

中等专业学校教学用书

有色冶金車間电气設備

沈阳有色金属学校电工教研組編



中国工业出版社

中等专业学校教学用书



有色冶金車間电气設備

沈阳有色金属学校电工教研組編

中国工业出版社

本书系根据中等专业学校“电工学及电气设备”课程的电气设备部分教学大纲编写而成，适用于有色金属及合金压力加工、重有色金属冶炼、轻有色金属冶炼、稀有金属冶炼等专业。由冶金工业部工业教育司推荐作为中等专业学校教学用书。

本书首先阐述电力拖动和自动控制的基本原理，在此基础上叙述起重运输机和各种通用机械的电气设备，并分章讨论铝镁电解车间、重金属及稀有金属冶炼车间、压延车间的电气设备，最后简略介绍冶金工厂的供电和照明问题。

本书由沈阳有色金属学校电工教研组金懋勳，李春甫，朱维治，黄国四，四位同志编写。

本书除作教学用书外，亦可供有关企业工程技术人员参考。

有色冶金车间电气设备

沈阳有色金属学校电工教研组编

•

冶金工业部工业教育司编辑（北京猪市大街78号）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

•

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $14^{7/8}$ ·插页1·字数344,000

1961年8月北京第一版·1964年12月北京第四次印刷

印数2,923—3,662·定价（科四）1.45元

•

统一书号：K15165·366（冶金—114）

目 录

第一章 电动机的机械特性	7
§ 1 机械特性的概念	7
§ 2 直流分激电动机的机械特性	8
§ 3 直流分激电动机在制动状态下的机械特性	10
§ 4 串激电动机的机械特性	14
§ 5 复激电动机的机械特性	16
§ 6 直流电动机的调速	16
§ 7 感应电动机的机械特性	21
§ 8 感应电动机的制动状态	23
§ 9 感应电动机的调速	26
§ 10 同步电动机的机械特性	29
第二章 电力拖动的动力学	31
§ 1 静转矩、动转矩和飞轮惯量 (飞轮转矩) 的概念	31
§ 2 电力拖动的运动方程式	32
§ 3 静转矩、转动惯量向电机轴上的换算	33
§ 4 起动及制动时间的计算	35
第三章 电动机的选择	39
§ 1 概述	39
§ 2 电动机的类型选择	41
一、电动机电流种类的选择	41
二、电动机额定电压的选择	43
三、电动机额定转速的选择	43
四、电动机运转状态的选择	44
五、电动机结构形式的选择	45
§ 3 电动机的容量选择	46
一、电动机的额定容量	46
二、电动机的过载能力	48
三、容量选择的基本原则	48
四、在长时不变负载下电动机容量的选择	49
五、长时可变负载电动机容量的选择	49
六、短时负载电动机的容量选择	51
七、重复短时运转电动机的容量选择	52
第四章 低压电器	55
§ 1 概述	55
§ 2 刀开关及刀形转换开关	55
§ 3 控制器	56

§ 4	接触器	59
§ 5	继电器	61
§ 6	主令电器	68
§ 7	制动电磁铁	73
§ 8	磁力起动器	73
§ 9	自动空气开关	74
§ 10	电阻器	75
第五章	电力拖动的自动控制	77
§ 1	概述	77
§ 2	自动控制系统线路的表示法	77
§ 3	电动机起动、制动和反转的控制原理	78
§ 4	几种继电器-接触控制线路	84
§ 5	电机放大机控制系统	89
§ 6	磁放大器控制线路	96
第六章	起重运输机的电气设备	100
§ 1	桥式起重机	100
一、	概述	100
二、	拖动方案	100
三、	桥式起重机的供电	101
四、	桥式起重机的凸轮和鼓形控制器控制	101
五、	桥式起重机的继电器-接触控制	103
§ 2	连续运输机电力拖动	105
第七章	通用机械的电气设备	107
§ 1	泵的电力拖动	107
§ 2	通风机的电力拖动	107
§ 3	空压机的电力拖动	108
§ 4	同步电动机的控制线路	108
第八章	铝镁电解原料车间及电解车间的电气设备	111
§ 1	铝镁电解原料车间的电气设备	111
一、	概述	111
二、	破碎机的电力拖动	112
三、	磨矿机的电力拖动	115
四、	迴轉窑的电力拖动	116
§ 2	电解车间电气设备	116
一、	概述	116
二、	电解车间的整流设备	117
三、	水银整流器	118
四、	滚动式机械整流器	123
五、	电解车间的供电	127

