

O'REILLY®



企业级编程与 控制理论

Feedback Control for Computer Systems:
Introducing Control Theory to Enterprise Programmers

[美] 菲利普·K. 雅内特 (Philipp K. Janert) 著

方敏 朱嵘 译



清华大学出版社

企业级编程与控制理论

[美] 菲利普·K.雅内特 (Philipp K. Janert) 著

方敏 朱嵘 译

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书包含四个部分和一个附录。第 I 部分“基础篇”讲述了为什么需要反馈控制，反馈系统和企业级编程的关系，系统的动态特性，控制器，识别输入输出信号灯。第 II 部分“实践篇”回顾了理论，介绍了测量传递韩溯，PID 控制调整，实现以及通用的反馈架构。第 III 部分“案例研究篇”包含控制系统模拟、高速缓存命中率、广告推送、扩展服务器、队列控制、冷却风扇速度、控制游戏引擎的内存消耗等内容。第 IV 部分再次回到理论，帮助读者建立实践与理论的联系，掌握控制理论在企业级编程中的实际应用。

本书适合具有一定编程基础并关注性能提升的读者阅读。

Copyright © 2014 Philipp K. Janert. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition, by O'Reilly Media, Inc., is published by Tsinghua University Press, 2018. Authorized translation of the original English edition, 2014 O'Reilly Media, Inc., the owner of all rights to publish and sell the same. All rights reserved including the rights of reproduction in whole or in part in any form.

本书之英文原版由 O'Reilly Media, Inc. 于 2014 出版。

本中文简体翻译版由 O'Reilly Media, Inc. 授权清华大学出版社于 2018 年出版。此翻译版的出版和销售得到出版权和销售权的所有者——O'Reilly Media, Inc. 的许可。

版权所有，未经书面许可，本书的任何部分和全部不得以任何形式复制。

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2018-8040

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。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

企业级编程与控制理论 / (美) 菲利普·K. 雅内特 (Philipp K. Janert) 著；方敏，朱嵘 译. —北京：清华大学出版社，2019

书名原文：Feedback Control for Computer Systems: Introducing Control Theory to Enterprise Programmers, 1st Edition

ISBN 978-7-302-52658-2

I. ①企… II. ①菲… ②方… ③朱… III. ①程序设计 IV. ①TP311.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 047099 号

责任编辑：文开琪

封面设计：Randy Comer 张 健

版式设计：方加青

责任校对：周剑云

责任印制：刘海龙

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编：100084

社 总 机：010-62770175

邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：北京国马印刷厂

经 销：全国新华书店

开 本：178mm×233mm

印 张：16.5

字 数：330 千字

版 次：2019 年 4 月第 1 版

印 次：2019 年 4 月第 1 次印刷

定 价：69.80 元

产品编号：081788-01

《企业级编程与控制理论》是一本从理论上和实践上都非常有价值的反馈控制的入门书，特别适合于系统软件工程师阅读和学习。

作者菲利普·K.雅内特（Philipp K. Janert）拥有美国华盛顿大学物理学博士学位，曾就职于亚马逊，其扎实的数学背景和实际应用反馈控制的工业经验，都反映在他这本书的写作之中。他深深地体会到，用典型的反馈控制可以解决企业计算机系统的许多问题，他观察到很多软件工程师不了解反馈控制的基本知识，所以有必要为这些编程人员提供一本专门的启蒙教材。

反馈控制是自动控制最基础的理念之一，它的概念和实现相对简单：反馈的原理是不断地对系统的实际行为与期望行为进行比较，如果实际行为不同于期望的行为，就需要采取纠正措施来减少偏差，将系统带回到理想状态。设计工程师不需要过多地了解被控制系统或过程的内部实现机理，只需要确认系统输入和输出的线性关系。反馈控制的自我调节是实时进行的，因而控制会更加精准及时，反馈具有一定的抗干扰能力，包括不确定的变化。反馈控制能力可以极大地超过人工的控制能力，可以有效地控制奇缺或昂贵系统资源的使用效率。

