

# 不同载荷作用下膜基反射镜面形分析和仿真

张庚生<sup>1,2</sup> 唐敏学<sup>1,2\*</sup> 陈新华<sup>1,3</sup> 余建军<sup>1,3</sup> 沈为民<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>苏州大学江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006  
<sup>2</sup>苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006  
<sup>3</sup>苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006

**摘要** 研制膜基反射镜需要解决的关键技术之一是膜基反射镜的面形控制。对自行开发的基于模糊逻辑控制理论的膜基反射镜面形控制系统的结构和功能作了详细介绍。在前期对均匀载荷作用下膜基反射镜面形控制进行理论研究的基础上,进一步对非均匀载荷作用下口径 300 mm、不同  $F$  数的膜基反射镜面形控制进行分析和仿真,并与均匀载荷作用下的仿真结果作了分析和比较。结果表明,非均匀载荷作用下膜基反射镜波前误差的均方根(RMS)值比均匀载荷作用下膜基反射镜波前误差的 RMS 值降低两个数量级。

**关键词** 膜基反射镜;面形控制;非均匀载荷;波前误差;仿真

中图分类号 TH751

OCIS 120.0120 220.0220 350.0350

文献标识码 A

## Simulation of Surface Shape of Membrane Mirrors under Different Loads

Zhang Gengsheng<sup>1,2</sup> Tang Minxue<sup>1,2</sup> Chen Xinhua<sup>1,3</sup>

Yu Jianjun<sup>1,3</sup> Shen Weimin<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Jiangsu Key Laboratory of Modern Optical Technology, Soochow University,  
Suzhou, Jiangsu 215006, China

<sup>2</sup>Institute of Information Optics Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

<sup>3</sup>Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

**Abstract** One of key technologies for the manufacture of membrane mirrors is its surface shape control. The structure and function of a surface shape control system which is developed by our laboratory based on fuzzy logic control theory are described in detail. The surface shape control of membrane mirror under uniform load previously has been theoretically analyzed and simulated. Here a non-uniform load method is analyzed and simulated for the surface shape control of a membrane mirror with 300 mm aperture and different  $F$  numbers. The results of the simulation show that the RMS wavefront error of the membrane mirror under non-uniform load can be controlled and improved in two orders of magnitude compared with that of the membrane mirror under uniform load.

**Key words** membrane mirror; surface shape control; non-uniform load; wavefront error; simulation

## 1 引言

随着空间光学系统的发展以及对分辨率要求的不断提高,研制大孔径、超轻型空间望远镜已经成为空间科学领域的主要任务和研究热点之一。以柔性薄膜为基坯的膜基反射镜具有重量轻、可折叠和展开、成本低

收稿日期: 2010-03-26; 收到修改稿日期: 2010-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(60678051,61078043)资助课题。

作者简介: 张庚生(1985—),男,硕士研究生,主要从事膜基反射镜面形控制系统的设计和仿真等方面的研究。

E-mail: 20074208053032@suda.edu.cn

导师简介: 唐敏学(1962—),女,研究员,主要从事光信息处理技术与器件等方面的研究。

E-mail: mxtang@suda.edu.cn(通信联系人)

等传统望远镜反射主镜无法比拟的特点,在未来大型空间光学系统中具有广阔的应用前景<sup>[1~4]</sup>。

近年来,我们对大口径、超轻型膜基反射镜的研制开展了理论和实验研究,对膜基反射镜的固定支撑方式、静电成形方法以及采用全息技术校正其面形误差等进行了研究。在此基础上,开发了基于模糊逻辑控制技术的膜基反射镜面形控制系统<sup>[5~7]</sup>。本文介绍了该膜基反射镜面形控制系统的功能与工作原理,分析讨论均匀载荷作用下膜基反射镜成形的理论数学模型和有限元模型。通过仿真实验,对均匀载荷与非均匀载荷作用下的膜基反射镜面形精度进行了分析和对比。

