

基于参数优化的商用车电池架性能提升研究

Research on the performance enhancement of commercial vehicle battery racks based on parameter optimization

张岫¹, 曾岩¹, 周锦航¹

Zhang Shen¹, Zeng Yan¹, Zhou Jinhang¹

1. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁大连, 116024

摘要: 商用车电池架作为新能源汽车的关键结构部件, 其性能对整车的安全性、耐久性及轻量化水平具有重要影响。本文基于 Isight 优化平台, 采用参数化建模方法对商用车电池架进行性能优化。通过将电池架划分为八层桁架结构, 构建了参数化有限元模型。本研究的优化目标为降低电池架的最大应力和最大位移, 同时减少整体质量, 以提高其结构强度和刚度。优化变量为矩形钢管截面参数。采用多岛遗传算法进行全局优化, 在多次迭代计算后, 获得最优截面参数组合。优化结果表明, 在满足强度和刚度要求的前提下, 优化后的电池架在关键工况下的最大应力降低了 46.95%, 最大位移减少了 16.35%, 同时整体质量降低了 3.3%。这一优化方案有效提升了电池架的结构性能, 并符合轻量化设计的要求。本文提出的方法不仅适用于商用车电池架的优化设计, 也可推广至其他汽车结构件的优化研究, 为新能源汽车轻量化与结构优化提供了有价值的参考。

关键词: 电池架, 参数优化, 静力分析, 轻量化

0 引言

自从中国一汽 1953 年建厂以来, 中国汽车工业已经走过了七十多年的历程。2024 年我国汽车产销量均突破 3100 万辆, 连续多年创造新高。汽车工业已经成为我国的支柱产业, 汽车工业在国民经济中的比重日渐增高 [1]。汽车工业的发展不仅推动了各种先进材料、电子电控技术以及先进的制造工艺的发展, 也带来了一系列的相关问题, 包括能源消耗、环境污染等 [2]。

为解决汽车工业发展带来的问题, 世界各国都制定了相关政策来保证汽车工业的健康发展。2020 年, 我国政府在第七十五届联合国大会上提出: “中国将采取更加有力的政策和措施, 力争 2030 年二氧化碳排放达到峰值, 2060 年实现碳中和 [3]。” 同样国际社会也越来越重视碳中和目标, 各个国家制定了严格的排放标准, 如欧盟“欧 7”、中国“国六”。为达到这一目标, 汽车轻量化是最有效的方法。相关研究表明, 汽车行驶的 75% 油耗与整车质量相关, 车辆每增加 100Kg, 燃油效率下降约 2%, 每公里二氧化碳排放量增加 4~6g。相反, 车辆每减少 10% 重量, 节约能耗 6%~10%, 二氧化碳等温室气体排放相应减少 6%~10% [4]。对于新能源汽车来说, 轻量化能够有效的增加续航, 降低车辆对电池的依赖。新能源汽车每降低 100Kg 车重, NEDC (欧洲驾驶循环标准) 工况续航增加 5.5% [5]。在新能源商用车中, 电池系统作为整车的重要组成部分, 其质量通常较大, 电池部分受制造工艺等水平限制, 很难有明显减重, 但是电池支撑结构通常有较大的设计空间。电池架不仅需要承载电池组的重量, 还需满足复杂工况下的强度、刚度等要求。由于电池架在电池系统中质量占比较高, 优化电池架的结构设计, 减少其重量, 同时确保其力学性能, 是实现商用车轻量化的关键环节之一。目前, 电池架的结构设计多采用高强度材料或先进制造工艺来减轻重量, 但通过结构优化进一步提高

材料利用率、降低冗余质量，更科学有效，具有很大的研究价值。

针对这一问题，本文研究了商用车电池架的参数优化方法，旨在通过合理调整结构截面参数，提高电池架的力学性能。在优化过程中，考虑电池架的受力特性，采用拓扑优化方法确定合理的结构布局，并进一步通过尺寸优化调整关键参数，以达到减重和提高刚度的双重目标。

1 电池架设计

1.1 电池架几何模型法

本文中电池架模型主要根据某款车型的实际尺寸进行设计。前期调研得到电池架的外观尺寸为：2415*765*2280mm，电池尺寸为 1060*630*250mm，电池质量每块 230Kg，共计四层，每层两块，共 1840Kg。电池架模型包含两大部分：电池模组部分和电池架部分，其中电池架部分分为底座和上部结构，均为矩形截面方管，电池模组与电池架部分通过吊耳连接。电池组部分不是本文的设计域，所以为了方便分析，电池模组部分采用等质量长方体来表示。电池架材料使用 Q235，密度为 $7.85 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ ，泊松比为 0.3，弹性模量 $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ ，屈服强度为 235MPa。电池架几何模型如图 12 所示：

