

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.06.018

地铁车载蓄电池箱结构的优化研究^{*}

樊智敏, 赵梓连

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:针对近些年列车不断提速,车载设备急需轻量化的问题,对某地铁车载蓄电池箱的结构强度、疲劳强度、模态、3 种结构优化方法等方面进行了研究。对拓扑优化变密度法和单目标、多目标优化方法在轨道车辆的应用开展了归纳,提出了基于变密度法的拓扑优化、尺寸优化、形貌优化相结合的优化方法;依托结构优化设计理论及 OptiStruct 优化软件对箱体进行了优化分析,利用疲劳数据系统对优化后的箱体进行了测试。研究表明:该优化方法实现了框架结构减重约 31.5%,静强度满足材料许用应力值,一阶固有频率提高到 20.7 Hz,疲劳损伤值小于 0.7,实现了结构的最大轻量化,优化方法为其他类型车载设备的轻量化设计提供了有益的借鉴。

关键词:蓄电池箱;结构优化;拓扑优化;变密度法;轻量化

中图分类号:TH122;TH114;U231.8

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)06-0697-05

Research on structure optimization of a subway vehicle battery box

FAN Zhi-min, ZHAO Zi-lian

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University
of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Aiming at the problem that the light weight of on-board equipment is urgently needed due to the trains have been speeding up in recent years, the structural strength, fatigue strength, modality and three structural optimization methods of a subway vehicle battery box were studied. The topology optimization variable density method and the application of single-objective and multi-objective optimization methods in rail vehicles was proposed. The optimization method based on topology optimization, size optimization and shape optimization based on variable density method was proposed. Based on the theory of structural optimization design and the optimization software of Optistruct, the optimization analysis of the box body was carried out. The optimized cabinet was tested using the fatigue data system. The results indicate that the optimization method achieves a weight reduction of about 31.5% for the frame structure, and the static strength satisfies the allowable stress value of the material. The first-order natural frequency increases to 20.7 Hz, and the fatigue damage value is less than 0.7, which realizes the maximum weight reduction of the structure. The method provides a useful reference for the lightweight design of other types of vehicle equipment.

Key words: battery box; structure optimization; topology optimization; variable density method; lightweight

0 引言

蓄电池是地铁车辆辅助系统中的重要设备,蓄电池箱是蓄电池的承载构件,其结构的优劣影响列车运行安全和可靠性,因此,对此类设备的结构进行优化有重要意义。

目前,大多数学者对车辆多数车载设备的结构进行了优化研究工作,主要集中在对单个结构的单一优化方法,或者是对优化方法的扩展。PARK 等^[1]建立了减轻转向架质量为目标函数,利用人工神经网络逼近疲劳强度的约束函数求解目标函数,最终实现了转向架的轻量化设计;JIN Hong-yu 等^[2]提出了一种模态

收稿日期:2019-09-05

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019GGX104088)

