

电机与拖动考试 参考书

全国成人高等学校职业教育专业课入学统一考试参考丛书
根据国家教育委员会制订的《复习考试大纲》编写

《电机与拖动考试参考书》编写组

中国经济出版社

前 言

1995 年国家教育委员会制定了《全国成人高等职业教育专业课复习考试大纲》。广大考生在使用该大纲进行复习备考时,由于缺少统一的教材而遇到了很大的困难。为了解决这个问题,我们组织编写和审查大纲的教授、专家,遵照大纲的要求编写了这套《全国成人高等学校职业教育专业课入学统一考试参考丛书》。此书的特点是综合性、系统性、专业性较强,同时注意到了实用性和针对性,可以帮助考生提高知识和能力水平。

考生复习备考的范围和程度以各科的《全国成人高等职业教育专业课复习考试大纲》为准。

本丛书共有 36 种:包括《会计基础》、《计算技术》、《经济法基础》、《商品知识》、《营销基础知识》、《实用公共关系》、《应用文与写作》、《旅游概论》、《礼仪规范》、《烹调技术》、《烹饪原料加工技术》、《有机化学》、《药剂学》、《中药学》、《中医基础学》、《人体解剖学》、《生理学》、《机械基础》、《机械制造工艺基础》、《机械制图》、《电工基础》、《电子技术基础》、《计算机应用基础》、《BASIC 语言》、《化工分析》、《化工基础》、《化学肥料》、《炼钢生产管理》、《轧钢生产管理》、《高炉冶炼技术知识及生产管理》、《建筑材料》、《金属切削原理与刀具》、《建筑结构》、《施工技术基础知识》、《电机与拖动》、《电路基础》。

希望各科专家和广大读者提出宝贵意见,待有机会再版时进一步完善。

这套丛书经国家教育委员会考试中心审定,并作为推荐用书。

国家教育委员会考试中心

1996 年 4 月 26 日

目 录

第一部分 直流电机	(1)
一、概述	(1)
二、知识要点	(2)
(一) 直流电机的基本知识及主要结构部件	(2)
(二) 电枢反应及换向	(2)
(三) 直流发电机	(2)
(四) 直流电动机	(2)
(五) 直流电动机的机械特性	(2)
(六) 直流电动机的调速	(3)
(七) 直流电动机的使用	(3)
(八) 直流电机实验	(3)
三、学习指导	(3)
(一) 直流电机的基本知识及主要结构部件	(3)
(二) 电枢反应及换向	(10)
(三) 直流发电机	(13)
(四) 直流电动机	(18)
(五) 直流电动机的机械特性	(21)
(六) 直流电动机的调速	(24)
(七) 直流电动机的使用	(28)
(八) 直流电机实验	(32)
四、基本训练	(33)
(一) 例题	(33)
(二) 自测题	(37)
第二部分 变压器	(39)
一、概述	(39)
二、知识要点	(40)
(一) 变压器的基本知识及主要结构部件	(40)
(二) 单相变压器空载运行分析	(40)
(三) 单相变压器负载运行分析	(40)
(四) 三相变压器	(41)
(五) 变压器的并联运行	(41)
(六) 其他用途变压器	(41)
三、学习指导	(41)
(一) 变压器的基本知识及主要结构部件	(42)

(二) 单相变压器空载运行分析	(44)
(三) 单相变压器负载运行分析	(49)
(四) 三相变压器	(54)
(五) 变压器的并联运行	(59)
(六) 其他用途变压器	(60)
四、基本训练	(63)
(一) 例题	(63)
(二) 自测题	(65)
第三部分 三相异步电动机	(67)
一、概述	(67)
二、知识要点	(67)
(一) 异步电动机的基本知识及主要结构	(67)
(二) 异步电动机的运行分析	(68)
(三) 起动和调速	(68)
三、学习指导	(68)
(一) 异步电动机的基本知识及主要结构	(68)
(二) 异步电动机的运行分析	(70)
(三) 起动和调速	(77)
四、基本训练	(82)
(一) 例题	(82)
(二) 自测题	(85)
第四部分 同步电机	(87)
一、概述	(87)
二、知识要点	(87)
(一) 同步电机的分类和基本结构	(87)
(二) 同步电机的额定值和型号	(88)
(三) 同步发电机的基本原理	(88)
(四) 同步发电机的电枢反应	(88)
(五) 隐极机的同步电抗	(88)
(六) 隐极机的等值电路和相量图	(88)
(七) 同步发电机的外特性、调整特性	(88)
(八) 同步发电机的并列条件	(88)
(九) 隐极机的功角特性	(88)
(十) 有功功率的调节	(88)
(十一) 无功功率的调节、U 形曲线	(88)
(十二) 同步电动机和调相机	(89)
三、学习指导	(89)
(一) 同步电机的分类和基本结构	(89)
(二) 同步电机的额定值和型号	(90)

