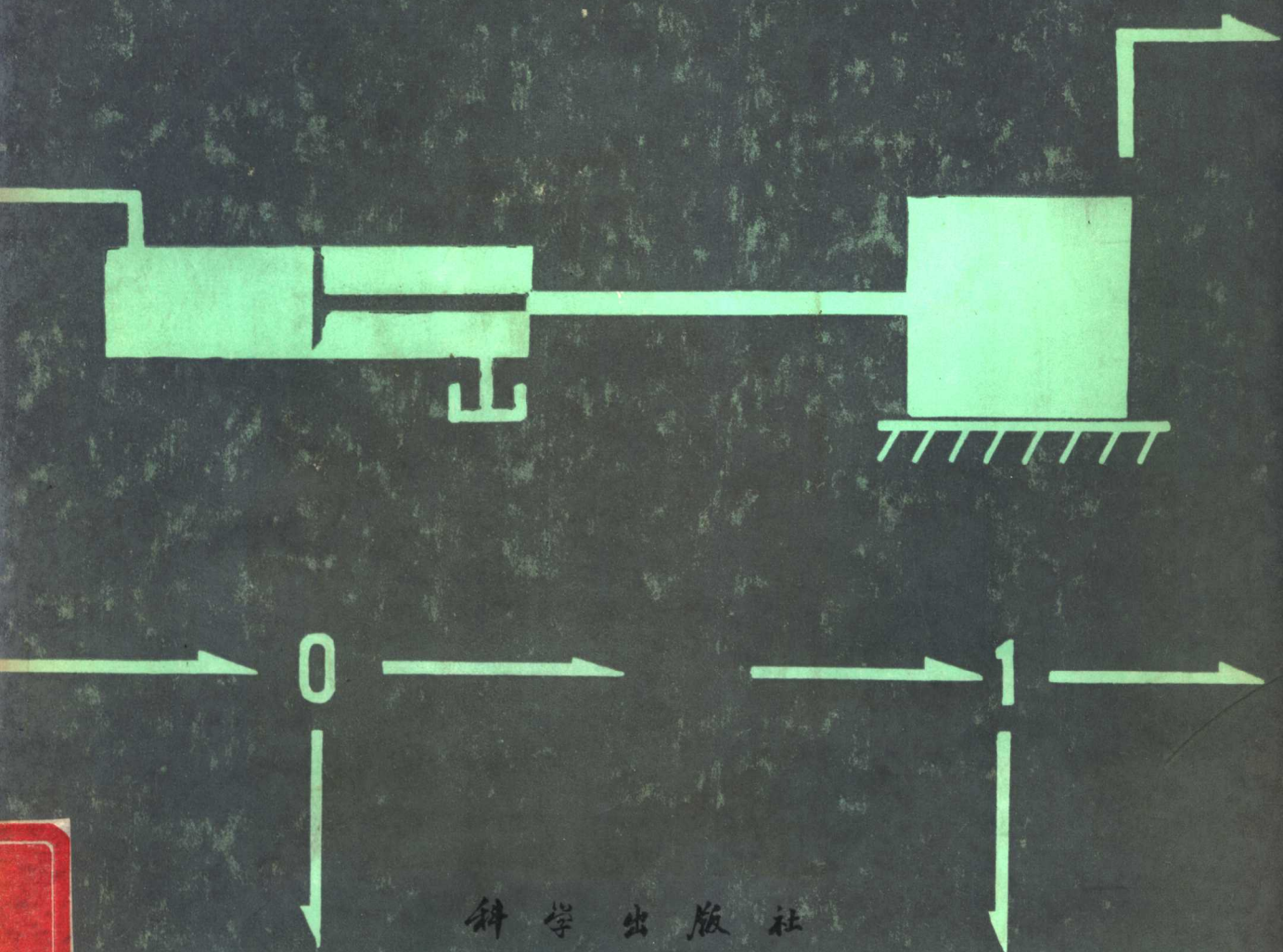


液压控制系统的设计 与动态分析

〔澳大利亚〕P.德兰斯菲尔德 著



液压控制系统的设计 与动态分析

〔澳大利亚〕 P. 德兰斯菲尔德 著

大连工学院液压教研室 译

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书叙述了液压控制系统设计中的动态特性分析问题,其中又以建立动态模型的有力工具——功率键合图为重点,作了相当详细的介绍.全书主要内容包括:绪论、符号和单位、传统的建模方法、功率流建模法、功率键合图、功率流模型的求解、方程和系数的选择、键合图的应用、动态响应的优化、影响响应的因素等.

本书可供从事液压技术工作的科技人员阅读,也可作为高等院校有关专业师生的教学参考书.

