

# 第 1 章 绪言

## 1.1 电机及电力拖动技术发展简介

电机是随着生产的发展而诞生，随着生产的发展而发展的，而电机的应用反过来又推动社会生产力的不断提高。生产力的不断提高，又要求有更先进的电机出现及拖动系统的应用。

20 世纪以前，电机的发展过程是由诞生到生产上的初步应用、各种电机的初步定型以及电机理论和电机设计计算的建立和发展。

以奥斯特发现电流在磁场中受力及安培对这种现象总结为基础，1834 亚哥比研制成第一台可以实用的直流电动机，1838 年人们将亚哥比的直流电动机用于拖动电动轮船试验，试验船在涅瓦河上运载 11 人，以 4 km/h 的速度成功地逆流而上和顺流而下，当时还没有可供实用的直流发电机，为电动机供电的是化学电池。这是人类制成的最早的可供实用的电动机。

1871 年凡·麦尔准发明了交流发电机。1878 年亚布洛契可夫使用交流发电机和变压器为他发明的照明装置供电。1885 年意大利物理学家费拉利斯发现了二相电流可以产生旋转磁场，1886 年费拉利斯和在美国的坦斯拉几乎同时制成了两相感应电动机的模型。1888 年多里沃·多勃罗沃尔斯基提出了交流电三相制，奠定了现代三相电路和三相电机的基础。

20 世纪初，现代各种主要电机均已设计制造成功。

20 世纪以后，电气化、原子能、计算机及自动化对电机提出了诸如性能良好、运行可靠、单位容量的重量轻、体积小等方面愈来愈多的要求，而且随着自动控制系统和计算装置的发展，在旋转电机的理论基础上，发展出多种高精度、快响应的控制电机。人们在降低电机成本、减小电机尺寸、提高电机性能、选用新型电磁材料、改进电机生产工艺等方面进行了大量工作。

中国的电机制造工业在解放前基础十分薄弱，制造出的直流发电机最大不超过 200 kW 电动机不超过 135 kW 变压器最大不超过 2 000 kV·A 根本没有能力生产汽轮发电机和水轮发电机。仅有一些小电机厂，设备简陋，多数是属于修理和装配性质。

1949 年中华人民共和国成立以来，电机制造工业发生了巨大的变化。电机制造工业形成了独立自主和完整的体系，而且有一些产品已经达到或接近世界先进水平，就各种拖动系统中的主要设备“电动机”而言，近年来已生产出多种大型的直流电动机、异步电动机和同步电动机；在中小型电机和控制电机方面，亦自行设计和生产出多种新系列电机。由于生产上的需要，这几年来，对电机的新原理、新结构、新工艺、新材料、新的运行方式和调试方法，亦进行许多摸索、研究和试验工作，取得了不少的成就。电机在制造上也向着大

型、巨型和小型、微型化方向发展。20世纪50年代末已经生产出电机容量为5万千瓦的汽轮发电机、7.25万kW水发电机和12万kW·A的变压器。1958年研制出世界第一台1.2万kW双水内冷汽轮发电机，一举震动了国际电工界。20世纪80年代我国交流电动机的年产量一直在400万kW徘徊，而2002年我国交流电机的累计产量为7005万kW，2003年产量达到8920.03万kW同比增长26.2%，2004年1~5月交流电动机产量为4280.86万kW比上一年同期增长31.4%。目前，我国生产的电机产品有300多个系列约1500多个品种。中小型电机产品的品种、规格、性能和产量基本上满足我国国民经济发展需要。2003年，中国与加拿大合作研发的混流式水轮发电机组单机容量达70万kW，并已经在三峡电站稳定运行。2005年我国制造出外径达18.43m、重达1694.5吨的发电机转子，珠海发电厂第一期四台发电机组的总装机容量达2600MW。经过几代人的努力，中国的电机制造业已接近或达到发达国家的同期水平。

上面简述了电机的发展概况。同样，应用各种电动机拖动各种生产机械的电力拖动技术，其发展也是有自身过程的。

最初人们应用人力、畜力、水力、风力等作为原动力来推动生产机械而后又发明了蒸汽机、内燃机等作为生产机械的原动机。由于电能的传输和分配十分方便、容易控制、电动机效率高、运行经济等一系列优点，电力拖动很快代替了蒸汽或水力等拖动，成为拖动各种生产机械的主要方式。当时电动机拖动生产机械的方式是通过天轴实现的，称为“成组拖动”。它是由一台电动机拖动一组生产机械，从电动机到各生产机械的能量传递以及在各生产机械之间的能量分配完全用机械方法，靠天轴及机械传动系统来实现。电动机远离生产机械，车间里有大量的天轴、长带和带轮等。能量传递过程中的损耗大、效率低、生产率低、灰尘大、控制不灵活无法满足某些生产机械的启动、制动、正、反转及调速等方面的要求，劳动条件与卫生条件很差，而且易出事故。另外，如果电动机发生故障，则成组的生产机械将停车，甚至整个生产可能停顿。这是一种陈旧落后的电力拖动方式。

为了克服上述缺点自20世纪20年代以来，生产机械上广泛采用一种“单电动机拖动系统”在这一系统中，一台生产机械用一台单独的电动机拖动。这样电动机与生产机械在结构上配合密切，可以用电气方法调节每台生产机械的转速，从而进一步简化机械结构，而且易于实现生产机械运转的全部自动化。

但是，如果用一台电动机拖动具有多个工作机构的生产机械时，则机械内部仍将保留着复杂的机械传动机构。因此，自20世纪30年代起广泛采用了“多电动机拖动系统”，即每一个工作机构用单独的电动机拖动，因而生产机械的机械结构可大为简化。例如，具有3个主轴的龙门刨床用3台电动机拖动，每台电动机拖动一根主轴运动。某些生产机械的生产过程长而连续，如造纸、印刷、纺织和轧制等机械，也都采用多电动机拖动系统，这些机械一般由多个分部组成，每一分部可用单独电动机拖动。

必须指出，在只有一个工作机构的生产机械上，有时也采用多电动机拖动系统。例如，链式输送机的工作机构是一条长的链式运输带，它往往采用多台电动机拖动。

在多台电动机拖动系统中，各台电动机可在机械上采用刚性连接或摩擦连接等。很多情况下也采用电气方法联系，用电气控制线路及装置实现各电动机间的转速关系保持恒定(如电轴系统)维持某一参数(如张力)在允许范围内(如造纸、纺织、印刷和轧制等生

