

多传感器最优信息融合白噪声反卷积滤波器

邓自立, 王 欣, 李 云

(黑龙江大学自动化系, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘 要: 基于 Kalman 滤波方法和白噪声估计理论, 在线性最小方差按矩阵加权最优信息融合准则下, 提出了带相关噪声系统多传感器信息融合白噪声反卷积滤波器. 提出了各传感器滤波误差之间的协方差阵计算公式, 可用于计算最优融合加权阵. 同单传感器情形相比, 可提高融合滤波精度. 它可减少在线计算负担, 便于实时应用. 它可应用于石油地震勘探信号处理. 一个 3 传感器信息融合 Bernoulli-Gaussian 白噪声反卷积滤波器的仿真例子说明了其有效性.

关键词: 相关噪声; 最优信息融合; 反射地震学; 反卷积; 白噪声估值器; Kalman 滤波方法

中图分类号: O211.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 05-0860-04

Multisensor Optimal Information Fusion White Noise Deconvolution Filter

DENG Zi-li, WANG Xin, LI Yun

(Department of Automation, Heilongjiang University, Heilongjiang, Harbin 150080, China)

Abstract: Based on the Kalman filtering method and white noise estimation theory, under linear minimum variance information fusion criterion weighted by matrices, a multisensor information fusion white noise deconvolution filter is presented for systems with correlated noises. The formula of computing covariances among filtering errors of sensors is presented, which can be applied to compute the optimal fused weighting matrices. Compared to the single sensor case, the accuracy of fused filtering is improved. It can reduce the on-line computational burden, and is suitable for real time applications. It can be applied to signal processing in oil seismic exploration. A simulation example for 3-sensor information fusion Bernoulli-Gaussian white noise deconvolution filter shows its effectiveness.

Key words: correlated noises; optimal information fusion; reflection seismology; deconvolution; white noise estimators; Kalman filtering method

1 引言

在石油地震勘探中^[1], 埋于地表下的炸药爆炸后, 各油层对地震波的反射构成的反射系数序列可用 Bernoulli-Gaussian 白噪声来描写, 它被用在地面上的传感器接收(观测). 传感器本质上是动态系统, 它的输入是白噪声反射序列, 它的输出是接收信号. 问题是由传感器输出信号估计白噪声输入信号, 这类问题叫反卷积. 它对判断是否有油田及确定油田的几何形状有重要意义. 文献[2, 3]分别用 Kalman 滤波方法和现代时间序列分析方法提出了输入噪声和观测噪声不相关时两传感器信息融合白噪声反卷积滤波器. 新近文献[5]用 Kalman 滤波方法对带相关噪声系统提出了多传感器信息融合白噪声非稳态最优滤波器, 它的缺点是要求在线计算 Riccati 方程, 局部 Kalman 滤波器增益和最优加权, 计算负担大, 不利于实时应用, 且不能处理白噪声平滑器估计问题. 本文用 Kalman 滤波方法提出带相关噪声的多传感器系统的信息融合稳态白噪

声估值器, 可在统一框架下处理信息融合白噪声滤波器和平滑器估计问题. 由于 Riccati 方程解、滤波增益阵和最优融合加权阵均可离线一次性计算, 因而大大减少在线计算负担, 便于实时应用.

2 多传感器信息融合最优白噪声反卷积滤波器

考虑带相关噪声多传感器系统

$$x(t+1) = \Phi x(t) + \Gamma w(t) \quad (1)$$

$$y_i(t) = H_i x(t) + v_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

其中 l 为传感器个数, $l \geq 2$, $x(t) \in R^n$ 为状态, $y_i(t) \in R^{m_i}$ 为第 i 个传感器的输出信号, 白噪声 $w(t) \in R^r$ 为传感器的输入信号, $v_i(t) \in R^{m_i}$ 为第 i 个传感器的观测噪声, $w(t)$ 和 $v_i(t)$ 是零均值、方差阵各为 Q_w 和 Q_{v_i} 的相关白噪声:

$$E \left\{ \begin{bmatrix} w(t) \\ v_i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^T(j) & v_i^T(j) \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} Q_w & S_i \\ S_i^T & R_i \end{bmatrix} \delta_{tj} \quad (3)$$

$$E \left\{ \begin{bmatrix} v_i(t) \\ v_j(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i^T(k) & v_j^T(k) \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} R_i & R_{ij} \\ R_{ij}^T & R_j \end{bmatrix} \delta_{tk} \quad (4)$$

其中 E 为均值号, T 为转置号, $\delta_{ti} = 1$, $\delta_{tk} = 0$, ($t \neq k$).

