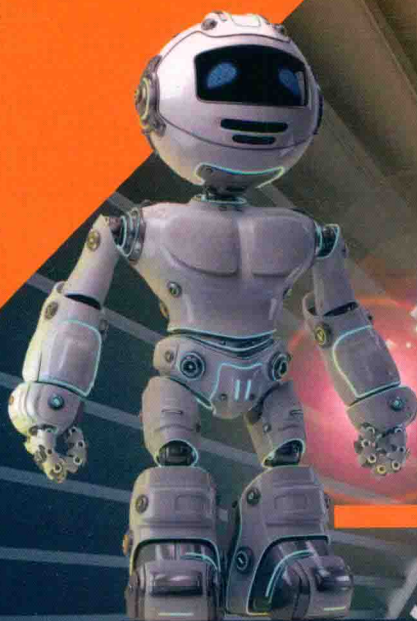




机械设计制造及其自动化专业课程群系列

机电传动控制

◎ “互联网+”时代，让学习
可以移动互联

◎ 扫二维码，链接海量资源，
随时随地学习

◎ 提供丰富教学资源（课件/
视频/文档等），方便教与学

主 编 张发军
副主编 钟先友

机械设计制造及其自动化专业课程群系列

机电传动控制

主 编
副主编

张发军
钟先友



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

机电传动控制是机械工程、电子科学、自动控制等学科相交叉所形成的一门科学技术。它包括电动机、电气控制电路以及电动机和运动部件相互联系的传动机构。其主要目的是研究解决与实际工程中运动的传动与控制问题。

本书以机电系统中运动的传动和控制为两条主线，分别叙述了机电传动系统动力学基础及其过渡过程与稳定运行要求；结合实际操作需求介绍了电机常用控制元件与基本电路；说明了直流电动机、交流电动机和常用控制电动机的工作原理及其结构特点，重点分析了直流电动机和三相异步电动机的机械特性以及它们启动、制动与调速的原理和相关知识；最后简要介绍了机电传动系统 PLC 变频控制基础等相关知识和典型设备电气控制线路的解读方法。

为便于读者学习，每章开头部分都有目标与解惑部分，用来引入主题知识点，并配有相关设备、数控机床的质疑图片，而每章结束部分均有对本章知识点的小结与拓展，并附有思考与习题。

本书可作为高等院校“机械制造及其自动化”“机械设计及理论”“机械电子工程”和“电气工程及其自动化”等专业“机电传动控制”课程的本科生与研究生教材，也可供从事机电传动及其自动控制领域的工程技术人员阅读与参考。

本书提供免费的教学课件，可以到中国水利水电出版社网站下载，网址为：<http://www.waterpub.com.cn/>。

图书在版编目（CIP）数据

机电传动控制 / 张发军主编. — 北京：中国水利水电出版社，2018.7

普通高等教育“十三五”精品规划教材. 机械设计制造及其自动化专业课程群系列

ISBN 978-7-5170-6110-6

I. ①机… II. ①张… III. ①电力传动控制设备—高等学校—教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第304615号

书 名	普通高等教育“十三五”精品规划教材 机电传动控制 JIDIAN CHUANDONG KONGZHI
作 者	主 编 张发军 副主编 钟先友
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： sales@waterpub.com.cn 电话：(010) 68367658（营销中心）
经 售	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	北京智博尚书文化传媒有限公司
印 刷	三河市龙大印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.5印张 349千字
版 次	2018年7月第1版 2018年7月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	39.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

PREFACE

很早以前，作者就想依据一个有着时代特征与专业鲜明的系统设备，来将机电传动控制的相关内容集成整合为一本专业教材，以飨读者，如今就真有了这样一个代表性很强的系统装置——数控机床。

数控机床的基本组成包括加工程序载体、数控装置、伺服驱动装置、机床主体和其他辅助装置，而各个组成装置部分就是机电传动与控制的核心内容。作为工程专业技术人员，通过一个系统设备的各个组成环节来认识机电传动控制课程的核心内容，是符合读者认知、学习本书知识体系的规律的。