六、整流电流的调整	132
第九章 重有色金属及稀有金属冶炼车间的电气设备	134
§ 1 焙烧和烧结车间的电气设备	134
一、概述	134
二、烧结机的电气设备	134
三、焙烧炉的电气设备	136
§ 2 冶炼车间的电气设备	138
一、反射炉的电气设备	138
二、鼓风炉熔炼的电气设备	139
三、迴轉炉的电气设备	139
四、有鉄心感应炉的电气设备	142
五、电弧炉的电气设备	147
§ 3 电解车间的电气设备	151
一、概述	151
二、电解车间整流设备	152
三、电解车间的供电	152
第十章 压延车间的电气设备	158
§ 1 概述	158
§ 2 不调速非可逆式压延机的电力拖动	160
§ 3 可调速非可逆式压延机的电力拖动	172
§ 4 可逆式压延机的电力拖动	175
§ 5 可逆式冷压延机的电力拖动	184
§ 6 連續式冷轧机的电动机容量选择	190
§ 7 管材轧机的电力拖动	193
§ 8 压延车间辅助机械的电力拖动	195
一、輓道的电力拖动	196
二、升降台的电力拖动	198
三、热鋸的电力拖动	201
四、压下装置的电力拖动	205
第十一章 电气照明	210
§ 1 基本概念	210
§ 2 电气光源及照明器	211
§ 3 电气照明的种类、系统及布置	215
§ 4 照明质量	216
§ 5 照明的计算	218
第十二章 冶金工厂的供电	223
§ 1 冶金工厂的供电系统	223
§ 2 车间低压配电系统	224
§ 3 车间变电所	226

§ 4 导线的选择.....	227
§ 5 功率因数的提高.....	231
§ 6 高压电器简介.....	233
附录.....	234
主要参考書.....	238

第一章 电动机的机械特性

§ 1 机械特性的概念

如众所熟知，电动机仅当其轉矩 M 和負載轉矩 M_0 相平衡时，方能等速運轉。一旦轉矩平衡被破坏，拖动系統速度便发生变化，就有可能迫使电动机停止運轉，或使其速度无限制的增长。

如果电动机的轉矩或生产机械的轉矩是速度的函数，則轉矩平衡虽被破坏，它們也可以在一個新的速度下达到平衡。显然，在估价电动机的性能如何，和为生产机械选择合适的电动机时，研究电动机的轉矩随其轉速的变化关系是具有极大的实际意义的。电动机在稳定状态下，其轉矩和轉速的关系 $n = f(M)$ ，即称为电动机的机械特性。

所謂稳定状态，是指电动机在規定負載下，轉速、电流和轉矩都保持不变的工作状态。

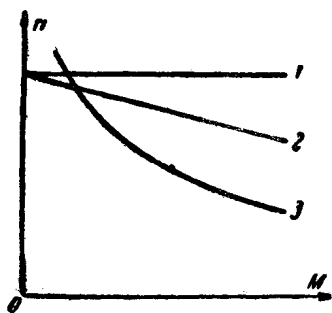


图 1—1 电动机的机械特性曲线

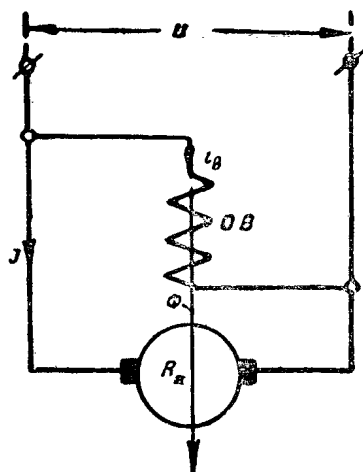


图 1—2 分激电动机的线路图

电动机的机械特性主要可分为三类：

1) 绝对硬特性。当电动机轉矩变化时，轉速严格的保持恒定不变。同步电动机就具有这种特性（图 1—1 中的直线 1）。

2) 硬特性。当电动机轉矩从空载增到額定負載时，轉速仅有較小的降低，其值不超过額定轉速的 5~10%。工作于稳定区的感应电动机和直流分激电动机都具有这种特性（图 1—1 中的曲线 2）。

3) 软特性。从空载到滿載轉速有較大的降低。直流串激电动机就具有这种特性（图 1—1 中的曲线 3）。

了解了机械特性，我們就可以根据生产过程的技术要求，初步的为生产机械选择适当的电动机。例如，可为燒結机、空压机、連軋机等选择具有硬特性的电动机，而为起重機、推鋼机等选用软特性的电动机。

