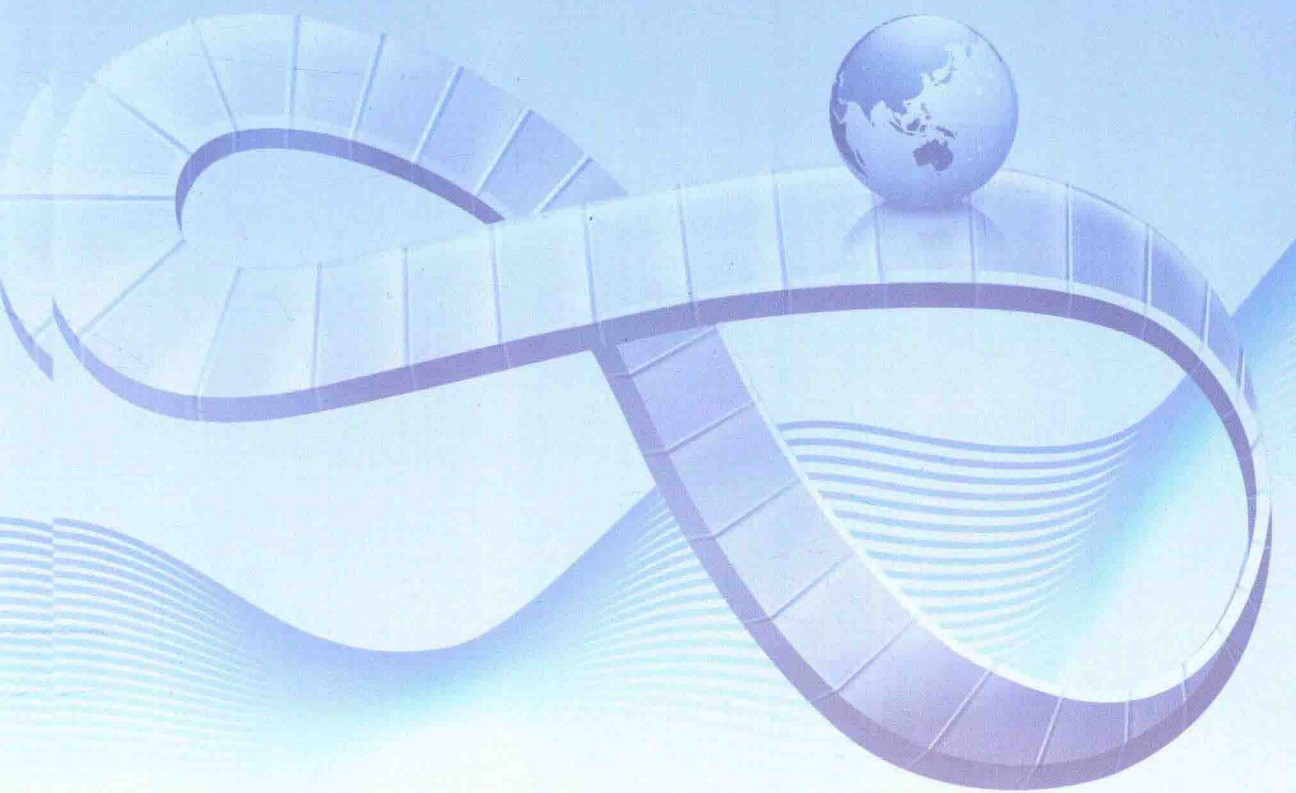


# 现代工程控制论

Modern Engineering Cybernetics

韩璞 著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 现代工程控制论

Modern Engineering Cybernetics

韩璞 著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 简 介

这是一部面向控制工程学科的理论联系工程实际的著作。集作者 40 年来从事自动控制学科的理论学习、教学和科研经验以及所取得的成果,从现代工程控制实际需求的角度阐述了自动控制理论体系内容。基于自动控制理论的形成年代缺少计算机作为计算工具这一事实,在完全尊重经典和现代控制理论时期所形成的各种理论分析和设计方法的基础上,抛弃了经典控制理论中的复频域分析方法,完全依赖计算机作为计算工具,以“数字仿真”和“参数优化”作为数学方法,以现代生产过程控制为工程背景,详细地论述了现代生产过程系统的建模、分析与优化设计方法。这些分析方法同样适合于运动控制系统。

书中所用的方法自成体系,内容新颖、丰富、物理概念清楚、联系工程实际紧密。非常适合于与控制工程学科相关的理论工作者和工程设计人员阅读与参考,也可作为相关学科的高年级学生、硕士和博士研究生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代工程控制论/韩璞著. —北京:中国电力出版社,2017.4  
ISBN 978-7-5198-0615-6

