

高等学校教学用书

机电传动控制基础

主编 陈白宁 段智敏 刘文波



東北大學出版社
Northeastern University Press

高等学校教学用书

机电传动控制基础

主编 陈白宁 段智敏 刘文波

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 陈白宁 段智敏 刘文波 2008

图书在版编目 (CIP) 数据

机电传动控制基础 / 陈白宁, 段智敏, 刘文波主编. —沈阳: 东北大学出版社, 2008.9
ISBN 978-7-81102-607-8

I. 机… II. ①陈… ②段… ③刘… III. 电力传动控制设备 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 138345 号

内 容 简 介

本书是根据机械设计制造及其自动化专业的“机电传动控制”课程教学大纲而编写的。

全书共分 12 章, 内容包括: 机电传动系统的动力学基础, 电机, 控制电器, 继电器-接触器控制系统, 可编程序控制器, 直流传动控制, 交流传动控制, 步进电动机控制。

本书力求突出机电结合、电为机用的特点, 力求理论联系实际。课程体系新, 内容全面、实用, 由浅入深, 重点突出。每章后附有思考与习题。

本书是机械设计制造及其自动化专业本科生的教材, 并可作为机械设计制造及其自动化专业高职、电大、函大、夜大、网大学生的教材和其他机械类与相近机械类专业本科生的教材, 亦可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳市市政二公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm×260mm

印 张: 21

字 数: 537 千字

出版时间: 2008 年 9 月第 1 版

印刷时间: 2008 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑: 王兆元

责任校对: 郎 坤

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

ISBN 978-7-81102-607-8

定 价: 40.00 元

前 言

“机电传动控制”课程是机械制造及其自动化专业的一门必修的专业基础课，它是机电一体化人才所需电知识结构的躯体。本课程的任务是使学生了解机电传动控制的一般知识，掌握电机、电器、电力电子器件等的工作原理、特性、应用和选用的方法，掌握常用的开环、闭环控制系统的工作原理、特点、性能及应用场所，掌握PLC的应用方法和设计方法，了解最新控制技术在机械设备中的应用。

本书的组成系统是根据机械制造及自动化专业的需要而建立的，内容比较全面，在编写时既注重基础理论知识，又注意与实际应用相结合；既描述了器件的外特性，又注重器件在控制系统中的应用；既结合当前的国情介绍当今广泛应用的机电传动与控制技术，又充分反映本领域的最新技术和发展趋势。

本书是机械制造及自动化专业本科生的教材，也可作为该专业电大、函大、夜大、职大生的教材，同时可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

全书共分12章。第1章为概述；第2章重点介绍了机电传动系统的力学基础；基于电动机是机电传动的动力与电气控制的对象，第3，4，5章分别介绍了直流电动机的工作原理、特性及其传动控制的基础与系统；第6，7章介绍了交流电动机的工作原理、特性及其传动控制的基础与系统；第8章介绍了继电器-接触器控制系统中用到的常用电器和基本控制线路，以及典型的应用实例等；第9章介绍了PLC原理与应用；第10章介绍了步进电动机传动控制系统的组成与工作原理及性能；第11章介绍了各类常用控制电机的结构特点、工作原理、性能和应用；第12章介绍了电动机的选择。本书各章后面均附有思考与习题。

本书主编为陈白宁、段智敏、刘文波，副主编为任晓虹、王海。其中第 1, 3, 8, 9 章由陈白宁编写；第 2 章由刘文波编写；第 6 章由陈白宁，王海编写；第 5, 7, 10 章由段智敏编写；第 4, 11, 12 章由任晓虹编写。全书由陈白宁，段智敏统稿。

由于编者水平所限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 5 月

目 录

前 言

第1章 概 述	1
1.1 机电传动控制的目的和任务	1
1.2 机电传动及其控制系统的发展概况	1
1.3 内容安排	2
第2章 机电传动系统的基础知识	3
2.1 机电传动系统的运动方程式	3
2.2 多轴系统转矩、转动惯量和飞轮转矩的折算	5
2.3 生产机械的机械特性	7
2.4 机电传动系统稳定运行的条件	9
思考与习题	10
第3章 直流电机的工作原理及特性	11
3.1 直流电机的基本结构和工作原理	11
3.2 直流他励电动机的机械特性	13
3.3 直流他励电动机的启动特性	18
3.4 直流他励电动机的调速特性	19
3.5 直流他励电动机的制动特性	22
思考与习题	29
第4章 电力电子器件及其基本电路	32
4.1 电力半导体器件及其应用	32
4.2 功率二极管	33
4.3 晶闸管	34
4.4 可控整流电路	37
4.5 三相可控整流电路	45
4.6 逆变器	53
4.7 晶闸管的触发电路	61
4.8 晶闸管的保护	62
4.9 功率晶体管	63