作者简介:樊智敏(1963-),男,山西万荣人,教授,主要从事机械传动设计理论与方法、机械系统创新设计等方面的研究。E-mail:zmfan@163.com

分析与拓扑优化相结合的加劲肋设计方法,采用基于拓扑优化的实体各向同性材料加罚(SIMP),得到了工作台底座的初始优化结构,通过数量和尺寸优化,对加劲肋的布置进行了改造,最终工作台底座的固有频率提高了 10% 以上,质量下降了 11%;周克民^[3]介绍了结构拓扑优化的一些基本概念和主要问题,并阐述了各种数学优化求解方法的基本原理;焦洪宇等^[4]提出了一种基于变密度理论固体各向同性微结构材料惩罚模型法的周期性拓扑优化方法,保证优化结构得到周期性的拓扑形式;蒲栋^[5]基于 IEC61373 标准工况对地铁蓄电池箱进行了疲劳寿命分析,得到该地铁列车用蓄电池箱结构强度远远符合标准要求,有很大的优化空间;张涛等^[6]针对高速列车车辆零部件安全性能逐步提高的问题,基于静强度分析,采用临界面法 Brown-Miller 模型对轴箱体进行了疲劳寿命预测,然后采用变密度法对轴箱体进行了优化设计,箱体减重了 8.43%;聂春戈等^[7]采用变密度法,建立了以结构的总柔度为目标函数,体积为约束的拓扑优化模型,对列车转向架轴箱转臂结构进行了减重设计;魏静等^[8]基于 SIMP 及应变能理论,应用拓扑优化和形状优化方法对动车齿轮箱箱体结构进行了优化,有效地提高了齿轮箱的刚度和强度;高月华等^[9]基于子结构法,利用 OptiStruct 求解器对动车组设备舱支架结构进行了优化,优化结果使刚度和强度有较大的提高,而且支架结构减重了约 25%;王倩等^[10]针对蓄电池箱常见箱门变形和密封不严等问题,对箱门的结构进行了优化;李永华等^[11]将可靠性理论与模态优化相结合,进行了动车组蓄电池箱结构可靠性分析,优化后箱体和车体不发生共振的概率为 98.64%;兰凤崇等^[12]结合整车多工况多体动力学分析,通过确定各工况的最优权重系数,进行了车身综合目标优化设计,使车体刚度和前六阶频率均有提高。

本文以某地铁车辆蓄电池箱为优化对象,采用拓扑优化、尺寸优化和形貌优化 3 种优化方法相结合的方式优化。

2 蓄电池箱有限元分析

该型地铁车辆蓄电池箱主要由箱体框架、蒙板、加强筋、电池小车、箱门、控制箱和蓄电池组成。为确保整体的力学性能,本文对结构进行静强度和模态分析。

本文利用 HyperMesh 软件对蓄电池箱进行有限元网格划分,有限元模型如图 1 所示。

蓄电池箱有限元模型的网格单元类型为壳单元,以四边形单元为主,整个有限元模型节点总数为 317 832,

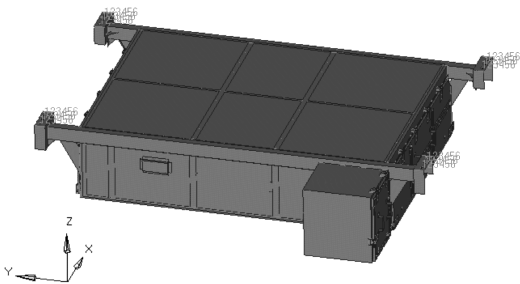


图 1 有限元模型

单元总数为 311 028。蓄电池箱内部电器件按照各自重量采用质量单元进行模拟,螺栓铆钉采用 beam 单元进行模拟,其余连接处均采用耦合约束进行简化。

根据 EN 12663:2010《Railway applications-Structural requirements of railway vehicle bodies》标准,本文对蓄电池箱建立 5 个静强度计算工况,静强度计算工况如表 1 所示。

表 1 静强度计算工况

工况	纵向加速度 a_x	横向加速度 a_y	垂向加速度 a_z
1	5g	/	-1g
2	-5g	/	-1g
3	/	4g	-1g
4	/	-4g	-1g
5	/	/	-4g-1g

g—重力加速度,取值为 9.81 m/s²

根据 EN 12663-1:2010 的规定,蓄电池箱材料评估所规定的安全系数如表 2 所示。

表 2 EN 12663-1:2010 规定的安全系数

	安全系数	备注
静强度工况	S1 = 1.15	对于屈服强度
	S2 = 1.5	对于抗拉强度

求解器采用 OptiStruct,静强度结果如表 3 所示。

表 3 静强度计算结果

工况	应力值 /MPa	材料	屈服强度	许用应力 /MPa	材料利用系数
1	158.1	Q345	345	300	0.53
	164.3	06Cr19Ni10	205	178	0.92
	68.2	5754-H111	80	70	0.94
2	157.6	Q345	345	300	0.53
	163.1	06Cr19Ni10	205	178	0.92
	64.3	5754-H111	80	70	0.92
3	78.6	Q345	345	300	0.26
	41.4	06Cr19Ni10	205	178	0.23
	16.1	5754-H111	80	70	0.23
4	76.0	Q345	345	300	0.25
	42.4	06Cr19Ni10	205	178	0.24
	17.1	5754-H111	80	70	0.24
5	97.7	Q345	345	300	0.33
	77.8	06Cr19Ni10	205	178	0.44
	42.9	5754-H111	80	70	0.61

