

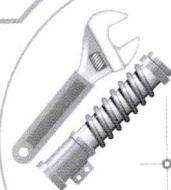


普通高等教育机械类“十二五”规划系列教材

机电一体化系统设计

JIDIAN YITIHUA XITONG SHEJI

主编 俞竹青 金卫东



System
Design



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育机械类“十二五”规划系列教材

机电一体化系统设计

主 编 俞竹青 金卫东

参 编 李尚荣 何亚峰

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了机电一体化系统的基本原理、机电一体化系统的构成、常用传感器、常用执行元件以及相关检测控制电路设计,力求贴近工程实用。全书共7章,内容包括:概论、机械系统部件及其设计、检测传感器及其接口电路、执行元件及控制、单片机及接口电路设计、机电一体化系统的抗干扰设计、机电一体化系统设计实例。本书注意理论与实际的结合,重视解决工程实际问题,并力求做到突出重点,层次分明,语言易懂,以便于读者自学。

本书主要作为高等院校机械设计制造、机械电子工程、工业自动化等专业的教材,也可作为高等专科学校、高等职业学校、成人高校相关专业教材,并可供机电类工程技术人员和研究人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

机电一体化系统设计 / 俞竹青, 金卫东主编. —北京: 电子工业出版社, 2011.8

普通高等教育机械类“十二五”规划系列教材

ISBN 978-7-121-13507-1

I. ①机… II. ①俞… ②金… III. ①机电一体化—高等学校—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 084524 号

策划编辑: 李 洁 (lijie@phei.com.cn)

责任编辑: 侯丽平

印 刷: 北京市铁成印刷厂
装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15.5 字数: 396.8 千字

印 次: 2011 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 29.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

机电一体化是多学科领域综合交叉的技术密集型系统工程。它是融合检测传感技术、信息处理技术、自动控制技术、伺服驱动技术、精密机械技术、计算机技术和系统总体技术等多种技术于一体的新兴综合性学科。随着机电一体化技术的产生与发展,在世界范围内掀起了机电一体化热潮,它使机械产品向着高技术密集的方向发展。当前,以柔性自动化为主要特征的机电一体化技术发展迅速,水平越来越高。任何一个国家、地区、企业若不拥有这方面的人才、技术和生产手段,就不具备国际、国内竞争所必需的基础。要彻底改变目前我国机械工业面貌,缩小与国外先进国家的差距,必须走发展机电一体化技术之路,这也是当代机械工业发展的必然趋势。

机电一体化的优势在于从系统、整体的角度出发,将各相关技术协调综合运用而取得整体优化效果,因此在机电一体化系统设计开发的过程中,特别强调技术融合和学科交叉的作用。面对机械工业向机电一体化方向快速发展,作为培养这方面高级技术人才的高等院校就不应仅限于向学生分离地介绍机械技术、微电子技术、计算机技术等机电一体化共性基础知识,还应在此基础上从系统设计的角度出发,通过“机电一体化系统设计”专业课教学及相应实践教学环节,使学生真正了解和掌握机电一体化的实质及其系统设计的理论和方法。只有这样,才能使学生真正灵活地运用相关技术进行机电一体化产品的分析、设计与开发,达到知识、能力的统一。

本书是为了适应高校机械类各专业及其他相近专业的“机电一体化系统设计”教学要求而编写的。作为教材,编者在文字叙述上力求深入浅出,循序渐进;在内容安排上既注意了基础理论、基本概念的系统性阐述,同时也考虑到工程设计人员的实际需要,在介绍各种设计方法时尽可能具体实用,书中给出的具体电路图都是实验验证可行的。本书共7章,主要包括:概论、机械系统部件及其设计、检测传感器及其接口电路、执行元件及控制、单片机及接口电路设计、机电一体化系统的抗干扰设计、机电一体化系统设计实例。

