

基于主观经验的俯仰座舱耳板优选设计过程

杨永生, 杨玉明

(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** 通过介绍耳板的结构优化过程, 介绍主观经验判定对结构优化, 特别是优化方向确定的积极作用。**方法** 根据耳板的使用条件, 在初步设计结构及 Ansys 计算结果基础上多次迭代, 凭借设计经验人为作出优选判断, 确定结构改变与优化方向。**结果** 将优化后的结构代入座舱整体模型, 对优化结果进行验算, 证实耳板优化后满足强度和刚度目标, 满足工程实施条件。**结论** 对于像耳板这样结构形式受到诸多限制的, 受力复杂的关键部件, 常用的优化方法难以保证获得满意的、工程切实可行的结果。采用主观预判优选确定优化方向更容易保证得到一种工程可实施结构。

关键词: 离心机; 飞行模拟器; 座舱; 结构优化

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.05.025

中图分类号: TJ05; V416 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)05-0140-05

Engineering-feasible Optimization Process of the Cockpit's Ear-board Based on Subjective Experience

YANG Yong-sheng, YANG Yu-ming

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

ABSTRACT: Objective To demonstrate the positive effect of subject empirical judgment on structure optimization, especially on direction optimization by introduction of the optimization process of ear-board structure. **Methods** Considering of the usage condition of ear-board, repeated iterations were made based on the original design and the calculation results by Ansys, the optimum selection was made subjectively based on design experience to determine structure modification and direction optimization. **Results** The emulation analysis result of the optimized ear-board structure was embedded into the overall cockpit model and the verification of the optimized results showed that the optimized ear-board could meet the requirements of strength and rigidity and satisfy the implementation condition of engineering. **Conclusion** For the ear-board, as an important part whose structure is restricted to many conditions and whose loading is complex, conventional methods are barely effectual to obtain satisfactory and feasible results. The subjective judgment of direction optimization is more likely to guarantee an implementable structure.

KEY WORDS: centrifuge; flight simulator; cockpit; structure optimization

俯仰座舱指用于离心飞行模拟的具有多角度转动自由度的舱体, 由于其在离心场中位置不固定, 承

载大, 且其自身又是主机的负载, 因此, 舱体耳板优化设计十分必要。希望通过优化设计, 寻求质量较轻,

收稿日期: 2015-07-31; 修订日期: 2015-09-05

Received: 2015-07-31; Revised: 2015-09-05

作者简介: 杨永生(1976—), 男, 湖北人, 硕士, 高级工程师, 主要从事非标机械结构设计。

Biography: YANG Yong-sheng(1976—), Male, from Hubei, Master, Senior engineer, Research focus: non-standard structure design.

刚强度能满足使用条件的耳板结构。

1 耳板的具体结构功能

耳板是俯仰座舱骨架关键部件,如图1所示。座舱由滚转框与俯仰舱组成,座舱整体处于15g离心场下,离心力沿固定方向垂直于滚转电机轴线不变,滚转框带着俯仰舱能以 8 rad/s^2 加速转动(转速不计),转动范围为 360° ,其与离心力夹角随之变化;俯仰舱在滚转框内能以 15 rad/s^2 加速转动,转动范围为 360° (转速不计)。俯仰舱自身及负载质量约900 kg。