全书围绕数控机床中所涉及的机电传动控制技术，先后引入各个章节的学习内容。书中每一章节主要是针对初学者看着一种装有程序控制系统的自动化机床而思索的几个相关问题而展开系统讲述。围绕着机电传动控制的系统动力学基础、系统过渡稳定、传统控制元件、传统控制方法、直流电机特性、交流电机特性、控制电机种类、电机启动与调速、PLC 变频控制技术和典型设备控制线路而展开编写。

本书特色主要是：以一个初学者面对数控机床的众多疑问为主线，向读者讲授机电传动控制中的基本概念、基本理论、基本方法和典型应用实例，将编者的科研成果与现代传动控制技术的发展现状及其发展趋势紧密结合起来。在内容安排上考虑到机械专业特点，对涉及过深的电机学、计算机控制以及信息处理等方面仅仅从概念上加以说明，并在相关地方印有二维码，以便需要更深入了解的读者快速索引。前言后附有本书二维码资源列表。在内容上不求高深，力求做到循序渐进、由浅入深，既让读者全面掌握机电传动控制的基本知识，又让读者对现代机电传动控制领域的发展前景有一个较全面的了解。

本书是以编者 20 余年来在机电传动控制教学与研究中的心得、体会与成果为基础，借鉴国内外同行最新研究成果，为满足新时期本科和研究生教学改革与发展的具体要求而编写的。



图书资源总码

在编写过程中，硕士研究生张烽、杨先威、杨晶晶、余奕、明晓杭、宋钰青、邓安禄等协助编者做了大量的编辑工作，在此深表感谢。由于编者水平所限，敬请读者对书中的缺点错误提出宝贵批评和意见。

编者
2018 年 3 月

机电传动控制全书二维码链接页码表

序号	章目	资源名称	资源种类	页码
1	第 1 章	滚珠丝杠	视频	5
2		惯量匹配原则	文档	12
3		黏性阻尼	视频	12
4	第 2 章	机械爬行现象	视频	27
5		间隙对稳定影响	视频	30
6	第 3 章	按钮	视频	34
7		行程开关	视频	34
8		光电开关	文档	37
9		接近传感器	视频	36
10		断路器	视频	38
11		空气开关	视频	38
12		继电器原理	视频	40
13		万能转换开关	视频	39
14		电磁继电器	文档	41
15		固态继电器	文档	46
16		固态继电器技术参数	文档	48
17		电动机单方向控制	视频	51
18		电动机正反控制	视频	52
19		熔断器	视频	56
20		熔断器选用	视频	56
21	第 4 章	电动机驱动正反启停控制演示	视频	65
22		电动机 PLC 控制演示	视频	77
23	第 5 章	直流电动机工作原理	视频	82
24		直流电动机结构	视频	82
25	第 6 章	电动机绕组头尾	视频	102
26		能耗及反接制动	视频	111
27		电动机类型选择	视频	116
28	第 7 章	步进电动机特点	视频	119
29		直流发电机	视频	129
30		直线电动机	视频	138
31		音圈电动机	视频	139
32	第 8 章	三相异步电动机启动调试与运行	视频	149
33		变频原理	视频	157
34	第 9 章	PLC 工作周期及过程	文档	173

目录

CONTENT

第1章 机电传动系统动力学基础知识	1
1.1 机电传动系统数学模型建立	1
1.1.1 机械平动系统数学模型	1
1.1.2 机械转动系统数学模型	2
1.1.3 机电拖动系统数学模型	2
1.1.4 电动机转矩	4
1.2 系统基本物理量的折算	6
1.2.1 负载转矩的折算	6
1.2.2 转动惯量的折算	7
1.2.3 飞轮矩的计算	10
1.2.4 关于惯量匹配原则	12
1.3 生产机械的机械特性	12
1.3.1 恒转矩型机械特性	13
1.3.2 通风机型机械特性	13
1.3.3 直线型机械特性	14
1.3.4 恒功率型机械特性	14
第2章 机电系统过渡过程与稳定运行	17
2.1 机电传动系统过渡过程含义	17
2.1.1 过渡过程含义	17
2.1.2 系统过渡重要性	18
2.1.3 系统静态与动态	18
2.2 机电传动系统过渡过程的分析	18
2.2.1 产生原因	18
2.2.2 机电时间常数 τ_m	21
2.2.3 加快系统过渡过程的方法	22
2.3 机电传动系统稳定运行的条件	24
2.4 机电系统的稳态设计分析	25

