某商用车底盘车架轻量化设计

李超，燕政辉，朱刚
西安增材制造国家研究院有限公司　陕西西安　710399

摘要：以某商用车底盘车架为例，介绍了基于变密度法的拓扑优化方法，应用商用有限元软件HyperWorks中的OptiStruct拓扑优化模块，通过优化过程迭代计算，对原始车架模型进行了轻量化设计，在优化过程中考虑了车架在行驶过程中所受的静载荷和动载荷以及固有频率特性，在满足车架总成刚度、强度条件下，车架结构初步减重15%左右，实现了车架的轻量化设计，能够为后期精细化的车架轻量化设计及车架结构定型提供参考。

关键词：商用车；底盘车架；拓扑优化；轻量化设计

结构工程师　李超

1　序言

车架作为商用车底盘中重要的承载构件，在结构中可以连接汽车的各总成结构系统和零部件系统。商用车车架在汽车行驶过程中，要承受由路面和车内物体所产生的载荷，如弯矩和剪切力作用，同时还要经历振动、疲劳等复杂工况，因此车架的性能非常重要。商用车车架设计的传统方式存在很大的局限性，不能充分发挥材料、结构形式的最大优势，往往造成材料浪费且不能保证最优的结构性能。随着计算机技术和结构优化理论方法的不断发展，以及如增材制造等智能制造工艺的不断成熟，结合拓扑优化设计方法和3D打印制造模式，为新型车架的结构设计提供了可行的技术支持。

2　拓扑优化理论

结构拓扑优化方法主要是将寻求结构的最优拓扑问题转化为在给定的设计区域内寻求最优材料的分布问题[1]。在优化过程中设计区域保持不变，区域内微结构的孔洞大小可以变化，均匀分布在设计区域上的材料重新分布，形成新的、在一定条件下的最优拓扑结构形式。目前常用的连续体结构的拓扑优化方法有变厚度法、变密度法及均匀化方法等[2]。变厚度法的数学模型简单，但优化对象受到很大的限制。均匀化方法是假设一种微结构单胞，在这一微结构基础上建立材料密度与材料特性之间的关系[3，4]。变密度法用连续变量的密度函数显式地表达单元的相对密度与材料的弹性模量之间的对应关系，变密度法中最常用的插值模型是固体各向同性惩罚微结构模型(Solid Isotropic Microstructures with Penalization，SIMP) [5]。本文基于OptiStruct软件提供的变密度法对商用车车架进行拓扑优化研究。

3　车架结构的拓扑优化设计

在满足车架总成刚度、强度条件下，以整车底盘高度集成化、轻量化为目的，利用拓扑优化和增材制造的特点，以某电动轻卡为研究对象进行整体性和局部细节的优化设计。如图1所示，直接由车架承载的部分有驾驶室、电池包、货物和小附件等，与车架相连的支撑结构为前后悬架固定点。整车总

质量4500kg，前轮距1650mm，后轮距1500mm。其中整备质量2300kg、货物质量2200kg、驾驶室430kg、81kW·h电池包560kg，小附件数量多、质量轻，不在此具体说明。

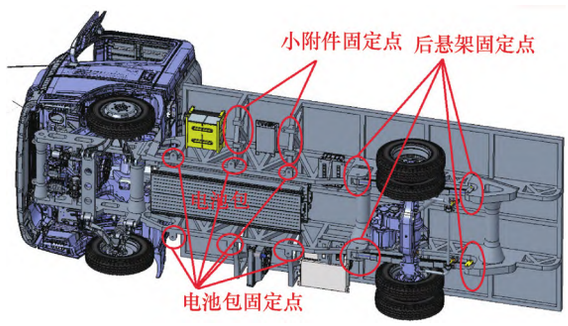


图1　整车信息

3.1　拓扑优化设计思路

拓扑优化方法多应用在新产品的概念设计阶段，主要针对铸件等实体部件，选择考察的性能工况需要包络所有的严苛受力状态，并约束设计空间体积分数，以加权柔度最小为设计目标。体积分数的约束具有主观性，因此往往拓扑优化后的结构仍具有轻量化空间。后续可以结合形貌优化、形状优化和参数优化等继续进行性能和轻量化优化。

