

基于在线测量技术的光机部件加工精度控制研究

韩保辉 常江 李松 陈英 江希龙 王琳然 马骏

(北京空间机电研究所, 北京 100094)



摘要: 针对高精度薄壁光机部件定心加工精度难控制, 提出基于精确计算装夹力和非接触式在线检测的装夹变形量控制方法。通过理论计算和有限元仿真获得定心加工三种工况下的装夹力数值, 搭建了装夹变形实时检测系统, 采取建立高精度连接面、精准调整装夹工艺螺钉拧紧力矩等措施控制光机部件装夹变形量, 在线预估光机部件的加工精度。试验表明, 该方法可实现光机部件设计精度指标, 为解决同类问题提供借鉴。

关键词: 薄壁; 光机; 在线测量; 装夹变形; 定心加工

中图分类号: TH164; TH166 文献标识码: A

Research on Machining Precision Control of Opto-mechanical Parts Based on Online Measurement Technology

Han Baohui Chang Jiang Li Song Chen Ying Jiang Xilong Wang Linran Ma Jun

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094)

Abstract: Aiming at the difficulty in controlling the optical alignment machining accuracy of high-precision thin-walled opto-mechanical components, a control method based on accurate calculation of clamping force and non-contact online detection of clamping deformation monitoring was proposed. Through theoretical calculation and finite element simulation, the clamping force values under three working conditions of centering processing are obtained, and a real-time detection system for clamping deformation is built. Measures such as establishing a high precision-connection surface and accurately adjusting the screw tightening torque of the clamping process are adopted to control the clamping deformation of the opto-mechanical components, and estimate the machining accuracy of the opto-mechanical components online. Experiments show that this method can realize the design accuracy index of opto-mechanical components and provide reference for solving the similar problems.

Key words: thin-wall; opto-mechanical; online measurement; clamping deformation; optical alignment machining

1 引言

随着遥感器研制技术的发展, 高分辨率红外遥感技术发挥着越来越重要的作用^[1], 使透射式光学系统的精度指标不断提高。高精度光机部件的典型结构及精度要求如图 1 所示, 镜框直径 $20\text{mm} < a < 200\text{mm}$, 镜框最小壁厚 2mm , 具有薄壁、精度高、小批量等特点。由

于光学元件制造工艺局限性, 透镜装框后难以保证精度, 通常在装框后使用定心加工保证精度。传统的定心加工技术可使平面度、垂直度等形位精度达到 $0.005 \sim 0.012\text{mm}$, 圆柱度、同轴度等形位精度能达到 $0.008 \sim 0.015\text{mm}$, 不能满足高性能镜头的设计精度要求。在结构件加工过程中, 由于夹具限制影响加工质量^[2], 工件的加工误差有 $20\% \sim 60\%$ 来自装夹变形^[3], 因此装夹变

作者简介: 韩保辉 (1979), 硕士, 航空工程专业专业; 研究方向: 航天遥感器精密结构件加工及装配工艺。

收稿日期: 2022-06-28

形是影响零件加工精度的重要因素^[4]。

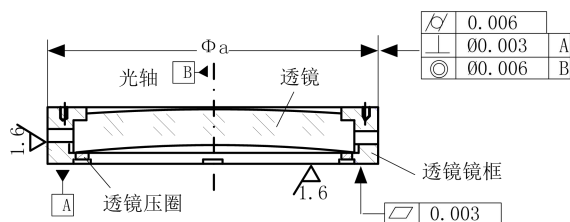


图1 光机部件典型形式

目前,在线测量技术发展迅速,是相对于三坐标测量机使用的离线测量方法的测量方案,在高精密机床上使用可以和三坐标测量机相媲美,在薄壁件加工测量一体化上有不可替代的作用^[5]。本文通过建立装夹力计算模型并结合有限元分析明确装夹要求,搭建了非接触式在线检测系统,获取装夹变形量,讨论了装夹变形的调整方法,实现了光机部件的装夹变形精密控制。

2 光机部件定心加工

定心加工是利用光学仪器(对心器)和定心调整工装,将光学基准与机床机械轴装调重合,然后对光机部件的装配机械基准进行精密车削加工,建立光机部件光学基准与其装配机械基准的关系,典型的加工系统形式如图2所示^[6]。

