

高等学校教材

机械设计制造及其自动化专业实验

王毅坚 高 艺 李颖卓 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

机械设计制造及其自动化专业实验/王毅坚, 高艺,
李颖卓主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 1
高等学校教材
ISBN 7-5025-6435-7

I. 机… II. ①王…②高…③李… III. ①机械设
计-实验-高等学校-教材②机械制造-实验-高等学校-
教材 IV. TH-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 136139 号

高等学校教材
机械设计制造及其自动化专业实验
王毅坚 高艺 李颖卓 主编
责任编辑: 程树珍 李玉晖
责任校对: 陈静
封面设计: 于剑凝

*
化学工业出版社 出版发行
教材出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64982530
<http://www.cip.com.cn>

*
新华书店北京发行所经销
北京永鑫印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 338 千字
2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-6435-7/G · 1643
定 价: 24.00 元

版权所有 违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

普通高等学校本科专业的建设和发展，对“机械设计制造及其自动化专业”学生的综合实践能力和动手能力，提出了越来越高的要求。要求学生在机电控制、可编程序控制器控制、液压与气压控制、计算机控制和数字控制等方面，具有较强的分析和解决问题的能力。为适应和满足该专业在新形势下培养目标的总体要求，特编写本实验教材。

机械设计制造及其自动化专业实验的教学目的是为了加深学生对本专业所学理论的理解；掌握本专业最基本的实验方法和测试技术；培养学生观察、分析和解决问题的能力。这就要求学生在实验前做好预习。明确实验目的、要求、步骤、需测定的数据；了解所使用的仪器、仪表及工具。在实验过程中，要细心操作，仔细观察，发现问题，思考问题。实验完成后，认真整理数据，根据实验结果及观察到的现象，加以分析，得出结论，并按规定要求提交实验报告。

根据机械设计制造及其自动化专业规范的要求，应将该专业实验单独开设课程。本实验教材按 36 学时安排。实验内容包括：机电传动控制、可编程序控制器、现代数控加工技术、液压与气压传动控制原理及实验四大部分，共计 48 个实验题目。参考学时为 24~36 学时。

本书由王毅坚、高艺、李颖卓主编，其中第 1 章、第 2 章由王毅坚、李颖卓编写；第 3 章由关金贵、王茁编写；第 4 章由王毅坚、张波、王茁编写。高艺参与了第 1 章、第 2 章部分内容的编写；王迪、田爱华、卢伟宏参与了第 3 章、第 4 章部分内容的编写。全书内容由王茁、李颖卓负责编排并完成初统稿。书中实验内容的验证工作由王毅坚、李颖卓、关金贵、王茁、卢伟宏完成。全书由邵泽波教授担任主审。

本书在编写过程中，参阅了大量的参考文献，在此向所有的作者表示感谢！本教材由吉林化工学院“教材出版基金”赞助出版。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编者
2004 年 10 月

目 录

1	机电传动控制理论及实验	1
1.1	直流电动机传动控制	1
1.1.1	直流他励电动机的启动	1
1.1.2	直流电动机的调速	3
1.1.3	直流电动机的制动	6
1.2	三相异步电动机的控制	12
1.2.1	鼠笼式异步电动机的启动	12
1.2.2	线绕式异步电动机的启动	15
1.2.3	三相异步电动机的调速	16
1.2.4	三相异步电动机的制动	19
1.3	交流伺服电动机	21
1.3.1	两相交流伺服电动机的结构	21
1.3.2	基本工作原理	22
1.3.3	消除自转现象的措施	22
1.3.4	特性和应用	23
1.4	直流伺服电动机	24
1.5	测速发电机	25
1.5.1	异步(交流)测速发电机	25
1.5.2	直流测速发电机	27
1.6	电力电子器件	28
1.6.1	三相可控整流电路	28
1.6.2	逆变器	33
1.6.3	晶闸管的触发电路	38
1.6.4	晶闸管的串并联和保护	43
1.7	机电传动控制实验	45
	实验一 直流并励电机	45
	实验二 鼠笼式异步电动机的检查与启动	47
	实验三 异步电动机的继电器接触控制电路	50
	实验四 交流伺服电动机	52
	实验五 异步电动机的行程控制和时间控制电路	54
	实验六 三相异步电动机断相保护电路	57
	实验七 步进电动机开环控制系统	58
	实验八 晶闸管调压电路	62
2	可编程序控制器原理及实验	67

2.1	S7-200 系列可编程序控制器	67
2.1.1	S7-200 Micro PLC 的概述	67
2.1.2	S7-200 系列 PLC 的性能比较	67
2.1.3	S7-200 Micro CPU 主要组成部分	68
2.1.4	最大 I/O 配置	69
2.2	S7-200 PLC 的安装	72
2.2.1	安装板面的布置	72
2.2.2	扩展模块的安装和拆卸	73
2.3	S7-200 编程软件的安装与使用	73
2.3.1	概述	73
2.3.2	STEP 7-Micro/WIN 32 快速入门	74
2.3.3	用 PC/PPI 电缆设置通讯	75
2.3.4	建立与 S7-200 CPU 的在线联系	76
2.3.5	修改 PLC 的通讯参数	77
2.4	S7-200 CPU 编程的基本概念	78
2.4.1	设计一个微型 PLC 系统的指导原则	78
2.4.2	S7-200 程序的基本概念	80
2.4.3	S7-200 编程语言和编程器的基本概念	80
2.4.4	SIMATIC 和 IEC 1131-3 指令之间的区别	83
2.4.5	建立程序的基本元素	86
2.4.6	CPU 扫描周期	87
2.4.7	选择 CPU 的工作方式	90
2.4.8	创建 CPU 密码	91
2.4.9	调试及监视程序	92
2.4.10	在 RUN 模式下编辑	95
2.5	可编程序控制器实验	96
实验一	基本逻辑指令实验	96
实验二	计数器指令实验	98
实验三	微分指令锁存器指令实验	99
实验四	位移指令实验	100
实验五	特殊功能指令实验	100
实验六	电梯控制实验	101
实验七	小车自动选向、定位控制实验	103
实验八	混料罐控制实验	103
实验九	传输线控制实验	104
实验十	十字路口交通信号灯控制实验	105
3	现代数控加工技术原理及实验	107
3.1	数控车削程序的编制与加工操作实验	107
3.1.1	数控机床编程基础	107
3.1.2	数控车床的编程方法	111

