DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.329 中图分类号：TM46 文献标志码：A

续流二极管反向恢复电流峰值模型及其在结温预测中的应用研究

焦乾明，祝令瑜，占 草，刘占磊，王伟丞，汲胜昌
(西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049)

摘要：准确预测功率模块芯片结温对保证其正常可靠运行具有重要意义。目前对于续流二极管芯片结温预测的研究尚不充分，缺乏二极管的温敏电参数模型与机理研究。基于续流二极管关断过程推导二极管反向恢复电流峰值模型，建立反向恢复电流峰值与母线电压、负载电流和结温的关系。进而提出基于随机变异粒子群优化算法的反向恢复电流峰值模型参数辨识方法，利用双脉冲实验结果提取模型参数并对模型进行验证。为了避免载流子线性分布和线性变化带来的模型误差，进一步增加模型中负载电流及母线电压指数参数，实现了峰值电流预测的优化。最后基于优化后的模型提出功率模块续流二极管芯片结温预测方法，相较查表法具有更高的预测精度，满足续流二极管结温预测需求。

关键词：功率模块；续流二极管芯片；结温预测；反向恢复电流；粒子群优化算法

Peak Reverse Recovery Current Model for Freewheeling Diode and Its Application in Junction Temperature Prediction

JIAO Qianming, ZHU Lingyu, ZHAN Cao, LIU Zhanlei, WANG Weicheng, JI Shengchang
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The accurate chip junction temperature prediction of power semiconductor modules is significant for their reliable operation. However, the research about freewheeling diode (FWD) chip junction temperature prediction is not sufficient at present, and the models of temperature sensitive electric parameters and the corresponding evaluation mechanism are lacking. A peak reverse recovery current model is deduced based on the turn-off process of FWD, and the relationship of peak reverse recovery current with bus voltage, load current and junction temperature is established. Then, a parameter identification approach for the peak reverse recovery current model is proposed based on the particle swarm optimization algorithm with random mutation, and the result of double-pulse test is used to extract the model parameters and verify the model. To reduce the model error caused by the linear distribution and linear changes of carriers, the exponential terms of load current and bus voltage are further added, thus optimizing the prediction of peak current. Finally, a junction temperature prediction approach for FWD chips in power semiconductor modules is put forward based on the optimized model, and this approach is more accurate compared with the look-up-table method, indicating that it can satisfy the requirements of FWD junction temperature prediction.

Keywords: Power semiconductor module; freewheeling diode (FWD) chip; junction temperature prediction; reverse recovery current; particle swarm optimization algorithm

近年来，高压大功率电力电子模块被广泛应用于新能源发电和柔性直流输电等领域，电力电子装置安全可靠运行对电力系统十分重要，而功率模块是电力电子装置中的薄弱环节[1]。功率模块通常包含多个绝缘栅双极晶体管 IGBT(insulated gate bipolar transistor)芯片和续流二极管 FWD(freewheeling diode)芯片，芯片结温是功率模块寿命预测、

收稿日期：2022-09-15；**修回日期：**2023-01-01，2023-02-22，2023-03-17；**录用日期：**2023-03-31；**网络首发日期：**2023-05-26
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51877168)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51877168

热管理设计、可靠性评估及健康度监测的重要参量，实时监测功率模块芯片结温对提高系统的可靠性具有重要意义[2]。

目前对功率模块结温监测主要有 4 种方法：物理接触法、光学测量法、热网络模型法和温敏电参数法 TSEP(temperature sensitive electric parameter)[3]，其中热网络模型法和温敏电参数法较适合现场应用[4-5]。热网络模型法通过数据手册、实验和有限元仿真等方法建立对应的热网络模型，进行结温预测，但是热网络模型建立复杂，需要考虑芯片间热耦合作用，并且影响因素较多[6-7]。温敏电参数法利用建立的模块电气参数与结温的校准关系，测量运行过程中的电气参数，从而实时监测结温，该方法无需打开模块封装并且响应速度快，具备芯片结温实时监测的能力，是目前研究的热点[8]。

现阶段对多芯片并联 IGBT 模块中 IGBT 芯片结温的监测已经进行了大量研究，提出了导通压降、关断过程集射极过冲电压、米勒平台宽度、峰值电流和准阈值电压等温敏电参数，并分析了这些参数的线性度、灵敏度和现场应用可行性等特点[9-13]，研究较为充分。二极管芯片为 IGBT 提供续流通路，因此对二极管进行结温监测同样具有重要意义。有学者提出小电流注入下二极管饱和压降作为结温敏感参数[14]。小电流饱和压降与结温呈较强的线性关系，但应用中需要增加多余的电流源，属于侵入式测试，不适合用于现场结温预测，同时该方法分辨率大约仅有 2 mV/℃，很小的测量偏差将导致较大的结温预测误差。利用负载电流下的导通压降进行结温监测解决了小电流注入时的侵入性问题[15]，该方法在校准时考虑了负载电流的影响，但导通压降的采集需要隔离母线高压，采样电路的设计较为复杂。为了从机理上解释负载电流对导通压降的影响，文献[16]推导了导通压降的数学模型，但该模型将双极扩散长度、高注入水平下载流子寿命等与结温有关的量作为常量进行分析，与实际情况不符，在监测二极管结温过程中会引入较大误差。为了解决利用导通压降进行结温预测存在的种种问题，有学者提出利用二极管反向恢复电流峰值的结温监测方法，利用实测数据建立了反向恢复电流峰值与结温的关系模型，可实现约 240 mA/℃的监测分辨率，测量偏差引起的结温预测误差较小，且该方法不存在高压母线电压隔离的问题[17]。然而，其所建立模型的基础数据仅为单一母线电压和负载电流下的实测结果，未对二极管反向恢复过程进行详细建模，无法考虑母线电压和负载电流对反向恢复电流峰值-结温曲线的影响，不能满足实际应用需求。

