



安徽省高等学校“十一五”省级规划教材

机械系统 仿真 原理与应用

翟 华◎主 编
高 洪◎副主编

合肥工业大学出版社

安徽省高等学校“十一五”省级规划教材

机械系统仿真原理与应用

主 编 翟 华

副主编 高 洪

合肥工业大学出版社

内 容 提 要

本书是机械设计制造及其自动化专业课程《机械系统仿真原理与应用》教学参考书,主要内容是机械系统的建模与计算机仿真的基本原理、基本方法。全书共十章:第一章概论,介绍系统的概念,动态设计的意义和方法,仿真的概念和仿真技术的全过程等;第二章主要介绍了机械系统仿真中常用的几种数学模型;第三章主要介绍了机械连续系统数字仿真中常用的方法,如数值积分法、离散相似法、采样系统数字仿真和分布参数系统仿真算法;第四章介绍了复杂机械连续系统数学模型的建立的方法——键合图法原理及其应用;第五章介绍了机械离散事件系统仿真数学基础,主要包括随机数的产生和检验;第六章介绍了机械离散事件系统仿真的一般方法,并介绍几种典型的离散事件系统仿真过程;第七章主要介绍了机械连续系统应用实例——直动式溢流阀数字仿真过程;第八章介绍了离散事件系统中典型的单队列单服务设备系统仿真过程;第九章介绍了 Matlab 软件在机械连续系统仿真中的典型应用;第十章介绍了 6-3-3 并联机器人工作空间仿真研究。

本书内容充实,重点突出,循序渐进,系统性强,富于启发性,可作为高等工科院校的机械设计制造及其自动化专业高年级本科生和机械工程学科相关专业研究生教材,也可供广大工程技术人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械系统仿真原理与应用/翟华主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2008.6

ISBN 978-7-81093-730-6

I. 机… II. 翟… III. 机械系统—系统仿真 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 029215 号

机械系统仿真原理与应用

主 编	翟 华	副 主 编	高 洪	责任编辑	章 建
出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2008 年 6 月第 1 版		
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2008 年 7 月第 1 次印刷		
邮 编	230009	开 本	710 毫米×1000 毫米 1/16		
电 话	总编室:0551-2903038	印 张	15		
	发行部:0551-2903198	字 数	210 千字		
网 址	www.hfutpress.com.cn	印 刷	合肥创新印务有限公司		
E-mail	press@hfutpress.com.cn	发 行	全国新华书店		

ISBN 978-7-81093-730-6

定价: 25.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

前 言

系统仿真是利用系统模型对实际系统进行实验研究的过程。在实际科学研究中,为减少实验次数,或有目的地进行实验,或系统实验比较困难甚至无法实现时,系统仿真技术就成为一项有利的工具。它是一门综合性很强的新兴技术学科,涉及系统分析、模型建立、控制理论和计算方法等诸多领域。近年来,系统仿真技术已逐步发展成为机械工程学科中重要研究方法之一,大量的理论和工程实践研究采用此技术。

本书结合编者多年来本门课程的教学实践,介绍了机械系统仿真的基本原理和应用,注重理论和实践相结合,着重培养读者的系统动态设计观念。在系统仿真中常用数学方法的阐述中,注重拓宽读者的知识面,对偏难偏深的数学知识不过多介绍。

书中还介绍了采用键合图法构建机械连续系统动力学模型的原理及方法。键合图法是仿真模型建立方法中的一种重要方法,它可以研究多能源综合机电系统,广泛应用在机械产品、液压设备和汽车等机械产品的动力学研究中,并通过直动式溢流阀的仿真实例,使读者掌握该方法的使用过程。

机械离散系统仿真的原理和应用过程是机械系统仿真研究中的又一个重要分支。书中在介绍离散系统仿真一般方法的基础上,通过单队列单服务设备系统仿真实例,使读者了解具体离散事件系统问题的仿真过程。

考虑到 Matlab 软件已成为系统仿真中应用最广的工具软件,书中介绍了 Matlab 软件中常用方法,通过工程实例中的每一步骤的介绍,使读者既了解 Matlab 软件的程序命令,又了解了该命令的使用场合。最后以编者在科研工作中的研究成果为例,加强读者对综合应用键合图法、状态变量法、

