



KONGZHI XITONG JIANMO YU SHUZI FANGZHEN

# 控制系统建模与 数字仿真

(第二版)

张显库 金一丞 编著

大连海事大学出版社

TP273  
1907-3



NUAA2013069505

# 控制系统建模与数字仿真

(第二版)

张显库 金一丞 编著



大连海事大学出版社

2013069505

© 张显库, 金一丞 2013

图书在版编目 (CIP) 数据

控制系统建模与数字仿真 / 张显库, 金一丞编著. — 2版. — 大连: 大连海事大学出版社, 2013.7

ISBN 978-7-5632-2881-2

I. ①控… II. ①张… ②金… III. ①控制系统—系统建模 ②控制系统—数字仿真 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 155274 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路 1 号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: [cbs@dmupress.com](mailto:cbs@dmupress.com)

大连住友彩色印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2013 年 7 月第 2 版

2013 年 7 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 140 mm×203 mm

印张: 8.75

字数: 238 千

印数: 1~700 册

出版人: 徐华东

责任编辑: 姜建军

版式设计: 晓江

封面设计: 王艳

责任校对: 刘牧园

ISBN 978-7-5632-2881-2

定价: 30.00 元

201306202

# 前 言

系统建模与仿真主要研究如何给系统建立数学模型，然后进行模型仿真以观察和分析模型本身的特性，或进行系统仿真以研究和分析系统及控制器的特性。

许多工程与科学技术问题，差不多都可以通过实验室仿真来验证其设计方案能否达到预期目的。如果不能达到目的，可以及时发现问题、修改方案，这样做既省时、经济又安全。

“系统建模与仿真”是控制理论和控制工程学科的本科生专业课程及研究生的学位课程，同时又是其他相关学科的选修或必修课程。笔者讲授该课 20 余次，2004 年正式出版了《控制系统建模与数字仿真》一书，并在实际教学中应用了 8 年，取得了良好的教学效果。本次出版的第二版是笔者在该书上一版的基础上，对近 8 年的教学和科研实践进一步总结，将课程内容精炼和再创造，重点补充了 MATLAB 编程及仿真的内容，形成一本新版的书；其内容融入了笔者在该领域的一系列研究成果，涉及 20 余篇学术论文，是一本理论与实际相结合的著作。

全书内容可分为五大板块：建模理论、建模理论应用、仿真实论、仿真工具及仿真实例。为了增强本书的实用性，在仿真工具部分增加了 MATLAB 和 Simulink 的仿真内容，在仿真实例方面增加了 MATLAB 和 Simulink 的多个仿真实例，各种示例供读者修改后套用到自己的仿真应用程序中。为了方便本科为非控制专业来的研究生使用本书，在附录二中增添了阅读本书需要了解的简单控制知识，避免阅读较厚的自动控制原理方面的书籍而带来更多的困扰。

最近获悉我所主讲的研究生课程“系统建模与仿真”被批准为首批辽宁省研究生精品课程，值此之际，本书作为该课程的教材得以再次出版，将能更好地为精品课程服务。

本书可供航海科学与技术、交通信息工程及控制、轮机工程和控制理论与控制工程类专业的研究人员，高校研究生与高年级本科生作为同名或相关课程的教材和参考书。

大连海事大学东昉教授、杨承恩教授、郭晨教授在百忙之中审阅了本书，并提出了宝贵的修改意见，使本书得到了进一步的完善，笔者在此深表谢意。

在此非常感谢恩师贾欣乐教授给予的不断鼓励，没有老师，此书难以顺利完成，谢谢！

本书的部分内容属于国家自然科学基金（50979009）、国家973子课题（2009CB320805）和高等学校创新引智计划（B08046）项目的研究成果，也是笔者所在单位的同事们和研究生的共同合作的成果，在此对他们表示敬意。

由于笔者水平有限，书中的缺点错误在所难免，欢迎读者批评指教。

张显库

2013年4月于大连海事大学

# 目 录

第1章 绪 论.....	1
1.1 系统建模与仿真在控制中的地位.....	1
1.2 系统建模与仿真的目的与意义.....	2
第2章 控制系统描述方式及建模方法.....	4
2.1 控制系统描述方式.....	5
2.2 控制系统建模方法.....	7
第3章 键图法建模.....	14
3.1 工程多端口.....	14
3.2 键图.....	16
3.3 基本多端口的因果关系考虑.....	26
3.4 系统模型.....	27
3.5 状态空间方程.....	35
习 题.....	44
第4章 电路网络法建模.....	47
4.1 电路网络法建模方法.....	47
4.2 含运算放大器的电路网络法建模.....	54
4.3 电路网络法和键图混合建模.....	64
4.4 Simulink与电路网络的混合仿真.....	69
本章小结.....	72

