

21 世纪高等院校教材

机电一体化设计基础

朱喜林 张代治 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在简要介绍机电一体化基本概念、发展状况及产品基本构成的基础上,讨论了机电一体化产品的共性关键技术及应用。重点讨论了机电一体化系统的建模方法,较详细地探讨了机械系统、计算机控制系统、伺服系统、检测系统及机电一体化总体设计的基本思想和方法。本书还对一些新型的机电一体化器件、液压和气动系统的应用方法进行了介绍。

本书可作为大专院校机械工程及自动化专业,及其相关专业的专业课和选修教材,也可供继续教育和自学人员研修相关专业使用,还可供研究生及从事机电一体化研究、产品设计、制造的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电一体化设计基础 / 朱喜林, 张代治 主编. —北京: 科学出版社, 2004
(21 世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-013489-3

I. 机… II. ①朱… ②张… III. 机电一体化-机械设计-高等学校-教材 IV. HT122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 050703 号

责任编辑: 马长芳 贾瑞娜 / 责任校对: 鲁 素

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 7 月第二次印刷 印张: 18 1/4

印数: 3 001—4 500 字数: 347 000

定价: 26.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

前 言

本书是根据机械工程及自动化专业教学指导委员会建议的课程体系大纲而编写的,旨在为学过机械基础知识、基本电工电子技术和微机原理等课程的学生提供一本能融会贯通所学基础知识、综合分析和设计机电一体化系统的教材,使学生们掌握机电一体化的共性理论与技术,为开发设计机电一体化产品打下基础。

计算机的产生和发展推动了现代科学技术的不断进步,也使传统的机械技术发生了彻底的变化。以先进材料、能源、信息三大技术为支柱构成的现代机械,不论是机械产品、生产制造系统还是实验设备和研究装置,几乎都与微电子技术及计算机技术紧密相连。机电一体化就是在微电子技术向传统机械技术渗透的过程中逐渐形成并发展起来的一门新兴的综合性技术学科。目前机电一体化技术得到了普遍的重视和广泛的应用,应用机电一体化技术而生产出来的机电一体化产品,已遍及人们日常生活和国民经济的各个领域。为了在当今国际范围内技术、经济竞争中占据优势,世界各国纷纷将机电一体化的研究和发展作为一项重要内容而列入本国的发展战略。

机电一体化是机械技术与微电子技术有机结合的产物,它包括机械技术、电子技术、自动控制技术、传感器技术、计算机技术等。但机电一体化并非是这些技术的简单叠加,它强调的是这些技术的相互渗透和有机结合,在某一具体的系统或产品中,取各单项技术之所长,形成优势互补,进而达到整体最优。因而,高等工程教育不应仅仅局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关键技术,还应在此基础上更进一步地通过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重要实质及机电一体化设计的理论和方法,从而能够灵活地综合运用这些技术进行机电一体化产品的分析、设计与开发,达到知识能力结构的机电一体化。

本书从系统的观点出发,着重讨论机电一体化技术的基本理论、数学建模、机电一体化系统各组成部分的分析与综合。近年来,世界上各发达国家竞相发展机电一体化技术,本书力求将最新的研究成果介绍给读者。机电一体化技术给传统的机械产业和人民的的生活带来了革命性的变革和惊人的效益,它是科学技术进步发展的必然趋势。

本书第1章由朱喜林编写;第2章由朱喜林、李晓梅编写;第3章由张代治编写;第4章由杨丽梅编写;第5章由时轮编写;第6章由范久臣、张志义、孙雪梅编写;第7章由石玉祥编写。全书由朱喜林完成修改和统稿工作并担任主编,张代治、时轮担任副主编。本书的出版得到吉林大学教材出版基金的支助,并得到科学

出版社的大力支持,许多同事和部分研究生也为本书的出版做了大量的工作,在此一并表示感谢。

限于我们的水平和经验,加之机电一体化技术的迅猛发展,本书中一定存在不少疏漏和错误之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2004 年 4 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 机电一体化基本概念	1
1.2 机电一体化发展概况和发展趋势	2
1.3 机电一体化共性关键技术	3
1.4 机电一体化产品的设计	5
1.4.1 机电一体化产品的基本设计思路	5
1.4.2 构思比较	5
1.4.3 方案的评价	7
1.4.4 详细设计	7
第 2 章 机电一体化系统数学建模	9
2.1 机械传动系统建模	9
2.1.1 机械移动系统	9
2.1.2 机械转动系统	11
2.2 电器控制系统模型	13
2.2.1 基本电路	13
2.2.2 伺服电机控制电路	16
2.3 液压、气压装置及系统模型	20
2.3.1 液压伺服马达的传递函数	21
2.3.2 气动伺服马达的传递函数	27
2.3.3 液压力矩放大器	31
第 3 章 机械系统设计	34
3.1 传动机构设计	34
3.1.1 传动机构性能要求	34
3.1.2 无侧隙齿轮传动机构	34
3.1.3 滚珠丝杠副传动机构	37
3.1.4 锥环无键联轴器	50
3.1.5 同步带传动	51
3.1.6 谐波传动	59
3.1.7 滚珠花键传动	60
3.2 支承与导向机构设计	62
3.2.1 回转运动支承	62

3.2.2	直线运动导向支承	70
3.2.3	机身	76
3.3	执行机构设计	78
3.3.1	执行机构的特点及要求	78
3.3.2	微动机构	78
第 4 章	计算机控制系统设计	84
4.1	被控对象数学模型的建立	84
4.1.1	数学模型的类型	84
4.1.2	建立数学模型方法	84
4.1.3	被控对象模型的辨识	85
4.2	计算机控制技术	93
4.2.1	计算机控制系统的组成及特点	94
4.2.2	Z 变换	94
4.2.3	Z 反变换	101
4.2.4	用 Z 变换解差分方程	103
4.2.5	Z 传递函数	104
4.2.6	离散系统的稳定性条件	105
4.3	计算机控制算法	106
4.3.1	数字 PID 控制算法	106
4.3.2	数字滤波器算法	109
4.3.3	达林算法	111
4.3.4	数字串级控制算法	115
4.4	数字控制器设计	117
4.4.1	PID 数字控制器设计	117
4.4.2	最少拍控制系统的设计	124
4.4.3	最少拍无波纹系统的设计	127
4.4.4	达林数字控制器设计	130
4.4.5	串级控制系统设计	131
4.5	控制输出接口设计	132
4.5.1	机电接口类型及其特点	132
4.5.2	D/A 转换器及其接口设计	133
4.5.3	功率接口设计	136
4.5.4	光电耦合器驱动接口设计	141
4.5.5	控制量输出通道的结构形式	143
第 5 章	伺服系统设计	145
5.1	伺服系统的分类及设计要求	145

5.1.1	什么是伺服系统	145
5.1.2	伺服系统的分类	145
5.1.3	对伺服系统的总体要求	148
5.2	伺服系统中的执行元件	148
5.2.1	执行元件的分类	148
5.2.2	伺服系统对执行元件的总体要求	150
5.3	步进电机伺服系统	150
5.3.1	步进电机的工作原理及特点	150
5.3.2	步进电机的结构类型	153
5.3.3	步进电机的运行特性及参数	154
5.3.4	步进电机的驱动技术	157
5.3.5	步进电机的微机开环控制	163
5.3.6	步进电机的微机闭环控制	168
5.3.7	步进电机伺服系统的设计计算	168
5.4	直流伺服系统	172
5.4.1	直流伺服电动机的原理、结构及分类	172
5.4.2	直流伺服电动机的稳态特性	173
5.4.3	直流伺服电动机的调速	175
5.4.4	直流位置伺服系统的结构	177
5.4.5	直流位置伺服系统的数学模型	179
5.4.6	无刷直流伺服电动机	181
5.4.7	伺服系统设计的有关计算	184
5.5	交流伺服系统	187
5.5.1	交流伺服电动机的类型及特点	188
5.5.2	异步电动机的调速方法	188
5.5.3	V_1/f_1 变频调速	188
5.5.4	转差频率控制的变频调速	192
5.5.5	矢量控制技术	193
5.6	直线电动机简介	195
5.6.1	直线电动机的基本原理	196
5.6.2	直线电动机的分类及特点	196
5.6.3	直线步进电动机	197
5.6.4	直线直流电动机	198
5.6.5	压电式直线电动机	199
5.7	液压和气压伺服系统	199
5.7.1	液压伺服系统	200