2.4.1	负载分析	25
2.4.2	执行元件匹配	25
2.5	影响机械传动系统稳定的要素	26
2.5.1	摩擦因素	26
2.5.2	爬行现象	27
2.5.3	阻尼影响	28
2.5.4	刚度要素	29
2.5.5	谐振频率	30

第3章 电动机常用控制元件与基本电路 33

3.1	机电控制系统主令电器元件	33
3.1.1	控制按钮	33
3.1.2	行程开关	34
3.1.3	接近开关	35
3.1.4	光电开关	37
3.1.5	空气开关	38
3.1.6	万能转换开关	39
3.2	机电控制系统中常用继电器	39
3.2.1	电磁式继电器	39
3.2.2	时间继电器	41
3.2.3	热继电器	43
3.2.4	速度继电器	44
3.2.5	干簧继电器	45
3.2.6	固态继电器	46
3.3	机电控制系统中常用接触器	48
3.3.1	接触器的工作原理	48
3.3.2	交流接触器的选择	48
3.3.3	交流接触器的接法	48
3.4	电器元件组成的典型基本电路	51
3.4.1	直接启动单向运行	51
3.4.2	电动机的正、反转控制电路	52
3.4.3	多机顺序联锁控制	53
3.4.4	多处同一控制	53
3.4.5	行程控制电路和行程控制	54
3.4.6	时间控制电路	54
3.5	电气保护电路	56
3.5.1	短路保护	56
3.5.2	过载保护	56
3.5.3	零压与欠压保护	56
3.5.4	过流保护	57

第4章 继电器—接触器电路及实物连线	59
4.1 实物外形及接线图	59
4.1.1 继电器	59
4.1.2 接触器	61
4.2 交流接触器选配	62
4.2.1 根据电动机的负载选配	62
4.2.2 接触器额定参数选择	63
4.3 继电器—接触器设计控制电路	64
4.3.1 三相异步电动机的点动运动控制	64
4.3.2 三相异步电动机的正反转控制安装	64
4.3.3 工作台自动往返控制线路	66
4.3.4 三相异步电动机的顺序控制	67
4.3.5 电动机Y— Δ 降压启动控制线路安装	68
4.3.6 三相异步电动机的反接制动控制	69
4.3.7 三相异步电动机的能耗制动	70
4.3.8 三相交流异步电动机变速控制电路	71
4.4 继电器与接触器的主要区别	73
4.5 继电器—接触器的PLC改造项目实例	75
4.5.1 PLC改造策略	75
4.5.2 PLC控制改造范例	75
第5章 直流电动机原理及其传动特性	81
5.1 直流电动机工作原理	81
5.2 直流电动机运行特性	82
5.2.1 他励直流电动机稳态运行	82
5.2.2 直流电动机的工作特性	83
5.3 他励直流电动机的机械特性	84
5.3.1 固有机械特性	84
5.3.2 人为机械特性	85
5.3.3 机械特性的计算	87
5.4 他励直流电动机反转特性	88
5.5 他励直流电动机的制动	89
第6章 交流电动机原理及其传动特性	101
6.1 三相异步电动机的工作原理	101
6.1.1 三相异步电动机的构造	101
6.1.2 三相异步电动机的转动原理	102
6.2 三相异步电动机的运行特性	105

6.3	三相异步电动机的机械特性	106
6.3.1	固有机械特性	106
6.3.2	人为机械特性	108
6.4	三相异步电动机的工作特性	110
6.4.1	转速特性 $n=f(P_2)$	110
6.4.2	定子电流特性 $I_1=f(P_2)$	110
6.4.3	功率因数特性 $\cos\Phi_1=f(P_2)$	110
6.4.4	电磁转矩特性 $T=f(P_2)$	110
6.4.5	效率特性 $\eta=f(P_2)$	110
6.5	三相异步电动机的制动	111
6.5.1	反馈制动	111
6.5.2	反接制动	112
6.5.3	能耗制动	113
6.6	三相交流电动机的选择	114
6.6.1	电动功率的选择	114
6.6.2	电动机类型选择	116

