

机电设备 电气控制技术

● 主编 王 浔

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

机电设备电气 控制技术

主编 王 浔
参编 叶珠芳



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

图书在版编目 (CIP) 数据

机电设备电气控制技术/王浔主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2018. 8

ISBN 978 - 7 - 5682 - 6311 - 5

I. ①机… II. ①王… III. ①机电设备 - 电气控制 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 208496 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) 68948351 (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 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 16

字 数 / 370 千字

版 次 / 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 63.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李 洋

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

Qianyan

本书是机电类专业的理想用书，也可以作为职工培训教材，是笔者根据“机电设备电气控制技术”课程标准，精心合理组织教学内容，循序渐进，把理论知识和操作技能有机结合编写而成的。全书以电气设备控制对象及控制技术为主线，先介绍直流电动机、交流电动机及应用的基本知识，接着重点进行三相异步电动机基本控制线路的组成和工作原理分析、直流电动机的控制线路原理以及典型生产机械设备的电气控制线路工作原理分析。让学习者通过对本书内容的学习，掌握电动机的基本知识以及电动机电气控制线路工作原理的分析方法和常见电气故障诊断及维修方法。

本书的内容设计为任务引领式课程体系，紧紧围绕工作任务的需要来选择项目内容，将知识本位转换为能力本位，以项目任务和职业能力分析为依据，将学科知识与职业能力进行有机整合，设定职业能力培养目标，以机电设备为载体，创设工作情境，培养学习者的实践操作技能。

本书以就业为导向，能力为本位，通过对机电一体化技术专业所涵盖的岗位群的职业能力分析，以电动机的使用维护，机电设备电气控制系统安装维护及故障分析、故障排除技术为主线，重视本专业学习者必须具备的岗位职业能力，采用理论知识与技能训练一体化的模式，把课程教学内容分解成若干项目和任务，以项目为单位组织教学，以机电设备为载体引出相关专业理论，使学习者在完成各学习任务学习的训练过程中，一步步加深对专业知识技能的理解和应用，培养学习者的综合职业能力，树立正确的职业道德观，锻炼团队协作精神和创业精神。

本书由王浔主编并统稿，叶珠芳编写了项目一、项目二，王浔编写了项目三、项目四、项目五。本书由徐益清主审。在本书编写过程中，得到了景魏老师和周江涛老师的关心、帮助和大力支持，并得到单位领导的关心和支持，在此表示衷心感谢。编写过程中参阅了许多文献和资料，难以一一列举，在此谨致以衷心感谢。

由于编者水平有限，书中疏漏之处恳请广大读者不吝指正。

编者

项目一 常用直流电机及应用	001
任务一 认识直流电机	001
实训 1-1 直流电动机的简单操作	010
任务二 直流电动机的调速	014
实训 1-2 直流电动机机械特性的测试及调速方法的操作	022
任务三 直流电动机的启动、反转和制动	025
实训 1-3 直流电动机启动、反转和制动方法的操作	029
任务四 直流电动机的选用和维护	032
思考与练习	037
项目二 常用交流电机及应用	038
任务一 认识三相异步电动机	038
任务二 三相异步电动机的运行	046
任务三 三相异步电动机的调速	052
任务四 三相异步电动机的启动、反转和制动	055
任务五 单相异步电动机的应用	059
任务六 实践操作	064
实训 2-1 单相异步电动机正反转控制电路的安装与调试	064
实训 2-2 单相异步电动机常用调速控制方式的实现	065
思考与练习	066
项目三 三相异步电动机的基本控制线路	068
任务一 电气控制线路图、接线图和布置图的识读	068
任务二 电动机单向旋转和正、反转控制线路	076
实训 3-1 电动机单向旋转接触器控制电路的安装	099
实训 3-2 三相异步电动机的正反转控制线路的安装	104
任务三 电动机的位置控制、自动循环往返控制、顺序控制和多地控制线路	108
实训 3-3 工作台自动循环往返控制线路的安装	115
实训 3-4 两台电动机顺序启动逆序停止控制线路的安装	119

