

文章编号: 1000-4750(2014)03-0247-10

不同边界扰动形式对充气天线反射面形面精度的影响

伞冰冰, 朱召泉, 何小斐

(河海大学土木与交通学院, 江苏, 南京 210098)

摘 要: 充气天线的性能主要取决于其形面几何精度。该文以几何非线性有限元法为基础, 对不同焦径比和口径的天线反射面进行分析, 探讨了三种具有代表性的边界扰动分布形式(均匀扰动、局部扰动及波形扰动)对天线反射面几何形状及应力的影响特性及原因, 并分别获得了形面精度对这三种扰动的敏感度。研究从影响区域、影响值大小、影响敏感度及褶皱分布等几个方面对三种扰动形式进行了定性和定量的比较, 得到如下主要结论: 均匀扰动及波形扰动对整个曲面形状均有影响, 在边界影响区曲面会同时产生平移和曲率变化, 中间区域则主要发生曲面平移。局部扰动则只对局部区域有影响; 三种扰动形式中, 在扰动值相同的情况下, 均匀扰动引起的误差值最大, 但形面误差值对局部扰动和波形扰动更敏感; 除施加向外均匀扰动时无褶皱以外, 其他扰动形式均会导致在影响区域内出现褶皱。此外, 研究还探讨了天线焦径比和口径的影响。最后, 在上述研究成果的基础上给出了反射面形面精度被动控制和主动控制的合理建议。

关键词: 充气天线反射面; 形面精度; 边界均匀扰动; 边界局部扰动; 边界波形扰动

中图分类号: TU359 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.07.0640

EFFECTS OF BOUNDARY PERTURBATIONS WITH DIFFERENT DISTRIBUTIONS ON SHAPE ACCURACY OF INFLATABLE ANTENNA REFLECTORS

SAN Bing-bing, ZHU Zhao-quan, HE Xiao-fei

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The performance of inflatable antennas critically depended on the shape accuracy of the membrane reflectors. Based on the non-linear finite element method, this paper explores the effects of boundary perturbations on the shape and stress of inflatable antenna reflectors of different focal-length-to-diameter ratios and diameters, as well as the reasons for these effects. Three kinds of distributions of boundary are focused on, including uniform distribution, local distribution and waveform distribution. The sensitivity analyses are respectively conducted. The effects of three kinds of boundary perturbations are compared in effect region, effect extent, sensitivity value and wrinkling. The study shows that: the effects of uniform and waveform perturbations act on the whole reflector. In the edge effect regions, the translation and curvature change of surface coexist. In the central regions, only the translation occurs. The effect of local distribution is limited to a local area. Among three kinds of perturbations, the uniform perturbation imposes the largest effect on the shape accuracy. However, the local distribution and waveform distribution have higher sensitivity values. All kinds of distributions except outward uniform distribution lead to wrinkling in effect areas. In addition, the influences of focal-length-to-

收稿日期: 2013-07-17; 修改日期: 2014-01-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51108159); 国家博士后基金面上项目(2012M520984)

通讯作者: 伞冰冰(1981-), 女, 黑龙江人, 讲师, 博士, 硕导, 从事膜结构研究(E-mail: sanbingbing@163.com).

作者简介: 朱召泉(1963-), 男, 河北人, 教授, 硕士, 硕导, 从事钢结构研究(E-mail: zzq@hhu.edu.cn);

何小斐(1987-), 女, 浙江人, 硕士生, 从事充气膜结构研究(E-mail: xfhe61@126.com).

diameter ratios and diameters are discussed. Based on the work presented, suggestions are given on proper strategy in passive and active control of the shape accuracy of inflatable antenna reflectors.

Key words: inflatable antenna reflector; shape accuracy; uniform boundary perturbation; local boundary perturbation; waveform boundary perturbation

随着卫星通信、空间探索、地球观测等空间科学技术的飞速发展,人们对大型空间天线的需求量与日俱增,对其各项技术指标的要求也越来越高。充气天线(图1)实为一种充气膜结构,一般由上下两片对称的抛物面薄膜组成,呈凸透镜状,信号穿过下面的透波面,在上面的反射面上反射而最终汇集在馈源处。它在发射前以折叠的方式存储,发射入轨后通过充气展开达到设计外形。与传统的机械式太空天线相比,充气天线具有重量轻、折叠效率高、展开可靠性高、成本低等优点^[1-2],是实现天线结构大型化和轻量化的有效途径之一。

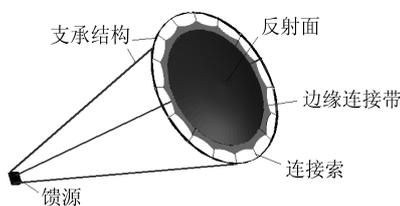


图1 充气天线

Fig.1 Inflatable antenna

不同于建筑膜结构,充气天线的性能主要取决于其形面几何精度^[3],即实际曲面形状与设计曲面形状的接近程度。为了保证天线反射面的工作效率,一般要求将反射面形面误差的均方根值 RMS (Root Mean Square)控制在天线工作波长的 $1/50 \sim 1/20$,也就是说,至少要将 RMS 值控制在毫米级^[4]。但由于充气天线自身刚度较低、易变形,且实际成形过程中会受到多种因素的影响,如气压变化、边界扰动、材性偏差等,因此,如何提高形面精度使其达到预定要求一直是充气天线应用和研究的难点。

根据加工工艺的不同,可将充气天线反射面分为两类:第一类是以平面为初始形状,在气压作用下变形为近似的抛物面形状;第二类是以曲面为初始形状,充气后获得抛物面。国内外学者对这两类天线的形面精度问题均已进行了大量的研究。其中,边界位置对形面精度的影响是研究热点之一。膜结构是一种边界敏感结构,边界位置的改变对膜结构形态将有较大的影响,因此对边界位置的影响进行研究具有重要意义。

