

doi: 10.7690/bgzdh.2016.05.020

某武装侦察机器人武器站大臂的拓扑优化设计

杨嘉伟, 潘玉田, 蒋华剑, 孙海涛
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 大臂是某武装侦察机器人武器站的主要承力部件与质量来源, 为兼顾该结构的可靠性和轻量化要求, 通过 HyperMesh 与 OptiStruct 对其进行了有限元优化设计。运用有限元方法分析了原结构在 3 种典型射角下, 载荷对结构静强度和位移的影响。在此基础上选用密度更小的 6061 铝合金代替原结构材质 45 钢建立新的拓扑优化模型, 以相对密度为设计变量, 以体积最小化为目标函数进行了拓扑优化, 得到优化结构。通过与试验样机对比, 优化后的方案不仅在满足强度要求的前提下获得了更为合理的结构形式, 而且大幅度降低了平台质量, 使其便于在战争中轻装携带与快速投送。该设计可为同类型小型作战平台的优化设计提供一定的理论与工程借鉴。

关键词: 武装侦察机器人; 武器站; 大臂; 有限元; 优化设计

中图分类号: TP241 **文献标志码:** A

Topology Optimization Design of The Weapon Station Arms of Certain Type Armed Reconnaissance Robot

Yang Jiawei, Pan Yutian, Jiang Huajian, Sun Haitao
(College of Mechanical & Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Arm is the main bearing part of a certain armed reconnaissance robot weapon station and makes up most of its weight. In order to achieve the reliability and weight reduction, the finite element optimal design is carried out by OptiStruct and HyperMesh. First of all, the original structure is analyzed under three typical shooting angles by the means of finite element to discover the effects of load on static structural strength and displacement. On the basis of that, a new topology optimization model, which is based on a smaller-density material-the 6061 aluminum alloy, is established to replace 45 steel. Regarding the relative density as the design variable, with the objective function of minimizing the volume, the optimization model is attained. By comparison with experimental prototype, the optimized scheme has completed a more reasonable structure under the prerequisite of satisfying the strength requirement, greatly reducing the weight of the platform and making it easier and lighter to carry and deliver in the war. All in all, this research can provide a theoretical and engineering reference to the optimal design of the same type of small operational platform.

Keywords: armed reconnaissance robot; weapon station; upper arm; finite element; optimization design

0 引言

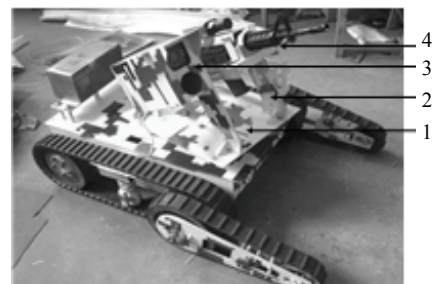
武装侦察机器人是地面无人化作战平台的重要成员之一, 兼具侦察和武装打击两大功能。为了提高侦察打击和战地维修效率, 某新型武装侦察机器人将其光学侦察系统与武装火力单元均加载在其即插即用式武器站上。武器站主要包含: 云台、左右大臂、火力组件和光学侦察系统等。

在前期设计中, 仅从结构的可靠性角度对武器站进行了设计, 因而根据工程经验将其主要承力部件左、右大臂设计为 45 钢材质的三角形框架。通过对初样样机的运载与投递试验发现, 机器人总体质量较大, 不便于轻装运载和投递。笔者针对遥控武器站部分的主要质量来源部件——大臂进行有限元优化设计, 以期获得更合理的结构形式, 并达到轻量化的目的。

1 优化设计建模

1.1 优化设计流程

优化前武装侦察机器人武器站组成如图 1。



1. 云台; 2. 大臂; 3. 光学侦察系统; 4. 火力单元。

图 1 某新型武装侦察机器人

优化设计的三要素分别是: 设计变量、目标函数和约束条件。设计变量是发生改变从而提高性能的一组参数; 目标函数要求最优的设计性能, 是关

收稿日期: 2016-01-29; 修回日期: 2016-03-11

作者简介: 杨嘉伟(1990—), 男, 山西人, 在读硕士, 从事自行火炮轻量化设计研究。

于设计变量的函数；约束条件是对设计的限制，是对设计变量和其他性能的要求^[1]。

优化数学模型可表述为：

Minimize(最小化)：

$$f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Subject to(约束)：

$$g(X) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m;$$

$$h_k(X) \leq 0, \quad k = 1, \dots, m_h;$$

$$X_i^L \leq X_i \leq X_i^U, \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

其中： $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是设计变量； $f(X)$ 是设计目标； $g(X)$ 和 $h(X)$ 是需要进行约束的设计响应；

