	参考文献	325
二、第二种计算方法	280	第十章 电机的计算机辅助设计概论	326
第四节 电机的机械噪声	287	第一节 电机设计与CAD	326
		一、电机的设计方法	326

二、电机的计算机辅助设计	328	四、开槽	373
第二节 电机CAD系统的组成	330	第六节 分析程序初始化	376
一、CAD系统的基本类型	330	一、数据文件输入	376
二、CAD系统的硬件及其类型	331	二、交互式输入	376
三、CAD系统的软件	332	三、利用数据库初始化	377
四、电机CAD软件包	333	四、建立数据库文件	377
第三节 CAD软件的开发	336	五、初始化命令文件	378
一、软件工程的观点	336	第七节 综合程序简介	381
二、软件计划阶段	337	一、循环计算	381
三、软件设计	339	二、综合程序举例	381
四、结构化程序设计	339	三、设计数据调整	382
五、程序的编码	340	四、综合程序的特点	386
第四节 电机CAD数据库	342	参考文献	387
一、文件、数据库	342	第十二章 电机设计的计算机绘图	388
二、dBASE III 简介	343	第一节 概述	388
三、中小型感应电动机CAD数据库	347	一、计算机绘图简介	388
参考文献	347	二、计算机绘图在电机设计中的应用	388
第十一章 感应电动机分析程序	348	第二节 自动绘图系统	389
第一节 分析程序的要求与功能	348	一、自动绘图系统原理	389
一、分析程序在电机CAD中的位置	348	二、微型计算机绘图系统	389
二、分析程序的功能	348	三、自动绘图机	390
三、对分析程序的要求	351	四、插补原理简介	392
第二节 数学模型与模块划分	352	第三节 DXY-800A型智能绘图机与程序 设计	393
一、感应电动机等效电路模型	352	一、绘图命令与绘图软件	393
二、手算程序特点	353	二、基本图形的程序设计	396
三、数据流的细化	354	第四节 计算机绘图软件	398
四、分析程序的模块划分	356	一、基本概念	398
第三节 分析程序的编程	358	二、绘图程序设计步骤	399
一、符号名命名	358	三、基本绘图子程序的设计	400
二、主要程序段举例	359	第五节 图形变换的矩阵方法	408
三、出错处理	362	一、基本变换矩阵	408
四、输出安排	362	二、齐次变换	410
五、数据的传递	363	三、二维图形的坐标变换	410
第四节 非计算性数据的处理	364	四、三维图形变换	412
一、公式化处理	364	第六节 电机绘图程序设计	414
二、曲线拟合	366	一、电动机零件图的程序设计	414
三、插值	368	二、电动机装配图的绘制	421
四、几何计算	369	参考文献	422
第五节 选线规与开槽	369	第十三章 电机电磁场的计算机辅助 分析	423
一、选线规方法之一——线规法	369	第一节 概述	423
二、选线规方法之二——线规组合表法	370		
三、建立线规组合表	371		

