

文章编号: 1005-0523(2023)06-0096-07



## 电动汽车快换电池锁止装置设计及仿真分析

孟飞<sup>1,2</sup>, 涂传旻<sup>1,2</sup>, 徐尤南<sup>1,2</sup>, 彭兴禹<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

**摘要:**针对电动汽车底盘换电的电池包,设计了一种快速换电的锁止装置,以实现电池的快速锁止和解锁。为了验证该装置的结构安全性,通过有限元 ANSYS 软件分析了该装置在两种典型极限工况下的静态特性和模态特性。结果表明:该装置在两种工况下的最大应力位于上锁体处,其最大应力值分别为 207.63 MPa 和 264.18 MPa,满足所选材料的强度设计要求;该装置的前 6 阶模态固有频率均大于电动汽车所受的激励频率,汽车在行驶过程不会与该装置发生共振。

**关键词:**锁止装置;静态特性;模态特性

中图分类号:TH122;U473

文献标志码:A

本文引用格式:孟飞,涂传旻,徐尤南,等.电动汽车快换电池锁止装置设计及仿真分析[J].华东交通大学学报,2023,40(6):96-102.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.06.004

## Design and Simulation Analysis of Quick-Change Battery Locking Device for Electric Vehicles

Meng Fei<sup>1,2</sup>, Tu Chuanmin<sup>1,2</sup>, Xu Younan<sup>1,2</sup>, Peng Xingyu<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Key Laboratory of Conveyance and Equipment of Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Aiming at the battery pack of chassis power exchange for electric vehicles, a locking device for rapid power change is designed to realize the rapid locking and unlocking of the battery. In order to verify the structural safety of the device, the static and modal characteristics of the device under two typical limit conditions were analyzed by finite element ANSYS software. The results show that the maximum stress of the device under the two working conditions is located at the lock body, and its maximum stress values are 207.63 MPa and 264.18 MPa, respectively, which meet the strength design requirements of the selected materials, and the natural frequencies of the first six modes of the device are greater than the excitation frequencies of the electric vehicle, so the car will not resonate with the device during driving.

**Key words:** locking device; static characteristics; modal characteristics

**Citation format:** MENG F, TU C M, XU Y N, et al. Design and simulation analysis of quick-change battery locking device for electric vehicles[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(6): 96-102.

电动汽车作为新时代的新兴产业,目前最大的是电池补给问题,电池的补给可以分为充电和换电两种模式<sup>[1]</sup>。相比于充电模式,换电模式更安全,所花费的时间更短,对电池的损耗也更低<sup>[2]</sup>。电池快换

技术作为换电模式中一项重要技术,其包括快换电池箱、快换电池托架和快换电池锁止机构等。电池锁止机构作为更换和固定电池的重要结构,其结构是否安全将直接影响电池包甚至整车的性能,

收稿日期:2023-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52075171);江西省研究生创新专项资金项目(YC2021-S466)

因此,电池锁止机构的设计和安全性研究对电池快换技术的发展具有重要的意义。

近年来,国内外专家学者针对电池快换技术的设计研究主要集中在电池箱和电池托架的安全性、轻量化和结构优化方面。李垚坤等<sup>[3]</sup>对电池包箱体结构进行了改进,并通过验证得出改进后的结构满足各项安全性能,既增强了结构强度和刚度,又实现了轻量化。Kaleg等<sup>[4]</sup>使用铝合金作为电池包外层结构的材料,并对电池包箱体厚度进行优化设计,从而得到合理的电池包结构。Zhao等<sup>[5]</sup>提出了一种新型复合材料电池箱,并对该电池箱进行有限元分析和优化,得到优化后的电池箱不仅更轻,且强度和刚度都更强。Li等<sup>[6]</sup>对电动客车动力电池箱底盘进行了有限元分析,验证了动力电池箱底盘结构的安全性。Hartmann等<sup>[7]</sup>对电池箱进行优化设计,既提高了电池箱的固有频率,又减小了电池箱的重量。Ma等<sup>[8]</sup>在应用泡沫铝材料的基础上,对电池包箱体结构的关键部件进行了优化设计,可有效减轻整车质量,提高整车安全性。罗发强等<sup>[9]</sup>建立了快换电池托架有限元模型,并对该电池托架结构的静态特性和模态特性进行了仿真分析。丁丽平等<sup>[10]</sup>基于SolidWorks软件分析了其公司生产的动力电池箱托架的静强度。丁习坤<sup>[11]</sup>针对电池箱在更换时出现锁止机构损坏问题进行了研究,经过仿真计算后,对结构进行改进和验证。张永峰等<sup>[12]</sup>以一种电池箱闭锁机构为研究对象,通过力学理论计算、运动仿真分析以及实验验证,得出该闭锁机构在锁紧的过程可以有效的防止电池箱甩出脱落。