对边界影响的研究包含了两方面的意义,一方

面是从被动控制的角度出发,考虑到在实际施工成形过程中,边界位置不可避免的会与设计位置产生偏离,而这一偏离值自然会使实际成形曲面与设计曲面产生差距。因此从被动控制的角度,需要探讨实际边界位置误差对形面精度的影响,从而给出合理的边界误差控制值;另一方面天线的成形会受到多种误差因素的影响,而且有些因素在设计中无法准确预测,如果只进行被动控制较难达到目标精度。这种情况下,就需要通过主动控制手段对曲面形状进行调整,其中对边界施加强制位移进而降低形面误差是主动控制的有效方法之一。为了提高主动控制的效率,就需要研究如何对边界施加强制位移以降低形面误差。但以上两方面本质上都是在研究边界位置与膜面形状之间的关系,因此本文不再进行区分,将边界位置误差和边界强制位移统称为边界扰动。

Jenkins 等^[4]采用有限元法研究了边界扰动对第一类天线形面精度的影响,对均匀分布于圆形边界上的离散边界点施加相等的径向扰动,获得天线曲面的变化情况,研究表明通过施加边界扰动可以显著的改变形面精度,并由此提出通过边界扰动来控制形面精度的方法。Tang 等^[5]采用非线性有限元法研究了边界为固定连续边界时边界扰动对形面精度的影响,以及反射面通过径向弹簧与支承结构相连的情况下弹簧系数对形面精度的影响。Bishop 等^[6]也开展了类似的工作。国内学者徐彦、关富玲等^[7]针对第一类天线,提出通过调整连接索来调整形面的方法。Greschik 等^[8]分别研究了边界扰动对两种天线形面精度的影响并进行了比较。Coleman 等^[9]研究了边界索力对反射面形状的影响,并与固定边界的情况进行了比较。本文作者在文献[10]中针对第二类天线,对边界扰动的影响进行了敏感度分析,并与裁剪片数、膜材弹性模量偏差、气压偏差等其他影响因素进行比较,结果表明形面精度对边界扰动的敏感度最大。上述研究已表明,边界扰动对形面精度有着显著的影响,是控制反射面形面精度的重要因素之一。

上述研究已取得了一系列有价值的成果,但这

些研究大多是针对边界均匀扰动情况，即边界上各点的扰动方向和扰动值是相等的。这与实际情况有一定的差距。首先从被动控制角度说，施工成形中产生的边界误差通常具有一定的随机性，可能的分布形式有多种，仅根据均匀扰动的影响，无法为边界误差的控制提供有效建议。另外从主动控制的角度讲，由于受到多种误差因素的共同作用，成形曲面的误差分布形式也具有多种可能形式，仅采用边界均匀扰动的方式有时无法有效的提高形面精度。综上，有必要对不同的边界扰动分布形式进行研究。

本文以第二类天线为研究对象，以几何非线性有限元法为基础，对不同焦径比和口径的天线反射面进行分析，探讨了三种具有代表性的边界扰动分布形式(均匀扰动、局部扰动及波形扰动)对天线反射面几何形状及应力的影响特性，并分别获得了形面精度对这三种扰动的敏感度。最后，从影响区域、影响值大小、影响敏感度及褶皱分布等几个方面对三种扰动形式进行了比较，力争为反射面形面精度的控制提供依据和建议。

1 基本分析方法

本文的研究针对第二类天线，即通过对一零应力初始曲面施加设计气压获得目标抛物面形状。这里采用迭代法^[10]求得目标抛物面对应的零应力曲面，该方法以非线性有限元法^[11]为基础，通过增加迭代次数，可不断提高求解精度，直至满足要求。因此，文中所采用的零应力曲面，在没有其他扰动影响的情况下，充气后即为目标曲面，误差近似为0。

采用非线性有限元法对该零应力曲面进行充气成形模拟，并在模拟过程中施加边界扰动，即获得边界扰动下的曲面形状。具体步骤如下：

- 1) 根据迭代法的结果建立零应力曲面的有限元模型，边界设为连续固定边界。
- 2) 将气压作为静力荷载施加到零应力曲面上。
- 3) 采用 Newton-Raphson 方法进行非线性有限元求解，并同时施加边界强制位移。有限元基本方程如下式所示。

$$(\mathbf{K}_{Li} + \mathbf{K}_{NLi}) \cdot \Delta \mathbf{U}_i = \mathbf{R}_i + \mathbf{F}_i \quad (1)$$

式中： \mathbf{K}_{Li} 、 \mathbf{K}_{NLi} 分别为第*i*个迭代步的材料刚度矩阵和几何刚度矩阵； $\Delta \mathbf{U}_i$ 为位移向量； \mathbf{R}_i 和 \mathbf{F}_i 分别为等效结点内力和外荷载向量。

考虑到膜材受压即产生褶皱，在上述有限元分析中引入松弛应变能密度法^[10]对褶皱进行模拟。

以上述方法为核心，本文编制了相应的 Fortran 程序进行边界扰动分析。分析中假定其他误差或扰动均为零。

对反射面的边界扰动主要是通过边界连接索施加的，通过索力的增大或减小使边界向外或向内移动，每一根索通过边缘连接带影响一段边界(图 1)。各索力的变化情况不同，反射面的边界扰动分布形式就会有所不同。本文主要分析三种具有代表性的边界扰动形式：均匀扰动、局部扰动、波形扰动。如图 2 所示，均匀扰动是指在全部连接索上施加方向相同、大小相等的径向扰动，则反射面边界上的各点将产生近似相等的位移；局部偏差是指在某一局部产生向内或向外的位移，靠近索的位置位移最大，向两侧逐渐减小，近似呈半个正弦波形状；波形扰动是指每隔一根连接索施加相同的扰动，则反射面边界上的各点将产生多个正弦波的扰动。扰动值大小以无量纲的形式表示为：

$$\delta = \Delta R / R \quad (2)$$

式中： $R = D / 2$ ， D 为抛物面口径； ΔR 表示边界位置相对于设计位置的径向差值，正值代表边界扰动径向向外，负值代表向内；扰动为局部扰动和波形扰动时， ΔR 代表扰动的峰值。

