

声 明

本电子书由中国轻工业出版社出版,相关权利归中国轻工业出版社所有。读者、著作权人和(或)依法可以行使著作权的权利人如有疑问,请与中国轻工业出版社联系:

地址:北京市东长安街6号

邮编:100740

电话:85119838

Email: xnxtm@yahoo.com.cn

中国轻工业出版社

高等学校轻工专业试用教材

常用电机原理与设计

贾大义 艾高烈 编

中国轻工业出版社

内 容 简 介

本书从电器工业和电器产品的发展需要出发,选编了传统的《电机学》很少涉及或根本不涉及的一些内容,如永磁直流电机、无刷电机、单相串励换向器电动机、磁滞式同步电动机和永磁式步进电动机等,主要讲述了各类电机的特点、结构、工作原理、运行管理、设计计算。

本书是高等学校电机、电器及其控制专业(四年制本科)教材,对从事民用、家用电器生产的科技人员亦有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

常用电机原理与设计/贾大义,艾高烈编,-北京:中国轻工业出版社,1996.4

高等学校轻工专业试用教材

ISBN 7-5019-1854-6

I. 常…Ⅰ. ①贾…②艾…Ⅲ. 电机-理论-设计-高等学校-教材Ⅳ. TM30

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第00583号

责任编辑 孟寿萱

中国轻工业出版社出版
(北京市东长安街6号)

三河市宏达印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

787×1092毫米 1/16 印张:30.75 字数:738千字

1996年5月 第1版第1次印刷

印数:1—4000 定价:36.50元

前 言

《电机学》是电机、电器及其控制专业(本科)的一门重要技术基础课,以往这门课程都是以大、中型电机作为主要内容。但是随着民用电器,特别是家用电器的发展,单相异步电动机、永磁直流电动机、磁滞电机和步进电动机等小型或微型驱动电机的重要性与日俱增,即使一般工业生产所用的电机也主要是中小型电机,大型电机一般是较少遇到的。根据这种情况,原轻工业部(现轻工总会)教育司委托轻工系统自动化专业教材委员会为本系统电机、电器及其控制专业(本科)制订了12种教材的编写大纲,本书就是根据其中的《电机学》教材编写大纲编写的。全书从电器工业和电器产品的需要出发,编入了永磁直流电机、无刷电机、单相异步电动机、单相串励换向器电动机、磁滞式同步电动机和永磁式步进电动机等内容,这些都是传统的《电机学》教材很少讲的或根本不讲的。由于上述新编入的内容的理论基础与一般电机学的内容是相同的,所以本书仍按直流电机、变压器、异步电机和同步电机的体系来编排。这样做一是为了保证全书的系统性,二是为了使工业生产用电机和电器产品用电机有一个恰当的比例关系。考虑到大型电机的一些专门性理论和运行知识对民用电器和家用电器工业关系不大,本书对相应的内容作了较多删节。由于一些电器生产厂还同时生产各种小型驱动电机,本书第六篇编写了单相异步电机的电磁设计并附计算实例以满足需要。从教学角度说,各校可根据需要选讲或独立设课。

按照编写大纲规定,本书是为电机、电器及其控制专业四年制本科编写的,全书可在90~100学时授完。编写大纲还规定,适当删减某些内容并控制深度要求,本书也可用作电机与电器(家用电器)专业三年制专科教材,总学时为70~80学时。由于本书选编大量小型电机的内容,对从事民用电器和家用电器生产的技术人员也有很大参考价值。

本书第一章至第十六章由天津轻工业学院艾高烈副教授编写,第十七章至第三十章由郑州轻工业学院贾大义副教授编写。全书由郑州工学院王俊鹞教授主审,王教授对本书内容提出了很多宝贵意见,编者在此表示感谢。由于水平所限,本书一定会有许多不妥或错误之处,敬请专家学者及使用本书者批评指正。

