

研究生教学用书

工程机械机电液系统 动态仿真

*Dynamic Simulation on the Hydro-
mechatronics System of Construction Machinery*

王国庆 等 编著



人民交通出版社
China Communications Press

研究生教学用书

**Dynamic Simulation on the Hydro-mechatronics
System of the Construction Machinery**

工程机械机电液系统动态仿真

王国庆 等编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以工程机械系统设计中涉及的不同领域动态仿真分析问题为主线,在介绍工程机械动态仿真中的力学、机构学基础知识和数值求解算法的基础上,结合 ADAMS 软件和 Recur-Dyn 软件,介绍了并联机构仿真、履带行驶系统仿真、带传动仿真和齿轮传动仿真等目前教材中较少介绍而工程中应用较多的机构仿真技术;并针对结构件的仿真分析问题,介绍了 ANSYS 的基本使用方法;结合 AMESim 和 HyPneu 软件介绍了工程机械液压系统的仿真分析技巧;针对工程机械控制器的设计介绍了 Multisim 和 DSP 的开发环境应用。同时还介绍了工程机械控制器半物理仿真的技术。

本书为工程机械专业研究生教材,也可以作为工程机械行业设计人员或其他机械系统设计人员进行动态仿真的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

工程机械机电液系统动态仿真/王国庆等编著. —北京:
人民交通出版社, 2009.9
ISBN 978-7-114-07845-3

I.工... II.王... III.工程机械-液压系统-动态仿真
IV.TU602

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 101484 号

研究生教学用书

书 名: 工程机械机电液系统动态仿真

著 者: 王国庆

责任编辑: 韩亚楠 曾 嘉

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 10

字 数: 243 千

版 次: 2009 年 9 月 第 1 版

印 次: 2009 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-07845-3

定 价: 18.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

本书为 21 世纪交通版高等学校教材。

众所周知,劳动的主要组成部分是劳动对象、劳动工具和劳动者,随着科学技术的进步,劳动工具的效率不断提高,而劳动者为了在市场中获得高的就业能力,就必须掌握最新的劳动工具。自 20 世纪 90 年代开始,机械设计领域的设计工具创新层出不穷,设计工具逐渐由丁字尺、手册、计算器进入到三维 CAD、CAE 阶段。在工程机械领域中,各大企业为了提高产品研发速度也纷纷购入了各种 CAD、CAE 工具。故此,为了提高研究生的就业能力和设计分析能力,长安大学自 1998 年起为二级学科“工程机械”专业下的研究生中开设了“工程机械动态仿真”课程。该课程主要讲授目前工程机械领域中新的实用型设计和分析工具,主要集中在结构动力学仿真分析、机构动力学仿真分析和液压系统的仿真分析,随着近几年机电液控制系统的发展,机电液系统的联合仿真及控制器设计与仿真也加入到授课内容中。本书是编著者根据多年授课过程中积累的资料编写而成。

本教材主要适用于“工程机械”专业的研究生课程,也可以适用于机械设计及理论、机械制造和机械电子等专业的研究生课程;同时也可以作为这些专业高年级的选修课程;对于工程机械企业的设计人员也是很好的参考书。

全书的内容共十章,王国庆、沈建军、张青哲、吴永平、柳有权、石喆文、王永鑫、李锋、杨国刚、李炜等参加了相关章节的编写,全书由王国庆负责整理和统稿。

在编写过程中,本书得到了相关软件代理商的支持,在此表示感谢。书中吸收了近年来国内外一些科研成果,也包含了一些正在探讨和研究中的问题,难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者
2009 年 6 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 现代机械系统发展现状.....	1
第二节 现代机械系统涉及的学科.....	3
第三节 仿真技术的发展.....	6
第二章 空间机构学与力学基础	11
第一节 机构动力学仿真的数学基础	11
第二节 空间机构学的基本概念	16
第三节 动量、动量矩和动能.....	19
第四节 牛顿-欧拉动力学方程.....	21
第五节 带拉格朗日乘子的动力学方程	22
第三章 仿真技术中的数值求解算法	24
第一节 数值解法的误差问题	24
第二节 龙格-库塔法与多步法	26
第三节 常微分方程的病态问题	28
第四节 解非线性代数方程的牛顿-拉斐逊方法	30
第五节 其他常用仿真算法	32
第四章 虚拟样机技术	34
第一节 概述	34
第二节 ADAMS 软件功能	35
第三节 虚拟样机建模	37
第四节 并联机构的基本概念	40
第五节 协调加载系统的机构虚拟样机模型	44
第五章 履带式行驶系统仿真	49
第一节 履带式行驶系统仿真简介	49
第二节 设置仿真环境	50
第三节 定义履带组件	51
第四节 完成履带子系统	57
第五节 开发和运行整体车辆模型	60
第六节 履带子系统调整	63
第七节 增加铲斗连接	66
第六章 带传动	72
第一节 带传动仿真	72
第二节 V 型带设计实例	81
第七章 齿轮传动仿真	92
第一节 齿轮的实体建模	92

