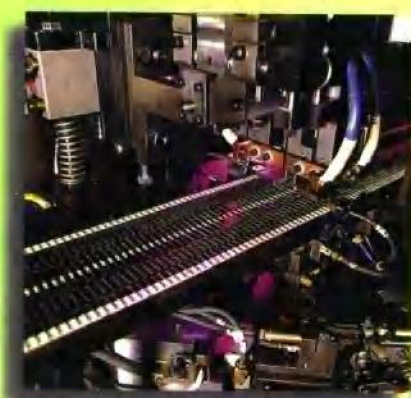


机床电气自动控制

JICHUANG DIANQI ZIDONG KONGZHI

★ 修订版

刘金琪 编著



哈尔滨工业大学出版社



机床电气自动控制

刘金琪 编著

NU27/23

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

内 容 简 介

前 言

《机床电气自动控制》一书自 1991 年出版以来,作为大专院校的教材和科研人员的参考书,收到了良好的效果,受到了广大读者的欢迎。

近年来,随着电力电子、计算机、控制理论等科学技术的发展,机床的电气控制从硬件结构到控制方式都有了很大的变化和进步。如在机床的主拖动系统中,采用由新型电力电子功率器件组成的变流装置供电的直流调速系统和变频、矢量控制的交流调速系统,在进给系统中采用数字化直、交流伺服系统等,从而大大提高了速度和位置控制质量;在机床的控制系统中采用可编程控制器(PLC),从而克服了以往大量采用各种继电器的弊端,提高了系统的可靠性。

考虑到上述自动化技术的进步,本次编写结合我国机床行业实际,力求体现实用性和先进性,对原书的内容作了如下较大的改动:

- (1) 以较大篇幅增加了可编程控制器及其在机床控制中的应用的内容;
- (2) 增加了由新型电力电子功率器件组成的变流装置供电的 PWM 控制的直流调速系统、无刷直流机调速系统、变频交流调速系统和矢量控制的交流调速系统等内容;
- (3) 增加了数字化直、交流伺服系统和步进电动机系统。

本书作为高等院校教材,经过多年教学实践,不断完善、不断充实,逐渐形成了现在的版本。本书由哈尔滨工业大学刘金琪副教授编著、郑载满教授审阅。

本书可作为高等工科院校机械工程及自动化专业的教材,也可供从事机电一体化有关专业的科研和工程技术人员参考。

作 者

1999 年 4 月

目 录

第一章 绪论

- 1.1 机床电气控制系统及其发展 (1)
- 1.2 机床电力拖动系统 (2)

第二章 电力拖动基础

- 2.1 电力拖动系统运动分析 (4)
 - 一、运动方程式 (4)
 - 二、电力拖动系统转矩分析 (5)
 - 三、系统工作的稳定条件 (7)
- 2.2 转矩、转动惯量的折算 (8)
 - 一、静态转矩和力的折算 (8)
 - 二、转动惯量的折算 (9)
 - 三、电动机的飞轮惯量 (10)
 - 四、典型负载转矩的计算 (11)
- 2.3 直流他激电动机的特性及速度调节 (14)
 - 一、机械特性方程式 (14)
 - 二、直流他激电动机的启动 (16)
 - 三、直流他激电动机的制动 (17)
 - 四、直流他激电动机的速度调节 (21)
 - 五、调速方式与负载性质的配合 (23)
- 2.4 三相异步电动机的特性及速度调节 (26)
 - 一、三相异步电动机的机械特性 (26)
 - 二、异步电动机的启动特性 (29)
 - 三、三相异步电动机的制动 (32)
 - 四、异步电动机的速度调节 (35)
- 2.5 同步电动机 (38)
 - 一、同步电动机的结构特点和基本工作原理 (38)
 - 二、永磁式同步电动机的特性 (39)
 - 三、磁阻式同步电动机 (41)
 - 四、磁滞式同步电动机 (42)

第三章 机床电气控制线路

- 3.1 机床常用低压电器 (44)
 - 一、开关电器 (44)

