

基于频域和时域法的电池包随机振动疲劳 计算对比研究

吴光强^{1†}, 李超¹, 丁丰², 章蕾²

[1. 同济大学汽车学院, 上海 201804;
2. 卡特彼勒技术研发(中国)有限公司, 江苏 无锡 214000]

摘要:针对频域法和时域法在随机振动疲劳计算中的适用性问题,以某型号电池包为研究对象,综合研究了2种方法的计算精度和计算效率.首先,建立电池包有限元模型,并通过模态试验进行验证;其次,以国标GB 38031—2020加速度功率谱密度(PSD)载荷谱作为频域载荷输入,并利用傅里叶逆变换技术将其转换为加速度时域载荷;最后,分别基于频域法和时域法计算电池包的振动加速度、应力和疲劳寿命,并进行了计算精度、效率的对比分析和精度的试验验证.结果表明,在电池包总振级和应力均方根值(RMS)方面,频域法和时域法计算结果相近,相对误差小于16%;在加速度和应力峰值方面,频域法“ 3σ ”计算结果与时域法差距较大,若采用“ 4σ ”或“ 5σ ”原则,计算结果与时域法相近,相对误差小于15%;在振动疲劳方面,频域法计算寿命约为时域法的3~6倍,主要原因包括Dirlik模型和应力响应PSD谱差异,其中Dirlik模型造成的差距小于1.5倍;在计算效率方面,频域法比时域法高约134倍.试验数据表明,时域法计算精度更高,适用于结构危险位置振动疲劳的精确计算,而频域法计算效率更高,适用于结构危险位置的快速预测.

关键词: 电池包; 随机振动; 疲劳寿命; 时域分析; 频域分析

中图分类号: TH123 **文献标志码:** A

A Comparing Study on Battery Pack Random Vibration Fatigue Calculation Based on Frequency Domain and Time Domain Approaches

WU Guangqiang^{1†}, LI Chao¹, DING Feng², ZHANG Lei²

[1. Automotive College, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Caterpillar Technology R & D (China) Co., Ltd., Wuxi 214000, China]

Abstract: Focusing on the applicability of the frequency domain method and time domain method in random vibration fatigue calculation, the accuracy and efficiency of the two methods are comprehensively studied with a certain type of battery pack as the research object. First, a finite element model of the battery pack is established and verified through the modal test. Secondly, the acceleration Power Spectral Density (PSD) of GB 38031—2020 is

* 收稿日期:2023-04-02

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2500803), National Key Research and Development Program of China(2021YFB2500803)

作者简介:吴光强(1965—),男,河北秦皇岛人,同济大学教授,工学博士

† 通信联系人, E-mail: wuguangqiang@tongji.edu.cn

taken as the load spectrum in the frequency domain and converted into the time domain load using Fourier inverse transformation technology. Finally, the vibration acceleration, stress, and fatigue life of the battery pack are calculated based on the frequency domain method and the time domain method, respectively. The calculation accuracy and efficiency of both methods are compared and verified by the test. The results show that in regard of the total vibration level and stress RMS value of the battery pack, the calculated values of the frequency domain method and the time domain method are similar, and the relative error is less than 16%. For the peak value of acceleration and stress, the " 3σ " calculation results of frequency domain method are much different from those of time domain method. With the adoption of the " 4σ " or " 5σ " principle, the calculation results of both methods are similar, and the relative error is less than 15%. In concern of vibration fatigue, the calculated life by the frequency domain method is about as 3 to 6 times long as that by the time domain method. The main reasons include Dirlik model and stress response PSD, in which the difference caused by the Dirlik model is less than 1.5 times. In terms of computational efficiency, the frequency domain method is about 134 times faster than the time domain method. The test data show that the time domain method is with higher accuracy and suitable for the accurate calculation of vibration fatigue at dangerous positions, while the frequency domain method is more efficient and suitable for the rapid prediction of structural high-risk positions.

Key words: battery pack; random vibration; fatigue life; time domain analysis; frequency domain analysis

随着我国电动汽车的推广普及,动力电池包的振动疲劳性能已经成为制约电动汽车发展的一个重要因素.现阶段,对试制样品的振动疲劳耐久性试验校核是电池包开发流程的典型环节,但其存在研发成本高、开发周期长的缺点.如果在开发设计阶段利用计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)技术进行产品的振动疲劳性能校核,可大大缩短研发周期、降低研发成本^[1-2].

目前,利用CAE进行电池包随机振动疲劳寿命预测的方法主要分为时域法和频域法^[3-4].二者都包含三部分内容,即载荷作用下结构应力-应变响应历程、单个载荷循环下的疲劳损伤和疲劳损伤累积模型^[5].不同之处在于时域法是基于结构振动的应力时域信号,利用雨流计数法对结构应力实际循环次数进行统计^[6];而频域法则是基于结构振动的应力功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)信号,利用应力幅分布模型对结构应力循环次数进行近似估计,其中Dirlik模型是与实际情况吻合较好且应用最广泛的模型^[7].时域法由于具有较高的结构累积损伤预测精度和处理非高斯平稳随机过程的能力,被认为是与实际最为接近的一种方法^[8],但存在随机过程模拟计算量大的缺点;而频域法不需要循环计数,计算量小,其应用逐渐受到工程界的重视^[9].

在实际工程设计中,频域法和时域法虽然广泛用于对电池包振动疲劳性能的验证分析,但是有关二者的综合对比研究比较缺乏,这种缺乏会带来以下问题:

1)如果只注重频域法计算简单、快速的优势,而忽视其与时域法预测值的差距,可能会导致频域法预测的疲劳寿命值与实际寿命差距过大.

2)频域法基于振动均方根(Root Mean Square, RMS)加速度值和正态分布" 3σ "原则,可能存在对电池包最大振动加速度估计不足的缺点.

为了避免类似情况的发生,本文分别利用频域法和时域法对某款动力电池包进行随机振动疲劳分析,并对二者分析结果进行对比,为频域法和时域法更好应用于工程设计提供一定参考.

1 基本理论

1.1 时域法

电池包结构振动属于线性小阻尼多自由度振动系统,其模态运动方程为:

$$m\ddot{q} + c\dot{q} + kq = Q \quad (1)$$

式中: m 为系统的模态质量矩阵; c 为模态阻尼矩阵; k 为模态刚度矩阵; q 为模态坐标; Q 为模态力矢量.

在时域载荷激励下,振动系统的位移响应 X 可由模态振型矩阵 Φ 和模态坐标 q 求出,其表达式为:

$$X = \Phi q \quad (2)$$

电池包结构在随机振动载荷作用下会呈现出复杂的应力应变状态,其疲劳裂纹萌生和扩展将在图1所示材料临界平面上发生,并且应力大小和方向会随构件位置和载荷作用时间不断变化^[10].