I. ①现… II. ①韩… III. ①工程控制论 IV. ①TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 071303 号

---

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:孙 芳 (01063412381) 马雪倩

责任校对:太兴华

装帧设计:赵姗杉

责任印制:蔺义舟

---

印 刷:三河市百盛印装有限公司

版 次:2017 年 4 月第一版

印 次:2017 年 4 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:47.25

字 数:1155 千字

印 数:0001—1500 册

定 价:238.00 元

---

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

## 序

与韩璞兄相识是在2001年4月30日，教育部自动化专业教学指导委员会成立会议上，后来我们都连续三届担任教育部自动化专业教学指导委员会委员。十五年过去，韩璞兄已经年近花甲，我也年过半百，彼此的了解愈加深刻，交情愈发醇厚。其实，从家庭背景、人生经历、兴趣性格，直到外表，我们两人差异很大。但是至少有三点是共同的：自20世纪80年代大学毕业，我们都在各自的母校学习、研究、任教，韩璞兄在华北电力大学（保定），秉承“团结、勤奋、求实、创新”的校训，我在中国科学技术大学，崇尚“红专并进、理实交融”的校训，即使在担任系主任、院长的时候，我们也都坚守教授必须给本科生开设课程的本分；从大学毕业开始，四十多年，我们坚持“实践出真知”，一天都没有离开过中国的产业界、中国的自动化行业，我们既是中国最后一代农业文明的见证者，也是世界第一大工业国的建设者，我们最重要的创作是写在祖国的工厂、车间里面；过去的三十多年，我们共同经历并实践了中国自动化系统从模拟仪表转变为数字化、网络化的全部过程。

1984年，我在中国科学技术大学学习《自动控制原理》时，我的导师彭立信先生告诉我，控制工程与控制理论之间存在一条鸿沟，一方面控制工程的飞速发展，提出许多亟待研究的问题，控制理论研究者却难以解决；另一方面，控制理论研究者提出的许多现代控制理论、控制算法，控制工程师在实践中又难以应用。过去的三十多年，随着自动化技术在各行各业的普遍应用，随着计算机技术、数字通信技术、网络技术在自动化行业的普遍应用，这条鸿沟越来越深、越来越宽。韩璞兄与我也都刻苦钻研过许多现代控制理论和控制算法，并竭尽全力在控制工程实践中应用，但是失败的教训比成功的经验更加深刻。最终，我们觉悟到，这些现代控制理论和控制算法往往是闭门造车的产物，也是随着经济全球化，某些发达国家产业转移、制造业空心化，控制理论研究“水无源，树无本”的必然结果；随着中国成为世界第一大工业国，中国的控制工程工作者已经积累的丰富的工程经验和实践案例，有能力开创新的控制理论体系，消除控制工程与控制理论之间的鸿沟，毕竟“总是先有事实，后有概念”。

韩璞兄四十年来致力于生产过程建模、仿真、控制、优化的研究与应用，在过程控制领域，尤其是电力系统自动化领域，积累了丰富的经验和工程案例。积四十年的工程、研究、教学经验，韩璞兄自立体系，成就了这一本面向控制工程学科的、求实创新、理实交融的著作。我深为韩璞兄高兴。

自动化是技术、是工程，至少，首先是工程技术。自动控制原理是控制工程工作者在长期的控制工程实践中，归纳、总结的具有普遍意义的基本规律，既能指导控制工程实践，又必须经受控制工程实践的检验。自动控制原理绝不是放之四海而皆准的真理。韩璞兄自立的自动控制原理的体系，也绝不是没有缺点、错误，但他至少不是人云亦云、言不及物。

“客观现实世界的变化运动永远没有完结，人们在实践中对于真理的认识也就永远没有完结”。



---

❶ 教育部自动化类专业教学指导委员会，委员；  
中国科学技术大学自动化系，教授；  
中国科学技术大学工业自动化研究所，所长。

## 前 言

我们都生活在四维空间，我们的思想、理念、知识、理论和技术都是时间的变量。

当我读大三的时候，我们开始学习“自动控制原理”。从那时起，我懂得了自动控制理论所要解决的问题。当时我对“自动控制原理”的感觉是，它是一种非常讲究技巧的课程，前人很有智慧，为了解决系统的控制品质问题，用了很多“变换”和许多“图和表”，在不求解微分方程的情况下，就能了解到控制系统的动态响应。由于当时我知道，一个描述工程系统的微分方程是很难得到解析解的，在很多情况下，用人工根本求不出解析解。所以，我更感觉到前人的伟大之处。

