

高等院校精品课程系列教材

# 电机学实验教程

张婷◎编著



Experimental Course  
of Electrical Machinery



机械工业出版社  
China Machine Press

高等院校精品课程系列教材

# 电机学实验教程

张婷◎编著



*E*xperimental Course  
of Electrical Machinery



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电机学实验教程 / 张婷编著. —北京: 机械工业出版社, 2018.2  
(高等院校精品课程系列教材)

ISBN 978-7-111-58970-9

I. 电… II. 张… III. 电机学—实验—高等学校—教材 IV. TM3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 011730 号

本书主要介绍电气自动化和电力系统自动化中常用的直流电机、变压器、异步电机、同步电机、交流伺服电动机、直流伺服电动机、自整角机和步进电动机的相关实验和原理, 通过实验, 学生可以掌握实验方法, 学会选择仪表、测取实验数据等基本实验研究技能, 加深对电机学理论知识的理解。本书主要以电机教学实验为主, 同时会照顾到工程实验应用, 并在内容讲述和编排上进行一些改革尝试。

本书原理阐述简明扼要, 实验指导突出可操作性, 可作为高等院校有关专业的辅助教材和参考书, 也可供电机试验等方面的工程技术人员参考。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 余 洁

责任校对: 李秋荣

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

版 次: 2018 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 12.75

书 号: ISBN 978-7-111-58970-9

定 价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

# 前 言

随着教学改革不断深化,电气工程类各学科的教学内容和教学方式都发生了很大的变化,加强实验教学环节、提高学生的动手能力已经成为人们的共识。

电机实验课是“电机学”及其相近课程的重要组成部分,本实验教材侧重于掌握实验方法,并运用课堂上所学的电机理论知识来分析和研究实验中的各种问题,并得出必要的结论,从而达到培养学生在电机学这门学科中分析问题和解决问题的初步能力。

本书阐述了常用电机和控制电机的分类、结构、工作原理、性能指标及应用等基础知识和相应实验,特别强调应用及实例,力求达到理论与实践相结合,为学生在以后的实际工作中能够灵活应用、合理选择、正确使用电机打下良好的基础。

本书内容包括直流电机、变压器、异步电机、同步电机、伺服电动机、自整角机、步进电动机,部分资料借鉴了国内外优秀教材,又兼顾了生产和科研的发展,以达到坚实基础、注重应用、提高能力的目标。

由于编者水平有限,书中难免有纰漏之处,敬请读者批评指正。

编者

# 目 录

前言	
第一篇 基础性实验	1
第1章 直流电机实验	1
1.1 直流电机的分类	1
1.2 直流电机的基本结构	2
1.3 直流电机的基本工作原理	5
1.3.1 直流电动机的工作原理	5
1.3.2 直流发电机的工作原理	5
1.4 直流电机的铭牌数据	6
1.5 无刷直流电机的应用	7
1.6 直流电机实验项目	8
1.6.1 实验一 认识实验	8
1.6.2 实验二 直流发电机	13
1.6.3 实验三 直流电动机	19
第2章 变压器实验	24
2.1 变压器的分类	24
2.2 变压器的基本结构	25
2.3 变压器的工作原理	26
2.3.1 单相变压器的工作原理	26
2.3.2 三相变压器的工作原理	27
2.4 变压器的铭牌数据	28
2.5 变压器的应用	29
2.6 变压器实验项目	30
2.6.1 实验一 单相变压器	30
2.6.2 实验二 三相变压器	35
2.6.3 实验三 三相变压器的联结组 和不对称短路	40
第3章 交流异步电动机实验	49
3.1 交流异步电动机的分类	49
3.2 交流异步电动机的基本结构	50
3.3 三相交流异步电动机的 基本工作原理	52
3.3.1 三相旋转磁场的产生	52
3.3.2 三相交流异步电动机的 基本原理	53
3.4 三相交流异步电动机铭牌数据及 主要系列	54
3.5 异步电动机的应用	56
3.6 交流异步电动机实验项目	57
3.6.1 实验一 三相笼形异步电动机的 工作特性	57
3.6.2 实验二 三相异步电动机的 起动与调速	67
3.6.3 实验三 三相异步电动机在 各种运行状态下的机械特性	73
3.6.4 实验四 三相异步电动机的 M-S 曲线测绘	82
第4章 同步电机实验	86
4.1 同步电机的分类	86
4.2 同步电机的基本结构	87
4.3 同步电机的基本工作原理	88
4.4 同步电机的铭牌数据	89
4.5 永磁同步电机的应用	89
4.6 同步电机实验项目	90
4.6.1 实验一 三相同步发电机的 运行特性	90
4.6.2 实验二 三相同步发电机的 并联运行	96
4.6.3 实验三 三相同步电动机	103