本书由俞竹青、金卫东担任主编。常州大学俞竹青编写第1、3、6、7章,常州工学院金卫东编写第2章,江苏技术师范学院李尚荣编写第5章,常州工学院何亚峰编写第4章。全书由俞竹青、金卫东承担统稿工作。

由于编者水平和经验有限,加之时间仓促,书中难免存在错误疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者
2011年5月

目 录

第1章 概论	1
1.1 机电一体化概念	1
1.2 机电一体化系统的构成	1
1.3 机电一体化关键技术	1
复习思考题	3
第2章 机械系统部件及其设计	4
2.1 概述	4
2.1.1 机电一体化产品对机械系统部件的基本要求	4
2.1.2 机电一体化产品机械系统的基本组成及其功能	4
2.2 机械传动机构	5
2.2.1 齿轮传动机构及其设计	6
2.2.2 丝杠螺母机构及其选用	15
2.2.3 同步带传动	30
2.3 导向与支承机构	36
2.3.1 回转运动支承	36
2.3.2 直线运动支承	42
2.3.3 框架类支承构件	54
2.4 机械执行机构	59
2.4.1 机械执行机构的功能	60
2.4.2 机械执行机构的分类	62
2.4.3 机械执行机构设计的要求	63
2.4.4 机械执行机构设计的步骤	63
复习思考题	64
第3章 检测传感器及其接口电路	66
3.1 温度传感器	66
3.2 力传感器	68
3.2.1 金属电阻应变片式力传感器	69
3.2.2 半导体应变式力传感器	70
3.3 位移测量传感器	71
3.3.1 电容位移传感器	71
3.3.2 气隙电感位移传感器	72
3.3.3 差动变压器结构电感式位移传感器	73

3.3.4 涡流电感式位移传感器·····	74
3.4 光电传感器·····	75
3.5 光电编码器·····	78
3.5.1 增量式光电编码器构成及原理·····	78
3.5.2 绝对式光电编码器构成及原理·····	80
3.5.3 增量式光电编码器计数电路·····	81
3.6 电流环信号传输·····	83
3.7 运算放大器的基本电路·····	83
复习思考题·····	86
第4章 执行元件及控制 ·····	87
4.1 执行元件的分类·····	87
4.1.1 电动执行元件·····	87
4.1.2 气动执行元件·····	88
4.1.3 液压执行元件·····	89
4.2 直流电动机的工作原理·····	90
4.3 三相异步电动机的旋转磁场·····	91
4.4 步进电动机·····	92
4.5 直线电动机·····	94
4.5.1 直线感应电动机·····	95
4.5.2 直线直流电动机·····	97
4.5.3 直线步进电动机·····	98
4.6 直流电动机的驱动控制·····	100
4.6.1 开关型功率接口电路·····	100
4.6.2 直流电动机 PWM 驱动方式·····	104
4.6.3 IR2130 三相驱动控制集成芯片·····	107
4.7 交流伺服电动机控制·····	110
4.8 电-气比例阀、伺服阀·····	111
4.8.1 滑阀式电气方向比例阀·····	112
4.8.2 动圈式二级方向伺服阀·····	113
4.8.3 动圈式压力伺服阀·····	114
4.8.4 脉宽调制伺服阀·····	115
4.8.5 电-气比例伺服系统的应用实例（柔性定位伺服汽缸）·····	117
4.9 电-液比例阀、伺服阀·····	118
4.9.1 电-液伺服阀·····	118
4.9.2 电-液比例阀·····	121
复习思考题·····	122
第5章 单片机及接口电路设计 ·····	123
5.1 MCS-51 单片机·····	123