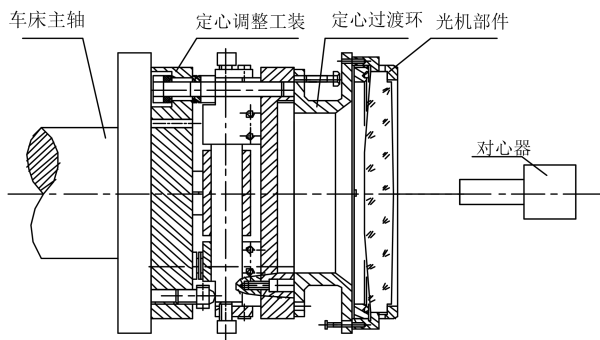


图2 定心加工典型形式

光机部件加工装夹变形控制的传统方法是:利用工艺螺纹孔先将光机部件安装至定心过渡环,工艺螺钉带上不紧固,然后通过千分表打表读取透镜镜框端面数据,然后对工艺螺钉施加拧紧力矩,再次读取装夹后状态数据,通过两次读数,识别装夹变形量,控制加工精度。但是,千分表的测量精度受操作者经验、使用方法、千分表结构影响较大^[7],检测精度 $\pm 1\mu\text{m}$,

目前高精度的光机部件的加工精度要求已达到 0.003mm ,传统打表方法显然不能适应精度控制需求,且存在检测误差大,效率低,操作繁琐不适合批量生产等局限。同时,传统的紧固方式是对螺钉施加拧紧力矩经验值,存在拧紧力矩过大,引起薄壁光机部件过度变形,导致加工精度不合格的风险。

3 装夹变形在线检测系统

以某光机部件——透镜一组件(图3)为例,建立装夹变形在线检测系统(图4),透镜一组件外形尺 $\Phi 100\text{mm} \times \Phi 77\text{mm} \times 18.5\text{mm}$,镜框材料为TC4钛合金,总重量473.6g。透镜一组件对外安装面平面度 0.003mm ,镜框外圆圆度 0.006mm ,外圆轴线与光轴同轴度 0.006mm ,与安装面垂直度 0.003mm 。

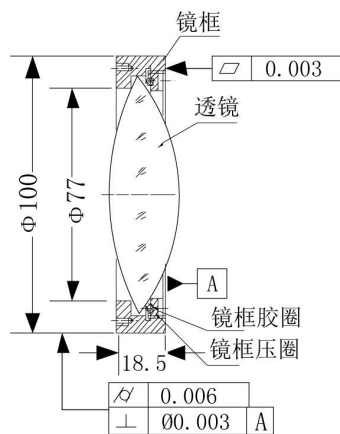


图3 透镜一组件图

在线检测系统包括精密车床、定心过渡环、透镜一组件、米铱传感器(激光测距仪)、控制器、稳压电源等,通过米铱传感器可实时探测透镜一组件的装夹数据,并通过软件读取,实现在线检测。米铱传感器的量程是 0.3mm ,非接触式探测精度为 $0.3\mu\text{m}$,满足测量需求。

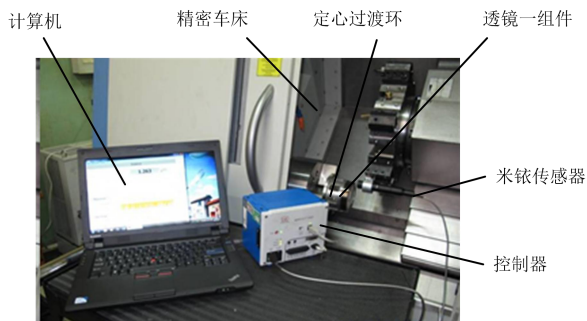


图4 装夹变形检测控制系统

加工时,将米铱传感器放置在量程内,对准透镜一组件的待加工端面,如图5所示。选取一处工艺螺钉位置作为起始点并读取数据,然后控制车床主轴旋转,直至所有螺钉(透镜一组件共8个M2.5螺钉)位置均记录读数为止。读数表示的是对应每个螺钉位置待加工面的高低值,在后续紧固的过程中,保持传感器的位置不变,传感器的数值变动量即表示该点的装夹变形量,实现对光机部件装夹变形量的在线检测。

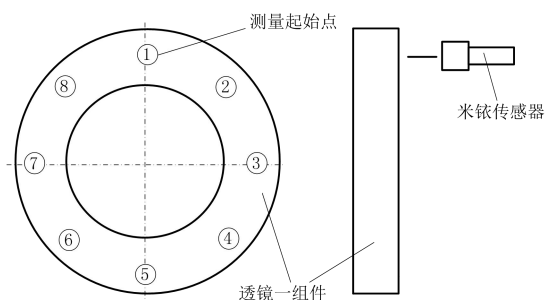


图5 传感器测量位置示意图

4 装夹力计算及仿真校验

以图3透镜一组件为例,进行单个工艺螺钉装夹预紧力计算。透镜一组件与定心过渡环是通过8个均布的M2.5工艺螺钉连接。为保证预紧力计算的可靠性,按照静态装夹、机床启动瞬间、切削加工中三种工况进行计算,根据计算结果取三种工况下透镜一组件装夹力需求最大值作为装夹力的最小要求,既能实现稳定装夹满足切削要求,又防止装夹力过大引起变形。

