

高等学校试用教材

# 电机及拖动基础

下 册

合肥工业大学 顾绳谷 主编

机械工业出版社

高等学校试用教材

电机及拖动基础

下册

合肥工业大学 顾绳谷 主编



机械工业出版社

# 电机及拖动基础

## 下 册

合肥工业大学 顾绳谷 主编

\*

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登记证出字第117号)

国防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 $10^{3/4}$ ·字数282千字

1981年1月北京第一版·1981年1月北京第一次印刷

印数 00,001—50,000·定价1.35元

\*

统一书号: 15033·5019

## 前 言

本书根据高等学校一机部对口工业电气自动化专业教材编写会议拟定的《电机及拖动基础》教材编写大纲编写。

本书拥有《电机学》及《电力拖动基础》两门课程的主要内容。鉴于过去两门课程内容重叠较多，传统的《电机学》教材偏重设计制造，不能适应工业电气自动化专业对电机选择使用的要求，原有的《电力拖动基础》教材内容庞杂烦琐，有些已过于陈旧，根据本专业发展需要，有待更新。为此，将上述两门课程合并为《电机及拖动基础》课程，使电机及拖动有机结合，更好地为专业的发展方向服务。同时，有可能避免内容重复，达到在有限的学时内基本掌握两部分的主要内容。

本书内容包括直流电机及拖动、变压器、交流电机及拖动、控制电机、多电动机拖动系统与拖动系统电机的选择等五部分，共十二章，分上、下两册。上册包括绪言及第一至五章，内容为直流电机及拖动、变压器及交流电机等部分；下册包括第六至十二章，内容为交流电机的拖动、控制电机、多电动机拖动系统与拖动系统电机的选择等部分。

本书可作为高等工业院校工业电气自动化专业的教材，也可供有关专业师生、工程技术人员及工人同志参考。

本书由合肥工业大学工业电气自动化教研室顾绳谷教授主编，其中第二、六、七、八、十一及十二章由顾绳谷教授编写；第一、四、五、九、十各章由姚守猷副教授编写。绪言由两同志合作写成。韩继生同志编写第三章的初稿，张世栋同志对本书文稿及图稿做了大量工作。

全书由哈尔滨工业大学工业电气自动化教研室赵昌颖副教授

#### Ⅳ

审阅。赵副教授认真细致反复地看了本书原稿，并提出了宝贵的修改意见，谨致以衷心的感谢。

在编写过程中，编者参考了清华大学、西安交通大学、华中工学院、哈尔滨电工学院等兄弟院校的自编教材及讲义与兄弟单位的有关资料，特此向热情提供讲义及资料的院校及单位表示感谢。

由于编写时间仓促，收集资料不够充分，书中一定会有缺点与错误，殷切希望读者批评指正。

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第六章 三相异步电动机的机械特性及各种运转状态      | 1   |
| § 6-1 三相异步电动机机械特性的三种表达式      | 1   |
| § 6-2 三相异步电动机的固有特性与人为特性      | 9   |
| § 6-3 三相异步电动机的各种运转状态         | 14  |
| § 6-4 根据异步电动机的技术数据计算异步电动机的参数 | 34  |
| § 6-5 绕线转子异步电动机调速及制动电阻的计算    | 39  |
| 小结                           | 46  |
| 习题                           | 48  |
| 第七章 三相异步电动机的起动及起动设备的计算       | 50  |
| § 7-1 三相异步电动机的起动方法           | 50  |
| § 7-2 改善起动性能的三相异步电动机         | 62  |
| § 7-3 三相笼型转子异步电动机起动设备的计算     | 64  |
| § 7-4 三相绕线转子异步电动机起动电阻的计算     | 83  |
| § 7-5 三相异步电动机的起动过程           | 92  |
| § 7-6 三相异步电动机过渡过程的能量损耗       | 97  |
| 小结                           | 101 |
| 习题                           | 103 |
| 第八章 三相异步电动机的调速               | 107 |
| § 8-1 变极调速                   | 107 |
| § 8-2 变频调速                   | 111 |
| § 8-3 改变转差率调速                | 114 |
| 小结                           | 134 |
| 第九章 其他交流电动机                  | 136 |
| § 9-1 单相异步电动机                | 136 |
| § 9-2 同步电动机                  | 145 |
| § 9-3 转子供电式三相并励交流换向器电动机      | 166 |

