

高等院校电气工程系列教材

电机设计理论与实践

杨莉 戴文进 等 编著

清华大学出版社

013062192

TM302
13

高等院校电气工程系列教材

电机设计理论与实践

杨莉 戴文进 等 编著



TM302
13



清华大学出版社
北京

013082125

内 容 简 介

本书主要论述电机设计的基础理论及具体的设计程序和设计方法。全书共分六章,分别为电机设计基础理论、异步电机设计、同步电机设计、直流电机设计、变压器设计和特种电机设计。

第1章用较少的篇幅简要地论述了电机的主要参数之间的关系、磁路计算、参数计算、损耗与效率计算等电机设计的基础理论知识,为后述的各种电机的具体设计打下了坚实基础。在随后的各章中,则分别论述了各种电机的具体设计方法,其中不仅给出了完整的设计程序,还附有实际的算例予以示范。

本书编排独特、构思新颖、基础理论论述精炼、设计程序丰富、实际算例翔实。

本书为“电机与电器”专业方向所开设的(属“电气工程及其自动化”专业)“电机设计”课程的教材,也可作为其他相近专业的参考书,还可供有关技术人员选用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电机设计理论与实践/杨莉等编著.--北京:清华大学出版社,2013

高等院校电气工程系列教材

ISBN 978-7-302-32093-7

I. ①电… II. ①杨… III. ①电机—设计—高等学校—教材 IV. ①TM302

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 082907 号

责任编辑:邹开颜 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:38.25

字 数:929千字

版 次:2013年8月第1版

印 次:2013年8月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:69.00元

产品编号:047435-01

清华大学出版社
北京

电机设计是电气工程及其自动化专业领域内电机与电器专业方向的一门重要的专业课。但已往的电机设计教材,更多的是侧重于对设计理论的论述。

应该承认,电机设计理论的学习是重要的,其对于电机设计的实践有着理论指导上的重要意义,是推导电机设计中各种参数和物理量计算公式的理论基础。

然而,电机的工作原理原本是建立在电磁场理论基础之上的,由于其结构上的复杂性,使得电机内电磁场的边界条件非常复杂,致使在进行其理论分析时,往往不得不作大量的近似和假设。这样一来,根据电机设计理论所得的分析计算结果,往往是近似的、象征性的、很不准确的。

因而,在电机设计的工程实践中,人们以设计理论分析为出发点,运用了大量经验的、近似的、简化的、类比的和旁推的方法,得出了各种在电机设计实践中行之有效的计算办法,进而形成了一整套程式化的计算公式,这也就是人们通常说的电机设计程序。所以,人们的电机设计实践,实际上就是凭着设计上的工程实际经验,跟随着电机设计程序中的一系列有序的计算公式,进行着一连串的初等数学的运算。

由此可见,电机设计这门课程实际上是一门实践性、操作性很强的课程。如若在电机设计的大学教学中仍然沿袭以往传统的教学方法,电机设计课程的课堂上讲授的还是大量的设计理论,教材中还是充斥着大量的理论分析内容,而学生们对那些实用的电机设计程序却一无所知(传统的电机设计教材确实对此只字未提),显然既不符合教学改革的方向,也不能满足工程实际需要。

什么样的电机设计教材,既能满足设计理论分析上的需要,又具有很强的实践性和操作性呢?这是笔者一直在思考和探索的问题。本书正是出自上述考虑,为推出一本崭新的电机设计教材所做的一点大胆尝试。

首先,笔者将电机设计的基本理论大刀阔斧地删繁就简,将其浓缩成为本书中的第1章——电机设计基础理论,而在传统的教材中,这几乎是该书的全部讲述内容。

其次,书中汇集了全部的四大类电机,以及各种类型的特种电机的设计内容,每大类电机自成一章。每一章开宗明义的是该类电机的设计特点,然后推出这种电机的设计程序,最后是运用该程序,对某一规格的电机进行设计计算的算例。书中的各类电机设计程序多达几十种,堪称电机设计程序之大全。这样做的结果既大大削减了电机设计课程的教学负担,又提高了学生电机设计的实际能力。

