



国防特色教材·船舶与海洋工程

船舶动力装置仿真技术

CHUANBO DONGLI ZHUANGZHI FANGZHEN JISHU

李淑英 主编

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社



国防特色教材·船舶与海洋工程

船舶动力装置仿真技术

李淑英 主编



主编 李淑英

代 编 薛 琳

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

U664.1

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



北航

C1665306

818870810
内容简介

本书首先对通用仿真技术中的基本概念和方法进行了详细的整理与分类,从而使人们对仿真技术有了清晰的认识。该书在基本理论论述上尽量系统地介绍了计算机仿真技术的基本术语和基本概念,并深入地阐述了基本的方法。主要介绍船舶动力装置仿真技术基础,如系统与模型,连续系统数学模型,连续系统仿真算法及仿真模型,系统仿真模型的有效性与确认。船舶动力装置仿真技术应用,船舶动力装置主机(主要燃气轮机和柴油机)、传动设备(主要是各种离合器)、及推进器进行分析,建立其数学模型;并介绍数学模型的简化方法与求解方法;建立仿真模型;最后以典型船舶动力装置系统为例,来介绍船舶动力装置工作特性的仿真分析。

本书可作为船舶动力专业在学习计算机仿真方面的教材,也可作为相关专业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

船舶动力装置仿真技术/李淑英主编. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2011.7
ISBN 978-7-5661-0099-3

I. ①船… II. ①李… III. ①船舶机械-动力装置-
计算机仿真 IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 122793 号

船舶动力装置仿真技术

李淑英 主编
责任编辑 薛力

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://www.hrbeupress.com> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

哈尔滨工业大学印刷厂 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:14.5 字数:308千字

2013年5月第1版 2013年5月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-5661-0099-3 定价:40.00元

前 言

随着船舶动力装置仿真技术的发展,需要将新的仿真技术及研究成果形成一个完整体系,供给研究生、博士生、及从事该领域工程技术人员参考。同时,为了加强哈尔滨工程大学轮机工程及动力机械研究生教材的建设,提高该研究方向教学质量,促进船舶动力装置建模与仿真教学的发展,培养高素质轮机工程及动力机械的工程人才,弥补船舶动力装置建模与仿真课程教材的匮乏,体现现代船舶动力装置发展的时代特色和作用,特编写本教材。

本教材编写以由浅入深,逐步提高,突出重点,内容充实,符合受教育者主要是研究生学习思维的规律以及掌握知识的渐进过程,体现现代船舶动力装置建模与仿真技术的发展特色为指导思想。

根据上述原因,本书的内容重点突出在船舶动力装置建模方面,并结合了作者从事多年船舶联合动力装置仿真与试验研究的经验及该项目研究成果,把船舶动力装置建模和仿真思想与实践应用很好的结合起来,增强学生的感性认识,有利于提高教学效果。

本书由李淑英教授主编,第1至第4章杨家龙副教授参编,主要介绍船舶动力装置仿真技术基础,如系统与模型,连续系统数学模型,连续系统仿真算法及仿真模型,系统仿真模型的有效性与确认。第5至第9章由李淑英教授编写介绍船舶动力装置仿真技术应用,船舶动力装置主机(主要燃气轮机和柴油机)、传动设备(主要是各种离合器)、及推进器进行分析,建立其数学模型;并介绍数学模型的简化方法与求解方法;建立仿真模型;最后以典型船舶动力装置系统为例,来介绍船舶动力装置工作特性的仿真分析。

本书由上海交通大学藏述升教授、哈尔滨工程大学郑洪涛教授认真审阅,并提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

编 者
2011年5月

目 录

绪论	1
0.1 计算机仿真国内外发展概况	1
0.2 计算机仿真的应用领域及特点	2
0.3 船舶动力装置计算机仿真国内外发展概况	4
0.4 船舶动力装置常用的仿真软件平台	6
第1章 系统仿真的基本概念与常用方法	8
1.1 概述	8
1.2 系统仿真的基本概念	10
1.3 系统仿真的分类	12
1.4 数学建模	15
第2章 连续系统数学模型	35
2.1 线性连续系统的数学模型	35
2.2 非线性连续系统的数学模型	46
2.3 非线性连续系统的数学模型的线性化	47
第3章 连续系统仿真算法及仿真模型	50
3.1 微分方程描述的连续系统仿真算法及模型	50
3.2 传递函数描述的系统离散化算法及仿真模型	54
3.3 状态方程描述的系统数字仿真算法及仿真模型	55
3.4 计算机控制系统仿真方法	60
3.5 刚性系统仿真方法	64
3.6 连续系统仿真的参数优化方法	70
第4章 系统仿真模型的有效性与确认	76
4.1 影响模型有效性的主要因素	76
4.2 仿真模型的确认、验证和认定	78

