

三相异步电动机 的制动

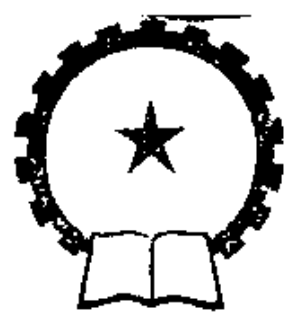
王振民 著



机械工业出版社

三相异步电动机的制动

王振民 著



机械工业出版社

(京) 新登字054号

本书主要介绍三相异步电动机(感应电动机)的一种新的制动技术——快速制动双绕组电动机。阐述了该电动机的结构特点和电磁设计,分析了该电动机的电磁关系和自制动原理,用运行实例比较详细地说明了该电动机在工业生产中的应用。

考虑到本书的系统性和完整性,作者还介绍了三相异步电动机的传统制动技术和三相异步电动机的阻容制动。本书是一本系统地阐述三相异步电动机制动技术的科技专著。

本书可供工厂企业从事电气工作的科技人员阅读,还可作为“电机与拖动”专业的高年级大学生及研究生的参考书或加选课的教材。

三相异步电动机的制动

王振民 著

责任编辑:陈国华 贾玉兰 版式设计:霍永明
封面设计:姚毅 责任校对:熊天荣
责任印制:路琳

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $8^{1/4}$ · 插页 2 · 字数 225 千字

1992年9月北京第1版·1992年9月北京第1次印刷

印数 0 001—8 200 · 定价:5.70元

ISBN 7-111-03357-4/TM·420

前 言

工业生产中广泛使用三相异步电动机（感应电动机）。为了减少生产辅助时间、提高生产率、实现准确停车、提高产品质量，以及保障人身安全等，在机床、纺织、化纤、化工、煤炭等工业中，许多机械都要求三相异步电动机工作在制动状态。

作者多年从事三相异步电动机制动的研究，并发明了快速制动双绕组电动机。该电动机集制动与节能技术于一体，依靠定子两套绕组的特殊接线，把电动机转轴上的动能转换为制动转矩。制动时不消耗额外能量。并且控制简单，操作方便。该电动机已由河北省张家口市电机厂和山西省榆次市水泵厂（潜水电机厂）成批生产，并已使用在铣床、车床、对焊机、并条机、转杯纺纱机等机械上，受到了国内用户和国外客商的欢迎和好评。为了进一步推广这项科技成果，作者撰写了本书。

本书阐述了快速制动双绕组电动机的结构特点和定子两套绕组的特殊接线；着重分析了电磁关系和自制动原理；介绍了该电动机的电磁设计；并且用实例说明了它在工业生产中的应用。

本书内容以快速制动双绕组电动机为重点，为了本书的系统性和完整性，还介绍了三相异步电动机的传统制动技术和三相异步电动机的阻容制动。

本书的出版得到了熊大慰教授、董达生教授、高庆荣（教授级）高级工程师的支持和帮助。在此表示衷心感谢。

由于作者学识业务水平有限，书中不妥和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

王振民

目 录

第一章	异步电动机的传统制动技术	1
第一节	概述	1
第二节	传统的电气制动	5
第三节	能耗制动的计算	22
第四节	三相异步电动机的电气制动控制线路	37
第二章	异步电动机的阻容制动	49
第一节	阻容制动原理	49
第二节	电容和电阻参数的确定	53
第三节	阻容制动的应用	64
第三章	快速制动双绕组电动机断电制动	71
第一节	结构特点和定子接线	71
第二节	双绕组电动机电磁关系和断电制动原理	76
第三节	双绕组电动机电动运行节电原理	84
第四节	双绕组电动机等效电路和机械特性	92
第四章	快速制动双绕组电动机能耗制动	99
第一节	能耗制动的几种接线方法	99
第二节	整经机的电动机过热问题及解决办法	107
第三节	双绕组电动机的软启动特性	112
第五章	快速制动双绕组电动机电磁设计	117
第一节	电磁设计步骤	119
第二节	电磁设计说明	137
第三节	电磁设计举例	140
第六章	快速制动双绕组电动机应用实例	181
第一节	在 CA618 K 型马鞍车床上的应用	181
第二节	在 X5646 型滑枕铣床上的应用	187
第三节	在 T68 型卧式镗床上的应用	192
第四节	在 C516-1 型立式车床上的应用	199

第五节	在组合机床中的应用	205
第六节	在 UNT-80 型链条对焊机上的应用	207
第七节	在 A 272 型并条机上的应用	210
第八节	在 1452 型高速整经机上的应用	217
附录 I	电气图中图形符号和文字符号	225
附录 II	快速制动双绕组电动机电磁设计计算机程序	237
参考文献		257

第一章 异步电动机的 传统制动技术

第一节 概 述

在工业生产中，许多生产机械要求电动机快速制动，实现准确停车。

目前，国内外三相异步电动机[⊖]的传统制动技术有：

（1）机械力制动

电动机轴上装有机械抱闸装置。这是一种落后的制动办法，对轴和闸瓦机械磨损严重，检修和维护的工作量很大。现代很少使用这种制动办法。

（2）电磁力制动

电动机轴上装有电磁铁抱闸装置、或装有电磁摩擦片装置、电磁圆盘制动器以及旁磁式制动装置等。这些电磁制动装置的共同结构特点是：具有电磁线圈和机械制动装置，故统称为电磁力制动。这类制动装置结构较复杂，安装的准确度要求高，也易磨损，维护修理要求具备一定的技术和设备。

（3）电力制动

电力制动又称电气制动。包括回馈制动、反接制动、能耗制动三类。三相异步电动机的电气制动没有机械制动装置，不存在机械磨损问题，减少了维护检修工作量，也容易实现自动控制，因此应用比较广泛。但电气制动也需要附加电气元件或电气设备。

以上这些传统的制动技术具有一个共同点，就是用外力克服电动机轴上的动能，使电动机制动停车。无论电动机采用上述的哪一种制动方法，均需要一定的装置或设备，而且制动时还要消

[⊖] 本书中的异步电动机均指感应电动机，不包括其它类型的异步电动机。

耗额外能量（回馈制动除外）。

作者发明的快速制动双绕组电动机，利用定子铁心中两套对称的三相绕组，把电动机轴上的惯性动能转变为制动力，实现断电制动。因为这种电动机是依靠自身的力量使其制动停车，故可称为自制动三相异步电动机。这种电动机由电动运行状态转变为制动状态，不需要附加任何元件或装置，也不消耗额外能量，而且电动运行时还具有节电效果。

为了便于对三相异步电动机制动状态的深入理解，让我们简单地回顾一下三相异步电动机的运行状态及生产机械的负载转矩特性。

当电动机的电磁转矩 M 的作用方向与转速 n 方向相同时，电动机运行在电动状态。电动机拖动生产机械运转，电动机的电磁转矩又称拖动转矩。这时电动机的定子从交流电源吸收电能，转变为转子轴的机械能输出。

