

文章编号 1004-924X(2018)02-0355-08

空间相机调焦机构自锁特性评价与试验

安 源^{1,2}, 杜一民^{1,3*}, 贾学志^{1,2}, 李 林^{1,3}, 李 季^{1,2}, 柯善良^{1,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:空间相机调焦机构需具有一定的锁止能力,以应对火箭发射中的冲击与振动,因此,对机构的自锁特性进行评价是保证空间光学遥感器正常工作的关键。针对某型空间相机调焦机构,研究了螺纹接触面的滑移机理,建立了工程分析模型,详细分析了两种螺距(1 mm,1.5 mm)的螺纹的接触应力、切应力分布特征及其自锁性。结果表明:螺纹螺距为 1 mm 的调焦机构 Mises 应力值大于其自锁标定值,自锁失效;螺距为 1.5 mm 的调焦机构 Mises 应力值小于其自锁标定值,满足自锁要求。最后,对调焦机构进行了振动试验,结果显示:螺距为 1 mm 的调焦机构焦平面位移达 2 753 μm ,自锁失效;螺距为 1.5 mm 的调焦机构焦平面位移为 6 μm ,小于测量误差,机构自锁正常,验证了分析方法的可靠性。这种动力学环境下研究机构自锁性的新方法对工程应用具有重要的意义。

关键词:空间相机;调焦机构;自锁;螺纹;随机振动

中图分类号:V445.8 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182602.0355

Evaluation and test of self-locking ability for focusing mechanism of space camera

AN Yuan^{1,2}, DU Yi-min^{1,3*}, JIA Xue-zhi^{1,2}, LI Lin^{1,3}, LI Ji^{1,2}, KE Shan-liang^{1,3}

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

2. *Chang Guang Satellite Technology LTD., Changchun 130033, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: duyimin0601@126.com*

Abstract: Focusing mechanisms in space camera needs to possess self-locking ability to resist the shock and vibration in the process of launching. Therefore, a self-locking analysis on the mechanism is the key of ensuring the space optics remote sensors work properly. This paper studied the sliding mechanism of thread contact surface under environments of vibration, and built a engineering models of the focusing mechanism of certain space camera with two types of screw pitch (1 mm,1.5 mm). Contact stress, shear stress distribution and self-locking ability of the mechanism were researched in detail. The results showed that the Mises stress value of focusing mechanism with screw pitch 1 mm was big-

收稿日期:2017-04-24;修订日期:2017-06-23.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFB0500904)

ger than its calibration value of self-locking, which means self-locking lost efficacy. The Mises stress value of focusing mechanism with screw pitch 1.5 mm was under its calibration value of self-locking, which means self-locks was effective. Finally, a random variation test was performed on the focusing mechanism. The results showed that the focal plane's displacement of the mechanism with 1 mm screw pitch reached 2 753 μm , resulting in failure of self-locking. On the contrary, the focal plane's displacement of the mechanism with 1 mm screw pitch reached 6 μm , which was less than measuring error, the mechanism worked properly. It can be seen that the analysis approach proposed is effective, reliable, and provides a new way of researching the self-locking of focusing mechanism under the dynamic environment.

Key words: space camera; focusing mechanism; self-lock; screw thread; random variation

1 引言

空间遥感相机是获得地面信息的重要手段之一,被广泛地应用于气象、地质勘探、农林、海洋、环境、军事、救灾等领域。空间遥感相机在轨运行时由于空间环境(如温度、压力等)的变化,引起各光学镜面位置的相对变化,进而使焦平面产生一定程度的偏移,即离焦。随着空间相机分辨率的提高,离焦对图像质量的影响更为显著,为了保证相机的成像质量,需设计调焦机构以补偿光学系统的离焦量^[1-3]。

目前,国内外空间遥感相机常用的调焦机构有丝杠螺母调焦机构和凸轮调焦机构^[4-5]。其中,丝杠螺母调焦机构因结构简单、成本低等优点被广泛地应用于空间光学遥感相机中。贾学志等人^[6]依据某轻型空间相机设计了丝杠和连杆配合使用的双滑块机构,通过丝杠螺母和连杆组成的双滑块机构将步进电机的圆周运动转化为调焦镜法线方向的直线运动。安源等人^[7]针对某空间相机的要求设计了一种直线调焦机构,用滚珠丝杠将旋转运动转化为直线运动,并结合直线导轨约束运动形式,该机构具有低摩擦、传动简单等优点。丝杠螺母作为调焦机构的执行机构,在真空与低温环境中容易出现卡滞现象,存在抗振动冲击能力差等缺点^[4]。卫星在升空过程中经受复杂的动力学环境,调焦机构需具有一定的锁止能力,以应对发射中的冲击与振动。现有的锁止形式主要有电磁锁紧与步进电机保持力矩锁止^[8],但若锁紧机构在发射过程中破损,则会导致整个调焦机构无法正常工作。因此,对丝杠螺母的自锁性进行分析是保证调焦机构正常工作的关键。国内

