

# 电机学—— 机电能量转换 习题集

哈尔滨电工学院 刘保安 主编

机械工业出版社

**电机学—机电能量转换习题集**

哈尔滨电工学院 刘保安 主编

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  · 印张  $11 \frac{5}{8}$  · 字数 258 千字  
1983 年 6 月北京第一版 · 1983 年 6 月北京第一次印刷

印数 00,001—14,300 · 定价 1.45 元

\*

统一书号: 15033 · 5428



## 前 言

本书是与《电机学—机电能量转换》(机械工业出版社1981年出版)配套的教学用书,为便于教学,各章编写顺序与所用符号,均与前书一致。

为了加深学生对机电能量转换机制的理解,熟悉机电系统运动方程的解法,针对各章的基本内容,每章都编有思考题、典型例题和习题。例题除给出解题过程外,为了说明解题的特点和应用范围,对有些例题,在解后还加以必要的说明,指出要点和简明的结论,以期达到示范、启发思考和扩展知识面的作用。

全书共有思考题221个,例题82个,习题304个;除少量证明题之外,全部习题都附有答案,以便读者核对。题目前面标有\*号的,是《电机学—机电能量转换》一书中原有的习题。

本书可作为高等院校讲授《电机学—机电能量转换》和《电机学》课程的教学用书,亦可供有关专业的师生、研究生和科技人员参考。

哈尔滨电工学院的郭立炜、王艳萍、王美夏、刘保安同志参加了本书的编写。汤蕴璆教授对本书的编写提出了许多宝贵意见,并对全书进行了仔细的审校和补充,对此编者表示衷心的感谢。本书的编写还得到了史乃、沈文豹、王振永副教授的大力支持和帮助。此外,宋红、范瑜、陈世元同志也提供了不少帮助。对此编者表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限,错误和不当之处敬请读者批评指正。

## 目 录

第一章	磁路与变压器	(1)
第二章	机电能量转换的基本原理	(48)
第三章	旋转电机的基本概念	(90)
第四章	旋转电机的工程问题	(125)
第五章	直流电机的稳态运行	(145)
第六章	感应电机的稳态运行	(185)
第七章	同步电机的稳态运行	(226)
第八章	交流电机的不对称运行	(263)
第九章	直流电机的动态分析	(298)
第十章	同步电机的动态分析	(315)
第十一章	单相感应电动机和其他型式电机	(342)

# 第一章 磁路与变压器

## 思 考 题

1-1 试述磁路计算的方法，并说明直流磁路和交流磁路计算上的不同？

1-2 已知磁路的尺寸和材料的磁化曲线、损耗曲线，问给定磁通或给定磁势时，两者计算上有何不同？

1-3 变压器的主磁通和漏磁通有什么区别？它们由什么磁势所激励？在等效电路中如何反映？

1-4 试述激磁阻抗  $Z_m = r_m + jx_m$  的意义。磁路饱和与否对  $r_m$  和  $x_m$  有何影响？为使  $r_m$  小、 $x_m$  大，变压器铁心应该用什么材料制造？ $r_m$  能否用直流电表测量？

1-5 变压器的自感电抗、漏感、激磁电抗、互感电抗之间有什么关系？

1-6 一台 50 赫的单相变压器，如接在直流电源上，其电压大小与铭牌电压一样，问此时会出现什么现象？次级开路 and 短路时对初级稳态电流的大小有无影响？

1-7 一台变压器的额定电压为 220 伏/110 伏，如不慎将低压边误接到 220 伏电源上，问激磁电流将会发生什么变化？变压器将会出现什么现象？

1-8 若其它条件不变，仅将变压器的初级和次级的线圈匝数变化 +10% 或 -10%，问对  $x_m$ 、 $x_{10}$  的影响怎样？如果仅将外施电压变化 +10% 或 -10%，其影响又怎样？如果仅将频率变化 +10% 或 -10%，其影响又怎样？

1-9 变压器负载运行时，铁心中的磁通量主要由哪些因素制约？如在制造时铁心截面做得较小或接缝较大，运行时将会出现什么现象？

1-10 何谓标么值？在变压器中通常如何选用基准值？这样选基值有什么好处？工程分析和计算中为什么常用标么值？

1-11 一台 50 赫的变压器接到 60 赫的电网上运行，额定电压不变，试问对激磁电流、铁耗、漏抗、电压变化率等有何影响？

1-12 两台单相变压器  $U_{1N}/U_{2N} = 220$  伏/110 伏，初级匝数相等，但空载电流  $I_{0I} = 2I_{0II}$ ，今将两台变压器的初级线圈顺极性串联起来，初级边加 440 伏电压，问次级边空载电压是否相等。

