

基于整车虚拟样机的车体结构拓扑优化

华顺刚^{*1}, 赵海波², 朱志豪¹, 张丽娜¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 沈阳理工大学 应用技术学院, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 基于整车零部件几何模型, 结合车体的有限元网格划分及模态分析, 构建履带装甲车辆刚柔混合虚拟样机, 进行典型工况下的多体动力学仿真分析, 输出若干关键时间点车体承受的荷载. 利用有限元分析技术将荷载加载到车体有限元模型上, 对车体进行结构力学分析和多荷载步拓扑优化. 根据拓扑优化结果修改车体局部结构, 并重新构建虚拟样机模型再次进行仿真分析, 将应力和变形分析结果与原仿真结果进行比较. 结果表明, 结合动力学仿真和有限元分析进行结构拓扑优化, 可以改善关键零部件的力学性能, 提高刚强度, 为改善装甲车辆的结构性能提供了一种有效方法.

关键词: 车体结构; 结构动力学仿真; 有限元分析; 拓扑优化

中图分类号: U270.32; TP391.9 **文献标志码:** A

0 引言

结构拓扑优化是现代结构优化方法之一, 其研究目的是在给定设计目标和约束的情况下, 使产品的材料在布局上达到最优^[1]. 设计者可以利用拓扑优化技术在工程结构设计的初始阶段获得一个概念性设计方案^[2], 从而改变了以往的设计、校核、修改这样一个不断反复的开发流程, 也可以根据拓扑优化结果对现有结构进行改进来提高产品的结构性能. 因此, 结构拓扑优化技术具有广阔的工程应用前景^[3].

目前拓扑优化技术在民用车辆和其他结构产品的开发和改进中已经有较广泛的应用^[4~6], 但在军用车辆中的应用还不深入, 特别是对于履带装甲车辆车体结构的优化研究还处于起步阶段. 车体是装甲车辆的重要组成部分, 具有防护、安装机件、承受冲击荷载等重要功能^[7], 车体的结构性能直接影响到整车的安全性和机动性. 因此车体结构的优化设计研究对提高整车的综合性能, 实现当代履带装甲车辆轻量化设计具有重要的意义.

履带车辆多体系统动力学仿真不仅能够使设

计者从多方面研究车辆的动力响应和刚强度性能, 还可以进一步根据动力学仿真结果, 将仿真输出的典型荷载加载到车体有限元模型上, 进行车体的“动态”分析和优化设计. 相比仅考虑车体内零部件静荷载, 或者单一时间点所承受荷载的设计分析方法, 该方法能获得更符合实际的结果. 本文结合有限元分析、结构拓扑优化和刚柔混合虚拟样机技术, 对车体进行结构力学分析和多荷载步拓扑优化研究, 以提高其刚强度, 改善力学性能.

1 车体结构拓扑优化总体思路

履带装甲车辆是一个各零部件之间紧密联系、高度耦合的复杂机械系统, 对此类系统的零部件进行结构设计时, 将其放在整车环境和实际工况下进行结构动力学和动态结构刚强度分析, 比独立分析单个零部件更加合理. 本文基于整车虚拟样机的车体结构拓扑优化研究的总体思路如下:

(1) 在多体系统动力学仿真软件中建立履带

收稿日期: 2010-04-04; 修回日期: 2012-03-04.

基金项目: 国家部委预研基金资助项目(40401010105).

作者简介: 华顺刚^{*} (1964-), 男, 博士, 副教授, E-mail: hsgang02@dlut.edu.cn.

