

《航空电机学》习题集



南京航空学院

1990.5.

V242.4-44
1001

V242.4-44
1001-1

39-90-303-300

前言

《航空电机学习题集》是为了配合国防工业出版社一九八六年版《航空电机学》编写的。内容上参考了过去使用多年的，由我院电气技术教研室编写的《航空电机学习题集》，並在此基础上作了较大的修改和补充。新编《航空电机学习题集》共分三部分，习题、自测题和计算机作业。同学在学习《航空电机学》后，应能完成70~80%的习题集内容，自测题作为同学自我检测对《航空电机学》的掌握程度。

《航空电机学习题集》第一部分、第三部分由张稼丰同志编写，第二部分由穆新华同志编写。全稿由刘迪吉教授进行了仔细审阅并提出了许多宝贵意见。刘建红同志绘制了大部分插图，钱忠东同志在编写、调试计算机程序中作了不少工作，在此一并表示衷心感谢。

由于时间紧迫、编者水平有限，本习题集难免存在许多不当之处，欢迎各位批评指正，以便我们作进一步修改。

愿本习题集能为您的学习带来方便。

南京航空航天大学
图书馆



一九九五年七月十三日



30741735

741735

第一部分 引 论

思 考 题

1. 什么是电机？电机有何用？
2. 航空电机的一般工作条件怎样？
3. 航空电机有哪些基本特点？
4. 航空电机有哪些基本要求？
5. 试述全电流定律、电磁感应定律、电路定律（基尔霍夫定律）及电磁力定律的物理含义和数学表达式。

6. 电磁感应定律有时写成 $e = - \frac{d\psi}{dt}$ ，有时写成 $e = - w \frac{d\phi}{dt}$ ，有时又写成 $e =$

$- L \frac{di}{dt}$ 。这三种表达方法之间有什么差别？哪一种写法最普遍？在什么情况下可

把电磁感应定律写成 $e = \frac{d\psi}{dt}$ 这种形式？

7. 磁性材料的主要特点是什么？

目 录

第一部分：习 题

引 论	0
第一章 直流电机概述	1
第二章 直流电机的空载磁路	2
第三章 直流电机的电枢绕组	9
第四章 直流电机的电枢反应	14
第五章 航空直流发电机	18
第六章 航空直流电动机	26
第七章 航空直流电机的换向	35
第八章 航空直流电机的损耗、发热与冷却	38
第九章 直流控制电机	40
第十章 航空变压器概述	41
第十一章 单相变压器的空载运行	42
第十二章 单相变压器的负载运行	45
第十三章 三相变压器	50
第十四章 特殊变压器	53
第十五章 航空交流电机概述	54
第十六章 交流绕组及其感应电势	55
第十七章 交流绕组的磁势	63
第十八章 同步电机概述	70
第十九章 三相同步发电机对称运行原理	71
第二十章 同步发电机的不对称运行	82
第二十一章 同步发电机的突然短路	86
第二十二章 同步发电机的并联运行	90
第二十三章 同步电动机	95
第二十四章 永磁电机	99
第二十五章 感应电动机概述	100
第二十六章 三相感应电动机的运行原理	101

第二十七章	感应电动机的功率、转矩和特性	108
第二十八章	感应电动机的起动、调速和制动	114
第二十九章	感应电动机的电压不对称运行 状态及单相感应电动机	122
第三十章	交流控制电机	126
第二部分	自测题	127
第三部分	计算机作业	147
附录	参考答案	153

第一篇 航空直流电机

本篇主要研究换向器式直流电机。内容包括：直流电机的工作原理和基本结构，直流电机的磁路计算，直流电枢绕组，直流电动机和直流发电机的工作特性，控制用直流电机以及旋转电机共同存在的损耗、发热和冷却等问题。

第一章 直流电机概述

本章要求掌握直流电机（电动机、发电机）的工作原理；熟悉直流电机的基本结构以及各部件的作用和构成材料；了解航空直流电机常见的型号。

思考题

1. 简述直流发电机和电动机的工作原理。换向器在直流发电机和直流电动机中各起了什么作用？
2. 试判断在下列情况下，电刷两端的电压是交流还是直流：
 - (1) 磁极固定，电刷与电枢同时旋转；
 - (2) 电枢固定，电刷与磁极同时旋转。
3. 什么是可逆性原理？为什么说发电机作用和电动机作用同时存在于一台电机中？
4. 直流电机有哪些主要部件组成？试说出它们的作用、结构和材料。
5. 从原理上看，直流电机电枢绕组可以只有一个线圈组成。但实际上直流电机用很多线圈串联组成，为什么？是不是用线圈越多越好？