读大三的第二学期，我们开始学习“过程控制”。当时我对“过程控制”的感觉是，它是面向工程的课程，它要解决实际工程问题。但是，当时我想，为什么不用“自动控制原理”的理论和方法来解决“过程控制系统”中的问题呢？我百思不得其解。后来发现，“过程控制”中所列举的控制系统都比“自动控制原理”中的复杂，在“过程控制”中，不得不用一些工程方法来解决实际系统的控制品质问题。所以，当时我接受了这样一个事实：“自动控制原理”是“过程控制”的理论基础，但是要想解决实际工程问题，还必须寻找一些工程上的方法。那时，我更渴望学习到更多的“自动控制理论”，使之能直接解决实际工程问题。

在学完“自动控制原理”以后，我们开始学习“现代控制理论”。这门课是与“过程控制”同时开设的。当时我对“现代控制理论”的感觉是，它没有把时间域的微分方程变换成复频域的传递函数或频率特性函数，而是把高阶的微分方程、多输入多输出（multi-input multi-output, MIMO）系统的数学模型都用状态方程来描述，这又是一个伟大的创举，它能把系统刻画得更详细、更全面。然后，在时间域里求解状态方程。但是，求状态方程的解析解也是一件非常困难的事，所以就采用了变换状态方程的方法，把状态方程变换成各种“标准型”。“标准型”就是一种矩阵的特殊表达形式，根据“标准型”就能很容易了解到控制系统的动态特性，进而可以设计出所需的控制系统。本来“现代控制理论”是要解决多变量系统的控制问题的，但是当系统的输入输出多于 $2 \times 2$ 时，使用“现代控制理论”来解决这样的问题就变得非常困难，特别是被控系统的各输入输出通道的模型阶次高于1阶时，就越发困难，因为这时，如果把一个高于 $4 \times 4$ 的状态矩阵用人工的方法变换成“标准型”是非常困难的。对于生产过程中的大迟延、大惯性系统，使用“现代控制理论”中的状态反馈

控制方法基本不太可能。实际上是说，“现代控制理论”不适合过程控制。事实上，“现代控制理论”的产生是建立在以计算机为基础之上的，但是“现代控制理论”形成的初期，只有一些高精尖领域才能拥有计算机，也只有在这样的领域里才能涉及“现代控制理论”，在民用领域也只能想办法用手工计算的方式来解决控制系统的分析问题，这就是“标准型”。

读大四的第一学期，我们开设了“控制系统计算机仿真”课程，控制系统计算机仿真就是求微分方程的数值解，它可以解决“自动控制原理”和“过程控制”所要解决的所有问题。为什么“自动控制原理”和“过程控制”不使用数字仿真来解决控制系统的分析与优化设计问题呢？那时每个大学最多能拥有 1~2 台小型计算机，而且每台小型计算机只有一个终端，即使学习了“控制系统计算机仿真”课程，也缺少计算机仿真实验环境，也只能是个别的学生能在小型计算机上进行仿真实验，那么一般的科技工作者和教师根本接触不到计算机，除了计算机专业的学生和老师以外，其他人很少使用计算机。

1981 年个人计算机（PC）的问世，使得一般科技工作者都能使用计算机。在 20 世纪 80 年代，从事自动控制的科技工作者们，把经典控制理论和现代控制理论中的数学算法都编制成了计算机程序，人们称之为控制系统计算机辅助设计（CSCAD）软件包。事实上，CSCAD 软件包是在 20 世纪 70 年代初开始研制的，例如瑞典 Lund 大学的 CSCAD 软件包，得到了瑞典技术发展部的支持，经过 10 年的努力，建立了一套较为完整的、在国际上具有领先地位的控制系统 CSCAD 软件包。后来在国际上也出现了许多比较著名的 CSCAD 软件包，例如英国的 UMIST、罗马尼亚的 SIPAC、匈牙利的 TAPSO 等。这些软件包一般都是用 FORTRAN 语言编写，通常运行在小型计算机上。个人计算机问世以后，有些 CSCAD 软件包移植到了 PC 上，有些直接在 PC 上直接开发，我国的 CSCAD 软件包都属于后者。CSCAD 软件包除了完成控制理论中的各种数学算法计算外，更主要的功能是提供友好的人机交互界面，使得工程设计人员解决控制系统的设计问题不再感到是一件困难的事情。