第二节 齿轮副的连接.....	101
第八章 ANSYS 在工程机械结构仿真中的应用	109
第一节 ANSYS 简介	109
第二节 ANSYS 文件类型及主菜单简介	110
第三节 ANSYS 分析基本过程	113
第九章 液压系统仿真.....	119
第一节 液压系统仿真的概况.....	119
第二节 AMESim 液压仿真	122
第三节 HyPneu 软件模块简介	129
第四节 HyPneu 软件使用实例	132
第十章 工程机械控制器的开发与仿真.....	136
第一节 工程机械控制器的发展与存在的问题.....	136
第二节 ICMC(工程机械智能化控制器)的体系结构和关键技术	138
第三节 Multisim 系统简介	140
第四节 TI 公司的 DSP 开发环境 CCS 简介	144
第五节 工程机械控制器半物理仿真系统的研究.....	149
参考文献.....	152

第一章 绪 论

第一节 现代机械系统发展现状

一、机械系统的定义

机械是人类提高工作效率的主要劳动工具。它通过能量转换将动力源的能量转换成机械能,也能将机械能转换成其他类型的能量。它在动力源的作用下通过特定的机械规律改变或传递能量以产生运动,完成人们所预期的工作。

同样,如果将国家视作一个巨人的话,机械工业就是这个国家的“肌肉”和“骨骼”,是各种日用生活品、建设工具和装备制造的根本力量,机械工业历来都是重要的支柱产业之一,是一个国家的工业基础。从 20 世纪中期开始,机械产品的升级换代放慢和从业人员的入门门槛降低使机械行业产生大幅度滑坡,一度曾被称为“夕阳产业”。但随着微电子技术和动力行业的兴起,各种新的要素为机械行业引入新动力,在新型动力源和自动控制技术与机械技术交叉而形成的新一轮技术进步蓬勃兴起之时,传统的机械工业在产品结构和生产系统结构等方面发生了质的变化,使其焕发了新的生命,形成了一个崭新的现代机械工业。可以认为,目前的机械技术已经不是单独地作为一种孤立技术,而是多学科技术的综合,其对国家的经济和政治生活的影响已远远超过了以往机械的定义。

传统的机械一般是由动力源、传动机构、执行机构和操作机构等部分组成,现代机械的组成远比传统机械系统复杂,但其基础仍然是传统机械的组成。美国机械工程师协会(ASME)在对美国国家科学基金会的报告中提出现代机械是:“同计算机信息网络协调与控制的,用于完成包括机械力、运动和能量等动力学任务的机械和/或机电部件相互联系的系统”。可见,现代机械是一个以传统机械为基础,融合电子、控制、信息等多学科技术的一体化的机械系统。因此,现代机械产品,不论其功能多少、结构简繁、体积大小,都是从系统角度出发,以分析传统机械为基础,考虑多学科融合来认识 and 理解的。如果不从系统观点出发,就不能发挥多学科融合的优势,而仅仅只能做到机电简单的协作。

因此,可以定义机械系统是在多学科技术支撑下的,以机械技术为骨架而支撑起的,能够实现预期运动的系统。换句话说,离开了机械的骨架,这个系统也就不存在了。

二、现代机械系统的构成

前面已经提到机械系统是人类自身能力的延伸,是人类在希望高效和高速完成预期目标的基础上发展起来的,它的基本功能是代替人的体力劳动和一部分脑力劳动。因此,从“人体替代”的角度出发,我们可以对照人体来说明现代机械系统的组成:人体是由心脏、大脑、感觉器官、肌肉和骨骼五大部分组成,而现代机械系统一般是由控制及信息处理装置、检测传感装

置、执行元件、机构和动力源部分组成。它们与人体结构已形成大致一一对应关系(见表 1-1)。因此,可以说现代机械系统已发展到了一定的水平,初步替代人类完成了一些由于自身心脏这个“发动机”功率不足引起的能力不足问题,并且随着科技的发展和社会的进步,它将更大程度地超越人体功能,成为人类必不可少的忠实朋友。

现代机械系统与人体结构的对应关系

表 1-1

现代机械系统	人 体	功 能
控制及信息处理装置	大脑	控制(信息存储、处理)
检测装置	感觉器官	检测(信息收集)
执行机构	肌肉、骨骼	基础与动作
动力源	心脏	吸收和转化能量

具体来说,现代机械的结构由以下几个部分组成。

1. 动力部分

动力部分就像人体心脏那样产生维持生命的能量,为系统提供动力,驱动执行机构,使系统正常运行。现代机械系统的动力源按驱动形式可以分为:气压驱动、电驱动、液压驱动和液力驱动等,其中液压和电能是主要动力源。