## V

|                     |     |
|---------------------|-----|
| § 9-4 无换向器电动机 ..... | 174 |
| § 9-5 直线异步电动机 ..... | 185 |
| 小结 .....            | 190 |
| 习题 .....            | 192 |

## 第四篇 控制电机

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第十章 控制电机 .....             | 194 |
| § 10-1 伺服电动机 .....         | 195 |
| § 10-2 测速发电机 .....         | 205 |
| § 10-3 自整角机 .....          | 214 |
| § 10-4 旋转变压器 .....         | 221 |
| § 10-5 微型同步电动机和步进电动机 ..... | 230 |
| § 10-6 力矩电动机与低惯量电动机 .....  | 247 |
| 小结 .....                   | 251 |
| 习题 .....                   | 254 |

## 第五篇 多电动机拖动系统与拖动系统电机的选择

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 第十一章 多电动机拖动系统 .....                  | 256 |
| § 11-1 硬轴联接的双电动机拖动系统 .....           | 257 |
| § 11-2 同步旋转系统(电轴) .....              | 261 |
| 小结 .....                             | 277 |
| 习题 .....                             | 279 |
| 第十二章 电力拖动系统电机的选择 .....               | 281 |
| § 12-1 电机的发热和冷却及电机工作制的分类 .....       | 284 |
| § 12-2 连续工作制电动机的选择 .....             | 291 |
| § 12-3 短时工作制电动机的选择 .....             | 309 |
| § 12-4 断续周期性工作制电动机的选择 .....          | 313 |
| § 12-5 笼型转子异步电动机允许小时合闸次数的确定 .....    | 316 |
| § 12-6 带冲击负载时电动机的选择 .....            | 319 |
| § 12-7 选择电动机功率的统计法或类比法 .....         | 324 |
| § 12-8 电动机电流种类、型式、额定电压与额定转速的选择 ..... | 325 |
| 小结 .....                             | 329 |
| 习题 .....                             | 331 |

## 第六章 三相异步电动机的机械特性及各种运转状态

### 内 容 提 要

本章主要研究三相异步电动机的机械特性及在各种运转状态下机械特性的计算。在§6-1及§6-2中着重介绍机械特性三种表达式的建立，固有与人为特性的分析及绘制方法；在§6-3中进一步分析三相异步电动机各种运转状态的物理概念，实用条件及其四象限的固有与人为特性；§6-4中介绍异步电动机参数的工程计算方法；最后在§6-5中通过实例介绍异步电动机调速与制动电阻的计算方法。

### §6-1 三相异步电动机机械特性的三种表达式

与直流电动机相同，三相异步电动机的机械特性也是指其转速与转矩间的关系  $n = f(M)$ 。其表达式可有三种形式，现分别介绍如下。

#### 一、物理表达式

在本书上册中已推导出三相异步电动机转矩公式的下列形式

$$M = C_{MJ} \Phi_m I_2' \cos \varphi_2' \quad (6-1)$$

式中  $C_{MJ}$ ——异步机的转矩系数；

$$C_{MJ} = \frac{p \dot{m}_1 W_1 k_{w1}}{\sqrt{2}} \quad (6-2)$$

$\Phi_m$ ——异步机每极磁通；

$I_2'$ ——转子电流的折算值；



$$I_2' = \frac{E_2'}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_2'^2}} \quad (6-3)$$

$\cos\varphi_2'$ ——转子电路的功率因数;

$$\cos\varphi_2' = \frac{r_2'/s}{\sqrt{(r_2'/s)^2 + x_2'^2}} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_2'^2 + s^2 x_2'^2}} = \cos\varphi_2 \quad (6-4)$$

由式(6-4)可见,  $\varphi_2' = \varphi_2$ , 因此在本书中  $\varphi_2$  与  $\varphi_2'$  是通用的。

按式(6-3)及(6-4), 并考虑到  $n = n_0(1-s)$ , 在图6-1上绘出  $n = f(I_2')$  及  $n = f(\cos\varphi_2')$  两条曲线。由式(6-3)可见, 当  $n = n_0 (s = 0)$  时,  $\frac{r_2'}{s} = \infty$ , 故  $I_2' = 0$ ; 随着  $n$  从  $n_0$  减小 ( $s$  由零渐增时), 当  $s$  较小时  $\frac{r_2'}{s} \gg x_2'$ ,  $x_2'$  可忽略,  $I_2'$  最初与  $s$  成正比地增加; 到  $s$  较大时,