(三) 同步发电机的基本原理	(91)
(四) 同步发电机的电枢反应	(91)
(五) 隐极机的同步电抗	(94)
(六) 隐极机的等值电路和相量图	(95)
(七) 同步发电机的外特性、调整特性	(96)
(八) 同步发电机的并列条件	(97)
(九) 隐极机的功角特性	(97)
(十) 有功功率的调节	(99)
(十一) 无功功率的调节、U 形曲线	(99)
(十二) 同步电动机和调相机	(102)
四、基本训练	(105)
(一) 例题	(105)
(二) 自测题	(106)
第五部分 电力拖动的初步知识	(108)
一、电力拖动的组成	(108)
二、生产机械的机械特性	(109)
三、电力拖动系统的运动方程式	(110)
四、电力拖动系统稳定运行的条件	(110)
五、电动机的选择	(111)
六、自测题	(112)
自测题参考答案(部分)	(113)
附录:	
1996 年成人高等学校职业教育招生专业课全国统一考试电机与拖动试题及答案	(115)

第一部分 直流电机

一、概 述

直流电机是实现直流电能和机械能相互转换的电气设备。其中，把机械能转换成直流电能的称为直流发电机；把直流电能转换成机械能的称为直流电动机。

直流发电机的主要功能是提供直流电能。电动势是直流发电机的一个重要物理量，因此，应掌握它的建立条件、影响它大小及方向的因素；当负载变化时，直流发电机的端电压如何变化以及怎样调节端电压的大小。

直流电动机的主要作用是从轴端输出机械能。电磁转矩和转速是直流电动机的重要物理量，因此，要掌握直流电动机的机械特性和直流电动机的起动、调速、反转和制动等问题。

学习直流电机时应注意以下两方面：

1. 认识直流电机的可逆性

直流电机是直流发电机和直流电动机的总称。一台直流电机，从理论上来说，既可作为发电机，又可作为电动机，区别在于它的输入的能量形式，如图 1-1 所示。

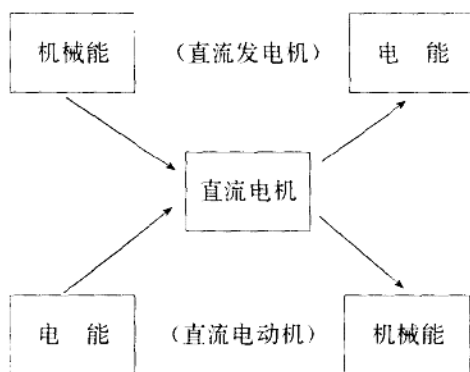


图 1-1 直流电机的能量转换方式

当在直流电机轴上加驱动力矩使电机转动起来时，电机便发出直流电动势，这时的直流电机是作发电机运行；仍是这台电机，当外加直流电源时，电机转动起来，从轴端输出转矩，带动机械负载，这时直流电机是作电动机运行。这就是直流电机的可逆性。

直流电机在运行中，不论是发电机还是电动机，都会发生电动机工作状态与发电机工作状态的相互转换。由于存在可逆性，直流发电机和直流电动机在构造上和电、磁关系上是一致的。

2. 掌握直流电机工作的基本公式

直流电机工作的内部规律表现为两个平衡方程式——电压平衡方程式和转矩平衡方程式，以及两个公式——电动势公式和电磁转矩公式。它们是分析直流电机的基本依据，在学习中应认真掌握，并善于运用这些规律去分析问题。

本书所复习的直流电机知识，主要包括以下内容：

- (一) 直流电机的基本知识及主要结构部件；
- (二) 电枢反应及换向；
- (三) 直流发电机；
- (四) 直流电动机；
- (五) 直流电动机的机械特性；
- (六) 直流电动机的调速；
- (七) 直流电动机的使用；
- (八) 直流电机实验。

二、知识要点

(一) 直流电机的基本知识及主要结构部件

- 1. 直流发电机的工作原理；
- 2. 直流电动机的工作原理；
- 3. 直流电机的主要结构部件；
- 4. 直流电机分类和型号；
- 5. 直流电机的额定值。

(二) 电枢反应及换向

- 1. 直流发电机的电枢反应；
- 2. 直流电动机的电枢反应；
- 3. 直流电机的换向；
- 4. 改善换向的方法。

(三) 直流发电机

- 1. 直流发电机的电动势和电磁转矩；
- 2. 他励发电机；
- 3. 并励发电机；
- 4. 复励发电机。

(四) 直流电动机

- 1. 直流电动机的电磁转矩和反电动势；
- 2. 直流电动机的基本方程式。

(五) 直流电动机的机械特性

- 1. 他励、并励电动机的机械特性；
- 2. 串励电动机的机械特性；
- 3. 复励电动机的机械特性；
- 4. 如何估算机械特性。

(六) 直流电动机的调速

1. 改变励磁磁通调速；
2. 电枢回路串电阻调速；
3. 改变电枢电压调速。

(七) 直流电动机的使用

1. 联接；
2. 起动；
3. 反转；
4. 制动。

(八) 直流电机实验

1. 直流电动机的起动、反转和调速；
2. 并励发电机的电压建立；
3. 并励发电机的外特性 $U=f(I)$ 实验；
4. 他励电动机机械特性 $n=f(T)$ 的测定。

