



高等院校EDA系列教材
Electronic Design Automation

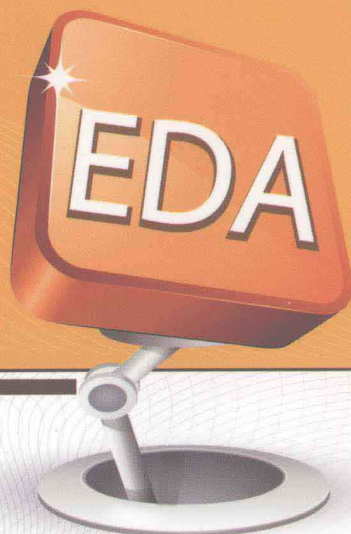
控制系统 的虚拟仪器仿真

郭天石 © 编著



程序代码下载网址

[http:// www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)



- 融合MATLAB和LabVIEW在控制功能和仪器功能上的长处
- 构筑控制系统动态仿真的数字化、智能化、虚拟化和网络化的虚拟仪器平台
- 提供虚拟仪器仿真程序代码，可供移植、扩展
- 实现控制系统特性曲线、数据、表达式综合显示与存储
- 实现控制系统特性随仪器面板旋钮同步捆绑变化
- 实现动态仿真曲线指导控制系统校正参数的选择



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等院校 EDA 系列教材

控制系统的虚拟仪器仿真

郭天石 编著

机械工业出版社

本书采用 MATLAB 与 LabVIEW 相结合的方法设计控制系统特性虚拟仿真分析仪。本书共分 6 章。在对控制系统时域、频域、稳定性及性能指标与校正的仿真分析中,突出虚拟仿真分析仪的仪器性、动态性、交互性和对系统参数选择的指导性。本书配有全书所有虚拟仿真仪程序代码,可从机械工业出版社网站上下载,所有仿真须在 MATLAB 6.5 及以上、LabVIEW 8.2 及以上版本下运行。虚拟仿真仪可对实用工程对象模型进行仿真,并且可移植。

本书可供测控技术与仪器类各专业、控制类和电子信息类各专业以及相关专业的本科生和研究生参考,也可供相关专业教师及工程技术人员用做研究开发虚拟仪器及仿真技术时参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

控制系统的虚拟仪器仿真/郭天石编著. —北京:机械工业出版社, 2011.10

高等院校 EDA 系列教材

ISBN 978-7-111-35881-7

I. ①控… II. ①郭… III. ①控制系统—计算机仿真—虚拟仪表—高等学校—教材 IV. ①TH86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 188896 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:李馨馨 责任编辑:李馨馨 赵东旭

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

责任印制:杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.75 印张·459 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-35881-7

定价:39.00 元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

近年来,控制系统的计算机仿真技术发展迅速。仿真技术的发展在促进控制理论研究向前拓展的同时,极大地促进了实际工程控制系统的设计和开发。控制系统的仿真已经成为新型控制技术走向实际应用、新型控制设备投入实际运行之前的一个不可或缺的手段。

以计算机为核心的现代测试及控制仪器正经历着数字化、智能化、虚拟化和网络化的发展进程。智能程度不断提高的虚拟仪器既是现阶段仪器发展的重大成果,也是仪器网络化的前提,是方兴未艾的物联网(传感网)技术中信息感知获取、加工处理、变换传输的重要组成部分。

控制系统的仿真和仪器虚拟化都依托于计算机技术,特别依赖于支撑这两项技术的工程软件。仿真技术中最有效的软件是功能强大的 MATLAB 软件,支持虚拟仪器技术的代表性软件是美国 NI 公司(美国国家仪器公司)开发的 LabVIEW。

将 MATLAB 软件和 LabVIEW 软件结合起来,在一台计算机上可以设计出能对控制系统各项性能进行仿真分析的虚拟仪器。这种虚拟仿真仪既具有 MATLAB 软件对于控制系统各项性能进行分析的巨大功能,又具有“软件即仪器”的虚拟仪器的强大功能,能够实现对控制系统参数的设定与调节,对控制系统中各种特征量的测量、显示、输出和存储,从而让用户使用自己设计的仪器实现对控制系统真正意义上的动态仿真。

本书以控制系统作为研究对象,将 MATLAB 软件和 LabVIEW 结合起来,融合它们各自在控制功能和仪器功能方面的长处,构筑起控制系统动态仿真的虚拟仪器平台。读者既可以下载本书提供的、已经实际运行通过的各个仿真仪程序对自选的控制系统进行仿真,同时也可以借鉴、移植、修改这些仿真仪程序,设计出自己的仿真仪,从这个意义上说,本书也可作为控制系统虚拟仿真仪的设计工具。

全书共分 6 章。

第 1 章,控制系统模型描述及仿真,介绍了连续传递函数、离散传递函数和状态空间模型中常用的生成命令、相互转换命令及其虚拟仿真仪的构成与运行。

第 2 章,控制系统时域特性的分析与仿真,介绍了典型输入及其组合信号,介绍在这些典型信号激励之下,单输入单输出(SISO)连续与离散系统、多输入多输出(MIMO)连续与离散状态空间模型的时域响应分析与仿真。