但是，经典控制理论是在没有计算工具的情况下形成的，它主要依靠手工计算和一些草图对控制系统进行分析和设计。即使有了 CSCAD 软件，也仅仅是把绘制草图的工作变成了计算机精确绘制，并没有改变控制系统的分析与优化设计方法。因此，当控制系统计算机仿真软件包（CSS）和仿真语言（例如 SIMEX、PSI、DARE-P 等）发展起来以后，CSCAD 软件就没有更进一步的发展。后来，我国许多高校在 20 世纪 80 年代给自动化专业硕士研究生开设的“控制系统计算机辅助设计”课程也相继取消。事实上，控制系统计算机仿真软件包和仿真语言是与 CSCAD 软件包同时发展起来的，它专门完成控制系统的数字仿真。确切来讲，它也是控制系统计算机辅助分析与设计软件。

仿真软件起初是用填写数据文件的方式进行人机交互，这显然是非常麻烦的，很多从事自动控制的科技工作者并不愿意使用这样的软件。1983 年，IBM-PC 引入中国后，作者在国内率先开发了自动控制系统数字仿真软件包 ASSPP-B1。在通用仿真软件中，该软件首次使

用了仿真功能“菜单”式选择、填表式控制系统组态，具有良好的人机交互方式，使得该软件在控制系统分析与优化设计方面得到了广泛的应用。后来作者又开发了仿真软件包的升级版 SSSA、MI-RTS、CTES、CAE2000，功能进一步扩大，交互更加人性化。

1985 年美国微软公司第一套 Windows 操作系统问世。在 1990~1995 年，又把视窗操作系统升级为 Windows 3.1、Windows 95 等。这时 Windows 操作系统已经被广泛应用。作者的 CAE2000 就是基于 Windows 操作系统开发的，控制系统组态方式已经改为图形化组态，简单地拖动鼠标就可完成一个控制系统的组态，进而就可以对控制系统进行各种仿真研究。

美国的 MathWorks 公司，从 1984 年成立，已经逐步成为全球科学计算和基于模型设计的软件供应商的领导者。MathWorks 公司发布的 MATLAB 主要面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。它将数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中，为科学研究、工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案，并在很大程度上摆脱了传统非交互式程序设计语言（如 C、Fortran）的编辑模式，代表了当今国际科学计算软件的先进水平。

Simulink 是 MATLAB 最重要的组件之一，它提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。在该环境中，无需大量书写程序，而只需要通过简单直观的鼠标操作，就可构造出复杂的系统。Simulink 具有适应面广、结构和流程清晰及仿真精细、贴近实际、效率高、灵活等优点，并基于以上优点，Simulink 已被广泛应用于控制理论和数字信号处理的复杂仿真和设计。自从 Simulink 被广泛地在国际上应用以来，其他的控制系统仿真软件很少再有发展。

数字仿真技术不仅为控制系统的分析与优化设计提供了一种全新的时域方法，还推动了控制理论和技术向更高、更新、更智能的方向发展：

由于有了控制系统的数字仿真，计算控制系统的品质指标函数不再是一件困难的事，因此发展了基于群体智能的全局优化算法。因为，群体智能算法是建立在多次计算目标函数的基础上来完成的，而每计算一次目标函数，就必须对控制系统进行一次仿真。

由于有了控制系统的数字仿真，就可以根据对生产过程系统已有的了解，选择所需的系统传递函数模型，而不必像经典最小二乘辨识算法那样，为了求得辨识参数的最优解析解，不得不选择差分模型，因此发展了智能辨识算法。智能辨识算法不需要对要辨识的系统施加额外的扰动，利用生产过程运行的历史数据就可以得到该系统的传递函数模型。

由于有了控制系统的数字仿真，使得对自适应与预测控制、智能控制等现代控制系统的分析与优化设计更容易。因为，许多新型控制算法已经不能用传递函数来描述，所以，经典控制理论的分析方法对这些新型控制系统已经无能为力。



自从数字仿真技术发展以后，在过程控制系统里，控制系统的分析与优化设计已经不在复频域中进行，而是在时间域里进行数字仿真和直接优化，“自动控制原理”所述的控制系统复频域分析方法不再使用。由于状态反馈控制策略存在着固有缺陷，事实上“现代控制理论”也没能在生产过程控制系统中得到应用。

正因为有了这些感受，撰写一部面向控制工程学科的理论联系工程实际的著作的想法油然而生。在撰写期间，许多想法不断地在改变，不断地在求证，不断地与业内人士交流，也不断地在完善，才形成了本书的内容。

本书力求集我 40 年来从事自动控制学科的理论学习、教学和科研经验以及所取得的成果，从现代工程实际需求的角度阐述自动控制理论体系内容。在完全尊重经典和现代控制理论时期所形成的各种理论分析和设计方法的基础上，抛弃经典控制理论中的复频域分析方法，完全依赖计算机作为计算工具，以“数字仿真”和“参数优化”作为数学方法，以现代生产过程控制为工程背景，详细地来论述现代生产过程系统的建模、分析与优化设计方法。

