



普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

自动控制理论实践教程

刘洪锦 主 编

高 强 副主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电气工程、自动化专业规划教材

自动控制理论实践教程

主 编 刘洪锦

副主编 高 强

参 编 贾 超 李俊芳 谷海青

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING



内 容 简 介

本书是突出工程理念、依托系统设计的实践类教材,强调控制理论的基本概念、基本原理和基本方法,注重对物理系统的建模和按实际系统的性能要求进行系统设计,体现“做中学”的工程教育理念。本书由两大部分组成,第一部分介绍自动控制原理的传统实验、模拟仿真和数字仿真实验,第二部分介绍常见系统设计典型案例。

本书可作为电气工程、自动化等相关专业的本科生实践教材,也可供相关专业研究生或从事自动化技术工作人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论实践教程 / 刘洪锦主编. — 北京:电子工业出版社, 2014. 3

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-22525-3

I. ①自… II. ①刘… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 033574 号

策划编辑:凌 毅

责任编辑:凌 毅

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:14.5 字数:372 千字

印 次:2014 年 3 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:29.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

“自动控制理论”是自动化学科的重要理论基础,是专门研究有关自动控制系统中基本概念、基本原理、基本方法的一门核心基础课程。“自动控制理论实践”是建立在“自动控制理论”基础上的实践类课程,是面向工程的研究自动控制共同规律的技术科学。学好“自动控制理论实践”,对掌握自动化技术有着十分重要的作用。

本书作为实践类教材,是依照工程理念,在强调基本概念、基本原理和基本方法的基础上,突出系统设计的实践教学用教材。本书采用工程数学的控制工程方法,强调对物理系统的建模,并按实际系统的性能要求进行控制系统设计。特别依托以软件 MATLAB 和实物如倒立摆、过程控制对象和系统、运动控制系统和自动控制系统等资源的系列实践项目,形成实践与理论知识的有机结合。本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材《自动控制原理(第3版)》(刘文定、谢克明主编,ISBN 978-7-121-19434-4)和《现代控制理论(第2版)》(王宏华主编,ISBN 978-7-121-19449-8)的配套实践教材。

本书的编写团队多年来致力于“能力培养”等方面的研究,曾承担多项国家级和省市级教学改革项目。2011年天津市教委资助《自动化课程群建设》研究项目、天津理工大学自动化专业2011年获批国家级“卓越工程师计划”项目及2013年获批教育部“本科教学工程”本科专业综合改革试点项目,已成为教学团队建设、品牌专业建设的阶段性成果。经过多年建设和实践,“基本概念、基本原理和基本方法”(简称“三基”)课程实践教学内容的特色已经形成,相关课件及实践讲义已使用多年。特别将 CDIO 思想(工程教育理念)引入教材内容编写中,通过实践项目内容实现,提高学生对控制理论内容的掌握,促进学生能力的提高。“三基”内容与典型控制系统项目的结合恢复了由“工程”到“理论”的过程,体现“做中学”的教育理念。本书将仿真分析与课程内容相结合,突出实现了由“验证仿真”到“实验—分析—结论”的转变。

本书由两大部分组成,第一部分为基础实践项目,第二部分为系统设计典型案例。第一部分介绍自动控制原理的传统实验、模拟仿真和数字仿真实验,第二部分介绍常见系统设计典型案例。本书有两个附录,附录 A 介绍 Simulink 应用、常用仿真方法,附录 B 介绍本书用到的求是公司传统实验装置运行环境。

本书可作为高等院校自动化类专业“自动控制原理”、“现代控制理论”和“控制系统设计与实践”的实践教程,分别对应实践环节学时数 8 学时、6 学时和 16 学时。也可供从事控制工程工作的技术人员参考,为解决工程实际问题提供了训练素材和可操作设计方案。

