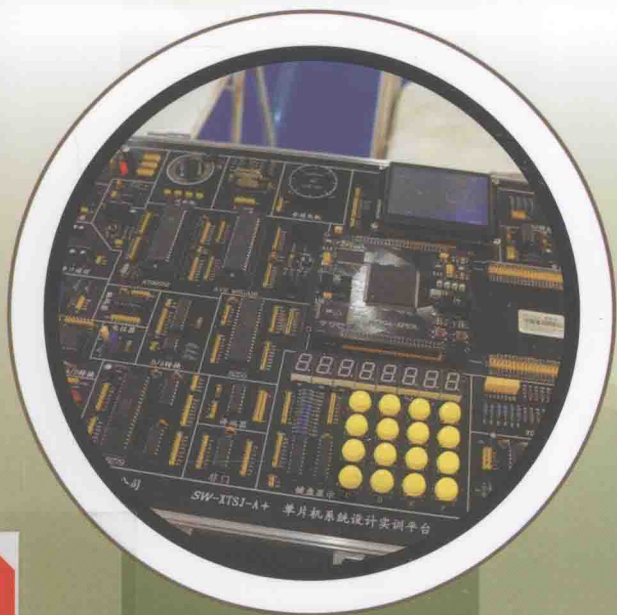


JIDIANCHUANDONGKONGZHI JISHU  
JISHEJIFANGFA TANJIU

# 机电传动控制技术

## 及设计方法探究

肖中俊 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 机电传动控制技术

## 及设计方法探究

肖中俊 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书共7章,内容包括机电传动控制概论、机电传动控制系统的控制电动机、继电器—接触器控制及其线路设计、可编程控制器及其系统设计、交直流电动机无级调速控制技术、机电传动控制其他技术、机电传动控制系统设计。

本书内容循序渐进,知识面广、应用性强,可作为机械制造、机械电子工程及相近专业和机械、电气工程相关专业人员的参考书籍。

## 图书在版编目(CIP)数据

机电传动控制技术及设计方法探究 / 肖中俊著. —  
北京:中国水利水电出版社, 2015.9  
ISBN 978-7-5170-3696-8

I. ①机… II. ①肖… III. ①电力传动控制设备  
IV. ①TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第232565号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:陈洁 封面设计:崔蕾

书 名	机电传动控制技术及设计方法探究
作 者	肖中俊 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京厚诚则铭印刷科技有限公司
印 刷	北京龙跃印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 15印张 269千字
版 次	2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

现代自动化生产设备早已不再是单纯的传统机械所组成的设备,而是机电一体化的综合系统,机电传动与电气控制已经成为现代生产机械中不可分割的重要组成部分。在现代自动化生产中,生产机械的电气自动化程度反映了工业生产的水平。

机电传动也称电力拖动或电力传动,是指以电动机为原动机驱动生产机械的系统的总称。其目的是将电能转变成机械能,实现生产机械的启动/停止和速度调节,以满足生产工艺过程的要求,保证生产过程正常进行。因此,机电传动控制包括用于拖动生产机械的电动机以及电动机控制系统两大部分。

对于整个工厂来说,机电传动控制系统所要完成的任务就是要使机械设备、生产线、车间都实现自动化;而对于一台设备来说,则是指通过控制电动机拖动生产机械,实现产品质量的提高、生产成本的降低、产品数量的增加、工人劳动条件的改善,以及能量的合理利用等。

随着计算机技术、微电子技术、自动控制理论、精密测量技术、电动机和电器制造业及自动化元件的发展,机电传动控制正在不断创新与发展,如直流或交流无级调速控制系统取代了复杂笨重的变速箱系统,简化了生产机械的结构,使生产机械向性能优良、运行可靠、体积小、重量轻、自动化方向发展。因此,在现代化生产中,机电传动控制具有极其重要的地位。

目前各种类型机电传动设备越来越多,技术越来越先进,控制技术及手段越来越精密繁杂。为了保证安全生产,促进设备长周期稳定运行,要求广大电气工程技术人员和操作人员应全面掌握有关机电传动控制的基础知识、设计理论、控制原理及应用等系统理论知识,不断地提高掌握机电设备应用、控制、维护、检修的实际操作能力。为了满足广大电气工程技术人员和操作人员工作和学习提高的需要,作者决定撰写本书。

