

数学交叉学科与应用数学丛书

卡尔曼滤波 及其实时应用 (第5版)

[美] Charles K. Chui [中] Guanrong Chen 著
戴洪德 李娟 戴邵武 周绍磊 译

Kalman Filtering with
Real-Time Applications
(Fifth Edition)



清华大学出版社

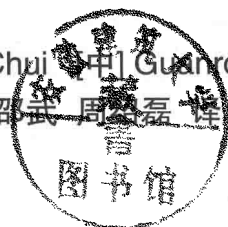


Springer

数学交叉学科与应用数学丛书

卡尔曼滤波 及其实时应用 (第5版)

[美] Charles K. Chui [中] Guanrong Chen 著
戴洪德 李娟 戴邵武 周磊 译



Kalman Filtering with
Real-Time Applications
(Fifth Edition)



清华大学出版社

北京



Springer

内 容 简 介

本书介绍了卡尔曼滤波的基本原理和相关的主题,包括卡尔曼滤波的直观理解和正交投影证明;系统噪声和测量噪声相关的卡尔曼滤波、有色噪声的处理、时不变系统的极限滤波、序贯算法和平方根算法、非线性系统的扩展滤波、高维系统的解耦滤波、不确定系统的区间滤波、随机信号多分辨分析的小波滤波、传感器网络的分布式估计等,并在最后一章简单列举了主体部分没有介绍到的卡尔曼滤波的一些其他重要主题;最后给出了每一章练习题的解答或提示。

本书可以作为通信、导航、自动化、电子、应用数学等专业高年级本科生或研究生的教学用书,也可作为工程技术人员的参考书。

Translation from the English language edition: Kalman Filtering with Real-Time Applications by Charles K. Chui and Guanrong Chen Copyright © Springer International Publishing AG 2017, This Springer imprint is published by Springer Nature The registered company is Springer International Publishing AG All Rights Reserved.

本书中文简体字翻译版由德国施普林格公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2018-4398

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

卡尔曼滤波及其实时应用:第5版/(美)崔锦泰,陈关荣著;戴洪德等译.一北京:清华大学出版社,2018

(数学交叉学科与应用数学丛书)

书名原文:Kalman Filtering with Real-Time Applications(Fifth Edition)

ISBN 978-7-302-49893-3

I. ①卡… II. ①崔… ②陈… ③戴… III. ①卡尔曼滤波—研究 IV. ①O211.64

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第175257号

责任编辑:薛慧

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

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:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×230mm 印 张:14

字 数:259千字

版 次:2018年8月第1版

印 次:2018年8月第1次印刷

定 价:49.00元

产品编号:077009-01

第 5 版译者序

PREFACE



卡尔曼滤波无论是理论还是应用最近十年都得到了快速发展。2013 年我们有幸翻译出版了 *Kalman Filtering with Real-Time Applications* 这本专著的第 4 版,很高兴看到第 4 版的翻译出版得到了国内读者的认可,并多次重印。当然最主要的原因还是原著对卡尔曼滤波理论深入浅出的透彻讲解以及对卡尔曼滤波实时应用简明清晰的实例分析。

2017 年,我们欣喜地看到原著第 5 版在 Springer 出版,传承了该专著前几版理论联系实际应用的讲授模式,在第 4 版的基础上增加了原著作者在卡尔曼滤波领域最新的研究成果——传感器网络的分布式估计。这是最近十年得到国内外广泛关注和深入研究的卡尔曼滤波领域前沿热点研究方向。我们再次非常荣幸地在第一时间完成了该专著第 5 版的翻译工作。

感谢清华大学出版社石磊老师为促成本书第四版和第五版成功翻译出版付出的辛勤劳动。

希望第 5 版及时的翻译出版能够促进卡尔曼滤波及其新发展在国内得到更深入的理论研究和更广泛的应用研究。虽然经过了反复的校对和修改,由于译者水平有限,难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

戴洪德(dihod@126.com)

2017 年 8 月 1 日

于烟台海军航空大学



卡尔曼滤波自从 20 世纪 60 年代初问世以来,就在航空航天领域获得了非常成功的应用。随着研究的深入,卡尔曼滤波技术越来越多地应用于各个领域,如导航制导、工业控制、目标跟踪、大地测量和金融等。

大部分初学者认为卡尔曼滤波理论性较强,门槛较高,且国内专门针对卡尔曼滤波的专著相对较少,给初学者带来了较大的不便。译者在求学时有幸拜读了 Charles K. Chui 和 Guanrong Chen 两位教授的专著 *Kalman Filtering with Real-Time Applications* 的第 3 版,获益匪浅。2009 年,我们欣喜地发现时隔 11 年后,两位教授推出了这本专著的第 4 版,我们觉得很有必要把这本从出版到现在经过 25 年时间考验和反复修订的专著介绍给国内的读者。本书深入浅出地介绍了卡尔曼滤波的基本原理和发展,以及它们的实时应用。