目 录

Contents

任务四 三相异步电动机的降压启动控制线路·····	124
实训 3-5 按钮切换 Y- Δ 降压启动控制线路的安装与检修·····	140
任务五 三相异步电动机的制动控制线路·····	144
实训 3-6 单向旋转反接制动控制线路的安装与检修·····	152
任务六 多速异步电动机控制线路·····	156
思考与练习·····	160
项目四 直流电动机的基本控制线路·····	166
任务一 并励直流电动机的基本控制线路·····	166
实训 4-1 安装与调试并励直流电动机启动控制线路·····	176
实训 4-2 并励直流电动机正反转及能耗制动控制线路安装、调试与检修·····	178
任务二 串励直流电动机的基本控制线路·····	181
实训 4-3 串励直流电动机启动、调速控制线路的安装与检修·····	188
思考与练习·····	190
项目五 典型生产机械的电气控制线路·····	194
任务一 普通车床的电气控制线路·····	199
实训 5-1 CA6140 型卧式车床电气控制线路的检修·····	208
任务二 磨床的电气控制线路·····	209
实训 5-2 M7130 型卧轴矩台平面磨床电气线路的检修·····	218
任务三 铣床的电气控制线路·····	220
实训 5-3 X62W 型万能铣床电气线路的检修·····	231
任务四 镗床的电气控制线路·····	233
实训 5-4 T68 型卧式镗床电气线路的检修·····	243
思考与练习·····	244
参考文献·····	246

项目一 常用直流电机及应用

本项目主要介绍直流电机的特点、用途、分类和结构原理，掌握直流电动机的运行特性和基本控制方法，通过学习达到以下目标。

教学目标：

了解直流电机的特点、用途、分类和结构，熟悉直流电机的基本原理；了解直流电机铭牌数据的含义；熟悉直流电机的工作特性；掌握直流电机的启动、制动、反转和调速方法；熟悉直流电机的使用和检修方法。

技能目标：

能够进行直流电机的检测和接线操作；会进行直流电机的常用启动、反转、制动和调速方法的操作。

任务一 认识直流电机

学习目标：

- (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。

技能要点：

会进行直流电动机的检测、接线和简单操作。

一、直流电机的概述

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，掌握主要参数的分析计算，并能正确熟练地操作使用直流电机。

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。而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。

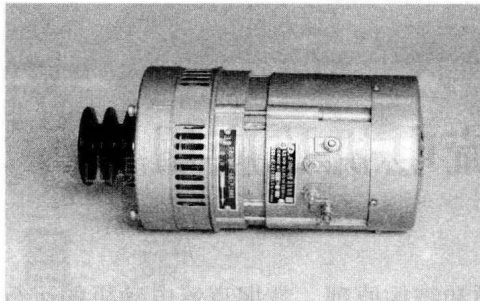


图 1-1 直流发电机

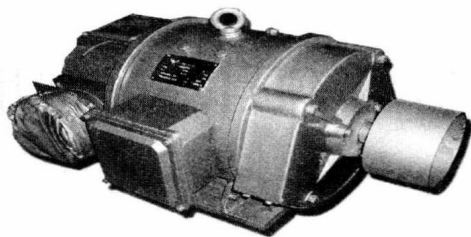
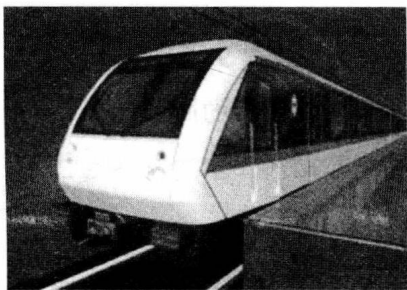