Matlab 软件等仿真方法的能力。

本书第一章至第九章由合肥工业大学机械与汽车工程学院翟华编写，第十章由安徽工程科技学院机械系高洪编写。在编写过程中，引用了不少学者的文献资料和数据，在此谨致诚挚的感谢。对本书审阅的是合肥工业大学的韩江教授和黄康教授，他们对本书编写工作提出了许多宝贵意见。本书的出版还得到了合肥工业大学出版社的领导和责任编辑的支持和帮助。2008 年 6 月，本书被评为安徽省高等学校“十一五”省级规划教材。

由于编者水平有限，时间仓促，难免存在缺点和错误，欢迎批评指正。

编 者
于合肥工业大学

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 系统的定义和分类	(2)
1.3 研究机械系统动态特性和动态设计的意义	(4)
1.4 系统模型	(8)
1.5 系统仿真	(11)
第 2 章 机械连续系统仿真数学基础	(15)
2.1 机械系统中的基本元件	(15)
2.2 微分方程数学模型	(18)
2.3 传递函数数学模型	(18)
2.4 状态空间数学模型	(19)
第 3 章 机械连续系统数字仿真	(36)
3.1 数值积分法	(36)
3.2 离散相似法	(44)
3.3 采样控制系统的仿真	(58)
3.4 分布参数系统仿真算法	(64)
第 4 章 键合图法理论及应用	(72)
4.1 键合图的基本概念	(72)
4.2 元件的键图模型	(78)

4.3	系统键合图的绘制	(97)
4.4	由键合图列写状态方程	(104)
第5章 机械离散事件系统仿真数学基础		(110)
5.1	随机变量及其概率分布	(110)
5.2	仿真中常用的概率分布	(113)
5.3	随机数的产生	(119)
5.4	随机数的检验	(126)
5.5	随机数概率分布的估计方法	(131)
第6章 离散事件系统仿真原理		(136)
6.1	离散事件系统基本要素	(136)
6.2	离散事件仿真模型的结构	(137)
6.3	时间推进法	(139)
6.4	随机网络仿真	(140)
6.5	排队系统仿真	(143)
第7章 连续系统仿真应用——直动式溢流阀特性系统仿真实验		(154)
7.1	问题的描述	(154)
7.2	系统的键图	(155)
7.3	状态方程的建立	(156)
7.4	确定各参量值、输入量值以及状态变量的初始值	(157)
7.5	实验参考 C 语言源程序	(161)
7.6	实验要求	(168)
7.7	实验报告	(168)
第8章 离散事件系统仿真应用——单服务员单队列系统仿真实验 ...		(170)
8.1	单服务员单队列系统仿真程序设计	(170)
8.2	参考 C 语言源程序	(173)
8.3	实验要求及实验报告	(179)

第 9 章	Matlab 软件在机械系统仿真中的应用	(181)
9.1	Matlab 软件概况	(181)
9.2	Matlab 软件的常用方法	(183)
9.3	Matlab 软件在机械系统仿真中的应用	(189)
9.4	由 SIMULINK 建立仿真模型	(195)
9.5	M 文件的建立和使用	(202)
9.6	应用 Matlab 研究系统动态特性实例	(211)
第 10 章	6-3-3 并联机器人工作空间仿真研究	(216)
10.1	6-3-3 并联机器人	(216)
10.2	6-3-3 并联机器人的工作空间	(218)
10.3	6-3-3 并联机构工作空间分析建模	(219)
10.4	6-3-3 并联机构工作空间分析仿真的程序实现	(224)
10.5	仿真分析	(227)
10.6	参考 M 文件	(228)
参考文献		(231)

第 1 章 概 论

1.1 引 言

系统仿真是利用系统模型对实际系统进行实验研究的过程。当在实际科学研究中,为减少实验次数,或有目的地进行实验,或系统实验比较困难甚至无法实现时,系统仿真技术就成为一项有利的工具。系统仿真随着科学的进步,是近 30 年发展起来的综合性很强的新兴技术学科,涉及系统分析、模型建立、控制理论和计算方法等诸多领域。

