

星载连接座的优化仿真设计*

OPTIMAL SIMULATION DESIGN OF SPACEBORNE CONNECTOR

于成月^{**1 2} 刘波^{***1} 汪纯鹏¹ 薛闯¹ 安明鑫¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2. 中国科学院大学, 北京 100049)

YU ChengYue^{1 2} LIU Bo¹ WANG ChunPeng¹ XUE Chuang¹ AN MingXin¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

(2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

摘要 在对航天卫星的星载连接座的设计研究中,提出一种联合优化方法,为了降低星载连接座螺栓轴力过大的问题,提出一种以螺栓轴力方差为目标函数及约束条件的自由尺寸优化数学模型,应用 OptiStruct 优化模块进行了优化仿真,对优化前后的螺栓受载情况进行了对比分析,并对优化迭代过程进行了详细阐述;在优化模型基础上,对支撑板进行尺寸优化设计。结果表明,通过所提出的数学模型进行优化后,螺栓的轴力明显降低,满足预期要求;优化目标在迭代过程不同阶段中受到的影响因素不同;通过尺寸优化设计,可以使结构基频提高,其优化方法为螺栓强度优化及卫星的结构设计提供了参考。

关键词 星载连接座 自由尺寸优化 尺寸优化 螺栓强度 优化数学模型

中图分类号 V411.8

Abstract In the design and research on the spaceborne connector of aerospace satellites, a joint optimization method is proposed. In order to reduce the problem of excessive bolt axial force of the spaceborne connector, a method with the variance of the bolt axial force as the objective function and constraint conditions is proposed. Free size optimization mathematical model, using OptiStruct optimization module for optimization simulation, a comparative analysis of the bolt loading before and after optimization, and a detailed description of the optimization iteration process; based on the optimization model, the size of the support plate is optimized design. The results show that after optimization by the proposed mathematical model, the axial force of the bolt is significantly reduced, which meets the expected requirements; The optimization target is affected by different factors in different stages of the iterative process; The structural fundamental frequency can be increased by optimizing the design. The optimization method provides a reference for the optimization of bolt strength and the structural design of spacecraft.

Key words Spaceborne connector; Free size optimization; Size optimization; Bolt strength; Optimal mathematical model

Corresponding author: LIU BO, E-mail: lb.mems@aliyun.com, Tel: +86-431-86708693

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No.11903034).

Manuscript received 20210126, in revised from 20210227.

引言

在卫星结构设计中,通用的连接方式主要有螺栓连接、胶接、胶螺混合连接^[1-2]。根据实际情况需要选择合适的连接方式。螺栓连接在卫星与发射平台之间的连接十分普及,但是螺栓强度将直接影响整个卫星的安全性能^[3]。在工程中必须要对螺栓的强度进行重点

分析,从而达到设计要求。同时为了提高结构的性能,优化设计的应用具有重要意义。

对于卫星结构的优化,许多学者做了大量研究。苏若斌等^[4]针对卫星复合材料桁架结构,提出一种多级优化设计方法,该方法能够减缩优化问题的求解规模,提高了解算精度,同时使结构刚度、强度等综合最优。螺栓的强度分析也已经有了较多的研究^[5-7],通

