

双应力步降加速退化试验优化设计 Monte-Carlo 仿真

潘刚, 梁玉英, 吕萌, 张国龙
(军械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要: 针对高可靠长寿命产品在双应力退化试验中存在的时间长、费用高、效率低的问题, 提出了一种基于 Monte-Carlo 仿真的双应力步降加速退化试验优化设计方法。采用 Monte-Carlo 对加速试验进行仿真模拟, 以监测频率、样本量大小、监测次数作为设计变量, 以总的试验费用作为约束条件, 以正常使用应力下的 p 阶分位寿命渐近方差估计作为目标函数, 建立了基于 Monte-Carlo 仿真的双应力步降加速退化试验优化设计模型。通过仿真实例验证了该方法的有效性、可行性, 为电子装备寿命预测的加速试验方案优化设计提供了理论支撑。

关键词: 双应力步降加速退化试验; 优化设计; 蒙特卡罗; 性能退化

中图分类号: V271.4; TB114.3 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2013)06-0100-05

Optimization Design of Double-Step-Down-Stress Accelerated Degradation Test Based on Monte-Carlo Simulation

PAN Gang, LIANG Yuying, LÜ Meng, ZHANG Guolong

(Department of Optics and Electronics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Considering to the problems of long test time, high cost and low efficiency for the double-step-down-stress degradation test for high-reliability, long-life products, we presented an optimal design method based on Monte-Carlo simulation for double-step-down-stress accelerated degradation test (DSDS-ADT). Simulation was made for the acceleration test with Monte-Carlo method. Taking the number of inspections on each unit, the number of test units and inspection frequency as variables, and the total experimental cost as a constraint, the asymptotic variance estimation of 100 p th percentile of the lifetime distribution of the product as goal function, we established the optimal designed model of DSDS-ADT based on Monte-Carlo simulation. Simulation results verify the feasibility and the validity of this method, and provided a theoretic support for optimal design of accelerated test in life prediction of electronic equipment.

Key words: double-step-down-stress accelerated degradation test (DSDS-ADT); optimal design; Monte-Carlo; performance degradation

0 引言

加速退化试验是解决高可靠性、长寿命产品可靠性评估的一个重要技术途径, 当前有大量文献对加速退化试验 (ADT) 进行研究。文献[1]对在费用约束条件下的退化试验优化设计进行了研究; 文献[2]对步进加速退化试验设计进行了研究; 文献[3]对步进加速退化试验优化设计进行了研究; 文献[4]对仿真基混合效应模型加速退化试验方案优化设计进行了研

究; 文献[5]对倒数 Weibull 分布退化率下的加速退化试验优化设计进行了研究; 文献[6]对基于 Wiener 过程的多应力加速退化试验设计进行了研究; 文献[7]对布朗运动模型下的步降加速退化试验优化设计进行了研究; 文献[8]对随机过程分布下的步进加速退化试验优化设计进行了研究; 文献[9]对竞争失效模型下的步降加速退化试验优化设计进行了研究。而高可靠长寿命产品的性能退化大都受到多个应力的影响, 性能退化信息很难得到, 且当前对满足混合效应模型假设下的多应力步降加速退化试验优化设计的研究相对较少, 从而使得多应力下的电子产品的试验优化问题没有较为完善的理论支持, 不能更好地满足工程实际需求。因而, 本文采用 Monte-Carlo 仿真的方法对双应

收稿日期: 2012-04-10

修回日期: 2012-05-04

基金项目: 河北省重点基金项目 (109635529D)

作者简介: 潘刚 (1987—), 男, 山东新泰人, 硕士生, 研究方向为系统性能检测与故障诊断。

力步降加速退化试验进行模拟。对模拟产生的双应力步降加速退化试验(DSDS-ADT)数据进行统计分析,建立了基于 Monte-Carlo 仿真的双应力步降加速退化试验优化设计模型。最后通过实例分析了应力水平大小、样本量、监测频率、监测次数等对目标函数的影响。

