DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.1 **中图分类号**：TM614 **文献标志码**：A

基于改进维纳滤波反卷积的 SiC 器件瞬态热结构函数建模研究

李龙女[1]，刘展鹏[1]，朱高嘉[1]，章松茂[1,2]，梅云辉[1](中国电源学会高级会员)
(1.天津工业大学电气工程学院，天津 300387；2.中国电子产品可靠性与环境试验研究所
电子元器件可靠性物理及其应用技术国家级重点实验室，广州 511370)

摘要：碳化硅(SiC)功率器件的热特性建模是其设计与开发中的关键。结构函数法是表征器件热特性的重要手段，其核心在于通过反卷积算法得到输入数据的时间常数谱。然而，在实际测试中，环境噪声的影响难以避免，这对结构函数的反卷积算法提出了更高的挑战。为此，提出1种基于改进维纳滤波的反卷积结构函数算法，有效解决瞬态热分析过程中测量数据的噪声问题。首先，提出1种基于维纳滤波反卷积的结构函数模型，并通过TDIM-Master基准问题进行分析，验证了算法的有效性。其次，针对基准问题加载不同量级的噪声，以探索不同噪声条件下时间常数谱的信号质量和峰值热阻，并与常规算法进行对比，验证改进方法在处理噪声问题时的准确性和优越性。最后，基于2颗不同规格的SiC功率器件，测量在有无导热硅脂下的瞬态热阻，并进行结构函数分析，验证所提算法在真实测量环境下的稳定性和适用性。

关键词：结构函数；SiC功率器件；瞬态热特性；维纳滤波反卷积；噪声抑制

Research on Transient Thermal Structure Function Modeling of SiC Devices Based on Improved Wiener Filtering Deconvolution

LI Longnü[1], LIU Zhanpeng[1], ZHU Gaojia[1], ZHANG Songmao[1,2], MEI Yunhui[1], *Senior Member*, *CPSS*
(1. School of Electrical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. The Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, China Electronic Product Reliability and Environmental Testing Research Institute, Guangzhou 511370, China)

Abstract: The thermal characteristic modeling of silicon carbide (SiC) power devices is a key aspect in their design and development. The structure function method is crucial for characterizing the devices' thermal characteristics, focusing on acquiring the time-constant spectrum of input data via deconvolution algorithms. However, the environmental noise inevitably affects actual tests, thereby demanding more sophisticated deconvolution algorithms for the structure function. Therefore, a deconvolution structure function algorithm based on improved Wiener filtering is proposed, effectively addressing the noise problem in the measurement data during the transient thermal analysis. First, a structure function model based on Wiener filtering deconvolution is put forward, and the algorithm's effectiveness is validated through analyzing the TDIM-Master benchmark problem. Second, different levels of noise are added to the benchmark problem to explore the signal quality and peak thermal resistance of the time-constant spectrum across various noise conditions. The

收稿日期：2025-01-10；**修回日期**：2025-03-08；**录用日期**：2025-03-20；**网络首发日期**：2025-04-10
基金项目：工程电介质及其应用教育部重点实验室(哈尔滨理工大学)资助项目(KFZ202603)；国家自然科学基金资助项目(52177189)；教育部“春晖计划”国际合作科研资助项目(HZKY20220604)；天津市科技计划项目京津冀基础研究合作专项(24JCZXJC00130)
This work is supported by Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application (Harbin University of Science and Technology), Ministry of Education under the grant KFZ202603; the National Natural Science Foundation of China under the grant 52177189; the "Chunhui Plan" Collaborative Research Project of Ministry of Education of China under the grant HZKY20220604; the Tianjin Municipal Science and Technology Bureau under grant 24JCZXJC00130

accuracy and superiority of the improved method when dealing with noises are verified through a comparison with the conventional algorithm. Finally, the transient thermal resistance of two different types of SiC power devices were measured under conditions with or without thermal silicone grease, and the structure function analysis was also performed, thus verifying the stability and applicability of the proposed algorithm under real measurement environment.

Keywords: Structure function; SiC power device; transient thermal characteristic; Wiener filtering deconvolution; noise suppression

结构函数法是功率器件内部热性能测试与分析的重要手段[1-3]，在器件的失效分析、封装结构与散热结构改进等方面得到了广泛应用[4-8]。结构函数法通过测量器件的功率阶跃响应，获得温度响应数据，再将得到的数据进行数学变换、反卷积等处理得到积分结构函数曲线[9-10]。立足于该结构函数曲线，可分析器件内的分层传热性能，为器件的热特性探索与热设计提供依托。

