

第 1 章 液压系统常见的仿真方法

1.1 动态系统的计算机仿真

1.1.1 系统与系统模型

1. 系统

系统指具有某些特定功能、相互联系、相互作用的元素的集合。这里的系统是指广义上的系统，泛指自然界的一切现象与过程，举例来说，工程系统如控制系统、通信系统等，非工程系统如股市系统、交通系统、生物系统等。

2. 系统模型

系统模型是对实际系统的一种抽象，是对系统本质（或系统的某些特性）的一种描述。系统模型具有与系统相似的特性。好的系统模型能够反映实际系统的主要特征和运动规律。

系统模型可以分为实体模型和数学模型。

实体模型又称物理效应模型，是根据系统之间的相似性而建立起来的物理模型，如建筑模型等。

数学模型包括原始系统数学模型和仿真系统数学模型。原始系统数学模型是对系统的原始数学描述。仿真系统数学模型是一种适合于在计算机上演算的模型，主要是指根据计算机的运算特点、仿真方式、计算方法、精度要求将原始系统数学模型转换为计算机程序。系统模型分类见表 1-1。

表 1-1 系统模型分类

静态系统模型	动态系统模型		
代数方程	连续系统模型		离散系统模型
	集中参数	分布参数	差分方程
	微分方程	偏微分方程	

1.1.2 仿真与计算机仿真

1. 仿真的概念

仿真是以相似性原理、控制论、信息技术及相关领域的有关知识为基础，以计算机和各种专用物理设备为工具，借助系统模型对真实系统进行试验的一门综合性技术。

2. 仿真的分类

实物仿真：又称物理仿真，是指研制某些实体模型，使之能够重现原系统的各种状态。早期的仿真大多属于这一类。其优点是直观、形象，至今仍然广泛应用；缺点是投资巨大、周期长、难以改变参数、灵活性差。

数学仿真：是用数学语言去描述一个系统，并编制程序在计算机上对实际系统进行研究的过程。其优点是灵活性高、便于改变系统结构和参数、效率高（可以在很短时间内完成实际系统很长时间的动态演变过程）、重复性好；缺点是对某些复杂系统可能很难用数学模型来表达，或者难以建立其精确模型，或者由于数学模型过于复杂而难以求解。

半实物仿真：又称数学物理仿真或混合仿真。为了提高仿真的可信度或针对一些难以建模的实体，在系统研究中往往把数学模型、物理模型和实体结合起来组成一个复杂的仿真系统，这种在仿真环节中存在实体的仿真称为半物理仿真或半实物仿真，如飞机半实物仿真。

3. 计算机仿真

计算机仿真是在研究系统过程中根据相似性原理，利用计算机来逼真模拟研究系统。研究对象可以是实际的系统，也可以是设想中的系统。在没有计算机之前，仿真都是利用实物或其物理模型来进行研究的，即物理仿真。物理仿真的优点是直接、形象、可信，缺点是模型受限、易破坏、难以重用。计算机仿真可以用于研制产品或设计系统的全过程，包括方案论证、技术指标确定、设计分析、故障处理等各个阶段，如训练飞行员、宇航员的仿真工作台和仿真机舱。

1.2 计算机仿真的三要素和三项基本活动

计算机仿真的三个基本要素是系统、模型和计算机，联系着它们的三项基本活动是数学模型建立、仿真模型建立（又称二次建模）和仿真试验。

数学仿真采用数学模型，用数学语言对系统的特性进行描述，其工作过程如下。

(1) 建立系统的数学模型。

(2) 建立系统的仿真模型，即设计算法并转换为计算机程序，使系统的数学模型能为计算机所接受并能在计算机上运行。

(3) 运行仿真模型，进行仿真试验，再根据仿真试验的结果进一步修正系统的数学模型和仿真模型。

1.3 常见的仿真方法

对液压元件和系统利用计算机进行仿真的研究和应用已有三十多年的历史。随着流体力学、现代控制理论、算法理论和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，液压仿真技术也日渐成熟，成为液压系统设计人员的有力工具。