电动机在正常運轉条件下的 $n = f(M)$ 的关系称为自然特性。例如直流分激电动机的自然特性是指在額定电压、額定激磁且在电枢电路中没有外加电阻时的机械特性。

但由于生产机械种类繁多，对电动机机械特性的要求也各有不同。电动机仅具有自然特性是不能满足生产要求的，为此可用人工方法获得多种人工特性以适应生产需要。所谓人工特性，就是上述条件之一不具备时（例如直流分激电动机电压不同于额定电压或电枢电路内有外加电阻等）的机械特性。

§ 2 直流分激电动机的机械特性

直流分激电动机的接线如图 1—2 所示。

我们已知直流分激电动机基本关系可由下列各式表示：

$$U = IR + E \quad (1-1)$$

$$E = C_e \Phi n \quad (1-2)$$

$$M = C_m \Phi I \quad (1-3)$$

式中 U ——外施电压（伏）；
 I ——电枢电流（安）；
 $R = r + R_a$ ——电枢电路总电阻（欧）；
 Φ ——电动机的磁通（韦）；
 n ——电动机转速（转/分）；
 M ——电动机转矩（公斤—米）；
 C_e, C_m ——与电动机构造有关的常数。

根据（1—1）、（1—2）两式可导出电动机转速与电流的关系式：

$$n = \frac{U - IR}{C_e \Phi} \quad (1-4)$$

将（1—3）式代入上式中得出：

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} M \quad (1-5)$$

（1—5）式称为直流分激电动机的机械特性方程式。

当 $I = 0, M = 0$ 时电动机转速。

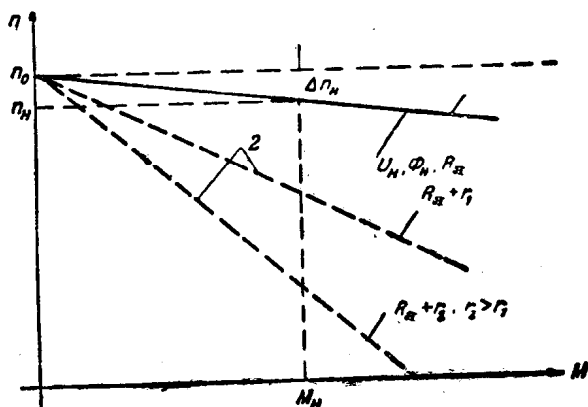


图 1—3 分激电动机机械特性

1—自然特性；2—人工特性

$$n = n_0 = \frac{U}{C_e \Phi} \quad (1-6)$$

转速 n_0 称为理想空载速度，它与电枢电阻无关。将(1-6)式代入(1-5)式得：

$$n = n_0 - \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} M$$

实际转速 n 与理想空载转速 n_0 之差为速度降，以 Δn 表之。

$$\Delta n = n_0 - n = \frac{MR}{C_e C_m \Phi^2} \quad (1-7)$$

这样，(1-5)式又可写成：

$$n = n_0 - \Delta n \quad (1-8)$$

如施于电动机的电压为额定电压，且外加电阻为 $r = 0$ 时，则(1-5)式即表示分激电动机的自然特性(如图1-3中的曲线1)。由于电动机电枢电阻 R_a 甚小，故 Δn 不大，所以分激电动机的自然特性为硬特性。

由(1-5)式得知，只要改变电动机的外施电压、电枢电路的外加电阻、激磁电路的外加电阻等，即可获得人工特性。

分激电动机的各种不同情况的人工机械特性如下：

1. 如在电枢电路中串入电阻 r_1 、 r_2 和 r_3 ……等，便可得到一族人工机械特性。此时机械特性方程式为：

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{(R_a + r)}{C_e C_m \Phi^2} M$$

此等人工机械特性如图1-3虚线所示。由上式及图(1-3)中可以看出，不同电阻的人工特性曲线皆通过 n_0 点，电枢电路中的外加电阻愈大特性愈软。

2. 当保持其他参数不变($U = U_n$, $R = R_a$)，使磁通 Φ 向低于其额定值 Φ_n 方面调变时，又可获得另一族人工特性。由减低磁通 Φ 而获得的人工机械特性示于图1-4中。