5.7.2 气压伺服系统	203
第 6 章 检测系统设计	206
6.1 模拟信号的检测	207
6.1.1 基本转换电路	207
6.1.2 振荡器	209
6.1.3 量程切换电路	211
6.1.4 放大器	212
6.1.5 信号的调制与解调	219
6.1.6 滤波器	226
6.1.7 运算电路	231
6.2 数字信号的检测	233
6.2.1 数字信号检测系统的组成	233
6.2.2 信号的细分与辨向	234
6.2.3 脉冲当量变换电路	243
6.3 检测系统中的抗干扰技术	244
6.3.1 干扰的类型及产生	244
6.3.2 常用的干扰抑制措施	245
6.4 检测信号的采集方法	250
6.4.1 模拟信号的采集方法	250
6.4.2 采样/保持电路	251
6.5 检测信号的处理方法	254
6.6 检测系统接口技术	255
6.6.1 ADC0809 模转换器和单片机接口应用	255
6.6.2 8031 和 5G14433A/D 转换器接口	260
第 7 章 机电一体化总体设计	265
7.1 概述	265
7.2 系统功能的划分	266
7.3 功能及性能指标的分配	267
7.3.1 机电一体化系统内部功能的设计要求	267
7.3.2 机电一体化系统常用性能指标	267
7.3.3 常用性能指标分配原则	271
7.4 总体设计的方法和步骤	274
7.4.1 机电一体化产品的设计类型和总体设计方法	274
7.4.2 机电一体化产品的设计与现代设计方法	276
7.4.3 机电一体化系统(或产品)的设计步骤	280
参考文献	282

第 1 章 概 论

1.1 机电一体化基本概念

机电一体化是以机械技术和电子技术为主体,多门技术学科相互渗透、相互结合的产物,是正在发展和逐渐完善的一门新兴的边缘学科。机电一体化(mechatronics)的英文名称是由日本人创造的,日本人通过截取英文机械学(mechanics)的词头和电子学(electronics)的词尾组合在一起而创造出来的一个新的英文名词——mechatronics。这一名词首次出现在 1971 年日本的《机械设计》杂志副刊上,后来随着机电一体化的发展而被广泛引用,目前已在世界范围内得到普遍承认和接受,已经成为一个正式的英文名词。

机电一体化是机械技术与电子技术结合的产物。它还处在不断发展和完善的过程中,到目前为止,国内外还没有统一的关于机电一体化这一概念的详尽解释。不同的个人、学术团体或企业,由于各自的理解不同,出发点或着眼点的不同,所做出的解释也不尽相同。日经产业新闻把机电一体化称为“机械技术的机械学和电子技术的电子学组合起来的技术进步的总称”。日本机械振兴协会经济研究所在其“关于机械工业施政调查研究报告”中提出:“机电一体化是指机械装置和电子设备适当地组合起来,构成机械产品或机电一体与机信一体的新趋势。”尽管众说纷纭,却都强调了机械与电子有机结合的思想。

由日本机械振兴协会经济研究所于 1983 年 3 月所做的解释被普遍接受,即“机电一体化乃是在机械的主功能、动力功能、信息功能和控制功能上引进微电子技术,并将机械装置与电子装置用相关软件有机结合而构成的系统的总称。”

美国机械工程师协会(ASME)于 1984 年为现代机械下了如下的定义:“由计算机信息网络协调与控制的,用于完成包括机械力、运动和能量流等动力学任务的机械和(或)机电部件相互联系的系统。”它与前面提及的关于机电一体化的定义是一致的。因此,可以说现代机械就是指机电一体化系统,它是以机电为基础,信息为核心的系统。

由此可见,机电一体化是一种崭新的学术思想。按照机电一体化思想,凡是由各种现代高新技术与机械和电子技术相互结合而形成的各种技术、产品(或系统)都应属于机电一体化范畴。机电一体化是一个综合的概念,包含了技术和产品两方面内容。首先是指机电一体化技术,其次是指机电一体化产品。机电一体化技术是指包括技术基础、技术原理在内的使机电一体化产品得以实现、使用和发展的技术。机电一体化产品是指采用机电一体化技术,在机械产品基础上创造出来的

新一代机电产品。

机电一体化技术是建立在机械技术、微电子技术、计算机和信息处理技术、自动控制技术、传感与测试技术、伺服驱动技术、系统总体技术等现代高新技术群体基础之上的一种高新技术。机电一体化技术的突出特点在于它在机械产品中注入了过去所没有的新技术,把电子器件的信息处理和自动控制等功能“糅合”到机械装置中去,从而获得了过去单靠某一种技术而无法实现的功能和效果。机电一体化技术的重要实质是应用系统的观点和方法来分析和研究机电一体化产品或系统(以下统称为机电一体化产品),综合运用各种现代高新技术进行产品的设计与开发,通过各种技术的有机结合,实现产品内部各组成部分的合理和外部的整体效能最佳。

机电一体化产品是具有很高技术含量的产品,其技术附加值随机电结合程度的加深而提高。在当代产品中,单纯机械技术带来的产品附加值在其总的产品附加值中所占的比重越来越少,而微电子技术带来的附加值在其总的产品附加值中所占的比重却越来越多。随着时代的发展和技术的进步,这种趋势还将增加。但这并不等于说,微电子技术可以脱离机械技术而在机械领域获得更大的经济效益,而是意味着,机械技术只有同微电子技术相结合,传统的机械产品只有向机电一体化产品方向发展,才是机械工业发展的唯一出路。

1.2 机电一体化发展概况和发展趋势

任何事物的产生和发展,都离不开科技进步和社会需求这两大前提。科技进步是新事物产生的基础,社会需求则是其产生的诱因和发展动力。机电一体化的产生和发展也不例外,机械技术、计算机技术、微电子技术等的发展为机电一体化的产生奠定了良好的基础;人们对生产和生活产品在质量和品种上的要求不断提高是机电一体化蓬勃发展的动力。与所有科学技术一样,机电一体化也经历了长期的产生和发展过程。早在机电一体化这一概念形成之前,世界各国的科学技术工作者已为机械与电子技术的有机结合自觉不自觉地做了许多工作,研究和开发了不少机电一体化产品,如电子工业领域内通信电台的自动调谐系统、雷达伺服系统,机械工业领域内的数控机床、工业机器人等,这一切都为机电一体化这一概念的形成奠定了基础。直到20世纪70年代初,日本人对机电一体化的长期实践和最新应用成果加以系统地概括和总结,才形成一个比较完整的机电一体化概念。此后由于大规模和超大规模集成电路技术及微型计算机和微电子技术的迅速发展,使得机电结合的形式更加灵活,内容更加丰富,应用更加广泛,从工业生产母机到医疗卫生设备、家电产品,引发了一场规模空前的技术革命。

目前,机电一体化产品已经渗透到国民经济和日常工作、生活的各个领域。电冰箱、全自动洗衣机、录像机、照相机等家电产品,电子打字机、复印机、传真机等自

动化办公设备,脑 CT、核磁共振等成像诊断仪器,数控机床、工业机器人、自动化物料搬运车等机械制造设备,以及由微机控制正时点火、助力转向、燃油喷射、排气净化等的交通运输设备等,都是典型的机电一体化产品。

科学技术的进步,尤其是机械技术和微电子技术的进步是机电一体化的产生和发展的基本条件,人们对社会需求的不断增长,尤其是对产品的种类和功能要求的不断提高是它的发展动力。机电一体化的发展又不断促进科学技术的进步和社会需求。机电一体化产品的显著特点是多功能、高效率、高智能、高可靠性,同时产品又具有轻、薄、细、小、巧的优势。其目的是为了不断满足人们生活的多样化要求和生产的省力、省时及自动化等方面的需要。机电一体化通过综合利用现代高新技术的优势,在提高精度、增强功能、改善操作性和使用性、提高生产率和降低成本、节约能源和降低消耗、减轻劳动强度和改善劳动条件、提高安全性和可靠性、简化结构和减轻重量、增强柔性和智能化程度、降低价格等诸多方面都取得了显著的技术经济效益和社会效益,促使社会和科学技术又向前大大迈进了一步。