然而,电池锁止机构的设计研究并不多,且对电池锁止机构结构安全性的研究主要集中于静力学方面。因此,本文针对底盘换电的电池包,设计了一种快速换电的锁止装置,以此实现电池的快速锁止和解锁。通过Pro/E建立了快换电池锁止装置和某电池包三维模型,并对该装置在电池包上的位置进行了布置,在此基础上使用ANSYS软件对该装置进行静态和模态分析,验证该装置的结构安全性。

## 1 快换电池锁止装置设计

### 1.1 结构设计及工作原理

根据底盘换电的特点以及现有锁止机构的优缺点,设计快换电池锁止装置的结构。本文设计的

快换电池锁止装置是由上锁体、下锁体和锁止机构组成,其中锁止机构包括驱动杆和四个锁止钢球,上锁体设有锁体内腔,下锁体设有锁定孔,驱动杆设有U型槽,锁止钢球在下锁体的锁定孔以 $90^\circ$ 均匀分布,图1所示为其锁止及解锁状态图。与现有的底盘螺栓锁止机构和固定销锁止机构相比,该装置的特点在于实现电池的快速锁止和解锁所需的扭矩更小,对材料的性能要求更低,所需的成本更小。同时该装置具有防止驱动杆顶升或者松脱过度,导致零件脱落或者破坏的特点<sup>[13]</sup>。

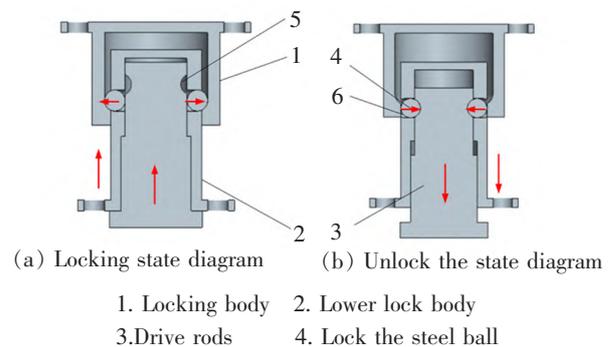


图1 快换电池锁止装置锁止及解锁状态图

Fig.1 Lock and unlock status for quick change battery lock device

该装置的下锁体与电池包箱体固定,上锁体与汽车底架固定。首先驱动杆与下锁体螺纹连接,如图1(b)所示位置,使得锁止钢球能缩进于锁定孔中,将下锁体伸入锁体内腔中;拧动驱动杆顶升使得锁止钢球相对于锁定孔伸出并与上锁体内壁卡接,如图1(a)所示位置,即实现锁止;拧动驱动杆下降使得U型槽与锁止钢球对准,且锁止钢球相对于锁定孔缩进并保持锁定孔内,即实现解锁。

### 1.2 锁止装置的布置形式

本文选用宁德时代提供给蔚来的 $100\text{ kW}\cdot\text{h}$ 的电池包来验证该装置是否满足强度设计要求,电池包的重量为 $555\text{ kg}$ 。为了使电池包安全牢固的固定在汽车底架上,实际做换电时,电池包固定吊点通常设计时要固定 $8\sim 12$ 个,因此,对锁止装置进行如下布置形式,采用8个快换电池锁止装置分布在电池包箱体的四周边缘。如图2所示,保留电池包下箱体,去除电池包上盖、电池组及其它电池组件,称该结构为整体模型。为了更好的分析快换电池锁止装置的静态特性,以整体模型作为分析该装置静态特性的对象。