第7章 机电传动系统常用控制电动机 118

7.1	步进电动机	118
7.1.1	步进电动机的基本结构	118
7.1.2	步进电动机工作原理	119
7.2	伺服电动机	123
7.2.1	直流伺服电动机	123
7.2.2	交流伺服电动机	125
7.2.3	步进电动机与伺服电动机比较	127
7.3	其他类型发电机和电动机	129
7.3.1	测速发电机种类与要求	129
7.3.2	自整角机	132
7.3.3	旋转变压器	134
7.3.4	力矩电动机	136
7.3.5	直线电动机	137
7.3.6	音圈电动机原理	139

第8章 机电传动系统电动机启动与调速 143

8.1	直流电动机的启动与调速	143
8.1.1	他励直流电动机的启动特性	143
8.1.2	他励直流电动机的调速特性	145
8.1.3	其他的直流调速系统	148
8.2	交流电动机的启动与调速	149
8.2.1	三相异步电动机的启动	149

8.2.2	三相异步电动机调速	155
8.2.3	单相异步电动机启动	157
8.3	步进电动机的启动运行特性	160
8.3.1	步进电动机启动频率特性	160
8.3.2	高频恒频运行特性	161
8.3.3	伺服电动机的三种控制方式	162
8.4	电动机软启动技术简介	163
8.4.1	软启动器概念	163
8.4.2	电动机软启动器工作原理	164
8.4.3	软启动器节能原理	164
8.4.4	软启动的几种启动方式	164
8.4.5	软启动器保护功能	165
8.5	电动机的软停车	165
第9章	机电传动系统 PLC 变频控制基础	169
9.1	可编程序控制器简介	169
9.1.1	PLC 的结构及各部分的作用	170
9.1.2	PLC 的工作原理	171
9.1.3	PLC 的程序编制	171
9.2	可编程序控制器的工作原理	173
9.2.1	PLC 的工作过程框图	173
9.2.2	PLC 基础 S7-200 简介	174
9.2.3	PLC 基本指令简介	175
9.3	可编程序控制器控制设计规则	178
9.3.1	PLC 编程语言	178
9.3.2	PLC 编程的几个步骤	178
9.3.3	PLC 控制电动机正反转实例	179
9.4	变频器概述	180
9.4.1	变频器的分类	180
9.4.2	交—直—交变频器基本原理	181
9.4.3	交—交变频器的工作原理	182
9.4.4	交—直—交间接型和交—交直接型	184
9.5	常用的控制方式	186
9.5.1	非智能控制方式	186
9.5.2	智能控制方式	187
9.6	变频器控制接线图	188
9.6.1	主电路的通用接线	188
9.6.2	控制电路的接线	188
9.6.3	使用注意事项	191

9.7 PLC 变频控制电动机正反转实例	192
9.7.1 控制电路设计	192
9.7.2 控制程序设计	192

第10章 典型设备电气控制线路图解读 195

10.1 控制电路识图基础	195
10.1.1 电气控制电路分析的内容	195
10.1.2 电路图阅读分析方法与步骤	196
10.2 绘制电气控制线路图原则	197
10.3 典型设备电气控制图	198
10.3.1 车床 CA6140 型电气控制线路	198
10.3.2 万能铣床 X6132 型电气控制线路	200
10.3.3 摇臂钻床 Z37 电气控制线路	202
10.3.4 平面磨床 M7475B 型电气控制线路	203
10.3.5 卧式镗床 T68 控制线路	206
10.4 机床 C650 的 PLC 电气控制实例	208
10.4.1 C650 卧式车床简述	208
10.4.2 C650 卧式车床的控制要求	209
10.4.3 电气控制线路分析	209
10.4.4 主电路分析	210
10.4.5 控制电路的分析	210
10.5 普通车床 C650 的 PLC 设计	211
10.5.1 控制要求	211
10.5.2 方案说明	211
10.5.3 确定 I/O 数量	211
10.5.4 控制系统 I/O 地址分配表	212
10.5.5 控制电路设计	213
10.5.6 PLC 控制设计要素	213

