

基于虚拟仪器和单片机的 机电控制系统设计与实践

JIYU XUNI YIQI HE DANPIANJI DE
JIDIAN KONGZHI XITONG SHEJI YU SHIJIAN

吴涛 著



化学工业出版社

基于虚拟仪器和单片机的 机电控制系统设计与实践

JIYU XUNI YIQI HE DANPIANJI DE
JIDIAN KONGZHI XITONG SHEJI YU SHIJIAN

吴涛 著



化学工业出版社

·北京·

本书主要探讨当下流行的虚拟仪器和单片机的应用,主要介绍分别应用虚拟仪器平台和 Arduino 平台的相关机电系统的设计和控制的实例,全书分为上、下两篇。上篇主要介绍基于虚拟仪器的控制系统的建模与仿真、控制系统典型环节的实验分析、数字量、模拟量端口实验、温度 PID 控制、电动机控制系统仿真、网络通信实验等内容。下篇主要介绍了应用 Arduino 平台开发的轮式小车设计、机械臂设计、双足机器人设计、蓝牙通信与 WiFi 视频传输技术、虚拟仪器和 Arduino 的互动通信控制设计、基于 Arduino 和 Andriod 平台的控制系统设计等内容。

本书可作为工程技术人员和科技工作者学习设计虚拟仪器和单片机的自学用书,也适合作为高等学校机电一体化、电子、通信、自动化、机械、测控技术与仪器、测试计量技术、计算机、信息技术等专业的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

基于虚拟仪器和单片机的机电控制系统设计与实践/
吴涛著. —北京:化学工业出版社, 2018. 8
ISBN 978-7-122-32175-6

I. ①基… II. ①吴… III. ①机电一体化-控制系统-
系统设计 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 101447 号

责任编辑:卢萌萌 刘兴春

责任校对:宋 玮

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:河北鹏润印刷有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 11 字数 156 千字 2019 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

机电系统控制工程作为一项现代化的技术工程，在支持经济建设、社会发展等方面发挥着不可替代的作用，极大地提高了生产效率，促进了制造业发展。机电一体化产品几乎已经涉及社会的各个方面，给人们的生活带来了极大便利。机电系统控制工程作为21世纪的重要科学技术之一，涵盖了机械、控制、电子、计算机、通信等诸多领域，已成为我国科技新时代发展中不可或缺的重要组成部分。特别是在工业4.0、新工科建设的时代大背景下，机电一体化控制无论是在智能制造还是智能产品中都发挥着越来越重要的作用，其涉及的产品小到玩具，大到机器人，都具有远大的发展前景。

本书总结了十多年来在机电系统控制领域的教学科研中应用虚拟仪器和Arduino单片机开发平台所开展的实验，将其中一些设计的思路总结后和大家一起分享。本书受教育部产学研合作协同育人项目“基于新工科的机电控制系统设计与实践”（项目编号：201702068002）以及昆明理工大学教改项目的支持。本书作者目前已在国内外刊物和国际会议上发表相关论文15篇（其中EI收录9篇），申请并获授权实用新型专利3项，受理发明专利1项，软件著作权登记5项，在第10届（2017年）中国大学生计算机设计大赛中获三等奖1项，获昆明理工大学教学成果一等奖1项。由于这些成果都是以分散的方式在各杂志或论文中出现，不方便查阅和交流，因此将这些成果汇集起来，以专著的形式和广大的机电控制系统设计方面的研究者、学生一起分享。

本书主要介绍基于虚拟仪器和Arduino单片机平台

的相关机电系统的设计和控制的的应用实例。全书分为上下两篇，一共12章。上篇主要介绍基于虚拟仪器的机电控制系统的设计与实践，该篇共分6章，主要介绍基于虚拟仪器的控制系统的建模分析、基本实验、数字端口控制、液位、温度控制及远程通信；下篇共分6章，主要介绍应用Arduino单片机平台开发的轮式小车、机械臂、双足机器人；基于Arduino和Android平台的蓝牙寻找器、智能停车位的设计以及虚拟仪器和Arduino的通信等。

