



21世纪高等院校规划教材



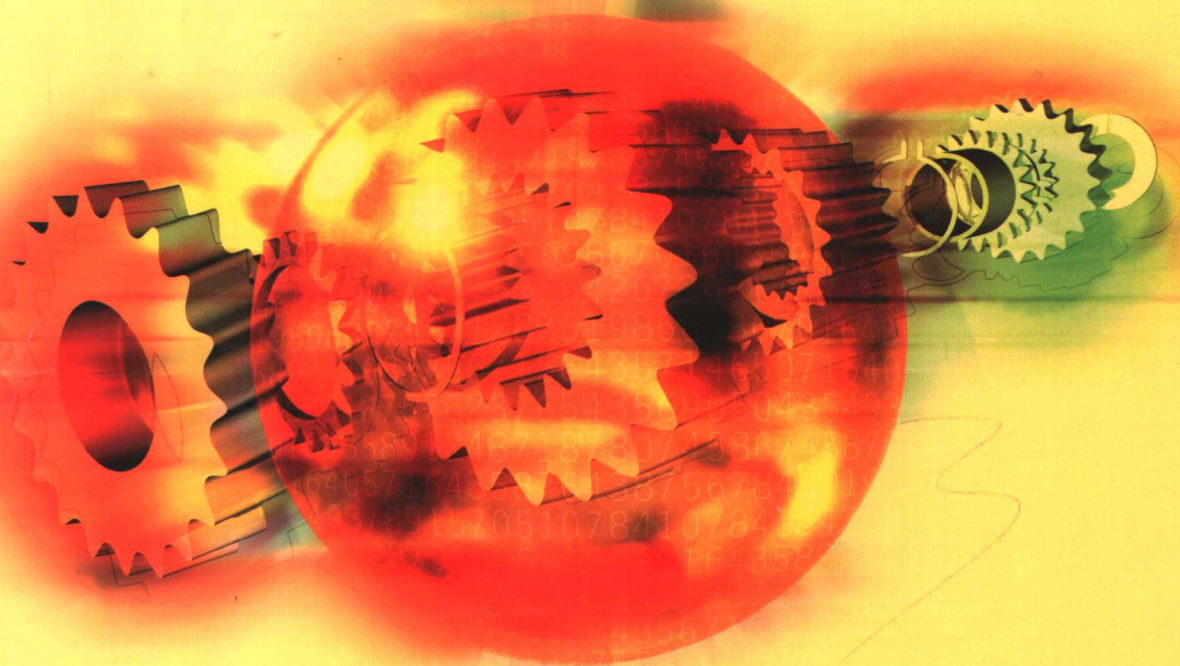
电机与拖动

康晓明 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press



21 世纪高等院校规划教材

电机与拖动

康晓明 主编

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动/康晓明主编. —北京:国防工业出版社,
2005.8

21 世纪高等院校规划教材

ISBN 7-118-04008-8

I. 电... II. 康... III. ①电机 - 高等学校 - 教材
②电力传动 - 高等学校 - 教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 072320 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13¼ 302 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:20.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

内 容 简 介

本书是根据“电机与拖动课程教学基本要求”编写的。主要包括:直流电机、直流电机的电力拖动、变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、控制电机。

本书简明扼要,深入浅出,可作为高等职业院校及成人教育自动化专业、机电一体化专业及其相关专业教材。

本书编委名单

主 编 康晓明

副主编 汤海梅

编 写 李 超 王丽华 丁娜仁花

绘 图 吴金荣

前 言

“电机与拖动”是一门重要的专业课程。我们根据“电机与拖动课程教学的基本要求”,在认真研讨和论证教学体系的基础上,组织长期讲授“电机与拖动”课程的教师,针对当前高等职业院校教育教学的特点,并结合学生的实际情况编写了此书。

本书的内容主要包括:直流电机、直流电机的电力拖动、变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、控制电机。

本书在编写过程中力求简明扼要、深入浅出,注重实效性,着重培养学生分析能力和解决问题的能力。

本书由康晓明副教授担任主编;康巨珍教授、陈益广副教授担任主审;汤海梅编写了第1章、第2章初稿,丁娜仁花编写了第2章第1节初稿,康晓明编写了第3章初稿,李超、康晓明编写了第4章、第5章初稿,王丽华编写了第6章初稿。本书的图由吴金荣绘制。全书由康晓明统稿。

