

# 空间遥感相机镜筒主要参数 工程分析与计算

杨 洪 波

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

**摘要** 空间遥感相机的镜筒是相机的主要部分, 它对要求苛刻的重量及光学性能影响很大, 本文论述了如何利用 CAD 技术, 对相机镜筒主要参数进行工程分析与计算, 并提出改善途径, 逐步实现合理的设计方案。

**关键词:** 工程分析; 变形; 自振频率。

## 1 引 言

空间相机作为高精度的空间摄影系统, 要求具有良好的光学性能和可靠性, 同时, 由于相机在发射运载过程中, 受到载体的限制, 对相机本身的体积、重量要求非常苛刻。各国尤其是发达国家正向着体积小、重量轻、高分辨率、性能可靠的方向发展。

相机镜筒是相机的关键部分之一, 它直接影响到相机光学系统的性能, 如同心度, 分辨率等。就结构而言, 保证像质及同心度的关键在于相机结构尺寸的稳定性, 即在不同的工况下光学部件的位移与偏转以及整体结构的变形在允许范围内。改变镜筒壁厚和材料, 可使相机重量减少, 但会影响到镜筒的结构刚度。这就要求设计人员对镜筒壁厚及材料作出优化选择。另外, 相机要受到来自载体的冲击、振动等周期或随机性干扰, 镜筒的自振频率在设计时要避开载体振动的频率带宽。为了达到减振的目的, 在相机的支撑方式中一般采取一端刚性固定, 一端弹性支撑, 弹性支撑环节的材料直接影响到整机的自振频率。上述问题通过对相机镜筒进行工程分析计算, 即通过计算机的模拟手段, 求出在各种工况下的位移响应, 镜筒本身的自振频率, 找出影响相机结构的薄弱环节, 确定镜筒壁厚, 弹性支撑环节材料的弹性模量, 进而为改进设计方案提供科学依据。

## 2 技术要求及分析计算内容

技术要求:

---

收稿日期: 1994年4月8日

从相机的光学成像质量的角度出发,要求镜筒结构应满足:

① 从前部校正镜到主镜之间的同心度偏移不得大于0.01mm。

从相机的稳定性角度出发,应满足下列技术指标:

② 镜筒本身的自振频率应在200~500Hz。

分析计算内容:

① 自重载荷下的结构变形。计算出前部校正镜到主镜之间的同心度最大偏移量,预估相机镜筒在空间环境下,因失重释放内能所产生的同心度的变化。

② 镜筒的动力学特性。计算自振频率,确定影响镜筒结构动态刚度的薄弱环节。

③ 在满足①和②的技术指标下,优化出镜筒的筒壁厚度及在校正镜部分的弹性支撑所采用减振材料的弹性模量E。

④ 在满足①、②、③条件下,计算镜筒在5g(发射时)的作用下,结构是否产生塑性变形,即最大应力值是否超出该材料的屈服应力强度极限。

### 3 FEM(有限元法)力学模型

#### 3.1 单元的划分

根据相机的结构特点,及环境条件的要求初步拟定相机是横式安装,在主镜端用一个30mm宽的环套刚性固定在舱壁上,在校正镜端用30mm环宽的环套内衬减振材料作弹性支撑,同样固定在舱壁上。相机镜筒结构示意图见图1。

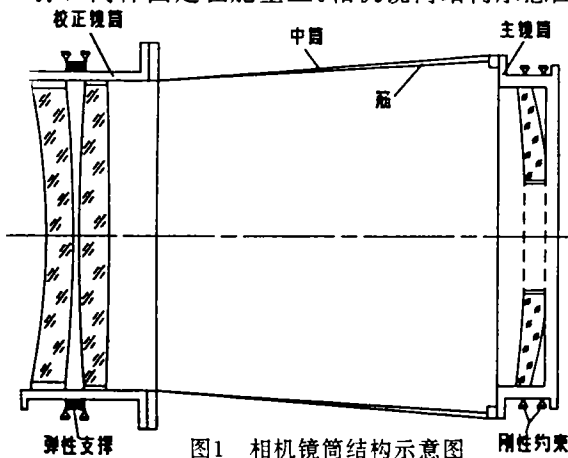


图1 相机镜筒结构示意图

根据上述结构建立相应的有限元力学模型。模型是按实际设计结构形式,通过必要力学简化处理,采用有限元分析程序 ANSYS 提供的相应单元类型划分而成。

根据镜筒各部件不同结构特点分别采用了不同的单元类型:

(1) 主镜筒和校正镜筒。由于宽高比不是很大,采用体单元。

(2) 中筒及轴向筋。由于宽高比较大,且是均厚的,采用板壳单元。

(3) 主镜和校正镜因对镜筒刚度有影响,所以在计算镜筒时应考虑它们的作用,这里采用体单元划分主镜和校正镜。

(4) 减振材料。由于它是弹性材料,主要提供弹性支撑及减振作用,质量很小,故采用具有轴向拉压作用的弹簧单元模拟。

(5) 次镜及支撑结构。由于其结构复杂,对镜筒的作用较小,将其作为集中质量,采用广义质量元加以模拟,通过若干只提供刚度而质量很小的杆单元连接到周围的筒壁上。

本模型中,节点总数为1014个,单元总数为716,总自由度数为3808。

在动力学计算中,由于只关心一阶振动频率,而最大可能的振动方向是Y或Z方向,所以选取主自由度方向为Y和Z方向。主节点的位置主要是保证能体现出镜筒的振动姿态和它的薄弱环节,故选取主节点位置为校正镜前部,中筒的中部和后部。共选取主自由度数为72个。

模型中各构件采用的材料主要考虑重量轻,刚度高的特点,如中筒部分就采用具有这一特点的碳纤维材料。所用材料见表1

表1 材料属性

物理量 材料	密度 (kg/mm <sup>3</sup> )	弹性模量 (kg/mm <sup>2</sup> )	泊松比	线胀系数	所用部件
铝合金	0.27E-05	7100	0.31	2.4E-05	主镜和校正镜筒
碳纤维	0.16E-05	11500	0.30	6.0E-07	中筒
K <sub>9</sub> 玻璃	0.27E-05	7000	0.25	7.6E-06	主镜、校正镜

### 3.2 载荷工况考虑

工况1:自重载荷。主要是考虑相机结构在地面装校时承受一个g的地球引力作用,当相机送入太空后,因重力释放,而使相机结构发生变形。

工况2:热载荷作用。暂未考虑。

工况3:运载工具在发射时,来自于舱体对相机5g的冲击及其它振动源产生的随机振动。在计算时,需要给定冲击谱线、作用时间等。由于目前未有这方面的准确数据资料,采用5g的静力载荷计算。

工况4:运载工具在太空运行过程中,以及其它仪器设备工作时,产生的随机性干扰,通过相机和舱体的连接点作用在相机上,一旦相机自振频率落入带宽之内产生共振,其破坏程度是很大的。同样,它在计算时也需要给定载荷谱,由于目前无确切数据资料暂未考虑。

### 3.3 约束和支撑

相机采用横式固定在舱壁上。主镜筒端采用30mm宽的环套刚性固定在舱壁上。校正镜筒端采用30mm宽的环套内衬减振材料作弹性支撑,同样固定在舱壁上。这样,减振材料弹性模量E的大小对相机的静力变形及自振频率的大小起着很大的作用。

## 4 计算结果和分析

根据分析目的和边界条件,用世界公认的有限元分析程序ANSYS在APOLLO工作站上对各工况进行了工程计算,其计算结果见表2。

表2 动力学计算结果数据

减振材料 弹性模量	中筒厚度 (mm)	一阶频率 (Hz)	薄弱环节	振动方向
0.3	6	205.76	中筒后端	UY
0C6	6	205.80	中筒后端	UY
10	6	218.24	中筒后端	UY
100	6	218.34	中筒后端	UY
1000	6	310.74	中筒后端	UY
3500	6	492.43	校正镜前端	UY
3500	10	500.87	校正镜前端	UY
4000	6	522.13	中筒前端	UY
4000	6无筋	517.66	中筒前端	UY