本书面向21世纪新经济发展及人才培养的需求，立足于对学习者的自主学习能力和实践创新精神的培养。在总体布局上紧紧围绕虚拟仪器和Arduino这条主线，同时又兼顾其他的一些基本硬件外设的设计；在实例的编排上既考虑了创新、全面，又注重对关键知识点的透彻剖析和软件硬件的结合；在原理方法的阐述上，作者尽量避免了高深和复杂的数学推理，突出了工程实践应用与通俗易懂的软件程序。总之，本书立足于理论与实践相结合、硬件电路与软件设计的融合以及创新思路的引入。这不仅符合科学技术的发展规律，并且更容易达到说理透彻、相辅相成、深入浅出和抛砖引玉的效果，也更有利于读者的综合应用能力的提高。

本书能够得以出版，还要感谢昆明理工大学机电工程学院的学生徐超、魏翀、吴嘉驹、刘浩、卢光跃所做的大量协助研究工作，他们卓有成效的工作使本书更加实用。本书所有机械结构图纸均用SolidWorks软件绘制。

鉴于作者水平及时间所限，书中难免存在不足和疏漏之处，恳请各位专家和读者不吝赐教和指正，对此表示诚挚感谢。

著者

2018年6月于昆明理工大学

目录

上篇 基于虚拟仪器平台的机电控制系统设计与实践

第1章 控制系统的建模与仿真 / 002

1.1 数学模型的创建	2
1.1.1 传递函数模型的创建	3
1.1.2 状态空间模型的创建及转换	4
1.2 系统时域分析及根轨迹分析	7
1.2.1 时间响应	7
1.2.2 系统的根轨迹分析	9
1.3 系统频率特性分析	10
1.4 控制系统的稳定性分析	13

第2章 控制系统典型环节的实验分析 / 015

2.1 实验器件	15
2.2 时域实验分析	17
2.3 频域特性分析	20

第3章 数字量、模拟量端口实验 / 024

3.1 彩灯控制设计	24
3.2 液位测量与控制	27

第4章 温度PID控制 / 029

第5章 电动机控制系统仿真 / 033

5.1 步进电动机控制系统仿真	33
-----------------------	----

5.1.1 步进电动机的数学模型	34
5.1.2 增量式 PID 控制器	37
5.1.3 仿真实验	38
5.2 交流电动机仿真	39

第6章 网络通信实验 / 042

6.1 浏览器方式	42
6.2 DataSocket (DS) 技术	43
6.3 TCP/IP 方式	45

下篇 基于 Arduino 平台的机电控制系统设计与实践

第7章 轮式小车设计 / 048

7.1 三轮型小车结构	48
7.2 三轮型循迹小车硬件系统设计	49
7.2.1 硬件模块介绍	50
7.2.2 硬件系统设计	52
7.3 三轮型小车的运动分析与调试	55
7.3.1 运动分析	55
7.3.2 智能小车运行调试	57
7.4 三轮型小车系统程序设计	58
7.5 四轮型小车	63
7.5.1 四轮型小车的结构	63
7.5.2 四轮型小车循迹系统设计	63
7.5.3 四轮型小车循迹系统的程序设计	65
7.5.4 四轮型小车循迹模块的安装调试步骤	67

第8章 机械臂设计 / 069

8.1 机械臂机构设计	69
8.2 机械臂的运动分析	72
8.3 机械臂的控制系统程序设计	74

8.4 机器人整体结构设计	76
---------------------	----

第9章 双足机器人设计 / 079

9.1 双足机器人结构及自由度分配	79
9.2 双足机器人硬件设计	81
9.2.1 舵机控制器	81
9.2.2 红外线数字避障传感器具体应用说明	82
9.2.3 电源模块	83
9.3 机器人步态分析与调试	85
9.3.1 机器人步态分析	85
9.3.2 机器人步态调试	87
9.4 双足机器人控制系统设计	91
9.4.1 控制系统设计方案	91
9.4.2 程序设计	92
9.5 机器人避障实验	101

