

零起点

看图学电气控制线路

丁跃澆 张万奎 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

零起点

看图学电气控制线路

丁跃浇 张万奎 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

全书共分8章,内容包括电动机、电动机的基本控制电路、电气控制线路设计及元件选择、变流技术基础、金属切削机床的电气控制线路、机械加工自动线的电气控制线路、起重设备的电气控制线路、数控机床的电气控制。

本书采用模块化结构,运用图解的方法,以图、表为主,图、文结合的方式介绍了机械设备的电气控制线路,体系新,内容实用,重点突出。

本书可作为机械设计制造及其自动化专业、机械电子工程专业和高职高专相关专业的教材,也可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考,更适合初次接触电气控制技术的人员学习和使用。

图书在版编目(CIP)数据

零起点看图学电气控制线路/丁跃尧,张万奎编著. —北京:
中国电力出版社,2012.2

ISBN 978-7-5123-2633-0

I. ①零… II. ①丁…②张… III. ①电气控制-控制电路-
图解 IV. ①TM571.2-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第014622号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012年5月第一版 2012年5月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 14.125印张 334千字

印数0001—3000册 定价30.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



机械设备是由电动机拖动运行的,这种拖动方式称之为“电力拖动”。电力拖动系统可以分为两个部分:一个是电力拖动部分,包括电动机以及使电动机和机械相互联系起来的传动机构;另一个是电动机的电气控制部分。电力拖动系统主要分为直流拖动和交流拖动两大类。直流拖动是以直流电动机为动力,交流拖动是以交流电动机为动力。早在19世纪30年代就开始使用直流电动机拖动机械设备。直流电动机由于调速和起动性能优良,在机械设备调速领域里,直流拖动系统长期居于首位。但是,直流电动机结构复杂、维护困难,制造大容量、高转速和高电压的直流电动机也受到限制。交流电动机出现后,其中的三相异步电动机结构简单、运行可靠、使用维护方便和价格便宜而被广泛用于各种机械设备。随着电力电子技术的飞跃发展,促使交流调速技术迅速发展。目前,三相笼型异步电动机的变频调速、三相绕线型异步电动机的串级调速和无换向器电动机的调速技术在机械设备中获得了广泛应用。由于电动机不同,它们的控制系统也就不同。目前,交流拖动系统在机械中占主导地位。电力拖动系统的发展大体上经历了成组拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。

电气控制系统的发展伴随着控制器件的发展而发展。大功率半导体器件、大规模集成电路、计算机控制技术、检测技术以及现代控制理论的发展,推动了电气控制技术的发展。其主要表现为:在控制方法上,从手动操纵发展到自动控制;在控制功能上,从单一功能发展到多种功能;在实际操作上,从紧张繁重发展到轻松自如。机械设备电气控制系统的发展日新月异,它主要经历了继电器—接触器控制系统、连续控制方式及自动控制系统、可编程程序控制器、计算机数字控制系统四个阶段。

为了便于初次接触电气控制技术的人员学习,《零起点看图学电气控制线路》的编写内容由浅入深、循序渐进、涉及知识面广。全书共分8章,首先介绍电动机的工作原理、起动、制动、调速的特性及方法,电动机的基本控制电路,电气控制电路的设计方法,电器元件的选择方法,以及半导体变流技术的基础知识。再详细分析常用的普通机床、机械加工自动线、起重机械、数控设备的电气控制线路。

本书采用模块化结构,运用图解的方法,以图、表为主,图、文结合的方式分析解读常用机械设备的电气控制线路图,在第4章、第5章、第6章、第7章的读图过程中,先分析机械设备的电气原理总图,再将总图分为若干个小图,进一步解读,以便使读者在阅读本书后,可以尽快地、全面地掌握机械设备的电气原理和维护技术。

在本书的编撰过程中,参考了大量相关教材和技术资料,在此,对这些教材和资料的作者谨致深切的谢意。在本书的出版过程中,得到了中国电力出版社的大力支持和帮助,在此也一并表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中错误在所难免,恳请读者朋友批评指正。

作者

2012年4月



前言

第1章

电动机

1.1 直流电动机的基本结构与工作原理	1
1.2 直流电动机的机械特性	4
1.3 直流他励电动机的起动、制动与调速	7
1.4 三相异步电动机的基本结构与工作原理	13
1.5 三相异步电动机的电路分析	17
1.6 三相异步电动机的机械特性	20
1.7 三相异步电动机的起动、制动与调速	23

第2章

电动机的基本控制电路

2.1 电气原理图	30
2.2 三相异步电动机的起动控制线路	33
2.3 三相异步电动机的制动控制电路	42
2.4 三相异步电动机变磁极对数的调速控制电路	44
2.5 液压动力滑台的电气控制电路	45
2.6 电气保护电路	49

第3章

电气控制电路设计及元件选择

3.1 电气设计的一般原则	53
3.2 电动机的选择	56
3.3 电气原理图设计	61
3.4 低压电器的选择	66
3.5 电气控制电路设计举例	75

第4章

变流技术基础

4.1 电力电子元件	81
4.2 晶闸管可控整流电路	85

4.3 晶闸管触发电路	93
4.4 逆变电路	97

第5章

金属切削机床的电气控制线路

5.1 C650 卧式车床的电气控制线路	104
5.2 钻床的电气控制线路	109
5.3 卧式铣床的电气控制线路	115
5.4 龙门刨床的电气控制线路	123

第6章

机械加工自动线的电气控制线路

6.1 组合机床的液压传动及其电气控制	134
6.2 动力滑台概述	145
6.3 组合机床电气控制线路	149
6.4 机械手工作原理	154

第7章

起重设备的电气控制线路

7.1 电动葫芦和梁式起重机的电气控制	160
7.2 桥式起重机概述	162
7.3 桥式起重机的电器设备及控制保护装置	163
7.4 15/3t 桥式起重机控制电路分析	169