再次,本书除了加入大量各类电机的设计程序和具体算例外,还在书后附有大量用于电机设计的各类曲线和图表等资料,因此本书又可堪称电机设计资料之大全,这样便大大提

高了本书的实用价值。

正因为如此,本书既可以作为电机专业的大学教材,也是相关专业的工程技术人员一本不可多得的参考和工具书。

本书由南昌大学戴文进教授和杨莉副教授负责全书的总体构思和后期的统稿工作。戴文进教授撰写了第2章和附录A,杨莉副教授撰写了第1章的1.1节和第5章。此外,南昌大学张景明、肖倩华、陈瑛和徐龙权副教授参加了本书的编著工作。具体撰写内容如下:张景明副教授撰写了第1章的1.3节和第3章,肖倩华副教授撰写了第1章的1.2节和第4章,陈瑛老师撰写了第1章的1.4节和第6章,徐龙权副教授撰写了附录B~F。此外,戴文进教授的在校研究生林卿生、杨华、王宝福、谢友慧、王凯、陈向杰、赵杰、刘海静、邓志辉和王少夫同学在本书的资料收集、文字录入、图表和曲线的绘制及扫描等方面做了大量工作,在此一并致谢。

本书所有作者虽都长期工作在电机设计的教学第一线,且对该门课程的教学改革有一定体会,但毕竟水平有限,加之本书在结构体系和内容取舍上均作了较大改革,故书中谬误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

编著者

2013年5月于南昌大学

第 1 章 电机设计基础理论	1
1.1 电机的主要参数之间的关系	1
1.1.1 主要尺寸	1
1.1.2 电磁负荷的选择	4
1.1.3 系列电机及电机的几何相似定律	5
1.1.4 电机的主要尺寸比及主要尺寸的确定	7
1.2 磁路计算	8
1.2.1 概述	8
1.2.2 空气隙磁压降的计算	10
1.2.3 齿部磁压降的计算	14
1.2.4 轭部磁压降的计算	16
1.2.5 磁极磁压降的计算	19
1.2.6 励磁电流和空载特性计算	19
1.3 参数计算	21
1.3.1 绕组电阻的计算	21
1.3.2 绕组电抗的一般计算方法	23
1.3.3 主电抗计算	24
1.3.4 漏电抗计算	27
1.3.5 漏抗标么值	35
1.4 损耗和效率	36
1.4.1 基本铁耗	36
1.4.2 空载时铁芯中的附加损耗	39
1.4.3 电气损耗	42
1.4.4 负载时的附加损耗	43
1.4.5 机械损耗	50
1.4.6 效率	52
第 2 章 异步电机设计	53
2.1 变频调速专用三相异步电动机的设计方法	53

2.1.1	概述	53
2.1.2	主要尺寸及电磁负荷的选取	56
2.1.3	额定电压及极对数的确定	60
2.1.4	电动机参数的选取	62
2.1.5	电磁设计中的某些特殊考虑	64
2.1.6	中大型变频调速异步电动机的设计特点	67
2.1.7	机械及结构方面的特殊考虑	70
2.1.8	中小型变频调速异步电动机的性能及其选用	75
2.2	中小型三相异步电动机电磁设计程序及算例	77
2.2.1	中小型三相异步电动机电磁设计程序	77
2.2.2	中小型三相异步电动机电磁设计算例	91
2.3	三相微型异步电动机电磁设计程序及算例	104
2.3.1	三相微型异步电动机电磁设计程序	104
2.3.2	三相微型异步电动机电磁设计算例	117
2.4	单相微型异步电动机电磁设计程序及算例	129
2.4.1	单相微型异步电动机电磁设计程序	129
2.4.2	单相微型异步电动机电磁设计算例	144
2.5	小型单相异步发电机电磁设计程序及算例	159
2.5.1	小型单相异步发电机电磁设计程序	160
2.5.2	小型单相异步发电机电磁设计算例	175
附录 2A	各种槽形单位漏磁导计算	189
附录 2B	电磁计算用曲线	193
附录 2C	电磁计算用表格	204
第 3 章	同步电机设计	208
3.1	小型三相同步发电机设计	208
3.1.1	小型三相同步发电机设计的主要问题	208
3.1.2	小型三相同步发电机电磁设计程序	212
3.1.3	小型三相同步发电机电磁设计算例	228
3.2	永磁同步发电机设计	245
3.2.1	永磁同步发电机设计的主要问题	245
3.2.2	永磁同步发电机电磁设计程序	245
3.2.3	永磁同步发电机电磁设计算例	256
3.3	异步起动永磁同步电动机设计	267
3.3.1	异步起动永磁同步电动机设计的主要问题	267
3.3.2	异步起动永磁同步电动机设计程序	273
3.3.3	异步起动永磁同步电动机设计算例	289
附录 3A	同步电机电磁设计用曲线	307
附录 3B	同步电机电磁设计用表格	308