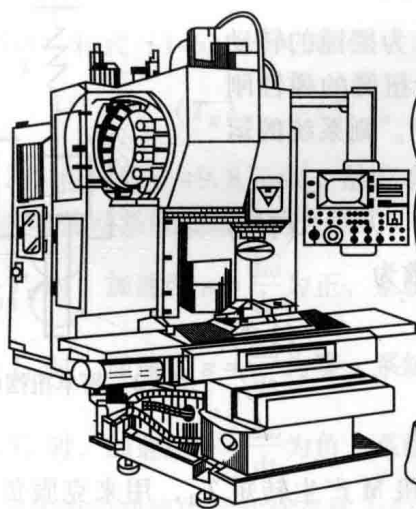
参考文献 221

第1章

机电传动系统动力学基础知识

【目标与解惑】

- (1) 熟悉电力拖动系统的运动方程、运动状态分析；
- (2) 掌握生产机械负载转矩特性几种类型和各自特点；
- (3) 掌握生产机械系统中转动惯量的几种折算方法；
- (4) 理解飞轮矩的计算及其惯量匹配原则；
- (5) 理解恒功率电动机与恒转矩电动机的概念；
- (6) 了解机电传动系统中动力学的意义。



1.1 机电传动系统数学模型建立

1.1.1 机械平动系统数学模型

机械平动系统的基本元件是质量、阻尼和弹簧。建立机械平动系统数学模型的基本原理是牛顿第二定律。

下面以图 1-1(a) 所示的组合机床动力滑台铣平面为例说明平动系统的建模方法。

设动力滑台的质量为 m ，液压缸的刚度为 k ，黏性阻尼系数为 c ，外力为 $f(t)$ 。若不计动力滑台与支承之间的摩擦力，则系统可以简化为图 1-1(b) 所示的力学模型。由牛顿第二定律知，系统的运动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

对上式取拉氏变换, 得到系统的传递函数为

$$\frac{X_0(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (1-1)$$

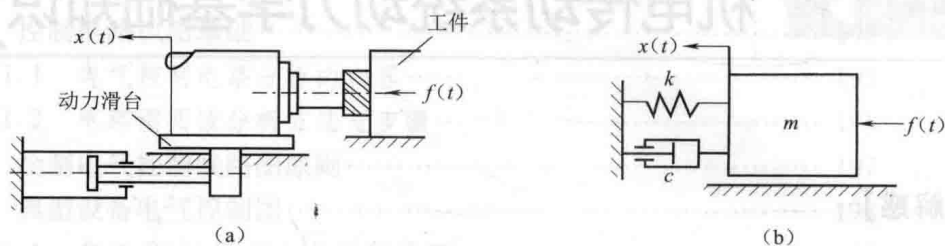


图 1-1 动力滑台铣平面及其力学模型
(a) 动力滑台铣平面; (b) 系统力学模型

1.1.2 机械转动系统数学模型

机械转动系统的基本元件是转动惯量、阻尼器和弹簧。建立机械转动系统数学模型的基本原理仍是牛顿第二定律。

简单扭摆的工作原理如图 1-2 所示, 图中 J 为摆锤的转动惯量; c 为摆锤与空气间的黏性阻尼系数; k 为扭簧的弹性刚度; $T(t)$ 为加在摆锤上的扭矩; $\theta(t)$ 为摆锤转角。则系统的运动方程为

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = m(t) \quad (1-2)$$

对式 (1-2) 取拉氏变换, 得系统的传递函数为

$$\frac{\theta(s)}{m(s)} = \frac{1}{Js^2 + cs + k} \quad (1-3)$$

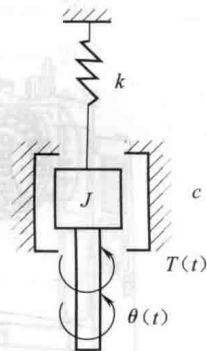


图 1-2 简单扭摆的工作原理

1.1.3 机电拖动系统数学模型

图 1-3 所示为单轴拖动系统, 它是由电动机 M 产生转矩 T_M , 用来克服负载转矩 T_L , 以带动产生机械运动, 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 $T_M = T_L$ 时, n 为常数, $dn/dt = 0$ 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)。

