

采用电压特征的模拟电路单元件预测方法研究

周靖宇, 田书林, 王厚军, 龙 兵

(电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 为了更好地进行模拟电路单元件剩余使用寿命的预测, 提出一种采用电压特征的模拟电路单元件预测方法. 该方法首先提出一种通过欧式距离和双测点电压斜率模型得到故障指示值的计算式, 然后根据此式建立的退化模型得到的拟合曲线, 提出了一种适用于粒子滤波的参数更新式. 根据这两个式子计算故障指示值, 然后通过粒子滤波进行参数更新, 从而预测单元件的剩余使用性能寿命. 实验结果表明该方法的性能更好.

关键词: 模拟电路; 故障预测; 剩余使用性能寿命; 粒子滤波

中图分类号: TN606

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)12-0044-05

An Original Prognostic Method for Single Component of Analog Circuit with Voltage Features

ZHOU Jing-yu, TIAN Shu-lin, WANG Hou-jun, LONG Bing

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In order to improve the performance of prognostic method for single component of analog circuit, an original prognostic method for single component of analog circuit with voltage features is proposed in this paper. Firstly, a novel formula to calculate fault indicator through Euclidean distance and two test points voltage based slope model is proposed, and according to this formula, a formula to parameter updating through particle filter is get. Secondly, according to these two formulas, the remaining useful life of single-component can be predicted through fault indicator calculation and parameter updating of particle filter proposed in this paper. And finally, the improvement of performance is confirmed in experiments.

Key words: analog circuits; prognostic; remaining useful performance; particle filter

1 引言

对于一个产品寿命周期的可靠性研究, 健康管理(PHM)是非常重要的^[1]. PHM 主要包括故障诊断和失效预测两个方面. 对于模拟电路故障诊断的研究发展非常快速, 但是模拟电路的故障诊断往往作用于故障发生之后, 不能有效地防止损失发生. 相比故障诊断, 失效预测的研究^[2-8]对于防止系统失效是更加积极主动的方法.

为了对模拟电路进行失效预测, 文献^[7]提出了一种模拟电路剩余性能寿命(RUP)预测方法, 这种方法通过马氏距离计算故障指示值(FI). 由于马氏

距离对于特征微小变化的反映过于强烈, 使得引入的容差影响被放大, 退化模型的前端特征值波动较大以至于无法将前端特征值用于失效预测, 大大降低了预测信息的完整性和准确性. 文献^[8]提出了一种利用频率特征, 基于粒子滤波(PF)的模拟滤波器电路失效预测方法, 通过采集频率输出信号的特征值计算 FI, 从而预测 RUP. 这种方法忽略了不同参数特征值之间的相关性, 使得 FI 的计算缺乏合理性, 影响了预测精度. 不仅如此, 之前的模拟电路失效预测方法^[7-8]在解决非纯电阻电路预测问题的同时, 不能解决纯电阻电路的失效预测.

本文提出一种采用电压特征的模拟电路单元

收稿日期: 2015-03-04; 修回日期: 2015-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(60934002, 61201009)

件预测法,通过采集电路任意双测点的电压建立斜率模型,然后分析斜率直线轨迹与元件退化的关系,将双测点电压的欧氏距离作为 FI,从而建立 FI 退化模型,通过粒子滤波(PF)对 FI 退化模型的拟合曲线进行参数更新,最后准确预测模拟电路的 RUP.

2 本文算法描述

本文提出的采用电压特征的线性模拟电路单元件预测方法是通过斜率法模型与参数扫描模型相关性的分析,斜率法建模理论在故障诊断和可测性中均有一定的研究^[9-10],但是在模拟电路预测中还没有相关的研究.

2.1 线性模拟电路的斜率建模原理

图 1(a)表示一个线性时不变网络 N ,受一个独立电压源 u_s 激励, V_1 和 V_2 分别代表测点 n_1 和 n_2 上的电位值.元件 x_j 上的压降为 u_j .根据替代理论可知元件 x_j 可由一个独立电压源 u_j 所代替,因此图 1(a)可转化为图 1(b).再根据叠加原理,图 1(b)中各测点上的电位值等于图 1(c)和图 1(d)中对应测点上的电位值之和.

