



高等院校机械工程专业
“十三五”规划教材

GAODENG YUANXIAO JIXIE GONGCHENG ZHUANYE
“SHISANWU” GUIHUA JIAOCAI

机电 系统建模理论 与方法

◎ 主 编 陈 爽

JIDIAN XITONG JIANMO
LILUN YU FANGFA



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



高等院校机械工程专业
“十三五”规划教材

GAODENG YUANXIAO JIXIE GONGCHENG ZHUANYE
“SHISANWU” GUIHUA JIAOCAI

机电 系统建模理论与方法

◎ 主 编 陈 爽

常州大学图书馆
藏书章



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

机电系统建模理论与方法. /陈爽主编. —长沙:
中南大学出版社, 2017.4

ISBN 978 - 7 - 5487 - 2759 - 0

I. 机... II. 陈... III. 机电系统 - 系统建模 IV. TH - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 062375 号

机电系统建模理论与方法

陈 爽 主编

☐责任编辑 刘颖维

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731 - 88876770

传真: 0731 - 88710482

☐印 装 长沙市宏发印刷有限公司

☐开 本 787 × 1092 1/16 ☐印张 10 ☐字数 253 千字

☐版 次 2017 年 4 月第 1 版 ☐2017 年 4 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 2759 - 0

☐定 价 30.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

前 言

现代机械是由多个具有各自的物理过程和单元技术的子系统组成的,通过子系统间的交互作用,在载体中实现能量转换和物质运动的演变,从而产生被人们所感知的功能和特性的复杂装备。

机电系统的分析、控制和动态特性设计等都与系统运作时的模型密切相关。研究机电系统建模的理论与方法有助于我们深入地研究机电系统设计、制造及控制的本质和规律。机电系统建模利用系统论,通过在电子计算机上对机电系统模型的仿真和运算,对其进行求解和进一步分析,并不断地检验和修正系统方案,获得机电系统设计、制造及控制的最佳方案并预测系统的未来,从而实现机电系统结构及控制系统的优化。

现实世界中各种机电系统的原理不尽相同,无法找到一种以一概全的建模方法,因此本书不可能给读者讲解每种模型的原理,只是给读者介绍一种解决系统建模问题的思路。

本书摒弃了以往建模和仿真分开独立编写的惯例,将建模与仿真结合起来编写,全书共分三大部分,共七章。第一部分为系统建模基础,主要包括系统的概念、分类、系统的模型、系统的数学基础。第二部分为建模方法综述,综合讲述系统建模的各种方法,包括基于先验知识的建模方法、基于数据的实验建模方法。第三大部分为复杂系统建模,主要包括基于系统辨识的建模方法、基于智能技术的复杂系统建模方法。

本书内容适合于高等院校理工科专业研究生、高年级本科生学习使用,也可供研究院所和企业的研究人员与工程技术人员参考学习。

感谢东北大学博士生导师孙志礼教授对本书编写的大力支持。感谢第三批国家教育部卓越工程师教育培养计划(机械工程)、江西省普通本科高校卓越工程师教育培养计划项目(机械工程及其自动化)、江西理工大学校级质量工程项目的资助。

由于时间仓促,编者水平有限,书中不足之处,在所难免,恳请广大读者予以指正。

编 者
2017 年 1 月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 机电系统的基本组成	(1)
1.2 机电系统建模理论概述	(3)
1.3 系统仿真	(5)
第2章 机电系统模型	(15)
2.1 系统模型的内涵	(15)
2.2 系统模型的构成	(15)
2.3 系统模型分类	(16)
2.4 系统建模方法	(17)
2.5 系统模型建模方法的选择原则	(22)
第3章 基于先验知识的解析建模	(24)
3.1 基础知识	(24)
3.2 简单机械系统组成与建模	(26)
3.3 拉普拉斯变换建模	(28)
3.4 电路系统的组成及建模	(35)
3.5 机理分析法建模方法与步骤	(37)
第4章 基于数据的实验建模	(49)
4.1 实验建模概述	(49)
4.2 实验建模步骤	(50)
4.3 回归分析法	(51)
4.4 正交实验设计	(58)
第5章 系统辨识	(68)
5.1 系统辨识定义	(68)
5.2 系统辨识的发展历程	(68)
5.3 系统辨识的研究目的及内容	(70)
5.4 最小二乘法	(72)
5.5 最小二乘法的实际应用	(78)

第 6 章 基于 3D 技术的计算机混合建模	(80)
6.1 概述	(80)
6.2 基于 3D 技术的计算机混合建模原理分析	(80)
6.3 计算机混合建模步骤	(81)
6.4 基于 Pro/e 齿轮轴系统建模实例	(82)
6.5 基于 ANSYS 的轴系结构静力学分析	(88)
6.6 基于 ANSYS/LS-DYNA 的轴系结构动力学分析	(95)
6.7 步行机器人步态轨迹及仿真实例	(104)
第 7 章 基于智能技术的复杂系统建模	(109)
7.1 复杂机电系统的特点与研究范围	(109)
7.2 复杂机电系统研究历程	(110)
7.3 复杂系统的建模途径与方法概述	(113)
7.4 遗传算法建模	(114)
7.5 神经网络建模	(126)
7.6 灰色预测模型	(145)

