

# 目 录

译者的话 .....	i
中文版序言 .....	ii
前言 .....	iii
<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 设计原理 .....	3
1.3 建立动态模型 .....	4
1.4 希望具备的基础知识 .....	7
1.5 本书的安排 .....	7
1.6 结束语 .....	8
<b>第二章 符号与单位</b> .....	9
2.1 引言 .....	9
2.2 符号表示法 .....	9
2.2.1 符号 .....	9
2.2.2 符号用法的例子 .....	9
2.2.3 方程 .....	11
2.2.4 说明 .....	11
2.3 单位 .....	11
2.3.1 说明 .....	11
参考文献 .....	12
<b>第三章 传统的建模方法</b> .....	13
3.1 引言 .....	13
3.2 传统的模型形式 .....	13
3.2.1 任意排列的方程组 .....	13
3.2.2 传递函数 .....	15
3.2.3 向量-矩阵模型 .....	15
3.2.4 方块图和信号流图 .....	15
3.3 推导模型 .....	15
3.4 相互关系的选择 .....	16
3.5 参数值的选择 .....	17
3.6 另一个例子 .....	17
3.7 结束语 .....	19
参考文献 .....	19
<b>第四章 功率流建模</b> .....	20
4.1 引言 .....	20

4.2 功率口 .....	21
4.3 功率流描述 .....	24
4.4 推导方程 .....	26
4.5 举例 .....	29
4.6 概要 .....	31
参考文献 .....	32
<b>第五章 功率键合图</b> .....	<b>33</b>
5.1 引言 .....	33
5.2 键合图的术语和符号 .....	33
5.2.1 力变量和流变量 .....	33
5.2.2 源 .....	34
5.2.3 功率键 .....	34
5.2.4 功率转换器 .....	34
5.2.5 动态影响因素 .....	36
5.2.6 阻尼型能量损耗 .....	37
5.2.7 容性型能量储存 .....	38
5.2.8 惯性型能量储存 .....	39
5.2.9 汇集结点 .....	40
5.2.10 基本术语和符号的概要 .....	42
5.3 建立功率键合图 .....	42
5.3.1 有摩擦的惯性负载 .....	42
5.3.2 液压缸 .....	43
5.3.3 感应电动机 .....	45
5.3.4 简单系统 .....	47
5.4 功率流向和因果关系 .....	48
5.4.1 引言 .....	48
5.4.2 功率流向 .....	48
5.4.3 因果关系 .....	49
5.4.4 举例：液压缸 .....	51
5.4.5 举例：感应电动机 .....	51
5.4.6 举例：简单的液压缸-负载系统 .....	52
5.4.7 概要 .....	53
5.5 建立方程组 .....	53
5.5.1 引言 .....	53
5.5.2 举例：一个简单的元件 .....	54
5.5.3 一个简单系统的例子 .....	55
5.5.4 一个较完整的系统 .....	57
5.5.5 概要 .....	59
5.6 键合图的其他问题 .....	61
5.6.1 作用元的调节 .....	61
5.6.2 可调变换器 .....	61

5.6.3 场和结点结构 .....	62
5.6.4 键合图的简化 .....	63
5.7 结束语 .....	63
参考文献 .....	63
<b>第六章 功率流模型的求解</b> .....	<b>64</b>
6.1 引言 .....	64
6.2 数字仿真 .....	64
6.3 面向表达式的CSSL'S .....	66
6.4 结束语 .....	66
参考文献 .....	67
<b>第七章 方程和系数的选择</b> .....	<b>68</b>
7.1 引言 .....	68
7.2 柔度 .....	68
7.2.1 引言 .....	68
7.2.2 油液的柔度 .....	68
7.2.3 体积弹性模量的数值 .....	71
7.2.4 机械柔度 .....	71
7.3 摩擦 .....	72
7.4 被驱动负载的模拟 .....	74
7.4.1 固有的负载 .....	74
7.4.2 外部负载力 .....	76
7.5 泄漏流量 .....	76
7.5.1 关系式 .....	76
7.5.2 系数 .....	77
7.6 溢流阀流量 .....	78
7.6.1 关系式 .....	78
7.6.2 系数 .....	79
7.7 感应电动机 .....	79
7.7.1 关系式 .....	79
7.7.2 模型 .....	81
7.7.3 系数 .....	81
7.7.4 结束语 .....	81
7.8 液压泵 .....	82
7.8.1 关系式 .....	82
7.8.2 系数 .....	85
7.9 四通控制阀 .....	85
7.9.1 引言 .....	85
7.9.2 基本关系式 .....	85
7.9.3 阀的液流术语 .....	87
7.9.4 中位封闭式 (O型) 控制阀 .....	87
7.9.5 中位常开式 (H型) 控制阀 .....	90