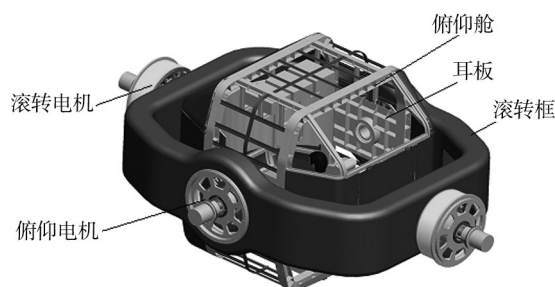


图1 座舱总体

Fig.1 The general cockpit

耳板除承受俯仰舱整体不确定方向离心力载荷外,还传递俯仰舱加速时的扭矩。结构优化通常希望设定结构变量、目标函数和约束条件,利用优化软件经过假定-分析-搜索-最优设计四个阶段能够自行得到合理的结果。其中的搜索过程是修改并优化的过程。它首先判断设计方案是否达到最优(包括满足各种给定的条件),如若不是,则按某种规则进行修改,以求逐步达到预定的最优指标。耳板结构和受力均非常复杂,利用软件自行寻求最优结果,其数学模型较难建立,得出的结构因此一般难以满足实际要求。在耳板的优化过程中,实际上经过软件结构分析-校核,在其基础上借助设计人员的专业经验重新设计,目的是要选择一个合理的方案。这种方法属于分析的范畴,且只能凭设计者的经验作很少几次重复分析以通过“校核”为满足。在进行特别复杂的结构设计时,难以建立简单正确的优化模型,借助设计者主观经验的优化手段能够更加有效地获得满意的结果。

2 初始耳板基本情况及其优化目标

由于受整体系统结构及性能约束,耳板整体设计为矩形腹板加4条纵筋与4条横筋的整体结构,腹板

与筋板厚度均为8 mm,中间有轴传动圆台接口。如图2所示。

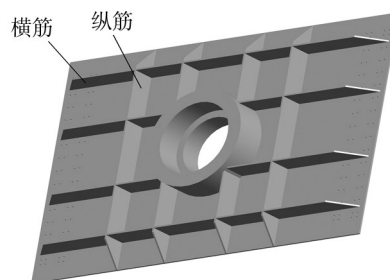


图2 耳板初始结构

Fig.2 The initial ear-board

2.1 耳板计算边界条件

耳板采用高强度铝合金7050,其 $\sigma_{p0.2}$ 为430 MPa。由于其受多种载荷,且各种载荷大小和方向均发生变化,分析时为保守起见,各种载荷均按最大考虑。

耳板受力方向不同,结构受力响应不一样,由于受力的机会对称,分析时取滚转角一个完整象限内 0° 、 30° 、 60° 、 90° 及俯仰角一个完整象限内 0° 、 30° 、 60° 、 90° 组合分析俯仰舱体骨架整体静力响应,共16种工况。然后提取耳板各工况受力,分析重点工况。经分析可知,滚转角 0° 、俯角 60° 工况下耳板受力最严峻。耳板优化设计在此工况下进行校验分析。

2.2 初始耳板受力

根据对俯仰舱整体建立有限元模型分析可知,初始耳板在 $(0^\circ, 60^\circ)$ 的应力分布如图3所示(未考虑材料屈服)。由结果可知,初始最大应力已达到640 MPa,早已超过屈服限,但根据应力分布图,耳板除横筋中间顶部边缘及与传扭圆台结合处有应力集中外,

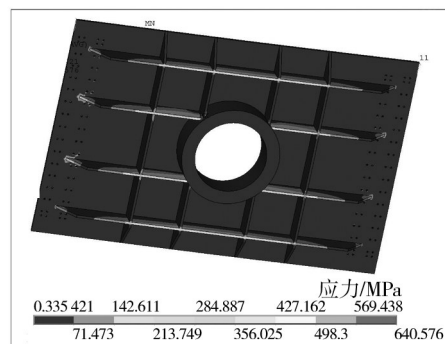


图3 初始耳板在重点工况下应力

Fig.3 The main stress map of the initial ear-board

主体应力基本上在 280 MPa 以下,认为在此结构基础上,进行优化设计有意义。

2.3 耳板优化条件及目标

耳板传递俯仰电机输出扭矩到俯仰舱上。其基本结构受其与电机输出轴及其与俯仰舱主体接口形式约束,且由于系统整体特性要求,希望优化后,耳板质量不得有明显的增加。因此耳板基本总体结构不是此次优化目标,此次优化目标为对腹板上筋板的结构布局进行优化,且不改变耳板与传动轴和舱体主框架的接口,使优化后耳板结构有限元分析强度安全系数达 1.5 以上。

3 优化方法

由于结构的复杂性,常见的拓扑优化难以得到可满足工程实施的结构。本次优化不借用优化软件,完全根据设计经验及借助有限元仿真软件进行优化并评估。

如前所述,耳板受力状况多变,根据初始耳板受力最严酷工况,分析认为耳板主体结构外形不变情况下,其受力状况应一致,因此,优化只在此工况下进行评估。

另外,俯仰舱总体结构复杂,其有限元模型数据量大,处理费时费力,优化时对每一次改变均代入俯仰舱总体模型进行验算评估不易实现。因此,提取初始耳板在俯仰舱总体有限元模型中的位移量,作为对优化结构的评估边界。这种位移替代能大大简化优化计算,但同时也存在问题。若结构改变后刚度变弱,很容易达到位移边界条件,实际承力不够;反之,结构刚度过高,则可能导致达到同样位移边界带来结构应力较实际大。

