

文章编号: 1004-4213(2011)10-1514-7

平面光栅支撑结构设计及其面形分析计算

梁彪^{1,2}, 刘伟¹, 陈程^{1,2}

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:为满足二氧化碳探测仪平面光栅高精度面形要求,对光栅及其支撑结构进行了设计和分析.首先,对光栅结构组件各材料的选取和支撑结构形式进行了研究;然后,以坐标变换法和最小二乘法为理论依据,对镜面刚体位移和畸变的计算求解进行了探讨;接着,采用有限元法对光栅结构组件在不同热力耦合状态下的面形精度和结构强度进行仿真分析.运用有限元软件本身提供的二次开发功能,开发了能内部调用 MATLAB 编写的面形误差计算程序.经计算,各工况下面形误差 $PV \leq 63 \text{ nm}$, $RMS \leq 12.6 \text{ nm}$.最后,为了验证结构组件的动态特性,进行了模态分析和谐响应分析,三个方向的基频分别达到 1 046.3 Hz, 1 640 Hz, 1 147.5 Hz.这些结果表明,光栅结构组件设计合理可行,能够满足各项设计要求.

关键词:支撑结构;面形计算;二次开发;谐响应分析

中图分类号: V443.5; TH703

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114010.1514

0 引言

二氧化碳是人类活动产生的最主要的温室气体,并且是参与全球碳循环的主要大气成分.由于人类的各项活动,现在人类每年约向大气中排放了超过 320 亿吨的二氧化碳,超过一半的二氧化碳气体被陆地上的各种植物和海洋所吸收,余下的就残留在大气中^[1].根据联合国政府间气候变化委员会的报告,二氧化碳含量在 18 世纪之前相对比较稳定,但在 20 世纪中期之后含量急剧增加,估计到 21 世纪中叶,大气中的二氧化碳浓度将比工业化前增加 1 倍.由于温室气体的排放,近百年来全球地表平均温度上升 0.74 °C.研究表明,如果气温升高超过 2.5 °C,全球所有区域都可能遭受不利影响,发展中国家所受损失尤为严重;如果升温 4 °C,则可能对全球生态系统带来不可逆的损害,因此监测和测量大气中二氧化碳已经迫在眉睫^[2].2002 年美国航空航天局决定研发轨道碳观测卫星(Orbiting Carbon Observatory,OCO)从太空来监测测量全球二氧化碳的来源与分布,日本 2009 年成功地发射了温室气体观测卫星(Greenhouse gases Observing Satellite,GOAST)来对全球的温室气体进行测量,其它很多国家也展开了相关温室气体探测的研究工作.

二氧化碳探测仪主要用来从太空来观测和测量二氧化碳,其主要目的是找出二氧化碳全球分布和来源.平面反射光栅作为二氧化碳探测仪主要的光学元件,其面形精度的好坏直接影响探测仪的性能.支撑方式是影响光栅面形精度的关键因素,它的设计是否合理直接影响到结构的稳定性.二氧化碳探测仪在轨工作期间,真空、低温、黑背景以及空间外热流等复杂的热环境都会引起仪器结构温度的变化,从而可能造成光栅镜面面形精度超差,导致光学系统成像质量恶化.因此对于平面光栅结构组件不仅要求具有良好的尺寸和结构稳定性,同时还要具有良好的热稳定性.目前光学元件支撑结构的设计研究主要集中在反射镜和透镜的支撑结构上^[3-5],对于光栅支撑结构设计研究相对较少.本文根据二氧化碳探测仪的各项设计要求,设计出了一种新型的光栅挠性支撑结构,并对其进行了各项力学分析.和其它普通支撑结构相比,装调方便快捷,并且在极端的冲击和振动环境作用后能很好保证光栅的共轴精度,对今后光栅支撑结构设计具有借鉴意义.

1 平面光栅支撑结构设计

1.1 光栅结构组件材料的选择

严酷的力学环境以及较大温度变化是空间光学

基金项目:国家高技术研究发展计划(No.2010AA1221091001)资助

第一作者:梁彪(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学精密机械结构设计及优化分析. Email: Vbhj602@163.com

导师(通讯作者):刘伟(1967-),男,副研究员,主要研究方向为光学精密机械结构设计. Email: 2400Liuwei@163.com

收稿日期:2011-06-27;修回日期:2011-08-15

仪器研制过程中主要面对的两大问题,为了确保光栅结构的可靠性以及减小温度变化对仪器性能的影响,所选结构件材料的选取应考虑以下几个因素^[4]:

