基于实际工况谱的功率模块寿命预测方法研究

马瑛　王佳斌　朱占山　李敏　张月馨

（中国第一汽车股份有限公司研发总院，长春 130013）

【欢迎引用】马瑛，王佳斌，朱占山，等．基于实际工况谱的功率模块寿命预测方法研究[J]．汽车文摘，2026(2)：57-62.

【Cite this paper】MA Y, WANG J B, ZHU Z S, et al. Research on the Lifetime Prediction Method of the Power Module Based on the Mission Profile[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(2): 57-62.

【摘要】为了在实际工况中预测功率模块的寿命，提出了一种基于温度模型的功率模块寿命预测方法。首先根据整车路谱信息获得电压、相电流、功率因数和开关频率等仿真参数，计算模块损耗。其次，结合Foster热网络模型计算其结温，获取模块温度变化序列，并利用雨流计数法提取结温波动序列。然后结合功率循环试验拟合出的寿命模型评估相应路谱的功率模块损伤度。最后，将同一模块发电工况与电动工况损伤度进行对比，分析不同应用场景下对模块的性能要求。结果表明：在24万km行驶路谱下，电动工况损伤度显著高于发电工况，且开关频率升高会加剧损伤。该方法能够有效支持功率模块的可靠性快速评估，为不同应用场景下的模块选型与优化提供依据。

关键词：绝缘栅双极晶体管；瞬态结温；结温波动；寿命预测

中图分类号：U463.61　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240320

Research on the Lifetime Prediction Method of the Power Module Based on the Mission Profile

Ma Ying, Wang Jiabin, Zhu Zhanshan, Li Min, Zhang Yuexin

（Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013）

【Abstract】To achieve lifetime prediction of power modules under actual operating conditions, a power module lifetime prediction method based on a temperature model is proposed. Simulation parameters such as voltage, phase current, power factor, and switching frequency are obtained from the vehicle driving cycle data to calculate module losses. First, the Foster thermal network model is then used to calculate the junction temperature, thereby obtaining the module temperature variation sequence. The rainflow counting method is applied to extract the junction temperature fluctuation sequence. Next, the damage degree of the power module under the corresponding driving cycle is evaluated by combining the lifetime model fitted from power cycling tests. Additionally, the damage degrees of the same module under power generation and electric driving conditions are compared to analyze the performance requirements of the module in different application scenarios. The results show that under a 240 000 km driving cycle, the damage degree in electric driving conditions is significantly higher than in power generation conditions, and an increase in switching frequency exacerbates the damage. This method can effectively support rapid reliability assessment of power modules and provide a basis for module selection and optimization in different application scenarios.

Key words: Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), Transient junction temperature, Junction temperature fluctuations, Lifetime prediction

0　引言

功率模块是电动汽车驱动系统的核心部件，其寿命预测研究对于提升整车安全性与可靠性具有重要意义。目前，功率模块的寿命预测方法主要分为2类：基于模型的预测方法和基于数据驱动的预测方法。其中，基于模型的方法可进一步划分为基于解析寿命模型和基于物理寿命模型的预测方法；而基于数据驱动的方法则主要包括基于机器学习与基于统计序列的预测方法[1]。

解析寿命模型通过建立模块失效循环次数与加速老化试验中各变量之间的关系进行寿命评估。文献[2]通过电力电子器件加速老化试验数据，拟合Coffin-Manson寿命模型参数，结合器件实际工作场景，对功率器件进行寿命预测与可靠性评估。物理寿命模型从材料属性层面，根据半导体器件的失效机理进行建模。文献[3]构建了功率器件累积损伤热循环计算模型，并利用该模型计算功率器件的寿命损耗，进一步提出了基于器件可靠性的功率器件设计思路。基于机器学习的预测方法具有良好的数据学习和推广能力，可以结合多参数快速准确建立输入与输出变量之间的关系[4]，基于机器学习的预测方法有神经网络法、自适应推理方法、灰色模型法等[1]。对于基于统计序列的预测方法，其统计模型构建依赖于表征模块性能的历史数据。目前，基于统计序列的预测方法种类较多，主要聚焦于蒙特卡洛法、粒子滤波法等典型预测方法应用较为广泛[5-6]。

本文以某绝缘栅双极晶体管（Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT）模块为例，阐述了一种基于实际整车工况谱的功率模块寿命预测方法，由功率模块损伤度计算功率模块功率循环次数需求，旨在加速试验过程、缩短试验时间、提高试验效率。