本书由刘洪锦主编、高强副主编。参加编写的有刘洪锦(前言、2.1 节、4.1 节、5.1 节、第 6 章、附录 B)、贾超(第 1 章、第 2 章其余章节、8.2 节、附录 A)、李俊芳(第 3 章、第 4 章其余章节、第 5 章其余章节)、谷海青(第 7 章、第 8 章、9.2.3 节、9.3.3 节)、高强(第 9 章其余章节)。

本书提供 MATLAB 仿真程序,读者可登录华信教育资源网:www.hxedu.com.cn,注册后免费下载;或通过邮件与作者联系索取,E-mail:liu200718@126.com。

本书的编写获得了 2013 年教育部“本科教学工程”本科专业综合改革试点项目(教高司函〔2013〕56 号)、2011 年天津市教委《自动化课程群建设》研究项目、2012 年天津理工大学教材建设基金项目的资助。在本书编写过程中,天津理工大学自动化学院的相关老师作为本书的第一批读者提出了许多宝贵意见,另有部分研究生对书稿录入和编辑给予了很大帮助,谨在此表示真诚的感谢!

由于作者水平有限,书中肯定存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 控制系统的数学模型	1
1.1 控制系统的数学模型	2
1.2 控制系统数学模型之间的变换	6
1.3 控制系统数学模型的组合连接	14
思考题	15
第 2 章 时域响应法	16
2.1 控制系统时域响应概述	16
2.2 控制系统时域响应的 MATLAB 实现	17
2.2.1 用 MATLAB 函数进行暂态响应分析	17
2.2.2 用 MATLAB 函数进行线性系统稳定性分析	24
2.2.3 系统动态特性分析	28
2.3 控制系统时域响应性能分析(传统实验)	30
2.3.1 典型环节	30
2.3.2 典型二阶系统	36
2.3.3 典型三阶系统	37
2.4 控制系统时域响应的数字仿真	38
思考题	40
第 3 章 根轨迹法	41
3.1 根轨迹的概念及其绘制方法	41
3.1.1 根轨迹的概念	41
3.1.2 绘制系统根轨迹的基本法则	42
3.1.3 控制系统的根轨迹分析	42
3.2 根轨迹绘制举例	43
3.3 采用 MATLAB 绘制根轨迹	46
思考题	51
第 4 章 频率特性法	52
4.1 频率特性及其表示	52
4.1.1 频率特性概念	52
4.1.2 开环频率特性	52
4.1.3 频率分析法	53
4.1.4 开环对数幅频的三频段	53
4.2 典型环节的频率特性	53
4.3 开环频率特性的绘制	54
4.3.1 开环幅相频率特性的绘制(极坐标图)	54
4.3.2 开环对数频率特性(伯德图)	55

4.4 最小相位系统与非最小相位系统	58
4.4.1 最小相位系统定义	58
4.4.2 最小相位系统的特征	59
4.4.3 非最小相位系统的频率特性	59
4.5 基于 MATLAB 的频域特性分析	59
思考题	64
第 5 章 控制系统的设计与校正	65
5.1 校正概念及常用校正装置	65
5.1.1 校正的基本概念	65
5.1.2 常用校正装置	66
5.2 常用校正方法	69
5.2.1 频率法校正	69
5.2.2 根轨迹法校正	72
5.3 控制系统校正实验(传统实验)	76
5.3.1 实验目的、内容及步骤	76
5.3.2 实验过程分析	76
5.4 基于 MATLAB 控制系统设计举例	80
思考题	85
第 6 章 非线性和采样系统设计	86
6.1 非线性系统及数学模型	86
6.1.1 常用方法	86
6.1.2 典型非线性环节及数学模型	87
6.2 非线性控制系统的建模及设计(传统实验)	89
6.2.1 典型非线性特性的模拟电路	89
6.2.2 实例考察	91
6.2.3 实验要求	95
6.3 基于 MATLAB 的非线性控制系统设计	96
6.4 采样控制系统分析	100
6.4.1 基本概念	100
6.4.2 数学模型	101
6.4.3 差分方程求解	102
6.4.4 脉冲传递函数(z 传递函数)	103
6.5 基于 MATLAB 的采样控制系统设计	107
6.5.1 连续系统的离散化	107
6.5.2 求离散系统的响应	108
思考题	110
第 7 章 状态变量控制系统	111
7.1 线性定常系统状态方程及其解	111
7.1.1 基本概念	111
7.1.2 MATLAB 的应用	112

