

doi: 10.7690/bgzd.2016.08.006

多工况下某火炮摇架拓扑优化设计

范林盛¹, 刘树华¹, 曹广群¹, 张孝明²

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 中国兵器工业第二〇八研究所, 北京 102202)

摘要: 为提高某火炮摇架的结构性能, 满足结构的轻量化设计要求, 减少研发周期和降低研发成本, 对该摇架的结构进行拓扑优化设计。通过选取某火炮摇架承载最恶劣的 2 个工况, 根据摇架的受力情况, 基于 Hypermesh-OptiStruct 软件平台建立其有限元模型, 采用变密度方法的拓扑优化技术, 对摇架的拓扑优化获得去除低密度材料区域后的几何模型, 并对 2 个工况下得到的几何模型进行布尔和操作以获得最终的优化结果。分析结果表明: 经过拓扑优化后, 模型质量减轻, 刚度与优化前相比有所提升, 能够满足火炮总体的动/静态响应特性要求。

关键词: 火炮; 摇架; 多工况; 拓扑优化; 变密度

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Research on Topology Optimization of Howitzer Cradle Under Multiple Loads

Fan Linsheng¹, Liu Shuhua¹, Cao Guangqun¹, Zhang Xiaoming²(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

Abstract: In order to improve structure property of the artillery cradle, satisfy the requirement of the structure lightweight design, and reduce the development cycle and development costs, a topology optimization design for the cradle structure is conducted in this article. Through choosing two of the most terrible sub cases which the artillery cradle bears, according to the force of the cradle, the finite element model based on Hypermesh-OptiStruct software can be obtained. By using topology optimization based on artificial material method, the geometric model of cradle can be obtained of which low density area is removed. Then in order to obtain the final optimization results, a Boolean sum operation is applied to the geometric model from two sub cases. Analysis results show that after the topology optimization, the stiffness of the cradle is higher than the one without optimization and the weight has some reduction. The result can satisfy the requirement of the artillery overall dynamic and static response.

Keywords: howitzer; cradle; multiple conditions; topology optimization; artificial material method

0 引言

摇架作为火炮上约束炮身运动和赋予射向的重要连接部件, 承受并传递后坐部分在射击或行军时产生的动载荷。拓扑优化设计能够提高摇架的结构性能, 满足结构的轻量化设计要求, 减少研发周期和降低研发成本。

某火炮采用筒形摇架结构, 筒后坐式的反后坐装置布置在炮身的上下方——复进机在下, 制退机在上(两者中心线均在射面内)。摇架在衬瓦和支座上受到由炮身和反后坐装置传来的载荷, 依靠平衡机、耳轴和高低齿轮支持。笔者以摇架结构为优化对象, 依据该炮射击时摇架结构受力情况, 在满足刚度要求的情况下, 以减轻其质量为目标, 运用拓扑优化方法寻求多工况下摇架的最佳材料分布, 对摇架的结构进行了轻量化设计。

1 拓扑优化技术在设计上的应用

优化前的摇架模型见图 1。

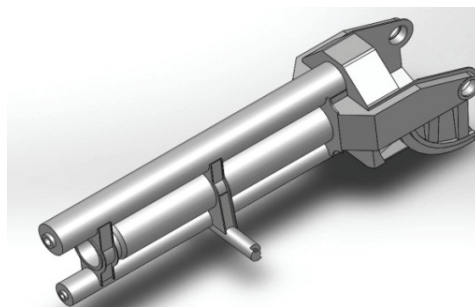


图 1 摇架三维实体模型

1.1 拓扑优化原理

拓扑优化技术是指在给定的设计空间内找到最佳的材料分布或者传力路径, 从而在满足各种性能的条件下得到质量最轻的设计^[1]。Altair OptiStruct 的拓扑优化技术, 以设计空间中每个单元的“单元密度”作为设计变量。该“单元密度”与材料弹性模量 E 之间具有某种函数关系, 取值于 0~1, 优化求解后数值越接近 1, 表明该单元位置处的材料越需要保留; 反之, 则表明该单元位置处材料不重要,

收稿日期: 2016-04-15; 修回日期: 2016-05-19

作者简介: 范林盛(1992—), 男, 山西人, 在读硕士, 从事武器系统设计研究。

可以去除^[2]。

1.2 刚度最大化的拓扑优化数学模型

OptiStruct 软件的拓扑优化技术包含了设计变量、约束条件以及目标函数 3 个要素：

$$\rho(x) = (\rho^e)^p; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \min C = U^T F = \sum_{e=1}^n (\rho^e)^p u_e^T k_0 u_e \\ KU = F \\ \text{s.t. } \left\{ \begin{aligned} \sum_{e \in \Omega} \rho^e V^e &\leq f \\ V_0 & \\ 0 < \rho_{\min} < \rho < 1 & \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： ρ^e 为设计变量； C 为结构柔度（目标函数）； V_0 为原始状态下结构有效体积； f 为体积分数（约束条件）。

