

国外计算机科学经典教材

THOMSON

# Modeling and Control of Dynamic Systems

# 动态系统建模与控制

Narciso F. Macia

George J. Thaler 著

李乃文 孙江宏 等译



清华大学出版社

# 动态系统建模与控制

Narciso F. Macia 著  
George J. Thaler

李乃文 孙江宏 等译

清华大学出版社

北京

Narciso F. Macia George J. Thaler

**Modeling and Control of Dynamic Systems**

EISBN: 1-4018-4760-9

Copyright © 2005 by Thomson Delmar Learning, a division of Thomson Learning.

Original language published by Thomson Delmar Learning (a division of Thomson Learning Asia Pte Ltd).

All Rights reserved.

本书原版由汤姆森学习出版集团出版。版权所有,盗印必究。

Tsinghua University Press is authorized by Thomson Learning to publish and distribute exclusively this Simplified Chinese edition. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本中文简体字翻译版由汤姆森学习出版集团授权清华大学出版社独家出版发行。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾)销售。未经授权的本书出口将被视为违反版权法的行为。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

**981-265-879-3**

北京市版权局著作权合同登记号 图字 01-2004-4741 号

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

**图书在版编目(CIP)数据**

动态系统建模与控制/(美)马卡(Macia, N. F.), (美)塞勒(Thaler, G. J.)著;李乃文,孙江宏等译. —北京:清华大学出版社,2006.5

书名原文:Modeling and Control of Dynamic Systems

ISBN 7-302-12650-X

I. 动… II. ①马… ②塞… ③李… ④孙… III. 动态系统-系统建模 IV. N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 018471 号

出版者:清华大学出版社 地址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:冯志强

文稿编辑:刘霞

印装者:清华大学印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开本:185×260 印张:23.75 字数:589千字

版次:2006年5月第1版 2006年5月第1次印刷

书号:ISBN 7-302-12650-X/TP·8087

印数:1~3000

定价:45.00元

# 前 言

## 简介

本书是针对动态系统和控制的第一本教材，适合作为工程技术院校教材。如果补充了课后作业，本书还可以供研究生使用。

哪些学生应该学习这样的动态系统课程呢？我们认为所有的工程专业学生都应该学习，而不管他们学习的是什么具体专业。因为如果深入理解了动态行为，那么就可以较好地解决实际问题。如果仅仅考虑了静态或稳态条件，在解决问题时经常会忽视关键因素。这种受限的视野就会产生短期的解决方案，或者不能从运作的整体角度解决问题。在编写本书时，我们想方设法地使读者得到必需的工具来评估与问题的动态性质有关的主题。不用说，我们还鼓励基于静态条件进行量级分析来“支撑”解决方案。

现在的学生发现有些课程充斥了各种主题。这样的课程让学生学习了很多主题的入门知识，学生往往不能抓住存在于各学科间的内在联系。我相信学习动态系统可以让学生理解很多主题背后的概念，并使他们可以在实际生活中应用这些概念。它还有助于学生把一些不相关的想法和原理转换为彼此联系的框架。我们不遗余力地帮助学生做到这一点。帮助学生掌握动态系统行为的和谐性质，并帮助他们更自信地应用掌握的主题对于我们来说是重大的成就。

本书用简单、实际的示例作为教授动态系统原理的工具。它逐步解释了为物理系统获得的“模块示意图”方法，并提供了获取所讨论的动态系统本质的示意图介绍。它还演示了如何把模块示意图变形为数学模块（微分方程或传递函数），然后可以用 MATLAB/SIMULINK 进行模拟（为了获得及时响应）。

本书让学生使用所开发的最强大的和易于使用的软件环境：MATLAB/SIMULINK。SIMULINK 提供的环境与 25 年前工程学生使用的环境类似：用仿真计算机解决微分方程和动态系统。但现在的学生通过使用 MATLAB/SIMULINK，获得的显示和故障查找工具远比前人使用的工具要丰富得多。另外，现在的学生可以自由选择很多非线性的控制块，这样可以评估他们在响应上做出的努力。同样，学生可以容易地看到改变时间常量和增益的影响。

## 实现

在第 11 章中，将向学生展示实现控制任务的多种方法。例如，工程师可以用大型机、微机或 PLC（可编程逻辑控制器）实现一些可能的应用。通过引入一些主题，如费用、开发时间、计算能力、规模等，它提供了工程师在做出选择时必须经历的进程。本书的多数部分假设 PLC 是读者实现控制图表的工具。因此，本书介绍了用 PLC 控制离散事件的



能力，然后深入讲解了用 PLC 实现闭环 PID (Proportional+Integral+Derivative) 循环的方法。

## DC 螺线管

本书用来帮助进一步深入调查的工具是一系列练习和实验。它们关注于特定的硬件：DC 螺线管，即位置控制系统。这样就使学生可以深入开发至少一个动态系统及其控制器。第 13 章和附带的实验手册都讲解了这些知识。本书目标是，当学期结束时，学生们可以舒适地使用驱动器、传感器和硬件，并能使用控制方法来表征、分析和设计特定控制系统。