第二节 有限元法的前处理 I —— 网格	
剖分.....	427
一、自动剖分网格法.....	428
二、自适应网格生成法.....	431
三、三维场自动剖分.....	436
第三节 有限元法的前处理 II —— 材料	
特性.....	439
一、软磁材料的数学模型.....	439
二、软磁材料模型的数值表达式.....	439
三、软磁材料的有效磁阻率.....	442
四、硬磁材料的处理概述.....	443
第四节 有限元法的前处理 III —— 边界	
条件.....	445
第五节 有限元法的后处理 I —— 等位线	
绘制.....	447
第六节 有限元法的后处理 II —— 电机参数	
求取.....	452
一、感应电动势.....	452
二、气隙磁密.....	454
三、电感.....	454
四、电磁力和电磁转矩.....	455
五、涡流密度和涡流损耗.....	459
参考文献.....	462
第十四章 电机优化设计.....	464
第一节 优化设计概述.....	464
一、什么是优化设计.....	464
二、对优化软件的要求.....	464
三、优化设计步骤.....	466
第二节 数学规划的标准形式.....	466
一、设计变量与设计空间.....	467
二、目标函数与等值面.....	467
三、约束条件和可行域.....	468
四、电机优化设计标准形式举例.....	469
五、数学规划方法分类.....	470
第三节 非线性规划算法的基本寻优策略.....	471
一、转化.....	472
二、下降.....	472
三、假定.....	473
四、迭代.....	474
五、终止.....	475
六、结论.....	476
第四节 一维搜索方法.....	476
一、一维搜索要求.....	476
二、一维搜索对函数的约定.....	477
三、极小点的划界.....	477
四、逼近极小点.....	477
五、一维搜索举例.....	481
第五节 无约束问题的直接方法.....	484
一、坐标轮换法.....	484
二、模式搜索法.....	485
三、共轭方向法.....	486
四、单纯形法.....	488
第六节 无约束问题的解析方法.....	489
一、梯度法.....	489
二、共轭梯度法.....	490
三、牛顿法.....	491
四、变尺度法.....	492
五、无约束算法小结.....	493
六、FR共轭梯度法程序举例.....	494
第七节 约束问题方法.....	499
一、罚函数法.....	500
二、乘子法.....	502
三、非转化方法.....	503
四、优化程序库.....	503
第八节 与CAD系统的接口.....	507
一、与分析程序的接口.....	507
二、优化初始化.....	510
第九节 电机优化设计特点.....	513
一、电机优化设计变量的选择.....	513
二、电机优化设计离散变量的处理方法.....	513
三、采用硬绕组电机的优化设计特点.....	514
四、系列电机优化设计方法.....	516
五、电机优化设计目标函数与约束条件.....	517
参考文献.....	519

第一章 电机结构设计概论

电机设计的全过程，按照工作进程，大体上分为初步设计、电磁设计和施工设计三个阶段；按照工作性质，则可分为结构设计和电磁设计两个方面。初步设计主要是确定电机的总体结构型式，这是电磁设计的基础，而施工设计则是实现电磁设计的保证，二者统称为电机的结构设计。

目前，电机已普遍地应用于从外层空间的宇宙航行到深海的石油钻探，从工农业生产到人们日常生活的各个领域和各个部门，其使用环境和技术要求千差万别。它们不但要求电机有优良的、与负荷相匹配的电气性能，而且要求有形态各异、耐用美观的结构与之相适应。近百年来电机的发展表明，它既有赖于电磁理论的研究，设计计算方法的进步，又有赖于各种材料的不断进步和电机结构上的创新，以及工艺上的改进。一般电机的设计工作中，结构设计的工作量往往占70%以上。因此，本书伊始就来讨论电机的结构及结构设计问题，是十分必要的。

第一节 结构设计的基本内容、原则和方法

一、电机结构设计的基本内容

- 1) 确定电机的总体结构型式。包括电机的防护型式、轴承型式和数目、轴伸型式和数目、安装方式和冷却系统等。
- 2) 确定某一零部件的结构型式、形状和具体尺寸，使用的材料。
- 3) 确定某些有机械联接的零部件（例如，转子铁心和轴、机座和端盖等）之间的联接方式。
- 4) 核算零件的机械性能，包括强度、刚度等的计算。

其中，1)，2)，3) 各项的一些主要内容，通常在初步设计阶段完成，另一些与电磁计算密切相关的部分，则在电磁设计过程中加以确定。因此，本章的重点是讨论属于初步设计阶段的电机总体结构设计问题。

二、结构设计的基本原则

- 1) 所有总体结构应符合有关国家标准的规定，例如，上一小节中所提及的各项；以及国际电工委员会(IEC)所推荐的有关电机文件中的相应规定，并满足使用部门提出的要求，如电机的中心高、外限尺寸、安装尺寸、出线盒位置等。
- 2) 所选结构能够保证电机有效部分（定、转子铁心及绕组）的准确和可靠运行。如铁心的固紧；绕组的绝缘结构，带电部分和接地部分之间的绝缘距离，定、转子同心度的保证等等。
- 3) 要切实注意结构的工艺性。结构应该力求简单，能够加工且易于加工，加工成本低，在保证安全可靠的前提下，尽可能地减少原材料的消耗；还须考虑工厂已有的工艺装备，工艺水平和合理与先进的工艺传统，并注意到产品的系列性、产品批量和对生产周期的要求。