$\frac{r_2'}{s}$  相对变小,  $x_2'$  即不能忽略, 且

逐渐成为式(6-3)中分母的主要部分, 此时随着  $n$  的继续减小 (即  $s$  的继续上升),  $I_2'$  增加缓慢。因此,  $n = f(I_2')$  即呈图6-1中的形状。

同时, 由式(6-4)可见,  $n = n_0$  (即  $s = 0$  时),  $\cos\varphi_2' = 1$ ; 随着  $n$  的逐步下降 (即  $s$  的逐步增大),  $\cos\varphi_2'$  将逐步下降。  $n = f(\cos\varphi_2')$  即绘出如图6-1上的形状。

在图6-1上, 当不同的  $n$  值时, 将上述两条曲线相乘, 并乘以常数  $C_{Mj}\Phi_m$ , 即得  $n = f(M)$  的曲线, 称为异步电动机的机械特性。由机械特性曲线可见, 曲线  $n = f(M)$  的形状与  $n = f(I_2')$  不同, 两者不成正比。当  $n = 0 (s = 1)$  时, 虽然  $I_2'$  较

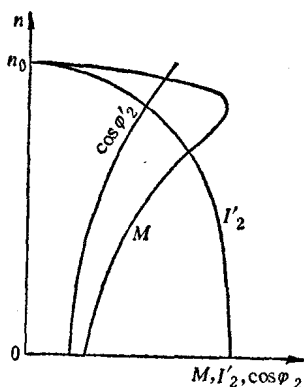


图6-1 在不同  $n$  值时由  $I_2'$  及  $\cos\varphi_2'$  的乘积求  $M$

大, 但由于  $\cos\varphi'_2$  较小, 使与两者乘积成正比的  $M$  值不大。但当  $n$  由  $n_0$  逐渐减小时,  $I'_2$  增加较快,  $\cos\varphi'_2$  的数值较大, 使  $M$  值增加较快。这样, 在  $n$  从零到  $n_0$  之间, 转矩  $M$  出现一个最大值, 称为异步机的最大转矩  $M_m$ 。

式 (6-1) 称为异步电动机的机械特性的第一种表达式, 它反映了不同转速时  $M$  与  $\Phi_m$  及转子电流的有功分量  $I'_2\cos\varphi'_2$  间的关系。在物理上, 这三个量的方向又必须遵循左手定则, 三者互相垂直, 因此这一表达式又称为物理表达式。它在形式上与直流电动机的转矩表达式  $M=C_M\Phi I_a$  相似, 用以在物理上分析异步电动机在各种运转状态下转矩  $M$  与磁通  $\Phi_m$  及转子电流的有功分量  $I'_2\cos\varphi'_2$  间的方向关系较为方便。

## 二、参数表达式

上述物理表达式不能直接反映异步电动机转矩与电机一些参数 (如定子相电压  $U_x$ ,  $s$ ,  $r_1$ ,  $r'_2$ ,  $x_1$ ,  $x'_2$ , 定子相数  $m_1$ , 转子同步机械角速度  $\Omega_0$  等) 间的关系, 为此必须进一步推导出机械特性的参数表达式。参数表达式可直接由物理表达式 (6-1) 推导出来:

将式 (6-2) 代入式 (6-1), 并考虑到

$$E'_2 = \sqrt{2} \pi f_1 W_1 k_{w1} \Phi_m \quad (6-5)$$

$$\Omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (6-6)$$

可得

$$M = \frac{m_1}{\Omega_0} E'_2 I'_2 \cos\varphi'_2 \quad (6-7)$$

由于

$$E'_2 = I'_2 Z'_2 \quad (6-8)$$

$$\cos\varphi'_2 = \frac{\frac{r'_2}{s}}{Z'_2} \quad (6-9)$$

则得

$$M = \frac{m_1}{\Omega_0} I_2'^2 \frac{r_2'}{s} \quad (6-10)$$

由于异步机的电磁功率  $P_M$  为

$$P_M = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} \quad (6-11)$$

式 (6-10) 即变为

$$M = \frac{P_M}{\Omega_0} \quad (6-12)$$

将式 (6-12) 分子分母同乘以  $(1-s)$ , 即得  $M$  与输出功率  $P_2$  及转子机械角速度  $\Omega$  间的关系:

$$M = \frac{P_2}{\Omega} \quad (6-13)$$

由异步电动机的近似等值电路, 得

$$I_2' = \frac{U_x}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s} + r_1\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (6-14)$$

