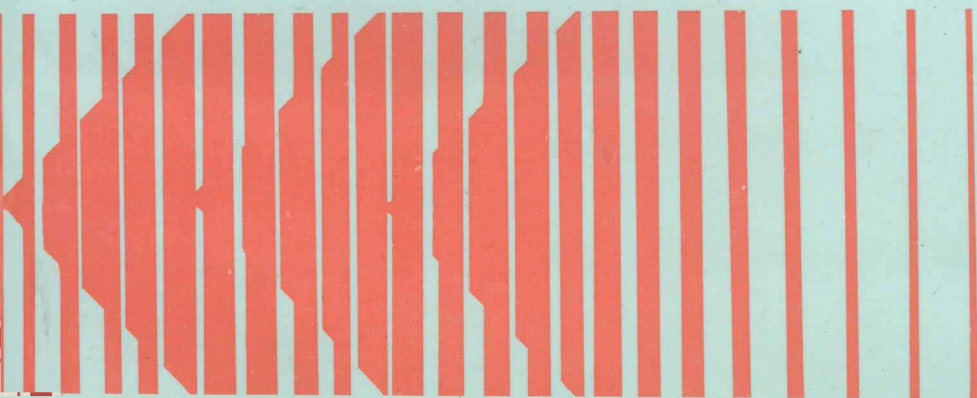


液压系统 动态特性数字仿真

刘能宏 田树军 编著

0 1 2 3 4



5 6 7 8 9

大连理工大学出版社

TH4 / <1>SH

液压系统动态特性数字仿真

刘能宏 田树军 编著

大连理工大学出版社

(辽) 新登字 16 号

内 容 简 介

本书介绍液压元件和液压系统动态分析的基本概念、数学模型的建立和在计算机上进行数字仿真的有关问题。

全书共分六章:第一章介绍液压系统动态分析的基本概念;第二章介绍作为液压系统有效建模工具——功率键合图的有关内容;第三章介绍系统数学模型的建立;第四章介绍数字仿真编程中的有关问题;第五章介绍几个典型液压系统建模与数字仿真实例;第六章介绍一种通用的液压系统动态特性数字仿真软件包。

本书着重于讲清概念及有助于实用,可作为高等院校工科“机械制造”、“流体传动与控制”等有关专业本科生和研究生的教学用书,也可供从事液压技术工作的工程技术人员参考。

液压系统动态特性数字仿真

Yeyaxitong Dongfaitexing Shuzifangzhen

刘能宏 田树军 编著

大连理工大学出版社出版发行

邮政编码:116024

大连海运学院印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:9.0625 字数:241千字

1993年8月第1版

1993年8月第1次印刷

印数:1—3000

责任编辑:史振声

封面设计:姜严军

责任校对:王 莹

ISBN 7-5611-0557-6/TH·15

定价:5.80元

前 言

当今世界技术发展突飞猛进,其中液压技术占有重要地位,特别是机电液一体化代表着一个重要发展方向。与此同时,对机器性能的要求也日益提高。如果说,过去对于液压系统的动态性能尚不够重视,今后对此在许多场合则不容忽视,诸凡运动平稳性、运动精度、振动、爬行、冲击、噪声等问题都与元件或系统的动态性能密切相关。因此,如何在机器的设计阶段,即能做到预测其动态特性,以保证机器制造运转后的要求,以及在改进设计中,如何通过动态分析,把握住提高性能措施的方向,当为技术界所瞩目并希望能顺利解决的课题之一。

目前,液压系统动态分析的方法并不鲜见,亦各有其特点,其中,应用功率键合图作为建模工具,并在计算机上进行数字仿真,当属海内外公认的液压系统动态分析的有效方法之一。本书即根据作者及其所在单位同仁十多年来在该领域从事教学,科研积累起的心得体会写成,以期适应当前在这方面的需要。

对系统动态特性进行分析,在技术层次上有较高的要求。写作本书的宗旨是:在液压系统动态特性数字仿真方面,着重于讲清概念及有助于实用,涉及到的有关问题,不追求系统、全面,够用就行,即使对于本书所采用的有效建模工具功率键合图技术也不例外。这是考虑到,一本书不可能包含内容过多,在掌握本书基本内容的基础上,根据需要进行进一步阅读有关文献并非难事。