第8章

数控机床的电气控制

8.1 概述	179
8.2 数控机床的分类	180
8.3 CNC 系统的硬件结构	187
8.4 数控机床伺服系统	190
8.5 数控机床常用检测装置	201
8.6 典型数控机床介绍	215

参考文献	219
------------	-----



电动机

电动机可分为直流电动机和交流电动机两大类。直流电动机虽然结构复杂,维护也不方便,但它的调速性能较好,起动转矩较大,在速度调节要求高、正反转和起制动频繁、多单元同步协调运行的机械设备上,仍然采用直流电动机拖动。三相异步电动机结构简单、运行可靠、坚固耐用、维护容易、价格便宜、具有较好的稳态和动态特性,在工业中得到最广泛的应用。本章主要介绍直流电动机和三相异步电动机的工作原理、起动、制动、调速的特性与方法。

1.1 直流电动机的基本结构与工作原理

直流电动机具有良好地起动性能和调速性能。到目前为止,虽然交流电动机的调速问题已经解决,但是在速度调节要求较高、正反转和起动制动频繁、多单元同步协调运转的机械设备上,仍然采用直流电动机拖动。

1. 直流电动机的结构

直流电动机有固定不动的和旋转的两部分,固定部分称为定子(磁极),旋转部分称为转子(电枢)。其结构简图如图1-1所示。在直流电动机中,都是将磁极部分放在定子上,将电枢部分放在转子上。下面将介绍直流电动机的具体构造。

2. 定子

定子是电动机固定不动的部分。直流电动机的定子由主磁极、换向磁极、机座和轴承等部分组成。

(1) 主磁极。磁极是用来在电动机中产生磁场的。它分成极心和极掌两部分。极心上放置励磁绕组,极掌的作用是使电动机空气隙中磁感应强度的分布最为合适,并用来挡住励磁绕组。磁极是用钢片叠成的,固定在机座上。改变励磁电流的方向就可以改变主磁极的极性,也就此改变了磁场的方向。

在小型直流电动机中,也有用永久磁铁作为磁极的。

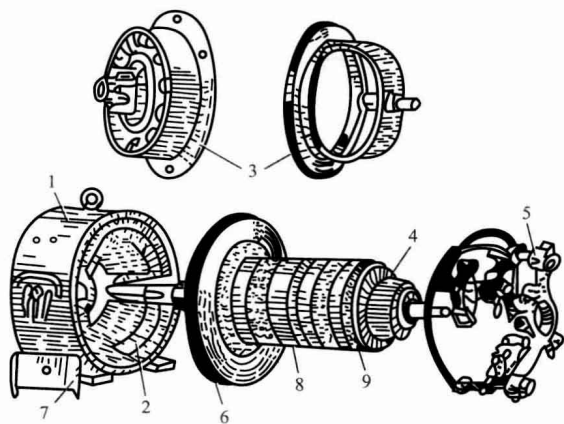


图1-1 直流电动机结构图

1—机座; 2—励磁绕组; 3—轴承端盖; 4—换向器; 5—电刷架;
6—风扇; 7—主磁极; 8—电枢铁心; 9—电枢绕组

(2) 换向磁极。简称换向极，它是位于主磁极之间的比较小的磁极，主要用于改善换向用的。

(3) 机座。用于固定主磁极和换向磁极，也是磁路的一部分。

(4) 轴承。用来支撑转子的转轴。

3. 转子

直流电动机的转子，它包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、风扇等几部分。

(1) 电枢铁心。由硅钢片叠成，表面有许多均匀分布的槽。

(2) 电枢绕组。是由许多线圈按一定的规则连接起来的。绕组安放在电枢铁心槽内，线圈的端部与换向片的楔形铜片相连接。

(3) 换向器。由许多换向片组成，外表呈圆柱形，片与片之间用云母绝缘。

4. 直流电动机的工作原理

图 1-2 所示为直流电动机最简单的模型，电动机具有一对固定的磁极 N 和 S，通常是电磁铁，在两个磁极 N 和 S 之间，有一个可以转动的圆柱铁心电枢，在电枢上缠有电枢绕组，为简单起见，我们假设绕组只有一匝线圈 abcd。线圈两端分别连接在相互绝缘的换向片 A1 和 A2 上，换向片组成的圆柱体称为换向器，换向器跟随电枢转动。电刷 B1 和 B2 固定不动，紧紧压在换向片上，与外部电路相连接。