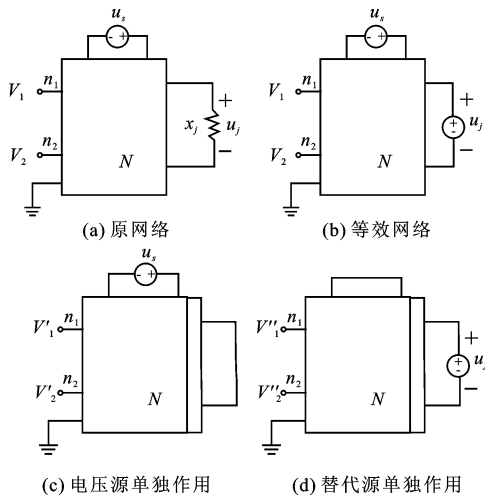


图 1 线性电路网络图

这里图 1(c)和图 1(d)分别满足式(1)和式(2):

$$\begin{cases} V_1' = u_s a_{10} \\ V_2' = u_s a_{20} \end{cases} \quad (1)$$

式中, a_{10} 为 V_1' 和 u_s 之间的比例因子, a_{20} 为 V_2' 和 u_s 之间的比例因子.

$$\begin{cases} V_1'' = u_j a_{1j} \\ V_2'' = u_j a_{2j} \end{cases} \quad (2)$$

式中, a_{1j} 为 V_1'' 和 u_j 之间的比例因子, a_{2j} 为 V_2'' 和 u_j 之间的比例因子.

因为,比例因子 a_{10} , a_{20} , a_{1j} 和 a_{2j} 都是独立于元件 x_j 的值.它们由网络 N 和元件 x_j 的位置唯一确定.根据叠加原理:

$$\begin{cases} V_1 = V_1' + V_1'' = u_s a_{10} + u_j a_{1j} \\ V_2 = V_2' + V_2'' = u_s a_{20} + u_j a_{2j} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可推得:

$$V_2 = V_1 k_j - u_{sj} \quad (4)$$

式中, $k_j = \frac{a_{2j}}{a_{1j}}$, $u_{sj} = u_s \frac{a_{10}}{a_{1j}} a_{2j} + u_s a_{20}$.它们都由网络 N 和元件 x_j 的位置唯一确定,独立于 x_j 的具体值.即不论元件 x_j 如何变化, k_j 和 u_{sj} 值是固定的.不仅如此,所有元件对应的斜率模型,都会经过一个公共点,这个点是电路的无故障无元件值偏移点.因此可知,不论元件值如何变化,退化模型在任意两个常规测点的电压输出值必满足直线方程式(4).

2.2 线性电阻模拟电路的 FI 集采集与计算

对于线性纯电阻模拟电路,根据上述斜率法,以图 2 所示的线性分压电路为例,扫描元件 R_2 从短路到开路变化时的两组不同测点(n_1, n_2)和(n_2, n_3)的电压输出,斜率模型分别如图 3(a)和(b)所示,这里元件值的开路状态设置为 $R_2 \times 10^3$,短路状态设置为 $R_2 \times 10^{-3}$,扫描步进为 1 k Ω ,其元件扫描的轨迹图形如图 3 所示.

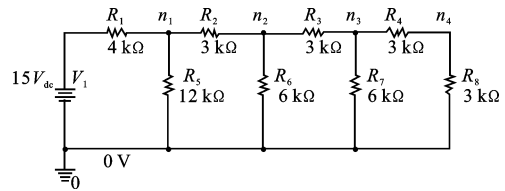


图 2 线性分压电路

如图 3(a)和(b)所示,图中点代表扫描元件得到的不同测点的电压值,线为根据两个测点建立的斜率模型, P_1 和 P_2 分别为开、短路点, P_3 为无故障点.图 3(a)所示为 R_2 从短路到开路变化时,理想条件下的 n_1 和 n_2 测点电压建立的斜率模型,图 3(b)所示为 R_2 从短路到开路变化时,理想条件下 n_2 和 n_3 测点电压建立的斜率模型.由图可以看到,对同一个元件从开路到短路的扫描轨迹,选择两个不同的常规测点,均可以通过斜率模型得到一个直线轨迹.同时,这里元件 R_2 的扫描虽然是等间距的,但是电压点并不是等间距的分布在直线上.因此可知,当元件等比例退化时,尽管两个测点的输出是在线的轨迹上运行,但是并不是匀速的运行,而运行速度