## 2 膜基反射镜面形控制系统

设计的膜基反射镜面形控制系统由面形设计模块、面形控制模块、面形控制仿真模块、以及面形分析模块等部分组成。面形设计模块的功能是设计一定口径与  $F$  数的标准反射镜(球面或抛物面),该模块的输出是表征面形的 37 项泽尼克(Zernike)多项式拟合系数,输出结果保存于数据库中,以供面形控制和分析使用。面形控制模块是本系统的核心,其控制方法基于模糊逻辑控制理论<sup>[8,9]</sup>。面形控制模块是一个闭环控制系统,其输入是实测面形与标准面形的误差,输出是面形控制促动器的控制驱动信号与实时面形信息。面形控制仿真模块属于面形控制模块的一个子系统,它的主要作用是预测实际膜基反射镜的面形控制效果和调整控制算法。面形分析模块的功能是面形质量评价与实测面形的显示。根据干涉原理,将实测面形与标准面形的波面进行干涉,得到干涉图、波面图、峰谷(PV)值、均方根(RMS)值等信息,用于评价膜基反射镜的面形质量。

图 1 是膜基反射镜面形控制系统工作的逻辑流程图,它描述了控制系统的工作原理,具体可用下述步骤说明:

1) 在面形设计模块中以所需膜基反射镜的类型、口径和  $F$  数为参数,采用泽尼克多项式系数的形式,确定标准反射镜面形数据;

2) 将 1) 中得到的标准反射镜面形与待控制膜基反射镜面形进行比较,待控制膜基反射镜的初始面形为平面。将比较得到的差值数据送入模糊逻辑控制器进行处理,输出膜基反射镜成形所需施加的载荷。采用薄膜大挠度形变理论或有限元分析方法模拟膜基反射镜的成形,模糊逻辑控制器的输出信号作为模拟分析的外载荷条件,模拟得到的面形再与标准反射镜面形进行比较,然后再交由模糊逻辑控制器处理。

上述流程即是膜基反射镜面形控制的仿真过程。重复仿真过程,根据其中膜基反射镜的成形情况修正模糊逻辑控制规则库,直至仿真得到的面形最接近标准反射镜面形为止,此时模糊逻辑控制器的控制精度亦达到最佳。

3) 探测膜基反射镜的实时面形,并将测得的实时面形数据与标准反射镜面形数据进行比较,以待控制膜

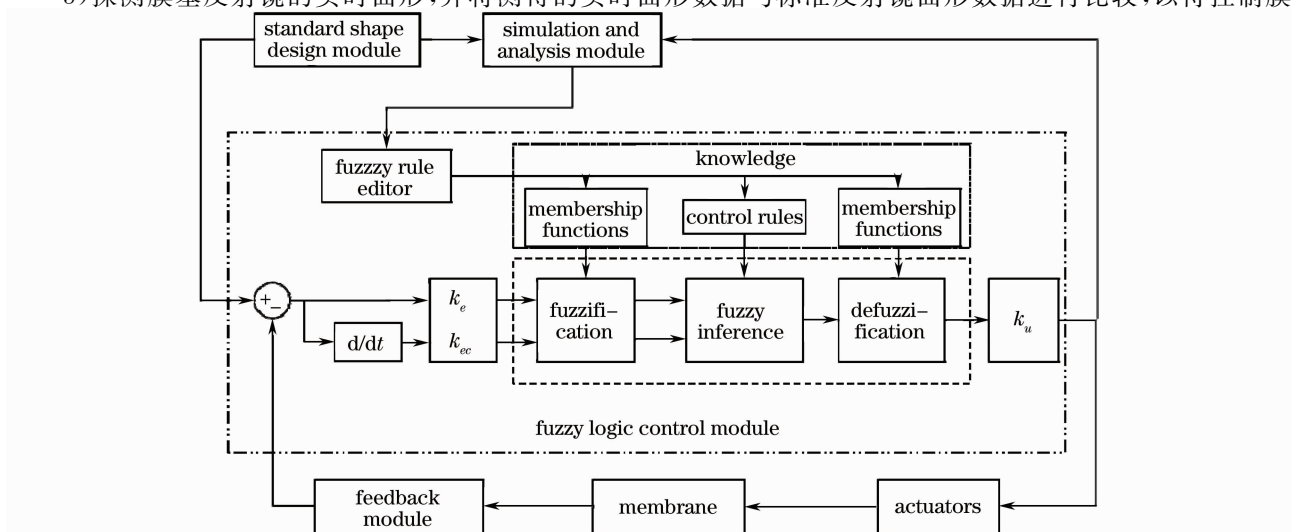


图 1 膜基反射镜面形控制系统控制逻辑流程

Fig. 1 Flow chart of surface shape control system

基反射镜与标准反射镜的中心截面矢高误差为控制变量,由模糊逻辑控制器进行处理,模糊逻辑控制器的输出信号输送至面形控制促动器,面形控制促动器产生相应的载荷施加于膜基反射镜上,从而使膜基反射镜产生相应的面形;

