DOI：10.3901/JME.2018.08.157

车用电池包结构动力学建模及分析方法研究*

兰凤崇[1,2] 黄培鑫[1,2] 陈吉清[1,2] 刘 金[1,2]
(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640；
2. 广东省汽车工程重点实验室 广州 510640)

摘要：汽车动力电池包多由单体电池、模组、壳体、电器联接部件及管理系统装配成整体，在变温、振动环境下完成充放电功能。其性能的可靠和安全直接决定了电动汽车的正常运行。研究复杂电池包结构的动力学建模和分析，探索其内部精细结构以及整体电池包的动力学响应，是车用电池包开发和结构、性能优化的迫切需要。提出了基于单体等效力学参数和实际接触连接条件的复杂电池包系统建模和动力学分析方法，结合电池包开发实例，建立各部分子模型并进行试验验证，通过优化算法确定最佳接触参数；对比集中质量模型、简化连接模型、接触模型的模态仿真结果，验证所建模型的有效性和精度，说明建模方法的可行性；获得了实例电池包内部关键电接触点在随机振动下的响应，发现同一振动工况下不同位置触点的加速度响应差异很大，呈现很强的不均匀性。给出了螺栓连接的电池包装配体动力学精细化建模方法和分析思路，对同类型电池包结构设计、安全性分析有实际意义。

关键词：车用电池包；单体建模；接触模态；动力学分析
中图分类号：U469

Study on the Method of Structural Dynamic Modeling and Analyzing of the EV's Battery Pack

LAN Fengchong[1,2] HUANG Peixin[1,2] CHEN Jiqing[1,2] LIU Jin[1,2]
(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Automotive, Guangzhou 510640)

Abstract：The EV's battery packs whose reliability and security performance directly determine the EV's normal operation mostly assembled into integration by battery cells, modules, shell, electrical connection components and management system, completing the charge and discharge function under the vibration and varying temperature environment. It's an urgent need to study on dynamic modeling and analyze of complicated battery packs and explore the dynamic response of internal fine structure and the whole integration during the developing and optimizing procedure of battery packs. The method of complicated battery packs systemic dynamic modeling and analyzing based on the cell's equivalent mechanical parameters and actual contact conditions is proposed. Combined with the development of a battery pack instance, each sub-model is established and under experimental verification. The optimum contact parameters are determined by optimization algorithm. The simulation results of mass-concentrated model, connection-simplified model and contact-considered model are compared to experimental result to verify the validity and accuracy of the model and the feasibility of the method. The random vibration responses of instance's internal key electrical contact points are achieved and show that different positions have big difference under a same vibration excitation and the responses are highly non-uniform distribution. The method of dynamic modeling and analyzing of bolt-connected battery pack is proposed and has practical significance to the design and safety analysis of the same type battery packs.

Key words：EV's battery pack；cell modeling；contact modal；dynamic analysis

0 前言

动力电池包是影响电动汽车安全性能的关键部件，从场变量的角度是一个机械场-电场-热场耦合的复杂系统。电池包动力学特性同时影响着机械系统、电系统和热系统的可靠性，在振动冲击条件下不仅会出现应力腐蚀、结构强度下降、电接触疲劳破坏等问题，更严重的会引发接触短路、高压漏电、着火等安全事故。从装配体的角度，动力电池包是一个多子系统的复杂装配体，其复杂性体现在电池

* 广东省科技计划(2014B010106002，2015B010137002，2016A050503021，2016B090918089)和 NAIS(2017X-0028)资助项目。20170725 收到初稿，20180201 收到修改稿

单体由金属外壳、隔膜层、及电解液等多种材料复合组成，而一个电池包包含成百上千个单体；电池模组与内支架、壳体之间的装配以及与蓄电池管理系统(Battery management system, BMS)，保护电路间的电接触都需要考虑预紧力条件下的接触，接触状态同时影响机械结构和电接触结构的可靠性。

在电池包开发设计阶段，针对其复杂性特点，对电池包内、外各组成部分进行精细化建模，确定各组件间的接触边界条件，建立合理的接触模型，以得到满足精度要求且能反映内部子结构动态特性的电池包动力学模型。在此基础上进行电池触点振动环境描述、壳体结构优化、内部电连接强度校核、焊点、螺栓疲劳寿命预测等动力学和可靠性分析。

目前对于电池包动态特性的研究主要集中在以下几个方面，结构强度静动态分析及对应的结构优化设计[1]；电池包结构疲劳寿命预测研究[2]；电池包结构模态分析及与之对应的结构优化设计[3]；电池包结构定频激励下的振动特性研究[4]。研究中电池包动力学有限元模型主要有两种，集中质量模型-即不考虑电池单体的建模，将其简化为集中质量点，质量点与箱体采用刚性连接；简化连接模型-考虑了单体的建模，将电池与箱体的连接关系简化为刚性或胶黏，忽略装配预紧力和部件间的接触关系对整体模态的影响。现有研究主要停留在电池包箱体层面，没有考虑内部精细部件及其复杂连接，误差较大的同时无法仿真出电池、触点以及附属电气构件的振动状态。