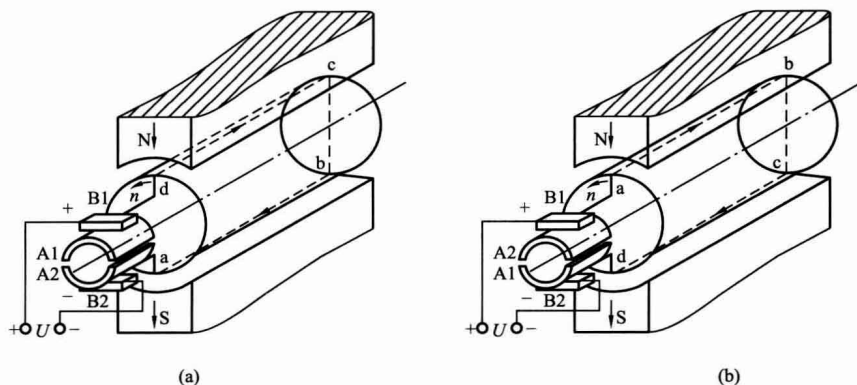


图 1-2 直流电动机工作原理图

(a) 通入直流电；(b) 转过 180°

下面来看直流电动机的工作原理。如图 1-2 (a) 所示，将直流电源接入电刷 B1 和 B2 之间，在 N 极下的导体电流方向为 $d \rightarrow c$ ，在 S 极上的导体电流方向为 $b \rightarrow a$ 。对于导体 dc 来说，通电导体处于磁场中，会受到电磁力的作用，根据电磁力定律，导体上的力大小为 $f = Bli$ ，方向由左手定则确定，可知在图示位置时，电磁力的方向为水平向左。同理，对于导体 ab 来说，也受到电磁力的作用，大小也为 $f = Bli$ ，方向为水平向右。因此，线圈 abcd 受到逆时针方向的转矩作用，使电枢绕逆时针方向转动。当电动机转过 90° 时，线圈处于水平位置，线圈受到的转矩为零，但是，电动机有一定的转速，在惯性的作用下，电动机可以转过这个位置。当电动机转过 180° 时，如图 1-2 (b) 所示，在 N 极下的导体为 ab，在 S 极上的导体为 cd，在换向器的作用下，线圈中的电流换向。对于导体 ab 来说，电流方向为 $a \rightarrow b$ ，受到的电磁力方向为水平向左；对于导体 cd 来说，电流方向为 $c \rightarrow d$ ，受到的电磁力方

向为水平向右。因此,线圈仍受到逆时针方向的转矩作用,使电枢沿逆时针方向旋转。由此可看出,换向器的作用是相当重要的,它改变线圈中的电流方向,从而保持线圈所受到的转矩方向不变,从而使电枢能连续旋转。

当电枢在磁场中旋转,切割磁力线时,根据电磁感应定律,在电枢中会产生感应电动势,其大小为 $\epsilon = -Nd\phi/dt$ 。方向由右手定则判断,它与外加电压或电流的方向相反,因此,通常称为反电动势 E 。在不同时刻,当线圈处于不同位置时,所通过的磁通 Φ 是不同的,磁通的变化率也是不同的。因此,反电动势 E 的大小是变化的,通常用它的平均值来表示,即

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

式中 E ——反电动势, V;

C_e ——电动势常数,由电动机结构决定;

Φ ——一对磁极的磁通, Wb;

n ——电动机的转速, r/min。

电磁转矩 T 是指电动机正常运行时,带电的电枢绕组在磁场中受到电磁力作用所形成的总转矩。在不同位置,电枢绕组所受的电磁转矩方向相同,大小不同,通常用电磁转矩的平均值来进行计算,即

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

式中 T ——电磁转矩, N·m;

C_t ——转矩常数,由电动机的结构决定, $C_t = 9.55 C_e$;

I_a ——电枢电流, A。

对于直流电动机来说,稳态运行时,作用在电动机轴上的转矩有三个,即电磁转矩 T 、空载损耗转矩 T_0 和负载转矩 T_L , 电磁转矩 T 是驱动转矩,使电动机旋转,电磁转矩 T 应等于空载损耗转矩 T_0 和负载转矩 T_L 之和,即

$$T = T_0 + T_L \quad (1-3)$$

由于空载损耗转矩很小,电动机在稳定运行时,为简单起见,通常可以忽略不计,认为电磁转矩与负载转矩相等。当负载转矩发生波动时,电动机的转速 n 、反电动势 E 、电枢电流 I_a , 以及电磁转矩 T 能自动进行调整,达到新的平衡。如负载减小时,电磁转矩大于负载转矩,转速上升,反电动势随着转速的上升而增大,电枢电流减小,电磁转矩减小。当电磁转矩减小到与负载转矩相等时,电动机达到新的平衡状态,此时,电动机以高于原来的速度稳定运行。

5. 直流电动机的分类

直流电动机的磁极一般由磁极铁芯和励磁绕组所组成。励磁绕组上通以直流电流时会产生励磁电动势,励磁电动势所形成的磁场就是直流电动机的磁场,也称为励磁磁场。按照励磁方式的不同,直流电动机可分为他励电动机、并励电动机、串励电动机和复励电动机四种,如图 1-3 所示。

他励电动机的励磁绕组由外电源 U_f 供电,励磁电流 I_f 不受电枢端电压 U 或电枢电流 I_a 的影响。并励电动机的励磁绕组与电枢绕组并联,由电枢端电压 U 供电,负载电流 I 分为励磁电流 I_f 和电枢电流 I_a ; 串励电动机的励磁绕组与电枢绕组串联,励磁电流 I_f 即为电枢

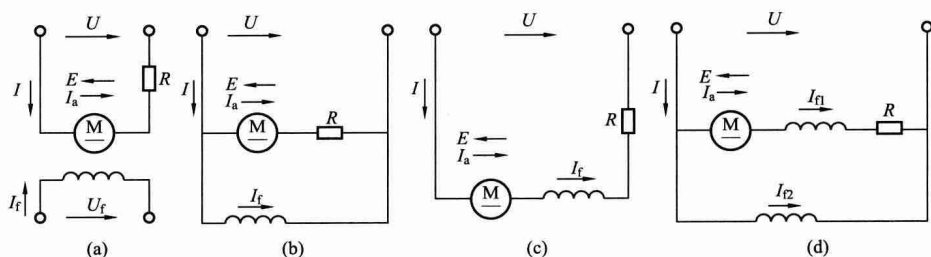


图 1-3 直流电动机的分类

(a) 他励电动机；(b) 并励电动机；(c) 串励电动机；(d) 复励电动机

电流 I_a ；复励电动机的磁极上有两个励磁绕组，一个与电枢绕组串联，一个与电枢绕组并联。

1.2 直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性指的是当电动机的电枢端电压 U 、电枢电阻 R_a 、电枢上的外串电阻 R 及励磁电流 I_f 不变时，电动机的转速 n 与转矩 T 之间的关系，曲线 $n=f(T)$ 称为电动机的机械特性曲线。