本书各章叙述内容概括如下:

第一章对液压系统动态特性的分析进行概述,包括动态分析的作用、研究的内容和方法以及影响动态特性的诸因素;

第二章介绍功率键合图的作用、构成、符号和绘制方法,主要通过实例进行,读者可以发现,即使以前从未涉及过该领域,对

于键合图的了解和应用,也是简单易学,便于掌握,该章最后并辅以几个键合图的应用实例,以期扩大读者视野;

第三章介绍系统数学模型的建立,包括从键合图推导状态方程的过程,上机进行仿真计算前的准备工作,并对涉及的变量间因果关系及时变非线性因素问题进行阐述;

第四章叙述数字仿真编程中的有关问题,包括计算方法、计算步长、刚性方程、输入与输出、时变参数的处理、约束条件及优化等问题;

第五章介绍几个典型液压系统建模与数字仿真实例,这些系统各具特点,读者可以由此了解到在不同的具体实用条件下,进行建模与数字仿真时处理有关技术问题的一些方法;

第六章介绍一种通用仿真软件包,应用该软件包在计算机上可以直接从键合图自动推导系统的数学模型、进行仿真计算直至输出仿真结果,这对进行液压系统动态特性数字仿真的设计分析人员来讲,将会感到很大的方便。

本书可用作“机械制造”、“流体传动与控制”以及机械类其它专业本科生和研究生有关课程的教材或教学参考书,也可作为有关工程技术人员的参考用书。

本书由刘能宏、田树军二人合作编写。刘能宏写第一、二、三章及第五章的§5-3、§5-4,田树军写第四、六章及第五章的§5-1、§5-2。

本书在编写过程中,得到学校、出版社、机械工程系和教研室有关同志的大力支持,谨在此表示衷心的感谢。

本书如能对国内同行在教学、科研、生产中有所裨益,即达到作者编写该书之初衷,但由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请同行和读者批评指正。

刘能宏

于大连理工大学

1992.10

目 录

第一章 液压系统动态特性概述	1
§ 1-1 动态特性分析在液压系统设计中的作用	1
一、液压系统正常工作应满足的要求	1
二、液压系统的动态过程	2
三、液压系统动态特性分析在液压系统设计及其 CAD 中的作用	5
§ 1-2 液压系统动态特性研究的内容和方法	7
一、液压系统动态特性研究的内容	7
二、液压系统动态特性研究的方法	8
1. 传递函数分析法	8
2. 数字仿真法	9
三、液压系统动态特性研究的复杂性	13
§ 1-3 影响液压系统动态特性的因素	13
一、机电液系统中的影响因素及其相似性	14
1. 机械系统中的影响因素	14
2. 电气系统中的影响因素	15
3. 液压系统中的影响因素	16
二、复合作用元	22
三、进行液压系统动态分析时应如何考虑其影响因素	23
第二章 功率键合图	25
§ 2-1 功率键合图的作用、构成和符号	25
一、功率键合图的作用	25
二、功率键合图的构成和符号	26
1. 功率键	26
2. 键间联系	26

3.. 作用元	30
4: 外界输入功率源	30
5. 因果关系	31
6. 标注因果线的规则	32
7. 控制关系	37
§ 2-2 功率键合图的绘制	41
一、对所研究系统的必要分析	41
1. 所研究的系统及其动态过程	41
2. 必要的系统结构简图	42
3. 需要考虑的影响因素	43
4. 分析功率流程	43
二、绘制功率键合图	45
1. 直动式溢流阀调压系统的功率键合图	45
2. 绘制功率键合图的步骤小结	47
三、有关功率键合图几个问题的分析	49
1. 关于功率流向	49
2. 功率键合图的全过程代表性	50
3. 功率键合图中各变量间的关系	51
§ 2-3 典型功率键合图举例	52
一、先导式溢流阀调压系统的功率键合图	52
二、液压管道的功率键合图	57
三、双泵供油回路的功率键合图	59
四、阀控缸系统的功率键合图	62
第三章 数学模型的建立	66
§ 3-1 从功率键合图推导状态方程	66
一、确定状态变量和输入变量	66
二、推导状态方程的步骤	68
三、状态方程的物理意义	70
§ 3-2 确定状态方程中的各量值	70
一、确定状态方程中的参量值	71
二、确定状态方程中的输入量值	73