编 者

1995. 7

目 录

第一篇 直流电机

第一章	直流电机的工作原理和基本结构	1
§1-1	直流电机的工作原理	1
§1-2	直流电机的主要结构	2
§1-3	直流电机的额定值	4
第二章	直流电机的磁路、电枢绕组和电枢反应	5
§2-1	直流电机的励磁方式	5
§2-2	直流电机的空载磁路	5
§2-3	直流电机的电枢绕组	8
§2-4	直流电机的电枢反应	13
§2-5	直流电机的感生电势和电磁转矩	15
§2-6	直流发电机	17
第三章	直流电动机运行分析	21
§3-1	直流电动机稳态运行时的基本方程式	21
§3-2	直流电动机的运行特性	23
§3-3	直流电动机的起动	27
§3-4	直流电动机的调速	31
§3-5	直流电动机的制动	37
第四章	直流电机的换向	42
§4-1	直流电机的换向过程	42
§4-2	直流电机换向的电磁理论	43
§4-3	改善换向的措施	45
第五章	电磁式小功率直流电动机设计要点	46
§5-1	主要尺寸的确定	46
§5-2	电枢绕组设计	48
§5-3	电枢冲片设计	49
§5-4	励磁绕组设计	52
§5-5	换向器和电刷	53
§5-6	换向条件的校核	54
§5-7	损耗和效率	55
第六章	永磁式直流电动机	57
§6-1	永磁电机的简单原理及分类	57

§6-2	永磁材料	59
§6-3	磁铁工作图及工作点的确定	63
§6-4	永磁直流电动机	72
§6-5	三槽电动机	76
§6-6	永磁直流电动机的稳速	82
§6-7	永磁直流伺服电动机	85
§6-8	永磁直流测速发电机	88
§6-9	永磁直流力矩电动机	88
§6-10	永磁式无刷直流电动机	91
第七章	电机的发热与冷却	95
§7-1	电机的温升及温升限度	95
§7-2	电机中常用的绝缘材料及其容许温度	96
§7-3	电机的发热和冷却过程	97
§7-4	电机的定额和运行方式	100
§7-5	电机的冷却方式	101
§7-6	电机机壳的防护型式	102

第二篇 变 压 器

第八章	变压器的分类和结构	104
§8-1	变压器的分类	104
§8-2	变压器的结构	105
§8-3	变压器的额定值	106
第九章	单相变压器的运行分析	108
§9-1	理想变压器的运行分析	108
§9-2	单相变压器的空载运行	110
§9-3	单相变压器的负载运行	113
§9-4	变压器的等值电路及相量图	115
§9-5	等值电路参数的测定	119
§9-6	变压器的运行特性	120
§9-7	自耦变压器	124
§9-8	电流互感器和电压互感器	126
§9-9	小容量变压器的设计与计算	127
第十章	三相变压器	134
§10-1	三相变压器的磁路系统	134
§10-2	三相变压器的绕组连接组	135
§10-3	三相变压器线圈的连接法和磁路系统对电势波形的影响	137
§10-4	三相变压器的并联运行	139
§10-5	三相变压器的不对称运行	141

第三篇 交流电机理论的共同问题

第十一章 交流电机的绕组和电势	145
§11-1 交流绕组的基本知识	145
§11-2 三相单层绕组	146
§11-3 三相双层迭绕组	149
§11-4 三相双层波绕组	152
§11-5 交流绕组中的感应电势	153
§11-6 感应电势中的高次谐波及其削弱方法	156
第十二章 交流电机绕组的磁势	161
§12-1 单相绕组的磁势——脉振磁势	161
§12-2 三相绕组合成磁势的基波	165
§12-3 三相绕组合成磁势的高次谐波	167
§12-4 三相合成磁势的波形图	170

第四篇 异步电机

第十三章 三相异步电机的结构和基本工作原理	171
§13-1 三相异步电机的基本类型和主要结构部件	171
§13-2 三相异步电机的作用原理和运行状态	174
§13-3 异步电动机的额定值和产品系列	176
第十四章 三相异步电机的运行原理	178
§14-1 三相异步电机的磁场	178
§14-2 转子静止时的三相异步电机	180
§14-3 转子旋转时的三相异步电机	185
§14-4 三相异步电机的转子绕组折算和等效电路	189
§14-5 三相异步电机的参数测定	194
§14-6 笼型转子的相数、极数和参数计算	197
第十五章 三相异步电机的功率、转矩和工作特性	200
§15-1 异步电机的功率和转矩平衡关系	200
§15-2 三相异步电机的电磁转矩	202
§15-3 三相异步电动机的工作特性	208
第十六章 三相异步电动机的起动、调速和制动	210
§16-1 起动过程和基本要求	210
§16-2 三相笼型异步电动机的起动	211
§16-3 绕线型三相异步电动机的起动	213
§16-4 深槽和双笼型异步电动机	214
§16-5 三相异步电动机的调速	216
§16-6 三相异步电动机的制动运行	223