1) 光学元件的线胀系数、比热容及导热系数是影响光学元件成像质量的关键因素。导热系数越大,线胀系数和比热容越小,光学元件在受到外界热作用时,其热稳定性越好。因此在选取光学元件材料时,所选取材料的线膨胀系数应尽可能的小。

2) 材料间的热匹配和热变形补偿能力是解决光学组件适应环境条件,尤其是温度环境的关键。光学元件通过金属结构件支撑、固定,为保证光学元件在较复杂的工况下能正常工作,与光学元件直接接触的支撑结构件的线胀系数应与光学元件的线胀系数匹配,否则在空间环境温度变化时,各结构间会产生相互作用力,直接影响面形精度。

综上,考虑到微晶玻璃具有成熟的加工工艺,面形抛光周期相对较短,材料自身综合性能较好等优点,且已广泛应用于空间各种探测仪器中,因此本文选用微晶玻璃作为平面光栅材料。殷钢具有稳定性好,内应力小,加工性能优良等优点,所以选择殷钢作为支撑框架结构材料。

1.2 支撑结构设计

在进行光栅支撑结构设计时,其基本设计原则和反射镜支撑设计原则大致相同。反射镜设计的基本原则是:以最少的支撑点使其在各种复杂的环境下变形最小。常用的反射镜支撑方式有周边支撑,中心支撑和背部支撑三种形式。周边支撑适用于小尺寸反射镜,通过压圈或胶粘的形式固定在镜框上;中心支撑方式适合于单拱形反射镜,多采用中心环定位支撑,有时辅以背部小平面支撑;背部支撑一般有三点、六点、九点等,大形反射镜一般采用多点、多层的背部支撑方式^[5]。在进行光栅支撑结构的设计时,首先要确定光栅的形状,因为其决定了支撑结构的形式和形状。本文所研究的光栅,其有效的通光口径是 180 mm×140 mm 的椭圆,因此光栅的基本形状有三种形式可选:长条形;椭圆形;圆形。

由于光栅结构组件承受的主要是基本对称的温度载荷,要求支撑结构也基本对称,以减小由于热应力产生的非对称载荷。光栅形状如果设计成长条形和椭圆形,材料利用率高,但支撑方式和支撑点位置的选取是一个难点^[6];如果设计成圆形,虽然支撑方式和支撑支撑点位置确定相对容易,但材料利用率低,会造成整个光栅结构组件质量偏重。考虑到以上几种方案的各自的优缺点,设计一种新形光栅形状,其形状不同于前面所讲的那三种基本形状,而是它们形状的有机组合,类似一个“肾”形,由两个半圆和

梯形有机组合而成。和其他基本方案形状相比较,材料利用率较高,同时支撑方案确定相对容易。由于整个“肾”形尺寸不是很大,因此采用周边支撑形式。平面光栅在重力和温度载荷作用下会产生变形,为了减少这种变形,因此在进行支撑结构设计时,需采用一定的固定安装方法使光学元件和外部载荷相隔离,以减少光栅承受不必要的外加应力^[7-8],所以本支撑结构设计采用“三点式”挠性安装形式,即支撑结构上设计出三个 120°分布挠性片,与光栅结构上的三个侧面粘接。图 1 是光栅结构形状示意图,图 2 支撑框架结构示意图。光栅结构上设计了三个凸台

