

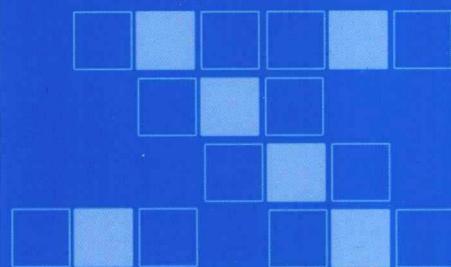
图  
册

# 变频器应用

变频器应用

BIANPINQI YINGYONG TUCE

● 张燕宾 编著



本书以类似连环图画的方式，比较全面地介绍了三相交流异步电动机的基本原理和特性，交一直一交变频器的原理和构成，变频器的控制方式和常用功能，变频拖动系统的控制要点及其在各类负载中的应用，变频调速的节能技术以及变频器的安装与维修等。

本书对变频器内部比较典型的常见控制电路进行了介绍，对变频器应用中较复杂的问题用深入浅出的方式进行了分析，有助于维修人员提高维修技巧。

本书的主要读者对象是工矿企业的电气工程师，本书也可作为技校、中专和高等职业学校师生的教学参考书。

### 图书在版编目（CIP）数据

变频器应用图册/张燕宾编著. —北京：机械工业出版社，2010.9

ISBN 978-7-111-31948-1

I. ①变… II. ①张… III. ①变频器-图解 IV. ①TN77-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 182465 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：林春泉 责任编辑：赵任 版式设计：张世琴

责任校对：李婷 封面设计：赵颖喆 责任印制：乔宇

北京汇林印务有限公司印刷

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·11.25 印张·276 千字

0001—4000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-31948-1

定价：29.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

社服务中心：(010) 88361066

销售一部：(010) 68326294

销售二部：(010) 88379649

读者服务部：(010) 68993821

网络服务

门户网：<http://www.cmpbook.com>

教材网：<http://www cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

# 前　　言

自 1989 年起，我开始应邀为一些学习班主讲《变频器应用技术》。开始时一年数次，后来发展到每月一次。算起来，总共已在百次以上了。自从笔记本电脑和投影仪普及以来，讲课已不必站在讲台上写粉笔字，而只需要拿着鼠标在电脑上来回点击就可以了。从那时起，我就把讲课内容构思成许许多多的图片，讲课时犹如讲解连环图画一般，我讲得方便，学员们听得也轻松。当然，要将这件事做得比较完美，也绝非易事。我每次讲完课后，总要根据自己的心得和学员们的反映来修改讲稿。于是就有学员提出，能不能直接拿讲稿出一本书。在经过无数次的反复修改之后，我也觉得有点“修炼成正果”的意思了。这就是本书的由来。

学习班的学员们希望能多讲一点变频器维修方面的知识，而我苦于自己没有修理变频器的经验，难于满足学员们的要求。几个月前，我买到了咸庆信先生写的《变频器电路维修与故障实例分析》一书，觉得非常之好，于是推荐给学员们。始料未及的是，有一些学员打电话给我，说这本书的确好，但要完全读懂也不容易，能不能把有关原理方面的基础知识也用图解的方式表示出来，让阅读者能比较轻松地看明白。我尝试着做了，并大胆地补充进我的讲课内容里，竟颇受欢迎。这给了我启发：图解是帮助读者入门的好方法。

在我原打算歇脚的老黄牛面前，仿佛又展现出了一条新路，令我兴奋，情不自禁地又迈起步来。

作　　者  
2010 年 8 月

# 目 录

## 前言

### 第1章 认识三相交流异步电动机 ..... 1

- 1.1 三相交流异步电动机 ..... 1
- 1.2 三相交流异步电动机的旋转原理 ..... 3
- 1.3 异步电动机的能量转换 ..... 4
- 1.4 三相交流异步电动机的铭牌 ..... 8
- 1.5 异步电动机的机械特性 ..... 10
- 1.6 异步电动机的起动 ..... 14
- 1.7 异步电动机的制动 ..... 17

### 第2章 认识交—直—交变频器 ..... 19

- 2.1 交—直—交变频器 ..... 19
- 2.2 变频与变压 ..... 22
- 2.3 载波频率及其影响 ..... 26
- 2.4 变频器的主电路 ..... 28
- 2.5 变频器的输入、输出电流 ..... 30
- 2.6 变频器运行数据的测量 ..... 34
- 2.7 变频器的抗干扰 ..... 37

### 第3章 变频器的控制方式 ..... 41

- 3.1 异步电动机变频后的人工机械特性 ..... 41
- 3.2 增大临界转矩的对策——V/F 控制  
方式 ..... 42
- 3.3 增大临界转矩的对策——矢量控制  
方式 ..... 50
- 3.4 增大临界转矩的对策——直接转矩  
控制方式 ..... 53
- 3.5 变频调速的有效转矩线 ..... 54
- 3.6 变频拖动系统的传动机构 ..... 56

### 第4章 变频器的常用功能 ..... 63

- 4.1 模拟量频率给定 ..... 63
- 4.2 频率的限制功能 ..... 66

- 4.3 变频调速系统的加速与起动 ..... 68

- 4.4 变频调速系统的减速与停机 ..... 70

- 4.5 加、减速功能的预置 ..... 76

### 第5章 变频拖动系统的控制 ..... 81

- 5.1 变频器的外接主电路 ..... 81
- 5.2 变频器的输入控制端 ..... 83
- 5.3 变频器的输出控制端 ..... 89
- 5.4 多单元同步控制 ..... 91
- 5.5 变频与工频的切换控制 ..... 93
- 5.6 变频调速的程序控制 ..... 96
- 5.7 变频器的闭环控制 ..... 98

### 第6章 变频器在各类负载中的应用 ..... 107

- 6.1 带式输煤机的变频调速 ..... 107
- 6.2 提升机的变频调速 ..... 110
- 6.3 卷绕机械的变频调速 ..... 114
- 6.4 车床的变频调速 ..... 118
- 6.5 风机、水泵的变频调速 ..... 121

### 第7章 变频调速的节能技术 ..... 126

- 7.1 减少浪费 ..... 126
- 7.2 大马拉小车的节能 ..... 128
- 7.3 释放能量的利用 ..... 133
- 7.4 变频调速最节能 ..... 135
- 7.5 供水系统的节能分析 ..... 138