第10章 蓝牙通信与WiFi视频传输技术 / 102

10.1 蓝牙无线通信	102
10.1.1 蓝牙无线通信模块	102
10.1.2 蓝牙模块实验	104
10.2 WiFi 视频传输实验	107
10.2.1 WiFi 视频传输系统介绍	107
10.2.2 视频传输实验	108

第11章 LabVIEW与Arduino的互动通信控制设计 / 111

11.1 LabVIEW interface for Arduino 机械臂舵机自动运行设计	111
11.1.1 LabVIEW interface for Arduino 函数介绍	111
11.1.2 机械臂 LabVIEW interface for Arduino 程序	113
11.1.3 机械臂舵机 LabVIEW interface for Arduino 调试程序	114
11.2 VISA 串口函数的舵机控制	115
11.3 VISA 串口函数的移动机器人控制	124

11.4	VISA 串口函数的双足机器人控制	125
11.4.1	系统设计方案	125
11.4.2	程序框图设计	126
11.4.3	Arduino 下位机程序设计	132
11.4.4	系统实验	137

第12章 基于Arduino和Android平台的控制系统设计 / 141

12.1	蓝牙寻找器	141
12.1.1	系统设计思路	142
12.1.2	硬件组成	142
12.1.3	软件设计流程	144
12.1.4	软件程序介绍	144
12.1.5	操作步骤	146
12.2	物联网车位引导系统	147
12.2.1	系统设计思路	148
12.2.2	硬件组成	148
12.2.3	软件设计流程	149
12.2.4	操作步骤	151

附录A 三轮型小车循迹行进程序 / 154

附录B 机械臂四舵机动作控制程序 / 158

附录C 双足机器人源程序 / 161

参考文献	166
------------	-----

随着科技的迅猛发展,人们对自动控制系统的功能、体积、能耗等方面的要求越来越高,而产品的价格又希望尽可能低,研制生产周期尽量短。传统的实验设备功能固定,硬件线路、软件固定,这样的系统可扩展性能差。越来越多的设计人员不再满足这样的实验设备,希望根据自己所要解决的问题,按照自己的想法来构建测控系统。

虚拟仪器(Virtual Instrument)是一个全新的仪器概念,是以通用计算机作为核心的硬件平台,配以相应功能的硬件作为信号的I/O接口,利用软件开发平台在计算机屏幕上虚拟出仪器的面板和相应的功能,然后通过鼠标和键盘操作仪器,借助通用的数据采集卡及其他硬件,用户可以通过软件构造出诸如示波器、频谱分析仪、信号发生器或其他装置,实现了“软件即是仪器”的概念。

LabVIEW软件由美国国家仪器公司(National Instrument, NI)公司开发,是目前国内常用的虚拟仪器软件,它是一种基于图形化语言(G语言)的软件开发工具。本篇将以LabVIEW为平台,通过建立相关硬件体系并开发相关软件,实现控制系统多功能的实验教学平台。该平台具有较好的可扩展性。

第1章

控制系统的建模与仿真

本章将介绍利用 LabVIEW 控制与仿真工具包编写仿真程序，完成控制系统的时域、根轨迹、频域、稳定性分析。使用 LabVIEW 实现传递函数的构建并对其进行分析，包括阶跃输入信号的时域响应，画出相应曲线图，计算相应的性能指标等；根轨迹分析；频域分析，画出奈奎斯特图和波特图；并介绍传递函数系统的稳定性分析的实验仿真程序。