刘锡安教授审阅了初稿并提出许多宝贵意见;许多院校教师对本书的编写也给予了极大支持,在此表示感谢。

本书编写过程中还得到了我的同窗好友薛蔚、刘文良、张晓艳、冯华、轧超的帮助,在此表示真诚谢意。

另外,本书在编写过程中还得到了我校教务处领导的支持以及同专业老师的支持和帮助,在此表示由衷感谢。

最后,特别感谢国防工业出版社刘炯编辑在本书出版过程中给予的大力支持。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请批评指正。

编著者

2005年4月

目 录

绪论	1
第 1 章 直流电机	2
1.1 直流电机的工作原理和结构	2
1.1.1 直流电机的工作原理	2
1.1.2 直流电机的主要结构	4
1.2 直流电机的磁场	11
1.2.1 直流电机的空载磁场	11
1.2.2 直流电机的电枢反应	13
1.3 直流电机的电磁转矩和电枢电动势	13
1.3.1 电磁转矩	13
1.3.2 电枢电动势	14
1.4 直流电机的基本方程和特性	15
1.4.1 直流电动机的基本方程和工作特性	15
1.4.2 直流发电机的基本方程和运行特性	18
1.5 直流电机的换向	22
1.5.1 直流电机的换向问题	22
1.5.2 换向的电磁理论	23
1.5.3 改善换向的方法	25
本章小结	27
习题	27
第 2 章 直流电动机的电力拖动	30
2.1 电力拖动系统的动力学基础	30
2.1.1 电力拖动系统的运动方程式	30
2.1.2 工作机构转矩、飞轮矩的折算	32
2.1.3 负载的转矩特性	37
2.2 他励直流电动机的机械特性	39
2.2.1 机械特性方程	39
2.2.2 固有机械特性和人为机械特性	40
2.2.3 机械特性的计算	41
2.2.4 电动机稳定运行的条件	44

2.3 他励直流电动机的启动	45
2.3.1 启动过程及其要求	45
2.3.2 直流电动机的启动方法	46
2.4 他励直流电动机的制动	47
2.4.1 能耗制动	47
2.4.2 反接制动	48
2.4.3 回馈制动	51
2.5 他励直流电动机的调速	54
2.5.1 调速指标	54
2.5.2 调速方法	55
本章小结	58
习题	59
第3章 变压器	63
3.1 变压器的工作原理及结构	63
3.1.1 变压器的工作原理	63
3.1.2 变压器的结构	64
3.1.3 变压器的额定值	66
3.1.4 变压器的标么值	67
3.2 变压器的空载运行	67
3.2.1 变压器空载运行时的物理情况	67
3.2.2 变压器空载运行时电动势和电压比	69
3.2.3 变压器空载运行时空载电流	70
3.3 变压器的负载运行	70
3.3.1 变压器负载运行时的物理情况	71
3.3.2 变压器负载运行时的基本方程式	71
3.3.3 折算法	72
3.3.4 变压器负载运行时的等值电路及相量图	73
3.4 变压器的参数测定	74
3.4.1 空载试验	74
3.4.2 短路试验	75
3.5 变压器的运行特性	77
3.5.1 变压器的电压调整率	77
3.5.2 变压器的效率	78
3.6 三相变压器	79
3.6.1 三相变压器的磁路	79
3.6.2 三相变压器绕组的连接	80
3.6.3 三相变压器的连接组	80
3.6.4 三相变压器空载电动势的波形	82

