

第 1 章 绪 论

1.1 控制系统的实验方法

在工程设计与理论学习过程中，我们会遇到许多控制系统的分析、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。

1.1.1 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振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，将系统等效为如图 1.1 所示的模型形式，进而得出描述该系统动态过程的二阶常微分方程：

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

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影响（例如“黑箱”问题、“灰箱”问题等），所以解析法往往有很大的局限性。

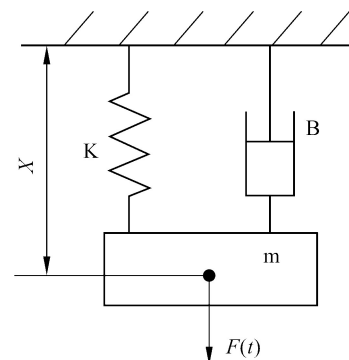


图 1.1 悬挂系统动力学模型

1.1.2 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符号的信号（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之为实验法。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。

带传动试验机转速控制系统如图 1.2 所示，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。静特性的测量结果如图 1.3 所示。

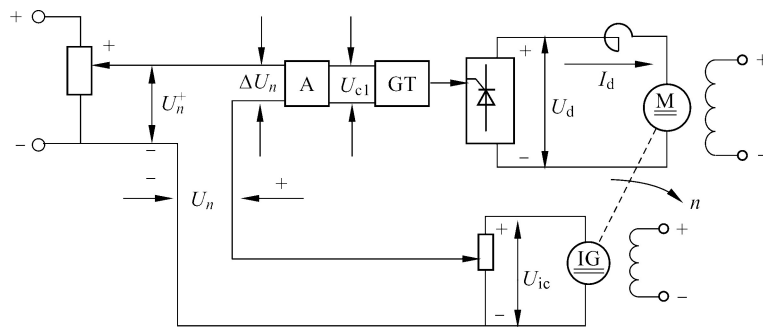


图 1.2 带传动试验机转速控制系统

但是，由于种种原因，这种实验方法在实际中常常难以实现，原因如下：

- (1) 对于控制系统的设计问题，由于实际系统还没有真正的建立起来，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，往往会导致最终成品的报废，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。

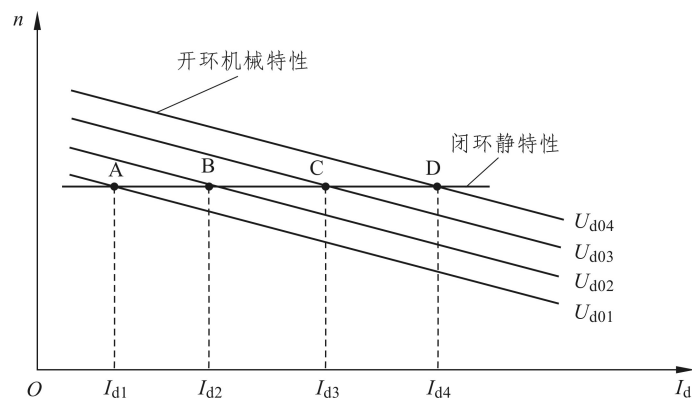


图 1.3 转速控制系统静特性

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。

1.1.3 仿真实验法

仿真实验法就是在物理或数学模型上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：一类是物理模型，另一类是数学模型。例如，在飞行器的研制中，将其放置在“风洞”之中进行实验研究，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，常常按一定的比例尺缩小建造一个船舶模型，然后将其放置在水池中进行各种动态性能的实验研究，其满足“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。

在物理模型上所做的仿真实验研究具有效果逼真、精度高等优点，但是，其造价高昂或耗时过长，不宜为广大的研究人员所接受，大多是在一些特殊场合下（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数字或模拟计算机上进行仿真实验研究。在数学模型上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 仿真实验的分类与性能比较

由于仿真实验是利用物理或数学模型来进行系统动态性能研究的实验，其中绝大多数都要应用模拟或数学计算机，因此其分类方式以及相应的名称均有所不同。下面仅就常用的几种情况进行说明。

1.2.1 按模型分类

当仿真实验所采用的模型是物理模型时，称之为物理仿真；是数学模型时，称之为数学仿真。

事实上，人们经常根据仿真实验中是否有实物介入以及与时间的对应关系将模型分类进一步细化，归纳为如图 1.4 所示的情况。由图可见，物理仿真总是有实物介入的，具有实时性和在线的特点。因此，仿真系统具有构成复杂、造价较高等特点。