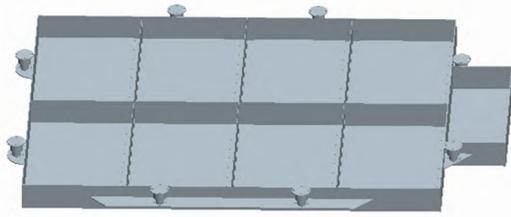


图2 锁止装置的布置形式  
Fig.2 Arrangement of locking device

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 网格划分

将快换电池锁止装置模型和整体模型转化为IGS格式导入ANSYS Workbench中进行网格划分,本文选用四面体单元类型划分电池包箱体、上锁体、下锁体和驱动杆,六面体单元类型划分锁止钢球,电池包下箱体网格尺寸设置为12 mm,锁止装置网格尺寸控制在1~3.5 mm。并且为了提高网格计算精度,还需对重点区域进行局部网格划分,得到快换电池锁止装置网格数量为62 327,节点数为106 459,整体模型网格数量为803 439,节点数为1 460 659,网格质量纵横比最小都为1.004 6,满足网格划分质量规范标准<sup>[14]</sup>。图3和图4分别为快换电池锁止装置有限元网格模型和整体结构有限元网格模型。

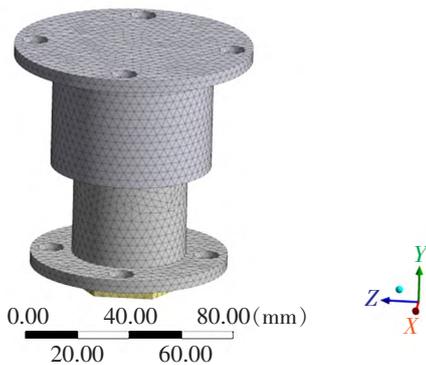


图3 锁止装置有限元网格模型

Fig.3 Finite element mesh model of locking device

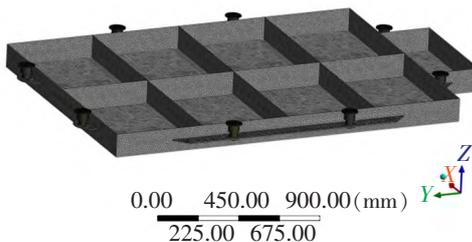


图4 整体结构有限元网格模型

Fig.4 Finite element analysis model

### 2.2 材料属性

本文选用4140合金钢作为快换电池锁止装置的材料,7075铝合金为电池包的材料,其材料属性如表1所示。

表1 材料参数

Tab.1 Material parameters

Material	Density/ (g/cm <sup>3</sup> )	Elastic modulus/MPa	Poisson's ratio	Yield strength/ MPa
4140 alloy steel	7.83	200 000	0.29	610
7075 aluminum alloy	2.81	71 000	0.33	455

## 3 快换电池锁止装置静、模态特性分析

### 3.1 静态特性分析

静态分析是研究结构受静载荷作用下的响应,如应力、应变和位移等<sup>[15]</sup>。通过分析快换电池锁止装置的静态特性,得到该装置的应力和变形云图,判断该装置是否满足所选材料的强度要求。

#### 3.1.1 约束条件及施加载荷

施加载荷:电池包总质量 $m$ 为555 kg。由于汽车在复杂的外部环境行驶,因此本文选取颠簸急转弯和急刹车两种典型极限工况分析该装置的静态特性。汽车在急刹车和急转弯工况下最大加速度分别为 $1g$ (方向与行驶方向相反)和 $0.4g$ ,且在颠簸路段汽车最大加速度为 $2g$ (垂直方向下),与重力加速度方向相同,因此颠簸路段最大加速度取 $3g$ <sup>[16-18]</sup>。因此,汽车在颠簸急转弯工况下,电池包箱体底部的作用力为 $F=3mg=16\ 328\text{ N}$ ,电池包箱体侧内壁与中间纵梁侧壁受到的力 $F_1=0.4mg=2\ 177\text{ N}$ ;汽车在颠簸急刹车工况下,电池包箱体底部受到的力为 $F=3mg=16\ 328\text{ N}$ ,电池包箱体前内壁与中间三横梁前壁受到的力为 $F_2=mg=5\ 442\text{ N}$ 。约束条件:约束8个上锁体的4个螺栓孔的全部自由度。并将上锁体与下锁体的接触设置为无分离,下锁体腔体段与箱体的接触设置为无摩擦,整体模型其它接触设置为绑定接触,图5和图6分别为两种工况下的边界条件示意图。