三相异步电动机电动运行的等值电路如图 1-1 所示。 r_1 、 x_1 分别为定子的电阻和漏抗， r'_2 、 x'_2 分别为折算后转子的电阻和漏抗， r_m 、 x_m 分别为励磁电阻和励磁电抗， s 为转差率。

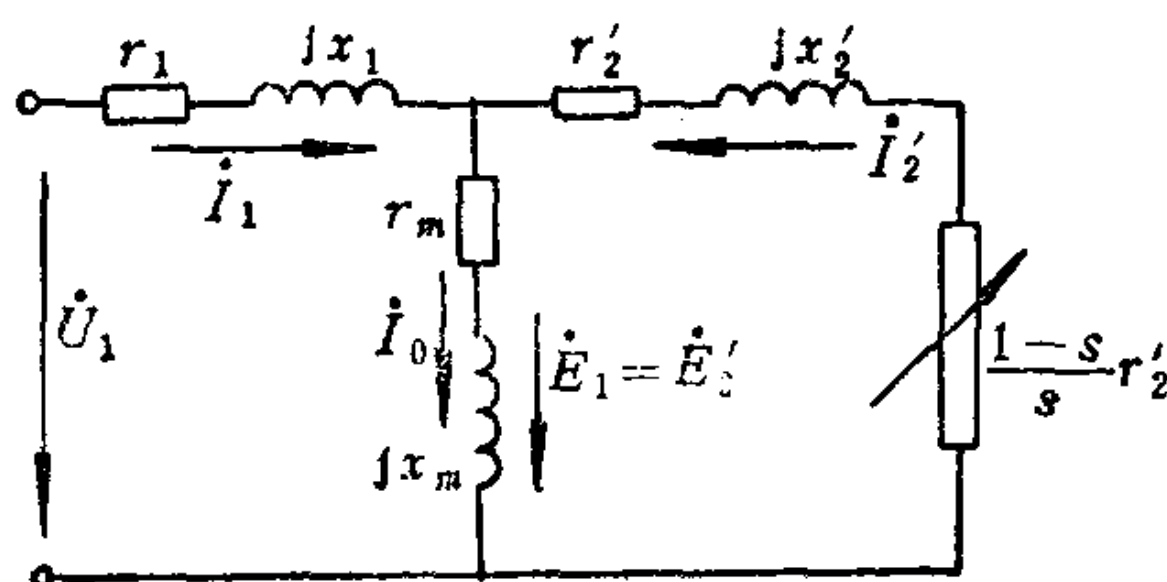


图1-1 等效电路

电动机的电磁转矩 M 与转速 n 的关系（即 $M = f(n)$ ）称为机械特性。三相异步电动机电磁转矩参数表达式（即机械特性方程式）为

$$M = \frac{m_1 U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{\Omega_0 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}$$

式中 U_1 ——定子额定相电压；

Ω_0 ——同步角速度；

m_1 ——定子绕组相数， $m_1 = 3$ 。

电磁转矩的实用表达式为

$$M = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

式中 M_m ——最大转矩；

s_m ——临界转差率。

由参数表达式或实用表达式，便可绘制出三相异步电动机的机械特性。如图 1-2 所示，第一象限中的曲线为正向电动运行特性，第三象限的曲线为反向电动运行机械特性，曲线 a 和 b 是转子回路中没有串入电阻的机械特性（称固有特性），曲线 c 和 d 是转子回路中串入电阻的机械特性（称人为特性）。

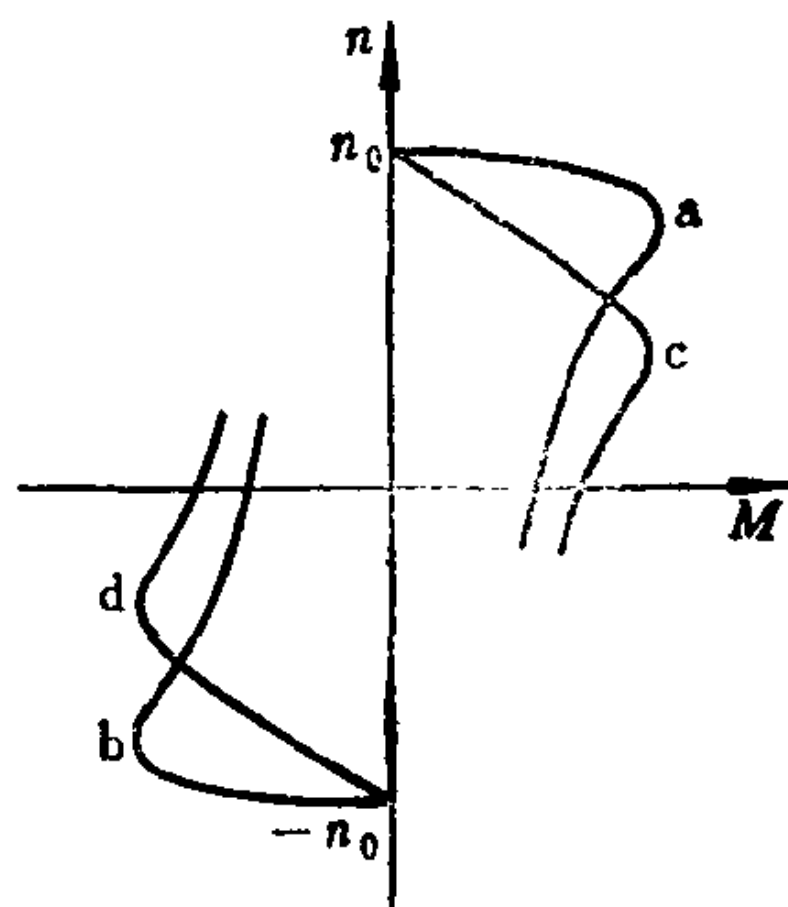


图1-2 机械特性

负载转矩 M_L 与转速 n 的关系（即 $M_L = f(n)$ ）称为生产机械的负载转矩特性，根据统计，大多数生产机械的负载转矩特性，可归纳下列三种类型：

（1）恒转矩负载特性

这类生产机械的负载转矩 M_L 的大小是个恒值，与转速 n 的数值无关。

根据负载转矩 M_L 的作用方向是否随转速 n 的方向改变，恒转矩负载特性又可分为反抗性恒转矩负载特性和位能性恒转矩负载特性。若负载转矩 M_L 作用方向总是与转速 n 的方向相反即负载转矩总是反对转动，则为反抗性恒转矩负载特性。它的特性线位于第一和第三象限，如图 1-3 所示。例如采煤机、运输机、机床进给机构就属于这类生产机械。若恒值负载转矩 M_L 的作用方向固定不变，即不随转速方向改变而改变，与转速方向无关，则为

