DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.05.013　　文章编号：1000-128X(2023)05-0119-11

功率器件热网络模型的快速反卷积算法研究

邓二平[1]，杨　颖[2]，王延浩[2]，常桂钦[3]，黄永章[2]，丁立健[1]
（1.合肥工业大学 电气与自动化工程学院，安徽 合肥　230009；
2.新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)，北京 昌平　102206；
3.株洲中车时代半导体有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：采用结构函数法是获得功率器件Cauer热网络模型的重要手段，然而在其反卷积步骤中，不同的计算方法对结果存在较大影响，影响了热网络模型的准确性。各算法的根本机理、不同算法对噪声的放大效果以及算法的合理选取方法等十分重要，且目前亟待解决。文章通过研究结构函数法中反卷积这一核心环节，对3种反卷积计算方法从算法输入、算法核心、误差分析这3个方面进行理论分析，从迭代次数、计算时间、采样频率、算法准确性、算法选择、实际应用这6个方面进行数据分析。针对3种方法计算特点分别总结了其适合的数据特点，为不同类型输入数据选择合适热网络模型的快速计算方法提供了参考和指导。

关键词：功率器件；结构函数法；热网络模型；反卷积；贝叶斯算法；傅里叶算法
中图分类号：TN305.94；TN302　　**文献标识码：**A

Research on deconvolution methods for thermal network of power devices

DENG Erping[1], YANG Ying[2], WANG Yanhao[2], CHANG Guiqin[3], HUANG Yongzhang[2], DING Lijian[1]

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;
2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Zhuzhou CRRC Times Semiconductor Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The structure function method is critical for obtaining Cauer thermal network models for power devices. However, in its deconvolution step, different calculation methods have a large impact on the results, which affects the accuracy of the thermal network model. The underlying mechanism of each calculation method, the amplification effect of different calculation methods on noise, and the reasonable selection of calculation methods are very important and need to be solved urgently at present. In this paper, by studying the core aspect of deconvolution in the structure function method, the theoretical analysis of three deconvolution calculation methods was carried out from three aspects: calculation method input, calculation method core, and error analysis; data analysis was carried out from six aspects: number of iterations, calculation time, sampling frequency, accuracy of calculation methods, selection of calculation methods and practical application. The suitable data characteristics were also summarized for each of the three methods according to their calculation characteristics, which provide reference and guidance for selecting appropriate fast calculation methods of thermal network models for different types of input data.

Keywords: power devices; structure function method; thermal network model; deconvolution; Bayesian calculation method; Fourier calculation method

基金项目：国家自然科学基金项目(52007061)；新能源电力系统国家重点实验室自主研究课题（LAPS202202）
通信作者：邓二平（1989—），男，博士，教授，博士生导师，主要从事功率半导体器件方面的研究；E-mail: erping.deng@hfut.edu.cn
引用格式：邓二平, 杨颖, 王延浩, 等. 功率器件热网络模型的快速反卷积算法研究[J]. 机车电传动, 2023(5): 119-129.
Citation: DENG Erping, YANG Ying, WANG Yanhao, et al. Research on deconvolution methods for thermal network of power devices[J]. Electric drive for locomotives,2023(5): 119-129.

0 引言

功率半导体器件(Power Semiconductor Devices)，简称功率器件，是适用于高电压大电流场景的半导体器件[1-3]。器件运行过程中间歇性导通大电流，长时间运行下会发生热疲劳。热疲劳会引起器件的结构损伤与性能的显著变化，导致器件热学及电学参数如热阻、饱和压降等退化乃至器件失效[4-5]。

器件热阻用来描述器件的热传导性能，是评价大功率器件可靠性与寿命预测的重要参数[6]。标准JESD51-1[7]中明确定义了通过器件结温T_j、器件壳温T_c与功率损耗P来计算功率半导体器件结到壳的稳态热阻值θ_{jc}；当对器件施加脉冲功率时，此时器件热阻为瞬态热阻$Z_{\theta jc}(t)$。结构函数法是通过对瞬态热响应曲线进行数值解析，从而提取器件内部热阻热容信息，得到器件热网络模型的非破坏性方法。传统的稳态测试法只能测量器件的整体热阻值[8]，而基于结构函数法的热瞬态测试技术可以分析器件内部从芯片到散热器热传导路径上各层封装材料的热学性能，体现器件内部的热阻和热容分布情况，使得热流路径精细结构的详细重建成为可能[9-10] 。

目前国内外虽已有不少学者对结构函数法进行了研究，A. Szalai,V.Szekely 等人在2010年提出了验证结构函数正确性的方法[11]，同时于2012年补充完善了验证标准[12]。2011年，Hensler等人基于传统贝叶斯反卷积模型提出了一种可以避免对热响应计算微分的反卷积新算法[13]。但是这些研究进展都仅仅局限于单一方法实现原理的分析，缺少一个系统性、综合性的对结构函数法不同反卷积实现方式的研究，使得不同反卷积方法之间难以实现综合对比。在其反卷积步骤中，不同的计算方法对结果存在较大影响，直接影响了热网络模型的准确性，其背后的根本机理、不同算法对噪声的放大效果，以及针对不同数据的算法合理选取等十分重要，目前亟待解决。

本文旨在研究3种功率器件热网络模型的反卷积的快速计算方法，深入对比算法原理与误差，针对3种方法各自的特点分别总结其适合的数据类型，总结分析通过3种方法计算得到的数据结果，最终提出最适合于功率器件热网络模型的反卷积算法。本文结构安排如下：首先深入分析3种快速反卷积计算方法的基本原理，然后针对算法核心、误差分析2个方面进行对比，探究3种计算方法原理上的本质区别。进一步地通过从迭代次数、计算时间、采样频率、算法准确性、算法应用等方面的研究，分析3种计算方法在实际应用中的性能与特点，为选择合适的热网络模型的快速反卷积计算方法提供指导。

1 算法原理

1.1 结构函数法原理

结构函数的概念最早由 V.Szekely 等人提出[14-15]，该方法通过对瞬态热响应曲线进行一系列的数学运算，最终得到包含功率器件内部各层结构热学参数的结构函数[16]。利用结构函数法计算器件热网络模型的全过程主要包括：测量热瞬态响应曲线、反卷积、时间常数谱离散化、Foster与Cauer网络模型转换[17]这4个基本步骤，如图1所示。

为了精细刻画热网络模型，将这种用于表征复杂系统热响应的时间常数τ_i和电阻相对振幅R_i确定的离散序列谱定义为时间常数谱[18-19]。通常将热瞬态响应曲线绘制在对数时间轴上[20], 热响应$a(t)$在对数时间尺度上的连续表达[21]如式(1)所示。

$$a(z)=\int_{-\infty}^{+\infty}R(\zeta)\left(1-\mathrm{e}^{-\mathrm{e}^{z-\zeta}}\right)\mathrm{d}\zeta \tag{1}$$