4.6.4 实验四 三相同步电机参数的测定	108	6.4.1 力矩式自整角机的工作原理	144
第5章 伺服电动机实验	115	6.4.2 力矩式自整角机的技术指标	146
5.1 直流伺服电动机	115	6.5 自整角机的应用	146
5.1.1 直流伺服电动机的分类和特点	115	6.6 自整角机实验项目	148
5.1.2 直流伺服电动机的工作原理	116	第7章 步进电动机实验	152
5.1.3 直流伺服电动机的额定值和两个主要参数	116	7.1 步进电动机的分类	152
5.1.4 直流伺服电动机的应用	117	7.2 步进电动机的结构	153
5.2 交流伺服电动机	120	7.3 步进电动机的工作原理	154
5.2.1 交流伺服电动机的分类和特点	120	7.4 步进电动机的主要性能指标	157
5.2.2 交流伺服电动机的基本结构	120	7.5 步进电动机的应用	158
5.2.3 交流伺服电动机的工作原理	122	7.6 步进电动机实验项目	159
5.2.4 交流伺服电动机的性能指标	123	第二篇 电机实验概论	165
5.2.5 交流伺服电动机的应用	125	第8章 电机实验概述	165
5.3 伺服电动机实验项目	126	8.1 电机实验的基本要求	165
5.3.1 实验一 直流伺服电动机实验	126	8.2 电机实验报告的编写	166
5.3.2 实验二 交流伺服电动机电源移相及幅值控制实验	130	8.3 电机实验安全操作规程及注意事项	166
5.3.3 实验三 交流伺服电动机电容移相及幅相控制实验	134	8.4 误差的基本概念	168
第6章 自整角机实验	137	8.4.1 误差公理及定义	168
6.1 自整角机的分类	137	8.4.2 误差的来源与分类	171
6.2 自整角机的基本结构	138	8.4.3 测量的精度与提高精度的条件	173
6.3 控制式自整角机	139	8.4.4 削弱系统误差的基本方法	175
6.3.1 控制式自整角机的工作原理	139	第9章 电机实验测量方法	179
6.3.2 控制式自整角机的技术指标	143	9.1 绝缘电阻的测量	179
6.4 力矩式自整角机	144	9.1.1 测量方法及有关要求	179
		9.1.2 测量结果的判定	179
		9.2 绕组直流电阻的测量	180
		9.3 功率的测量	182
		9.3.1 功率表的正确选择和使用	182
		9.3.2 功率表接线规则	182
		9.3.3 三相有功功率的测量	183

9.3.4 三相无功功率的测量 ..... 184

9.4 温度的测量 ..... 185

9.4.1 温度计法 ..... 185

9.4.2 电阻法 ..... 185

9.4.3 埋置检温计法 ..... 186

9.5 转速和转差率的测量 ..... 186

9.5.1 转差率的测量 ..... 186

9.5.2 转速的测量 ..... 188

9.6 转矩的测量 ..... 190

9.6.1 弹簧秤或磅秤 ..... 190

9.6.2 电动测功机 ..... 191

9.6.3 分析过的直流电机 ..... 193

9.6.4 转矩-转速特性曲线  
测量仪 ..... 194

9.7 测量高阻抗负载和低阻抗负载时  
电路和仪表的布置 ..... 195

9.7.1 测量高阻抗负载时电路和  
仪表的布置 ..... 195

9.7.2 测量低阻抗负载时电路和  
仪表的布置 ..... 196

参考文献 ..... 197

# 第一篇 基础性实验

## 第1章 直流电机实验

直流电机是人类发明和应用最早的一种电机，它包括直流发电机和直流电动机两大类，直流发电机将机械能转换为直流电能；直流电动机则是将直流电能转换为机械能以拖动生产机械。虽然目前直流电机的应用已不如交流电机普遍，但是，由于直流电动机具有优良的制动和调速性能，故仍广泛应用于如轧钢机、矿山用电动车、城市电车和音像设备中。在对快速性和调速范围要求很高的自动控制系统中，它的应用更为广泛。直流发电机作为各种直流电源，如直流电动机的电源、同步发电机的励磁电源和以直流电为主的飞机上的电源，仍具有重要的地位。随着电子工业的蓬勃发展，利用功率电子器件取得直流电的技术日臻完善并迅速发展，在一些应用领域中，该技术已逐步取代直流发电机，成为新的静止式的直流电源。

### 1.1 直流电机的分类

直流电机按结构及工作原理可分为无刷直流电机和有刷直流电机。

有刷直流电机可分为永磁直流电机和电磁直流电机。电磁直流电机又分为串励直流电机、并励直流电机、他励直流电机和复励直流电机。永磁直流电机又分为稀土永磁直流电机、铁氧体永磁直流电机和铝镍钴永磁直流电机。

直流电机在工作时，电枢绕组通过电刷外接直流电枢电源，用以产生电枢电流；励磁绕组也要通入直流励磁电源，用以产生主磁场；这两个方面协调工作，可使得电枢获得一个电磁转矩转动起来。电枢绕组和励磁绕组可以共用一个电源，也可以采用两个电源单独供电。即使是采用一个电源供电，也有不同的连接方式。励磁绕组与电源的连接方式称为励磁方式。按照不同的励磁方式，直流电机可以分为他励、并励、串励和复励四种，如图 1-1 所示。

#### (1) 他励直流电机

励磁绕组与电枢绕组采用两个电源供电，没有直接的电联系，如图 1-1a 所示，电枢电流  $I_a$  由电枢端电压决定，而励磁电流  $I_f$  由励磁绕组端电压决定。

