

高等工科院校控制类专业教学用书



随机信号估计 与系统控制

宁寿 著

北京工业大学出版社

高等工科院校控制类专业教学用书

随机信号估计 与系统控制

徐宁寿 著

北京工业大学出版社

内 容 简 介

本书着重用工程观点介绍随机信号统计分析、估计和随机系统控制的基本理论及其在实际系统控制和信号处理领域中的一些应用。

全书除绪论外共分十三章,包括矩阵和多维随机变量等方面的预备知识,随机信号(过程)的统计分析,线性时变随机动态系统分析,五种基本估计方法,离散时间线性随机系统状态信号的最佳滤波、预报和平滑,连续时间线性随机系统状态信号的滤波,针对计算误差和模型误差所致滤波发散的补偿技术,非线性滤波问题的近似求解,随机系统最优控制与自适应预报控制,随机信号估计与随机系统控制理论在GPS信号滤波、结构减振控制和改进型广义预报控制等技术上的一些典型应用。

本书可供控制科学与控制工程和涉及信号处理技术的各类专业的师生以及有关科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

随机信号估计与系统控制/徐宁寿编著. —北京:北京工业大学出版社, 2001.1
ISBN 7-5639-0946-X

I. 随… II. 徐… III. ①随机信号-信号分析: 系统分析②随机系统-随机控制 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 58941 号

随机信号估计与系统控制

徐宁寿 著

※

北京工业大学出版社出版发行

邮编 100022 电话 67392308

各地新华书店经销

世界知识印刷厂印刷

※

2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 16 开本 28 $\frac{1}{4}$ 印张 670 千字

印数: 1~1000 册

ISBN 7-5639-0946-X/T·168

定价: 38.00 元

前 言

在当今数字计算机技术空前普及的时代,以卡尔曼滤波方法为核心的现代估计理论和随机控制理论已广泛应用于科学技术和国民经济的各个领域,成为随机信号处理和随机动态系统控制的一种有效手段。因此,掌握随机信号最佳估计和随机系统最优控制的基本理论及其应用技术,是系统控制和其他各种涉及现代信息科学的领域中从事技术开发应用与研究的高级工程技术人员必须具备的条件之一。

本书写作的宗旨是,主要针对着重培养工程应用型人才的工科高等院校有关控制科学与控制工程和涉及信号处理技术的各类专业研究生的教学需要,力图透过估计理论中繁复抽象的数学分析推导,从工程背景、物理意义、几何形象概念等多方面进行辅助说明,以期即使是初学的读者也能较快地接受和深入地理解基本理论的实质,进而达到联系实际、融汇贯通、恰当运用。对于各个领域已经或准备从事随机信号处理和系统控制教学或研究的高等院校教师、科技工作者来说,本书也将不失为有所助益的参考书。

阅读本书之前,要求读者学过《线性代数》、《初等概率论》和《线性系统理论》等课程。对于超出以上课程的内容,在本书中作了针对性的补充介绍。

全书除绪论外共分四篇十三章。第一篇(第1~3章)为随机信号与系统的基础知识。第1章为数学准备,着重于对某些在初等矩阵论和概率论教材中一般未涉及的知识(如矩阵求导运算、多维随机变量的统计描述等)作必要的补充,其中对于理论和实用上都很重要的正态概率分布的形成和多维正态概率分布特征作了刻力阐述。第2章对随机信号(过程)的基本统计分析知识从工程应用观点作了较细致说明,对于初学者往往感到难于理解的随机过程统计特性描述、白噪声信号的形象等也作了有特色的说明。第3章介绍有关线性时变随机动态系统输入输出关系的统计定量分析和定性分析的基本知识,以满足卡尔曼滤波技术中对被估计信号所采用的消息模型进行分析处理和随机控制技术对系统动态行为进行分析的需要。

第二篇(第4~8章)为随机信号估计的基本理论。第4章对于作为统计估计理论基础的5种基本估计方法(最小方差估计、最大验后估计、最大似然估计、线性最小方差估计、最小二乘估计)的准则、求解方法、相互关系和估计量性能评价等作了概要介绍。第5章用正交投影法导出离散时间线性随机系统状态信号的卡尔曼(线性最小方差)滤波递推算法。第6章通过对等效离散时间系统取采样周期趋于零的极限,导出连续时间线性随机系统状态信号的卡尔曼滤波算法。第5、6两章均对稳态卡尔曼滤波和一般控制系统及噪声为有色情况下的推广卡尔曼滤波算法作了较详细的论述。对于连续时间随机系统模型到离散时间随机系统模型的转换、由批量算法到递推算法的必要性等工程背景作了明确交代,并从具有白噪声特性的新息序列驱动的观点说明卡尔曼滤波器运行机制的物理含义,从马尔可夫估计与一步预报的最优加权平均的观点论述卡尔曼滤波的实质。在第5章中还

