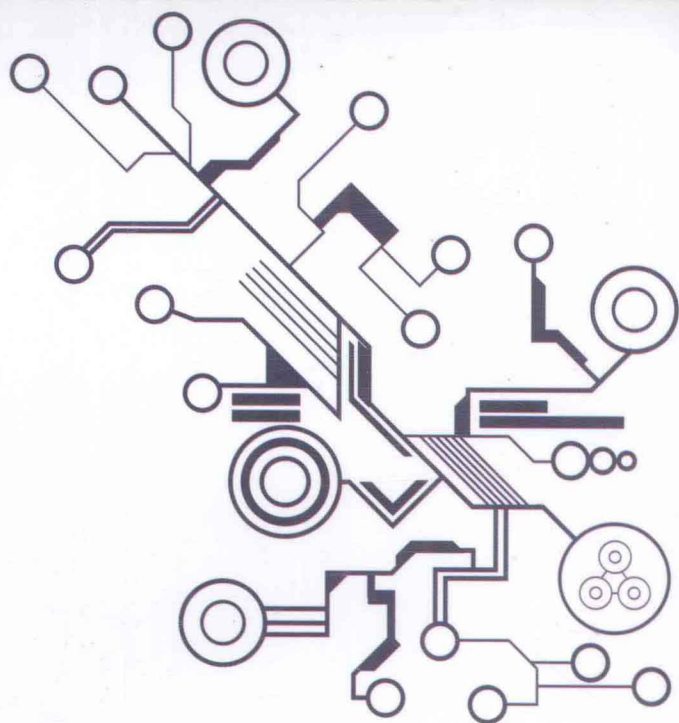




高钦和 马长林 著

液压系统动态特性 建模仿真技术及应用

YEYA XITONG DONGTAI TEXING
JIANMO FANGZHEN JISHU JI YINGYONG



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

液压系统动态特性建模仿真 技术及应用

高钦和 马长林 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书针对液压系统动态特性建模仿真问题,从基本原理、实现方法、技术应用3个层面展开论述。在介绍液压系统动态特性建模与仿真的基本原理和方法的基础上,概括了典型液压元件仿真模型的建立方法、常见仿真软件环境下实现液压系统动态特性仿真与优化的技术方法,给出了应用仿真技术解决实际问题的实例。

本书旨在为机械液压领域工程技术人员开展液压系统动态特性建模、仿真分析和优化等提供技术参考,为复杂机电液压系统仿真与控制等方面的研究提供借鉴,可作为高等院校相关专业的研究生、本科生学习的参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

液压系统动态特性建模仿真技术及应用/高钦和,马长林著. —北京:电子工业出版社,2013.9
ISBN 978-7-121-21467-7

I. ①液… II. ①高… ②马… III. ①液压系统—动态特性—系统建模②液压系统—动态特性—系统仿真 IV. ①TH137

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第215822号

策划编辑:曲 昕

责任编辑:桑 昀

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×980 1/16 印张:14.75 字数:352.2千字

印 次:2013年9月第1次印刷

印 数:3 000册 定价:48.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

由于液压传动在各类设备和系统中的应用广泛,对其性能的要求也越来越高。一个好的液压系统不仅应有良好的静态性能,而且还应具有良好的动态性能,这就需要应用仿真技术开展液压系统动态特性的分析和优化。应用仿真技术,技术人员可以在设计阶段就能预测和分析液压系统的动静态特性,从而缩短液压系统或元件的设计周期,避免因重复实验以及加工所带来的昂贵费用,还可以及早地认识到该系统在动态特性设计方面存在的薄弱环节并加以消除,提高系统的性能。

本书针对液压系统动态特性仿真问题,从基本原理、实现方法、技术应用 3 个层面展开论述。在介绍液压系统动态特性建模与仿真的基本原理和方法的基础上,概括了典型液压元件仿真模型的建立方法、常见仿真软件环境下实现液压系统动态特性仿真与优化的技术方法,给出了应用仿真技术解决实际问题的实例。本书在编写上注重内容的系统性与实用性的统一,在内容组织上注意将建模与仿真问题有机结合,建模方法、仿真软件与仿真实例紧密结合,有较强的实用性和参考价值。