* 20210126 收到初稿,20210227 收到修改稿。国家自然科学基金项目(11903034)资助。

** 于成月,男,1996年4月出生,山东聊城人,汉族,中科院长春光机所硕士研究生,主要研究方向为飞行器结构设计及有限元仿真分析。

*** 刘波(通信作者),男,1977年7月出生,吉林长春人,汉族,中科院长春光机所副研究员,硕士生导师,博士,主要研究方向为航天器结构设计。

常, 螺栓孔的应力集中是导致结构破坏的原因, 王增山等^[8]利用 Ansys 软件对机翼接头进行强度分析, 并对螺栓孔的应力集中问题进行研究, 通过对接头的应力分布规律改进了接头模型, 有效地降低了螺栓孔的应力集中; 螺栓本身结构的改进, 是降低螺栓应力的有效方法, 常瑜等^[9]针对螺纹根部存在明显应力集中的问题, 应用有限元分析软件对螺栓进行强度计算分析, 通过增加卸荷槽和螺纹锥角, 实现了对螺栓的优化设计; 通过对螺栓位置的布局设计, 可以有效的降低螺栓强度, 胡朝辉等^[10]采用基于拓扑计算的高强度螺栓优化方法准确地确定零件中螺栓的位置, 实现了螺栓强度的优化。目前, 对于螺栓强度分析的优化设计, 还有待深入分析和研究。

本文提出联合优化方法, 首先基于螺栓轴力的自由尺寸优化方法, 建立某卫星的星载连接座的有限元模型及优化数学模型^[11], 并应用 OptiStruct 优化模块, 完成基于螺栓强度的星载连接座底板的自由尺寸优化设计; 接着在此基础上完成支撑板的尺寸优化设计。优化后的螺栓轴力降低, 结构基频提升, 其优化方法为螺栓强度优化问题及卫星结构设计提供了参考。

1 尺寸优化理论

尺寸优化是最经典的优化技术, 用于详细设计的尺寸优化技术, 能够确定结构的具体尺寸和参数; 用于概念设计的自由尺寸优化, 其适用范围是板壳结构, 其优化算法同拓扑优化相类似。在自由尺寸优化中, 设计空间的每个单元的厚度作为一个独立的设计变量, 每一个单元都会有不同厚度的尺寸。

设计灵敏度是设计响应对设计变量的偏导数, 基于有限元静力平衡方程

$$KU = P \quad (1)$$

式中, K 为刚度矩阵; U 为位移矢量; P 为载荷矢量。

对式(1)中设计变量 X 求偏导数

$$\frac{\partial K}{\partial X}U + K \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial P}{\partial X} \quad (2)$$

对位移矢量 U 求偏导数

$$\frac{\partial U}{\partial X} = K^{-1} \left(\frac{\partial P}{\partial X} - \frac{\partial K}{\partial X}U \right) \quad (3)$$

在有限元中, 设计响应是位移矢量 U 的函数

$$T = Q^T U \quad (4)$$

对于自由尺寸优化, 设计响应对设计变量 X 的偏导数为

$$\frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\partial Q^T}{\partial X}U + Q^T K^{-1} \left(\frac{\partial P}{\partial X} - \frac{\partial K}{\partial X}U \right) \quad (5)$$

在 OptiStruct 优化中, 采用数学规划的方法, 通过求解灵敏度构造近似模型, 采用小步长迭代找到最

优解。

本文提出的联合优化方法, 整个优化过程分为两步, 首先是结合应力、体积分数等要求, 以螺栓轴力方差为目标函数及约束条件的自由尺寸优化设计; 接着是在以第一次优化结果的基础上, 以基频最大为目标进行尺寸优化设计, 其流程如图 1 所示。

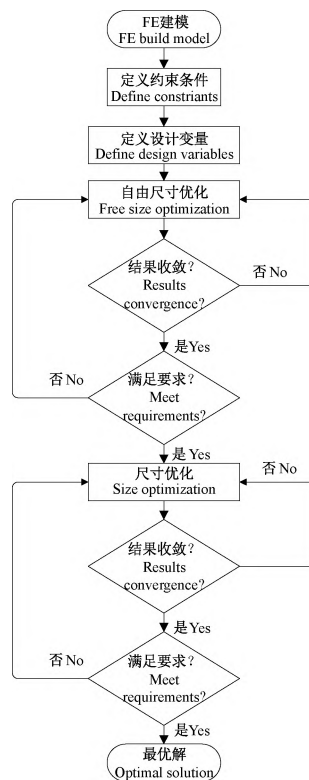


图 1 优化流程图

Fig.1 Optimization flow chart

2 设计实例

本文以某卫星的星载连接座为例, 应用上述优化方法, 首先建立基于螺栓强度的自由尺寸优化数学模型, 通过改变底板的厚度, 改变结构刚度, 使螺栓轴力降低, 实现螺栓强度的优化分析; 在优化模型基础上, 基于基频最大目标为实现支撑板的尺寸优化。