1 路谱计算

路谱计算是对路谱中每个工况点的损耗与结温进行计算。每工况点时间间隔设置为1 s。基于扭矩与转速数据，结合电机特性，可以从整车路谱信息获取电压、相电流、功率因数和开关频率等仿真参数，生成以时间为维度、包含各工况点仿真参数的电机载荷谱。本文以某车型行驶24万km（24万km常作为车辆设计寿命，用来衡量汽车零部件的可靠性）的整车路谱信息为分析条件，以富士某逆导型IGBT为分析对象，模块具体参数如表1所示。

表1 富士某逆导型IGBT参数

参数	25 ℃	175 ℃	参考电压/V	参考电流/A
每脉冲开通损耗E_{on}/mJ	20.8	37.2	400	600
每脉冲关断损耗E_{off}/mJ	31	44.2	400	600
反向恢复损耗E_{rr}/mJ	8.6	15.9	400	600
IGBT等效导通电阻R_{ce}/mΩ	0.74	1.26		
二极管导通压降V_f/V	1.75	1.89		
二极管导通电阻R_f/mΩ	0.93	1.17		

1.1 损耗计算

IGBT模块损耗主要包括IGBT芯片损耗和二极管芯片损耗，主要受电池电压、相电流、功率因数、调制比和芯片结温等因素影响。其中，电池电压、相电流和芯片结温与运行密切工况相关[7-8]。IGBT损耗分为静态损耗和开关损耗（驱动损耗通常可忽略不计）。在静态损耗中，主要考虑导通损耗，正向截止损耗因其影响较小可以忽略不计。

因此，IGBT的总功率损耗P_{IGBT}计算公式为：

$$P_{IGBT} = P_{IGBT_cond} + P_{IGBT_sw} \tag{1}$$

$$P_{Diode} = P_{dio_cond} + P_{rr} \tag{2}$$

式中：P_{IGBT_cond}为导通损耗，P_{IGBT_sw}为开关损耗；P_{Diode}为二极管的功率损耗，主要包含导通损耗P_{dio_cond}和反向恢复损耗P_{rr}。

1.1.1 IGBT与二极管的导通损耗

为了简化IGBT导通损耗的计算过程，理想条件下可假设IGBT的击穿电压和电流存在函数关系。在功率器件的正常工作区中，可近似认为导通压降$V_{CE}(t)$和导通电流$i(t)$之间呈线性关系，计算公式为：

$$V_{CE}(t) = V_{ce0} + R_{ce}i(t) \tag{3}$$

式中：V_{ce0}为门槛电压，R_{ce}为IGBT等效导通电阻。

IGBT导通损耗计算公式为：

$$P_{IGBT_cond}(t) = \frac{1}{T_{sw}}\int_0^{T_c}(V_{ceo} + R_{ce}i(t))i(t)D(t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：$D(t)$为占空比函数，T_{sw}为开关周期，T_c为相电流周期。

IGBT占空比为$D(t)$，则二极管占空比为$1 - D(t)$，得到二极管导通损耗公式为：

$$P_{dio_cond}(t) = \frac{1}{T_{sw}}\int_0^{T_c}(V_{f0} + R_f i(t))i(t)(1 - D(t))\mathrm{d}t \tag{5}$$

式中：V_{f0}为二极管的门槛电压，R_f为二极管的导通电阻。

车辆实际使用空间矢量脉宽调制（Space Vector Pulse Width Modulation，SVPWM），本文为简化计算，使用正弦脉宽调制（Sine Pulse Width Modulation，SPWM）代替，在此调制方法下，占空比$D(t)$和正弦输出电流计算公式为：

$$D(t) = \frac{1}{2}(1 + m\sin(\omega t + \varphi)) \tag{6}$$

$$i(t) = i_p\sin(\omega t) \tag{7}$$

式中：ω为正弦输出电流角频率，m为SPWM的调制比，φ为相位角，$i(t)$为正弦输出电流。

IGBT的导通损耗计算公式为：

$$P_{\mathrm{IGBT_cond}}=\left(\frac{1}{2\pi}+\frac{m\cos\varphi}{8}\right)V_{\mathrm{ce0}}i_{\mathrm{p}}+\left(\frac{1}{8}+\frac{m\cos\varphi}{3\pi}\right)R_{\mathrm{ce}}i_{\mathrm{p}}^{2} \tag{8}$$

