

高等学校交流讲义

电机设计

下册

西安交通大学电机与电器制造教研组编译

只限学校内部使用



中国工业出版社

高等学校交流讲义



电机设计

下册

西安交通大学电机与电器制造教研组编译

中国工业出版社

本书分上下两册出版。上册为变压器设计，主要根据季霍米罗夫著变压器计算编译而成；下册为旋转电机设计，主要根据维诺格拉道夫等著电机设计编译而成。上册中主要介绍了变压器设计的一些基本方法和内容，下册中主要介绍了异步电机、直流电机、凸极和隐极同步电机的设计方法和内容。

本书供高等学校电机电器专业或电机专业之交流讲义，亦可供电机制造厂工程技术人员参考之用。

电 机 设 计 下 册

西安交通大学电机与电器制造教研组编译

*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $29 \frac{1}{8}$ · 字数 683,000

1961年9月北京第一版·1961年9月北京第一次印刷

印数 00,001—03,537 · 定价(10-6)3.40元

统一书号: 15165 · 641 (一机-125)

目次

第一章 主要尺寸的决定	5	§ 5-5 轉子軛的磁勢	78
§ 1-1 电机常数	5	§ 5-6 磁极的漏磁系数	79
§ 1-2 电机制造中的几何相似律	8	§ 5-7 空载时的激磁磁化力, 空载特性曲线	80
§ 1-3 派生重量与派生损耗	9	第六章 繞組的有效电阻和感应	
§ 1-4 适合定则	9	电抗的确定	83
§ 1-5 在实际应用中对于适合定则的偏差	11	§ 6-1 繞組有效电阻的确定	83
§ 1-6 主要尺寸的决定	13	§ 6-2 繞組感应电抗的确定	86
§ 1-7 成系列电机和单独电机的计算	15	第七章 损耗和效率	95
§ 1-8 电机设计的程序	16	§ 7-1 一般概念	95
第二章 直流电机的电枢繞組	17	§ 7-2 铁芯中的损耗	95
§ 2-1 基本概念	17	§ 7-3 机械损耗	101
§ 2-2 叠繞組	18	§ 7-4 电气损耗	105
§ 2-3 波繞組	19	§ 7-5 附加损耗	106
§ 2-4 混合(蛙式)繞組	21	§ 7-6 效率	113
§ 2-5 繞組的对称条件	22	第八章 通风的计算	114
§ 2-6 均压联接线	23	§ 8-1 通风系统	114
§ 2-7 实用繞組接线图和均压联接线表	24	§ 8-2 通风的计算	118
§ 2-8 繞組的制造	26	§ 8-3 風扇	123
§ 2-9 繞組的絕緣	28	§ 8-4 徑向通风的近似计算法	131
§ 2-10 繞組的选择	33	§ 8-5 氬气冷却	132
§ 2-11 繞組的尺寸	34	§ 8-6 导体内部冷却	134
第三章 交流电机的电枢繞組	38	第九章 电机的热计算	139
§ 3-1 一般概念	38	§ 9-1 一般概念	139
§ 3-2 单层繞組	38	§ 9-2 均匀物体的发热	139
§ 3-3 双层繞組	41	§ 9-3 稳定发热计算	141
§ 3-4 短路轉子繞組	49	§ 9-4 按照等值热路图计算稳态温升	144
§ 3-5 繞組的制造	49	§ 9-5 热计算的简化公式	145
§ 3-6 繞組的絕緣	54	§ 9-6 发热时间常数及不稳定发热过程的计算	153
§ 3-7 繞組的尺寸	58	§ 9-7 电动机启动时繞組的发热	153
第四章 激磁、补偿和阻尼繞組	63	第十章 电机的机械计算	158
§ 4-1 直流电机的激磁繞組	63	§ 10-1 一般概念	158
§ 4-2 补偿繞組	67	§ 10-2 换向器的计算	159
§ 4-3 凸极同步电机的激磁繞組	67	§ 10-3 轉軸的计算	169
§ 4-4 阻尼繞組	68	§ 10-4 槽楔及扎线的计算	175
第五章 磁路的计算	69	§ 10-5 轉子铁芯的计算	177
§ 5-1 空气隙的磁势	69	§ 10-6 同步电机焊接轉子支架的计算	179
§ 5-2 齿磁势	73	§ 10-7 磁极固定的计算(同步机)	180
§ 5-3 磁极的磁势	76	§ 10-8 直流电机主极及换向极的螺钉的	
§ 5-4 定子軛的磁势	77		