第1章

绪论

1.1 机电系统的基本组成

机电系统的本质是机电一体化,是充分运用电子计算机的信息处理和控制功能的现代化机械系统,实现了机械系统的智能化和自动化。对于机电系统的组成,目前有以下四种观点。

1.1.1 五块论

德国 Darmstadt 大学的 Rolf Isermann 提出,机电一体化系统是由控制功能、动力功能、传感检测功能、操作功能等五大功能模块组成的。他将五大功能模块通俗地类比为人的大脑、内脏、五官、四肢及躯干。机电一体化系统与人体的对比如图 1-1 所示。

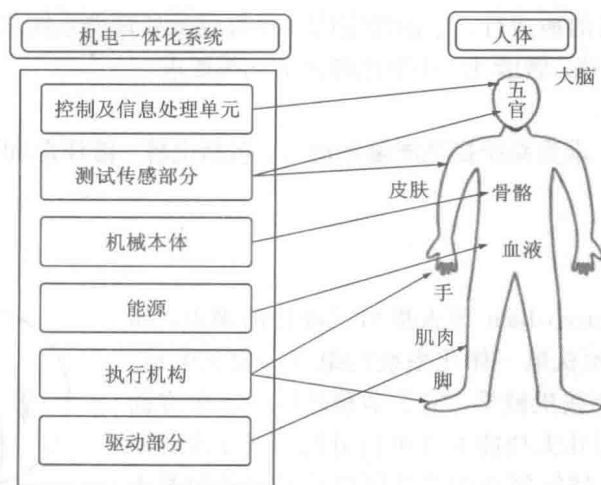


图 1-1 机电一体化系统与人体对比

机械本体是人的躯体;测试传感部分犹如人的五官,能感知各种信号和信息;控制及信息处理单元相当于人的大脑和神经系统;执行器如同人的四肢。人完成各种动作和做各类工作,要靠食物供给能量,而机电系统则主要靠液能、电能提供能量和动力。提供液能需要液

压泵,电能要由电工电子装置变换后才能使用。

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、能源这六个基本结构要素,各要素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,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。驱动部分包括电动机、电液和电气驱动元件等。驱动部分应满足高效、快速响应、高可靠性和环境适应性等要求。

(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)与系统的动力输出(末端)之间的机械结构。执行机构分为机械执行机构、电磁执行机构、液压执行机构和气动执行机构等,应满足高刚度、低惯量、高可靠性、模块化、标准化和系列化等要求。

(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、小型化和标准化等要求。

(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。能源应满足高效、无危害等要求。

1.1.2 三环论

丹麦理工大学的 Jacob Baur 等人提出三环论的观点,如图 1-2 所示,以此表示机电一体化系统的组成和相互关系。该模型的特点是将功能按机械学、电子学和软件学三个方面进行分配,而不是按照几大功能部件进行分配,该方法有助于模型的表达,使产品错综复杂的关系可以按照学科门类来理顺。三环论中电子学的含义比较含糊,软件学是指实现信息处理和控制的程序,同样无法使人们对真实系统作出科学和明确的组成划分。

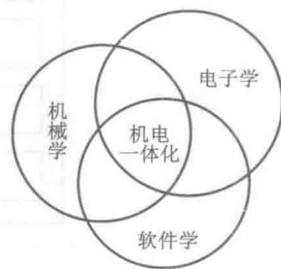


图 1-2 三环论模型

1.1.3 两个系统

挪威科技大学的 Bassam A Huses 提出将机电一体化系统分为物理系统与控制系统两大子系统。物理系统包括各种驱动装置、执行机构、传感器等；控制系统包括软件与硬件。

1.1.4 四个部分

有人从系统的角度将复杂机电系统分为四个部分：系统单元、系统结构、边界条件、输入和输出要素。

(1) 系统单元

系统单元是实现某种功能而不需要进一步划分的部分，即为系统相互联系和作用的基本组成要素。

(2) 系统结构

系统结构反映系统内部各个单元之间的关系，系统只有通过结构才能实现总功能。然而，不同的结构既可完成不同的功能，也可完成相同的功能。

(3) 边界条件

边界条件是系统与外部环境的作用界面，通过这种界面，可以明确分析设计对象的范围。但是，界面又是相对的，可以随着分析研究的具体要求而不同。确定边界的主要依据是：在所研究的具体条件下，当该单元发生变化时，看是否对系统功能产生决定性影响；看是否应当把某个或某些单元包含在系统内部。根据其与环境有无一定的联系，系统又可以分为封闭系统和开放系统。封闭系统与环境无关系，开放系统受环境的影响。