同理可以得到，二极管的导通损耗$P_{\mathrm{dio_cond}}$计算公式为：

$$P_{\mathrm{dio_cond}}=\left(\frac{1}{2\pi}-\frac{m\cos\varphi}{8}\right)V_{\mathrm{f0}}i_{\mathrm{p}}+\left(\frac{1}{8}-\frac{m\cos\varphi}{3\pi}\right)R_{\mathrm{f}}i_{\mathrm{p}}^{2} \tag{9}$$

1.1.2　IGBT与二极管的开关损耗

IGBT的开关损耗主要与开通损耗E_{on}和关断损耗E_{off}相关，二极管开关损耗仅考虑反向恢复损耗E_{rr}。IGBT和二极管的开关损耗计算公式为：

$$P_{\mathrm{IGBT_sw}}=f_{\mathrm{sw}}(E_{\mathrm{on}}+E_{\mathrm{off}}) \tag{10}$$

$$P_{\mathrm{rr}}=f_{\mathrm{sw}}E_{\mathrm{rr}} \tag{11}$$

式中：E_{on}和E_{off}分别表示每个脉冲的开通和关断能量损失；E_{rr}为二极管的反向恢复能量，f_{sw}为开关频率。

由于IGBT的开关损耗和二极管反向恢复损耗受功率器件两端电压、流过的电流以及温度的影响，为了获得较为精确的开关损耗值，需要对式（10）和式（11）进行修正：

$$P_{\mathrm{IGBT_sw}}=f_{\mathrm{sw}}\cdot\left(E_{\mathrm{on}}\left(T_{\mathrm{j}}\right)+E_{\mathrm{off}}\left(T_{\mathrm{j}}\right)\right)\cdot\frac{\sqrt{2}}{\pi}\cdot\frac{I_{\mathrm{out}}}{I_{\mathrm{ref}}}\cdot\left(\frac{V_{\mathrm{DC}}}{V_{\mathrm{ref}}}\right)^{K_{\mathrm{v}}} \tag{12}$$

$$P_{\mathrm{rr}}=f_{\mathrm{sw}}\cdot E_{\mathrm{rr}}(T_{\mathrm{j}})\cdot\left(\frac{\sqrt{2}}{\pi}\cdot\frac{I_{\mathrm{out}}}{I_{\mathrm{ref}}}\right)^{K_{\mathrm{i}}}\cdot\left(\frac{V_{\mathrm{DC}}}{V_{\mathrm{ref}}}\right)^{K_{\mathrm{v}}} \tag{13}$$

式中：K_{v}为开关损耗电压关系的指数参数，K_{i}为开关损耗电流关系的指数参数，V_{DC}为母线电压值，V_{ref}为母线电压参考值，I_{out}为输出电流值，I_{ref}为输出电流参考值，E_{on}、E_{off}和E_{rr}均为结温T_{j}的函数，可通过双脉冲测试得到。

1.2　结温计算

电动汽车行驶时，逆变器IGBT模块会产生功率损耗，引起IGBT和二极管芯片温度升高。IGBT芯片温度通常被视为模块结温，结温变化会进一步影响模块的损耗特性，形成电-热耦合作用。在散热路径上，热量主要通过热传导由芯片传递至外壳再至散热器，最终散发至环境。基于热电比拟理论，热传递过程可与电路网络进行类比：热流对应于电流，温差对应于电压，热阻和热容则分别对应于电阻与电容。依此可构建等效热网络模型，用于分析模块的温度动态特性。

在热网络建模中，Cauer网络模型和Foster网络模型是2种常用的热网络表示方法。Cauer网络模型依据器件内部传热的物理机制，其热阻和热容直接对应于器件的各层物理结构。然而，获取Cauer网络参数的过程相对复杂，通常需利用Foster网络进行等效变换，或依据各层材料的物理属性进行繁琐的数值计算。相比之下，Foster网络模型为经验性集中参数网络，其R/C参数虽然不能直观反映器件传热的物理本质，但是很容易从实测得到的瞬态热阻抗Z_{th}曲线上拟合出来，或通过制造商提供的模块数据手册等方式获得，因此该模型往往适用于模块结温仿真[9]。

