

光学载荷钢丝绳减震器的结构设计与分析

李浩, 徐钰蕾, 谭淞年, 程艳萍

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了减小振动对大负载光学载荷在飞行过程中相机成像质量的影响, 设计了一种新型向心结构的减震器。针对传统减震器的不足, 提出了向心结构的设计方案, 可以很好地将力进行解耦, 通过在升降板上沿圆环均布的方式排列安装, 有效避免了光学载荷内部发生碰撞。为了检验向心结构的减振效果, 通过拉伸试验与有限元分析相结合的方式对光学载荷验证。结果表明, 在 120 kg 负载下, 整体结构最大变形为 3 mm, 最大应力为 34.3 MPa, 实际振型频率为 9.81 Hz, 均满足设计要求。

关键词: 光学载荷; 减震器; 拉伸试验; 有限元分析

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2023)03-0298-05

Structural Design and Analysis of Optical Load for Wire-Rope Shock Absorber

LI Hao, XU Yulei, TAN Songnian, CHENG Yanping

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: To reduce the effect of vibration on camera image quality during flight under heavy optical loads, a new type of centripetal shock absorber was designed. In view of the shortcomings of traditional shock absorbers, a design scheme for the centripetal structure is proposed that can effectively decouple the force. By uniformly distributing the force along the ring on the lifting plate, collisions within the optical load were effectively avoided. To test the vibration-damping effect of the centripetal structure, the optical load was verified using a combination of tensile tests and finite element analysis. The results showed that under a load of 120 kg, the maximum deformation of the entire structure was 3 mm, the maximum stress was 34.3 MPa, and the actual mode frequency was 9.81 Hz, which met the design requirements.

Key words: optical load, shock absorber, tensile test, finite element analysis

0 引言

由于飞机在飞行时, 光学载荷也在随之运动, 当飞机突然加速或者减速时, 由于惯性的作用载荷会受到加速度等约束的冲击, 对设备或结构会产生破坏性的影响, 特别是超过设备的允许范围, 会减少设备的使用寿命。因此, 对设备引入隔振系统, 减少各种约束对设备的冲击, 阻断振动的路径。特别是相机组件, 如果对振动敏感, 会影响相机的成像质量, 造成图像模糊、扭曲等^[1]。

在众多减震器中, 钢丝绳减震器以其非线性的特性而闻名, 其具有低固有频率、良好的干摩擦特性, 大变形刚度软化, 宽频隔振, 耐高低温, 可以承受剪切、横滚和拉压载荷, 兼顾了弹性支撑元件隔振, 并且成本低, 安装方便^[2], 广泛应用于车载、航空航天、

舰载等领域^[3-4]。

目前, 常用的减震器为橡胶减震器, 但其容易受温度、环境和化学溶剂的影响, 导致减震器性能降低。橡胶老化, 容易松弛, 使用寿命短。针对橡胶减震器的不足, 国内很多学者对钢丝绳减震器做出诸多研究, 如张春晖等人^[5]设计一种带球形导向结构的钢丝绳减震器, 解决横滚和剪切时的受力不均。王平^[6]分析一种带钢丝绳减震器的风机系统, 利用有限元来研究风机的抗震性能。

本文设计一种适用于大负载(一种相对的含义, 光学负载一般都是 100 kg 以内, 本文应用的光学负载为 120 kg)结构的钢丝绳减震器, 通过钢丝绳的伸缩变化减少内部结构组件所承受的缓冲力, 增加结构的使用寿命。

收稿日期: 2022-11-15; 修订日期: 2022-11-30.

作者简介: 李浩(1994-), 男, 研究实习员, 主要研究方向为航空光电系统设计及分析。E-mail: 17614376198@163.com

基金项目: 面向 XX 的光电系统设计与仿真(E22481SZLZ00)。

1 钢丝绳减震器的理论分析

根据振动力学表述, 钢丝绳减振系统的动力学模型的一般表达式为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

式中: $x(0)=x_0$, $\dot{x}(0)=\dot{x}_0$ 为初始位移和初始加速度;

\ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 是系统的输入, 分别表示为加速度、速度、位移; m 、 c 、 k 是系统的参数, 分别表示系统的质量矩阵、阻尼矩阵以及刚度矩阵; $f(t)$ 表示系统的外激励, 是系统的输入量。

系统的输入不同, 研究内容会有所差别。当 $f(t)=0$ 时, 系统做自由振动, 其仅靠本身的弹性恢复力“自由地”振动, 其振动的特性仅决定于系统本身的物理特性(质量和刚度); 当 $f(t)\neq 0$ 时, 系统做受迫振动或自激振动。所谓的受迫振动就是指系统受到外接持续的激励作用从而“被迫地”进行振动, 其振动的特性不仅和本身物理特性有关, 还受到激励特性影响。在工程中, 大部分的运动都属于受迫振动。所谓的自激振动, 是指系统自身控制的激励作用下发生的振动。本文主要考虑在自然情况下的实际运动。

这里以单自由度系统为例, 对钢丝绳减震器分析, 其结构原理如图1所示。

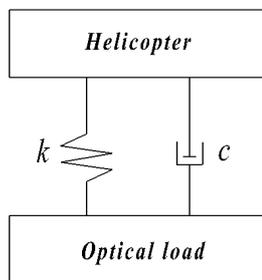


图1 单自由度系统钢丝绳减震器的结构简化模型

Fig.1 Simplified structural model of single-degree-of-freedom system wire rope shock absorber

对方程(1)化简为无量纲方程, 即:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = \frac{f(t)}{m} \quad (2)$$

式中: $\sigma=c/(2m)$, 表示衰减系数; $f = \sqrt{k/m}/2\pi$, 表示圆频率, $F(t)=f(t)/m$, 表示激励函数。

钢丝绳的阻尼我们不过多考虑, 因为钢丝绳本身就具有良好的阻尼特性, 通过调整钢丝绳的圈数、压板宽度、弯曲半径等多方面因素, 来控制钢丝绳刚度 k , 从而设计一种适用于大负载的钢丝绳减震器, 并让其圆频率 f 符合挂载的频率范围。

2 钢丝绳减震器的设计

传统的钢丝绳减震器只考虑其承重的能力, 而没有从其结构形式、适用范围等方面考虑, 如图2所示。而本文提出一种的新型钢丝绳减震器, 结构合理规范, 适用于一类大负载光学载荷, 且采用向心(设备的质心)的结构形式, 这样有利于彼此之间解耦, 避免出现应力集中。



(a) T型减震器

(b) G型减震器

(a) T-shaped shock absorber (b) G-shaped shock absorber

图2 传统的钢丝绳减震器

Fig.2 Traditional wireline shock absorbers

基于此, 根据负载需求, 设计一种新的钢丝绳减震器, 它由上压板、下压板、向心压板、钢丝绳以及锁扣共5部分组成, 结构如图3所示。钢丝绳采用对称的结构形式贯穿于两对压板之间, 利用螺钉将钢丝绳固定, 其原理是压缩钢丝绳的变形量, 对负载实施减振缓冲效果。

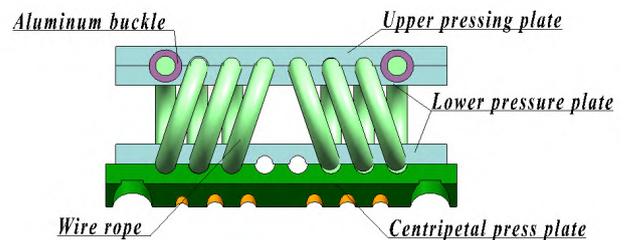


图3 钢丝绳减震器的结构模型

Fig.3 Structural model of wire rope shock absorber

钢丝绳减震器主要受钢丝绳的股数、压板宽度、贯穿孔的孔距、钢丝绳的弯曲半径以及加工的误差等多方面误差的影响。这里我们设定压板宽度为10 mm, 锁扣长度为7 mm, 钢丝绳直径为4 mm, 压板孔距为10 mm, 钢丝绳的弯曲半径为15 mm(要在钢丝绳的弯曲半径范围内, 一般是钢丝绳直径的1.5~2.5倍)。

3 钢丝绳减震器的拉伸试验

利用拉伸试验机对减震器做拉伸试验, 从而确定减震器的刚度。分别对直径为4 mm、5 mm、6 mm 钢丝绳做3个方向的拉伸(X、Y、Z), 结果见图4所示, 从而可以确定3个方向的刚度, 见表1。从图4中可以得出, 无论是X、Y、Z哪个方向, 初始阶段曲线斜率(即刚度 k) 陡然增加, 随着拉伸(或压缩)

的距离逐渐增加的时候, 曲线斜率的增幅逐渐减弱, 这符合钢丝绳减震器这一运动状态。且从表1中的计算结果表明, 钢丝绳的3个方向的刚度近似符合

$K_x:K_y:K_z=1:1:3$, 与参考文献[7-8]对钢丝绳减震器静态加载试验描述一致, 并为钢丝绳的仿真计算提供刚度参数。

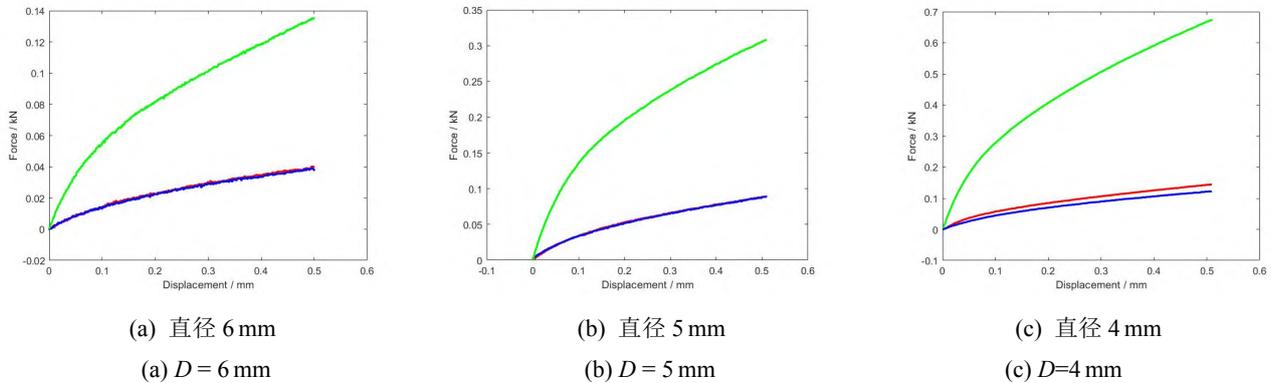


图4 不同钢丝绳直径的力与位移曲线

Fig.4 Force versus displacement curves for different rope diameters

表1 不同钢丝绳的直径的刚度系数

Table 1 Stiffness coefficient of different wire rope diameters

	K_x	K_y	K_z
6 mm	206.2	184.6	952.7
5 mm	123.7	119.9	399.8
4 mm	60.1	58.8	185.6

4 带负载的钢丝绳减震器系统分析

根据给定的钢丝绳参数, 加工出实物模型, 将其应用到120kg光学机构负载上, 光学负载减振系统如图5所示, 在分析时通常都将负载作为集中质量施加在结构的质心中。减震器一共四组, 采用组内对称排列, 组外均布排列, 且每一个均指向质心, 如图6所示。

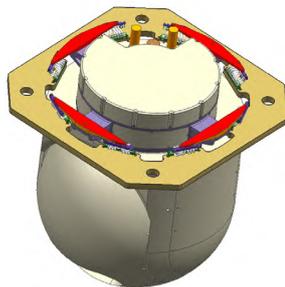


图5 光学负载减震系统

Fig.5 Optical load damping system

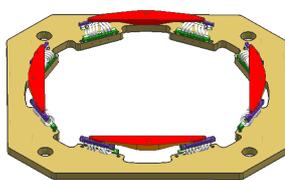


图6 减震器的均布排列

Fig.6 Uniform arrangement of shock absorbers

4.1 模型有限元建模

利用建模软件UG NX10.0对钢丝绳减震器建模, 在不影响结构的条件下适当对模型简化。由于模型结构无明显过薄结构, 在有限元网格划分中, 为了保证仿真结果的准确性, 将升降板以及过渡连接板一并加入到分析模型中, 且光学负载质量以集中质量的方式加入模型中(位于质心处), 其中减振器的设置采用BUSH单元分析, 网格采用3D十节点四面体实体单元进行网格划分^[9]。该有限元模型见图7, 结构划分单元数量为506218个, 节点数为801704个。



图7 减震器系统的有限元模型

Fig.7 Finite element model of shock absorber system

4.2 材料的选择

选择减震器和其他结构件的材料时需要考虑承重效果和整体强度。铝合金材料具有良好的加工工艺性, 可用车、磨等机械工艺进行加工^[10]。此外铝合金材料在轻量化设计方面有着得天独厚的优点, 由于升降板体积较大, 考虑加工质量、成本等多方面因素, 所以选择铝合金作为其主要材料。而减震器和过渡件起着承重的作用, 且对材料的抗弯与抗拉性能有着更高的要求。由于不锈钢具有耐腐蚀性能、较高的硬度,

因此选择不锈钢作为减震器和过渡件的主要材料。材料属性见表2所示。

表2 材料参数

Table 2 Material parameters

Materials	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Density/(kg/m ³)
Aluminium alloy	71	0.33	2770
Stainless steel	193	0.31	7750

4.3 静力学分析

升降板、减震器以及过渡件在实际工作状态下,它们起着承重的作用,所以要考虑自身的重力问题,分析其变形情况及其应力分布情况。

根据结构的安装形式,在有限元分析时,对升降板底面施加固定约束,将质量点集中加在4个过渡板正中间的底部位置,使其与实际工况边界条件一致。

在条件约束下,整体结构的变形云图和应力云图如图8所示,框架的最大变形量3 mm,出现在过渡梁的中间的边缘位置,满足结构承重要求;最大应力为34.3 MPa,位于过渡梁底端与减震器的接触位置,应力值在材料许用应力范围内。

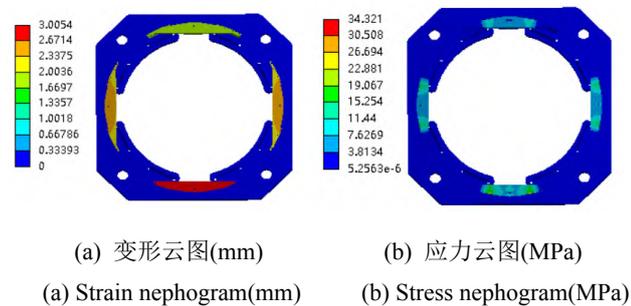


图8 带负载的静力学分析结果
Fig 8 Static analysis results with load

4.4 模态分析

模态分析是分析整体结构动力学特性的有效方法,其通过计算分析得到结构的模态参数,包括各阶相应的频率、振型、刚度等参数,对结构优化设计,避开共振。

对结构分析了前六阶模态,云图见图9,模态分析结果见表3。从模态分析可以确定,第三阶振型与实际最为接近,频率为9.81 Hz。根据给定指标,直升机的中转轴转速400转/分,共有4个桨叶,所以其频率为27.3 Hz,其实际振型频率满足光学载荷指标要求,避免共振。

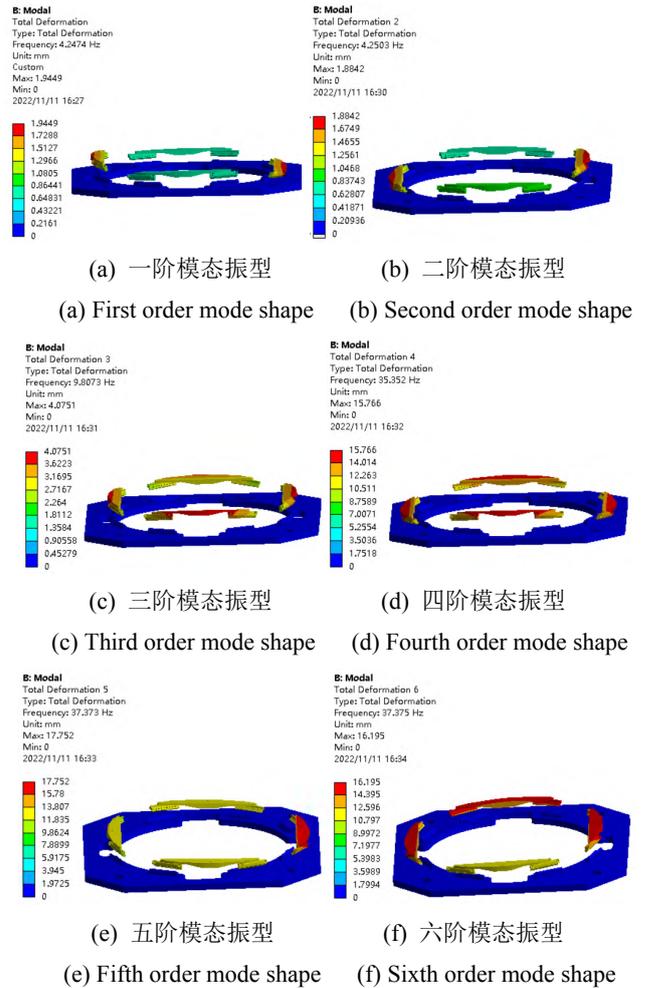


图9 带负载的前六阶模态云图
Fig.9 First six order modal cloud diagrams with load

表3 带负载结构的模态分析结果

Table 3 Modal analysis results of loaded structures

Modal order	Natural frequency/Hz	Mode description
1	4.25	Rotate around X axis
2	4.25	Second order bending in the XZ plane
3	9.81	Stretch along the Z axis
4	35.35	First order bending in XZ plane
5	37.37	Stretch along Y axis
6	37.38	Stretch along the X axis

5 结论

本文设计了一种适用于大负载的钢丝绳减震器,并将相应的组件以及减震器进行有限元建模,对该结构进行了静力学分析和模态分析。分析结果表明,在120 kg 负载的情况下,最大的变形量为3 mm,最大

应力为 34.3 MPa, 实际模态的振型频率为 9.81 Hz, 以上参数都满足指标需求。利用拉伸试验计算刚度为结构组件仿真提供更加真实可靠的依据, 同时验证该减震器适用于大负载, 为以后设计提供了一定参考价值。

参考文献:

- [1] 张洪伟, 徐钰蕾, 谭淞年, 等. 长焦红外相机的减振系统设计[J]. 红外技术, 2016, **38**(8): 643-647.
ZHANG Hongwei, XU Yulei, TAN Songnian, et al. Design of damping system for long focus infrared camera [J]. *Infrared Technology*, 2016, **38**(8): 643-647
- [2] 杨剑锋, 徐振邦, 刘宏伟, 等. 光学有效载荷在轨隔振器的设计[J]. 光学精密工程, 2014, **22**(12): 3294-3302.
YANG Jianfeng, XU Zhenbang, LIU Hongwei, et al. Design of optical payload on orbit isolator [J]. *Optical Precision Engineering*, 2014, **22**(12): 3294-3302.
- [3] 王忠素, 吴清文, 郭权峰, 等. 空间光学载荷探测器组件抗冲击隔振设计[J]. 光学精密工程, 2017, **25**(8): 2098-2105.
WANG Zhongsu, WU Qingwen, GUO Quanfeng, et al. Anti shock and vibration isolation design of space optical load detector assembly[J]. *Optical Precision Engineering*, 2017, **25**(8): 2098-2105.
- [4] 万叶青, 范立民, 齐煜. 钢丝绳隔振器非线性特性分析[J]. 振动与冲击, 2007, **26**(7): 46-49.
WAN Yeqing, FAN Limin, QI Yu. Nonlinear characteristic analysis of wire rope isolator [J]. *Vibration and Shock*, 2007, **26**(7): 46-49.
- [5] 张春辉, 卢凯田, 张磊, 等. 新型钢丝绳隔振器力学性能试验与仿真研究[J]. 振动与冲击, 2021, **40**(16): 213-219.
ZHANG Chunhui, LU Kaitian, ZHANG Lei, et al. Mechanical performance test and simulation study of new wire rope isolator[J]. *Vibration and Shock*, 2021, **40**(16): 213-219.
- [6] 王平. 关于核电站中带钢丝绳减震器的风机的抗震性能研究[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2021, **39**(2): 83-87.
WANG Ping. Research on seismic performance of fans with wire rope dampers in nuclear power plants [J]. *Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition*, 2021, **39**(2): 83-87.
- [7] 班书昊, 李晓艳, 蒋学东, 等. 钢丝绳隔振器的非线性动力学模型[J]. 力学与实践, 2012, **34**(1): 66-69.
BAN Shuhao, LI Xiaoyan, JIANG Xuedong, et al. Nonlinear dynamic model of wire rope isolator[J]. *Mechanics and Practice*, 2012, **34**(1): 66-69.
- [8] 张春辉, 卢凯田, 张磊, 等. 钢丝绳隔振器的力学性能研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2020, **41**(3): 231-236.
ZHANG Chunhui, LU Kaitian, ZHANG Lei, et al. A review of research on mechanical properties of wire rope vibration isolators[J]. *Journal of Weapon Equipment Engineering*, 2020, **41**(3): 231-236.
- [9] 谭淞年, 李全超, 张洪伟, 等. 某航空光电稳定平台方位框架设计和分析[J]. 应用光学, 2016, **37**(3): 327-331.
TAN Songnian, LI Quanchao, ZHANG Hongwei, et al. Design and analysis of azimuth frame of an aviation optoelectronic stabilization platform[J]. *Applied Optics*, 2016, **37**(3): 327-331.
- [10] 李全超, 谭淞年, 李蕾, 等. 某红外相机稳定平台框架结构设计与分析[J]. 红外技术, 2016, **38**(9): 728-732.
LI Quanchao, TAN Songnian, LI Lei, et al. Design and analysis of the frame structure of an infrared camera stabilization platform[J]. *Infrared Technology*, 2016, **38**(9): 728-732.