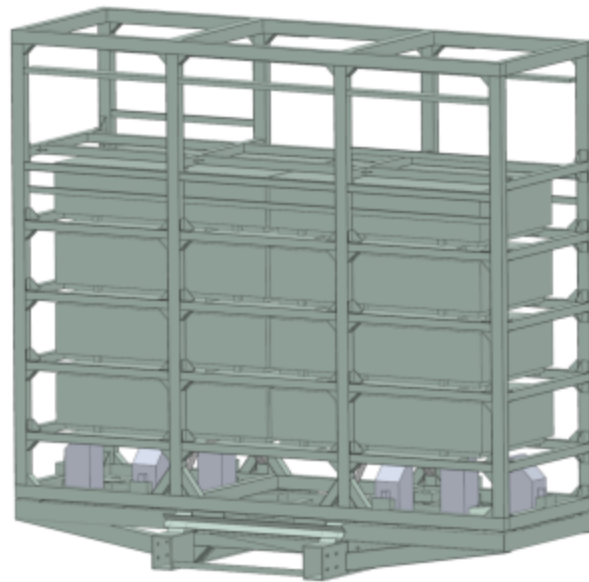


图 1 电池架模型

1.2 电池架有限元模型建立法

将电池架模型导入 Abaqus 中，为确保网格划分的质量，提高计算的精度和效率，对模型进行几何清理。主要删除冗余特征、修复几何缺陷、简化复杂结构。电池架部分的矩形截面钢管厚度较小，所以采用壳单元建模。电池模组部分本身不参与后续优化，且为实体结构，为减少网格数量，在每块电池的几何中心设定 RP 点，将其耦合在与电池架相连的吊耳上，并在 RP 点附加电池质量的自重取代原有电池组模型。电池架有限元模型如图 2 所示：

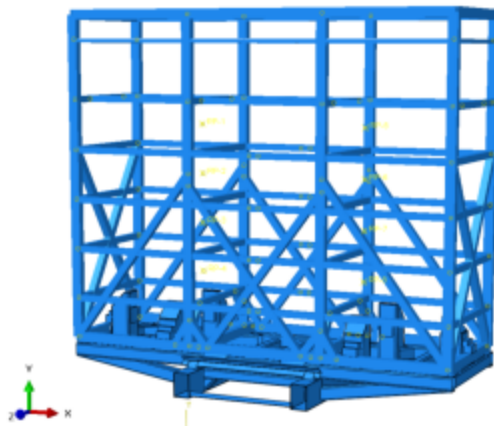


图 2 电池架有限元模型

1.3 电池架多工况分析

商用车在实际运行过程中会经历复杂多变的工况，包括加速、转向、颠簸路面等动态载荷条件。因此，电池架作为新能源商用车的重要承载结构，必须在多种典型工况下具备足够的强度和刚度，同时在轻量化前提下确保车辆的安全性和可靠性。为了全面评估电池架的结构性能，本文选取加速工况、转向工况和过坑工况作为主要分析场景，通过有限元仿真对电池架在不同工况下的受力情况进行研究。

在加速工况下，车辆在动力系统驱动下迅速提速，电池架受到纵向惯性力作用，可能导致结构发生整体变形或局部应力集中。此工况主要考察电池架的抗拉和抗压能力，以确保电池组在快速加速过程中稳定固定，不发生松动或结构损伤。

在转向工况下，车辆受到横向惯性力的影响，电池架需要承受侧向载荷，尤其在高速转弯时，电池组的侧向摆动可能引发连接部位的应力集中。因此，该工况的分析重点在于电池架的抗侧向变形能力，确保其刚度满足设计要求，避免因侧向冲击导致的结构疲劳或损坏。