Peter Dransfield
HYDRAULIC CONTROL SYSTEMS—DESIGN AND
ANALYSIS OF THEIR DYNAMICS
Springer-Verlag, 1981

液压控制系统的设计与动态分析

〔澳大利亚〕P. 德兰斯菲尔德 著

大连工学院液压教研室 译

责任编辑 李淑兰 杨 艳

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街137号

北京景山学校印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987年3月第一版 开本: 787×1092 1/16
1987年3月第一次印刷 印张: 10 3/4
印数: 0001—4,950 字数: 236,000

统一书号: 15031·794

本社书号: 4909·15-8

定价: 2.55元

译 者 的 话

液压控制系统的动态特性问题已愈来愈为人们所重视。

数字仿真是对液压系统进行动态分析的一种重要方法，而功率键合图又是建立系统动态模型的一种有力工具，它的一些特点对液压控制系统的建模尤其适合。这一技术近几年来在国内也已得到重视。

为了使功率键合图技术在国内有更广泛的了解和应用，我们翻译了这本书。本书是控制和信息科学丛书中的第33册。书中以功率键合图为重点，给予了相当详细的介绍，对功率键合图有兴趣的读者，将会发现这是一本较好的读物。

本书由大连工学院液压教研室林建东、董本刚、关松林、田树军、姜秀萍、曾桂生、张亚明、车广洲等同志翻译。全部译稿由刘能宏同志审校。

由于译、校者水平有限，译文中会有不少错误和不当之处，敬希读者批评指正。

译 者

1985.2.

中文版序言

我非常高兴我写的这本书已由大连的我的同事们翻译成中文。我希望中国的许多学生和工程师们能从学习本书中受益，并将学会很有意义的键合图技术，以有助于设计出良好的动力控制系统。

愿这次合作的尝试有助于在我们两国人民之间建立起一座彼此有益的友谊桥梁。
顺致最热烈的祝愿！

P. 德兰斯菲尔德

蒙纳什大学，澳大利亚

1985.9.

前 言

本书是围绕着液压控制系统的下列概念进行阐述的。

- 液压控制系统的动态响应品质对其正常工作是重要的;
- 动态响应性能的预测最好是通过建立动态模型来获得;
- 许多设计人员不能有效地完成预先的动态分析,其根源在于建模的可靠性不足;
- 应用功率键合图是建立可靠的动态模型的一种直观而有效的方法;
- 数字仿真为从动态模型求得响应信息提供了最适合的方法。

在上述内容中,键合图(功率键合图的简称)的应用又是本书的重点。因此,对键合图作了相当详细的介绍、解释、示例和应用。键合图具有一些性质,使其适合于液压控制系统的设计工作。这些性质是,键合图在结构上与真实的系统及其元件有着相似性,键合图结构的组合形式、模块性质和可重复使用性,以及可以从它所提供的结构中有规则地推导出形成动态模型的方程组。

假定本书的读者对液压控制系统的性质、工作及其主要元件已有一般的了解。本书主要是为那些机械和控制工程师们而写的,他们很想在设计液压控制系统的技术工作中进行动态特性的预测分析,但是觉得现有的分析方法不够满意或不适用。本书也可用于相应的研究生或高年级大学生20学时的课程以及用于专门的具有伸缩性的课程。

为了完全理解本书,读者需要作一些“突破”,即对键合图的符号和结构充分理解并能应用。这种突破也是一个我所指导的硕士研究生促使我作的。我愉快地感谢Caulfield工学院的高级讲师Bevis Barnard,他的发现使我确信,对于动力控制系统的建模、仿真和设计,键合图具有某些独到之处。我也要肯定Henry Paynter的理论、Dean Karnopp和Ron Rosenburg有创造性的和持续开展的工作、键合图促进者Jean Thoma的工作、同事Jacek Stecki的帮助以及大学生和研究生们虽小但持续不断所做的有益工作,他们中有Rob Winton, M.K. Teo, Roger LaBrooy, Kevin Duke, S. Ramachandran, V. K. L. Mai, Merren Cliff等。

许多人为本书的出版作出了贡献,我要特别感谢Monash大学的Lorry Ryan和John Millar,他们在打字和绘图上分别作了出色的工作。

还有一个人,就是我的妻子Nevillie,她的支持是持久的、鼓舞人心的和必不可少的,没有她的鼓励本书现在不一定能完成。

那些希望学习、希望探索一条新路的人们,请行动吧!

