

离心状态下吊篮系统有限元模拟

靳凡, 刘平艳, 许恒, 徐兵

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: **目的** 研究吊篮在离心载荷下的力学行为,尤其是强度和刚度性能。**方法** 通过精细化模拟吊篮系统各部件间的接触关系,在对某离心机吊篮初始设计方案进行模拟分析的基础上,开展吊篮的强度性能研究,对吊篮结构的整体布局、主要部件强度考核和降低局部应力集中等多方面开展计算分析。**结果** 在指定工况下吊耳与配重板之间的局部接触导致的应力集中,致使安全系数达不到强度要求。**结论** 提出改进措施,改进设计后的吊篮结构强度得到了较大的提高,满足吊篮设计的强度要求。

关键词: 离心机; 吊篮; 有限元; 强度设计

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.05.026

中图分类号: TJ05; V416 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)05-0145-06

Finite element analysis of centrifuge baskets in the centrifugal state

JIN Fan, LIU Ping-yan, XU Heng, XU Bing

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: Objective To study mechanical behaviors of the suspended basket, especially the strength and stiffness performance under the centrifugal loading. **Methods** By precisely modelling the contact relations between parts of the basket, the present paper established a finite element model based on an initial design of centrifuge baskets. Special emphasis was placed on a systematic study of the strength property of centrifuge baskets. Calculation and analysis were performed to check the overall structure, the strength of key parts and the reduction of local stress concentration. **Results** Certain stress concentration existed due to local contact between the lifting lug and the bob-weight, leading to the result that the safety parameters failed to meet requirement on strength. **Conclusion** An improved design is provided with higher structural strength, which satisfies the corresponding mechanical strength requirements.

KEY WORDS: centrifuge; basket; finite element analysis; strength design

作为一种集机械、力学、控制、土木和生物化学等多学科于一身的重要的科学仪器设备^[1-2],离心机被广泛应用于岩土力学研究^[3-5]、航天设备实验、仪器例行试验^[6]和航天员超重训练等方面^[7-8]。在离心机的结构

设计中,通常采用经验结构,设计过程往往经过反复的设计—分析—改进多个循环,直到所设计的结构刚度和强度满足才能够完成^[9]。

吊篮是离心机的重要承载结构,是连接试件与离

收稿日期: 2015-07-22; 修订日期: 2015-08-12

Received: 2015-07-22; Revised: 2015-08-12

作者简介: 靳凡(1984—),男,河南人,博士,助理研究员,主要从事结构静力学分析研究。

Biography: JIN Fan (1984—), Male, from Henan, Doctor, Assistant researcher, Research focus: structure statics.

离心机转臂的纽带,它位于离心机最大的加速度场中,旋转时产生的巨大离心力是离心机主要载荷之一,其结构直接影响离心机的规模和运行工况。在保证吊篮刚度、强度的前提下,采用结构优化和拓扑优化技术可以有效减轻吊篮质量,降低离心机功耗并提高离心机容量,在更大程度上实现结构最佳功能和最小成本的结合^[10-12]。

作为一种有效的数值计算方法,有限元法能够较为真实地模拟离心机实际工作状态,计算分析结构在各种工况下的受力和变形情况,以校核各部件的刚度和强度等力学指标,有限元计算结果能够为产品设计和性能分析提供可靠依据。有限元静力分析技术已经成功应用于60g-t土工离心机^[13]和TLJ-500土工离心机^[14]的整体设计中,以及500 t离心机吊篮设计中^[15]。

由于吊篮系统由多个部件通过接触相互连接,在对吊篮进行数值建模的过程中,需要考虑各部件之间的连接特点,因此吊篮系统的力学性能分析重点在于考察各部件间的多重接触关系。文中在对某离心机吊篮初始设计方案进行模拟分析的基础上,对吊篮结构的整体布局、各部件强度考核和降低局部应力集中等多方面开展力学分析,并提出相应的改进措施。

