

# 基 础 篇

---

本篇共3章，包括仿真技术概述、系统建模与仿真方法，其中所涉及的概念、理论与方法是我们在进行系统仿真实验与利用仿真工具时必须了解与掌握的。因此，本篇所述内容是基础，应该给予充分的重视。





## 1.1 系统的实验研究方法

在工程设计与理论学习过程中,我们会接触到许多系统的分析、综合与设计问题,需要对相应的系统进行实验研究,概括起来有解析法、实验法与仿真实验法三种实验方法。

### 1. 解析法

所谓解析法,就是运用已掌握的理论知识对控制系统进行理论上的分析、计算。它是一种纯理论意义上的实验分析方法,在对系统的认识过程中具有普遍意义。

例如,在研究汽车轮子悬挂系统的减震器性能及其弹簧参数变化对汽车运动性能的影响时,可从动力学角度分析,将系统等效为图 1-1 所示模型形式,进而得出描述该系统动态过程的二阶常微分方程

$$a \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = F(t) \quad (1-1)$$

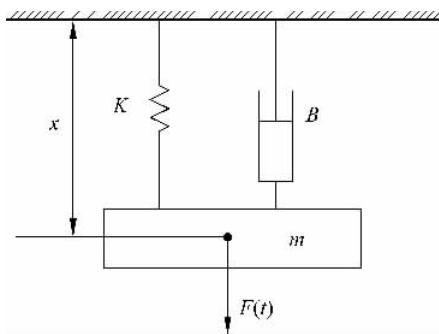


图 1-1 悬挂系统动力学模型

对于式(1-1)的分析求解显然就是一个纯数学解析问题。但是,在许多工程实际问题中,由于受到理论的不完善性以及事物认识的不全面性

等因素的影响(例如“黑箱”、“灰箱”问题等),解析法往往有很大的局限性。

## 2. 实验法

对于已经建立的(或已存在的)实际系统,利用各种仪器仪表与装置,对系统施加一定类型的信号(或利用系统中正常的工作信号),通过测取系统响应来确定系统性能的方法称为实验法。它具有简明、直观与真实的特点,在一般的系统分析与测试中经常采用。

图 1-2 给出的是一带传动性能试验机转速控制系统,其动态性能  $n(t)$  及静态性能  $n(I_d)$  均可通过实验的方法测得,图 1-3 是其静特性的测量结果。

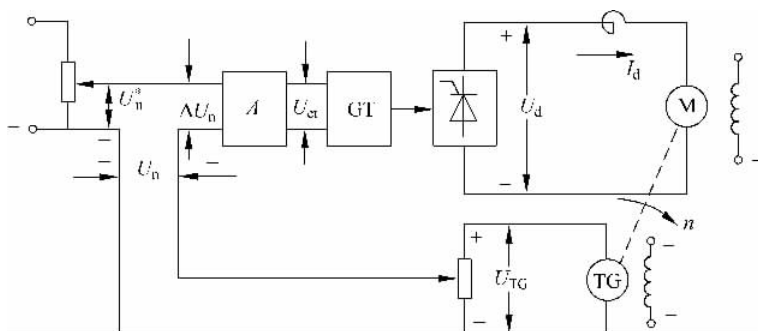


图 1-2 带传动试验机转速控制系统

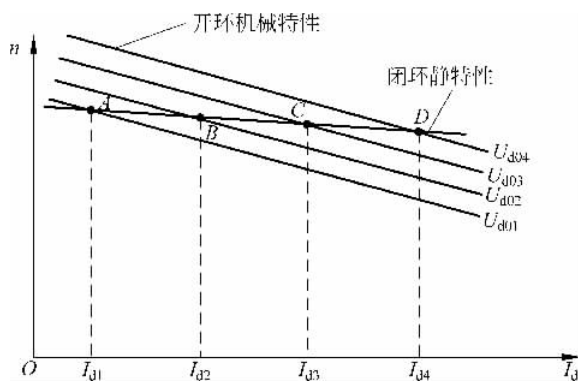


图 1-3 转速控制系统静特性

但是,由于种种原因,这种实验方法在实际中常常难以实现。归纳起来有如下几方面的原因:

(1) 对于控制系统的设计问题,由于实际系统还没有真正地建立起来,所以不可能在实际的系统上进行实验研究。

(2) 实际系统上不允许进行实验研究。比如在化工控制系统中,随意改变系统运行的参数,往往会导致最终产品的报废,造成巨额损失,类似的问题还有许多。

(3) 费用过高、具有危险性、周期较长。比如：大型加热炉、飞行器及原子能利用等问题的实验研究。

鉴于上述原因,在模型上进行的仿真实验研究方法逐渐成为对控制系统进行分析、设计与研究的十分有效的方法。

### 3. 仿真实验法

仿真实验法就是在模型上(物理的或数学的)所进行的系统性能分析与研究的实验方法,它所遵循的基本原则是相似原理。

系统模型可分为两类,一类为物理模型,另一类是数学模型。例如,在飞行器的研制中,将其置放在“风洞”中进行的实验研究,就是模拟空中情况的物理模型的仿真实验研究,其满足“环境相似”的基本原则。又如,在船舶设计制造中,常常按一定的比例缩小建造一个船舶模型,然后将其置放在水池中进行各种动态性能的实验研究。这满足“几何相似”的基本原则,是模拟水中情况的物理模型的仿真实验研究。

在物理模型上所作的仿真实验研究具有效果逼真、精度高等优点,由于造价高昂,或者耗时过长,不为广大的研究人员所接受,大多是在一些特殊场合下(比如,导弹或卫星一类飞行器的动态仿真,发电站综合调度仿真与培训系统等)采用。

随着计算机与微电子技术的飞速发展,人们越来越多地采用数学模型在计算机(数字的或模拟的)上进行仿真实验研究。在数学模型上所进行的仿真实验是建立在“性能相似”的基本原则之上的。因此,通过适当的手段与方法建立高精度的数学模型是其前提条件。

## 1.2 仿真实验的分类

由于仿真实验是利用模型(物理的或数学的)来进行系统动态性能研究的实验,其中绝大多数都要应用计算机(模拟的或数字的),因此其分类方式以及相应的称呼均有所不同。下面仅就常用的几种情况加以说明。

### 1. 按模型分类

若仿真实验采用的模型是物理模型,则称之为物理仿真;若是数学模型,则称之为数学仿真。

事实上,人们经常把仿真实验中有无实物介入以及与时空的对应关系来对模型进行分类,可归纳成图 1-4 所示的情况。由图可见,物理仿真总是有实物介入的,具有实时性与在线

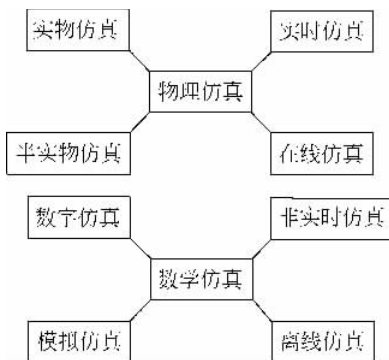


图 1-4 按模型分类的几种情况

的特点。因此,物理仿真系统具有构成复杂、造价较高等特点,图 1-5 给出了某卫星姿态控制的实物仿真系统原理,从中可略见一斑。数学仿真是在计算机上进行的,具有非实时性与离线的特点,是一种经济、快捷与实用的实验方法。

