

上海交通大学出版社



陆元章 编著

液压系统的建模与分析

液压系统的建模与分析

陆元章 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍如何建立液压系统的数学模型和用计算机解出其动、静态特性。

第1章为基本概念, 2~3章叙述大系统数学模型的形式和大系统的动、静特性, 4~5章叙述模型和参数的辨识以及典型系统的模型。

本书内容新颖、取材广泛, 既可作为教材, 又兼有工具书的功能。

本书可供高等院校机械系液压专业研究生或高年级学生作教材, 也可供广大工程技术人员参考。

液压系统的建模与分析

出版: 上海交通大学出版社
(淮海中路1984弄19号)

发行: 新华书店上海发行所

印刷: 上海交通大学印刷厂

开本: 850×1168 (毫米) 1/32

印张: 9.125

字数: 200000

版次: 1989年12月 第1版

印次: 1989年12月 第1次

印数: 1-1450

科目: 210-300

ISBN7-313-00605-5/TH·137

定价: 2.05元

661-103/07

代 序

利用计算机仿真技术对液压系统的动、静态特性进行预测与研究,合理选择其参数,具有很大的实际意义。对液压系统的计算机仿真研究,在我国始于70年代末、80年代初,比国外晚了约十年。因此,虽然国内一些高校和科研部门已做了不少工作,研究成功了一些实用的仿真软件包。但目前在生产上推广还不够,而且一些工程技术人员尚缺乏这方面的知识。

陆元章教授收集了70年代以来国内外有关液压系统建模和计算机仿真领域内的论文及科研成果中的重要内容,并结合国内近几年内的研究成果,写成了《液压系统的建模与分析》。该书的问世对仿真技术的推广和应用无疑具有促进作用。

该书介绍了液压系统分析和建模的新方法,如状态变量法、功率键图法等;介绍了液压系统中某些参数(软量)的辨识方法(如综合容积弹性模量 β_c);介绍了仿真求解方法,特别是求解刚性方程(病态方程)的方法;还介绍了典型液压系统,使读者能学以致用。国内目前尚无同类型著作出版。

该书适合于研究液压技术工作的高等学校教师、研究生和高年级学生以及广大工程技术人员阅读参考,也可作为液压专业研究生课程教材。

史维祥 林廷圻

前 言

计算机辅助设计(CAD)已普遍应用于许多学科。虽然液压CAD起步较晚,但近十年来发展较快,已成为新产品开发与研究工作的重要手段。可惜,至今国内外尚未见到公开出版介绍有关这方面内容的基础书,使初学者入门有所困难。为此本人将七年来为研究生授课所用的讲义整理成书,希望能有助于我国液压学科与工业的发展。

本书取材广泛,有近年来国内外发表的有关论文,有同事和学生们的研究成果,有的则根据本人的工作实践和体会,对前人的方法作了一定的补充和发展,力求自成体系。本书基本上反映了本学科的现状。

本书的第一章是模型概说,其中1.4.2节中介绍的三种模型形式,是最实用的模型,因此通用于全书。

第2章介绍的状态变量模型,以功率键图为辅助工具,便于求解大系统。功率键图的表达形式,各家不一,本书严格按其因果关系而绘制,并专列一表,以便应用。

第3章介绍了不少求解响应的方法,讨论到非线性和刚性问题。其中用欧拉法和4阶龙格库塔法如何求最大稳定步长,是作者个人工作实践中的见解。至于离散法采样时间的选定,尚无成熟办法,本书所列,可作为选用的起点。

第4章介绍了模型与参数的辨识方法。这是液压系统建模的关键。其中求 β 的压力梯度法,是严金坤教授和王钧功副教授的科研成果,目前能求得平均值,至于其与压力的瞬态关系,还有待补充。

第5章根据本人掌握的材料,列举了几个典型液压系统的建模方法。其中5.3.6半实物仿真是王钧功副教授、赵琥芬高级工程师

师和研究生王黎明等为主实现的。此法可用于一般液压系统和机械系统。

5.8 节是张永杲副教授编写，反映了他多年讲授“管道动特性”一课的心得。

本书得到多位同志的支持，特别是张海燕同志协助加工，在此向他们表示感谢。由于作者的局限性，本书一定存在不足之处，敬请批评指正。

陆元章

1989年7月

符 号 说 明

主符	A	面积
	B	阻尼系数；体积弹性模量
	C	常数；电容；热容量
	D	泵、马达的排量/弧度
	e	电压
	F	力
	f	摩擦系数
	G	液导
	h	步长
	i	电流
	J	转动惯量
	K	常系数；弹簧刚度
	L	长度；电感
	M	质量
	m	液压马达
	N	功率
	n	转速
	P	能量
	p	压力
	Q	流量
	q	排量/转
	R	电阻
	ρ	密度
	s	拉氏算子
	η	效率
	T	扭矩；温度

