

# 电气控制 技术基础

范次猛 主编

从基础  
到实践

基础知识全面覆盖  
实践操作循序渐进

从理论  
到应用

理论讲解详尽具体  
动手应用实操实练

从入门  
到进阶

入门知识由浅入深  
掌握技能进阶无忧

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 电气控制技术基础

主 编 范次猛

副主编 王意修



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书是依据教育部最新公布的《高等职业学校专业教学标准》中电气自动化技术专业标准，结合五年制高等职业教育实际情况，并参照相关国家职业标准和行业职业技能鉴定规范编写而成。

本书主要内容包括：直流电机的应用、变压器的应用、交流电机的应用、特种电机的应用，三相异步电动机基本控制电路的安装与调试、多速异步电动机控制电路的安装与调试、绕线转子异步电动机控制电路的安装与调试、常用生产机械电气控制电路的调试与检修等。采用模块化的形式，每个模块又分为若干个单元，通过单元对直流电机、交流电机、变压器、特种电机的具体应用进行阐述，对电气控制电路安装与调试的知识和技能进行整合构建，每个单元中都附有任务描述、任务目标、相关知识、操作训练和思考与练习，便于自学。

本书可作为高等职业院校、五年制高职学校、中等职业学校、技工学校自动化类、机电类、数控类等专业的教学用书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电气控制技术基础 / 范次猛主编. -- 北京: 北京理工大学出版社, 2021. 8

ISBN 978 - 7 - 5763 - 0160 - 1

I. ①电… II. ①范… III. ①电气控制—高等职业教育—教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 165752 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市天利华印刷装订有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 19

字 数 / 425 千字

版 次 / 2021 年 8 月第 1 版 2021 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 73.00 元

责任编辑 / 朱 婧

文案编辑 / 朱 婧

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 施胜娟

---

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

# 前 言

“电气控制技术基础”是高等职业院校电气类专业的专业核心课程，本书是依据教育部最新公布的《高等职业学校专业教学标准》中电气自动化技术专业标准，并参照相关国家职业标准和行业职业技能鉴定规范编写而成的。

本书在编写过程中进行了大量的企业调研，邀请许多企业专家参与了典型职业活动分析，并在职业教育专家的指导下将典型职业活动转化为学习领域课程，突破了以往学科体系教材编写的理念。本书在编写过程中以能力为本位，以工作过程为导向，以项目为载体，以实践为主线，本着符合行业企业需求、紧密结合生产实际、跟踪先进技术、强化应用、注重实践的原则设计应用模块，在任务实施过程中强调技能、知识要素与情感态度价值观要素相融合。

本书模块一以3个单元引领学习直流电机的应用，包括认识直流电机，直流电动机的调速，直流电动机的启动、反转和制动等；模块二以3个单元引领学习变压器的应用，包括单相、三相和特种变压器的基本结构、原理、使用和操作；模块三以5个单元引领学习交流电机的应用，包括认识三相异步电动机，三相异步电动机的运行、调速、启动、反转和制动，单相异步电动机的应用等；模块四以4个单元引领学习特种电机的应用，包括伺服电动机的应用、测速发电机的应用、步进电动机的应用和直线电动机的应用等；模块五以7个单元引领学习三相异步电动机基本控制电路的安装与调试，包括常用低压电器的功能、结构、使用和维修，单向点动与连续控制电路，正反转控制电路，位置控制、自动往返控制、顺序控制和多地控制电路，降压启动控制电路，制动控制电路，多速异步电动机控制电路，绕线转子异步电动机的基本控制电路等；模块六以5个单元引领学习常用生产机械电气控制电路的调试与检修，包括CA6140型车床、M7130型平面磨床、Z3040型钻床、X62W型万能铣床、T68型卧式镗床电气控制电路。

本书由江苏省无锡交通高等职业技术学校范次猛任主编，并由其完成全书的统稿工作；江苏省无锡交通高等职业技术学校王意修任副主编；苏州工业园区工业技术学校苏建参与编写。全书分为六个模块，模块一由王意修编写，模块二至模块五由范次猛编写，模块六由苏建编写。