## 思考题

另外，本书使用已经毕业的学生 Sapto Susilo 的建议，增加了动态系统和控制的趣味和关联性。每个学生都可以有自己的想法，然后把它与控制课堂演示的所有工具和方法相联系。这样做的目的是，这个学生对他的想法有特别的兴趣，它也许会激励该学生投入更多的时间来探索这个研究领域。我把这个建议的实现放在思考题部分。在每一章的结尾，思考题将提出一系列问题，它们将促使学生去投入研究。在这个过程中他们将从控制工程师的角度出发，画出图表，评估模块参数并执行模拟。附录 G 包括了其他建议并提供了有用的表格，可以通过这个创造性过程指导学生。

## 实现平台

本教程的一个目的是帮助学生理解实现控制的各种平台。在第 11 章讨论到，实现控制有很多方法。经过深思和试验哪种硬件是最实际的教学工具，本书选择了可编程逻辑控制器 (PLC)。这样本书就需要考虑到，动态系统和控制课堂的学生来自不同的专业，有电子学、计算科学、数学和生产控制理论背景知识。PLC 是一种可供所有工程专业学生使用的控制器平台，不管他们是否熟悉电子学或编程。PLC 还是生产运营的骨干，因为它可以容易地进行编程，从而可以用来测试很多系统。

## 关于作者

本书把动态系统与它们的控制这两个很接近的领域合为一体。当还是机械工程的大一学生时，我就对动态系统着迷。后来成为研究生、工程师和大学教授，我一直保持了这种兴趣。我还涉猎从射流电路到 PLC 控制器的分析、设计和实现等领域。在这个过程中，我知道了这些平台的优点和弱点。我后来的合作者，著名教授 George J. Thaler，把他的职业生涯奉献给控制理论的研究和教学。他写作或合作撰写了很多有关这个主题的书籍和文章。他对如何设计控制系统的贡献将会证明对任何工程师都极具价值。毫无疑问，如果没有他的贡献就不会有本书。

## 致谢

我要特别感谢那些鼓励我编写本书的人们。我还要感谢相信我的教师和教授们，他们授予我知识来编写这本有纪念价值的书。他们是：Linda Darnell、Charles C. Blackwell、Robert L. Woods、David Hullender、Robert White、Walter Higgings 和 William J. Dorson。

Delmar 的小组提供了很大的支持和耐心：Michelle Ruelos Cannistraci 在保证本书按时发行时提供了坚定的支持。与她的合作者 Linda DeMasi、Kathleen Vonk、Jon Duff、和 Stacy Masucci 一起工作也是令人愉快的。其他人在此过程中也提供了支持，他们包括：Mimi Villaca、Charles Okonkwo、Antonio Rodriguez 和 Jose Manuel Campoy。我还要向审阅本书原稿的众多审阅人员表示感谢。他们的建议使本书更有条理。在此对下面的审阅人员表示感谢：