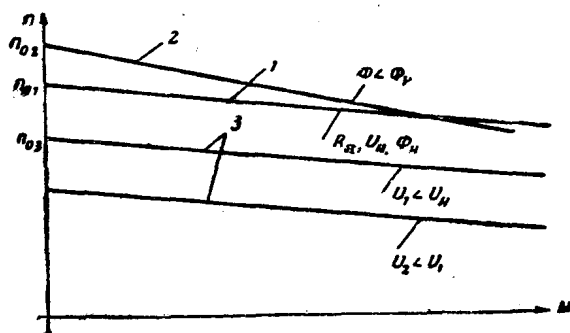


图1-4 分激电动机机械特性

1—自然特性；2—调变磁通特性；3—降低电压特性

从(1-6)、(1-7)式得知,随着磁通的减低,这种特性的速度降较理想空载速度增长的快。因此,由减弱磁通所获得人工机械特性比自然机械特性陡,磁通愈小特性愈软。

3. 改变施于电枢两端电压大小(在 $\Phi=\Phi_n$, $R=R_n$ 条件下)可以获得一族人工特性。对于大多数电动机电压仅允许向低于其额定值 U_n 方面调整。此时理想空载速度将按照(1-6)式正比于电压而下降,按照(1-7)式,速度降的绝对值与自然特性的相同,因而,如图1-4所示,这些人工特性位于自然特性下方并与自然特性平行。

§3 直流分激电动机在制动状态下的机械特性

在冶金工厂中,有许多生产机械,它们的生产能力和产品质量在许多场合下,取决于电动机的反转和停止的迅速程度和停止的准确度。为此对这些经常起动、停止和反转的拖动装置,必须施以制动。常用的制动方法有两种:机械制动和电气制动。机械制动有许多缺点,如制动器零件易被磨损,产生振动及制动转矩不易调整等。电气制动是靠电磁力制动的,因此没有物体间的摩擦,而且制动强度也容易调整。电气制动已在工业拖动装置和运输等方面获得广泛应用。有些生产机械常常采用电气制动和机械制动相结合的方法;当高速时采用电气制动,待速度降低后再适合以机械制动。

制动状态的基本特征,并即它与电动状态的主要区别是:在电动状态时,电动机是拖动者,因此电动机转动方向与其自身所产生的转矩 M 同向。而在制动状态时,因其产生的制动转矩 M_r 是阻止拖动系统运动,故电动机所发出的制动转矩 M_r 的方向与自身实际转动方向(即转速 n 的方向)相反(如图1-5所示)。



图1-5 电动状态与制动状态之基本特征

a—电动状态; b—制动状态

因 $M=C_m\Phi I$,要使电动机产生与旋转方向相反的转矩,只有改变磁通或电流方向。实际上常采用后者。直流电动机电流 I 为:

$$I = \frac{U - E}{R}$$

欲使 I 为负值可用下列方法实现:

1) 使 U 为负值,则 $I = \frac{-U - E}{R} = \text{负值}$ (反接制动基础)

2) 使 $U=0$,则 $I = \frac{0 - E}{R} = \text{负值}$ (动力制动基础)

3) 使 $E > U$,则 $I = \frac{U - E}{R} = \text{负值}$ (再生制动基础)

可見，电气制动可具有下列三种形式：

- 1) 再生（发电）制动；
- 2) 动力（能耗）制动；
- 3) 反接制动。

电气制动是电动机除电动状态之外的另一种运转状态；电气制动的特性就是电动机在制动状态下的机械特性。

1. 动力制动

为了使电力拖动系统迅速停止，我们把正在运转的电动机按图 1—6 所示方法改变其接线。即在切除电枢两端外施电压后，把电枢接在制动电阻 R_r 上，其激磁绕组仍然接在电源上。