二、接触器	(50)
三、继电器	(52)
四、执行电器	(54)
3.2 机床电气控制系统图	(57)
一、图形符号与文字符号	(57)
二、电气原理图	(57)
三、电气安装图	(59)
3.3 机床电气控制线路的基本环节	(60)
一、三相鼠笼式异步电动机的直接启、停控制线路	(60)
二、降压启动控制线路	(64)
三、三相异步电动机的电气制动控制线路	(65)
3.4 典型机床电气控制线路分析	(68)
一、普通车床电气控制线路	(68)
二、磨床的电气控制线路	(73)
三、钻床电气控制线路	(76)
3.5 机床电气控制线路的设计	(80)
一、机床电气控制系统设计的基本内容	(80)
二、电力拖动方案确定的原则	(81)
三、继电器-接触器控制线路的设计方法	(81)
四、设计线路时应注意的问题	(86)
五、电动机的选择	(88)
六、常用低压电器的选择	(90)
第四章 可编程控制器及其系统设计	
4.1 可编程控制器 PLC 的结构和工作原理	(94)
一、PLC 的基本结构	(94)
二、PLC 的基本工作原理	(98)
三、程序执行过程	(99)
四、扫描周期	(99)
五、PLC 的主要特点	(100)
4.2 OMRON-C200H 的硬件资源	(101)
一、C200H PLC 的系统结构及特点	(102)
二、基本 I/O 单元	(104)
三、继电器区与数据区	(104)
四、CPU 的扫描时序和扫描时间	(112)
4.3 OMRON-C200H 的指令及编程方法	(115)
一、PLC 的编程方法与一般规则	(115)

二、C200H的基本指令	(118)
三、利用基本指令编程时应注意的问题	(120)
四、C200H的特殊功能指令	(122)
五、编程器	(130)
4.4 可编程控制器系统的设计	(132)
一、PLC控制系统设计的内容与步骤	(132)
二、可编程控制系统的设计举例	(134)
第五章 电力拖动调速系统	
5.1 机床的速度调节	(146)
一、机床对调速的要求和实验	(146)
二、调速系统性能指标	(148)
5.2 直流调速系统	(149)
一、晶闸管-电动机直流调速系统	(149)
二、IGBT-电动机直流调速系统	(158)
5.3 交流调速系统	(163)
一、变频器及其在交流调速中的应用	(163)
二、无刷整流子电动机调速系统	(169)
三、矢量控制调速系统	(171)
第六章 电气伺服系统	
6.1 伺服系统的基本结构	(176)
一、伺服电动机	(176)
二、增量式光电编码器	(177)
三、位置环增益 K_v	(178)
6.2 机床的位置控制	(180)
一、点到点的位置控制	(180)
二、直线切削时的位置控制	(180)
三、圆弧切削时的位置控制	(181)
6.3 数字伺服系统	(182)
一、偏差计数器控制伺服系统	(183)
二、PID控制伺服系统	(184)
6.4 步进电动机系统	(185)
一、步进电动机的结构和工作原理	(185)
二、步进电动机的驱动电源	(187)
三、步进电动机系统在机床中的应用	(190)
附录	(196)

第一章 绪 论

1.1 机床电气控制系统及其发展

机床,一般指金属切削机床,是机械制造业中的主要加工设备,因为绝大多数生产机械都是由机床加工而成的。机床的自动化水平,对提高生产率、提高产品质量、减轻体力劳动等方面起着很重要的作用。因此,机床工业的发展,对机械工业,乃至整个国民经济的发展,都具有重要的意义。

机床要运行,一需要动力,二需要控制。现代机床的动力主要由电动机来提供的,即由电动机来拖动机床的主轴和进给系统。机床的控制任务是实现对主轴的转速和进给量的控制,有时还要完成如各种保护、冷却、照明等系统的控制。机床的电气控制系统就是用电气手段为机床提供动力,并实现上述控制任务的系统。

在机床工业的发展过程中,提高机床的加工速度和加工精度,始终是人们努力解决的相互制约的两大课题,也是推动机床电气控制系统发展的动力。电力拖动控制、电力电子、检测、计算机和控制理论的发展,为机床电气控制系统不断发展提供了物质和技术条件。

20世纪40年代以前,机床的电气控制主要采用交流电动机拖动的继电器-接触器控制。由于当时的交流电动机难以实现调速,只能通过皮带、齿轮等机械机构来实现有级变速,因而机床的机械结构比较复杂,同时还限制了加工精度的提高。继电器-接触器控制系统可以实现机床的各种运动控制(如启动、制动、反转、变速等),并可实现逻辑控制、联锁控制、异地控制等,因而大大提高了机床的自动化水平,有助于减轻工人的劳动强度。这种控制系统技术简单、易于掌握,至今仍被广泛采用。

