



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

# 反馈控制导论

**Feedback and Control for Everyone**

[西班牙] 佩德罗·阿尔韦托斯 (Pedro Albertos)

著

[澳大利亚] 艾文·马雷斯 (Iven Mareels)

范家璐 王良勇

等译

柴天佑

审校



 **机械工业出版社**  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 反馈控制导论

Feedback and Control for Everyone

[西班牙] 佩德罗·阿尔韦托斯 (Pedro Albertos) 著  
[澳大利亚] 艾文·马雷斯 (Iven Mareels)

范家璐 王良勇 等译  
柴天佑 审校

常州大学图书馆  
藏书章



机械工业出版社

Translation from English language edition:

Feedback and Control for Everyone

by Pedro Albertos and Iven Mareels

Copyright © 2010 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Right Reserved.

This title is published in China by China Machine Press with license from Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可的出口，视为违反著作权法，将受法律制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2013-8301 号。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

反馈控制导论/ (西) 佩德罗·阿尔韦托斯 (Pedro Albertos), (澳) 艾文·马雷斯 (Iven Mareels) 著; 范家璐等译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 1

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Feedback and Control for Everyone

ISBN 978-7-111-59038-5

I. ①反… II. ①佩…②艾…③范… III. ①反馈控制 - 研究

IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 017060 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: 林春泉 责任编辑: 林春泉

责任校对: 郑 婕 封面设计: 马精明

责任印制: 孙 炜

北京玥实印刷有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 17.5 印张 · 321 千字

0 001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-59038-5

定价: 79.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

本书是反馈控制理论的初级教程。第1章介绍了反馈的基本概念，并用其与动力学的关系对反馈与控制的特征和要点进行了介绍；第2~5章介绍了反馈控制中涉及的信号和系统模型；第6章分析了反馈控制的稳定性、敏感性与鲁棒性；第7章重点分析了反馈；第8、9章介绍了控制子系统的结构与组成；第10章讲述了如何设计反馈控制器，使系统满足期望运行性能的同时还具有稳定性和抗干扰能力；第11、12章介绍了反馈控制在实际领域中的应用和益处。

本书从反馈与控制的理论介绍开始，然后扩展到我们日常生活中的控制应用，将反馈控制理论和个人以及社会联系起来，使读者能更清晰、生动地了解反馈控制并学会如何应用反馈控制。本书内容浅显易懂、内容全面、从理论延伸到实际应用。

主要读者为反馈控制初学者，包括学生以及相关专业领域的工作人员，还可作为大学反馈控制理论等相关课程的入门教材。



# 译者序

非常感谢机械工业出版社让我们来翻译 Pedro Albertos 和 Iven Mareels 两位控制领域全球知名专家著的《Feedback and Control for Everyone》一书，非常荣幸地将关于反馈控制的优秀外文书籍翻译成中文，以供国内更多对反馈控制感兴趣的学者和技术人员等阅读和研究，以推动反馈控制理论及应用在国内的发展。

2011 年秋，我博士毕业加入东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室工作，彼时原著作者、IFAC 前主席 Pedro Albertos 教授正利用学术休假与我们合作教学、科研。当时，Albertos 教授应邀加入柴天佑院士（实验室主任）领衔的授课团队，为东北大学信息科学与工程学院自动化专业的大一新生讲授“自动化导论”等系列课程，而我被指派为翻译。当时，Albertos 教授的授课讲义是以这本《Feedback and Control for Everyone》为基础，其内容深入浅出，一些复杂的专业理论知识通过用易于理解的例子进行分析讲解，让学生们听得津津有味，不再感到专业的理论知识枯燥乏味。而且 Albertos 教授纯正的英文、让学生们感到和一个纯正的英文讲述者进行学术交流是一件很激发兴趣和交流欲的事，所以学生们和 Albertos 教授全程的沟通和互动都很顺畅和很积极，我这个翻译在课堂上完全没有了用武之地。也就是那次课学生对这门课的反应和反响以及那种热烈的课堂气氛，让我萌生了将这部经典专著译成中文版本的想法，想必在东北大学之外，也有很多学生以及从事相关专业领域的从业人员会对这本书的内容有兴趣，也相信将这本书翻译成中文会帮助更多的人解决求学或在实际工作中遇到的反馈控制问题。经过提议，Albertos 教授和柴天佑院士都表示很支持，随后我便与实验室的王良勇老师一起开始了本书的翻译工作。