X_i^L 和 X_i^U 是设计变量的下限和上限值。OptiStruct 优化设计具体流程如图 2 所示。

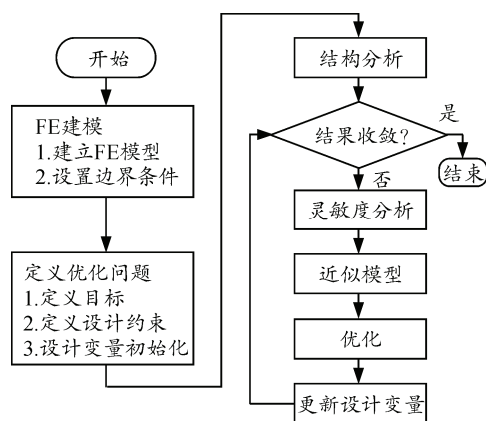


图 2 OptiStruct 优化流程

1.2 寻优策略

文中的寻优策略就是根据约束、载荷以及优化目标，在所选择的优化区域内实现材料的最优分配，从而达到轻量化的设计目的。且带约束的优化问题在最优点处必须满足 Kuhn-Tucker 条件，即对于优化问题，有：

目标函数： $f(X) \rightarrow \max$ 或 $f(X) \rightarrow \min$ 。 (3)

约束条件： $g_j \leq 0$ 。 (4)

引入拉格朗日乘子：

$$L(X, \mu) = f(X) + \mu^T g = f(X) + \sum \mu_j g_j \quad (5)$$

拉格朗日方程最小化的条件是：

$$\nabla_x L(X) = \nabla_x f(X) + \sum \mu_j \nabla_x g_j = 0; \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \nabla_{\mu} L(\mu) = g = 0 \\ \mu_j^T g_j = 0 \\ \mu_j \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

1.3 灵敏度分析

设计灵敏度是设计响应对优化变量的偏导数。对于有限元方程

$$[K]\{U\} = \{P\} \quad (8)$$

其中： $[K]$ 为刚度矩阵； $\{U\}$ 为单元节点位移矢量； $\{P\}$ 为单元节点载荷量。

对于拓扑优化这种设计约束少而设计变量多的优化问题，常采用伴随变量法设计灵敏度，分别用式 (8) 对设计变量 X 和位移向量 U 求偏导，可得到以下二式：

$$\frac{\partial [K]}{\partial X} \{U\} + [K] \frac{\partial \{U\}}{\partial X} = \frac{\partial \{P\}}{\partial X}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \{U\}}{\partial X} = [K]^{-1} \left(\frac{\partial \{P\}}{\partial X} - \frac{\partial [K]}{\partial X} \{U\} \right) \quad (10)$$

一般情况下，设计响应与位移向量有如下关系：

$$g = \{Q\}^T \{U\} \quad (11)$$

在计算灵敏度时引入伴随变量 E ，且有

$$[K]\{E\} = \{Q\} \quad (12)$$

于是得到结构响应的灵敏度为：

$$\frac{\partial g}{\partial X} = \frac{\partial Q^T}{\partial X} \{U\} + \{E\}^T \left(\frac{\partial \{P\}}{\partial X} - \frac{\partial [K]}{\partial X} \{U\} \right) \quad (13)$$

1.4 结构优化方法与变密度算法原理

连续体结构拓扑优化是在所选定的空间区域内实现材料最优分布的一种优化方法，这个过程多采用基结构法^[2]，文中所采用的变密度算法即是基结构法中的一种。它是引入一种假想的密度可变的材料，将连续体离散成有限元模型后，每个单元内的密度指定为相同，并以每个单元的密度为设计变量。当单元的相对密度为 1 时，表示该单元为有材料，应该保留或增加该单元(实体)。当单元的相对密度为 0 时，表示该单元无材料，应该被删除。在拓扑优化时，应尽量使材料的相对密度为 0 或 1 分布在设计区域^[3]。

2 有限元分析

2.1 优化前结构分析

如图 3 所示，优化前的大臂结构是根据工程经验所设计的，缺乏理论与仿真计算依据。笔者首先对其进行了有限元强度校核，以了解其刚强度的富裕度。

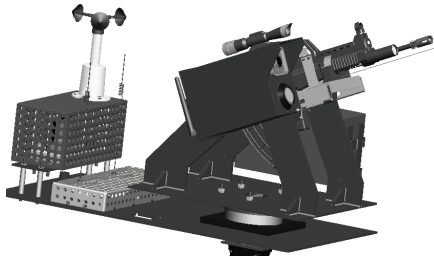


图 3 优化前的武器站大臂设计图

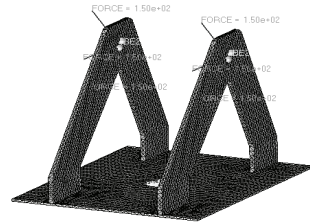


图 5 施加载荷与边界条件的大臂有限元模型

2.2 有限元模型的建立与网格划分

利用 Pro/E 三维建模软件进行实体建模，并在建模过程中对一些影响之后划分网格但不影响设计精度的因素进行清理和简化^[4]，原设计采用的为 45 钢，其材料特性如表 1 所示。