3.1.3	编程实例	115
3.1.4	数控机床的组成及功能	116
3.1.5	机床操作面板、控制面板及软件功能	116
3.1.6	车床操作方法	118
3.2	数控铣削程序的编制与加工操作实验	125
3.2.1	数控铣床编程基础	125
3.2.2	常用功能的编程方法	126
3.2.3	数控铣床简介	132
3.2.4	铣床操作方法与步骤	135
3.3	数控电火花线切割机床的编程与加工实验	141
3.3.1	数控电火花线切割机床工作原理	141
3.3.2	操作编程部分	142
3.4	现代数控加工技术实验	145
	实验一 数控车削程序编程实验	145
	实验二 数控车床加工实验	146
	实验三 数控铣削程序编程实验	147
	实验四 数控铣床加工实验	148
	实验五 数控电火花线切割程序编程实验	148
	实验六 数控电火花线切割机床加工实验	149
4	液压与气压传动回路原理及实验	150
4.1	液压与气压实验基础知识	150
4.1.1	液压与气压实验技术	150
4.1.2	液压与气压实验设备	151
4.2	方向控制回路	160
4.2.1	一般方向控制回路基本原理	160
4.2.2	其他方向控制回路基本原理	160
4.3	压力控制回路	162
4.3.1	调压控制回路基本原理	162
4.3.2	减压控制回路基本原理	162
4.3.3	增压控制回路基本原理	163
4.3.4	卸荷回路基本原理	164
4.4	速度控制回路	165
4.4.1	节流调速回路基本原理	165
4.4.2	容积调速回路基本原理	168
4.4.3	容积节流调速回路基本原理	169
4.4.4	速度换接回路基本原理	170
4.5	多缸工作控制回路	171
4.5.1	顺序动作回路基本原理	172
4.5.2	同步回路基本原理	173
4.6	液压传动回路实验	174

实验一	手动换向阀的换向回路实验	178
实验二	用“O”型、“M”型机能换向阀的锁紧回路实验	179
实验三	液控单向阀的锁紧回路实验	180
实验四	压力调定回路实验	181
实验五	二级调压回路实验	182
实验六	用减压阀的减压回路实验	182
实验七	增压回路实验	183
实验八	换向阀的卸载回路实验	184
实验九	进油节流调速回路实验	186
实验十	回油节流调速回路实验	187
实验十一	变量泵调速回路实验	187
实验十二	变量泵与调速阀组成的复合调速回路实验	188
实验十三	流量阀短接的速度换接实验	189
实验十四	调速阀串联与并联的速度换接实验	190
实验十五	用顺序阀的顺序动作回路实验	192
实验十六	用压力继电器的顺序动作回路实验	193
实验十七	用行程开关的顺序动作回路实验	194
实验十八	用行程阀的顺序动作回路实验	195
4.7	气压传动回路实验	196
实验十九	方向控制回路实验	196
实验二十	速度控制回路实验	197
实验二十一	压力与力控制回路实验	198
实验二十二	位置控制回路实验	199
实验二十三	连续往复运动回路实验	200
实验二十四	安全回路实验	201
4.8	工程应用实验实例——水下钻孔器钻孔实验	202
4.8.1	机械部分刀具钻孔实验	203
4.8.2	液压传动部分钻孔实验	204
4.8.3	电液控制系统控制的钻孔实验	206
4.8.4	水下钢板钻孔实验	207
附录	机械设计制造及其自动化专业实验报告	209
参考文献		211

1 机电传动控制理论及实验

电动机可分为有换向器的直流电动机和无换向器的直流电动机两大类。直流电动机在结构、价格、维护性能方面都不如交流电动机，但长期以来交流电动机的调速控制问题未能得到满意的解决，所以直流电动机就以其良好的控制特性得到了广泛的应用。目前，虽然交流电动机的调速控制问题已经解决，但由于设备投入和改造需要一个相当长的过程，交流电动机调速控制尚未普及，直流电动机系统仍在普遍使用。

直流电动机调速系统最早采用恒定直流电压给直流电动机供电，通过改变电枢回路中的电阻来实现调速。这种方法简单易行、设备制造方便、价格低廉；缺点是效率低、机械特性软，不能得到较宽和平滑的调速性能。该法只适用在一些小功率且调速范围要求不大的场合。20世纪30年代末期，发电机-电动机系统的出现才使调速性能优异的直流电动机得到广泛应用。这种控制方法可获得较宽的调速范围、较小的转速变化率和平滑的调速性能。但此方法的主要缺点是系统质量大、占地多、效率低及维修困难。近年来，随着电力电子技术迅速发展，由晶闸管变流器供电的直流电动机调速系统已取代了发电机-电动机调速系统，其调速性能也远远地超过了发电机-电动机调速系统。特别是大规模集成电路技术以及计算机技术的飞速发展，使直流电动机调速系统的精度、动态性能、可靠性有了更大的提高。电力电子技术中绝缘栅极双极晶体管（IGBT）等大功率器件的发展正在取代晶闸管，出现了性能更好的直流调速系统。

1.1 直流电动机传动控制

1.1.1 直流他励电动机的启动

电动机的启动就是接通电源，使转子转动。达到所要求的转速后，即转入正常运转。对直流电动机而言

$$U = E + I_a R_a$$

式中 U ——供电电压；

E ——反电动势；

I_a ——电枢电流；

R_a ——电枢电阻。

电动机启动前，当电动机的转速 $n=0$ ， $E=0$ ，而 R_a 很小，所以将电动机直接接入电网并施加额定电压时，启动电流为

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_a}$$

式中 I_{st} ——电动机启动电流；

U_N ——电动机的额定电压。

此时启动电流将很大，一般情况下能达到其额定电流的 10~20 倍。这不仅使电动机在

换向过程中产生危险的火花，烧坏整流子，而且过大的电枢电流还产生过大的电动应力，可能引起绕组的损坏，并产生与启动电流成正比例的启动转矩，会在机械系统和传动机构中产生过大的动态转矩冲击，使机械部件损坏。对电网来说，过大的启动电流将使保护装置动作，切断电源造成事故，或者引起电网电压的下降，影响其他负载的正常工作。因此，直流电动机是不允许直接启动的。即在启动时必须设法限制电枢电流，例如普通的 Z_2 型直流电动机，规定电枢的瞬时电流不得大于额定电流的 $1.5\sim 2$ 倍。