#### (2) 并励直流电机

励磁绕组和电枢绕组并联，采用同一个电源供电，由一个开关控制，如图 1-1b 所示。



其特点是励磁绕组的电压即为电枢电压，电源电流为电枢电流  $I_a$  与励磁电流  $I_f$  之和。为了降低损耗，并励直流电机的励磁电流一般较小，约为电枢电流的 5%；为了保证足够的磁通，励磁绕组一般导线较细，匝数多，电阻大。

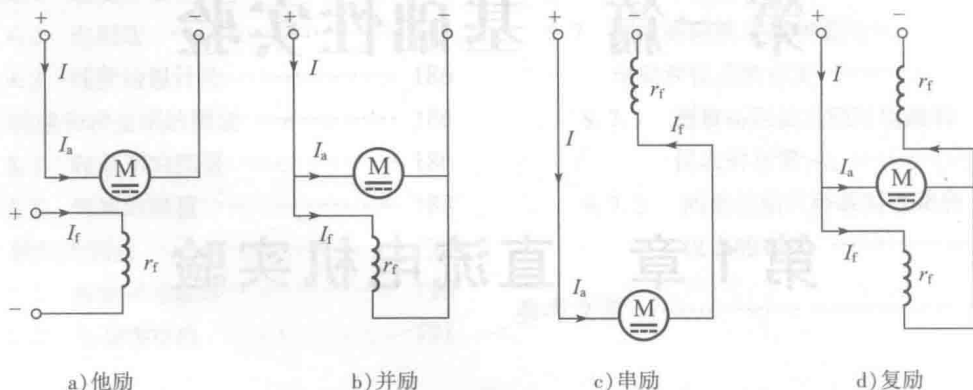


图 1-1 直流电机按励磁分类接线图

### (3) 串励直流电机

励磁绕组与电枢绕组串联，采用同一个电源供电，由一个开关控制，如图 1-1c 所示。其特点是励磁电流  $I_f$  与电枢电流  $I_a$  相同，这个电流一般较大，所以串励直流电机的励磁绕组导线较粗，匝数少，电阻小。

### (4) 复励直流电机

这种电机中既有串励又有并励，一部分励磁绕组与电枢绕组串联，另一部分励磁绕组再与电枢绕组并联，如图 1-1d 所示。其特点是电机的主磁通由这两个励磁绕组共同产生。若串励绕组产生的磁通势与并励绕组产生的磁通势方向相同则称为积复励，若两个磁通势方向相反则称为差复励。

不同励磁方式的直流电机有着不同的特性，一般情况下直流电动机的主要励磁方式是并励、串励和复励，直流发电机的主要励磁方式是他励、并励和复励。

## 1.2 直流电机的基本结构

直流电机的结构型式是多种多样的，图 1-2 是一台常用的小型直流电机的结构剖面图。

直流电机是由静止的定子部分和转动的转子部分构成的，定子和转子之间的空隙称为气隙。在直流电机中，大多数情况下都是将磁极放在定子上，电枢放在转子上，下面将分别予以介绍。

### 1. 定子

直流电机运行时静止不动的部分称为定子，定子的主要作用是产生磁场，由主磁极、机座、换向极、端盖和电刷装置等部件组成。

#### (1) 主磁极

主磁极的作用是建立主磁场。绝大多数直流电机的主磁极不是利用永久磁铁而是由励磁绕组通以直流电流来建立磁场的。主磁极由主磁极铁心和套装在铁心上的励磁绕组构成，如图 1-3 所示。主磁极铁心靠近转子一端的扩大的部分称为极靴，它的作用是使气隙磁阻减

小,改善主磁极磁场分布,并使得励磁绕组更容易固定。为了减少转子转动时由于齿槽移动引起的铁耗,主磁极铁心采用 $1\sim 1.5\text{mm}$ 的低碳钢板冲压成一定形状叠装固定而成。主磁极上装有励磁绕组,整个主磁极用螺杆固定在机座上。主磁极的个数一定要是偶数,励磁绕组的连接必须使得相邻主磁极的极性按N、S极交替出现。