思考与习题	65
第5章 直流传动控制系统	67
5.1 概 述	67
5.2 晶闸管-直流电动机单闭环控制系统	73
5.3 双闭环直流调速系统	83
5.4 可逆直流调速系统	86
5.5 晶体管脉宽调制 (PWM) 调速系统	93
5.6 数字化直流调速系统	97
思考与习题	104
第6章 交流电动机的工作原理与机械特性	106
6.1 三相异步电动机的结构和工作原理	106
6.2 三相异步电动机的机械特性	111
6.3 三相异步电动机的启动特性	115
6.4 三相异步电动机的调速特性	119
6.5 三相异步电动机的制动特性	121
6.6 单相异步电动机	123
6.7 同步电动机	126
思考与习题	128
第7章 交流传动控制系统	129
7.1 交流调压调速	129
7.2 电磁转差离合器调速系统	133
7.3 串级调速	134
7.4 变频调速	137
7.5 异步电动机矢量变换控制	149
7.6 无换向器电动机调速	153
思考与习题	158
第8章 继电器-接触器控制系统	159
8.1 常用控制电器	159
8.2 继电器-接触器自动控制的基本线路	165
8.3 继电器-接触器基本控制线路的设计	185
思考与习题	187
第9章 可编程序控制器	189
9.1 PLC 概述	189
9.2 PLC 的组成、工作原理及其软硬件基础	192

9.3 西门子 S7-200 系列 PLC 的基本指令	197
9.4 PLC 梯形图的经验设计方法	212
9.5 顺序控制设计法与顺序功能图	217
9.6 PLC 的功能指令	241
思考与习题	266
第 10 章 步进电机控制系统	271
10.1 步进电机的种类及结构	271
10.2 步进电机的工作原理	272
10.3 步进电机的运行特性	274
10.4 步进电机开环系统	274
10.5 步进电机的功率驱动电路	277
10.6 步进电机的主要性能指标和使用	279
思考与习题	282
第 11 章 控制电机	283
11.1 控制电机的基本用途、分类和特点	283
11.2 直流力矩电动机	284
11.3 测速发电机	286
11.4 自整角机	290
11.5 直线电动机	296
思考与习题	298
第 12 章 电动机的选择	300
12.1 选用电动机的基本方法	300
12.2 电动机的技术要求	301
12.3 一般运行条件下电动机的选择	305
12.4 电动机功率的计算	311
12.5 晶闸管供电对电动机的影响	319
思考与习题	320
附录 1 电气图形符号	322
附录 2 电气技术文字符号	326
参考文献	328

第 1 章 概 述

1.1 机电传动控制的目的和任务

在现代化的生产中,生产机械的自动化程度反映了工业生产发展的水平。现代化的生产设备与系统已不再是传统意义上单纯的机械系统,而是机电一体化的综合系统,电气传动与控制系统已经成为现代生产机械的重要组成部分。机与电、传动与控制已经成为不可分割的整体。

所谓机电传动,是指以电动机为原动机驱动生产机械的系统的总称,它的目的是将电能转变为机械能,实现生产机械的启动、停止以及速度调节,完成各种生产工艺过程的要求,保证生产过程的正常进行。

在现代工业中,为了实现生产过程自动化的要求,机电传动不仅包括拖动生产机械的电动机,而且包含控制电动机的一整套控制系统,也就是说,现代机电传动是和由各种控制元件组成的自动控制系统紧密地联系在一起的,所以本书取名为《机电传动控制基础》。

机电传动控制系统所要完成的任务,从广义上讲,就是要使生产机械设备、生产线、车间,甚至整个工厂都实现自动化;从狭义上讲,则指通过控制电动机驱动生产机械,实现生产产品数量的增加,质量的提高,生产成本的降低,工人劳动条件的改善以及能量的合理利用。随着生产工艺的发展,对机电传动控制系统提出了越来越高的要求。例如,一些精密机床要求加工精度达百分之几毫米,甚至几微米,重型镗床为保证加工精度和粗糙度达到要求,就要在极慢的稳速下进给,即要求在很宽的范围内调速;轧钢车间的可逆式轧机及其辅助机械,操作频繁,要求在不到 1 秒的时间内完成从正转到反转的过程,即要求能迅速地启动、制动和反转;对于电梯和提升机则要求启动与制动平稳,并能准确地停止在给定的位置上;为了提高效率,由数台或数十台设备组成的生产自动线,要求统一控制和管理。诸如此类的要求都是靠电动机及其控制系统和机械传动装置来实现的。

