

# 弹性基体对光学仪器动态特性的影响

单宝忠 武克用 卢 镔

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

**摘要** 弹性基体对光学仪器主体的动态特性影响较大,建立光学仪器的力学模型进行动力学分析时有必要考虑弹性基体的影响。同时考察了主体光学仪器受弹性基体刚度影响的一般性规律。

**关键词** 动态特性 弹性基体 光学仪器

## 1 引言

在进行动力学分析的过程中,建立有限元模型是基体的也是十分关键的一步。模型建立的正确与否直接影响动力学分析结果的正确性及精度。建模过程中影响动力学特性的因素主要有:单元的选取、有限元网格的划分和边界条件的处理等。

单元的选取及网格的划分直接影响整机计算模型的质量及刚度的分布,即影响 $[M]$ 、 $[K]$ 矩阵。而边界条件的处理则影响阻尼的变化,同时也影响整体刚度。这些都对整机的固有频率、振型等动力学特性产生影响。这里重点研究一下边界条件的处理对光学仪器动态特性的影响。

对于某些光学仪器,由于应用的需要,有时要固定到以薄壁的或杆件结构为主的基础上。连接到这样结构上的仪器,往往同时还具有静态强度、静态刚度、疲劳寿命、动态刚度等要求。而且光学仪器对所处的各种复杂力学环境较敏感,各种形式的载荷、动态干扰将使光学仪器产生振动。若频率匹配不当,当固有频率与外界干扰频率相同或接近时将发生共振。这些都将对光学仪器工作的可靠性、成像质量等产生影响。因此精确确定光学仪器的固有频率,避免发生共振是很重要的。对光仪自身的特性尤其是动态特性要求很严,在分析中如何能正确评估仪器的动态特性就成为关键问题。通常研究某一仪器时对边界处理有两种分析方法:

- (1) 对边界进行全约束,分析其动态特性;
- (2) 将仪器用非常软的弹簧悬挂或支撑,分析其动态特性;

对安装在弹性基体上的仪器,第一种方法的基本前提就是假定边界处的节点的六个自由度全部约束,与实际情况不符。第二种处理方法可近似求得仪器自身的固有频率,但却忽视了与基体的动力学耦合。由于实际结构通常是弹性基体,与仪器主体存在耦合问题,对主体的动态特性有较大的影响,所以在研究主体的动态特性的同时必须要考虑与基体的动力学耦合问题。下面以一个光学仪器为例来研究其中的规律。

## 2 工程分析模型的建立

此光学仪器为折返式光学系统,其光学系统如图 1 所示由主镜 1、次镜 2 组成。

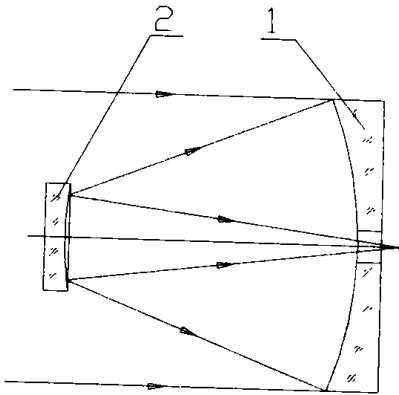


Fig. 1 Optical system

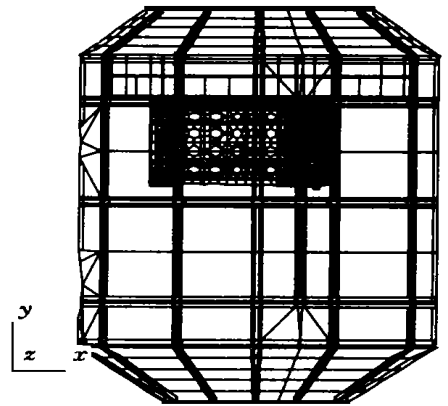


Fig. 2 Structure model

光学仪器有一个梁结构支架,并与筒状基体相连。由于基体为壳状结构不能作刚体看待,而应视为弹性体,图 2 为其结构模型图。

在研究光学仪器的动力学特性时主要考虑光学系统在整机动力学特性中的表现。所以在研究基体对光学系统动力学特性影响时主要考虑在光学元器件处出现的振型。对只包含主镜和次镜的光学系统,我们关心的是主镜次镜间的三个相对位移—离轴、倾斜和离焦。次镜相对主镜的横向移动定义为离轴;相对与次镜顶点相切的一个轴的旋转定义为倾斜;沿光轴的移动定义为离焦。对高精度光学仪器来说,上述三种位移的微小变化都会引起像差,使成像质量也有较大损失。焦距较大的光学系统对离轴和离焦更为敏感,对偏转的敏感程度稍微差一些。