本书第 0 章全面概述了自动控制理论的发展过程。按照人们的习惯把控制理论的发展分为经典控制理论、现代控制理论以及智能控制理论三个阶段，论述了各阶段的数学方法、研究内容、存在的缺陷以及能力范围。

第 1 章讲述了自动控制的一般概念以及一些术语的定义；生产过程的分类；自动控制系统基本组成原理；控制系统的分类；对控制系统的品质要求；工业控制器等。

第 2 章以自动控制技术发展过程为顺序，详细地阐述了控制系统的动态数学模型描述方法，包括：差分方程、微分方程、传递函数、频率特性函数、脉冲传递函数、方框图、状态方程等。讲述了差分方程的数字仿真程序设计方法，并给出了非常有实用价值的仿真计算步距（采样周期）估计经验公式；介绍了微分方程、传递函数与状态方程之间的转换方法。

第 3 章深入地论述了控制系统数字仿真技术。深入地阐述了数值积分法和离散相似法，并从物理概念上统一了两种不同的仿真算法；详细地论述了数字仿真程序设计方法；讨论了数字仿真计算稳定性以及刚性系统仿真问题。

第 4 章详细地论述了目标函数选取方法。通过介绍经典的黄金分割及单纯形优化算法以及对穷举法和群体智能优化算法的详细论述，揭示出优化算法的实质；并根据多年的实践经验，给出了可以用于实际工程的 PID 控制器最优参数估计经验公式；为了便于对系统进行分析，给出了传递函数模型变换（升降阶、消去纯迟延等）的经验公式。

第 5 章详细地论述了经典的最小二乘批处理及在线递推辨识算法，以及辨识时的工程问题；以群体智能算法作为参数优化工具，把被控系统的试验建模问题转化成参数优化问题，从而解决了不用在生产现场进行试验，使用现场运行的历史大数据就可以建立起开环或闭环以及多变量系统的传递函数模型问题；给出了智能辨识算法应用的工程实例。

第 6 章以实际工程问题为背景，以理论与实际工程相结合为目标，详细地阐述了单变量

系统的分析与优化设计方法。首先介绍了控制系统的理论分析基础，进而介绍了控制系统的稳态误差分析、稳定性分析以及鲁棒性分析；深入地论述了各种 PID 控制策略、大纯迟延系统的史密斯预估控制策略及内模控制策略；深入地讨论了前馈+反馈控制系统及双回路控制系统的优化设计问题；深入地讨论了离散时间控制系统的优化设计问题，包括采样周期对控制品质的影响、最小拍（无纹波）及大林算法控制等，并讨论了离散时间系统与连续时间系统统一性问题。

第 7 章介绍了多变量系统的数学模型描述方法；深入地讨论了状态反馈控制系统优化设计问题；论述了多变量系统的解耦控制、协调控制以及最优控制优化设计方法。

第 8 章介绍了非线性模型的线性化方法、典型硬非线性仿真程序设计方法；针对用经典控制理论分析非线性系统困难的问题，通过实例，论述了非线性系统的数值分析方法，以及非线性系统的有益应用方法。

第 9 章针对当前控制理论的研究热点，详细地论述了自适应控制、预测控制算法。介绍了自适应控制系统组成结构；详细地讨论了模型参考自适应 PID 控制系统和自调整自适应 PID 控制系统的优化设计方法；详细地阐述了作者所设计的预整定自适应控制策略；作为预测控制算法设计的实例，详细地论述了动态矩阵控制系统的优化设计方法。对于每种控制算法，都探讨了实际应用时的工程问题。

第 10 章针对当前智能控制的研究热点，以模糊控制算法为例，详细地讨论了模糊控制器的优化设计及其工程实现问题。介绍了模糊数学基础；深入地讨论了基本模糊控制器的优化设计方法；介绍了带可调整因子的模糊控制器的设计方法；作为模糊控制器实际应用的例子，详细地阐述了模糊自整定 PID 控制器的设计方法。

书中所给出的实例大多是工程实际问题，所阐述的许多方法都是我在工程研究项目中所用到的，有些算法是我首创，书中的程序可直接用于工程实际。

为了便于读者理解书中所述的内容及其在实际工程中应用，本书所论述的各种算法均配有相应的用 MATLAB 基本语句编写的算法程序，而不使用 MATLAB 的工具箱和复杂函数。所给出的源程序代码都放在了网站 <http://cscenter.ncepubd.edu.cn> 上，可以免费下载（特别说明：书中的所有曲线都是通过运行这些程序而得，且图中的时间轴量纲均为“s”）。