对于刚毕业的青年教师，在教学与学术成长的路上既要忙于发表论文和申请项目，还要服务于实验室的各方面建设，所以白天很难有时间集中进行本书的翻译工作。通常是在夜深人静时在书房进行翻译工作，常常是东方露出鱼肚白的清晨伴我左右，这种安静的环境也让我能更加专心、仔细地进行翻译，尽最大努力翻译准确，不曲解原著对反馈控制的解释与介绍，尽量不让读者因为翻译的不准确而造成理解的偏差。

初稿出炉后，每次趁 Albertos 教授来访时一起讨论，推敲一处处可能存在翻译不准确的地方并进行修改。柴天佑院士也在百忙之中对全书进行了审校。在整个翻译过程中，我们也得到了流程工业综合自动化国家重点实验室研究生们的帮助，他们分别是高伟男、路兴龙、崔莹、张也维、郭单、曲钧天、杨霄、崔文

娟、张猛和薛文倩。成稿之后，《控制工程》编辑部主任高敏教授也对全文进行了再次审核。在此，一并感谢大家！

不论是我和良勇老师本人，还是帮忙的研究生们，虽然我们对反馈控制都比较熟悉，但难免会有检查遗漏等原因造成的错误，敬请同行和读者赐教。

范家璐

2017年11月

# 原书前言

我们着手撰写一部关于控制与反馈导论的书始于意识到很少有人从学术圈子外介绍其主要思想。尽管我们自我介绍是控制工程师，实际上我们被反复提醒一个事实：对于控制工程和控制技术，大众并没有普遍的了解。所以，也就免不了得到一个“什么是工程师？”的回复。我们不禁怀疑大部分控制工程师甚至都不这样自我介绍，因为这势必导致一场糟糕的交流。

同事、朋友和合作者们会经常问我们一些相当本质性的问题，比如：“你在控制中研究的是什么？有没有这个领域的非专业性导论？我能不能通过阅读一些资料来对这个领域的系统理论有一定的了解？你们主要尝试解决什么问题？主要结果是什么？”。为了回答以上问题，我们可以给出一大堆以数学为基础的技术文献，这对于工程师或数学系毕业生来说是完全可以接受的，但是对于大多数人来说却是一个难以跨越的障碍。我们这种欠妥的回复充满了对该领域的历史和系统原理的亵渎，这不禁让人紧皱眉头，引起惊讶、质疑和反对。

但是你怎样才能撰写一个能针对一切事物并能应用到任何地方的理论呢？很显然，抽象化是一个好的方法，对于工程师来说，具有一定精度的抽象化是一条通往数学的道路。

这个任务看上去很难。其实我们可以很容易地理解为什么在使大众广泛接受控制理论与控制工程方面我们做得这么少。事实上，理由非常容易找到。

- 有一些更合格、更有资格的人应该或者将要去去做这件事。
- 我们的同行不会赞成我们草率的做法，或者其他可能发现了现在的形势仍然很严峻。这是一个值得称赞的追求，但是失败的可能性大于成功。
- 我们可能不能做这样的判定，因为这个领域包罗万象，发展得太快而且还不成熟，应该晚一点再提出完整的想法。
- 做研究更重要，还有很多事应该做并且能做，至少做研究可以拓宽知识面。