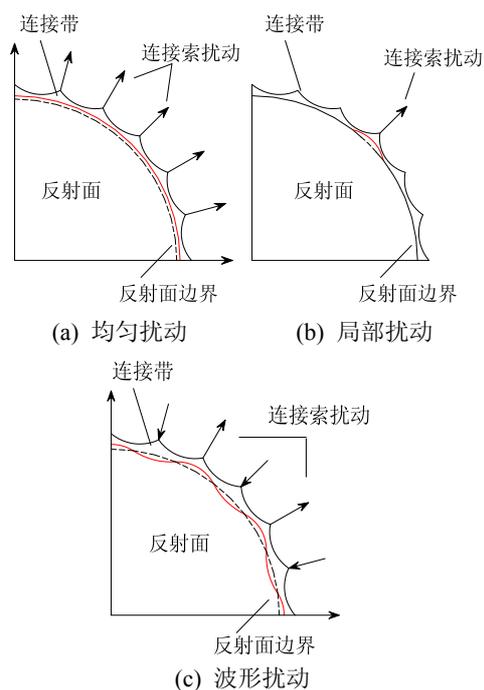


图 2 边界扰动形式

Fig.2 Distributions of boundary perturbation

充气抛物面天线的形面误差是指受扰动后的实际曲面形状与设计形状之间的差异。本文反射面与透光面为对称设置,因此根据对称性可仅取出反射面进行分析,建立坐标轴如图3所示。形面误差采用实际曲面上各个点与设计曲面对应点之间的竖向(即 z 向)差值 dz 来表示, dz 大于零表示实际曲面比设计曲面高, dz 小于零则相反。分析中将通过 dz 的分布云图和其沿径向或环向的分布曲线来表征边界扰动对曲面形状的影响。同时,引入均方根值RMS及RMS与口径 D 的比值对整体形面误差进行量化描述,RMS表达式如下:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n dz_i^2}{n}} \quad (3)$$

式中: dz_i 为第 i 个有限元结点对应的 z 向差值; n 为有限元结点总数。

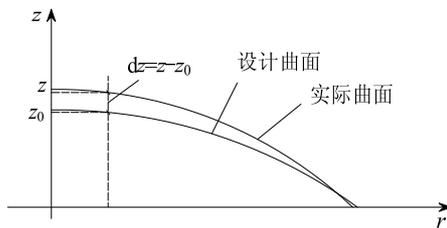


图3 形面几何误差示意图
Fig.3 Sketch of shape error

考虑到膜结构“形”与“态”一一对应的特点,研究也将探讨边界扰动对膜面应力的影响,以期更全面的阐明边界扰动对膜曲面的影响。此外,反射面要求膜面尽量光滑,因此将根据最小主应力的分布分析褶皱的产生情况。

参考已有文献资料,扰动值范围取 $0 \sim \pm 0.3\%$ 。通过参数分析获得RMS/ D 值与扰动值 δ 之间的关系曲线,并采用无量纲化的敏感度函数对影响敏感程度进行描述:

$$S = \left| \frac{d\text{RMS}}{\text{RMS}} \right| / \left| \frac{d\delta}{\delta} \right| \quad (4)$$

敏感度值 S 越大,表明形面精度对边界扰动越敏感。

分析考虑不同焦距比 F/D 和口径 D 的影响。参考天线的常规取值范围,本文分别取焦距比 $F/D = 0.50, 0.75, 1.00, 1.25$,口径 $D = 3\text{m}, 6\text{m}, 9\text{m}, 12\text{m}$ 。膜材采用Kapton膜,参数取值如下:膜材弹性模量 $E = 2.5 \times 10^9 \text{Pa}$ 、泊松比 $\mu = 0.34$ 、膜材厚度 $t = 2.5 \times 10^{-3} \text{mm}$ 。设计气压 $P = 10 \text{Pa}$ 。取局部扰动和波

形扰动的半波长为 $0.175R$ 。为了简化计算,根据结构的对称性,分析局部扰动时取 $1/2$ 反射面,分析均匀扰动和波形扰动时则取 $1/4$ 反射面。将反射面边界设为固定连续支座,通过对边界结点施加强制位移模拟边界扰动。

2 边界均匀扰动对形面精度的影响

首先以 $F/D = 0.75, D = 3.0\text{m}$ 的反射面为例探讨边界均匀扰动对形面精度的影响特征。图4给出了扰动值为 $\pm 0.1\%$ 时的形面误差分布情况。可以看到,当均匀扰动向外时,反射面整体下降。除靠近边界的区域以外,整个膜面的形面误差分布比较均匀,在 -5.00mm 左右,整体RMS值经计算为 4.89mm 。也就是说,均匀扰动对中间区域,只使其发生平移而不会改变其曲率,但对边界区域会同时改变其位置和曲率(称该区域为边界影响区)。当均匀扰动向内时,曲面整体上升,同扰动向外的情况相似,扰动对中间区域的影响较为均匀。误差绝对值较之扰动向外的情况略低,RMS值为 4.35mm 。

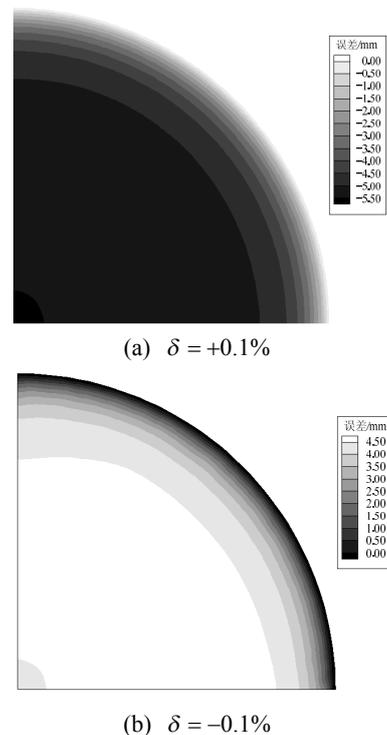


图4 边界均匀扰动下的形面误差分布图

Fig.4 Distribution of shape error induced by uniform boundary perturbation

将扰动值增大至 $\pm 0.3\%$,与 $\delta = \pm 0.1\%$ 的情况比较可以看到(图5),随着误差扰动值的增大,形面误差值增大,边界影响区的范围也随之增大。在 $\delta \leq \pm 0.3\%$ 的范围内,边界影响区在 $0.7R \sim 1.0R$ 。