雅内特博士是一个很有经验的科技作家，为了使读者快速学习反馈的原理和实践，同时避免过于繁复的数学推导，他将本书分成五大部分：基础篇、实践篇、案例研究篇、理论篇和附录。他精心选择了系统软件工程师们比较熟悉的几个效率问题，如服务器数量的实时扩展、排队队列长度、搜索高速缓存命中率、互联网广告推送等，在全书中反复引用，以便加深印象、层层深入。作者介绍了基本的反馈原理和设计，例如，比例、积分和微分控制器即PID控制器，典型的闭环反馈系统结构和组件，反馈系统的动态特性和数学模型，以及时域和频域的转换和运算。如果读者想要进一步了解反馈理论，最好阅读一下理论篇和附录。本书讨论较多的是单一输入/输出的线性系统，但也介绍了如何扩展控制器来处理非线性的行为。本书还提供了计算机反馈模拟和实际代码，有兴趣的读者可以运行模拟系统，或者修改计算机模拟程序以实现具体的控制项目。

本书的内容涉及多个科技领域，包括控制理论、反馈控制系统、高等数学、计算机系统、软件编程、信号分析等。我们翻译这本书有绝对的优势，我们的大学专业分别与无线电工程有关系，所以已经理解书中提到的一些数学和技术概念。另外朱嵘女士在欧洲空中客车飞机公司有过多年的维修经历，方敏先生在微软公司的IT、服务器和云搜索等部门做过许多计算机系统项目，实际接触过的案例类似于书中作者所讨论的案例研究。在翻译中一旦觉得拿不准，我们也会做进一步的资料查询和深入分析，力求搞清楚作者想要表达的技术细节，解决所有的问题。

我们与清华大学出版社翻译出版过多部科技书籍，这次重新使用了成熟的翻译流程。要说这次翻译的特色，我们更多地从作者和读者两个角度来审视跨越语言和科技概念的交流，从作者的角度，不仅要按字面翻译成中文，而且经常会问我们自己，作者要重点强调什么，新的概念是怎么工作的，与其他概念有什么关系，数学推导是怎么来的，等等；从读者的角度，我们会思考新的概念是不是很难理解，换一种中文表达是否更清楚，因此我们对有些段落做了多次修改。一想到本书所针对的广大读者，我们觉得这些额外的努力都是值得的。作为译者，我们也很开心，因为翻译在为我们带来成就感的同时，也扩大了我们的知识面。

计算机系统的反馈控制有很多的应用场景，包括计算机系统内部和外部的控制流程，以及与外部实体设备的控制等等。特别是当今互联网、物联网、云计算和人工智能迅猛发展，新的控制需求和挑战都会出现，如果系统软件开发人员掌握了扎实的反馈控制理论和技术，在面对科技转型和智能提升时，他们都会打开思路，善于创新，实现新的解决方案。

前言

这本书的主题是关于反馈控制技术的，但是没有多少编程人员（包括其他有关人员）了解这方面的知识。这是很遗憾的，因为反馈控制技术最初的产生是为了解决软件工程师们很熟悉的问题，特别是与企业系统打交道的工程师们需要了解。反馈控制是一种技术，旨在确保大型复杂系统能够稳定地运行，甚至在有外部干扰的情况下也不会受到影响，确保有效地使用有限的资源。

如果你正在寻找这样一种系统：当数据中心的数据流量出现大的跳跃时，需要增加服务器的数量，而在这个突发事件过去之后需要减少服务器的数量，那么这本书将为你提供很好的解决方案。

什么是反馈？

反馈的原理是不断地对系统的实际行为与期望行为进行比较，如果实际行为不同于期望的行为，就需要采取纠正措施来减少偏差，将系统带回到理想状态。只要该系统还在运行，反馈过程就会不断地重复下去。

反馈控制一个很有用的功能就是不需要对被控制的系统有太多的了解。当系统出现偏差时，只要我们知道哪个方向可以调回系统，就可以建立一个反馈循环。因此，反馈是一种控制大型的、复杂的、不透明系统的最有效的技术。

另外，反馈系统具有自我调节的功能，甚至有外部干扰出现时也不受影响。由于系统的行为总是处于监视和调整中，所以，反馈系统会自动对操作状态中出现的变化进行响应。所以，当流量拥挤时，系统不需要设置专门的设施来激活额外的服务器：反馈控制器会通知负荷增加，并且增加服务器的数量直到满足所需的服务质量要求。同样，一旦流量峰值过后，控制器会根据负荷减少程度，相应地再次减少服务器的数量。

但是我们也要小心，因为太大的控制调整或者在时机不当的调整，都会造成“过量”的控制干扰。这样的控制非但不能减少期望行为和实际行为之间的偏差，反而造成以

相反方向的偏差来代替现有方向的偏差。在最坏的情况下，这些偏差的幅度会逐步增长，直到系统出现错误，甚至崩溃！

为了避免出现这样的后果，控制理论制定出一种专门的实验来分析系统的行为。从这些实验中得到的结果可以用于设计和调整循环控制，使得这些循环操作更安全，同时将准确稳定地跟踪参考值。