在此特别感谢我团队的董泽教授、王东风教授，在 5 年的撰写过程中，我一旦有一些新想法时，总是会与他们讨论，直至我们达成共识时，我才会把这些内容写在本书中；感谢山东电力科学研究院教授级高工石金宝，是他给了我许多如何将控制理论与实际控制工程相结合的思想；感谢张悦讲师、孙明讲师、王晓燕讲师，孙剑、袁世通、张婷等博士生们，他们总会到工程中去实践我的一些新想法。

本书写作历时 5 年，在这 5 年里，得到了我带领团队的教师、硕士和博士研究生们，企

业中的许多工程师们以及全国高校里的许多同行老师们等众多人的帮助，是与他们不断地交流，才形成了我的思想，他们对我思想的肯定，才使我有信心坚持把这部书写完，由于涉及的人员太多，这里无法一一列出，在此一并向他们表示衷心的感谢。

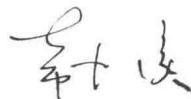
中国科学技术大学吴刚教授详细地审阅了本书，提出了很多宝贵意见，并为本书作了序，在此向他表示衷心的感谢。

最后，特别感谢山东鲁能控制工程有限公司全体同仁们对本书的撰写与出版给予大力的支持。

写作本书的目的是讨论怎样使用计算机来解决控制理论所要解决的问题，为此起到“抛砖引玉”作用，并非表达哪些控制算法有用或没用、哪些分析方法重要或不重要。由于不同工程领域背景的人士对自动控制理论有不同的认识，加之作者水平有限，对控制理论的理解会有偏颇，论述方面可能有片面性，错误之处诚望读者指正。

作者通信地址：hanpu@ncepubd.edu.cn

作者团队网站：<http://cscenter.ncepubd.edu.cn>



2017年1月1日

# 目 录

序	
前言	
<b>第0章 绪论</b> .....	1
<b>第1章 自动控制的一般概念</b> .....	7
1.1 自动控制系统的基本概念 .....	7
1.1.1 名词解释 .....	7
1.1.2 自动化与自动控制 .....	8
1.1.3 常系数线性系统和变系数线性系统 .....	9
1.1.4 非线性系统 .....	10
1.2 连续生产过程与间歇生产过程系统 .....	10
1.2.1 连续生产过程 .....	10
1.2.2 间歇生产过程 .....	10
1.2.3 过程变量 .....	11
1.3 自动控制系统的组成 .....	12
1.3.1 自动控制系统的基本组成结构及术语定义 .....	12
1.3.2 闭环控制和开环控制系统 .....	15
1.4 对连续过程控制系统性能的基本要求 .....	17
1.4.1 控制系统稳定性概念 .....	17
1.4.2 连续过程控制系统的动态性能 .....	18
1.4.3 控制系统的质量（品质）指标 .....	19
1.5 自动控制系统的分类 .....	22
1.5.1 按被控对象特性分类 .....	22
1.5.2 按系统输入输出的个数分类 .....	23
1.5.3 按给定值信号的特点分类 .....	25
1.5.4 按系统中传输信号对时间的关系分类 .....	26
1.6 工业控制器 .....	27
1.6.1 双位或开关控制器 .....	28
1.6.2 比例控制器（P） .....	28
1.6.3 微分控制器（D）与比例+微分控制器（PD） .....	29
1.6.4 积分控制器（I）与比例+积分控制器（PI） .....	29

1.6.5	比例+积分+微分控制器 (PID)	30
<b>第2章</b>	<b>控制系统的动态数学模型描述</b>	<b>31</b>
2.1	建模方法简介	31
2.2	控制系统的微分方程模型	32
2.3	控制系统的差分方程模型及其计算程序	34
2.3.1	差分方程模型	34
2.3.2	差分方程计算机程序设计	38
2.4	线性定常系统的传递函数模型	41
2.4.1	传递函数概念	41
2.4.2	典型环节的微分方程与传递函数描述	43
2.5	控制系统的方框图模型	47
2.5.1	方框图的定义	47
2.5.2	方框图运算	48
2.5.3	开环传递函数与闭环传递函数	49
2.5.4	规范化方框图	49
2.6	控制系统的状态空间模型	50
2.6.1	状态与状态变量	51
2.6.2	状态空间方程模型	52
2.6.3	状态空间模型的矩阵表示	58
2.7	控制系统的频率特性函数模型	60
2.7.1	频率特性函数概念	60
2.7.2	频率特性函数运算	62
2.7.3	频率特性函数曲线	63
2.8	脉冲传递函数模型	64
2.8.1	离散时间(采样)控制系统的构成	64
2.8.2	采样与保持过程及其数学模型	64
2.8.3	数/模(D/A)转换器及其数学模型	66
2.8.4	采样定理及采样周期的选择	66
2.8.5	Z变换以及脉冲传递函数	69
2.8.6	Z传递函数运算以及开环与闭环系统的脉冲传递函数	73
2.9	非线性系统的数学模型	75
2.10	微分方程、传递函数与状态方程之间的转换	77
2.10.1	微分方程与状态方程之间的转换	77
2.10.2	传递函数与状态方程之间的转换	80
2.10.3	系统方框图与状态方程之间的转换	83
2.11	本章小结	88
<b>第3章</b>	<b>微分方程的数值解(数字仿真)</b>	<b>91</b>
3.1	数字仿真概念	91
3.2	连续系统的离散化	92

