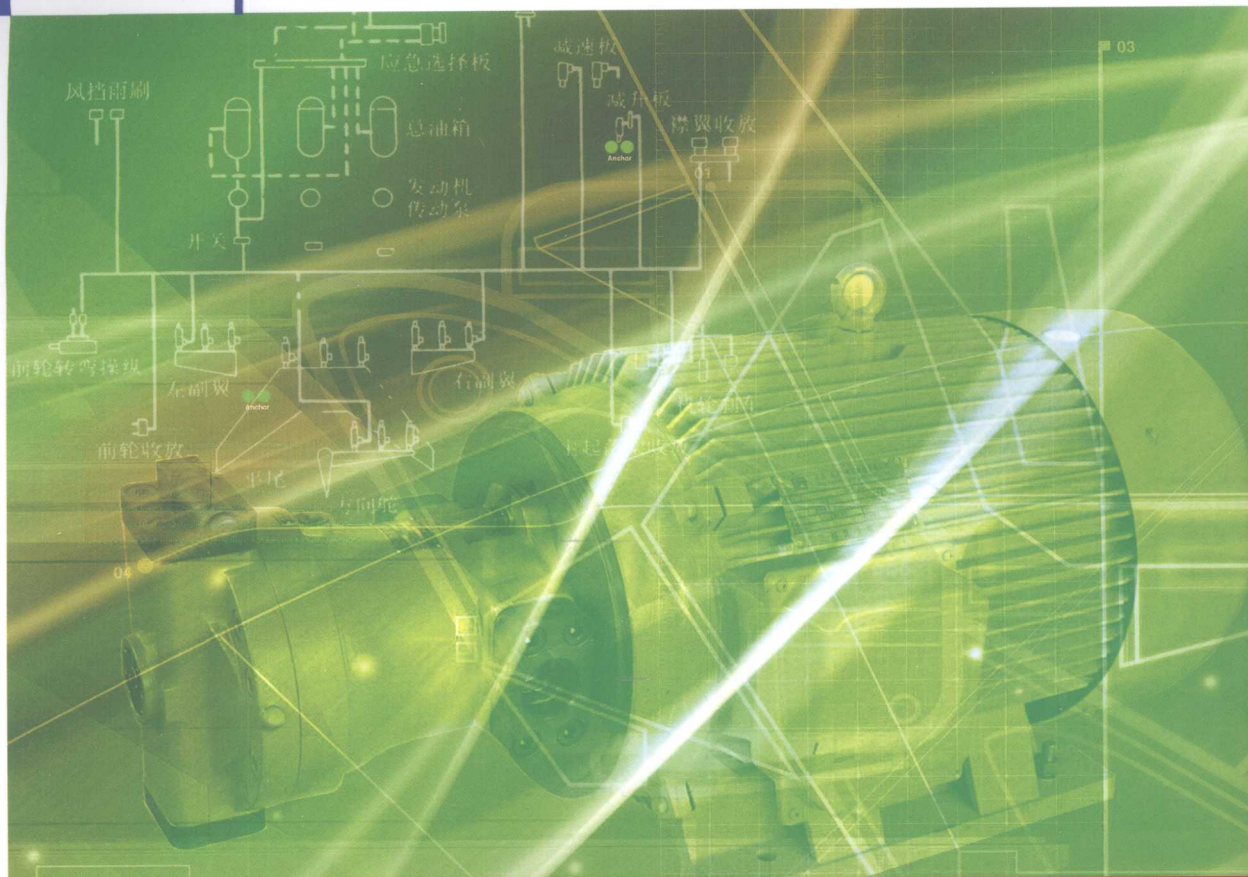


# 液压系统建模

# 与仿真分析



李成功 和彦森 编著

航空工业出版社

# 液压系统建模与仿真分析

李成功 和彦森 编著

航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

本书根据目前液压系统仿真的发展需求,较全面、系统地介绍了液压系统的动力学与热力学建模以及仿真理论,并通过更为直观的算法程序深入分析了液压系统建模与仿真软件的运行机理,并基于该理论,通过对阀控液压缸的建模与仿真实例辅助读者理解液压系统仿真建模的原理以及系统分析与优化的方法。

本书可作为高等院校本科生和研究生的教学参考书,也可供工程技术人员参考,以便对液压系统建模与仿真理论及液压系统仿真软件的使用有更深入的理解。

### 图书在版编目(CIP)数据

液压系统建模与仿真分析/李成功,和彦森编著. —北京:航空工业出版社,2008.9  
ISBN 978-7-80243-203-1

I. 液… II. ①李…②和… III. ①液压系统—系统建模  
②液压系统—系统仿真 IV. TH137

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第134685号

## 液压系统建模与仿真分析 Yeya Xitong Jianmo yu Fangzhen Fenxi

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行电话:010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2008年9月第1版

2008年9月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:8.625

字数:210千字

印数:1—2000

定价:22.00元

# 前 言

随着科学技术的发展，液压系统已经应用到工程领域的各个方面。对液压系统动态特性的分析已经成为液压系统设计的主要辅助手段。工程人员通过对液压元件及液压系统的仿真、分析系统的动态特性，辅助液压元件及系统的设计，及时发现系统中存在的问题，优化系统的性能，从而达到缩短研发周期、降低研发成本的目的。