限制直流电动机的启动电流，一般有以下两种方法。

一是降压启动，即在启动瞬间，降低供电电源电压。随着转速 n 的升高，反电势 E 增大，再逐步提高供电电压，最后达到额定电压 U_N 时，电动机达到所要求的转速。直流发电机-电动机组和晶闸管整流装置-电动机组等就是采用这种降压方式启动的。

二是在电枢回路内串接外加电阻，此时启动电流 $I_{st} = U_N / (R_a + R_{st})$ 将受到外加启动电阻 R_{st} 的限制。随着电动机转速 n 的升高，反电势 E 增大，再逐步地切除外接电阻，直至全部切除，电动机达到所要求的转速。

生产机械对电动机启动的要求是有差异的。例如，市内无轨电车的直流电动机传动系统，要求平稳慢速启动，若启动过快会使乘客感到不舒适；而一般生产机械则要求有足够的启动转矩，以缩短启动时间，提高生产效率。从技术上来说，一般希望平均启动转矩大，以缩短启动时间，这样启动电阻的段数就应较多；而从经济角度看，则要求启动设备简单、经济和可靠，启动电阻的段数就应尽量少。

如图 1-1 (a) 所示，图中只有一段启动电阻，启动后，将启动电阻一下全都切断。其启动特性如图 1-1 (b) 所示。此时由于电阻被切断，工作点将从特性 1 切换到特性 2 上。由于在切除电阻的瞬间，机械惯性的作用使电动机的转速不能突变，在此瞬间 n 维持不变，即从 a 点切换到 b 点，此时冲击电流仍会很大。为了避免这种情况，通常采用逐级切除启动电阻的方法。图 1-2 (a) 所示为具有三段启动电阻的原理线路和启动特性。 T_1 、 T_2 分别称为尖峰（最大）转矩和换接（最小）转矩。启动过程中，接触器 KM_1 、 KM_2 、 KM_3 依次将外接电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 短接，其启动特性如图 1-2 (b) 所示。 n 和 T 沿着箭头方向在各条特性曲线上变化。

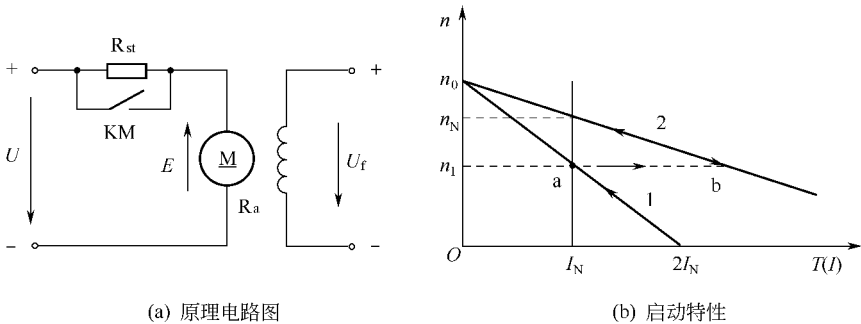


图 1-1 具有异端启动电阻的他励电动机

可见，启动级数愈多， T_1 、 T_2 愈与平均转矩 $T_{av} = (T_1 + T_2) / 2$ 接近，启动过程就快而平稳，但所需的控制设备也就愈多。国内生产的标准控制柜是按快速启动原则设计的，一般启动电阻为 $3\sim 4$ 段。

当多级启动时， T_1 、 T_2 数值需按照电动机的具体启动条件决定。原则是保持每一级的最大转矩 T_1 （或最大电流 I_1 ）不超过电动机的允许值，而每次切换电阻时的 T_2 （或 I_2 ）也

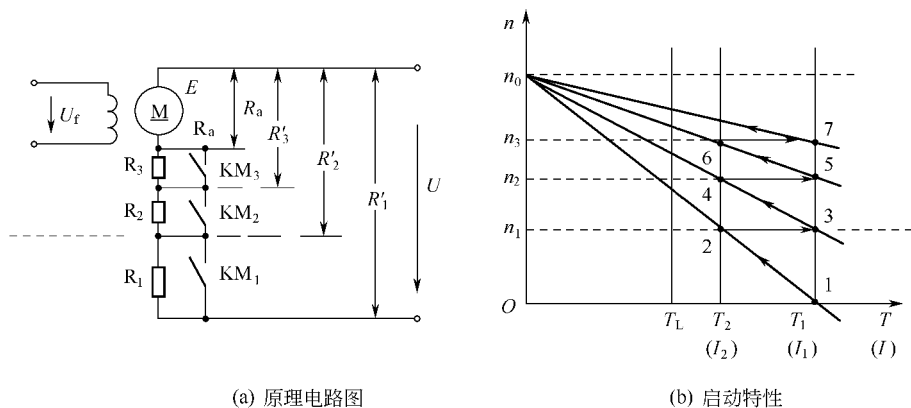


图 1-2 具有三段启动电阻的他励电动机

基本相同。一般选择

$$T_1 = (1.6 \sim 2) T_N$$

$$T_2 = (1.1 \sim 1.2) T_N$$

式中 T_N ——额定转矩。

1.1.2 直流电动机的调速

直流电动机的转速 n 和其他参量的关系可表示为

$$n = \frac{U - I_a R_a}{K_e \Phi} \quad (1-1)$$

式中 U ——电枢供电电压，V；

I_a ——电枢电流，A；

Φ ——励磁磁通，Wb；

R_a ——电枢电阻， Ω ；

K_e ——与电动机结构有关的常数， $K_e = \frac{pN}{60a}$ ；

p ——电磁对数；

a ——电枢并联支路数；

N ——导体数。

由式 (1-1) 可以看出，式中 U 、 R_a 、 Φ 三个参量都可以成为变量，只要改变其中一个参量，就可以改变电动机的转速，所以直流电动机有三种基本调速方法：① 改变电枢电阻 R_a ；② 改变电枢供电电压 U ；③ 改变励磁磁通 Φ 。

