

中等专业学校试用教材

电机 电源

南京铁路运输学校 林瑜筠 编

中国铁道出版社

1994年·北京

前 言

《电机电源》教材是根据1982年制订的铁路中等专业学校信号专业教学大纲编写的，1984年审稿时根据实际需要部分内容进行了增删。本教材分为电机、信号电源两大部分。电机部分包括直流电动机和交流电动机，信号电源部分包括信号设备供电概况、变压器、交流稳压器、电源屏、变频设备、蓄电池和硅太阳电池，共八章。每章后附有小结和习题，以加深对教材内容的理解。

本教材在编写过程中，注意了以下几个方面：

1. 考虑到我国铁路信号设备迅速发展的情况，尽量搜集最新的技术资料，近几年来出现的各种新型的信号电源设备都引入了本教材。

2. 为贯彻理论联系实际的原则，各种电机、电源设备的正确使用及维护保养都作为教材的一个重要部分。

3. 为提高学生的学习能力，以适应科学技术不断发展的需要，本教材改进了叙述方法。在前几章，先将电源设备的基本知识、基本理论讲清楚，到第六章电源屏时，屏中的主要部件已经掌握，只要以一、二种电源屏为例重点介绍电路构成原则，其它繁多的种类就可以让学生举一反三，触类旁通。这样，既解决了课时少和内容多的矛盾，又在一定程度上培养了学生用基础理论解决工程技术实际问题的能力。

4. 我国幅员广大，有着漫长的铁路线，各地信号电源设备有较大差异，为适合各校教学需要，本教材尽量有所兼顾，望各校根据实际需要安排教学内容。

本教材由南京铁路运输学校林瑜筠编写，由西安铁路运输学校孙智主审。参加审稿的有锦州铁路运输学校、柳州铁路运输学校、武汉铁路运输学校、内江铁路机械学校、洛阳铁路电务工程学校的任课老师。

本教材在编写过程中，得到天津信号工厂的大力支持和帮助，在此深表感谢。

由于资料搜集不全，时间仓促，更由于编者水平有限，教材中难免有疏漏、错误及不妥之处，恳切期望各校师生和其它读者提出批评及改进意见，以不断提高教材质量。

编 者

一九八五年六月

(京)新登字063号

内 容 简 介

本教材是根据铁道部教育局制订的《电机电源》教学大纲编写的。内容包括 电机和信号电源两大部分。电机部分介绍直流电动机和交流异步电动机的结构、工作原理、运行特性及使用和维护。信号电源部分介绍信号设备的供电概况，变压器、交流稳压器的结构和工作原理，电源屏、变频设备的电路原理及使用和维护，镉镍蓄电池、硅太阳电池的结构、工作原理及使用。

本教材系铁路中等专业学校信号专业教材，也可供铁路信号工作人员学习参考及职工技术教育之用。

中等专业学校试用教材
电 机 电 源
林瑜筠 编

*

中国铁道出版社出版、发行
(北京市东单三条14号)
责任编辑 倪嘉寒
各 地 新 华 书 店 经 售
北京顺义燕华印刷厂印

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 附图: 1 册 字数: 294 千
1986年11月 第1版1994年4月第3次印刷
印数: 13001—18000 册

ISBN 7-113-01223-X/U·376 定价: 8.90 元

目 录

第一篇 电 机

第一章 直流电动机..... 1

第一节 直流电动机的结构和工作原理..... 1

第二节 直流电动机的电枢绕组及换向..... 6

第三节 直流电动机的运行..... 14

第四节 直流电动机的维护..... 23

本章小结..... 24

习 题..... 25

第二章 交流电动机..... 27

第一节 异步电动机的分类及应用..... 27

第二节 三相异步电动机..... 29

第三节 单相异步电动机..... 47

第四节 直线异步电动机..... 52

本章小结..... 55

习 题..... 56

第二篇 信 号 电 源

第三章 信号设备供电概况..... 58

第一节 信号设备对供电的基本要求..... 58

第二节 信号设备的供电概况..... 60

本章小结..... 65

习 题..... 66

第四章 变 压 器..... 67

第一节 变压器的结构和运行..... 67

第二节 三相变压器..... 76

第三节 电流互感器..... 78

本章小结..... 80

习 题..... 80

第五章 交流稳压器..... 82

第一节 饱和电抗器..... 82

第二节 感应调压器..... 85

第三节 铁磁谐振式交流稳压器..... 90

本章小结..... 95

习 题.....	95
第六章 电源屏.....	97
第一节 概 述.....	97
第二节 控制和保护电器.....	99
第三节 小站电源屏	107
第四节 PX·Z-2.5 型小站电源屏	113
第五节 PX-W2.5 型小站电源屏	117
第六节 DDY型大站电源屏.....	118
第七节 PD ₁ -15型大站电源屏.....	134
第八节 PZ-5型中站电源屏	139
第九节 驼峰电源屏	143
第十节 电源屏的维修	146
本章小结	147
习 题	149
第七章 变频设备	151
第一节 75Hz 变频器.....	151
第二节 25Hz 电源屏.....	160
本章小结	167
习 题	168
第八章 碱蓄电池和硅太阳电池	169
第一节 碱蓄电池	169
第二节 硅太阳电池	176
本章小结	182
习 题	183