问题是求 $w(t)$ 的局部稳态最优白噪声反卷积滤波器 $\hat{w}_i(t|t+N)$, $i = 1, 2, \dots, l$, 并求由它们加权构成的信息融合稳态最优白噪声反卷积滤波器 $\hat{w}_0(t|t+N)$.

引理 1^[6] 第 i 个单传感器系统式(1)和式(2)有渐近稳定的局部最优白噪声反卷积滤波器 $\hat{w}_i(t|t+N)$ 为

$$\hat{w}_i(t|t+N) = \sum_{j=0}^N M_i(j) \varepsilon_i(t+j), \quad i = 1, 2, \dots, l, N \geq 0 \quad (5)$$

$$M_i(0) = S_i Q_{\varepsilon_i}^{-1} \quad (6)$$

$$M_i(1) = D_i H_i^T Q_{\varepsilon_i}^{-1} \quad (7)$$

$$D_i = -S_i K_i^T \Phi_i^T + Q_w \Gamma^T - S_i J_i^T \quad (8)$$

$$\Phi_i = \Phi - J H_i, J_i = \Gamma S R_i^{-1} \quad (9)$$

$$M_i(j) = D_i \left(\Psi_{pi}^T \right)^{j-1} H_i^T Q_{\varepsilon_i}^{-1}, \quad j = 1, \dots, N \quad (10)$$

$$\Psi_{pi} = \Phi_i (I_n - K_i H_i) \quad (11)$$

$$Q_{\varepsilon_i} = H_i \Sigma H_i^T + R_i \quad (12)$$

$$K_i = \Sigma H_i^T Q_{\varepsilon_i}^{-1} \quad (13)$$

$$K_{pi} = \Phi_i K_i + J_i \quad (14)$$

$$\bar{K}_{pi} = \Phi_i K_i, \bar{w}_i(t) = \Gamma w(t) - J_{pi} \hat{w}_i(t) \quad (15)$$

Σ_i 服从 Riccati 方程

$$\Sigma_i = \Phi_i [\Sigma_i - \Sigma_i H_i^T (H_i \Sigma_i H_i^T + R_i)^{-1} H_i \Sigma_i] \cdot \Phi_i^T + \Gamma (Q_w - S_i R_i^{-1} S_i^T) \Gamma^T \quad (16)$$

它可用迭代法求解^[7]. 记估值误差 $\tilde{w}_i(t|t+N) = w(t) - \hat{w}_i(t|t+N)$, 则其方差阵为

$$P_i(N) = E[\tilde{w}_i(t|t+N) \tilde{w}_i^T(t|t+N)] \\ = Q_w - \sum_{j=0}^N M_i(j) Q_{\varepsilon_i} M_i^T(j), \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (17)$$

且新息 $\varepsilon_i(t)$ 由 Kalman 预报器递推给出

$$\hat{x}_i(t+1|t) = \Psi_{pi} \hat{x}_i(t|t-1) + K_{pi} \varepsilon_i(t) \quad (18)$$

$$\varepsilon_i(t) = y_i(t) - H_i \hat{x}_i(t|t-1), \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (19)$$

带初值 $\hat{x}_i(1|0) = 0$.

定理 1 多传感器系统式(1)和式(2)的估计误差 $\tilde{w}_i(t|t+N)$ 的协方差阵 $P_{ij}(N) = E[\tilde{w}_i(t|t+N) \tilde{w}_j^T(t|t+N)]$ ($i \neq j$) 为

$$P_{ij}(N) = Q_w - \sum_{r=0}^N M_i(r) Q_{\varepsilon_i} M_i^T(r) - \sum_{s=0}^N M_j(s) Q_{\varepsilon_j} M_j^T(s) \\ + \sum_{r=0}^N \sum_{s=0}^N M_i(r) e_{ij}(r, s) M_j^T(s) \quad (20)$$

