



Stephen Elliott

Signal Processing for Active Control

主动控制中的信号处理

[英] 史蒂芬·埃利奥特 著
翁震平 吴文伟 王飞 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



Signal Processing for Active Control

主动控制中的信号处理

【美】李德福·拉森著 潘
建明 周海 译



电子工业出版社
WILEY-INTERSCIENCE



主动控制中的信号处理

Signal Processing for Active Control

[英] 史蒂芬·埃利奥特 著
翁震平 吴文伟 王 飞 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-137 号

图书在版编目(CIP)数据

主动控制中的信号处理 / (英) 埃利奥特 (Elliott, S.) 著; 翁震平, 吴文伟, 王飞译. —北京: 国防工业出版社, 2014. 5

书名原文: Signal processing for active control

ISBN 978-7-118-09638-5

I. ①主... II. ①埃... ②翁... ③吴... ④王... III. ①控制信号—信号处理 IV. ①TN911.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 156259 号

<Signal Processing for Active Control by Stephen Elliott>

ISBN: 978-0-12-237085-4 (ISBN of original edition)

Copyright © <2001> by Elsevier All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. and National Defense Industry Press

Copyright © <2014> by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Published in China <National Defense Industry Press> under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd..

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan.

Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject of Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予国防工业出版社在中国大陆地区 (不包括香港、澳门以及台湾地区) 出版与发行。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 30 1/4 字数 525 千字

2014 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 120.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

译者序

本书是一本有关主动控制的专业性教科书,也是主动控制领域的一部经典著作。作者 Stephen Elliott 是研究主动控制的先驱人物,作者所处的英国南安普顿大学也是国际上有名的主动控制研究圣地。本书从信号处理的角度阐述主动控制,着重从根本上理解主动控制的优点、缺点,以大量的实际应用为基础,展开讲述搭建实际主动控制系统所需的相关知识,主要为实现自适应控制系统所需的自适应算法,根据具体应用所选的前馈、反馈控制方案,针对单频和随机扰动而需要的不同控制策略,以及单通道、多通道控制的联系与区别,实际系统布置传感器、作动器时的位置优化问题等。作者以实现实时性的自适应鲁棒主动控制系统为核心,有强调也有侧重,详略得当,对于学习、掌握主动控制的相关技术是一本难得的好书。

由于译者水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

译者
2013 年 5 月
船舶振动噪声重点实验室

丛书系列序

目前,信号处理的应用非常广泛。借助相对比较便宜的商业化产品和比较昂贵的军用、工业产品,信号处理技术得到非常深入的研究。这种技术的快速发展始于20世纪60年代,当时在一些应用中使用便宜的数字技术实现实时的信号处理算法。从那时起一直到今天,半导体技术的快速发展都为此项技术的流行提供了强有力的支撑。同时,持续发展的数学理论也一直用于设计信号处理算法。然而,作为基础的数学理论在应用到信号处理领域之前就已经发展得很成熟了。

《信号处理及其应用》借助大量的应用实例阐述原理和技术,很好地阐释了信号处理所涉及的广度和深度。这也反映在编委会的组成上,他们主要关注以下几个方面。

(1) 理论,包括对象的物理模型和系统的数学模型。

(2) 实现,包括VLSI/ASIC设计,计算机结构,数值方法,系统设计方法和CAE。

(3) 应用,包括语音,声呐,地震学,医药,交流(包括声音和图像),导航,航海,遥感,成像,测绘,归档,无损和非接触检测,以及个人娱乐。

《信号处理及其应用》非常适合研究生,教师及相关领域技术工程人员使用。其中的一些例子对于将毕业的研究生会非常有帮助。

Richard C. Green
The Engineering Practice,
Farnborough, UK

献 给

“所有的巨龙都是一端孱弱,然后中间非常粗壮,接着在另一端又很瘦小。
这就是我的理论”

(A. Elk, 1972)

这本书献给那些创造过经典理论的人们。

前 言

主动控制通过引入可控的次级源抑制那些不想要的干扰,其中次级源的输出经调整与原始初级源产生的干扰破坏性地结合在一起。这种技术广泛应用于噪声和振动的控制,而且被称为主动控制用以区别传统的被动控制方法,即那些使用本身不产生功率的装置,主要通过吸收或反射控制噪声、振动的方法。这种,通过叠加一个相等的或相反的干扰实现干扰抑制的方法在科研和工程的一些领域非常常见。然而,对噪声和振动的工程涉及非常专业的知识,主要因为这些干扰的波的属性,从而实现空间中一点的控制并不能保证其他点也满足控制要求。

