



新世纪高等学校规划教材·电气工程系列

王德江 陈 涛 杨海柱  
赵铁英 陈丽华 杨 明 编 著

# 电机及电力拖动



北京师范大学出版集团  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP  
北京师范大学出版社

## ◆ 内容提要 ◆

本书主要叙述直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步发电机、同步电动机及电力拖动、电力拖动系统中电动机的选择、控制电机等内容。

本书可作为普通高等学校应用型本科电气工程及其自动化、自动化等专业的教材，也可作为成人高等学校学生和函授学生的教材，还可供工程技术人员参考。

## ◆ 前 言 ◆

本书是普通高等学校应用型本科电气工程及其自动化、自动化等专业的教材，也可作为成人高等学校学生和函授学生相关专业的教材，还可供相关工程技术人员参考。由于本书是按电气工程及其自动化专业 96 学时编写，若电气工程及其自动化专业、自动化专业或其他专业不足 96 学时，可适当删减。

本书共分 9 章，包括：直流电机、直流电动机的电力拖动、变压器、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步发电机、同步电动机及电力拖动、电力拖动系统中电动机的选择、控制电机。

本书与其他同类教材的最大区别是便于学生自学，内容阐述通俗易懂，对以往教材阐述不够或不够明确的地方，书中力求阐述到位。书中配合大量例题，书后有大量习题，习题都有答案，大量的例题、习题帮助学生理解教材内容。

烟台南山学院王德江教授编写绪论、第 8 章；河南工程学院陈涛副教授编写第 4 章、第 5 章；河南理工大学杨海柱副教授编写第 1 章、第 2 章；河南理工大学赵铁英讲师编写第 6 章、第 7 章；武夷学院陈丽华讲师编写第 3 章；烟台南山学院杨明讲师编写第 9 章，全书由王德江教授统稿。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不当之处，恳请使用本书的教师、学生、读者批评指正。

编 者

2017 年 4 月

# 目 录

绪 论 .....	(1)
0.1 电机及电力拖动概述 .....	(1)
0.2 磁场和磁路定律 .....	(2)
第 1 章 直流电机 .....	(4)
1.1 直流电机的结构及工作原理 .....	(4)
1.1.1 直流电机的构造 .....	(4)
1.1.2 直流电机的工作原理 .....	(7)
1.1.3 直流电机的分类 .....	(8)
1.1.4 直流电机的额定值 .....	(9)
1.2 直流电机的电枢绕组 .....	(10)
1.2.1 直流电机电枢绕组的一般介绍 .....	(10)
1.2.2 直流电机电枢绕组的基本形式 .....	(11)
1.2.3 不同绕组的适用范围 .....	(17)
1.3 直流电机的磁场 .....	(17)
1.3.1 直流电机的空载磁场 .....	(17)
1.3.2 直流电机负载时的磁场及电枢反应 .....	(19)
1.4 感应电动势和电磁转矩的计算 .....	(22)
1.4.1 感应电动势的计算 .....	(22)
1.4.2 电磁转矩的计算 .....	(23)
1.4.3 电磁功率的计算 .....	(24)
1.5 直流电机的换向 .....	(25)
1.5.1 换向的电磁理论 .....	(25)
1.5.2 改善换向的方法 .....	(28)
1.5.3 环火及补偿绕组 .....	(29)
1.6 直流发电机 .....	(30)
1.6.1 直流发电机的基本方程式 .....	(30)
1.6.2 他励发电机的特性 .....	(32)
1.6.3 并励发电机 .....	(35)
1.7 直流电动机 .....	(37)
1.7.1 直流电动机的基本方程式 .....	(37)
1.7.2 他励(并励)直流电动机的工作特性 .....	(39)
1.7.3 串励电动机的工作特性 .....	(41)

