

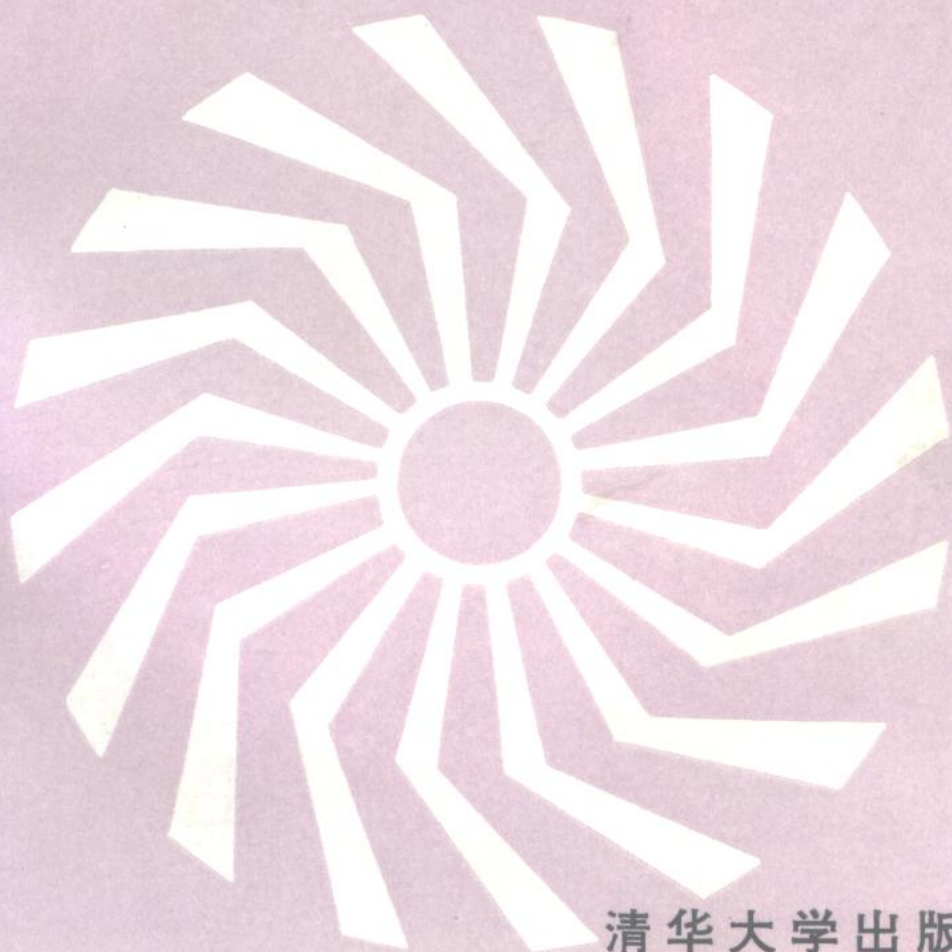
DIAN JI SHE JI

李隆年 王宝玲 周汝潢 编著



电机设计

DIAN JI SHE JI



清华大学出版社

电机设计

李隆年 王宝玲 周汝潢 编著

清华大学出版社

内 容 摘 要

本书为我校电机设计课数十年教学实践之总结。概念分析透彻。理论联系实际。精选传统理论内容的同时加强了计算机应用的基础理论部分。

本书共分电磁、机械、计算机三大部分。

一、电磁设计。结合电机原理,联系生产实际,深入浅出地着重于概念的透彻分析,讲解了多种电机的电磁设计问题。并介绍了大电机新换位方式、单相电机椭圆磁场长轴空间最佳位置、热管冷却等新技术。

二、结构设计、机械计算。凸极电机转子及隐极电机转子主要部件的应力与变形计算;热套配合部件的设计。转轴的回转振动及扭振的固有频率的计算。机座振动的特点。由振动引起的噪声的分析与控制。

三、计算机辅助设计及优化。自动开槽、自动选线程序及校核程序的编制。单机优化与系列电机多目标函数优化的区别。计算机辅助制图基本程序介绍。

本书适用于作为大、专院校电机工程专业教学用书。也可作为有关生产、科研技术人员的重要参考书。

(京)新登字 158 号

电 机 设 计

李隆年 王宝玲 周汝潢 编著

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

中国科学院印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 24 字数: 566 千字

1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

印数: 0001—6000

ISBN 7-302-01022-6/TM·12

定价: 7.75 元

前 言

本书为清华大学电机设计、电机强度、计算机辅助电机设计三门课程多年教学实践及教材建设之总结。

在传统的电磁设计部分,本书以三相异步电动机为重点。从电机原理的基本概念出发分析电机设计的实际问题,在重点部分讲深、讲透、讲活;使同学在掌握电机设计的基本规律的同时提高学习、思考、分析问题的能力,而不是简单的积累知识。对异步机以外的其它类型电机只讲其设计特点、特殊问题;并重点介绍该领域先进技术、措施。著者力争处理好重点深入与全面普及的关系,作到既突出系统理论分析又避免了繁琐重复。