2. 检测传感装置

检测传感装置就像人的感觉器官,其功能是对系统运行时内部状态信息和外部环境信息进行检测。被测信息包括:位置、速度、力、力矩、电流、温度等物理量。检测装置利用各种传感器把这些物理量变成一定规格的电信号,然后由控制装置处理、决策,并通过执行机构实现下一步的动作。

3. 控制装置

这部分相当于人的大脑,是系统的核心。它能根据系统功能要求和传感器的反馈信息,进行处理运算和决策以控制整个系统的运行。它以工业控制计算机、微控制器为主要运算装置及相应的硬件、软件等外设组成。

4. 执行机构

执行机构相当于人的躯干和手足,是现代机械的基础。它基本上就是传统机械产品中的机械结构和机构部分,包括机身、框架、机械连接等内在的支持结构及机械传动和操作机构。其形式因作业需求的不同而变化,当接到“大脑”来的控制信号后,执行机构将忠实地执行要求的指令,完成系统所要完成的动作。执行机构一般采用机械、电、液等机构。由于它是实现系统目的功能的直接参与者,其性能好坏往往决定了整个系统的性能。

三、现代化机械系统的主要特征

现代机械系统是由机械技术与多学科技术有机结合而形成的一个新系统。它是以机械技术为基础的多学科的结合,互相渗透,有效地改变了传统机械产品的面貌,赋予了机械产品新的活力,同时也促进了相关技术的发展,扩大了相关技术的应用领域。现代机械系统是在激烈的市场竞争中发展起来的,具有明显的优势,主要特征如下。

1. 功能增加,柔性提高

在机械机构和结构不变或少许组合的基础上,通过改变控制系统来不断增加新的功能是现代机械产品与传统机械产品最主要的区别之一。这也称为机械系统的“柔性”。现代机械系

统中各机构的协调动作、工艺顺序、工作节拍等都可以根据控制系统中预定的程序进行工作,如果要改变机构的动作规律、工作顺序,只要修改控制程序便可达到预期目的。这样的设计思路能够明显地降低制造企业的成本,也降低了用户的使用成本,从而使之真正体现了方便的多功能化。例如:加工中心的出现,就可以将多台普通机床上的多道工序在一次装夹中完成,改变程序就能改变加工工序,完成不同的工作,大大提高了工作效率和加工精度,大幅提高了产品的利润率。又如,机器人的出现,三坐标的机械臂其基本机械结构大同小异,但配备不同的驱动装置和控制装置后可以完成许多作业。这种极强的功能性和良好的柔性是传统机械系统所不能比拟的。

2. 结构简化,改善性能

在传统机械系统中,为了增加一种功能,或实现某一控制规律,往往要靠增加机构的办法来实现。例如,为了达到变速目的,就要用一系列齿轮组成的变速箱;为了实现不同的非线性运动规律控制,就要使用各种不同的凸轮结构。但是,随着新型电力电子技术和运动控制技术的发展和引入,笨重、重杂的齿轮变速箱可以用轻便的调速装置来代替,精确的运动规划或过去靠机械传动链实现的各种关联运动,可以用运动控制器的软件很方便地实现。这样,现代机械产品就减小了体积,简化了结构,减轻了重量,节省了材料。例如,一台微机控制的精密插齿机,其齿轮等传动部件比传统插齿机减少 30%;一台现金出纳机采用一只微处理器就代替了几百个机械传动部件;而现代常用的打字机中,一个微处理器就代替了原来打字机中 936 个机械零件。

现代机械系统由于机械传动部件减少,使机械磨损、配合间隙及受力变形等所引起的误差大大减少,同时由于采用电子技术实现自动检测、自动补偿,校正了因各种干扰因素造成的动态误差,从而达到了传统机械设备所不能实现的工作精度。如常见的数控机床,由于可以实现自动上下料、自动调速、自动进给、自动测量、自动校正等功能,大大提高了加工精度,减少了误差,比手工操作加工精度可以提高一个数量级。

传统的机械装置的运动部分,除了运动配合间隙所引起的动作误差外,它还会由于摩擦、撞击、振动等影响装置的寿命和可靠性。现代机械系统中由于结构的简化,运动部件的减少使机械磨损大为减少,因而显著地延长了产品和系统的寿命,提高了可靠性和稳定性。

3. 效率提高,成本降低

现代机械系统由于引入了多学科技术,其控制和检测功能有了很大的提高。它可以模拟最佳操作工人的技巧,不受人的主观因素的影响去实现最佳操作,保证最佳质量。另外,它能减少生产准备和辅助时间,缩短生产周期,提高合格率,降低成本,提高生产力。例如,数控机床对工件加工的质量稳定,生产效率比普通机床高 5~6 倍,每万元产值的金属消耗约减少 90%;柔性制造系统可使生产周期缩短 40%,生产成本降低 50%,生产设备利用率可提高 2~3 倍,机床数量和操作人员都可减少 50%以上。整个投资在几年内便可全部收回。