本书的撰写时力求避免与“电工学”等学科存在过多的交叉和重叠,着力体现内容的实用性和先进性,使读者系统、全面地掌握机电传动控制系统设计的基本原则和基本方法,为今后设计和开发机电传动控制系统奠定扎实的技术基础。本书共7章。第1章为机电传动控制概论;第2章为机电传动控制系统的控制电动机;第3章为继电器-接触器控制及其线路设计;第4章为可编程控制器及其系统设计;第5章为交直流电动机无级调速控

制技术;第6章为机电传动控制其他技术;第7章为机电传动控制系统设计。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请广大读者、同行批评指正。

齐鲁工业大学

肖中俊

2015年7月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 机电传动控制概论</b> .....	1
1.1 机电传动控制技术的发展 .....	1
1.2 机电传动系统的运动方程式 .....	3
1.3 负载机械特性方程 .....	7
1.4 机电传动系统稳定运行的条件 .....	9
<b>第 2 章 机电传动控制系统的控制电动机</b> .....	11
2.1 伺服电动机及其控制.....	11
2.2 步进电动机的驱动与控制.....	14
2.3 力矩电动机的结构特性.....	32
<b>第 3 章 继电器-接触器控制及其线路设计</b> .....	34
3.1 电气原理图的绘制及相关符号.....	34
3.2 继电器-接触器基本控制线路分析 .....	43
3.3 继电器-接触器控制线路设计及设计举例 .....	61
<b>第 4 章 可编程控制器及其系统设计</b> .....	85
4.1 可编程控制器的编程语言与工作过程.....	85
4.2 S7-200 系列 PLC .....	88
4.3 S7-200 系列 PLC 常用指令 .....	97
4.4 PLC 控制系统软硬件设计及设计举例 .....	117
<b>第 5 章 交直流电动机无级调速控制技术</b> .....	151
5.1 直流电动机调速要求及方法 .....	151
5.2 直流电动机调速控制系统 .....	154
5.3 交流电动机调速控制系统 .....	169

第 6 章 机电传动控制其他技术	178
6.1 不同类型传感器技术	178
6.2 电力电子技术	204
第 7 章 机电传动控制系统设计	214
7.1 机电传动控制系统设计原则	214
7.2 机电传动控制系统设计应注意的问题	215
7.3 机电传动控制系统设计举例	220
参考文献	233

# 第 1 章 机电传动控制概论

机电传动控制概论主要从理论上阐述了机电传动技术的发展状况和力学基础。本章主要介绍机电传动控制技术的发展、机电传动系统的运动方程以及负载机械特性方程。

## 1.1 机电传动控制技术的发展

### 1.1.1 机电传动的发展

机电传动及其控制系统总是随着社会生产的发展而发展的。20 世纪初,由于电动机的出现,使得设备的驱动方式发生了深刻的变革,电动机替代了蒸汽机。机电传动的发展分为以下 3 个阶段。

机电传动的发展 { 成组拖动  
单电机拖动  
多电机拖动

#### 1. 成组拖动

机电传动最先开始运用到工业上的是成组拖动<sup>①</sup>,这种传动方式有很大的弊端,一旦在生产过程中电动机发生故障,就会导致整个生产线瘫痪,并且利用这种传动方式生产效益比较低,劳动条件低下。

#### 2. 单电机拖动

单电机拖动是用一台电动机拖动一台生产机械。较之成组拖动,单电机拖动简化了传动机构,缩短了传动路线,提高了传动效率,至今仍有一些中小型通用机床采用单电机拖动。

#### 3. 多电机拖动

随着机电传动系统的发展,现在主要采用的是多电机拖动<sup>②</sup>。多电机

---

① 成组拖动是指用一台电动机拖动一根天轴,然后再由天轴通过皮带轮和皮带分别拖动各生产机械。

② 多电机拖动是指一台生产机械的每一个运动部件分别由一台专门的电动机拖动。



拖动相比成组拖动和单电机拖动具有明显的优势。由于其是一个运动部分对应的是一台机械,因此若是其中一台器械发生故障,并不影响其他机械的正常运转,方便机械的自动化实施,提高生产效益,灵活掌控机械的运转,为大规模的生产线生产提供了基础。