当 $\min(r, s) > 0$ 时

$$e_{ij}(r, s) = H_i \Psi_{pi}^r \Sigma_{ij} \Psi_{pj}^T H_j^T + \sum_{k=0}^{\min(r, s)} H_i \Psi_{pi}^{r-k} [\Gamma^T - K_{pi}] \\ \cdot \begin{bmatrix} Q_w & S_j \\ S_i^T & R_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma^T \\ -K_{pj}^T \end{bmatrix} \Psi_{pj}^{(s-k)T} H_j^T + R_{ij} \delta_{rs} \quad (21)$$

当 $\min(r, s) = 0$ 时

$$e_{ij}(0, 0) = H_i \Sigma_{ij} H_j^T + R_{ij}, \\ e_{ij}(0, s) = H_i \Sigma_{ij} \Psi_{pj}^T H_j^T + (S_i^T \Gamma^T - R_{ij} K_{pj}^T) \Psi_{pj}^{(s-1)T} H_j^T, \quad (22)$$

$$e_{ij}(r, 0) = H_i \Psi_{pi}^r \Sigma_{ij} H_j^T + H_i \Psi_{pi}^{r-1} (\Gamma S - K_{pi} R_{ij})$$

其中 Σ_{ij} 为 Kalman 预报误差 $\tilde{x}_i(t+1|t) = x(t+1) - \hat{x}_i(t+1|t)$ 的协方差阵, 它们满足 Lyapunov 方程:

$$\Sigma_{ij} = \Psi_{pi} \Sigma_{ij} \Psi_{pj}^T + [\Gamma^T - K_{pi}] \begin{bmatrix} Q_w & S_j \\ S_i^T & R_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma^T \\ -K_{pj}^T \end{bmatrix} \quad (23)$$

可用迭代法求解^[7].

证明 注意

$$P_{ij} = Q_w - E[\hat{w}_i(t|t+N) w^T(t)] - E[w(t) \hat{w}_j^T(t|t+N)] \\ + E[\hat{w}_i(t|t+N) \hat{w}_j^T(t|t+N)] \quad (24)$$

将式(5)代入上式并注意到定义^[6].

$$M_i(j) = E[w(t) \varepsilon_i^T(t+j)] Q_{\varepsilon_i}^{-1} \quad (25)$$

可得式(20)右边前三项, 而由式(5)有式(20)右边第四项为

$$E[\hat{w}_i(t|t+N) \hat{w}_j^T(t|t+N)] = \sum_{r=0}^N \sum_{s=0}^N M_i(r) e_{ij}(r, s) M_j^T(s) \quad (26)$$

其中定义 $e_{ij}(r, s) = E[\varepsilon_i(t+r) \varepsilon_j^T(t+s)]$. 注意到 Kalman 预报误差 $\tilde{x}_i(t+1|t) = x(t+1) - \hat{x}_i(t+1|t)$ 有关系

$$\hat{x}_i(t+1|t) = \Psi_{pi} \tilde{x}_i(t|t-1) + \bar{w}_i(t) - \bar{K}_{pi} v_i(t) \quad (27)$$

其中 \bar{K}_{pi} , $\bar{w}_i(t)$ 由式(15)计算. 上式迭代 k 次并代入式(14)和式(15)有关系

$$\tilde{x}_i(t+k|t+k-1) = \Psi_{pi}^k \tilde{x}_i(t|t-1) + \sum_{j=1}^k \Psi_{pi}^{k-j} \\ \cdot [\Gamma w_i(t+j-1) - K_{pi} v_i(t+j-1)] \quad (28)$$

又将式(2)代入式(19)有关系

$$\varepsilon_i(t+k) = H_i \tilde{x}_i(t+k|t+k-1) + v_i(t+k) \quad (29)$$

利用式(28)和式(29)可得式(21)和式(22). 又由式(3), 式(14), 式(15)和式(27)可得式(23). 证毕.