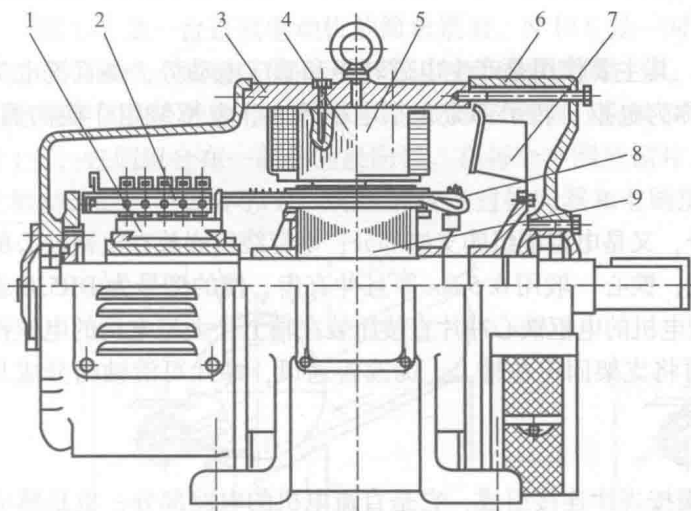


图 1-2 直流电机结构剖面图

1—换向器; 2—电刷装置; 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

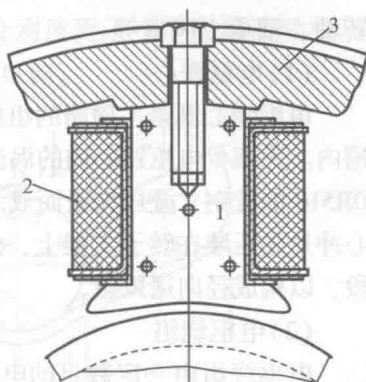


图 1-3 主磁极的结构图

1—主磁极; 2—励磁绕组; 3—机座

## (2) 机座

电机定子的外壳称为机座。机座的作用有两个:一是用来固定主磁极、换向极和端盖,并对整个电机起支撑和固定作用;二是机座本身也是磁路的一部分,可以构成磁极之间磁的通路,磁通通过的部分称为磁轭。为保证机座具有足够的机械强度和良好的导磁性能,一般为铸钢件或由钢板焊接而成。

## (3) 换向极

换向极是安装在两个相邻主磁极之间的小磁极,它的作用是改善直流电机的换向情况,使得电机在运行时不会产生有害的火花。换向极结构与主磁极类似,是由换向极铁心和套在铁心上的换向极绕组构成的,并用螺杆固定在机座上。换向极的个数一般与主磁极的极数相等,在功率很小的直流电机中,也有不安装换向极的。换向极绕组在使用中是与电枢绕组相串联的,要流过较大的电流,因此其与主磁极的串励绕组一样,导线应有较大的截面。

## (4) 端盖

端盖装在机座两端并通过端盖中的轴承支撑转子,将定转子连为一体,同时端盖还会对电机内部起到防护作用。

## (5) 电刷装置

电刷装置是电枢电路的引出(或引入)装置,它由电刷、刷握、刷辫和压紧弹簧等部分组成,如图 1-4 所示。电刷

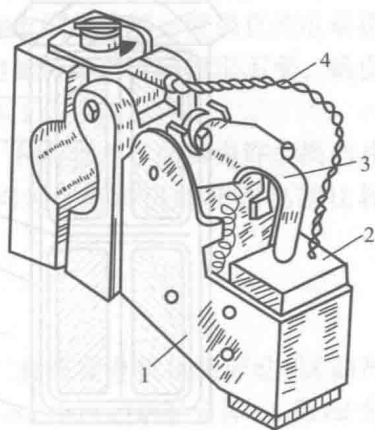


图 1-4 电刷装置

1—刷握; 2—电刷; 3—压紧弹簧;  
4—刷辫

是石墨或金属石墨组成的导电块，放在刷握内用弹簧以一定的压力安放在换向器的表面，旋转时与换向器表面形成滑动接触。刷握用螺钉夹紧在刷杆之上。每一刷杆上的一排电刷组成一个电刷组，同极性的各刷杆用连线连在一起，再引到出线盒。刷杆安装在可移动的刷杆座上，以便调整电刷的位置。

## 2. 转子

直流电机的转动部分称为转子，其主要作用是产生电磁转矩和感应电动势，是直流电机进行能量转换的枢纽，所以通常又称为电枢，转子部分包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴、轴承、风扇等。

### (1) 电枢铁心

电枢铁心既是主磁路的组成部分，又是电枢绕组的支撑部分；电枢绕组嵌放在电枢铁心的槽内。为减少电枢铁心内的涡流损耗，铁心一般用 0.5mm 厚且冲有齿、槽的型号为 DR530 或 DR510 的硅钢片叠压夹紧而成。小型电机的电枢铁心冲片直接压装在轴上，大型电机的电枢铁心冲片先压装在转子支架上，然后再将支架固定在轴上。为改善通风，冲片可沿轴向分成几段，以构成径向通风道。

### (2) 电枢绕组

电枢绕组由一定数目的电枢线圈按规律连接组成，它是直流电机的电路部分，也是感应电动势、产生电磁转矩进行机电能量转换的部分。线圈用绝缘的圆形或矩形截面的导线绕成，分上下两层嵌放在电枢铁心槽内，上下层以及线圈与电枢铁心之间都要妥善地绝缘，并用槽楔压紧，如图 1-5 所示。大型电机电枢绕组的端部通常紧扎在绕组支架上。

### (3) 换向器

在直流发电机中，换向器起整流作用；在直流电动机中，换向器起逆变作用；因此换向器是直流电机的关键部件之一。换向器由许多具有鸽尾形的换向片排成一个圆筒，其间用云母片绝缘，两端再用两个 V 形环夹紧而构成，如图 1-6 所示。每个电枢线圈首端和尾端的引线，分别焊入相应换向片的升高片之内。小型电机常用塑料换向器，这种换向器用换向片排成圆筒，再用塑料通过热压制成。