由于编者学识和水平有限，书中难免存在疏漏和不足，恳请同行和使用本书的广大读者批评指正。

# 目 录

模块一 直流电机的应用 .....	1
单元1 认识直流电机 .....	1
单元2 直流电动机的调速 .....	14
单元3 直流电动机的启动、反转和制动 .....	21
模块二 变压器的应用 .....	27
单元1 认识变压器 .....	27
单元2 三相变压器的应用 .....	34
单元3 特种变压器的应用 .....	39
模块三 交流电机的应用 .....	44
单元1 认识三相异步电动机 .....	44
单元2 三相异步电动机的运行 .....	53
单元3 三相异步电动机的调速 .....	59
单元4 三相异步电动机的启动、反转和制动 .....	64
单元5 单相异步电动机的应用 .....	74
模块四 特种电机的应用 .....	79
单元1 伺服电动机 .....	79
单元2 测速发电机 .....	83
单元3 步进电动机 .....	86
单元4 直线电动机 .....	89
模块五 三相异步电动机的基本控制电路 .....	97
单元1 三相异步电动机单向点动与连续运转控制电路 .....	97
单元2 三相异步电动机正反转控制电路 .....	131
单元3 三相异步电动机位置控制、自动往返控制、顺序控制和多地点控制电路 .....	141
单元4 三相异步电动机降压启动控制电路 .....	158
单元5 三相异步电动机制动控制电路 .....	176

单元 6	多速异步电动机控制电路 .....	194
单元 7	绕线转子异步电动机的基本控制电路 .....	208
<b>模块六</b>	<b>常用生产机械电气控制电路调试与检修 .....</b>	<b>232</b>
单元 1	调试与检修 CA6140 型车床电气控制电路 .....	232
单元 2	调试与检修 M7130 型平面磨床电气控制电路 .....	245
单元 3	调试与检修 Z3040 型钻床电气控制电路 .....	257
单元 4	调试与检修 X62W 型万能铣床电气控制电路 .....	268
单元 5	调试与检修 T68 型卧式镗床电气控制电路 .....	280
<b>参考文献</b>	.....	<b>291</b>

# 模块一 直流电机的应用

## 单元1 认识直流电机

### 任务描述

直流电机是实现直流电能与机械能之间相互转换的电力机械，按照用途可以分为直流电动机和直流发电机两类。其中将机械能转换成直流电能的电机称为直流发电机，如图1-1所示；将直流电能转换成机械能的电机称为直流电动机，如图1-2所示。直流电机是工矿、交通、建筑等行业中的常见动力机械，是机电行业人员的重要工作对象之一。作为一名电气控制技术人员必须熟悉直流电机的结构、工作原理和性能特点，能正确使用直流电机。



图1-1 直流发电机

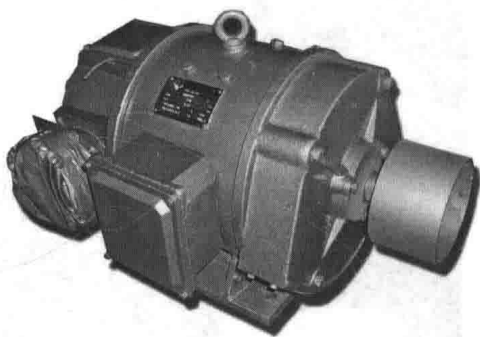


图1-2 直流电动机

### 任务目标

- (1) 了解直流电机的特点、用途和分类；熟悉直流电机的基本工作原理。
- (2) 认识直流电机的外形和内部结构，熟悉各部件的作用。
- (3) 了解直流电机铭牌中型号和额定值的含义，掌握额定值的简单计算。

## 相关知识

## 一、直流电机的特点和用途

## 1. 直流电机的特点

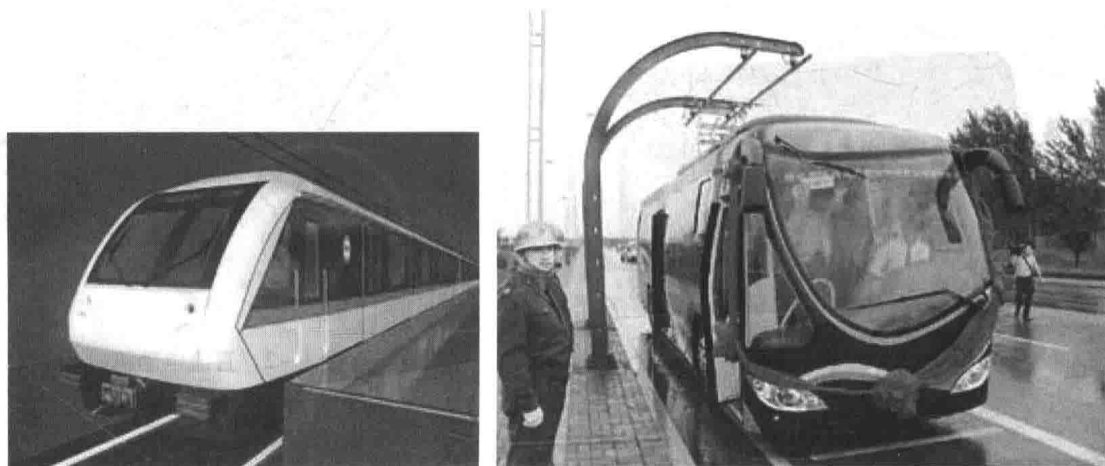
直流电动机与交流电动机相比,具有优良的调速性能和启动性能。直流电动机具有宽广的调速范围、平滑的无级调速特性,可实现频繁的无级快速启动、制动和反转;过载能力大,能承受频繁的冲击负载;能满足自动化生产系统中各种特殊运行的要求。