车辆刚柔混合虚拟样机模型、进行结构动力学仿真分析;

(2)输出仿真分析结果中车体承受的关键时间点荷载,在有限元软件中将这荷载加载到车体有限元模型上,并添加约束进行静力学求解,利用求解后的有限元模型对车体上表面进行拓扑优化;

(3)参照拓扑优化结果对车体模型梁结构进行调整;

(4)将改进的车体模型再次导入到动力学仿真软件中进行结构动力学仿真分析,获得改进后的车体应力和变形值,并与原仿真结果比较,车体结构拓扑优化流程如图1所示。

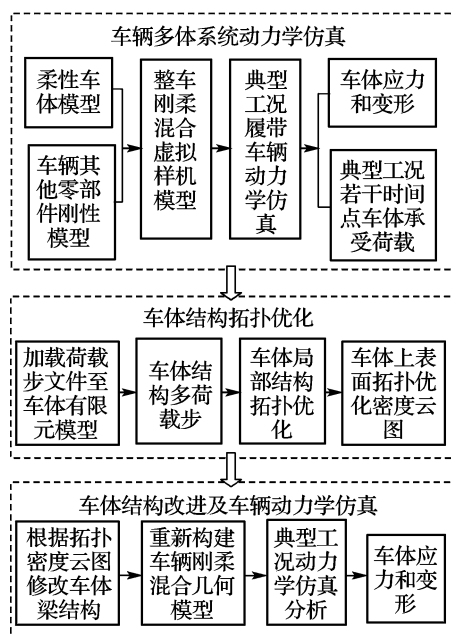


图1 车体结构拓扑优化流程图

Fig.1 Flowchart of vehicle body structural topology optimization

2 典型工况动力学仿真

利用三维几何造型软件、有限元分析软件和多体动力学软件,建立某履带车辆的虚拟样机和典型路面模型,构建履带车辆仿真环境系统进行动力学仿真分析。

2.1 整车虚拟样机模型

本文主要研究车体的结构性能,车体的柔性对整车的操作性及动力性有重要影响,所以建立车辆刚柔混合虚拟样机模型就显得较为必要^[8]。柔性体可以较真实地反映车体弹性对整车动力学特性的影响,采用柔性体模型在仿真分析后可以

获得车体的应力、变形等性能参数,这些数值不但可以为车体设计提供判定准则,而且可以提供最大变形量或最大应力值所在时间点的荷载作为拓扑优化的依据。而其他零部件采用刚体,既对车体所承受的荷载基本没有影响,又减小了计算量。履带车辆刚柔混合虚拟样机模型建立过程如下:

(1)采用三维CAD软件建立车辆各零部件模型。

(2)抽取车体中面导入有限元分析软件中,根据车辆实际结构,添加支撑梁单元,对车体划分网格,建立车体有限元模型。建立好的车体有限元模型共有26 643个节点,26 085个单元。

建立好车体有限元模型后,为了分析车体的振动性能,同时也是多体动力学仿真的需要,对车体结构进行模态分析。模态是机械结构的固有振动特性,每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和振型。根据结构的主要模态特性,可以估计结构在外部或内部各种振源作用下的振动响应情况,降低共振引起的系统破坏。模态分析结果表明,该车体具有较理想的振动性能,其一阶局部振动频率高于25 Hz,由于路面主要激励在20 Hz以下的频率范围内,可见该车体可以有效地避免道路激励引起的共振。

(3)将车体有限元模型导入多体动力学软件中,添加悬挂系统、行走系统、配重和其他零部件,建立起履带车辆的刚柔混合虚拟样机模型。

2.2 典型工况动力学仿真及荷载输出

根据该车型实车的动力性能要求,分别进行了履带车辆越障、越沟、爬坡及在随机不平路面行驶等多个工况的动力学仿真。经过仿真分析,可获得一系列重要数据,包括系统各个部件的速度、加速度,连接单元上的作用力、力矩,柔性车体的应力和变形等。

本文以车体应力和变形较大的越障工况为例,选择输出该工况中比较典型的4个时间点的荷载步,每个荷载步都包括了此时车体在整体坐标系下的加速度、角速度、角加速度以及该时刻车体与其他零部件之间的相互作用荷载。将荷载步以荷载文件的形式输出,对荷载文件中车体在每个时间步的承载和约束等边界条件进行处理,并加载到车体有限元模型,为拓扑优化提供计算条件。表1为选择的4个荷载步。

表1 选择进行拓扑优化的4个荷载步

Tab.1 Four load steps chosen for topology optimization

荷载步对应 仿真时间点	动力学仿真中车辆对应的工况
5.1 s	车体底面与第2扭杆罩接触位置应力最大时刻
5.8 s	车辆与台阶墙发生撞击后扭杆安装孔附近应力最大时刻
6.4 s	车体上表面炮塔后部附近变形最大时刻
8.7 s	右侧前舱门附近应力最大时刻