在电机强度设计部分,本书从材料力学基本概念出发,应用弹性力学理论分析大型电机主要部件典型结构的强度、刚度问题;对振动及扭振问题也作了充分的论述。将经典的力学概念与电机实际结构有机地融合起来。

在计算机辅助电机设计部分,重点对各种实用的优化方法作详尽的论述及对比,指明其适用的工程问题及函数方程。系统讲述了计算机辅助制图理论,着重论述了制图程序软件编制及调试的理论问题。这部分是电机设计教材中的新内容。

全书共二十四章,第一章绪论;第二章至第十五章主要以三相异步电动机为主线,叙述电磁设计的共同部分,然后分别介绍汽轮发电机、水轮发电机、直流电机、永磁电机、单相异步电动机、变压器等各种电机的设计特点,并介绍新技术在这些机组中的应用,如水轮发电机定子绕组换位方式的分析;单相电机椭圆磁场长轴空间最佳位置的确定及其节能效果;热管冷却在电机中的应用等。还专设第十九章介绍了常用的导磁、导电及绝缘材料。

第十六章至十八章以及第二十、二十一章为机械计算部分。主要针对大机组转子结构叙述了圆环、圆盘、厚壁筒在旋转离心力作用下的应力与变形;轴的回转及扭振的固有频率问题,机座振动特点;噪声分析及控制;热套配合件在电机结构中的应用。

第二十二至第二十四章介绍了校核程序的编制;自动开槽、自动选线程序的编制;不同优化方法的分析与比较,单机优化与系列电机多目标函数优化方法的区别;计算机辅助制图基本程序介绍。

本书第十九、二十章为周汝潢副教授编写。第二十二、二十三、二十四章为王宝玲副教授编写。其余各章为李隆年副教授编写。在编写过程中,胡元德副教授为噪声分析一章提供了充分的资料。北京重型电机厂设计处为中型异步电动机设计及优化提供了宝贵的资料。哈尔滨电机厂设计处,大电机研究所对大型机组的设计及结构提供了丰富的资料。作者在此表示感谢。

本书适用于作为高等工科院校及大专院校电机工程专业的教材,也可作为有关生产、科研技术人员的重要参考书。

作者 1991.12

目 录

第一章 绪论	1
第一节 电机生产在国民经济发展中的作用.....	1
第二节 电机设计工作涉及的范围.....	2
第三节 标准化、系列化、通用化在电机设计中的重要性.....	4
第四节 电机设计课的学习方法.....	4
第二章 异步电动机主要尺寸的确定	7
第一节 三相交流异步电动机主要尺寸与电机容量的关系.....	7
第二节 电机的几何相似定律.....	9
第三节 主要尺寸的合理选择.....	12
第三章 异步电动机定、转子槽数、槽形的选择及气隙的确定	16
第一节 定子槽数、槽形的确定.....	16
第二节 转子槽数的确定.....	17
第三节 转子槽形的确定.....	23
第四节 气隙的选择.....	24
第四章 异步电动机磁路计算	25
第一节 概述.....	25
第二节 异步电机主磁通的确定.....	26
第三节 气隙磁通密度及气隙安匝计算.....	27
第四节 齿部磁密及安匝计算.....	30
第五节 轭部磁密及安匝计算.....	33
第六节 异步机磁化电流及激磁电抗.....	34
第五章 电机参数的计算	37
第一节 概述.....	37
第二节 定子绕组的电阻值.....	38
第三节 定子绕组的漏电抗.....	41
第四节 异步电机转子电阻、漏电抗的计算.....	45
第六章 电机的损耗及性能计算	48
第一节 概述.....	48
第二节 中小型异步电动机定转子铜损耗的计算, 定转子额定电流的确定.....	49
第三节 定子铁损耗、基本铁耗、表面损耗、脉振损耗.....	51
第四节 异步电机负载时的附加损耗.....	52
第五节 空载附加损耗.....	54
第六节 异步电机的挤流效应及其所引起的转子电阻的增加和转子漏电抗的	

减小	54
第七节 异步机漏磁路的饱和引起定、转子漏抗的减小	57
第八节 异步机起动电流和起动转矩的计算	59
第九节 异步机功率因数,转差率,最大转矩倍数的确定	60
第七章 异步电动机特殊型式绕组	62
第一节 三相正弦绕组	62
第二节 单绕组多速异步电动机绕组	69
第三节 双鼠笼电机转子的设计	77
第八章 单相异步电动机的设计	81
第一节 单相电机正弦绕组	81
第二节 单相电机运行性能分析计算	83
第三节 单相电容电动机最佳匝比以及电容量的确定	88
第四节 单相电机起动计算	89
第五节 单相电机的调速	91
第六节 单相电机设计的特殊问题	94
第九章 汽轮发电机设计	97
第一节 主要尺寸及气隙的确定	97
第二节 定、转子槽数槽形的确定	98
第三节 定子绕组股线的换位方式	101
第四节 激磁绕组的设计	106
第五节 转子漏磁通与电机空载特性计算	108
第六节 参数及性能计算	109
第七节 大型汽轮发电机设计特点	113
第十章 凸极同步电机设计	115
第一节 磁极形状的确定	115
第二节 阻尼绕组的计算	116
第三节 大型水轮发电机设计特点	122
第四节 蓄能机组的设计	124
第五节 贯流式水轮发电机	125
第十一章 直流电机设计	126
第一节 主要尺寸的确定	126
第二节 直流电机气隙的选择	127
第三节 极数的选择	128
第四节 直流电机电枢绕组,激磁绕组,换向极绕组的设计	129
第五节 补偿绕组及均压线的设计	132
第十二章 永磁电机设计特点	135
第一节 概述	135
第二节 永久磁钢工作原理及性能稳定措施	135