基于结构函数法的器件热特性分析过程中，通常将输入数据的导数进行反卷积变换，得到其时间常数谱，进而得到积分结构函数曲线。因此，反卷积环节在结构函数中起着至关重要的作用，决定了最终输出结果的准确性。目前，傅里叶反卷积法和贝叶斯反卷积法是求解时间常数谱中使用最为广泛的反卷积方法，国内外学者已针对其应用与改进进行了诸多探索。Schweitzer 等[2]研究了不同结壳热阻测量方法所得数值对结构函数的具体影响，并明确指出，双界面测量法在减少结壳热阻误差方面表现最优，因此更适合用于构建结构函数；Pareek 等[11]对贝叶斯反卷积法和傅里叶反卷积法的结果进行了深度剖析，通过分布式模型，探讨了贝叶斯反卷积法中迭代次数变化及傅里叶反卷积法中滤波带宽和滤波陡度的不同设置对结果的具体影响；邓二平等[12]针对 2 种反卷积法，对输入数据数量不同、变化率各异等条件下的反卷积效果进行了探究，并据此提出了针对不同输入数据的最佳反卷积方法建议。然而，实际功率器件的热特性测量过程中，测量设备与周围环境均存在波动，不可避免地在测量数据中引入噪声。测量噪声直接作用于反卷积环节，影响结构函数分析结果的准确性。

针对该问题，本文提出了 1 种基于改进维纳滤波反卷积的结构函数计算方法，有效解决了瞬态热分析中测量数据的噪声问题。基于该算法，立足于 TDIM-Master 基准测试数据，通过对比基准热结构函数曲线，验证算法的有效性；在基准问题中引入不同量级噪声，对比常规算法，验证本文方法在噪声干扰中的准确性和优越性；最后，基于 C2M0080120D 单管及自研功率模块的热特性测试，验证本文所提方法在实际问题中的稳定性和适用性。

1 改进维纳滤波反卷积建模与分析

1.1 结构函数基本原理

结构函数是 1 种非破坏性的热测试方法，目的是通过电子器件的功率阶跃响应体现热量传递的过程，反映器件每层的热传递特性。其构建包括 Foster 模型的构建、Cauer 模型的构建、Foster 模型向 Cauer 模型的转化[13-14]、反卷积求解时间常数谱及积分结构函数曲线的绘制。结构函数中的 Foster 模型与 Cauer 模型如图 1 所示[13-14]。图中：R_i 为热阻；C_i 为热容；$Z(s)$为傅里叶形式下 2 种模型的热阻抗总值。

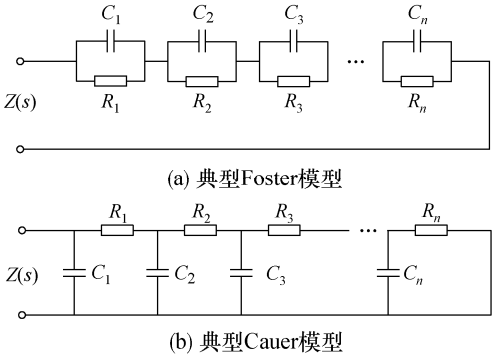


图 1 结构函数中的 Foster 模型和 Cauer 模型

Fig. 1 Foster and Cauer models in structure function

FTC(Foster to Cauer)变换过程中，首先将 Foster 模型的热阻抗进行时间换元、求导及置入权重函数等数学变换，得到热阻抗对时间的导数

$\mathrm{d}a(z)/\mathrm{d}z$ 、时间常数谱 $R(z)$ 和权重函数 $W_z(z)$ 三者的卷积形式，即

$$\frac{\mathrm{d}a(z)}{\mathrm{d}z}=R(z)\otimes W_z(z) \tag{1}$$

在得到卷积形式后，对 $\mathrm{d}a(z)/\mathrm{d}z$ 进行反卷积变换，使用 $R(z)$ 可以得到 Cauer 模型下的 R_{th} 和 C_{th}，再使用二者的累加形式绘制出结构函数曲线。因此，FTC 变换过程中，时间常数谱反映变换后 Cauer 模型中的热阻变化规律，是实现结构函数法的关键环节，且依赖于反卷积运算。当 Foster 模型与 Cauer 模型阶数趋于无穷时($n\to\infty$)，时间常数谱可以看作 1 条连续的曲线 $R(\tau)$，如图 2 所示。图中，τ 为对数形式的时间变量。

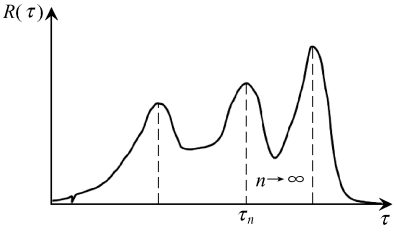


图 2　连续的时间常数谱

Fig. 2 Spectrum of continuous time-constant

1.2 改进维纳滤波反卷积方法

反卷积运算是结构函数 FTC 变换中时间常数谱求解的核心环节。目前广泛应用于求解时间常数谱的反卷积方法有傅里叶反卷积法和贝叶斯反卷积法。傅里叶反卷积法的关键是在频域中引入费米-狄拉克滤波函数，对高频噪声进行滤波处理，滤波时，需同时调节滤波函数的滤波带宽和滤波陡度 2 个参数，再通过反卷积计算得到时间常数谱。贝叶斯反卷积法是基于贝叶斯定理的迭代计算法，通过对起始值的预估，经数次迭代推算下一个信息的位置，迭代 n 次后得到的值无限接近真实值，即为所求的时间常数谱。