14号 ZF-BA1
ZF

ZD

BZD

A

第二章 直流电机的空载磁路

直流电机的空载磁场是由主磁极绕组，通以直流电流产生的。空载时建立一定的气隙磁通 Φ_0 ，需要一定的励磁磁势 F_f 。 $\Phi_0 = f(F_f)$ 或 $\Phi_0 = f(I_f)$ 的关系称为电机的磁化曲线。

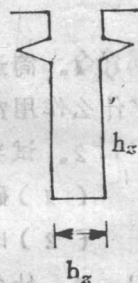
学习本章要求掌握直流电机的磁路构成，主磁场和漏磁场的分布情况。当气隙磁通 Φ_0 给定时，能够计算相应的励磁磁势 F_f ，或者，当 F_f 给定时计算 Φ_0 。

本章中出现了漏磁系数 K_σ 、叠片系数 K_c 、气隙系数 K_δ 和饱和系数 K_μ 等系数，要求弄清它们的定义、物理概念以及它们的通常取值范围。

例题

【例 2-1】 已知一台 8 级的直流发电机，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 $D_i = 0.65$ 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 $b_z = 0.011$ 米，槽深 $h_z = 0.04$ 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 $D = 1.5$ 米，机座内径 $D_j = 1.35$ 米，机座长度 $L_j = 0.55$ 米，电枢铁心由 21 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，以求得当 $F_f = 11000$ 安匝/对极时，主磁通 Φ_0 的数值。



【解】 本题与《航空电机学》中的例题 (P. 29) 有点不同。在那里我们已知 Φ_0 求 F_f ，这属于正面问题。而本题是已知 F_f ，求 Φ_0 ，这是所谓的逆问题。由于铁磁材料的非线性特点，使得我们不能够直接找出答案。通常求解这类问题的方法是猜试法。即首先假定问题的解是 $\Phi_{0(1)}$ ，用求正面问题的方法，求对应的 $F_{f(1)}$ 。一般来说， $F_{f(1)}$ 不等于 F_f 。如果 $F_{f(1)} > F_f$ ，则应重新假定磁通值 $\Phi_{0(2)}$ ，使得 $\Phi_{0(2)} < \Phi_{0(1)}$ ；如果 $F_{f(1)} < F_f$ ，则应有 $\Phi_{0(2)} > \Phi_{0(1)}$ 。以 $\Phi_{0(2)}$ 为基础，计算相应的 $F_{f(2)}$ 值。重复以上步骤，直至磁势计算值与给定值偏差小于工程精度要求为止。

为了使得 $\Phi_{0(1)}$ 接近 Φ_0 ，一般假定气隙磁压降占总磁压降的 7.5% 左右。即，

$$F_\delta = 0.75 F_f = 0.75 \times 11000 = 8250 \text{ 安匝/对极}$$

齿宽

$$b_z = t_z - b_c = \frac{\pi D_a}{Z} - b_c = \frac{\pi \times 0.99}{115} - 0.011 = 0.016 \text{ 米}$$

气隙系数

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

气隙磁密

$$B_{\delta} = \frac{\mu_0 F_{\delta}}{2k_{\delta}\delta} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 8250}{2 \times 1.167 \times 0.005} = 0.8884 \text{ 特}$$

计算极弧长度

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

电枢铁心叠片总长

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

电枢计算长度

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

气隙磁通

$$\Phi_{(1)} = B_{\delta} b_i l_i = 0.8884 \times 0.263 \times 0.32 = 0.07477 \text{ 韦}$$

根据这一磁通, 我们就能计算相应磁势值。

(1) 齿部磁势

距齿根 $\frac{1}{3}$ 齿高处的齿距

$$t_{z\frac{1}{3}} = \frac{\pi (D_a - 2 \frac{2h_c}{3})}{z} = \frac{\pi (0.99 - 2 \times \frac{2 \times 0.04}{3})}{115} = 0.0256 \text{ 米}$$

距齿根 $\frac{1}{3}$ 齿高处的齿宽

$$b_{z\frac{1}{3}} = t_{z\frac{1}{3}} - b_c = 0.0256 - 0.011 = 0.0146 \text{ 米}$$