表3 静力变形计算结果数据 工况: 1g 作用

减振材料 弹性模量	中筒厚度 (mm)	同心度偏差 (mm)	技术要求 最大偏心	最大变形位置	变形方向
0.3	6	0.703E-02	0.01mm	校正镜前端	UY
10	6	0.660E-02	0.01mm	校正镜前端	UY
3500	6	0.145E-02	0.01mm	校正镜前端	UY

表4 应力计算结果数据表 工况: 1g 作用

减振材料 弹性模量	中筒厚度 (mm)	最大主应力 (kg/mm <sup>2</sup> )	屈服强度 (kg/mm <sup>2</sup> )	最大应力位置
0.3	6	0.0828	64~67	中筒后端
10	6	0.0810	64~67	中筒后端
100	6	0.0731	64~67	中筒后端
3500	6	0.0157	64~67	中筒后端

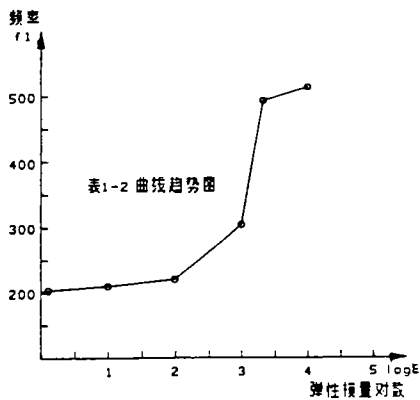


图2 表2曲线趋势图

表5 静力变形计算结果 工况: 5g 作用

减振材料 弹性模量	中筒厚度 (mm)	同心度偏差 (mm)	技术要求 最大偏心	最大变形位置	变形方向
0.3	6	0.0370	0.01mm	校正镜前端	UY
10	6	0.0366	0.01mm	校正镜前端	UY
3500	6	0.0073	0.01mm	校正镜前端	UY

表6 应力计算结果数据 工况: 5g 作用

减振材料 弹性模量	中筒厚度 (mm)	最大主应力 (kg/mm <sup>2</sup> )	屈服强度 (kg/mm <sup>2</sup> )	最大应力位置
0.3	6	0.4101	64~67	中筒后端
10	6	0.4050	64~67	中筒后端
3500	6	0.0784	64~67	中筒后端

从上述计算结果可以看出,弹性支撑环节、中筒壁厚及轴向筋,对静、动力学特性影响较大。在分析计算时,根据技术要求,首先满足它的动力学特性,即相机的自振频率在200~500Hz之间。我们通过不断调节减振材料的弹性模量、壁厚及加筋与否,进行多次反复计算迭代,使相机的自振频率逐步逼近200~500Hz。

改变镜筒中筒壁厚。由于受到相机总重量的限制,不能为了提高动态刚度,较大地增大壁厚。而动态刚度又可表达为 $\sqrt{K/M}$ ( $K$ -结构刚度, $M$ -质量),增大壁厚,虽增大中筒的结构刚度,但其质量也增大了,未必有效地增大动态刚度。从数据表中可以看出,当弹性支撑环节的弹性模量不变时,适当地增大壁厚,可提高自振频率,但提高的幅度不大,但重量增加的较大。当 $H=6\text{mm}$ 时,中筒重量为11.74kg, $H=10\text{mm}$ 时,中筒重量为19.68kg。将重量和自振频率统筹考虑,为保证不超出相机总重量的限制,应选择较小的壁厚。