将式 (6-14) 代入式 (6-10), 即得异步电动机的机械特性参数表达式:

$$M = \frac{m_1}{\Omega_0} \cdot \frac{U_x^2 \frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \quad (6-15)$$

按式 (6-15) 并考虑  $n = n_0(1-s)$  及  $\Omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}$ , 即可绘制异步电动机的机械特性如图 6-2。显然, 其形状与按物理表达式绘出的图 6-1 中的  $n = f(M)$  曲线是一样的。

机械特性方程式 (6-15) 为一二次方程式, 故在某一转差率  $s_m$  时, 转矩有一最大值  $M_m$ , 称为异步机的最大转矩。

在式 (6-15) 中, 使  $\frac{dM}{ds} = 0$ , 即可求得  $M_m$ 。当  $\frac{dM}{ds} = 0$

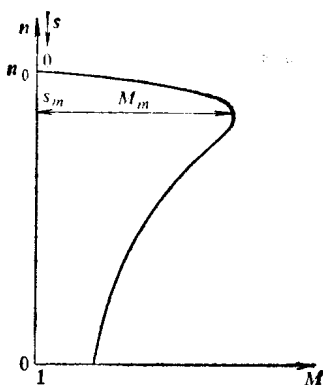


图6-2 异步电动机的机械特性

$$n = f(M)$$

时，可求出产生  $M_m$  时的转差率  $s_m$

$$s_m = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (6-16)$$

$s_m$  称为临界转差率。将式 (6-16) 代入式 (6-15)，可求得最大转矩  $M_m$  为

$$M_m = \pm \frac{m_1}{\Omega_0} \cdot \frac{U_2^2}{2[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]} \quad (6-17)$$

式中正号对应于电动机状态，而负号则适用于发电机状态。

通常  $r_1 \ll (x_1 + x_2')$ ，故式 (6-16) 及式 (6-17) 可近似变为

$$s_m \approx \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} \quad (6-18)$$

$$M_m \approx \pm \frac{m_1 U_2^2}{2\Omega_0 (x_1 + x_2')} \quad (6-19)$$

由式 (6-16)~(6-19) 可见：

(1) 当电机各参数及电源频率不变时， $M_m$  与  $U_2^2$  成正比， $s_m$  则保持不变，与  $U_2$  无关；

(2) 当电源频率及电压不变时， $s_m$  与  $M_m$  近似地与  $(x_1 + x_2')$  成反比；

(3)  $M_m$  与  $r'_2$  之值无关,  $s_m$  则与  $r'_2$  成正比。对于绕线转子异步电动机, 当转子电路串接某一恰当电阻  $R_0$  时, 可使  $s_m = 1$  (相当于  $n = 0$ ), 即起动时转矩达最大值  $M_m$ 。显然, 此时转子电路总电阻为

$$r'_2 + R_0 = \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}$$

由此可求出

$$R_0 = \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} - r'_2 \quad (6-20)$$

$M_m$  是异步电动机可能产生的最大转矩。如果负载转矩  $M_L > M_m$ , 电动机将因承担不了而停转。为保证电动机不会因短时过载而停转, 电动机必须具有一定的过载倍数  $\lambda_M$ :

$$\lambda_M = \frac{M_m}{M_e} \quad (6-21)$$

一般异步电动机的  $\lambda_M \approx 1.6 \sim 2.2$ , 对于起重冶金机械用的电动机, 其  $\lambda_M$  可达  $2.2 \sim 2.8$ 。 $\lambda_M$  是异步电动机很重要的参数, 它反映了电动机短时过载的极限。

除了  $M_m$  外, 异步机还有另一重要参数, 即起动转矩  $M_0$ , 它是异步机接至电源开始起动时的电磁转矩, 此时  $s = 1$  ( $n = 0$ ), 代入式 (6-15), 得

$$M_0 = \frac{m_1}{\Omega_0} \cdot \frac{U_1^2 r'_2}{(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \quad (6-22)$$

