

916627

高等学校教材

电机学

下册

(修订本)

华中理工大学 许实章 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI



机械工业出版社

高等学校教材

电 机 学

下 册

(修 订 本)

华中理工大学 许实章 主编



机械工业出版社

本书根据从特殊到一般的认识规律,首先逐一论述直流电机、变压器、感应电机和同步电机四种典型电机的工作原理、基本结构、电磁过程、理论分析方法、运行特性和参数,而于最后总结各种电机在电、磁、力各方面的共同特点,使读者在掌握各电机个性的基础上,了解它们的共性,对各种电机的内在联系和机电能量转换的实质有一个完整的认识。书中每章都有小结和习题,包括思考题和计算题,便于学习。修订本在压缩全书篇幅,精炼内容,改变难点的分析方法等方面作了较大改进。

全书分为上、下两册,上册包括绪论、直流电机和变压器,下册包括感应电机、同步电机和总结。本书可作为高等学校电机专业的“电机学”课程的教材,也可作为其他电力类各专业的“电机学”教材,对电机制造厂和电力部门的技术人员,也是一本很好的参考书。

电 机 学

下 册

(修 订 本)

华中理工大学 许实章 主编

*

责任编辑:刘家琼 版式设计:吴静霞

责任印制:王国光 责任校对:熊天荣

*

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)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $19 \frac{3}{4}$ · 字数 481 千字

1981年4月北京第一版

1990年5月北京第二版·1990年5月北京第十一次印刷

印数 74,301—80,300 · 定价:3.95 元

*

ISBN 7-111-02009-X/TM·274 (课)

前 言

本书自1980年出版以来,为大多数高等院校所欢迎,至1986年底止,本书已印刷了七次,上册出书七万多册,下册出书六万多册。

1983年11月,原机械工业部电工技术类电机教材编审小组在广州召开评审会议,会上对本书的优点给以充分肯定,如内容比较充实,有一定的特色,能较好地总结有关院校的教学经验和体现改革精神,并能注意联系实际。会上对本书的进一步修订也提出了建设性意见,如注意精简内容,对有些部分的讲法希望研究改进以达到“有利于教学”等。

本书修订本是根据1983年5月在杭州召开的电工技术类教材编审委员会上制订的“高等工业学校电机教学大纲”和上述广州教材评审会的精神进行修改的。首先是注意精简内容,原来的六个附录全部取消,而把其中与教学大纲有关部分的内容移到正文中讲述。原书正文中不是教学大纲规定的内容也几乎都删掉,只对一些理论上或实用上有较大意义的内容才保留下来,但在章节标题上加了星标,表示这些内容可结合各自需要自由选读。其次在写法上,对交流绕组磁势和感应电机的时空矢量图等的分析过程作了较大改进,对单相感应电动机提出了新的等效电路,还有许多内容在论述方法上作了精炼和改进。

本书贯彻了国家标准GB3101~3102~82中有关量、单位和符号的有关规定,以及国家标准GB4728电气图用图形符号的有关规定。

修订版和原书比较有较大改进,是一部内容上符合教学大纲要求、论述方法适合教学的比较完善的教材。

这次修订仍由原来的主要编写人执笔,具体分工如下:华南工学院潘观海教授修改直流电机;华中理工大学熊衍庆教授修改绪论和变压器;浙江大学王毓车副教授修改同步电机;华中理工大学许锦兴副教授编写“整流供电直流电动机采用的功率半导体电路”;许实章教授修改交流电机的绕组、电势和磁势,感应电机和总结,并对全部修订稿作了仔细修改。参加本书第一版编写的还有蒋豪贤、许承千、沈云宝和张耀同志。

本书由湖南大学蒋定宇教授主审,他对修订稿作了详细审阅,提出了很多宝贵意见。

这里,谨向蒋定宇教授和很多用过本书、提过宝贵意见的同志表示衷心感谢!

主要符号表

下面列出下册新添的主要符号

a —— 交流绕组每相并联支路数
 B_ν —— ν 次谐波磁密
 B_a —— 电枢反应磁场磁密
 B_{ad} —— 直轴电枢反应磁场磁密
 B_{aq} —— 交轴电枢反应磁场磁密
 B_{f1} —— 励磁磁场的基波磁密
 E_0 —— 空载电势, 励磁电势
 E_a —— 电枢反应电势
 E_{ad} —— 直轴电枢反应电势
 E_{aq} —— 交轴电枢反应电势
 E_σ —— 定子漏电势
 E_ν —— ν 次谐波电势
 F_a —— 电枢磁势(基波幅值)
 F_{ad} —— 直轴电枢磁势(基波幅值)
 F_{aq} —— 交轴电枢磁势(基波幅值)
 F_{f1} —— 励磁磁势基波幅值
 f_1 —— 感应电机定子频率
 f_2 —— 感应电机转子频率
 I —— 同步电机的电枢电流
 I_d —— 同步电机电枢电流的直轴分量(直轴电流)
 I_q —— 同步电机电枢电流的交轴分量(交轴电流)
 k_e —— 感应电机的电势变比
 k_i —— 感应电机的电流变比
 k_a —— 隐极同步电机电枢磁势的折算系数
 k_d —— 直轴电枢磁密分布曲线的波形系数
 k_q —— 交轴电枢磁密分布曲线的波形系数
 k_{ad} —— 直轴电枢磁势的折算系数
 k_{aq} —— 交轴电枢磁势的折算系数
 k_f —— 励磁磁势分布曲线的波形系数
 k_{q1} —— 电势或磁势基波的绕组分布系数
 k_{y1} —— 电势或磁势基波的线圈短距系数
 k_{N1} —— 电势或磁势基波的绕组系数
 $k_{q\nu}$ —— 电势或磁势 ν 次谐波的绕组分布系数
 $k_{y\nu}$ —— 电势或磁势 ν 次谐波的线圈短距系数
 $k_{N\nu}$ —— 电势或磁势 ν 次谐波的绕组系数
 k_{sk1} —— 电势基波的斜槽系数
 $k_{sk\nu}$ —— 电势 ν 次谐波的斜槽系数
 k_c —— 短路比
 k_v —— 电压波形正弦性畸变率