电枢铁心净铁长

$$l_{re} = l_{ta} K_{re} = 0.3 \times 0.93 = 0.279 \text{ 米}$$

距齿根 $\frac{1}{3}$ 齿高处的齿磁密

$$B_{z\frac{1}{3}} = \frac{\Phi_t}{b_{z\frac{1}{3}} l_{re}} = \frac{B_{\delta} t_z l_i}{b_{z\frac{1}{3}} l_{re}} = \frac{0.8884 \times 0.027 \times 0.32}{0.0146 \times 0.279} = 1.8844 \text{ 特}$$

由磁化曲线知:

$$H_{z\frac{1}{3}} = 1.83 \times 10^4 \text{ 安/米}$$

齿部每对极所需磁势 $F_z = 2 H_{z\frac{1}{3}} \cdot h_z = 2 \times 1.83 \times 10^4 \times 0.04 = 1464 \text{ 安匝}$

(2) 电枢铁心磁势

电枢轭高

$$h_a = \frac{D_a - 2b_s - D_1}{2} = \frac{0.99 - 2 \times 0.04 - 0.65}{2} = 0.13 \text{ 米}$$

不计轴向通风孔影响时, 电枢轭的截面积

$$A_a = h_a l_{Fe} = 0.13 \times 0.279 = 0.0363 \text{ 米}^2$$

电枢轭磁密

$$B_a = \frac{\Phi_{a(1)}}{2A_a} = \frac{0.07477}{2 \times 0.0363} = 1.0299 \text{ 特}$$

查表, 得对应 B_a 的磁场强度

$$H_a = 5.4 \times 10^2 \text{ 安/米}$$

电枢轭的磁路长度

$$l_{a1} = \frac{\pi(D_1 - h_a)}{2P} = \frac{\pi(0.65 + 0.13)}{8} = 0.306 \text{ 米}$$

电枢轭磁势(每对极)为

$$F_a = H_a l_{a1} = 540 \times 0.306 = 165.24 \text{ 安匝}$$

(3) 主磁极磁势

设磁极漏磁系数 K_σ 为 1.15, 则

$$\Phi_m = K_\sigma \Phi_{a(1)} = 1.15 \times 0.07477 = 0.08599 \text{ 韦}$$

主磁极铁心截面积为

$$A_m = b_m l_m K_{Fe} = 0.2 \times 0.34 \times 0.96 = 0.0653 \text{ 米}^2$$

主磁极铁心平均磁密

$$B_m = \frac{\Phi_m}{A_m} = \frac{0.08599}{0.0653} = 1.3168 \text{ 特}$$

查表, 得

$$H_m = 11.32 \times 10^2 \text{ 安/米}$$

主磁极铁心的磁势(每对极)为

$$F_m = 2 H_m l_m = 2 \times 1132 \times 0.175 = 396.2 \text{ 安匝}$$

(4) 定子轭磁势

定子磁轭高

$$h_j = \frac{1}{2}(D - D_j) = \frac{1}{2}(1.5 - 1.35) = 0.075 \text{ 米}$$

定子磁轭截面积

$$A_j = h_j L_j = 0.075 \times 0.55 = 0.04125 \text{ 米}^2$$

定子轭内的平均磁密

$$B_j = \frac{\Phi_m}{2A_j} = \frac{0.08599}{2 \times 0.04125} = 1.0423 \text{ 特}$$

定子轭内的平均磁场强度 (查表)

$$H_j = 988 \text{ 安/米}$$

定子轭的磁路长度

$$h_{j1} = \frac{\pi(D - h_j)}{2p} = \frac{\pi(1.5 - 0.075)}{8} = 0.5593 \text{ 米}$$

定子轭所需磁势 (每对极)

$$F_j = H_j L_{j1} = 988 \times 0.5593 = 525.59 \text{ 安匝}$$

(5) 总的励磁磁势

当 $\phi = \phi_{(1)} = 0.07477$ 韦时, 每对极所需磁势为:

$$\begin{aligned} F_{f(1)} &= F_\delta + F_z + F_a + F_m + F_j \\ &= 8250 + 1464 + 165.24 + 396.2 + 525.59 \\ &= 10801 \text{ 安匝} \end{aligned}$$