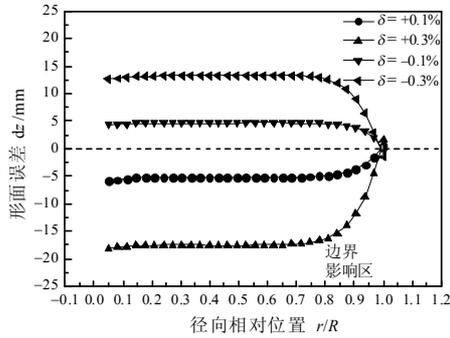


图 5 边界均匀扰动对形面误差的影响

Fig.5 Effect of uniform boundary perturbation on shape error

边界均匀扰动对膜面应力的影响如图 6 所示, 当扰动向外时, 整个膜面受拉, 最大主应力(沿曲面径向)和最小主应力(沿曲面环向)均增大, 因此膜面没有褶皱产生; 当扰动向内时, 膜面有受压的趋势, 最大主应力和最小主应力均减小, 在靠近边界的区域最小主应力减小至 0, 也就是说在边界区域产生了褶皱, 褶皱沿径向单向受拉。随着扰动值的增大, 褶皱区域也增大。

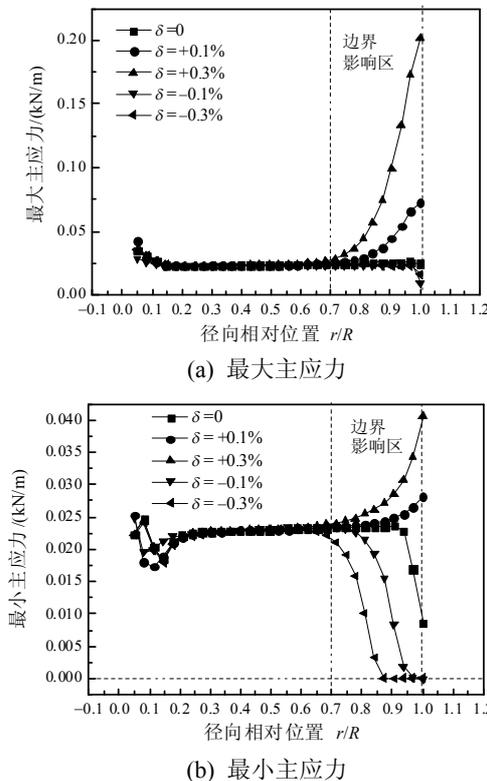


图 6 边界均匀扰动对膜面应力的影响

Fig.6 Effect of uniform boundary perturbation on stress

进一步对不同焦径比和口径的反射面进行分析。分析表明, 随着焦径比的增大, 也就是随着曲面趋于平坦, 形面误差值 RMS 增大, 且边界影响区所占比例也会增大; 随着跨度的增大, 误差值

RMS 和边界影响区比例均增大。图 7、图 8 给出了相对误差值 RMS/D 与扰动值的关系, 以便为形面精度控制提供依据。可以看到, RMS/D 值随扰动绝对值的增大而线性增大。扰动值一定的情况下, RMS/D 值随焦径比的增大而增大, 随口径的增大而减小。总体而言, 焦径比的影响大于口径的影响。由于 RMS/D 与扰动值近似呈线性关系, 根据式(3)可计算出, RMS/D 对边界均匀扰动的敏感度值为 1。也就是说, 扰动值每变化 1%, RMS 值就会改变 1%。

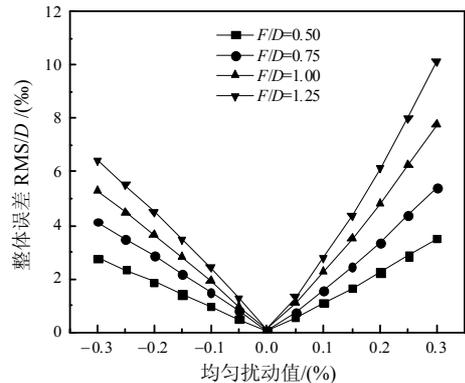


图 7 不同焦径比下 RMS/D -均匀扰动值的关系($D=3m$)

Fig.7 Relationship between RMS/D and uniform perturbation value with respect to different F/D ($D=3m$)

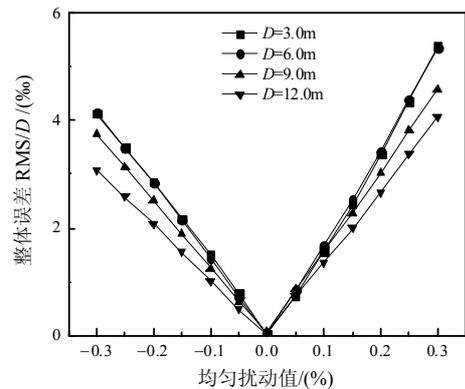


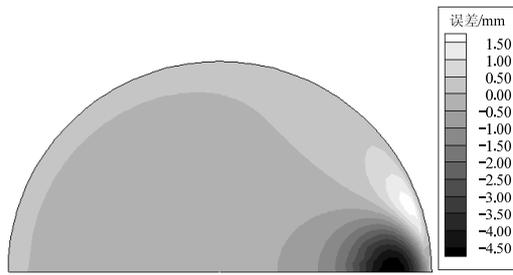
图 8 不同口径下 RMS/D -均匀扰动值的关系($F/D=0.75$)

Fig.8 Relationship between RMS/D and uniform perturbation value with respect to different D ($F/D=0.75$)

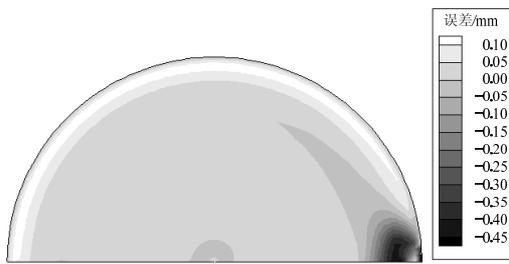
3 边界局部扰动对形面精度的影响

仍以 $F/D=0.75$, $D=3.0m$ 的反射面为例, 观察边界局部扰动对形面的影响。图 9 为局部扰动值为 $\pm 0.1\%$ 时的形面误差分布。可以看到, 当施加向外的局部扰动时, 曲面的大部分区域均有所下降, 但仅在靠近边界扰动的局部区域影响较大, 这个区域被称为局部影响区。在这个区域内最大误差可达到 $-4.5mm$, 与均匀向外扰动时的最大误差值接近。但对局部影响区以外的膜面影响较小, 误差值仅在