在一些朋友的鼓励下，特别是 Petar Kokotovic 和我们家人诚挚的支持，我们终于冲破了以上的托辞，充分地挑战自己，开始撰写任何人都能看得懂的控制。并不是因为我们相信一定会把它做好，而是我们没有把成败当回事。控制理论和控制工程都是工程世界的一种手段，反馈是自然世界的基础，也是工程世界的基础。反馈与控制值得被广泛关注。

### 本书撰写的方式与地点：

我们的写作过程历经了整整五年，整个过程就好像走两步退一步，再走两步再退一步。在与我们的朋友 Karl J. Åström 讨论如何让青少年和儿童了解这些复杂的问题时，我们发现了一本具有挑战性的书籍，叫《生命工作的方式》(Hogland 和 Dodson 1995)，这本书指出将关键的概念用简单的语言表达出来是可能的。在这本书中，作者运用了大量的实例说明，虽然我们不会像他这样做，但是我们会参考他的做法并且开始了相关的工作。

我们日常生活之外的思维集中时段（研究、教学、管理、日常事务，都在一个熟悉的环境）是将这本书应用到生活中的关键。我们经常拿出一周的时间，与朋友、家人和同事隔绝，在陌生的学术场景中，从网络和移动电话中解放出来，专心撰写、修改这本书，还有更重要的就是以批判性的眼光审视我们的工作：“这里数学公式太多了”“不，这太欠缺了”“你可能看不懂我们想在这里阐释的微妙想法”“到底有没有人能够明白我们想说的是什么”“显然这个太难了”“抱歉，这样太浅显了”“这里没有讲到任何实质性的内容”。

所以，直接回到我们所熟悉的领域是很简单的事，但我们面临的挑战是让每个人都能看懂这本书。从这个意义上说，我们非常感激大批高中生和我们学校的二年级学生自愿去阅读本书并提供极富价值的“反馈”意见。事实上，在这些年轻的“合作者”阅读之后，我们还增加了另外的事例和进一步的解释。非常感谢 Miguel、Sergio、Carmen、Tamara、Pablo、Miguel Angel、Felix、Saul、Ismael、Pura、Alvaro、Mercedes 等人。

我们去了墨尔本、瓦伦西亚、布拉格、塞维利亚、新加坡、圣地亚哥和雅典，最后又回到墨尔本，在这些地方完成了本书的撰写。对那些曾经热情招待我们的朋友表示深深的感谢！

### 期待什么：

如果你期待从这本书中找到优美的数学公式，想对“控制是什么，它的最大贡献是什么”这类问题寻求精确的表达，请不要继续了，你现在就可以把书放下了。我们已经放弃了尝试任何精确的、一般性的或完整的表达。简洁的表述往往无法做到精确性和一般性，我们有限的知识导致无法做到完美的表达。尽管简洁的表述胜于精确的表达，但由于精确表述的重要性和细节信息的缺失，所以在这些问题上，我们不想误导大众。我们的主要目的是提供一种直观性和激励性，传达一些主要思想的魅力以及工程成就的影响。如果我们能够激发一些人继续研究下去，去阅读或者学习技术文献的热情，那对我们来说是莫大的鼓励。

如果你期望这本书中没有一点公式，抱歉，又一次让你失望了。虽然我们删减了大量的数学公式，但是，显然控制和系统理论是数学领域的问题。它需要抽象的数学去支撑，如果将其全部去掉，那将会扭曲它的本质。数学公式的使用非



常有限，大部分的文本都没有依赖数学公式。但一些地方偶尔会出现方程和数学表达，但是在首次阅读时可以跳过大部分的数学公式，而且这些公式都有文字注解。对于那些和我们一样充满兴趣，愿意学习信号和系统背后的思想，或是推动其发展的人来说，高级数学知识和计算机专业知识将会是生活的一部分。这个历程不无艰辛，但是收获一定会不少。

我们的目标是，通过对微积分的基本理解，就能理解本书中的大部分内容。我们也希望这本书能够给予那些希望略过数学表述也能理解书中内容的读者足够的空间。由你们来评判我们的工作。

