

研究生用教材



机电系统仿真与设计

JIDIAN XITONG FANGZHEN YU SHEJI

张立勋 董玉红 著

哈尔滨工程大学出版社



哈尔滨工程大学“十五”研究生教材建设专项资金资助出版

机电系统仿真与设计

张立勋 董玉红 著

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机电系统仿真与设计/张立勋,董玉红著. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2006
ISBN 7-81073-869-0

I.机… II.①张… ②董… III.①机电系统-系
统仿真 ②机电系统-系统设计 IV.TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 107094 号

内 容 简 介

本书针对机电系统的设计问题,阐述了基于 MATLAB 软件的仿真与设计方法。具体内容包括仿真的基本概念、机电系统的基本结构要素及机电系统设计的技术路线、机械传动系统的建模及仿真、机构动态仿真、基于 MATLAB 的控制系统设计与仿真,以及机电系统的半物理仿真等。通过典型实例的分析介绍了机电系统的综合设计方法。

本书的主要使用对象是机电方向的硕士、博士研究生,也可作为机电产品开发人员的技术参考书。

哈 尔 滨 工 程 大 学 出 版 社 出 版 发 行
哈 尔 滨 市 东 大 直 街 124 号
发 行 部 电 话:(0451)82519328 邮 编:150001
新 华 书 店 经 销
黑 龙 江 省 地 质 测 绘 印 制 中 心 印 刷

*

开本 787mm×960mm 1/16 印张 17.5 字数 370 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—1 000 册

定价:25.00 元

前 言

科学技术的快速发展对机电系统的性能分析与设计提出了越来越高的要求。建立机电系统模型和对机电系统进行仿真与设计,对于系统的设计与开发具有极其重要的作用。

计算机技术与信息处理技术的发展给系统仿真技术带来了惊人的变化。采用计算机仿真可以很好地解决实物与半实物等传统仿真中的问题。只要系统设计者能够全面了解系统所处的环境及系统中的对象,并且能够正确建立系统的数学模型,便可以使用计算机对系统进行仿真与分析。计算机仿真程序可重复利用,特别是对系统的修改非常方便、安全,代价小。用户在不断地进行仿真修正的基础上,可以深化对系统的认识,进而对系统采取相应的控制策略。特别是半物理仿真和快速原型技术的应用,使得仿真结果更接近实际系统的工作状态,并且可以实现机电产品的快速开发。

本教材是为配合硕士研究生和博士研究生的“机电系统仿真与设计”课程而编写的,针对典型机电系统仿真与设计的问题,介绍了 MATLAB 软件在系统建模、仿真分析、仿真实验中的应用。结合机电系统研制的科研实践,在教材中充实了大量的应用实例,增强了本书的实用性和先进性。

本书内容共分 7 章:在第 1 章中主要介绍了机电一体化技术的基本概念,以及仿真在机电系统设计中的作用;在第 2 章中介绍了机械传动系统的建模及仿真,主要讲述机械传动系统的建模方法和传动系统的机械参数对系统性能的影响;在第 3 章中介绍了机构动态仿真,主要介绍机构运动学模型及仿真、机构动力学分析、机构动态仿真实例;在第 4 章中介绍了基于 MATLAB 的系统分析与设计方法,重点介绍系统数学模型的表示、时域分析、频域分析、根轨迹分析、系统稳定性判别、系统校正设计和线性系统分析及设计工具;在第 5 章中介绍了伺服驱动系统的设计与仿真,主要讲述基于传递函数的伺服控制系统设计与仿真、基于状态空间模型的控制系统设计、模糊控制系统设计及仿真、非线性环节对伺服系统性能的影响;在第 6 章中介绍了机电系统的综合设计方法,主要讲述驱动方案设计、驱动器的选择、检测方案设计、控制方案设计、系统与环境设计、数控旋压机系统设计以及教学机器人设计实例;在第 7 章中讲述了基于 dSPACE 的半物理仿真方法,主要讲述了 RTW 实时开发环境、dSPACE 实时仿真系统和 dSPACE 半物理仿真应用实例。