受益于微电子技术的迅速发展,主动控制可以以合理的价格实现快速、多通道控制器,以及与日俱增的以较小的重量损失解决低频噪声、振动问题的期望,从而在过去的 10 年得到迅速发展。当前的工业应用主要包括:耳机,空调管路和飞机推进器的主动降噪,以及工业机械和直升机的主动振动隔离。

主动控制的成功应用需要深刻理解系统的物理原理和主动控制的实际限制,以及需要了解实现这样一个系统可用的电子控制技术。与噪声和振动的主动控制有关的物理原理现在已经被研究非常透彻(参见 Nelson 和 Elliott, 1992; Fuller, Elliott 和 Nelson, 1996; Preumont, 1997; Clark, Saunders 和 Gibbs, 1998)。本书的目的是阐述这些应用所使用的电子控制的共同原理,以及将这项工作扩展到传统的信号处理和传统的自动控制领域,用以更加清晰明白地解释相关内容。

本书从信号处理的角度,以更加容易让高年级本科生和研究生,以及工程师理解的方式写成。坦白地说,实际主动控制系统所使用的控制技术跟信号处理领域的关系比跟自动控制领域的关系更加密切。虽然两个学科都以不同的着眼点解决类似的问题,但假设方式甚至是表示方式都很难从一个学科转换到另一个学科。信号处理倾向于以快速的采样率实时实现,尤其是使用自适应方法,从而解决相对比较简单例子。而自动控制则花费了很大的努力用于发展设计具有稳定性质的最优控制器的离线实现方法。这些倾向于运行在比较慢的采样率上,从而它们的计算成本不是很重要。然而,随着最优控制理论的发展,尤其是

自适应控制器和那些对系统不确定度鲁棒的控制器,也越来越多地应用在主动控制中,其中的一些发展将会在本文的早期信号处理工作中讨论。

离散时域方法和离散频域方法的对偶性是本书重点强调的内容,不论是计算最优性能还是自适应控制的结构。这两种方法均可用于计算实际控制系统的直接测量参数,尤其是对于随机数据从相关和谱密度的测量数据得到的参数。在绝大多数情况下刻意避免使用状态变量,一方面是因为对于这种方法在别处已经介绍得足够多,另一方面是为了避免对测量系统构建系统的状态空间模型的困难。尤其对于许多声系统构建状态空间模型会非常困难,因为它们的阶数一般很高,而且包括众多显著的延时。

典型主动控制系统的实现可以大概归为以下几个阶段[类似于 Morgan (1991),所描述的性能的几个典型级别],即使一个幸运的设计者从不需要递归使用这几个阶段。

(1) 使用简化的分析模型分析物理系统,是为了确定对给定的应用进行主动控制所面临的基本物理限制。

(2) 在理想条件下,通过利用从被控系统测得的数据,离线使用不同的控制律计算主动控制的最优性能。

(3) 在不同的工作环境中,使用从被控系统测得的数据对不同的控制律进行仿真。

(4) 实现实时性的控制器,并在各种不同的工作环境中进行测试,以保证具有预期的性能。

从而清晰地了解实际系统的物理限制和作用在上面的电子控制律非常重要。在讨论设计主动控制的控制器的内容之前,首先复习噪声和振动的主动控制的物理基础。作者见过许多对被控对象的主动控制都是建立在不切实际的假设上,因此这部分内容对于成功设计控制器非常重要。第1章对简单的分析模型的建立提供了一种指导,其可以在许多应用中确定主动控制的可行性。这种模型主要基于被控对象的连续时间表示。对于这些应用可以认为干扰是单频的,这样会简化对象模型的表示,并可以以直观的方式理解主动控制的过程。虽然得到这些模型的详细过程对于具有信号处理或控制专业背景的人来说不是很熟悉,但是作者希望通过将大量的结果以图表的形式表示,可以帮助、加深理解主动控制所涉及的物理限制。

第2章在回顾最优和自适应电子滤波器的有关内容后,后续的3章(第4章,第5章,第6章)会涉及前馈控制器的设计,以单通道单频或窄带干扰的控制开始,接着是多通道随机或宽带干扰的控制。其中重点强调了最小二乘法在这些应用中的使用,因为搭建控制系统时需要使用从实际系统测得的数据计算特