随着计算机科学的发展,计算机仿真技术也迅速发展起来。在计算方面,计算机计算的特点是精度高、重复性好、通用性强、价格便宜、速度快,已逐渐成为科学研究的重要工具,仿真技术借助计算机科学的发展迅速发展成熟,在许多科学领域出现了专用计算机仿真程序和仿真语言,解决了诸多生产管理、工程技术、军事研究、科学实验、国民经济、重大决策以及在社会科学和自然科学等领域的问题。

本章主要说明有关系统、系统模型、系统仿真、工程系统和动态设计的相关概念以及系统仿真的相应步骤,以使读者对系统仿真有一个基本了解,为进一步阅读后续各章打下基础。

1.2 系统的定义和分类

1.2.1 系统的定义和特点

系统一词已被广泛应用于各种领域,但它在各个不同的领域内含义是不尽相同的。这里,针对系统仿真几乎可应用于任何科学研究问题,恩格斯对“系统”的定义是:具有特定功能的,彼此相互联系的若干要素的有机整体。这是一个概念面很宽的定义。

系统的特点在于:

第一,系统的整体性。系统是由许多要素组成,各个组成部分是不可分割的。正如人体是由头、身躯、四肢等各部分组成一样,如果把这些部分各自拆开,那么就不称其为人了。

第二,系统的相关性。系统内部各个要素之间以一定规律相互联系着,它们的特定关系形成了具有特定功能的系统。例如一个大学系统,它由院、系、教务部门、后勤部门、公用计算中心、公用实验室组成,它们相互间形成一个具有特定关系的培养人才和学校系统。

第三,系统的功能性。系统总是体现出各种各样的功能,有些系统功能被人们所认知,有些系统的功能尚有待人们去发现,有些系统的功能需要人们去设计和制造。

相应的,认识和理解系统应从以下角度去研究:

第一,要以客观的观点认识系统。系统是客观存在的。系统是认识主体对客体的一个客观划分,是人们认识客观世界的手段和重要工具。认识和研究系统应全面了解系统的构成,认清构成系统的各主要成分,不要遗漏任何一个系统构成要素。要以全面、细致的观点观察研究系统,不能以偏概全,否则会导致仅仅注意了系统的局部,而忽视了系统的整体,甚至会导致错误地认识系统。

第二,要以运动的观点认识系统。系统只有随时间的运动才能发挥系统所具有的功能,系统各要素间的联系才能最终体现出来。如果以静止的观点

研究系统,势必不能正确认识系统中固有的、内在的联系,不能正确认识系统的最终功能。因此,认识系统要求带有运动的观点。

第三,要以功能的观点认识系统。人们只注重研究对自身有用的功能,对其无关的功能是不关心的。相同的系统在不同的研究者面前有不一样的功能,因为不同的研究者采取的研究方法、研究态度和价值取向不尽相同,得到的最终结论自然也就大相径庭。

1.2.2 系统的分类

系统可以根据人为参与的情况分为自然系统和人造系统。完全由自然界本身构成的系统称为自然系统,如海洋系统、太阳系统、气象系统、长江水力系统、生态系统等等;由人工参与的系统称为人造系统,如各种工程系统、社会系统、贸易系统、政府系统,以及学校、仓储系统等都是人造系统。

人造系统,往往是为了满足某种特定功能,或者达到一定经济利益而由人们在生产生活中逐渐形成的。例如,我们最熟悉的食堂系统,其目标是满足顾客用餐需求,同时为达到赢利的目的。食堂里的每位员工和每位顾客都是这个系统中的元素,每个元素又都有各自的特点和特性。从姓名、编号、性别、年龄、服务种类和服务技术水平等特征,可以区分出不同的食堂服务员。同时从进入食堂的时刻、来自不同的地域、年龄、饥饿程度、携带的资金数等等,可以决定在食堂消费的每位顾客。食堂服务员之间是各不相同的,但他们也有一个共同点,即他们都要为顾客提供可口的饭菜。顾客也是各有各的个性,但也存在一个基本共同之处,即他们都是来就餐的,是服务对象。食堂系统中这两大类元素之间是服务与被服务关系,食堂服务员之间存在一定的关系,如轮流为顾客服务的关系;顾客之间也存在着一定关系,如先来者先就餐。因此,可以说食堂系统是一个典型的人造系统。