#### 3.1.2 颠簸急转弯工况

通过ANSYS求解计算,得到颠簸急转弯工况下快换电池锁止装置的应力和变形情况分别如图7和图8所示。

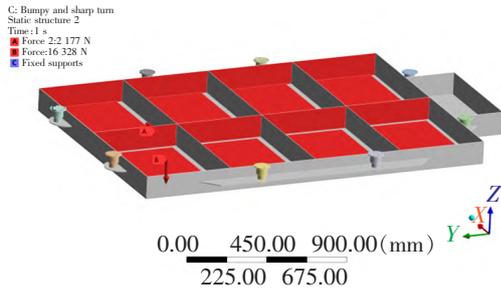


图 5 颠簸急转弯工况下的边界条件示意图  
Fig.5 Schematic diagram of boundary conditions under bumpy and sharp turn conditions

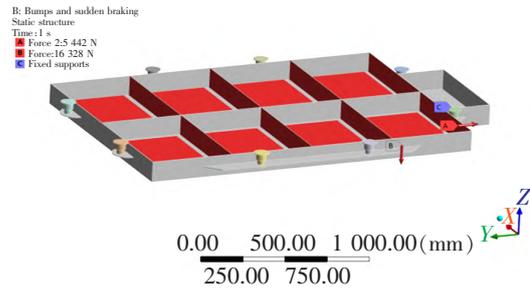


图 6 颠簸急刹车工况下的边界条件示意图  
Fig.6 Schematic diagram of boundary conditions under bumpy and sharp braking conditions

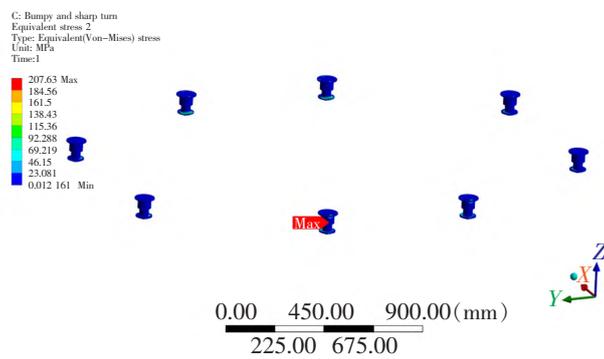


图 7 颠簸急转弯工况下应力云图  
Fig.7 Stress cloud under bumpy and sharp turn conditions

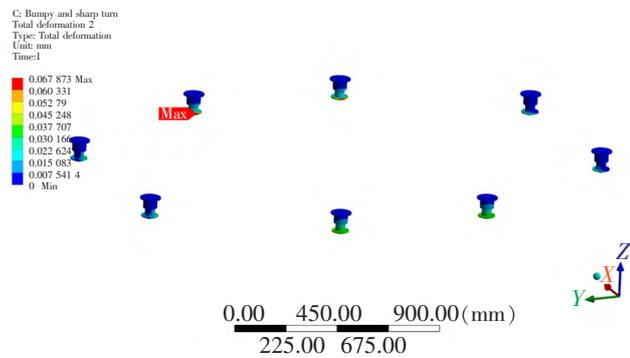


图 8 颠簸急转弯工况下变形云图  
Fig.8 Deformation cloud map under bumpy and sharp turn conditions

### 3.1.3 颠簸路段急刹车工况

通过 ANSYS 求解计算得到, 颠簸急刹车工况下快换电池锁止装置的应力和变形情况分别如图 9 和图 10 所示。

由图 7~图 10 可知, 当汽车处于颠簸路段急转弯工况下, 最大应力和最大变形分别位于上锁体和下锁体处, 其最大应力值为 207.63 MPa, 最大变形量为 0.067 873 mm。当汽车处于颠簸急刹车工况下, 最大应力和最大变形同样分别位于上锁体和下锁体处, 最大