第 3 章,线性控制系统频域特性的分析与仿真,介绍了频率特性分析中的伯德图、奈奎斯特图、尼柯尔斯图和根轨迹图。在介绍离散系统频率特性时,分别介绍了真实和虚拟两种频率特性描述方法,最后介绍系统时域和频域性能指标的相互关系。

第 4 章,控制系统的稳定性分析与仿真,主要介绍了连续线性系统的劳斯判据、赫尔维茨判据、中国学者谢绪凯提出的稳定性判据、奈奎斯特判据和对数判据,同时也介绍了离散系统稳定性的判别方法。最后介绍了状态空间模型稳定性及李亚普诺夫稳定性的判别与仿真。

第5章, 控制系统的性能仿真分析。本章围绕“稳、准、快”三种性能, 介绍在典型信号激励下, 不同类型控制系统的时域和频域性能指标, 其中包括时域稳态误差指标、时域快速性动态指标、频域中的相对稳定性指标、闭环频率特性指标和频域时域性能指标的关系。

第6章, 控制系统的校正分析与仿真。本章着重介绍最常用的相位超前、相位滞后、相位滞后——超前和PID等串联校正方法, 最后介绍了计算机控制中针对纯滞后系统的大林算法和史密斯预估器校正的设计与仿真。

书中所有虚拟仿真仪的程序代码可在机工教育服务网 (www.cmpedu.com) 上下载。程序代码可直接在装有MATLAB 6.5及以上版本, LabVIEW 8.2及以上版本软件的计算机上运行。读者可以输入自己的实用工程对象参数替代仿真示例参数进行仿真分析, 也可移植程序代码设计新的虚拟仿真仪。

在本书成书过程中, 得到了四川理工学院机械学院的多方面支持和鼓励, 特别感谢测控技术及仪器系柳忠彬、杨大志、韩采芹、陶跃珍和其他老师的鼎力帮助, 也得到了测控专业及相关专业学生的互动启发, 在本书落稿之时, 作者谨表谢忱。

由于作者水平有限, 错误和不妥之处在所难免, 恳请各位读者不吝赐教。

作 者

目 录

前言

绪论	1
第 1 章 控制系统模型描述及仿真	5
1.1 连续系统的传递函数模型	5
1.1.1 连续系统传递函数模型的描述方法	5
1.1.2 传递函数框图的处理	7
1.2 离散系统的传递函数模型	15
1.2.1 离散系统传递函数模型的描述方法	15
1.2.2 连续、离散系统传递函数模型的相互转换	15
1.3 连续系统状态空间模型	19
1.3.1 连续系统的状态方程及其框图	19
1.3.2 连续系统状态空间模型的传递函数矩阵	19
1.3.3 连续系统状态空间模型描述的 MATLAB 主要指令	20
1.3.4 连续系统状态空间模型的典型连接 ^[6]	23
1.4 离散系统状态空间模型	58
1.4.1 离散系统状态方程及其框图	58
1.4.2 离散状态空间描述的 MATLAB 主要指令	58
1.4.3 离散与连续状态空间描述的相互转换	64
第 2 章 控制系统时域特性的分析与仿真	67
2.1 典型输入信号时域响应仿真的主要命令	67
2.1.1 典型输入信号的定义	67
2.1.2 时域响应的 MATLAB 主要命令	71
2.2 一阶控制系统的时域响应	79
2.2.1 一阶控制系统的传递函数	79
2.2.2 一阶控制系统的时域响应	80
2.2.3 一阶控制系统时域响应的仿真实例	82
2.3 二阶控制系统的时域响应	88
2.3.1 二阶控制系统的传递函数	88
2.3.2 二阶控制系统的时域响应	89
2.3.3 二阶控制系统时域响应的仿真实例	92
2.4 高阶控制系统的时域响应	98
2.4.1 高阶控制系统的传递函数及其分解	98
2.4.2 高阶控制系统的时域特性	99

2.4.3	高阶控制系统时域特性仿真的 MATLAB 主要命令	100
2.4.4	高阶控制系统时域特性的仿真实例	102
2.5	状态空间模型的时域响应	105
2.5.1	状态方程的解	105
2.5.2	求解状态方程的 MATLAB 命令	105
2.5.3	状态方程时域响应的仿真实例	108
2.6	离散系统的时域响应	115
2.6.1	离散系统时域响应的 MATLAB 主要命令	115
2.6.2	离散系统时域响应的仿真实例	117
2.6.3	离散状态方程的解	121
第 3 章	线性控制系统频域特性的分析与仿真	128
3.1	频率特性概述	128
3.1.1	频率特性的定义	128
3.1.2	频率特性与传递函数的关系	128
3.1.3	幅频特性和相频特性的常用求法	129
3.2	频率特性的图形描述	130
3.2.1	频率特性中的奈奎斯特图	130
3.2.2	频率特性中的伯德图	131
3.2.3	频率特性中的尼科尔斯图	131
3.3	频率特性仿真的 MATLAB 函数	133
3.3.1	频率特性的符号运算	133
3.3.2	频率特性的数字仿真命令	134
3.4	频率特性仿真实例	136
3.4.1	单输入单输出系统频率特性仿真实例	136
3.4.2	多输入多输出系统频率特性仿真实例	138
3.5	控制系统根轨迹图的仿真与分析	141
3.5.1	控制系统的根轨迹概述	141
3.5.2	控制系统根轨迹图的 MATLAB 命令	143
3.6	根轨迹图仿真分析实例	148
3.6.1	单输入单输出系统根轨迹图仿真实例	148
3.6.2	多输入多输出系统根轨迹图仿真实例	150
第 4 章	控制系统的稳定性分析与仿真	153
4.1	控制系统稳定性的基本描述	153
4.2	连续控制系统的稳定性判据	153
4.3	连续控制系统的稳定性判定及仿真	154
4.4	离散控制系统的稳定性判定及仿真	159
4.5	状态空间模型的稳定性判定及仿真	163
4.5.1	状态空间模型开环、闭环结构及其稳定性判别	163
4.5.2	状态空间模型稳定性判定仿真	166