习题.....	76
<b>第5章 机车电传动系统建模应用.....</b>	<b>80</b>
5.1 机车电传动系统结构.....	80
5.2 电机基本数学方程.....	81
5.3 机车电传动系统数学模型.....	85
5.4 柴油机数学模型及转速控制.....	86
5.5 机车微机系统仿真试验台.....	86
5.6 非线性曲线拟合技术.....	90
<b>第6章 船舶运动控制系统建模应用.....</b>	<b>100</b>
6.1 引言.....	100
6.2 船舶平面运动的运动学.....	102
6.3 船舶平面运动的动力学.....	105
6.4 船舶平面运动的线性化数学模型.....	107
6.5 船舶平面运动的一种简洁非线性数学模型.....	124
6.6 操舵伺服系统的数学模型.....	137
6.7 非线性船舶运动数学模型.....	140
6.8 船舶运动仿真研究平台.....	146
练习.....	152
<b>第7章 控制系统数字仿真实论.....</b>	<b>153</b>
7.1 引言.....	153
7.2 仿真实论.....	154
7.3 控制系统建模与数字仿真过程.....	164
练习.....	166

<b>第8章 控制系统仿真工具</b> .....	167
8.1 仿真工具概述.....	167
8.2 VB语言仿真.....	167
8.3 C语言仿真.....	178
8.4 MATLAB语言仿真.....	178
<b>第9章 仿真实例——航海模拟器</b> .....	200
9.1 概述.....	200
9.2 航海模拟器的功能.....	200
9.3 航海模拟器的等级划分.....	206
9.4 航海模拟器的体系结构及工作流程.....	213
9.5 航海模拟器中的视景系统.....	217
<b>附录一: Z变换公式表</b> .....	244
<b>附录二: 自动控制原理补充</b> .....	246
<b>附录三: 实验内容</b> .....	260
<b>参考文献</b> .....	262



# 第1章 绪论

系统建模与仿真主要研究如何给控制系统建立数学模型, 然后进行模型仿真以观察和分析模型本身的特性, 或进行系统仿真以研究和分析系统及控制器的特性。

理论源于实践、高于实践并最终为应用于实践服务。由实践上升为理论的一个途径就是为实际系统建模, 而在理论应用实践的过程中仿真是一个十分重要的手段。

## 1.1 系统建模与仿真在控制中的地位

建模和仿真是控制理论和控制工程专业课的重要组成部分。如图 1.1.1 所示, 控制系统标准反馈结构由 4 部分组成: 信号部分  $r, d, y, u$ ; 控制器部分  $K$ ; 被控对象部分  $P$  和传感器部分  $M$ 。控制理论与控制工程学科所有的专业课程都是围绕这 4 部分设置的。在信号部分可以学到“信号处理”、“信号检测”等课程; 在控制器部分可以学到“控制原理”、“过程控制”及与各种控制算法有关的课程, 如 PID 控制(自整定 PID、增益规划式 PID、自适应 PID、鲁棒 PID 及智能 PID)、最优控制、自适应控制、鲁棒控制、专家系统、智能控制、模糊控制、神经网络控制、混合智能控制、混沌控制、预测控制、变结构控制、非线性控制等; 在被控对象部分可以学到“建模与仿真”、“多模型理论”及“系统辨识”等课程; 在传感器部分可以学到“传感器与仪表”等课程。

建模是得到  $P$  的过程, 而系统仿真与  $r, d, y, u, P, K, M$  都相关, 故系统建模与仿真在控制中的地位是非常重要的。

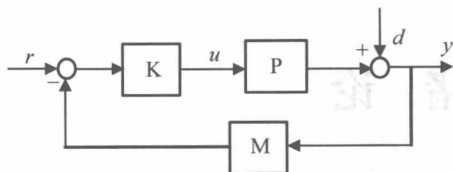


图 1.1.1 标准反馈结构图

## 1.2 系统建模与仿真的目的与意义

许多工程与科学技术问题，差不多都可以通过实验室仿真来验证其设计方案能否达到预期目的。如果不能达到目的，可以及时发现问题、修改方案，这样做既省时又安全。

仿真的基础是数学模型，在仿真中有许多具体的问题需要解决，如根匹配、终值匹配、实时性与稳定性、仿真的精度以及非线性系统的线性化仿真等。

仿真的目的与意义如下：

(1) 系统特性复杂，难于实验，而又要降低这些系统的研究与设计费用，有时实验费用是惊人的。如美国海军 1975 年做了一次船舶性能试验，总计花费了 2 亿多美元，实验历时 3 个多月，为保证船舶的大范围的快速回转、Z 形及正弦试验，出动了大量的巡逻艇以防止渔民等进入实验的海域。再如，火车提速要求机车的整体性能提高，重新设计并试验机车电传动系统要求工厂停产，生产损失及试验费用（燃油及零部件报废）是相当大的。如果通过仿真研究将停产时间从 1 个月降至 1 周，将节省近百万元的经费。