1 计算模型

1.1 结构简介

离心机吊篮系统结构如图1所示,包括带有配重板和无配重板两种形式。在带有配重板的结构中,配重块置于配重板上,后者搭接在吊耳内侧壁上;在无配重板的结构中,配重块直接置于底板上,二者通过连接销轴与吊耳连接。离心机吊篮系统包括吊耳、吊篮销轴、底板连接销、直线轴承、底板、配重块、配重板和水平锁定销轴等部件,它们之间一般通过接触关系连接。因此吊篮系统的静力学性能分析重点在于考察各部件间的多重接触关系。

在初始设计中,吊耳和吊篮底板采用铝材料,其密度为2.7 t/m³,弹性模量为70 GPa,泊松比为0.33,屈服强度为275 MPa。吊篮销轴、轴套、水平锁定销轴、直线轴承和配重板采用钢材料,其密度为7.8 t/m³,弹性模量为200 GPa,泊松比为0.3,屈服强度为345 MPa。

1.2 载荷条件

吊篮距离旋转中心的有效半径为2 m,带有配重板时,吊篮系统的最大有效负载为71 kg;无配重板的

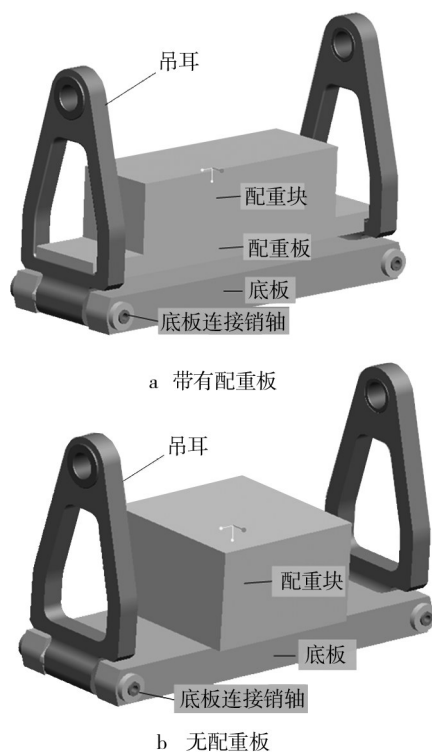


图1 吊篮系统结构

Fig.1 Structures of the centrifuge baskets a: with bob-weight; b: without bob-weight

最大有效负载为20 kg。吊篮系统的工作状态分为以下两种工况。

1.2.1 快加速过程(工况1)

快加速过程中的最大离心加速度为12g ($g=9.8 \text{ m/s}^2$),加速度变化率为10 g/s,利用公式:

$$\omega = \sqrt{a/r} \quad (1)$$

$$\frac{da}{dt} = \frac{d(\omega^2 r)}{dt} = 2\omega r \frac{d\omega}{dt} = 2\omega \varepsilon \quad (2)$$

式中: r 为旋转半径,m; ω 为角速度,rad/s; a 为最大加速度, m/s^2 ; ε 为角加速度, rad/s^2 。将相应的数据代入公式(1),(2),可得该工况下吊篮系统的角速度7.668 rad/s,角加速度3.195 rad/s²。

1.2.2 恒加速过程(工况2)

在恒加速过程中(工况2)的最大离心过载为50g,利用公式(1)可算出吊篮系统工作时的角速度为15.652 rad/s。

1.3 有限元模型

快加速过程中,配重块与底板直接相联结;恒加速过程中,配重块与配重板连接,而配重板置于吊耳内侧边上。依照结构的对称性采用半模分析。采用Abaqus软件建立了吊篮系统的三维有限元模型,运用

六面体一阶单元 C3D8 离散,如图 2 所示。轴套与吊耳、直线轴承内外圈、以及底板连接销和圆螺母之间均采用绑定约束,而吊篮销轴与钢套、吊耳与直线轴承、直线轴承与底板连接销、底板连接销与底板之间为接触关系,各接触面的摩擦系数为 0.1。根据吊篮系统的工作状态,对吊篮销轴模拟件的两个端面采用固支约束,在整体结构的对称面施加对称约束。