为应对电池包复杂系统开发要求，提出考虑电池等效力学参数和接触条件的电池包动力学建模方法。首先介绍了建模思路、采用的试验和数值分析方法；然后建立各部分子模型并与试验对比进行验证，通过优化算法确定了最佳接触参数；最后对比了集中质量模型、简化连接模型、接触模型的模态仿真结果与模态试验结果，验证所建动力学模型的有效性和精度，说明建模方法的可行性；在此基础上获得了内部关键电接触点在随机振动下的响应。为螺栓连接的电池包装配体动力学精细化建模提供了一种思路，为同类型电池包结构设计，安全性分析作基础性工作。

1 建模思路和方法

如图 1 所示，任何复杂电池包动力学模型可拆解为电池建模、壳体等外部件建模、装配关系定义三个部分。

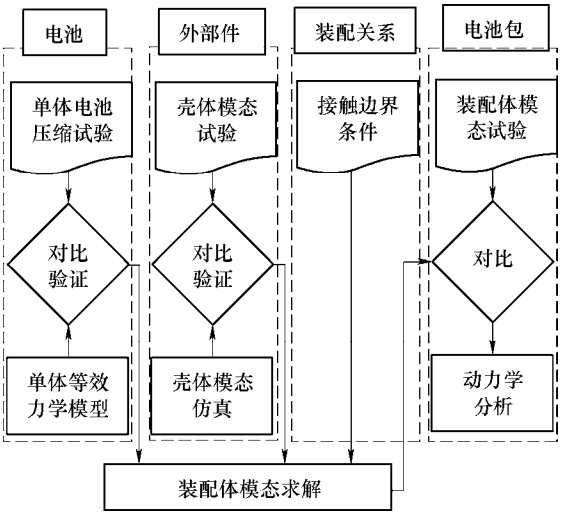


图 1 建模思路

电池占电池包总重 50%以上，合理、准确的单体电池模型是整体建模的基础。壳体等外部件分为金属与非金属两类，金属壳体多由薄钢板拼焊或点焊而成。装配关系中，单体电池之间通过极柱与大极片激光点焊组成模组，模组之间的电连接、模组与壳体之间的紧固连接多为螺栓连接。

采用各个部分独立建模，逐一验证，最后组成装配体求解的方式，将电池包开发实例的建模流程具体为电池等效力学模型的建立与验证、电池壳体的模态分析及验证、结合装配体模态试验确定最优边界条件、装配体模态求解及动力学分析。

1.1 试验方法

(1) 电池单体压缩试验。目前学者主要从两个角度对电池结构建模进行了相关尝试性研究，其中一个方向是用多层复合结构来模拟[5]。该方法主要是利用电池内部成千上万层正负极和隔膜的材料属性来估算模拟单元的材料属性，此法适用于单体研究，不适用于电池包级别的整体建模。另一种方法是电池均质化，并通过单体电池的力学试验获得其材料属性。SHARAEI 等[6]利用均质的可压缩泡沫模型模拟了 18650 锂离子电池在不同载荷下的变形情况，并与试验吻合度较高。

采用均质化法模拟电池，针对电池包所用 1865140 方形单体电池进行单向压缩试验，获取材料属性，为建立均质化电池有限元模型作基础。具体电池参数如表 1 所示。为保证试验安全，防止电池在力学试验过程中因为内部短路引起起火爆炸等危险，试验前利用 IT8514C+电子负载对样件放电至 SOC=0(完全放电)。将样件按压缩试验要求，固定于试验机夹具上，沿着锂离子电池的主轴方向，以恒定的速度压缩，当试验压力达到某一预定值或压缩量达到某一预定值时，试验停止。如图 2 所示，

本次试验速度 V 设为 1 mm/s，预定压力值 F 设为 140 kN，预定压缩值设为 10 mm。

表 1　1865140 方形电池参数

项目	指标	项目	指标
长/mm	135	标称容量/Ah	10
宽/mm	65	标称电压/V	3.2
厚/mm	17	内阻/ mΩ	≤10
质量/g	275	寿命	0.5 C 放电下 2 000 次

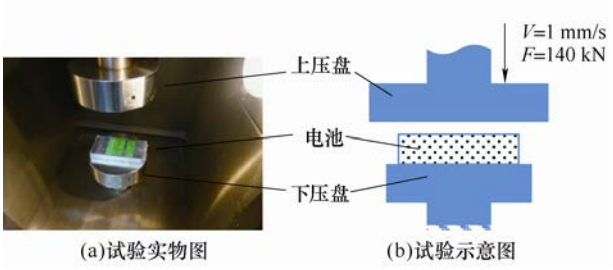


图 2　电池单体压缩试验

(2) 壳体及装配体模态试验。电池模组、外壳体和连接接触关系组成了电池包装配体，为验证外壳体有限元模型的正确性，采用力锤敲击法对壳体进行模态试验。

(3) 装配体模态试验。为验证整体动力学模型的有效性，采用单点激振多点拾振的方法对电池包装配体进行模态试验，如图 3 所示。进行悬挂前确认所有螺钉按标准紧固，各个部件接触面紧密贴合，若存在间隙会大大增加系统的非线性度，影响结果精度。同时把易受激振动的附件如信号线、正负极立柱等部件固定好，避免部件因自由振动影响试验，对传感器作绝缘处理。电池包整体参数如表 2 所示，共设置 116 个测点，频率分辨率为 1 Hz，测量频率范围 0～200 Hz。