位能性恒转矩负载特性。重物重力造成的负载转矩就是这样，重力总是朝向地心。例如提升机、起重机及电梯等就属于这类生产机械。图 1-3 中也示出了位能性恒转矩负载特性，位于第一和第四象限。

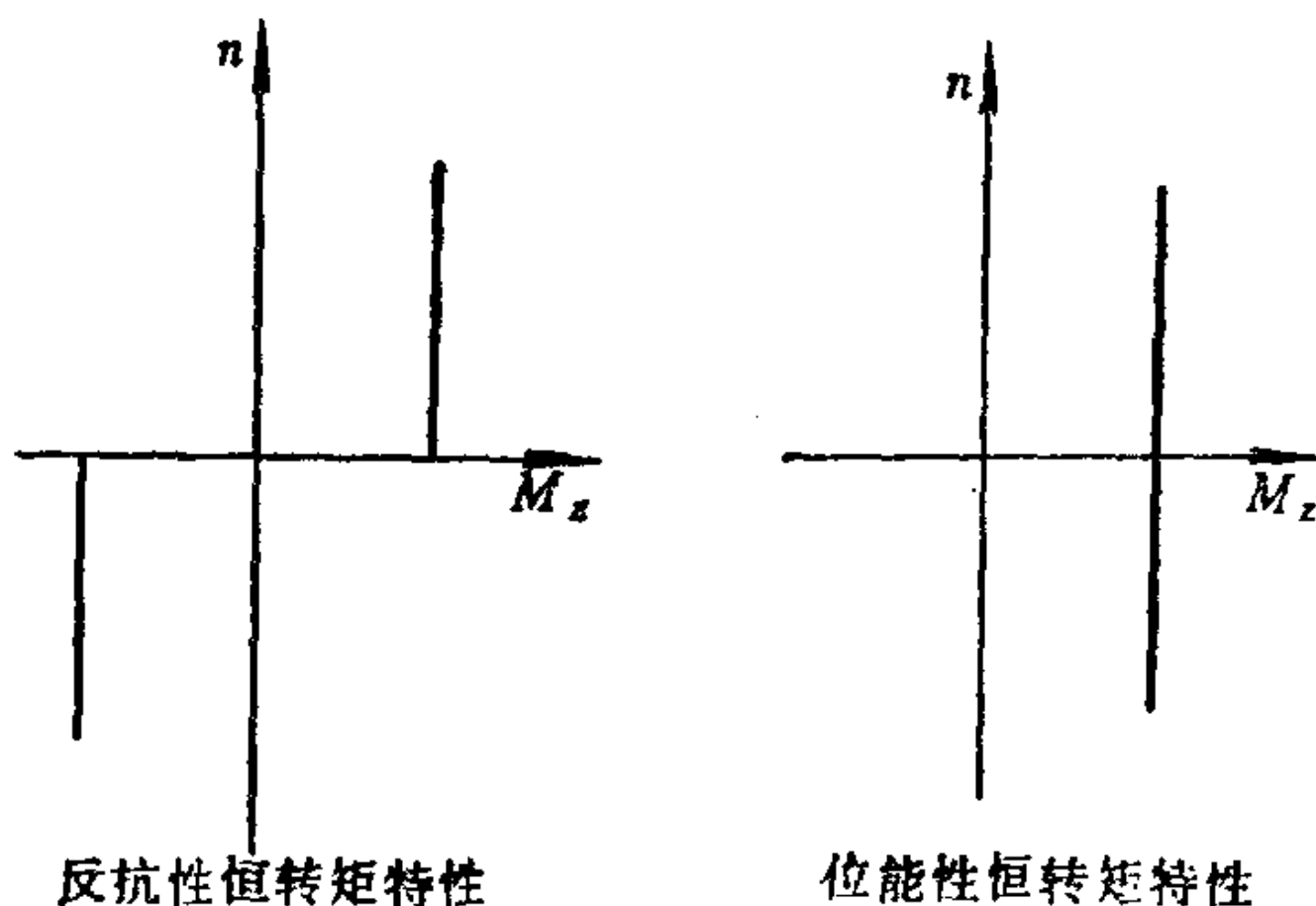


图1-3 恒转矩负载特性

(2) 通风机负载转矩特性

通风机、水泵等生产机械的负载转矩的大小与转速的大小有关，基本上与转速的平方成正比，即

$$M_z = K n^2$$

式中 K ——比例常数。

通风机负载转矩特性如图 1-4 所示。

(3) 恒功率负载转矩特性

一些切削机床，如车床切削的负载转矩 M_z 的大小与转速的大小成反比，而切削功率不变。图 1-5 示出恒功率负载转矩特性。

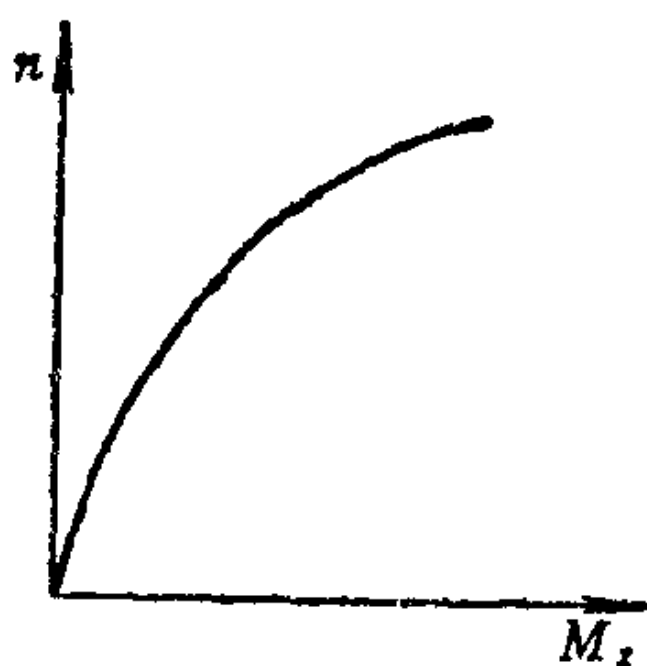


图1-4 通风机负载特性

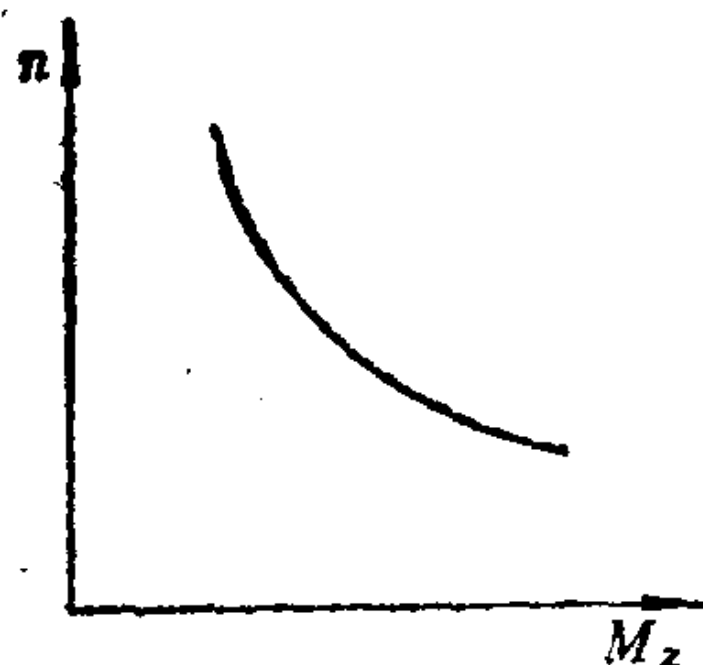


图1-5 恒功率负载特性

第二节 传统的电气制动

