·汽车芯片技术专题·

新能源汽车芯片任务剖面综述*

吴宇立[1] 周昕[1] 姜海滔[1] 陈杰[1] 陆晓磊[2]

（1.中汽院（江苏）汽车工程研究院有限公司，苏州 215010 2.中国汽车工程学会，北京 102600）

【欢迎引用】吴宇立，周昕，姜海滔，等．新能源汽车芯片任务剖面综述[J]．汽车文摘，2026(9)：1-12.

【Cite this paper】WU Y L, ZHOU XI, JIANG H T, et al. Review on Mission Profiling for New Energy Vehicle Chips[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(9): 1-12.

【摘要】为了突破传统车规芯片任务剖面体系在新能源汽车高压化、宽禁带器件规模化应用背景下的适配瓶颈，以AEC-Q100 Rev-J为基准，系统综述了车规芯片任务剖面的理论体系、标准化范式、载荷参数差异、可靠性评估模型及工程应用边界。多维度对比燃油汽车与新能源汽车芯片载荷差异，研究表明：新能源汽车芯片热载荷时长较燃油汽车提升约10倍，工作电压达800 V，功率器件开关频率提升约20倍；传统车规芯片可靠性评估无法适配新能源汽车多物理场耦合、长周期老化和宽禁带器件独特失效机理。目前，车规芯片可靠性认证正从“通用符合性证明”向“应用适用性证明”转型。未来，构建精细化动态多尺度任务剖面、完善宽禁带器件适配评估体系，将成为该领域待突破的核心方向。

关键词：新能源汽车；车规级芯片；任务剖面；可靠性评估；多物理场耦合；宽禁带半导体

中图分类号：U463.67　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20260044

Review on Mission Profiling for New Energy Vehicle Chips

Wu Yuli[1], Zhou Xin[1], Jiang Haitao[1], Chen Jie[1], Lu Xiaolei[2]

（1. China Automotive Engineering Research Institute (Jiangsu) Co., Ltd., Suzhou 215010 2. China Automotive Engineering Society, Beijing 102600）

【Abstract】To address the adaptability bottlenecks of traditional automotive-grade chip mission profile frameworks in the context of high-voltage electrification and the large-scale deployment of wide-bandgap devices in new energy vehicles, this paper conducts a systematic review of the theoretical framework, standardization paradigms, load parameter discrepancies, reliability assessment models, and engineering application boundaries of automotive chip mission profiles, based on AEC-Q100 Rev-J. The fundamental differences in chip loading characteristics between conventional fuel vehicles and new energy vehicles are comparatively analyzed across multiple dimensions. The study reveals that the thermal load duration of chips in new energy vehicles is approximately 10 times longer than that in fuel vehicles, with operating voltages reaching 800 V and power device switching frequencies increasing by approximately 20 times. Traditional automotive chip reliability assessments are inadequate for new energy vehicles, failing to address multi-physics coupling, long-term aging, and the unique failure mechanisms of wide-bandgap devices. Currently, the reliability certification of automotive-grade chips is shifting from “general compliance demonstration” to “application suitability demonstration”. In the future, constructing refined, dynamic, and multi-scale mission profiles, along with improving the suitability assessment system for wide-bandgap devices, will become critical directions requiring breakthrough in this field.

Key words: New energy vehicles, Automotive-grade chips, Mission profile, Reliability assessment, Multi-physics coupling, Wide bandgap semiconductors

0 引言

在全球气候治理与低碳法规持续落地的背景下，电动化逐步成为汽车产业重要演进方向[1]。随着新一代电动化平台产业化落地，整车电子电气架构集中化演进、高压系统安全管控、动力电池热管理以及大功率电驱系统集成等关键技术面临严峻的工程化挑战[2-3]。产业升级同步提高了车规级芯片等核心元器

*基金项目：车规级计算芯片（SoC）综合测评技术研究及应用（0001KTCP20241600-01）。

件的可靠性服役指标。

新能源汽车凭借其在碳减排与能源效率方面的比较优势，已成为全球主要国家的重点发展方向[4]。我国新能源汽车产业发展迅速，2025年我国新能源汽车销量达1 649万辆，新车市场渗透率升至47.9%；纯电动车型占据市场主流，插电混动车型增速显著[5]。随着产业从规模扩张向技术升级转型，“电动化”与“智能化”的技术融合正驱动整车电子电气架构向高集成度、高复杂度方向演进。

在此背景下，汽车芯片的可靠性成为保障整车功能安全与预期功能安全的核心要素。与传统消费电子芯片相比，汽车芯片需在-40~165 ℃的宽温域极端环境下维持功能完整性，其设计使用寿命通常需覆盖10~15年，且对失效时间（Failure In Time，FIT）的要求为器件每小时发生故障次数低于10^{-8}[6]。任务剖面作为界定元器件全生命周期内所承受环境载荷与功能载荷集合的关键参量，是整车企业联合零部件供应商开展车规芯片正向设计与验证的通用规范性依据[7]。该参数体系完整覆盖元器件从制造到装车应用全生命周期的静态与动态载荷，包含温度、电压、机械应力、湿度等工况参数。依托汽车芯片标准化任务剖面，整车企业与上游供应商可实现高效技术协同，切实保障芯片在车辆实际运行工况下的服役可靠性。

当前国内外研究大多聚焦于燃油汽车标准工况建模与单一应力加速模型拟合，针对新能源汽车高压化、长时间待机、宽禁带器件应用下的载荷机理解构、多物理场耦合表征、动态时序剖面构建等方向仍存在不足，且AEC-Q100、ZVEI等传统标准体系对新能源汽车芯片的适配性不够。基于此，本文系统梳理车规芯片任务剖面的理论体系、标准化范式、载荷参数差异、可靠性评估模型及工程应用边界，分析现有研究局限与产业技术瓶颈，研判未来发展趋势，为我国车规芯片可靠性标准完善与国产化替代提供理论支撑。

1 任务剖面基础理论体系与标准化规范

1.1 任务剖面及其层级架构

任务剖面是打通整车系统需求与器件级可靠性验证的关键，其参数架构与建模逻辑直接决定失效机理分析、加速试验方案设计与器件鲁棒性量化评估的科学性。基于标准化的任务剖面，整车级使用寿命指标能够自上而下逐级拆解为芯片端可量化、可复现的载荷边界，构成了车规半导体器件正向研发与合规认证的必要输入。

1.1.1 任务剖面的定义

任务剖面定义为半导体器件从出厂到整车全生命周期内，所承受的环境、电气、机械等各类载荷的时序与统计表征，覆盖运输、存储、整机装配及车载运行全流程工况[8]。任务剖面将系统级可靠性指标逐层分解为器件可量化、可测试的技术参数，是车规芯片可靠性设计与认证的基础输入。通用芯片面向行业典型工况建模，专用集成电路（Application-Specific Integrated Circuit，ASIC）依据定制化整车场景单独制定剖面参数。

1.1.2 任务剖面的核心组成

车规芯片任务剖面由全生命周期基准参数、多维度环境应力载荷、器件服役全周期工况3大模块构成，如图1所示。

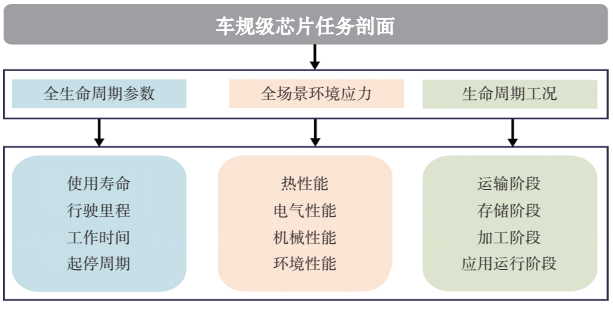


图1 车规级芯片任务剖面构成要素

（1）整车全生命周期相关基准参数：使用寿命、行驶里程与发动机工作时间等相关参数是任务剖面建模的基础量化边界，核心指标如表1所示。

表1 整车全生命周期核心参数[8]