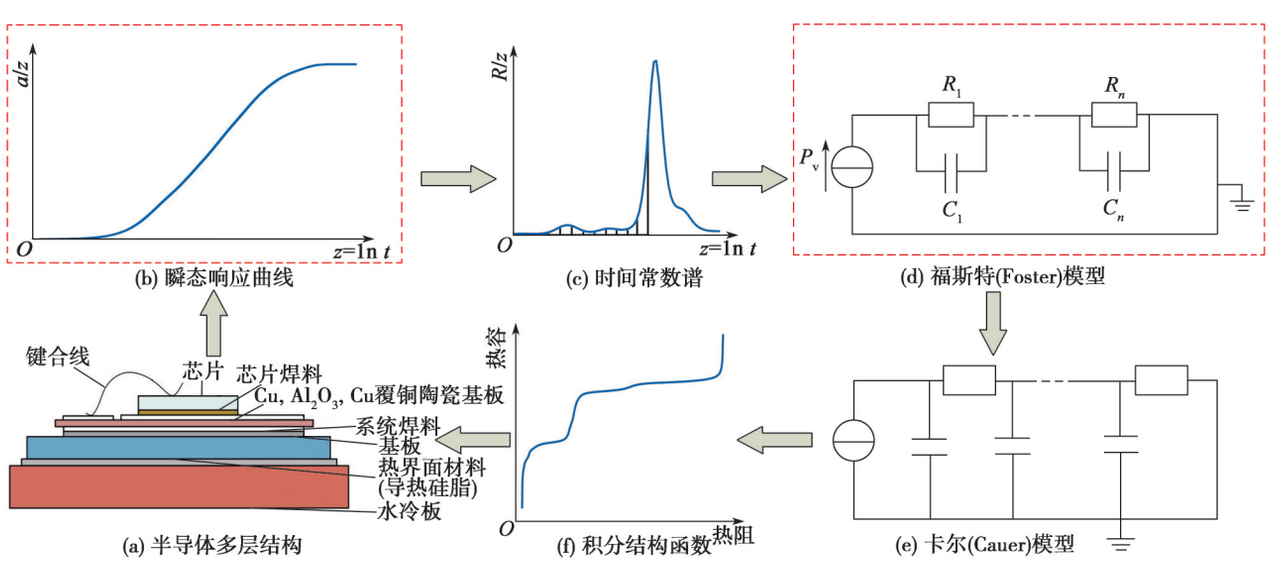


图1 利用结构函数法分析器件热网络模型

Fig. 1 Analysis of thermal network models of device using the structure function method

等式两边同时对z求微分，并根据卷积定义整理变形为：

$$R(z)=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}a(z)\otimes^{-1}W(z) \tag{2}$$

$$W(z)=\exp\left(z-\exp(z)\right) \tag{3}$$

da/dz是热瞬态响应$a(t)$对z=ln t的微分，$W(z)$是已知的转移矩阵，$R(z)$则是需要求解的时间常数谱。由式(2)可知提取时间常数谱$R(z)$的关键在于计算热响应微分量与转移矩阵的反卷积，反卷积的算法将直接影响结果的准确性和精度等。

1.2　反卷积原理

反卷积在电路、信号处理和图像[22]等领域已有较为成熟的应用，但应用在功率器件的热网络模型进行数据提取还需要考虑特定性问题，目前主要有3种典型算法：Richardson和Kennett基于贝叶斯理论，提出贝叶斯迭代方法[23-24]；Hensler等人基于传统贝叶斯反卷积模型提出的避免微分计算的反卷积新算法[13]；以及基于傅里叶变换与反变换实现的反卷积算法。这3种计算方法的主要差异在于提取时间常数谱过程中所使用的反卷积算法不同。不同的输入导致所提取的信息还原初始信息的准确度、提取速度不同，最终结果呈现出差异。

1.3　贝叶斯算法1

贝叶斯算法1将热响应微分量作为输入，贝叶斯条件概率公式如式(4)所示, 其中$P(H)$为先验概率，$P(H|D)$为后验概率, $P(D|H)$ 为事件D在事件H已经发生条件下的概率。

$$P\left(H|D\right)=\frac{P\left(D|H\right)P(H)}{P(D)} \tag{4}$$

在离散频谱中，测量谱M与真实谱T可以用矩阵的方式进行表达(其中$\boldsymbol{W}$为响应矩阵)，具体为

$$M=\boldsymbol{W}\cdot T \tag{5}$$

基于贝叶斯概率公式推导，考虑到热响应微分量作为测量谱M，时间常数谱作为真实谱T，则得到式(6)。

$$R_i^{p+1}=R_i^p\sum_j\frac{W_{ji}\dfrac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}z}}{\sum\limits_k W_{jk}R_k^p} \tag{6}$$

式中：p为迭代次数；$\boldsymbol{W}$为转移矩阵；R为时间常数谱。

由式(6)可知，贝叶斯算法1需要进行反复迭代以逼近R的真实值，算法采用热响应曲线的微分量da/dz作为输入，计算过程中还需要用到转移矩阵$\boldsymbol{W}$，迭代次数和瞬态热响应曲线是时间常数谱准确获取的关键。

1.4　贝叶斯算法2

贝叶斯算法2将热响应直接作为输入，将式(1)由连续形式变换为离散形式：索引“j”将对数时间轴z离散化，索引“i”将对数时间常数轴ζ离散化，再将其改写为如下矩阵乘积形式：

$$A=\boldsymbol{W}\cdot R \tag{7}$$

$$W_{ij}=1-\exp\left[-\exp\left(z_j-\zeta_i\right)\right] \tag{8}$$

将上式代入贝叶斯概率公式得到

$$R_i^{p+1}=\frac{1}{\sum\limits_j W_{ji}}\sum_j\frac{W_{ji}R_i^p a_j}{\sum\limits_k W_{jk}R_k^p} \tag{9}$$

由式(9)可知，贝叶斯算法2也需要进行多次迭代计算，算法采用热响应曲线$a(z)$作为输入，计算过程中同样需要用到转移矩阵$\boldsymbol{W}$，但不需要对输入曲线进行微分的过程。

1.5　傅里叶反卷积算法

对式(2)两边同时进行傅里叶变换(注意需在对数时域进行变换[25])得到

$$M(\Phi)=R(\Phi)\cdot W(\Phi) \tag{10}$$

实际测量得到的信号会存在噪声分量。将原始信号目标信号定义为$m(z)$，实际测量得到信号定义为$m^*(z)$，附加噪声信号定义为$n(z)$，再对等式两边进行傅里叶变换并变形后，得到时间常数谱$R(z)$在频域中对应的象函数$R^*(\Phi)$为

$$R^*(\Phi)=\frac{M^*(\Phi)}{W(\Phi)}=\frac{M(\Phi)}{W(\Phi)}+\frac{N(\Phi)}{W(\Phi)} \tag{11}$$

在频域中引入滤波函数$F(\Phi)$对$R^*(\Phi)$进行降噪处理，降噪后的信号定义为$R'(\Phi)$，对频域滤波后的$R'(\Phi)$进行傅里叶反变换得到时间常数谱$R(z)$如下：

$$R(z)=F^{-1}[R'(\Phi)]=F^{-1}\left[\frac{M^*(\Phi)\cdot F(\Phi)}{W(\Phi)}\right] \tag{12}$$