第二节 现代机械系统涉及的学科

现代机械系统仍然是以传统机械技术为基础发展起来的,因此,现代机械系统的基石依旧是传统机械技术所依赖的力学学科以及以力学学科为基础发展起来的机械设计、机械制造工艺等学科。

一、力学学科

力学学科是机械技术的主要理论基础,经常用到的力学分支为结构力学和机构力学,通俗地讲,结构力学分析的就是机械系统不参加运动的部分,常称为机架、底盘等。材料力学提供的方法可解决一些非常普通的结构,但对于稍微复杂的异型结构是不适用的,这种情况就要用到结构动力学,尤其是其中的有限元技术了。

从实际工程出发,机械系统中结构体的分析和设计,还会遇到变载荷、高温、与土耦合、与液体耦合等问题。这些会导致损伤、疲劳断裂等现象,要分析这些现象就要用到断裂力学、损伤力学、疲劳力学、接触力学、空气动力学、海洋工程力学等。这些力学分支是专门为了解决结构方面的工程实践而开展的。

机构动力学是机械机构运动分析的主要工具,其要解决的问题是机械系统中运动部分的运动学和动力学分析。机构分为平面机构和空间机构,在本科阶段的理论力学解决了平面机构的运动和动力学分析问题,对于机械设计而言,就是利用理论力学的知识如何分析具体机构的动力学问题;但对于实际工程需要而言,空间机构的运动是非常广泛的,尤其是在工程机械中(如挖掘机等),因此,空间机构学是很重要的。

二、机械设计学科

机械设计技术包括产品结构、工艺设计、材料选用以及设计理论与方法等。传统的机械设计技术和方法,已不能满足现代社会和生产实践的需要。比如,汽轮机叶片结构设计、数控机床设计、高效节能电机的设计等,最常规的机械设计技术就难以达到设计要求。又如高度自动化的数控机床,在生产加工过程中无法实施人工补偿和调整,因此就要在设计时采用新结构、新材料,以保证机床结构及工艺过程中的高精度、高刚度、微小热变形和良好的精度保持性。近几十年来,设计方法已由直觉设计发展到现代设计。现代设计方法是在设计的各个阶段应用先进理论和有效手段,解决设计中遇到的各类问题。现代设计涉及系统工程、相似理论、仿真技术、优化设计、可靠性设计、计算机辅助设计(CAD)、动态载荷和模态分析等内容。它是应用现代信息技术,进行科学的思维,使物质和能源最有效利用的设计方法。它大大地提高了设计质量和设计效率,促进了机械设计技术的飞速发展。

三、制造工艺学科

制造工艺是机械设计具体实现的保证,同样是机械技术发展的关键之一。随着实际需要的发展,各种现代制造工艺层出不穷,发展迅速,制造工艺学发展的目标可以用“三高”来概括:

(1)高效率是现代技术的一个明显特征。制造工艺发展的目标可期,提高加工速度。像加工中心等设备集各类加工于一体,在计算机控制下,完成对工件的各种切削加工,大大缩短了加工周转时间和辅助时间。

(2)高精度是机械技术水平的一个重要标志。精度水平从20世纪40年代的 $0.1\mu\text{m}$,发展到目前的 $0.01\mu\text{m}$,提高了两个数量级,它对光学、电子学、计算机科学、国防、航空航天、核工业等技术领域的发展作出了重要贡献。

(3)高柔性化是制造工艺学发展的一个重要方向。所谓加工柔性化就是指加工品种的多样性,加工的灵活性和多适应性。目前,柔性制造系统分制造单元(FMU)、柔性制造自动线(FML)和柔性制造系统(FMS)三种类型。它们都是以数控设备为基础,用自动运储系统连接

起来,由计算机控制的能加工多品种零部件的自动化生产系统。它们的出现有力地推动了制造工艺的发展。

四、测量技术学科

检测传感技术中的关键是传感器。它是将机械系统中被测对象的各种物理量转变为电信号的一种变换器。它主要被用于检测现代机械系统中的自身与作业对象、作业环境的状态,向控制器提供信息以决定系统的动作。传感器的精度、灵敏度和可靠性很大程度上决定了系统性能的好坏。因此,它在系统中占有非常重要的地位。检测传感技术包括两个方面的内容,一是传感器本身的研究和应用;二是检测装置的研究与开发。

传感器的发展是伴随新材料、新原理的出现而产生的。20世纪60年代中期,半导体技术渗透到传感器领域,出现了半导体温度传感器和半导体磁传感器等元件。陶瓷和有机材料进入传感器领域,出现了性能稳定的新型温度、湿度、速度、离子等传感器。光导纤维在传感器中的应用,解决了电量传输的抗干扰等问题。