在过坑工况下，车辆通过颠簸路面或障碍物时，电池架受到来自路面的冲击载荷，产生剧烈振动，甚至出现瞬态冲击力。此工况考察电池架的纵向抗冲击性能。

电池架三种工况载荷施加方式如下表所示：

表一 电池架载荷条件

工况	载荷大小
加速工况	X向 3g, Z向 1g
转向工况	Y向 3g, Z向 1g
过坑工况	Z向 5g

电池架通过底部螺栓孔与车架相连，所以边界条件施加方式为固定底部螺栓孔三个方向的自由度，施加位置如下图所示。

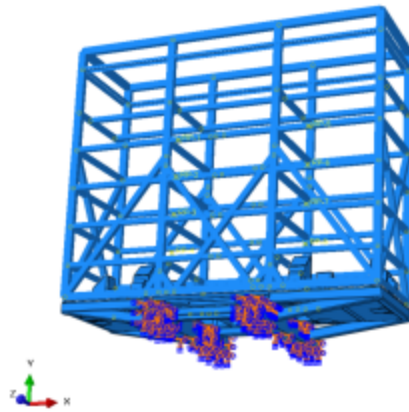


图 3 电池架边界条件

电池架三种工况的计算结果如下表所示：

表二 三种工况计算结果

工况	最大应力/MPa	最大位移/mm
加速工况	799.3	7.207
转向工况	427.3	5.376
过坑工况	176.4	4.982

计算结果表明，在这三种工况中，加速工况对电池架的影响最为显著，其应力水平最高，整体变形最大。加速工况下，电池架主要受到纵向惯性力的作用，由于电池组质量较大，在车辆加速时，其惯性力会对电池架施加显著载荷。有限元分析表明，加速工况下的结构应力峰值远高于转向和过坑工况，尤其是在连接部位和支撑结构处应力最大。同时，电池架的整体变形量在加速工况下也达到了最大值，表明该工况对结构刚度的要求尤为严格。加速工况应力和位移云图如下图所示。因此，重点给出了加速工况下的应力与位移云图，后文也将以此工况做为重点工况进行研究。

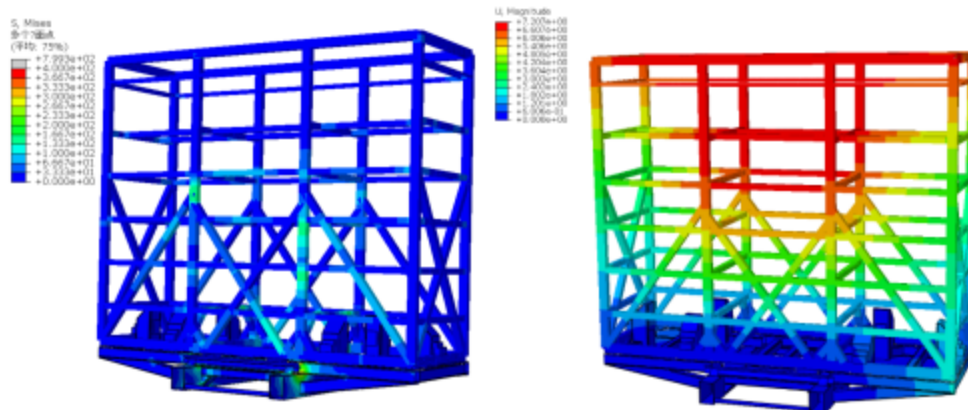


图 4 加速工况应力和位移云图

2 面向性能提升的电池架的参数优化

为了提高电池架的结构力学性能，同时满足轻量化设计需求，参数优化成为一个重要的研究方法[6]。本研究基于 Isight 优化平台，Isight 是一款仿真流程集成与自动化平台，广泛应用于汽车、航空航天、机械制造等多个工程领域结合有限元分析工具[7]。通过合理调整电池

架的截面参数，不仅可以降低结构在特定工况下的应力水平和位移幅度，还能有效减少电池架的整体质量，从而提升整车的能效比和动力性能。

本文采用参数优化方法对电池架进行结构优化，加速工况条件下，目标是在降低最大应力和的同时，也尽可能减少电池架的质量。优化过程中，首先选取电池架的关键截面参数作为设计变量，并建立优化目标和约束条件。借助遗传算法迭代优化寻找最优设计方案。在优化过程中，通过灵敏度分析识别对结构性能影响较大的关键设计变量，并对这些变量进行调整，以达到更优的性能指标。

2.1 参数化建模

本文采用参数化建模方法对电池架进行优化设计，将电池架上部的桁架结构改用梁模型建模，方便后续更改截面参数。考虑到电池架的整体结构特点，将其划分为八层桁架结构，并在每一层选用相同截面的钢管，以减少变量数量，提高优化效率。针对钢管的截面参数，选取矩形钢管的长、宽和壁厚作为优化变量，后续通过调整这些参数来改善电池架的结构性能。电池架参数化建模如图 5 所示：