为了得到适用于不同运行工况的反向恢复电流峰值结温预测模型，需要对二极管反向恢复过程进行分析和建模。二极管反向恢复模型可分为功能模型和物理模型。功能模型不考虑模块工艺特性和物理过程，可以通过对实验数据拟合直接建立模型。文献[18]利用曲线拟合和数据映射的方法建立了反向恢复特性模型，揭示了反向恢复电流峰值与负载电流的关系，但未考虑母线电压和结温的影响，且该方法物理意义不明确。物理模型基于模块物理特性建立精确模型，但存在模型参数多且较难获取的问题[19]。结合功能模型和物理模型的优点，文献[20]采用 4 个阶段描述反向恢复过程，利用数据手册和实验条件求解模型参数，为建立考虑结温的反向恢复电流峰值模型奠定基础。

本文采用功能模型和物理模型相结合的建模方式，基于续流二极管四阶段反向恢复过程建立含待定参数的反向恢复电流峰值模型，针对该模型设计基于随机变异粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)算法的参数辨识方法，进而利用双脉冲实验数据辨识模型中的待定参数，建立二极管反向恢复电流峰值和结温、母线电压及负载电流之间的关系，最后得到考虑不同母线电压和负载电流下基于二极管反向恢复电流峰值的结温预测方法。

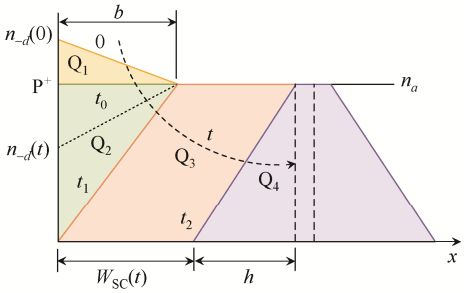
1 反向恢复电流峰值模型及参数辨识方法

续流二极管芯片为快恢复二极管，快恢复二极

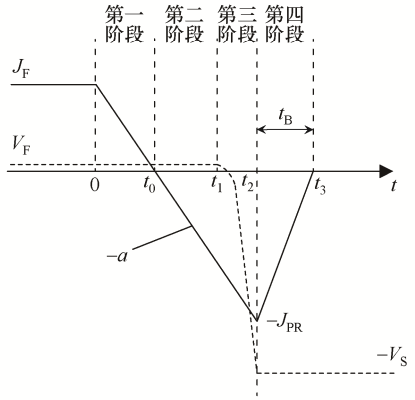
管在常规功率二极管的基础上加入了少子寿命控制技术[20]。由于二极管仅在复合全部载流子后才能重新具有全电压阻断能力，IGBT 快速开通会导致对应的续流二极管产生明显的电流梯度和反向恢复电流[21]。为了建立二极管反向恢复电流峰值和结温的关系，需要对二极管关断瞬态过程进行分析。

1.1 二极管芯片关断暂态过程分析

续流二极管芯片为 PIN 结构[18]，该结构由于电导调制效应，正向导通压降大大降低[22]，电导调制效应的存在，使得在关断时需要抽出漂移区的过剩载流子。为了研究二极管反向恢复过程，二极管载流子分布被简化为 1 种线性分布的模型[23]，如图 1(a)所示，该过程对应的电流、电压波形如图 1(b)所示。根据该模型，二极管反向恢复过程可被分为 4 个阶段[23]。



(a)二极管芯片线性化载流子分布



(b)反向恢复过程电流、电压波形示意

图 1　线性载流子分布模型及反向恢复过程电流、电压波形

Fig. 1 Linear carrier distribution model, and waveforms of current and voltage during reverse recovery process

(1)第一阶段($0<t<t_0$)：二极管从导通开始向截止过渡，基区 PN 结附近 $x=0$ 处过剩载流子浓度开始从 $n_{-d}(0)$ 减小，到 t_0 时刻该位置载流子浓度减小为 $x=b$ 处的平均载流子浓度 n_a，此过程中二极管仍处于正向导通状态，两端电压为正向导通电压 V_F，电流从正向导通电流密度 J_F 线性减小至 0。

(2)第二阶段($t_0<t<t_1$)：电流减小为 0 后漂移区仍有大量过剩载流子，因此两端电压仍然维持正向导通电压 V_F，此阶段过剩载流子被反向抽出，形成反向电流，反向电流从 0 线性增大，直至 t_1 时刻 P^+N^- 结处载流子浓度降为 0 时第二阶段结束。

(3)第三阶段($t_1<t<t_2$)：P^+N^- 结处载流子浓度降为 0，意味着空间电荷区开始展开，二极管开始承受反向电压，并且迅速达到母线电压 V_S，电流在 t_2 时刻达到反向恢复电流峰值。

(4)第四阶段($t_2<t<t_3$)：漂移区载流子依靠扩散运动扩散到两极，二极管反向电流逐渐减小至 0。

1.2 二极管芯片反向恢复电流峰值模型

首先建立二极管芯片反向恢复电流峰值与母线电压、负载电流、结温之间的模型。感性负载下，$0\sim t_2$ 阶段电流变化斜率 a 恒定，且斜率 a 与母线电压 V_S 和寄生电感 L_S 满足

$$a=\frac{V_S}{L_S} \tag{1}$$

$0\sim t_2$ 阶段内电流密度为时间的函数，即

$$J(t)=J_F-at \tag{2}$$

在反向恢复过程的 4 个阶段内，每个阶段对应的时刻可以由该阶段电荷的变化量与电流密度对时间积分联立求解得到[23]，根据式(2)可以得到反向恢复电流密度峰值为

$$J_{PR}=\sqrt{\frac{L_a}{Kd-L_a}J_F^2+2qn_a a\sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_S}{qN_D}}} \tag{3}$$