2 摇架结构优化模型

2.1 目标函数

以摇架多工况下刚度最大为目标函数。

2.2 约束条件

在摇架拓扑优化设计中，将体积分数不小于 0.6 定义为约束条件。

体积分数的计算公式为：

体积分数 = (当前迭代步总体积 - 初始非设计区域体积) / 初始设计区域体积

对摇架优化时，高低齿弧与高低齿轮接触处，摇架与摇架相连的耳轴处以及平衡机与摇架的连接部位为受约束部位，结构不能变化；各个托箍以及托箍所靠近的筒体部位由于起连接作用以及承受载荷等原因，结构也不能变化。因此，应从 3 个筒体上偏离托箍一段距离的 6 个圆柱体进行拓扑优化^[3]，设置如图 2 所示的拓扑优化模型。

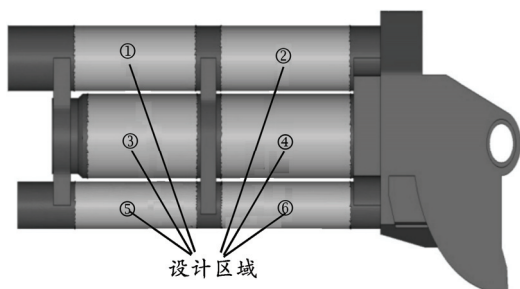


图 2 摇架优化的设计区域划分

2.3 载荷施加

火炮在后坐过程中摇架受力较大，本设计中摇架所受的相关载荷主要考虑后坐运动过程。摇架受力包括炮身在铜衬瓦处对摇架的作用力，复进杆和制退杆对于摇架沿后坐方向的拉力，摇架自身的重力^[4]以及平衡机，耳轴和高低齿弧对摇架的约束反力。其中制退机力和复进机力数据曲线以及各工况对应时间见图 3。

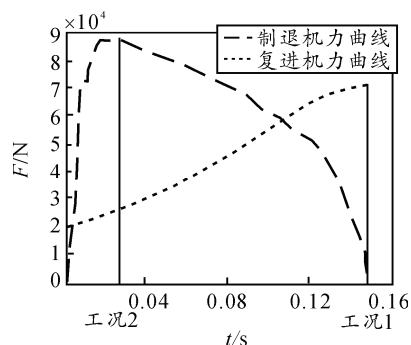


图 3 制退机力与复进机力随时间变化曲线

根据相关实验数据经过计算得出：炮身对摇架在铜衬瓦处的最大作用力发生在 0° 射角后坐终了的时候，此时对应的复进机力是最大的，将此工况设为工况 1，在此工况下拓扑优化得到的结果可以满足③、④、⑤、⑥区域的刚强度要求；但是①、②区域是在制退机力达到最大值时，承受到最大制退杆对摇架的作用力，因此需要加入制退机力最大的瞬时作为第 2 个工况，以满足①、②区域的刚强度要求^[5]。为了方便施加载荷，笔者通过添加刚性单元 rbe2 来确定载荷的作用部位。

2.4 设计变量

摇架拓扑优化的设计变量是设计区域材料单元的相对密度。为了保证优化结果的可制造性，笔者定义了设计变量的最小成员尺寸和模式组约束，最小成员尺寸约为单元尺寸的 2 倍，设计空间施加关于射面对称的约束以生成对称设计^[6]。

3 优化计算及结果

基于 OptiStruct 结构优化软件进行拓扑优化求解，工况 1 经过 5 次迭代，工况 2 经过 11 次迭代后，计算收敛，结果如图 4、图 5 所示，单元密度等值线图中单元相对密度低于 0.2 的材料已被去除^[7]。