对于丝杠螺母自锁性的研究较少,尚无在外加交变载荷作用下其锁止能力的研究。在实际工程中,通常采用提高强度、降低螺纹导程角的方法,但效果并不明显^[9]。

本文对振动环境中螺纹自锁失效的机理开展了理论研究,选定两种螺距的螺纹,建立了工程分析模型,详细分析了在交变载荷作用下螺纹的自锁性,并通过试验验证提供了一种在动力学环境下研究调焦机构自锁性的新方法,弥补了空间相机调焦机构研究工作的不足。

2 螺纹自锁失效机理分析

螺纹接触面在振动工况下会产生幅值极小的相对滑动,并且与摩擦紧密相关。文献^[9,10]指出,螺纹接触面间的微动是螺纹产生相对滑动的重要原因,因此,螺纹的自锁性分析属于微动摩擦学范畴。所谓微动^[9-11],是指两接触表面间发生位移极小的相对运动,位移振幅通常在微米量级。

摩擦是两接触面相对运动或有相对运动趋势时产生的物理现象。微动摩擦学指出在一定的条件下,微动接触区存在滑移区与黏着区。在切向应力的作用下,接触表面之间会发生位移很小的相对滑动。针对微动问题,接触状态可以分为滑移状态和黏着状态。本研究中采用库伦摩擦作为模型,即使用摩擦系数来表示接触面之间的摩擦特性。库伦摩擦的计算公式为:

$$\tau_{\text{crit}} = \mu \cdot \sigma_n, \quad (1)$$

式中: τ_{crit} 为临界切应力; σ_n 为接触面的法向接触应力; μ 为摩擦系数。

在摩擦切应力 τ_t 达到临界切应力之前,两接触面之间不会发生相对滑动。因此,若 $\tau_t < \tau_{\text{crit}}$,

则该点不发生相对滑动,处于黏着状态,所有黏着点组成黏着区域;若 $\tau_t = \tau_{crit}$,该点相对滑动,处于滑移状态,所有滑移点组成滑移区域。因此,两接触面间的接触行为可以分为三种接触状态:完全滑移状态、黏着状态和部分滑移状态。

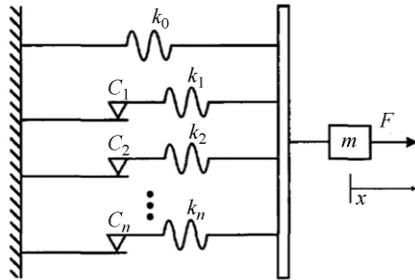


图 1 螺纹接触滑移动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of contact and slippage of screw thread

为了表征螺纹接触面的接触状态,建立了如图 1 所示的动力学分析模型,将多个摩擦阻尼与弹簧所构成的组合单元并联在一起,可以较好地模拟出螺纹接触面的三种接触状态。

系统动力学方程可以写为:

$$m\ddot{x}(t) + k_0x(t) + \sum_{i=1}^n c_i(t) = F(t), \quad (2)$$

式中:

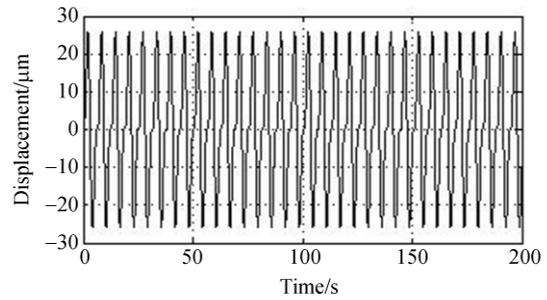
$$c_i(t) = \begin{cases} k_i[x(t) - x_{rev}] - C_i \operatorname{sgn}[\dot{x}(t)], & \operatorname{abs}(c_i(t)) < C \\ C_i \operatorname{sgn}[\dot{x}(t)], & \text{else} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: C_i 为第 i 个摩擦阻尼的动摩擦力, x_{rev} 为速度反向时的位移, sgn 为符号函数。