4)重复3),直至膜基反射镜面形精度达到设计要求。

上述过程能够实现基于智能算法的膜基反射镜的闭环控制,与现有技术相比较,所设计的膜基反射镜面形控制系统具有以下特点:

1)该系统采用了智能控制技术,与自适应光学中的变形镜面形控制技术相比,无需建立膜基反射镜面形控制的精确数学模型,因此,无需进行过程复杂且困难的面形影响函数的建立,使得控制系统的建立更为方便、快捷。

2)该系统将膜基反射镜面形控制仿真分析集成到面形控制系统中,在对膜基反射镜面形实施控制之前,可先进行膜基反射镜面形控制的仿真,根据仿真结果调整和优化模糊逻辑控制器的隶属函数、模糊规则,使控制算法的设计更简单、直观和高效。利用仿真修正后的模糊控制器进行膜基反射镜去面形控制时,其控制精度可达到最佳状态,待控制的膜基反射镜面形与标准面形之间的误差达到最小。

3)提出了将待控制膜基反射镜与标准曲面反射镜的中心截面矢高误差作为控制器的控制变量,简化了控制器的结构,降低了设计难度。

4)该系统以泽尼克多项式作为膜基反射镜面形的分析工具,对面形与波前数据进行处理<sup>[10]</sup>。利用泽尼克多项式与赛德尔(Seidel)像差的关系,可以在控制过程中实时且直观地得到膜基反射镜面形的波前信息。此外,与直接利用面形或波面的离散数据相比,采用泽尼克多项式处理数据,大大减少了数据量,提高了数据存储和运算效率。

### 3 膜基反射镜面形控制的仿真分析模型

设计的膜基反射镜面形控制系统的仿真子系统有以下两种工作模式,一是基于薄膜大扰度形变理论数学模型进行仿真(以下简称理论分析模式),这种模式是对膜基反射镜进行均匀载荷作用下面形控制的模拟;二是基于有限元分析模式(FEM)进行仿真,其中又可分为均匀载荷作用和非均匀载荷作用两种情况。用理论分析模式进行仿真时,可以得到膜基反射镜成形的理论外载荷条件以及预计成形结果;而用有限元分析模式进行仿真则可以更精确地模拟膜基反射镜的实际成形情况,对膜基反射镜成形和面形控制实验具有很好的指导作用。

#### 3.1 薄膜大扰度形变理论模型

将圆薄板卡曼(Karman)方程过渡到圆薄膜模型,即可得到描述薄膜变形的理论方程<sup>[11]</sup>:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r T_r \frac{dw}{dr} \right) + p(r) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{Eh}{2} \left( \frac{dw}{dr} \right)^2 + r \frac{d}{dr} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r^2 T_r) = 0, \quad (2)$$

式中  $r$  为薄膜径向坐标,  $h$  为薄膜厚度,  $w$  为薄膜的变形量,  $T_r$  为薄膜张力,  $E$  为杨氏模量,  $p$  为加载于薄膜上的压强。上述方程在均匀压强下的亨基(Hencky)级数解为

$$w(r) = h \cdot \sqrt{\frac{ca^4 p(1-\nu^2)}{Eh^4} / (2-2\nu^2)} \cdot \left[ g(a) - \frac{r^2}{a^2} g\left(c \frac{r^2}{a^2}\right) \right], \quad (3)$$

式中  $a$  为薄膜半径,  $\nu$  为泊松比,  $c$  为常数且  $c = \frac{2(1-\nu)}{3-\nu} - \sum_{n=2}^{\infty} (b_n c^n)$ ,

$$g(x) = 1 + \frac{1}{4}x + \frac{5}{36}x^2 + \frac{55}{576}x^3 + \frac{7}{96}x^4 + \frac{305}{3456}x^5 + \frac{51153}{1016064}x^6 + \dots \quad (4)$$