直流电动机的机械特性与励磁方式有关，励磁方式不同的电动机，其机械特性是有区别的。他励和并励电动机比较常用，当他励电动机的励磁电源电压 U_f 取为电动机的电枢端电压 U 时，就成了一台并励电动机。可以说并励电动机是他励电动机的一种特例，两者的机械特性是相同的。下面以他励电动机为例来分析他励和并励电动机的机械特性。

1. 他励电动机机械特性的表达式

由图 1-3 (a) 可看出，他励电动机电枢回路的电压平衡方程式为

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

由式 (1-2) 得

$$I_a = T/C_t\Phi \quad (1-5)$$

将式 (1-1) 和式 (1-5) 代入式 (1-4) 中并整理，得他励电动机机械特性曲线方程为

$$n = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{R_a + R}{C_e C_t \Phi^2} T = n_0 - \Delta n \quad (1-6)$$

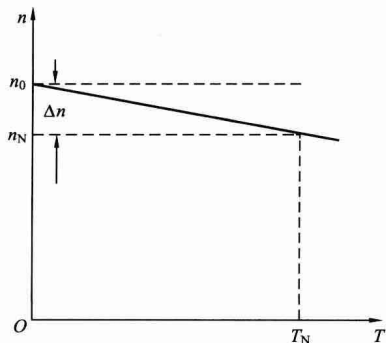


图 1-4 他励电动机机械特性曲线

电枢端电压 U 、励磁电阻、励磁电流一定时，磁通 Φ 也为一常数。由式 (1-6) 可看出，电动机的机械特性曲线为一条斜直线。随着电磁转矩 T 的增大，转速降低，如图 1-4 所示。

当电磁转矩 $T=0$ 、电枢端电压和励磁电流不变时，磁通 Φ 为一定值。 $n=n_0=U/C_e\Phi$ 是电动机空载时的转速。事实上，对于电动机来说，即使负载转矩为零，但由于空载损耗转矩的存在，电磁转矩 T 也不可能为零，

因此,通常将 n_0 称为理想空载转速,点 $(0, n_0)$ 就称为理想空载点。

$\Delta n = (R_a + R)T / C_e C_t \Phi^2$ 增加时,电磁转矩增大,电枢电流 $I_a = (U - E) / (R_a + R)$ 增大,在电阻 $(R_a + R)$ 上引起的压降增大,而电源电枢端电压不变,因此,反电动势 E 减小,所以,转速 $n = E / C_e \Phi$ 降低。

电动机的机械特性有固有机机械特性和人为机械特性两种。固有机机械特性是指在额定条件下,即电枢端电压为额定电压 ($U = U_N$),励磁电流为额定励磁电流 ($I_f = I_{fN}$ 即磁通 $\Phi = \Phi_N$),电枢电路中外不接任何电阻 ($R = 0$) 时的转速与转矩之间的关系。而人为机械特性则是指改变电枢端电压 U 、励磁电流 I_f (即磁通 Φ) 和电枢电路中的电阻 R 时所得到的转速与转矩之间的关系。

2. 固有机机械特性

当 $I_f = I_{fN}$, $U = U_N$, $R = 0$ 时, $\Phi = \Phi_N$, 由式 (1-6) 得他励电动机的固有机机械特性曲线方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi_N^2} T = n_{0N} - \Delta n_N \quad (1-7)$$

他励电动机的固有机机械特性曲线是一条直线,只需要确定其中的两个点即可确定这条直线。电动机的电枢电阻 R_a 可根据电动机的损耗来估算,通常认为电动机在额定负载下的铜损耗 $I_a^2 R_a$ 为总损耗的 50%~75%。电动机铭牌上给出了电动机的额定功率 P_N 、额定电压 U_N 、额定电流 I_N 和额定转速 n_N 等,根据这些数据就能求出电动机的理想空载转速 n_0 , 额定转矩 T_N 等。因此,他励电动机的固有机机械特性曲线可根据电动机的铭牌数据来绘制,一般用理想空载点 $(0, n_0)$ 和额定运行点 (T_N, n_N) 来确定。

【例 1-1】 一台他励电动机,其铭牌数据如下: $P_N = 12\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $I_N = 65\text{A}$, $n_N = 1000\text{r/min}$ 。试计算此电动机的固有机机械特性。

解 估算电枢电阻 R_a

$$I_a^2 R_a = (I_N U_N - P_N)(0.5 \sim 0.75)$$

$$R_a = (65 \times 220 - 12000)(0.5 \sim 0.75) / 65^2 = 0.272 \sim 0.41 (\Omega)$$

取 $R_a = 0.35\Omega$

求 $C_e \Phi_N$

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{(220 - 65 \times 0.35)}{1000} = 0.197$$

求理想空载转速 n_0

$$n_0 = U_N / C_e \Phi_N = 220 / 0.197 = 1116.8 (\text{r/min})$$

求额定转矩 T_N

$$T_N = 9.550 P_N / n_N = 9550 \times 12 / 1000 = 114.6 (\text{N} \cdot \text{m})$$

绘出电动机的固有机机械特性曲线如图 1-4 所示。其中,理想空载点坐标 $(0, 1116.8)$; 额定工作点坐标 $(114.6, 1000)$ 。

3. 人为机械特性

人为机械特性就是指式 (1-6) 他励电动机机械特性中电枢端电压 U 、磁通 Φ 不是额定值或电枢电路中接有外加电阻 R 时的机械特性,又称人为特性。因此,他励电动机有三种