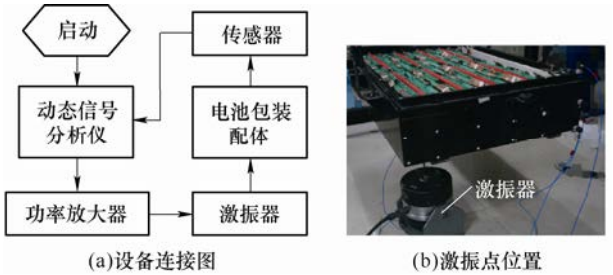


图 3　电池包装配体模态试验

表 2　电池包整体参数

项目	指标	项目	指标	项目	指标
长/mm	1 006	宽/mm	616	高/mm	194
标称容量/ Ah	150	标称电压/V	76.8	质量/ kg	158.7

1.2　数值方法

一般的自由模态分析建立在线性系统且无边界条件的假设上，而组合装配体模态分析有其特殊性。

(1) 螺栓预紧力使得组合结构在装配完成时存在预应力场，预应力场会影响整个装配体的固有频率。

(2) 各个组件之间需要定义接触关系，存在边界非线性。研究表明[7]，当接触状态趋于稳定，则结构刚度矩阵不再变化，可以近似为线性结构而采用线性计算。

m 自由度无阻尼或比例阻尼的线性时不变系统的固有振动方程为[8]

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{X} = \boldsymbol{0} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{M}$，$\boldsymbol{K}$ 分别为系统的质量矩阵和刚度矩阵；$\boldsymbol{X}$ 为系统的位移矢量。

设主振动为

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{\Phi}\sin(\omega t + \varphi) \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{\Phi}$ 是常数列矢量。

$$\boldsymbol{\Phi} = (\phi_1\ \phi_2 \cdots \phi_m)^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

将式(2)代入式(1)，得到下列代数齐次方程组

$$(\boldsymbol{K} - \omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{\Phi} = 0 \tag{4}$$

上面的方程组存在非零解 $\boldsymbol{\Phi}$ 的充要条件是系数行列式为零，即得到不考虑预应力场的特征方程

$$\left|\boldsymbol{K} - \omega^2\boldsymbol{M}\right| = 0 \tag{5}$$

行列式展开后求解关于 ω^2 的 m 次多项式，获得系统第 i 阶特征值 ω_i^2，将 $\omega^2 = \omega_i^2$ 代回式(4)求得系统第 i 阶固有振型 ϕ_i。

考虑螺栓预紧力作用下的预应力场，产生附加刚度矩阵[9]

$$\boldsymbol{S}\boldsymbol{X}_s = \boldsymbol{F}_s \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{F}_s$ 为螺栓预紧力，$\boldsymbol{X}_s$ 为预紧力引起的位移响应，$\boldsymbol{S}$ 为产生的附加刚度矩阵。系统特征方程改写为

$$\left|(\boldsymbol{K} + \boldsymbol{S}) - \omega^2\boldsymbol{M}\right| = 0 \tag{7}$$

可见有限元法求解接触模态的实质是先求解接触状态下的静力学问题，将由接触产生的附加刚度矩阵 $\boldsymbol{S}$ 叠加进原系统的整体刚度矩阵，第二步以叠加后的刚度矩阵作为初始迭代的系统刚度阵进行模态参数求解。

附加刚度矩阵 $\boldsymbol{S}$ 与预紧力和接触定义密切相关，当预紧力一定时，主要受接触状态的影响。接触状态分为法向行为和切向行为，分别以法向接触刚度和切向摩擦因数表征。

依据接触力学相关理论，可由接触面的粗糙度参数确定出接触刚度[10-11]。根据赫兹理论[12]，对于粗糙平面间的接触，根据其受力后顶点的变形及粗

糙层内应力分布的特点，可先假设：① 粗糙平面模型凹凸起伏的顶点是具有常曲率 k_s 的球形；② 由于平面接触时接触斑点密度很低，故可以近似认为，各接触点之间相互独立，微凸体变形互不影响。由文献[13]的研究结果可知，当顶点高度分布均为高斯分布，且分布的有效值分别为 σ_1 和 σ_2 时，其接触可以转换为一个光滑的刚性表面和另一个等效弹性模量为 E^*，顶点高度满足高斯分布且等效不平度为 $\sigma=(\sigma_1^2+\sigma_2^2)^{1/2}$ 的粗糙表面相接触，如图 4 所示。