式中：L_a 为双极扩散长度；$K=\dfrac{\cosh(-d/L_a)}{\sinh(d/L_a)}-\dfrac{\sinh(-d/L_a)}{2\cosh(d/L_a)}$；$d$ 为漂移区宽度的一半；q 为电子电荷量；ε_s 为硅的介电常数；N_D 为漂移区掺杂浓度。

式(3)中，L_a、K、d、n_a和N_D 与模块的工艺参数有关，这些工艺参数无法通过数据手册获得。为

解决这一问题，本文对其进行了处理，即

$$\tau_{\mathrm{HL}}=(1+\zeta)\tau_{\mathrm{p0}}=\frac{1+\zeta}{v_{\mathrm{TP}}\sigma_{\mathrm{cp}}N_{\mathrm{r}}} \tag{4}$$

式中：τ_{HL} 为漂移区大注入水平下载流子寿命；ζ 为重掺杂 P 区多子寿命与重掺杂 N 区多子寿命之比；τ_{p0} 为重掺杂 P 区多子寿命；v_{TP} 为空穴的热速度，与 $T^{-\alpha}(\alpha>0)$ 成正比，T 为结温；σ_{cp} 为空穴的捕获截面积；N_{r} 为复合中心浓度。

温度、母线电压和负载电流对 ζ、σ_{cp}、N_{r} 的影响可忽略不计，则

$$\tau_{\mathrm{HL}}=C_1'T^{\alpha} \tag{5}$$

$$L_a=\sqrt{D_a\tau_{\mathrm{HL}}} \tag{6}$$

$$D_a=\frac{2D_{\mathrm{n}}D_{\mathrm{p}}}{D_{\mathrm{n}}+D_{\mathrm{p}}}=2\frac{kT}{q}\frac{\mu_{\mathrm{n}}\mu_{\mathrm{p}}}{\mu_{\mathrm{n}}+\mu_{\mathrm{p}}} \tag{7}$$

式中：C_1' 为常数；$\alpha>0$；D_a 为双极扩散系数；D_{n}、D_{p} 分别为电子、空穴扩散系数；k 为玻尔兹曼常数；μ_{n}、μ_{p} 分别为电子、空穴迁移率，其为温度 $T^{\beta'}(\beta'<0)$ 的函数。

由于电子、空穴迁移率数量级相同，式(7)可简化为

$$D_a=2\frac{kT}{q}\frac{\mu_{\mathrm{n}}\mu_{\mathrm{p}}}{\mu_{\mathrm{n}}+\mu_{\mathrm{p}}}\overset{\mu_{\mathrm{p}}=C_2\mu_{\mathrm{n}}}{\approx}\frac{kT}{q}C_2'\mu_{\mathrm{n}}=C_3'T^{\beta}$$
$$\beta<0 \tag{8}$$

将式(5)与式(8)代入式(6)，可得

$$L_a=\sqrt{D_a\tau_{\mathrm{HL}}}=\sqrt{C_1'C_3'T^{\alpha+\beta}}=CT^{\gamma} \tag{9}$$

平均载流子浓度 n_a 的表达式为

$$n_a=\frac{J_{\mathrm{F}}\tau_{\mathrm{HL}}}{2qd} \tag{10}$$

同时，式(3)中的 K 随温度的变化很小，可以看作常数。综上，将式(1)、式(5)、式(9)和式(10)代入式(3)并化简，最终得到二极管反向恢复电流密度峰值的模型为

$$J_{\mathrm{PR}}=\sqrt{\frac{C_1T^{\gamma}}{d_1-C_1T^{\gamma}}J_{\mathrm{F}}^2+C_2T^{\alpha}J_{\mathrm{F}}V_{\mathrm{S}}^{\frac{3}{2}}} \tag{11}$$

其中，$C_1>0$、$C_2>0$、$\alpha>0$、$d_1>0$，且 $Kd>L_a$，则 J_{F}、T 和 V_{S} 的系数均为正数，因此反向恢复电流密度峰值随负载电流、母线电压和结温的增大而增大。

1.3 基于随机变异粒子群算法的模型参数辨识方法

根据式(11)可知待优化的参数为 C_1、C_2、d_1、α和γ，因此模型参数辨识问题可以转化为多参数优化问题。优化的过程即为减小由待优化参数组合计算得到的反向恢复电流峰值 I_{PR} 与实测数据之间误差的过程。

选取误差平方和 SSE(sum of squared errors)作为优化目标函数，即

$$S_{\mathrm{SE,min}}=\sum_{1}^{n}(I_{\mathrm{PR,calc}}-I_{\mathrm{PR}})^2 \tag{12}$$

式中：n 为优化过程所用到的实测数据总数；$I_{\mathrm{PR,calc}}$ 为待优化参数组合计算得到的反向恢复电流峰值。

为确保 t_1 和 t_2 有意义，需要使 $Kd>L_a$，即约束条件为

$$d_1>L_a \tag{13}$$

粒子群算法受鸟类群集、鱼类群集等群集理论启发，也与进化计算有关。粒子代表着不同参数组合式(11)所示的模型。同时粒子具有记忆，使得粒子在向个体最优解 P_{best} 和全局最优解 G_{best} 靠拢过程中，在解空间内搜索最优解。每个粒子会根据个体的最优位置和全局最优位置决定下一次迭代时的速度，从而更新自己的位置[24-25]。更新公式为

$$V=\omega V+c_1rand(P_{\mathrm{best}}-X)+$$
$$c_2rand(G_{\mathrm{best}}-X) \tag{14}$$

$$X=X+V \tag{15}$$

式中：V 为粒子速度；ω 为惯性因子；c_1和c_2 为个体学习因子和全局学习因子，反映了向个体和全局学习能力的相对大小；*rand* 为 0~1 间的随机数，增加了解的随机性；X 为粒子位置，其包含 5 个维度，分别代表 C_1、C_2、d_1、α和γ。