表 1 45 钢的材料特性

牌号	密度/(kg/m ³)	屈服强度/MPa	泊松比
45	7.8e+03	355	0.27

在 HyperMesh 中建立了大臂的有限元模型作为基结构，实体单元采用四面体网格^[5]，经划分后得到 6 056 个节点与 16 733 个单元，有限元模型如图 4 所示。



图 4 大臂的有限元模型

2.3 在模型上施加载荷与边界条件

95 式自动步枪是本武装机器人的火力部，当它打出第一发弹后，枪身有向前的速度，后一发弹开始时，膛内压力需要消耗一部分能量使枪身向前的速度为零，再推动枪身后座^[6]。第一发弹射出时大臂所承受的后坐力最大，故在静强度校核中，只需考虑单发射击的后坐力即可。载荷施加：95 式步枪的后坐力为 300 N，此力通过枪架耳轴作用于大臂上，等效作用点为两圆孔中心，各受 150 N 的力。位移约束的施加：大臂与方向机通过底板的上的圆孔刚性连接，需要在圆孔中心处赋予全约束，表示为 RBE2 连接。大臂上的圆孔与枪架耳轴同样属于刚性连接，故也用 RBE2 连接方式表示。限制底板圆孔中心 dof1 至 dof6 的自由度。OptiStruct 子工况（载荷步）的创建：位移载荷集分别和 3 个不同的力载荷集根据 3 种射击角度一起创建 3 种不同的子工况。完成载荷施加和边界条件设定的有限元模型如图 5 所示。

2.4 有限元分析结果

将模型导入至 Radioss 模块中进行静强度分析求解^[7]，得到 3 种射角下的有限元分析结果，如表 2 所示。此处给出 0°射角下的应力云图与等效位移云图，如图 6、图 7 所示。

表 2 初始设计大臂静力分析结果

工况	最大位移量/mm	最大等效应力/MPa	质量/kg
-30°	0.112	3.846	
0°	0.149	5.001	19.54
45°	0.135	5.914	

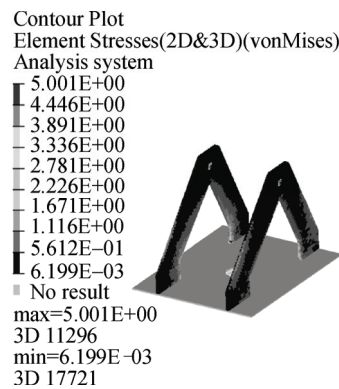


图 6 应力云图

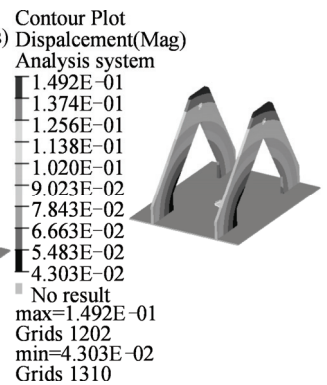


图 7 等效位移云图

45 钢的屈服强度为 355 MPa，安全系数取 2。大臂的许用应力为：

$$[\sigma] = \sigma_s / n_s = 355 / 2 = 177.5 > \sigma_{\max}; \quad (14)$$

$$\sigma_{\max} = 5.914 \text{ MPa}。 \quad (15)$$

通过计算比较得知：大臂的最大等效应力远远小于 45 钢的许用应力，故而应考虑更换密度小，且屈服强度一般的金属材料即可。本次优化设计中，笔者拟选用经济性更好的 6061 铝合金。该种铝合金的材料特性如表 3 所示。

表 3 6061 铝合金的材料特性

牌号	密度/(kg/m ³)	屈服强度/MPa	泊松比
6061	2.7e+03	55.1	0.33

3 武器站大臂的拓扑优化设计

3.1 优化方法

笔者采用变密度法的拓扑优化方法对武装机器人的大臂进行优化设计^[8]。图 8 在划分网格时已经

定义了设计区域(灰色区域)和非设计区域(黑色区域)。并在定义优化变量的同时,以零件加工工艺的实际要求为考量,进行对称与最小成员尺寸约束^[9]。具体操作为:将连续离散体为有限元模型后,将每个单元内的密度指定为相同,以每个单元的密度为设计变量,以结构的体积最小化为目标,考虑了 3 种不同工况下的位移约束,使得优化得到的结构质量更加轻^[10]。