由上式可见, 对于绕线转子异步电动机, 转子电路串接附加电阻 (即加大  $r'_2$ ), 即能改变  $M_0$ , 从而可改善起动特性。

对于笼型转子异步电动机, 则  $M_0$  不能用转子电路串接电阻的方法改变。此时  $M_0$  与  $M_e$  的比值称为起动转矩倍数  $K_M$ , 即

$$K_M = \frac{M_0}{M_e} \quad (6-23)$$

$K_M$  是笼型转子异步电动机的一个参数, 它反映了电动机的起动能力。对于某一型号的笼型转子异步电动机, 其  $K_M$  的数值可由产品目录中查到。

显然，当  $M_0 > M_*$  时，电机才能起动起来。在额定负载下，只有  $K_M > 1$  的笼型转子异步电动机才能起动。

### 三、实用表达式

上述参数表达式，对于分析  $M$  与电机参数间的关系，进行某些理论分析，是非常有用的。但是，由于在电机产品目录中，定子及转子的参数  $r_1$ ,  $x_1$ ,  $r_2'$  及  $x_2'$  等是查不到的，因此，用参数表达式以绘制机械特性或进行分析计算是很不方便的，为此，必须导出较为实用的表达式。

将式 (6-17) 除式 (6-15) 并考虑式 (6-16)，化简后得

$$M = \frac{2M_m \left( 1 + s_m \frac{r_1}{r_2'} \right)}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + 2s_m \frac{r_1}{r_2'}} \quad (6-24)$$

如忽略  $r_1$ ，得

$$M = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (6-25)$$

式 (6-25) 中的  $M_m$  及  $s_m$  可由电动机产品目录中查得的数据求得，故较为实用，称为实用表达式。现介绍求  $M_m$  及  $s_m$  的方法如下：

由式 (6-21) 可得

$$M_m = \lambda_M M_e \quad (6-26)$$

式中

$$M_e = 9550 \frac{P_e}{n_e} \quad (6-27)$$

式 (6-26) 及 (6-27) 中的  $\lambda_M$ ,  $P_e$  (千瓦)，及  $n_e$  (转/分) 均可由产品目录查得，从而可求得  $M_m$  (牛·米)。

$s_m$  可用下式求得：

$$s_m = s_e (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) \quad (6-28)$$

式中  $s_e$  —— 额定转差率

$$s_e = \frac{n_0 - n_e}{n_0} \quad (6-29)$$

式 (6-28) 可导出如下:

在实用表达式 (6-25) 中, 当  $s = s_e$  时,  $M = M_e$ , 得

$$M_e = \frac{2M_m}{\frac{s_e}{s_m} + \frac{s_m}{s_e}} \quad (6-30)$$

对上式中的  $s_m$  进行求介, 考虑到  $M_m = \lambda_M M_e$ , 即可求得式 (6-28) 了。

这样在实用表达式中, 在按产品目录求出  $M_m$  及  $s_m$  后, 只剩下  $M$  与  $s$  两个未知数了。如欲绘制异步机的机械特性, 只要给定一系列的  $s$  值, 按实用表达式 (6-25) 求出相应的  $M$  值, 即可绘出  $n = f(M)$  曲线。同样, 利用式 (6-25), 还可进行机械特性的其他计算, 其应用极为广泛。

当电动机在额定负载以下运行时, 转差率  $s$  很小, 则  $\frac{s}{s_m} \ll \frac{s_m}{s}$ , 在式 (6-25) 中, 如进一步忽略  $\frac{s}{s_m}$ , 则得

$$M = \frac{2M_m}{s_m} s \quad (6-31)$$

由式 (6-31) 可见,  $M_m$  与  $s_m$  已知, 当  $s < s_e$  时,  $M$  与  $s$  成正比, 机械特性是一条直线。式 (6-31) 称为机械特性的近似计算公式, 应用这个公式时,  $s_m$  可按下列式计算:

$$s_m = 2\lambda_M s_e \quad (6-32)$$

上式可用  $s = s_e$ ,  $M = M_e$  代入式 (6-31) 求得。

异步机的机械特性可视为由两部分组成: 当负载转矩  $M < M_e$  时, 机械特性近似为直线, 称为机械特性的直线部分, 又可称为工作部分, 因电动机不论带动何种负载均能稳定运行; 当  $s \geq s_m$  时, 机械特性为一曲线, 称为机械特性的曲线部分, 有时又称之为非工作部分。但所谓非工作部分是仅对恒转矩负载或恒功率负载而言的, 因为电动机这一特性段与这类负载转矩特性的配合,

