

基于SFE隐式参数化的纯电动商用车电池框架轻量化设计

王亮, 净艺杰, 李超虎, 李亚妮

陕西重型汽车有限公司 陕西西安 710200

摘要: 以某纯电动商用车电池框架为研究对象, 应用CAE分析驱动设计的理念, 建立电池框架隐式参数化模型, 定义零件料厚、断面尺寸共37个变量, 以电池框架性能不降低为前提, 采用Isight开展多目标设计优化, 确定料厚和断面的最佳组合方案, 完成纯电动商用车电池框架轻量化设计。

关键词: 电池框架; 隐式参数化; 静力学分析; 轻量化

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.11.002

在国家双碳战略、双积分等政策以及市场需求等综合因素驱动下, 商用车迅速向电动化方向转型, 商用车新能源渗透率快速提升。但目前纯电驱商用车整备质量比柴油车大了1.5~2.0t, 其中后电池框架质量在500~800kg, 占增加质量的30%~40%。轻量化是新能源商用车降低整车电耗和提升续航里程的重要途径之一。因此, 对商用车电池框架进行轻量化优化设计具有重要的意义^[1-2]。

SFE CONCEPT软件基于CAE分析驱动设计的理念, 可以通过建立隐式参数化模型, 在设计早期快速确定最佳的设计方案, 节约开发周期成本。近年来, SFE隐式参数化建模技术在白车身轻量化设计方面得到了广泛应用。史国宏等^[3]在白车身设计初期应用隐式参数化白车身模型, 结合多学科优化设计等, 实现白车身质量减少12kg, 减重率4.5%。王登峰等^[4]采用SFE CONCEPT开展轻量化设计, 在白车身性能不降低的情况下, 实现白车身减重19.9kg。吴鹏兴等^[5]

建立商用车白车身隐式参数化模型, 结合遗传算法求解, 在保证性能的前提下, 实现白车身减重16.9kg。张峰等^[6]建立某白车身的参数化模型, 通过拓扑、断面和料厚优化, 满足性能的前提下, 实现白车身减重17.5kg。综上所述, 隐式参数化建模设计方法在白车身轻量化设计方面取得了比较好的效果, 但在整车其他零部件设计上研究应用较少。

本文以某纯电动商用车电池框架为研究对象, 应用CAE分析驱动设计的理念, 建立电池框架隐式参数化模型, 定义零件料厚、断面尺寸共37个变量, 以电池框架性能不降低为前提, 采用ISIGHT开展多目标设计优化, 确定料厚和断面的最佳组合方案, 完成纯电动商用车电池框架轻量化设计。

参数化模型搭建及零件材料定义

应用SFE CONCEPT软件, 以某纯电动商用车电池框架验证的有限元模型为依据, 建立电池框架隐式

全参数化模型。为了便于模型建立，先将电池框架模型分为左框架、右框架、中框架和连接支架4个部分。再按照基点、基线、断面、梁和接头等建模步骤分别完成4个部分几何特征构建，接着通过映射关系或接头将各部分装配成总成，最后完成全部参数化模型的建立^[7-9]。同时通过软件网格生成功能，自动生成满足虚拟仿真分析要求的有限元模型（见图1），包括零件的材料、属性和焊点等信息。

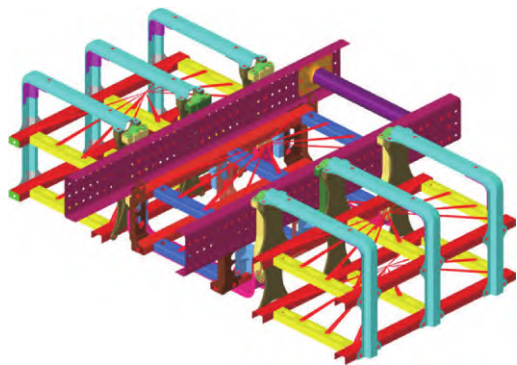


图1 隐式参数化电池框架模型

电池框架结构初始性能分析

1. 电池框架模态分析

对电池框架进行模态分析，边界条件为约束车架区域自由度，模态分析结果如表1所示。

表1 模态分析结果

阶数	约束模态频率/Hz	振型描述
1	6.3	左右局部模态
2	8.9	上下局部模态
3	12.5	支架下部前后局部模态
4	27	前后局部模态
5	26.6	支架下部局部模态
6	30.6	中间支架局部模态