7.9.6 中位旁通式 (M型) 控制阀 .....	93
7.9.7 概要 .....	95
<b>7.10 液动机</b> .....	95
7.10.1 引言 .....	95
7.10.2 液压缸 .....	97
7.10.3 回转液动机 (液压马达) .....	98
7.10.4 方程和系数 .....	99
<b>7.11 其他一些通用元件</b> .....	99
7.11.1 液压管道 .....	99
7.11.2 滤油器 .....	101
7.11.3 蓄能器 .....	101
7.11.4 一些其他的阀 .....	102
7.12 结束语 .....	105
参考文献 .....	105
<b>第八章 键合图的应用</b> .....	106
8.1 引言 .....	106
8.2 用中位封闭式滑阀控制的带有摩擦的惯性负载 .....	106
8.3 承载的液压伺服系统 .....	109
8.4 液压泵子系统 .....	109
8.5 液压泵控制的液压传动 .....	115
8.6 阀控制的液压传动 .....	116
8.7 提升系统 .....	119
8.7.1 引言 .....	119
8.7.2 绘制键合图 .....	121
8.7.3 方程式和系数 .....	122
8.7.4 仿真 .....	124
8.7.5 结束语 .....	125
8.8 一个高动态性能的电液控制系统 .....	125
8.8.1 引言 .....	125
8.8.2 键合图 .....	127
8.8.3 结束语 .....	128
8.9 结束语 .....	128
参考文献 .....	128
<b>第九章 系统响应的优化</b> .....	129
9.1 引言 .....	129
9.2 要求 .....	129
9.3 误差指标 .....	130
9.4 搜索过程 .....	131
9.4.1 引言 .....	131
9.4.2 单参数优化 .....	132
9.4.3 多参数优化 .....	133

9.4.4 复合形法 .....	133
9.5 举例 .....	135
9.6 结束语 .....	135
参考文献 .....	137
<b>第十章 影响系统响应的因素 .....</b>	<b>138</b>
10.1 引言 .....	138
10.2 空穴现象 .....	138
10.2.1 概述 .....	138
10.2.2 建模和仿真中的空穴现象 .....	141
10.3 液压游隙 .....	141
10.4 阀的液动力 .....	142
10.5 液压卡紧 .....	144
10.6 被污染的流体 .....	147
10.7 结束语 .....	148
参考文献 .....	148
<b>第十一章 结论 .....</b>	<b>150</b>
<b>附录 I 静态设计方法 .....</b>	<b>151</b>
<b>附录 II SI制单位换算表 .....</b>	<b>154</b>
<b>附录 III 有关动态响应的文献目录 .....</b>	<b>155</b>
<b>索引 .....</b>	<b>158</b>

# 第一章 绪 论

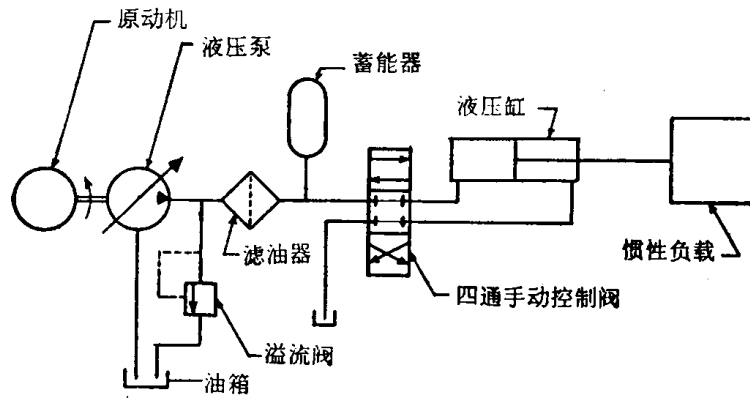
## 1.1 引 言

液压控制系统用于控制阻性负载的位置或速度。最后的驱动通常是由液动机——直线运动的液压缸或回转运动的液压马达——来实现。液动机从容积式液压泵获得具有一定压力（通常为7~35兆帕）的液体来产生它的力或扭矩。同时，它也通过从泵系统获得液体的流速来产生运动。图1.1表示了几个简单的液压控制系统。

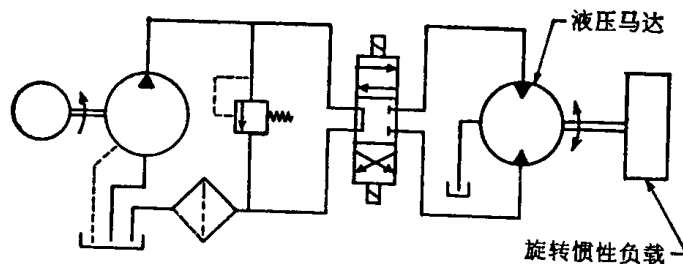
液压控制系统常用于：

(1) 需要较大力或扭矩的场合（如工业压力机、汽车吊、挖掘机以及材料装运设备等）。

(2) 需要阻性负载迅速及刚性响应的场合（如机床传动、飞行模拟器等）。



(a) 直线驱动液压控制系统



(b) 旋转驱动液压控制系统

图 1.1 典型的液压控制系统

(3) 需要严格控制响应的场合（如飞机翼面控制、机床滑台以及工业机器人等）。

(4) 需要对大功率的运动实施手控的场合（如汽车设备、飞机控制以及交通运输工具的驾驶等）。

(5) 在复杂的自动控制场合（如电-液飞行模拟器、工业机器人、疲劳试验机以及其他

可编程的试验设备等)中作为最后执行器的子系统。

这说明液压控制系统常用于动态场合。在这类场合,对指令的响应虽然不能是瞬时的,但必须是可控制的,而且往往要优化成能够遵循预定的运动-时间轨迹。图1.2表示了二组简单的指令与响应。