继电器-接触器控制系统是由各种电器组成的,而这些电器的机械动作寿命是有限的,必须按时更换损坏的电器,以免影响系统的可靠性。另外,根据加工工艺的要求,需要改变控制逻辑关系时,必须修改线路,重新安装配线,这对现代机床的控制要求是很不适应的。

20世纪40年代后,发电机-电动机、交磁放大机-电动机等直流调速系统,以其优良的调速性能,被广泛用于大型机床的主拖动和进给拖动系统中,不仅提高了机床的加工性能,还简化了机床的传动结构。

60年代开始发展起来的电力电子器件及其变换技术,将直流调速系统中的发电机、交磁放大机等旋转变换机,改变为性能更加优良的静止变换器。如可控硅(SCR)的直流调速系统被广泛用于龙门刨和大型立车的主拖动系统中;由大功率晶体管(GTR)、功率场效应管(P-MOSFET)、绝缘栅双极性晶体管(IGBT)等功率器件供电的直流调速系统用于各种机床的进给拖动系统中。

近年来, 由于电力电子器件及其变换技术的发展和矢量控制技术的应用, 交流调速系统有了很大的发展, 在调速性能上完全可以与直流调速系统相媲美, 加之性能可靠、维护方便, 因而在现代机床中逐步取代着直流调速系统。

在机床的控制方面, 近年出现的可编程控制器(PLC)已广泛用于电气控制系统中。可编程控制器不仅可以按事先编好的程序进行各种逻辑控制, 还具有随意编程、自动诊断、通用性强、体积小、可靠性高的特点。因此, 可编程控制器正逐步取代着继电器-接触器控制系统。

50 年代开始发展起来的数控(NC)机床, 是根据事先编制好的程序自动进行加工的自动化程度很高的新型机床。随着电力电子、计算机控制、现代控制理论和精密测量等技术的发展, 现代数控机床已发展为具有自动编程、自动加工、自动诊断、自动换刀等功能的全面自动化的计算机数控(CNC)机床, 数控机床已成为现代机床工业发展的主要方向。

可以预料, 随着科学技术的发展, 机床电气控制系统将继续向更高的自动化方向发展, 以不断提高机床的加工精度、生产效率和自动化水平。

1.2 机床电力拖动系统

前已述及, 现代机床的主轴拖动和进给拖动, 主要是由电动机提供动力的。这种以电动机为动力的机床拖动系统, 称为机床电力拖动系统。在机床电力拖动系统中, 电动机的任务是为机床的各种运动提供动力, 并根据加工工艺要求调节速度。

按负载性质, 机床的拖动系统可分为恒功率和恒转矩拖动系统。恒功率负载要求拖动系统在调速范围内提供恒定的功率, 而恒转矩负载则要求拖动系统在调速范围内提供恒定的转矩。车床、铣床、镗床等机床的主拖动为恒功率负载, 龙门刨床的主拖动(刨台拖动)和多数机床的进给拖动为恒转矩负载。

根据电动机数量, 机床电力拖动系统又可分为单电动机拖动和多电动机拖动系统。单电动机拖动是由一台电动机通过机械传动机构拖动主轴和进给系统, 因而机床的机械传动机构比较复杂。小型机床一般多采用单电动机拖动, 图 1.1 为 C 620 型普通车床的单电动机拖动示意图。

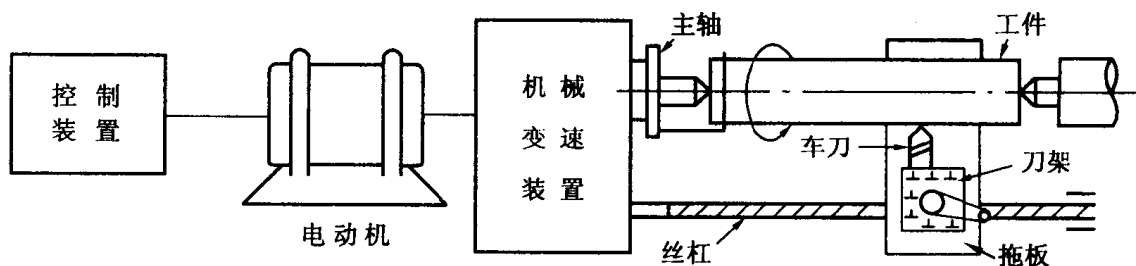


图 1.1 C 620 型普通车床单电动机拖动示意图

中、大型机床一般采用多电动机拖动, 即主轴和各进给系统分别由各自的电动机来拖动。采用多电动机拖动, 不仅可简化机床的机械传动机构, 还可使各拖动系统选择最合理的速度来进行加工, 从而提高加工精度。