迭代过程中计算所有粒子的 SSE，根据该值确定个体最优解和全局最优解，利用式(14)确定对应维度上的速度，并根据式(15)完成粒子位置的更新。

为了防止粒子群过早地收敛于局部解，在此参考遗传算法 GA(genetic algorithm)引入变异率的概

念，即每个粒子均有一定概率在迭代过程中随机跳跃到解空间的任意位置，增大寻找到最优解的可能性。

对于粒子群优化算法，如果能够给出合理的初值和优化取值范围，将会大大提高收敛速度并提升优化效果。根据模型化简过程可知，常数 C_1、C_2 与二极管芯片制造过程中的相关参数有关，难以通过数据手册获取和推断，为了保证解空间的有效性，将其优化范围取为 $10^{-10}\sim10^{10}$ 这一较大范围；参数 d_1 与本征区宽度处于同一数量级，根据典型制造工艺参数确定其优化取值范围为 $10^{-5}\sim10^{-3}$；参数 α 与空穴热速度有关，取值范围为 $0\sim5$；参数 γ 与空穴热速度和电子、空穴的迁移率有关，取值范围为 $-5\sim5$[23]。

通常采用在解空间随机均匀初始化的方式生成参数初值，即

$$x_0 = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) \times rand \tag{16}$$

若采用该方式生成初值，将使 C_1、C_2 取值在较小数量级空间内的概率降低，从而影响优化速度与效果。为了解决该问题，本文采用在解空间内的对数坐标下随机初始化的方法生成 C_1、C_2 的初值，即在解空间上、下限的对数范围内随机生成初值的指数，可表示为

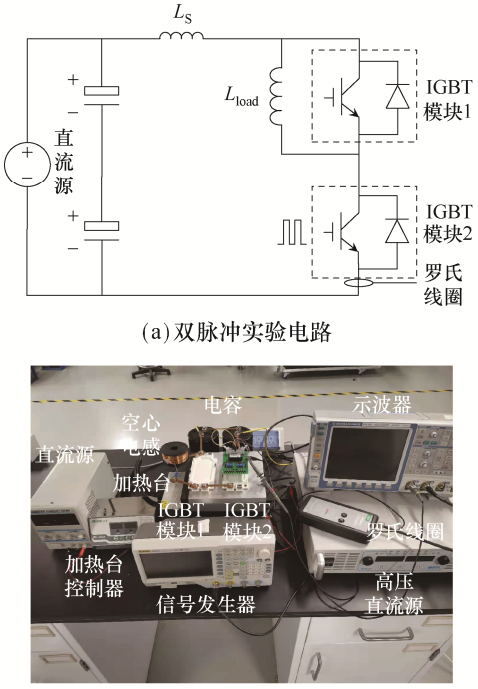
$$temp = \log_{10} x_{\min} + (\log_{10} x_{\max} - \log_{10} x_{\min}) \times$$
$$randx_0 = 10^{\text{temp}} \tag{17}$$

该方法可以确保初值在每个数量级下均有一致的随机性，适用于大范围内随机初值的生成。

2　模型参数辨识结果及修正

2.1　双脉冲测试

为了测试不同母线电压、负载电流和结温下的二极管反向恢复电流峰值，本文根据文献[26]搭建了双脉冲测试电路，电路拓扑和实验平台如图 2 所示。IGBT 模块采用 FF150R12ME3G，对 IGBT 模块 1 施加负电压，保证该模块可靠关断，对 IGBT 模块 2 施加双脉冲开关信号，以实现双脉冲测试，高压直流源为整个测试平台提供测试电压，母线电容维持测试过程中的电压稳定，负载电感采用空心电感，保证测试过程电流线性升高并且防止磁饱和。各器件间的连接线采用硬铜排，缩短接线距离，减小电感的同时增强实验平台接线可靠性。



(a) 双脉冲实验电路

(b) 双脉冲实验平台

图 2　双脉冲实验电路及平台

Fig. 2 Circuit and platform for double-pulse test

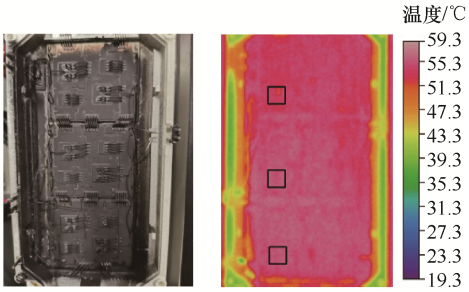
已知 IGBT 开通过程电流过冲峰值 I_m 为二极管反向恢复电流峰值 I_{PR} 与负载电流 I_{load} 之和[17]，可表示为

$$I_m = I_{PR} + I_{load} \tag{18}$$

因此，可以通过测量 IGBT 开通过程电流的过冲峰值获得二极管反向恢复电流峰值。

保持母线电压、负载电流及半桥模块 2(IGBT 芯片)温度不变，改变半桥模块 1(二极管芯片)的温度，以研究二极管芯片结温对反向恢复电流峰值的影响。利用 MIKRON 热成像仪对去除硅胶并喷黑漆的 IGBT 模块进行拍摄，根据热成像微调温控系统将芯片平均结温控制至所设温度，尽管双脉冲测试时在导通阶段芯片会有温升，但是导通时间短，因此可以忽略此温升带来的影响。图 3(b)所示为热成像图片，选中的 3 个区域对应二极管芯片的温