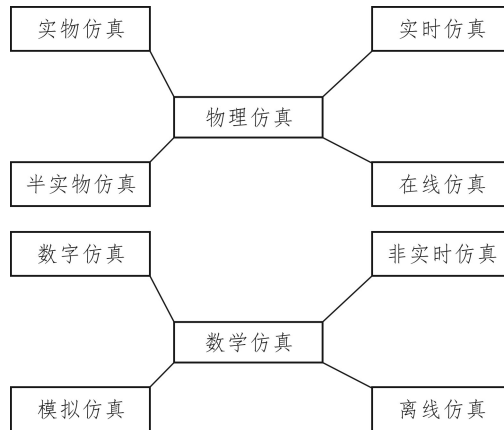


图 1.4 按模型分类的几种情况

1.2.2 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之为模拟仿真。模拟计算机的组成如图 1.5 所示，其中“运算部分”是核心，它是由熟知的“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。

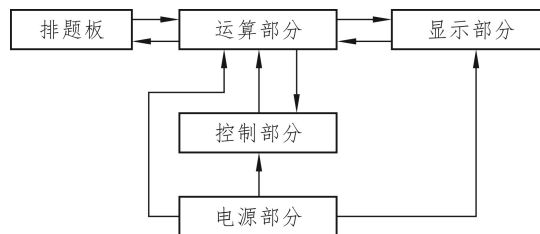


图 1.5 模拟计算机的组成

例 1.1 在如图 1.1 所示的系统中，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) 有如图 1.6 所示的模拟仿真结构图，依据它在模拟计算机上进行排版及仿真实验。

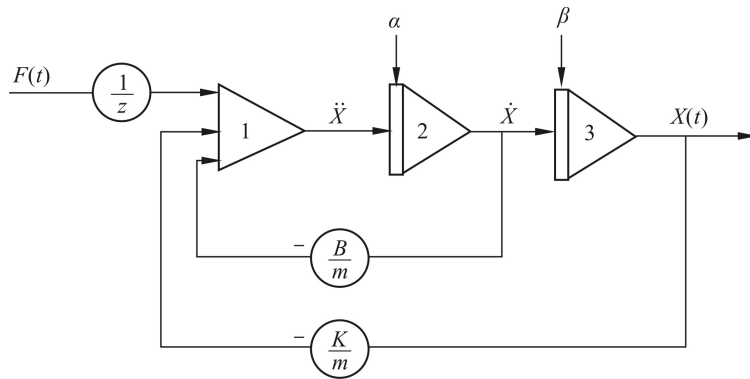


图 1.6 模拟仿真结构图

若 $F(t) = 1(t)$ ，则当参数 B 取不同值时，有如图 1.7 所示的仿真结果。从中可见，适当选择 B 值可以使系统减小或消除振动，提高乘坐汽车的舒适性。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。

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。

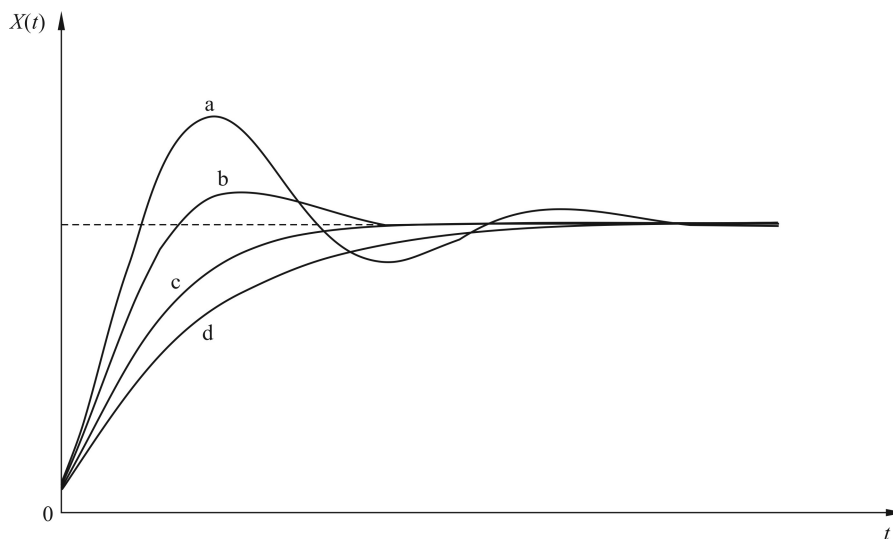


图 1.7 动态仿真结果

2. 数字仿真

采用数学模型,在数字计算机上借助数值计算的方法所进行的仿真实验称之为数字仿真。

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,其精度不宜定得过高。

(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,其对一些“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”会在不同程度上予以改进与提高,因此可以说数字仿真技术有着极强的生命力。