(2) 需要验证在系统中所采用的数学模型方程系数是能用的。另外，模型比现实容易操作，尤其是一些参数值的改变在模型中操作比在现实问题中操作要容易。

(3)有些变量在现实中要很长时间才能看出变化情形,但用模型研究时可以很快看出变化规律,从而能迅速抓住其本质特性。

(4)通过灵敏度分析,可以看出哪些因素对系统影响更大。例如战略核武器杀伤力模型,当年,当赫鲁晓夫鼓吹亿吨级氢弹时,美国却走提高导弹精度的道路,实践证明这是一条捷径。以 $K$ 代表杀伤力, $Y$ 代表威力, $C$ 代表精度,即 $K = Y^{2/3} / C^2$ 。当威力提高8倍,杀伤力只提高4倍,而当精度提高2倍,杀伤力即可提高4倍,体积会大大缩小。

(5)需要根据控制或决策变动后的估算,来预测系统对复杂控制或决策的响应。此时用仿真能达到省时、安全和省钱的目的。

## 第2章 控制系统描述方式及建模方法

(1) 数学模型。一个实际的系统针对所控的变量经一定的合理的假设就变成了物理模型，再根据物理定律和机械定律等进行推导就得到了数学模型。

数学模型只能对某些特定的输入响应，故它不能包含实际系统对输入响应的全部真实的信息，且数学模型是实际系统的简化，所以在建模时就有很大学问。

太复杂和精细的模型可能包含难于估计的参数，也不便于分析。过于简单的模型不能描述系统的重要性能，这就需要在建模时掌握好复杂和简单的度，作合理的折中。

(2) 仿真数学模型。建立数学模型意味着在计算机上建立起对象可以计算的模型。一般来说，系统的数学模型都必须改写成适合于计算机处理的形式才能使用，被称为仿真数学模型。

(3) 仿真模型分类。数学模型分为静态模型和动态模型，前者主要用于系统的静态误差分析。动态模型又分为连续模型（用微分方程表述）和离散模型（用差分方程表述）。

系统的数学模型还可按目的分为三大类，即：

- ① 模型是用来帮助对象设计和操作的；
- ② 模型是用来帮助控制系统设计和操作的；
- ③ 模型是用来系统仿真的。

本书主要研究后两种情况。

## 2.1 控制系统描述方式

控制系统主要有如下6种系统描述方式。

### 2.1.1 微分方程(组)(状态空间)

这种方法比较直观,特别是借助于计算机,可以迅速而准确地求得结果。但是,如果系统结构形式改变,便需要重新列写并求解微分方程,因此不便于对系统进行分析和设计。

典型的的状态方程如式(2-1-1)所示。

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ Y &= CX + Du \end{aligned} \quad (2-1-1)$$

### 2.1.2 传递函数

运用拉氏变换求解系统的线性常微分方程,可以得到系统在复数域的数学模型,称其为传递函数。传递函数不仅可以表征系统的动态特性,而且可借以研究系统的结构或参数变化对系统性能的影响。

在经典控制理论中广泛应用的频率法和根轨迹法,就是在传递函数基础上建立起来的。因此,传递函数是经典控制理论中最基本也是最重要的概念。

传递函数与状态空间方程的关系为

$$G(s) = C[sI - A]^{-1}B + D$$

### 2.1.3 结构图

结构图是描述各组成元部件之间信号传递关系的数学图形。它表示了系统输入变量与输出变量之间的因果关系以及对系统中各变量所进行的运算,是控制工程中描述复杂系统的一种简便方法。

系统结构图实质上是系统原理图与数学方程两者的综合。在结构图上,

用记有传递函数的方框取代了系统原理图上的元部件，同时，摈弃了元部件的具体结构，而抽象为数学模型。结构图既补充了原理图所缺少的变量间的定量关系，又避免了抽象的纯数学描述；既把复杂原理图的绘制简化为方框图绘制，又能直观了解每个元部件对系统性能的影响，可以对系统特性进行全面的描述。典型的系统结构图如图 2.1.1 所示。