本书由张立勋教授和董玉红教授撰稿。在本书的编写过程中,得到了哈尔滨工程大学机电一体化研究室的支持和帮助,哈尔滨工程大学的赵国良教授为本书的结构及内容安排提出了宝贵的意见,在此一并表示感谢。

本书得到“哈尔滨工程大学‘十五’研究生教材建设专项资金”的资助,并得到了九州恒润科技有限公司的支持,在此深表谢意。

由于时间仓促,书中难免有不当之处,敬请读者指正。

作 者

2006年7月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 机电一体化技术	1
1.2 机电一体化系统设计的技术路线	6
1.3 仿真在机电系统设计中的作用	8
1.4 机电系统常用的计算机仿真软件	12
习题与思考题	24
第2章 机械传动系统的建模及仿真	25
2.1 机械传动系统概述	25
2.2 机械传动系统的动力学模型	27
2.3 传动机构的仿真分析	32
2.4 传动机构的机械参数对系统性能的影响	50
习题与思考题	57
第3章 机构动态仿真	59
3.1 机构运动学模型及仿真	59
3.2 机构动力学分析	72
3.3 机构动态仿真实例	81
习题与思考题	91
第4章 基于 MATLAB 的系统分析与设计	92
4.1 系统数学模型的表示	92
4.2 时域分析	99
4.3 频域分析	102
4.4 根轨迹分析	105
4.5 系统稳定性判别	107
4.6 系统校正设计	112
4.7 线性系统分析及设计工具	123
习题与思考题	128
第5章 伺服驱动系统的设计与仿真	130
5.1 概 述	130

5.2 基于传递函数的伺服控制系统设计与仿真	131
5.3 基于状态空间模型的控制系统设计	142
5.4 模糊控制系统设计及仿真	154
5.5 非线性环节对伺服系统性能的影响	171
习题与思考题	181
第6章 机电系统综合设计	183
6.1 驱动方案设计	183
6.2 驱动元件及驱动器的选择	190
6.3 检测方案设计	195
6.4 控制方案设计	201
6.5 系统与工作环境设计	205
6.6 数控旋压机系统设计实例	207
6.7 教学机器人实例	215
习题与思考题	230
第7章 基于 dSPACE 的半物理仿真	232
7.1 RTW 实时开发环境	232
7.2 dSPACE 实时仿真系统	237
7.3 半物理仿真应用实例	247
习题与思考题	257
附录 MATLAB 常用函数及使用方法	258
F.1 MATLAB 的常用函数	258
F.2 MATLAB 绘图	263
参考文献	272

第 1 章 绪 论

1.1 机电一体化技术

1.1.1 机电一体化技术产生的背景

机电一体化技术是在以大规模集成电路和微型计算机为代表的微电子技术高度发展并向传统机械工业领域迅速渗透、机械技术与电子技术深度结合的基础上,综合运用机械技术、微电子技术、自动控制技术、传感测试与信息处理技术、计算机及接口技术等,根据系统功能目标合理配置机械本体、执行机构、动力驱动单元、传感测试元件、控制计算机及接口元件等硬件要素,并使之在软件程序控制下形成物质和能量的有序规则运动,在高功能、高质量、高可靠性、低能耗的意义上实现特定功能价值的系统工程技术。由此而产生的功能系统,则成为一个以微电子技术为主导的、以现代高新技术为支撑的机电一体化系统或机电一体化产品。

日本在 20 世纪 70 年代初开始使用“机电一体化”这个新名词,这个词是根据英文 Mechanics(机械学)的前半部和 Electronics(电子学)的后半部相结合而构成的,即 Mechatronics(日本造的英文组合词),用日本汉字“機電一體化”来表示。“机电一体化”这组汉字比较恰当地表述了一个新的概念,因而能迅速直接被我国接受和使用。1984 年美国机械工程协会(ASME)的一个专家组在给美国国家科学基金会的报告中,明确地提出现代机械系统的定义为:“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。”这一含义实质上是指机电一体化的机械系统,它与以上的定义是一致的。