由计算结果知, $F_{f(1)} < F_f$, 应重新假定 ϕ 值。设, $\phi_{(2)} = 0.08$ 韦。重复以上步骤, 可得

$$F_\delta = 8827 \text{ 安匝}$$

$$F_z = 2680 \text{ 安匝}$$

$$F_a = 199 \text{ 安匝}$$

$$F_m = 535 \text{ 安匝}$$

$$F_j = 621 \text{ 安匝}$$

$$F_{f(2)} = F_\delta + F_z + F_a + F_m + F_j = 12862 \text{ 安匝}$$

由计算结果可知, $F_{f(2)} > F_f$,

故必须减少气隙磁通值。然后再重新计算, 直至满足要求。

我们也可以采用插值方法 (如线性插值等)。作图 2-2, 则有

$$\begin{aligned} \phi_0 &= \phi_{(1)} + \frac{F_f - F_{f(1)}}{F_{f(2)} - F_{f(1)}} (\phi_{(2)} - \phi_{(1)}) \\ &= 0.07477 + \frac{11000 - 10801}{12862 - 10801} \cdot (0.08 - 0.07477) \\ &= 0.07527 \text{ 韦} \end{aligned}$$

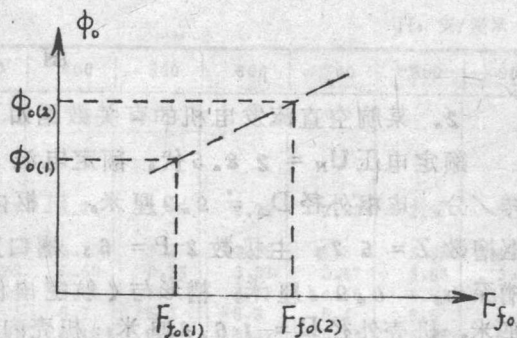


图 2-2

思考题

1. 直流电机的空载磁场是如何分布的? 什么叫主磁通? 什么叫漏磁通? 漏磁通与哪些因素有关?

2. 直流电机的主磁路包括哪几部分? 如何从电机的结构尺寸确定各部分磁路的长度和

截面积?

3. 试述磁路计算的基本思想和方法。

4. 什么是气隙系数? 在计算气隙磁压降时为什么要用气隙系数进行修正? 齿中磁压降的计算有什么特点?

5. 什么叫气隙线?

6. 什么是饱和现象?

7. 系数 K_{σ} 、 K_c 、 K_{δ} 和 K_{μ} 的物理意义是什么? 通常它们的取值范围如何?

习 题

1. 图 2-3 所示磁路由 0.5 毫米厚的 D 21 电工硅钢片叠压而成, 铁心的叠片系数 $K_c = 0.91$, 各部分的尺寸如图 2-3 所示 (单位为厘米); 试求 $N = 200$ 匝时, 在铁心磁路中建立 1.8×10^{-3} 韦的恒定磁通时, 所需的励磁电流。

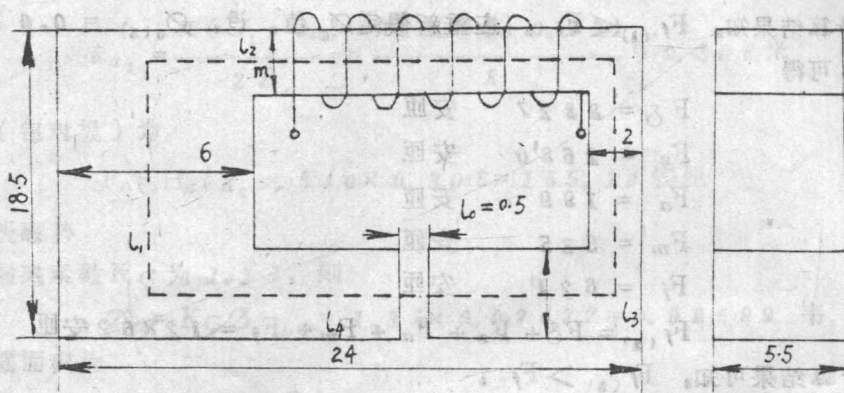


图 2-3

2. 某航空直流发电机的有关数据如下:

额定电压 $U_N = 28.5$ 伏; 额定电流 $I_N = 300$ 安; 转速 $n = 4000 \sim 9000$ 转/分; 电枢外径 $D_a = 9.9$ 厘米, 电枢内径 $D = 6.1$ 厘米, 电枢长度 $L_a = 9$ 厘米; 电枢槽数 $Z = 57$; 主极数 $2P = 6$; 槽口宽度 $b'_c = 0.13$ 厘米; 槽宽 $b_c = 0.25$ 厘米; 槽深 $b_z = 0.94$ 厘米; 槽形与《航空电机学》图 2-6 所示相同; 极下气隙 $\delta = 0.05$ 厘米; 机壳外径 $D = 16.6$ 厘米; 机壳内径 $D_j = 15.2$ 厘米; 机壳长度 $L_j = 12.8$ 厘米; 主极长度 $L_m = 9$ 厘米; 主极高度 $h_m = 2.6$ 厘米; 主极宽度 $b_m = 2.01$ 厘米; 漏磁系数 $K_{\sigma} = 1.2$, 计算极弧系数 $\alpha' = 0.666$; 电枢铁心采用厚为 0.35 毫米的 D 21 硅钢片迭成, 其迭片系数 $K_{c1} = 0.95$; 主极铁心采用厚为 0.5 毫米的 D 21 电工钢片迭成, 其迭片系数 $K_{c2} = 0.96$; 机壳采用 DT 1 电工钢。

试求: 当每极产生主磁通 $\Phi_p = 1.84 \times 10^{-3}$ 韦伯时, 每对极所需的励磁磁势。

表 2 - 1 磁化曲线表

D11 D12 D21电工钢片

H: 安/厘米

B 韦/米 ²	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0.4	1.4	1.43	1.46	1.49	1.52	1.55	1.58	1.61	1.64	1.67
0.5	1.71	1.75	1.79	1.83	1.87	1.91	1.95	1.99	2.03	2.07
0.6	2.11	2.16	2.21	2.26	2.31	2.36	2.41	2.46	2.51	2.56
0.7	2.61	2.66	2.71	2.76	2.81	2.87	2.93	2.99	3.06	3.12
0.8	3.18	3.24	3.3	3.37	3.44	3.52	3.60	3.69	3.78	3.87
0.9	3.97	4.07	4.17	4.27	4.37	4.47	4.58	4.69	4.8	4.91
1.0	5.02	5.14	5.27	5.41	5.55	5.7	5.85	6.00	6.15	6.31
1.1	6.47	6.64	6.82	7.01	7.2	7.39	7.59	7.79	8.0	8.21
1.2	8.45	8.66	8.91	9.18	9.46	9.76	10.1	10.4	10.7	11.0
1.3	11.4	11.8	12.2	12.6	13	13.4	13.8	14.3	14.8	15.3
1.4	15.8	16.4	17.1	17.8	18.6	19.5	20.5	21.5	22.6	23.8
1.5	25.0	26.4	27.8	29.5	31.1	32.8	34.6	36.6	38.8	41.2
1.6	43.7	46.3	49.1	52.2	55.3	58.8	62.3	66.0	69.8	73.7
1.7	77.8	82	86.3	90.7	96.3	101	106	111	116	122
1.8	128	134	142	146	152	159	166	173	180	188
1.9	197	206	216	226	236	246	256	268	282	296
2.0	310	325	343	365	390	420	455	495	545	595
2.1	655	725	800	880	960	1040	1120	1200	1280	1360
2.2	1440	1580	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2.3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2.4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760
2.5	3840	3920	4000	4080	4160	4240	4320	4400	4480	4560

表 2 - 2 1~1.7 5毫米的钢片磁化曲线

H: 安/厘米

B 韦/米 ²	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0.1	1									
0.2	1.4									
0.3	1.8									
0.4	2.1									
0.5	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75	2.79	2.83	2.87	2.91
0.6	2.95	3.0	3.05	3.1	3.15	3.2	3.25	3.3	3.35	3.4
0.7	3.45	3.51	3.57	3.63	3.69	3.75	3.81	3.87	3.93	3.99
0.8	4.05	4.12	4.19	4.26	4.33	4.4	4.48	4.56	4.64	4.72
0.9	4.8	4.9	4.95	5.05	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6
1.0	5.7	5.82	5.95	6.07	6.15	6.5	6.42	6.55	6.65	6.8
1.1	6.9	7.03	7.2	7.31	7.48	7.6	7.75	7.9	8.08	8.25
1.2	8.45	8.6	8.3	9.0	9.2	9.4	9.6	9.92	10.15	10.45
1.3	10.8	11.12	11.45	11.15	12.2	12.6	13.0	13.5	13.93	14.5
1.4	14.9	15.3	16.95	16.45	17.0	17.5	18.5	19.2	20.1	21.1
1.5	22.7	24.5	25.6	27.1	28.8	30.5	32.0	34.0	36.5	37.5
1.6	40.0	42.5	45.0	47.5	50.0	52.5	55.8	59.5	22.3	66.0
1.7	70.5	75.3	79.5	84.0	88.5	93.2	98.0	103.0	108.0	114.0
1.8	119.0	124.0	130.0	135.0	141.0	148.0	156.0	162.0	170.0	178.0
1.9	188.0	197.0	207	215.0	226.0	235.0	245.0	256.0	265.0	275.0
2.0	290.0	302.0	315.0	328.0	342.0	361.0	380.0			