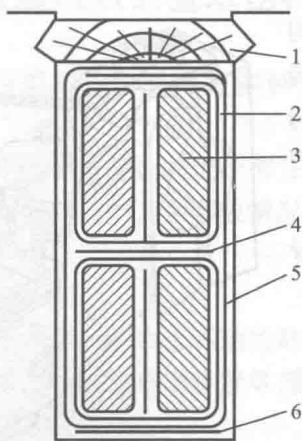


图 1-5 电枢槽的结构

1—槽楔；2—线圈绝缘；3—电枢导体  
4—层间绝缘；5—槽绝缘；6—槽底绝缘

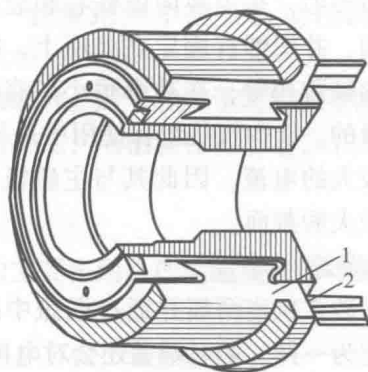


图 1-6 换向器结构

1—换向片；2—连接部分

## 1.3 直流电机的工作原理

### 1.3.1 直流电动机的工作原理

图 1-7 是一台直流电动机的简单模型。N 和 S 是一对固定的磁极，可以是电磁铁，也可以是永久磁铁。磁极之间有一个可以转动的铁质圆柱体，称为电枢铁心。铁心表面固定一个用绝缘导体构成的电枢线圈  $abcd$ ，线圈的两端分别接到相互绝缘的两个半圆形铜片（换向片）上，它们组合在一起称为换向器。在每个半圆形铜片上又分别放置了一个固定不动而与之滑动接触的电刷 A 和 B，线圈  $abcd$  通过换向器和电刷接通外电路。

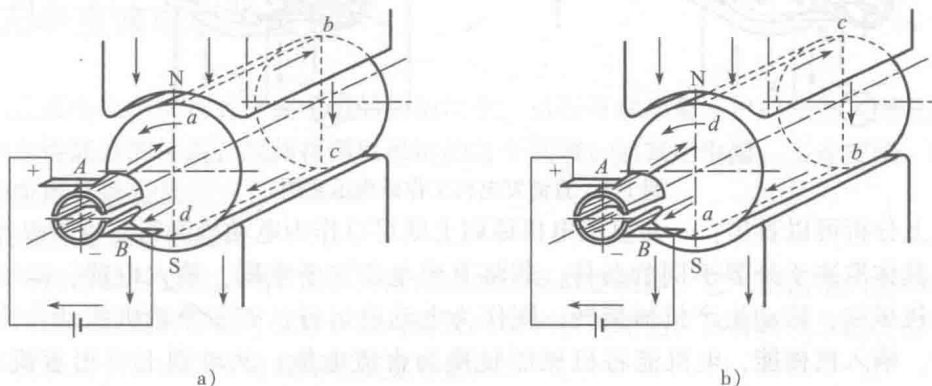


图 1-7 直流电动机工作原理示意图

将外部直流电源加于电刷 A (正极) 和 B (负极) 上，则线圈  $abcd$  中流过电流，在导体  $ab$  中，电流由  $a$  指向  $b$ ，在导体  $cd$  中，电流由  $c$  指向  $d$ 。导体  $ab$  和  $cd$  分别处于 N、S 极磁场中，受到电磁力的作用。用左手定则可知导体  $ab$  和  $cd$  均受到电磁力的作用，且形成的转矩方向一致，这个转矩称为电磁转矩，为逆时针方向。这样，电枢就顺着逆时针方向旋转，如图 1-7a 所示。当电枢旋转  $180^\circ$ ，导体  $cd$  转到 N 极下， $ab$  转到 S 极下，如图 1-7b 所示，由于电流仍从电刷 A 流入，使  $cd$  中的电流变为由  $d$  流向  $c$ ，而  $ab$  中的电流由  $b$  流向  $a$ ，从电刷 B 流出，用左手定则判别可知，电磁转矩的方向仍是逆时针方向。

由此可见，加在直流电动机的直流电源，借助于换向器和电刷的作用，使得直流电动机电枢线圈中流过的电流方向是交变的，从而使得电枢产生的电磁转矩的方向恒定不变，确保直流电动机向确定的方向连续旋转。这就是直流电动机的基本工作原理。

实际的直流电动机的电枢圆周上均匀地嵌放着许多线圈，相应地，换向器由许多换向片组成，使电枢线圈所产生的总的电磁转矩足够大并且比较均匀，电动机的转速也就比较均匀。

### 1.3.2 直流发电机的工作原理

直流发电机的模型与直流电动机的模型相同，不同的是，直流发电机是用原动机（如汽轮机）拖动电枢向某一方向（例如逆时针方向）旋转，如图 1-8a 所示。这时导体  $ab$  和  $cd$  分别切割 N 极和 S 极下的磁力线，感应产生电动势，电动势的方向可用右手定则确定。可知导体  $ab$  中电动势的方向由  $b$  指向  $a$ ，导体  $cd$  中电动势的方向由  $d$  指向  $c$ ，在一个串联回路中相互叠加，形成电刷 A 为电源正极，电刷 B 为电源负极。电枢转过  $180^\circ$  后，导体  $cd$  与导体