系统中被研究的对象或元素称为实体,如服务员、顾客、机器等。实体的特征称为属性,如顾客等待服务的优先权、服务员的服务速度等。实体间的相互作用被称为系统的活动过程,也称为系统变化。因此,活动是指一特定长度的时间周期内引起系统变化的过程,其中包含有时间的概念。例如,对银行系统来说,储户是实体,存折上的金额是顾客的属性之一;而储户到达银行、接受服务、离开银行则是一个活动,存取款的过程也是一个活动。

在任意给定时间,系统所有实体、属性和活动的情况信息之集合称为系统在该时刻的状态,能表示系统状态的变量称为状态变量。系统有许多可能的状态,如果按系统中起主导作用的状态变化是否连续,可以将系统分为连续和离散两种系统。

一、连续系统

若一个系统的状态随时间连续变化,就称为连续系统。这类系统的动态特性可以用微分方程或一组状态方程来描述,也可以用差分方程或一组离散状态方程来描述。究竟采用哪一种,这取决于研究者是对系统状态随时间连续变化的整个过程都感兴趣,或者是所能得到的数据资料仅仅限于某些时间点。例如,在有些生产过程中常常采用巡回检测仪表,这些仪表有各种检测频率(如每秒 100 次,1000 次等等)。这时,被控制量即使是连续变化的,但是被测到的数据却是间断的。还有,在一些社会经济系统中,往往所能得到的统计数据也只是按月、季度,甚至按年的。尽管这类系统实际的状态变化是连续的,但是也只能用差分方程和(或)离散状态方程来描述。

二、离散系统

系统的状态变化只在时间的离散时刻发生,状态值又是随机的,这样的系统称为离散系统。在工程和计划管理中有许多这类系统,例如:排队系统、库存系统、通信系统、计算机系统、交通管理系统等等。这些系统一般规模庞大、结构复杂,很难用解析法求得结果,因此,一般采用计算机仿真技术来进行系统分析设计。

在实际中,完全是连续或离散系统是很少见的,大多数系统中既有连续的成分也有离散的成分,不过对大多数系统而言,在某种变化类型占优势时,我们就把它归入这一类系统。

1.3 研究机械系统动态特性和动态设计的意义

1.3.1 研究机械系统动态特性的意义

系统动态特性是指系统随时间变化的工作状态,它客观、真实地反映了

系统每个瞬时的状况,引起这种工作状态变化的原因是多方面的,如组成系统的元件工作状态的变化,外界载荷的变化,干扰因素的影响等等,如果系统的动态特性不好,在动态过程中的工作情况就不能满足要求,甚至无法正常工作。机械系统在工作中的振动、冲击、噪声、加工精度和运动精度不高等等,往往是由于系统的动态特性不良所致,对这些品质的研究,如果仅限于静态标准,就不可能达到很高的要求。

随着技术进步和科技的发展,机械系统逐渐综合利用传感器、机械、电子、计算机、控制等各种相关技术优势,扬长补短,实现机械系统优化的效果,使机电产品性能、功能达到应用目标,取得了显著的社会效益和经济效益。因此研究机械系统动态特性的意义在于:

第一,提高机械系统的精度。机械系统主要由动力系统、执行系统、传动系统、操纵和控制系统等构成。系统的环节越多,系统的之间的机械磨损、配合间隙及受力变形等引起的误差越大,通过研究系统构成,系统间的联系,找到影响误差的主要因素,采用一定的手段加以改进,从而使系统误差不断减小,精度逐步提高。

第二,提高机械系统多功能要求。现代高新技术的引入可以使机械产品具有多种复合功能,如加工中心能在一次装夹中完成要由多台普通机床才能实现的多道工序。功能的增加,意味着结构的改变,如何使机械系统能同时满足多种功能的需要,必须要研究多种工况下的机械系统动态特性,实现多工况下均能满足要求的机械系统。

第三,节约能源,促进环保。通过机械系统动态特性研究,完善系统结构设计,设计研究系统最佳控制模式,在满足系统功能的前提下,提高设备的能源利用率。如汽车轻量化设计,在不影响汽车载重量、汽车动力性能的情况下,能有效节约燃料的消耗。