2.1 星载连接座三维模型

星载连接座作为连接空间锁紧筒和卫星平台安装座的基础结构, 其底板共有三行五列 15 个螺栓, 底板上方设有五个初始厚度为 12 mm 的支撑板, 支撑板根据力的传递路径已经做了减重设计, 底板的初始厚度为 20 mm, 星载连接座三维模型如图 2、图 3 所示。

2.2 星载连接座有限元模型

模型的准确性直接决定着计算结果的可靠性, 为了节省计算时间, 网格的大小设定给了充分考虑, 底板和螺栓安装座单元尺寸设置为 2 mm, 其余部件的单元尺寸设置为 6 mm, 底板及螺栓安装座简化为壳单元,

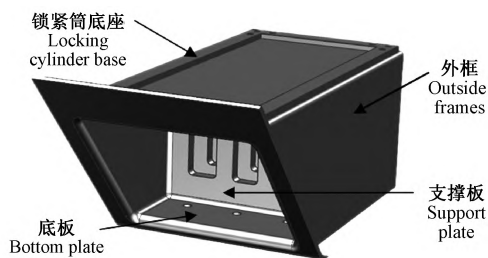


图 2 星载连接座三维模型 1

Fig.2 Three-dimensional 1 model of spaceborne connector

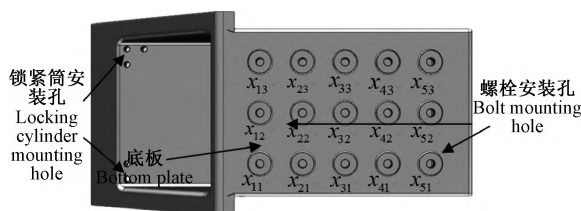


图 3 星载连接座三维模型 2

Fig.3 Three-dimensional 2 model of spaceborne connector

向下偏置中性面,目的是使底板向下空间内进行寻优。螺栓一端六个自由度完全固定,各部件之间的连接采用共节点处理,保证了单元节点的连续性。空间锁紧筒简化为质量点,应用 RBE3 单元将其质量分配到外框的四角。通过对整个卫星施加纵向 $10g$ 和横向 $5g$ 的加速度后,分析出星载连接座上的受力情况,质量点上受到水平向左大小为 $9\ 800\ \text{kN}$ 的载荷,有限元模型如图 4 所示,整个连接座及螺栓的材料为钛合金。

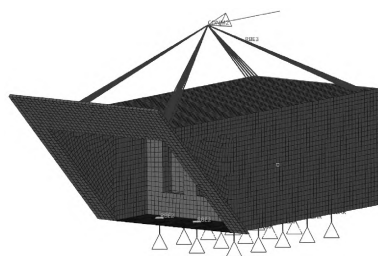


图 4 星载连接座有限元模型

Fig.4 Finite element model of spaceborne connector

2.3 自由尺寸优化

2.3.1 优化数学模型

星载连接座的底板作为自由尺寸的优化部件,进行网格细分,每个单元的厚度作为优化设计变量,自由尺寸优化中,首先给定底板的初始厚度,再给定寻优厚度的范围,进行优化迭代。其设计变量如表 1 所示。