3.6.5 三相变压器并联运行·····	83
3.7 特殊变压器·····	85
3.7.1 自耦变压器·····	85
3.7.2 电压互感器和电流互感器·····	86
本章小结·····	88
习题·····	89
第4章 三相异步电动机 ·····	91
4.1 三相异步电动机的基本结构及工作原理·····	91
4.1.1 三相异步电动机的基本结构·····	91
4.1.2 三相异步电动机的工作原理·····	92
4.1.3 三相异步电动机的铭牌和主要系列·····	94
4.2 三相异步电动机的空载运行·····	96
4.2.1 空载运行时的电磁关系·····	96
4.2.2 空载运行时定子电压平衡关系·····	97
4.3 三相异步电动机的负载运行·····	98
4.3.1 负载运行时的电磁关系·····	99
4.3.2 转子绕组各电磁量·····	99
4.3.3 磁通势平衡方程·····	101
4.3.4 电动势平衡方程·····	102
4.4 三相异步电动机的等效电路和相量图·····	103
4.4.1 折算·····	103
4.4.2 等效电路·····	105
4.5 三相异步电动机的功率和电磁转矩·····	107
4.5.1 功率平衡和转矩平衡·····	107
4.5.2 电磁转矩·····	109
4.6 三相异步电动机的参数设定·····	111
4.6.1 空载试验·····	111
4.6.2 短路试验·····	113
本章小结·····	114
习题·····	114
第5章 三相异步电动机的电力拖动 ·····	116
5.1 三相异步电动机的机械特性·····	116
5.1.1 三相异步电动机机械特性的3种表达式·····	116
5.1.2 三相异步电动机的固有机械特性与人为机械特性·····	120
5.2 三相异步电动机的启动·····	122
5.2.1 笼型异步电动机的启动·····	122
5.2.2 绕线转子异步电动机的启动·····	130

5.3 三相异步电动机的制动	135
5.3.1 三相异步电动机的反接制动	135
5.3.2 三相异步电动机的回馈制动	137
5.3.3 三相异步电动机的能耗制动	138
5.3.4 异步电动机的相关计算	140
5.4 三相异步电动机的调速	142
5.4.1 三相异步电动机的变极调速	143
5.4.2 三相异步电动机的变频调速	147
5.4.3 变转差率调速	151
本章小结	154
习题	154
第6章 控制电机	157
6.1 单相异步电动机	157
6.1.1 单相异步电动机的工作原理	157
6.1.2 各种类型的单相异步电动机	160
6.2 伺服电动机	164
6.2.1 直流伺服电动机	165
6.2.2 交流伺服电动机	168
6.3 测速发电机	175
6.3.1 直流测速发电机	176
6.3.2 交流异步测速发电机	178
6.4 步进电动机	183
6.4.1 概述	183
6.4.2 步进电动机的工作原理和基本结构	184
6.4.3 步进电动机的基本特点	187
6.4.4 步进电动机的运行特性	189
6.4.5 步进电动机的驱动电源	196
参考文献	203

绪 论

电机是实现能量转换和信号转换的电磁装置。用做能量转换的电机称为动力电机,用做信号转换的电机称为控制电机。

动力电机中,将机械能转换成电能的装置称为发电机;将电能转换成机械能的装置称为电动机。任何电机,理论上既可作发电机运行,也可作电动机运行,所以电机是一种双向的机电能量变换装置,这一特性称为电机的可逆原理。

按电流种类的不同,动力电机又分为交流电机和直流电机两大类。交流电机按工作原理的不同又分为异步电机(感应电机)和同步电机。每种电机又有单相和三相之分。直流电机按励磁方式的不同有他励电机、并励电机、串励电机和复励电机4种。

控制电机的种类也很多,主要用于信号的变换与传递,在各种自动化控制系统中常用于检测、放大、执行和校正等元件使用,容量和体积一般都比较小。在国防工业、数控机床、计算机外围设备、机器人等领域均大量使用控制电机。

变压器虽然是一种静止的电器,却是一种能量转换的电磁装置,其作用是将一种电压等级的电能转换为另一种电压等级的电能。

用电动机作为原动机来拖动生产机械运行的系统,称为电力拖动系统。

在电力拖动系统中,电动机是其中的机电能量转换装置。本课程从使用电机的观点出发,研究电机的基本结构、工作原理、内部电磁物理过程、功率关系和机械特性等问题,重点放在研究电动机的启动、制动、调速3大问题上,为学生掌握本专业知识和学习后续课程打下必要的理论基础。