中国在 20 世纪 80 年代提出机电一体化概念,并有“机电一体化”、“机电液一体化”和“光机电一体化”等提法。考虑到机电系统已经包括光传感、光通信和液压伺服等内容,因此,机电一体化提法更具代表性。

机电一体化以各种各样的形式渗透到了社会的各个角落,社会生产、家庭生活、交通运输、航空航天及海洋开发都在使用机电一体化产品,都离不开机电一体化技术,机电一体化概念也普遍被人们所接受。机电一体化技术是机械技术向自动化、智能化方向发展的必然产物,它的产生和发展具有广泛的技术基础和社会基础。

机电一体化技术的核心是机械技术和电子技术,而力学、机械学、加工工艺学和控制技术构成了机械技术的四大支柱学科。即使一个简单的机械产品的设计也都需要以上技术的支持。近年来,由于超大规模集成电路技术的发展,计算机技术得到了快速发展,机械技术的四个支柱学科也随之发生了很大的变化。如有限元技术的出现,依靠快速、大存储量和高精度的计算机,几乎使任何复杂的力学计算成为可能。机械优化设计、计算机辅助设计技术的发展,使得原来主要靠人工完成的机械设计任务大部分可以由计算机来完成。数控技术、计算机辅助制造技术的出现使得加工工艺产生了一次革命,微电子技术和信息技术成了加工工艺过程的重要技术。变化最明显的是控制技术,它经历了从古老的机械式手动控制、继电器逻辑控制、计算机自动控制、智能控制的发展历程,它的每一次技术进步都是微电子技术和计算机技术发展的产物。可见,机械技术的四个支柱学科无一不渗透了电子技术和信息技术,正是由于这些技术有机地结合使得传统的机械技术发展成今天的机电一体化技术。

1.1.2 机电一体化的基本概念

1. 机电一体化的定义

机电一体化包含机电一体化技术和机电一体化产品两个概念。

(1) 机电一体化技术

机电一体化技术是微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术相结合的新兴综合性高技术,是机械技术与微电子技术的有机结合。

(2) 机电一体化产品

新兴机械与电子器件,特别是与微处理器、微型机相结合而开发出的新一代电子化机械产品。

2. 机电一体化系统的基本要素

一个较完善的机电一体化系统应包括:机械本体、能源、测试传感部分、执行机构、驱动部分、控制及信息处理单元等六个基本结构要素。各要素和环节之间通过接口相联系,构成机电一体化系统。

(1) 机械本体

机械本体是系统所有功能元素的机械支撑结构,包括机身、框架和机械连接。机械本体的结构、工艺、材料和形状应满足产品的高效、多功能、可靠、节能、小型、轻量、美观等要求。

(2) 测试传感部分

测试传感部分对系统运行所需要的本身的或者外界环境的各种参数及状态进行检测,变成可识别的信号,传输到信息处理单元,经过分析和处理产生相应的控制信号。它一般由传感器和专用自动化仪表来实现,它直接影响系统的控制精度。

(3) 驱动部分

驱动部分在控制信息的作用下为系统提供驱动力,驱动执行机构完成各种动作。它包括

各种电动机、电液和电气驱动元件。它应满足高效、快速响应、高可靠性和环境适应性的要求。

(4) 执行机构

执行机构是根据控制指令完成机械动作的运动部件,是指驱动部分的输出(主动端)到系统的动力输出(末端)之间的机械结构。一般采用机械、电磁、液压和气动等机构。它应满足高刚度、低惯量、小质量、高可靠性、模块化、标准化和系列化的要求。

(5) 控制及信息处理单元

控制及信息处理单元将测试传感信息和输入命令进行分析处理,按一定程序发出控制命令,控制整个系统有目的的运行。它由特定的计算机或微处理器系统来实现,应满足信息处理速度快、可靠、抗干扰、智能化、小型化和标准化的要求。

