

doi: 10.7690/bgzdh.2016.12.002

某轮式自行火炮的平衡轴支架优化设计

田家林, 郭张霞, 张莹
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 为提高轮式自行火炮工作性能和安全系数, 针对轮式自行火炮的工况特性, 对平衡轴支架进行优化设计。建立轮式自行火炮平衡轴支架的有限元模型, 依据平衡轴支架的结构受力特性及技术设计要求, 利用 ANSYS Workbench 中的 Design Exploration 对其进行优化设计, 在满足强度的条件下对支架进行减重优化。优化后的支架质量为 45.018 kg, 最大等效应力为 601.35 MPa, 与原支架相比最大等效应力增加并且质量减小 20.87%, 减重效果显著, 降低了生产成本, 产生了明显的经济效益。

关键词: ANSYS Workbench; 轮式自行火炮; 平衡轴支架; 优化设计; 轻量化
中图分类号: TJ818 **文献标志码:** A

Optimal Design of Balanced Shaft Bracket of Certain Type Wheeled Self-propelled Gun

Tian Jialin, Guo Zhangxia, Zhang Ying
(College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: According to the working condition characteristics and security index of wheeled self-propelled gun, carry out optimization design for balanced shaft bracket. The finite element model of balanced shaft bracket of the wheeled self-propelled gun is established. According to the structure stress characteristics and technical design requirements, use Design Exploration of ANSYS Workbench to carry out optimization design. Carry out weight loss optimization of the balanced shaft bracket under the condition of satisfying stress. The after optimization, the weight of the bracket is 45.018 kg, and the maximum equivalent stress is 601.35 Mpa. Compared with the original bracket, the maximum equivalent stress increases and the quality decreases 20.87%, the weight loss effect is obvious, which reduces the production cost, and the obvious economic benefits.

Keywords: ANSYS Workbench; wheeled self-propelled gun; balanced shaft bracket; optimization design; light weight

0 引言

现代化战争对轮式自行火炮的战术技术性能提出了越来越高的要求。平衡轴支架是轮式自行火炮悬架部分的重要零部件之一, 在火炮发射和行进过程中承受巨大的冲击载荷, 其结构、刚度以及强度对火炮的战术性能有着重要的影响^[1-3]; 因此, 一个结构良好的平衡轴支架对提高轮式自行火炮工作性能、提高安全系数具有重要意义。在满足结构强度及刚度条件下节省材料和降低成本, 对平衡轴支架进行优化设计, 具有明显的经济效益和社会效益。

笔者以某轮式自行火炮平衡轴支架结构为优化对象, 依据车辆行驶实际工况时平衡轴支架的结构受力特性及其技术设计要求, 以提高平衡轴支架强度和减轻质量。笔者在 Proe/E 环境下对平衡轴支架参数化建模, 导入 ANSYS Workbench 中利用 ANSYS Workbench Environment 的优化设计模块, 对平衡轴支架进行灵敏度分析和目标驱动优化设计, 最终达到提高强度和减轻质量的目的^[4-5]。

1 平衡轴支架的参数化建模

1.1 参数化建模

ANSYS Workbench 本身带有 CAD 建模软件 Design Modeler (DM), 但 DM 三维建模非常复杂, 所以采用 Pore/E 进行平衡轴支架的三维建模, Proe/E 可以和 ANSYS Workbench 无缝连接, 将用 Proe/E 建立的三维模型导入到 ANSYS Workbench 中进行有限元分析, 其中的参数化数据也传递到 ANSYS Workbench 中。

由于平衡轴支架的结构比较复杂, 为减少计算工作量, 在不影响其精度的情况下, 笔者对平衡轴支架三维模型进行必要的模型简化: 不重要区域的小尺寸区域可被忽略; 去除模型上的螺纹、倒角等细节特征。在 Proe/E 中建立的简化模型如图 1。

1.2 模型参数化设置

在 Proe/E 中指定平衡轴支架高度 D_{S1} 、板簧安装孔直径 D_{S2} 、板簧安装孔位置高度 D_{S3} 为参数,

收稿日期: 2016-08-10; 修回日期: 2016-09-20

作者简介: 田家林(1990—), 山东人, 男, 硕士, 从事火炮、自动武器与弹药工程, 轮式自行火炮悬挂系统研究。

并设定参数关系：支架宽度 $=0.5 \times D_{S1}$ 、主肋板前宽度 $=D_{S1}/6$ 、主肋板前宽度=主肋板后宽度，通过Proe/E与ANSYS Workbench的无缝连接，将参数化的三维模型导入ANSYS Workbench中。