(3)式即是仿真系统中所用的薄膜变形的理论模型解。

#### 3.2 有限元模型

FEM 是分析物体或系统变形时常用的一种分析方法,以 ANSYS 软件作为有限元分析工具。ANSYS

中几何模型的生成有两种方法:一是在 ANSYS 软件中创建实体的几何模型;另一种方法是导入其他专业计算机辅助设计软件(如 AutoCAD, Pro/E 等)中创建的模型。在 ANSYS 中创建几何模型亦有两种方式,即自底向上建模和自顶向下建模。膜基反射镜的几何模型较为简单,可直接在 ANSYS 中创建。

均匀载荷作用下的膜基反射镜的几何模型和有限元模型如图 2 所示,采用自顶向下的建模方式以及三角形单元的自由网格划分。进行计算分析时,将膜基反射镜的整个面作为一个区域施加载荷。

图 3 是非均匀载荷作用下膜基反射镜的几何模型和有限元模型,几何模型由圆和圆环面体素组成。图 3 中所示的模型是将膜基反射镜分成 5 个区域,分析时根据设计面形要求对这些区域加载不同大小的载荷,因此称这个模型为非均匀载荷下膜基反射镜的有限元模型。

用薄膜大扰度形变理论模型进行膜基反射镜面形控制仿真时,可以在仿真系统内部用程序实现理论模型的数学解。当采用有限元分析模式仿真时,需要调用 ANSYS 进行分析,这时可以使用 ANSYS 软件提供的 APDL(参数化程序设计语言)作为接口工具,实现面形控制系统与 ANSYS 软件的联合仿真及数据共享。

## 4 均匀载荷作用下膜基反射镜面形控制仿真

### 4.1 理论模型与有限元模型的仿真对比

为了验证所设计面形控制系统的稳定性和所建立有限元模型的可靠性,采用仿真系统提供的理论分析模式与均匀载荷作用下的有限元分析模式,对口径 300 mm,  $F/10$  的膜基反射镜进行面形控制仿真。理论分析模式下,成形所需的压强为 1.92 Pa,面形误差 PV 为 100.340  $\lambda$  ( $\lambda = 632.8$  nm, 下同), RMS 值为 35.278  $\lambda$ 。采用均匀载荷作用的有限元分析模式下,成形所需的压强为 1.97 Pa,面形误差 PV 值为 103.250  $\lambda$ , RMS 值为 35.081  $\lambda$ 。由此可见,有限元分析结果与理论分析结果基本相符,表明了所设计控制系统以及所建立有限元模型和分析结果的可靠性。

### 4.2 均匀载荷作用下的面形控制仿真

对口径 300 mm,  $F$  数分别为 5, 10 和 20 的膜基反射镜进行均匀载荷作用下的面形控制仿真。仿真结果如表 1 所示。其中给出的是在均匀载荷作用下,各膜基反射镜稳定成形所需施加的载荷大小、面形精度的 PV 与 RMS 值。这里仅给出口径 300 mm,  $F/10$  膜基反射镜与标准抛物面镜的一维剖面比较图,如图 4 所示。图 4(a) 左边图形中的实线代表标准抛物面的一维剖面,点划线代表膜基反射镜的一维剖面,虚线代表两者的误差,右边图形给出的是误差的放大曲线。图 4(b) 为膜基反射镜面形与标准抛物面形波前误差的三维形貌与俯视图,其中口径方向作了归一化处理。

从上述仿真结果中可以得出以下结论:

1) 均匀载荷作用下,膜基反射镜的面形精度与其口径和  $F$  数有关。对于相同口径的膜基反射镜,  $F$  数越大,面形误差越小。

2) 均匀载荷作用下,膜基反射镜与标准抛物面镜的面形误差的一维剖面均呈左右对称分布的 M 型(根据绘图方式的不同也可说呈 W 型,此时曲线的开口向上)。

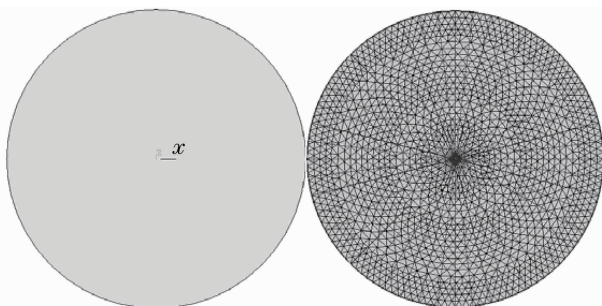


图 2 均匀载荷作用下膜基反射镜的几何模型和有限元模型

Fig. 2 Geometry and finite element models for membrane mirrors under uniform load