测量装置是把传感器的原始输出信号进行放大、滤波、整形、阻抗变换、运算补偿、标定记录等处理的装置。微型计算机的应用及微控制器的出现,使测量装置发生了很大的变化。目前,该技术的发展趋势主要是集成化和智能化。集成化有两层含义:一是把相同性质或不同性质的传感器集成在一起,形成矩阵式传感器或复合式传感器;二是把传感器和测量装置集成在一起,形成一体化传感器。集成传感器使检测传感装置具有多功能、小型化的特点,使其性能提高且更加稳定可靠。

智能化主要是指检测传感装置具有自动判断、自动处理和自动操作等功能。目前,许多检测传感装置中已经具有了以下功能:

- (1)能自动对被测参数进行数据处理。
- (2)能自动进行误差及非线性修正,自动标定等。
- (3)能对参数进行自动采样,对参数和量程进行自动选择。
- (4)故障的自诊断等。

五、自动控制技术

现代机械系统中的自动控制技术是指对机械运动的控制技术,它包括对机械部分的位置控制、轨迹控制、速度控制、力控制等技术。

自动控制的理论基础是自动控制原理,它可分为经典控制理论和现代控制理论。经典控制理论研究对象主要是单变量的线性不变系统,使用的数学工具是拉氏变换,用传递函数方法在频率域内进行系统分析。现代控制理论是以多变量、非线性、时变系统为研究对象,所用数学工具是线性代数、矩阵论和集合论。它是用状态空间法在时间域内进行系统分析,用状态方程描述系统过程,根据当前的状态及条件,分析估算好下一步的状态。它研究的主要内容是最优胜控制、随机控制、自适应控制、智能控制和鲁棒控制等。但实践中看,经典控制理论的应用是最广泛的,现代控制理论的算法复杂,参数不易得到,因此在实时应用场合较难实现。

对现代机械系统来说,研究的重点是实现控制理论的工程化和实用化。特别在现代机械系统的核心部分——伺服系统工程化方面要进行重点研究。

六、电子技术

从前述可知,不论是信息、检测、控制技术,其实现的载体均为电子技术,尤其是以微控制器为基础的现代数字技术对机械系统的迅速发展起了至关重要的作用。

目前,微控制器以位数来分,可分为 8 位、16 位、32 位等,64 位技术目前主要应用在处理器中。从机械设计应用来看,8 位微控制器价格低,但功能有限,各大半导体公司均有生产,主要的系列有 51 系列、AVR、Freescale 和 PIC 家族,其应用各有特色,在选择时主要是功能和价格有所差别。16 位的微控制器在发展了一段时间后,由于 32 位 ARM 体系的出现已有被替代的趋势,ARM 系列有 ARM7、ARM9、ARM11 和 Cortex-M3 等,其主要特点是外设强大,价格便宜,有很好的发展潜力。对于控制系统和信号系统而言,DSP 是实现实时化解决方案的最好选择,但价格较高。

各种微控制器并不能完全实现机械系统设计的要求,其外部还需要各种输入输出接口和转换器件,因此,以微控制器为核心设计的机械系统控制器已成为现代机械系统的“心脏”。

第三节 仿真技术的发展

一、计算机仿真技术

由于现代机械系统多学科融合的特点,机械类设计人员往往有力不从心的感觉。但是,随着计算机软件技术的发展,专业人员技术逐步软件化,从而屏蔽了其中繁复的理论,使复杂的技术简单化,设计人员只要知道了基本的理论过程和关键因素点,其余的分析过程交给软件进行即可,这样的软件称为计算机仿真软件,这种方法就称为仿真技术。计算机仿真就是建立系统数学模型,并利用该模型在计算机上运行,进行系统科学试验研究的全过程。

仿真技术的发展已近半个世纪。计算机仿真应用早期局限在国防科技和军工部门,如今已深入到科学研究、工程设计、辅助决策、系统优化等各个方面,使人们的许多传统观念和方法产生了重大变革,计算机仿真技术被称为继科学理论和试验研究后的第三种认识和改造世界的工具。计算机技术的发展,计算数学的成熟,使计算机仿真技术成为一种工程领域必不可少的重要设计手段,它的应用可以大大地缩短产品的开发周期和降低产品开发的成本,提高产品的竞争力。

传统的设计方法往往是通过反复的试制样品(物理成型)和试验来分析该系统是否达到设计要求,因此在设计过程中大量的人力和物力投入在样品的试制和试验上。随着计算机仿真技术的不断发展,在工程系统的设计开发中,大量地采用了数字化的方法,即通过建立系统的数字模型,通过计算机仿真使得大量产品设计问题的发现和解决在物理成型之前就得到处理,从而极大地减少反复物理成型的人力和物力的投入,使企业可以在最短的时间以最低的成本将新产品投放到市场,从而在竞争日益激烈的市场上占得先机。正是由于计算机仿真技术的这种优越性,在国外,计算机仿真技术已经充分地被各大公司应用到产品的设计、开发和改进中。