4.3	模型确认的方法	80
4.4	建模过程的文本化控制方法	86
4.5	仿真实验设计方法	87
第5章	船舶燃气轮机系统建模与仿真	91
5.1	船舶燃气轮机的模块化建模	91
5.2	船舶燃气轮机部件的建模与仿真	94
5.3	船舶燃气轮机系统的建模与仿真	120
第6章	船舶涡轮增压柴油机系统建模与仿真	159
6.1	船舶涡轮增压柴油机系统的物理模型与模块划分	160
6.2	船舶涡轮增压柴油机系统部件的建模与仿真	161
6.3	船舶涡轮增压柴油机系统的仿真模型	177
第7章	船舶动力装置传动系统建模与仿真	180
7.1	离合器建模与仿真	180
7.2	并车齿轮箱建模与仿真	192
第8章	船舶推进螺旋桨建模与仿真	193
8.1	调距桨系统的物理模型	193
8.2	调距桨系统的建模与仿真模型	194
第9章	船舶联合动力装置系统建模与仿真	205
9.1	柴—燃联合动力装置 CODOG 系统的建模与仿真	205
9.2	燃—燃联合动力装置 COGAG 系统的建模与仿真	217
参考文献		224

绪 论

仿真技术是以相似原理、系统技术、信息技术以及仿真应用领域的有关专业技术为基础,以计算机系统与应用有关的物理效应设备及仿真器为工具,利用模型对系统(已有的或设想的)进行研究的一门多学科的综合性的技术。仿真本质上是一种知识处理的过程,典型的系统仿真过程包括系统模型建立、仿真模型建立、仿真程序设计、仿真试验和数据分析处理等,它涉及多学科多领域的知识与经验。随着现代信息技术的高速发展以及军用和民用领域对仿真技术的迫切需求,仿真技术也得到了飞速的发展。

0.1 计算机仿真的国内外发展概况

仿真的历史源远流长,但在计算机问世以前,仿真主要是基于物理仿真。如现在仍然使用飞行器研制中的飞行模型风洞试验;船舶制造过程中的船舶模型水动力学实验等。但现在所说的仿真一般指计算机仿真。计算机仿真技术自20世纪40年代电子计算机问世以来便应运而生。40年代末期,第一台模拟计算机被用于三自由度飞机系统的仿真。其发展的第一个高潮出现在50年代,建立在反馈运算放大器基础上的模拟计算机风行一时。50年代末期,一方面数字计算机有了很大发展;另一方面这一时期的微分方程数值解的理论方面又有很大发展,加上一些计算机高级语言的问世,数字计算机在非实时仿真方面开始得到广泛应用。由于当时数字计算机在仿真速度上还不能满足动态系统实时或超实时仿真的要求,促进了模拟计算机和数字计算机结合。1958年出现了第一台专用的数模混合计算机,用来解决导弹轨道的计算问题。

20世纪60年代初期出现了数模混合计算机的商品,并在60年代末期70年代初期形成了第二个浪潮。70年代微电子技术和数字计算机在硬件、软件上的飞跃发展,使数字仿真技术迅速崛起,已有可能解决动态系统的实时仿真问题,对数模混合仿真提出了有力的挑战。这两种仿真主导地位之争进行了近十年。1978年第一台全数字实时仿真计算机AD10问世(美国ADI公司研制)。这种基于并行处理原理,采用MIMD(指令多数据流)及变字长结构的数字计算机在处理集中参数系统仿真方面显示出优越的实时仿真性能,数字仿真逐渐成为计算机仿真的主流。

20世纪80年代数字仿真技术迅速发展,带动了仿真方法学、并行仿真技术、仿真算法、仿真软件技术的发展,计算机仿真的应用领域不断拓宽,形成了计算机仿真的第三个浪潮。

我国在20世纪60年代开始了模拟计算机仿真的研究工作,1965年12月由北京计算机一厂(原北京无线电制造厂)生产的DMJ-3型模拟计算机,可解不高于20阶的线性或非线性微