第十七章 单相异步电动机的结构和基本工作原理	225
§17-1 单相异步电动机的特点与分类	225
§17-2 单相异步电动机的绕组	228
§17-3 单相异步电动机的磁势和磁场	233
§17-4 单相异步电动机的分析与计算方法	242
第十八章 正交双绕组单相异步电动机的运行与调速	253
§18-1 单相电阻起动异步电动机	253
§18-2 单相电容起动异步电动机	259
§18-3 单相电容运转异步电动机	262
§18-4 单相异步电动机的调速方法	265
第十九章 非正交绕组单相异步电动机	276
§19-1 罩极式单相异步电动机	276
§19-2 非正交双绕组单相异步电动机	288
§19-3 三绕组电容异步电动机	292
第二十章 单相串励换向器电动机	297
§20-1 单相串励换向器电动机的结构	297
§20-2 单相串励换向器电动机的工作原理与特性	300
§20-3 换向过程和改善换向的方法	303
§20-4 单相串励换向器电动机的噪声和无线电干扰	305

第五篇 同步电机

第二十一章 同步电机的结构与额定值	312
§21-1 同步电机的结构	312
§21-2 同步电机的励磁系统	314
§21-3 同步电机的额定值	316
第二十二章 同步发电机的运行原理	318
§22-1 同步发电机的空载运行	318
§22-2 对称负载时的电枢反应	320
§22-3 隐极同步发电机的电势方程式和同步电抗	323
§22-4 凸极同步发电机的电势方程式和交、直轴同步电抗	325
§22-5 同步发电机的短路特性、零功率因数特性和电抗测定	328
第二十三章 同步发电机的并联运行	332
§23-1 并联运行的条件和方法	332
§23-2 同步发电机的电磁功率和功角特性	335
§23-3 同步发电机的无功功率调节	339
第二十四章 同步电动机	342
§24-1 三相同步电动机	342
§24-2 磁阻式同步电动机	346

§24-3 磁滞式同步电动机	350
§24-4 步进电动机	355

第六篇 单相异步电动机设计

第二十五章 电机主要尺寸的确定和定、转子冲片设计	365
§25-1 概述	365
§25-2 铁芯尺寸和空气隙的确定	367
§25-3 定、转子冲片设计	370
第二十六章 小功率异步电动机定子主绕组和转子笼型绕组的设计	374
§26-1 定子主绕组的初步设计	374
§26-2 转子笼型绕组的初步设计	377
第二十七章 参数计算	380
§27-1 概述	380
§27-2 电抗的一般计算方法与励磁电抗的计算	380
§27-3 定子绕组的漏抗计算	382
§27-4 转子绕组的漏抗计算	389
§27-5 饱和对参数的影响	393
第二十八章 单相异步电动机的磁路计算	396
§28-1 概述	396
§28-2 气隙磁势的计算	397
§28-3 齿、轭磁势的计算	399
§28-4 励磁电流和励磁损耗	401
第二十九章 单相异步电动机的电磁计算程序与计算实例	403
§29-1 电磁计算程序	403
§29-2 单相电容运转异步电动机电磁计算实例	416
第三十章 单相串励换向器电动机的设计	431
§30-1 设计要点	431
§30-2 电磁计算程序	435
§30-3 电磁计算实例	442
习题	452
附录	470
主要参考文献	481

第一篇 直流电机

直流电机是指发出直流电流的发电机，或通以直流电流而转动的电动机。

由于直流电动机具有良好的起动的性能，能在宽广的范围内平滑而经济地调节速度，所以它被广泛地用于电力机车、无轨电车、轧钢机、机床和起重设备中。直流发电机则作为各种直流电源。近来由于可控整流元件组成的直流电源设备迅速发展，直流发电机已被逐步取代。在自动控制系统中，小容量直流电动机的应用也很广泛。

本篇主要研究换向器式电磁直流电机(永磁直流电机仅励磁方式不同)，首先介绍其工作原理和基本结构，并对其磁路系统和电路系统进行分析，然后着重分析直流电动机运行时的电磁过程及工作特性，最后简介换向过程。第六章专门介绍永磁直流电机的有关理论。

第一章 直流电机的工作原理和基本结构

§1-1 直流电机的工作原理

图1-1是一个直流发电机的物理模型，在两个固定的磁铁 北极(N极)和南极(S极)之间，有一个铁制的圆柱体(电枢铁芯)，电枢铁芯与磁极之间的间隙称为空气隙。图中两根导体 ab 和 cd 连接，成为一个线圈并敷设在电枢铁芯表面上，线圈的首、末端分别连接到两片圆弧形的铜片(称为换向片)上。换向片固定在转轴上，换向片之间以及换向片与转轴都互相绝缘，这种由换向片构成的整体称换向器。整个转动部分称为电枢。电刷 A 与 B 使电枢与外电路相接通，电刷在空间固定不动。当电枢转动时，电刷 A 只能与转到上面的一片换向片相接触；电刷 B 则只能与下面的一片换向片相接触。