全书共分为 7 章,第 1 章为绪论;第 2 章为液压系统动态特性建模与仿真基础,介绍了液压系统仿真涉及的基本理论与方法;第 3 章为液压元件的仿真建模;第 4 章为液压系统动态特性仿真与优化,分别从元件级和系统级论述了液压系统仿真实实现的技术方法;第 5 章为液压系统缸内缓冲过程建模与仿真;第 6 章为高速开关阀的特性仿真与应用研究;第 7 章为多级液压缸驱动举升系统控制仿真研究。后 3 章结合具体问题论述了仿真技术在液压系统设计与动态特性分析优化中的应用技术,可供读者借鉴和参考。

本书第 1、5、6 章由高钦和编写,第 2、3、4、7 章由马长林编写,全书由高钦和统稿,宋海洲、马志刚、郑贤林等参加了模型实现、资料整理等方面的工作。本书的编写是在作者导师黄先祥院士指导下完成的,同时得到了作者所在单位和同事的大力支持和帮助,参阅了国内同行发表的大量相关技术文献,在此表示衷心的感谢。由于作者水平有限,时间仓促,书中难免存在一些疏漏之处,恳请读者批评指正。

作 者

2013 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 系统仿真的概念	1
1.1.1 系统	1
1.1.2 系统的模型	2
1.1.3 系统仿真	3
1.2 计算机仿真的概念	5
1.2.1 计算机仿真的定义	5
1.2.2 计算机仿真的基本要素与活动	5
1.2.3 计算机仿真的一般过程	6
1.3 液压系统的计算机仿真	7
1.3.1 液压系统的静动态特性	7
1.3.2 仿真技术在液压领域中的应用	8
1.3.3 液压系统动态特性仿真的研究过程	9
1.3.4 液压系统仿真技术的发展现状	10
第 2 章 液压系统动态特性建模与仿真基础	12
2.1 液压系统的建模原理	12
2.1.1 基本方程	12
2.1.2 模型的非线性因素	13
2.1.3 模型的降阶处理	13
2.2 液压系统动态特性建模方法	14
2.2.1 功率键合图法	14
2.2.2 节点容腔法	18
2.2.3 灰箱建模法	19
2.3 液压系统动态特性仿真方法	20
2.3.1 数值积分基本原理	20
2.3.2 龙格-库塔法	21
2.3.3 吉尔法	23

2.4	液压系统动态特性的仿真软件	29
2.4.1	MATLAB/Simulink 仿真软件	29
2.4.2	AMESim 仿真软件	33
2.4.3	20-Sim 仿真软件	44
2.5	液压系统动态特性仿真的刚性问题	52
2.5.1	刚性问题的定义	52
2.5.2	液压系统刚性问题的实质	53
2.5.3	液压系统动态特性刚性问题的解决途径	53
第3章	液压元件的仿真建模	61
3.1	基于 Simulink 的液压元件仿真建模	61
3.2	液压泵/马达的仿真建模	63
3.2.1	液压泵的仿真建模	63
3.2.2	液压马达的仿真建模	64
3.3	压力控制阀的仿真建模	65
3.3.1	溢流阀的仿真建模	65
3.3.2	平衡阀的仿真建模	66
3.4	流量控制阀的仿真建模	66
3.4.1	节流阀的仿真建模	66
3.4.2	调速阀的仿真建模	67
3.5	电磁换向阀的仿真建模	69
3.5.1	电磁换向阀的数学模型	70
3.5.2	电磁换向阀的仿真模型	80
3.6	电液比例方向阀的仿真模型	84
3.6.1	电液比例方向阀的数学模型	84
3.6.2	电液比例方向阀的仿真模型	91
3.7	液压管路的仿真建模	91
3.7.1	管路的分布参数模型	92
3.7.2	近似的集中参数模型	93
3.7.3	液压管道的仿真模型	94
3.8	液压缸的仿真建模	95
3.8.1	单级液压缸的仿真建模	95
3.8.2	多级液压缸的仿真建模	97