图 1-2 直流电动机

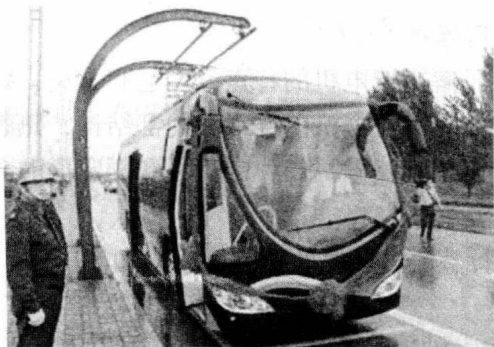
但直流电机也有它显著的缺点：一是制造工艺复杂，消耗有色金属较多，生产成本高；二是运行时电刷与换向器之间容易产生火花，因此可靠性较差，维护比较困难。所以在一些对调速性能要求不高的领域中它已被交流变频调速系统所取代。但是在某些要求调速范围大、快速性好、精密度高、控制性能优异的场合，直流电机的应用目前仍占有较大的比重。

2. 直流电机的用途

由于直流电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机械生产中，图 1-3 所示为其应用的几种实例。



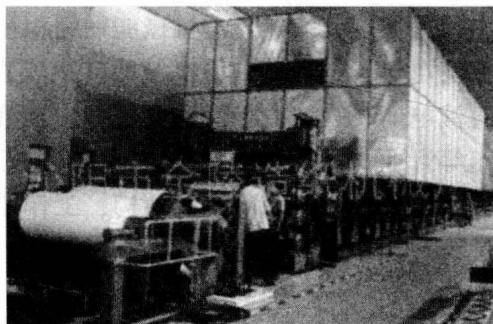
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-3 直流电机应用的几种实例

(a) 地铁列车；(b) 城市电车；(c) 电动自行车；(d) 造纸机

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，称作气隙。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，通常也被称作电枢。它主要包括电枢铁芯、电枢绕组以及换向器、转轴、风扇等。直流电机的结构如图 1-4 和图 1-5 所示。

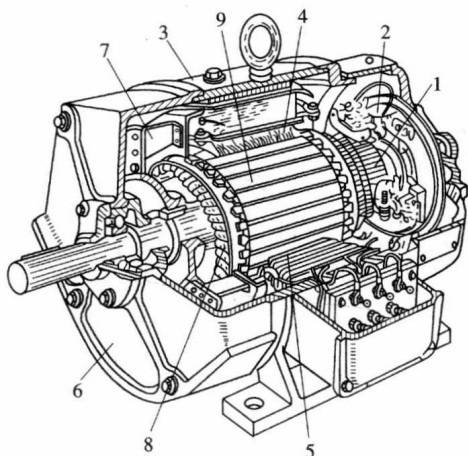


图 1-4 直流电机装配结构图

- 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

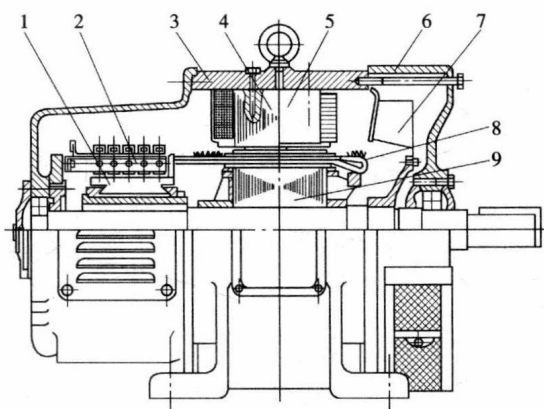


图 1-5 直流电机纵向剖视图

- 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

1. 主磁极

主磁极的作用是产生主磁通，它由主极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都是串联起来的。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。其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。