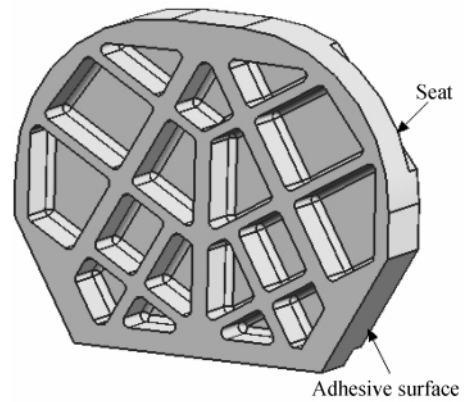


图 1 光栅结构形状示意图

Fig. 1 Diagram of the grating

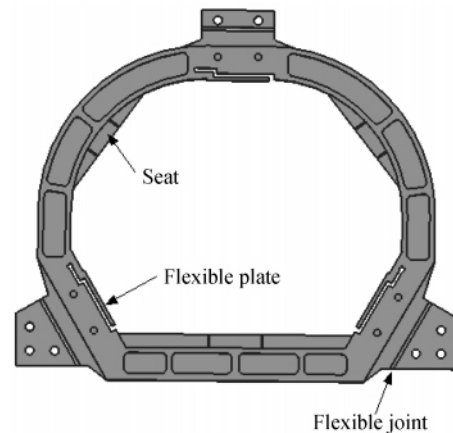


图 2 支撑结构示意图

Fig. 2 Diagram of the supporting structure

与支撑结构上的凸台相配合来实现装配时的轴向定位。设计了一个轴向挡圈结构,与支撑结构上三个凸台一起实现光栅的机械保护作用,结构示意图如图 3。由于整个光栅结构组件要与镜筒结构相连接,镜筒结构材料和支撑结构、光栅材料都不相同,因此为了减小温度变化时,材料热膨胀系数不匹配带来的影响,需要设计柔性结构来通过自身变形吸收这部分能量,图 2 中挠性片和柔性铰链结构就是为了实现这个目的而设计的。柔性铰链结构其结构示意图如图 4。对于在柔性铰链结构的设计过程中,难点在于确定一个合适的柔度值。因为若柔度过小,镜面

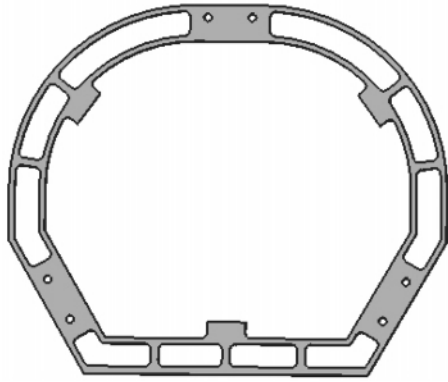


图 3 挡圈结构示意图

Fig. 3 Diagram of the shield ring structure

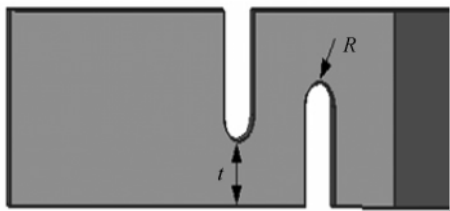


图 4 柔性铰链结构示意图

Fig. 4 The structure of flexible joint

综合面性误差将超出设计要求;若柔度过大,整个光栅结构组件的动态刚度与最大变形将不能满足设计要求. 根据参考文献[9]知,柔节转动刚度影响其最主要的两个因素是圆弧半径 R 和柔性铰链最小厚度 t 的值,其中影响最为显著的又是厚度 t 的值. 随着值的增加,转动刚度呈二次曲线增加,因此在柔节结构设计过程中,合理选择的 t 值十分重要. 对于本文中,经过多次迭代计算,最后确定厚度值 t 选取为 2 mm, R 选取为 1.5 mm. 三个挠性片的厚度也确定为 2 mm. 整个光栅结构组件的装配示意图如图 5.

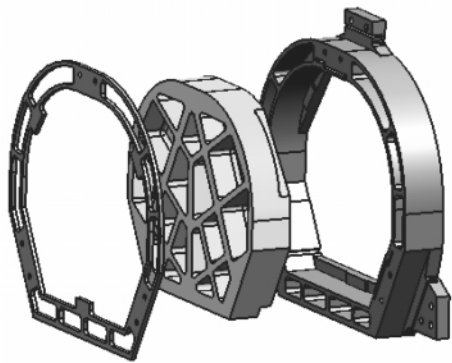


图 5 光栅装配组件示意图

Fig. 5 3D model of the grating sub-assembly

2 镜面面形计算基本原理

镜面变形位移包括了刚体位移和表面畸变,刚体位移可以通过调整光学系统各元件之间的相对位置关系而消除,对于表面畸变则不能通过调整各光学元件之间的位置关系而去除,因此在设计光机结构过程中,评价结构性能是否满足设计要求的的一个重要指标就是镜面畸变,即面形误差. 镜面刚体位移求解可以通过齐次坐标变换方法来实现,把镜面变形中刚体位移去除,得到镜面畸变值^[10].