随着流体力学、现代控制理论、算法理论、可靠性理论等相关学科的发展，特别是计算机技术的突飞猛进，液压系统仿真软件也日益成熟，越来越成为液压系统设计人员的有力工具。对于资深的液压系统设计人员，必须熟练掌握液压系统仿真软件，才能更好地进行辅助系统设计。但是，仅熟练地掌握仿真软件是不够的，必须深入理解液压系统建模与仿真的理论，深刻理解软件的仿真机理，才能够顺利地解决软件仿真过程中出现的各种问题，准确而快速地得到仿真结果，从而达到真正辅助系统设计的目的。

本书详细推导了液压系统动力学及热力学的建模理论，有助于读者对液压系统建模机理的理解。书中通过一定的算法程序深入分析了液压系统仿真软件的仿真运行机理，将建模与仿真紧密结合，使读者理解仿真软件仿真运行机理。本书还给出了油液属性的一些计算方法，油液属性的计算是仿真软件中很重要的一部分计算工作，其计算结果关系到系统仿真结果的准确性。本书通过阀控液压缸的建模与仿真实例，辅助读者加深对仿真建模的理解，并对液压系统典型特性分析方法的机理进行了简要介绍，而且对目前仿真软件给出的系统优化算法进行了一定的分析，从而帮助读者更好地理解和应用液压系统仿真软件。

本书适合于液压系统设计及仿真技术人员，流体动力系统专业本科及以上学历学生和相关研究人员使用；也适合于高压开关专业工程技术人员及相关学科人员进行液压操动机构设计仿真计算时参考；有志于从事流体动力系统建模与仿真软件开发的人员，也将从本书中深深受益。

本书在编写过程中得到了中国电力科学院高压开关研究所袁大陆所长、宋杲所长助理等专家的大力支持，在此深表谢意。

本书由中国电力科学研究院科技专著出版基金资助。

鉴于作者水平有限，难免有不当之处，恳请读者予以批评指正。

作 者

2008 年 1 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	( 1 )
1.1 建模方法的分类 .....	( 2 )
1.2 模块化建模思想 .....	( 5 )
1.3 液压系统的建模过程 .....	( 8 )
1.4 液压系统的规范型模型 .....	( 9 )
1.5 模型阶数的选定 .....	( 10 )
<b>第 2 章 液压元件动态建模</b> .....	( 12 )
2.1 基本液压元件建模 .....	( 12 )
2.2 金属外壁的模型 .....	( 19 )
2.3 典型液压元件建模 .....	( 30 )
<b>第 3 章 液压油液属性的计算</b> .....	( 36 )
3.1 油液的等温压缩系数及体积弹性模量 .....	( 36 )
3.2 油液的体积膨胀系数 .....	( 40 )
3.3 油液的密度 .....	( 40 )
3.4 油液的黏度 .....	( 42 )
<b>第 4 章 阀控液压缸系统建模及程序实现</b> .....	( 44 )
4.1 采用 C++ 语言编制元件模型 .....	( 44 )
4.2 建立液压元件模型及程序实现 .....	( 45 )
<b>第 5 章 液压系统数学模型及仿真求解方法</b> .....	( 63 )
5.1 液压系统数学模型的建立 .....	( 63 )
5.2 数值积分方法 .....	( 69 )
5.3 初值对系统的影响 .....	( 72 )
5.4 不连续点的处理 .....	( 74 )
5.5 代数方程的排序与代数环 .....	( 79 )
5.6 仿真计算结果 .....	( 84 )
5.7 通用液压系统仿真软件的仿真计算及分析 .....	( 87 )

<b>第 6 章 液压系统典型特性分析</b> .....	( 94 )
6.1 频谱特性分析 .....	( 94 )
6.2 频率响应分析 .....	( 103 )
6.3 模型线性化分析 .....	( 105 )
6.4 试验设计方法(DoE) .....	( 109 )
<b>第 7 章 伺服液压系统参数优化</b> .....	( 115 )
7.1 优化问题的数学表达 .....	( 115 )
7.2 伺服液压系统的结构与优化 .....	( 115 )
7.3 参数优化流程 .....	( 116 )
7.4 方案评价方法 .....	( 117 )
7.5 优化方法 .....	( 118 )
7.6 阀控液压缸优化实例 .....	( 119 )
<b>第 8 章 协同仿真机理分析</b> .....	( 125 )
8.1 嵌入式仿真模式 .....	( 125 )
8.2 协同仿真模式 .....	( 126 )
<b>参考文献</b> .....	( 130 )

# 第1章 绪 论

系统仿真是近几十年发展形成的一门综合性学科，它为系统的设计、研究和决策提供了一个先进而有效的手段，并可以缩短设计周期、降低费用，已广泛应用于工程及非工程领域。仿真技术作为液压系统或元件设计阶段的必要手段，已被业界广泛认识。随着流体力学、现代控制理论、算法理论、可靠性理论等相关学科的发展，特别是计算机技术的突飞猛进，液压仿真技术也日益成熟，已成为液压系统设计人员的有力工具。