附录 3C 常用定、转子槽比漏磁导计算	309
第 4 章 直流电机设计	311
4.1 中小型直流电机设计	311
4.1.1 中小型直流电机设计的主要问题	311
4.1.2 中小型直流电机电磁设计程序	326
4.1.3 中小型直流电机电磁设计算例	337
4.2 永磁直流电动机设计	347
4.2.1 永磁直流电动机设计的主要问题	347
4.2.2 永磁直流电动机电磁设计程序	361
4.2.3 永磁直流电动机电磁设计算例	370
附录 4A 电磁计算用曲线	381
第 5 章 变压器设计	385
5.1 设计基础	385
5.1.1 设计概述	385
5.1.2 变压器主要尺寸的选择及磁路系统的初步计算	387
5.1.3 绕组和绝缘	393
5.1.4 短路特性计算	399
5.1.5 空载特性计算	401
5.1.6 变压器温升计算	402
5.2 电力变压器设计的主要问题	405
5.2.1 决定变压器的基本电量	405
5.2.2 绕组的排列	405
5.2.3 绕组幅向及轴向尺寸计算	409
5.2.4 阻抗电压计算	409
5.2.5 铁窗高度及绝缘半径计算	410
5.3 电力变压器电磁设计程序及算例	410
5.3.1 电力变压器电磁设计程序	410
5.3.2 电力变压器电磁设计算例	445
附录 5A 标准的线、相电压	454
附录 5B 相、线电流表	456
附录 5C 铁芯截面表	460
附录 5D 油道校正温升	464
第 6 章 特种电机设计	465
6.1 开关磁阻电机设计	465
6.1.1 概述	465
6.1.2 开关磁阻电机设计的主要问题	468

6.1.3	开关磁阻电机电磁设计估算程序	473
6.1.4	开关磁阻电机电磁设计算例	480
6.2	单相串励电动机设计	489
6.2.1	单相串励电动机设计的主要问题	489
6.2.2	单相串励电动机电磁设计程序	492
6.2.3	单相串励电动机电磁设计算例	504
附录 6A	电磁计算用曲线	515
附录 A	三相异步电动机技术数据	517
附录 B	直流电机技术数据	556
附录 C	三相油浸电力变压器基本参数和技术数据	563
附录 D	特种电机技术数据	573
附录 E	导电材料	580
附录 F	导磁材料	588
参考文献		603

第 1 章

电机设计基础理论

1.1 电机的主要参数之间的关系

1.1.1 主要尺寸

由电机学知识可知,电机的电磁过程主要是在气隙中进行的,也就是说其能量形式的转换是通过气隙主磁通进行的,因此,主要尺寸就必定与气隙有着密切的关系。实践证明,靠近气隙的电枢直径(D)与铁芯有效长度(l_{ef})是电机的主要尺寸,而气隙可以说是第三个主要尺寸。对于直流电机而言,电枢直径是指转子外径;对于交流电机而言,电枢直径是指定子内径。从几何角度看,这些尺寸一经确定,其他尺寸就大体上确定了,而且电机的重量、价格、工作性能和运行可靠性等,也就基本上确定了。

1. 计算功率

电机将电能(机械能)转换成机械能(电能)时,该能量均以电磁能的形式通过定、转子间的气隙进行传递,与之相对应的功率称为电磁功率。在电机设计中,电磁功率通常用计算功率 P' 表示。不同类型电机的计算功率,可由给定的额定功率 P_N 来决定,其方法如下:

(1) 对于异步电机

$$P' = mE_1 I \quad (1-1)$$

式中, m ——电枢绕组相数;

E_1 ——电枢绕组相电势, V;

I ——电枢绕组相电流, A。

输入功率为

$$P_1 = mU_{\phi N} I_1 \cos\varphi_N$$

式中, $U_{\phi N}$ ——额定相电压。

额定功率为

$$P_N = P_1 \eta_N = mU_{\phi N} I_1 \cos\varphi_N \eta_N$$

由此可得

$$P' = \frac{E_1}{U_{\phi N}} \cdot \frac{1}{\eta_N \cos\varphi_N} P_N = \frac{K_E}{\eta_N \cos\varphi_N} P_N \quad (1-2)$$

