

绪 论

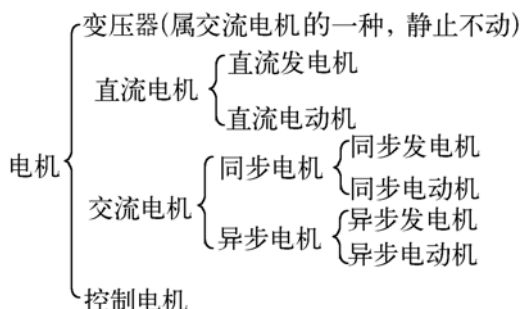
1. 电机、电力拖动技术在国民经济中的作用

电能是现代能源中应用最广的二次能源，它的生产、变换、传送、分配、使用和控制都较为方便经济，而要实现电能的生产、变换和使用等都离不开电机。

电机是利用电磁感应原理和电磁力定律，将能量或信号进行转换或变换的电磁机械装置。它应用广泛，种类繁多，性能各异，分类方法也很多。常见的分类方法为：按功能用途分，可分为发电机、电动机、变压器和控制电机 4 大类。

按照电机的结构或转速分类，可分为变压器和旋转电机。根据电源的不同，旋转电机又分为直流电机和交流电机两大类。交流电机又分为同步电机和异步电机两类。

综合以上分类方法，可归纳如下：



在电力工业中，产生电能的发电机和对电能进行变换、传输与分配的变压器是电站和变电所的主要设备。在机械制造、冶金、纺织、石油、煤炭、化工、印刷及其他工业企业中，人们利用电动机把电能转换成机械能，去拖动机床、轧钢机、纺织机、钻探机、电铲机、起重机、传输带等各种生产机械，从而满足生产工艺过程的要求。在交通运输业中，需要大量的牵引电动机和船用、航空电机。随着农业机械化的发展，电力排灌、播种、收割等农用机械中，都需要规格不同的电动机。在伺服传动、机器人传动、航天航空和国防科学等领域的自动控制技术中，各种各样的控制电机作为检测、定位、随动、执行和解算元件。在日益走进百姓家庭的小轿车中，其内装备的各类微特电机一般已超过 60 台。在医疗仪器、电动工具、家用电器、办公自动化设备和计算机外部设备中，也离不开功能各异的小功率电动机和特种电机……。综上所述，电机在一切工农业生产、交通运输、国防、科技、文教领域以及人们日常生活中，早已成为提高生产效率和科技水平以及提高生活质量的主要载体之一，因此电机在国民经济的各个领域起着重要的作用。

同样，以电动机为动力拖动生产机械的拖动方式——电力拖动，具有许多其他拖动方式（如蒸汽机、内燃机、水轮机等）无法比拟的优点。

电力拖动具有优良的性能，起动、制动、反转和调速的控制简单方便、快速性好且效率高。电动机的类型很多，具有各种不同的运行特性，可以满足各种类型的生产机械的要求。电力拖动系统各参数的检测、信号的变换与传送方便，易于实现最优控制。因此，电力拖动已成为现代工农业生产、交通运输等中最广泛采用的拖动方式。而且随着自动控制理论不断发展，电力电子器件的普遍应用，以及数控技术和计算机技术的发展与应用，电力拖动装置的性能得以大为提高，极大地提高了劳动生产率和产品质量，提高了生产机械运转的准确性、可靠性和快速性，提高了电力拖动系统的自动化控制程度，所以电力拖动已成为国民经济中现代工农业等领域电气自动化的基础。

电力拖动的发展过程，交、直流两种拖动方式并存于各生产领域，各时期科学技术的发展水平不同，它们所处的地位也有所不同。在交流电出现以前，直流电力拖动是唯一的一种电力拖动方式。随着经济实用交流电动机的研制成功，使交流电力拖动在工业中得到了广泛的应用。但是随着生产技术的发展，特别是精密机械加工与冶金工业生产过程的进步，对电力拖动在启动、制动、正反转以及调速提出了新的、更高的要求。由于交流电力拖动比直流电力拖动在技术上难以实现这些要求，所以从 20 世纪以来，在可逆、可调速与高精度的拖动领域中，在相当长一个时期内几乎都是采用直流电力拖动，而交流电力拖动则主要用于恒转速系统。

虽然直流电动机具有调速性能优异这一突出优点，但是由于它具有电刷与换向器，这使得它的故障率较高，电动机的使用环境受到限制（如不能在有易燃、易爆气体及尘埃多的场合使用），其电压等级、额定转速、单机容量的发展也受到限制，所以在 20 世纪 60 年代以后，随着电力电子技术的发展，交流调速的不断进步和完善，在调速性能方面由落后状态直到可与直流调速相媲美。今天，交流调速在很多场合已取代直流调速。在不远的将来，交流调速将完全取代直流调速，可以说这是一种必然的发展趋势。

2. 本课程的性质、任务和内容

本课程是电气自动化控制、供用电技术和机电一体化等专业的一门专业基础课。它是将《电机学》、《电力拖动》和《控制电机》等课程有机结合而成的一门课。

本课程的任务是使学生掌握变压器、交直流电机及控制电机的基本结构和工作原理以及电力拖动系统的运行性能、基本分析计算、电机选择、使用和维护方法，为今后的工作打下必要的基础，同时也培养学生在电机及电力拖动方面分析和解决问题的能力。

本课程的内容有直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、三相交流异步电动机、三相交流异步电动机的电力拖动、单相异步电动机、同步电机、电动机的选择、控制电机等。

3. 本课程的特点及学习方法

电机与电力拖动既是一门理论性很强的技术基础课，又具有专业课的性质，涉及的基础理论和实际知识面广，是电学、磁学、动力学、热学等学科知识的综合，所以理论性较强。而用理论分析各种电机及拖动的实际问题时，必须结合电机的具体结构、采用工程观点和工程分析方法。在掌握基本理论的同时，还要注意培养学生的实验操作技能