表3中,许用应力相对于屈服强度,其安全系数为1.15。根据箱体静强度计算结果可知,工况一所受环境最为恶劣,箱体框架和加强筋材质为Q345,材料利用系数为0.53,材料没能得到充分的利用,因此,对该部分进行结构优化研究具有重要意义。通过研究使其结构应力分布均匀,可提高材料利用率,进而达到轻量化的目的。

模态计算结果如表4所示。

表4 模态计算结果

阶次	1	2	3	4	5
频率/Hz	18.9	19.1	20.9	21.1	24.4

根据表4结果可知,箱体一阶固有频率为18.9 Hz,为了避免车载电器设备与车体发生共振,需对振动较大位置蒙板后板进行优化。根据列车标准,提高一阶固有频率为20 Hz以上。

3 蓄电池箱结构优化

3.1 加强筋拓扑优化

根据箱体静强度分析结果,在进行拓扑优化过程中,笔者只考虑对加强筋结构影响最大的工况(第一工况),建立拓扑优化数学模型^[13]如下:

Find

Min

s. t.

$x = (x_1, x_2, \cdots, x_N)^T$

$V_0(x)$

$\sigma \leq 300 \text{ MPa}$

$D_i \leq 0.9$

$0 \leq x_i \leq 1$

(1)

式中: x_i —设计区域的单元密度,其值在0~1之间; V_0 —加强筋的总体积; σ —材质Q345的应力值; D_i —加强筋结构焊缝处的最大疲劳损伤值。

为消除优化结果中细小的传递路径,需确保结构最小尺度大于最小成员尺寸,即设置最小成员尺寸要求,从而得到比较均匀的材料分布。基于给定的拓扑优化模型,笔者应用HyperMesh中OptiStruct求解器进行求解。

经过113次迭代得到最优结果,加强筋拓扑结果和优化结果如图2所示。

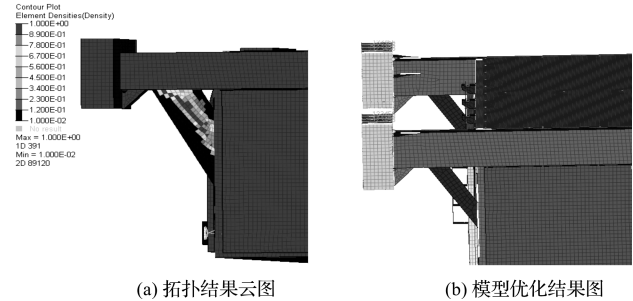


图2 加强筋拓扑优化结果

针对连续体结构拓扑优化问题,应力约束零阶近似为一个总的求解策略,在迭代寻优中还需执行其他的策略,用以配合寻优过程的有效进行。这些策略包括^[14]:单元删除原则、机构判断准则、删除率的自适应调整准则、射线步调整准则、收敛准则。

根据上述拓扑结果云图,综合考虑5个准则的约束要求,新优化的加强筋结构保留密度值大于0.3的部分,保留之后模型优化结果在满足静强度的条件下,达到轻量化的目的。

3.2 箱体框架尺寸优化

针对主框架结构,笔者以板厚为设计变量,以许用应力为约束,建立优化数学模型^[15]:

Find

Min

s. t.