1 双应力步降加速退化试验方法

文献[10]对双应力步进加速退化试验统计分析方法进行了研究,参照文献[10]可对双应力步降加速退化试验步骤做如下具体描述。设有两组应力水平 S^1 和 S^2 ,每组应力组合包含一系列应力水平,为了方便后续分析,在此假定两组应力水平数及应力组合数大小均为 k 。 $S_1^1 > S_2^1 > \dots > S_k^1 > S_0^1, S_1^2 > S_2^2 > \dots > S_k^2 > S_0^2$ 。其中: (S_0^1, S_0^2) 为作用于产品的正常应力组合; (S_i^1, S_j^2) 为第1组应力的第 i 个应力水平数和第2组应力的第 j 个应力水平数的组合($i=1, 2, \dots, k, j=1, 2, \dots, k$)。在满足上述假设的前提下对试验过程具体描述如下。从试验样本中随机选取 n 个样本进行测试,首先确定 k 个监测周期 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_k$;其次将选取的样本置于最高应力水平组合 (S_1^1, S_1^2) 下监测 T_1 小时;然后放入下组应力水平组合 (S_2^1, S_2^2) 下监测 T_2 小时;如此试验下去,直到最后一组应力水平组合 (S_k^1, S_k^2) 。其中, T_i 就是应力组合水平 (S_i^1, S_i^2) 持续的时间。整个试验的应力施加过程如图1所示。

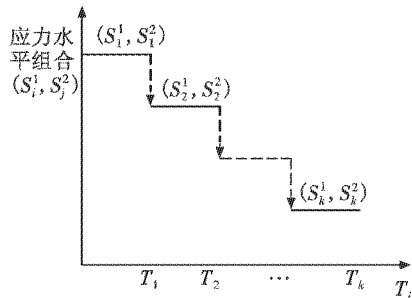


图1 双应力步降加速退化试验的应力施加过程

Fig. 1 Course of DSDS-ADT testing

2 模型假设

2.1 退化模型假设

假设在第 i 个应力组合 (S_i^1, S_j^2) 下,样本的退化轨迹可用以下混合效应模型描述。

$$\Phi(y_{ih}, | S_i^1, S_j^2) = -\beta_u t_{ih}^\alpha + \varepsilon_{ih}, \quad (1)$$

式中: $i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, k; l=1, 2, \dots, n; h_i=1, 2, \dots, m_i$; Φ 为退化量; $\beta_u > 0$ 反映第 i 个应力水平组合下第 l 个样品的随机特征, $\beta_u^{-1} \sim Weibull(m, \eta_i)$, m 为形状参数, η_i 为分布参数; t_{ih} 为 i 个应力组合水平下的监测时间点; $\alpha > 0$,为固定常数; $\varepsilon_{ih}(t_i, l)$ 为测量误差,

相互独立且服从标准正态分布 $\varepsilon_{ih}(t_i, l) \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ 。

2.2 物理模型假设

退化轨迹参数中的随机效应参数 β_u 服从 $G\Theta(\cdot)$ 分布,分布参数中 η_i 与应力存在如下关系。

$$\ln \eta_i = \gamma_0 + \gamma_1 \varphi_1(S_i^1) + \gamma_2 \varphi_2(S_j^2) + \gamma_3 \varphi_3(S_i^1, S_j^2) \quad (2)$$

在得到各参数先验值 $\alpha, \sigma_\varepsilon^2, m, \gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 及 $\varphi_1(S_i^1), \varphi_2(S_j^2), \varphi_3(S_i^1, S_j^2)$ 表达式的基础上可实现双应力步降加速退化试验数据的仿真。

3 优化问题描述

3.1 设计变量

1) 样本量 n ; 2) 应力水平组合数 k ; 3) 加速应力水平组合 (S_i^1, S_j^2) ; 4) f_{ij} 为 (S_i^1, S_j^2) 下的监测频率; 5) g_{ij} 为 (S_i^1, S_j^2) 监测次数,且 $g_{ij} \geq 2$,因而试验的总时间 $T = \sum_{i=1}^k f_{ij} \cdot g_{ij} \cdot t_u$, t_u 为单位时间(h)。从而试验方案可表示为 $d = \{n, k, (S_i^1, S_j^2), f_{ij}, g_{ij}\}$ 。

3.2 优化目标

选用正常使用应力水平下 p 阶分位寿命渐近方差的局部估计值作为目标函数,即

$$U = \text{Avar}(\xi_{p0}) \quad (3)$$

3.3 约束条件

$$TC(f_{ij}, g_{ij}, n, k) = nC_s + nC_m \sum_{i=1}^k g_{ij} + C_e f \sum_{i=1}^k (g_{ij} - 1) \leq C_b \quad (4)$$