由于荷载文件中包含了各个时间点车体在整体坐标系下的加速度、角加速度,将加速度和角加速度转化为惯性力的形式与车体所承受的荷载达到平衡,即将动态的车体转化为某个时刻的“静态平衡”形式.理论上讲,动力学仿真中输出的荷载和车体惯性力能够使车体达到平衡,但是由于存在计算误差,在静力分析中难免会出现车体整体刚性位移现象.本文采用对车体添加弱弹簧约束作为车体的边界约束条件,即在车体的角落处与大地之间添加几个弹簧单元来防止车体的整体刚性位移.需要注意的是,弱弹簧的支反力必须不大,这样才能说明添加弱弹簧约束之前车体是基本平衡的.分析完后可以在后处理中使用 prrsol 命令查看约束部位的支反力大小,经过查看结果发现弹簧支反力远小于其他荷载,因此它可以阻止车体刚性位移而对车体分析结果只会产生很小的影响.

3 车体结构拓扑优化

3.1 拓扑优化理论

连续体拓扑优化本质上是一种 0-1 离散变量的整数优化问题,目前已发展出几种具有连续拓扑设计变量的优化模型,可将离散变量的优化问题转变为一个连续变量的优化问题^[9].拓扑优化算法的目的为在边界条件的约束下寻求结构对材料的最佳利用,得到最佳材料分配方案.这种方案在拓扑优化中表现为“最大刚度”设计,即通过调整结构材料的分配和布局来达到提高结构刚度的目的.算法引入材料伪密度的概念,将设计材料的宏观属性(如许用应力、弹性模量)与材料伪密度联系起来.以材料的伪密度为拓扑设计变量,以在给定荷载并满足最大刚度准则的情况下保留的材料体积为约束条件,以结构的柔度最小为优化的目标函数,将结构的拓扑优化问题转化为材料的最优分布问题.数学模型可以表示为

$$\begin{aligned} & \text{find} \quad \rho_i (i = 1, 2, \dots, n) \\ & \text{min} \quad C \\ & \text{s. t.} \quad \int_{\Omega} \rho_i d\Omega \leq \alpha V \\ & \quad \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \end{aligned}$$

式中: ρ_i 为第*i*个单元的伪密度; n 为优化区域的单元个数; C 为结构的柔度; α 为用户给定的保留材料百分比; V 为优化区域材料体积; Ω 为优化设计域.

3.2 拓扑优化计算及结果分析

前述动力学仿真分析结果显示,车顶炮塔后部在各工况下的应力较大,另外乘员舱舱门后部周边区域和炮塔后部表面有较大变形,而且大部分情况下,该区域是整车变形最大的区域.另外模态分析结果表明上表面多处区域在低频范围内的振幅较大,这些都与车体上表面结构布局有关.故本研究选择车身上表面壳单元为拓扑优化区域,单元类型为 SHELL93.

采用多荷载步同时考虑的方式,将动力学仿真输出的荷载步文件输入到车体有限元模型,对车体结构进行荷载文件中给定荷载和边界条件下的静力分析.静力分析结果显示,车体应力和变形与多体动力学仿真的结果相比分布基本相同,大小相差也比较合理,验证了车体边界条件约束和荷载施加的正确性,为车体结构拓扑优化提供了基础.

随后以结构的柔度最小为优化的目标函数,为了获得比较清晰且与车体上表面梁结构近似的拓扑分布,选择一定的保留材料比例,对选定区域进行拓扑优化.程序经过多次迭代后收敛,输出结构的拓扑密度云图如图2所示.图中下部标尺显示的是单元伪密度值.