产机械及各电动机间互相连锁 保证一定的启动运转、停车程序 等。

随着生产的发展，对上述单电动机拖动系统及多电动机拖动系统提出了更高的要求：如要求提高加工精度与工作速度，要求快速启动、制动及逆转，实现在很宽范围内调速及整个生产过程自动化等。但是，要完成这些任务，除电动机外，还必须有自动控制设备，组成自动化的电力拖动系统。

现代工业的电力拖动，一般都要求局部的或全部的自动化，因此必然要与各种控制元件组成的自动控制系统联系起来，而电力拖动则视为自动化电力拖动系统的简称。在这一系统中可对生产机械进行自动控制，如实现自动控制启动、制动、调速和同步，自动维持转速、转矩或功率为恒定值，按给定程序或事先不知道的规律改变速度、改变转向和工作机构的位置，及使工作循环自动化等。

随着电机及电器制造业以及各种自动化元件的发展，自动化电力拖动系统得到不断地更新与发展。最初采用的控制系统是继电器—接触器型 属于有触点断续控制系统 称为继电器—接触器自动控制系统。

20 世纪 30 年代初，出现了发电机—电动机组，使调速性能优异的直流电动机得到了广泛的应用。在直流电动机的拖动系统中，由于电机、电器、自动化元件及电力电子器件的不断更新与发展，在上述发电机—电动机组的基础上，发展成为采用交磁电机扩大机、磁放大器、可控离子变流器及晶闸管整流器等组成的自动化直流电力拖动系统。目前晶闸管等直流自动电力拖动系统已得到了广泛的应用，并正在向大容量的方向发展，做到集中控制、集中监视。在自动化元件方面已有整套标准控制单元，控制装置集成化、小型化、微型化，做到结构上组合安装积木化，微型化的自动化装置可直接装于电动机机座上，做到与电动机一体化，节省专用的控制柜。设备可靠性高，维护简便，许多设备都可做到锁门运行，不需监视与维护。

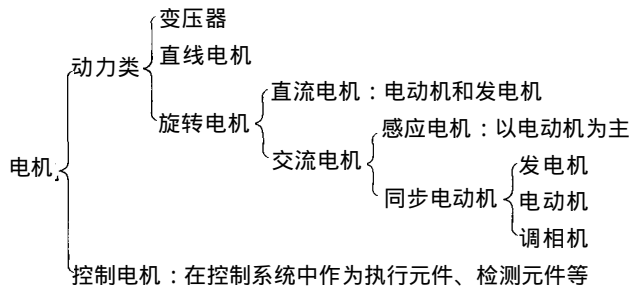
国外在 20 世纪 40 年代末到 50 年代，对串级及离子变频的交流调速系统进行了一些研究，并提出了无换向器电动机的原理。其后，晶闸管及电力电子自关断器件的出现，为交流调速系统开辟了广阔的前途。目前已进入扩大应用及系列化、进一步提高性能指标、向大容量发展的阶段。串级调速系统、变频调速系统及无换向器电动机已在工业中广泛应用。

随着近代电力电子技术和计算机技术的发展以及现代控制理论的应用，自动化电力拖动正向着计算机控制的生产过程自动化的方向迈进。在一些现代化的工厂里，力求做到从原料进厂到产品出厂都是自动化或半自动化的，而且达到高速、优质、高效率地生产。但必须指出，在大多数综合自动化系统中，例如在计算机集成制造系统（CIMS）中自动化的电力拖动系统仍然是不可缺少的主要组成部分。我国与国外的发展情况相同，一些工厂企业的生产过程正从单机、局部自动化发展到全盘、综合自动化。目前已出现大批自动生产线，一些自动化车间和自动化工厂也将会在我国出现。

另外，低成本自动化的技术与设备的开发，愈来愈引起国内外的注意，特别对于中小型企业，应用适用技术的设备，不仅有利于获得经济效益，而且能提高生产率、可靠性与柔性，还有易于应用的优点。自动化的电力拖动系统更是低成本自动化系统的重要组成部分。

## 1.2 电机的类别及其制造材料

电机的分类方法有很多，对于工业中常用的电机，主要类型归纳如下：



电机一般是以磁场为耦合场，利用电磁感应和电磁力的作用而实现能量转换的机械。因此，电机中所用的材料可分为以下 4 类。

(1) 导电材料：作为电机中的电路系统。为减小  $I_a^2 R$  损耗，要求材料的电阻率小。常用紫铜及铝。

(2) 导磁材料：作为电机中的磁路系统。为在一定励磁磁动势下产生较强的磁场和降低铁耗，要求材料具有较高的磁导率和较低的铁耗系数。常用硅钢片、钢板和铸钢。

(3) 绝缘材料：作为带电体之间及带电体与铁芯间的电气隔离。要求材料的介电强度高且耐热强度好。按耐热能力可分为 A、E、B、F、H 和 C 等 6 级，其最高允许工作温度分别为 105℃、120℃、130℃、155 及 180℃ 高于 180℃。

(4) 结构材料：使各部分构成整体、支撑相连接其它机械。要求材料的机械强度高，加工方便、重量轻。常用铸铁、铸钢、钢板、铝合金及工程塑料。

## 1.3 本课程的专业地位与主要内容

电机原理与拖动基础是原电机学、电力拖动基础和微特电机等课程的有机结合。本课程是工业电气自动化专业及相近专业的一门专业基础课（又称技术基础课）。它的先修课程是高等数学、物理及电路原理等。它包含电学、磁学、力学和热学的规律，几方面的因素又互相影响，所以分析问题时，必须全面考虑，不能作为单纯的电学或单纯的其它学科问题来处理。又因为实际问题涉及的因素很多，可以根据具体条件抓住主要矛盾，忽略次要因素，运用“电路原理”、“物理学”等基本理论来分析研究各类电机内部的电磁物理过程，从而得出各类电机（及变压器）的一般规律及各种电力拖动系统的静态、动态特性。

本课程学完后，应使学生掌握常用交、直流电机、控制电机及变压器等的基本结构与工作原理，以及电力拖动系统的运行性能；电力拖动系统中的电动机的调速方法、调速原理和分析计算；电力拖动的机械过渡过程及主要分析方法；电机选择与实验方法。为今后学习拖动自动控制系统、反馈控制理论、自动控制原理及计算机控制技术课程，准备必要的基础知识。

## 第 2 章 直流电机

直流电机是电机的主要类型之一。理论上说，一台直流电机既可作为发电机使用，也可作为电动机使用。用作直流发电机可以得到直流电源，而作为直流电动机，由于其具有良好的调速性能，在许多对调速性能要求较高的场合，仍得到广泛使用。本章主要介绍直流电机的工作原理和结构。