国外从20世纪70年代初开始研究液压系统和元件的计算机数字仿真，我国是从20世纪70年代末80年代初开始进行液压系统和元件的仿真研究的。经过几十年的研究开发，液压仿真软件包的性能实现了从精度低、速度慢发展到精度高、速度快；从只能处理单输入、单输出的线性系统发展到能处理多输入、多输出的非线性系统；从复杂的编程和输入发展到交互友好的图形用户界面等。特别是近几年，在国外尤其在欧洲液压仿真技术得到了飞速发展，各款老牌的液压仿真软件纷纷推出了面目一新的版本。如英国的 Bathfp，瑞典的 Hopsan，德国的 DSHplus 等。另外一些擅长液压系统仿真的综合系统仿真软件在商业上也获得了很大的成功，具代表性的有法国的 AMESim，美国的 Easy5。液压系统仿真人员应用这些专业的液压系统仿真软件进行液压系统设计、分析、优化，缩短了产品的研发过程，降低了研发成本。

对于资深的工程仿真人员而言，仅熟练地掌握液压系统仿真软件的使用是不够的，必须深入掌握液压系统建模与仿真的理论，深刻理解软件的仿真机理，这样才能够顺利地解决软件仿真过程中出现的各种问题，准确而快速地得到仿真结果。笔者根据多年的仿真经验认为，资深的液压系统仿真工程师需要具备以下三个基本条件。

(1) 雄厚的液压系统建模与仿真的理论基础。数学模型是系统本质的抽象，准确地建立系统的数学模型才能真正做到深刻理解系统仿真的运行机理，所以建模是仿真人员的基本功。仿真是对模型的求解，只有对数值计算有深刻的理解，才能够合理地选择和设置参数，准确而快速地得到仿真结果。

(2) 深厚的液压系统的工程背景。只有具备这个条件，才能够抓住主要矛盾，合理地建立或选择模型，使模型既能够充分体现液压系统的特性，又不至于因过于复杂而导致模型调整困难，浪费时间和精力。

(3) 熟练地掌握液压系统仿真软件的操作。只有掌握这一点才能够快速、准确地实现上面两个条件。现在的液压系统仿真软件有数十种之多，各有千秋。有的模型库比较多，有的开放性比较好，有的计算速度比较快。笔者认为仿真人员最好能同时掌握几种仿真软件的操作，根据工程需要选择软件。例如，对于要仿真的液压系统中的液压元件多为较成熟的产品，不需要自己开发元件模型，这时可以考虑模型库较多的软件，反之则考虑开放性较好的软件；对于仿真时间很长的液压系统（如对温度特性进行仿真），则可以考



虑计算速度较快的软件。但是也不能一概而论，要根据实际情况定夺。

通过以上分析可以发现，若要成为资深的液压系统仿真人员需要具备三个条件，而第一个条件是基础，只有具备这个条件，才能更好地发展和完善后两个条件，这也是写此书的初衷。通过对本书的阅读和研究，读者可以快速掌握液压系统建模与仿真的基本理论，深入理解液压系统仿真软件对系统进行仿真的运行机理。

## 1.1 建模方法的分类

数学模型是用字母、数字和其他数学符号构成的等式或不等式，或用图表、图像、框图、数理逻辑等来描述系统的特征及其内部联系或与外界联系的模型。它是真实系统的一种抽象。数学模型是研究和掌握系统运动规律的有力工具，它是分析、设计、预报或预测、控制实际系统的基础。数学模型的种类很多，而且有多种不同的分类方法。

(1) 静态和动态模型。静态模型是指要描述的系统各量之间的关系是不随时间的变化而变化的，一般都用代数方程来表达。动态模型是指描述系统各量之间随时间变化而变化的规律的数学表达式，一般用微分方程或差分方程来表示。

(2) 分布参数和集中参数模型。分布参数模型是用各类偏微分方程描述系统的动态特性，而集中参数模型是用线性或非线性常微分方程来描述系统的动态特性。在许多情况下，分布参数模型借助于空间离散化的方法，可简化为复杂程度较低的集中参数模型。

(3) 连续时间和离散时间模型。模型中的时间变量是在一定区间内变化的模型称为连续时间模型，上述各类用微分方程描述的模型都是连续时间模型。在处理集中参数模型时，也可以将时间变量离散化，所获得的模型称为离散时间模型，离散时间模型用差分方程描述。

(4) 随机性和确定性模型。随机性模型中变量之间关系是以统计值或概率分布的形式给出的，而在确定性模型中变量间的关系是确定的。

(5) 参数与非参数模型。用代数方程、微分方程、微分方程组以及传递函数等描述的模型都是参数模型。建立参数模型的目的在于确定已知模型结构中的各个参数，通过理论分析可得出参数模型。非参数模型是直接或间接地从实际系统的实验分析中得到的响应，例如，通过实验记录到的系统脉冲响应或阶跃响应就是非参数模型。运用各种系统辨识的方法，可由非参数模型得到参数模型。如果实验前可以决定系统的结构，则通过实验辨识可以直接得到参数模型。