人为机械特性。

(1) 改变电枢电压 U 时的人为机械特性。当 $I_f = I_N$, $R=0$, 改变电枢端电压 U 时, 由式 (1-6) 可得改变电枢端电压 U 时的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi_N^2} T = n_0 - \Delta n \quad (1-8)$$

由此可看出, 理想空载转速 n_0 与电枢端电压 U 成正比, 转速降 Δn 与电枢端电压 U 无关。因此, 改变电枢端电压 U 时的人为机械特性与固有机机械特性相比, 是一些理想空载点不同而斜率相同的平行的直线, 并且随着电压的降低, 理想空载转速也降低。另外, 由于电动机电压不能超过额定电压, 只能在额定值以下改变电压的大小, 因此, 改变电枢端电压 U 的人为机械特性是一簇在固有机机械特性以下并与之平行的直线, 如图 1-5 所示。

(2) 电枢回路中串附加电阻 R 时的人为机械特性。当保持 $I_f = I_N$, $U = U_N$, 在电枢回路中串入附加电阻 R 时, 由式 (1-6) 得电枢回路中串联附加电阻时的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R}{C_e C_t \Phi_N^2} T = n_{0N} - \Delta n \quad (1-9)$$

它与固有机机械特性相比, 理想空载转速 n_0 不变, 而转速降随着附加电阻的增大而增大。因此, 它是一簇过点 $(0, n_{0N})$ 的射线, 附加电阻 R 越大, 则直线的斜率越大, 转速下降越大, 如图 1-6 所示。

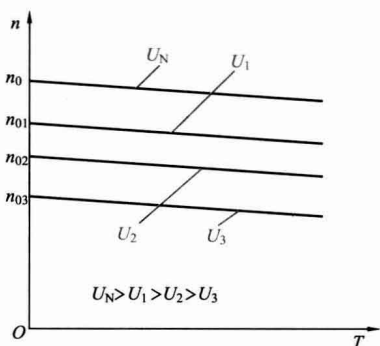


图 1-5 改变电枢电压 U 时的人为机械特性

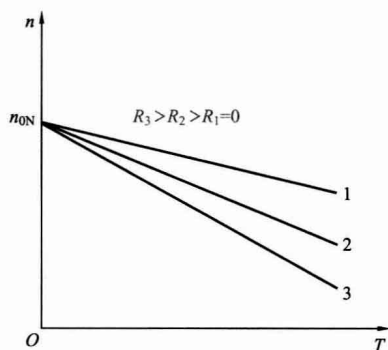


图 1-6 电枢回路串电阻时的人为机械特性

(3) 改变磁通 Φ 时的人为机械特性。在保持电枢端电压为额定电压 U_N , 电枢回路中不串入任何外接电阻 ($R=0$) 的情况下, 改变励磁电流 I_f , 则磁通 Φ 也随之发生改变。由式 (1-6) 得改变磁通时的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T = n_0 - \Delta n \quad (1-10)$$

由此可看出, 改变磁通 Φ 时, 理想空载转速和转速降都随着磁通的减小而增大, 如图 1-7 所示, 每条人为机械特性都与固有机机械特性相交。一般来说, 受励磁线圈发热和电动机磁饱和的限制, 电动机的磁通

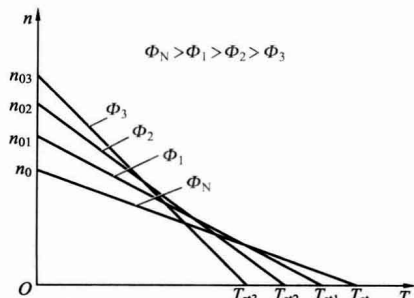


图 1-7 改变磁通 Φ 时的人为机械特性

Φ 只能在额定磁通以下进行调节, 因此, 人为机械特性的理想空载点总在固有机特性的理想空载点之上。如果励磁电流为零, 从而导致磁通 Φ 为零, 电动机的速度将会非常高, 理论上可趋于无穷大, 这种现象称为“飞车”, 在实际中是绝不允许的。因此, 他励电动机在起动前必须先通励磁电流, 并且保证在运转过程中, 励磁电流不为零, 一般在运转过程中都设有“失磁”保护。

4. 串励电动机的机械特性

如图 1-3 (c) 所示, 串励电动机的电压平衡方程式为

$$U = E + I_a R_0 \quad (1-11)$$

其中, R_0 为总电阻, 包括电枢电阻 R_a 、励磁绕组 R_f 和附加电阻 R 。

将式 (1-1)、式 (1-5) 代入式 (1-11), 并整理得串励电动机的机械特性方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_0}{C_e C_t \Phi^2} T = n_0 - \Delta n \quad (1-12)$$

串励电动机的励磁电流 I_f 就是它的电枢电流 I_a , 而电枢电流随着负载的变化而变化, 因此, 磁通 Φ 也会随着电枢电流 I_a 的变化而变化。串励电动机的机械特性可分两段来进行分析。

当负载较轻时, 电枢电流较小, 此时, 可近似认为磁通 Φ 与电枢电流成正比, 即 $\Phi = KI_a$, 其中, K 为比例常数。所以, 有

$$T = C_t \Phi I_a = C_t \Phi^2 / K$$

即

$$\Phi = \sqrt{TK/C_t} \quad (1-13)$$

将式 (1-13) 代入式 (1-12) 得

$$n = \frac{U}{C_e \sqrt{TK/C_t}} - \frac{R_0}{C_e K} = \frac{U}{K_1 \sqrt{T}} - \frac{R_0}{K_2} \quad (1-14)$$