第三节	磁钢工作及性能指标	137
第四节	永磁电机的特殊问题	139
第十三章	变压器设计	141
第一节	变压器的主要尺寸	141
第二节	变压器漏电抗计算	143
第三节	变压器绕组	147
第四节	变压器的冷却方式	152
第十四章	电机发热计算	154
第一节	均匀物体的发热	154
第二节	热量的传导及绝缘层温度降落	154
第三节	对流散热及表面温差	156
第四节	热计算简化等值公式	156
第五节	水冷电机温升的计算	160
第六节	热管冷却方式	164
第十五章	通风计算	165
第一节	电机的通风方式	165
第二节	总风量的确定及风路风阻计算	167
第三节	离心式风扇的计算	170
第十六章	能量法求反力及变形——凸极电机转子应力分析	173
第一节	强度和变形的设计要求	173
第二节	杆件拉伸、扭转、弯曲的应变能	173
第三节	弹性体广义的应变能表达式	178
第四节	卡氏定理	180
第五节	静不定问题	181
第六节	圆环受径向集中力系作用时的计算	182
第七节	带辐条的转子的静不定计算	185
第八节	圆环受周向均布转动力矩作用	188
第十七章	厚壁筒及圆盘——汽轮发电机转子应力分析	190
第一节	概述	190
第二节	回转等厚圆盘或厚壁筒的应力和变形	190
第三节	内缘表面受均布压力时的圆盘或厚壁筒的应力和变形	195
第四节	外缘表面受均布压力时的圆盘或厚壁筒的应力和变形	196
第五节	旋转圆盘的热套配合计算	197
第十八章	轴的回转运动的基本性质	202
第一节	轴的回转的力学性质	202
第二节	竖直轴回转运动的临界转速	203
第三节	扭转振动的发生及性质	204
第四节	高阶临界转速的概念	207

第五节	机座振动的概念	208
第六节	单边磁拉力作用下的轴的挠度及临界转速	209
第十九章	电机常用的材料	211
第一节	导磁材料	211
第二节	导电材料	216
第三节	绝缘材料	222
第二十章	异步电动机的结构特点	236
第一节	中小型异步电动机的典型结构	236
第二节	轴向尺寸公差的作用及尺寸链	238
第三节	大型异步电动机的几个结构问题	240
第二十一章	电机的噪声及其控制	242
第一节	概述	242
第二节	声音的物理概念及量度	242
第三节	噪声的评价	244
第四节	电机振动源及噪声源	245
第五节	电磁噪声及其控制	249
第六节	通风噪声及其控制	252
第七节	电机机械噪声及其控制	254
第二十二章	计算机辅助电机电磁设计	256
第一节	概述	256
第二节	三相异步电动机电磁设计校核程序	261
第三节	自动开槽程序	279
第四节	循环计算	288
第二十三章	优化设计	292
第一节	优化的基础知识	292
第二节	优化方法简介	306
第三节	电机的优化设计	341
第二十四章	计算机辅助图形设计	349
第一节	概述	349
第二节	绘图程序设计	352
第三节	几何变换与交互式绘图的基本概念	365
习题		371
参考书		374

第一章 绪 论

第一节 电机生产在国民经济发展中的作用

社会生产的不断发展,人民生活的不断提高,需要不断的开发新型电机。一个国家工农业生产的发展速度要求电力工业的发展速度与其相适应。电力工业发展速度要高于工业发展速度 20% 左右。也就是说一个国家工业年增长率为 8% 则电力工业增长率应为 9.6%。电力工业的发展对发电机制造行业不断地提出新要求。单机容量越来越大。我国汽轮发电机组容量从 2.5 万、5 万、10 万、20 万、30 万 kW, 现在已达到 60 万 kW 的大机组,以满足火力发电厂的装机要求;水轮发电机组容量由 1 万、5 万、10 万、20 万 kW, 现已达到 30 万 kW 的大机组,以满足水力发电厂的装机要求。由于大机组效率高,单位容量的制造成本低,电厂总容量相同时,采用大机组减少了运行维护人员,所以当前发电设备容量越来越大。国际上由于核电站的出现,汽轮发电机组单机容量已达到 100 万、150 万 kW;水轮发电机单机容量也达到了 70 万~80 万 kW。由以上数据可看出,我国发电设备制造行业技术水平相当于国际上 70 年代末期水平。