附 图 目 录

附图 1	PX·Z-2.5型小站电源屏电路原理图 (X4639).....	1
附图 2	PX-W2.5型小站电源屏电路原理图 (X4653).....	2
附图 3	DDY型大站电源屏的调压屏电路原理图 (X4621).....	3
附图 4	DDY型大站电源屏的交流屏电路原理图 (X4622).....	4
附图 5	DDY型大站电源屏的直流屏电路原理图 (X4623).....	3
附图 6	DDY型大站电源屏的转换屏电路原理图 (X4624).....	6
附图 7	PD ₁ -15型大站电源屏的调压屏电路原理图 (X4609).....	5
附图 8	PD ₁ -15型大站电源屏的转换屏电路原理图 (X4625).....	8
附图 9	PD ₁ -15型大站电源屏的交流屏电路原理图 (X4643).....	10
附图 10	PD ₁ -15型大站电源屏的直流屏电路原理图 (X4652).....	10
附图 11	PZ-5型中站电源屏的调压屏电路原理图 (X4620).....	11
附图 12	PZ-5型中站电源屏的交直流屏电路原理图 (X4641).....	14
附图 13	驼峰电源屏的电空型直流屏电路原理图 (X4647).....	11
附图 14	驼峰电源屏的转换屏电路原理图 (X4657).....	12
附图 15	驼峰电源屏的电池屏电路原理图 (X4658).....	15
附图 16	驼峰电源屏的电动型直流屏电路原理图 (X4659).....	16
附图 17	PZG-900/25、PXG-600/25型25Hz中小站电源屏电路原理图 (X4634、 X4635)	16
附图 18	PDG-1800/25型25Hz大站电源屏电路原理图 (X4633).....	15
附图 19	25Hz特大站电源屏电路原理图 (X4649、X4650、X4651).....	17

第一篇 电 机

电能是现代应用最为广泛的一种能源，它在生产、管理、输送、分配、使用、控制以及能量转换等方面均较方便。而电能的生产、变换和使用都必须利用电机来进行。电机是工业、农业、交通运输业中的重要动力设备，它的主要任务是进行能量转换。按照能量的转换方式，电机可分为：将机械能变为电能的发电机和将电能变为机械能的电动机。发电机是发电厂的主要设备，如将水力、风力、热能、核能等转换为电能，都要使用发电机。而在工业、农业、交通运输业中都用电动机作为动力设备。在国民经济其它各部门和日常生活中，电机的应用也日趋广泛。

在铁路信号设备中，各类电机得到了较广泛的应用。例如，电气路签闭塞机采用了直流发电机；电动臂板信号机、电动转辙机、电动栏木采用了直流电动机；交流计数电码自动闭塞中的电动发码器、中站电源屏的调压屏采用了单相异步电动机；DDY型等大站电源屏的调压屏、道口自动栅栏及驼峰空压室、液压室采用了三相异步电动机。在国外的自动化驼峰编组站上还采用直线电动机来制成电动小车作为连续调速工具。

从基本原理上来看，发电机和电动机只是电机的两种运行方式，它们是可逆的。而从结构上看，电机大体上可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。但必须指出，这样的分类并不是绝对的，它们之间的内在联系极为密切，这样分仅仅是为了便于研究分析，不要机械地把它们割裂开来。

本篇主要介绍直流电动机和交流异步电动机的结构、工作原理、运行特性、正确使用和维护保养的基本知识。

第一章 直流电动机

直流电动机是将直流电能转换为机械能的旋转电机。与交流电动机相比，它虽有结构复杂、价格较贵、故障较多等缺点，但具有良好的起动、制动和调速性能。直流电动机广泛应用于对起动和调速性能要求较高的机械上，以及电车、电力机车上作为动力。由于目前交流电动机在调速性能方面还不能完全满足生产上的要求，因此直流电动机仍占有重要的地位，是电力拖动中的一种主要电机。

第一节 直流电动机的结构和工作原理

一、直流电动机的结构

直流电动机由定子和转子组成，在定子和转子之间留有一定的间隙称为气隙。直流电动

机的结构如图 1—1 所示。

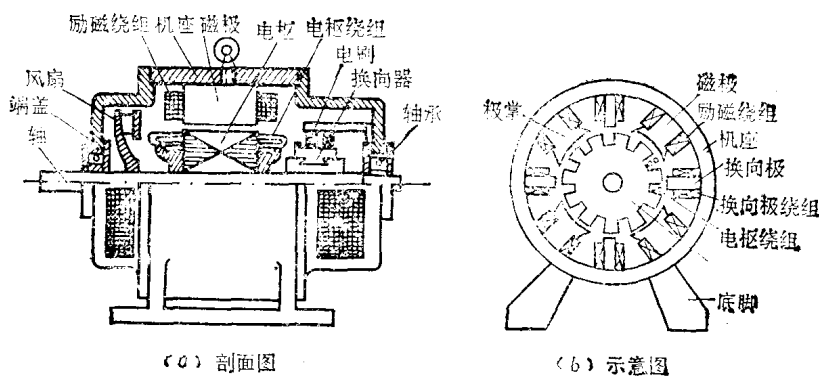


图 1—1 直流电动机的结构

(一) 定 子

定子是直流电动机的静止部分，它由主磁极、换向极、机座、端盖和轴承等组成，电刷装置也固定在定子上。定子的主要作用是产生磁场，并作为电动机的机械支撑。

1. 主 磁 极

主磁极的作用是产生主磁通，它由铁心和绕组组成，如图 1—2 所示。铁心一般由 1~1.5mm 厚的硅钢冲片叠成。主磁极是成对的，各主磁极上的绕组联接必须保证相邻磁极按 *N* 极和 *S* 极依次排列。为了减小气隙中有效磁通的磁阻，改善气隙磁通密度的分布，磁极下的极掌（又称极靴）比极身宽，这样可使绕组牢固地套在磁极上。整个磁极用螺钉固定在机座上。

