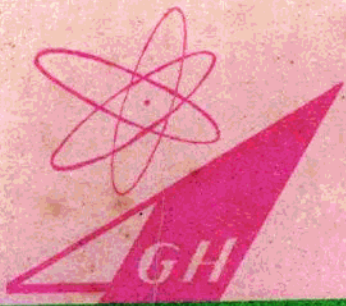




中等专业学校 规划教材
工科·电子类

电机与控制

朱承庆 朱中林 张 平



东南大学出版社

中等专业学校教材

电机与控制

朱承庆 朱中林 张平

东南大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍生产机械电力拖动与自动控制领域的基本知识,全书共分9章:1. 直流电动机及拖动;2. 变压器;3. 交流电机及拖动;4. 控制电机;5. 电动机的选择;6. 电气控制线路;7. 顺序控制;8. 交磁放大机调速系统;9. 晶闸管自动调整系统。本书取材广泛,通俗易懂,理论联系实际。通过学习使学生能了解常用电机与控制电器在电力拖动与自动控制领域中的应用;具有阅读、分析电力拖动自动控制线路的初步能力;为从事自动化设备和生产线的生产、运行、维护、安装调试工作奠定基础。

本书是电子工业部组织的电子类专业教材,主要供中等专业学校电子机械类专业电气技术人员极好的自学用书。用,也是厂矿企业

责任编辑:陈天授

责任校对:刘娟娟

电 机 与 控 制

朱承庆等

*

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼2号 邮编 210018)

江苏省新华书店经销 扬中县印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 18.25 字数 433 千

1995 年 10 月第 1 版 1995 年 12 月第 1 次印刷

印数:1—3000 册

ISBN 7—81050—066—X/TP·9

定价:23.80 元

(凡因印装质量问题,可直接向承印厂调换)

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部电子类专业教材办公室

前 言

本教材系电子工业部的工科电子类专业教材,根据 1991~1995 年编审出版规划,由电子机械专业教材编审委员会征稿并推荐出版。责任编委于德友。

本教材由北京无线电工业学校朱承庆担任主编,天津无线电机学校曲学礼担任主审。

本课程的参考学时数为 130。其主要内容为直流电机及拖动、变压器、交流电动机及拖动、控制电机、电动机容量的选择,以及电气控制线路、顺序控制、交磁放大机调速系统、晶闸管调速系统等自动控制内容。

本教材由朱中林编写第 1、3、4 章;张平编写第 2、5、6、7 章;朱承庆编写第 8、9 章,并统编全稿。在编写过程中,我们得到许多同志的大力支持和帮助,特别是在出版前,东南大学赵家璧教授仔细审读了全部书稿,提出了不少宝贵的意见,编者在此表示诚挚的感谢。由于我们水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

1995 年 1 月

目 录

1 直流电机及拖动

1.1 直流电机的结构与工作原理	(2)
1.2 直流电机的运行特性	(24)
1.3 直流电动机的机械特性	(38)
1.4 他励直流电动机的起动和制动	(46)
1.5 他励电动机的调速	(52)
习题与思考题	(58)

2 变压器

2.1 变压器的基本结构及类型	(59)
2.2 变压器空载运行	(62)
2.3 变压器有载运行	(65)
2.4 变压器的运行特性	(68)
2.5 三相变压器	(69)
2.6 特殊变压器	(73)
习题与思考题	(77)

3 交流电动机及拖动

3.1 三相异步电动机旋转原理及结构	(79)
3.2 三相异步电动机的定子电路与转子电路	(86)
3.3 异步电动机的功率和转矩	(89)
3.4 三相异步电动机的机械特性	(90)
3.5 三相异步电动机的起动	(93)
3.6 三相异步电动机的制动	(99)
3.7 三相异步电动机的调速	(102)
3.8 单相异步电动机	(109)
3.9 同步电动机	(114)
习题与思考题	(117)

4 控制电机

4.1 伺服电动机	(118)
4.2 测速发电机	(124)
4.3 自整角机	(126)
4.4 步进电动机	(130)
习题与思考题	(134)