4) 尽可能地采用标准的零部件、常规材料并注意它们的通用性,采用特殊材料(特殊性能或特殊规格)时,应注意供应条件、价格和供货时间等。

5) 考虑安装和拆卸、维护和检修方便,以及使用单位的技术水平。对于大型电机,还应注意运输条件。

三、结构设计的一般方法

1) 在初步设计时,选定电机的总体结构型式和所用材料,画出结构草图。

2) 根据电磁计算中所确定的电机有效部分的形状和尺寸,以及与之相关零部件的结构,例如由定、转子铁心的内外径,铁心轴向长度和每叠铁心长则可画出铁心;计算出绕组端部伸长后,在考虑通风系统、绝缘距离的要求、允许的外限和安装尺寸等等,逐步画出机座和端盖等,则构成了电机的总装配图。

3) 根据总装配图绘出部件分装图,即把每个部件(如定子、转子、换向器等)分别画出,具体化某些尺寸,提出配合面的配合等级及公差要求和某些技术要求。

4) 将各部件中各零件(除标准件外)的形状、尺寸进一步具体化,确定所有的加工尺寸和公差、加工精度、表面粗糙度,提出非标准材料的技术要求等,构成了零件加工图。

5) 根据零件图,可能要修改分装图,并相应地要修改总装配图。

6) 进行机械计算。结构零部件中,除某些计算上还存在困难、计算方法不够准确或不够可靠,或仅涉及工艺上要求而不进行机械计算的以外,一般都要核算其机械性能。即电机的零件在运行时(或加工过程中,甚至考虑到运输和安装过程),在可能承受到的各种力的作用下,零件中的应力及其所产生的相应变形的大小,要求它们既不超过所用材料的许用应力,又不致有危害电机准确及可靠运行的变形。

机械计算应按最不利的情况进行。例如计算离心力时,应取零件在运行或制造过程中的最高可能转速;计算几个力同时作用时,应按可能出现的“相加”作用考虑;某一截面上,力的作用比较复杂时,应同时计算所产生的几种应力(如拉、剪切等),然后按材料力学中的强度理论相加;力的作用表面上看来似乎是“分布”,但由于加工、装配等因素有可能成为“集中”时,应按集中载荷来处理等等。计算时,首先确定所有作用力或转矩,并计算各自的数值;其次分析各力对零件的作用(拉伸、压缩、弯曲、扭转等)和零件本身的力学模型(如简支梁、悬臂梁、薄环等),力的作用是集中或分布,以及力是否具有周期性、冲击(动态)性等等。于是,根据“材料力学”或“机械设计”课程中相应的情况进行计算。

还应指出,在经验设计阶段,机械计算常采用安全系数法,即为了方便计算,将零部件的复杂受力情况简单化,动态载荷静态化,周期性载荷采用其平均值等等。为了符合实际情况,则降低许用应力值,即用大于1的安全系数来计及。

在当前计算手段不断更新的条件下,应积极研究采用数值计算方法,解决一些以前未能计算的零件受力和变形,或提高现有某些原来只进行简化计算的构件的机械计算精度。

由于电磁设计尚未进行,本章只能着重讨论电机的总体结构设计的有关问题。

第二节 电机的总体结构设计

一、电机的结构型式

电机的总体结构,如前所述,包括机座的安装型式、轴承的配置、轴及轴伸的型式及数

目、冷却系统、出线盒位置，以及起吊装置等。这些，都是在初步设计或技术条件中必须确定的。

机座的安装型式系指卧式或立式；安装在基础构件（如底板）或直接安装在其相关的机械上；借底脚安装或用凸缘，或是二者兼而有之。另一方面，电机是采用端盖轴承或是座式轴承，或是二者兼之。轴承的数目可以是1个、2个、3个或不用轴承；用滚动轴承或滑动轴承；导轴承、推力轴承的不同布置等等。

由于电机的安装与基础构件、原动机或被驱动配套机械的结构型式有密切关系，例如大型水轮发电机的机坑，中大型机组的公共底板，机组的耦合形式等等，在电机的总体设计中均应予以考虑。为了便于制造和安装使用，国家标准GB997—81“电机结构及安装型式代号”和国际电工委员会出版物IEC34—7旋转电机第七部分“结构及安装型式代号”，对电机的安装型式进行了详细的分类及统一的规定。其代号由国际(International)及安装(Mounting)的第一个字母IM连同4位阿拉伯数字组成。第1位数字表示结构型式，共分为1~9类，如表1-1所列。第2、3位数字表示安装的具体型式。第4位数字表示轴伸型式，也分为9类，如表1-2所示。