核心参数	含义	数值
使用寿命/年	车辆的设计使用寿命	15
行驶里程/km	车辆在使用寿命内的总行驶里程	600 000
发动机工作时间/h	发动机运转的总时长	12 000
发动机关闭时间/h	发动机停止但部分电子系统仍工作的时间	3 000
非运行时间/h	车辆完全静置的时间	116 400
起停循环次数/次	发动机起停的总次数	50 000

整车基础参数明确了芯片服役时间与工况基准。受行车习惯、运行工况及地域气候差异影响，车载芯片结温呈现明显动态波动特征，温度循环成为诱发器件热机械疲劳的关键诱因。文献[9]研究表明，不同气候区域的温变幅值与循环频次存在显著分化特征。如图2所示，寒冷地区以大温差低频循环为主，炎热地区以小温差高频波动为主，该分布规律可为芯片热疲劳评估提供数据支撑。

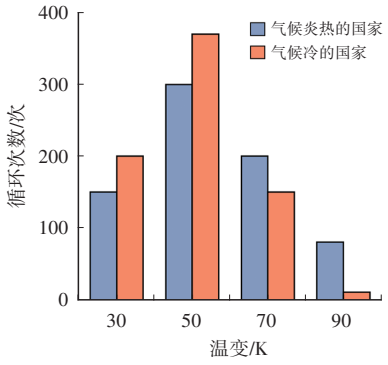


图2　极端气候下芯片温度波动频次分布[2]

（2）环境条件与应力载荷因素：环境应力是驱动车载芯片性能退化与失效的外部诱因，按照载荷属性划分为热、电气、机械、湿热腐蚀4类载荷[10]，各类载荷同时包含稳态恒定、动态交变、空间梯度分布，关键考核指标及失效影响如表2所示。

表2　环境条件与应力载荷因素关键参数

应力类型	核心测试指标	典型影响与要求
热性能	整车安装环境温度、电子控制单元内部温度、器件结温等	需考虑季节/日间极值、器件自发热、安装与冷却方式；温度波动引发热机械应力
电气性能	电压、电流、瞬态能量、磁场	含静态/动态/瞬态载荷，覆盖发动机起停、冷起动、应急搭电等特殊工况；含数字/模拟器件专属模式
机械性能	振动冲击、压力	易引发键合线疲劳、焊点开裂、连接松动；振动影响与器件安装方式强相关
其他	腐蚀性化学物质、湿度（地域差异化）电磁/粒子辐射	湿度需关注与温度协同效应；辐射影响因器件类型（逻辑/存储）存在差异

热性能是驱动汽车芯片老化失效的首要载荷类型。以寒冷气候典型场景为例，芯片环境温度分布特征可直观反映长期热载荷演化规律，为热老化失效机理解析提供量化支撑。寒冷气候芯片温度概率分布如图3所示，呈现了不同温度区间的时间占比特征。

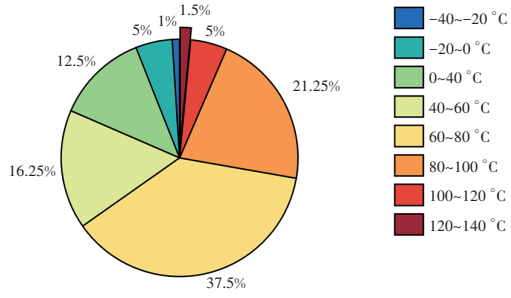


图3　寒冷气候下芯片环境温度分布特征

（3）器件全生命周期阶段的工况特征：任务剖面建模需覆盖半导体器件运输、存储、整机加工、车载运行4大阶段[8]。各环节产生的振动、温湿度及装配机械应力均需纳入表征范围，其中车载运行工况载荷最复杂、损伤贡献占比最高，是任务剖面构建的核心环节。

1.2　任务剖面的标准化格式

为实现整车、零部件与半导体企业之间载荷数据跨主体、跨层级高效互通，需建立统一的任务剖面标准化规范。Sohrmann等[7]提出MPFO任务剖面标准化格式框架，可实现整车到元器件级自上而下与自下而上的双向层级映射，兼容解析公式、统计表格、时序直方图等多种数学表达，时间尺度覆盖毫秒级功率循环至年级全生命周期。

当前MPFO格式仅适配传统燃油车通用工况，尚未针对新能源800 V高压平台、SiC高频开关、多物理场耦合等新型工况制定扩展规范，难以满足新能源车型定制化芯片剖面的工程复用需求。

在车规芯片认证层面，AEC-Q100 Rev-J[11]附录7首次将任务剖面纳入芯片可靠性认证体系，搭建起工况剖面定义、表征与加速测试匹配的技术框架，但该标准同样依托传统燃油汽车服役参数编制，未形成适配高压宽禁带器件的专项规范，无法支撑新能源汽车功率芯片的精细化可靠性验证。

1.3　AEC-Q100在任务剖面中的应用

ZVEI验证规范、MPFO标准化剖面格式均基于传统燃油汽车工况搭建，前者缺少量化剖面定义、后者仅解决数据互通，两者均未建立实车服役载荷向芯片加速试验的转化链路。AEC-Q100 Rev-J附录7新增任务剖面相关要求，从芯片认证维度补齐上述短板，是对传统任务剖面体系的重要补充升级。

AEC-Q100 Rev-J[11]版本附录7正式引入任务剖面机制，将车规芯片认证从通用“符合性评价”升级为面向实际工况的“适用性评价”，使实验室加速测试与真实服役载荷实现精准关联匹配。

1.3.1　任务剖面的核心参数

以燃油汽车15年设计寿命为基准，燃油汽车芯片任务剖面量化参数如表3所示。

采用时间加权平均法计算芯片平均结温：

$$\bar{T}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{j,i} \times t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i} \tag{1}$$

式中：$\bar{T}_j$为芯片时间加权平均结温，n为温度区间总数量，$T_{j,i}$为第i个结温区间的代表温度；t_i为芯片在第i个结温区间的累计工作时间。

结合全生命周期工作与静置时长占比，通过式（2）进一步加权获得平均环境温度：

$$\bar{T}_{env}=\frac{T_{work}\times\bar{t}_{j}+T_{off}\times\bar{t}_{off}}{T_{total}} \quad (2)$$

式中：$\bar{T}_{env}$为平均环境温度，T_{work}为芯片有效工作时长，$\bar{t}_{j}$为平均结温，T_{off}为非工作时间，$\bar{t}_{off}$为非工作时段环境温度，T_{total}为全生命周期时长。

表3　燃油汽车芯片任务剖面核心参数[11]

类别	核心参数	量化指标
基础寿命	使用寿命/年	15
	使用寿命内行驶里程/km	600 000
	使用寿命内平均工作时间/h	12 000
	使用寿命内总工作时间/h	131 400
热载荷	芯片平均温度变化范围/℃	76
	芯片平均结温/℃	87
环境载荷	平均环境温度/℃	32
	平均环境湿度/%	74
工况频次	使用寿命内起停周期数/次	54 750

此外，整车在15年设计寿命内起停周期累计54 750次，可用于量化芯片在频繁起停工况下的循环应力水平。上述任务剖面参数为AEC-Q100可靠性测试的工况设计与应力等级匹配提供了核心依据。