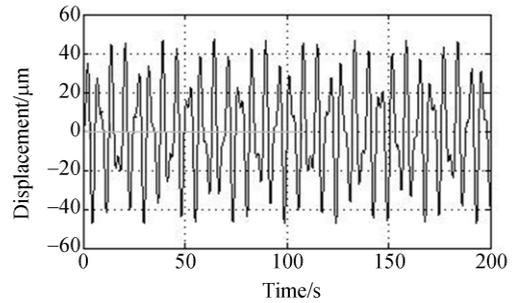
当位移 x 较小时,所有单元均处于黏着状态,螺纹接触面处于黏着状态;随着位移 x 的增大,不断有单元转变为滑移状态,接触面处于部分滑移状态。最后,所有单元均转变为滑移状态,接触面转变为完全滑移状态。在动力系统中,摩擦阻尼为非线性项,所以整个系统表现为非线性,采用数值仿真法求解较为方便。基于以上分析采用 MATLAB/Simulink 对动力学方程进行数值求解,求解函数采用 ode45(四阶变步长 Runge-Kutta 法),得到三种接触状态下系统的位移响应,如图 2 所示。其主要特征如下:

(1) 螺纹接触面处于粘着状态时,系统为线性系统,稳态响应为简谐信号;

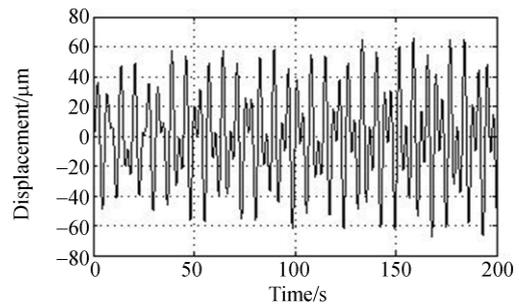
(2) 随着激励 F 的增大,接触状态转变为部



(a) 黏着状态
(a) Adhesive status



(b) 部分滑移状态
(b) Partial slipping status



(c) 完全滑移状态
(c) Gross slipping status

图 2 三种接触状态下系统的位移响应结果

Fig. 2 Displacement response results under three types of contact status

分滑移状态,响应的非线性程度逐渐增强,出现非周期现象;

(3) 继续增大激励 F ,接触状态最终转变为完全滑移状态,响应的非周期现象更加显著,存在明显的响应状态突变。

由上述分析可知,当螺纹接触面处于黏着状态或部分滑移状态时,两接触面存在黏着区,螺纹自锁可靠;当接触面处于完全滑移状态,整个接触面产生相对滑动,螺纹自锁失效。因此,确定螺纹

接触状态是判定螺纹是否自锁的一个重要标准。

Fouvy 等^[12]描述了微动滑移状态的转变,定量给出了部分滑移向完全滑移的转变判据,即能量比 $\kappa=0.2$ 是部分滑移转变为完全滑移的一个临界值。其中,能量比 κ 定义为微动循环的耗散能 E_d 与系统总能量 E_s 的比率:

$$\kappa = \frac{E_d}{E_s}. \quad (4)$$

在所创建的系统中,微动循环的耗散能 E_d 与系统总能量 E_s 可以表示为:

$$\begin{aligned} E_d &= E_{d1} + E_{d2} + \dots + E_{dn}, \\ E_s &= E_{s1} + E_{s2} + \dots + E_{sn}. \end{aligned} \quad (5)$$

处于黏着状态的单元其 $E_{di}=0$ 。设前 k 个单元为滑移单元,结合式(5)有:

$$E_d = E_{d1} + E_{d2} + \dots + E_{dk}. \quad (6)$$

根据螺纹受力特点,有 $E_{d1} \approx E_{d2} \approx \dots \approx E_{dk}$, $E_{s1} \approx E_{s2} \approx \dots \approx E_{sn}$, 根据式(4)、式(5)和式(6)可得:

$$\kappa \approx \frac{kE_{d1}}{nE_{s1}} \approx \frac{k}{n} = \eta. \quad (7)$$

因此,可以将能量比 κ 近似等价于接触滑移区与接触区面积的比值 η 。根据文献[13],螺纹所承受载荷的分布很不均匀,且第一圈螺纹所承受的载荷最大,约为总载荷的 20%~30%。因此,需要考虑载荷集中对螺纹接触状态的影响。在工程分析中,集中系数法较为常用。定义载荷集中系数 K 为第一圈螺纹所承受的实际载荷与名义载荷之比,即:

$$K = 0.3z, \quad (8)$$

式中 z 为旋合螺纹圈数。根据以上分析,可得:

$$\kappa \approx K \cdot \eta = K \cdot \frac{k}{n} = 0.3z \cdot \frac{k}{n}. \quad (9)$$