3.2 拓扑优化结果

将计算模型导入到 OptiStruct 中进行优化求解,经过 24 次迭代后得到收敛结果,单位密度云图以及其等值线云图,如图 8、图 9 所示。

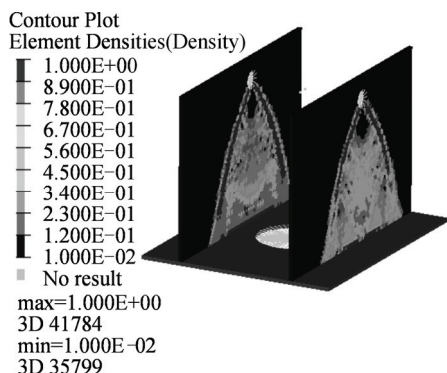


图 8 单位密度的云图

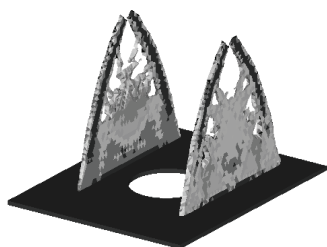


图 9 密度 0.4 以上的等值线云图

3.3 结构优化建模

拓扑优化所得模型为不规则结构体,难以加工生产,因而需要进行结构重建。重建时,要遵循拓扑优化主体结构模型,兼顾加工工艺、装配需求和美观审美等因素的要求。重新建模后的左右大臂如图 10 所示。

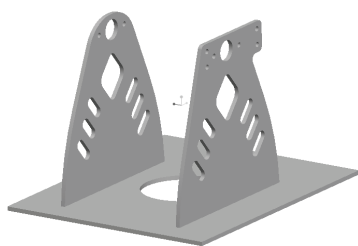


图 10 根据拓扑优化结果改进后的大臂结构

3.4 优化前后结构强度的比较

为了考证优化后的结构力学特性是否满足作业需求,再次对优化后模型进行有限元强度分析,经划分后得到 4 851 个节点与 13 111 个单元,设置完成各项条件后再次导入 Radioss 模块中进行计算,最终得到机器人武器站大臂优化前后,在 3 种射角下的等效应力分析结果,如表 4 所示。此处同样给出 0°射击工况下的应力云图与等效位移云图,如图 11、图 12。

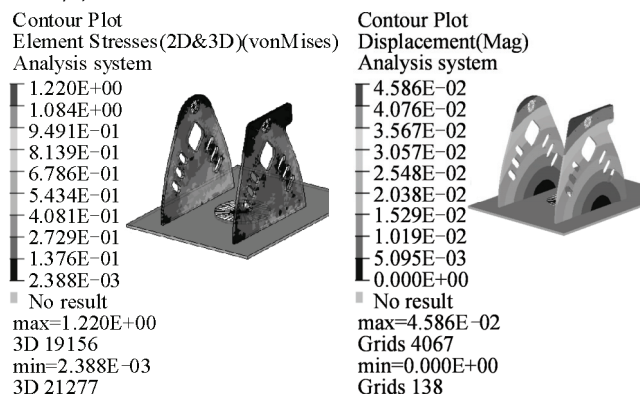


图 11 应力云图

图 12 等效位移云图

表 4 优化设计后大臂静力分析结果

工况	最大位移量/mm	最大等效应力/MPa	质量/kg
-30°	0.046	1.140	7.08
0°	0.045	1.220	
45°	0.027	0.861	

与表 2 数据对比可知:采用拓扑优化设计方法得到的大臂,不仅质量较前期方案大幅下降了 64%,而且 3 种射角下的最大应力和最大位移量也均有所降低。且由表 3 可知,6061 铝合金的许用应力为:

$$[\sigma] = \sigma_s / n_s = 55.1 / 2 = 27.55 > \sigma_{\max}; \quad (16)$$

$$\sigma_{\max} = 1.695 \text{ MPa}。 \quad (17)$$

通过计算得知:优化后的大臂结构最大应力依然远远小于 6061 铝合金的许用应力;因此,可以保证新的大臂结构不会被应力破坏。

4 结论

针对某武装侦察机器人初样试验中出现的武器站质量超标问题,笔者采用 Hypermesh 与 OptiStruct 对武器站主要结构件大臂进行了拓扑优化设计。得出以下研究结论:

1) 通过对原枪架大臂进行有限元分析得出分析结果:枪架大臂的最大应力为 5.914 MPa,远远低于 45 钢的许用应力;因此可以将其替换为经济性更好,质量更轻 6061 铝合金。