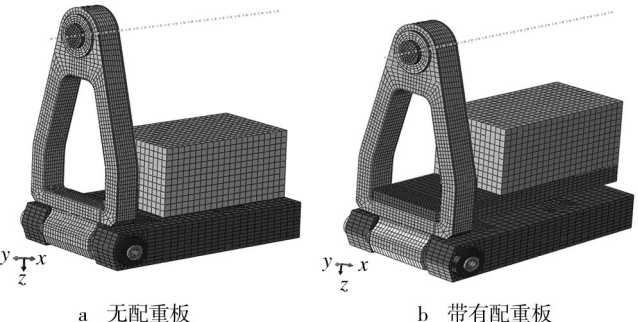


图2 吊篮系统模型
Fig.2 Finite element model of the centrifuge baskets

1.4 结果分析

1.4.1 快加速过程(工况 1)

图 3 给出了工况 1 下时吊篮系统整体及主要部件的等效应力云图。最大等效应力发生在吊耳下端拐角处和直线轴承内圈底部,分别为 13.99、14.7 MPa。吊耳和直线轴承材料分别为铝和钢,屈服强度分别为 275、345 MPa,相应的安全系数分别为 19.66 和 23.47。

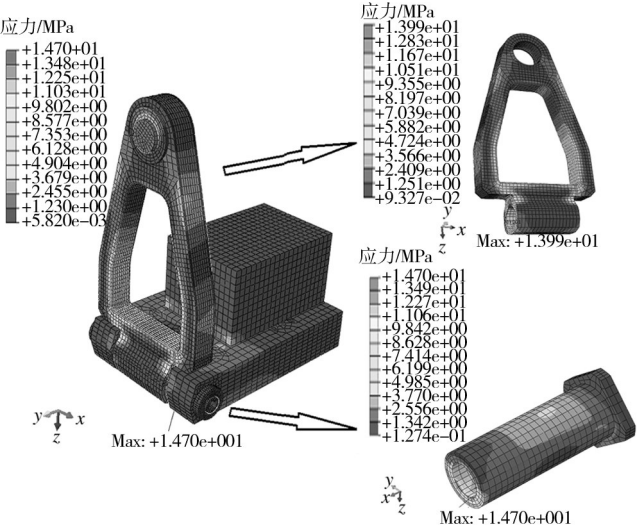


图3 吊篮系统整体和主要部件的等效应力
Fig.3 Equivalent stress distribution of the whole body and the main part of the centrifuge basket

吊篮水平锁定销轴最不利的受力情况即销轴完全承受吊篮系统重力,因此只需分析该状态下的销轴性能。以吊篮销轴为支点,系统重力和水平锁定销轴的剪力产生的弯矩达到平衡。吊篮整体质量(一半)为 22.6 kg,重心据支点距离为 258 mm,水平锁定销轴距离支点 52 mm。利用杠杆原理可求水平锁定销轴承受的剪力、剪应力和安全系数分别为:

$$F = \frac{mgL}{l} = 1099 \text{ N}, \tau = \frac{F}{\pi r^2} = 9.72 \text{ MPa},$$
$$n = \frac{\sigma_s/2}{\tau} = 17.7$$

(3)

1.4.2 恒加速过程(工况 2)

图 4 给出了工况 2 下吊篮整体及主要部件的等效应力云图。最大等效应力发生在吊耳与配重板接触边缘处,为 169 MPa。吊耳为铝材料,屈服强度为 275 MPa,安全系数为 1.63。应力集中是由局部接触造成的,虽然该区域处于完全压缩状态,可有效抑制断裂破坏,但安全系数达不到 2,不满足设计的强度要求,具体结果详见表 1。

