

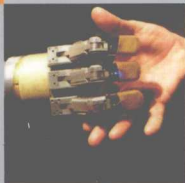


国防特色教材·机械工程

机电系统建模与仿真

张立勋 等 编著

Modeling and Simulation of Mechatronics System



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·机械工程

机电系统建模与仿真

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书针对机电系统建模与仿真问题,阐述了 MATLAB 软件及其他常用建模与仿真软件的特点和使用方法。

本书共分 6 章,内容涉及机电系统的动力学方程、动力学仿真软件和试验建模方法;面向动力学模型和面向实体模型的机电系统仿真分析方法;重点介绍了 MATLAB 系统分析与设计工具在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的应用;基于 dSPACE 的半物理仿真及辨识试验方法。

本书的特色在于突出机电系统的一体化设计思想,并结合机电系统研究的科研实践,在教材中充实了大量的应用实例,每章课后附有习题和思考题,增强了本书的实用性。本书可作为高等院校机械电子工程专业的研究生教材,也可作为相关专业、科技人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

机电系统建模与仿真/张立勋等编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2009.11

ISBN 978 - 7 - 5603 - 2929 - 1

I .机… II .张… III .机电系统 - 系统仿真 IV .TH - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 207409 号

机电系统建模与仿真

张立勋 等 编著

责任编辑 赵文斌 费佳明 范业婷

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号(150006) 发行部电话:0451 - 86418760 传真:0451 - 86414749

<http://hitpress.hit.edu.cn>

哈尔滨工业大学印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:20 字数:432 千字

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978 - 7 - 5603 - 2929 - 1 定价:36.00 元

前 言

机电系统模型的建立与仿真,对于机电系统的设计与开发具有极其重要的作用。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,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。

本书针对典型机电系统建模与仿真问题,介绍了基于动力学方程、动力学仿真软件的建模方法以及试验建模方法,给出了各种建模方法的仿真和设计实例。本书重点介绍了 MATLAB 和 ADAMS 软件在系统建模、仿真分析、仿真实验中的应用。本书的特色在于突出机电系统的一体化设计思想,结合机电系统研究的科研实践,在教材中充实了大量的应用实例,每章课后附有习题和思考题,增强了本书的实用性。

全书共分 6 章。第 1 章主要介绍了机电系统的基本概念、分析与设计方法、常用的仿真软件;第 2 章介绍了机电系统的建模方法,主要讲解基于动力学方程的机构模型建立方法、基于动力学仿真软件的自动建模方法以及试验建模方法;第 3 章介绍了面向动力学模型和面向实体模型的仿真分析方法;第 4 章介绍了基于 MATLAB 的系统分析与设计方法,重点讲解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、系统校正器设计和线性系统分析及设计工具;第 5 章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方法;第 6 章讲述了半物理仿真及辨识试验,主要介绍基于 dSPACE 系统的半物理仿真与辨识应用实例。

本书的 2.4 节和第 6 章由王岚负责编写;第 4 章由董玉红负责编写;1.3、2.3、

3.2和5.4节由王克义负责编写;2.2、3.1、3.3节由于凌涛负责编写;张立勋负责编写1.1、1.2、3.4和5.1~5.3节,并负责全书的统稿工作。

由于时间仓促,书中难免有不当之处,敬请读者指正。

编 者

2009年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机电系统概述	1
1.1.1 机电一体化技术产生的背景	1
1.1.2 机电一体化的基本概念	2
1.2 建模及仿真在机电系统设计与开发中的作用	6
1.2.1 机电系统开发的技术路线	6
1.2.2 仿真在机电系统设计中的作用	7
1.3 机电系统常用的计算机仿真软件	10
1.3.1 Pro/Engineer 三维设计仿真软件	10
1.3.2 ANSYS 有限元分析软件	12
1.3.3 ADAMS 机械系统动力学仿真软件	14
1.3.4 MATLAB 仿真软件	16
1.3.5 软件协作仿真技术	20
习题与思考题	25
第 2 章 机电传动系统建模方法	26
2.1 机电传动系统概述	26
2.2 机构的数学建模	27
2.2.1 机构的运动学建模	28
2.2.2 典型传动机构的动力学模型	36
2.2.3 系统的动力学模型	41
2.3 面向实体的机构建模	57
2.3.1 基于 ADAMS 的机械系统建模	57
2.3.2 基于 MATLAB 的机构建模	69
2.4 试验建模	79
2.4.1 辨识的基本概念	79
2.4.2 最小二乘辨识方法	80
2.4.3 频率响应法	92