三、学习指导

(一) 直流电机的基本知识及主要结构部件

1. 直流发电机的工作原理

图 1—2 是两极直流电机的原理示意图，线圈 $abcd$ 的引出端分别与同轴的两个半圆形铜环相联接，半圆形铜环之间相互绝缘。两铜环分别与固定在端盖上的电刷 A、B 构成滑动接触。线圈 $abcd$ 通过电刷与外电路构成闭合回路。

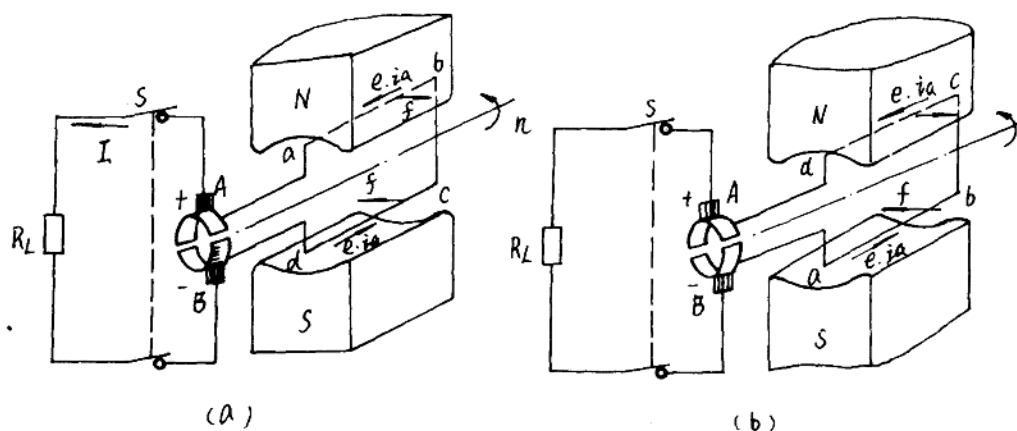


图 1—2 直流发电机原理示意图

当原动机带动线圈 $abcd$ 以转速 n 逆时针旋转时, 导体 ab 、 cd 因切割磁力线而产生感应电动势。电动势的大小为 $e = Blv$, 方向用右手定则判定, 如图 1—2a 所示。两段导体产生的电动势串联相加便是线圈两端的合成电动势 $2e$ 。当接上负载电阻时, 在电动势 $2e$ 的作用下, 回路中就有电流 i 流过。外电路的电流方向为由 A 到 B , 也就是说电刷 A 为正极, 电刷 B 为负极。

当线圈 $abcd$ 转过 180° 之后, 导体 ab 、 cd 感应电动势的方向与图 1—2a 中的相反, 如图 1—2b 所示, 线圈的合成电动势仍为 $2e$, 电刷 A 仍为正极, 电刷 B 仍为负极, 因而负载电阻中的电流方向没有变。也就是说, 线圈 $abcd$ 中的电动势和电流是交变的, 但通过半圆形铜环使电刷 A 、 B 两端得到了方向不变的直流电动势。这是因为电刷 A 总是和处在 N 极下的导体相接, 电刷 B 总是和处在 S 极下的导体相接, 它们的极性始终不变。产生电动势的线圈 $abcd$ 叫做电枢绕组, 两个半圆形铜环叫做换向器 (或整流子)。

两极单个线圈产生的电动势, 波形如图 1—3a 所示, 脉动太大。解决的方法是在转子铁芯上均匀嵌放多个线圈, 换向铜环的数目也相应增加。图 1—3 (b) 中的曲线 2 与 3 分别为转子上有两个线圈和四个线圈时电动势的波形。可见随着每个磁极下线圈数目的增多, 电刷两端电动势的脉动程度逐渐减小。当每个磁极下的线圈数目大于 8 时, 电动势的脉动程度将小于 1%。这时可认为电刷两端的电动势是大小及方向都恒定不变的直流电动势。