1-13 有一台单相变压器  $U_{1N}/U_{2N} = 220$  伏/110 伏，当在高压边加 220 伏电压时，空载电流为  $I_0$ ，主磁通为  $\Phi_0$ ，今将  $X$ 、 $a$  端联在一起，在  $A$ 、 $x$  两端加 330 伏电压，此时空载电流和主磁通为多少？若将  $X$  与  $x$  端联接起来，在  $A$ 、 $a$  端加 110 伏电压，则空载电流和主磁通又为多少？

1-14 变压器次级加电阻、电感或电容负载时，从初级边输入的无功功率有何不同？初级边电压一定时，其次级边的电压如何变化？根据图 1-1 中规定的正方向，绘出电容性负载时的相量图。

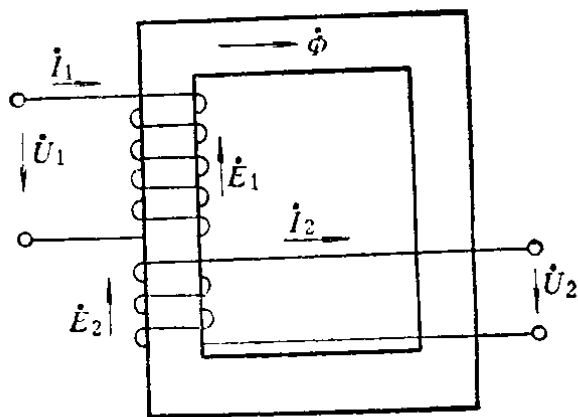


图 1-1

1-15 铁心损耗和铜损耗相等时，变压器效率最高，但

在设计变压器时，却常使铁耗远较额定电流下的铜耗小，例如仅为铜耗的 $\frac{1}{3}$ ，这是为什么？

**1-16** 有一台变压器，其额定容量为  $S_N = 320$  千伏安，已知额定电压下空载损耗为  $P_0 = 21$  千瓦，如果初级电压降低 10% 或提高 10%，问变压器的空载损耗将大体变为多少？

**1-17** 有一台  $Y/Y-12$  连接的三相变压器组，误将初级边  $B$  相绕组的两个端点接反，问接通三相电源时，将会出现什么现象？能否在次级边予以纠正？如果是三相心式变压器，又会发生什么现象？

**1-18** 试说明为什么三相变压器组不宜采用  $Y/Y$  连接组？为什么三相变压器中常希望初级或次级边有一方接成  $\Delta$  形？

**1-19** 变压器理想并联运行的条件是什么？如果几台容量和参数都不相同的变压器并联运行，如何选择每台的参数才能使设备容量得到合理利用？

**1-20** 一台  $Y/Y_0-12$  和一台  $Y/Y_0-8$  的三相变压器，变比相等，能否经过适当改接后作并联运行？

**1-21** 自耦变压器的额定容量与线圈容量有何关系？自耦变压器的功率是如何传递的？这种变压器最合适的变比范围是多大？

**1-22** 音频变压器的频率特性是如何得出的？什么是半功率点？

## 例 题

〔例 1-1〕 图 1-2 所示磁路由 0.5 毫米厚电工硅钢片叠装而成，铁心的叠装系数  $k_{fe} = 0.91$ ，各部分的尺寸如图 1-2

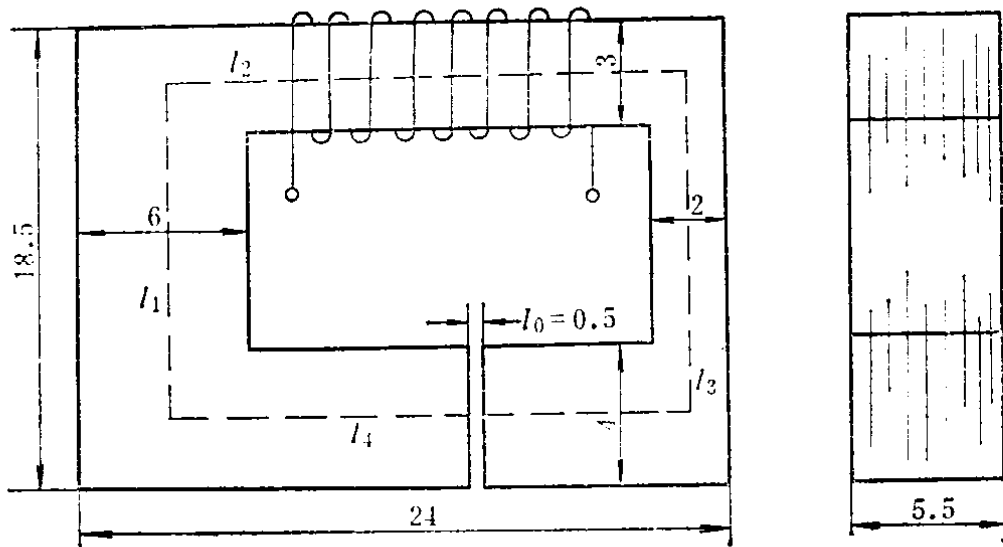


图 1-2

所示（单位为厘米）；试求  $N = 200$  匝时，在铁心磁路中建立  $1.8 \times 10^{-3}$  韦的恒定磁通时，所需的激磁电流。

〔解〕 根据磁路截面积和材料的不同，把磁路分为五段，并由磁路的中心线算出各段长度：

$$l_1 = l_3 = \left[ 18.5 - \frac{1}{2}(4 + 3) \right] \times 10^{-2} = 0.15 \text{ 米}$$

$$l_2 = \left[ 24 - \frac{1}{2}(6 + 2) \right] \times 10^{-2} = 0.2 \text{ 米}$$

