

液压元件 及系统的动态仿真

【西德】 W. 霍夫曼 著

陈 鹰 译

吴根茂 路甬祥 校

DSH

137.5

内 容 简 介

本书着重介绍液压系统动态特性的模型建立和数字仿真的基本原理及方法,讨论“液压系统动态特性仿真程序(DSH)”的程序结构和编程方法,同时还对液压系统和元件的标准算法、典型系统数学模型建立、仿真方法等问题进行了阐述。最后举例说明DSH系统在工程中的应用。

本书可供工程技术人员、科研单位和高校研究人员及研究生,特别是从事液压系统仿真的科研人员参考。

责任编辑: 尤建忠

液压元件及系统的动态仿真

[西德] W. 霍夫曼 著

陈 鹰 译

吴根茂 路甬祥 校

* * *
浙江大学出版社出版

(杭州玉泉浙江大学内)

德清雷甸印刷厂印刷

新华书店浙江省总店发行

* * *
850×1168 32开本 4印张 97千字

1988年7月第1版 1988年7月第1次印刷

印数: 1—2000

ISBN 7-308-00084-2

TH·010 定价: 1.30

译者的话

本书是W. 霍夫曼在联邦德国亚琛液压气动与控制研究所完成的一篇博士论文。该文介绍的液压系统动态特性仿真通用程序DSH,已被引进国内,并由浙江大学流体传动及控制研究所加以发展和推广,在国内液压计算机仿真领域,有着较大的影响。

原文参变量均为正体,翻译时按我国习惯作了适当修改。至于计量单位,全按国家法定计量单位修改,正文中不再一一说明。

本书承蒙吴根茂副教授、路甬祥教授的仔细校阅和审核,在翻译过程中又曾得到了邓延光、陈大中两位副教授的帮助,在此表示衷心感谢。

译者

1987年8月

目 录

符号缩写表

1 总论

- 1.1 概述 1
- 1.2 液压系统动态特性仿真 1
- 1.3 任务的提出 2

2 数学模型

- 2.1 一般方程建立 5
- 2.2 构件描述 6

3 系统说明

- 3.1 一般说明 11
 - 3.1.1 结构说明 11
 - 3.1.2 构件说明 13
- 3.2 影响因子说明 (MIKRO说明) 14
 - 3.2.1 说明的目的 14
 - 3.2.2 结构说明 14
 - 3.2.3 构件说明 15
- 3.3 组件说明 (MAKRO说明) 18
- 3.4 构件的标识号说明 18
- 3.5 与机械和电气的联接 20
 - 3.5.1 通过节点的联接 20
 - 3.5.2 外部构件的联接 22

4 模型整理

- 4.1 模型数据库 24
- 4.2 方程表达式的编码形式 28
- 4.3 模型的实现 34

4.3.1	状态变量的实现	34
4.3.2	常量的实现	37
4.4	标准算法	39
4.5	结构参数数据库	57
5	程序系统	
5.1	程序流程	59
5.2	建模程序结构	61
5.3	初始值的计算	64
5.4	数据库管理	66
5.4.1	模型库的管理	66
5.4.2	结构数据库的管理	66
5.5	液压系统静态特性仿真程序	67
6	应用	
6.1	油缸油马达并联回路	71
6.1.1	系统说明	71
6.1.2	系统仿真	75
6.1.3	溢流阀对整个系统性能的影响	76
6.2	采用二通插装阀技术的压力机控制系统	81
6.2.1	系统说明	81
6.2.2	系统简化的可行性	83
6.2.3	卸压与增压仿真	93
6.3	先导型比例节流阀	97
6.3.1	阀的说明	97
6.3.2	比例节流阀的仿真	103
6.4	液压系统静态特性仿真	106
	结束语	
	参考文献	