表1-1 结构型式分类

第一位数字	结 构 型 式 说 明
1	具有端盖式轴承用底脚安装的电机
2	具有端盖式轴承用底脚和凸缘安装的电机
3	具有端盖式轴承，其中1个端盖带凸缘，用凸缘安装的电机
4	具有端盖式轴承，机座带凸缘，用凸缘安装的电机
5	无轴承电机
6	具有端盖式轴承和座式轴承的电机
7	具有座式轴承的电机（无端盖）
8	除上述1~4以外的立式电机
9	特殊安装的电机

表1-2 轴伸型式分类

第四位数字	轴 伸 型 式
0	无轴伸
1	有1个圆柱形轴伸
2	有2个圆柱形轴伸
3	有1个圆锥形轴伸
4	有2个圆锥形轴伸
5	有1个带凸缘的轴伸
6	有2个带凸缘的轴伸
7	传动端有带凸缘的轴伸，在非传动端有圆柱形轴伸
8	所有其他类型的轴伸

例如：IM1001，表示具有2个端盖式轴承带底脚安装的电机，卧式安装，1个圆柱形轴伸，如图1-1所示；IM2011表示具有2个端盖式轴承，用底脚和凸缘安装的电机，带有通孔的凸缘在1个端盖上，立式安装，1个圆柱形轴伸，如图1-2所示；而IM7211则表示具有2个座式轴承，带底脚无端盖的电机，有整块底板，卧式安装，1个圆柱形轴伸，如图1-3所示。以IM1~IM9表示的各类电机的安装型式，可参阅文献[1-1,1-2]。

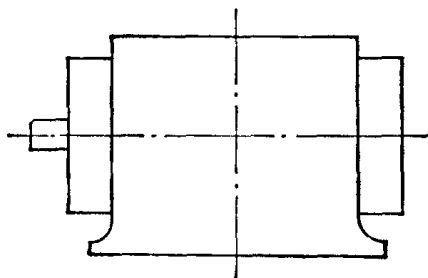


图1-1 IM1001

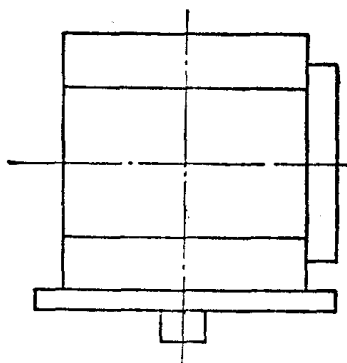


图1-2 IM2011

对于具有2个端盖式轴承的电机，通常又分为两大类，即卧式安装电机和立式安装电机，代号分别为B和V，另加1位或2位数字，如IMB3、IMV16等等。对于中小型电机，目前多用这种代号表示。

标准电动机的出线盒或引线装置，设置在从传动端看去的右侧，如有特殊需要才安放在左侧。对于需要任意方向引线的电机，出线盒则安放在电机顶部。这些，都要根据用户需要，在技术条件或供货合同中予以说明，以便在电机总体结构设计中考虑。

电机轴伸是传递转矩及与其他机械连接中相配合的部位，其公称尺寸及偏差均应符合GB756—79“电机圆柱形轴伸”或GB757—79“电机圆锥形轴伸”的规定，其型式如图1-4所示。

二、电机的防护型式

广义地说来，电机的防护含有两方面的内容。一方面是防止各种环境因素对电机运行性能和使用寿命的影响；另一方面，是防止电机的行为对环境的污染，包括对人身安全的威胁。本节主要介绍在结构设计中，如何考虑选用电机外壳防护型式。

根据GB4942.1—85“电机外壳防护分类”，以及IEC相应的文件，电机外壳的防护型式可分为两大类。第一类是防止固体异物进入电机内部及防止人体触及电机内部带电或运动部分的防护，共分为7个等级，如表1-3所列。第二类是防止水进入电机内部达到有害程度的防护，分为9级，如表1-4所示。