具体优化过程中先不考虑存在的问题,以找到应力水平较低的结构为目标,再与初始结构比较刚度,最后,带入整体模型进行验证。

4 耳板优化方案一

4.1 优化方向

根据初始耳板的应力分布,其横筋中间外边缘及其与耳板圆台结合处应力集中明显。初步考虑结合处局部存在尖角导致应力集中,外边缘可能是横向筋板需要整体加强。

首先对筋板之间连接进行倒圆、增大圆角,再尝试对横向筋板加厚以及增加筋板、调整筋板布局等改进措施。结果表明,增大倒圆半径、增加横向筋板厚度以及增加横向筋等措施对改善耳板局部应力集中起到了一定的作用,但耳板的最大应力仍然超过了材料的屈服强度,达到 450 MPa 上下,且应力集中区域随着局部加强会有所转移。

分析认为耳板应力集中不是因为强度不够,而是因为筋板之间约束太强,因此,又尝试对横向筋板进行降刚度改变。

降低刚度包括降低所有筋板的高度、去掉部分横筋并调整位置以及去掉中间两条横筋等,如图 4 所示。计算证实,降低刚度确实会得出应力集中大大减小的结果。由于验证计算是提取初步结构的位移为边力界,因此,计算结果并不可信,只作为优化参考方向。

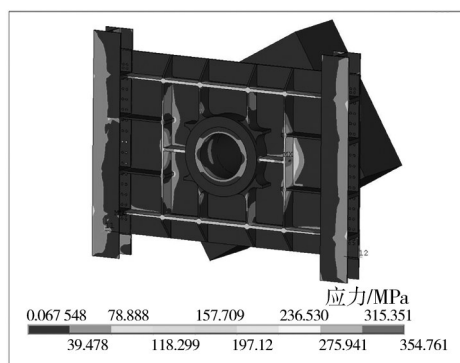


图 4 去掉部分横筋并调整位置

Fig.4 Abolishment and adjustment of some cross ribbed slabs

经过几轮计算分析认为,耳板横向筋板刚度应该降低,但刚度降低后的计算结果并不真实,同时担心刚度降低导致强度降低。因此,一次优化时认为,应降低外围横向刚度,同时,增强中心区域整体强度,希望这种改变能分散集中应力。

4.2 优化结果

图 5 为第一次优化后的目标结构,将原先连接轴套的两块横向筋板的中间部分外移,在轴套的两侧增加厚度为 12 mm 的横向筋板,并将两边的纵向筋板的厚度由 8 mm 增加到 12 mm,所有筋板高度由 65 mm 减小到 48 mm,同时,纵筋外侧横向筋板坡度变长。这样改进的目的是增加耳板中间部分的刚强度而降低耳板两边部分的横向刚度,达到降低耳板应力的目的。