T_{pi} —— 同步电动机的牵入转矩
 n_1 —— 同步转速, 定子基波旋转磁场的转速
 n_2 —— 转子基波旋转磁场相对于转子的转速
 N —— 匝数
 q —— 每极每相槽数
 R_{st} —— 起动电阻
 s —— 转差率
 s_m —— 发生最大电磁转矩时的转差率
 s_+ —— 转子对正转磁场的转差率
 s_- —— 转子对反转磁场的转差率
 T_a —— 定子绕组的时间常数
 T'_d —— 励磁绕组的时间常数
 T''_d —— 阻尼绕组的时间常数
 T_{d0} —— 定子绕组和阻尼绕组都开路时的励磁绕组的时间常数
 X_a —— 电枢反应电抗
 X_σ —— 定子漏抗
 X_l —— 同步电抗
 X_d —— 直轴同步电抗
 X_q —— 交轴同步电抗
 X_{ad} —— 直轴电枢反应电抗
 X_{aq} —— 交轴电枢反应电抗
 X'_d —— 直轴瞬变电抗
 X''_d —— 直轴超瞬变电抗
 X_+ —— 正序电抗
 X_- —— 负序电抗
 X_0 —— 零序电抗
 Z —— 槽数, 阻抗(复数)
 Z —— 复数阻抗的模(绝对值)
 Z_1 —— 感应电机定子漏阻抗(复数)
 Z_2 —— 感应电机转子漏阻抗(复数)
 Z_+ —— 正序阻抗(复数)
 Z_- —— 负序阻抗(复数)
 Z_0 —— 零序阻抗(复数)
 Φ_1 —— 基波磁通
 Φ_ν —— ν 次谐波磁通
 Φ_a —— 电枢反应磁通
 Φ_{ad} —— 直轴电枢反应磁通
 Φ_{aq} —— 交轴电枢反应磁通
 Φ_0 —— 励磁磁通
 Ω_1 —— 同步角速度

目 录

主要符号表

第三篇 交流电机的绕组、 电势和磁势

第十四章 交流电机的绕组和电势	1
§ 14-1 交流电机的工作原理	1
§ 14-2 交流绕组的基本要求和分类	3
§ 14-3 槽电势星形图	3
§ 14-4 三相双层绕组	5
§ 14-5 三相单层绕组	10
§ 14-6 分数槽绕组	13
§ 14-7 在正弦分布磁场下的绕组电势	18
§ 14-8 在非正弦分布磁场下电势中的高 次谐波及其削弱方法	22
§ 14-9 齿谐波电势及其削弱方法	26
§ 14-10 小结	29
第十五章 交流电机绕组的磁势	32
§ 15-1 单相绕组的脉振磁势	32
§ 15-2 三相绕组旋转磁势的基波	38
§ 15-3 时间矢量与空间矢量	43
§ 15-4 圆形和椭圆形旋转磁势	44
§ 15-5 三相绕组合成磁势的高次谐波	46
§ 15-6 三相合成磁势波形图	47
§ 15-7 小结	49

第四篇 感 应 电 机

第十六章 感应电机的运行状态和基本 结构	51
§ 16-1 感应电机的三种运行状态	51
§ 16-2 感应电机的主要结构部件	53
§ 16-3 感应电机的额定值	57
§ 16-4 小结	58
第十七章 感应电机的运行原理	59
§ 17-1 感应电机的磁场、主磁通、漏 磁通和漏抗	59
§ 17-2 转子静止时感应电机的运行	61

§ 17-3 转子旋转时感应电机的运行	67
§ 17-4 感应电机转子侧各物理量的折算	73
§ 17-5 感应电机的等效电路	77
§ 17-6 感应电机的参数测定	80
§ 17-7 笼型转子的相数、极数和参数 计算	84
§ 17-8 小结	87
第十八章 感应电机的功率、转矩和运 行特性	89
§ 18-1 感应电机的功率和转矩平衡 方程式	89
§ 18-2 感应电机的电磁转矩	93
§ 18-3 感应电动机的工作特性	100
§ 18-4 感应电机的圆图	102
§ 18-5 小结	106
第十九章 三相感应电动机的起动、调 速和制动	108
§ 19-1 感应电动机的起动性能	108
§ 19-2 三相感应电动机的起动方法	109
§ 19-3 深槽式和双笼感应电动机	115
§ 19-4 感应电动机的附加转矩及其对 起动的影响	117
§ 19-5 感应电动机的调速	121
§ 19-6 感应电动机的制动方法	129
§ 19-7 小结	131
第二十章 三相感应电动机在不对称 电压下运行及单相感应电 动机	133
§ 20-1 三相感应电动机在不对称电压 下运行	133
§ 20-2 单相感应电动机	136
§ 20-3 小结	141
第二十一章 感应发电机及特种感应 电机	142
§ 21-1 感应发电机	142
§ 21-2 交流伺服电动机	144

§ 21-3	交流测速发电机	146
§ 21-4	感应调压器	147
§ 21-5	直线感应电动机	149
§ 21-6	单相串励换向器电动机	151
§ 21-7	转子馈电式的三相并励电动机	154
§ 21-8	小结	156

第五篇 同步电机

第二十二章 同步电机的基本结构

§ 22-1	同步电机的基本结构型式	159
§ 22-2	隐极同步电机的基本结构	160
§ 22-3	凸极同步电机的基本结构	162
§ 22-4	同步电机的冷却方式	164
§ 22-5	同步电机的励磁方式	167
§ 22-6	额定值	169
§ 22-7	小结	169

第二十三章 同步电机的运行原理

§ 23-1	同步发电机的空载运行	171
§ 23-2	电压波形正弦性畸变和 电话干扰	172
§ 23-3	对称负载时的电枢反应	173
§ 23-4	隐极同步发电机的电势方程式、 同步电抗和矢量图	176
§ 23-5	凸极同步发电机的双反应理论	181
§ 23-6	凸极同步发电机的电势方程式、 同步电抗和矢量图	184
§ 23-7	小结	188

