

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.03.004

高压水炮系统水箱与连接件静态特性分析

李忠群¹, 刘阳¹, 邹向巧²

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南翔为通用航空有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: 消防直升机因其高机动性、大载质量和长航时等优点而被广泛应用于扑灭森林、超高层建筑和危化品场所等火灾。为防止结构问题引发安全事故, 需要对其外挂水炮系统结构进行静力学分析, 确保设计的外挂水箱结构强度和刚度符合适航标准。首先, 使用 SolidWorks 软件建立了消防直升机外挂水箱和连接件的三维模型, 并进行了适当的简化。然后, 通过有限元分析软件对水箱及各连接件进行了静力学分析。仿真结果表明, 所设计的高压水炮系统的水箱及连接件结构具有良好的静态特性, 能够满足适航要求, 并能保证系统的正常运行和性能表现。

关键词: 救火直升机; 高压水炮系统; 有限元仿真; 静态特性

中图分类号: V215.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)03-0025-07

引文格式: 李忠群, 刘阳, 邹向巧. 高压水炮系统水箱与连接件静态特性分析[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(3): 25-31.

Static Feature Analysis of Water Tanks and Connectors in a High-Pressure Water Cannon System

LI Zhongqun¹, LIU Yang¹, ZOU Xiangqiao²

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Hunan Xiangwei General Aviation Co., LTD., Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Firefighting helicopters find their wide application in extinguishing fires in forests, high-rise buildings, hazardous material sites, and other fire-prone areas due to their advantages of high maneuverability, large payload, and long endurance. In view of an prevention of safety accidents brought about by structural issues, it is necessary to conduct a static analysis of the external water cannon system structure so as to ensure that the strength and stiffness of the designed external water tank structure can meet airworthiness standards. Firstly, a three-dimensional model has thus been established of an external water tank and connectors for fire helicopters by using SolidWorks software, with appropriate simplifications made. Subsequently, a static analysis has been carried out on the water tank and its various connectors by using the finite element analysis software. The simulation results show that the water tank and connector structure of the designed high-pressure water cannon system is characterized with good static characteristics, which meet airworthiness requirements, thus ensuring the normal operation and performance of the system.

Keywords: fire-fighting helicopter; high-pressure water cannon system; finite element simulation; static feature

收稿日期: 2023-08-27

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2024JJ7136)

作者简介: 李忠群, 男, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为切削动力学与先进数控加工技术,

E-mail: zhqunli@163.com

1 研究背景

随着生态文明建设推进,我国森林蓄积量增加、林下可燃物增多,加之全球气候变暖加剧了森林防火形势。此外,高层建筑增多,灭火难度加大。传统灭火设备已无法应对复杂的森林地形和增多的高层建筑给消防灭火工作带来的挑战^[1-3]。因此,如何有效应对森林火灾和高层建筑火灾成为全球性难题^[4]。

直升机吊桶灭火系统机动灵活、反应迅速、携带水量较大,能够在一定程度上解决森林和高层建筑火灾问题^[5]。近年来,高压水炮系统,包括 Ka-32、AC313 和 H425 等直升机水炮系统^[6]备受科研工作者们关注,通过在消防直升机上外挂水箱并配合使用高压水炮,不仅提高了灭火精度和效率,同时保持了直升机机动性。这种系统在高层建筑和森林火灾灭火中被认为是最佳选择^[7]。

直升机外挂水炮系统的结构强度对其飞行安全至关重要。水箱的结构会影响其承载能力和质量,为了减轻质量,可以采用碳纤维复合材料替代轻质合金材料^[8]。此外,关键的连接件在工作状态下需要承受载荷、振动和外部作用力,必须具备足够的强度和刚度。结合水箱的形状、尺寸和安装要求,设计和制造合适的连接件以确保直升机和水箱之间可靠连接,这对于实现高压水炮系统的功能至关重要。因此,为防止结构问题引发安全事故,在设计外挂水箱和关键连接件时,必需对其进行静力学分析,确保外挂水箱的结构强度和刚度符合适航标准。