第 4 章 液压系统动态特性仿真与优化	102
4.1 基于 Simulink 的液压系统动态特性仿真	102
4.1.1 重物举升液压系统简介	102
4.1.2 基于 Simulink 的重物举升液压系统仿真	102
4.2 基于 20-Sim 的液压系统动态特性仿真	104
4.2.1 基于键合图的液压系统建模方法	104
4.2.2 基于 20-Sim 的重物提升液压系统仿真	105
4.3 基于 AMESim 的液压系统动态特性仿真	107
4.3.1 典型机液耦合系统简介	107
4.3.2 基于 AMESim 的典型机液耦合系统仿真	108
4.4 基于 Simulink 的液压系统动态特性优化	112
4.4.1 遗传算法优化原理	113
4.4.2 基于 Simulink 和遗传算法的参数优化思路	114
4.4.3 目标函数的选取及 Simulink 优化实现	115
4.5 基于 AMESim 的液压系统动态特性优化	118
4.5.1 基于 Design Exploration 模块的优化方法	120
4.5.2 基于 AMESim/MATLAB 接口的优化方法	120
4.6 基于 Simulink 和 AMESim 的液压系统动态特性联合仿真	121
4.6.1 Simulink 和 AMESim 联合仿真平台的构建	121
4.6.2 Simulink 和 AMESim 联合仿真的实现	123
第 5 章 液压系统缸内缓冲过程建模与仿真	126
5.1 液压冲击与缸内缓冲	126
5.1.1 液压冲击产生的机理与危害	126
5.1.2 液压冲击的控制与缸内缓冲	129
5.1.3 缸内缓冲装置的结构形式	130
5.2 缸内缓冲过程的数学建模	131
5.2.1 圆柱形缸内缓冲装置缓冲过程数学建模	132
5.2.2 台阶形缸内缓冲装置缓冲过程分析与建模	135
5.2.3 平板节流孔式缸内缓冲装置缓冲过程分析与建模	136
5.3 缸内缓冲过程仿真软件设计	138
5.3.1 Simulink 仿真模型的建立	138
5.3.2 缓冲过程仿真软件界面设计	142
5.3.3 缓冲过程仿真软件的使用	145

5.4	缸内缓冲装置的结构参数优化	149
5.4.1	优化问题分析	149
5.4.2	圆柱形缓冲装置缓冲过程仿真与参数优化	151
5.4.3	台阶形缓冲装置缓冲过程仿真与参数优化	155
5.4.4	平板节流孔式缓冲装置缓冲过程仿真与参数优化	159
第 6 章	高速开关阀的特性仿真与应用研究	163
6.1	电液控制技术与高速开关阀	163
6.1.1	间接式电液数字控制技术	163
6.1.2	直接式电液数字控制技术	164
6.1.3	高速开关阀的结构与原理	165
6.2	高速开关阀的特性分析	167
6.2.1	高速开关阀的主要特性	167
6.2.2	高速开关阀的数学建模	168
6.2.3	高速开关阀的仿真建模	170
6.2.4	高速开关阀的特性仿真	171
6.2.5	高速开关阀的特性实验	174
6.3	基于 HSV 的直控式液压缸速度控制	177
6.3.1	液压回路与控制信号设计	177
6.3.2	液压回路的数学建模	178
6.3.3	系统仿真建模	179
6.3.4	仿真实验与验证	180
6.4	基于 HSV 的旁路节流式液压缸速度控制	182
6.4.1	液压回路与控制信号设计	182
6.4.2	液压回路的数学建模	183
6.4.3	系统仿真建模	184
6.4.4	仿真实验与验证	184
6.5	基于 HSV 的双缸调平系统同步控制	186
6.5.1	双缸同步控制系统方案设计	186
6.5.2	高速开关阀模糊控制器设计	188
6.5.3	主从式同步控制系统建模与仿真	191
6.5.4	协同式同步控制系统建模与仿真	195
6.5.5	同步控制效果实验验证	197