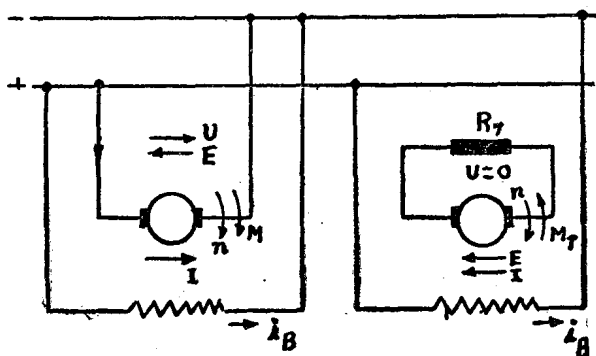


图 1—6 动力制动

这时拖动系统依赖惯性力作用仍然在继续旋转，激磁电流照常供给，故电动机电势（反电势）依然存在。由于电势 E 的作用，在电枢与制动电阻所构成的回路中，产生与 E 同向之电流 I ，此电流方向与电动状态时的电流方向恰相反。但因磁场方向未变，故电动机产生的转矩为制动转矩，这时拖动装置很快降低速度，最后停止。动力制动能保证拖动装置准确停止，这是由于当电动机停止时 $n = 0$ ，使电枢中电势 $E = 0$ ， $I = 0$ ，而 $M_r = 0$ ；这样，就可以保证拖动装置一旦停止之后就不再反向运转或发生其它情况。在进行动力制动时，由于 $U = 0$ ，即 $n_0 = 0$ ，故其机械特性方程式为：

$$n = - \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} M \quad (1-9)$$

按照上式画出的特性曲线如图 1—7 所示。从图中可以看出，动力制动转矩随电动机速度的降低而减小；此外在电枢电路中制动电阻 R_r 愈大所产生的制动转矩愈小。

2. 反接制动

有两种情况可以产生反接制动，下面分别予以说明。

1) 迅速停止或反转的制动情况

为了使正在运转的电力拖动装置迅速停止或反转，像图 1—8 所示将电枢两端反接在电源上。这时加在电枢两端的外施电压的方向改变了，并和反电势 E 方向一致，遂迫使电枢电源改变其方向，从而产生制动转矩。

$$\text{此时电枢电流 } I = \frac{-U - E}{R_a}。$$

因电枢电阻 R_a 很小, 故在反接制动时电枢电流非常大, 为了限制电枢电流不超过允许值, 在反接制动的同时必须串入相当大的制动电阻 R_r 。

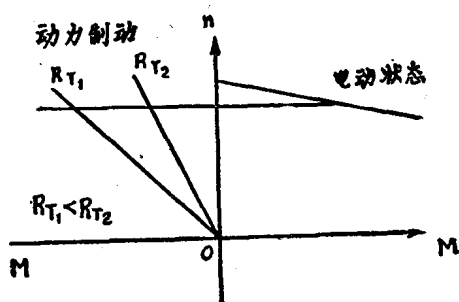


图 1-7 动力制动机械特性

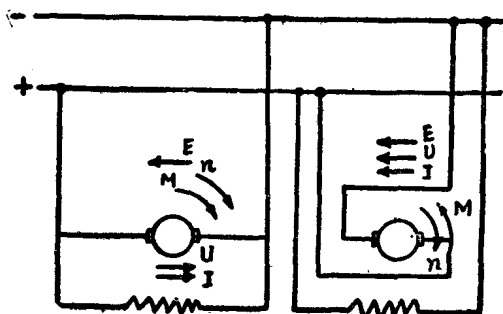


图 1-8 反接制动线路

当电枢两端外施电压改变方向时, 电动机的理想空载速度 n_0 立即变为负的, 但电力拖动装置不能立即反转, 首先进行的是反接制动过程。这时的机械特性方程式如下:

$$n = n_0 - \frac{R}{C_e C_m \Phi^2} M \quad (1-10)$$

式中 $R = R_a + R_r$

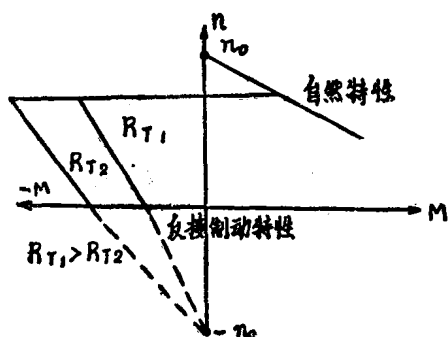


图 1-9 反接制动机械特性

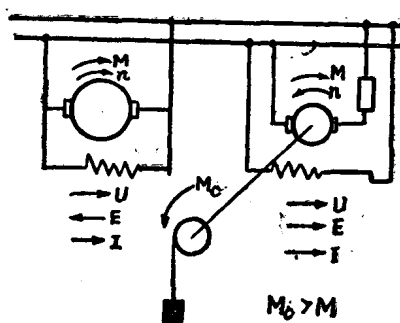


图 1-10 反接制动线路

在图 1-9 中给出反接制动的机械特性。由图 1-7 和图 1-9 中可以看出, 为使拖动装置迅速停止或反转, 反接制动比动力制动效果好些, 因此反接制动的转矩随转速的下降减低较少。但是, 电动机在停止状态时反向转矩依然存在, 如负载转矩小于反向转矩, 拖动系统便开始反转。因此欲迅速停止拖动装置, 必须在 $n=0$ 瞬间将电动机从网路上切除, 否则电机便反向运转。这样看来对要求准确停止的电力拖动装置不宜采用反接制动。

