

# 机床电气控制技术

## 项目化教程

● 主编 李楠

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

# 机床电气控制技术 项目化教程

主 编 李 楠

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

版权专有 侵权必究

---

图书在版编目 (CIP) 数据

机床电气控制技术项目化教程/李楠主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2016.8

ISBN 978-7-5682-2899-2

I. ①机… II. ①李… III. ①机床—电气控制—高等院校—教材  
IV. ①TG502.35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 199491 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 / 北京富达印务有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 12.5

字 数 / 297 千字

版 次 / 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 41.00 元

责任编辑 / 张旭莉

文案编辑 / 张旭莉

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 马振武

---

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

我国高等教育的根本任务是培养适合我国现代化建设和经济发展的高等技术应用人才，所以高等教育的教学过程应根据专业要求将理论联系实际、知识与能力有机地结合起来，达到学以致用目的。本书正是一本注重技术应用训练，以项目为主线，以具体的工作任务为载体，以相关的实践知识为重点的教材。

本书在内容选择上，以企业岗位工作任务为依据，突出基本技能和综合职业能力培养，主要包括：直流电机的使用与检修、变压器的维护与检修，交流电动机的使用与检修，常用低压电器的选择与使用，电动机典型控制线路的安装与检修，典型机床控制线路的装调与检修6个典型项目，14个具体任务。各部分内容均从任务角度进行阐述，注重理论联系实际，通过对典型应用实例进行分析，强化对学生职业能力的培养与训练，以期培养学生分析、解决生产实际问题的能力。

由于编者水平和实践经验有限，加之时间仓促，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请有关专家和广大读者批评指正。

编 者

<b>项目 1 直流电动机的使用与检修</b> .....	1
1.1.1 直流电动机的基本原理与结构 .....	1
1.1.2 直流电动机的电磁转矩和电枢电动势 .....	6
1.1.3 他励直流电动机的运行原理与机械特性 .....	7
1.1.4 直流电动机的起动 .....	11
1.1.5 直流电动机的调速 .....	12
1.1.6 直流电动机的制动 .....	13
1.1.7 直流电动机的维护与检修方法 .....	17
<b>项目 2 变压器的维护与检修</b> .....	29
2.1.1 变压器的工作原理、分类及结构 .....	29
2.1.2 单相变压器的空载运行 .....	31
2.1.3 单相变压器的负载运行 .....	33
2.1.4 三相变压器 .....	35
2.1.5 其他用途变压器 .....	36
2.1.6 变压器的维护与检修 .....	39
<b>项目 3 交流电动机的使用与检修</b> .....	45
3.1.1 三相异步电动机的结构与工作原理 .....	45
3.1.2 三相异步电动机的机械特性 .....	50
3.1.3 三相异步电动机的起动 .....	52
3.1.4 三相异步电动机的制动 .....	56
3.1.5 三相异步电动机的调速 .....	58
3.1.6 同步电动机 .....	60
3.1.7 单相异步电动机 .....	62
3.1.8 三相异步电动机的维修 .....	65

# 目 录

Contents

项目 4 常用低压电器的选择与使用 .....	78
4.1.1 低压电器基本知识 .....	78
4.1.2 主令电器 .....	80
4.1.3 接触器 .....	84
4.1.4 继电器 .....	87
4.1.5 熔断器 .....	93
4.1.6 刀开关与低压断路器 .....	95
项目 5 电动机典型控制线路的安装与检修 .....	100
任务 5.1 三相异步电动机单向直接起动 控制线路的安装与检修 .....	100
5.1.1 电气控制系统图的基本知识 .....	100
5.1.2 三相异步电动机单向直接起动控制 .....	104
任务 5.2 三相异步电动机正反转控制线路的安装与检修 .....	113
5.2.1 没有互锁的正反转控制 .....	113
5.2.2 电气互锁的正反转控制 .....	114
5.2.3 双重互锁正、反转控制 .....	115
任务 5.3 三相异步电动机降压起动控制 线路的安装与检修 .....	121
5.3.1 $\text{Y}$ - $\Delta$ 降压起动 .....	121
5.3.2 定子绕组串电阻降压起动 .....	124
5.3.3 自耦变压器降压起动 .....	125
任务 5.4 三相异步电动机制动控制线路的安装与检修 .....	129
5.4.1 反接制动 .....	129
5.4.2 能耗制动 .....	132
任务 5.5 三相异步电动机调速控制线路的安装与检修 .....	137
5.5.1 双速电动机自动控制 .....	138
5.5.2 双速电动机手动控制 .....	139