度，实验时将这 3 个区域的平均温度控制在所设置的温度。



(a) 去除硅胶的IGBT模块　(b) 热成像图片

图 3　去除硅胶的 IGBT 模块以及热成像图片

Fig. 3 IGBT module with silica gel removed, and corresponding thermal image

设置母线电压为 400 V，调节双脉冲驱动信号使得负载电流大小分别为 20、30、40 和 50 A，控制二极管温度从 25 ℃至 125 ℃变化，变化步长为 25 ℃，获得 400 V 母线电压和不同负载电流时的反向恢复电流峰值随结温的变化曲线，如图 4 所示。I_{PR} 与结温 T 近似服从线性关系，分辨率为 200 mA/℃，该关系线性度良好且灵敏度高，非常适合用于结温监测。

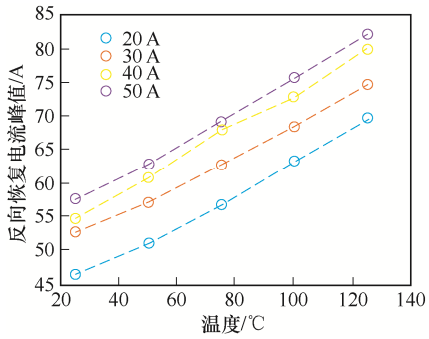
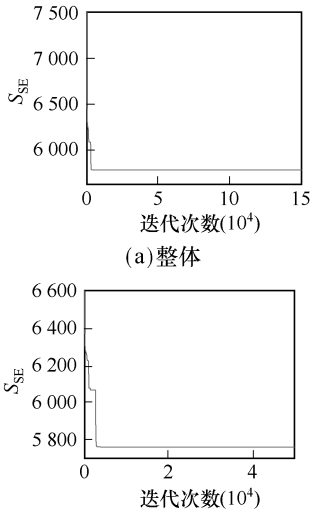


图 4　反向恢复电流峰值随结温变化曲线

Fig. 4 Curves of relationship between peak reverse recovery current and junction temperature

2.2　反向恢复电流峰值模型参数辨识结果分析

基于双脉冲测试得到在不同母线电压、负载电流和结温下的反向恢复电流峰值的测试数据，采用随机变异粒子群优化算法进行模型参数辨识，优化过程中 SSE 变化如图 5 所示。由图 5 可见，约 5 000 次后，粒子群算法收敛到最优解，优化后模型中 C_1=0.000 929、C_2=2.176 650 93×10^{-10}、d_1=0.000 463、α=3.004 379 55、γ=−0.315 107 21。

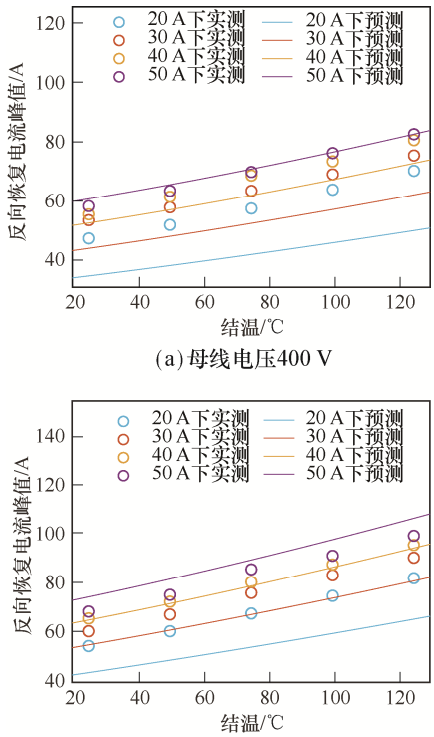


(a)整体　(b)局部放大

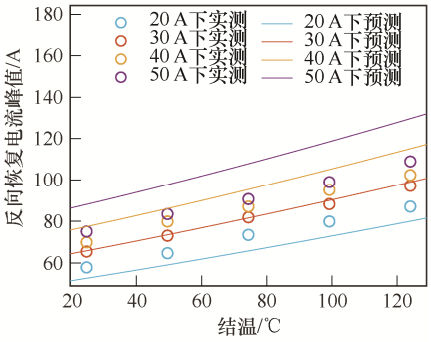
图 5　反向恢复电流峰值模型参数优化过程

Fig. 5 Optimization process of parameters for peak reverse recovery current model

代入优化参数后的模型预测值与实验实测值的对比如图 6 所示。从图中可以看到，预测曲线随着母线电压、负载电流的升高而升高，同时反向恢复电流峰值与结温呈线性关系。通过母线电压、负载电流和结温预测出的反向恢复电流峰值基本跟



(a) 母线电压400 V　(b) 母线电压600 V



(c) 母线电压800 V

图 6　反向恢复电流峰值模型预测结果

Fig. 6 Prediction result of peak reverse recovery current model

踪了实测数据的变化趋势，证明了本文模型基本正确。然而计算的 S_{SE}=5 758.68 A^2，平均预测误差为 9.8 A，误差较大，需要对模型进行进一步修正。

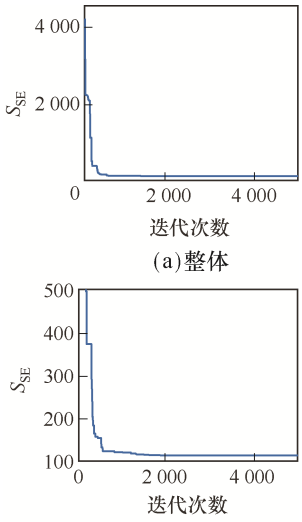
2.3　反向恢复电流峰值模型误差分析及修正

通过分析建模过程中假设与简化因素寻找模型误差的来源。二极管反向恢复电流峰值模型中存在载流子线性分布的假设，如图 1(a)所示，而实际载流子为非线性分布，线性分布的假设引入了误差。此外，模型中认为 0~t_2 时刻电流完全线性变化，由于在 0 和 t_2 时刻附近电流并非线性变化，该简化假设也引入了模型误差。