机电一体化技术的发展水平是一个国家技术水平的标志,在一定程度上反映了该国的技术经济实力。因此,工业发达国家和地区对机电一体化技术都十分重视,从政府到企业都制定了相应的发展战略。我国对机电一体化的研究虽起步较晚,但发展速度较快,尤其是在我国加入 WTO 以后,面对国际市场激烈竞争的新形势,已充分认识到机电一体化对我国经济发展的重要战略意义。相关部门组织专家根据我国国情对发展机电一体化的目标、原则、层次和途径等进行了深入而广泛的研究,制定了一系列有利于机电一体化发展的政策法规,确定了数控机床、工业自动化控制仪表、工业机器人、汽车电子化等 15 个优先发展领域及 6 项共性关键技术的研究方向和课题。

目前,机电一体化技术思想已被普遍接受和采用,机电一体化技术体系正在不断地发展和完善。国民经济建设和发展迫切需要大量掌握机电一体化技术的人才去改造传统产业,研究和开发新一代机电一体化产品以改善出口产品结构,增强我国产品在国际市场上的竞争力。机电一体化已经显示出了强大的生命力,并正以空前的速度和力度冲击着传统的技术思想、生产方式和方法以及传统的机电产品和产业结构,国民经济的各个领域都将因此而发生深刻变革。机电一体化是科学技术发展的必然趋势,并将成为 21 世纪的主流技术之一。

1.3 机电一体化共性关键技术

机电一体化是一门新兴的边缘学科,它是由多种技术相互交叉、相互渗透而形成的,所涉及的技术领域非常广泛。要掌握机电一体化、开发机电一体化产品,就必须了解并掌握这些相关技术。概括起来,机电一体化共性关键技术主要有六大

技术。

1. 机械技术

机械技术是机电一体化化的基础。机电一体化产品中的主功能和构造功能,往往是以机械技术为主实现的。在机械与电子相互结合的实践中,不断对机械技术提出更高的要求,使现代机械技术相对于传统机械技术发生了很大变化。新材料、新工艺、新原理、新机构等不断出现,现代设计方法不断发展和完善,以满足机电一体化产品对减轻重量、缩小体积、提高精度和刚度、改善性能等多方面的要求。

2. 计算机与信息处理技术

信息处理技术包括信息的交换、存取、运算、判断和决策等,实现信息处理的主要工具是计算机。计算机技术包括计算机硬件技术和软件技术、网络与通信技术、数据库技术等。在机电一体化产品中,计算机与信息处理装置指挥整个产品的运行。信息处理是否正确、及时,直接影响到产品工作的质量和效率。因此,计算机应用及信息处理技术已成为促进机电一体化技术和产品发展的最活跃的因素。

3. 检测与传感技术

检测与传感技术的研究对象是传感器及其信号检测装置。机电一体化产品中,传感器作为感受器官,将各种内、外部信息通过相应的信号检测装置反馈给控制及信息处理装置。因此检测与传感是实现自动控制的关键环节。机电一体化要求传感器能快速、精确地获取信息并经受各种严酷环境的考验。但是由于目前检测与传感技术还不能与机电一体化化的发展相适应,使得不少机电一体化产品不能达到满意的效果或无法实现设计。因此,大力开展检测与传感技术的研究对发展机电一体化具有十分重要的意义。

4. 自动控制技术

自动控制技术范围很广,包括自动控制理论、控制系统设计、系统仿真、现场调试、可靠运行等从理论到实践的整个过程。由于被控对象种类繁多,所以控制技术的内容极其丰富,包括高精度定位控制、速度控制、自适应控制、自诊断、校正、补偿、示教再现、检索等控制技术。自动控制技术的难点在于自动控制理论的工程化与实用化,这是由于现实世界中的被控对象往往与理论上的控制模型之间存在较大差距,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。由于微型机的广泛应用,自动控制技术越来越多地与计算机控制技术联系在一起,成为机电一体化中十分重要的关键技术。

5. 伺服驱动技术

伺服驱动技术的主要研究对象是执行元件及其驱动装置。执行元件有电动、气动、液压等多种类型,机电一体化产品中多采用电动式执行元件,其驱动装置主要是指各种电动机的驱动电源电路,目前多采用电力电子器件及集成化的功能电路构成。执行元件一方面通过电气接口向上与微型机相连,以接受微型机的控制指令;另一方面又通过机械接口向下与机械传动和执行机构相连,以实现规定的动作。因此伺服驱动技术是直接执行操作的技术,对机电一体化产品的动态性能、稳态精度、控制质量等具有决定性的影响。

6. 系统总体技术

系统总体技术是一种从整体目标出发,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。系统总体技术所包含的内容很多,接口技术是其重要内容之一,机电一体化产品的各功能单元通过接口连接成一个有机的整体。系统总体技术是最能体现机电一体化设计特点的技术,其原理和方法还在不断发展和完善。

1.4 机电一体化产品的设计

1.4.1 机电一体化产品的基本设计思路

如前所述,机电一体化产品种类繁多,涉及技术领域广泛,不同的产品所涉及的技术范围和结构的复杂程度也不尽相同。通常把机电一体化产品划分为功能附加型、功能替代性和机电融合型三大类,针对不同类型的产品要应用不同的设计方法。从产品设计角度出发,可分为开发性设计(全新设计)、适应性设计(原理方案不变,仅对功能及结构进行重新设计)和变参数设计(仅改变部分结构尺寸而形成系列产品),因此机电一体化产品的设计过程也有其各自的特点,归纳其基本思想,机电一体化产品基本设计思路如图 1-1 所示。

1.4.2 构思比较

在充分进行市场调研和预测的基础上,确定了产品开发目标及产品功能要求后,接下来的任务就是进行具体的设计。一个好的设计师是从一个好的产品构思开始的。机电一体化产品设计应鼓励创新,充分发挥创造能力和聪明才智来构思和创造新的方案,常采用以下方法。