为什么写这本书？

反馈控制在电子学、工业流程和车辆工程领域的应用有很长的成功历史，但它的应用不限于此。反馈是自我调节的，所以即使条件意外改变，它也能够保证系统运作正常。反馈只要求对受控流程有个基本的了解，因此它可以应用在复杂和不透明的系统状况下，例如企业环境下的那些典型系统。

在这本书里，我们将研究如何把反馈原理应用到几个软件工程问题上，例如，高速缓存的最佳容量、服务器群的管理、等待队列或高速缓存的控制等。所有这些例子都向我们展示了一点，在不断变化的条件下，反馈可以帮助我们有效地使用稀缺或昂贵的资源。

然而，把反馈原理应用到计算机系统会遇到与传统应用领域不同的问题。描述计算机系统行为的规则比起现实世界系统的规则限制要少得多，所以我们会更多依赖于实际测量和现象学描述，而较少地依赖于理论分析（你会发现工业流程应用反馈方法时有着相似的情况）。同时比起物理组件来，计算机系统提供了大量控制信号，我们有更大的自由度选择最佳控制信号，当然必须了解有关的限制和折中。我们将特别关注这些问题。

由于在软件系统设计理念中很少有人讨论反馈控制，我希望人们能够意识到，反馈控制在这个方面会有很多的潜力，事实上，软件工程师通常遇到的许多问题，都可以在反馈控制上找到正确的解决方案。

如何阅读这本书？

外行人学习反馈相关理论可能会有些困难。教科书和科技文章使用了专门的术语和从现有应用领域选出的例子，这些内容有的时候掩盖了基本的概念。出现在典型反馈应用领域的问题不一定是编程人员最感兴趣的问题。同时也应该知道，许多有关反馈控制的教科书最关心底层控制理论的数学推演，而很少关注概念开发或具体实现。

这本书采用了不同的方法。理论研究可能很重要，很精彩，但不是本书的重点，我已经把这部分内容放在本书后面的第Ⅴ部分中。第Ⅰ部分简单介绍了反馈控制、系统动态和控制器设计。第Ⅱ部分描述了实现和调节控制器的大量实用技术，同时讨论了一些反馈循环“设计模型”的例子。第Ⅲ部分搜集了一组典型案例的研究，来介绍如何使用反馈方法解决计算机系统的专门问题。在每一个案例分析中，详细讨论了许多不同的方法及其折中方案。

案例研究是这本书的重头戏。我建议从第Ⅰ部分开始阅读，熟悉基本的反馈概念。然后看一下案例研究，如果需要其他的信息可以跳到第Ⅱ部分（实践篇）和第Ⅳ部分（理论篇），案例研究的顺序大体上是按照复杂度的增加来排列的。

所有案例研究都实现了计算机模拟，在这本书的互联网站上可以找到这些程序。这些程序有意写得简单和直接，以便可以容易地扩展和修改程序。动手尝试模拟代码是最好的学习方法，发现闭环系统有时会出现的神奇表现，从而真正意识到这种反馈技术确实很酷！

使用本书的约定

本书使用了下列的印刷约定。

斜体字符

代表新的术语、URL、电子邮件地址、文件名以及文件的扩展名。

固定宽度字符

用于程序列表或者段落中的程序元素，例如变量、函数名、数据库、数据类型、环境变量、语句和关键词。

黑体固定宽度字符

表明用户应该输入的命令或其他文字。

斜体固定宽度字符

展示临时文字，它需要替换为用户提供的数值，或者被上下文确定的数值。



这个图标表示小经验、建议或一般说明。



这个图标表示注意或警告。

使用代码示例

这本书的目的是帮助你完成任务的。一般情况下，如果这本书有代码例子，你可以在你的程序和文档中使用该代码。除非重新产生本书的大部分代码，否则不需要联系我们以获得使用权。例如，写的程序使用了这本书的几段代码，不需要获得使用权。销售或者分发有O'Reilly书中例子的CD-ROM是需要申请使用权的。在回答问题时提到这本书或引用代码的例子是不需要批准的。把这本书例子中的大部分代码集成到产品文档中是需要申请使用权的。