其中, K_1, K_2 为两个常数。

由此可看出, 在负载较轻的情况下, 当电枢端电压 U 不变时, 串励电动机的转速 n 与 $\sqrt{T}$ 成反比, 其机械特性曲线如图 1-8 所示, 近似为一条双曲线。当负载转矩增加时, 转速下降很快, 转速 n 轴是它的渐近线, 它的理想空载转速 n_0 趋向于无穷大。当串励电动机空载时, 转速相当高, 这也可能造成“飞车”。因此, 串励电动机绝不允许空载运行, 也不允许用皮带传动, 以防皮带脱落。

当负载较重时, 电枢电流较大, 此时, 可认为磁路已经趋向饱和, 近似认为磁通 Φ 为常数, 此时的机械特性曲线近似为一条直线, 如图 1-8 后段曲线所示。

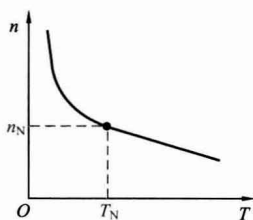


图 1-8 串励直流电动机的机械特性



1.3 直流他励电动机的起动、制动与调速

1. 直流他励电动机的起动

电动机接上电源, 从静止状态转动后, 达到稳态运行状态的过程就是电动机的起动过程。对于电动机的起动一般有两个要求: 一是起动转矩能够克服起动时的摩擦转矩和负载转

矩,使电动机能转动起来;二是起动电流不能太大,以免对电源、电动机及生产机械产生有害的影响。

电动机刚起动时,转速为零,反电动势 E_a 为零,电枢回路中的外串电阻 R 也为零。由式 (1-1)、式 (1-4) 可知,起动电流 I_{st} 为

$$I_{st} = U/R_a \quad (1-15)$$

电枢电阻 R_a 一般很小,因此起动电流 I_{st} 相当大,可达到额定电流的 10~20 倍。因此,除了小容量的他励电动机,一般是不允许将电动机直接接到额定电压的电源上起动的。他励电动机的起动方法有电枢回路中串电阻分级起动及降压起动两种。

(1) 电枢回路中串电阻分级起动。在电枢回路中串入起动电阻 R_{st} 时,电动机起动电流 I_{st} 和起动转矩 T_{st} 分别为

$$I_{st} = \frac{U}{R_a + R_{st}} \quad (1-16)$$

$$T_{st} = C_t \Phi I_{st} \quad (1-17)$$

起动电阻 R_{st} 越大,则起动电流越小。但起动电阻也不是越大越好,图 1-9 所示为他励电动机电枢回路中串联电阻后的机械特性,起动电阻越大,起动转矩越小,带负载能力越弱。当起动电阻为图 1-9 (a) 中的 R_{st2} 或图 1-9 (b) 中的 R_{st4} 时,电动机的起动转矩小于负载转矩 T_L ,电动机无法起动。在图 1-9 (a) 中,当电动机中串一级起动电阻 R_{st1} 时,电动机从 A 点起动,沿机械特性曲线向 B 点移动,速度不断上升。随着转速的升高,反电动势 E_a 不断增大,起动电流 I_{st} 逐步减小到 I_N ,起动转矩也逐步减小到额定转矩 T_N 。在 B 点时,切除起动电阻 R_{st1} ,机械特性由曲线 2 过渡到曲线 1 上,由于机械惯性的作用转速不能突变,因此,工作点由 B 平移到 C 点,然后再沿着固有机机械特性曲线 1 移动,最后稳定运行在额定工作点 D。这种方法能限制起动电流,但是在从 B 点向 C 点切换的过程中,冲击电流相当大,另外,在起动过程中,起动转矩不断减小,整个起动过程中的平均起动转矩不大,起动快速性不好。

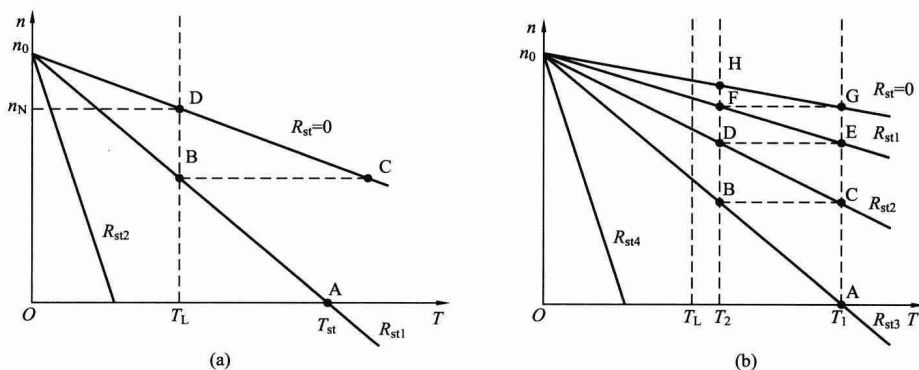


图 1-9 他励电动机电枢回路串联电阻分级起动
(a) 一级起动电阻; (b) 三级起动电阻

为了避免上述这些缺点,可以将起动电阻分级切除。如图 1-9 (b) 所示,分三级切除起动电阻。电动机从 A 点起动,沿着 ABCDEFGH 移动,最后稳定运行在 H 点。这种起动方法冲击电流小、且平均起动转矩大,起动过程快而平稳,但是所需要的控制设备也相应地

增多,一般采用三级或四级分级启动。

(2) 降压启动。由式(1-15)可知,启动电流与电枢端电压成正比。因此,电动机启动时,降低电枢端电压 U ,可以限制启动电流。然后,随着转速的升高,反电动势 E 增大,再逐渐提高电枢端电压 U ,保证电枢电流 $I_a = (U - E)/R_a$,小于允许的最大电流。当电压为 U_N 时,转速也升高到额定转速 n_N ,电动机稳定运行。