根据式(9),若螺纹接触面处于非完全滑移状态应满足:

$$\frac{k}{n} < \frac{2}{3z}. \quad (10)$$

在交变载荷的作用下,若螺纹接触面 $2/3z$ 的接触区域出现滑动,即可认定螺纹接触面处于完全滑移状态,螺纹副自锁失效。

3 有限元模型

针对某空间相机所设计的调焦机构主要由电机、丝杠螺母组件、导轨组件以及焦平面组件(负

载)组成。机构原理如图 3 所示,螺旋传动可以将步进电机的旋转运动转化为焦平面组件的直线运动。在振动环境下,螺纹牙承受较大的轴向交变载荷。丝杠螺母组件作为薄弱环节,是保证调焦机构锁止可靠的关键。

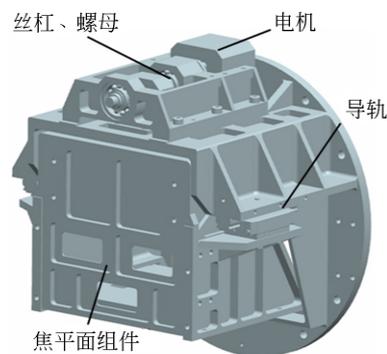


图 3 调焦机构结构

Fig. 3 Structure of focusing mechanism

螺纹副的接触面是一个空间螺旋曲面,其模型的建立极其复杂。根据文献[14],螺纹升角较小的变化对各螺纹牙载荷的分布影响很小。因此,在保证有限元分析结果准确的情况下忽略了升角的影响。选取螺距 $p=1$ mm 与 $p=1.5$ mm 的螺纹进行建模,具体螺纹参数见表 1。由于分析的重点为螺牙,在螺牙处细化网格,保证计算结果的精确,减少计算时间。在振动环境下,各部分螺纹接触面的接触状态会发生变化,在本研究中,需要不断地判定螺纹接触面各个部分的接触状态,因此采用有限滑移分析。

表 1 螺纹建模参数

Tab. 1 Model parameters of screw thread

螺距 p/mm	螺纹圈数	旋合螺纹圈数
1	16	14
1.5	12	10

螺纹受力属于典型的接触问题,接触状态的变化使模型表现出边界条件的高度非线性,需要占用较大的计算资源。丝杠螺母的几何结构和载荷具有轴对称性,因此,将分析模型简化为原模型的 $1/2$,并在对称面施加对称约束,载荷也相应地降低为原来的一半。负载以一个集中质量点代替,有限元模型如图 4 所示。