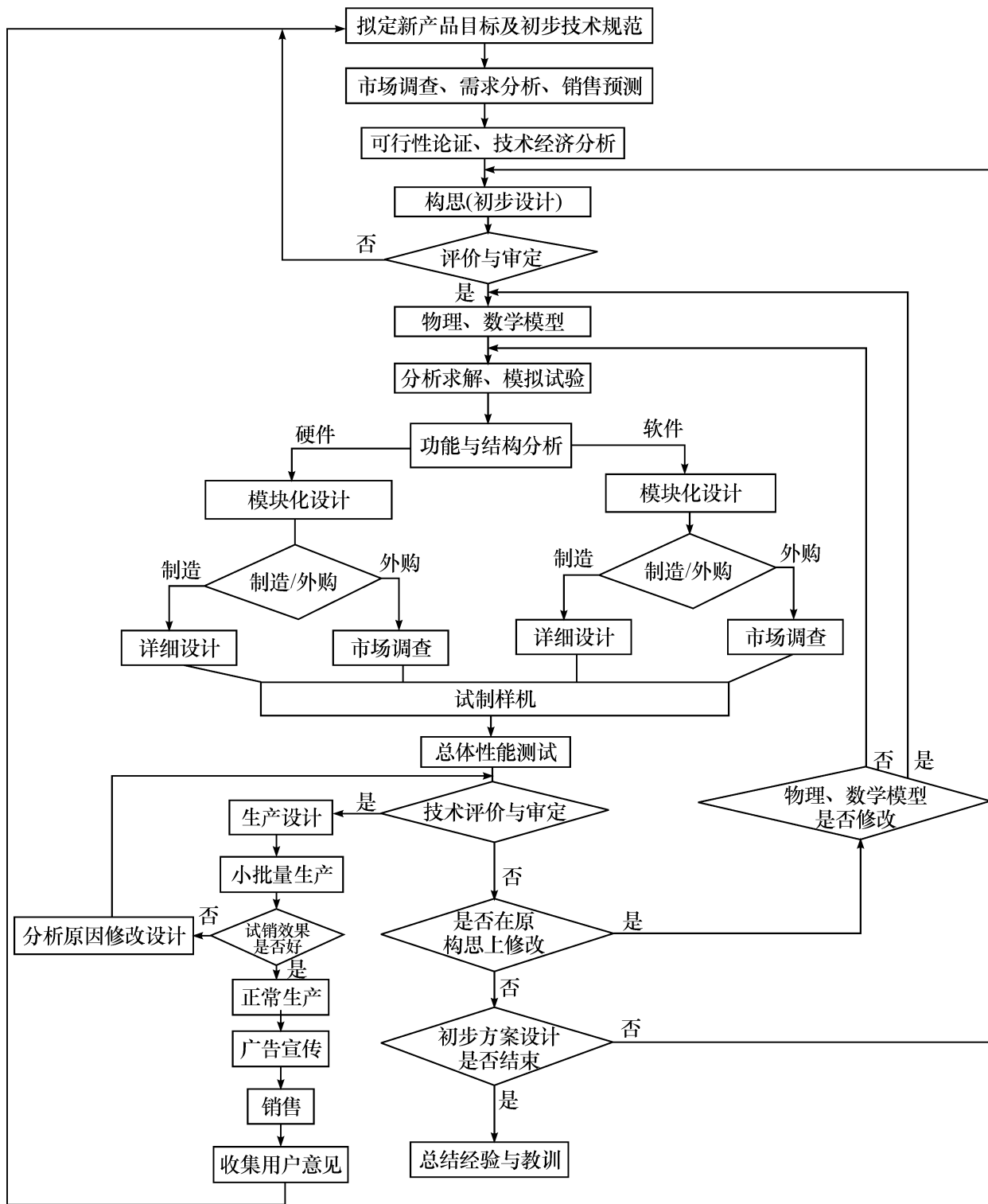


图 1-1 机电一体化产品的基本设计思路

(1) 专家调查法

请专家发表意见,选择、集中其中的新思想来创造新方案。

(2) 头脑风暴法

召集创新方案的会议,鼓励与会人员自由开放地思考问题,发表创见。

(3) 检查提问法

通过提出问题,引导人们对设计方案提出新的构思。

(4) 检查表法

详细列出若干值得推敲的问题进行对照检查,以便改进方案。

(5) 特性列举法

将研究对象按其特性加以表述,并逐一研究其实现方法。

(6) 缺点列举法

列举已有构思、设计方案或已有产品的各种缺点,以激发人们提出改善方案。

(7) 希望列举法

通过列举改进希望提高人们创新方案。

1.4.3 方案的评价

对各种构思和多种方案进行筛选,选择较好的可行方案进行分析组合和概述评价,从中再选几个方案按机电一体化产品系统设计评价原则和评价方法进行深入的综合分析评价,最后确定实施方案。

1.4.4 详细设计

详细设计是指根据综合评价确定的基本方案,从技术上将其细节逐层全部展开,直至完成试制产品样机所需全部技术图纸及文件的过程。

(1) 系统总体设计

包括人-机系统的详细设计,总体布局设计,维护及维修对策的设计,与制造单位的工艺协调,事前准备的未来发展对策设计,产品性能及最终运行条件的设计。

(2) 机械本体设计

包括现有设备的利用与改造部分设计,新设计产品的详细设计方案和工程设计,对象的加工相关设计,作业工具、量具、工具设计,安全装置的设计,特殊附加装置的设计,机器控制对策的设计,现有制造装备的改造及添加部分的设计。

(3) 控制系统设计

包括标准控制及扩展方案的讨论,机器控制的顺序与方法的确定,接口设计,控制回路设计及整个机电一体化产品整体回路的设计,连锁及安全的设计等。

(4) 程序设计

根据系统设计及接口技术方案进行程序编制和调试。

(5) 后备系统设计

包括故障预测及修复方法设计,故障停机时机器对策的调查和制定,控制对策和准备工作的设计。

(6) 完成详细设计书及制造图样

包括制作整体构成及各模块和局部的设计说明书,产品制造图样及零件清单,

标准件表及材料表,成本核算表,综合评价表,检验规范,调整规范,预算分配方案等。

(7) 产品使用文件的设计

包括设计用户使用说明书,调整维护说明书,产品出厂检验证书,教育培训计划等。

详细设计过程需要在试制、试用、用户调研的基础上经过多次循环、反复修改,逐步完善。

第 2 章 机电一体化系统数学建模

机电一体化系统的范围广、种类多,针对不同的研究对象有不同的模型种类。本章针对机电一体化系统中常见的结构,讨论几种具有代表性结构的数学模型的建立。通过对典型系统建模的讨论,主要目的是使读者能够学会机电一体化系统数学模型建立的一般方法。

2.1 机械传动系统建模

2.1.1 机械移动系统

机械移动系统的基本元件是质量、阻尼和弹簧。常用 $F(t)$ 代表外力; $x(t)$ 代表位移; m 代表质量; f 代表黏滞阻尼系数; K 代表弹簧刚度。由图 2-1 所示的系统,根据物理学定律可得到质量的数学模型为

$$F(t) = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \quad (2-1)$$

阻尼器的数学模型为

$$F(t) = f \left[\frac{dx_1(t)}{dt} - \frac{dx_2(t)}{dt} \right] \quad (2-2)$$

弹簧的数学模型为

$$F(t) = K [x_1(t) - x_2(t)] \quad (2-3)$$

下面举例说明移动系统的建模方法。

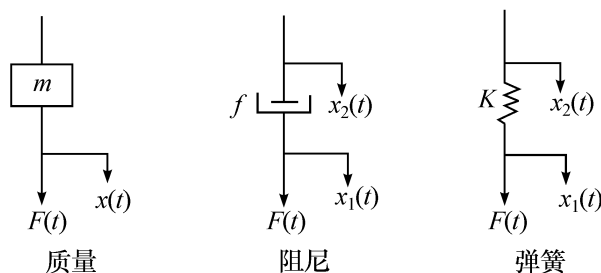


图 2-1 机械移动模型受力图

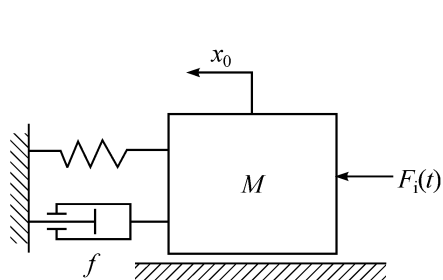


图 2-2 移动系统力学模型

图 2-2 为某机床动力滑台经简化后的力学模型。根据牛顿第二定律,系统方程为

$$F_i(t) - F_{x_0}(t) - f \frac{dx_0(t)}{dt} = M \frac{d^2 x_0(t)}{dt^2} \quad (2-4)$$

对式(2-4)取拉普拉斯变换,得系统传递函数

$$\frac{X_0(s)}{F_i(s)} = \frac{1}{Ms^2 + fs + K} \quad (2-5)$$

例 2-1 求图 2-3(a)所示系统以作用力 $F(s)$ 为输入, 分别以 $X_1(s)$ 和 $X_2(s)$ 为输出位移的传递函数。图中 m_1 、 m_2 表示质量; f 为阻尼系数; K_1 、 K_2 表示弹簧刚度; $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 分别为 m_1 和 m_2 的独立位移。

解 通过对系统进行受力分析, 可以建立 m_1 的力平衡方程(运动方程)

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -f \left[\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right] - K_1(x_1 - x_2) \quad (2-6)$$

同理, m_2 的力平衡方程式为

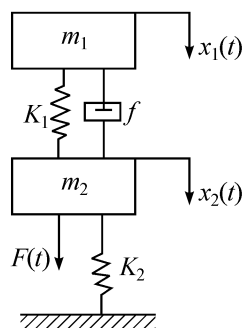
$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = F(t) - f \left[\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right] - K_1(x_2 - x_1) - K_2 x_2 \quad (2-7)$$