第二十四章 同步发电机的运行特性

§ 24-1	同步发电机的空载特性和短 路特性	190
§ 24-2	同步发电机的零功率因数负 载特性	192
§ 24-3	同步发电机的短路比和直轴 同步电抗	194
§ 24-4	同步发电机的外特性和 调整特性	196
§ 24-5	电压调整率和额定励磁磁势 的求法	197
§ 24-6	稳态参数的测定	201
§ 24-7	小结	202

第二十五章 同步发电机的并列运行

§ 25-1	并列投入的条件和方法	205
--------	------------	-----

§ 25-2	同步发电机的功率和转矩 平衡方程式	209
§ 25-3	同步电机的功角特性	209
§ 25-4	同步发电机与大电网并联运行时 有功功率的调节和静态稳定	211
§ 25-5	无功功率的调节和V形曲线	215
§ 25-6	小结	216

第二十六章 同步电动机和同步调相机

§ 26-1	同步电动机的基本方程式、 矢量图和功角特性	219
§ 26-2	无功功率的调节	221
§ 26-3	同步电动机的起动方法	222
§ 26-4	同步调相机	225
§ 26-5	小结	225

第二十七章 同步发电机的不对称运行

§ 27-1	同步发电机不对称运行时的 各相序阻抗和等效电路	228
§ 27-2	三相同步发电机的不对称稳 定短路	232
§ 27-3	负序和零序参数的测定	235
§ 27-4	不对称运行对电机的影响	236
§ 27-5	小结	237

第二十八章 同步电机的突然短路

§ 28-1	超导体闭合回路磁链守恒原理	239
§ 28-2	对称突然短路的物理过程	240
§ 28-3	瞬变电抗和超瞬变电抗及其 测定方法	244
§ 28-4	突然短路电流及其衰减时间 常数的计算	247
§ 28-5	不对称突然短路概念*	252
§ 28-6	突然短路对电机的影响	253
§ 28-7	小结	254

第二十九章 同步电机的振荡

§ 29-1	同步电机振荡的物理过程	256
§ 29-2	同步电机在振荡过程中的转 矩平衡方程式	257
§ 29-3	自由振荡和阻尼绕组的作用	260
§ 29-4	动态稳定概念	261
§ 29-5	强迫振荡概念	264
§ 29-6	小结	266

第三十章 其他同步电机

§ 30-1	磁阻同步电动机	269
--------	---------	-----

V

§ 30-2 永磁同步电机.....	271	§ S-2 电磁转矩.....	283
§ 30-3 爪极同步电机*	272	§ S-3 电势平衡关系.....	300
§ 30-4 步进电动机*	273	§ S-4 磁势平衡关系.....	303
总结 电机运行中电、磁、力		§ S-5 转矩平衡关系.....	305
各方面的共同特点.....	277	§ S-6 功率平衡关系.....	307
§ S-1 电机中的磁场能量.....	277		

第三篇 交流电机的绕组、电势和磁势

交流旋转电机主要分为同步电机和异步电机两类。异步电机中主要是感应电机，感应电机的转子电流是由定子电流感应产生的，它的名称即由此而产生，感应电机运行时，其转速互不同于同步转速，故又称为异步电机，为使同类教材采用的名称一致，本书把属于感应电机的异步电机，都称为感应电机。（感应电机分为笼型感应电机、绕线型感应电机和换向器型感应电机）。同步电机按转子结构形式分为凸极同步电机和隐极同步电机；同步电机主要用作发电机，也用作电动机或调相机。感应电机主要用作电动机，有时也用作发电机。两类电机虽然激磁方式和运行特性有很大差别，但电机内部发生的电磁现象和机电能量转换的原理却基本上是相同的，因此存在许多共同性的问题，可以统一起来进行研究；这就是本篇所要研究的交流电机的绕组、电势及磁势等问题。这些问题对以后分别研究感应电机和同步电机的运行性能有着重要的意义。

第十四章 交流电机的绕组和电势

如同直流电机一样，交流电机绕组的功用也是感应电势、流过电流和产生电磁转矩，达到进行机电能量转换的目的，所以它是电机的重要部件。

本章先介绍交流电势的特点，由此导出交流绕组的绕制方法，再分析绕组电势的计算方法和电势中的谐波。

为了了解绕组及其电势在具体电机中的作用，先介绍同步电机和感应电机的工作原理。

§ 14-1 交流电机的工作原理

一、同步电机的工作原理

以发电机为例来说明。同步电机和直流电机类似，也由定子和转子两部分组成，定、转子之间的气隙，如图14-1所示。定子上有AX、BY、CZ三相绕组，它们在空间上彼此相差 120° 电角度，每相绕组的匝数相等。转子磁极（简称主极）上装有励磁绕组，由直流励磁，其磁通从转子N极出来，经过气隙、定子铁心、气隙，进入转子S极而构成回路，如图14-1中虚线所示。

如果用原动机拖动发电机沿反时针方向恒速旋转，则磁极的磁力线将切割定子绕组的导体，由电磁感应定律可知，在定子导体中就会感应出交变电势。设磁极磁场的气隙磁密沿圆周按正弦规律分布，则导体电势也随时间按正弦规律变化，即

$$e_c = B_a l v = B_m l v \sin \omega t = E_{cm} \sin \omega t \quad (14-1)$$

式中 $E_{cm} = B_m l v$ 是导体电势的最大值， B_a 为导体所在处的磁密， B_m 为正弦波磁密的最大值， l 为磁力线切割导体的长度， v 为磁力线切割导体的线速度， $\omega = 2\pi f$ ， f 是电势的频

率。

由于三相绕组在空间彼此互差 120° 电角度,在图14-1所示转向下,磁力线将先切割A相绕组,再切割B相,最后切割C相。因此,定子三相电势大小相等,相位彼此互差 120° 。设相电势的最大值为 E_m ,A相电势的初相角为零,则三相电势的瞬时值为:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (14-2)$$

三相电势的波形如图14-2所示。

从图14-2和式(14-1)及式(14-2)可见,多相交流电势存在大小、频率、波形和对称等问题,这些内容将在本章中详细讨论。

电势的频率可这样决定:当转子为一对极时,转子旋转一周,绕组中的感应电势正好交变一次(即一周波);当电机有 p 对极时,则转子旋转一周时,感应电势交变 p 次(即 p 个周波);设转子每分钟转数为 n ,则转子每秒钟旋转 $\frac{n}{60}$ 转,因此感