电动机作为所有机械设备的动力元件,其容量从 1kW 到 1 万 kW。每分钟转速从 3000 转到几百转。主要型式分为同步电动机、异步电动机与直流电动机三种,分别应用于不同的场合,直流电动机调速方便,多用于速度大范围变化的场合,如直流轧钢电动机等。同步电动机转速恒定,功率因数高,主要用于大中型机械设备(如风机、水泵、磨粉机等)。异步电动机可分为鼠笼式及线绕式两种。鼠笼式应用最广泛,可适用于所有的机械设备,(如机床、风机、水泵等),其特点为造价低,运行可靠,维护简单。线绕式电机调速方便,主要用于吊车、提升装置的拖动。

家用电器的发展对电机生产的要求主要是单相电机。如电风扇、空调装置、洗衣机、电冰箱等都采用单相电动机拖动。电动缝纫机、吸尘器、炊事用多功能切削机等采用单相交流串激整流子电机。电动玩具、美容用吹风机、声像设备的走带装置多采用永磁直流电动机。预计家用电动工具类产品如电钻、电砂轮等很快也将进入家庭消费范畴。

随着科学技术的发展,新技术新材料的不断涌现,促进了电机制造行业产品的不断翻新。例如由于超导材料临界温度的不断提高,使超导电机对制冷系统的要求逐渐降低,这就使大容量超导发电机、电动机的实验研究及工业应用可以更高的速度发展。由于变频技术的不断完善及大容量可控硅元件制造成本的降低,使电力电子技术迅速发展,各种变频调速节能装置不断翻新。电动机—变频装置—控制设备一体化的装置正在发展。稀土族钕铁硼永磁材料的研究使高磁能积磁钢的生产及应用成为现实,促进了大容量交直流永磁电机的研究及制造。当然新型绝缘材料的应用,低损耗高导磁冷轧硅钢片的研究及制造,冷却方法的改进都在不断促进电机制造行业的发展。

除以上的常规电机之外,在特殊的工业和科研领域还将对电机性能提出特殊的要求,

如科研用离心机上要求制造每分钟10万转以上的高频高速电动机。大规模集成电路光刻系统驱动装置要求高精度小步长(每步长仅为几个微米)的步进电机,跟踪系统中的雷达驱动装置要求一天转一转的力矩电机。医疗器械、军事科学,智能机器人的研究都会对驱动电机的性能提出特殊的要求,这肯定会使电机制造行业不断地发展前进。

第二节 电机设计工作涉及的范围

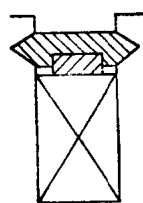
电机设计任务的来源有两个,一个是国家指令性计划下达的任务另一个是厂方与用户签订的合同,都会明确地确定两方面的问题:首先是主要的技术指标。对异步电动机而言主要指标也就是该产品的国家标准,内容包括效率、功率因数、起动力矩倍数、起动电流倍数、最大转矩倍数、温升。必须满足上列六项指标的规定性能才是合格产品,否则就是废品。其次是经济指标,也就是产品的销售价格。设计工作者的任务就是在保证产品技术性能指标的前提下尽可能降低成本,以获得较大的经济效益。我们统称这两项指标为技术经济指标。具体工作步骤如下。

一、电磁设计

这一阶段的任务就是按照电磁设计程序确定一个合理的电磁方案,可以是人工择优的方案,也可以是计算机优化设计结果所提供的方案,这个方案应该是满足技术性能国家标准的,成本最低的方案。方案中应全部确定了定子铁心、转子铁心、定子线圈、转子绕组的有关材料、规格、几何尺寸。如定子铁心硅钢片牌号、铁心外径、铁心内径、定子槽型尺寸及槽数、定子槽绝缘规范、定子线圈匝数及绝缘导线规格、定子铁心长、定子铁心径向通风沟数等。在这个阶段还应包括电机的温升计算以校核额定状态下运行的稳定温升是否满足国家标准的规定。

二、结构设计

这一阶段主要是确定电机通风冷却方式的具体结构,定、转子绕组的槽部及端部固定结构,定转子线圈的绝缘结构,轴承润滑方式的具体结构。例如在通风结构方面是轴向通风还是径向通风;是采用桨式风扇还是离心式风扇;冷却方式是外部表面冷却还是冷却介质进入定、转子线圈铜线内腔进行内部冷却。



(a)

(b)

图 1-1

定转子线圈端部及槽部的固定方式。定子线圈端部可以是绑线绑环固定方式,也可以是压板固定,或环氧整体固化方式。槽部固定可以是线圈与铁心整体浸漆烘干以达固定目的;也可在定子槽内放置波纹板利用其弹性进行固定,也可以采用组合槽楔进行固定。组合槽楔示意图如图1-1,其在槽中位置如图1-1(a)所示,分固定块与滑动块两部分。固定块固定于定子铁心槽部,不可能有沿槽高方向的移动。固定块与滑动块的接触面是一个斜面。滑动块如图1-1(b)所示为一个斜楔,打紧滑动块则可逐渐将定子线圈压紧在槽中。转子线圈