2.1 镜面刚体位移求解

在外界载荷作用下,镜面各点的刚体位移可以分解为沿坐标系 $OXYZ$ 三个方向的移动量和转动量. 设 x_k, y_k, z_k ($k=1, 2, \dots$) 为镜面各点变形前坐标系中 $OXYZ$ 的坐标; x'_k, y'_k, z'_k ($k=1, 2, \dots$) 为仅发生刚体位移后在 $OXYZ$ 中的坐标; e, f, g 为刚体位移中沿坐标轴三个方向的平移量; $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 为刚体位移中绕三个坐标轴的转动量,由于 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 很小,所以可令

$$\sin \theta_x = \theta_x, \sin \theta_y = \theta_y, \sin \theta_z = \theta_z$$

$$\cos \theta_x = 1, \cos \theta_y = 1, \cos \theta_z = 1$$

高阶小量忽略,根据坐标变换存在

$$\begin{bmatrix} x'_k \\ y'_k \\ z'_k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_x & \theta_y & e \\ \theta_z & 1 & -\theta_x & f \\ -\theta_y & \theta_x & 1 & g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

即

$$\begin{aligned} x'_k &= x_k - y_k \theta_x + z_k \theta_y + e \\ y'_k &= x_k \theta_z + y_k - z_k \theta_x + f \\ z'_k &= -x_k \theta_y + y_k \theta_x + z_k + g \end{aligned} \quad (2)$$

镜面实际变形位移由刚体位移和镜面畸变两部分构成,所以把镜面发生实际变形后各点坐标值代入式(2),左右两边等式不会相等,存在偏差,这里的偏差即镜面畸变值,为了较为准确地分离出刚体位移,得到镜面畸变值,基于最小二乘法的思想,构造出评价函数

$$Q = \sum_{k=1}^N [(x'_k - x_k + \theta_z y_k - \theta_y z_k - e)^2 + (y'_k - \theta_z x_k - y_k + \theta_x z_k - f)^2 + (z'_k + \theta_y x_k - \theta_x y_k - z_k - g)^2] \quad (3)$$

为使 Q 值最小,对其求偏导,最后可写成

$$\begin{bmatrix}
 N & 0 & 0 & 0 & \sum_{k=1}^N z_k & -\sum_{k=1}^N y_k \\
 0 & N & 0 & -\sum_{k=1}^N z_k & 0 & \sum_{k=1}^N x_k \\
 0 & 0 & N & \sum_{k=1}^N y_k & -\sum_{k=1}^N x_k & 0 \\
 0 & -\sum_{k=1}^N z_k & \sum_{k=1}^N y_k & \sum_{k=1}^N (z_k^2 + y_k^2) & -\sum_{k=1}^N x_k y_k & -\sum_{k=1}^N x_k z_k \\
 \sum_{k=1}^N z_k & 0 & -\sum_{k=1}^N x_k & -\sum_{k=1}^N x_k y_k & \sum_{k=1}^N (x_k^2 + z_k^2) & -\sum_{k=1}^N y_k z_k \\
 -\sum_{k=1}^N y_k & \sum_{k=1}^N x_k & 0 & -\sum_{k=1}^N x_k z_k & -\sum_{k=1}^N y_k z_k & \sum_{k=1}^N (x_k^2 + y_k^2)
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 e \\
 f \\
 g \\
 \theta_x \\
 \theta_y \\
 \theta_z
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sum_{k=1}^N x'_k - x_k \\
 \sum_{k=1}^N y'_k - y_k \\
 \sum_{k=1}^N z'_k - z_k \\
 \sum_{k=1}^N y_k z'_k - y'_k z_k \\
 \sum_{k=1}^N z_k x'_k - z'_k x_k \\
 \sum_{k=1}^N x_k y'_k - x'_k y_k
 \end{bmatrix}
 \quad (4)$$

简记作

$$\mathbf{AX} = \mathbf{b} \quad (5)$$

因此求解上述方程便可以分离出镜面变形位移中的刚体位移。

2.2 镜面畸变求解

镜面各点变形位移中,利用前面所述的方法,刚体位移已经分离出来,因此把求解出的刚体位移值代入式(1)可得镜面各点仅发生刚体位移后的坐标值.设镜面各点实际变形后坐标为 $x''_k, y''_k, z''_k (k=1, 2, \dots)$,则镜面各点变形位移即畸变为

$$\begin{bmatrix}
 \Delta x_k \\
 \Delta y_k \\
 \Delta z_k
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 x''_k \\
 y''_k \\
 z''_k
 \end{bmatrix}
 -
 \begin{bmatrix}
 x'_k \\
 y'_k \\
 z'_k
 \end{bmatrix} \quad (6)$$

因此对于平面光栅反射面 Z 轴方向(反射面法向)的镜面畸变 PV_Z 和 RMS_Z 计算为

$$PV_Z = \max(\Delta z) - \min(\Delta z) \quad (7)$$

$$RMS_Z = \sqrt{\frac{\sum (\Delta z_i - \overline{\Delta z_i})^2}{N-1}} \quad (8)$$