5	电动机的选择	
5.1	电动机容量的选择	(135)
5.2	电动机电流种类、型式、额定电压及额定转速的选择	(139)
	习题与思考题	(140)
6	电气控制线路	
6.1	常用低压电器	(141)
6.2	电气控制系统中元件的符号和线路图	(150)
6.3	电动机的基本控制环节	(152)
6.4	基本控制方法	(171)
6.5	基本保护环节	(174)
	习题与思考题	(176)
7	顺序控制器	
7.1	基本概念	(177)
7.2	逻辑组合型顺序控制器	(183)
7.3	步进型顺序控制器	(187)
	习题与思考题	(194)
8	交磁放大机调速系统	
8.1	开环与闭环调速系统	(195)
8.2	交磁放大机	(200)
8.3	具有转速负反馈的自动调速系统	(202)
8.4	自动调速系统静态结构图	(207)
8.5	电压负反馈和电流正反馈自动调速系统	(211)
8.6	具有电流截止负反馈的自动调速系统	(216)
8.7	稳定环节	(220)
8.8	应用举例	(223)
	习题与思考题	(226)
9	晶闸管自动调速系统	
9.1	晶闸管	(227)
9.2	单相可控整流电路	(230)
9.3	三相半波可控整流电路	(247)
9.4	三相全控桥式整流电路	(253)
9.5	晶闸管可控整流供电的直流电动机机械特性	(260)
9.6	晶闸管电路的保护	(264)
9.7	晶闸管自动调速系统	(269)
	习题与思考题	(285)
	参考文献	(286)

1

直流电机及拖动

直流电机是将直流电能与机械能相互转换的旋转电机。直流电机可以作为发电机运行，也可以作为电动机运行。作为发电机必须由原动机拖动向负载输出直流电能；而作为电动机它本身就是原动机去拖动各种生产机械，向负载输出机械能。

直流电动机具有良好的起动性能和调速性能，因而被广泛应用于电力牵引、轧钢机、起重设备以及要求调速范围较广的切削机床中。在自动控制中，小容量直流电动机的应用也很广泛。

与交流电机相比，直流电机的结构复杂，造价较高，维护困难，目前由晶闸管整流元件组成的直流电源设备正逐步取代直流发电机。

尽管如此，目前低压、大电流直流电源，仍采用直流发电机。在电力拖动系统中，由于直流电动机性能优越，因而仍占据很重要的地位。

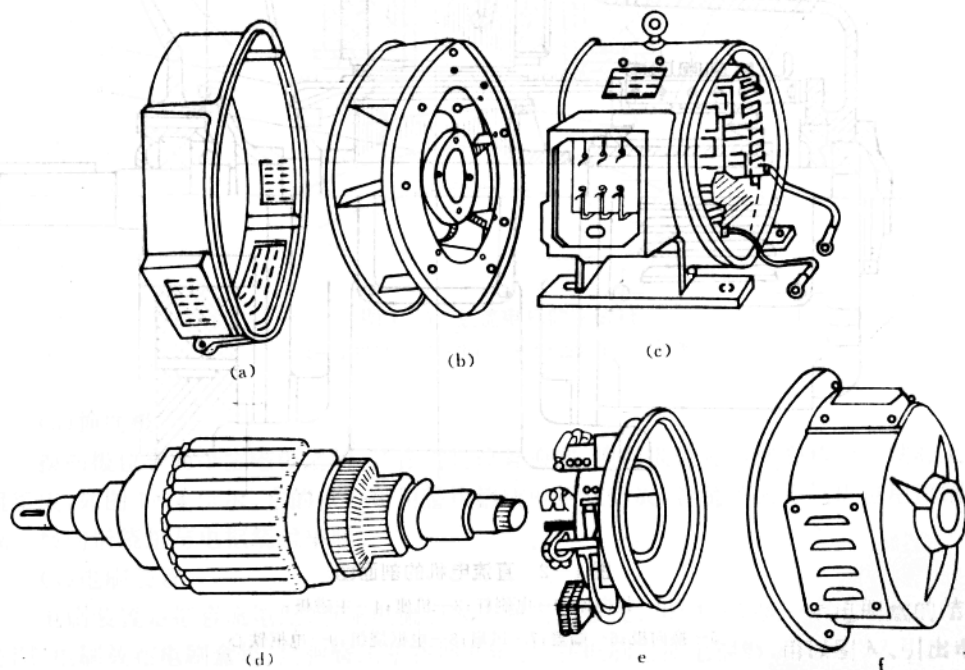


图 1—1 直流电机主要部件图

(a)前端盖；(b)风扇；(c)定子；(d)转子；(e)电刷装置；(f)后端盖

1.1 直流电机的结构与工作原理

1.1.1 直流电机的结构

直流电机主要由两大部分组成：一是静止部分（称为定子）；二是转动部分（称为转子或电枢）。静止部分主要由主磁极、换向磁极、机座和电刷装置等组成；转动部分主要由电枢铁心、电枢绕组、换向器和转轴等组成。定、转子之间因有相对运动，故留有一定的空气隙，一般中小型电机的空气隙为0.7~5毫米，大型电机为5~10毫米左右。图1-1是直流电机的主要部件图，图1-2是直流电机的剖面图。