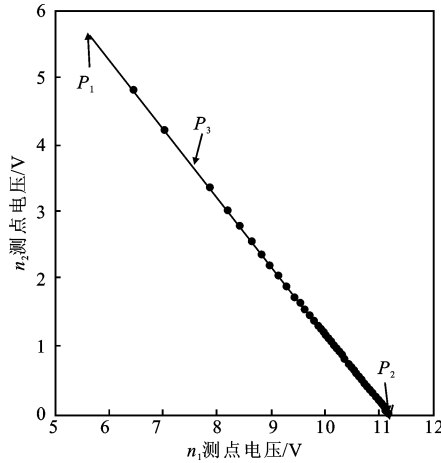
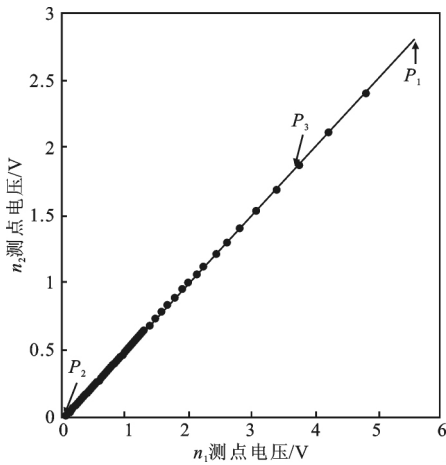
(a) n_1, n_2 轨迹(b) n_2, n_3 轨迹

图3 不同双测点电压图

即待预测电路的元件退化输出电压与无故障测点的距离与运行时间的比值,这个比值很好地反映非匀速运动的过程.因此本文提出,利用任意两个常规测点的电压与无故障点的距离作为特征值建立 FI 退化模型,如式(5)所示:

$$FI_t = \sqrt{(x_t - x_0)^2 + (y_t - y_0)^2} \quad (5)$$

式中, FI_t 为某个元件退化 t 个时间索引的 FI 值,此时的两个测点的输出电压分别为 x_t 和 y_t ,而初始状态的两个测点的电压输出为 x_0 和 y_0 .

对于上述 FI 的计算方法并不适用于所用情况,因为对于线性纯电阻模拟电路,整个斜率模型基于二维空间即可,但是对于线性非纯电阻模拟电路,因为测点的电压是一个复数,整个斜率模型是建立在四维空间下,我们考虑其运行轨迹为一个四维下的空间直线.因此对于这类型线性模拟电路,本文提出利用任意两个常规测点的电压与无故障点的四维空

间欧氏距离作为特征值,从而建立 FI 退化模型,如式(6):

$$FI_t = \sqrt{(x_t - x_0)^2 + (a_t - a_0)^2 + (y_t - y_0)^2 + (b_t - b_0)^2} \quad (6)$$

式中,两个测点的输出电压分别为 $x_t + ia_t$ 和 $y_t + ib_t$,而无故障元件偏移的两个测点的电压输出为 $x_0 + ia_0$ 和 $y_0 + ib_0$.

2.3 粒子滤波的退化模型更新

如图3中的退化轨迹,可以通过式(7)进行曲线拟合.

$$f(x) = a \cdot x^b + c \quad (7)$$

式中, $f(x)$ 为 FI, x 为时间索引, a, b, c 为拟合式的参数.