$$l_0 = 0.5 \times 10^{-2} \text{ 米}$$

$$l_4 = l_2 - l_0 = 0.2 - 0.5 \times 10^{-2} = 0.195 \text{ 米}$$

考虑叠装系数后磁路的有效厚度

$$b = 5.5 \times 0.91 \times 10^{-2} = 0.05 \text{ 米}$$

各段磁路的截面积为

$$A_1 = 5 \times 6 \times 10^{-4} = 3 \times 10^{-3} \text{ 米}^2$$

$$A_2 = 5 \times 3 \times 10^{-4} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ 米}^2$$

$$A_3 = 5 \times 2 \times 10^{-4} = 10^{-3} \text{ 米}^2$$

$$A_4 = 5 \times 4 \times 10^{-4} = 2 \times 10^{-3} \text{ 米}^2$$



$$A_0 = (5 + 0.5)(4 + 0.5) = 2.475 \times 10^{-3} \text{米}^2$$

在计算气隙的有效截面积时，考虑到气隙磁场的边缘效应，每边加长  $l_0$ 。

各段磁路的磁感强度为

$$B_1 = \frac{\Phi}{A_1} = \frac{1.8 \times 10^{-3}}{3 \times 10^{-3}} = 0.6 \text{ 特}$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{A_2} = \frac{1.8 \times 10^{-3}}{1.5 \times 10^{-3}} = 1.2 \text{ 特}$$

$$B_3 = \frac{\Phi}{A_3} = \frac{1.8 \times 10^{-3}}{1.0 \times 10^{-3}} = 1.8 \text{ 特}$$

$$B_4 = \frac{\Phi}{A_4} = \frac{1.8 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-3}} = 0.9 \text{ 特}$$

$$B_0 = \frac{\Phi}{A_0} = \frac{1.8 \times 10^{-3}}{2.475 \times 10^{-3}} = 0.7273 \text{ 特}$$

根据 D<sub>41</sub> 硅钢片的磁化曲线 (图 1-3)，查出各段铁心中相应的磁场强度为

$$H_1 = 108 \text{ 安/米}$$

$$H_2 = 520 \text{ 安/米}$$

$$H_3 = 14300 \text{ 安/米}$$

$$H_4 = 230 \text{ 安/米}$$

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.7273}{4\pi \times 10^{-7}} = 579060 \text{ 安/米}$$