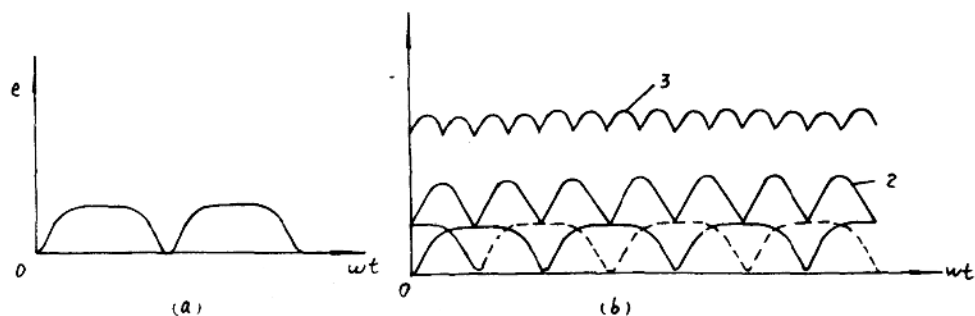


图 1—3 直流电机的电势波形图

当直流发电机接上负载而在电枢绕组中流过电流 i_a 时, 电枢绕组就成为载流线圈, 它在磁场中要受到电磁力的作用, 该电磁力 f 的大小为 $f = BLi_a$, 电磁力的方向用左手定则判定, 如图 1—2 (a) 所示。两个力 f 将产生一个顺时针的转矩 T , 这个转矩由电枢电流和磁场相互作用而产生, 称为电磁转矩。由图 1—2a 可见直流发电机的电磁转矩与原动机的驱动转矩方向相反, 原动机必须克服这个制动性的电磁转矩和空载转矩才能带动发电机转子旋转。所以, 在直流发电机向负载电阻供电的同时, 原动机必须向发电机输入机械能。输出的电能越多, 需要输入的机械能也越多, 这时直流电机不断地将机械能转变成电能。

2. 直流电动机的工作原理

图 1—4 是直流电动机的工作原理示意图。直流电源加在电刷 A 、 B 两端, 它与电枢绕组构成闭合回路, 在电枢绕组中流过电流 i 。图 1—4a 中电流的流向为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$, 产生的电磁力 f 的方向为 N 极极面向左, S 极极面向右, 形成逆时针的电磁转矩驱使电机转子

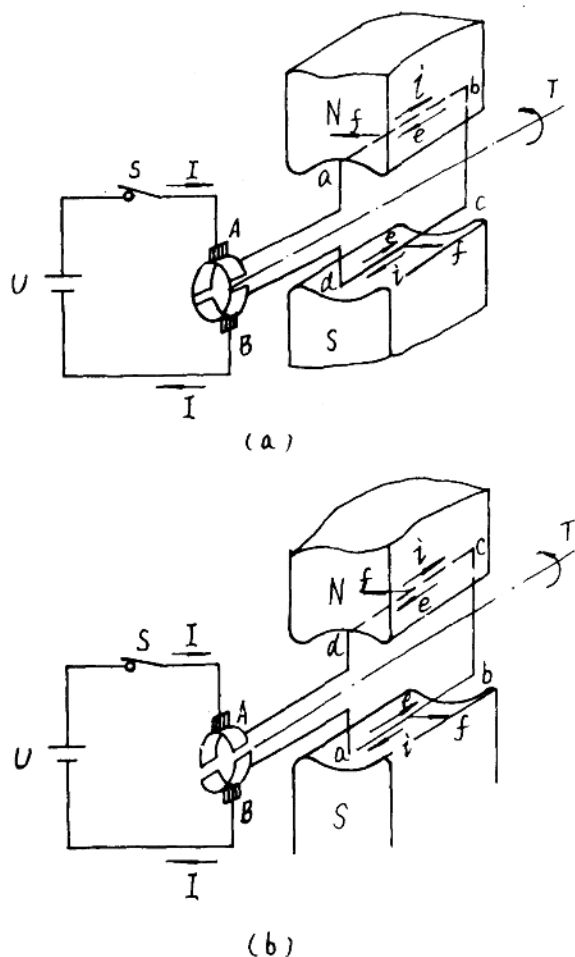


图 1—4 直流电动机的原理示意图

逆钟向转动。图 1—4b 所示是电枢绕组旋转 180° 之后的位置，这时电枢绕组中电流的流向为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ，导体产生的电磁力仍然是在 N 极下向左、 S 极下向右，电磁转矩仍为逆钟向。可见，由于电刷和换向器互相配合的作用，在 N 极下和 S 极下的导体中，电流的流向不变，因而产生的电磁转矩方向也不变，使直流电机向恒定的方向旋转。

在电磁转矩的驱动下，直流电动机带动轴上的机械负载旋转并向负载输出机械功率。由于转子的旋转，使电枢绕组切割磁力线而产生感应电动势，该电动势 e 的方向用右手定则判定，它与电流 i 的方向相反，称为反电动势，如图 1—4 所示。外加电压必须克服这个反电动势才能向电机输入电能。可见，在直流电动机向负载输出机械功率的同时，直流电源必须向电机输送电功率，这时直流电机不断地将电能转换成机械能。

综上所述，可得如下结论：

(1) 直流电机具有双向机——电能量转换的功能，称为直流电机的可逆性。直流电机

的运行状态取决于所加驱动能量的形式。

(2) 电刷和换向器组成的机械整流装置的作用：对发电机来说，是将电枢绕组内部的交流电转换成电刷之间的直流电；对电动机来说，是将外施的直流电转换成电枢绕组内部的交流电。