和计算能力，因此实践性也较强。鉴于以上原因，为学好电机及电力拖动这门课，学习时应注意以下几点：

（1）要抓主要矛盾，忽略一些次要因素，抓住问题的本质。

（2）要抓住重点，即应牢固掌握基本概念、基本原理和主要特性。

（3）要有良好的学习方法，可运用对比的学习方法，找出各种电机的共性和特点，以加深对各种电机及拖动系统性能和原理的理解。

（4）学习时要理论联系实际，重视试验和到工厂实践。

（5）要站在应用的角度看电机，把电机视为拖动系统中的一个器件来学习，不宜过多地耗时于电机的内部电磁关系上。

第1章 直流电机

内容提要

直流电机是实现直流电能与机械能之间相互转换的电力机械，按照用途可以分为直流电动机和直流发电机两类。将机械能转换成直流电能的电机称为直流发电机；将直流电能转换成机械能的电机称为直流电动机。直流电机最大特点是拖动性能良好，所以它是工矿、交通、建筑等行业中的比较常见动力机械，是机电行业人员的重要工作对象之一。熟悉直流电机的结构、工作原理和性能特点，掌握主要参数的分析计算，正确并熟练地操作使用直流电机是电气技术工作的重要内容。

本章主要介绍直流电机的用途、基本结构及工作原理，讨论直流电机的磁场分布，分析影响感应电动势和电磁转矩大小的因素，电枢反应及其对电机的影响，电机的换向及改善换向的方法并从应用的角度分析直流电动机的励磁方式和工作特性，以案例的形式介绍直流电动机典型故障的分析处理。

1.1 直流电机的基本工作原理与结构

1.1.1 直流电机的特点和用途

1. 直流电机的特点

直流电动机与交流电动机相比，具有优良的调速性能和启动性能。直流电动机具有宽广的调速范围，平滑的无级调速特性，可实现频繁的无级快速启动、制动和反转；过载能力强，能承受频繁的冲击负载；能满足自动化生产系统各种不同的特殊运行要求。而直流发电机则能提供无脉动的大功率直流电源，且输出电压可以精确地调节和控制。

直流电机也有它显著的缺点：一是制造工艺复杂，消耗有色金属较多，生产成本低；二是运行时由于电刷与换向器之间容易产生火花，因而可靠性较差，维护比较困难。所以在一些对调速性能要求不高的领域中已被交流变频调速系统所取代。但是在某些要求调速范围大、快速性高、精密度好、控制性能优异的场合，直流电动机的应用目前仍占有较大的比重。

2. 直流电机的用途

由于直流电动机具有良好的启动和调速性能，常应用于对启动和调速有较高要求的场合，如大型可逆式轧钢机、矿井卷扬机、宾馆高速电梯、龙门刨床、电力机车、内燃机车、城市电车、地铁列车、电动自行车、造纸和印刷机械、船舶机械、大型精密机床和大型起重机等生产机械中。

直流发电机主要用作各种直流电源，如直流电动机电源、化学工业中所需的低电压大电流的直流电源、直流电焊机电源等。

1.1.2 直流电机的工作原理

从能量转换的角度可以将直流电机分为直流电动机和直流发电机两大类，其工作原理可通过直流电机的简化模型进行说明。

1. 直流发电机的工作原理

如图 1-1 所示为直流发电机的简化模型。图 1-1 中 N，S 为固定不动的定子磁极，abcd 是固定在可旋转的导磁圆柱体上的转子线圈，线圈的首端 a，末端 d 连接到两个相互绝缘并可随线圈一同转动的导电换向片上。转子线圈与外电路的连接是通过放置在换向片上固定不动的电刷来实现的。在定子与转子间有间隙存在，称为气隙。当有原动机拖动转子以一定的转速逆时针旋转时，根据电磁感应定律可知，在切割磁场的线圈 abcd 中将产生感应电动势。两条有效边（ab、cd）导体中产生的感应电动势大小应为：

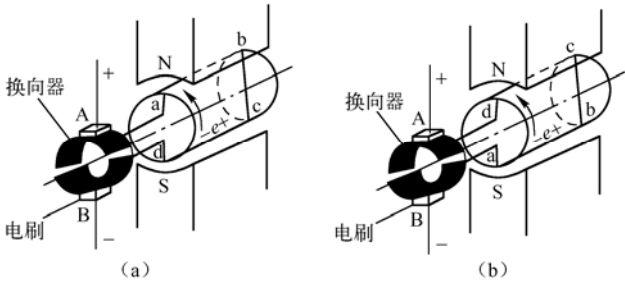


图 1-1 直流发电机模型

$$e = B_x Lv \tag{1-1}$$

式中， B_x 为导体所在处的磁通密度，单位为 Wb/m^2 ；
 L 为导体 ab 或 cd 的有效长度，单位为 m；
 v 为导体 ab 或 cd 与 B_x 间的相对线速度，单位为 m/s ；
 e 为导体感应电动势，单位为 V。

导体中感应电动势的方向可用右手定则确定。在逆时针旋转情况下，如图 1-1 (a) 所示，导体 ab 在 N 极下，产生的感应电动势极性为 a 点高电位，b 点低电位；导体 cd 在 S 极下，感应电动势的极性为 c 点高电位，d 点低电位，在此状态下电刷 A 的极性为正，电刷 B 的极性为负。当线圈旋转 180° 时，如图 1-1 (b) 所示，导体 ab 在 S 极下，感应电动势的极性为 a 点低电位，b 点高电位，而导体 cd 则在 N 极下，感应电动势的极性为 c 点低电位，d 点高电位，此时虽然导体中的感应电动势方向已改变，但由于原来与电刷 A 接触的换向片已经与电刷 B 接触，而与电刷 B 接触的换向片同时换到与电刷 A 接触，因此电刷 A 的极性仍为正，电刷 B 的极性仍为负。

从图 1-1 中可看出，导体 ab 和 cd 中感应电动势方向是交变的，而与电刷 A 接触的导体总是位于 N 极下，与电刷 B 接触的导体总是在 S 极下，因此电刷 A 的极性总为正，而电刷 B 的极性总为负，在电刷两端可获得直流电动势输出。