### 2.1 直流电机的基本原理和结构

#### 2.1.1 直流电机的工作原理

##### 1. 直流发电机的工作原理

电机的工作原理建立在电磁力和电磁感应的基础上。图 2.1.1 是一个直流发电机的物理模型。图中两个空间固定的永久磁铁北极 N 和南极 (S) 之间 安放一个有凹槽的圆柱形铁芯，称为电枢铁芯；电枢铁芯和磁极之间的缝隙称为气隙；在电枢铁芯的凹槽中安放一个线圈 (abcd)，称为电枢绕组；绕组的两端焊接在两个互相绝缘的半圆形铜换向片上，由换向片构成的圆柱体称为换向器；为了把电枢和外电路相连，安装了空间固定不动的两个碳质电刷 A 和 B 电刷同换向器接触 当电枢转动时 电枢铁芯 电枢绕组以及换向器是旋转的，而主磁极及电刷在空间固定不动。下面利用这个模型来说明直流发电机的工作原理。

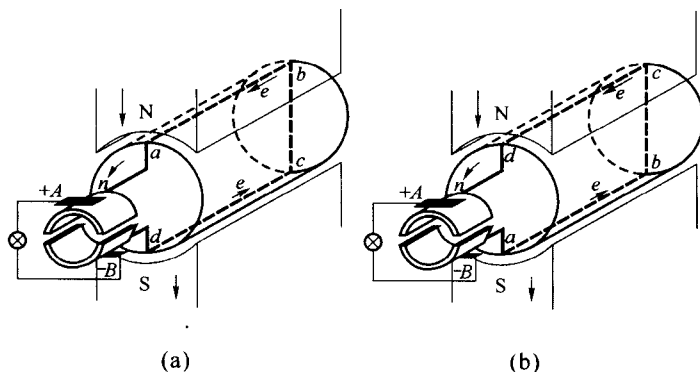


图 2.1.1 直流发电机基本工作原理

当原动机拖动电枢 转子 以转速  $n$  沿逆时针方向旋转 转子正好转到图 2.1.1(a) 所示位置时 导体  $ab$  正好在 N 极下 而导体  $cd$  正好在 S 极下。如果这时导体所在处的磁通密度为  $B$  有效导体长度为  $l$  导体的线速度为  $v$ 。根据法拉第电磁感应定律，每根导

体感应电动势瞬时值为  $e = Blv$ ，其方向用右手定则决定。N极下的  $ab$  导体电动势方向由  $b$  到  $a$ ，而 S极下的  $cd$  导体电动势方向由  $d$  到  $c$  如图 2.1.1(a) 箭头所示。线圈  $abcd$  的电动势大小恰好是  $ab$  导体电动势或  $cd$  导体电动势的 2 倍，方向为  $d$  端为正， $a$  端为负。此时电刷 A 极性为正，电刷 B 极性为负。

当转子转过  $180^\circ$  在如图 2.1.1(b) 所示位置时，导体  $ab$  正好在 S 极下，而导体  $cd$  正好在 N 极下，导体  $cd$  电动势方向由  $c$  到  $d$ ，导体  $ab$  电动势方向由  $a$  到  $b$  如图 2.1.1(b) 箭头所示。此时线圈  $abcd$  的电动势方向  $d$  端为正， $a$  端为负。但由于电刷不随换向片转动，仍然有电刷 A 极性为正，电刷 B 极性为负。可见转子连续旋转时，A 刷引出的总是 N 级下导体的正电动势，B 刷引出的总是 S 级下导体的负电动势。经过电刷和换向器，把电枢绕组内的感应的交变电动势变成了由电刷 A、B 间输出的直流电动势，这就是直流发电机的基本工作原理。

现在来分析一下输出电动势波形。由式  $e = Blv$  可知，如果线圈有效导体长度  $l$  和切割磁通的速度  $v$  恒定不变，则感应电动势  $e$  正比于导体所在位置的磁通密度  $B$ 。如果  $B$  沿定转子之间的气隙空间分布波形为  $B = f(\alpha)$ 。线圈  $abcd$  两端感应电动势  $e$  随时间变化的波形  $e = f(\omega t)$  与  $B = f(\alpha)$  有相同的形状。其中  $\alpha$  为磁极的空间角度， $\omega t$  对应导体电动势的时间角度。图 2.1.2(a) 绘出这种情况下磁通密度  $B = f(\alpha)$  和感应电动势  $e = f(\omega t)$  的波形，两波形重合。经过整流由电刷 A 和 B 输出的电动势波形如图 2.1.2(b) 所示。可见直流发电机电枢绕组的感应电动势是交流电动势，但电刷引出的是经过机械整流的直流电动势。

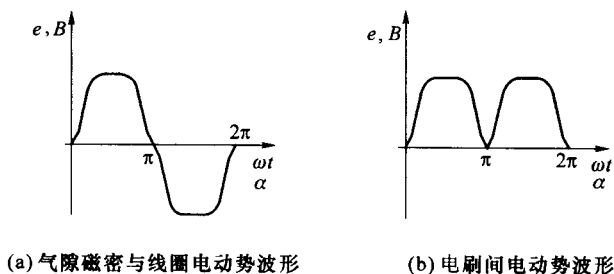


图 2.1.2 电动势波形图

在实际电机中，电枢不只是一个线圈，而是由许多按一定规律连接起来的线圈组成，这样电动势的脉振程度会减少。

## 2. 直流电动机的工作原理

直流电动机的结构与直流发电机一样。它把直流电能转换成机械能，带动轴上的生产机械做功。在图 2.1.3 的电刷 A 和 B 上加上直流电源，便成为直流电动机的物理模型。当电动机转到图 2.1.3(a) 所示位置时， $ab$  导体刚好在 N 极下， $cd$  导体在 S 极下。直流电流由电源正极经 A 刷流入电枢绕组，在线圈内部电流的方向是由  $a$  到  $b$  由  $c$  到  $d$ 。然后经 B 刷返回电源负极。如果导体所在处的磁通密度为  $B$ ，有效导体长度为  $l$ ，电流为  $i$ ，根据电磁力定律可知，这时导体受力为  $f = Bli$ 。受力方向由左手定则判定，判定结果：

导体  $ab$  和  $cd$  受力产生的转矩均为逆时针方向，电机转子转动。当电机转子转过  $180^\circ$  时，转到图 2.1.3(b) 所示位置 这时导体  $cd$  在 N 极下 导体  $ab$  在 S 极下。电流经 A 刷由  $d$  端流入线圈。在线圈内部方向是由  $d$  到  $c$  由  $b$  到  $a$ ，如图中箭头所示。根据左手定则仍可判定  $ab$  和导体  $cd$  受力产生的转矩为逆时针方向。由此可知，虽然导体内部电流方向变了 但受力产生的转矩方向不变 因此转子连续旋转 这就是直流电动机的基本工作原理。