3.3	离散系统差分方程的求取	95
3.3.1	离散-再现环节在系统的入口处	95
3.3.2	规范化方框图中基本环节的差分方程	107
3.3.3	离散-再现环节在系统的积分器处	111
3.4	非线性系统数值积分公式	122
3.5	离散时间控制系统的数字仿真	128
3.5.1	离散时间控制系统的数学模型	128
3.5.2	离散时间控制系统的数字仿真程序设计	135
3.6	仿真计算的稳定性分析	137
3.6.1	计算步距对系统稳定性的影响	137
3.6.2	“代数环”对系统稳定性的影响	139
3.6.3	刚性 (Stiff) 系统数字仿真的稳定性分析	143
3.7	本章小结	147
<b>第4章</b>	<b>最优化理论与方法</b>	<b>149</b>
4.1	最优化问题的一般描述	149
4.1.1	单目标优化问题的数学描述	149
4.1.2	多目标优化问题的数学描述	150
4.1.3	最优化问题的求解方法	150
4.2	控制系统参数优化目标函数的选取	153
4.2.1	直接型目标函数	153
4.2.2	间接型目标函数	155
4.2.3	综合型目标函数	157
4.2.4	控制系统动态品质指标计算程序	157
4.3	优化系统的数学模型描述	159
4.3.1	工业 PID 控制律的数学模型描述	159
4.3.2	被控对象的数学模型描述	159
4.3.3	对象的阶次、时间常数以及纯迟延时间之间的转换	161
4.4	经验整定公式	165
4.4.1	有自平衡能力被控对象的经验整定公式	165
4.4.2	无自平衡能力被控对象的经验整定公式	172
4.5	穷举法	178
4.6	黄金分割法	185
4.7	单纯形法	190
4.7.1	单纯形法的工作原理	191
4.7.2	单纯形的初始步长对优化结果的影响	198
4.7.3	压缩因子和扩张因子对优化效果的影响	199
4.7.4	优化参数初始值对优化效果的影响	200
4.8	群体智能优化算法	201
4.8.1	遗传优化算法	202

4.8.2	蚁群优化算法	220
4.8.3	粒子群优化算法	230
4.9	多变量控制系统参数优化	234
4.10	本章小结	239
<b>第5章</b>	<b>生产过程系统建模理论与方法</b>	<b>241</b>
5.1	建模方法综述	241
5.2	估计模型的选择	243
5.3	最小二乘法辨识算法	254
5.3.1	最小二乘批处理算法	254
5.3.2	最小二乘批处理算法程序设计	255
5.3.3	最小二乘辨识的工程问题	257
5.3.4	最小二乘递推算法	270
5.4	智能辨识方法	279
5.4.1	基于粒子群算法的智能辨识算法程序	280
5.4.2	智能辨识方法的工程问题	283
5.5	多变量线性系统辨识	304
5.5.1	MIMO 系统的数学模型描述	304
5.5.2	MIMO 系统的辨识算法	306
5.5.3	MIMO 系统辨识的工程问题	306
5.6	实际工程系统试验建模案例	317
5.6.1	1000MW 超超临界直流炉机组负荷系统模型辨识	317
5.6.2	1000MW 超超临界直流炉机组燃烧系统模型辨识	326
5.6.3	600MW 亚临界火电机组燃烧系统模型辨识	330
5.7	本章小结	337
<b>第6章</b>	<b>线性单变量控制系统分析与优化设计</b>	<b>338</b>
6.1	线性单变量系统综述	338
6.2	控制系统的理论分析基础	339
6.2.1	典型试验信号的选取	339
6.2.2	系统的平衡状态及各状态变量的初始值	341
6.2.3	控制系统中的固有非线性环节	342
6.2.4	系统的瞬态(动态)响应与稳态响应	343
6.3	单位反馈控制系统的稳态误差分析	346
6.3.1	静态位置误差常数 $K_p$	347
6.3.2	静态速度误差常数 $K_v$	348
6.4	稳定性分析	348
6.4.1	负反馈分析	349
6.4.2	稳定参数区间分析	350
6.5	鲁棒性分析	361
6.6	PID 控制策略	365