3. 直流电机的主要结构部件

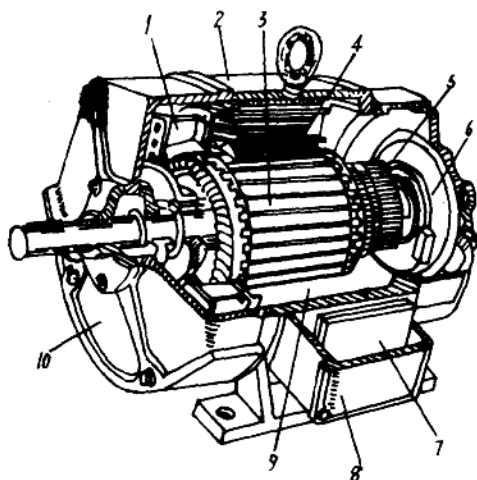


图 1—5 直流电机的结构剖图

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

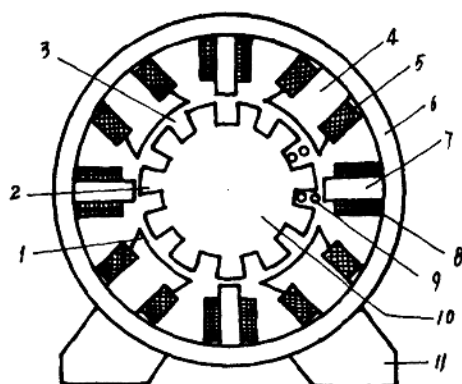


图 1—6 直流电机的剖面示意图

1—极靴，2—电枢齿，3—电枢槽，4—主磁极，5—励磁绕组，6—磁轭（机座），
7—换向极，8—换向极绕组，9—电枢绕组，10—电枢铁芯，11—底脚

直流电机分为固定不动部分和转动部分，前者称为定子，后者称为转子。直流电机的磁极装在定子上，电枢绕组和换向器装在转子上。图 1—5 为直流电机的结构剖图，图 1—6 为直流电机结构剖面示意图。

(1) 定子

定子是用来产生磁场的。定子由主磁极、换向极、机座、端盖、轴承以及电刷装置等部件组成。

①主磁极 主磁极的作用是产生主磁通。除小型直流电机用永久磁铁作磁极外，一般均用电磁铁来产生磁场。图 1—7a 为主磁极结构图。主磁极由铁芯及励磁绕组两部分组成。铁芯采用 1~1.5mm 厚的钢板冲片叠压而成。铁芯分为极芯和极靴两个部分，极芯上放置励磁绕组，铁芯与绕组之间垫有绝缘，极靴的作用是使电机气隙中的磁通密度分布最合理，并且用它托住励磁绕组。

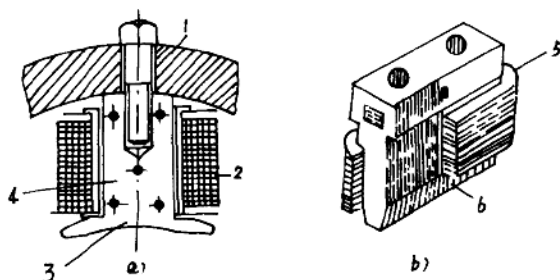


图 1—7 主磁极和换向极的结构

a 主磁极结构，b 换向极结构

1—机座，2—主磁极励磁绕组，3—极靴，4—主磁极极芯，5—换向极绕组，6—换向极铁芯

②换向极 换向极的作用是产生一个附加磁场，用以改善电机的换向。换向极也是由铁芯和绕组组成，其数量与主磁极相同或是其一半，其结构如图 1—7b 所示。

③机座 机座是电机的外壳，是整个电机的机械支撑部件，借助底脚将电机固定在基础上。它还用来固定主磁极、换向极和端盖，同时它又是电机磁路的一部分，机座的导磁部分称为定子磁轭。机座通常用铸钢或钢板焊接而成。

④电刷装置 电刷装置由电刷、刷杆、刷握和刷杆座等部件组成，如图 1—8 所示。电刷放在特制的刷盒内，用压指和弹簧压在换向器表面上，保持滑动接触。借助铜丝辫来导通电流。根据电流的大小每一刷杆上可由几个电刷组成电刷组，电刷组的数目等于主极的数目，并且要求它们在换向器表面上分布的距离相等。为了便于调整电刷的位置，刷杆都装在一个可以转动的座圈上。