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

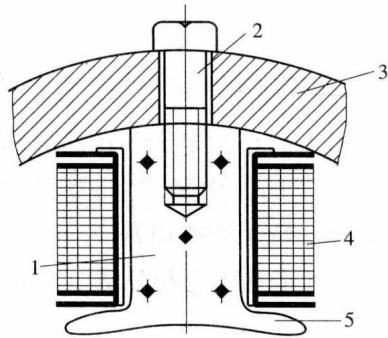


图 1-6 直流电机的主磁极

1—主极铁芯；2—固定螺钉；3—机座；
4—励磁绕组；5—极靴

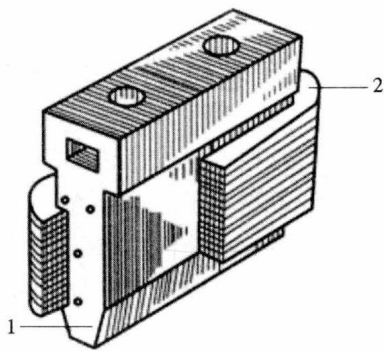


图 1-7 换向磁极的位置

1—换向磁极铁芯；2—换向磁极绕组

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（转子）铁芯

电枢铁芯是主磁路的主要部分，同时用以嵌放电枢绕组。一般电枢铁芯由 0.5 mm 厚的硅钢片冲制而成的冲片叠压而成 [冲片的形状如图 1-9 (a) 所示]，以降低电机运行时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或转子支架上。铁芯的外圆开有电枢槽，槽内嵌放电枢绕组，如图 1-9 (b) 所示。

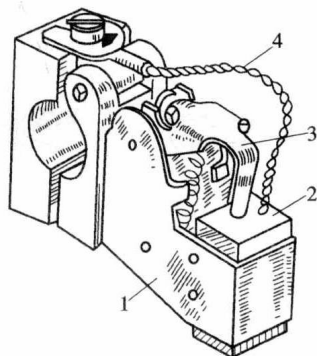
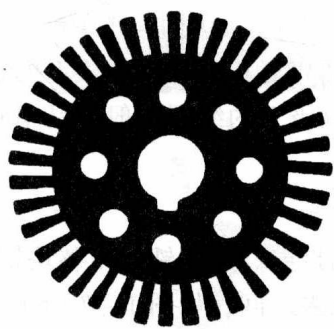
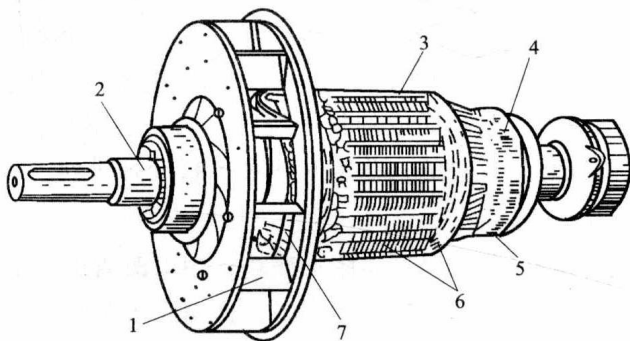


图 1-8 电刷与刷握

1—刷握；2—电刷；
3—压紧弹簧；4—钢丝瓣



(a)



(b)

图 1-9 电枢结构图

(a) 冲片；(b) 电枢

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

6. 电枢（转子）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，其作用是将直流电动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，使电动机连续运转。

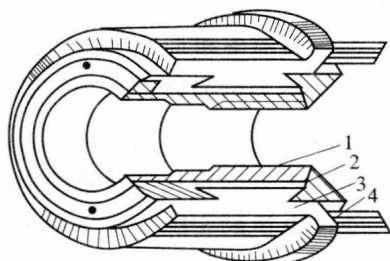


图 1-10 换向器的结构

1—V 形套筒；2—云母片；
3—换向片；4—连接片

三、直流电动机的工作原理

直流电动机是将电源电能转变为轴上输出的机械能的电磁转换装置。由定子绕组通入直流励磁电流，产生励磁磁场，主电路引入直流电源，经碳刷（电刷）传给换向器，再经换向器将此直流电转化为交流电，引入电枢绕组，产生电枢电流（电枢磁场），电枢磁场与励磁磁场合成气隙磁场，电枢绕组切割合成气隙磁场，产生电磁转矩。这是直流电机的基本工作原理。