2) 制动下降情况

在提升机构的电力拖动中, 如在电动机电枢电路中串入相当大的电阻, 致使电动机静止时所产生的转矩(提升方向的)小于电机轴上的负载下降转矩, 则电动机即被负载

拖向反轉（向下降方向旋轉），如图 1-10 所示。此时由于激磁方向未变，而电动机旋轉方向改变，所以电机反电势方向与原来相反，而与外施电压方向相同。

$$\text{这时电流 } I = \frac{U+E}{R},$$

式中 $R = R_x + R_{T0}$

随着負載下降速度的增加，电势 E 也增大，因之电动机电流、轉矩也漸漸增加，直到电动机轉矩与負載下降轉矩相平衡时为止。这时負載将以稳定速度下降。

图 1-11 給出分激电动机制动下降时的机械特性。这种反接制动的特性是电动特性向第四象限的延长。在同一負載下，电枢电路电阻愈大，下降速度愈高，但这时特性已經很陡，負載只要有微小的变动就会使速度有很大的变化。

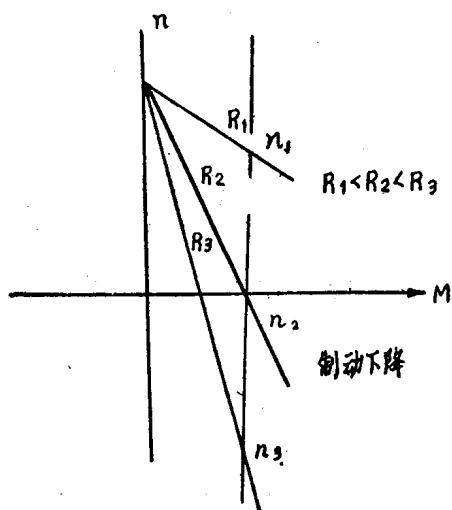


图 1-11 制动下降特性

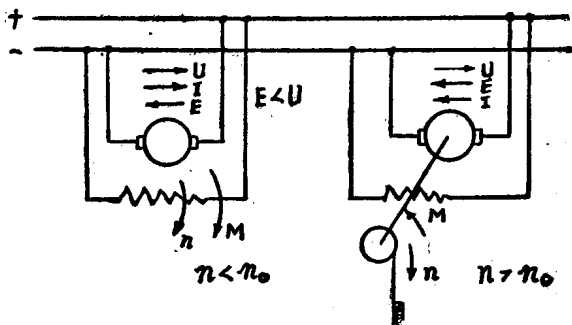


图 1-12 再生制动綫路

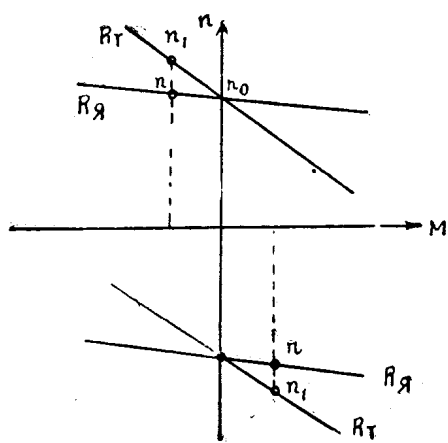


图 1-13 再生制动特性

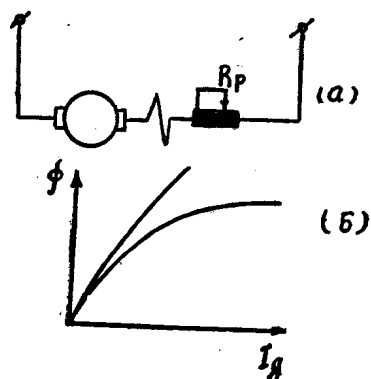


图 1-14 串激电动机

3. 再生制动

当直流分激电动机被生产机械拖动，且使电动机的转速超过理想空载速度时，由于反电势大于外施电压，则电枢电流反向，电动机便产生了与旋转方向相反的制动转矩（图1—12）。这时电动机已变为发电机，把自身轴上输入的机械能变为电能向电源反馈。如起重机在下降重物时就会产生这种运行情况。再生制动机械特性示于图1—13中。