各段磁路所需的磁势为

$$F_1 = H_1 l_1 = 108 \times 0.15 = 16.2 \text{ 安匝}$$

$$F_2 = H_2 l_2 = 520 \times 0.2 = 104 \text{ 安匝}$$

$$F_3 = H_3 l_3 = 14300 \times 0.15 = 2145 \text{ 安匝}$$

$$F_4 = H_4 l_4 = 230 \times 0.195 = 44.85 \text{ 安匝}$$

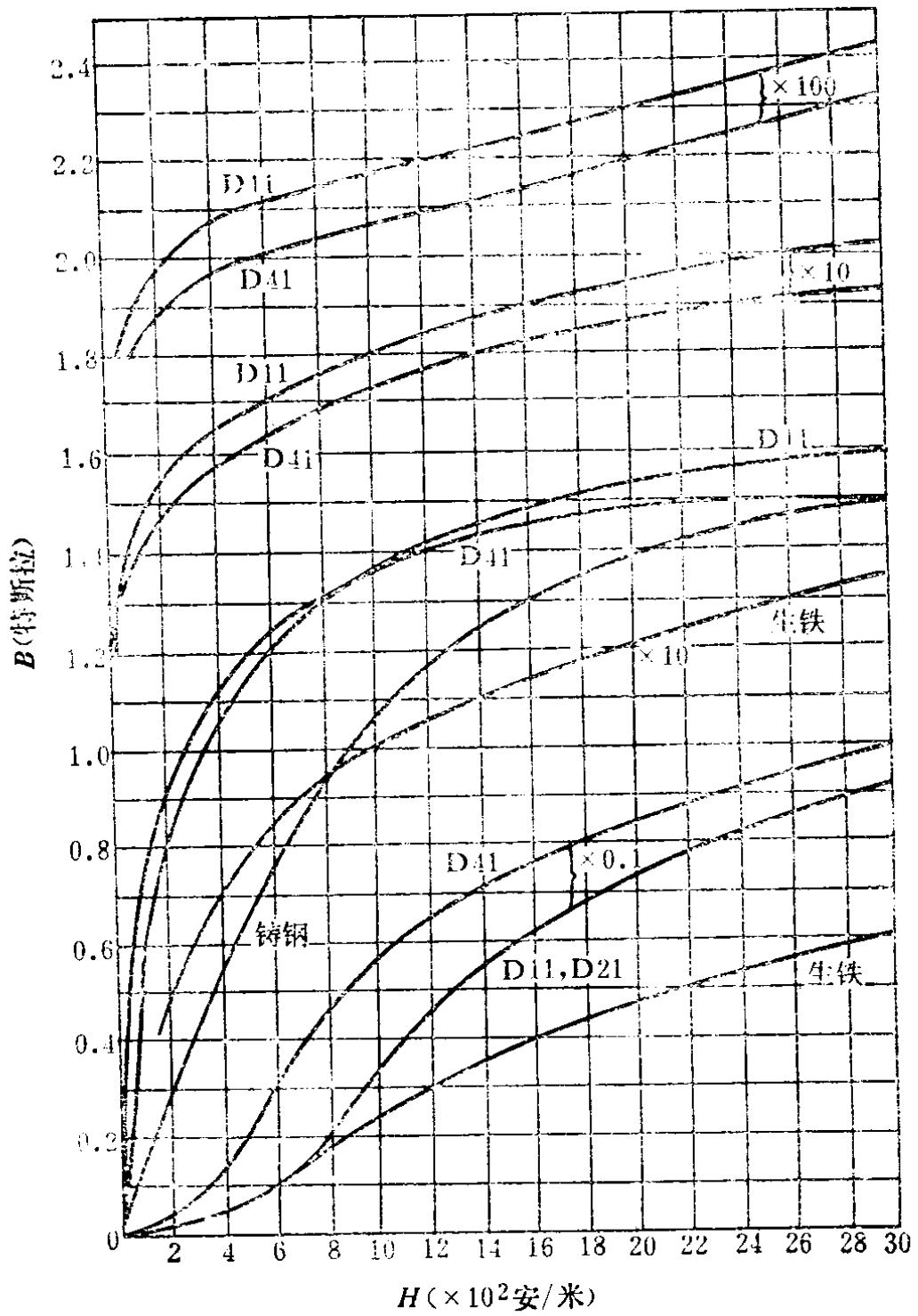


图1-3 常用铁磁材料的平均磁化曲线

$$F_0 = H_0 l_0 = 579060 \times 0.5 \times 10^{-2} = 2895.3 \text{ 安匝}$$

总激磁磁势

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_0 \\ &= 16.2 + 104 + 2145 + 44.85 + 2895.3 \\ &= 5205.35 \text{ 安匝} \end{aligned}$$

激磁电流为

$$I = \frac{F}{N} = \frac{5205.35}{200} = 26 \text{ 安}$$

〔例1-2〕 试计算下图（图 1-4）所示理想铁心所构成的磁路中，气隙  $\delta$  内的磁感应强度（忽略气隙磁场的边缘效应）。长度单位为毫米；铁心厚 20 毫米。