$ab$  交换位置, 但电刷的正负极性不变, 如图 1-8b 所示。可见, 同直流电动机一样, 直流发电机电枢线圈中的感应电动势的方向也是交变的, 而通过换向器和电刷的整流作用, 在电刷  $A$ 、 $B$  上输出的电动势是极性不变的直流电动势。在电刷  $A$ 、 $B$  之间接上负载, 发电机就能向负载供给直流电能。这就是直流发电机的基本工作原理。

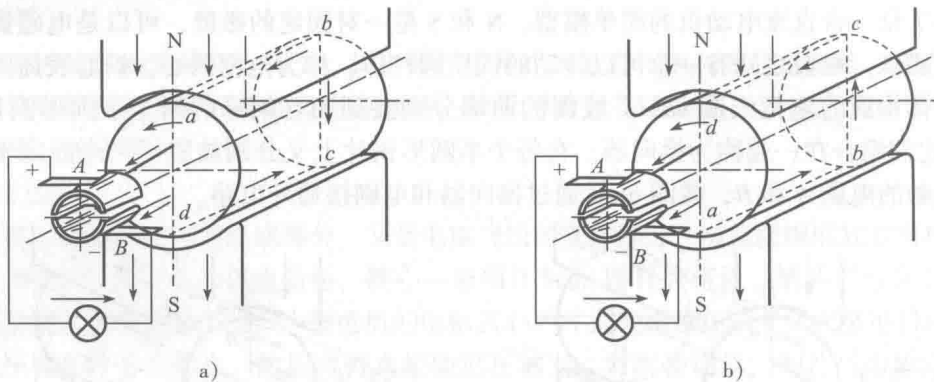


图 1-8 直流发电机工作原理示意图

从以上分析可以看出: 一台直流电机原则上既可以作为电动机运行, 也可以作为发电机运行, 具体取决于外界不同的条件。若将直流电源加于电刷, 输入电能, 电机能将电能转换为机械能, 拖动生产机械旋转, 则作为电动机运行; 如用原动机拖动直流电机的电枢旋转, 输入机械能, 电机能将机械能转换为直流电能, 从电刷上引出直流电动势, 则作为发电机运行。同一台电机, 既能作为电动机运行又能作为发电机运行的原理, 称为电机的可逆原理。

## 1.4 直流电机的铭牌数据

为了确保用户正确使用电机, 电机制造厂在每台电机的机座上都会钉上一块金属牌, 上面标有该电机的技术数据, 主要包括其型号和额定值, 该标牌称为铭牌。

### (1) 型号

直流电动机的型号如 Z2-41, Z 表示直流电动机, 2 表示第二次统一设计, 41 中的 4 表示机座号, 1 表示电枢铁心的长度序号。

直流电动机还有其他的型号表示方法, 如 ZF2-151-1B、ZD2-121-1B 等, 具体可查阅电工手册。

### (2) 额定电压

对于电动机, 额定电压是指电动机在额定工作状态下的输入电压; 对于发电机, 额定电压是指在额定工作状态下发电机的输出电压。

### (3) 额定电流

对于电动机, 额定电流是指电动机长期连续运行时从电源输入的电流; 对于发电机, 额定电流是指长期连续运行时供给负载的电流。

### (4) 额定转速

电动机在额定运行状态下, 转轴的转速称为额定转速。

### (5) 额定功率

电动机在额定运行状态下,电动机轴上输出的机械功率称为额定功率;发电机的额定功率是指供给负载的电功率。

### (6) 额定励磁电流

电动机在额定运行状态下,通过励磁绕组的电流称为额定励磁电流。

### (7) 励磁

直流电机铭牌上的励磁是指直流电机的励磁方式。

直流电机铭牌上还有额定转矩、额定励磁电压、额定温升、工作方式等数据。

## 1.5 无刷直流电机的应用

无刷直流电机不仅具有交流电机的结构简单、运行可靠和免维护的特点,而且还具备直流电机调速性能好的优点,故其在国民经济的各个领域,如家用电器、工业控制、仪器仪表等方面的应用日益普及。

### 1. 在变频空调中的应用

变频空调器是新型的高效节能、冷暖兼用的热泵型空调器,它可根据室内空调的负载大小控制压缩机电动机的转速。变频空调与传统的定频空调相比,具有高效节能、制冷制热速度快、温度波动小和适应环境温度范围宽等优点。

目前,变频空调压缩机驱动电机大多采用单相异步电动机或直流电机,因为异步电动机存在转差损耗,而直流电机电刷的存在使其具有故障率高、使用寿命短的缺点,所以异步电动机和直流电机都不是空调压缩机的理想部件。无刷直流电机是新一代高性能的驱动电机,可以很好地克服上述缺点,并可大幅度减小压缩机系统的整体体积。目前,HITACHI、SANYO、TOSHIBA 等多家公司已采用无刷直流电机作为变频空调的驱动电机。