2. 初始电池框架静态强度仿真分析

电池框架静态强度分析需要满足垂向、转弯、制动工况和加速4个工况强度要求。各工况下加速度数值如表2所示。

表2 工况设定表

序号	分析工况			
	工况	X/g	Y/g	Z/g
1	垂向冲击工况	0	0	-5
2	制动工况	1	0	-2
3	转弯工况	0	1	-1
4	加速工况	1	0	-1

电池框架各工况应力分布如图2~图5所示，在垂向冲击工况下的最大应力为720MPa，处于电池框架L型件与铸件连接位置；制动工况下的最大应力为440MPa，处于电池包框架折弯件与连接铸件位置；转弯工况下的最大应力为334MPa，处于中间横梁与纵梁

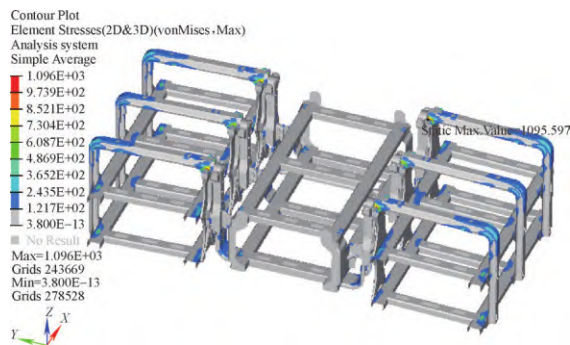


图2 垂向冲击工况静态强度分析应力

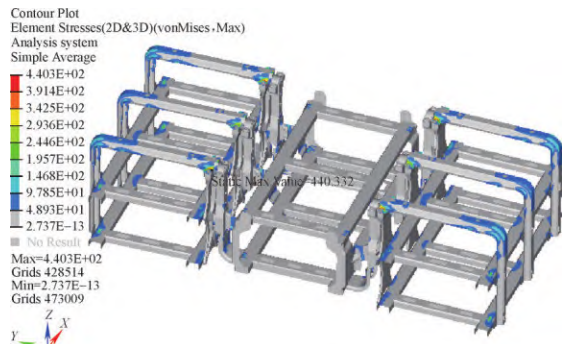


图3 制动工况静态强度分析应力

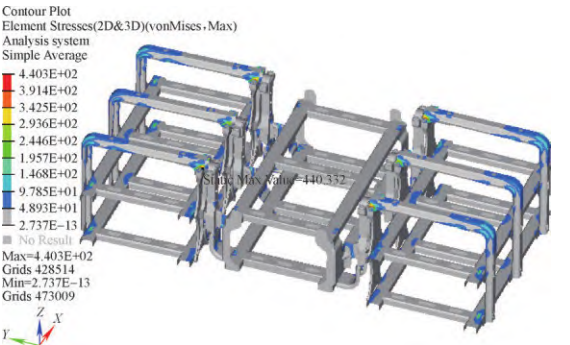


图4 转弯工况静态强度分析应力

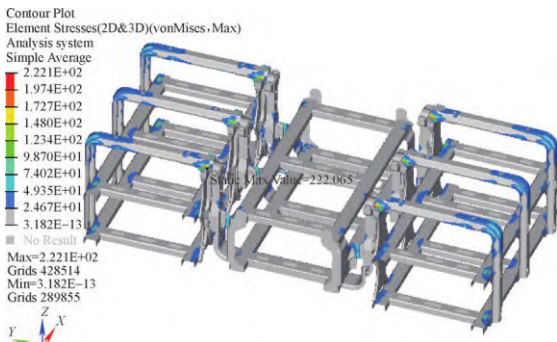


图5 加速工况静态强度分析应力

连接处；加速工况下的最大应力为745MPa，处于电池框架L型件与铸件连接位置。

电池框架轻量化优化设计

电池框架结构为梁结构，梁类零件的料厚和断面形状对电池框架性能有比较大的影响。因此将零件的料厚和断面形状作为设计优化变量。以电池框架模态（下降 $\leq 3\%$ ）和静态强度作为约束条件，以质量最小为优化目标，采用正交试验设计（DOE）方法得出设计变量的数据样本，根据约束和目标筛选的设计变量拟合数学模型，采用ISIGHT软件进行多目标设计优化，求出最佳轻量化方案。SFE联合ISIGHT轻量化如图6所示，流程为a**→**b**→**c。