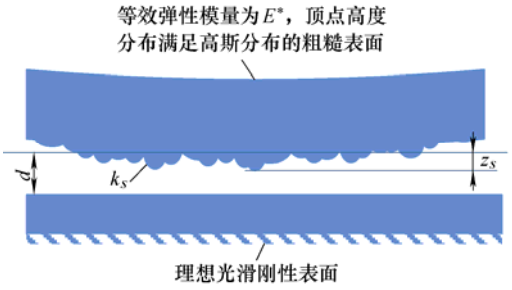


图 4 接触假设示意图

取表面的平均水平线为基准线，称刚性表面到基准距离为间隔 d，称顶点到基准的距离为顶点高度 z_s。z_s 的平均值为 $\bar{z}_s$，其概率密度函数为 $\varphi(z_s)$。如果在名义表面积 A_0 中有 N 个顶点，则在间隔 d 处接触的顶点数为

$$N^{'}=N\int_d^{\infty}\varphi(z_s)\mathrm{d}z_s \tag{8}$$

如果顶点高度超出了间隔，那么它将被压缩 $\delta=z_s-d$，并且将在半径为 a 的小圆形区域中与平面构成接触。因此，第 i 个顶点具有的接触区域为

$$A_i=\pi a_i^2=f(\delta_i) \tag{9}$$

压缩该顶点所需要的力为

$$P_i=g(\delta_i) \tag{10}$$

式中 $f(\delta)$ 和 $g(\delta)$ 与接触表面的材料性质有关。如果变形完全是在弹性极限之内，由赫兹方程有

$$f(\delta)=\pi\delta/k_s$$

$$g(\delta)=\frac{4}{3}E^*k_s^{-1/2}\delta^{3/2} \tag{11}$$

为了求出真实的总接触面积 A 和总的名义应力 $\bar{p}=P/A_0$，必须对高度超出间隔的所有凹凸起伏求和。于是有

$$A=N\int_d^{\infty}f(z_s-d)\varphi(z_s)\mathrm{d}z_s$$

$$\bar{p}A_0\equiv P=N\int_d^{\infty}f(z_s-d)\varphi(z_s)\mathrm{d}z_s \tag{12}$$

将式(11)代入式(12)，并进行归一化处理可得

$$A^*=\frac{Ak_s}{N\sigma_s}=\int_d^{\infty}\pi\left(\frac{z_s-\bar{z}_s}{\sigma_s}-d^*\right)\varphi(z_s)\mathrm{d}z_s$$

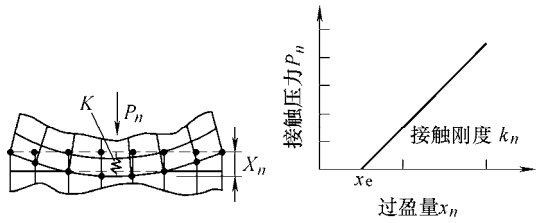
$$P^*=\frac{Pk_s^{-1/2}}{NE^*\delta^{3/2}}$$

$$d^*=\frac{d-\bar{z}_s}{\sigma_s} \tag{13}$$

由式(13)可得接触刚度 k_c

$$k_c=\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}d}=NE^*\left(\frac{\sigma_s}{k_s}\right)^{1/2}\left|\frac{\mathrm{d}P^*}{\mathrm{d}d^*}\right| \tag{14}$$

实际中的接触压力和接触表面粗糙度较难获得，故较难求得精确的接触刚度。有限元法中可用线性罚函数控制接触刚度(图 5)。



(a)面-面接触示意图 (b) 线性罚函数法

图 5 罚函数法控制接触刚度示意图

$$P_n=nk_c(x_n-x_e) \tag{15}$$

式中，n 为接触刚度因子(量纲一)，P_n 为接触压力，x_n 为过盈量，x_e 为接触压力为零时的过盈量。临界剪切应力与法向接触压力的关系下式，当超过临界剪切应力，接触面将发生切向相对滑动。

$$\tau_{crit}=P_n\mu_f \tag{16}$$

式中，τ_{crit} 为临界剪切应力，μ_f 为切向摩擦因数。

有限元法中可以通过调整接触刚度因子和切向摩擦因数来逼近真实的接触状态，进而影响附加刚度矩阵和最终的模态参数。

2 数值模型的建立

以其中一个模组(共 8 个模组)为例，电池包装配体示意图如图 6 所示，由壳体、压杆、压盖、内架等部件组成，对控制电源、排气扇等电气附件简

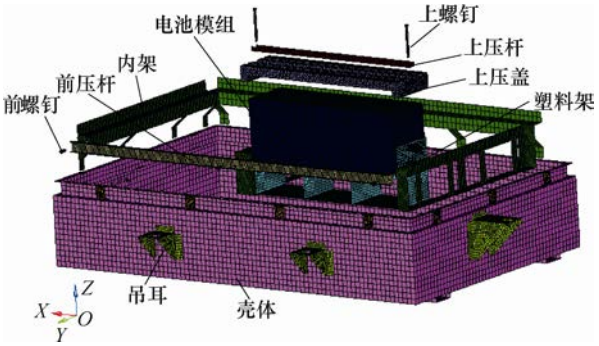


图 6 电池包装配体示意图

化处理，通过质量单元平均分配到相应安装点上。各部件的材料参数和单元类型如表 3 所示。

表 3　电池包各部件材料参数

部件	单元类型	弹性模量 ($\times10^5$ MPa)	泊松比	密度 ($\times10^3$ kg/m^3)
壳体	壳单元 S4R	2.06	0.3	7.8
内架	壳单元 S4R	2.06	0.3	7.8
上压盖	实体 C3D10	2.32	0.34	1.13
压杆	壳单元 S4R	2.06	0.3	7.8
螺钉	实体 C3D10	2.06	0.3	7.8