2. 换 向 极

换向极又称附加极，用来改善电动机的换向。它和主磁极一样，也是由铁心和绕组组成的，如图 1—3 所示。其铁心一般由整块的钢制成，也可用钢片叠成。绕组由匝数不多的带状铜导体绕制而成。换向极安装在两主磁极之间的中心线上，并用螺杆固定在机座上。

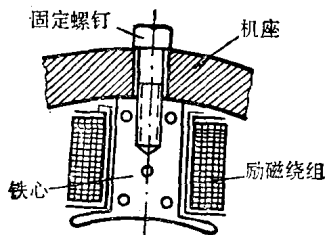


图 1—2 直流电动机的主磁极

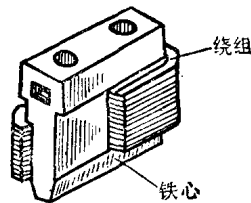


图 1—3 直流电动机的换向极

3. 机 座

机座作为主磁极和换向极磁通所经过的磁路的一部分，并用来固定主磁极、换向极和端盖等，作为电动机的机械支架。机座一般采用铸钢或由钢板焊接而成，小型电动机也有采用铸铁的。其厚度必须保证足够的强度，而且要有足够的截面积，使磁通密度不致过高。机座下部两边焊接或铸出两个底脚，以便与基础固定。

当转子直径不超过 35~45cm 时 装有轴承的端盖也装在机座上。端盖式轴承均采用滚动轴承。

4. 电刷装置

电刷装置用来保持固定的电刷与旋转的换向器间的滑动接触，使外电路和电枢相联接。它由电刷、刷握、压紧弹簧和铜丝辫等组成，如图 1—4 所示。电刷放在刷握内，用弹簧压紧在换向器上，刷握固定在刷杆上，刷杆装在刷杆座上，彼此之间都绝缘。刷杆座装在端盖或轴承内盖上，调整好位置后，将其固定。

刷杆的数目通常等于磁极的数目。刷杆上可装一个或数个刷握。目前多采用碳质、碳—石墨质、黄铜或青铜—石墨质的电刷。一般电刷在换向器上跨接两、三个换向片。同极性的各电刷经汇流线接至电动机的出线端。

(二) 转 子

转子又称电枢，它是直流电动机的转动部分，其作用是产生感应电势和电磁转矩。转子由电枢铁心、电枢绕组、换向器和轴等组成。

1. 电枢铁心

电枢铁心用来嵌放电枢绕组，并作为主磁极和换向极磁通所经过的磁路的一部分，它应有良好的导磁性能。

铁心用 0.5mm 厚的硅钢片冲制叠成，片间以绝缘漆或以其表面的氧化膜作为绝缘。小型电动机的冲片为整块圆形，如图 1—5 所示。用硅钢片可减少铁耗，提高效率。

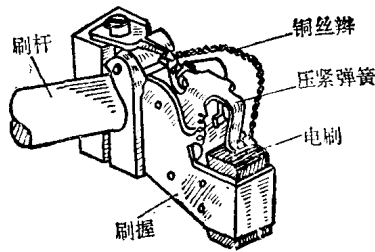


图 1—4 电刷装置

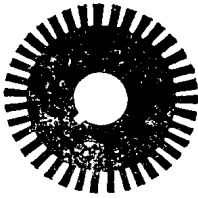


图 1—5 电枢铁心冲片

为了改善电枢的冷却条件，小型电动机采用轴向通风沟，在转子上装有风扇。

2. 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电势、电磁转矩，以实现能量转换。它由嵌放在电枢铁心槽中的绕组元件（绕组中每个线圈的两个出线端各接到一个换向片上，它是绕组的一个单元，称为元件）按一定规律联接而成。绕组元件通常分两层放在槽内。元件在槽内切割磁力线产生感应电势的部分称为有效部分，亦称槽部。伸出槽外用以联接有效部分的称为端接部分，亦称端部，在换向器一端的称为前端部，另一端称为后端部。为避免各元件的端接部分在一个平面内互相交叠，增加弯曲端部分工艺上的麻烦，元件在槽中分两层叠放，在端接部分的中间弯曲，如图 1—6 所示。槽中层与层间，绕组与铁心间均应绝缘。绕组元件的两前端按一定规律焊在换向片上。

3. 换 向 器

换向器用来将输入的直流电流转换为电枢绕组中的交变电流，并保证在每一磁极下电枢导体中的电流方向不变，以产生方向恒定的电磁转矩。换向器有多种形式，常用的有金属套筒换向器和塑料换向器。换向器的导电部分是由许多楔形的、互相绝缘的铜质换向片围成的圆柱体，再用金属套筒或塑料固紧。图 1—7 所示为金属套筒换向器及换向片的结构。套筒和换向片间用云母绝缘。