1. 电池框架零部件断面形状变量定义

结合结构和受力，选择电池框架10个主要承载零件断面作为优化对象，如图7所示。利用SFE CONCEPT软件定义19个几何变量，断面形状设计变量的范围见表3。每个断面可以通过2~3个参数控制

表3 断面优化设计变量

序号	设计变量	尺寸范围/mm	序号	设计变量	尺寸范围/mm
1	A-1-Z-2	-10~+20	11	F-2-Z-2	-6~+6
2	A-2-X-2	-10~+20	12	G-1-Y-2	-12~+12
3	B-1-Z-2	-40~+20	13	G-2-Z-2	-4~+8
4	B-2-Y-2	-16~+20	14	H-1-X-2	-20~+20
5	C-1-Y-2	-10~+10	15	H-2-Z-2	-6~+4
6	C-2-Z-2	-6~+10	16	I-1-Y-2	-10~+10
7	D-1-X-2	-20~+20	17	I-2-X-2	-16~+10
8	D-2-Z-2	-6~+6	18	J-1-Y-2	-10~+12
9	E-1-Y-2	-14~+14	19	J-2-X-2	-12~+12
10	F-1-X-2	-20~+10	-	-	-

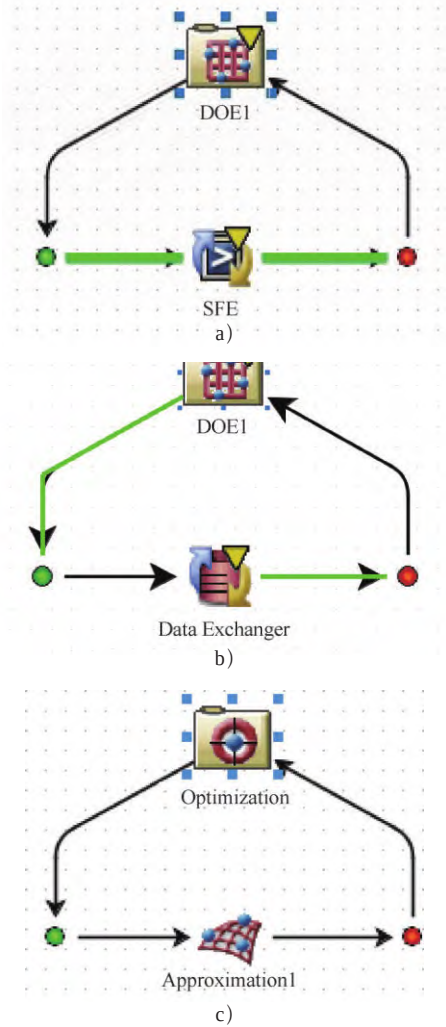


图6 SFE联合ISIGHT轻量化优化流程

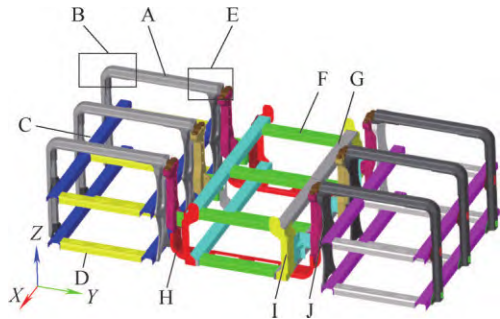


图7 承载零件断面定义

形状，驱动SFE参数化模型调整零件几何形状^[10]。

2. 电池框架零件料厚变量定义

结合工程分析经验，结合电池框架强度灵敏度分析^[11]，选取影响最大的18个部件作为料厚优化变量，如表4所示。

表4 料厚优化变量及范围

序号	变量	优化范围	序号	变量	优化范围
1	T1	-20%~+20%	10	T10	-20%~+20%
2	T2	-20%~+20%	11	T11	-20%~+20%
3	T3	-20%~+20%	12	T12	-20%~+20%
4	T4	-20%~+20%	13	T13	-20%~+20%
5	T5	-20%~+20%	14	T14	-20%~+20%
6	T6	-20%~+20%	15	T15	-20%~+20%
7	T7	-20%~+20%	16	T16	-20%~+20%
8	T7	-20%~+20%	17	T17	-20%~+20%
9	T9	-20%~+20%	18	T18	-20%~+20%

3. 优化结果及验证

通过ISIGHT多目标迭代优化，最终确定5个断面和9个料厚最佳轻量化优化方案，断面尺寸优化结果见表5，断面厚度优化结果见表6。

表5 断面尺寸优化结果

序号	设计变量	尺寸优化结果/mm
1	C-1-Y-2	-10
2	C-2-Z-2	-6
3	D-1-X-2	-20
4	E-1-Y-2	-14
5	G-2-Z-2	-4

表6 断面厚度优化结果

序号	设计变量	料厚优化结果/mm
1	T1	-20.0%
2	T2	-20.0%
3	T4	-20.0%
4	T7	-20.0%
5	T9	16.7%
6	T10	-20.0%
7	T11	-16.7%
8	T12	-16.7%
9	T16	16.7%

根据优化结果，对电池框架模型进行调整，进行模态和静态强度仿真分析，验证优化优化方案性能是否满足要求。表7为电池框架在轻量化优化前后模态分析结果对比，可以看出，优化后各阶模态变化在3%以内，满足约束条件。

表7 轻量化优化前后模态对比

阶数	初始模态/Hz	优化后模态/Hz	变化率
1	6.3	6.4	1.6%
2	8.9	8.8	-1.1%
3	12.5	12.2	-2.4%
4	27	26.3	-2.6%
5	26.6	26.8	0.8%
6	30.6	29.9	-2.3%