	t	时间	
	u	输入变量	
	V	容积	
	v	速度	
	ω	转速; 频率	
	X	状态变量	
	x	位移	
	y	输出变量	
	Z	阻抗	
脚标	av	平均	
	c	恒值	
	cy	缸	
	eq	当量	
	i	输入	
	L	负载	
	l	漏油	
	M	质量	
	M	电机	
	m	液压马达	
	o	输出; 起始点	
	p	泵	
	s	弹簧; 动力源	
	t	总共	
	th	理论上的	
	v	阀; 容积	
其他	β	综合体积弹性模量	
	C_t	液容	
	C_m	马达的恒参数	
	C_v	缸	

I_l 液感
 K_m 液压马达的漏油系数
 K_p 泵的漏油系数
 K_T 粘性扭矩损失系数
 K_v 流量增益
 psi 英制压力单位。磅/吋²
 p_T 油箱压力
 $p_{\text{调}}$ 调定的压力
 R_l 液阻
 $\eta_{m.e.}$ 机械效率
 η_t 总效率
 η_v 容积效率
 $\underline{\Delta}$ 定义为

目 录

1 模型概说	(1)
1.1 几个基本概念	(1)
1.2 液压系统的物理特性	(6)
1.3 模型在设计中的应用	(9)
1.4 数学模型的分类	(12)
1.5 对计算机辅助分析的评说	(14)
2 大系统的模型	(17)
2.1 两种模型形式	(17)
2.2 功率键图	(23)
2.3 大系统的线性模型及其规范形	(33)
2.4 非线性时变系统的规范形模型	(43)
2.5 液压的基本要素(液阻、液感、液容与阻抗)	(46)
2.6 模型阶数的选定	(53)
3 求系统的动、静态特性	(58)
3.1 从闭环矩阵求特征值	(59)
3.2 用数值积分法求各类系统的响应	(74)
3.3 用预解矩阵法求连续系统的响应	(92)
3.4 用离散迭代法求解连续系统的响应	(95)
3.5 算法的阶数和步长的选取	(101)
3.6 液压系统的非线性环节	(107)
3.7 求解非线性传递函数式模型的响应	(118)
3.8 用牛顿-拉夫逊法求非线性方程组的静态解	(121)
3.9 数学刚性系统的解法	(129)
4 参数与模型的辨识	(139)
4.1 概说	(139)
4.2 液压油的综合体积弹性模量 β_v 的辨识	(142)

4.3 用参考模型法求管道的摩擦系数 f	(151)
4.4 求半经验模型的参数 (气动活塞式蓄能器的热传递 时间常数 τ)	(167)
4.5 求经验模型输出量与输入量之间的关系	(170)
4.6 用粗略的模型及均值法求参数	(172)
4.7 频域辨识——山下法	(174)
4.8 辨识液压系统的液压自然频率 ω_h (已知 β_e)	(180)
5 典型系统的模型	(182)
5.1 泵或马达的静态模型	(182)
5.2 泵的动态模型	(201)
5.3 泵控马达的静动态模型	(209)
5.4 阀控马达系统的模型	(233)
5.5 伺服阀控制液压缸系统的模型	(237)
5.6 蓄能器模型	(242)
5.7 液压管道的静特性模型	(251)
5.8 管道时域动特性模型	(262)

1 模型 概 说

1.1 几个基本概念[6.8.9]

1.1.1 系统的定义

系统是指在一个预先划定的边界线以内的一组相互连结和相互作用的元件。边界线将系统与其环境隔开，如图 1.1.1 所示。各单个元件之间的接触点代表能量口，能量间的相互作用通过能量口实现。系统与环境之间也相互作用，能量口即存在于系统的边界上，见图 1.1.2。