项目 6 典型机床控制线路的装调与检修 .....	143
任务 6.1 CA6140 型车床电气电路的故障检修 .....	143
6.1.1 机床电气原理图的识读方法 .....	143
6.1.2 CA6140 型车床的主要结构、运动形式及控制要求 .....	144
6.1.3 CA6140 型车床电气原理图分析 .....	145
6.1.4 CA6140 型车床电气电路典型故障的分析与检修 .....	147
任务 6.2 X62W 型铣床电气电路的故障检修 .....	157
6.2.1 X62W 型铣床的主要结构、运动形式及控制要求 .....	157
6.2.2 X62W 型铣床电气原理图分析 .....	159
6.2.3 X62W 型铣床电气电路典型故障的分析与检修 .....	164
任务 6.3 Z3040 型摇臂钻床电气电路的故障检修 .....	167
6.3.1 Z3040 型摇臂钻床的主要结构、运动形式及控制要求 .....	167
6.3.2 Z3040 型摇臂钻床电气原理图分析 .....	168
6.3.3 Z3040 型摇臂钻床电气电路典型故障的分析与检修 .....	171
任务 6.4 M7130 型平面磨床电气电路的故障检修 .....	174
6.4.1 M7130 型平面磨床的主要结构、运动形式及控制要求 .....	175
6.4.2 M7130 型平面磨床电气原理图分析 .....	176
6.4.3 M7130 型平面磨床电气电路典型故障的分析与检修 .....	178
任务 6.5 T68 卧式镗床电气电路的故障检修 .....	180
6.5.1 T68 卧式镗床的主要结构、运动形式及控制要求 .....	180
6.5.2 T68 卧式镗床电气原理图分析 .....	181
6.5.3 T68 卧式镗床电气电路典型故障的分析与检修 .....	185
参考文献 .....	187

# 项目 1 直流电动机的使用与检修



## 任务描述

现有一台出现故障的 Z3-42 型直流电动机，要求工程技术人员维修这台电动机。



## 知识准备

### 1.1.1 直流电动机的工作原理与结构

#### 1. 直流电动机的工作原理

图 1-1 为直流电动机的工作原理示意图。

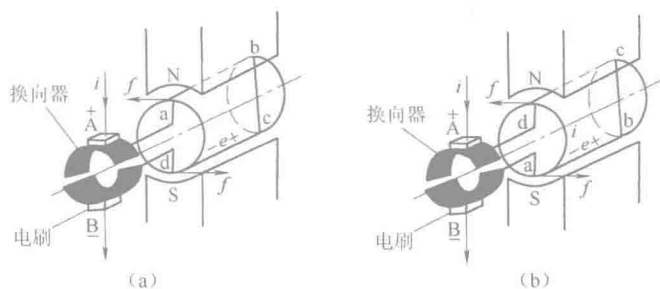


图 1-1 直流电动机的工作原理示意图

图 1-1 中：N、S——定子磁极，用以产生磁场。容量较小的电动机定子磁极由永久磁铁构成，容量较大的电动机定子磁极由绕在磁极铁心上的绕组（称为励磁绕组）通以直流电流（称为励磁电流）构成。

abcd——电枢绕组（图中只画出一匝），安放在能绕轴旋转的圆柱形铁心（称为电枢铁心）表面的槽内。

换向器——互相绝缘并可随电枢绕组一同旋转的铜片，连接电枢绕组的首端 a 和末端 d。  
A、B——炭质电刷，压在换向片上与其滑动接触。

在两个电刷间加一直流电源，当导体 ab 靠近 N 极，cd 靠近 S 极时，电枢电流方向为电刷 A→与电枢绕组的首端 a 连接的换向片→电枢绕组 a→b→c→d→与电枢绕组的末端 d 连接的换向片→电刷 B。根据电磁力定律，用左手定则可确定通电导体 ab 和 cd 在磁场中所受电