本课程既具有很强的理论性,又具有一定的实践性,是自动化专业的一门重要的技术基础课,在该专业学习中占有重要的地位。

第1章 直流电机

1.1 直流电机的工作原理和结构

1.1.1 直流电机的工作原理

1. 直流电动机的工作原理

图1-1是一台直流电动机的工作原理简图。固定的部分称为定子,主要由两个磁极N、S组成(一般是电磁铁,也可以是永久磁铁),由它产生磁场;转动的部分称为转子(又称电枢),在它的上面绕有线圈 $abcd$,线圈的两端分别接到换向器的两个半圆形铜片上,这两个铜片称为换向片。在换向片上分别放上两个固定不动的由石墨制成的电刷A和电刷B。通过电刷A和电刷B把旋转着的电路与外部电路相连接。

如图1-1所示的直流电动机,将电枢绕组通过电刷A、电刷B接到直流电源上,绕组的转轴与机械负载相连,如图1-1(a)所示,线圈的 ab 边在N极下, cd 边在S极下,线圈中的电流沿着 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 的方向流动。电枢电流与磁场相互作用产生电磁力 f 为

$$f = BLI \quad (1-1)$$

式中 B ——导体所在处的气隙磁密(Wb/m^2 , 韦/米²);

L ——导体 AB 或导体 CD 的长度(m, 米);

I ——导体中的电流(A, 安)。

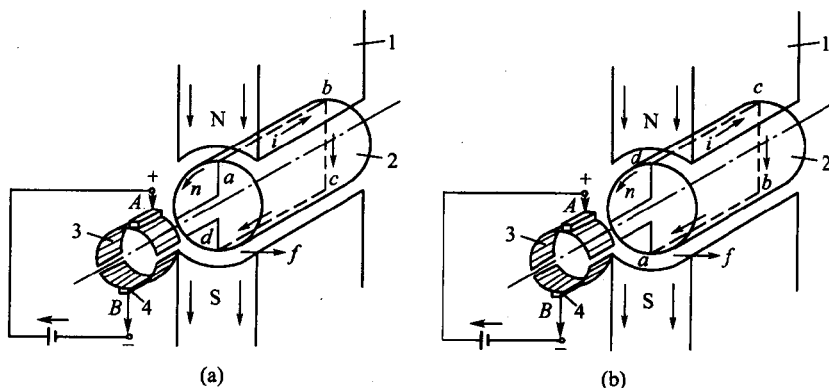


图1-1 直流电动机的原理

(a) ab 边在N极下;(b) ab 边在S极下。

1—磁极;2—电枢;3—换向器;4—电刷。

其方向用左手定则确定。该电磁力与转子半径之积即为电磁转矩,该转矩的方向为逆时针。当电磁转矩大于电枢上的阻转矩(例如,由摩擦引起的阻转矩以及其他负载转

矩),电枢就能按逆时针方向旋转起来。当电枢转了 180° 后,如图 1-1(b) 所示,当 cd 边转到 N 极下, ab 边转到 S 极下时,如果线圈中电流的方向仍然不变,那么作用在这两个线圈边上的电磁力和电磁转矩的方向就会与原来的方向相反,电机便无法旋转。为此,必须改变电枢绕组中电流的方向。这一任务由连接在线圈两端的铜片和电刷来完成。从图 1-1(b) 中可以看到,由于原来与电刷 A 相接触的线圈 a 端的铜片现在已改成与电刷 B 接触,而原来与电刷 B 相接触的线圈 d 端的铜片现在已改成与电刷 A 接触,因而电枢绕组中的电流变成沿 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 的方向流动。利用左手定则判断出:电磁力及电磁转矩的方向仍然使电动机逆时针旋转。由此可见,在直流电动机中,为了产生方向始终如一的电磁转矩,外部电路中的直流电流必须改变成电机内部的交流电流,这一过程称为电流的换向。

2. 直流发电机的工作原理

直流发电机的工作原理就是,把电枢线圈中感应的交变电动势,靠换向器配合电刷的换向作用,使之从电刷端引出时变为直流电动势的原理。

当原动机拖动电枢以恒速 n 逆时针方向转动时,根据电磁感应定律可知,在线圈边(即导体) ab 和 cd 中有感应电动势产生。感应电动势 ϵ 的大小用式(1-2)确定。

$$\epsilon = BLv \quad (1-2)$$

式中 B ——导体所在处的磁密(Wb/m^2 , 韦/米²);