应力值为 264.18 MPa, 最大变形量 0.071 179 mm。

本文选用的材料为 4140 低合金钢, 其材料的屈服强度 $[\sigma_s]=610$  MPa。由于静载条件下, 塑性材料的安全系数可取 1.5~2.0, 取材料的安全系数为  $\gamma=1.7$ , 其许用应力就为 $[\sigma]=[\sigma_s]/\gamma=358.8$  MPa。而上述两种工况下的最大应力结果分别为 207.63 MPa 和 264.18 MPa, 均小于许用应力 358.8 MPa。因此, 快换锁止装置的结构满足所选材料的许用应力, 即满足强度设计要求。

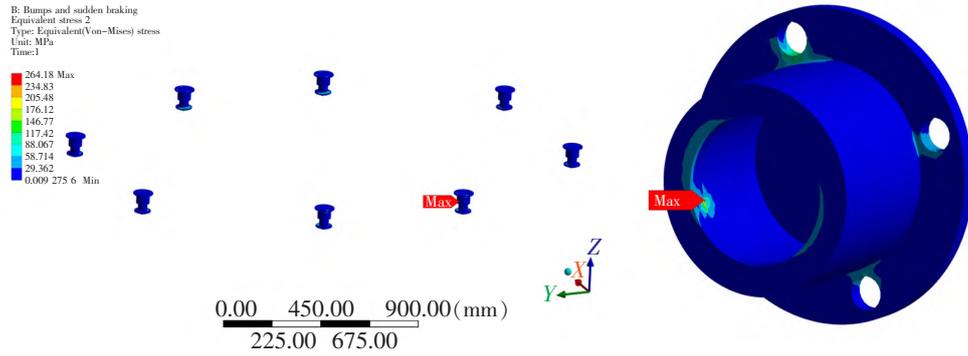


图9 颠簸急刹车工况下应力云图

Fig.9 Stress cloud under bumpy and hard braking conditions

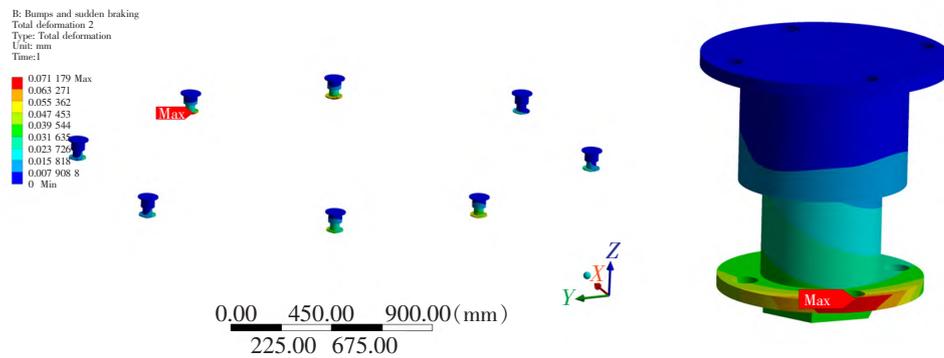


图10 颠簸急刹车工况下变形云图

Fig.10 Deformation cloud map under bumpy and sharp braking conditions

### 3.2 模态特性分析

模态分析是研究结构动力学特性的一种方法,在汽车领域应用广泛。分析结构的模态特性,得到结构的固有频率和振型,找出结构刚度不足的零件,避免发生共振<sup>[9]</sup>。

结构动力响应有限元分析时,其平衡方程如下

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

式中: $M$ 为系统的质量矩阵; $C$ 为系统的阻尼矩阵; $K$ 为系统的刚度矩阵; $\ddot{\delta}, \dot{\delta}, \delta$ 分别为系统的加速度矩阵,速度矩阵和位移矩阵。