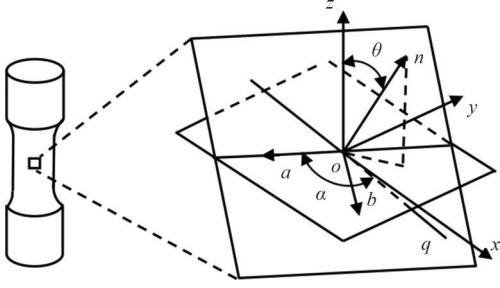


图1 材料临界面及法向 n

Fig.1 Normal (n) of a material plane

为此,基于不同转角 θ 坐标系平面应力转换公式,时域法通过对不同转角平面应力时间历程进行计算和雨流统计,并结合材料的疲劳特性实现临界面求解和结构最大损伤时的疲劳寿命计算,应力转换公式为:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3)$$

式中: σ_{xx} 和 σ_{yy} 为平面正应力; τ_{xy} 为平面切应力.

通过对空间不同方向应力状态下的结构损伤进行计算,临界面法可以准确预测复杂应力状态下的结构疲劳失效问题,因此得到工程界广泛认可^[11-12].

1.2 频域法

式(1)可转化为频域数学表达式:

$$S_x(\omega) = H(\omega) S_p(\omega) H^H(\omega) \quad (4)$$

式中: $S_x(\omega)$ 为输入载荷 PSD 矩阵; $S_p(\omega)$ 为随机响应 PSD 矩阵; $H(\omega)$ 为频响应函数矩阵; $H^H(\omega)$ 为 $H(\omega)$ 的共轭转置.

频响应函数矩阵 $H(\omega)$ 表达式为:

$$H(\omega) = (-\omega^2 M + i\omega C + K)^{-1} \quad (5)$$

当载荷以 PSD 输入时,结构振动位移、加速度和应力响应均可由式(4)和式(5)求出.

在连续加载时间 T 内,幅值为 S 的结构应力循环次数 $N(S)$ 由 Dirlik 模型式(6)和式(7)求出.

$$P(S) = \frac{1}{2\sqrt{m_0}} \left(\frac{D_1}{Q} e^{\frac{-z}{Q}} + \frac{D_2 Z}{R^2} e^{\frac{-z^2}{2R^2}} + D_3 Z e^{\frac{-z^2}{2}} \right) \quad (6)$$

$$N(S) = E(P)TP(S) \quad (7)$$

式中: $E(P)$ 为峰值概率期望.

1.3 RMS 值

虽然随机振动的不确定性状态无法用振幅、频率和相位进行描述,但可用 RMS 值对随机振动统计特征进行描述.

RMS 值是与结构振动能量大小有关的物理量.在时域内,振动信号 $x(t)$ 的 RMS 计算公式为:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (8)$$

在频域内,振动信号 $x(t)$ 的 RMS 值可经 PSD 谱在频率上积分求面积 S 后开根号求出,即

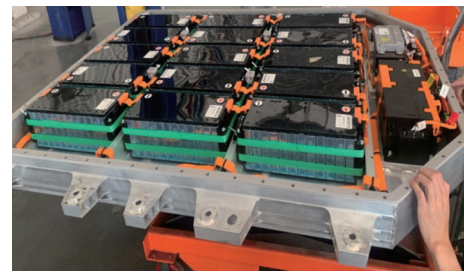
$$X_{RMS} = \sqrt{S} \quad (9)$$

当结构振动响应服从正态分布时,基于“ 3σ ”原则,可将 $3X_{RMS}$ 作为结构振动最大幅值的近似估计^[13].

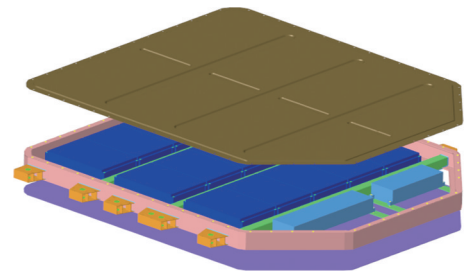
2 电池包模型及模态验证

2.1 有限元模型

基于某型号电池包的实体结构和几何模型,建立如图2所示的有限元模型.在建模过程中,按照不改变结构力学性能和计算精度的要求,为减小计算资源,对模型进行局部简化和修正,例如去除了较小倒角、螺栓、小圆孔等^[14].约束边界按照实车装配对安装吊耳孔进行全约束.



(a) 电池包实物结构



(b) 有限元模型

图2 某型号电池包实物及有限元模型

Fig.2 Physical structure and finite element model

2.2 模态测试

为了验证有限元模型精度,采用 LMS 模态测试系统进行电池包约束模态的敲击测试.测试系统主要由激振部分、数据采集部分和分析计算部分组成,如图 3 所示.

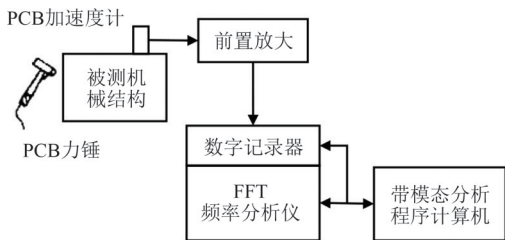


图 3 LMS 模态试验测试系统组成
Fig.3 LMS modal test system

图中 PCB 力锤对电池包进行敲击激励,LMS 数据采集仪和 PCB 加速度传感器用于振动信号采集,笔记本电脑利用采集信号完成约束模态参数的识别.

此次电池包模态测试共布置了 46 个振动数据采集点,采用如图 4 所示的 5×5 布点形式,力锤敲击点分别位于图 5 所示电池包下箱体拐角、上箱盖拐角以及上箱盖中央三个位置.

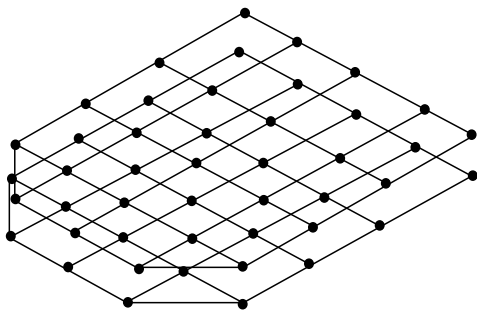


图 4 电池包 5×5 测点布置
Fig.4 Battery pack 5×5 measuring point layout

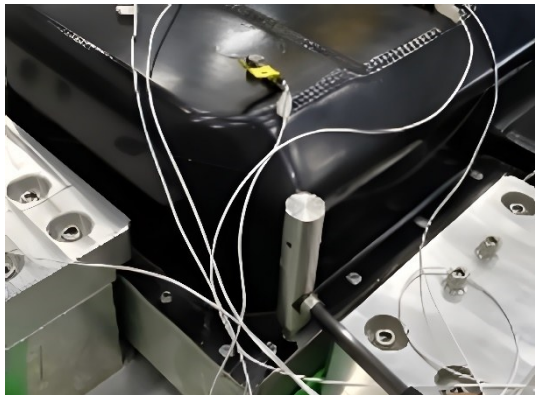
2.3 模态验证

模态是结构的固有属性,与结构自身的材料属性、几何形状以及约束条件等有关.固有频率、模态振型是模态的两个重要特征参数^[15-16],反映了结构的刚度和质量分布,可用于有限元建模精度的验证.