2.1　电池等效力学模型建立与验证

电池有限元模型采用大小为 3 mm 的正四面体单元，根据试验数据，材料参数取值分别为：弹性模量 75 MPa，泊松比 0.01，其中弹性模量为应力应变曲线中线性阶段斜率值。建立电池压缩有限元模型如图 7 所示，边界条件与试验设置一致。上压盘力-位移曲线的仿真值与试验值对比如图 8 所示，可以以看出无论是开始的线性阶段还是后续的平台阶段，仿真与试验结果非常吻合，验证了均质化方法的可行性以及等效力学参数的有效性。

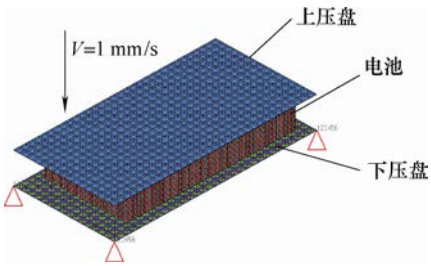


图 7　模拟压缩有限元模型

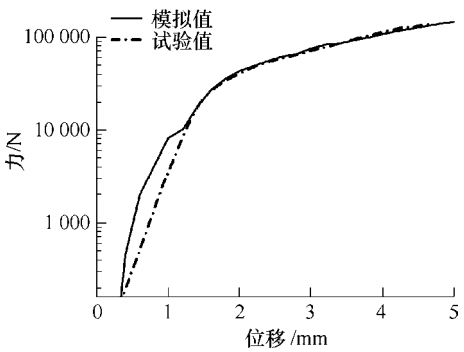


图 8　上压盘力-位移曲线

2.2　壳体模态仿真与验证

壳体试验与仿真对比结果如表 4 所示，前三阶模态误差均在 3%以内，且振型一致，验证了箱体模型的有效性。其中第一阶模态振型图如图 9 所示。

表 4　箱体的模态仿真及试验验证

阶数	振型	频率/Hz		误差 (%)
		仿真结果	试验结果	
1	整体一阶扭转	22.01	22.10	0.6
2	前板弯曲、地板鼓动	51.82	52.42	1.1
3	左板弯曲，地板鼓动	72.90	70.81	2.8

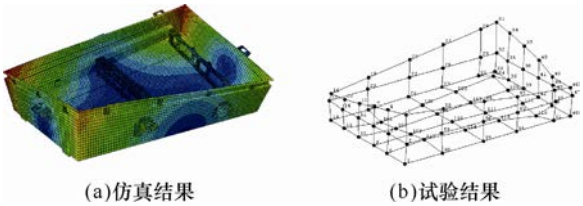


图 9　壳体模态仿真与试验对比(1 阶)

2.3　接触边界条件的确定

将经过验证的壳体模型与电池模型装配，将试验测得的预紧力矩 5 Nm 换算成预紧力施加在螺栓上。如图 6 所示，电池包装配体在 *Z* 向有上螺钉-上压杆、上压杆-压盖、压盖-电池等 5 个接触对，类似的 *Y* 向有 10 个接触对，综合考虑接触面积、计算量和精度，用电池-壳体接触的接触关系定义所有接触对。实际中测量接触刚度和摩擦因数是很困难的，目前大部分工程人员只能根据经验设置参数，难以获得最佳的参数组合，当仿真与试验结果出现偏差时亦缺乏修正仿真参数的方法。将参数设为连续变量，通过遗传算法结合试验反求参数，通过参数修正使仿真结果更精确。表 5 为当切向摩擦因数为 0.1 时，接触刚度对各阶固有频率的影响。

表 5　接触刚度对各阶固有频率的影响(μ_f=0.1)

接触刚度因子	1 阶频率/Hz	2 阶频率/Hz	3 阶频率/Hz	4 阶频率/Hz
0.005	31.19	47.74	62.44	69.62
0.010	33.42	48.75	63.93	71.11
0.015	34.48	49.12	64.59	71.78
0.020	35.15	49.44	64.84	72.25
0.025	35.73	49.66	65.24	72.69
0.030	36.02	49.76	65.39	72.88
0.035	36.33	49.83	65.52	73.07
0.040	36.44	49.82	65.59	73.10
0.045	36.68	49.97	65.70	73.30
0.060	36.74	49.99	65.58	73.34
0.080	37.32	50.16	65.94	73.78
0.100	37.59	50.20	66.01	73.89

电池包各阶固有频率和接触刚度因子、摩擦因数和广义刚度的关系如图 10～12 所示。可见，各阶固有频率随着接触刚度因子的增大而增大，但当刚度因子增大到一定程度，固有频率值趋于稳定；本电池包由于 *Z* 向和 *Y* 向都有螺栓紧固，所以切向行为对固有频率影响很小。广义刚度随着接触因子的