-0.5mm 左右。由于扰动的影响只局限于一个局部区域，因此整体 RMS 值较低，仅为 0.66mm。



(a) $\delta = +0.1\%$



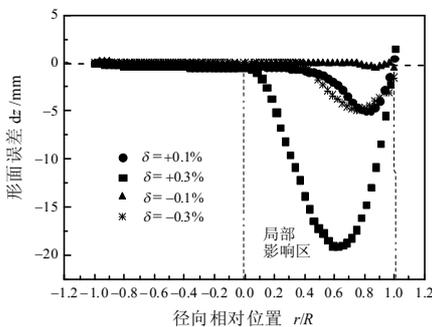
(b) $\delta = -0.1\%$

图 9 边界局部扰动下的形面误差分布图

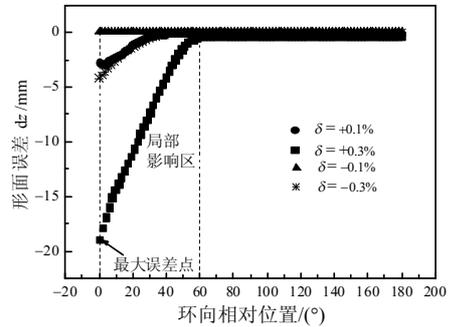
Fig.9 Distribution of shape error induced by local boundary perturbation

当边界局部扰动向内时，与均匀扰动的情况不同，曲面没有上升反而大部分区域下降，靠近边界局部扰动的位置也产生了一个局部影响区，但这一区域的面积比局部扰动向外时小，且误差值也较小，最大误差值仅为-0.45mm，远小于均匀扰动的情况。整体 RMS 值经计算仅为 0.05mm。可见，局部向内扰动对曲面精度影响很小。

图 10 给出了局部扰动值为 $\pm 0.1\%$ 和 $\pm 0.3\%$ 时形面误差沿径向和环向的分布(取经过误差最大点的径向线和环向线)。可以看到，随着扰动值的增大，误差值增大，局部影响区所占比例也有所增大。就整个曲面来说，在 $\delta \leq \pm 0.3\%$ 的范围内，局部影响区沿径向不超过曲面的 1/2，沿环向不超过 120° (圆心角)。



(a) 误差沿径向分布

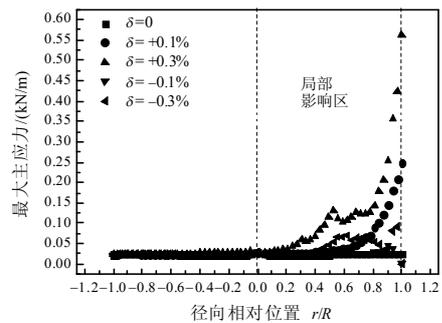


(b) 误差沿环向分布

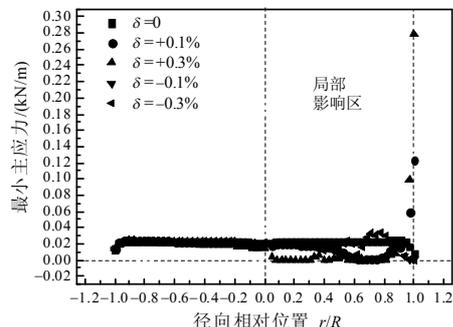
图 10 边界局部扰动对形面误差的影响

Fig.10 Effect of local boundary perturbation on shape error

图 11 表明，当局部扰动向外时，最大主应力增大，且增大幅度大于均匀扰动向外的情况，最小主应力减小，部分区域甚至降至 0，即产生了褶皱，褶皱分布如图 12(a)所示；当局部扰动向内时，最大主应力增大，最小主应力仅有较小幅度的变化，在靠近边界处产生了少量的褶皱(图 12(b))。这主要是由于扰动区和非扰动区的相互作用造成的。当局部边界向外移动时，其他未发生扰动区域将会对扰动区域产生径向的拉力和环向的压力。由于径向应力为最大主应力，对整个曲面的变形起到主要控制作用，因此曲面仍会有较大幅度的降低。当局部扰动向内时，扰动区沿径向受到了非扰动区的阻碍，应力未有减小，反而有所增加。由于最大主应力的控制作用，曲面有小幅度的降低。



(a) 最大主应力



(b) 最小主应力

图 11 边界局部扰动对膜面应力的影响

Fig.11 Effect of local boundary perturbation on stress

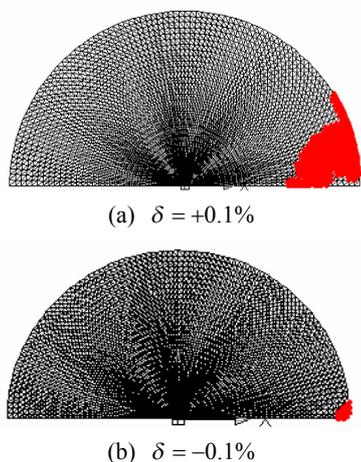


图 12 边界局部扰动下的褶皱分布(加粗区域为褶皱)
Fig.12 Distribution of wrinkles induced by local boundary perturbation (represented in bold)

进一步探讨形面误差值与局部边界扰动的关系及结构参数焦距比和口径的影响。由图 13、图 14 可以看到, RMS/D 值随扰动值的增大而增大, 且呈非线性关系。焦距比 F/D 对形面精度影响较小(图 13)。随着口径的增大, RMS/D 值减小, 当 $D \geq 6m$ 时, 口径影响很小。

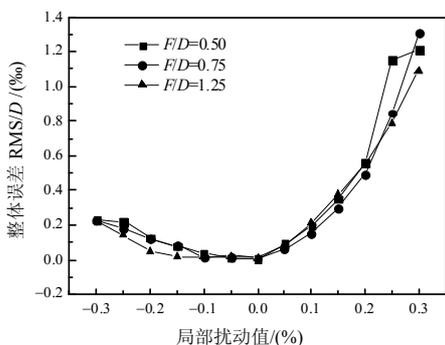


图 13 不同焦距比下 RMS/D-局部扰动值的关系($D=3m$)
Fig.13 Relationship between RMS/D and local perturbation value with respect to different F/D ($D=3m$)