1.7.4	复励电动机的工作特性 .....	(42)
1.7.5	电动机的适用范围 .....	(42)
<b>第2章</b>	<b>直流电动机的电力拖动 .....</b>	<b>(45)</b>
2.1	电力拖动系统动力学 .....	(45)
2.1.1	运动方程式 .....	(45)
2.1.2	运动方程式中转矩正负号的规定 .....	(46)
2.1.3	工作机构转矩和转动惯量的折算 .....	(46)
2.2	生产机械的负载转矩特性 .....	(51)
2.2.1	恒转矩负载特性 .....	(51)
2.2.2	通风机与泵类的负载特性 .....	(52)
2.2.3	恒功率负载特性 .....	(52)
2.3	他励直流电动机的机械特性 .....	(52)
2.3.1	机械特性方程式 .....	(53)
2.3.2	直流电动机的固有机械特性 .....	(53)
2.3.3	直流电动机的人为机械特性 .....	(54)
2.3.4	机械特性的绘制 .....	(54)
2.3.5	电力拖动系统稳定运行的条件 .....	(57)
2.4	他励直流电机的起动 .....	(58)
2.4.1	直接起动 .....	(59)
2.4.2	电枢回路串电阻起动 .....	(59)
2.4.3	降电枢电压起动 .....	(60)
2.5	他励直流电动机的调速 .....	(60)
2.5.1	调速指标 .....	(60)
2.5.2	电枢串电阻调速 .....	(62)
2.5.3	改变电枢电压调速 .....	(63)
2.5.4	弱磁调速 .....	(64)
2.6	他励直流电动机的制动 .....	(65)
2.6.1	直流电动机的能耗制动 .....	(66)
2.6.2	直流电动机的反接制动 .....	(68)
2.6.3	直流电动机的回馈制动 .....	(69)
2.7	串励直流电动机的电力拖动 .....	(70)
2.7.1	串励电动机的机械特性 .....	(70)
2.7.2	串励直流电动机的起动和调速 .....	(71)
2.7.3	串励电动机的制动 .....	(74)
2.8	复励电动机的机械特性 .....	(74)
2.9	电力拖动系统的过渡过程 .....	(75)



2.10	无刷直流电动机简介 .....	(77)
2.10.1	无刷直流电动机的组成 .....	(77)
2.10.2	无刷直流电动机的工作原理 .....	(79)
2.10.3	无刷直流电动机的特点 .....	(81)
2.10.4	无刷直流电动机的应用 .....	(81)
<b>第3章</b>	<b>变压器</b> .....	<b>(84)</b>
3.1	变压器的工作原理 .....	(84)
3.1.1	电压变换 .....	(85)
3.1.2	电流变换 .....	(85)
3.1.3	阻抗变换 .....	(85)
3.1.4	电磁关系 .....	(86)
3.1.5	功率关系 .....	(89)
3.2	变压器的结构类型 .....	(90)
3.2.1	变压器基本结构 .....	(90)
3.2.2	变压器类型 .....	(91)
3.2.3	变压器额定参数 .....	(92)
3.3	变压器的运行分析 .....	(93)
3.3.1	等效电路 .....	(93)
3.3.2	基本方程式 .....	(96)
3.3.3	相量图 .....	(97)
3.4	变压器的参数测定与运行特性 .....	(98)
3.4.1	变压器的参数测定 .....	(98)
3.4.2	变压器的运行特性 .....	(101)
3.5	三相变压器 .....	(103)
3.5.1	三相变压器的结构类型 .....	(103)
3.5.2	三相变压器的连接组 .....	(105)
3.6	变压器的并联运行 .....	(109)
3.7	特殊类型变压器 .....	(110)
3.7.1	自耦变压器 .....	(111)
3.7.2	仪用互感器 .....	(112)
<b>第4章</b>	<b>三相异步电动机</b> .....	<b>(117)</b>
4.1	异步电动机概述 .....	(117)
4.1.1	异步电动机的用途与分类 .....	(117)
4.1.2	三相异步电动机的基本结构 .....	(117)
4.1.3	异步电机的铭牌与额定值 .....	(119)
4.2	异步电动机的工作原理和运行状态 .....	(121)
4.2.1	基本工作原理 .....	(121)