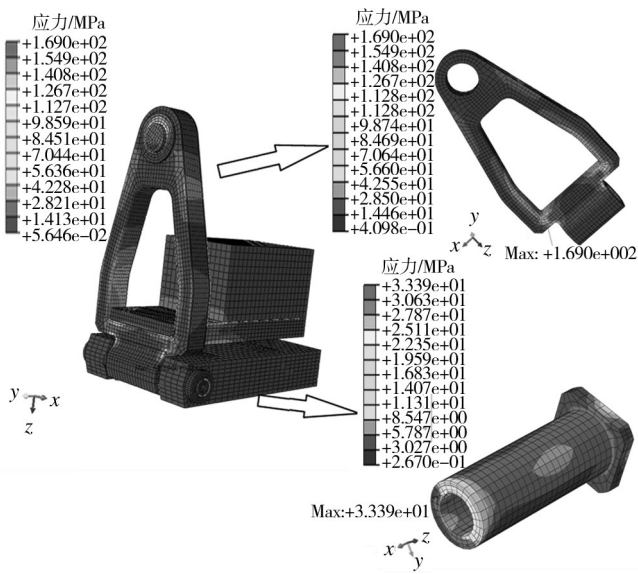


图4 吊篮系统整体和主要部件的等效应力
Fig.4 Equivalent stress distribution of the whole body and the main part of the centrifuge basket

如前文所述,吊篮水平锁定销轴最不利的受力情况即销轴完全承受吊篮系统重力,因此只需分析该状态下的销轴性能。以吊篮销轴为支点,系统重力和水平锁定销轴的剪力产生的弯矩达到平衡。吊篮整体质量(一半)为 48 kg,重心据支点距离为 231 mm,水平锁定销轴距离支点 52 mm。利用公式(3)可求水平锁定销的剪应力为 18.5 MPa,相应的安全系数为 9.3。

表 1 方案改进前后两种工况计算结果及安全系数

Table 1 Maximum equivalent stress and safety factor in the original and improved designs

工况号	吊耳		直线轴承		水平锁定销轴	
	最大等效应力/MPa	安全系数	最大等效应力/MPa	安全系数	最大等效应力/MPa	安全系数
原方案	1	13.99	19.66	23.47	9.72	17.7
	2	169	1.63	10.33	18.5	9.3
改进后	1	15.42	22.37	22.02	11.3	15.3
	2	134	2.57	9.87	18.48	9.3

2 改进设计方案

按照前面的分析结果,在恒加速过程中,吊耳与配重板之间局部接触导致的应力集中,致使安全系数达不到强度要求。为改善吊耳的承载能力,在不改变几何模型的前提下,建议将吊耳所用的铝材料修改为钢材料,屈服强度从 275 MPa 提升为 345 MPa,从而增大安全系数。基于前文建立的有限元模型,将吊耳材料修改为钢材料,重新进行吊篮系统的静力计算。

2.1 快加速过程(工况 1)

2.1.1 吊篮整体及主要部件的结果分析

图 5 描述了工况 1 吊篮整体及主要部件的等效应力。最大等效应力发生在吊耳下端拐角处和直线轴承内圈底,分别为 15.42,5.67 MPa。吊耳和直线轴承材料为钢,屈服强度为 345 MPa,安全系数为 22,见表 1。

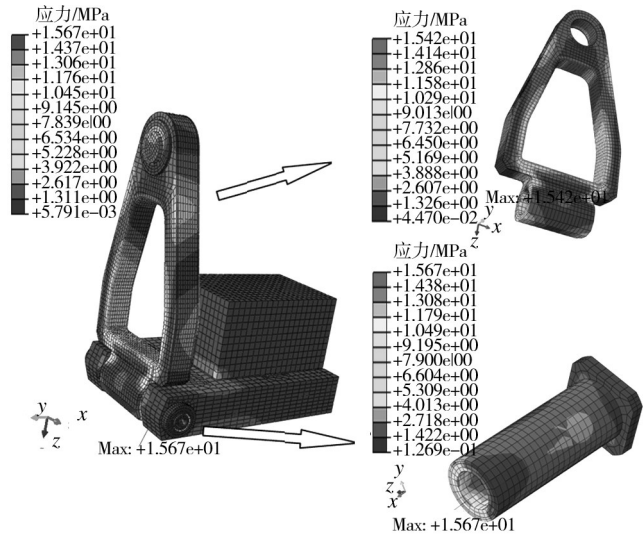


图 5 吊篮系统整体和主要部件的等效应力
Fig.5 Equivalent stress distribution of the whole body and the main part of the centrifuge basket