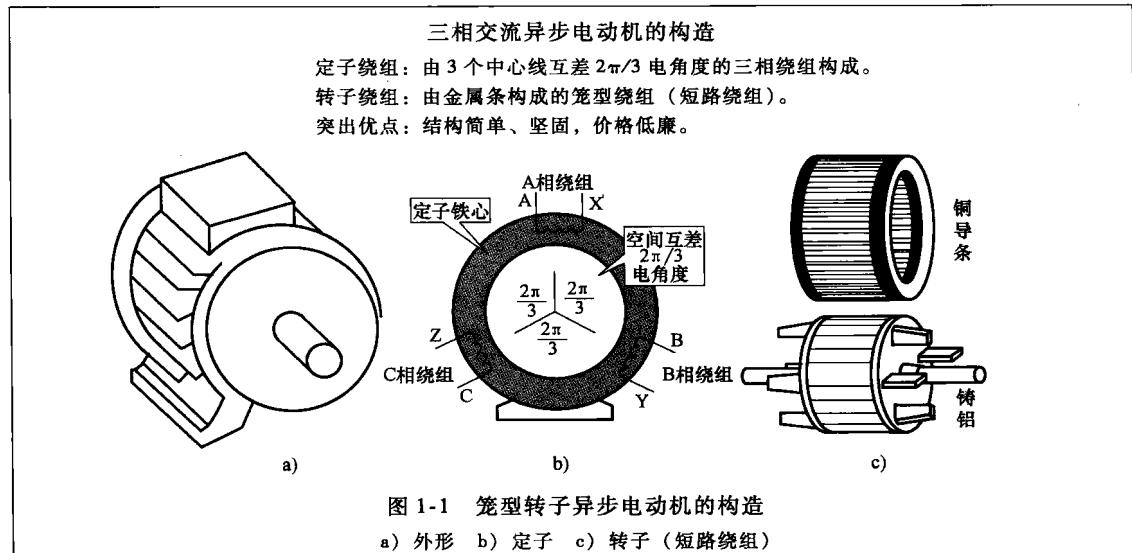
### 第8章 变频器的安装与维护 ..... 144

- 8.1 变频器的安装要点 ..... 144
- 8.2 变频器的接线要点 ..... 146
- 8.3 变频器主电路的测试 ..... 150
- 8.4 变频器的控制电源 ..... 157
- 8.5 变频器的保护 ..... 160
- 8.6 变频器的通电与试机 ..... 170