对最有实用意义的几种快速递推算法、线性随机系统状态的最小二乘滤波递推算法、卡尔曼最佳预报递推算法和采用最大验后法推导的最佳平滑递推算法结合离散时间系统情况作了介绍。第5章中关于观测噪声中含有确定性扰动情况下的推广卡尔曼滤波算法为第11章中提出的内模自适应卡尔曼滤波算法作了初步准备。第7章论述卡尔曼滤波在理想使用条件下的稳定性、针对计算误差和系统模型误差所致滤波发散现象的补偿技术,以及适用于噪声统计特性未知或慢时变情况的自适应滤波技术。对系统模型误差所致滤波发散现象的各种现有补偿技术的效果通过一典型例子作了全面的定量比较。对于消息模型和/或观测系统为非线性情况下出现的非线性滤波问题,第8章采用线性化卡尔曼滤波法和推广卡尔曼滤波法作近似求解,并给出了便于编程实现的迭代型算法,提出了人工神经网络实现的方法。

第三篇(第9~10章)为随机系统控制的理论。两章分别在简要论述离散时间确定性系统最优控制和预报控制理论的基础上,进一步对随机系统基于二次型性能指标的全局最优控制、局部滚动优化预报控制和系统参数估计问题的求解作了论述。第10章证明了在实现随机系统输出的多步预报方面,基于卡尔曼新息模型与基于丢番方程两种方法间的等效性。两章中均对克服时延效应和可用内模描述的一大类确定性扰动影响等实际中经常出现的问题作了针对性探讨,从而也为第13章中提出改进型广义预报控制技术打下了必要的基础。

第四篇(第11~13章)为随机信号估计和随机系统控制基本理论的应用实例。作为随机信号估计基本理论和方法的应用,第11章对全球定位系统(GPS)信号的卡尔曼滤波的现有技术作了较全面的概括,并进一步提出了内模自适应卡尔曼滤波新技术,并对野值修正及QR自适应卡尔曼滤波算法作了一定改进。第12,13章均属随机系统控制基本理论和方法的应用。第12章提出基于主导内模法的预报型结构减振控制技术。此法的基本思想是,根据被控工程结构的主导自然频率设计内模多项式,实现了结构在随机激励下响应的多步预报,进而成功地克服了执行机构动作的时延效应。第13章提出了过程控制用改进型广义预报控制技术及其单片式微处理器实现。这种广义预报控制新技术是以克服确定性扰动的最优滑动平均滤波器、连续时间系统的离散化模型参数理论近似值和系统输出多步预报的模型递推法等三项理论成果为基础的。

前三篇主要章节配有适量的习题,书末附有习题参考答案及参考文献,可供对相关专题有兴趣的读者进一步查阅之用。

在本书写作中,力求多反映一些最新的教学和科学研究成果。在前几章对现有理论的阐述中大量融入了作者多年来有关教学经验和实际运用体验,在后几章中则引入了作者近年间多项相关科研成果(特别是在基于内模原理的、可克服实际中常见的不可测确定性扰动的最佳滤波和预报控制,以及人工神经网络在卡尔曼滤波和预报控制中的应用等方面)。但限于个人水平,书中疏误在所难免,谨盼读者不吝指正。

在本书写作过程中,舒迪前教授、李友善教授、毛士艺教授等给予了热情帮助和鼓励,张其善教授对本书中基于内模原理的非线性自适应卡尔曼滤波理论新成果在GPS中的应用研究给予了特殊的支持。张建华、杨志鸿、杨红、余晨、高荣和高巍等在学校攻读学位

期间协助进行了部分书稿整理和数字仿真工作。张建华讲师在作者出访期间付出了大量精力代为校对书稿。在此一并向他们表示诚挚感谢。

本书内容所涉及的科研工作先后得到过三个国家自然科学基金项目(No. 6884006、No. 69474015、No. 59478031)和三个北京市自然科学基金项目(No. 4942004、No. 3942001、No. 3982006)的资助。

最后,作者衷心感谢北京工业大学有关领导对本书写作和出版的鼓励和支持。

徐宁寿

2000年12月

目 录

绪论	(1)
0.1 统计估计理论与应用的发展过程	(1)
0.2 随机动态系统中估计与控制问题的提出	(2)
0.3 随机信号估计和随机系统控制问题的分类	(4)
0.3.1 随机信号估计问题的分类	(4)
0.3.2 随机系统控制问题的分类	(5)
参考文献	(6)