1.2 机电传动及其控制系统的发展概况

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。单就机电传动而言,它的发展大体上经历了成组拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。所谓成组拖动,就是一台电动机拖动一根天轴,再由天轴通过皮带轮和皮带分别拖动各生产机械,这种拖动方式生产效率低,劳动条件差,一旦电动机发生故障,将造成成组的生产机械停车;所谓单电动机拖动,就是用一台电动机拖动一台生产机械,它虽然较成组拖动前进了一步,但当一台生产机械的运动部件较多时,机械传动机构仍十分复杂;多电动机拖动,即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,例如,龙门刨床的刨台、左右垂直刀架与侧刀架、横梁及其夹紧机构,均分别由一台电动机拖动,这种拖动方式不仅大大简化了生产机械的传动机构,而且控制

灵活,为生产机械的自动化提供了有利的条件,所以,现代化机电传动基本上均采用这种拖动形式。

控制系统的发展伴随控制器件的发展而发展。随着功率器件、放大器件的不断更新,机电传动控制系统的发展日新月异,它主要经历了四个阶段:最早的机电传动控制系统出现在20世纪初,它仅借助于简单的接触器与继电器等控制电器,实现对控制对象的启动、停车以及有级调速等控制,它的控制速度慢,控制精度差。20世纪30年代出现了电机放大机控制,它使控制系统从断续控制发展到连续控制,连续控制系统可随时检查控制对象的工作状态,并根据输出量与给定量的偏差,对控制对象进行自动调整,它的快速性及控制精度都大大超过了最初的断续控制,并简化了控制系统,减少了电路中的触点,提高了可靠性,使生产效率大为提高。20世纪40—50年代出现了磁放大器控制和大功率可控水银整流器控制;时隔不久,于20世纪50年代末期出现了大功率固体可控整流元件——晶闸管,很快晶闸管控制就取代了水银整流器控制,后又出现了功率晶体管控制,由于晶体管、晶闸管具有效率高、控制特性好、反应快、寿命长、可靠性高、维护容易、体积小、重量轻等优点,它的出现为机电传动自动控制系统开辟了新纪元。随着数控技术的发展,计算机的应用特别是微型计算机的出现和应用,又使控制系统发展到一个新阶段——采样控制,它也是一种断续控制,但是和最初的断续控制不同,它的控制间隔(采样周期)比控制对象的变化周期短得多,因此,在客观上完全等效于连续控制,它把晶闸管技术与微电子技术、计算机技术紧密地结合在一起,使晶体管与晶闸管控制具有强大的生命力。

20世纪70年代初,计算机数字控制(CNC)系统被应用于数控机床和加工中心,这不仅加强了自动化程度,而且提高了机床的通用性和加工效率,在生产上得到了广泛的应用。工业机器人的诞生为实现机械加工全盘自动化创造了物质基础。20世纪80年代以来,出现了由数控机床、工业机器人、自动搬运车等组成的统一由中心计算机控制的机械加工自动线——柔性制造系统(FMS),它是实现自动化车间和自动化工厂的重要组成部分。机械制造自动化高级阶段是走向设计、制造一体化,即利用计算机辅助设计(CAD)与计算机辅助制造(CAM)形成产品设计和制造过程的完整系统,对产品构思和设计直至装配、试验和质量管理这一全过程实现自动化。为了实现制造过程的高效率、高柔性、高质量,研制计算机集成制造系统(CIMS)是人们今后的任务。

1.3 内容安排

全书共分12章。第1章为概述;第2章重点介绍了机电传动系统的力学基础,第3,第4,第5章分别介绍了直流电动机的工作原理、特性及其传动控制的基础与系统;第6,7章介绍了交流电动机的工作原理、特性及其传动控制的基础与系统;第8章介绍了继电器-接触器控制系统中用到的常用电器和基本控制线路,以及典型的应用实例等;第9章介绍了PLC的原理与应用;第10章介绍了步进电动机传动控制系统的组成与工作原理及性能;第11章介绍了各类常用控制电机的结构特点、工作原理、性能和应用;第12章介绍了电动机的选择。本书各章后面均附有思考与习题。

第2章 机电传动系统的基础知识

机电传动系统是一个由电动机拖动并通过传动机构带动生产机械运转的机电运动的动力学整体。尽管电动机种类繁多、特性各异,生产机械的负载性质也可以各种各样,但从动力学的角度来分析,则都应服从动力学的统一规律,所以,本章首先分析机电传动系统的运动方程式,进而分析机电传动系统稳定运行的条件。