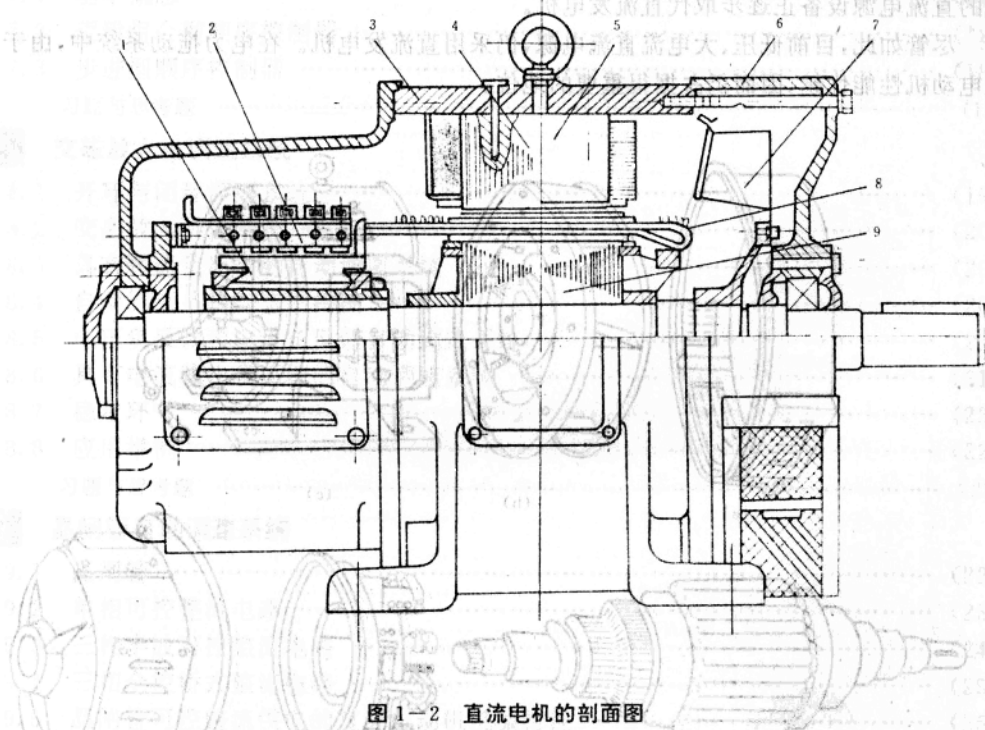


图1-2 直流电机的剖面图

1—换向器；2—电刷杆；3—机座；4—主磁极；
5—换向极；6—端盖；7—风扇；8—电枢绕组；9—电枢铁心

下面介绍定、转子中各主要部件的基本结构及其作用。

1) 定子部分

(1) 机座

直流电机的机座通常由铸钢或厚钢板焊接制成，见图1-1(c)。它有两个用途：一是用

来固定主磁极、换向极和端盖；二是组成磁路的一部分，称该部分为磁轭。

(2) 主磁极

主磁极的作用是产生主磁场。它由主极铁心和励磁绕组两部分组成。图 1-3 中，1 是主磁极铁心的形状，它是由薄钢片叠成的。铁心的下部做成弧形，称为极掌，极掌的形状得使磁极下面的磁通分布较为均匀。而励磁绕组则被牢固地固定在铁心上。励磁绕组是用铜线或铝线绕制的。整个主磁极用螺钉固定在机座上。在直流电机中，主磁极可以有一对、两对或者更多。