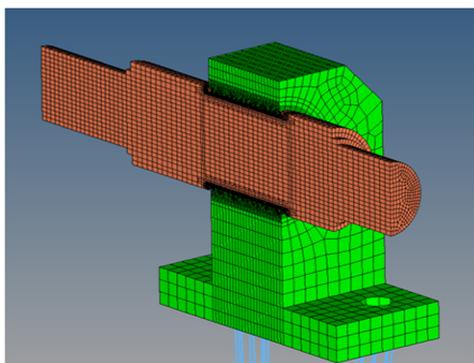


图 4 丝杠和螺母的有限元模型

Fig. 4 Finite element modal of screw

4 机构自锁性分析

在如图 5 所示的路径上选取 8 个点来表征该圈螺纹的受力特点。根据式(10),两种螺纹均可通过分析第一圈螺纹的接触状态来确定丝杠螺母的自锁状况。

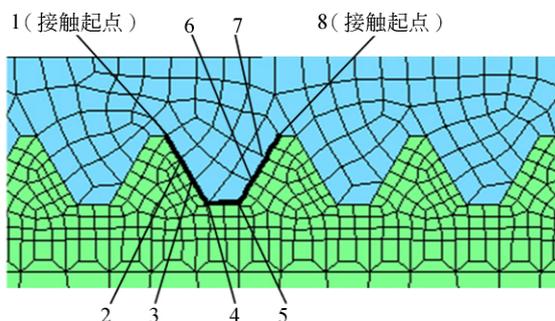
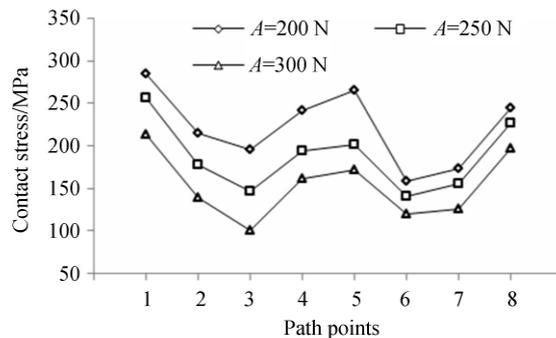


图 5 螺纹分析路径点

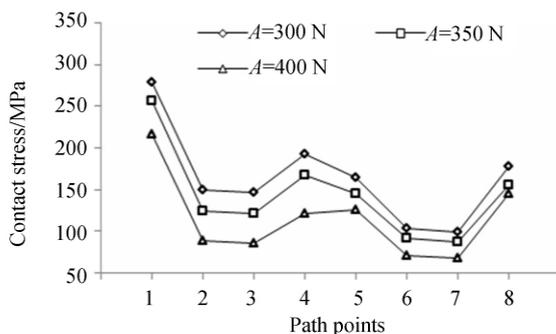
Fig. 5 Path points in screw thread analysis

4.1 第一圈旋合螺纹接触应力分布

为了准确分析在第一圈旋合螺纹的接触应力分布特征,分别提取了螺距 $p=1\text{ mm}$ 和 $p=1.5\text{ mm}$ 的第一圈旋合螺纹在 3 种不同幅值的交变载荷作用下沿设定路径点的接触应力变化曲线。图 6(a)为 $p=1\text{ mm}$ 时螺牙接触应力沿设定路径点的变化曲线,接触的起点(1 点)与终点(8 点)应力较大,螺纹牙底应力相对集中,但不高于螺纹牙顶,其余接触点由应力集中点向两侧衰减。图 6(b)为 $p=1.5\text{ mm}$ 时螺牙接触应力沿设定路径点的变化曲线,可见螺牙的接触应力仍然具有上述特点,接触起点的接触应力值高于终点。



(a) $p=1\text{ mm}$



(b) $p=1.5\text{ mm}$

图 6 不同交变载荷下第一圈螺纹的接触应力

Fig. 6 Contact stress of first lap of screw thread under different alternating loads

图 7 为 $p=1\text{ mm}$ 与 $p=1.5\text{ mm}$ 的螺牙在幅值为 $A=300\text{ N}$ 的交变载荷作用下接触应力的对比。总体上, $p=1\text{ mm}$ 的螺牙接触应力普遍高于 $p=1.5\text{ mm}$ 的应力, $p=1.5\text{ mm}$ 的螺牙接触应力较 $p=1\text{ mm}$ 的螺牙略微平缓。这说明 $p=1.5\text{ mm}$ 的螺牙承载能力更高。

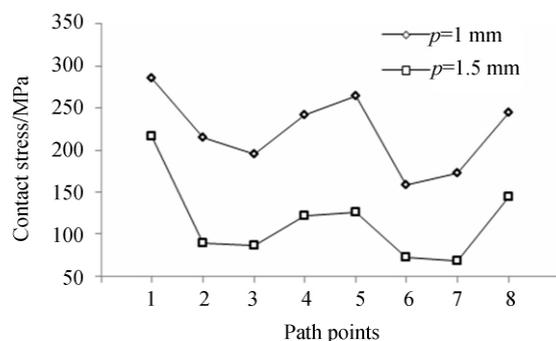


图 7 两种螺纹接触应力对比

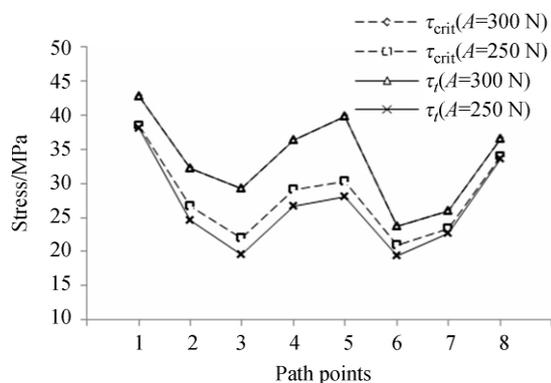
Fig. 7 Comparison of contact stress between two types of screw thread