1.1.2.1 改变电枢回路电阻调速

各种直流电动机都可以通过改变电枢回路电阻来调速，如图 1-3 (a) 所示。此时转速特性公式为

$$n = \frac{U_a - I_a (R_a + R_w)}{K_e \Phi} \quad (1-2)$$

式中 R_w ——电枢回路中的外接电阻， Ω 。

当负载一定时，随着串入外接电阻 R_w 的增大，电枢回路总电阻 $R = (R_a + R_w)$ 增大，电动机转速就降低。其机械特性如图 1-3 (b) 所示。 R_w 的改变可用接触器或主令开关切换来实现。

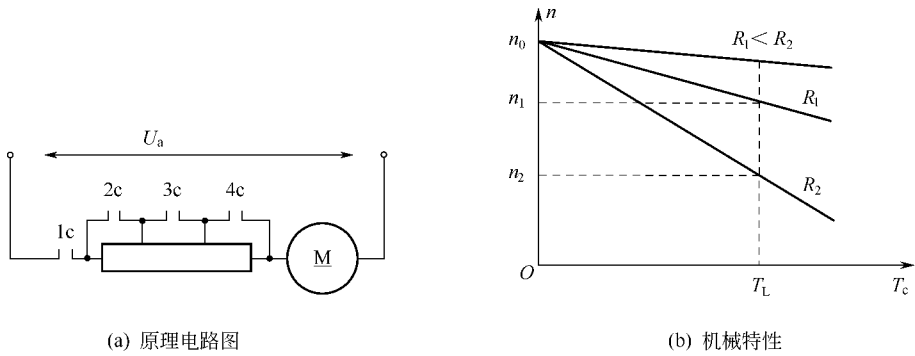


图 1-3 改变电枢回路电阻调速

这种调速方法为有级调速，调速比一般约为 2 : 1 左右，转速变化率大，轻载下很难得到低速，效率低，故现在极少采用。

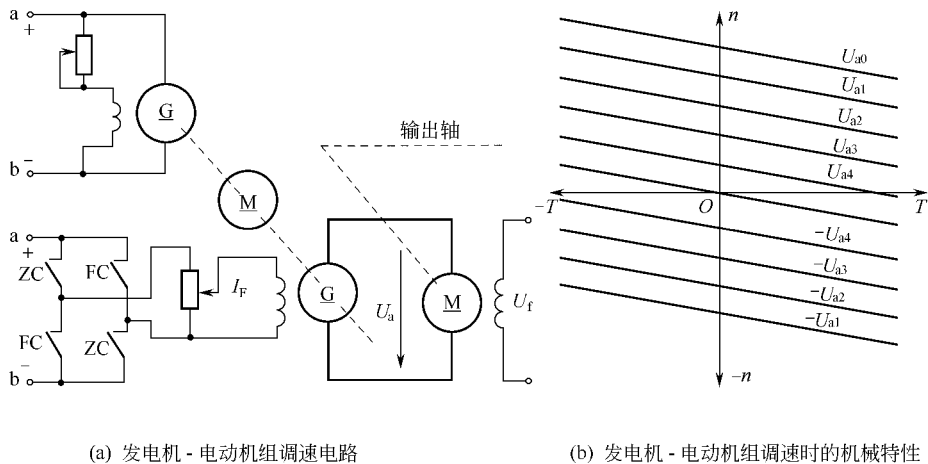
1.1.2.2 改变电枢电压调速

连续改变电枢供电电压，可以使直流电动机在很宽的范围内实现无级调速。

如前所述，改变电枢供电电压的方法有两种，一种是采用发电机-电动机组供电的调速系统；另一种是采用晶闸管变流器供电的调速系统。下面分别介绍这两种调速系统。

(1) 采用发电机-电动机组调速

如图 1-4 (a) 所示，通过改变发电机励磁电流 I_F 来改变发电机的输出电压 U_a ，从而改变电动机的转速 n 。在不同的电枢电压 U_a 时，得到的机械特性便是一组完全平行的直线，如图 1-4 (b) 所示。由于电动机既可以工作在电动机状态，又可以工作在发电机状态，所以改变发电机励磁电流的方向，如图 1-4 (a) 中切换接触器 ZC 和 FC，就可以使系统很方便地工作在任意四个象限内。



(a) 发电机 - 电动机组调速电路

(b) 发电机 - 电动机组调速时的机械特性

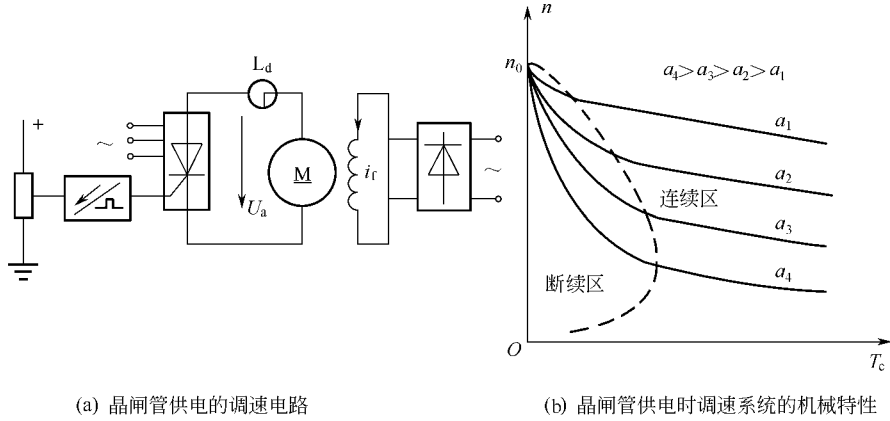
图 1-4 改变电枢电压调速 (一)