早期的计算机仿真技术,需要仿真人员自己推导系统的数学模型,应用编程语言将数学模型转化成为计算机能够直接运算的程序。应用此法设计仿真程序,不仅要求仿真人员精通所

采用的计算机语言,还使他们将大量的时间和精力耗费在程序的编写和调试上,而不能致力于对系统模型和仿真方法的研究。为了使仿真人员摆脱复杂的程序设计,从 20 世纪 60~70 年代起,就有人发展了面向仿真问题的仿真专用语言。它采用简单的方式(即仿真人员熟悉的描述问题的方式)来表达仿真中常用的算法或控制流程。早期的仿真语言有 CSMP, CSSL, DSL, MIMC 等,应用十分广泛。20 世纪 80 年代,美国 Mathworks 公司推出一种面向科学和工程计算的 Matlab 语言,它以矩阵运算为基础,把计算、可视化及程序设计融合到了一个交互的工作环境中,可以实现工程计算、算法研究、建模和仿真、数据分析及可视化、科学和工程绘图、应用程序开发等功能。这些通用的计算机仿真软件系统的主要特点是:

- (1)提供了方便的数学模型建立工具,使用者可方便地在计算机上建立自己的数学模型。
- (2)定义了一些典型的通用和专用的非线性函数,加快了数学模型的建立过程。
- (3)提供多种数值计算方法。
- (4)提供灵活、方便和直观的多种输出格式。
- (5)提供了友好的人机界面等。

然而,这些仿真语言还是基于提供给仿真人员一种更方便的数学模型在计算机中的表达方式,通过仿真语言这一中介,使得仿真人员可以更方便地把数学模型转化到计算机中去运算,因此数学模型的建立还是需要仿真人员进行。

在此基础上,更进一步发展起来的就是由各个仿真软件公司以图形化的方法将各种数学模型包含起来从而更加方便了技术人员的应用,也更降低了对技术人员的理论要求,它发展成了目前的计算机辅助工程学科 CAE(Computer Aided Engineering)。

二、计算机辅助工程 CAE

计算机辅助工程 CAE 是一个很广泛的概念,从字面意义而言,它可以包括工程和制造业信息化的所有方面,但是传统的 CAE 主要是指用计算机对工程和产品的运行性能与安全可靠性分析,对其未来的状态和运行状态进行模拟,及早地发现设计计算中的缺陷,并证实未来产品功能和性能的可用性和可靠性。准确地说,CAE 是指工程设计中的分析计算与分析仿真,具体包括工程问题的建模和数值分析。工程数值分析用来分析确定产品的性能;结构与过程优化设计用来在保证产品功能、工艺过程的基础上,使产品、工艺过程的性能最优;结构强度与寿命评估用来评估产品的精度设计是否可行,可靠性如何,以及使用寿命为多少;运动学或动力学仿真用来对 CAD 建模完成的虚拟样机进行运动学仿真和动力学仿真。从过程化、实用化技术发展的角度看,CAE 的核心技术为力学和数学。

对 CAE 进一步分析,其具体的含义表现为以下几个方面:

(1)运用工程数值分析中的有限元等技术分析计算产品结构的应力、变形等物理场量,给出整个物理场量在空间与时间上的分布,实现结构的从线性、静力计算分析到非线性、动力的计算分析。

(2)运用过程优化设计的方法在满足工艺、设计的约束条件下,对产品的结构、工艺参数、结构形状参数进行优化设计,使产品结构性能、工艺过程达到最优。

(3)运用结构强度与寿命评估的理论、方法、规范,对结构的安全性、可靠性以及使用寿命作出评价与估计。

(4)运用运动学或动力学的理论、方法,对由 CAD 实体造型设计出的机构、整机进行运动学或动力学仿真,给出机构、整机的运动轨迹、速度、加速度以及动反力的大小等。

(一)有限元技术的发展

经过 60 多年的发展,有限元技术已趋于成熟,为工程界所普遍接受,并开发了相应的有限元分析软件,这些软件在功能、性能、使用上均达到了比较高的水平。在功能上,影响软件的前处理器可以调用 CAD 中的几何模型,可以便捷地实现网格划分及自动划分,灵活地施加各类便捷条件,定义材料特性,设置不同的计算工况,对特殊问题实现用户子程序的调用等;求解器带有适合不同问题的求解算法;后处理器可给出所需要的可视化的技术结果。性能上,可完成线性与非线性、静力与动力等问题的求解。

(二)结构优化技术的发展

早期的结构优化方法采用的是基于直觉的准则法,如满应力准则法、满应变准则法等。20 世纪 60 年代,数学规划法引入结构优化设计中,标志着现代优化设计的开始,数学规划法中的复合形法、可行方向法、惩罚函数法等,在结构优化设计中得到了广泛应用。20 世纪 70 年代出现了优化准则法,其思想是将设计问题的力学特性与数值方法中的各种近似手段相结合,把高度非线性问题转化为一系列近似的带显示约束问题,然后借助于数学规划法进行求解。20 世纪 80 年代以后,结构优化设计开始应用于工程优化设计中,并形成了专门研制的工程优化设计软件。目前具有结构优化功能的软件有十多种;而在有限元分析软件中带有优化设计功能的软件有 ANSYS、MSC. NASTRAN 等,还有与 CAD 相集成的优化设计软件 MSC. VISUAL NASTRAN 等。