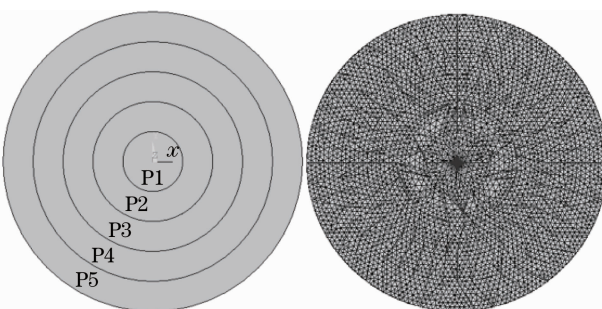


图 3 非均匀载荷作用下膜基反射镜的几何模型和有限元模型

Fig. 3 Geometry and finite element models for membrane mirrors under non-uniform load

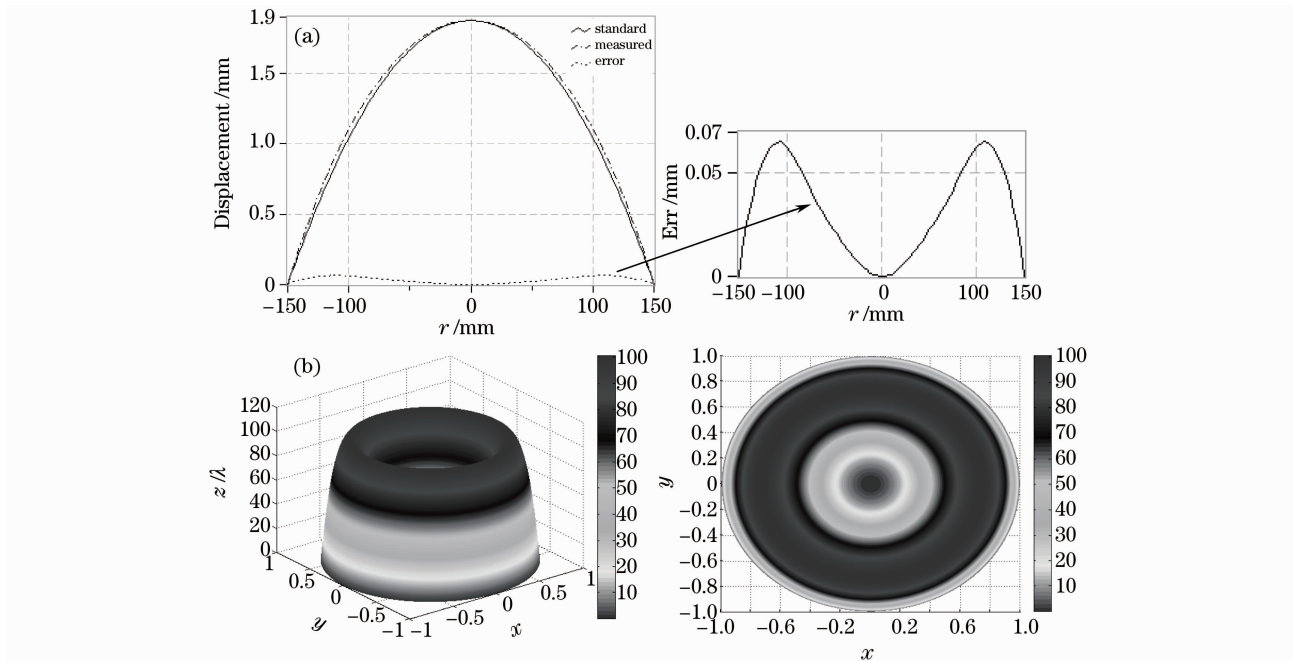
图4 均匀载荷作用下口径300 mm,  $F/10$  的膜基反射镜仿真面形Fig. 4 Surface shape simulation of membrane mirror with 300 mm aperture and  $F/10$  under uniform load表1 均匀载荷作用下口径300 mm,  $F$  数分别为5, 10和20的膜基反射镜面形控制结果