計算.....	182	§ 13-8 激磁繞組	352
§ 10-9 机座刚度及强度計算概念	184	§ 13-9 阻尼(启动)繞組	356
第十一章 直流电机的計算	185	§ 13-10 同步电机的参数和时间常数.....	358
§ 11-1 一般概念	185	§ 13-11 同步电机的特性.....	361
§ 11-2 电磁負載	187	§ 13-12 計算例题.....	366
§ 11-3 主要尺寸的确定	188	第十四章 隐极汽輪发电机的計算	384
§ 11-4 极数的选择	191	§ 14-1 一般概念	384
§ 11-5 电樞的繞組, 槽及軛	192	§ 14-2 电磁負載的选择	384
§ 11-6 换向器(整流子)及电刷.....	197	§ 14-3 定子鉄芯内徑和外徑的选择	386
§ 11-7 空气隙	199	§ 14-4 定子鉄芯长度的选择	387
§ 11-8 磁极与机座	199	§ 14-5 定子槽数的选择	389
§ 11-9 空載特性曲綫, 过渡特性曲綫	200	§ 14-6 定子槽形及其几何尺寸	389
§ 11-10 激磁繞組.....	202	§ 14-7 定子繞組有效匝数的选择	390
§ 11-11 补偿繞組.....	204	§ 14-8 定子繞組节距系数的选择	391
§ 11-12 换向的檢查和换向磁极的計算.....	205	§ 14-9 气隙尺寸的选择	392
§ 11-13 运行特性.....	211	§ 14-10 轉子外徑, 内徑和长度的选择.....	394
§ 11-14 极限容量的电机.....	215	§ 14-11 轉子槽分度数及綫槽数的选择.....	394
§ 11-15 計算例题.....	220	§ 14-12 轉子槽形及其几何尺寸.....	395
第十二章 异步电机的計算	262	§ 14-13 轉子激磁繞組的选择.....	395
§ 12-1 一般概念	262	§ 14-14 参数及运行特性.....	396
§ 12-2 电磁負載	263	§ 14-15 隐极汽輪发电机的磁路計算.....	396
§ 12-3 主要尺寸的決定	264	附录 I 电樞外徑.....	403
§ 12-4 定子的繞組, 槽和軛	270	附录 II 鋼及鉄的磁化曲綫及表格.....	403
§ 12-5 轉子的繞組, 槽和軛	272	附录 III 电工鋼片的比耗.....	407
§ 12-6 空气隙	280	附录 IV 繞組導綫.....	408
§ 12-7 异步电机的参数	281	附录 V 电机用电刷.....	412
§ 12-8 运行特性及启动特性	293	附录 VI 直流电机电樞繞組絕緣举例	415
§ 12-9 計算例题	306	附录 VII 交流电机电樞繞組絕緣举例.....	420
第十三章 凸极同步电机的計算	340	附录 VIII 繞組系数.....	433
§ 13-1 一般概念	340	附录 IX 下册符号表.....	436
§ 13-2 电磁負載	341	附录 X 卡特系数.....	438
§ 13-3 主要尺寸的決定	342	附录 XI 磁极漏磁系数.....	440
§ 13-4 定子的繞組, 槽和磁軛	346	附录 XII 交流电机槽漏磁感抗的計算.....	441
§ 13-5 空气隙	348	附录 XIII 齿端漏磁感抗的計算	446
§ 13-6 轉子极和軛	349	附录 XIV 槽内电流外挤現象的分析	447
§ 13-7 空載特性	351	附录 XV 涡流反应系数	453
		附录 XVI 空載时的附加鉄損耗	457
		附录 XVII 厚壁圓筒承受均称載荷时之应力 与变形計算.....	461

第一章 主要尺寸的決定

电机的主要尺寸系指它的电枢直径 D 和长度 l 。对于直流电机而言，直径 D 系指其电枢的外径；对于一般的异步机和同步机而言，直径 D 系指定子的内径。

D 和 l 也主要决定了电机的其它一些尺寸：磁极的尺寸，定子的外径，轴和端盖的尺寸等等。电机的重量和价格以及其工作特性和可靠性都决定于主要尺寸 D 、 l 和它们两者之间的比值。

因此决定主要尺寸 D 和 l 应视为电机设计的一个最基本的步骤。

尺寸 D 和 l 与电机的容量，转速，以及所选择的电磁负荷有关。磁负荷主要决定于空气隙中的磁通密度 B_g ，而电负荷主要决定于线负荷 A （安/厘米）。

§ 1-1 电机常数

上述各因素间的关系可用下面的方法求得：对于交流电机，计算容量

$$P' = mEI \times 10^{-3} \text{ (仟伏安)}, \quad (1-1)$$

式中 m ——相数；

E ——电枢绕组中的相电势(伏)；

I ——电枢绕组中的相电流(安)。
电枢（或定子）中的电势

$$E = 4k_B k_0 f W \Phi \times 10^{-8} \text{ (伏)}, \quad (1-2)$$

式中 k_B ——磁场波形系数，当磁场为正弦波形时等于1.11；

$$f = \frac{pn}{60} \text{ (赫)}. \quad (1-3)$$

为电流的频率，

式中 p ——极对数；

k_0 ——绕组系数；

W ——每相匝数；

Φ ——每极磁通；

$$\Phi = \alpha_s \tau_s l_s (\text{韦}), \quad (1-4)$$

式中 α_s ——极弧计算系数；

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (1-5)$$

τ ——为极距；

l_s ——电枢的计算长度(厘米)；

B_g ——空气隙中的最高磁通密度(高斯)。

线负荷

$$A = \frac{2mWI}{\pi D} \text{ 安/厘米}. \quad (1-6)$$

把(1-2)式代入(1-1)式并考虑到上述的一些关系式，可得到：

$$\frac{D^2 l_s n}{P'} = \frac{6.1 \times 10^{11}}{\alpha_s k_B k_0 A B_s} \quad (1-7)$$

对于直流电机, 计算容量

$$P' = E_a I_a 10^{-3} \text{ (瓩)}, \quad (1-8)$$

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{pn}{60} \frac{N}{a} \Phi \times 10^{-8} \text{ (伏)} \\ &= \frac{pn}{60} \frac{N}{a} B_s \alpha_s l_s \frac{\pi D}{2p} \times 10^{-8} \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中 N 为直流电机电枢绕组的有效导体数。

令

$$\begin{aligned} A &= I_a N / 2a\pi D, \text{ 则} \\ I_a &= A 2a\pi D / N \end{aligned} \quad (1-10)$$