镜面其它两个方向的镜面畸变求解与 Z 方向的基本相同.在实际利用干涉仪在对镜面面形误差的检测时,检测的是镜面法向方向的面形误差.鉴于此,为了方便和实际检测结果相对比,本文中光栅各工况下所求的面形误差 PV 和 RMS 都指其法向误差。

3 光栅组件的有限元分析和面形精度计算

3.1 热力耦合分析

探测器在轨工作期间,既受到微重力作用,又受到热载荷作用,热力耦合状态是光栅结构组件最恶劣的工作状态,因此需要分别考察其在三个方向重力和 10°C 温降共同作用下对镜面变形的影响.图 6 是 Z 方向(光栅平面法向)重力和 $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ 温降耦

合作用下光栅装配组件的变形图,图 7 是应力分布图.由图可知,光栅整个结构组件最大应力值为 2.7 MPa,远远小于材料的强度极限,说明结构强度满足要求.由前面可知,在光机结构设计中,评价一个结构是否设计合理的一个重要指标就是面形精度.通过有限元分析计算所得镜面各点变形位移不能直接用来评价镜面面形精度,需要对其处理,大致步骤为:1)按照前面所述的计算面形误差的方法,利用 MATLAB 编写一个面形误差求解程序;2)基于 ANSYS 中的二次开发功能,编写一个节点初始坐标和变形位移读取和调用面形误差计算的宏命

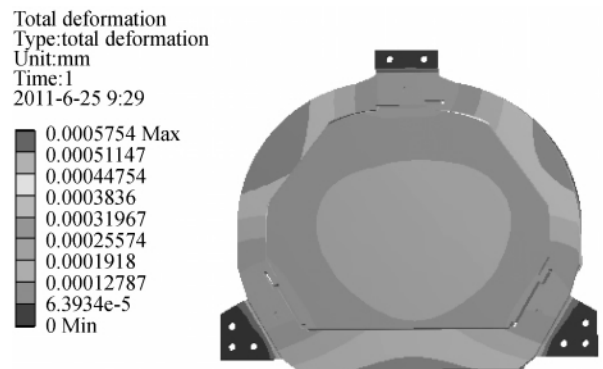


图 6 热力耦合载荷作用下变形云图

Fig. 6 Displacement of system subject to coupled loads

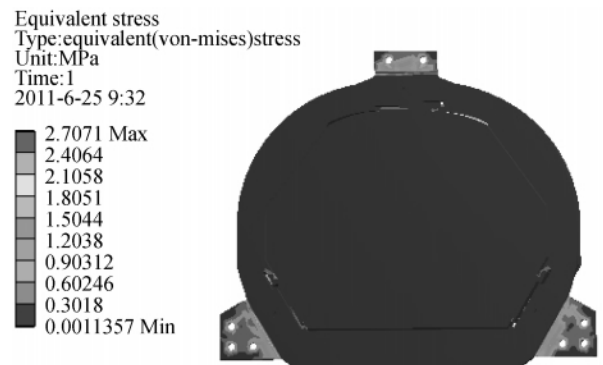


图 7 耦合载荷作用下应力分布云图

Fig. 7 Stress of the system subject to coupled loads

令,并把其作为一个子程序链接到 ANSYS 中去;3)在 ANSYS 中运行 2)步中的程序,即可得到镜面刚体位移和面形误差值.表 1 和表 2 是对光栅组件进行热力耦合分析后,得到镜面刚体位移及面形精度分析结果.由表 2 可知,在 Z 轴方向重力载荷和温度载荷作用下,光栅面形误差最大,PV 最大为 58.25 nm,RMS 最大为 10.12 nm,但各项均小于设计要求,说明结构具有良好的热环境适应能力,能够满足使用要求.

表 1 平面光栅热力耦合载荷作用下镜面刚体位移

Table 1 The rigid body displacement and tilt of grating with coupled loads

		Load		
		$G_x, \Delta t = 10^\circ\text{C}$	$G_y, \Delta t = 10^\circ\text{C}$	$G_z, \Delta t = 10^\circ\text{C}$
Displacement / μm	ΔX	0.013	0.014	0.023
	ΔY	0.075	≈ 0	0.21
	ΔZ	0.073	0.014	0.23
Tilt	θ_x	0.045"	0.05"	0.047"
	θ_y	0.058"	0.085"	0.033"
	θ_z	≈ 0 "	≈ 0 "	≈ 0 "

