

12-13-2019

## Design and Finite Element Analysis of reflector Spherical Shell for Flight Simulator

Hailiang Bai

*93199 Troops, Harbin 150001, China;*

Jiang Nan

*93199 Troops, Harbin 150001, China;*

Zhang Liao

*93199 Troops, Harbin 150001, China;*

Yuewen Fu

*93199 Troops, Harbin 150001, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Design and Finite Element Analysis of reflector Spherical Shell for Flight Simulator

### Abstract

**Abstract:** The flight simulator with six-degree-of-freedom motion platform can simulate the flight attitude in real time and provide realistic overload dynamic feeling, which requires that the equipment on the platform must adapt to the overload during flight simulation. *To solve the contradiction between the rigidity and weight of material, the glass fiber composite material is used to design and manufacture the spherical shell of the mirror . To improve the optical collimation of the reflector, the specific hyperboloid aspheric surface is selected as the surface design scheme,*the 3D model of the spherical shell is constructed. The parameters of the composite materials are predicted based on the series and parallel models and empirical formulas of composite sheets. Aiming at the overload condition of flight simulation,*the stress-strain finite element analysis of composite spherical shells is carried out by ANSYS software.* The experimental results show that the structural design and material technology meet the engineering requirements.

### Keywords

glass fiber, flight simulator, membrane mirror, finite element analysis

### Recommended Citation

Bai Hailiang, Jiang Nan, Zhang Liao, Fu Yuewen. Design and Finite Element Analysis of reflector Spherical Shell for Flight Simulator[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2388-2392.

# 飞行模拟器反射镜球壳的设计及有限元分析

白海亮, 姜南, 张辽, 付跃文

(93199 部队, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 配备六自由度运动平台的飞行模拟器可实时模拟飞行姿态和过载动感, 要求台体上的设备必须适应飞行仿真过程中的运动过载。为解决材料刚性和重量的矛盾, 采用玻璃纤维复合材料设计制作反射镜球壳。为提高反射镜的光学准直性, 选取特定双曲面作为面型设计方案, 并以此构建球壳的三维模型。依据复合材料薄片串、并联模型及经验公式预测复合材料参数。针对飞行模拟的过载工况, 利用 ANSYS 软件对复合球壳的分层进行了应力应变有限元分析。实验结果证明结构设计和材料工艺满足工程要求。

**关键词:** 玻璃纤维; 飞行模拟器; 薄膜反射镜; 有限元分析

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 11-2388-05

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0352

## Design and Finite Element Analysis of reflector Spherical Shell for Flight Simulator

Bai Hailiang, Jiang Nan, Zhang Liao, Fu Yüewen

(93199 Troops, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The flight simulator with six-degree-of-freedom motion platform can simulate the flight attitude in real time and provide realistic overload dynamic feeling, which requires that the equipment on the platform must adapt to the overload during flight simulation. To solve the contradiction between the rigidity and weight of material, the glass fiber composite material is used to design and manufacture the spherical shell of the mirror. To improve the optical collimation of the reflector, the specific hyperboloid aspheric surface is selected as the surface design scheme, the 3D model of the spherical shell is constructed. The parameters of the composite materials are predicted based on the series and parallel models and empirical formulas of composite sheets. Aiming at the overload condition of flight simulation, the stress-strain finite element analysis of composite spherical shells is carried out by ANSYS software. The experimental results show that the structural design and material technology meet the engineering requirements.

**Keywords:** glass fiber; flight simulator; membrane mirror; finite element analysis

## 引言

随着国内飞行仿真水平及规模不断提高, 对

模拟器视景系统的视场角、成像精度提出更高的要求。

受限于运动平台承载能力, 大口径反射镜系统的结构、重量与性能之间的矛盾变得愈加突出。利用各类硅化合物或金属材料制作反射镜, 由于材料密度高, 成型和承载都比较困难, 已被淘汰。利用负压控制的薄膜制作反射镜成为研究重点。它的基



收稿日期: 2019-05-17 修回日期: 2019-07-19;  
作者简介: 白海亮(1983-), 男, 河北抚宁, 硕士, 讲师, 研究方向为飞行仿真; 姜南(1969-), 女, 辽宁本溪, 博士, 副教授, 研究方向为飞行仿真; 张辽(1963-), 男, 黑龙江, 硕士, 副教授, 研究方向为飞行仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2388 •