式中, η_N 、 $\cos\varphi_N$ ——额定负载时的效率和功率因数;

K_E ——满载电势标么值,即额定负载时,感应电势与端电压的比值。

由图 1-1 所示的异步电动机的相量图可知

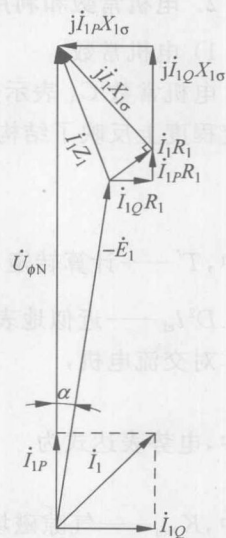


图 1-1 异步电动机的相量图

$$K_E = \frac{E_1}{U_{\#N}} = 1 - \frac{I_{1P}R_1 + I_{1Q}X_{1\sigma}}{U_{\#N}} = 1 - (i_{1P}^*R_1^* + i_{1Q}^*X_{1\sigma}^*) = 1 - \epsilon_L \quad (1-3)$$

式中, I_{1P} 、 I_{1Q} ——定子电流的有功分量和无功分量;

i_{1P}^* 、 i_{1Q}^* ——定子电流有功分量标么值和无功分量标么值;

ϵ_L ——定子绕组阻抗压降的标么值, $\epsilon_L = i_{1P}^*R_1^* + i_{1Q}^*X_{1\sigma}^*$ 。

(2) 对于同步电动机

$$P' = \frac{K_E}{\eta_N \cos\varphi_N} P_N \quad (1-4)$$

(3) 对于同步发电机

$$P' = \frac{K_E}{\cos\varphi_N} P_N \quad (1-5)$$

输出电功率为

$$P_N = mU_{\#N} I_1 \cos\varphi_N$$

(4) 对于同步调相机

$$\begin{cases} P' = K_E P_N \\ P_N = mU_{\#N} I \end{cases} \quad (1-6)$$

(5) 对于并励直流发电机

$$P' = K_g P_N \quad (1-7)$$

式中, K_g ——考虑发电机电枢压降和绕组电流而引入的系数。

(6) 对于并励直流电动机

$$P' = \frac{K_m P_N}{\eta_N} \quad (1-8)$$

式中, K_m ——考虑电动机电枢压降和绕组电流而引入的系数。

电机设计时, η_N 、 $\cos\varphi_N$ 可由设计任务书或技术条件查得, K_E 可先假设得到, 然后通过给定的额定功率 P_N 得到计算功率 P' 。

2. 电机常数和利用系数

1) 电机常数

电机常数 C_A 表示产生单位计算转矩所耗用的有效材料(铜、铝或电工钢)的体积, 并在一定程度上反映了结构材料的耗用量。其表达式为

$$C_A = \frac{D^2 l_{ef}}{P'/n} = \frac{60D^2 l_{ef}}{2\pi T'} \quad (1-9)$$

式中, T' ——计算转矩, 其表达式为 $T' = \frac{P'}{\Omega} = \frac{60P'}{2\pi n}$;

$D^2 l_{ef}$ ——近似地表示转子有效部分的体积, 定子有效部分的体积也与它有关。

对交流电机,

$$P' = mEI$$

其中, 电势表达式为

$$E = 4K_{Nm} K_{dp} fN\Phi$$

式中, K_{Nm} ——气隙磁场波形系数, 当气隙磁场正弦分布时 $K_{Nm} = 1.11$;

f ——电流频率, Hz;

N ——电枢绕组的每相串联匝数；

K_{dp} ——电枢绕组系数；

Φ ——每极磁通, Wb。

每极磁通 Φ 为

$$\Phi = B_{\delta av} \tau l_{ef} = B_{\delta} \alpha'_p \tau l_{ef}$$

式中, B_{δ} ——气隙磁通密度的最大值, T;

$B_{\delta av}$ ——气隙磁通密度的平均值, T;

α'_p ——计算极弧系数, $\alpha'_p = \frac{B_{\delta av}}{B_{\delta}} = 0.63 \sim 0.72$;

l_{ef} ——铁芯有效长度, m;