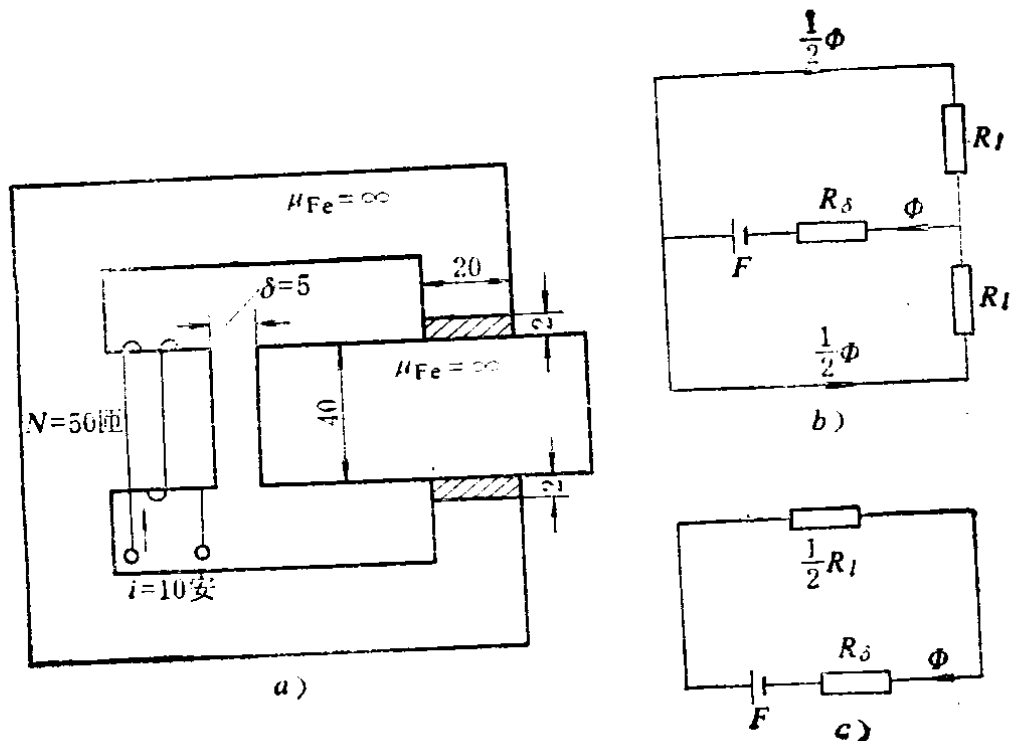


图 1-4

〔解〕 图 1-4 b) 表示与图 1-4 a) 类比的电路，图 1-4 c) 为其简化等效电路。对于图 1-4 c)，

$$R_{\delta}(\text{气隙磁阻}) = \frac{5 \times 10^{-3}}{\mu_0 (20 \times 40 \times 10^{-6})} = \frac{50}{8\mu_0}$$

$$R_s(\text{填衬磁阻}) = \frac{2 \times 10^{-3}}{\mu_0 (20 \times 20 \times 10^{-6})} = \frac{20}{4\mu_0}$$

$$R(\text{总磁阻}) = R_{\delta} + \frac{1}{2} R_s = \frac{70}{8\mu_0}$$

于是气隙  $\delta$  内的磁通量  $\Phi_{\delta}$  等于

$$\begin{aligned} \Phi_{\delta} &= \frac{F}{R} = \frac{50 \times 10}{70/8\mu_0} = \frac{400 \times 4\pi \times 10^{-7}}{7} \\ &= 0.718 \times 10^{-4} \text{ 韦} \end{aligned}$$

磁感强度  $B_{\delta}$  则为

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{A_{\delta}} = \frac{0.718 \times 10^{-4}}{20 \times 40 \times 10^{-6}} = 89.75 \times 10^{-3} \text{ 特}$$

〔例1-3〕 已知一台 8 极的直流发电机，其额定容量  $P_N = 500$  千瓦，额定电压  $U_N = 460$  伏，额定电流  $I_N = 1087$  安，额定转速  $n_N = 375$  转/分。电机磁路各部分尺寸如下：

电枢外径  $D_a = 0.99$  米，电枢内径  $D_{i_a} = 0.65$  米，

电枢总长  $L_a = 0.34$  米，径向通风道数  $n_v = 4$ ，

通风道宽  $b_v = 0.01$  米，电枢槽数  $Z = 115$ ，

槽宽  $b_s = 0.011$  米，槽深  $h_s = 0.04$  米，

主极下气隙  $\delta = 0.005$  米，主极铁心长  $L_m = 0.34$  米，

主极宽  $b_m = 0.2$  米，主极高  $h_m = 0.175$  米，

主极极弧长  $b_p = 0.253$  米，机座外径  $D_j = 1.5$  米，

机座内径  $D_{i_j} = 1.35$  米，机座长度  $L_j = 0.55$  米，

电枢铁心由普通热轧硅钢片叠成，主极由 1.5 毫米钢板叠成，机座为铸钢。试进行磁路计算以求得主磁通  $\Phi_0 = 0.0828$  韦（对应于空载额定电压）时的励磁安匝。