4.2 第一圈旋合螺纹切应力分布

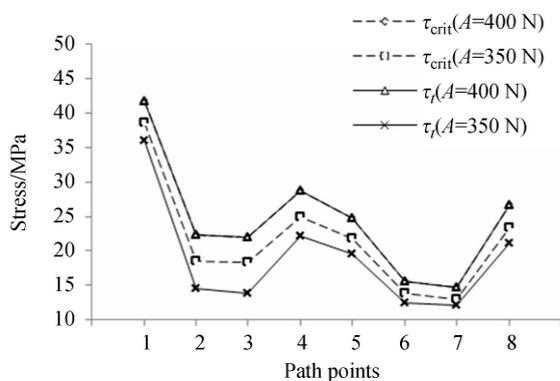
在交变应力的作用下,螺纹副的两接触表面之间会发生位移很小的相对滑动。针对小滑移问题,接触状态可以分为滑移状态和黏着状态。在 Abaqus 分析中采用常用的库伦摩擦作为模型。

根据得到的接触应力曲线,结合式(1)依次计算第一圈旋合螺纹各路径点上的临界切应力 τ_{crit} ,比较 τ_t 与 τ_{crit} 的大小。图 8(a) 为 $p=1$ mm 时螺牙 τ_t 与 τ_{crit} 的变化曲线,摩擦切应力表现出与接触应力相同的特征,接触起点、接触终点和中间牙底段应力较高,且首尾接触点应力稍大于中间点应力。通过对比可知, $A=250$ N 时,第一圈旋合螺纹在接触的起点和终点较为接近滑移状态,其它路径点为黏着状态; $A=300$ N 时,螺纹已全部处于滑移状态。

图 8(b) 为 $p=1.5$ mm 时螺牙 τ_t 与 τ_{crit} 的变化曲线,同理, $A=350$ N 时,第一圈旋合螺纹所



(a) $p=1$ mm



(b) $p=1.5$ mm

图 8 不同载荷下第一圈螺纹的接触状态分析

Fig. 8 Contact status of first lap of screw thread under different alternating loads

有路径点处于黏着状态; $A=400$ N 时,螺纹路径点全部处于滑移状态。可见, $p=1.5$ mm 的螺牙较 $p=1$ mm 的螺牙承载能力更高,自锁性更好。

从上述分析可知,在外载荷幅值相对较小的条件下,螺纹接触面处于黏着状态。随着载荷增加到一定的水平,在接触的起点与终点区域首先出现滑移,并迅速扩展到整个螺纹接触面,演变为完全滑移并最终导致螺纹副的自锁失效。

4.3 随机激励下机构自锁性分析

随机响应分析基于扫频分析,各个频率上的激励引起各个频率上的响应,它们之间的桥梁是传递函数。而螺纹受力属于接触问题,其边界条件不能在计算的开始全部给出,传递函数因接触状态的变化而发生改变。在这种情况下,只能对动力平衡方程直接积分求解。而现有随机响应分析方法不适用于接触问题,必须寻求一种方法将非线性问题转化为线性问题,本文用连续系统替代离散系统以进行随机响应分析。螺纹副的应力集中于螺纹牙顶与牙底,故连接丝杠、螺母牙顶与牙底相对应的节点,将非线性分析转化为线性分析。连接节点示意如图 9 所示。

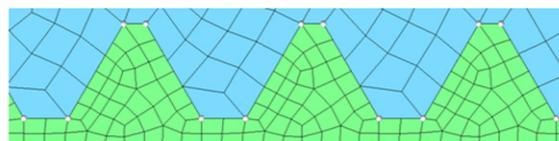
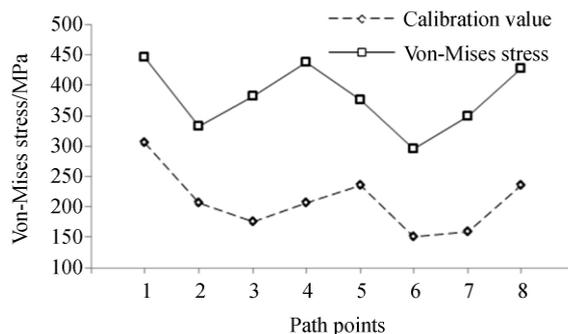