三相异步电动机不但能工作在电动状态，在一定条件下也能实现制动状态。当电动机的电磁转矩 M 的作用方向与转速 n 方向相反时，电动机工作在制动状态，这时电动机的电磁转矩称作制动转矩。电动机从轴上输入机械能，转变为电能消耗在定子和转子电路的电阻上或者转变为电能回馈电网。使用电气方法实现电动机的制动状态，称为电气制动或电力制动。三相异步电动机的传统电气制动有三种，下面分别介绍。

一、回馈制动

回馈制动又称再生发电制动。当三相异步电动机的转子转速 n 大于旋转磁场的转速 n_0 时（即满足 $n > n_0$ 的条件），电动机实现回馈制动。

在图 1-6 a 中假定转子和磁场（用磁通 Φ 表示）顺时针方向旋转，转子的转速 n 大于旋转磁场的转速 n_0 （即 $n > n_0$ ）。根据右手定则可确定转子导体感应电势和

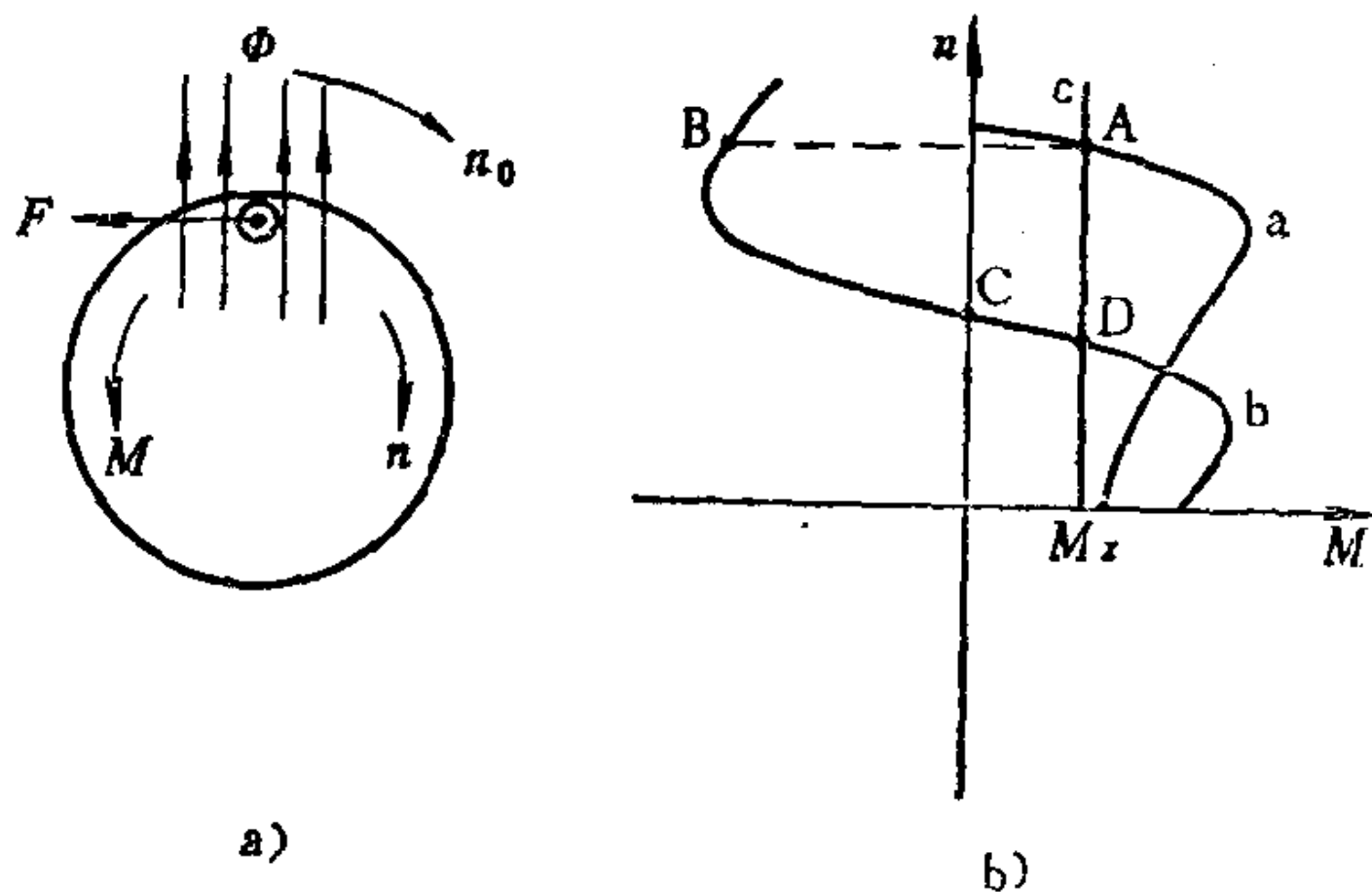


图1-6 回馈制动转矩方向及机械特性

感生电流方向是从纸面流出（图中标“·”），用左手定则可确定转子导体受力方向向左，从而得出电磁转矩 M 的作用方向是逆时针方向，实现了电磁转矩 M 的作用方向与转速 n 方向相反，因此电动机处于回馈制动状态。

大家知道，三相异步电动机电动运行时，转子转速 n 永远小于同步转速 n_0 （即旋转磁场转速）。那么如何才能使转子转速 n 超过同步转速 n_0 ，而实现回馈制动呢？下面从两方面进行阐述。