第 7 章 多级液压缸驱动举升系统控制仿真研究	199
7.1 多级液压缸驱动举升系统控制分析	199
7.1.1 多级液压缸驱动举升系统控制的研究内容	199
7.1.2 多级液压缸驱动举升系统控制的难点	200
7.2 多级液压缸驱动举升系统控制方案与角速度规划	200
7.2.1 举升过程控制方案	200
7.2.2 举升过程角速度动态分段规划方法	202
7.3 单神经元 PSD 控制策略	204
7.3.1 单神经元 PID 控制器	205
7.3.2 自适应 PSD 控制算法	205
7.3.3 单神经元自适应 PSD 智能控制器	207
7.4 基于多软件协同的多级液压缸举升系统建模与控制仿真	208
7.4.1 机电液一体化系统中的参数关联分析	208
7.4.2 基于 Simulink 的集成化仿真平台框架	210
7.4.3 多软件间的组织协同仿真实现	211
7.4.4 多级液压缸驱动举升系统控制仿真	218
参考文献	221

第 1 章 绪 论

1.1 系统仿真的概念

科学实验是人类认识社会和改造自然的基本活动和有效手段。科学实验有两条重要途径：一是在实际系统上进行实验，即实物实验或物理实验；二是利用模型完成实验研究，即模型实验，或称之为“仿真”。简单地说，系统仿真就是建立系统的模型，并在模型上开展实验研究的一项活动。

1.1.1 系统

在自然界与人类社会中存在着多种系统，既包含工程系统，如控制系统、通信系统等；也包含非工程系统，如股市、交通、生物系统等。概括地讲，系统是具有某些特定功能，相互联系、相互作用的元素的集合。系统具有两个基本特征：整体性和相关性。整体性是指系统作为一个整体存在而表现出某项特定的功能，它是不可分割的；相关性是指系统的各个部分、元素之间是相互联系的，有物质、能量与信息的交换。系统仿真所研究的系统，还应该具备两个特征：有序性和动态性。

一个系统以特有的表征和内在特性而区别于其他系统，其特征主要表现在构成系统的三个要素上：实体、属性和活动。其中，实体是构成系统的具体对象（个体）；属性是描述实体特性的信息（常以状态和参数来表征）；活动是指系统实体随时间推移而发生的属性变化。组成系统的实体之间相互作用而引起的实体属性的变化，通常用状态变量来描述，系统仿真主要就是研究系统状态变量的动态变化。

如图 1.1 所示为两个具有相似性的系统：即机械系统与电系统。机械系统由质量、弹簧、阻尼构成，其属性包括物体质量 M 、弹簧系数 K 、阻尼系数 D ，物体运动的距离 X 、速度 V ，外界作用力 $F(t)$ ；电系统由电阻、电感、电容构成，其属性包括电阻值 R 、电感值 L 、电容量 C ，以及电路中的电荷 q 、电流 I ，外部激励信号 $E(t)$ 。机械系统的活动表现为机械振荡，而电系统的活动表现为电振荡。

除了研究系统的实体、属性和活动外，还需要考虑影响系统活动的外部条件，即系统所处的界面状况（包括干扰和约束等），通常将这些外部条件称为环境。自然界的实物之间是普遍联系的，系统是在外界环境的不断变化中产生活动的，因此研究系统所处的环境是十分必要的。但是应该注意到，系统与环境的边界是不确定的，对于同一个系统可能因为研究目的的不同而不同。

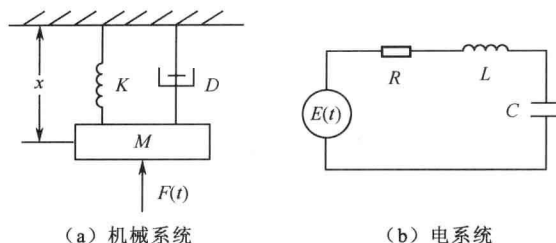


图 1.1 机械系统与电系统示意图

1.1.2 系统的模型

1. 模型的概念

建立系统概念的目的在于深入认识并掌握系统的运动规律,不仅能定性地了解系统,还要能定量地分析。定量分析的最有效的方法是模型法。一个系统,只有在其研究目的确定,且其实体、属性、活动、环境作了明确描述后,才是确定的,才可能去考虑系统模型的建立。