# 第1章 认识三相交流异步电动机

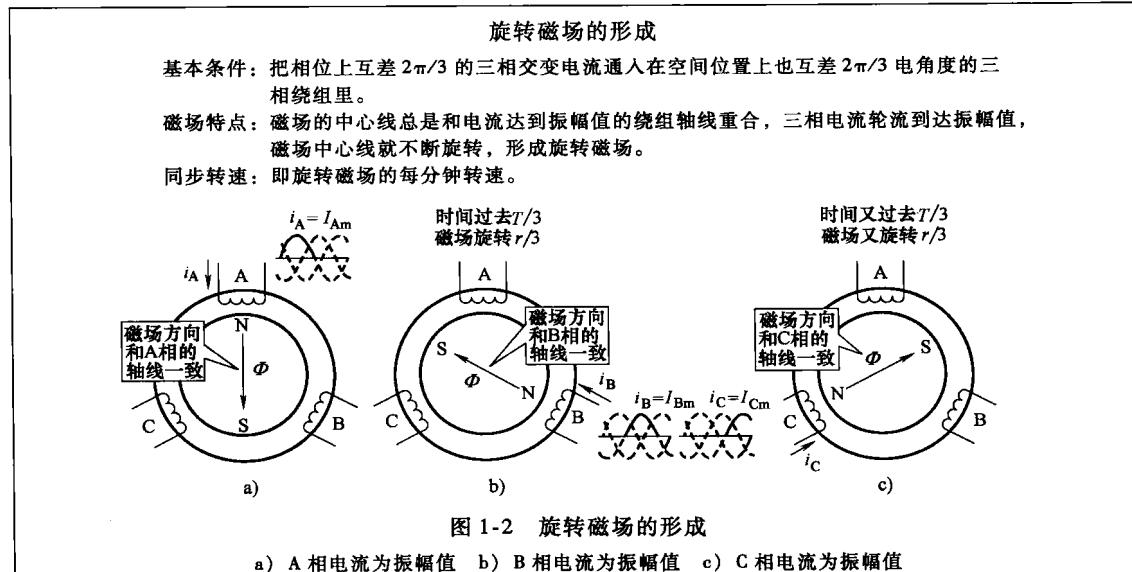
## 1.1 三相交流异步电动机

### 1.1.1 三相交流异步电动机的构造



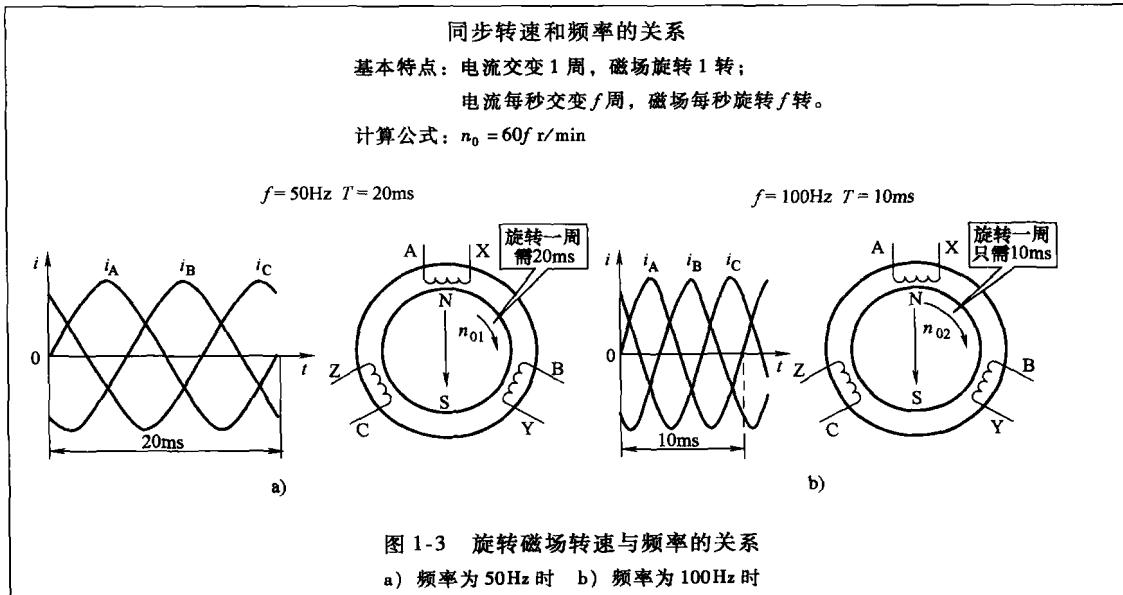
### 1.1.2 旋转磁场

#### 1. 旋转磁场的形成

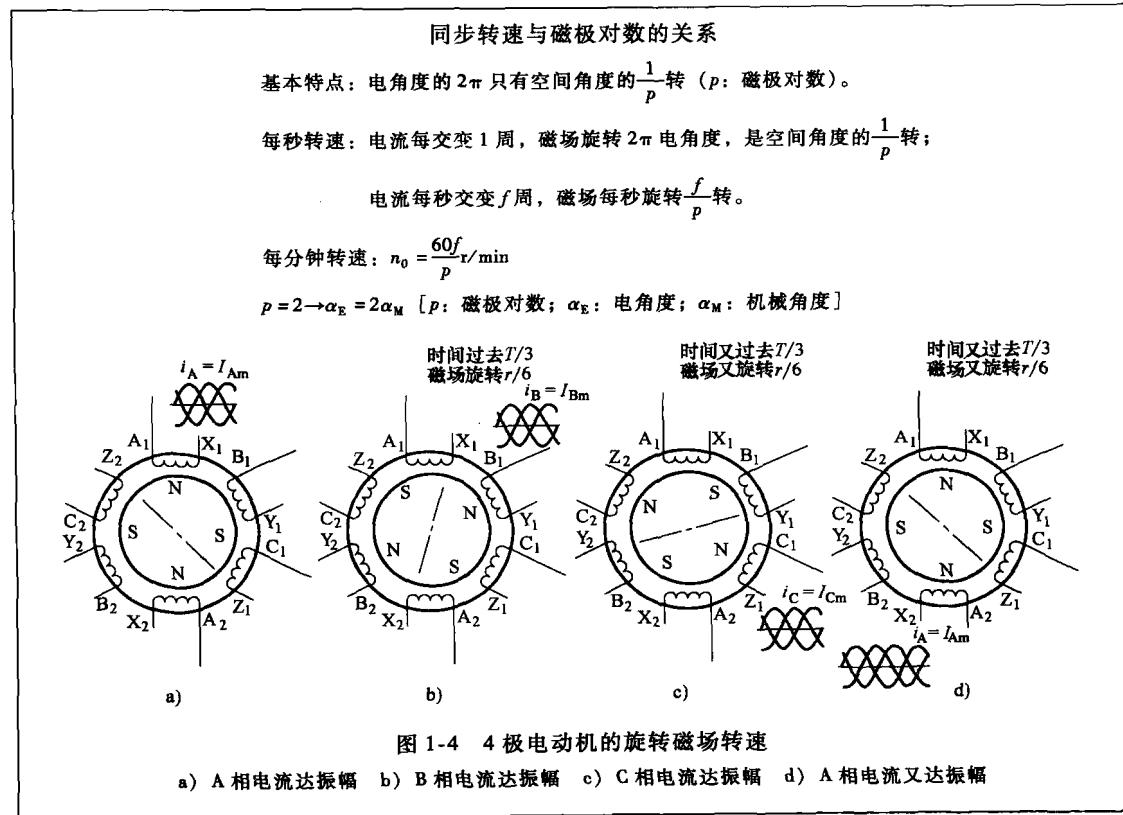


## 2. 旋转磁场的转速（同步转速）

### (1) 同步转速和频率的关系



### (2) 同步转速和磁极对数的关系



## 1.2 三相交流异步电动机的旋转原理

### 1.2.1 旋转原理

#### 异步电动机的旋转原理

转子电流：转子绕组因切割旋转磁场的磁力线而产生感应电动势，又因转子绕组是自成回路的，故有感应电流。

电磁转矩：转子绕组作为载流导体，要受到旋转磁场的作用力，并形成电磁转矩  $T_M$ ，使转子旋转。

电动机转速：因为产生转子电流的前提是转子绕组必须切割旋转磁场，所以转子的转速必小于同步转速： $n_M < n_0$ 。

转差：同步转速与转子转速之差： $\Delta n = n_0 - n_M$ 。

转差率：转差与同步转速之比： $s = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n_0 - n_M}{n_0}$ 。