1. 减小同步转速 n_0 ，满足 $n > n_0$ 条件

因为同步转速 $n_0 = \frac{60f_1}{p}$ ，所以维持定子频率 f_1 不变时，增加

极对数 p ，同步转速 n_0 减小；或者维持极对数不变时，减小定子频率 f_1 ，同步转速 n_0 也可减小。现分别介绍这两种情况。

有一种靠自动换接定子绕组接线以改变极对数的笼型三相异步电动机，常称为变极调速异步电动机。图 1-6 b 中表示它的机械特性，曲线 a 是 2 极的，曲线 b 是 4 极的，曲线 c 是恒转矩负载特性。如果从原来运行在 2 极的机械特性上 A 点，自动换接定子绕组接线，使电动机由 2 极变为 4 极，工作点将从曲线 a 移到曲线 b 上，因机械惯性，转速不能突变，工作点由第一象限 A 点沿水平虚线移至第二象限 B 点，该点的转速 n_B 大于相应的同步转速 n_0 ，电磁转矩 M_B 为负值，而转速 n_B 仍为正值，这说明电磁转矩作用方向与转速方向相反，电磁转矩为制动转矩，电动机由电动状态转入了回馈制动。电动机在制动转矩和负载转矩的共同作用下，沿着曲线 b 减速至 c 点时，转子转速等于同步转速，回馈制动结束，到达 C 点虽然电磁转矩等于零，但电动机在负载转矩 M_L 作用下，将继续减速，工作点便由第二象限又回到第一象限，恢复原来的电动状态，直至 D 点稳定运行。在这个减速过程中，电动机运行在第二象限 B → C 这一段机械特性上时，始终满足 $n > n_0$ 的条件，而且 $n > 0$ ， $M < 0$ ，即 M 与 n 方向相反，所以在 B → C 段电动机工作在制动状态，称之为正向回馈制动。

减小定子供电频率，也可使 $n > n_0$ ，实现回馈制动。图 1-7 中表示两条不同频率的机械特性， $f_1 < f'_1$ 。假设原来电动机在频率 f'_1 的机械特性上 A 点电动运行，现在定子电源供电频率自动地由 f'_1 变为 f_1 ，电动机的工作点将从频率为 f'_1 的机械特性上移到频率为 f_1 的机械特性

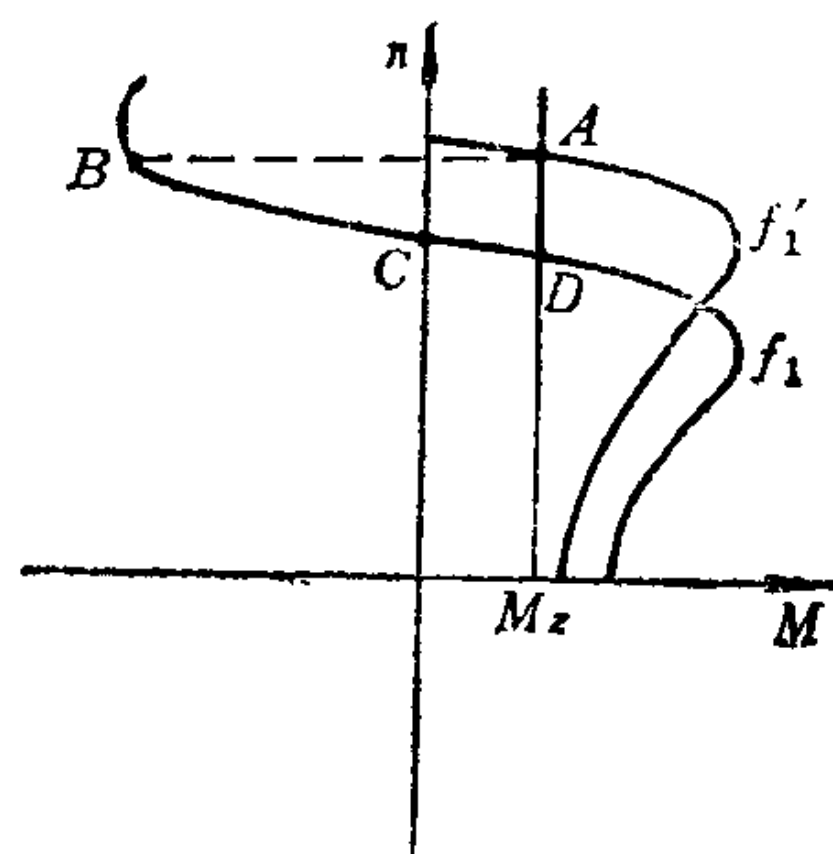


图1-7 减小频率的
正向回馈制动

上,因转速不能突变,由第一象限A点水平移至第二象限B点,这时 $M_B < 0$, $n_B > 0$,说明 M 与 n 方向相反,电动机转入回馈制动状态,在 M_B 和 M_z 共同作用下,沿第二象限机械特性减速,到达C点转子转速等于同步转速时, $M = 0$,回馈制动结束。但在 M_z 单独作用下,电动机继续减速,直到第一象限机械特性上D点,电动机以电动状态稳定运行。同样,在这个减速过程中,电动机运行在第二象限B→C段机械特性上,始终 $n > n_0$, M 与 n 方向相反,所以电动机工作在回馈制动状态。

2. 增大转子转速 n ,满足 $n > n_0$ 条件

依靠位能性负载的作用下,可使电动机的转速超过同步转速,实现回馈制动。下面结合矿井提升机下放重物的情况加以说明。

规定重物提升时电动机转速 n 方向为正,重物下放时电动机转速 n 方向为负。为使重物从井口下放,电动机改变相序接通三相电源,电动机反向起动,从图1-8中A点开始,在电磁转矩和负载转矩共同作用下,沿第三象限的机械特性升速,到达B点,在A→B段机械特性上, $M < 0$, $n < 0$,即 M 与 n 方向相同,电动机工作在反向电动状态;在B点电磁转矩 $M_B = 0$,但电动机在位能性负载转矩 M_z 的作用下,继续升速,工作点由第三象限进入第四象限,转子转速超过同步转速,而且电磁转矩由负值变为正值, M 与 n 方向相反,电动机由电动状态转入制动状态,一直加速到C点,电磁转矩与负载转矩平衡,即 $M_e = M_z$,电动机以回馈制动状态稳定运行。把运行在第四象限($n < 0$)的回馈制动称为反向回馈制动。