(6) 线性和非线性模型。线性模型中各量之间的关系是线性的，可以应用叠加原理，即几个不同的输入量同时作用于系统的响应，等于几个输入量单独作用的响应之和。线性模型简单，应用广泛。非线性模型中各量之间的关系不是线性的，不满足叠加原理。在允许的情况下，非线性模型往往可以线性化为线性模型，方法是把非线性模型在工作点邻域内展成泰勒级数，保留一阶项，略去高阶项，就可得到近似的线性模型。

对于液压系统而言，人们通常关心的重点是对非线性的连续时间的动态分析。所以可将其模型分为两类：分布参数建模和集中参数建模。

### ➤ 分布参数建模

对于连续介质,流体质点的一切物理量必然都是坐标与时间变量 $(x, y, z, t)$ 的单值、连续、可微函数,所以液压元件内油液的温度、压强和流量不仅是时间的函数而且是三维空间的函数,所以液压元件的准确模型需要用偏微分方程描述。但是就目前的数值计算的发展水平而言,只能用有限元法或有限体积法等数值计算方法才能求解描述液压元件内部油液的压力、温度和速度分布的偏微分方程。而液压元件几何形状复杂,油液与元件壁在压力和温度上有耦合效应存在,如果采用有限元法或有限体积法,不仅前处理阶段所进行的网格划分数量惊人,而且以目前计算机的计算速度,其计算量也将无法接受。所以分布参数建模目前仅限于对几何形状规则的简单液压元件进行研究或对液压元件某一局部进行研究。

#### ► 集中参数建模

工程上通常研究的是整个液压系统(不只是单个元件)的动态行为,若用有限元法或有限体积法等方法,不仅计算量无法接受,而且也是不现实的。所以目前几乎所有的液压系统建模与仿真软件都采用集中参数建模的方法研究液压系统的动态特性。对于某些用分布参数模型描述的液压元件,通常借助于空间离散化的方法,将其简化为复杂程度较低的集中参数模型。

集中参数模型的参数是采用平均的技术得到的,采用平均的方法可以提高模型对空间参数变化的适应能力,大量地简化计算,但同时必然带来误差。采用集中参数模型可以大大简化被建模对象的数学模型,从而使系统级的仿真成为可能。本书研究的是液压系统的动态特性,更加注重液压系统各结点的压力和温度变化情况,而不是液压元件内部的压力和温度分布,所以本书采用集中参数建模。

对于集中参数建模,不同领域的系统模型的具体建模方法也有不同,目前主要分为两类:基于信号流建模和基于功率流建模。

#### a. 基于信号流建模

此种建模方法比较成熟,广泛应用于控制领域,如 Matlab 的 Simulink 模块以及 MATRIXx 等。此种建模方法认为被建模对象以信号传递为主,通过方框图的方法建立对象模型。但是对于液压系统等复杂的机电系统,其元件模型之间通常传递的是功率数据,所以其数据传递具有双向性。例如,对于伺服阀,其流量输出的计算需要与其相连接的液压元件提供端口压力,而且输出的流量又是与其相连接元件模型的输入。采用信号流方法信号传递方向固定,所以伺服阀模型端口数据必须至少通过两条信号线连接才能实现数据双向传递,所以建立的方框图模型必然使信号连接复杂,可读性不强。图 1-1 所示是 AMESim 在分析基于信号流建立液压系统模型的缺点时给出的一个例子。

图 1-1 中右图为应用信号流法建立的液压系统仿真原理图,左图可以认为是系统的工作原理图。可以看出,采用信号流法建立液压系统的仿真原理图,每个相连接的液压元件模型模块至少需要两条连线,从而实现数据的双向传递。用这种方法建立模型不仅不够直观,而且很容易出错,不利于调试。最大的问题是用这种方法建立有信号双向传递的模型,很容易产生代数环,导致仿真无法进行。所以这种建模方法适用于信号单向传递的场合,如在液压系统仿真中,对于其控制部分可以用此种方法建模,但此时需要注意模型在计算中的排序问题,而且要尽量避免代数环。