由图 1-4 可知，这种调速方法需要两台与调速电动机容量相当的旋转电机和另一台容量小一些的励磁发电机 (LF)，因而设备多、体积大、费用高、效率低、安装需打基础、运行噪声大、维护不方便。为克服这些缺点，20 世纪 50 年代开始采用水银整流器 (大容量) 和闸流管这样的静止交流装置来代替上述的旋转变流机组。目前已被更经济、可靠的晶闸管变

流装置所取代。

(2) 采用晶闸管变流器供电的调速

由晶闸管变流器供电的调速电路如图 1-5 (a) 所示。通过调节触发器的控制电压来移动触发脉冲的相位,即可改变整流电压,从而实现平滑调速。在此种调速方法下可得到与发电机-电动机组调速系统类似的调速特性。其开环机械特性示于图 1-5 (b) 中。



(a) 晶闸管供电的调速电路

(b) 晶闸管供电时调速系统的机械特性

图 1-5 改变电枢电压调速 (二)

图 1-5 (b) 中的每一条机械特性曲线都由两段组成。在电流连续区特性还比较硬,改变延迟角 α 时,特性呈一组平行的直线,这和发电机-电动机组调速时的完全一样。但在电流断续区,特性曲线则呈非线性的软特性。这是由于晶闸管整流器在具有反电势负载时,电流易产生断续造成的。

改变电枢电压调速是直流电机调速系统中应用最广的一种调速方法。在此方法中,由于电动机在任何转速下磁通都不变,只是改变电动机的供电电压,因此在额定电流下,如果不考虑低速下通风恶化的影响(也就是假定电动机是强迫通风或为封闭自冷式),则不论在高速还是低速下,电动机都能输出额定转矩,故称这种调速方法为恒转矩调速。这是它的一个极为重要的特点。如果采用反馈控制系统,调速范围可达 $50:1 \sim 150:1$,甚至更大。

(3) 采用大功率半导体器件的直流电动机脉宽调速

脉宽调速系统出现的历史久远,但因缺乏高速大功率开关器件而未能及时在生产实际中推广应用。近年来,由于大功率晶体管(GTR),特别是 IGBT 功率器件的制造工艺成熟、成本不断下降,大功率半导体器件实现的直流电动机脉宽调速系统才获得迅猛发展,目前其最大容量已超过几十兆瓦数量级。

1.1.2.3 改变励磁电流调速

当电枢电压恒定时,改变电动机的励磁电流也能实现调速。由式 (1-1) 可以看出,电动机的转速与磁通 Φ (也就是励磁电流) 成反比,即当磁通减小时,转速 n 升高;反之,则 n 降低。与此同时,由于电动机的转矩 T 是磁通 Φ 和电枢电流 I_a 的乘积(即 $T=K_t \Phi I_a$, K_t 为与电动机结构有关的常数, $K_t=9.55K_e$),电枢电流不变时,随着磁通 Φ 减小,电动机的输出转矩也会相应地减小。所以,在这种调速方法中,随着电动机磁通 Φ 减小,其转速升高,转矩反而会相应地降低。在额定电压和额定电流下,当不同转速时,电动机始终可以输出额定功率,因此这种调速方法又称为恒功率调速。

为了使电动机的容量能得到充分利用,通常只是在电动机基速以上调速时才采用这种调

速方法。采用弱磁调速时的范围一般为 $1.5:1 \sim 3:1$ ，特殊电动机可达到 $5:1$ 。

这种调速电路的实现很简单，只要在励磁绕组上加一个独立可调的电源供电即可。

1.1.3 直流电动机的制动

电动机的制动是与启动相对应的一种工作状态。启动是从静止加速到某一稳定转速，而制动则是从某一稳定转速开始减速到停止，或是限制位能负载下降速度的一种运转状态。

电动机的制动与自然停车是两个不同的概念。自然停车是电动机脱离电网，靠很小的摩擦阻转矩消耗机械能使转速慢慢下降，直到转速为零而停车。这种停车过程需要较长时间，不能适应生产机械的要求。为了提高生产效率，保证产品质量，需要实现快速和准确停车，即要求电动机运行在制动状态，常简称为电动机的制动。

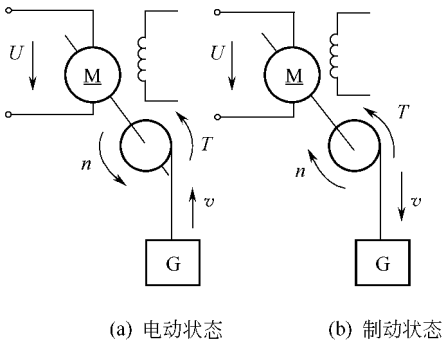


图 1-6 直流他励电动机的工作状态

就能量转换的观点而言，电动机有两种运转状态，即电动状态和制动状态。电动状态是电动机最基本的工作状态，其特点是电动机所发出的转矩 T 的方向与转速 n 的方向相同，如图 1-6 (a) 所示。当起重机提升重物时，电动机将电源输入的电能转换成机械能，使重物 G 以速度 v 上升。电动机若在其发出的转矩 T 与转速 n 方向相反的状态下工作，这就是电动机的制动状态，如图 1-6 (b) 所示。此时，为使重物稳速下降，电动机必须发出与转速方向相反的转矩，以吸收或消耗重物的机械能，否则

重物由于重力作用，其下降速度将愈来愈快。又如当生产机械要由高速运转迅速降低到低速或者生产机械要求迅速停车时，也需要电动机发出与旋转方向相反的转矩，来吸收或消耗机械能，使它迅速制动。

从上述分析可看出，电动机的制动状态有下述两种形式。

① 在卷扬机下放重物时为限制位能负载的运动速度，电动机的转速不变，以保持重物匀速下降，这属于稳定的制动状态。

② 在降速或停车制动时，电动机的转速是变化的，则属于过渡的制动状态。

两种制动状态的区别在于转速是否变化。它们的共同点是，电动机发出的转矩 T 与转速 n 方向相反。电动机工作在发电机运行状态，电动机吸收或消耗机械能（位能或动能），并将其转化为电能反馈回电网或消耗在电枢电路的电阻中。