底盘数值优化的主要流程如下。

1）概念阶段：针对原铸件等实体部件进行拓扑优化，根据选择的考察性能工况得到满足性能要求的材料分布。

2）结构数据阶段：可针对钣金结构件进行2D拓扑优化，用于指导结构开孔、减材等设计。

3）工艺数据阶段：进行料厚优化，根据具体情况可以选择使用Optistruct进行基于线性工况如弯扭刚度、模态等性能的料厚参数优化。或使用多学科优化软件进行多学科目标优化，同时考察刚度、NVH、强度等性能。

4）最后进行细节优化，可选择多参数优化，如同时考察料厚、形状等参数的基于某个性能的局部细节优化。此时需要结合经验分析的多变量优化。

轻卡电动车底盘结构主要承载驾驶室、电池包、货物以及质量较轻的辅助部件，根据总布置、人机工程等要求，确定优化边界条件。首先基于车架在不同载荷下的工况，进行整体车架的优化设计，包括参数优化和拓扑优化方法，输出车架的概念设计模型，即优化后的初始构型，再针对车架的局部结构继续细节上的拓扑优化。

作为全新集成化车架，省去连接件，周边不做专门的辅助支架，而是把承载物相连的支架通过3D打印集成于车架本身。因此，在设计之初预留支架以及悬架支撑位置，作为非设计区域，将整体框架结构填充为实体，运用拓扑优化算法，弱化传统制造约束限制，在平板、块状结构中寻找合理的传力路径，从而设计出富有实用性、创新性和美观性的集成底盘车架结构。

由于车架在实际使用中模型和工况过于复杂，故本文在拓扑优化设计时只考虑大型的主要承载构件，选取主要的载荷工况类型以及相对简单的模型等效方式。设计流程如图2所示。

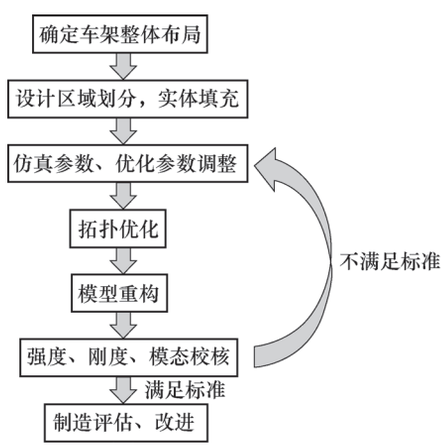


图2　车架设计流程

3.2　拓扑优化模型的建立

（1）车架设计迭代模式　分析如下。

原始车架形态为框架结构，由于车架拓扑优化初始结构要求能将最终拓扑模型完全包含在初始拓扑结构中，而无需对内部具体结构建模，所以在初步的整体优化中对模型结构进行拆解和填充，如图3所示。车架主体部分运用拓扑优化，在实体结构中寻找传力路径的材料分布；支撑面选择2D拓扑，即形貌优化，用来寻找合适的平板结构的加强筋分布。整体结构的尺寸约为5900mm ×2100mm×660mm（长×宽×高），车架预留承载质量件的安装孔和悬架安装面。

预留承载质量件、悬架的安装孔和货物支撑面作为保留区域，如图4所示，其中棕色部分为设计区域，会在这部分结构中寻找合理的材料分布，灰色区域作为支架安装孔或者支撑面，将其定义为非设