直流发电机则能提供无脉动的大功率直流电源,且输出电压可以精确地调节和控制。

但直流电机也有它显著的缺点:一是制造工艺复杂,消耗有色金属较多,生产成本高;二是运行时由于电刷与换向器之间容易产生火花,因而可靠性较差,维护比较困难。所以在一些对调速性能要求不高的领域中已被交流变频调速系统所取代。但是在某些要求调速范围大、快速性高、精密度好、控制性能优异的场合,直流电动机的应用目前仍占有较大的比例。

## 2. 直流电机的用途

由于直流电动机具有良好的启动和调速性能,常应用于对启动和调速有较高要求的场合,如大型可逆式轧钢机、矿井卷扬机、宾馆高速电梯、龙门刨床、电力机车、内燃机车、城市电车、地铁列车、电动自行车、造纸和印刷机械、船舶机械、大型精密机床和大型起重机等生产机械中,图1-3所示是其应用的几种实例。



(a)

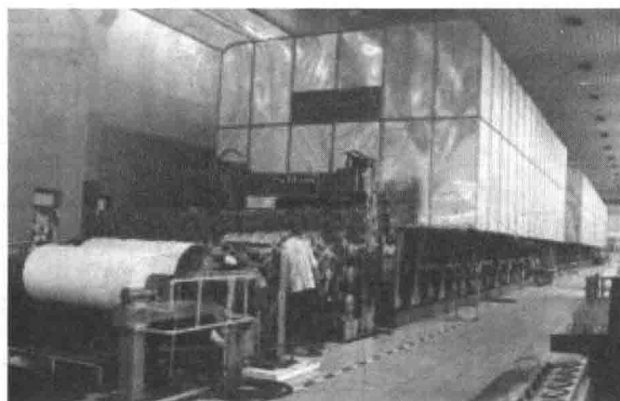
(b)

图1-3 直流电动机的应用实例

(a) 地铁列车; (b) 城市电车



(c)



(d)

图 1-3 直流电动机的应用实例 (续)

(c) 电动自行车; (d) 造纸机

直流发电机主要用作各种直流电源, 如直流电动机电源、化学工业中所需的低电压大电流的直流电源、直流电焊机电源等, 如图 1-4 所示。



(a)



(b)

图 1-4 直流发电机的应用实例

(a) 电解铝车间; (b) 电镀车间

## 二、直流电机的基本结构

直流电动机和直流发电机的结构基本一样。直流电机由静止的定子和转动的转子两大部分组成, 在定子和转子之间存在一个间隙, 称为气隙。定子的作用是产生磁场和支撑电机, 它主要包括主磁极、换向磁极、机座、电刷装置、端盖等。转子的作用是产生感应电动势和电磁转矩, 实现机电能量的转换, 通常也被称为电枢。它主要包括电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴、风扇等。直流电机的结构如图 1-5 所示。

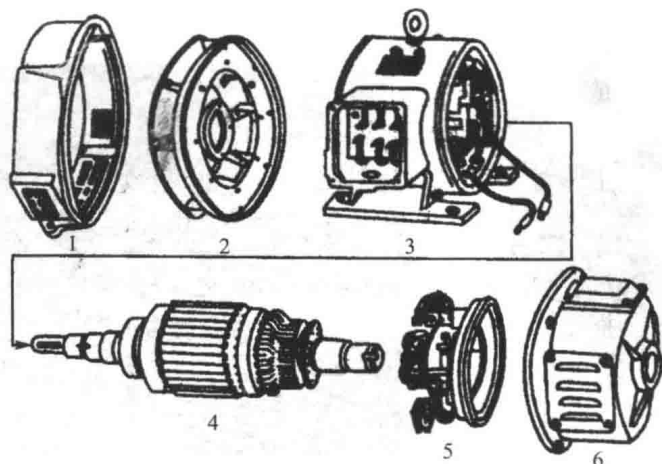


图 1-5 直流电机的结构

1—前端盖；2—风扇；3—定子；4—转子；5—电刷及刷架；6—后端盖。

### 1. 主磁极

主磁极的作用是产生主磁通，它由铁芯和励磁绕组组成，如图 1-6 所示。铁芯一般用 1~1.5 mm 的低碳钢片叠压而成，小电机也有用整块铸钢磁极的。主磁极上的励磁绕组是用绝缘铜线绕制而成的集中绕组，与铁芯绝缘，各主磁极上的线圈一般是串联起来的。主磁极总是成对的，并按 N 极和 S 极交替排列。