将 (1-9), (1-10) 式代入 (1-8) 式, 得

$$D^2 l_s n / p = 6.1 \times 10^{11} / \alpha_s A B_s \quad (1-11)$$

将 (1-11) 式和 (1-7) 式作一比较, 可知: 对于交流电机和直流电机, 其主要尺寸和容量, 转速, 电磁负载之间的关系是类似的, 都可以式 (1-7)

$$D^2 l_s n / p' = \frac{6.1 \times 10^{11}}{\alpha_s k_B k_0 A B_s} = C_A$$

来表示。只是在用于直流电机时, 令 $k_B k_0 = 1$ 。

系数 C_A 称为阿诺特 (Arnold) 电机常数。它的倒数 $\frac{1}{C_A} = K_A$ 称为电机的利用系数。在沒有徑向通風槽的电机中, 电枢的计算长度 l_s 和实际长度 l_1 相差很小; 在具有徑向通風槽的电机中, 计算长度 l_s 略小于实际长度 l_1 ; 在异步机中約小 10~15%; 在直流机和同步机中, 約小 5~10%。极弧计算系数 $= B_{scp} / B_s = 0.63 \sim 0.72$, 式中 B_{scp} , B_s 为空气隙中之平均磁通密度和最大磁通密度。

不同型式的电机的计算容量 P' 系按給定的額定容量 P_N 来决定。

对于直流电机,

$$P' = E_a I_a \times 10^{-3} \text{ 瓩},$$

式中 $E_a = k_u U_N$; $I_a = k_I I_N$ 。 U_N 及 I_N 为額定电压及电流。 k_u 为考虑到电枢压降而引入的系数, k_I 为考虑到并激磁場繞組中的电流而引入的系数。

对于額定容量 P_N 为 1~1000 瓩的直流发电机,

$$k_{u_g} = 1.08 \sim 1.02; \quad k_{I_g} = 1.06 \sim 1.01;$$

$$k_u = k_{u_g} k_{I_g} = 1.14 \sim 1.03.$$

因此

$$P' = k_u U_N I_N \times 10^{-3} = k_u P_N \text{ 瓩}. \quad (1-12)$$

对于額定容量 P_N 为 1~1000 瓩的直流电动机, $k_{u_m} = 0.92 \sim 0.98$; $k_{I_m} = 0.94 \sim 0.99$,

$$k_g = k_{u_m} \cdot k_{I_m} = 0.87 \sim 0.97.$$

因此

$$P' = k_g U_N I_N \times 10^{-3} = k_g P_N / \eta_n \text{ 瓩}, \quad (1-13)$$

式中 η_n 为电动机的效率, 見 § 11-3。

对于异步电动机

$$P' = m E I_N \times 10^{-3} = m k_B U_N I_N \times 10^{-3} = \frac{k_B P_N}{\eta_n \cos \varphi_n} \text{ (仟伏安)}, \quad (1-14)$$

式中 $k_B = 0.98 \sim 0.93$ (图 5-9);

η_n 及 $\cos \varphi_n$ 值見 § 12-3

对于同步发电机

$$P' = mE_s I_n \times 10^{-3} = m k_E U_n I_n \times 10^{-3} = \frac{k_E P_n}{\cos \varphi_n} \text{ (仟伏安)} \quad (1-15)$$

k_E 值与給定的 $\cos \varphi_n$ 值有关 (見 § 13-3); 如果 P_n 是以仟伏安表示的, 則 $P' = k_E P_n$ 。

对于同步电动机

$$P' = mE_s I_n \times 10^{-3} = m k_E U_n I_n \times 10^{-3} = \frac{k_E P_n}{\eta_n \cos \varphi_n} \text{ (仟伏安)} \quad (1-16)$$

k_E 值与給定的 $\cos \varphi_n$ 值有关 (見 § 13-3)。

同步电动机的效率 η_n 見 § 13-3。

关系式 (1-7) 是决定电机主要尺寸的依据。許多重要的关系式都可从該式求得。 $D^2 l$ 值和轉子的体积成比例; 定子的体积也和它有关。因而 $\frac{D^2 l}{P'}$ 值大略确定出电机每单位容量的体积。从 (1-7) 式可以看到: 在 B_s 和 A 不变时上述的体积和轉速 n 成反比, 亦即电机的尺寸和它的重量随轉速的增加而减少。上述的关系在正常轉速电机的实际制造中已加以証实。

从 (1-7) 式也可以看出: 电机的尺寸在很大程度上和所选用的电磁負載 A 及 B_s 有关: 这类負載愈大, 电机的尺寸便愈小。这也說明了为什么要力求选择較大的 A 和 B_s 的值。但必須注意到在 A 和 B_s 的值太大时, 将使电机的部件受到不能容許的过热, 电机的运用特性恶化和制造时的困难。此外, 應該在一定的範圍內选择 A 与 B_s 間的比值, 因为这个比值决定了电机的工作特性。近代电机制造的实践和电机运用的长期經驗已使确定适用的 A 和 B_s 的範圍成为可能。

由实践和經驗所确定的 A 和 B_s 的数值, 当然不是最高的数值。材料 (例如电工鋼和絕緣材料) 的改进, 选择更合理的电机几何形状 (电机尺寸間的关系) 和通風的改善, 可使电机的利用情况提高, 或者在容量相同时可使电机的尺寸减小。

A 和 B_s 两值和电机的容量和轉速有关, 或者說得更确切一些, 即和极距 τ 及轉子的圓周速度 V_p 有关。

对小容量 (τ 不大) 的电机, 必須选用較小的 A 和 B_s 值, 使不致于得到过坏的工作特性, (例如: 降低异步电动机的效率和功率因数)。

对中容量和大容量的电机, A 和 B_s 的值可以提高, 因为这对它們工作特性恶化的影响較小。当 τ 和圓周速度愈大时, 或者当 τ 一定而极数愈多时, 可以采用的 A 和 B_s 值亦愈大。