L ——导体 ab 或导体 cd 的长度(m, 米);

v ——导体 ab 或导体 cd 与 B 之间的相对线速度(m/s, 米/秒)。

感应电动势 ϵ 便会在线圈与负载所构成的闭合回路中产生电流,电流的方向和电动势的方向相同,由右手定则确定。如图 1-2(a) 所示,在电机内部,电流沿着 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 的方向流动;在电机外部,电流沿着电刷 $A \rightarrow$ 负载 $\rightarrow$ 电刷 B 的方向流动。当线圈逆时针方向旋转 180° 时,如图 1-2(b) 所示,这时 cd 边位于 N 极下, ab 边位于 S 极下,此时,线圈中感应电动势的方向发生了变化,使得电机内部电流的方向变成了沿 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 的方向流动。由于换向器的作用,电机外部的电流方向并未改变,仍然沿着电刷 $A \rightarrow$ 负载 $\rightarrow$ 电刷 B 的方向流动。这就是直流发电机的工作原理。

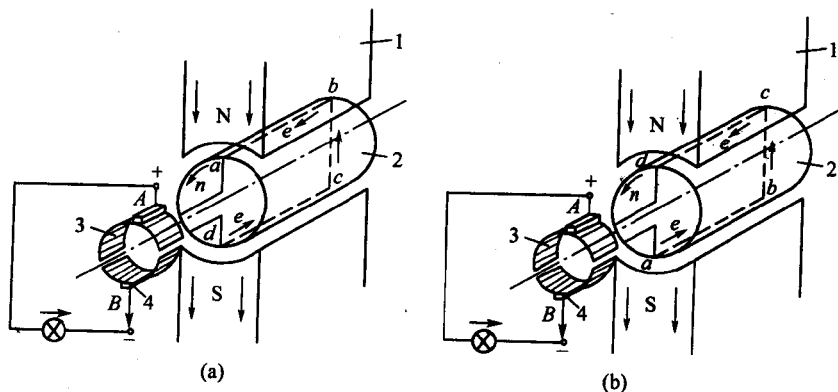


图 1-2 直流发电机的工作原理

(a) ab 边在 N 极下;(b) ab 边在 S 极下。

1—磁极;2—电枢;3—换向器;4—电刷。

从上述基本电磁情况来看,一台直流电机原则上既可以作为发电机运行,也可以作为电动机运行,只是其输入输出的条件不同而已。如用原动机拖动直流电机的电枢,将机械能从电机轴上输入,而电刷上不加直流电压,则从电刷端可以引出直流电动势作为直流电源,可输出电能,电机将机械能转换成电能而成为发电机;如在电刷上加直流电压,将电能输入电枢,则从电机轴上输出机械能,拖动生产机械,将电能转换成机械能而成为电动机。这种同一台电机,既能作发电机又能作电动机运行的原理,在电机学理论中称为电机的可逆原理。

1.1.2 直流电机的主要结构

直流电机是由静止的定子部分和转动的转子部分构成的,定、转子之间有一定大小的间隙(称为气隙)。如图 1-3 所示是一台常用的小型直流电机的结构剖面图。现对各主要结构部件的基本结构及其作用简述如下。

1. 主要部件

1) 定子部分

直流电机定子的作用是产生磁场和作为电机机械的支撑。它主要由主磁极、换向极、机座、端盖和电刷装置等组成。

(1) 主磁极(又称主极) 主磁极的作用是,能够在电枢表面外的气隙空间里产生一定形状分布的气隙磁密。主磁极由铁心和励磁绕组组成。主磁极铁心包括极身和极靴两部分,如图 1-4 所示。主磁极的铁心用 1mm~1.5mm 厚的低碳钢板冲片叠压紧固而成。把事先绕制好的励磁绕组套在主极铁心外面,整个主磁极再用螺钉固定在机座的内表面上。各主磁极上的励磁绕组连接必须使通过励磁电流时,相邻磁极的极性呈 N 极和 S 极交替的排列,为了减小气隙中有效磁通的磁阻,改善气隙磁密的分布,磁极下的极靴比极身宽。这样也可使励磁绕组牢固地套在磁极上。