### 2. 换向磁极

换向磁极的作用是产生附加磁场，用以改善电机的换向性能。通常铁芯由整块钢做成，换向磁极的绕组应与电枢绕组串联。换向磁极装在两个主磁极之间，如图 1-7 所示。换向磁极极性在作为发电机运行时，应与电枢导体将要进入的主磁极极性相同；在作为电动机运行时，则应与电枢导体刚离开的主磁极极性相同。

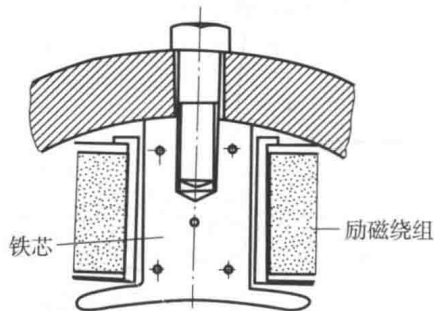


图 1-6 直流电机的主磁极

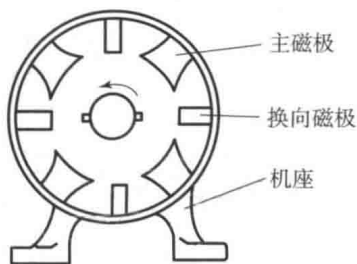


图 1-7 换向磁极的位置

### 3. 机座

机座一方面用来固定主磁极、换向磁极和端盖等，另一方面作为电机磁路的一部分（称为磁轭）。机座一般用铸钢或钢板焊接制成。

#### 4. 电刷装置

在直流电机中，为了使电枢绕组和外电路连接起来，必须装设固定的电刷装置，它是由电刷、刷握和刷杆座组成的，如图 1-8 所示。电刷是用石墨等做成的导电块，放在刷握内，用弹簧压指将它压触在换向器上。刷握用螺钉夹紧在刷杆座上，用铜绞线将电刷和刷杆连接，刷杆装在刷杆座上，彼此绝缘，刷杆座装在端盖上。

#### 5. 电枢铁芯

电枢铁芯的作用是通过磁通和安放电枢绕组。当电枢在磁场中旋转时，铁芯将产生涡流和磁滞损耗。为了减少损耗，提高效率，电枢铁芯一般用硅钢片冲叠而成。电枢铁芯具有轴向通风孔，如图 1-9 所示。铁芯外圆周上均匀分布着槽，用以嵌放电枢绕组。

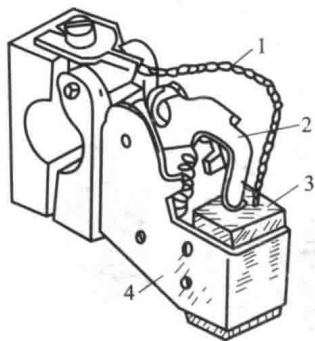


图 1-8 电刷装置

1—铜绞线；2—弹簧压指；3—电刷；4—刷握。

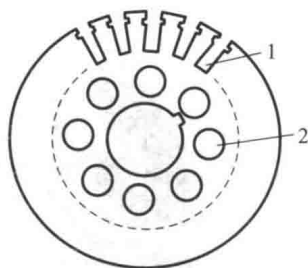


图 1-9 电枢铁芯

1—槽；2—轴向通风孔。

#### 6. 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电动势和通过电流产生电磁转矩，实现机电能量转换。绕组通常用漆包线绕制而成，嵌入电枢铁芯槽内，并按一定的规则连接起来。为了防止电枢旋转时产生的离心力使绕组飞出，绕组嵌入槽内后，用槽楔压紧；线圈伸出槽外的端接部分用无纬玻璃丝带扎紧。

#### 7. 换向器

换向器的结构如图 1-10 所示，它由许多带有鸽尾形的换向片叠成一个圆筒，片与片之间用云母片绝缘，借 V 形套筒和螺纹压圈拧紧成一个整体。每个换向片与绕组每个元件的引出线焊接在一起，其作用是将直流电机输入的直流电流转换成电枢绕组内的交变电流，进而产生恒定方向的电磁转矩，使电机连续运转。