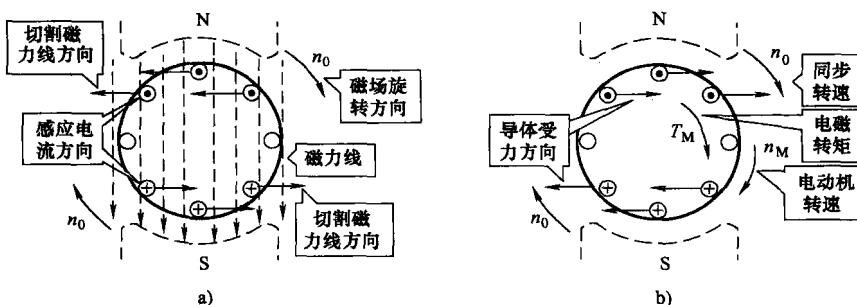


图 1-5 异步电动机旋转原理

a) 转子产生感应电流 b) 转子导体受力产生电磁转矩

### 1.2.2 异步电动机的转速、转差和转差率

表 1-1 三相交流异步电动机的转速、转差和转差率

磁极对数	磁极数	同步转速	电动机转速	转差	转差率	备注
$p$	$2p$	$n_0/(r/min)$	$n_M/(r/min)$	$\Delta n/(r/min)$	$s$	电动机容量/kW
1	2	3000	2900	100	0.033	5.5 ~ 7.5
			2930	70	0.023	11 ~ 18.5
			2940	60	0.020	22
			2950	50	0.017	30 ~ 37
			2970	30	0.01	45 ~ 160
2	4	1500	1420	80	0.053	2.2 ~ 3.0
			1440	60	0.040	4.0 ~ 7.5
			1460	40	0.027	11 ~ 15
			1470	30	0.02	18.5 ~ 30
			1480	20	0.013	37 ~ 315
3	6	1000	910	90	0.09	0.75 ~ 1.1
			940	60	0.06	1.5 ~ 2.2
			960	40	0.04	3 ~ 5.5
			970	30	0.03	7.5 ~ 30
			980	20	0.02	37 ~ 250