τ ——极距, $\tau = \frac{\pi D}{2p}$, m。

线负荷为

$$A = \frac{2mNI}{\pi D}$$

式中, D ——电枢直径, m。

把上面各关系代入式(1-9)可得

$$C_A = \frac{D^2 l_{ef} n}{P'} = \frac{6.1}{\alpha'_p K_{Nm} K_{dp} A B_{\delta}} \quad (1-10)$$

对直流电机,

$$P' = E_a I_a$$

其中电势为

$$E_a = \frac{p N_a n \Phi}{60 a}$$

式中, N_a ——电枢绕组的总导体数;

a ——电枢绕组的并联支路对数。

每极磁通为

$$\Phi = B_{\delta av} \tau l_{ef} = B_{\delta} \alpha'_p \tau l_{ef}$$

线负荷为

$$A = \frac{I_a N_a}{2 a \pi D}$$

把上面各关系代入式(1-9)可得

$$C_A = \frac{D^2 l_{ef} n}{P'} = \frac{6.1}{\alpha'_p A B_{\delta}} \quad (1-11)$$

比较式(1-10)与式(1-11)可知,对于交流电机和直流电机,其电机常数 C_A 的表达式相似,均可表示为

$$C_A = \frac{D^2 l_{ef}}{P'/n} = \frac{60 D^2 l_{ef}}{2 \pi T'} = \frac{6.1}{\alpha'_p K_{Nm} K_{dp} A B_{\delta}} \quad (1-12)$$

只不过对于直流电机,其 $K_{Nm} K_{dp} = 1$ 。

由于在一定功率和转速范围内的电机, B_{δ} 、 A 变动范围不大,且 α'_p 、 K_{Nm} 和 K_{dp} 变化范围更小,故称 C_A 为电机常数。

分析式(1-12)可以得出以下重要结论:

(1) 电机的主要尺寸决定于计算功率 P' 与转速 n 之比或计算转矩 T' 。由式(1-11)可知,在其他条件相同时,计算转矩相近的电机所消耗的有效材料相近,功率大、转速高与功率小、转速低的电机相比,若其 P'/n 相近,则电机体积接近,二者可采用相同的电枢直径与某些其他尺寸。

(2) 在一定转速范围内电磁负荷 A 、 B_s 不变。功率一定时,转速高的电机尺寸较小;尺寸相同时,转速高的电机功率较大。可通过提高转速来减小电机的体积和重量。

(3) 转速和直径一定时,若采用不同长度可得不同功率的电机。

(4) α'_p 、 K_{Nm} 和 K_{dp} 一般变化不大,电磁负荷 A 、 B_s 值直接影响电机的主要尺寸和有效材料用量, A 、 B_s 选得越高,电机的尺寸就越小,耗用的材料越少。

2) 利用系数

利用系数 K_A 为电机常数 C_A 的倒数,其表达式为

$$K_A = \frac{1}{C_A} = \frac{P'/n}{D^2 l_{ef}} = \frac{2\pi T'}{60 D^2 l_{ef}} \quad (1-13)$$

利用系数 K_A 为单位体积有效材料及单位同步速(或额定转速)所能产生的视在功率,也表示单位体积的有效材料所能产生的计算转矩,反映了电机有效材料的利用程度。在设计方案比较时, K_A 往往是一项很好的比较指标,随着电机冷却技术的改善、制造工艺的提高及材料质量的改进, K_A 将不断增大。

1.1.2 电磁负荷的选择

电磁负荷 A 、 B_s 值决定了利用系数,直接影响电机的有效材料的耗用量,更为重要的是 A 、 B_s 值与电机运行参数、性能和可靠性有密切关系。

电磁负荷的选择要考虑的因素很多,应综合考虑电机的技术和经济指标,其选择要点如下:

(1) 当输出功率一定时,提高电磁负荷 A 、 B_s ,电机的尺寸和体积将减小,可节省有效材料,但其需要较好的冷却条件和绝缘材料。

(2) 选取较高的 A ,绕组用铜(铝)量将增加。由于电机的尺寸减小了,若 B_s 不变,每极磁通将减小,为得到一定的感应电势,绕组匝数必将增多。

(3) 选择较高的 A 或导体电流密度 J ,绕组电阻将增加,使绕组温升增高。对直流电机, A 过高,电抗电势将增加,使换向恶化。

(4) 选择较高的 B_s ,电机基本铁耗增加。由于电枢铁芯中的磁通密度与 B_s 有一定比例关系,而铁的比损耗(单位重量铁芯中的损耗)与铁磁材料内磁通密度的平方成正比关系,故随着 B_s 的提高,比损耗的增加速度比铁芯重量减少的速度更快。因此导致电枢铁耗增加、效率降低及在冷却条件不变时温度将升高。