本原理是: 由薄膜和反射镜球壳密封成负压腔体, 再通过调节腔体内、外气压差, 获得面型可控的薄膜反射镜。考虑到六自由度平台的工况限制, 反射镜球壳必须具有密度低、强度高、抗冲击的特性。一般金属材质的强度虽然能满足要求, 但太过笨重; 钛合金和碳纤维等新型复合材料工艺难度大, 制造成本高, 并不适用于小批量的飞行模拟器开发。针对以上需求, 选用玻璃纤维增强塑料(Glass Fiber Reinforced Polymer)制作球壳具有突出的优势。此类材料强度密度比高、耐腐蚀、抗老化, 造价和工艺易于接受, 能制备成精密的曲面体<sup>[1]</sup>; 另一方面, 玻纤材料的弹性模量比金属材料低, 必须通过改进结构和工艺, 提高产品的刚性。

为验证复合玻纤制作球壳是能否满足飞行模拟的设计需求, 本文设计了三种典型动载工况, 利用有限元分析进行仿真试验, 为轻质玻纤反射镜球壳的设计和使用提供理论基础。

## 1 反射镜球壳的设计及加工

### 1.1 反射镜面形的确定

工程中使用的轴对称曲面方程式如下<sup>[2]</sup>:

$$z = \frac{(x^2 + y^2)^2}{2R_0} + \frac{(1+K)(x^2 + y^2)^4}{8R_0^3} + \frac{(1+K)^2(x^2 + y^2)^6}{16R_0^5}$$

式中:  $L^2 = y^2 + z^2$ 。当  $K=0$  为球面, 当  $-1 < K < 0$  为椭球面方程, 当  $K=-1$  为抛物面方程, 当  $K < -1$ , 为双曲面方程。通过改变式中系数  $K$  的值可以调整非球面面形, 进行球差修正, 改善系统准直性<sup>[3]</sup>。

细光束的弧矢焦点位置及细光束子午焦点位置分别为<sup>[4]</sup>:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{r_s} \quad (1)$$

$$\frac{n' \cos^2 I'}{t'} - \frac{n \cos^2 I}{t} = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{r_t} \quad (2)$$

式中:  $r_t$  为子午面曲率半径;  $r_s$  为弧矢面曲率半径;  $t$  为子午面物距;  $t'$  为子午面像距;  $s$  为弧矢面物距;

$s'$  为弧矢面像距;  $n$  为入射介质折射率;  $n'$  为反射介质折射率;  $I$  为细光束入射角;  $I'$  为细光束折射角。要使视点正前方区域像散为零, 则子午面像距与弧矢面像距相等, 即  $t'=s'$ 。大气环境下  $n$ 、 $n'$  均为 1, 子午面与弧矢面物距相同<sup>[5]</sup>, 得到

$$r_s/r_t = \cos^2 I' \quad (3)$$

可以选用双曲率反射面作为理想离轴非球面面型<sup>[5]</sup>。其双曲线参数与偏心率及顶点曲率半径须满足式(4)<sup>[2]</sup>

$$a = \frac{R}{1-e^2}, c = \frac{eR}{e^2-1} \quad (4)$$

依据口径的要求, 设定  $R$ ,  $K$ , 代入轴对称曲面方程可得理想非球面表达式。在大型模拟器中, 反射镜球壳处于运动平台上、控制室前、飞行座舱外的区域。它与顶盖共同构筑了一个封闭空间。球壳内壁边缘处分布了条环状的框架结构。薄膜将通过粘接和压紧的方式固定在框架上。框架的表面和内边缘形状就成为约束薄膜受力的界面条件<sup>[6]</sup>。工程实践中, 依据理想面型表达式并结合实际情况, 设计三维模型(图 1)和施工图纸。设计和制作的关键点是确保固定薄膜的边框必须处于理想面型上。因此, 除了制作加工时要严格控制工艺外, 在球壳加工完成后, 必须对框架形状进行检验和修正。可采取的办法是: 按理想面型对应的二次曲线制作样板吊装在悬臂梁上, 利用检验样条绕对称中心旋转修正偏差。