符号缩写表

符号	名称	单位
A	面积	cm^2
AD	流量系数	
ADMA	流量系数最大值	
$A_i, (i=1,2,\dots)$	油口 <i>i</i> 处的阀芯面积	cm^2
AX, AY	阀芯面积	cm^2
$a_i, (i=1,\dots,10)$	常数	不定
$B_i, (i=1,2,\dots)$ BX, BY,	非线性液阻系数 } 变开口液阻系数 }	$1/(\text{min} \cdot \text{mm} \sqrt{\text{Pa}})$
CX, CY, C1	弹簧刚度	N/mm
CC	反馈弹簧刚度	N/mm
DA	直径	mm
DAEM	阻尼量	
DD	两个运动件间的粘性摩擦系数	Ns/m
DE	AD = f(RE)在层流状况下的梯度	
DH	水力直径	mm
DP	压差	Pa
DT	时间步长	s
DX, DY, D1	粘性摩擦系数	Ns/m
EI	数值1.	
EL	考虑油中存在未溶空气时的当量 弹性模量	Pa
E0	实际当量弹性模量	Pa
E0MA	当量弹性模量的最大值	Pa
FA	仿真中打印范围标志	
$FA_i, (i=1,2,3)$	边界值场	
F1, F2, F3	标准算法中的边界值	
F_1, F_2	力	N

符号	名称	单位
F_{DN}, F_{DP}	负值、正值压力	N
F_F	弹簧力	N
F_{FF}	外部影响弹簧力	N
F_{FN}	负值弹簧力	N
F_L, FL	负载力	N
F_{MI}	电磁力	N
F_{MY}	与阀芯位移相关的电磁力	N
F_{P1}, F_{P2}	油压力	N
F_R	摩擦力	N
F_S	液动力	N
F_V, F_{VF}	弹簧预压缩力	N
F_{VP}	正值弹簧预压缩力	N
F_X, F_Y, F_1, F_S	液动力系数	N/(mmPa)
G_X, G_1	线性液阻的液导	1/(minPa)
I	惯性力矩	kgm ²
IM	油马达惯性力矩	kgm ²
IMAX	电流最大值	A
IS	电流值	A
$K_i, (i=1, 2 \dots)$ K_1, K_G, K_X	}非线性液阻的液导	1/(min√Pa)
$K_j, (j=1 \dots n)$		
KA	综合指数	
KI	电磁铁电流-力梯度	N/A
KY	电磁铁位移-力梯度	N/mm
L	电感	H
m	质量	kg
M	力矩	Nm
M_D	摩擦力矩	Nm
MI	数值-1.	

符号	名称	单位
ML	负载力矩	Nm
M_p	油压力矩	Nm
MX, MY, M _I	质量	kg
NA, NE	转速的最大、最小值	min ⁻¹
NU	动态粘度	mm ² /s
OMEG	固有圆频率	s ⁻¹
p	压力	Pa
PI	数值 π	
PL	大气压力	Pa
PS, PSOL	额定压力	Pa
PX, PY, PZ	系统内部压力	Pa
PV	导通容腔中压力	Pa
PV _i , (i = 01, 02, ...)	某构件油口 i 上的压力	Pa
PVXY	XY (由任意罗马字符和数字组成) 容腔中压力	Pa
P ₀	初始点压力	Pa
P _o	工作点压力	Pa
p1, p2	压力	Pa
Q, Q1, Q2 Q _i , (i = 1, 2, ...)	} 流量	l/min
Q _{XY}	通过XY构件的流量	l/min
Q _{XYi}	在i油口通过XY构件的流量	l/min
Q _{ij}	从油口i到油口j的流量	l/min
Q _{ZF}	阀芯排出流量	l/min
Q _{ZS}	阀芯吸入流量	l/min
R	电阻	Ω
RE	雷诺数	
R0	密度	kg/l
R1	半径	mm.

符号	名称	单位
S	跨距	mm
S ₀ , S _S	连接点的间距	mm
t	时间	s
T _E	终止时间	s
T _L , T _M , T _N	转接时间	s
T _O , T _S	开启、关闭时间	s
T ₀	起始时间	s
U	电压	V
UM	长度范围	mm
USOL	电压额定值	V
V _A , V _B , V _C	标准算法中的状态变量	
V _A , V _B , V _H , V _R V _P , V ₁	} 容积	l
V _I	数值4.	
V _L	负载容腔的容积	l
V ₀	导通容腔的容积	l
V _{0XY}	容腔XY(XY为任意罗马字符与数字)的容积	l
V _X , V _Y	系统内部容腔的容积	l
V ₁ , V ₂	容腔的容积	l
V _i , \dot{V}_i (i = 1, ..., n)	变量i, 变量i对时间的导数	
WB	弧度制中的转角	rad
WG	角度制中的转角	(°)
x	位移	mm
X ₀	位移起始值	mm
X _A , X _{MAX}	最大位移值	mm
X _E , X _{MIN}	最小位移值	mm
XP	速度值	m/s
XV	弹簧预压缩量	mm