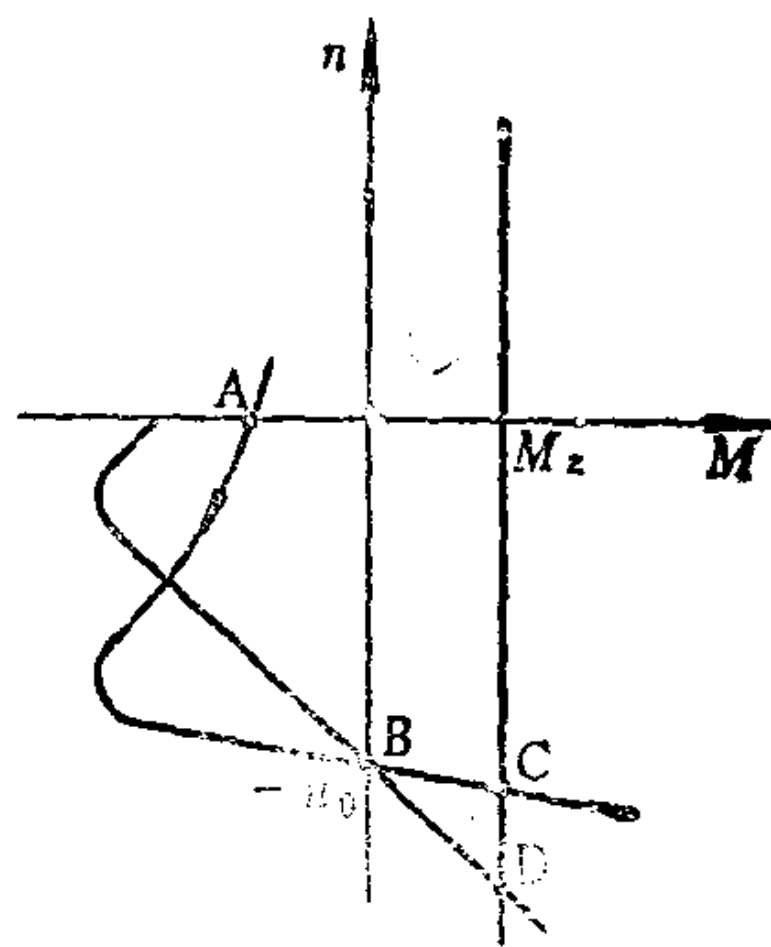


图1-8 反向回馈制动

在生产实际中,拖动起重机或提升机的绕线转子三相异步电动机,运行在反向回馈制动状态,高速下放重物。这时电动机转子回路串入较大的电阻,如图1-8中电动机工作在串入电阻的人

为特性上D点。

下面分析一下三相异步电动机运行在回馈制动状态时，功率传递情况。

电动机工作在回馈制动状态， $n > n_0$ ，转差率 $s = \frac{n_0 - n}{n_0} < 0$ ，从三相异步电动机的等效电路看出，电动机的机械功率为负值，即

$$P_{\Omega} = 3I_2'^2 \frac{1-s}{s} r_2' < 0$$

这说明拖动系统减少了动能而向电动机输入机械功率。电动机的电磁功率也变为负值，即

$$P_M = 3I_2'^2 \frac{r_2'}{s} < 0$$

这说明电磁功率 P_M 传递方向也改变了，变成了从转子传递给定子，那么到定子中的电磁功率 P_M 又到哪里去了呢？为此，先看看转子侧功率因数角 φ_2 的情况。

我们知道

$$\cos\varphi_2 = \frac{\frac{r_2'}{s}}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_2')^2}} < 0$$

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2' \frac{r_2'}{s} + j\dot{I}_2' x_2'$$

根据以上二式，画出回馈制动时异步电动机的相量图，见图1-9所示。显然得出结论为 $\varphi_2 > 90^\circ$ 。从相量图上可以看出，因为 $\dot{I}_0$ 、 $\dot{I}_1 r_1$ 、 $j\dot{I}_1 x_1$ 各量均很小，所以 $\varphi_1 \approx \varphi_2$ ，因此定子侧的功率因数 $\cos\varphi_1$ 也为负值，即 $\cos\varphi_1 < 0$ ，这样一来，异步电动机的输入功率则为负值，即

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1 < 0$$

$P_1 < 0$ 说明有功功率 P_1 传递方向改变，不再是电源向定子输入，而是电动机定子送出有功功率给交流电源了。这也就是说，电动

机工作在回馈制动状态，由转子传递到定子的电磁功率 P_M ，扣除定子绕组的铜损耗 p_{Cu1} 后，大部分余下来的功率就是 P_1 ，回馈给电源了。

从上面对回馈制动状态的有功功率传递分析看出，回馈制动状态下的三相异步电动机实际上是一台异步发电机，它把拖动系统减小的动能转变为电能送回电网。因此回馈制动又得名再生发电制动。最后要说明的一点是，工作在回馈制动状态的异步电动机，仍旧要从交流电源吸收感性的无功功率，用来建立旋转磁场。