三、确定状态变量的初始值	74
四、确定引起系统动态过程的输入信号	75
五、必要的约束条件	76
六、确定输出变量	77
七、状态方程的形式	79
1. 状态方程中微分方程的形式	79
2. 状态方程的结构形式	80
§ 3-3 功率键合图中因果线的作用	81
一、关于标注因果线的规则	81
二、标准型键合图和非标准型键合图	84
1. 标准型键合图	84
2. 非标准型键合图	88
三、不合理的键合图	93
§ 3-4 液压系统中常见的时变非线性因素	98
一、时变非线性阀口液阻	98
1. 普通滑阀阀口的液阻	99
2. 带有锥度部分的滑阀阀口液阻	99
3. 伺服阀阀口的液阻	101
4. 非环形通流截面阀口的液阻	103
二、可变液容	106
三、库仑摩擦力	108
四、系统中存在时变非线性因素时的处理方法	111
第四章 数字仿真程序设计中的典型问题	112
§ 4-1 数字仿真程序的基本模式	112
1. 主控子程序	113
2. 参数输入子程序	113
3. 参数计算子程序	113
4. 仿真过程执行子程序	115
5. 仿真算法子程序	116
6. 模型子程序	116
7. 时变非线性函数处理子程序	117

8. 约束条件子程序	117
9. 仿真结果输出子程序	117
§ 4-2 计算方法的选择	121
一、数值积分法的基本原理	121
二、数值积分法的一些基本概念	123
1. 单步法与多步法	123
2. 显式方法与隐式方法	123
3. 自开始与非自开始方法	123
4. 截断误差	123
5. 舍入误差	124
6. 数值稳定性	125
三、龙格-库塔 (Runge-Kutta) 法	125
四、其它常用数值积分法	128
1. 欧拉 (Euler) 法与改进欧拉法	128
2. 阿达姆斯 (Adams) 法	129
3. 预报-校正法	130
4. 适于求解刚性方程的方法	131
五、关于计算方法的选择	133
1. 精度要求	134
2. 计算速度	134
3. 数值稳定性	135
4. 程序设计的难易性	136
§ 4-3 计算步长的选择	136
1. 根据系统状态方程特征值确定	137
2. 根据系统动态响应特征估计	137
3. 根据键合图模型中储能元特征估计	138
4. 关于变步长方法	139
§ 4-4 输入与输出	140
一、输入	141
1. READ/DATA 语句方式	141
2. 键盘输入方式	141
3. 数据文件方式	141
二、输出	142

1. 屏幕显示输出与打印机输出	142
2. 绘图机输出	147
§ 4-5 时变参数的处理	154
1. 时变液导	155
2. 时变作用力	156
3. 时变液容	158
4. 其它时变参数	159
§ 4-6 约束条件问题	160
一、设置约束条件的目的	160
二、约束条件的编程处理方法	161
§ 4-7 优化问题	162
一、人工控制调整参数的优化	163
1. 优化目标的确定	163
2. 线性加权法	164
3. 波形面积法	165
4. 设计变量的选取	166
二、程序自动控制调整参数的优化	168
第五章 液压系统建模与数字仿真实例	173
§ 5-1 先导式溢流阀调压系统	173
一、功率键合图	173
二、系统状态方程	175
1. 状态方程推导及非线性时变系数计算	175
2. 非线性时变液阻的处理	177
三、非标准键合图现象及其建模处理	178
四、仿真结果及分析	180
§ 5-2 限压式变量叶片泵供油系统	185
一、功率键合图与状态方程	186
二、系统中的典型非线性因素及其建模处理	187
1. 泵的流量 Q	188
2. 水平方向内力转换系数 $B(\theta)$	190
3. 库仑摩擦力 $S_F(p)$	192