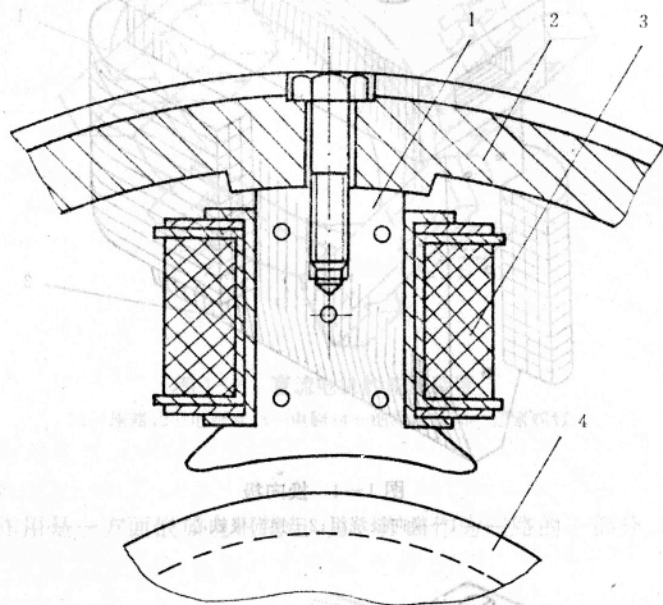


图 1-3 直流电机的主磁极

1—主极铁心；2—机座；3—励磁绕组；4—电枢

(3) 换向极

换向极位于两个主磁极之间，其作用是改善换向。换向极也是由铁心和套在铁心上的绕组组成，如图 1-4 所示。它的铁心可用整块钢或厚钢板制成，容量较大的电机也用薄钢片叠成。换向极绕组与电枢绕组串联。

(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。图 1-5 是一个电刷盒的结构示意图。电刷放在电刷盒里，用弹簧压紧在换向器上。在电刷上嵌上铜辫，用以引入、引出电流。电刷盒固定在刷杆上，刷杆装在刷杆座上，彼此之间都绝缘。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，如图 1-6 所示。在电路的连接上，把同一个绝缘刷杆上的电刷盒并联起来，成为一组电刷。可见电刷组的数目可以用电刷杆数表示，刷杆的数目与电机的主磁极数目一样多。刷杆在换向器外表面上沿圆周方向均匀分布。如果电刷杆的位置放得不合理，将直接影响电机的性能。为此，在小型直流电机里，把所有刷杆都装在一个可以转动