表 2 平面光栅热力耦合作用下面形精度分析结果

Table 2 Analysis results of grating surface shape error with coupled loads

Load	PV/nm	RMS/nm
$G_x, \Delta T = 10^\circ\text{C}$	52.82	8.37
$G_y, \Delta T = 10^\circ\text{C}$	44.11	7.54
$G_z, \Delta T = 10^\circ\text{C}$	58.25	10.12

3.2 模态分析

光栅结构组件中设计有柔性支撑,随着柔性支撑的柔化,因此光栅的位置误差度误差将增大,动态刚度也随之降低.刚度问题是整个光栅结构组件的核心问题,为保证二氧化碳探测器能正常工作,要求其具有良好的刚度,使其在外界机械扰动下不会产生抖动.所以为了验证光栅结构组件的动态组件,需要对其进行模态分析,分析结果如表 3.由表 3 可知,反射镜组件一阶频率为 1 046.3 Hz,高于设计要求的 400 Hz,动态刚度足够高,前三阶频率无密频现象,所以光栅结构组件动态刚度满足要求.

表 3 光栅组件模态分析结果

Table 3 The results of the modal analysis

Frequency direction	X	Y	Z
F_n/Hz	1 046.3	1 640	1 147.5

3.3 谐响应分析

为了考察光栅结构组件的动态特性,需要对其做振动动态特性分析.振动环境对于对空间探测仪器来说,是一种非常主要的动力学环境,在地面运输

和动力飞行过程中都将受到振动环境的作用,其中最主要的一种是低频正弦振动,其频率范围大概是 5~100 Hz,为了考察光栅结构组件的动态性能,需对其做谐响应分析,因为通过谐响应分析,能够预知结构的持续动力特性,从而验证结构的设计是否合理^[11].在实际振动试验测试中,试验所提供的激励载荷一般是加速度载荷,具体施加的工况如表 4 所示,且激励振动点是基础约束点,但目前的有限元分

表 4 正弦振动加速度激励

Table 4 Sine vibration acceleration excitation

Parameter	Frequency range/Hz
	5~100
Amplitude(O-P)	10 g
Load direction	Three axial, Scan rate 2oct/min

析软件,一般是不支持直接把加速度载荷直接加载约束点上.为了解决这个问题,目前对于带有基础激励的谐响应分析过程中,很多文章中都是使用大质量法来进行研究,其基本思想是将原有限元模形处理为无约束模形,并在适当位置构造一大质量点,并在大质量点与原约束点之间建立刚性连接,这样便把加速度激励转换为节点力施加在大质量点上,进而传递到基础约束上^[12].利用此方法得到结构响应的位移、速度、加速度均为绝对值.对于结构设计人员来说,更关心的是结构与基础之间的相对位移,因为只有结构与基础之间存在相对位移时,结构才会产生变形,才会产生应力,因此为了更加直观地获得结构在激励下的响应,采用相对运动法来处理带有基础激励的谐响应分析^[13].相对运动法基本原理实质就是坐标系变换,对于在大地坐标系中(即绝对坐标系),当给基础一个加速度载荷激励时,结构上各点的加速度为 0,而当坐标系选取在基础上时,这时基础加速度为 0,而结构上具有一个与激励方向相反的加速度.基于以上思想,本文给基础约束以外的各质点施加一个与激励加速度方向相反的加速度,加速度大小为 10 g,为了在更加宽的频率范围内考察模拟整个结构组件对外界激励的响应情况,所以施加的激励频率变化范围为 0~2 000 Hz.输出结构上所有节点单元的响应将付出非常昂贵的计算成本,因此需要压缩输出响应数量,选择关键点进行输出,考察其响应.取挠性片上受力最大处节点、柔性铰链结构圆弧处节点、光栅反射面上中心位置处节点及反射面上边缘处节点作为考察点.图 8 和图 9 是在沿 Z 向(反射面法向)施加 10 g 加速度激励时,光栅反射处和边缘处节点加速度响应曲线,由图可知,在频率值 1 150 Hz 和 1 430 Hz 左右加速度响应两次出现峰值,与前面模态分析所得的 Z 方向固

有频率值非常接近,加速度响应最大峰值分别为 $2.46E6 \text{ mm/s}^2$ 和 $3.1E6 \text{ mm/s}^2$,与输入的加速度激

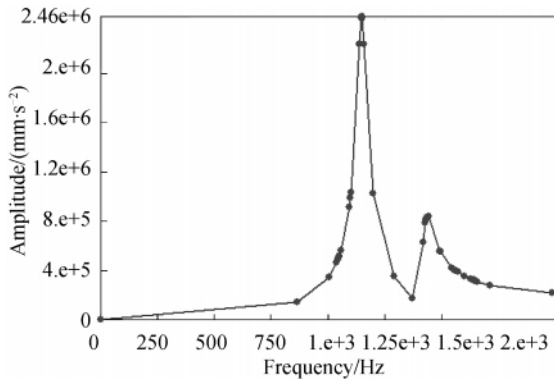


图 8 光栅反射面上中心位置处节点 Z 向加速度激励响应曲线
Fig. 8 Acceleration response of node on the center position of the reflection surface in the Z direction