Penn 州立大学的 Sohail Anwar

Texas A Times M 大学的 Ray Bachnak

Indiana Purdue 大学的 Harold Broberg

Weber 州立大学的 Warren Hill

Cincinnati 大学的 Kathy Ossman

DeVry 大学的 Chia-Chi Tsui

我还要感谢很多学生，他们修正了错误，建议了控制问题，提供了表达原理的更好方法。他们还给我提供机会来合作论文或应用项目。我们都学到了很多知识。

我很希望改进本书，如果有任何建议或修改方案，欢迎指出。

macia@asu.edu

# 目 录

<b>第 1 章 入门知识</b> .....	1
1.1 简介 .....	1
1.2 模型 .....	2
1.3 开环系统 .....	2
1.4 反馈控制 .....	3
反馈控制示例 .....	3
1.5 闭环系统的一般表示 .....	5
1.6 从模型的角度分析系统 .....	5
1.7 稳定系统与非稳定系统 .....	6
稳定系统和非稳定系统的示例 .....	7
1.8 控制工程师的作用 .....	8
1.9 小结 .....	9
1.10 思考题 .....	10
1.11 复习题 .....	10
<b>第 2 章 动态系统的数学背景</b> .....	13
2.1 历史观点 .....	13
2.2 简介 .....	13
2.3 运算 .....	14
2.4 微分方程 .....	16
2.5 量纲一致 .....	18
2.6 拉普拉斯变换 .....	20
2.7 传递函数 .....	31
2.8 框图 .....	32
2.9 MATLAB/SIMULINK .....	36
2.9.1 模拟计算机 .....	36
2.9.2 用 SIMULINK 解答微分 方程 .....	40
2.9.3 用 SIMULINK 确定传递 函数的输出 .....	42
2.9.4 不同的单位 .....	42
2.10 小结 .....	43
2.11 思考题 .....	43
2.12 复习题 .....	43
<b>第 3 章 动态系统建模</b> .....	50
3.1 历史观点 .....	50
3.2 建模原则 .....	51
3.3 表示数学模型的方法 .....	54
3.4 教学建议 .....	56
3.5 物理元件建模 .....	56
3.5.1 类似点 .....	56
3.5.2 across 和 through 变量 .....	56
3.5.3 分块元件和它们的基本 方程 .....	57
3.6 电子系统 .....	58
3.7 流体系统——液压 .....	59
3.8 流体系统——气动 .....	62
3.9 机械式直线型系统 .....	63
3.10 机械式旋转系统 .....	65
3.11 热系统 .....	65
3.12 物理系统建模 .....	70
3.13 电子系统建模 .....	74
3.14 用 SIMULINK 获得用于分析或 模拟的传递函数 .....	81
3.15 流体系统建模 .....	82
3.16 气动系统建模 .....	83
3.17 机械系统建模 .....	85
3.18 热系统建模 .....	89
3.19 混合系统建模 .....	90
3.20 小结 .....	92
3.21 思考题 .....	92
3.22 复习题 .....	92
<b>第 4 章 反馈控制</b> .....	100
4.1 历史观点 .....	100
4.2 定义、模型和反馈控制 .....	101
4.3 系统的阶 .....	104
4.4 直流电机：开环和闭环系统 的比较 .....	107
4.5 稳态误差分析 .....	112
4.6 确定全反馈控制中的稳态 误差的过程 .....	116
4.7 扰动造成的误差 .....	117

4.8	总体误差	119	7.10	轨迹与虚轴相交	166
4.9	非全反馈系统的稳态误差	119	7.11	轨迹在复极点或0点的方向	167
4.10	非线性	119	7.12	绘制轨迹	167
4.11	小结	120	7.13	在轨迹上定位根	169
4.12	思考题	120	7.14	增益以外的参数的根轨迹	170
4.13	复习题	120	7.15	通过根轨迹进行系统分析	172
<b>第5章</b>	<b>稳定性和动态响应</b>	<b>124</b>	7.16	各种极点-0点排列的典型根轨迹集合	173
5.1	简介	124	7.17	使用 MATLAB 绘制根轨迹	175
5.2	稳定性分析	124	7.18	根轨迹绘制规则总结	175
5.3	Routh 标准	125	7.19	小结	178
5.4	小结	132	7.20	思考题	178
5.5	思考题	132	7.21	复习题	178
5.6	复习题	132	<b>第8章</b>	<b>频率响应分析</b>	<b>181</b>
<b>第6章</b>	<b>时域性能特征</b>	<b>135</b>	8.1	历史观点	181
6.1	简介	135	8.2	简介	181
6.2	极点位置	135	8.3	数学基础	182
6.3	扰动系统以调查系统特征	135	8.4	返回到 OLTF 的原始表示法	182
6.4	一阶系统	136	8.5	对正弦信号输入的系统响应	182
6.5	一阶系统对阶跃输入的响应	136	8.6	频率响应图的应用	182
6.6	用方波激励一阶系统	138	8.7	一阶系统响应	184
6.7	$T_r$ 和 $BW$ 及 $\tau$ 之间的关系	139	8.8	二阶系统响应	185
6.8	二阶系统分类	139	8.9	共振	187
6.9	二阶系统对阶跃输入的响应	141	8.10	绘制 Bode 图	188
6.10	主根	145	8.10.1	建议用于幅度曲线的绘制过程(普通计算方法)	193
6.11	小结	146	8.10.2	更正渐近幅度曲线	196
6.12	思考题	147	8.10.3	角曲线	196
6.13	复习题	147	8.11	使用 MATLAB 获得 Bode 图	198
<b>第7章</b>	<b>根轨迹分析</b>	<b>154</b>	8.12	柯西的辐角原理	198
7.1	历史	154	8.13	稳定性分析	201
7.2	简介	154	8.14	非最小相位系统	205
7.3	根轨迹基本理论	155	8.15	相对稳定性(增益裕度和相位裕度)	206
7.4	$GH(s)$ 的正确表示法	155	8.16	闭环频率响应	207
7.5	传递函数因式的图形表示法	156	8.17	来自 Bode 图的稳定性和相对稳定性	208
7.5.1	根的数量	157	8.18	使用 MATLAB 获得 GM 和 PM	209
7.5.2	实轴上的根轨迹段	158	8.19	使用 MATLAB 获得 Nyquist 图	209
7.5.3	根轨迹上的终点	159			
7.6	简单示例	160			
7.7	渐近线	162			
7.8	根轨迹与实轴相交	163			
7.9	渐近线形心	165			