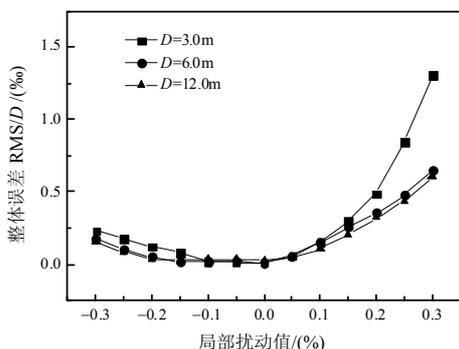


图 14 不同口径下 RMS/D-局部扰动值的关系($F/D=0.75$)
Fig.14 Relationship between RMS/D and local perturbation value with respect to different D ($F/D=0.75$)

考虑到局部向内扰动对形面精度影响很小, 对

形面精度控制的意义不大, 这里仅给出当局部扰动向外时形面精度对扰动值的敏感度(图 15、图 16)。可以看到, 局部扰动时敏感度主要在 1.0~2.2, 也就是说形面精度对局部扰动比对均匀扰动更敏感。

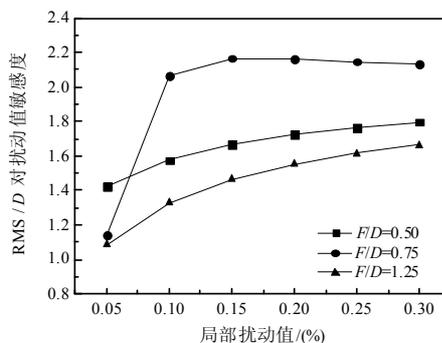


图 15 不同焦距比下 RMS/D 对局部扰动值的敏感度($D=3m$)
Fig.15 Sensitivity of RMS/D on local perturbation value with respect to different F/D ($D=3m$)

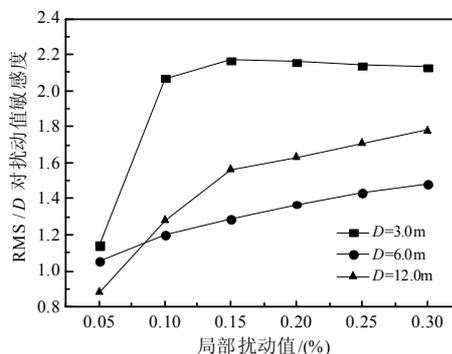


图 16 不同口径下 RMS/D 对局部扰动值的敏感度($F/D=0.75$)
Fig.16 Sensitivity of RMS/D on local perturbation value with respect to different D ($F/D=0.75$)

4 边界波形扰动对形面精度的影响

对于 $F/D=0.75$, $D=3.0m$ 的反射面施加边界波形扰动, 由图 17、图 18 可以看到, 波形扰动对整体曲面的影响与向外均匀扰动的情况相近: 整体曲面下降, 误差分布均匀, 只在靠近边界的区域略受边界的波形影响。随着扰动值的增大, 形面误差值 RMS 增大, 边界影响区增大。边界影响区范围与均匀扰动的情况接近, 在 $\delta = 0.1\% \sim \delta = 0.3\%$ 的范围内, 边界影响区在 $0.7R \sim 1.0R$ 。在边界影响区内, 形面误差值与均匀扰动向外的情况近似相等, 在中间平移区, 误差值比边界均匀扰动向外的情况略小。由于随扰动值增大, 局部影响区越大, 因此波形扰动的误差值与均匀扰动向外的误差值越接近。经计算当扰动值为 0.1%、0.3% 时, RMS 值为 3.76mm、15.56mm, 分别比均匀向外扰动时减小了 23.0%、4.8%。

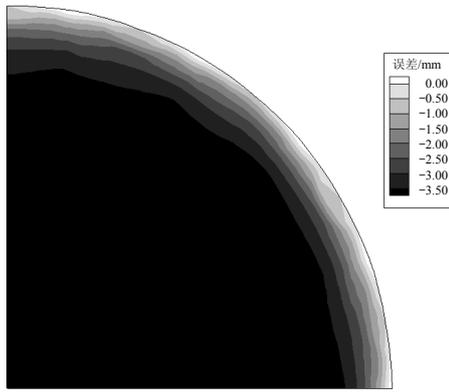
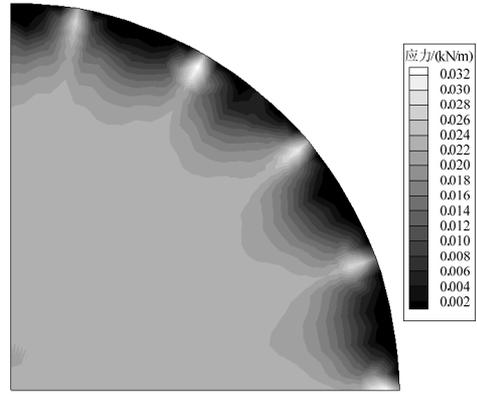


图 17 边界波形扰动下的形面误差分布图($\delta = 0.1\%$)
 Fig.17 Distribution of shape error induced by waveform boundary perturbation ($\delta = 0.1\%$)



(b) 最小主应力

图 19 边界波形扰动下的膜面应力($\delta = 0.1\%$)
 Fig.19 Distributions of stress with respect to waveform boundary perturbation ($\delta = 0.1\%$)

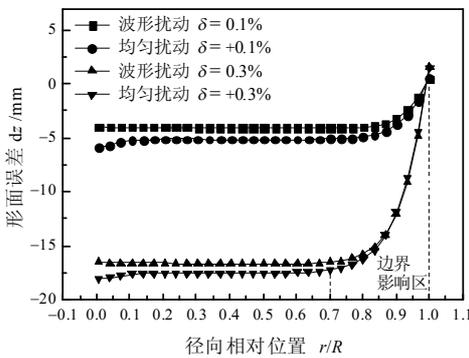


图 18 边界波形扰动与均匀扰动下的形面误差比较
 Fig.18 Comparison of effects of waveform and uniform boundary perturbation

由图 19 可以看到, 受到边界波形扰动的影响, 边界影响区内的应力沿环向产生了较为明显的不均匀分布, 其中扰动向外的峰值处对应的应力值最大, 向内的峰值处对应的应力最小。在边界影响区内, 最小主应力降至零, 即产生了褶皱。这主要是由于边界变形的不协调导致的。在中间平移区内, 应力值与均布向外扰动的情况接近。总体看来, 在波形扰动中, 向外扰动起到了控制作用。