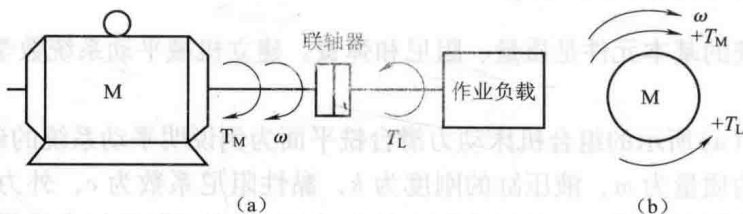


图 1-3 单轴拖动系统

(a) 传动系统图; (b) 转矩与转速方向

当 $T_M \neq T_L$ 时, 速度 (n 或 ω) 就要变化, 产生加速或减速, 速度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

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-4)$$

这就是单轴机电传动系统的运动方程式。

式中: T_M 为电动机产生的转矩; T_L 为单轴传动系统的负载转矩; J 为单轴传动系统的转动惯量; ω 为单轴传动系统的角速度; t 为时间。

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 的关系为

$$(J)_{\text{kg} \cdot \text{m}^2} = (m)_{\text{kg}} (R^2)_{\text{m}^2} = \frac{(GD^2)_{\text{N} \cdot \text{m}^2}}{4 (g)_{\text{m/s}^2}} \quad (1-5)$$

或

$$(GD^2)_{\text{N} \cdot \text{m}^2} = 4 (g)_{\text{m/s}^2} (J)_{\text{kg} \cdot \text{m}^2}$$

且

$$(\omega)_{\text{rad/s}} = \frac{2\pi}{60} (n)_{\text{r/min}} \quad (1-6)$$

将式 (1-5) 和式 (1-6) 代入式 (1-4), 就可得运动方程式的实用形式:

$$(T_M)_{\text{N} \cdot \text{m}} - (T_L)_{\text{N} \cdot \text{m}} = \frac{(GD^2)_{\text{N} \cdot \text{m}^2}}{375} \frac{d(n)_{\text{r/min}}}{d(t)_{\text{s}}} \quad (1-7)$$

式中: 常数 375 包含着 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 故它有加速度的量纲。 GD^2 是个整体物理量。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 $T_M > T_L$ 时, 加速度 $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ 为正, 系统为加速运动状态。

当 $T_M = T_L$ 时, 加速度 $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ 为零, 系统为静止或匀速运动状态。

当 $T_M < T_L$ 时, 加速度 $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ 为负, 系统为减速运动状态。

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

$$(T_d)_{\text{N} \cdot \text{m}^2} = \frac{(GD^2)_{\text{N} \cdot \text{m}^2}}{375} \frac{d(n)_{\text{r/min}}}{d(t)_{\text{s}}} \quad (1-8)$$

它使系统的运动状态发生变化。这样运动方程式也可以写成转矩平衡方程式

$$T_M - T_L = T_d \quad \text{或} \quad T_M = T_L + T_d \quad (1-9)$$

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 $T_M = T_L$ 时, $T_d = 0$, 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 1-3 (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_M 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, 根据上述约定就可以从转矩与转速的符号上判定 T_M 与 T_L 的性质了。

若 T_M 与 n 符号相同 (同为正或同为负), 则表示 T_M 的作用方向与 n 相同, T_M 为拖动转矩; 若 T_M 与 n 符号相反, 则表示 T_M 的作用方向与 n 相反, T_M 为制动转矩。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。

例如: 如图 1-4 所示, 在提升重物过程中, 判定起重机启动和制动时电动机转矩 T_M 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 1-4 (a) 所示, 电动机拖动重物上升, T_M 与 n 正方向一致, T_M 取正号; T_L 与 n 方向相反, T_L 亦取正号。这时的运动方程式为