第一篇 随机信号与系统基础知识

第1章 数学准备——矩阵论、概率论补充知识	(7)
1.1 矩阵论补充知识	(7)
1.1.1 矩阵反演定理和分块方阵的求逆公式	(7)
1.1.2 矩阵的迹(Norm)和范数(Trace)	(8)
1.1.3 矩阵不等式	(9)
1.1.4 矩阵函数的求导运算	(10)
1.2 多维(连续型)随机变量的联合概率分布及边际概率分布	(13)
1.2.1 一维随机变量情况回顾	(13)
1.2.2 多维随机变量概念	(15)
1.2.3 多维联合概率分布	(15)
1.2.4 边际概率分布	(15)
1.3 多维条件概率分布与统计独立性	(17)
1.3.1 随机事件的条件概率回顾	(17)
1.3.2 随机变量的条件概率分布密度	(17)
1.4 多维(连续型)随机变量的数字特征	(19)
1.4.1 一维随机变量情况回顾	(19)
1.4.2 二维随机向量情况	(21)
1.4.3 多维随机向量情况	(22)
1.4.4 条件均值(回归)与条件方差	(25)
1.5 多维随机向量的变换	(27)
1.5.1 一维随机变量情况回顾	(27)
1.5.2 多维随机向量情况	(28)
1.6 随机变量之和的概率分布与中心极限定理	(29)
1.6.1 多个随机变量之和的概率分布	(30)
1.6.2 中心极限定理	(31)

1.7 随机变量的特征函数	(33)
1.7.1 傅里叶变换引入概率论的背景	(33)
1.7.2 一维随机变量的特征函数	(34)
1.7.3 多维随机变量的特征函数	(35)
1.8 多维正态(高斯)分布	(36)
1.8.1 一维正态分布	(37)
1.8.2 多维正态分布的定义	(38)
1.8.3 联合分布与边际分布、条件分布的一致正态性	(39)
1.8.4 多维正态分布的条件均值、条件方差及其特点	(41)
1.8.5 独立性与不相关性之间的等价性	(41)
1.8.6 线性变换与线性组合前后的一致正态性	(42)
习题	(43)
参考文献	(45)
第2章 随机过程(信号)的数学描述	(46)
2.1 随机过程的统计描述	(46)
2.1.1 随机过程的基本概念	(46)
2.1.2 随机过程的概率分布表示法	(47)
2.1.3 随机过程的统计函数表示法	(49)
2.2 独立过程、不相关过程及正态过程	(51)
2.2.1 独立过程	(51)
2.2.2 不相关过程	(52)
2.2.3 δ 相关过程	(53)
2.2.4 正态过程	(54)
2.3 平稳过程	(54)
2.3.1 严平稳过程	(54)
2.3.2 广平稳过程	(56)
2.3.3 遍历性过程	(57)
2.4 随机信号(过程)的功率谱密度	(60)
2.4.1 帕什瓦尔定理与能量型信号的能量谱密度	(60)
2.4.2 信号的功率谱密度及自相关函数	(62)
2.4.3 功率型信号的功率谱密度与自相关函数间的关系	(63)
2.4.4 随机信号(过程)的功率谱密度	(63)
2.4.5 平稳随机信号(过程)的功率谱密度与维纳-辛钦定理	(63)
2.5 白噪声过程	(64)
2.5.1 平稳白噪声过程的频域定义	(64)
2.5.2 非平稳多维白噪声过程的时域定义	(66)
2.6 时间序列——自回归滑动和序列或 $ARMA(n, m)$ 序列	(67)
2.6.1 时间序列的定义和生成	(67)
2.6.2 时间序列的自相关序列特点	(67)