图 1-9 为变频空调器控制系统结构图,主要包括室内机组和室外机组两部分。由室内机组控制板和室外机组控制板组成的控制系统,可根据房间温度和用户的需求控制压缩机和风扇电动机,从而使室温达到理想要求。运行部件包括室内和室外两部分,室外运行部件包括压缩机和室外风扇,其作用为冷媒系统的循环和室外的热交换,室内运行部件包括室内风扇电动机和摆叶电动机,其作用是把冷量或热量传到室内的不同区域,以实现均匀调节室内温度。温度设定等空调器运行指令由红外遥控器通过室内电控板红外接收器传递到室内控制器,控制器根据这些指令调节室内风扇电动机和摆叶电动机,并与室外控制器进行通信以完成对压缩机运行的控制。

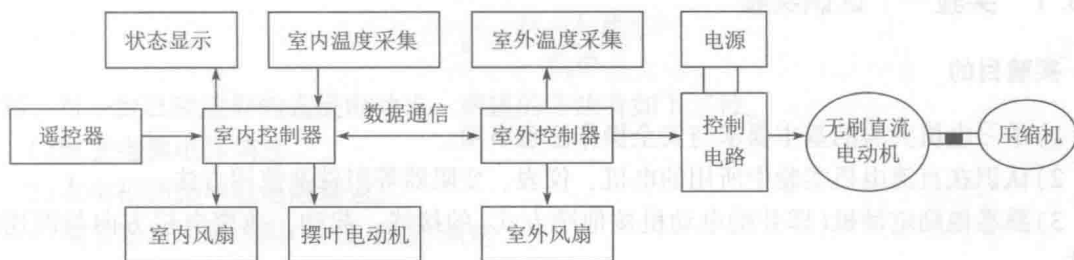


图 1-9 变频空调器控制系统结构图

## 2. 在计算机外围设备中的应用

在计算机的硬盘驱动器、光盘驱动器、冷却风扇等外围设备中,要求驱动电机可靠性高、控制精度高、寿命长、免维护,无刷直流电动机就具备这些特点,因此其具有广泛的应用。

硬盘驱动器是一种高度精密的机电一体化产品,主要由盘体、头盘组件、主轴电动机、寻道取数电动机及读写电路与驱动电路等组成,图 1-10 为其结构示意图。

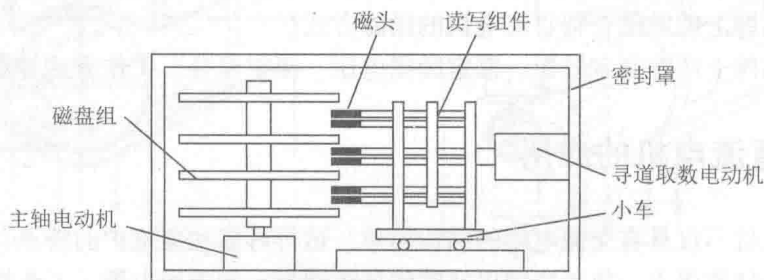


图 1-10 硬盘驱动器的结构示意图

从硬盘驱动器的发展过程来看,主轴电动机的结构类型已由印刷绕组电动机、交直流伺服电动机,发展到无刷直流电动机。其原因是随着硬盘容量的不断增大,磁盘的转速要求也相应得到提高,因此也带来了机械磨损加剧、温度升高、噪声增大等一系列负面影响,而采用无刷电动机,在结构上可省略电刷、减少机械磨损,从而达到降温、减噪、提高效率的目的,特别是由于电子元器件和工艺性能的提高,使得无刷电动机成为一种十分理想的驱动源。

## 3. 在洗衣机中的应用

目前市场上已有相当一部分洗衣机采用的是低噪声、扁平型无刷直流电动机,不带任何机械减速和传动装置,由无刷直流电动机直接驱动洗衣机滚筒,并采用无级调速,洗衣时低速运转,脱水时高速运转,故障率很低,同时采用了模糊控制技术,提高了技术档次。

洗衣机所用的无刷直流电动机一般采用外转子结构,定子铁心采用带料冲槽,充分利用材料,采用三相集中的星形联结绕组和铁氧体永磁材料。应用 PWM 控制技术,洗涤速度和节拍可同时改变,控制灵活,可根据衣物质地选择不同的脱水转速,达到了高洗涤、低磨损、免缠绕的效果。

# 1.6 直流电机实验项目

## 1.6.1 实验一 认识实验

### 一、实验目的

- 1) 学习电机实验的基本要求与安全操作注意事项。
- 2) 认识在直流电机实验中所用的电机、仪表、变阻器等组件及使用方法。
- 3) 熟悉他励电动机(即并励电动机按他励方式)的接线、起动、改变电机方向与调速的方法。

## 二、预习要点

- 1) 如何正确选择使用仪器仪表,特别是电压表、电流表的量程。
- 2) 他励直流电动机起动时,在电枢回路中为什么需要串联起动变阻器?不连接会产生什么样的严重后果?
- 3) 直流电动机起动时,励磁回路连接的磁场变阻器应调至什么位置?为什么?若励磁回路断开造成失磁,会产生什么样的严重后果?
- 4) 直流电动机调速及改变转向的方法。