1.3.2　基于任务剖面的可靠性测试加速模型

AEC-Q100标准依据车规芯片典型服役载荷特征，建立了失效机理、测试项目与加速模型的对应体系，可将实际整车工况等效转换为实验室加速试验条件，为芯片寿命评估提供标准化依据，各载荷匹配关系如表4所示。

表4　车规芯片可靠性测试加速模型及核心参数[11]

核心载荷	测试项目	对应加速模型	核心参数
热老化	高温工作寿命	Arrhenius	活化能/eV：E_a = 0.7 平均结温/℃：T_u=87 试验温度/℃：T_{test}=125
热机械循环	温度循环	Coffin-Manson	疲劳指数：m = 4 温变幅度/℃：ΔT_u = 76 试验温度/℃：ΔT_t = 205
湿度腐蚀1	温湿度偏置	Hallberg-Peck	Peck指数：p = 3 测试温度/℃：T_{test}=85
湿度腐蚀2	高加速蒸汽测试	Hallberg-Peck	Peck指数：p = 3 测试温度/℃：T_{test}=130

上述映射关系中，各加速模型的定量表达形式阐述如下。

Arrhenius模型是描述温度应力与失效速率关系的经典加速老化模型，基于化学反应速率随温度的指数规律，用于表征温度对器件老化速率的加速作用[12-14]，温度加速因子满足：

$$A_f=\exp\left[\frac{E_a}{K_B}\left(\frac{1}{T_u}-\frac{1}{T_{test}}\right)\right] \quad (3)$$

式中：E_a为热老化活化能，K_B为玻尔兹曼常数，T_u为实际工况平均结温温度，T_{test}为实验室加速测试绝对温度。

Coffin-Manson模型是温度循环应力下器件疲劳损伤的经典可靠性模型，用于表征循环温差引发的热机械疲劳失效，广泛应用于温度循环测试的寿命评估[15-16]。该模型用于表征循环环境温度差引起的热机械疲劳失效，热机械循环加速因子满足：

$$A_f=\left(\frac{\Delta T_t}{\Delta T_u}\right)^m \quad (4)$$

式中：ΔT_t为加速测试温变幅度，ΔT_u为实际工况温变幅度，m为与材料相关的疲劳指数。

Hallberg-Peck模型用于描述温湿度耦合作用下的腐蚀失效，可评估电子元件、材料及产品在恶劣湿热环境下的耐久性与寿命[17]，温湿耦合腐蚀加速因子可表征为：

$$A_f=\left(\frac{H_t}{H_u}\right)^p\times\exp\left[\frac{E_a}{K_B}\left(\frac{1}{T_u}-\frac{1}{T_{test}}\right)\right] \quad (5)$$

式中：H_u、H_t分别为实际工况湿度与测试湿度，p为湿度敏感指数。

AEC-Q100依托上述3类经典加速模型，分别实现了热老化、热机械疲劳、湿热腐蚀3类典型失效的实验室加速等效，所给出的典型参数具有明确的工程适用性与标准统一性，能够为汽车芯片全生命周期可靠性评估提供统一的模型与量化依据。

1.3.3　三层递进的决策路径评估方法

AEC-Q100 Rev-J附录7建立了三层递进的可靠性评估决策体系，可依据芯片技术成熟度与测试可行性，选取适配的验证方案，具体路径如下：

（1）标准通用测试：适用于工艺成熟、失效机理与加速模型已充分验证的车规芯片。基于任务剖面完成载荷等效计算，确认标准测试应力与时长可覆盖器件全生命周期可靠性要求，直接沿用现有标准开展认证测试。

（2）工况定制测试：当芯片采用新型材料与工艺、存在未知失效机理，或标准测试无法等效实车全周期载荷损伤时，需依托任务剖面与失效物理模型，针对性调整测试应力、时长与考核项目，实现真实工况精准复刻。

（3）底层稳健性验证：针对整机级测试存在工程局限的场景，包括多类失效机理耦合、折算测试周期过长、成品端失效信号难以监测等情况，可复用晶圆

级、封装级前期可靠性数据，通过器件固有鲁棒性完成间接可靠性论证。

2 新能源汽车芯片任务剖面：演进与挑战

车规芯片任务剖面是将整车可靠性要求分解至器件层级载荷的核心载体。以AEC-Q100为代表的行业规范，基于燃油汽车间歇运行、单物理场作用及硅基器件失效特征构建了成熟的评价体系。然而，新能源汽车高压架构、全天候待机模式与宽禁带器件的应用，彻底改变了芯片服役环境。尽管AEC-Q100 Rev-J补充了任务剖面相关内容，但其核心参数与模型仍沿用燃油汽车基准，无法适配新能源汽车多场耦合、高频瞬态与长周期老化的工况，导致认证结果与实车可靠性存在偏差。本章对比2类车型芯片的载荷差异，剖析现有标准与建模缺陷，总结当前研究的难点与技术挑战。

2.1 任务剖面参数体系的系统性重构

依托标准化量化参数，任务剖面可实现车规芯片全生命周期多维度服役应力的定量表征。基于AEC-Q100 Rev-H搭建的5类载荷评价框架适配燃油汽车间断运行、应力交变幅度偏低的工况特点，但无法适配新能源汽车高压架构与全域带电待机催生的复杂应力环境。

开展燃油汽车与新能源汽车芯片任务剖面参数对标分析，整合车规标准、实车测试工况及相关公开文献权威数据集，并完成多气候工况试验校验（表5）。结果表明，新能源车载芯片服役应力产生结构性演化，集中表现为有效服役时序延长、稳态应力幅值提升、瞬态交变应力占比增大。服役周期的量级提升，使慢速累积型退化损伤成为器件失效关键诱因，进而偏离传统硅基芯片可靠性评估的时间适用边界。

现有载荷表征框架存在机理短板：参数统计以稳态工况为主，缺少载荷时序演化规律与芯片内部空间非均匀应力的精细化表征；同时忽略多物理场协同退化机理，尚未针对宽禁带半导体独有的耐受特性与失效规律优化参数设置。

2.2 单场载荷的研究进展与局限

2.2.1 热载荷特征

热应力是决定车用电子器件长期可靠性的核心因素[18]。研究表明，新能源汽车与燃油汽车的热环境存在本质差异：一方面，由于电驱动系统相比内燃机功耗更低，发动机舱热负荷显著降低[19]；另一方面，电池充电和持续电压应力使电池管理系统（Battery Management System，BMS）、电机控制器等核心芯片的运行时间大幅增加[19]，导致热应力来源从发动机外部辐射热转变为功率半导体器件内部的导通损耗与开关损耗[20]。

表5 燃油汽车与新能源汽车芯片任务剖面参数对比分析

载荷类别	参数	燃油汽车	新能源汽车
服役寿命	15年总运行时长/h	12 000	120 000~130 000
	非运行时长/h	119 400	91 400
热载荷	工作温度范围/℃	-40~125	-40~140
	热量来源	外部辐射热	自发热（功率损耗）
电载荷	电压架构	单一复合域	高低压复合域
	开关频率/kHz	10~20	最高200
机械载荷	振动主频区间/Hz	100~200	10~100
	振动幅值	较高	较低
	主控失效诱因	高频振动	热-机械耦合应力
环境载荷	核心老化机理	常规温湿老化	Peck模型主导温湿耦合老化
器件特性	最高长期工作结温/℃	150	150~175
	高温敏感失效机理	常规热老化	栅氧界面缺陷累积、参数漂移