4. 电磁阀通流液阻 $R_{\text{阀}}$	194
三、仿真研究结果及系统的改进设计	194
§ 5-3 平面磨床液压换向系统	198
一、系统的工作原理	199
二、状态分段法	201
三、建立数学模型所作的假设	203
四、系统的功率键合图	203
五、系统的数学模型	206
六、数学模型中几个主要非线性因素	210
七、数学模型的求解和仿真结果	211
八、系统的改进	213
§ 5-4 液压非圆仿形系统	214
一、系统的工作原理	215
二、建立数学模型时所考虑的因素及所作的假设	216
三、系统的功率键合图	217
四、系统的数学模型	220
五、伺服阀控制阀口的液导	223
六、系统非圆仿形的输入函数	224
七、系统非圆仿形的数字仿真	226
八、系统的改进	228
第六章 应用计算机自动建模及液压系统通用仿真软件包	231
§ 6-1 概述	231
§ 6-2 键合图模型数字化描述语言	234
一、键合图模型数字化的概念与描述语言	234
二、键合图描述语言的主要组成成分及规则	235
三、参量描述段的设置	237
§ 6-3 自动建模的实现过程	238
一、键合图文件的语法和语义检查	238
1. 语法检查	239

2. 语义检查	239
二、键合图文件的格式化处理和特征矩阵	240
1. 键合图文件格式化	240
2. 特征矩阵	241
三、结点方程	242
1. 关于以功率变量取代能量变量作为状态变量的处理	243
2. 结点方程的不同形式	244
3. 结点方程的自动生成	246
四、数学模型-状态方程的自动生成	247
1. 状态方程的结构及特征	247
2. 状态方程的准线性化处理	248
3. 状态方程的自动生成	249
五、其它模型子程序的自动生成及自动建模实例	250
§ 6-4 非线性模型库与非线性模型的自动生成	253
一、非线性模型库的基本特点	253
二、模型库的数据结构	253
三、模型库的容量与规模	254
四、模型库应用程序设计	255
§ 6-5 非标准键合图的自动建模处理方法	259
一、非标准键合图特征分析	259
二、采用非独立变量法实现非标准键合图的自动建模	261
§ 6-6 SIM-1液压系统动态仿真通用软件包	262
一、软件包的基本结构与功能	263
1. 子系统 A	263
2. 子系统 B	263
3. 子系统 C	265
4. 子系统 D	266
5. 子系统 E	266
二、应用实例	267
主要参考文献	275

第一章 液压系统动态特性概述

§ 1-1 动态特性分析在液压系统设计中的作用

一、液压系统正常工作应满足的要求

在国民经济诸多领域的发展中, 液压传动及其控制的应用已日益增多。一台机器的液压系统要能正常工作, 需要满足以下几方面的要求:

(1) 工作循环要求: 应能完成机器所要求的自动工作循环以及在工作中所必需的安全保护。

(2) 静态特性要求: 主要参量应选择正确, 能满足机器工作中的静态特性要求, 例如能驱动外界负载, 能产生需要的驱动速度, 包括快速运动速度和工作速度的调节, 以及必要的速度稳定值, 相应地需要液压系统能提供必要的功率。

(3) 动态特性要求: 一般的液压系统应能满足机器工作时的动态特性要求, 例如工作器官不产生振动、爬行, 噪声小, 系统中不产生液压冲击, 有时要求工作循环中各动作环节转换迅速平稳, 不产生较大的动态误差等。在对液压系统的动态特性要求较高时, 仅考虑系统的静态特性进行设计是不够的, 还必需在设计时进行动态特性分析。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。近年来, 由于对液压系统工作性能的要求日益提高, 液压系统的动态特性已逐渐被人们所重视。

以上所述是对液压系统能正常工作的基本要求。当然, 在这

前提下,设计一台液压系统,还要考虑其结构简单、耗能少、成本低、制造维护方便、操作简单、可靠性高等。在某些条件下,这些问题往往也成为设计液压系统时应考虑的重要因素。

二、液压系统的动态过程

液压系统的动态特性是其动态过程中的特性。液压系统的动态过程可以由许多原因引起,归纳起来有下述两个方面:

(1) 由控制过程引起的:为了得到工作循环中的不同动作,某一或某些元件受控改变其工作状态。例如工作器官的起动、制动,运动方向或运动速度的转换,工作压力的转换,卸荷,不同执行机构动作的切换等。有时还将产生连续的动态过程,例如仿形加工和数控加工等的连续控制过程。

(2) 由外界干扰引起的:例如外界被驱动负载的变化,机床加工中切削力的变化,工作器官运动中的阻力如摩擦力的变化等。

液压系统是机器的一部分。一台液压机械既有机械系统部分,也有液压系统部分。整台液压机械的动态结构将由这两部分的动态结构构成,如图 1-1 所示。加在整个系统上的外界负载 $f(t)$ 需要液压系统输出的驱动力



图 1-1 液压机械的动态结构框图

$p(t)$ 予以克服,经过机械系统中各种因素的作用,可以使工作器官获得运动速度 $v(t)$,如果外界负载有一变化,即有一外界干扰,工作器官的运动速度 $v(t)$ 即产生变化,这时液压系统作为一个反馈环节,在其动态过程中,可以根据工作器官速度的变化,调节其输出的驱动力 $p(t)$,以适应外界负载的变化。如果液压系统是一个自动调节系统,就可以使工作器官基本维持原来的运动速度,或使运动速度的变化不大。

液压系统在产生动态过程以前,是在某一稳态状况下工作的,即系统中各参量相互间的关系都处于静平衡状态。系统产生动态过程时,这种平衡状态即遭破坏。当动态过程结束时,系统又恢复平衡,但这是一种新的平衡状态。所以液压系统的动态过程是系统失去原来平衡状态到达新的平衡状态的过程。在这一过程中,系统中各参量都在随时间发生变化。这种变化过程性能的好坏,就是系统动态特性的好坏。

现以一简单的直动式溢流阀调压系统为例对液压系统的动态过程作进一步说明。

直动式溢流阀调压系统工作原理简图如图 1-2 所示。图中 $Q_{\text{泵}}$

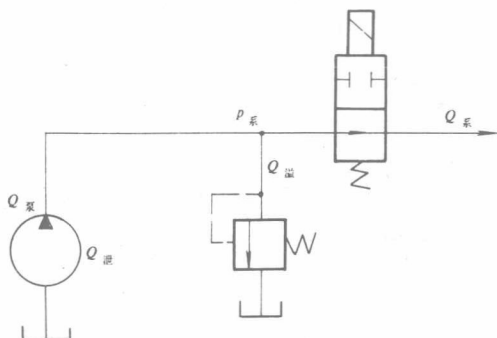


图 1-2 直动式溢流阀调压系统工作原理简图

为泵的理论流量, $Q_{\text{系}}$ 为输给系统工作的流量, $Q_{\text{溢}}$ 为经溢流阀流回油箱的流量, $Q_{\text{泄}}$ 为泵的泄漏流量, $p_{\text{系}}$ 为系统的工作压力。图 1-3 为直动式溢流阀的结构简图。图中 $x_{\text{口}}$ 为阀的开口量。在液压元件中, 直动式溢流阀虽是一个很简单的液压元件, 但它本身却也是一个闭环的压力自动调节装置。

当系统在某一稳态状况下工作时, 从溢流阀口排出某一溢流量 $Q_{\text{溢}}$, 相应地系统有一工作压力 $p_{\text{系}}$, 整个系统处于一种平衡状态下工作。这时系统中的各物理量相互间都处于静平衡状态, 即相

互间都符合静平衡关系式，不随时间变化。这些应符合的静平衡关系式一般有受力平衡方程，液流连续性方程和流量方程等。在本例中静平衡关系式可有：

(1) 根据流量连续性方程， $Q_{\text{泵}}$ 等于 $Q_{\text{系}}$ 、 $Q_{\text{溢}}$ 和 $Q_{\text{泄}}$ 之和。

(2) 阀的开口量 $x_{\square}$ 、系统的工作压力 $p_{\text{系}}$ 和经阀口的溢流量 $Q_{\text{溢}}$ 符合阀口的流量特性方程。