2.6.3 自回归序列的尤尔-瓦尔克方程	(69)
2.6.4 时间序列的主要应用简介	(69)
2.7 马尔可夫过程	(70)
2.7.1 一阶马氏过程(马氏-1 过程)	(70)
2.7.2 高阶马氏过程(马氏- q 过程)	(71)
2.7.3 正态马氏过程(序列)	(72)
2.8 独立、不相关及正交增量过程	(74)
2.8.1 独立增量过程	(74)
2.8.2 不相关及正交增量过程	(77)
习题	(77)
参考文献	(79)
第3章 线性时变随机系统特性的统计分析	(80)
3.0 引论	(80)
3.0.1 问题的提出	(80)
3.0.2 研究要求	(80)
3.0.3 研究方法	(81)
3.1 连续时间线性随机系统的基本结构及其状态随机过程的性质	(81)
3.1.1 系统的数学模型	(81)
3.1.2 关于状态初值和噪声统计特性的基本简化假设	(82)
3.1.3 状态向量随机过程的性质	(83)
3.2 离散时间线性随机系统的基本结构及其状态随机过程的性质	(84)
3.2.1 系统的数学模型	(84)
3.2.2 关于状态初值和噪声统计特性的简化假设	(87)
3.2.3 状态向量随机序列的性质	(88)
3.3 线性时变随机系统的输入-输出关系	(89)
3.3.1 连续时间随机系统的情况	(89)
3.3.2 离散时间随机系统的情况	(93)
3.4 线性时变随机系统的重要性质分析	(95)
3.4.1 线性时变随机系统的稳定性	(95)
3.4.2 线性时变随机系统的可观测性	(96)
3.4.3 线性时变随机系统的可控制性	(97)
习题	(99)
参考文献	(100)

第二篇 随机信号估计理论

第4章 基本估计方法概论	(101)
4.0 最佳估计问题的提出及其准则	(101)
4.0.1 随机动态系统中估计问题的表述	(101)
4.0.2 关于最佳估计准则选择的讨论	(102)

4.1	最小(误差)方差估计(Minimum Variance-of-error estimation)	(104)
4.2	最大验后估计(Maximum A Posteriori estimation)	(106)
4.2.1	最大验后准则	(106)
4.2.2	最大验后估计求解方法	(108)
4.3	最大似然估计(Maximum Likelihood estimation)	(109)
4.3.1	最大似然准则	(109)
4.3.2	最大似然估计求解方法	(110)
4.4	线性最小方差估计(Linear Minimum Variance estimation)	(113)
4.4.1	工程背景	(113)
4.4.2	线性最小方差估计问题的表述	(114)
4.4.3	线性最小方差估计求解方法	(114)
4.4.4	线性最小方差估计的统计性质	(116)
4.5	最小二乘估计(Least Squares estimation)	(117)
4.5.1	最小二乘准则	(117)
4.5.2	马尔可夫估计	(118)
4.6	估计量的性能评价与克拉美-罗不等式	(120)
4.6.1	估计量的性能	(120)
4.6.2	克拉美-罗不等式	(122)
	习题	(124)
	附录 各种基本估计量之间的关系及比较	(127)
	参考文献	(128)
第5章	离散时间线性随机系统状态的最佳线性递推估计	(129)
5.0	递推估计或滤波问题的提出	(129)
5.0.1	随机系统状态估计问题的工程背景	(129)
5.0.2	采用递推算法实现线性最小方差估计的必要性	(130)
5.1	正交投影定理	(131)
5.1.1	正交投影的定义	(131)
5.1.2	关于正交投影运算性质的三个定理	(131)
5.2	卡尔曼滤波递推算法基本公式的正交投影法推导	(135)
5.3	新息(观测的一步最佳预报误差)的统计性质	(141)
5.4	卡尔曼滤波器运行机制的物理说明	(144)
5.4.1	离散时间线性随机系统卡尔曼滤波器的结构分析	(145)
5.4.2	运行情况的特例分析	(146)
5.4.3	一般运行情况的分析	(147)
5.5	离散时间线性定常随机系统的稳态卡尔曼滤波器——离散时间维纳滤波器	(154)
5.5.1	稳态卡尔曼滤波器的基本结构	(155)
5.5.2	卡尔曼滤波器稳态误差方差阵的求解	(155)
5.5.3	离散时间情况下稳态卡尔曼滤波器与维纳滤波器的等效关系	(159)