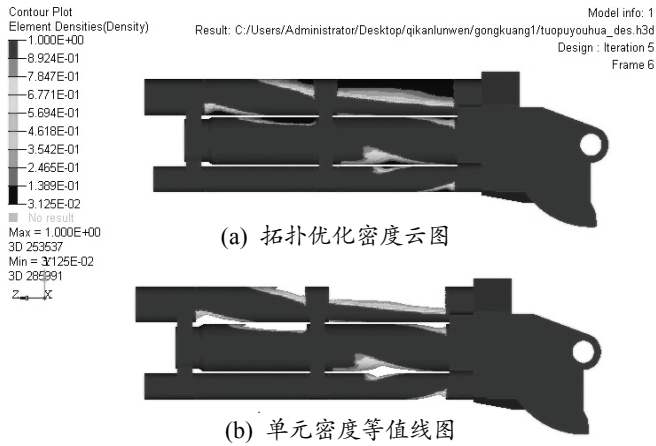


图 4 工况 1 拓扑优化密度云图与单元密度等值线图

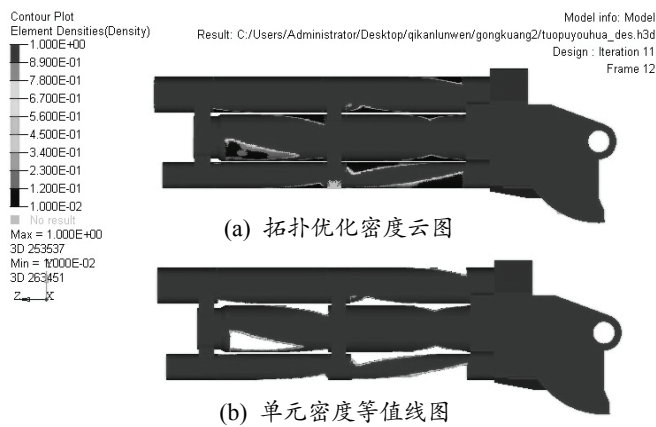


图 5 工况 2 拓扑优化密度云图与单元密度等值线图

根据 2 个工况优化所得到的结果，笔者利用 OptiStruct 的 OSSmooth 模块将拓扑优化设计结果，按照一定的单元密度阈值，解释成 CAD 模型，然后对 2 个工况所得的单元密度等值线图上的剩余材料进行布尔和操作，在此基础上进行结构设计，重新建立了摇架的模型^[8]如图 6 所示。从图中可以看出：对摇架进行拓扑优化后，由于材料相对密度低于 0.2 的部分已被去除，摇架的质量减轻^[9-10]。摇架整体质量由 371 kg 减到 332.5kg，减少了 38.5 kg，降低了 10.4%。

笔者将优化后的摇架建模并导入 Hypermesh 软件中进行刚强度分析，将分析结果与优化前的结果进行对比。优化后的摇架最大应力由 129.6 MPa 降为 117.4 MPa；最大位移由 2.350 mm 降为 1.945 mm。由于优化得到的模型是在摇架 2 个承载最恶劣的工况下经过布尔求和后得到的，可见优化后的摇架的

刚强度符合其设计要求，该摇架达到了优化的目的。

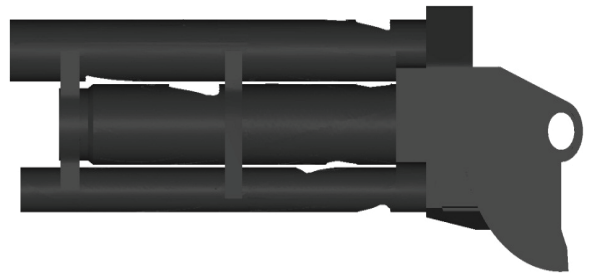


图 6 优化后重新建立的摇架模型

4 结论

由于摇架结构受力十分复杂，且受力方向也在随时间变化而变化，在工况 1 被减去了许多材料，但为了满足工况 2 的刚强度要求又被加上，使得减重效果不是很明显。在当前装备研制火炮轻量化要求十分苛刻的形势下，每一个零部件减小一部分质量，整个火炮上叠加起来减重效果就很明显了，而且经过结构优化后的摇架不仅质量减轻，承载能力也略有提升，刚强度特性得到一定改善，能够满足火炮总体的动/静态响应特性要求。

参考文献：

- [1] 刘志强, 王明强. 应用拓扑优化理论进行结构概念设计[J]. 机械与电子, 2005(10): 27-29.
- [2] 张鑫磊, 顾克秋, 张志军. 某轻型牵引炮摇架结构动态优化设计[J]. 兵器装备工程学报, 2016(1): 48-51.
- [3] 周克民, 李俊峰, 李霞. 结构拓扑优化研究方法综述[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 69-76.
- [4] 傅英定, 成孝予, 唐应辉. 最优化理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 4-15.
- [5] 华恭, 伊玲益. 炮架设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 1-20.
- [6] 左孔天, 陈立平, 钟毅芳, 等. 基于人工材料密度的新型拓扑优化理论和算法研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(12): 31-37.
- [7] 梁传建, 杨国来, 王晓锋. 基于接触碰撞理论的火炮摇架受力分析[J]. 现代制造工程, 2014(5): 64-68.
- [8] 荣辉, 吴国庆, 王格芳. 军械装备器材三维数据自动采集系统[J]. 兵工自动化, 2006, 25(11): 36-37.
- [9] 张海航, 于存贵, 唐明晶. 某火炮上架结构拓扑优化设计[J]. 弹道学报, 2009(2): 83-85.
- [10] 王格芳, 陈国顺, 吴国庆, 等. 快速成型技术及在装备零件仿制中的应用[J]. 兵工自动化, 2013(7): 27-30.