对式(2-6)和式(2-7)进行拉普拉斯变换, 可得

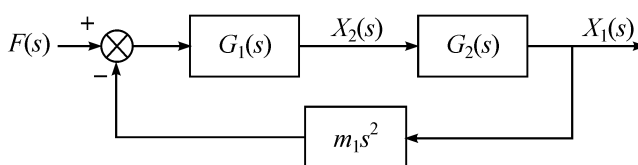
$$m_1 s^2 X_1(s) = fs[X_1(s) - X_2(s)] - K_1[X_1(s) - X_2(s)] \quad (2-8)$$

$$m_2 s^2 X_2(s) = F(s) - fs[X_2(s) - X_1(s)] - K_1[X_2(s) - X_1(s)] - K_2 X_2(s) \quad (2-9)$$

根据式(2-8)和式(2-9)可画出系统方框图, 简化后的系统方框图如图 2-3(b)所示。



(a) 系统方框图



(b) 简化后的系统方框图

图 2-3 双质量系统及简化后的系统方框图

根据图 2-3(b)可以求出以作用力 $F(s)$ 为输入, 分别以 $X_1(s)$ 和 $X_2(s)$ 为输出位移的传递函数如下

$$\begin{aligned} \frac{X_1(s)}{F(s)} &= \frac{G_1(s) G_2(s)}{1 + m_1 s^2 G_1(s) G_2(s)} = \frac{fs + K}{(m_2 s^2 + K_2)(m_1 s^2 + fs + K) + m_1 s^2 (fs + K_1)} \\ &= \frac{fs + K_1}{m_1 m_2 s^4 + (m_1 + m_2) fs^3 + (m_1 K_1 + m_1 K_2 + m_2 K_1) s^2 + fK_2 s + K_1 K_2} \end{aligned} \quad (2-10)$$

$$\begin{aligned}\frac{X_2(s)}{F(s)} &= \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s) G_2(s) m_1 s^2} \\ &= \frac{m_1 s^2 + fs + K_1}{m_1 m_2 s^4 + (m_1 + m_2) fs^3 + (m_1 K_1 + m_1 K_2 + m_2 K_1) s^2 + fK_2 s + K_1 K_2}\end{aligned}\quad (2-11)$$

2.1.2 机械转动系统

机械转动系统的基本元件与移动系统基本相同,只是把质量变成了转动惯量,阻尼器和弹簧不变。常用 $M(t)$ 代表外力矩; $\theta(t)$ 代表转角; J 代表转动惯量; f 代表黏滞阻尼系数; K 代表弹簧刚度。由图 2-4 所示的系统,根据物理学定律可得到转动惯量的数学模型为

$$M(t) = J \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} \quad (2-12)$$

黏滞阻尼器的数学模型为

$$M(t) = f \left[\frac{d\theta_1(t)}{dt} - \frac{d\theta_2(t)}{dt} \right] \quad (2-13)$$

弹簧的数学模型为

$$M(t) = K[\theta_1(t) - \theta_2(t)] \quad (2-14)$$

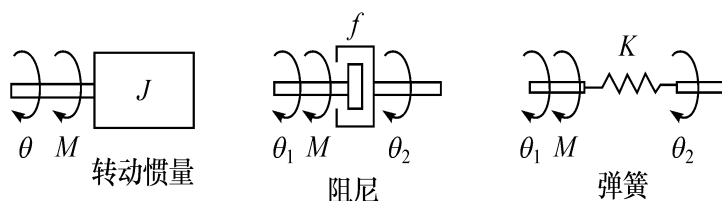


图 2-4 机械转动模型受力图

例 2-2 求图 2-5 所示扭摆的系统传递函数。图中: J 表示摆锤的转动惯量; f 表示摆锤与空气的黏滞阻尼系数; K 表示扭簧弹性刚度。

解 加在摆锤上的力矩 $M(t)$ 与摆锤转角 $\theta(t)$ 之间的运动方程为

$$J \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} = M(t) - f \frac{d\theta(t)}{dt} - K\theta(t) \quad (2-15)$$

对式(2-15)取拉普拉斯变换,得该系统传递函数为

$$\frac{\theta(s)}{M(s)} = \frac{1}{Js^2 + fs + K} \quad (2-16)$$

例 2-3 求图 2-6 所示同步齿形带驱动装置的传递函数。图中: K, f 分别

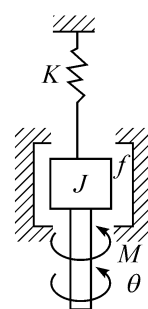


图 2-5 扭摆示意图

表示同步齿形带的弹性刚度与阻尼系数； $M(t)$ 为步进电机的力矩； J_m 和 J_L 分别为步进电机轴和负载的转动惯量； $\theta_i(t)$ 与 $\theta_o(t)$ 分别为输入轴与输出轴的转角。

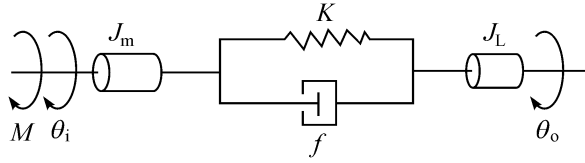


图 2-6 同步齿形带驱动装置示意图

解 首先对输入轴和输出轴分别写出力矩平衡方程

$$J_m \frac{d^2 \theta_i}{dt^2} = M(t) - f \left[\frac{d\theta_i}{dt} - \frac{d\theta_o}{dt} \right] - K(\theta_i - \theta_o) \quad (2-17)$$

及

$$J_L \frac{d^2 \theta_o}{dt^2} = -f \left[\frac{d\theta_o}{dt} - \frac{d\theta_i}{dt} \right] - K(\theta_o - \theta_i) \quad (2-18)$$

对上两式取拉普拉斯变换得

$$J_m s^2 \theta_i(s) = M(s) - (fs + K)[\theta_i(s) - \theta_o(s)] \quad (2-19)$$

$$J_L s^2 \theta_o(s) = (fs + K)[\theta_i(s) - \theta_o(s)] \quad (2-20)$$

根据式(2-19)和式(2-20)可画出系统方框图,简化后的系统方框图如图 2-7所示。

$$\begin{aligned} \frac{\theta_o(s)}{M(s)} &= \frac{\frac{fs + K}{J_L s^2 (J_m s^2 + fs + K)}}{1 + \frac{J_m s^2 + fs + K}{J_L s^2 (J_m s^2 + fs + K)}} \\ &= \frac{fs + K}{J_L s^2 (J_m s^2 + fs + K) + J_m s^2 (fs + K)} \\ &= \frac{fs + K}{(J_L + J_m) s^2 \left[\frac{J_L J_m}{J_L + J_m} s^2 + fs + K \right]} \end{aligned} \quad (2-21)$$

图 2-7 同步齿形带驱动装置系统方框图

2.2 电器控制系统模型

2.2.1 基本电路

1. 基本无源电路网络

基本电路通常是指由电阻、电容和电感等基本元件组成的无源网络电路和在无源网络基础上加入运算放大器后组成的有源网络电路。建立基本电路网络模型主要是依据电路方面的基本定律。为方便起见,人们常使用复阻抗的概念来建立电路网络模型,这时用 R 表示电阻,用 Ls 表示电感,用 Cs 表示电容,这样可以用 s 的代数方程代替复杂的微分方程,从而方便地得到电路网络的传递函数。

图 2-8 是一个简单的基本 RC 网络电路,根据电路的基本定律,可以写出微分方程

$$u_i = Ri + u_o$$

$$u_o = \frac{1}{C} \int i dt$$

对上面两式进行拉普拉斯变换,可得

$$U_i(s) = RI(s) + U_o(s) \quad (2-22)$$

$$U_o(s) = \frac{1}{Cs} I(s) \quad (2-23)$$

由式(2-22)和式(2-23)可以得到图 2-8 的传递函数如下

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (2-24)$$

以上是通过消元法求出的传递函数,这对于比较简单的电路网络是非常方便的,但当网络比较复杂的时候,利用消元法不但计算复杂而且容易出错。因此,人们常采用动态结构图来描述电路的信号传输过程,在某种程度上讲动态结构图也是一种数学模型,并在实际中得到了广泛的应用。另外,由动态结构图可以很方便地求出传递函数。