为了进一步提高模型的精度，通过引入新的模型参数对式(11)中的模型进行修正，即

$$J_{PR}=\sqrt{\frac{C_1T^{\gamma}}{d_1-C_1T^{\gamma}}J_F^{k_1}+C_2T^{\alpha}J_F^{k_2}V_S^{k_3}} \tag{19}$$

0~t_2 时刻电流完全线性变化这一简化引入的误差可通过修改 J_F和V_S 的指数项来修正。即 J_F和V_S 上的指数由原模型的确定值变为待优化的参数 k_1、k_2和k_3，修正后的模型参数变为 8 个，即 C_1、C_2、d_1、α、γ、k_1、k_2和k_3。增加优化参数以后，载流子线性化带来的误差可由对 C_1、C_2、d_1、α和γ 的优化过程得到修正。考虑到原模型平均误差仅为 9.8 A，说明仅需对模型进行小幅度修正，因此 k_1、k_2和k_3 的取值不应与原模型差值过大，取值范围选为 0~2。对修正后的模型进行参数辨识，优化过程 SSE 变化如图 7 所示，在 2 000 次左右收敛到最优解，说明修正模型不仅提高了预测精度，也加快了收敛速度。



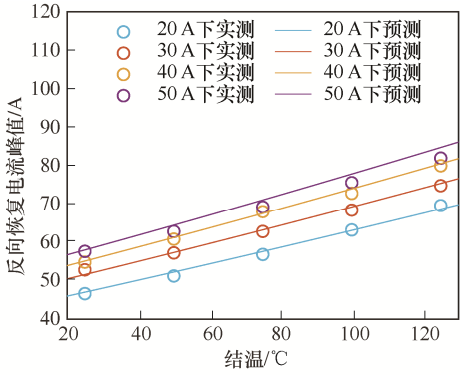
(a) 整体

(b) 局部放大

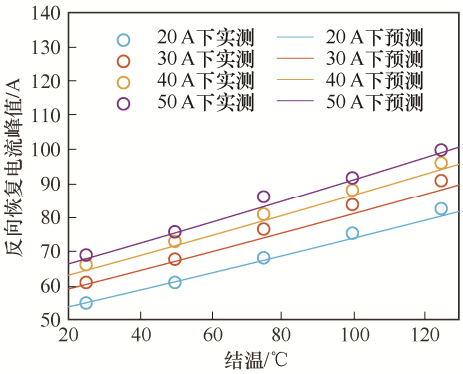
图 7　反向恢复电流峰值修正模型参数优化过程

Fig. 7 Optimization process of parameters for peak reverse recovery current model after modification

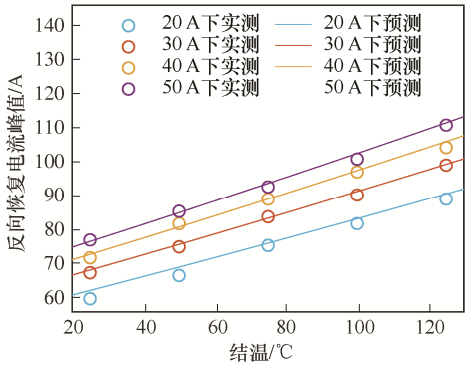
修正模型进行随机变异粒子群参数辨识后，C_1=0.000 493、C_2=1.81×10^{-6}、d_1=4.78×10^{-4}、α=2.63、γ=−0.503、k_1=0.956、k_2=0.459、k_3=0.765。图 8 为



(a) 母线电压400 V



(b) 母线电压600 V



(c)母线电压800 V

图 8 反向恢复电流峰值修正模型预测结果

Fig. 8 Prediction result of peak reverse recovery current model after modification

修正模型预测结果，S_{SE}=112.92 A^2，平均预测误差为 1.37 A，可见修正后模型误差大大降低，证明了修正模型的有效性。

3 二极管结温预测公式及验证

反向恢复电流峰值修正模型建立了反向恢复电流峰值和母线电压、负载电流及二极管芯片结温之间的函数关系，利用优化后的模型参数，将修正模型参数辨识结果代入式(19)中，可得

$$J_{PR}^2=\frac{T^{-0.5}}{1-T^{-0.5}}J_F^{0.96}+1.81\times10^{-6}T^{2.63}J_F^{0.46}V_S^{0.76} \tag{20}$$

经过计算，式(20)中等式右侧第 2 项的计算值远大于第 1 项的计算值，因此可以将第 1 项忽略，则有

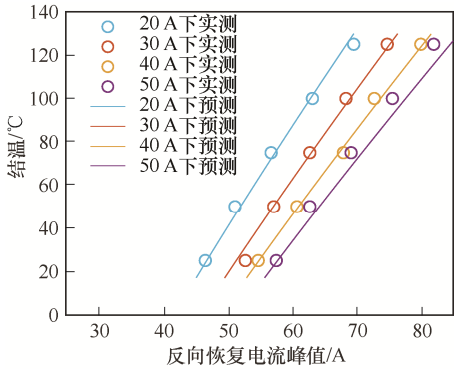
$$J_{PR}^2=1.81\times10^{-6}T^{2.63}J_F^{0.46}V_S^{0.76} \tag{21}$$

根据式(21)可以得到考虑母线电压和负载电流影响的基于反向恢复电流峰值的二极管结温统一预测公式，即

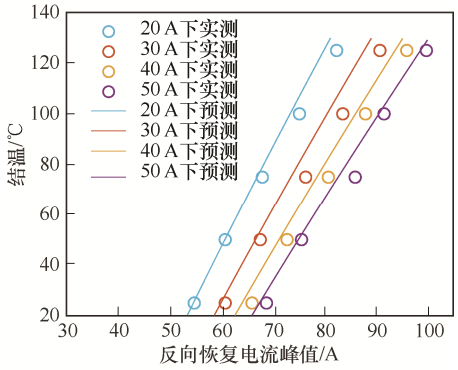
$$T=\left(\frac{J_{PR}^2}{1.81\times10^{-6}J_F^{0.46}V_S^{0.76}}\right)^{\frac{1}{2.63}} \tag{22}$$