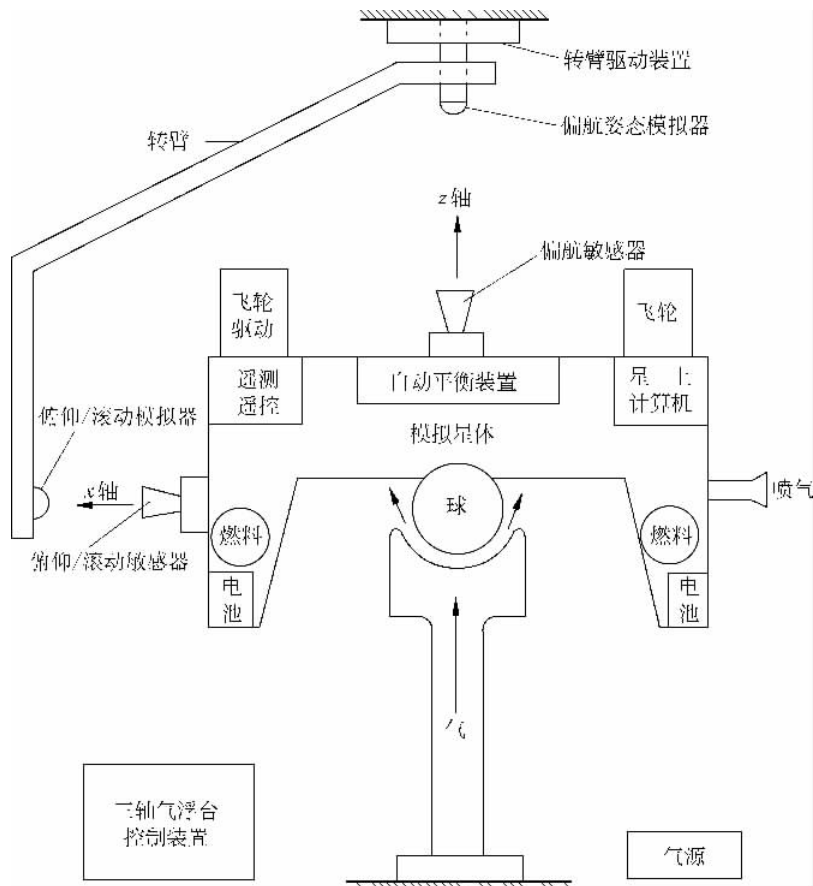


图 1-5 卫星姿态控制的实物仿真系统原理图

本书重点讨论基于数学模型的数字仿真问题。

## 2. 按计算机类型分类

由于数学仿真是在计算机上进行的,所以视计算机的类型以及仿真系统的组成不同可有多种仿真形式。

### (1) 模拟仿真

采用数学模型在模拟计算机上进行的实验研究称为模拟仿真。模拟计算机的组成如图 1-6 所示,其中“运算部分”是它的核心,它

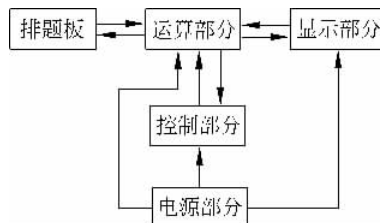


图 1-6 模拟计算机的组成

是由我们熟知的“模拟运算放大器”为主要部件所构成的,能够进行各种线性与非线性函数运算的模拟单元。下面的例子说明了模拟仿真实验的实现过程。

**例 1-1** 在图 1-1 所示系统中,若初始条件为  $\dot{x}(t)|_{t=0} = \dot{x}(0) = \alpha, x(t)|_{t=0} = x(0) = \beta$ ,试分析参数  $B$  对系统振动特性的影响。

**解** 对于式(1-1),不难确定:  $a=m, b=B, c=K$ ,则有

$$\ddot{x}(t) = -\frac{B}{m}\dot{x}(t) - \frac{K}{m}x(t) + \frac{1}{m}f(t) \quad (1-2)$$