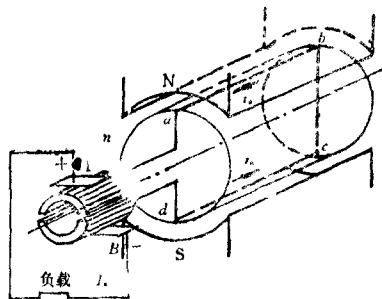


图 1-1 直流发电机原理图

我们令电机模型作为发电机，用原动机拖动电枢以转速 n 逆时针方向旋转，根据法拉第电磁感应定律，每根导体均感应电势，其方向由右手定则决定，设每根导体在磁场中的有效长度为 l ，在图1-1所示位置，导体中感生电势：

$$e = B_x l v \quad (1-1)$$

式中 B_x ——导体所在位置的磁通密度；

l ——导体有效长度，即导体切割磁力线部分的长度；

v ——导体的线速度。

式(1-1)表明,导体感生电势 $e \propto B_x v$ 。当导体 ab 处于N极下时,感生电势由 b 指向 a ,若转过 180° 到S极下,则电势将改变方向,即由 a 指向 b 。同理,导体 cd 在图示位置时,处于S极下,感生电势由 d 指向 c ,转过 180° 后,处在N极下,感生电势则由 c 指向 d 。由上述分析可见,导体在转动过程中将感生交变电势,但处于N极或S极下的导体,感生电势的方向是不变的。

通过电刷 A 、 B 引出的线圈电势为 $2e = 2B_x l v$,由于电刷 A 只与处于N极下的导体相接触,故为“+”极性。电刷 B 只与处于S极下的导体相接触,为“-”极性。从电刷 A 、 B 端引出的电势为单向脉动电势,如图1-2所示,虚线为气隙磁密曲线。

实际的电机,为减小电势的脉动程度,电枢上不只一个线圈,而是按一定规律连接成的电枢绕组,当然,换向器也是由许多换向片构成的。

将电刷 A 、 B 与外电路(负载)相连,线圈中就有电流 i_a ,电流的方向与线圈感应电势的方向一致。载有电流 i_a 的导体在磁场中受力大小由比-萨电磁力定律决定:

$$f = b_x l i_a \quad (1-2)$$

电磁力 f 的方向由左手定则决定,如图1-3。在发电机运行时, f 所形成的电磁转矩与转速 n 的方向相反,是一种制动性的转

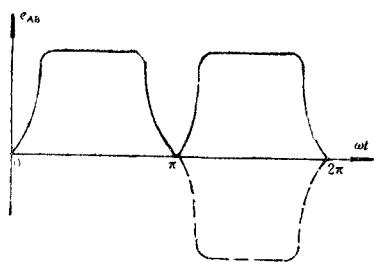


图 1-2 电刷电势波形

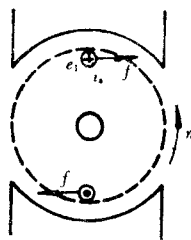


图 1-3 直流发电机电磁力

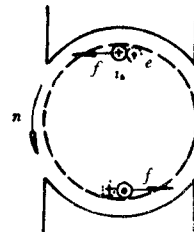


图 1-4 直流电动机电磁力

若欲使上述直流电机模型作电动机运行,则需由外电源向电刷 A 、 B 引入直流电流。设保持电刷 A 、 B 极性不变,由分析可知:电磁力 f 与 n 方向一致,是一种牵引力,而感生电势 e 与电流 i_a 方向相反,是一种反电势,其示意图见图1-4。