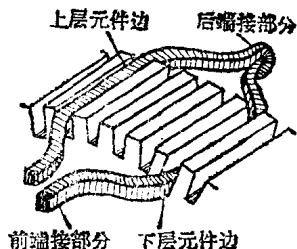


图 1—6 绕组元件在槽中的位置

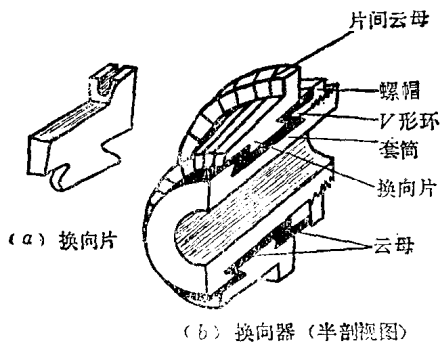


图 1—7 金属套筒换向器及换向片的结构

(三) 气 隙

小型电动机定子和转子间的气隙为 $0.5\sim 3\text{ mm}$ 。其数量虽小，但磁阻很大，是磁路的重要组成部分，对电动机的运行性能有很大的影响。

二、直流电动机的基本原理

图 1—8 所示为一台两极直流电动机的原理图。固定部分主要由两个磁极—— N 极和 S 极组成。磁极可以由永久磁铁制成，但通常是在磁极铁心上绕有励磁绕组，通以一定方向的电流，即可产生从 N 极到 S 极的磁通。转动部分（电枢）绕有线圈 $abcd$ ，电枢在两极之间旋转。线圈的两端分别与固定在轴上的两个半圆铜环相联接。这两个半圆铜环即为换向片，两片间互相绝缘，它们组成最简单的换向器。换向器与两个接通外电路的固定不动的电刷 A 、 B 相接触。

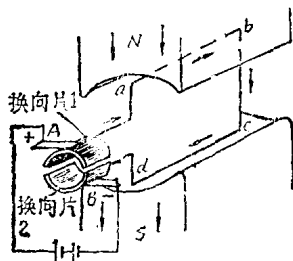


图 1—8 直流电动机原理

将电刷 A 接至电源正极，电刷 B 接至电源负极。电流即从正极流出，经电刷 A 、换向片 1、线圈 $abcd$ 到换向片 2、电刷 B ，最后回到负极。根据皮-萨电磁力定律，载流导体在磁场中受到电磁力的作用，力的方向由左手定则确定。由图 1—8 所示瞬间，导体 ab 中电流的方向由 a 至 b ， ab 所受的电磁力的方向向左，而 cd 中电流的方向由 c 至 d ， cd 所受的电磁力的方向向右。这样就产生了一个转矩，使电枢按逆时针方向旋转。当电枢转过 90° 时，电刷不与换向片而与换向片间的绝缘物接触，此时线圈中没有电流流过，使电枢旋转的转矩消失。但由于机械惯性的作用，电枢仍转动，则电刷 A 、 B 分别与换向片 2、1 接触，线圈中又有电流流过。这时电流从电源正极流出，经电刷 A 、换向片 2、线圈 $dcb a$ 到换向片 1、电刷 B ，回到电源负极。导体 ab 中的电流方向变为由 b 至 a ，所受电磁力的方向向右，而 cd 中的电流方向变为由 d 至 c ，所受电磁力的方向向左，电枢继续按逆时针方向旋转。这样，电枢便能一直旋转下去。

三、直流电动机的分类及应用

直流电动机的运行性能决定于励磁方式，按励磁方式的不同，可将直流电动机分为：

1. 他励电动机——电枢绕组和励磁绕组分别由两个独立的直流电源供电，如图 1—9

(a) 所示。

2. 并励电动机——电枢绕组和励磁绕组并联，由同一直流电源供电，如图 1—9 (b) 所示。某些并励电动机，为稳定其转速，在主磁极上还有少量串励绕组，但仍以并联磁势为主。

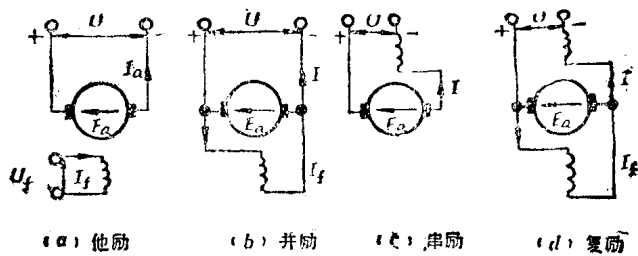


图 1—9 直流电动机的励磁方式

3. 串励电动机——电枢绕组和励磁绕组相串联，如图 1—9 (c) 所示。

4. 复励电动机——有并励和串励两个励磁绕组，它们分别与电枢并联和串联，如图 1—9 (d) 所示。串励绕组与并励绕组的磁势方向相同的，称为积复励；方向相反的，称为差复励。差复励电动机因运行时转速不稳定，故无实际用途。

直流电动机广泛地使用于对起动和调速要求较高的机械上，例如用来拖动轧钢机、电力机车、内燃机车、船舶机械、矿井卷扬机和要求广泛调速的切削机床等。

直流电动机也广泛应用于铁路信号设备中，用得最多的是电动转辙机。如在 ZD₆ 型电动转辙机中采用断续工作制双磁极串励可逆电动机来转换道岔，这是因为串励电动机的起动转矩较大。在电动臂板信号机中采用串励电动机来开放臂板信号。电动栏木则采用并励电动机来动作栏木关闭道口。

直流电动机的铭牌 表 1—1

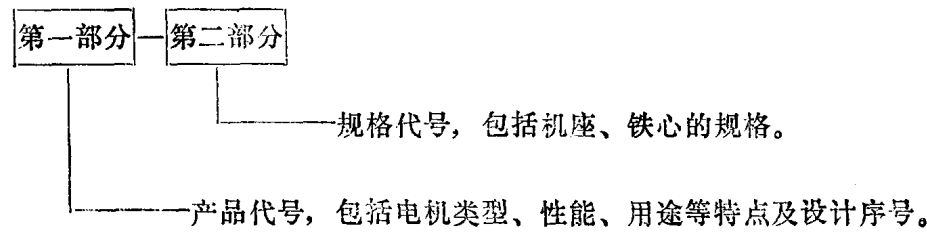
直 流 电 动 机			
型 号	Z ₂ -12	励 磁 并	
功 率	1.1kW	励磁电压	220 V
电 压	220 V	励磁电流	0.565 A
电 流	6.41 A	定 额 连 续	
转 速	3000r/min	温 升	70℃
× × 电 机 厂			