这样, 在电机容量和它的轉速增高时, A 和 B_s 就跟着增加。因之, 电机常数 " C_A " 实际上不是固定的数值, 而是随着电机容量的增加而显著减小。

現在我們再来探討变压器的計算容量表示式。变压器的計算容量:

$$P_n = m E I_n \times 10^{-3}, \quad (1-17)$$

$$\text{而} \quad E = 4.44 f \Phi W \times 10^{-8} = 4 k_B f W B_c k_c \frac{\pi D^2}{4} \times 10^{-8}. \quad (1-18)$$

$$\text{令:} \quad A = \frac{W I_n}{l},$$

$$\text{則:} \quad I_n = \frac{A l}{W}. \quad (1-19)$$

将 (1-18) 及 (1-19) 式代入 (1-17) 式, 得到:

$$\frac{D^2 l f}{P'} = \frac{10^{11}}{m k_B k_c \pi A B_c} \quad (1-20)$$

将 (1-20) 与 (1-7) 式作一比较, 就可看出: 对于交流电机、直流电机和变压器, 其主要尺寸和容量、转速(或频率)、电磁负载之间的关系均是类似的。其间的关系存在着内在的统一性。

§ 1-2 电机制造中的几何相似律

试研究一系列容量递增而几何形状彼此相似的电机, 它们具有相同的电流密度、磁感应、转速和极数。所谓几何形状相似系指电机相对应的尺寸间有一个相同的比值。(例如, 对几何形状相似的两个电机 A 和 B , $\frac{D_A}{D_B} = \frac{l_A}{l_B}$ 等等)。

电机的计算容量和电动势及电流的乘积成比例, 即:

$$P' \equiv EI_0 \quad (1-21)$$

在频率和转速已定的情况下, 电势 E 和电枢绕组的匝数 W 及磁通 Φ 成比例。即绕组中的电动势可由下式表示:

$$E \equiv W\Phi \quad (1-22)$$

把 $\Phi = BS_c$ (式中 B 为截面积 S_c 中的磁感应) 代入上式得:

$$E \equiv WBS_c \quad (1-23)$$

电流 $I = \Delta S_n$,

式中 Δ ——电流密度; S_n ——导体截面积。因之 (1-21) 式可改写作

$$P' \equiv WBS_c \Delta S_n \quad (1-24)$$

如果所用线匝的铜的总截面积以下式表示:

$$S_m = WS_n \quad (1-25)$$

那么

$$P' \equiv B \Delta S_c S_m \quad (1-26)$$

面积 S_c 和 S_m 各和长度的因次 l 的平方成比例, 因此:

$$S_c S_m \equiv l^2 \cdot l^2 = l^4 \quad (1-27)$$

从而在当 B 和 Δ 为定值时:

$$P' \equiv l^4 \quad (1-28)$$

或:

$$l \equiv P'^{\frac{1}{4}} \quad (1-29)$$

有效材料(铜和钢)的重量和它们的体积成比例, 亦即和长度因次的立方成比例:

$$G \equiv l^3 \quad (1-30)$$

因而:

$$G \equiv P'^{\frac{3}{4}} \quad (1-31)$$

因此, 在尺寸增大时, 电机重量的增加比容量的增加来的慢。

可以认为: 在磁感应和电流密度已给的情况下, 有效材料的价格 C_{axm} 及它的损耗 ΣP 也和重量成比例:

$$C_{axm} \equiv G \equiv P'^{\frac{3}{4}} \quad (1-32)$$

$$\Sigma P \equiv G \equiv P'^{\frac{3}{4}} \quad (1-33)$$

如果把电机的重量、价格和它的损耗与容量对比, 则得:

$$\frac{G}{P'} = \frac{C_{akm}}{P'} = \frac{\Sigma P}{P'} = \frac{P'^{\frac{3}{4}}}{P'} = \frac{1}{P'^{\frac{1}{4}}} \quad (1-34)$$

因而，在 Δ 和 B 的数值保持不变时，对一系列容量递增，几何形状相似的电机，每瓩或每仟伏安有效材料的重量和价格，以及它们的相对损耗值（每单位容量的损耗）和容量的 $\frac{1}{4}$ 次方成反比。

将(1-14)式和上册(2-13)(2-15)式作一比较，我们可知：有效材料、重量、价格、损耗和容量之间的关系式不仅适用于电机，且亦适用于变压器。因之，从决定主要尺寸的关系式中〔式(1-7)及(1-20)〕以及从几何相似律中，我们都可以看到电机和变压器之内在的统一性。

这也说明了在近代电气设备上为什么有采用大容量的电机（或变压器）来代替数个总容量相等的小容量电机（或变压器）的倾向（在这种代替是可能而又合理的地方）。

在一系列几何形状相似而容量递增的电机中，假定它们的转速不变，那么，它们的转矩 M 将和容量（功率）成比例：

$$M = P' = I^4 \quad (1-35)$$

如果研究每分钟转数 n 各不相同的同一类型的电机，则它们的容量将和转数成比例：

$$P' = Mn = I^4 n \quad (1-36)$$

亦即在电机尺寸和电磁负载 Δ 及 B_s 相同时，电机的容量和转速 n 成正比例。实际上当电机的转速增加到某一限度时，电机的容量比转速 n 增加得快，这是因为冷却条件的改善，可使 B_s 和 Δ 的数值略为增高。

上面已经指出〔等式(1-33)〕：电机的损耗和长度因次的立方成比例。但冷却面积的增加只和长度因次的平方成比例。因此，随着电机容量的增加，必须提高它们的冷却强度而放弃它们几何形状上的相似。

(1-26)~(1-36)的关系式只在决定电机容量、损耗和电机尺寸的关系时作为一般参考，而且它们也只是近似的，实际上设计容量递增的电机时，由于构造上，工艺上和别的原因，总在某种程度上和这些关系式有出入。