## 三、实验项目

- 1) 了解教学实验台中的直流稳压电源、涡流测功机、变阻器、多量程直流电压表、电流表、毫安表及直流电动机的使用方法。
- 2) 用伏安法测量直流电动机和直流发电机的电枢绕组的冷态电阻值。
- 3) 他励直流电动机的起动、调速及转向改变。

## 四、实验原理

### 1. 直流电动机的起动

电动机从静止状态过渡到稳定运行状态的过程称为直流电动机的起动过程。电动机在起动的瞬间,电动机的端电压全部降落在电枢电阻上,此时电动机的电枢电流称为起动电流,起动电流可能达到额定电流的十几倍。为了限制起动电流,一般采用在电枢回路中串联电阻的方法,将起动电流限制在额定电流的1.5~2倍以内,从而保证有足够的起动转矩。

对于自动控制系统中使用的直流电动机,功率只有几百瓦,由于电枢电阻比较大,其起动电流不超过额定电流的5~6倍,加上其转动惯量较小,转速上升快,起动时间短,所以可以直接起动,而且起动电流大,起动转矩也大,这也正是控制系统所希望的。

为了获得较大的起动转矩,励磁磁通应为最大,因此电动机起动时,励磁回路的调节电阻必须短接,并在励磁绕组两端加上额定励磁电压。

### 2. 直流电动机的调速

由直流电动机驱动的某些机械如电车、机床等,在运行时往往要求电动机的转速在一定范围内可以方便地调节。其调速范围则可根据负载要求来决定。

由直流电动机的转速公式

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (1-1)$$

可知,对一台已制造好的直流电动机,调速的方法有如下三种。

- 1) 改变电源电压调速。
- 2) 在电枢回路串联电阻调速。
- 3) 调节励磁回路电阻(改变磁通)调速。

下面分析转矩、电流和转速等物理量的稳态值在调速前后的变化。

#### (1) 降低电源电压调速



电源电压越低，转速越低。这种调速方法可以实现平滑无级调速，但需要附加调压设备。

### (2) 电枢回路串联电阻调速

电枢回路串联的电阻值越大，转速越低。这种调速方法的损耗较大，效率较低。当轻载时，电枢电流较小，串联电阻后转速变化不大。但是，这种调速方法设备比较简单。

### (3) 改变励磁回路电阻调速

励磁回路串联的电阻值越大，转速越高。这种调速方法的特点具体如下。

1) 容易控制：励磁电流只有电枢额定电流的百分之几，所以调节电阻的容量小，铜耗也小，而且容易控制。

2) 调速的快速性较差：励磁回路绕组匝数多，电感比电枢回路大，电气时间常数较大。

3) 转速只能升高：励磁回路串联电阻只能使励磁电流减小。

4) 改变磁通(弱磁)调速时，必须降低负载转矩：由于  $T_{em} = C_T \Phi I_a$ ，若电动机拖动恒转矩负载，重新稳定后，因磁通  $\Phi$  减弱，所以电流  $I_a$  增大，将超过原来的额定值，这是不允许的，因此，在要求调速范围大的场合，几种调速方法总是同时兼用的。当电源电压可调时，通过降压降低转速，通过增加励磁回路电阻提高转速。当电源电压恒定时，则通过增加电枢回路电阻降低转速，通过增加励磁回路电阻提高转速。

需要注意的是，对于电动机的励磁绕组，若起动前就断开，则电动机由于起动转矩小而不能起动。如果在运行过程中断开，则相当于励磁回路串联的电阻无穷大，电动机转速大大超过额定转速，电动机会发出尖锐的噪声，出现“飞车”事故。

## 五、实验设备及仪器

1. 电机系统教学实验台主控制屏。
2. 电机导轨及测功机、转速转矩测量组件。
3. 直流电动机：型号为 110SZS2， $P_N = 185\text{W}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $I_N = 1.10\text{A}$ ， $n_N = 1600\text{r/min}$ 。
4. 220V 直流可调稳压电源。
5. 直流电压表、毫安表、安培表。

## 六、实验说明及操作步骤

### 1. 伏安法测量电枢绕组的直流电阻值

接线原理图如图 1-11 所示。

1) 按图 1-11 连接线路。经检查接线无误后，逆时针调节磁场调节电阻  $R$  使至最大。直流电压表量程选为 300V 挡，直流安培表量程选为 2A 挡。

2) 按顺序按下主控制屏绿色“闭合”按钮开关，可调直流稳压电源的船形开关以及复位开关，建立直流电源，并调节直流电源至 220V 输出。

调节  $R$  使电枢电流达到 0.2A (如果电流太大，则可能会由于剩磁的作用使电动机旋转，测量无法进行；如果此时电流太小，则可能由于接触电阻产生较大的误差)，迅速测取电动机

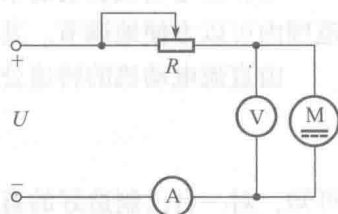


图 1-11 测量电枢绕组  
直流电阻接线图  
M—直流电动机电枢；U—可调直流稳压电源；R—3000Ω  
磁场调节电阻；V—直流电压表；A—直流安培表