4.1 静态装夹

静态装夹时,螺钉的装夹力用于克服组件的重力及重力在连接面上产生的弯矩。

$$G = mg \quad (1)$$

式中: G 为重力, m 为透镜组件质量 473.6g, g 为重力加速度 9.8m/s^2 。

$$M = \frac{GL}{2} \quad (2)$$

式中: M 为重力在连接面产生的弯矩, L 为镜头组件高度 18.5mm。

$$I_z = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \quad (3)$$

式中: I_z 为惯性矩, D 为镜框外径 100mm, d 为

最小内径 77mm。

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I_z} y_{\max} = \frac{MD}{2I_z} \quad (4)$$

式中: σ_{\max} 为连接面最大拉应力。

$$F_1 = \frac{G}{f} \quad (5)$$

式中: F_1 为克服重力需要的预紧力, f 为镜框与连接面的摩擦系数,取 0.1。

$$F_{\min} = \frac{F_1}{n} + \sigma_{\max} \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (6)$$

式中: F_{\min} 为单个螺钉最小预紧力, n 为螺钉个数 ($n=8$), d_1 为螺钉直径。

通过式(1)至式(6)计算得知,单个螺钉最小预紧力 $F_{\min}=5.87\text{N}$ 。

4.2 机床启动瞬间

机床启动瞬间,螺钉的预紧力需要克服零件旋转受加速度影响带来的惯性力,取极限情况下机床的加速度为 20 倍重力加速度,则

$$K_d = 1 + \frac{a}{g} \quad (7)$$

式中: K_d 为动载系数,计算得知 $K_d=21$ 。

$$F_{\min}^1 = K_d F_{\min} \quad (8)$$

式中: F_{\min}^1 为机床启动瞬间螺钉预紧最小值,计算得知: $F_{\min}^1=121.8\text{N}$ 。

4.3 切削加工中

车削加工时,零件受的切削力 $F_{\text{合}}$ 分解如图6所示。

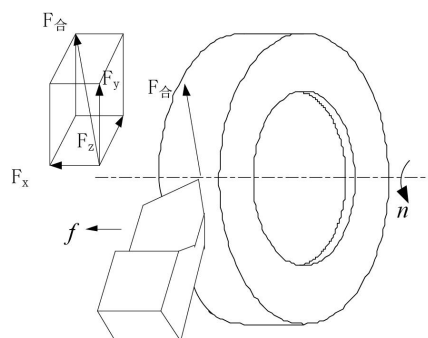


图6 切削力分析

在进行光机部件车削加工时, F_x 与 F_z 对螺纹连接造成切向力和弯矩, F_y 对螺纹连接造成切向力和旋转

力矩；切向力和旋转力矩对螺纹的预紧不产生影响，剩余预紧力仍等于螺纹的预紧力，可不必分析；弯矩会在螺纹连接面产生拉应力，导致螺纹变松。

根据文献^[6]对切削力的仿真分析， F_x 的极限值可取为 30N， F_z 的极限值可取为 300N。

$$M_z = F_z L \quad (9)$$

式中： M_z 为径向力 F_z 在连接面产生的最大弯矩。

$$\sigma_{\max} = \frac{M_z}{I_z} y_{\max} = \frac{M_z D}{2I_z} \quad (10)$$

式中： σ_{\max} 为连接面最大拉应力。

$$F_2 = \sigma_{\max} \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (11)$$

式中： F_2 为螺钉的拉松力。

$$F' = (G + F_x)/n + F_2 \quad (12)$$

式中： F' 为每个螺钉承受的载荷。

$$F = (1 - \varphi)F' + F'' + F_{Re} \quad (13)$$

式中： F 为螺钉连接松弛后保证连接正常工作的最小预紧力； F' 为外载荷； F_{Re} 为螺栓连接预紧后最大初松弛量引起的预紧力负增量； F'' 为连接载荷所需最小螺栓剩余预紧力。

$$F'' = 0.2(1 - \varphi)F' \quad (14)$$

式中： φ 为相对刚度系数，即螺栓刚度与被连接系统刚度之比，取值 0.5。

$$F_{\min}^2 = (1 - \varphi)F' + 0.2(1 - \varphi)F' \quad (15)$$

式中： F_{\min}^2 为切削加工过程中光机部件单个螺钉的最小装夹力，计算得 $F_{\min}^2 = 5.2\text{N}$ 。

由上可知， $F_{\min}^1 > F_{\min}^2 > F_{\min}^2$ ，因此将机床启动瞬间的螺钉预紧力要求值 121.8N 作为理论最小装夹预紧力要求，为保证产品安全，安全系数取 2，因此单个螺钉的最小预紧力要求值为 243.6N。

$$T = KF_0 d \quad (16)$$

式中： T 为螺钉拧紧力矩，N·m； d 为螺纹公称直径（本文为 2.5mm）； F_0 为预紧力，N； K 为拧紧力矩系数。 K 与螺纹升角、螺纹当量摩擦角、螺纹当量摩擦系数、螺钉与被联接件支撑面间的摩擦系数有关。一般当被联接件表面为加工面无润滑状态时，取