端部可用护环固定,也可用无纬玻璃丝带绑扎后环氧固化。所有固定方式均应经过强度校核。对定子线圈要考虑承受突然短路时的瞬态电动力的冲击,对转子线圈要承受超速状态时离心力的负荷。

绝缘结构主要是确定绝缘材料及其尺寸如多股并联换位线圈的股间绝缘、排间绝缘、对地绝缘。高压防电晕措施中含铁粉石棉带及半导体漆的选用,其考虑指标为耐电压试验及防电晕试验。

所有轴承结构,如滚动轴承、滑动轴承、推力轴承等等,均应通过散热及寿命核算。

重要的结构部件如机座、端盖、转轴、转子支架、转子铁心,应进行结构设计及强度校核。对轴及机座应进行固有频率的计算以避开 100Hz 电磁力及离心力的干扰频率,防止回转及扭转共振现象的发生。

综上所述结构设计实际上主要是电机结构的强度计算。

三、施工设计

施工设计的任务是出图,就是画出全部零件的加工图纸、部件装配图和总装图。这些图纸是库房为生产准备原材料的依据;是工、夹、模具设计的依据;是工人加工零件的标准也是质量检查的标准。施工设计这部分的工作量随容量及品种的不同相差非常悬殊,大型电机全套施工图纸可近上千张,小型电机只有 20 多张。

四、工、夹、模、量具的设计

电机制造过程中涉及到的加工方法非常广泛。很多加工方法都需用特殊的模具,如铁心冲剪时需要设计冲模;铸铁机座制造时需用木模;转子铸铝时需用金属压铸模;线圈绕线时需用绕线模;多个定位钻孔加工时用钻胎;高压电机粉云母绝缘带加温固化时要用热压成型模;关键尺寸的检验工具——量规;保证定子机座两端止口同心度的特殊夹具;转子铸铝时所用的假轴,以上这些都是电机生产过程中为保证质量,提高生产效率所必需的专用工具、夹具、模具、量具,都应进行单独设计,并绘制全部加工图纸。

五、工艺设计

对每一工件来讲,都要经过不只一道加工工序才能完成零件图纸所需的加工要求。例如一根轴要经过下料、打顶尖孔、粗车、精车、铣键槽、磨轴颈(与轴承配合的地方)。这些工序的加工顺序、加工方法、两道工序间应留的加工裕量、哪些工序之后应安排什么尺寸的检验,这些都应有一个合理的安排。这个工作就叫确定零部件的工艺流程路线,也就是工艺设计的主要内容。工艺设计不合理,零件质量就不易保证。例如一根轴,若先铣键槽再精车,精车时高速旋转的转轴上有键槽,车刀与工件不再是连续切削而是断续切削,工件表面光洁度就无法保证,而且容易打刀——也就是工件的撞击将刀具打坏。所以这不是一个合理的方案,应该采用先精车,后铣键槽的方案。

在本书中以讲述电磁设计为主,计算机辅助设计及电机优化设计也都是指电磁设计的问题。对电机主要部件的结构方式、强度、振动及其计算方法也加以较详细的讨论,对施工设计、工、夹、模、量具的设计以及工艺设计基本上不进行讨论。

第三节 标准化、系列化、通用化 在电机设计中的重要性

大批量生产便于机械化自动化,提高劳动生产率、降低产品成本。如单个螺钉的制造一般采用车床挑扣的方法或用板牙套扣的方法,速度慢,且质量不易保证,大批生产时,则用滚丝机制造速度提高几百倍。所以设计时,螺钉、螺母均采用国家标准产品,称其为标准件。在电机中常见的还有滚动轴承、定子线圈用标准绝缘铜线等。

在电机制造中更普遍的是系列化、通用化的问题,也可以看做是企业内部标准件问题,如电机铁心冲模在电机全部工模具中价值最高,生产周期最长,单槽冲模约几百元至几千元,复式冲模为几千元至几万元,高速冲功模为几十万元一套。这就提出了在不同容量、不同转速、不同规格品种的电机中有没有可能应用同一种类型的冲片,即使用同一个冲模可以生产多种产品,这就要求在电机设计中要考虑系列化,冲片要有通用性。首先,电机外径不能任意选择。应选择用1m宽的硅钢片裁剪出几个整圆硅钢片后,没有浪费的条料,我们称为提高套裁率的问题。如直径245mm就可在1m宽的料上裁出4个整圆来,每个冲片留有5mm的冲剪裕量。230mm的外径不应被选用,它的选用会剩下一个60mm的条料无法利用。外径245mm的冲片可以制造2极、4极、6极、8极电机,冲片内径可以不一样,铁心轴向长度也可不同,这些电机的机座、端盖、轴、轴承、轴承盖、外风扇、风罩等都有可能通用,这就极大地减少了结构部件的品种规格。同一个极数的电机,容量相近的两、三个规格可以采用同一个铁心冲片,只调整铁心长度就可以设计制造出不同容量的电机,这就减少了冲模的套数。有些个别极数的电机制造台数有限时,还可考虑不同极数、不同容量电机通用同一种冲片,这就提高了冲模的通用性。如有些6极电机批量很小,可利用外径相同的4极电机冲片进行制造。这样作减少了模具制造费用,缩短了生产周期。虽然材料利用不尽合理,但总体上是经济的。还应考虑到模具和冲片类型的增加会增加模具库房与半成品库房的面积,增加管理的复杂性和差错的可能性,这都导致管理成本的增加。中、小型电机产品系列化(即产品容量等级规格化)、部件通用化、零件标准化,安装尺寸标准化,使国内外同规格电机具有互换性,利于用户维修更新。