3. 混合仿真

由以上介绍可知，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。其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，如参数寻优、统计分析等。
- (2) 要求与实物链接进行实时仿真，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

对计算机控制系统的仿真问题，在实际应用中为了简化系统构成，对象的模拟可以用一台数字计算机来实现，对象各种机理的模拟用软件来实现，如图 1.8 所示。从中可见，控制计算机系统是真实的系统，今后要被实际应用；而仿真计算机是用来模拟被控对象的，可用软件灵活构成，因此全数字仿真系统具有灵活、多变、构成简单的特点。

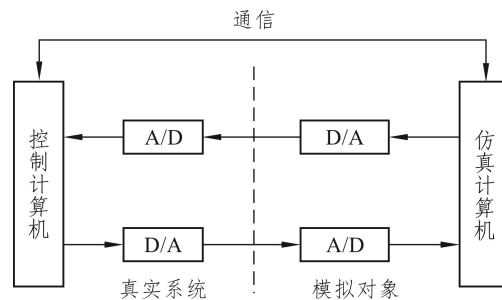


图 1.8 全数字仿真系统原理图

在全数字仿真中，若想进一步降低仿真系统成本，或仅用其做理论研究，则图 1.8 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，单一地或仅用两台计算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，但这一矛盾始终困扰数字仿真技术的推广及深入应用。大型（或巨型）计算机虽然具有卓越的性能，但是价格限制了其市场范围。

如何用普通 PC 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途径，如图 1.9 所示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，分别在主站和各分站的计算机上同时运行，其有用数据通过网络与主站进行信息互换，在网络通信速度足够快的条件下，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有所保证，但成本相对低很多，这是一种简便有效地解决复杂系统数字仿真的方法。

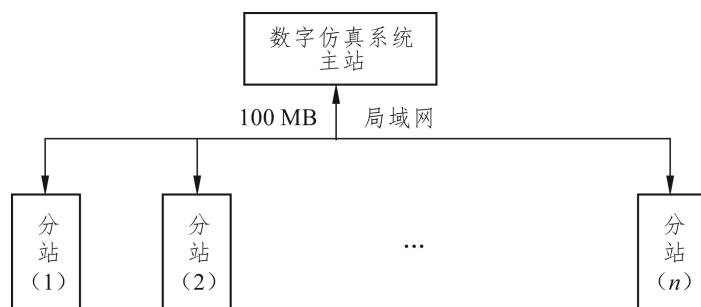


图 1.9 分布式数字仿真系统

1.3 系统、模型与数字仿真

在进行数字仿真实验时，对实际系统的认识，对系统模型的理解以及在计算机上的实现是一个有机的整体，每个环节都不同程度地对最终结果有所影响。因此，我们有必要对它们深入了解与掌握。

1.3.1 系统的组成与分类

系统是由一些具有特定的功能、相互间以一定规律联系着的物体（又称子系统）所构成的有机整体。

1. 组成系统的三要素——实体、属性和活动

(1) 实体就是存在于系统中的具有确定意义的物体。比如，电力拖动系统中的执行电机、热力系统中的控制阀等。

(2) 属性即实体所具有的任何有效特征。比如，温度、控制阀的开度及传动系统的速度等。

(3) 活动系统内部发生的任何变化过程称为内部活动，而系统外部发生的对系统产生影响的任何变化过程称为外部活动。比如，控制阀的开启为热力系统内部活动，电网电压的波动为电力拖动系统的外部活动（即外部扰动）。

2. 系统具有的三种特性——整体性、相关性和隶属性

(1) 整体性。即系统中的各部分（子系统）不能随意分割。比如，任何一个闭环系统的组成中，对象、传感器及控制器缺一不可。因此，系统的整体性是一个重要特性，直接影响系统功能与作用。

(2) 相关性。即系统中的各部分（子系统）以一定的规律和方式相联系，由此决定了其特有的功能。比如，电动机调速系统是由电动机、测速机、PI 调节器及功率放大器等组成，