式中: $f_{ij} > 0; g_{ij} \geq 2$,且 n 和 g_{ij} 均为正整数; C_m 为监测单个样本监测一次所需的费用; C_s 为单个样本费用; C_e 为单位时间的操作费用^[1]。

4 优化设计方法

4.1 优化算法

图2为基于 Monte-Carlo 仿真的双应力步降加速退化试验优化设计流程图,具体描述如下。

1) 构造备选方案集 D 。

2) 在备选方案集 D 中选取一个试验方案 $d_r = \{n, k, (S_i^1, S_j^2), f_{ij}, g_{ij}\}, r=1, 2, \dots, R, R$ 为备选方案的个数。

3) 利用 Monte-Carlo 方法,模拟双应力步降加速退化试验 Q 次,得到 Q 组模拟试验数据: $\{y_{c_{ih}}, i=1, 2, \dots, k, l=1, 2, \dots, n, h_i=1, 2, \dots, m_i\}, q=1, 2, \dots, Q$ 。

4) 通过对 $y_{c_{ih}}$ 进行统计分析,计算目标函数值 $f_{q,r}(d)$ 。

5) 计算平均值 $\bar{f}_r(d)$ 。

$$\bar{f}_r(d) = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q f_{qr}(d) \quad (5)$$

将其作为目标函数值 f_r 。

6) 返回2), 选取另一个试验方案重复2)~5), 直至第 R 个方案完成, 目标函数集为 $f = \{f_r, r = 1, 2, \dots, R\}$ 。

7) 选取使得目标函数值 f_r 达到最小的方案作为最优试验方案 d^* 。

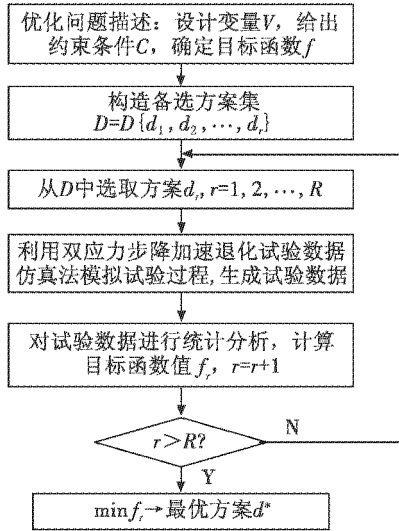


图2 双应力步降退化试验优化设计流程图
Fig. 2 Optimal design flow chart for DSDS-ADT

4.2 目标函数的计算

目标函数的计算主要涉及 p 阶分位寿命 ξ_p 的推导、数学模型及物理模型中先验参数的估计以及 $Avar(\xi_p)$ 的计算。其模型中相关参数的估计比较简单, 可以参照文献[1]给出的最小二乘估计方法进行求解, 这里重点给出 $Avar(\xi_p)$ 的计算方法。

首先给出对数似然函数

$$l = \sum_{i=1}^k n \cdot \ln m + \sum_{i=1}^k n \cdot m \cdot \ln \eta_i + \sum_{i=1}^k \sum_{l=1}^n (m-1) \cdot \ln\left(\frac{1}{\beta_{i,l}}\right)^m - \sum_{i=1}^k \sum_{l=1}^n (m-1) \cdot \ln\left(\frac{1}{\beta_{i,l} \cdot \eta_i}\right)^m \quad (6)$$

式中, $\eta_i = \exp(\gamma_0 + \gamma_1 \varphi_1(S_i^1) + \gamma_2 \varphi_2(S_j^2))$ 。

然后通过式(6)求二阶偏导可得到局部 Fisher 矩阵。

$$F = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 l}{\partial m^2} & -\frac{\partial^2 l}{\partial m \partial \gamma_0} & -\frac{\partial^2 l}{\partial m \partial \gamma_1} & -\frac{\partial^2 l}{\partial m \partial \gamma_2} \\ -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_0 \partial m} & -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_0^2} & -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_0 \partial \gamma_1} & -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_0 \partial \gamma_2} \\ -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_1 \partial m} & -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_1 \partial \gamma_0} & -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_1^2} & -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_1 \partial \gamma_2} \\ -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_2 \partial m} & -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_2 \partial \gamma_0} & -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_2 \partial \gamma_1} & -\frac{\partial^2 l}{\partial \gamma_2^2} \end{bmatrix}, \text{ 其}$$