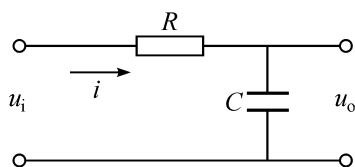


图 2-8 基本 RC 电路网络

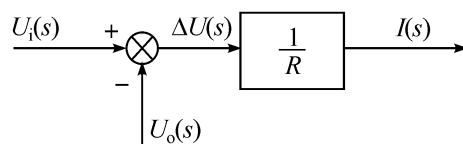


图 2-9 式(2-22)所对应的动态结构图

如式(2-22)可以写成

$$\frac{1}{R} [U_i(s) - U_o(s)] = I(s)$$

这一数学关系可以用图 2-9 形象地表示出来,同理式(2-23)可以用图 2-10 形象地表示出来。将图 2-9 和图 2-10 合并,将同一变量的信号通路连在一起,即得到图 2-9 所示的 RC 网络的动态结构图,如图 2-11 所示。由图 2-11 可以得出同样的 RC 网络的传递函数。

由于无源电路网络内部不含任何电压源或电流源,只由电阻、电容、电感组合而成,因此对于串联电路,复阻抗等于各串联复阻抗之和;对于并联电路,复阻抗的倒数等于各并联复阻抗的倒数之和。通过这样的简化,利用复阻抗的概念,就可以很容易地求出多数无源网络的传递函数。

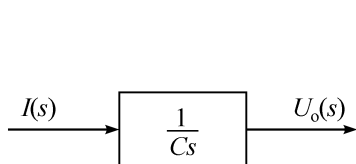


图 2-10 式(2-23)所对应的动态结构图

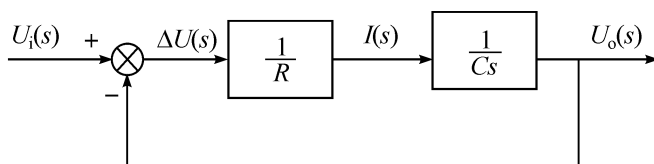


图 2-11 RC 网络的动态结构图

2. 基本有源电路网络

在无源网络中加入运算放大器等有源器件后,该网络就变成了有源网络。由运算放大器组成的有源网络,在很多场合可取代无源网络。运算放大器相互连接时,由于各运算放大器输入阻抗很高,可以忽略负载效应。系统数学模型可通过分别求取各运算放大器的数学模型得到,大大简化了建模的步骤,降低了难度。各个运算放大器的模型一般可通过反馈复阻抗对输入复阻抗之比求得。

图 2-12 为运算放大器工作原理图。由于运算放大器的开环增益极大,输入阻抗也非常大,所以把图 2-12 中 a 点看成“虚地”,即 $U_a \approx 0$,同时 $i_2 \approx 0$ 及 $i_1 \approx -i_f$ 。于是有

$$\frac{U_i}{Z_i} = -\frac{U_o}{Z_f}$$

对上式进行拉普拉斯变换,有

$$\frac{U_i(s)}{Z_i(s)} = -\frac{U_o(s)}{Z_f(s)}$$

因此,运算放大器的传递函数为

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = -\frac{Z_f(s)}{Z_i(s)} \quad (2-25)$$

式中: $Z_f(s)$ 和 $Z_i(s)$ 分别代表反馈复阻抗和输入复阻抗。

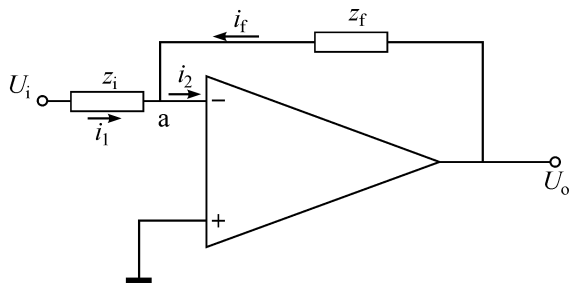


图 2-12 运算放大器原理图

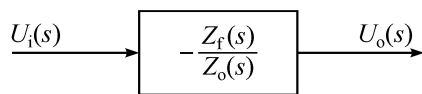


图 2-13 运算放大器的
动态结构图

由式(2-25)可见,若选择不同的输入电路阻抗 Z_i 和反馈回路阻抗 Z_f ,就可组成各种不同的传递函数,也就是说,只需改变运算放大器的输入阻抗或反馈阻抗就可以改变电路的性质(图 2-13),这是运算放大器的一个显著特点。

例 2-4 求图 2-14 所示的比例-积分电路的传递函数,并画出其动态结构图。

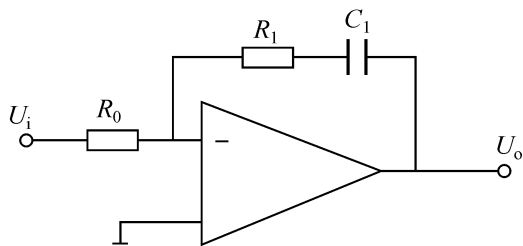


图 2-14 比例-积分电路

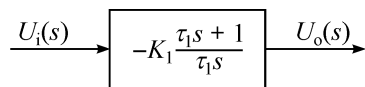


图 2-15 比例-积分电路动态结构图

由图 2-14 可求出该电路的输入复阻抗和反馈复阻抗分别为

$$Z_i = R_0$$

$$Z_f = R_1 + \frac{1}{C_1 s}$$

故其传递函数为

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = -\frac{Z_f(s)}{Z_i(s)} = -\frac{R_1 + \frac{1}{C_1 s}}{R_0} = -\left(\frac{R_1}{R_0} + \frac{1}{R_0 C_1 s}\right) \\ &= -\frac{R_1}{R_0} \frac{R_1 C_1 s + 1}{R_1 C_1 s} = -K_1 \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_1 s} \end{aligned} \quad (2-26)$$

式中: $K_1 = \frac{R_1}{R_0}$ 为比例调节系数; $\tau_1 = R_1 C_1$ 为积分调节系数。

由式(2-26)可以画出其动态结构图如图 2-15 所示。

2.2.2 伺服电机控制电路

电机是机电控制系统中最重要的执行元件,电机数学模型的建立既要考虑到电机内部的电磁相互作用,又要考虑电机带有负载的情况。直流伺服电机的控制技术较为成熟,交流伺服电机的控制技术近年来发展得也很快,正在逐步走向成熟。

图 2-16 是直流伺服电动机的结构原理图。由图 2-16 可以看出,要想改变直流伺服电动机的转速,可以采用两种方式,一是改变电枢两端的电压,二是改变磁场强度,即电枢电压控制和励磁磁场控制两种方式。

1. 电枢控制式直流电动机

图 2-17 是直流伺服电动机电枢等效电路图。图中: U_a 为电机电枢电压; ω 为电机输出转速; R_a 为电枢绕组的电阻; L_a 为电枢绕组的电感; I_a 为电枢绕组的电流; E_a 为电机感应电势; M 为电机转矩; J 为电机及负载折算到电机轴上的转动惯量; f 为电机及负载折算到电机轴上的黏性阻尼系数。对于电枢回路,根据基尔霍夫定律,有

$$U_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (2-27)$$

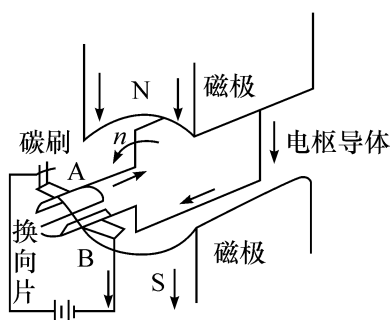


图 2-16 直流伺服电动机结构原理图

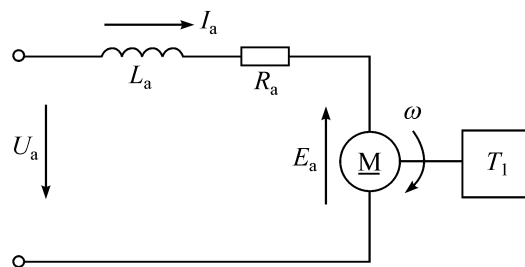


图 2-17 电枢等效回路图

电机转矩 M 与电枢电流 i_a 和每气隙磁通 Φ 的乘积成正比,即

$$M(t) = C_m \Phi i_a(t) \quad (2-28)$$

式中: C_m 为转矩常数,仅与电动机的结构有关。

电动机电枢的反电动势 e_a 与电动机的转速 ω 和每气隙磁通 Φ 的乘积成正比,即

$$e_a = C_e \Phi \omega = C_e \Phi \frac{d\theta_o(t)}{dt} \quad (2-29)$$

式中: C_e 为电动势常数,仅与电动机的结构有关。

根据转动体的牛顿定律,有

$$M(t) - f \frac{d\theta_o(t)}{dt} = J \frac{d^2\theta_o(t)}{dt^2} \quad (2-30)$$