尽管可以通过曲线拟合得到 FI 的退化趋势建立退化模型,但是由于容差和高斯白噪声等随机影响,使得 FI 的值存在一定的波动,造成拟合的曲线参数存在微弱的变化,影响预测的精确性.为了降低退化模型拟合曲线中的参数波动,提高预测的精确性,本文提出利用粒子滤波来对模型进行更新.

粒子滤波是一种较为常用的非线性滤波器,在 PHM 领域应用非常广泛^[11-13].粒子滤波的思想基于蒙特卡洛方法,其选择 N 个随机样本模拟状态空间,通过这 N 个样本计算后验概率,其大致包括以下两个步骤:

第一个为预测步骤,即根据动态模型由 $k-1$ 时刻的状态向量得到 k 时刻的 N 个随机样本.换句话说就是通过先验概率得到 k 时刻的 N 个随机样本,同时计算这 N 个样本的权值,进行归一化.

第二个为更新步骤,即进行重采样,保证样本集中的 N 个样本都具有较大的权重.这样就可以得到新的样本集作为 k 时刻的后验样本集.

粒子滤波的核心在于重要性权值的计算,重要性权值计算公式如下:

$$w_k^i = \frac{P(z_k | x_k^i) P(x_k^i | x_{k-1}^{i*})}{q(x_k^i | x_{k-1}^{i*}, z_k)} \quad (8)$$

式中, $P(z_k | x_k^i)$ 为相似性, $P(x_k^i | x_{k-1}^{i*})$ 为迁移的概率密度函数,而 $q(x_k^i | x_{k-1}^{i*}, z_k)$ 为重要性密度,一个最优的重要性密度将会使得重要性权值的方差最小化.

为了降低拟合退化模型曲线中参数的波动,提高预测的精确性,本节提出的 FI 的退化趋势拟合曲线公式改进如下:

$$f(x) = a_k \cdot x^{b_k} + c_k \quad (9)$$

$$a_k = a_{k-1} + v_1, \quad v_1 \in N(0, \sigma_1);$$

$$b_k = b_{k-1} + v_2, \quad v_2 \in N(0, \sigma_2);$$

$$c_k = c_{k-1} + v_3, \quad v_3 \in N(0, \sigma_3).$$

式中, $f(x)$ 为时间索引为 x 时候的 FI, k 代表第 k 个参数. 式(9)中, v 服从正态分布, σ 为 v 的协方差值. 这里 $k=0$ 时, 各个参数的初始值为初始状态下利用式(7)拟合得到的参数值的平均值. 然后利用 PF 对参数进行更新, 从而得到最适合当前样本的预测式. 本文 FI 模型中需要 PF 更新的参数只有 a 、 b 、 c 三个, 相比之前的方法更为简单.

2.4 本文算法结构与步骤

本节提出的采用电压特征的线性模拟电路单元件预测方法, 其主要步骤如下所示.

① 选择任意两个常规的测点采集电压特征即可.

② FI 退化特征集采集. 当两个测点选定后, 采集包括初始时刻的每一个时间索引的两个测点的电压值, 对于纯电阻线性模拟电路, 采集电压值 x 、 y , 然后利用式(4)计算得到每个时间索引下的 FI 值; 而对于非电阻线性模拟电路, 采集电压值 $x+a_i$ 、 $y+b_i$, 然后利用式(6)计算每个时间索引下的 FI 值, 这里为了便于退化模型的研究, 我们设置每个时间索引元件的退化率为 0.4%, 其他元件在容差范围内波动. 对于实际测试时, 初始时刻的电压值即无故障无元件偏移状态的值, 因为元件值受容差的影响服从高斯分布, 所以初始时刻值考虑经过多次测试的平均值.

③ 曲线拟合, 采集 PF 参数集.

对于上述特征集利用式(7)进行拟合, 得到初始状态参数值.

④ 基于 PF 的参数更新.

根据式(9), 利用 PF 进行参数更新, 得到最优的曲线拟合参数.

⑤ 根据阈值预测 RUP.

根据待预测元件的故障阈值, 结合步骤④的参数更新式预测线性模拟电路待预测单元件的 RUP.