$x = (x_1, x_2, \cdots, x_7)^T$

$M(x)$

$\sigma \leq 300 \text{ MPa}$

$x_{imin} \leq x_i \leq x_{imax}$

(2)

式中: x_i —设计变量,既主框架结构的各个板厚; M —梁的总质量; σ —材质Q345的应力值; x_{imin} , x_{imax} —设计变量上、下限。

设计变量信息如表5所示。

表5 设计变量信息

设计变量	初值/mm	下限值/mm	上限值/mm
x_1	5	3	5
x_2	3	1	3
x_3	4	2	4
x_4	3	1	3
x_5	3	1	3
x_6	3	1	3
x_7	3	1	3

基于给定的尺寸优化模型,经过4次迭代得到的主框架优化云图如图3所示。

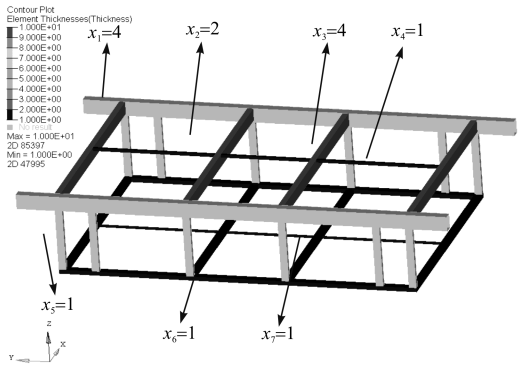


图3 主框架优化云图

图3中,标记变量为对应各个梁优化后的结果。优化结果显示:除变量 x_3 厚度不变外,其他梁厚均可减薄,框架总重减少47.4 kg。

3.3 优化后箱体静强度校核

根据加强筋和主框架结构优化的结果,本文建立优化后的有限元模型,并对其进行静强度和模态校核。优化前、后的静强度结果对比如表 6 所示。

表 6 优化前后静强度结果对比

工况	原结构/MPa	优化结构/MPa
1	164.3	218.0
2	163.1	222.6
3	78.6	83.4
4	76.0	82.2
5	97.7	150

优化前、后的模态结果对比如表 7 所示。

表 7 优化前后模态结果对比

	原结构/Hz	优化结构/Hz
一阶频率	18.9	16.7

由表(6,7)可知:优化后模型所受最大静强度为 222.6 MPa,位置在材质 Q345 上,在安全范围内,材料利用率显著提高;加强筋结构和主框架结构共减重 50.2 kg,约占框架结构的 31.5%,实现了主框架结构的轻量化。

但优化后由于加强筋尺寸和主框架厚度的减少,蓄电池箱一阶固有频率降低,车载电器设备与车体极易发生共振,需进一步对模态低的蒙板后板进行形貌优化,以提高箱体的一阶固有频率。

3.4 蒙板形貌优化

形貌优化是提高结构机械性能的常用方法,本文用该方法来提高箱体的一阶固有频率,减少振动及变形。

蓄电池箱体模态降低主要是由于底板的振动,本文对蒙板底板进行形貌优化。

选定形貌优化的起筋参数,起筋参数说明如图 4 所示。

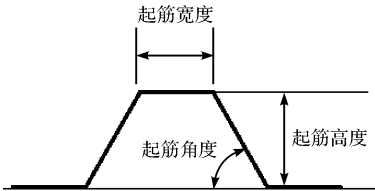


图 4 起筋参数说明

起筋各参数与网格尺寸相关,网格尺寸为 10 mm,起筋宽度设定为 20 mm,起筋高度设定为 10 mm,起筋角度为 60°;蒙板向上或向下起筋^[16]。定义蒙板频率和柔度为响应,蒙板频率响应定义为约束,柔度最小为优化目标函数。