5.6 卡尔曼滤波的快速递推算法	(160)
5.6.1 序贯处理法	(160)
5.6.2 信息滤波法	(162)
5.6.3 系统分割法	(164)
5.7 离散时间线性随机系统卡尔曼滤波的一些推广	(166)
5.7.1 白噪声作用下的一般离散时间线性随机控制系统情况	(166)
5.7.2 有色噪声作用下的离散时间线性随机系统情况	(172)
5.7.3 观测噪声中含有确定性扰动分量的情况	(177)
5.8 离散时间线性随机系统最小二乘滤波递推算法	(182)
5.9 离散时间线性随机系统的最佳预报	(185)
5.9.1 最佳固定区间预报	(186)
5.9.2 最佳固定点预报	(186)
5.9.3 最佳固定超前预报	(187)
5.9.4 最佳预报的误差特性	(187)
5.9.5 一般离散时间线性随机控制系统情况下的推广	(190)
5.10 离散时间线性随机系统的最佳平滑	(191)
5.10.1 最佳固定区间平滑	(192)
5.10.2 最佳固定点平滑	(196)
5.10.3 最佳固定滞后平滑	(200)
习题	(204)
参考文献	(205)
第6章 连续时间线性随机系统状态信号的最佳滤波	(206)
6.0 问题的提法及解决途径	(206)
6.0.1 连续时间线性随机系统最佳滤波问题的提法	(206)
6.0.2 求解的基本途径	(207)
6.1 连续时间线性随机系统与离散时间线性随机系统参数间的对应关系	(207)
6.1.1 由离散时间随机系统到连续时间随机系统的参数阵换算关系	(208)
6.1.2 由连续时间随机系统到离散时间随机系统噪声方差阵之间的对应关系	(209)
6.2 连续时间线性随机系统的最佳线性滤波方程	(210)
6.2.1 等效的离散时间线性随机系统	(210)
6.2.2 连续型卡尔曼滤波方程	(211)
6.3 连续时间线性定常随机系统的稳态卡尔曼滤波器——连续时间维纳滤波器	(216)
6.3.1 稳态卡尔曼滤波器的基本结构	(216)
6.3.2 卡尔曼滤波器稳态误差方差阵的求解	(217)
6.4 连续时间线性随机系统卡尔曼滤波的一些推广	(220)
6.4.1 白噪声作用下的一般连续时间线性随机控制系统情况	(220)
6.4.2 有色噪声作用下的连续时间线性随机系统情况	(222)
习题	(225)

参考文献	(225)
第7章 卡尔曼滤波发散现象的成因及补偿技术	(226)
7.0 卡尔曼滤波发散问题的提出	(226)
7.1 理想使用条件下卡尔曼滤波的稳定性	(227)
7.1.1 滤波稳定性问题的一般分析	(227)
7.1.2 最佳滤波误差方差阵的有界性	(228)
7.1.3 滤波误差方差阵的稳态特性	(229)
7.2 针对计算误差所致滤波发散的补偿技术	(231)
7.2.1 强制对称法	(232)
7.2.2 双倍字长法	(232)
7.2.3 平方根算法	(232)
7.3 针对模型误差所致滤波发散的补偿技术	(236)
7.3.1 模型误差对滤波误差的影响分析	(236)
7.3.2 限定增益下界法	(242)
7.3.3 伪随机噪声法	(244)
7.3.4 增益直接加权法	(246)
7.3.5 渐消(衰减)记忆法	(248)
7.3.6 限定记忆法	(250)
7.3.7 扩充状态向量法	(253)
7.4 自适应滤波技术	(255)
7.4.0 问题的提出及解决思路	(255)
7.4.1 基本关系式	(256)
7.4.2 仅观测噪声方差阵 R 不精确掌握的情况	(258)
7.4.3 仅动态噪声方差阵 Q 不精确掌握的情况	(260)
7.4.4 两种噪声方差阵 QR 均不精确掌握的情况	(260)
参考文献	(262)
第8章 非线性滤波问题的近似求解	(264)
8.0 非线性滤波问题的提出	(264)
8.1 线性化卡尔曼滤波法	(265)
8.1.1 连续时间非线性随机系统情况	(265)
8.1.2 离散时间非线性随机系统情况	(267)
8.2 迭代型推广卡尔曼滤波法	(268)
8.2.1 连续时间非线性随机系统情况	(268)
8.2.2 离散时间非线性随机系统情况	(272)
8.3 降低线性化次优滤波误差的途径	(274)
8.3.1 坐标变换法	(274)
8.3.2 二阶滤波法	(275)
8.3.3 自适应滤波法	(275)
8.4 非线性次优滤波的人工神经网络实现	(275)

习题.....	(276)
参考文献.....	(277)