§ 1-3 派生重量与派生损耗

因为有效重量与损耗根据(1-33)(1-34)式正比于容量的 $\frac{3}{4}$ 次方。所以重量及损耗和功率的 $\frac{3}{4}$ 次方之比代表某常数（如果负载密度不变并且电机几何上是相似的）。这种常数称做派生重量，它表征出电机几何尺寸的比例关系或电机的适合性，最适合的与最便宜的将是这种电机，在其中：

$$g_{np} = \frac{G}{P^{3/4}}, \quad (1-37)$$

$$p_{np} = \frac{\Sigma P}{P^{3/4}}, \quad (1-38)$$

为最小。

§ 1-4 适合定则

如欲设计一电机，假定其容量及转速为已知，则即使负载密度（磁通密度及电流密度）

都已选取好, 所設計出的电机的几何尺寸及損耗等仍可有许多不同的能量。首先发生关于电机直径与长度之比的問題、关于电机銅鉄重量之比的問題以及关于銅損、鉄損之間比值的問題; 其次发生关于槽宽齿宽比的問題、关于鉄軛与齿的价格比的問題(在旋轉电机中), 以及关于鉄軛与鉄柱的价格比的問題(在变压器中)。在电机制造剛萌芽的时期, 設計者的設計原則可以下列三个詞表达出来: “假定”、“試驗”、“修正”。这种設計方法主要依靠設計者的眼光、經驗与艺术。第一次世界大战后, M. Vidmar 氏等导出了簡單的“經濟定則”及“适合性原則”。虽然这些原則的应用范围是有限的, 并且是不十分完善的; 但从設計方法上来讲, 这些原則在現在仍旧有其一定的参考价值。对于变压器而言, 这些原則包括:

1) 若变压器的容量及总損耗为已知, 則在銅損耗等于鉄損耗时, 变压器的价格将为最便宜;

2) 若容量与总損耗为已知, 則在銅价等于鉄价时, 变压器价格将为最便宜;

3) 鉄軛价格应等于鉄柱价格;

4) 鉄軛中的損耗应等于鉄柱中的損耗。

对于电机而言这些定則包括:

1. 电樞內的損耗应四等分分配:

a) 有效銅中的損耗;

b) 端接部分中的銅損耗;

c) 齿中的損耗;

d) 軛中的損耗。

2. 这四部分的价格應該是相等的并且各等于有效材料总价格的1/4。

这些定則的証明是很簡單的。例如: 第一定則——銅鉄損失的分配定則。我們是从这样的条件出发来証明这个定則, 即在电机模型为已知的条件下, ΔB 的乘积达到最大值时容量为最大。但在已知总損耗的条件下, 当銅鉄損耗相等时, ΔB 的乘积为最大, 即当

$$\Delta^2 k_m G_m = B^2 k_{cm} G_{cm} \quad (1-39)$$

的时候 ΔB 的乘积为最大。

系数 k_m 及 k_{cm} 各等于在单位电流密度与单位磁通密度时每公斤銅重与鉄重中的損耗, 对于銅而言 $k_m = \frac{\rho}{\gamma_m}$, 銅的密度 γ_m 以公斤/厘米³ 計, 电阻系数 ρ 以欧×厘米²/厘米計, 則上式中 Δ 以安/厘米² 計, 对于鉄而言 $k_{cm} = P_{10} \times 10^8$, P_{10} 为磁通密度为 10^{-4} 韦/厘米² 时鉄的比耗, 上式中 B 以韦/厘米² 計。

第二定則——价格分配定則——的証明比較复杂些。首先証明在已知电損耗 ΣP_m 及損耗比 $\xi = \frac{P_m}{P_{cm}}$ 的条件下, 銅鉄重量的乘积等于一个常数。

$$G_{cm} \cdot G_m = \text{常数}。$$

然后証明: 既然总价

$$C_{akm} = c_{cm} G_{cm} + c_m G_m,$$

这里 c_{cm} 及 c_m ——鉄和銅的单价, 則当銅价等于鉄价时, 总价格为最小即:

$$c_{cm} G_{cm} = c_m G_m. \quad (1-40)$$

損耗与价格按四等分分配的定則可利用派生重量或派生价格最小值的条件来証明。我

們假定任何一个电机模型，其所有尺寸都保持不变，仅将其长度改变。

一 这样，容量将正比于长度 x ，而总价将按下式变动：

$$C_{axm} = C_A + \tilde{C}_a x,$$

式中 C_A ——繞組端接部分的价格保持不变；

$\tilde{C}_a$ ——全部有效材料每单位长度的价格。

派生价格

$$C_{np} = \frac{C_{axm}}{P^{3/4}} = k \frac{C_A + \tilde{C}_a x}{x^{3/4}}.$$

因此，当

$$C_A = \frac{1}{3} \times \tilde{C}_a = \frac{1}{4} \times (x \tilde{C}_a + C_A) = \frac{1}{4} C_{axm} \quad (1-41)$$

时，派生价格将为最小。这可由方程式

$$\frac{\partial C_{np}}{\partial x} = 0$$

得到。

这样繞組端接部分的价格等于全部有效部分（銅与鉄）价格的 1/3 或有效材料总价的 1/4。

用类似的方法，即只改变槽的高度而电樞长度不变，可証明当鉄軛价格等于有效材料总价的 1/4 时，派生价格为最小，即当

$$C_R = \frac{1}{4} C_{axm}. \quad (1-42)$$

按公式 (1-40) 銅价等于鉄价。由此得出价格按四等分分配的定則。同样的，由派生損耗的最小值出发可証明損耗按四等分分配的定則。

§ 1-5 在实际应用中对于适合定則的偏差

研究电机和变压器的各种結構，我們可发现（在个别情况下）十分“适合”的电机，但在很多情况下設計出的电机和变压器都違背了适合原則，并且有时違背得很厉害。

它的主要原因有下列各点：

1. 設計一个电机不仅应使其价格为最小，并且主要地應該获得良好的工作特性。为了得到电机的所給定的特性（电的特性、参数、短路电流、电压降及功率因数等），我們时常遇到与适合原則相矛盾的要求，所有这些要求我們称之为技术要求，我們当然應該首先滿足这些要求。