本书由海军航空工程学院的戴洪德、周绍磊、戴邵武和鲁东大学的李娟合作翻译,另外海军航空工程学院电子信息工程系的吴芳教员参与了第 11 章的翻译,博士研究生李飞参与了第 7、8 章的翻译,尹高阳参与了第 4 章的翻译。参加翻译的还有徐庆九、于进勇、吴光彬、吴晓男、支岳、曹文静、徐胜红、丛源材、吴青坡、蒋华、袁锐、赵伟等。全书由戴洪德统稿,秦永元主审,戴邵武校对。

感谢西北工业大学自动化学院的陈明教授,把我带进卡尔曼滤波的奇妙世界,并把这本书的原著介绍给我。非常感谢西北工业大学的秦永元教授百忙中对译稿进行了非常认真细致的审校。秦永元教授是研究卡尔曼滤波的著名专家,他在 1998 年出版的《卡尔曼滤波与组合导航原理》是该领域的经典著作,成为相关领域研究者案头必备的参考书,并于 2012 年 6 月进行了再版。感谢西北工业大学的严恭敏副教授在本书翻译过程中与译者的深入交流及提出的有益建议。

非常感谢清华大学出版社石磊和赵从棉两位老师为本书的顺利出版所付出的辛勤劳动。

在出版清样第一稿完成后,非常荣幸地联系上了原著作者之一陈关荣教授。陈教授在百忙之中对译稿进行了校对,特此致谢。

本书虽然经过了反复的校对和修改,由于译者水平有限,难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

戴洪德
2012 年 12 月
于烟台海军航空工程学院

第 5 版前言



FOREWORD

我们以最大的敬意,谨以新版本纪念 Rudolf E Kalman (1930. 5. 19—2016. 7. 2)。Kalman 最先研究了线性随机动态模型的离散时间黎卡提方程,并且推导出相应估计器的最优线性反馈增益。这个天才创新的重要性在于实现了最优估计器的实时计算,诞生了著名的“卡尔曼滤波器”(Kalman Filter),这正是我们这本专著讨论的核心内容。

Kalman 还通过介绍状态空间框架,定义系统可控和可观的概念,开创了现代系统和控制理论。Kalman 对现代科技还有许多其他重要贡献。为了介绍控制系统,我们于 1989 年同样在 Springer-Verlag 出版了另外一本专著,题为《线性系统和最优控制》(*Linear Systems and Optimal Control*),可以看作是这本关于卡尔曼滤波专著的姊妹篇。

在第 5 版中,在 Wen Yang 和 Ling Shi 两位博士的帮助下,我们新增加了一章,即第 12 章,研究了传感器网络的分布式估计。因为这是卡尔曼滤波实时工程应用领域的热点研究专题,我们相信这部分内容和本书的其他内容融为一体。

我们诚挚地希望读者能够认为这个新版本更好理解、更有益,我们期待您无私的反馈。

Charles K. Chui
Guanrong Chen
2016. 8

第3版前言



----- FOREWORD

第3版的《卡尔曼滤波及其实时应用》中增加了两个关于卡尔曼滤波的新主题。为了扩展卡尔曼滤波在不确定系统中的应用,增加了区间卡尔曼滤波(第10章);结合高效的小波和样条技术,介绍了小波卡尔曼滤波(第11章),并给出了信号估计和信号分解等领域内更为有效的计算方案。希望加入这两章能使新版本给出更完整和与时俱进的实时应用卡尔曼滤波技术。

Charles K. Chui

Guanrong Chen

1998.8

第 2 版前言



FOREWORD

除了进行较少的勘误和参考文献更新外,我们将第 1 版第 10 章的“实时系统辨识”扩展为两节,合并到第 8 章。在第 10 章包含了非常基本的小波分析介绍。虽然小波分解和重构的金字塔算法和卡尔曼滤波算法截然不同,它们仍然可以应用到时域滤波。希望在不久的将来,样条和小波可以与卡尔曼滤波相结合。

Charles K. Chui

Guanrong Chen

1990.9



卡尔曼滤波作为一种最优状态估计方法,可以应用于受随机干扰的动态系统。准确地说,卡尔曼滤波器给出了一种递推算法,由实时获得的受噪声污染的离散观测数据,对系统状态进行线性、无偏及最小误差方差的最优估计。该算法已经广泛应用于工业和控制的许多领域,如视频和激光跟踪系统、卫星导航、弹道导弹轨迹估计、雷达和火力控制等。随着最近高速计算机的发展,卡尔曼滤波的应用将更加广泛,特别是在更加复杂的实时应用中。