有关机械结构静力学分析的研究非常广泛。李剑英等^[9]使用 Ansys 对电动汽车电池箱进行了静态特性和模态分析,通过修改结构参数提高了系统刚度。李忠群等^[10]对数控激光机床的整机和关键部件进行了静动态特性分析,并提出了优化方案。席建普等^[11]利用 Workbench,对内嵌式快刀伺服装置进行了有限元仿真,并得到了实验验证。Zhang X. Q. 等^[12]通过静力学分析,发现连接空投系统与飞机的支座上部靠近双耳孔处易产生应力集中。He Z. K. 等^[13]对玻璃钢复合材料制成的风力机叶片进行了静力结构分析,结果表明,在最大载荷下,叶片有限元模型处于安全范围内。对于大型结构和复杂测试设备而言,实验分析方法耗时耗力,而有限元法因其广泛的适用性和灵活性,在工程实践中得到了广泛应用。

综观已有研究,虽然直升机外挂高压水炮系统被认为是解决森林防火和高层建筑火灾的有效方案,但已有研究尚未对该系统的水箱和连接件进行适航验证。因此,本研究拟对自主设计的高压水炮系统

的水箱及其连接件进行验证,即利用有限元法对其进行结构静力学分析。首先,利用 SolidWorks 软件对高压水炮系统的水箱及其连接件进行有限元建模,然后进行静力学分析,以验证其结构强度和刚度,以期能在确保灭火直升机的功能和飞行安全的前提下,提高其灭火效率。

2 有限元模型建立

2.1 网格划分

采用 SolidWorks 软件构建自主设计的高压水炮系统水箱及连接件三维模型,为提高有限元分析效率,在将三维模型导入有限元软件前,对其进行适当简化,具体包括:去除对分析结果影响较小的局部几何特征,如倒角、圆角和螺纹孔等,以减少节点和网格单元数量,这在分析大型复杂结构时尤为重要。因保密性要求,具体结构尺寸从略,简化后高压水炮系统的水箱及其连接件三维模型见图 1。

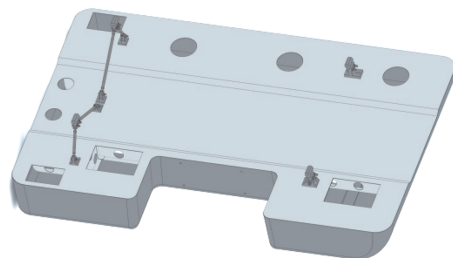


图 1 零件简化后的水箱及其连接件三维模型

Fig. 1 3D model of a simplified water tank with its connectors

本文采用四面体实体单元的补丁适形算法来进行网格划分,并针对不同的零件采用不同的网格尺寸进行调整。具体而言,箱体的上盖板、下壳体和内部隔板结构尺寸较大,采用了 30 mm 的网格尺寸控制,前吊压板、前吊扣 L 型板、前吊扣、后吊挂座、拉杆吊挂和拉杆为关键连接件,采用了 10 mm 的网格尺寸控制,而六角头螺栓和六角螺母尺寸较小,则采用了 2 mm 的网格尺寸控制。水箱及其连接件的有限元网格模型如图 2 所示。

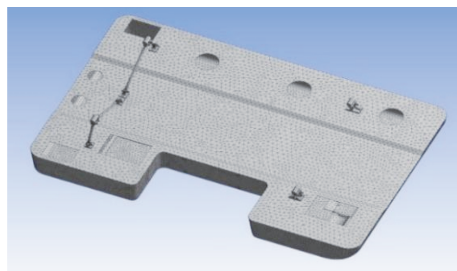


图 2 水箱及其连接件有限元网格模型

Fig. 2 Finite element mesh model of the water tank with its connectors

2.2 材料属性确定

高压水炮系统的水箱上盖板、下壳体 and 内部隔板均采用碳纤维与玻纤维的复合材料,其材料属性如表1所示,各连接件的材料属性如表2所示^[14-15]。

表1 复合材料的材料属性

Table 1 Material properties of composite materials

经向模量 / GPa	纬向模量 / GPa	泊松比	剪切模量 / GPa	密度 / (kg·m ⁻³)	许用应力 / MPa
70	70	0.03	4	1 600	400

表2 连接件的材料属性

Table 2 Material property of connectors

连接件	材料	弹性模量 / GPa	泊松比	密度 / (kg·m ⁻³)	许用应力 / MPa
长拉杆、短拉杆	304 不锈钢	195	0.25	7 930	520
拉杆吊挂	7075 铝合金	71	0.33	2 700	524
前吊压板、前吊扣 L 型板、前吊扣、后吊挂座	6061-T6	69	0.33	2 700	295

2.3 质量校核

经过计算,满装载情况下高压水炮系统的总质量为 804.50 kg,低于 1 000 kg,满足飞行手册和外部载荷加改装要求,各零部件质量如表3所示。

表3 高压水炮系统各零部件质量

Table 3 Mass of various components of the high-pressure water cannon system

水箱整体 (包括内部隔板)	载液 限量	连接件	高压 水枪	电源及 保护盒	高压 水泵
137.4	600.0	4.0	15.0	13.5	34.6

3 静力学分析条件设置

消防水箱作为高压水炮系统的储水装置,连接件用于实现消防水箱与直升机的有效和可靠固定。为了验证其是否满足设计要求,对其进行静力学分析是必不可少的^[16]。

3.1 载荷设置

根据引用的适航标准^[17]规定,有人外挂载重的旋翼航空器外挂物的吊挂设备,要承受等于 3.5 或某一较小但不小于 2.5 的系数乘以最大外挂物的质量所产生的限制静载荷。考虑到直升机操作限制、外界环境条件和飞行员操纵行为等因素,本结构设计采用最大限制载荷系数 3.5。极限载荷应按限制载荷的 1.5 倍施加,外挂载荷的作用方向为垂直方向。

直升机消防水箱中灭火液的最大限量为 600 kg,对应的载荷值为 5 880 N,极限载荷值为 30 870 N。这些载荷在 -Z 方向以均布压力形式施加在水箱下壳体底面。为了计算效率和简化高压水泵结构的复杂性,将高压水泵、电源和保护盒的重力以集中力的方式施加在其质心位置上,使用远程点来表示。在该远程点的 -Z 方向上施加极限远程力 2 474.75 N (见图3)。对于前吊压板、拉杆以及其他连接件和消防水箱,增加 3.5 倍的最大限制载荷和 1.5 倍的极限载荷,在 Z 方向上施加 5.25 倍的地球重力加速度,具体数值为 -51 450 mm/s²。

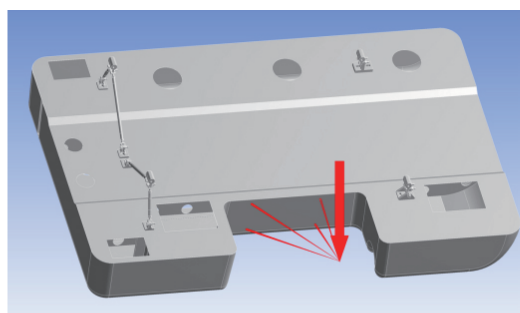


图3 远程点上施加远程力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of remote force applied on remote points

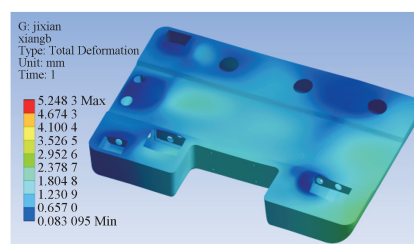
3.2 边界条件

水箱内部隔板与水箱壳体的接触设定为绑定;前吊扣、前吊压板和后吊挂座分别与水箱上盖板表面设置为绑定连接;前吊压板与前吊扣的 L 型板以及长短拉杆与后吊挂座均采用螺栓进行连接;螺栓与螺母之间采用绑定连接。连接件与螺栓、连接件与连接件、螺母与连接件之间采用摩擦接触,摩擦系数设置为 0.2。螺栓和螺栓孔之间存在间隙,因此二者之间不设置接触条件。对于 4 个拉杆吊挂的螺栓孔,施加固定约束。

4 有限元仿真结果

4.1 消防水箱

有限元仿真所得消防水箱的变形云图和 von-mises 应力云图如图4所示。



a) $z = -51\,450\text{ mm/s}^2$ 正面变形云图

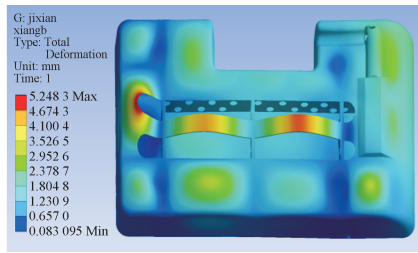
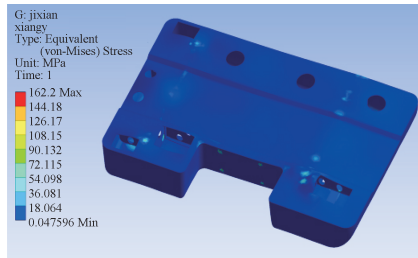
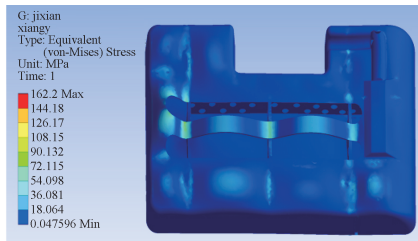
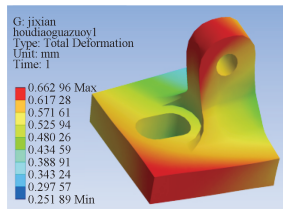
b) $z = -51\ 450\ \text{mm/s}^2$ 反面变形云图c) $z = -51\ 450\ \text{mm/s}^2$ 正面应力云图d) $z = -51\ 450\ \text{mm/s}^2$ 反面应力云图

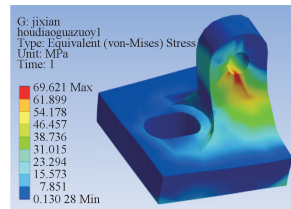
图 4 消防水箱静力学分析结果

Fig. 4 Statics analysis results of the fire water tank

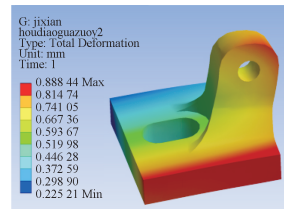
为了能更直观地确认最大变形量和最大应力的



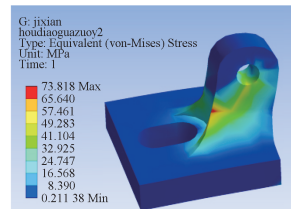
a) 左 1 后吊挂座变形云图



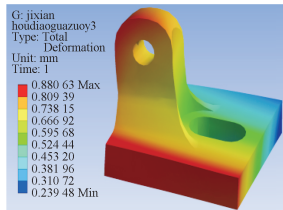
b) 左 1 后吊挂座应力云图



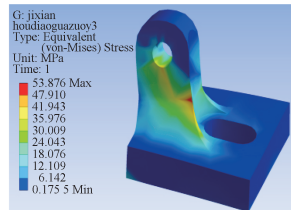
c) 左 2 后吊挂座变形云图



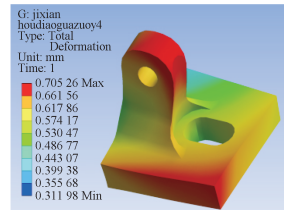
d) 左 2 后吊挂座应力云图



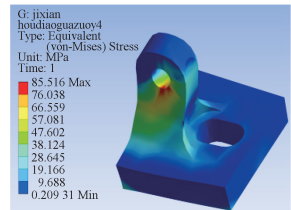
e) 右 1 后吊挂座变形云图



f) 右 1 后吊挂座应力云图



g) 右 2 后吊挂座变形云图



h) 右 2 后吊挂座应力云图

图 6 后吊挂座静力学分析结果

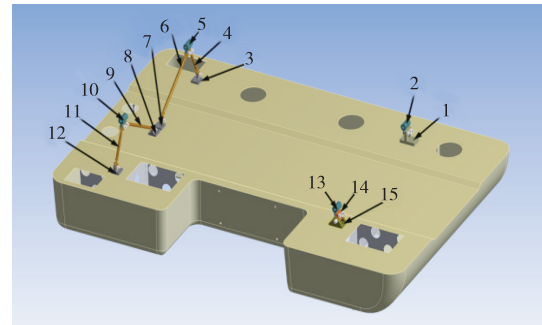
Fig. 6 Static analysis results of the rear suspension seat

由图 6 可知, 左 1 后吊挂座最大变形量约为 0.663 mm, 位于耳片与左短拉杆的连接处, 最大应力为 69.621 MPa, 位于耳片螺栓孔处; 左 2 后吊挂座最大变形量约为 0.888 mm, 位于底座靠近水箱质心的一端, 最大应力为 73.818 MPa, 位于耳片与底座连接

相应位置, 分别从消防水箱的正面和反面进行观察, 由图 4 可以得知水箱的最大变形量为 5.248 3 mm, 其位于消防水箱箱底的排水口处, 最大应力为 162.2 MPa, 位于高压水泵、电源及保护盒与消防水箱的安装孔连接处。

4.2 连接件

各连接件具体位置如图 5 所示。



- 1- 前吊扣; 2- 左 1 拉杆吊挂; 3- 左 1 后吊挂座;
4- 左短拉杆; 5- 左 2 拉杆吊挂; 6- 左长拉杆;
7- 左 2 后吊挂座; 8- 右 1 后吊挂座; 9- 右长拉杆;
10- 右 1 拉杆吊挂; 11- 右短拉杆; 12- 右 2 后吊挂座;
13- 右 2 拉杆吊挂; 14- 前吊扣 L 型板; 15- 前吊压板。

图 5 各连接件位置图

Fig. 5 Location diagram of each connector

4.2.1 后吊挂座

仿真分析所得后吊挂座的变形云图和 von-mises 应力云图如图 6 所示。

处; 右 1 后吊挂座最大变形量约为 0.881 mm, 位于底座靠近消防水箱质心的一端, 最大应力为 53.876 MPa, 位于耳片与底座连接处; 右 2 后吊挂座最大变形量约为 0.705 mm, 最大应力为 85.516 MPa, 均位于耳片螺栓孔处。

4.2.2 拉杆

仿真分析所得拉杆的变形云图和 von-mises 应力云图如图 7 所示。由图可知, 左短拉杆的最大变形量约为 0.608 mm, 位于与左 1 后吊挂座连接的耳片部位, 最大应力为 328.17 MPa, 位于拉杆与耳片之间; 右短拉杆的最大变形量约为 0.654 mm, 位于与

右 2 后吊挂座连接的耳片部位, 最大应力为 339.49 MPa, 位于拉杆与耳片之间; 左长拉杆的最大变形量约为 0.846 mm, 最大应力为 218.51 MPa, 均位于拉杆与耳片之间; 右长拉杆的最大变形量约为 0.853 mm, 位于与右 1 后吊挂座连接的耳片部位, 最大应力为 187.41 MPa, 位于拉杆与耳片之间。

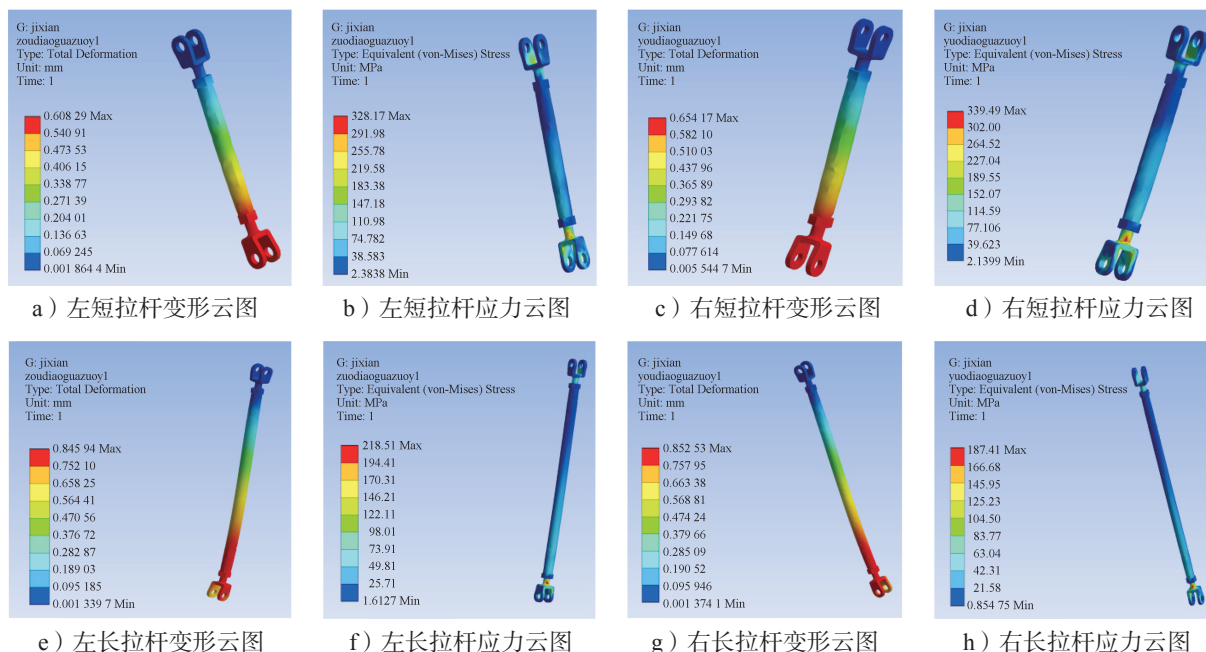


图 7 拉杆静力学分析结果

Fig. 7 Tie rod static analysis results

4.2.3 前吊压板

仿真分析所得前吊压板的变形云图和 von-mises 应力云图如图 8 所示。

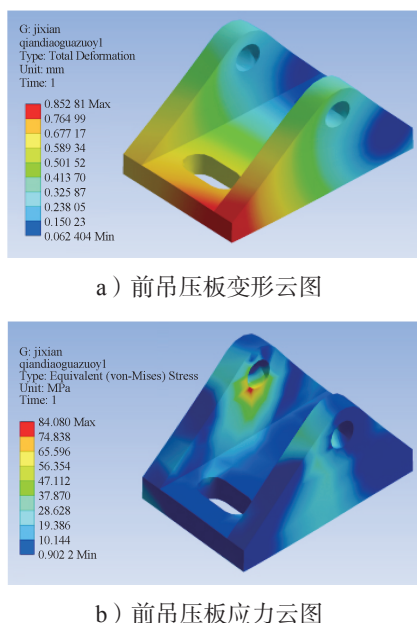


图 8 前吊压板静力学分析结果

Fig. 8 Static analysis results of the front suspension pressure plate

由图 8 可知, 前吊压板最大变形量约为 0.853 mm, 位于底座直角处, 最大应力为 84.08 MPa, 位于耳片螺栓孔处。

4.2.4 前吊扣 L 型板

仿真分析所得前吊扣 L 型板的变形云图和 von-mises 应力云图如图 9 所示。

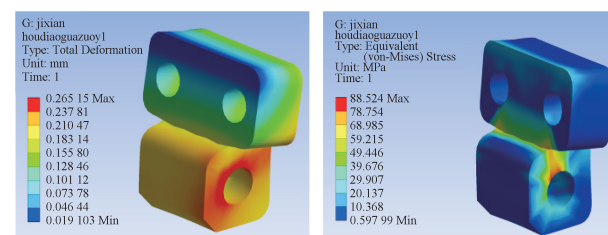


图 9 前吊扣 L 型板静力学分析结果

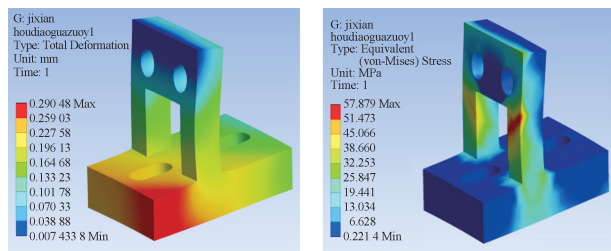
Fig. 9 Static analysis results of L-shaped plate with front suspension buckle

由图 9 可知, 前吊扣 L 型板的最大变形量约为 0.265 mm, 最大应力为 88.524 MPa, 均位于安装孔处。

4.2.5 前吊扣

仿真分析所得前吊扣的变形云图和 von-mises 应力云图如图 10 所示, 由图可得前吊扣的最大变形

量约为 0.290 mm，位于底座直角处，最大应力为 57.879 MPa，位于右侧立柱中间处。



a) 前吊扣变形云图 b) 前吊扣应力云图

图 10 前吊扣静力学分析结果

Fig. 10 Static analysis results of the front suspension buckle

4.2.6 拉杆吊挂

仿真分析所得拉杆吊挂的变形云图和 von-mises 应力云图如图 11 所示。由图 11 可知，左 1 拉杆吊挂的最大变形量约为 0.094 8 mm，位于耳片下端，最大应力为 94.502 MPa，位于耳片外缘处；左 2 拉杆吊挂的最大变形量约为 0.012 7 mm，最大应力为 51.664 MPa，均位于耳片螺栓孔周围；右 1 拉杆吊挂的最大变形量约为 0.021 8 mm，位于耳片外缘处，最大应力为 62.213 MPa，位于耳片螺栓孔处；右 2 拉杆吊挂的最大变形量约为 0.168 mm，最大应力为 150.76 MPa，均位于耳片下端。

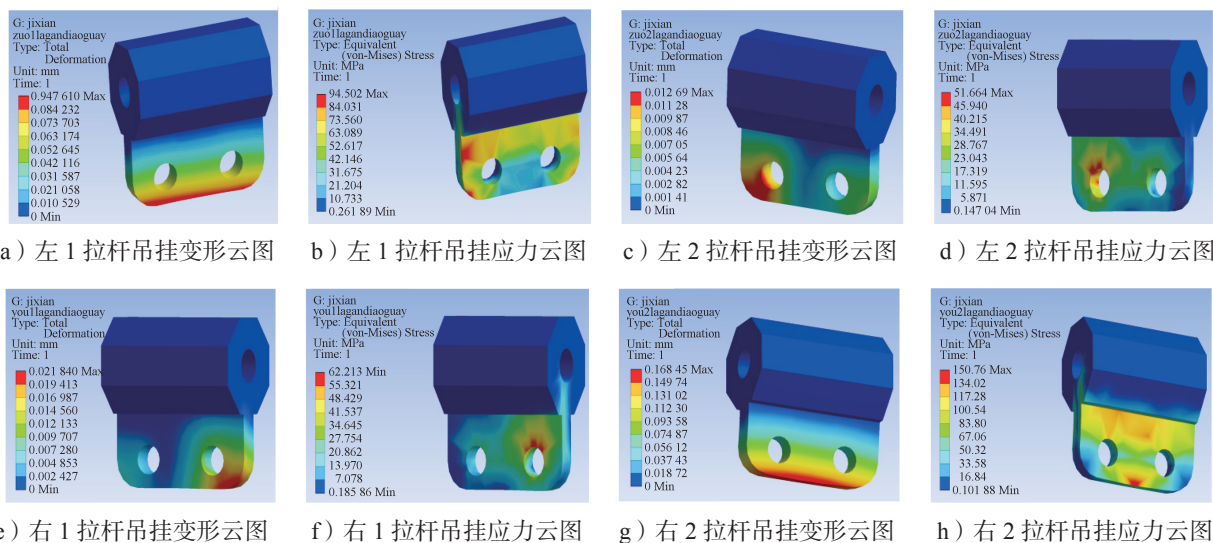


图 11 拉杆吊挂静力学分析结果

Fig. 11 Tie rod suspension static analysis results

5 结论

经过 SolidWorks 软件的三维建模和适当简化，对自主设计的高压水炮系统水箱及各连接件进行了静力学分析，得出以下结论：

1) 消防水箱的静力学分析结果显示，其最大变形量约为 5.248 mm，出现在消防水箱下壳体的排水口处；最大应力为 162.2 MPa，出现在高压水泵、电源及保护盒与消防水箱的安装孔连接处；连接件与消防水箱的连接处、水箱下壳体排水口处均出现了应力集中现象。最大应力小于碳纤维复合材料的许用应力值，最大变形量对水箱的使用影响较小，该零件符合设计标准。

2) 连接件的静力学分析结果显示，后吊挂座、前吊压板、前吊扣 L 型板和前吊扣的最大变形量为左 2 后吊挂座的 0.888 mm，出现在其底座上。最大应力为前吊扣 L 型板的 88.524 MPa，出现在其安装孔处。长、短拉杆最大变形量为右长拉杆的 0.853

mm，出现在耳片部位。最大应力为右短拉杆的 339.49 MPa，出现在拉杆与耳片之间。拉杆吊挂最大变形量为右 2 处的 0.168 mm，最大应力为右 2 处的 150.76 MPa，均出现在耳片下端。各连接件的最大应力均小于其材料所允许的应力破坏值，最大变形量较小，满足设计标准要求。

3) 通过对高压水炮系统水箱及其连接件的静力学分析可知，在施加最大限制载荷系数和极限载荷系数后，该系统结构设计在满载情况下仍具备足够的强度与刚度。可见该设计不仅符合适航标准规定，且确保了高压水炮系统与直升机的结构紧密连接。这为后续高压水炮系统的优化提供了理论依据。

参考文献：

[1] 闫 鹏. 新时期我国森林航空消防发展现状及对策研究[J]. 今日消防, 2022, 7(1): 1-4.

YAN Peng. Research on the Development of Aerial

- Firefighting in Forest Fires in China in the New Era and Countermeasures[J]. Fire Protection Today, 2022, 7(1): 1-4.
- [2] 张永生. 高层建筑疏散逃生与灭火救援措施[J]. 科技创新与应用, 2019(35): 112-113.
ZHANG Yongsheng. Evacuation, Escape and Fire Fighting and Rescue Measures for High-Rise Buildings[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2019(35): 112-113.
- [3] 戚本成, 王琳. 高层建筑安全疏散设计[J]. 建材与装饰, 2019(28): 145.
QI Bencheng, WANG Lin. Safety Evacuation Design of High-Rise Buildings[J]. Construction Materials & Decoration, 2019(28): 145.
- [4] WANG Y C, MARSDEN J, KELLY M. Challenges of Fire Fighting in Fire Engineered Built Environment[J]. Procedia Engineering, 2011, 11: 583-592.
- [5] ZHOU T J, LU J Z, HE L F, et al. Experiments in Aerial Firefighting with and Without Additives and Its Application to Suppress Wildfires Near Electrical Transmission Lines[J]. Journal of Fire Sciences, 2022, 40(5): 313-346.
- [6] 俞东锋, 张裕兵, 常建龙. 某轻型直升机加装灭火水枪设备试飞技术工作研究[J]. 科技风, 2020(1): 134-135, 139.
YU Dongfeng, ZHANG Yubing, CHANG Jianlong. Research on Test Flight of a Light Helicopter Equipped with Water Gun[J]. Technology Wind, 2020(1): 134-135, 139.
- [7] 徐明, 李永亮, 刘文琦, 等. 城市消防直升机发展现状与应用前景研究[J]. 直升机技术, 2018(3): 68-72.
XU Ming, LI Yongliang, LIU Wenqi, et al. Present Situation and Development Analysis of Fire Helicopter in City[J]. Helicopter Technique, 2018(3): 68-72.
- [8] 李树宽, 方海滨. 大型直升机机载水箱洒水灭火技术的探讨[J]. 森林防火, 2004(1): 43-44.
LI Shukuan, FANG Haibin. Discussion on Sprinkler Technology of Airborne Water Tank for Large Helicopter[J]. Forest Fire Prevention, 2004(1): 43-44.
- [9] 李剑英, 卢志东. 电动汽车快速更换电池箱有限元分析及优化设计[J]. 现代制造工程, 2020(7): 31-38.
LI Jianying, LU Zhidong. Finite Element Analysis and Optimization Design of Electric Vehicle Quick Replacement Battery Box[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(7): 31-38.
- [10] 李忠群, 张伟峰, 刘强, 等. 数控激光加工机床静态特性分析[J]. 制造技术与机床, 2022(12): 76-80.
LI Zhongqun, ZHANG Weifeng, LIU Qiang, et al. Analysis of Static and Dynamic Characteristics of CNC Laser Processing Machine Tool[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(12): 76-80.
- [11] 席建普, 李亚东, 刘同士, 等. 内嵌式快刀伺服机构的静态特性分析与实验验证[J]. 机床与液压, 2020, 48(10): 34-39.
XI Jianpu, LI Yadong, LIU Tongshi, et al. Static Characteristic Analysis and Experimental Verification for Fast Tool Servo[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(10): 34-39.
- [12] ZHANG X Q, WANG J L, CHEN H, et al. Statics Analysis and Topology Optimization of Support Base for Airdrop Based on ANSYS Workbench[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1798(1): 012030.
- [13] HE Z K, CAI J, CUI S S, et al. Static Structural Analysis of 2 MW Wind Turbine Blade Based on ANSYS Workbench[C]//Science and Engineering Research Center. Proceedings of 2017 2nd International Conference on Test, Measurement and Computational Method(TMCM 2017). [S.l.]: DEStech Publications, 2017: 430-434.
- [14] 王建青, 宋云涛, 武松涛, 等. ITER 磁体过渡馈线的结构设计及优化[J]. 核技术, 2006(4): 271-275.
WANG Jianqing, SONG Yuntao, WU Songtao, et al. Structural Design and Optimization of Cryostat Feedthrough for ITER Magnet[J]. Nuclear Techniques, 2006, 29(4): 271-275.
- [15] 孙宗平. 复合材料耐压壳的设计[D]. 上海: 东华大学, 2022.
SUN Zongping. Design of Composite Pressure-Resistant Shell[D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [16] 周琦. 基于 SolidWorks 的某定位连接部件有限元优化分析[J]. 锻压装备与制造技术, 2023, 58(3): 70-74.
ZHOU Qi. Finite Element Optimization Analysis of Some Positioning Connection Component Based on Solidworks[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2023, 58(3): 70-74.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 正常类旋翼航空器适航规定: CCAR-27-R2[S]. 北京: 交通运输部办公厅, 2017: 124-125.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Airworthiness Regulations for Normal Class Rotorcraft: CCAR-27-R2[S]. Beijing: General Office of the Ministry of Transport, 2017: 124-125.

(责任编辑: 廖友媛)