对于液压系统设计者来说,仅仅知道他所拟用的系统能够驱动负载从一种状态运动到另一种状态是不够的,他也应该知道负载将怎样运动。设计者不仅需要重视响应的初始状态和最终状态,而且也要重视介于这两种状态之间的时域轨迹(如图1.2所示)。他应该知道系统的响应是否稳定,响应速度是否足够快或过快,以及响应是否振荡等等。

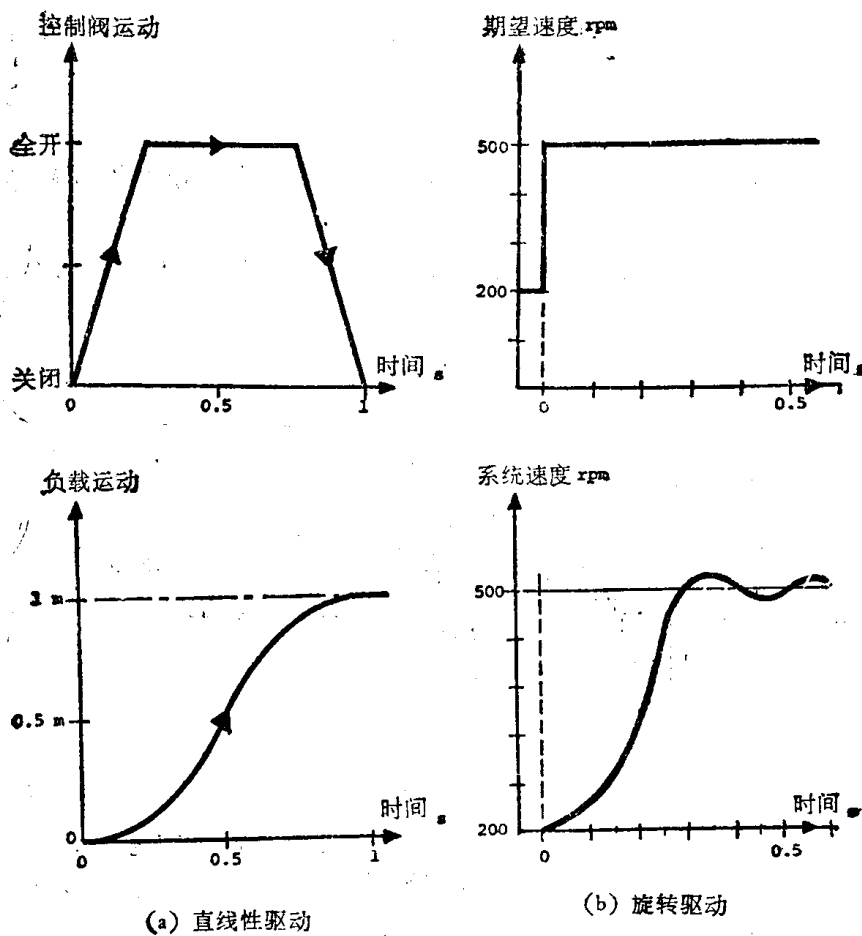


图 1.2 两组指令-响应关系  
(根据系统、负载和输入信号的不同,响应时间会比图示的情况快很多或慢很多)

动态分析可以是:

- (1) 实质上的修正,其目的在于弄清为何一个现存的系统不能令人满意地工作,并推断出为了改进系统现状能够采取的措施。
- (2) 实质上的综合,其目的是在制造出具体设备以前就能保证系统具有良好的动态响应。

在后一种情况下,拟用系统动态特性的分析设计被当作整个系统设计过程的一个组成部分。本书要着重讨论动态的综合分析方法,虽然这也是与修正分析有关的。

## 1.2 设计原理

图1.3表示了动态特性设计方法的一般步骤。“确定任务”并不意味着采用哪种特定的系统或技术,仅仅是规定所应完成的任务。“规定所要求的响应”也是一个与使用哪种特定系统或技术无关的问题,一般来说,这是所需系统响应形式的一条以时间与响应幅值为坐标的时域曲线,如图1.2所示。

“拟用系统”这一步要求初步确定采用某一种技术,在本书中就是决定采用某种液压系统,并随之拟定系统的具体形式。液压元件的初步选择通常是由以下诸因素共同决定的:

- 以往的经验;
- 系统所允许的最高压力;
- 对稳态功率以及整个运动过程的考虑;
- 可供选用的液压元件及其成本。

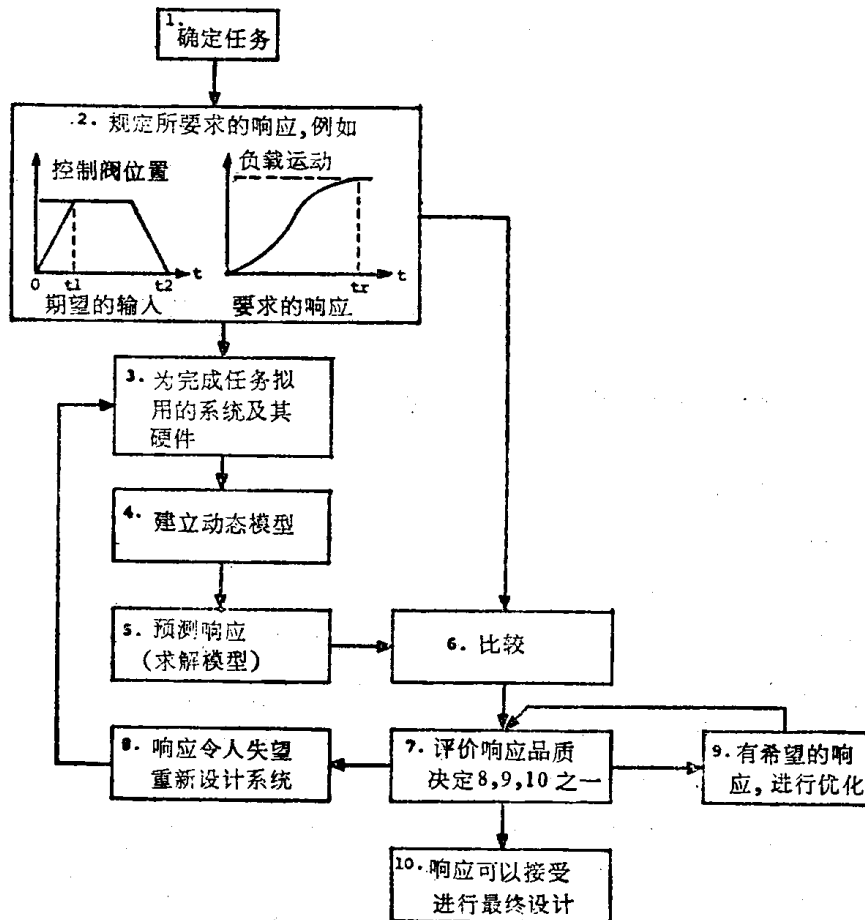


图 1.3 设计动态响应的流程图

在完成上述液压元件的初步选择以后,需要“建立动态模型”和“预测响应”(通过对模型的求解)两个步骤,来完成更具有启发性和结论性的动态响应分析。预测的响应与所期望的响应进行比较(“比较”)并评价二者之间的差异(“评价响应品质”)。

然后就可判断所拟定系统的性能是:



- 可用的 (“响应可以接受,进行最终设计”);
- 很有希望,仅需简单调整参数就能使系统性能被接受 (“响应有希望,进行优化”);
- 相当令人失望,需要重新设计拟定的系统 (“响应令人失望,重新设计系统”).

动态特性分析通常用于飞机、军事、航天和一些机床设备中的那些成本昂贵的液压系统.一般工业系统的设计中则很少进行液压系统的动态分析,其结果之一就是当用户使用许多这类普通系统时,它们的性能很少接近于所期望的最佳状态.

对系统的预测性动态分析感到自信和胜任的机械(或其他专业)工程师寥寥无几.预测性动态分析依赖于系统数学表达式的形成.这个数学模型可用来求得系统响应特性的信息.如果不能迅速地、有把握地得到一个完善的数学模型,那么对于大多数分析设计者来说,进行动态分析就不会是令人感兴趣的事.

几乎没有多少液压控制系统的设计者能自信地建立拟用系统的动态模型.但另一方面,当给出了一个数学模型后,大多数工程师都能求出它的解,以获得所需动态特性的预测.一般来说,除了那些最简单的数学模型外,最好用数字计算机来求解.一些易于使用的通用数字仿真程序是特别适用的,它并不要求分析设计者本人是一名计算机程序员.有了求解(仿真)模型的方法,分析设计者就可变换一个或几个模型参数,来寻求所期望的系统响应形式.这种响应的优化可以通过反复变更参数求解模型来获得,也可以采用自动优化方法来获得.

求解数学模型是比较容易的,对于分析设计者来说最大的难点在于迅速而又自信地建立一个适合于拟用系统的数学模型.

### 1.3 建立动态模型

传统的建立控制系统动态模型的技术,如

- 传递函数;
- 方块图和信号流图;
- 形式各异的方程组;
- 向量-矩阵(状态空间)表达式;

已经使用了很长时间,杂志上也有许多成功应用上述各种方法的范例.但是,这些模型形式还未能被液压系统设计者广泛使用,这表明它们还没有足够的吸引力.