应电势每秒交变 $\frac{pn}{60}$ 次,即电势的频率为

$$f = \frac{pn}{60} \quad (14-3)$$

从上式可见,感应电势的频率 f 等于电机的极对数 p 与转子每秒钟的转速 $\frac{n}{60}$ 的乘积。我国国家标准规

定工业交流电势的频率为50Hz,因此电机的极数和转速成反比关系。例如,在汽轮发电机中,如果 $n = 3000 \text{ r/min}$,电机为1对极; $n = 1500 \text{ r/min}$,电机为2对极。所以转速越低则极对数越多。在水轮发电机中,如果 $n = 100 \text{ r/min}$,则电机为30对极。

如果在图14-1所示三相绕组的出线端接上三相负载,便有电能输出,也就是说发电机把机械能转换成电能。

从式(14-3)可见,同步电机的转速 n 和电网频率 f 之间有严格不变的关系,即当电网频率 f 一定时,电机的转速 $n = \frac{60f}{p}$ 为一恒值,而感应电机就不是这样,这是同步电机和感应电机的基本差别。

二、感应电机的工作原理

以电动机为例来说明。从结构上讲,感应电机和同步电机的定子是一样的,只有转子结构不同而已。图14-3为一笼型感应电动机的原理图。转子槽内有导体,导体两端用短路环连接起来,形成一个闭合的绕组。当定子绕组加上对称的三相交流电压后,定子三相绕组中便有对称的三相电流通过,它们联合产生一个定子旋转磁场(将在第十五章中讨论),在图

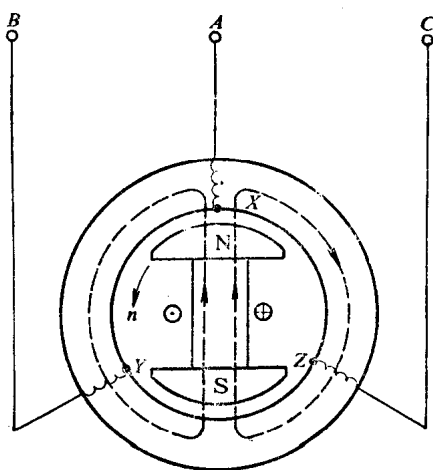


图14-1 同步发电机的工作原理图

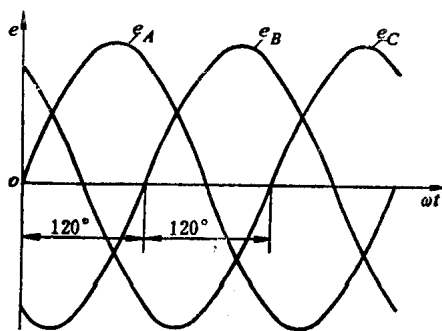


图14-2 三相电势波形

14-3中用N、S极表示。设定子旋转磁场以转速 n_1 （称为同步转速）沿反时针方向旋转，则它的磁力线将切割转子导体而感应电势。电势的方向可用右手定则或图0-11所示方法确定。如图14-3中的叉和点所示。在该电势的作用下，转子导体内便有电流通过，电流的有功分量与电势同相位。于是，由电磁力定律可知，转子导体电流与旋转磁场相互作用使转子导体受到电磁力 f 的作用，它的方向可由左手定则或图0-16所示方法确定，如图14-3所示。在该电磁力的作用下，电动机转子就转动起来，其转向与旋转磁场的方向相同。这时，如果在转子轴上加上机械负载，电动机就拖动机械负载旋转，输出机械功率，也就是说，电动机把电能转换成机械能。

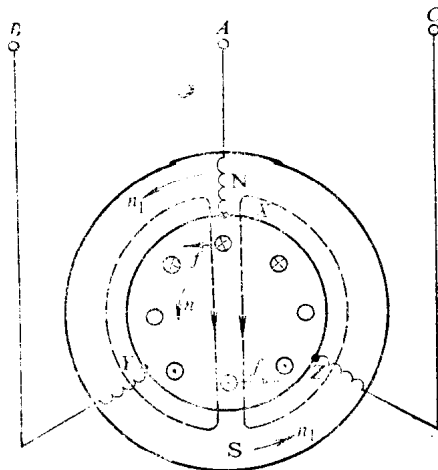


图14-3 感应电动机的工作原理图

感应电动机的转速不可能达到定子旋转磁场的转速，即同步转速，因为如果达到同步转速，则转子导体与旋转磁场之间没有相对运动，在转子导体中不能感应出电势和电流，也就不能产生推动转子旋转的电磁力。因此，感应电动机的转速总是低于同步转速，即两种转速之间总是存在差异，故感应电动机又称为异步电动机。

§ 14-2 交流绕组的基本要求和分类

对交流绕组的基本要求是：（1）在一定导体数下，获得较大的基波电势和基波磁势；（2）在三相绕组中，对基波说，三相电势和磁势必须对称，即三相大小相等而相位上互差 120° ，并且三相的阻抗也要求相等；（3）电势和磁势波形力求接近正弦波，为此要求电势和磁势中的谐波分量尽可能小；（4）用铜量少，绝缘性能和机械强度可靠，散热条件好；（5）制造工艺简单，检修方便。

交流电机的绕组，按绕组的相数、槽内层数、每极每相槽数的不同可分为：（1）按相数分为单相、两相、三相和多相绕组；（2）按槽内层数分为单层绕组和双层绕组，双层绕组又分为叠绕组和波绕组，单层绕组又分为等元件、交叉式和同心式绕组等；（3）按每极每相槽数是整数还是分数分为整数槽绕组和分数槽绕组。