4.6	李雅普诺夫稳定性判定及仿真	171
4.6.1	李雅普诺夫第一方法	171
4.6.2	李雅普诺夫第二方法	172
4.6.3	李雅普诺夫方程	172
4.6.4	二次型函数和对称矩阵的定号性	173
4.6.5	运用李雅普诺夫第二方法分析非线性系统的稳定性	174
4.6.6	李雅普诺夫稳定性分析仿真	175
第5章	控制系统的性能仿真分析	187
5.1	控制系统的时域性能指标	187
5.1.1	控制系统的稳态时域性能指标及仿真	187
5.1.2	考虑扰动时控制系统的稳态误差及仿真	191
5.1.3	控制系统的瞬态时域性能指标及仿真	197
5.2	控制系统的频域性能指标	201
5.2.1	控制系统的稳定性裕度及仿真	201
5.2.2	闭环系统的频域性能指标及仿真	205
5.2.3	频域、时域性能指标之间的关系	209
第6章	控制系统的校正分析与仿真	219
6.1	控制系统的相位超前校正	219
6.2	控制系统的相位滞后校正	230
6.3	控制系统的相位滞后—超前校正	239
6.4	控制系统的PID校正	252
6.4.1	模拟PID调节器原理	252
6.4.2	模拟PID调节器的设计	253
6.4.3	模拟PID校正仿真分析实例	254
6.5	数字PID调节器的设计与仿真	270
6.5.1	数字PID调节器的脉冲传递函数	270
6.5.2	数字PID调节器的设计步骤	271
6.5.3	数字PID调节器的设计仿真实例	271
6.6	大林算法仿真分析	276
6.6.1	大林算法的基本思路	276
6.6.2	大林算法的实现	277
6.6.3	大林算法的仿真分析	278
6.7	史密斯预估补偿调节器仿真分析	283
6.7.1	史密斯预估补偿调节器的基本原理	283
6.7.2	史密斯预估补偿调节器的设计步骤	284
6.7.3	史密斯预估补偿法的仿真分析	285
参考文献		289

绪 论

本书讨论控制系统特性的动态仿真问题。仿真对象涉及控制系统的多种描述模型，包括经典传递函数模型、状态空间模型、连续和离散系统模型、线性系统 and 非线性系统模型描述等。所有讨论仅从仿真实际需要出发，引用控制理论的若干结论，而不着重于对控制理论本身的论述与介绍。

本书讨论的动态仿真是在 MATLAB^[1] 和 LabVIEW^[2] 两种软件环境下进行的。撰写本书的初衷，或者说本书有别于其他仿真书籍的地方，是突出了控制系统仿真技术的仪器性、动态性、交互性和对系统参数选择的指导性。因此，与未对控制理论本身进行详细论述类似，本书同样未对上述两种软件进行专门介绍。一则因为这方面的文献书籍很多，可供参考的资料较多，同时作者认为，读者已经具有控制理论、MATLAB 和 LabVIEW 应用这方面的基础。

下面通过一个简单的仿真实例初步领略一下虚拟仿真仪的特点和优势。

【例 0-1】 仿真二阶控制系统阻尼比 ξ 和固有频率 ω_n 对其单位阶跃响应的影响。

设典型二阶系统为

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (0-1)$$

通常使用 MATLAB 软件进行仿真。MATLAB 问世以来，随着它本身功能的不断增强，已被业界作为控制系统计算机仿真的基本软件。所以，下面首先使用 MATLAB 仿真阻尼比 ξ 对其单位阶跃响应的影响。程序代码为

```
i = 1;
for del = 0.1:0.2:0.9;
    num = 1;
    den = [1 2 * del 1];
    step(tf(num,den),30),grid
    hold on,
    i = i + 1;
end
```

程序中设式 (0-1) 所示二阶系统的固有频率 $\omega_n = 1$ ，阻尼比 ξ 分别等于 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9。运行该程序立即获得如图 0-1 所示的仿真曲线簇。