看来,传统的建立动态模型的方法不能完全满足设计者的某些需要,这些需要包括:

(1) 在建模过程中需要有便于遵循的规范.

(2) 对常见的液压系统元件需要有可靠且能反复使用的模型.液压控制系统具有模块化的结构,它们可以通过把一些定型的和通用的液压元件装配和相互连接而组成.每一种具体型号和尺寸的泵、阀或液动机等都可以用在许多不同的系统中.设计者需要一组可供使用的动态模型,其中每一个模型分别用于一个常用的液压元件,它们能够象构成液压系统本身那样互相连接以形成一个系统的模型.

(3) 需要能够方便地修改拟用系统的模型,以便反映所设想的系统变化,保证对一具体系统作出最佳设计的选择.

对于设计方案构思,工程技术人员需要富于创造性,即具有想像力.但是对于随之

而来的分析，设计人员则需要有便于使用的充分成熟的技术。

在动态分析方面，液压控制系统具有一些明显的特点，例如：

(1) 通常这些系统的规模不大。按传递函数的说法，他们的动态特性常常可适当地用一个二阶、三阶或四阶微分方程来描述。尽管会出现复杂的多通道系统，但它们很少需要用六阶以上的传递函数来描述。这些系统通常十分紧凑，适于用集中参数法。因此，它们本身可以进行动态建模。

(2) 由于存在阀口紊流流动、摩擦、阀口搭合量和压力饱和作用等，所以它们是固有非线性系统。

(3) 通常希望它们具有大幅度（值）的响应。要求它们驱动负载从一个极限位置运动到另一个极限位置是很平常的。

(4) 上述后面两个因素使得线性化技术的应用受到很大限制。

(5) 它们是功率转换、功率传递系统。通常是从一个动力源（如电源、柴油机、航空发动机等）中吸取功率，逐渐将其转换并传递到所驱动的负载上，成为可以使用的机械功率。

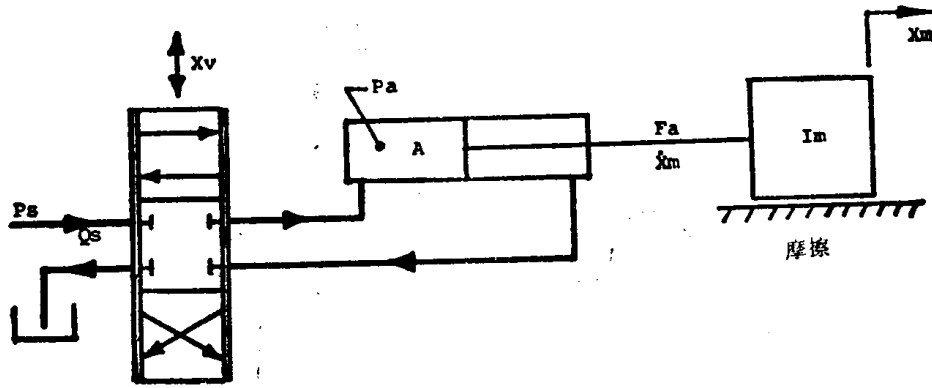
传统建模方法既没有详细考虑到这些因素，也没有特别地利用这些因素来使建模方法趋于完善。写作本书的目的就是要说明：发生在系统元件之间的动态功率交换是把动态响应分析纳入到系统设计范围中去的关键。功率流建模提供了一种与模块化系统本身物理联系和作用密切相关的系统动态描述方法。

功率流的建模方法，特别是它的最新发展功率键合图，向功率控制系统的设计人员提供了一种在系统设计中较为基本和有用的动态建模方法。作者将在本书末尾论证这一点。作者还打算给读者留下一个最常用液压系统元件的功率键合图模型库，并使读者能够建立可望使用的其他任何元件的功率键合图模型。

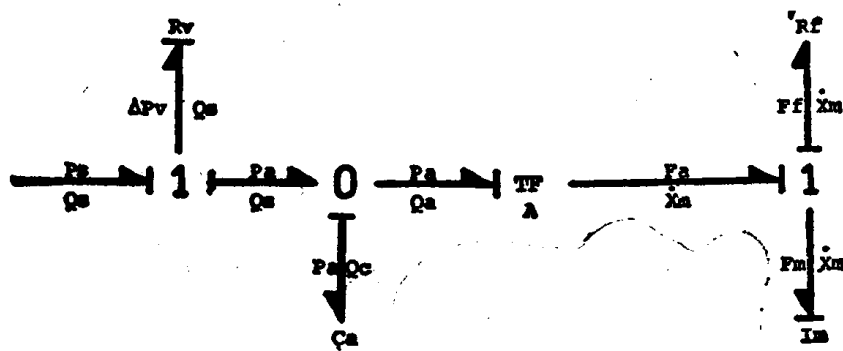
图1.4(a)表示了一个简单的液压系统，图1.4(b)是该系统的功率键合图模型结构，图1.4(c)是一组方程，它就是该系统的动态模型。键合图结构是把系统与其动态模型联系起来的关键。键合图是信号流图的一种类型，它向熟悉键合图的人提供了一种与硬件系统图之间的惊人的联系。由功率键合图可以十分方便地建立方程组。