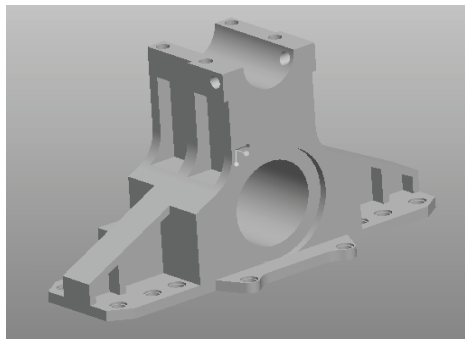


图1 平衡轴支架三维模型

2 平衡轴支架优化设计

2.1 优化设计数学模型

优化设计包括设计变量、约束条件及目标函数三要素。设计变量通常是由 x_1, x_2, \dots, x_n 的 n 个变量组成的 n 维列向量表示：

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T. \quad (1)$$

式中： \mathbf{X} 为设计变量向量； x_i 为第 i 个设计变量； n 为设计变量的个数。

按数学表达式的不同，约束条件可以分为等式约束和不等式约束。其形式如下：

$$h_k(\mathbf{X}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, l; \quad (2)$$

$$g_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

式中： k 为等式约束的数目； j 为不等式约束的数目。

目标函数就是要求的最优设计性能，是关于设计变量的函数。目标函数的表示形式：

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow \text{Opt}, \quad \mathbf{x} = x_1, x_2, \dots, x_n; \quad (4)$$

或
$$\text{Opt} f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (5)$$

优化设计的数学模型的一般模式为：

$$\text{求设计变量 } \mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \text{ 使} \\ f(\mathbf{X}) \rightarrow \text{Opt}. \quad (6)$$

且满足约束条件

$$\left. \begin{aligned} h_k(\mathbf{X}) &= 0, \quad k = 1, 2, \dots, l \\ g_j(\mathbf{X}) &\leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \\ \mathbf{X} &\leq 0 \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

2.2 平衡轴支架的ANSYS Workbench有限元分析

2.2.1 材料属性设置

将平衡轴支架的参数化模型导入ANSYS

Workbench后，首先定义其材料属性，包括弹性模量、泊松比、密度等，平衡轴支架采用的材料是ZG650-830，其屈服极限为650 MPa，并且在分析中定义为各向同性结构材料。材料的详细属性设置如表1所示。

表1 材料属性值

属性名称	属性值
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7 800
弹性模量 E/Pa	$2.1\text{E}+11$
泊松比 μ	0.3

2.2.2 支架的有限元模型

对支架采用自由网格划分的方法，尺寸控制选用Element Size，网格划分类型为协调分片算法(Patch Conforming)，采用四面体(Tetrahedrons)网格，对肋板等可能应力集中的地方进行必要的网格细化，以保证后期分析结果的准确性。有限元模型划分为76 216个单元，118 730个节点。平衡轴支架的有限元模型如图2所示。

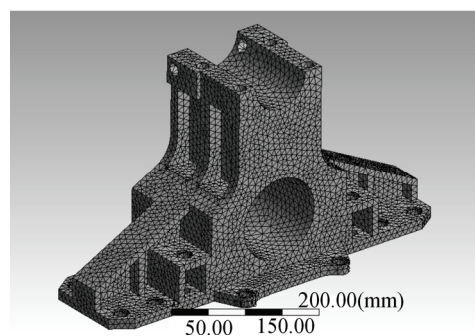


图2 支架有限元模型

2.2.3 加载与求解

2.2.3.1 边界条件

平衡轴支架与车架的安装面约束其垂向(Z向)自由度，约束安装螺栓孔的纵向(Y向)和切向(X向)的自由度^[6]。

2.2.3.2 加载条件

平衡轴支架的受力主要包括：板簧安装孔的垂向力和纵向力、板簧偏心产生的弯矩、下推力杆的推力/拉力以及板簧安装面的侧向力。平衡轴支架所受力的方向和类型跟车辆行驶的状态有关，包括静平衡工况、加速工况、转向工况等。为了简化步骤和说明问题，笔者只选择一种工况进行分析，按照实际载荷的方向，分别在板簧安装孔施加垂直方向载荷110 kN，水平方向的力矩110 kN·m，作用于推力杆安装处的水平方向载荷110 kN。求解后得到支架的最大等效应力为371.58 MPa。

3 优化方案

3.1 设置参数

指定 Pro/E 中的参数平衡轴支架高度 DS_1 、板簧安装孔直径 DS_2 、板簧安装孔位置高度 DS_3 分别对应 Workbench 中 P_3 、 P_2 、 P_1 ，并将其设置为输入参数，模型质量 P_4 、最大等效应力 P_5 设置为输出参数，在不影响平衡轴支架各种性能的前提下设定各参数的变化范围。各参数的初始值 and 变化范围如表 2 所示。