(6) 能源

能源根据控制的要求为系统提供能量和动力。它包括电源、液压源和气压源等。它应满足高效、无危害的要求。

机电一体化系统的六个结构要素有机地结合构成了机电一体化系统,各个要素之间的关系如图 1-1 所示。一个机电一体化系统好像一个人的身体一样,各个部分都有不同的分工,它们之间有着密切的联系,只有各个部分分工协作才能完成预期的作业任务。血液就是人体

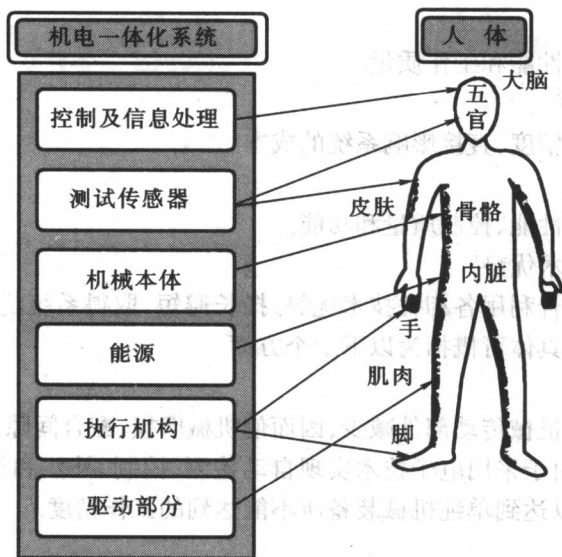


图 1-1 机电一体化系统与人体对比

的能源,它把能量通过血管输送到人体的各个部分,为各种人体组织提供营养和能量;肌肉是

人体的驱动元件,人的任何动作都是肌肉的收缩、膨胀运动的结果,而肌肉要从血液中获得能量,它的动作指令则来自于人的大脑;人的皮肤和耳、鼻、口、眼等器官相当于机电一体化系统中的传感器,它们把外部信息通过神经系统传递给大脑,为大脑决策提供外部信息;人的神经系统则相当于机电一体化系统中的信息传输网络系统;人的大脑则相当于机电一体化系统中的控制及信息处理单元,它把传感器的反馈信号进行采样、存储、分析、处理、判断,根据人的想法指挥肌肉运动,使得各个器官产生相应的动作;人的骨骼则相当于机电一体化系统中的机械本体,对人的身体起到支撑、造型和美观的作用。

3. 机电一体化的相关技术

机电一体化是系统技术、计算机及信息处理技术、自动控制技术、伺服传动技术和机械技术等多学科技术领域交叉的技术密集型系统工程技术,它主要包括以下六个相关技术。

(1) 机械技术

它是机电一体化技术的基础,任何机电一体化系统都离不开机械技术。

(2) 计算机及信息处理技术

它直接影响系统的工作质量、工作效率和自动化程度。

(3) 系统技术

它影响系统的优化程度和系统的总体质量。

(4) 自动控制技术

它影响系统的控制性能和工作质量。

(5) 传感与检测技术

它决定系统的最高精度,直接影响系统的成本。

(6) 伺服驱动技术

它影响系统的动态性能、控制质量和功能。

4. 机电一体化的技术优势

机电一体化技术综合利用各相关技术优势,扬长避短,取得系统优化效果,有显著的社会效益和技术经济效益。具体可概括为以下十个方面。

(1) 提高精度

机电一体化技术使机械传动部件减少,因而使机械磨损、配合间隙及受力变形等所引起的误差大大减小。同时,由于采用电子技术实现自动检测、控制、补偿和校正因各种干扰因素造成的动态误差,从而可以达到单纯机械装备所不能达到的工作精度。

(2) 增强功能

现代高新技术的引入,极大地改变了机械工业产品的面貌,具备多种复合功能,成为机电一体化产品和应用技术的一个显著特征。例如,加工中心机床可以将多台普通机床上的多道工序在一次装夹中完成,并且还有刀具磨损自动补偿、自动显示刀具动态轨迹图形、自动控制和自动故障诊断等极强的应用功能;配有机器人的大型激光加工中心,能完成自动焊接、划线、