2. 直流电动机的工作原理

若把电刷 A、B 接到一直流电源上，电刷 A 接电源的正极，电刷 B 接电源的负极，此时在电枢线圈中将有电流流过。如图 1-2（a）所示，设线圈的 ab 边位于 N 极下，线圈的 cd 边位于 S 极下，则导体每边所受电磁力的大小为：

$$f = B_x LI \tag{1-2}$$

式中， B_x 为导体所在处的磁通密度，单位为 Wb/m^2 ；
 L 为导体 ab 或 cd 的有效长度，单位为 m；
 I 为导体中流过的电流，单位为 A；
 f 为电磁力，单位为 N。

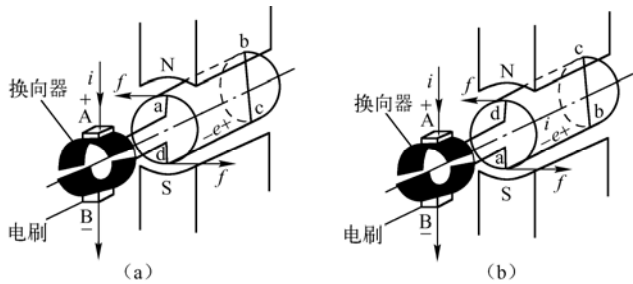


图 1-2 直流电动机的模型

导体受力方向由左手定则确定。在图 1-2（a）的情况下，位于 N 极下的导体 ab 受力方向为从右向左，而位于 S 极下的导体 cd 受力方向为从左向右。该电磁力与转子半径的乘积即为电磁转矩，该转矩的方向为逆时针。当电磁转矩大于阻转矩时，线圈按逆时针方向旋转。当电枢旋转到图 1-2（b）所示的位置时，原来位于 S 极下的导体 cd 转到 N 极下，其受力方向变为从右向左；而原来位于 N 极下的导体 ab 转到 S 极下，其受力方向变为从左向右，该转矩的方向仍为逆时针方向，线圈在此转矩作用下继续按逆时针方向旋转。这样虽然导体中流通的电流为交变的，但 N 极下的导体受力方向和 S 极下导体所受力的方向并未发生变化，电动机在此方向不变的转矩作用下转动。

实际直流电机的电枢根据实际应用情况有多个线圈。线圈分布于电枢铁芯表面的不同位置上，并按照一定的规律连接起来，构成电机的电枢绕组。磁极 N、S 也是根据需要交替放置多对。

1.1.3 直流电机的基本结构

直流电机由固定不动的定子与旋转的转子两大部分组成，定子与转子之间有间隙，称为气隙。

定子部分包括机座、主磁极、换向极、端盖、电刷等装置；转子部分包括电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴、风扇等部件。

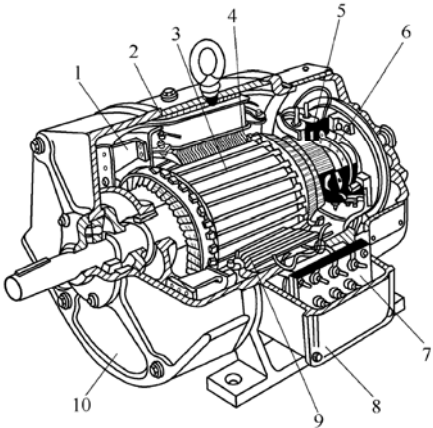
直流电机主要部件的基本结构与作用，如图 1-3 所示。

1. 定子部分

（1）机座 机座用以固定主磁极、换向极、端盖等，又是电机磁路的一部分（称为磁轭）。

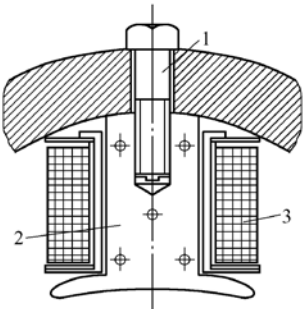
机座一般用铸钢或厚钢板焊接而成，具有良好的导磁性能和机械强度。

(2) 主磁极 主磁极的作用是产生气隙磁场，由主磁极铁芯和主磁极绕组（励磁绕组）构成，如图 1-4 所示。主磁极铁芯一般由 1.0~1.5mm 厚的低碳钢板冲片叠压而成，包括极身和极靴两部分。极靴做成圆弧形，以使磁极下气隙磁通较均匀。极身上面套有励磁绕组，绕组中通入直流电流。整个磁极用螺钉固定在机座上。



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 1-3 直流电机的结构图

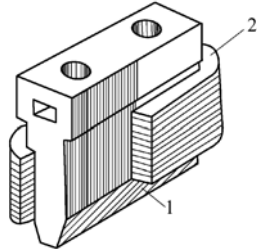


1—固定主磁极的螺钉；
2—主磁极铁芯；3—励磁绕组

图 1-4 直流电机的主磁极

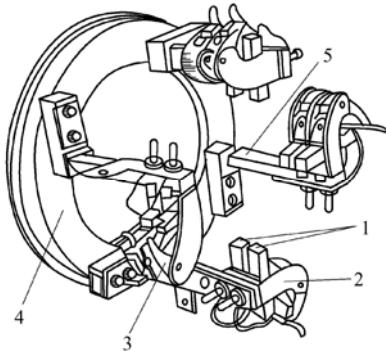
(3) 换向极 换向极用来改善电机的换向，由铁芯和套在铁芯上的绕组构成，如图 1-5 所示。换向极铁芯一般用整块钢制成，如果换向要求较高，则用 1.0~1.5mm 厚的钢板叠压而成，其绕组中流过的是电枢电流。换向极装在相邻两主极之间，用螺钉固定在机座上。

(4) 电刷装置 电刷与换向器配合可以把转动的电枢绕组电路和外电路连通并把电枢绕组中的交流量转变成电刷端的直流量。电刷装置由电刷、刷握、刷杆、刷杆架、弹簧、铜辫等构成，如图 1-6 所示。电刷的数量，一般与主磁极的数量相同。



1—换向极铁芯；2—换向极绕组

图 1-5 直流电机的换向极



1—电刷；2—刷握；3—弹簧压板；4—座圈；5—刷杆

图 1-6 直流电机的电刷装置

2. 转子部分

(1) 电枢铁芯 电枢铁芯是电机磁路的一部分，其外圆周开有槽，用来嵌放电枢绕组。电枢铁芯一般用 0.5mm 厚、表面涂有绝缘漆的硅钢片冲片叠压而成，如图 1-7 所示。电枢铁芯固定在转轴或转子支架上。铁芯较长时，为加强冷却，可把电枢铁芯沿轴向分成数段，段与段之间留有通风孔。