定控制律的最优性能。这种最优性能可以为主动控制系统实际运行时测得的性能提供基准参考。同时还强调了控制作用在系统运行时的重要性,控制作用可以调整控制问题,确保自适应算法对系统响应中的变化具有鲁棒性。起初控制作用是作为待最小化的二次性能函数中的一项,但紧接着讨论实际使用时约束系统的情形,控制作用必须小于一个指定的最大值。文中讨论了各种不同的自适应控制算法,而且重点关注了 filtered - reference 方法和 filtered - error 方法之间的联系。

第6和第7章主要讨论了反馈控制系统,并重点关注了在一定的简化后可以非常类似前面章节所讨论的前馈控制系统的控制器的特定结构和参数化。反馈控制系统的主要问题是面对被控系统响应的不确定度时的稳定性,这种鲁棒稳定性的需求可以非常方便地作为一种约束集成在已经建立起来的框架中。正如第6章所讨论的,对固定反馈控制器的设计已经非常成熟,而使这种控制器变得自适应的理论则有些不足。然而,第7章复习了可以用于使这种控制器变得自适应的结构,尤其是那种对非静止的干扰自适应的结构。在主动控制应用中,在自适应的过程中保持控制器的鲁棒稳定性非常重要。同时讨论了模拟控制器和数字控制器的互补特性,这使得我们可以设计一种具有内部固定模拟反馈回路和外部自适应数字反馈的组合控制器。

第8章主要关注非线性系统的控制。在主动控制应用中,被控系统通常具有弱的非线性,尤其当使用结构作动器时更是如此。文中讨论了几种补偿弱非线性的方法,而且证明这种弱的非线性不一定会降低主动控制系统的性能。具有挑战性的是对强非线性系统的控制,这种系统可以表现出混沌特性,对于这种系统需要使用完全不同的控制律。

第9章讨论主动控制的另一个重要方面——作动器和传感器位置的最优化。这种优化问题完全不同于其他信号处理问题,其往往会归结为组合搜索问题。在此问题中使用最多的是指导随机搜索算法而不是梯度下降法。主要讨论了两种指导随机搜索算法:遗传算法和模拟退火。其中特别强调了为了使控制系统的性能对系统响应和干扰的变换具备鲁棒性而对变换器位置选择的需要。

第10章描述了实现实时的主动控制系统所涉及的各种硬件,包括处理器、转换器、抗混叠滤波器,以及对有限精度和其他各种可能在实际主动控制系统产生的数值影响进行了简单讨论。

最后在附录对一直使用的线性代数进行了简单介绍,包括多通道系统所使用的矩阵。

尽管笔者对本书的缺点承担所有责任,但是对那些审阅本书草稿的每个章节并给出了大量有用的建议的人表示最诚挚的感谢,他们是 D. Anthony 博士,

K - H. Baek 博士, S. Billings 教授, J. Cook 博士, E. Friot 博士, P. Gardonio 博士, C. H. Hansen 教授, L. Heck 博士, M. Jolly 博士, P. Joseph 博士, A. J. Keane 教授, A. Langley 博士, V. Martin 博士, M. Morari 教授, A. Omoto 博士, B. Petitjean 博士, S. Popovich 博士, B. Rafaely 博士, D. Rosetti 博士, K - H. Shin 博士, R. W. Stewart 博士, T. J. Sutton 博士和 M. C. M. Wright 博士。还要特别感谢 R. L. Clark 教授和 P. A. Nelson 教授,他们对最终稿进行了审阅,而且 D. R. Morgan 博士对整个书稿进行了认真的检查,避免了许多表示和语法的错误。

同样感谢 J. Shotter 女生对手稿的文字整理及公式的录入工作, M. Hichs 先生和 T. Sors 先生及 J. Shotters 先生对文中大量图表的准备工作。最后衷心地感谢妻子及家人的理解和耐心,没有他们的帮助和支持,本书不可能付梓。