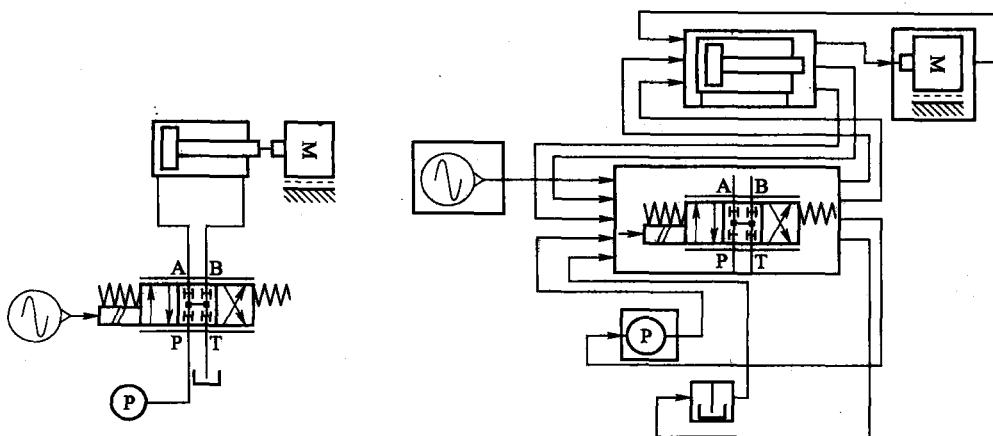


图 1-1 基于信号流绘制的液压系统仿真原理图

b. 基于功率流建模

基于功率流建模的原理在很多书中都有介绍，此处不再赘述，感兴趣的读者可以参阅相关书籍。应用功率流建模最有效的方法就是功率键合图。功率键合图是近 20 年发展起来的一种描述动力系统动态结构的有效建模工具，是一组由有限符号组成的双信号流图，用一系列键和简单符号就能够形象地描述系统能量网络中功率流的流向和分配，能量的汇集和转换等，清晰准确地表达系统结构特征及各种影响因素，且与基于现代控制理论的状态变量数学模型之间存在严密、一一对应的内在逻辑联系。因此，功率键合图是一种先进的系统图形化结构模型，克服了传递函数法的某些局限性，且依据它推导出的状态方程中的各个状态变量一般都是研究系统中感兴趣的、有实际意义的各种物理变量。但是直接应用功率键合图方法建模并不直观，对于大多数工程人员并不适用。如图 1-2 所示，右图是左图考虑摩擦的质量块对应的功率键合图。

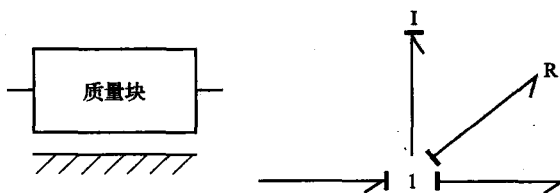


图 1-2 考虑摩擦的质量块的键合图

可以看出直接采用功率键合图建模不仅不够直观，而且当系统比较复杂时修改也比较困难。特别是当系统包含控制部分时，该部分的建模若用此方法则比较麻烦，所以目前广泛使用的液压系统仿真软件通常不单纯地使用该方法建模。对于实际工程系统，不仅包含功率传递，而且包含信号传递，所以单纯应用一种建模方法是不够的。

无论是基于信号流建模还是基于功率流建模，主要目的是推导描述系统动态特性的微分方程，信号流和功率流是建模的手段和方法，并没有绝对的优劣之分。信号

流的方法比较适合于设计控制系统，通常表示为方块图的形式。能量端口的方法在能被描述成环路图的系统中得到了很好的应用，因为环路图表示了系统的物理拓扑结构。所以工程人员要能够灵活应用各种方法（并不限于这两种方法）建立系统的微分方程，不必拘泥于某种方法。图 1-3 是动态系统仿真软件 20-SIM 绘制的信号流与功率流混合建模实例。20-SIM 是一个交互式的、面向对象的建模和仿真平台，该软件可以直接支持功率键合图建模。

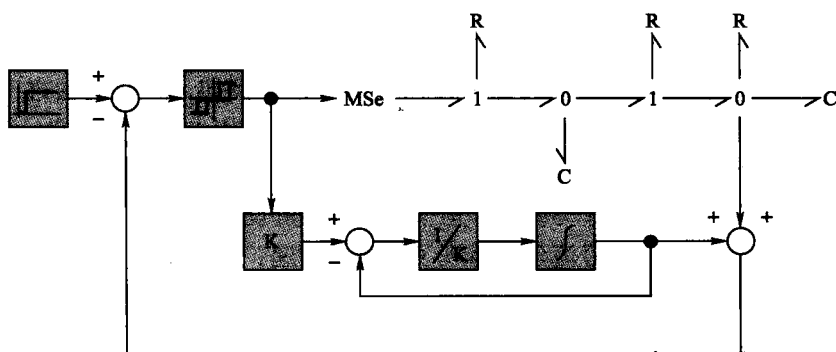


图 1-3 20-SIM 绘制的信号流与功率流混合建模实例

从上图可以看到将控制信号转化为功率信号需要转换元件（如 MSe 模块），它相当于一种源元件。此时如果仅用功率流建模的方法不太容易处理控制信号部分（当然也是可以的），但仅用信号流建模则不太容易处理功率部分，而且很容易导致代数环的出现。所以通常在建模时应根据实际情况选择建模方法，不拘泥于某种建模方法。

## 1.2 模块化建模思想

模块化建模目前已经广泛应用到系统仿真建模中，大多数系统仿真软件都应用模块化建模方法建立系统模型。作为仿真人员，有必要培养模块化建模的思想。在介绍液压系统仿真中应用模块化建模思想之前，首先介绍一些系统的概念，使用户能够从系统的角度理解仿真，有助于更加深入地理解仿真的本质。