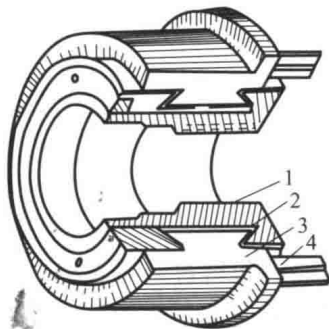


图 1-10 换向器的结构

1—V 形套筒；2—云母片；  
3—换向片；4—连接片。

### 三、直流电机的工作原理

#### 1. 直流发电机的工作原理

图 1-11 所示是直流发电机工作原理，定子上有两个磁

极 N 和 S，它们建立恒定磁场，两磁极中间是装在转子上的电枢绕组。绕组元件  $abcd$  的两端  $a$  和  $d$  分别与两片相互绝缘的半圆形铜片（换向器）相接，通过电刷  $A$ 、 $B$  与外电路相连。

当原动机带着电枢逆时针方向旋转时，线圈两个有效边  $ab$  和  $cd$  将切割磁场磁力线产生感应电动势，方向按右手定则确定，如图 1-11 (a) 所示，在 S 极下为  $d \rightarrow c$ ，在 N 极下为  $b \rightarrow a$ ，电刷  $A$  为正极，电刷  $B$  为负极。负载电流的方向为  $A \rightarrow B$ 。

当线圈转过  $90^\circ$  时，如图 1-11 (b) 所示，两个线圈的有效边位于磁场物理中性面上，导体的运动方向与磁力线平行，不切割磁力线，因此感应电动势为零。虽然两电刷同时与两铜片相接使线圈短路，但线圈中无电动势和电流。

当线圈转过  $180^\circ$  时，如图 1-11 (c) 所示，此时线圈有效边中的电动势方向改变了，在 S 极下为  $a \rightarrow b$ ，在 N 极下为  $c \rightarrow d$ 。由于此时电刷  $A$  和电刷  $B$  所接触的铜片已经互换，因此电刷  $A$  仍为正极，电刷  $B$  仍为负极，输出电流  $I$  的方向不变。

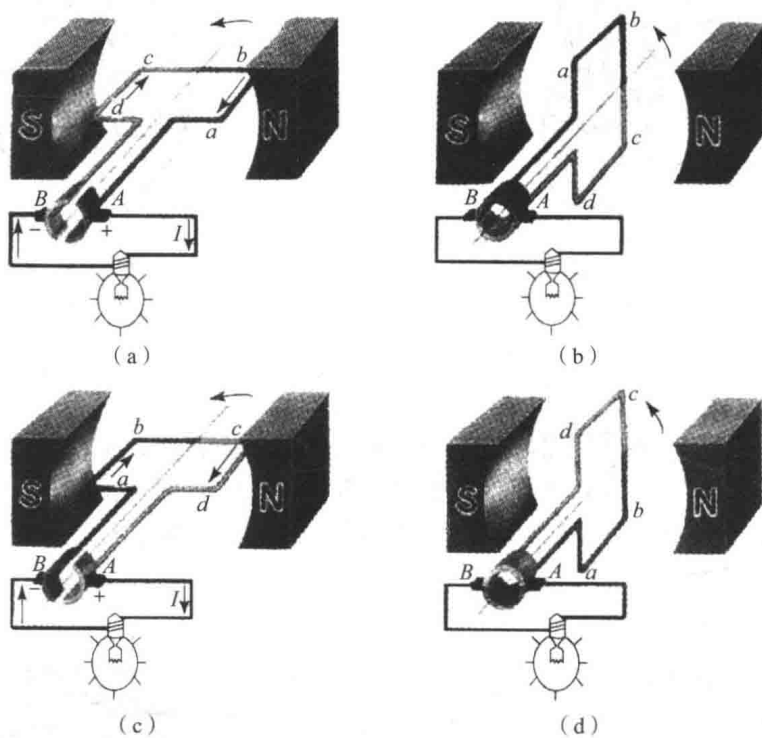


图 1-11 直流发电机工作原理

(a) 灯亮；(b) 灯不亮；(c) 灯亮；(d) 灯不亮

线圈每转过一对磁极，其两个有效边中的电动势方向就改变一次，但是两电刷之间的电动势方向是不变的，电动势大小在零和最大值之间变化。显然，电动势方向虽然不变，但大小波动很大，这样的电动势是没有实用价值的。为了减小电动势的波动程度，实用的发电机在电枢圆周表面装有较多数量且互相串联的线圈和相应数量的铜片。这样，换向后的合成电动势的波动程度就会显著减小。由于实际发电机的线圈数较多，所以电动势波动很小，可认为是恒定不变的直流电动势。

由以上分析可得直流发电机的工作原理：当原动机带动直流发电机电枢旋转时，在电枢绕组中产生方向交变的感应电动势，通过电刷和换向器的作用，在电刷两端输出方向不变的直流电动势。