笔者经过 4 次迭代得到最优结果,再根据优化结果云图对优化设计部位进行起筋。

蒙板形貌优化结果和起筋后模型如图 5 所示。

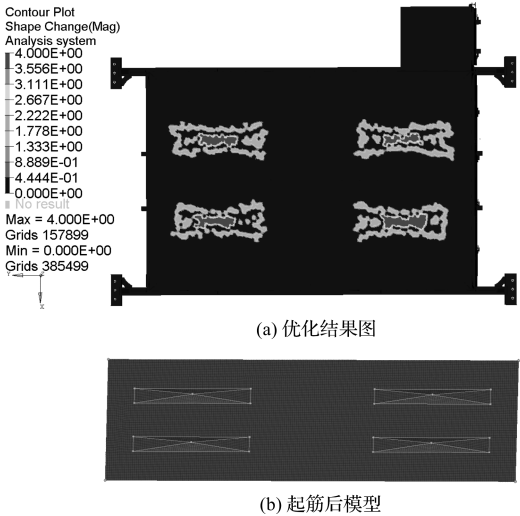


图 5 蒙板形貌优化结果
非黑色区域—形貌优化设计空间

图 5 中,蒙板中间部位起筋高度最大为 10 mm,逐步向边缘部位过度,整个蒙板后板共起筋 4 块区域。

笔者建立新的有限元模型进行模态计算对比,结果表明,优化后一阶固有频率为 20.7 Hz,满足列车行驶时所受冲击振动的要求,大大降低了与车体产生共振的几率。

4 疲劳强度校核

由于主框架尺寸的减小,焊缝疲劳损伤值将会增大,为确保焊缝处不会断裂,需进行疲劳强度校核^[17-18]。根据标准 DVS 1612:2009,其对应的存活率 $Pü = 97.5\%$,载荷振幅恒定时,载荷最低循环次数为 2×10^6 。焊缝疲劳利用系数进行计算。

垂直于焊缝的强度利用系数为:

$$UF_{\sigma_{\perp}} = \frac{\sigma_{r_{\perp} \max}}{\sigma_{\perp \text{zul}}} \tag{3}$$

平行于焊缝的强度利用系数为:

$$UF_{\sigma_{\parallel}} = \frac{\sigma_{r_{\parallel} \max}}{\sigma_{\parallel \text{zul}}} \tag{4}$$

焊缝剪切强度利用系数为:

$$UF_{\tau_{\parallel}} = \frac{\tau_{r_{\parallel} \max}}{\tau_{\parallel \text{zul}}} \tag{5}$$

式中: $\sigma_{\parallel \text{zul}}, \sigma_{\perp \text{zul}}, \tau_{\parallel \text{zul}}$ —许可疲劳强度特征值,其值均小于 1(对于板厚 $2 \text{ mm} \leq t \leq 10 \text{ mm}$ 有效,该值根据 DVS 1612:2009 计算得到,与焊缝类型、板厚、屈服强度等因素相关)。

焊缝合成疲劳强度利用系数 UF_{eqv} 为:

$$UF_{\text{eqv,weld}} = \frac{((UF_{\sigma\perp})^2 + (UF_{\sigma\parallel})^2 - (UF_{\sigma\perp}) \times (UF_{\sigma\parallel}) + (UF_{\tau\parallel})^2)}{1.1} \quad (6)$$

焊缝最大利用系数表示为:

$$UF_{\text{max,weld}} = \max\{UF_{\sigma\perp}, UF_{\sigma\parallel}, UF_{\tau\parallel}, UF_{\text{eqv,weld}}\} \quad (7)$$

由于该结构焊接质量等级为 CPC2, 根据 DVS 1612:2009 德国标准, 焊缝疲劳强度利用系数满足:

$$UF_{\text{max,weld}} \leq 1.0。$$

根据焊缝疲劳强度评估标准, 笔者对优化后蓄电池箱结构焊缝的疲劳强度进行评估, 评估内容包括 $UF_{\sigma\perp}$ 、 $UF_{\sigma\parallel}$ 、 $UF_{\tau\parallel}$ 、 $UF_{\text{eqv,weld}}$ 焊缝疲劳强度。

焊缝疲劳强度系数如图 6 所示。

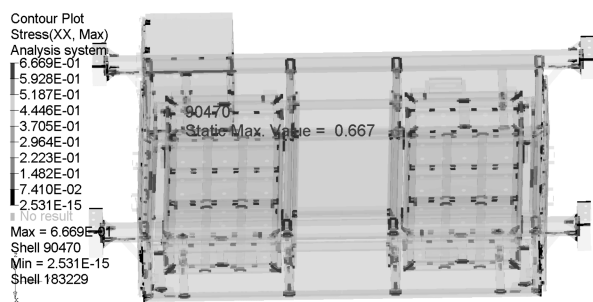


图 6 焊缝疲劳强度系数

计算得到焊缝疲劳强度的最大利用系数 $UF_{\text{max}} = 0.667$, 小于评估标准要求的 1.0, 由此可见能够满足焊缝疲劳强度的要求。

5 结束语

车载电气设备采用轻量化设计是趋势, 本文采用变密度法建立蓄电池箱拓扑优化的数学模型, 结合尺寸优化和形貌优化方法, 进行了优势互补, 实现了蓄电池箱结构的轻量化; 优化后的结构减重 50.2 kg, 占原主框架结构的 31.5%; 箱体的一阶固有频率达 20 Hz 以上。