安装尺寸标准化主要指中心高、地角螺钉的纵、横向间距,轴伸直径,键槽规格,轴伸的长度等的标准化。安装尺寸标准化使用户选择不同厂家产品时,设备安装的混凝土基础不需作任何变动。

第四节 电机设计课的学习方法

电机设计是一门专业知识课。学习电机设计是为了能够根据生产的需要设计电机产品,因此必须理论联系实际地进行学习。有些设计参数的确定不能按照理论推导的最佳计算结果,而是受生产工艺条件限制的。例如异步电机气隙小一点,激磁电流小,可以提高功率因数,但气隙长度有一个生产容许限度,小于此容许值电机加工、装配很困难。同时电机运转时有磁拉力存在会使定、转子相互磨擦,使电机不能正常工作。再如铸铁的电

机机座,当电机容量很小时可以设计得比较薄,但铁水在砂型中有一个厚度的铸造极限,小于这个尺寸,铁水在砂型中迅速降温,流动性差,铸件易产生气孔、砂眼、表面皱折等缺陷。这些尺寸的确定不是取决于电机电磁性能计算与强度计算的结果,而是工艺条件的制约。这些知识的获取,数据的积累主要不是在讲课中讲授,而是要在生产实践中、实际工作中学习积累。

下面我们重点介绍电磁设计的学习方法。电磁设计的任务是在尽量节约原材料的条件下,提供一个技术性能优越的电机设计方案。原材料的用量肯定是电机各部分几何尺寸的函数。其中,定子铁心外径及铁心长是确定硅钢片用量的关键尺寸。定子导体横截面积、每匝线圈长度、定子线圈总匝数是确定用铜量的关键数据。当电机参数已知时,电机的技术性能可由等值电路算出。异步电机等值电路如图 1-2。其中 S_H 为额定转差,其定义为输出机械功率为电机额定功率千瓦数时的转差。电机效率、功率因数、起动转矩等性能的计算在电机原理中已详细讲述过,我们主要是应用。电机温升的计算专门有一章

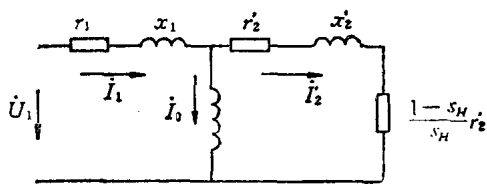


图 1-2

讲述之。电机参数与电机定、转子冲片,槽数、槽形、定子线圈匝数、导体截面等几何尺寸有固定的函数关系。了解、掌握、运用这些规律以提高电机性能、节约原材料是设计课的主要内容。例如要提高电机效率,可令定子导体截面增加一倍,若定子铁心长不变,定子匝数不变,定子电阻 r_1 降至 50%,定子铜耗降至 50%,效率将会提高,定子绕组温升会降低。这时定子槽面积也必须相应扩大一倍,否则铜线在槽内就放不下了。如图 1-1 之定子槽形,令其槽宽不变,槽高增加一倍,槽面积增加一倍。定子内径不变,槽高增加了,铁心外径也要相应增加,以保证定子磁路饱和程度不变化。定子用铁量增加。定子用铜量增加一倍。定子槽漏抗也有所上升。定子齿高了,齿部消耗磁动势大了,激磁电流 I_m 略有上升,激磁电抗 x_m 略有下降。由以上讨论可看出,定、转子铁心,定、转子线圈这四部分电机有效材料构件中,任何一个几何尺寸的变化都会影响电机材料的消耗,影响电机相应的参数,导致电机性能的变化。电机设计课重点讲述有效材料构件中几何尺寸的变化对电机参数、性能影响的函数关系。这些概念掌握了,在电机设计方案比较,进行人工择优的工作中,就容易判断优化方向,通过修改方案迅速找出优化结果。实际工作中,当电机个别性能指标不合格时,能抓住主要矛盾,找出解决问题的调整措施。对这些函数影响变化规律了解透彻,就可找出影响电机参数、性能的几个关键几何尺寸,将其作为电磁方案优化设计的 n 维自变量,就可得电机优化设计结果。综上所述电机设计是分析有效材料几何尺寸如何影响电机参数、性能的内在规律及其函数关系。同理,结构、强度设计是分析几何尺寸影响电机强度的内在规律及其函数关系。