综上所述,一台直流电机可以作发电机运用,此时它将机械能转换为电能;也可作电动机运用,这时电机将电能转换为机械能,这就是直流电机的可逆性原理。

§1-2 直流电机的主要结构

为适应生产任务的各种需要,直流电机的种类很多,图1-5为一种常见的小型直流电机结构图,它主要由定子部分和转子部分构成。

一、定子部分

定子部分主要包括机座、主磁极、换向极和电刷装置等。

1. 机座

直流电机的机座有两个作用：一是起导磁作用，它是主磁路的一部分，称定子磁轭，一是起机械支撑作用，主磁极、换向极以及转动部分都直接或间接固定在机座上。

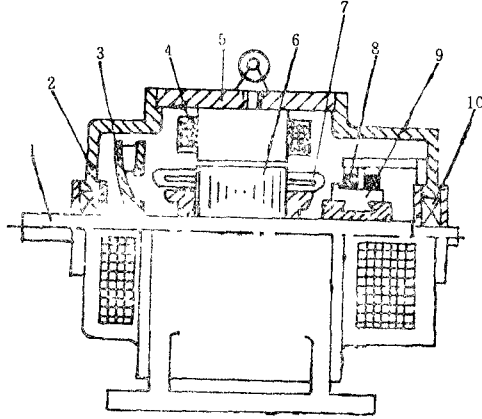


图 1-5 直流电机结构示意图

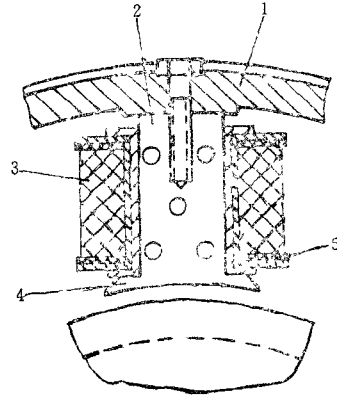


图 1-6 主磁极

1—轴 2—端盖 3—风扇 4—励磁绕组 5—机座 6—电枢 7—电枢绕组 8—电刷 9—换向器 10—轴承
1—机座 2—极身 3—励磁线圈 4—极靴 5—框架

机座材料多用导磁效果较好的铸钢，小型电机也有用厚钢板卷制焊接而成的。

2. 主磁极

主磁极也叫主极，它由主极铁芯和励磁线圈构成。主极的作用是能够在电枢表面外的气隙空间里产生按一定形状分布的气隙磁密。主磁极的装配图如图1-6。

主极铁芯是主磁路的一部分，用1~1.5mm厚的低碳钢冲制叠压而成，外套励磁线圈后，用螺钉固定在机座上。

套在主极铁芯上的励磁线圈由圆截面或矩形截面的绝缘铜线或铝线绕制而成，有并励和串励两种。并励线圈匝数多、导线细；串励线圈匝数少、导线粗。各个主极线圈相连接(串联或并联)时，必须使相邻极的极性为N、S极交替出现。

3. 换向极(或称附加极、间极)

容量大于1kW的直流电机，在相邻两个主极间要加装换向极，其作用是改善换向。

换向极也有铁芯和换向极绕组，小型直流电机的换向极铁芯用整块钢制成。换向极绕组与电枢电路串联，故导线少而粗。

4. 电刷装置

电刷装置是直流电机中的一个重要部件，其作用是将电枢中旋转电路里的交流电流与外部静止电路的直流电流相接通。

电刷装置(见图1-7)包括刷盒、电刷、铜辫和压紧弹簧。电刷放在电刷盒里，上面用压紧弹簧压在换向器上。

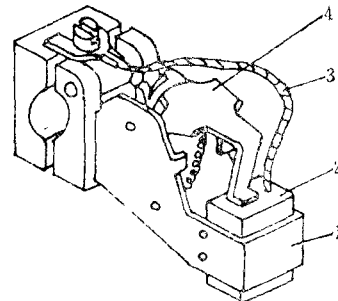


图 1-7 电刷盒装配

1—刷盒 2—电刷 3—铜辫 4—压紧弹簧

电刷装置的数目与磁极数相等，且固定在电机的端盖上。

二、转动部分

直流电机的转动部分包括电枢铁芯、电枢绕组、换向器、风扇、转轴和轴承等。

1. 电枢铁芯

电枢铁芯是直流电机主磁路的一部分。由于电机旋转时，铁芯中磁通方向不断改变，因而引起涡流和磁滞损耗。为减少这种称为铁损耗的部分损耗，通常采用0.5mm厚的低硅硅钢片冲片装叠而成。

电枢铁芯上开槽是为嵌放电枢绕组用的，冲片形状如图1-8。

2. 电枢绕组

电枢绕组用来感应电势和通过电流，使电机能实现机电能量转换，是直流电机电路的主要部分。

电枢绕组用带绝缘的导线绕成线圈（亦称元件），置于电枢铁芯槽内。并按一定的规则连接成绕组。

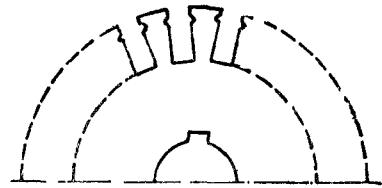


图 1-8 直流电机定子冲片

3. 换向器

换向器由许多彼此绝缘的换向片组装而成，并与绕组元件相联结。小型直流电机采用塑料绝缘的换向器。

§1-3 直流电机的额定值

电机制造厂按照国家标准，根据电机的设计和试验数据而规定的每台电机的正常运行状态和条件，称为电机的额定运行情况。其主要数据标记在电机的铭牌或产品说明书上，称为额定值。计有：