符号	名称	单位
XW	位移值	mm
X ₀	工作点位移	mm
y	位移	mm
YA, YE	最大、最小位移值	mm
YN, Y ₁ , Y ₂ , Y ₃ Y ₄	} 遮盖量	mm
Y ₀ , YS	斜坡因子	
YP	速度值	m/s
YV	弹簧预压缩量	mm
YW	位移值	mm
ZP	速度值	m/s
ZW	位移值	mm
Z ₂	数值2.	
φ	转角	rad
φ_0	转角起始值	rad
ω	转速	s ⁻¹
ω_0	转速起始值	s ⁻¹

1 总论

1.1 概述

就电子计算机的应用而言，液压系统既可以看成单个元件，又可以看成是一个复杂的组件。其中各构件间的能量或信号的传递通常是经过液压管道来实现的。当然，也可以通过诸如机械、电气或气动等其它途径来达到目的。

至今人们对液压系统的认识基本上还是以流体静力学理论为立足点，同时局部考虑实际压力传递介质的特性。随着对构件及系统的可靠性、精确性和快速性等要求的不断提高，一方面使得现有产品的性能得到不断改善，另一方面促进了新产品的开发，像近几年来出现在控制技术中的二通型插装阀和比例阀技术。

1.2 液压系统动态特性仿真

在许多液压技术应用场合，如果设计者在设计阶段就考虑到系统的动态特性，则可以大大地缩短液压系统的调整时间，并且可避免返工现象的出现。正是由于液压系统的固有阻尼一般很小，在实现精确定位或高速度时就带来了动态特性上的问题。解决这个问题，不可避免地会增加试验及加工所带来的费用，但可及早地认识到该系统在动态特性方面存在的薄弱环节

并加以消除。这可通过对系统的动态特性进行预测来实现。由于进行动态特性的预测只需要利用计算机求解一组非线性联立微分方程组，因而这在经济上是可行的。

借助数字仿真来求解非线性微分方程组，不仅能定性地，而且能定量地预先对液压系统的动态特性进行测定。但其先决条件为：不但数学模型与实际系统的特性能足够精确地相吻合，且数学模型中构件的结构参数值和试验参数值能精确地被测量到。

同时，在液压系统研究中还会遇到许多情况，如了解并行负载回路中负载间的相互影响，认识单个构件在整个系统动态响应中的作用，或者识别动态负载下的误动作等等。

在元器件开发研究中还会遇到像建立液阻网络来抑制超调，采取一定措施以提高稳定性或验证测量结果等问题。

目前，大多在检验、修改现有的系统时所产生的这样或那样的问题，一般均可以根据计算结果有效地解决，其中，设计者判断结果的能力是非常重要的。

1.3 任务的提出

数字计算机的每种计算方式，都必须满足一定的条件。进行液压系统的动态特性仿真要求满足的条件见图1.1所示。

以往这些要求只有在高校或大企业中才能被满足，这就导致了一系列仿真语言的开发^[1]。在这些仿真语言中，至今多数还仅处于研究阶段^{[2][3][4]}，而只有少数被应用在中小型规模的企业中。这些应用于企业的软件还要求具有这样一些基础：首先，要求工程人员具有一定的技术水平，这不但需要拥有广泛的数据处理知识，而且在数学方面亦应具有丰富的计算