由图 20、图 21 可知, RMS/D 值随边界扰动值增大而增大, 且呈非线性关系。随着焦径比 F/D 的增大, RMS/D 值增大; 随口径 D 的增大, RMS/D 值减小。总体来看, 焦径比和口径对形面精度的影响均比较大。进一步计算出敏感度如图 22、图 23 所示, RMS/D 值对波形扰动的敏感度在 1.0~1.8, 比均匀扰动大, 比局部扰动略小。

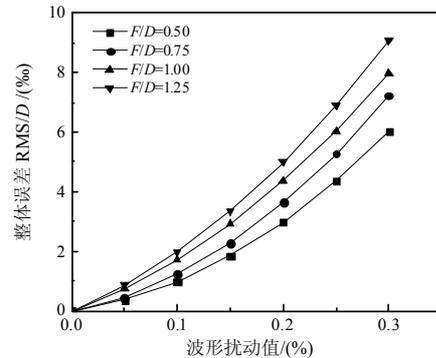
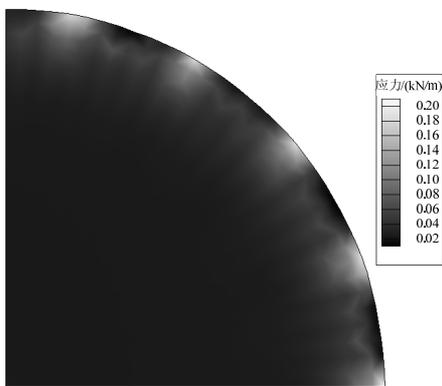


图 20 不同焦径比下 RMS/D-波形扰动值的关系($D=3m$)
 Fig.20 Relationship between RMS/D and waveform perturbation value with respect to different F/D ($D=3m$)



(a) 最大主应力

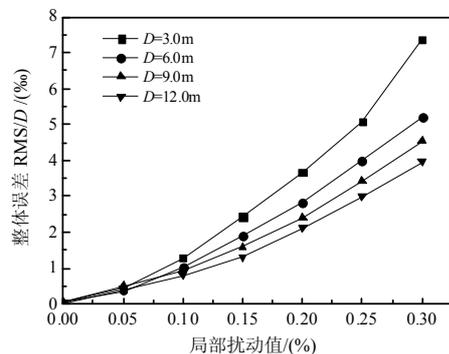


图 21 不同口径下 RMS/D-波形扰动值的关系($F/D=0.75$)
 Fig.21 Relationship between RMS/D and waveform perturbation value with respect to different D ($F/D=0.75$)

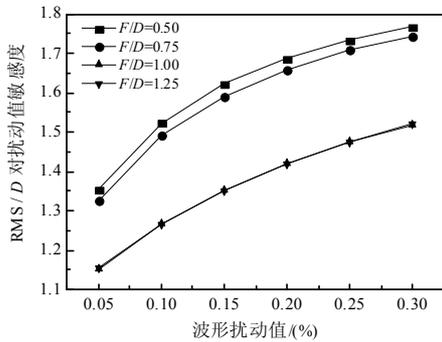


图 22 不同焦距比下 RMS/D 对波形扰动值的敏感度(D=3m)
Fig.22 Sensitivity of RMS/D on waveform perturbation value with respect to different F/D (D=3m)

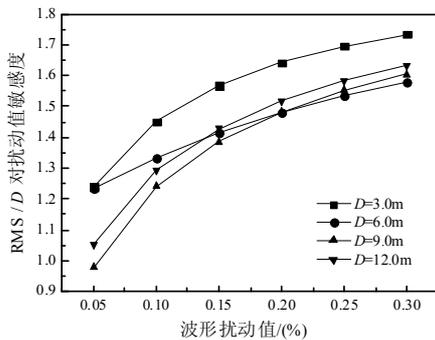


图 23 不同口径下 RMS/D 对波形扰动值的敏感度(F/D=0.75)
Fig.23 Sensitivity of RMS/D on waveform perturbation value with respect to different D (F/D=0.75)

5 形面精度控制建议

通过上述分析可知,不同形式的边界扰动对反射面的形面精度影响有所不同:

1) 扰动影响区域(图 24): 均匀扰动及波形扰动对整个曲面均有影响,在边界影响区曲面会同同时产生平移和曲率变化,中间区域则主要发生曲面平移。局部扰动只对局部区域有影响,在局部影响区内既有平移又有曲率变化;局部扰动向外时影响区域较大,向内时影响区域较小。

2) 褶皱情况(图 24): 施加向外均匀扰动时,无褶皱;施加向内均匀扰动和波形扰动时,边界影响区内的部分区域出现褶皱;施加向外局部扰动时,局部影响区的膜面均产生褶皱;施加向内局部扰动时产生较少褶皱。

3) 影响值大小(即 RMS/D 值大小): 在扰动值相同的情况下,均匀扰动>波形扰动>局部扰动。均匀扰动与扰动值近似呈线性关系,局部扰动、波形扰动呈非线性关系。随着扰动值的增大,波形扰动对应的误差值逐渐接近均匀向外扰动的情况。

4) 对扰动的敏感度(图 25): 局部扰动>波形扰

动>均匀扰动。

5) 焦距比及口径的影响: 对于均匀扰动, RMS/D 值随焦距比的增大而增大,随口径的增大而减小,焦距比的影响大于口径的影响;对于局部扰动,焦距比 F/D 对形面精度影响较小,口径的影响略大,随着口径的增大, RMS/D 值减小,当 D ≥ 6m 时,口径影响很小;对于波形扰动,随着焦距比 F/D 的增大, RMS/D 值增大;随着口径 D 的增大, RMS/D 值减小,焦距比和口径对形面精度误差值的影响均比较大。

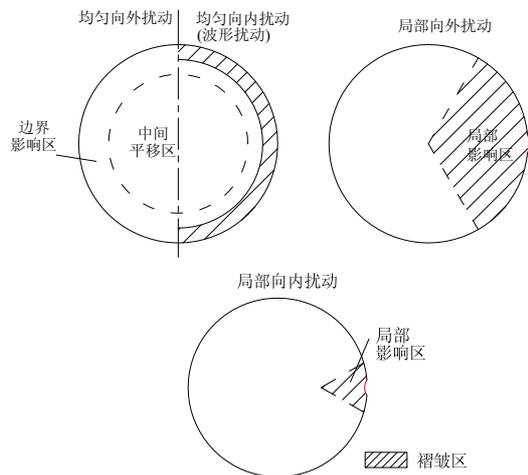


图 24 不同边界扰动形式对形面的影响
Fig.24 Effect sketch of different kinds of boundary perturbation