(4) 输入和输出系统

系统的行为通常表现为它与外部环境的相互联系与作用，可以用系统的输入和输出来表征。德国的 Rodenacher 教授指出，无论哪类系统都是对系统能量、物料、信息，即工业的三大要素进行某种处理后，输出所需要的能量、物料、信息系统。

不难看出，以上反映了现代机电系统的基本特征：

① 机电系统是由计算机进行信息处理和控制的现代机械系统，其最终目的是实现机械运动和做功。

② 从完成工艺动作过程这一功能的要求出发，机电系统可分为广义执行结构子系统、信息处理及控制子系统、传统检测子系统，这些子系统分别完成机械运动和做功、信息获取、信息处理及控制过程。

③ 机电系统中的执行子系统，是由驱动元件和执行元件（或执行机构）组成的广义执行机构，这种结构便于实现可控性。

1.2 机电系统建模理论概述

系统在机电装备中普遍存在，简单机械系统是由一些机械元件组成的系统，如平面连杆机构系统、由凸轮元件组成的凸轮机构系统、由齿轮元件组成的齿轮系统等。这些元件常常与电气系统、液压系统等结合起来，组成一种新的系统，如机械和电子结合形成的机电一体化系统。机电一体化技术是从系统工程观点出发，应用机械、电子、信息等有关技术对它们

进行有机的组织与综合,实现整体最佳化。

现代复杂机电系统是机械、电子、液压、光等多物理过程、多单元技术集成于机械载体而实现整体功能的复杂设备,高速轧机、数控加工中心、大型工程机械等都是典型的复杂机电系统。复杂机电系统由众多子系统组成,各子系统由简单系统、机电液控制系统组成,具有各自的物理过程和单元技术,通过系统集成激活子系统间的交互作用,在载体中实现能量的转换和物质运动的各种演变,从而产生被人们所感知的功能和特性。

系统建模的思想自从 20 世纪中叶被提出之后发展迅速。传统的数学建模方法基本上有两大类:机理分析建模和实验统计建模。近些年建模方法又有了新的进展,常见方法有:机理分析法、直接相似法、系统辨别法、回归统计法、概率统计法、量纲分析法、网络图论法、图解法、模糊集论法、蒙特卡罗法、层次分析法、“隔舱”系统法、定性推理法、“灰色”系统法、多分面法、分析-统计法及计算机辅助建模法等。数学建模中,如何较合理地选择建模方法,至今没有一个固定程式,常常根据系统状况、建模目标、建模要求及实际背景来确定。近代西方科学工作者通过实验、归纳、推演(实验建模)的方法在自然科学研究中取得了重大的成果。其中,法拉第的“电磁感应定律”以及麦克斯韦的“麦克斯韦方程组”等,都是在实践过程中遵循了系统建模的理论方法。大多数实验模型只是用实验得到的数据,来验证或校核由计算机模型得到的结果,理论模型往往只能针对较简单的系统进行演示和验证,不能真正用于工程实践当中。

20 世纪 80 年代之后,计算机技术的巨大进步使一些系统建模基础理论得到进一步发展,如机械系统有限元建模、大型机械结构实验模态分析方法建模等机械系统的理论建模、实验建模和计算机辅助混合建模的方法和技术都逐步走向实用,并相继在航空、航天、建筑等工业领域得到了成功的应用。

从 20 世纪 90 年代开始,我国在复杂机电系统方面针对大型轧制设备、大型旋转设备、混合动力系统、数控机床、微机电系统(MEMS)和机器人系统开展了大量的研究,包括机电系统的多过程耦合与集成、复杂机电系统动力学以及复杂机电系统故障诊断等。关于复杂机电系统的非线性、混沌、奇异和分岔等建模方法也开展了初步研究。

系统动态建模的方法发展至今通常划分为经典和现代两大类。其中,经典方法主要针对线性时不变系统动态分析或者稳态过程在时域或变换域(如频域、拉普拉斯域和 Z 域)中进行分析,最常用的有时域和频域的统计分析和参数建模分析,如时域波形幅值的各阶矩估计、时序建模分析和参数谱估计等。此外,针对机械系统的特殊工况还提出了一些特殊的变换域分析法,如阶比分析、全息谱分析和高阶谱分析等。但是,由于经典方法的研究对象主要限于线性时不变系统和稳态过程,故其应用存在一定的局限性。20 世纪 90 年代后以时域联合域分析方法(简称时域分析)为代表的现代系统分析方法发展很快,这类方法所关注的研究对象主要是瞬态过程和时变系统。其中有代表性的方法有短时傅立叶变换、小波分析、威格纳·维利分布和时域分析级数等。时域分析的最大好处是清晰地描述一个过程在任意时刻的频率结构。