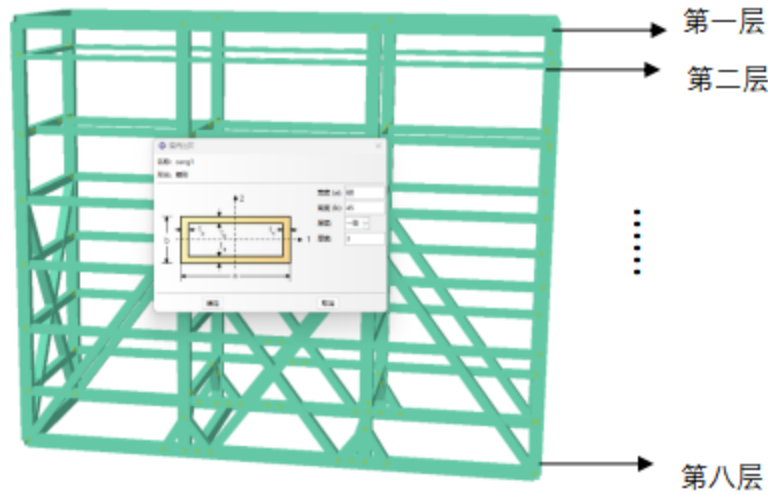


图 5 参数化建模电池架

2.2 Isight 参数优化

本文优化算法采用多岛遗传 (Multi-Island Genetic Algorithm, MIGA) 算法 [8]，多岛遗传算法 (MIGA) 是一种改进型的遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)，其主要思想是将整个种群划分为多个相互独立的子种群 (即“岛屿”)，并在各个岛屿内独立进行进化计算，同时引入一定的个体迁移机制，在不同岛屿之间交换个体。这种方法能够提高种群的多样性，减少过早收敛的可能性，并提高全局搜索能力。

参数优化的优化目标主要包括：降低最大应力，提高结构强度，增强刚度。约束条件为电池架整体质量不超过初始设计质量，以优化前的结构总重 0.368t 为约束，相应的数学模型描述为：

$$\begin{cases} \min & mises(x) \\ \text{s.t.} & m(x) \leq 0.368 \\ & x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

其中， $mises(x)$ 为最大应力； $m(x)$ 为总质量； x_i 为设计变量； x_i^L 和 x_i^U 为设计变量上下限。

参数化建模的设计变量为下图所示的八层桁架结构以及电池架的立柱结构，共 9 种截面，每种截面包含长、宽和壁厚三个参数，所以总体设计变量共 27 个，设计变量名称及其设计范围如表三所示。

表三 截面优化设计变量

序号	设计变量	尺寸范围	序号	设计变量	尺寸范围
1	Ceng1a	40-80	16	Ceng6a	20-60
2	Ceng1b	30-60	17	Ceng6b	20-60
3	Ceng1t	1-5	18	Ceng6t	1-5
4	Ceng2a	20-60	19	Ceng7a	20-60
5	Ceng2b	20-60	20	Ceng7b	20-60
6	Ceng2t	1-5	21	Ceng7t	1-5
7	Ceng3a	20-60	22	Ceng8a	40-80
8	Ceng3b	20-60	23	Ceng8b	30-60
9	Ceng3t	1-5	24	Ceng8t	1-5
10	Ceng4a	20-60	25	lizhua	25-65
11	Ceng4b	20-60	26	Lizhub	25-65
12	Ceng4t	1-5	27	Lizhut	1-5
13	Ceng5a	20-60	-	-	-
14	Ceng5b	20-60	-	-	-
15	Ceng5t	1-5	-	-	-

3 优化结果及验证

通过 Isight 迭代优化，最终确定了上述 27 个参数的最优尺寸，截面尺寸优化结果见表四所示：

表四 截面参数优化结果

序号	设计变量	尺寸范围	序号	设计变量	尺寸范围
1	Ceng1a	73.484	16	Ceng6a	54.377
2	Ceng1b	43.061	17	Ceng6b	41.551
3	Ceng1t	1.25	18	Ceng6t	1.78
4	Ceng2a	43.977	19	Ceng7a	60.709
5	Ceng2b	40.161	20	Ceng7b	40.942
6	Ceng2t	2.68	21	Ceng7t	3.07
7	Ceng3a	43.84	22	Ceng8a	79.537
8	Ceng3b	55.89	23	Ceng8b	50.944
9	Ceng3t	2.70	24	Ceng8t	2.68
10	Ceng4a	57.215	25	lizhua	42.828
11	Ceng4b	58.343	26	Lizhub	54.778
12	Ceng4t	1.31	27	Lizhut	3.16
13	Ceng5a	58.768	-	-	-
14	Ceng5b	47.091	-	-	-
15	Ceng5t	1.96	-	-	-