由式(2-27)、(2-28)、(2-29)、(2-30)整理可得

$$C_m \Phi U_a(t) = L_a f \frac{d^3\theta_o(t)}{dt^3} + (R_a J + L_a f) \frac{d^2\theta_o(t)}{dt^2} + (C_m C_e \Phi^2 + R_a f) \frac{d\theta_o(t)}{dt} \quad (2-31)$$

对式(2-31)取拉普拉斯变换,得传递函数为

$$\frac{\theta_o(s)}{U_a(s)} = \frac{C_m \Phi}{s[L_a J s^2 + (L_a f + R_a J)s + (R_a f + C_m C_e \Phi^2)]} \quad (2-32)$$

式(2-32)右端分子分母同时除以 $C_m C_e \Phi^2$,并令

$$\begin{aligned} \tau_j &= \frac{R_a J}{C_m C_e \Phi^2} \\ \tau_d &= \frac{L_a}{R_a} \\ K_m &= \frac{1}{C_e \Phi} \end{aligned}$$

可得

$$G_m(s) = \frac{\theta_o(s)}{U_a(s)} = \frac{K_m}{s \left[\tau_j \tau_d s^2 + \left(\tau_j \tau_d \frac{f}{J} + \tau_j \right) s + \left(\tau_j \frac{f}{J} + 1 \right) \right]} \quad (2-33)$$

式中: τ_j 为直流伺服电动机的机电时间常数; τ_d 为直流伺服电动机的电磁时间常数; K_m 为直流伺服电动机的静态放大系数。

当黏滞阻尼系数 f 较小可忽略时,则传递函数可近似为

$$G_m(s) = \frac{\theta_o(s)}{U_a(s)} = \frac{K_m}{\tau_j \tau_d s^3 + \tau_j s^2 + s} \quad (2-34)$$

2. 磁场控制式直流电动机

前面讨论了直流伺服电动机的电枢电压控制方式,它属于恒转矩控制,即在整个调速过程中,电动机的输出转矩始终保持不变。但在有些场合,希望电动机的转矩随转速的变化而改变,即希望当电动机的转速提高时,其转矩随之下降,这就需要采用另一种控制方式——磁场控制方式,它属于恒功率控制。

图 2-18 是磁场控制式直流电动机原理图。图中: $e_i(t)$ 是激磁绕组输入电

压； $\theta_o(t)$ 是电机输出转角； R_f 是励磁绕组的电阻； L_f 是励磁绕组电感； i_f 是励磁绕组电流； R_a 为电枢电路的电阻； i_a 为电枢电流(常量)； $M(t)$ 为电机转矩； J 为电机及负载折算到电机轴上的转动惯量； f 为电机及负载折算到电机轴上的黏滞阻尼系数。由图可见,对于励磁回路有下列等式存在

$$e_i(t) = L_f \frac{d i_f(t)}{d t} + R_f i_f(t) \quad (2-35)$$

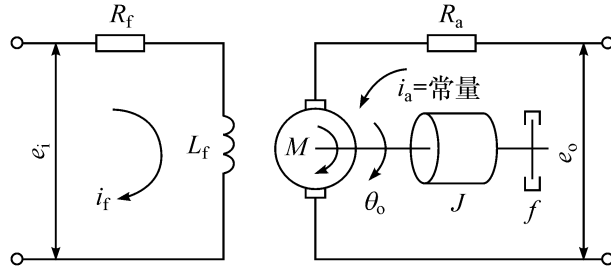


图 2-18 励磁控制等效回路

由于电机转矩 $M(t)$ 与电枢电流 i_a 和每气隙磁通量 Φ 的乘积成正比,故有

$$M(t) = C_m \Phi i_a(t) \quad (2-36)$$

而每气隙磁通量 Φ 又与励磁电流 i_f 成正比,即

$$\Phi = \frac{i_f(t) N}{R_m} \quad (2-37)$$

式中： N 为定子线圈匝数； R_m 为磁阻。

由式(2-36)和式(2-37)可得

$$M(t) = C_m \frac{N i_a(t)}{R_m} i_f(t) \quad (2-38)$$

当电机结构一定时,式(2-38)中 C_m 、 N 、 R_m 均为常数。在采用磁场控制方式时,电枢电流 i_a 也为常量,故电机转矩 $M(t)$ 与励磁电流 $i_f(t)$ 成比例。

根据转动体的运动方程有

$$M(t) = J \frac{d^2 \theta(t)}{d t^2} + f \frac{d \theta(t)}{d t} \quad (2-39)$$

将式(2-35)、(2-38)、(2-39)联立,经过拉普拉斯变换可得

$$\frac{\theta(s)}{E_i(s)} = \frac{\frac{C_m}{R_m} N i_a(t)}{s [L_f J s^2 + (L_f f + R_f J) s + R_f f]}$$

式中:令 $\frac{C_m}{R_m} N i_a(t) = K$, 经整理,可得

$$\frac{\theta(s)}{E_i(s)} = \frac{\frac{K}{R_f f}}{s \left(\frac{L_f}{R_f} s + 1 \right) \left(\frac{J}{f} s + 1 \right)} \quad (2-40)$$

因为通常, $\frac{L_f}{R_f} \ll \frac{J}{f}$, 并令 $K_m = \frac{K}{R_f f}$, $T_m = \frac{J}{f}$, 则传递函数可近似为

$$\frac{\theta(s)}{E_i(s)} = \frac{\frac{K}{R_f f}}{s \left(\frac{J}{f} s + 1 \right)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (2-41)$$

3. 两相交流伺服电动机

图 2-19 是两相交流伺服电动机原理图。图中 $e_i(t)$ 为输入控制电压; $\theta_o(t)$ 为输出转角; $M(t)$ 为电机转矩; J 为电机及负载折算到电机轴上的转动惯量; f 为电机及负载折算到电机轴上的黏滞阻尼系数。

两相交流伺服电动机的转矩 $M(t)$ 是电机轴转速和控制电压的二元函数, 为研究问题方便, 线性化后可近似表示为

$$M(t) = -K_n \frac{d\theta_o(t)}{dt} + K_c e_i(t) \quad (2-42)$$

式中: K_n 和 K_c 为大于零的常数。

根据牛顿第二定律, 电机轴的动力方程为

$$M(t) = J \frac{d^2 \theta_o(t)}{dt^2} + f \frac{d\theta_o(t)}{dt} \quad (2-43)$$

将式(2-42)、(2-43)联立, 消去中间变量 $M(t)$, 经过拉普拉斯变换后, 可得传递函数

$$\frac{\theta_o(s)}{E_i(s)} = \frac{\frac{K_c}{f + K_n}}{s \left(\frac{J}{f + K_n} s + 1 \right)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (2-44)$$

式中: $K_m = \frac{K_c}{f + K_n}$ 为电动机的增益常数; $T_m = \frac{J}{f + K_n}$ 为电动机的时间常数。

4. 直流发电机

图 2-20 是直流发电机的原理图。图中: $e_i(t)$ 为输入控制电压; $e_o(t)$ 为发电

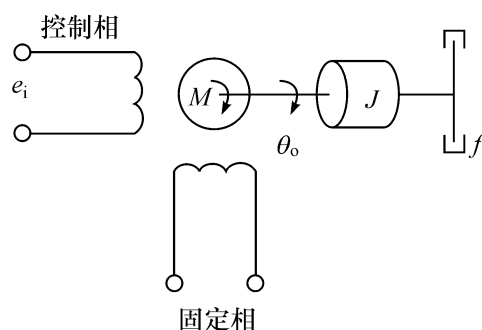


图 2-19 两相交流伺服电动机原理图

机输出电压； R_f 、 R_g 分别为输入和输出回路电阻； L_f 、 L_g 分别为输入和输出回路电感； $i_f(t)$ 、 $i_g(t)$ 分别为输入和输出回路电流； Z_L 为负载阻抗； $e_L(t)$ 为负载电压。