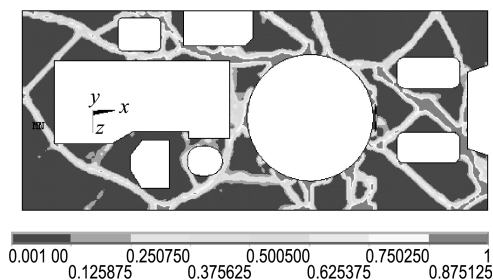


图2 拓扑优化密度云图

Fig.2 Topology optimization density contour

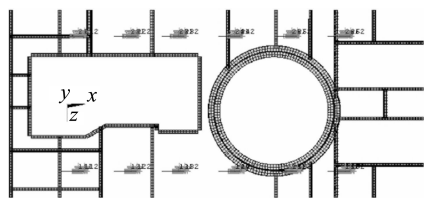
由密度云图可以看出,由于选择了适当的离散参数,得到了比较清晰的拓扑分布.图中伪密度值越趋向于1表示该部分材料越需要保留,为0

则表示拟删除该处单元. 理论上讲, 结构设计时在密度云图中伪密度值趋于 1 的部分建立加强梁, 能以最少的材料达到最大的结构刚度, 而实际上由于各方面考虑, 不能建立如此不规则的结构. 本研究将以拓扑优化密度云图作为参考, 调整原车体上表面梁的布局以实现车体结构的改进, 提高车体结构的刚度.

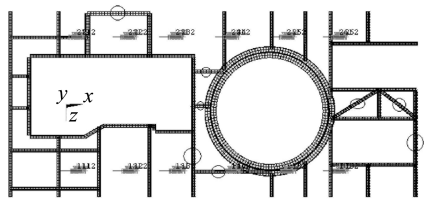
4 基于拓扑优化的车体结构改进

4.1 车体上表面梁结构的布局优化

车体的梁结构是采用梁单元 BEAM189 模拟的, 图 3(a) 是原车体上表面的梁布局, 参考拓扑优化密度云图修改车顶梁结构如图 3(b) 所示, 图中小圆圈指示的是新添加的梁单元.



(a) 原始车顶梁结构布局



(b) 改进后车顶梁结构布局

图 3 基于拓扑优化修改车顶梁布局

Fig. 3 Modification of the vehicle body roof beam distribution based on topology optimization

4.2 改进的车体模态分析和车辆虚拟样机仿真分析

采用原方法对改进的车体结构进行模态分析, 结果表明, 经过优化改进的车体最低阶局部振动模态频率比优化前提高了约 0.6 Hz, 优化后车体模态振型与改进前基本相同. 说明了对车体上表面梁结构布局进行如上所述的修改之后, 在不破坏原有振型的基础上, 车体的振动性能有稍许改善.

将改进的柔性车体模型导入动力学软件, 重新构建新的刚柔混合虚拟样机模型进行越障工况的仿真分析, 仿真设置和车辆在路面的初始位置与改进前完全相同. 仿真结束后得到车体应力和

变形等结果, 将改进模型与原模型的仿真结果进行对比以对改进方案进行验证和评价.

仿真结果数据显示, 改进后车体的最大应力和变形节点所在位置与改进前相同, 而值分别比改进前下降了 18.8% 和 41.4%. 图 4 为改进前后最大应力所在节点的应力曲线, 最大变形节点变形曲线对比如图 5 所示.