- (1) 额定容量 P_N (W或kW)，直流电机的输出功率；
- (2) 额定电压 U_N (V)；
- (3) 额定电流 I_N (A)；
- (4) 额定转速 n_N (r/min)。

还有一些额定值，如额定效率 η_N ，额定转矩 M_N ，额定温升 T_N 等，不一定标在铭牌上。

各额定值间存在如下几种关系：

对于直流电动机 $P_N = \eta_N U_N I_N$ ；

对于直流发电机 $P_N = U_N I_N$ 。

运行于额定值情况下的电机负载，称为满载；若电机出力超过额定容量，则称超载；若比额定容量小得多，则称轻载。超载会使电机过热，降低电机使用寿命，甚至损坏电机。轻载则浪费容量和降低电机使用效率。故一般要求在额定值附近运行，从而达到较好的经济效果。

第二章 直流电机的磁路、电枢绕组和电枢反应

直流电机依靠气隙磁通作为传递能量的媒介，而气隙磁通由主极磁势和电枢磁势共同产生。本章将研究其产生及分布情况。

§2-1 直流电机的励磁方式

直流电机的励磁方式有他励(永磁电机亦属此类)、并励、串励与复励之分，其原理接线如图2-1所示。

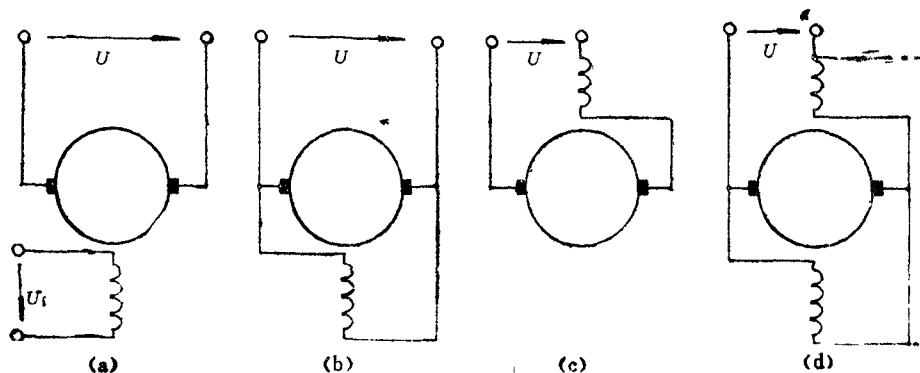


图 2-1 直流电机的励磁方式
(a)他励 (b)并励 (c)串励 (d)复励

他励机〔图2-1(a)〕是指励磁电流由另外的电源提供；并励〔图2-1(b)〕是指由同一电源供电给并联着的电枢和励磁绕组；串励〔图2-1(c)〕电机的电枢绕组与励磁绕组相串联；复励〔图2-1(d)〕电机的主极铁芯上既有并励绕组也有串励绕组，两种绕组磁势可以相加(积复励)，也可以相减(差复励)，连接方法可按图示实线相联(称短复励)，也可按图上虚线相联(称长复励)。

§2-2 直流电机的空载磁路

直流电机负载运行的气隙磁场是由励磁绕组、电枢绕组、换向极绕组与补偿绕组共同产生的，而空载磁场则是只有励磁绕组起作用而产生的磁场。

当励磁绕组有励磁电流 I_f 通过时，每极磁势为 $F_f = W_f I_f$ (W_f ——每极励磁绕组匝数)，将在电机磁路里产生磁通，其磁力线的路线及分布情况如图2-2所示。由图可见，大部分磁通由N极出发，经气隙进入电枢齿部，再经过电枢铁芯的磁轭到另外的电枢齿，又通过气隙进入S极，然后经定子磁轭回到原来的N极。这部分磁路称主磁路，完全通过主磁路的磁通称主磁通。还有一小部分磁力线不穿过气隙进入电枢铁芯，而直接由相

邻的磁极或定子磁轭形成闭合回路，这部分磁通称漏磁通。漏磁通不在电枢绕组感生电势，只会增加主磁极磁路的饱和程度。漏磁通在数量上比主磁通要小，大约是主磁通的20%左右。