为了减小噪声对时间常数谱的影响，本文提出 1 种基于维纳滤波原理、调节参数单一、鲁棒性强的反卷积方法，并使得到的时间常数谱更加符合被测器件 DUT(device under test)热传递规律。维纳滤波反卷积法通过确保计算过程中输入信号与含噪输入信号之差的期望值最小化，实现了对噪声干扰下结构函数的更精确解析。

针对 1 个线性系统，其输入信号为 $x(t)$，系统的冲激响应为 $h(t)$，输出信号为 $y(t)$，加性噪声为 $n(t)$，则系统的输出可以表示为

$$y(t)=x(t)\otimes h(t)+n(t) \tag{2}$$

为了从受噪声干扰的输出信号 $y(t)$ 中恢复原始信号 $x(t)$，首先需通过傅里叶变换将卷积运算转换为频域中的乘积运算，即

$$Y(f)=X(f)H(f)+N(f) \tag{3}$$

式中，$Y(f)$、$X(f)$、$H(f)$ 和 $N(f)$ 分别为 $y(t)$、$x(t)$、$h(t)$ 和 $n(t)$ 通过傅里叶变换的频域形式。

$\bar{X}(f)=W(f)Y(f)$ 为估计的输入信号，$W(f)$ 为维纳滤波法的频域形式。在真实输入信号与预估输入信号均方误差 $E[|X(f)-\bar{X}(f)|^2]$ 达到最小时[15-17]，可以求得 $W(f)$ 的表达式为

$$W(f)=\frac{H^*(f)}{|H(f)|^2+\mathrm{NSR}} \tag{4}$$

式中，NSR 为功率噪信比，其取值大小决定了滤波作用的强弱[18-19]，可以根据所需时间常数谱的分离度对取值自由调节。

首先，本文根据结构函数性质使用新的卷积核变量 a 替换 t，目的是变换反卷积的求解次序，使反卷积运算围绕变量 z 的中点进行。由此得到的时间常数谱能够表征热量从热源传递至外界的过程，此时变量 a 和系统的输出可以表示为

$$a=t-t_{\mathrm{ave}} \tag{5}$$

$$y(t)=x(t)\otimes h(a)+n(t) \tag{6}$$

式中，t_{ave} 为时间变量的平均值。

其次，在反卷积过程中置入调节函数 $B(t)$，目的是修正反卷积结果，将热阻信息一一映射到求解结果中，获得时间常数谱，即等效于原始信号中的 $x(t)$，可表示为

$$B(t)=\frac{Z_{\mathrm{th}}(\infty)}{\int ifft[Y(f)W(f)/H(\phi)]\mathrm{d}t} \tag{7}$$

$$x(t)=ifft[Y(f)W(f)/H(\phi)]B(t) \tag{8}$$

式中：$Z_{\mathrm{th}}(\infty)$ 为 DUT 稳态时测得的热阻抗数据；ϕ 为变量 a 的频域表达形式。

1.3 算法验证

为验证本文所提方法对时间常数谱求解的准确性，针对 TDIM-Master 示例中的热阻抗数据，将通过本文方法得到的时间常数谱和积分结构函数的结果与 TDIM-Master 示例中的各部分结果进行对比。

TDIM-Master 示例 1 是在 DUT 的 2 种状态(底部均匀涂抹导热硅脂和无导热硅脂)下分别求解时间常数谱和积分结构函数。从示例 1 中导出 2 种状态下的热阻抗曲线，如图 3 所示。在此基础上，采用本文算法分别得到输入数据的时间常数谱与积分结构函数，并分别与示例结果对比，如图 4 所示。在数据无噪声干扰的条件下，由图 4(a)可见，本文算法得到的时间常数谱与示例1结果的相位差小于 100 μs、幅值的最大相对误差小于 2%；由图 4(b)可见，本文算法得到的积分结构函数与示例 1 的结果基本重合，以此验证本文算法在无噪声情况下可以得到足够准确的分析结果。

