

# 空间光学镜筒结构参数的探讨

王 俊 卢 铿 王家骥

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

**摘要** 空间光学镜筒是一个典型的圆筒形薄壳结构,而圆筒形薄壳在航空、航天等机械领域得到了广泛的应用,为减轻薄壳质量、提高薄壳强度和提高了其制造工艺性,通常的圆柱形薄壳都具有加强筋,很显然,加强筋使薄壳的强度及制造工艺性大大提高。但是,加强筋使空间光学镜筒的动力学特性如何变化,至今还没有被深入的探讨。本文对航天相机中筒处的具有轴向和径向加强筋的圆筒进行动力学分析,研究加强筋对空间光学镜筒动力学特性的影响。

**关键词** 薄壳 加强筋 动力学特性

## 1 引 言

板壳结构在工程中有着广泛的应用,但由于其受力状态的复杂性及边界条件的多样性,使得对板壳结构的静力学问题及动力学特性方面的研究至今仍是该领域较为棘手的问题,因此对板壳结构的研究也倍受关注。由于板壳结构的力学复杂性,在研究中一般先提出一些假设条件,对问题予以简化,然后进行理论分析,在理论分析的基础上,采用适当的数值方法求解该问题。相机中筒在相机中是一个较为重要的组成部件,它的前端对光学系统中的次反射镜进行支撑,后端直接与支撑主反射镜的主镜室相连接,工程中对中筒有以下几点要求:

1. 尺寸稳定性要求: 由于相机发射运载的特殊工况及恶劣的空间环境,要求相机中筒必须具有较高的强度及刚度和抗温度扰动的能力,防止发射后的残余应力及变形和温度变化引起的应力与变形,以保证主次反射镜的相对位置关系的正确性;
2. 重量要求: 航空及航天领域,轻量化是一个比较重要的问题,在保证强度及刚度的前提下,空间光学镜筒应尽量具有较轻的重量;
3. 光学要求: 包括安装问题及光阑问题,空间光学镜筒必须便于与其他部件的安装,而且要便于内部的消杂光光阑的安装。

针对以上要求,相机中筒被确定为一种具有外部径向和轴向加强筋的薄壳结构.本文利用板壳理论及板壳的一般分析方法,着重对空间光学镜筒进行动力学特性分析,并在此基础上,进一步讨论加强筋的形状、分布对中筒动力学特性的影响。

## 2 基本理论

相机中筒是一个典型的筋壳结构,若对其进行深入的探讨,需要以下基本假设为前提.首先进行几点假设:

(1) 中筒变形前垂直于中曲面的直线在变形后仍保持为直线,并且仍垂直于中曲面;

(2) 相对于其他应力分量,沿中曲面垂直方向的法向应力可忽略不计;

(3) 相对于壳体微体的移动惯性力,可忽略其转动惯性力;

(4) 法向挠度沿中曲面发现上各点是不变的。

根据以上几点假设,可分别得到中曲面应变与中曲面位移之间的关系、中曲面应变与中曲面内力的关系。然后通过建立中曲面的内力平衡方程,得到具有加强筋圆柱壳(见图1)的振动微分方程:

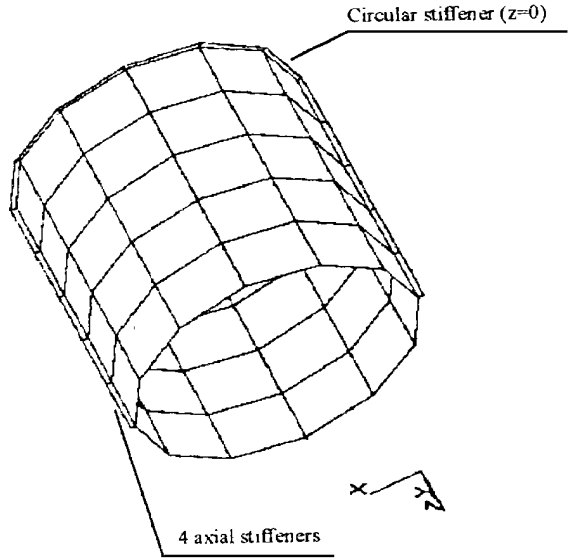


Fig. 1 Thin cylindrical shell

$$B_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + B_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \frac{\partial^2 \Psi}{R \partial x^2} + \rho h_e \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

$$D_x \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^4} + 2T \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^4} - \frac{Eh \partial^2 \Psi}{R \partial x^2} = 0 \quad (2)$$