5.1.1	MCS-51 单片机的引脚描述及片外总线结构	123
5.1.2	MCS-51 片内总体结构	125
5.1.3	MCS-51 单片机基本外围电路	125
5.1.4	MCS-51 单片机看门狗电路(MAX6814)	127
5.2	A/D 转换及与单片机接口电路设计	129
5.3	多路模拟开关	131
5.4	AVR 单片机简介	133
5.4.1	ATmega128 的结构和主要特点	133
5.4.2	ATmega128 的封装和引脚	134
5.4.3	ATmega128 的 I/O 端口描述	136
5.4.4	ATmega128 端口的第 2 功能	137
5.4.5	ATmega128 的时钟系统	143
5.5	AVR 单片机开发工具(ATmega128)	144
5.5.1	ICCAVR 集成开发环境	144
5.5.2	ICCAVR 介绍	144
5.5.3	ICCAVR 导游	151
5.5.4	ICCAVR C 库函数与启动文件	152
5.5.5	访问 AVR 硬件的编程	154
5.6	ATmega128 基础实例	155
5.6.1	发光二极管应用实验	155
5.6.2	键盘电路应用实例	157
	复习思考题	160
第 6 章	机电一体化系统的抗干扰设计	161
6.1	电磁干扰形成的条件	161
6.2	干扰源	162
6.2.1	供电干扰	162
6.2.2	过程通道干扰	162
6.2.3	场干扰	163
6.3	提高系统抗电源干扰能力的方法	163
6.3.1	配电方案中的抗干扰措施	163
6.3.2	利用电源监视电路抗电源干扰	164
6.3.3	用 Watchdog 抗电源干扰	164
6.4	电场与磁场干扰耦合的抑制	165
6.4.1	电场与磁场干扰耦合的特点	165
6.4.2	电场与磁场干扰耦合的抑制	166
6.5	几种接地技术	170
6.5.1	单点接地	170
6.5.2	多点接地	170

6.5.3	混合单点接地	171
6.5.4	混合多点接地	171
6.5.5	接地的一般性原则	172
6.6	过程通道抗干扰措施	173
6.7	模拟信号的线性光耦隔离	176
6.7.1	HCNR200 基本工作原理	176
6.7.2	HCNR200 的基本工作电路	177
6.7.3	HCNR200 应用电路设计	177
6.8	空间干扰的抑制	179
6.9	软件抗干扰技术	179
6.9.1	实施软件抗干扰的必要条件	179
6.9.2	数据采样的干扰抑制	179
6.9.3	程序运行失常的软件抗干扰措施	181
6.10	铁氧体插损器	181
6.10.1	铁磁性材料(铁氧体)特性	181
6.10.2	磁导率对电磁干扰的影响	181
6.10.3	铁氧体的特性阻抗	183
6.10.4	铁氧体插损器件及应用	185
	复习思考题	190
第7章	机电一体化系统设计实例	191
7.1	RC 伺服电动机控制	191
7.1.1	RC 伺服电动机简介	191
7.1.2	RC 伺服电动机的内部组成	191
7.1.3	RC 伺服电动机的控制	192
7.1.4	硬件电路图	192
7.1.5	RC 伺服电动机的正向旋转和逆向旋转控制实验	193
7.1.6	RC 伺服电动机的旋转相应角度实验	194
7.1.7	RC 伺服电动机速度控制实验	195
7.2	步进电动机应用软/硬件设计实例	197
7.2.1	步进电动机概述	197
7.2.2	步进电动机的分类与结构	197
7.2.3	步进电动机的基本参数	198
7.2.4	步进电动机的特性	198
7.2.5	反应式步进电动机的结构	199
7.2.6	反应式步进电动机的工作原理	200
7.2.7	步进电动机的失步、振荡及解决方法	203
7.2.8	步进电动机的控制	204
7.2.9	步进电动机的应用设计	207

7.3 小型打印机系统	209
7.3.1 硬件电路设计	209
7.3.2 典型器件选型及介绍	213
7.3.3 硬件电路	214
7.3.4 软件设计	217
7.3.5 经验总结	220
7.4 直流电动机的控制实例	221
7.4.1 硬件电路设计	221
7.4.2 典型器件选型及介绍	223
7.4.3 硬件电路	225
7.4.4 软件设计	228
复习思考题	235