目前,国内外学者一直致力于用神经网络、分形几何、遗传算法、模糊数学、混沌理论等最新理论成果解决非线性系统的状态描述和模式识别问题,并已相继在一些特殊的工程课题中取得了应用成果,但比较系统、完整的非线性系统动态分析理论尚有待形成。

系统建模理论所涉及的知识面很宽,如数学分析、信息分析、信号与信息处理、系统辨

识、模式识别及计算机应用等,体现了现代工程研究中各学科相互依存、相互渗透、相互交叉、相互促进的特点。虽然它是一门新兴学科,但是前人所做的理论研究和实践探索对于这门学科的创立和发展起到了巨大贡献。

现实世界中各种系统的原理均不相同,无法找到一种以一概全的建模方法,因此本书不可能给读者讲解每种模型的原理,只能给读者介绍一个解决系统建模问题的思路。

随着计算机及其应用的迅速发展,在研究、实现的手段和工具上,在所研究对象的扩展上,机械系统建模和动态分析已成为一门多学科横向交叉、渗透、集成的新学科,它至少是以下学科的综合:

- ①机械设计理论、机械电子工程。
- ②机器人、车辆工程。
- ③动态数据测试、统计分析方法。
- ④控制理论及其应用、信息理论与方法。
- ⑤计算机软硬件及其应用。
- ⑥优化理论、方法和实践。
- ⑦可靠性理论与方法、故障诊断。
- ⑧转子动力学、结构力学。
- ⑨材料科学、环境科学。

追求和谐制造与装备运行是当今机械学科的研究特点和时代特征,《机械工程学科发展战略报告(2011—2020)》定义了机械学科的11个领域:机构学与机械振动学、机械的驱动与传动科学、复杂机电系统的集成科学、零件与结构失效与安全服役科学、机械表面界面科学与摩擦学、生物制造与仿生科学、高性能精确程序制造课程、高能束与特种能场制造科学、高精度数字化制造科学、机械制造与运行参数测量科学、微纳制造科学与技术。事实上,每个领域的学科研究都在不断地与其他学科相互交叉和渗透。

例如机构学与机械振动学:机构是传递运动和力的可动装置,机构学是研究机构的组成原理,分析已有机构的功能和性能,设计满足特定功能和性能的新机构的一门科学,主要包括机构拓扑学、机构运动学和机构动力学,具有系统的理论体系。机械振动学以力学、声学 and 数学为理论基础,结合控制论、信息科学、环境科学和材料科学等相关学科而形成的工程技术学科,是研究结构和机械系统在载荷作用下微幅往复振动规律的一门科学,主要研究内容包括机械系统的动力学建模、机械系统各种复杂振动-冲击-噪声的分析与控制、机械系统的动态设计和优化。

机械学科基础理论与方法众多,因为篇幅有限,本书难以面面俱到地深入探讨机电系统建模所需的所有学科知识,只能简单讨论机电系统建模中的一些共性问题。

1.3 系统仿真

1.3.1 建模与仿真的关系

系统是一些元件或零部件按照一定方式相互连接成的集合体。在机电一体化系统中,机械系统与电系统的连接往往是通过传感器或换能器,将被测物理量(位移、速度、加速度、声

波、液压等)转化为变化的电压或电流,使系统在给定条件下(如一定的信号形式)完成某种功能。与所有系统设计一样,无论是分析还是设计,都需要进行实验研究。在实验研究前,要进行系统描述,即建立系统模型。利用模型进行实验,从而获取所需信息,这一过程称为模拟或仿真。通过模拟来达到对真实系统的了解和分析。

系统仿真是一种基于模型的活动,是根据被研究的真实系统的模型,建立系统模型,并使该模型在计算机上运行来对模型进行检验和修正,使模型不断趋于完善的科学实验研究过程。它是建立在系统科学、系统识别、控制理论、计算机技术与控制工程基础上的一门综合性很强的实验科学技术,是分析、综合各类系统,特别是大系统的一种研究方法和有力工具。

1.3.2 系统仿真概述

系统仿真过程中的三个要素是系统、模型和仿真。其中系统是研究的对象,模型是对系统的抽象,仿真是对模型的实验,其关系如图 1-3 所示。

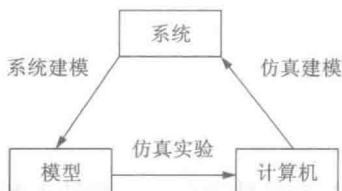


图 1-3 计算机仿真三要素之间的关系

传统上系统建模属于系统辨识技术范畴,仿真技术则侧重于仿真建模,即针对不同形式的系统模型研究其算法,使其在计算机上得以实现。

现代仿真技术的一个重要进展是将仿真活动扩展到上述三个要素中,并将其统一到同一环境中。在系统建模方面,除了传统的基于物理学、化学、生物学、社会学等的基本定律及系统辨识的方法外,现代仿真技术提出了用仿真的方法建立系统的数学模型。例如,根据某系统在实验中得到的输入、输出数据,在计算机上进行仿真实验,确定模型的结构参数。基于模型库的结构建模,采用面向对象的建模方法,在类库的基础上实现模型的拼合和重用。