1.1.3.1 反馈制动

电动机为正常接法时，在外部条件作用下电动机的实际转速 n 大于其理想空载转速 n_0 时，电动机即运行于反馈制动状态。如电车走平路时，电动机工作在电动状态，电磁转矩 T 克服摩擦性负载转矩 T_r 并以 n_a 转速稳定在 a 点工作，如图 1-7 所示。当电天下坡时，电车位能负载转矩 T_p 使电车加速，转速 n 增加，越过 n_0 继续加速，使 $n > n_0$ ，感应电势 E 大于电源电压 U ，故电枢中电流 I_a 的方向便与电动状态相反。转矩的方向也由于电流方向的改变而变得与电动运转状态相反。直到 $T_p = T + T_r$

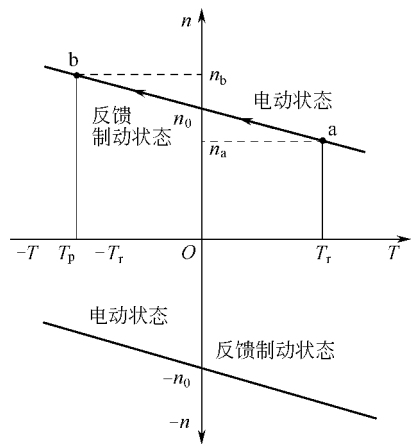


图 1-7 直流他励电动机的反馈制动

时，电动机以 n_b 的稳定转速控制电车上坡。实际上这时是电车的位能转矩带动电动机发电，把机械能转变成电能，向电源馈送，故称反馈制动，也称再生制动或发电制动。

在反馈制动状态下电动机的机械特性表达式仍为

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R_a + R_{ad}}{K_e K_t \Phi^2} T \quad (1-3)$$

与电动状态不同的仅是 T 改变了符号（即 T 为负值）。而理想空载转速和特性的斜率均与电动状态下的一致，这说明电动机正转时，反馈制动状态下的机械特性是第一象限中电动状态下的机械特性在第二象限内的延伸。

在电动机电枢电压突然降低使电动机转速降低的过程中，也会出现反馈制动状态。例如原来电压为 U_1 ，相应的机械特性为图 1-8 中的直线 1，在某一负载下以 n_1 运行在电动状态。当电枢电压由 U_1 突降为 U_2 时，对应的理想空载转速为 n_{02} ，机械特性变为直线 2。但由于电动机转速和由它所决定的电枢电势不能突变，若不考虑电枢电感的作用，则电枢电流将由

$$I_a \left(= \frac{U_1 - E}{R_a + R_{ad}} \right) \text{ 突然变为 } I_b \left(= \frac{U_2 - E}{R_a + R_{ad}} \right)。$$

若 $n_{02} < n_1$ ，即 $U_2 < E$ 时，则电流 I_b 为负值并产生制动转矩。即电压 U 突降的瞬时，系统的状态在第二象限中的 b 点。从 b 点到 n_{02} 这段特性上，电动机进行反馈制动，转速逐步降低。当降至 $n = n_{02}$ ， $E = U_2$ 时，电动机的制动电流和与之相应的制动转矩也下降为零，反馈制动过程结束。此后，在负载转矩 T_L 的作用下转速进一步下降，电磁转矩又变为正值，电动机又重新运行于第一象限的电动状态，直至达到 c 点 $T = T_L$ 时，电动机又以 n_2 的转速在电动状态下稳定运行。

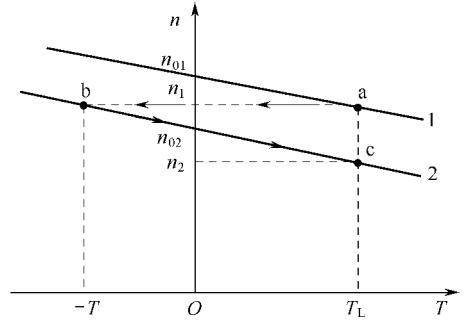


图 1-8 电枢电压突然降低时的反馈制动过程

同样，电动机在弱磁状态用增加磁通 Φ 的方法来降速时，也能产生反馈制动过程，以实现迅速降速的目的。

当卷扬机构下放重物时，也能产生反馈制动过程，以保持重物匀速下降，如图 1-9 (a) 所示。设电动机正转时是提升重物，机械特性曲线在第一象限。若改变加在电枢上的电压极