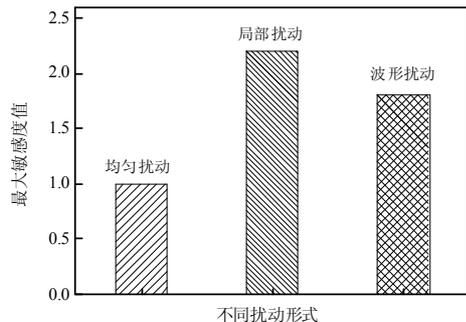


图 25 不同边界扰动形式的敏感度最大值
Fig.25 Maximum sensitivity of different kinds of boundary perturbation

根据上述结论,本文分别为反射面形面精度的被动控制和主动控制提出如下建议:

1) 被动控制

实际边界的误差分布可能存在多种形式,但通过上述分析可知均匀扰动产生的误差值大于局部和波形扰动,为最不利分布形式。因此可以根据均匀扰动的 RMS/D-扰动值关系曲线(图 7、图 8)确定边界误差的控制值。对图 7 和图 8 进行线性拟合,

得到控制值表达式如下:

$$\delta \leq k \cdot E_d \cdot \frac{D}{F} \quad (5)$$

式中: E_d 为形面精度要求, $E_d = (\text{RMS}/D)_d$; k 为系数, 当扰动向外时, $k = 18 \sim k = 26$; 扰动向内时, $k = 14 \sim k = 18$ 。

2) 主动控制

当曲面形状受到了其他未预测因素的干扰而偏离设计曲面, 且较设计曲面偏高时, 可采用均匀向外扰动和波形扰动。其中波形扰动敏感度较大, 调整效率更高。例如, 若将 RMS 值提高 10%, 需施加 10% 的均布向外扰动, 但只需施加 5.7%~9% 的波形扰动。当整个曲面存在误差, 且较设计曲面偏低时, 应采用均匀向内的扰动。若曲面仅在局部有误差且较设计曲面偏高, 则对相应位置的连接索施加局部向外的扰动。

上述建议主要针对口径 12m 以内的反射面, 且尚未考虑边界扰动的随机性及边界扰动与其他类扰动可能存在的耦合作用。在下一步工作中将在考虑随机性及多种误差耦合的基础上, 进一步对大口径的形面精度问题展开研究, 对上述建议进行完善。

6 结论

本文以几何非线性有限元法为基础, 对不同焦距比和口径的天线反射面进行分析, 探讨了三种具有代表性的边界扰动分布形式(均匀扰动、局部扰动及波形扰动)对天线反射面几何形状及应力的影响特性及内在原因, 并分别获得了形面精度对这三种扰动的敏感度。研究从影响区域、影响值大小、影响敏感度及褶皱分布等几个方面对三种扰动形式进行了比较, 得到如下主要结论:

(1) 均匀扰动及波形扰动对整个曲面均有影响, 在边界影响区曲面会同时产生平移和曲率变化, 中间区域则主要发生曲面平移。局部扰动则只对局部区域有影响。

(2) 三种扰动形式中, 均匀扰动引起的误差值最大, 但形面误差值对局部扰动和波形扰动更敏感; 除施加向外均匀扰动时无褶皱以外, 其他扰动形式均会导致在影响区域内出现褶皱。

(3) 研究给出了天线焦距比和口径的影响, 并提出了反射面形面精度被动控制值的表达公式。同时, 从主动控制的角度给出了建议, 建议当实际曲面较设计曲面偏高时, 宜采用均匀向外扰动和波形

扰动; 当实际曲面较设计曲面偏低时, 宜采用均匀向内的扰动。

参考文献:

- [1] Bounzidi R, Lecieux Y. A numerical method to optimize the design of a space inflatable membrane reflector [J]. *Acta Astronautica*, 2012, 74: 69-78.
- [2] 毛丽娜, 谭惠丰. 充气天线反射面结构的理论分析与精度预测[J]. *工程力学*, 2010, 27(4): 197-201.
Mao Lina, Tan Huifeng. Structure analysis and precision evaluation of inflatable antenna reflector [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(4): 197-201. (in Chinese)
- [3] Naboulsi S. Investigation of geometric imperfection in inflatable aerospace structures [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2004, 17(3): 98-105.
- [4] Jenkins C H, Kalanovic V D, Padmanabhan K, et al. Intelligent shape control for precision membrane antennae and reflectors in space [J]. *Smart Materials and Structures*, 1999, 8(6): 857-867.
- [5] Tang T N. Edge effects in pressurized membranes [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128(10): 1100-1104.
- [6] Bishop J A. Shape correction of initially flat membranes by a genetic algorithm [C]. *The 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC, Structure, Structure Dynamics, and Materials Conf.*, AIAA, 98-1984.
- [7] 徐彦, 关富玲, 管瑜. 充气可展天线精度分析和形面调整[J]. *空间科学学报*, 2006, 26(4): 292-297.
Xu Yan, Guan Fuling, Guan Yu. Precision analysis and shape adjustment of inflatable antenna [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2006, 26(4): 292-297. (in Chinese)
- [8] Greschik G, Palisoc A, Cassapakis C, et al. Sensitivity study of precision pressurized membrane reflector deformations [J]. *AIAA Journal*, 2001, 39(2): 308-314.
- [9] Coleman M J, Baginski F, Romanofsky R R. The effect of boundary support and reflector dimensions on inflatable parabolic antenna performance [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2011, 49(5): 905-914.
- [10] 伞冰冰. 膜结构的精细化分析、多目标形态优化与精确成形[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 69-72.
San Bingbing. Refined analysis, multi-objective optimization and accurate surface-forming of membrane structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 69-72. (in Chinese)
- [11] 伞冰冰, 武岳, 沈世钊. 膜结构有限元分析中的平面单元与曲面单元的比较[J]. *工程力学*, 2008, 25(2): 168-173.
San Bingbing, Wu Yue, Shen Shizhao. Comparison between plane and curved elements for the analysis of membrane structures by finite element method [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(2): 168-173. (in Chinese)