交流电机绕组的种类虽然很多，但现代主要采用三相双层绕组，因为它能较好地满足上述要求。因此，本章重点讨论每极每相整数槽的双层绕组，其他绕组只作一般介绍。

槽电势星形图是分析绕组的一个有效方法。特别是用于分析比较复杂的绕组（如分数槽绕组、变极调速绕组等）时，概念比较清楚，所以下面先介绍槽电势星形图。

§ 14-3 槽电势星形图

当把电枢上各槽内导体按正弦规律变化的电势分别用矢量表示时，这些矢量构成一个辐射星形图，称为槽电势星形图。下面用一个具体例子来说明。

例14-1 图14-4是一台三相同步发电机定子槽内导体沿圆周分布情况，已知 $2p = 4$ ，

$Z = 36$, 试绘出槽电势星形图。

解 在图14-4中, 相邻两槽间的距离以电角度表示时, 称为槽距电角, 以 α_1 表示。由于整个电枢圆周为 360° 机械角度, 以电角度计算时, 一对极距范围就等于 360° 电角度。当电机有 p 对极时, 则电枢圆周应为 $p360^\circ$ 电角度, 因此, 槽距电角

$$\alpha_1 = \frac{p 360^\circ}{Z} \quad (14-4)$$

式中 p 是电机的极对数, Z 是电枢槽数。对所举例子来说

$$\alpha_1 = \frac{p 360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$$

假设磁极磁场的磁密沿气隙圆周按正弦规律分布, 转子沿反时针方向恒速旋转, 由式(14-1)可知, 定子各槽内导体的感应电势将随时间按正弦规律变化。由于各槽在空间彼此互差 α_1 电角度, 因此各导体电势在时间相位上也彼此互差 α_1 电角度。于是, 假设1号槽的导体电势以矢量1表示(见图14-5a), 则在图示的转子转向下,

2号槽的导体电势矢量2比矢量1滞后 20° 。同理矢量3比矢量2滞后 20° 。依此类推, 就可绘出图14-5a所示的槽电势星形图。从图可见, 19、20、21……等矢量与1、2、3……等矢量分别重合, 这是由于它们在磁极下分别处于对应的位置, 所以它们的感应电势同相位。一般说, 对于每极每相整数槽绕组, 如果电机有 p 对极, 则有 p 个重叠的槽电势星形。普遍地说, 当 p 和 Z 有最大公约数 l 时, 则有 l 个重合的槽电势星形。对本例题而言, p 和 Z 的最

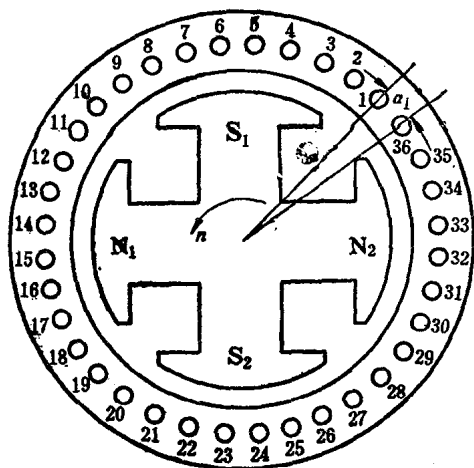


图14-4 槽内导体沿定子圆周的分布情况

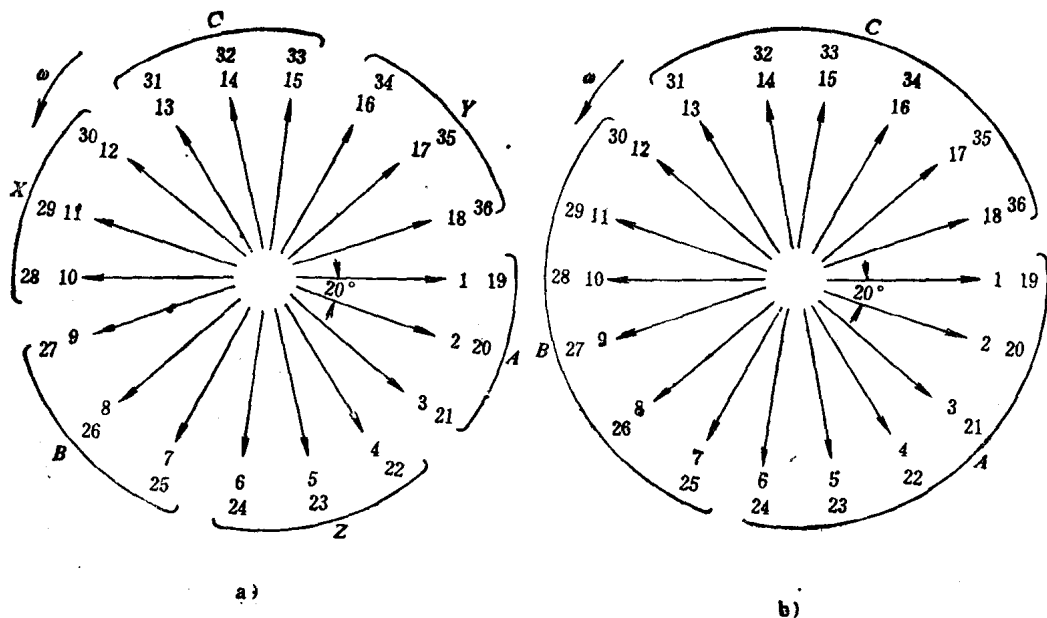


图14-5 槽电势星形图

a) 60° 相带 b) 120° 相带

大公约数为 2，故有两个重合的槽电势星形。

§ 14-4 三相双层绕组

三相双层绕组有叠绕组和波绕组两种。这里主要讨论如何用槽电势星形图分析叠绕组的连接方法，关于波绕组只介绍其特点和连接规律。

一、叠绕组

交流电机的叠绕组和直流电机中的单叠绕组一样，任何两个相邻的线圈都是后一个叠在前一个的上面。然后把属于同一相的相邻线圈直接串联起来，再通过一定的连接法构成三相绕组。下面用一实例来说明。