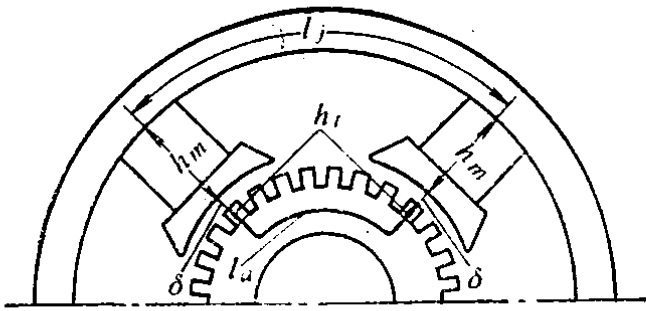


图 1-5

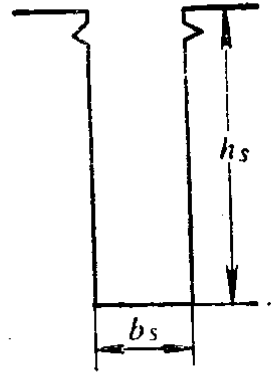


图 1-6

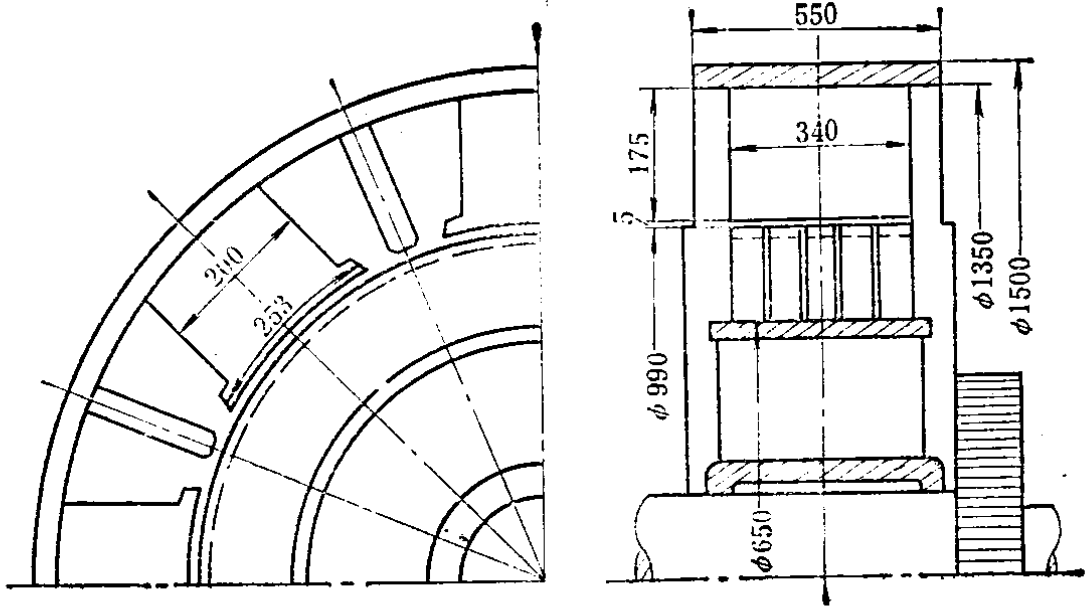


图 1-7

〔解〕

(1) 气隙磁势

计算极弧长

$$b_i = b_p + 2\delta = 0.253 + 2 \times 0.005 = 0.263 \text{ 米}$$

电枢铁心叠片总长

$$l_{ia} = l_a - n_v b_v = 0.34 - 4 \times 0.01 = 0.3 \text{ 米}$$

电枢计算长度

$$l_i = \frac{1}{2} (l_m + l_{ia}) = \frac{1}{2} (0.34 + 0.3) = 0.32 \text{ 米}$$

气隙磁密

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_0}{b_i l_i} = \frac{0.0828}{0.263 \times 0.32} = 0.9838 \text{ 特}$$

极距

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} = \frac{\pi \times 0.99}{8} = 0.3886 \text{ 米}$$

齿距

$$t_{z1} = \frac{\pi D_a}{Z} = \frac{\pi \times 0.99}{115} = 0.027 \text{ 米}$$

齿顶宽

$$b_{z1} = t_{z1} - b_s = 0.027 - 0.011 = 0.016 \text{ 米}$$

气隙系数

$$k_{\delta} = \frac{t_{z1} + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta} = \frac{0.027 + 10 \times 0.005}{0.016 + 10 \times 0.005} = 1.167$$

气隙所需磁势

$$\begin{aligned} F_{\delta} &= \frac{2}{\mu_0} B_{\delta} k_{\delta} \delta \\ &= \frac{2}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.9838 \times 1.167 \times 0.005 \\ &= 9141 \text{ 安匝} \end{aligned}$$