可以看出，制动转矩随转速增高而增大，当制动转矩与电动机轴上负载转矩相平衡时，电动机将以某一速度稳定运转。显然，如果没有制动的作用，在放下重物时，由重物所形成的转矩将使拖动系统加速到非常危险的程度。

电枢电路的外电阻愈大，电动机所达到的转速也愈高，为了防止在制动时电动机产生过高的速度，在进行再生制动时电枢电路中不应串入外加电阻。

再生制动从经济方面来看是很理想的。但是这种运用情况不是一般生产机械都做得到的，因此限制了它的应用。一般冶金工厂的生产机械有许多要求迅速停止或反转，因此在冶金工厂中动力制动和反接制动应用得最广泛。

§ 4 串激电动机的机械特性

串激电动机的接线图示于图1—14(a)中。串激电动机的激磁绕组与电枢串联，流过激磁绕组和电枢的是同一个电流，因此，串激电动机的主要特征是其磁通 Φ 依电枢电流而变化。磁通 Φ 与激磁电流（即电枢电流）间的关系可用磁化曲线表示，如图1—14(b)所示。因为磁化曲线还没有很准确的数学公式来表示它，所以串激电动机的机械特性也很难用公式准确的表达。实际上是利用制造厂所给的万用特性曲线来绘制串激电动机的机械特性。万用特性曲线是用百分值表示的转速及转矩对电动机电流的关系曲线。如图1—15所示。利用万用特性曲线可以画出电动机的机械特性，其步骤是把所找

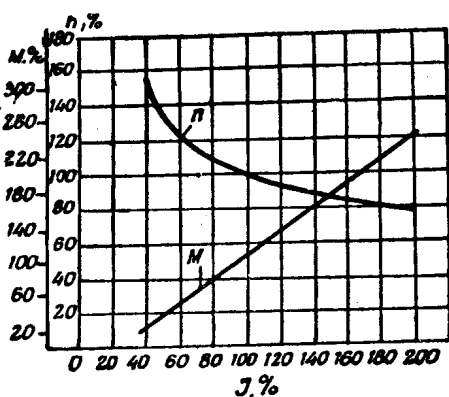


图1—15 万用特性

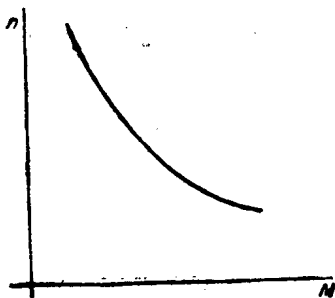


图1—16 串激电动机的机械特性

出的一系列的相对应转矩及转速之值列在另一座标系统（由转速和转矩所组成的座标）上，然后依点描绘即可画出电动机的机械特性曲线。

为了阐明电动机的主要原理，我們假定流经激磁绕组的电枢电流与磁通間有线性关系。据此导出的串激电动机的机械特性为：

$$n = \frac{A}{\sqrt{M}} - B \quad (1-11)$$

式中 A 、 B 为常数。

这样，在电动机磁路不飽和的情况下，串激电动机机械特性曲线可用双曲线表示（如图 1-16 所示）。当然，实际电动机的机械特性与用公式（1-11）所繪制的有所出入。串激电动机的机械特性是软特性，并且不能得到理想空载速度。当负载很轻时，转速有急剧升高的现象，以至达到机械强度所不容許的高速。故串激电动机不可以空载或轻载（额定负载的 15~20% 以下）运转，负载很小的生产机械，和以皮带传动的机械，不能用串激电动机来拖动，以防皮带脱落造成串激机空载。

在使用串激电动机的时候，大多数应用在人工的变阻器特性上。图 1-17 给出了自然特性和电动机在电枢中接入不同电阻器的人工特性。也可以通过其它方法得到不同人工特性，这将在以后述及。