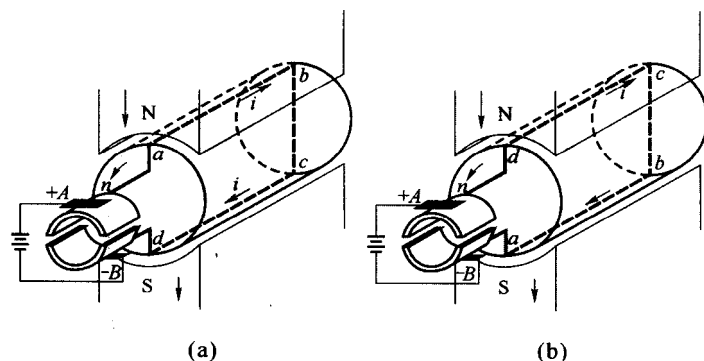


图 2.1.3 直流电动机基本工作原理

### 3. 电机的可逆原理

由上面分析可知，同一台直流发电机，只要改变外界的条件，既可以当直流发电机运行，又可以当直流电动机工作。如果用原动机拖动电枢恒速旋转，就可以从电刷端引出直流电动势而作直流电源对负载供电；如果在电刷端外施加直流电压，则电枢导体受力，转子旋转成为电动机，从而把电能变成机械能。

这种同一台电机由于外界条件的不同，既可以作发电机，也可以作电动机运行的原理 不仅适用于直流电机 而且也适用于交流电机 是电机理论中的普遍原理 称为电机的可逆原理。

## 2.1.2 直流电机的结构

现代的直流电机的结构是较为复杂，而且型式多种多样。图 2.1.4 和图 2.1.5 分别为直流电机的纵横剖面结构图 它主要由定子 固定部分 和转子 转动部分 组成。定子主要用来产生磁通和作电机的机械支撑。它包括主磁极、换向器机座、端盖、轴承和电刷装置等部件 转子用来产生感应电动势和电磁转矩 它包括电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等部件。现就几个主要部件的作用简述如下。

### 1. 定子

#### (1) 主磁极

主磁极的作用是在定子与转子之间的气隙中建立磁场，使电枢绕组在该磁场的作用下产生感应电动势和电磁转矩。主磁极包括主极铁芯（包括极身和极掌）和套在主极铁芯上的励磁绕组两部分 如图 2.1.5 所示。主磁极总是偶数，且 N,S 极相间出现。为了降低电枢旋转时极靴表面引起的涡流损耗，主极铁芯一般用  $1.0\sim 1.5\text{ mm}$  厚的低碳钢板冲

片叠压而成。在小型直流电机中，主磁极也可采用永久磁铁，它不需要励磁绕组，这种电机叫做永磁直流电机。

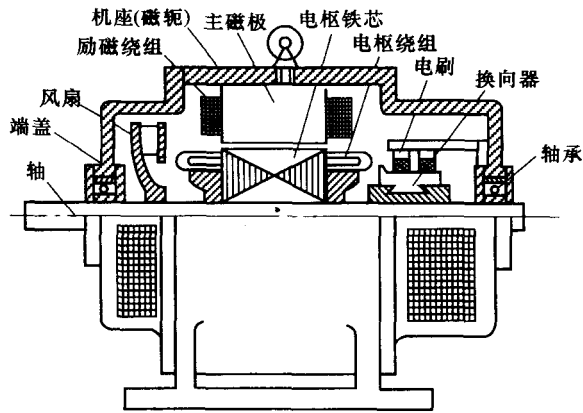


图 2.1.4 直流电机纵剖面图

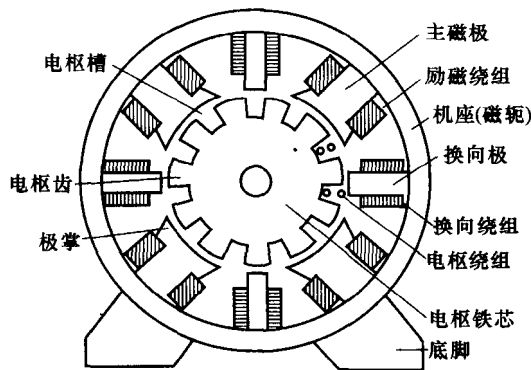


图 2.1.5 直流电机横剖面图

### (2) 换向极

换向极又称附加极，装在两相邻主磁极之间的几何中心线上，其作用是为了改善直流电机的换向，消除或减小电刷与换向器之间的火花。换向极的结构与主磁极相似，由换向极铁芯和套在其上的换向极绕组两部分组成，如图 2.1.5 所示。换向极铁芯一般用整块钢制成，当换向要求较高时用 1.0~1.5 mm 厚的钢片叠压而成。

在 1 kW 以下的小容量直流电机中，有时换向极的数目只有主磁极的一半，或不装换向极。

### (3) 机座

机座也称机壳 既是磁极间磁的通路 又要用来固定主磁极、换向极及端盖 并借助底脚把电机固定在基础上。因此要求机座既要导磁性好与足够的导磁面积，又要有足够的机械强度和刚度。

对于换向要求较高的电机，机座也可用薄钢片冲片叠压而成。

#### (4) 电刷装置

如图 2.1.6 所示，电刷装置的作用是把转动的电枢电路与静止的外电路接通，并与换向器配合，起到整流或逆变的作用。电刷装置是固定不动的，它由电刷、刷握、握杆、握杆座及铜丝辫等零部件组成。电刷放在刷握中，由弹簧把电刷压在换向器表面上。刷握固定在握杆上，握杆装在握杆座上，彼此之间相互绝缘。整个电刷座装在端盖或轴承内盖上，可以在一定范围内移动，用来调整电刷位置。

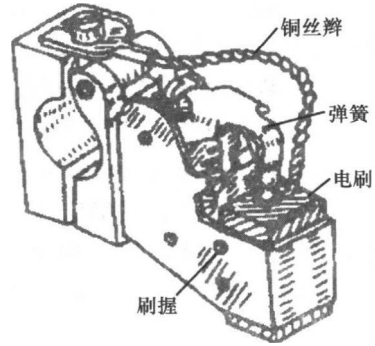


图 2.1.6 直流电机的电刷装置

### 2. 转子

#### (1) 电枢铁芯

电枢铁芯是电机主磁路的一部分，而且用来嵌置电枢绕组。为了减少电枢旋转时因磁通方向变化引起的铁芯损耗，常由涂有绝缘漆的 0.5 mm 厚硅钢片叠压而成。

#### (2) 电枢绕组

电枢绕组是用来产生感应电动势和电磁转矩，从而实现机电能量转换的关键部件。如果电枢绕组只有一个单匝的绕圈，则其感应电动势及电磁转矩不仅数值太小，而且具有很大的脉动分量，不能满足现代生产对直流电机的要求。为此，现代直流电机的电枢在其圆周上均匀地分布有许多线圈，每个可以单匝也可以多匝，称为元件。每个元件的两个有效边分别嵌放在相隔一定槽数的电枢铁芯的两个槽中，所有元件按一定规律连接成一闭合回路。