磁力的方向为上(ab)左、下(cd)右,这两个电磁力形成的电磁转矩方向为逆时针,电动机按逆时针方向旋转,如图1-1(a)所示。

当导体cd转到靠近N极,ad靠近S极时,电枢电流方向为电刷A→与电枢绕组的末端d连接的换向片→电枢绕组d→c→b→a→与电枢绕组的首端a连接的换向片→电刷B。用左手定则可确定通电导体ab和cd在磁场中所受电磁力的方向为上(cd)左、下(ab)右,电磁转矩方向仍为逆时针,电动机仍按逆时针方向旋转,如图1-1(b)所示,如此周而复始。

改变电枢电流方向、磁场方向(可通过改变励磁电流方向实现)两者中的任意一个,都能改变直流电动机的旋转方向。

由此可见,直流电动机是基于通电导体在磁场中会受到电磁力作用这一电磁力定律,利用换向器和电刷使电动机沿固定方向旋转的。

## 2. 直流电动机的结构

直流电动机主要由定子(固定不动)与转子(旋转)两大部分组成,定子与转子之间有一个较小的空气间隙(简称“气隙”),其结构如图1-2所示。

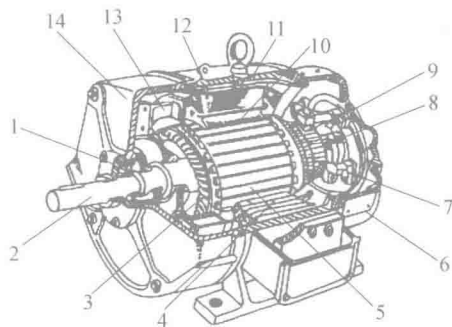


图 1-2 直流电动机的结构

- 1—轴承; 2—轴; 3—电枢绕组; 4—换向极绕组; 5—电枢铁心; 6—后端盖; 7—刷杆座;  
8—换向器; 9—电刷; 10—主磁极; 11—机座; 12—励磁绕组; 13—风扇; 14—前端盖

### 1) 定子部分

定子部分包括机座、主磁极、换向极、端盖、电刷等装置,主要用来产生磁场和起机械支撑作用。

(1) 机座。机座既可以固定主磁极、换向极、端盖等,又是电动机磁路的一部分(称为磁轭)。机座一般用铸钢或厚钢板焊接而成,具有良好的导磁性能和机械强度。

(2) 主磁极。主磁极的作用是产生气隙主磁场,它由主磁极铁心和主磁极绕组(励磁绕组)构成,如图1-3所示。主磁极铁心一般由1.0~1.5mm厚的低碳钢板冲片叠压而成,包括极身和极靴两部分。极靴做成圆弧形,以使磁极下气隙磁通较均匀。极身外边套着励磁绕组,绕组中通入直流电流。整个磁极用螺钉固定在机座上。

(3) 换向极。换向极用来改善换向,减少由于直流电动机换向而造成的换向火花。换向极由铁心和套在铁心上的绕组构成,如图1-4所示。铁心一般用整块钢制成,如换向要求较高,则用1.0~1.5mm厚的钢板叠压而成;因其绕组中流过的是电枢电流,故绕组多用扁平

铜线绕制而成。换向极装在相邻两主磁极之间，用螺钉固定在机座上。

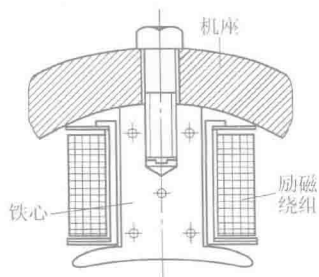


图 1-3 直流电动机的电枢绕组

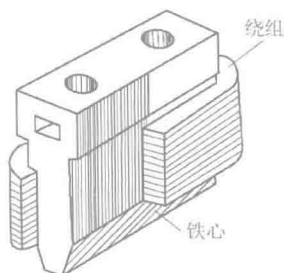


图 1-4 直流电动机的换向绕组

(4) 电刷装置。电刷与换向器配合可以把转动的电枢绕组和外电路连接。电刷装置由电刷、刷座、刷杆、刷杆座、弹簧、铜辫构成，如图 1-5 所示。电刷通常采用炭刷、石墨刷和金属石墨刷，其个数一般等于主磁极的个数。电刷被安装在刷座上。