例如：在快速汽輪发电机中，軛的損耗与价格超过齿的損耗与价格 3~4 倍，有时超过还要多，而适合原則要求軛損等于齿損、軛价等于齿价。如果我們將这些損耗与价格作成相等，則必須将齿高增加到不能容許的高度，并且該电机的工作特性将十分不完善了。

2. 在实际应用中适合原則本身存在的矛盾。实际应用时不可能（并且亦不恰当）同时滿足“損耗四等分”和“价格四等分”的原則。

在变压器中当銅損等于鉄損时，在个别情况下得到太小的电流密度值。

由公式

$$\xi = \frac{P_m}{P_{cm}} = \frac{\Delta^2 k_m G_m}{B^2 k_{cm} G_m},$$

得出

$$\Delta = B \sqrt{\xi \frac{k_{cm} G_{cm}}{k_m G_m}} \quad (1-43)$$

以銅鉄价格比

$$\psi = \frac{C_{cm}}{C_m} = \frac{G_{cm} m_{cm}}{G_m m_m} \quad (1-44)$$

代入 (1-43) 式, 得到

$$\Delta = B \sqrt{\xi \psi \frac{k_{cm} m_m}{k_m m_{cm}}} \quad (1-45)$$

在理想的适合原則下

$$\xi = 1, \psi = 1。$$

对于电机而言

$$\xi = \frac{\text{槽中銅損}}{\text{齿中的損耗}},$$

$$\Delta = B \sqrt{\xi \frac{k_{Fe}}{k_{Cu}} \frac{G_{Fe} Z}{G_{Cu} z}} \quad (1-45 a)$$

如果取价格比 $\frac{m_{Cu}}{m_{Fe}} = 4$, 而損耗系数 $k_{Fe} = 1.6 \times 10^8$,

$$k_{Cu} = \frac{2.8 \times 10^{-6}}{8.9} \times 1000 = 2.6 \times 10^{-4},$$

則得

$$\Delta = 1.57 \times 10^6 B。$$

例如: 对于变压器而言, 由于損耗与溫升的限制, 磁通密度 B 很少有大于 1.5×10^{-4} 韦/厘米² 者, 这样由 (1-43) 式, 电流密度 Δ 将等于 235 安/厘米² 即 2.35 安/毫米², 这个电流密度值常常显示出过于低小 (在良好的冷却系統下)。設計者被迫違背損耗与价格定則, 并且按照 Vidmar 的意見應該均匀地違背这两个定則。設計者根据 (1-44) 式希望提高电流密度值取

$$\xi > 1,$$

同时

$$\psi > 1。$$

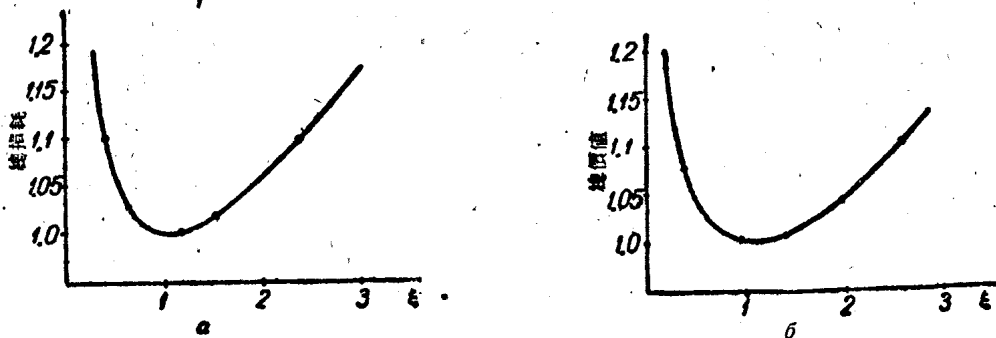


图1-1 适合定則的偏差。

这样就价格而言, 当 $\xi = \psi$ 时, 价格的增高为最小, 并且損耗与价格定則不再是各自独立的。

由图 1-1 a、b, 可知即使在頗大的程度上違背了适合定則, 电机价格并不增加很多, 但是違背得越远电机价格就越大。图 1-3 a 表示出对于适合原則偏差达到 200% 时, 总損耗增加 6%; 偏差达到 300% 时总損耗增加 16%。对于价格定則亦有类似的情况, 如图 1-1 b 所示。

当 ξ 大大地超过 1 时, $\psi = \xi$ 就不可能了, 因为如果 $\psi = \xi$, 由 (1-44) 式得出的 Δ 值将过大, 超过温升所许可的限度, 因此当 $\xi = 3 \sim 4$, $\psi = 1$ 。

§ 1-6 主要尺寸的決定

上述的适合定則由于在实用中的偏差, 一般不直接根据这些原則来决定主要尺寸, 这些原則只能作为設計时的参考。

决定主要尺寸时, 一般采用 (1-7) 式作为計算之基础。由 (1-7) 式

$$\frac{D^2 l_n}{r'} = \frac{6.1 \times 10^{11}}{\alpha_s k_s k_o A B_s}。$$

可知电机的主要尺寸和电磁負載 A 及 B_s 有关。如果正确选择 A 和 B_s , 那末从 (1-7) 式可以求得 $D^2 l_n$ 。以后的問題便是要从已求得的 $D^2 l_n$ 来分別决定 D 和 l_n 。决定 D 和 l_n 系根据所选用的比值

$$\lambda = \frac{l_n}{r}。 \quad (1-46)$$

(1-7) 式中系数 α_s , k_s , k_o 均在某一定的范围之內, 变化很少, 轉速 n 一般是給定的, P' 可根据給定的 P_n 初步算出, 因之决定尺寸 D 和 l_n 主要在于合理的选择电磁負載 A 和 B_s 以及尺寸比 λ 。

a) 电磁負載 A 、 B_s 的选择

由 (1-7) 式可知为了縮小电机的体积 $D^2 l_n$, 必須选择較高的电磁負載 A 和 B_s , 但較高的 A 和 B_s 将对于电机的工作特性温升等产生不良的影响。如果我们选取較高的 A 将导致:

- 1) 电机尺寸及体积較小, 可以节省鋼鉄材料。
- 2) 需要較多的銅, 这是由于电机的尺寸小了。在 B_s 为一定的条件下电机的磁通小了, 这时为了产生一定的感应电势, 必須采用較多的匝数因之用銅量增多了。
- 3) 增加了繞組单位表面面积所产生的銅耗, 因而增加了它的温升。繞組有效部分(在槽中的部分)的損耗为

$$P'_{sA} = m 2 W r' I^2, \quad (1-47)$$

式中 r' ——每根导体在槽部分的电阻,

$$r' = \rho \frac{l_l}{s_n}; \quad (1-48)$$

式中 s_n ——导体截面。

将 (1-48) 式代入 (1-47) 得

$$P'_{sA} = 2 m W \rho l_l \Delta。$$

每单位电樞表面的銅耗

$$q = \frac{P'_{sA}}{\pi D l} = \frac{2 m W \rho l_l \Delta}{\pi D l} = \rho \Delta A [\text{瓦/厘米}^2],$$

式中 ρ 以欧·厘米²/厘米計, Δ 以安/厘米², A 以安/厘米計。

如果 Δ 以安/毫米², A 以安/厘米, ρ 以欧·毫米²/米計,

$$\text{則} \quad q = \frac{\rho \Delta A}{100} \text{瓦/厘米}^2。 \quad (1-49)$$

4) 改变了电气参数, 因为在其他条件不变的情况下, 繞組电抗的标么值随 A/B_s 比

值成正比的。这将影响到电机的工作特性。

5) 在 B_s 为一定的条件下, 由于铁重减小, 铁耗将减小。

由上述分析可知线负载 A 的大小不仅和电机的尺寸、重量有关, 并且与电机的工作特性亦有密切的关系。因之在设计时必须选择合理的 A 值, 对于一般交直流电机来讲, A 值约为 200~500 安/厘米, 详见第十章~第十四章。

如果我们选取较高的 B_s 将导致:

- 1) 电机尺寸及体积较小, 可以节省钢、铁材料。
- 2) 增加了铁耗, 因为铁耗与磁通密度的平方成正比的。
- 3) 增加了硅钢片的饱和程度, 因之增加了激磁电流的数值; 激磁电流的增加使异步电机的功率因数降低, 而且在电机的激磁绕组中由于激磁电流的增加而使铜耗增加。
- 4) 改变了电气参数及工作特性。理由见 § 1-5 a。

由上述分析, 可知磁通密度 B_s 的大小不仅和电机的尺寸、重量有关, 并且与电机的工作特性亦有密切的关系。因之在设计时必须选择合理的 B_s 值。对于一般的交直流电机来讲, B_s 值约为 6000~8000 高, 详见第十章~第十四章。

6) 尺寸比 $\lambda = l_s / \tau$ 的选择

前面已经指出, 电机的主要尺寸不仅和电磁负载 A 和 B_s 有关, 并且与所选用的尺寸比 $\lambda = l_s / \tau$ 亦有密切的关系。

对一般的直流电机, 普通选用 $\lambda = 0.6 \sim 1.5$ 。 λ 愈大, 所得的电机也就比较长。按照材料的消耗, 机身长的电机价格可以较廉。这是因为在这类电机里, 绕组的铜利用的比较好。此外电机的结构部件也比较轻。不过由于绕组换向元件中的电抗电动势增大, 整流的情况变坏, 同时, 冷却的条件也较差, 供在这类长的电机上不得不采用较复杂的轴向通风。对小容量电机, 常常必须采用较低的 λ , 以便在电枢上获得足够的槽数。在某些情况下, 采用提高的 λ 值是为了要得到不大的飞轮转矩 (GD^2)^① 和在启动时减小电机的升速时间和损耗。

对容量不大的异步机, 选择 $\lambda = 0.5 \sim 1.2$; 对大容量的电机, 则选择 $\lambda = 0.9 \sim 2$, 其中较大的 λ 系在极数较多时采用。电机的过载能力和它的 $\cos \varphi$ 与 λ 值有关, 最适宜的数值约为 $\lambda = 1 \sim 1.3$ 。当 $\lambda = 1.5 \sim 3$ 时, 可得到在铜的重量和损耗上最适宜的电机。选择 λ 同时也要考虑到电机通风系统的设计。轴向通风时所取用的 λ 比径向通风时所取用的来得大。在径向通风时, 虽然需要消耗较多的材料, 但是因为定子和转子的装配以及绕组的安放容易, 而且常常不需要装置特殊的通风设备, 结果在热量分配较均匀, 制造困难较小的情况下, 电机的运用更为可靠。

对凸极同步电机, λ 和极数很有关系。正常的电机采用 $\lambda = 0.9 \sim 2$ (当容量为 100~1000 瓩), 其中上限属于极数较多的电机。对水轮发电机中转速高者, 必须增大 λ , 因而减小转子的直径, 使不至于有过高的圆周速度。相反的, 对必须具有较高转动惯量的电机, 则必须减小 λ , 以得到较大的转子直径。