3 实验

本节将通过仿真和实验加以论证上述理论. 所有仿真都由一台 3 GHz 处理器和 2 GB 内存的个人电脑完成, 仿真程序采用 MATLAB7.1 和 OrCAD10.5. 实验则采用 Tektronix 数字示波器采集被测电路各个退化时间索引下的电压特征值, 由上

述个人电脑进行数据处理.

为了验证本文方法的预测效果, 选用四级放大双二阶低通滤波器模拟电路作为实验对象, 电路元件设置如图 4 所示. 实验中, 选用 Tektronix 数字示波器采集输出电压特征, 其示波器采样率为 1 GS/s, 带宽为 100 MHz. 考虑电阻 R_6 为退化元件, 每次让 R_6 增加 40 Ω , 使得 R_6 从 10 k Ω 变为 12 k Ω , 选用其中 10 k Ω 变为 11.2 k Ω 采集数值作为预测数据, 测点分别选择 n_1 、 n_2 和 n_2 、 n_3 , 预测 R_6 变化到 12 k Ω 时预测曲线与实际采集数据进行比较, 如图 5 所示.

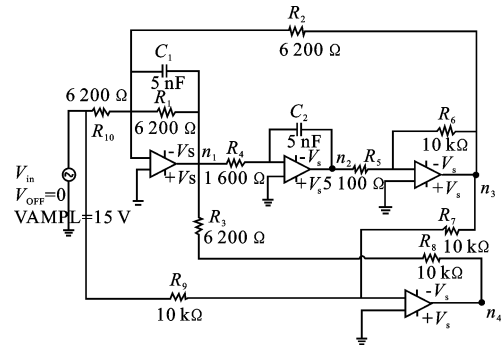
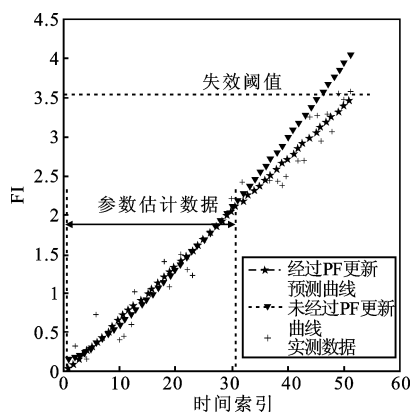
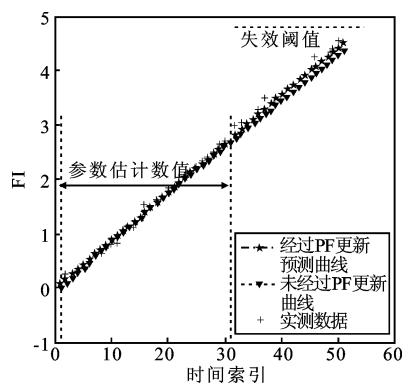
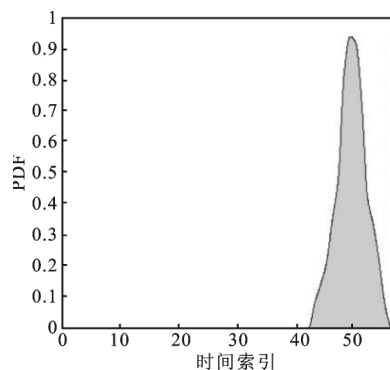
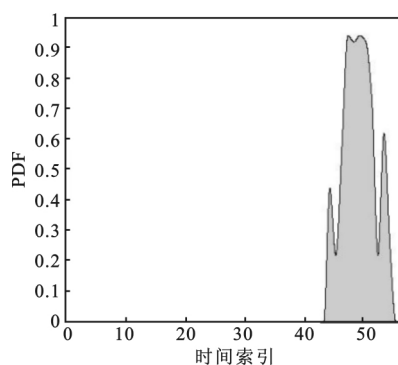