图 1-11 为简单的两极直流电机模型，由主磁极（励磁线圈）、电枢（电枢线圈）、电刷和换向片等组成。固定部分（定子）上，装设了一对直流励磁的静止的主磁极 N、S，主磁极由励磁线圈的磁场产生；旋转部分（转子）上，装调电枢铁芯与电枢绕组。电枢电流由外供直流电源所产生。定子和转子之间有一气隙。电枢线圈的首、末端分别连接于两个圆弧形换向片上，换向片之间互相绝缘，由换向片构成的整体称为换向器。换向片固定在转轴上，与转轴也是绝缘的。在换向片上放置着一对固定不动的电刷 B_1 、 B_2 ，当电枢旋转时，电枢线圈通过换向片和电刷与外电路接触（引入外供直流电源）。

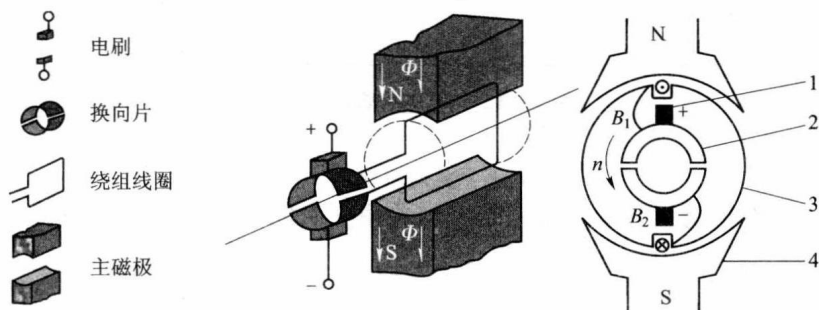


图 1-11 直流电动机的（物理）结构模型

1—电刷；2—换向片；3—电枢铁芯；4—主磁极

因为主磁极的磁场方向是固定不变的（由接入励磁电源极性所决定），要使电枢受到一个方向不变的电磁转矩，关键在于：当线圈边在不同极性的磁极下，如何将流过线圈中的电流方向及时地加以变换，即进行所谓“换向”，线圈中的电流随所处磁极极性的改变同时改变其方向，以确保线圈在不同磁极下的电流保持一个方向，从而使电磁转矩的

方向始终保持不变。

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。这种原理在电机理论中被称为可逆原理。当转轴为原动机所拖动，电机绕组中产生交流电势，经电刷输出至外部负载电路，此时的换向器（又称整流子）恰恰具有了“整流器的特性”，输出电压为直流电压。本章内容只涉及直流电动机。

直流电机的实际构成比模型要复杂一些，如增设了换向磁极（绕组）来改善换向，换向极绕组与电枢绕组相串联。增设补偿绕组（与电枢绕组相串联），二者都起到减轻合成气隙磁场的畸变和减小电刷火花（环火）的作用。

四、直流电动机的励磁方式

直流电动机的励磁方式是指电动机励磁电流的供给方式，直流电动机按励磁方式分类，有他励和自励两种。他励指励磁与电枢回路在电气上相独立，自励则两者有直接的电气联系。自励多应用于小功率电机，而他励则多应用于中、大功率电机。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