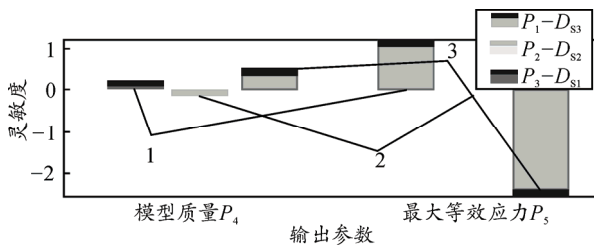
表 2 各参数的初始值 and 变化范围

参数	初始值	变化范围
P_1/mm	300	260~340
P_2/mm	120	105~135
P_3/mm	90	80~100
P_4/MPa	371.580	< 650
P_5/kg	56.893	—

3.2 优化尺寸敏感度分析

优化尺寸敏感度分析是通过一定的数学方法和手段，显示输出参数关于输入参数的敏感性，借此选出对支架静态性能影响较大的尺寸，进而对支架进行必要的优化设计^[7]。

在 ANSYS Workbench 中添加响应面系统 (Response Surface)，选择 3 个输入参数进行响应面计算，完成后查看其局部敏感度图。如图 3 所示。



1. P_1-DS_3 ; 2. P_2-DS_2 ; 3. P_3-DS_1 。

图 3 局部敏感度

图 3 中优化尺寸的敏感度为正值，表示当这个尺寸增大时，目标函数的值会相应增大；相反，当敏感度为负值，表示当这个尺寸增大时，目标函数的值会相应减小。可以看出，平衡轴支架高度对支架质量和最大等效应力的影响最大。

3.3 目标驱动优化

ANSYS 随机在各参数所设定的边界范围内选择足够数量的测量点，采用默认的中心复合法进行组合，自动生成 15 个设计点，每一个设计点即代表一种支架的优化方案。

当响应面计算完成后，可以查看其设计空间图，根据目标函数可以在设计空间图确定最优条件和最

优区域。图 4 为平衡轴支架的质量和最大等效应力。

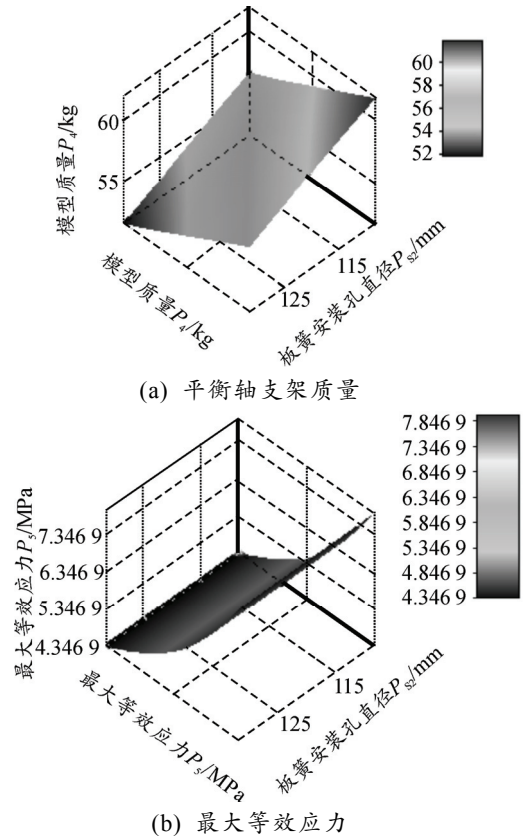


图 4 设计空间

ANSYS Workbench 的 DX(design exploration)提供了 2 种目标驱动优化方式，分别为：响应面优化 (Response surface optimization) 和直接优化 (Direct optimization)，笔者采用直接优化的目标驱动优化方式^[8]。

在进行最优化处理时，笔者采用 screening 优化方法，以质量和最大等效应力为目标求解，将质量设计为目标最小，最大等效应力设计为目标最大，设定质量和最大等效应力重要程度为 Higher，其他均为默认值。计算完成后，得到 3 组符合要求的点，如表 3 所示。

表 3 优化设计方案

组别	P_1/mm	P_2/mm	P_3/mm	P_4/kg	P_5/MPa
A	89.55	122.1	273.72	45.018	614.65
B	97.65	115.35	275.94	49.443	612.98
C	98.55	127.35	295.94	55.986	615.34

通过上面 3 组符合要求的点和各参数对最大等效应力和质量的影响，对于最大等效应力最大和质量最小，这里有 2 种选择：1) 以质量最小为最后目标，选择 A 组为设计方案；2) 以最大等效应力最大为最后目标，选择 C 组为设计方案。把 A、C 组中的各参数作为新的设计点，将平衡轴支架重新建

模进行静力学分析，得到的数据与优化前的进行比较如表 4、表 5 所示。

表 4 A 组优化前后参数比较

参数	优化前值	优化后值	参数	优化前值	优化后值
板簧安装孔位置高度/mm	90	89.55	支架质量/kg	56.893	45.018
板簧安装孔直径/mm	120	122.1	最大等效应力/MPa	371.58	601.35
平衡轴支架高度/mm	300	273.7	—	—	—