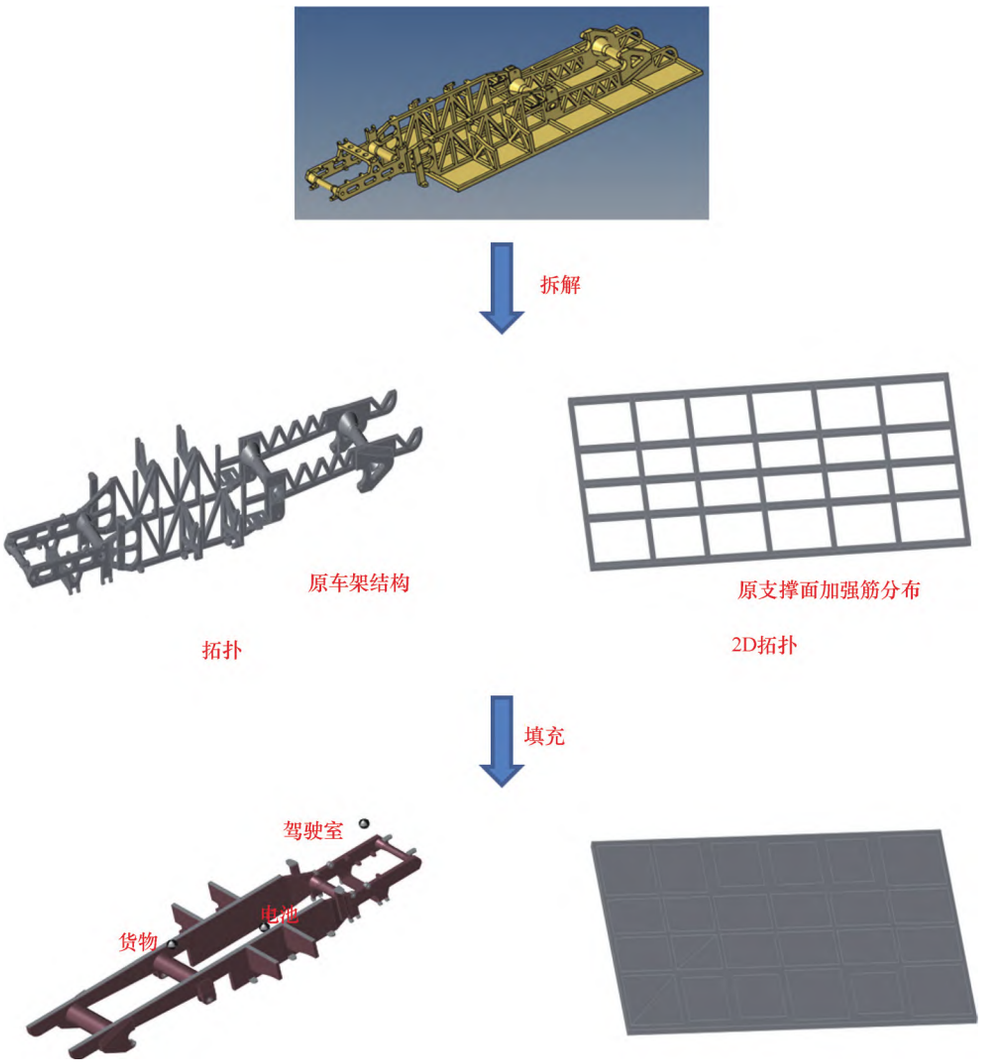
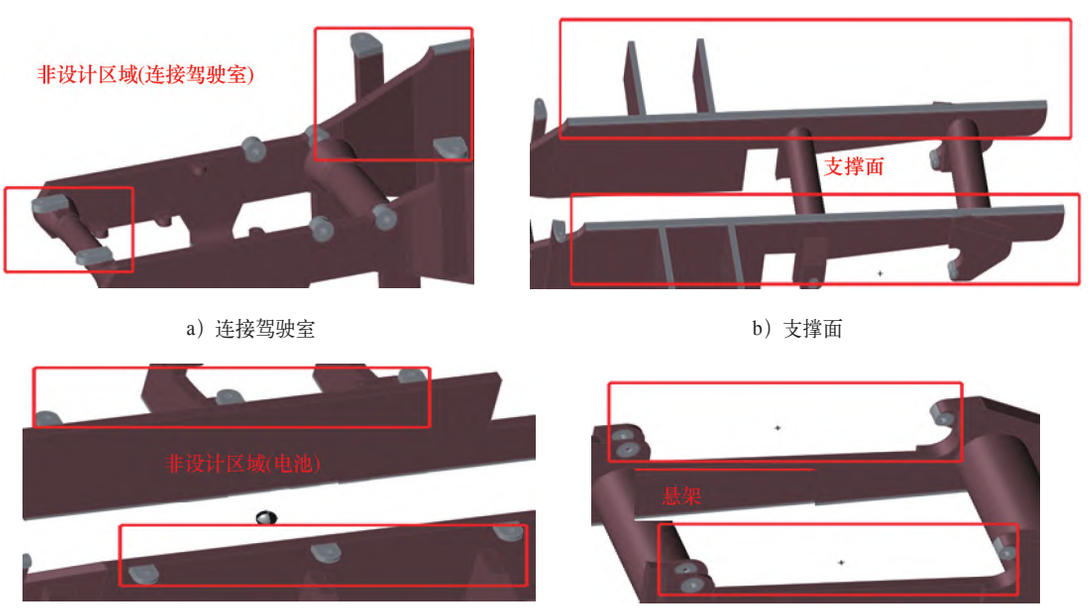