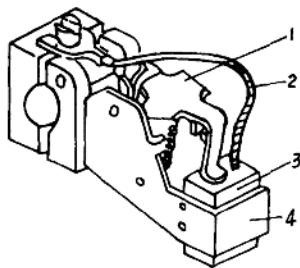


图 1—8 电刷装置

1—压指，2—刷辫，3—电刷，4—刷盒

电刷装置的作用是通过固定的电刷与换向器之间的滑动接触，把外部电路与电机的转子电路联接起来。

⑤端盖 端盖用来支持转子的转轴，端盖中心放有轴承。电刷架也固定在端盖上。

(2) 转子

直流电机的转子由电枢铁芯、电枢绕组、换向器和轴等主要部分组成，如图 1-9 所示。

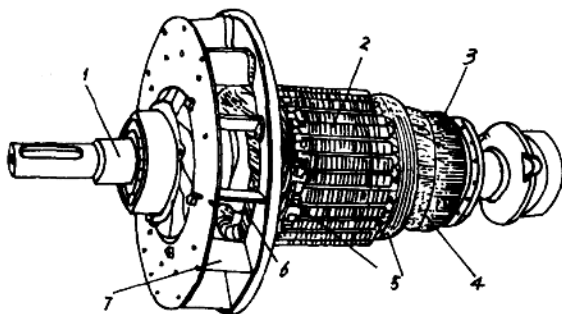


图 1-9 直流电机转子

1—转轴，2—电枢铁芯，3—换向器，4—电枢绕组，5—镀锌钢丝，6—电枢绕组，7—风扇

①电枢铁芯 电枢铁芯也是磁路的一部分，是嵌放电枢绕组的地方。电枢铁芯采用 0.5mm 厚的硅钢片叠压而成，片间用漆膜绝缘以减少涡流损耗。沿铁芯外圆冲有槽，槽中嵌放电枢绕组。为了加强电机的冷却，在电机铁芯上开有轴向通风孔、轴上装有冷却用的风扇。

②电枢绕组 电枢绕组是产生电动势、电流和电磁转矩的，是电机实现机—电能量转换的关键部分。电枢绕组由许多相同的线圈组成，每个线圈端部按一定规律焊接到换向片上，如图 1-10 所示。

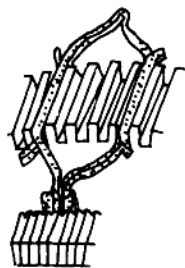


图 1-10 电枢绕组的安放情况

③换向器 换向器装在转轴的一端，是完成交、

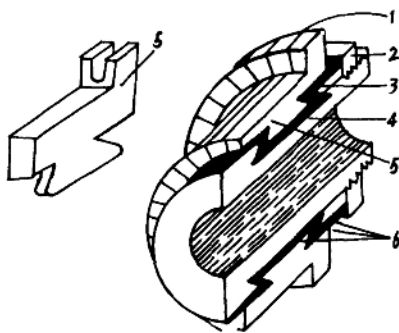


图 1-11 换向器结构剖面图

1—片间云母，2—锁紧螺母，3—V 形环，4—套筒，5—换向片，6—云母绝缘

直流变换作用的部件。图 1—11 是换向器结构的剖面图。换向片由楔形铜片做成。在铜片之间以云母或者塑料绝缘隔开，用套筒和锁紧螺母把换向片组成一个圆柱体。

4. 直流电机的分类和型号

(1) 直流电机的分类

直流电机的性能受到励磁绕组联接方式的影响，所以直流电机一般按励磁方式来分类，有他励式、并励式、串励式和复励式四种。图 1—12 所示为直流电机的励磁方式及图形符号。当做为直流发电机时文字符号标作“G”，做为直流电动机时文字符号标作“M”。

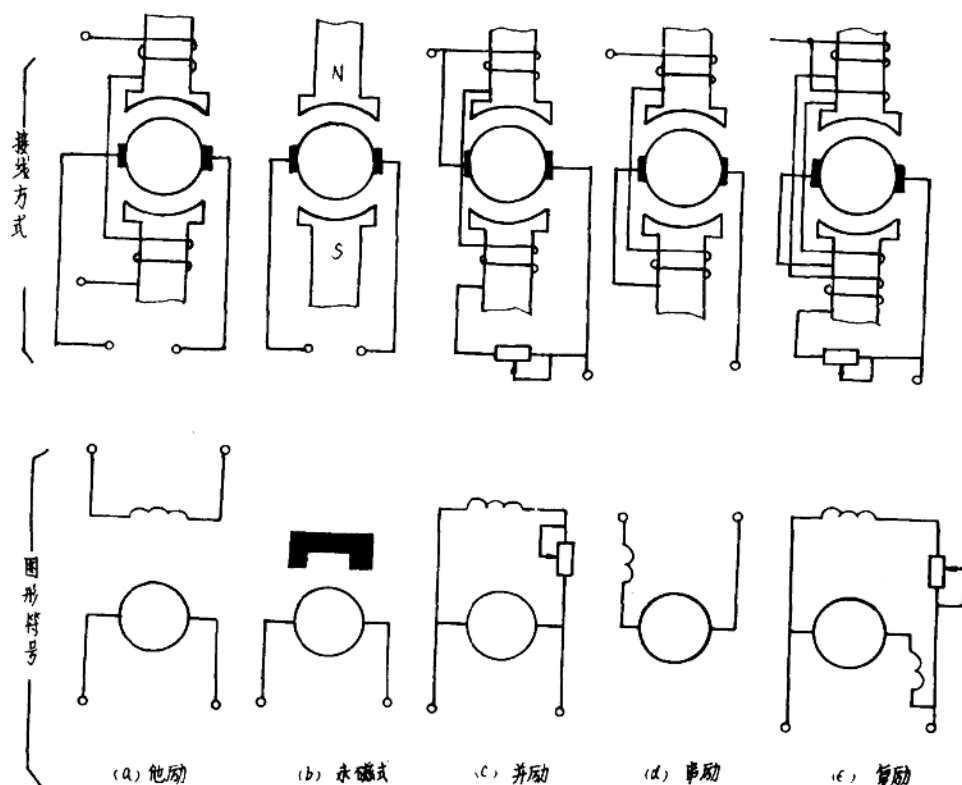
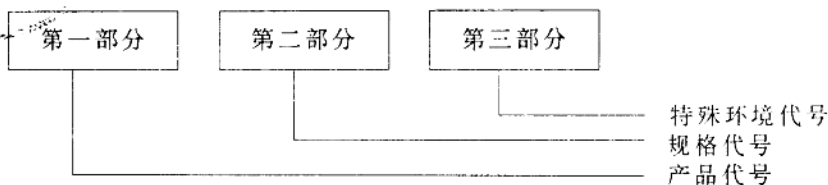