参考式(12)，为了使$F^{-1}[R'(\Phi)]$更接近真正的时间常数谱，必须选择合适的滤波函数尽可能滤除噪声分量。实践表明，JESD51-14中标准的Fermi-Dirac函数$F(\Phi)$不仅能满足滤波要求，而且可以得到与原始信号吻合度较高的重构信号，其中Φ为带宽，σ为边缘陡度，滤波函数$F(\Phi)$图像如图2所示。

$$F(\Phi)=\frac{1}{\mathrm{e}^{\frac{|\Phi|-\Phi_0}{\sigma}}+1} \tag{13}$$

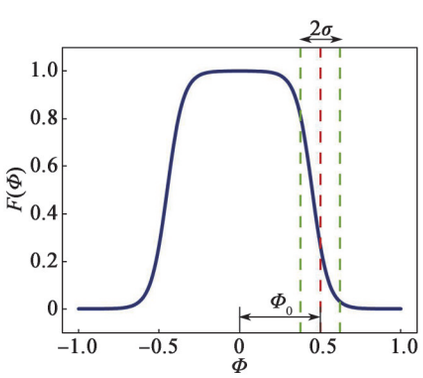


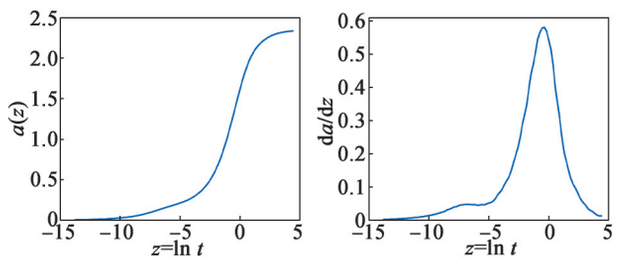
图2　滤波函数$F(\Phi)$

Fig. 2　Filter function $F(\Phi)$

2 算法理论分析与对比

2.1 算法核心

对比贝叶斯算法 1、贝叶斯算法 2 和傅里叶反卷积算法这 3 种反卷积算法的最终表达式(6)、式(9)、式(12)可以得到：在贝叶斯反卷积算法中，贝叶斯算法 1 和贝叶斯算法 2 分别采用热响应微分量 da/dz、热响应 $a(z)$作为输入，如图 3 所示；傅里叶反卷积算法与贝叶斯算法 1 同样采用热响应微分量 da/dz 作为输入。



(a) 热瞬态响应曲线　　(b) 热瞬态响应微分曲线

图 3　不同反卷积算法的输入数据

Fig. 3　Input data for different deconvolution calculation methods

贝叶斯反卷积算法需要不断进行迭代以逼近真实值，直至满足收敛条件。因此迭代次数是评估贝叶斯反卷积算法的重要指标，在一定程度上可以反映出算法的收敛速度与计算时长，并且直接影响着反卷积结果的准确性；而傅里叶反卷积算法通过时域与频域的相互变换求解，无须迭代。

对于贝叶斯算法 1 与贝叶斯算法 2，虽然基于相同的原理贝叶斯概率公式，但输入数据分别为热响应微分量 da/dz 与热响应 $a(z)$，两种算法收敛所需要的迭代次数也不同。考虑到结构函数的本质就是通过大功率器件散热时的热响应曲线来重建热流路径的精细结构，微分量 da/dz 可以看作热响应 $a(z)$的热流细节放大，可以更显著地体现出热响应曲线中包含的有效信息，因此理论上贝叶斯算法 1 更容易达到收敛。

2.2 算法误差分析

2.2.1 噪声选择

实际热响应测试时，由于其采样频率较高（15~50 kHz）、饱和压降的精度较高（mV 量级），常存在一定的测量噪声，该噪声即为白噪声，与 2.2.2 节中人为添加的噪声类型相同。白噪声由导体中电子的热振动引起，它存在于所有电子器件和传输介质中，导致在接收端电压会存在扰动等现象。

从理论角度进行分析，热响应测量过程中实际产生的噪声应该是热噪声，这种由热扰动导致导体内部的电荷载体达到平衡状态时的电子噪声存在于所有的电子器件与传输介质中。由于热噪声在较宽的频率范围内具有均匀的功率谱密度，通常被认为是白噪声的一种。

从数据角度进行验证，本文对目前国际公认的高精度热阻分析软件 TDIM-Master 中自带的测试数据集进行分析，对拟合前、后热响应曲线进行数据比较，对比还原出拟合过程中筛除的噪声部分，发现噪声部分在整个时间域内呈现均匀分布。

综上，使用白噪声来模拟实际场景中的测量噪声进行研究是具有代表性和研究价值的。

2.2.2 贝叶斯算法 1

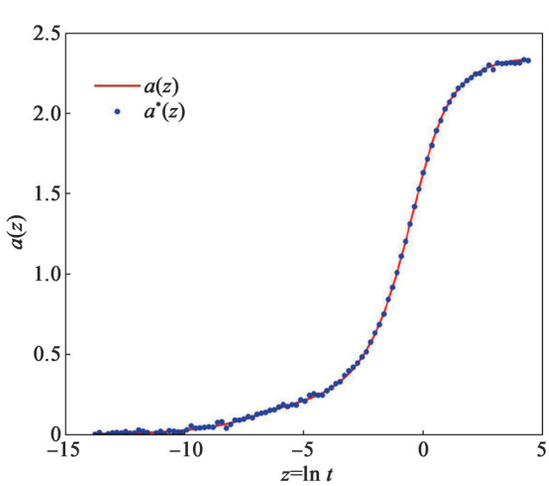
为了探究噪声分量在贝叶斯算法 1 计算过程中的具体变化过程，本文对一组拟合后的热响应曲线添加噪声分量，对其求取微分并将此作为算法输入数据，如图 4 所示。本文定义反卷积计算结果与基准值的局部误差为 ε，如式(14)所示，其中 $\tilde{R}(z)$ 定义为基准时间常数谱幅值，这里将无噪声数据计算得到的结果作为基准值。为了更直观地反映整体计算结果与基准值的偏差情况，定义整体误差 Δ 如式(15)所示。

$$\varepsilon = R(z) - \tilde{R}(z) \tag{14}$$

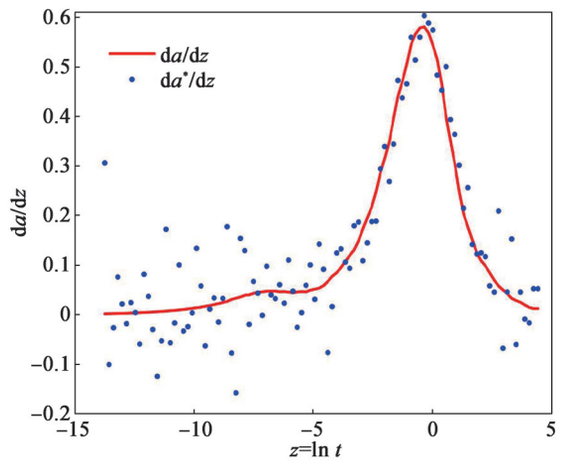
$$\Delta = \sum_{i=1}^{n} |\varepsilon_i| \tag{15}$$

绘制不同迭代次数下局部误差 ε 在对数时间轴上的分布情况，得到初始噪声分量随迭代次数在贝叶斯算法 1 计算过程中的波形变化，如图 5 及表 1 所示。分析可知，初始噪声分量引起的计算结果误差并不会在计算中被抵消，相反，误差会随着迭代次数的增加而累积。由于贝叶斯算法需要进行多次迭代，初始噪声引起的误差将在迭代中不断积累，最终影响计算结果时间常数谱的准确性。

因此，原始热响应曲线中含有的噪声分量在微分曲线中会被放大，热响应微分量作为贝叶斯算法 1 的输入数据参与计算，导致最终计算结果出现误差。这就对测量数据的精度和准确度提出了更高的要求和挑战。



