自动控制系统

（第 8 版）

Benjamin C. Kuo，Farid Golnaraghi 编著

汪小帆　李　翔　译

高等教育出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

图字：01-2003-5102 号

Automatic Control Systems，8th ed.
Benjamin C. Kuo，Farid Golnaraghi
Copyright ©2003 John Wiley & Sons，Inc. All rights reserved.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS，New York，Chichester，Brisbane，Singapore AND Toronto. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons，Inc.

内容简介

《自动控制系统》前 7 版曾被美国及全世界的上百所大学采用。第 8 版在保留原著基本内容的基础上又作了仔细的修订。全书内容更加条理化，并且引入了更多的计算机辅助工具。该书把控制理论、实际例子与计算机工具有机地结合在一起，用易于接受的方式，全面而又恰当地介绍了控制的内容。配套光盘上提供的基于 MATLAB 的 ACSYS 软件和虚拟实验室（Virtual Lab）是第 8 版的重要特色，它使读者能用简单的方式处理控制系统的建模、分析、设计与模拟。

本书非常适于作为高等院校自动化类相关专业的教科书，也可供相关领域研究人员作为控制设计的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

自动控制系统：第 8 版：翻译版／（美）库沃（Kuo，B. C.），（美）高那菲（Golnaraghi，F.）；汪小帆，李翔译. —北京：高等教育出版社，2004.6
书名原文：Automatic Control Systems
ISBN 7-04-014561-8

Ⅰ. 自… Ⅱ. ①库…②高…③汪…④李… Ⅲ. 自动控制系统－高等学校－教材 Ⅳ. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 050506 号

策划编辑 韩 颖 责任编辑 刘 洋 封面设计 刘晓翔 责任绘图 郝 林
版式设计 王艳红 责任校对 殷 然 责任印制

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010－82028899

购书热线 010－64054588
免费咨询 800－810－0598
网 址 http://www.hep.edu.cn
http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787×1092 1/16
印 张 36.5
字 数 900 000

版 次 年 月第 1 版
印 次 年 月第 次印刷
定 价 48.20 元（含光盘）

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。
版权所有 侵权必究

Dedications

Benjamin C. Kuo

To my family and Pugsley, Baobei, Buppy, and Tuskers

M. Farid Golnaraghi

To my wife, Mitra, for standing by me and for showing me the meaning of true love, and to baby Sophia, the joy of my life.

前 言

虽然本书只是老版本的修订本，但这是我第一次为 John Wiley & Sons 出版公司写书。2000 年，Simon&Schuster 出版公司被 Pearson 出版公司收购。根据美国司法部的规定，被并购后 Simon&Schuster 出版公司失去了一系列图书的版权。显然，《自动控制系统》第 7 版是这些图书中的一本。也许在司法部里有懂控制系统的专家，Simon&Schuster 出版公司在拥有《自动控制系统》这本书的版权将近 40 年后，突然就将其转归 John Wiley&Sons 出版公司所有了，这就是关于本书版权的一个简要的说明。然而，作为 Wiley 出版社的作者，我们感到无比的高兴。事实上，当初被迫的版权移交现在已经变成了一件令人高兴的事。

为了引入新的思想和最新的资料，第 8 版增加了一位合作者，加拿大安大略滑铁卢大学的 Farid Golnaraghi 教授。

本次修订的主要任务是在保留原著基本内容的基础上使这本书的内容更加条理化，并且为教师和学生加入了更多的计算机辅助工具。许多教授审阅过本书出版前的原稿，本书采纳了大多数有价值的建议。

在第 8 版中，以下资料都被放到了光盘的附录中。它们是：

附录 A：复变量理论
附录 B：微分和差分方程
附录 C：初等矩阵理论和代数学
附录 D：Laplace 变换表
附录 E：运算放大器
附录 F：根轨迹的特征和构造
附录 G：频域图
附录 H：广义 Nyquist 判据
附录 I：离散控制系统
附录 J：z 变换表
附录 K：ACSYS 2002 软件说明
一些习题的答案