按加工过程中的作用, 机床的拖动系统分为主拖动和进给拖动系统。如车床的带动

工件旋转的机构为主拖动，带动刀架运动的机构为进给拖动。龙门刨床的主拖动为带动刨台运动的机构，带动各刀架的机构为进给拖动。在机床的加工过程中，主拖动系统消耗加工功率的绝大部分。因此，主拖动系统应提供足够大的功率(或转矩)，同时还要有一定的调速范围和机械特性硬度。机床的主拖动，有采用交流电动机通过机械传动机构调速的有级变速拖动系统和可实现无级变速的直流调速系统。在磨床的主拖动系统中，由于砂轮转速很高(每分钟几万转以上)，上述交、直流拖动系统难以满足要求，因此多采用交流变频调速系统。

机床的进给拖动系统是提高加工精度的关键，因此必须具备良好的性能。首先要有较宽的调速范围，一般需要 1 000 以上；其次要有较高的调速精度，通常做成无差系统；第三要有良好的动态性能，如超调要小、响应时间要快、抗干扰性要强。为此，现代机床的进给拖动系统一般采用直流宽调速系统，近年更多的采用矢量控制的交流调速系统。

《机床电气自动控制》课程，主要介绍机床电力拖动及其电气控制系统的工作原理、实际控制线路和设计方法。本书是为机械工程及自动化专业和机床设计人员学习掌握机床电气控制系统而编写的教材。

第二章 电力拖动基础

电力拖动(或电气传动)系统是由电动机拖动,通过传动机构带动生产机械运转的一个动力学整体。要使生产机械有效而经济地工作,必须选择合适的电力拖动自动控制系统。这就需要了解电力拖动的基础知识以及相关的自动化技术。

本章介绍电力拖动的基本理论和概念。包括:生产机械的静转矩的性能、电力拖动系统运动方程式及其运动分析;交、直流电动机的机械特性、各种运转状态以及速度调节的基本原理和方法等。

2.1 电力拖动系统运动分析

一、运动方程式

电力拖动系统是电气与机械综合的系统,既有电气部分,又有机械部分。当机器运转时,它们的运动都服从动力学的基本规律。在讨论其运动情况时,所使用的重要工具即是运动方程式。

首先从最简单的单轴电力拖动系统来分析,如图 2.1 所示。电动机通过联轴节直接带动工作机械。

电动机发出的转矩 T 除了克服生产机械的负载转矩 T_L 之外,如有剩余,则使系统产生角加速度 $d\omega/dt$ 。根据力学中刚体的转动定律,有

$$T - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.1)$$

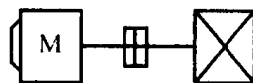


图 2.1 单轴电力拖动系统

式中 T 、 T_L ——电动机、负载转矩, $N \cdot m$;

J ——系统的转动惯量, $kg \cdot m^2$;

ω ——电动机轴的角速度, rad/s ;

t ——时间, s 。

式(2.1)右端 $J d\omega/dt$ 称为动态转矩或惯性转矩。在这里,电动机转矩和负载转矩是决定运动性质的主导因素,而动态转矩是其作用的结果。

式(2.1)是电力拖动系统运动方程式的一般形式。但是,在工程计算中往往不用转动惯量 J ,而是用飞轮惯量(或称飞轮矩) GD^2 来表征系统的惯性作用;也不用角速度 ω ,而是使用转速 n 来表示速度。