1)固有频率.相似振型模态的固有频率之间的接近程度可用相对误差 δ 来考察^[17],其计算公式为

$$\delta = \frac{|f_{Test} - f_{FEA}|}{f_{Test}} \times 100\%$$
 (10)

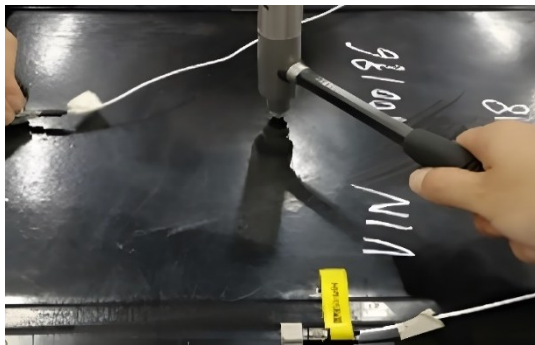
式中: f_{Test} 为试验模态频率; f_{FEA} 为有限元模态频率.
由表 1 统计的电池包前 4 阶模态频率值可知,有



(a)下箱体拐角



(b)上箱盖拐角



(c)上箱盖中央

图 5 模态试验力锤激励点

Fig.5 Force hammer excitation point of modal test

限元模态与试验模态之间的固有频率相近,相对误差均小于 5%.

2)模态振型.模态置信准则 (Modal Assurance Criteria, MAC)可用于验证有限元模态振型和试验

表 1 电池包前 4 阶模态固有频率
Tab.1 Natural frequency of the first four modes

阶数	固有频率/Hz		相对误差/%
	有限元模态	试验模态	
1	13.95	14.28	2.31
2	19.83	20.79	4.62
3	26.31	27.14	3.06
4	33.28	31.86	4.46

模态振型的相似程度^[18],即:MAC 值等于 1,表示两个模态振型完全一样;等于 0,表示两个振型不相关.其计算式为:

$$MAC(\Phi_{ej}, \Phi_{fk}) = \frac{(\Phi_{ej}^T \Phi_{fk})^2}{(\Phi_{ej}^T \Phi_{ej})(\Phi_{fk}^T \Phi_{fk})} \tag{11}$$

式中: Φ_{ej} 为试验模态第j阶振型向量; Φ_{fk} 为有限元模态的第k阶振型向量.

图 6 和图 7 分别为电池包试验模态和有限元模态的前 4 阶振型图,二者振型的 MAC 值分别为 0.93、0.86、0.89 和 0.87,表明同阶振型之间相似度水平高.

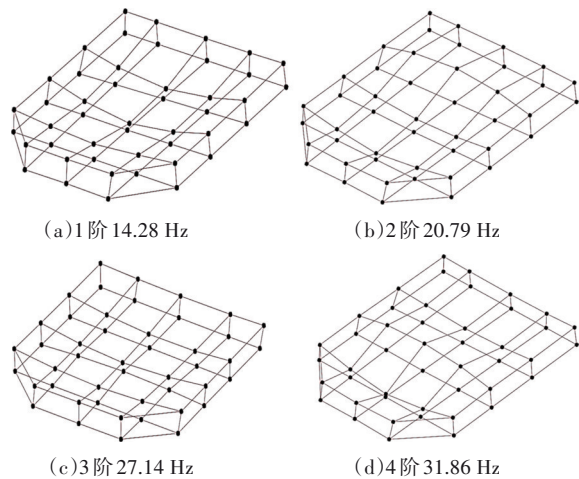


图 6 电池包试验模态前 4 阶振型
Fig.6 First 4 test modes of battery pack

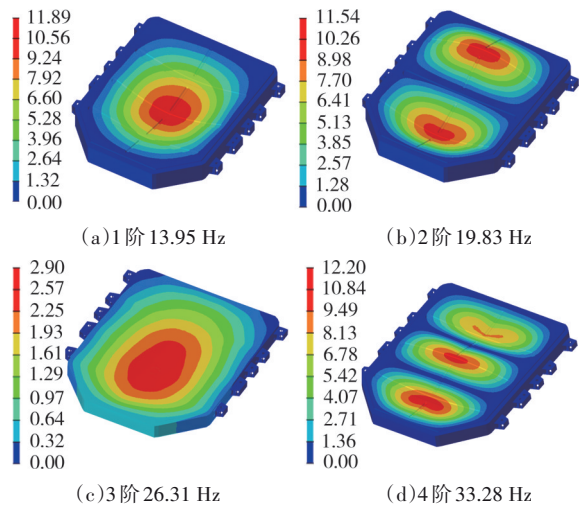


图 7 电池包有限元模态前 4 阶振型
Fig.7 First 4 finite element modes of the battery pack

由于有限元模态的固有频率和模态振型计算结果与模态试验结果相近,表明电池包有限元模型的质量分布和刚度分布与实际结构相符合,可用于随机振动疲劳分析.

3 随机振动疲劳分析

3.1 载荷的输入

输入载荷是影响时域法和频域法计算结果的重要因素,二者载荷 PSD 谱统计特征相匹配是能够进行计算结果对比的前提.

频域法的输入载荷为国标 GB 38031—2020 推荐加速度载荷 PSD 谱,如表 2 所示.基于表 2 的功率谱密度值,利用傅里叶逆变换和 Python 编程技术计算得到时域法的加速度输入载荷,如图 8 所示.

表 2 频域法加速度载荷 PSD 谱

Tab.2 Acceleration PSD load of frequency domain method					
频率/Hz	5	15	65	100	200
Z 轴	0.015	0.015	0.001	0.001	0.000 1

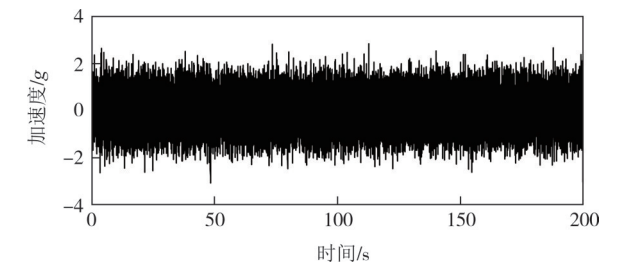


图 8 加速度时域载荷
Fig.8 Acceleration time domain load

由图 9 所示的输入载荷 PSD 曲线对比可知,时域法和频域法的输入载荷统计特征相匹配,二者的计算结果可进行对比.