四、直流电动机的铭牌数据

电动机上都钉有一块铭牌，铭牌上标明各种额定数据，是正确使用电动机的依据。直流电动机的铭牌如表 1—1 所示。

铭牌上的各数据的意义如下：

1. 型号 表示直流电动机属于哪一类别，用字母和数字组合起来表示。



例如 Z₂-12,

Z —— 表示一般用途的小型直流电机;

2 ——表示第二次统一设计；

12 ——表示1号机座，第2种电枢铁心长度（即长铁心）。

2. 额定功率 P 。指电机在额定情况下，长期运行所允许的输出功率，单位以W或kW表示。直流电动机的额定功率指的是轴上输出的机械功率，它等于额定电压、额定电流、效率三者的乘积。

3. 额定电压 U 。指正常工作时，加在电动机两端的输入电压，单位为V。

4. 额定电流 I 。指长期连续运行时，允许从电源输入的电流，单位为A。

5. 额定转速 n 。指电压、电流和输出功率均为额定值时的转子旋转速度，单位为r/min。

6. 励磁 表示励磁的方式。

7. 额定励磁电压 指加在励磁绕组两端的额定电压，单位为V。

8. 额定励磁电流 指在额定励磁电压下，通过励磁绕组的额定电流，单位为A。

9. 额定工作方式 指电机在正常使用时所持续的时间，一般分连续、断续、短时三种。

10. 额定温升 表示电机在额定情况下，所允许的工作温度减去环境温度的数值，单位为℃。

铭牌上的各额定数值是选用或使用电机时的主要依据。电机在运行时，其各数值可能与额定值有所不同，将由负载的大小来确定。一般不允许较长时间地超过额定值运行，因为过载将要降低电机的寿命，甚至损坏电机。但电机长期处于轻载运行，则没有得到充分利用，经济效果较差。所以，按铭牌上的额定值来选用电机是比较经济合理的。

第二节 直流电动机的电枢绕组及换向

一、直流电动机的电枢绕组

电枢绕组是直流电动机的主要部分，它是电枢上按一定规律联接起来的所有线圈的总称。每个线圈可由单匝或多匝绝缘铜线绕成，它的两端分别接到两个换向片上，构成整个电枢绕组的一个基本单元，称为绕组元件。

不同型式的电枢绕组，区别在于绕组元件间及元件与换向片间的联接规律不同。直流电动机的电枢绕组可分为叠绕组和波绕组两种。叠绕组又分为单叠绕组和复叠绕组；波绕组也有单波绕组、复波绕组之分；还有叠绕组和波绕组的混合绕组，称为蛙形绕组。

（一）简单的绕组

在叙述直流电动机的工作原理时，假设电枢上仅有一个线圈，线圈的出线端分别与互相绝缘的两个换向片相联接，如图1—8所示。如果电枢上有四个线圈，则换向器由八个换向片组成，如图1—10所示。这样的绕组不能满足技术要求，因为线圈互不联接，电流不能通过所有线圈，所产生的电磁转矩不够大。必须把所有线圈互相联接起来。

如果将线圈的出线端接到特定的换向片上，使所有线圈都通过换向片联成一个整体，构成一个闭合的电枢绕组，如图1—11所示。在该图所表示的瞬间，八个线圈边构成两条并联支路，一条由线圈边1、2、3、4组成，另一条由8、7、6、5组成，通过电刷A、B将两条支路并联起来，如图1—12(a)所示。而当电枢按逆时针方向转过90°时，则一条支

路由线圈边 3、4、5、6 组成，另一条支路由 2、1、8、7 组成，如图 1—12 (b) 所示。这样，电枢连续转动，虽然组成每条支路的线圈边在依次轮换，但并联的支路数始终不变，所有线圈都被利用了。直流电动机的电枢绕组是一个闭合绕组，这是直流电动机绕组构成的原则。

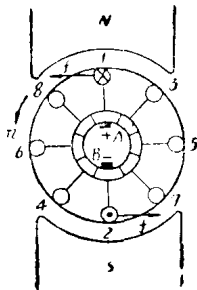


图 1—10 互不联接的多线圈装置

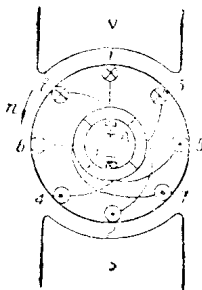


图 1—11 简单的绕组

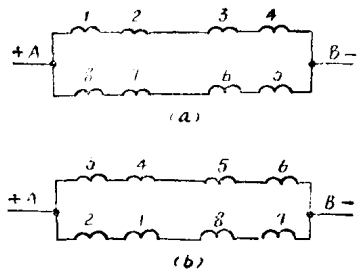


图 1—12 绕组电路

在实际的电动机中，为了使元件端接部分能平整地排列，采用的是双层绕组。即每个槽中的元件边分上下两层叠放，元件的一个边放在一个槽的上层，称为上层边；另一个边放在另一个槽的下层，称为下层边。元件在槽内的放置，如图 1—6 所示。元件的两个出线端分别焊接在两个换向片上，与上层边相联的出线端称为始端，与下层边相联的称为末端。