系统模型是对系统活动的抽象描述,是为了一定的研究目的,对被研究的实际系统特性进行简化、抽象、提炼出来的原型的替代物。在任意时间,系统所有的实体、属性和活动情况的信息之集合称为系统在该时间的状态,能表示系统状态的变量称为系统变量,系统有许多可能的状态,而系统模型就是描述系统状态变化的关系。

2. 模型的分类

系统的模型可分为两类:实体模型和数学模型。

(1) 实体模型:根据系统之间的相似性而建立起来的物理模型。最常见的是比例模型,如风洞实验常用的翼型模型或建筑模型。

(2) 数学模型:根据流体力学、动力学、机构学、热力学等物理或工程上的基本定律,定量地将物理系统中人们感兴趣的输出变量用数学形式表示为有关的输入变量和参数的函数。

通常所提到的模型一般是指数学模型。如图 1.1 所示机械系统和电系统,可以分别用式 (1.1) 和式 (1.2) 所示的二阶微分方程来描述其活动,这就是系统的数学模型。通过系统模型可以看出,这两个系统的数学模型在形式上是相同的,因此两者具有相似性。

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

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{1}{C}q = E(t) \quad (1.2)$$

人们之所以可以用模型来模仿实际系统,是因为各种系统有一定的相似性,虽然很多系统的组成或元素有差异,其组成元素的微观结构不尽相同,但通过一定的组织之后,

都可以表现出几乎同样的行为。

数学模型按表达形式分为数学方程式、图形曲线或算图、数表三种。

(1) 数学方程式：最为常用，具有能准确描述物理模型的特点。

(2) 图形曲线或算图：可向用户提供对物理现象定性理解。采用算图形式，省去费时的求解过程，在工程中应用较多；但图形曲线方式只许改变少数的变量，修改不是很方便。例如，表征溢流阀溢流特性的溢流曲线，能修改的参数仅包括斜率、截距等，很难达到较高精度。

(3) 数表：即数据查表的形式。由于计算机检索运算速度很高，因此数表最适合在计算机上使用。但是，跟图形曲线方式一样，包含参数不多，修改不方便，并且如果模型庞大，需存储的空间也很大。

总的来说，图形曲线和数表一般用来表示系统的静态特性，而系统的动态特性多用数学方程的形式来表示。

数学模型按获得的途径可分为三类：解析模型（也称理论模型）、经验模型和介于两者之间的半经验模型。

(1) 解析模型：把系统分解为若干基本要素，用方程描述每个要素的行为，再建立不同要素间的相互关系而得到的。

(2) 经验模型：采用“黑箱”模式求得，以试验数据作为建模基础，得到描述系统输入和输出之间的关系表达，其参数一般不具备真正的物理意义。

(3) 半经验模型：仍以试验数据为基础，但表达形式与解析式模型的物理原理相关，介于解析模型和经验模型两者之间。

1.1.3 系统仿真

1. 仿真的定义

系统仿真是研究系统的一种重要手段，而系统模型则是仿真所要研究的直接对象。研究一个系统的目的是为了了解系统各组成部分之间的关系，或者是预示系统在一种新的工作策略下的执行情况。然而，由于许多系统不具有实际试验的可能性，这时就需要按实际系统建立系统模型进行研究，然后利用模型实验研究的结果来推断实际系统的工作，这种使用模型来研究系统的方法称为系统仿真，简称“仿真”。

历史上对“仿真”的定义很多，例如：

- G. W. Morgenthater 于 1961 年首次对“仿真”进行了技术性定义：“仿真意指在实际系统尚不存在的情况下对于系统或活动本质的实现。”
- Korn 于 1978 年在其著作《连续系统仿真》中将“仿真”定义为：“用能代表所研究的系统的模型进行实验。”
- Spriet 于 1982 年将仿真的内涵加以扩充，定义为：“所有支持模型建立与模型分析的活动即为仿真活动。”

- Orén 于 1984 年给出了“仿真”的基本概念框架：“建模—实验—分析”，并提出了“仿真是一种基于模型的活动”的定义，被认为是现代仿真技术的一个重要概念。