(a)热响应曲线



(b)热响应微分曲线

图4　热响应曲线附加噪声后的输入数据

Fig. 4　Input data after adding noise to the thermal response curve

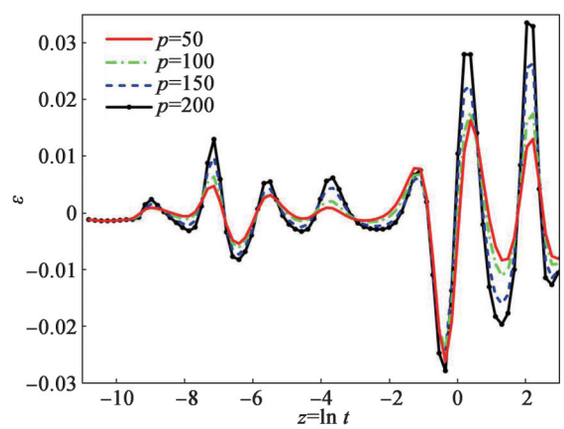


图5　计算结果中噪声分量随迭代次数的变化(贝叶斯算法1)

Fig. 5　Variation of the noise component with number of iterations in the Bayesian calculation method 1

2.2.3　贝叶斯算法2

将相同添加噪声分量后的热响应曲线作为算法输入，得到附加噪声分量随迭代次数在贝叶斯算法2计算过程中的波形变化，如图6所示。分析后得到与2.2.2节相同结论：输入数据中的初始噪声分量在计算过程中随着迭代次数增加而累积。

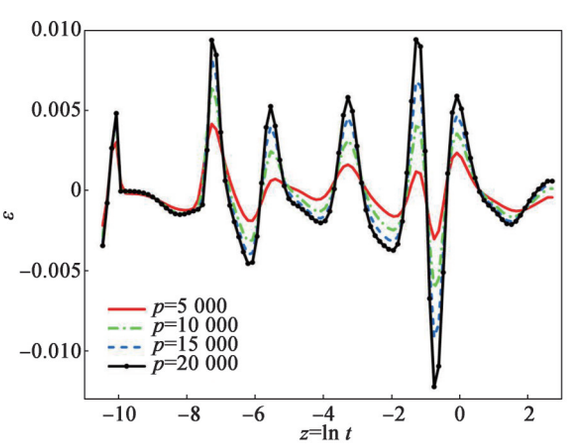


图6　计算结果中噪声分量随迭代次数的变化(贝叶斯算法2)

Fig. 6　Variation of noise component with number of iterations in the Bayesian calculation method 2

测量得到的热响应曲线中包含的噪声分量确实是导致计算结果误差的来源。反向过程进行分析，采用高精度测量和曲线拟合等方式降低输入数据中的噪声分量是减小计算结果误差、提高计算结果准确度的有效措施。

2.2.4　傅里叶反卷积算法

根据算法原理分析，傅里叶反卷积算法的误差来源可能是滤波函数和热响应微分量计算。将添加相同噪声分量后的热响应曲线作为算法输入，结果如图7与表1所示。分析可得，输入数据热响应曲线中包含的噪声分量会在傅里叶变换与逆变换的过程中放大，使最终计算结果准确性下降。

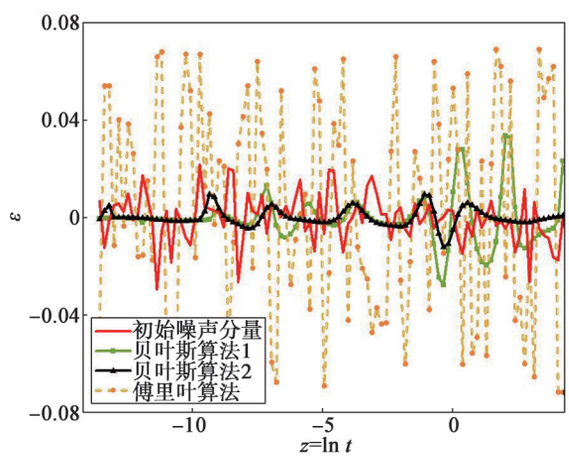


图7　初始噪声分量与3种算法计算结果中噪声分量对比

Fig. 7　Comparison of the initial noise component with noise component in calculation results of the three calculation methods

表1　不同反卷积算法计算结果中噪声分量

Table 1　Noise components in the calculation results of different deconvolution calculation methods

$a(z)$ 噪声含量	da/dz 噪声含量	迭代次数	反卷积误差（贝叶斯算法1）	反卷积误差（贝叶斯算法2）	反卷积误差（傅里叶算法）
0.725	5.154	p = 50	0.554	0.018	4.751
		p = 100	0.711	0.020	
		p = 150	0.840	0.024	
		p = 200	0.941	0.027	
		p = 5 000	2.596	0.103	
		p =10 000	2.927	0.159	
		p = 15 000	3.125	0.208	
		p = 20 000	3.240	0.251	

通常使用的滤波函数$F(\Phi)$的形状由两个参数决定：带宽Φ、边缘陡度σ。带宽越大，所得结构函数的分辨率越高，但信号中高频噪声的增强也越大，这会导致结构函数具有受干扰的人为特征。边缘陡度σ的影响更加复杂：其增大使滤波函数变得更陡，这增加了信号分量与频率的权重值，但降低了低频段的有效信息。Φ_0=0.45和σ=0.05是初始默认的合理参数值[26]，应用于

具体数据可在此基础上一定范围内进行修正调整。总之，要实现好的滤波效果，必须调整参数，在分辨率和噪声增强之间找到平衡点；最佳参数值取决于测量数据的信噪比[26]。因此，在实际应用中，需要对傅里叶反卷积算法进行精细的参数调节和优化，同时结合其他方法来进一步提高反卷积的精度和稳定性。

2.2.5 算法综合对比

分析表1，综合比较3种算法，对初始热响应曲线施加相同噪声分量在最终计算结果中产生的误差从大到小为傅里叶算法、贝叶斯算法1、贝叶斯算法2。由表1可知，微分运算放大了热响应曲线中的噪声含量，并且2种贝叶斯算法输入数据的初始噪声分量会在计算过程中随着迭代次数的增加而积累。尽管在计算过程中，两种贝叶斯算法在迭代过程中由噪声引起的误差均被放大，傅里叶算法结果中噪声误差也被放大，但其产生的本质原理不同，由此最终结果中呈现的噪声含量与噪声分布特点也不同。

贝叶斯算法中的误差增大来自于其通过反复迭代逼近真实值的计算原理。在反复迭代中数据逐渐呈现出两种极端的趋势，绝对值较小数据在迭代中逐渐变小以至最终无限趋近于0，最终结果上表现为贴近x坐标轴或被抹去；绝对值较大数据在迭代中被保留并逐渐累积，最终在结果中呈现出波峰或波谷的形式。贝叶斯算法1与贝叶斯算法2的计算原理本质都来自于贝叶斯概率的推导，因此观察图7可知，2种贝叶斯算法计算中的误差均呈现出连续光滑的集中分布，并呈现出明显的波峰与波谷。因为贝叶斯算法1使用微分量da/dz作为输入数据，初始噪声含量在进行微分过程中被进一步放大，所以最终结果中的噪声误差是贝叶斯算法1大于贝叶斯算法2。