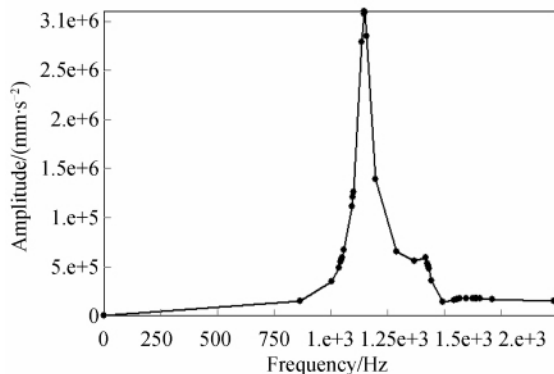


图 9 光栅反射面上边缘处节点 Z 向加速度激励响应曲线
Fig. 9 Acceleration response of node on the marginal position of reflection surface

励 $9.8E4 \text{ mm/s}^2$ 相比,放大倍数约为 30 倍,但由于实际正弦激励频率的范围为 $5 \sim 100 \text{ Hz}$,在这个范围内,加速度响应值较小.由于整个光栅支撑结构中,挠性片和柔节铰链结构是相对较薄弱部位,因此有必要考察其应力响应.图 10 和图 11 是支撑结构挠性片上和柔性铰链结构处应力响应曲线,最大值为 16.8 MPa ,远远小于强度的要求,其它两个相互垂直方向的激励响应同样满足设计要求,因此光栅结构组件刚度能够承受发射过程中正弦振动环境.

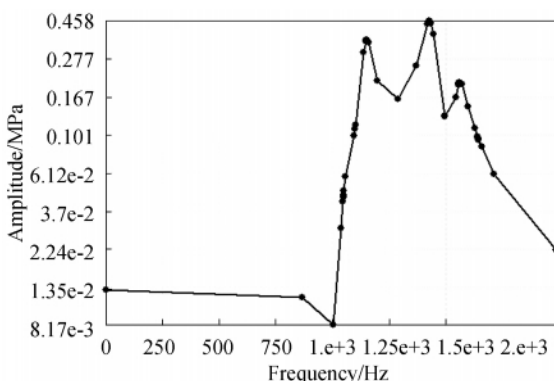


图 10 挠性片圆弧半径处节点应力响应曲线
Fig. 10 Stress response of nodes on the flexure

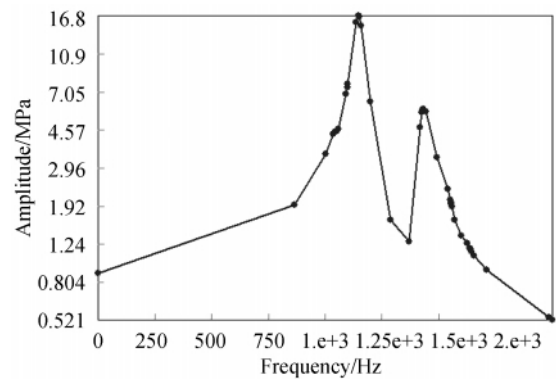


图 11 柔性铰链机构圆弧半径处节点应力响应曲线
Fig. 11 Stress response of nodes on the flexible joint

4 结论

平面反射光栅是二氧化碳探测仪的主要分光元件,其面形精度的高低直接影响着整个探测仪的性能,因此要求结构具有良好的尺寸和结构稳定性.本文根据探测仪对光栅组件的各项设计要求,对光栅支撑结构进行了详细地设计和分析.利用有限元软件的二次开发功能,编写了节点数据处理和面形计算调用程序,实现了有限元分析与面形计算的一体化,提高了设计效率.在热力耦合环境作用下,光栅镜面面性误差 PV 最大值为 58.25 nm ,RMS 最大值为 10.12 nm .对结构组件进行模态分析和谐响应分析,结果显示一阶固有频率为 1046.3 Hz ,高于设计要求的 400 Hz ;在简谐激励作用下各方向放大倍率均小于设计要求,说明结构抗震能力较强.本文对光栅支撑结构设计具有一定的借鉴意义.