他励方式中，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。其接线图如图 1-12 所示。

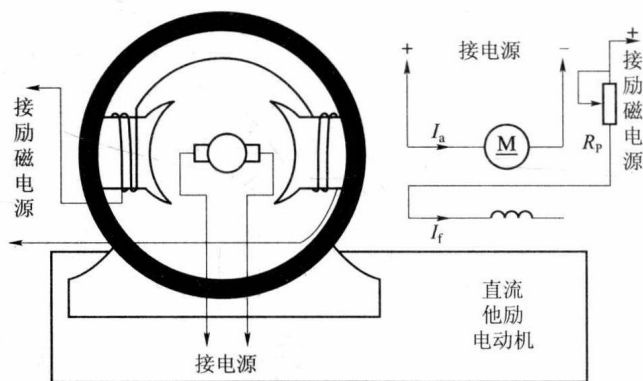


图 1-12 他励电动机接线图

2. 并励方式

并励方式中，电枢绕组和励磁绕组是并联关系，由同一电源供电，其接线图如图 1-13 所示。

3. 串励方式

串励方式中，电枢绕组与励磁绕组是串联关系，其接线图如图 1-14 所示。

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。其接线图如图 1-15 所示。

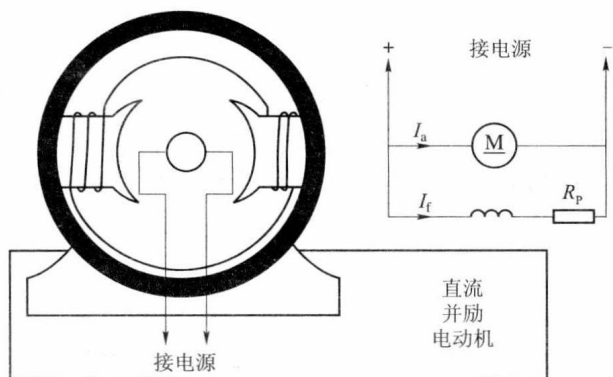


图 1-13 并励电动机接线图

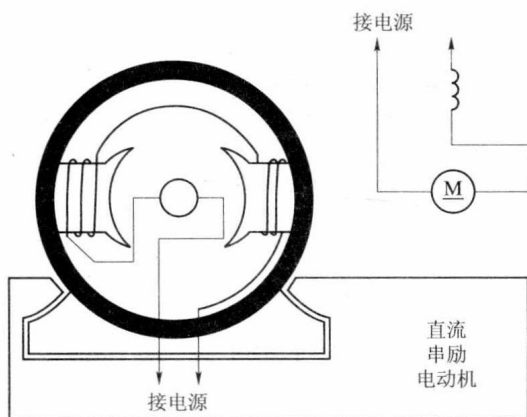


图 1-14 串励电动机接线图

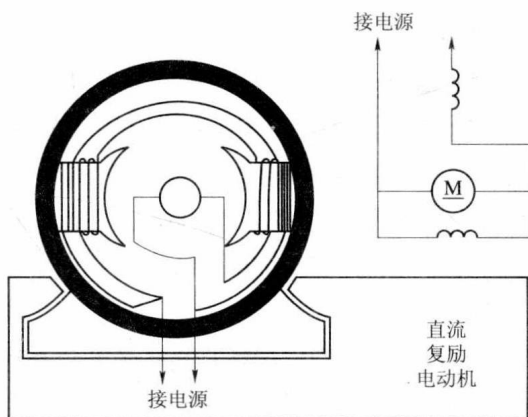


图 1-15 复励电动机接线图

五、直流电机的铭牌数据与系列

1. 直流电机的铭牌数据

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,是正确合理使用电机的依据。直流电机的主要额定值见表 1-1。

表 1-1 直流电机的主要额定值

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			

直流电机的额定值有：

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；对电动机而言，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。

4) 励磁方式，指电动机励磁绕组的连接和供电方式，有他励、自励等 5 种连接方式。

5) 其他。如工作方式、温升、绝缘等级等。

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、冶金用直流电动机系列。电压有 220 V、440 V 两种。工作方式有连续、短时和断续三种。ZZJ 系列电机启动快速，过载能力大。