尽管如此重要,卡尔曼滤波的数学理论以及含义并没有被很好地理解,甚至对于一些应用数学家和工程师也是如此。事实上,非常多的应用者仅仅被告知滤波算法是什么,而不知道为什么它们如此有效。本书的一个主要目标就是通过对卡尔曼滤波的数学理论和多种实时应用问题的讨论,来揭开卡尔曼滤波器的神秘面纱。

本书首先介绍了滤波方程的基本推导。该方案的优势是通过假设某些矩阵非奇异,可以很好地理解卡尔曼滤波的最优性。当然通过应用广为人知的正交投影方法,有时也称之为新息方法,可以不需要这些假设。然后将该方法进行扩展来处理系统和量测噪声相关的问题,以及有色噪声问题。本书还讨论了针对非线性系统的卡尔曼滤波及其在自适应系统辨识中的应用。此外,介绍了实时应用中的极限或稳态卡尔曼滤波理论、序贯算法和平方根算法等高效计算方法。卡尔曼滤波一个典型的应用是数字跟踪滤波器设计,如 α - β - γ 和 α - β - γ - θ 跟踪器。对于白噪声,应用卡尔曼增益的极限值来定义 α 、 β 和 γ 参数,对于有色噪声则为 α 、 β 、 γ 和 θ ,可以将该跟踪滤波器描述为极限或稳态卡尔曼滤波器。因为最优估计的误差随着时间以指数衰减,从这个角度看,通过这些更有效的预测-校正方程得到的状态估计是近似最优的。我们还研究了一种可以得到状态向量各分量滤波方程的解耦方法。

本书的写作风格趋向于随意而非刻板式的,数学证明趋向于简单但是严谨,使得具备基本的线性代数和系统理论的任何人,无论是学生还是专家,都易于阅读。考虑到这一点,本书引入了一个预备知识章节,包含了矩阵理论、行列式、概率论和最小二乘原理。为了说明相关知识点,加强对材料的理解,或完成书中的一些证明,在每一章都配备了一定数量的练习题,并在书的末尾给出了答案或提

示。为了满足感兴趣读者进一步的研究,附录材料和参考文献也列在书尾。

本书的设计是为了达到三个目的:适用于自学;适用于应用数学或工程专业大学高年级学生或一年级研究生的半学期或一学期的卡尔曼滤波课程;另外,希望本书能够成为工业或控制工程师有价值的参考资料。

第一作者要感谢美国军队研究办公室的持续资助,特别感谢白沙导弹靶场(White Sands Missile Range)的 Robert Green 的鼓励和多次深入的讨论。对于爱妻, Margaret, 作者要感谢她的理解和一如既往的支持。第二作者非常感谢中山大学的陈铭俊教授将这一非常重要的研究领域介绍给作者,以及感谢他夫人 Qiyun Xian 的耐心和鼓励。

在给出有价值建议的同事中,作者要特别感谢 Andrew Chan 教授(得克萨斯 A&M)、Thomas Huang 教授(伊利诺斯)、Tomas Kailath 教授(斯坦福)。最后,非常感谢 Helmut Lotsch 博士和 Angela Lahee 博士友好的合作和帮助,以及 Springer-Verlag 编辑们的工作。

Charles K. Chui
Guanrong Chen
1987. 1



A, A_k	系统矩阵
A^c	矩阵 A 在 Cholesky 分解时的“平方根”
A^u	矩阵 A 在上三角分解时的“平方根”
B, B_k	控制输入矩阵
C, C_k	量测矩阵
$\text{Cov}(X, Y)$	随机变量 X 和 Y 的协方差
$E(X)$	随机变量 X 的期望
$E(X Y=y)$	条件期望
e_j, \hat{e}_j	
$f(x)$	概率密度函数
$f(x_1, x_2)$	联合概率密度函数
$f(x_1 x_2)$	条件概率密度函数
$f_k(x_k)$	非线性向量函数
G	极限卡尔曼增益矩阵
G_k	卡尔曼增益矩阵
$H_k(x_k)$	非线性矩阵函数
H^*	
I_n	$n \times n$ 单位矩阵
J	矩阵的若尔当标准型
K_k	
$L(x, v)$	
M_{AF}	可控性矩阵
N_{CA}	可观测性矩阵
$O_{n \times m}$	$n \times m$ 阶零矩阵
P	极限(误差)协方差矩阵
$P_{k,k}$	估计(误差)协方差矩阵
$P[i, j]$	矩阵 P 的第 (i, j) 个元素