图 1—12 直流电机的励磁方式及符号

(2) 直流电机的型号

直流电机的型号由三部分组成，其含义为

①产品代号 由类型代号和设计序号组成。例如类型代号 Z 表示直流电动机，ZF 表示直流发电机。设计序号用阿拉伯数字表示，如 Z2 表示第二次改型设计的直流电动机。



②规格代号 小型直流电机通常采用以下两种表示方法。

一种是表示机座直径号数及铁芯长度号数 (1 表示短铁芯, 2 表示长铁芯, 或用 S 表示短铁芯, M 表示中铁芯, L 表示长铁芯)。例如 Z2—102 表示 10 号机座, 2 号铁芯 (长铁芯)。

另一种是由两组数字组成, 中间用一短横隔开, 例如 Z4—132—1 表示中心高为 132mm, 1 号端盖结构。

③特殊环境代号 表示在特殊条件下使用的代号, 如表 1—1 所示。例如 ZF—90S—TH, 表示适合于湿热带用、机座中心高为 90mm、短铁芯的直流发电机。

表 1—1 特殊环境代号

特殊环境条件	代号	特殊环境条件	代号
高原用	G	热带用	T
海船用	H	湿热带用	TH
户外用	W	干热带用	TA
化工防腐用	F		

5. 直流电机的额定值

表征电机在额定工作状态下运行时的数据叫额定值。它是使用 and 选择电机的基本依据。

(1) 额定电压 是指直流电机在额定工作状态下运行时的线端电压, 用 U_N 表示, 单位为 V (伏)。

(2) 额定转速 是指直流电机在额定工作状态下运行时的转速, 用 n_N 表示, 单位为 r/min (转/分)。

(3) 额定功率 用 P_N 表示, 单位为 KW (千瓦)。对发电机来说, 是指电枢端点输出的电功率, 它等于额定电压和额定电流的乘积, 即

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

对电动机来说, 是指轴端输出的机械功率, 它等于输入的电功率乘以效率, 即

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

(4) 额定电流 I_N , A (安) 和额定励磁电流 I_{fN} , A (安)。

(二) 电枢反应及换向

直流电机在空载运行时气隙磁场只有主磁极励磁绕组产生的磁场, 称为直流电机的主磁场, 如图 1—13 所示。直流电机带上负载之后, 电枢绕组中流有电流, 它在气隙中产生的磁场称为电枢磁场, 如图 1—14 所示。电枢磁场对主磁场的影响称为直流电机的电枢反应。

1. 直流发电机的电枢反应

将图 1—13 与图 1—14 叠加在一起就得到直流发电机带负载时的磁场分布图, 如图

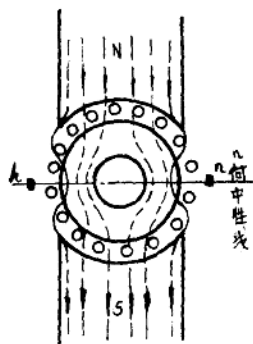


图 1-13 电机的主磁场

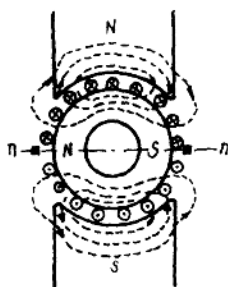


图 1-14 电枢磁场

1—15 所示。可见，电枢反应使气隙磁场发生歪扭，电枢沿旋转方向进入磁极的一端磁场减弱，而离开磁极的一端磁场增强，使合成磁场为零的轴线从几何中性线（两个磁极之间的空间分界线）顺转向移动一个位置。发电机的磁路处于不饱和状态时，因每极的磁通总量并没有变化，可以忽略电枢反应的影响，中、小型电机一般属于这种情况。

如果直流发电机工作在磁路接近饱和区域时，电枢反应不仅使气隙磁场歪扭，而且还使主磁场削弱，为了保证气隙磁通量不变，应增加励磁磁动势 $N_f I_f$ 来补偿电枢反应的去磁作用，否则将使直流发电机的电动势减小。

2. 直流电动机的电枢反应

直流电动机的合成磁场分布如图 1—16 所示。电枢沿转向进入磁极的一端磁场增强，离开磁极的一端磁场减弱，磁场为零的轴线从几何中性线逆转向移动了一个位置。这是因为在电机的转向和励磁磁场方向不变时，电动机的电枢电流与发电机的电枢电流方向相反之故。

