

Dianli Tuodong Yu Kongzhi

DIANLI  
TUODONG  
YU  
KONGZHI

DIANLI TUODONG YU KONGZHI

# 电力拖动与控制

杨 洋 编

中国矿业大学出版社  
China University of Mining and Technology Press

# 电力拖动与控制

杨 洋 编

中国矿业大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

电力拖动与控制/杨洋编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2005. 10

ISBN 7 - 81107- 088 - X

I. 电… I. 杨… III. 电力传动—控制电路—高等学校:技术学校—教材 N. TM921. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 063809 号

- 书 名** 电力拖动与控制  
**编 者** 杨 洋  
**责任编辑** 耿东锋  
**责任校对** 周俊平  
**出版发行** 中国矿业大学出版社  
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)  
**网 址** <http://www.cumtp.com> **E-mail** cumtpvip@cumtp.com  
**排 版** 中国矿业大学出版社排版中心  
**印 刷** 淮阴新华印刷厂  
**经 销** 新华书店  
**开 本** 787×960 1/16 **印张** 11.25 **字数** 213 千字  
**版次印次** 2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷  
**定 价** 18.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

本书根据“淡化理论、够用为度、培养技能、重在应用”的原则，结合高职教育的特点与现状编写而成。

本书分为九章，系统地介绍电力拖动系统动力学和直流电动机及异步电动机机械特性方面的知识、电动机的选择方法、控制电器及典型控制线路，将“电力拖动”、“电气控制”等课程有机结合在一起的一门课程。在编写过程中，始终坚持编写原则，把内容的重点放在现阶段使用较多的电机上；在分析电动机拖动系统时，结合“电气控制”的分析方法，两者之间有机结合在一起。在内容的叙述上，淡化理论推导过程，重在阐述公式的各个物理量的意义，及运用公式进行分析、计算的能力。

全书由江西工业工程职业技术学院杨洋编写。

由于编者水平有限，书中错误及不当之处难免，恳请读者批评指正。

编 者  
2005.5

## 目 录

<b>第一章 电力拖动系统动力学</b> .....	1
第一节 电力拖动系统动力学方程.....	1
第二节 电力拖动系统转矩的折算.....	3
小结.....	6
习题.....	6
<b>第二章 电动机的机械特性</b> .....	8
第一节 负载和电动机的机械特性分类.....	8
第二节 电力拖动系统的稳定运行条件.....	11
小结.....	12
习题.....	13
<b>第三章 直流电动机拖动</b> .....	14
第一节 他励直流电动机的机械特性.....	14
第二节 他励直流电动机的起动.....	19
第三节 他励直流电动机的制动.....	22
第四节 他励直流电动机的调速.....	25
第五节 串励电动机的电力拖动.....	29
小结.....	33
习题.....	34
<b>第四章 三相异步电动机的电力拖动</b> .....	36
第一节 三相异步电动机的机械特性.....	36
第二节 三相异步电动机的起动.....	43
第三节 异步电动机的调速.....	47
第四节 三相异步电动机的制动.....	61
小结.....	72

习题 .....	73
<b>第五章 电动机起动设备的计算 .....</b>	<b>74</b>
第一节 三相笼型异步电动机定子对称起动电阻的计算 .....	74
第二节 三相笼型电动机定子不对称起动电阻的计算 .....	75
第三节 三相笼型电动机定子对称与不对称起动电抗器的计算 .....	79
第四节 三相笼型电动机起动自耦变压器的计算 .....	83
第五节 三相绕线转子异步电动机转子对称起动电阻的计算 .....	84
第六节 三相绕线转子电动机转子不对称起动的计算 .....	87
小结 .....	89
习题 .....	90
<b>第六章 电动机的选择 .....</b>	<b>91</b>
第一节 电动机选择的原则 .....	91
第二节 电动机的发热与冷却过程 .....	94
第三节 连续运行方式下电动机容量的选择 .....	99
第四节 短时运行方式下电动机容量的选择 .....	109
第五节 断续周期运行方式下电动机容量的选择 .....	111
第六节 确定电动机容量的统计法与类比法 .....	112
小结 .....	113
习题 .....	114
<b>第七章 控制电器 .....</b>	<b>116</b>
第一节 非自动切换电器 .....	116
第二节 自动切换电器 .....	119
第三节 保护电器 .....	124
第四节 开关电器 .....	126
小结 .....	129
习题 .....	129
<b>第八章 电气控制基本线路 .....</b>	<b>130</b>
第一节 电气图中元件符号与电气图分类 .....	130
第二节 电动机的基本控制环节 .....	134
第三节 电动机的基本控制方法 .....	140