这样, 我们看到: 关于决定 l_s 对 τ 的比值亦即在极数已知时选择 l_s 对 D 的比值的问题, 必须在考虑很多情况后解决。这个问题主要要在经验数据的基础上亦即在合理设计的

① 即转动惯量。

电机数据的基础上求解；这些电机的制造和运用，已证实它们制造时的简单和经济、运用时的可靠性、效率、 $\cos \varphi$ 和其他工作特性等的优良品质。

在以后研究各式电机的计算时，对 λ 的选择将有更详细的叙述。

§ 1-7 成系列电机和单独电机的计算

在电机制造厂中，很少碰到要设计单独的电机，只有当这个电机和制造厂内成批生产的电机，例如，在容量、运用特性和结构等相差很大时，才需要这种设计。即在这种情况下，也必须考虑到工厂内现有的正规设备（例如冲模、模型、样板、量具等），使所选择的电机尺寸，有可能利用这些正规设备。

通常需要设计的是成系列容量递增的电机——在结构上有统一共同性并作为大批生产的电机。

成系列电机的设计是一个复杂而又重要的任务，因为在设计时，必须考虑到很多的要求，而它们又往往是互相矛盾的：一方面要求电机在制造时尽可能采用较少的材料，要求它们的结构简单、价格低廉，但另一方面又要求电机工作可靠，电机的特性不比国家标准所规定的特性为差。

所有这些要求都只能部分的满足。设计者必须选择适当的解决办法。在某种程度上，可放弃掉，例如单纯由材料消耗观点出发所认为是最适宜的电机尺寸的比值。

在设计成系列的电机时，合理的生产组织和生产工艺等问题具有重大的意义。而这些问题又和零件的划一和结构组合、零件的标准化等问题有密切的关系（这里也牵涉到“互换性”的问题）。

对异步和同步电机，就由于这些问题迫使设计者不得不这样选择定子的外径，即在单独改变定子的内径并保持或仅稍稍改变电机长度的情况下，便可以得到不同容量和转速的电机，并且对极数相同的 2~3 种电机，可以保持相同的内径而只改变它们的长度。

对数种容量和转速的直流电机，设计者也同样地选择相同的电枢外径，而仅改变电枢的长度。

这样选择的结果，大大地减少了冲压转子和定子或磁极钢片所需的冲模数量，减少了机座和轴承端盖的模型。对成系列的电机，可以采用同一的轴径、轴承、整流子和绕组支架，并大大地减少了量具的数量等。

在选择异步和同步电机的定子外径或直流电机的电枢外径时，必须考虑电工钢片的最合理的裁剪率，直流电机电枢标准化直径列于附录 I 表 I-1 中；当电枢直径 D 大于 368 毫米时，建议采用表 I-3 中所列的尺寸。

异步电机和同步电机定子的标准化外径列于附录 I 表 I-3 中；当直径 D_a 大于 990 毫米时，必须采用扇形片，这时的标准化可参阅该表下首所列尺寸（这些尺寸尚未最终定案）。

已经指出，在成系列交流电机中，某一种定子外径，往往有数种适合本身极数的内径和它配合，以便能够应用同一种定子外壳，轴承端盖和其他的部件。这时，电机的长度可以保持不变，或者变化很少。对极数相同的交流电机，单靠长度的改变，可以得到不同的容量。这种长度的变化，一般只限于两种。当定子的直径相同时，交流电机线槽的尺寸一般保持不变，它和定子的长度及电压无关。

在成系列的直流电机中，每一种电枢外径配合一个定子内径，同时，对若干种容量和转速的电机，可以保留下同一的机座和磁极的冲模，但槽数和它们的尺寸却跟着电枢长度和电压而改变，这又和限制选择槽数的整流子有关。

有时在选择主要尺寸时，必须预见到各种变型的电机制造的必要性，例如，容量自1~100瓩，大量应用的各式异步电动机。这里必须注意，如何做到防护，封闭和防爆，以及如何提高起动转矩和最大转矩，或如何提高转差率。

在所有情况中；当选择主要尺寸的比值时，必须拿所推荐的 λ 值作为根据。选择此值须适合于所采用的通风系统，并考虑到对两相邻型式获得可以接受的 λ 值的必要性，此两相邻型式具有相同的定子直径或电枢直径。

§ 1-8 电机设计的程序

这里只指出电机计算的一般程序。在第十一、十二、十三、十四章中有比较详细的叙述，在那几章里将研究不同型式的电机的计算方法和程序。

首先决定主要尺寸 D 和 I_a ，对于异步电机和同步电机，同时须决定其定子外径 D_a 。选择的直径应考虑到能适用于容量相近转速相同的电机。

决定主要尺寸时，最好把各种方案列成表格，加以比较，从中选择最适宜的 λ 值。

异步电机在决定主要尺寸以后，就设计定子轭、定子槽，和计算定子绕组，然后选择气隙尺寸，设计转子轭、转子槽，和计算转子绕组等；对于同步电机，设计程序类似于异步电机：首先设计定子、气隙，然后设计转子。对于直流电机，在决定主要尺寸以后，应首先设计电枢绕组、槽和整流子，然后在选择了气隙尺寸以后，再设计磁极、机座和激磁绕组。

决定电机的主要尺寸以及决定电机有效部分的一些其他尺寸都属于电磁计算的范畴。其他如磁路计算，绕组参数的计算，损耗、效率、工作特性、启动特性等等的计算亦属于电磁计算之列。电磁计算完成以后，即可知道所设计的电机是否满足所给定的以及国家标准所规定的技术条件。

最后进行电机的通风计算、发热计算、机械计算和结构设计。必须注意，在进行通风及机械计算之前，应作出电机结构的草图。