分方程,对我国的系统仿真研究起过重要作用。

20世纪70年代后,我国开始进行数字仿真、数模混合仿真的研究工作。80年代我国在计算机仿真领域取得了较大的进展,高性能仿真计算机和各类仿真器陆续问世并得到广泛应用。例如:中国国防科技大学于1985年研制成功的银河仿真计算机YHF-1,在功能上达到了AD10仿真计算机的水平。另外我国在高性能仿真工作站、小巨型仿真计算机、一体化仿真软件、人工智能仿真等方面都取得了不少研究成果。

同时,我国在仿真器的研制和应用方面也取得了迅速的进展。1983年研制成功歼6飞行仿真器,1988年研制成功地地对地导弹发射训练仿真器,轮机驾驶训练仿真器、汽车驾驶训练仿真器、机车驾驶及运行仿真器、石油化工培训仿真器、火电和核电培训仿真器等也相继研制成功。这些仿真器的研制成功,不仅缩短了高性能装备的研制周期,而且降低了培训技术人员的费用,节省能源,及时地为我国培养了一批急需的技术人员。

90年代到现在,国内外在计算机仿真学科取得了突飞猛进的发展,科学家们在计算机分布式仿真、计算机虚拟仿真、计算机智能仿真等技术领域的研究工作不断深入,推动了计算机仿真学科的不断发展。

0.2 计算机仿真的应用领域及特点

计算机技术的迅猛发展,则为仿真提供了强有力的手段和工具。因此,计算机仿真在仿真中占有越来越重要的地位。其应用领域有以下几个方面。

(1) 船舶工业

在船舶动力领域,应用数字仿真和半物仿真,指导舰船动力系统的论证、设计、试验等方面发挥了重要作用,是船舶动力装置设计、试验、制造不可缺少的、重要的方法和手段。

(2) 航空与航天工业

飞行器设计中的三级仿真体系:纯数学模拟(软件)、半实物模拟、实物模拟或模拟飞行实验。

飞行员及宇航员训练用飞行仿真模拟器。

(3) 电力工业

电力系统动态模型实验:电力系统负荷分配、瞬态稳定性以及最优潮流控制等。发电厂、变电站操作人员培训模拟系统。

(4) 原子能工业

模拟核反应堆。

核电站仿真器用来训练操作人员以及研究异常故障的排除处理。

(5) 石油、化工及冶金工业

模拟(6)非工程领域

医学、社会学、宏观经济与商业策略的研究。

由以上可知,仿真从领域的覆盖面上已差不多包括现代社会的各个领域(能源、交通、航空、航天、冶金、化工、生态、环境,以及人口、经济运行、金融运作等)。从各个领域中的“纵向”来看:设计阶段参数优化、动态特性、控制系统配置等;工业性试验阶段(放大的理论校核、模型的验证与完善等);整个系统的调试阶段用仿真来提供调整的数据,避免做大量不可能或没必要的实验,大大缩短调试过程,使设备及早投入运行;系统运行阶段(故障诊断、事故预报、预测性维修等);人员培训(各类不同的仿真培训装置)等;都需要建立数学模型进行仿真研究与试验。

仿真技术得以发展的主要原因是它具有经济性、安全性、快捷性等特点,这些特性带来了重大的社会和经济效益。

(1) 经济性

大型、复杂系统直接实验是十分昂贵的,如:空间飞行器的一次飞行实验的成本约在1亿美元左右,而采用仿真实验仅需其成本的1/10~1/5,而且设备可以重复使用。

(2) 安全性

某些系统(如载人飞行器、核电装置等),直接实验往往会有很大的危险,甚至是不允许的,而采用仿真实验可以有效降低危险程度,对系统的研究起到保障作用。

(3) 快捷性

提高设计效率:比如电路设计,服装设计等等。

(4) 具有优化设计和预测的特殊功能

对一些真实系统进行结构和参数的优化设计是非常困难的,这时仿真可以发挥它特殊的优化设计功能。

在非工程系统中(如社会、管理、经济等系统),由于其规模及复杂程度巨大,直接实验几乎不可能,这时通过仿真技术的应用可以获得对系统的某种超前认识。

随着人们对物理过程理解的不断深入、计算机软件和硬件的发展,数模和仿真技术必将不断细化、深化,其发展趋势有如下几个方面。

(1) 硬件方面:基于多CPU并行处理技术的全数字仿真将有效提高仿真系统的速度,大大增强数字仿真的实时性。

(2) 应用软件方面:直接面向用户的数字仿真软件不断推陈出新,各种专家系统与智能化技术将更深入地应用于仿真软件开发之中,使得在人机界面、结果输出、综合评判等方面达到更理想的境界。