### 1.2.1 系统的概念

系统是指存在于一定环境中的一组有联系的事物，具有独立的功能或特性，系统与环境有交换。一盘散沙算不上一个系统，因为它的内部缺乏联系；一筐螃蟹虽然足互相缠绕在一起，但是没有体现总体的功能，很难算做一个系统。液压系统中各液压元件相互联系、相互合作，最终体现总体的功能，所以是一个系统。

#### (1) 系统的嵌套性

任何系统都是一个更大系统的分系统。譬如地球本身是一个系统，但它属于太阳系，而太阳系又属于银河系。一个液压元件算作一个系统，而液压元件又是整个液压系统的子系统，整个液压系统又是一个工程产品（如飞机）的子系统，飞机又是航空系统的子系

统，航空系统又是运输系统的子系统。所以说系统具有嵌套性。

### (2) 系统间与系统内的联系

系统与环境的交换一般有三种形态，即物质、能量和信息。例如，将一个液压元件作为一个系统，它的输入是油液，其中包含物质和能量；它的输出是位移和速度，其中包含能量和信息。所以物质流、能量流和信息流是系统与环境的三种形态。从建模的角度来说，流动形态不同，建模方法也要有一定的区别。

信息就是通常所说的信号、指令、代码、消息等。它可以用来表达一种结构、状态、特征，传递一种命令。信息能提供情况、帮助了解、供给知识和指导行动。信息总是与物质或能量的传递联系在一起的，它总是需要一定的载体。例如，邮政局通过“信”这个物质传递信息，电信局通过传送电脉冲来传递信息，烽火台用光波传递信息，汽笛用声波传递信息，液压系统通过电、光等载体传递信息等。

信息虽然是以物质和能量作为载体，但又不是物质和能量本身，而是一种可以作用于人类、为人类感知的信号。信号流建模体现了信息的传递，而功率流建模体现了物质和能量的传递，所以两种建模方法需要紧密结合。

### 1.2.2 液压系统仿真中的模块化建模

以液压元件模型为基本模块（子系统），模块直接通过信号或功率键的连接实现数据传递。对于功率的传递，采用功率流的方法利用功率键实现双向数据传递，从而使元件连接可读性强；对于控制信号连接采用信号流的方法实现单向传递。当然，也可以将两种类型的信号整合在一起，元件之间通过端口实现数据传递。端口既可以传递功率信号，也可以传递控制或者其他数据信号，这种端口被定义为多端口（Multiport），如 AMESim 采用了此种方法，如图 1-4 所示。

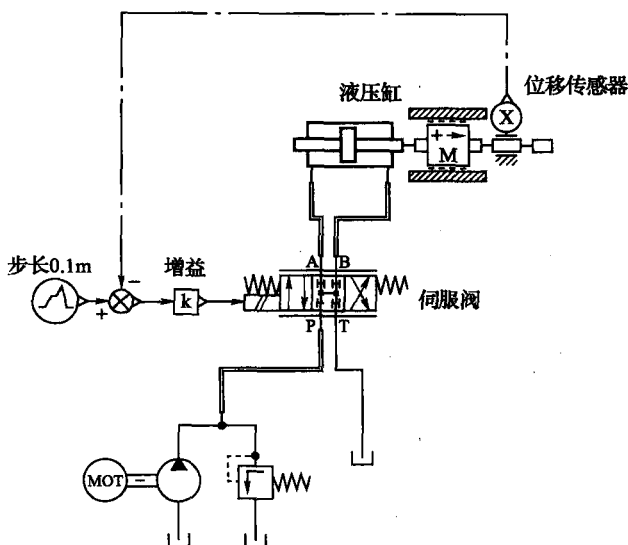
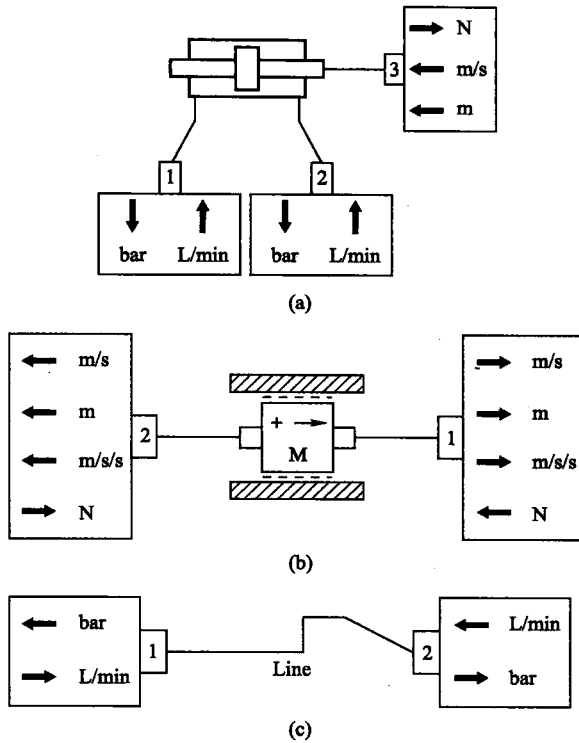