## 1.3 异步电动机的能量转换

### 1.3.1 吸收电功率的过程

#### 1. 吸收电功率的要点

##### 异步电动机输入电功率

能量的载体：三相定子绕组。

作功的主体：施加于定子绕组的三相交变电压，它要产生交变电流。

受体的反作用：定子绕组的自感电动势（反电动势），它要阻碍电流交变。

作功的标志：电路里有了电流。

讨论方法：因为三相电流是平衡的，故只需了解一相电流的规律即可。

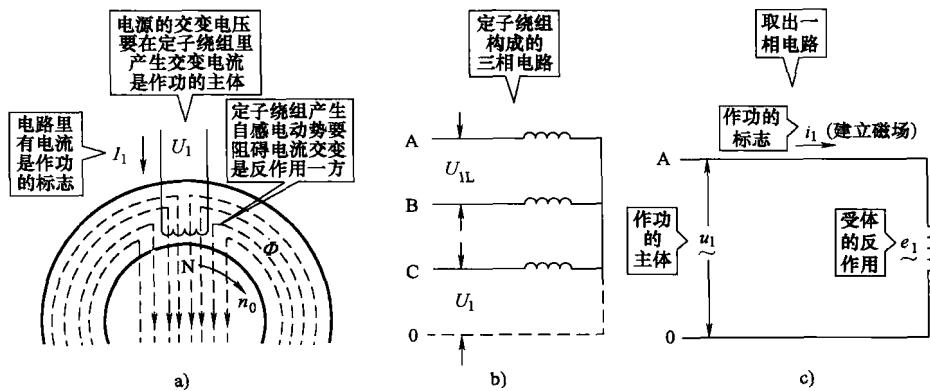


图 1-6 定子取用电功率的电路

a) 电动机输入电能 b) 定子三相电路 c) 取出一相电路

## 2. 电动机的反电动势（自感电动势）

### 反电动势的大小

瞬时值：感应电动势的瞬时值与磁通的变化率成正比。

有效值：与频率和磁通的乘积成正比。

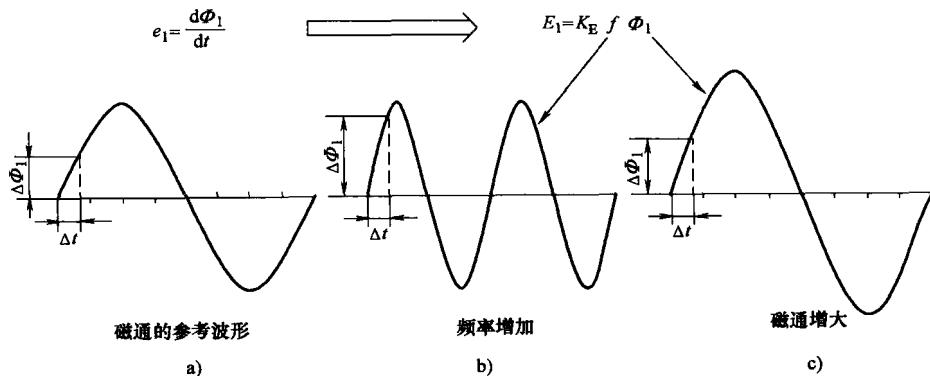


图 1-7 定子绕组的反电动势

a) 参考波形的磁通变化率 b) 频率增加后的磁通变化率 c) 磁通增大后的变化率

### 3. 定子的等效电路

#### 电动势平衡方程

主磁通：能够穿过空气隙，把能量传递给转子的磁通。定子绕组切割主磁通产生的自感电动势由反电动势  $E_1$  表示。

漏磁通：不能穿过空气隙，不传递能量的磁通。定子绕组切割漏磁通产生的自感电动势由漏磁电抗的压降  $I_1 X_1$  表示。

电动势平衡方程：电源电压除了要克服反电动势  $E_1$  外，还要克服电路的阻抗压降  $\Delta U_1$ 。

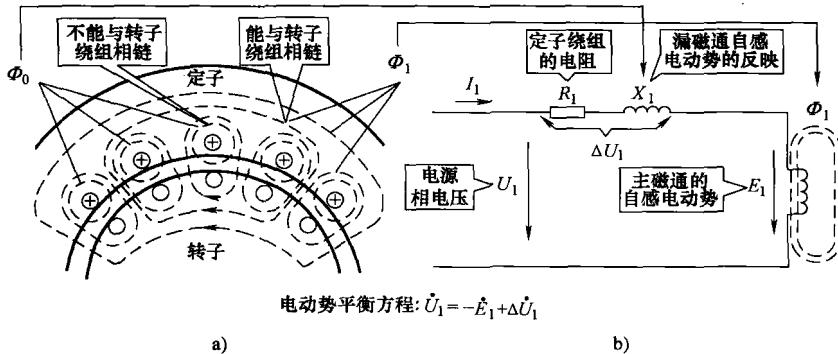


图 1-8 定子一相绕组的等效电路

a) 主磁通和漏磁通 b) 定子等效电路

### 1.3.2 能量的传递过程

#### 1. 能量的传递

#### 电动机的能量传递

输入功率：三相电功率  $\sqrt{3} U_L I_L \cos\phi_1$ 、 $3 U_1 I_1 \cos\phi_1$ 。

输出功率：轴上的机械功率  $\frac{T_M n_M}{9550}$ 。

传递功率：磁场功率，通常称为电磁功率  $P_M$ 。

损耗功率：主要是定、转子的铜损和铁损。

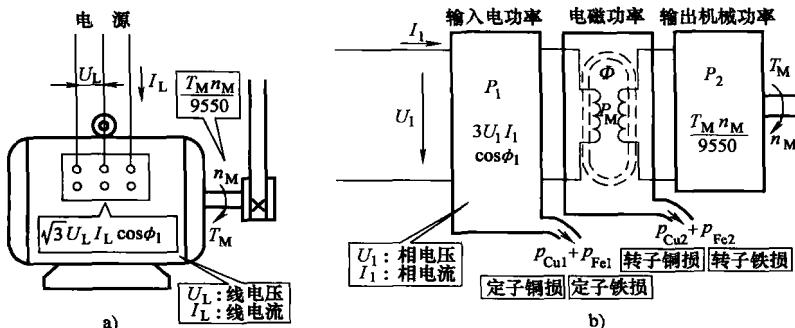


图 1-9 定、转子之间的能量传递

a) 能量传递靠磁通 b) 作功的过程

## 2. 转子的等效电路

### 转子的等效电路

第一步：用等效的三相绕组代替多相绕组。

要点：等效绕组的匝数与定子绕组相等。

第二步：用等效的静止电路代替旋转电路。

要点：负载等效电阻消耗的功率等于机械功率。

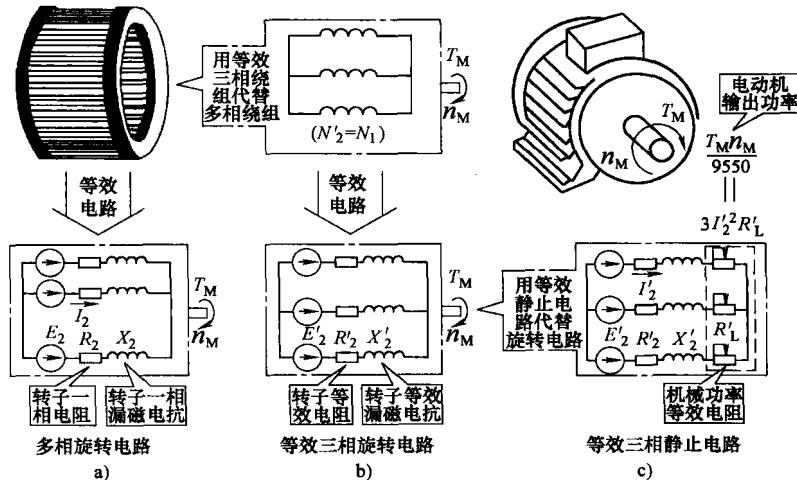


图 1-10 转子等效电路的演变

a) 转子绕组的电路 b) 等效三相旋转电路 c) 等效三相静止电路

## 3. 磁动势平衡方程

### 磁动势平衡方程

转子等效电路：电源：转子绕组切割旋转磁场产生的感应电动势；

负载：与机械负载等效的电阻。

$$\text{磁动势平衡方程: } \dot{I}_1 N_1 = -\dot{I}_2' N_1 + \dot{I}_0 N_1$$

$$\text{电流平衡方程: } \dot{I}_1 = -\dot{I}_2' + \dot{I}_0$$

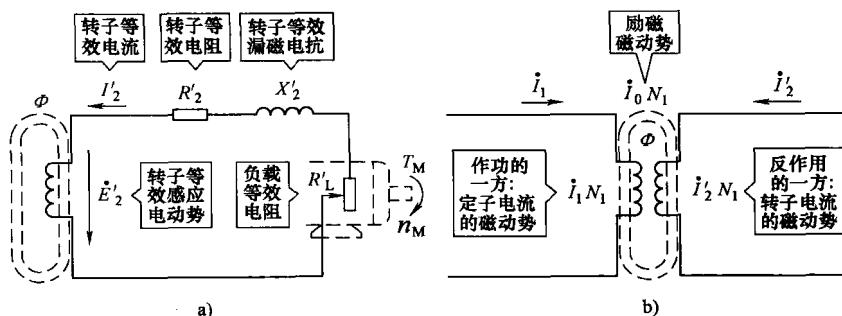


图 1-11 磁动势的平衡

a) 转子一相等效电路 b) 磁动势的平衡

### 1.3.3 异步电动机的等效电路

#### 1. 等效电路的得出

##### 异步电动机的等效电路

定子电路的输出侧：是定子绕组切割主磁通而得的反电动势  $E_1$ 。

转子电路的输入侧：是转子等效绕组切割主磁通的感应电动势  $E'_2$ 。

励磁支路：因为  $E_1$  和  $E'_2$  是两个匝数相同的绕组切割同一个磁通的结果，两者相等，所以，在电路中可以合而为一，成为“励磁支路”。励磁支路中的电流称为励磁电流  $I_0$ 。