Table 1 Surface shape control results of membrane mirrors under uniform load

| Aperture /mm | $F/\#$ | Load /Pa | PV / $\lambda$ ( $\lambda=632.8$ nm) | RMS / $\lambda$ ( $\lambda=632.8$ nm) |
|--------------|--------|----------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 300          | 5      | 15.33    | 200.635                              | 70.534                                |
|              | 10     | 1.97     | 103.250                              | 35.081                                |
|              | 20     | 0.24     | 50.156                               | 16.052                                |

## 5 非均匀载荷作用下膜基反射镜的面形控制仿真

对口径300 mm,  $F$ 数分别为5, 10和20的膜基反射镜进行非均匀载荷作用下的面形控制仿真,并将仿真结果与均匀载荷作用下的仿真结果进行对比。仿真结果如表2所示,其中给出的是各种膜基反射镜的面形在其达到最佳面形时各个区域的载荷大小、面形误差的PV值、RMS值,其中载荷P1~P5的分布如图3中所示。图5(a)为口径300 mm,  $F/10$ 的膜基反射镜与标准抛物面镜的一维剖面比较图及其误差的放大曲线;图5(b)为其面形误差的三维形貌和俯视图。

表2 非均匀载荷作用下口径300 mm,  $F$ 数分别为5, 10和20的膜基反射镜面形控制结果

Table 2 Surface shape control results of membrane mirrors under non-uniform load

| Aperture /mm | $F/\#$ | Load /Pa | PV / $\lambda$ ( $\lambda=632.8$ nm) | RMS / $\lambda$ ( $\lambda=632.8$ nm) |       |
|--------------|--------|----------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------|
| 300          | 5      | P1=17.72 | P2=16.82                             | 2.516                                 | 0.509 |
|              |        | P4=13.27 | P5=10.40                             |                                       |       |
|              | 10     | P1=2.24  | P2=2.13                              | 1.337                                 | 0.272 |
|              |        | P4=1.69  | P5=1.32                              |                                       |       |
|              | 20     | P1=0.35  | P2=0.33                              | 0.875                                 | 0.253 |
|              |        | P4=0.27  | P5=0.23                              |                                       |       |

从以上仿真结果中可以看出,4.2节中得出的结论1)在非均匀载荷作用的情形下仍适用,即对于非均匀作用载荷下成形的膜基反射镜,当口径相同时,  $F$ 数越大,面形误差越小。由于采用对称性结构的非均匀加载方式,所得的膜基反射镜与标准抛物面镜之间的面形误差仍具有对称性,但在各个载荷施加区域的交界处

具有不连续性,有一定的起伏。这与非均匀载荷条件下,两个相邻区域之间的边界上受力的不均匀分布有关。同时,通过与4.2节均匀载荷作用下膜基反射镜面形控制结果的比较可以发现,使用非均匀载荷进行膜基反射镜的面形控制其面形的精度与使用均匀载荷相比可以提高2个数量级。