图 6 为改进耳板结构的等效力云图。可以看出,耳板的最大等效力为 256.7 MPa,且发生在纵向

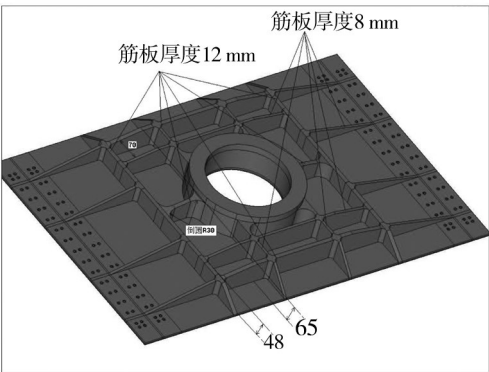


图5 优化目标结构
Fig.5 The optimized structure

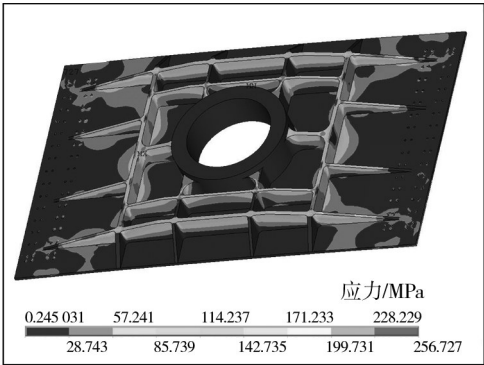


图6 以初位移验算优化结果
Fig.6 Checking result based on the initial displacement

筋板上。

4.3 优化结果验算

以改进后的耳板结构(图5)代替原初始耳板结构,建立俯仰舱整体线性有限元模型,耳板以壳单元来模拟。对该模型施加(0° ,60°)工况的载荷及边界条件,计算俯仰舱的力学响应,并从计算结果中提取耳板非线性分析边界条件,再计算改进后耳板的力学响应,计算结果如图7所示。验证表明,耳板的最大

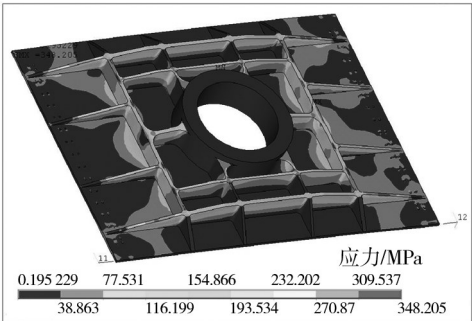


图7 代入整体模型验算结果
Fig.7 Checking result of the first optimized structurebased on the whole model

合位移较改进前增加了26%,说明耳板的刚度降低了,使得耳板的最大等效应力达到348.2MPa,安全系数仅为1.23,达不到设计指标要求。

5 耳板优化方案二

5.1 优化方向

方案一的优化大大降低了耳板的应力集中,但安全系数达不到设计要求,因此寻求第二种优化方案,改变耳板上筋板的布局形式,由原来纵横交错的筋板改为放射状的筋板,如图8所示。

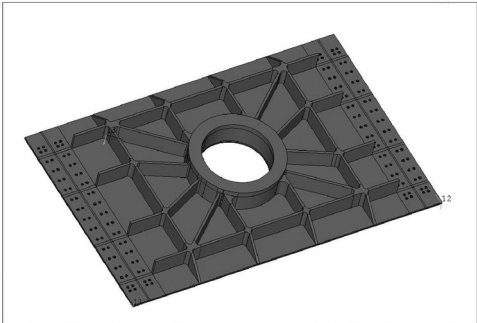


图8 放射形筋板结构
Fig.8 The structure with radial ribbed slab

图9为以初始位移验算放射形耳板的应力分布,结果表明,放射形初始耳板的最大等效应力达到了642.6 MPa,远超过材料的屈服强度。最大应力发生在筋板与轴套的连接部位,考虑用变截面筋板及倒圆角来降低此处应力。调整后放射筋板上的应力还是较大,纵向筋板的应力很小,考虑将位于两边外侧的纵向筋板去掉以释放对放射状筋板的约束,可能会降低放射状筋板的应力。

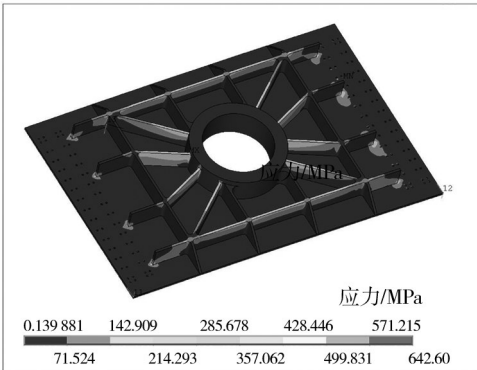


图9 初始位移验算放射形耳板应力分布
Fig.9 Stress distribution of the radial ear-board based on the initial displacement

5.2 优化结果

针对耳板应力集中,分别采用去掉外侧纵向筋、对放射筋板进行变截面设计,同时,对筋板上所有连接相交处进行圆滑过渡。每一步都进行了简化验证,结果如图10—12所示。计算表明,经优化后耳板的最大等效应力为258.2 MPa,发生在斜筋板上。与放射形耳板初始结构相比,应力集中程度大大降低。