第四,提高安全性、可靠性。通过研究系统动态特性,可以了解系统极限工作状态情况,为系统安全提供参考性意见。如6关节机器人的操作空间可以在计算机上仿真实现,为系统安全运行打下一定的基础。还可以通过系统动态特性,决定系统是否能安全可靠使用,为系统可靠性评价指标体系的建立提供了理论依据。



1.3.2 研究机械系统动态特性的常用方法

系统动态特性研究的内容与静态特性的研究完全不同,主要包括稳定性和过渡过程品质问题。系统如能在稳定状态遭受破坏之后能及时地恢复到新的稳定状态,这样的系统才可称为稳定系统。稳定是必须的。过渡过程品质是指系统偏离稳定状态的程度和恢复到新的稳定状态所需要的时间快慢,即系统的精度和快速性。因此研究机械系统的动态特性也就是研究系统的稳定性、快速性和精确性。研究机械系统动态特性常用方法有微分方程法,传递函数法,频率响应法和状态变量法。

运用微分方程法可以建立系统单输入单输出系统模型。对机械系统一般可以通过牛顿第二定律建立系统的力平衡方程,根据能量守恒定律建立能量方程。方程的建立主要针对系统的一对输入变量和输出变量。当方程中的系数为线性常数,则称系统为线性定常系统,对简单的线性微分方程,可以通过解微分方程求解相应的输出。该方法的主要优点是在时域内研究问题,研究问题直观,便于理解,但其缺点是方程建立需要专门知识,方程求解有时是不易实现的,方程只能研究一对变量,对多组变量的研究需要建立多个微分方程。

传递函数法也能建立系统的单输入单输出系统研究模型。在微分方程的基础上通过拉普拉斯变换,可以获得频域中的传递函数,传递函数计算相对时域中的微分方程的计算要容易,因此受到许多工程技术人员的青睐,已普遍运用在机械系统的稳定性分析、动态分析等场合。但是它也和微分方程法存在同样的问题,仅能求解方程和研究一对变量,对多组变量的研究需要建立多个传递函数,而且只能研究线性系统,对非线性系统需要通过在局部进行线性化才能运用。

频率响应法也称为频率特性分析法,是在传递函数分析法的基础上演变而来。这种方法建立在实验基础上,要求真实物理系统已经存在并且可以做实验,通过给定频率输入,测量系统输出,建立系统相应的频率响应方程,研究系统特性。这种方法简单实用,直观性好,但需要有真实系统进行实验才能获得,对小型系统可以采用,对大型系统不适用。同样这种方法仍然只限于单输入、单输出的系统,也只限于线性系统。

现在随着控制论的发展,仿真所依据的数学模型大多为状态方程,用状态方程研究系统动态特性的方法,称为状态变量法,也称状态空间法。状态方程依据系统的结构建立起的状态方程为基础,可以同时研究多个输入对系统的影响,也可以研究多个输出对系统的影响。由于采用数值积分法进行求解,使得系统研究不仅能反映时域结果,而且可以研究非线性系统。因此状态变量法拓宽了系统的动态特性的研究范围,可以是多输入、多输出系统,也可以是非线性系统,而且状态变量的初值不一定限于零。

1.3.3 机械系统动态设计的意义

已有的简单产品的机械设计主要采用静态设计方法,而现代产品设计需要运用动态设计方法。静态设计是根据设计任务书的指标要求,以类比或经验的方式进行简单的模仿设计,是建立在大致的、粗略的、近似的基础之上的方式。传统的静态设计认为外力 $\{F\}$ 与变形 $\{y\}$ 的关系为

$$\{F\} = [k]\{y\} \quad (1-1)$$

其中: $[k]$ ——表示系统刚度矩阵

动态设计则认为外力与响应的关系为

$$\{F\} = [k]\{y\} + [c]\{\dot{y}\} + [M]\{\ddot{y}\} \quad (1-2)$$

其中: $[c]$ ——表示系统阻尼矩阵

$[M]$ ——表示系统质量矩阵

由式(1-2)可见:

(1) 动态分析中,力与变形的关系由线性方程变成了二阶微分方程,引入了质量阵和阻尼阵;

(2) 动态方程的微分形式反映了力函数与响应函数随时间变化的特征,使结构分析从确定性分析领域进入了随机振动的结构分析中;

(3) 动态系统经常是一种耗散性系统,因此阻尼是动态设计的又一重要因素,它描述了结构振动过程中能量传递和衰减的性能;