单叠绕组和单波绕组是直流电动机电枢绕组的两种基本型式。

(二) 单叠绕组

单叠绕组的特点是元件的两个出线端联接于相邻的两个换向片上，如图 1—13 所示。图中上层边用实线表示，下层边用虚线表示。元件跨距用 y_1 表示（一般用所跨槽数计算），上、下层边所联接的两个换向片之间的距离用 y_k 表示（一般用换向片数计算）。单叠绕组和简单绕组一样，所有的相邻元件依次串联，即后一元件的始端与前一元件的末端联在一起，接到一个换向片上去。最后一个元件的末端与第一个元件的始端联在一起，形成一个闭合回路。这种绕组的每两个紧相串联的后一元件的端接部分紧“叠”在前一元件的端接部分上，元件的两个出线端所联的换向片间的距离为“1”个换向片宽 ($y_k = 1$)，所以称之为单叠绕组。

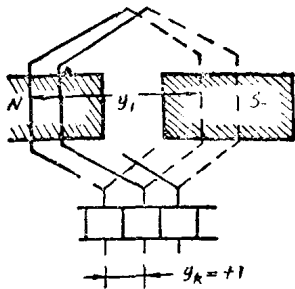


图 1—13 单叠绕组

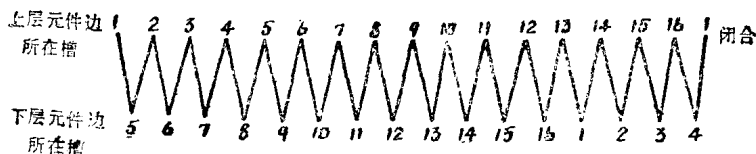
下面举例分析单叠绕组联接的特点和支路的组成情况：

例如有一台直流电动机，其极对数 $p = 2$ ，槽数为 16，元件数 S 等于换向片数 K ，即为 16，即 $S = K = 16$ ， $y_1 = 4$ ， $y_k = 1$ 。

图 1—14 为绕组展开图。图中 N 极表示磁力线进入纸面， S 极表示磁力线从纸面穿出，箭头表示电磁转矩的方向。将元件、槽和换向片按顺序编号，编号的方法是：元件的号码、上层边所放槽的号码及上层边所联接的换向片的号码编得一样。如 1 号元件的上层边放在 1 号槽内，与 1 号换向片相联。可以清楚地看出，从 1 号换向片出发，经 1 号元件上层边，按元件跨距（在本例中相隔四个槽），经过 5 号槽内的下层边，到 2 号换向片，再经 2 号元件上层边，到 6 号槽下层边，然后到 3 号换向片，这样依次经过 16 个元件和 16 个换向片。可用表

1—2所示的元件联接顺序表来表示这种联接顺序。从图中可看出，从1号换向片出发，绕过电枢一周，将全部元件边与换向片都联接起来，又回到1号换向片，形成了一个闭合回路。

单叠绕组元件联接顺序表 表 1—2



对于图 1—14 所表示的瞬间，根据电刷之间元件的联接顺序，可画出相应的电枢绕组电路图，如图 1—15 所示。由该图可看出，电枢绕组由四条并联支路组成，上层边处在同一磁极下的元件中的电流方向相同，串联起来通过电刷构成一条支路。被电刷短路的元件边处于两相邻磁极间的几何中性线（在相邻两磁极轴线之间并且与这两磁极等距离的直线）上，由于该处的磁通密度为零，元件中的感应电势也为零，所以不会产生短路电流。这些元件不参加支路，因此单叠绕组的支路数等于电机的磁极数。

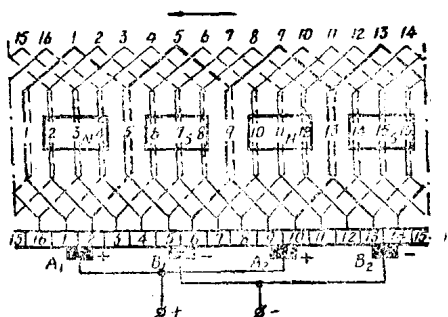


图 1—14 单叠绕组展开图

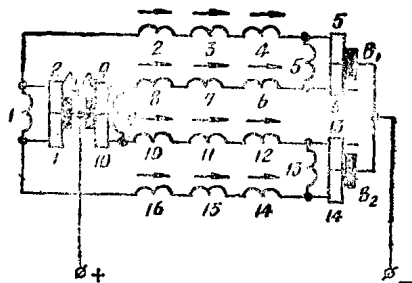


图 1—15 图 1—14 所表示瞬间的绕组电路图

为了保证电动机运行时，每个磁极下各元件边中的电流方向相同，使电动机得以产生最大的电磁转矩，电刷必须固定在磁极轴线下。如果电刷位置偏离磁极轴线，一方面被电刷短路的元件有感应电势，元件中将产生短路电流，另一方面，每条支路中有部分元件的感应电势被抵消，电枢总电势将有所下降。

（三）单波绕组

单波绕组的联接规律和单叠绕组不同，它把相距大约两个极距（相邻两主磁极轴线之间在圆长上所跨的距离），即在磁场中位置差不多相对应的元件联接起来。这样可保证当元件中通以电流时，产生同方向的电磁力，从而使电动机产生的总电磁转矩达到最大。单波绕组的特点是元件两出线端所联的换向片相隔较远，相串联的两元件也相距较远，如同波浪一样向前延伸，故称之为波绕组。又由于顺着串联元件绕电枢一周以后，元件的末端不能与起始元件上层边所联的换向片相联，而必须与其相邻的换向片相联，如图 1—16 所示。否则元件绕一周后就闭合，无法再把元件继续联接下去。这样，起始换向片与绕电枢一周后所联接的换向片（图 1—17 中的 1 号和 15 号换向片）相隔为“1”个换向片（即两者为相邻的换向片）的距离。这种波绕组称为单波绕组。