(2) 电枢绕组 电枢绕组是直流电机的重要组成部分，其作用是感应电动势、通过电枢电流，它是电机实现机械能与电能转换的关键。通常用绝缘导线绕成的线圈（或称元件），并按一定规律连接而成。

(3) 换向器 换向器是由多个紧压在一起的梯形状铜片构成的一个圆筒，片与片之间用一层薄云母绝缘，电枢绕组各元件的始端和末端与换向片按一定规律连接，如图 1-8 所示。换向器与转轴固定在一起。

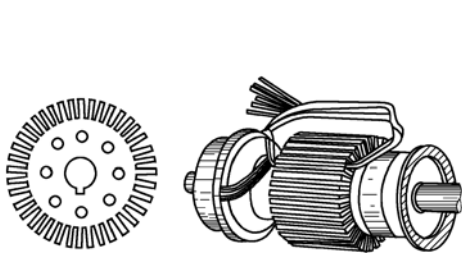
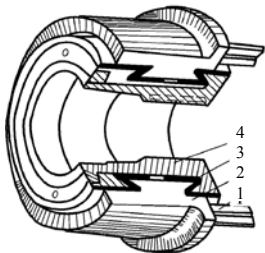


图 1-7 电枢铁芯



1—连接片；2—换向片；3—云母环；4—V 形套筒

图 1-8 换向器

1.1.4 直流电机的铭牌数据及主要系列

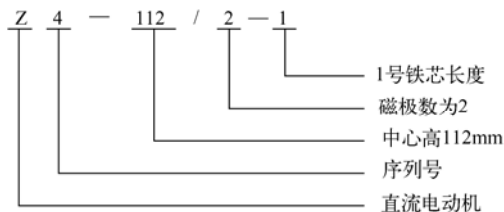
每台直流电机的机座上都钉有一块铭牌，如图 1-9 所示，它类似于每个人的身份证，上面标注了直流电机的型号和一些重要技术数据，这些数据称为额定值。

直流电动机			
型号	Z4-112/2-1	励磁方式	并励
额定功率	5.5kW	励磁电压	180V
额定电压	440V	励磁电流	0.4A
额定电流	15A	额定效率	81.2%
额定转速	3000r/min	绝缘等级	B级
定额	连续	出厂日期	××××年××月
××××电机厂			

图 1-9 直流电动机的铭牌

1. 型号

电机型号由若干字母和数字所组成，用以表示电机的系列和主要特点。根据电机的型号，便可以从相关手册及资料中查出该电机的有关技术数据。电机型号的含义如下：



常见的电机产品系列见表 1-1。

表 1-1 常见电机产品系列

代 号	含 义
Z3	一般用途的中、小型直流电机，包括发电机和电动机
Z、ZF	一般用途的大、中型直流电机系列。Z 是直流电动机系列；ZF 是直流发电机系列
ZZJ	专供起重冶金工业用的专用直流电动机
ZT	用于恒功率且调速范围比较大的驱动系统里的宽调速直流电动机
ZQ	电力机车、工矿电机车和蓄电池供电电车用的直流牵引电动机
ZH	船舶上各种辅助机械用的船用直流电动机
ZU	用于龙门刨床的直流电动机
ZA	用于矿井和有易爆气体场所的防爆安全型直流电动机
ZKJ	冶金、矿山挖掘机用的直流电动机

2. 额定值

额定值是电机制造厂对电机正常运行时有关的电量或机械量所规定的数值。额定值是正确选择和合理用电机的依据。根据国家标准，直流电机的额定值有以下几个。

(1) 额定功率 P_N 。电机在额定情况下允许输出的功率。对于发电机，是指输出的电功率；对于电动机是指轴上输出的机械功率，单位一般都为 kW 或 W。

(2) 额定电压 U_N 在额定情况下，电刷两端输出或输入的电压，单位为 V。

(3) 额定电流 I_N 在额定情况下，电机流出或流入的电流，单位为 A。

额定功率 P_N 、额定电压 U_N 和额定电流 I_N 三者之间的关系如下：

直流发电机： $P_N = U_N \cdot I_N$

直流电动机： $P_N = U_N \cdot I_N \cdot \eta_N$

式中， η_N ——额定效率。

(4) 额定转速 n_N 。在额定功率、额定电压、额定电流时电机的转速，单位为 r / min。

(5) 额定励磁电压 U_{fN} 。在额定情况下，励磁绕组所加的电压，单位为 V。

(6) 额定励磁电流 I_{fN} 。在额定情况下，通过励磁绕组的电流，单位为 A。

有些物理量虽然不标在铭牌上，但它们也是额定值，例如在额定运行状态时的转矩、效率分别称为额定转矩、额定效率等。若电机运行时，各物理量都与额定值一样，称为额定状态。电机在实际运行时，由于负载的变化，往往不是总在额定状态下运行。如果流过电机的电流小于额定电流，称为欠载运行；超过额定电流，称为过载运行。长期过载或欠载运行都不好。长期过载有可能因过热而烧坏电机；长期欠载，电机没有得到充分利用，效率降低，

不经济。电机在接近额定状态下运行，才是最经济、合理的。

例 1-1 一台直流电动机的额定数据为： $P_N=13\text{ kW}$ ， $U_N=220\text{ V}$ ， $n_N=1\,500\text{ r/min}$ ， $\eta_N=87.6\%$ ，求额定输入功率 P_{IN} 、额定电流 I_N 和额定输出转矩 T_{2N} 。

解：已知额定输出功率 $P_N=13\text{ kW}$ ，额定效率 $\eta_N=87.6\%$ ，所以

额定输入功率为：
$$P_{IN} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{13}{0.876} = 14.84\text{ kW}$$

额定电流为：
$$I_N = \frac{P_{IN}}{U_N} = \frac{14.84 \times 10^3}{220} = 67.45\text{ A}$$