(3) 溢流阀阀芯上所受的各力符合静平衡方程。这些作用力有阀芯底部的液压控制力，阀芯上的弹簧力和阀口处的稳态液动力等。因为这时阀芯处于稳定不变位置，速度为零，阀芯底部的控制油压等于系统的工作压力 $p_{\text{系}}$ 。

如果由于某一原因使系统需要的工作流量 $Q_{\text{系}}$ 突然减少，例如由于换向阀关闭或速度转换，或液压缸工作到头等，使油液输向系统的阻力增大，这时原来系统的静平衡状态即被破坏，引起一个动态过程。由于泵输出的理论流量 $Q_{\text{泵}}$ 是一定的， $Q_{\text{系}}$ 减小了，势必使其其它的出路如 $Q_{\text{溢}}$ 等增大。因为这时阀口的开度 $x_{\square}$ 并未变化，要排出的流量增多，就会导致系统压力 $p_{\text{系}}$ 升高，溢流阀的阀芯是受系统压力控制的，压力升高，破坏了原来阀芯上的受力平衡，使阀芯产生运动，阀口开度 $x_{\square}$ 增大，在控制油压以及阀芯本身惯性的作用下，可能使阀口开得过大，因而使系统压力 $p_{\text{系}}$ 又下降，阀芯又向相反方向运动，使 $x_{\square}$ 减小，这样 $p_{\text{系}}$ 又增大。经过几次波动后，最后系统达到一个新的平衡状态。在这一新的平衡

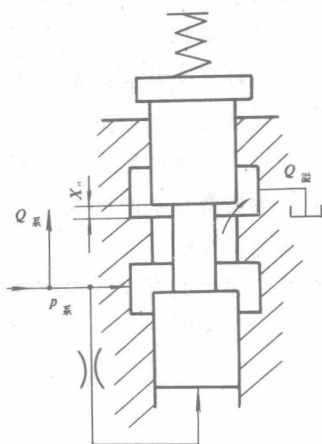


图 1-3 直动式溢流阀的结构简图

状态中,系统中的各物理量相互间仍将符合前述的三个静平衡关系式,但这些物理量的数值已是新的数值了。由于 $Q_{溢}$ 增多,系统的压力 $p_{系}$ 要升高,但同时由于直动式溢流阀的自动调节作用,使阀口开度 $x_{口}$ 加大,所以 $p_{系}$ 的升高不大,同时由于 $p_{系}$ 的升高, $Q_{溢}$ 也相应地有所增多。以上所述,就是简单的直动式溢流阀调压系统在工作中产生的一个动态过程。

通常,一个液压系统是由若干液压元件所组成,其中包括泵、液压马达或液压缸、各种阀及管道等,因此液压系统的动态过程及其特性将由这些元件及由液压系统驱动的机械工作部件综合形成。经过一个动态过程,系统中各个参量间,将由原来的平衡状态过渡到一个新的相互间平衡的状态。

三、液压系统动态特性分析在液压系统设计及其 CAD 中的作用

液压系统的设计过去都由人工进行,最近十多年来,由于计算机技术的迅速发展,在液压技术领域计算机也得到较多应用,液压系统的计算机辅助设计(CAD)获得了较快发展,特别是液压系统的动态特性分析,往往要借助于计算机的应用。无论主要是由人工进行设计还是应用 CAD 技术,液压系统的设计程序大致如图 1-4 所示。

根据提出的设计要求,首先要拟定液压系统原理图,以保证所需要的工作循环和各项功能,并初步确定各液压元件的型号、规格。以后进行液压系统静态特性分析,以验算所需要的驱动力及运动速度是否能得到保证,负载特性和能源利用率如何,温升是否在允许范围内。如果不够满意,则反回去修改液压原理图和选择的液压元件,直至满意为止。下一步根据需要进行某些专用液压件的设计,如专用液压缸、专用液压集成阀块以及必需的专用阀件等。以后即可进行液压系统装配图和安装图的设计,在这些工作完成以后,如果需要,则进行液压系统动态特性分析。

并不是所有的液压系统都需要进行动态特性分析。例如一些