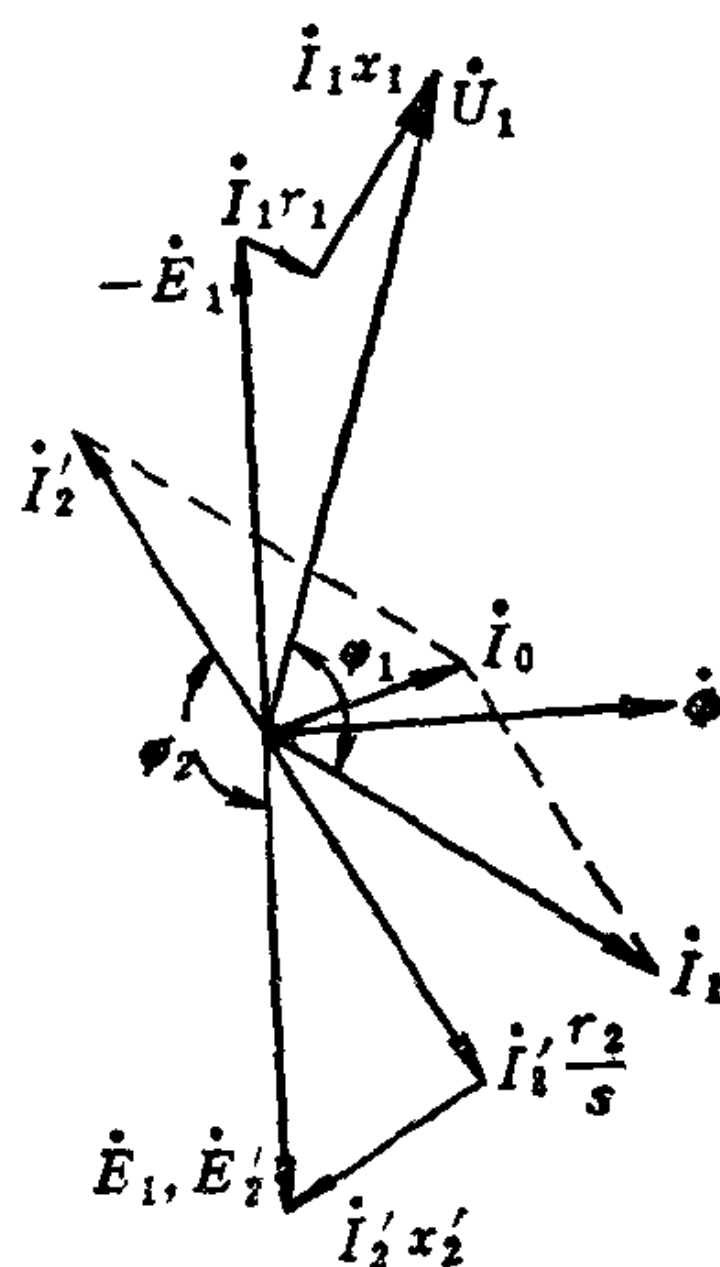


图1-9 回馈制动的相量图

二、反接制动

大家知道，三相异步电动机工作在电动状态时，转子的旋转方向与旋转磁场的旋转方向相同，即 n 与 n_0 的方向相同。而电动机工作在反接制动状态时，则情况不同，转子转速 n 的方向与旋转磁场转速 n_0 的方向相反。也就是说，只要做到 n 与 n_0 方向相反，便实现了反接制动。如何做到 n 与 n_0 方向相反呢？有两种办法，一种办法是，改变旋转磁场的转向，而转子的转向不变，使 n_0 与 n 方向相反，便实现了所谓的改变相序反接制动；另一种办法是，依靠位能性负载倒拉电动机反转，而旋转磁场的转向不变，使 n 与 n_0 方向相反，便实现了所谓的倒拉反转反接制动。分别介绍如下。

1. 改变相序的反接制动

图1-10中接触器1KM触点闭合为电动机的正向电动运行。假定电动机转速 n 为顺时针方向，那么旋转磁场也应该是顺时针方向旋转。

现在接触器1KM触头断开，接触器2KM触头闭合，电源相

序改变了, 旋转磁场立即改变旋转方向, 即 n_0 由原来的顺时针方向改变为逆时针方向, 因机械惯性, 而转子旋转方向不会一下子改变, 即电动机的转速 n 仍然为顺时针方向, 这样 n_0 与 n 方向相反。如图1-11所示, 用右手定则可确定出转子导体的感应电动势和感生电流的方向, 是从纸面流出 (标以“·”)。用左手定则可判断出转子导体在磁场中受力的方向是向左的, 从而看出电磁转矩 M 的作用方向是逆时针方向, 与转速 n 方向相反, 则电动机处于反接制动状态。

让我们再用图1-12所示的机械特性, 看一看电动机拖动反抗性恒转矩负载, 从电动运行转入反接制动的过程。

假设电动机原来在A点正向电动运行。现在改变电源的相序, 旋转磁场转向立即改变, 转子的转速方向和大小均来不及改变, 工作点水平移至第二象限机械特性上B点, B点的电磁转矩 M_B 变为负值, 而转速 n_B 仍为正值, 说明电磁转矩作用方向与转