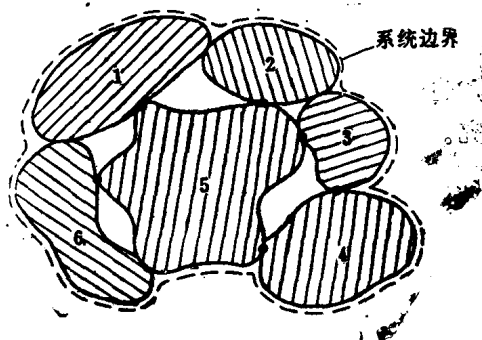


图 1.1.1 由相互连接和相互作用的若干元件构成一个系统

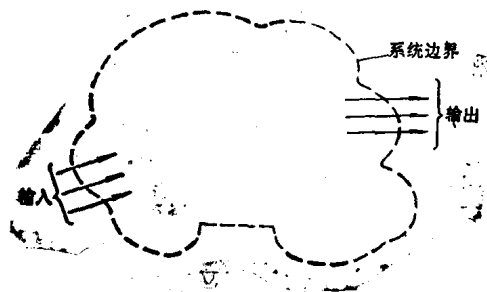


图 1.1.2 系统与环境之间的相互作用

每个能量口总存在两个变量，一为能流变量，如液体流量、电流、热能、力等；另一为能势变量，如液压降、速度差、电压降、温度差等。同一个能量口的流变量与势变量之积即等于该口所传递的功率，故能量口亦称功率口。

在每一个口的两个变量中，按逻辑因果关系，总有一个是独立变量，或称为输入变量。另一变量则为应变量，它取决于该口的独立变量和系统的特性，并被称为输出变量。

系统边界的选定，常决定了系统的复杂程度和求解此问题所要求的技术。假若边界线不受限制，差不多任何有用的系统都包括了人。但通常选定的边界线，往往把系统简化为几个既简单而又相互作用的元件，即可充分描述其主要的行为。

一个大系统可以由几个子系统或元件组成。一个子系统可由几个更小的子系统或元件组成。这里所说的元件，当人们对其进行深入研究时，也是一个系统。简单的如节流孔，也可将其作为一个系统来研究。略复杂些的如溢流阀，在大系统中常作为一阶、二阶甚至零阶即静态元件；但在作二级溢流阀设计时，它至少有六阶，即两个阀芯各二阶，两个受压腔各一阶，此时阀就是一个系统。据研究，要仿真此阀 40ms 的实时工作过程，在计算机上所需计算时间为其 625 倍。可见元件只是相对于大系统而言。

1.1.2 模型的定义

为了研究系统的某些特定的运动规律，人们构造了一个实物，即物理模型，和一个数学表达形式即数学模型来描述该系统。

1.1.2.1 物理模型

将所研究的对象实际的物理过程抽象化，使其成为一个想象出来的物理系统即为物理模型。其主要特征应类似该实际的系统，但较理想和简单些，便于作理论研究。

在物理模型的构成中，常用而又有效的近似方法有以下几种：

- (a) 略去作用小的因素;
- (b) 假设物理变量之间有线性因果关系;
- (c) 假设参量不随时间而变化;
- (d) 用集中参量 (lumped parameter) 代替分布参量 (distributed parameter);
- (e) 假设系统除边界条件外, 不受环境影响;
- (f) 略去不确定因素如噪声等。

在物理模型系统确定后, 应把这个想象中的系统用草图表示出来, 所有的近似化假设均准确地用文字写明, 模型边界条件也应测试出来, 以确保这些条件代表实际系统与其环境之间的相互作用。这一系列工作被称为建模。所以建模之中, 直觉和近似化的能力很关键, 须通过学习和实践培养。

须重复说明的是: 由于实际的物理系统/元件, 从来不是纯粹理想化的东西, 因此, 很可能物理模型只反映了其中某个起决定性作用的物理性质。例如实际的液流管道, 不但包括液容和液感 (以贮存能量), 而且还有液阻 (使能量散失)。但在静态或低频下, 管道的主要特征是液阻; 至于长管道在高频下工作, 则可足够准确地由液感来模拟。

1.1.2.2 数学模型

这是根据流体力学、动力学、机构学、热力学等物理和工程的基本定律, 定量地将物理模型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量的函数。它是结合系统的设计而进行的。图 1.1.3 给出了数学模型系统设计的过程。