$P(X)$	随机变量 X 的概率
Q_k	随机向量 ξ_k 的方差矩阵
R_k	随机向量 η_k 的方差矩阵
R^n	列向量空间 $x = [x_1 \ \cdots \ x_n]^T$
S_k	ξ_k 和 η_k 的协方差矩阵
tr	迹
u_k	在第 k 时刻的确定性控制输入
$\text{Var}(X)$	随机变量 X 的方差
$\text{Var}(X Y=y)$	条件方差
v_k	观测(量测)数据
$v^{2\#}$	
W_k	权值矩阵
w_j	
$(W_\psi f)(b, a)$	小波积分变换
x_k	k 时刻的状态向量
$\hat{x}_k, \hat{x}_{k k}$	x_k 的最优滤波估计
$\hat{x}_{k k-1}$	x_k 的最优预测
\check{x}_k	x_k 的次优滤波估计
\bar{x}_k	x_k 的近优滤波估计
x^*	
$x^\#, x_k^\#$	
$\ w\ $	w 的范数
$\langle x, w \rangle$	x, w 的内积
$Y(w_0, \dots, w_r)$	向量 w_0, \dots, w_r 的线性生成空间
$\{z_j\}$	数据的新息序列
$\alpha, \beta, \gamma, \theta$	跟踪器参数
$\{\beta_k\}, \{\gamma_k\}$	白噪声序列
Γ, Γ_k	系统噪声矩阵
δ_{ij}	Kronecker 符号
$\underline{\varepsilon}_{k,l}, \bar{\varepsilon}_{k,l}$	随机(噪声)向量
η_k	(k 时刻的)量测噪声
$\underline{\xi}_k$	(k 时刻的)系统噪声
Φ_{kl}	转移矩阵
df/dA	雅克比矩阵
$\partial h/\partial x$	雅克比矩阵



第 1 章 预备知识	1
1.1 矩阵和行列式初步	1
1.2 概率论初步	6
1.3 最小二乘初步	12
练习	14
第 2 章 卡尔曼滤波：简单推导	16
2.1 模型	16
2.2 最优准则	17
2.3 预测-校正公式	19
2.4 卡尔曼滤波过程	22
练习	23
第 3 章 正交投影和卡尔曼滤波	27
3.1 最优估计的正交性	27
3.2 新息序列	29
3.3 最小方差估计	31
3.4 卡尔曼滤波方程	31
3.5 实时跟踪	36
练习	38
第 4 章 系统噪声和量测噪声相关的卡尔曼滤波	42
4.1 仿射模型	42
4.2 最优估计算子	44
4.3 额外数据对最优估计的影响	45
4.4 卡尔曼滤波方程推导	47
4.5 实时应用	52

4.6 线性确定/随机系统	54
练习	55
第5章 有色噪声环境下的卡尔曼滤波	58
5.1 处理思路	58
5.2 误差估计	59
5.3 卡尔曼滤波过程	61
5.4 系统白噪声	63
5.5 实时应用	64
练习	66
第6章 极限(稳态)卡尔曼滤波	68
6.1 处理思路	69
6.2 主要结论	70
6.3 几何收敛	77
6.4 实时应用	81
练习	82
第7章 序贯算法和平方根算法	84
7.1 序贯算法	84
7.2 平方根算法	88
7.3 实时应用算法	91
练习	91
第8章 扩展卡尔曼滤波和系统辨识	93
8.1 扩展卡尔曼滤波	93
8.2 卫星轨道估计	96
8.3 自适应系统辨识	97
8.4 一个常值参数辨识的例子	100
8.5 改进的扩展卡尔曼滤波	102
8.6 时变参数辨识	107
练习	111

第 9 章 滤波方程解耦	113
9.1 解耦公式	113
9.2 实时跟踪	115
9.3 α - β - γ 跟踪器	117
9.4 一个例子	120
练习	121
第 10 章 区间系统的卡尔曼滤波	124
10.1 区间数学	125
10.1.1 区间及其特性	125
10.1.2 区间运算	126
10.1.3 有理区间函数	129
10.1.4 区间期望和方差	130
10.2 区间卡尔曼滤波	132
10.2.1 区间卡尔曼滤波方案	133
10.2.2 次优区间卡尔曼滤波	134
10.2.3 目标跟踪的例子	135
10.3 加权平均区间卡尔曼滤波	137
练习	138
第 11 章 小波卡尔曼滤波	141
11.1 小波初步	141
11.1.1 小波基础	142
11.1.2 离散小波变换和滤波器组	143
11.2 信号估计和分解	145
11.2.1 随机信号的估计和分解	146
11.2.2 一个随机游走的例子	149
练习	151
第 12 章 传感器网络的分布式估计	152
12.1 背景	152
12.2 问题描述	153
12.3 算法收敛性	156

12.4 仿真算例	160
练习	161
第 13 章 附录	162
13.1 卡尔曼平滑器	162
13.2 α - β - γ - θ 跟踪器	164
13.3 自适应卡尔曼滤波	166
13.4 自适应卡尔曼滤波在维纳滤波中的应用	167
13.5 卡尔曼-布希滤波	168
13.6 随机最优控制	169
13.7 平方根滤波及其脉动阵列实现	170
参考文献	173
练习答案和提示	178
索引	201