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

要能提升重物, 必存在 $T_M > T_L$, 即动态转矩 $T_d = T_M - T_L$ 和加速度 $a = \frac{dn}{dt}$ 均为正, 系统加速运行。

制动时: 如图 1-4 (b) 所示, 仍是提升过程, n 为正, 只是此时要电动机制止系统运动, 所以, T_M 与 n 方向相反, T_M 取负号, 而重物产生的转矩方向总是向下, 和启动过程一样, T_L 仍取正号, 这时运动方程式为

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

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, 系统中动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。

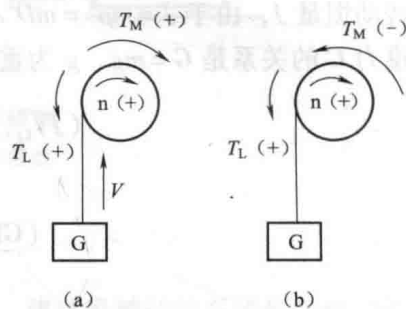


图 1-4 T_M 、 T_L 符号的判定

(a) 启动时; (b) 制动时

1.1.4 电动机转矩

1. 转矩与扭矩

使机械元件转动的力矩称为转动力矩, 简称转矩。

机械元件在转矩作用下都会产生一定程度的扭转变形, 故转矩有时又称为扭矩。

转矩是各种工作机械传动轴的基本载荷形式, 与动力机械的工作能力、能源消耗、效率、运转寿命及安全性能等因素紧密联系。转矩的测量对传动轴载荷的确定与控制、传动系统工作零件的强度设计以及原动机容量的选择等都具有重要的意义。

转矩与功率的关系: $T = 9549 \frac{P}{n}$ 。

电动机的额定转矩表示额定条件下电动机轴端输出转矩。转矩等于力与力臂或力偶臂的乘积, 在国际单位制 (SI) 中, 转矩的计量单位为牛顿·米 ($N \cdot m$)。电动机轴端输出转矩等于转子输出的机械功率除以转子的机械角速度。功率越大, 转矩越大。同功率的电动机, 磁极数大的转矩大。

电动机的转矩是一种力矩, 力矩在物理中的定义是: 力矩 = 力 × 力臂, 这里的力臂就可以看成电动机所带动的物体的转动半径。电动机的转矩 = 皮带轮拖动皮带的力 × 皮带轮的半径。

电动机的转矩单位是 $\text{N} \cdot \text{m}$ (牛顿·米), 计算公式是 $T = 9\,549 \frac{P}{n}$ 。 P 是电动机的额定(输出)功率, 单位是千瓦 (kW), 额定转速 n 单位是转每分 (r/min)。

2. 电动机转矩计算

电动机在机械工程特别是在机械加工切削过程中具有举足轻重的作用, 对其主要参数——转矩的计算在不同工况下也有不同方法, 下面就电动机在机械工程中的几种计算方法介绍如下:

1) 快速空载启动时所需力矩

$$M = M_{\text{amax}} + M_f + M_0$$

2) 最大切削负载时所需力矩

$$M = M_{\text{at}} + M_f + M_0 + M_t$$

3) 快速进给时所需力矩

$$M = M_f + M_0$$

式中: M_{amax} 为空载启动时折算到电动机轴上的加速力矩, $\text{kgf} \cdot \text{m}$; M_f 为折算到电动机轴上的摩擦力矩, $\text{kgf} \cdot \text{m}$; M_0 为由于丝杠预紧引起的折算到电动机轴上的附加摩擦力矩, $\text{kgf} \cdot \text{m}$; M_{at} 为切削时折算到电动机轴上的加速力矩, $\text{kgf} \cdot \text{m}$; M_t 为折算到电动机轴上的切削负载力矩, $\text{kgf} \cdot \text{m}$ 。

对于系统在采用滚动丝杠螺母传动时, M_a 、 M_f 、 M_0 和 M_t 的计算公式如下:

4) 加速力矩

$$M_a = \frac{J_r n}{9.6T} \times 10^{-2}, (\text{kgf} \cdot \text{m}) \quad T = \frac{1}{17}s$$