傅里叶算法时域与频域之间的转换更容易导致噪声分量放大，并且转换是对数据整体进行并且不需要迭代计算，因此结果中的噪声分量更容易呈现出不光滑、杂乱分布的特点。傅里叶变换与反变换过程对数据的精度要求很高，计算过程中极易产生异常跳变值，最终结果中的噪声含量也很大程度上依赖于滤波函数的参数选择，所以导致使用傅里叶算法结果中的噪声误差普遍大于2种贝叶斯算法产生的误差。

3 算法的实现和效果

3.1 迭代次数

迭代次数是贝叶斯反卷积算法中一个非常重要的参数，它决定了算法收敛的速度和反卷积结果的准确性。本文以TDIM-Master软件得到的计算结果作为基准值，通过不同反卷积算法的计算结果与基准值进行对比，研究迭代次数对贝叶斯反卷积结果的影响，对算法进行更加全面的评估。TDIM-Master是一款根据JEDEC标准JESD51-14基于瞬态双接口测量方法(Transient Dual Interface Measurement，TDIM)确定半导体器件结–壳热阻的已成熟商用的软件，是目前国际公认的高精度的热阻计算分析软件。

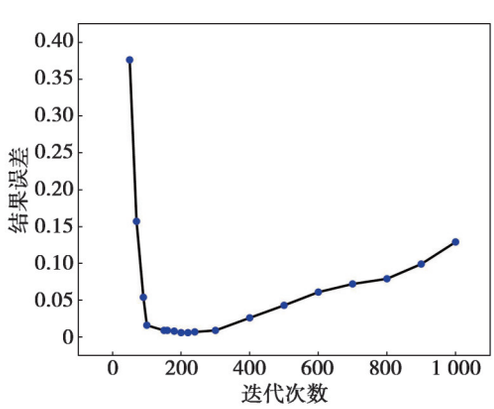
计算结果误差Δ与迭代次数p关系见表2，计算结果误差Δ随迭代次数p变化关系曲线见图8，不同迭代次数对应时间常数谱结果见图9。如表2所示，使用贝叶斯算法1时，随着迭代次数的增加，计算结果误差整体呈现一个先减小后增大的趋势。本文定义结果误差最小时对应的迭代次数为建议优选迭代次数p_0，由图8(a)可知p_0的取值范围大致在150~300，本文默认使用p_0=200作为后续探究贝叶斯算法1的建议取值。如图9(a)，迭代次数p在过小时时间常数谱峰值数量少、峰值低，更多峰值随迭代次数的增加而出现，计算结果接近基准值；当p大于p_0后，迭代次数继续增加则会导致一些杂乱无关的干扰峰值在曲线上出现，同时时间常数谱对应的幅值也不再准确，结果误差增大。

使用贝叶斯算法2时，随着迭代次数的增加，计算结果误差整体呈现减小的趋势。观察图8(b)可知p_0的取值范围大致在10 000~30 000。当算法对迭代次数达到饱和后，继续增大迭代次数并不会显著降低误差，反而会增加计算成本。

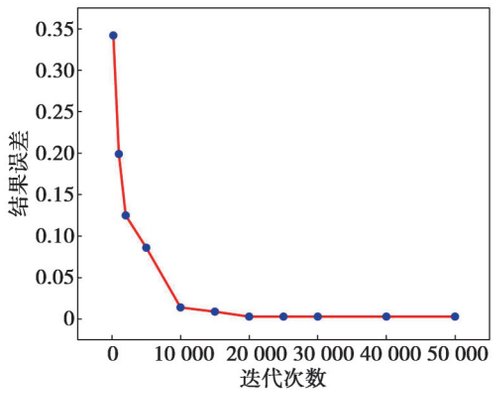
表2 计算结果误差Δ与迭代次数p关系

Table 2 Calculation results error Δ versus the number of iterations p

贝叶斯算法1		贝叶斯算法2	
迭代次数p	结果误差Δ	迭代次数p	结果误差Δ
50	0.376	200	0.342
100	0.011	1 000	0.199
150	0.009	2 000	0.125
160	0.009	5 000	0.086
180	0.008	10 000	0.014
200	0.006	15 000	0.009
220	0.006	20 000	0.003
240	0.007	25 000	0.003
300	0.009	30 000	0.003
1 000	0.129	50 000	0.003



(a)贝叶斯算法1



(b)贝叶斯算法 2

图 8　计算结果误差 Δ 随迭代次数 p 变化关系图

Fig. 8　The change diagram of calculation result error Δ versus number of iterations p

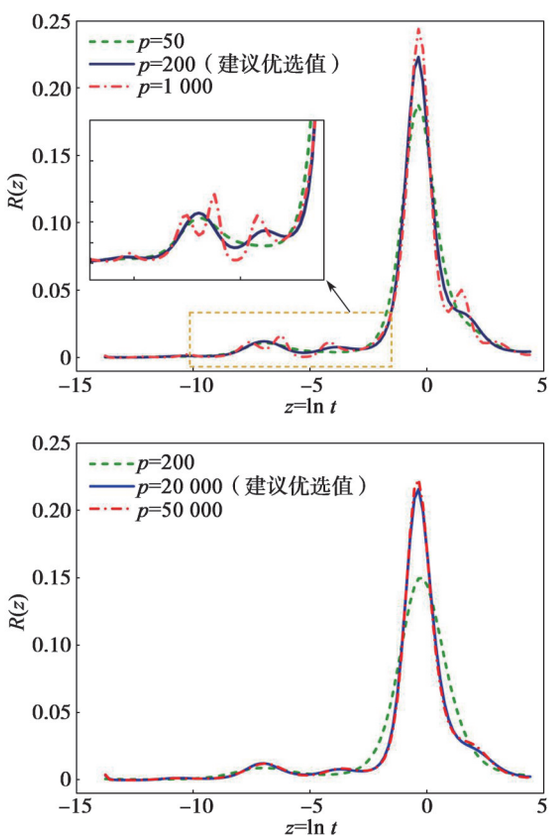


图 9　不同迭代次数对应时间常数谱结果

Fig. 9　Results of time constant spectrum corresponding to different iterations

3.2　计算时间

计算时间是衡量 3 种快速反卷积算法性能的重要指标，影响算法计算时间的因素主要与算法自身原理和输入数据量有关。本文通过对热响应曲线拟合后重新取点的方式改变输入数据量，选取 50、100、300 个点的数据量进行计算，迭代次数选择临界迭代次数 p_0，得到结果如表 3 所示。

分析表 3 数据可得，2 种贝叶斯算法的计算时间均随着输入数据量的增加而增加，并且贝叶斯算法 1 的计算用时整体显著低于贝叶斯算法 2；而傅里叶算法计算时间基本保持稳定。

表 3　3 种方法的计算时间对比

Table 3　Comparison of calculation time of three different methods　　s

输入数据量	贝叶斯算法 1	贝叶斯算法 2	傅里叶算法
n=50	0.781	3.32	0.013
n=100	1.060	25.60	0.013
n=300	9.550	740.00	0.014

注：计算使用的个人笔记本电脑主要参数如下：ThinkPad P53 移动工作站；处理器为英特尔酷睿 i7-9850H @ 2.60 GHz；内存为 64 GiB DDR4 2 667 MHz；显卡为 Intel(R)UHD Graphics 630，NVIDIA Quadro RTX 3000；系统为 Windows 11 Pro。