图3　拆解、填充模型示意



a）连接驾驶室　　b）支撑面

c）电池　　d）悬架

图4　模型设计区域示意

计区域，在优化过程中保留这些结构。

（2）建立车架拓扑优化有限元模型　步骤如下。

1）建立材料及质量点。在有限元软件中用边长为10mm的四面体单元对整体车架进行离散化，并设置材料为AlSi10Mg，弹性模量为75000MPa，密度为2.77×10^{-9}t/mm^3，泊松比为0.33。驾驶室、电池包和货物质心坐标已知，均以质量点的方式用刚性单元与车架对应位置相连接，如图5所示。该车架是通过钢板弹簧座与钢板弹簧相连接，根据所要模拟车架的实际工况，需要对车架与钢板弹簧座连接处的每个节点施加适当的自由度约束，本模型中进行相应简化，用柔性单元连接代替。

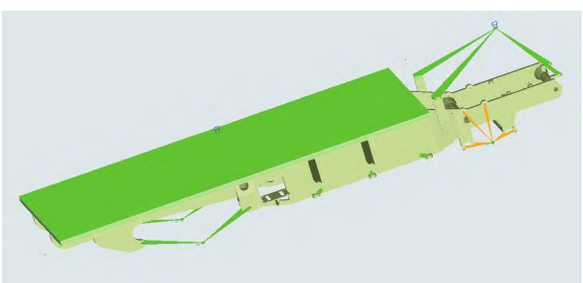


图5　质量点和耦合位置

2）考虑车架工况条件。商用车车架的工况条件十分复杂，典型工况一般分为静载、动载和模态3种类型，在车架拓扑优化时，整体考虑车架结构的所有典型工况载荷，利用线性加权法将所有的典型工况载荷进行组合求解，从而保证车架设计的合理性。

静载主要来源为车辆静止时在不同形态下受到的各连接质量对车架本身造成的弯扭载荷，本模型中考虑左前轮和右后轮着地，右前轮和左后轮同时悬空90mm的弯扭工况。

动载主要来源为车辆在行驶中受到的路面激励以及转弯、制动状态下的受力，大小取决于作用在车架各处的静载荷、加速度大小及动载系数。路面的反作用力使车架受垂直载荷，根据经验，在计算时，考虑最恶劣工况，在实际静载荷的基础上，给垂直载荷施加两倍的动载系数；同时，施加2g的垂向加速度载荷，来表征车架受到的动载荷；在急速转弯工况中，车架及车辆均承受较大的离心力作用，所以需要考虑侧向载荷，此处，给车架施加0.4g的侧向加速度载荷来模拟急速转弯工况的载荷；由于在紧急制动工况中，车辆及车架均承受较大的惯性力，此处，施加0.7g的纵向向后的加速度载荷来模拟紧急制动工况。

车辆在行驶时，不可避免的经常处于颠簸的路面，导致其长时间处于振动状态，研究车架的动态特性如固有频率等，对于车架设计是非常重要的一个环节。在车架的优化设计中，一般要考虑该车辆的发动机在怠速工况下，振动频率对车架结构性能影响的大小，在车架设计中，要尽可能使车架的固有频率避开发动机的怠速频率，从而避免新结构因怠速频率所引起的共振问题。本模型中只考虑车架的固有频率最小值，并无其他要求。

3）设置优化参数。在分析时，将最小应变能以及体积分数作为结构的响应（response）函数，设置最小应变能为优化的目标，设置体积分数作为拓扑优化计算的约束。其中，体积分数是指当前迭代步设计空间体积与初始设计空间体积的比值。同时对优化过程进行控制，在软件中设置如下参数[4]。