在仿真建模方面,现代仿真技术采用模型与数据分离技术,即模型的数据驱动技术。每一个仿真问题可以分为两个方面,即模型与实验,对于这一点,现代仿真技术与传统仿真技术的区别在于现代仿真技术又将模型分为参数模型和参数值两部分。参数值属于实验内容之一。这样,模型参数和与其对应的参数模型分离开来。在进行仿真实验时,只需要对参数模型赋予具体的参数值,就得到了特定的模型,从而大大提高了仿真的效率和灵活性。

在仿真实验方面,现代仿真技术将仿真框架与仿真运行控制区分开来,一个实验框架定义一组条件,包括:模型参数、输入变量、观测变量、初始条件、终止条件、输出说明。另外,现代仿真技术将输出函数的定义也与仿真模型分离开来。这样,当需要不同形式的输出时,就不必重新修改仿真模型。

系统仿真的目的及其在系统研究中的重要性在于优化设计。现代大型系统的规模和复杂性,要求在建立系统之前能够预测系统的性能和参数,以便使所设计的系统达到最优指标。

仿真实验具有以下优点:

①经济性。对于一个大型的系统,直接实验成本十分昂贵。采用仿真实验的方法仅需直接实验成本的 $1/10 \sim 1/5$, 而且仿真设备可以重复使用。

②安全性。对于某些系统,直接实验往往是危险的或不被允许的。

③预测。对于经济、社会、生物等非工程系统,直接实验几乎是不可能的,仿真则可以用于预测系统的特性和外部作用的影响,从而研究控制的策略。

1.3.3 仿真的分类

(1) 根据模型的物理属性分类

根据模型的物理属性,仿真分为以下三类:

①物理仿真。按照真实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的过程称为物理仿真。物理仿真的优点是直观、形象。物理仿真的缺点是模型改变困难,实验限制多,投资较大。

②数学仿真。对实际系统进行抽象,并将其特性用数学关系加以描述而得出数学模型,再对数学模型进行实验的过程称为数学仿真,也称为计算机仿真。数学仿真的优点是方便、灵活、经济。数学仿真的缺点是受限于系统建模技术,即系统数学模型不易建立。

③半实物仿真。半实物仿真即将数学模型与物理模型甚至实物联合起来进行实验。这种仿真对系统中比较简单的部分或对其规律比较清楚的部分建立数学模型,并在计算机上加以实现;对比较复杂的部分或对规律尚不十分清楚的系统,数学模型的建立比较困难,常采用物理模型或实物。仿真时将两者结合起来完成整个系统的实验。

(2) 根据仿真计算机类型分类

根据仿真计算机类型,仿真可分为以下三类:

①模拟计算机仿真。模拟计算机本质上是一种通用的电气装置,这是 20 世纪 50 ~ 60 年代普遍采用的仿真设备。将系统数学模型在模拟机上加以实现并进行实验称为模拟机仿真。模拟机仿真是一种并行仿真,仿真时,代表模型的各部件是并发执行的。

②数字计算机仿真。将系统数学模型用计算机程序加以实现,通过运行程序来得到数学模型的解,从而达到系统仿真的目的。早期的数字计算机仿真则是一种串行仿真,因为计算机只有一个中央处理器(CPU),计算机指令只能逐条执行。

③数字模拟混合仿真。为了发挥模拟计算机并行计算和数字计算机强大的存储记忆及控制功能,以实现大型复杂系统的高速仿真,20 世纪 60 ~ 70 年代,在数字计算机技术还处于较低水平时产生了数字模拟混合仿真,即将系统模型分为两部分,其中一部分在模拟计算机上运行,另一部分在数字计算机上运行,两个计算机之间利用 A/D、D/A 转换装置交换信息。

(3) 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类

实际动态系统的时间基称为实际时钟。系统仿真时模型所采用的时钟称为仿真时钟。根据实际时钟和仿真时钟之间的比例关系,仿真可以分为以下三类:

①实时仿真。实时仿真即仿真时钟与实际时钟完全一致,模型仿真的速度与实际系统运行的速度相同,当被仿真的系统中存在物理模型或实物时,必须进行实时仿真。

②亚实时仿真。亚实时仿真即仿真时钟慢于实际时钟,模型仿真的速度慢于实际系统运行的速度,也称为离线仿真。

③超实时仿真。超实时仿真即仿真时钟快于实际时钟,模型仿真的速度快于实际系统运

行的速度。

(4) 根据系统模型的特性分类

根据系统模型的特性, 仿真可分为以下两类:

①连续系统仿真。连续系统是指系统状态随时间连续变化的系统, 进一步可以分为: 集中参数系统模型, 一般用常微分方程(组)描述; 分布参数系统模型, 一般用偏微分方程(组)描述; 离散时间变化模型, 这种模型中的差分模型归为连续系统仿真范畴。

②离散事件系统仿真。离散事件系统是指在某些随机时间点上系统的状态发生变化的系统。离散事件系统与连续系统仿真的主要区别在于状态变化发生在随机时间点上, 这种引起状态变化的行为称为事件, 因而这类系统是由事件驱动的。

1.3.4 仿真软件工具

建模过程中经常会遇到需要进行强度、刚度、动力学、电磁学等方面的有限元分析以及数学计算和信号处理等情况, 因此功能足够强大的计算机辅助仿真软件在建模过程中是必不可少的。目前系统建模最常用的仿真软件有: Matlab/Simulink、Saber、NASTRAN、ANSYS 等。

(1) Matlab/Simulink

Matlab 是 Matrix Laboratory(矩阵实验室)的缩写, 由美国 The MathWorks 公司出品的一种用于算法开发、数据可视化、数据分析以及数值计算的高级技术计算语言和交互式环境。而且 Matlab 还可以用来创建用户界面及调用其他语言(包括 C, C++ 和 FORTRAN)编写的程序。Matlab 与 Simulink 具有强大的信号及数据分析和系统仿真能力, 20 世纪 90 年代, Matlab 已经成为国际控制界公认的标准计算软件。

Matlab 可分为五个部分: Matlab 编程语言、Matlab 工作环境、Matlab 数学函数库、Matlab 图形处理系统、Matlab 应用程序接口。

进入 Matlab 主界面, 除菜单和工具条外, 有三个窗口: 指令窗(Command Window)、工作空间(Workspace)和历史指令窗(Command History)。其中指令窗是最主要的窗口, 在该窗口内可键入各种 Matlab 预置的指令、函数、表达式等。如:

①指令 clc: 清除指令窗中显示的内容, 这样可以方便后续操作和观察。

②指令 clear: 清除 Matlab 工作空间中保存的变量, 相当于清除内存。

③指令 plot: 绘制曲线。

Matlab 具有专用模块工具箱, 是针对专门领域而开发的特殊工具箱, 其实这也是通过 Simulink 基本模块搭建后封装而成的。其中个别模块在实践中应用较多, 如状态流(Stateflow)模块, 即虚拟现实工具箱(Virtual Reality Toolbox)、机构仿真工具(SimMechanics)、半物理仿真及快速原型设计工具。

Matlab 提供了十分丰富的绘图功能, 通过绘图函数 plot 命令就可以绘制各种二维图形和三维图形。通过这一功能可以在使用过程中对数据和实验结果进行分析处理。

利用 Matlab 强大的函数功能可以进行矩阵的多种计算、可以进行各种微分和积分运算、可用于求解代数方程和进行多项式运算, 而且在 Matlab 中, 具有最小二乘法、曲线拟合和插值程序, 使用命令和函数可以完成多项式曲线拟合、线性插值和三次样条插值; 在 Matlab 中, 可以完成求函数的极值、函数的零点计算和傅立叶变换; 在用数值法求解常微分方面, Matlab 提供了两种龙格-库塔法函数, 使用方法非常方便。

Matlab 最基本和最重要的功能是矩阵运算。矩阵可以是实数矩阵,也可以是复数矩阵。Matlab 提供了许多生成和操作矩阵的函数,输入数据后可自动生成矩阵;Matlab 具有强大的矩阵运算功能,可以进行转置矩阵运算、矩阵的四则运算、矩阵的乘方运算和关系逻辑运算等;在矩阵操作方面,可以排列子矩阵、查看矩阵大小,并可利用矩阵操作函数实现矩阵转换。

1990 年,在 Matla 软件的基础上,又推出了交互式模型输入与仿真环境专用软件 SimuLab,并于 1992 年改名为 Simulink。Simulink 包括一个基本工具箱和若干个专用工具箱,基本工具箱中有若干基本功能模块。“Simu”是仿真的含义,“Link”是连接的含义,即通过线条连接一系列模块构成复杂的仿真模型。Simulink 有诸多优点:

①它可以对动态系统模型进行数字仿真,并且其图形化设计界面使得构造系统模型的工作非常直观和方便。而且用户只需在模型窗口上调出各个系统环节,并用连线将它们串接起来,即可利用 Simulink 提供的功能对系统进行仿真和分析,这种模型表示方法与控制工程中常用的框图表示法极为类似,所以很容易将一个复杂系统的模型输入到计算机中,使用非常方便。