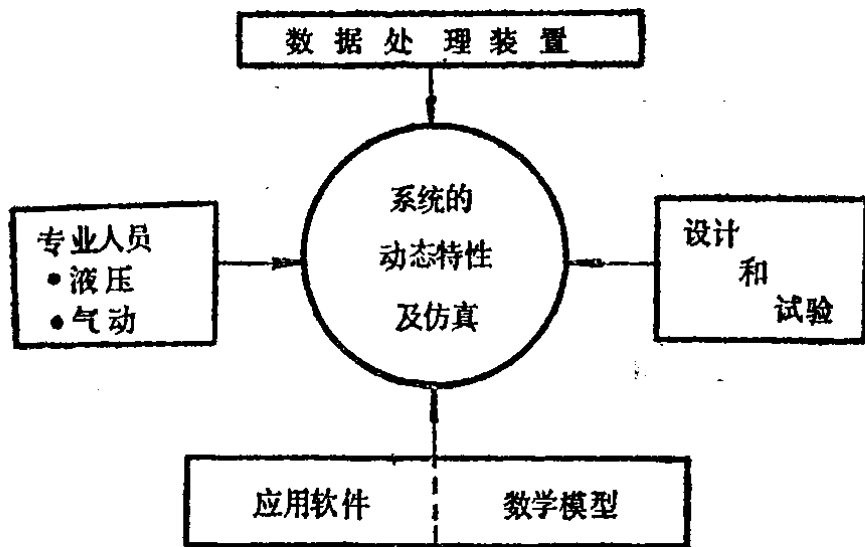


图1.1 数字机进行液压系统动态特性仿真的先决条件

机编程知识。其次，计算机容量及外部设备均要求达到一定的水准。这在许多公司企业中是无法满足的。此外还存在着这样的问题，即针对某一确定机型编制的程序，由于使用了专门的机器语言进行编写，难以移植到其他机型的计算机上去。而且程序是以非文件形式存在的，因而不能得到经常性的维护。其中部分程序还不能够处理非线性问题^[4]，而非线性问题恰恰是液压系统中的一个重要问题。

因为部分仿真语言是为了解决交叉学科问题而提出的，所以问题一般表现为微分方程组的处理，这给各类课题的处理带来了很大的方便，但是另一方面数字计算机所提供的自动化方面的优势却没有被充分利用起来^[2-7]。

在液压领域中，液压系统数学描述的研究工作已开展多年^[8-11]，但构件及其结构参数和试验参数的系统综合，由于最终总是归结到系统的动态特性仿真，至今未能解决。

因而本论文旨在提出一种方法，以解决用动态特性仿真的观点来系统地说明液压构件，以及如何将该构件贮存入数据库中，以便能以尽可能简单的方式使该构件在任意液压装置的模

型建立中实现。考虑到常见的应用情况，本文对计算机的输入和液压系统的数学表示给出了几种不同的说明方法，并且阐述了哪些观点对于一个有效的仿真是有意义的，同时根据应用实例中实测结果与计算结果的比较，对结构参数及试验数据的作用进行详细的说明。

2 数学模型

2.1 一般方程建立

在进行仿真计算时，液压系统通常可被描述成普通的微分方程组，并采用数值积分进行求解。这些方程通常可表示成矢量形式

$$\dot{\vec{y}} = f(\vec{y}) \quad (2.1)$$

在一定的时间 t ，等式左边的状态变量 $\vec{y}(t)$ 值可通过对前一时刻已知状态变量 $\vec{y}(t-1)$ 的积分来得到。

当仅限于求解压力、速度(角速度)、位移(角位移)这些重要的状态变量来讨论动态特性时，上式可以用来描述如图2.1所示的液压系统。

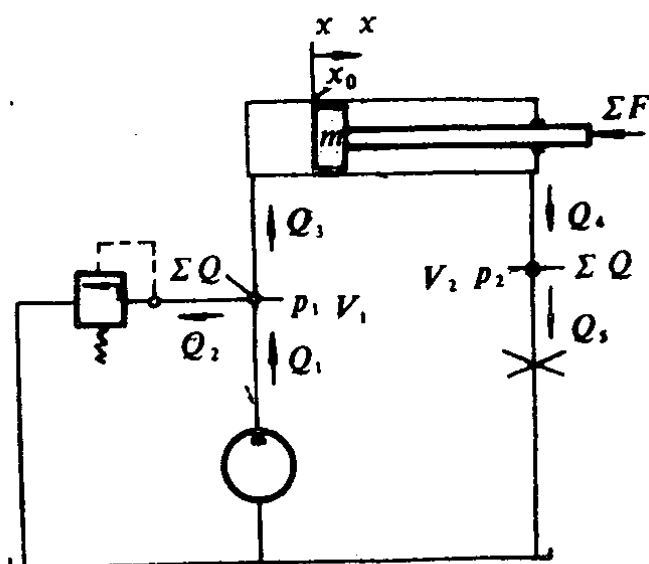


图2.1 液压系统的特征值

图中的压力可由公式

$$p = \frac{E_0}{V_0} \int \Sigma Q dt + p_0 \quad (2.2)$$

来计算，其中 V_0 是构件间封闭容腔中的油液体积，它与弹性模量 E_0 一起来表明该容腔为一理想液容。 ΣQ 是进出该容腔流量的总和。某个运动构件的速度可根据牛顿定理得到：