可见，随着历史的发展和技术进步，仿真的含义也不断地得到发展和完善。而无论哪种定义，“仿真基于模型”这一基本观点是共同的。

2. 仿真的分类

1) 按照实现方式的不同分类

可以从不同的角度对系统仿真进行分类。例如，按照实现方式的不同，可以将系统仿真分为三类：物理仿真、数学仿真、半实物仿真。

(1) 物理仿真：基于物理模型进行的仿真。它是指研制某些实体模型，使之能够重现原系统的各种状态。早期的仿真大多属于这一类。它的优点是直观形象，至今仍然广泛应用。例如，为了研究飞机翼型，要建立翼型的比例模型，更重要的是要在地面建立对空中气流环境的模拟。但是为系统构造一套物理模型，将是一件非常复杂的事情，投资巨大，周期长，且很难改变参数，灵活性差。至于社会、经济、生物系统则根本就无法用实物进行实验。

(2) 数学仿真：基于数学模型进行的仿真。数学仿真把研究对象的结构特征或者输入输出关系抽象为一种数学描述（微分方程函数、状态方程，可分为解析模型、统计模型）来研究具有很大的灵活性，它可以方便地改变系统结构、参数；而且速度快，可以在很短的时间内完成实际系统很长时间的动态演变过程；精确度高，可以根据需要改变仿真的精度；重复性好，可以很容易地再现仿真过程。然而数学仿真也有其局限性。对某些复杂系统可能很难用数学模型来表达，或者难以建立其精确模型，或者数学模型过于复杂而目前无法求解，或者计算量太大而无法利用现有的计算资源进行仿真。

(3) 半实物仿真：又称为数学—物理仿真或者混合仿真。为了提高仿真的可信度或者对于一些难以建模的实体，在系统研究中往往把数学模型、物理模型和实体结合起来组成一个复杂的仿真系统，这种在仿真环节中存在实体的仿真称为半实物仿真。这样的仿真系统有飞机半实物仿真、制导导弹半实物仿真等，以及许多模拟器也属于半实物仿真。

2) 按照仿真时钟和实际时钟的比例关系分类

实际动态系统的时间称为实际时钟，而进行系统仿真时模型所采用的时钟称为仿真时钟，根据两者的比例关系，系统仿真可以分为三类：实时仿真、亚实时仿真、超实时仿真。

(1) 实时仿真：仿真时钟与实际时钟完全一致，即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，如各种训练模拟器，也称在线仿真。

(2) 亚实时仿真：仿真时钟慢于实时时钟，即模型仿真的速度慢于实际系统运行的速度。对仿真速度要求不高时一般为亚实时仿真，如大多数系统离线研究与分析，也称为离线仿真。