此外，光盘中还包含了用于 ACSYS 的 MATLAB 文件，它们是一些用于解决控制系统问题的软件工具。光盘中还包含用于演示书中实例的 Powerpoint 文件。我们还将每一章中关于离散控制系统的内容抽出来并放入了附录 I 中。

以下段落主要针对适用本书的三类人群：已经采用这本书，或是将要选用这本书作为教材的教师；寻找答案以解决日常设计问题的实际工程师；最后是选择了控制系统课程而需要学习这本书的学生。

对教师：这本书的内容是作者在大学从教时，在教授高级控制系统课程的过程中所做的总结。前 7 版已经被美国及全世界的上百所大学所采用，而且至少已经被翻译成了六种语言。第 7 版中几乎所有的设计课题都保留了下来。一个重大的改变就是将离散控制系统部分放入了光盘的附录 I 中。我们更乐意将离散控制系统当作连续系统的延伸来讲授。然而，实际上，在一个学期的课程中要想涵盖连续和离散控制系统所有内容还是比较困难的。

这一版中增加的软件与其他控制类书籍所附带的软件有很大的差别。这里，我们通过大量使用 MATLAB GUI 程序开发了非常易用的软件。这样，学生只需要把注意力集中在控制问题的学习上而不是编程上！我们还加入了两个非常新的应用：SIMLab 和 Virtual Lab，学生可以在软件环境中处理实际问题并进行速度和位置控制实验。在 SIMLab 中学生能够看到并且修改系统参数（就像在任何仿真中一样）。在 Virtual Lab 中，我们引入了黑箱方法，学生无法看到系统参数，必须运用一些系统辨识方法去寻找它们。Virtual Lab 最主要是给学生提供了一个符合实际的在线平台，它包括了在实际速度或位置控制实验时会遇到的所有问题，比如，放大器饱和，噪声和非线性。我们欢迎您提出宝贵意见以使本书以后的版本不断改进。

最后，在教师手册里面给出了一个按章节顺序排列的一学期课程的样本。有资格的教师可以从出版商处获得教师手册。该手册里还包含了书中所有问题的详细解答。

对实际工程师：我们在写作这本书时是始终把读者放在心里的。因此，本书很适合自学。我们的目标是清楚而透彻地处理课题。这本书没有用理论—证明—Q.E.D 的格式，也没有过多的数学知识。多年来作者在众多工业领域做过大量的顾问工作，并且参与解决过许多控制系统问题，从宇航系统到工业控制，汽车控制和计算机外围设备控制。虽然在这种层次的书本中难以包括实际问题的所有细节和真实性，但是书中的一些例子和问题还是反映了实际系统的简化形式。

对学生：你现在手中有这本书是因为你选了这门课而且你的老师指定用这本书！尽管你在读了此书后有权表达你对该书的观点，但你却无权让老师不选该书。更糟的是，你的老师选这本书的理由之一是因为他或她想让你努力学习。但是请不要误解我们：我们的本意是，尽管在我们看来这是一本易于学习的书，但这不是一本没有意义的书。书中没有卡通或漂亮的图片来吸引你。从这儿开始，将是大量的、艰苦的工作。你应该已具有典型线性系统课程中讲授的一些预备知识，例如线性常微分方程的求解，Laplace 变换及应用，线性系统的时间响应和频域分析。在这本书中你不会发现太多你以前没有遇到过的新数学工具。你应当学习怎样运用你在过去的两三年内所学到的数学工具，这才是一件有趣而富于挑战性的事情。也许你需要重温一下某些数学基础，你可以在随书附带光盘的附录里找到它们。光盘还包含了许多其他内容，如 ACSYS 软件，它是用基于 MATLAB 的程序来解决线性控制系统问题的 GUI 软件，以及基于仿真的 SIMLab 和 Virtual Lab，它们可以帮助你增进对实际控制系统的理解。