表 1 底板厚度寻优变量

Tab.1 Optimum variable of bottom plate thickness

单元厚度 Element thickness/mm	值 Value/mm
最小值 Min	0.3
最大值 Max	30
初始值 Initial	20

自由尺寸优化变量设定后,为了确保轻量化原则,将底板的体积分数作为约束条件。根据性能指标要求,底板的应力不能超过设定值,保证目标函数在指定范围内进行寻优。

相距载荷作用点的距离不同以及位置不同,螺栓所受到的力的方向、大小不同,载荷作用点左侧螺栓承受压力,作用点右侧螺栓承受拉力。本文首先将每列螺栓的轴力作为一组,建立每列螺栓轴力方差的函数方程,作为优化约束条件及目标响应。图 3 中表明了每个螺栓的 ID 号,每列螺栓轴力方差函数方程如下

$$\bar{y}_i = (x_{i1} + x_{i2} + x_{i3}) / 3 \quad i = 1\ 2\ 3\ 4\ 5 \quad (6)$$

$$\delta_i^2 = [(x_{i1} - \bar{y}_i)^2 + (x_{i2} - \bar{y}_i)^2 + (x_{i3} - \bar{y}_i)^2] / 3$$

$$i = 1\ 2\ 3\ 4 \quad (7)$$

其中, i 表示螺栓列数; x_{i1} 、 x_{i2} 、 x_{i3} 分别表示每列螺栓的轴力; $\bar{y}_i$ 表示每列螺栓轴力的平均值; δ_i^2 表示每列螺栓轴力的方差。

以第五列方差方程作为目标函数,其余各列方差作为约束,要求每列螺栓之间轴向力载荷相差小于 10%,本文取螺栓轴力最大一列的差值近似值为参考,星载连接座的优化过程数学模型为

$$f(Y) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (8)$$

$$F(X, \bar{y}_i) = [(x_{i1} - \bar{y}_i)^2 + (x_{i2} - \bar{y}_i)^2 + (x_{i3} - \bar{y}_i)^2] / 3$$

$$i = 1\ 2\ 3\ 4\ 5 \quad (9)$$

$$0 \leq F(X, \bar{y}_i) \leq 160000 \quad i = 1\ 2\ 3\ 4 \quad (10)$$

$$0.1 \leq V \leq 0.9 \quad (11)$$

$$S \leq 200\ \text{MPa} \quad (12)$$

式中, $Y = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示底板单元厚度; $F(X, \bar{y}_i)$ 表示螺栓轴力方差, $F(X, \bar{y}_5)$ 作为目标函数,求取最小值;式(10)表示前四列螺栓的轴向力方差,作为约束条件; V 表示底板的体积分数; S 表示底板的应力。

2.3.2 优化结果分析

首先对星载连接座进行初步有限元分析,利用有限元优化软件 Optistruct 求解器进行运算,得出静力学结果。星载连接座整体受力产生弯曲载荷,表 2 可以看出螺栓的轴力与上文阐述相同,第一、二、三列螺栓受到压应力,第四、五列螺栓受到拉应力,距离作用点越远,螺栓轴力越大,并且中间一行螺栓的轴向力远小于两侧螺栓的轴向力。因为螺栓安装座采用 RBE2 单元与螺栓连接,刚性大,所以导致最大应力出现在两者连接的单元,此单元应力可以忽略。

建立优化数学模型,进行优化求解,经过 177 步迭代优化,从优化结果来看,星载连接座的约束条件已经全部满足,优化后的底板厚度云图见图 5。随着底板上单元厚度在 $0.3\ \text{mm} \sim 30\ \text{mm}$ 的范围内改变,上下两行螺栓孔周围的单元厚度变化明显,结构刚度发生改变,螺栓轴向力也随之发生改变,为了承担上下两行螺栓