进一步分析表 3 数据，当热响应曲线的取点数超过临界值 100 后，2 种贝叶斯方法计算时间都急剧增加。参考不同输入数据量对应的时间常数谱，如图 10 所示，发现取点数为 100 与 300 时计算得到的时间常数谱高度重合，证明此时算法已经对热响应曲线的取点数达到饱和，继续增加点数不仅不会提高计算结果的精确性，反而会大幅增加计算用时。因此综合考量计算时间与结果准确度，本文建议对输入的热响应曲线选择 100 左右的数据点进行计算。

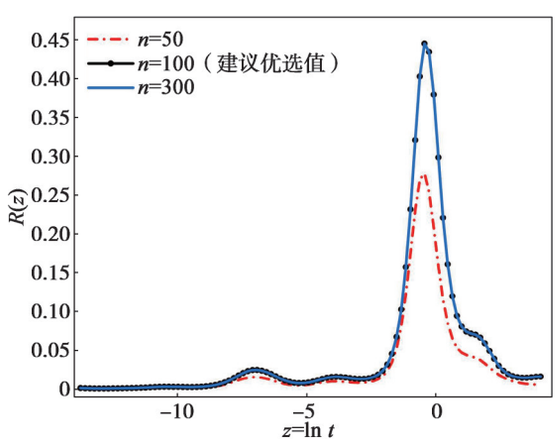


图 10　不同输入数据量对应的时间常数谱结果（贝叶斯算法 2）

Fig. 10　Results of time constant spectrum corresponding to different amounts of input data when using Bayesian calculation method 2

3.3　数据采样频率

为了探究数据采样频率对计算结果的影响，本文对同一器件分别以 10 kHz、50 kHz、100 kHz、500 kHz、1 MHz 频率进行采样，并采用贝叶斯算法 1 进行计算。采用不同采样频率数据计算得到的时间常数谱如图 11，采用不同采样频率数据计算得到的结构函数如图 12。

计算整体误差如表 4，分析表 4 数据得到：计算误差随采样频率的增加而减小，但采样频率达到 500 kHz 时，采样频率对误差的影响已经趋于饱和。分析图 11 可知：采用 500 kHz 与 1 MHz 采样计算得到峰值位置基

本相同，高度略有不同；采用 10 kHz 采样计算结果中峰值位置明显产生了偏移。分析图 12 可知，相较于采用 1 MHz 与 500 kHz 采样的计算结果，采用 10 kHz 采样计算得到结构函数曲线中出现了不平滑的“尖刺”。出现上述现象是因为当采样频率较低时一些有效信息没有被采集到，热响应曲线在经过一次拟合后会在一些细节处丢失原始信息导致误差。

使用贝叶斯算法 2 时计算结果呈现相同规律，只是其对输入数据的要求要低于贝叶斯算法 1，当采样频率为 50 kHz 即可满足要求。

表 4　不同采样频率对应结果整体误差对比

Table 4　Comparison of errors of results calculated at different sampling frequencies

采样频率/kHz	计算误差
10	0.031
50	0.024
100	0.011
500	0.003
1 000	0.002

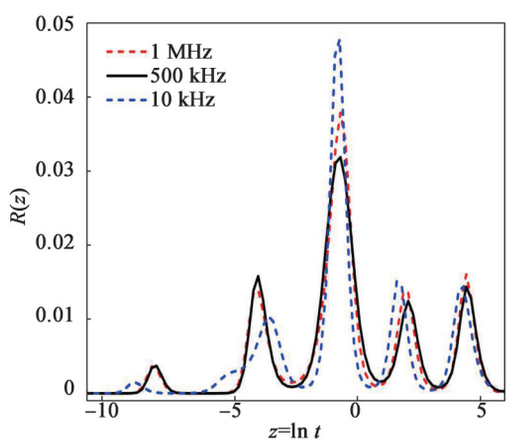
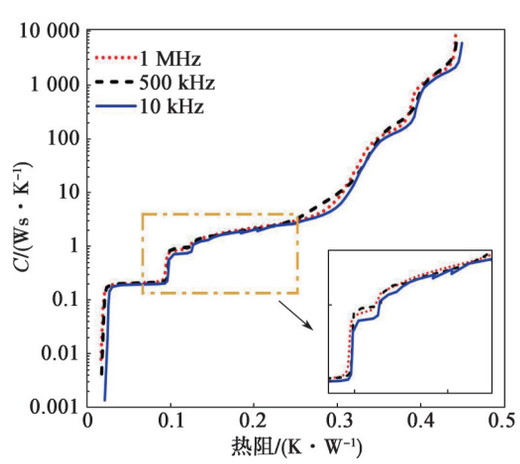


图 11　不同采样频率数据计算得到的时间常数谱图

Fig. 11　Time constant spectrum results calculated from data with different sampling frequencies



12　不同采样频率数据计算得到的结构函数

Fig. 12　Structure functions calculated from data with different sampling frequencies

3.4　算法准确性

3 种反卷积算法计算结果对比如图 13。分析图 13 可知，使用贝叶斯算法 1 计算得到的时间常数谱更容易产生噪点。这是因为贝叶斯算法 1 的输入数据热响应微分量 d*a*/d*z* 中含有一些跳变的数据点，如图 14 所示。傅里叶算法也采用热响应微分量 d*a*/d*z* 作为输入，因此计算结果也会受到计算微分过程中噪点的影响，但对结果准确性影响更大的是滤波函数与其参数的选择。改变滤波函数参数得到的时间常数谱噪声分量急剧增大，如图 15 所示。

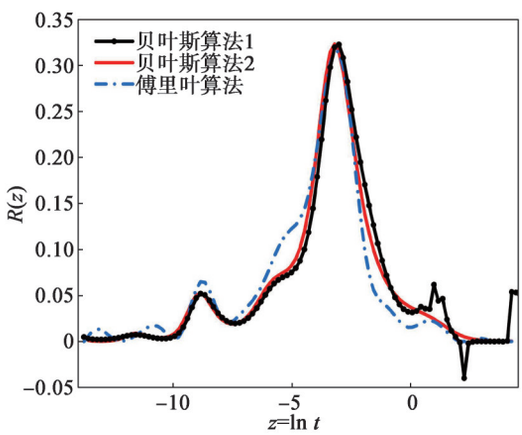


图 13　3 种反卷积算法计算结果对比

Fig. 13　Comparison of results of three deconvolution calculation methods

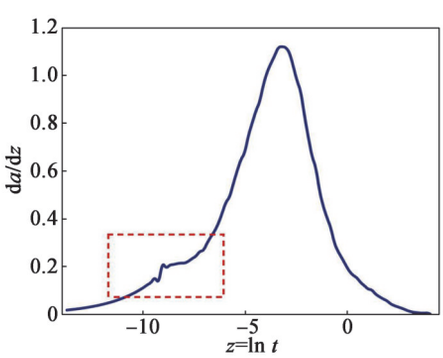


图 14　热响应微分曲线

Fig. 14　Differential thermal response curve

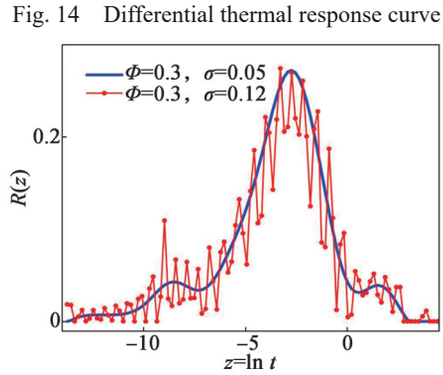


图 15　傅里叶反卷积结果

Fig. 15　Results of Fourier deconvolution

3.5　算法选择

3 种反卷积算法分别选择最佳迭代次数与滤波参数

（参考3.1节），得到结果如图16和图17所示。采用2种贝叶斯算法计算得到的时间常数谱和结构函数都较为接近，采用傅里叶算法得到的结果与它们有一些偏差。

贝叶斯算法1迭代次数少，建议对输入数据进行拟合。在要求快速提取时间常数谱，对准确度有一定要求且得到初始曲线噪声分量小时，可以选择贝叶斯算法1。

贝叶斯算法2迭代次数较多，但输入数据不需要进行微分，并且计算结果更加精确。在数据本身含有较高噪声分量或拟合后仍无法得到光滑的微分曲线，对准确度要求较高、对时间要求低时可以选择贝叶斯算法2。