研究液压系统动态特性的方法，过去用得较多的是古典控制工程中的传递函数分析法，

近年来,随着现代控制理论及计算机应用的发展,给液压系统动态特性的研究开辟了新的途径。为了求得系统的瞬态响应,可以对系统的动态特性进行数字仿真,即写出系统在动态过程中的数学模型,然后在计算机中求出系统中各主要变量在过渡过程中的时域解,其仿真的具体方法是功率键合图法和节点容腔法。

下面将分别介绍液压系统常见的仿真方法。

1.3.1 传递函数分析法

这种方法主要适用于分析液压系统的稳定性,但只限于线性系统,对于非线性系统要进行线性化,而有些严重的非线性系统很难进行线性化。同时,这种方法主要适用于单输入、单输出,以及初始条件为零的情况。如果要用这种方法求系统的过渡过程(瞬态响应),那么只有在系统相当简单时才有可能。这些都是传递函数分析法的局限性。

1.3.2 功率键合图法

功率键合图是研究机械、液压、电气等系统模型的工具。它用于表示系统功率流程,即表示系统在各种因素作用下,在动态过程中,功率的流向、汇集、分配和能量转换等关系。键合图技术是建立在状态变量理论基础之上的一门研究系统动态特性的技术,它通过键合图直接得到描述系统的状态方程,列方程的方法与其他方法不同,但状态方程的形式完全一样。由一个完全增广定向的键合图模型就可以按一种非常规则的方式拟定系统的方程,有三个需要遵循的简单步骤,即选定输入能量状态变量及其能量变量、列出初步的系统方程组、将初步方程式归并为状态空间形式。真正意义上的自动建模应该是利用系统的功率键合图模型,由软件根据键合图变量之间的关系,推导出一组一阶微分方程组,即代表系统特征的状态方程。键合图理论的资料相对较少,理解应用相对比较困难。

1.3.3 节点容腔法

液压系统既可以看成单个元件,也可以看成是一个复杂的组件,其中各构件间的能量或信号传递通常是经过液压管道实现的。在计算机数字仿真中,液压系统可以描述成普通的微分方程组,并采用数值积分法进行求解。在求解压力、速度、位移等重要的状态变量来讨论动态特性时,可以采用节点容腔法进行仿真。

设 ΣQ 是进出容腔流量总和,则由连续性方程可以得出容腔压力基本方程为

$$p(t) = \frac{E_0}{\Sigma V} \int_0^t \Sigma Q dt + p_0 \quad (1.1)$$

式中 ΣV ——连接容腔节点所有元件的容积之和;

ΣQ ——流过节点上所有元件的流量之和;

E_0 ——油液的体积弹性模量。

在液压系统中,流入或流出某节点的流量决定了其压力的大小,根据节点容腔法建模的原理,式(1.1)所示压力方程中的流量关系就对应于液压回路中的液压元件与管路的关系。根据这一原则,对液压系统中每个液压节点建立其流量-压力方程,这样液压系统就可以由一阶微分方程组来描述各节点容腔压力的动态特性。对此方程组联立求解,就可以对液压系统中各容腔的压力值进行动态特性仿真。

各种工作机械上的液压传动系统及其元件，迄今为止绝大多数都是按“克服阻力、保证速度”的静态指标来计算并设计的。在液压技术不断向前发展的今天，这种情况越来越难以适应高速、高压、大功率和高精度的要求。例如，机床在换向、启动等阶段及在负载突然变化时常常会出现振荡或颤抖，机床上的工作机构不能在外来扰动的作用下保持速度恒定的运动，有时还会产生持续的振荡等。为了查明这些现象的成因，提出解决办法，有必要对工作机械中的液压元件和系统进行动态特性的研究，以便了解它的主导因素和内在的作用规律。