#### (3) 换向器

换向器的作用是在电刷间得到直流电动势，并保证每个磁极下电枢导体电流方向不变，以产生恒定方向的电磁转矩。由于电枢绕组由许多元件组成，而每个元件的两个引出端需分别连接两片换向片，所以换向器是由许多彼此互相绝缘的铜换向片所组成。

### 3. 气隙

气隙并非结构部件，它是定子的磁极和转子的电枢之间自然形成的缝隙。但是，气隙是主磁路的一部分，气隙中的磁场是电机进行机电能量转换的媒介。因此，气隙的大小对电机的运行性能有很大的影响。小容量直流电机的气隙约为 1~3 mm，大容量电机的气隙可达几毫米。

以上介绍了直流电机的主要部件，一些次要部件这里不一一叙述。

## 2.1.3 直流电机的额定值及主要系列

### 1. 直流电机的额定值

为了使电机安全可靠地工作，而且有优良的运行性能，电机制造厂根据国家标准及电机的设计数据，对每台电机在运行中的有关物理量，如电压、电流、功率和转速等，所规定的保证值，称为电机的额定值。电机在运行中，若各物理量都符合它的额定值，称为该电机运行于额定状态。电机在额定运行状态时，其性能最好且安全可靠。

为了使用方便，每台电机的额定值一般标志在电机的铭牌上，所以又称之为铭牌数。

据。直流电机的额定值有以下几项：

(1) 额定容量 功率  $P_N$ ：对于发电机而言，是指发电机引出端输出的电功率；对电动机而言，是指从它的转轴上输出的机械功率，单位为 W 或 kW；

(2) 额定电压  $U_N$ ：是指额定状态下电机出线端的电压，单位为 V；

(3) 额定电流  $I_N$  是指额定状态下电机出线端的电流 单位为 A；

(4) 额定转速  $n_N$  单位为 r/min。

还有一些物理量的额定值，如额定效率  $\eta_N$ 、额定转矩  $T_N$ 、额定温升  $\tau_N$  及额定励磁电流  $I_{fN}$  等，不一定都标在铭牌上。

为此可得直流发电机的额定容量

$$P_N = U_N \cdot I_N \quad (2-1)$$

而直流电动机的额定功率

$$P_N = U_N \cdot I_N \cdot \eta_N \quad (2-2)$$

电动机轴上输出额定转矩  $T_N$ ，其大小是额定功率除以转子角速度的额定值，

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = P_N \frac{2\pi n_N}{60} = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$$

在实际运行中，有时电机不一定运行于额定状态。如果电机的电流小于额定电流，称为欠载或轻载 如果电流大于额定电流 称为过载或超载 如果电流恰好等于额定电流 称为满载运行。长期过载会使电机过热，降低电机的使用寿命，甚至损坏电机。长期轻载不仅使电机的设备容量得不到充分利用，而且会降低电机的效率。为此，必须根据负载情况，合理地选择电机。

**例 2-1** 一台直流电动机，其额定功率  $P_N = 160 \text{ kW}$  额定电压  $U_N = 220 \text{ V}$  额定效率  $\eta_N = 90\%$  额定转速  $n_N = 1500 \text{ r/min}$ ，求该电动机的输入功率、额定电流及额定输出转矩各是多少？

解 额定输入功率： $P_1 = P_N / \eta_N = 160 / 0.9 = 177.8 \text{ kW}$

额定电流： $I_N = P_1 / U_N = 177.8 \times 10^3 / 220 = 808.1 \text{ A}$

额定输出转矩： $T_N = 9.55 P_N / n_N = 9.55 \times 160 \times 10^3 / 1500 = 1018.7 \text{ N}\cdot\text{m}$

## 2. 我国生产的直流电机的主要系列

国产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。其中汉语拼音字母是根据电机的全名称选择有代表意义的汉字，再从该汉字的拼音中得到。例如  $Z_2-31$  的含意：Z 表示一般用途的防护式中小型直流电机；2 表示第二次设计；3 表示机座号；1 表示铁芯长度顺序号。

当前我国生产的直流电机主要有以下系列：

$Z_2$  系列是一般用途的中、小型直流电机，包括发电机和电动机。

Z 和 ZF 系列是一般用途的大、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。

ZT 系列是用于恒功率，且调速范围比较大的拖动系统里的广调速直流电动机。

ZZJ 系列是冶金辅助拖动机械用的冶金起重直流电动机。

ZQ 系列是电力机车、工矿电机车和蓄电池供电电车用的直流牵引电动机。

ZH 系列是船舶上各种辅助机械用的船用直流电动机。  
 ZA 系列是用于矿井和有易爆气体场所的防爆安全型直流电动机。  
 ZU 系列是用于龙门刨床的直流电动机。  
 ZKJ 系列是冶金、矿山挖掘机用的直流电动机。  
 还有其它系列直流电机，可参看有关的产品目录。

## 2.2 直流电机的空载磁场

由工作原理可知 直流电机在正常工作时必须有磁场 电枢绕组切割磁场才能产生感应电动势。电枢电流在磁场中受力才能产生电磁转矩，从而才能实现机电能量的转换。因此，要弄清直流电机的工作原理和特性，就必须对直流电机的磁场情况有一个正确的了解。

为此 先来分析直流电机空载时的磁场 它是由励磁绕组通入励磁电流产生的 是直流电机中最主要的磁场。其它绕组流过电流产生的磁场对它的影响，将在后面陆续加以介绍。

### 2.2.1 直流电机的磁化曲线

图 2.2.1 是一台四极直流电机空载磁场的示意图。空载时，只有主磁极的励磁绕组流过励磁电流产生的磁场。一个主磁极的磁动势为  $F = N_f I_f$  式中  $N_f$  是励磁绕组的匝数； $I_f$  是直流励磁电流。这一磁动势在磁路中产生的磁通可分为主磁通  $\Phi$  和漏磁通  $\Phi_l$  两部分。

主磁通走主磁路 其路径如图 2.2.1 所示：从 N 极铁芯出发，经气隙进入电枢齿部，然后进入电枢轭 经相邻的 S 极下电枢齿 再经气隙进入 S 极铁芯，然后由定子轭回到 N 极形成闭合回路。主磁通与电枢绕组交链，占总磁通的 80% 以上。