我们建议但不要求标明著作权。著作权通常包括标题、作者、出版商和ISBN。例如，“Feedback Control for Computer Systems by Philipp K. Janert (O'Reilly) . Copyright 2014 Philipp K. Janert, 978-1-449-36169-3”。

如果感到你使用代码例子的方式不属于正常的使用范围，或者不符合前面提到的使用权规定，请联系我们，电子邮箱地址是 permissions@oreilly.com。

Safari在线



Safari在线 (www.safaribooksonline.com) 是一家按需服务的数字图书馆，以图书的方式或者视频的方式提供世界技术和商业领域里顶级作者所写的专业内容。

技术专业人士、软件开发人员、互联网设计者、商业和创新专业人士使用Safari在线作为主要的资源，进行研究、解决问题、学习和认证培训。

Safari在线为机构、政府部门和个人提供了一系列产品组合和价格方案。用户可以完全搜索数据库，访问上千种书籍、培训视频和出版前的手稿，内容来自许多出版机构O'Reilly Media, Prentice Hall Professional, Addison-Wesley Professional, Microsoft Press, Sams, Que, Peachpit Press, Focal Press, Cisco Press, John Wiley & Sons, Syngress, Morgan Kaufmann, IBM Redbooks, Packt, Adobe Press, FT Press, Apress, Manning, New Riders, McGraw-Hill, Jones & Bartlett, Course Technology等。有关Safari在线的更多信息，可以访问我们的网站。

如何联系我们？

请把你对本书的意见和疑问发给出版社：

美国：

O'Reilly Media, Inc.

1005 Gravenstein Highway North

Sebastopol, CA 95472

中国：

北京市西城区西直门南大街2号成铭大厦C座807室（100035）

奥莱利技术咨询（北京）有限公司

我们还有一个服务于本书的网站。那里有示例的列表以及未来版本的计划。点击<http://bit.ly/feedback-control>了解这些信息。

评论或是询问这本书技术相关的问题，请发送邮件到bookquestions@oreilly.com。

关于本书、课程、会议以及新闻，请访问我们的网站：<http://www.oreilly.com>

在FaceBook上找到我们：<http://facebook.com/oreilly>

在Twitter上关注我们：<http://twitter.com/oreillymedia>

在YouTube上观看我们：<http://www.youtube.com/oreillymedia>

致 谢

和一群熟悉的朋友和同事做这个项目是一件很愉快的事情。麦克·罗克德斯 (Mike Loukides) 用他一贯和蔼可亲的态度指导了这个项目。马特·达内尔 (Matt Darnell) 再一次对文稿做出了巨大的贡献。当我提出要求修改数学格式和图形时, O' Reilly的制作团队全力配合我的要求。

本·皮尔斯 (Ben Peirce) 读完了全部书稿, 提供了富有价值的评论。我也要感谢奥斯汀·金 (Austin King)、克瑞斯·豪罗特 (Chris Nauroth) 和乔伊·阿德勒 (Joe Adler), 我和他们有过非常有意义的交谈。

特别感谢理查德·科瑞寇 (Richard Kreckel), 他仔细阅读了书稿的多个版本, 提出了许多极其有价值 and 洞察力的建议。

这本书是在Linux上写出来的, 也用到了IceWM、tcsh和XEmacs, 使用了LaTeX和AMS-LaTeX来准备书稿, LaTeX书稿然后转换成出版商的内部格式以便制作出版。使用Gnuplot和pic制作了图形, 第24章的根轨迹图形的计算用的是Scilab, 计算机模拟的实现用到了Python。

目 录

第 I 部分 基础篇

第1章 为什么需要反馈	3
实际的例子	4
希望最好的情况	5
建立控制	7
累加偏差	7
小结	8
模拟程序	9
第2章 反馈系统	13
系统和信号	14
跟踪误差和矫正行动	15
稳定性、性能和准确性	16
设定值	18
不确定性和变化	19
反馈和前馈	19
反馈和企业系统	20
模拟代码	20
第3章 系统动态特性	23
滞后和延迟	23
强制反应和自然反应	25
瞬时响应和稳态响应	25
物理世界和虚拟世界的动态特性	26
动态特性和记忆	27
反馈循环的滞后和延迟的重要性	28