据式(1-2)可有图 1-7 所示的模拟仿真结构图,依据它在模拟计算机排题板上即可进行排版及作仿真实验。

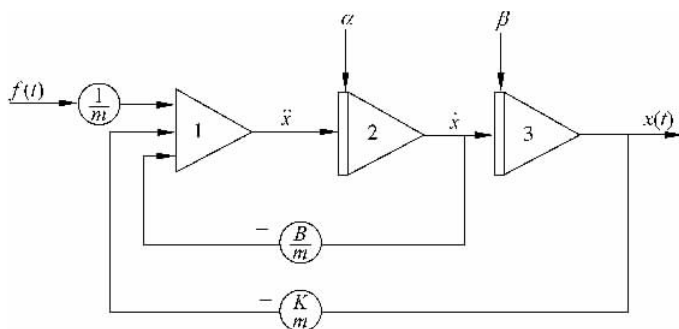


图 1-7 模拟仿真结构图

若  $f(t)=1(t)$ ,则当参数  $B$  取不同值时,有图 1-8 所示仿真结果。从中可见,适当选择  $B$  值可以使系统减小或消除振动,提高汽车乘坐的舒适性。这一结果与解析法分析结果是一致的。阻尼系数  $B$  值过小时系统易产生振动。

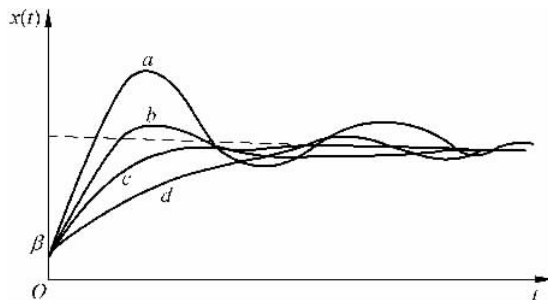


图 1-8 动态仿真结果

模拟仿真具有如下优缺点:

- ① 描述连续的物理系统的动态过程比较自然而逼真。
- ② 仿真速度极快,失真小,结果可信度高。
- ③ 受元器件性能的影响,仿真精度较低。

④ 对计算机控制系统(采样控制系统)的仿真较困难。

⑤ 仿真实验过程的自动化程度较低。

## (2) 数字仿真

采用数学模型,在数字计算机上借助于数值计算的方法所进行的仿真实验称为数字仿真。数字仿真具有简便、快捷、成本低的特点,同时还具有如下优缺点:

① 计算与仿真的精度较高。由于计算机的字长可以根据精度要求来“随意”设计,因此从理论上讲系统数字仿真的精度可以是无限的。但是,由于受到误差积累、仿真时间等因素的影响,其精度不易定得过高。

② 对计算机控制系统的仿真比较方便。

③ 仿真实验的自动化程度较高,可方便地实现显示、打印等功能。

④ 计算速度比较低,在一定程度上影响到仿真结果的可信度。因此,对一些“频响”较高的控制系统进行仿真时具有一定的困难。

随着计算机技术的发展,“速度问题”会在不同程度上得以改进与提高,因此可以说数字仿真技术有着极强的生命力。

## (3) 混合仿真

通过上面的介绍可以看到,模拟仿真与数字仿真各有优缺点,同时其优缺点可以互补,由此就产生了将这两种方法结合起来的混合仿真实验系统,简称混合仿真,主要应用于下述情况:

① 要求对控制系统进行反复迭代计算时,例如:参数寻优、统计分析等。

② 要求与实物连接进行实时仿真,同时又有一些复杂函数的计算问题。

③ 对于一些计算机控制系统的仿真问题。此时,数字计算机用于模拟系统中的控制器,而模拟计算机用于模拟被控对象。

混合仿真集中了模拟仿真与数字仿真的优点,其缺点是系统构成复杂、造价偏高。

## (4) 全数字仿真

对于计算机控制系统的仿真问题,在实际应用中为简化系统构成,对象的模拟也可用一台数字计算机来实现,用软件来实现对象各种机理的模拟,如图 1-9 所示。从中可见,控制计算机系统是真实系统,即今后要实际应用的;而仿真计算机