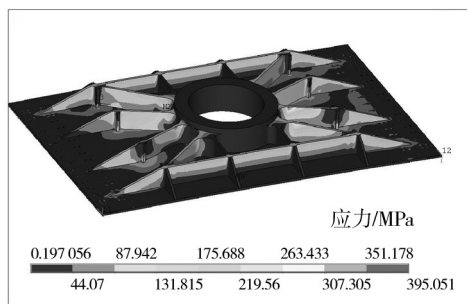


图10 去掉外侧纵向筋

Fig.10 Get rid of the outer vertical ribbed slab

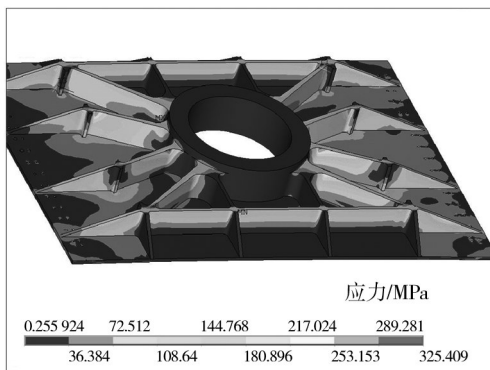


图11 放射筋板变截面处理

Fig.11 Treatment of the ribbed slab by variable cross section

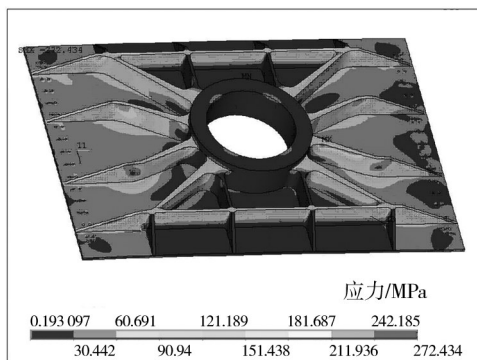


图12 连接处圆滑过渡

Fig.12 Smoothen treatment

优化后的最终结构如图13所示。

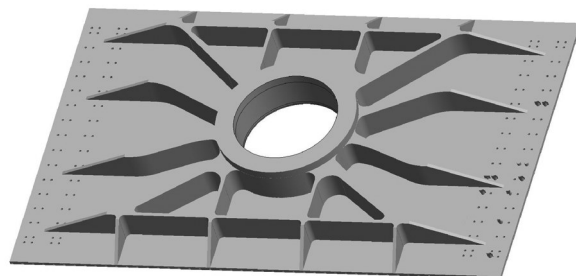


图13 放射形耳板优化最终结构

Fig.13 The final structure of the ear-board with radial ribbed slab

5.3 优化结果验算

对改进后的耳板结构(图13)代替最初耳板结构,建立俯仰舱整体线性有限元模型,耳板以壳单元来模拟。对该模型施加(0° , 60°)工况的载荷及边界条件,计算俯仰舱的力学响应,并从计算结果中提取耳板非线性分析边界条件,再计算改进后耳板的力学响应。计算结果如图14所示。结果表明,耳板的最大等效应力为251.8 MPa,发生在耳板的边缘,筋板上的最大等效应力为224.8 MPa,耳板的安全系数为1.7。经位移分析可知,优化后耳板的刚度较原结构增加了。分析表明,对方案二改进以后的耳板结构满足强度设计指标要求。

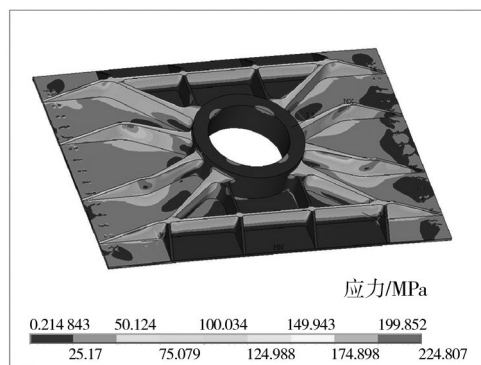


图14 代入整体模型验算结果

Fig.14 the stress map of the radial ear-board based on the whole model

6 结语

俯仰座舱耳板经过多轮优化设计,并经过代回原
(下转第150页)

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.