这本书有大量的演示例子。其中一些例子为了说明新思想和主要问题而有意识地作了简

需要全本请访问 www.ertongbook.com

化。另一些例子则更加精细,旨在让你更贴近实际。此外,本书的目标在于用一种清楚和透彻的方法来描述一门复杂的学科。作为一名学生,一种重要的学习策略就是不要完全依赖于课本。当学习某门课的时候,去图书馆查找一些类似的课本看一看其他作者是如何处理相同课题的。你也许能获得关于这门学科的新观点并且可以发现某个作者对资料的论述也许比其他作者更仔细和彻底。不要为了记录一大堆过分简单的例子而分散注意力。在现实世界中,你将面对含非线性和/或时变元件,以及具有使你害怕的阶数的高阶控制系统的设计。现在就告诉你在现实世界中并不存在严格的线性和一阶系统,也许会让你有点泄气。

一些工科类高年级大学生不相信他们在课堂上学到的知识以后会直接运用到工业中去。我们的一些学生从工业现场和工厂参观实习回来后都惊奇地发现,他们在控制系统课上学到的知识如今确实用到了工业中。他们惊讶地发现本书在实际工程师中也是一本流行的参考书。遗憾的是,往往在快毕业的时候学校才组织这些能够让学生认识世界,开阔眼界和激励自我的参观实习,这对于提高学生学习的积极性通常是太迟了。

本书有许多辅助学习的工具:基于 MATLAB 的 ACSYS 软件能够帮助你求解各种类型的控制问题。SIMLab 和 Virtual Lab 软件用来对虚拟实验系统进行仿真。这些都可以在随书附带的光盘上找到。此外,每章后面的复习题和小结也会对你有所帮助。你还可以访问本书的专门网站,在那里你可以找到本书的勘误表和其他补充材料。

我们希望你能喜欢这本书。它将是你在大学生涯中获得(投资)的又一本主要的教材。我们建议你不要在学期结束的时候把它卖回给书店。如果你这样做了,而在你以后的职业生涯中又需要参考一本控制系统书籍的时候,你就不得不重花高价把它买回来。

关于 ACSYS 软件的一个重要说明:在本书出版的时候,关于 MATLAB 6.0 (R12),MATLAB (R12) 的学生版以及 MATLAB 6.1 (R12.1) 和 Window XP 之间存在兼容性问题。根据我们的要求 Mathwork 公司作了如下声明:

"MATLAB 6.0 (R12) 的学生版不被 Windows XP 正式支持。关于 MATLAB 6.0 (R12) 学生版的系统需求的更多信息请见以下的 URL:

http://www.mathworks.com/products/studentversion/sys_req.shtml

目前,没有在 Windows XP 上正式支持 MATLAB 6.0 (R12) 学生版的计划,我们的研发人员将来也许会重新考虑 Windows XP 对 MATLAB 6.0 (R12) 学生版的支持。"

此外在以下 URL:

http://www.mathworks.com/support/solutions/data/30479.shtml

的声明中他们建议:"MATLAB 6.1 (R12.1) 是在 Windows XP 完成之前发布的,所以在 Windows XP 下不被认可。Windows XP 将正式支持我们下一个发布的 MATLAB 版本。MATLAB 6.1 (R12.1) 的系统需求可以在以下 URL 找到:

http://www.mathworks.com/products/system.shtml/windows

在我们所做的最小限度的测试中,我们已经遇到了一些 MATLAB 6.1 (R12.1) 和Windows XP 的不兼容性问题。你可以有两种可能的工作环境来处理这些问题:

(1) 你可以让 Windows XP 工作在"Windows 典型模式"。

⑵ 你可以下载一个新文件，hg.dll。

请注意 新的 hg.dll 文件不是针对在 Windows XP 上运行 MATLAB 6.0 (R12) 学生版的。

基于前面的陈述，我们认为 MATLAB R12 和 Windows XP 是不兼容的，而 MATLAB 6.1 (R12.1) 可以在 Windows XP 上运行，但可能会有一些问题。