定理 2 多传感器系统式(1)式(2)有最优信息融合白噪声反卷积滤波器 $\hat{w}_0(t|t+N)$ 为

$$\hat{w}_0(t|t+N) = \sum_{i=1}^l A_i(N) \hat{w}_i(t|t+N), \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (30)$$

其中在线性最小方差最优融合准则下, 最优加权系数阵 $A_i(N)$, $i = 1, 2, \dots, l$ 由下式计算

$$[A_1(N), \dots, A_l(N)] = (e^T P^{-1}(N) e)^{-1} e^T P^{-1}(N)$$

其中 $e^T = [I_r, \dots, I_r]$, $P(N)$ 是以 $P_{ij}(N)$ 为元素的 $rl \times rl$ 矩阵

$$P(N) = (P_{ij}(N)) \quad (31)$$

其中定义 $P_{ii}(N) = P_i(N)$, $P_i(N)$ 和 $P_{ij}(N)$ 由式(17)和式(20)计算, I_r 为 $r \times r$ 单位阵, 最小融合误差 $\tilde{w}_0(t|t+N) = w(t) - \hat{w}_0(t|t+N)$ 方差阵 $P_0(N)$ 为

$$P_0(N) = (e^T P^{-1}(N) e)^{-1} \quad (32)$$

且有关系

$$P_0(N) \leq P_i(N), \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (33)$$

证明 由文献[4]的线性最小方差融合公式得证.

3 仿真例子 —— Bernoulli-Gaussian 白噪声最优信息融合反卷积平滑器

考虑带有色观测噪声 $\eta_i(t)$ 的 3 传感器系统

$$x(t+1) = \Phi x(t) + \Gamma w(t) \quad (34)$$

$$w(t) = b(t)g(t) \quad (35)$$

$$z_i(t) = H_0 x(t) + \eta_i(t), i = 1, 2, 3 \quad (36)$$

$$\eta_i(t+1) = a_i \eta_i(t) + \zeta_i(t) \quad (37)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0.3 & -0.2 \end{bmatrix} \quad \Gamma = \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix} \quad H_0 = [1 \quad 1] \quad (38)$$

仿真中取 $a_1 = 0.2$, $a_2 = 0.3$, $a_3 = 0.5$, 其中 $w(t)$ 和 $\zeta_i(t)$ 是零均值、方差分别为 σ_w^2 , $\sigma_{\zeta_1}^2 = 0.4$, $\sigma_{\zeta_2}^2 = 0.7$, $\sigma_{\zeta_3}^2 = 0.9$ 的相互独立的白噪声, 且 $w(t)$ 为 Bernoulli Gaussian 白噪声^[1], 其中 $b(t)$ 为取值为 1 或 0 的 Bernoulli 白噪声, 取值概率为: $P(b(t) = 1) = \lambda$, $P(b(t) = 0) = 1 - \lambda$, $\lambda = 0.2$, 且 $g(t)$ 为零均值、方差 $\sigma_g^2 = 4$ 的 Gaussian 白噪声, 独立于 $b(t)$ 。

问题是基于观测 $z_i(t)$ 求局部白噪声反卷积平滑器 $\hat{w}_i(t|t+2)$ 及最优融合白噪声反卷积平滑器 $\hat{w}_0(t|t+2)$ 。

引入单位滞后算子 q^{-1} , 则式(37)可写为

$$(1 - a_i q^{-1}) \eta_i(t+1) = \zeta_i(t) \quad (39)$$

在式(36)中置 $t = t+1$ 后两边左乘 $(1 - a_i q^{-1})$, 利用式(34)和式(39)可得新的带白色观测噪声的观测方程为

$$y_i(t) = H x(t) + v_i(t) \quad (40)$$

其中定义

$$y_i(t) = (1 - a_i q^{-1}) z_i(t+1) = z_i(t+1) - a_i z_i(t) \quad (41)$$

$$H_i = H_0 \Phi - a_i H_0 \quad (42)$$

$$v_i(t) = H_0 \Gamma w(t) + \zeta_i(t) \quad (43)$$

显然 $v_i(t)$ 是零均值、方差为 R_i 的白噪声, 且 $w(t)$ 与 $v_i(t)$ 的相关系数为 S_i , 则有

$$R_i = H_0 \Gamma \sigma_w^2 \Gamma^T H_0^T + \sigma_{\zeta_i}^2 \quad (44)$$

$$S_i = E[w(t) v_i^T(t)] = \sigma_w^2 \Gamma^T H_0^T \quad (45)$$

此时 $v_i(t)$ 与 $v_j(t)$ 是相关的观测噪声, 相关系数为 $R_{ij} = E[v_i(t) v_j^T(t)]$ 为

$$R_{ij} = H_0 \Gamma \sigma_w^2 \Gamma^T H_0^T \quad (46)$$

于是原系统式(34)~式(37)化为等价的带白色观测噪声系统式(34)和式(40), 即符合式(1)和式(2)的系统。代入数据后可得

$$\sigma_w^2 = \lambda \sigma_g^2 = 0.8, H_1 = [1.1 \quad -0.4],$$

$$H_2 = [1 \quad -0.5], H_3 = [0.8 \quad -0.7],$$

$$v_i(t) = w(t) + \zeta_i(t), R_i = \sigma_w^2 + \sigma_{\zeta_i}^2, R_{ij} = \sigma_w^2, S_i = \sigma_w^2.$$