其中,  $w$  和  $\Psi$  为中筒薄壳的中曲面上沿  $z$  方向的位移分量与应力函数。 $E$ 、 $\rho$  和  $h_e$  分别为杨氏模量、密度和当量壳厚度。方程(1)和方程(2)中的系数分别为:

$$B_x = D + (EI/s)_x \quad D_x = 1/(1 - \nu^2) + (EA)_x/h \quad (3)$$

$$B_y = D + (EI/s)_y \quad D_y = 1/(1 - \nu^2) + (EA)_y/h \quad (4)$$

$$H = D + [(GJ/s)_x + (GJ/s)_y] \quad (5)$$

$$T = (1 - \nu^2) [D_x D_y - \nu(1 - \nu^2)^2] \quad (6)$$

其中,  $I$ 、 $J$  和  $A$  分别是加强筋的转动惯量、扭转刚度和横截面面积,  $D$  是薄壳的柔性刚度,  $G$  和  $\nu$  分别为材料的剪切模量和泊松比。

为求解上述运动微分方程所表示的薄壳运动特性,可采用有限元数值解法来分析.本文利用了大型有限元软件 Patran 求解该问题,对中筒进行了有限元分析。

### 3 计算结果

为弄清加强筋对中筒动态特性的影响, 本文首先对未加加强筋的空间光学镜筒进行了动态特性分析, 然后分别对几种具有不同形式加强筋的圆柱筒进行了计算, 其中包括加四条纵向加强筋、六条纵向加强筋、十二条纵向加强筋、周向圆形加强筋及各种情况时圆筒振动随筋的高度、厚度变化的情况(各种情况前六阶振型相似, 仅以图 2 示意)。圆筒基本结构为: 直径 500mm, 长 500mm, 圆筒壁厚 10mm, 计算结果频率单位为 Hz, 计算过程中的约束方式为自由—自由方式。

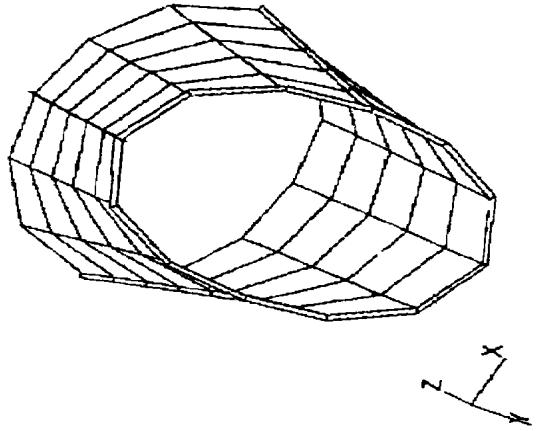


Fig. 2 Mode shape of the shell

Table 1 Natural frequency of the thin cylindrical shell (Hz)

the mode	mode1	mode2	mode3	mode4	mode5	mode6
natural frequency	109	109	140	140	311	311

### 4 结 论

通过以上的分析计算, 我们可以得出结论: 加强筋虽然能使空间光学镜筒结构静强度及制造工艺性得到好转, 但同时给动力学特性带来了变化, 纵向加强筋使得各阶固有频率降低, 圆形加强筋使得各阶固有频率提高, 频率变化程度受到筋的高度、厚度、筋的位置和筋的分布形式的影响。由表一可见, 未加加强筋以前的圆筒结构运动微分方程具有重根, 一阶和二阶、三阶和四阶、五阶和六阶分别为重特征值与特征向量。加入四条纵向加强筋后, 使得重频率解耦, 并由图 3 可见, 纵向加强筋使除第四阶以外的各阶频率降低, 而且, 固有频率值随筋的厚度、高度的变化而变化, 当保持其中一个量不变时, 频率随另一个量的增大而降低; 在保持筋的体积占结构总体积的比例不变的情况下, 将四条筋变为六条筋和十二条筋, 由图 4 可以发现: 结构的固有频率都随着筋的高度或厚度的增加而降低, 而且又出现了重根的情况, 而且, 当继续增加加强筋的数目时, 固有频率趋于一定值; 由图 5 和图 6 还可见, 圆形加强筋对圆筒结构的固有频率起到提高的作用, 而且加强筋的厚度及高度越大, 固有频率提高的越大, 同时, 固有频率的变化还与加强筋的位置有关, 加强筋越向圆筒的中央移动, 就越使固有频率提高的越多。由此可见, 本文的分析对空间光学镜筒结构参数的确定具有一定的指导意义: 当结构的强度及刚度满足要求的前提下, 若需要较高的固有频率时, 加周向圆形加强筋、增大周向加强筋的厚度和高度或减小纵向加强筋的厚度和高度可以达到要求; 而需要较低的固有频率时, 可以加纵向加强筋、减小周向圆形加强筋的厚度和高度或增大纵向加强筋的厚度和高度。