此外，还有 ZQ 直流牵引电动机系列及用于易爆场合的 ZA 防爆安全型直流电动机系列等。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
ZD、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 是直流发电机系列
ZZJ	专供起重冶金工业用的专用直流电动机
ZT	用于恒功率且调整范围比较大的驱动系统里的宽调速直流电动机

续表

代号	含义
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，它们对电机的运行起着重要的作用。直流发电机中是感应电动势在起主要作用，直流电动机中是电磁转矩在起主要作用。

1. 电枢绕组的感应电动势 (E_a)

对电枢绕组电路进行分析，可得直流电机电枢绕组的感应电动势为

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1-1)$$

式中， Φ 为电机的每极磁通； n 为电机的转速； C_e 为与电机结构有关的常数，称为电动势常数。

E_a 的方向由 Φ 与 n 的方向按右手定则确定。从式 (1-1) 可以看出，若要改变 E_a 的大小，可以改变 Φ (由励磁电流 I_f 决定) 或 n 的大小。若要改变 E_a 的方向，可以改变 Φ 的方向或电机的旋转方向。

无论直流电动机还是直流发电机，电枢绕组中都存在感应电动势，在发电机中 E_a 与电枢电流 I_a 方向相同，是电源电动势；而在电动机中 E_a 与 I_a 的方向相反，是反电动势。

2. 直流电机的电磁转矩 (T)

同样，我们也能分析得到电磁转矩 T 为

$$T = C_T \Phi I_a \quad (1-2)$$

式中， I_a 为电枢电流； C_T 为一个与电机结构相关的常数，称为转矩常数。

电磁转矩 T 的方向由磁通 Φ 及电枢电流 I_a 的方向按左手定则确定。式 (1-2) 表明：若要改变电磁转矩的大小，只要改变 Φ 或 I_a 的大小即可；若要改变 T 的方向，只要改变 Φ 或 I_a 其中之一方向即可。

感应电动势 E_a 和电磁转矩 T 是密切相关的。例如，当他励直流电动机的机械负载增加时，电机转速将下降，此时反电动势 E_a 减小， I_a 将增大，电磁转矩 T 也增大，这样才能带动已增大的负载。

七、直流电动机的基本方程式

直流电动机的基本方程式是了解和分析直流电动机性能的主要方法与重要手段，直流电动机的基本方程式包括电压方程式、转矩方程式、功率方程式等。

图 1-16 所示为直流并励电动机的工作原理图。以它为例分析电压、转矩和功率之间的关系。并励电动机的励磁绕组与电枢绕组并联，由同一直流电源供电。接通直流电源后，励磁绕组中流过励磁电流 I_f ，建立主磁场；电枢绕组中流过电枢电流 I_a ，电枢电流与主磁场作用产生电磁转矩 T ，使电枢朝转矩 T 的方向以转速 n 旋转，将电能转换为机械能，带动生产机械工作。

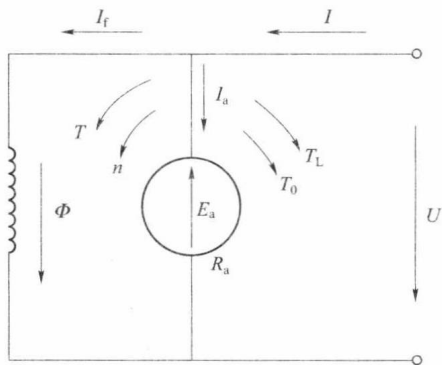


图 1-16 直流并励电动机的工作原理图

(1) 电压方程式。从图 1-16 所示直流并励电动机的工作原理图可知，直流并励电动机中有两个电流回路：励磁回路和电枢回路。下面主要分析电枢回路的电压、电流以及电动势之间的关系。