4.2.2	转差率	(122)
4.2.3	异步电动机的三种运行状态	(122)
4.3	交流电机的绕组	(123)
4.3.1	交流绕组的基础知识	(123)
4.3.2	交流绕组的几个基本概念	(124)
4.3.3	三相单层绕组	(125)
4.3.4	三相双层绕组	(126)
4.4	交流电机绕组的感应电动势	(128)
4.4.1	一根导体的电动势	(128)
4.4.2	线圈的电动势及短距系数	(129)
4.4.3	线圈组的感应电动势及分布系数	(130)
4.4.4	相绕组基波感应电动势	(131)
4.5	交流电机绕组的磁动势	(134)
4.5.1	单相绕组的磁动势——脉动磁动势	(135)
4.5.2	三相绕组的合成磁动势——旋转磁动势	(140)
4.6	三相异步电动机的空载运行与负载运行	(142)
4.6.1	三相异步电动机的空载运行	(142)
4.6.2	三相异步电动机的负载运行	(144)
4.7	三相异步电动机的等效电路和相量图	(147)
4.7.1	折算	(148)
4.7.2	等效电路	(150)
4.7.3	相量图	(151)
4.7.4	笼型转子的极数、相数、匝数和绕组系数	(152)
4.8	三相异步电动机的功率关系、转矩关系和工作特性	(152)
4.8.1	三相异步电动机的功率平衡和转矩平衡关系	(153)
4.8.2	三相异步电动机的工作特性	(155)
4.9	三相异步电动机的参数测定	(156)
4.9.1	空载实验	(156)
4.9.2	短路实验	(157)
4.10	单相异步电动机	(158)
4.10.1	单相异步电动机的磁动势	(159)
4.10.2	单相异步电动机的工作原理	(160)
4.10.3	单相异步电动机起动方法和分类	(161)
<b>第5章</b>	<b>三相异步电动机的电力拖动</b>	<b>(165)</b>
5.1	三相异步电动机的机械特性	(165)
5.1.1	固有机械特性	(165)



5.1.2	人为机械特性 .....	(169)
5.2	三相异步电动机的起动 .....	(170)
5.2.1	鼠笼式异步电动机的起动 .....	(171)
5.2.2	深槽转子异步电动机和双笼异步电动机的起动 .....	(173)
5.2.3	绕线式异步电动机的起动 .....	(174)
5.3	三相异步电动机的调速 .....	(177)
5.3.1	变极调速 .....	(177)
5.3.2	变频调速 .....	(181)
5.3.3	变转差率调速 .....	(185)
5.4	三相异步电动机的制动 .....	(187)
5.4.1	能耗制动 .....	(188)
5.4.2	反接制动 .....	(189)
5.4.3	回馈制动 .....	(190)
5.5	异步电动机的各种运行状态 .....	(191)
第6章	同步发电机 .....	(195)
6.1	同步发电机的结构、工作原理、额定值 .....	(195)
6.1.1	同步发电机的基本结构 .....	(195)
6.1.2	同步发电机的基本工作原理 .....	(197)
6.1.3*	同步电机的运行状态 .....	(198)
6.1.4	同步电机的额定值 .....	(199)
6.2	同步发电机的励磁方式 .....	(200)
6.2.1	直流励磁机励磁 .....	(200)
6.2.2	整流器励磁 .....	(201)
6.3	同步发电机的空载运行 .....	(201)
6.4	同步发电机的电枢反应 .....	(202)
6.4.1	$\dot{I}$ 与 $\dot{E}_0$ 同相, $\Psi_0 = 0^\circ$ .....	(202)
6.4.2	$\dot{I}$ 滞后于 $\dot{E}_0$ , $90^\circ > \Psi_0 > 0^\circ$ .....	(204)
6.4.3	$\dot{I}$ 超前 $\dot{E}_0$ , $0^\circ > \Psi_0 > -90^\circ$ .....	(205)
6.5	隐极式同步发电机的负载运行 .....	(205)
6.6	凸极式同步发电机的电压方程和相量图 .....	(207)
6.6.1	双反应理论 .....	(207)
6.6.2	凸极同步发电机的电压方程和相量图 .....	(208)
6.6.3	直轴和交轴同步电抗的意义 .....	(210)
6.7	同步发电机的功率方程和转矩方程 .....	(210)
6.7.1	功率方程和电磁功率 .....	(210)