漏磁通走漏磁路闭合 不进入电枢 仅交链励磁绕组自身 不与电枢绕组交链 不参加机电能量的转换，不能在电枢绕组中产生感应电动势，也不能产生电磁转矩，只增加磁极的饱和程度。漏磁通一般不超过总磁通的 20%。

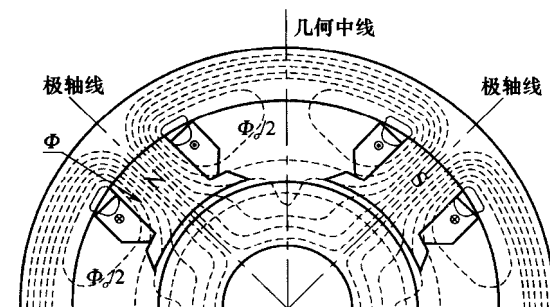


图 2.2.1 直流电机空载时的磁场分布

下面仅对主磁路进行分析。应用全电流定律得出：沿任意闭合路径  $l$  磁场强度  $H$  的线积分等于该回路所包围的导体电流的代数和。即

$$\oint Hdl = \sum i \quad (2-3)$$

在电机中，总是把场的问题简化为路的问题来处理。因此，全电流定律可以简化成磁路第二定律 即

$$\sum H_k l_k = Ni \quad (2-4)$$

式中  $H_k$  为第  $k$  段磁路的磁场强度，单位为 A/m； $l_k$  为第  $k$  段磁路的平均长度，单位为 m； $N$  为线圈匝数； $Ni$  为作用在整个磁路上的磁动势 单位为 A； $H_k l_k$  为第  $k$  段磁路上的磁压降。

如图 2.2.1 所示 式(2-4)具体可以写成：

$$2H_\delta \delta + 2H_i l_i + H_r l_r + 2H_p l_p + H_s l_s = 2N_f I_f \quad (2-5)$$

式中  $2H_\delta \delta$  为两段气隙的磁压降； $2H_i l_i$  为两段电枢齿磁压降； $H_r l_r$  为转子轭磁压降； $2H_p l_p$  为两段主磁极铁芯磁压降； $H_s l_s$  为定子轭磁压降； $2N_f I_f$  为两个励磁线圈产生的总磁动势； $N_f$  为励磁线圈的匝数； $I_f$  为每个励磁电流。

上述各段的磁压降又可以写成：

$$Hl = \frac{B}{\mu} l = \Phi \frac{l}{\mu S} = \Phi R_m \quad (2-6)$$

式中  $\mu$  为磁导率； $S$  为磁路的截面积； $R_m$  为磁阻。式(2-6)表明 每段磁路的磁通乘上该段磁路的磁阻，即为该段磁路的磁压降。

考虑到式(2-6)、式(2-4)又可写成：

$$\sum \Phi R_m = N_f I_f \quad (2-7)$$

由式(2-7)可以看出 磁通  $\Phi$  是励磁电流  $I_f$  的函数。 $\Phi = f(I_f)$  曲线 如图 2.2.2 中曲线 2 所示，称为直流电机的空载磁化曲线。当励磁电流较小时，气隙和铁芯中的磁阻都是常数 因此  $\Phi$  与  $I_f$  有线性关系。这时铁芯中的磁阻较小，气隙磁阻占绝大部分。当电流逐渐增大，铁芯逐渐出现饱和，铁芯中磁阻有所增加，因此  $\Phi$  就不能再与电流  $I_f$  成正比地增加，曲线出现饱和。图 2.2.2 中直线 1 是曲线 2 直线部分的切线，它实际上是气隙磁化曲线。当磁通达到额定值时，图中  $ab$  代表气隙磁动势， $ac$  是磁路的总磁动势。

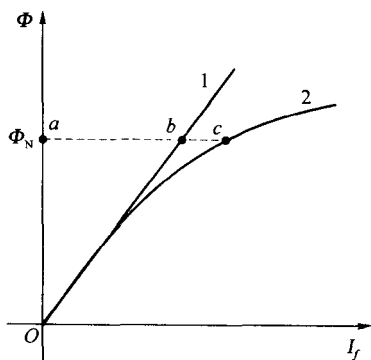


图 2.2.2 直流电机磁化曲线

$K_M = ac / ab$  比值称为饱和系数，它代表磁路的饱和程度，在一般直流电机中  $K_M = 1.11 \sim 1.35$  可见 在正常情况下直流电机的磁路有一定程度的饱和。

### 2.2.2 气隙磁通

气隙磁通指空载时经过气隙进入电枢铁芯的磁通。在电枢表面实际上是有槽和齿的 为了简单起见 不考虑槽和齿对气隙磁通密度的影响 认为电枢表面是光滑的 这种情

况下气隙磁通密度分布，如图 2.2.3 所示。

假定铁芯中磁阻较小，略去铁芯中的磁压降，认为全部磁动势都降在气隙中，这样在电枢表面各处磁动势都是相等的，一对磁极的两个励磁绕组的磁动势降到两段气隙中，所以每段气隙的磁压降为一个励磁线圈的磁动势  $N_f I_f$ 。即

$$N_f I_f = H_\delta \delta = \frac{B_\delta \delta}{\mu_\delta} \quad (2-8)$$

由式(2.8)可以看出  $N_f$  和  $\mu_\delta$  为常数 当  $I_f$  固定时,  $B_\delta$  与  $\delta$  成反比。也就是说 在电枢圆周表面各处的气隙磁通密度与气隙长度成反比。

由于电机磁极内表面与电枢铁芯外表面之间气隙不均匀，在磁极中心处的气隙较小；在磁极的两个极尖处气隙较大，这种情况下气隙磁密分布，如图 2.2.3 所示，即在磁极中心附近的磁密大，两极尖处磁密小。图中在极靴以外，磁密迅速减小。这是由于极靴以外的气隙更大的缘故。在两极之间的几何中性线处，磁密等于零。根据磁密分布曲线和电枢的尺寸，可以计算出每极下进入电枢的磁通量，在计算性能时，每极磁通量是一个很重要的数据。

在计算每极磁通量时，先将气隙磁密波等效为矩形波再计算。如图 2.2.3 所示  $B_{av}$  是气隙磁密的平均值：

$$B_{av} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau b_\delta \cdot d\alpha \quad (2-9)$$