2.1 机电传动系统的运动方程式

图2.1所示为一单轴机电传动系统,它是由电动机M产生转矩 T ,用来克服负载转矩 T_L ,以带动生产机械运动。当这两个转矩平衡时,传动系统维持恒速转动,转速 n 或角速度 ω 不变,加速度 dn/dt 或角加速度 $d\omega/dt$ 等于零,即当 $T = T_L$ 时, $n = \text{常数}$, $dn/dt = 0$,或 $\omega = \text{常数}$, $d\omega/dt = 0$,这种运动状态称为静态(相对静止状态)或稳态(稳定运转状态)。当 $T \neq T_L$ 时,转速 n (或 ω)就要变化,产生加速或减速,转速变化的大小与传动系统的转动惯量 J 有关,把上述的这些关系用方程式表示,即为

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

式中: T ——电动机产生的转矩;

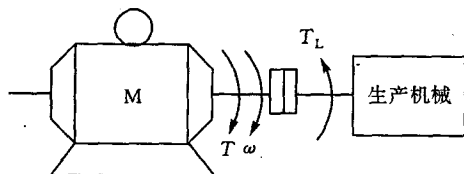
T_L ——单轴传动系统的负载转矩;

J ——单轴传动系统的转动惯量;

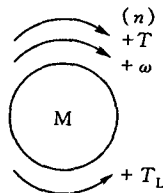
ω ——单轴传动系统的角速度;

t ——时间。

式(2.1)即为单轴机电传动系统方程式。



(a) 传动控制系统



(b) 转矩转速的正方向

图 2.1 单轴机电传动系统

在实际工程计算中,往往用转速 n 代替角速度 ω ,用飞轮惯量(也称飞轮转矩) GD^2 代替转动惯量 J ,由于 $J = m\rho^2 = mD^2/4$,其中, ρ 和 D 定义为惯性半径和惯性直径,而质量 m 和重力 G 的关系是 $G = mg$, g 为重力加速度,所以, J 与 GD^2 的关系是

$$\{J\}_{\text{kg}\cdot\text{m}^2} = \frac{1}{4} \{m\}_{\text{kg}} \{D^2\}_{\text{m}^2} = \frac{1}{4} \frac{\{G\}_{\text{N}}}{\{g\}_{\text{m/s}^2}} \{D^2\}_{\text{m}^2} = \frac{1}{4} \{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}^2/\{g\}_{\text{m/s}^2}} \quad (2.2)$$

且

$$\{\omega\}_{\text{rad/s}} = \frac{2\pi}{60} \{n\}_{\text{r/min}} \quad (2.3)$$

将式(2.2)和式(2.3)代入式(2.1),就可得运动方程式的实用形式:

$$\{T\}_{\text{N}\cdot\text{m}} - \{T_L\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = \frac{\{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}^2}}{375} \frac{d\{n\}_{\text{r/min}}}{d\{t\}_{\text{s}}} \quad (2.4)$$

式中,常数 375 包含着 $g=9.81\text{m/s}^2$,故它有加速度的量纲, GD^2 是一个整体物理量。运动方程式是研究机电传动系统最基本的方程式,它决定着系统运动的特征。当 $T > T_L$ 时,加速度 $a = dn/dt$ 为正,传动系统为加速运动;当 $T < T_L$ 时, $a = dn/dt$ 为负,系统为减速运动。系统处于加速或减速的运动状态称为动态。处于动态时,系统中必然存在一个动态转矩

$$\{T_d\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = \frac{\{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}^2}}{375} \frac{d\{n\}_{\text{r/min}}}{d\{t\}_{\text{s}}} \quad (2.5)$$

它使系统的运动状态发生变化。这样,运动方程式(2.1)或(2.4)也可以写成转矩平衡方程式

$$T - T_L = T_d$$

或

$$T = T_L + T_d \quad (2.6)$$

就是说,电动机所产生的转矩在任何情况下,总是由轴上的负载转矩(即静态转矩)和动态转矩之和所平衡。

当 $T = T_L$ 时, $T_d = 0$,这表示没有动态转矩,系统恒速运转,即系统处于稳态。稳态时,电动机发出转矩的大小仅由电动机所带的负载(生产机械)所决定。