除了一些思想之外，我们还希望通过实例对工程技术进行一些说明，包括它能做什么，被应用到哪里，在哪里有发展。毕竟技术创新是工程师要做的事。

### 怎样阅读本书：

从本质上说，我们通过直觉和简单的例子来阐述什么是重要的，什么是无关紧要的。

你可以随机地阅读不同的章节，不需要太多背景作为依托，你就可以在每个章节找到我们想表达的思想。这些思想的发展有特定的顺序，因此读者不难理解书中的内容。第1章是对本书的一个总结和统领，其内容在后面的章节中都有体现。有一些“审稿人”建议我们最好先定义概念，然后通过具体事例及应用对其进行阐述。从这本书开始，我们决定不这么做，确切地说，是在第3章，列举了很多不同的例子，在这些例子中，反馈和控制的存在具有不可辩驳的重要性。

第1章绪论部分，介绍了该领域的一般性，并给出了一些通用的词汇。大部分思想和概念都会在后面被反复大量的描述。余下的章节对这里用到的例子从不同的角度进行了分析和重现。和其他章节的结尾一样，本章的结尾会揭示主要的观点，并为后面的阅读和学习提供线索。

第2章介绍了类比法在信号和系统中的应用，我们将类比视为抽象概念的核心，并将它广泛应用在信号和系统中。主要目的就是使人们相信只要限制条件清晰，对任何事情建立一个有意义的理论并付之应用是可能的。类比并不是只应用在系统理论研究领域。事实上，类比在心理学和社会科学应用更为广泛。它作为一种方法论，能够有效地从简单的环境到更加类似且复杂的情形下进行理论扩展。

在第3章，描述了一些以反馈和控制作为基础的过程。此外，我们还挑选了一些生产过程中的工程实例，比如瓷砖生产、洗车、大型灌溉的分布系统和无线电天文天线。我们主要关注什么被测量了，这些测量信息怎样决定下一步工作，以及决定是怎样执行的，进而控制未来的过程行为。如果感知、推理、计算和决断都能自动进行，说明我们正在处理的是一个自动控制系统。如果控制响应于测量，说明反馈起了作用。许多人造的控制系统都来源于自然，在这些自然控制过

程中，反馈无处不在。在人体内部，内稳态亦是基于反馈的。不仅如此，大多数心理学和社会学过程均直接或间接地得益于反馈。

我们需要理解的两个关于反馈的基本概念是信号和系统；一方面在反馈执行之前，必须测量信号；另一方面系统的行为受到反馈的影响。此外，无论何时，当谈到能产生和修正信号的系统，信号和系统总是交错在一起。信号会在第4章里展开介绍。什么是信号？它有什么性质？我们怎样来描述它？我们怎样来处理它？像以往一样，我们会用启发性的例子来传达这些信息，每个人都能在他周围的环境中识别很多信号：声音（音乐、噪声、鸟鸣）、感觉（温度、湿度、亮度、嗅觉）以及很多其他物理或心理上的数值量（力、速度、位移、重量、幽默、疲劳、注意力）。因为定量推理是反馈的核心，所以这里的主题从工程学的角度展开，而信号的数学表达形式占极其重要的部分，因此某些特定的数学方法将被用到。但是，讲述的方式和推理过程并不是数学形式的。

模型是系统理论和反馈的核心。第5章介绍了在处理系统和模型时用到的一些基本概念和工具。对真实过程，模型是一种便捷的描述，而便捷通常意味着“估算”。我们主要阐述一些简单的例子来展现模型的效力，并简要地讨论怎样完成建模以及关注它结构上的特性。

某些系统特性在反馈中至关重要，比如稳定性、敏感度和鲁棒性等，这些将在第6章作简要介绍。当然，这些概念也是非常严谨的。事实上，在研究系统里，理论上没有终点。毕竟它是一种关于所有事物的理论，所以仍需投入大量的人力。尤其是在处理大规模复杂的系统时，该理论还处于初级阶段。