在工作温度区间上，新能源汽车芯片需满足车规Grade-0（-40~150 ℃）或Grade-1（-40~125 ℃）的宽温要求[11]。参考NXP发布的扩展任务剖面（Extended Mission Profile，EMP）实测数据，新能源汽车核心芯片全生命周期结温覆盖-40~140 ℃，高低温区间驻留时长显著高于燃油汽车；15年全生命周期累计工作时长可达130 000 h，为传统燃油汽车工作时长（12 000 h）的10倍以上[21]。

受新能源汽车芯片常与电池连通的架构影响，BMS、整车电控单元在车辆驻车及电池均衡过程中始终保持工作状态并持续发热，使其高温运行时段占比明显偏高。在此工况下，新能源汽车芯片主要面临3类热载荷：长期通电形成的持续性低热应力会缓慢累积损伤；功率器件损耗引发的自热效应将造成结温快速上升；而大功率快充带来的瞬时热冲击，则是器件发生热疲劳失效的重要诱因。

现阶段相关研究多聚焦于芯片温度统计分布规律，针对长时低热累积、快充瞬态热冲击的耦合作用机理研究仍较为匮乏，同时行业尚未面向800 V高压平台与SiC器件建立专用热任务剖面标准。

2.2.2 电载荷参数

电气载荷的高压升级、工况动态化与开关高频

化是新能源汽车与传统燃油汽车芯片任务剖面最核心的差异。随着400 V/800 V高压平台规模化应用，整车电气架构形成12 V低压车载域、400 V/800 V动力高压域及芯片内核微电压的多层级分布形式[22]。对于800 V系统，行业普遍采用1 200 V级功率半导体器件以补偿瞬态过冲，先进方案甚至可保证高达1 400 V的瞬态耐压，电压斜率超过20 kV/μs，输出电流可降低约12%[23]。在此基础上，车辆行驶工况的动态变化与大功率快充的瞬时大电流注入，进一步使芯片长期承受幅值波动与瞬态冲击叠加的电气应力。

在开关特性层面，传统硅基绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）的开关频率通常限制在20 kHz以下，而SiC MOSFET凭借更小的寄生电容和更高的电流、电压瞬态变化速率，可将开关频率提升至200 kHz以上[24]。频率跃升虽可缩小无源元件体积，却显著增加了开关瞬态中的电压过冲与高频振荡（由寄生电感与器件较高的电压变化率耦合引发）。这不仅降低了电磁兼容性，还会因开关损耗与结温耦合使器件加速老化并最终导致失效[25]。

上述技术特征使电气应力呈现幅值-频率-温度深度耦合的复杂形态，然而现有任务剖面研究通常将电压、电流应力独立处理或简化为恒定幅值循环，忽视了800 V平台下快充插枪瞬间的电流陡升、SiC器件关断过冲以及低温冷启动时电池内阻剧增引发的电压塌陷-恢复尖峰等瞬态事件的时序耦合效应。这种简化导致基于Miner线性累积损伤理论的寿命预测结果与真实失效数据存在显著偏差，亟需建立考虑瞬态幅值-频率-温度多场耦合的电气任务剖面重构方案。目前行业对电压等级区间虽已达成统一认知，但针对高压瞬态尖峰、高频电压变化率与变工况时序特征的量化建模仍不够完善，难以精准支撑电气任务剖面的精细化构建。

2.2.3　机械载荷参数

车载芯片所受机械载荷主要包括整车振动、结构共振与热-机械耦合应力3类。相较于传统燃油汽车，新能源汽车无内燃机高频激振，整体振动频谱分布更为平缓。而热循环引发的二次结构应力成为芯片机械失效主控因素[26]。

燃油汽车的振动能量主要来源于发动机，集中在中高频段。然而，而新能源汽车的振动场由电机运转、底盘响应与路面激励共同耦合形成，能量主要分布于10~100 Hz低频区间[27]。台架测试表明，电动汽车驾驶员座椅处综合振动加速度有效值仅为0.002 1 m/s^2，显著低于燃油汽车加速度有效值（0.006 7 m/s^2）；在车速为30 km/h的城市工况下，电动汽车Y轴振动加速度（0.018 m/s^2）较燃油汽车（0.028 m/s^2）降低约36%[27]。尽管其振动幅值相对更低，但长周期作用下仍易在芯片封装结构内部形成低频疲劳累积损伤。在车辆充电与静置工况下，外部路面振动大幅衰减，但功率模块仍承受电池系统昼夜循环充放热引发的热-机械耦合应力，在任务剖面建模过程中必须纳入考量。

芯片在快充、加速与驻车冷却过程中结温大幅交变，半导体、封装基板与焊料层热膨胀系数失配，持续诱发交变机械应力，易造成焊料蠕变、界面分层及键合线断裂[28]。功率循环工况下焊料层的蠕变-疲劳交互是主导退化机制，短时间加热阶段蠕变占主导，而长时间高温下则表现为复杂的蠕变-疲劳耦合失效过程[29]。功率循环测试表明，在-40~150 ℃温度循环条件下，焊料层热循环疲劳与键合线失效是车用功率模块最典型的2类失效形式[28]。针对不同车载应用场景的对比研究表明，布置于发动机舱内的功率模块因昼夜温差波动更为剧烈，其焊料接头退化速率显著高于乘客舱环境。在汽车发动机舱典型工况下，模块平均疲劳寿命较极端航空环境延长36%，但应力损伤始终集中于焊料接头外围区域，该位置成为可靠性加固的关键部位[30]。此外，芯片还需承受路面冲击、加减速惯性以及装配运输过程中的静态挤压载荷，机械耐受特性必须满足车规可靠性要求。除此之外，机械载荷并非孤立存在，只有结合温度、电气载荷开展多物理场耦合分析，才能精准复现芯片真实的服役应力状态。然而，现有热疲劳失效研究多聚焦于单一失效模式，对微焊点在宽温域下的热疲劳特性及界面结构演化行为缺乏系统量化，限制了任务剖面中机械损伤的精确迭代预测[31]。

现有研究大多侧重于整车层级振动性能的宏观横向对比，忽略了芯片封装级长周期低频疲劳损伤与电池热诱导附加应力的定量量化研究。而且，热-机械耦合交互机理仅停留在定性分析层面，暂无成熟的全生命周期时序应力迭代与疲劳损伤预测模型，最终导致机械载荷任务剖面精度不足，难以满足新能源汽车芯片实车可靠性评估需求。

2.2.4　环境载荷参数

环境载荷是影响新能源汽车芯片长期服役可靠性的关键外部因素，主要包括温湿老化、化学腐蚀与电磁干扰3类应力形式。各环境因子并非独立作用，而是与热、电、机械载荷形成多场耦合，加速芯片封装

劣化与内部结构失效。相较于传统燃油汽车停机断电后应力快速衰减，新能源汽车长期带电待机，芯片持续处于宽温域工况，温度场直接决定湿度与腐蚀应力的累积演化规律。

基于英飞凌实测的BMS芯片全生命周期任务剖面如图4所示[32]。芯片15年服役周期内工作时长40 000 h、非工作静置时长91 400 h；全年60 ℃以上累计驻留超65 000 h，非工况占比达91%，80~85 ℃高温区间累计服役8 226 h。这种由电池热管理带来的长期高温驻留特性是新能源汽车独有的环境载荷累积窗口期，与燃油汽车停机快速降温模式存在本质差异。