中: l 为对数似然函数; 矩阵各项为 l 的二阶偏导数在 $m = \hat{m}, \gamma_0 = \hat{\gamma}_0, \gamma_1 = \hat{\gamma}_1, \gamma_2 = \hat{\gamma}_2$ 的值。

根据文献[6]易推导出 p 阶分位寿命的极大似然

估计为

$$\xi_{p0} = \{ [-\eta_0 \cdot h(D_f)] \cdot [-\ln(1-p)]^{1/m} \}^{1/\alpha} \quad (7)$$

则 p 阶分位寿命 ξ_{p0} 的渐近方差估计为

$$\text{var}(\xi_{p0}) = \mathbf{H} \mathbf{F}^{-1} \mathbf{H}' \quad (8)$$

其中, $\mathbf{H} = \left[\frac{\partial(\xi_{p0})}{\partial m} \quad \frac{\partial(\xi_{p0})}{\partial \gamma_0} \quad \frac{\partial(\xi_{p0})}{\partial \gamma_1} \quad \frac{\partial(\xi_{p0})}{\partial \gamma_2} \right]$ 。

4.3 试验方案的设计

1) 构造应力水平组合, 其中, $i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, k$; 为了方便后续讨论, 令 $i = j$, 则 (S_i^1, S_j^2) 的计算公式为: $S_i^1 = S_{i\max}^1 - (i-1)(S_{i\max}^1 - S_{i\min}^1)/(k-1); S_j^2 = S_{j\max}^2 - (j-1)(S_{j\max}^2 - S_{j\min}^2)/(k-1)$ 。

2) 计算试验样本的上限, 在此总预算费用约束条件下, 由文献[1]可得试验样本的上限 $n_u = [(C_b - kC_e)/(C_s + 2kC_m)]$, $[\cdot]$ 为取整函数。

3) 由工程实践经验可知每次试验的样本量不小于5, 故令 $n = 5$ 。

4) 给定 n 下, 当监测次数 $g_{ij} = 2$ 时, 由文献[1]可得监测频率 f 的上限, 计算公式为 $f_u = [(C_b - nC_s - 2knC_m)/(kC_e)]$, $[\cdot]$ 为取整函数。

5) 令 $f = 1$ 。

6) 利用下式寻找所有的 g_{ij} , 即 $nC_s + nC_m \sum_{i=1}^k g_{ij} + C_e f \sum_{i=1}^k (g_{ij} - 1) \leq C_b$, 进而得到试验方案 $\{n, k, (S_i^1, S_j^2), f, g_{ij}\}$ 。

7) 令 $f = f + 1$, 返回6)继续计算, 直到 $f = f_u$ 。

8) 令 $n = n + 1$, 返回4)~7)继续计算, 直到 $n = n_u$, 即可计算出所有应力组合水平下的试验方案。

5 实例分析

采用文献[6]中的实例进行分析, 发光二极管(LED)的使用寿命受到温度和电流影响, 其中该型LED的正常使用温度为278 K, 最低温度加速应力为298 K, 最高为378 K; 正常使用电流25 mA, 加速电流最低为28 mA, 最高为40 mA。费用参数分别为: $C_b = 2000$ 元, $C_s = 55$ 元, $C_m = 0.3$ 元, $C_e = 0.6$ 元/h。试验样品的先验信息为: $1 - 1/y_{i0}(t_{i0}) = -\beta_i t_{i0}^\alpha + \varepsilon_{ij}(t_{i0})$ 。式中: $\alpha = 0.65; \varepsilon_{ij}(t_{ij}, k) \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2), \sigma_\varepsilon^2 = 1.978171 \times 10^{-3}; \beta_{ik}^{-1} \sim Weibull(m, \eta_i), m$ 为形状参数, 与应力水平无关, $m = 6.8549; \eta_i$ 为尺度参数, 其物理模型为 $\ln \eta_i = \gamma_0 + \gamma_1 \varphi(T_i) + \gamma_2 \varphi(V_i)$ 。其中: $\gamma_0 = 4.5255382; \gamma_1 = 1918.1624087; \gamma_2 = -1.4047622; \varphi(T_i) = 1/(T_i + 273); \varphi(V_i) = \ln V_i$ 。

为简化优化问题, 特对试验变量做以下假设:

1) 本文仅分析应力水平 $k = 2$ 和 $k = 3$ 时的双应

力步降加速退化试验方案,其他应力水平下的优化设计方法可参考进行;

2) 为了简化计算、方便分析,在此将应力设置为等间隔,即 $T_i = T_{\max} - (i - 1)(T_{\max} - T_{\min}) / (k - 1)$, $V_j = V_{\max} - (j - 1)(V_{\max} - V_{\min}) / (k - 1)$; $i, j = 1, 2, \dots, k$ 。

在最低温度为 298 K,最高温度为 378 K,应力水平 $k = 2$ 和 $k = 3$ 时,按照本文提出方法对该型 LED 进行双应力步降加速退化试验优化设计,详细优化设计结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 双应力步降加速退化试验优化设计结果 ($k = 2$)

Table 1 Optimal test plan for DSDS-ADT with $k = 2$

C_b	n	f	g_{high}	g_{low}	$\text{var}(\xi_{j0})/106$
1500	16	2	4	15	1.7711
2000	23	1	3	32	1.1628
2500	27	2	6	22	0.8214
3000	32	1	8	44	0.7556
3500	37	1	4	54	0.5408

表 2 双应力步降加速退化试验优化设计结果 ($k = 3$)

Table 2 Optimal test plan for DSDS-ADT with $k = 3$

C_b	n	f	g_{high}	g_{mid}	g_{low}	$\text{var}(\xi_{j0})/105$
1500	17	1	4	10	15	3.0174
2000	25	1	4	11	14	1.2527
2500	26	2	3	4	23	0.8965
3000	34	1	4	10	32	0.4793
3500	37	1	4	5	39	0.2465

比较分析表 1 与表 2 可以得到如下结论:

1) 在应力水平组合数 k 相同的情况下,随着费用的增加,样本量逐渐增大且目标函数值逐渐减小(精度不断提高);

2) 在同等费用约束条件下,应力水平组合数 $k = 3$ 时的最优试验方案的评估精度要比 $k = 2$ 时高。

在实际试验时,还需考虑应力组合水平对优化试验方案的影响,表 3 列出了 $C_b = 2000$ 约束条件下 $k = 3$ 时最高应力水平、中间应力水平、最低应力水平变化时的优化试验方案。

表 3 双应力步降加速退化试验优化设计结果 ($k = 3$)

Table 3 Optimal test plan for DSDS-ADT with $k = 3$

T_{\max}	T_{mid}	T_{\min}	V_{\max}	V_{mid}	V_{\min}	n	f	g_{high}	g_{mid}	g_{low}	$\text{var}(\xi_{j0})/106$
373	335.5	298	39.3	33.65	28	17	2	3	7	22	0.1885
368	333	298	38.6	33.3	28	16	3	3	3	18	0.1861
363	330.5	298	37.9	32.95	28	22	2	4	4	15	0.1957
358	328	298	37.2	32.6	28	25	1	4	7	18	0.3182
353	325.5	298	36.5	32.25	28	16	2	5	5	24	0.3484
348	323	298	35.8	31.9	28	16	1	3	3	53	1.0186
343	320.5	298	35.1	31.55	28	20	1	3	6	35	15.0218
338	318	298	34.4	31.2	28	18	1	5	10	36	754.2485
333	315.5	298	33.7	30.85	28	27	1	5	11	35	14381.3418

由表 3 可以得出如下结论:

1) 当最低应力水平 T_{\min} 、 V_{\min} 一定时,目标函数值

$\text{Avar}(\xi_{j0})$ 是最高应力水平 T_{\max} 、 V_{\max} 的减函数;

2) 当最高应力水平 T_{\max} 、 V_{\max} 减小到一定程度时,目标函数值 $\text{Avar}(\xi_{j0})$ 的值发生突变且急剧增大,此外,当 $(T_{\max} - T_{\min})$ 之间差值小于 35 和 $(V_{\max} - V_{\min})$ 之间差值小于 5.7 时, $\text{Avar}(\xi_{j0})$ 值的大小超出了理论框架允许的精度要求,因而本文在此不再继续分析。