由于输出功率 $P_N = T_{2N} \cdot \omega_N$ ，而角速度 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，所以，

额定输出转矩为：
$$T_{2N} = \frac{60 P_N \times 10^3}{2\pi n_N} = 82.77\text{ N}\cdot\text{m}$$

1.2 直流电机的电枢绕组

1.2.1 电枢绕组的基本知识

电枢绕组是直流电机的一个重要组成部分，电机中能量的变换就是通过电枢绕组而实现的，直流电机的转子也称为电枢。电枢绕组的结构对电机基本参数和性能都有重要影响，因此对电枢绕组提出了一定的要求，即在允许通过规定的电流和产生足够的电动势的前提下，尽可能地节省材料并且要结构简单、运行可靠。

电枢绕组是由结构、形状相同的线圈组成的，线圈有单匝、多匝之分，分别如图 1-10 (a)、(b) 所示。不论单匝或多匝线圈，它的两条边分别安放在不同的槽中，如图 1-11 所示，用来产生电动势和电磁转矩，故称为线圈的有效边。而处于槽外部分，仅起连接作用，称为端部接线。线圈的两个端头称为首端和尾端。电枢绕组大多做成双层绕组，将线圈的一条有效边放在槽的上层，称做上层边（画成实线）；另一条有效边放在有一定距离的另一槽的下层，称为下层边（画成虚线），线圈的一条有效边若嵌放在某槽的上层边，则另一条有效边则嵌放在另一槽的下层边，如图 1-11 所示。

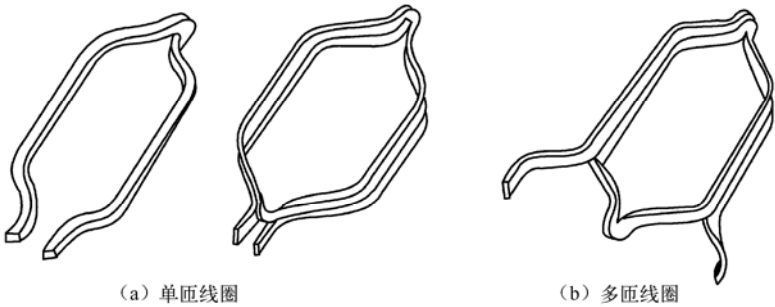


图 1-10 线圈结构

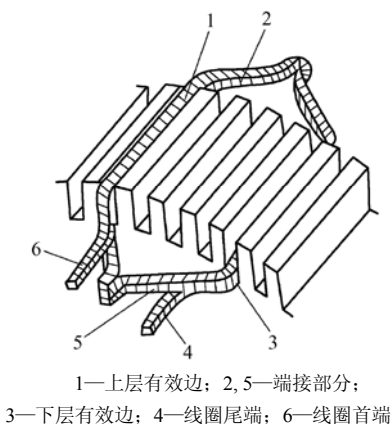


图 1-11 线圈在槽内安放示意图

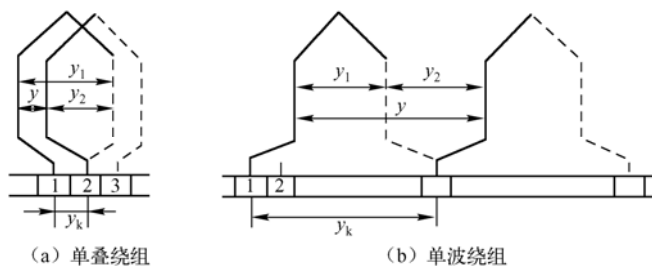


图 1-12 绕组画法和节距

电枢绕组的端线是通过换向片进行连接的，电枢绕组的线圈数和换向片数、槽数之间应有如下的关系：因为每一个线圈有两个边，而每一换向片总是把一个线圈的尾端与紧跟的另一个线圈的首端焊接在一起，因此，线圈数与换向片数相等；如果电枢铁芯每个槽内只安排一个上层边和一个下层边（称为一个单元槽），这样，线圈数又与单元槽数相等。由此可知，一台直流电机的线圈数 S 与换向片数 K 、槽数 Z 之间有如下关系：

$$S=K=Z \quad (1-3)$$

为了正确地把各元件安放在电枢槽内，并且和相应的换向片按一定规律连接起来，就必须先了解绕组和换向器的一些基本概念。

1. 极距 τ

极距是一个磁极在电枢表面的空间距离，用 D 表示电枢直径， p 表示磁极对数，则：

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}$$

通常用一个磁极在电枢表面占多少个槽来计算极距，即：

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad (1-4)$$

式中， Z 为电枢槽数。

2. 第一节距 y_1

第一节距 y_1 是指一个线圈两有效边之间在电枢表面上的跨距，以槽数表示，如图 1-12 所示。由于线圈边要放入槽内，所以 y_1 应是整数。而为了让绕组能感应出最大的电动势，应使 y_1 接近或等于极距，即：

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \mp \varepsilon \quad (1-5)$$

式中， ε ——正分数，是将 y_1 补成整数的一个分数。若 $\varepsilon = 0$ ，则 $y_1 = \tau$ ，称为整距绕组。若取

正号, 则 $y_1 > \tau$, 称为长距绕组; 若取负号, 则 $y_1 < \tau$, 称为短距绕组。为了节省铜线及方便工艺, 一般多采用短距或整距绕组。

3. 第二节距 y_2

第二节距 y_2 是指相串联的两个相邻线圈中, 第一个线圈的下层边与相邻的第二个线圈的上层边之间的距离, y_2 用槽数表示, 如图 1-12 所示。

4. 换向片节距 y_k

换向片节距 y_k 是线圈两端所连接的换向片之间的距离, 用该线圈跨过的换向片数来表示, 如图 1-12 所示。

5. 合成节距 y

合成节距 y 是指相串联的两个相邻线圈对应的有效边之间的距离, 用槽数来表示, 如图 1-12 所示。

1.2.2 单叠绕组

单叠绕组的特点是相邻元件(线圈)相互叠压, 合成节距与换向节距均为 1, 即: $y = y_k = 1$ 。

1. 单叠绕组的节距计算

第一节距 y_1 计算公式如下:

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon$$

单叠绕组的合成节距和换向节距相同, 即 $y = y_k = \pm 1$, 一般取 $y = y_k = +1$, 单叠绕组多为右行绕组, 元件的连接顺序为从左向右进行。

第二节距 y_2 计算 单叠绕组的第二节距 y_2 由第一节距和合成节距之差计算得到:

$$y_2 = y_1 - y \tag{1-6}$$

2. 单叠绕组的展开图

电机的绕组展开图是把放在圆形铁芯槽里、构成绕组的元件剖开, 画在平面图上, 其作用是展示元件相互间的电气连接关系。展开图中除元件外, 还要反映主磁极、换向片及电刷的相对位置关系。在画展开图前应根据所给定的电机磁极对数 p 、槽数 Z 、元件数 S 和换向片数 K , 计算出各节距值, 然后根据计算值画出单叠绕组的展开图。

下面通过一个具体的例子说明绕组展开图的画法。

例 1-2 已知一台直流电机的磁极对数 $p=2$, $Z=S=K=16$, 试画出其右行单叠绕组展开图。

解: 第一步 计算绕组的各节距:

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{16}{4} = 4$$

$$y = y_k = +1$$

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

第二步 画绕组元件。用实线代表上层边元件，虚线代表下层边元件，虚线靠近实线，实线（虚线）根数等于元件数 S ，从左向右为实线编号，分别为 1 至 16。

第三步 放置主磁极。两对主磁极应均匀的、NS 两极交替地放置在各槽之上，每个磁极的宽度约为 0.7 倍的极距。

第四步 放置换向片。用带有编号的小方块代表各换向片，换向片的编号也是从左向右顺序编排并以第一元件上层边所连接的换向片为第一换向片号。

第五步 根据计算所得各节距值连接绕组。第一号元件上层边连接第一号换向片，根据第一节距找到第一号元件的下层边（本例中编号为 5 的虚线），下层边的端线按换向片节距 $y_k=1$ 连接到第二换向片上。根据合成节距 $y=1$ ，第二号元件的上层边连接到第二号换向片上，其下层边连接第三号换向片上。其余元件与换向片的连接关系依此类推。

第六步 放置电刷。在展开图中，直流电机的电刷与换向片的宽度相同，电刷数与主磁极数相同。放置电刷时应使正负电刷间的感应电动势最大，或被电刷短接的元件感应电动势最小。当把电刷放置在主磁极的几何中心线处时，被电刷短接元件的感应电动势为零，同时正负电刷间的电动势也最大。当电枢按图示方向转动时，电刷间的电动势方向根据右手定则可判定为 A_1 、 A_2 为正， B_1 、 B_2 为负。单叠绕组的完整展开图如图 1-13 所示。

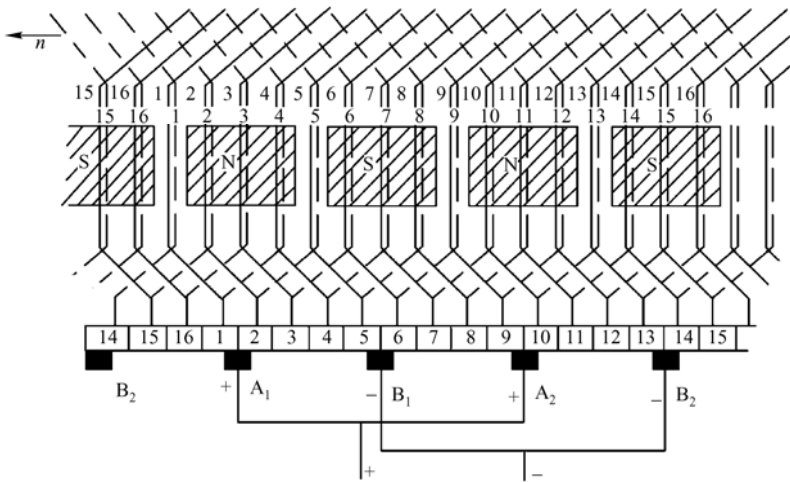


图 1-13 单叠绕组展开图

在实际生产过程中，由于电枢反应的影响，直流电机电刷的实际位置需要在电机制造好后通过试验的方法进行调整。

3. 单叠绕组的元件连接顺序及并联支路图

根据图 1-13 可以看出绕组中各元件之间是如何连接的。在图 1-13 中，根据第一节距值 $y_1=4$ 可知第 1 槽元件 1 的上层边，连接到第 5 槽的元件 1 的下层边，构成了第 1 个元件；根据换向节距 $y_k=1$ ，元件 1 的首、末端分别接到第 1、2 号两个换向片上；根据合成节距求得 $y_2=3$ ，第 5 槽的元件 1 的下层边连接到第 2 槽元件 2 的上层边，这样就把第 1、2 两个元件连

接起来了。其余元件的连接依此类推，如图 1-14 所示。

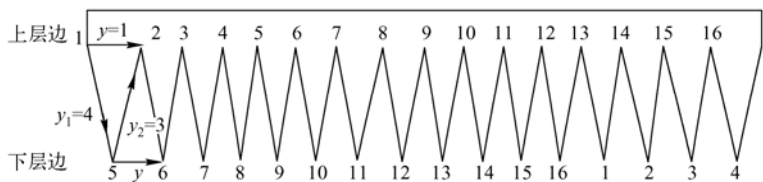


图 1-14 单叠绕组元件连接顺序图

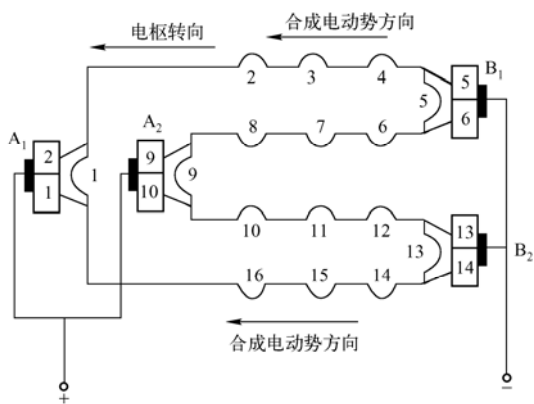


图 1-15 单叠绕组并联支路图

从图 1-14 中可看出，从元件 1 开始，绕电枢一周，把全部元件边都串联起来之后，又回到元件 1 的起始点。可见，整个绕组是一个串联的闭合电路。

根据图 1-13 和图 1-14 可得到绕组的并联支路电路图，如图 1-15 所示。电刷短接元件为元件 1、5、9 和 13，并联支路对数 a 与主磁极对数相同，即 $a=p$ 。