## 2. 直流电动机的工作原理

直流电动机在机械构造上与直流发电机完全相同，图 1-12 所示是直流电动机的工作原理。电枢不用外力驱动，把电刷 A、B 接到直流电源上，假定电流从电刷 A 流入线圈，沿  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$  方向从电刷 B 流出。载流线圈在磁场中将受到电磁力的作用，其方向按左手定则确定， $ab$  边受到向上的力， $cd$  边受到向下的力，形成电磁转矩，使电枢逆时针方向转动，如图 1-12 (a) 所示。当电枢转过  $90^\circ$  时，如图 1-12 (b) 所示，线圈中虽无电流和力矩，但在惯性的作用下继续旋转。

当电枢转过  $180^\circ$  时，如图 1-12 (c) 所示，电流仍然从电刷 A 流入线圈，沿  $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$  方向从电刷 B 流出。与图 1-12 (a) 比较，通过线圈的电流方向改变了，但两个线圈有效边受电磁力的方向却没有改变，即电动机只朝一个方向旋转。若要改变其转向，必须改变电源的极性，使电流从电刷 B 流入、从电刷 A 流出。

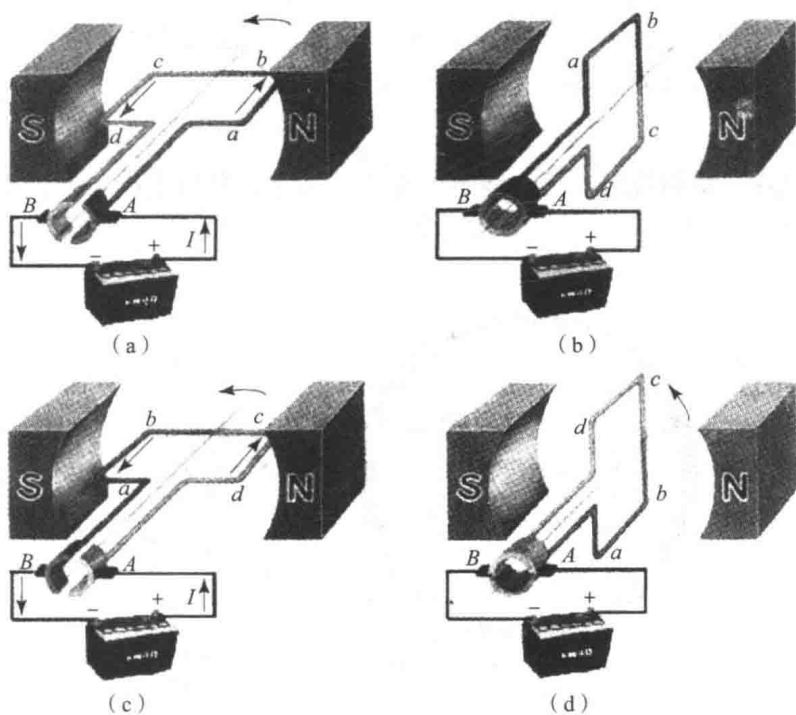


图 1-12 直流电动机的工作原理

- (a) 受电磁力，逆时针转动；
- (b) 不受电磁力，惯性转动；
- (c) 受电磁力，逆时针转动；
- (d) 不受电磁力，惯性转动

由以上分析可得直流电动机的工作原理：当直流电动机接入直流电源时，借助于电刷和换向器的作用，在直流电动机电枢绕组中流过方向交变的电流，从而使电枢产生恒定方向的电磁转矩，保证了直流电动机朝一定的方向连续旋转。

### 3. 直流电机的可逆原理

比较直流电动机与直流发电机的结构和工作原理，可以发现：一台直流电机既可以作为发电机运行，也可以作为电动机运行，只是其输入输出的条件不同而已。

如果在电刷两端加上直流电源，将电能输入电枢，则从电机轴上输出机械能，驱动生产机械工作，这时直流电机将电能转换为机械能，直流电机工作在电动机状态。

如果用原动机驱动直流电机的电枢旋转，从电机轴上输入机械能，则从电刷两端可以引出直流电动势，输出直流电能，这时直流电机将机械能转换为直流电能，其工作在发电机状态。

同一台电机既能作发电机运行，又能作电动机运行的原理，称为电机的可逆原理。一台电机的实际工作状态取决于外界的不同条件。实际的直流电动机和直流发电机在设计时考虑了工作特点的一些差别，因此有所不同。例如，直流发电机的额定电压略高于直流电动机，以补偿线路的电压降，便于两者配合使用；直流发电机的额定转速略低于直流电动机，便于选配原动机。