基于式(22)，可以利用 IGBT 模块实际工作时的母线电压、负载电流及二极管反向恢复电流峰值预测出二极管结温。由于该模型所用训练数据基于 FF150R12ME3G 模块的双脉冲测试得到，因此仅适用于该模块中二极管结温的预测，但是本文所提方法可以推广到其他型号功率模块。

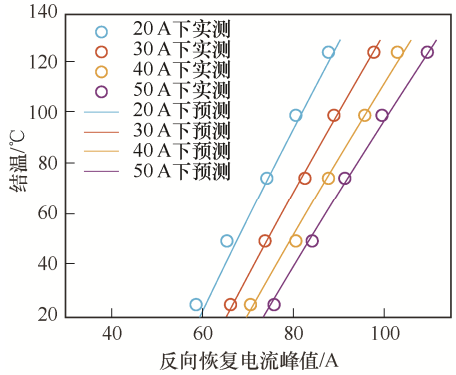
图 9 为基于式(22)利用双脉冲实验实测的母线电压、负载电流和反向恢复电流峰值计算的二极管结温结果。图 10 为预测误差的正态概率，预测误差数据点线性分布在参考线周围，表明预测误差服从正态分布，经计算该分布为 N(0.902, 23.996)；平均预测误差为 0.902 ℃，预测精度高；标准差为 4.899 ℃，误差一致性较好；平均灵敏度为 277 mA/℃。



(a)母线电压400 V



(b)母线电压600 V



(c)母线电压800 V

图 9 二极管芯片结温预测模型预测结果

Fig. 9 Prediction result of FWD chip junction temperature prediction model

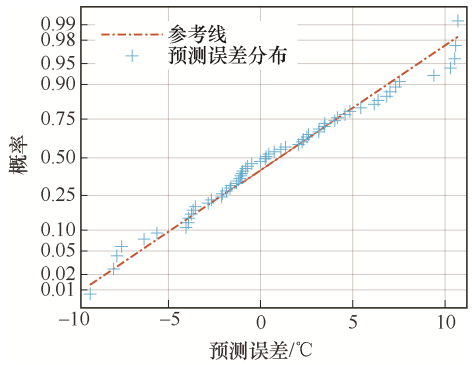


图 10　预测误差正态概率

Fig. 10 Normal probability of prediction error

目前工程中往往根据双脉冲实验的标定数据利用实测的母线电压、负载电流和反向恢复电流峰值通过查表法预测芯片结温。为了对比本文所提二极管结温统一预测模型与查表法的预测结果，在母线电压 600 V、负载电流 60 A 的条件下，控制芯片温度为 25、50、75、100 和 125 ℃得到了 5 组测试数据。上文中的标定数据仅有 20、30、40 和 50 A 下的负载电流，应用查表法时对于 60 A 的实验数据需要进行插值拟合，拟合方式选为薄板样条插值，该方式较线性插值得到的曲面更为平滑。图 11 为二极管结温统一预测模型与查表法的预测结果对比，本文所提结温预测模型的平均预测误差为 0.84 ℃，查表法的平均误差为 7.06 ℃。可见对于非标定数据下的结温预测，本文所提结温预测模型相比查表法预测结果更加精确。模型预测精度及参数灵敏度能够满足现场应用要求。

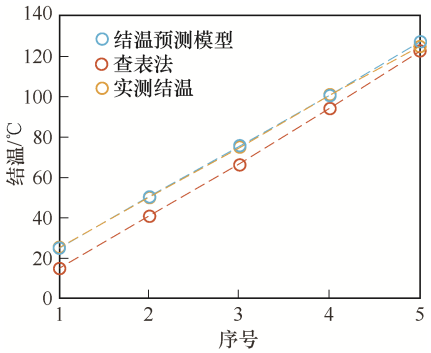


图 11　结温预测模型与查表法预测结果对比

Fig. 11 Comparison of prediction result between junction prediction model and look-up-table method

4　结论

本文建立了续流二极管反向恢复电流峰值模型，提出了 1 种基于该模型的二极管结温统一预测方法，得到以下结论。

(1)建立了考虑母线电压、负载电流和结温的二极管反向恢复电流峰值模型，模型及双脉冲实验结果均表明二极管反向恢复电流峰值随负载电流和母线电压的增大而增大，与二极管芯片结温呈线性关系。

(2)提出了适用于反向恢复电流峰值模型参数辨识的随机变异粒子群算法，算法能够快速收敛到满意的模型参数。

(3)获得了二极管芯片结温统一预测公式，可利用功率模块运行过程中的母线电压、负载电流和反向恢复电流峰值预测结温，对于本文研究的半桥模块预测灵敏度为 277 mA/℃，预测平均误差为 0.902 ℃，较查表法具有更高的预测精度。

本文利用双脉冲实验场景下的结果，证明了所建模型能够准确反映各因素影响规律，以及结温预测结果的有效性，下一步将对该方法在换流器现场应用场景中的结温预测问题进行进一步研究。

参考文献：

[1] Yang Shaoyong, Bryant A, Mawby P, et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1451.

[2] 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)

[3] 肖凯，王振，严喜林，等. 基于导通压降的大容量 IGBT 模块结温观测与误差分析研究[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 127-137.
Xiao Kai, Wang Zhen, Yan Xilin, et al. Observation and

error analysis of junction temperature of large-capacity IGBT module based on on-state voltage drop [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 127-137. (in Chinese)

[4] Berthou M, Godignon P, Millán J. Monolithically integrated temperature sensor in silicon carbide power MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4970-4977.