7.1.3 实验要求	115
7.2 能控性和能观性的判别	116
7.2.1 基本原理	116
7.2.2 MATLAB在能控能观性等方面的应用	121
7.2.3 实验要求	127
7.3 稳定性	128
7.3.1 基本概念	128
7.3.2 MATLAB在李雅普诺夫稳定性上的应用	129
7.3.3 实验要求	132
7.4 极点配置和状态观测器	132
7.4.1 基本要点	132
7.4.2 MATLAB在极点配置和状态观测器设计方面的应用	136
7.4.3 实验要求	140
思考题	141
第8章 控制系统典型案例	142
8.1 位置随动系统	142
8.1.1 系统组成及工作原理	142
8.1.2 数学模型	143
8.1.3 控制系统设计	144
8.2 水箱液位控制系统	148
8.2.1 单容水箱液位控制系统	148
8.2.2 双容水箱液位控制系统	152
8.3 运动控制系统设计	156
8.3.1 单闭环直流调速系统设计	157
8.3.2 双闭环直流调速系统设计	160
第9章 复杂控制典型案例	165
9.1 倒立摆控制系统	165
9.1.1 数学模型的建立	165
9.1.2 倒立摆 PID 控制	168
9.1.3 倒立摆 LQR 控制	170
9.2 三自由度直升机	173
9.2.1 数学模型的建立	173
9.2.2 控制器设计	175
9.2.3 仿真实验	176
9.3 四旋翼飞行器	178
9.3.1 模型的力学分析	178
9.3.2 PID 控制器设计	181
9.3.3 线性二次最优控制器设计	183
附录 A MATLAB 基础	185
A.1 MATLAB 基础	185

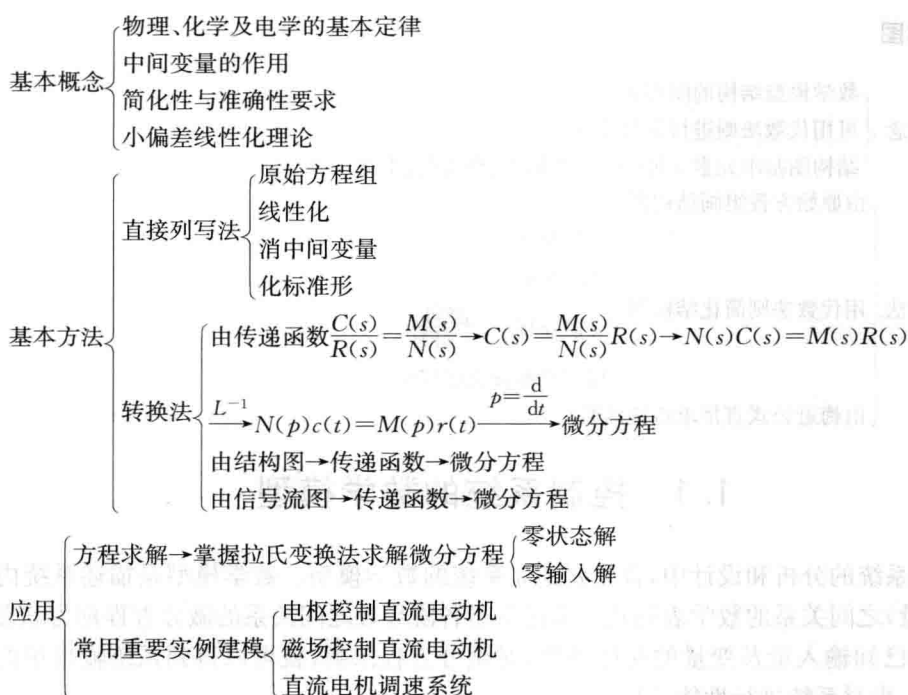
A.2	Simulink 基础	198
A.3	计算机仿真基础	201
附录 B	传统实验装置功能介绍	210
B.1	实验装置概述	210
B.2	安装指南及系统要求	213
B.3	功能使用说明	214
参考文献		221