综上所述，单叠绕组有以下特点：

(1) 同一主磁极下的元件串联在一起组成一个支路，有几个主磁极就有几条支路。

(2) 电刷数等于主磁极数，电刷位置应使

支路感应电动势最大，电刷间电动势等于并联支路电动势。

(3) 电枢电流等于各并联支路电流之和。

1.2.3 单波绕组

1. 单波绕组的节距计算

单波绕组的第一节距 y_1 的计算方法与单叠绕组的计算相同。

合成节距 y 和换向器节距 y_k ：选择 y_k 时，应使相串联的元件感应电动势同方向。为此，得把两个相串联的元件放在同极性磁极的下面，此时它们在空间位置上相距约两个极距。其次，当沿圆周向一个方向绕了一周，经过 p 个串联的元件后（ p 为主磁极对数），其末尾所连的换向片必须落在与起始的换向片相邻的位置，这样才能使第二周元件继续往下连，此时换向总节距数为 py_k ，即：

$$py_k = K \mp 1$$

式中， K 为换向片数。

因此，由上式可得换向节距为：

$$y_k = \frac{K \mp 1}{p} \tag{1-7}$$

在式 (1-7) 中，正负号的选择首先应满足使 y_k 为整数，其次考虑选择负号。选择负号时的单波绕组称为左行绕组，左行绕组端部叠压少。单波绕组的合成节距与换向节距相同，即

$y = y_k$ 。

第二节距 y_2 的公式如下：

$$y_2 = y_1 - y$$

2. 单波绕组的展开图

单波绕组的展开图可见下例。

例 1-3 已知主磁极对数 $p=2$, $Z=S=K=15$, 试绘制单波左行绕组展开图。

解：首先计算各节距：

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \mp \varepsilon = \frac{15}{4} + \frac{1}{4} = 4$$

$$y = y_k = \frac{K-1}{p} = \frac{15-1}{2} = 7$$

$$y_2 = y - y_1 = 7 - 4 = 3$$

参照单叠绕组的展开图画法，可做出单波绕组的展开图如图 1-16 所示。

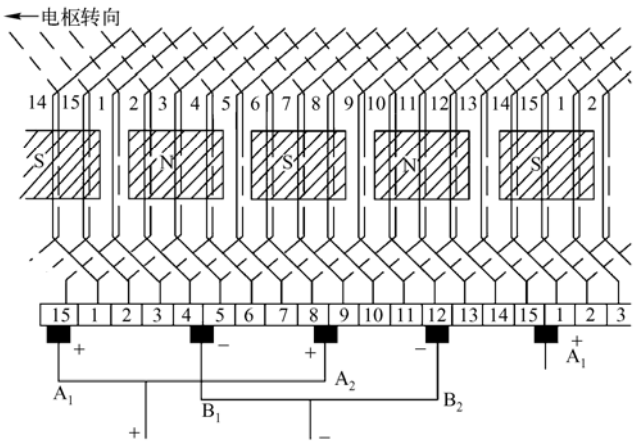


图 1-16 单波绕组的展开图

3. 单波绕组的连接次序及并联支路图

根据绕组的节距可以画出它的连接次序表，如图 1-17 所示。可见，单波绕组也是一个串联的闭路电路。

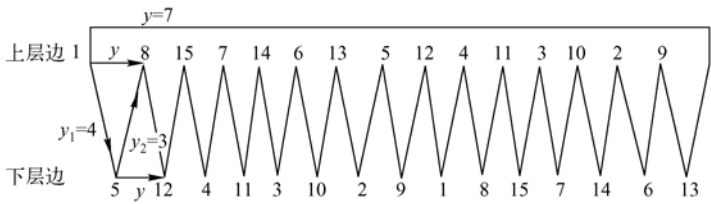


图 1-17 单波绕组连接次序表

单从支路对数来看,单波绕组有两个电刷就能进行工作,在实际使用过程中,仍然要安装和主磁极数相同的电刷,这样做有利于直流电机的换向以及减小换向器轴向尺寸。只有在特殊情况下可以少用电刷。

(1) 同极性下各元件串联起来组成一个支路, 支路对数 $a=1$, 与磁极对数 p 无关。

(3) 电刷杆数也应等于磁极数 (采用全额电刷)。

(4) 电枢电动势等于支路感应电动势。

(5) 电枢电流等于两条支路电流之和。

以后在分析电机的运行原理及绘制电机应用原理图时,为了方便起见,不再画出那些复杂的定、转子结构以及各种电枢绕组,而是用如图 1-19 所示的示意图表示,图 1-19 中 A 代表电枢部分(转子),F 代表励磁部分(定子)。

在直流电机中，电枢绕组是容易出故障的部件。电枢绕组常见故障有：断路、短路接地及绕组接反等故障，如何检查和修理，下面举例加以说明。

图 1-19 直流电机示意图

• 16 •

接正常，若在相连接的换向片上，测得压降比平均值显著增大，则该处电枢绕组断线或焊接不良，试解释其中道理。

解：根据单叠绕组的嵌放规律，两相邻换向片之间有一个线圈，若线圈无断线故障，则电枢线圈、可变电阻 R 与电源形成闭合回路，如图 1-21 所示。由于线圈电阻较小，故电源电压大部分降落在可变电阻 R 上，毫伏表指示的绕组压降值较小。若线圈出现断路故障，大部分电压均降落在线圈上，毫伏表指示为接近电源电压值，比正常值大很多，故能判断故障所在线圈。