由于拓扑优化只考虑了危险系数最大的两个工况, 今后将可以对其进行多工况、多目标的拓扑优化。

参考文献 (References):

[1] PARK B H. Bogie frame design in consideration of fatigue

strength and weight reduction [J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit**, 2008, 220(3): 201-206.

- [2] JIN Hong-yu, YANG Fan, WANG Han, et al. A stiffener structural design method for worktable of heavy-duty vertical lathe by combining modal analysis and topology optimization [J]. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2019, 60(2): 745-756.
- [3] 周克民. 结构拓扑优化的一些基本概念和研究方法[J]. **力学与实践**, 2018, 40(3): 245-252.
- [4] 焦洪宇. 基于变密度法的周期性拓扑优化[J]. **机械工程学报**, 2013, 49(13): 132-138.
- [5] 蒲 栋. 地铁列车蓄电池箱疲劳仿真分析[J]. **中国科技信息**, 2018(3): 70-71.
- [6] 张 涛, 李 超. 高速列车轴箱体强度分析及结构优化[J]. **重庆理工大学学报**, 2016, 30(6): 13-16.
- [7] 聂春戈, 李晓峰, 兆文忠. 高速转向架轴箱转臂结构拓扑优化设计[J]. **机械设计**, 2007, 24(6): 58-60.
- [8] 魏 静. 基于 SIMP 及应变能理论的高速动车齿轮箱结构优化[J]. **机械强度**, 2011, 33(4): 558-564.
- [9] 高月华. 基于子结构法的动车组设备舱支架优化设计[J]. **大连交通大学学报**, 2016, 37(4): 33-37.
- [10] 王 倩. 铁路客车用蓄电池箱箱门结构优化[J]. **科技风**, 2019(10): 151.
- [11] 李永华, 赵传福. 基于模态优化的动车组蓄电池箱结构可靠性分析[J]. **机械设计与制造工程**, 2018, 47(7): 6-10.
- [12] 兰凤崇, 赖番结, 陈吉清. 考虑动态特性的多工况车身结构拓扑优化研究[J]. **机械工程学报**, 2014, 50(20): 122-128.
- [13] 柳拥军, 王 菲. 地铁 B 型车转向架构架拓扑与尺寸优化研究[D]. 北京: 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 2012.
- [14] 隋允康. 连续体结构拓扑优化的 ICM 方法[M]. 1 版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [15] 高月华, 赵 丹, 谢素明. 基于代理模型的焊接构架纵梁优化设计[J]. **大连交通大学学报**, 2018, 39(4): 32-36.
- [16] 林建军, 姚曙光. 基于 OptiStruct 的设备舱底板刚度优化[J]. **轨道车辆**, 2016, 54(7): 1-4.
- [17] 张士朋, 刘震顺, 吴高峰, 等. 某核级管道 BOSS 头含缺陷焊缝处置方案优化研究[J]. **压力容器**, 2019, 36(10): 56-61.
- [18] 王 磊, 郑连学, 陈中荣, 等. 球罐对接焊缝中裂纹、夹渣相控阵识谱技术探讨[J]. **压力容器**, 2019, 36(6): 65-71.

[编辑: 程 浩]

本文引用格式:

樊智敏, 赵梓连. 地铁车载蓄电池箱结构的优化研究[J]. **机电工程**, 2020, 37(6): 697-701.

FAN Zhi-min, ZHAO Zi-lian. Research on structure optimization of a subway vehicle battery box[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2020, 37(6): 697-701.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>