因为底板厚度的降低导致轴力的增加,中间一行螺栓周围单元厚度增加,同时螺栓轴向力增加,实现每列螺栓轴力的均载分布。优化前后螺栓轴力对比如表 2 所示。

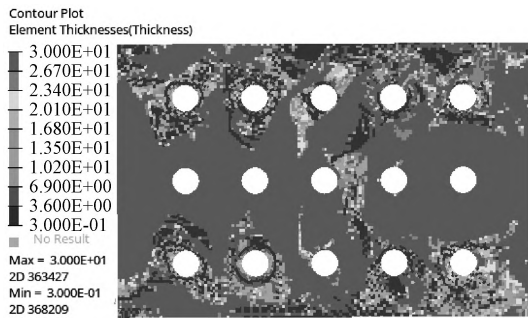


图 5 底板厚度

Fig.5 Thickness of bottom plate

表 2 螺栓轴力对比

Tab.2 Bolt axial force comparison

螺栓 Bolt ID	优化前 Before optimization /N	优化后 Optimized /N
x_{11}	-3 900	-2 850
x_{12}	-1 300	-2 840
x_{13}	-3 880	-2 850
x_{21}	-2 130	-1 750
x_{22}	-977	-1 750
x_{23}	-2 130	-1 750
x_{31}	-385	-559
x_{32}	-241	-559
x_{33}	-392	-562
x_{41}	1 300	817
x_{42}	566	816
x_{43}	1 290	818
x_{51}	4 430	4 340
x_{52}	3 320	4 340
x_{53}	4 420	4 340

对比优化前的结果,优化后第一、三行螺栓轴力已经明显减小,第二行螺栓轴力增加到一、三两行的数值,同时第三列螺栓轴力相对增加,说明承载分配比例增加,并且每列螺栓的轴力大小相差小于 10%。

其优化目标函数、约束条件的迭代曲线如图 6 所示。

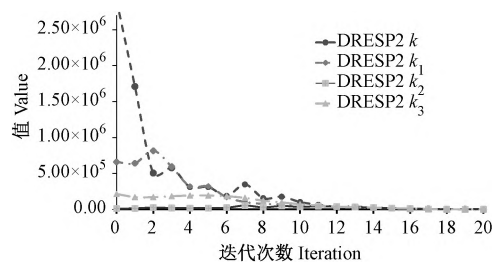


图 6 前四列螺栓方差迭代曲线

Fig.6 The first four columns of bolt variance iteration curve

图 6 表示了前四列螺栓轴力方差作为约束条件的迭代优化过程,迭代步数只取前 20 步,之后经过每步迭代后螺栓方差的变化很小,所以在图中未给出。 k 、 k_1 、 k_2 、 k_3 分别代表了第一、二、三、四列螺栓轴力的方差函数方程,可以看出,方程的值随着迭代步数的不断增加而减小,最后趋近于 0,说明最终每列螺栓之间的轴力差距满足约束条件。第三列螺栓方差 k_2 的值一直很小,说明此列螺栓的轴力差距远小于其它几列,并且结合表 2 也可知此结论。

图 7 表示底板体积分数迭代曲线,在前 20 步迭代优化过程中,体积分数变化非常大,螺栓轴力方差约束的剧烈变化也出现在此范围内,之后趋于平稳,其迭代曲线走向趋势的转折点与图 8 基本吻合。说明可以通过适当的降低体积分数,得出最优的目标函数。

在图 8 第五列轴力方差的目标函数迭代曲线中,前期迭代曲线的变化主要是因为前四列螺栓轴力方差的约束以及底板体积分数的影响,中期迭代曲线趋于平稳,后期迭代曲线主要受到体积分数的降低的影响。