值得指出的是,图 2.1(b)中关于转矩正方向的约定:由于传动系统有各种运动状态,相应的运动方程式中的转速和转矩就有不同的符号。因为电动机和生产机械以共同的转速旋转,所以,一般以转动方向为参考来确定转矩的正负。设电动机某一转动方向的转速 n 为正,则约定电动机转矩 T 与 n 一致的方向为正向,负载转矩 T_L 与 n 相反的方向为正向。根据上述约定,可以从转矩与转速的符号上判定 T 与 T_L 的性质:若 T 与 n 符号相同(同为正或同为负),则表示 T 的作用方向与 n 相同, T 为拖动转矩;若 T 与 n 符号相反,则表示 T 的作用方向与 n 相反, T 为制动转矩。而若 T_L 与 n 符号相同,则表示 T_L 的作用方向与 n 相反, T_L 为制动转矩;若 T_L 与 n 符号相反,则表示 T_L 的作用方向与 n 相同, T_L 为拖动转矩。

如图 2.2 所示,在提升重物过程中,试判定起重机启动和制动时电动机的电磁转矩 T 和负载转矩 T_L 的符号。设重物提升时电动机旋转方向为 n 的正方向。

启动时:如图 2.2(a)所示,电动机拖动重物上升, T 与 n 正方向一致, T 取正号; T_L 与 n 方向相反, T_L 也取正号。这时的运动方程式为

$$\{T\}_{\text{N}\cdot\text{m}} - \{T_L\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = \frac{\{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}^2}}{375} \frac{d\{n\}_{\text{r/min}}}{d\{t\}_{\text{s}}}$$

若能提升重物,必存在 $T > T_L$,即动态转矩 $T_d = T - T_L$ 和加速度 $a = dn/dt$ 均为正,系

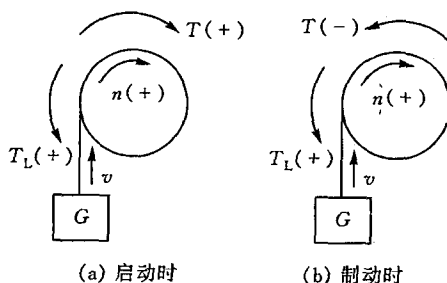


图 2.2 T, T_L 符号的判别

统加速运行。

制动时:如图 2.2(b)所示,仍是提升过程, n 为正,只是此时电动机的电磁转矩制止系统运动,所以, T 与 n 方向相反, T 取负号,而重物产生的转矩总是向下,和启动过程一样 T_L 仍取正号,这时的运动方程式为

$$- \{T\}_{N \cdot m} - \{T_L\}_{N \cdot m} = \frac{\{GD^2\}_{N \cdot m^2} d \{n\}_{r/min}}{375 \frac{d \{t\}_s}{dt}}$$

可见,此时动态转矩和加速度都是负值,它使重物减速上升,直到停止。制动过程中,系统中能产生的动态转矩由电动机的制动转矩和负载转矩所平衡。

2.2 多轴系统转矩、转动惯量和飞轮转矩的折算

2.1 节所介绍的是单轴拖动系统的运动方程式,但实际的拖动系统一般常是多轴拖动系统,如图 2.3 所示。这是因为许多生产机械要求低速运转,而电动机一般具有较高的额定转速。这样,电动机与生产机械之间就必须安装减速机构,如减速齿轮箱或蜗轮蜗杆、皮带等减速装置。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,即折算成如图 2.1 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同折算后的单轴系统,在能量关系或功率关系上保持不变。下面简单地介绍折算方法。

2.2.1 负载转矩的折算

由于负载转矩是静态转矩,它是一个与功率有关的物理量,因此可根据静态时功率守恒原则进行折算。

对于旋转运动,如图 2.3(a)所示,当系统匀速运动时,生产机械的负载功率为

$$P_L' = T_L' \omega_L$$

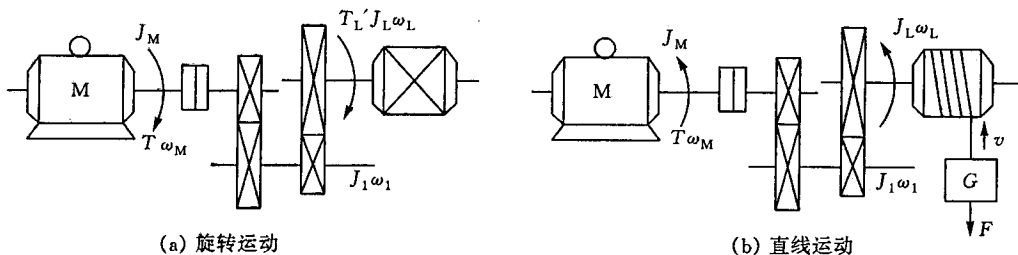


图 2.3 多轴拖动系统

式中: T_L' , ω_L ——生产机械的负载转矩和旋转角速度。

设 T_L' 折算到电机轴上的负载转矩为 T_L , 则电动机轴上的负载功率为

$$P_M = T_L \omega_M$$

式中: ω_M ——电动机输出轴上的角速度。

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 η_C 来表示,且

$$\eta_C = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = \frac{P_L'}{P_M} = \frac{T_L' \omega_L}{T_L \omega_M}$$