表 5 C 组优化前后参数比较

参数	优化前值	优化后值	参数	优化前值	优化后值
板簧安装孔位置高度/mm	90	98.55	支架质量/kg	56.893	55.986
板簧安装孔直径/mm	120	127.35	最大等效应力/MPa	371.58	615.34
平衡轴支架高度/mm	300	295.94	—	—	—

由表 4 可以看出：优化后平衡轴支架的质量明显减少，在满足结构强度的条件下，平衡轴支架的质量减少了 20.87%，最大等效应力增加 61.84%。由表 5 可以看出：在满足结构强度的条件下，最大等效应力增加 65.6%，而质量减少 1.59%。

4 结论

笔者把 Pro/E 跟 ANSYS Workbench 进行了有效的结合，可以方便地对平衡轴支架进行建模和优化设计。经过优化选择 A 组数据作为设计方案，在满

(上接第 3 页)

5) 根据隶属度计算伺服机构的健康状态评估得分，本步骤中采用的是线性加权的方法。

在本系统中采用的是 10 分制，及格分数为 6 分。在实际测试流程中，1)~3)的计算在软件设计之初已经完成，软件只需要完成 4)和 5)，即根据测试数据计算隶属度并进行综合评估。在软件设计过程中还考虑到随着对伺服舵机了解的深入，权重判断矩阵的取值可以根据实际进行相应更改，即可以根据需要重新装订组合权重的分配值。

4 结论

该测试系统充分发挥了 PXI 总线和虚拟仪器的优势，具有操作简便、测试精度高、可靠性高、系统开放、可移植性强等特点，可满足导弹伺服机构动态测试的要求，同时由于测试平台的体积大大减小，提高了其灵活性与可移动性。实验结果表明：该系统能够实时、稳定、连续地提供导弹伺服机构

足结构强度的条件下，平衡轴支架的质量减少了 20.87%，从而降低了生产成本，产生了明显的经济效益。该研究方法不仅为平衡轴支架的优化设计提供了有效的途径，同时也能为其他工程结构的优化设计提供有价值的参考。

参考文献：

- [1] 梁传建, 杨国来, 王晓锋. 计及多射角工况的火炮上架结构优化设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2014, 35(2): 30-34.
- [2] 王焕美. 基于某重型车的平衡悬架结构优化设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2012: 1-6.
- [3] 李学忠. 某重型商用车平衡轴支架轻量化设计与研究[D]. 太原: 中北大学, 2014: 1-12.
- [4] 石作维. 机械结构拓扑优化及其在重型卡车平衡轴支架改进设计中的应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009: 1-6.
- [5] 杨建伟, 石启龙, 李捷, 等. 基于 ANSYS 的断开式平衡轴支架疲劳特性的分析[J]. 汽车工程, 2011, 33(4): 335-339.
- [6] 石作维, 居刚, 吕新生, 等. 基于 Hyperworks 的平衡轴支架拓扑优化设计[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(1): 78-79, 82.
- [7] 魏小文, 韩俊花, 王靖, 等. 基于 Pro/E 和 ANSYS Workbench 的液压支架底座优化设计[J]. 煤矿机械, 2015, 36(3): 223-225.
- [8] 查太东, 杨萍. 基于 Ansys Workbench 的固定支架优化设计[J]. 煤矿机械, 2012, 33(2): 28-30.

状态信息,从而能更好地掌握伺服机构的性能状态,为装备的维护保养提供支持。

参考文献：

- [1] 朱忠惠, 陈梦葶, 胡隆庆, 等. 推力矢量控制伺服系统[M]. 北京: 宇航出版社, 1995: 245-155.
- [2] 张强, 叶林, 石航飞, 等. 交流伺服系统负载转矩的辨识方法[J]. 兵工自动化, 2014, 33(4): 47-49.
- [3] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW8.20 程序设计从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 15-18.
- [4] 李勇, 陈志锦, 张森. 交流伺服驱动功率回路参数选取方法[J]. 兵工自动化, 2014, 33(8): 79-81.
- [5] 谢虎. 基于相关分析的控制系统的频率特性建模研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 22(7): 92-94.
- [6] 张毅, 汪刘应, 曹继平, 等. 基于模糊综合评判的装备维修效能评估[J]. 兵工自动化, 2015, 34(9): 15-17.
- [7] 马鹏举, 朱东波, 丁玉成, 等. 基于模糊层次分析方法(F-AHP)盟员优化选择算法[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(7): 108-110.
- [8] 王玮, 张玉芝. 模糊 AHP 的权重向量求解方法研究[J]. 控制与决策, 2006, 21(2): 184-188.