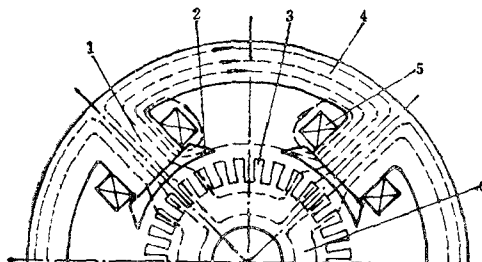


图 2-2 直流电机的磁路

1—极身 2—极靴 3—电枢齿 4—定子磁轭 5—励磁绕组 6—电枢磁轭

由全电流定律(或称安培环路定律)可知，磁场强度沿某闭合回路的线积分，等于该回路所包围的全部电流的代数和，即：

$$\sum I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (2-1)$$

式中 $\sum I$ ——回路所包围的全电流；
 H ——回路上各点磁场强度；
 l ——回路长度。

将式(2-1)用于电机磁路来计算励磁电流与磁通密度分布关系时，可将它改写成

$$WI = \sum_{k=1}^n H_k l_k \quad (2-2)$$

式中 WI ——所循磁回路全部安匝数；
 $H_k l_k$ —— k 段磁路的磁压降。

运用式(2-2)计算电机磁路的步骤如下：

(1) 将磁路按材料性质和截面积分段，图2-2所示电机的闭合磁路由5段构成：气隙两个、电枢齿两个、主极铁芯两个、定子磁轭和电枢磁轭。

(2) 取各段磁路平均长度为计算长度，则各段磁压降为： $2H_\delta \cdot \delta + 2H_z \cdot h_z + 2H_m \cdot h_m + H_j \cdot l_j + H_a l_a$ ，它们分别表示气隙、电枢齿、主磁极、定子磁轭及电枢磁轭的磁压降。各部分的磁场强度：

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \text{——气隙磁场强度}$$

式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，为空气导磁率。

至于铁磁物质，由于其导磁率不是常数，需通过各相应段铁磁材料的 $B-H$ 曲线，根据磁感应强度值查找对应的磁场强度。

(3) 根据全电流定律可写出：

$$2F_f = 2W_f I_f = 2H_\delta \cdot \delta + \sum H_{f_i} \cdot l_{f_i}$$

式中 $\sum H_{f_i} l_{f_i}$ 为由铁磁物质构成的各段磁路的磁压降。

在铁磁材料不饱和时，其导磁率比空气导磁率大得很多(几百至几千倍)，故在分析气隙磁密的分布规律时，可忽略 $\Sigma H_{te} \cdot l_{te}$ 的影响，则每极励磁磁势为：

$$F_t = W_t I_t \approx H_0 \cdot \delta = \frac{B_0}{\mu_0} \cdot \delta$$

则气隙磁通密度为：

$$B_0 = \mu_0 \frac{F_t}{\delta} \quad (\text{W}_b/\text{m}^2) \quad (2-3)$$

式中 F_t ——励磁磁势(安匝/每极)；

δ ——气隙长度(m)。

在一个磁极范围内，励磁磁势 F_t 不变，故气隙磁密 B_x 的大小与气隙长度 δ 成反比。在电机主磁极内表面与电枢铁芯外表面间的气隙是不均匀的。在磁极中心处的气隙小，磁密大；在磁极的两个极尖处气隙大，磁密小；而在两极中间的几何中性线上磁密为零，因此，在一个磁极范围内，磁密 B_x 的分布波形如图2-3所示，其最大磁密为 B_0 ， τ 为每个磁极所跨的电枢表面长度，称为极距。应该指出，适当改变气隙 δ 的大小，就可以改变 B_x 的波形形状。

电枢气隙的每极磁通量 Φ_0 ，可通过 B_x 的波形经计算得到，即：

$$\Phi_0 = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} B_x l_s dx = \alpha_s B_0 l_s \tau \quad (2-4)$$

式中 $\alpha_s = \frac{\text{气隙平均磁密}}{\text{气隙最大磁密}}$ ， $\alpha_s = 0.62 \sim 0.72$

在直流电机中，为了感应电势或产生电磁转矩，气隙需要一定数量的每极磁通 Φ_0 ，这就需要一定数量励磁磁势 F_x 。或者当励磁绕组的匝数一定时，需要加一定的励磁电流 I_t 。我们把空载时气隙每极磁通 Φ_0 ，与空载励磁磁势 F_{t_0} 或空载励磁电流 I_{t_0} 的关系，即 $\Phi_0 = f(F_{t_0})$ 或 $\Phi_0 = f(I_{t_0})$ 称为直流电机的空载磁化曲线。