近来,有些人提出一种直接设计法。它的主要特点是上述常规设计的逆运算。即电磁性能确定之后,相关参数只能在很小范围内变化,具体几何尺寸也就被最终确定了。即由性能确定参数,由参数确定尺寸。常规设计方法是选定尺寸,计算参数,校核性能,如性能不满足再调整尺寸重新计算。直接设计法需要大量统计现有产品经验数据作为依据,在变频调速等较大的电力电子设备设计中应用较为有利。

在电机原理教学中以基波为主，对谐波问题稍加涉及。电机设计中当谐波问题突出时，要进行定性、定量分析，如定、转子齿槽配合对谐波转矩的影响，三相正弦绕组对谐波的影响，利用谐波调速等。

学好电机设计要掌握电路理论、电机原理、工程力学、传热学基础。还要了解流体力学、声学、交变电磁场、电机过渡过程分析基本概念。还要具有熟练应用计算机语言及调试程序的能力。还需对一般金属加工工艺有一定了解。

第二章 异步电动机主要尺寸的确定

第一节 三相交流异步电动机主要尺寸与电机容量的关系

交流电机的主要尺寸是指定子内径和定子铁心有效长度。电机主要尺寸确定了电机的外形轮廓、电机的质量及材料费用。它和电机的技术性能有非常密切的关系。电机的主要尺寸设计选择的合理,电机设计工作就有了一个好的基础,电机就可能有一个比较好的技术经济指标。因此,主要尺寸的确定是一个非常重要的步骤。

电机主要尺寸与电机的容量、同步转速、气隙磁通密度等参数有关。下面我们讨论这些参数之间的关系。

由于三相交流异步电动机定子绕组感应电势随时间作正弦变化,故可由电磁感应定律确定电机绕组感应电势和绕组匝数、电机每极磁通量关系为

$$E_1 = 4.44fW_1K_{d\phi_1}\Phi \quad (2-1)$$

式中 f ——电压的频率,单位为 Hz; W_1 ——定子绕组每相串联匝数; $K_{d\phi_1}$ ——定子绕组绕组系数; Φ ——电机气隙主磁通每极磁通量,单位为 Wb; E_1 ——定子绕组每相感应电势,单位为 V。

对于交流电机其同步转速与电压的频率关系为

$$f = \frac{n_1 p}{120} \quad (2-2)$$

式中 n_1 ——电机同步转速,单位为 r/min; p ——电机的极数。

当气隙磁通密度沿空间作正弦分布时其与每极磁通量关系为

$$\begin{aligned} \Phi &= \tau_p l_{eff} \times 10^{-4} \times \frac{1}{\pi} \int_0^\pi B_g \sin \alpha d\alpha \\ &= \frac{2}{\pi} B_g \tau_p l_{eff} \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (2-3)$$

式中 B_g ——气隙磁通密度正弦波的峰值,单位为 T; τ_p ——电机极距,单位为 cm; l_{eff} ——电机定子铁心有效长,单位为 cm。

$$\tau_p = \frac{\pi D_{ii}}{p} \quad (2-4)$$

式中 D_{ii} ——电机铁心定子内圆直径,单位为 cm。

在电机设计中有一个电磁参数和气隙磁密的重要程度相当,这个参数就是线负荷,其定义为沿定子内径圆周方向单位长度的安培导体数。其数学函数形式为

$$A = \frac{2m_1 W_1 I_1}{\pi D_{ii}} \quad (2-5)$$

式中 m_1 ——定子绕组相数; I_1 ——定子相电流,单位为 A; A ——线负荷,单位为 A/cm。

式(2-5)中之系数 2 是因为每一匝线圈由两个导体边组成。将(2-5)式改写为

$$W_1 = \frac{\pi D_{i1} A}{2 m_1 I_1} \quad (2-6)$$

将式(2-2)、(2-3)、(2-4)、(2-6)代入式(2-1)整理后得到

$$D_{i1}^2 l_{\text{eff}} = \frac{8.6 m_1 I_1 E_1}{K_{d\rho_1} B_g A n_1} \times 10^3 \quad (2-7)$$

式中 $D_{i1}^2 l_{\text{eff}}$ 单位为 cm^3 。

在异步电动机中定子绕组感应电势与相电压数值之间有一不大的差值，这是由于定子绕组有漏阻抗压降的影响，其关系可表示为

$$E_1 = k_E U_1 \quad (2-8)$$

式中 k_E ——电势系数； U_1 ——定子绕组相电压，单位为 V。

将(2-8)式代入式(2-7)得

$$D_{i1}^2 l_{\text{eff}} = \frac{8.6 m_1 I_1 k_E U_1}{K_{d\rho_1} B_g A n_1} \times 10^3 \quad (2-9)$$