表 2-3 DT1 电工钢片磁化曲线

B 韦/米 ²	0	100	200	300	400
1.1	5.92	6.02	6.12	6.22	6.32
1.2	6.92	7.02	7.12	7.22	7.32
1.3	7.9	8.01	8.12	8.22	8.32
	500	600	700	800	900
	6.42	6.52	6.62	6.72	6.82
	7.42	7.52	7.61	7.7	7.8
	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8

表 2-4 铸钢或钢板磁化曲线

H: 安/厘米										
B 韦/米 ²	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0	0	0.08	0.16	0.24	0.32	0.4	0.45	0.56	0.64	0.72
0.1	0.8	0.88	0.96	1.04	1.12	1.2	1.28	1.56	1.44	1.52
0.2	1.6	1.68	1.76	1.84	1.92	2.00	2.06	2.16	2.24	2.32
0.3	2.4	2.48	2.50	2.64	2.72	2.8	2.86	2.96	3.04	3.12
0.4	3.2	3.28	3.36	3.40	3.52	3.6	3.68	3.76	3.84	3.92
0.5	4.0	4.04	4.17	4.26	4.34	4.43	4.52	4.61	4.7	4.79
0.6	4.88	4.97	5.06	5.16	5.25	5.35	5.44	5.54	5.64	5.74
0.7	5.84	5.93	6.03	6.13	6.23	6.32	6.42	6.52	6.62	6.72
0.8	6.82	6.93	7.03	7.24	7.34	7.45	7.55	7.66	7.76	7.87
0.9	7.98	8.10	8.23	8.35	8.48	8.5	8.73	8.85	8.98	9.11
1.0	9.24	9.38	9.53	9.69	9.86	10.04	10.22	10.39	10.56	10.73
1.1	10.9	11.08	11.27	11.47	11.62	11.62	11.87	12.27	12.48	12.69
1.2	12.9	13.15	13.4	13.7	14.0	14.3	14.6	14.9	15.2	15.55
1.3	15.9	16.3	16.7	17.2	17.6	18.1	18.6	19.2	19.7	20.3
1.4	20.9	21.6	22.3	23.0	23.7	24.4	25.3	26.2	27.1	28.0
1.5	28.9	29.9	31.0	32.1	33.8	34.3	35.6	36.0	38.3	39.6
1.6	41.0	42.5	44.0	45.5	47.0	48.7	50.0	51.5	53.0	55.0

第三章 直流电机的电枢绕组

电枢绕组是电机的核心，是电机实现机电能量转换的关键部分。直流电机的电枢绕组，可分为五种型式：单叠、单波、复叠、复波以及蛙型绕组。

本章主要介绍航空直流电机中常见的绕组型式：单叠绕组和单波绕组。由于它们连接规律不同，因而具有不同的并联支路数。它们的特征为：

(1) 单叠绕组：

元件第一节距 $y_1 = \frac{z}{2p} + \varepsilon = \text{整数}$ ，换向器节距 $y_K = \pm 1$ ，一般取 $+1$ (右行绕组)。并取支路对数 $a = p$ 。

(2) 单波绕组：

y_1 的决定同上。 $y_K = \frac{K \pm 1}{p} = \text{整数}$ ，一般取 -1 (左行绕组)， $a = 1$ 。

为了使正负电刷间获得最大电势，电刷应放在换向器几何中性线上。在单叠绕组中，电刷杆数目必须与主极数 $2P$ 相等；对于单波绕组，则不论极数为多少，可以只用正、负两只电刷，但实际上仍用全额电刷。

(3) 正负电刷间的电枢绕组感应电势计算表达式为：

$$E_a = \frac{PN}{60a} \phi n = C_e \phi n$$

这是直流电机的最基本公式之一。

例题

【例 3-1】电枢绕组数据： $N = 56$ ， $w_y = 2$ ， $K = S = 14$ ， $P = 2$ ，单叠左行绕组。试计算节距，画出绕组展开图，安放磁极和电刷，画出电路图，并求出并联支路对数。