转动惯量可用下式表示

$$J = m r^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (2.2)$$

式中 m 、 G ——旋转体的质量与重力, $G = mg$, kg 或 N;

r 、 D ——旋转半径与旋转直径, m;

g ——重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

由式(2.2)可知

$$GD^2 = 4gJ \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

GD^2 即为飞轮惯量, 它是另一种表示转动体惯量的物理量。另外, 角速度 ω 与转速 n 之间的关系为

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

这样, 可以得到工程计算中使用的运动方程式

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (2.3)$$

当系统做直线运动时, 可以使用上述类似的方法, 根据牛顿第二定律直接得到下列运动方程式

$$F - F_L = m \frac{dv}{dt} \quad (2.4)$$

式中 F 、 F_L ——主动力、阻力, N;

m ——直线运动体的质量, kg;

v ——运动体的速度, m/s。

二、电力拖动系统转矩分析

借助于运动方程式可以分析系统的运动状况。为此首先需要分别了解电动机发出的转矩和生产机械负载转矩的性质, 然后研究这两个转矩共同作用到系统的效果。

1. 电动机转矩

电动机内电磁作用产生转矩, 它是转速的函数, $T = f(\omega)$ 。在电力拖动中, 经常写成 $n = f(T)$ 的形式, 即机械特性表达式。例如, 直流他激电动机的转速与转矩的关系可以看成是直线关系(见图 2.2 曲线 2); 鼠笼式异步电动机转速与转矩的关系是一条曲线(见图 2.2 曲线 3)。图 2.2 示出了 4 种电动机的机械特性。

由于电动机类型、运转状态以及生产机械负载类型的不同, 电动机轴上的转矩 T 及负载转矩 T_L , 不仅大小不同, 而且方向也是变化的。为此, 在应用运动方程式时, 转矩的正负号是很重要的。

通常把电动机的某一旋转方向(如逆时针方向)定为正方向, 与此方向相同的转矩 T 就取正号, 相反时则取负号。负载转矩 T_L 的作用方向, 当与电动机规定的旋转正方向相反时为正号, 相同时为负号。

2. 负载转矩

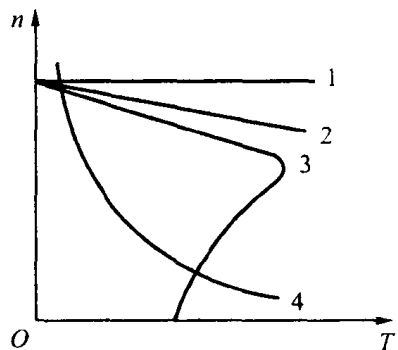


图 2.2 几种类型电动机的机械特性

- 1—同步电动机机械特性;
- 2—直流他激电动机机械特性;
- 3—感应电动机机械特性;
- 4—直流串激电动机机械特性

生产机械工作时，反映在电动机轴上的转矩称为负载转矩。常见的生产机械负载转矩可分为三种类型：

(1) 恒转矩负载

恒转矩负载是指负载转矩 T_L 与转速无关的负载，即当转速变化时，负载转矩为定值。恒转矩负载又分为反抗性恒转矩负载(阻力转矩负载)和位能性恒转矩负载。

当负载转矩的作用方向总是与运动方向相反，即运动方向改变时，其作用方向也改变，这种性质的转矩称为反抗性负载转矩，即为阻力转矩。例如，摩擦转矩、金属切削的阻力转矩等。反抗性恒转矩负载的特性如图 2.3 所示。