切割、钻孔、热处理等操作,可加工金属、塑料、陶瓷、木材、橡胶等各种材料。这种极强的复合功能,是传统机械加工系统所不能比拟的。

(3)提高生产效率,降低成本

机电一体化生产系统能够减少生产准备时间和辅助时间,缩短新产品的开发周期,提高产品合格率,减少操作人员,提高生产效率,降低成本。例如,数控机床生产效率比普通机床要高5~6倍,柔性制造系统可使生产周期缩短40%,生产成本降低50%。

(4)节约能源,降低消耗

机电一体化产品通过采用低能耗的驱动机构、最佳的调节控制和提高设备的能源利用率来达到显著的节能效果。例如:汽车电子点火器,由于控制最佳点火时间和状态,可大大节约汽车的耗油量;若将节流工况下运行的风机、水泵随工况变速运行,平均可节电30%;工业锅炉若采用微机精确控制燃料与空气的混合比,可节煤5%~20%;还有被称为电老虎的电弧炉,是最大的耗电设备之一,如改用微型计算机实现最佳功率控制,可节电20%。

(5)提高安全性和可靠性

具有自动检测监控的机电一体化系统,能够对各种故障和危险情况自动采取保护措施,及时修正运行参数,提高系统的安全可靠性。例如,大型火力发电设备中锅炉和汽轮机的协调控制、汽轮机的电液调节系统、自动启停系统、安全保护系统等,不仅提高了机组运行的灵活性,而且提高了机组运行的安全性和可靠性,使火力发电设备逐步走向全自动控制。又如大型轧机多极计算机分散控制系统,可以解决对大型、高速冷热轧机的多参数测量和控制问题,保证系统可靠运行。

(6)改善操作性和使用性

机电一体化装置中相关传动机构的动作顺序及功能协调关系,可由程序控制自动实现,并建立良好的人-机界面,对操作参量加以提示,因而可以通过简便的操作实现复杂的控制功能,获得良好的使用效果。如示教再现工业机器人,在由人工进行一次示教操作后,即可按示教内容自动重复实现全部动作。有些更高级的机电一体化系统,还可通过被控对象的数学模型和目标函数,以及各种运行参数的变化情况,随机自寻最佳工作过程,协调对内对外关系,以实现自动最优控制。如微型计算机控制的钢板测厚自动控制系统、电梯全自动控制系统、智能机器人等。机电一体化系统的先进性是和技术密集性与操作使用的简易性和方便性相互联系在一起的。

(7)减轻劳动强度,改善劳动条件

机电一体化,一方面能够将制造和生产过程中极为复杂的人的智力活动和资料数据记忆查找工作改由计算机来完成;另一方面又能由程序控制自动运行,代替人的紧张和单调重复的操作,以及在危险或有害环境下的工作,因而大大减轻了人的脑力和体力劳动,改善了人的工作环境条件。例如,CAD和CAPP极大减轻了设计人员的劳动复杂性,提高了设计效率;搬运、焊接和喷漆机器人取代了人的单调重复劳动;武器弹药装配机器人、深海机器人、太空工作机

器人、在核反应堆和有毒环境下的自动工作系统,则成为人类谋求解决危险环境中的作业问题的最佳途径。

(8)简化结构,减少质量

由于机电一体化系统采用新型电力电子器件和新型传动技术,代替笨重的老式电气控制的复杂机械变速传动机构,由微处理机和集成电路等微电子元件和程序逻辑软件,完成过去靠机械传动链来实现的关联运动,从而使机电一体化产品体积减小、结构简化、质量减小。例如,无换向器电动机,将电子控制与相应的电动机电磁结构相结合,取消了传统的换向电刷,简化了电动机的结构,提高了电动机的寿命和运行特性,并缩小了体积;数控精密插齿机可节省齿轮等传动部件 30%;一台现金出纳机用微处理机控制可取代几百个机械传动部件。采用机电一体化技术使结构简化、质量减小,对于航天航空技术而言更具有特殊的意义。