P. 德兰斯菲尔德

1981年3月

目 录

译者的话	i
中文版序言	ii
前言	iii
第一章 绪论	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
第二章 符号与单位	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
第三章 传统的建模方法	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 方块图和信号流程图	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
第四章 功率流建模	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
第五章 功率键合图	33
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
第六章 功率流模型的求解	64
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
第七章 方程和系数的选择	68
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
7.10 液动机	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
7.11 其他一些通用元件	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
第八章 键合图的应用	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
第九章 系统响应的优化	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
第十章 影响系统响应的因素	138
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
第十一章 结论	150
附录 I 静态设计方法	151
附录 II SI制单位换算表	154
附录 III 有关动态响应的文献目录	155
索引	158

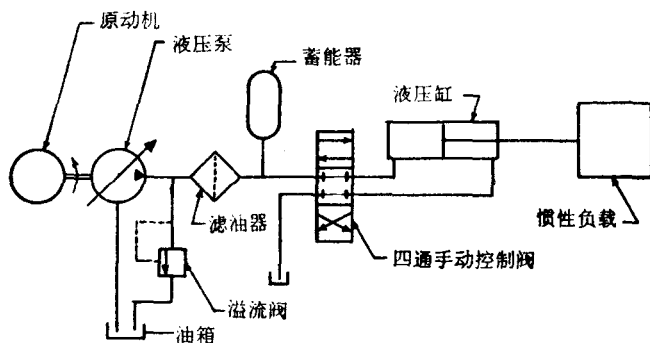
第一章 绪 论

1.1 引 言

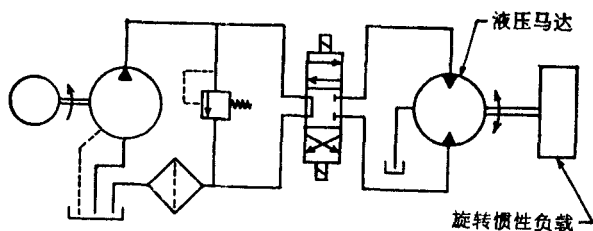
液压控制系统用于控制阻性负载的位置或速度。最后的驱动通常是由液动机——直线运动的液压缸或回转运动的液压马达——来实现。液动机从容积式液压泵获得具有一定压力（通常为 $7 \sim 35$ 兆帕）的液体来产生它的力或扭矩。同时，它也从泵系统获得液体的流速来产生运动。图1.1表示了几个简单的液压控制系统。

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表示了两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。