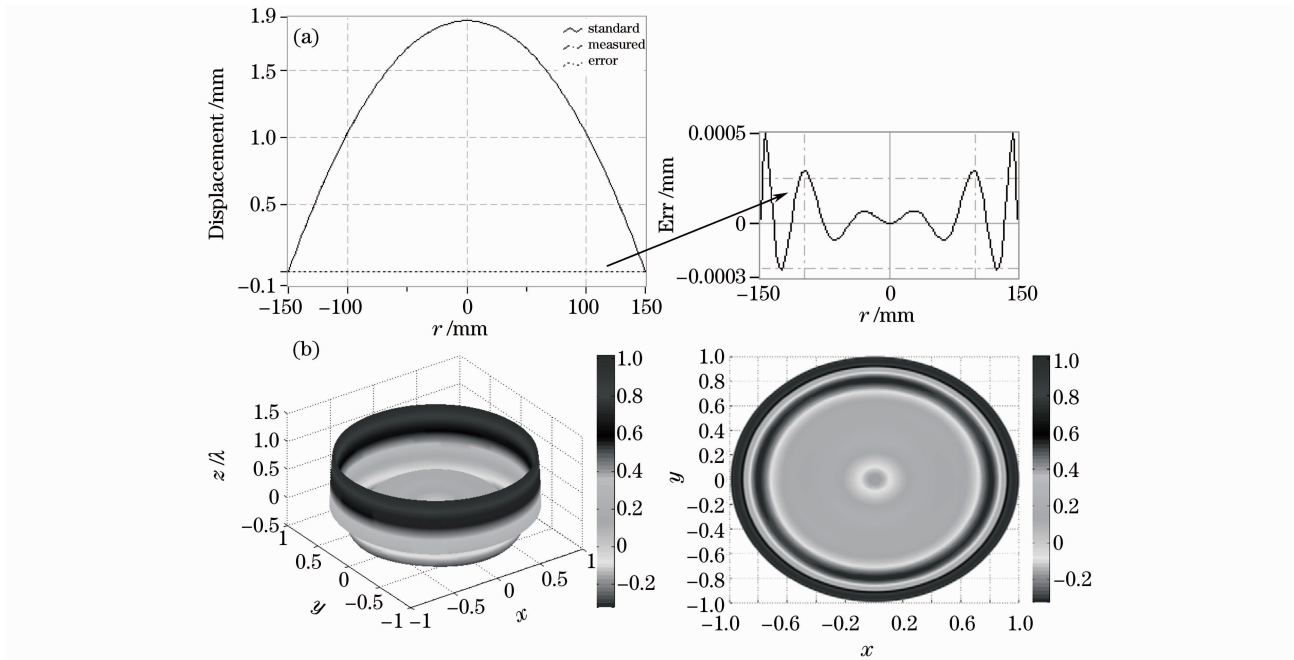


图5 非均匀载荷下口径300 mm,  $F/10$ 的膜基反射镜仿真面形

Fig. 5 Simulation surface of membrane mirror with 300 mm aperture,  $F/10$  under non-uniform load

## 6 结 论

介绍了自行开发的膜基反射镜面形控制系统的功能及其工作原理,分析讨论膜基反射镜成形的理论数学模型,并对均匀载荷和非均匀载荷下膜基反射镜的有限元模型做了分析和说明,实现了膜基反射镜面形控制系统的非均匀载荷控制功能。对口径300 mm,不同 $F$ 数的膜基反射镜分别做了均匀载荷和非均匀载荷下的仿真分析。仿真实验表明,在非均匀载荷作用下,膜基反射镜面形精度比均匀载荷作用下的精度要高出1~2个数量级。这种非均匀载荷的作用方式,可望用于高面形质量的大口径轻型膜基反射镜的设计和研制。

## 参 考 文 献

- 1 J. D. G. Rather, G. W. Zeiders, J. R. Powell. Breakthrough technologies for ultra large telescopes[C]. AIP Conference Proceedings, 2008, **969**(1): 511~517
- 2 Michael J. Shepherd, Richard G. Cobb, Gina A. Peterson *et al.*. Quasi-static optics-based surface control of an in-plane actuated membrane mirror[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2007, **44**(4): 953~963
- 3 M. J. Shepherd, R. G. Cobb, A. N. Palazotto *et al.*. Scaling analysis for large membrane optics[C]. 2007 IEEE Aerospace Conference, 2007. 1~13
- 4 Surya Chodimella, James D. Moore, Brian G. Patrick. Design, fabrication, and validation of an ultra-lightweight membrane mirror[J]. *SPIE*, 2005, **5894**: 589416
- 5 Zhang, Gengsheng, Tang, Minxue. Design and simulation of the surface shape control system for membrane mirror[C]. *SPIE*, 2009, **7506**: 750610
- 6 Gao P., Tang M., Zhang G. *et al.*. Theoretical and experimental study on the figuration of flexible membrane mirror[C]. *SPIE*, 2008, **7156**: 71562N
- 7 Chen Xinhua, Tang Minxue, Shen Weimin. Membrane mirror deformed by electrostatic pressure[C]. *SPIE*, 2007, **6721**: 67210K

- 8 R. A. Carreras, D. K. Marker, B. J. Lutz. Fuzzy logic control for an optical membrane mirror[J]. *Intell. Autom. Soft Co.*, 2005, **11**(1): 59~68
- 9 Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich. Fuzzy Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 1~118
- 10 Daniel Malacara. Optical Shop Testing[M]. Bai Guoqiang, Xue Junao *et al.*. Transl. Beijing: China Machine Press, 1983. 443~460  
马拉卡拉. 光学车间检验[M]. 白国强, 薛君敖 等译. 北京: 机械工业出版社, 1983. 443~460
- 11 Zhen Xiaojing. Large Disturbance Theory of Circular Thin Plate and Application [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1990. 135~164  
郑晓静. 圆薄板大扰度理论及应用[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1990. 135~164