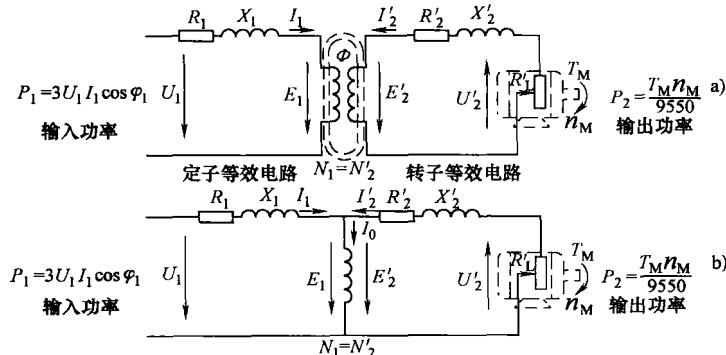


图 1-12 异步电动机的等效电路

a) 定、转子电路的耦合 b) 合并成单一的等效电路

#### 2. 等效电路的简化

##### 等效电路的简化

简化的方法：定、转子的漏磁电抗忽略不计，即

$$X_1 \approx 0, X'_2 \approx 0.$$

简化的结果：定子电流可以分解成两个互相垂直的分量：

励磁分量  $I_1$ ，用于产生磁通；

转矩分量  $I'_2$ ，即转子等效电流，用于产生电磁转矩。

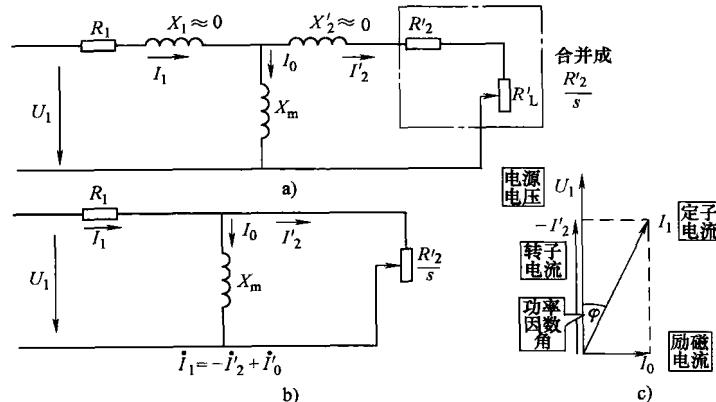


图 1-13 等效电路的简化

a) 简化的假设条件 b) 简化后的电路 c) 简化后的电流矢量图

### 3. 励磁电流和转矩电流

#### 励磁电流和转矩电流

励磁电流：用于产生磁通。励磁电流和磁通之间符合磁化曲线规律。

转矩电流：即转子的等效电流，和磁通相互作用，产生电磁转矩。

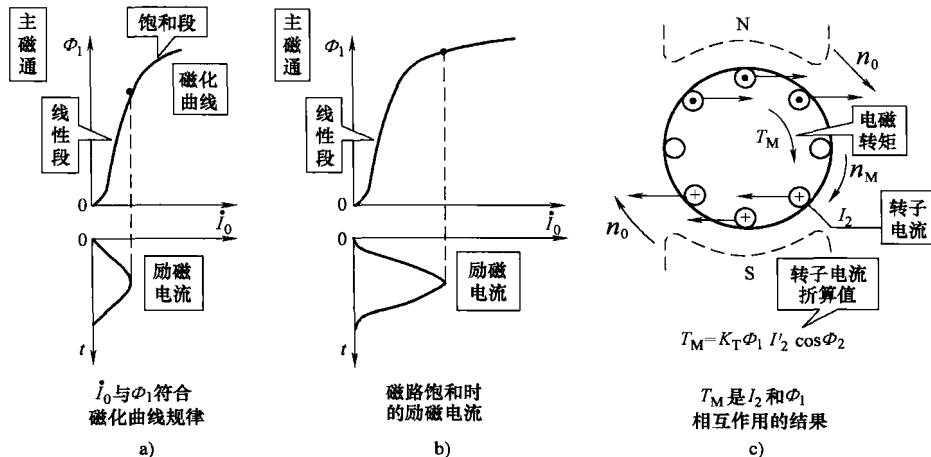


图 1-14 励磁电流和转矩电流

a) 磁化曲线 b) 磁路饱和时的励磁电流 c) 转矩电流的作用

## 1.4 三相交流异步电动机的铭牌

### 1.4.1 三相交流异步电动机的铭牌示例

#### 电动机铭牌的运行数据

额定容量：电动机轴上允许输出的最大功率。

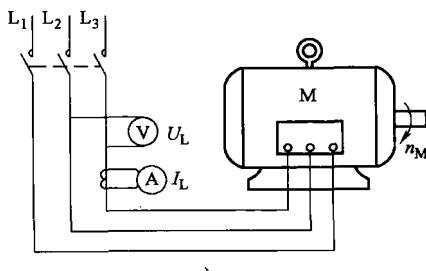
额定电压：与电动机适配的电源线电压。

额定电流：输出额定功率时的运行电流。

额定转速：电动机轴上带动额定负载时的转速。

额定效率：电动机运行在额定状态时的效率。

额定功率因数：电动机运行在额定状态时的功率因数。



型号: Y 280S-4	电压: 380V
容量: 75kW	电流: 139.7A
频率: 50Hz	转速: 1480r/min
效率: 0.93	功率因数: 0.88
接法: Δ	定额: 连续
绝缘等级: E	温升: 75°C
出厂日期: 2008年12月8日	

b)

图 1-15 异步电动机的铭牌

a) 异步电动机的接线 b) 电动机的铭牌

### 1.4.2 三相交流异步电动机的额定电压与电流

#### 电动机绕组的联结

Y联结：绕组的相电压等于线电压的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ，相电流等于线电流，用于小容量电动机。

$\Delta$ 联结：绕组的相电压等于线电压，相电流等于线电流的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ，用于大容量电动机。