1.1 数学模型的创建

用来描述系统因果关系的数学表达式称为系统的数学模型。建立控制系统的数学模型是系统分析和设计的基础。控制系统的数学模型有多种表达形式。时域中常用的有微分方程、差分方程；复域中常用的有传递函数、状态空间表达式、结构图；频域中常用的有频率特性。建立控制系统数学模型的方法有分析法和实验法。实验法又称为系统辨识。

实际工程中，要解决自动控制问题所需用的数学模型与该问题所给

定的已知数学模型往往不一致；或者要解决问题最简单而又最方便的方法所用到的数学模型与该问题所给定的已知数学模型不同，此时，就需要对控制系统的数学模型进行转换。

下面主要介绍使用 LabVIEW 软件创建系统的数学模型并实现数学模型之间的转换的相关方法与思路。

1.1.1 传递函数模型的创建

在讨论数学模型的创建之前，先了解一下 LabVIEW 软件的控制设计与仿真工具包。控制设计与仿真工具包可以在结构框图选板中找到，如图 1-1 所示。



图 1-1 控制设计与仿真工具包

下面将讨论创建传递函数模型和创建状态空间模型。创建各种类型的数学模型，例如传递函数模型、零点/极点/增益模型和状态空间模型等，根据实际情况选择相应的模型选板。传递函数模型端子如图 1-2 所示。重要的端子为分子（numerator）和分母（denominator）。一旦模型被创建，那么它既可以被显示在前面板中，也可以连接到其他函数上。

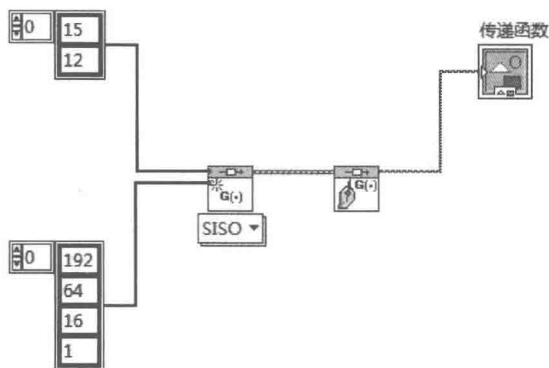


图 1-2 创建传递函数模型的程序框图

我们将介绍部分在子选板中出现的函数。如需了解进一步的信息，可查看 LabVIEW 软件的帮助文档。

根据传递函数公式：

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (1-1)$$

通过在图 1-2 所示的函数模型对应的端子中填入式 (1-1) 中不同的分子 $b_m, b_{m-1} \dots$ ，分母 $a_n, a_{n-1} \dots$ 等参数，即可构建所需的传递函数。

【例 1-1】 如果传递函数是 $G(s) = \frac{12s+15}{s^3+16s^2+64s+192}$ ，在 LabVIEW 软件中创建其数学模型。

解：分子和分母需要按照以下方式进行输入：

在 LabVIEW 软件中，数组的第一个元素为 s^0 的系数，第二个元素为 s^1 的系数，第三个元素为 s^2 的系数 $\dots$ ，以此类推。这个函数创建的传递函数方程，可以通过创建指示器来在前面板中显示。

创建的传递函数模型通过方程指示器将结果显示在前面板上，具体如图 1-3 所示。

1.1.2 状态空间模型的创建及转换

(1) 控制设计与仿真工具包中的创建状态空间模型

创建状态空间模型的程序框图如图 1-4 所示，在 A、B、C、D 端子

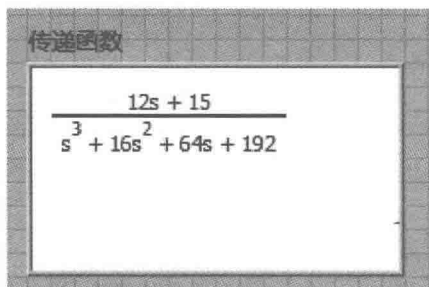


图 1-3 传递函数模型的前面板

上连入数据。它的输出端可以连接到控制设计工具包中很多其他函数上，作为它们的输入端。

如果采样时间端子没有连接，那么系统被默认为是连续采样。将一个值连到采样时间端子上会使系统变为离散系统，它使用给定的时间作为采样间隔。状态空间模型的 A、B、C、D 矩阵都有对应的端子。一旦 LabVIEW 软件创建了状态空间模型（其输出端子可用），该模型就可以用于其他函数并且可以转化成其他的形式。