而模态分析是在 $F(t)=0$ 的条件下进行的,这时阻尼小的可以忽略,因此式(1)可化为

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

式(2)的解可设为

$$\delta = \delta_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得

$$(K - \omega^2 M)\delta_0 = 0 \quad (4)$$

由于结构在自由振动下,式(4)中的振幅 $\delta_0$ 不存在全为零,因此,式(4)中 $K - \omega^2 M$ 行列式的值一

定是零,由此能得到结构在自由振动下,其频率方程为

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

由此可通过求解式(5)得到结构的固有频率,再代入式(4),可得到结构的固有振型。

ANSYS 模态提取方法中,Block Lanczos 法求解精度高,运算速度也较快,对计算机的要求也不高,因此采用此法对快换电池锁止装置进行模态分析。

约束快换电池锁止装置上锁体的4个螺栓孔的所有自由度,将上锁体与下锁体接触设置为无分离,锁止装置其它接触设置为绑定接触。通过ANSYS 求解得到锁止装置的前6阶固有频率,如表2所示,其中前6阶振型图如图11~图16所示。

表2 前6阶固有频率  
Tab.2 Natural frequencies of the first 6 order

Order	Natural frequency/Hz	Order	Natural frequency/Hz
1	1 905.9	4	5 033.0
2	1 906.4	5	5 035.9
3	4 216.5	6	5 522.1