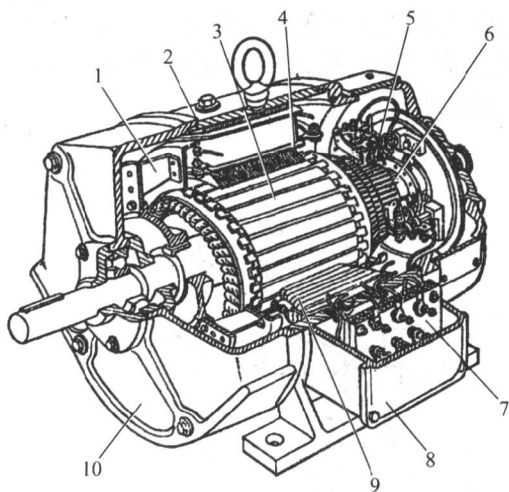


图 1-3 直流电机的结构图

1—风扇;2—机座;3—电枢;4—主磁极;
5—刷架;6—换向器;7—接线板;8—出线盒;
9—换向极;10—端盖。

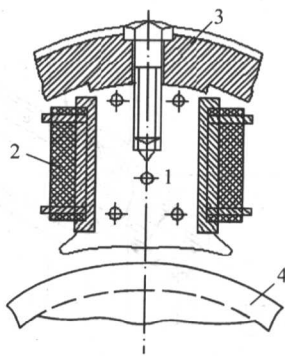


图 1-4 直流电机的主磁极

1—主极铁心;2—励磁绕组;3—机座;4—电枢。

(2) 换向极(又称附加极或间极) 其作用是为了改善直流电机的换向,容量在1kW以上的直流电机均应安装换向极。换向极的形状比主磁极简单,也是由铁心和绕组构成,如图1-5所示。铁心一般用整块钢或钢板加工而成。换向极安装在相邻两主磁极之间的几何中性线上,换向极绕组与电枢绕组串联。

(3) 机座 直流电机有两种机座:一种是整体机座,一种是叠片机座。整体机座一般多用导磁效果较好的铸钢制成,机座同时起导磁和机械支撑的作用,由于机座要起导磁的作用,所以它是主磁路的一部分,叫定子磁轭。主磁极、换向极和端盖都固定在机座上,机座又起了机械支撑的作用。一般直流电机都用整体机座。叠片机座是用薄钢板两面涂上漆叠压成定子磁轭,专起导磁作用,然后把整个定子磁轭装在一个专起机械支撑作用的机座里。这样定子磁轭和机座是分开的,机座只起支撑作用,可用普通钢板制成。叠片机座主要用于主磁通变化快、调速范围较高的场合。

(4) 电刷装置 电刷装置是把直流电压、直流电流引入或引出的装置,如图1-6所示。电刷放在电刷盒里,用弹簧压紧在换向器上,电刷上有个铜丝辫,可以引出、引入电流。直流电机里,常常把若干个电刷盒装在同一个绝缘的刷杆上,在电路连接上,把同一个绝缘刷杆上的电刷盒并联起来,使之成为一组电刷。一般直流电机中,电刷组的数目可以用电刷杆数表示,电刷杆数与电机的主磁极数相等。各电刷杆在换向器外表面上沿圆周方向均匀分布。正常运行时,电刷杆相对于换向器表面有一个正确的位置,如果电刷杆的位置放得不合理,将直接影响电机的性能。电刷杆装在端盖或轴承内盖上,调整位置后,将它固定。