(9)降低成本

由于结构的简化,材料消耗的减少,制造成本的降低,同时由于微电子技术的高速发展,微电子器件价格迅速下降,因此机电一体化产品价格低廉,而且维修性能得到改善,使用寿命得到延长。例如,石英晶振电子表以其多功能、使用方便及低价格优势,迅速占领了计时商品市场。

(10)增强柔性

机电一体化系统可以根据使用要求的变化,对产品的功能和工作过程进行调整和修改,满足用户多样化的使用要求。例如,工业机器人具有较多的运动自由度,通过更换手爪部分可以换用不同工具,通过修改程序、改变运动轨迹和运动姿态可以适应不同的作业过程和工作内容;利用数控加工中心或柔性制造系统,可以通过调整系统运行程序,适应不同零件的加工工艺。机械工业约有 75% 的产品属中小批量,利用柔性生产系统,能够经济、迅速地解决中小批量、多品种产品的自动化生产,对机械工业发展具有划时代的意义。通过编制用户程序,实现工作方式的改变,可以适应各种用户对象及现场参数变化的需要。机电一体化的这种柔性应用功能,构成了机械控制“软件化”和“智能化”的特征。

1.2 机电一体化系统设计的技术路线

1.2.1 现代系统设计的特征

由于计算机软件技术的迅速发展,使得机电系统的设计手段与设计方法发生了根本的改变和创新。现代系统设计的特征主要表现在以下几个方面:

1. 以理论作指导,不同于单纯依靠经验的传统设计方法,设计的成功率高;
2. 明确的设计目标、科学的设计过程,可获得优于传统设计方法的设计结果;

3. 重视设计过程、设计程序、规范化设计,工作质量好、效率高;
4. 强调抽象设计思维,以获得创新;
5. 采用扩展性设计思维,避免传统封闭式设计思维,满意度高;
6. 强调评价决策,避免主观决策,易获得最佳方案、最佳价值水平;
7. 采用优化设计,以求得综合优化的结果;
8. 运用计算机辅助设计,设计效率高、质量好;
9. 系统地进行概念设计,采用特殊形式表达设计结果。

1.2.2 机电系统设计与开发的技术路线

依机电系统的设计任务的不同,系统设计和开发的技术路线也有所区别,主要分以下几种情况:机电产品的开发;机电系统的研制;机电系统设计。

1. 机电产品开发的技术路线

- (1) 拟定目标及初步技术规范;
- (2) 可行性分析;
- (3) 初步设计(总体方案设计);
- (4) 总体方案的评价、评审;
- (5) 建模(理论分析、仿真、模拟实验);
- (6) 详细设计(样机设计);
- (7) 详细设计方案的评价、评审;
- (8) 试制样机;
- (9) 样机实验测试;
- (10) 技术鉴定;
- (11) 小批量生产;
- (12) 试销;
- (13) 批量生产;
- (14) 销售。

2. 机电系统研制的技术路线

机电系统研制的任务是研制机电一体化产品或装置的原理样机,因此只需要完成机电产品开发路线中(1)~(10)步骤的内容。

3. 机电系统设计的技术路线

机电系统的设计任务是完成机电系统设计的理论工作,因此只需要完成机电产品开发技术路线中(1)~(7)步骤的内容。其中,总体方案设计、建模及理论分析、详细设计的主要内容如图1-2、图1-3和图1-4所示。