(3) 分布式数字仿真:充分利用网络技术,协调合作,投资少,效果好。

(4) 虚拟现实技术:综合了计算机图形技术、多媒体技术、传感器技术、显示技术以及仿真技术等多学科,使人置身于真实环境之中。

0.3 船舶动力装置仿真国内外发展概况

计算机仿真用于船舶动力装置研究,始于20世纪70年代初期,国外开始舰船动力系统的仿真研究。随着计算机技术的应用,20世纪70年代末开始进行数字仿真和半实物仿真,并在指导舰船动力系统的论证、设计、试验等方面发挥了重要作用,是船舶动力装置设计、试验、制造不可缺少的、重要的方法和手段。美国的海军研究与发展中心、德国的MTU公司、英国的Yard公司、法国的ALSTOM公司都有专门从事舰船动力系统仿真研究的机构。他们的研究领域主要有两个方面:一是数字仿真,主要研究动力系统的动态匹配性能,以及控制系统的参数设定对系统动态性能的影响;二是研制训练模拟器,主要是训练舰员和控制系统的实际操作者。

在20世纪70年代,C. J. Rubis对一艘由带调距桨的柴燃联合动力装置(CODAG)驱动的单架驱逐舰进行了正车稳定工况和加速工况动力特性的仿真研究,提出了螺距/转速的组合控制思想。Rubis针对CODAG的舰艇仿真提出了动力学模型。同时,R. S. Benson和Ernst E. Streit等又分别对增压柴油机的仿真作了进一步的研究。随后R. V. Tompson针对一艘扫雷艇研究了由柴油机带定距桨推进系统的控制策略。1982年,Rubis又著文对燃气轮机推进舰艇的仿真提出了全面的观点。

1984年,美国密歇根大学的J. B. Woodward教授和R. G. Latorre教授对船用增压柴油机的瞬态仿真建模提出了新的观点。他们在前人的基础上,利用准稳态建模法(Quasi-steady)将四冲程柴油机模型用14个方程式来表示,其中包括16个变量和10个常量,并着重介绍了如何通过分析柴油机运行参数,来对容积效率、中冷器效率等5个量进行估值。同年他们根据热动力学和流体力学原理,并结合一些必要的经验公式,分别给出了二冲程和四冲程柴油机的各部分模型,更进一步地阐述了这种思想。

20世纪80年代后期,A. Fowler则对采用CODAG装置的护卫舰进行了仿真专项研究,着重研究了柴油机带调距桨的机动过程,给出了由起航到全速前进、全速前进到全速倒退(急停)、半速前进到全速前进三种情况下的仿真结果。其柴油机模型同样采用的是准稳态法。在该文中,A. Fowler还将用当时流行的ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)高级仿真语言写成的软件包仿真得出的结果,与用传统的混合计算机得出的结果进行比较,论证了使用这一语言进行仿真研究的可行性,标志着船舶推进装置仿真技术进入一个新的阶段。

20世纪90年代到至今,船舶推进装置的仿真研究更进一步发展。1996年,日本神户海事大学的Lan等又在Woodward的基础上将船用柴油机模型用7个经验公式,加上16个解析方程式来表示。在这个柴油机模型基础上,提出了一个新的柴油机电子调速器控制策略的设计方案。

国内的计算机仿真在船舶推进装置方面的应用始于20世纪80年代初。哈尔滨工程大

学、上海交通大学、海军论证中心、海军工程大学(原海军工程学院)、武汉理工大学(原武汉交通科技大学)等高校和研究单位都相继从不同侧面和角度开展研究工作,分别在船舶柴油机、船舶燃气轮机、船舶推进装置及控制系统设计、机舱自动化等方面开展了计算机仿真技术的应用研究,取得了较大的成果。

哈尔滨工程大学,在20世纪80年代,利用仿真技术在船舶燃气轮机、船舶柴油机、船舶汽轮机、船舶核动力装置及联合动力装置工作特性及仿真实验验证技术进行大量的研究工作。如对某舰 CODOG 切换过程进行非实时仿真,其仿真的结果与国外某公司提供的仿真结果基本一致;与此同时在国内首次利用仿真技术对先进循环蒸汽回注燃气轮机装置性能进行仿真分析,其仿真的结果与试验结果一致。在20世纪90年代,该校在国内首次对 CODAG 联合动力装置工作特性、控制策略进行仿真与实验验证研究,得到 CODAG 联合动力装置系统运行规律及控制器;同时对船用柴油机的控制系统、调速器、相继增压控制规律进行大量仿真研究与试验验证技术研究;在核动力装置仿真方面进行大量研发工作,成功研制国产首台核动力装置仿真模拟器。进入21世纪,该校又在国内首次利用仿真技术对先进循环燃气轮机湿压缩和化学回热燃气轮机性能进行仿真分析与试验验证;同时对 COGAG 联合动力装置工作特性、控制策略进行仿真研究,得到 COGAG 联合动力装置系统运行规律及控制器;研制出船用燃气轮机发电系统半物理仿真平台,对发电系统动态特性及控制策略进行研究;研制出船用柴油机半物理仿真平台,在该平台下开发出船用柴油机电子调速器及相继增压控制系统;研究开发出船舶蒸汽动力装置性能预测与评估分析仿真软件。