位能性恒转矩负载有固定的作用方向，与运动方向无关。位能性恒转矩负载的实例有：起重机的提升机构、卷扬机构等。位能性恒转矩负载的特性如图 2.4 所示。

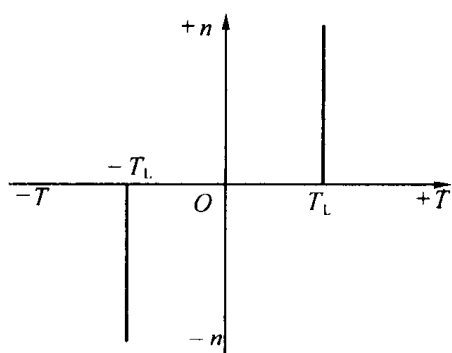


图 2.3 反抗性恒转矩的负载特性

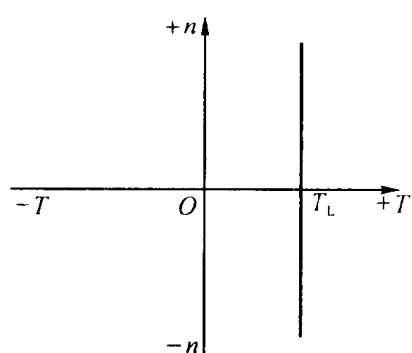


图 2.4 位能性恒转矩负载特性

(2) 通风机负载

通风机的负载转矩与转速的平方成正比，即

$$T_L = Kn^2 \quad (2.5)$$

式中 K —比例系数。

通风机负载特性如图 2.5 所示。属于通风机负载的生产机械有：通风机、水泵、油泵等。

(3) 恒功率负载

恒功率负载的负载转矩与转速成反比，即

$$T_L = \frac{K}{n} \quad (2.6)$$

则负载功率为

$$P_L = T_L \omega = T_L \frac{2\pi n}{60} = \frac{T_L n}{9.55} = \frac{K}{9.55} = K'$$

负载功率为常数，即转速变化时，负载功率不变。一些机床，如车床在粗加工时，切削量大，切削阻力大，应低速运行。在精加工时，切削量小，切削阻力小，往往采用高速运行。在不同转速下，负载转矩基本与转速成反比，负载功率基本是常数。恒功率的负载特性如图 2.6 所示。

按负载转矩与转速的关系，除有以上三种典型的负载外，还有其他类型的负载，这里不一一赘述。需要指出的是，实际的负载特性可能是几种典型负载的综合，应根据具体情况来确定。

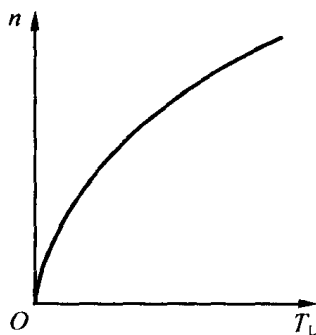


图 2.5 通风机负载特性

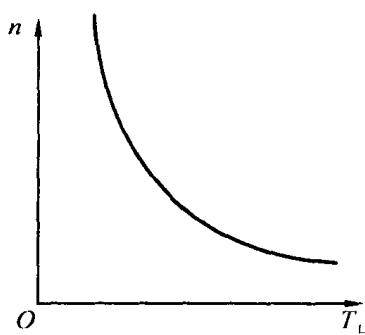


图 2.6 恒功率负载特性

3. 动态转矩

前面已经介绍, 动态转矩是电动机转矩 T 和负载转矩 T_L 共同作用的结果。通过运动方程式(2.1)、(2.3)的分析可知, 电动机工作状态有如下三种情况:

- ① 当 $T = T_L$, $J \frac{d\omega}{dt} = 0$, $\frac{dn}{dt} = 0$, 即 $n = 0$ 或 $n = \text{常数}$ 。说明电动机静止或等速旋转, 电力拖动系统处于某一稳定运转状态下。
- ② 当 $T > T_L$, $J \frac{d\omega}{dt} > 0$, 电力拖动系统处于加速状态, 即处于过渡过程中。
- ③ 当 $T < T_L$, $J \frac{d\omega}{dt} < 0$, $\frac{dn}{dt} < 0$, 电力拖动系统处于减速状态, 也是处于过渡过程中。

三、系统工作的稳定条件

为了使电力拖动系统正常工作, 系统必须是稳定的。所谓稳定, 就是系统受干扰后(负载变化以及电压、电阻等电气参量变化), 有自动回到稳定平衡状态的能力。

图 2.7 给出了鼠笼式异步电动机带有负载转矩 $T_L = \text{常数}$ 时两个负载转矩平衡点 A 和 B, 其中 A 点是稳定工作点, 而 B 点不是稳定工作点。