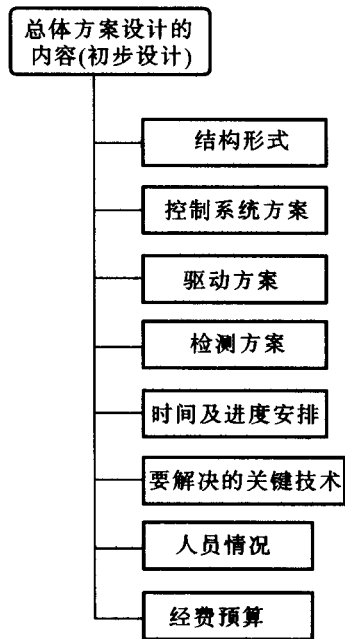


图 1-2 总体方案设计的主要内容

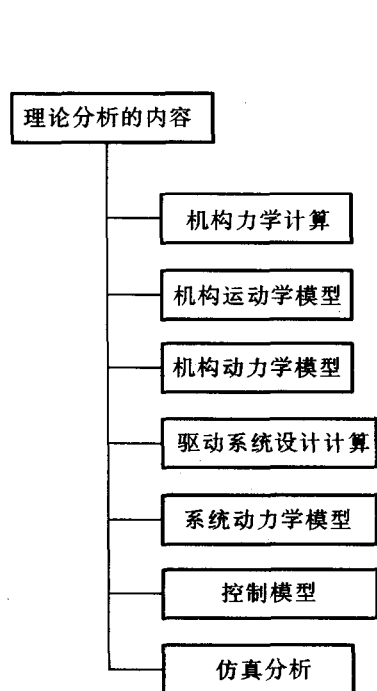


图 1-3 理论分析的主要内容

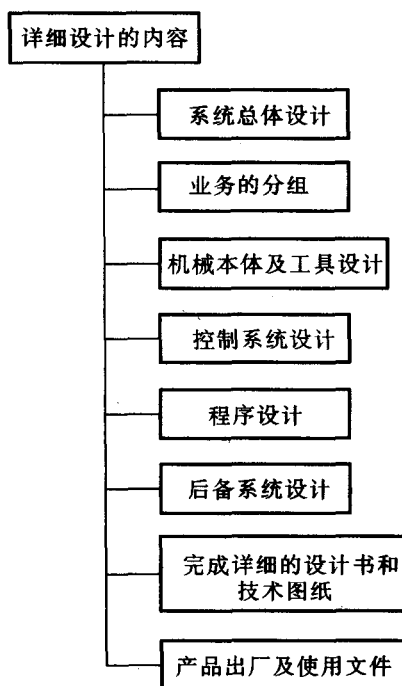


图 1-4 详细设计的主要内容

1.3 仿真在机电系统设计中的作用

1.3.1 仿真的定义及分类

1. 仿真的定义

仿真的基本思想是利用物理或者数学模型来类比模仿现实过程,以寻求过程和规律。它的基础是相似现象,即几何相似性和物理相似性。

2. 仿真的类型

在工程应用中,按照实现方式和手段的不同,系统仿真可划分为以下五种类型。

(1) 物理仿真

物理仿真是按照实际系统的物理性质构造系统的物理模型,并在物理模型上进行实验研究。物理仿真直观形象,逼真度高,但不如数学仿真方便。对于复杂系统,物理模型的建立通

常需要巨大的资金和时间的投入。而且物理模型一旦建立,就很难修改系统结构和参数。另外,物理仿真是实时运行的。

(2) 数学仿真

数学仿真无需昂贵的实物系统,也不需要模拟客观世界真实环境各种物理效应的设备,而是建立等价的数学模型,在计算机上编写仿真程序,编译并运行,如图 1-5 所示。数学仿真实验时,用户可以通过键盘等输入设备改变系统参数或系统结构,通过 CRT、打印机、绘图仪等输出设备显示仿真结果,或将结果保存到存储设备上(如磁带、磁盘、光盘等)。数学仿真既可以实时运行,也可以非实时运行(超实时或欠实时运行)。数学仿真具有经济性、灵活性和模型通用性好的特点。随着并行处理技术、图形技术、人工智能技术和仿真软硬件技术的发展,数学仿真技术必将产生新的飞跃。