于是可得折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_L = \frac{T_L' \omega_L}{\eta_C \omega_M} = \frac{T_L'}{\eta_C j} \quad (2.7)$$

式中: η_C ——电动机拖动生产机械运动时的传动效率;

j ——传动机构的速比, $j = \omega_M / \omega_L$ 。

对于直线运动,如图 2.3(b)所示的卷扬机构就是一例。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

$$P_M = T_L \omega_M$$

式中: T_L ——负载力 F 在电动机轴上产生的负载转矩。

如果是电动机拖动生产机械旋转或移动,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

$$T_L \omega_M = \frac{Fv}{\eta_C}$$

将

$$\{\omega\}_{\text{rad/s}} = \frac{2\pi}{60} \{n\}_{\text{r/min}}$$

代入上式,可得

$$\{T_L\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = \frac{9.55 \{F\}_{\text{N}} \{v\}_{\text{m/s}}}{\eta_C \{n_M\}_{\text{r/min}}} \quad (2.8)$$

式中: n_M ——电动机轴的转速。

如果是生产机械拖动电动机旋转,例如,卷扬机构下放重物时,电动机处于制动状态,这种情况下传动机构中的损耗则由生产机械的负载来承担,于是有

$$T_L \omega_M = Fv \eta_C'$$

或

$$\{T_L\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = \frac{9.55 \eta_C' \{F\}_{\text{N}} \{v\}_{\text{m/s}}}{\{n_M\}_{\text{r/min}}} \quad (2.9)$$

式中: η_C' ——生产机械拖动电动机运动时的传动效率。

2.2.2 转动惯量和飞轮转矩的折算

由于转动惯量和飞轮转矩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。对于旋转运动(如图 2.3(a)所示的拖动系统),折算到电动机轴上的总转动惯量为

$$J_Z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} \quad (2.10)$$

式中: J_M, J_1, J_L ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的转动惯量;

$j_1 = \omega_M / \omega_1$ ——电动机轴与中间传动轴之间的速比;

$j_L = \omega_M / \omega_L$ ——电动机轴与生产机械轴之间的速比;

$\omega_M, \omega_1, \omega_L$ ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的角速度。

折算到电动机轴上的总飞轮转矩为

$$GD_Z^2 = GD_M^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \quad (2.11)$$

式中: GD_M^2, GD_1^2, GD_L^2 ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的飞轮转矩。

当速比 j 较大时, 中间传动机构的转动惯量 J_1 或飞轮转矩 GD_1^2 , 在折算后占整个系统的比重不大。在实际工程中, 为了计算方便起见, 多采用适当加大电动机轴上的转动惯量 J_M 或飞轮转矩 GD_M^2 的方法, 来考虑中间传动机构的转动惯量 J_1 或飞轮转矩 GD_1^2 的影响, 于是有

$$J_Z = \delta J_M + \frac{J_L}{j_L^2} \quad (2.12)$$

或

$$GD_Z^2 = \delta GD_M^2 + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \quad (2.13)$$

一般 $\delta = 1.1 \sim 1.25$ 。

对于直线运动(如图 2.3(b)所示的拖动系统), 设直线运动部件的质量为 m , 折算到电动机轴上的总转动惯量或总飞轮转矩分别为

$$J_Z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} + m \frac{v^2}{\omega_M^2} \quad (2.14)$$

或

$$\{GD_Z^2\}_{N \cdot m^2} = \{GD_M^2\}_{N \cdot m^2} + \frac{\{GD_1^2\}_{N \cdot m^2}}{j_1^2} + \frac{\{GD_L^2\}_{N \cdot m^2}}{j_L^2} + 365 \frac{\{G_N\} \{v^2\}_{(m/s)^2}}{\{n_M^2\}_{(r/min)^2}} \quad (2.15)$$

依照上述方法, 就可把具有中间传动机构带有旋转运动部件和直线运动部件的多轴拖动系统折算成等效的单轴拖动系统, 将所求得的 T_L, GD_Z^2 代入式(2.4), 就可得到多轴拖动系统的运动方程式

$$\{T\}_{N \cdot m} - \{T_L\}_{N \cdot m} = \frac{\{GD_Z^2\}_{N \cdot m^2} d\{n\}_{r/min}}{375 \frac{d\{t\}_s}{dt}} \quad (2.16)$$