8.20	Nichols 坐标和 Nichols 图	209	10.12	超前补偿与滞后补偿的比较	260
8.21	使用 MATLAB 生成 Nichols 图	211	10.13	使用根轨迹进行设计	260
8.22	各种方法的比较	211	10.14	分区	262
8.23	小结	212	10.15	极点布置	265
8.24	思考题	212	10.16	使用状态变量进行极点布置	267
8.25	复习题	213	10.17	参数平面	268
<b>第 9 章</b>	<b>状态空间法简介</b>	<b>218</b>	10.18	PID 控制器	272
9.1	历史观点	218	10.19	Ziegler-Nichols 方法	274
9.2	简介	218	10.20	Ziegler-Nichols 调整过程	275
9.3	矩阵基础	218	10.21	对设定点求微分的意义	279
9.4	动态系统表示法	219	10.22	小结	281
9.5	将微分方程转换为状态空间	220	10.23	思考题	281
9.6	将传递函数转换为状态空间	221	10.24	复习题	281
9.7	使用状态空间建模	223	<b>第 11 章</b>	<b>用 PLC 硬件实现控制模式</b>	<b>284</b>
9.8	将 SIMULINK 框图转换为状态空间	223	11.1	简介	284
9.9	矩阵的秩	225	11.2	影响系统选择的因素	284
9.10	一阶微分方程的合并	226	11.3	示例实现平台	284
9.11	使用 MATLAB 的变换过程	227	11.4	对各种实现控制任务的方法的比较	286
9.12	其他控制领域	228	11.5	PLC 简介	287
9.13	小结	229	11.6	用 PLC 实现 PID 闭环控制	291
9.14	思考题	229	11.6.1	基本的控制术语	292
9.15	复习题	229	11.6.2	输入信号的类型和范围	293
<b>第 10 章</b>	<b>控制系统的设计</b>	<b>231</b>	11.6.3	低通滤波	293
10.1	历史观点	231	11.6.4	模拟信号的内部表示	294
10.2	简介	232	11.6.5	综合的编程和监控环境	297
10.3	精度要求	233	11.6.6	调整参数	303
10.4	对动态行为的要求	233	11.6.7	输入	303
10.5	标准形式	234	11.6.8	输出	303
10.6	回路中补偿器的位置	237	11.6.9	PID 调整参数的选择	304
10.7	级联补偿的设计方法	238	11.7	小结	304
10.8	使用代数进行设计	239	11.8	思考题	304
10.9	级联补偿的 Bode 图设计	241	11.9	复习题	304
10.9.1	Bode 图级联设计——超前补偿	241	<b>第 12 章</b>	<b>数字控制系统简介</b>	<b>307</b>
10.9.2	Bode 图级联设计——滞后补偿	249	12.1	历史观点	307
10.10	反馈补偿的 Bode 设计	254	12.2	简介	307
10.11	反馈补偿的 Bode 设计的图形法	256	12.3	$z$ 变换	308
			12.4	使用 $z$ 变换捕获差分方程	310
			12.5	零阶保持	311



12.6	连续到离散的传递函数转换	312	13.12	改进的设计: PD 控制器	329
12.7	获得离散传递函数的后向 规则法(直接代换)	313	13.13	用数字控制器实现	329
12.8	获得离散传递函数的后向 规则法(使用变换)	315	13.14	小结	329
12.9	获得离散传递函数的拉普 拉斯变换法	317	13.15	思考题	330
12.10	其他近似方法	319	附录 A	$T_r$ 、 $BW$ 和 $\tau$ 之间关系的推导	331
12.11	使用 MATLAB 进行连续 到离散的转换	320	附录 B	MATLAB 基础	333
12.12	PID 控制	321	B.1	有用的命令	334
12.13	将连续设计转换为离散 实现的过程	321	B.2	函数	335
12.14	小结	323	B.3	脚本文件	336
12.15	思考题	323	B.4	函数文件	337
12.16	复习题	323	B.5	绘制 SIMULINK 模拟结果	339
第 13 章	实例研究: 使用 DC 螺线管 的位置控制系统	325	附录 C	用于渐进 Bode 幅度绘制的 MATLAB 函数 <code>asymbode.m</code>	340
13.1	简介	325	C.1	程序清单	340
13.2	过程概述	325	C.2	应用	342
13.3	问题定义	325	附录 D	Allen-Bradley 的 PID 指令 (Allen-Bradley 公司惠赠)	343
13.4	驱动器的选择和实现	326	D.1	过程控制指令	343
13.5	测试	327	D.2	应用示例: PID 调整	360
13.6	建模	327	附录 E	DC 螺线管的特征	362
13.7	螺线管驱动器的选择	328	附录 F	直流电机的制造厂家规格 (经 Bodline 电气公司许可)	365
13.8	模型参数的确定和测量	328	附录 G	开发你的创意组合的原则	368
13.9	模拟	329			
13.10	控制器的选择(连续型设备)	329			
13.11	最初的控制设计: 比例反馈	329			