本文采用Foster热网络模型，对电动汽车驱动系统中IGBT模块的热传导特性进行模拟分析。IGBT模块散热方式主要为水冷，考虑到IGBT模块在电动汽车中的安装布局，本文假设在车辆行驶过程中，冷却液的温度能够保持恒定。功率模块Foster热网络模型如图1所示。

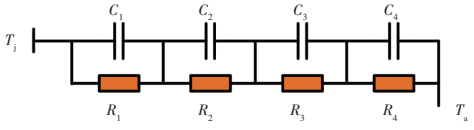


图1　功率模块Foster热网络模型

R/C项的数量即Foster热网络模型的阶数，与模型拟合精度相关。为保证拟合准确性，R/C项的数目需大于等于3个[10]。在综合考虑计算复杂度和精度要求的基础上，本文采用四阶Foster热网络模型，计算公式为：

$$Z_{\mathrm{th}}=\sum_{i=1}^{4}R_i\left(1-e^{\frac{-t}{R_i\cdot C_i}}\right) \tag{14}$$

式中：Z_{th}为热阻抗，R_i和C_i为提取出的瞬态热阻抗参数，t为每工况点时间间隔。

对每工况点进行结温计算，从而得到以时间为维度的结温序列，计算公式为：

$$T_{\mathrm{j}}=(P_{\mathrm{IGBT}}+P_{\mathrm{Diode}})\cdot Z_{\mathrm{th}}+T_{\mathrm{a}} \tag{15}$$

式中：T_{a}为冷却水温，P_{IGBT}和P_{Diode}分别为前文计算得到的IGBT与二极管的功率损耗。

以市区工况、模块开关频率8 K为例，图2、图3分别为该模块发电工况下电流谱以及计算出的结温结果，图4、图5分别为该模块电动工况下电流谱以及计算出的结温结果。

2　雨流计数法

雨流计数法由Matsuishi和Endo于1968年首次提出[11]，被广泛应用于材料结构疲劳以及寿命分析领域，是目前公认最能反映出金属疲劳实际寿命的算法。雨流计数法示例如图6所示。