(5) A 与 B_s 应选择恰当的比值。由于励磁电流标么值 $I_m^* \propto \frac{B_s}{A}$,选取较高的 B_s 或较低的 A ,励磁电流将增大,使异步电机的功率因数降低。而漏抗的标么值 $X_s^* \propto \frac{A}{B_s}$,故 B_s 较高或 A 较低时,漏抗减小,其堵转转矩及过载能力将提高,但其堵转电流也将增大。

总的来说,电磁负荷的选择要考虑的因素很多,很难单纯从理论上来确定。通常主要参

考电机工业长期积累的经验数据,并分析对比设计电机与已有电机之间在使用材料、结构、技术条件和要求等方面的异同后进行选取。随着材料性能提高、冷却条件改善、电机结构不断改进, A 、 B_s 的数值和电机利用系数正在逐步提高,从而在保证电机性能的同时,使其体积和重量不断减小。

1.1.3 系列电机及电机的几何相似定律

1. 系列电机

电机产品通常按系列生产,以便能利用已有的工艺装备,降低成本和缩短生产周期。所谓系列电机就是在应用范围、结构形式、性能水平和生产工艺等方面有共同性,功率按一定比例系数递增,并成批生产的一系列电机。我国目前生产的几个主要系列如下:

(1) 基本系列,是使用面广、生产量大、一般用途的系列。例如直流电机的 Z_2 系列(小型直流电机)、ZF系列(中型直流发电机)和ZD系列(中型直流电动机);异步电机的 J_2 、 JO_2 系列(三相鼠笼式异步电动机)和Y系列(新型三相异步电机);同步电机的 T_2 系列(三相同步发电机)、TD系列(同步电动机)和TT系列(同步补偿机)。

(2) 派生系列,是为满足不同的使用要求,将基本系列进行部分改动而派生出来的系列,它与基本系列有较多的通用性。例如,ZJD大型轧钢及卷扬机用直流电动机,由ZD系列派生而来;JZ₂冶金及起重用三相感应电动机,由 J_2 系列派生而来;JDO₂三相多速异步电动机,由JO₂系列派生而来。

(3) 专用系列,是适用某种特殊条件或使用面很窄的系列。例如GD系列辊道电动机,用于冶金工业中工作辊道和传送辊道,其有堵转转矩大、堵转电流小、堵转时间长、变频调速宽的特点,能够在频繁起动、制动、反转的条件下运行。

系列电机设计有如下特点:

(1) 同一系列中,功率按一定规律递增。

通常,系列中相邻两功率等级的比值,称为功率递增系数或容量递增系数 K_p' ,其数值直接影响到整个功率等级数目的确定。功率等级的确定要根据用户的要求、选用的方便和经济性等多方面全面综合分析来确定。

(2) 安装尺寸的确定必须综合考虑其具体情况。

电机的安装尺寸是指电机与配套机械进行安装时的有关尺寸,系列电机的安装尺寸一般按轴中心高分级,它的确定必须综合考虑配套机械和电机本身的具体情况,原则上是按优先系数递增。

对端盖式轴承的电机,确定功率等级与安装尺寸的对应关系时,主要是确定功率等级与轴中心高的对应关系。功率等级确定后,选取轴中心高等级,必须全面考虑工艺装备、用户要求、电磁设计和材料利用等因素。

(3) 交流电机系列定子冲片外径的确定应与规定的轴中心高数值一致。

此外,还应考虑硅钢片利用的经济合理性,并考虑在条件允许的情况下,尽量充分利用已有的工艺装备。

2. 电机的几何相似定律

所谓几何相似,是指电机对应的尺寸具有相同的比值。如, A 、 B 两台电机若是几何相似,则其对应尺寸成比例,即

$$\frac{D_A}{D_B} = \frac{l_A}{l_B} = \frac{h_{sA}}{h_{sB}} = \frac{b_{sA}}{b_{sB}} = \dots$$