# 第 1 章 入门知识

本章学习目标：

- 认识动态系统
- 表征闭环系统
- 区分开环系统和闭环系统
- 掌握开环系统和闭环系统的用法
- 了解非稳定的反馈系统
- 指出控制工程师验证模型使用的测试方式

## 1.1 简介

本书介绍有关系统的知识。系统是用来完成某项任务的一种设备或设备集合。其定义表明,系统必须有至少一个输入设备和一个输出设备,并且这两者之间存在因果关系(也就是说,输入的改变会引起输出的改变)。

在本书中,我们介绍了动态系统——在这个系统里,改变输入将引起输出随着时间改变。例如,假定动态系统是一个简单的积分器,输入是正的常量。对于这种输入,积分器的输出随着时间呈线形增加(例如,会输出斜线)。在每种工程课程中都会遇到动态系统,甚至有人说所有的系统都是动态系统。我们主要讲解电、流体、机械和热系统,但是你所掌握的技能、工具和方法也可以应用到其他系统,包括化学、经济学和人口动态系统。

本书大多数章节都针对一种动态系统:闭环反馈控制系统。这种系统遍布于我们的现代生活中。其应用包括:

- 车辆中的速度和燃油控制
- 电子电路
- 轮船和飞机控制
- 卫星跟踪
- 流体和化学反应进程控制
- 温度控制(例如,家用供暖控制)
- 医疗仪器
- 计算机硬件和软件

要求使用反馈控制的新思想在日常生活中日益推广。

任何物理系统的动态性质都由自然法则控制。要理解系统的行为,必须知道应用了哪

些法则。这时,通常你要绘制简化的模型示意图,以捕获相关的特征。然后用这个模型示意图得到该系统的数学模型。一种常见的数学模型形式是微分方程或方程组。得到方程后,就可以利用不同的方法来解答它们。有些方法是分析方法,另外一些是数字方法。数字方法通常要用到计算机解法。

## 1.2 模型

要设计、分析或修改动态系统,我们必须理解该系统的工作方式。本书的主要目的是帮助你学习使你能确定动态系统特征的过程。本书的另一个目的是帮助你掌握分析动态系统性能的能力,这需要用到计算机。用原型模型反复试验来开发系统太费时而且昂贵。当今,只有对系统模型完成大量的计算机研究后才需要硬件原型。

因为计算机研究(分析和设计)是数学模型的预定用法,所以模型本身应该是容易输入计算机的形式。两种常见的形式是传递函数框图形式和状态—空间形式。可以根据用户的喜好、软件、动态系统的本质、预期的行为种类和系统的预定用法来选择模型形式。

模拟是把数学模型输入计算机并应用所选信号的过程(信号有助于分析系统)。基于所选输入,计算机程序确定输出结果。最常用的模型经常由框图和传递函数组成。传递函数代表传感器、正在研究的动态系统或控制器本身。可以购买的模拟程序,如 MATLAB 及其工具箱(如 SIMULINK),使工程师可以很容易地把模型输入计算机。这样就减轻了编写软件的负担,从而使工程师可以集中精力分析或设计问题。

## 1.3 开环系统

设想用煤气炉为房子供暖。在没有恒温器,没有合适的温度测量手段的情况下控制调整介质流的阀门。在某天,可以评估上午房内的温度,并将煤气阀门设置到合适的数值,使房间整天都很暖和。这是一个开环系统,如图 1-1 所示。输入是数值设置。输出是房间内的温度。对于某些天气条件,将房内温度维持在可以接受的数值。但是,要注意的是,如果外面的天气比预期的冷,房内也会比预期的冷,因为阀门设置以及煤气流都是常量。

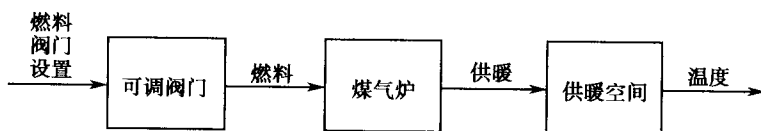


图 1-1 家庭供暖——开环系统

注意,在开环系统中,信号流直接从输入到输出。如果输出是不可接受的数值,则没有可用的自动化修正手段。只能人工调整输入阀门设置来进行修正。如果它们的性能

足够好,开环系统要比反馈控制简单、便宜,而且通常需要较少的维修。它们可以应用于很多领域。

## 1.4 反馈控制

反馈或闭环控制的框图也许与开环系统的框图类似,但它根据下面这个简单的原理工作:要测量(和控制)的信号是输出信号,它通过减法与输入信号比较。多数反馈控制都是“复印机”,意思是它们努力生成复制输入的输,尤其是当系统处于稳态时。输入与输出的不同之处称为“出错信号”。