将上述优化结果代入有限元模型中，加速工况优化后最大应力为：424MPa，优化后最大位移为：6.029mm。优化后结果的云图如图所示：

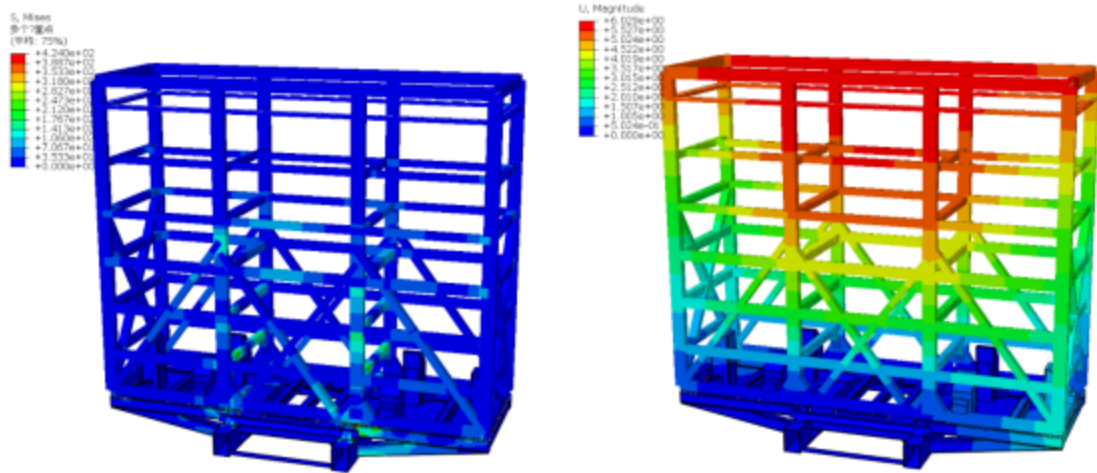


图 6 电池架优化后结果

优化前后，结构最大应力和最大位移有显著下降，刚度有显著提升，同时，力学性能有大幅提升的同时，质量也有所减轻，电池架的轻量化水平和结构安全性。结构优化前后结果对比如表五所示：

表五 优化前后结果对比

力学指标	优化前	优化后	力学指标变化
最大应力/MPa	799.3	424	降低 46.95%
最大位移/mm	7.207	6.029	降低 16.35%
结构质量/t	0.368	0.356	降低 3.3%

4 结论

本研究采用 Isight 优化平台，结合有限元软件对电池架在多种工况下的力学性能进行仿真计算，并通过优化算法不断调整截面参数，以满足优化目标。最终，优化后的电池架在满足强度和刚度要求的同时，最大应力和最大位移得到显著降低，整体质量也有所减少。

本研究的参数化建模与优化方法不仅为电池架的设计提供了高效的优化策略，也为类似的汽车结构件优化设计提供了参考。优化后的电池架能够更好地适应商用车的复杂工况，提升整车的可靠性和运行效率，为新能源汽车的轻量化和结构优化设计提供理论支持和工程实践指导。

参考文献

- [1]王思瑜.新能源汽车发展现状研究综述[J].内燃机与配件.2024.(05):135-137.
- [2]马鸣图.王国栋.王登峰.汽车轻量化导论[M].化学工业出版社.2020.
- [3]田瑾.佟琼.梁栋.中国交通运输业碳减排成本测算及碳减排潜力分析[J].北京交通大学学报(社会科学版).1-13
- [4]张梦瑶.地面常规公交效率对城市客运交通碳排放的影响研究[D].北京交通大学.2020.
- [5]文志.纯电动汽车行驶策略及能量管理仿真研究[D].长安大学.2014.
- [6]季枫.王登峰.陈书明.等.轿车白车身隐式全参数化建模与多目标轻量化优化[J].汽车工程.2014.36(02):254-258.
- [7]卞翔.李占营.董彦龙.等.基于 Isight 的某 SUV 白车身轻量化设计[J].汽车实用技术.2024.49(07):54-58.
- [8]Chen H, Ooka R, Kato S. Study on optimum design method for pleasant outdoor thermal environment using genetic algorithms (GA) and coupled simulation of convection, radiation and conduction[J]. Building and

Environment, 2008, 43(1): 18-30.

第一作者简介：张岫，男，1998年04月生，辽宁省阜新市人，大连理工大学力学与航空航天学院工程力学系车辆工程专业硕士在读，研究方向为车辆力学与工程。通讯方式：辽宁省大连市大连理工大学工程力学系，邮箱：984029800@qq.com 联系电话 18340898098

张岫，男，1998年04月出生，辽宁省阜新市人，大连理工大学力学与航空航天学院工程力学系车辆工程专业硕士在读。本科毕业于大连理工大学车辆工程专业，硕士期间参与多个与汽车研发密切相关的项目，涵盖整车结构优化、NVH分析等方面，在系统建模、仿真分析和优化设计工作领域有丰富的实践经验。