2.4.4 其他辨识方法	95
习题与思考题	98
第3章 机械传动系统的数字仿真分析	100
3.1 面向数学模型的仿真分析	100
3.1.1 传动机构的仿真分析	100
3.1.2 机械系统的运动学仿真分析	106
3.1.3 机械系统的动力学仿真分析	110
3.2 面向实体的机构动态仿真	116
3.2.1 基于 ANSYS 的系统分析设计	116
3.2.2 基于 ADAMS 的仿真分析	123
3.2.3 基于 SimMechanics 的仿真分析	135
3.3 Simulink 与 SimMechanics 联合仿真	140
3.3.1 3-RPS 并联机构仿真实例	141
3.3.2 6 自由度串联机构仿真实例	147
3.4 机电系统非线性对系统性能的影响	159
3.4.1 摩擦非线性	159
3.4.2 间隙非线性	162
习题与思考题	164
第4章 基于 MATLAB 的系统分析与设计	167
4.1 系统数学模型表示	167
4.1.1 传递函数模型	167
4.1.2 零极点增益模型	168
4.1.3 状态空间模型	170
4.1.4 三种模型之间的转换	170
4.1.5 系统回路的数学模型	172
4.2 时域分析	173
4.3 频域分析	176
4.4 根轨迹分析	179
4.5 系统稳定性判别	181
4.5.1 代数稳定判据	181
4.5.2 频域稳定判据	182
4.6 系统校正设计	186

4.6.1	超前校正设计	187
4.6.2	滞后校正设计	191
4.6.3	滞后 - 超前校正设计	194
4.7	线性系统分析及设计工具	198
4.7.1	LTI 观测器	198
4.7.2	SISO 系统设计工具	199
4.7.3	响应优化模块及其应用	204
	习题与思考题	212
第 5 章	伺服系统的设计与仿真	213
5.1	概述	213
5.2	基于传递函数的伺服控制系统设计与仿真	214
5.2.1	直流电动机伺服控制系统的模型	215
5.2.2	直流速度伺服系统设计及仿真	218
5.2.3	直流位置伺服系统设计及仿真	222
5.2.4	Simulink 与 SimMechanics 联合仿真	226
5.2.5	机电控制系统饱和和非线性对系统性能的影响	233
5.3	基于状态空间模型的控制系统设计	236
5.3.1	极点配置设计状态反馈控制器的基本原理	236
5.3.2	Gura - Bass 算法	238
5.3.3	Ackermann 算法	240
5.3.4	状态反馈控制的增益补偿	242
5.3.5	状态反馈控制的 Simulink 仿真分析	246
5.4	模糊控制系统设计及仿真	249
5.4.1	模糊控制原理	249
5.4.2	基于 MATLAB 工具箱的模糊控制器设计	253
	习题与思考题	267
第 6 章	半物理仿真及辨识试验	268
6.1	半物理仿真概述	268
6.1.1	半物理仿真原理	269
6.1.2	半物理仿真技术	272
6.2	控制系统半物理仿真	274
6.2.1	RTW 实时开发环境	274

6.2.2 基于 dSPACE 半物理仿真方法·····	279
6.2.3 半物理仿真应用实例 ·····	286
6.3 辨识试验方法 ·····	294
6.3.1 基于 dSPACE 的辨识原理·····	294
6.3.2 MATLAB 系统辨识工具箱 ·····	294
6.3.3 典型实例 ·····	301
习题与思考题·····	309
参考文献 ·····	310