Setphen Elliott

索引

- ARMAX 模型/90
- Duffing 振荡器/328
- FFT 控制器/106
- Fictitious 传感器噪声
- Filtered – error LMS 算法/125
- Filtered – reference LMS 算法/117
- Filtered – reference LMS 算法的稳定
性/129
- Filtered – u 算法/145
- Filtered – x LMS 算法/122
- FIR 滤波器/45
- FIR 滤波器的权值/49
- FIR 滤波器的误差表面/70
- H_2 and H_∞ 范数/48
- H_2/H_∞ 控制器设计/287
- H_2/H_∞ 控制器的离散频率设计/269
- Helmhotz 方程/3
- Hermitian 二次型/13
- Hermitian 转置/26
- Hermitian 矩阵/401
- Hessian 矩阵/50
- Hilbert 变形/59
- IIR 滤波器/47
- IIR 滤波器的系数/82
- Karhunen – Loeve 变形/80
- Kronecker delta 函数/45
- LMS 的收敛时间/122
- LMS 的收敛系数/71
- LMS 算法/42
- LMS 算法的模式/70
- LMS 算法的失调/72
- LQG 控制, 单通道/262
- LQG 控制, 多通道/283
- NARMAX 模型/331
- OGY 方法/353
- PC_LMS 算法/190
- Q 参数化/259
- Q 符号/258
- RLMS 算法/85
- RLS 算法/73
- Sigma – delta 转换器/386
- TAG 算法/137
- Toeplitz 矩阵/63
- Volterra 系列/330
- Youla 参数化/258
- Z 变换/42
- 安静区域/38
- 标称性能/262
- 标准方程/52
- 病态矩阵/74
- 病态条件/384
- 波动方程/2
- 波反射/7
- 波形综合/100

- 部分更新/225
采样频率/42
采样时间/42
参考传感器/92
参考信号, 控制系统/90
乘法输入不确定度/275
惩罚函数方法/175
初级声源/29
初级通道/109
初级源/1
初值定理/44
处理器要求/404
传递函数/11
传递函数的极点/246
传感器布置/92
传感器噪声/107
次级通道/107
次级源/1
单边维纳滤波器/58
单位阶跃函数/60
单位圆/43
单位阵/50
迭代最小二乘/104
叠加/3
动态爬坡/368
对角矩阵/215
对象/1
多层感知/335
多路复用器/399
多通道 filtered – reference LMS 算法的
 稳定性/220
多通道单频控制/105
多通道电子滤波器/213
多通道反馈控制/197
多通道维纳滤波器/63
多误差 LMS/220
多值非线性/327
耳朵保护装置/322
反馈对消/108
反馈控制/40
反馈伺服控制/309
方程误差方法/82
非结构化的不确定度/278
非线性系统/5
分散控制/194
粉红噪声/53
辐射模式/2
辐射效率/32
复数梯度/164
复数压力/3
改进 filtered – reference LMS 算法/123
干扰的增强/253
功率谱密度/52
共振/2
广义近似理论/337
广义逆/417
过采样/397
过定系统/159
过模拟/101
过拟合/83
行列式/197
后背封闭式耳机/318
后冲函数/333
蝴蝶效应/355
互补敏感度函数/244
互谱密度/52
互相关函数/50
互相关向量/52

- 回归映射/358
- 回路增益/243
- 混叠/150
- 混沌系统/328
- 混沌系统的控制/355
- 间接自适应控制/309
- 简支板/32
- 桨叶基频(BPF)/201
- 交叉验证/343
- 结构化的不确定度/278
- 截止频率/8
- 静态非线性逆/346
- 矩阵/12
- 矩阵的范数/427
- 矩阵的迹/63
- 矩阵的经典伴随阵/216
- 矩阵的逆/65
- 矩阵的数值秩/427
- 矩阵二次方程/421
- 矩阵逆的引理/75
- 均衡系统/170
- 抗混叠滤波器/150
- 控制信号/4
- 控制作用/91
- 块 LMS 算法/77
- 快速 LMS 算法/78
- 快速 RLS 算法/76
- 快速傅里叶变换/59
- 扩散/38
- 扩展的最小二乘/141
- 离散傅里叶变换/59
- 连续域最优化/367
- 量化噪声/401
- 零阶保持器/93
- 零矩阵/413
- 零空间/164
- 脉冲传递函数/94
- 脉冲响应/45
- 敏感度函数/243
- 模拟退火/366
- 模数转换器/150
- 模型密度/30
- 模型重叠/30
- 模型阻尼/30
- 挠波波数/14
- 内采样特性/256
- 内积/49
- 牛顿法/73
- 庞加莱截面/357
- 配置/1
- 频率窗口/54
- 频域自适应/76
- 平面波/1
- 普通最小二乘/88
- 谱半径/274
- 谱密度矩阵/65
- 奇异阵/422
- 奇异值分解/165
- 前馈控制/40
- 欠定系统/161
- 欠拟合/83
- 权值参数的系数/50
- 全通部分/112
- 确定性干扰/98
- 确定性混沌/330
- 弱非线性/5
- 神经网络/174
- 神经网络控制器/354