避免延迟.....	29
理论和实践.....	30
模拟代码.....	30
第4章 控制器	33
方框图.....	34
开关控制.....	34
比例控制.....	35
为什么比例控制还不够.....	35
积分控制.....	36
积分控制改变动态特性.....	37
积分控制可以产生恒定的偏移量.....	37
微分控制.....	38
微分控制的问题.....	39
三项PID控制器.....	39
模拟代码.....	40
第5章 识别输入输出信号	41
控制的输入和输出.....	41
输入/输出关系的方向性.....	42
例子.....	43
热控制1：加热.....	43
高速缓存.....	45
服务器扩展.....	46
通过动态标价控制供需关系.....	48
热控制2：冷却.....	50
选择控制信号的标准.....	51
用于控制输入.....	51
用于控制输出.....	51
关于多维系统的注释.....	52
第6章 回顾和展望	55
反馈概念.....	55
迭代.....	55

过程知识	55
避免不稳定性	56
设定值	56
控制, 不是最优化	56

第 II 部分 实践篇

第7章 理论预习	59
----------	----

频率表示	59
传递函数	59
方框图代数	60
PID控制器	60
传递函数的极点	61
过程模型	62

第8章 测量传递函数	63
------------	----

静态输入/输出关系: 过程特征	63
实际考虑	64
阶梯输入的动态反应: 过程反应曲线	65
实践方面	66
过程模型	66
自我调节过程	67
累积过程	68
带有振荡的自我调节过程	70
非最小相位系统	71
系统识别的其他方法	72

第9章 PID 控制调整	73
--------------	----

调整的目的	73
控制器参数变化的一般影响	75
齐格勒·尼科尔斯调整方法	76
半分析调整方法	77
实践方面	78
仔细研究控制器调整公式	79

第10章 实现问题 81

 执行器饱和与积分器暂停..... 81

 防止积分器暂停..... 82

 设定值变化和积分器预加载..... 82

 平滑微分项影响..... 83

 选择抽样间隔..... 83

 PID控制器的替代形式 84

 增量形式..... 85

 误差反馈与输出反馈..... 85

 通用线性数字控制器..... 86

 非线性控制器..... 87

 误差平方和间隙控制器..... 87

 模拟浮点输出..... 88

 分类输出..... 88

第11章 通用反馈架构..... 91

 改变运行条件：增益调度..... 92

 轻度非线性系统的增益调度..... 93

 强干扰：前馈..... 93

 快-慢动态特性：嵌套或“级联”控制..... 94

 具有延迟的系统：史密斯预报器..... 95

第Ⅲ部分 案例研究篇

第12章 通过模拟探索控制系统..... 99

 案例研究..... 99

 建模时间..... 100

 控制时间..... 101

 模拟时间..... 101

 模拟框架..... 102

 组件..... 103

 对象和系统..... 103

 控制器..... 103

执行器和过滤器.....	105
标准循环的便利函数.....	106
产生图形输出.....	108
第13章 案例研究：高速缓存命中率	109
定义组件.....	109
制造缺陷引起的缓存失效.....	111
测量系统特性.....	112
控制器调整.....	114
模拟代码.....	116
第14章 案例研究：广告推送	121
场景.....	121
测量系统特性.....	122
建立控制.....	123
改进性能.....	124
类型变换.....	127
累计目标.....	127
增益时间调度.....	128
积分器的预加载.....	128
周末效应.....	128
模拟代码.....	128
第15章 案例研究：扩展服务器	131
场景.....	131
测量和调节.....	132
用非标准控制器达到100%	133
处理延迟.....	136
模拟代码.....	137
第16章 案例研究：等待队列的控制	141
队列和缓存的机理.....	141
结构.....	142
设置和调整.....	142

救援情况的微分控制..... 145

控制器替代方案..... 146

模拟代码..... 147

第17章 案例研究：冷却风扇速度..... 149

 场景..... 149

 模型..... 149

 调整和服役..... 151

 封闭回路性能..... 152

 模拟代码..... 153

第18章 案例研究：控制游戏引擎内存消耗..... 157

 场景..... 157

 问题分析..... 158

 架构选择..... 159

 非传统循环结构..... 159

 具有对数的传统循环..... 159

 结果..... 161

 模拟代码..... 162

第19章 案例研究的总结..... 165

 简单的控制器，简单的循环..... 165

 测量和调整..... 165

 保持控制..... 166

 处理噪音..... 166

第Ⅳ部分 理论篇

第20章 传递函数..... 171

 微分方程..... 171

 拉普拉斯变换..... 171

 拉普拉斯变换的属性..... 173

 用拉普拉斯变换解微分方程..... 174

 工作的例子..... 174