在图1.4(b)中水平串接的每一条线段都代表了一个实在的元件，功率通过它们在相邻的系统元件间流动。写在每条线段上下两侧的两个变量的乘积描述了在该线段中所流过的功率。因此， $P, Q$ （供油压力乘以供油流量）描述了流入控制阀的功率。同样， $F, \dot{X}_m$ （作用在质量上的力乘以质量的速度）描述了流入被驱动负载的功率。出现在图中的分支线段终端的符号  $R, C, I$  分别表示影响系统动态响应的阻性 ( $R$ )、容性 ( $C$ ) 和感性 ( $I$ ) 作用元。每条线段上的半箭头表示每条功率键上功率流动的方向，这个方向可以是真实的或者是假定的。每条线段一端的短横杠表示因果关系，其目的在于以后可从键合图结构建立起一组最适合于仿真的方程。这些问题将在本书中逐步叙述并加以解释。书中所用术语和单位将在第二章中讨论。

模型结构（即功率键合图）的建立、方程中要用到的精确关系式的确定以及方程组的形成和排列都是在推导动态模型的过程中逐步完成的。然而在传统的建模过程中，这些步骤都交错在一起，这样常常在非专业的动态分析者的思想上造成混乱。在后面几章中将阐明，功率流模型提供了在系统设计场合所需要的规范性和灵活性，特别表现在：



(a) 系统



(b) 功率键合图

(忽略回油, 并只考虑  $X_v$  为正的情况)

$$P_s = \text{常量 (假定)}$$

$$Q_s = K X_v \Delta P_v^{1/2} \quad (\text{设 } X_v \text{ 为正})$$

$$P_a = P_a(0) + 1/C_a \int Q_c dt \quad (\text{线性容性方程})$$

$$F_f = R(\dot{X}_m) = \text{对液压缸的摩擦力}$$

$$F_m = F_a - F_f$$

$$\dot{X}_m = X(0) + 1/I_m \int F_m dt \quad (\text{牛顿定律})$$

$$F_a = P_a A$$

$$Q_a = \dot{X}_m A$$

$$\Delta P_v = P_s^* - P_a$$

$$Q_c = Q_s - Q_a$$

(c) 动态方程

图 1.4 一个基本的液压控制系统和它的键合图模型

- 元件的模型在许多系统模型中都有用, 这就同硬件元件本身在许多系统中都有用一样;
- 系统模型可以方便地直接用元件模型连接而成, 因为系统就是用元件构成的;
- 模型结构中的局部修改是易于做到的;

• 此处原文为  $P_s$ 。——校者注

- 可以改变模型的局部关系而不影响它的其余部分。

功率流和功率键合图建模方法可以用于各种类型的功率控制系统——电气的、气动的、机械的等。但本书集中讨论它们在液压系统中的使用，尽管其中也包括了电动机、电液装置和多种机械子系统。其他一些学者也对功率流和功率键合图的建模理论作了研究，在适当的地方将介绍参考文献。本书仅仅应用功率流技术，并着重应用于液压控制系统的设计和分析中。

本书除了在附录 I 和参考文献中所作的一些回顾外，并不提供怎样进行某一用途的液压系统基本设计的指导。本书着重研究作为系统设计过程的一部分的动态响应分析。

## 1.4 希望具备的基础知识

### 1. 读者应具备的基础知识

(1) 熟悉基本的液压控制系统的元件、系统以及如图 1.1 所示系统简图中代表液压元件的符号。

(2) 熟悉液压系统的设计，能够针对某一用途选择主要元件，如泵、溢流阀、控制阀和液动机。

(3) 熟悉工程动力学，至少要掌握常用的物理概念和关系式，如牛顿定律、压降-流速-阻尼的概念、势能-流速-容抗或柔度的概念等。掌握这些概念和关系式对所有动态建模方法来说是最起码的。

(4) 熟悉初级控制理论或动态系统分析中的一些传统建模方法。

### 2. 本书的读者对象

(1) 液压控制系统的实际设计者和常常从事设计或确定液压系统所需性能的工程师们。

(2) 对控制工程、自动化或设计感兴趣的人们，他们的工作可能会涉及到液压控制系统的使用。

(3) 那些在其专门的大学课程、研究生课程或选修课程中涉及到动态分析和流体动力系统的学生。

## 1.5 本书的安排

第一章介绍写作本书的背景及意义；第二章提供一份有关的术语表，它有助于识别方程中的符号，本章也讨论了SI单位的应用并且提供了在本书中用到的SI单位的一览表；第三章举例回顾了动态分析中使用的传统建模方法；第四章介绍并解释了功率流建模方法，从而为研究功率键合图技术提供了基础；第五章介绍功率键合图，这是本书最主要的特点，它使更多的液压控制系统设计者向能够进行预测性动态分析跨出重要的一步；第六章简述功率流模型的数字仿真，并指出这是模型求解的最实际、最有用的方法；第七章讨论和解释对于物理作用和装置如何选择方程和关系式，同时也讨论方程中系数取值问题；第八章叙述液压系统的键合图建模和数字仿真的一些应用；第九章简略地概述了与液压系统设计有关的响应优化技术；第十章简要地说明可能影响液压系统性能的因素。