仿真图绘制了固有频率固定的情况下，对应 5 个 ξ 值的“静止”单位阶跃响应曲线。响应的特征量，例如超调，随阻尼比变化的趋势清晰可见，即阻尼比越小，超调越大，系统振荡性越强。这是图 0-1 的优势，显示了 MATLAB 软件在控制系统仿真方面的强大能力。但也明显存在着不足。

第一，不具仪器性。首先是不能在图形面板上随意调节阻尼比（或固有频率）。要想获

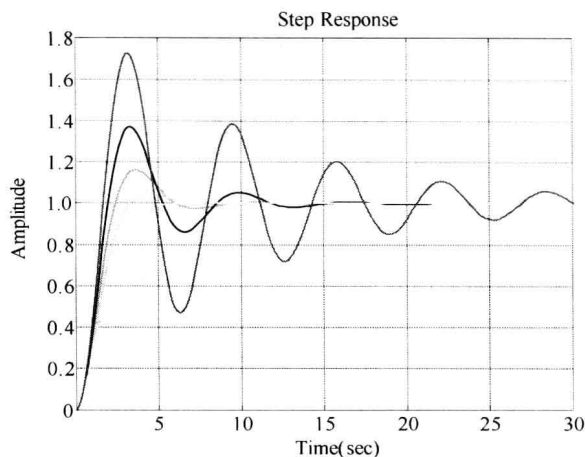


图 0-1 二阶系统阻尼比 ξ 对单位阶跃响应的影响仿真图

得程序设定的 5 个值以外的阻尼比对系统响应的影响，只能修改程序代码。其次，虽然可以使用鼠标单击测量曲线上一点的纵横坐标，但难以保证测量的准确性。既不能在面板上调节参数，也不方便测量，丧失了测量仪器的基本特征。

第二，不具动态性。图 0-1 所获得的是 5 条静止的响应曲线。阻尼比对二阶系统响应的影响是从静止仿真曲线上分析得到的，实际上是一种“静态仿真”。虽然可以采用其他手段使仿真曲线随阻尼比的变化而动态变化，但程序显得复杂，调整仍不方便。实际要求像调节音量一样，使系统响应曲线随着阻尼比旋钮的变化而动态变化，实现真正意义上的“动态仿真”。

第三，与图形面板不具交互性。程序代码一旦编制，赋值参数即被固定，仿真结果只由程序代码决定，一旦运行，仿真结果即被程序代码“凝固”。用户只能“被迫”接受这一结果，而不能从仿真曲线图面板上改变系统参数，不能进行干预。

第四，对系统参数选择的指导性不强。仿真的重要目的是研究系统参数变化对系统性能的影响，以便选择符合实际需要的参数，优化系统性能。在图 0-1 的仿真中，阻尼比变化步长较大（例 0-1 中为 0.2），致使各条响应曲线之间变化跨度大，难以通过仿真曲线的指导细致选择合适的系统参数。虽然可以通过修改程序代码减小参数变化步长，获得变化更为精细的仿真曲线簇，但仿真曲线簇越精细，分布越密，选择误差反而变大，选择参数的准确性反而变低。如果能使系统参数近于连续变化，系统的仿真曲线（而非曲线簇）也随之“捆绑式”变化，根据仿真曲线的数据选择系统参数就更准确，也更容易。

如果将 MATLAB 脚本嵌入 LabVIEW 之中，构成虚拟仿真仪器，则可以克服上述“静态”仿真的不足。

基于 LabVIEW 的虚拟仪器由前面板和程序面板组成^{[3],[4]}。前面板类似于传统仪器的面板，但具有比传统仪器更强大的功能和更灵活的布局。可以根据个人的需求和风格，在计算机屏幕上设置、摆放和修饰控件与显示件，实现对控制参数的设定与调节，以及被测量的显示、测量、输出和存储。

虚拟仪器的程序面板类似于传统仪器内部实现各种功能的电路硬件。在虚拟仪器中，这些功能是依靠软件，通过编制符合软件语法规则的程序（流程），与前面板构成一个整体来

实现的。这就是通常所说的“软件即仪器”的含义。

式 (0-1) 所示系统的动态虚拟仿真仪程序见配套程序中的 shili00_01. vi 文件。仿真运行时前面板如图 0-2 所示，程序流程图面板如图 0-3 所示。