增大呈现出不同的趋势，1 阶和 4 阶广义刚度随着接触因子的增大而增大，2 阶和 3 阶则呈现相反的趋势。

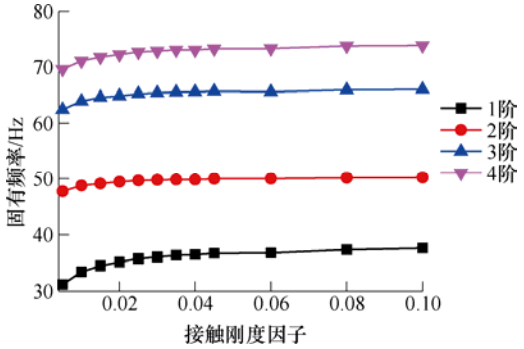


图 10 接触刚度对各阶固有频率的影响(f=0.1)

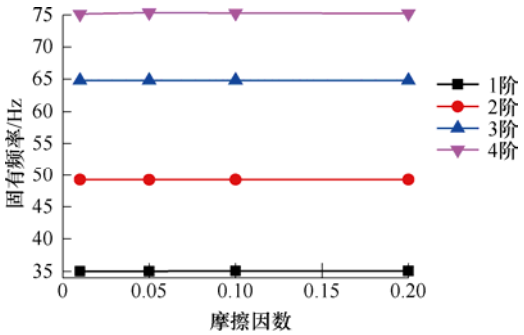


图 11 切向摩擦因数对固有频率的影响(n=0.02)

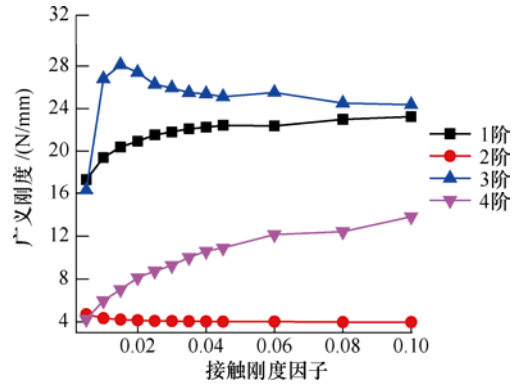


图 12 接触刚度因子对各阶广义刚度的影响(f=0.1)

由于摩擦因数对固有频率几乎无影响，本文主要反求接触刚度因子 n，设摩擦因数为 0.1。通过多项式法拟合得到 n 与固有频率的关系

$$\omega_{f1}=9\,274\,000n^5-2\,958\,000n^4+363\,600n^3-21\,590n^2+643.2n+28.59 \tag{17}$$

$$\omega_{f2}=5\,795\,000n^5-1\,758\,000n^4+203\,100n^3-11\,200n^2+303.9n+46.53 \tag{18}$$

$$\omega_{f3}=5\,917\,000n^5-1\,928\,000n^4+240\,900n^3-14\,360n^2+415.9n+60.8 \tag{19}$$

$$\omega_{f4}=4\,675\,000n^5-1\,617\,000n^4+213\,200n^3-13\,380n^2+415.6n+67.93 \tag{20}$$

式中 ω_{f1}，ω_{f2}，ω_{f3}，ω_{f4} 为前四阶固有频率仿真值。为使有限元结果逼近试验值，基于最小二乘法设置目标函数

$$y=\sum_i^4\left(\omega_{fi}-\omega_{ri}\right)^2\to\min \tag{21}$$

ω_{fi} 和 ω_{ri} 为各阶固有频率仿真值和试验值。边界约束条件为单阶仿真值与试验值误差不超过 5%

$$0.95\omega_{ri}\leqslant\omega_{fi}\leqslant1.05\omega_{ri} \tag{22}$$

目标函数随自变量变化的结果如图 13 所示。利用 Matlab 遗传算法工具箱迭代 51 次后求得 $y_{\min}=6.872\,1$，此时 $n=0.022\,4$。即当接触刚度取 0.022 4 时，可使前四阶模态仿真结果与试验值误差平方和最小。

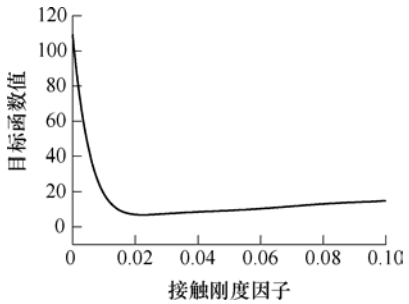


图 13 目标函数随接触刚度因子的变化

3 结果与分析

如图 14 和 15 所示，建立了该电池包的集中质点模型和简化连接模型：用 RBE2 单元代替螺栓连接如图 15a 所示；用 S8RT 单元模拟胶黏连接，如图 15b 所示。将求得的接触刚度因子代回接触模型。三个动力学模型的模态参数对比结果如表 6 所示，1 阶模态振型的仿真和试验结果如图 16 所示。