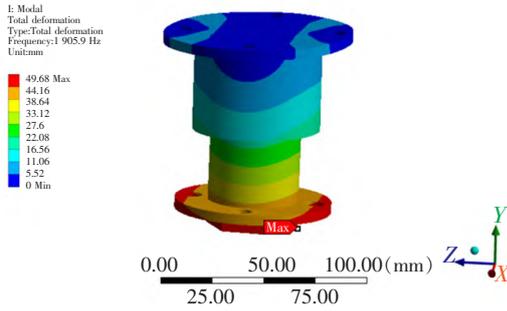


图 11 第 1 阶模态振型图

Fig.11 Modal mode diagram of the first order

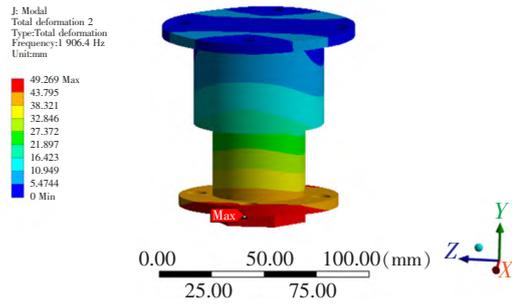


图 12 第 2 阶模态振型图

Fig.12 Modal mode diagram of the second order

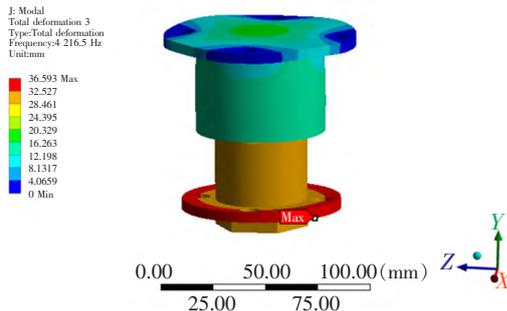


图 13 第 3 阶模态振型图

Fig.13 Modal mode diagram of the third order

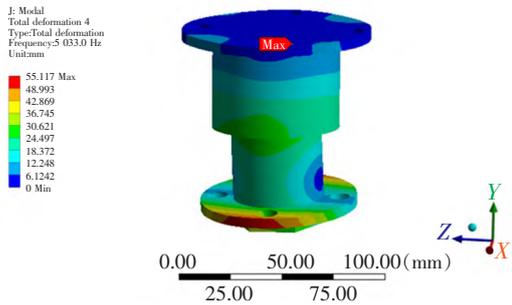


图 14 第 4 阶模态振型图

Fig.14 Modal mode diagram of the fourth order

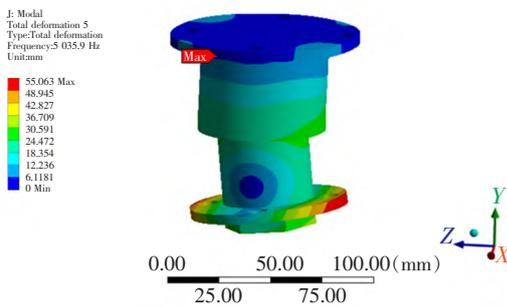


图 15 第 5 阶模态振型图

Fig.15 Modal mode diagram of the fifth order

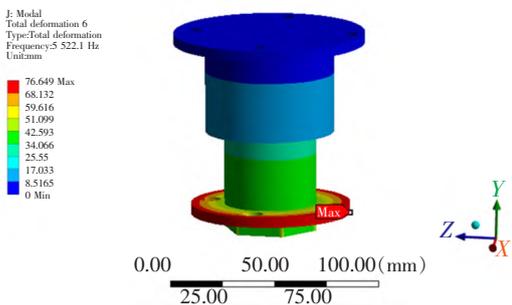


图 16 第 6 阶模态振型图

Fig.16 Modal mode diagram of the sixth order

从图11~图 16 可知,快换电池锁止装置的第 1 阶模态主要表现为下锁体和驱动杆绕 X 轴摆动,第 2 阶模态主要表现为下锁体和驱动杆绕 Z 轴摆动,第 3 阶模态主要表现为下锁体沿 Y 轴上下振动,第 4 阶模态主要表现为下锁体绕 Z 轴摆动,第 5 阶模态主要表现为下锁体绕 X 轴摆动,第 6 阶模态主要表现为下锁体绕 Y 轴的转动。综上,快换电池锁止装置振动部位主要发生下锁体上,第一阶最小固有频率为 1 905.9Hz。电动汽车所受外界激励频率不超过 30 Hz<sup>[20]</sup>,均远小于锁止装置各阶模态的固有频率,因此汽车在行驶的过程不会发生共振。