2.1.2 吊篮水平锁定销轴承载分析

如前文所述,分析吊篮水平锁定销轴完全承受吊

篮系统重力的最不利情况。以吊篮销轴中心为支点,系统重力和水平锁定销轴的剪力产生的弯矩达到平衡。吊篮整体质量(一半)为 28 kg,重心据支点距离为 242.2 mm,水平锁定销轴距离支点 52 mm。利用式(3)可求水平锁定销轴的剪应力 11.3 MPa,安全系数为 15.3。

2.2 恒加速过程(工况 2)

2.2.1 吊篮整体及主要部件的结果分析

按照修改方案,吊耳(两个)的质量增加约 10 kg,为使吊篮整体质量不变,故配重块和配重板质量减轻 10 kg。图 6 为工况 2 下时吊耳和直线轴承的等效应力。最大等效应力发生在吊耳与配重板接触区的边缘处,为 134 MPa。吊耳材料为钢,屈服强度为 345 MPa,安全系数为 2.57,满足强度要求,具体结果见表 1。

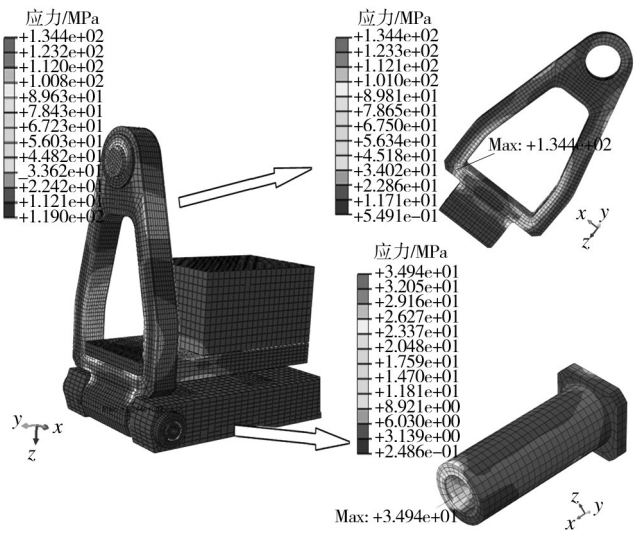


图 6 吊篮系统整体和主要部件的等效应力
Fig.6 Equivalent stress distribution of the whole body and the main part of the centrifuge basket

2.2.2 吊篮水平锁定销轴承载分析

吊篮整体质量(一半)为 48.6 kg,重心据支点距离为 228.1 mm,水平锁定销轴距离支点 52 mm。利用式

(3)可求水平锁定销轴的剪应力 18.48 MPa,安全系数为 9.3。

表 1 给出了设计方案修改前后,两种工况下吊篮系统主要部件的最大等效应力、安全系数。方案修改后,吊耳在工况 2 下出现的局部最大等效应力得到了有效降低,并满足安全系数要求。

3 结论

文中在对某离心机吊篮初始设计方案进行模拟分析的基础上,开展吊篮的强度性能研究,对吊篮结构的整体布局、主要部件强度考核和降低局部应力集中等多方面开展计算分析,提出改进措施。通过分析,可以得到如下结论。