研究液压元件或系统的动态特性必须使用自动控制理论。古典控制理论对分析、综合单变量的线性定常系统已发展得比较完善，可以简洁扼要地、形象地解释清楚许多问题。各种液压元件和系统都有各自的特点，在分析动态特性之前，必须建立该元件（或系统）的动态数学模型，然后再按自动控制理论的方法来进行分析。分析工作最后都汇聚到传递函数上，因为它就是古典控制理论中的动态数学模型。在分析中遇到非线性问题时，均用线性化的方法处理。

1.4 系统按数学模型分类

仿真其实就是用数学模型描述实际系统。因而，先要研究数学模型。从系统数学模型的观点出发，可把系统分成线性系统和非线性系统。

1.4.1 线性系统

尽管具体的物理系统可能是不相同的，但用微分方程来描述其动态特性时，对输出量、输入量及其各阶导数而言，都只是线性的组合，称这类微分方程为线性微分方程。凡是由线性微分方程来描述其动态特性的系统，称为线性系统。

线性系统微分方程的一般表达式为

$$a_n x_o^{(n)} + a_{n-1} x_o^{(n-1)} + \cdots + a_1 \dot{x}_o + a_0 x_o = b_m x_i^{(m)} + b_{m-1} x_i^{(m-1)} + \cdots + b_1 \dot{x}_i + b_0 x_i \quad (1.2)$$

式中 x_o —— 系统输出量；

x_i —— 系统输入量。

当 a_i 、 b_j ($i=0,1,\dots,n$, $j=0,1,\dots,m$) 为时间的变量时，则式 (1.2) 所描述的线性系统称为线性时变系统；当 a_i 、 b_j 为不随时间变化的常量时，则式 (1.2) 所描述的线性系统称为线性定常系统。线性系统可以运用叠加原理，当有几个输入量同时作用于系统时，可以逐个输入，求出对应的输出，然后把各个输出进行叠加，即为系统的总输出。

1.4.2 非线性系统

如果微分方程的系数与自变量有关，则称该微分方程为非线性微分方程。由非线性微分方程来描述其动态特性的系统，称为非线性系统。在自动控制系统中，即使只含有一个非线性元件，该系统便是非线性系统。

典型的非线性元件，就其 I/O 特性来看，可分为继电器特性、饱和特性和不灵敏区特性非线性元件等，如图 1-1 所示。

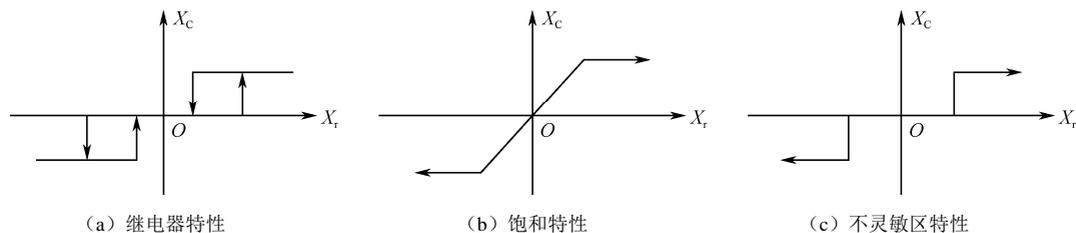


图 1-1 典型的非线性元件

非线性系统就其本质来说与线性系统是不同的。它不具备线性系统的叠加性和均匀性。因此，不能采用研究线性系统的方法去研究非线性系统。

应该指出，任何物理系统的特性精确地说都是非线性的。但在误差允许范围内，可以将某些非线性特性线性化，近似地用线性微分方程来描述，这样就可以按照线性系统来处理。

1.5 控制系统的线性化数学模型

通常所说的线性系统是有条件的，是在一定的工作范围之内保持着线性关系的。例如，系统中的阻尼器，在低速时可以看成是线性的，但在高速时，阻尼摩擦力则与速度的二次方成正比，系统就变成非线性的了。对于含有非线性关系的系统，非线性数学模型的建立和求解，特别是高阶非线性方程的求解，其过程是相当复杂的。