(3) 超实时仿真：仿真时钟快于实际时钟，即模型仿真的速度快于实际系统的运行

速度。实际系统运行时间较长时一般为超实时仿真，如交通系统的仿真、社会和经济问题的仿真等。

1.2 计算机仿真的概念

1.2.1 计算机仿真的定义

数学仿真使用的模型是数学模型，其模型运行工具为计算机及其支撑软件，因此数学仿真也称计算机仿真。

按照所使用计算机的不同，计算机仿真又可以分为三类：模拟计算机仿真、数字计算机仿真和混合计算机仿真。

(1) 模拟计算机仿真：是以模拟计算机作为仿真工具，简称模拟仿真。

(2) 数字计算机仿真：是以数字计算机及其仿真支撑软件作为仿真工具，简称数字仿真。

(3) 混合计算机仿真：既可以使用模拟计算机，也可以使用数字计算机的计算机仿真，简称混合仿真。

目前，计算机仿真通常是指在数字计算机上进行的数字仿真。

1.2.2 计算机仿真的基本要素与活动

1. 计算机仿真的三要素

计算机仿真有三个基本要素：系统、数学模型、计算机。

(1) 系统：仿真研究的对象。

(2) 数学模型：对所研究系统的抽象。

(3) 计算机：对系统的模型进行实验研究的工具。

2. 计算机仿真的三项基本活动

联系计算机仿真三要素的是三项基本活动：数学建模、仿真建模、仿真实验，如图 1.2 所示。

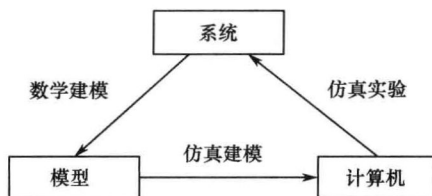


图 1.2 计算机仿真的三要素与三项基本活动

(1) 数学建模：根据研究目的，确定系统的模型形式、结构和参数，已得到正确描述系统特征和变化过程的数学表达式。

(2) 仿真建模：根据系统的特点和仿真要求，采用合适的仿真算法，将数学模型转换为计算机上能运行的模型。

(3) 仿真实验：根据仿真的目的，设定仿真参数，在计算机上进行实验，并校正、修改和优化系统模型，获得仿真结果。

1.2.3 计算机仿真的一般过程

计算机仿真的一般过程如图 1.3 所示。

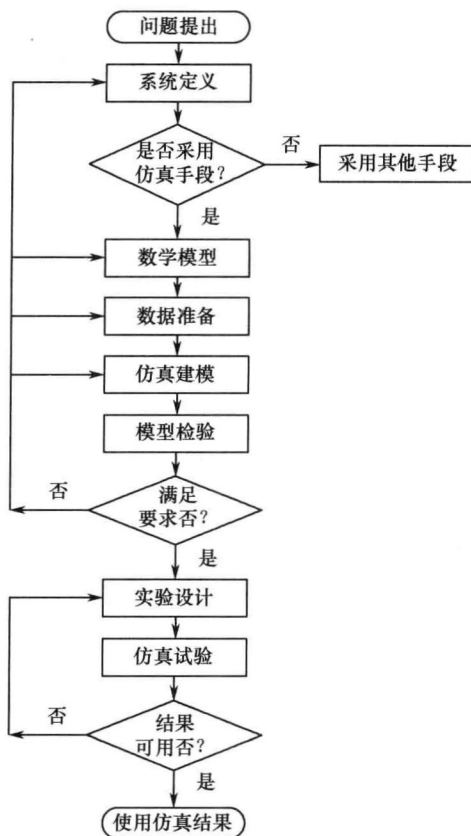


图 1.3 计算机仿真的一般过程

(1) 描述仿真问题，明确仿真目的。

(2) 系统定义与仿真规划：根据仿真目的，确定仿真对象（系统的实体、属性、活动）及环境（系统的边界条件与约束条件），规划相应的仿真系统结构（实时仿真，还是

非实时仿真；纯数学仿真还是半实物仿真等）。

（3）数学建模：根据系统的先验知识、实验数据及其机理研究，按照物理原理或者采取系统辨识的方法，确定模型的类型、结构及参数，对模型进行形式化处理，得到系统的数学模型，并对模型进行可信性检验。

（4）仿真建模：根据数学模型的形式、计算机类型和仿真的要求，选择合适的算法，采用的高级语言或其他仿真工具，将数学模型转换成能在计算机上运行的程序或其他模型，也即获得系统的仿真模型。

（5）仿真实验：根据仿真的目的，确定仿真实验的要求，如仿真运行参数、控制参数、输出要求等，对仿真模型进行多方面的运行实验，相应地得到模型的输出。

（6）仿真结果分析：根据仿真目的和实验要求，对仿真实验的结果进行分析处理（整理及文档化）。根据分析结果修正数学模型、仿真模型或仿真程序，以进行新的实验。模型是否能够准确地表示实际系统，是需要不断的修正和验证的，它不是一次完成的，而是比较模型和实际系统的差异，不断地修正和验证。

仿真技术是伴随着计算机技术的仿真而发展的。在计算机问世之前，基于物理模型的实验一般称为“模拟”，它一般附属于其他相关学科中。在计算机特别是数字计算机出现后，其高速计算能力和巨大的存储能力使得复杂的数值计算成为可能，计算机仿真技术得到蓬勃发展，并逐步独立出来形成了一门专门学科——系统仿真学科。