【例 1-2】 如果某系统的状态空间表达式为，

$$\begin{cases} \dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -6 & -11 & -6 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} U \\ Y = [1 \quad 1 \quad 0] X \end{cases}$$

在 LabVIEW 软件中创建其状态空间表达式。

解：按图 1-4 连接参数，其创建状态空间模型的参数前面板显示如图 1-5 所示。

在图 1-4 和图 1-5 中，输入端子既可以是常数（在结构框图中），也可以是控制量（在前面板中）。为了更容易理解，我们演示的大多数例子在结构图中使用常数，但是，使用前面板上的控制量时常会使效率更高。常数、控制量和指示器都可以通过在需要的端子上单击右键，并且在弹出菜单的选项中选择进行创建。控制设计工具包中的很多特殊函数和数据结构，使得它成为正确创建控制量和指示器的一个非常有用的

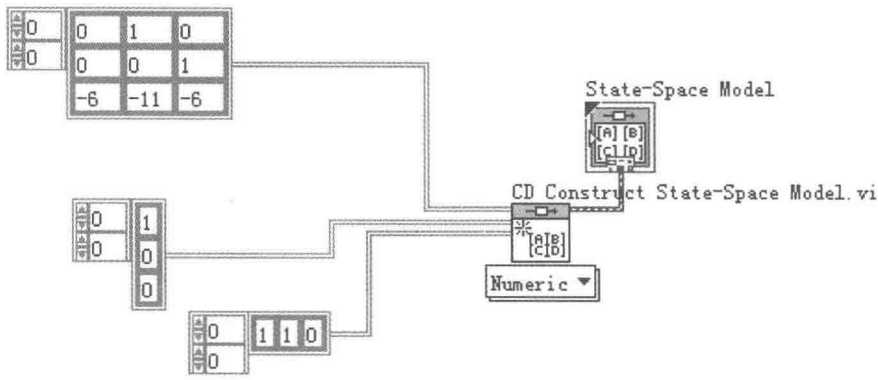


图 1-4 创建状态空间模型的程序框图

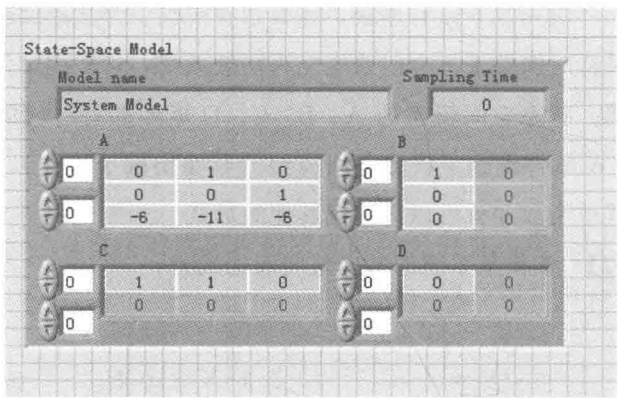


图 1-5 创建状态空间模型的前面板

快捷方式。

许多控制设计函数，包括创建状态空间模型都是多项式的。一个多项式形式的函数在图标下有额外的菜单结构。模型的输入可以是数字形式的。相同的函数也可以以符号的形式输入，代表输入的可以是变量，而变量值是由前面板来控制的。