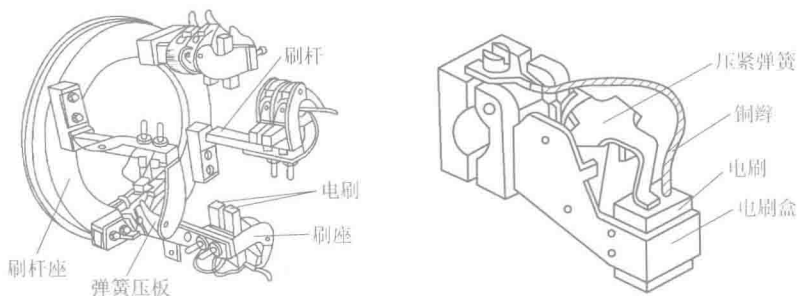


图 1-5 直流电动机的电刷装置

## 2) 转子部分

转子部分包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴、风扇等部件，其主要作用是产生感应电动势和电磁转矩。

(1) 电枢铁心。电枢铁心除了用来嵌放电枢绕组外，还是电动机磁路的一部分。为嵌放电枢绕组，电枢铁心的外圆周开槽；为了减少涡流损耗，电枢铁心一般用 0.5mm 厚、两边涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成；为加强冷却，当铁心较长时，可把电枢铁心沿轴向分成数段，段与段之间留有通风孔，如图 1-6 所示。电枢铁心固定在转轴或电枢支架上。

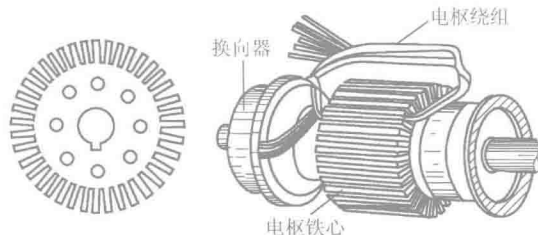


图 1-6 电枢铁心

(2) 电枢绕组。电枢绕组是产生感应电动势和电磁转矩的关键部件。电枢绕组通常用绝

缘导线绕成多个形状相同的线圈，按一定规律连接而成。它的一条有效边（因切割磁力线而感应电动势的有效部分）嵌入某个铁心槽的上层，另一条有效边则嵌入另一铁心槽的下层，两个引出端分别按一定的规律焊接到换向片上，如图 1-7 所示。

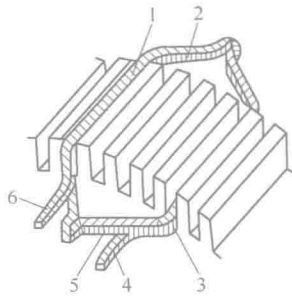


图 1-7 线圈在槽内安放示意图

1—上层有效边；2、5—端接部分；3—下层有效边；4—线圈尾端；6—线圈首端

电枢绕组线圈间的连接方法根据连接规律的不同，分为单叠绕组、单波绕组和混合绕组等。其中单叠绕组、单波绕组的连接示意图如图 1-8 所示。

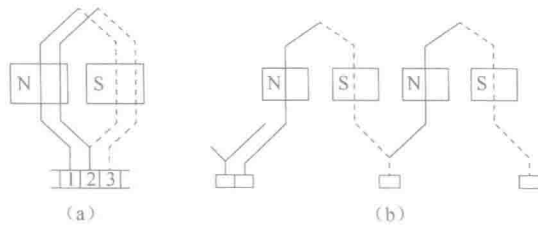


图 1-8 单叠绕组、单波绕组的连接示意图

(a) 单叠绕组；(b) 单波绕组

(3) 换向器。换向器又称为整流子，通过与电刷滑动接触，将加于电刷之间的直流电流变成绕组内部方向可变的电流，以形成固定方向的电磁转矩。换向器由多个片间相互绝缘的换向片组合而成，电枢绕组每个线圈的两端分别接至两个换向片上，如图 1-9 所示。换向器固定在转轴的一端。