温湿耦合老化遵循Peck模型机理，环境温升与湿度协同加速Cu-Al键合线等金属互连结构的电化学腐蚀[33]。道路盐雾等腐蚀介质通过氯离子扩散引发局部电偶腐蚀并形成腐蚀坑；高湿度同时促进封装聚合物吸湿塑化，导致界面粘附强度下降与分层失效[34]。现有基于失效物理的可靠性模型仅能部分描述单一环境因子下的退化行为，而多因子耦合的复杂性限制了其长期服役性能评估的准确性。

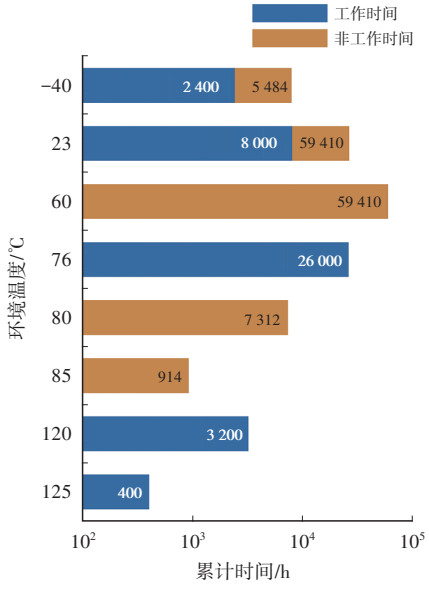


图4　BMS芯片温度-时间分布[32]

车载电磁干扰主要源于功率变换器高频开关瞬态，SiC MOSFET较高的电流、电压变化率[32]与系统电路寄生参数相互作用，引发电压浪涌与振荡，在2~50 MHz频段产生高于硅基IGBT的电磁干扰（Electromagnetic Interference，EMI）频谱幅值[35]。

然而，上述环境载荷特征在实车中并非独立演化。现有研究多聚焦温湿、腐蚀或电磁的单一因子分析，对高温驻留-凝露湿度-盐雾腐蚀多因子协同及热-电-机械耦合失效机理探究不足，且缺少基于实测任务剖面、覆盖不同服役工况的差异化环境载荷模型，难以支撑车载芯片环境可靠性的精细化表征与工程应用。

2.3　多物理场耦合载荷特征

新能源汽车芯片长期处于电、热、机械、电磁多物理场叠加环境，各类载荷呈现强非线性耦合特征，相互作用并放大应力效应，显著加快器件老化速率。

电-热耦合是功率芯片最主要的耦合作用机制。器件工作损耗转化为焦耳热致使结温升高，而结温波动会在封装层间诱发循环热应力，加速键合线脱落与焊料分层失效[36]。在温度循环工况下，功率模块焊料层与芯片界面因热膨胀系数失配承受剧烈热机械应力，疲劳累积显著加速[37]。

宽幅温度交变驱动形成热-机械耦合效应，温度循环引发封装结构热膨胀系数失配，持续产生交变机械应力[38]。同时，焊料层累积损伤表现为键合线脱落与焊料分层，是热-机械耦合作用下封装失效的主要形式。

此外，SiC MOSFET高频开关瞬态使电压急剧变化，易与回路寄生参数相互作用引发电压浪涌与振荡[39]。高频开关还会在160 MHz以内频段产生显著辐射电磁干扰，且EMI强度随开关速度提升而急剧增大[40]。

在电力电子变换器中，基于任务剖面的可靠性评估方法已用于量化长期服役应力与失效贡献[41]。若忽略多物理场耦合效应，会严重低估实际服役应力，造成可靠性预测偏差，因此需引入考虑电-热-力交互的失效演化模型实现精准评估。

现有研究多聚焦单一载荷分析，对多场耦合机理与正反馈演化规律的探究尚不充分。同时缺少面向整车全工况的时序量化方法与标准化耦合模型，难以开展芯片高精度可靠性评估。

2.4　宽禁带半导体芯片的特殊载荷

现有车载芯片载荷演化规律与任务剖面均基于硅基芯片服役工况建立，其参数体系与应力划分规则完全匹配硅半导体的材料边界特性。在800 V高压电动平台与高频电驱技术快速推广的背景下，SiC宽禁带功率器件正逐步替代传统硅基IGBT，成为车载功率变换模块的核心元器件[42-43]。宽禁带材料在热导率、力学模量及载流子输运特性方面与硅基体存在本质差异，致使器件在热-电-力多场耦合下的载荷响应规律完全不同。若直接沿用硅基芯片的标准化任务剖面，会造成服役应力评估与寿命预测结果失真，需针对宽禁带器件开展任务剖面重构与机理适配研究。

在热载荷特性层面，硅基IGBT工程应用的长期结温上限仅为150 ℃，而宽禁带器件具备显著的高温耐受优势。英飞凌第二代CoolSiC功率模块可实现175 ℃长期稳态运行，并可在200 ℃条件下承受100 h级短时过载应力[44]。AQG 324标准在SiC专项规范中规定，HTRB、HTGB高温可靠性试验以器件手册标称最大结温作为考核温度，现阶段量产SiC模块普遍将额定长期结温设定在175 ℃及以上[45]。由此可见，沿用硅基器件的温度分级与热载荷划定标准，无法真实反映宽禁带芯片的高温服役裕量，易低估热老化风险、误判器件工作边界，现有热载荷剖面已难以适配宽禁带器件的高温应用场景。

宽禁带器件固有的高频开关特性，还催生了区别于硅基器件的动态电气载荷特征。其高速开关过程会引发剧烈电压、电流瞬态变化，易诱发功率回路寄生振荡。因此，AQG 324专门增设动态反向偏压考核，要求器件耐受高电压变化率下的超长期开关循环[45]。SiC MOS凭借材料本征优势，电压变化率远超硅基器件[46]。在800 V车规高压功率变换工况下，实际工作频率可达50~60 kHz[42]，高温工况下电压过冲现象更为突出。而现行电气任务剖面多基于低频稳态工况建立，并未纳入高电压变化率瞬态冲击、电压尖峰等高频附加应力，难以还原宽禁带器件真实电气服役环境，是当前剖面体系的重要缺失。

从封装热机疲劳与失效机理来看，宽禁带器件与硅基芯片同样存在本质差异。硅基IGBT模块各层基材热膨胀系数不匹配，交变载荷下温度波动会加剧封装形变与焊料疲劳劣化[47]，SiC材料硬度与杨氏模量远高于硅基体，相同温度循环载荷下封装焊料层更易产生累积蠕变应变，进而引发器件电参数随温度显著漂移[48]。通过芯片烧结与键合工艺优化，SiC模块的功率循环能力已大幅提升。采用烧结芯片和新型铝线键合工艺的第二代SiC模块，在结温变化幅度为100 K、芯片最高结温为175 ℃条件下，可实现100 000次功率循环寿命，较上一代同封装SiC模块（20 000次）提升约5倍[44]。然而沟槽栅SiC器件虽能降低导通损耗，却会加剧栅氧层电场应力，呈现出短路耐受时间短、开关能量随温度反常变化等特有失效特征[49]。可见硅基器件的封装疲劳理论与失效判据，已无法解释宽禁带芯片的老化演化规律，传统寿命分析方法不再适用。

现行通用车载芯片任务剖面及配套Coffin-Manson等老化模型，应用于宽禁带器件时存在明显适配局限：热载荷阈值无法匹配高温耐受特性，传统恒定应力模型难以表征高频瞬态动态载荷，封装力学差异则直接降低寿命模型的预测精度。已有基于实车行驶循环的对比研究表明，SiC模块服役寿命较硅基IGBT提升幅度显著[50]。同时AQG 324已将多项动态应力测试纳入SiC考核体系，为专用任务剖面构建提供了标准支撑。综上，现有硅基体系无法兼容宽禁带器件高温、高频、特殊热机疲劳的载荷特征，后续需依托AEC-Q100与AQG 324标准框架，建立适配宽禁带物理机理的专用测试条件与寿命评估模型，填补高压车载电力电子器件可靠性分析的理论空白。