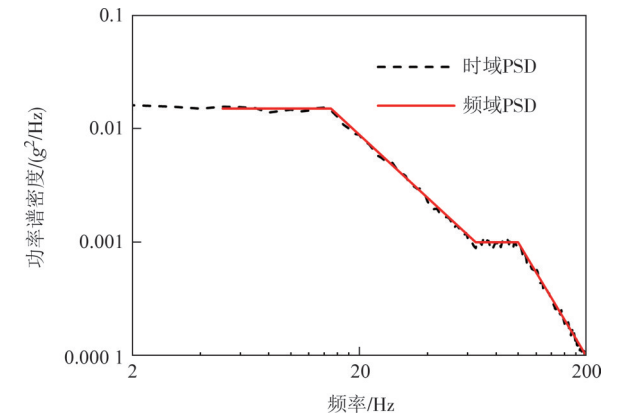


图 9 输入载荷 PSD 的对比
Fig.9 Comparison of load PSD

3.2 有限元分析计算

本文基于达索公司的 ABAQUS 软件,通过时域瞬态响应分析和频域随机振动分析来计算电池包有限

元模型单元积分点的应力响应,并利用 Python 编程完成结构疲劳危险位置的寿命计算,分析流程见图 10.

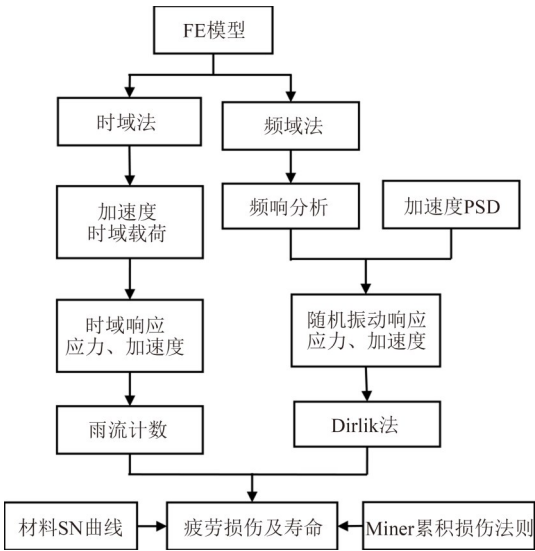


图 10 随机振动疲劳 CAE 分析流程
Fig.10 CAE analysis process of random vibration fatigue

4 结果及讨论

4.1 振动加速度

图 11 为频域法计算的电池包加速度 RMS 值分布云图.由图 11 可知,箱盖中央 A₆位置振动加速度最大.

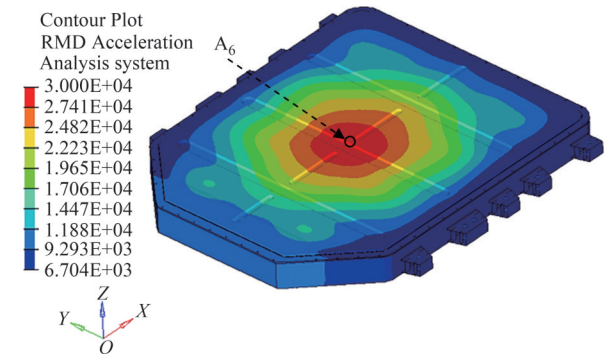


图 11 频域法 RMS 加速度分布云图
Fig.11 RMS acceleration contour of frequency domain method

为了与频域法对比,除了取箱盖中央 A₆测点外,另取图 12 安装吊耳和模组承载梁处的 A₁至 A₅测点进行时域法分析,加速度响应结果如图 13 所示.

由表 3 的振动加速度统计值可知,频域法与时域法的加速度 RMS 值接近,最大相对误差为 5.8%,表明二者所预测的电池包总振级相近;频域法“3 σ ”计算最大加速度与时域法最大加速度存在较大差距,相对误差范围为 24.8%~30.1%,表明频域法“3 σ ”计算值对

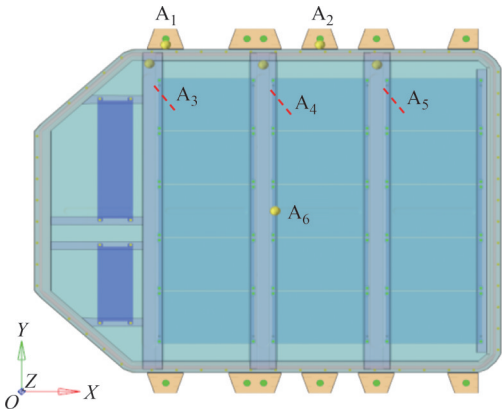
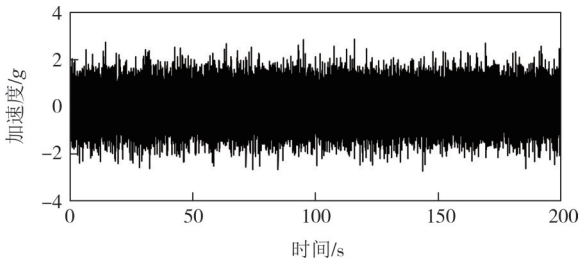
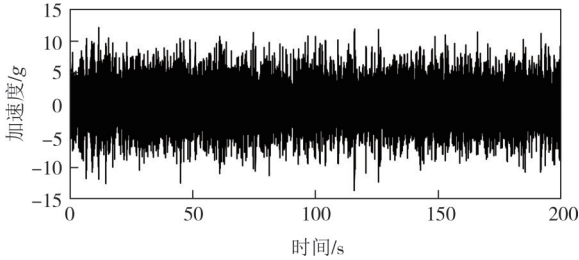


图 12 时域法加速度测点位置
Fig.12 Acceleration gage map of time domain method



(a) A₁ 加速度时域信号



(b) A₆ 加速度时域信号

图 13 加速度时域响应

Fig.13 Acceleration time domain response

电池包振动最大加速度幅值的估计精度不足.
究其原因如下:

表 3 结构振动加速度对比						
Tab.3 Comparison of structural vibration acceleration						
位置	时域法加速度/g		频域法加速度/g			
	RMS	最大值	RMS	与频域法最大相对误差/%	3 σ 值/g	3 σ 与时域法最大误差/%
A ₁	0.69	2.90	0.69	0.1	2.08	28.3
A ₂	0.69	2.79	0.69	0.6	2.07	25.8
A ₃	0.90	3.91	0.92	2.3	2.77	29.2
A ₄	0.86	3.66	0.87	1.9	2.62	28.4
A ₅	0.80	3.46	0.81	1.5	2.42	30.1
A ₆	3.26	13.77	3.45	5.8	10.35	24.8

随机振动载荷下的电池包加速度幅值服从正态分布,如表4所示.由图14可知,正态分布“3 σ ”原则的0~99%估计范围和时域法的最大加速度幅值分布范围存在较大差距.