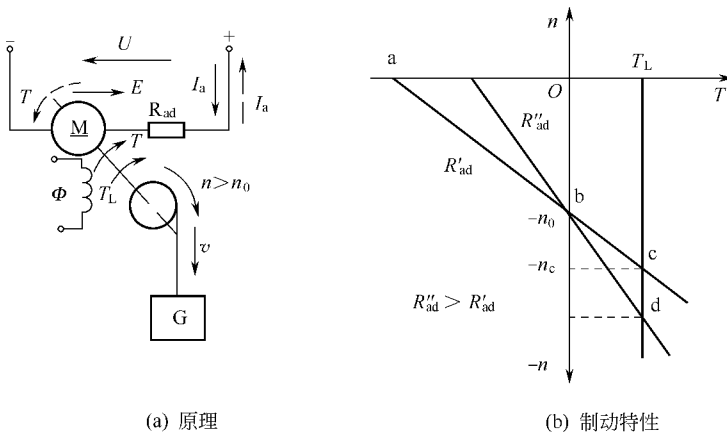


图 1-9 下放重物时的反馈制动过程

性，其理想空载转速为 $(-n_0)$ ，特性曲线则在第三象限，电动机反转。在电磁转矩 T 与负载转矩（位能负载） T_L 的共同作用下重物迅速下降，且愈来愈快，使电枢电势 $E=K_e\Phi n$ 增加，电枢电流 $I_a=(U-E)/(R_a+R_{ad})$ 减小，电动机转矩 $T=K_t\Phi I_a$ 亦减小，传动系统的状态沿其特性由 a 点向 b 点移动。由于电动机的机械特性曲线在第三象限没有交点，系统不可能建立稳定平衡点，所以系统的加速过程一直进行到 $n=-n_0$ 和 $T=0$ 时仍不会停止，而在重力作用下继续加速。当 $|n| > |-n_0|$ 时， $E>U$ ， I_a 改变方向，电动机转矩 T 变为正值，其方向与 T_L 相反，系统的状态进入第四象限，电动机进入反馈制动状态。在 T_L 的作用下，状态由 b 点继续向 c 点移动，电枢电流和它所建立的电磁制动转矩随转速上升而增大，直到 $n=-n_c$ ， $T=T_L$ 时为止。此时系统稳定平衡点在第四象限中的 c 点，电动机以 $n=-n_c$ 的转速在反馈制动状态下稳定运行，以保持重物匀速下降。若改变电枢电路中的附加电阻 R_{ad} 的大小，也可以调节反馈制动状态下电动机的转速，但与电动状态下的情况相反。反馈制动状态下附加电阻越大，电动机转速越高 [见图 1-9 (b) 中所示的 c、d 两点]。为使重物下降速度不致过高，串接的附加电阻不宜过大。但即使不串接任何电阻，重物下放过程中电动机的转速仍高于 n_0 ，如果下放的工件较重，则采用这种制动方式运行是不太安全的。

1.1.3.2 反接制动

当他励电动机的电枢电压 U 或电枢电势 E 中的任一个，在外部条件作用下改变了方向，即两者由方向相反变为方向一致时，电动机即运行于反接制动状态。把改变电枢电压 U 的方向所产生的反接制动称为电源反接制动；而把改变电枢电势 E 的方向所产生的反接制动称为倒拉反接制动。下面对这两种反接制动分别讨论之。

(1) 电源反接制动

如图 1-10 所示，若电动机原运行在正向电动状态，电动机电枢电压 U 的极性为图 1-10 (a) 中的虚线所示，此时电动机稳速运行在第一象限中特性曲线 1 的 a 点 [见图 1-10 (b)]，转速为 n_a 。

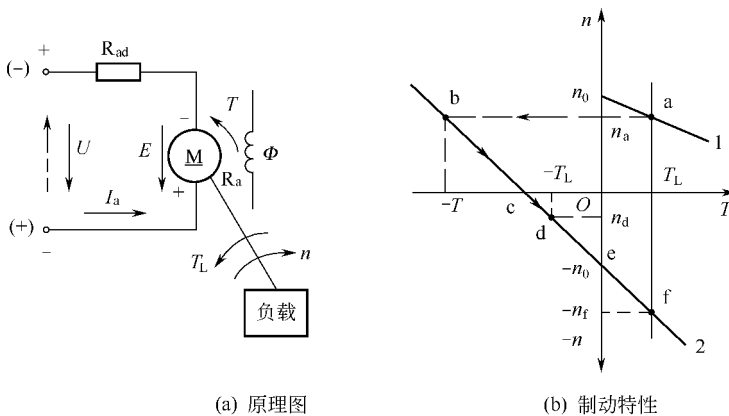


图 1-10 电源反接时的反接制动过程

若电枢电压 U 的极性突然反接，如图 1-10 (a) 之实线所示时，此时电势平衡方程式为

$$E = -U - I_a (R_a + R_{ad}) \tag{1-4}$$

注意，电势 E 、电枢电流 I_a 的方向为电动状态下假定的正方向。以 $E=K_e\Phi n$ ， $I_a=T/(K_t\Phi)$ 代入上式，便可得到电源反接制动状态的机械特性表达式

$$n = \frac{-U}{K_c \Phi} - \frac{R_a + R_{ad}}{K_c K_t \Phi^2} T \quad (1-5)$$

可见，当理想空载转速 n_0 变为 $-n_0 = -U/(K_c \Phi)$ 时，电动机的机械特性曲线为图 1-10 (b) 中的直线 2，其反接制动特性曲线在第二象限。由于在电源极性反接的瞬间，电动机的转速和它所决定的电枢电势不能突变，若不考虑电枢电感的作用，此时系统的状态由直线 1 的 a 点变到直线 2 的 b 点。电动机发出与转速 n 方向相反的转矩 T （即 T 为负值），它与负载转矩共同作用，使电机转速迅速下降，制动转矩将随 n 的下降而减小，系统的状态沿直线 2 自 b 点向 c 点移动。当 n 下降到零时，反接制动过程结束。这时若电枢还不从电源拉开，电动机将反向启动，并将在 d 点（ T_L 为反抗转矩时）或 f 点（ T_L 为位能转矩时）建立系统的稳定平衡点。

注意，由于在反接制动期间，电枢电势 E 和电源电压 U 是串联相加的，因此，为了限制电枢电流 I_a ，电动机的电枢电路中必须串接足够大的限流电阻 R_{ad} 。

电源反接制动一般应用在生产机械要求迅速减速、停车和反向的场合，以及要求经常正反转的机械上。

(2) 倒拉反接制动

如图 1-11 所示，在进行倒拉反接制动以前，设电动机处于正向电动状态，以 n_a 转速稳定运转，提升重物。若欲下放重物，则需在电枢电路内串入附加电阻 R_{ad} 。这时电动机的运行状态将由自然特性曲线 1 的 a 点过渡到人为特性曲线 2 的 c 点。此时电动机转矩 T 远小于负载转矩 T_L ，因此传动系统转速下降（即提升重物上升的速度减慢），即沿着特性曲线 2 向下移动。由于转速下降，电势 E 减小，电枢电流增大，则电动机转矩 T 相应增大，但仍比负载转矩 T_L 小，所以系统速度继续下降，即重物提升速度愈来愈慢。当电动机转矩 T 沿特性曲线 2 下降到 d 点时，电动机转速为零，即重物停止上升。此时电动机反电势也为零，但电枢在外加电压 U 的作用下仍有很大电流，该电流产生堵转转矩 T_{st} 。只是 T_{st} 仍小于 T_L ，故 T_L 拖动电动机的电枢开始反方向旋转，即重物开始下降，电动机工作状态进入第四象限。这时电势 E 的方向也反过来，和 U 同方向，所以电流增大，转矩 T 增大。随着转速反方向增大，电势 E 、电流和转矩均增大，直到转矩 $T = T_L$ 的 b 点，转速不再增加，而以稳定的 n_b 速度下放重物。由于这时重物是靠位能负载转矩 T_L 的作用落下，而电动机转矩 T 是阻碍重物下