第1章 控制系统的数学模型

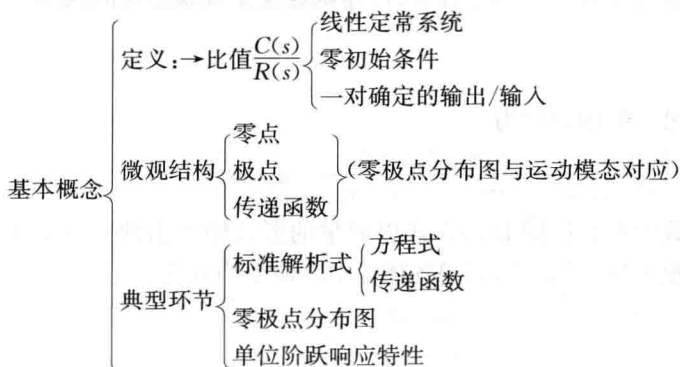
本章内容涉及较多数学和物理系统的一些理论知识,有些需要进一步回顾,有些需要加深理解,特别是时域和频域的多种数学描述方法、各种数学模型之间的对应转换关系,对下一步深入讨论自动控制理论的具体方法至关重要。

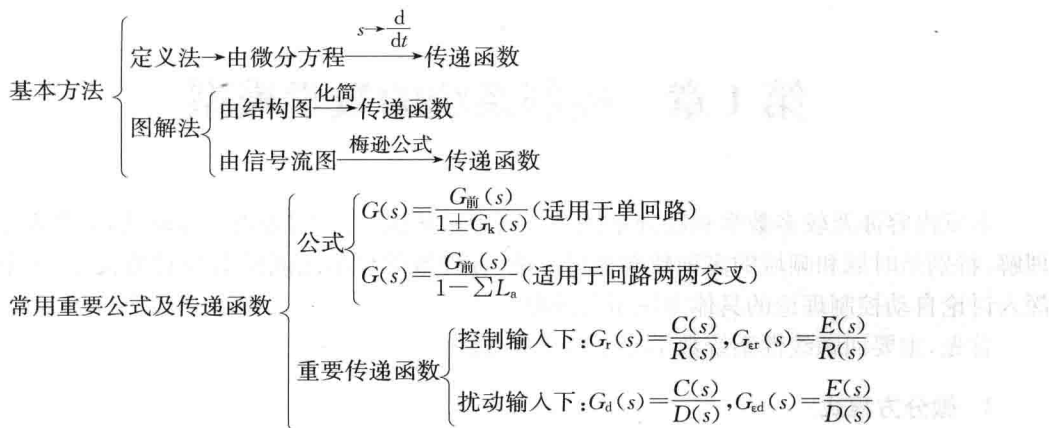
首先,主要回顾线性系统数学模型的建立方法。

1. 微分方程式

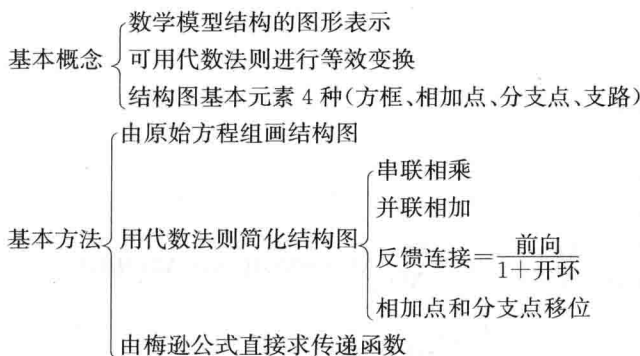


2. 传递函数





3. 结构图



1.1 控制系统的数学模型

在控制系统的分析和设计中,首先要建立系统的数学模型。数学模型是描述系统内部物理量(或变量)之间关系的数学表达式。描述变量各阶导数之间关系的微分方程称为动态数学模型。如果已知输入量及变量的初始条件,对微分方程求解,就可以得到系统输出量的表达式,并能进一步对系统进行性能分析。