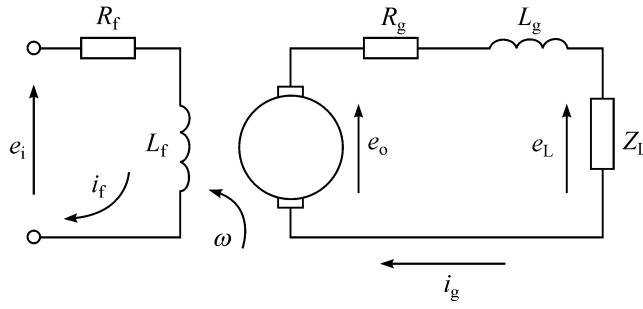


图 2-20 直流发电机原理图

对于输入回路,按基尔霍夫定律有

$$e_i(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{d i_f(t)}{d t} \quad (2-45)$$

当发电机的转轴恒速转动时,发电机输出电压 $e_o(t)$ 可认为与控制电流 $i_f(t)$ 成正比,即

$$e_o(t) = K_g i_f(t) \quad (2-46)$$

式中 K_g 为常数。

由式(2-45)、(2-46),可得

$$e_i(t) = \frac{1}{K_g} \left[R_f e_o(t) + L_f \frac{d e_o(t)}{d t} \right] \quad (2-47)$$

对式(2-47)进行拉普拉斯变换并整理,得传递函数

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{K_g}{R_f + L_f s} = \frac{\frac{K_g}{R_f}}{\frac{L_f}{R_f} s + 1} = \frac{K_m}{T_m s + 1} \quad (2-48)$$

式中： $K_m = \frac{K_g}{R_f}$ ； $T_m = \frac{L_f}{R_f}$ 。

在机电控制系统中,广泛使用的直流测速机是一种小型直流发电机。测速机的激磁是恒定的,即图 2-20 中控制电压应保持恒定,输入变量是发电机轴的转速,测速发电机输出电压与输入转速成正比,传递函数为

$$\frac{E_o(s)}{\omega(s)} = K \quad (2-49)$$

2.3 液压、气压装置及系统模型

流体传动分为液压传动和气压传动,他们的区别是产生驱动力的介质不同。

流体驱动有动力缸(液压缸、汽缸)和马达(液压马达、气动马达)作为执行元件的系统称为液、气压伺服系统。在这些系统中,常用滑阀作控制元件。无论执行元件是作直线运动的动力缸还是作回转运动的马达,它与滑阀组成的环节统称为伺服马达。所以,只要建立了伺服马达这个环节的运动方程,就不难求得系统的开环和闭环传递函数。下面重点讨论液压及气动伺服马达的传递函数的求取方法,此外,对一些重要的伺服元件将做简单的介绍。

2.3.1 液压伺服马达的传递函数

这里讨论的伺服马达包括阀控动力缸和阀控马达两大类,虽然它们具有不同的运动参数,但运动方程的形式却完全相同,所以只需研究其中之一。

1. 液压滑阀的流量方程

如图 2-21 所示的阀控液压缸,由于滑阀在结构上的对称性,进油口面积 A_1 与出油口面积 A_2 始终是相等的,即

$$A_1 = A_2 = A$$

根据流量计算公式,进油口流量 Q_1 与出油口流量 Q_2 分别为

$$Q_1 = C_d A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} = C_d A \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} \quad (2-50)$$

$$Q_2 = C_d A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2 - P_0)} = C_d A \sqrt{\frac{2}{\rho} P_2} \quad (2-51)$$

式中: C_d 为流量系数; ρ 为流体密度; P_s 为供油压力; P_0 为回油压力; P_1 为进油腔压力; P_2 为回油腔压力。

因滑阀相对液压缸的容积很小,忽略油液在滑阀中的压缩性(注意:在液压缸中则不能忽略),并注意到 $Q_1 = Q_2$, 比较以上两式得

$$P_s = P_1 + P_2 \quad (2-52)$$

显然负载压力

$$P_L = P_1 - P_2 \quad (2-53)$$

由式(2-52)和式(2-53)可得

$$2P_1 = P_s + P_L$$

$$2P_2 = P_s - P_L$$

将它们分别代入式(2-50)和式(2-51)得

$$Q_1 = Q_2 = C_d A \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_s - P_L)}$$

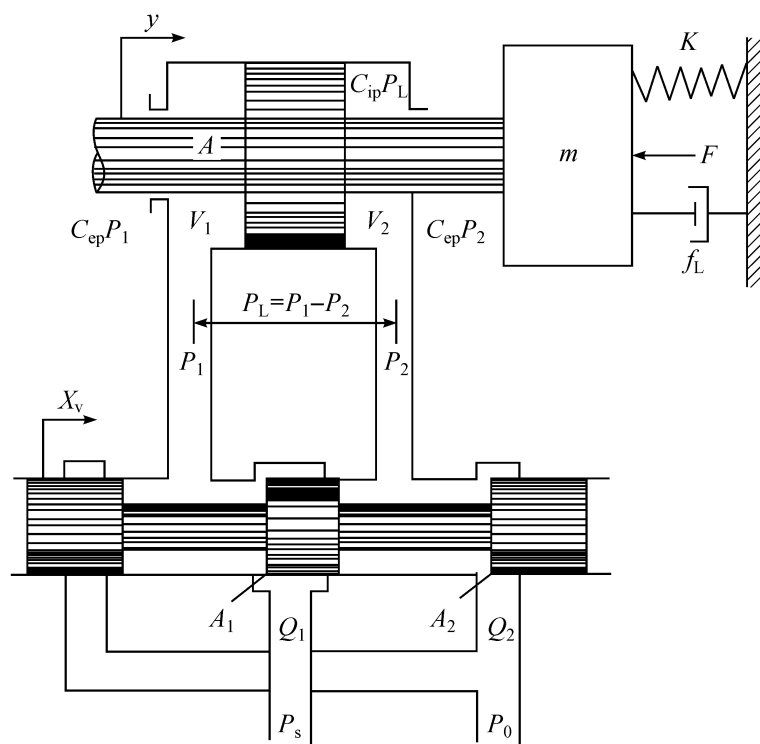


图 2-21 阀控液压缸系统

对于阀芯肩宽等于阀套槽宽的零开口滑阀,假定阀及油缸无泄漏,则负载流量(驱动负载的流量) Q_L 与 Q_1 或 Q_2 相等,即

$$Q_L = C_d A \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_s - P_L)} = C_d \omega X_v \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_s - P_L)} \quad (2-54)$$

式中: ω 为滑阀窗口孔的宽度; X_v 为阀芯的位移。

式(2-54)表明滑阀在供油压力 P_s 恒定时,负载压力 P_L 与负载流量呈非线性关系。显然, Q_L 与 P_L 的关系也是非线性的。

为了使问题简化,我们把非线性函数在工作点展成泰勒级数,取其一阶近似式,得到增量方程。因此,用泰勒公式在特定工作点(X_{vi} = 常数, P_{Li} = 常数)处展开,取一次项而得

$$Q_L = Q_{Li} + \left. \frac{\partial Q_L}{\partial X_v} \right|_i \Delta X_v + \left. \frac{\partial Q_L}{\partial P_L} \right|_i \Delta P_L$$

增量方程为

$$\Delta Q_L = Q_L - Q_{Li} = K_q \Delta X_v - K_c \Delta P_L$$

将此方程的坐标零点置于工作点(X_{vi} , P_{Li}),有 $Q_{Li} = 0$,则可得滑阀流量-压力特性的线性化方程

$$Q_L = K_q X_v - K_c P_L \quad (2-55)$$

式中: K_q 为滑阀流量增益; K_c 为滑阀流量压力系数。