6.7.2	转矩方程	(211)
6.8	同步发电机的运行特性	(211)
6.8.1	外特性	(211)
6.8.2	调节特性	(212)
6.8.3	效率特性	(212)
6.9	同步发电机的并网运行	(213)
6.9.1	投入并联运行的条件	(213)
6.9.2	投入并联的方法	(214)
6.10	与无穷大电网并联时同步发电机的功角特性	(216)
6.11	并网运行时有功功率的调节与静态稳定	(217)
6.11.1	有功功率的调节	(217)
6.11.2	静态稳定	(217)
6.12	并列运行时无功功率的调节与V形曲线	(219)
6.12.1	无功功率的调节	(219)
6.12.2	同步发电机的V形曲线	(220)
6.13*	同步发电机的三相突然短路	(221)
6.13.1	带阻尼绕组的同步发电机模型图	(221)
6.13.2	短路过程中定子绕组电抗变化过程	(222)
6.13.3	突然短路电流及其衰减	(224)
6.13.4	同步发电机突然短路对发电机和电力系统的影响	(225)
<b>第7章</b>	<b>同步电动机及电力拖动</b>	<b>(228)</b>
7.1	同步电动机的结构和额定值	(228)
7.1.1	同步电动机的结构	(228)
7.1.2	同步电动机的额定值	(228)
7.2	同步电动机的电势方程式和向量图	(229)
7.2.1	同步电机的三种状态	(229)
7.2.2	同步电动机的电压方程和相量图	(230)
7.3	同步电动机的功率和转矩	(232)
7.3.1	功率平衡方程式	(232)
7.3.2	转矩平衡方程式	(232)
7.4	同步电动机的功角特性和功率因数调节	(232)
7.4.1	功角特性	(233)
7.4.2	同步电动机的无功功率调节	(233)
7.4.3	同步电动机的V形曲线	(234)
7.5	同步电动机的起动和制动	(235)
7.5.1	起动方法	(235)



7.5.2	同步电动机的制动	(236)
7.6	同步电动机的调速	(236)
7.6.1	同步电动机的变频调速	(236)
7.6.2	自控式同步电动机调速系统	(237)
7.7	同步调相机	(238)
7.7.1	同步调相机的工作原理	(238)
7.7.2	调相机在电网的安装方式	(239)
7.7.3	调相机的额定值和特点	(240)
<b>第8章</b>	<b>电力拖动系统中电动机的选择</b>	<b>(242)</b>
8.1	电动机选择的主要内容	(242)
8.1.1	电动机种类的选择	(242)
8.1.2	电动机额定功率的选择	(243)
8.1.3	电动机额定电压的选择	(243)
8.1.4	电动机额定转速的选择	(243)
8.1.5	电动机结构形式的选择	(244)
8.1.6	电动机安装形式的选择	(244)
8.1.7	电动机工作制的选择	(244)
8.1.8	电动机型号的选择	(244)
8.2	电动机的发热和冷却	(244)
8.2.1	温升	(244)
8.2.2	冷却	(246)
8.3	电动机的工作制	(246)
8.3.1	连续工作制(S1)	(246)
8.3.2	短时工作制(S2)	(247)
8.3.3	断续周期工作制(S3)	(247)
8.4	电动机的额定功率和允许输出功率	(248)
8.4.1	电动机额定功率的确定	(248)
8.4.2	电动机的允许输出功率	(249)
8.5	连续工作制电动机额定功率的选择	(250)
8.5.1	长期恒定负载连续工作制电动机额定功率的选择	(250)
8.5.2	周期性变动负载连续工作制电动机额定功率的选择	(250)
8.5.3	起动、制动、停机过程时发热公式的修正	(254)
8.6	短时恒定负载电动机额定功率的选择	(255)
8.6.1	选择短时工作制电动机	(255)
8.6.2	选择断续周期工作制电动机	(256)
8.6.3	选择连续工作制电动机	(256)



8.7	断续周期恒定负载电动机额定功率的选择 .....	(257)
8.7.1	选择断续周期工作制电动机 .....	(257)
8.7.2	选择连续工作制电动机 .....	(258)
8.8	选择电动机额定功率的统计法和类比法 .....	(258)
8.8.1	统计法 .....	(258)
8.8.2	类比法 .....	(259)
<b>第9章</b>	<b>控制电机</b> .....	<b>(261)</b>
9.1	伺服电动机 .....	(261)
9.1.1	直流伺服电动机 .....	(262)
9.1.2	交流伺服电动机 .....	(265)
9.2	测速发电机 .....	(269)
9.2.1	直流测速发电机 .....	(270)
9.2.2	交流异步测速发电机 .....	(271)
9.3	自整角机 .....	(274)
9.3.1	基本结构 .....	(274)
9.3.2	力矩式自整角机 .....	(274)
9.3.3	控制式自整角机 .....	(275)
9.3.4	自整角机应用举例和选用时应注意的问题 .....	(276)
9.4	旋转变压器 .....	(278)
9.4.1	正余弦旋转变压器 .....	(278)
9.4.2	线性旋转变压器 .....	(281)
9.4.3	比例式旋转变压器 .....	(282)
9.4.4	数据传输用旋转变压器 .....	(282)
9.4.5	旋转变压器的应用 .....	(282)
9.5	步进电动机 .....	(284)
9.5.1	工作原理 .....	(284)
9.5.2	运行特性 .....	(287)
9.5.3	驱动电源 .....	(290)
9.6	力矩电动机 .....	(291)
9.6.1	直流力矩电动机 .....	(291)
9.6.2	交流力矩电动机 .....	(292)
9.7	微型同步电动机 .....	(292)
9.7.1	永磁式同步电动机 .....	(292)
9.7.2	反应式同步电动机 .....	(293)
9.7.3	磁滞式同步电动机 .....	(294)
	习题参考解答 .....	(298)
	参考文献 .....	(324)