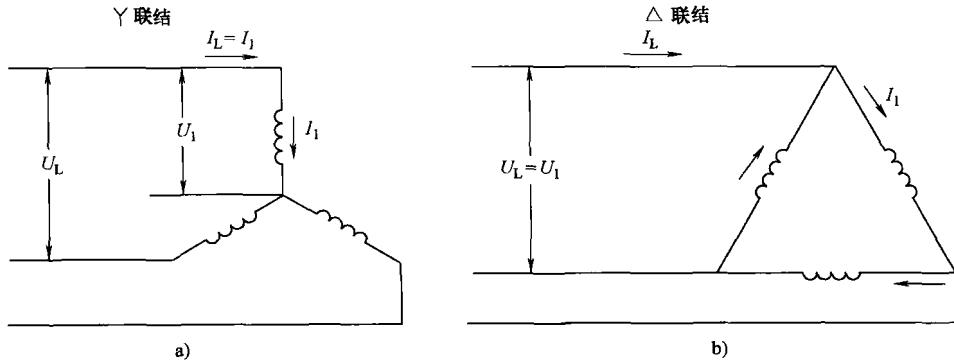


图 1-16 异步电动机的额定电压与电流

a) 当定子绕组为Y联结时 b) 当定子绕组为 $\Delta$ 联结时

### 1.4.3 三相交流异步电动机的额定温升与定额

#### 1. 温升曲线和散热曲线

##### 电动机的温升曲线

温升曲线：表明电动机在运行过程中，其温升按指数规律上升的曲线。它是电动机产生的热量和散发的热量相互平衡的结果。

稳定温升：当电动机产生的热量与散发的热量相等时，温度不再上升时的温升。

稳定温升的大小，与电动机运行电流的大小有关。

发热时间常数：假设电动机不散发热量时，达到稳定温升所需要的时间。或者说，是电动机的温升上升到稳定温升的 63% 所需要的时间。

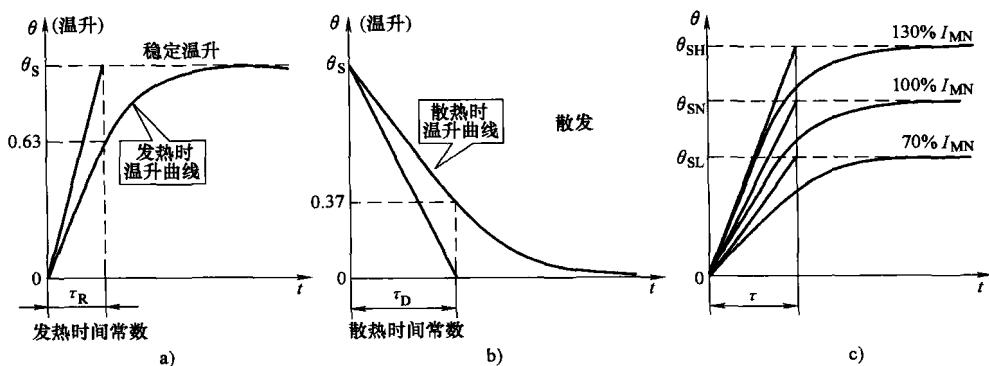


图 1-17 电动机的发热与散热

a) 电动机的温升曲线 b) 电动机的散热曲线 c) 温升曲线与电流的关系

## 2. 电动机的定额

### 电动机的定额

连续负载：连续不断地运行的负载，定额的描述为“连续”。连续负载中又分：

- 1) 连续不变负载：在运行过程中，负载轻重不变的负载；
- 2) 连续变动负载：在运行过程中，负载的轻重经常变化的负载。

断续负载：时而运行、时而停止的负载，定额由负载持续率  $FC$  来描述。

短时负载：运行时间短，在运行时间，温升达不到稳定温升；停止时间长，在停止时间，温升可以降为 0 的负载。其定额用运行时间  $t_0$  来描述。

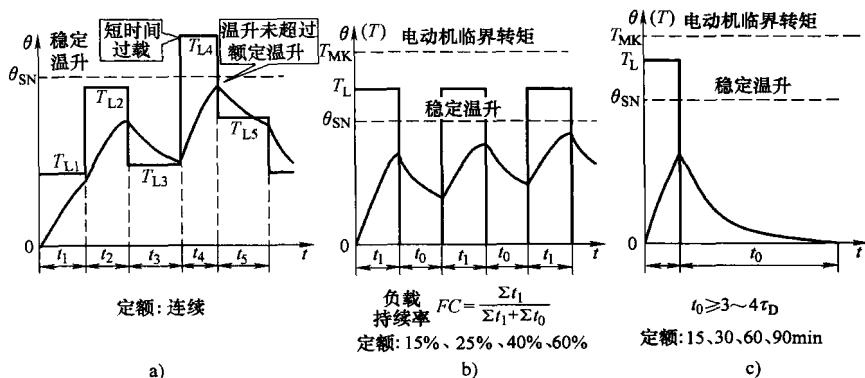


图 1-18 电动机的定额

a) 连续负载 b) 断续负载 c) 短时负载

## 1.5 异步电动机的机械特性

### 1.5.1 自然机械特性

#### 1. 自然机械特性的要点

##### 异步电动机的机械特性

机械特性：表明电动机产生的电磁转矩和转速之间关系的特性曲线。

自然机械特性：没有改变任何参数时的机械特性。

曲线的标志点：理想空载点、起动点、临界点。

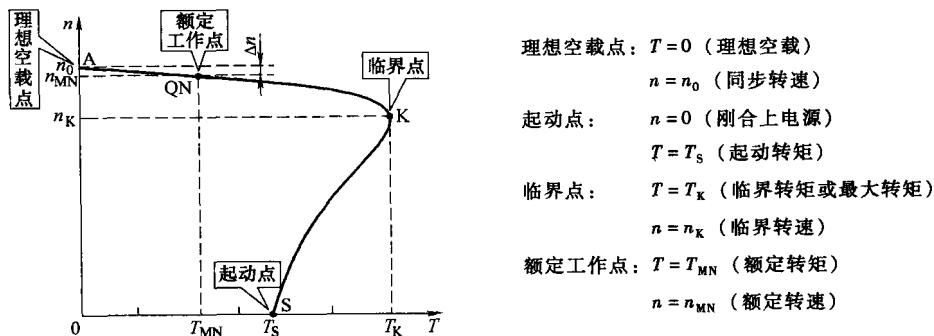


图 1-19 自然机械特性的要点

## 2. 机械特性说明的问题

### 自然机械特性说明的问题

从电动机侧看：转速下降，电磁转矩将增大。

从负载侧看：负载转矩增加，转速有所下降。

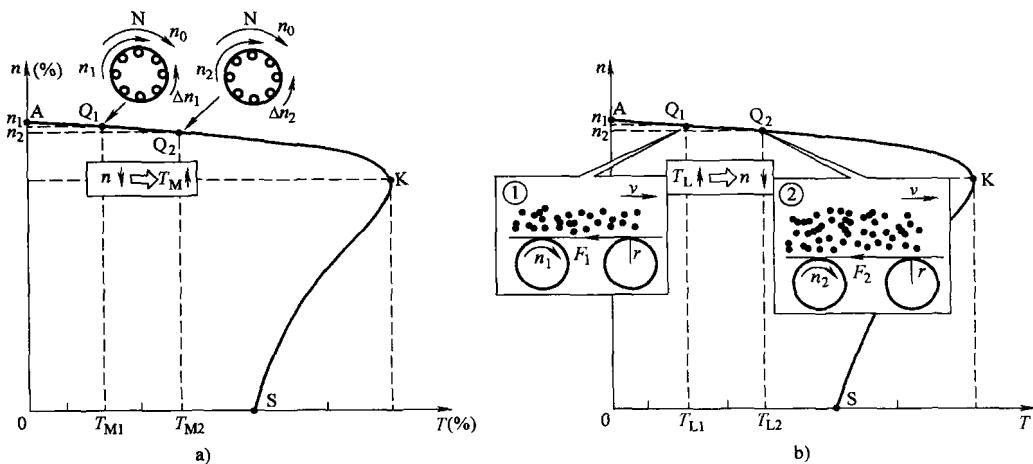


图 1-20 机械特性说明的问题

a) 从电动机的角度看 b) 从负载的角度看

## 3. 不同磁极数电动机的机械特性

### 额定转矩与磁极对数

基本关系：电动机的额定功率和额定转矩与额定转速的乘积成正比。

额定转矩：容量相同的电动机中，额定转速高者，额定转矩必小。

带载能力：电动机的带负载能力，主要看转矩。所以同容量电动机的带负载能力不尽相同，还要看额定转速的大小。

$$\because P_{MN} = \frac{T_{MN} n_{MN}}{9550}$$

$$\therefore T_{MN} = \frac{9550 P_{MN}}{n_{MN}}$$

假设： $P_{MN} = 75 \text{ kW}$

则：

$2p$	$n_{MN}/(\text{r}/\text{min})$	$T_{MN}/(\text{N} \cdot \text{m})$
2	2970	241
4	1480	484
6	980	731