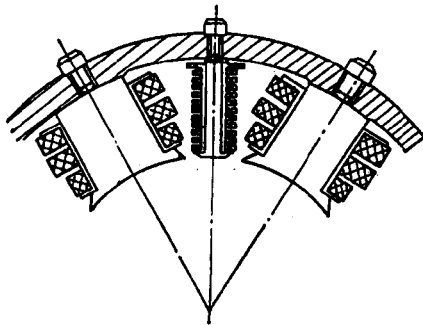


图 1-5 中型电机的主磁极和换向极

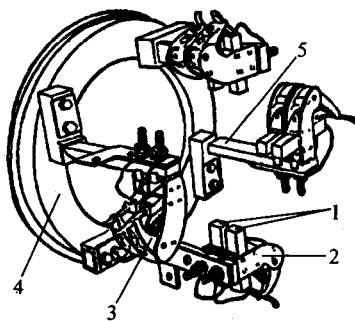


图 1-6 电刷装置

1—电刷;2—刷握;3—弹簧压板;
4—座圈;5—刷杆。

(5) 端盖 机座的两边各有一个端盖。端盖的中心处装有轴承,用来支撑转子的转轴。

2) 转子部分

直流电机转子部分主要由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。图1-7为直流电机电枢装配示意图。

(1) 电枢铁心 电枢铁心用做电机磁路和嵌放电枢绕组。由于电枢铁心和主磁场之间的相对运动,会在铁心中引起涡流损耗和磁滞损耗(这两部分损耗合在一起称为铁心损耗,简称铁耗)。为了减少铁耗,通常用0.5mm厚的涂有绝缘漆的硅钢片的冲片叠压而

成,固定在转轴上。电枢铁心沿圆周上有均匀分布的槽,里面可嵌入电枢绕组,如图 1-8 所示。

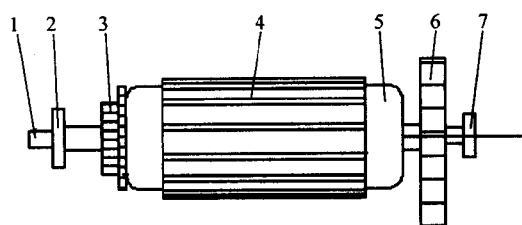


图 1-7 直流电机的电枢

1—转轴;2—轴承;3—换向器;4—电枢铁心;
5—电枢绕组;6—风扇;7—轴承。

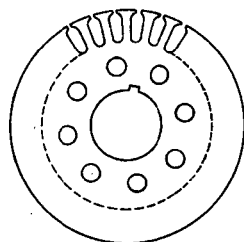


图 1-8 电枢铁心冲片

(2) 电枢绕组 电枢绕组的作用是通过电流和感应产生电动势,以实现机电能量的转换。绕组由带绝缘的导体绕制而成,对于小型电机常采用铜导线绕制,对于大型电机常采用成型线圈绕制。在电机中每一个线圈称为一个元件,多个元件有规律地连接起来形成电枢绕组。绕制好的绕组或成型绕组放置在电枢铁心上的槽内,放在槽内的直线部分能切割磁通,产生感应电动势,称为元件的有效部分;而在槽外的部分不切割磁通,不会产生感应电动势,仅起连接作用,称为端接部分。电枢绕组分上、下两层放在槽中,上、下层之间以及线圈与铁心之间都要妥善地绝缘。然后用槽楔压紧,再用钢丝或玻璃丝带扎紧,以防止离心力将绕组甩出槽外,如图 1-9 所示,线圈的端部接到换向片上。

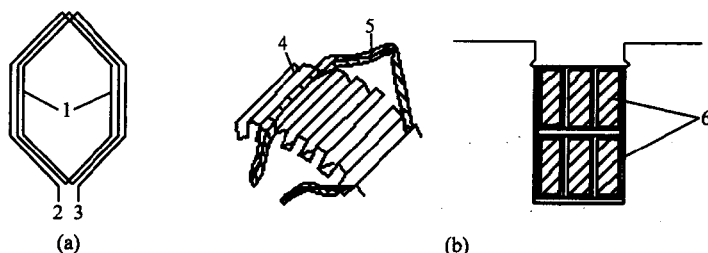


图 1-9 电枢绕组的元件及在槽内的放置情况

(a) 元件;(b) 元件在槽内的放置。

1—元件边;2—首端;3—末端;4—有效部分;5—端接部分;6—元件边。

图 1-10 是线圈与换向片连接的示意图。图中只画了 8 个线圈,每相邻两线圈的端部接到同一个换向片上,8 个线圈共需 8 个换向片,彼此绝缘的 8 个换向片组成一个换向器。当电枢转到图 1-10(a)所示的位置时,从两个固定的电刷 A 和 B 看进去,构成了如图 1-10(b)所示的两条并联支路。一条支路由线圈 1、2、3、4 串联,另一条支路由线圈 5、6、7、8 串联。不管电枢转到哪个位置,并联支路数目不变,而每条支路中串联的线圈号码却在变化。图中,通过每个线圈的电流即每条支路中的电流用 I 表示,电枢绕组的电流即并联支路的总电流用 I_a 表示;导体的电动势用 ϵ 表示,电枢绕组的电动势用 ϵ 表示。