第 1 章

概 论

1.1 机电一体化概念

现代科学技术的发展极大地推动了不同学科的相互交叉与渗透,促进了很多工程领域的技术革命与改造。机电一体化是在以微型计算机为代表的微电子技术、信息技术迅速发展,向机械工业领域迅猛渗透,与机械电子技术深度结合的现代工业基础上,综合应用机械技术、微电子技术、信息技术、自动控制技术、传感测试技术、电力电子技术、接口技术和软件编程技术等。机电一体化技术并不是机械技术和电子技术的简单叠加,而是有着自身体系的新型学科。机电一体化产品不仅是人的手与肢体的延伸,还是人的感官与头脑的延伸,具有智能化的特征是机电一体化与机械电气化在功能上的本质区别。在机械工程领域,由于微电子技术的飞速发展及其向机械工业的渗透所形成的机电一体化,使机械工业的技术结构、产品结构、功能与构成、生产方式及管理体系均发生巨大变化,使工业生产由机械电气化迈入了机电一体化的发展阶段。

1.2 机电一体化系统的构成

机电一体化系统有多种形式,其功能也有所不同,但其基本上是由机械系统、传感器、执行元件、传感变送电路、驱动电路、接口电路与控制计算机组成的,如图 1-1 所示。机械系统中配置一定数量的传感器以检测系统运行过程中所需的本身和外界环境的各种参数及状态,经传感变送电路处理为模拟电压量,再经 A/D 模数转换电路进入控制计算机,信息处理后控制计算机发出指令,经驱动电路功率放大后推动执行元件产生机械运动。

1.3 机电一体化关键技术

机电一体化上是多种学科相互交叉、渗透而形成的一门综合性学科,其共性的关键技术有机械精密传动技术、计算机信息处理技术、传感检测技术、自动控制技术、伺服驱动技术及系统总体技术。

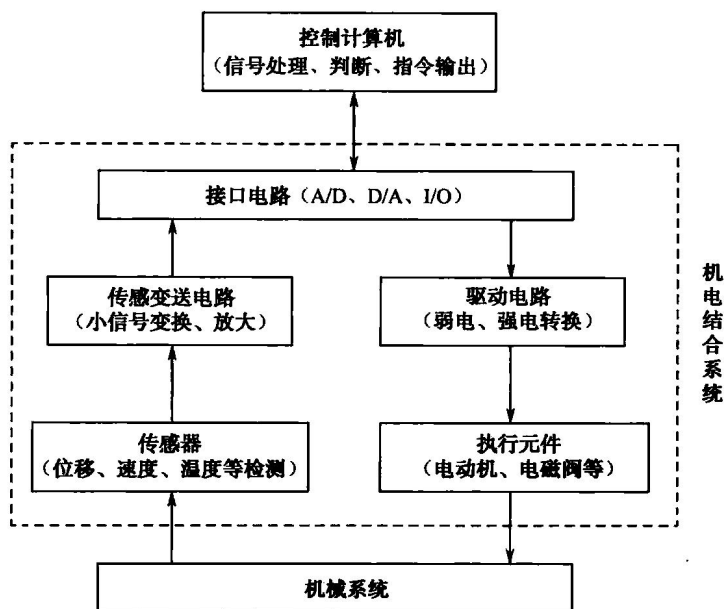


图 1-1 机电一体化系统的构成

1. 机械精密传动技术

机械精密传动技术是机电一体化产品的重要基础，特别是那些关键传动部件如导轨、滚珠丝杠、轴承、齿轮的材料和精度对机电一体化产品的性能和控制精度影响极大。此外，机械系统的静、动刚度和热变形程度也对机电一体化产品的性能和控制精度有一定影响。

2. 计算机信息处理技术

计算机信息处理技术包括计算机硬件和软件技术、网络与通信技术、数据库技术等。控制计算机是机电一体化产品的大脑，通过对大量数据信息的处理指挥控制整个机电一体化产品的工作过程。