图 1-4 AMESim 建立的液压系统仿真原理图

为了更加清晰地展示其利用多端口实现数据传递的方法，将图 1-4 中部分元件的端口数据传递信息显示到图 1-5 中。



(a) 液压缸端口数据 (b) 质量块端口数据 (c) 管路端口数据

图 1-5 部分元件的端口数据传递信息

图 1-5 中， $\leftarrow m/s$  代表速度信号； $\leftarrow m$  代表位移信号； $\leftarrow m/s/s$  代表加速度信号； $\Rightarrow N$  代表力信号； $\leftarrow bar$  代表压力信号； $\Rightarrow L/min$  代表流量信号，箭头代表信号方向。

在实际建模过程中，仿真人员不难发现，多端口只是数据传输的一种手段，这种手段使元件连接的可读性更强。而对于实际的数学模型的建立，仍然将信号流和功率流分开考虑。这里需要特别指出的是，不要误认为功率传递只是信号的双向传递而已，跟信号流建模中信号的单向传递没有区别。从功率键合图的角度来看，功率传递是通过功率键完成的，功率键不仅完成了信号的双向传递，更重要的是功率键要满足因果关系，这种因果关系才是功率建模的核心，是其与信号流建模的本质区别，所以功率传递是具有因果关系的双向数据传递，它将与通过信号流方法建立系统方程的过程有所区别，所以必然导致在建模时需要将信号流和功率流分开考虑。此处读者不要迷惑，本书将给读者更直观和深刻的体会。

当今的液压系统仿真软件，几乎无一例外地采用了模块化建模的思想，在软件中液压元件的模型为基本的建模模块单位，其模型直接用数学方程表达。软件通过液压元件模型之间的连接的拓扑关系，根据液压元件的数学模型，自动通过一定的算法建立液压系统的数学模型，从而实现正确求解。

本书直接应用了模块化建模思想，但并不着重强调某种建模方法，而是希望读者通过阅读本书，尽量摆脱建模方法的束缚，化有形于无形，将建模方法自然融入其中，直接发掘液压系统建模与仿真本质，做到融会贯通、游刃有余。

### 1.3 液压系统的建模过程

液压系统的动力学模型和热力学模型是描述系统动态特性的数学模型，而建立系统的数学模型通常有两条基本途径：理论法和试验法。理论法是从已知的定理、定律出发，通过机理分析找出系统内在的运动规律，借助数学工具推导出数学模型，故又称为解析建模法。试验建模法是通过观察、测量系统实体的有关可观测量，经过数据和数学处理获得数学模型，也称辨识建模。就液压系统而言，系统的理论分析研究已经比较完善和成熟，通过机理分析确定的模型结构具有相当高的精度。所以本书主要采用解析建模的方法建立液压系统的动力学和热力学模型。

建模过程就是将系统进行概括、抽象和数学解析处理的过程。一般可通过划分子系统、建立基本模型、集总模型三个阶段完成。

#### ● 划分子系统

实际的液压系统通常比较复杂，由许多液压元件连接而成，直接建立液压系统的动态模型通常比较困难，而且不利于系统分析与调试。所以为了便于建立液压系统的动力学和热力学模型，必须将液压系统分解成若干子系统，从子系统的模型入手分析和建立整个液压系统的模型，这些划分的子系统之间相互连接实现系统能量和信息的传递。而一个子系统又可分解成许多元件，元件可以认为是系统的最基本组成部分。为使系统模型简单、直观，本书将每个液压元件看成子系统，相连的液压元件实现能量和信息的传递。

#### ● 建立基本模型

组成液压元件模型的最基本要素称为单元（或作用元），单元不等于元件，它是经过分析概括以后，抽象化的、按性质划分的、更基本的组成部分。单元用来表达对系统动态特性产生某种影响作用的因素。对于液压系统而言，通常有阻性元、容性元和感性元三种。液压元件的模型不是这些作用元的简单集合，而是许多这些单元相互作用、相互依存，最后使系统具有某种特定功能，有规可循的集合整体。从键合图理论的角度来看，三种作用元通过功率键实现功率流的传递。对于通常的液压元件，严格地说是由这三种作用元共同作用完成其功能的。在简化计算中，某些元件也可以被近似认为由某个基本元组成，如节流阀在近似计算中可以认为其模型仅由阻性元构成，忽略其内部容腔内流体的体积。所以必须根据实际工程需要选择元件模型的复杂度。

为了实现液压元件模型的公式更加具有通用性，必须从元件模型中提出更加基本的元素，这就是基本模型。基本模型是能够解释系统实体所研究范围的输入-输出行为模型，不要求它能提供系统实体行为的全部解释，建立模型只是作为了解系统、研究系统的手段和工具，因此模型的形式应该适合于应用的目的。本书根据研究对象的特点和研究的目的，为了便于建模和研究，定义三种基本液压元件：容性元件、阻性元件和感性元件。容性元件仅由容性元组成；阻性元件仅由阻性元组成；感性元件主要由感性元组成。在工程