MINDIM参数控制拓扑优化的最小结构尺寸，根据经验，一般为网格中单元平均尺寸的3倍。MATINIT参数用以判断在拓扑优化过程中初始迭代的材料增加与减少的比例大小。MINMETH参数表示优化设计最小尺寸控制的方法，数值为1或2，数值为2时，优化后的拓扑结构更加离散化，避免结构聚集，此处选择2进行拓扑优化设计。MINDENS参数表征模型中单元的最小密度，且该数值不能设置为0，以避免计算迭代过程中产生病态矩阵，使优化结果误差增大。DELTOP定义拓扑优化中设计变量最初的变化率。DISCRETE参数为离散参数，其主要影响单元密度在优化过程中趋向于0或1的趋势，该值越大，则优化出的单元密度就越趋向0或者1，此时结构的拓扑结构越清晰。根据经验该参数数值设置为3.0。DESMAX参数为优化迭代计算的最大步数。OBJTOL参数表示计算过程中的收敛准则，如果优化迭代循环中前后2次迭代计算的目标函数相差的值小于该收敛准则数值，则表示该次迭代计算结束，程序自动进行下一步的迭代计算。

拓扑优化方法作为一种初始性的探索性设计，可以给结构设计提供重要的创新思路，但拓扑优化后的模型一般难以用传统加工方法进行加工，通常需要在对结构进行优化设计时，施加对称性约束条件，保证结构在拓扑优化的材料分布关于中间平面左右对称，而且该方法能够在结构不承受对称力载

荷工况下也能得到对称的优化结果。施加拔模约束即为了得到能够容易制造的结构，避免出现空腔。

本模型约束体积分数30%，全体单元等效应力值不高于材料屈服强度的80%，目标为加权最小柔度，各个工况所占权重相同。施加单向拔模约束和对称约束，具体参数设置如图6所示。

```
 ---------------------------------
  Optimization Parameters Summary :
 ---------------------------------

  Initial Material Fraction [0,1] :   0.3000
  Minimum Element Volume Fraction :   1.0000E-02
  Discreteness Parameter          :   3.0000

  Topology Optimization Method    :   Density Method
  Maximum Number of Iterations    :        80

  Convergence Tolerance           :   5.0000E-03
  Step Size (Topology)            :   0.5000

  Checkerboard Control            :   On (1 - Global Averaging)

  Run Type                        :   Topology Optimization

 -------------------------------
 Topology Optimization Summary :
 -------------------------------

 -------- ---------- ---------- ----------
 DTPL ID    Minimum    Maximum    Minimum
          Member Size Member Size  Gap Size
 -------- ---------- ---------- ----------
        1  0.3000E+02  0.6000E+02  0.6000E+02
 -------- ---------- ---------- ----------

 -------- ------- ------- ---------- ---------- ---------- ---------- ----------
 DTPL ID  Pattern Pattern  Draw Dir.   Stamping     No Hole    Extrusion   Overhang
           Repet.  Group. Constraints Constraints Constraints Constraints Constraints
 -------- ------- ------- ---------- ---------- ---------- ---------- ----------
        1   NONE  1-PLANE    SINGLE       NONE       NONE       NONE       NONE
 -------- ------- ------- ---------- ---------- ---------- ---------- ----------
```

图6　拓扑优化参数设置

4　车架拓扑优化结果

车架拓扑优化结果如图7所示，云图中由蓝色到红色代表单元密度从0到1，意味着材料存在的重要性逐步提高，设计思路即根据优化结果重新确定材料的分布情况，在已经有明显传力路径的区域，设计师按照示意图重新设计或者在优化结果上进行多边形建模，图中成片的蓝色或者红色区域是不合理的，这是由于该位置没有直接载荷。

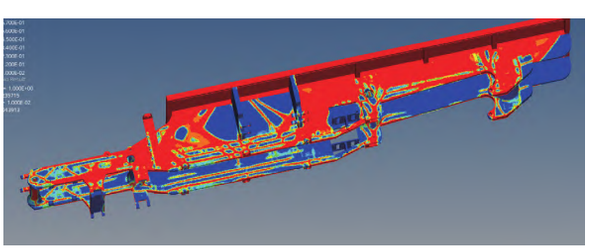
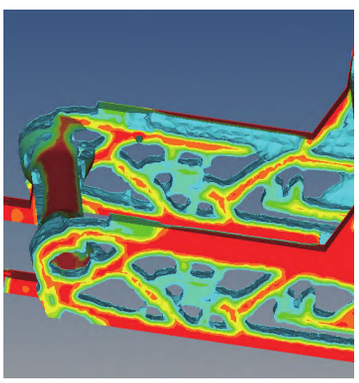