第7章介绍了本书的核心问题，即反馈。关于反馈的概念在前面的章节中已介绍了大部分概念，本章重点讨论反馈的优点与缺点。优点是反馈在很大程度上改善了系统的行为，虽然它也在可行域上增加了限制。

这里需要重点强调的是，控制或反馈的某些形式在表现良好的系统中是很有有效的。控制子系统和控制交互过程中可能存在的结构是第8章的主题。在本章中，读者可以了解到很多控制与过程交互的方式，以及如何改变控制效用和控制能力的方式。结论是，如果在设计之初，综合考虑过程和控制，系统可以获得最好的性能。

科技是反馈发展的重要动力，反过来，反馈又是科技的主要驱动力。构成控制子系统、传感器、通信、滤波器、执行机构、计算机和软件的不同元素将在第9章进行介绍。本章介绍了一些现存的、可以实施控制的硬件和软件。

接下来介绍设想、设计和测试。许多计算工具支持的设计以及实用方法都可用来进行控制设计，其中一些方法将在第10章作简要描述。参与控制设计的模型、目标、约束和信号的多样性使列举出的所有方法无法实现。因此，在这个领域仍有很多需要做的工作。控制设计需要源源不断的创新和创造力，以及很多成

功的方法。此外，尽管我们已经表明正确的控制方法是在设计之初就把它视为总设计的一部分，但据我们所知，在工程设计上沿用这个控制方法并未获得实质性的进展。

很明显，我们相信反馈和控制至关重要，而且它给社会带来很多益处，在第11章将重点介绍这部分内容。我们希望读者还能发现其他益处。事实上，本书的目的就是让读者了解合理地利用反馈和控制带来了多少益处、实现了多少益处，从而使这项隐藏的技术清晰地展现在众人面前。客观起见，我们也指出了反馈所带来的风险，能意识到这些弊端的读者，表明已经对这个问题了解得很清晰了。

在第12章，将会对控制进行总结，并对不可预测的未来作出展望。一些未来的发展趋势已经很明了。一些即将发生的技术革新也很容易发现，但我们将作出一些更大胆的预测。未来是开放的，我们期待看到我们的读者在“反馈”的路上能取得更大的进步。

#### 阅读顺序：

读者可以依照正常的阅读顺序，或者也可以按一个更简单的顺序来阅读，例如，从第1~3章，然后跳到最后两章，然后从第8~10章，这里只用了一些很简单的数学，最后读第4~7章，这4章涉及一些数学公式，以便更好地理解其中介绍的概念。

此外，每个章节将用一张插图来重点阐明该章节提到的概念要素。我们要感谢 Arturo 细致的工作使得书中的工程术语可以有正确、简单的表达。

作者

# 目 录

译者序	
原书前言	
<b>第 1 章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 反馈	2
1.2 框图、系统、输入、输出	3
1.3 关于框图的更多介绍	6
1.3.1 录音	6
1.3.2 串级水箱	7
1.3.3 框图总结	8
1.4 反馈和动力学	10
1.4.1 淋浴中的反馈	10
1.4.2 回声	10
1.4.3 锅炉水位控制	10
1.4.4 出生与死亡的过程	11
1.4.5 制造业和机器人	12
1.4.6 反馈设计与综合	12
1.5 系统、因果关系、平稳性和线性	13
1.6 模型	15
1.6.1 建模	16
1.6.2 系统连接	17
1.7 基本的控制回路	18
1.8 控制设计	19
1.9 结束语	20
1.10 注释与拓展阅读	21
<b>第 2 章 类比方法</b>	<b>23</b>
2.1 方法介绍和研究意义	23
2.2 信号及其图形表示	24
2.3 信号与模拟信号	28
2.4 系统举例	30
2.4.1 加热烤箱	30