上海交通大学对船舶推进系统仿真技术进行大量研究。特别是在燃气轮机建模与仿真进行深入研究。20世纪80年代中期自行研制了第一台并行处理实时仿真机——多微机仿真系统(MMSS, Multiple Microcomputers Simulation Systems),使当时的计算机仿真工具得到了很大的改善,这套系统基本上能满足一般动力装置仿真研究的实时性要求。1994年,上海交通大学和上海船舶运输科学研究所联合开发了一个面向结构图的仿真软件 RTS,并成功地将其应用于推进装置监控系统的调试。

海军论证中心在20世纪80年代末期,完成对某舰 CODOG 控制的非实时仿真。在20世纪90年代,该中心对某舰的机桨匹配动态特性进行了仿真研究,又对某综合运输补给船的动力装置进行了动态仿真,对该舰推进装置建立了控制系统模型、柴油机模型、离合器及轴系模型、螺旋桨和船体直线运动模型,以及回转操纵运动模型。其中柴油机模型也是使用准稳态建模方法。利用开发的仿真软件对该舰的稳态性能、直线航行动态性能及机动性,以及回转机动性进行了预测、分析,并检验和评价了其柴油机动力系统的动态特性和可使用性。

20世纪90年代初期,上海船用柴油机研究所使用常规的柴油机特性资料建立了涡轮增压柴油机准动态数学模型,并使用该模型对一台 MTU20V956 柴油机带调距桨推进装置在无负荷控制和带负荷控制两种情况下进行了数字及混合计算机实时仿真,结果表明使用准动态模型进行仿真可以兼顾仿真的精度和速度。

武汉理工大学(原武汉交通科技大学),1994年底,研制成功国产首台远洋船舶轮机训练仿真器(WMS-1型),它由集控室、模拟机舱、驾控室和讲习室等4个训练舱室组成。包括模拟主机及推进装置、动力装置系统控制箱、船舶电站配电盘、集控台、驾控台及大型动态图形示教板等,并于1995年通过部级验收,投入训练使用。

由此可知,计算机仿真技术在船舶推进装置方面应用,对于我国新型船舶动力装置的优化设计、缩短船舶推进装置及控制系统实船的调试时间,新技术和新产品开发具有十分重要的作用。

0.4 船舶动力装置常用的仿真软件平台

仿真软件充分吸收了仿真方法学、计算机、网络、图形/图像、多媒体、软件工程、自动控制、人工智能等技术所取得的新成果,从而得到了很大的发展。自1955年第一个仿真软件问世以来,按照新技术出现的时间顺序,仿真软件的发展历程包括:程序编程阶段、仿真程序包及初级仿真语言、完善的商品化的高级仿真语言、一体化(局部智能化)建模与仿真环境、智能化建模与仿真环境以及支持分布交互仿真的综合仿真环境。

近几年可用于船舶动力装置仿真研究常用的仿真软件平台有以下几种。

1. MSC. EASY5

是一个基于图形的用来对动态系统进行建模、分析和设计的软件,其建模主要面向由微分方程、差分方程、代数方程及其方程组所描述的动态系统。模型直观地由基本的功能性模块组装而成,例如加法器、除法器,过滤器、积分器和特殊的系统级部件如阀、执行器、热交换器、传动装置、离合器、发动机、气体动力模型、飞行动力模型等很多部件。在稳态分析方面,MSC. EASY5提供了强大的稳态搜索工具,并且支持高度非线性模型。采用专门针对非线性系统设计的Newton Raphson迭代方法,MSC. EASY5的稳态分析可以在几秒钟内计算出结果,而无需使用动态仿真耗时几小时来积分求解稳态值。在动态分析方面,MSC. EASY5仿真分析工具包包含了波音公司提供的一整套针对不同类型问题最优化的数值计算方法,在解决与实际问题的复杂数值计算方面,比其他工具有明显的优势。与其他软件工具相比在处理复杂非线性问题方面运行时间少两个数量级。它是一个可用于燃气轮机、柴油机系统仿真分析的专业仿真软件平台。