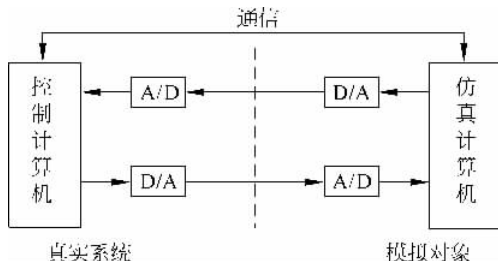


图 1-9 全数字仿真系统原理图

是用来模拟被控对象的,可用软件灵活构成各种线性及非线性特性,因此全数字仿真系统具有灵活、多变、构成简便的特点。

在全数字仿真中,若想进一步降低仿真系统成本,或仅用其作理论研究,则图 1-9 中的 A/D 与 D/A 接口电路部分可以去掉,用网络通信的方法实现控制器与模拟对象之间的信息交换,其在复杂系统数字仿真加速方法上具有独到之处。

#### (5) 分布式数字仿真

对于算法复杂的大型数字仿真问题,仅用一两台 PC 机进行数字仿真往往受到速度与精度这一对矛盾因素的影响,尽管数字计算机单机的运行速度在不断提升,这一矛盾问题始终困扰数字仿真技术的推广及深入的应用。大型(或巨型)计算机虽然具有卓越的性能,但价格限制了其市场范围。

那么如何用普通 PC 机来解决数字仿真中的加速与精度的提高问题呢?现代计算机网络技术为其开辟了新径。图 1-10 给出了基于网络技术实现的分布式数字仿真系统。从中可见,数字仿真系统将所研究的问题分布成若干个子系统,分别的主站与各分站的计算机上同时运行,有用数据通过网络与主站进行信息交换,在网络通信速度足够高的条件下,分布式数字仿真系统具有近似的多 CPU 并行计算机的性能,使仿真速度与精度均可有所保证,而成本却相对低得多,这是一种简便有效的解决复杂系统数字仿真问题的方法。

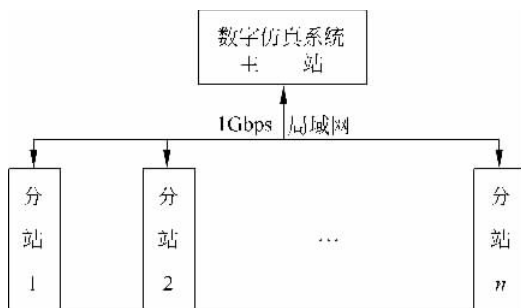


图 1-10 分布式数字仿真系统

## 1.3 相似性原理

相似性是人们在认识世界过程中广泛存在的一种现象,众多科学家的发明或发现都应用到相似性原理;从 1638 年伽利略论述的“威尼斯人在造船中应用几何相似原理”、1686 年牛顿在他的名著《自然哲学的数学原理》中讨论的“两个固体运动过程中的相似法则”,到 1848 年物理学家柯西(Cauchy)从弹性物体的运动方程导出了集合相似物体中的声学现象与规律,再到 1920 年前后 M. B. 基尔比切夫在其“弹性现象中的相似性定理”问题研究中使“相似性原理”得以逐步完善。可以说“相似性原理”是科学技术创新与应用的桥梁。

## 1. 相似方式

在现代实验科学中,常用的相似方式可归纳成如下几种基本类型。

### (1) 几何相似

在几何学中,相似性具有多种“等比”特性。依据该原理,人们在“风洞试验”、“水池船舶实验”等问题的研究中广泛应用“几何相似原理”。图 1-11 所示的是水池船舶实验与船舶模型。



图 1-11 水池船舶实验与船舶模型

同理,在实验科学研究中还经常应用“时间相似”、“速度相似”、“动力学相似”等原理。

### (2) 环境相似

在有人参与的仿真实验系统中(例如:虚拟现实),人们往往追求耳、眼、鼻等感觉器官的真实感。因此,“环境相似”就成为相似方式中的重要一环,它可使仿真系统更为真实。图 1-12 给出了某大型船舶“驾驶员操控培训系统”的实物场景,从中可见,仿真培训系统从视觉、听觉、身体触觉等多方面达到了与真实船舶驾驶舱完全相同的境地。



图 1-12 船舶驾驶培训仿真系统