表4 A_6 加速度分布统计特征值

Tab.4 Statistical characteristics of acceleration distribution at A_6

统计指标	期望 μ	标准差 σ	峰度	偏态
时域法统计	0	3.259	3.182	0.011
频域法正态估计	0	3.448	3.000	0.000

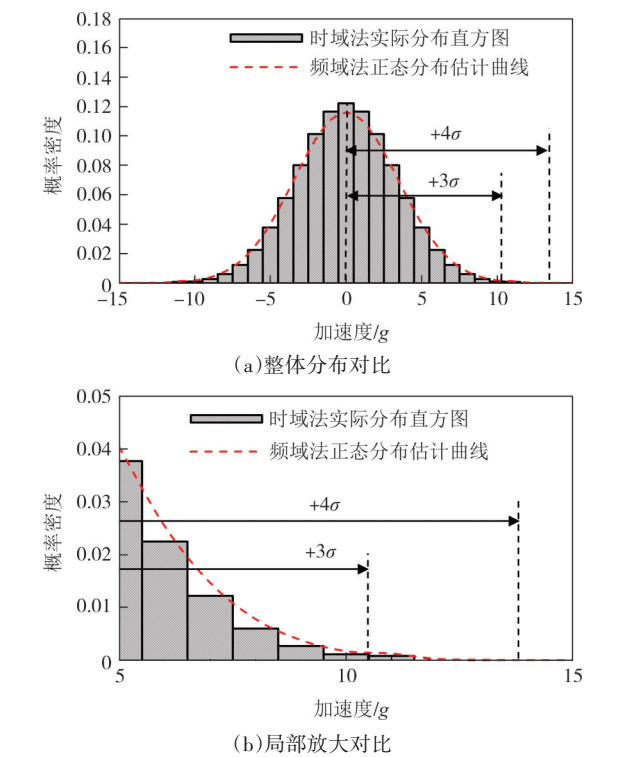


图14 A_6 振动加速度分布对比

Fig.14 Comparison of acceleration distribution at A_6

如果频域法采用“4 σ ”原则,计算加速度的估计范围将扩大到0~99.993 6%,与时域法的加速度最大分布范围接近,相对误差小于6.6%,见表5.

表5 频域法“4 σ ”计算加速度

Tab.5 The “4 σ ” acceleration of frequency domain method

位置	加速度最大值/g		相对误差/%
	时域法	频域法	
A_1	2.90	2.77	4.4
A_2	2.79	2.76	1.0
A_3	3.91	3.69	5.8
A_4	3.66	3.50	4.4
A_5	3.46	3.23	6.6
A_6	13.77	13.79	0.1

4.2 振动应力

利用频域法计算得到电池包箱体和箱盖的RMS应力值,分别见图15和图16.

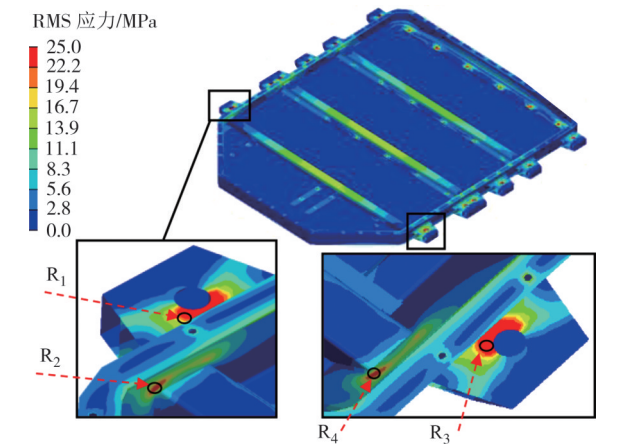


图15 电池包箱体RMS应力分布

Fig.15 RMS stress contour of battery pack body

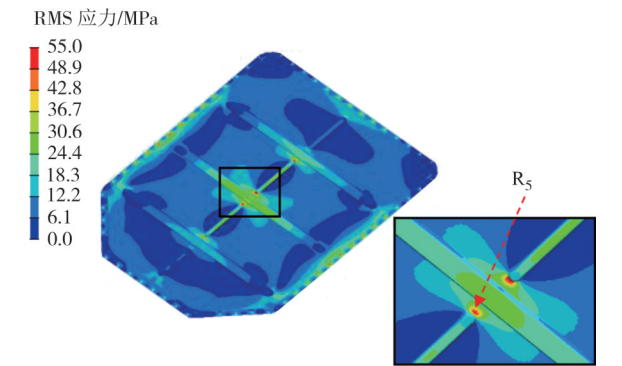


图16 电池包箱盖RMS应力分布

Fig.16 RMS stress contour of battery pack cover

由图15可知,箱体高应力区主要分布在安装吊耳孔附近、模组承载梁与侧围板连接位置;由图16可知,箱盖中央加强筋位置应力最大.

根据RMS应力分布,利用式(3)和式(12)对图15和图16中5个危险位置的结构最大损伤应力和等效Von Mises应力进行时域法计算,应力时域响应结果如图17和图18所示.

$$\sigma_{VM}^2 = \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} + 3\tau_{xy}^2 \tag{12}$$

式中: σ_{VM} 为时域等效Von Mises应力.

由表6电池包的振动应力对比可知,频域法和时域法的RMS应力值相近,最大相对误差小于15.2%,表明二者所预测的平均动应力相近.

由表7可知,频域法的“5 σ ”应力值比“3 σ ”应力值更接近时域法最大Von Mises值,最大相对误差小于13.1%.