为了绕过非线性系统造成的数学上的困难，一般采用两种方法来处理：一是忽略那些次要的非线性因素，如死区、饱和及干摩擦等；二是当系统的信号或变量变化范围不大或非线性不太严重时，可以引入等效的线性系统来代替非线性系统，即应用线性化数学模型来代替非线性数学模型。

所谓线性化，就是指在一定条件下进行某种近似或缩小研究问题的范围，将非线性微分方程作为线性微分方程来处理。它的数学处理是将变量的非线性函数展开成泰勒（Taylor）级数，分解成这些变量在某工作状态的微增量的表达式，然后略去高于一阶微增量的无穷小，从而求得近似的线性函数，这时就可以用线性控制理论对系统进行分析了。

泰勒级数的一阶近似如下。

对于一元函数有

$$F(x) = F(x_0) + \left(\frac{dF}{dx} \right)_0 \Delta x \quad (1.3)$$

对于二元函数有

$$F(x, y) = F(x_0, y_0) + \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)_0 \Delta y \quad (1.4)$$

在液压系统中，可采用这种方法建立滑阀节流口的线性化流量方程。滑阀节流口的流量公式为

$$Q = C_d w x_v \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1.5)$$

式中 C_d ——流量系数;
 w ——滑阀的面积梯度;
 x_v ——阀芯的位移量;
 Δp ——节流口的压降;
 ρ ——油液的密度。

式(1.5)是一个二元非线性方程,应用泰勒级数进行线性化,有

$$Q = C_d w x_{v0} \sqrt{\frac{2\Delta p_0}{\rho}} + C_d w \sqrt{\frac{2\Delta p_0}{\rho}} \Delta x_v + C_d w x_{v0} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \times \frac{1}{2\sqrt{\Delta p_0}} \Delta p \quad (1.6)$$

即

$$Q - Q_0 = C_d w \sqrt{\frac{2\Delta p_0}{\rho}} \Delta x_v + C_d w x_{v0} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \times \frac{1}{2\sqrt{\Delta p_0}} \Delta p \quad (1.7)$$

所以有

$$\Delta Q = K_q \Delta x_v + K_c \Delta p \quad (1.8)$$

式中 $K_q = C_d w \sqrt{\frac{2\Delta p_0}{\rho}}$ ——流量增益;

$K_c = \frac{C_d w x_{v0}}{\sqrt{2\rho\Delta p_0}}$ ——流量-压力系数;

$Q_0 = C_d w x_{v0} \sqrt{\frac{2\Delta p_0}{\rho}}$ ——空载流量;

x_{v0} ——某个工作点的阀芯位移量(或阀开口量);

Δp_0 ——某个工作点的压降。

由于 x_{v0} 和 Δp_0 分别是某个工作点的阀芯位移量(或阀开口量)和压降,这些值都是常数,因而 K_q 和 K_c 也都是常数。由公式 $\Delta Q = K_q \Delta x_v + K_c \Delta p$ 可知,在某个工作点附近,滑阀节流口的流量随阀芯位移量的增加而成比例地增加,并随节流口压降的增加也成比例地增加。显然,它们之间为线性关系。

在处理线性化问题时,应注意以下几点。

(1) 首先要确定系统处于平衡状态时各组成元件的静态工作点。这是因为在不同的静态工作点时,液压系统线性化方程的参数值有所不同。

(2) 如果输入量工作在较大的范围内,所建立的线性化数学模型势必有较大误差,所以液压系统非线性模型线性化是有条件的。

(3) 如果非线性特性是不连续的,则在不连续点附近不能得出收敛的泰勒级数,这时对系统不能进行线性化处理。

(4) 线性化后的微分方程是以增量为基础的增量方程。

课后题

1. 系统的定义是什么？
2. 系统模型是什么？
3. 仿真的基本概念是什么？
4. 试列举一种生活中常见的设备，思考其是否能用仿真来替代。
5. 试列举计算机仿真的三要素。