控制理论中数学模型有多种形式。时域中有微分方程、差分方程和状态方程;复数域中有传递函数、结构图;频域中有频率特性等,这里重点回顾传递函数模型和状态空间模型。

1. 有理分式模型

线性系统的传递函数模型可一般地表示为

$$G(s) = \frac{b_1 s^m + b_2 s^{m-1} + \cdots + b_m s + b_{m+1}}{s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n} \quad n \geq m \quad (1-1)$$

将系统的分子和分母多项式的系数按降幂的方式以向量的形式输入给两个变量 num 和 den,就可以轻易地将传递函数模型输入到 MATLAB 环境中。命令格式为:

$$\text{num} = [b_1, b_2, \cdots, b_m, b_{m+1}] \quad (1-2)$$

$$\text{den} = [1, a_1, a_2, \cdots, a_{n-1}, a_n] \quad (1-3)$$

在 MATLAB 控制系统工具箱中,定义了 tf() 函数,它可由传递函数分子分母给出的变

量构造出单个的传递函数对象,从而使得系统模型的输入和处理更加方便。

该函数的调用格式为:

$$G=tf(num,den) \quad (1-4)$$

【例 1-1】 一个简单的传递函数模型

$$G(s)=\frac{s+10}{s^4+5s^3+4s^2+3s+2}$$

【解】 可以将下面的命令输入 MATLAB 工作空间中:

```
>>num=[1,10];
>>den=[1,5,4,3,2];
>>G=tf(num,den)
```

运行结果为:

```
Transfer function:
      s + 10
-----
s^4 + 5 s^3 + 4 s^2 + 3 s + 2
```

这时对象 $G(s)$ 可以用来描述给定的传递函数模型,作为其他函数调用的变量。

2. 零极点模型

线性系统的传递函数还可以写成极点形式

$$G(s)=K \frac{(s+z_1)(s+z_2)\cdots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\cdots(s+p_n)} \quad (1-5)$$

将系统增益、零点和极点以向量的形式输入给 3 个变量 KGain、Z 和 P,就可以将系统的零极点模型输入到 MATLAB 工作空间中,命令格式为:

$$KGain=K; \quad (1-6)$$

$$Z=[-z_1; -z_2; \cdots; -z_m]; \quad (1-7)$$

$$P=[-p_1; -p_2; \cdots; -p_n]; \quad (1-8)$$

在 MATLAB 控制工具箱中,定义了 zpk() 函数,由它可通过以上 3 个 MATLAB 变量构造出零极点对象,用于简单地表述零极点模型。该函数的调用格式为:

$$G=zpk(Z,P,KGain) \quad (1-9)$$

【例 1-2】 某系统的零极点模型为

$$G(s)=6 \frac{(s+1.9294)(s+0.0353 \pm 0.9287j)}{(s+0.9567 \pm 1.2272j)(s-0.0433 \pm 0.6412j)}$$

该模型可以由下面的语句输入到 MATLAB 工作空间中:

```
>>KGain=6;
>>z=[-1.9294;-0.0353+0.9287j;-0.0353-0.9287j];
>>p=[-0.9567+1.2272j;-0.9567-1.2272j;0.0433+0.6412j;0.0433-0.6412j];
>>G=zpk(Z,P,KGain)
```