以此来研究机电传动系统的运动规律。

2.3 生产机械的机械特性

上面所讨论的机电传动系统运动方程式中, 负载转矩 T_L 可能是不变的常数, 也可能是转速 n 的函数。同一转轴上负载转矩和转速之间的函数关系, 称为生产机械的机械特性。为了便于和电动机的机械特性配合起来分析传动系统的运行情况, 今后提及生产机械的机械特性时, 除特别说明外, 均指电动机轴上的负载转矩和转速之间的函数关系, 即 $n = f(T_L)$ 。不同类型的生产机械在运动中受阻力的性质不同, 其机械特性曲线的形状也有所不同, 大体上可以归纳为以下几种典型的机械特性。

2.3.1 恒转矩型机械特性

此类机械特性的特点是负载转矩为常数, 如图 2.4 所示。属于这一类的生产机械有提升机构、提升机的行走机构、皮带运输机以及金属切削机床等。

依据负载转矩与运动方向的关系, 可以将恒转矩型的负载转矩分为反抗转矩和位能转矩。

反抗转矩也称摩擦转矩,是因为摩擦及非弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的负载转矩,机床加工过程中切削力所产生的负载转矩就是反抗转矩。反抗转矩的方向恒与运动方向相反,运动方向发生改变时,负载转矩的方向也会随着改变,因而它总是阻碍运动的。由 2.1 节中关于转矩正方向的约定可知,反抗转矩恒与转速 n 取相同的符号,即 n 为正方向时 T_L 为正,特性在第一象限; n 为反方向时 T_L 为负,特性在第三象限,如图 2.4(a)所示。位能转矩与摩擦转矩不同,它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,卷扬机起吊重物时重力所产生的负载转矩就是位能转矩。位能转矩的作用方向恒定,与运动方向无关,它在某方向阻碍运动,而在相反方向便促进运动。卷扬机起吊重物时由于重力的作用方向永远向着地心,所以,由它产生的负载转矩永远作用在使重物下降的方向,当电动机拖动重物上升时, T_L 与 n 方向相反;而当重物下降时, T_L 则与 n 方向相同。不管 n 为正向还是反向, T_L 都不变,特性在第一、四象限,如图 2.4(b)所示。不难理解,在运动方程中,反抗转矩 T_L 的符号总是正的;位能转矩 T_L 的符号则有时为正,有时为负。

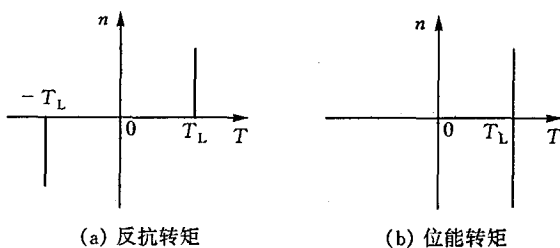


图 2.4 两种恒转矩型机械特性

2.3.2 离心式通风机型机械特性

这一类型的机械是按离心力原理工作的,如离心式鼓风机、水泵等,它们的负载转矩 T_L 与 n 的平方成正比,即 $T_L = Cn^2$, C 为常数,如图 2.5 所示。

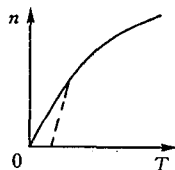


图 2.5 离心式通风机型机械特性

2.3.3 直线型机械特性

这一类机械的负载转矩 T_L 是随 n 的增加成正比例增大,即 $T_L = Cn$, C 为常数,如图 2.6 所示。

实验室中作模拟负载用的他励直流发电机,当励磁电流和电枢电阻固定不变时,其电磁转矩与转速即成正比。

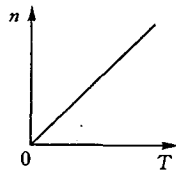


图 2.6 直线型机械特性

2.3.4 恒功率型机械特性

此类机械的负载转矩 T_L 与转速 n 成反比,即 $T_L = K/n$, 或 $K = T_L n \propto P$ 为常数,如图 2.7 所示。例如,车床加工,粗加工时,切削量大,负载阻力大,开低速;精加工时,切削量小,负载阻力小,开高速。当选择这样的方式加工时,不同转速下,切削功率基本不变。

除了上述几种类型的生产机械外,还有一些生产机械具有各自的转矩特性,如带曲柄连杆机构的生产机械,它们的负载转矩 T_L 是随转角 α 而变化的,而球磨机、碎石机等生产机械,其负载转矩则随时间作无规律的随机变化。