(4) 在静态设计的许多情况下,结构变形只是动态设计第一阶模态的近似,也是由能量法求第一阶固有频率时选取静挠度的依据。

静态设计在考虑了一定的裕度后,可以应用于某些共振设计的场合,然

而动态设计法认为:结构振动的能量分配于各阶模态,每一阶振动模态表达着一定能量的平衡状态。因此,动态设计的本质就是模态设计,是寻求模态参数之间的最佳耦合,以便改善响应性能,提高结构寿命。静态设计的另一个特点是:五种强度理论都认为失效是由于材料超过某一弹性状态所致。因此,外力或内力的临界值是其关注的焦点。然而,从动态观点看,强度失效和疲劳断裂都是与整个载荷时间历程相关联的,外力的大小和频率及所有重要的高变应力都应作统计分析。

目前,解决大型自行式设计多依据静动态设计法,这种设计方法的特点是:通过动载系数 α 来保证设计的可靠性,它认为

$$\{F_T\} = \alpha \{F\} = \alpha [k] \{y\} = [k] \{y_T\} \quad (1-3)$$

所以
$$\{F\} = [k] \{y_T\} / \alpha$$

式中: F_T 与 y_T 表示动态的 F 与 y , $\alpha > 1$ 。

静动态设计本质上仍属于一种保守却不保险的静态设计。静动态设计的安全系数将载荷、材料寿命、应力分布,特别是应力集中全包括在一个系数 α 中,结果导致结构设计成为宏观保守与局部危险相结合的产物。

随着产品机械向大型化、高生产率、系列化发展,对其进行传统的静态结构分析和静态设计已满足不了工程实际要求,动态分析和动态设计已逐步被人们所重视。尤其是计算机仿真技术的发展,使大型、复杂结构动态设计成为可能,并将逐步完善,进而取代单纯静态设计。

1.4 系统模型

研究系统的目的是为了了解系统各个组成部分间要素、关系,或者为了预示系统在一种新的策略下的新功能。然而对这种系统进行实际实验也许是不可能的,也许这个系统实际不存在,或正在设计之中,或研究成本很大而效果差,或者会导致现有工作系统的破坏。

许多系统不具有实际实验的可能性,就需要按实际系统建立系统模型

(物理模型或数学模型)进行研究,利用模型实验研究的结果来推断实际系统的工作。模型是系统的另外一种表示,为了研究系统的目的而开发的,是系统内在联系及它与外界关系的一种描述。使用模型研究实际系统的方法叫做系统模拟或系统仿真。

建立系统模型的基本要求是:

1. 清晰性。一个大的系统由许多子系统组成,因此对应系统的模型也由许多子模型组成。相互耦合要少,结构尽可能清晰。

2. 功能性。模型的建立应与系统最终研究的功能有关。对同一个系统,模型不是唯一的,研究的目的不同,构建的模型也不一样。

3. 精密性。同一系统模型按其精密程度要求分许多级,对不同的工程,精密度要求不一样。对精密度要求低的系统,一些影响因素较小的环节可以忽略。但精密度要求高的系统,则必须将每一系统环节都容纳到模型中去。

4. 集合性。有时要尽量以一个大的实体考虑对一个系统实体的分割。

模型的分类方法很多,根据模型的表示方式简单地将模型分成物理模型和数学模型。

1.4.1 物理模型

物理模型又称实体模型,它是实际系统在尺寸上缩小或放大后的相似体,其系统构成和真实系统相似,描述问题的逼真感强。如建筑师做缩小比例的房子模型,称为“放样”,作为自己的设计方案的一种具体描述。一般对重大关键系统在具体实施前,如条件允许,尽可能建立和拟筹建真实系统相近的物理模型,以获得现场实际资料。

从相似理论的基本点出发,模型能正确地模拟原型系统的条件是:

1. 模型与原型几何相似。
2. 模型和原型的现象应属同一类的性质,可用同一物理关系或微分方程式描述。
3. 模型和原型方程中响应的同名物理量应相似。
4. 模型和原型的同名已定的相似准则在数值上应相等。
5. 模型与原型的初始条件和边界条件必须相似。
6. 模型材料尽量与原型相同,且性能稳定。