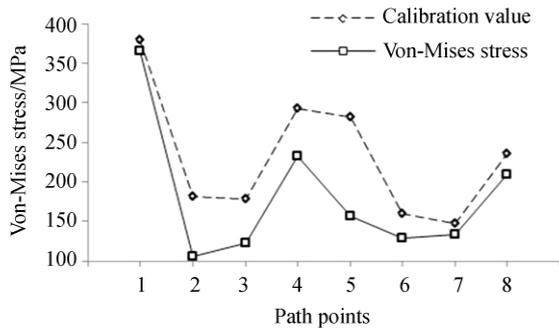
图 9 线性分析中连接节点示意

Fig. 9 Contacted nodes in linear analysis

将接触分析中第一圈旋合螺纹出现完全滑移的前一工况作为准滑移状态,并提取其各路径点上的 Von-Mises 应力作为自锁标定应力,来衡量随机激励下螺纹副是否自锁。图 10 所示为 Von-Mises 应力对比曲线。可以看出, $p=1$ mm 的螺



(a) $p=1$ mm



(b) $p=1.5$ mm

图 10 随机激励下螺纹自锁性分析

Fig. 10 Self-locking ability of screw thread under random variation

纹的随机响应 Von-Mises 应力远远大于其自锁标定应力,螺纹接触面处于完全滑移状态,自锁失效; $p=1.5$ mm 的螺纹的随机响应 Von-Mises 应力小于其自锁标定应力,螺纹接触面处于黏着状态,自锁可靠。

5 试验验证

分别对 $p=1$ mm 与 $p=1.5$ mm 的相机调焦机构样机进行振动试验,试验装置主要包括调焦机构和工装。试验的目的是为了验证机构的抗振动冲击能力及其自锁性,获取各个组件的响应值。试验各部件的安装关系如图 11 所示。

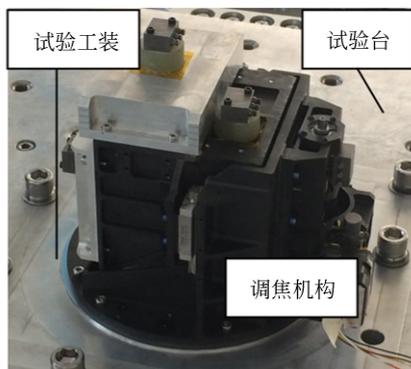


图 11 相机调焦机构各部件的安装位置关系

Fig. 11 Installation position of each component of camera focusing mechanism

按照试验要求,在 $15\sim 25$ °C 的环境下分别对两套调焦机构的 z 向进行输入 RMS 值为 $5.88g$ 的随机振动试验。在振动试验前后分别测量焦平面所在的位置。测量原理如图 12 所示,通过数显

千分表检测试验前后焦平面组件的位置。

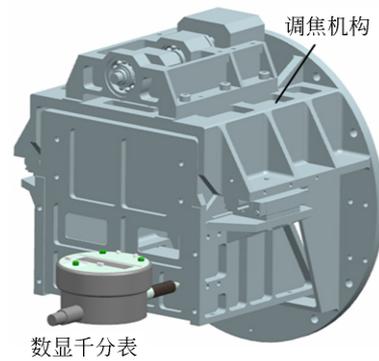


图 12 焦平面位置测量

Fig. 12 Positional measurement of focal plane

表 2 所示为试验前后焦平面的位置变化。根据测量结果可知,螺距为 1 mm 的调焦机构焦平面位移达 $2\ 753\ \mu\text{m}$,螺纹自锁失效,机构运动出现卡滞;螺距为 1.5 mm 的调焦机构焦平面位移为 $6\ \mu\text{m}$,由于振动试验后需对数显千分表进行重新定位安装,两次测量存在 $\pm 10\ \mu\text{m}$ 的测量误差,因此,焦平面位移可忽略不计,机构自锁良好,运动正常,由此验证了仿真分析的合理性与正确性。