$$\dot{x} = \frac{1}{m} \int \Sigma F dt + \dot{x}_0 \quad (2.3)$$

而其位移则可通过对速度的积分获得：

$$x = \int \dot{x} dt + x_0 \quad (2.4)$$

对于旋转运动物体，相应地有

$$\omega = \frac{1}{I} \int \Sigma M dt + \omega_0 \quad (2.5)$$

及

$$\varphi = \int \omega dt + \varphi_0 \quad (2.6)$$

为了实现数学模型的自动建立，首先必须将液压构件的诸重要信息组合起来。

2.2 构件描述

有关的液压构件信息，既不是直接从液压流程图中获得，也不是直接来自明细表，而是必须要用字母数字符号输入计算机。由于每个系统的动态特性数学模型的建立总是从相似的原则出发，因此每个构件的信息均应系统地加以概括并且贮存起来，就像图2.2所示对先导型溢流阀所处理的那样。

为了统一起见，每个构件都用不超过六个数字或字符的标识符来定义它的构件类别(这儿为DRUVEN)和结构形式(这儿

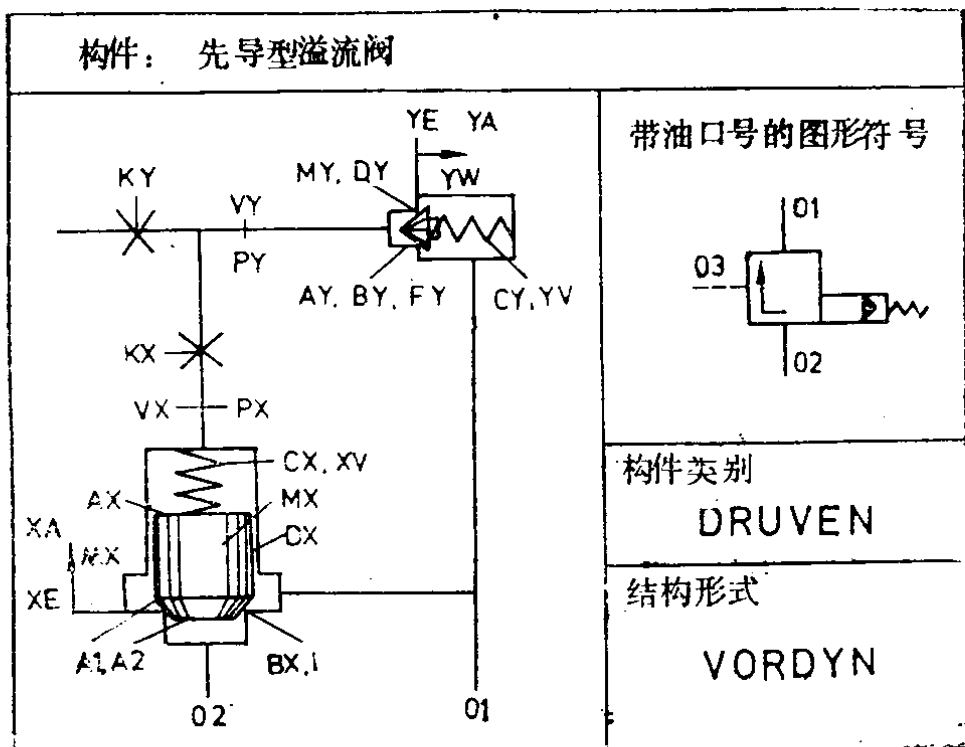


图2.2 先导型溢流阀的构件信息

为VORDYN)。这些关键字同时对程序、模型库和输入产生影响，从而得到正确的子模型。

在每个构件的接口处，赋以固定的油口号码(这儿为01, 02, 03)来清楚地确定该构件在系统内部所处的安装位置。构件简图中已标上在数学模型中所涉及到的全部参数名及状态变量名。确定用两个字母符号来表示参数名和状态名，充分兼顾了所必需的内存占用和设计人员所需的简易明瞭性。

确定构件类别和结构形式

构件类别	说明
PUMPE	泵
MOTOR	油缸和马达
STROVE	流量阀
结构形式*	
NÜVKON	定转速定排量泵
LINDOP	双作用油缸
BLENDE	非线性液阻

图2.3 表示液压系统构件类别和结构形式的关键字

* 原文图中此处误缺，增补——译者注