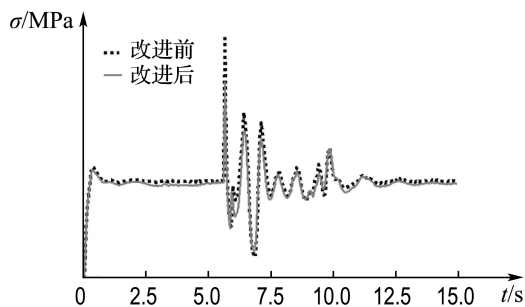


图 4 改进前后最大应力节点应力曲线

Fig. 4 Original and modified stress curves of the maximal stress node

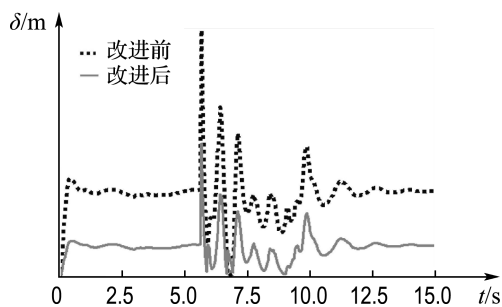


图 5 改进前后最大变形节点变形曲线

Fig. 5 Original and modified deformation curves of the maximal deformation node

从图 4、5 中曲线对比可以看出, 车体的最大应力和变形节点在整个越障工况的全时域内, 相应的应力和变形曲线趋势相似, 而数值都有不同程度的降低. 其中最大应力峰值下降较多, 其他时间点变化不太明显, 而变形值在全时域内减小的幅度都较大. 观察改进前后多个典型时刻下车体的应力和变形云图, 全面对比车体改进前后各个部分的应力和变形情况发现, 改进后的车体大部分区域的应力和变形的分布趋势与改进前基本吻合, 而数值都有明显的减小, 特别是结构局部刚度有了较大幅度的提高, 表明改进方案提高了车体结构的力学性能.

5 结 论

本文针对某型履带装甲车辆的结构特点, 在

对其进行动力学仿真分析的基础上,利用有限元分析和连续体拓扑优化技术对车体结构进行分析和拓扑优化,参考拓扑优化结果实现了对车体上表面的梁布局改进.改进后的仿真结果显示,车体的局部强度和局部刚度都有了明显提高.表明以虚拟样机动力学仿真为基础的拓扑优化方法,对装甲车辆车体的设计和改进具有参考和指导价值,该优化设计方法也可用于其他相似类型产品的结构设计.

参考文献:

- [1] NIU Fei, XU Sheng-li, CHENG Geng-dong. A general formulation of structural topology optimization for maximizing structural stiffness [J]. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2011, **43**(4):561-572
- [2] 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,**28**(8):903-908
- [3] BENDSOE M P, SIGMUND O. **Topology Optimization: Theory, Methods and Applications** [M]. Berlin:Springer, 2003
- [4] PATEL N M, KANG Byung-soo, RENAUD J E, *et al.* Crashworthiness design using topology optimization [J]. **Journal of Mechanical Design**, 2009, **131**(6):0610131-06101312
- [5] 扶原放,金达锋,乔蔚炜.微型电动车车架结构优化设计方法[J].机械工程学报,2009,**45**(9):210-213
- [6] MENG X J, WANG S H, QIU J, *et al.* Cogging torque reduction of BLDC motor using level set based topology optimization incorporating with triangular finite element [J]. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, 2010, **33**(4):1069-1076
- [7] 闫清东,张连第,赵毓芹.坦克构造与设计[M].北京:北京理工大学出版社,2007:201-204
- [8] GONÇALVES J P C, AMBRÓSIO J A C. Optimization of vehicle suspension Systems for improved comfort of road vehicles using flexible multi-body dynamics [J]. **Nonlinear Dynamics**, 2003, **34**(1-2):113-131
- [9] 罗震,蒙永立,郭文德,等.分布式柔性机构拓扑优化设计的理论和算法[J].机械工程学报,2006,**42**(10):27-36

Topology optimization for body structure based on vehicle virtual prototype

HUA Shun-gang^{*1}, ZHAO Hai-bo², ZHU Zhi-hao¹, ZHANG Li-na¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Polytechnic School, Shenyang Ligong University, Fushun 113122, China)

Abstract: Based on geometry models of vehicle components, a rigid-flexible coupling virtual prototype of a certain tracked armored vehicle was constructed by vehicle body finite element model meshing and modal analysis. After the multi-body dynamics simulation of the prototype under several typical driving conditions, the loads acting on the vehicle body at several typical moments were exported and imposed on the body finite element model. The structural mechanics analysis and multi-load steps topology optimization of the body structure were carried out. According to the optimization results, local structure of the body was modified. A new virtual prototype was constructed by the improved body and the simulation was executed again, from which the stress and deformation results of the body were got. Comparison with the original results shows that the structure topology optimization technology which combines dynamics simulation with finite element analysis can improve the mechanical properties of the key components, enhance the stiffness and strength, which provides an effective means to improve the structural performance of armored vehicle.

Key words: vehicle body structure; structure dynamics simulation; finite element analysis; topology optimization