1.1.2.3 系统设计的过程

系统设计的过程大致可分为两个阶段, 即初步设计阶段和辨识后改进阶段。具体可细分为以下六步。

(1) 在系统开发之初, 还没有初始型实物。先在纸上规定出成本和所期望的物理特性。

其原始要求无论为行家或外行人所提出, 往往都不完全、不

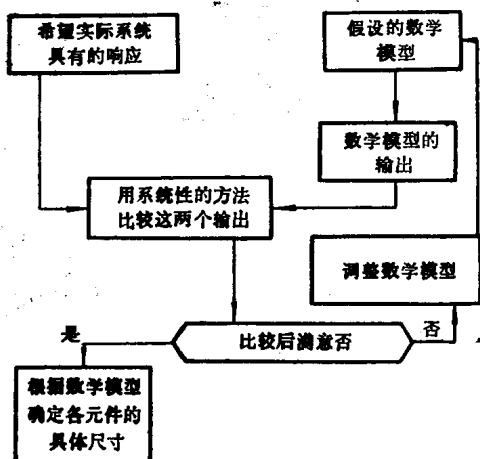


图 1.1.3(a) 用数学模型分析系统或设计元件

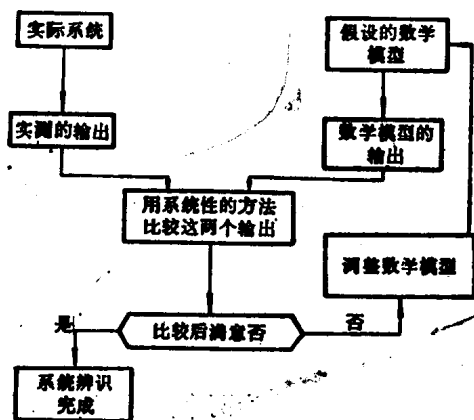


图 1.1.3(b) 用数学模型实现系统辨识

准确, 甚至包括相互矛盾的提法。因此, 我们必须从中抽象和总结出系统的任务要求, 形成一组完整的科学要求, 使之具有明确的目的和判据。

一般其共同性的要求有:

- (a) 系统工作安全, 能够预测故障, 而且有失效保护;
- (b) 充分满足所有可以预想到的 (conceivable) 负载要求;
- (c) 有适当长而可靠的工作寿命;
- (d) 尽量价廉;
- (e) 低的维修费。

至于特殊要求, 如精度、响应速度、总效率、容许最高应力等, 可作为设计的约束条件或目标。

(2) 写出该系统中各元件的假设的数学模型, 然后在计算机上确定它的输出响应。

(3) 将数学模型所给出的结果与所期望的特性作比较, 并调整参数。可以用尝试法作比较, 设计者根据主观判断, 改变参量的数值, 然后作计算机仿真。如此进行, 直至找到满意的数学模型。此法虽原始, 但往往有效, 反正仅是针对数学模型作运算。也可用计算机来做, 用陡降法和寻求主平面法 (seeking principal planes) 参见参考文献 [33] 和 [34]。

常被改变的参量有节流口有效面积、节流口液导、阀芯直径、弹簧刚度等。这就相当于同时筛选了方案和找到使系统性能敏感的关键参量。经选定的参数, 就是原始型的尺寸。它的构件尺寸接近于最优, 从而节省了试制费用和时间。

以上三步属于第一阶段, 即制成初始型以前的阶段, 见图 1.1.3(a)。

(4) 对系统进行辨识。将按前三步仔细设计后制成的初始型, 在试验室测试, 如未达到所期望的性能, 则按辨识的结果修改设计。图 1.1.3 还表示了系统辨识的过程。图中的实际系统即

初始型系统。在试验室测试出初始型的响应，即作为所期望的响应，与数学模型的输出作比较，并据此修改数学模型的参量，甚至结构。经修改后的数学模型须与初始型的实际响应基本一致。见图 1.1.3(b)。

对于此精确的数学模型在计算机上求出的响应，应考查：

(a) 其结果是否可以理解？是否违反任何基本定律或必要的约束条件？

(b) 该结果是否代表了该原有物理系统的主要特性，而且精度足够？

如果答案不满意，须作修正，即改进模型和（或）计算方法。

(5) 用这个精确的数学模型，再按照图 1.1.3(a) 作系统设计，选用元件，而设计的依据则是期望的物理系统响应。

系统中任何参数改变所形成的响应，应有把握地与该初始型系统相应的参数受到同样改变后的响应相同。这个过程，是在数学模型上作运算，比在初始型上作修改和实测要经济得多，因而节省了人力物力。

(6) 在系统方案和元件选定后，核对系统是否满足正常工作中的静态和动态要求，以及考查在极端环境下（如热天或冷天）和用户可能遇到的所有工作情况下系统的行为，这也用计算机分析。

以上六步中，后三步即为辨识后改进阶段。

1.2 液压系统的物理特性^[7]

1.2.1 静特性

静特性是系统由瞬态过程进入稳态过程后的输出状态。例如泵或阀的流量，执行机构的速度，元件的效率和系统的稳定性。

求解时，先须建立静态模型，即一组代数方程。然后用数字