此外，在本书发行的最后阶段，MATLAB 6.5 R13 试用版也已经发布。ACSYS 软件在 MATLAB 6.5 R13 试用版上已作了成功测试，而且可以在任何微软 Windows 操作系统中使用。预期 MATLAB 6.5 R13 的学生版和完全版可以在 2003 年发布。

所以，我们决定随书附带发行三个版本的 ACSYS 软件：

⑴ ACSYS 2002 (R12) 除了 Windows XP 外，被所有微软操作系统支持。MATLAB 6.0 (R12) 的学生版使用者必须使用这个版本。

⑵ ACSYS 2002 (R12.1) 被所有的微软操作系统支持，在 Windows XP 下工作状况良好。虽然我们还没有发现 MATLAB 6.1 运行于 Windows XP 操作系统下的问题，但是 Windows XP 的使用者在实际使用中也许会遇到一些问题。

⑶ ACSYS 2002 (Pre - release R13) 被所有的微软操作系统支持。这个版本应该可以在 MATLAB 6.5 R13 的学生版和完全版发布后使用。

特别致谢 初稿的审阅对这次修订工作有很大的影响。作者要感谢以下审阅者，他们允许我们在这里列出他们的名字：

B. Ross Barmish 教授，威斯康星大学

Peter Reischi 教授，圣荷西州立大学

Hy D. Tran，新墨西哥大学

Hoss Cyrus Ahmadi，不列颠哥伦比亚大学

作者特别感谢缅因大学的 Duane Hanselman 教授对这次修订提出的宝贵建议。

作者感谢滑铁卢大学的研究生 Tony Kim，Peter Wom 和 Hamid Karbasi，感谢他们对软件开发提供的帮助，感谢滑铁卢大学的 Jan Huissoon 教授在创建 SIMLab 和 Virtual Lab 的实验中提供的帮助。Farid Golnaraghi 还要感谢 Benjamin Kuo 教授，为能与他共同分享写作此书的快乐，为感谢他在写作过程中的教诲，耐心和支持。

作者要感谢 John Wiley&Sons 出版社的专业职员：Bill Zobrist，Jenny Welter 和 Jovan Yglecias，感谢他们在该项目的各个阶段所做的工作。尤其要感谢资深编辑 Caroline Sieg 和图表协调员 Anna Melhorn，感谢他们在整个出版过程所做的专业处理。最后，作者要感谢 Wiley 大学出版社的出版商 Peter Janzow 对这一项目的支持。