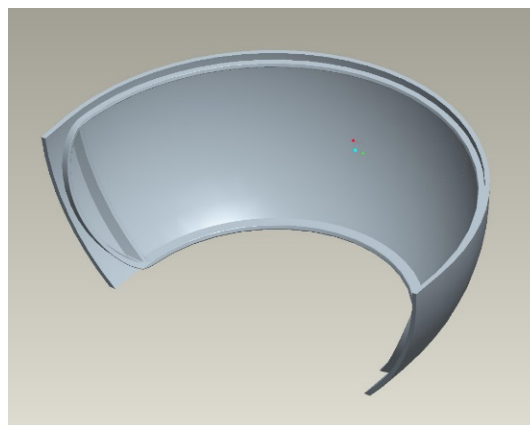


图 1 球壳三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of spherical shell

## 1.2 球壳材料和制作工艺

普通玻璃钢的弹性模量小于金属,在工程使用中可能因刚性不足,发生塑性变形。而且普通的复合材料填充物的抗拉、抗剪性能均不够理想。为了克服这些缺点,工程中从两方面加强材料性能:一是采用夹层结构改善材料性能,二是选用高模量纤维、中空纤维等新材料提高基材性能。这里,玻璃钢等复合材料的制作加工技术比较成熟,改变截面尺寸和形状的制造工艺不存在困难。像蜂窝夹芯结构(Honeycomb Sandwich Structural)可以很好的承载结构上大部分的剪力,有效分散和吸收冲击,充分弥补硬质发泡塑料弹性模量低的弱点<sup>[7]</sup>。通过改变截面的尺寸和形状可以弥补弹性模量低的弱点。以聚氨酯为代表的泡沫塑料密度低、抗震抗压性能好、承载能力强,广泛用于制作夹芯材料填充物。我们选用聚氨酯(PUR)为基材,以环氧树脂胶接制作蜂窝结构夹芯层。在同等材料和限定重量的条件下,通过增大截面面积来提高截面惯性矩和极惯性矩,实现了按应力分布规律合理分配截面材料。在减轻结构重量的同时,确保了结构刚度,使得球壳更耐冲击和过载。

## 2 球壳结构有限元分析

### 2.1 建立有限元分析模型

球壳的里、中、外 3 层,分别为玻璃布/聚酯、聚氨酯泡沫、玻璃布/聚酯。对 Pro/E 设计的三维模型,进行必要的简化:薄膜的固定框架、薄膜结构及固定压板、标准件等附属件总重不超过 25 kg,对球壳结构力学分析影响较小,予以省略。将模型文件导入 Ansys 软件中,对不兼容的局部进行了修改补充。

### 2.2 设定结构分析参数及条件

(1) 在串联模型中,可通过混合法则求得串联纵向弹性模量<sup>[8]</sup>:

$$E_1^I = E_{f1}v_f + E_m v_m \quad (5)$$

在并联模型中,横向弹性模量与纵向弹性模量相同:

$$E_2^{II} = E_1^{II} = E_1^I \quad (6)$$

因此,采用串联纵向弹性模量  $E_1^I$  作为弹性模量。

(2) 在并联模型中,柏松比的标准公式为:

$$\gamma_1^{II} = \gamma_2^{II} = \frac{v_f E_f v_f + v_m E_m v_m}{E_f v_f + E_m v_m}$$

工程预测改用经验公式:

$$\gamma = K_1(v_f \gamma_f + v_m \gamma_m), \quad 0.95 \leq K \leq 1 \quad (7)$$

(3) 串联模型的面内剪切模量:

$$G^I = \frac{G_f G_m}{G_f v_f + G_f(1 - v_f)}$$

并联模型剪切模量:  $G^{II} = G_f v_f + G_m v_m$ , 则依据植存-山肋半经验公式<sup>[8]</sup>:

$$G = 1 - cG^I + cG^{II}, \quad 0 \leq c \leq 1 \quad (8)$$

式中:  $v_f$  为纤维体积含量;  $v_m$  为基体体积含量,利用以上公式计算并结合厂方试验数据,将分析材料所需的各种参数列入表 1。

表 1 材料参数  
Tab. 1 Material parameters

序号	参数	内外层 (玻璃布/聚酯)	芯材(聚氨酯)
1	厚度/mm	3	61
2	弹性模量/E	14 GPa	10 MPa
3	泊松比/ $\gamma$	0.12	0.12
4	树脂含量/%	42.5	-
5	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1750	60
6	极限强度/MPa	280	0.5(压缩强度)

### 2.3 条件设定

在分析单元类型的选择上,Shell 91(非线性层状壳单元)可对夹层结构、壳结构进行划分,特别适用于对铺层的分析需求<sup>[9]</sup>。如图 2 所示,按照薄壁结构简化原则对反射镜球壳抽取中面,并划分网格。