例14-2 已知 $Z = 36$ ， $2p = 4$ ，试绘制一个并联支路数 $\alpha = 1$ 的三相双层叠绕组展开图。

解 绘展开图的步骤是：（1）绘槽电势星形图；（2）分相；（3）绘绕组展开图（即把各相导体按一定规律连接成对称三相绕组）。现分述如下。

（1）绘槽电势星形图 由于本例题的极对数、槽数与图14-4相同，故槽电势星形图与图14-5完全相同。

在双层绕组中，上层线圈边的电势星形与槽电势星形完全相同。下层线圈边的位置取决于线圈的节距。如果我们把各个线圈的上层边电势矢量与下层边电势矢量相减，使得各线圈的电势矢量，它们也构成一个电势星形，相邻两矢量间相位差也是 α_1 。所以在双层绕组里，槽电势星形的每一个矢量既可以假定为槽内上层线圈边的电势矢量也可以假定为一个线圈的电势矢量。在下面的分析中就是把它看成一个线圈的电势矢量，如矢量 1 是上层边嵌于槽 1 的线圈的电势矢量。

（2）分相 所谓分相，就是在星形图上划分各相所属槽号。分相的原则是使每相电势最大，且三相电势对称。为了使三相电势相等，每相在每极下应占有相等的槽数，该槽数称为每极每相槽数，以 q 表示

$$q = \frac{Z}{2pm} \quad (14-5)$$

式中 m 是相数。对本例题而言

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{36}{2 \times 2 \times 3} = 3$$

根据分相原则和每极每相槽数 q ，就可在星形图（图14-5a）上进行分相。

以 A 相为例，由于 $q = 3$ ， A 相在每个极下应占有三槽。在第一对极距范围内，如果在 S_1 极下将 1、2、3 三个槽划归 A 相，在旁边标以字母 A ，如图14-5a所示。为了使每相合成电势最大，则应把 N_1 极下的 10、11、12 三个槽也划归 A 相，标以字母 X 。类似地把第二对极距范围内的 19、20、21 和 28、29、30 等六个槽也划归 A 相。

同理，为了使三相绕组对称，应将距 A 相 120° 处的 7、8、9、16、17、18 和 25、26、27、34、35、36 等划归 B 相。而将距 A 相 240° 处的 13、14、15、22、23、24 和 31、32、33、4、5、6 等槽划归 C 相。

上述分相的特点是把每极下的电势表面分为三等分，每相占一等分，故称每一等分为一

相带。这里因每一相带宽度相当于 $\frac{180^\circ}{m} = \frac{180^\circ}{3} = 60^\circ$ 电角度，故称为 60° 相带。

除上述分相方法外，也可选 1、2、3、4、5、6 和 19、20、21、22、23、24 等 12 个槽作为 A 相，7、8、9、10、11、12 和 25、26、27、28、29、30 作为 B 相，以及 13、14、15、16、17、18 和 31、32、33、34、35、36 作为 C 相，而得到一个三相对称的 120° 相带绕组，如图 14-5b 所示。由于 60° 相带绕组的合成电势比 120° 相带的大，故除了单绕组变极电机外，一般都用 60° 相带绕组。

同理，每一相带可取 30° 电角度。这时每对极下有 12 个相带，可以接成十二相，也可以接成六相，即把 12 个相带接成两个星形连接的三相绕组，每一个星形的每相绕组由相距 180° 电角度的两个相带组成，而两个星形之间彼此位移 30° 电角度。这种六相 30° 相带绕组，实际上是把通常按星形连接的三相 60° 相带绕组的每一相带等分为两个相带，把一个星形变成两个星形，彼此位移 30° ，因此又称为六相双 Y 移 30° 绕组。

六相双 Y 移 30° 绕组用于超巨型汽轮发电机和带整流负载的同步发电机上有突出优点。对于汽轮发电机，这是提高电机效率、减小绕组振动和提高电机极限容量的有效措施。国外已用于 120 万 kW 的 2 极汽轮发电机上。对于带整流负载的同步发电机，采用这种绕组可使整流系统产生的线电流中的高次谐波对发电机的危害显著减小，因此这种绕组已被广泛用于核物理研究中的供电发电机上。

(3) 绘绕组展开图 绘绕组展开图就是根据星形图上分相的结果，把属于各相的导体按一定规律连接起来，组成三相绕组。绘展开图时，把电枢从齿中心沿轴向剖开，展成一平面，磁极在上面，如图 14-6 所示。由于原来编号是沿反时针编的（图 14-4），故展开后按自左至右编号。编号的原则是线圈和线圈的上层边所在的槽编为同一号码。绘图时，上层边用实线表示，下层边用虚线表示。其次把展开图上的槽分为 $2p$ 等分，根据右手定则，或图 0-9 所示方法，标出各槽内导体电势的方向。然后，选择线圈节距，以 y_1 表示。设电机极距为 τ ，以槽数计算时极距

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad (14-6)$$

对本例题， $\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{2 \times 2} = 9$ 槽。则当 $y_1 = \tau$ 时，称为整距绕组；当 $y_1 > \tau$ 或 $y_1 < \tau$ 时，分别称为长距或短距绕组。为了改善电势波形以及节省材料，通常采用短距绕组。

设选用短距绕组，取 $y_1 = 7$ 槽，则第一槽的上层导体与第八槽的下层导体连接起来构成第一个线圈，余类推（图 14-6a）。在双层绕组中，因为每槽放两个线圈边，而一个线圈有两个线圈边，所以线圈数等于槽数。在本例题中， $Z = 36$ ，故有 36 个线圈。这时图 14-5a 所示的 36 根矢量可以认为是 36 个线圈的电势矢量。

以 A 相为例，根据图 14-5a 中 A 相所属的线圈矢量，把上层边在第一个极下的 1、2、3 三个线圈串联起来（线圈 1 的尾与线圈 2 的头接在一起，余类推）得到一个线圈组。类似地，把在其他极下属于 A 相的 10、11、12；19、20、21；28、29、30 等线圈分别串联起来构成另外三个线圈组。这样，A 相共有四个线圈组，如图 14-6a 所示。

从图 14-5a 可见，每个线圈组的合成电势大小相等，相位相同或相反，故每个线圈组可以独立成为一条支路。这样，对每极每相整数槽双层叠绕组，如果电机有 $2p$ 个磁极，每相便有