为了证明这种论断, 我们先由一般情况开始, 图 2.8 中给出的电动机转矩 T 与负载转矩 T_L 两特性曲线, 其交点处是平衡的, 即

$$T = T_L$$

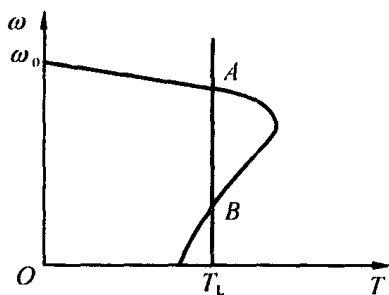


图 2.7 鼠笼式异步电动机的稳定工作

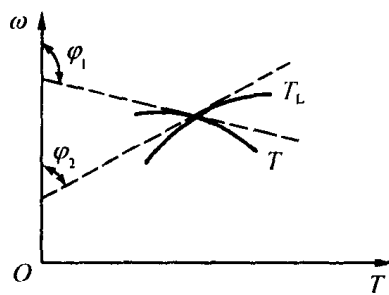


图 2.8 拖动系统稳定工作条件的确定

当系统受到干扰后, 平衡状态就破坏了。当只考虑系统机械惯性时, 电力拖动系统的工作决定于运动方程式

$$T - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.7)$$

假设当干扰过后, 转矩和转速、角速度的增量为 ΔT 、 ΔT_L 、 $\Delta \omega$ 。在微小偏差的情况下, 电动机和负载转矩可以用平衡交点处的切线代替, 这样就可以写出

$$\Delta T = \alpha_1 \Delta \omega$$

$$\Delta T_L = \alpha_2 \Delta \omega$$

式中

$$\alpha_1 = \frac{dT}{d\omega}$$

$$\alpha_2 = \frac{dT_L}{d\omega}$$

α_1 、 α_2 代表平衡交点处电动机特性和负载转矩特性各自的切线对转速轴夹角的正切函数。

$$\alpha_1 = \tan \varphi_1$$

$$\alpha_2 = \tan \varphi_2$$

将运动方程式写成增量的形式

$$\alpha_1 \Delta \omega - \alpha_2 \Delta \omega = J \frac{d\Delta \omega}{dt}$$

积分后, 得

$$\Delta \omega = \Delta \omega_0 e^{\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{J} t} \quad (2.8)$$

其中 $\Delta \omega_0$ ——干扰后转速变化的初始值。

为了保证系统的稳定工作, 必须是在 $t \rightarrow \infty$ 时, 转速偏差 $\Delta \omega \rightarrow 0$, 为此, 式(2.8)中指数应为负值。由于转动惯量永为正值, 所以稳定的条件是

$$\alpha_1 - \alpha_2 < 0$$

如果将相应的角度代入上式, 可得

$$\tan \varphi_1 < \tan \varphi_2 \quad (2.9)$$

也就是说系统的稳定条件是: 电动机转矩特性对转速轴倾斜角的正切函数, 要小于负载转矩特性的倾斜角的正切函数。

根据这个条件, 可以很容易地确定图 2.7 中的 B 点是不稳定的工作点。

由以上分析可知, 为使拖动系统稳定运行, 一般要求 $\tan \varphi_1$ 为负值, 即要求电动机具有下降的机械特性。

2.2 转矩、转动惯量的折算

在多数情况下, 电动机不是与被拖动的工作机械直接连接的, 而是借助于齿轮、皮带等传动链相连接。这是因为很多生产机械的工作转速较低, 而电动机在相同容量下, 额定转速愈高, 体积则愈小, 价格愈便宜, 因此大都是高额定转速。这样, 在电动机与工作机构之间, 就需要用传动装置来降低转速。为了列写系统的运动方程式, 通常是把一个真实的带有中间传动机构的多轴系统, 用一个简单而等效的单轴系统来代替。为此, 我们要把转矩和转动惯量等折算到电动机轴上。

一、静态转矩和力的折算

为了说明问题方便, 我们以起重机械为例, 推导静态转矩和力的折算方法。图 2.9

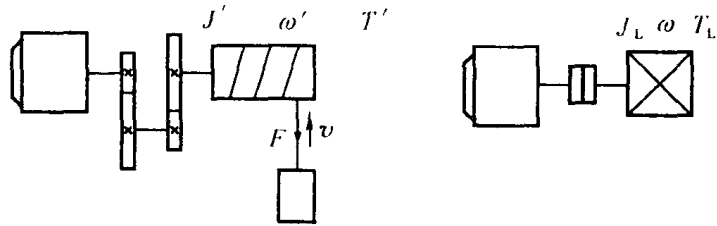
是起重机的传动系统图, 它是由电动机、减速齿轮和卷筒等组成的。

为了把作用在卷筒上的转矩 T_L 折算到电动机轴上, 应该使折算前后的功率保持不变。在折算中使用效率 η 来考虑传动机构中的损耗, 则有

$$T_L \omega \eta = T'_L \omega'_L$$

或

$$T_L = \frac{1}{j\eta} T'_L \quad (2.10)$$



(a) 多轴系统

(b) 等效单轴系统

图 2.9 起重机传动系统图

式中 T_L ——折算到电动机轴上的负载转矩, N.m;