图 4 四级放大双二阶低通滤波器

如图 5 所示, 五星条状虚线代表通过 PF 参数更新后的预测曲线, 三角点状虚线代表没有通过 PF 参数更新的某一次测试的拟合曲线. 圆点为某次的实际测试所建立的 FI 退化模型. 其中, 图 5(a)所示为测点 n_1 、 n_2 采用 31 个时间索引实际测试数据预测 R_6 偏差 20% 结果, 而图 5(b)所示为测点 n_2 、 n_3 采用 31 个时间索引实际测试数据预测 R_6 偏差 20% 结果. 由图 5 可知, 由于容差的存在, 测试的电压值所计算得到的 FI 值存在一定程度的波动. 因此, 某一次的测试所建立的 FI 退化模型拟合曲线相比通过 PF 参数更新后的预测曲线有较大的偏差, 通过 PF 参数更新后的曲线能更精确的进行 FI 退化模型的预测. 相比文献[10]中的实际测试效果, 本章方法预测效果更加的稳定和精确. 不仅如此, 本章方法选用任意不同的双测点 n_1 、 n_2 和 n_2 、 n_3 采集电压特征所得到的预测曲线, 都能较好的接近实际测试的曲线. 图 6(a)和图(b)分别为预测 RUP 的概率密度(PDF)图, 从图中可以看出, 在阈值为 50 的时间索引附近的 RUP 的 PDF 均比较高.

4 结束语

文中提出了一种采集电压特征的模拟电路单元件预测方法, 这种方法针对模拟电路中单元件故障占

(a) 测点 n_1 、 n_2 预测 R_6 变化曲线(b) 测点 n_2 、 n_3 预测 R_6 变化曲线图 5 $FI(R_6)$ 预测数据与实际采集数据对比图(a) 测点 n_1 、 n_2 预测 R_6 的 PDF 图(b) 测点 n_2 、 n_3 预测 R_6 的 PDF 图图 6 不同双测点预测 R_6 的 PDF 图

大多数的特点,主要目的在于单元件 RUP 的预测.从线性模拟电路的结构出发,通过建立斜率模型,分析模型中参数变化与单元件退化的关系,从而得到更合理的 FI 特征采集与计算方法,然后通过曲线拟合得出 FI 退化模型的相关参数,最后用粒子滤波对模型进行参数更新,预测模拟电路单元件的 RUP. 相比之前文献的方法,本文方法特征采集简单,PF 参数更新过程也得到简化,预测精度也得到了提高.

参考文献:

- [1] Pecht M. Prognostics and health management of electronics[M]. USA: Wiley-Interscience, 2008.
- [2] 张娜, 龙兵, 刘震. 基于多特征信息融合的模拟电路故障预测[J]. 测控技术, 2011, 30(12): 82-85.
- [3] Cheng Y M, Wu H C, Chou M W, et al. Online failure prediction of electrolytic capacitors for LC filter of switching mode power converters[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2008, 55(1): 400-406.
- [4] Lall P, Bhat C, Hande M, et al. Prognostication of residual life and latent damage assessment in lead-free electronics under thermomechanical loads[J]. IEEE Trans. Ind. Electron, 2011, 58(7): 2605-2616.
- [5] Alam M A, Azarian M H, Osterman M, et al. Prognostics of failures in embedded planar capacitors using model-based and data-driven approaches[J]. J. Intell. Mater. Syst. Struct., 2011, 22(12): 1293-1304.
- [6] Kwon D, Azarian M, Pecht M. Prognostics of interconnect degradation using RF impedance monitoring and sequential probability ratio test[J]. International Journal of Performability Engineering, 2010, 6(5): 443-452.
- [7] Vasan A S S, Long B, Pecht M. Diagnostics and prognostics method for analog electronic circuits[J]. IEEE Trans. Ind. Electron, 2013, 60(11): 5277-5291.
- [8] Min Li, Weiming Xian, Bing Long, et al. Prognostics of analog filters based on particle filters using frequency features[J]. J. Electron Test. 2013, 29(4): 567-584.
- [9] Chenglin Yang, Shulin Tian, Bing Long. Test points selection for analog fault dictionary techniques[J]. Journal of Electronic Testing: Theory and Application, 2009, 25(2/3): 157-168.
- [10] Chenglin Yang, Shulin Tian, Bing Long, et al. A novel test points selection method for analog fault dictionary techniques[J]. Journal of Electronic Testing: Theory and Application, 2010, 26(5): 523-534.