第三篇 随机系统控制理论

第 9 章 离散时间线性随机系统的最优控制	(278)
9.1 确定性系统最优控制和预报控制中线性二次型问题简述	(278)
9.1.1 确定性离散时间系统模型	(278)
9.1.2 基本型最优控制问题	(280)
9.2 线性随机最优控制问题的提法	(289)
9.2.1 离散时间随机系统模型	(289)
9.2.2 基本型全局最优控制问题	(291)
9.3 线性-二次型-高斯(LQG)情况下的确定性等价定理与分离原理	(291)
9.3.1 求解 LQG 问题的确定性等价定理与分离原理	(291)
9.3.2 LQG 情况下最佳滤波与最优控制的对偶性	(306)
9.3.3 一般情况下随机最优控制近似处理中的分离原理	(307)
习题.....	(309)
参考文献.....	(309)
第 10 章 离散时间线性随机系统的自适应预报控制	(310)
10.1 确定性系统预报控制问题简述.....	(310)
10.1.1 离散时间系统中确定性扰动的内模描述	(310)
10.1.2 抗扰动型预报控制问题	(310)
10.1.3 多步预报控制律推导	(314)
10.2 线性随机系统预报控制和参数估计问题的提法.....	(322)
10.2.1 抗扰动型多步预报控制问题	(322)
10.2.2 随机系统参数估计问题	(322)
10.3 线性随机系统的参数估计.....	(323)
10.3.1 系统参数单独估计情况	(323)
10.3.2 系统状态和参数同时估计情况	(324)
10.4 线性随机系统的自适应预报控制.....	(329)
10.4.1 线性定常随机系统的最小方差多步预报	(330)
10.4.2 自适应多步预报控制	(339)
10.4.3 作为特例的一些自校正控制技术	(341)
10.4.4 人工神经网络的应用	(341)
参考文献.....	(350)

第四篇 应 用 实 例

第 11 章 全球定位系统(GPS)信号的卡尔曼滤波	(351)
11.0 GPS 信号滤波问题概述	(351)
11.1 GPS 信号的状态空间法建模	(352)

11.1.1	GPS 定位信号建模问题的讨论	(353)
11.1.2	基于微分多项式的消息模型	(355)
11.1.3	基于一阶时间相关函数的辛格消息模型 ^[1]	(356)
11.1.4	“当前”加速度统计模型 ^[1]	(357)
11.1.5	基于内模原理的系统数学模型	(359)
11.2	野值修正的卡尔曼滤波	(363)
11.3	QR 参数自适应卡尔曼滤波	(365)
11.4	基于当前加速度模型的自适应卡尔曼滤波	(368)
11.5	内模自适应卡尔曼滤波	(370)
11.5.1	静态定位情况	(373)
11.5.2	动态定位情况	(374)
11.5.3	人工神经网络实现	(380)
	参考文献	(382)
第 12 章	基于主导内模法的预报型结构减振控制技术	(383)
12.0	结构减振控制问题概述	(383)
12.1	结构动力学模型	(384)
12.2	主导内模法的实施	(386)
12.3	控制律的推导	(387)
12.4	闭环稳定性分析	(390)
12.5	主导内模法对于设定频率的鲁棒性分析	(391)
	参考文献	(399)
第 13 章	过程控制用改进型广义预报控制	(401)
13.0	广义预报控制概述	(401)
13.1	基本型广义预报控制算法简介	(401)
13.2	最优滑动平均滤波器用于抑制确定性扰动和模型噪声 ^[10,24]	(403)
13.3	离散系统模型参数的理论近似值用于设定参数估计初值	(407)
13.4	模型递推法用于实现多步预报 ^[11,13,25]	(410)
13.5	改进型广义预报控制律	(413)
13.6	单片式微处理器实现	(414)
13.6.1	基本控制算法的简化	(414)
13.6.2	参数估计算法的简化	(416)
13.6.3	纯时延的简捷估算	(417)
13.6.4	稳态增益的简捷估算	(417)
	参考文献	(421)
附录	函数插值型联想记忆系统简介	(424)
	参考文献	(430)
	习题参考答案	(431)

绪 论

0.1 统计估计理论与应用的发展过程

估计理论所要解决的问题,简单地说,就是要从受到各种干扰的信号观测结果中尽可能充分地滤除干扰的影响,析离出预期的有用信息;或者说,通过处理一系列含有误差的测量数据,得出隐含于其中的被测量的估计值。由于干扰和信号都可能具有随机性质,这种估计工作只有采用统计学的方法才能解决。

久远以前,人类就注意到根据对自然现象的观测和试验结果进行估计和预测的问题。为此,人们尝试过采用较简单的多项式和三角级数等作为基本趋势项的表达式进行数据拟合。但估计理论的正式开始,只能从1632年伽里略(G. Galileo)通过试用各种误差函数极小化提出了估计理论问题算起。随后所开展的一系列早期研究工作中,主要有1795年高斯(C. F. Gauss)提出的至今在理论上和应用中仍然富有生命力的最小二乘估计方法和1910年费歇尔(R. A. Fisher)提出的最大似然估计方法。但高斯当年在处理天体星座定位问题时,将被估计的天体运动轨道看作确定性的几何曲线,只是观测数据受到随机干扰影响而有误差。至于最小二乘方法用于更复杂的随机信号的估计问题上,则是晚了将近150年、估计理论进入现代阶段以后的事。