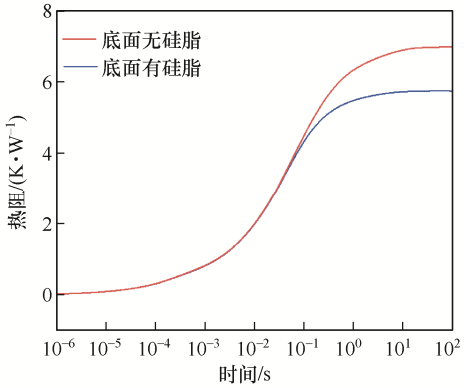
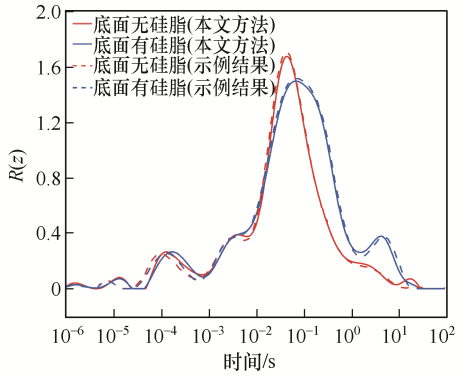
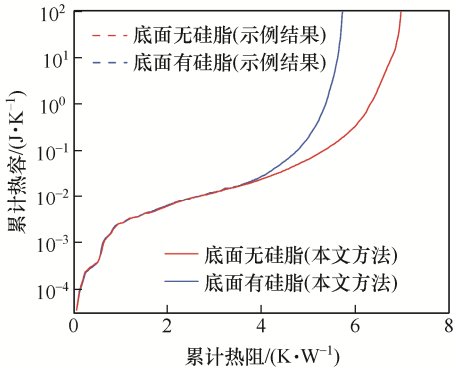


图 3 示例 1 中 2 种情况下的热阻抗曲线

Fig. 3 Thermal impedance curves of Example 1 in two cases



(a) 时间常数谱对比



(b) 积分结构函数曲线对比

图 4 本文方法与示例 1 的结果对比

Fig. 4 Comparison of results obtained using proposed method with the results in Example 1

2 改进维纳滤波反卷积算法抗噪能力分析

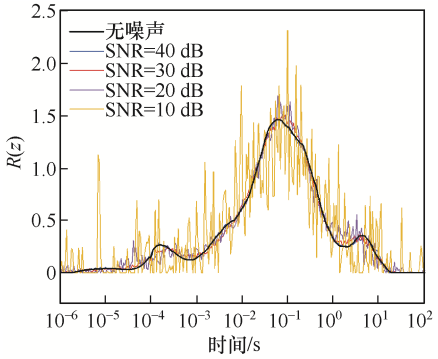
实际瞬态结温、热阻测量结果中，由于测量设备、测量环境存在波动，测量结果中往往掺杂噪声干扰，影响结构函数法表征的精准性。本文提出的改进维纳滤波反卷积算法能在一定程度上抑制测量噪声，更为精准地提取瞬态热结构特征，具有突出的应用优势。为了验证算法在有噪声问题中的准确性，使用 TDIM-Master 示例中无硅脂情况时的热阻抗曲线，人为添加不同程度的高斯白噪声及突发噪声，且不添加额外的滤波环节，对比本文算法和传统算法在该问题下的处理结果，如图 5 所示。其中，噪声幅度通过调节信噪比 SNR(signal-to-noise ratio)得到[20]，即

$$\mathrm{SNR}=10\lg\frac{P_{\mathrm{s}}}{P_{\mathrm{n}}} \tag{9}$$

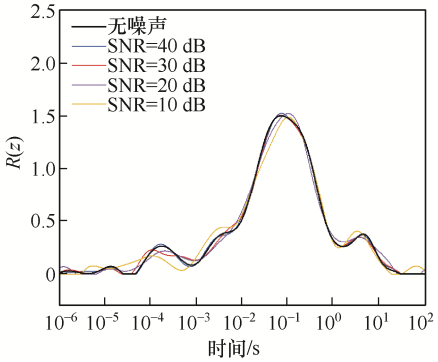
式中：P_{s}为信号的平均功率；P_{n}为噪声的平均功率。

不同 SNR 下的信号质量评估标准为：①当 SNR 低于 10 dB 时，信号几乎被噪声完全覆盖，导致数据结果无法有效使用；②当 SNR 在 10~20 dB 之间时，信号受到噪声的严重干扰，信号质量明显不佳；③当 SNR 在 20~30 dB 范围内时，信号虽受

噪声轻微影响，但信号质量仍属一般水平；④当 SNR 高于 30 dB 时，信号几乎未受噪声干扰，信号质量较好。



(a) 传统算法



(b) 本文改进算法

图 5　常规算法与本文改进算法在不同噪声下的时间常数谱

Fig. 5 Time-constant spectra obtained using conventional algorithm and the improved algorithm in this paper under different noises