单波绕组绕电枢一周后，经过 p 对磁极，就有 p 个元件串联起来；每个元件在换向器上

跨过 y_k 个换向片；并且绕一周以后，须联接到起始换向片的后（或前）一个换向片，这个换向片，若依次计数是第 $(K-1)$ 或 $(K+1)$ 个。

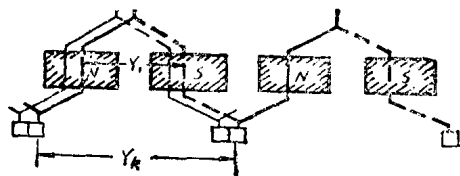


图 1—16 单波绕组

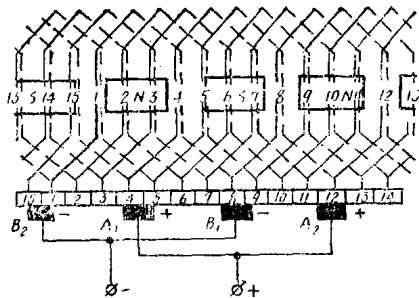


图 1—17 单波绕组展开图

下面举例分析单波绕组：

例如有一台直流电动机，其磁极对数 $p=2$ ，槽数为15，元件数 S 等于换向片数，亦为15，即 $S=K=15$ ，取元件跨距为3个槽，即 $y_1=3$ ，元件两出线端所联换向片间的距离 $y_k=7$ （即7个换向片）。

图 1—17为其绕组展开图。元件、槽及换向片的编号方法同单叠绕组，电刷也放在磁极轴线下的换向片上，也是4个。绕组联接顺序，也可用如表 1—3 所示的元件联接顺序表来表示。

单波绕组元件联接顺序 表 1—3

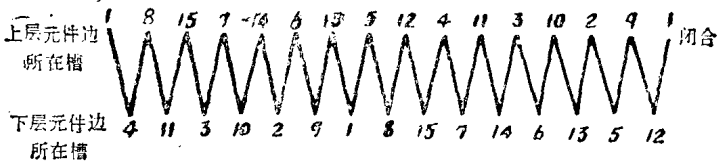


图 1—17所表示瞬间的绕组电路图如图 1—18所示。由该图可看出，元件 5、12被两个正极性电刷 A_1 、 A_2 短路；元件 1、8、9被两个负极性电刷 B_1 、 B_2 短路。元件 4、11、3、10、2 串联，构成一条支路，这些元件中的电流方向相同，因它们的上层边都在 N 极下，故产生方向相同的电磁转矩。元件13、6、14、7、15串联，构成另一条支路，这些元件中的电流方向相同，因它们的上层边都在 S 极下，也产生方向相同的电磁转矩。这样，整个绕组的各元件边所受到的电磁力的方向一致，使得电动机所产生的总电磁转矩最大。由于每条支路由同一极性的所有磁极下的元件组成，尽管电枢在旋转，组成支路的元件在改变，被电刷短路的元件在轮换，但始终保持一对支路。所以单波绕组的支路对数与磁极对数无关，总是等于1。

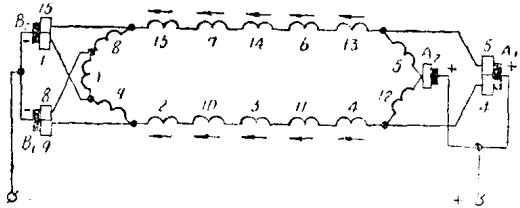


图 1—18 图 1—17所表示瞬间的绕组电路图

单波绕组的元件端接部分也是对称的，电刷也必须放在磁极轴下。其电刷对数也等于磁极对数，如果从引出支路的观点来考虑电刷数，因单波绕组不论其磁极对数多少，支路只有两条，故需一对电刷。但若去掉一些电刷，则通过所剩电刷的电流将增大，这需增加换向器

的长度，并费铜。因此，一般单波绕组的电刷对数总等于磁极对数。

除上述基本形式外，还有复叠、复波和混合绕组等。这些复绕组的元件是一个隔一个地放置在电枢槽内的 m 个（ m 为正整数，一般为2）单绕组用电刷并联起来构成的。其联接规律并无多大区别，仅仅是绕组支路数增加为相应单绕组的 m 倍。一套叠绕组和一套波绕组联接在同一换向器上也可构成一种混合绕组。

总的说来，各种绕组的差别主要在于它们所并联的支路数上。支路数多，组成每条支路的串联元件数相对减少。一般地，电流较大、电压较低的直流电动机，应采用并联支路较多、串联元件较少的叠绕组。若电流较小、电压较高，就采用支路较少、而每条支路串联元件较多的波绕组。

二、直流电动机的电枢反应

直流电动机的磁场是使电动机产生感应电势和电磁转矩的必要条件，直流电动机的运行性能在很大程度上决定于电动机的磁场特性。直流电动机的磁场一般是由励磁绕组中通以直流电流而产生的。

（一）直流电动机的空载磁场

直流电动机的空载是指电枢电流等于零或很小，且可不计其影响的一种运行状态，此时电动机无负载，即无功率输出。因而直流电动机的空载磁场是指励磁绕组单独建立的磁场，称为主磁场。图1—19所示为一台两极直流电动机的空载磁场分布情况。