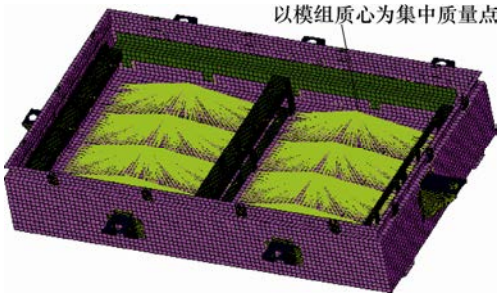
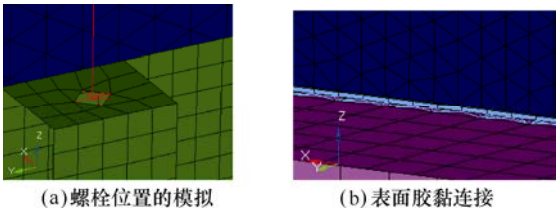


图 14 集中质点模型



(a)螺栓位置的模拟 (b)表面胶黏连接

图 15 简化连接模型

表 6　三种动力学模型模态参数结果对比

阶数	频率/Hz		误差 (%)	频率/Hz	误差 (%)	频率/Hz	误差 (%)
	试验值	接触模型		集中质点模型		简化连接模型	
1	35.20	35.30	0.2	*	*	38.22	8.5
2	51.22	49.51	3.3	51.64	0.8%	54.83	7.0
3	66.62	65.02	2.4	70.28	5.5%	71.31	6.9
4	71.12	72.31	1.7	80.03	12.5%	79.60	11.9

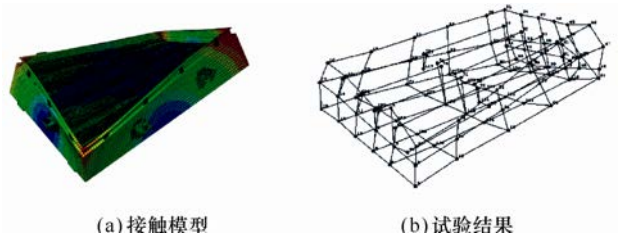


图 16　装配体模态仿真与试验对比(1 阶)

由表 6 和图 16 可见，集中质点模型缺失了整体一阶扭转模态，频率误差随着阶数的增大而增大，最大误差 12.5%。简化连接模型的振型与试验基本一致，但各阶频率均大于试验值，最大误差 11.9%。考虑电池等效力学参数和接触条件的电池包动力学模型精确度更高，最大误差 3.3%，能更好的反映电池包装配体的动态特性，同时也说明本文建模方法的可行性。

参考 GB/T 31467.3-2015《电动汽车车用锂离子动力蓄电池包和系统 第 3 部分：安全性要求与测试方法》中的振动试验要求，对电池包施加 *Z* 向单轴随机激励，*Z* 轴 PSD 如表 7 所示。输出 32 个带反馈信号线的关键触点加速度功率谱，结果如表 8 所示。

表 7　*Z* 轴 PSD 值

频率/Hz	功率谱密度(PSD)/ (g^2/Hz)	功率谱密度(PSD)/ [$(m/s^2)^2$/Hz]
5	0.05	4.81
10	0.06	5.77
20	0.06	5.77
200	0.000 8	0.08
RMS	1.44 g	14.13 m/s^2

表 8　关键触点加速度响应(*Z* 向)

触点	1	2	3	4	5	6	7	8
加速度 RMS/*g*	14.5	15.4	13.2	10.6	6.0	2.3	7.9	8.2
触点	9	10	11	12	13	14	15	16
加速度 RMS/*g*	13.2	16.7	16.4	18.9	17.5	13.3	7.9	3.2
触点	17	18	19	20	21	22	23	24
加速度 RMS/*g*	17.3	15.2	11.9	7.5	2.8	1.8	4.7	4.9
触点	25	26	27	28	29	30	31	32
加速度 RMS/*g*	8.1	11.2	10.5	6.4	5.3	5.2	4.2	2.6

结合图 17 中标明的电池包关键触点位置信息，分析表 8 中的加速度相应测试结果，同一振动工况下，不同位置触点的加速度响应差异很大，呈现很强的不均匀性，最大响应为 12 号触点的 18.9 *g*，最小响应为 22 号触点的 1.8 *g*。长时间的振动环境不一致会使得各触点连接耐久性也呈现不一致，振动恶劣的位置将率先出现疲劳破坏。



图 17　带信号反馈线的关键触点位置

图 18 为 12、13、17 号触点加速度功率谱密度曲线，可见在 39.45 Hz 附近振动被放大。装配体的一阶约束模态频率为 39.5 Hz，可见 *Z* 向振动主要由一阶模态主导。在进行电池包整体设计时，需先进行装配体模态分析，电池成组时尽量避免振型较大的位置，或对处于该位置的电接触连接进行针对性设计；电池包结构设计应考虑隔振、减振，对变形较大位置进行刚度补强或增加阻尼。