(三)结构强度与寿命评估的发展

由于结构的速度、经济性、耐久性、可靠性的不断提高,以及不断地减轻结构的重量,结构强度与寿命评估变得越来越复杂,越来越重要。复杂机电产品的选型时,要了解的已不仅是设备的强度指标,还包含设备的使用寿命指标,生产厂家必须向用户回答在什么情况下厂家提供的设备的可靠工作年限。要进行结构强度与寿命评估需要借助于有关的理论、方法、行业上的规范以及材料的数据,这些理论、方法、数据大都是经过大量试验、工程实践总结归纳出来的,国外将这方面的科研成果编制成软件,如 MSC. FAUIGUE 软件、MSC. MARC 软件中的失效与破坏分析模块。由于我国国情不同,尤其是评估的数据库内容的不同,需要有适合我国国情的评估体系。我国在结构强度与寿命评估的理论、方法、规范及其数据库方面也取得了一定进展,但与国外的发展水平还有很大的差距,目前还没有成熟的软件可供使用,但在 CAE 系统中有关结构强度与寿命评估的内容是必不可少的。

(四)机构动态仿真的发展

在 CAD 造型设计的基础上形成了工程机构的动态仿真,在这方面已推出的软件有 ADAMS 和 WorkingModel 等,它们是通用的机械机构仿真软件。ADAMS 提供了模拟实际系统运动和动力过程的仿真环境,可以全面地仿真实际制造活动中的机构、信息及制造过程。该软件包括十几个分析模块,其主要功能是动态模拟与动态分析。动态模拟包括速度、加速度、力响应、效率能量等;动态分析包括动态信号的处理、频谱分析、数字滤波、传递函数的取得等。

三、工程机械仿真技术的应用

随着工程机械的发展,更加细分的市场使工程机械的设计也更加细化,用户要求的多样性和设计周期的紧迫性使企业不得不加快设计步伐,机械系统的仿真技术也逐步扩大了在工程机械行业的应用。

我国高校在这方面工作开展得最早,从 2000 年左右开始,长安大学、吉林大学等学校结合工程机械行业的需要做了很多工作,也通过这些科研项目提高了工程机械动态仿真技术在行业中的普及程度。从已有的研究上看,主要针对如下机种进行了大量的仿真研究,同时也使用了多种仿真工具,这使得工程机械动态仿真的应用深度和广度得到了很大的加强。

1. 装载机

(1)已有的研究基于虚拟样机技术,利用 ADAMS 软件对轮式装载机建模,并对其进行运动学及动力学仿真,检查装载机在运动工作过程中是否出现干涉,同时获得装载机各部件的运动学及动力学相应曲线,分析装载机结构设计及其受力情况是否合理,这些研究可以为装载机设计提供参考。

(2)从装载机工作装置的力学分析方面,有学者针对通常采用的静态分析法(且分析焦点往往是六杆机构的问题),对综合性能更具优势的八杆机构装载装置进行优化设计,继而根据优化数据建立装载机工作装置的多体动力学模型,较准确地分析了装载机工作装置的诸多性能指标,其结论验证了优化设计结果。

(3)针对挖掘装载机挖掘装置回转过程中存在的稳定性问题,对回转过程进行运动分析,判断其回转稳定性,找出影响因素,用 Matlab 仿真软件中的 Simulink 对其进行动态特性仿真,证明通过对几个关键参数的优化能改善回转过程的动态性能。

(4)针对装载机的控制系统设计,引入了半物理仿真技术,设计了装载机线控转向技术硬件在线回路仿真系统,并介绍了其组成工作原理,采用比例溢流阀加载的方式对系统进行模拟加载。利用传递函数法建立了仿真系统的数学模型,并在 Matlab 中对其进行了仿真与 PID 参数的调整。利用该硬件在线回路仿真系统分别对不同的输入信号及不同负载条件下的响应进行了试验,试验结果表明,采用比例溢流阀加载的方式可以较好地对系统进行模拟加载,线控转向技术在装载机上应用是可行的。

上述研究多采用的是 ADAMS 和 Matlab 软件进行仿真,由于这些软件的使用成本较高,有些学者采用了 SolidWorks 软件建立装载机工作装置的虚拟样机模型,用 COSMOSMotion 软件进行仿真分析。其分析结果对缩短产品的开发周期,提高设计质量也同样有指导意义。