异步电动机额定功率为轴上输出的机械功率，表示式为

$$P_H = m_1 U_1 I_1 \eta \times 10^{-3} \cos \varphi \quad (2-10)$$

式中 P_H ——异步电动机额定功率，单位为 kW； $\cos \varphi$ ——电机额定功率因数； η ——电机额定效率。

由(2-10)式整理得

$$m_1 U_1 I_1 = \frac{P_H}{\eta \cos \varphi} \times 10^3 \quad (2-11)$$

将(2-11)式代入(2-9)式得

$$D_{i1}^2 l_{\text{eff}} = \frac{8.6 k_E P_H}{K_{d\rho_1} B_g A n_1 \eta \cos \varphi} \times 10^7 \quad (2-12)$$

将上式化简为

$$D_{i1}^2 l_{\text{eff}} = C \frac{P_H}{n_1} \quad (2-13)$$

式中

$$C = \frac{8.6 k_E}{K_{d\rho_1} B_g A \eta \cos \varphi} \times 10^7 \quad (2-14)$$

对中小型异步电动机

$$\begin{aligned} k_E &\approx 0.93 & A &\approx 200 \text{ A/cm} \\ K_{d\rho_1} &\approx 0.95 & \cos \varphi &\approx 0.85 \\ B_g &= 0.6 \text{ T} & \eta &\approx 0.85 \end{aligned}$$

则式(2-14)中之 C 就是一个近似于常数的数。

由公式(2-13)知道电机定子内圆包括的圆柱体体积和电机容量成正比，和电机同步速成反比。公式(2-12)就是主要尺寸与电机容量关系的表达式。我们利用这个规律可以解释很多生产中的现象。

(1) 同步速相同之电机其容量越大，电机体积也越大，基本上成正比例。例如 4 极电

机中心高为 160 时电机容量为 18.5kW, 而当中心高为 250 时容量为 75kW。

(2) 体积相同, 同步速越高的电机其容量越大。例如中心高为 160 之电机体积基本相同, 8 极转速时容量为 5.5kW; 6 极转速时为 7.5kW, 4 极转速时为 11kW, 2 极转速时为 22kW。

公式 (2-12) 是由电磁能量转换成机械能时通过计算电磁能量的大小得到的主要尺寸与电机容量的关系式。当然也可以从机械能量的计算来得到主要尺寸与电机容量的关系。为了简便, 不详细进行推导论证, 而是将式(2-12)改写一下, 就可以很直观地从机械能量的角度对这个规律进行说明。

将式(2-12)改写为

$$\frac{P_H}{n_1} = \frac{K_{d\phi_1}}{8.6k_B} \times 10^{-7} \eta B_g A D_{ii}^2 l_{eff} \cos \varphi \quad (2-15)$$

将(2-5)式代入式(2-15)等式右边得

$$\begin{aligned} & \frac{K_{d\phi_1}}{8.6k_B} \times 10^{-7} \eta B_g \frac{2m_1 l_1 W_1}{\pi D_{ii}} D_{ii}^2 l_{eff} \cos \varphi \\ & - \frac{2K_{d\phi_1}}{8.6\pi k_B} \times 10^{-7} \eta B_g l_{eff} l_1 (\cos \varphi) \times 2m_1 W_1 \frac{D_{ii}}{2} \end{aligned} \quad (2-16)$$

式中 $B_g l_{eff} l_1 \cos \varphi$ ——反映了每根导体的电动力; $2m_1 W_1$ ——定子绕组全部导体数; $\frac{D_{ii}}{2}$ ——电磁力矩的力臂; $\frac{2K_{d\phi_1}}{8.6\pi k_B} \times 10^{-7} \eta$ ——此系数是考虑了磁密在空间上正弦分布, 电流随时间正弦变化, 三相短距分布绕组等因素。

从电机原理我们知道旋转磁场对电流有功分量作用产生平均电磁转矩, 它对无功电流作用时, 每一根导体的无功电流会受到电动力, 但在整个电机的圆周上其电磁力矩之和为零。

通过以上分析我们看出式(2-15)左边电磁转矩是以电磁能量表示的; 等式右边的电磁转矩是通过电动力与力臂乘积表示的, 更为直观。下面我们再深入探讨一下磁密与线负荷的乘积反映什么呢? 在定子内圆取一个切向长度与轴向长度均为单位长度的单位正方形面积。此面积上电流总数为线负荷值, 所以此面积上所受电动力总和正比于线负荷与磁密的乘积。这就告诉我们电磁负荷的确定对主要尺寸的确定有决定性的影响。电机容量相同时, 电磁负荷取的较高就能用较小的电机表面积与体积获得同样的电磁转矩。这一点从式(2-15)中也可明显看出。

第二节 电机的几何相似定律

从生产实际中我们发现大容量电机直径大, 轴向长度长, 定子槽深、槽宽均增加, 气隙也大。大电机各个方面的尺寸就好像小容量电机均匀、对称按固定比例放大了一样, 这样的两台电机我们称为几何相似。其数学表示式为

$$\frac{D_A}{D_B} = \frac{l_A}{l_B} = \frac{h_{SA}}{h_{SB}} = \frac{b_{SA}}{b_{SB}} = \frac{g_A}{g_B} = \dots = k \quad (2-17)$$