# ◆ 绪 论 ◆

## 0.1 电机及电力拖动概述

### 1. 电机

电机是利用电磁感应原理进行能量转换的电气设备。例如：发电机是将机械能转换成电能；电动机是将电能转换成机械能。

### 2. 电机的分类

电机的分类方法有很多。按原理可分为直流电机、异步电机、同步电机、变压器、控制电机。前四种为四大典型电机，要求能量转换效率高；控制电机不是以能量转换为主，而是以在控制系统中实现某种功能为主。

### 3. 电力拖动

用电动机来拖动生产机械称电力拖动。分为：

成组拖动，现已很少采用；

单电动机拖动系统，例如水泵，由一台电动机拖动；

多电动机拖动系统，例如龙门刨床、车床、洗床，由多台电动机拖动；

自动化电力拖动系统，例如自动化生产设备和生产线。

### 4. 电机及电力拖动在国民经济中的地位和作用

所有发电厂的电能产生必须用发电机；电能的远距离传输必须用变压器；工业、农业、交通、军事、航天等各行各业以至家庭，都使用电动机；在许多自动控制系统中，必须用控制电机来实现某种功能。可以说，没有电机及电力拖动就没有今天的电气化和信息化，人类社会就会倒退一百多年。

### 5. 电机及电力拖动的发展趋势

#### (1) 大型化

单机容量越来越大，电压等级越来越高。例如：1000MW 的同步发电机、1000kV 的电力变压器。

#### (2) 微型化

为适应设备小型化、自动化的要求，电机的体积越来越小，重量越来越轻。例如：机器人、航天用的电机等。

#### (3) 新原理、新工艺、新材料的应用

例如：超声波电动机、无刷双馈电机、永磁无刷直流电动机等。

#### (4) 电力拖动系统朝着网络化、信息化方向发展

现场总线、智能控制、互联网等各种新技术、新方法均在电力拖动系统中得到应用。

## 0.2 磁场和磁路定律

在电机及电力拖动中，常用到以下关于磁场和磁路的知识，在以下叙述中各物理量的单位均是国际单位制。

### 1. 描述磁场的几个物理量

磁场是由电流产生的，磁场形象地用磁力线描述，磁力线是闭合曲线，且与产生它的电流相交链。磁力线的方向与产生它的电流方向满足右手螺旋定则，即大拇指方向为电流方向，四指回转方向为磁力线方向。

#### (1) 磁感应强度

磁感应强度又称磁通密度，用  $B$  表示。磁感应强度是描述磁场中某一点的磁场强弱及方向的物理量，用磁力线的疏密程度表示磁感应强度的大小，用磁力线上某点的切线方向表示该点的磁感应强度方向，磁感应强度是一个向量。

#### (2) 磁通量

磁通量简称磁通，用  $\Phi$  表示。磁通量是穿过某一截面的磁力线数，它是一个标量。

磁场均匀，且磁场与截面  $A$  垂直时

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (0-1)$$

$B$  的单位是 T(特斯拉)， $\Phi$  的单位是 Wb(韦伯)， $A$  的单位是  $\text{m}^2$ (平方米)。

#### (3) 磁场强度和磁导率

磁场强度是计算磁场时引入的一个物理量，用  $H$  表示，它是一个向量，其方向与  $B$  的方向相同。

用来表示物质磁导能力大小的物理量称磁导率，用  $\mu$  表示，它与磁场强度的乘积等于磁感应强度，即

$$B = \mu H \quad (0-2)$$

$H$  的单位是 A/m(安培每米)， $\mu$  的单位是 H/m(亨每米)。

磁场强度  $H$  和磁感应强度  $B$  的区别是： $H$  反应电流的励磁能力，其大小与电流成正比，与介质无关； $B$  不仅与励磁电流大小有关，还与介质的性质有关。