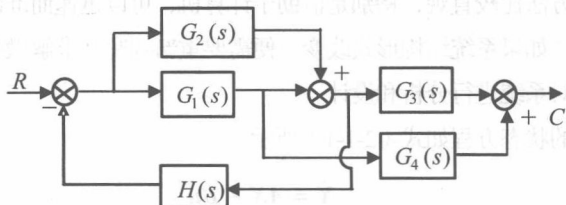


图 2.1.1 典型的系统结构图

#### 2.1.4 原理图

这是一种物理的、原始的系统原理描述方框图，是理想元件（如电阻、电容等）的连接图或文字说明方框图等。典型的系统原理图如图 2.1.2 所示。

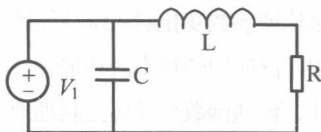


图 2.1.2 典型的系统原理图

#### 2.1.5 信号流图

信号流图和结构图一样，都是控制系统中信号传递关系的图解描述，然而信号流图符号简单，便于绘制和运用。但是，信号流图只适用于线性系统，而结构图也可用于非线性系统。在系统的计算机模拟研究以及状态空间法分析设计中，信号流图可以直接给出计算机模拟程序和系统的状态方程描述，从而显示出它在这方面的优越性。图 2.1.1 的信号流图如图 2.1.3 所示。

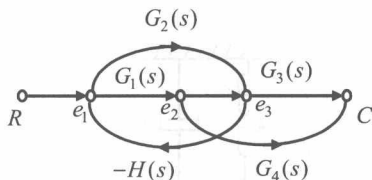


图 2.1.3 图 2.1.1 的信号流图

### 2.1.6 键图

前几种系统描述方法的最大缺点是不能有效地描述有源或产生动力的元件的特性,而这也是键图法的最大优点,且该法已经标准化形成软件包,使用方便。

键图法的优点是:

- (1) 有利于研究系统模型的结构和各个部分的特性以及连接方式。
- (2) 可以把不同类型能源的系统(如热、电、机械、液压、气动和磁系统等)连接起来。
- (3) 只需很少的理想元件集合(7个)即可描述不特别复杂的系统。
- (4) 易转换成微分方程和计算机仿真框图,形成标准软件包。

## 2.2 控制系统建模方法

常用的控制系统建模方法有如下 8 种。

### 2.2.1 理论推导

根据系统的结构和机理,应用基本的物理定律,采用数学推导的方法得出数学模型。其缺点是繁琐,要求数学基础高且对系统了解深刻;优点是较准确。

图 2.2.1 为一个弹簧—质体—阻尼器系统。

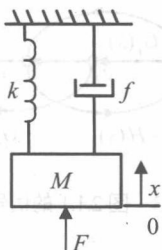


图 2.2.1 弹簧—质体—阻尼器系统

如图 2.2.1 所示，其输入是外力  $F$ ，输出是位移  $x$ ，则力的平衡方程为

$$F = M \frac{d^2 x}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + kx \quad (2-2-1)$$

设  $x_1 = x, x_2 = dx/dt, X = [x_1 \ x_2]^T$ ，则

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ M\dot{x}_2 + fx_2 + kx_1 &= F \end{aligned} \quad (2-2-2)$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{M} & -\frac{f}{M} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} F$$

式 (2-2-2) 为弹簧—质体—阻尼器系统的标准状态空间数学模型。

可由式 (2-2-1) 直接利用拉普拉斯算子的物理意义求出系统的传递函数型数学模型：

$$\begin{aligned} F &= Ms^2x + fsx + kx \\ G(s) = \frac{x}{F} &= \frac{1}{Ms^2 + fs + k} \end{aligned} \quad (2-2-3)$$

式 (2-2-3) 也可用状态空间转换方法求出，输出  $x = x_1 = [1 \ 0]X$ ，则



$$G(s) = C[sI - A]^{-1}B + D = [1 \quad 0] \left[ s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{M} & -\frac{f}{M} \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} + 0 = \frac{\frac{1}{M}}{s(s + \frac{f}{M}) + \frac{k}{M}} = \frac{1}{Ms^2 + fs + k}$$

### 2.2.2 实验方法

#### (1) 飞升实验

给系统加上阶跃输入，得到系统的飞升实验曲线，如图 2.2.2 所示，适用于阶数较低的惯性系统。

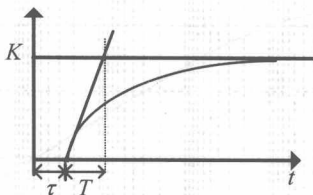


图2.2.2 典型的飞升实验曲线

由飞升实验曲线得到的数学模型为

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}$$

如果得到的实验曲线为振荡曲线，则数学模型采用二阶形式近似：

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

其中： $\omega_n \approx \frac{1+0.7\zeta}{t_d}$ ， $\zeta\omega_n = \frac{3.5}{t_s}$ （取5%误差带）， $t_d$ 、 $t_s$ 分别为延迟时间和