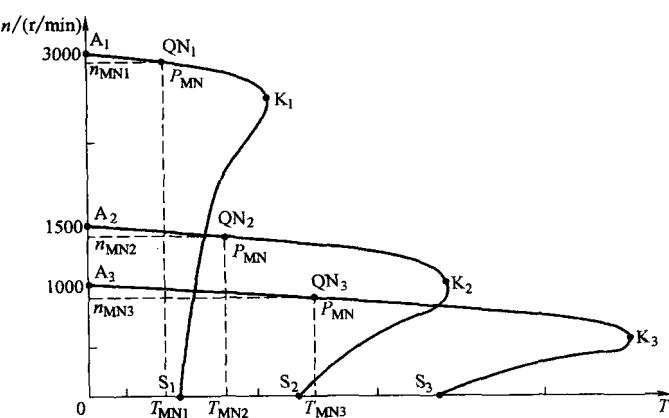


图 1-21 不同磁极数电动机的机械特性

#### 4. 对机械特性的评价

##### 机械特性的评价

硬机械特性：负载增加后，转速下降不多。

软机械特性：负载增加后，转速下降较多。

动态响应：负载增加后，转速复原的快慢。

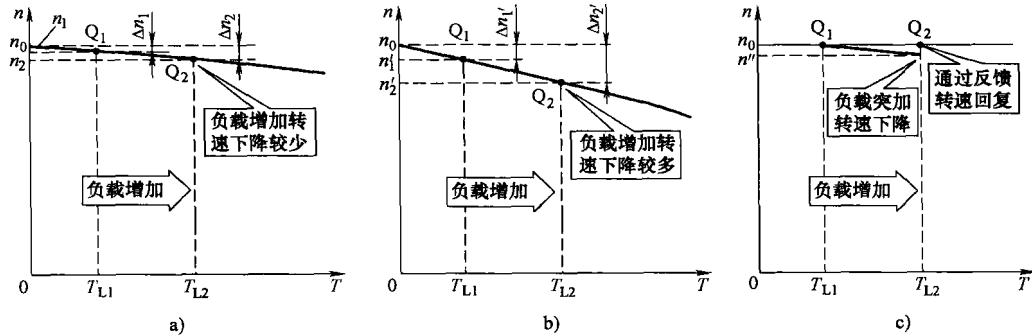


图 1-22 对机械特性的评价

a) 硬机械特性 b) 软机械特性 c) 动态响应能力

#### 1.5.2 异步电动机的人工机械特性

##### 1. 转子电路串入电阻的机械特性

##### 转子电路中串联电阻后的机械特性

理想空载点：不变。因为同步转速未变。

临界点：下移。即临界转矩的大小与串联电阻无关；临界转速随串联电阻的增大而下降。

起动点：右移。即起动转矩因串联电阻的增大而增大。

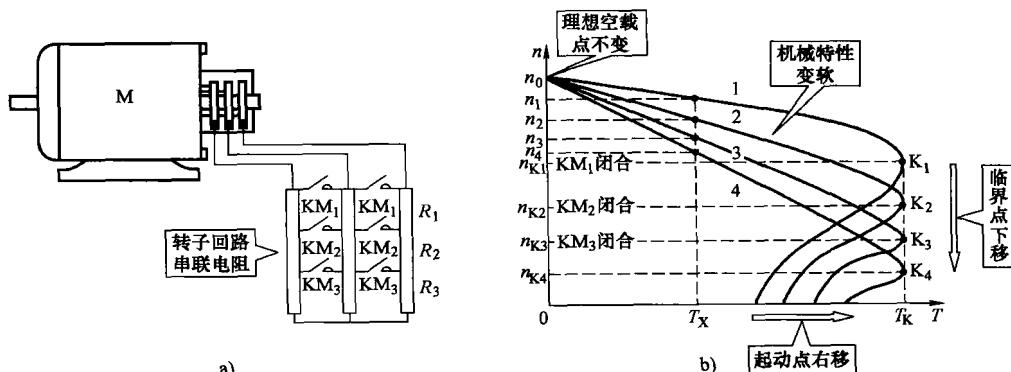


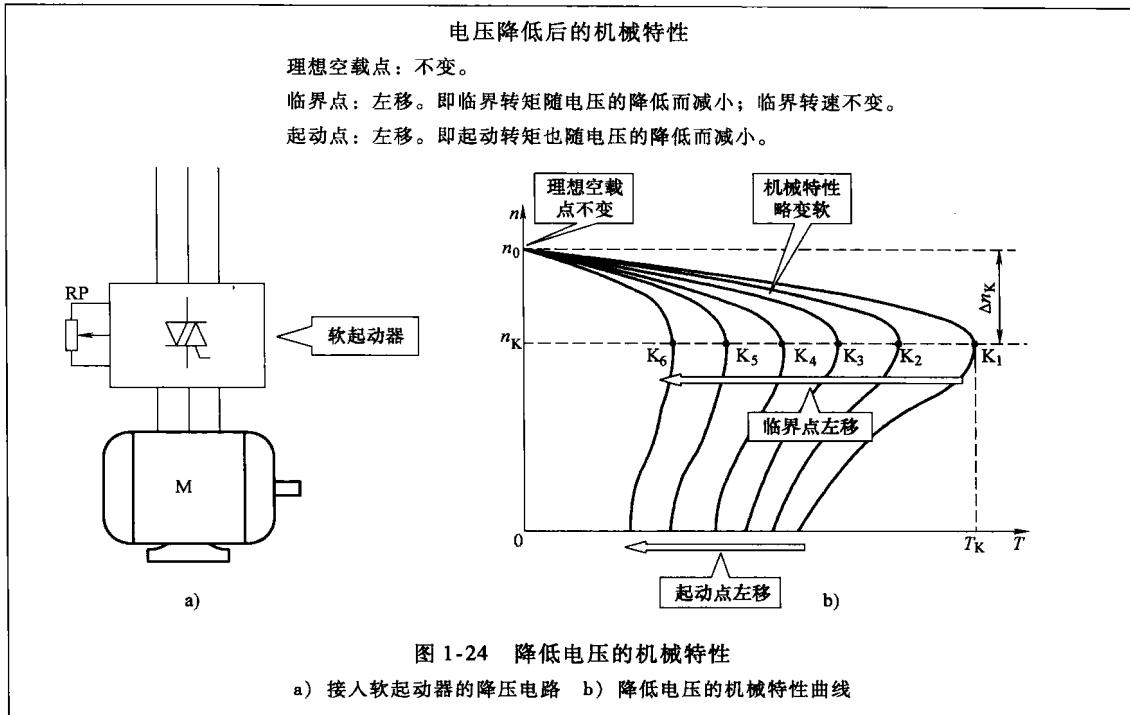
图 1-23 转子电路串入电阻的机械特性

a) 转子电路串入电阻的电路 b) 转子电路串入电阻的机械特性曲线

1—自然机械特性 2—串入  $R_1$  的机械特性 3—串入  $R_1 + R_2$  的机械特性

4—串入  $R_1 + R_2 + R_3$  的机械特性

## 2. 降低电压的机械特性



### 1.5.3 特殊异步电动机的机械特性

#### 1. 电磁调速电动机的机械特性