参考文献

- [1] DAVID C, CHARLES E M, PHILIP L D. NASA Orbiting carbon observatory: measuring the column averaged carbon dioxide mole fraction from space [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2008, **023508**(2): 15-20.
- [2] HE Yu-long, DAI Ben-lin. The effect of the source and sink of Atmospheric of CO_2 and the increase of it in the air on the environment [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2010, **36**(5): 25-27.
贺玉龙,戴本林.大气中 CO_2 的源与汇及其含量增加对环境的影响[J]. *工业安全与环保*, 2010, **36**(5): 25-27.
- [3] GUO Jiang, HE Xin. Design of support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1642-1647.
郭疆,何欣.大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1642-1647.
- [4] LIU Hong-wei, ZHANG Qin, DING Ya-lin, et al. Design of strip primary mirror supporting structure based on finite element analysis [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(6): 556-557.
刘宏伟,张芹,丁亚林,等.基于有限元分析的长条状主镜支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(6): 556-557.
- [5] WANG Zhong-su, ZHAI Yan, MEI Gui, et al. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1834-1835.

- 王忠素, 翟岩, 梅贵, 等. 空间光学传感器反射镜柔性支撑的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(8): 1834-1837.
- [6] FU Yun, XU Chang-ji, DING Ya-lin. Scanning mirror supporting structure of aerial remote sensing camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(6): 551-552.
付芸, 徐长吉, 丁亚林. 航空遥感相机扫描反射镜支撑技术[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(6): 551-552.
- [7] LI Fu, RUAN Ping, ZHAO Bao-chang. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 272-275.
李福, 阮萍, 赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 272-275.
- [8] DING Fu-jian, LI Ying-cai. The stress and strain analysis of main reflector with uniform pressure support and support angle optimization [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(1): 1041-1045.
丁福建, 李英才. 反射镜浮动支撑应力与变形分析及支撑参量化[J]. *光子学报*, 1998, **27**(1): 1041-1045.
- [9] SUN Bao-yu. Design and analysis on the flexible structure of the optical reflector based on the computer aided engineering [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2009, **36**(1): 104-105.
孙宝玉. 基于 CAE 的光学反射镜柔性结构设计与分析[J]. *光电工程*, 2009, **36**(1): 104-105.
- [10] CHEN Yong-cong, HU Yong-ming, LI Ying-cai, et al. Displacement analyzing and support position optimizing of the main mirror with backside support [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1730-1732.
陈永聪, 胡永明, 李英才, 等. 背部支撑主反射镜的面形分析与支撑点优化[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9): 1730-1732.
- [11] WANG Jian-she. Environment experiment of dynamics of space optical subassemblies [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(2): 174-175.
王建设. 空间光学组件的动力学环境试验[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(2): 174-175.
- [12] YANG Li-wei, LI Zhi-lai. Design of a flexible supporting structure based on finite element analysis [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, **31**(1): 51-52.
杨利伟, 李志来. 一种基于有限元分析的柔性支撑结构设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2008, **31**(1): 51-52.
- [13] DAI Zong-miao, DU Jun-min. Study on shock property of ship-based equipment [J]. *Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, **31**(1): 51-52.
戴宗妙, 都军民. 舰船设备冲击特性计算研究[J]. *洛阳理工学院学报(自然科学版)*, 2010, **20**(1): 29-31.

Design of Supporting Structure for Plane Grating and Surface Deformation Calculation

LIANG Biao^{1,2}, LIU Wei¹, CHEN Cheng^{1,2}

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to meet the high profile accuracy requirements of plane grating for carbon dioxide detector, the grating and its support structure were designed and analyzed. Firstly, the principles of selecting material for grating sub-assembly and the supporting form for grating were investigated. Then, the calculation method for mirror rigid body motion and surface shape error were discussed, based on the Homogenous Coordinate transformation theory and least square method. Subsequently, the surface figure precision and structural strength were analyzed with finite element method subject to thermal-structural coupling loads. A program that can directly call the surface shape error calculation program written by MATLAB was compiled using the secondary development function provide by the finite element analysis software. Simulation results show that the $PV \leq 63$ nm, $RMS \leq 12.6$ nm. To verify the sub-assembly's dynamic character, the modal and harmonic response analysis were adopted. The results indicate that the fundamental frequencies of the component in three directions are 1 046.3 Hz, 1 640 Hz, 1 147.5 Hz, respectively. These results demonstrate that the rationality of the supporting structure and can meet the requirements.

Key words: Support structure; Surface deformation; Secondary development; Harmonic response analysis