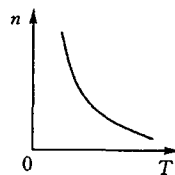


图 2.7 恒功率型机械特性

还应指出,实际负载可能是单一类型的,也可能是几种类型的综合,例如,实际通风机除了

主要是通风机性质的负载特性外,轴上还有一定的摩擦转矩 T_0 ,所以,实际通风机的机械特性应为 $T_L = T_0 + Cn^2$,如图 2.5 中的虚线所示。

2.4 机电传动系统稳定运行的条件

机电传动系统里,电动机与生产机械连成一体,为了使系统运行合理,就要使电动机的机械特性与生产机械的机械特性尽量相配合。特性配合好的一个基本要求是系统要能稳定运行。

机电传动系统的稳定运行包含两重含义:一是系统应以一定速度匀速运转;二是系统受某种外部干扰作用(如电压波动、负载转矩波动等)而使运行速度稍有变化时,应保证在干扰消除后系统能恢复到原来的运行速度。

为保证系统匀速运转,必要条件是电动机轴上的拖动转矩 T 和折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 大小相等,方向相反,相互平衡。从 T - n 坐标平面上看,这意味着电动机的机械特性曲线 $n = f(T)$ 和生产机械的机械特性曲线 $n = f(T_L)$ 必须有交点,如图 2.8 所示,图中,曲线 1 为异步电动机的机械特性,曲线 2 为电动机拖动的生产机械的机械特性(恒转矩型的),两特性曲线有交点 a 和 b,交点常被称为拖动系统的平衡点。

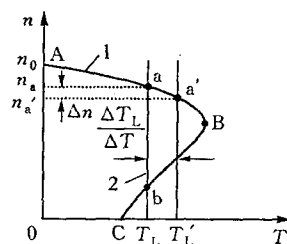


图 2.8 稳定工作点的判别

但是机械特性曲线存在交点只是保证系统稳定运行的必要条件,还不是充分条件,实际上只有 a 点才是系统的稳定平衡点,因为在系统出现干扰时——例如负载转矩突然增加 ΔT_L ,变为 T_L' ,于是 $T < T_L'$,由拖动系统运动方程可知,系统要减速,即 n 要下降到 $n_a' = n_a - \Delta n$,从电动机机械特性的 AB 段可看出,电动机转矩 T 将增大为 $T' = T + \Delta T$,当干扰消除($\Delta T_L = 0$)后,必有 $T' > T_L'$,迫使电动机加速,转速 n 上升,而 T 又要随 n 的上升而减小,直到 $\Delta n = 0$, $T = T_L$,系统重新回到原来的运行点 a;反之,若 T_L 突然减小, n 上升,当干扰消除后,也能回到 a 点工作,所以 a 点是系统的稳定平衡点。在 b 点,若 T_L 突然增加, n 要下降,从电动机机械特性的 BC 段可看出, T 要减小,当干扰消除后,则有 $T < T_L$,使得 n 又要下降, T 随 n 的下降而进一步减小,使 n 进一步下降,一直到 $n = 0$,电动机停转;反之,若 T_L 突然减小, n 上升,直至越过 B 点进入 AB 段的 a 点工作。所以, b 点不是系统的稳定平衡点。从以上分析可以总结出机电传动系统稳定运行的充分必要条件是:

(1) 电动机和生产机械的机械特性曲线 $n = f(T)$ 和 $n = f(T_L)$ 有交点(即拖动系统的平衡点);

(2) 当转速大于平衡点所对应的转速时, $T < T_L$,即若干扰使转速上升,当干扰消除后,应有 $T - T_L < 0$;而当转速小于平衡点所对应的转速时, $T > T_L$,即若干扰使转速下降,当干扰消除后,应有 $T - T_L > 0$ 。

只有满足上述两个条件的平衡点,才是拖动系统的稳定平衡点,即只有这样的特性配合,系统在受到外界干扰后,才具有恢复到原平衡状态的能力而进入稳定运行。

例如,当异步电动机拖动直流他励发电机工作,具有图 2.9 的特性时, b 点便符合稳定运行条件,因此,在此情况下, b

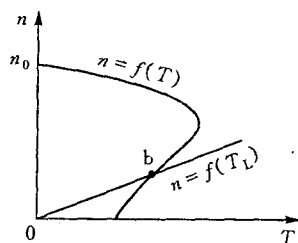


图 2.9 异步电动机拖动直流他励发电机工作时的特性