2.4.2 向厨房水池中注水 .....	31
2.4.3 对电容器充电 .....	32
2.4.4 计算机算法 .....	32
2.5 这些系统的例子具有怎样的相似性? .....	34
2.6 离散时间还是连续时间? .....	34
2.7 类比系统 .....	35
2.8 综合式系统和分布式系统 .....	37
2.9 振幅 .....	38
2.9.1 能量交换 .....	38
2.9.2 系统观点 .....	39
2.10 注释与拓展阅读 .....	40
<b>第3章 反馈与控制 .....</b>	<b>42</b>
3.1 引言和研究目的 .....	42
3.2 制造瓷砖 .....	43
3.3 重力给料的灌溉系统 .....	47
3.4 射电天文学天线的伺服设计 .....	53
3.5 简单自动控制 .....	58
3.6 体内平衡 .....	59
3.7 社会系统 .....	64
3.7.1 简单的控制结构 .....	66
3.7.2 其他控制方法 .....	69
3.8 注释与拓展阅读 .....	70
<b>第4章 信号分析 .....</b>	<b>72</b>
4.1 引言和研究目的 .....	72
4.2 信号与信号分类 .....	73
4.2.1 数学算法定义的信号 .....	74
4.2.2 周期信号 .....	79
4.2.3 随机信号 .....	81
4.2.4 无序信号 .....	82
4.3 信号变换 .....	83
4.4 信号测量 .....	85
4.4.1 信号大小 .....	85
4.4.2 信号采样 .....	86
4.4.3 周期信号采样:混淆问题 .....	87
4.5 信号处理 .....	89
4.6 记录和重放 .....	90

## XII 反馈控制导论 Feedback and Control for Everyone

4.6.1 语音记录及重现 .....	92
4.7 注释与拓展阅读 .....	94
<b>第5章 系统和模型 .....</b>	<b>96</b>
5.1 引言与目的 .....	96
5.2 系统和模型 .....	97
5.2.1 通过信号获取模型 .....	97
5.2.2 从系统到模型 .....	99
5.2.3 模型的分类 .....	100
5.3 连接系统 .....	101
5.4 简化假设 .....	103
5.5 一些基本的系统 .....	105
5.5.1 线性增益 .....	105
5.5.2 传输延时 .....	107
5.5.3 积分器 .....	108
5.5.4 反馈环的积分器 .....	110
5.6 线性系统 .....	110
5.6.1 线性模型 .....	111
5.6.2 线性系统的框图联结 .....	112
5.7 系统分析 .....	115
5.7.1 时间响应 .....	115
5.7.2 频域 .....	116
5.7.3 串联系统 .....	118
5.7.4 积分器串联且加反馈 .....	119
5.8 线性系统的合成 .....	120
5.9 线性系统的状态空间描述 .....	122
5.10 谈谈有关离散时间系统的事 .....	124
5.11 非线性模型 .....	125
5.12 注释与拓展阅读 .....	126
<b>第6章 稳定性、敏感性和鲁棒性 .....</b>	<b>127</b>
6.1 引言与目的 .....	127
6.2 举例 .....	128
6.3 自治系统的稳定性 .....	130
6.4 线性自治系统 .....	132
6.4.1 一般的时间离散自治线性系统 .....	133
6.4.2 时间连续线性系统 .....	134
6.4.3 稳定性的探索 .....	135