铁磁物料的磁感应强度  $B$ 、磁导率  $\mu$  与磁场强度  $H$  大小之间的关系曲线如图 0-1 所示。

曲线  $B=f(H)$  是铁磁材料的基本磁化曲线，它是磁滞回线的平均值。在  $H=0$  时， $B \neq 0$ ，是因为磁化过的铁磁材料有剩磁；在  $H$  比较小时， $B$  与  $H$  几乎成比例的增加，这种现象称磁不饱和；当  $H$  增加到一定值后， $B$  的增加缓慢下来，出现了非线性，这种现象称磁饱和。

铁磁材料的  $B=f(H)$  曲线，随着磁饱和的增加，磁导率  $\mu_{\text{Fe}}=f(H)$  曲线急剧下降。

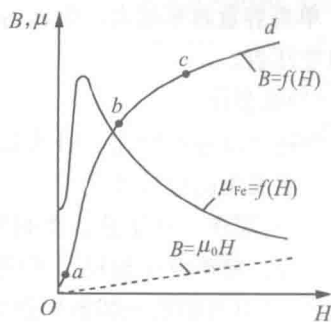


图 0-1 起始磁化曲线



真空的磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ , 非铁磁材料(包括空气)的磁导率约等于  $\mu_0$ 。在电机和变压器中, 工作点设计在  $B=f(H)$  曲线的膝点附近, 不同铁磁材料工作点的磁导率  $\mu_{\text{Fe}}$  为  $\mu_0$  的 2000~7000 倍。

## 2. 铁损耗

铁磁材料在交变磁场中反复磁化, 使磁畴之间不停地相互摩擦, 就会消耗能量而引起损耗, 这种损耗称磁滞损耗。

当铁芯中通过交变磁通时, 铁芯内将感应电动势并产生环流, 这种环流称涡流。涡流在铁芯中引起的损耗称涡流损耗。

磁滞损耗和涡流损耗合在一起称铁损耗。电机和变压器中用的电工硅钢片, 工作点的磁感应强度  $B$  为  $1\text{T} \leq B \leq 2\text{T}$ , 计算铁损耗的经验公式为

$$p_{\text{Fe}} = K_{\text{Fe}} f^{1.3} B_m^2 m \quad (0-3)$$

式中,  $K_{\text{Fe}}$  是与材料有关的损耗系数;  $f$  是磁场交变频率;  $B_m$  是磁感应强度幅值;  $m$  是铁芯质量。

可见, 由直流电流产生的恒定磁场无铁芯损耗。

## 3. 磁路定律

磁通所通过的路径称磁路。在电机及电力拖动中进行磁路分析时, 常用到以下定律:

### (1) 安培环路定律

在磁场中, 任意时刻沿着任意一个闭合回路  $L$ , 磁场强度  $H$  的线积分值等于该回路所包围的总电流(代数和)

$$\oint_L H dl = \sum I \quad (0-4)$$

式中,  $I$  为恒定电流或为变化电流。在电机和变压器中,  $\sum I$  又称磁动势, 用  $F$  表示, 单位是 A(安培)。式(0-4)的另一种表达形式为

$$\sum HL = \sum I \quad (0-5)$$

式中,  $HL$  称闭合磁路中各段的磁压降, 单位是 A(安培);  $H$  是各段平均磁场强度, 单位是 A/m;  $L$  是各段磁路平均长度, 单位是 m(米)。式(0-5)也称磁路基尔霍夫第二定律。

### (2) 磁路欧姆定律

由安培环路定律得

$$F = HL = \frac{B}{\mu} L = \frac{\Phi L}{A\mu} = R_m \Phi \quad (0-6)$$

式中,  $R_m = \frac{L}{A\mu}$  称磁路的磁阻, 单位是  $\text{H}^{-1}$  (1/亨),  $\Phi$  的单位是 Wb,  $F$  的单位是 A。

$F = R_m \Phi$  称磁路欧姆定律, 即任意时刻作用在磁路上的磁动势等于磁路内的磁通乘磁路的磁阻。 $R_m$  若为闭合磁路的总磁阻,  $F$  就是作用在该磁路上的总磁动势;  $R_m$  若为某段磁路的磁阻,  $F$  就是作用在该段磁路上的磁压降  $HL$ 。

# ❖ 第 1 章 直流电机 ❖

## 本章学习目标

- ①掌握直流电机的基本结构及工作原理；
- ②了解直流电机的电枢绕组及磁场分布；
- ③掌握直流电机的电枢电动势和电磁转矩；
- ④了解直流电机的换向过程；
- ⑤掌握直流发电机和直流电动机的基本方程式；
- ⑥掌握直流发电机的空载特性、外特性和调节特性；
- ⑦掌握直流电动机的工作特性。

直流发电机作为各种直流电源使用，目前正逐渐被由电力电子整流元件组成的直流电源所取代。直流电动机具有良好的启动和调速性能，在电力拖动系统和自动控制系统中，仍占有很重要的地位。利用晶闸管整流电源配合直流电动机而组成的调速系统正在迅速发展。

本章主要研究换向式直流电机，重点分析它们的工作原理、结构、电路系统、磁路系统、稳态运行的基本方程式和运行特性。

## 1.1 直流电机的结构及工作原理

直流电动机从电枢端输入直流电流，将电能转换为机械能从转轴上输出。与三相交流异步电动机相比，虽然结构复杂，维修也不便，但它的调速性能好、起动转矩大，因此广泛应用于电力牵引、轧钢机、起重设备以及要求调速范围广泛的切削机床中。

### 1.1.1 直流电机的构造

直流电机由定子和转子(又称为电枢)两大部分组成。直流电机运行时静止不动的部分称为定子，其主要作用是产生磁场。运行时转动的部分称为转子，其主要作用是产生电磁转矩和感应电动势，是直流电机进行机电能量转换的枢纽，所以通常又称为电枢。直流电机纵向剖视图如图 1-1 所示。

#### 1. 定子

定子主要由主磁极、换向极、机座、电刷装置等构成。

##### (1) 主磁极

主磁极的作用是产生气隙磁场。主磁极由主磁极铁芯和励磁绕组两部分组成。铁芯一般采用薄硅钢片冲压叠装而成，分为极身和极靴两部分，上面套励磁绕组的部分称为极身，下面扩宽的部分称为极靴，极靴宽于极身，既可以调整气隙中磁场的分布，又便于固定励

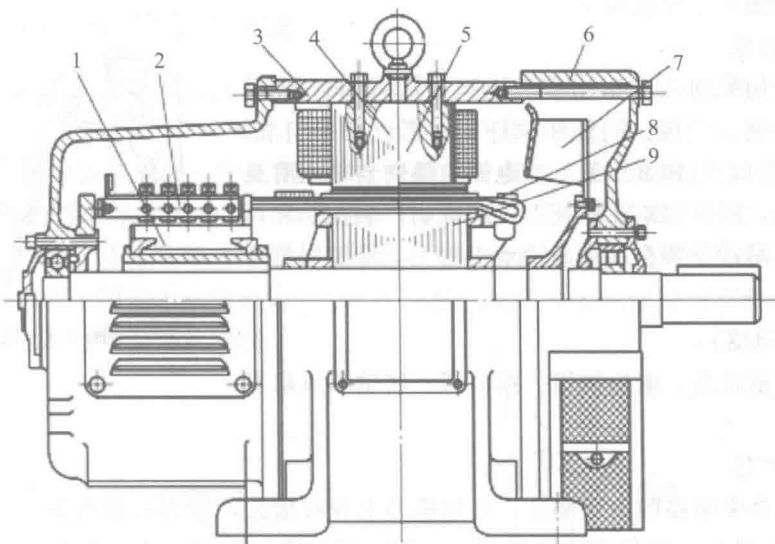


图 1-1 直流电机纵向剖视图

- 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—电枢铁芯

磁绕组。励磁绕组用绝缘铜线绕制而成，套在主磁极铁芯上。整个主磁极用螺钉固定在机座上，如图 1-2 所示。

### (2) 换向极

换向极的作用是改善换向，减少电机运行时电刷与换向器之间可能产生的电火花，一般装在两个相邻主磁极之间，由换向极铁芯和换向极绕组组成，如图 1-3 所示。换向极绕组用绝缘铜导线绕制而成，套在换向极铁芯上，换向极的数目与主磁极相等。