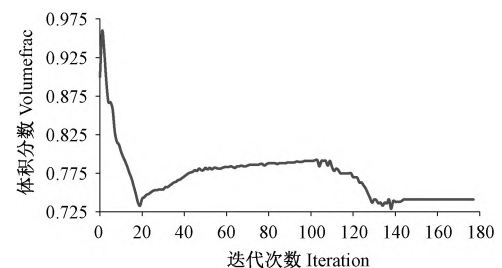


图 7 底板体积分数迭代曲线

Fig.7 Iterative curve of floor volume fraction

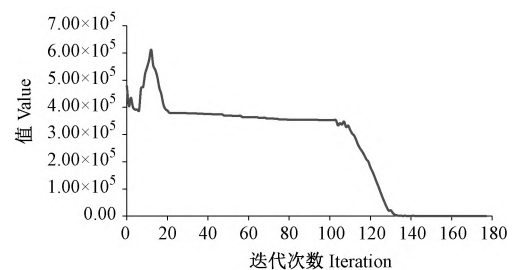


图 8 目标函数迭代曲线

Fig.8 Objective function iteration curve

为了探究基于横向螺栓轴力方差对螺栓轴向力的影响,再次进行优化,将每列螺栓的轴向力方差全部作为约束条件,横向螺栓的轴力方差优化作为目标函数,经过 138 次迭代后,其螺栓轴力如表 3 所示。

表 3 横向优化螺栓轴向力

Tab.3 Lateral optimization of bolt axial force

螺栓 Bolt ID	轴力 Axial force/N	螺栓 Bolt ID	轴力 Axial force/N	螺栓 Bolt ID	轴力 Axial force/N
x_{11}	-2 920	x_{23}	-1 730	x_{42}	907
x_{12}	-2 910	x_{31}	-515	x_{43}	919
x_{13}	-2 920	x_{32}	-504	x_{51}	4 240
x_{21}	-1 730	x_{33}	-517	x_{52}	4 230
x_{22}	-1 720	x_{41}	920	x_{53}	4 240

从表 3 可以看出,与第一次优化后相比,螺栓轴力差别很小,其中,第四列螺栓承担更多的载荷抵消第五列螺栓轴力的降低,因为第五列螺栓是所有螺栓中轴力最大的,所以轴力少量的降低是十分有必要。

2.4 尺寸优化

根据上述得到的自由尺寸优化结果重新建立模型对星载连接座进一步做尺寸优化设计。将支撑板改为壳单元建模,其厚度作为优化设计变量,最大应力不超过 200 MPa,以基频最大为目标,进行尺寸优化,支撑板依次标号为 1~5 号,图 9 表示设计变量与目标函数的关系图。

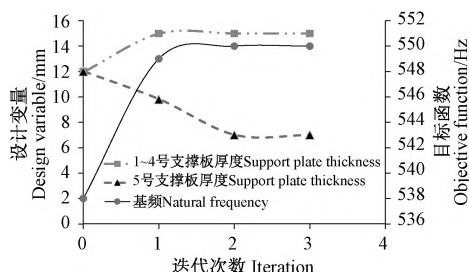


图 9 目标函数与设计变量的关系

Fig.9 The relationship between objective function and design variables

可以看出,1~4 号支撑板的厚度变化一致,随着迭代次数的增加,从初始值 12 mm 逐渐增加到 15 mm,其厚度对基频的影响非常明显,呈正相关;反之,5 号支撑板厚度从初始值 12 mm 减小到 7 mm,其影响呈负相关。通过对支撑板的尺寸优化,星载连接座的结构基频得到改善。

3 结论

本论文主要研究了星载连接座的优化设计方法,在卫星结构设计中,通过建立合理的数学模型可以在改变少数的结构下完成螺栓强度的优化设计以及结构性能的改善,此论文为此提供了参考性的优化方法。从文中的结果可以得出以下结论:

1) 以螺栓强度为研究点,提出一种以螺栓轴力方差为目标函数及约束条件的自由尺寸优化数学模型,经过首次 177 步优化迭代后,一、三两行的螺栓的轴力降低了大约 17.8%~37.2%,每列螺栓轴力基本趋于

一致,满足预期要求。

2) 底板的体积分数经过迭代后是初始体积的 73.5%,实现轻量化,经过横向螺栓轴力优化迭代后,最大螺栓轴力有所降低。

3) 通过对支撑板的尺寸优化,实现了结构基频的优化,使星载连接座的基频得到提升。

参考文献 (References)