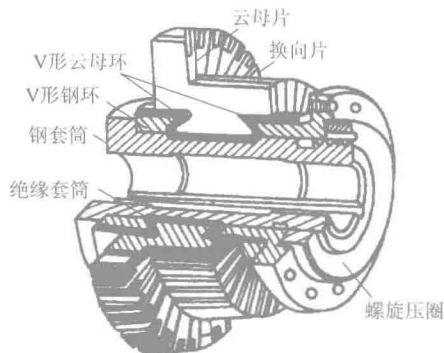


图 1-9 换向器

### 3. 直流电动机的励磁方式

磁场是电动机产生感应电动势和电磁转矩不可缺少的因素，绝大多数直流电动机的磁场都是由主磁极励磁绕组中通入的直流电流产生的。所谓直流电动机的励磁方式，是指供给励磁绕组电流的方式，直流电动机的励磁方式有并励、串励、他励、复励四种。

(1) 并励。如图 1-10 (a) 所示，电枢绕组和励磁绕组并联，由同一电源供电。电源电流  $I$ 、电枢电流  $I_a$ 、励磁电流  $I_f$  之间的关系是  $I=I_a+I_f$ 。

(2) 串励。如图 1-10 (b) 所示，电枢绕组和励磁绕组串联，由同一电源供电。电源电流  $I$ 、电枢电流  $I_a$ 、励磁电流  $I_f$  之间的关系是  $I=I_a=I_f$ 。

(3) 他励。如图 1-10 (c) 所示，励磁绕组由与电枢绕组供电电源无关的其他电源供电。电源电流  $I$ 、电枢电流  $I_a$ 、励磁电流  $I_f$  之间的关系是  $I=I_a$ ； $I_f$  与  $I$ 、 $I_a$  无关。

(4) 复励。如图 1-10 (d) 所示，励磁绕组有两个：一个匝数少而线径粗，与电枢绕组串联；另一个匝数多而线径细，与电枢绕组并联，由同一电源供电。复励是串励和并励两种励磁方式的结合。

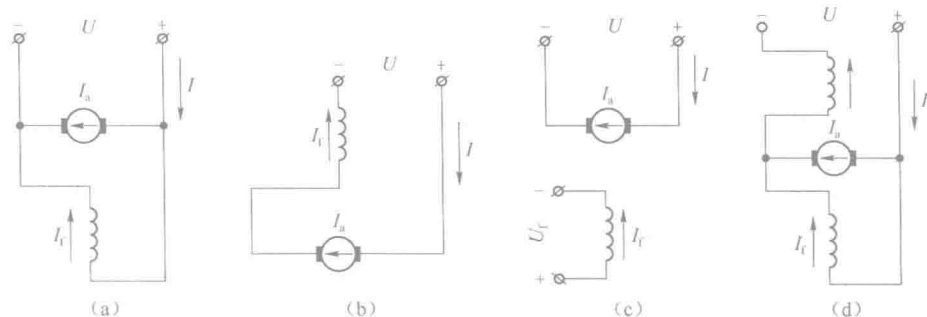


图 1-10 直流电动机的励磁方式

(a) 并励；(b) 串励；(c) 他励；(d) 复励

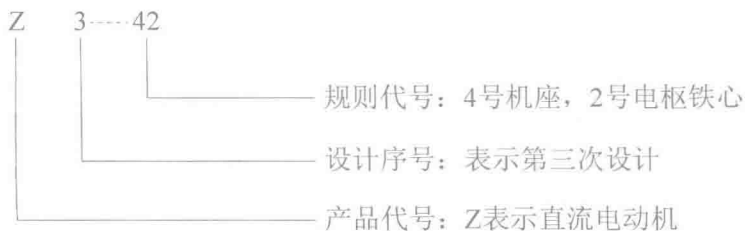
不同的励磁方式对直流电动机的运行性能有很大的影响，直流电动机的励磁方式主要采用他励、并励和复励，很少采用串励方式。