### 1.1.2 电动机控制系统的发展

随着社会生产的发展和科技水平的提高,人们对电器的要求提高,自动化的需求也相应提高,这使得电动机的控制也由以前的简单控制(如开关)向复杂控制发展。电动机的控制系统自动化几乎在每一个工业领域都有相应的运用,如数控机床、绣花机、卫星姿态等。随着工业化的日新月异,电动机的控制也发生了深刻的变化,正在不断地完善和提高。

最早的机电传动控制系统是有触点断续控制系统。该系统结构简单,能够实现简单的控制,能够对别要求控制的对象实现开启、关闭或其他一些简单的功能。但有触点断续控制系统由于其控制简单,导致控制精度不精,且控制操作时,速度缓慢。

接着,出现了直流发电机—电动机调速系统。由于该系统需要旋转变流机组(至少包括两台与调速电动机容量相当的旋转电动机),还要一台励磁发动机,所以设备多、体积大、费用高、效率低、安装需打地基、运行有噪声、维护不方便。20世纪50年代,采用了水银整流器(大容量时)和闸流管(小容量时)静止变流装置来代替旋转变流机组。到了20世纪60年代,出现了晶闸管一直流电动机无级调速系统。晶闸管出现以后,又陆续出现了其他种类的电力电子器件,如门极可关断晶闸管(GTO)、电力功率晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(电力MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等。由于这些器件的电压、电流定额及其他电气特性均得到了很大的改善,所以它们相比简单的继电器具有许多优点,能够快速高效的反应,且能够长时间使用,维护起来也十分方便,再加上体积小、质量轻等优势,使得机电传动控制系统等到了更宽广的应用领域。到了20世纪80年代,由于逆变技术、脉宽调制技术、矢量控制技术的出现和发展,使交流电动机无级调速系统得到了迅速发展。由于交流电动机没有电刷与换向器,减小了交流电动机的整体体积。同时由于结构的简单化,节约了交流电动机的成本,方便维护等好处。电压等级可以做得很高,可以实现高速拖动等,所以交流机电传动系统取代直流机电传动系统已经是无可争议的事实了。目前已出现了多种以多用芯片或DSP为核心的变频器调速系统,它们使交流电动机的控制变得更简单、可靠性更高、拖动系统的性能更好。它们的出现为机电传动系统的控制开辟了新纪元。

目前,随着计算机技术的高速发展,控制系统和计算机技术联合运用,使得控制系统又发展到一个新阶段——采样控制。通过计算机系统的精确计算、采样控制,推动着机电控制技术向着集成化、智能化、信息化、网络化方向发展。

## 1.2 机电传动系统的运动方程式

### 1.2.1 单轴机电传动系统的运动方程式

如图 1-1 所示为一单轴机电传动系统。由电动机 M 产生的转矩  $T_M$  用来克服负载转矩,以带动生产机械运动。

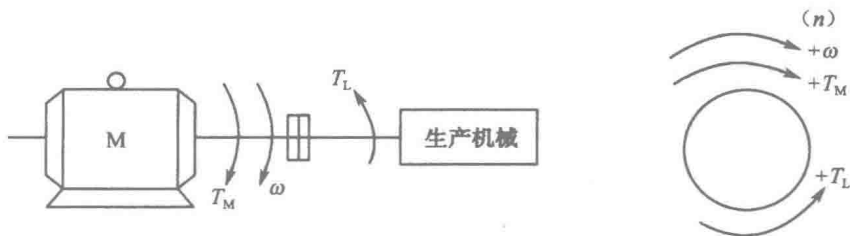


图 1-1 单轴机电传动系统

根据动力学列运动平衡方程式,则有

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

式中,  $T_M$  为电动机的输出转矩( $N \cdot m$ );  $T_L$  为电动机的负载转矩( $N \cdot m$ );  $J$  为转动惯量( $kg \cdot m^2$ );  $\omega$  为电动机的角速度( $rad/s$ )。

在实际工程计算中,经常用转速  $n(r/min)$  代替角速度  $\omega(rad/s)$ 。其关系为  $\omega = 2\pi n/60 = n/9.55$ , 则式(1-1)就变为

$$T_M - T_L = \frac{1}{9.55} J \frac{dn}{dt} \quad (1-2)$$

式(1-1)就是单轴机电传动系统的运动方程式。该方程决定着系统运动的特征。当  $T_M > T_L$  时,  $\frac{d\omega}{dt} > 0$ , 系统加速; 当  $T_M < T_L$  时,  $\frac{d\omega}{dt} < 0$ , 系统速度减小;