电机外壳的防护等级，用国际(International)和防护(Protecting)的第一个字母IP连同2位数字组成的代号表示，其中第1位数字代表第一种防护型式，即外壳防异物侵入和防尘

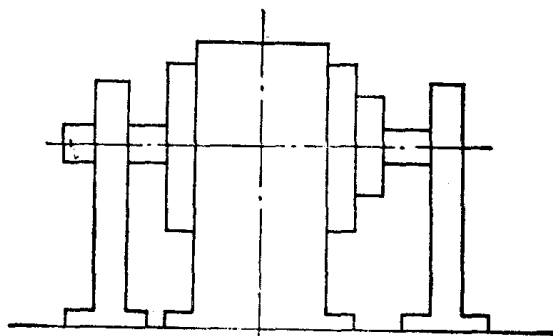


图1-3 IM7211

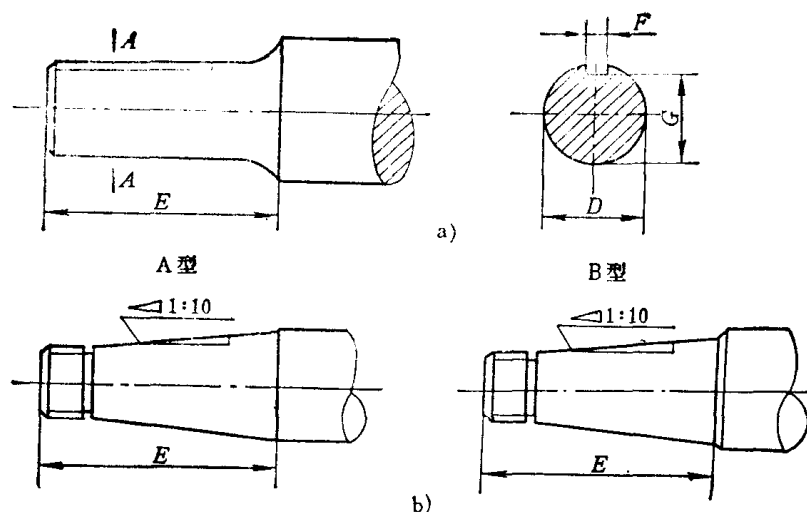


图1-4 轴伸型式

a) 圆柱形轴伸 b) 圆锥形轴伸

表1-3 外壳防异物和防尘等级

防护等级	简 称	定 义
0	无防护	没有专门的防护
1	防护大于 $\phi 50\text{mm}$ 的固体	能防止直径大于 $\phi 50\text{mm}$ 的固体异物进入壳内,能防止人体的某一大面积部分(如手)偶然或意外地触及壳内带电或运动部分,但不能防止有意识地接近这些部分
2	防护大于 $\phi 12\text{mm}$ 的固体	能防止直径大于 $\phi 12\text{mm}$ 的固体物进入壳内,能防止手指触及壳内带电或运动部分
3	防护大于 $\phi 2.5\text{mm}$ 的固体	能防止直径大于 $\phi 2.5\text{mm}$ 的固体异物进入壳内,能防止厚度(或直径)大于 $\phi 2.5\text{mm}$ 的工具、金属线等触及壳内带电或运动部分
4	防止大于 $\phi 1\text{mm}$ 的固体	能防止直径大于 $\phi 1\text{mm}$ 的固体异物进入壳内,能防止厚度(或直径)大于 $\phi 1\text{mm}$ 的工具、金属线等触及壳内带电或运动部分
5	防尘	能防止灰尘进入达到影响产品正常运行的程度。完全防止触及壳内带电或运动部分
6	尘密	完全防止灰尘进入壳内。完全防止触及壳内带电或运动部分

表1-4 外壳防水等级

防护等级	简 称	定 义
0	无防护	没有专门的防护
1	防滴	垂直的滴水应不能直接进入电机内部
2	15°防滴	与铅垂线成15°角范围内滴水应不能直接进入电机内部
3	防淋水	与铅垂线成60°角范围内淋水应不能直接进入电机内部
4	防溅	任何方向的溅水对电机应无有害影响
5	防喷水	任何方向喷水对电机应无有害影响
6	防海浪或强力喷水	猛烈的海浪或强力喷水对电机应无有害影响
7	浸水	产品在规定的压力和时间下浸在水中,进水量应无有害影响
8	潜水	产品在规定的压力下长时间浸在水中,进水量应无有害影响