2. Matlab/Simulink

MATLAB具有强大的数值计算能力,包含各种工具箱,其程序不能脱离MATLAB环境而运行,所以严格讲,MATLAB不是一种计算机语言,而是一种高级的科学分析与计算软件。Simulink是MATLAB最重要的组件之一,它提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环

境。在该环境中,无需大量书写程序,而只需要通过简单直观的鼠标操作,就可构造出复杂的系统。是实现动态系统建模、仿真和分析的一个软件包,被广泛应用于线性系统、非线性系统、数字控制及数字信号处理的建模和仿真中。

3. GPS

是由普惠公司开发的燃气轮机仿真程序的简称。是基于非线性模块化建模环境下的仿真程序。这种仿真程序可以对任何型号的燃气轮机进行静态与动态仿真建模。GPS 是一个功能强大的性能预测与非设计分析工具。

4. MODELICA 语言

是面向对象的物理系统建模语言,适用于多领域的大型复杂系统的建模仿真。MODELICA 通过代数和微分方程模拟物理系统,实现了无因果建模;可以自动产生高效的代码,快捷地实现模型间的通信,并且真正实现了模型的再利用,提高了建模效率。同时,MODELICA 支持非连续系统和离散事件仿真,在系统建模和仿真方面都用面向对象的系统分析方法和程序设计思想。从建模到仿真实验和数据处理,更贴近人的思维方式,实现了多领域复杂系统的高效建模和仿真。

5. SIMUWORKS

是我国自主研发的仿真软件。它是为大型科学计算、复杂系统动态特性建模研究、过程仿真培训、系统优化设计与调试、故障诊断与专家系统等,提供通用的、一体化的、全过程支撑的、基于微机环境的开发与运行支撑平台。采用了动态内存机器码生成技术、分布式实时数据库技术和面向对象的图形化建模方法,在仿真领域处于国内领先水平。它主要用于能源、电力、化工、航空航天、国防军事、经济等研究领域,既可用于科研院所的科学研究,也可用于实际工程项目。武汉理工大学系统仿真与控制中心,成功的运用 SIMUWORKS 软件建立了多套船舶动力仿真系统。

第1章 系统仿真的基本概念与数学建模

1.1 概述

仿真的重要特点是实验性。一个具体的物理系统可以用它本身或其模型进行实验,也可以用有效表示一个系统某些方面性能的近似模型进行实验。下面通过系统仿真实例,来理解系统仿真的概念。

例如一台安装在弹性支撑上的柴油发电机组,它受到自己工作中所造成的干扰力 f 的作用,在带有阻尼的减振器上产生振动。为了研究该振动特性,将该系统用有效的近似物理模型代替,进行振动特性的物理或计算机仿真实验研究。近似物理模型如下:柴油发电机组可利用具有一定的质量物体代替,阻尼的减振器可用弹簧常数为 K 的弹簧支撑和阻尼系数为 D 的阻尼油缸代替,组成图1.1柴油机减振系统物理模型,利用这个物理模型进行试验研究,观测在某个激振力 $f(t)$ 下,由弹簧常数为 K 的弹簧支撑,阻尼油缸阻尼系数为 D ,质量为 M 的物体运动规律 $x(t)$,这种仿真称为物理仿真。

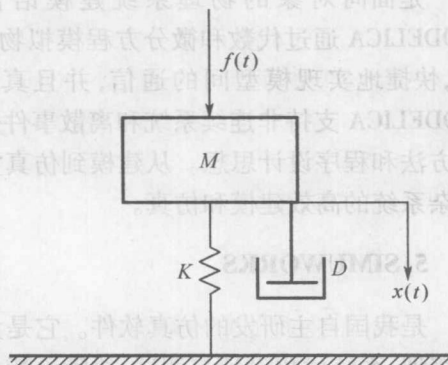


图1.1 柴油机减振系统物理模型

在图1.1物理模型中,对质量为 M 的物体进行受力分析可知,该系统受力:激振力 $f(t)$ 、弹簧支撑力 Kx 、阻尼力 $D\dot{x}$,忽略重力,由牛顿第二定律,可写出它的运动方程,即为该系统的数学模型

$$M\ddot{x}(t) + D\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (1.1)$$

式中 $\ddot{x}(t)$ ——物体运动位移 $x(t)$ 对时间的二阶导数;