### 4. 直流电动机的铭牌数据

铭牌数据主要包括电机型号、额定功率、额定电压、额定电流、额定转速、额定励磁电压和额定励磁电流及励磁方式等。

(1) 电机型号。电机型号表示电机的结构和使用特点，国产电机的型号一般用大写汉语拼音字母和阿拉伯数字表示，其格式：第一部分字符用大写的汉语拼音表示产品代号；第二部分字符用阿拉伯数字表示设计序号；第三部分字符是机座代号，用阿拉伯数字表示；第四部分字符表示电枢铁心长度代号，用阿拉伯数字表示。

现以型号 Z3-42 为例说明如下：



- (2) 额定功率  $P_N$ 。电动机在额定工作条件下轴上输出的机械功率，单位为 W 或 kW。
- (3) 额定电压  $U_N$ 。指在额定工作条件下，电刷两端输入的电压，单位为 V 或 kV。
- (4) 额定电流  $I_N$ 。指在额定电压下，电源输入电动机的电流，单位为 A 或 kA。
- (5) 额定转速  $n_N$ 。指在额定工作条件下，电动机的转速，单位为 r/min。
- (6) 额定励磁电压  $U_{fN}$ ：指电源输入励磁绕组的允许电压，单位为 V 或 kV。
- (7) 额定励磁电流  $I_{fN}$ ：指电源输入励磁绕组的允许电流，单位为 A 或 kA。
- 此外，铭牌上还标有额定效率  $\eta_N$ 、额定转矩  $T_N$ 、励磁方式、绝缘等级和电动机质量等。

### 1.1.2 直流电动机的电磁转矩和电枢电动势

#### 1. 电磁转矩

(1) 直流电动机的电磁转矩  $T$  的大小可表示为

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

式中  $C_T$ ——与电动机结构有关的常数；

$\Phi$ ——每极磁通 (Wb)；

$I_a$ ——电枢电流 (A)；

$T$ ——电磁转矩 (N·m)。

(2) 直流电动机的转矩  $T$  与转速  $n$  及轴上输出功率  $P$  的关系式为

$$T = 9550 \frac{P}{n} \quad (1-2)$$

式中  $P$ ——电动机轴上的输出功率 (kW)；

$n$ ——电动机转速 (r/min)；

$T$ ——电动机电磁转矩 (N·m)。

#### 2. 电枢电动势

直流电动机电枢电动势的大小为

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1-3)$$

式中  $C_e$ ——与电动机结构有关的另一常数；

$\Phi$ ——每极磁通 (Wb)；

$n$ ——电动机转速 (r/min)；

$E_a$ ——电枢电动势 (V)。



如图 1-11 所示, 直流电动机在旋转时, 电枢电动势  $E_a$  的大小与每极磁通  $\Phi$  和电动机转速  $n$  的乘积成正比, 它的方向与电枢电流方向相反, 在电路中起着限制电流的作用。