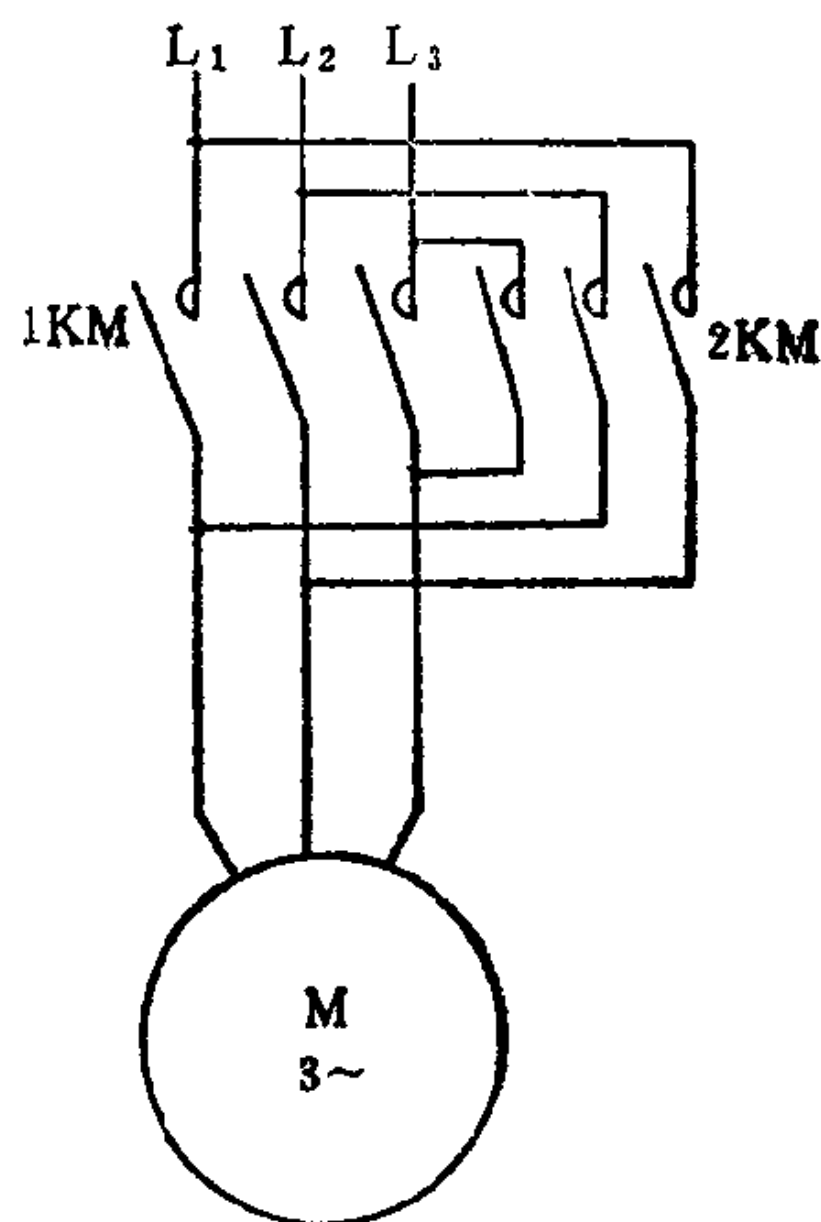


图1-10 反接制动的定子接线

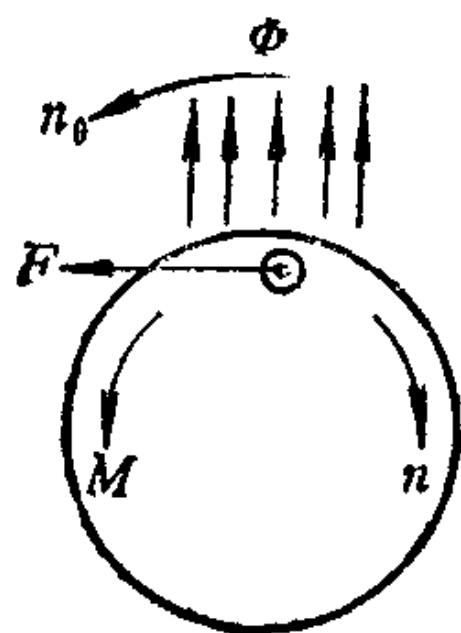


图1-11 改变相序反接制动原理图

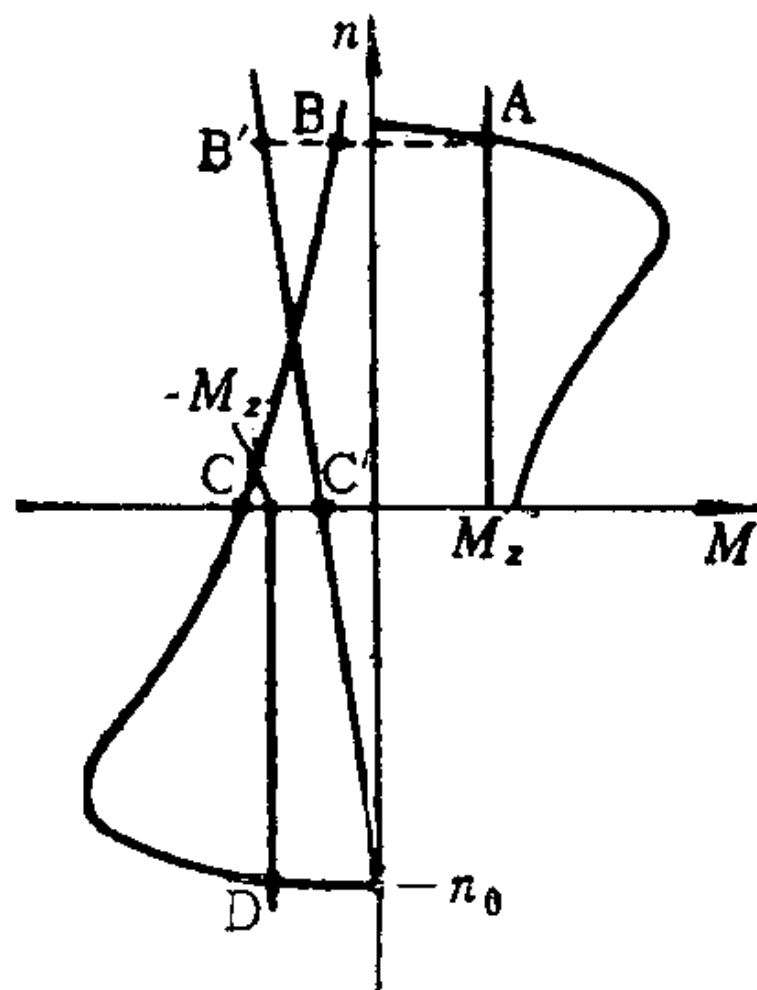


图1-12 改变相序的反接制动过程

速方向相反,电动机转入反接制动状态。在 M_B 与 M_L 共同作用下,电动机沿着 $B \rightarrow C$ 段机械特性减速,到达C点时,电动机的转速 $n_c = 0$,但C点的电磁转矩绝对值大于负载转矩的绝对值,即 $|-M_c| > |-M_L|$,所以在电磁转矩的作用下电动机反转,工作点进入第三象限,转速 n 变为负值,电磁转矩 M 仍为负值,说明电动机又由制动状态转变为反向电动状态。电动机沿着第三象限的机械特性升速,直至D点, $M_D = M_L$,电动机反向稳定运行。电动机在第二象限 $B \rightarrow C$ 段机械特性上减速过程,始终 M 与 n 方向相反,电动机工作在反接制动状态。

从改变相序的反接制动过程看出,笼型异步电动机的反接制动很难做到准确停车。在生产实际中,使用速度继电器,当减速到C点转速为零时,速度继电器立即动作,及时把三相电源断开,才能在 $n_c = 0$ 时停车,否则电动机将进入反转电动运行。如果是绕线转子异步电动机进行改变相序的反接制动,同时在转子回路串入较大电阻,便能做到准确停车,如图1-12中电动机沿第二象限人为特性 $B' \rightarrow C'$ 段减速到 C' 点,转速 $n_{c'} = 0$,这时即使未能及时断开电源,电动机也不会反转,这是因为串入电阻的反向电动的人为特性(第一象限 C' 至 $-n_0$ 段)上,任何一点的电磁转矩绝对值均小于负载转矩的绝对值,因此电动机减速到 C' 点就停车,不会反转。

2. 倒拉反转的反接制动

一台绕线转子三相异步电动机,拖动位能性恒转矩负载,在固有特性上A点电动运行,正在提升重物,如图1-13所示。

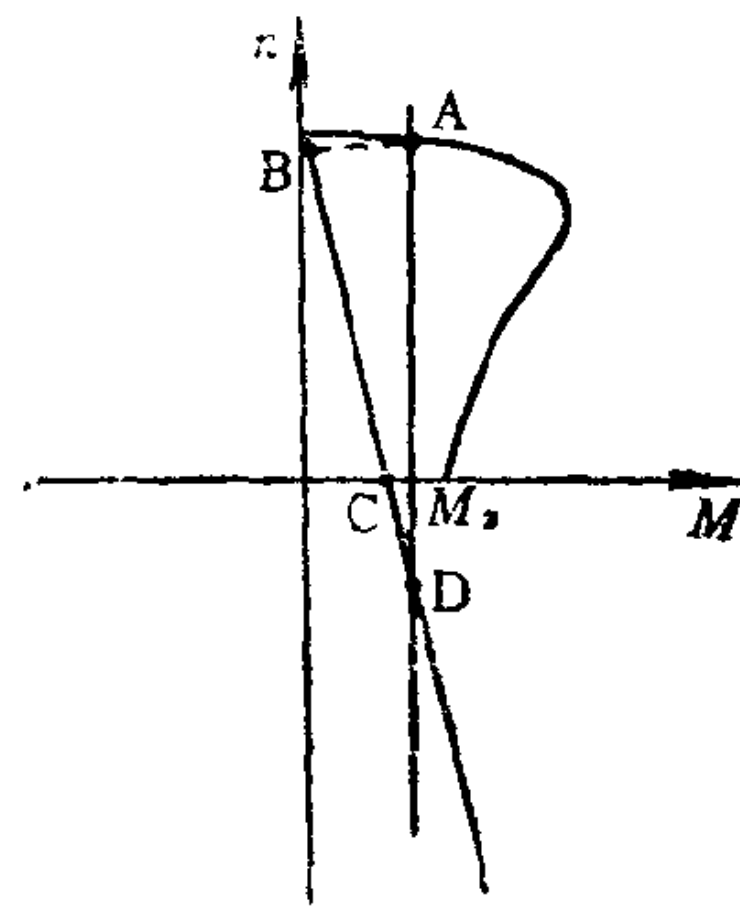


图1-13 倒拉反转的反接制动过程

现在,在电动机的转子回路中串入较大电阻,电动机的工作点便从固有特性上A点平移至人为特性上B点,B点的电磁转矩 $M_B < M_L$,电动机沿人为特性 $B \rightarrow C$ 段减速。在 $B \rightarrow C$ 段人为特性