式中, h_s 、 b_s ——槽高和槽宽。

通常所谓的几何相似定律是指:在电流密度、磁感应强度、转速和频率保持不变时,对一系列功率递增、几何相似的电机,每单位功率所需有效材料的质量 $M(G)$ 、成本 C_{ef} 及产生的损耗 $\sum p$ 与功率 P' 的 $1/4$ 次方成反比,即

$$\frac{G}{P'} \propto \frac{C_{ef}}{P'} \propto \frac{\sum p}{P'} \propto \frac{P'^{\frac{3}{4}}}{P'} = \frac{1}{P'^{\frac{1}{4}}}$$

证明如下:

条件: J 、 B 、 n 、 f 保持不变。

(1) 长度 l 与功率 P' 之间的关系

由于

$$E \propto N\Phi, \quad \Phi = BS_{Fe}$$

式中, S_{Fe} ——铁芯净截面。则

$$E \propto NBS_{Fe}$$

且 $I = JS_c$ (J 为电流密度, S_c 为导体截面积), 代入 $P' \propto EI$, 则

$$P' \propto NBS_{Fe}JS_c \quad (B, J \text{ 保持不变}, S_{Cu} = NS_c)$$

可得

$$P' \propto S_{Fe}S_{Cu}$$

式中, S_{Cu} ——绕组净截面。

已知

$$S_{Fe} \propto l^2, \quad S_{Cu} \propto l^2$$

故

$$P' \propto l^4 \quad \text{或} \quad l \propto P'^{\frac{1}{4}}$$

(2) G 、 C_{ef} 和 $\sum p$ 与 P' 的关系

有效材料重量与体积成正比, 即与长度 l 的立方成正比; 而有效材料的成本 C_{ef} 和损耗 $\sum p$ 均与 $M(G)$ 成正比, 故可得

$$G \propto l^3 \quad \text{即} \quad G \propto P'^{\frac{3}{4}}$$

$$C_{ef} \propto G \quad \text{即} \quad C_{ef} \propto P'^{\frac{3}{4}}$$

$$\sum p \propto G \quad \text{即} \quad \sum p \propto P'^{\frac{3}{4}}$$

(3) 单位功率所需有效材料的质量 $M(G)$ 、成本 C_{ef} 及产生的损耗 $\sum p$ 与功率 P' 的关系

$$\frac{G}{P'} \propto \frac{C_{ef}}{P'} \propto \frac{\sum p}{P'} \propto \frac{P'^{\frac{3}{4}}}{P'} = \frac{1}{P'^{\frac{1}{4}}}$$

从几何相似定律可以看出, 随着单机容量增加, 其有效材料的重量 G 和成本 C_{ef} 的增加比容量的增加要慢, 故其有效材料的利用率提高了; 损耗 $\sum p$ 的增加比容量增加也慢, 故效率得以提高。因此, 在可能的情况下, 近代电气设备通常尽可能采用大功率电机来代替总

功率相等的数台小功率电机。此外还可以看出,电机损耗与长度 l 的立方成正比,而冷却表面却与长度成正比,随着电机功率的增加,其长度也将增加,但电机损耗的增加速度大于冷却表面的增加速度,电机温升将增加,因此就必须设法改变冷却系统或冷却方式。故冷却问题对大功率电机比对小功率电机更显得重要,甚至放弃它们的几何形状相似。

1.1.4 电机的主要尺寸比及主要尺寸的确定

1. 电机的主要尺寸比

在已知电机的计算功率和转速情况下,适当地选取电磁负荷,借助电机常数或利用系数的表达式,可初步确定电机的 $D^2 l_{ef}$ 。但 $D^2 l_{ef}$ 相同的电机,可以有不同的外形。为了反映电机的几何形状,引入一新的概念——主要尺寸比 λ ,且

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{\tau} \quad (1-14)$$

当有效体积不变时, λ 值较大的电机外形较细长,反之则粗短。

选择 λ 值时,通常主要考虑电机参数与温升、节约用铜(铝)、转子的机械强度和转动惯量等方面的限制和要求,其选择的具体要点如下:

(1) 在合理范围内适当选择较大的 λ 值。

l_{ef} 较大而 D 较小,电机较细长,此时端部较短,可减少绕组端部用铜和端部各部件(端盖、轴承、刷架和换向器等)的尺寸,可使得电机端部漏抗减小、重量和成本降低及效率得以提高。