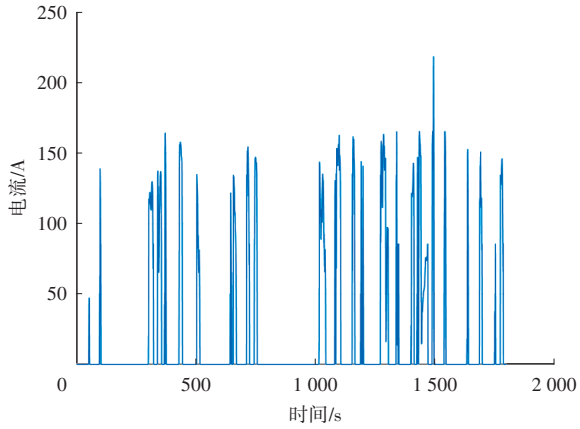


图2　发电机市区工况电流谱

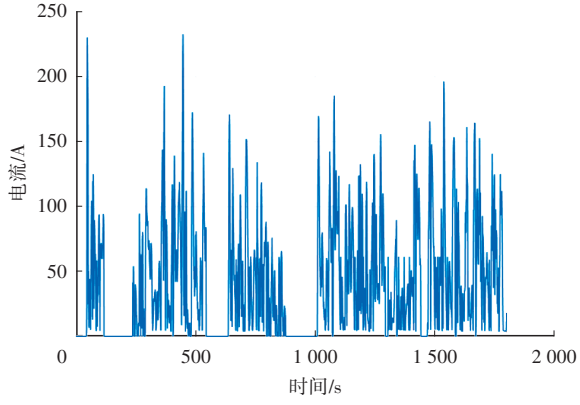


图3　发电机市区工况模块结温

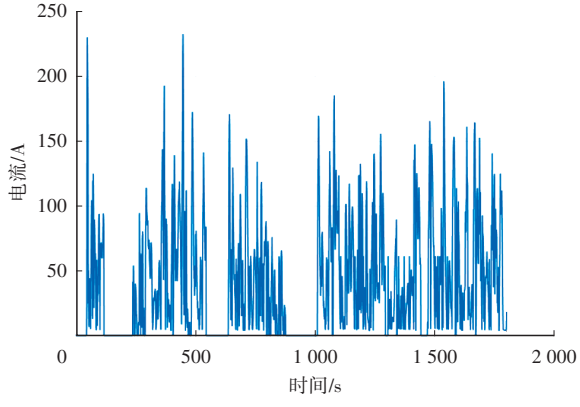


图4　电动机市区工况电流谱

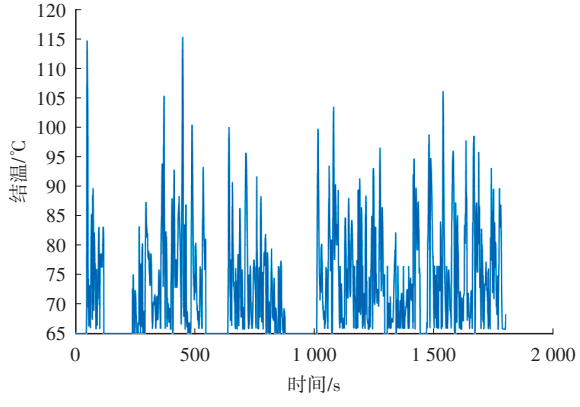


图5　电动机市区工况模块结温

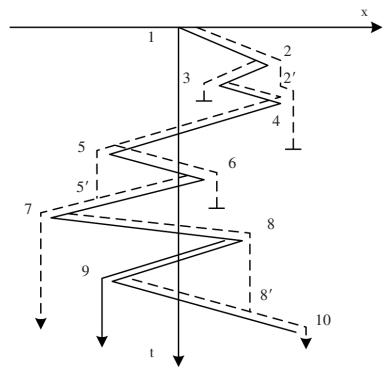


图6　雨流计数法示例[12]

实际工况计算中，需要统计功率器件承受的热载荷数据，即结温波动数据。本文在路谱计算获取的结温序列的基础上，采用四点雨流计数法，分别统计不同工况下的温度循环幅值、均值及其对应的循环次数，以量化温度变化对功率模块造成的累积疲劳损伤。对前文路谱计算获取的结温序列进行雨流计数统计，计算各工况结温序列的幅值均值和循环次数。雨流计数法计算过程和具体的代码实现方法在网络资源中已有广泛详述，本文不再赘述。此处分别以发电机和电动机市区工况、开关频率8 K为例，对图3、图5进行统计，统计结果如图7、图8所示。

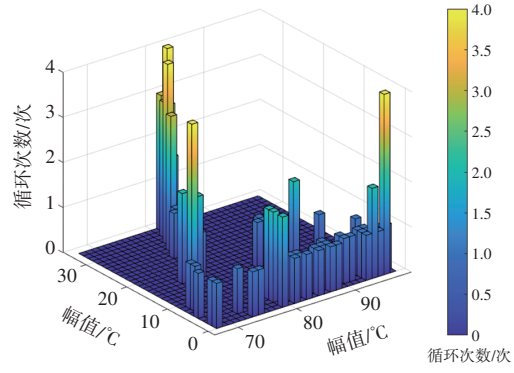


图7　发电机市区工况四点雨流计数法结果

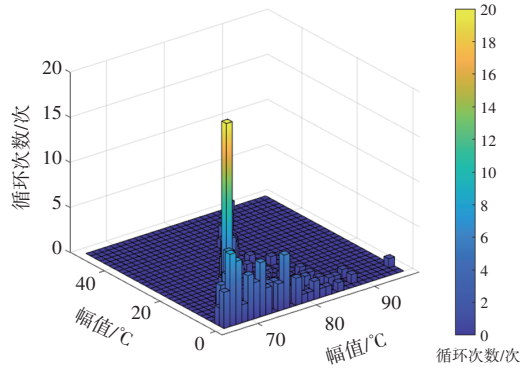


图8　电动机市区工况四点雨流计数法结果

由整体计算结果可知，整个工况周期内存在少量大幅结温波动和大量小幅结温波动，2种工况结温幅值主要分布在0~50 ℃，在0~10 ℃区间最为密集。在

电动机市区工况中，功率模块结温幅值相对较大、分布范围较广，且循环次数远高于发电机市区工况。

3 功率循环测试与寿命函数拟合

功率循环测试是考核功率半导体器件可靠性的重要测试方法，通过模拟器件芯片在工作过程中的发热与冷却循环，加速其老化过程，从而研究功率模块的失效机理并预测其使用寿命。该测试通过施加较大的结温波动，有效缩短试验周期，对可靠性建模具有重要意义。