二阶系统单位阶跃响应仿真仪: shili00_01

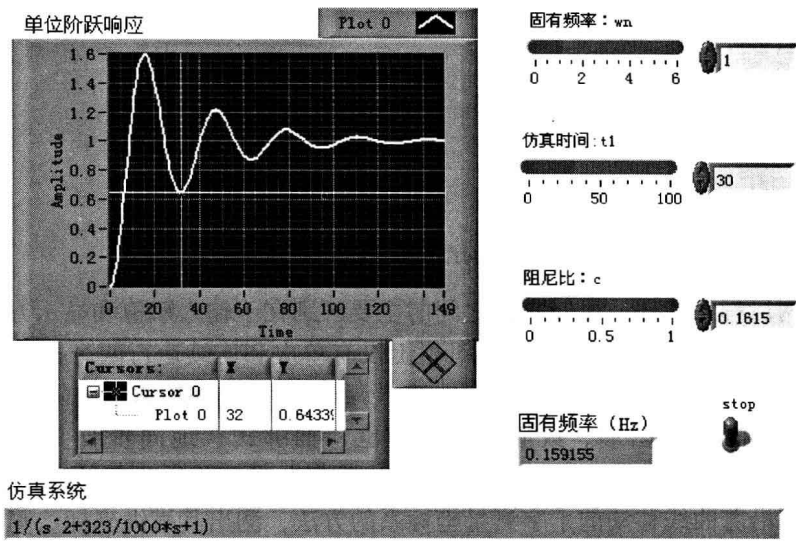


图 0-2 二阶系统单位阶跃响应动态仿真仪前面板图

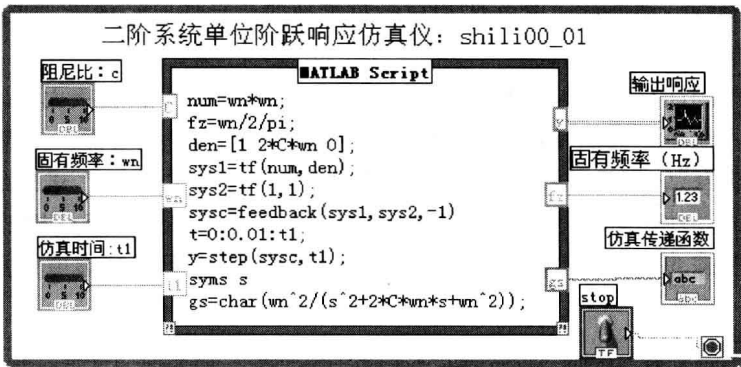


图 0-3 二阶系统单位阶跃响应动态仿真仪程序流程面板图

前面板上的控制件包括：固有频率调节件、阻尼比调节件和仿真时间调节件，如图 0-2 所示。

前面板上的显示件包括：示波器屏幕（图形显示）、固有频率（以 Hz 为单位，数字显示）、仿真系统（传递函数表达式，字符串显示）。

程序框图面板如图 0-3 所示。将 MATLAB 脚本嵌入 LabVIEW 的 While 环中，所有控制件作为 MATLAB 脚本的输入端口，脚本内部 MATLAB 程序代码的控制变量（固有频率 ω_n 、阻尼比 ξ 、仿真时间 t ）由前面板相应控制件赋值输入。所有显示器件作为 MATLAB 脚本的输出端口，显示程序运行结果。MATLAB 脚本内的程序代码为

```

程序 shili00_01
num = wn * wn;
fz = wn/2/pi;
den = [1 2 * C * wn 0];
sys1 = tf(num, den);
sys2 = tf(1, 1);
sysc = feedback(sys1, sys2, -1)
t = 0: 0.01: t1;
y = step(sysc, t);
syms s
gs = char(wn^2/(s^2 + 2 * C * wn * s + wn^2));

```

对比上述两段程序代码，可知它们之间的主要区别在于输入赋值和显示方式不同。

运行程序 shili00_01. vi。前面板的工具栏上设有单次和连续运行两个按钮。按下连续运行按钮，拖动前面板上任意一个赋值控制件的“调节滑竿”，在输入参数随滑竿“连续”改变的同时，可见显示件的图形、数值和字符串也“捆绑式”地同步改变，形象地仿真式(0-1)所示系统的输出随输入的动态变化。如果要准确测量单位阶跃响应曲线上某时刻的幅值，可以使用沿着曲线移动的十字测量坐标系的方法，测出其横纵坐标。测量精度在一定范围内取决于仿真时间步长（横坐标分格）。

通过连续运行和改变系统参数，像 shili00_01. vi 这样仅具有虚拟仪器基本特征的仿真仪所表现出来的仪器性、动态性、交互性和对参数选择的指导性已经清晰可见。虚拟仪器仿真较之传统仿真的优点也清晰可见。

在构成程序框图面板时，通常使用 LabVIEW 提供的图形节点连接而成。图形节点实际上是一个具有输入端口、输出端口和复杂内部结构的“子”虚拟仪器。通常将 LabVIEW 称为“G（图形）语言”，但这并不是说在 LabVIEW 中不使用“语句”式的编程方式。上述实例，以及本书的其他仿真程序均大量使用“语句”式指令和图形节点相结合的编程方法。这样做，可以使熟悉 MATLAB 的读者更方便地设计基于 LabVIEW 的虚拟仿真仪。

第1章 控制系统模型描述及仿真

在 MATLAB 语言中，控制系统的传递函数通常有分子分母多项式降幂系数行矢量、零极点增益和以 s 为自变量的（有理）分式等 3 种形式，这些描述形式可以相互转换。构造传递函数的模型可以使用不同的命令，有的形式可以在程序中进行代数运算，有的形式不可以进行代数运算，在编程时要加以注意。本章分别介绍了连续系统的传递函数、离散系统的传递函数和连续系统状态空间模型中常用的 MATLAB 生成命令、相互转换命令以及运行结果。这些命令大都使用 LabVIEW 中的 MATLAB 脚本节点构成虚拟仪器进行计算分析和仿真。仿真实例中的模型参数可以随机赋值，也可通过输入数组或簇由仪器前面板输入。