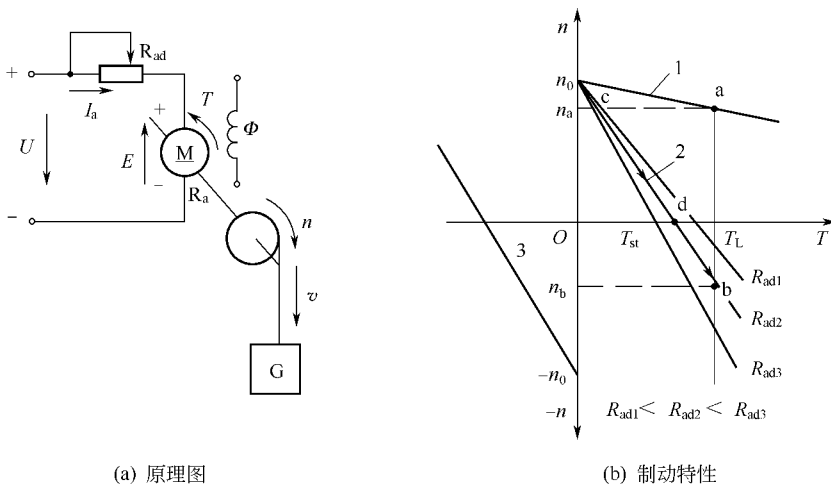


图 1-11 倒拉反接制动状态下的机械特性

放的，此时的电动机起制动作用。这种工作状态称为倒拉反接制动或电势反接制动状态。

适当选择电枢电路中附加电阻 R_{ad} 的大小，即可得到不同的下降速度。附加电阻越小，下降速度越低。这种制动方式弥补了反馈制动的不足，可以得到极低的下降速度，保证了生产安全。故倒拉反接制动常用于控制位能负载的下降速度，使之不致在重物作用下有愈来愈大的加速。其缺点是，若对 T_L 的大小估计不准，则本应下降的重物可能向上升的方向运动。另外，其机械特性硬度小，因而较小的转矩波动就可能引起较大的转速波动，即速度的稳定性较差。由于图 1-11 (a) 中电压 U 、电势 E 、电流 I_a 都是电动状态下假定的正方向，所以，倒拉反接制动状态下的电势平衡方程式、机械特性表达式均与电动状态下相同。即分别为

$$E=U-I_a(R_a+R_{ad}) \quad (1-6)$$

$$n=\frac{U}{K_e\Phi}-\frac{R_a+R_{ad}}{K_eK_t\Phi^2}T \quad (1-7)$$

因在倒拉反接制动状态下电枢反向旋转，故上列各式中的转速 n 、电势 E 应是负值。由此可见倒拉反接制动状态下的机械特性曲线实际上是第一象限中电动状态下的机械特性曲线在第四象限中的延伸。若电动机反向运转在电动状态，则倒拉反接制动状态下的机械特性曲线就是第三象限中电动状态下的机械特性曲线在第二象限的延伸，如图 1-11 (b) 曲线 3 所示。

1.1.3.3 能耗制动

电动机在电动状态运行时，若把外施电枢电压 U 突然降为零，而将电枢串接一个附加电阻 R_{ad} 短接起来，便能得到能耗制动状态，如图 1-12 (a) 所示。制动时，接触器 KM 断电，其常开触点断开，常闭触点闭合。这时，由于机械惯性电动机仍在旋转，以及磁通 Φ 和转速 n 的存在，使电枢绕组上继续有感应电势 $E=K_e\Phi n$ ，其方向与电动状态方向相同。电势 E 在电枢和 R_{ad} 回路内产生电流 I_a ，该电流方向与电动状态下由电源电压 U 所产生的电枢电流方向相反，而磁通 Φ 的方向未变，故电磁转矩 ($T=K_t\Phi I_a$) 也反向，即 T 与 n 反向，于是 T 变成了制动转矩。这时由工作机械的机械能带动电动机发电，使传动系统储存的机械能转变成电能通过电阻（电枢电阻 R_a 和附加的制动电阻 R_{ad} ）转化成热量消耗掉，故称之为“能耗”制动。

由图 1-12 (a) 可看出，电压 $U=0$ ，电势 E 、电流 I_a 仍为电动状态下假定的正方向，故

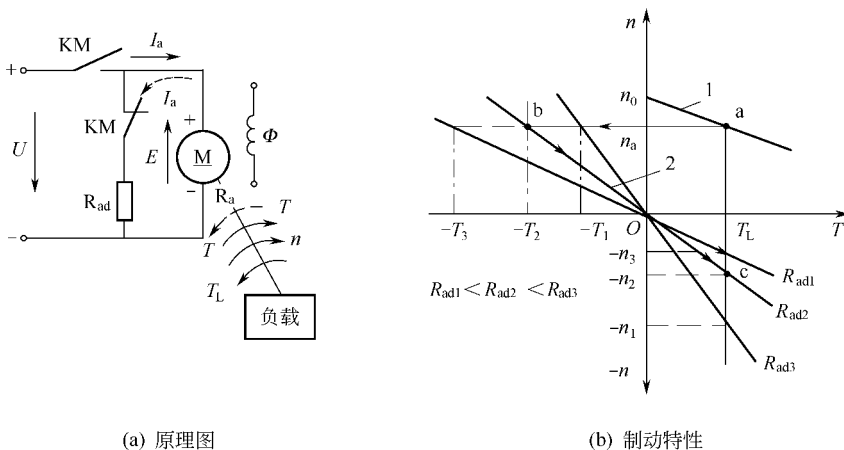


图 1-12 能耗制动状态下的机械特性