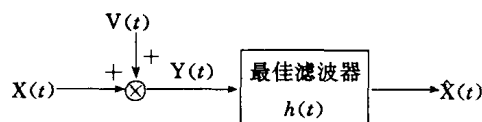


图 0-1 维纳滤波问题示意图

作为现代统计估计理论的奠基人,维纳(N. Wiener)和柯罗莫格洛夫(A. H. Колмогоров)于1940年代分别进行了大体相似的开创性工作。维纳提出的滤波理论对于信号和干扰都满足平稳随机性质和存在有理谱密度的情况,解决了在最小均方误差意义下信号的最佳估计问题。如图0-1所示,对随机信号 $X(t)$ 进行观测所得数据 $Y(t)$ 中含有随机干扰 $V(t)$ 。现要求设计一个冲激响应特性为 $h(t)$ 的最佳滤波器,使其输出

$$\hat{X}(t) = \int_{-\infty}^t y(v)h(t-v)dv \quad (0.1-1)$$

与信号真值 $X(t)=x(t)$ 之间满足如下最小均方误差逼近的要求:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [\hat{X}(t) - x(t)]^2 dt = \min \quad (0.1-2)$$

可以证明,此最佳滤波器的冲激响应特性 $h(t)$,可通过求解如下维纳-霍普夫(Wiener-Hopf)积分方程得到:

$$R_{YX}(\tau) - \int_0^{\infty} h(v)R_Y(\tau-v)dv = 0, \quad \tau \geq 0 \quad (0.1-3)$$

式中

$$\begin{aligned} R_{YX}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y(t)x(t+\tau)dt \\ R_Y(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y(t)y(t+\tau)dt \end{aligned} \quad (0.1-4)$$

分别为 $Y(t)$ 与 $X(t)$ 之间的互相关函数和 $Y(t)$ 的自相关函数。显然,相关函数的计算、维纳-霍普夫积分方程的求解和每一时刻下滤波器响应的推求,都涉及到大量历史数据的存储和运算,在一般情况下只有采用高速、大容量的计算机才能较充分地满足估计工作的实时性要求。这一困难使维纳滤波理论的应用和发展受到极大限制。

至 20 世纪 60 年代初,随着空间技术发展对于处理统计特性具有非平稳性(即时变性)的多维随机信号和干扰的迫切需要,卡尔曼(R. E. Kalman)和布西(R. S. Bucy)提出了递推滤波算法。通过引入状态变量法建立反映被估计信号生成和演化机理的“消息模型”(实际上是一种线性时变随机系统的状态转移方程),直接计算状态的估计值及其均方误差。卡尔曼滤波方法的显著特点和优点是,计算中出现了一个便于用计算机数值求解的非线性微分方程——黎卡提(Riccati)方程,且不需保存大量过去的测量数据,从而回避了维纳滤波方法中最佳滤波器冲激响应特性的求解困难,并突破了平稳性和单变量的限制。由此开辟了估计理论飞跃发展和广泛应用于随机系统控制和随机信号处理领域的新阶段。

0.2 随机动态系统中估计与控制问题的提出

在一般的确定性动态系统理论中,对任何随机因素都不予考虑。但在随机系统控制和随机信号处理技术所涉及的估计问题中,就要专门来探讨如何对付受到随机环境影响和测量噪声干扰的动态系统中的一些问题。先来看一个简例。

例 0-1 设在对空战斗中,一架敌机正径直向我方雷达俯冲过来(图 0-2)。这时,为了命中敌机,须立即根据雷达发出的脉冲电磁波的反射时间 T 的测量结果,对敌机的距离 r 和速度 $\dot{r}$ 做出尽可能准确的估计。

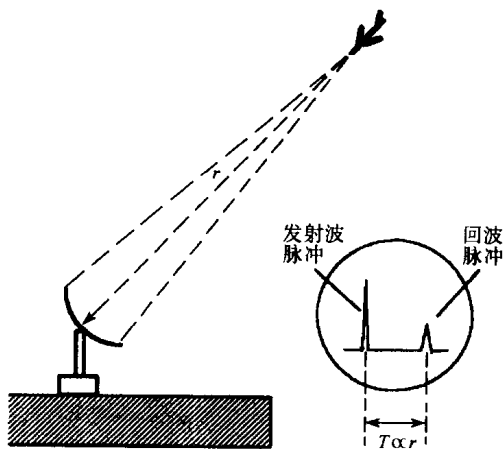


图 0-2 对空战斗中的估计问题

按牛顿加速度定理,有

$$\ddot{r}(t) = \frac{1}{m} \mathbf{W}(t) \quad (0.2-1)$$

式中, m 为飞机的质量, $\mathbf{W}$ 为作用在飞机上的合力。由于高空中的风力变化有随机性,加上敌机驾驶员为了逃避我方火力,也故意采取随机操纵作法,致使 $\mathbf{W}$ 也呈随机变化。因此, (0.2-1) 式实际上是一个随机微分方程。