通常的做法是使用出错信号来减少输入和输出的不同。重新设想开环的煤气炉,并假设可以使用恒温器。该恒温器有一个测温设备(通常是双金属片),可以控制房内温度的预期范围并设置所选的数值。当温度是所选数值时,煤气数值就使相应的煤气流通过。当房内温度增加的数值大于指定的数量时,恒温器就关小阀门。测量房内温度,以及用测量结果修改输入的煤气流的进程就组成了反馈控制系统(闭环系统)。它可以自动修正输出(房内温度)的变化。图 1-2 显示了这个进程。

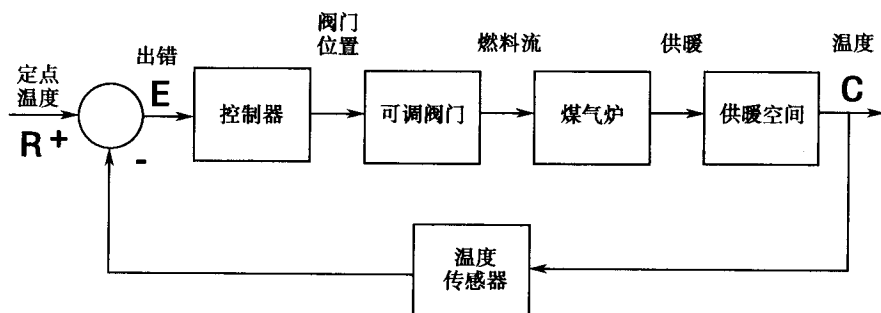


图 1-2 有反馈(闭环)系统的房间供暖图

自动修正的优点是使用反馈控制的一个显著原因。其他系统还有其他的原因。主要的不足之处是费用。在煤气炉的示例中增加了恒温器。

### 反馈控制示例

考虑下面的示例,并思考如何把它们转换为闭环(反馈)系统。思考开环系统和闭环系统的优缺点。

#### 1. 传送带

设想一种系统,该系统把箱子从一层移到下一层,就像机场的传送行李系统一样。系统沿 30 度的斜坡移动。传送带的驱动器是采用 12V 电压的电机。当需要传送的箱子的重量增加时,传送带的速度会发生什么变化?

## 2. 水平面控制器

假设有一个蓄水池，它的水平面必须保持恒定。这个蓄水池有三个进水管道，管道末端有阀门和固定的孔。阀门随机地开或关，以改变流入量。蓄水池底部有调节阀门，可以进行自动或人工调整，来控制蓄水池的流出量。图 1-3 显示了这样的系统。