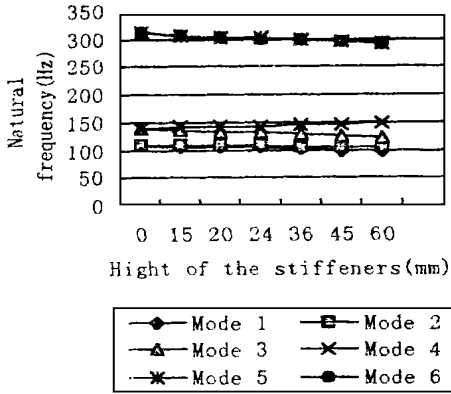


Fig. 3 Natural frequency with 4 axial stiffeners

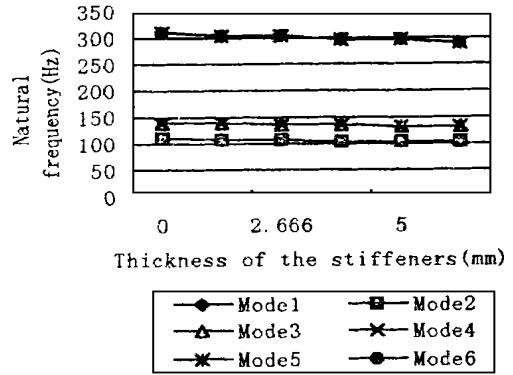
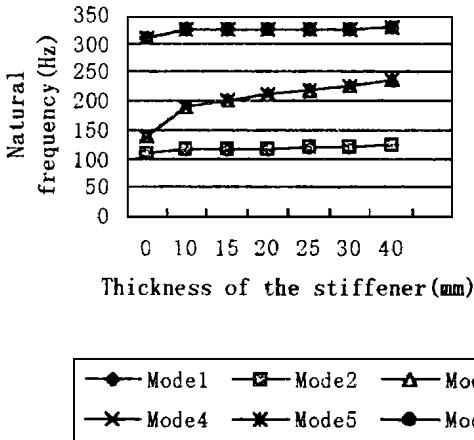
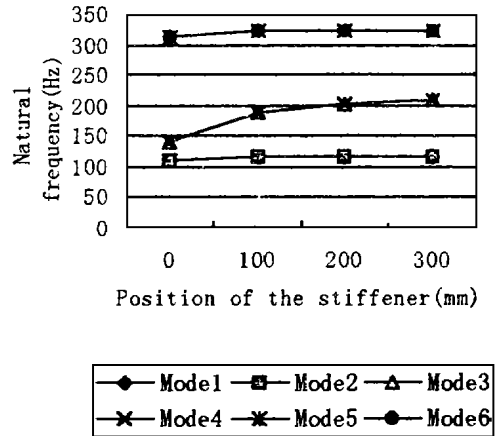


Fig. 4 Natural frequency with 12 axial stiffeners

Fig. 5 Natural frequency with circular stiffener ( $z = 0$ )Fig. 6 Natural frequency with circular stiffener (from  $z = 0$  to  $z = 300$ )

## 参 考 文 献

- 曹志远. 板壳振动理论. 北京: 中国铁道出版社, 1989
- Mead D J, Bardell N S. Free Vibration of a Thin Cylindrical Shell with Discrete Axial Stiffeners. Journal of Sound and Vibration, 1986, 111(2): 229 ~ 250
- Mecitoglu Z. Free Vibrations of Thin, Stiffened, Cylindrical Shallow Shell. AIAA Journal, 1991, 30(3): 848 ~ 850
- 赵经文, 王宏钰. 结构有限元分析, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988

## An Investigation Scheme on Structural Parameters of a Space Optical Tube

WANG Jun, Lu E, WANG Jia-Qi

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

### Abstract

A space optical tube is a typical thin cylindrical shell structure, and thin cylindrical shell is widely used in the field of aircraft, spacecraft and ships. Hence, the dynamic characteristics of this kind of shell have been studied extensively. In order to improve the static characteristics of the shell, stiffeners have found wide applications to stiffen the shell. It is unknown that how the dynamic characteristics of the shell change. The purpose of the present work is to analyze the dynamic characteristics of thin cylindrical shell with axial and circular stiffeners, and the changes of the dynamic characteristics which are affected by the stiffeners parameters.

**Key words:** Thin shell, Dynamic characteristics, Stiffeners

王 俊 男, 中国科学院长春光学精密机械研究所博士研究生。1994年毕业于吉林工业大学汽车与拖拉机专业, 1997年获得吉林工业大学工学硕士学位, 1997年考入中国科学院长春光学精密机械研究所攻读博士学位。