基于功率循环试验数据，采用Coffin-Manson模型对功率模块寿命函数进行拟合，该模型主要反映结温波动ΔT_j对功率模块寿命的影响，其寿命预测模型的计算公式如下：

$$N_f = m\Delta T_j^{-n} \tag{16}$$

式中：ΔT_j为结温波动幅值，m、n为功率循环试验数据拟合得到的常数参数；N_f为ΔT_j所对应的失效循环次数[1]。该模块寿命函数拟合结果为式(17)，曲线图如图9所示。

$$N_f = 6.879 \cdot 10^{10} T_j^{-4.856} \tag{17}$$

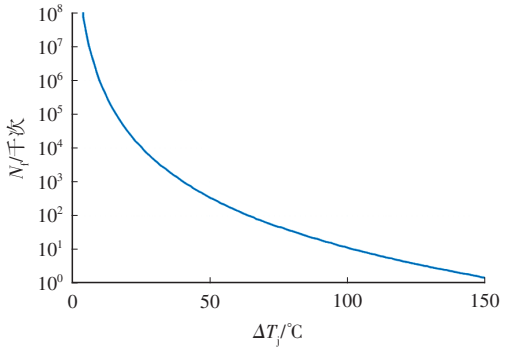


图9 寿命函数曲线

4 损伤度与归一

Miner理论是一种在工程中应用最为广泛的线性累积损伤理论，其表达式为：

$$D = \sum_{\Delta T_j=1}^{\Delta T_{j\max}} \left(\frac{N(\Delta T_j)}{N_f(\Delta T_j)} \right) \tag{18}$$

式中：$N(\Delta T_j)$为当前雨流计数法根据实际路谱温度序列统计出的某ΔT_j对应的循环次数，$N_f(\Delta T_j)$为该ΔT_j在拟合出的寿命函数中所对应的循环次数，二者的比值即为循环比。结合前文拟合出的寿命函数，将第2章雨流计数法统计出的所有ΔT_j所对应的循环比按照此公式累加起来，与指定行驶里程内该工况的循环次数相乘，即可计算出该里程内此工况下的模块损伤度D。

以市区工况为例，开关频率8 K时发电机和电动机模块损伤度分别为0.035和0.071。将各工况损伤度相加即为模块总损伤度，总损伤度>1时，模块完全失效。计算得到开关频率8 K、10 K时发电工况下模块损伤度分别为0.084和0.149；电动工况下模块损伤度分别为0.460和0.833，均小于1，模块正常运行，具体结果如表2、表3所示。

为加速功率循环过程，计算该模块在ΔT_j=100 ℃时，达到与此整车路谱相同损伤度所需的循环次数。经计算，发电工况开关频率8 K、10 K所对应的循环次数分别为1 121次、1 986次，电动工况开关频率8 K、10 K所对应的循环次数分别为6 137次和11 124次。

整车试验对功率模块可靠性进行认可的试验里程为几千到几万公里不等，试验周期通常长达2~5个月，与整车试验所需的复杂工况和较长周期相比，使用这种方法来折算功率模块可靠性试验需求，简化了试验过程，将试验周期缩短到一周左右。虽不能完全替代整车试验，但可以在整车试验之前预先使用此方法对功率模块可靠性进行更准确的评估和测试，以提升整车试验通过率。例如前文该模块电动工况、开关频率10 K损伤度可折算为ΔT_j=100℃下功率循环11 124次，以8 s一个循环为例，仅需3~4天的功率循环测试即可达成整车试验对模块可靠性的要求。

表2 发电机功率模块损伤度计算结果

工况	损伤度（开关频率8 K）	损伤度（开关频率10 K）
市区工况	0.035	0.065
市郊公路	0.003	0.005
平坦公路	0.006	0.011
高速	0.001	0.002
WLTC	0.016	0.029
NEDC	0.001	0.00f3
CLTC	0.022	0.034
合计	0.084	0.149

表3 电动机功率模块损伤度计算结果

工况	损伤度（开关频率8 K）	损伤度（开关频率10 K）
市区工况	0.071	0.126
市郊公路	0.240	0.444
平坦公路	0.030	0.054
高速	0.014	0.025
WLTC	0.024	0.043
NEDC	0.002	0.004
CLTC	0.078	0.138
合计	0.460	0.833