下端采用全约束边界条件 Fix support 模型固定连接,质量点耦合在壳体上边缘,用于模拟遮光罩、加强筋等结构。

依据是否开启六自由度运动平台,可将飞行模拟分为静态、动感两种飞行状态。静态工况的分析

结果远小于设计极限, 予以省略。依据运动平台的性能及台体设计要求, 选取 3 种极端的加速度值, 作为研究工况条件: (1) 竖直方向加速度 0.8 g; (2) 侧向加速度 1 g; (3) 角加速度 150 °/S<sup>2</sup>。

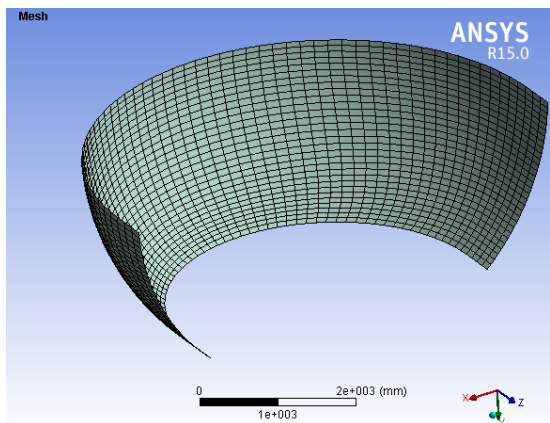


图 2 球壳网格划分  
Fig. 2 Meshing of spherical shells

### 2.4 仿真结果及分析

将 3 种工况下各层计算得出的最大位移及等

效应力列入表 2。

表 2 最大位移及等效应力  
Tab. 2 Maximum displacement and equivalent stress

工况	加速度	位移 /mm	分层	材料	等效应力/MPa
1	竖直方向 0.8 g	0.572	第一层	玻璃布/聚酯	1.409
			第二层	聚氨酯泡沫	0.006
			第三层	玻璃布/聚酯	1.861
2	侧向方向 1 g	8.743	第一层	玻璃布/聚酯	15.553
			第二层	聚氨酯泡沫	0.0814
			第三层	玻璃布/聚酯	18.439
3	滚转 2.62 rad/s (150 °/S <sup>2</sup> )	3.198	第一层	玻璃布/聚酯	8.905
			第二层	聚氨酯泡沫	0.045
			第三层	玻璃布/聚酯	11.548

图 3 展示角加速度 150 °/S<sup>2</sup> 条件下, 3 个分层的位移及应力云图。可以发现, 应力的极值均出现在球壳下部边框处。内外层及芯材极值均小于材料的许用强度(内外层 280 MPa, 夹层 0.5 MPa), 且具备相当的安全系数。