当  $T_M = T_L$  时,  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ , 系统保持匀速。系统处于加速或减速的运动状态称为动态, 系统处于恒速的运动状态称为稳态或静态。

传动系统的运动状态不同, 可以不时的变化速度和方向, 以及工作机械负载性质的不同, 输出转矩  $T_M$  和负载转矩  $T_L$  不仅大小不同, 方向也是变

化的,所以对式(1-1)中的转速、转矩符号给出一种约定(通常以转速  $n$  的方向作为参考来确定  $T_M$ 、 $T_L$  的正负,如图 1-2 所示):当  $T_M$  与  $n(+)$  同向时为正,此时  $T_M$  为驱动转矩;当  $T_M$  与  $n(+)$  反向时为负,此时  $T_M$  为制动转矩。 $T_L$  与  $n(+)$  反向时为正(制动),反之,为负(拖动)。

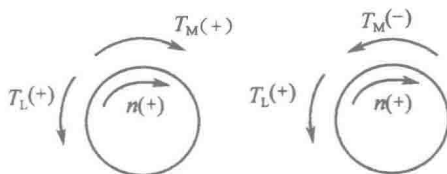


图 1-2  $T_M$ 、 $T_L$  符号的约定

### 1.2.2 多轴机电传动系统的运动方程式

如图 1-3 所示为多轴机电传动系统。在这种情况下,为了列出这个系统的运动方程,必须先将各转动部分的转矩和转动惯量或直线运动部分的质量都折算到某一根轴上,一般折算到电动机轴上,即折算成图 1-1 所示的最简单的典型单轴系统。折算的基本原则是,折算前的多轴系统与折算后的单轴系统在能量关系上或功率关系上保持不变。

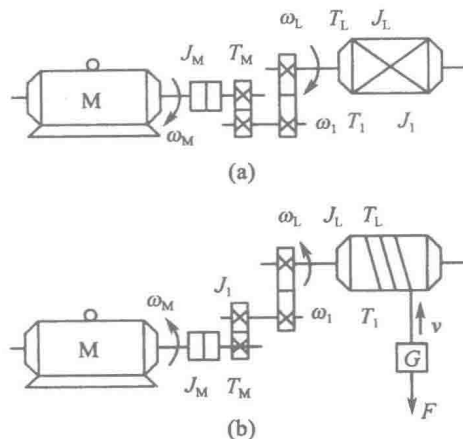


图 1-3 多轴机电传动系统

(a) 旋转运动; (b) 直线运动

#### (1) 负载转矩的折算

当负载转矩是静态转矩时,可根据静态时的功率守恒原则进行折算。对于旋转运动,如图 1-3(a)所示,当系统匀速运动时,生产机械的负载功率为

$$P_L = T_L \omega_L$$

式中,  $T_L$  为生产机械的负载转矩 ( $N \cdot m$ );  $\omega_L$  为生产机械的旋转角速度 ( $\text{rad/s}$ )。

电动机输出功率为

$$P_M = T_M \omega_M$$

式中,  $T_M$  为电动机的输出转矩 ( $N \cdot m$ );  $\omega_M$  为电动机转轴的角速度 ( $\text{rad/s}$ )。

由于系统处于匀速运行时, 电动机输出功率应该等于整个系统的负载功率, 即相当于电动机轴上有一等效的负载转矩  $T_{eq}$ , 故有

$$P_M = T_{eq} \omega_M T_{eq}$$

考虑到传动机构在传递功率的过程中有损耗, 这个损耗可以用传动效率  $\eta$  表示, 即

$$\eta = \frac{P_L}{P_M} = \frac{T_L \omega_L}{T_{eq} \omega_M}$$

于是可得折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_{eq} = \frac{T_L \omega_L}{\eta \omega_M} = \frac{T_L}{\eta i} \quad (1-3)$$