3. 传感检测技术

机电一体化产品中，传感器作为感受元件，能快速、精确地获取产品中各种内外部信息并通过相应的处理电路反馈给控制计算机。传感器的发展正进入集成化、智能化阶段，把传感器件与信号处理电路集成在一个芯片上就形成了信息型传感器，如再将微处理器集成到芯片上就形成了智能型传感器。

4. 自动控制技术

自动控制技术就是在没有人直接参与的情况下，通过控制器使被控制对象或过程自动地按照预定的规律运行。自动控制技术包括精密定位、速度控制、自适应控制、校正、补偿等技术，其难点在于自动控制理论的工程化和实用化，往往理论上的控制模型与现实中的控制对象之间存在较大差距，使得从控制设计到控制实施往往要经过多次反复调试与修改，才能获得比较满意的结果。

5. 伺服驱动技术

伺服驱动技术是将控制计算机发出的指令信息经功率放大后驱动伺服执行元件产生精密机械运动。伺服执行元件一般有电动伺服交直流电动机、液压伺服电动机及液压缸等。

6. 系统总体技术

系统总体技术是从整体目标出发,用系统的观点和方法将系统总体分解成相互有机联系的若干功能单元,并以功能单元为子系统继续分解,直至找到可实现的技术方案,然后再把功能和技术方案组合成方案组进行分析、评价和优选的综合应用技术。

复习思考题

- 1.1 机电一体化系统由哪些部分构成?
- 1.2 机电一体化关键技术有哪些?

第2章

机械系统部件及其设计

2.1 概述

随着机电控制技术的发展，在机电一体化产品中广泛采用了伺服技术和计算机控制技术，每一个机械运动都可单独由控制电动机、传动机构和执行机构组成子系统来完成，而各个子系统之间的运动协调则由计算机来实现。因此，机械系统往往是整个伺服系统的一部分，其实现的方法、手段和可靠性往往对机电一体化产品的性能有着重要的影响。

2.1.1 机电一体化产品对机械系统部件的基本要求

机械系统是机电一体化产品中不可或缺的组成部分，其主要功能是为实现一系列机械运动提供传递机械力、传送运动和对整个系统起支撑作用。除了一般高精度机械产品要求较高的系统刚度、良好的可靠性和体积小、寿命长等基本要求外，机电一体化产品对机械系统还有如下要求。

1) 高精度

机电一体化产品的精度将直接影响产品的性能和可靠性。而与普通机械产品相比，机电一体化产品的使用功能、技术性能和工艺水平都有着很大的提高空间。如果机械系统的精度不能满足要求，即使其他组成部分的工作性能很精确，也不可能完成预定的机械操作。因此，机电一体化产品中的机械系统的高精度是首要的、基本的要求。

2) 快速响应特性

快速响应是控制系统的一项重要指标，对作为机电一体化伺服系统一部分的机械系统提出了低惯性的要求，具体可分为机械本体的重量轻、转动惯量小和低阻尼特性等。

3) 高稳定性

高稳定性是对机械系统的抗干扰能力提出要求，即要求机械系统的工作性能不受外界环境的影响。

2.1.2 机电一体化产品机械系统的基本组成及其功能

一个典型的机电一体化产品，通常由数字控制部件、接口与功率放大电路、机械系统部件、执行元件（步进电动机、伺服电动机等），以及传感检测元件等组成。其中，按照具体功能及其实现方法的不同，可将机械系统部件分为机械传动机构、导向与支承机构，以及机械执行机构。

机电一体化产品中的机械传动机构不仅仅是运动和力矩的变换器,而且已经成为其伺服系统的一部分,主要根据伺服控制的功能与性能要求进行设计。传动机构的性能主要取决于传动类型、传动方式、传动精度、动态特性及可靠性。