6 小结

本文对双应力步降加速退化试验优化设计进行讨论,给出了在费用约束条件下双应力步降加速退化优化设计的一般方法,分析了不同费用条件下应力水平组合数 $k = 2$ 和 $k = 3$ 时的最优试验方案,同时以 $k = 3$ 为例分析了一定费用条件下应力变化对最优试验方案的影响,得出了一些指导双应力步降加速退化试验的有用结论,补充和完善了加速退化试验优化设计理论框架,同时也为双应力步降加速退化试验优化设计的工程应用奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] WU S J, CHANG C T. Optimal design of degradation tests in presence of cost constraint [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76(2): 109-115.
- [2] TANG L C, YANG G Y, XIE M. Planning of step-stress accelerated degradation test [C]//RAMS, Los Angeles, USA, 2004: 278-292.
- [3] GE Zhengzheng, LI Xiaoyang, ZHANG Jingrui. Planning of step-stress accelerated degradation test with stress optimization [C]//Advanced Materials Research, Germany, 2010, 118-120: 404-408.
- [4] 汪亚顺,张春华,陈循,等. 仿真基混合效应模型加速退化试验方案优化设计研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 108-114.
- [5] YU H F. Designing an accelerated degradation experiment with a reciprocal Weibull degradation rate [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2006, 136(1): 282-297.
- [6] 潘正强,周经伦,彭宝华. 基于 Wiener 过程的多应力加速退化试验设计[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 8(29): 64-71.
- [7] ZHANG Jingrui, JIANG Tongmin, LI Xiaoyang, et al. Optimization of step stress accelerated degradation test plans [C]//The 17th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IE and EM 2010, China, 2010, 10: 947-951.

- [8] LIAO C M, TSENG S T. Optimal design for step-stress accelerated degradation tests [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2006, 55(1):59-66.
- [9] LI Xiaoyang, JIANG Tongmin. Optimal design for step-stress accelerated degradation with competing failure modes [C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2009: 64-68.
- [10] 汪亚顺,莫永强,张春华,等. 双应力步进加速退化试验统计分析研究——模型与方法 [J]. 兵工学报, 2009,30(4):451-456.

(上接第 92 页)

结合,才能设计出满足实用要求的高压电源。

参 考 文 献

- [1] 李作民. 电视机原理与接收机 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1997:6-7.
- [2] 戈特利布 I M. 稳压电源 [M]. 北京:科学出版社,1993: 52-53.
- [3] BROWN M. 开关电源设计指南 [M]. 徐德鸿,等译. 北京:机械工业出版社,2004:23-27.
- [4] 王英剑,常敏慧,何希才. 新型开关电源实用技术 [M]. 北京:电子工业出版社,1999:86-89.
- [5] 徐德高,金刚. 脉宽调制变换器型稳压电源 [M]. 北京:科学出版社,1983:24-31.
- [6] 李定宣. 开关稳定电源设计与应用 [M]. 北京:中国电力出版社,2006:104-105.
- [7] 麦克·威廉亨姆. VMOS 应用电路精选 [J]. 应用电子文摘,1986(3):12.

(上接第 95 页)

- [6] 李素云,石润华. 一种动态的密钥分存方案 [J]. 安徽大学学报:自然科学版,2010,34(3):38-42.
- [7] 傅瑜. 关系数据库的数字水印模型 [D]. 武汉:华中师范大学,2011.
- [8] LOU Oujun, WANG Zhengxuan. A contourlet—domain watermarking algorithm against geometric attacks based on feature template [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(2):308-317.
- [9] 张健,于晓洋,任洪娥. 一种改进的 ArnoldCat 变换图像置乱算法 [J]. 计算机工程与应用,2009,45(35):14-17.

下 期 要 目

AFDX 实时流量的时间确定性中间件接入模型研究
微波着陆系统横向自动进近控制律设计
基于角点检测的双目视觉测距新方法
基于辅助粒子滤波的机动弱目标 TBD 算法
基于弦线法的去导迭代扩展卡尔曼滤波器
基于命中概率的制导炸弹可达域定量缩减方法
舰载反潜双机协同定位及其误差估计问题研究
一种基于共形阵的自适应单脉冲测角方法

一类离散时间系统的间接自适应模糊滑模控制
轮廓波和方向小波变换方法的性能比较
基于点迹态势图像处理的数据关联新方法
基于 Renyi 熵的非线性系统中传感器管理算法
基于 FPGA 和 TSC695F 的空间相机控制器设计
指数趋近律单向辅助面滑模控制
基于扩展卡尔曼滤波的动中通低成本姿态估计
高超声速滑翔式飞行器摆动突防设计