运行结果为:

```
Zero/pole/gain:
      6 (s+1.929) (s^2 + 0.0706s + 0.8637)
-----
(s^2 - 0.0866s + 0.413) (s^2 + 1.913s + 2.421)
```

注意:对于单变量系统,其零极点均是用列向量来表示的,故 Z、P 向量中各项均用分号(;)隔开。

3. 反馈系统结构图模型

设反馈系统结构图如图 1-1 所示。

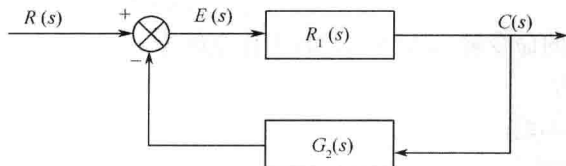


图 1-1 反馈系统结构图

控制系统工具箱中提供了 feedback() 函数,用来求取反馈连接下总的系统模型,该函数调用格式如下:

$$G = \text{feedback}(G1, G2, \text{sign}) \quad (1-10)$$

其中,变量 sign 用来表示正反馈或负反馈结构,若 $\text{sign} = -1$ 表示负反馈系统的模型,若省略 sign 变量,则仍将表示负反馈结构。G1 和 G2 分别表示前向模型和反馈模型的 LTI(线性时不变)对象。

【例 1-3】 若反馈系统图 1-1 中的两个传递函数分别为: $G_1(s) = \frac{3}{(s+2)^2}$, $G_2(s) = \frac{1}{s+3}$, 则反馈系统的传递函数可由下列 MATLAB 命令得出,程序如下:

```
>> G1=tf(3,[1,4,4]);
>> G2=tf(1,[1,3]);
>> G=feedback(G1,G2)
```

运行结果为:

```
Transfer function:
      3 s + 9
      -----
s^3 + 7 s^2 + 16 s + 15
```

若采用正反馈连接结构,输入命令:

```
>> G=feedback(G1,G2,1)
```

则得出如下结果:

```
Transfer function:
      s + 1
      -----
s^3 + 3 s^2 + 3 s
```

【例 1-4】 若反馈系统为更复杂的结构,如图 1-2 所示。

其中, $G_1(s) = \frac{s^3 + 7s^2 + 18s + 15}{s^4 + 14s^3 + 37s^2 + 43s + 12}$, $G_2(s) = \frac{7s + 5}{2s}$, $H(s) = \frac{5}{0.2s + 1}$, 则闭环系统的传递函数可以由下面的 MATLAB 程序得出:

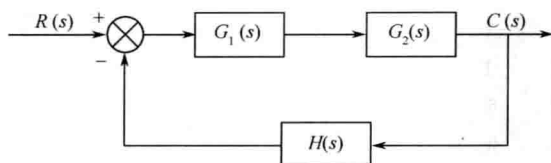


图 1-2 复杂反馈系统

```
>>G1=tf([1,7,18,15],[1,14,37,43,12]);
```

```
>>G2=tf([7,5],[2,0]);
```

```
>>H=tf([5],[0.2,1]);
```

```
>>G_a=feedback(G1 * G2,H)
```

则得出如下结果：

Transfer function:

$$1.4 s^5 + 17.8 s^4 + 86.2 s^3 + 200 s^2 + 210 s + 75$$

$$0.4 s^6 + 7.6 s^5 + 77.8 s^4 + 361.2 s^3 + 895.8 s^2 + 999 s + 375$$

4. 状态空间模型

状态方程与输出方程的组合称为状态空间表达式,又称为动态方程,如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}u \end{cases}$$

则在 MATLAB 中建立状态空间模型的程序如下:

```
>> A=[A];
```

```
>> B=[B];
```

```
>> C=[C];
```

```
>> D=[D];
```

```
>> G = ss(A,B,C,D)
```

【例 1-5】 已知系统的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -6 & -11 & 6 \\ -6 & -11 & 6 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} -1 \\ 6 \\ 5 \end{bmatrix} u \\ \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} \end{cases}$$