1.1 连续系统的传递函数模型

1.1.1 连续系统传递函数模型的描述方法

传递函数有理分式模型的通式为

$$G(s) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i s^i}{\sum_{j=0}^n a_j s^j} \Rightarrow \frac{\text{num}}{\text{den}} \quad (n \geq m) \quad (1-1-1)$$

传递函数零极点增益模型的通式为

$$G(s) = \frac{K \prod_{i=1}^m (s + z_i)}{s^v \prod_{j=1}^{n-v} (s + p_j)} \quad (n \geq m) \quad (1-1-2)$$

在编写程序时，常常表述为分子分母 s 多项式降幂系数行矢量形式。

【例 1-1】 设传递函数为

$$G(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (1-1-3)$$

用不同的方法求出零极点和增益。程序如 shili01_01. vi 所示。

程序 shili01_01

```
% 求取传递函数的零极点增益
num = [b1 b0]; % 分子系数
den = [a3 a2 a1 a0]; % 分母系数
sys = tf(num, den); % 有理分式
[Z, P, K] = tf2zp(num, den); % 零极点增益数值
```

```

P01 = P(1,:);
P02 = P(2,:);
P03 = P(3,:);
d_s = zpk('s') % 构造零极点增益自变量 s
sys_s = (b1 * d_s + b0) / (a3 * d_s^3 + a2 * d_s^2 + a1 * d_s + a0);
% 零极点增益表达式

[Z1,P1,K1] = zpkdata(sys_s,'v'); % 由表达式反求零极点增益数值
P11 = P1(1,:);
P12 = P1(2,:);
P13 = P1(3,:);
ee1 = norm(Z1-Z); % 两种算法的误差
ee2 = norm(P1-P);
ee3 = norm(K1-K);

end

```

待定参数 b_1 、 b_0 、 a_3 、 a_2 、 a_1 、 a_0 由用户在虚拟仪器面板上自行设定。传递函数零极点增益模型的前面板和框图面板分别如图 1-1-1 和图 1-1-2 所示。

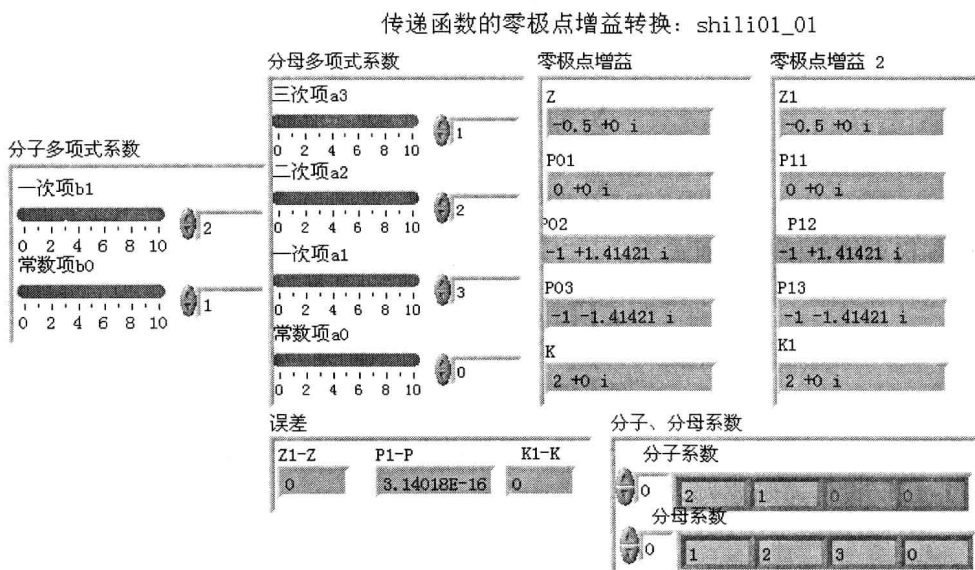


图 1-1-1 程序 shili01_01 前面板

由于 MATLAB 在非符号工具箱中传递函数系数不支持符号参数，因此为待定系数赋值的功能由用户在虚拟仪器前面板上完成。这种赋值功能可以在连续运行程序时，通过连续调节数值滑竿进行，因此称这种赋值方式为“动态赋值”。在进行动态赋值时，对应的零极点增益随着滑竿的移动而“捆绑式”变化。