【解】 (1) 计算节距

$$\text{槽数 } Z = S = K = 14$$

因为是左行，故合成节距

$$y = y_K = -1$$

第一节距

$$y_1 = \frac{Z}{2p} + \varepsilon = \frac{14}{2 \times 2} - \frac{1}{2} = 3$$

第二节距

$$y_2 = y - y_1 = -1 - 3 = -4$$

(2) 画绕组展开图(图 3-1)。

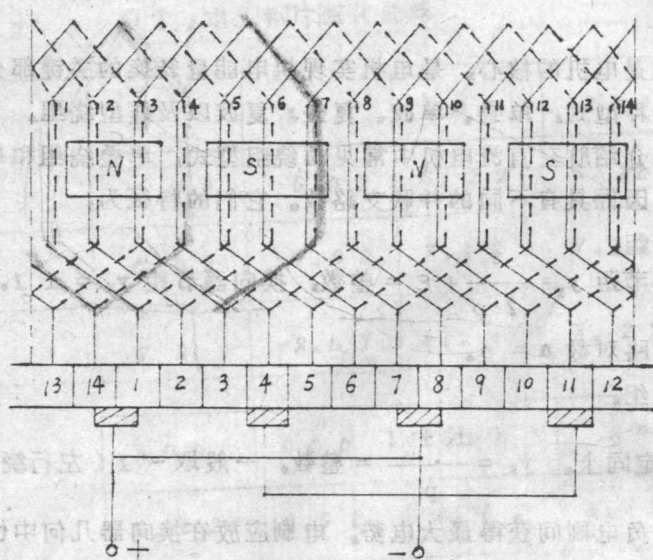


图 3-1

第一步：先画出 14 个槽，将槽编号。

第二步：根据节距画出第一个元件，将其上元件边放在 1 号槽内，下元件边则应放在 $1 + y_1 = 4$ 号槽内，元件首端接在 1 号换向片上，尾端接在 14 号换向片上。接着画 14 号元件，上层边放在 14 号槽上层，下层边放在 3 号槽内，首端接 14 号换向片，即与 1 号元件尾端接在同一个换向片上。依次将所有元件画出，最后一个元件边放在 2 号槽的上层，下元件边放在 5 号槽的下层，其首端接在 2 号换向片上，尾端接在 1 号换向片上。各元件依次串联成一个闭合回路。从本例可看出编号原则：虚槽号、元件号、上元件边号、首端接的换向片号相同。

(3) 安放磁极和电刷

磁极分布的原则是使其均匀分布在电枢绕组展开图上，磁极中心线之间的距离为 τ 。

$$\text{这里, } \tau = \frac{Z}{2P} = \frac{14}{4} = 3.5 \text{ 个虚槽。}$$

磁极极弧宽 $b_p = \alpha_p \tau = (0.6 \sim 0.75) \times 3.5 = 2.1 \sim 2.625$ ，取 $b_p = 2.5$ 槽。

必须强调，磁极和电刷是相对静止的，而电枢相对于它们是运动的。因此一个图只能表示一个时刻。原则上可以画在任意时刻下的情况，但为便于观察常将某个，例如第 1 号磁极的中心线画在第 1 号元件的中心线上。再根据 τ 和 b_p 画出另外三个磁极的位置和磁极宽度。