式中: J_r 为折算到电动机轴上的总惯量; T 为系统时间常数, s; n 为电动机转速, r/min。

当 $n = n_{\text{max}}$ 时, 计算 m_{max} ; $n = n_t$ 时, 计算 M_{at} 。 n_t 为切削时的转速, r/min。

5) 摩擦力矩

$$M_f = \frac{F_0 \cdot s}{2\pi \cdot \eta \cdot i} \times 10^{-2} (\text{kgf} \cdot \text{m})$$

式中: F_0 为导轨摩擦力, kgf ; s 为丝杠螺距, cm; i 为齿轮降速比; η 为传动链总效率; 一般 $\eta = 0.7 \sim 0.85$ 。

6) 附加摩擦力矩

$$M_0 = \frac{P_0 s}{2\pi \eta \cdot i} (1 - \eta_0^2) \times 10^{-2} (\text{kgf} \cdot \text{m})$$

式中: P_0 为滚珠丝杠预加载荷, $\text{kg} \cdot \text{f}$; s 为丝杠螺距, cm; η 为传动链总效率; i 为齿轮降速比; η_0 为滚珠丝杠未预紧时的效率, 计算公式可扫右侧二维码, 一般 $\eta_0 \geq 0.9$ 。



视频课: 滚珠丝杠传动

7) 切削力矩

$$M_t = \frac{P_t s}{2\pi \eta \cdot i} \times 10^{-2} (\text{kgf} \cdot \text{m})$$

式中: P_t 为进给方向的最大切削力, $\text{kg} \cdot \text{f}$; s 为丝杠螺距, cm; η 为传动链总效率; i 为齿轮降速比。

1.2 系统基本物理量的折算

在建立机械系统数学模型的过程中,经常会遇到基本物理量的折算问题,在此结合机械进给系统实例,介绍在系统建模中的基本物理量的折算问题。

1.2.1 负载转矩的折算

转矩折算是对系统进行的一种等效变换,其折算两大原则是功率守恒原则和能量守恒原则。上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都是多轴拖动系统,如图 1-5 所示。这是因为许多生产机械要求低速运转,而电动机一般具有的是较高的额定转速。这样,电动机与生产机械之间就得装设减速机构,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,即折算成图 1-3 所示的最简单的典型单轴系统。折算时的基本原则是折算前的多轴系统与折算后的单轴系统,在能量关系或功率关系上保持不变。下面简单地介绍折算方法。

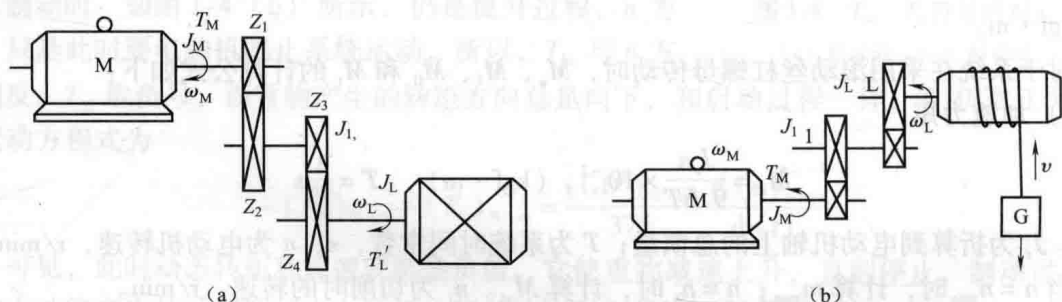


图 1-5 多轴拖动系统

(a) 旋转运动; (b) 直线运动

负载转矩是静态转矩,可根据静态时功率守恒原则进行折算。

对于旋转运动,如图 1-5 (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 和 ω_L 为生产机械的负载转矩和旋转角速度。

设 T'_L 折算到电动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 为电动机转轴的角速度。

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。即

$$\eta_c = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = \frac{T'_L \omega_L}{T_L \omega_M}$$

于是可得折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_L = \frac{T'_L \omega_L}{\eta_c \omega_M} = \frac{T'_L}{\eta_c i} \quad (1-10)$$

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