选择如图 1-1-1 所示参数运行程序。如果在 MATLAB 的命令窗口输入 `sys` 和 `sys_s`，则

传递函数的零极点增益转换: shili01_01

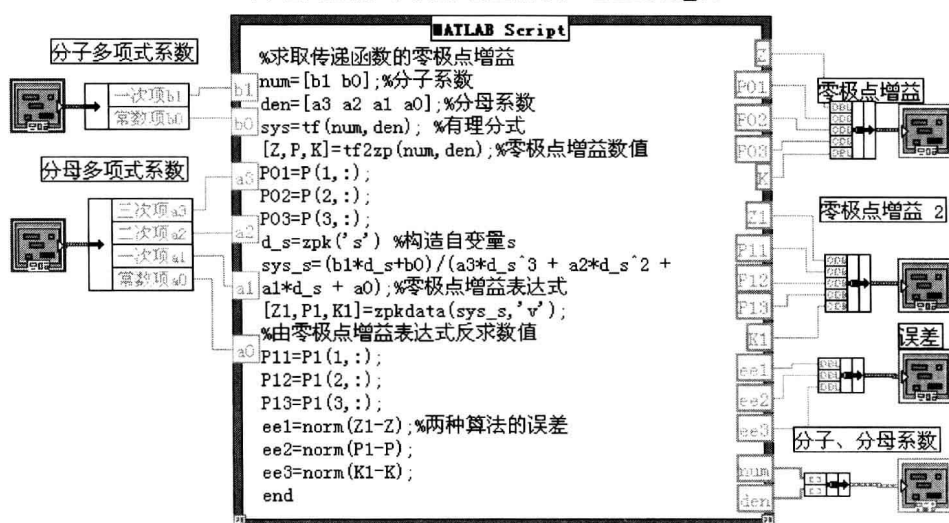


图 1-1-2 程序 shili01_01 框图面板

可以分别获得赋值后的有理分式和零极点增益模型，见式（1-1-4）和式（1-1-5）。

$$\frac{2s+1}{s^3+2s^2+3s} \quad (1-1-4)$$

$$\frac{2(s+0.5)}{s(s^2+2s+3)} \quad (1-1-5)$$

命令 `d_s = zpk('s')` 可以生成连续传递函数的自变量 `s`，可以使用 `d_s` 代替 `s`，像书写代数式一样书写传递函数表达式，这种表达式具有零极点增益形式，而且可以在程序中进行代数运算。例如程序 shili01_01 中的表达式 `sys_s` 就是用 `d_s` 代替 `s` 构成的，运行结果为式（1-1-5）。显然 `sys_s` 中含有一个实极点和一对复共轭极点，这是一个很有用的命令。

命令

```
[Z1,P1,K1]=zpkdata(sys_s,'v')
```

可以直接求取零极点和增益。

程序 shili01_01a 使用命令 `char` 可以在前面板上显示出传递函数的字符串表达式。

1.1.2 传递函数框图的处理

用框图可以方便地表示传递函数的并联、串联及反馈。使用虚拟仪器功能，可以方便地获得框图变换结果。

1. 并联

两传递函数的并联如图 1-1-3 所示。

两传递函数并联的等效传递函数为参与并联的传递函数的代数和。

基本语句如下：

```
sys = parallel(sys1,sys2)
```

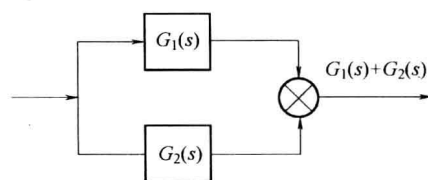


图 1-1-3 传递函数的并联

```
[num,den]=parallel(num1,den1,num2,den2)
```

```
G = G1 + G2
```

其中，第3条语句中的 G_1 和 G_2 最好使用上述的自变量 $d_s = \text{zpk}('s')$ 语句书写。

【例 1-2】 设两传递函数 G_1 、 G_2 分别为

$$G_1(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, G_2(s) = \frac{T_1 s + k_1}{T_2 s + k_2} \quad (1-1-6)$$

求并联等效传递函数。

设通过程序面板选定 G_1 的参数构成为式(1-1-4)。 G_2 中 $T_1 = 2, k_1 = 0; T_2 = 4, k_2 = 1$, 并联等效变换程序如 shili01_02 所示。程序 shili01_02 的框图面板和前面板分别如图 1-1-4 和图 1-1-5 所示。