使电力拖动系统不能稳定运行，而对于通风机负载，则在这一特性段上系统却能稳定工作（请读者参照上册所述方法，自行分析）。由于没有普遍意义，因此应用“非工作部分”的名称是不确切的。

前述异步电动机机械特性的三种表达式，其应用场合各有不同。一般物理表达式适用于定性分析  $M$  与  $\Phi_m$  及  $I_2 \cos \varphi_2'$  间的关系；参数表达式可用以分析各参数变化对电机运行性能的影响；实用表达式最适于用以进行机械特性的工程计算。

## § 6-2 三相异步电动机的固有特性与人为特性

### √一、固有特性

固有特性是指异步电动机工作在额定电压及额定频率下，电动机按规定的接线方法接线，定子及转子电路中不外接电阻（电抗或电容）时所获得的机械特性曲线  $n = f(M)$ 。

三相异步电动机的固有特性绘出如图 6-3。为了描述机械特

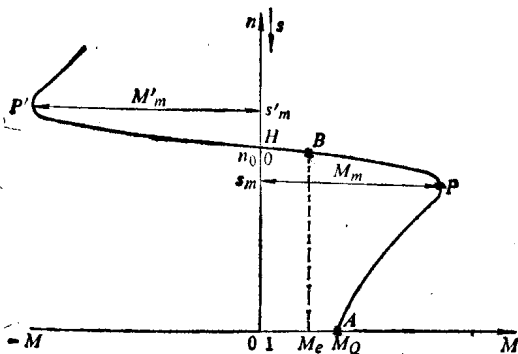


图6-3 异步电动机的固有特性

性的特点，下面着重研究几个反映电机工作的特殊运行点：

(1) 起动点  $A$ ：其特点是： $n = 0$  ( $s = 1$ )； $M = M_0$  ( $M_0$  为起动转矩)；起动电流  $I_{10} = (4 \sim 7) I_{1e}$ 。



(2) 额定工作点  $B$ : 其特点是:  $n = n_r$  ( $s = s_r$ );  $M = M_r$ ,  $I_1 = I_{1r}$ 。

(3) 同步速点  $H$ : 其特点是:  $n = n_0$  ( $s = 0$ );  $M = 0$ ;  $I_2 = 0$ ,  $I_1 = I_{10}$ 。  $H$  点是电动状态与回馈制动状态的转折点。

(4) 最大转矩点:

(a) 电动状态最大转矩点  $P$ : 其特点是:  $M = M_m$ ,  $s = s_m$  [式 (6-16) 及式 (6-17) 中带正号时]。

(b) 回馈制动最大转矩点  $P'$ : 其特点是:  $M = M'_m$ ,  $s = s'_m$  (均为负值)。这对应于式 (6-16) 及式 (6-17) 中带负号时。由两式可见:

$$|s'_m| = |s_m| \quad (6-33)$$

$$|M'_m| > |M_m| \quad (6-34)$$

由式 (6-34) 可见, 在回馈制动时异步机的过载能力较电动状态时大, 只有当忽略  $r_1$  时, 两者才相等。

## 二、人为特性

由异步电动机的机械特性参数表达式可见: 异步机电磁转矩  $M$  的数值是由某一转速  $n$  (或  $s$ ) 下的电源电压  $U_x$ , 电流频率  $f_1$ , 定子极对数  $p$ , 定子及转子电路的电阻及电抗  $r_1, r'_2, x_1, x'_2$  决定的。因此人为地改变这些参数, 就可得到不同的人为特性。现介绍改变某些参数时的人为特性如下:

### (一) 降低 $U_x$

当供电电网电压降低时, 由式 (6-16), (6-17) 及 (6-22) 可见: 最大转矩  $M_m$  及起动转矩  $M_0$  与  $U_x^2$  成正比地降低;  $s_m$  与  $U_x$  的降低无关 (即保持不变); 由于同步转速  $n_0 = \frac{60f_1}{p}$ , 因此  $n_0$  也保持不变 (其值与  $U_x$  无关)。

降低  $U_x$  的人为特性, 可在固有特性的基础上绘制, 在不同的转速 (或转差率) 处, 固有特性上的转矩值乘以电压变化的百分数的平方, 即得人为特性上对应的转矩值。