B. C. Kuo

美国尚佩恩，伊利诺依大学

M. F. Golnaraghi

加拿大安大略，滑铁卢大学

2002，马年

目 录

第一章 绪 论 …… 1

1-1 引言 …… 1

1-1-1 控制系统的基本组成部分 …… 1

1-1-2 控制系统应用举例 …… 2

1-1-3 开环控制系统(无反馈系统) …… 5

1-1-4 闭环控制系统(反馈控制系统) …… 6

1-2 反馈的含义及其作用 …… 6

1-2-1 反馈对于总增益的影响 …… 7

1-2-2 反馈对于稳定性的影响 …… 7

1-2-3 反馈对于外部干扰或噪声的作用 …… 9

1-3 反馈控制系统的类型 …… 9

1-3-1 线性系统与非线性系统 …… 10

1-3-2 定常与时变系统 …… 10

1-4 小结 …… 12

复习题 …… 12

第二章 数学基础 …… 14

2-1 引言 …… 14

2-2 Laplace 变换 …… 15

2-2-1 Laplace 变换的定义 …… 15

2-2-2 Laplace 反变换 …… 16

2-2-3 Laplace 变换的基本定理 …… 16

2-3 通过部分因式展开来求 Laplace 反变换 …… 19

2-3-1 部分因式展开 …… 19

2-4 应用 Laplace 变换法求解线性常微分方程 …… 22

2-5 线性系统的脉冲响应与传递函数 …… 24

2-5-1 脉冲响应 …… 25

2-5-2 单输入单输出系统的传递函数 …… 25

2-5-3 多变量系统的传递函数 …… 26

2-6 MATLAB 工具和案例分析 …… 28

2-6-1 传递函数工具箱的介绍及其使用 …… 28

2-7 小结 …… 38
复习题 …… 38
参考文献 …… 38
习题 …… 39
附加计算机练习题 …… 40
第三章 方块图和信号流图 …… 41
3-1 方块图 …… 41
3-1-1 控制系统的方块图 …… 42
3-1-2 方块图和多变量系统传递函数 …… 43
3-2 信号流图 …… 45
3-2-1 信号流图的基本元素 …… 45
3-2-2 信号流图的基本性质 …… 46
3-2-3 信号流图术语的定义 …… 47
3-2-4 信号流图代数 …… 48
3-2-5 反馈控制系统的信号流图 …… 49
3-2-6 信号流图增益公式 …… 50
3-2-7 在输出节点与非输入节点间应用增益公式 …… 52
3-2-8 增益公式在方块图中的应用 …… 52
3-3 状态图 …… 54
3-3-1 根据微分方程得到状态图 …… 55
3-3-2 根据状态图得到传递函数 …… 56
3-3-3 根据状态图得到状态方程和输出方程 …… 56
3-4 MATLAB 工具和案例分析 …… 58
3-5 小结 …… 60
复习题 …… 61
参考文献 …… 61
习题 …… 62
第四章 物理系统的模型 …… 72
4-1 引言 …… 72
4-2 电气网络的模型 …… 72
4-3 机械系统的模型 …… 75
4-3-1 平移运动 …… 75
4-3-2 旋转运动 …… 77
4-3-3 平移运动与旋转运动之间的转换 …… 79
4-3-4 齿轮传动链 …… 80
4-3-5 齿隙和死区 (非线性特性) …… 82
4-4 机械系统的方程 …… 82

4-5 控制系统中的感应器和编码器 …… 87
4-5-1 电位计 …… 87
4-5-2 转速计 …… 91
4-5-3 增量式编码器 …… 93
4-6 控制系统中的直流电动机 …… 95
4-6-1 直流电动机的基本操作原理 …… 96
4-6-2 永磁直流电动机的基本分类 …… 96
4-6-3 永磁直流电动机的数学模型 …… 98
4-7 非线性系统的线性化 …… 101
4-8 具有传输滞后的系统 (时滞系统) …… 105
4-8-1 通过有理函数近似表达时滞函数 …… 106
4-9 一个太阳观测系统的例子 …… 107
4-9-1 坐标系统 …… 108
4-9-2 误差辨别器 …… 108
4-9-3 反向放大器 …… 109
4-9-4 伺服放大器 …… 109
4-9-5 转速计 …… 109
4-9-6 直流电动机 …… 109
4-10 MATLAB 工具和案例分析 …… 110
4-11 小结 …… 110
复习题 …… 111
参考文献 …… 111
习题 …… 112
第五章 状态变量分析 …… 127
5-1 引言 …… 127
5-2 状态方程的向量-矩阵描述 …… 127
5-3 状态转移矩阵 …… 129
5-3-1 状态转移矩阵的意义 …… 130
5-3-2 状态转移矩阵的性质 …… 130
5-4 状态转移方程 …… 131
5-4-1 从状态图求状态传递方程 …… 133
5-5 状态方程与高阶微分方程之间的关系 …… 135
5-6 状态方程与传递函数之间的关系 …… 137
5-7 特征方程、特征值和特征向量 …… 139
5-7-1 特征值 …… 140
5-7-2 特征向量 …… 141
5-8 相似变换 …… 143