## 四、直流电机的励磁方式

直流电机的励磁方式是指电机励磁电流的供给方式，根据励磁支路和电枢支路的相互关系，有他励、自励（并励、串励和复励）、永磁方式。

### 1. 他励方式

在他励电机中，电枢绕组和励磁绕组电路相互独立，电枢电压与励磁电压彼此无关。他励电机接线如图 1-13 所示。

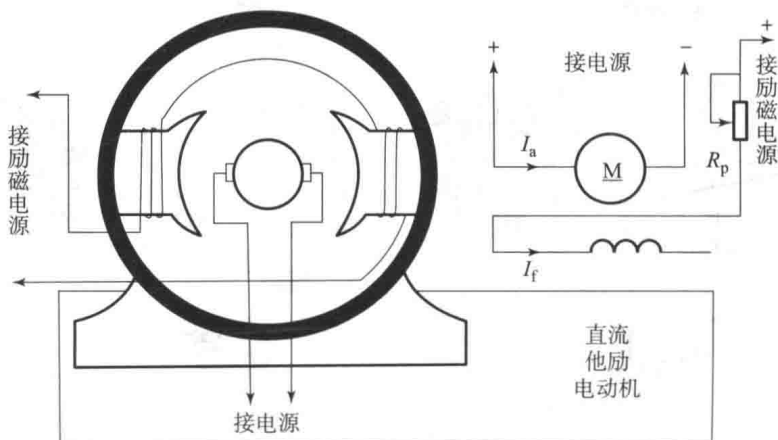


图 1-13 他励电机接线

### 2. 并励方式

在并励电机中，电枢绕组和励磁绕组是并联关系，由同一电源供电，其接线如图 1-14 所示。

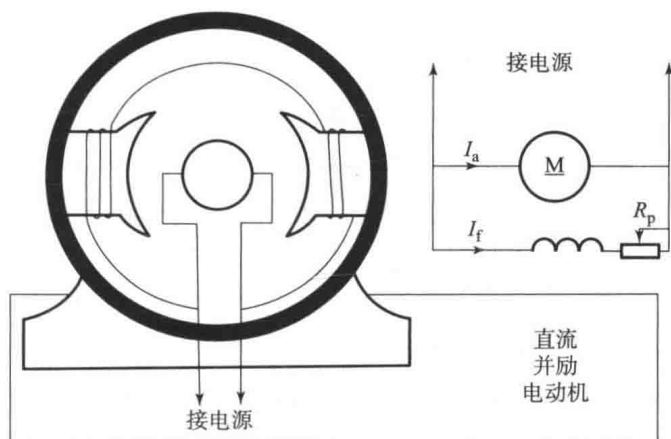


图 1-14 并励电机接线

### 3. 串励方式

在串励电机中，电枢绕组与励磁绕组是串联关系，其接线如图 1-15 所示。

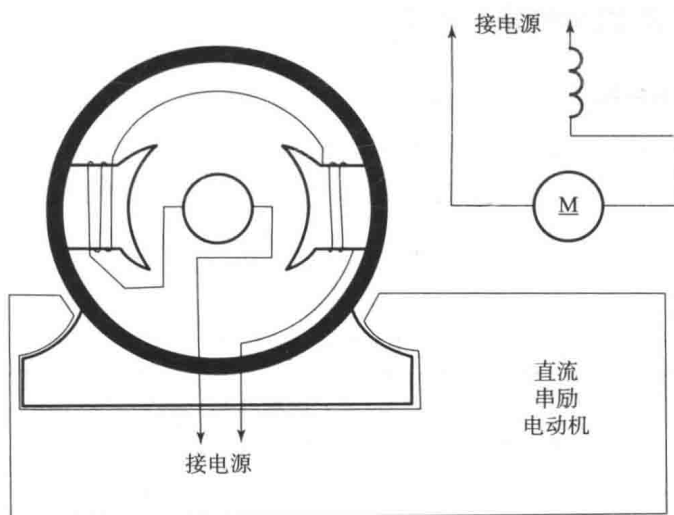


图 1-15 串励电机接线

### 4. 复励方式

复励电机的主磁极上有两部分励磁绕组，其中一部分与电枢绕组并联，另一部分与电枢绕组串联。当两部分励磁绕组产生的磁通方向相同时，称为积复励，反之称为差复励。复励电机接线如图 1-16 所示。