增程式汽车在市区中短途行驶、电池电量充足时，由动力电池驱动电动机，提供整车驱动功率需求，此时发电机不参与工作[13]。当汽车处于长途高速等工况，电池电量消耗到一定程度时，发电机启动，通过发动机带动发电机发电，以此驱动电动机，多余功率为电池充电，当电池电量恢复到设定阈值，则关闭发电机，仍使用电池驱动电动机。以此达到提升续航能力，增加车辆的续驶里程。

在此过程中，发电工况和电动工况的功率模块损伤度存在明显差异，由于发电机工况较为稳定，结温波动不大，在相同开关频率下，功率模块在发电工况的损伤度远小于电动工况损伤度；在相同工况下，开关频率对模块损伤度的影响较大，功率逆变器的总功率损耗随着开关频率的增加而线性增加[14]。随着实际应用场景不同，对功率模块性能要求有所区别。

5 结束语

本文介绍了一种基于整车路谱的功率模块寿命预测方法，功率模块寿命预测以及功率循环次数计算的整体流程：(1)输入电机载荷谱和模块手册进行路谱计算，输出结温序列；(2)雨流计数法进行结温幅值的循环次数统计；(3)导入功率循环试验中拟合出的寿命函数，计算模块累积损伤度。

通过对比同一模块在发电与电动工况下的损伤度，本文分析了不同应用场景下对模块的性能要求。计算过程中主要考虑到结温波动对功率模块寿命的影响，依赖于电热模型和疲劳损伤理论，可能无法完全考虑到功率模块在实际应用中影响功率模块寿命的众多因素和复杂的失效机理，导致计算精度不足。

在后续研究中，可以利用大数据云端获取实时整车路谱信息，采用在线雨流计数法，对功率模块进行实时健康监测。进一步引入以数据驱动的寿命预测方法，如机器学习、时间序列分析等先进技术，有望更准确地描述功率模块的退化过程，从而提升寿命预测的精确性与实用性。

参 考 文 献

[1] 唐圣学, 张继欣, 姚芳, 等. IGBT模块寿命预测方法研究综述[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 177-194.

[2] YANG Y, WANG H, BLAABJERG F, et al. Mission Profile Based Multi-disciplinary Analysis of Power Modules in Single-phase Transformerless Photovoltaic Inverters[C]// 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications. Lille, France: EPE, 2013: 1-10.

[3] SINTAMAREAN C, BLAABJERG F, WANG H, et al. Real Field Mission Profile Oriented Design of A SiC-based PV-inverter Application[C]// 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, USA: ECCE, 2013: 940-947.

[4] CHOI U M, M K, BLAABJERG F. Validation of Lifetime Prediction of IGBT Modules Based on Linear Damage Accumulation by Means of Superimposed Power Cycling Tests[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(4): 3520-3529.

[5] REIGOSA P D, WANG H, YANG Y H, et al. Prediction of Bond Wire Fatigue of IGBTs in a PV Inverter Undera Long-Term Operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 7171-7182.

[6] HAQUE M S, CHOI S, BAEK J. Auxiliary Particle Filtering-Based Estimation of Remaining Useful Life of IGBT[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2693-2703.

[7] 杨洪波, 王征宇, 黄宜山. IGBT损耗和结温计算研究[J]. 大功率变流技术, 2016(1): 30-33+52.

[8] 吴宇轩, 黄永章, 邓二平, 等. 功率器件热网络建模综述[J]. 电工技术, 2022(17): 12-22.

[9] 姚芳, 王少杰, 陈盛华, 等. IGBT功率模块瞬态热阻抗测量方法研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(9): 103-105.

[10] BAGNOLI P E, CASAROSA C, DALLAGO E, et al. Thermal Resistance Analysis by Induced Transient (TRAIT) Method for Power Electronic Devices Thermal Characterization. II. Practice and Experiments[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(6): 1220-1228.

[11] MATSUISHI M, ENDO T. Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress[J]. Japan Society of Mechanical Engineers, 1968, 68(2): 37-40.

[12] 董乐义, 罗俊, 程礼. 雨流计数法及其在程序中的具体实现[J]. 航空计测技术, 2004(3): 38-40.

[13] 刘欣, 李春. 新能源汽车技术现状及发展趋势浅析[J]. 汽车零部件, 2021(8): 108-111.

[14] SONG Q, WANG W, ZHANG S, et al. The Analysis of Power Losses of Power Inverter Based on SiC MOSFETs[C]// 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM). IEEE, 2019: 152-157.

（责任编辑 **明慧**）