从图 5 中可以看出，当 SNR 为 30 dB 及 40 dB 时，传统算法与本文改进算法均可得到较为准确、稳定的分析结果。当 SNR 下降到 20 dB 时，传统算法开始表现出明显的波动，分析结果受到较大程度的噪声干扰，而本文改进算法仍能稳定输出时间常数谱曲线。当 SNR 达到 10 dB 后，传统算法已严重波动，输出的时间常数谱受到极大程度的噪声干扰，本文提出的改进算法输出的时间常数谱曲线虽与标准曲线有所偏差，但仍基本保留了时间常数谱的主要特征。为便于观察，将 2 种算法在 5 次重复分析中的信噪比进行对比，见表 1，时间常数谱的 6 个波峰处的热阻值见表 2。从表 1 中可以看出，输入信号的信噪比为 10 dB 时，本文方法的结果均值仍保持在 19.84 dB，传统方法则大幅下降至 9.64 dB，本文方法在信号质量精度上提高了 50%以上。此外，在计算过程中，2 种方法均未开启额外的运算并行池，在计算资源和复杂度上无明显差异。

表 1　不同噪声下 2 种方法得到的时间常数谱信号的信噪比

Tab. 1 SNR of time-constant spectral signals obtained using two methods under different noises

dB

输入信号的信噪比	本文方法输出的信噪比	传统方法输出的信噪比
SNR=40	36.6、36.5、38.1、35.7、33.8	43.4、45.1、44.2、44.1、44.2
SNR=30	29.4、32.7、29.3、32.3、32.0	34.7、34.5、33.9、33.7、34.2
SNR=20	25.7、25.8、24.3、27.6、23.1	21.0、22.0、22.1、22.5、21.1
SNR=10	18.9、21.1、19.6、18.8、20.8	9.7、9.6、9.8、9.1、10.0

表 2　不同噪声下本文方法得到的时间常数谱波峰处对应热阻值对比

Tab. 2 Comparison of thermal resistance values corresponding to peak of time-constant spectral wave obtained using proposed method under different noises

输入信号的信噪比/dB	第 1 个波峰的热阻/(K·W^{-1})	第 2 个波峰的热阻/(K·W^{-1})	第 3 个波峰的热阻/(K·W^{-1})	第 4 个波峰的热阻/(K·W^{-1})	第 5 个波峰的热阻/(K·W^{-1})	第 6 个波峰的热阻/(K·W^{-1})
无噪声干扰	0.027	0.069	0.482	5.842	0.569	3.87×10^{-4}
SNR=40	0.025	0.067	0.464	5.867	0.594	4.05×10^{-4}
SNR=30	0.026	0.075	0.465	5.824	0.633	3.61×10^{-4}
SNR=20	0.044	0.055	0.513	5.713	0.635	3.39×10^{-4}
SNR=10	0.275	0.432	0.387	5.641	0.281	2.55×10^{-4}

除高斯白噪声外，在实际应用中，突发噪声也属于 1 种比较常见的噪声。该噪声的产生是由于在对器件进行通流测试时，器件内部存在缺陷或者在制造过程中存在工艺问题，导致电压或电流尖峰的

产生，使瞬态热测试中部分区域的温度结果发生跳变。不同程度噪声干扰的导数曲线如图 6 所示。

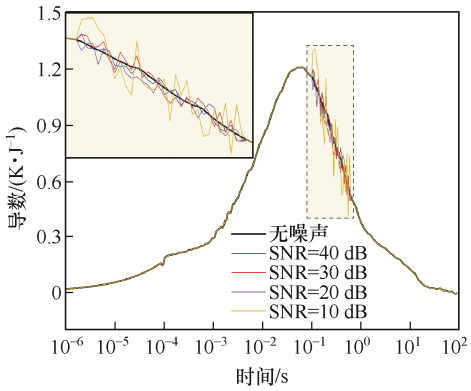
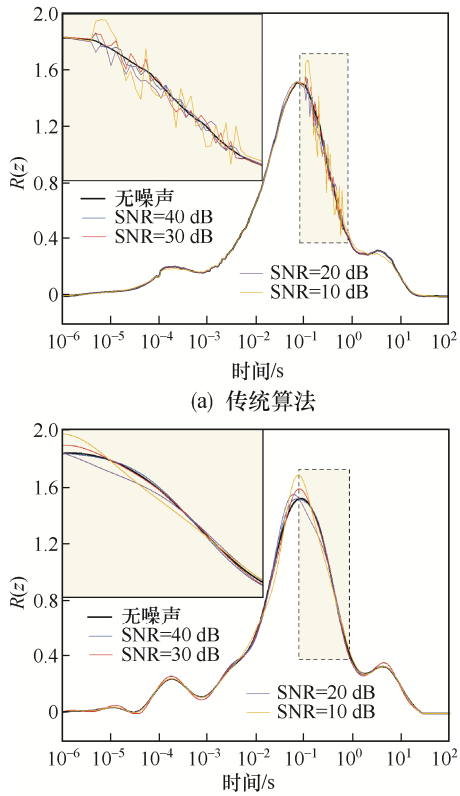