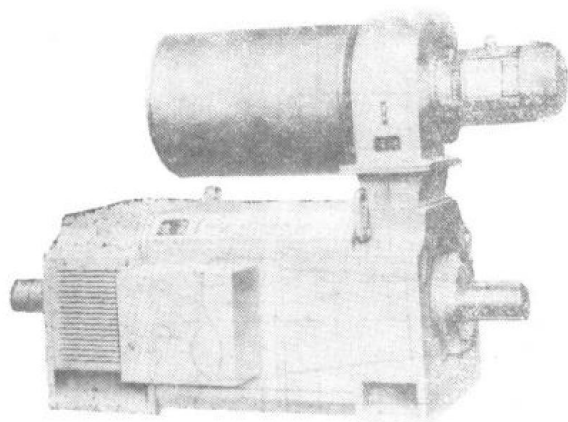


图1-5 小型直流电机

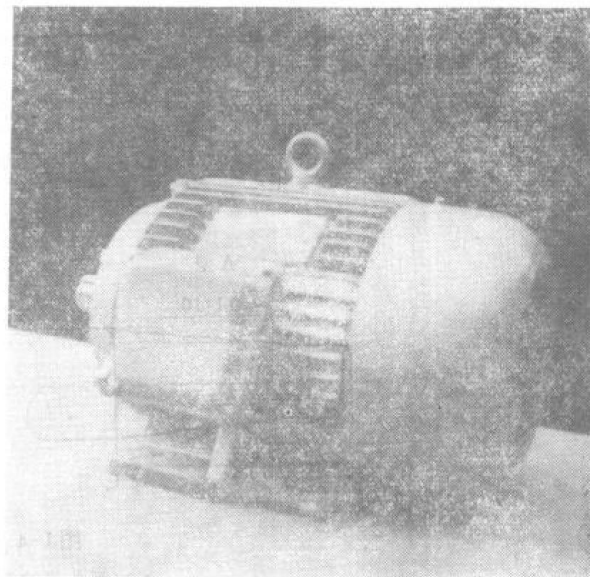


图1-6 Y系列IP44感应电动机

的等级；第2位数字代表外壳防水的等级。例如IP23，其中2——代表能防止大于 $\phi 12\text{mm}$ 的固体进入或人的手指触及机壳内的带电或运动部分，3——表示机壳能防淋水，即通常所说的防护式电机，如中型感应电机的JS、JR系列，小型感应电机Y系列中心高160mm以上的IP23部分规格，以及直流电机的Z₂、Z₄系列等等。这种电机只能用于室内及尘埃、金属屑粒较少的场合，其典型结构如图1-5所示。

又如IP44的防护型式，则表示能防止直径大于 $\phi 1\text{mm}$ 的固体进入电机内部；同时，任何方向的溅水对电机内部都不造成有害的影响，即通常所说的封闭式电机，如Y系列小型三相感应电动机，其典型结构如图1-6所示。

在不同环境中使用的电机，要求不同的防护型式，原则上可以这样来选择其防护等级：

防固体1~3级主要是考虑人身的安全和小工具的可能偶然落入，使用场所一般应较为清洁，粉尘少和没有导电粉尘。4级能完全防止人体触及壳内的带电部分，适用于粉尘较多的场所。5级外壳虽未达到气密的程度，但密封性已相当良好，适用于具有导电、易燃、易爆、有腐蚀性或硬质粉尘的场所，对腐蚀性气体也有一定的防护能力。对于纤维粉尘较多的场所，往往由于粉尘积聚于外壳表面或堵塞通风道，影响电机的正常运行，但这只能从根本上解决环境清洁问题，而难以从电机外壳的防护来妥善解决。

防水1、2级适用于有滴水的场所，如果滴水密集或滴水与铅垂线夹角超过 15° ，应选用3级。若还有溅水，则宜选用4级。5级能承受一定压力水柱短时期的冲淋，它连同6级，大都适用于船舶甲板上的电机，它们能承受不同程度海浪的飞溅或冲击。7级和8级适用于浸没或潜于水中运行的电机，目前尚未普遍使用。