机电一体化产品要求其机械系统的各运动装置都必须得到安全的支承,并能准确地实现特定方向的运动,这些任务将由导向与支承机构来完成。导向与支承机构的整体与接触刚度、制造与装配精度、抗振性、热稳定性与精度保持性都会影响整个产品的运行精度、动态特性和使用可靠性。

机械执行机构将根据操作指令的要求在动力源的带动下完成预定的机械动作,从而实现产品的功能与性能要求。因此,执行机构要求能实现准确定位,并具有较高的灵敏度、良好的可重复性和相当的可靠性。

2.2 机械传动机构

在机电一体化产品中,一般多采用调速范围大、可无级调速的控制电动机,省去了大量用于进行变速和换向的齿轮、轴承和轴类零件,减少了产生误差的环节,提高了传动效率,从而使得机械传动机构的设计也得到了很大简化。特别是由于伺服技术和计算机控制技术的应用,其机械传动方式也由传统的串联或串并方式演变为并联传动方式,即每一个机械运动都由单独的控制电动机、传动机构和执行机构组成的子系统来完成,各个运动之间的传动关系则由计算机数控系统统一协调和控制。

机械传动机构的主要功能是传递转速和转矩,大多还具有改变速度大小和范围、改变运动形式(旋转运动变为直线运动或曲线运动等)、改变运动方式(连续运动变为间歇运动等)、将单向运动变为往复运动等多种功能。由于其具有结构简单,性能可靠,不易受电、磁、热等条件的影响,加工修理方便等优点,故在机电一体化产品中得到广泛的应用。

为确保机械系统的传动精度和工作稳定性,机电一体化产品中的机械传动部件不仅应保证有精确的传动比、高刚度、低摩擦、低振动、低噪声、高热稳定性,还要满足传动链短、转动惯量小、无间隙传递、小型化、轻量化等设计要求。

常用的机械传动机构有齿轮传动、螺旋传动(丝杠螺母副、涡轮蜗杆副)、同步带传动等线性传动部件,以及连杆机构、凸轮机构等非线性传动部件。表2-1所示为常用传动机构及其功能,一些传动机构可满足一项或多项功能要求。本章主要介绍齿轮传动机构、丝杠螺母机构、同步带传动。

表 2-1 常用传动机构及其功能

常用传动机构	运动变换				动力变换	
	形式	行程	方向	速度	形式	大小
丝杠螺母	√				√	√
齿轮传动			√	√	√	
齿轮齿条	√					√
链轮链条	√					

续表

常用传动机构	运动变换				动力变换	
	形式	行程	方向	速度	形式	大小
带传动			√	√		
缆绳、绳轮	√		√	√	√	√
杠杆机构		√		√	√	
连杆机构		√		√	√	
凸轮机构	√	√	√	√		
摩擦轮			√	√	√	
万向节			√			
软轴			√			
涡轮蜗杆			√	√	√	
间歇机构	√					

2.2.1 齿轮传动机构及其设计

齿轮传动机构能保证恒定的传动比，能传递任意夹角两轴间的运动，并且结构紧凑、传递动力大、传动效率高、工作平稳、可靠性高，因此在机电一体化产品中得到了广泛的应用。为了获得高精度、高可靠性和低噪声，在机电一体化产品设计中，齿轮传动除了需要进行一般的设计与计算外，还需要进行动力学性能分析。另外，在齿轮传动中，往往要求传动机构具有反向传动功能，这就要求齿轮传动机构必须消除齿侧间隙。

1. 齿轮传动总传动比的确定

齿轮传动比应满足驱动部件和负载之间的位移、转矩及转速的匹配要求。用于伺服系统的齿轮减速器实际上是一个力矩变换器，其输入电动机为高转速、低转矩，而输出为低转速、高转矩，借此来加速负载。因此，齿轮传动机构传递转矩时，不仅要求具有足够的刚度以保证传动精确度，而且要求其转动惯量尽量小，以便在获得相同的加速度时所需转矩小，即在采用同一驱动功率时，其响应加速度最大。