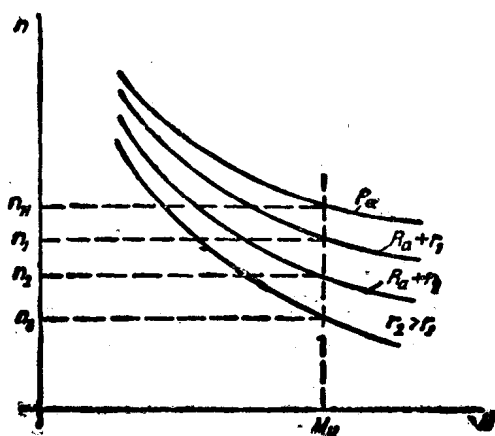


图 1-17 串激电动机的自然特性和人工特性

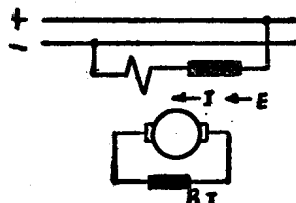


图 1-18 串激电动机动力制动

串激电动机不能进行再生制动，这是因为串激电动机的理想空载速度 $n_0 = \infty$ ， n 不可能大于 n_0 之故。所以它只能有动力制动和反接制动。

1. 动力制动。串激电动机在动力制动时，一般是连接成他激的，这时，激磁绕组经过一段电阻接在电源上（图 1-18 所示）。由于激磁电路中有很大的电能消耗，故这种他激的动力制动是不经济的。

2. 反接制动。在串激电动机制动方式中，应用最广的是反接制动。产生反接制动的方式与分激电动机的情况相同。为了限制电流，在电枢电路中应接入制动电阻。反接制动的接线图示于图 1-19 中。

经过分析，串激电动机与分激电动机相比较有较大的过载能力和起动转矩（在相同起动电流下），在轻负载时可以自动提高速度，故它适于负载经常变动的生产机械，如起重机及轧钢车间某些辅助机械的电力拖动。

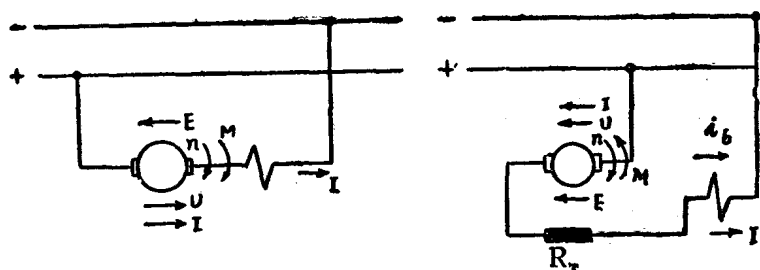


图 1—19 串激电动机反接制动

§5 复激电动机的机械特性

复激电动机的接线图示于图 1—20 中。复激电动机的机械特性和串激电动机一样，不能用准确的公式表示出来。复激电动机的机械特性曲线如图 1—21 曲线 3 所示。它介

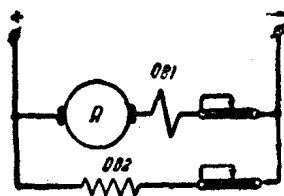


图 1—20 复激电动机接线图

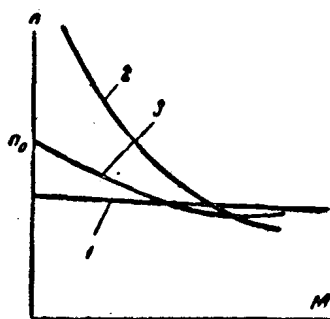


图 1—21 复激电动机机械特性

于分激和串激之间。它有确定的理想空载速度，故不能产生像串激电动机那样速度过高的危险。复激电动机一般是软特性，但其软硬程度视串激或分激成分多少而定。

复激电动机各种不同情况示于图 1—22 中。复激电动机三种制动方法都能实现。在再生制动和动力制动时把串激绕组短接；反接制动时串激绕组不必短接，其实现方法如分激电动机。以前冶金车间某些辅助机械用串激电动机拖动，但近来多用复激电动机代替。这是由于生产机械的空载转矩减少以及在电气制动方面串激机不如复激机性能良好的缘故。

§6 直流电动机的调速

为了提高生产率和产品质量，冶金车间的各种生产机械常常要求电力拖动在各种不同的速度下运转。例如在起重运输机中，为了保证平稳的降速和最后在指定位置上准确停止，必须在停止前降低运行速度；在轧钢机中，对每一轧制截面都有其适当轧制速度；烧结机要相应于矿粉的情况选择一适当的运行速度。为了获得适合生产要求的运转速度，就必须调节电动机的转速。

应该注意，电动机的调速是指根据技术程序的要求，使电动机的转速人为的强制改变。不要把转速调节与负载转矩变化时所引起的转速变化混为一谈。