②它的 MathWorks 本身提供大概有 40 多个工具箱,其他公司或研究单位所提供的工具箱总数已有上百个之多,可以应用于生物医药工程、图像信号处理、语言信号处理、信号分析、时间序列分析、控制论和系统论等各个领域。

③它提供了与 ADAMS 等机械动力学分析软件的接口功能,可以将动力学模型直接导入到 Simulink 仿真空间,可以实现对测试传感、伺服控制、机械系统运动学、动力学等机电系统所有环节的仿真。

(2) Saber

Saber 是 Analogy 公司于 20 世纪 80 年代中期开发的一款 EDA 软件,专用于混合信号和混合技术领域仿真验证。2000 年 2 月 Analogy 被 Avanti 公司收购,随后 Avanti 公司又被 Synopsys 公司收购,Saber 也就成了 Synopsys 公司的产品。

Saber 适用于多技术、多领域的不同类型系统构成的混合系统仿真,如电子、电力电子、机电一体化、机械、光电、光学、控制等,为用户提供了一个功能强大的混合信号系统,兼容模拟、数字、控制量的混合仿真,可以解决从系统开发到详细设计验证等一系列问题。因此被誉为全球最先进的系统仿真软件,现已成为混合信号、技术设计和验证工具的业界标准。

Saber 的典型应用是航空器领域的系统设计,其整个设计过程包含了机械技术、电子技术、液压技术、燃油系统、娱乐系统、雷达无线技术等复杂的混合技术设计与仿真。从航空器、轮船、汽车到消费电子、电源设计都可以通过 Saber 来完成。

Saber 软件有以下特点及优势:

①仿真速度快且有效。与其他仿真软件不同,Saber 在结构上采用硬件描述语言(MAST)和单内核混合仿真方案,并对仿真算法进行了改进,使 Saber 仿真速度更快、更加有效,应用也越来越广泛。

②集成度高。从调用画图程序到仿真模拟,均可以在一个环境中完成,不用四处切换工作环境。

③完整的图形查看功能。Saber 提供了 SaberScope 和 DesignProbe 来查看仿真结果,SaberScope 的功能更为强大。

④各种完整的高级仿真。可进行偏置点分析、DC 分析、AC 分析、瞬态分析、温度分析、参数分析、傅立叶分析、蒙特卡诺分析、噪声分析、应力分析、失真分析等。

⑤模块化和层次化。可将一部分电路块创建成一个符号表示,用于层次设计,并可对于电路和整体电路进行仿真模拟。

⑥强大的收敛性分析。Saber 非常仔细地选择了算法,使遇见收敛性问题的可能性降到最小,这是其他仿真器经常遇到而无法解决的问题。Saber 可以依次使用多种强大的算法来解决仿真过程中的收敛性问题,若一种算法失败,Saber 将自动采用下一种算法。在系统评估时,Saber 对精确系统方程提出一种分段式线性评估。这样,即使非常困难的仿真问题,如尖锐信号的瞬态分析,也可以被很好地控制。

⑦利用 Calaveras 算法实现快速仿真。Saber 协同仿真技术使用 Calaveras 模拟/数字算法,它允许数字仿真器及 Saber 利用最佳的时间步长来仿真。它使得在数字仿真器和模拟仿真器之间的数据交换只有在需要的时候才进行,这样可以极大地提高仿真速度。而相应的其他仿真理论则要求在每一个时间步长都交换信息,并通过回溯来重新评估先前的计算。这些都极大地影响了仿真速度,特别是调用多极反馈循环时。

⑧Saber 协同仿真。Saber 可以同其他仿真软件结合起来协同仿真。这使用户更容易查看相互关联的模拟及数字信号的仿真结果。Saber 协同仿真具有可同当前主要的设计环境结合起来、可利用 Calaveras 算法来获得最佳性能和便于设计再利用等优点。

(3) NASTRAN

NASTRAN 是在 1966 年由美国国家航空航天局(NASA)主持开发的大型应用有限元程序,最初只是为了满足当时航空航天工业对结构分析的迫切需求,于 1969 年推出了其第一个 NASTRAN 版本,即 NASTRAN Level 12。MSC 参与了整个 NASTRAN 的开发过程。之后, MSC 公司成为 NASTRAN 的特邀维护商。之后, MSC 公司对原始的 NASTRAN 做了大量改进,采用了新的单元库,增强了程序的功能,改进了用户界面,提高了运算精度和效率。继而推出了自己的专利版本 MSC. NASTRAN。

经过近 50 年的发展,如今 MSC. NASTRAN 能够以其强大的有限元分析能力满足日益复杂的工程实践以及科学研究的需求,并以其独特的优势(极高的软件可靠性、优秀的软件品质、作为工业标准的输入/输出格式、强大的软件功能、高度灵活的开放式结构、无限的解题能力)进一步吸引着更多的用户。