另一种气候防护式电机IPW，其壳内空气通道要作3个 90° 的转折，借以降低气流速度，使雨、雪、砂尘或气载杂物沉积在一定的地点，以减少其对电机安全运行的影响，很适用于户外的中型电机。

选用防护型式时应考虑经济性和合理性，防止等级选得越高越好的偏向。封闭式电机比开启式的多耗费有效材料，体积也较大。例如Y系列中心高(160~280)mm的6个机座号，

2极和4极19个规格的电机, IP23比IP44的用铜量平均少34.16%, 用铁量少24.2%, 且由于同机座号的输出功率平均提高两级, 因此相应地节约包装运输费用, 减少安装面积等[13]。

三、电机的冷却系统通论

目前, 除了大型汽轮发电机和少数水轮发电机用氢和水, 或超导电机用液氮或液氦作为电机的初级冷却介质以及个别特殊情况采用其它冷却介质(如油)外, 绝大多数电机的初级冷却介质仍为空气。因此, 本节所述电机的冷却系统亦即为电机的通风冷却系统。

所谓初级冷却介质是从电机的有效部分首先接收热量的冷却介质; 而次级冷却介质是温度比初级冷却介质低的一种冷却介质, 它通过冷却器将初级冷却介质的热量带走。

电机的结构及防护型式与其冷却系统有着密切的关系。因此, 将从这方面来论述通风系统的选择及相应的总体结构设计方面的问题。至于电机内部具体的风路结构, 风路特性计算, 风压元件设计等问题, 将在第六章详细论述。总的说来, 冷却介质的循环方式, 分为开路冷却和闭路循环冷却。开路冷却的冷却介质取自电机的周围, 通过电机后仍返回到电机周围, 中小型电机一般采用这种冷却系统; 闭路循环冷却的初级冷却介质通过电机, 必要时通过冷却器构成闭合循环, 热量由初级冷却介质经过构件或冷却器传递给次级冷却介质, 大型电机或使用环境十分恶劣的电机多采用此种冷却系统。

采用不同冷却介质的冷却方式, 对于电机外壳的结构型式, 主要是冷却介质的进出口管(孔)的布置, 冷却器的型式及安装部位等等, 有相应的变化。冷却介质循环回路的安置方式, 有下列10种, 如图1-7 a ~ j 所示。

(1) 自由循环方式 冷却介质由周围自由地流入电机或流过电机表面, 并自由地返回, 如一般开启式和防护式电机, 其示意图如图1-7 a。

(2) 进口管或进口孔道循环方式 冷却介质由电机周围介质以外的来源, 通过进口管或孔道流入电机, 然后自由地流入周围环境, 如图1-7 b 所示。这类电机用于使用环境粉尘较多的场合, 其进风管道自室外引入较清洁的空气, 以免电机内部积尘过多, 影响电机的电气性能和冷却效果。

(3) 出口管或出口孔道循环 冷却介质由周围自由地流入电机, 然后通过出口管或孔道送至远离电机的地方, 如图1-7 c, 主要是避免被电机加热后的空气影响工作环境。

(4) 进出口管或孔道循环 这种电机的外壳除进出口管孔外, 都要求是封闭的, 如图1-7 d 所示。

(5) 机壳表面冷却 初级冷却介质在闭合回路内循环, 并通过机壳表面把热量传递给周围介质。对于小功率电机, 机壳表面可以是光滑的; 对于中小型电机, 为了增加散热面, 加强冷却效果, 通常在机座上, 甚至在端盖上都加了冷却筋(翅), 其防护型式一般为IP44。最典型的如小功率三相和单相感应电动机AO2、BO2、CO2、DO2系列, 及Y系列中小型三相感应电动机的冷却系统, 其结构示意如图1-7 e。

(6) 装入式(管道)冷却器 初级冷却介质在电机内部通过装在机壳内的冷却器, 一般是与电机构成一体的冷却管, 构成闭合循环回路, 由冷却管将热量传给次级冷却介质, 后者是电机周围的环境介质(空气), 如图1-7 f 所示。在我国, 防护等级为IP44的中型感应电动机中采用过这种冷却系统与结构型式。