### 4 结论

本文设计了一种快速换电的锁止装置,以实现

电池的快速锁止和解锁。通过 ANSYS 软件分析了该装置在两种典型极限工况下的静态特性,同时对该装置进行了模态分析,得出以下结论。

1) 在两种典型极限工况下,电动汽车快换电池锁止装置应力最大和变形最大的位置分别位于上锁体和下锁体处,且应力最大值均小于材料的许用应力,满足结构强度设计要求。

2) 通过对锁止装置进行模态分析可知,振动部位主要集中在下锁体,但各阶模态固有频率均大于电动汽车所受激励频率,所以锁止装置在行驶的过程不会发生共振。

### 参考文献:

[1] 潘毅勇. 浅谈公交企业纯电动快充与慢充的选择[J]. 人民

- 公交,2019(1):74-76.  
PAN Y Y. Discussion on the choice of pure electric fast charging and slow charging of bus enterprises[J]. People's Bus,2019(1):74-76.
- [2] 王信锐. 电动汽车换电模式发展情况、研究现状与挑战分析[J]. 四川职业技术学院学报,2021,31(5):163-168.  
WANG X R. Development research status and challenge analysis of electric vehicle battery swap mode[J]. Journal of Sichuan Vocational and Technical College,2021,31(5):163-168.
- [3] 李焱坤,余万铨,贺东方,等. 纯电动汽车电池箱体结构分析与轻量化设计[J]. 塑料工业,2020,48(8):91-95.  
LI Y K,YU W Q,HE D F,et al. Structural analysis and lightweight design of battery box for pure electric vehicle[J]. Plastics Industry,2020,48(8):91-95.
- [4] KALEG S,AMIN. 1P15S lithium battery pack:Aluminum 5052-0 strength of material analysis and optimization[C]// Jakarta:2016 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application(ICSEEA),2016.
- [5] ZHAO Y,ZHEN S Q,YAN M H,et al. Experimental analysis on mechanical properties of BF/PLA composites and its lightweight design on power battery box[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part D:Journal of Automobile Engineering,2022,236(13):2894-2913.
- [6] LI J C,CAO X H,GUO L. Finite element analysis of power battery box chassis of electric bus[J]. Journal of Physics: Conference Series,2020,1578(1):012235.
- [7] HARTMANN M,ROSCHITZ M,KHALIL Z. Enhanced battery pack for electric vehicle;Noise reduction and increased stiffness[J]. Materials Science Forum,2013,765:818-822.
- [8] MA C C,HOU J H,LAN F C,et al. Structural analysis of battery pack box for new energy vehicles based on the application of basic foam aluminum materials[J]. Journal of Physics: Conference Series,2022,2355(1):012082.
- [9] 罗发强,宋保清,郝战铎. 电动汽车快换电池托架结构分析[J]. 制造业自动化,2014,36(7):4-6.  
LUO F Q,SONG B Q,HAO Z D. Structural analysis of quick-change battery tray for electric vehicle[J]. Manufacturing Automation,2014,36(7):4-6.
- [10] 丁丽平,韩付申,娄连英. 电动汽车动力电池箱托架仿真分析[J]. CAD/CAM与制造业信息化,2011(12):64-66.  
DING L P,HAN F S,LOU L Y. Simulation analysis of electric vehicle power battery box bracket[J]. CAD/CAM and Manufacturing Informatization,2011(12):64-66.
- [11] 丁习坤. 快换电池箱及其锁止机构的设计与仿真分析[J]. CAD/CAM与制造业信息化,2013(7):79-81.  
DING X K. Design and simulation analysis of quick-change battery box and its locking mechanism[J]. CAD/CAM and Manufacturing Informatization,2013(7):79-81.
- [12] 张永峰,张洋,朱云霄. 电动汽车快换电池箱闭锁机构防脱技术研究[J]. CAD/CAM与制造业信息化,2011(10):52-54.  
ZHANG Y F,ZHANG Y,ZHU Y X. Research on anti-detachment technology of locking mechanism of electric vehicle quick-change battery box[J]. CAD/CAM and Manufacturing Informatization,2011(10):52-54.
- [13] 孟飞,涂传旻,彭兴禹,等. 一种快速换电的锁止装置:CN217835334U[P]. 2022-11-18.  
MENG F,TU C M,PENG X Y,et al. A locking device for rapid power exchange:CN217835334U[P]. 2022-11-18.
- [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.  
CHENG B L. Research on optimal design of battery pack structure for pure electric vehicle[D]. Taiyuan:North University of China,2021.
- [15] 黄晶. 电动汽车电池箱静态特性分析与结构优化研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.  
HUANG J. Research on static and dynamic characteristics analysis and structural optimization of electric vehicle battery box[D]. Changsha:Hunan University,2018.
- [16] 董相龙,张维强. 电动汽车电池箱结构强度的有限元分析及改进设计[J]. 机械强度,2015,37(2):312-316.  
DONG X L,ZHANG W Q. Finite element analysis of structural strength of electric vehicle battery box and its improved design[J]. Journal of Mechanical Strength,2015,37(2):312-316.
- [17] 李剑英,卢志东. 电动汽车快速更换电池箱有限元分析及优化设计[J]. 现代制造工程,2020(7):31-38.  
LI J Y,LU Z D. Finite element analysis and optimization design of quick replacement battery box for electric vehicle[J]. Modern Manufacturing Engineering,2020(7):31-38.
- [18] MUNDO D,HADJIT R. Simplified modeling of joints and beamlike structures for BIW optimization in a concept phase of the vehicle design process[J]. Finite Elements in Analysis and Design,2009,45:456-462.
- [19] 崔长青. 车载动力电池包结构分析及优化设计[D]. 济南:山东建筑大学,2021.  
CUI C Q. Structural analysis and optimization design of vehicle power battery pack [D]. Jinan:Shandong Jianzhu University,2021.
- [20] 路致远,张卫国,赵明宇,等. 基于扫频法的电动汽车快换电池箱结构仿真与优化[J]. 现代制造工程,2013(5):63-68.  
LU Z Y,ZHANG W G,ZHAO M Y,et al. Simulation and optimization of electric vehicle quick-change battery box structure based on frequency sweeping method[J]. Modern Manufacturing Engineering,2013(5):63-68.



第一作者:孟飞(1975—),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为机械制造及其自动化。E-mail:727854364@qq.com。



通信作者:涂传旻(1996—),男,硕士研究生,研究方向为电动汽车快换电池技术。E-mail:1215441080@qq.com。

(责任编辑:吴海燕)