第1章 绪论

1.1 机电系统概述

1.1.1 机电一体化技术产生的背景

机电技术是在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、计算机及接口等技术,根据系统功能目标合理配置机械本体、执行结构、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、以现代高新技术支持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),用日文汉字“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。

我国在 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,机电一体化化的提法更具代表性。

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、加工工艺学和控制构成了机械技术的四大支柱学科,即使一个简单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以及依靠快速、大存储量和高精度的计算机的支持,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,到继电器逻辑控制、计算机自动控制、智能控制的发展历程,它的每次技术进步都是微电子技术和计算机技术发展的产物。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的结合使得传统的机械技术发展成为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

机电一体化产品包括新兴机械与电子器件,特别是微处理器、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

一个较完整的机电一体化系统应包括:机械本体、测试传感部分、驱动部分、执行机构、控制及信息处理单元、能源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、轻质、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。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、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地运行。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,包括电源、液压源和气压源等。能源应满足高效、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,各个要素与人体之间的对比关系如图 1.1 所示。

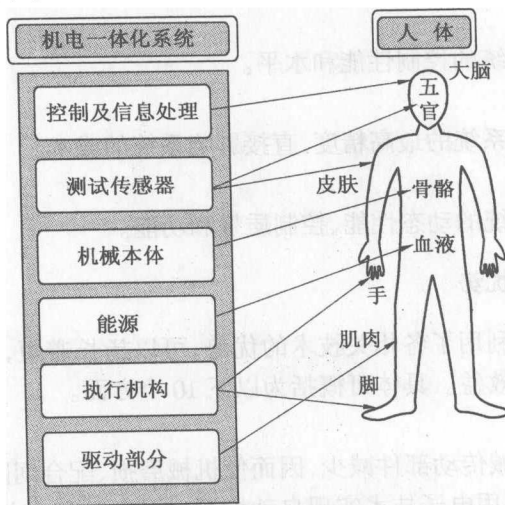


图 1.1 机电一体化系统与人体的对比

一个机电一体化系统正如一个人的身体一样,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和膨胀运动的结果,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,为大脑决策提供依据;人的手和脚则相当于机电一

体化系统中的执行机构;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、处理和判断,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和造型的作用。

3. 机电一体化的相关技术

机电一体化是机械技术、计算机与信息处理技术、系统技术、自动控制技术、传感与检测技术和伺服传动技术等多学科技术领域综合交叉的技术密集型系统工程技术。

(1) 机械技术

机械技术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

计算机及信息处理技术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

系统技术影响系统的优化程度和系统的总体性能。

(4) 自动控制技术

自动控制技术影响系统的控制性能和水平。

(5) 传感与检测技术

传感与检测技术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

伺服驱动技术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了各相关技术的优势,可以扬长避短,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 10 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难以达到的工作精度。

(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了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,并且具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、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%;若采用微机精确控制燃料与空气的混合比,工业锅炉可节煤5%~20%。

(5) 提高安全性、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、自动启停、安全保护等,不仅提高了机组运行的性能,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。又如大型轧机多级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。

(7) 减轻劳动强度,改善劳动条件

机电一体化系统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的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,因而大大减轻了脑力和体力劳动,改善了工作环境条件。例如采用CAD和CAPP技术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,减轻质量

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、质量减轻。例如,无换向器电机,将电子控制与相应的电机电磁结构相结合,取消了传统的换向电刷,简化了电机的结构,提高了电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 30% 的齿轮等传动部件。采用机电一体化技术使结构简化、质量减轻,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、材料消耗的减少和制造成本的降低,同时由于微电子技术的高速度发展,微电子器件价格迅速下降,使得机电一体化产品价格降低,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、使用方便及价格低等优势,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更换不同作业工具,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 建模及仿真在机电系统设计与开发中的作用