图 6 不同程度噪声干扰的导数曲线

Fig. 6 Derivative curves under varying degrees of noise interference

分别使用传统算法及改进算法求解不同噪声干扰情况下的时间常数谱，结果如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出，由于传统算法基于贝叶斯全概率理论，通过大量已知数据对下一时刻数据进行推



(a) 传统算法

(b) 本文改进算法

图 7 不同噪声下的时间常数谱对比

Fig. 7 Comparison of time-constant spectra under different noises

导，而该噪声具有突发性，因此在导数曲线 SNR 处于 10~40 dB 时求解得到的时间常数谱仍受到突发噪声的干扰，受干扰的程度与噪声程度成正比，无法彻底消除突发噪声的干扰；本文改进算法求得的 4 种情况下的时间常数谱基本消除了噪声干扰，抑制效果较为明显，体现了更好的抗噪能力。

3 实验验证

为进一步验证本文改进算法在实际功率器件热特性建模中的作用，以 Cree C2M0080120D 1 200 V—31.6 A SiC 单管及 1 200 V—150 A SiC 自研功率模块分别作为被测元件，瞬态热性能测试平台如图 8 所示，基于本文改进算法进行结构函数分析。

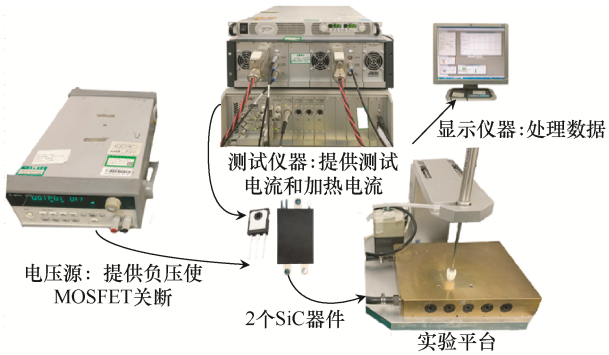
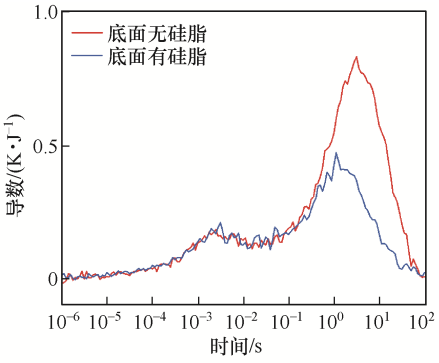


图 8 实验平台

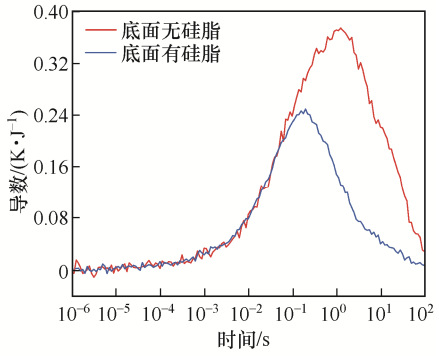
Fig. 8 Experimental platform

实验采取瞬态双界面法进行测量，即在一个 SiC 器件的背面均匀涂抹导热硅脂，另一个不涂抹，在相同压力的基础上，使被测对象与冷却板充分接触。实验中，Cree C2M0080120D 1200 V—31.6 A 单管的测试电流为 25 mA、加热电流为 10 A，自研 1 200 V—150 A 功率模块的测试电流为 25 mA、加热电流为 15 A。以 SiC MOSFET 的体二极管为温敏电参数，在被测器件的源漏极接入测量仪器，用以提供测试过程中的加热电流和测试电流。由于测试过程中需要保持被测器件处于关断状态，使用电压源在 MOSFET 的栅源极间施加−3 V 电压，用以关断器件。将器件连接完成后，平整地放在水冷板上，使二者充分接触。开启加热电流和测试电流，

检测体二极管的正向电压V_{sd}，当V_{sd}不再发生变化时断开加热电流，器件开始进入降温过程，采集降温过程中的V_{sd}，并通过K系数将V_{sd}转换为温度信息，代入热阻抗计算公式中进行计算、求导。2 颗器件的导数曲线如图 9 所示。