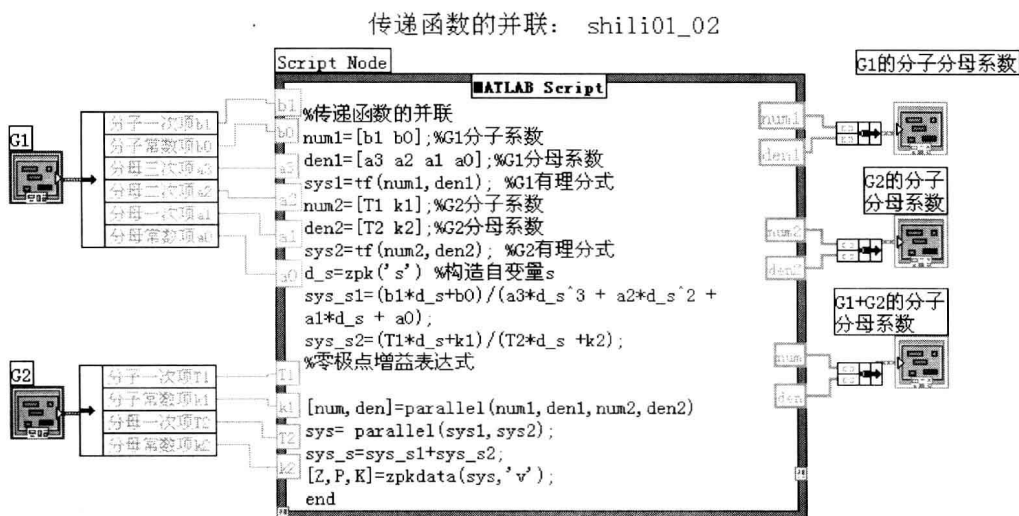


图 1-1-4 程序 shili01_02 框图面板

在 MATLAB 命令窗口运行 sys ，得到 G_1 与 G_2 并联的多项式，见式 (1-1-7)。

$$\frac{2s^4 + 4s^3 + 14s^2 + 6s + 1}{4s^4 + 9s^3 + 14s^2 + 3s} \quad (1-1-7)$$

运行 sys_s 得到 G_1 与 G_2 并联的零极点增益形式，见式 (1-1-8)。

$$\frac{0.5(s^2 + 0.4634s + 0.08055)(s^2 + 1.537s + 6.207)}{s(s + 0.25)(s^2 + 2s + 3)} \quad (1-1-8)$$

由式 (1-1-8)，再对比式 (1-1-5) 和式 (1-1-6) 可见，并联后传递函数的极点由参与并联的传递函数的极点共同组成。

注意：程序中实现并联功能的代数表达式语句为

```
sys_s = sys_s1 + sys_s2
```

其中 sys_s1 与 sys_s2 都是用 d_s 形式书写的。

2. 串联

两传递函数串联后的等效传递函数为参与串联的传递函数之积，如图 1-1-6 所示。

基本语句如下：

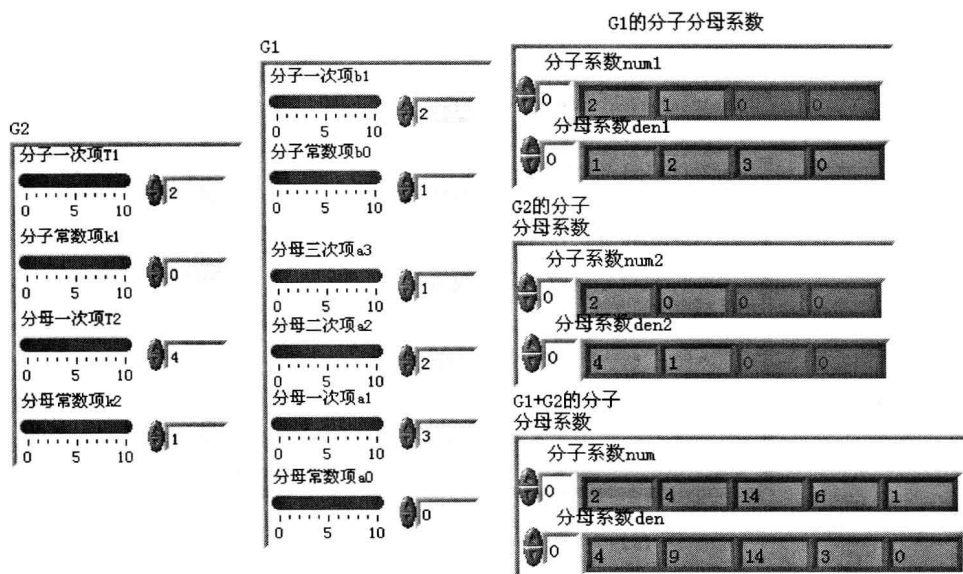


图 1-1-5 程序 shili01_02 前面板

```
sys = series(sys1,sys2)
[num,den] = series(num1,den1,num2,den2)
G = G1 * G2
num = conv(num1,num2)
den = conv(den1,den2)
```

最后两条语句采用多项式乘法分别求取分子分母多项式的降幂系数。

【例 1-3】 设两传递函数 G_1 与 G_2 分别为

$$G_1(s) = \frac{b_1s + b_0}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}, \quad G_2(s) = \frac{T_1s + k_1}{T_2s + k_2}$$

使用不同方法求其串联等效传递函数。

程序如 shili01_03 所示。通过程序面板选择与例 1-2 相同的参数，其框图面板和前面板分别如图 1-1-7 和图 1-1-8 所示。

在 MATLAB 命令窗口运行 sys，得到 G_1 与 G_2 串联的多项式形式见式 (1-1-9)。

$$\frac{4s^2 + 2s}{4s^4 + 9s^3 + 14s^2 + 3s} \quad (1-1-9)$$

运行 sys_s 得到 G_1 与 G_2 串联的零极点增益形式见式 (1-1-10)。

$$\frac{s(s + 0.5)}{s(s + 0.25)(s^2 + 2s + 3)} \quad (1-1-10)$$

由式 (1-1-10)，再对比式 (1-1-5) 和式 (1-1-6) 可见，串联后传递函数的零极点分别由参与串联的传递函数的零极点共同组成，增益为各串联环节增益之积。



图 1-1-6 传递函数的串联