- [1] 许焕宾,施丽铭,肖伟,等.薄壁密封舱大承载胶接结构设计[J].航天器工程,2016,25(5):45-50.
XU HuanBin, SHI LiMing, XIAO Wei, et al. Design of large load bonding structure of sealed cabin with thin wall [J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(5): 45-50 (In Chinese).
- [2] 张胜,何宇廷,张腾,等.飞机典型结构原始疲劳质量评估[J].机械强度,2016,38(3):480-484.
ZHANG Sheng, HE YuTing, ZHANG Teng, et al. Assessment on initial fatigue quality of aircraft typical connected structure [J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 25(5): 45-50 (In Chinese).
- [3] 杨新峰,张晓敏,张立华.模块化卫星的多螺栓连接分析[J].航天器工程,2014,23(1):41-46.
YANG XinFeng, ZHANG XiaoMin, ZHANG LiHua. Multi-bolt connection analysis for a modular satellite [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(1): 41-46 (In Chinese).
- [4] 苏若斌,陶炯鸣,孔祥森.卫星复合材料桁架结构多级优化设计方法[J].航天器工程,2016,25(1):40-45.
SU RuoBin, TAO JiongMing, KONG XiangShen. Multilevel optimization method of composite truss structure for satellite [J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(1): 40-45 (In Chinese).
- [5] 李晓峰,孙瑞,颜楷晨.标准化动车组设备舱螺栓强度分析方法[J].大连交通大学学报,2020,41(1):29-34.
LI XiaoFeng, SUN Rui, YAN KaiChen. Study on strength analysis method of bolts in standardized EMU equipment bay [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2020, 41(1): 29-34 (In Chinese).
- [6] 刘仁宇,何宇廷,杜金强,等.基于有限元建模的某飞机连接件螺栓头断裂分析[J].机械工程材料,2010,34(8):79-82.
LIU RenYu, HE YuTing, DU JinQing, et al. Failure analysis for bolt head of an aircraft connector based on finite element modeling [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010, 34(8): 79-82 (In Chinese).
- [7] 张宏伟,徐春龙,武耀昱.飞机机身螺栓连接多钉载荷合理分配研究[J].计算机仿真,2019,36(6):83-86.
ZHANG HongWei, XU ChunLong, WU YaoGang. Research on pin load rational distribution of multi-bolt-jointed plates for aircraft fuselage [J]. Computer Simulation, 2019, 36(6): 83-86 (In Chinese).
- [8] 王增山,虞伟建,王开福.基于 Ansys 的机翼接头强度分析及优化设计[J].机械设计与制造,2009(7):47-49.
WANG ZengShan, YU JianWei, WANG KaiFu. Strength analysis and optimization design for wing joint based on ANSYS [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(7): 47-49 (In Chinese).

- [9] 常 瑜,黄维勇,陈 峰,等.拉伸机预紧螺栓强度分析及优化设计[J].重型机械,2016(1):52-55.
CHANG Yu, HUANG WeiYong, CHEN Feng, et al. Intensity analysis and optimum design of strengthener pre-stress bolt [J]. Heavy Machinery, 2016(1): 52-55(In Chinese).
- [10] 胡朝辉,张 健,李光耀,等.基于区间分隔的卡车车架轻量化设计[J].中国机械工程,2016,27(8):1130-1135.
HU ZhaoHui, ZHANG Jian, LI GuangYao, et al. Lightweight design of a truck frame based on intervals [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(8): 1130-1135(In Chinese).
- [11] 冯琨程,高九州.某型系留无人机复合材料机体结构优化设计与分析[J].玻璃钢/复合材料,2018(10):56-61.
FENG KunCheng, GAO JiuZhou. Optimization design and analysis of composite airframe oftethered hovering unmanned aerial vehicle [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018 (10): 56-61 (In Chinese).