3 基于新能源汽车芯片任务剖面的可靠性评估

传统车规芯片可靠性评估体系多基于恒定应力、短时服役、单一场域燃油汽车工况建立，模型参数、测试标准与寿命算法均围绕硅基器件常规载荷标定。但新能源汽车高压平台普及后，车载芯片呈现服役寿命倍增、高频瞬态载荷突出、热-电-湿-机械多场强耦合、宽禁带器件规模化应用特征，传统评估方法难以直接匹配实际服役损伤规律，评估偏差显著。为此，本章从变应力累积损伤建模、加速测试等效转换、全生命周期FIT量化3个核心层面，阐述适配新能源汽车芯片任务剖面的可靠性评估理论与工程方法，并剖析传统体系的适配局限与优化路径。

3.1 累积损伤模型

新能源汽车芯片区别于传统燃油汽车芯片的核心特征在于全生命周期载荷持续动态波动，高低温交替、电压瞬变、功率频繁切换构成典型变应力服役环境，恒定应力寿命假设完全失效，需依靠累积损伤模型量化多阶应力下的老化累积并分析寿命演化规律[51]。目前，工程主流均基于威布尔（Weibull）分布构建3类经典累积损伤模型，适配新能源变应力剖面的建模需求。

3.1.1 累积暴露模型

累积暴露模型（Cumulative Exposure，CE）以老化进程与应力加载路径无关为核心假设，仅由当前应力水平与累积失效状态决定剩余寿命[52]。模型通过等效起始时间实现多阶温度、电压应力下的寿命递推求解，分布函数与Weibull表征形式如式(6)和式(7)，整体形状参数保持恒定，仅通过尺度参数区分不同应力下的老化速率，适合新能源汽车芯片多台阶稳态载荷的寿命折算。

$$F_{\mathrm{CE}}(t)=F_i(t-T_i),(t_i<t<t_{i+1}) \tag{6}$$

式中：$T_i=t_i-t_i'$为位置参数；t_i'为等效起始时间；t_i为第i级应力开始的时刻，满足应力切换点连续条件$F_2(t_2'=F_1(t_2)$；对应的Weibull分布形式为：

$$F_i(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t - T_i}{\alpha_i}\right)^{\beta}\right\} \quad (7)$$

式中：α_i为尺度参数，β为恒定形状参数。

3.1.2 修正随机变量模型

修正随机变量模型（Tampered Random Variable，TRV）通过引入时间变换因子，对应力切换后的寿命时域进行线性校正，其时域变换规则见式（8）。该模型与累积暴露模型物理逻辑相近，当Weibull形状参数一致时二者数学完全等价，可互换用于新能源常规变应力剖面拟合。

该模型通过时间变换因子κ对应力切换后的剩余寿命进行线性修正，时间变换规则为：

$$T_{\mathrm{TRV}} = \begin{cases} t, & t \leqslant t_2 \\ t_2 + \kappa(t - t_2), & t > t_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中：κ为时间变换因子（Tampering Coefficient），其值等于相邻应力等级间加速因子A_f的倒数，即$\kappa = 1/A_f$，κ表征应力切换后剩余寿命的线性调整系数。

3.1.3 修正失效率模型

修正失效率（Tampered Failure Rate，TFR）模型则从失效率演化角度切入，假定应力切换后失效率按固定比例缩放，对应失效率与可靠度表达式见式（9）和式（10）。3类模型建模逻辑不同，为新能源汽车芯片复杂任务剖面提供了多样的损伤量化思路。

$$\lambda_{\mathrm{TFR}}(t) = \begin{cases} \lambda_1(t), & t \leqslant t_2 \\ k \cdot \lambda_1(t), & t > t_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中：$\lambda_{\mathrm{TFR}}(t)$为TFR模型下，芯片$t$时刻的瞬时失效率；$t$为实际服役时间；$t_2$为应力切换时刻；$\lambda_1(t)$为初始应力水平下芯片的失效函数；比例因子$k = \left(\frac{\alpha_{i-1}}{\alpha_i}\right)^{\beta}$与应力级间加速因子直接相关，$\alpha_i$和$\alpha_{i-1}$分别为第$i$级和第$i-1$级应力水平下Weibull分布的尺度参数；$\beta$为形状参数。

基于失效率推导的可靠性函数为：

$$R_{\mathrm{TFR}}(t) = \begin{cases} R_1(t), & t \leqslant t_2 \\ R_1(t_2) \cdot \left[\frac{R_1(t)}{R_1(t_2)}\right]^k, & t > t_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中：$R_{\mathrm{TFR}}(t)$为TFR模型下器件的实时可靠度；$R_1(t)$为应力切换前，初始应力水平的可靠性函数；t_2为应力水平发生改变的切换时刻；k为失效率比例因子，表征应力切换后失效率的调整幅度。

基于22FD先进工艺TDDB失效机理的加速试验结果表明，CE与TRV模型对变应力退化拟合精度更高，更贴合新能源芯片渐进式老化特征；而TFR模型失效率突变假设与器件真实退化规律不符，预测偏差较大，工程适用性有限。即便如此，现有2类可用模型仍难以完全适配新能源芯片复杂服役特性：（1）模型均采用单应力独立叠加假设，无法表征新能源工况热-电-湿耦合协同加速老化效应，易低估实际损伤；（2）模型参数完全基于硅基器件标定，不能适配SiC/GaN宽禁带器件更高活化能与差异化失效机理；（3）无法刻画新能源快充工况超高温变速率带来的瞬态热冲击疲劳，仅适用于慢变稳态载荷，瞬态损伤量化能力缺失。

3.2 加速寿命测试与任务剖面转换

新能源车载芯片服役寿命可达10余年、超长时带电待机占比极高，同时伴随高频电压尖峰、极速温变等瞬态载荷，传统AEC-Q100短时、单应力、稳态测试标准无法覆盖真实损伤模式，必须通过任务剖面等效转换，将全生命周期复杂载荷压缩为实验室可执行的加速测试条件。

当前主流加速方法可与新能源芯片失效机理精准对应：温度加速依托Arrhenius模型，适配长期高温老化、电迁移等热激活失效，匹配整车长时待机与稳态高温工况；电压加速基于指数与幂律模型，针对栅氧击穿、介质退化，适配高压电控瞬态过电应力；功率循环测试Coffin-Manson理论为基础，模拟温度交变载荷，重点考核封装焊料、键合线的热机械疲劳，契合新能源频繁启停、快充温变工况。

但传统剖面转换方法在新能源汽车领域中的应用存在明显短板：常规1 000 h级标准测试远不足以覆盖十余年全生命周期老化，单纯提升加速应力还易诱发实际不存在的寄生失效机理；快充工况10 ℃/s级极速温变不能简单平均为稳态温度，否则会严重低估封装热疲劳损伤；同时传统单应力独立加速模式，忽略新能源温-电-湿多场耦合效应，加速因子计算偏差极大。因此，新能源汽车芯片任务剖面转换必须遵循失效机理不变原则，单独剥离瞬态冲击载荷设计定向加速方案，采用多场联合测试，并综合工况占比、活化能、设备约束完成等效设计，才能还原真实老化损伤。

3.3 FIT计算方法

FIT是车规芯片全生命周期失效率的核心量化指标，也是ISO 26282功能安全等级评定的关键依据。新能源汽车芯片载荷动态性强、耦合因素多、服役环境地域差异大，传统基于平均稳态应力的静态FIT算法，无法反映真实退化速率，难以满足ASIL-D高等级安全评估要求。