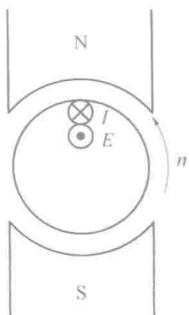


图 1-11 电枢电动势和电流

### 1.1.3 他励直流电动机的运行原理与机械特性

图 1-12 为一台他励直流电动机的结构示意图和电路图。

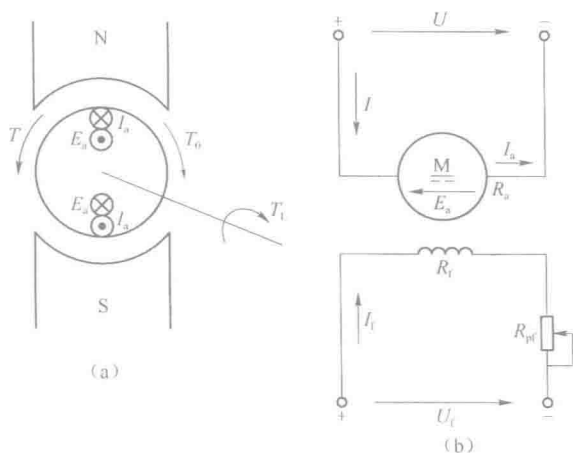


图 1-12 他励直流电动机的结构示意图和电路图

(a) 结构示意图; (b) 电路图

各物理量正方向的规定如图 1-12 所示: 电枢电动势  $E_a$  为反电动势, 与电枢电流  $I_a$  方向相反; 电磁转矩  $T$  为拖动转矩, 方向与电动机转速  $n$  的方向一致;  $T_L$  为负载转矩;  $T_0$  为空载转矩, 方向与  $n$  的方向相反。

#### 1. 直流电动机的基本方程式

$$U = E_a + I_a R_a \quad (1-4)$$

式中  $U$ ——电枢电压 (V);

$I_a$ ——电枢电流 (A);

$R_a$ ——电枢电阻 ( $\Omega$ )。

## 2. 功率平衡方程式

(1) 直流电动机的损耗按其性质可分为机械损耗  $P_m$ 、铁心损耗  $P_{Fe}$ 、铜损  $P_{Cu}$  和附加损耗  $P_s$ 。

空载损耗  $P_0$  为

$$P_0 = P_m + P_{Fe} \quad (1-5)$$

直流电动机的总损耗  $\sum P$  为

$$\sum P = P_m + P_{Fe} + P_{Cu} + P_s$$

(2) 直流电动机输入的电功率为

$$P_1 = UI = UI_a = (E_a + I_a R_a) I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a = P_{em} + P_{Cu}$$

上式说明：输入的电功率一部分被电枢绕组消耗（电枢铜损），一部分转换成机械功率。

(3) 直流电动机输出的机械功率为

$$P_2 = P_{em} - P_{Fe} - P_m - P_s = P_{em} - P_0 - P_s = P_1 - \sum P \quad (1-6)$$

(4) 直流电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} \times 100\% \quad (1-7)$$

一般中小型直流电动机的效率为 75%~85%，大型直流电动机的效率为 85%~94%。

(5) 他励直流电动机的功率平衡关系可用功率流程图来表示，如图 1-13 所示。

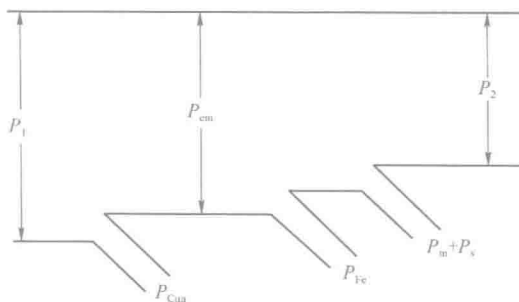


图 1-13 他励直流电动机的功率流程图

**【例 1-1】** 已知某直流电动机铭牌数据如下：额定功率  $P_N = 75\text{kW}$ ，额定电压  $U_N = 220\text{V}$ ，额定转速  $n_N = 1500\text{r/min}$ ，额定效率  $\eta_N = 88.5\%$ ，试求该电动机的额定电流。

解：对于直流电动机，有

$$P_N = U_N \cdot I_N \cdot \eta_N$$

故该电动机的额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \cdot \eta_N} = \frac{75000}{220 \times 88.5\%} \approx 385(\text{A})$$

## 3. 转矩平衡方程式

$$\frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_0}{\Omega}$$

$$T_2 = T - T_0$$

$$T = T_2 + T_0$$

式中  $T$ ——电动机电磁转矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ );

$T_2$ ——电动机轴上输出的机械转矩 (负载转矩) ( $\text{N} \cdot \text{m}$ );

$T_0$ ——空载转矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ );

$\Omega$ ——角速度。

#### 4. 他励直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性是在稳定运行情况下, 电动机的转速与电磁转矩之间的关系, 即  $n=f(T)$ 。

##### 1) 他励直流电动机的机械特性方程式

(1) 机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_1 \Phi^2} T \quad (1-8)$$