选用状态变量

$$\begin{cases} X_1(t) = r(t) \\ X_2(t) = \dot{X}_1(t) = \dot{r}(t) \end{cases}$$

即状态向量

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}$$

可得状态方程

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1(t) \\ \dot{X}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \mathbf{W}(t), \quad \begin{bmatrix} X_1(t_0) \\ X_2(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(t_0) \\ \dot{r}(t_0) \end{bmatrix}$$

或

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{X}(t) + \mathbf{F} \mathbf{W}(t), \quad \mathbf{X}(t)|_{t=t_0} = \mathbf{X}(t_0) \quad (0.2-2)$$

式中 $\mathbf{X}(t_0)$ 为初始状态, 显然它也是随机的。

又由于用雷达对 r 进行测量所得结果 Y 中包含有随机误差 V , 观测方程的形式为

$$\mathbf{Y}(t) = r(t) + \mathbf{V}(t) = [1 \ 0] \mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t)$$

或

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t) \quad (0.2-3)$$

按 (0.2-2)、(0.2-3) 二式可画出如图 0-3 所示具有一般性的方框图。显然, 随机扰动作用力 $\mathbf{W}(t)$ 和随机观测误差 $\mathbf{V}(t)$ 的出现, 使状态 $\mathbf{X}$ 和观测 $\mathbf{Y}$ 都成为随机量。在此, 方程 (0.2-2) 也可认为是一种描述随机状态 $\mathbf{X}$ 的生成机制的“消息模型”。在这种情况下, 估计工作的任务就是: 在作为“消息模型”的动态系统状态方程参数 $(\mathbf{A}, \mathbf{F})$ 、观测系统参数 $\mathbf{C}$ 以及随机量 $\mathbf{W}$ 和 $\mathbf{V}$ 的统计知识给定的前提下, 根据截止到当前 t 时刻的、受到测量噪声干扰的观测记录 $\mathbf{Y}(t), t \in [t_0, t]$, 对于随机状态 $\mathbf{X}$ 做出尽可能精确的估计。

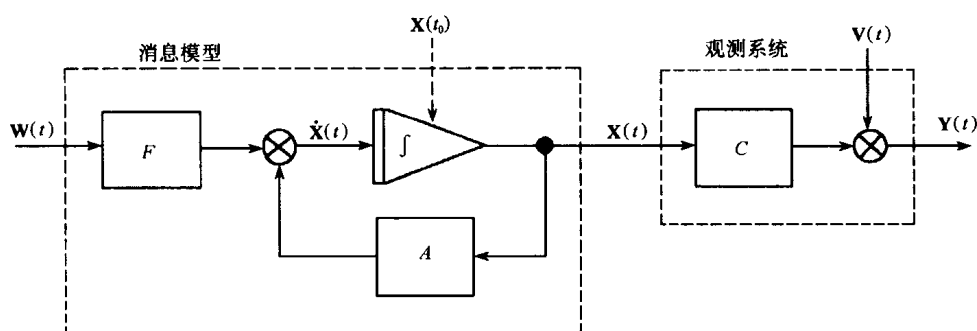


图 0-3 动态系统状态的消息模型和观测系统

估计问题在信号处理和通信领域中也大量存在。

下面再考虑随机控制系统中的估计问题。其实, 例 0-1 中的敌机若换成由我方地面遥控的无人驾驶飞机, 则面临的就随机控制系统中的估计问题了。

在随机控制理论中, 线性时变系统模型的一般形式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{F}(t)\mathbf{W}(t), & \mathbf{X}(t)|_{t=t_0} = \mathbf{X}(t_0) \\ \mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t) \end{cases} \quad (0.2-4)$$

其中 $\mathbf{W}$ 也称作动态噪声, 相应的随机控制系统结构如图 0-4 所示。

为了实现对于 (0.2-4) 式描述的线性时变随机系统的最优控制, 估计工作的任务简单说来就是设计最佳估计器, 以便对当前 t 时刻下的随机状态 $\mathbf{X}(t)$ 做出最佳估计 $\hat{\mathbf{X}}(t)$ 提供最优控制器, 最终产生最优控制量 $\mathbf{u}(t)$, 使状态 $\mathbf{X}(t)$ 的变化符合预定的要求。

在工程实用中, 估计问题的一种典型提法是: