

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.01.001

基于 Optistruct 的电池包结构分析与优化

刘成武, 吴平, 李喆, 施京凯, 吴铭
(福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 基于 Hyperworks 软件对某电池包精细化建模, 然后进行多工况和约束模态仿真。仿真结果表明, 该电池包在颠簸路面刹车和加速工况下均能满足条件, 但在约束模态分析中前两阶模态较低, 其中上盖板与路面激振频率接近, 产生共振对电池造成破坏。运用 Optistruct 中的厚度优化方法对上盖进行优化, 优化后再次建模仿真。优化后一阶约束模态达到 28.4 Hz, 有效避开了来自路面的共振频率, 研究结果可为电池包结构设计提供依据。

关键词: 电池包; 精细化建模; 工况分析; 约束模态分析; 厚度优化

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2021)01-0001-06

Analysis and optimization of battery package structure based on Optistruct

LIU Chengwu, WU Ping, LI Zhe, SHI Jingkai, WU Ming
(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A refined model of a certain battery pack was built based on a software, Hyperworks. After that, simulations under multiple load cases and constraint modes were carried out. The simulation results show that the battery pack can meet the conditions under the operating conditions of braking and speeding on the bumpy road. However, the first order and second order modes are lower in the analysis of the constrained mode, in which the excitation frequency of the upper cover plate resonates with that of the road surface, and consequently the resonance does damage to the battery. The method of thickness optimization in Optistruct was applied to optimize the upper cover, and the optimized battery pack was modelled and simulated again. After optimization, the first-order constrained mode reached 28.4Hz, which effectively avoided the resonance frequency from the road surface. The research results can provide a basis for the structural design of the battery pack.

Keywords: battery pack; refined modeling; condition analysis; constrained modal analysis; thickness optimization

纯电动汽车的核心为电池、电机和电控系统^[1]。电池包是纯电动汽车的储能装置, 要求有足够的强度和刚度, 其约束模态必须能够避开由电机和路面不平度引起的共振。为了更长的续航, 电池包体积不断增加, 不少纯电动汽车轴距越来越长, 导致动力电池上盖面积增大、刚度不足的现象时有发生。针对电池包进行各种极限工况和约束模态仿真分析, 研究其刚度和强度的分布情况, 在工程应用中具有一定参考价值。

1991 年, Kazuo Ao^[2]便开始对电池包的设计和分析。1995 年, Krawczuk^[3]对电池包做模态分析。2011 年, Ariyoshi Tomohik^[4]对新能源汽车动力系统建模与仿真的研究。之后国外出现了一些用有限元方法研究电池包的文章^[5-8]。国内也有类似的研究, 兰凤崇、王振坡和崔佳等人^[9-11]用有限元技术对电池包的轻量化、碰撞安全性和振动疲劳等进行研究。但目前的研究还存在一些不足, 如文献[12]对电池包进行有限元分析, 但连接

关系和电池模组都过于简单,不能充分模拟各种工况下电池包内部各部件之间力的传递过程。

本文以某纯电动汽车电池包为研究对象,模拟真实情况下电池包内部的连接关系,搭建更精确的有限元模型。

1 电池包精细化建模

电池包由箱体、电池模组、托架、电气系统元器件、热管理系统元器件和冷却系统等部分组成。将电池模组简化为一个均质长方体,建立模组与侧板之间固定的长螺栓。保留模组底部的水冷板和模组与模组之间的软连接。由于电器件、高压插件、霍尔传感器、继电器、水冷管、输电线等一些塑料件刚度、强度对整体影响不大,为了减少计算量,将它们以质量点的形式施加在相关单元上。

动力电池模组采用六面体网格划分,其他均采用壳单元划分,六面体单元尺寸为 8 mm,壳单元尺寸为 10 mm。有限元模型如图 1 所示,主要材料、属性及厚度见表 1。本文主要对电池包进行静力学工况分析,电池未发生失效,故采用均质化模型。

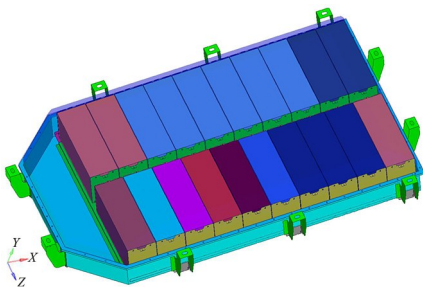


图 1 电池包有限元模型

Fig.1 Finite element model of the battery pack

表 1 材料参数

Tab.1 Material parameters

部件名称	材料名称	密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	厚度/ mm
箱体	Q345	7.9	206	0.3	5
上盖	PA6	1.13	23.2	0.3	3
吊耳	Q345	7.9	206	0.3	4
加强筋	Q345	7.9	206	0.3	5
螺栓	Q345	7.9	206	0.3	4
模组挡板	Q345	7.9	206	0.3	4

焊点采用 ACM 单元如图 2(a)所示,引入实体单元提高计算精度,同时 rb3 单元不会提高刚度。螺栓由 rbe2 单元和 cbeam 单元组成如图 2(b)所示,能够较好地模拟真实情况中螺栓的固定作用。最终模型共计 1 374 252 个网格,1 507 302 个节点,雅可比小于 0.6 的网格只有 246 个远小于 5%,总质量 450.7 kg 与实际质量误差小于 5%。模型用于仿真分析。

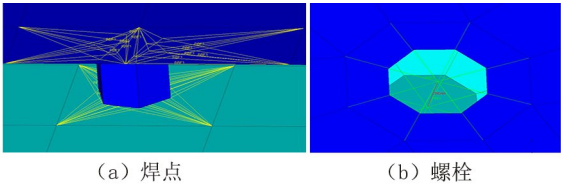


图 2 焊点和螺栓建模形方式

Fig.2 Modeling of solder joints and bolts

2 静力学典型工况分析

电池包通常占用纯电动汽车质量的 1/3,在静力学典型工况中主要受振动载荷及惯性力的作用。为了考察电池包的动力学特性,对电池包在颠簸、刹车、加速、急转弯等典型工况下进行分析,判断是否具有足够的强度和刚度,以及是否能够抵抗复杂的加速度和惯性力,从而确定电池包是否达到对电池模组和电器系统的保护作用以及模组是否受损。

参考文献[13]选取颠簸路面急转弯和颠簸路面急刹车两种典型工况对电池包进行分析。边界条件加载方式列于表 2,其中车辆前进方向为 X-,驾驶员左侧方向为 Z+,垂向为 Y+,其中 Y 向的加速度包含重力加速度。

表 2 典型工况及加载方式

Tab.2 Typical working conditions and loading methods

工况	加载方式
颠簸路面+急刹车	Y 方向 3g X 方向 3g
颠簸路面 + 急转弯	Y 方向 3g Z 方向 2g

注: g 为重力加速度。

电池包通过 10 个螺栓与车身相连,为了更好地模拟电池包与汽车的真实连接情况,在螺栓孔周围建立一圈 washer,然后用 rbe2 单元抓取,约

束 rbe2 单元所有自由度。

上盖主要起封闭作用,不作为这两种工况下的主要讨论对象。为避免 rbe2 单元刚度太高,导致部分吊耳螺栓孔附近应力集中,隐藏与 rbe2 单元直接相连的 washer 网格,对吊耳,箱体,加强筋、电池模组等部件进行分析。

2.1 颠簸路面急刹车工况

在颠簸路面急刹车工况下,对电池包施加边界条件为约束吊耳 rbe2 单元所有自由度。载荷条件为在 Y 向施加 3g 加速度,在 X 向施加 3g 加速度。结果如图 3 所示。

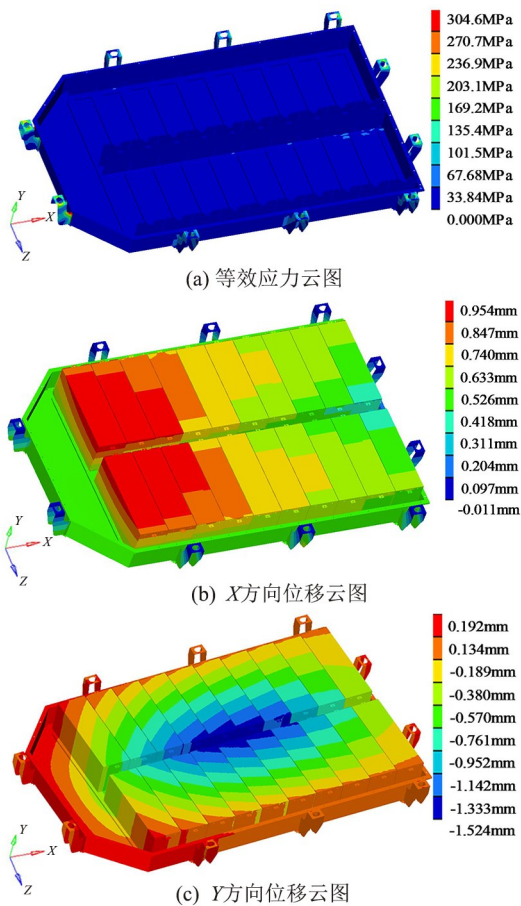


图 3 颠簸路面急刹车工况应力、位移云图
Fig.3 Stress and displacement cloud diagram of sudden braking conditions on bumpy roads

由图 3(a) 可知,在颠簸路面急刹车工况下,承受应力最大的部位是吊耳与箱体的连接处,应力为 304.6 MPa,吊耳所采用的材料是 Q345 钢材,其屈服值为 345 MPa,所以在颠簸路面急刹车这种极限工况下,电池箱体安全,没有零部件发生屈服。

王芳等^[14] 评价电池包静力学特性指标为: 在 3g 的加速度作用下,结构件的变形不应超过 3 mm。从图 3(b) 分析得到,在颠簸路面急刹车的工况下,电池包 X 方向上电池模组发生的最大位移不超过 1 mm,由图 3(c) 可知,在 Y 方向上位于电池包中间的模组发生上下颤动,最大位移 1.52 mm,小于 3 mm。综上,该电池包在颠簸路面急刹车工况下结构安全。

2.2 颠簸路面急转弯工况

在颠簸路面急转弯工况下,对电池包施加边界条件为约束电池包吊耳所有自由度。载荷条件为在 Y 向施加 3g 加速度,在 Z 向施加 2g 加速度,仿真结果如图 4 所示。

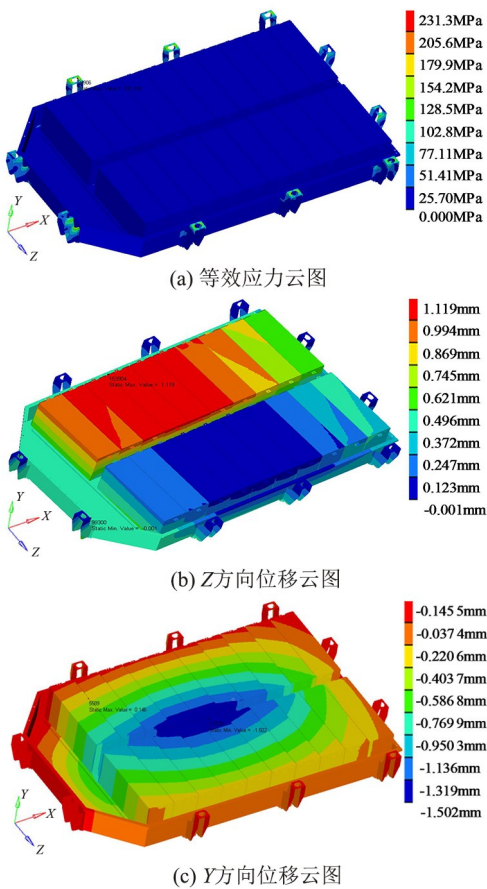


图 4 颠簸路面急转弯工况应力、位移云图
Fig.4 Stress and displacement cloud diagrams of sharp turning conditions on bumpy roads

由图 4(a) 可知,电池包在吊耳与汽车固定处出现应力最大值 231.3 MPa,小于 345 MPa。由图 4(b) 可知,模组 Z 方向最大位移为 1.119 mm。由图 4(c) 可知,在 Y 向加速度作用下,电池模组发

生了颤动, Y 向位移量为 1.5 mm, 根据文献[14]中的评价指标, 该电池包在颠簸路面急转弯工况下结构安全。

3 约束模态分析及优化

3.1 电池包约束模态分析

约束模态求解分析数学模型及求解过程如下:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

其中, $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\ddot{\delta}\}$ 为节点加速度矩阵; $\{\dot{\delta}\}$ 为速度列阵; $\{\delta\}$ 为位移列阵; $\{F\}$ 为激励力矩阵。对于电池包而言, 方程可以简化为:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = 0 \quad (2)$$

自由振动的相应振型和固有频率

$$\{\delta\} = \{\delta_0\} \sin(\omega x + \varnothing) \quad (3)$$

带入简化可得:

$$([K] - \omega^2[M])\{\delta\} = 0 \quad (4)$$

自由振动情况下:

$$([K] - \omega^2[M]) = 0 \quad (5)$$

解出 n 个实根 $\omega_{2i} (i = 1, 2, 3, \dots, n)$:

$$\omega_{2_1} \leq \omega_{2_2} \leq \dots \leq \omega_{2_n} \quad (6)$$

将式(5)中解出的 ω 代回式(3), 解出固有振型 $\{\delta_i'\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

提取电池包前 6 阶约束模态, 振型如图 5 所示, 具体振型描述及频率见表 3。

表 3 约束模态振型及频率

Tab.3 Vibration modes and frequencies of the constraint mode

阶数	振型描述	频率/Hz
1	上盖发生共振、上盖刚度不足	26.4
2	上盖发生共振、上盖刚度不足	27.5
3	在上盖形成两处共振区	31.3
4	上盖中心区域共振	33.7
5	箱底两处共振	42.6
6	箱盖两处共振、峰谷交替	45.1

纯电动汽车的主要激励来源于地面不平度和电机运转, 通常电机产生的激励小于 20 Hz。所以主要考虑路面不平度引起的加速度和位移激励, 电池包的一阶频率应该高于由路面不平度引

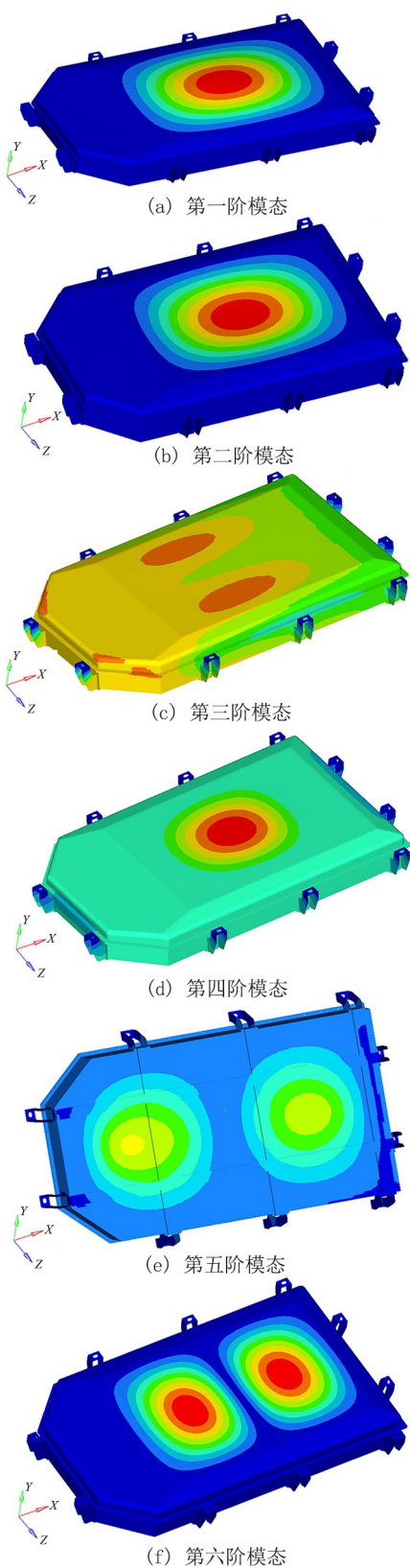


图 5 前 6 阶约束模态

Fig.5 The first 6-order constraint modes

起的激励。式(7)为路面激振频率计算公式。

$$f = \frac{V}{L \times 3.6} \tag{7}$$

式(7)中, V 为行驶车速, km/h; L 为路面不平度波长, m。表 4 列出了国内常见路面的激振频率^[15]。

表 4 常见路面的激振频率

Tab.4 Excitation frequencies of common road surfaces

路面种类	波长/m	车速/ (km · h ⁻¹)	路面激振 频率/Hz
搓板路面	0.42~6.7	40	26.46
碎石路面	0.74~8.2	60	22.52
平坦路面	1.00~90.9	100	27.78

从表 4 可知, 为了避免共振, 电池包一阶频率应该高于 27.78 Hz。从表 3 得出, 电池包前两阶频率都低于 27.78 Hz, 且第二阶频率与平坦路面下的激振频率极为接近, 提示上盖刚度不足, 应该进行优化。

3.2 电池包上盖拓扑优化

优化思路: 现有动力电池上盖多为复合材料, 采用模压成型, 厚度容易控制, 且控制成本较低。由于上盖刚度较弱, 导致电池包一阶约束模态频率偏低, 通过厚度优化设计, 提升电池包一阶约束模态频率。拓扑优化数学模型如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimize: } f(\vec{X}) = f(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n) \\ \text{Subject: } c(\vec{X}) \leq 0 \quad i = 1, \cdots, n \\ M_j(\vec{X}) \leq 0 \quad j = 1, \cdots, n \\ X_k^L \leq X_k \leq X_k^U \quad k = 1, \cdots, n \end{array} \right\} \tag{8}$$

式(8)中: X 为设计变量; $f(X)$ 为目标函数; $c(X)$ 和 $M(X)$ 为约束响应; X_k^L 和 X_k^U 为设计变量上下限; 为了优化效果最佳, 将装配体结构和约束条件代入优化过程。以上盖厚度为设计变量, 上限为 4 mm, 下限为 3 mm。以电池包一阶频率为目标, 定义体积和一阶频率响应。约束体积响应增加不超过 30%, 目标为一阶频率最大化。经过 4 步迭代得到优化结果, 如图 6 所示。

红色区域厚度为 4 mm, 以此为参考, 重新在 Creo 软件中设计上盖, 将重新设计的电池包模型进

行有限元分析, 优化后的一阶约束模态如图 7 所示。

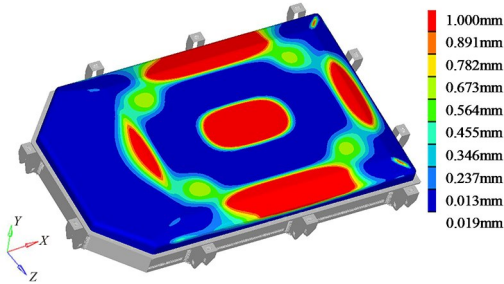


图 6 优化结果

Fig.6 Optimization results

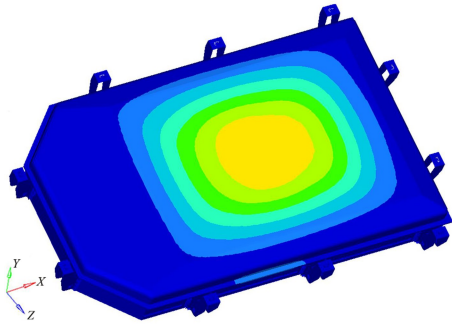


图 7 优化后一阶约束模态 28.4 Hz

Fig.7 The optimized first-order constrained mode 28.4 Hz

对优化后的模型进行约束模态分析, 得出第一阶频率为 28.4 Hz, 高于 27.78 Hz, 有效地避开了路面的激振频率。图 8 为优化前后电池包前 6 阶约束模态频率对比, 相比于优化之前频率都有提高。优化厚度之后上盖质量增加 1.58 kg, 对整车影响较小。

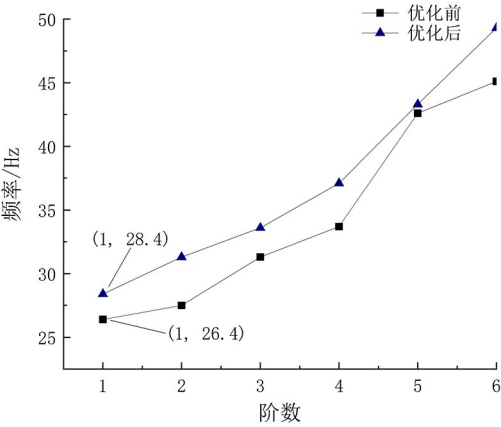


图 8 优化前后前 6 阶约束模态频率

Fig.8 The first 6 constrained modal frequencies before and after optimization

4 结论

本文模拟了该动力电池两种极限工况,得出电池包在这两种工况下均满足条件。提取电池包前 6 阶约束模态,分析得出第一阶频率较低,上盖刚度较低,与地面的激励形成共振且对电池模组

发生干涉,对电池造成危害。

运用拓扑优化方法,对上盖进行厚度优化设计,经过 4 次迭代,优化后一阶频率达到 28.4 Hz,高于 27.78 Hz,改进了上盖的刚度,提高了一阶频率,避开路面的激振频率。提升了电池包的动力学性能,为结构设计优化提供参考。

参考文献:

- [1] 张书桥. 新能源电动汽车发展历程、现状以及制造技术[J]. 金属加工(冷加工), 2020(4): 8-13.
- [2] AO KZ, NIIYAMA J, MATSUI T, et al. Analysis of torsional stiffness share rate of truck frame[J]. Technical Papers, 1991(10): 18-21.
- [3] KRAWCZUK M, OSTACHOWICZ W, CARTMELL J, et al. Modal analysis of the low-pressure frame of steam turbine[J]. American Society of Mechanical Engineers, 1995(2): 275-287.
- [4] LEE Y. A study on the battery case injection molding by CAE analysis[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2011, 12(1): 55-61.
- [5] LI Y, WANG L, LIAO C, et al. Recursive modeling and online identification of lithium-ion batteries for electric vehicle applications[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(2): 403-413.
- [6] LI X, FAGHRI A. Optimization of the cathode structure of lithium-air batteries based on a two-dimensional, transient, non-isothermal model[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2012, 159(10): A1747-A1754.
- [7] HU R, LIU H, ZENG M, et al. Progress on Sn-based thin-film anode materials for lithium-ion batteries[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(32): 4119-4130.
- [8] XIE J, GE Z, ZANG M, et al. Structural optimization of lithium-ion battery pack with forced air cooling system[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 583-593.
- [9] 兰凤崇, 刘金, 陈吉清, 等. 电动汽车电池包箱体及内部结构碰撞变形与响应分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 1-8.
- [10] 王震坡, 王越. 纯电动客车侧碰撞有限元建模及仿真分析[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(3): 266-270.
- [11] 崔佳. 电动客车侧向被动安全仿真与结构优化研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [12] 桑林, 叶健诚, 董晨. 电动汽车动力电池箱模态分析和试验研究[J]. 制造业自动化, 2013, 35(22): 77-79.
- [13] 程文文. 基于精密铸造技术的电动汽车电池包结构轻量化研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [14] 王芳, 夏军. 电动汽车动力电池系统安全分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [15] 李明秋. 电池包箱体的有限元分析和结构优化设计[D]. 长春: 吉林大学, 2017.

(责任编辑: 陈雯)