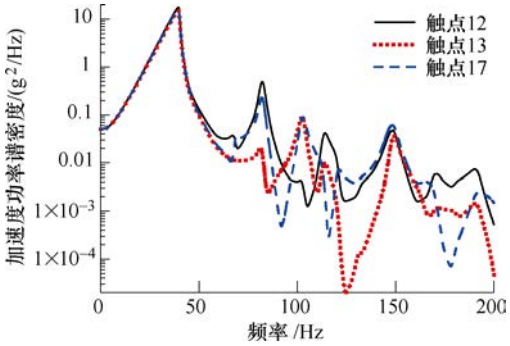


图 18　触点 12、13、17 的加速度功率谱密度

4　结论

(1) 提出了电池包装配体精细化建模流程和方法。对比了集中质点模型、简化连接模型的计算精度，考虑电池等效力学参数和接触条件的电池包动力学模型精确度更高，能更好的反映电池包装配体的动态特性。

(2) 建立了均质化的电池模型，并结合试验获得其均质化后的等效力学参数，为电池单体的建模

研究提供了一种思路。

(3) 研究了法向刚度因子对装配体固有频率的影响，发现各阶固有频率随着接触刚度因子的增大而增大，但当刚度因子增大到一定程度，固有频率值趋于稳定；结合试验提出了法向刚度因子优化方法，反求最佳参数组合对模型进行修正，使得仿真结果与试验结果更接近，具有工程应用价值。

(4) 获得了关键电触点位置的随机振动响应，发现同一振动工况下，不同位置触点的加速度响应差异很大，呈现很强的不均匀性且，加速度分布与装配体模态振型关联很大，对分析内部电连接可靠性，进行电池包整体设计有指导意义。

参 考 文 献

[1] 杨书建. 电动汽车电池箱动静态特性分析及其结构优化设计[D]. 长沙：湖南大学, 2012.
YANG Shujian. Static-dynamic analysis and strucyural optimization of electric vechicle battery box[D]. Changsha：Hunan University, 2012.

[2] 谷理想. 电动汽车电池包疲劳寿命预测关键技术研究[D]. 大连：大连理工大学, 2014.
GU Lixiang. Key technology research on fatigue life prediction of ev battery packs[D]. Dalian： Dalian University of Technology, 2014.

[3] 王力, 邓雄志, 陈家设. 基于结构优化的混合动力轿车电池包模态特性改进[J]. 上海汽车, 2014(6)：3-7.
WANG Li, DENG Xiongzhi, CHEN Jiashe. Modal characteristic improvements of hybrid vechicle’s batter pack based on structural optimization[J]. Shanghai Atuo, 2014(6)：3-7.

[4] 孙小卯.某型电动汽车电池包结构分析及改进设计[D]. 长沙：湖南大学, 2013.
SUN Xiaomao. Structure analysis and improvement design of battery pack in electric vehicle[D]. Changsha：Hunan University, 2013.

[5] AVDEEV I, GILAKI M. Structural analysis and experimental characterization of cylindrical lithiumion battery cells subject to lateral impact[J]. Journal of Power Souces, 2014, 271：382-391.

[6] SAHRAEI E, CAMPBELL J, WIERZBICIKI T. Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions[J]. Journal of Power Sources, 2012, 220：360-372.

[7] 谈卓君, 廖日东, 左正兴, 等. 接触条件下组合结构的动力学分析[J]. 机械强度, 2006, 28(5)：658-663.
TAN Zhuojun, LIAO Ridong, ZUO Zhengxing, et al. Dynamic analysis of composite structure on contact condition[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(5)：658-663.

[8] WILLIAM T T, MARIE D D. Theory of vibration with applications[M]. Beijing： Tsinghua University Press, 1998.

[9] ABAQUS INC. Abaqus 6.11 user’s guide[M]. Lebanon, NH： Abaqus Inc, 2013.

[10] 饶柱石, 夏松波. 粗糙平而接触刚度的研究[J]. 机械强度, 1994, 16 (2)：71-75.
RAO Zhushi, XIA Songbo, WANG Guangming. A study of contact stiffness of flat rouge surfaces[J]. Journal of Mechanical Strength. 1994, 16 (2)：71-75.

[11] JOHNSON K J. Contact mechanics[M]. Beijing： Higher Education Press, 1992.

[12] 饶柱石. 栏杆组合式特种转子动力学特性及其接触刚度的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学,1992
RAO Zhushi. Reseaches on dynamic characteristic and contact stiffness of special modular rotor rod[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology, 1992.

[13] GREENWOOD J A, TRIP J H. The contact of two nominally flat rough surface[J]. Pro. IMechE, 1970, 185：102-108.

作者简介：兰凤崇，男，1959 年出生，博士，教授博士研究生导师。主要研究方向为汽车结构与安全及汽车环境适应性。
E-mail：fclan@scut.edu.cn
黄培鑫，男，1991 年出生。主要研究方向为电池包复杂安全理论及结构安全设计。
E-mail：15913174264@163.com
陈吉清(通信作者)，女，1966 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为车身结构优化及汽车环境适应性。
E-mail：chjq@scut.edu.cn
刘金，男，1991 年出生。主要研究方向为电池包复杂安全理论及结构安全设计。
E-mail：2292765570@qq.com