5－8－1 相似变换的不变特性 …… 143
5－8－2 能控标准型(CCF) …… 144
5－8－3 能观标准型(OCF) …… 145
5－8－4 对角标准型(DCF) …… 147
5－8－5 Jordan 标准型(JCF) …… 148
5－9 传递函数的分解 …… 149
5－9－1 直接分解 …… 150
5－9－2 串级分解 …… 153
5－9－3 并行分解 …… 154
5－10 控制系统的能控性 …… 156
5－10－1 能控性的概念 …… 157
5－10－2 状态能控性的定义 …… 157
5－10－3 能控性的其他检验方法 …… 158
5－11 线性系统的能观性 …… 160
5－11－1 能观性的定义 …… 160
5－11－2 能观性的其他检验方法 …… 160
5－12 能控性、能观性和传递函数之间的关系 …… 161
5－13 能控性和能观性的不变性定理 …… 163
5－14 实例 磁球悬浮系统 …… 164
5－15 MATLAB 工具和案例分析 …… 167
5－15－1 状态空间分析工具箱的使用说明 …… 167
5－15－2 状态空间应用的 TFsym 工具箱的使用说明 …… 174
5－15－3 另一个例子 …… 174
5－16 小结 …… 180
复习题 …… 181
参考文献 …… 181
习题 …… 181
附加计算机练习题 …… 194
第六章 线性控制系统稳定性 …… 195
6－1 引言 …… 195
6－2 连续时间系统的有界输入、有界输出(BIBO)稳定性 …… 195
6－2－1 特征方程的根和稳定性之间的关系 …… 196
6－3 连续时间系统的零输入和渐近稳定性 …… 197
6－4 稳定性判定方法 …… 198
6－5 Routh－Hurwitz 判据 …… 199
6－5－1 Routh 表格[1] …… 200
6－5－2 当 Routh 表格提前中止时的特殊情形 …… 201

需要全本请访问 www.ertongbook.com

6-6 MATLAB 工具和案例分析 …… 204
6-7 小结 …… 207
复习题 …… 209
参考文献 …… 209
习题 …… 209
附加计算机练习题 …… 213
复习题答案 …… 213

第七章 控制系统的时域分析 …… 214
7-1 连续时间系统的时间响应 引言 …… 214
7-2 控制系统时间响应的典型测试信号 …… 215
7-3 单位阶跃响应和时域描述 …… 216
7-4 稳态误差 …… 217
7-4-1 线性连续时间控制系统的稳态误差 …… 218
7-4-2 非线性系统元件产生的稳态误差 …… 228
7-5 一阶系统的时间响应 …… 229
7-5-1 直流电动机的转速控制 …… 229
7-6 典型二阶系统的暂态响应 …… 230
7-6-1 阻尼比和阻尼因子 …… 232
7-6-2 自然无阻尼频率 …… 232
7-6-3 最大超调 …… 235
7-6-4 延迟时间和上升时间 …… 236
7-6-5 调节时间 …… 238
7-7 定位控制系统的时域分析 …… 241
7-7-1 单位阶跃暂态响应 …… 244
7-7-2 稳态响应 …… 246
7-7-3 单位斜坡输入的时间响应 …… 247
7-7-4 一个三阶系统的时间响应 …… 248
7-8 传递函数增加零极点的影响 …… 251
7-8-1 在前向通道传递函数中增加一个极点 单位反馈系统 …… 251
7-8-2 在闭环传递函数中增加一个极点 …… 252
7-8-3 在闭环传递函数中增加一个零点 …… 254
7-8-4 在前向通道传递函数中增加一个零点 单位反馈系统 …… 254
7-9 传递函数的主导极点 …… 256
7-9-1 相对阻尼比 …… 257
7-9-2 基于稳态响应的考虑,忽略次要极点的适当方法 …… 257
7-10 用低阶系统近似高阶系统 标准方法 …… 258
7-10-1 近似准则 …… 258