由于负载特性和工作条件的不同，可有不同的最佳传动比选择原则，如“负载峰值力矩为最小”、“负载均方根力矩为最小”、“转矩储备最大”等。在以伺服电动机驱动负载的传动机构中常采用“负载加速度为最大”的原则来选择最佳传动比。

如图 2-1 所示，额定转矩为 T_m 、转动惯量为 J_m 的电动机 M ，通过总传动比为 i 的齿轮系 G ，带动转动惯量为 J_L 、摩擦阻力矩为 T_{Lf} 的负载 L 。其最佳传动比为

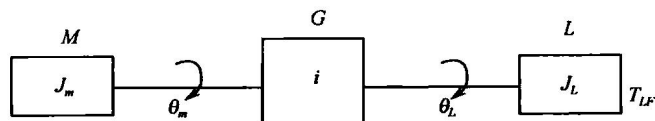


图 2-1 电动机驱动齿轮传动及负载的惯量模型

$$i = \frac{\theta_m}{\theta_L} = \frac{\dot{\theta}_m}{\dot{\theta}_L} = \frac{\ddot{\theta}_m}{\ddot{\theta}_L} \quad (2-1)$$

式中 θ_m 、 $\dot{\theta}_m$ 、 $\ddot{\theta}_m$ ——电动机的角位移、角速度和角加速度；

θ_L 、 $\dot{\theta}_L$ 、 $\ddot{\theta}_L$ ——负载的角位移、角速度和角加速度。

T_{LF} 换算到电动机轴上的阻抗力矩为 T_{LF}/i ，换算到电动机轴上的转动惯量为 J_L/i^2 。根据旋转运动方程，设电动机轴上的合转矩为 T_a ，则

$$T_a = T_m - \frac{T_{LF}}{i} = \left(J_m + \frac{J_L}{i^2} \right) \ddot{\theta}_m = \left(J_m + \frac{J_L}{i^2} \right) i \ddot{\theta}_L \quad (2-2)$$

则

$$\ddot{\theta}_L = \frac{(T_m i - T_{LF})}{(J_m i^2 + J_L)} = \frac{i T_a}{(J_m i^2 + J_L)} \quad (2-3)$$

根据“负载加速度为最大”的原则，令 $d\ddot{\theta}_L/di = 0$ ，解得

$$i = \frac{T_{LF}}{T_m} + \sqrt{\left(\frac{T_{LF}}{T_m} \right)^2 + \frac{J_L}{J_m}} \quad (2-4)$$

若不计摩擦，即 $T_{LF} = 0$ ，有

$$i \approx \sqrt{\frac{J_L}{J_m}} \quad (2-5)$$

上式表明，齿轮系传动比的最佳值就是使负载换算到电动机轴上的转动惯量能够正好等于电动机转子的转动惯量。此时，电动机的输出转矩一半用于加速负载，一半用于加速电动机转子，从而可达到惯性负载和力矩源的最佳匹配。如图 2-2 所示，用来加速惯性负载的力矩就是电动机电矩 T_m 和摩擦阻力矩 T_{LF}/i 之差。原则上，处于电动机曲线以下的全部摩擦负载曲线所代表的齿轮传动比（阴影部分）均可选择，但符合极值条件的才是其最佳值。

事实上，在齿轮传动机构的具体设计中，鉴于其他工程考虑，实际传动比可能比最佳值小，这样所获得的负载加速度将不超过最大值。但有时当作用于负载的干扰力矩较大时，为提高传动系统的抗干扰能力，常选用较大的传动比。另外，当选定执行元件（步进电动机）步距角 α 、系统脉冲当量 δ 和丝杠导程 l_0 之后，其减速比还应满足关系式 $i = \alpha l_0 / (360^\circ \delta)$ 。