同样，当工作在接近磁路饱和状态时，电动机的电枢反应也产生去磁作用，补偿的方法与发电机的相同。

3. 直流电机的换向

(1) 简述换向过程

换向是指直流电机的电枢绕组元件从一条支路经过电刷进入另一条支路时，绕组元件中电流改变方向的过程。

图 1—17 所示为电枢绕组中 $abcd$ 线圈的换向过程（图中用粗实线画出）。当电刷仅与换向片 1 接触时如图 1—17a 所示， $abcd$ 线圈中电流等于电枢绕组的支路电流 i_a ，电流方向为

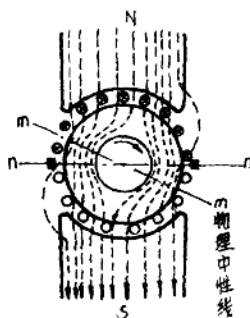


图 1-15 直流发电机的合成磁场

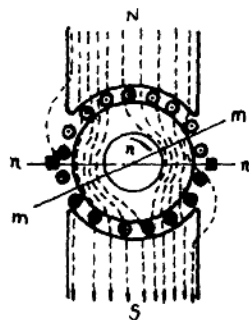


图 1-16 直流电动机的合成磁场

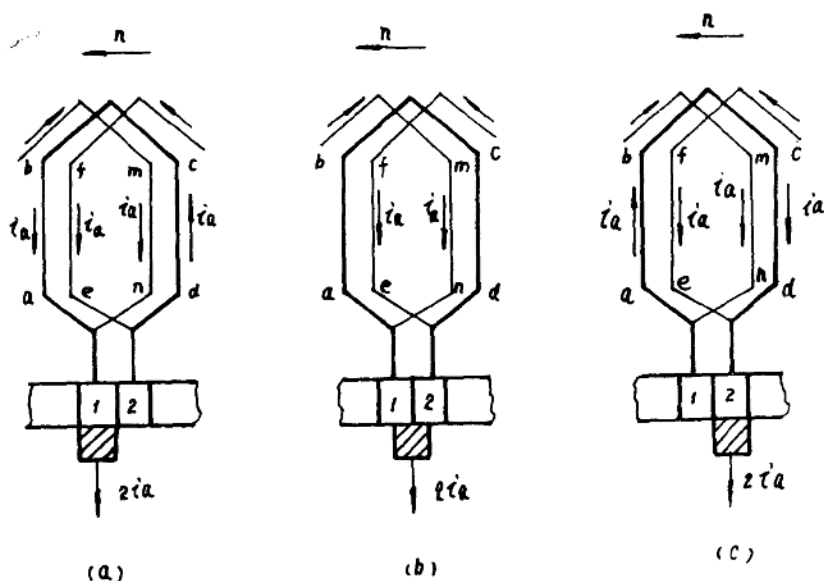


图 1-17 直流电机电枢绕组元件的换向过程

a 换向开始瞬间, b 正在换向瞬间, c 换向结束瞬间

逆钟向。当电刷同时与换向片 1、2 相接触时如图 1—17b 所示, 线圈的 ab、cd 导体正处于磁场的几何中性线上, 感应电动势为零, 并且被电刷短路, abcd 线圈中没有电流, 此时电刷电流是由 ef、mn 导体提供的。当电枢再向右移动使电刷只与换向片 2 接触时如图 1—17c 所示, 线圈 abcd 进入另一条支路, 流过电流 i_a 的方向变为顺钟向。直流电机运行时, 电枢绕组中的每个元件在经过电刷时, 都要经历上述的换向过程。

(2) 换向过程中存在的问题

直流电机换向时, 会在电刷与换向片之间产生火花。当火花超过一定限度时, 有可能损坏电刷和换向器表面, 从而使直流电机不能正常运行。按国家标准规定火花等级分为五级: 1 级、 $1\frac{1}{4}$ 级、 $1\frac{1}{2}$ 级、2 级、3 级 (具体内容可参阅有关教材)。电机正常运行时, 火花应不超过 $1\frac{1}{2}$ 级。

换向时产生火花的原因有: 电磁原因、机械原因、化学原因。下面仅指出产生火花的电磁原因。

①自感电动势 当电枢中某一线圈在换向时, 电流由换向前的 $+i_a$ 变为换向后的 $-i_a$, 会在线圈内产生自感电动势。这个电动势与线圈换向前的电流同方向, 是阻碍电流变化的, 也就是阻碍换向的。

②电枢反应电动势 由于电枢反应的影响, 电机的合成气隙磁场被扭歪, 使几何中性线 (两个磁极之间的空间分界线) 处的磁通不再为零, 因而处于该处的换向元件会产生一个电枢反应电动势, 该电动势也与线圈内换向前的电流方向一致, 它也是阻碍电流变化的。

自感电动势和电枢反应电动势都在换向元件内产生阻碍换向的附加电流, 在换向过程中使线圈内储存磁场能以火花形式释放出来。