中筒轴向筋。在中筒的内壁上30度均布加12根三角状的轴向筋,提高了中筒的结构刚度,通过加筋可减小壁厚。从数据表中看到,加筋与否对自振频率影响不是很大,这是因为影响动态刚度的薄弱环节主要在中筒与校正镜筒及主镜筒的联接处,在联接处加筋或改变联接结构会大大提高镜筒的动态刚度,以尽可能地减少壁厚。

弹性支撑环节的弹性模量 $E$ 。从数据表中可以看出, $E$ 值的大小对自振频率的影响较大。在选择减振材料上,既要考虑对自振频率的作用,也要考虑减振的效果。若选用橡胶材料,它减振的效果好,吸收能量的能力大,可减轻设计装置振动幅度,弱化负荷冲击作用。在弹性区内,它的弹性模量为 $0.3\sim 0.6\text{kg/mm}^2$ ,相机镜筒自振频率约为205Hz左右。满足自振频率技术要求,如果要求自振频率进一步提高,最有效的办法是提高减振材料的弹性模量。一种方法是在非线性区内使用橡胶材料,通过增大金属环套在装夹时的预紧力使橡胶产生塑性变形从而达到希望的弹性模量。另外也可采用特种橡胶、塑料或软金属等弹性模量高又有一定弹性的材料。

在动力学结果数据表中,满足自振频率技术要求的是:

$$E = 0.3 \sim 4000\text{kg/mm}^2$$

$$H = 6\text{mm}$$

在满足动力学特性后,再看看它的自重变形及5g的静力载荷下是否满足静力学方面的要求,选择满足动力学特性的最小弹性模量 $E=0.3$ 和壁厚 $H=6$ 进行静力计算。从静力变形的结果数据表中可看出,由变形产生的最大同心度偏差量为 $\Delta Y=0.0073\text{mm}$ ,小于 $0.01\text{mm}$ ,满足要求。考虑最坏的情况,即在5g冲击作用下, $\Delta Y=0.037=0.037\text{mm}$ ,大于 $0.01\text{mm}$ ,但最大的主应力值为 $0.41\text{kg/mm}^2$ ,远小于碳纤维材料的屈服强度,不会产生塑性变形,当5g的静力载荷释放后,能恢复到原来的位置。完全能满足技术要求。

## 5 结 束 语

根据上述计算结果和分析,针对这一方案建议相机镜筒的结构为:

- (1) 材料选择。校正镜及主镜筒为铝合金材料,中筒为碳纤维材料。
- (2) 中筒壁厚为6mm,内壁加筋,且主要加强中筒与校正镜筒及主镜筒联接处的结构刚度。

(3) 装夹方式。采用横式安装。主镜筒端用金属环套刚性固定在舱壁上,校正镜筒端用金属环套内衬减振材料,其减振材料的弹性模量根据对自振频率大小的要求不同而选择不同的弹性模量,同样固定在舱壁上。如有可能相机的安装位置应尽量避免舱体的最大振动点。

通过采用 CAD 技术,为设计方案的检验、预估、选择、优化提供了有力的科学依据,使设计趋于更加合理,提高了产品的质量和一次成功率,尤其对空间遥感相机这类高精密产品的研制更具有实用价值。

### 参 考 文 献

- [1] Leonard Snyder, Television optics for the voyager mission to jupiter and saturn. SPIE, 1979, 183: 274~283
- [2] Ansys-engineering analysis system user's manual swason analysis systems. Inc. , 1987
- [3] 卢镔, 光学机械, 1989, (4): 16~23

## Engineering Analysis and Calculation of The Primary Parameters for Mirror Drum of Space Remote-Sensing Camera

Yang Hongbo

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

### Abstract

The mirror drum is primary part of space remote-sensing camera. It has great influence upon weight of tight requirement and property of the optical system. How to use CAD technology to analysis and calculate the primary parameters of mirror drum has been described in this paper. The way of improving can be carried out. The reasonable design scheme has been obtained progressively.

**Key words:** Engineering analysis, Deformation, Natural frequency