2. 齿轮传动的级数及传动比分配

为了既满足动态性能和提高传动精度的要求，又使整个传动链结构紧凑，经常将一系列齿轮机构或其他传动机构组成传动链，以达到驱动部件与负载之间的转矩、转速的匹配。因此，在齿轮传动的总传动比确定之后，还存在齿轮传动的级数确定及各级传动比的分配问题。下面以两级圆柱齿轮传动为例，介绍齿轮传动级数及传动比分配的一般原则和方法。

1) 等效转动惯量最小原则

对于伺服传动系统，要求其启动、停止和逆转要快。当力矩一定时，转动惯量越小，角加速度越大，运转就越灵敏。这样可使过渡过程短、响应快、启动功率小。因此，常按照换算到电动机轴上的等效转动惯量最小的原则，来确定齿轮传动链级数和分配各级传动比。

齿轮系传动的功率大小不同，其传动比的分配也有所不同。以图 2-3 所示的小功率电动机驱动的两级齿轮传动为例，为简化起见，假设传动效率为 100%，各主动小齿轮转动惯量相同，轴与轴承的转动惯量忽略不计，各齿轮均为同宽度、同材料的实心圆柱体。那么，该齿轮系的

转动惯量换算到电动机轴上的等效转动惯量为

$$J_e = J_1 \frac{J_1 + J_2}{i_1^2} + \frac{J_3}{i_1^2 i_2^2} \quad (2-6)$$

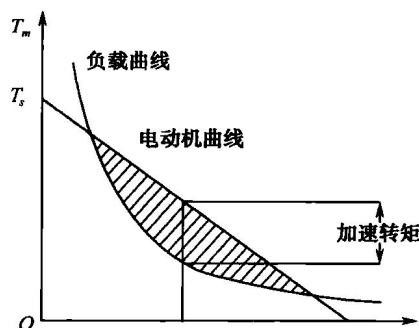


图 2-2 电动机驱动齿轮传动图及负载的转矩-转速曲线

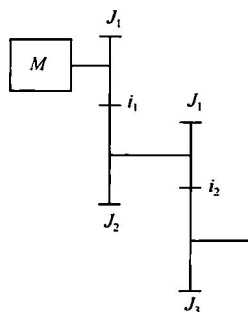


图 2-3 小功率电动机驱动的两级齿轮传动

设分度圆直径为 D ，圆柱齿轮的转动惯量为

$$J = \frac{1}{2} m R^2 = \frac{\pi b r}{32 g} D^4 \quad (2-7)$$

所以

$$J_1 = \frac{W_1}{8g} D_1^2 = \frac{\pi b \rho}{32} D_1^4 \quad (2-8)$$

$$J_2 = \frac{\pi b \rho}{32} D_2^4 = \frac{\pi b \rho}{32} D_1^4 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 = J_1 i_1^4 \quad (2-9)$$

$$J_3 = \frac{\pi b \rho}{32} D_3^4 = \frac{\pi b \rho}{32} D_1^4 \left(\frac{D_3}{D_1} \right)^4 = J_1 i_2^4 \quad (2-10)$$

由于 $i = i_1 i_2$ ，则

$$J_e = J_1 \left(1 + i_1^2 + \frac{1}{i_1^2} + \frac{i_2^2}{i_1^4} \right) \quad (2-11)$$

$$\frac{dJ_e}{di_1} = J_1 \left(2i_1 - \frac{2}{i_1^3} - \frac{4i_2^2}{i_1^5} \right) \quad (2-12)$$

令 $dJ_e/di_1 = 0$ ，可得

$$i_2 = \sqrt{\frac{i_1^4 - 1}{2}} \quad (2-13)$$

当 $i_1^4 \gg 1$ 时，则上式可简化为

$$i_2 \approx \frac{i_1^2}{\sqrt{2}} \quad (2-14)$$

$$i_1 \approx (\sqrt{2} i_2)^{1/2} = (\sqrt{2} i)^{1/3} = (2i^2)^{1/6} \quad (2-15)$$