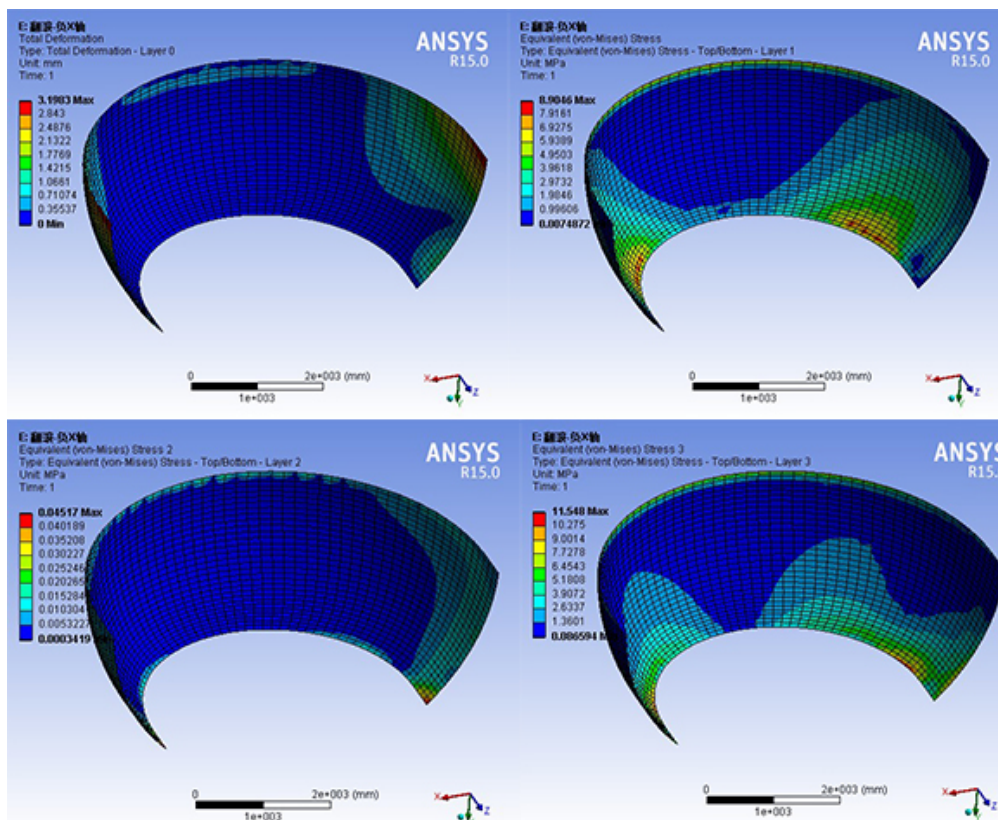


图 3 角加速度 150 °/S<sup>2</sup> 各分层的位移应力云图  
Fig. 3 Displacement stress nephogram of each layer at 150 °/S<sup>2</sup> angular acceleration



### 3 结论

分析了采用玻璃纤维增强材料制作反射镜球壳的必要性,提出具体的实施方法。选取双曲率非球面作为面型设计方案构建球壳三维模型。根据飞行模拟器的实际应用,在竖直加速度  $0.8\text{ g}$ 、侧向加速度  $1\text{ g}$  以及角加速度  $150\text{ }^\circ/\text{S}^2$  的条件下,对球壳分层的应力应变情况进行了有限元分析。验证了复合材料球壳能够在大型运动平台上安全使用。以玻纤反射镜球壳为基础制备的负压薄膜反射镜,具备口径和视场角大,曲率精度和比强度高的突出优势,其曲率半径  $3\ 300\text{ mm}$ ,水平视场角超过  $210^\circ$ ,垂直视场角超过  $45^\circ$ ,薄膜面型精度控制在  $2\text{ mm}$  以内。同时,产品的结构轻便,利于安装及运输。

#### 参考文献:

- [1] 邓晴莺,李国翬,王宝奇. 大下视场飞行模拟器视景系统的设计与实现[J]. 系统仿真技术, 2016, 12(2): 123-129.  
Deng Qingying, Li Guochen, Wang Baoqi. Design and implementation of a Large Down FOV Visual System in a flight simulator [J]. System simulation technology, 2016, 12(2): 123-129.
- [2] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 45-48.  
Pan Junhua. Design, fabrication and inspection of optical aspheric surface[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004: 45-48.
- [3] 李哲煜,杨洪波,张岫. 大型运输机飞行模拟器视景光学显示系统的研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2449-2451.  
Li Zheyu, Yang Hongbo, Zhang Xun. Research on visual optical display system of large transport aircraft flight simulator [J]. Journal of system simulation, 2007, 19(11): 2449-2451.
- [4] 王红敏. 工程光学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009: 88-90.  
Wang Hongmin. Engineering Optics [M]. Beijing: Peking University Press, 2009: 88-90.
- [5] 关英姿. 飞行训练模拟器广角无限显示系统设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(10): 1214-1216.  
Guan yingzi. Design of wide angle infinite display system of flight training simulator [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(10): 1214-1216.
- [6] 秦英绚. 视景系统薄膜反射镜成形的有限元分析及控制方案研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 9-10.  
Qin yingxuan. Study on the finite element analysis and control scheme of the forming of the thin film mirror in the visual system [D]. Harbin: Harbin University of technology, 2007: 9-10.
- [7] 白海亮,王克英,张辽. 玻璃纤维增强材料球形反射镜的设计与加工[C]. 国防科技工业系统仿真大会论文集. 北京: 国防科技工业系统仿真大会组委会, 2013: 248-250.  
Bai Hailiang, Wang Keying, Zhang Liao. Design and processing of glass fiber reinforced material spherical reflector [C]. Proceedings of national defense science and technology industry system simulation conference. Beijing: Organizing Committee of national defense science and technology industry system simulation conference, 2013: 248-250.
- [8] 王耀先. 复合材料结构设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 45-49.  
Wang Yaoxian. Structural design of composite materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 45-49.
- [9] 李宜宇. 玻璃钢快艇结构有限元分析中边界约束条件的初步研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2010: 12-14.  
Li Yiyu. Preliminary study on boundary constraints in finite element analysis of FRP speedboat structure [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of science and technology, 2010: 12-14.