6.5 非线性系统: 李雅普诺夫稳定性 .....	138
6.5.1 李雅普诺夫第一方法 .....	139
6.5.2 能量与稳定性: 李雅普诺夫第二方法 .....	139
6.6 非自治系统 .....	141
6.6.1 线性系统 .....	141
6.6.2 非线性系统 .....	142
6.6.3 输入到状态稳定和串级 .....	144
6.7 平衡之外的知识 .....	145
6.7.1 限制圆和混沌 .....	145
6.8 敏感性 .....	147
6.8.1 鲁棒性 .....	148
6.8.2 敏感度的计算 .....	149
6.8.3 一般的方法 .....	149
6.8.4 相对于系统动态变化的灵敏度 .....	150
6.8.5 灵敏度测量 .....	151
6.9 注释与拓展阅读 .....	151
<b>第7章 反馈</b> .....	<b>153</b>
7.1 引言 .....	153
7.2 内部反馈 .....	154
7.3 反馈与模型的不确定性 .....	156
7.4 系统稳定性与调节 .....	158
7.4.1 输入-状态稳定性和反馈系统 .....	159
7.4.2 线性反馈系统 .....	161
7.4.3 奈奎斯特稳定性判据 .....	162
7.4.4 带有延时的积分器和负反馈 .....	163
7.5 抗干扰 .....	164
7.5.1 噪声反馈 .....	165
7.6 两自由度控制 .....	167
7.7 反馈设计 .....	167
7.8 讨论 .....	169
7.9 评论与深度阅读 .....	169
<b>第8章 控制子系统</b> .....	<b>171</b>
8.1 引言 .....	171
8.2 信息流 .....	174
8.3 控制目标 .....	175
8.4 开环 .....	178

8.5	闭环	181
8.6	其他控制结构	183
8.6.1	两自由度控制	183
8.6.2	串级控制	183
8.6.3	选择控制	184
8.6.4	逆响应系统	185
8.7	分布式和分级控制	186
8.8	过程与控制协同设计	188
8.8.1	过程尺度标定及其控制	188
8.8.2	过程再设计	189
8.9	简评与扩展阅读	190
<b>第9章</b>	<b>控制子系统的组成</b>	<b>192</b>
9.1	引言	192
9.2	传感器和数据采集系统	195
9.2.1	变换器	197
9.2.2	软测量	198
9.2.3	通信和联网	199
9.2.4	传感器和执行器网络	200
9.3	控制器	201
9.3.1	自动机和 PLC	201
9.3.2	开关控制	202
9.3.3	连续控制: PID	203
9.4	计算机控制器	204
9.5	执行器	206
9.5.1	智能执行器	208
9.5.2	双重执行器	208
9.6	结论和扩展阅读	209
<b>第10章</b>	<b>控制设计</b>	<b>211</b>
10.1	引言	211
10.2	控制设计	214
10.3	局部控制	217
10.3.1	逻辑控制与基于事件的控制	217
10.3.2	跟踪和调节	219
10.3.3	交互作用	223
10.4	自适应与学习	225
10.4.1	模型参考自适应系统: MIT 准则	225



10.4.2	自校正控制 .....	226
10.4.3	增益调度 .....	227
10.4.4	学习系统 .....	229
10.5	监督控制 .....	230
10.6	优化控制 .....	232
10.6.1	控制硬盘驱动器的读写磁头 .....	232
10.6.2	模型预测控制 .....	233
10.7	总结 .....	235
10.8	结论和扩展阅读 .....	235
<b>第 11 章</b>	<b>控制的益处 .....</b>	<b>237</b>
11.1	引言 .....	237
11.2	医学应用 .....	238
11.3	工业应用 .....	240
11.3.1	安全和可靠性 .....	241
11.3.2	能量、原料或是经济效益 .....	241
11.3.3	可持续性 .....	242
11.3.4	更好地利用基础设施 .....	242
11.3.5	使能作用 .....	243
11.3.6	其他应用领域 .....	244
11.4	社会风险 .....	245
11.5	注解和延伸阅读 .....	245
<b>第 12 章</b>	<b>展望 .....</b>	<b>247</b>
12.1	引言 .....	247
12.2	从模拟控制器到分布式网络控制 .....	247
12.2.1	嵌入式控制系统 .....	248
12.2.2	网络化控制系统 .....	250
12.2.3	信息物理系统 .....	251
12.3	从自动操作者到类人机器人 .....	252
12.3.1	类人挑战 .....	253
12.3.2	主从系统 .....	253
12.4	控制中的人工智能 .....	254
12.4.1	环境智能 .....	256
12.4.2	智能体 .....	256
12.5	系统和生物学 .....	257
12.5.1	生物系统建模 .....	258
12.5.2	生体模仿学 .....	258