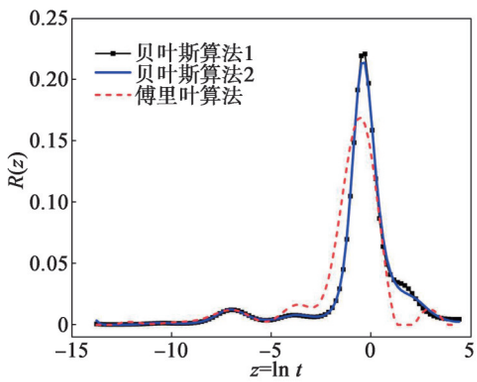


图16　3种计算方法提取到的时间常数谱对比

Fig. 16　Comparison of time constant spectrum extracted by three calculation methods

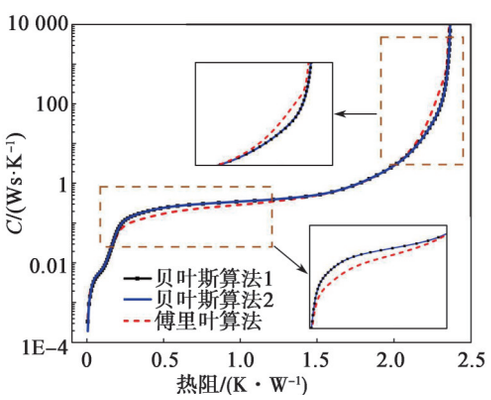


图17　3种计算方法最终得到结构函数对比

Fig. 17　Comparison of final structure functions obtained by three calculation methods

傅里叶反卷积算法原理简单，易于实现，但是其极易受到数据噪声干扰。虽然引入滤波函数$F(\Phi)$可以在一定程度上降低噪声带来的不利影响，但是滤波函数的带宽Φ与边缘陡度σ2个关键参数又取决于实际测量数据的信噪比，缺乏普遍性，每次都需要针对新数据重新调整参数设置，实际应用中操作较麻烦。如果得到原始数据的噪声分量小或对数据滤波降噪能力较强，对运算时间要求很高时可以选择傅里叶算法。3种反卷积算法的性能比较见表5。

表5　3种反卷积算法的性能比较

Table 5　Performance comparison among three deconvolution calculation methods

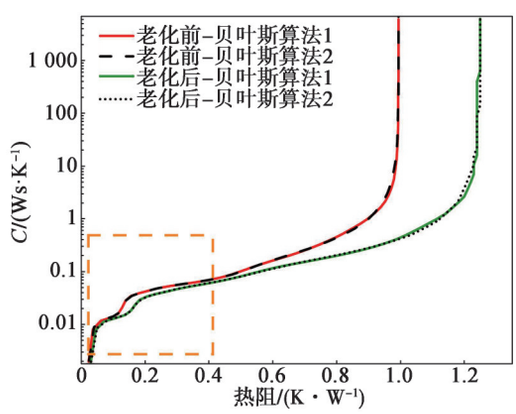
算法名称	算法是否需要迭代	计算时间/s	迭代次数优选值	受噪声分量影响
贝叶斯算法1	是	1.060	200	较大
贝叶斯算法2	是	25.600	20 000	较小
傅里叶算法	否	0.013		最大

3.6　实际应用

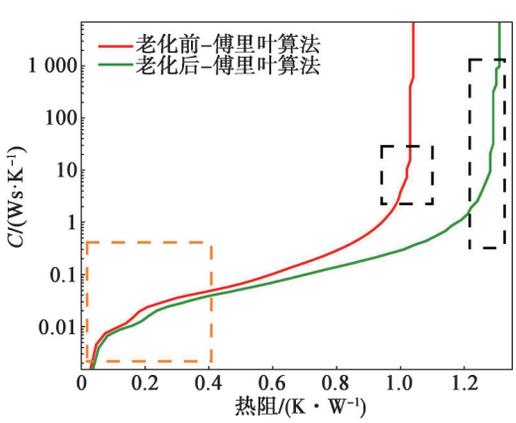
热阻是表征器件散热性能优劣的主要参数，是分析及判断器件是否失效以及失效程度的重要标准。

本文以50 kHz采样的试验数据为例，使用不同反卷积算法计算同一器件功率循环老化前后所对应的积分结构函数曲线。其中试验数据的采样频率为50 kHz，热响应曲线数据拟合后作为算法输入的有效数据量为200。贝叶斯算法1的迭代次数为200次，贝叶斯算法2的迭代次数为20 000次，傅里叶算法中滤波函数$F(\Phi)$的参数选择为Φ_0=0.43，σ=0.05。

图18为功率循环老化前后结构函数曲线对比图，积分结构函数曲线中，随着横坐标热阻的增大，每个明显的台阶状转折都对应功率器件中不同结构层的转换，焊料层热阻增大反映出器件的老化。分析图18可得，使用贝叶斯算法与傅里叶算法计算得到的分离点基本相同，对应时间常数约为0.001 5，对应芯片焊料区域。该分离点代表老化前后，在芯片焊料处的热阻、热容发生了改变，老化后芯片焊料热阻增大了25.3%，该现象与功率循环的失效机理对应（热阻R_{th}增大20%或饱和压降V_{cesat}增大5%时认为器件失效）。



(a)贝叶斯算法



(b)傅里叶算法

图18　功率循环老化前后结构函数曲线对比

Fig. 18　Comparison of structure function curves before and after power cycle aging

分析图18，使用贝叶斯算法1与贝叶斯算法2计算得到老化前后结构函数曲线十分接近，且表征器件内部结构分层的阶梯状转折较为清晰，贝叶斯反卷积算法在处理带有噪声和不完整信息的情况下表现较好，对非线性系统和非平稳信号也具有一定的适应性；使用傅里叶算法结构函数曲线呈现出的阶梯状转折不如贝叶斯算法清晰明显，并且受到算法自身原理的限制，结果中更容易出现噪点，曲线平滑程度相较于贝叶斯算法有所下降。傅里叶反卷积算法适用于线性系统和平稳信号的恢复，但对噪声和非线性系统的影响较为敏感。

4 总结

① 3种算法本质上的差异在于其原理不同，贝叶斯算法1以热响应微分量da/dz作为输入，贝叶斯算法2以热响应直接作为输入，2种算法均基于贝叶斯概率公式通过多次迭代实现反卷积求解。傅里叶算法则通过时域与频域之间的正、逆变换直接求解时间常数谱，无须迭代。