可求得最优加权系数各为, $A_1 = 0.6363$, $A_2 = 0.2195$, $A_3 = 0.1442$ 。局部和融合估计误差方差 P_i ($i = 0, 1, 2, 3$) 见表 1

P_1	P_2	P_3	P_0
0.0493	0.0841	0.1118	0.0400

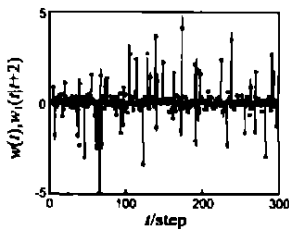


图 1 $w(t)$ 与白噪声局部反卷积平滑器 $\hat{w}_1(t|t+2)$

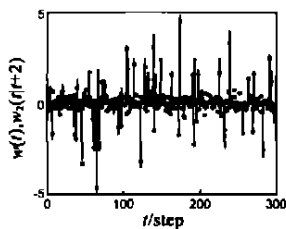


图 2 $w(t)$ 与白噪声局部反卷积平滑器 $\hat{w}_2(t|t+2)$

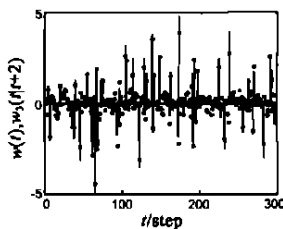


图 3 $w(t)$ 与白噪声局部反卷积平滑器 $\hat{w}_3(t|t+2)$

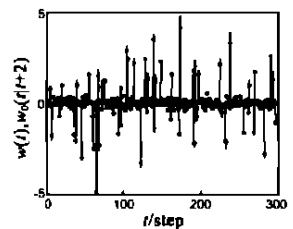


图 4 $w(t)$ 与白噪声最优融合反卷积平滑器 $\hat{w}_0(t|t+2)$

比较可得到 $P_0 < P_i$, $i = 1, 2, 3$ 。由此看到信息融合估计可提高局部估计精度, 仿真结果图如图 1~图 4 所示, 其中实线端点纵标代表真实值 $w(t)$, 圆点代表估值 $\hat{w}_i(t|t+N)$ 。可看到融合估计精度高于每个局部估计精度。图 5 累积平滑误差曲线, 也可看到最优融合估计精度高于每个局部估计精度。

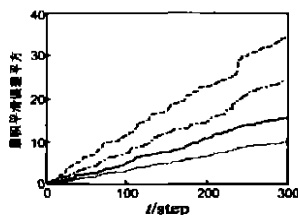


图 5 $\hat{w}_i(t|t+2)$ 累积平滑误差平方曲线

4 结论

白噪声反卷积问题在

石油地震勘探中有重要应用背景。本文用 Kalman 滤波方法提出了按矩阵加权多传感器信息融合白噪声反卷积估值器。为了计算最优加权阵, 提出了计算局部白噪声估计误差互协方

差的公式。可统一实时处理白噪声滤波白噪声融合滤波和平滑估计问题。

参考文献:

- [1] J M Mendel. Optimal Seismic Deconvolution: an Estimation Based Approach[M]. New York: Academic Press, 1983.
- [2] 邓自立, 高媛, 李云, 白敬刚, 崔崇信. 基于 Kalman 滤波的信息融合白噪声最优反卷积滤波器[J]. 科学技术与工程, 2004, 4(3): 169-171.
- [3] 邓自立, 高媛, 马建为. 两传感器信息融合最优白噪声反卷积 Wiener 滤波器[J]. 科学技术与工程, 2003, 3(3): 216-218.
- [4] Sun Shuli, Deng Zili. Multi sensor optimal information fusion Kalman filter[J]. Automatica, 2004, 40(6): 1017-1023.
- [5] Sun Shuli. Multi-sensor information fusion white noise filter weighted by scalars based on Kalman predictor[J]. Automatica, 2004, 40(8): 1447-1453.
- [6] 邓自立. 卡尔曼滤波与维纳滤波——现代时间序列分析方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
- [7] 邓自立. 自校正滤波理论及其应用——现代时间序列分析方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.