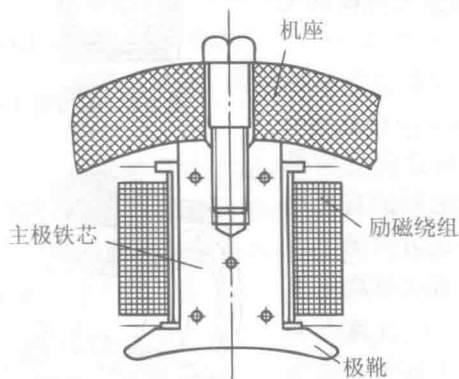


图 1-2 主磁极的结构

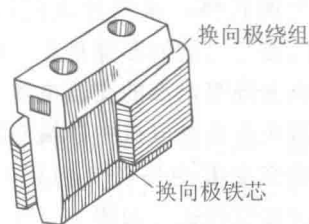


图 1-3 换向极

### (3) 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，并支撑和固定整个电机；二是机座本身也是磁路的一部分，借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电性能，一般





为铸钢或由钢板弯制焊接而成。

#### (4) 电刷装置

电刷装置用来通入和引出直流电流，如图 1-4 所示。电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座、汇流条等组成。电刷放在刷握内，用弹簧压紧，使电刷与换向器之间有良好的滑动接触，刷握固定在刷杆上，绝缘刷杆装在圆环形的刷杆座上，刷杆座装在端盖或轴承内盖上，沿圆周位置可以调整。

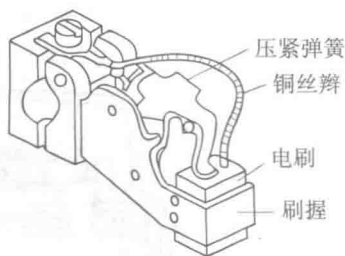


图 1-4 电刷装置

## 2. 转子(电枢)

转子由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。

### (1) 电枢铁芯

电枢铁芯是主磁路的主要部分，电枢铁芯上冲有槽孔，槽内嵌放电枢绕组。一般电枢铁芯由 0.5mm 厚的硅钢片冲槽叠压而成，以降低电机运行时在电枢铁芯中产生的涡流损耗和磁滞损耗。叠成的铁芯固定在转轴上。电枢铁芯的外圆开有电枢槽，槽内嵌放电枢绕组。

### (2) 电枢绕组

电枢绕组的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关键部件。电枢绕组由许多绕组元件按一定规律连接而成，绕组采用高强度漆包线或玻璃丝包扁铜线绕成，不同线圈的绕组元件分上、下两层嵌放在电枢槽内，线圈与铁芯之间以及上、下两层线圈之间都必须妥善绝缘。为防止离心力将线圈边甩出槽外，槽口用槽楔固定，如图 1-5 所示。绕组元件线圈伸出槽外的端接部分用热固性无纬玻璃带进行绑扎。

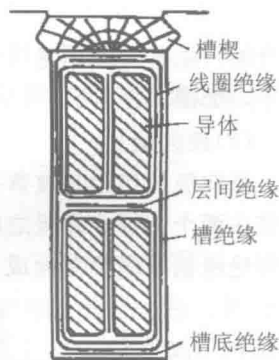


图 1-5 电枢槽结构

### (3) 换向器

电枢绕组的一端装有换向器，换向器由许多铜质换向片组成一个圆柱体，换向片之间用云母绝缘。在直流电动机中，换向器与电刷的摩擦接触，将正、负电刷之间的直流电流变换成为绕组内部的交流电流，以便形成固定方向的电磁转矩。而在直流发电机中，换向器配以电刷，将电枢绕组感应产生的交变电动势转换为正、负电刷上引出的直流电动势。换向器结构通常如图 1-6 所示，换向片的下部做成燕尾形，两端用钢制 V 形套筒和 V 形云母环固定，再用螺母锁紧。

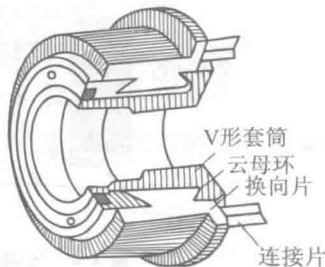


图 1-6 换向器结构

### (4) 转轴

转轴起着转子旋转的支撑作用，需要一定的机械强度和刚度，一般用圆钢加工而成。