$\dot{x}(t)$ ——物体运动位移 $x(t)$ 对时间的一阶导数。

只要给出激振力随时间的变化规律 $f(t)$,求解微分方程(1.1),可得到柴油机振动的运动规律 $x(t)$ 。

如果利用计算机对(1.1)进行求解,需要通过仿真算法将数学模型转换为计算机能运行的仿真模型。如果 $f(t)$ 为零,即为系统自振规律研究,可将(1.1)式写为

$$\ddot{x}(t) = -\frac{D}{M}\dot{x}(t) - \frac{K}{M}x(t) \quad (1.2)$$

由于方程(1.2)式为二阶微分方程,需积分两次,可求出运动位移 $x(t)$ 。

利用仿真软件平台 Simulink 建立系统仿真模型,其模型如图 1.2 所示。

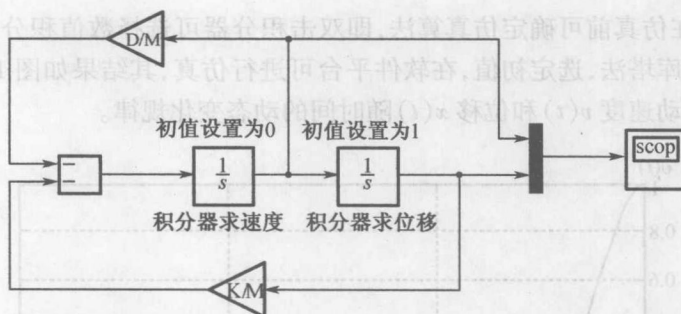
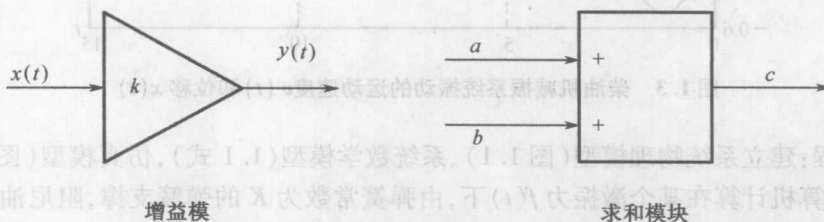


图 1.2 柴油机减震系统仿真模型

增益模块:使输入信号乘以一个常数并输出,可用代数表达式表示为

$$y(t) = kx(t)$$



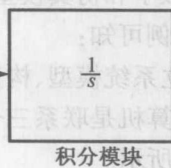
求和模块:对两个或多个信号进行求和运算。可用代数表达式表示为

$$c = a + b$$

本例

$$c = \ddot{x}(t), a = -\frac{D}{M}\dot{x}(t), b = -\frac{K}{M}x(t)$$

积分模块:计算输入信号从起始时间到当前时刻对时间的积分。



代表如下微分方程:

$$y(t) = y(t_0) + \int_{t_0}^t x(\tau) d\tau$$

输出模块:将计算结果输出到输出模块 scop,由图 1.2 可知,本例将求出的速度和位移输出到输出模块 scop。

上述模型中,在仿真前可确定仿真算法,即双击积分器可选择数值积分方法,该软件默认的方法为四阶龙格库塔法,选定初值,在软件平台可进行仿真,其结果如图 1.3 所示。柴油机减振系统振动的运动速度 $v(t)$ 和位移 $x(t)$ 随时间的动态变化规律。

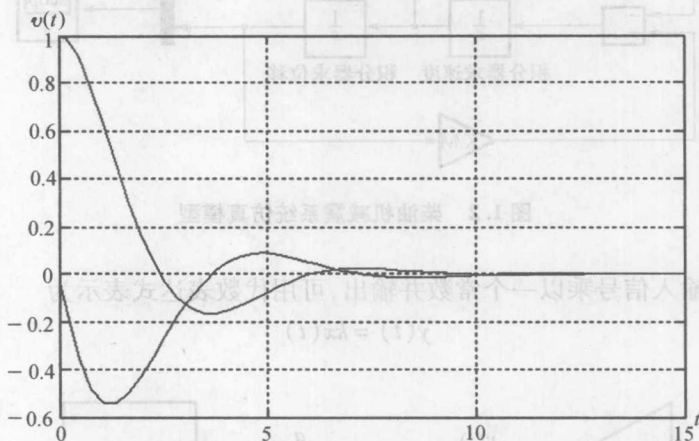


图 1.3 柴油机减振系统振动的运动速度 $v(t)$ 和位移 $x(t)$

上述过程:建立系统物理模型(图 1.1)、系统数学模型(1.1 式),仿真模型(图 1.2),选择算法,利用计算机计算在某个激振力 $f(t)$ 下,由弹簧常数为 K 的弹簧支撑,阻尼油缸阻尼系数为 D 的质量为 M 的物体运动规律 $x(t)$,这种试验研究称为计算机仿真。