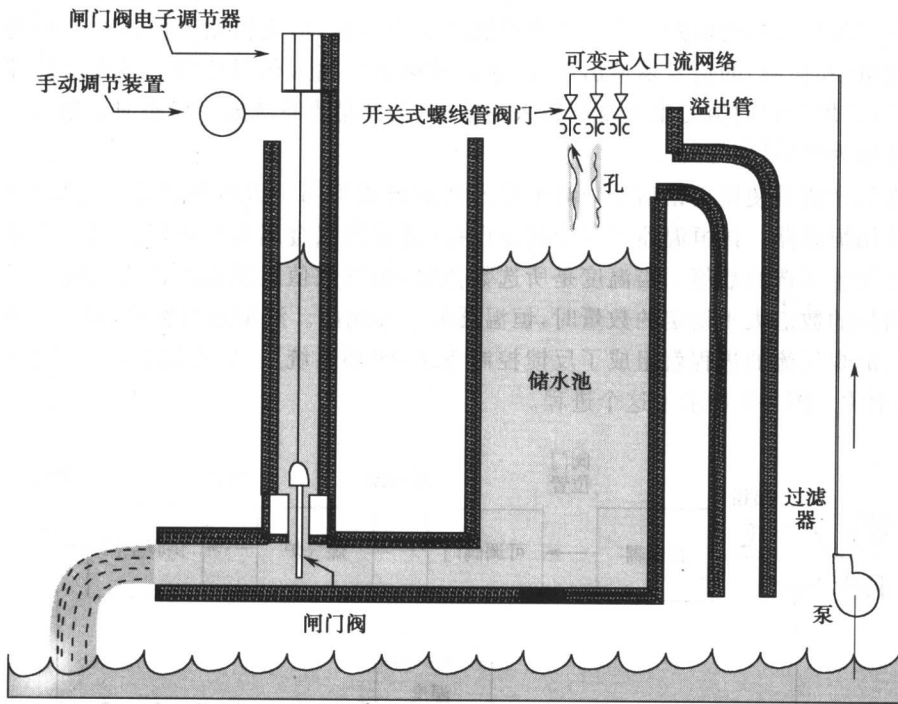


图 1-3 水平面控制系统

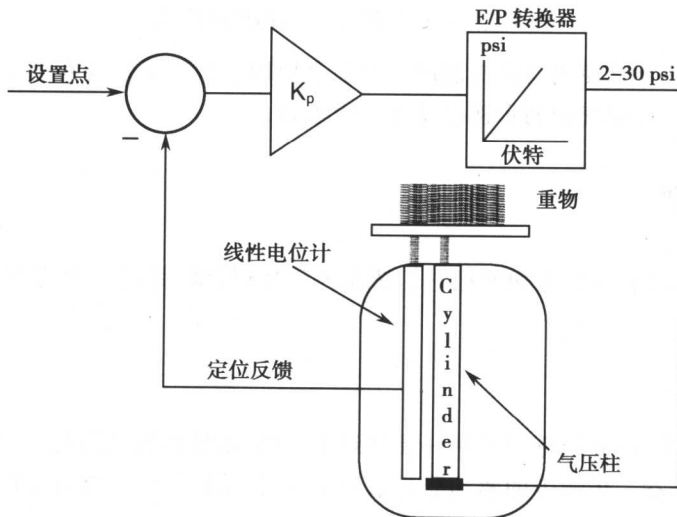


图 1-4 气压平台

### 3. 气压平台

气压平台与气压升降机类似。在这个系统中,一个气压汽缸支持一个平台,在这个平台上可以放置不同重量的箱子,并可以把箱子从一个层次移动到另一个层次上。图 1-4 显示了该系统。如果箱子的重量增加,汽缸的位置会有什么变化?

## 1.5 闭环系统的一般表示

可以用框图来描述本书包含的大多数闭环系统,称为单一输入、单一输出(SISO)系统。下面的示例描述了另一种闭环系统。设想一个陶工的轮子有自动化速度控制。设计这个系统是为了维持轮子速度恒定,而不管陶工挤压粘土时,系统经历的减速/抵制作用。图 1-5 演示了该系统的框图,包括输入(基准速度)、输出(轮子速度)和干扰(陶工对粘土施加的减速扭转力)。这种表示方式与传递函数(第 2 章将会讲解)一起为控制工程师提供了统一的通信框架,而不管他们的专业领域是什么。

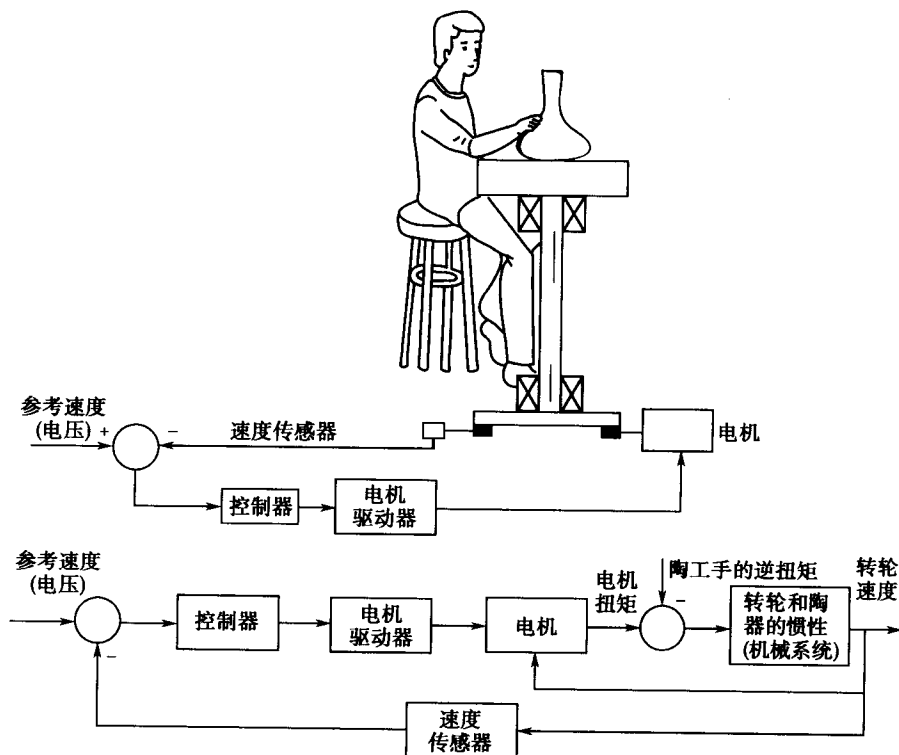


图 1-5 陶工在电动轮上转动粘土的示意图和框图

## 1.6 从模型的角度分析系统

设备或系统需要多个模型。例如,房屋建筑师可以从描绘房屋外部的草图开始。他们甚



至准备了三维模型,模型是静态的而不是动态的。当初始模型并不一定成比例时,在构造开始之前需要准确的参数数值(如长度、墙的位置)。类似地,动态系统模型可以从草图或框图开始,在图中每个块代表一个元件或硬件。有些块也许代表静态设备,但是多数重要的块代表动态设备。

对于每个块,如果要分析系统的动态行为,就需要数学描述。描述动态部分的方程通常是普通的微分方程,此类方程用基本的自然法则(如牛顿定理、基尔霍夫定理)就可以导出。经常把这些微分方程转换为传递函数来简化它们的解答。注意,如果要信任分析,则需要参数的准确值。