图 1-11(a)是电枢绕组的展开图。该绕组共有 16 个槽,4 个磁极。采用双层全距绕

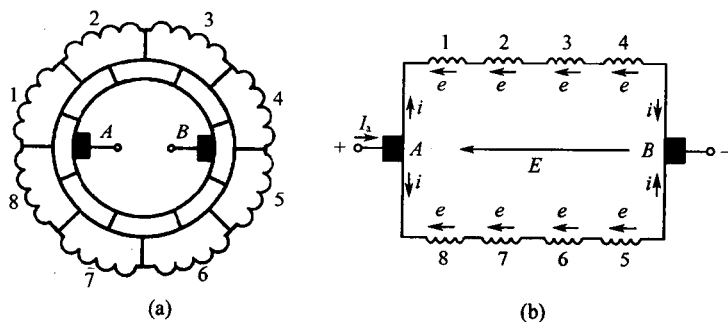


图 1-10 线圈与换向片的连接图
(a) 线圈与换向片的连接图; (b) 电枢绕组电路图。

组。绕组的节距为

$$y = \frac{z}{2p} = \frac{12}{2 \times 2} = 3$$

因而 1~4' 是一个线圈, 圈边 1 放在槽 1 的外层, 圈边 4' 放在槽 4 的内层; 2~5' 是一个线圈, 圈边 2 放在槽 2 的外层, 圈边 5' 放在槽 5 的内层, 依次类推。这样将所有的线圈串联起来形成一个闭合的回路, 而且相邻两线圈都连接到同一个换向片上, 12 个线圈有 12 个换向片。每对磁极之间放有一组固定的电刷。相同磁极下的电刷并联, 然后引出两个电枢绕组的接线端, 从而形成了如图 1-11(b) 所示的电枢绕组电路图。该电路共有 4 条并联支路, 若用 a 表示并联支路对数, 则 $a = 2$ 。除这种连接顺序外, 还可采用其他连接方式, 这里就不介绍了。

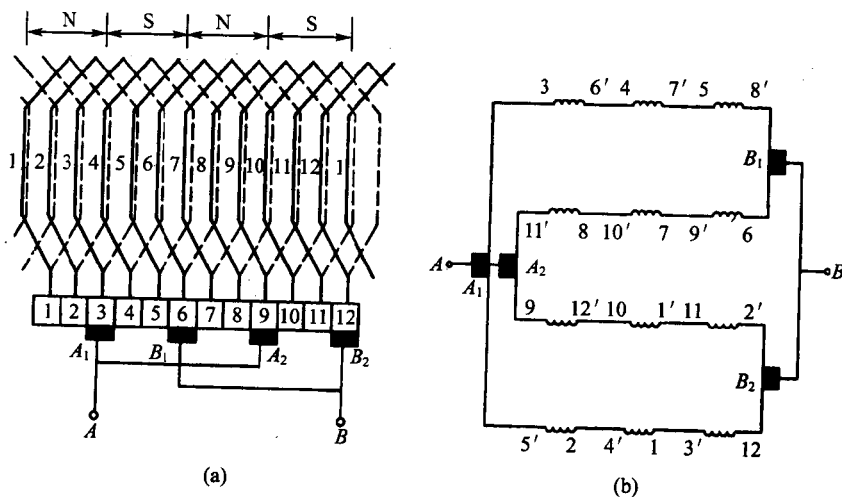


图 1-11 直流电机的电枢绕组
(a) 电枢绕组展开图; (b) 电枢绕组电路图。

(3) 换向器(又称整流子) 在直流发电机中, 它的作用是将绕组内的交变电动势转换为电刷端上的直流电动势; 在直流电动机中, 它将电刷上所通过的直流电流转换为绕组