芯片整体FIT由裸片本征退化、封装热机老化、瞬

态过电损伤3部分构成，分别受工艺节点、封装结构、高频电气瞬态变化制约，与新能源汽车高压、高频、变温工况高度关联。传统FIT计算框架存在明显适配缺陷：(1)忽略新能源车辆长时间带电待机的温湿耦合老化贡献，仅统计工作时段损伤，直接低估整体失效率；(2)未引入热-电-湿耦合修正系数，无法量化多场协同加速带来的寿命损耗；(3)未考虑南北、高寒、湿热等地域气候差异，统一算法导致不同区域芯片可靠性评估失真。

由此可见，新能源汽车芯片FIT计算必须依托精细化任务剖面，纳入待机老化、多场耦合、地域差异3类修正因子，采用动态载荷分段统计方式替代传统平均应力估算，才能精准匹配真实服役失效率，为高压车载电控系统功能安全设计提供可靠依据。

4 任务剖面指导芯片设计改进的工程应用

任务剖面的价值不仅体现在实验室可靠性测试与寿命预测环节，更在于其能够作为核心输入反向牵引新能源汽车芯片的全流程设计优化，实现整车服役工况需求与器件设计特性的深度精准匹配。在工艺与材料选型层面，可依据任务剖面揭示的宽温域工作、高温长时驻留特征，优先采用SiC/GaN宽禁带半导体工艺，通过优化栅极介质与衬底材料体系，提升器件在150 ℃以上高温工况的长期稳定性。在封装结构设计层面，结合任务剖面中的热机械循环温差、振动载荷频次等参数，选用高导热、低热膨胀系数的封装材料，优化键合线布局与焊料层厚度，有效抑制温度循环与低频振动引发的封装疲劳失效。在电路拓扑与驱动参数设计层面，匹配任务剖面中400 V/800 V高压瞬态载荷与200 kHz高频开关工况，优化驱动电路电阻-电容(Resistor-Capacitor，RC)缓冲网络与钳位保护拓扑，抑制瞬态过压与电压振铃，降低电击穿失效风险。在整车热管理协同层面，基于任务剖面的温度-时间分布特征，针对性优化电机控制器、车载充电机、电池管理系统等核心芯片的散热路径，缩短快充、爬坡等高负荷工况下的高温持续时长，削减器件累积热损伤。在功能安全设计层面，结合任务剖面的多载荷时序分布，拆分裸片本征、封装结构、过电应力3类失效率分量，加权计算全生命周期FIT值并设定器件每小时发生故障次数低于10^{-8}的设计冗余，确保满足ISO 26262功能安全标准要求。

5 结束语

本文系统梳理MPFO标准化格式、ZVEI规范及AEC-Q100 Rev-J等任务剖面主流技术体系，从热、电、机械、环境及多场耦合维度量化对比燃油汽车与新能源汽车芯片载荷本质差异。伴随800 V高压架构普及与SiC宽禁带器件量产装车，车载芯片呈现长时高温驻留、高频电压瞬变、多场协同老化等全新服役特征。依托硅基与燃油汽车间歇工况建立的传统任务剖面及可靠性评估体系，难以精准复现新能源汽车实车退化规律，造成实验室加速认证与整车失效统计偏差显著。同时精细化任务剖面可反向指导芯片选材、封装、驱动电路与整车热管理优化，推动芯片车规认证从通用符合性考核向工况适配型验证转型。

现阶段国内外标准尚未形成面向新能源汽车与宽禁带器件的专属任务剖面细则，现有累积损伤与加速寿命模型大多基于单场硅器件数据标定，忽略电热力耦合协同老化作用，复杂工况下寿命与FIT测算精度受限。后续需围绕新能源汽车独有服役特征构建动态多尺度任务剖面体系，建立适配宽禁带器件的多场耦合退化模型，借助智能算法优化实车-加速试验等效换算方法；加快构建适配国内车辆运行特征的车规芯片标准，助推国产车载功率芯片产业化与产业链自主可控。

参 考 文 献

[1] HAGHANI M, SPREI F, KAZEMZADEH K, et al. Trends in Electric Vehicles Research[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 123: 103881.

[2] SANGUESA J A, TORRES-SANZ V, GARRIDO P, et al. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges[J]. Smart Cities, 2021, 4(1): 372-404.

[3] LI Y L, OUYANG M G, CHAN C C, et al. Key Technologies and Prospects for Electric Vehicles within Emerging Power Systems: Insights from Five Aspects[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(2): 439-447.

[4] 洪吉超, 梁峰伟, 杨京松, 等. 新能源汽车产业及其技术发展现状与展望[J]. 科技导报, 2023, 41(5): 49-59.

[5] 李骏, 张进华, 侯福深, 等. 节能与新能源汽车发展十年回顾与展望[J]. 中国工程科学, 2026, 28(1): 191-201.

[6] KREIS A, MAJETIC M. Novel Assessment Approaches to Support Accelerated Automotive Battery Design and Development Using Tailored Mission Profiles[C]// 21st Asia Pacific Automotive Engineering Conference. Melbourne: SAE Australasia, 2022.

[7] SOHRMANN C, FISCHBACH R, KRINKE A, et al. Towards a Standardized Format for Automotive Mission Profiles[C]// GMM-Fachbericht 99: Automotive Meets Electronics (AmE 2021). Online-Event: VDE Verlag, 2021.

[8] ZVEI. Handbook for Robustness Validation of Semicon-

ductor Devices in Automotive Applications[M]. Frankfurt am Main: ZVEI, 2015.

[9] ZVEI. Automotive Application Questionnaire for Electronic Control Units and Sensors[R]. Frankfurt am Main: ZVEI, 2006.

[10] ZVEI. Handbook for Robustness Validation of Automotive Electrical/Electronic Modules[M]. Frankfurt am Main: ZVEI, 2013.

[11] Automotive Electronics Council. AEC-Q100-Rev-J: Failure Mechanism Based Stress Test Qualification for Integrated Circuits in Automotive Applications[S/OL]. (2023-08) [2026-08-14]. https://img. antpedia. com/standard/files/pdfs_ora/20250902/ace/AEC_Q100_Rev_J_Base_Document.pdf.

[12] RONGEN R, SOUFFLET AP, PUEL F, et al. Extended Mission Profiles for Automotive and Non-Automotive Applications[R]. Eindhoven: NXP Semiconductors, 2023.

[13] 跃胜, 傅霖煌, 武岳山 . 基于芯片产品的加速寿命试验研究综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2024, 42(3): 67-71.

[14] SINGH K, KALRA S. Reliability Forecasting and Accelerated Lifetime Testing in Advanced CMOS Technologies[J]. Microelectronics Reliability, 2023, 151: 115261.

[15] JEDEC 固态技术协会 . 温度循环: JESD22-A104F.01[S]. 2023.

[16] HE J T, LING Y, LEI D. Mechanical Properties of Sn-Pb Based Solder Joints and Fatigue Life Prediction of PBGA Package Structure[J]. Ceramics International, 2023, 49(16): 27445-27456.

[17] LI C, CHENG J, ZHU H, et al. Degradation Modeling and Remaining Useful Life Prediction for Electronic Device under Multiple Stress Influences[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1):19117.

[18] CELLIER Z, QIU H K, NDIAYE M. Thermal Mission Profile Build Up with Monte Carlo Simulation[C]// Congrès Lambda Mu 24. Bourges, 2024.