电池框架在轻量化优化后不同工况下的静态强度分析结果如图8~图11所示，轻量化方案相比原方案，

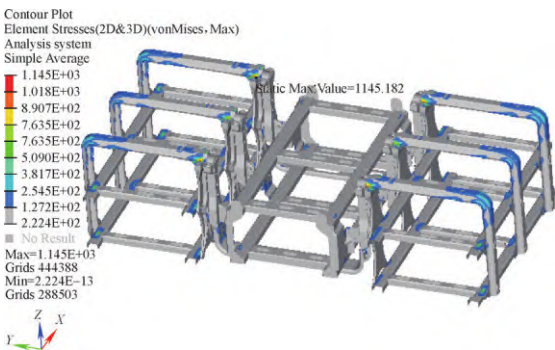


图8 垂直冲击工况应力分布云图

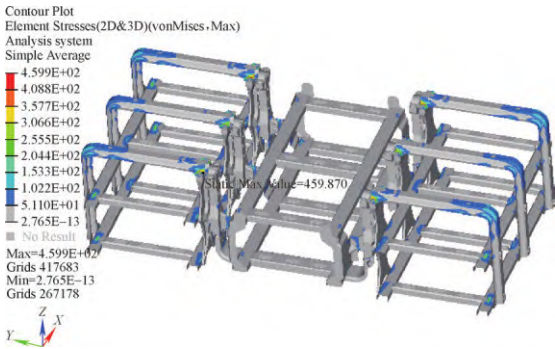


图9 制动工况应力分布云图

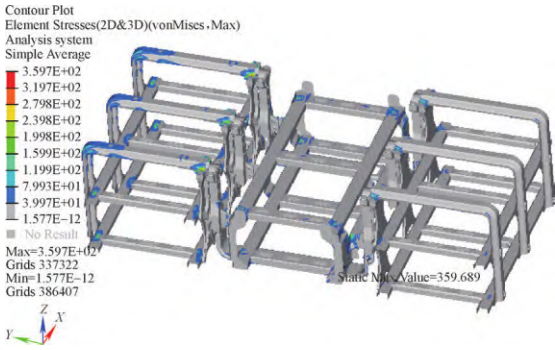


图10 转弯工况应力分布云图

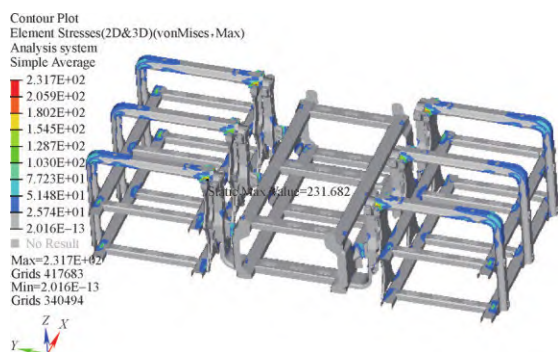


图11 加速工况应力分布云图

转弯工况条件下电池框架纵梁及与车架连接铸件的最大应力均得到下降,其他工况条件下电池框架各位置的最大应力均有所增加,但都在安全系数以内,满足产品性能要求。

通过对电池框架关键零件的断面形状、料厚进行优化,在保证电池框架模态和力学性能基本不降低的情况下,最大限度的实现电池框架降重31.4kg,减重率为7.78%。

结语

(1) 应用CAE分析驱动设计的理念,在商用车某电池框架设计早期,基于SFE CONCEPT软件,建立隐式参数化模型,将料厚和断面作为设计变量,以性能不降低为前提,开展多目标设计优化,确定最佳的料厚和断面尺寸优化方案,最终高效的实现电池框架轻量化设计。与传统设计方法相比,可有效减少方案修改和CAE仿真的次数,大幅提高设计开发的效率。

(2) 某款纯电动商用车电池框架通过采用SFE隐式参数化建模技术,定义共37个变量,通过ISIGHT多目标优化,在保证模态及静态强度不降低的前提下,实现降重31.4kg,减重率7.78%,大幅提升了电池框架的轻量化水平。

参考文献:

- [1] 冯毅,张德良,高翔. 基于安全、轻量化、可靠性多目标的新能源汽车电池包壳体开发 [J]. 汽车工程学报, 2024, 14 (2): 155-167.