(2) 齿磁势

距齿根  $\frac{1}{3}$  齿高处的齿距

$$\begin{aligned} t_{z\frac{1}{2}} &= \frac{\pi \left( D_a - 2 \frac{2h_s}{3} \right)}{Z} = \frac{\pi \left( 0.99 - 2 \times \frac{2 \times 0.04}{3} \right)}{115} \\ &= 0.0256 \text{ 米} \end{aligned}$$

距齿根 $\frac{1}{3}$ 齿高处的齿宽

$$b_{z\frac{1}{3}} = t_{z\frac{1}{3}} - b_s = 0.0256 - 0.011 = 0.0146$$

电枢铁心净铁长

$$l_{Fe} = l_{ia} k_{Fe} = 0.93 \times 0.3 = 0.279 \text{ 米}$$

式中  $k_{Fe}$  为铁心的叠压系数。

距齿根 $\frac{1}{3}$ 齿高处的齿磁密

$$\begin{aligned} B_{z\frac{1}{3}} &= \frac{\Phi_t}{b_{z\frac{1}{3}} l_{Fe}} = \frac{B_d t_{z1} l_i}{b_{z\frac{1}{3}} l_{Fe}} \\ &= \frac{0.9838 \times 0.027 \times 0.32}{0.0146 \times 0.279} = 2.0867 \text{ 特} (> 1.8 \text{ 特}) \end{aligned}$$

齿部磁密修正系数

$$k_z = \frac{b_s}{b_{z\frac{1}{3}} k_{Fe}} = \frac{0.011}{0.0146 \times 0.93} = 0.81$$

根据  $B_{z\frac{1}{3}}$  和  $k_z$ , 查齿部磁化曲线 (图 1-8), 可得

$$H_{z\frac{1}{3}} = 3.95 \times 10^4 \text{ 安匝/米}$$

齿部 (每对极) 所需磁势

$$F_z = 2H_{z\frac{1}{3}} h_s = 2 \times 39500 \times 0.04 = 3160 \text{ 安匝}$$

(3) 电枢磁势

电枢轭高

$$h_u = \frac{D_a - 2h_s - D_{ia}}{2} = \frac{0.99 - 2 \times 0.04 - 0.65}{2} = 0.13 \text{ 米}$$