直流电机的空载磁化特性可以通过磁路计算得到，计算时先假设一个 Φ_0 ，运用安培环路定律可计算出相应的励磁磁势 F_{t_0} ，就得到特性曲线上一个点，再设一个 Φ_0 ，又可得到一个点，将这多个点连接起来即为空载磁化特性。具体计算方法此处不介绍，必要时可查阅有关资料。

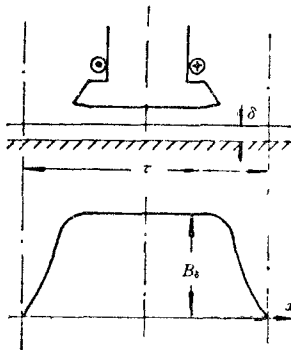


图 2-3 无齿电枢的气隙磁场分布

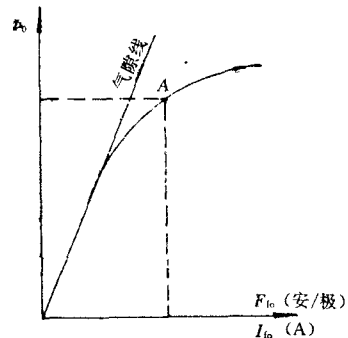


图 2-4 空载磁化特性

空载磁化特性如图2-4所示。这条特性曲线具有饱和的特点，这是因为，当每相磁

通 Φ_0 较小时,气隙磁场强度和铁磁材料的磁场强度都和磁通 Φ_0 成正比变化,这时励磁磁势主要由气隙磁势决定,铁磁材料构成的磁路段则消耗的磁势很小,所以磁化曲线呈线性关系。

当气隙每极磁通增大时,气隙消耗的磁势仍线性增长,而铁磁材料里消耗的磁势随着磁密的增大而迅速增大,使磁通与消耗的磁势间呈非线性关系,所以总励磁磁势迅速增大,磁化曲线偏离直线,如图2-4的样子,图中的斜直线是气隙消耗的磁势,简称气隙线。

为了经济地利用材料,一般直流电机额定运行时,它的额定磁通 Φ_0 工作在图2-4的A点,即磁化特性开始拐弯的地方(亦称膝部)。

§2-3 直流电机的电枢绕组

电枢绕组是直流电机的核心,无论是发电机还是电动机,当电枢在磁场中旋转时,绕组会感生电势;当电枢中有电流时,与气隙磁场相互作用又会产生电磁转矩,从而完成机电能量转换,故电枢绕组是能量转换的枢纽。

本节研究电枢绕组的构成方法,重点研究鼓型单迭绕组和单波绕组。

鼓形电枢绕组由两个元件边组成,每个元件可以是单匝或多匝,元件两端与两个换向片相联结,如图2-5(a)、(b)分别为单迭绕组和单波绕组的元件图形。

鼓型电枢绕组元件在电枢表面槽内分两层放置,某元件一边放在某槽上层(称上层元

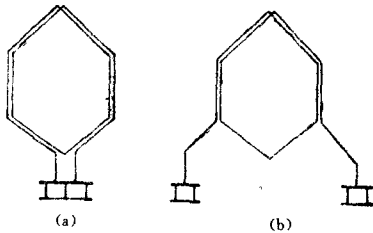


图2-5 直流机电枢绕组元件
(a)单迭绕组 (b)单波绕组

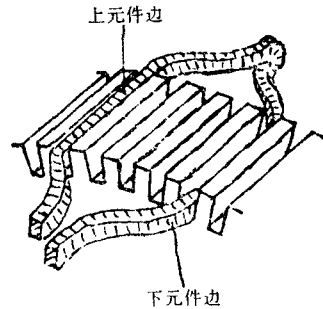


图2-6 电枢绕组元件在槽内的放置

件边),另一边则放在与这个元件上层边相距约一个极距的另外一槽的下层(称下层元件边)。元件边在槽内的安置情况如图2-6。

为改善电机性能,往往希望用较多的元件来组成电枢绕组。由于工艺原因,电枢铁芯不便开太多的槽,故常在每个槽的上、下层多放若干个元件边。设每槽放有 u 个元件边,则看作每个槽包含 u 个“虚槽”。图2-7表示 $u=2$ 和 $u=3$ 的情况。一般情况下,实际的槽数 Z 与虚槽数 Z_1 的关系如下:

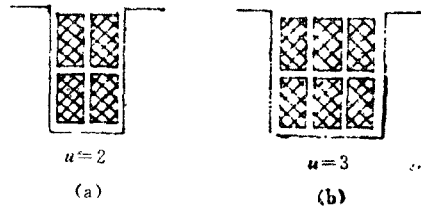


图 2-7 实槽与虚槽