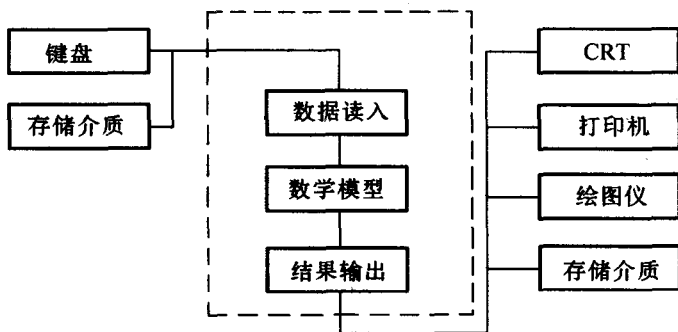


图 1-5 数学仿真

(3) 半物理仿真

半物理仿真是有实物对象参与的仿真,它包括三种类型。

① 硬件在回路仿真

硬件在回路仿真是将实际系统中的一部分用数学模型加以描述,并转换为仿真模型在计算机上运行,将系统的另一部分以实物(或物理模型)引入仿真回路,如图 1-6 所示。通常,由于真实系统的某些部分很难(或根本无法)建立准确的数学模型,再加上各种难以实现的非线性因素和随机因素的影响,使得进行纯数学仿真十分困难。面对这种情况,只有采用硬件在回路仿真,才能将不易建模的部分用实物代替。由于在回路中有实物硬件加入,因此硬件在回路仿真必须是实时运行的。利用硬件在回路仿真,可以检验真实系统的某些实物部分乃至整个系统的性能指标和可靠性,有助于准确调整系统参数和控制规律。而且它还可以用来检验数学模型的正确性和仿真结果的准确性。硬件在回路仿真在航天航空、武器系统等研究领域已成为不可缺少的重要手段。

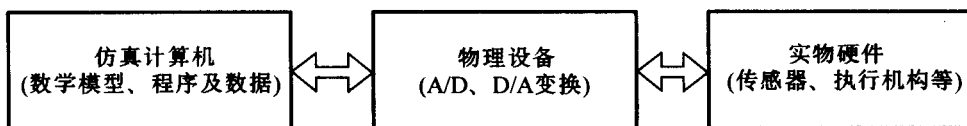


图 1-6 硬件在回路仿真

②软件在回路仿真

软件在回路仿真是将系统计算机与仿真计算机接口连接起来,进行系统实验,如图 1-7 所示。接口的作用是将不同格式的数字信息进行转换。目前大型控制系统、导航系统和制导系统等高精度复杂系统广泛采用数字计算机,通过专用的系统软件进行控制、导航和制导运算。由于软件的规模越来越大,功能越来越强,软件在系统中的测试也显得尤为重要。软件在回路仿真就是针对这种情况产生的,一般情况下要求实时运行。

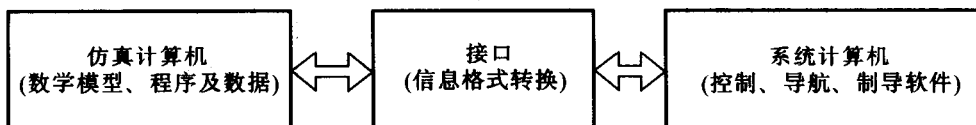


图 1-7 软件在回路仿真

③人在回路仿真

人在回路仿真是操作人员在系统回路中进行操作的仿真实验,如图 1-8 所示。这种仿真将对象实体的动态特性通过数学模型在计算机上运行,通过各种模拟人的感觉的物理效应设备,包括视觉、听觉、触觉和动感等模拟生成人所感觉到的物理环境。由于操作人员在回路中,因此,人在回路仿真必须实时运行。

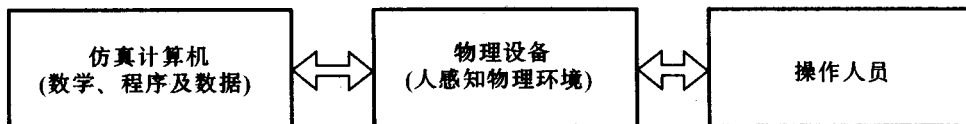


图 1-8 人在回路仿真

1.3.2 计算机仿真的基本概念

计算机仿真也称为计算机模拟,是利用计算机对所研究系统的结构、功能和行为以及参与