素以及系统设计者应该对这些因素有所认识；第十一章是小结和结论；附录 I 简略地回顾确定液压系统元件及其尺寸规格的传统（静态）设计方法；附录 II 提供了在本书中用到的一些物理量的英制与 SI 制单位换算关系；附录 III 提供了液压控制系统动态分析的一些文献目录。

## 1.6 结 束 语

最后，可以将本书力图努力的方向叙述成：“给定一个拟用的液压控制系统后，在最终着手制造昂贵的硬件（设备）之前，要对系统进行仿真，以便检查并优化它的动态特性”。

## 第二章 符号与单位

### 2.1 引言

即使不存在符号与单位的不一致和不标准的问题,要掌握已成熟的各种动态分析技术也已不容易了,再加上不可避免地要使用许多下标符号,就更加剧了混乱。许多作者使用英制、米制和国际单位制(SI),有时甚至将不同量纲混杂到他们选用的单位系统中。

要是每个作者都使用相同的符号和单位将会多么有益!这将使人马上就能识别关系式中的符号、参数大小和数字意义,在系统设计场合中这种识别的意义是不可低估的。设计者应能迅速利用已经公认的技术和数据,而不是去寻求新的未经证明和含混不清的资料。

本书采用的符号、关系式的书写格式和单位都试图标准化。

### 2.2 符号表示法

#### 2.2.1 符号

图2.1列出了本书所采用的符号。一般准则是:

(1) 通常采用英文大写字母来代表系统的变量和系数,每个大写字母专门用来代表特定的量;一些常用的希腊字母仍然沿用; $g, t, i$ 分别用来代表重力加速度、时间和电流。

(2) 下标用小写英文字母表示,每个小写字母专门用来代表一种特定意义,此外也用数字作下标。

(3) 只要有可能,一些具有特殊量值的符号的通常用法和物理意义都予以保留。

(4) 假定读者会知道或会很快知道哪些参数是动态的(即是时间的因变量),哪些参数是常量,所以很少用符号关系( $t$ )来加以区别。例如,用 $P$ 而不是用 $P(t)$ 来代表一个动态压力。如果假定一个正常的动态参数为恒定值时,则在其前面加 $S$ 来表示其为源,例如 $SP$ 代表一个恒压力。

#### 2.2.2 符号用法的例子

- $C_k$ 表示一根弹簧( $k$ )的柔度( $C$ );
- $B_o$ 表示油液( $o$ )的体积弹性模量( $B$ );
- $I_p$ 表示液压泵( $p$ )回转部分的惯量( $I$ );
- $R_{lp}$ 表示由液压泵( $p$ )的泄漏( $l$ )形成的液阻( $R$ )表达式或液阻系数;
- $Kv_1$ 表示某一个(1)阀( $v$ )的系数 $K$ ,同时还存在一个以上的同类系数(如 $Kv_2$ 等);

大 写 字 母	小 写 字 母	希 腊 字 母
A 面 积	a	$\alpha$ 角加速度
B 油液体积弹性模量	b	$\beta$
C 容性或容性元或柔度	c	$\gamma$
D 导数算子 d/dt	d	$\delta$
E 力(势)变量的一般符号, 电压	e	$\epsilon$
F 力	f	$\zeta$ 阻 尼 比
G	g 重力加速度	$\eta$ 效 率
GY 旋转功率变换器	h	$\theta$ 角 位 移
H	i 电 流	$\tau$
I 惯性元或感性元, 惯量或感量	j	$\kappa$
J	k	$\lambda$
K 系数的一般符号	l	$\mu$ 摩 擦 系 数
L 长度	m	$\nu$ 运 动 粘 度
LR 杠杆比	n	$\xi$
M	o	$\omega$
N 单位时间的转数	p	$\pi$
O	q	$\rho$
P 压力	r	$\sigma$
Q 体积流量, 一般的流量变量	s	$\tau$ 时 间 常 数
R 阻尼, 或阻泄元	t 时 间	$\upsilon$
S 源, 常量或自变量	u	$\varphi$
SE 力(势)源	v	$\chi$
SQ 流源	w	$\psi$
T 扭矩	x	$\omega$ 角 速 度
TF 直接功率变换器	y	
U	z	
V 体积		
W		
X 直线位移		
Y		
Z		

(a) 参数 (系数与变量)

a 执行器 (液压缸或液压马达)	n
b 滤油器, 滤网	o 油 液
c 油的柔度 (可压缩性)	p 油 泵
d	q
e 出油口 (油箱或回油管道)	r 溢 流 阀
f 摩 擦	s 供 应 源
g 重 力	t
h 软管或流体管道	u 库 伦 摩 擦
i 输 入	v 阀
j 转动惯量	w
k 弹 簧, 机 械 柔 度	x
l 泄 漏	y
m 直线运动的惯性 (质量)	z