- [2] 康元春,王瑞芳,张康. 某商用车蓄电池支架多目标拓扑优化[J]. 机械设计, 2020, 37 (3): 92-95.
- [3] 史国宏,陈勇,杨雨泽,等. 白车身多学科轻量化优化设计

应用 [J]. 机械工程学报, 2012, 48 (8): 110-114.

- [4] 王登峰,蔡珂芳,马明辉,张帅. 基于隐式参数化模型的白车身轻量化设计[J]. 汽车工程, 2018, 40 (5): 610-616+624.
- [5] 吴鹏兴,刘夫云,宋超. 基于NSGA-II的隐式参数化白车身轻量化设计[J]. 机械设计, 2022, 39 (2): 95-100.
- [6] 张峰,程建勇,董立强,石荡赫,朱红霞. 基于SFE CONCEPT的某平台改款车型车身结构轻量化设计[J]. 机械设计, 2022, 39 (11): 106-111.
- [7] 沈保山,范圣耀,钟兵,张国芬. 基于隐式参数化的车身轻量化设计[J]. 机械设计, 2022, 39 (8): 109-113.
- [8] 季枫,王登峰,陈书明,刘波,李晓青. 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 (2): 254-258.
- [9] 陈鑫,胡翠松,宁厚于,吴元强,汪硕,杨昌海. SUV白车身隐式参数化建模及多性能优化轻量化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46 (6): 1780-1785.
- [10] 卞翔,李占营,董彦龙,高文亮. 基于Isight的某SUV白车身轻量化设计[J]. 汽车实用技术, 2024, 49 (7): 54-58.
- [11] 周松,高翔,张志,万鑫铭,赵清江. 基于相对灵敏度的重型自卸车结构轻量化设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (35): 15027-15034. **AUTO1950**