中很难找到某液压元件属于基本液压元件，当然，某些元件的简化模型可以近似认为是基本液压元件。所有液压元件的热力学模型都由一个或多个基本液压元件模型组成。

#### ● 集总模型

根据已知的子系统的模型和划分的边界条件，按照一定的规则步骤就可以归纳建立描述整个系统的集总模型。液压系统是由液压元件连接而成的，液压系统的动力学和热力学模型也由液压元件的动力学和热力学模型组成。但是液压系统的模型并不是液压元件模型的简单组合，液压元件根据系统工作原理进行连接，所以液压系统的模型不仅需要根据液压元件的连接关系确定数据流向，而且必须满足液压元件模型对输入和输出数据的需求（也就是键合图理论中的相容性），以便方程求解能够顺利进行。

子系统模型虽然从局部的角度看已经比较简单，但经集总处理后，又会使模型过于复杂，导致响应求解困难。因而尚需根据模型的使用目的对所研究的系统做合理的假设，提出简化设想，将系统模型进一步简化，从而实现快速求解。

### 1.4 液压系统的规范型模型

液压系统是典型的非线性时变系统，如上文所述，其数学模型  $S$  由  $N$  个子系统的数学模型组成。每个子系统的数学模型  $S_i$  可以表达为

$$S_i \begin{cases} f_i(\dot{x}, x_i, u_i, t) = 0 \\ y_i = g_i(x_i, u_i, t) \\ i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (1-1)$$

式中： $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in_i})$  为第  $i$  个子系统的  $n_i$  维状态向量；

$y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im_i})$  为第  $i$  个子系统的  $m_i$  维输出向量；

$u_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ir_i})$  为第  $i$  个子系统的  $r_i$  维输入向量；

$f_i$  为  $n_i$  维向量函数；

$g_i$  为  $r_i$  维向量函数；

$t$  为时间。

式 (1-1) 适用于一切系统，但是式 (1-1) 并不是整个系统的完全描述，液压系统由其子系统构成，其模型有子系统的模型方程、子系统之间的连接方程以及整个系统的外输入方程构成。其中子系统之间的连接方程和系统的外输入方程构成约束方程，表达如下：

$$H(Y, U, V) = 0 \quad (1-2)$$

式中： $H$  为  $p$  维向量方程， $p$  为约束方程的个数；

$U = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ ，由  $N$  个子系统的输入向量组成；

$V = (v_1, v_2, \dots, v_r)$  为  $r_v$  维输入向量；

$Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ ，由  $N$  个子系统的输出向量组成。

所以整个系统的方程由  $N$  个子系统的方程组合起来构成，表达如下：



$$S \begin{cases} F(\dot{X}, X, U, t) = 0 \\ H(Y, U, V) = 0 \\ Y = G(X, U, t) \end{cases} \quad (1-3)$$

式中:  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ , 由  $N$  个子系统的状态向量组成;

$G = (g_1, g_2, \dots, g_N)$ , 由  $N$  个子系统的输出方程组成。

该方程是整个系统的完整的概括性的描述, 是系统方程的规范型, 此处仅给读者一个感性认识, 使读者对系统方程有整体把握。若系统模型可以用显式常微分方程描述时, 则系统方程可以简化为

$$S \begin{cases} \dot{X} = F(X, U, t) \\ Y = G(X, U, t) \end{cases} \quad (1-4)$$

约束代数方程  $H(Y, U, V) = 0$  将被代入微分方程右端项而消去。对于液压系统模型, 大多数属于这种情况。

## 1.5 模型阶数的选定

这里所说的模型的阶数与传递函数中定义的模型的阶数不同, 是用来表示模型的复杂度的含义。也就是说模型的阶数越高, 模型越复杂。对于一个实际的液压元件模型, 既可以用简单模型表示, 又可以用复杂模型表示。本节针对模型阶数选定的问题加以讨论分析。

### 1.5.1 模型的阶段性

模型是用数学的方程描述物理系统, 是系统的本质与运行机理的体现。模型是由人建立的, 人类对物理系统的认知程度直接反映了模型的准确程度。参与计算的模型的准确程度不仅受到人类认知程度的制约, 还要受到客观条件的制约。因为实际参与计算的模型中的参数要具体化, 而这些参数需要通过设计或者辨识的手段得到。产品的设计制造是具有阶段性的, 所以可以参与计算的模型的准确性必然是有阶段性的。高阶系统也许更加准确地描述了系统的动态行为, 但是通常有更多的参数需要人为确定, 而很可能该阶段无法给出这些参数, 从而影响了高阶模型的计算准确性, 所以需要根据产品设计的不同阶段设计和选择模型。

#### (1) 初步设计阶段

该阶段通常数据不全, 除利用元件和系统生产厂提供的数据以外, 很多参数很难给出。所以此阶段尽量用简化模型, 阶数很低, 但一般已经符合需要。例如, 可以用一些静态模型或曲线代替系统模型。如恒压变量泵模型, 这时可以用厂商提供的  $P-Q$  曲线代替。而对于成熟的商业化的液压系统仿真软件, 对同一种液压元件也提供了很多模型供用户选择。

#### (2) 样机阶段

该阶段元件的样机已经制造完成, 通常样机中会有很多问题需要解决, 此阶段的仿真计算就是要解决这些问题。由于有物理样机, 所以许多参数可以通过辨识或者测量得到,