1.2 系统仿真基本概念

仿真:是利用物理的或数学的模型来类比模仿现实过程,以寻求对真实过程的认识。它所遵循的基本原则是相似性原理。

计算机仿真:是基于所建立的系统数学和仿真模型,利用计算机对系统进行分析与研究。由计算机仿真定义以及上述仿真实例可知:

计算机仿真包含三个基本活动:建立系统模型、构造仿真模型和进行仿真实验。

计算机仿真三要素:系统、模型及计算机是联系三个活动的计算机仿真三要素。

如图 1.4 计算机仿真三要素的关系所示。

系统:指具有某些特定功能、相互联系、相互作用的实体的有机组合。如安装在弹性支撑上的柴油发电机组可看成系统。不管是复杂系统还是简单系统,都可总结出描述系统的三个特性,即实体、属性、活动。



图 1.4 计算机仿真三要素的关系

模型:是对现实系统有关结构信息和行为的某种形式的描述,是对系统的特征与变化规律的一种定量抽象,是人们认识事物的一种手段或工具。

模型分为物理模型、数学模型、仿真模型。

物理模型:PM(physitic model)指不以人的意志为转移的客观存在的实体,如图 1.1 柴油机减振系统物理模型;飞行器研制中的飞行模型;船舶制造中的船舶模型等。

数学模型:MM(mathematic model)是采用数学语言对系统或实体内在的运动规律及与外部的作用关系进行抽象和对其本质特征进行的描述,采用数学方程等描述方式,这种描述与原系统相比能够保持运动规律、信息传递的一致性或相似性。如连续系统的数学模型主要采用微分方程(如方程 1-1 为柴油机减振系统的数学模型)或微分方程组来表征;而离散系统的数学模型主要采用差分方程或差分方程组;离散事件系统用概率分布、排队论等来描述。模型的详细程度必须与研究的目标相匹配。

仿真模型:SM(simulaxion model)是将系统的数学模型通过数学仿真算法转换成为能在计算机上运行的数字模型,即将数学模型离散化,建立相应的递推公式,便于进行迭代运算,仿真模型是各种仿真算法的有机结合,完成模型的结算和信息处理。不同类型的数学模型有不同的仿真算法,如集中参数连续系统常用的仿真算法有数值积分法、离散相似法等,分布参数连续系统常用的仿真算法是有限差分法,离散事件常用的仿真算法有时间调度、活动扫描法等。柴油机减振系统数学模型,采用的是二阶微分方程组来描述。而建立仿真模型,首先要将原来的二阶微分方程转换为等效的一阶微分方程,根据仿真任务的不同需要,选择不同的积分算法转换为一组差分方程,进行数值求解。这个过程可用软件平台来完成,图 1.2 柴油机减振系统仿真模型。如果用于分析计算、参数选择,可采用精度高,计算稳定但计算时间长的 4 阶龙格-库塔法,进行非时实仿真。如果用于实时性要求高的硬件在回路(HL)仿真或人在回路(MIL)仿真,则可采用欧拉积分法或梯形积分法,在当前计算速度已经不是主要问题的前提下,经过试验,可以选择计算精度较高、计算稳定性好而费时较多的其他积分算法,如二阶阿当姆斯算法等。

计算机仿真的基本步骤:

包括三个基本的内容:建模、仿真实验及结果分析,如图 1.5 所示。

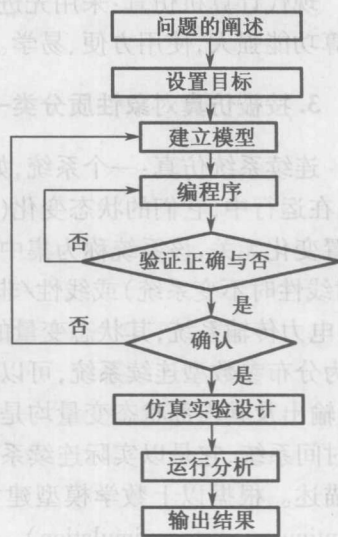


图 1.5 计算机仿真流程