2. 摊铺机

摊铺机的仿真研究主要集中在工作装置和控制系统上。

(1)有学者提出摊铺机的振捣机构是平面连杆机构的理论,并基于复数矢量法采用数值分析软件 Matlab 对其进行了计算机仿真,从而计算出了振捣机构的运动参数,为振捣机构的设计提供了理论依据。

(2)考虑到在摊铺机中,由熨平压实机构和压实介质组成的系统,为两个自由度的非线性动力学系统,压实介质简化为黏弹塑性体。建立熨平压实机构动态特性力学模型,利用 Matlab 软件,研究了熨平压实机构的动力学问题,分析了熨平压实机构动力学参数变化对该系统动态特性的影响。

(3)摊铺机的找平系统是一个核心技术,为此有研究建立了摊铺机自动调平装置横坡调平控制系统的数学模型,在此基础上以 PF—5500 履带式摊铺机为例,利用数字 PID 控制方法,实现对横坡调平系统的自动控制,并利用 Matlab 编制 M 文件实现了控制系统的计算机仿真。

(4)针对摊铺机行驶驱动系统的特殊要求,有文献重点研究恒速摊铺的控制问题。采用了模糊 PID 混合控制算法,利用 Simulink 对整个行驶驱动系统建立了数学模型并进行仿真分析,仿真结果表明采用模糊 PID 控制效果要优于传统 PID 控制。

3. 压路机

(1)对振动压路机的“压路机—土壤”振动系统进行动力学分析,建立了动力学模型,对其采用 Matlab 进行计算机仿真。

(2)有文献根据协同仿真技术的实现方法,找到了适合中小企业的产品开发模式——基于接口的多学科协同仿真模式。以 YZ18JA 型振动压路机振动机构为例,利用 ADAMS 及其 Hydraulics 模块,在同一界面下创新性地实现了机械系统和液压系统的协同仿真。

(3)还有的研究利用虚拟样机技术,建立了冲击压路机的动力学模型;主要对牵引主机在作业中所受水平冲击载荷进行了仿真研究。首先在 Pro/E 环境下建立了冲击压路机的装配模型;然后将该模型导入独立的 ADAMS 环境中,并建立整机的动力学仿真模型。在压实工况下,对该系统进行了动态特性仿真研究,并获得了地面和工作装置传递给牵引主机的水平冲击载荷及其变化规律。通过仿真结果与试验结果的对比,验证了模型的正确性。

(4)路基压实度的实时检测是一个很大的难题,为了研究振动压路机的工作特性,探索路基压实度的检测方法,采用置于振动压路机振动轴上的加速度传感器来间接测量路基压实度,利用 Matlab/Simulink 对压路机进行仿真,并验证了方案的可行性。

总体而言,目前在工程机械的研发中,使用的仿真软件有 ADAMS、Matlab、AMESim 等,研究领域主要集中在机构动力学分析、结构动力学分析和液压系统分析中,高校的研究多集中在机构动力学和液压系统仿真上,而企业的需求集中在结构动力学的分析上。

第二章 空间机构学与力学基础

由于机械系统的动态仿真涉及机构动力学及数值分析等基本知识,尤其是国内机械工程学科的教学体系偏重于平面机构的分析,而工程机械中的大多数作业装置均为空间机构,这就使许多工程机械行业的学生和工程师缺乏基本的分析能力,进而也导致产品设计时的创新能力不足。针对这一问题,我们在本章和第三章将介绍一些基本的空间机构学、力学和数值分析知识,这样在使用这些仿真软件时才不会感到无从下手。

第一节 机构动力学仿真的数学基础

数学方法是进行空间机构的运动学和动力学分析的基础,这里主要涉及回转矩阵的基本概念和性质。

一、回转变换矩阵

(一)点的位置在坐标系中的表示

如图 2-1 所示,在空间的一个杆件上固连坐标系 $oijk$, o 为坐标原点, i, j, k 分别为坐标轴上的单位向量,可用列矩阵来表示:

$$i = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad j = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

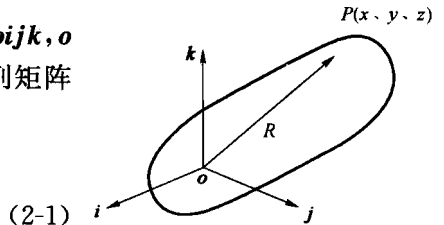


图 2-1 杆件坐标系

杆件上任一点 P 相对于杆件坐标系的位置,可以用它在坐标轴上的坐标来决定,表示为 $P(x, y, z)$,也可以用从原点 o 指向 P 的位置向量 R 来表示:

$$R = xi + yj + zk \quad (2-2)$$

上式可写为矩阵形式:

$$R = [i \quad j \quad k] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [I] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

式中 $[I]$ 为 3×3 单位矩阵。由于坐标系是固连于杆件的,因此,杆件上某点相应于该杆件坐标系的坐标与该杆件的运动无关,是常数。