图7　优化结果云图

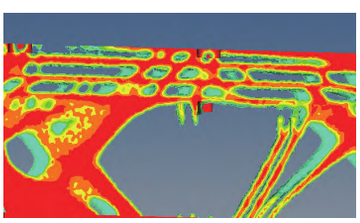
通过设定密度阈值，可以保留在某单元密度值以上区间的材料，如图8所示（阈值为0.5），在红色圆圈标记区域可以清晰地看到力的传递路径。局部区域可以提供一定的设计思路，在逆向建模时能够明确加强筋的分布，而其余大片空白区域或者实体区域可以根据后续迭代的计算进行细化设计。

从拓扑优化的设计结果可以看出，拓扑之后材料分布较原结构发生明显变化，并且能够满足约束

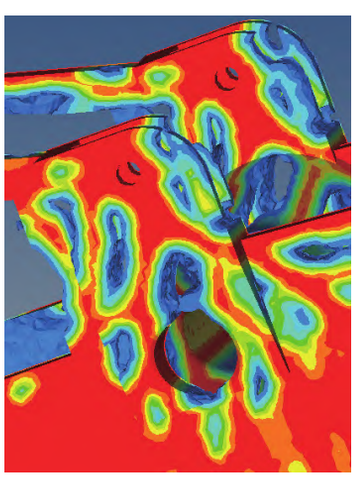
a）整体



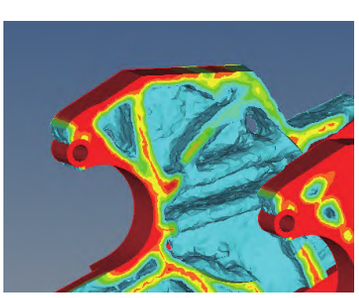
b）前悬架连接部分拓扑密度结果



c）电池包连接部分拓扑密度结果



d）后悬架连接位置1拓扑密度结果



e）后悬架连接位置2拓扑密度结果

图8　优化结果示意

条件，符合刚度和强度要求。整体车架减重约15%左右，车架整体结构较为复杂，增材制造特点较为明显，为后续车架细节结构的确定及车架整体设计提供了有价值的参考作用。

5 结束语

1）本文采用拓扑优化设计方法对车架结构进行了初始概念性设计，可以为工程师在初始设计阶段提供轻量化设计思路，大大缩短产品开发周期，节约开发成本。本文对原始的车架结构在静载荷、动载荷、固有频率特性等多工况下进行了创新性的优化设计，得到的车架满足一定的刚度和强度要求，且拓扑构型合理，相比原始车架，减重指标达到15%左右，达到了明显的轻量化设计目的。

2）在结构的创新性设计中，尺寸优化和形状优化等优化方法均有一定的局限性，在概念设计阶段，运用拓扑优化方法对结构进行设计，同时采用轻质铝合金等新材料并与颠覆传统的增材制造（3D打印）手段相结合，是汽车底盘件轻量化设计的重要方向，为汽车行业提供了更先进、更成熟的设计方法。

参考文献：

[1] FUKUSHIMA J，SUZUKI K，KIKUCHI N. Shape and Topology Optimization of a Car Body with Multiple Loading Conditions[J]. SAE Technical Paper Series，1992 920777：1-3.

[2] 石琴，姚成，马恒永. 集装箱半挂车车架结构拓扑优化设计[J]. 农业机械学报，2005（1）：10-12，17.

[3] 王显会，许刚，李守成，等. 特种车辆车架结构拓扑优化设计研究[J]. 兵工学报，2007（8）：903-908.

[4] 魏显坤，米林，万鑫铭，等. 基于Optistruct的铝合金半挂车车架结构拓扑优化设计[J]. 四川兵工学报，2012，33（1）：86-89.

[5] 郭瑞武，韩振南，刘邱祖. 某牵引车车架多目标拓扑优化设计[J]. 现代制造工程，2017（7）：85-89.

MW 20240906