建立系统的状态空间模型。

【解】 在命令窗中运行下列程序:

```
>> A=[0 1 -1;-6 -11 6;-6 -11 6];
```

```
>> B=[-1;6;5];
```

```
>> C=[6 0 0];
```

```
>> D=0;
```

```
>> G=ss(A,B,C,D)
```

则得出如下结果:

```
a =
```

```

      x1  x2  x3
x1    0   1  -1
x2   -6  -11  6
x3   -6  -11  6

```

b =

```

      u1
x1   -1
x2    6
x3    5

```

c =

```

      x1  x2  x3
y1    6   0   0

```

d =

```

      u1
y1    0

```

Continuous-time model.

注意: $D=0$ 不能默认。

1.2 控制系统数学模型之间的变换

不同形式之间模型转换的函数:

- tf2zp: 多项式传递函数模型转换为零极点增益模型。格式为:

```
[z,p,k]=tf2zp(num,den)
```

- zp2tf: 零极点增益模型转换为多项式传递函数模型。格式为:

```
[num,den]=zp2tf(z,p,k)
```

- ss2tf: 状态空间模型转换为多项式传递函数模型。格式为:

```
[num,den]=ss2tf(a,b,c,d)
```

- tf2ss: 多项式传递函数模型转换为状态空间模型。格式为:

```
[a,b,c,d]=tf2ss(num,den)
```

- zp2ss: 零极点增益模型转换为状态空间模型。格式为:

```
[a,b,c,d]=zp2ss(z,p,k)
```

- ss2zp: 状态空间模型转换为零极点增益模型。格式为:

```
[z,p,k]=ss2zp(a,b,c,d)
```

下面结合 MATLAB 程序具体说明各类模型之间的变换方法。

1. 有理分式模型与零极点模型的转换

有了传递函数的有理分式模型之后,求取零极点模型就不是一件困难的事情了。在控制系统工具箱中,可以由 zp2tf() 函数立即将给定的 LTI 对象 $G(s)$ 转换成等效的零极点对象

$G_1(s)$ 。该函数的调用格式为：

$$G1 = \text{zpk}(G) \quad (1-11)$$

【例 1-6】 给定系统传递函数为

$$G(s) = \frac{s^2 + 37s + 58}{s^4 + 3.4s^3 + 17s^2 + 25s + 1}$$

对应的零极点格式可由下面的程序得出：

```
>> num=[1,37,58];
>> den=[1,3.4,17,25,1];
>> G=tf(num,den);
>> G1=zpk(G)
```

结果显示：

```
Zero/pole/gain:
      6.8 (s+7) (s+2)
-----
s (s+1.5) (s^2 + 6s + 13)
```

可见，在系统的零极点模型中若出现复数值，则在显示时将以二阶因子的形式表示相应的共轭复数对。

同样，对于给定的零极点模型，也可以直接由 MATLAB 语句立即得出等效传递函数模型。调用格式为：

$$G1 = \text{tf}(G) \quad (1-12)$$

【例 1-7】 给定零极点模型： $G(s) = \frac{(s+5)(s+8)}{s(s+1 \pm j2)(s+1.5)}$ ，可以用下面的 MATLAB 命令立即得出其等效的传递函数模型，输入程序的过程中要注意字母大小写。

```
>> Z=[-5,-8];
>> P=[0,-1-2j,-3+2j,-1.5];
>> K=1;
>> G=zpk(Z,P,K);
>> G1=tf(G)
```

结果显示为：

```
Transfer function:
      s^2 + 13 s + 40
-----
s^4 + 5.5 s^3 + (13+4i) s^2 + (10.5+6i) s
```

2. 控制系统模型向传递函数或零极点增益形式转换

(1) 状态空间方程向传递函数形式的转换

系统的状态空间方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}u \end{cases} \quad (1-13)$$

等效的系统传递函数模型 $G(s) = \frac{\text{num}(s)}{\text{den}(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}$ 。显然在转换过程中，求取