(a) Cree C2M0080120D 1 200 V—31.6 A单管

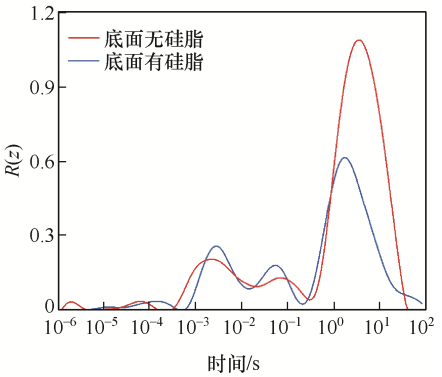


(b) 自研1 200 V—150 A功率模块

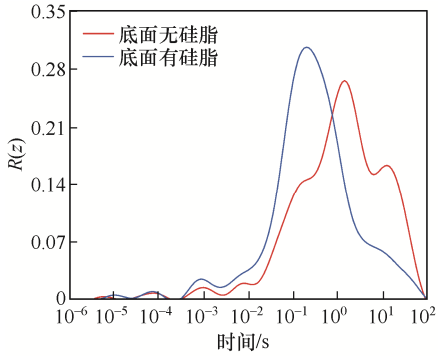
图 9　2 颗器件的导数曲线

Fig. 9 Derivative curves for two devices

得到导数曲线后，使用本文所提方法对导数数据进行反卷积计算，得到 2 种情况下的时间常数谱曲线和积分结构函数曲线，分别如图 10 和图 11 所示。由分析结果可知，在实验测量中，由于噪声的影响，2 种情况下的曲线在彻底分离前易出现



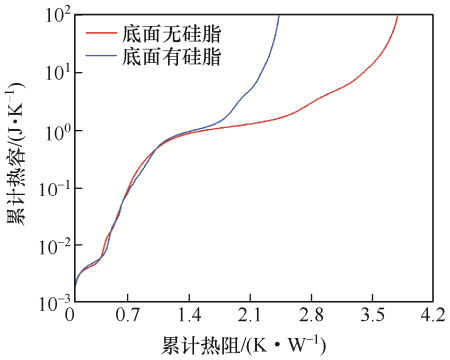
(a) Cree C2M0080120D 单管



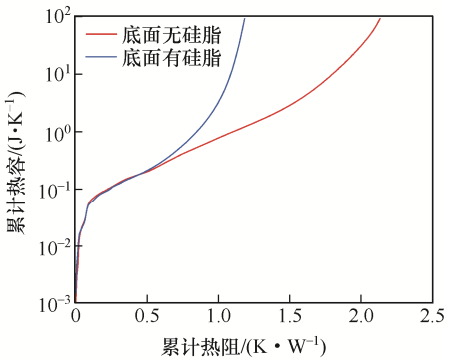
(b) 自研功率模块

图 10　2 颗器件的时间常数谱曲线

Fig. 10 Time-constant spectra curves for two devices



(a) Cree C2M0080120D 单管



(b) 自研功率模块

图 11　2 颗器件的积分结构函数曲线

Fig. 11 Integral structure function curves for two devices

小幅度分离，但并未影响整体结果的准确性。有、无硅脂下被测器件出现的分离点符合理论预期，进一步验证了本文改进算法可抑制测量噪声，提高测试分析结果的准确性，具有一定实用价值。

4　结语

针对结构函数法反卷积环节噪声敏感的问题，

本文提出 1 种改进维纳滤波反卷积方法，该方法通过持续最小化输入信号与含噪声输入信号间差异的期望值，确保在噪声干扰下对结构函数进行精确分析。立足 TDIM-Master 基准，对比本文方法和基准结果，结果表明，在无噪声干扰时，本文算法得到时间常数谱与TDIM-Master基准示例1结果的相位差小于 100 μs、幅值的最大相对误差小于 2%，验证了本文算法在无噪声情况下可以得到足够准确的分析结果。加入高斯白噪声干扰后，在 SNR 为 30 dB、40 dB 时，传统算法与本文改进算法均可以得到较为准确、稳定的分析结果。当 SNR 下降到 20 dB 时，传统算法开始表现出明显波动，分析结果受到了较大程度的噪声干扰，本文改进算法仍能稳定输出时间常数谱曲线。当 SNR 达到 10 dB 后，传统算法已严重波动，输出的时间常数谱极大程度受噪声干扰，本文方法在信号质量精度上提高了 50%以上。加入突发噪声干扰时，在 SNR 处于 10~40 dB 内时，本文改进算法较传统算法均表现出更明显的抑制效果，验证了本文改进算法在有噪声问题中的优越性。本文研究工作对功率器件热特性建模与分析具有一定参考价值。

参考文献：

[1] Székely V. Enhancing reliability with thermal transient testing [J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(4-5): 629-640.

[2] Schweitzer D, Pape H, Chen Liu. Transient measurement of the junction-to-case thermal resistance using structure functions: Chances and limits [C]// 2008 Twenty-fourth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. San Jose, CA, USA, 2008: 191-197.