(下转第 53 页)

TPMOS 为 $110 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, VDMOS 为 $150 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 与半超结结构相比, 性能较差。

4 结束语

本文设计了一款 VDMOS 半超结元胞结构, 采用三次生长次外延的方法形成 P 柱, 通过增加次外延 t_{epi2} 的掺杂浓度来减小半超结元胞结构特征导通电阻, 并优化了 N 柱和 P 柱的掺杂浓度和宽度, 最终实现了 1 008 V 的耐压。与传统 VDMOS 结构相比, 提高了击穿电压并减小了特征导通电阻, 缓和了击穿电压和导通电阻的矛盾, 并获得较好的开关性能。

参考文献:

- [1] 陈星弼. 功率 MOSFET 与高压集成电路[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990: 6-8.
- [2] 胡佳贤, 韩雁, 张世峰, 等. 200 V 高压大电流 VDMOS 的研制[J]. 固体电子学研究与进展, 2011, 31(1): 85-89.
- [3] Balliga B J. Fundamental of power semiconductor devices[M]. New York: Springer-Verlag, 2008: 174.
- [4] Deboy G, Marz M, Stengl J P, et al. A new generation of high voltage MOSFETs breaks the limit line of silicon [C] // International Electron Devices Meeting, USA, San Francisco, 1998: 683-685
- [5] 陈文高, 荆吉利, 孙伟峰, 等. 半超结 VDMOS 的研究

[J]. 微电子学, 2009, 39(4): 584-587.

- [6] 胡佳燕. 超结高压功率 MOSFET 器件研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 7-8.
- [7] Balliga B J. Advanced power MOSFET concepts[M]. Berlin: Springer, 2010: 326-328.
- [8] 黄海猛. 超结结构的模型研究及优化设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 5-10.
- [9] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋升, 等. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 50-51.
- [10] 黄示, 郭宇峰, 姚佳飞, 等. 横向超结器件衬底辅助耗尽效应的研究与展望[J]. 微电子学, 2013, 43(4): 586-588.
- [11] 干红林, 冯全源, 王丹. 高压功率 VDMOS 元胞的研制[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(2): 47-49.
- [12] 孙丞. 功率 MOSFET 新结构及其工艺研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.

作者简介:

刘 铭 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为大功率器件的研究与设计.

冯全源(通讯作者) 男, (1963-), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为数字、模拟及射频集成电路设计.

E-mail: fengquanyuan@163.com.

庄圣贤 男, (1964-), 教授, 博士生导师. 研究方向为 SoC 系统设计方法、电力电子系统控制与集成.

(上接第 48 页)

- [11] Wei He, Nicholas Williard, Michael Osterman, et al. Remaining useful performance analysis of batteries [C] // IEEE Conference on Prognostics and Health Management, Denver, 2011: 20-23.
- [12] Wei He, Nicholas Williard, Michael Osterman, et al. Prognostics of lithiumion batteries based on Dempster-Shafer theory and the Bayesian Monte-Carlo method [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(23): 10314-10321.
- [13] Gunnarsson F, Bergman N, Forssell U, et al. Particle filters for positioning[J]. Navigation and Tracking. IEEE Trans. Signal Processing, 2002, 50(2): 425-437.

作者简介:

周靖宇 男, (1984-), 博士研究生. 研究方向为模拟电路故障预测、故障诊断、测试生成算法.

E-mail: 1308531709@qq.com.

田书林 男, (1968-), 教授, 博士生导师. 研究方向为测试技术与仪器.

王厚军 男, (1961-), 教授, 博士生导师. 研究方向为研究方向为测试技术与仪器.

龙 兵 男, (1974-), 副教授, 硕士生导师. 研究方向为可测性分析与电路与电子系统故障诊断.