(2) 模型转换与互联

模型转换选板中的函数是用于把系统模型从一种形式转化为另一种形式（例如，把状态空间形式转化为传递函数形式或者极点/零点/增益形式，反之亦然）。连续模型和离散时间模型也可以从一种形式转化为另一种形式。这个选板还可以把用于控制设计的模型转化为仿真模型的

函数，反之亦然。

模型互联选板中的函数可被用于在不同的配置方式（如串联、并联和反馈模式）下连接不同的模型。在前面创建的状态空间模型和传递函数模型可以按照串联等方式连接。值得一提的是，把传递函数模型连接到状态空间模型的反馈路径中，那么需要使用 CD Feedback 函数，模型连接的次序十分重要，前向通道连接于第一个端子上（模型 1），位于反馈路径中的模型被连接到第二个端子上（模型 2）。

1.2 系统时域分析及根轨迹分析

系统性能指标是指在分析一个控制系统时，评价系统性能好坏的标准。总体来看，系统的性能要求可以归结为如下三个方面。

- ① 系统的稳定性。
- ② 系统进入稳态后，应满足给定的稳态误差的要求。
- ③ 系统在动态过程中应满足动态品质的要求。

下面将介绍如何使用 LabVIEW 进行控制系统的时域分析，绘制控制系统时域响应曲线图，使用 LabVIEW 进行系统时域暂态性能指标的计算以及根轨迹的具体分析方法。

1.2.1 时间响应

时间响应选板中被经常使用的是阶跃响应，在前面板上可显示输出曲线图。该阶跃响应曲线可创建的，在阶跃响应曲线的输出端子上点击右键，并选择创建>>显示控件选项。这个曲线图的默认外观与 LabVIEW 软件的原有外观可能不尽相同。许多函数需要从前面板上使用不同的方式来创建特殊的曲线。在很多时候，在某个函数的输出上单击右键时，在弹出菜单中会出现创建显示控件选项。对于大部分时间响应和频率响应的选板 VI 来说，可以使用相似的选项。

相应的时域参数（如上升时间、峰值时间、调节时间、超调量和稳态增益等）可以调用 CDParametric Time Response Data. vi 这个函数计算系统的瞬态响应，第二个输出端子（时间响应参数）给出了以上所有的信息。

【例 1-3】 设单位负反馈系统的开环传递函数为 $G(s) = \frac{9}{s(s+1)}$ ，试求系统单位阶跃响应和系统动态性能指标。

解：首先已知系统的开环传递函数，需计算其闭环传递函数。闭环传递函数公式如式（1-2）所示。

$$G_B(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (1-2)$$

由式（1-2）计算可得其闭环传递函数为：

$$G_B(s) = \frac{9}{s^2 + s + 9}$$

然后建立传递函数的数学模型如图 1-6 所示，响应曲线和性能指标分析结果如图 1-7 所示。

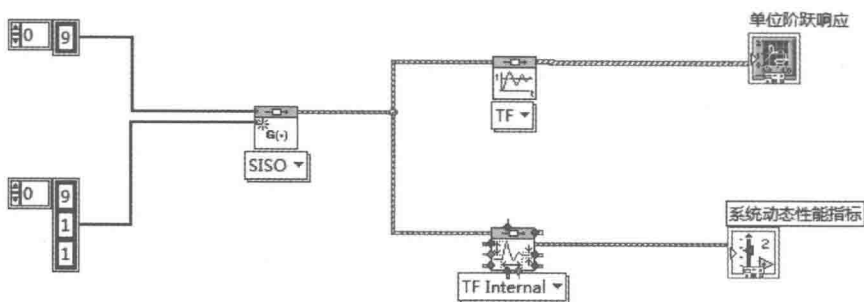


图 1-6 [例 1-3] 系统单位阶跃响应及动态性能指标分析程序框图

由分析结果可以得出该系统的动态性能指标为：上升时间 0.4 秒，峰值时间为 1.08 秒，调整时间 8.79 秒，超调量 58.7%，稳态值 1，峰值 1.59 秒。