的座圈上,见图 1-6。当转动这个座圈时,就可以调整电刷在换向器外表面上的相对位置。当把位置调整好后,将座圈固定在端盖上。

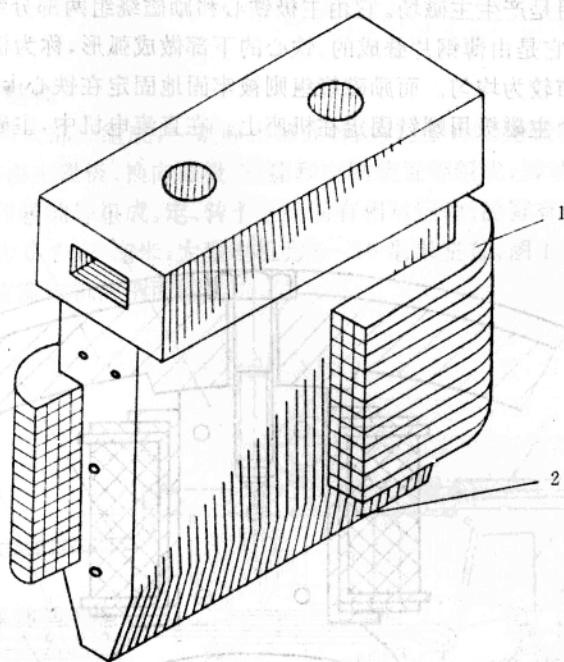


图 1-4 换向极

1—换向极绕组;2—换向极铁心

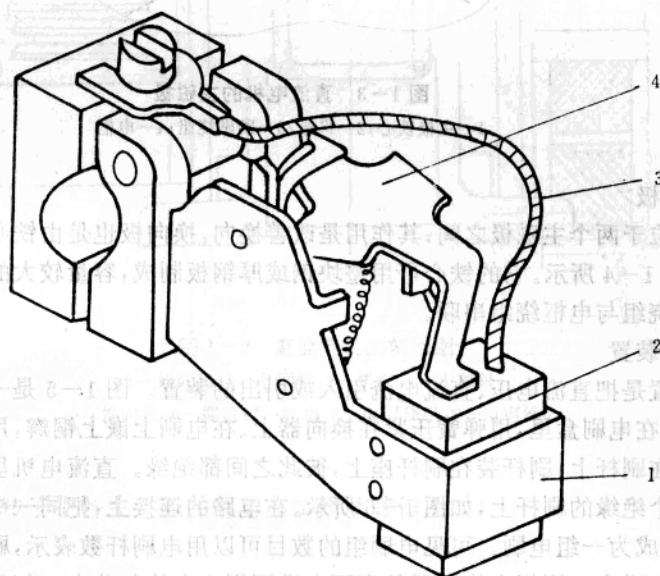


图 1-5 电刷盒装配

1—刷盒;2—电刷;3—铜辫;4—压紧弹簧

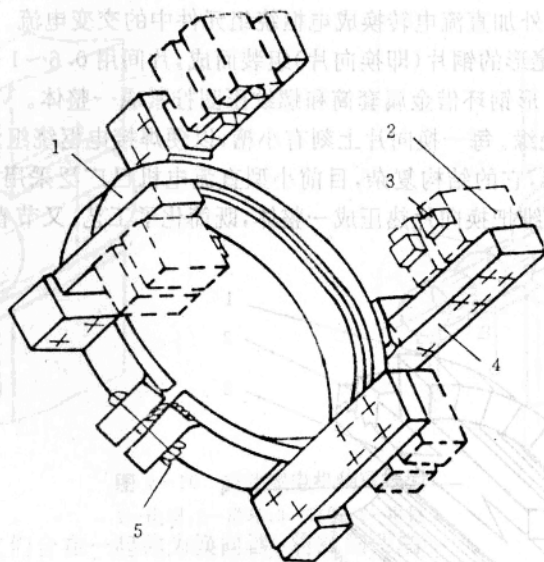


图 1-6 直流电机的座圈装置

1—座圈；2—电刷盒；3—电刷；4—绝缘刷杆；5—把紧螺钉

2) 转子部分

(1) 电枢铁心

电枢铁心的作用是一方面嵌放电枢绕组，另一方面作为磁路的一部分。它由 0.5 毫米厚

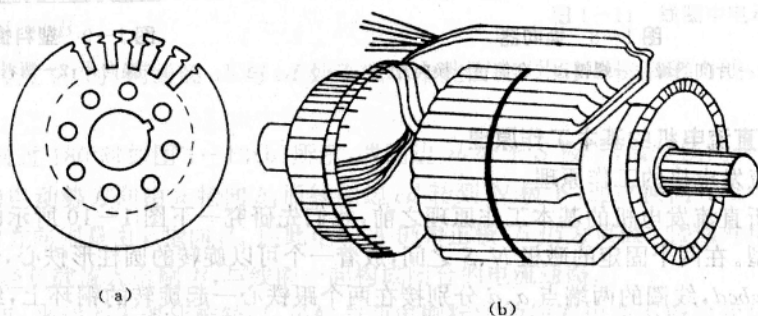


图 1-7 电枢铁心冲片和铁心

(a) 电枢铁心冲片；(b) 电枢铁心

的硅钢片叠压而成。(见图 1-7) 钢片沿轴向叠装，以减少磁滞和涡流损耗，提高电机效率。

(2) 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电势和电磁转矩，从而实现机电能量的转换。因此，它是电机的重要部件。电枢绕组是由许多完全相同的线圈按照一定的规律连接起来的。线圈用带绝缘的铜线绕成，嵌放在电枢槽内，槽中线圈层与层之间、绕组相互之间、绕组与铁心之间，都要妥善绝缘，然后用槽楔压紧，再用钢丝或玻璃丝带扎紧，以防离心力将绕组甩出槽外。

(3) 换向器

在发电机中换向器的作用是,将电枢绕组元件中的交变电势转换为电刷间的直流电势;在电动机中换向器将外加直流电转换成电枢绕组元件中的交变电流。图 1-8 为换向器的结构图。它是由许多燕尾形的铜片(即换向片)组装而成,片间用 0.6~1 毫米厚的云母片绝缘,形如圆筒。两端用 V 形钢环借金属套筒和螺纹压圈拧紧成一体。V 形钢环与换向片之间用 V 形云母片进行绝缘。每一换向片上刻有小槽,以便焊接电枢绕组元件的引出线。这种换向器称为拱形换向器,它的结构复杂,目前小型直流电机已广泛采用塑料换向器,见图 1-9,它是用酚醛玻璃纤维把换向片热压成一整体,既简化了工艺,又节省了材料。