MSC. NASTRAN 采用了模块化的功能选项,主要有:静力分析、模态分析、屈曲分析、热应力分析、流-固耦合分析、动力学分析、热传导分析、非线性分析、超级单元分析、气动弹性分析等模块。

①静力分析。静力分析是工程结构设计中最为频繁的手段,主要用来求解结构在与时间无关或时间影响因素可以忽略的静力载荷作用下的响应。MSC. NASTRAN 支持全范围的材料模式,包括均质各向同性材料、正交各向异性材料、各向异性材料、随温度变化的材料。

②屈曲分析。MSC. NASTRAN 中屈曲分析包括的线性屈曲和非线性屈曲分析对于研究结构在特定载荷下的稳定性以及确定结构失稳的临界载荷效果显著。

③动力学分析。MSC. NASTRAN 的主要动载荷力学分析功能有:特征模态分析、直接复特征值分析、直接瞬态响应分析、模态瞬态响应分析、响应谱分析、模态复特征值分析、直接频率响应分析、模态频率响应分析、非线性瞬态分析、模态综合、动力灵敏度分析等。

④非线性分析。MSC. NASTRAN 强大的非线性分析能力为设计人员精确地仿真实际问题中材料的几何、边界和单元等非线性因素,有效地设计产品、减少额外投资提供了一个十分有用的工具。

⑤热传导分析。MSC. NASTRAN 提供广泛的与温度相关的热传导分析支持能力。基于一维、二维、三维热分析单元, MSC. NASTRAN 可以解决包括传导、对流、辐射、相变、热控系统在内所有的热传导问题,并真实地仿真各类边界条件,构造各种复杂的材料和几何模型,模拟热控系统,进行热-结构耦合分析。

⑥空气动力弹性分析。空气动力弹性问题是应用力学的分支,涉及气动、惯性及结构力间的相互作用,在 MSC. NASTRAN 中提供了多种有效的解决方法。人们所知的飞机、直升机、导弹、斜拉桥乃至高耸的电视发射塔、烟囱等都需要空气动力弹性方面的计算。

⑦流-固耦合分析。流-固耦合分析主要用于解决流体(含气体)与结构之间的相互作用效应。MSC. NASTRAN 中拥有多种方法求解完全的流-固耦合分析问题,包括流-固耦合法、水弹性流体单元法、虚质量法。

⑧多级超单元分析。多级超单元分析是 MSC. NASTRAN 的主要强项之一,适用于所有的分析类型,如线性静力分析、刚体静力分析、正则模态分析、几何和材料非线性分析、响应谱分析、模态综合分析(混合边界方法和自由边界方法)、设计灵敏度分析、稳态传热分析、非稳态传热分析、线性传热分析、非线性传热分析等。

(4) ANSYS

ANSYS 是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件,广泛应用于各个工程领域,是世界范围内增长最快的计算机辅助工程(CAE)软件,能与多数计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)软件结合,实现数据的共享和交换,如 Creo, NASTRAN, AutoCAD 等。ANSYS 灵活、开放的解决方案为从概念设计到最终测试的设计全过程提供了有效的协同仿真环境,使用户可以在设计的各个阶段大规模地采用 CAE 技术,充分地发挥 CAE 对设计流程的贡献,大幅度地缩短研发流程,降低研发费用,提高设计质量。

1970 年,Swanson 博士创建了 ANSYS 公司,并发布了 ANSYS 的第一个版本,但当时它仅提供了热分析及线性结构分析功能,与当时大多数程序一样,只是一个批处理程序,且只能在大型计算机上运行。20 世纪 70 年代末,交互方式的加入大大地简化了模型生成和结果评价(前处理和后处理)。在进行分析之前,可用交互式图形来验证模型的几何形状、材料及边界条件;在分析完成之后,计算结果的图形显示,可立即用于分析检验。历经 30 多年发展,如今该软件的功能更强大,使用更便利。由于工程中的结构几何外形复杂,所受载荷也相当多,通过理论分析进行求解往往无法进行,而通过有限元软件获得数值解是很好的解决办法。ANSYS 主要分析实际结构在受到外载荷作用后所出现的位移、应力、应变等响应,根据响应可以知道结构所处的状态,从而判断结构是否符合设计要求。

ANSYS 提供了虚拟样机设计法,减少了昂贵费时的物理样机;ANSYS 具有多物理场耦合的功能,允许在同一模型上进行各式各样的耦合计算,如热-结构耦合、磁-结构耦合及电-磁-流体-热耦合,在个人计算机上生成的模型同样可以运行于巨型机上,这样就确保了 ANSYS 对多领域多变工程问题的求解;ANSYS 分析模型工具易于使用,支持多种工作平台,并在异种异构平台上数据百分之百兼容,提供了多种耦合的分析功能;同时该软件提供了一个不断改进的功能清单,包括结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体力学分析、设