由图1—19可看出，绝大部分磁通经主磁极、气隙及电枢铁心，这部分磁通同时与励磁绕组、电枢绕组相交链，称为主磁通。此外，还有一部分磁通不经过气隙，仅仅交链励磁绕组本身，并不进入电枢铁心，不和电枢绕组相交链，这部分磁通称为漏磁通。主磁通的磁路中气隙较小，所以磁阻较小。而漏磁通的磁路中空间较大，磁阻也大。主磁通比漏磁通大得多。

主磁通能使旋转的电枢绕组产生感应电势，并和电枢绕组电流相互作用而产生电磁转矩。漏磁通不能使电枢绕组产生感应电势，也不产生电磁转矩，却增加了磁极的饱和程度。

（二）直流电动机负载时的电枢磁场

电动机带上负载后，电枢绕组中就有电流流过，并产生电枢磁势，建立电枢磁场，如图1—20所示。这是设想只有电枢磁势单独存在时产生的电枢磁场。

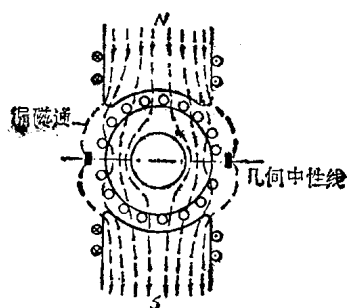


图 1—19 直流电动机的空载磁场

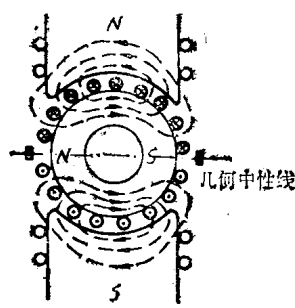


图 1—20 直流电动机负载时的电枢磁场

为了便于分析，在图1—19和图1—20中，假定电刷位于几何中性线处（实际上电刷放

在磁极轴线上，只是被电刷短路的元件位于几何中性线上，为了分析方便，通常不画换向器，而把电刷直接画在几何中性线处）。

（三）直流电动机的电枢反应

直流电动机负载时电枢磁势对主磁场的影响，称为电枢反应。电枢反应对电动机的运行性能有很大的影响。

负载时气隙磁场是由主磁场和电枢磁场共同建立的，如不考虑磁路饱和，气隙的合成磁场为主磁极磁势所产生的磁场和电枢磁势所产生的磁场相叠加，如图 1—21 所示。

电枢反应的结果是：

（1）使气隙磁场发生畸变

空载时，几何中性线处主磁通为零，电动机中磁通为零的位置通称物理中性线，故此时物理中性线与几何中性线相重合。而在负载时，由于电枢反应的影响，在每一磁极下，主磁场的一半被加强，另一半被削弱，使气隙磁场发生畸变，电枢表面磁通为零点的位置也随着移动，物理中性线不再与几何中性线重合。

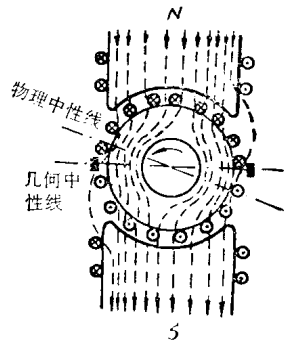


图 1—21 直流电动机负载时的合成磁场

（2）对主磁通的影响

在磁路不饱和时，主磁通被削弱的数量恰好等于被加强的数量，因此负载时每磁极下的合成磁通量与空载时相同。但实际上，电动机的磁路总是饱和的，在主磁极的两边磁场变化情况不同，一边是增磁的，另一边是去磁的。增磁会提高饱和程度，使铁心磁阻增大。去磁使饱和程度降低，铁心磁阻略有减小。由于磁阻变化的非线性，磁阻的增加要大于磁阻的减小，即增加的磁通数量小于磁通减小的数量，因此负载时每极磁通比空载时略有减少，总的说来是呈去磁作用的。

三、直流电动机的换向

由前述，当电枢旋转时，组成电枢绕组的每条支路的元件在依次轮换，即一条支路中的元件经过被电刷短路以后，变为另一条支路的元件。在元件由一条支路转入另一条支路的过程中，其中的电流要改变一次方向。这种元件中电流改变方向的过程，称为换向。

换向是一切带换向器的电机的专门问题。换向不良，将在电刷下产生火花，当火花超过一定程度后，就会烧坏电刷和换向器，使电机不能继续运行。

（一）换向的电磁现象

图 1—22 所示为一个单叠绕组在一个电刷下的两个元件的换向过程。设电刷宽度等于换向片的宽度（电刷宽度可根据电刷的电流密度、机械强度和换向情况来决定，一般为换向片宽的 1.5~3 倍，为了说明问题方便起见，电刷宽度均取等于换向片宽度），电刷不动，换向器从左向右运动。当电刷与换向片 1 接触时，如图 1—22(a) 所示，元件 1 属于右边一条支路，其中的电流由右元件边流向左元件边，将这时的电流定为 $+i_a$ 。当电刷与换向片 1、2 同时接触时，如图 1—22(b) 所示，元件 1 被电刷短路。当电刷与换向片 2 接触时，如图 1—22(c) 所示，元件 1 就进入左边一条支路，其中的电流由左元件边流向右元件边，为 $-i_a$ 。这样，元件 1 中的电流在被电刷短路后改变了方向，即进行了换向。