作者简介:



邓自立 男,教授,1938 年 8 月生于哈尔滨,1962 年毕业于黑龙江大学数学系,在国内外发表论文 300 余篇,出版专著 5 部,曾获黑龙江省科技进步一等奖、国家科技进步二等奖、教育部科技进步三等奖,主要研究方向为最优滤波、信息融合、信号处理、现代时间序列分析、状态估计等。E-mail: dzl@hlju.edu.cn.



王 欣 男,助教,1978 年 5 月生于哈尔滨,2001 年毕业于黑龙江大学自动化系,获工学学士学位,现为黑龙江大学硕士研究生,主要研究方向为信息融合,信号处理等。

李 云 女,1978 年 7 月生于齐齐哈尔,2001 年毕业于黑龙江大学自动化系,获工学学士学位,现为黑龙江大学硕士研究生,主要研究方向为信息融合,信号处理等。

电子工业出版社新书推介

为推动我国微电子和集成电路领域的人才培养和产业发展,电子工业出版社依靠来自清华、北大、复旦、东南大学和上海交大等高校的专家资源,遴选该领域国外的经典图书,精心组织引进出版工作,目前已经出版近三十个品种,可供高校师生和专业人员使用。其中新近出版的有以下几本:

1.《CMOS 数字集成电路——分析与设计》(第三版),Sung Mo Kang 等著,东南大学王志功、龚建华等译,2005 年 1 月出版,定价 48 元。本书是现代数字集成电路设计课程的理想教材和参考书,详细讲述了 CMOS 数字集成电路,反映了现代技术的发展水平,提供了电路设计的最新资料。

2.《数字信号处理——基于计算机的方法》(第二版),Sanjit K Mitra 著,武汉大学孙洪、余翔宇等译,2005 年 1 月出版,定价 65 元。本书是近年来数字信号领域最受欢迎的一本教材。自第二版在国内推出以来,已被国内多家大学采用,2004 年 10 月在浙江大学举办的双语教学国际研讨会上,电子科技大学博导彭启琮教授等专门对本书进行了推荐。本书配有实验指导手册:《数字信号处理实验指导书》(MATLAB 版)。

3.《电路》(第七版)(英文版),James W Nilsson 等著,2005 年 2 月出版,定价 79 元。IEEE Spectrum 称本书为“电路领域的经典之作”,是美欧“电路”课程采用最为广泛的教材。本书结合生活中的实际应用讲解知识,并给出了大量的例题、习题和详尽的图表资料,内容新颖、讲解透彻,是电路分析领域公认的一本优秀教材。

4.《半导体器件基础》Robert F Pierret 著,黄如等译,韩汝琦审校,2004 年 11 月出版,定价 53 元。本书是一本微电子技术方面的入门书籍,全面介绍了半导体器件的基础知识,还分析了一些器件相关的物理问题,并介绍了一些新型场效应器件。本书可作为微电子专业的本科生及研究生的教材或参考书,也适用于该领域工程技术人员,还是非常实用的参考资料。本书有习题解答手册供教师使用。

5.《先进半导体存储器——结构、设计与应用》,Ashok K Shama 著,曾莹等译,朱钧等审校,2005 年 1 月出版,定价 43 元。本书深入介绍了先进半导体存储器的技术与发展,论述非常全面,涵盖了近年来的诸多新技术成果。本书适合作为大学微电子专业高年级本科生及研究生的教材,也适合从事半导体制造与研究的工作人员参考之用。

6.《Verilog HDL 高级数字设计》,Michael D Ciletti 著,天大张雅琦、李锐等译,2005 年 1 月出版,定价 65 元。本书通过大量完整的实例讲解了使用 Verilog HDL 进行超大规模集成电路设计的结构化建模方法、关键步骤和设计验证方法等实用内容,适用于计算机、电子等相关专业本科高年级学生或研究生课程,同时也适合专业人员学习和参考之用。

联系单位:电子工业出版社 教材服务部

地址:北京市万寿路 173 信箱 邮编:100036

电话:010-68152204

传真:010-68151741

010-68151742

E-mail: edu@phei.com.cn