1) 在两种工况下,吊耳上均出现了最大等效应力。

2) 无配重板时,吊耳上最大等效应力是由配重块和底板对吊耳施加的弯矩造成的;存在配重板时,吊耳上最大等效应力是由配重块和配重板对吊耳产生的局部接触造成的。

3) 原方案中,吊耳在工况 2 下的最大等效应力不满足安全系数设计要求;方案修改后,该局部最大等效应力得到有效降低,满足强度要求。

4) 方案修改后,吊篮系统整体及主要部件满足设计强度要求。

参考文献:

- [1] 杨云,金绿松,郭文军,等. 离心机驱动结构回顾与展望[J]. 机械设计与制造工程,2000,29(5):1—3.
YANG Yun, JIN Lv-song, GUO Wen-jun, et al. Review and Prospect on the Driving Structure of Centrifuge[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2000, 29(5): 1—3.
- [2] 冉光斌. 土工离心机及振动台发展综述[J]. 环境技术, 2007, 25(3): 138—144.
RAN Guang-bin. Summarization of Geotechnical Centrifuge and Table Vibrator's Development[J]. Environmental Technology, 2007, 25(3): 138—144.
- [3] CHARLES W W NG. The State-of-the-art Centrifuge Modeling of Geotechnical Problems at HKUST[J]. J Zhejiang Univ-Sci A (Appl Phys & Eng), 2014, 15(1): 1—21.
- [4] 林明. 国内土工离心机及专用试验装置研制的新进展[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(4): 80—84.
LIN Ming. Progress of Geotechnical Centrifuge and Specialized Test Device in China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(4): 80—84.
- [5] 杜延龄. 大型土工离心机基本设计原则[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(6): 10—17.
DU Yan-ling. Fundamental Design Principles of Large Geotechnical Centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(6): 10—17.
- [6] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备—离心机的设计(1)[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(1): 86—101.
JIA Pu-zhao. The Design of a Steady State Acceleration Simulation Test Equipment—centrifuge (1)[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(1): 86—101.
- [7] 陆惠良. 载人离心机及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
LU Hui-liang. Human Centrifuge and Its Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.
- [8] 姚永杰, 司高潮. 当代载人离心机的现状与发展趋势[J]. 空军医学杂志, 2012, 28(1): 60.
YAO Yong-jie, SI Gao-chao. Current Conditions and developing Tendency of the Contemporary Human Centrifuge[J]. Medical Journal of Air Force, 2012, 28(1): 60.
- [9] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备—离心机的设计(13)[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(1): 91—102.
JIA Pu-zhao. The Design of a Steady State Acceleration Simulation Test Equipment—centrifuge (13)[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(1): 91—102.
- [10] 冉光斌, 罗昭宇, 刘小刚, 等. 土工离心机吊篮的设计及优化方法[J]. 机械设计, 2009, 26(11): 68—70.
RAN Guang-bin, LUO Zhao-yu, LIU Xiao-gang, et al. Design and Optimization of the Suspended Basket of Geotechnical Centrifuge[J]. Machine Design, 2009, 26(11): 68—70.
- [11] 李伟, 郝志明. 渐进结构优化在离心机吊篮结构设计中的应用[J]. 计算力学学报, 2011, 28(S1): 122—125.
LI Wei, HAO Zhi-ming. The Application of Evolutionary Structural Optimization in the Design of a Centrifuge Nacelle [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28 (S1): 122—125.
- [12] 陈磊, 洪建忠, 杨永生, 等. 相对变形约束下某离心机吊篮的拓扑优化设计[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(1): 240—243.
CHEN Lei, HONG Jian-zhong, YANG Yong-sheng, et al. Topology Optimization Design of Centrifuge Basket under Relative Deformation Constraint[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(1): 240—243.
- [13] 李心耀, 张明雷, 余绍蓉. 60g-t 土工离心机的设计与应用[R]. 中国国防科学技术报告, GF-A0162846G, 2011.
LI Xin-yao, ZHANG Ming-lei, YU Shao-rong. Design and application of 60g-t geotechnical centrifuge[R]. GF Report, GF-A0162846G, 2011.
- [14] 杨玉明. TLJ-50 土工离心机静力学建模技术[R]. 中国国防

科学技术报告, GF-A0164282G, 2012.