直流并励电动机通电旋转后，电枢导体切割主磁场，产生电枢电动势 E_a ，在电动机中，此电动势的方向与电枢电流 I_a 的方向相反，称为反电动势。电源电压 U 除了提供电枢内阻压降 $I_a R_a$ 外，主要用来与电枢电动势 E_a 相平衡。列出电压方程式如下：

$$U = E_a + I_a R_a$$

上式表明直流电动机在电动状态下运行时，电枢电动势 E_a 总是小于端电压 U 。

(2) 转矩方程式。直流电动机正常工作时，作用在轴上的转矩有三个：一个是电磁转矩 T ，方向与转速 n 方向相同，为驱动性质转矩；一个是电动机空载损耗形成的转矩 T_0 ，是电动机空载运行时的制动转矩，方向总与转速 n 方向相反；还有一个是轴上所带生产机械的负载转矩 T_L ，一般为制动性质转矩。 T_L 在大小上也等于电动机的输出转矩 T_2 。稳态运行时，直流电动机中驱动性质的转矩总是等于制动性质的转矩，据此可得直流电动机的转矩方程式：

$$T = T_0 + T_L$$

(3) 功率方程式。从图 1-16 直流并励电动机的工作原理图可以看出电源输入的电功率为

$$P_1 = UI$$

技能训练

实训 1-1 直流电动机的简单操作

1. 任务目标

(1) 认识并检测直流电动机及相关设备。



(2) 学会直流电动机的接线和简单操作方法。

2. 工具、仪器和设备

(1) 直流电动机励磁电源和可调电枢电源各一个。

(2) 直流他励电动机一台。

(3) 励磁调节电阻和电枢调节电阻各一个。

(4) 万用表和转速表各一块。

(5) 导线若干。

3. 实训过程

1) 认识、检测并记录直流电动机及相关设备的规格、量程和额定值

本次实训操作需要使用直流电源、直流电动机、转速表和调节电阻等相关设备，如图 1-17 所示。

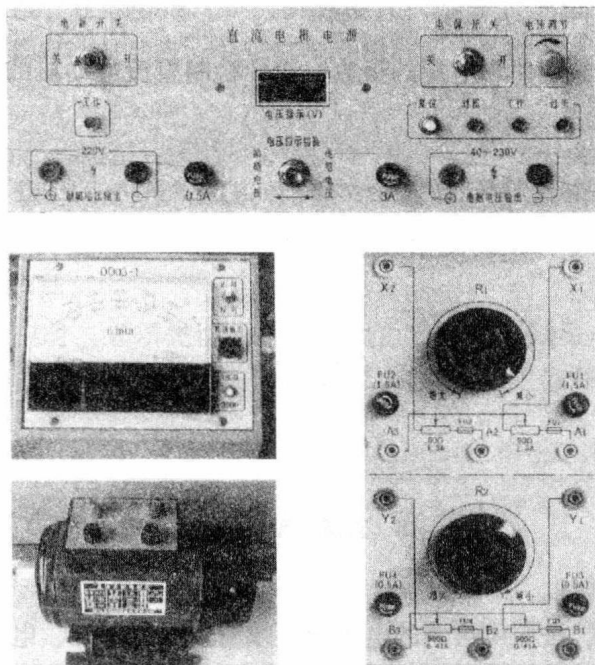


图 1-17 直流电动机及相关设备

直流电源分励磁电源和电枢电源两部分，分别接直流电动机的励磁绕组和电枢绕组，通过开关控制电路的通断，电枢电源可以利用调节旋钮改变输出电压的高低。由于两者容量不同，不可互换。

直流电动机是实训操作的对象，通电后观察其启动、反转以及转速变化的情况。转速表可以直接测量电动机转速的高低，利用开关来设置量程和转向。

励磁调节电阻串联在励磁电源与励磁绕组之间，总阻值较大，旋转手柄可以调节阻值的大小；电枢调节电阻串联在电枢电源与电枢绕组之间，总阻值较小，也可以通过手柄的旋转来调节阻值的大小。调节电阻的作用是改变电动机电流和转速的大小。

在使用上述设备前，先检测并记录它们的规格、量程和额定值，记录在表 1-3 中。