- 声波数/194
声波长/17
声单极子/15
声辐射/2
声体积速度/204
声压/2
声阻抗/18
时间提前控制信号/312
收敛因子/68
输出不确定度/276
输出误差方法/82
输入不确定度/275
输入功率和总能量/24
数据转换器/141
数模转换器/93
数字控制器/93
数字滤波器中的截断噪声/408
水床效应/254
损耗/20
特征方程/197
特征轨迹/274
特征增益/424
特征值扩散度/119
特征值 - 特征向量分解/119
梯度向量/103
体积速度/2
凸函数/259
推广/42
外部输入/108
外积/212
完全反馈控制器/292
完全确定系统/161
伪逆/65
稳定性/4
误差表面的主轴/71
误差传感器/40
稀疏自适应/225
系统辨识/81
系统辨识/81
系统模型/123
线性/3
线性预测/53
相对稳定性/121
相关矩阵/50
相位图/356
相位滞后补偿器/254
向量/12
向量的 2 范数/199
向量的无穷范数/429
小增益理论/274
信噪比/402
压缩空气扩音器/351
延时导致的带宽限制/245
一般性能函数/159
遗传算法/366
遗忘因子/74
抑制/2
因果性/43
影响系数/339
映射/81
有限精度影响/411
有效作用加权/173
与干扰有关的补偿/322
与频率有关的收敛系数/79
圆周卷积/134
在线辨识/142
振动的局部控制/38
正交原理/52

- 直流漂移/41
- 指导随机搜索方法/237
- 秩空间/167
- 重构滤波器/45
- 主动耳机/40
- 主动靠枕/241
- 主增益/170
- 驻波/6
- 转置/13
- 状态空间表达式/262
- 自适应 FIR 控制器/116
- 自适应 IIR 控制器/142
- 自适应反馈控制/117
- 自适应逆控制/311
- 自稳定/86
- 自相关函数/50
- 自相关矩阵/50
- 棕色噪声/53
- 总动能/25
- 总声势能/28
- 组合爆炸/365
- 最低有效位/409
- 最速下降法/42
- 最小方差控制/242
- 最小相成分/59
- 最小相系统/22
- 最优变换器位置/373
- 作动器布置/381
- 作用加权参数/172

术 语

信号规范

$x(t)$	标量连续信号
T	采样时间 $t = nT$ n 是整数
f_s	采样率等于 $1/T$
$x(n)$	标量采样信号, 离散时间 n 变量的函数
$\mathbf{x}(n) = [x_1(n) x_2(n) \cdots x_k(n)]^T$	采样信号向量或 $[x(n) x(n-1) \cdots x(n-l+1)]^T$ 单个信号的过去采样的向量
$X(z)$	信号 $x(n)$ 的 z 变换
$\mathbf{x}(z)$	$\mathbf{x}(n) = [x_1(n) x_2(n) \cdots x_k(n)]^T$ 中信号的 z 变换
$X(e^{j\omega T})$	$x(n)$ 的傅里叶变换
$X(k)$	$x(n)$ 的离散傅里叶变换 (DFT)
ω	角频率, 赫兹形式的实际频率的 2π 倍
ωT	归一化的无量纲的角频率
$R_{xx}(m)$	$E[\mathbf{x}(n)\mathbf{x}(n+m)]$, 自相关序列
$R_{xy}(m)$	$E[\mathbf{x}(n)\mathbf{y}(n+m)]$, 互相关序列
$S_{xx}(z)$	$R_{xx}(m)$ 的 z 变换
$S_{xy}(z)$	$R_{xy}(m)$ 的 z 变换
$S_{xx}(e^{j\omega T})$	功率谱密度 也可以表示为 $E[X(e^{j\omega T}) ^2]$ 满足附录所描述的条件
$S_{xy}(e^{j\omega T})$	互谱密度, 也可以表示为 $E[\mathbf{X}^*(e^{j\omega T})\mathbf{Y}(e^{j\omega T})]$ 满足附录所描述的条件
$R_{xx}(m)$	$E[\mathbf{x}(n+m)\mathbf{x}^T(n)]$, 自相关矩阵
$R_{xy}(m)$	$E[\mathbf{y}(n+m)\mathbf{x}^T(n)]$, 互相关矩阵
$S_{xx}(e^{j\omega T})$	$R_{xx}(m)$ 的傅里叶变换, 也可表示为 $E[\mathbf{x}(e^{j\omega T})\mathbf{x}^H(e^{j\omega T})]$ 满足附录所列的条件
$S_{xy}(e^{j\omega T})$	$R_{xy}(m)$ 的傅里叶变换, 也可表示为 $E[\mathbf{y}(e^{j\omega T})\mathbf{x}^H(e^{j\omega T})]$ 满足附录所列的条件