---

第四节 电动机的保护环节·····	148
小结·····	149
习题·····	149
<b>第九章 异步电动机的控制·····</b>	<b>151</b>
第一节 C650—2 型普通车床电气控制·····	151
第二节 铣床的电气控制·····	153
第三节 镗床的电气控制·····	163
小结·····	169
习题·····	169
<b>参考文献·····</b>	<b>171</b>

# 第一章 电力拖动系统动力学

“拖动”是应用各种原动机使生产机械产生运动,以完成一定的生产任务。用各种电动机作为原动机的拖动方式称为电力拖动。虽然电动机有不同的种类和特性,负载特性也不尽相同,但从动力学角度分析,都服从动力学的统一规定,因此称为电力拖动系统动力学。

## 第一节 电力拖动系统动力学方程

### 一、电力拖动系统的组成

一般情况下,电力拖动系统由电动机、传动机构、工作机构、控制设备和电源五个部分组成,如图 1-1 所示。

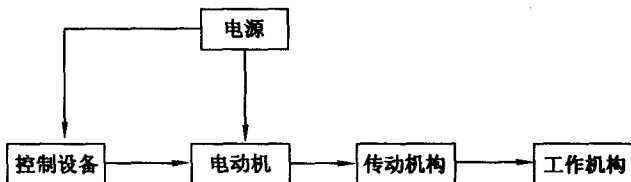


图 1-1 电力拖动系统组成

### 二、电力拖动系统的转矩

在电力拖动系统中有三种转矩:

#### (一) 拖动转矩

拖动转矩是拖动整个系统转动的转矩,其特点是转矩方向与转速方向相同。电动时,拖动转矩为电动机轴上的输出转矩,在工程计算中,可认为等于电动机的电磁转矩。制动时,拖动转矩为工作机构的负载转矩。

#### (二) 阻转矩

阻转矩指企图阻止整个系统转动的转矩,其特点是转矩方向与转速方向相反。转动时,阻转矩为工作机构的负载转矩;制动时,阻转矩为电动机的电磁



转矩。

### (三) 动态转矩

动态转矩指当电动机转速发生变化时,由电动机转子和被它拖动的工作机构的运动惯性而产生的惯性转矩。

### 三、运动方程

电力拖动系统经过简化,都可以视为如图 1-2 所示的电动机转轴与生产机械的工作机构直接相连的单轴电力拖动系统。

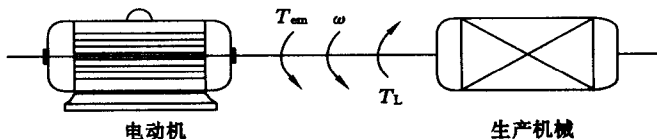


图 1-2 等效的单轴系统

根据牛顿力学定律,该系统的运动方程为

$$T_{em} - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中  $T_{em}$ ——电动机的电磁转矩,  $N \cdot m$ ;

$T_L$ ——生产机械的阻转矩,  $N \cdot m$ ;

$J$ ——电动机轴上的总转动惯量,  $kg \cdot m^2$ 。

$$J = m\rho^2 \quad (1-2)$$

其中  $m$ ——转动部分的质量,  $kg$ ;

$\rho$ ——质量  $m$  的转动半径,  $m$ ;

$\omega$ ——电动机的角速度,  $rad/s$ 。

习惯上电动机的转速用每分钟转速  $n$  表示,即

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{n}{9.55} \quad (1-3)$$

把式(1-2)、式(1-3)代入式(1-1)可以得运动方程

$$T_{em} - T_L = \frac{J}{9.55} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

分析式(1-4)可知:

(1) 当  $T_{em} > T_L$  时,  $\frac{dn}{dt} > 0$ , 拖动系统处于加速状态。

(2) 当  $T_{em} < T_L$  时,  $\frac{dn}{dt} < 0$ , 拖动系统处于减速状态。

(3) 当  $T_{em} = T_L$  时,  $\frac{dn}{dt} = 0$ , 拖动系统处于稳速状态或静止状态。

#### 四、运动方程式中转矩正负号的分析

在运动方程式中,由于力、转矩、速度、角速度都可能有两个方向,因此,有必要用正负号来描述它们的方向关系,如图 1-3 所示。

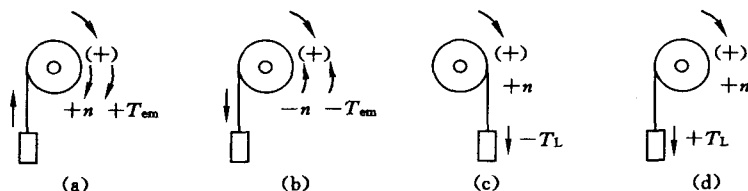


图 1-3  $T_{em}$  和  $T_L$  的方向

当选取某一个量的正方向后,其他量的符号根据此方向作出相应的确定。一般先选取电动机的转速  $n$  的正方向,然后按照下列规则确定转矩的正负号:

(1) 电磁转矩  $T_{em}$  与转速正方向相同时取正,相反时取负,如图 1-3(a)、(b) 所示。

(2) 负载转矩  $T_L$  与转速正方向相反时取正,相同时取负,如图 1-3(c)、(d) 所示。动态转矩  $\frac{J}{9.55} \cdot \frac{dn}{dt}$  的大小及正负号由  $T_{em} - T_L$  的代数和来确定。

## 第二节 电力拖动系统转矩的折算

在电力拖动系统中,电动机和工作机构之间往往装有若干个传动机械,形成多轴系统,经过传动装置变速,各个传动轴的转速和转矩均不一样,如对每一根轴列出相应的运动方程,然后联合求解,则很不方便。在研究过程中,往往根据折算前后保持拖动系统传递的功率和存储的功能不变的原则,把多轴系统等效成单轴系统。

### 一、转矩的折算

为了便于分析,先考虑一个简单的二轴系统等效单轴系统,如图 1-4 所示。设  $T_L'$  为折算前的负载转矩, $T_L$  为折算后的负载转矩,如果要把工作机构的转矩

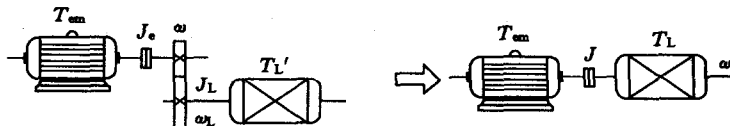


图 1-4 二轴系统等效单轴系统

$T_L'$  折算到电动机轴上,其静态转轴的等效原则为:系统的传输功率不变。

如不考虑传动机构的损耗,工作机构折算前的机械功率为  $T_L'\omega_L$ ,折算后的电动机轴上的机械功率为  $T_L\omega$ ,根据功率不变原则

$$T_L'\omega_L = T_L\omega \quad (1-5)$$

式中  $\omega_L$ ——生产机械的负载转速,rad/s;

$\omega$ ——电动机的转速,rad/s。

由式(1-5)可得

$$T_L = \frac{T_L'}{\omega/\omega_L} = \frac{T_L'}{J_L} \quad (1-6)$$

式中  $J_L$ ——电动机轴与工作机械轴间的速度比, $J_L = \omega/\omega_L = n/n_L$ 。

在实际的传动过程中,传动机构还存在功率损耗,可用传动效率  $\eta_c$  表示。

(1) 电动机工作在电动状态时,传动损耗由电动机承担,此时

$$T_L'\omega_L = \frac{T_L\omega}{\eta_c} \quad (1-7)$$

$$T_L = \frac{T_L'}{\eta_c\omega/\omega_L} = \frac{T_L'}{J_L\eta_c} \quad (1-8)$$

(2) 电动机工作在制动状态时,传动损耗由传动机构承担,此时

$$T_L'\omega_L = T_L\omega\eta_c \quad (1-9)$$

$$T_L = \frac{T_L'}{J_L}\eta_c \quad (1-10)$$

对于多级传动,已知各级速度比为  $J_1, J_2, J_3, \dots, J_n$ ,则总的速度比为各级速度比之积,即

$$J = J_1 J_2 J_3 \dots J_n = \prod_{i=1}^n J_i \quad (1-11)$$

已知各级的传递效率为  $\eta_{c1}, \eta_{c2}, \dots, \eta_{cn}$ ,则总效率  $\eta_c$  应为各级效率之积,即

$$\eta_c = \prod_{i=1}^n \eta_{ci} \quad (1-12)$$

## 二、工作机构直线运动质量的折算

做直线运动的质量  $m_L$  中也储存有动能,直线运动的工作机构由电动机拖动,为此,需要把速度  $v_L$ 、质量  $m_L$  折算到负载轴上,即把负载轴上的一个转动惯量  $J_L$  与之等效。

$$\frac{1}{2}J_L\omega_L^2 = \frac{1}{2}m_L v_L^2 \quad (1-13)$$

把  $\omega_L = \frac{2\pi n_L}{60}$  及  $m_L = \frac{G_L}{g}$  代入上式,得到采用转动惯量的表达式为

$$J_L^2 = \frac{9.3G_L v_L^2}{n_L^2} \quad (1-14)$$

### 三、工作机构做直线运动时作用力的折算

工作机构运动时,有相当一部分是直线运动,如图 1-3 所示的系统,钢丝绳以力  $F_L$  吊质量为  $m_L$  的重物  $G_L$ ,以速度  $v_L$  上升或下降,图中  $F_L$  在电动机轴上的反映就是负载转矩  $T_L$ ,折算方法如下:

(1) 电动机在电动状态时

$$T_L \omega = \frac{F_L v_L}{\eta_G}$$

把电动机的角速度  $\omega$  化为每分钟转速  $n$  时,有

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n \eta_G} \quad (1-15)$$

式中  $F_L$ ——作用在直线运动机构上的静态力, N;

$v_L$ ——直线运动机构的移动速度, m/s;

9.55——角速度  $\omega$  与转速  $n$  的转换关系,  $9.55 = \frac{60}{2\pi}$ 。

(2) 电动机在制动状态时

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n} \eta_G \quad (1-16)$$

通过折算,就可以把既有旋转又有直线运动的多轴系统,折算成一个单轴的旋转运动系统,这样仅用一个运动方程式就可以研究多轴系统。

**例题 1** 设一提升机构,其传动系统如图 1-5 所示,电动机转速 950 r/min,齿轮减速箱的传动比  $J_1 = J_2 = 4$ ,卷筒直径  $D = 0.24$  m,滑轮的减速比  $J_L = 2$ ,空钩重量  $G_0 = 200$  N,起动负载  $G = 1\,500$  N,电动机的飞轮惯量  $GD_e = 1.05$  N·m<sup>2</sup>。试求提升速度  $v_L$  和折算到电动机的静转矩  $T_L$ 。

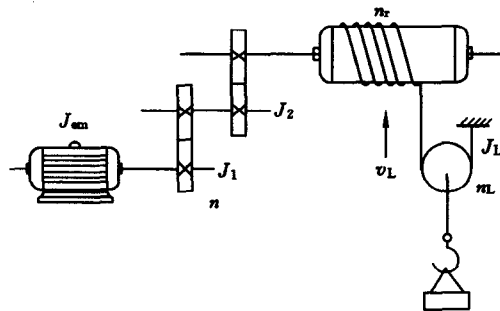


图 1-5 例题 1 图

解 (1) 计算提升速度  $v_L$ 。

依照电动机转速  $n$  经过三级减速后,再转换成直线速度的关系得

$$\frac{n}{n_L} = j, j = j_1 j_2 j_3, n_L = \frac{n}{j} = \frac{n}{j_1 j_2 j_3}$$

$$v_L = \pi D n_L = \frac{\pi D}{j_1 j_2 j_3} n = \frac{3.14 \times 0.24 \times 950}{4 \times 4 \times 2} = 22.37 \text{ (m/min)}$$

(2) 计算折算到电动机轴的静转矩  $T_L$ 。

考虑传动的耗损,假设每对齿轮的效率为 0.95,并取滑轮和转筒的效率为 0.92,按功率平衡原则得出折算到电动机轴上的静转矩为

$$T_L = \frac{F_L v_L}{\omega \eta_c}$$

$$F_L = G_L = G + G_0, v_L = \frac{\pi D}{j} \frac{n}{60}, \omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$T_L = \frac{(G+G_0) \frac{D}{2}}{j \eta_c} = \frac{(G+G_0) \frac{D}{2}}{j_1 j_2 j_3 \eta_c} = \frac{(1500+200) \times 0.12}{4 \times 4 \times 3 \times 0.83} = 5.12 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

## 小 结

通过本章的学习,主要了解以下几个方面的知识:

(1) 电力拖动系统是以电动机为原动机来拖动生产机械工作的系统。研究电动机与生产机械之间的关系,关系的描述用运动方程进行表述

$$T_{em} - T_L = \frac{J}{9.55} \cdot \frac{dn}{dt}$$

(2) 通过该方程可以分析拖动系统的运动状态,也可进行起动、制动的定量分析。

(3) 生产机械的负载转矩特性分类。

(4) 在电力拖动系统中,电动机和工作机构之间往往装有若干个传动机械,形成多轴系统,在研究过程中,往往根据折算前后保持拖动系统传递的功率和存储的功能不变的原则,把多轴系统等效成单轴系统。

## 习 题

- 1.1 什么是电力拖动系统?它包括哪些部分?
- 1.2 电力拖动系统的运动方程式有何实际应用意义?

1.3 电力拖动系统旋转运动方程式中各个物理量的物理意义是什么？它们的正负号如何确定？

1.4 把多轴系统简化为单轴电力拖动系统时，负载转矩的折算原则是什么？

1.5 起重机提升和下放重物时，传动机构的损耗是由电动机还是重物负担？提升和下放重物时，传动机构损耗大小是否相同？传动机构的效率是否相同？

1.6 有一起重机的电力拖动系统如图 1-5 所示，电动机转速  $1\ 000\ \text{r/min}$ ，齿轮减速箱的传动比  $J_1 = J_2 = 3$ ；卷筒直径  $D = 0.22\ \text{m}$ ，滑轮的减速比  $J_L = 4$ ；空钩重量  $G_0 = 100\ \text{N}$ ；起动负载  $G = 1\ 600\ \text{N}$ ；电动机的飞轮惯量  $GD_e = 1.05\ \text{N} \cdot \text{m}^2$ 。试求提升速度  $v_L$  和折算到电动机的静转矩  $T_L$ ？

## 第二章 电动机的机械特性

### 第一节 负载和电动机的机械特性分类

在电力拖动系统中,电动机是主体,负载(生产机械)是客体。只有电动机的机械特性满足负载的机械特性,才能完成特定的生产任务。

电动机的机械特性是电动机在运行过程中机械性能的主要表现形式,电动机不同其机械特性也不相同。负载的机械特性是生产机械在电动机拖动下所表现出来的机械性能,不同的生产机械,其机械特性不同。

#### 一、生产机械的负载转矩机械特性

生产机械运行时常用负载转矩描述其负载的大小。不同的生产机械的转矩因速度变化而不同,用负载转矩特性来表征,就是生产特性的转速  $n$  与负载转矩  $T_L$  之间的关系  $n=f(T_L)$ 。

根据统计,各种生产机械负载转矩特性可分为三类。恒转矩负载特性,通风机负载特性,恒功率负载特性。

##### (一) 恒转矩负载特性

恒转矩负载特性指负载转矩  $T_L$  与转速  $n$  无关的特性,即当转速发生变化时,负载转矩  $T_L$  保持常值不变。根据负载转矩的方向特点又可以分为反抗性和位能性负载两种。

##### 1. 反抗性恒转矩负载特性

反抗性负载转矩由摩擦力产生,与转速无关,故又称为阻转矩。其特性曲线如图 2-1 所示,  $T_L=f(n)=\text{常数}$ 。转速方向为正,负载转矩为正;转速方向为负,负载转矩为负;转速为零时  $T_L=0$ 。

##### 2. 位能性恒转矩负载特性

位能性恒转矩与反抗性转矩不同,它由拖动系统中某些具有位能的部件造成,其特点是转矩  $T_L$  具有固定的方向,不随转速方向的改变而改变,其特性曲线如图 2-2 所示。提升重物时,反抗提升;下降重物时,重力帮助下降。

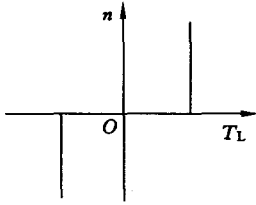


图 2-1 反抗性恒转矩负载特性

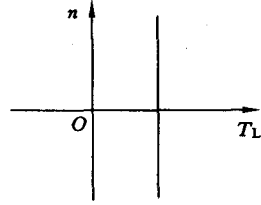


图 2-2 位能性恒转矩负载特性

### (二) 通风机负载特性

通风机的负载的转矩与转速的大小有关,转矩  $T_L$  与转速的平方成正比关系,即  $T_L = Kn^2$ ,且属于反抗性负载。其特性曲线如图 2-3 所示。当转速为正向时, $T_L$  为正值;当转速反向时, $T_L$  为负值。