1, 2, ..., 9 表示不同位置的数字

(b) 下标 (都是小写字母)

图 2.1 标准符号

•  $\theta_a$ 表示液压马达（执行器）的角位移。

### 2.2.3 方程

以下是一些会在本书中出现的典型表达式：

$$Q_{i,p} = P_p / R_{1,p}$$

$$Q_p = K_v X_v \Delta P^{1/2}$$

$$\dot{X}_m = \dot{X}_m(0) + 1/I_m \int F_m dt$$

$$B_o = 1750 \times 10^6 \text{帕}$$

### 2.2.4 说明

(1) 无需使用几次就可发现上述符号体系便于书写、打字，便于理解，便于用于数字计算机程序以及打印。

(2) 图2.1中包括有一些术语专门用于功率键合图，将在以后介绍。

(3) 只有在本书中使用的符号才标于图2.1中，对于以后应用或一般用途，这些符号是远远不够的。

## 2.3 单 位

本书中将毫无例外地采用国际单位制（SI）。SI制不仅具有实际价值并越来越得到国际承认，它克服了绝大多数在工程技术与科学中应用英制和标准米制单位产生的易于混淆的问题。

图2.2列出了在本书中所出现的SI单位。附录II提供了一些有用的换算数据。

### 2.3.1 说明

(1) 在会话或说明性的文字中，基本SI单位的适当组合可能是有用的。例如，流量用升/秒（l/s）；压力用兆帕（MPa）；力用千牛顿（kN）；角速度用转/分钟（rpm）。作者认为压力单位巴是SI制中的一个多余的误用，故不提倡用巴（1巴 =  $10^5$ 帕）。

(2) 对数字运算（如确定系数、应用关系式等），应只使用基本的SI单位，例如流量用 $\text{m}^3/\text{s}$ ，压力用Pa，力用N，角速度用rad/s。若不这样做，就会在运算中导致严重的、意料不到的数量级误差（ $10^{\pm n}$ ， $n = 1, \dots, \infty$ ）到处出现。人们可以随意地说成或写成10MPa，但当代入方程时，则必须将其写成 $10^6\text{Pa}$ 。

(3) 在单位的乘积中，用中圆点将各单位分开，如牛顿·秒用N·S不用Ns，公斤·米<sup>2</sup>用kg·m<sup>2</sup>而不同kgm<sup>2</sup>。

(4) 在使用斜杠的地方，注意单位的指数，如 $\text{m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \text{m}^2 / (\text{Pa} \cdot \text{s}) \approx \text{m}^2 / \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。



物理量	单位名称	单位符号	习惯代用单位
基本单位			
长度	米	m	厘米(cm), 毫米(mm)
质量	公斤	kg	吨(t) $1t=10^3kg$
时间	秒	s	分(min) $1min=60s$
电流	安培	A	
温度	摄氏度	°C	
导出单位			
面积	平方米	m <sup>2</sup>	
体积	立方米	m <sup>3</sup>	升(l) $1l=10^{-3}m^3$
密度	公斤/米 <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	
力(包括重量)	牛	N	千牛(kN)
扭矩	牛·米	N·m	
转动惯量	公斤·米 <sup>2</sup>	kg·m <sup>2</sup>	
压力	帕(N/m <sup>2</sup> )	Pa	kPa, MPa
能量(功)	焦耳	J	
功率	瓦	W	千瓦(kW)
电位(电压)	伏特	V	
电阻	欧姆	Ω	
速度	米/秒	m/s	
加速度	米/秒 <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	
流量	米 <sup>3</sup> /秒	m <sup>3</sup> /s	升/秒或升/分
角度	弧度	rad	转
角速度	弧度/秒	rad/s	转/秒或转/分
频率	赫芝	Hz	周/秒
动力粘度	牛顿·秒/米 <sup>2</sup> 或帕·秒	N·s/m <sup>2</sup> 或Pa·s	厘泊(cP)
运动粘度	米 <sup>2</sup> /秒	m <sup>2</sup> /s	厘斯(cSt)

常用倍数: 微( $\mu$ )  $10^{-6}$ , 毫(m)  $10^{-3}$ , 厘(c)  $10^{-2}$ , 千(k)  $10^3$ , 兆(M)  $10^6$ .

图 2.2 有关SI单位制和符号(换算因子见附录 I)

### 参 考 文 献

- [ 2.1 ] Blackman, D. R., SI units in Engineering., MacMillan, 1969.
- [ 2.2 ] Chiswell, B. and Grigg, E. C. M., SI Units, J. Wiley, 1971.
- [ 2.3 ] The International System of Units, Nat. Bur. Stand. (U. S.), special publication No. 330, 1972.
- [ 2.4 ] The ABC's of SI, National Fluid Power Association, USA, 1974.