表 2 随机振动试验结果

Tab. 2 Result of random variation test

螺距 p /mm	焦平面位移/ μm			试验后 机构状况
	试验前	试验后	位移	
1	0	-2753	2753	机构卡滞
1.5	0	6	-6	运行正常

6 结 论

本文分别对螺距为 1.5 mm 和 1 mm 的空间相机调焦机构进行自锁性分析,利用 CAE 分析软件系统地研究了螺纹牙的接触应力及摩擦切应力分布特征,并分析了螺纹牙的接触状态。最后,对两种调焦机构进行了随机振动试验,结果显示:螺距为 1 mm 的调焦机构焦平面位移达 $2\ 753\ \mu\text{m}$;螺距为 1.5 mm 的调焦机构焦平面位移为 $6\ \mu\text{m}$,小于测量误差 $10\ \mu\text{m}$,机构自锁正常。该结果验证了分析的准确性与合理性。本研究弥补了空间相机调焦机构研究工作的不足。

参考文献:

- [1] 曹启鹏, 叶钊, 董小静, 等. 基于图像评价的国外空间相机调焦方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 11102.
CAO Q P, YE ZH, DONG X J, *et al.*. A method of focusing of foreign space camera based on image evaluation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 11102. (in Chinese)
- [2] 浦前帅, 翟岩, 文大化, 等. 星载红外探测器调焦机构设计与分析[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2015, 38(2): 25-28.
PU Q SH, ZHAI Y, WEN D H, *et al.*. Design and analysis of focusing mechanism for spaceborne infrared detector[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2015, 38(2): 25-28. (in Chinese)
- [3] 杨会生, 李志来, 樊延超, 等. 空间相机均力输出式调焦机构[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 796-803.
YANG H SH, LI ZH L, FAN Y CH, *et al.*. Focusing mechanism with equal output forces for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 796-803. (in Chinese)
- [4] 丁亚林, 田海英, 王家骥. 空间遥感相机调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2001, 9(1): 35-38.
DING Y L, TIAN H Y, WANG J Q. Design on the focusing mechanism of space remote-sensing camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1): 35-38. (in Chinese)
- [5] 范洪杰, 董吉洪, 李威, 等. 一种空间相机调焦机构的设计与分析[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2016, 39(3): 1-4.
FAN H J, DONG J H, LI W, *et al.*. Design and analysis of focusing mechanism for space camera[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2016, 39(3): 1-4. (in Chinese)
- [6] 贾学志, 张雷, 安源, 等. 空间光学传感器精密调焦机构设计与试验[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 25-30.
JIA X ZH, ZHANG L, AN Y, *et al.*. Design and experiment research on precision focusing mechanism of space remote sensor[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(13): 25-30. (in Chinese)
- [7] 安源, 齐迎春. 空间相机直线调焦机构的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 609-614.
AN Y, QI Y CH. Design of straight-line focusing mechanism for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 609-614. (in Chinese)
- [8] 陈洪达. 空间高分辨遥感仪器调焦系统研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
CHEN H D. *Research on Focusing System of High-Resolution Space Remote Sensing Instrument* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [9] 周仲荣, 朱旻昊. 复合微动磨损[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
ZHOU ZH R, ZHU M H. *Composite Fretting Wear* [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2004. (in Chinese)
- [10] 刘建华. 轴向激励下螺栓连接结构的松动机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
LIU J H. *Research on the Self-loosening Mechanism of Bolted Joints under Axial Excitation* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [11] WATERHOUSE R B. Fretting fatigue[J]. *International Materials Reviews*, 1992, 37(1): 77-98.
- [12] FOUVRY S, KAPSA P, ZAHOUANI H, *et al.*. Wear analysis in fretting of hard coatings through a dissipated energy concept[J]. *Wear*, 1997, 203-204: 393-403.
- [13] 倪佩韦, 王胜春, 张焯. 基于三维有限元模型的螺纹副承载力分布研究[J]. 起重运输机械, 2015(10): 33-37.
NI P W, WANG SH CH, ZHANG Y. Bolt bearing capacity study based on the 3D model[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2015(10): 33-37. (in Chinese)
- [14] ZHAO H. Analysis of the load distribution in a bolt-nut connector[J]. *Computers & Structures*, 1994, 53(6): 1465-1472.

作者简介:



安源(1980—),男,黑龙江安达人,博士,研究员,主要从事空间遥感的结构设计。E-mail: any@ciomp.ac.cn

通讯作者:



杜一民(1991—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,2015年于吉林大学获得学士学位,主要从事空间相机调焦机构的设计。E-mail: duyimin0601@126.com