### (三) 恒功率负载特性

恒功率负载特性是指在不同转速下,负载转矩与转速成反比,是属于功率不变的负载机械特性,即

$$T_L = \frac{K}{n}$$

$$P_L = T_L \omega = \frac{K}{n} \frac{2\pi n}{9.55} = \frac{K}{9.55} = K_1 = \text{常数}$$

式中  $P_L$ ——负载功率, W。

可见,切削功率基本不变,负载转矩  $T_L$  与  $n$  的特性曲线呈现恒功率的性质,如图 2-4 所示。

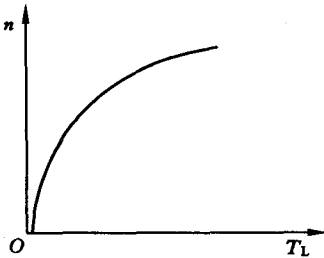


图 2-3 通风机负载特性曲线

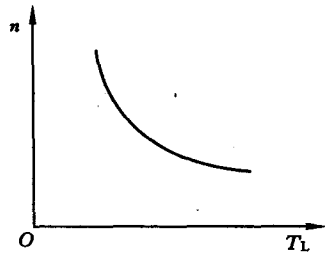


图 2-4 恒功率负载特性曲线

### (四) 实际生产机械的负载特性

实际生产机械并非只具有一种机械特性,而是几种机械特性的组合,在实际应用时要综合考虑并予以分析。例如,实际通风机除了主要是通风机负载特性外,由于轴承上还存在摩擦转矩  $T_f$ ,因而实际的通风机负载特性应为



$$T_L = T_i + kn^2$$

其特性曲线如图 2-5 所示。

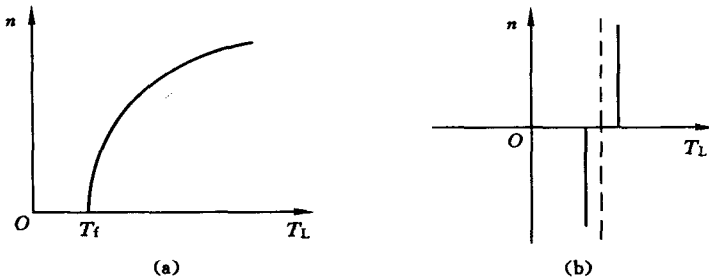


图 2-5 实际生产机械的负载特性

(a) 实际通风机负载特性; (b) 实际起重机负载特性

## 二、电动机的机械特性

电动机在运行时,其内部进行着电能——磁场能——机械能的形式上的转变。电磁转矩  $T_{em}$  与转速  $n$  有着一定的关系,  $n = f(T_{em})$ , 这种关系称为电动机的机械特性。常用电动机的机械特性曲线如图 2-6 所示。图中曲线 1 为同步电动机的机械特性,其转速为一恒定值,与转矩无关。曲线 2、3、4 分别为异步电动机、直流他励电动机、直流串励电动机的机械特性,转速与电磁转矩呈一定的关系,转矩变化,转速也发生相应的变化。

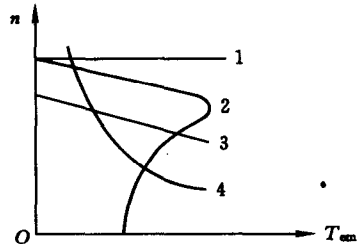


图 2-6 电动机的机械特性

从图 2-6 可以看出,电动机的机械特性不同,电磁转矩随速度变化的承担也不同。为了表征其特性的形状,引入机械特性“硬度”的概念。所谓特性的“硬度”是指电动机转矩的改变而引起转速变化的程度,通常用硬度系数  $\alpha$  表示。在特性曲线上任一点的硬度系数,就是该点转矩变化的百分数与速度变化的百分数之比,即

$$\alpha = \frac{\Delta M \%}{\Delta n \%}$$

根据硬度系数的大小,可把电动机的机械特性分为三类。

### (一) 绝对硬特性

当转矩发生变化时,电动机的转速恒定不变,硬度系数  $\alpha = \infty$ 。同步电动机属于此类特性。