7－11 MATLAB 工具和案例分析 …… 266
7－12 小结 …… 280
复习题 …… 280
参考文献 …… 281
习题 …… 281
附加计算机练习题 …… 288
判断题答案 …… 288
第八章 根轨迹法 …… 289
8－1 引言 …… 289
8－2 根轨迹 (RL) 的基本性质 …… 290
8－3 根轨迹的性质 …… 293
8－3－1 $K=0$ 和 $K=\pm\infty$ 的点 …… 293
8－3－2 RL 的分支数 …… 294
8－3－3 RL 的对称性 …… 294
8－3－4 RL 的渐近线交角：$|s|=\infty$ 处 RL 的行为 …… 294
8－3－5 渐近线的交点 (质心) …… 295
8－3－6 实轴上的根轨迹 …… 295
8－3－7 RL 的出射角与入射角 …… 296
8－3－8 RL 与虚轴的交点 …… 296
8－3－9 RL 的分离点 (鞍点) …… 296
8－3－10 根敏感度 [17,18,19] …… 297
8－4 根轨迹设计 …… 300
8－4－1 在 $G(s)H(s)$ 中增加零极点的影响 …… 300
8－5 根轨迹族：多参数变化情形 …… 306
8－6 MATLAB 工具与根轨迹 …… 311
8－7 小结 …… 314
复习题 …… 314
参考文献 …… 315
习题 …… 316
判断题答案 …… 320
第九章 频域分析 …… 321
9－1 引言 …… 321
9－1－1 闭环系统的频域响应 …… 322
9－1－2 频域性能指标 …… 323
9－2 标准二阶系统的 M_r、ω_r 和带宽 BW …… 324
9－2－1 谐振峰值和谐振频率 …… 324
9－2－2 带宽 …… 326

9－3 增加开环传递函数零点的影响 …… 328
9－4 增加开环传递函数极点的影响 …… 332
9－5 Nyquist 稳定性判据:基础 …… 333
9－5－1 稳定性问题 …… 333
9－5－2 环绕和包围的定义 …… 334
9－5－3 环绕和包围次数 …… 335
9－5－4 幅角原理 …… 336
9－5－5 Nyquist 曲线 …… 339
9－5－6 Nyquist 判据以及 $L(s)$ 或 $G(s)H(s)$ 图 …… 340
9－6 具有最小相位传递函数系统的 Nyquist 判据 …… 340
9－6－1 应用 Nyquist 判据于非严真的最小相位传递函数 …… 341
9－7 根轨迹和 Nyquist 图的关系 …… 342
9－8 示例:最小相位传递函数的 Nyquist 判据 …… 344
9－9 增加 $L(s)$ 的极点和零点对 Nyquist 图的形状的影响 …… 348
9－10 相对稳定性:增益裕量和相位裕量 …… 352
9－10－1 增益裕量 …… 354
9－10－2 相位裕量 …… 355
9－11 用 Bode 图作稳定性分析 …… 357
9－11－1 具有纯时滞的系统的 Bode 图 …… 358
9－12 Bode 图的幅值曲线的斜率与相对稳定性的关系 …… 361
9－12－1 条件稳定系统 …… 361
9－13 用幅值－相位曲线进行稳定性分析 …… 364
9－14 幅值－相位图中的定常 M 曲线:Nichols 图 …… 365
9－15 Nichols 图应用于非单位反馈系统 …… 371
9－16 频域中敏感度研究 …… 372
9－17 MATLAB 工具和案例分析 …… 374
9－18 小结 …… 386
复习题 …… 387
参考文献 …… 388
习题 …… 388
附加计算机练习题 …… 396
判断题答案 …… 396

第十章 控制系统的设计 …… 397
10－1 引言 …… 397
10－1－1 设计要求 …… 397
10－1－2 控制器结构 …… 398
10－1－3 设计的基本原则 …… 400