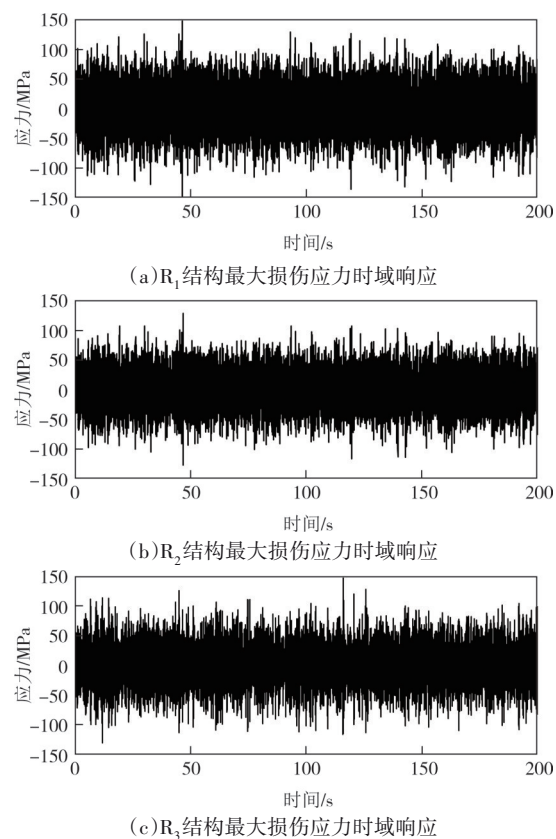


图 17 结构最大损伤应力时域响应
Fig.17 Time domain response of maximum structural damage stress

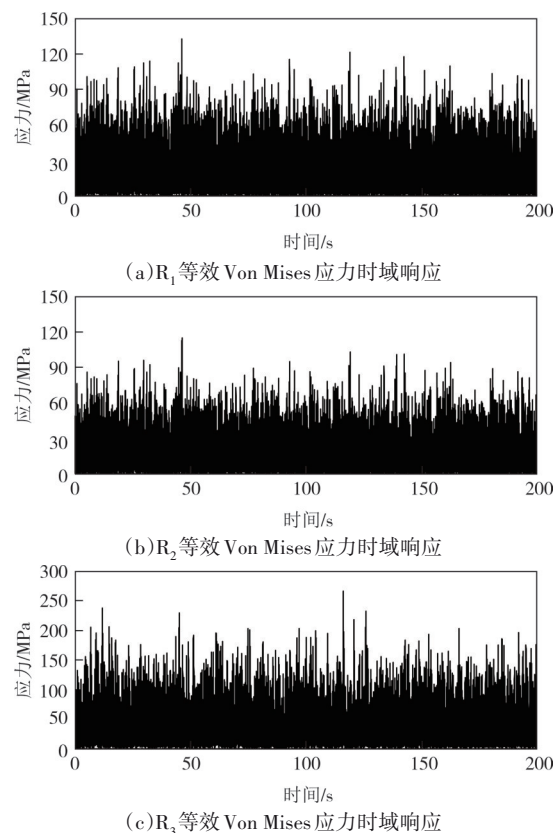


图 18 等效 Von Mises 应力时域响应
Fig.18 Time domain response of equivalent Von Mises

表 6 结构振动应力对比
Tab.6 Comparison of structural vibration stress

位置	频域法 RMS	时域法 RMS	相对误差/%
	应力/MPa	应力/MPa	
R ₁	24.4	28.8	15.2
R ₂	21.3	24.5	13.1
R ₃	24.6	28.9	14.9
R ₄	21.4	24.2	11.9
R ₅	60.4	60.6	0.4

表 7 频域法估算应力峰值与时域法最大 Von Mises
Tab.7 Stress peak of frequency domain method and maximum Von Mises of time domain method

位置	时域法最大 Von Mises/MPa	频域法 3σ 原则		频域法 5σ 原则	
		应力/MPa	误差/%	应力/MPa	误差/%
R ₁	134.1	73.2	45.4	122	9.0
R ₂	114.4	63.9	44.1	106.5	6.9
R ₃	133.8	73.8	44.8	123	8.0
R ₄	113.5	64.2	43.4	107	5.8
R ₅	267.1	181.2	32.2	302	13.1

4.3 疲劳寿命

基于应力响应,利用频域法和时域法对图 15 和图 16 所示危险位置的疲劳寿命进行预测,并用式(13)计算二者之间的误差因子 $E_r^{[19]}$,结果见表 8.

$$E_r = \frac{N_{\text{freq}}}{N_{\text{test}}}$$

(13)

式中: N_{freq} 为频域法计算疲劳寿命; N_{test} 为时域法计算疲劳寿命.

表 8 振动疲劳寿命
Tab.8 The vibration fatigue life

位置	频域法疲劳寿命/s	时域法疲劳寿命/s	误差因子/倍
R ₁	1 870	511	3.7
R ₂	29 300	5 540	5.3
R ₃	1 920	524	3.7
R ₄	29 200	6 420	4.5
R ₅	2 980	799	3.7

由表 8 可知,频域法计算的疲劳寿命为时域法计算值的 3.7 ~ 5.3 倍,主要原因是 Dirlik 模型和应力响应 PSD 谱差异的影响.

1)Dirlik 模型的影响.由雨流计数和 Dirlik 模型得到的 R₂位置应力幅循环次数曲线的对比可知,时域法和频域法在同一应力幅值处计算的循环次数存在一定差距,如图 19 所示.由表 9 可知,Dirlik 模型造成的差距在 1.2 ~ 1.5 倍,误差影响率的范围为 23% ~ 41%,平均影响率为 34%.

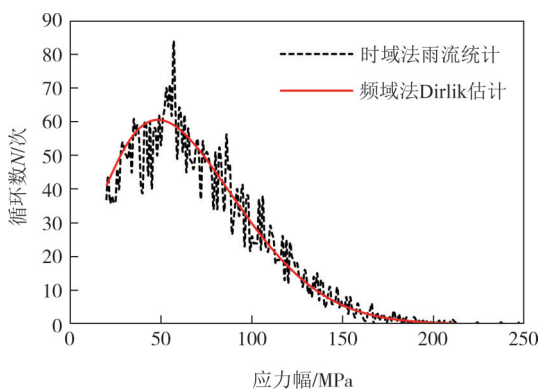


图 19 雨流计数与 Dirlik 模型的应力循环次数对比
Fig.19 Comparison of stress cycles between rain-flow counting method and Dirlik model

表 9 Dirlik 模型的影响

Tab.9 Influence of Dirlik model approach				
位置	Dirlik 估计疲劳 寿命/s	雨流计数疲劳 寿命/s	误差因子/倍	影响率/%
R ₁	720	510	1.4	39
R ₂	6 800	5 500	1.2	23
R ₃	740	520	1.4	39
R ₄	7 800	6 400	1.2	27
R ₅	1 200	800	1.5	41

2)应力响应 PSD 谱差异的影响.由式(3)可知,时域法的疲劳寿命计算基于临界面正应力的雨流计数,而频域法疲劳寿命计算基于 Von Mises 等效应力 PSD 谱,其计算表达式为:

$$G_{\sigma_{em}}(f_m) = \text{trace}(A \cdot G_{\sigma\sigma}(f_m)) \tag{14}$$

式中: $G_{\sigma\sigma}(f_m)$ 为应力响应 PSD 矩阵; A 为 Von Mises 的二次计算式.