式中,  $\eta$  为电动机拖动生产机械运动时的传动效率;  $i$  为传动机构的速比,  $i = \omega_M / \omega_L$ 。

对于直线运动, 如图 1-3(b) 的卷扬机所示, 若生产机械直线运动部件的负载力为  $F$ , 运动速度为  $v$ , 则所需的机械功率为

$$P_L = Fv$$

它反映在电动机轴上的机械功率为

$$P_M = T_{eq} \omega_M$$

式中,  $T_{eq}$  为负载力  $F$  在电动机轴上产生的等效负载转矩。

如果是电动机拖动生产机械旋转或移动 (如卷扬机拖动重物上升), 则传动机构中的损耗应由电动机承担, 根据功率平衡关系, 有

$$T_{eq} \omega_M = Fv / \eta$$

将  $\omega_M = 2\pi n_M / 60$  代入上式可得

$$T_{eq} = 0.955 Fv / (n_M / \eta) \quad (1-4)$$

式中,  $n_M$  为电动机轴的转速 ( $\text{r/min}$ )。

如果是生产机械拖动电动机旋转, 则传动机构中的损耗由生产机械的负载来承担, 于是有

$$T_{eq} \omega_M = Fv / \eta'$$

则

$$T_{eq} = 0.955 Fv \eta' / n_M \quad (1-5)$$

式中,  $\eta'$  为生产机械拖动电动机运动时的传动效率。

## (2) 转动惯量的折算

转动惯量与运动系统的动能有关,因此,可根据动能守恒原则进行折算。设如表示折算到电动机轴上的总转动惯量,对于图 1-3(a)所示的旋转运动有

$$\frac{1}{2}J_{\text{eq}}\omega_M^2 = \frac{1}{2}J_M\omega_M^2 + \frac{1}{2}J_1\omega_1^2 + \frac{1}{2}J_L\omega_L^2$$

则

$$J_{\text{eq}} = J_M + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_L}{i_L^2} \quad (1-6)$$

式中, $J_M$ 、 $J_1$ 、 $J_L$  为电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的转动惯量; $\omega_M$ 、 $\omega_1$ 、 $\omega_L$  为电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的角速度; $i_1$  为电动机轴与中间传动轴之间的速比, $i_1 = \omega_M/\omega_1$ ; $i_L$  为电动机轴与生产机械轴之间的速比, $i_L = \omega_M/\omega_L$ 。

当速比  $i_1$  较大时,中间传动机构的转动惯量以在折算后占整个系统的比重不大。为计算方便起见,实际工程中多用适当加大电动机轴上的转动惯量  $J_M$  的方法来考虑中间传动机构的转动惯量  $J_M$  的影响,于是有

$$J_{\text{eq}} = \delta J_M + \frac{J_L}{i_L^2} \quad (1-7)$$

式中, $\delta$  一般为 1.1~1.25。

对于图 1-3(b)所示的直线运动,设直线运动部件的质量为  $m$ ,根据动能守恒有

$$\frac{1}{2}J_{\text{eq}}\omega_M^2 = \frac{1}{2}J_M\omega_M^2 + \frac{1}{2}J_1\omega_1^2 + \frac{1}{2}J_L\omega_L^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

则折算到电动机轴上的总转动惯量为

$$J_{\text{eq}} = J_M + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_L}{i_L^2} + m \frac{v^2}{\omega_M^2} \quad (1-8)$$

## (3) 多轴机电传动系统的具体运动方程式

依照上述折算方法,就可把具有中间传动机构、带有旋转运动部件或直线运动部件的多轴机电传动系统,折算成等效的单轴拖动系统,将所求得的  $T_{\text{eq}}$ 、 $J_{\text{eq}}$  代入式(1-1)就可得到多轴机电传动系统的运动方程式为

$$T_M - T_{\text{eq}} = J_{\text{eq}} \frac{d\omega_M}{dt} \quad (1-9)$$

或

$$T_M - T_{\text{eq}} = \frac{1}{9.55} J_{\text{eq}} \frac{dn_M}{dt} \quad (1-10)$$

### 1.3 负载机械特性方程

从机电传动系统的运动方程式可以看出,分析系统的动力学关系,必须了解负载转矩  $T_L$ 。 $T_L$  可能是不变的常数,也可能是转速  $n$  的函数。同一转轴上的负载转矩  $T_L$  和转速  $n$  之间的函数关系称为机电传动系统的负载特性,也就是生产机械的负载特性,有时也称为生产机械的机械特性。除特别说明外,一般所说的生产机械的负载特性均是指电动机轴上的负载转矩和转速之间的函数关系,即  $n=f(T_L)$ 。转矩  $T_L$  随转速变化的规律也不相同。典型的负载特性大体上可以归纳为以下几种。

#### 1.3.1 恒转矩型负载特性

##### 1. 反抗转矩负载特性

反抗转矩负载的转矩大小不变,且其方向随着运动方向的改变而改变,总是保持与运动方向处于相反的方向,对运动系统起到阻碍作用。反抗转矩负载特性曲线如图 1-4(a)所示。按前面介绍的运动方程式中符号的约定法则可知,反抗转矩  $T_L$  与转速  $n$  取相同的符号,行为正时  $T_L$  为正,特性曲线在第一象限;行为负时  $T_L$  为负,特征曲线在第三象限。所以在转矩平衡方程式中,反抗转矩  $T_L$  的符号总是正的。

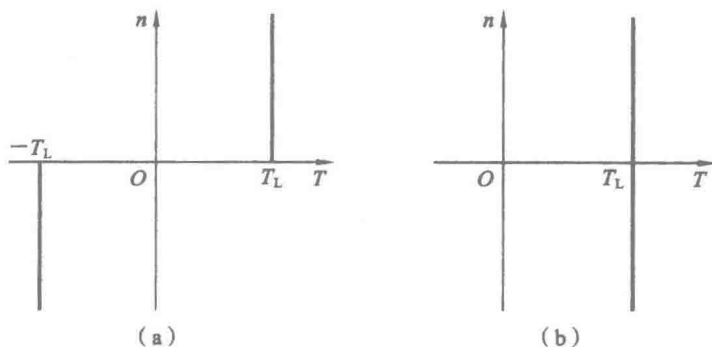


图 1-4 两种恒转矩负载特性曲线

(a) 反抗转矩; (b) 位能转矩

其负载属于反抗转矩负载的生产机械有提升机的行走机构、带式输送机、轧钢机、某些金属切削机床的平移机构等。

## 2. 位能转矩负载特性

位能转矩<sup>①</sup>的负载与反抗转矩的负载特性不同,位能转矩的负载不随运动速度和方向的改变而改变,而是保持大小恒定不变。它在某方向阻碍运动,却在相反方向促进运动。位能转矩负载特性曲线如图 1-4(b)所示,不管  $T_L$  为正向还是反向, $T_L$  都不变,特征曲线在第一、第四象限。所以在转矩平衡方程式中,反抗转矩  $T_L$  的符号有时为正、有时为负。

其负载属于位能转矩负载的生产机械有起重机的提升机构、矿井提升机构等。

### 1.3.2 通风机型负载特性

通风机型负载转矩  $T_L$  的大小与速度 $n$ 的平方成反比,即

$$T_L = Cn^2$$

式中, $C$  为比例常数。

这一类型的负载是按离心力原理工作的,其特性曲线如图 1-5 所示,属于这一类的生产机械有离心式通风机、离心式水泵等。

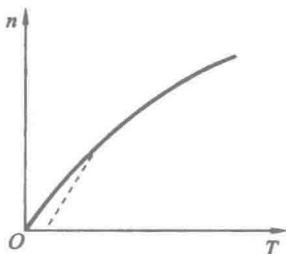


图 1-5 通风机型负载特性曲线

### 1.3.3 恒功率型负载特性

恒功率型负载转矩  $T_L$  与转速  $n$  成反比,即

$$T_L = K/n$$

式中, $K$  为常数,或  $K = T_L n \propto P$  ( $P$  为常量)。

恒功率型负载特性曲线如图 1-6 所示。其负载属于恒功率型负载的生产机械有机床的主轴机构和轧钢机的主传动机构等。例如,轧钢机轧制钢板时,工件小时需要高速度、低转矩,工件大时需要低速度、高转矩,不同转

<sup>①</sup> 位能转矩是由物体的重力和弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的负载转矩。