YANG Yu-ming. Statics Modeling Technology of TLJ-500 Geotechnical Centrifuge[R]. GF Report, GF-A0164282G, 2012.

[15] 杨玉明, 范志庚. 500T 土工离心机吊篮强度设计方法研究

[C]//中国航天第八专业信息网交流会. 2010.

YANG Yu-ming, FAN Zhi-geng. Strength Design Method of 500T Geotechnical Centrifuge[C]// China Aerospace Eight Information Network Conference. 2010.

(上接第 144 页)

始模型验算可知, 优化后的耳板较好地改善了应力集中现象, 整体结构强度达到了设计要求。

通过对耳板的优化计算过程可知, 薄板加筋结构局部的应力集中现象不仅仅是局部结构引起, 必须进行认真的分析, 对整体筋板进行合理的布置, 改变应力的传递, 可以明显改善局部应力集中现象。

参考文献:

- [1] 杨玉明. 飞行模拟器工程阶段吊舱强度分析[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 2014.
YANG Yu-ming. Analysis of Engineering Flight Simulator pod stage strength[R]. Mianyang: Institute of Systems Engineering, CAEP, 2014.
- [2] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
LIU Hong-wen. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993.
- [3] GIL Llius, ANDREU Antoni. Integration Methodology of Different Software Tools for Constrained Optimization of Structures[J]. Computers and Structures, 2004, 82: 20—21.
- [4] 陶晶. 机械产品结构优化设计的规则挖掘研究[J]. 制造业自动化, 2013, 35(3): 78—81.
TAO Jing. Research on the Law of Mechanical Product Structure Optimization Design[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(3): 78—81.
- [5] CHRISTOPHER D Eamon, MASOUD Rais Rohani. Intergrated Reliability and Sizing Optimization of a Large Composite Structure[J]. Marine Structures, 2009, 22(2): 50—53.
- [6] KIRSCH U. Two-level Optimization of Prestressed Structures[J]. Engineering Structures, 1997, 19(4): 49—52.
- [7] ERIK Lund. Buckling Topology Optimization of Laminated

Multi-material Composite Shell Structures[J]. Composite Structures, 2009, 91(2): 124—127.

- [8] 康金章. 结构优化设计的两个可行方向法[J]. 固体力学学报, 1982(1): 117—124.
KANG Jin-zhang. Two Feasible Direction Method for Structural Optimization Design[J]. Journal of Solid Mechanics, 1982(1): 117—124.
- [9] ZHANG Y, TAYLOR D. Optimization of Spot-welded Structures[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001, 37(1): 135—139.
- [10] CHEN Yu-hang, ZHOU Shi-wei. Multidjective Topology Optimization for Finite Periodic Structures[J]. Computers and Structures, 2010, 88(11): 806—811.
- [11] 线令希. 关于结构优化设计中的主观信息[J]. 计算结构力学及其应用, 1985(2): 73—77.
XIAN Ling-xi. Subjective Information on Structural Optimization Design[J]. Computational Structural Mechanics and Its Application, 1985(2): 73—77.
- [12] 康金章. 结构布局几何可调的优化设计[J]. 福州大学学报, 1983(2): 1—9.
KANG Jin-zhang. Optimization Design of the Structural Layout Geometry[J]. Journal of Fuzhou University, 1983(2): 1—9.
- [13] KRAVANJA S, ULA T. Cost Optimization of Industrial Steel Building Structures[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(3): 442—450.
- [14] 朱加铭. 优化设计的线性性态模型法[J]. 固体力学学报, 1984(2): 34—40.
ZHU Jia-ming. Optimal Design of Linear State Model[J]. Journal of Solid Mechanics, 1984(2): 34—40.
- [15] KAREH A, KHAYATAZAD M. Ray Optimization for Size and Shape Optimization of Truss Structures[J]. Computers and Structures, 2013, 117: 82—94.