断线线圈也可从外观上寻找。电枢绕组应是闭合绕组，若电枢线圈出现断线，则当该线圈转到电刷下时，电流就通过电刷接通，而离开电刷时，电流被切断，在电刷接触和离开的瞬间出现较大的点状火花，使断路线圈两侧的换向片灼黑，根据灼黑的换向片就可以找出断线线圈的位置。

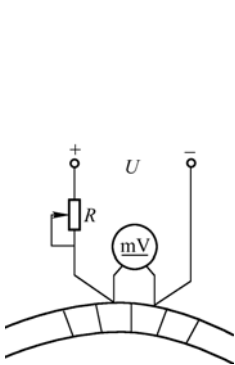


图 1-20 测量换向片间电压降接线图

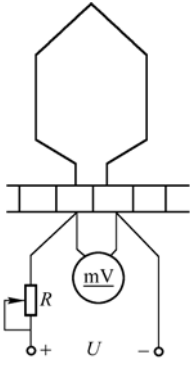


图 1-21 判断单叠绕组断路故障原理图

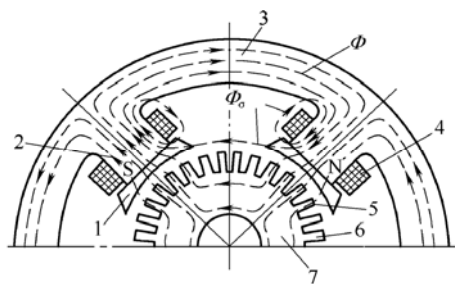
1.3 直流电机的电枢反应

直流电机的磁场是由主磁极产生的励磁磁场和电枢绕组电流产生的电枢磁场合成的一个合成磁场，它对直流电机产生的电动势和电磁转矩都有直接的影响，而且直流电机的运行特性在很大程度上也取决于磁场特性。因此，认识直流电机的磁场是十分必要的。

1. 直流电机的空载磁场

直流电机空载（发电机与外电路断开，没有电流输出；电动机轴上不带机械负载）运行时，其电枢电流等于零或近似等于零。因而空载磁场可以认为仅仅是励磁电流通过励磁绕组产生的励磁磁通势所建立的。

如图 1-22 所示为四极电机空载时磁场分布，当励磁绕组通入直流电流后，主磁极产生磁场，以 N，S 极间隔均匀地分布在定子内圆周上，此时只有励磁磁动势单独建立的空载磁场。每对磁极下的磁通所经过的路径不同，根据它们的作用可以分为两类，其中占绝大部分的磁通是从主磁极的 N 极出来经过气隙进入电枢的齿槽、电枢的磁轭，然后到达电枢铁芯另一边的齿槽，再穿过气隙，进入主磁极的 S 极，通过定子磁轭回到 N 极，形成闭合磁回路。这部分磁通同时交链励磁绕组和电枢绕组，是直流电机进行电磁感应和能量转换所必需的，称为



1—极靴；2—极身；3—定子磁轭；4—励磁线圈；
5—气隙；6—电枢齿；7—电枢磁轭

图 1-22 直流电机空载时磁场分布

磁极的几何中性线 $n-n$ 重合。

主磁通 Φ 。此外，还有一小部分磁通从 N 极出来后并不进入电枢，而是经过气隙直接进入相邻的磁极或磁轭，它对电机的能量转换工作不起作用，相反，使电机的损耗加大，效率降低，增大了磁路的饱和程度，这部分磁通称为漏磁通 Φ_σ ，一般 $\Phi_\sigma = (15\% \sim 20\%) \Phi$ 。

如图 1-23 (a) 所示为主磁场在电机中的分布情况。按照图中所示的励磁电流方向，应用右手螺旋定则，便可确定主极磁场的方向。在电枢表面上磁感应强度为零的地方是物理中性线 $m-m$ ，它与

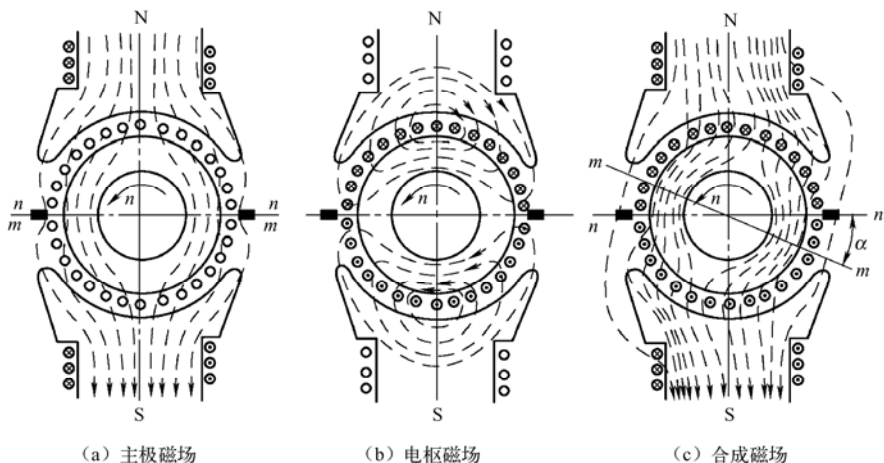


图 1-23 直流电动机气隙磁场分布示意图

2. 直流电机的电枢磁场

直流电动机在带负载运行时，电枢绕组中有电流通过产生电枢磁场。电枢磁场与主极磁场共同在气隙里建立合成磁场。

如图 1-23 (b) 所示为以电动机为例的电枢磁场，它的方向由电枢电流根据右手螺旋定则来判断。由图可以看出，不论电枢如何转动，电枢电流的方向总是以电刷为界限来划分的。在电刷两边，N 极面下的导体和 S 极面下的导体电流方向始终相反，只要电刷固定不动，电枢两边的电流方向就不变，电枢磁场的方向不变，即电枢磁场是静止不动的。根据图上的电流方向用左手定则可判定该台电动机旋转方向为逆时针。

3. 电枢反应

所谓电枢反应是指电枢磁场对主磁场的影响，电枢反应对电机的运行性能有很大的影响。如图 1-23 (c) 所示为主极磁场和电枢磁场合在一起而产生的合成磁场。与图 1-22 (a) 比较可见，由于带负载后出现的电枢磁场，对主极磁场的分布有明显的影响。电枢反应对磁