10－2 PD 控制器的设计 …… 401
10－2－1 PD 控制的时域分析 …… 403
10－2－2 PD 控制的频域分析 …… 404
10－2－3 PD 控制作用总结 …… 405
10－3 PI 控制器的设计 …… 416
10－3－1 PI 控制的时域分析与设计 …… 418
10－3－2 PI 控制的频域分析与设计 …… 418
10－4 PID 控制器的设计 …… 430
10－5 相位超前控制器的设计 …… 433
10－5－1 相位超前控制的时域分析及设计 …… 435
10－5－2 相位超前控制的频域分析与设计 …… 435
10－5－3 相位超前补偿的作用 …… 450
10－5－4 单阶相位超前控制的局限性 …… 451
10－5－5 多阶相位超前控制器 …… 451
10－5－6 敏感度考虑 …… 454
10－6 相位滞后控制器的设计 …… 456
10－6－1 相位滞后控制的时域分析和设计 …… 456
10－6－2 相位滞后控制的频域分析和设计 …… 459
10－6－3 相位滞后控制的作用和局限性 …… 468
10－7 超前－滞后控制器的设计 …… 468
10－8 零极点对消设计 陷波滤波器 …… 470
10－8－1 二阶有源滤波器 …… 472
10－8－2 频域解释和设计 …… 473
10－9 前向和前馈控制器 …… 481
10－10 鲁棒控制系统的设计 …… 482
10－11 次环反馈控制 …… 491
10－11－1 速率反馈或转速计反馈控制 …… 491
10－11－2 含有源滤波器的次环反馈控制 …… 492
10－12 状态反馈控制 …… 494
10－13 通过状态反馈进行极点配置设计 …… 496
10－14 含积分控制的状态反馈 …… 500
10－15 MATLAB 工具和案例分析 …… 506
10－16 小结 …… 518
复习题 …… 519
参考文献 …… 519
习题 …… 520
判断题答案 …… 535

第十一章 虚拟实验室 …… 536
11－1 引言 …… 536
11－2 直流电动机响应的重要方面 …… 536
11－2－1 速度响应、自感效应和扰动－开环响应 …… 537
11－2－2 直流电动机的速度控制 :闭环响应 …… 539
11－2－3 位置控制 …… 540
11－3 虚拟实验系统的描述 …… 541
11－3－1 电动机 …… 541
11－3－2 位置传感器或速度传感器 …… 542
11－3－3 功率放大器 …… 542
11－3－4 接口 …… 542
11－4 SIMLab 和 Virtual Lab 软件的描述 …… 542
11－5 仿真和虚拟实验 …… 546
11－5－1 开环速度 …… 547
11－5－2 开环正弦输入 …… 549
11－5－3 速度控制 …… 551
11－5－4 位置控制 …… 553
11－6 设计项目 …… 555
11－7 小结 …… 560
参考文献 …… 560
习题 …… 560
Laplace 变换表 …… 563
译后记 …… 565

第一章　绪　论

1-1　引　言

本章目的是使读者熟悉以下几个方面的内容：

1. 什么是控制系统。
2. 控制系统的重要性。
3. 控制系统的基本组成部分。
4. 几个控制系统应用的例子。
5. 为什么绝大多数控制系统均具有反馈。
6. 控制系统的分类。

初学控制系统的人经常会问："什么是控制系统？"要回答这个问题，我们可以联系日常生活中那些需要实现某种"目标"的例子。比如在家里，为了舒适地生活，我们需要控制室内的温度和湿度；在交通领域，我们需要控制汽车和飞机精确而又安全地从一个地方到达另一个地方；在工业上，制造过程包含大量产品需要达到的指标，这些指标要满足精度和成本效益的要求。一个人能够完成许多种类的任务，包括做决定。其中有些任务，如捡起物体后再从一个地方走到另一个地方，通常是以一种程序化的方式完成的。在某些情况下，有些任务要按尽可能好的方式完成。比如在一百米短跑中，运动员期望以尽可能短的时间跑完这段距离。而一个马拉松选手不仅要尽可能快地跑完，还必须在这个过程中控制能量的消耗并设计最好的比赛策略。实现这些"目标"的方法通常包含能够实现特定控制策略的控制系统。

近年来，控制系统在现代文明和技术的发展与进步上扮演了越来越重要的角色。我们日常活动的每一个方面几乎都受到某种控制系统的影响。控制系统已经大量应用到工业的所有部门，比如产品质量控制、自动装配线、机床控制、空间技术与武器系统、计算机控制、运输系统、动力系统、机器人、微机电系统、纳米技术等等。自动控制理论还被用于社会与经济系统的控制。

1-1-1　控制系统的基本组成部分

控制系统的基本组成部分包括：

1. 控制目标。
2. 控制系统元件。

需要全本请访问 www.ertongbook.com