不计轴向通风孔影响时, 电枢轭的截面积

$$A_c = h_u l_{Fe} = 0.13 \times 0.279 = 0.0363 \text{ 米}^2$$

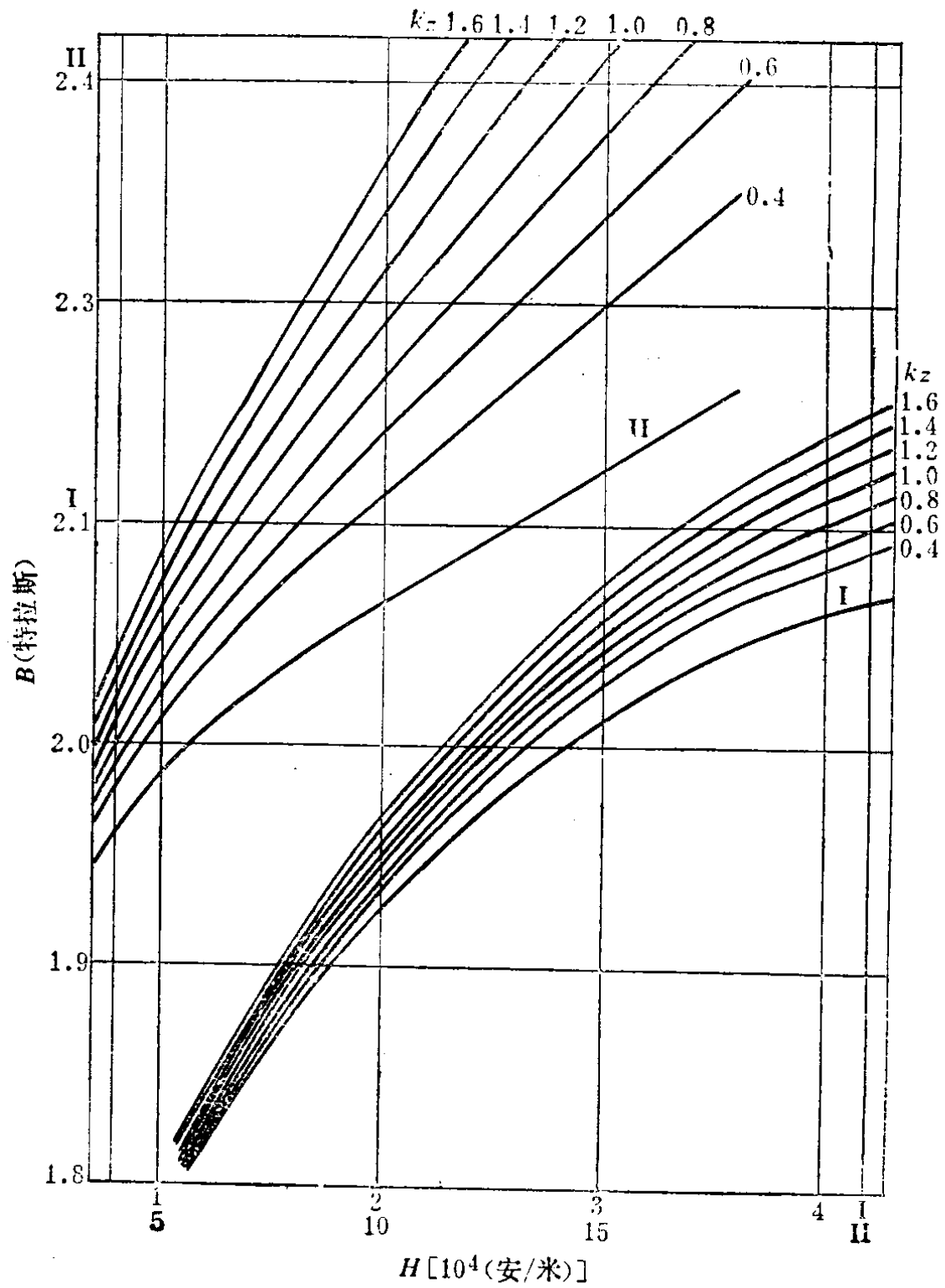


图 1-8



## 电枢轭磁密

$$B_a = \frac{\Phi_a}{2A_a} = \frac{0.0828}{2 \times 0.0363} = 1.1405 \text{ 特}$$

对应  $B_a$  的磁场强度 (查表 1-1)

表1-1 热轧硅钢片50赫兹0.5毫米典型磁化曲线  
(H单位为安/米 $\times 10^2$ )

B (特斯拉)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	B (特斯拉)
0.4	1.37	1.38	1.40	1.42	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	0.4
0.5	1.56	1.58	1.60	1.62	1.64	1.66	1.68	1.70	1.72	1.75	0.5
0.6	1.77	1.79	1.81	1.84	1.87	1.89	1.92	1.94	1.97	2.00	0.6
0.7	2.03	2.06	2.09	2.12	2.16	2.20	2.23	2.27	2.31	2.35	0.7
0.8	2.39	2.43	2.48	2.52	2.57	2.62	2.67	2.73	2.79	2.85	0.8
0.9	2.91	2.97	3.03	3.10	3.17	3.24	3.31	3.39	3.47	3.55	0.9
1.0	3.63	3.71	3.79	3.88	3.97	4.06	4.16	4.26	4.37	4.48	1.0
1.1	4.60	4.72	4.86	5.00	5.14	5.29	5.44	5.60	5.76	5.92	1.1
1.2	6.10	6.28	6.46	6.65	6.85	7.05	7.25	7.46	7.68	7.90	1.2
1.3	8.14	8.40	8.68	8.96	9.26	9.58	9.86	10.2	10.6	11.0	1.3
1.4	11.4	11.8	12.3	12.8	13.3	13.8	14.4	15.0	15.7	16.4	1.4
1.5	17.2	18.0	18.9	19.9	20.9	22.1	23.5	25.0	26.8	28.6	1.5
1.6	30.7	33.0	35.6	38.2	41.1	44.0	47.0	50.0	53.5	57.5	1.6
1.7	61.5	66.0	70.5	75.0	79.7	84.5	89.5	94.7	100	105	1.7
1.8	110	116	122	128	134	141	148	155	162	170	1.8
1.9	178	186	195	204	214	224	234	245	256	268	1.9
2.0	281	296	310	327	345	370	396	428	469	515	2.0
2.1	565	625	685	750	815	890	970	1050	1130	1210	2.1
2.2	1290	1370	1450	1530	1610	1690	1770	1850	1930	2020	2.2

磁感应超过2.2特斯拉时,磁化曲线可用等式  $B = 2.04 + 1.24H \times 10^{-6}$  计算。

$$H_a = 515 \text{ 安/米}$$

电枢轭的磁路长度

$$l_{a1} = \frac{\pi(D_{a1} + h_a)}{2p} = \frac{\pi(0.65 + 0.13)}{8} = 0.306 \text{ 米}$$