[19] KRÜGER M, STRAUBE S, MIDDENDORF A, et al. Requirements for the Application of ECUs in E-Mobility Originally Qualified for Gasoline Cars[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 64: 140-144.

[20] ASIM M, BAIG T, SIDDIQUI F R, et al. Advancements in Thermal Management Solutions for Electric Vehicle High-Power Electronics: Innovations, Cooling Methods, and Future Perspectives[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 111: 115344.

[21] RONGEN R, SOUFFLET A P, PUEL F, et al. Extended Mission Profiles for Automotive and Non-Automotive applications[R]. Eindhoven: NXP Semiconductors, 2023.

[22] Research and Markets. New Energy Vehicle 800-1 000 V High-Voltage Architecture and Supply Chain Report 2025[R]. Dublin: Research and Markets, 2025.

[23] GRAOVAC D, LUNIEWSKI P, MÜLLER H, et al. 800 V Architectures in Electric Vehicles and How This Market will Evolve[FB/OL]. (2025-2-09) [2026-08-24]. https://pcim. mesago. com/nuernberg/en/pcim-insights/pcim-magazine/800-varchitectures-in-electric-vehicles-and-how-this-market-will-evolve.html.

[24] KINYUA J M, AOKI M. Comparative Dynamic Performance Evaluation of Si IGBTs and SiC MOSFETs[J]. Energies, 2025, 18(24): 6540.

[25] ZHANG S. Influence of Driving and Parasitic Parameters on the Switching Behaviors of the SiC MOSFET[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 1079623.

[26] CHEN Y F, LAN X, LI L Z, et al. Failure Evolution Analysis of SiC Power Modules in Electric-Thermal-Mechanical Multi-Physical Fields[J]. Microelectronics Reliability, 2025, 169: 115751.

[27] CEBULSKA W, HADRYS D. Comparison of Vibration Emissions in Electric and Conventional Cars[J]. Combustion Engines, 2025, 202 (3): 74-80.

[28] CHEN J B, LIU Y F, LIU B W, et al. Structure and Temperature Dependence of Solder Layer and Electric Parameters in IGBT Modules[J]. Micromachines, 2025, 16(9): 1023.

[29] ZHAO S, YANG X, WU X, et al. Investigation on Creep-Fatigue Interaction Failure of Die-Attach Solder Layers in IGBTs under Power Cycling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(5): 7261-7274.

[30] NEBO S E, AMALU E H, HUGHES D J. Effect of Operating Ambient Temperatures on Degradation of Solder Joints in IGBT Power Module[J]. Journal of Electronic Materials, 2025, 54(8): 6870-6885.

[31] I L, DU X, CHEN J, et al. Thermal Fatigue Failure of Micro-Solder Joints in Electronic Packaging Devices: A Review[J]. Materials, 2024, 17(10): 2365.

[32] VASQUEZ BORUCKI S. Mission Profile Evaluation for Automotive Applications: An Anthology of Best Practices[R]. Germany: Infineon Technologies AG, 2019.

[33] MAMUN M A Z, ALAM M A. Reduced Relative Humidity (RH) Enhances the Corrosion-Limited Lifetime of Self-Heated IC: Peck's Equation Generalized[C]// 2022 IEEE

International Reliability Physics Symposium (IRPS). Dallas: IEEE, 2022.

[34] LANG F Y, ZHOU Z R, LIU J, et al. Review on the Impact of Marine Environment on the Reliability of Electronic Packaging Materials[J]. Frontiers in Materials, 2025, 12: 1584349.

[35] ZHANG C, JASNI J, MOHD RADZI M A, et al. Research and Analysis of Electromagnetic Interference of a Motor Drive Control System Based on PMSM with SiC MOSFET for New Energy Electric Vehicles[J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 11: 1338212.

[36] GE X, CHEN K, WANG H, et al. Failure Mechanism Investigations of Bond Wires Lifting-Off and Die-Attach Solder Aging Considering the Thermal Coupling Effects[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(1): 2042-2056.

[37] DUDEK R, DÖRING R, MATHEW A, et al. Modelling Thermal Fatigue in Power Electronics[C]// 2022 23rd International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, 2022.

[38] HE Y, WANG L, YIN Z, LI X. Multi-Timescale Cross-Platform Co-Simulation Framework for Electromagnetic-Thermal-Mechanical Coupling Analysis of Solid-State Power Controllers[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2025, 14(3): 3527 - 3544.

[39] KINYUA J M, AOKI M. Investigating the Parasitic Elements Sensitivity on Switching Transients in SiC MOSFET for High Frequency Power Conversion[C]// 2025 IEEE PES/IAS Power Africa, 2025.

[40] HUANG H, WANG N, WU J, et al. Radiated Disturbance Characteristics of SiC MOSFET Module[J]. Journal of Power Electronics, 2021, 21: 494-504.

[41] LU Y, XIANG E, ZHU A, et al. Mission-Profile-Based Reliability Evaluation of IGBT Modules for Wide-Speed Range Electric Vehicle Drive Using Fast Multistep Mapping Simulation Strategy[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(5): 5376-5390.

[42] ABBASI M, LAM J. An SiC-Based AC/DC CCM Bridgeless Onboard EV Charger with Coupled Active Voltage Doubler Rectifiers[C]// 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Detroit: IEEE, 2020.

[43] ALLCA-PEKAROVIC A, KOLLMEYER P J, REIMERS J, et al. Loss Modeling and Testing of 800 V DC Bus IGBT and SiC Traction Inverter Modules[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(2): 2923-2935.

[44] MÜLLER H, STALLMEISTER M, SPITZER D. Optimizing Power Modules by Enhancing Power Density, Ease of Implementation and Automotive Reliability[C]// 2024 CIPS International Conference. Nuremberg: VDE, 2024.

[45] European Center for Power Electronics. ECPE Guideline AQG 324: Qualification of Power Modules for Use in Power Electronics Converter Units in Motor Vehicles (Release 04.1)[S]. Nuremberg: ECPE, 2025.

[46] KIM S, LEE J, PARK J, et al. Static, Dynamic, and Short-Circuit Characteristics of Split-Gate 1.2 kV 4H-SiC MOSFETs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43(6): 928-931.

[47] WANG J H, BAI L B, CHEN C, et al. Impacts of Switching Parameters on Thermal and Mechanical Characteristics in IGBT Modules[C]// 2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Houston: IEEE, 2022.

[48] LI S, HAO F, YANG Y, et al. Fabrication of 1200 V 800 A Power Module Used of SiC Trench MOSFETs[C]// 2025 22nd China International Forum on Solid State Lighting & 2025 11th International Forum on Wide Bandgap Semiconductors (SSLCHINA: IFWS), 2025.

[49] KIM J J, PARK J H, SABRI S, et al. Investigation into Relationship of the Switching Performance and Short-Circuit Withstand Time on 1.2 kV 4H-SiC Power MOSFETs[C]// 2024 36th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Bremen: ISPSD, 2024.

[50] AMIRPOUR S, THIRINGER T, HAGSTEDT D. Mission-Profile-Based Lifetime Study for SiC/IGBT Modules in a Propulsion Inverter[C]// 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference(PEMC). Gliwice: IEEE, 2021.

[51] ZHANG J, WANG J, ZHANG Z, et al. Power Cycling Method of Power Semiconductor Devices Based on Mission Profiles[C]// 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS). Shanghai: IEEE, 2021.

[52] HIRLER A, BIBA J, LIPP D, et al. Experimental Reliability Study of Cumulative Damage Models on State-of-the-art Semiconductor Technologies for Step-stress Tests and Mission Profile Stresses[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2020, 38(6): 064001.

（责任编辑　**明慧**）