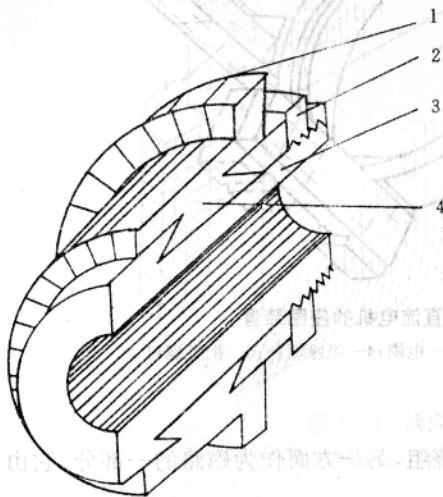


图 1-8 换向器

1—片间绝缘;2—螺帽;3—套筒;4—换向片

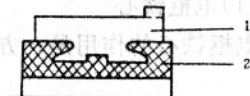


图 1-9 塑料换向器

1—换向片;2—塑料套筒

1.1.2 直流电机的工作原理

1) 直流发电机的工作原理

在分析直流发电机的基本工作原理之前,我们先研究一下图 1-10 所示的交流发电机的物理模型。在两个固定的磁极 N 、 S 之间,放着一个可以旋转的圆柱形铁心,铁心上固定着单匝线圈 $abcd$,线圈的两端点 a 、 d 分别接在两个跟铁心一起旋转的铜环上,经过两个固定不动的电刷 A 、 B 与外电路相联。当原动机拖动圆柱形铁心及固定在其上的线圈在磁场中旋转时,根据电磁感应定律,线圈的两条有效边 ab 和 cd 切割磁力线就会产生感应电动势,如导体 ab 旋绕 N 、 S 极一周,将感生交变的电动势。在这种情况下,经电刷输出给负载的是交流电,这种发出交流电的发电机叫做交流发电机。若沿电枢周围磁感应强度是按正弦规律分布的,则电枢旋转一周时,导体上的感应电动势在时间上也按正弦规律变化,如图 1-11 所示。

如果把交流发电机模型上的两个铜环换成图 1-12 所示的相互绝缘的半圆形铜片,这

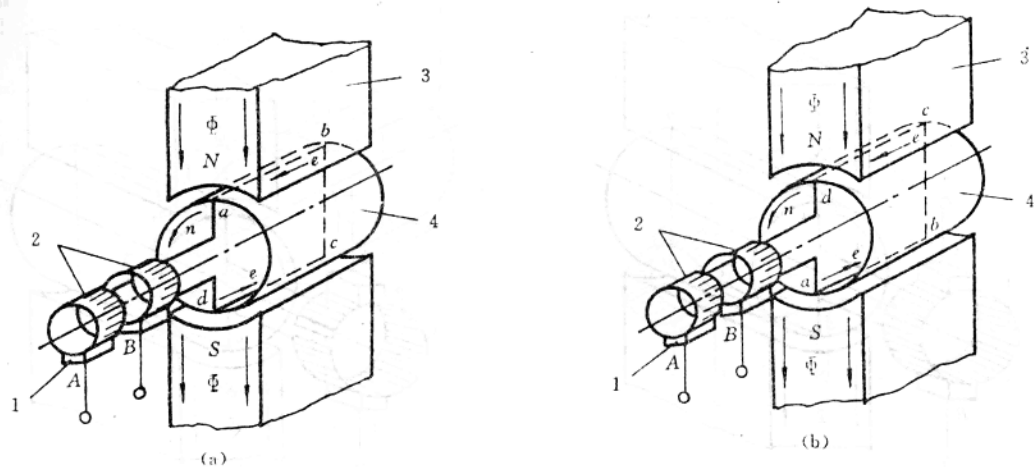


图 1-10 交流发电机物理模型

1—电刷；2—滑环；3—磁极；4—电枢

两个铜片叫换向片，它们合在一起称为换向器。将线圈两端 a 、 d 分别与换向片 1、2 连接，通过电刷 A 、 B 与外电路连接。

当线圈随电枢逆时针旋转时，两线圈边 ab 与 cd 切割磁力线产生电动势的方向如图 1-12(a) 所示，线圈边 ab 产生的电动势是从 b 指向 a ，而线圈边 cd 感应电动势方向是从 d 指向 c 。因此，电刷 A 为正极，电刷 B 为负极。负载上的电流方向由 A 到 B 。

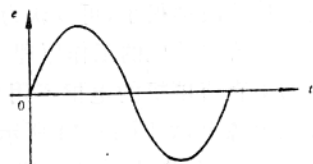


图 1-11 线圈中电动势的波形

当线圈转过 90° 时，两线圈 ab 与 cd 处于磁场中性面上，此时不切割磁力线，感应电动势为零。

当线圈转过 180° 时如图 1-12(b) 所示，线圈边 ab 处于 S 极下，通过换向片 1 与电刷 B 接触，产生的电动势方向由 a 指向 b ，而线圈边 cd 转到 N 极下，通过换向片 2 与电刷 A 接触，电动势的方向则是由 c 指向 d 。因此电刷 A 仍为正极， B 仍为负极。接通外电路时，电流仍从电刷 A 经负载流入电刷 B ，与线圈一起构成闭合的电流通路。