框图中的块可以用方程表示,目的是供计算机执行。在开始阶段,也许需要方程的 long-hand 解答。但是因为不同的初始条件、测试信号和参数数值(检查容错性),帮助系统分析的模拟经常需要方程的多个解答。最常见的框图模型的块使用传递函数来描述块中的硬件。

要得到有意义的模拟结果,模型本身必须是对系统的准确描述。如果存在硬件,也导出了基本的方程,就可以通过计算、尺寸和手册数据得到元件的参数值。最后,如果可以从硬件中得到测试数据,计算机模型就在相同的条件下得到测试结果并对其进行比较。如果存在重大不同,就可以认为计算机模型出错,必须改进模型。如果模型和系统的结果具有可比性,该模型就可以用于系统分析。注意,在设计问题时,经常不选择硬件,使用的是“完美模型”(就是计算机模型)。我们认为这种完美模型与硬件模型等效,并把它性能与提议系统的性能进行比较,来确认提议系统的计算机模型。

模型验证与模型研究使用的测试信号的本质是可变的,这在以后的章节中会学到。最常用的测试信号是:

- 正弦输入——线性系统的一个特征是:当它被正弦输入激活时,将产生相同频率的正弦输出。为了评估该系统,可以用具备指定频率的正弦输入激活该系统。然后用量和相位数据来比较输出信号和输入。当这个进程重复很多频率时,则称其为频率响应测试。可以用特殊图表来表示得到的结果,这种图表称为 Bode Plot。
- 分步输入——如果输入突然从一个数值改变为另一个数值(尽可能快),则可以通过输出的总体改变和跃迁速度来评估输出。
- ramp 输入——输入可以随着时间呈线形增加。当然,这个进程只能持续一定的时间,因为物理系统最后将到达一个界限。
- 脉冲输入——与系统的动态性相比,脉冲是非常短的输出。例如,敲击漂浮的原木或用锤子敲打钉子就是脉冲输入。
- 分步改变参数值——当系统参数(如摩擦系数、重量)突然改变时,参数值就会发生分步改变。然后根据修改过的参数分析输出。

要执行这样的测试和分析结果,工程师必须知道预期什么以及如何解释结果。下面的章节将提供需要的背景知识。

## 1.7 稳定系统与非稳定系统

虽然闭环系统能提供比开环系统更好的控制(它们更准确、快速),但是执行它们更困





难。当循环是闭合的时,闭环系统更容易变得不稳定。

非稳定性的概念也许是新的,因为你看到的系统几乎全部是稳定的。但是在早期的开发过程中,这些系统很可能是非稳定的。有些工程师勤奋地工作,为的是使它们稳定。

在理解稳定性时,把动态系统(工厂)的非稳定性与完整反馈系统(如闭环系统)的非稳定性分开是有所帮助的。虽然工厂(要控制的物理系统)是非稳定的,但某拥有稳定的反馈系统是可能的。

## 稳定系统和非稳定系统的示例

下面是工厂或物理系统使用的稳定、有条件的稳定、不稳定和几乎不稳定系统以及完整的反馈系统的示例。

### 1. 工厂/物理系统

- 位于山顶的球(非稳定)
- 倒置的钟摆(非稳定)
- 用加热元件烧水的过程(有条件的稳定,取决于应用的电压)。(散热太多会在加热硬件周围形成蒸汽,从而阻止其散发更多的热量。这样就会使加热元件的温度升高,最后导致其烧坏。)
- 有碳丝的灯泡(稳定的)(碳的阻值随着温度的增加而增加,直至达到稳定的温度。)
- 被上升气流悬在空中的球(稳定)(根据贝努利法则,这个球停留在气流的中心。)

### 2. 完整的反馈(闭环)系统

- 用自行车前刹刹车(几乎是非稳定的)(重心试图到达制动点的前端,也就是前轮。)
- 飞机的尾部拖物,在着陆后减速的时候(几乎是非稳定的)(与上面的示例一样。大部分重量(以及重心)都落在两个前轮后面。当前轮刹车时,重心(和尾部)有继续向前的趋势。这种作用容易使飞机旋转。)
- 保持倒置于手掌上的扫帚的平衡(稳定的,但是比较困难)
- 自行车(稳定的)(虽然重心在支撑点的上部,但当车轮接触地面时,骑车人和车轮的回旋力保持了它的稳定。)
- 骑车时两手交叉握持车把(对于多数人而言是非稳定的)
- 有太多回音的声音系统或公共场所系统(非稳定)
- 两个激烈争论的人(非稳定)
- 有不可控制的癌细胞生长的癌症(如果没有药物的介入是非稳定的)
- 坐在光滑的座位上尝试使车辆缓慢停止(非稳定)(当车辆减速时,司机会向前滑动,给刹车更大的压力,从而加快减速)
- 超负荷的电话中心(非稳定)(人们打电话,等了一会,挂断,然后重新拨打)