[5] 雷万钧, 刘进军, 吕高泰, 等. 大容量电力电子装备关键器件及系统可靠性综合分析与评估方法综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3353-3361.
Lei Wanjun, Liu Jinjun, Lü Gaotai, et al. Review of reliability comprehensive analysis and evaluation methods for key components and system of large capacity power electronic equipment [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3353-3361. (in Chinese)

[6] Bruckner T, Bernet S. Estimation and measurement of junction temperatures in a three-level voltage source converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1): 3-12.

[7] 祝令瑜, 占草, 刘琛硕, 等. 高压 IGBT 劣化机理分析及状态监测技术研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 903-916.
Zhu Lingyu, Zhan Cao, Liu Chenshuo, et al. Review of deterioration mechanism analysis and condition monitoring technology for high voltage IGBT [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 903-916. (in Chinese)

[8] 陈杰, 邓二平, 赵雨山, 等. 高压大功率器件结温在线测量方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6677-6688.
Chen Jie, Deng Erping, Zhao Yushan, et al. Review of on-line junction temperature measurement methods of high voltage power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6677-6688. (in Chinese)

[9] 王惠民, 许智亮, 丁菊霞, 等. 基于开通集射极电压下降平台的功率器件结温监测方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4682-4696.
Wang Huimin, Xu Zhiliang, Ding Juxia, et al. A junction temperature monitoring method for power devices based on turn-on collector-emitter voltage drop platform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4682-4696. (in Chinese)

[10] Yang Yanyong, Zhang Pinjia. In situ insulated gate bipolar transistor junction temperature estimation method via a bond wire degradation independent parameter turn-off V_{ce} overshoot [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(10): 10118-10129.

[11] van der Broeck C H, Gospodinov A, De Doncker R W. IGBT junction temperature estimation via gate voltage plateau sensing [C]// 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati, OH, USA, 2017: 5899-5906.

[12] Baker N, Munk-Nielsen S, Iannuzzo F, et al. IGBT junction temperature measurement via peak gate current [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3784-3793.

[13] Mandeya R, Chen Cuili, Pickert V, et al. Prethreshold voltage as a low-component count temperature sensitive electrical parameter without self-heating [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 2787-2791.

[14] Khatir Z, Dupont L, Ibrahim A. Investigations on junction temperature estimation based on junction voltage measurements [J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(9-11): 1506-1510.

[15] Perpiñà X, Serviere J F, Saiz J, et al. Temperature measurement on series resistance and devices in power packs based on on-state voltage drop monitoring at high current [J]. Microelectronics Reliability, 2006, 46(9-11): 1834-1839.

[16] Yang Yanyong, Zhang Pinjia. A novel in situ IGBT and FWD junction temperature estimation technique for IGBT module based on on-state voltage drop measurement [C]// 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, MI, USA, 2020: 2529-2534.

[17] Yang Yanyong, Zhang Pinjia. A novel PiN diode junction temperature estimation method based on switching traces [C]// 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia). Nanjing, China, 2020: 921-926.

[18] 袁义生, 钟青峰, 邱志卓, 等. 功率二极管反向恢复特性的建模[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5189-5198, 5316.
Yuan Yisheng, Zhong Qingfeng, Qiu Zhizhuo, et al.

Modeling of reverse recovery characteristics of power diodes [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5189-5198, 5316. (in Chinese)

[19] Tan C M, Tseng K J. Using power diode models for circuit simulations-a comprehensive review [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(3): 637-645.

[20] 易荣, 赵争鸣, 袁立强. 高压大容量变换器中快恢复二极管的模型[J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 62-67, 80.
Yi Rong, Zhao Zhengming, Yuan Liqiang. Fast recovery diode model for circuit simulation of high voltage high power three level converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 62-67, 80. (in Chinese)

[21] 郑丹, 宁圃奇, 仇志杰, 等. 基于老化补偿的功率模块全生命周期在线结温监测方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3705-3717.
Zheng Dan, Ning Puqi, Qiu Zhijie, et al. Full life-cycle online junction temperature monitoring of power module based on aging compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3705-3717. (in Chinese)

[22] 谭巍. 高压快速软恢复二极管研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
Tan Wei. Research on the high voltage and fast soft recovery diode [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)

[23] Baliga B J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices [M]. Boston, MA, USA: Springer US, 2008

[24] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Perth, WA, Australia, 2002: 1942-1948.

[25] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [C]// MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya, Japan, 1995: 39-43.

[26] International Electrotechnical Commission. Semiconductor devices – Part 9: Discrete devices – Insulated-gate bipolar transistors(IGBTs): IEC 60747-9: 2019 [S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission，2019.



焦乾明

作者简介：

焦乾明(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：功率模块结温监测技术及其应用。E-mail：854074130@qq.com。

祝令瑜(1988—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：电力设备振动与噪声，直流电弧特性与检测，电力设备状态监测及故障诊断，新能源设备服役特性及状态评估。E-mail：zhuly1026@xjtu.edu.cn。

占草(1993—)，男，博士研究生。研究方向：功率器件可靠性分析，电力电子化电力设备状态监测。E-mail：zhancao@stu.xjtu.edu.cn。

刘占磊(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：中频变压器的设计。E-mail：2452356003@qq.com。

王伟丞(1994—)，男，硕士研究生。研究方向：MMC 子模块状态监测技术。E-mail：2985746736@qq.com。

汲胜昌(1976—)，男，博士，教授。研究方向：电力设备状态监测及故障诊断，电力设备振动与噪声，新能源设备服役特性及状态评估。E-mail：jsc@xjtu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)