由此可见，当线圈不停地旋转时，虽然与两电刷接触的线圈边在不停地变化，但是和电刷 A 接触的导体永远处于 N 极下，和电刷 B 接触的导体永远处于 S 极下。可见电刷 A 总是正极性，电刷 B 总是负极性。因此由两电刷引出的是具有恒定方向的电动势，只是大小在零与最大值之间变化，如图 1-13 所示。

显然，这种方向虽然不变，但大小波动很大的电动势是不符合实际要求的。

如果在电枢上绕以两个线圈，即每隔 90° 有一个线圈边，这些线圈的出线端接到四个换向片上，则电动势的脉动程度减半。所以要减小电动势的波动程度，可以在电枢上适当增加线圈数和换向片数，如若电机每磁极下的导体数大于 8 时，电动势的脉动幅度将小于 1%。

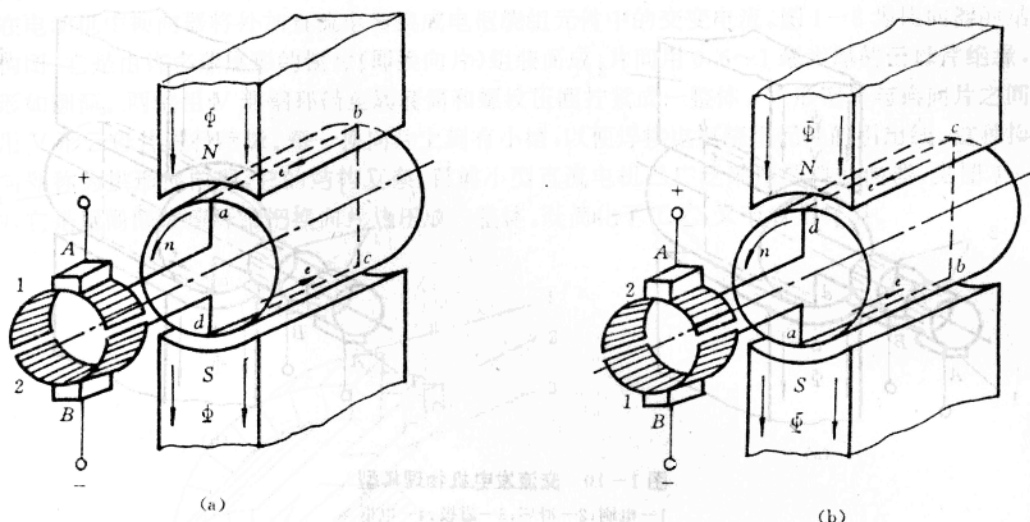


图 1-12 直流发电机工作原理

实际应用的直流电机中,线圈数与换向片数总是较多的,所以电动势的波动很小,可以认为是恒定不变的直流动势。

2) 直流电动机的工作原理

如果直流电机的电枢不用外力拖动,而把电刷 A、B 接到直流电源上,如图 1-14 所示。电刷 A 接到电源正极,电刷 B 接到负极,电流从 A 刷流入线圈,沿 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 方向,从电刷 B 流出。根据电磁力定律,载导体在磁场中要受到电磁力的作用,其方向可用左手定则确定。因此线圈边 ab 受力的方向向左,线圈边 cd 受力的方向向右。这两个电磁力形成的电磁转矩,使电枢逆时针方向旋转。

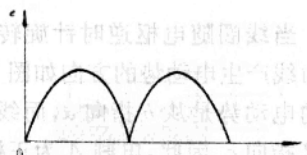


图 1-13 换向后一匝线圈电刷两端电动势波形

当转过 90° 时(线圈转到磁极的中性面上时),电刷不与换向片接触,而与换向片间的绝缘部分接触,此时线圈无电流,转矩为零,但由于惯性作用,电枢会继续旋转。

当线圈转过 180° 时,线圈边 ab 与 cd 对换位置即 ab 边处于 S 极下,与 B 刷接触见图 1-14(b),电流从 b 流向 a ,所受电磁力方向向右, cd 边处于 N 极下,与 A 刷接触,电流从 d 流向 c ,所受电磁力方向向左,电枢仍受力按逆时针方向旋转,保持原来转动方向不变。从而使电枢沿着固定的方向不停地旋转下去。

由此可见,要使线圈按照一定的方向旋转,关键问题是当导体从一个磁极范围内转到另一个异性磁极范围内时,导体中电流的方向也要同时改变。换向器和电刷就是完成这个任务的装置。在直流发电机中,换向器和电刷的任务是把线圈中的交流电变为直流向外输出;而在直流电动机中,则用换向器和电刷把输入的直流电变为线圈中的交流电。可见,换向器和电刷是直流电机中不可缺少的关键性部件。