[3] 王兆萍, 信金蕾, 杜明星. 混合热网络模型的构建及其结温估计方法[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 30-37.
Wang Zhaoping, Xin Jinlei, Du Mingxing. Construction of hybrid thermal network model and estimation method for its junction temperature [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 30-37. (in Chinese)

[4] 皇甫宜耿, 宋少林, 王晓鹏, 等. 功率模块主动热控制技术研究综述[J]. 电源学报, 2024, 22(3):118-126.
Huangfu Yigeng, Song Shaolin, Wang Xiaopeng, et al. Review of research on active thermal control technologies for power modules [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3):118-126. (in Chinese)

[5] 胡震, 崔曼, 吴晓华, 等. 功率器件结温主动控制及优化策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5732-5741.
Hu Zhen, Cui Man, Wu Xiaohua, et al. Active control and optimization strategy of junction temperature for power devices [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5732-5741. (in Chinese)

[6] Faria de Souza D, Santos Greff D, Luiz Rech Vidor D. Estimation of IGBT module degradation using foster's model and structure function [C]// 2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP). Florianopolis, Brazil, 2024: 1-7.

[7] 郭轩, 肖云昊, 李驰, 等. 综合考虑材料热各向异性与多种传热方式的磁性元件热阻网络精准模型[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1806-1817.
Guo Xuan, Xiao Yunhao, Li Chi, et al. An accurate thermal resistance network model for magnetic elements considering thermal anisotropy of materials and various heat transfer ways [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1806-1817. (in Chinese)

[8] Luo Yafei, Kajita Y, Hatakeyama T, et al. Thermal transient test based thermal structure function analysis of IGBT package [C]// 2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP). Toyama, Japan, 2014: 596-599.

[9] Schweitzer D, Pape H, Chen Liu, et al. Transient dual interface measurement—A new JEDEC standard for the measurement of the junction-to-case thermal resistance [C]// 2011 27th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. San Jose, CA, USA, 2011: 222-229.

[10] 王兴华. 基于结构函数法的全 SiC 功率模块热阻提取[D]. 济南: 山东大学, 2021.
Wang Xinghua. Thermal resistance extraction of all SiC power module based on structure function method [D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)

[11] Pareek K A, Grosse C, Sternberg M, et al. Effect of

different deconvolution methods on structure function calculation [C]// 2020 26th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). Berlin, Germany, 2021: 97-104.

[12] 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.
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. (in Chinese)

[13] 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.

[14] Lagonotte P, Soulier F, Thomas A, et al. The differences between equivalent foster and cauer circuits and factorised impedance [J]. Advances in Theoretical & Computational Physics, 2022, 5(1): 314-323.

[15] 朱一帆. 基于逆滤波、维纳滤波算法的图像复原技术的研究[J]. 中国新通信, 2018, 20(6): 238.
Zhu Yifan. Research on image restoration technology based on inverse filtering and Wiener filtering algorithm [J]. China New Telecommunications, 2018, 20(6): 238. (in Chinese)

[16] Chen Jingdong, Benesty J, Huang Yiteng, et al. New insights into the noise reduction Wiener filter [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2006, 14(4): 1218-1234.

[17] Benesty J, Chen Jingdong, Huang Y A, et al. Study of the Wiener Filter for Noise Reduction [M]. Speech Enhancement. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 9-41.

[18] Hussien M N. Automatic estimation of noise to signal powerspectrum ratio in Wiener filtering technique for computed tomography images [D]. Selangor, Malaysia: University Putra Malaysia, 2013.

[19] Biswas P, Sufian Sarkar A, Mynuddin M. Deblurring images using a Wiener filter [J]. International Journal of Computer Applications, 2015, 109(7): 36-38.

[20] 徐利兵, 周旭, 田发林, 等. 基于信噪比和噪声功率密度测量的射频接收通道状态检测方法[J]. 电子信息对抗技术, 2024, 39(5): 97-100.
Xu Libing, Zhou Xu, Tian Falin, et al. RF receiving channel state detection method based on SNR and noise power density measurement [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2024, 39(5): 97-100. (in Chinese)



李龙女

作者简介：

李龙女(1988—　)，女，博士，副教授。研究方向：电气装备多物理场建模与优化。E-mail：lilongnv@tiangong.edu.cn。

刘展鹏(1999—　)，男，硕士研究生。研究方向：功率器件热稳定性分析。E-mail：email0257@163.com。

朱高嘉(1989—　)，男，博士，副教授。研究方向：电气装备多物理场建模与优化。E-mail：zhugaojia@tiangong.edu.cn。

章松茂(1999—　)，男，硕士。研究方向：功率半导体器件的封装可靠性及寿命评估。E-mail：zhangsongmao0804@163.com。

梅云辉(1985—　)，男，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子器件高可靠封装与材料。E-mail：meiyunhui@tiangong.edu.cn。

(责任编辑：耿越)