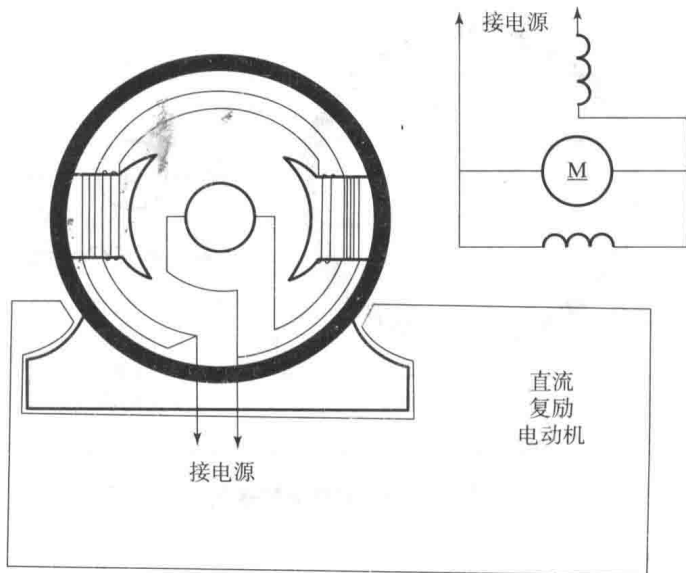


图 1-16 复励电机接线

## 五、直流电机的铭牌数据与系列

### 1. 直流电机铭牌数据

电机制造厂按照国家标准，根据电机的设计和试验数据，规定了电机的正常运行状态和条件，通常称之为额定运行。凡表征电机额定运行情况的各种数据均称为额定值，标注在电机铝制铭牌上，它是正确合理使用电机的依据。直流电机的主要额定值如表 1-1 所示。

表 1-1 直流电机铭牌

型号	Z2-72	励磁方式	并励
功率	22 kW	励磁电压	220 V
电压	220 V	励磁电流	2.06 A
电流	116 A	定额	连续
转速	1 500 r/min	温升	80 ℃
编号	× × × ×	出厂日期	× × × × 年 × 月 × 日
× × × × 电机厂			

#### 1) 额定容量（额定功率） $P_N$ (kW)

额定容量指电机的输出功率。对发电机而言，是指输出的电功率；对电动机，则是指转轴上输出的机械功率。

#### 2) 额定电压 $U_N$ (V) 和额定电流 $I_N$ (A)

注意它们不同于电机的电枢电压  $U_a$  和电枢电流  $I_a$ ，发电机的  $U_N$ 、 $I_N$  是输出值，电动

机的  $U_N$ 、 $I_N$  是输入值。

### 3) 额定转速 $n_N$ (r/min)

额定转速是指在额定功率、额定电压、额定电流时电机的转速。

电机在实际应用时,是否处于额定运行情况,要由负载的大小决定。一般不允许电机超过额定值运行,因为这样会缩短电机的使用寿命,甚至损坏电机。但也不能让电机长期轻载运行,这样不能充分利用设备,运行效率低,所以应该根据负载大小合理选择电机。

## 2. 直流电机系列

我国目前生产的直流电机主要有以下系列。

### 1) Z2 系列

该系列为一般用途的小型直流电机系列。“Z”表示直流,“2”表示第二次改进设计。系列容量为 0.4 ~ 200 kW,电动机电压为 110 V、220 V,发电机电压为 115 V、230 V,属防护式。

### 2) ZF 和 ZD 系列

这两个系列为一般用途的中型直流电机系列。“F”表示发电机,“D”表示电动机。系列容量为 55 ~ 1 450 kW。

### 3) ZZJ 系列

该系列为起重、冶金用直流电机系列。电压有 220 V、440 V 两种。工作方式有连续、短时和断续三种。ZZJ 系列电机启动速度快,过载能力强。

此外,还有 ZQ 直流牵引电动机系列及用于易爆场合的 ZA 防爆安全型直流电机系列等。常见电机产品系列见表 1-2。

表 1-2 常见电机产品系列

代号	含义
Z2	一般用途的中、小型直流电机,包括发电机和电动机
Z、ZF	一般用途的大、中型直流电机系列。Z 是直流电动机系列;ZF 是直流发电机系统
ZZJ	专供起重冶金工业用的专用直流电动机
ZT	用于恒功率且调速范围比较大的驱动系统里的宽调速直流电动机
ZQ	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	船舶上各种辅助机械用的船用直流电动机
ZU	用于龙门刨床的直流电动机
ZA	用于矿井和有易爆气体场所的防爆安全型直流电动机
ZKJ	冶金、矿山挖掘机用的直流电动机

## 六、直流电机的感应电动势和电磁转矩

无论是直流电动机还是直流发电机,在转动时,其电枢绕组都会由于切割主磁极产生的磁力线而感应出电动势。同时,由于电枢绕组中有电流流过,电枢电流与主磁场作用又会产生电磁转矩。因此,直流电机的电枢绕组中同时存在着感应电动势和电磁转矩,它们