对整机建立力学模型。基体除框架外均采用壳单元。为了探讨基体刚度对仪器的影响,通过改变壳单元的厚度来改变其刚度。在 UG II 中建立有限元模型。通过 Neutral 中间文件转换到 Patran 中,用 AdvancedFEM 模块进行解算。由于模型较大,需要采用叠加的方式将两个分别建立的模型块连接到一起构成整个模型,有限元模型如图 2 所示。单元类型为八面体单元、三角单元、四边形单元。节点总数为 14977,单元总数为 11741。

### 3 动力学分析

通过改变弹性基体壳单元的厚度可以改变基体的刚度,可观察光学仪器主体部分各阶固有频率随着基体刚度变化的情况。改变基体壳单元的厚度以改变基体的刚度,并分别考察光学仪器固有频率、振型的影响。下表为光学仪器边界全约束及壳单元厚度分别为 2mm、4mm、6mm、7mm、8mm 时的各阶固有频率表。本结果是在 MSC Patran 上完成的。

**Table 1 Natural frequency with various thickness of the shell of flexible foundation**

model	all constrained	thickness				
		2	4	6	7	8
1	95.652	14.962	18.837	21.155	22.016	22.745
2	120.42	16.957	20.533	22.635	23.408	24.059
3	146.21	49.737	55.905	59.387	60.725	61.897
4	158.49	80.382	94.879	95.571	95.581	95.587
5	158.73	82.375	95.5	98.782	100.79	102.95
6		87.545	100.16	108.46	111.73	114.33
7		95.363	108.48	113.45	115.26	117.11
8		98.504	116.2	122.13	123.73	125.02
9		100.19	121.55	127.34	126.91	126.36
10		113.12	127.59	131.76	133.04	134.01

图 3 为两个典型的振型图。图 3(a) 所示振型变形发生在基体上,光学仪器主体作刚体移动,自身不发生变形;图 3(b) 所示为基体与光学仪器主体同时发生变形的振型。

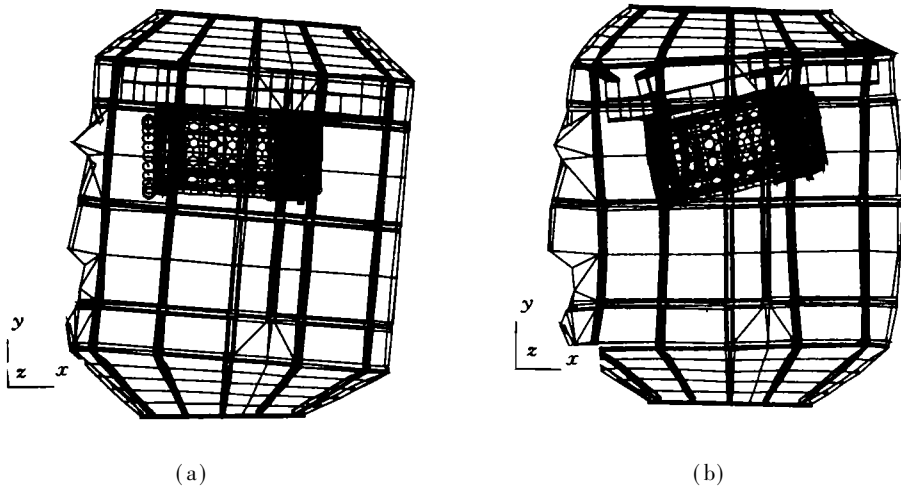


Fig. 3 Modes of vibration

## 4 结果分析

以固有频率和振型为参照来考察其动力学特性一般规律。因为对光学系统来说,影响主要为三个光学元件间相对位移的振型:次镜相对主镜的离轴、倾斜、离焦。所关心的也主要是对三个振型及其固有频率的变化。

根据上面的分析结果我们在 Patran 的后处理中找到在不同基体刚度情况下有关的振型的频率、阶次。下面来分析其一般规律。

从各阶振型的形式看,前几阶振型中光学仪器本身并不发生变形,但随着基体的变形光学仪器要产生平移、倾斜等刚体位移,这会导致光学仪器视轴的变化,引起观察或拍照时瞄准的不精确,其典型振型如图 3(a) 所示。在此后出现的振型中,随着基体的变形光学仪器自身也发生变形,在这样的振型中光学仪器除了在位移中所引起的视轴发生变化的同时,由于其光学元件之间发生相对平移、倾斜等变形,从而引起视轴复合变化,其典型振型如图 3(b) 所示。