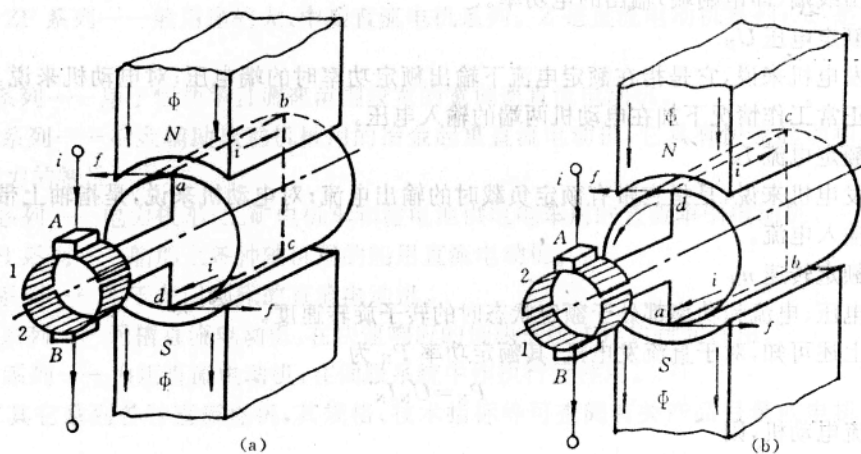


图 1-14 直流电动机工作原理

与直流发电机模型一样,作为直流电动机电枢上也不只一个线圈,因为一个线圈产生的转矩也是脉动的,根据需要设有若干个线圈放在电枢表面上,可使电枢上得到几乎是恒定不变的转矩。

1.1.3 直流电机的铭牌数据

电机制造厂按照国家标准,根据电机的设计和试验数据,规定了电机正常运行状态和条件,通常称之为额定运行情况。凡用以表征电机额定运行情况的各种数据,称为额定值。额定值一般都标注在电机的铭牌上,所以也称为铭牌数据,它是合理使用电机的依据。图 1-15 是直流电机的铭牌,现对其中几项主要指标说明如下。

直 流 电 动 机			
型 号		励磁方式	
额定功率		励磁电压	
额定电压		励磁电流	
额定电流		定 额	
额定转速		绝缘等级	
标准编号		质 量	
出品编号		出厂日期	
中华人民共和国×××电机厂制造			

图 1-15 直流电机的铭牌

1) 额定容量(额定功率) P_N

电机容量是指电机的输出功率。对电动机来说,它是指轴上输出的机械功率。对于发电机是指出线端(即电刷端)输出的电功率。

2) 额定电压 U_N

对发电机来说,它是指在额定电流下输出额定功率时的端电压;对电动机来说,是指在规定的正常工作情况下加在电动机两端的输入电压。

3) 额定电流 I_N

对发电机来说,是指它带有额定负载时的输出电流;对电动机来说,是指轴上带额定负载时的输入电流。

4) 额定转速 n_N

在电压、电流和功率都处于额定状态时的转子旋转速度。

从上述可知,对于直流发电机,其额定功率 P_N 为

$$P_N = U_N I_N$$

对于直流电动机,则

$$P_N = U_N I_N \eta_N$$

式中 η_N 是直流电动机的额定效率。它是直流电动机额定运行时,输出的机械功率与电源输入电功率之比。

5) 励磁

表示励磁的方式。

6) 额定励磁电压

表示加在励磁绕组两端的额定电压。

7) 额定励磁电流

表示在额定励磁电压下,通过励磁绕组上的电流。

8) 工作方式

是指电机在正常使用时持续的时间,一般分连续、断续与短时三种。

9) 额定温升

表示在额定情况下,电机所允许的工作温度减去环境温度的数值。

电机在实际应用中,是否处于额定运行状态,则要由负载大小来决定,一般不允许电机超过额定值运行,因为这会降低电机的使用寿命,甚至损坏电机。若电机长期处于低负载工作,则电动机的能量没有得到充分利用,效率降低,不经济。所以应根据负载情况合理选用电机,尽量使电机工作在额定状态。

1.1.4 国产电机的主要系列产品

电机产品的型号一般采用大写印刷体的汉语拼音字母和阿拉伯数字表示。例如 Z_2-72 , 其中各字母和数字含义如下:

Z——一般用途的防护式中小型直流电机;

2——第二次设计;

7——机座号;

2——2号铁心(1号为短铁心,2号为长铁心)。

国产的直流电机种类很多,下面列出一些常见的产品系列。