可见，系统仿真以相似性原理、控制论、信息技术及相关领域的有关知识为基础的，以计算机和各种专用物理设备为工具，借助系统模型对真实系统进行试验研究的一门综合性高技术。它利用物理的或数学的方法来建立模型，类比模拟现实过程或者建立假想系统，以寻求过程的规律，研究系统的动态特性，从而达到认识和改造实际系统的目的。

1.3 液压系统的计算机仿真

1.3.1 液压系统的静动态特性

工业装备上应用的液压系统主要分为两类：一类是以传递功率为主的液压传动系统，其主要作用是驱动执行机构的运动；另一类是以传递信息为主的液压控制系统，要求其具有良好的响应特性、控制精度和控制稳定性。两类液压系统的作用不同，对其性能要求也有所不同，但不管是哪一类，都可以从静态和动态两个方面描述其特性。

1. 液压系统的静态特性

液压系统静态特性是指系统由瞬态过程进入稳态过程后的输出状态。当测量系统处于规定的静态条件下时，给系统输入不同的标准量，测量与之相应的系统的实际输出量，所得到的输出与输入量之间的关系就是静态特性。例如，泵或阀的流量、执行机构的速度、元件的效率、系统的稳定性等。

求解静态特性一般需要建立系统的静态模型，通常是一组代数方程，然后用计算机进行数值求解。静态计算除了用于系统稳态特性设计外，所求解的稳态值又是系统动态特性分析的起点。

2. 液压系统的动态特性

当液压系统受到外部扰动的影响或是参考输入发生变化时，被控参量就会随之发生变化，经过一段时间后，被控参量恢复到原来的平衡状态或到达一个新的给定状态时，通常称这一过程为过渡过程。液压系统动态特性就是指在这一过渡过程中所表现出来的特性，或是指控制系统在接收到输入信号以后，从初始状态到最终状态的相应过程，即通常所称的瞬态响应。

引启动态过渡过程的原因主要有两个：一个是由传动与控制系统的过程变化引起的；另一个是由外界干扰引起的。在这一动态过程中，系统中各参变量都在随时间变化，这种变化过程性能的好坏，就决定系统动态特性的优劣。对于液压系统来说，其动态特性主要是指高压管道与高压腔的压力瞬态峰值与波动情况、负载或控制机构（控制阀和变量泵的变量机构）的相应反应速度。求解动态特性需要建立动态模型，通常是一组以时间为独立变量的微分方程。

液压系统动态特性需研究的问题主要有两个方面：一方面是稳定性问题，即高压系统（管道和容腔）中压力瞬间峰值与波动情况，主要分析液压系统是否会因为压力峰值过高而产生压力冲击，或系统经过动态过程后，是很快达到新的平衡状态，还是形成较持续的动荡；另一方面是过渡过程的品质问题，即执行机构和控制机构（如负载和液压元件）的响应品质和响应速度，主要研究系统达到新的稳定状态所经历的过渡时间，达到压力峰值的时间以及速度、位移等参数随时间的变化等。

对于液压系统来说，不仅要求其应有良好的静态性能，而且还应具有良好的动态特性。传统的液压系统设计方法，通常是以完成设备工作循环和满足静态特性为目的，显然已经不能适应现代产品的设计和性能要求，需要充分考虑系统的动态性能优劣。随着计算机技术的快速发展，计算机仿真技术已经成为液压系统动态特性分析最实用有效的方法和手段，其具有周期短、费用低、结果准确可靠等优点。

1.3.2 仿真技术在液压领域中的应用

液压系统仿真是指通过建立液压系统的数学模型并在计算机上进行解算，用以对系统的动态特性进行研究的过程。液压系统仿真作为系统仿真的一个分支，为液压系统的设计、优化与控制，特别是系统动态特性的提高，提供了一种有力的技术手段，已经成为现代液压系统设计体系中一个非常重要的环节。

采用计算机仿真方法可以分析多输入、多输出的非线性系统和各种复杂液压系统，可在时域里模拟出任何输入作用下系统的动态响应和系统中参数变化情况，从而获得对系统动态过程直接全面的了解，使研究人员在设计阶段就可以预测液压系统的动态特性，