T'_L ——工作机械轴(卷筒)上的负载转矩, N.m;

ω 、 ω'_L ——电动机轴、工作机械轴的角速度, rad/s;

j ——电动机轴到工作机械轴的传动比, $j = \frac{\omega}{\omega'_L}$ 。

我们也可以把直线作用的力 F 直接折算成为旋转运动的转矩。为此, 根据两种运动形式功率相等的原则, 写出

$$T_L \omega \eta = Fv$$

或

$$T_L = \frac{Fv}{\omega \eta} = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} \quad (2.11)$$

式中 v ——直线运动的速度, m/s。

二、转动惯量的折算

为了使用等效的单轴系统来代替真实的多轴系统, 需要把各轴上的转动惯量折算到同一轴上, 如折算到电动机轴(见图 2.9)。为此, 必须使折算前后系统储存的动能不变, 在一般情况下, 有

$$\frac{J\omega^2}{2} = \frac{J_M\omega^2}{2} + \frac{J_1\omega_1^2}{2} + \frac{J_2\omega_2^2}{2} + \dots + \frac{J_k\omega_k^2}{2}$$

或

$$J = J_M + J_1 \frac{1}{j_1^2} + J_2 \frac{1}{j_2^2} + \dots + J_k \frac{1}{j_k^2} \quad (2.12)$$

式中 J ——折算到电动机轴上的总转动惯量 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;

J_M 、 ω ——电动机轴上转动部件本身的转动惯量、角速度, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、rad/s;

$J_1 \dots J_k$ 、 $\omega_1 \dots \omega_k$ ——各传动轴上的转动惯量、角速度, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、rad/s;

$j_1 \dots j_k$ ——电动机轴到各传动轴的传动比。

在一般情况下, 传动机构的转动惯量比较小, 在计算中可以考虑适当增大电动机电

枢的转动惯量，作为传动机构的转动惯量。简化计算后，系统的转动惯量为

$$J = (1 + \delta) J_M + \frac{1}{j^2} J_L' \quad (2.13)$$

式中 $\delta = 0.1 \sim 0.2$ 为考虑传动机构转动惯量的系数。

j ——由电动机轴到工作机械的传动比。

在工程计算中，经常使用飞轮惯量 GD^2 ，则式(2.13)可写成

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_a^2 + \frac{1}{j^2} GD_L'^2 \quad (2.14)$$

当需要把直线运动的质量折算到旋转运动的飞轮惯量时，仍根据能量不变的原则，写成

$$J \frac{\omega^2}{2} = m \frac{v^2}{2}$$

$$J = m \frac{v^2}{\omega^2}$$

或

$$\frac{GD^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{G}{g} v^2$$

$$GD^2 = \frac{365G v^2}{n^2} \quad (2.15)$$

式中 J 或 GD^2 ——折算到电动机轴上的转动惯量或飞轮惯量， $N \cdot m$ 或 $kg \cdot m^2$ ；

m ——运动物体的质量， N ；

G ——运动物体的重力， kg ；

v ——物体运动的速度， m/s ；

n ——电动机的转速， r/min 。

三、电动机的飞轮惯量

在电力拖动系统的设计中，有的虚要知道电动机的 GD^2 ，即使是粗略的数据也好。但是这样的电动机可能需要根据拖动系统设计结果提出的要求专门制造，当然不可能由产品目录查得 GD^2 值。下面给出电动机的功率与其他参数的关系

$$P = CD^2 l \omega \quad (2.16)$$

式中 C ——电动机常数，与线负载和磁通密度有关；

D ——电枢直径， m ；

l ——电枢有效长度， m ；

ω ——电动机轴的角速度， rad/s 。

将式(2.16)除以转速 ω ，得

$$T = CD^2 l \quad (2.17)$$

由式(2.17)可以看出，电动机尺寸基本上决定于所需转矩，而与转速无关。

同一转矩的电动机，可以令直径大、长度短，或直径小、长度长。但是长度与直径之比 $\lambda = l/D$ 是有限制的，一般 $\lambda = 0.5 \sim 1$ ，有时可达 2 至 3。

把 λ 值代入式(2.17)中，得

$$T = C\lambda D^3$$

或

$$D = K_1 \sqrt[3]{T} \quad (2.18)$$