(2) 高速大型电机的 λ 值一般选择得较大。

由于电机细长,转子的转动惯量较小,将 λ 值选得较大可以满足转子材料强度限制。

(3) λ 值不宜选择得过大。

λ 值过大时,风路便增长,冷却条件变差,此时必须采取措施来加强冷却,对于无径向通风道的开启式或防护式的电机,为充分利用绕组端部散热,其 λ 值应选择的较小。此外由于铁芯细长,还将增加冲片数量,增加叠压和嵌线工时。

(4) 同步电机一般选择较大的 λ 值。

对于异步电机,若为中小型电机,通常取 $\lambda=0.4\sim 1.5$;若为大型电机,通常取 $\lambda=1\sim 3.5$,极数较多时取较大值。对于同步电机,若为凸极电机,一般取 $\lambda=0.4\sim 1.5$,并随着极数的增加而增大;高速或大型同步电机,由于材料机械强度的限制,故 λ 值选择得较大,可达 $3\sim 4$ 。若为汽轮机,转速高,离心力大,为使转子机械应力不超过允许值,在加强冷却的条件下,电机的 λ 值随功率的增加而增大。对于直流电机,若为中小型电机,通常取 $\lambda=0.6\sim 1.2$;若为大型电机,通常取 $\lambda=1.25\sim 2.5$ 。 λ 值越大,电枢越细长,换向条件变差,故直流电机采用较小 λ 值。若是要求转动惯量较小(例如轧钢机)或是大型高速的直流电机, λ 值也应取得大些。

2. 主要尺寸的确定

确定电机主要尺寸一般可采用两种方法,即计算法和类比法。

1) 计算法

在采用计算法确定电机主要尺寸时,可根据其本身特点而采用不同的步骤,甚至将主要尺寸的关系式写成其他形式。其一般步骤如下。

(1) 由电机额定功率 P_N ,根据式(1-2)~式(1-7)求得计算功率 P' ;

- (2) 利用推荐的数据或曲线选取电磁负荷 A 、 B_δ ;
- (3) 由 P' 、 n (交流机 $n = n_0$, 直流机 $n = n_N$)、 A 和 B_δ , 根据式 (1-12) 或式 (1-13) 求得 $D^2 l_{ef}$;
- (4) 参考推荐的数据选用适当的 λ ;
- (5) 由 $\lambda = \frac{l_{ef}}{\tau}$ 及已算得的 $D^2 l_{ef}$, 分别求得主要尺寸 l_{ef} 和 D ;
- (6) 确定交流电机定子外径 D_1 、直流电机电枢外径 D_a 。

对于交流电机, 计算得到定子内径 D_{i1} 后, 参照定子内外径比的经验值可估算定子外径 D_1 。算得 D_1 (或 D_a) 后, 参照表 1-1 和表 1-2 选取标准直径, 然后对 D_{i1} 和 l_{ef} 进行必要的调整。

表 1-1 交流电机定子的标准外径 mm

机座号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D_1	12	14.5	16.7	21	24.5	28	32.7	36.8	42.3	56	56
机座号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
D_1	65	74	85	99	118	143	173	215	260	325	425

表 1-2 直流电机电枢的标准外径 mm

机座号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D_a	8.3	10.6	12	13.8	16.2	19.5	21	24.5	29.4	32.7	36.8
机座号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
D_a	42.3	49.3	56	65	74	85	99	120	150	180	215

2) 类比法

在实际生产中, 很多时候不采用算法, 而是采用类比法, 即根据所设计电机的具体条件 (结构、材料、技术经济指标和工艺等), 参照已生产过的同类型相似规格电机的设计和试验数据, 直接初选主要尺寸及其他数据。

1.2 磁路计算

1.2.1 概述

电机的绕组中通过电流时, 就会在电机内建立起相应的磁场, 通常将电机内的磁场分为主磁场和漏磁场。进行磁路计算的目的, 就在于确定电机中感应一定电势所对应的主磁场所必需的磁化力或励磁磁动势, 进而计算励磁电流及电机的空载特性, 校核电机各部分磁通密度选择得是否合适, 并确定有关尺寸。

1. 全电流定律

全电流定律 (也称安培环路定律) 为电机设计中进行磁路计算所依据的基本原理。表述为: 磁场强度 H 沿闭合路径的线积分等于该回路所包围的全电流, 即

$$\oint_l H \cdot dl = \sum i \quad (1-15)$$

若积分路径沿着磁场强度矢量取向 (即沿磁力线), 则有 $\oint_l H dl = \sum i$ 。