降压启动的方法可以平滑地增加电源电压,使电枢电流始终保持在允许的最大值上。电动机始终以最大启动转矩启动,使启动过程一直处于最优运行状态。但是这种方法单独需要一套直流电源调节设备,投资比较大。

2. 直流他励电动机的制动

电动机断电,在摩擦力的作用下使电动机停车的过程叫自然停车。这种停车过程时间比较长,在生产过程中,为了提高生产效率,保证产品质量,一般要求能加快停车过程,实现准确停车等,这就要求采取一些措施使电动机能快速地从某一稳定速度开始减速到停转,这就是电动机的制动。电动机的制动还包括采取一些措施使电动机从高速运转降到低速运转,或者限制位能型负载在某一转速下稳定运转。电动机制动的关键是产生一个与电动机运转方向相反的阻转矩。他励电动机常用的制动方法有能耗制动、反接制动和回馈制动。

(1) 能耗制动。电动机在电动状态运行时,断开电枢端电压 U ,在电枢两端串接一个附加电阻 R ,使电动机制动的状态称为能耗制动。

如图1-10(a)所示,当开关打在1位置时,电动机正常工作。如果将开关打在2位置,如图1-10(b)所示时,电动机从直流电源断开,电动机与电阻 R 构成一个回路。由于惯性的作用,电动机仍然转动,电枢绕组上的感应电动势 $E = C_e \Phi n$ 仍然存在,且方向不变,从而在电阻与电动机回路中产生电流 I'_a ,方向与原电枢电流 I_a 方向相反。因此,电磁转矩 $T' = C_t \Phi I'_a$ 与转速方向相反,电动机减速制动。此时,机械系统储存的机械能转变成电能,以热量的形式消耗在电阻上,“能耗”制动也因此而命名。

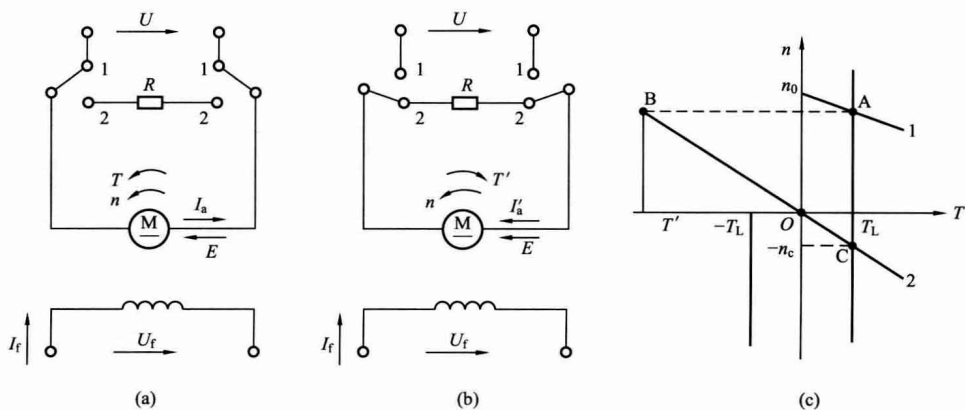


图 1-10 他励电动机能耗制动

(a) 电动状态时; (b) 制动状态时; (c) 机械特性

由图1-10(b)可知,能耗制动时的电压平衡方程式为

$$E = I'_a(R + R_a)$$

又

$$E = C_e \Phi n, I'_a = \frac{T'}{C_t \Phi} = -\frac{T}{C_t \Phi}$$

因此, 能耗制动时的机械特性为

$$n = -\frac{R + R_a}{C_e C_t \Phi^2} T \quad (1-18)$$

所以, 能耗制动时的机械特性曲线为一条过原点的直线, 且位于第二、四象限内, 如图 1-10 (c) 中直线 2 所示。正常工作时, 电动机在 A 点稳定运行。制动时, 工作点由电动状态时的特性曲线 1 过渡到制动状态时的特性曲线 2 上, 工作点从 A 点平移到 B 点, 此时电磁转矩为 T' , 方向与转速方向相反, 起制动作用。磁转矩为 T' 使电动机减速运行, 由 B 点向原点移动。当到达原点时, 对于反抗型负载来说, 负载为 $-T_L$, 是制动转矩, 电动机不会反方向运转; 对于位能型负载来说, 负载 T_L 为拖动转矩, 它将带动电动机反方向运转, 电磁转矩仍然起制动作用, 最后, 当电磁转矩与负载转矩平衡时, 稳定运行在 C 点, 以一定的速度 $-n_c$ 稳定运转。由式 (1-18) 可知, 制动时的速度 n_c 与串入的电阻值 R 的大小有关, 电阻 R 越大, 则速度越大。能耗制动通常用在卷扬机等恒速下放重物的场合。

(2) 反接制动。电动机运行在电动状态时, 电枢端电压 U 与反电动势 E_a 的方向总是相反的。如果在外部条件下, 改变电枢端电压 U 或反电动势 E 中任意一个的方向, 使两者方向一致时, 电动机的电磁转矩会改变方向, 与转速方向相反, 电动机处于制动状态, 这种制动方法称为反接制动。根据改变的参数不同, 反接制动可以分为两种: 靠改变电枢端电压 U 的方向所形成的制动称为电源反接制动; 靠改变反电动势 E 的方向所形成的制动称为倒拉反接制动。由于反接制动时, 电动机的电枢端电压与反电动势方向一致, 电枢电流 I_a 比较大, 因此通常在电枢回路中串入一个合适的限流电阻 R 来限制电枢中的电流 I_a 。