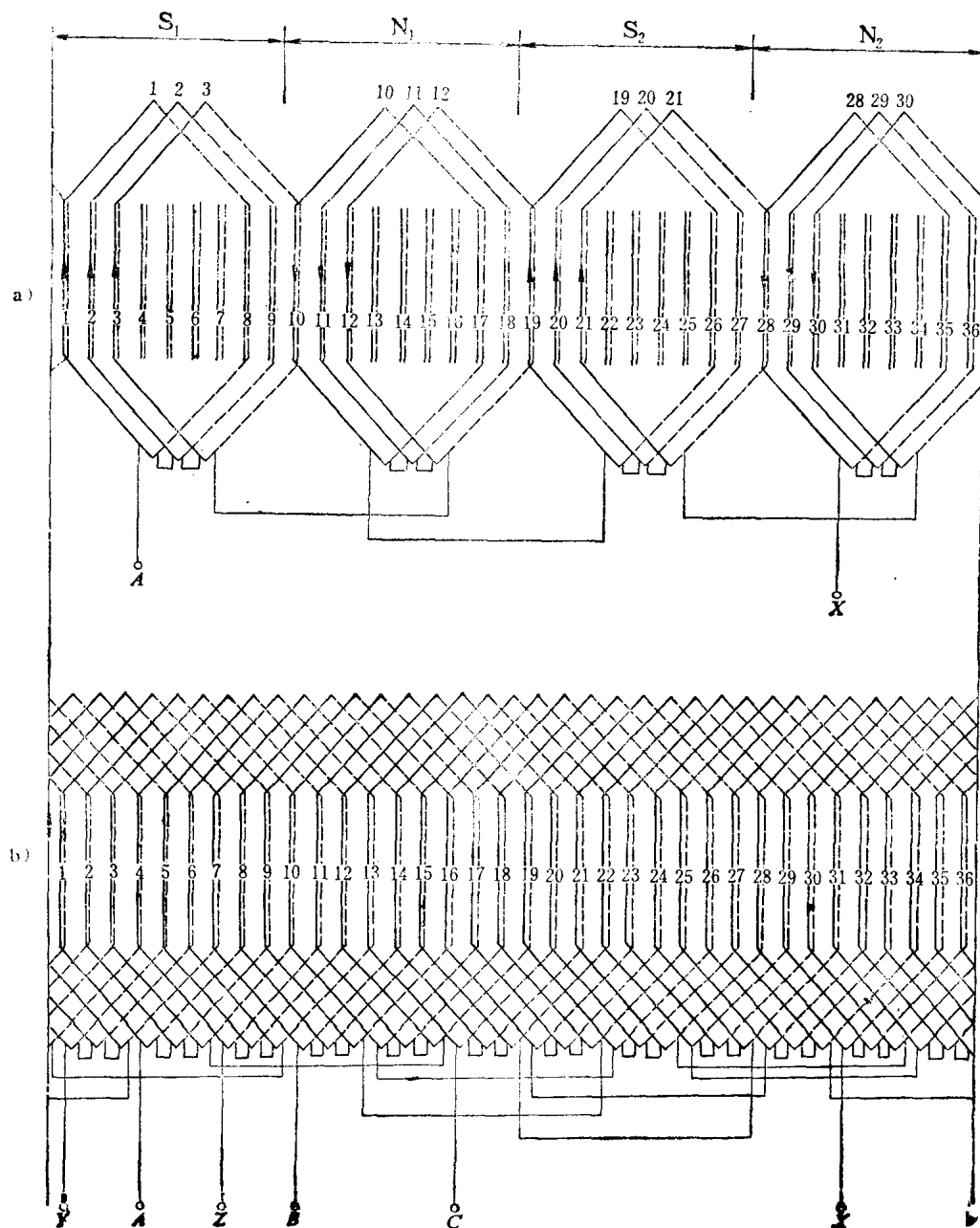


图14-6 三相双层叠绕组展开图

$$2p = 4 \quad Z = 36 \quad a = 1$$

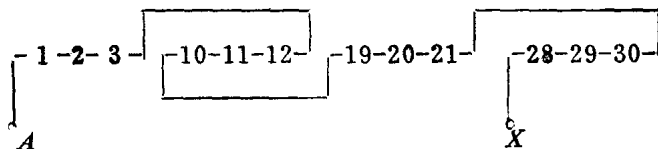
a) A相展开图 b) 三相展开图

$2p$ 个线圈组，故每相最大并联支路数 $a_{\max}$ 等于极数，即

$$a_{\max} = 2p \quad (14-7)$$

对具体电机而言，各线圈组是串联还是并联，视所选并联支路数 a 而定。在本例题中，因要求 $a = 1$ ，所以四个线圈组应该串联成一条支路。由于不同极性下的线圈组电势方向相反（见图14-5a和图14-6a），为了使整个绕组的电势相加，线圈组串联时应采用“尾接尾，头

接头”的规律。这样就连成了A相绕组，如图14-6a所示。这时A相所包括的十二个线圈的串联次序如下表所示：



同理，根据星形图上划分的B相和C相所属线圈矢量，按同样规律连接起来，便构成B相和C相绕组。这样，可得三相绕组的展开图如图14-6b所示。

叠绕组的优点是短距时能节省端部用铜和便于得到较多的并联支路。缺点是线圈组之间的连接线较长，在多级电机中这些连接线用铜量很大。叠绕组的线圈一般为多匝线圈，主要用在10kW以上的中、小型同步电机和感应电机以及大型同步电机的定子绕组中。

二、波绕组

交流电机的波绕组和直流电机的波绕组类似，任何两个串联线圈沿绕制方向象波浪似地前进。和直流电机一样，我们用合成节距 y 来表征波绕组的连接规律，它说明每串联一个线圈时，绕组沿绕制方向前进了多少槽。由于波绕组是依次把同极性下的线圈串联起来，每次前进约一对极距（ 2τ ）。故对整数槽波绕组来说，合成节距 y 通常选为一对极距，即

$$y = \frac{Z}{p} = 2mq$$

但当合成节距这样选择时，在绕组串联 p 个线圈（沿定子绕了一周）后，绕组将回到原来出发的槽号而自行闭合。因此，为了把所有属于同一相的线圈全部连接起来，每绕完一圈之后，必须人为地前进或后退一个槽，才能使绕组继续地绕下去。下面用具体例子来说明。