6.6.1	基本 PID 控制律	365
6.6.2	抗积分饱和 PI 控制律	369
6.6.3	微分先行 PID 控制律	372
6.6.4	积分分离 PID 控制律	375
6.7	前馈加反馈控制系统优化设计	380
6.7.1	按给定值扰动补偿的复合控制策略	380
6.7.2	按外部扰动补偿的复合控制策略	386
6.8	大纯迟延系统的史密斯预估控制	396
6.8.1	史密斯预估器补偿算法原理	396
6.8.2	史密斯预估控制算法的鲁棒性	400
6.8.3	纯迟延时间对史密斯预估控制效果的影响	402
6.8.4	完全消除内部扰动的史密斯预估补偿器	403
6.9	大纯迟延系统的内模控制	404
6.9.1	内模控制原理	404
6.9.2	内模控制的工程实现	407
6.9.3	内模控制律的鲁棒性分析	416
6.10	串级双回路反馈控制系统优化设计	419
6.10.1	串级控制系统设计	420
6.10.2	串级控制系统中被控对象传递函数描述形式的转换	424
6.10.3	导前区模型对系统控制品质的影响	428
6.11	离散时间控制系统的优化设计	430
6.11.1	采样周期 $T_s$ 对控制品质的影响	430
6.11.2	最小拍控制	435
6.11.3	最小拍无纹波控制	447
6.11.4	大林算法控制	451
6.12	本章小结	456
<b>第 7 章</b>	<b>线性多变量控制系统分析与优化设计</b>	<b>459</b>
7.1	多变量系统的数学模型描述	459
7.2	状态反馈控制系统优化设计	460
7.2.1	状态反馈控制系统结构	460
7.2.2	状态反馈控制器设计	461
7.2.3	控制品质指标的选择方法	473
7.2.4	带有状态观测器的状态反馈控制系统设计	475
7.2.5	无静差系统的状态观测器优化设计	480
7.2.6	高阶或带有纯迟延系统的状态反馈控制器设计	485
7.3	多变量系统的解耦控制	488
7.3.1	动态解耦器的优化设计	489
7.3.2	静态解耦器的优化设计	499
7.3.3	被控系统可解耦条件	509



7.4	协调控制 .....	513
7.5	最优控制 .....	523
7.5.1	最优控制问题的一般描述 .....	523
7.5.2	最优状态空间控制系统的设计 .....	525
7.6	本章小结 .....	528
<b>第8章</b>	<b>非线性控制系统分析与优化设计 .....</b>	<b>530</b>
8.1	非线性系统综述 .....	530
8.2	非线性模型的线性化 .....	531
8.2.1	小信号分析线性化 .....	531
8.2.2	非线性反馈线性化 .....	532
8.2.3	逆非线性补偿线性化 .....	532
8.3	典型硬非线性特性及其仿真程序 .....	533
8.3.1	继电器 .....	533
8.3.2	有不灵敏区的继电器 .....	533
8.3.3	限幅器(饱和特性) .....	534
8.3.4	不灵敏区(死区) .....	534
8.3.5	齿轮间隙 .....	534
8.3.6	具有死区和滞环的继电器 .....	535
8.3.7	摩擦 .....	536
8.4	非线性系统特性分析 .....	536
8.4.1	经典分析方法回顾 .....	536
8.4.2	非线性系统的数值分析 .....	540
8.5	非线性特性的有益应用 .....	545
8.5.1	相位超前环节的实现 .....	546
8.5.2	非线性控制器 .....	547
8.6	本章小结 .....	550
<b>第9章</b>	<b>自适应与预测控制系统分析与优化设计 .....</b>	<b>551</b>
9.1	自适应现象与自适应控制 .....	551
9.2	自适应控制系统组成结构 .....	552
9.2.1	模型参考自适应控制系统结构 .....	553
9.2.2	自校正自适应控制系统结构 .....	554
9.2.3	预测控制系统结构 .....	554
9.3	模型参考自适应PID控制系统的优化设计 .....	556
9.3.1	参考模型设计 .....	556
9.3.2	自适应机构设计 .....	558
9.3.3	参考模型对自适应控制系统调节品质的影响 .....	563
9.3.4	扰动量对控制品质的影响 .....	565
9.3.5	结论 .....	571
9.4	自调整自适应PID控制系统的优化设计 .....	571