(7) 装在电机上面的冷却器 多用于箱式结构的电机, 冷却器型式很多, 可在户外安

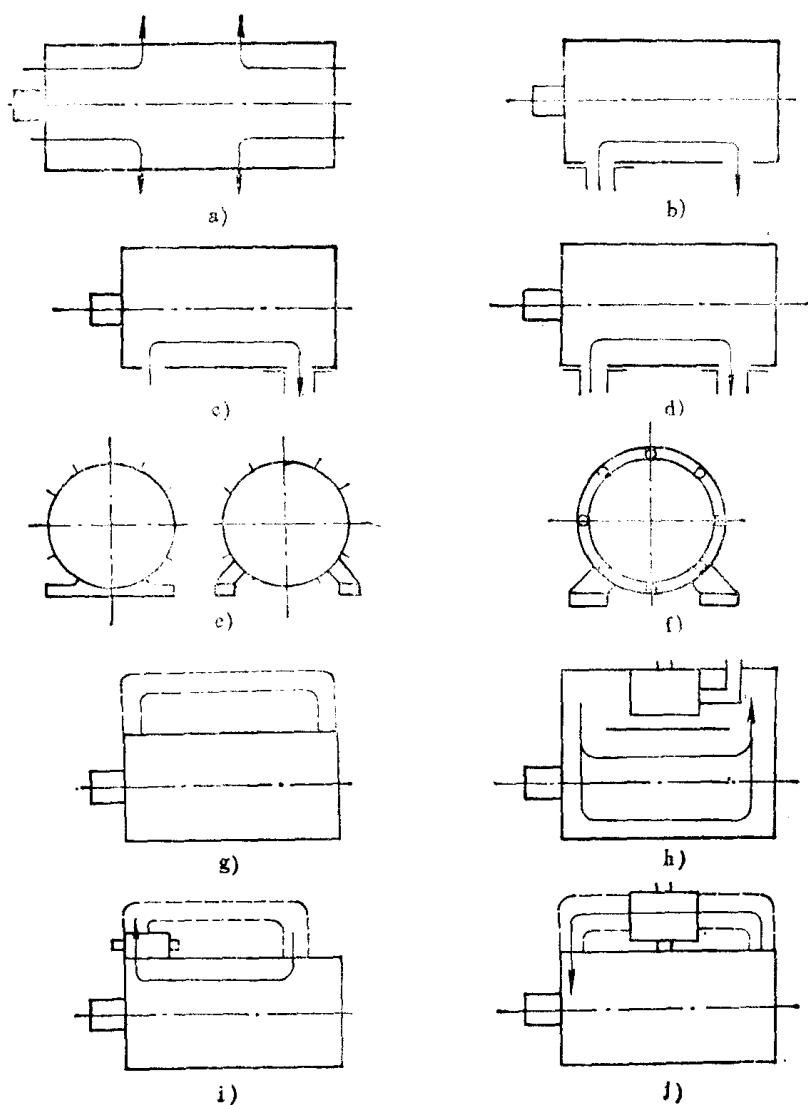


图1-7 电机冷却系统循环方式示意图

装，成为气候防护型(IPW)电机，如图1-7 g。

(8) 装入电机内不用周围环境介质冷却的冷却器 如图1-7 h 所示。

(9) 装在电机上面不用周围环境介质冷却的冷却器 如图1-7 i 所示。

(10) 独立安装的冷却器 初级冷却介质在闭合回路内循环，并通过独立安装的冷却器，把热量交给次级冷却介质，如图1-7 j。大型电机，例如大型水轮发电机，都采用这种冷却系统。冷却器对称地分布在机坑内，以冷却水作为次级冷却介质。

上述10种冷却介质循环回路的布置方式中，除第一种外，电机的外壳都要求是封闭的。

GB1993—80“电机的冷却方法”中规定，以国际(International)和冷却(Cooling)的第一个字母IC，加上2位数字来表示电机的冷却方法。第1位数字0~9，表示上述冷却介质循环回路的各种布置方式，第2位数字0~9表示冷却介质循环所需动力的提供方式。例如IC01表示自冷开启式，风扇装在轴上；IC11表示有进口管的自通风电机，风扇装在轴上，等等。