速下切削功率基本不变。

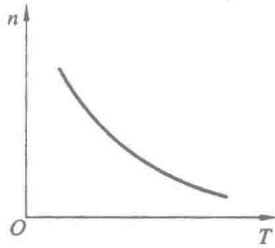


图 1-6 恒功率型负载特性曲线

以上所述恒转矩型负载、通风机型负载和恒功率型负载都是从各种实际负载中概括出来的典型的负载形式。

### 1.4 机电传动系统稳定运行的条件

从机电传动系统的运动方程式可以看出,保证系统匀速运转的必要条件是动转矩为零,即电动机轴上的拖动转矩  $T_M$  与折算到电动机轴上的负载转矩  $T_L$  大小相等,方向相反。从  $OTn$  坐标面上看,动转矩为零意味着电动机的机械特性曲线  $n = f(T_M)$  和生产机械的负载特性曲线  $n = f(T_L)$  必须有交点,如图 1-7 所示。图中,曲线 1 表示异步电动机的机械特性,曲线 2 表示的生产机械的负载特性,两特性曲线有两交点  $a$  和  $b$ 。交点常称为机电传动系统的平衡点,但到底哪一个交点是系统的稳定运行点呢?

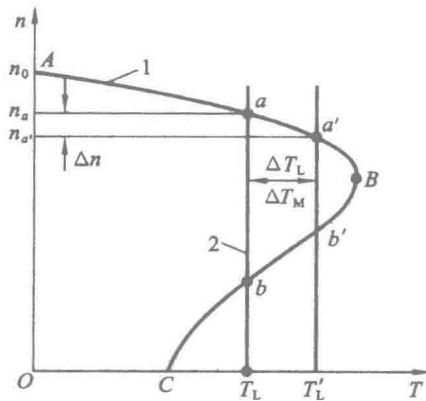


图 1-7 稳定工作点的判别

实际上只有点  $a$  才是系统的稳定运行点。假设系统原来工作在平衡点  $a$ , 此时  $T_M = T_L$ 。如果负载转矩突然增加了  $\Delta T_L$ , 即  $T_L$  变为  $T'_L$  ( $T'_L = T_L$ )



$+\Delta T_L$ ), 而电动机来不及变化, 仍工作在原来的点  $a$ , 其转矩仍为  $T_M$ 。于是,  $T_M < T'_L$ , 由电动机传动系统的运动方程可知, 系统要减速,  $n$  要由  $n_a$  下降为  $n'_a$ , 电动机的工作点转移到  $a'$ , 从电动机机械特性曲线的  $AB$  段可以看出, 电动机转矩  $T_M$  将增大为  $T'_M$ 。当干扰消除后, 必有  $T'_M > T_L$ , 迫使电动机转速上升。随着转速的上升, 转矩  $T_M$  又要减小, 直到  $n_a = n'_a$ ,  $T_M = T_L$ , 系统又回到原来的运行点  $a$ 。反之, 若  $T_L$  突然减小, 则  $n$  上升, 当干扰消除后, 系统也能回到原来的运行点  $a$ , 所以  $a$  点是系统的稳定运行点。

在  $b$  点, 若负载  $T_L$  突然增大, 则转速以下降, 从电动机机械特性曲线的  $BC$  段可以看出, 电动机的电磁转矩  $T_M$  要减小。当干扰消除后, 有  $T_M < T_L$ , 又使得  $n$  下降,  $T_M$  随  $n$  的下降而进一步减小, 促使  $n$  再进一步减小, 直至到零, 电动机停转。所以,  $b$  点不是系统的稳定运行点。

同理, 可以看出图 1-8 中的交点 6 是系统的稳定运行点。

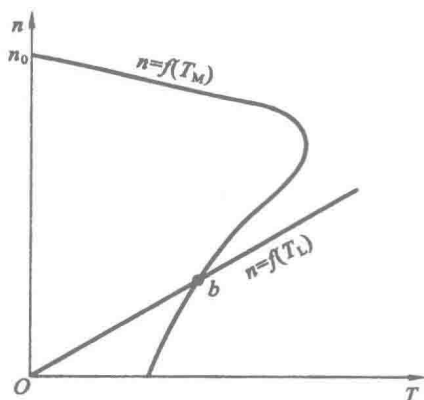


图 1-8 异步电动机拖动直流他励发电机工作时的特性

一般负载情况下, 只要电动机的机械特性是下降的, 整个系统就能够稳定运行。