当铁芯长为  $l$  每极磁通量

$$\Phi = B_{av} \tau l \quad (2-10)$$

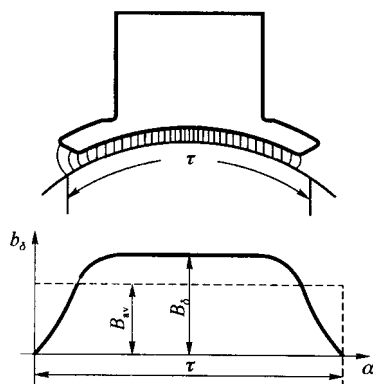


图 2.2.3 气隙磁通密度波形图

## 2.3 直流电机的电枢绕组

电枢绕组是直流电机的核心部件，在电机的机电能量转换过程中起着重要的作用，对电机技术经济指标和运行性能有很大的影响。因此，对电枢绕组有一定的要求，主要有在能通过规定的电流和产生足够大的感应电动势及电磁转矩的前提下，所消耗的有效材料（包括导线和绝缘 最省、强度 机械、电气和热强度高、运行可靠、结构简单、下线方便等。

直流机电枢绕组的形式很多，按其绕组元件和换向器的连接方式不同，可以分为单叠绕组、单波绕组和混合绕组。其中最基本的形式是单迭绕组和单波绕组。

### 2.3.1 技术术语

在分析绕组电路连接之前，先介绍一下绕组元件及有关术语。

#### 1. 极轴线

极轴线是将每个主磁极分成左右对称两部分的直线，如图 2.2.1 所示。

## 2. 几何中性线

几何中性线是相邻两个主磁极之间的几何分界线，它到两个主磁极轴线的距离相等。

## 3. 极距

极距用符号  $\tau$  表示，是相邻两个主磁极沿电枢圆周表面量度的圆弧距离，它等于相邻两个极轴线或相邻两个几何中性线之间沿电枢表面量度的弧长。常用槽数表示，如果电枢槽数为  $Z$  极对数为  $p$  (主磁极极数为  $2p$ ) 以槽数表示的极距

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad (2-11)$$

## 4. 绕组元件

绕组元件是两端分别与两个换向片相连接的单匝或多匝线圈。绕组元件是电枢绕组的基本单元 图 2.3.1(a) 绘出了单匝和多匝单叠绕组元件的示意图。

每个元件有两个放在电枢槽中能切割磁场产生感应电动势的有效边，称为元件边，在槽外部分不产生感应电动势，只起连接作用，称为端接部分。为便于嵌线，每个元件的一个元件边放在一个槽的上层，另一个元件边放在另一槽的下层，形成直流电枢绕组的双层结构。元件边在槽内的安放情况，如图 2.3.1(b) 所示。

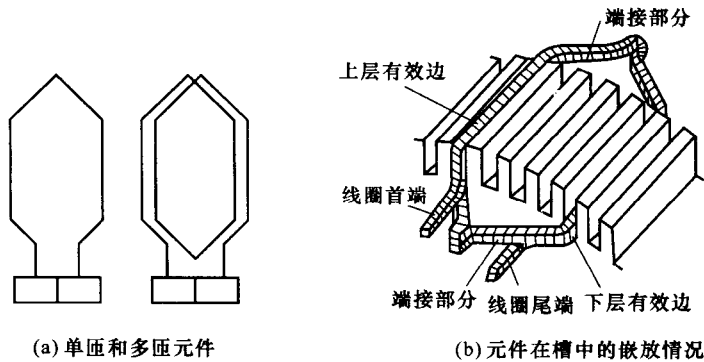


图 2.3.1 单叠绕组元件

## 5. 绕组的节距

绕组元件的宽度及元件之间的连接规律由绕组的各种节距来表示，有第一节距  $y_1$ ，第二节距  $y_2$  合成节距  $y$  及换向节距  $y_k$ 。它们的具体含义如下：

### (1) 第一节距 $y_1$

第一节距是一个元件的两个有效边之间的距离，以所跨槽数表示。为使元件产生的感应电动势最大， $y_1$  应当等于或近似接近极距  $\tau$ 。因为极距  $\tau = Z/(2p)$  不一定是整数，而第一节距  $y_1$  必须是整数 因此有

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon \quad (2-12)$$

式中  $\epsilon$  为小于 1 的分数。当  $y_1 = \tau$  时，称为整距元件； $y_1 < \tau$  时，称为短距元件； $y_1 > \tau$  时 称为长距元件。长距元件因端接线长一般不采用。

### (2) 第二节距 $y_2$

在元件串接过程中第 1 元件的第二元件边与紧接着串联的第 2 元件的第一元件边之间的距离称为第二节距，也以所跨槽数表示。

(3) 合成节距  $y$

合成节距是相邻两个串联元件之间的距离，也以所跨槽数表示。也可以说它是相邻两个串联元件对应有效边之间的距离。

(4) 换向节距  $y_k$

换向节距是同一元件的首端和尾端在换向器上所跨的换向片数。在数值上它总与合成节距相等即

$$y_k = y \tag{2-13}$$

### 2.3.2 单叠绕组

单叠绕组的特点是它的合成节距和换向节距都等于 1。这种绕组后一个元件总是紧接着前一个元件嵌放，每串接完一个元件在电枢表面上移过一个槽，在换向器上也移过一个换向片直到串接完最后一个元件。最后一个元件的尾端与第 1 元件的首端接在同一个换向片上，形成闭合绕组。

在一般情况下，直流机电枢绕组的元件数  $S$  总等于槽数  $Z$  也等于换向片数  $K$ 。

例如，一台直流电机极数  $2p=4, Z=S=K=16$  试绕制一单叠绕组。

1. 节距的计算

$$\text{第一节距: } y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \frac{16}{4} = 4$$

$$\text{合成节距与换向节距: } y = y_k = 1$$

$$\text{第二节距: } y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$$

2. 绕组的连接顺序表与绕组展开图

根据上面计算出的  $y_1, y_2, y$  和  $y_k$  可以先排出绕组的连接顺序 为此先把槽、元件、换向片依次排上号。

编号的原则是，把元件和元件上层边所在的槽和元件首端所接的换向片编上相同的号码。如第 1 元件 它的上层边放在第 1 槽中 它的首端所接换向片为 1 号换向片。这样就可以按下面的顺序安排绕组 第 1 元件的上层边放在第 1 槽的上层 它的首端接 1 号换向片。

由于  $y_1=4$  可知第 1 元件的下层边放在第 5 槽的下层 (排表时以  $5'$  表示) 因为  $y_k=1$ ，所以第 1 元件的尾端接 2 号换向片。根据  $y_2=3$  可知第 2 元件的上层边返回第 2 槽的上层 再由  $y_1=4$  知第 2 元件的下层边放在第 6 槽下层 尾端接 3 号换向片 然后开始第 3 元件的安放 以此类推 直到第 16 元件放在第 16 槽上层和第 4 槽的下层 其尾端接回 1 号换向片，形成闭合绕组。整个绕组元件按图 2.3.2 的顺序连接。