还可以写成

$$n = n_0 - \beta T = n_0 - \Delta n \quad (1-9)$$

式中  $n_0$ ——理想空载转速,  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ ;

$\beta$ ——机械特性斜率;

$\Delta n$ ——转速降,  $\Delta n = \frac{R}{C_e C_1 \Phi^2} T$ 。

(2) 机械特性曲线如图 1-14 所示。

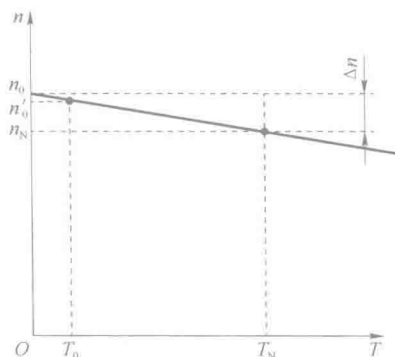


图 1-14 他励直流电动机的机械特性

##### 2) 他励直流电动机的固有机械特性

当他励直流电动机的电源电压、磁通为额定值, 电枢回路未接附加电阻  $R_{pa}$  时的机械特性称为固有机械特性, 其特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_1 \Phi^2} T \quad (1-10)$$



### 5. 人为机械特性

人为机械特性是人为地改变电动机电路参数或电枢电压而得到的机械特性，即改变式(1-10)中的参数所获得的机械特性，一般只改变电压、磁通、附加电阻中的一个，并励电动机有下列三种人为机械特性。

#### 1) 电枢串电阻时的人为机械特性

此时  $U = U_N$ ， $\Phi = \Phi_N$ ， $R = R_a + R_{pa}$ ，人为机械特性的方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_{pa}}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (1-11)$$

与固有特性相比，理想空载转速  $n_0$  不变，但是，转速降  $\Delta n$  增大。 $R_{pa}$  越大， $\Delta n$  也越大，特性“变软”，如图 1-15 所示。

这类人为机械特性是一组通过  $n_0$ ，但具有不同斜率的直线。

#### 2) 改变电枢电压时的人为机械特性

此时  $R_{pa} = 0$ ， $\Phi = \Phi_N$ ，机械特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad (1-12)$$

由于电动机的额定电压是工作电压的上限，因此改变电压时，只能在低于额定电压的范围内变化。与固有特性相比较，特性曲线的斜率不变，理想空载转速  $n_0$  随电压减小成正比减小，故改变电压时的人为特性是一组低于固有机机械特性而与之平行的直线，如图 1-16 所示。

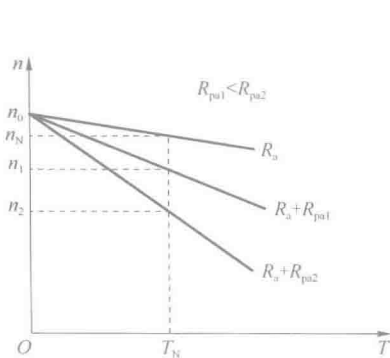


图 1-15 并励电动机电枢串电阻的人为机械特性

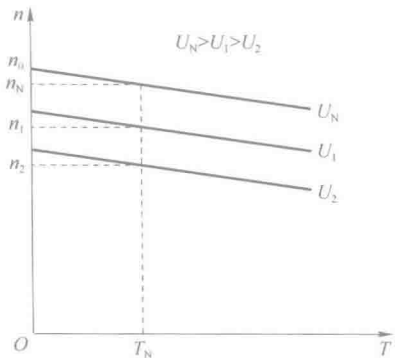


图 1-16 并励电动机改变电枢电压的人为机械特性

#### 3) 减弱磁通时的人为机械特性

可以在励磁回路内串接电阻  $R_{pL}$  或降低励磁电压  $U_f$  来减弱磁通，此时  $U = U_N$ ， $R_{pa} = 0$ ，机械特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (1-13)$$

由于磁通  $\Phi$  的减少，使得理想空载转速  $n_0$  和斜率  $\beta$  都增大，其特性曲线如图 1-17 所示。