临界面正应力与 Von Mises 等效应力的差异是导致时域法和频域法计算的应力响应 PSD 谱出现差异的主要原因,如图 20 所示.

应力响应 PSD 谱的差异通过应力循环次数影响结构疲劳寿命的计算值,如图 21 所示.由表 10 可知,应力响应 PSD 谱差异导致的误差因子在 2.5~4.3 倍,误差影响率的范围为 59%~77%,平均影响率为 66%.

4.4 计算效率和精度

4.4.1 计算效率分析

时域响应信号的采样频率是影响时域法分析精度的重要因素,为了保证时域响应信号在关心频率带宽内无混叠和不失真,根据 Shannon 采样定理,采样频率至少为关心信号最高频率的 2 倍^[20].

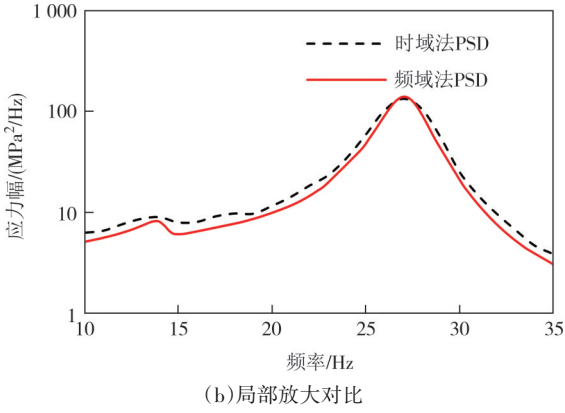
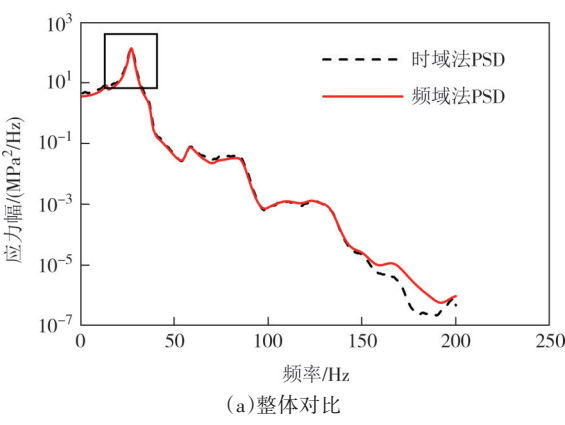


图 20 R₂应力响应 PSD 谱对比
Fig.20 Comparison of stress response PSD at R₂

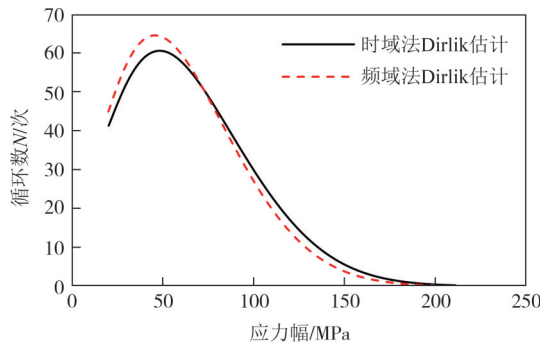


图 21 应力 PSD 谱差异的影响
Fig.21 Influence of stress PSD difference

表 10 应力 PSD 谱差异的影响

Tab.10 Influence of stress PSD difference				
位置	Dirlik 估计疲劳 寿命/s	雨流统计疲 劳寿命/s	误差因子/倍	影响率/%
R ₁	1 900	720	2.6	61
R ₂	29 000	6 800	4.3	77
R ₃	1 900	740	2.6	61
R ₄	29 000	7 800	3.7	73
R ₅	3 000	1 200	2.5	59

由表 2 可知,电池包的最高分析频率为 200 Hz,因此时域法最低采样频率应为 400 Hz,采样时间间隔为 0.002 5 s,完成一次总时长为 200 s 的分析至少

需要 80 000 个迭代步,而在同样频率分辨率的情况下,频域法只需要 595 个迭代步,计算效率比时域法高了约 134 倍。

4.4.2 计算精度验证

为了验证时域法和频域法的计算精度,基于表 2 加速度 PSD 谱,利用 LDS 振动台对电池包进行 12 h 随机振动测试,如图 22 所示。试验结果显示, R_2 位置处的最低振动疲劳寿命为 12 h 目标寿命的 16.4%,见图 23。

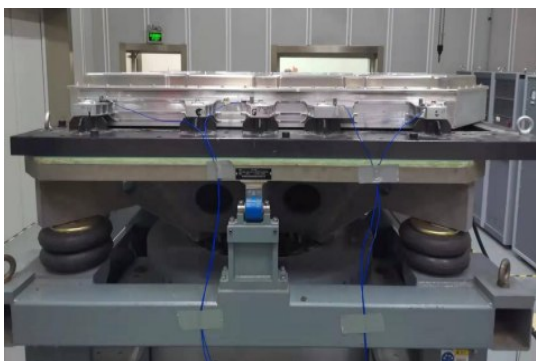


图 22 电池包随机振动疲劳测试

Fig.22 The random vibration fatigue test of battery pack

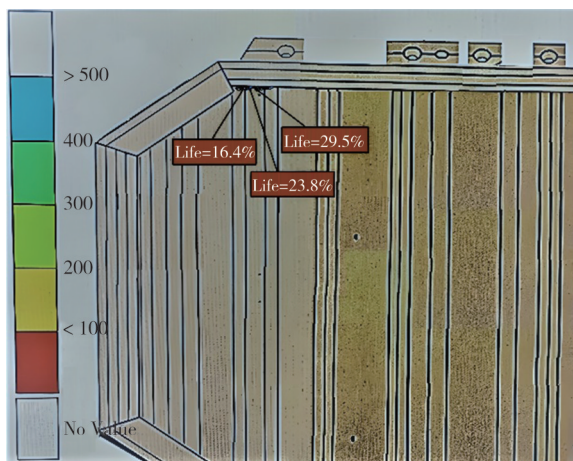


图 23 R_2 疲劳测试寿命

Fig.23 The test fatigue life of R_2

由表 8 可知,频域法 R_2 疲劳寿命为 29 300 s,占 12 h 目标寿命的 67.8%,而时域法疲劳寿命为 5 540 s,占 12 h 目标疲劳寿命的 12.8%,与试验测试结果更接近,计算精度更高。