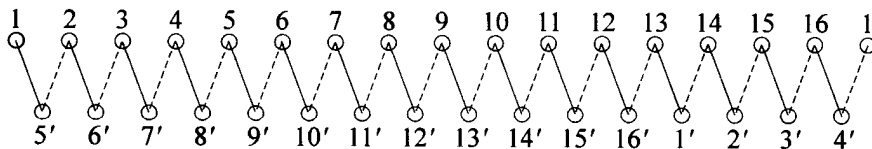


图 2.3.2 绕组元件的连接顺序

图 2.3.2 中 1,2,3...表示上层元件边,1',2',3'...表示下层元件边。实线表示一个元件,虚线表示通过换向片把两个元件连接起来。

为了直观起见,工程上都把电机的电枢绕组图画成沿电枢轴向切开,展成平面的绕组展开图 如图 2.3.3 所示。N极下磁力线进入纸面,S极下磁力线穿出纸面。

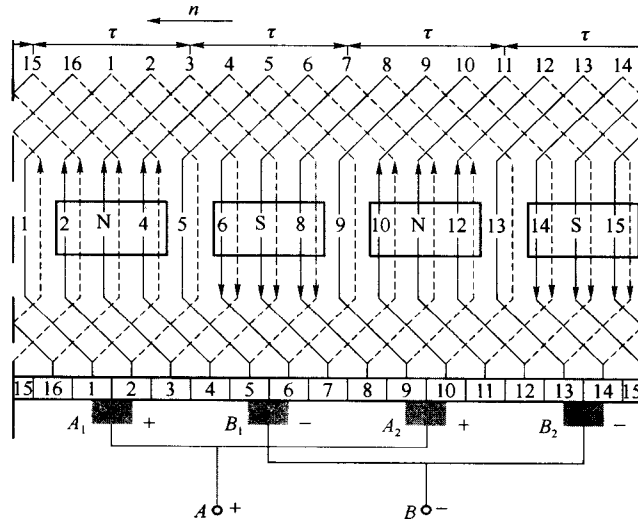


图 2.3.3 单叠绕组展开图

一般情况下绕组元件的形状都是对称的。所以每个元件连接的两个换向片的分界线正好对准该元件的轴线。这样就确定了换向片与绕组元件的相对位置,换向片画在展开图的下部。

### 3. 绕组电路分析

设电动机按逆时针方向旋转,这在图 2.3.3 中相当于绕组向左边运动。运用左手定则可得出 N 极下元件边的电流方向向上 S 极下元件边的电流方向向下,所以电刷  $A_1$  和  $A_2$  应当接到电源的正极,电刷  $B_1$  和  $B_2$  应当接到电源的负极。在图示瞬间,电刷通过换向器将 1 号、5 号、9 号和 13 号元件短路,整个绕组形成 4 条并联支路 这 4 条并联支路是:

- (1) 电刷  $A_1$ ——元件 2——元件 3——元件 4——电刷  $B_1$ ;
- (2) 电刷  $A_2$ ——元件 8——元件 7——元件 6——电刷  $B_1$ ;
- (3) 电刷  $A_2$ ——元件 10——元件 11——元件 12——电刷  $B_2$ ;
- (4) 电刷  $A_1$ ——元件 16——元件 15——元件 14——电刷  $B_2$ 。

由此得出电枢绕组的并联支路图,如图 2.3.4 所示。由绕组展开图可以看出,除了两边位于几何中性线上被电刷短路的绕组元件不产生电磁转矩,其余的绕组元件有效边都产生同一方向的电磁转矩。

如果是直流发电机,可以根据电枢旋转方向,用右手定则判断出各元件边的电动势方向。从而定出电刷的极性,同样也可以得出将电刷  $A_1$  和  $A_2$  并联、 $B_1$  和  $B_2$  并联的结论。

同时还可以看到，在同一并联支路中，各绕组元件的感应电动势方向相同，这些电动势串联起来构成支路的总电动势，也就是电枢电动势（即刷间电动势）。当元件被电刷短路时，它的有效边处在主磁极磁通密度很小的范围内，这就保证了发电机能够获得最大电动势。分析同一条支路中各元件在展开图上的位置就可以发现，单叠绕组的每条支路都是由上层边处在同一磁极下的绕组元件串联起来组成的。因此，单叠绕组的并联支路数必然等于磁极数。设并联支路对数 两条支路为一对为  $a$  磁极对数为  $p$  则

$$a = p \quad (2-14)$$

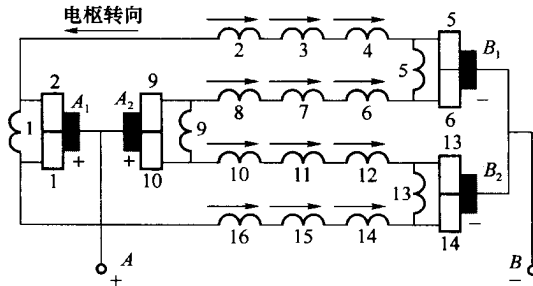


图 2.3.4 并联支路图

以上分析可以总结出，单叠绕组具有以下特点：

- (1) 元件的两个出线端连接于相邻两个换向片上；
- (2) 并联支路等于磁极数  $2a = 2p$ ；
- (3) 整个电枢绕组的闭合回路中，感应电动势的总和为 0 绕组内部无“环流”；
- (4) 每条支路由不相同的电刷引出，所以电刷数等于磁极数；
- (5) 正负电刷之间引出的电动势即为每一支路的电动势，电枢电压等于支路电压；
- (6) 由正负电刷引出的电枢电流  $I_a$  为各支路电流之和 即  $I_a = 2ai_a$  (式中  $i_a$  为每一条支路的电流，即绕组元件中流过的电流)。

### 2.3.3 单波绕组

波绕组的特点是每个绕组元件的两端所接的换向片相隔较远，互相串联的两个元件也相隔较远，连接成整体后的绕组像波浪形，因而称为波绕组。如图 2.3.5 所示。

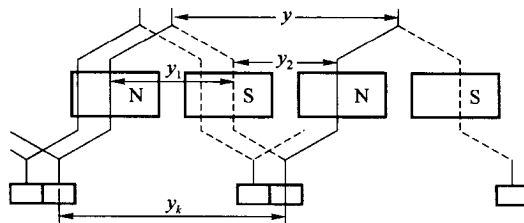


图 2.3.5 单波绕组的连接情况

单波绕组具有以下特点：