1.2.1 机电系统开发的技术路线

要想清楚地了解建模及仿真在机电系统设计与开发中的作用,首先需要了解机电系统研发的技术路线。机电系统研发的任务是研制机电一体化产品(装置)或者原理样机,机电系统开发要经历从技术规范的确立,到总体方案设计、理论分析、样机研制、实验研究、再到产品生产销售的过程。典型机电系统研发的技术路线要经历以下 10 个步骤:

- 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 理论分析(建模、仿真、模拟试验);
- 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 样机试验测试;
- ⑩ 技术鉴定。

机电系统理论分析的主要内容如图 1.2 所示。理论分析是对任何机电系统研发都不可缺少的过程,也是其中最重要的环节。理论分析的主要目的是通过建立系统的数学模型和仿真分析等方法来设计和优化系统的结构、确定系统的运动参数和动力参数、设计控制系统并分析系统的控制性能、对系统的功能进行模拟和检验,为系统的详细设计提供依据,避免设计的盲目性,确保系统的研发质量。

1.2.2 仿真在机电系统设计中的作用

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三种主要类型。

(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仿真试验研究。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,就很难修改其结构和参数。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的各种物理效应设备,而是建立等等的数学模型,在计算机上编写仿真程序,编译并运行。数学仿真系统结构如图 1.3 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(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等特点。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,数学仿真技术正在得到越来越广泛的应用。

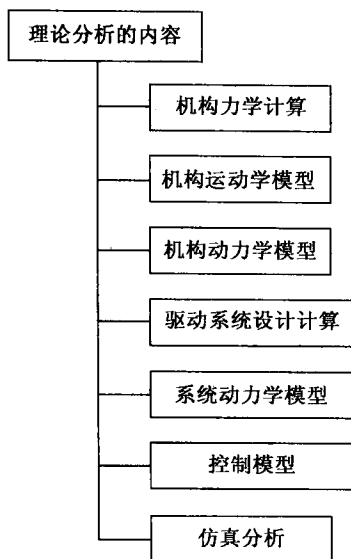


图 1.2 理论分析的主要内容

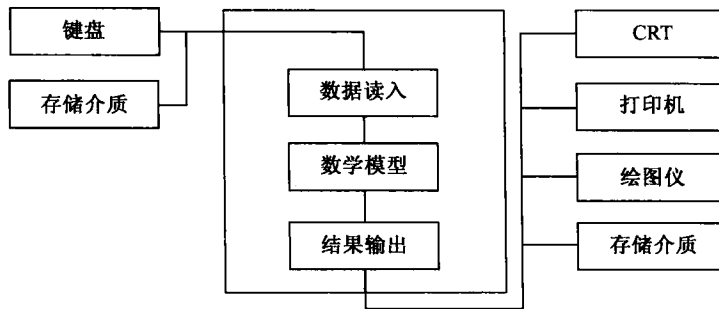


图 1.3 数学仿真

(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,其原理如图 1.4 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,可以采用硬件在回路仿真,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,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,可以用来检验数学模型的正确性和数学仿真结果的准确性。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的技术手段。

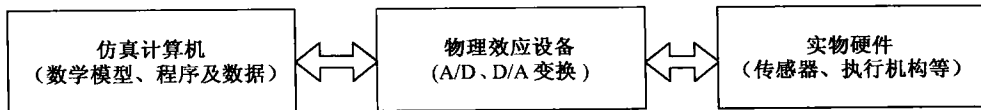


图 1.4 硬件在回路仿真

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通过接口连接起来进行系统仿真试验,其原理如图 1.5 所示。接口的作用是将不同格式的数字信息进行转换。在卫星、飞行器的导航系统和制导系统等高精度复杂系统中,广泛采用了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,软件在回路仿真要求实时运行。

③ 人在回路仿真。人在回路仿真是指操作人员在系统回路中进行操作的仿真试验,其原理如图 1.6 所示。这种仿真将对象实体的动态特性由数学模型在计算机上运行,通过各种模拟人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