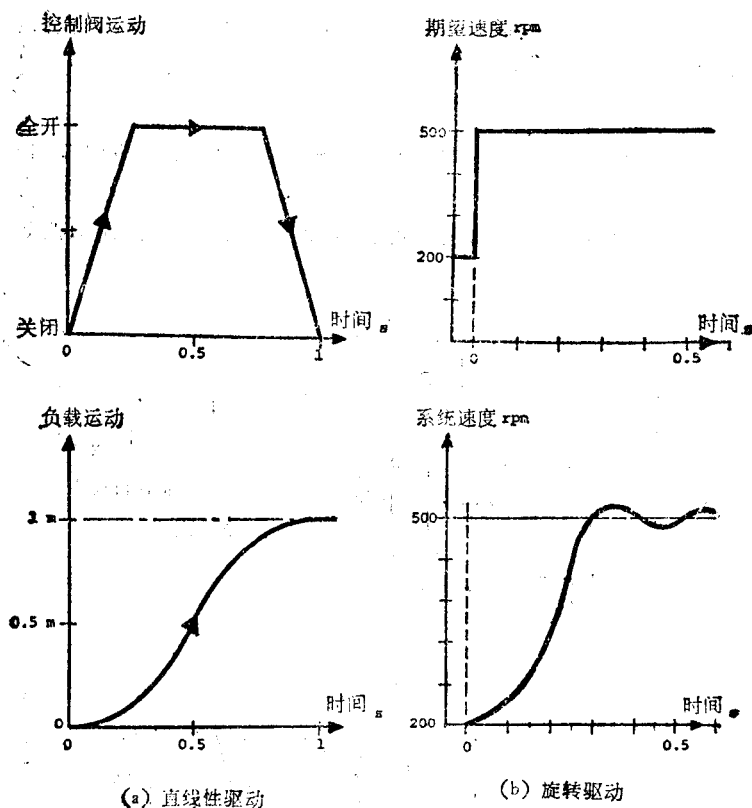


图 1.2 两组指令-响应关系

(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。

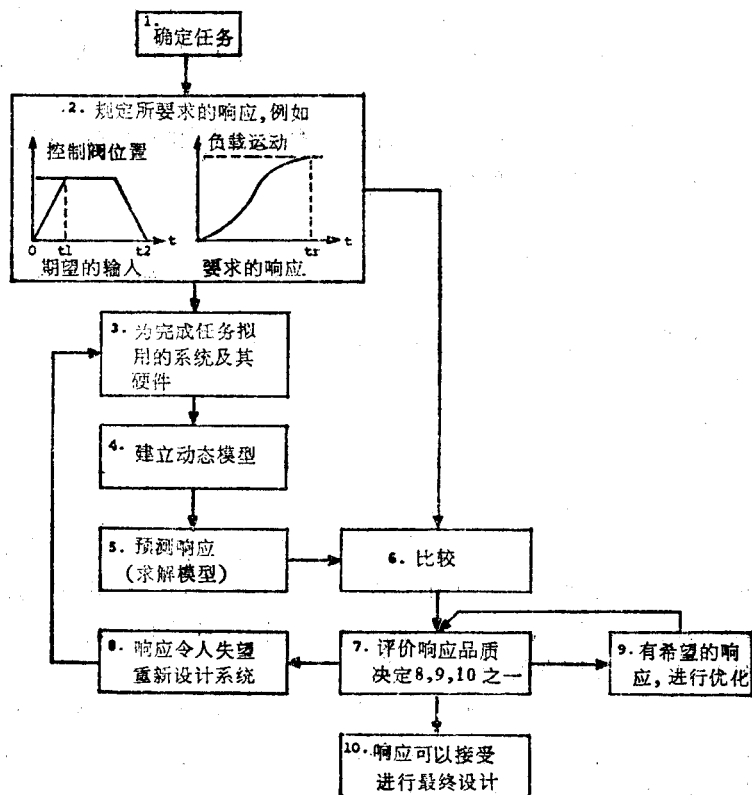


图 1.3 设计动态响应的流程图

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编程员。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。

对于设计方案的构思,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。

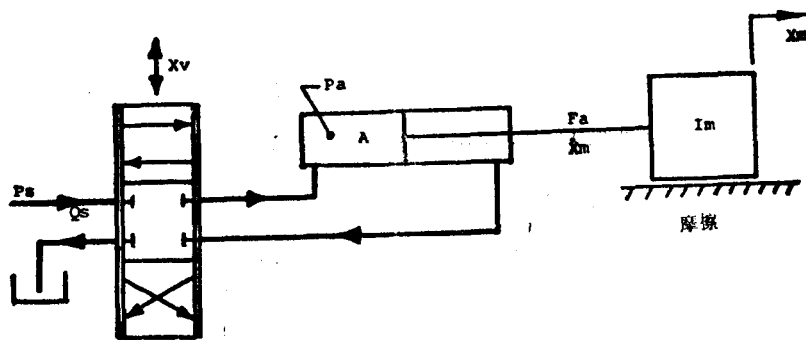
传统建模方法既没有详细考虑到这些因素,也没有特别地利用这些因素来使建模方法趋于完善。写作本书的目的就是要说明:发生在系统元件之间的动态功率交换是把动态响应分析纳入到系统设计范围中去的关键。功率流建模提供了一种与模块化系统本身物理联系和作用密切相关的系统动态描述方法。

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。

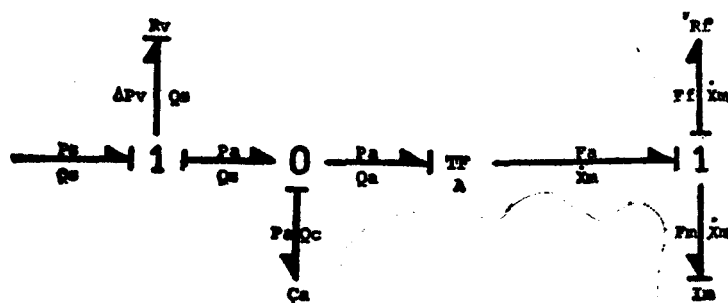
图1.4(a)表示了一个简单的液压系统,图1.4(b)是该系统的功率键合图模型结构,图1.4(c)是一组方程,它就是该系统的动态模型。键合图结构是把系统与其动态模型联系起来的关键。键合图是信号流图的一种类型,它向熟悉键合图的人提供了一种与硬件系统图之间的惊人的联系。由功率键合图可以十分方便地建立方程组。

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, $F_m \dot{x}_m$ (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)

$P_s = \text{常量 (假定)}$

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

$P_a = P_s(0) + 1/C_a \int Q_s dt$ (线性容性方程)

$F_f = R(\dot{X}_m)$ = 对液压缸的摩擦力

$F_m = F_s - F_f$

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

$F_s = P_a A$

$Q_s = \dot{X}_m A$

$\Delta P_v = P_s^* - P_a$

$Q_s = Q_s - Q_s$

(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