例14-3 试将例题14-2绘成三相双层波绕组展开图。

解 绘波绕组展开图的步骤与绘叠绕组的完全相同。由于本例题与例题14-2有相同的槽数和极数，故槽电势星形图和分相结果与例题14-2完全相同，见图14-5a，这里不再重复。

绘波绕组展开图时，首先应确定线圈的各种节距，设选合成节距

$$y = \frac{Z}{p} = \frac{36}{2} = 18$$

第一节距

$$y_1 = 7$$

则第二节距

$$y_2 = y - y_1 = 18 - 7 = 11$$

现以A相为例说明具体接法。设从 S_1 极下槽3开始，按节距 y_1 、 y_2 和 y 进行连接，如图14-7所示，连接顺序如下： A_1 （头）——3上——（ $3 + 7 = 10$ 下）——（ $10 + 11 = 21$ 上）——（ $21 + 7 = 28$ 下），这样绕过了两对极，即沿电枢表面绕过了一周。如果这时第二节距 y_2 仍用11槽，则绕组将接到 $28 + 11 = 39 = 36 + 3$ ，即回到3号槽的上层边而自行闭合。为了使绕组能继续绕下去，在绕第二圈时，把 y_2 缩短一槽，即使 $y_2 = 10$ ，使第二圈从第二槽的上层边开始往下绕，即（ $28 + 10 = 36 + 2$ ，即2上）——（ $2 + 7 = 9$ 下）——（ $9 + 11 = 20$ 上）——（ $20 + 7 = 27$ 下）。又将 y_2 缩短一个槽距，使第三圈从1号槽的上层边往下绕，即

($27+10=36+1$, 即1上)——($1+7=8$ 下)——($8+11=19$ 上)——($19+7=26$ 下)—— A_2 (尾)。至此, 绕完了所有上层边在S极下属于A相的六个线圈, 构成A相绕组的一半。

同理, 再从 N_1 下把A相所属的槽按同样方法进行连接, 其顺序为: X_1 (头)——12上——($12+7=19$ 下)——($19+11=30$ 上)——($30+7=36+1$ 下)——($1+10=11$ 上)——($11+7=18$ 下)——($18+11=29$ 上)——($29+7=36$ 下)——($36+10=36+10$ 上)——($10+7=17$ 下)——($17+11=28$ 上)——($28+7=35$ 下)—— X_2 (尾), 绕完了所有上层边在N极下属于A相的六个线圈, 构成A相绕组的另一半。由于这两半 A_1 — A_2 和 X_1 — X_2 的电势方向相反, 因此串联成一条支路时, 应采用“尾接尾”, 即 A_2 和 X_2 连接在一起。这样可得A相十二个线圈的串联次序如下表:

$$\begin{array}{l} A(\text{头})-A_1-3-21-2-20-1-19-A_2 \\ X(\text{尾})-X_1-12-30-11-29-10-28-X_2 \end{array}$$

从图14-7可见, 当波绕组采用 $y=2\tau$ 时的连接规律是: 绕组沿电枢表面绕行 q 圈, 把所有上层边在S极下属于一相的线圈按一定顺序串联起来, 构成相绕组的一半, 然后再沿电枢表面绕行 q 圈, 把所有上层边在N极下属于同一相的线圈也按同样的规律串联起来, 构成相绕组的另一半。这两半之间既可串联, 也可并联, 视所需支路数 a 而定。当串联时(如上表)则得 $a=1$, 如果并联(A_1 和 X_2 连接作为头, A_2 和 X_1 连接作为尾), 则得 $a=2$ 。

在整数槽绕组中, 无论是叠绕组还是波绕组, 每相可能的最大并联支路数都是 $a_{max}=2p$ 。对于叠绕组前面已作了分析, 对于波绕组, 为了得到最大并联支路数, 必须改变图14-7的连接方法, 不用 $y=2\tau$, 而用 $y=2\tau+1$ 槽来连接绕组, 便可得到 $2p$ 条并联支路, 如图14-8所示。图中取 $y=2\tau+1=19$ 槽, $y_1=9$ 槽, $y_2=y-y_1=10$ 槽。对照图14-5a可见,

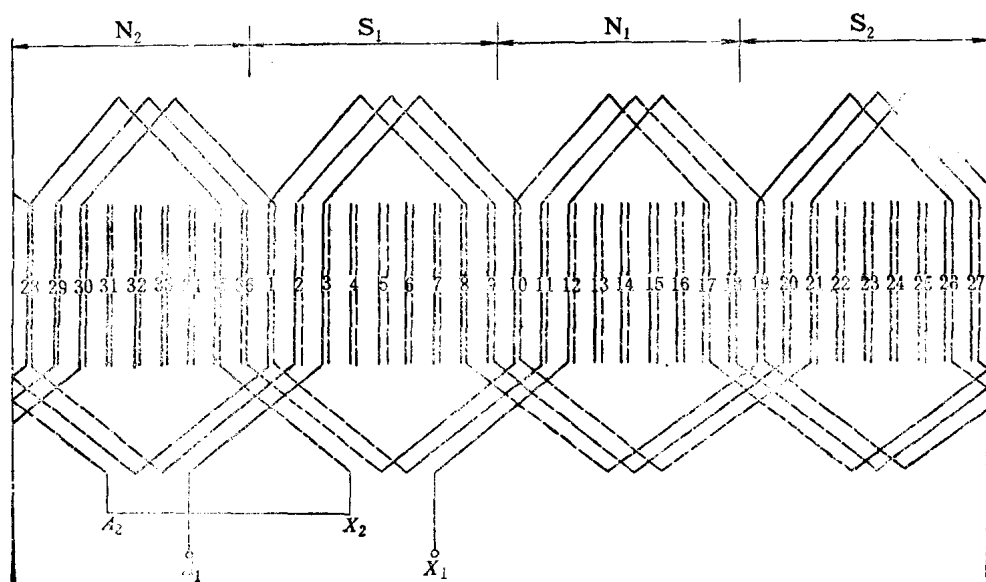


图14-7 三相双层波绕组的A相展开图

$$2p=4 \quad Z=36 \quad a=1$$