1) 电源反接制动。如图 1-11 (a) 所示, 电动机工作在电动状态。如果将电源反接, 如图 1-11 (b) 所示, 则电枢电流反向 $I'_a = -I_a$, 转速方向不变, 因此反电动势 E 不变, 则此时的电压平衡方程式为

$$-U = E - I_a(R + R_a) \quad (1-19)$$

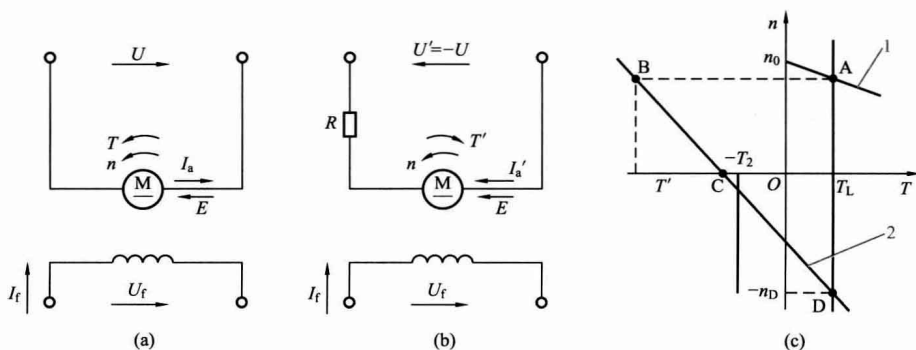


图 1-11 他励电动机电源反接制动

(a) 电动状态时; (b) 制动状态时; (c) 机械特性

将式 (1-1)、式 (1-5) 代入式 (1-19) 并整理得电源反接制动时的机械特性曲线方程为

$$n = \frac{-U}{C_e \Phi} - \frac{R + R_a}{C_e C_t \Phi^2} T \quad (1-20)$$

电动机电源反接制动时的机械特性曲线如图 1-11 (c) 中直线 2 所示, 其理想空载转速为 $-n_0$, 当工作点位于二、四象限时, 电动机处于制动状态。正常工作时, 电动机在 A 点稳定运行。电源反接制动时, 工作点由 A 点平移到曲线 2 上的 B 点, 在制动转矩与负载转矩的作用下, 转速迅速下降到零, 即工作点移到 C 点。此时, 如果电磁转矩大于负载转矩, 应该迅速断开电源, 否则的话, 电动机将反向起动, 最后以速度 n_D 稳定运行在 D 点。

2) 倒拉反接制动。如图 1-12 (a) 所示, 当串入电阻 $R=0$ 时, 电动机处于电动状态, 电动机在图 1-12 (b) 中固有机械特性曲线 1 上的 A 点稳定运行。如果将电阻 R 串入电枢回路中, 则工作点将平移到人为机械特性曲线 2 上的 B 点, 此时, 电磁转矩小于负载转矩, 电动机减速。当速度减为零时, 如图中的 C 点, 反电动势为零, 但电枢电流不为零, 它会产生堵转转矩 T_{st} , 由于 T_{st} 小于负载转矩 T_L , 因此, 电动机会反方向运转, 工作状态进入第四象限, 速度反向, 电磁转矩起制动作用。此时, 反电动势和电源电压方向相同, 电枢电流 $I_a = (E + U) / (R_a + R)$ 增大, 电磁转矩增大。当电磁转矩增大到与负载转矩相等时, 电动机以速度 $-n_D$ 稳定运行在 D 点。这种靠改变反电动势方向, 从而使电动机进入制动状态的方法就是倒拉反接制动。通过调节电阻 R 的大小, 可以得到不同的下降速度, 电阻越大, 下降速度越大。

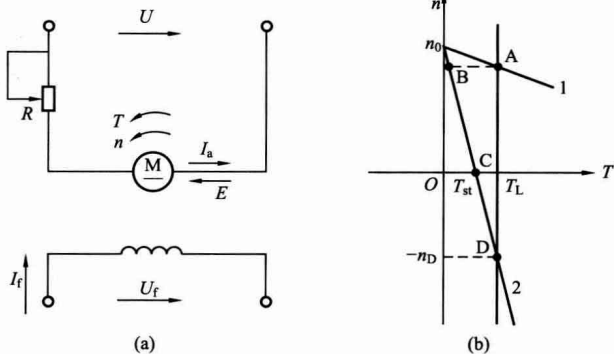


图 1-12 倒拉反接制动

(a) 原理图; (b) 机械特性

(3) 回馈制动。电动机采取正常接线方法, 在外部条件下使电动机的实际工作转速 n 大于它的理想空载转速 n_0 时, 电动机产生的反电动势 E 大于电枢端电压 U , 此时, 电枢电流 I_a 的方向发生改变, 从而使电磁转矩 T 的方向改变, 电动机进入制动状态, 这样的一种制动方式称为回馈制动。

3. 直流他励电动机的调速

电动机拖动一定的负载运行, 转速由工作点决定。电动机的调速就是在负载一定的前提下, 人为地改变电动机的参数, 从而改变电动机的稳定工作点。速度调节与速度变化是有区别的, 速度变化是指由于电动机负载转矩发生变化 (增大或减小), 从而引起的电动机转速变化 (下降或上升), 此时, 电动机的机械特性曲线是不变的; 而速度调节则是在负载不变的前提下, 改变电动机的机械特性, 使工作点发生变化。

由转速的计算式 (1-6) 可看出: 在负载转矩一定时, 改变电动机的电枢端电压 U 、磁通 Φ 及电枢电路的外串电阻 R 都能改变电动机的机械特性, 从而改变速度, 相应的速度调节方法也有三种。

(1) 改变电枢端电压 U 调速。前面已介绍, 改变电枢端电压 U 时的人为机械特性是一