② 初始热响应曲线施加相同噪声分量时最终结果误差从大到小为傅里叶算法、贝叶斯算法1、贝叶斯算法2。

③ 算法的输入数据量过少时，无法准确反映出功率器件的热网络模型；当算法达到饱和后，如果继续增加输入数据量，不仅不会提高计算结果的准确性，反而会大幅度增加计算时间。综合考量计算时间与结果准确度，输入数据量建议选择100。

④使用贝叶斯算法时，迭代次数过少，计算结果产生较大误差；迭代次数过多可能导致算法过拟合，计算准确度会降低，并且计算时间与成本增加。对于输入数据量为100的情况，贝叶斯算法1迭代次数建议优选值范围为150~300，贝叶斯算法2迭代次数建议优选值范围为10 000~30 000。

⑤在一定范围内，采样频率越高得到结构函数与真实值之间的误差就越小，但频率一直增加会引起计算成本与采样成本的增加，因此本文建议在合适范围内选择较高采样频率，例如在功率循环测试中使用50 kHz及更高的采样频率。

⑥贝叶斯算法1适用于热响应微分曲线较为平滑的试验数据或仿真数据，适合对计算速度要求较高的场景；贝叶斯算法2适用于试验数据、微分曲线不光滑或拟合效果较差的仿真数据，且适合对计算速度要求不高的场景；傅里叶算法适用于微分曲线光滑或拟合效果很好的仿真数据，适合对计算速度要求极高且可以接受繁琐操作的场景。

本文研究是在教育部“6 000 A压接型IGBT器件功率循环测试平台（装备）的产品开发”项目的资助下进行的，在此表示感谢。

参考文献：

[1] 余岳辉, 梁琳. 电力电子器件发展综述[C]//中国电工技术学会. 中国电工技术学会电力电子学会2004年第九届学术年会论文集. 秦皇岛: 中国电工技术学会, 2004: 7-11.
YU Yuehui, LIANG Lin. A review of the development of power electronic devices[C]//China Electrotechnical Society. Proceedings of the Ninth Academic Annual Conference of the Power Electronics Society of China Electrotechnical Society in 2004. Qinghuangdao: China Electrotechnical Society, 2004: 7-11

[2] 钱照明, 何湘宁. 电力电子技术及其应用的最新发展(一)[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 361-366.
QIAN Zhaoming, HE Xiangning. The recent developments of power electronics and its applications (1)[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 361-366.

[3] HOWER P L, 李志晨. 功率半导体器件综述[J]. 微电子学, 1989(4): 34-43.
HOWER P L, LI Zhichen. Overview of power semiconductor devices[J]. Microelectronics, 1989(4): 34-43.

[4] OETTINGER F F, BLACKBURN D L. Semiconductor measurement technology: thermal resistance measurements [M]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1990.

[5] 冯士维, 谢雪松, 吕长志, 等. 半导体器件热特性的电学法测量与分析[J]. 半导体学报, 1999, 20(5): 358-364.
FENG Shiwei, XIE Xuesong, LYU Changzhi, et al. Measurement and study on thermal characteristics of semiconductor devices by electrical method[J]. Journal of semiconductors, 1999, 20(5): 358-364.

[6] 李山, 张立. IGBT极限电流与通态极限功耗的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 47-51.
LI Shan, ZHANG Li. Research on IGBT limiting current and on state limiting power loss[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 47-51.

[7] SMITH B, BRUNSCHWILER T, MICHEL B. Comparison of transient and static test methods for chip-to-sink thermal interface characterization[J]. Microelectronics journal, 2009, 40(9): 1379-1386.

[8] ZHOU Bin, LI Xunping, YANG Shaohua, et al. Internal thermal resistance test and analysis of power device based on structure function[C]//IEEE. 2013 14th International Conference on Electronic Packaging Technology. Dalian: IEEE, 2013: 1082-1085.

[9] RENCZ M R, SZEKELY V. Measuring partial thermal resistances in a heat-flow path[J]. IEEE transactions on components and packaging technologies, 2002, 25(4): 547-553.

[10] SZALAI A, SZÉKELY V. How do we know if a structure function is correct? [C]//IEEE. 2010 16th International

Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems. Barcelona: IEEE, 2010: 1-4.

[11] SZALAI A, SZÉKELY V. Possible acception criteria for structure functions[J]. Microelectronics journal, 2012, 43 (2): 164-168.

[12] HENSLER A, WINGERT D, HEROLD C, et al. Thermal impedance spectroscopy of power modules[J]. Microelectronics reliability, 2011, 51(9/10/11): 1679-1683.

[13] SZÉKELY V, VAN BIEN T. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method[J]. Solid-state electronics, 1988, 31(9): 1363-1368.

[14] SZEKELY V. Identification of RC networks by deconvolution: chances and limits[J]. IEEE transactions on circuits and systems I: fundamental theory and applications, 1998, 45(3): 244-258.

[15] LUO Yafei, KAJITA Y, HATAKEYAMA T, et al. Thermal transient test based thermal structure function analysis of IGBT package[C]//IEEE. 2014 International Conference on Electronics Packaging. Toyama: IEEE, 2014: 596-599.

[16] SZÉKELY V. A new evaluation method of thermal transient measurement results[J]. Microelectronics journal, 1997, 28 (3): 277-292.

[17] BOGNAR A, CSEPES G, KALOCSAI L, et al. Spectrum of polarization phenomena of long time-constant as a diagnostic method of oil-paper insulating systems[C]//IEEE. Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Tokyo: IEEE, 1991: 723-726.

[18] GARDNER D G, GARDNER J C, LAUSH G, et al. Method for the analysis of multicomponent exponential decay curves [J]. The journal of chemical physics, 1959, 31(4): 978-986.

[19] SZEKELY V. Evaluation of short pulse thermal transient measurements[C]//IEEE. 2008 14th International Workshop on Thermal Inveatigation of ICs and Systems. Rome: IEEE, 2008: 20-25.

[20] SZEKELY V. On the representation of infinite-length distributed RC one-ports[J]. IEEE transactions on circuits and systems, 1991, 38(7): 711-719.

[21] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. Journal of the optical society of America, 1972, 62(1): 55-59.

[22] KENNETT T J, PRESTWICH W V, ROBERTSON A. Bayesian deconvolution I: convergent properties[J]. Nuclear instruments and methods, 1978, 151(1/2): 285-292.

[23] ADAMI K Z. Variational methods in Bayesian deconvolution[EB/OL]. (2003-09-08) [2023-05-18]. https://slac. stanford.edu/econf/C030908/papers/TUGT002.pdf.

[24] SZÉKELY V, RENCZ M, POPPE A, et al. THERMODEL: A Tool for thermal model generation, and application for MEMS[J]. Analog integrated circuits and signal processing, 2001, 29(1): 49-59.

[25] JEDEC. Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance junction-to-case of semiconductor devices with heat flow through a single path: JESD51-14[S]. Arlington, VA: JEDEC Solid State Technology Association, 2010.

[26] SZÉKELY V. Enhancing reliability with thermal transient testing[J]. Microelectronics reliability, 2002, 42(4/5): 629-640.

收稿日期：2023-08-08
修回日期：2023-08-23