### 找出三个关心振型

在基体刚度变化时分别出现的振型的阶次,并绘出阶次—刚度(壳单元厚度)曲线,如图 4 所示。从图中可以看出,随着刚度的减小、柔度的增大,所关心的光学仪器的振型阶次会升高。这是因为光学仪器固有频率较大,高出基体初阶固有频率 3—5 倍以上,可以看作刚体,使得整机出现附加振型,前几阶的振型都出现在弹性基体上。

如图 5 所示为频率与基体刚度(壳单元厚度)的关系曲线(对主次镜的三个相对运动的振型对应的频率进行考察)。从图可以看出,在各基体刚度变

化的情况下,所关心的三个振型的频率值略有偏差,这主要是由于弹性基体与光学仪器存在动力学耦合,引起整机的质量、刚度分配发生变化所致。对于基体来讲光学仪器的刚度较大,基体刚度的变化对其频率影响不是很大,曲线变化较平缓。图中,实线为折线图,虚线为二次多项式拟合图。从总体趋势来看,随着基体刚度的增大,光学仪器的固有频率呈增大趋势。

基于上面的分析,我们看到,弹性基体不仅使光学仪器整体产生刚体位移,还影响学仪器光学元件间的相对位置变化,导致视轴变化及成像时产生像差。基于此,提出几点解决意见:

(1) 提高整机的动态刚度,通过改变材料、结构参数来提高其固有频率,以增加抗干扰能

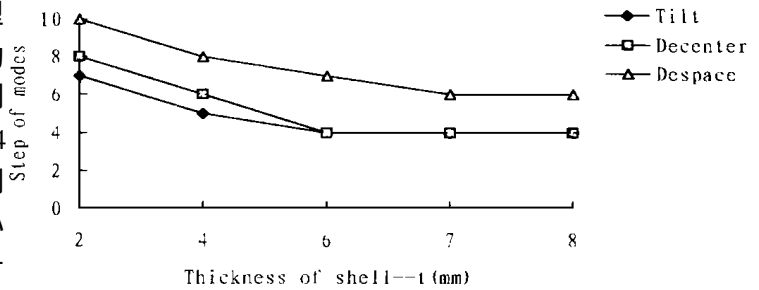


Fig. 4 Relation of step of each mode and stiffness (thickness of shell)

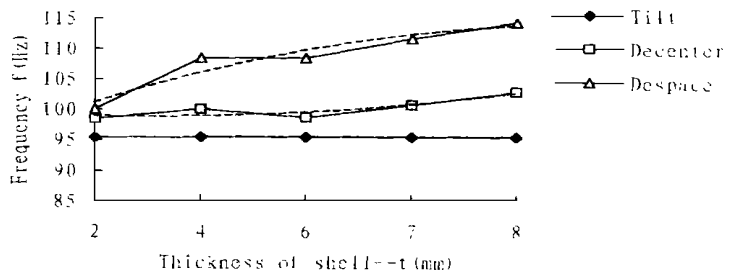


Fig. 5 Relation of frequency and stiffness (thickness of shell)

力。但增加刚度的同时也在增加成本, 所以还要考虑经济效益问题。

(2) 改变整机的质量分布、支撑方式及位置等, 通过优化的方法使某些主要振型的驻点出现在光学元件—主镜、次镜的位置, 避免光学元件的移动, 也就消除了对光学成像的影响。

## 5 结 论

(1) 对安装在弹性基体上的光学仪器, 基体刚度越小, 所关心的光学仪器的振型出现的阶次越高;

(2) 随着基体刚度的变化, 各阶振型出现的频率值也发生变化, 说明弹性基体与光学仪器的动力学耦合影响着光学仪器的固有频率;

(3) 弹性基体的低阶振型导致光学仪器的刚体移动及光学元件间的相对位置变化, 引起视轴的变化及像差;

(4) 为使分析过程中要充分考虑有限元的建模精度对动力学特性的影响, 对弹性基体的考虑更要充分, 进行全约束处理必然导致分析结果的不精确。需要对整机进行提高动态刚度、有驻点控制的优化等处理以提高其抗干扰能力。

### 参 考 文 献

- 1 George C A. Systematic Study of Focal Ratios and Effects of Optical Misalignment For LST. Marshall Space Flight Center, Alabama 25812, NASA TN D-7627, 1974

## Study of Boundary Condition in Optical Instrument

SHAN Bao-Zhong , WU Ke-Yong, LU E

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

### Abstract

Flexible foundation has large effect on dynamic character of optical instrument. It is necessary to take the effect of flexible foundation in consideration while establishing mechanics model. At the same time, the general discipline of flexible foundation affecting the optical instrument is also mentioned in this paper.

**Key words:** Dynamic character, Flexible foundation, Optical instrument

单宝忠 男, 生于 1970 年 3 月, 1996 年获吉林工业大学机械学硕士学位, 现为中国科学院长春光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事光学仪器的整机动力学分析工作。