安放电刷：电刷安放在换向器的几何中性线上，对前端接对称布置的绕组，换向器

的几何中心线与磁极中心线相对齐，所以电刷就安放在与主极中心线对齐的换向器的位置上。两个电刷间的距离，用换向片数表示时，正好是极距 τ_K 。

$$\tau_K = \frac{K}{2P} = \frac{Z}{2P} = \frac{14}{4} = 3.5$$

(4) 电路图及并联支路对数

根据图 3-1 可画出图 3-2 所示的电路图。从图 3-2 可清楚看出： $a = p = 2$

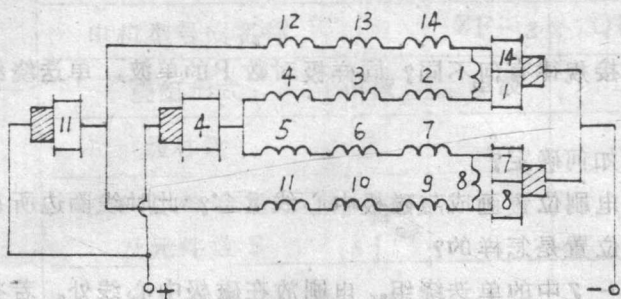


图 3-2

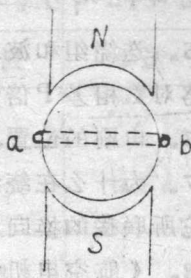


图 3-3

〔例 3-2〕 试用电磁感应定律 $e = - \frac{d\psi}{dt}$ ，证明直流电机电枢绕组感应电势 $E_a = C_e \Phi n$ ， $C_e = \frac{PN}{60a}$ 。其中， P 为电机极对数， N 为电枢绕组总导体数， a 为绕组并联支路对数， Φ 为每极主磁通， n 为电枢转速。

证明：根据已知条件，可知每条支路导体数为 $N/2a$ 。它可看成是由 $N/4a$ 个 1 匝的整距线圈构成。

电枢每转过一个极距，线圈中磁通变化 2Φ 。其道理可由图 3-3 所示一对极情况说明。

电枢转过一个极距时磁通从 $+\Phi$ 变到 $-\Phi$ ，故变化量为 2Φ 。

那么，电枢转过一个极距需要几秒钟呢？已知电枢转速为 n 转/分，即 $n/60$ 转/秒。因此，电枢转过一个极距需要 $60/n$ 秒。

由于电枢绕组感应电势为直流电，故可用平均值来分析。根据电磁感应定律，电枢绕组中感应电势 E_a 的大小为

$$E_a = \left(\frac{N}{4a} \cdot 2\Phi \right) / \left(\frac{60}{n} \right)$$

$$= \frac{PN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n$$

证毕

思 考 题

1. 绕组的槽数 Z 、元件数 S 及换向片数 K 之间有什么关系?
2. 如何确定绕组的第一节距 y_1 ? 为什么说 y_1 是绕组的重要参数?
3. 长距和短距绕组为什么会削弱一部分电势? 为什么一般不采用长距?
4. 单波和单迭绕组有何区别? 如何判断一台已经绕好的电枢绕组是波绕组还是迭绕组? 节距
5. 迭绕组和波绕组的元件联接规律有何不同? 同样极对数 P 的单波、单迭绕组为何支路对数相差 P 倍?
6. 电刷的位置、刷距和数目如何确定?
7. 为什么在绕组展开图上将电刷位置画成与磁极中心线重合? 此时线圈边所在的槽和它所联接的换向片之间的相对位置是怎样的?
8. 《航空电机学》中的图 3-7 中的单迭绕组, 电刷放在磁极中心线处。若将其电刷移到几何中心线处, 这时作为发电机用, 能发电吗? 作为电动机用, 能旋转吗?
9. 如果一单迭绕组的元件设计成如图 3-4 所示的不对称形状, 它的电刷应放在什么位置?
10. 当《航空电机学》中图 3-7 所示的单迭绕组电机作发电机运行时,
 - (1) 若去掉相邻的一对电刷 (A_1 、 B_1), 会产生什么后果?
 - (2) 若去掉相对的一对电刷 (A_1 、 A_2), 电机能运动吗?
 - (3) 如果只去掉一只电刷, 又如何?
 - (4) 若其中一个元件断线 (例如元件 3), 电刷上电压有何变化? 电流呢?
 提示: 可采用支路图 (即符号图) 进行分析。
11. 为什么航空直流发电机的单迭绕组要有均压线? 如何连接? 均压线中的电流是交流还是直流? 交流 单迭绕组的对称条件是什么?
12. 为什么单波绕组和 $P=1$ 的单迭绕组没有均压连接线? 一个-一个
13. 写出直流电机的感应电势公式, 说明其中变量的意义, 并用直流电机基本工作原理来理解它。

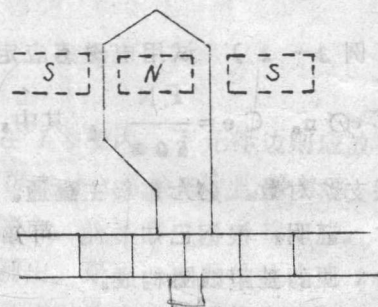


图 3-4

习 题

1. 设计下列直流电机电枢绕组, 画出展开图, 并标出电刷和磁极位置:
 - (1) $2P=4$, $S=K=Z=14$, 单迭右行绕组, 并画出均压线 (只要求画两根), 画出符号图。