5 结论

1) 频域法和时域法在电池包振动总级、应力 RMS 值以及疲劳寿命预测趋势上相近,但与复杂的时域临界面法相比,频域法计算效率更高,约高

134 倍。

2) 考虑到频域法“ 3σ ”计算值与时域法最大幅值的差距较大,推荐频域法采用“ 4σ ”或“ 5σ ”原则对加速度和应力的最大幅值进行估算。

3) Dirlik 模型和应力响应 PSD 谱的差异是造成频域法和时域法的疲劳寿命值产生较大差距的主要原因,其中 Dirlik 模型造成的差距小于 1.5 倍,平均影响率约为 34%。

4) 与频域法相比,时域法计算精度更高,因此为了对电池包结构振动的疲劳性能进行更快和更精确的验证,可先利用频域法对结构振动疲劳危险位置进行快速预测,再利用时域法对危险位置的疲劳寿命进行精确计算。

参考文献

- [1] 黄培鑫, 兰凤崇, 陈吉清. 随机振动与冲击条件下电动车电池包结构响应分析[J]. 汽车工程, 2017, 39(9): 1087–1093.
HUANG P X, LAN F C, CHEN J Q. The structural response analysis of EV battery pack under random vibration and impact conditions [J]. Automotive Engineering, 2017, 39(9): 1087–1093. (in Chinese)
- [2] 吴光强, 张曙. 汽车数字化开发技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 83–106.
WU G Q, ZHANG S. Automotive digital development technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 83–106. (in Chinese)
- [3] 袁盛铭, 吴兴文, 赵明花, 等. 随机振动疲劳寿命评估频域法模型适用性研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(2): 28–34.
YUAN S M, WU X W, ZHAO M H, et al. Research on applicability of frequency domain model for random vibration fatigue lifespan assessment [J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(2): 28–34. (in Chinese)
- [4] 郑向远, 李冬安, 邹荔兵, 等. 考虑初始条件的结构振动方程的频域算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 32–40.
ZHENG X Y, LI D A, ZOU L B, et al. Frequency-domain algorithm for structural vibration equations considering initial conditions [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(3): 32–40. (in Chinese)
- [5] 吴光强, 李运超, 盛云. 后悬架多轴疲劳寿命预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 880–884.
WU G Q, LI Y C, SHENG Y. Multiaxial fatigue life prediction of rear suspension [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(6): 880–884. (in Chinese)
- [6] 王天鹏, 张建仁, 王磊, 等. 基于裂纹扩展的锈蚀拉索疲劳寿命评估[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 90–99.
WANG T P, ZHANG J R, WANG L, et al. Fatigue life assessment of corroded cables based on crack propagation [J].

- Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(1): 90-99. (in Chinese)
- [7] KIM H G, KIM G, JI W, et al. Random vibration fatigue analysis of a multi-material battery pack structure for an electric vehicle [J]. Functional Composites and Structures, 2021, 3(2): 025006.
- [8] 谢敏捷, 赵松, 曾小利, 等. 基于时域法和频域法的车身动态疲劳分析[J]. 失效分析与预防, 2020, 15(2): 69-73.
- XIE M J, ZHAO S, ZENG X L, et al. Dynamic fatigue analysis of trimmed body based on time domain and frequency domain methods [J]. Failure Analysis and Prevention, 2020, 15 (2): 69-73. (in Chinese)
- [9] 戴江梁, 熊飞, 刘静, 等. 基于某车型动力电池包的随机振动疲劳分析与结构设计改进[J]. 机械强度, 2020, 42 (5): 1266-1270.
- DAI J L, XIONG F, LIU J, et al. Random vibration fatigue analysis and structural design improvement of battery pack based on an vehicle [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(5): 1266-1270. (in Chinese)
- [10] 吴勇明. 任意角度应变花主应变与主方向的计算机方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001, 29(3): 95-98.
- WU Y M. Computer methods of calculating the principal strains and the directions of any angle strain rosette [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2001, 29(3): 95-98. (in Chinese)
- [11] CARPINTERI A, SPAGNOLI A, RONCHEI C, et al. Critical plane criterion for fatigue life calculation: time and frequency domain formulations [J]. Procedia Engineering, 2015, 101: 518-523.
- [12] 王肇喜, 白金, 王海东, 等. 临界平面多轴疲劳寿命估算模型的验证与评估[J]. 失效分析与预防, 2020, 15(6): 343-348.
- WANG Z X, BAI J, WANG H D, et al. Verification and evaluation of critical plane-based multiaxial fatigue life prediction models [J]. Failure Analysis and Prevention, 2020, 15 (6): 343-348. (in Chinese)
- [13] 机械设计手册编委会. 机械设计手册: 单行本: 机械振动和噪声[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 48-51.
- Editorial Board of Mechanical Design Manual. Mechanical design manual: booklet: mechanical vibration and noise [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 48-51. (in Chinese)
- [14] 程必良. 纯电动汽车电池包结构优化设计研究[D]. 太原: 中北大学, 2021: 19-31.
- CHENG B L. Research on optimal design of battery pack structure for pure electric vehicles [D]. Taiyuan: North University of China, 2021: 19-31. (in Chinese)
- [15] 许本文, 焦群英. 机械振动与模态分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 177-204.
- XU B W, JIAO Q Y. Fundamentals of mechanical vibration and modal analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 1998: 177-204. (in Chinese)
- [16] WANG Z, XIA E, CHEN Z, et al. Study on the quantitative relationship between static stiffness and modal parameters of an aluminum space frame [J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2020; 4(2): 97-107.
- [17] 龙江启, 周平, 郑金品, 等. 考虑多工况刚度和模态灵敏度的全地形车车架轻量化设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(7): 109-118.
- LONG J Q, ZHOU P, ZHENG J P, et al. Lightweight design of all-terrain vehicle frame considering multi-condition stiffness and modal sensitivity [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36 (7): 109-118. (in Chinese)
- [18] 陈德朋. 基于模态参数的白车身有限元模型修正[D]. 长沙: 湖南大学, 2018: 18-20.
- CHEN D P. Finite elements model updating of body in white based on modal parameters [D]. Changsha: Hunan University, 2018: 18-20. (in Chinese)
- [19] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 357-366.
- YAO W X. Structural fatigue life analysis [M]. Beijing: Science Press, 2018: 357-366. (in Chinese)
- [20] 沃德·海伦, 斯蒂芬·拉门兹, 波尔·萨斯, 等. 模态分析理论与试验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001: 31-44.
- HEYLEN W, LAMMENS S, SAS P, et al. Modal analysis theory and testing [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2001: 31-44. (in Chinese)