0.18~0.21；本文取值 $K=0.21$ 。

计算可知，当 $F_0=243.6\text{N}$ 时，单个螺钉的拧紧力矩为 $T=0.13\text{N}\cdot\text{m}$ ，即为透镜一组件装夹时单个螺钉的最小拧紧力矩。另外，根据企业标准单个螺钉的最大力矩按照实测值 0.55~0.8N·m 选取。

4.4 装夹变形仿真

根据装夹力计算结果，用 abaqus 有限元分析软件对透镜一组件镜框在最大拧紧力矩时的装夹变形进行数值模拟仿真。假设钛合金连接面为理论平面建立模型。镜框为 TC4 钛合金，密度 $\rho=4500\text{kg}/\text{m}^3$ ，弹性模量 $E=110\text{GPa}$ ，泊松比 $\mu=0.342$ ，按照单个螺钉最大拧紧力矩 $T=0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 对结构件施加载荷。

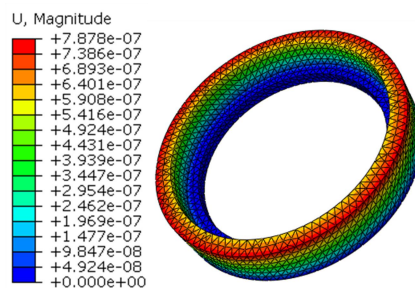


图7 装夹变形仿真结果

仿真结果如图7所示，镜框与定心过渡环的连接面变形量最大，结构件的最大变形量为 $7.878\text{e}^{-7}\text{mm}$ ，变形量很小。因此对单个螺钉施加 $0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 的拧紧力矩时不会引起结构件的过度变形，使用 $0.13\sim 0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 的拧紧力矩装夹光机部件时能够满足装夹变形控制要求。

5 试验验证

5.1 试验过程

按照图4搭建的装夹变形在线检测系统进行装夹变形控制试验，为尽量减小由于连接面平面度不足导致的装夹变形，结合实际加工经验，试验前保证定心过渡环连接面平面度 0.002mm ，透镜一组件安装面平面度 0.003mm 。

将透镜一组件安装至定心过渡环，对工艺螺钉暂不施加拧紧力矩，读取每个螺钉位置的检测数据。然后，对装夹工艺螺钉交替施加 $0.7\sim 0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩使螺钉紧固，再次读取相应螺钉位置的传感器检测数据。根据结构件紧固前后的数据变化对结构件加工精度进行预估，若满足要求则进行切削加工，若不满足

要求,通过重新调整螺钉拧紧力矩的方法,将装夹变形量控制在 0.003mm 以内,然后对透镜一组件使用文献^[6]的切削参数($\alpha_p=0.02\text{mm}$ 、 $f=0.1\text{mm/r}$ 、 $V_c=30\text{m/min}$)进行加工,使用三坐标测量机对加工表面进行精度检测。

5.2 试验结果



图 8 产品实物图

切削加工后的透镜一组件见图 8,米铱传感器的检测数据、装夹变形调整情况等见表 1。

表 1 装夹变形在线检测记录 μm

螺钉编号	装夹调整前在线检测数据			装夹调整后在线检测数据		
	螺钉未加力矩	螺钉紧固	数据变化量	螺钉未加力矩	螺钉紧固	数据变化量
1	0.6	5.3	4.7	1.3	3.2	1.9
2	0.5	3.0	2.5	-0.5	-0.6	-0.1
3	1.1	2.7	1.6	-0.7	0.7	1.4
4	1.3	3.3	2.0	0.8	1.8	1.0
5	0.8	3.4	2.6	1.1	2.8	1.7
6	0.0	1.4	1.4	0.9	0.6	-0.3
7	-0.6	1.4	2.0	0.7	2.7	2
8	-0.3	1.8	2.1	-0.3	-1.3	-1.0
最大变形	4.7			2		
变形调整方法	重新装夹,将1、5位置螺钉的拧紧力矩调整至0.5~0.6N·m,最大变形由4.7变为2					

由表 1 可知,装夹调整前,数据变化量高达 0.0047mm,加工后难以达到平面度 0.003mm 的要求。根据检测数据,将结构件重新装夹,针对性地对 1、5 位置的螺钉力矩进行调整,将拧紧力矩调整至 0.5~0.6N·m,发现只有 7 号螺钉位置的装夹变形量最大,紧固后变形量为 0.002mm,再加上机床精度 $\leq 0.001\text{mm}$

的影响,能够满足平面度 0.003mm 的加工精度要求,具备切削加工状态,实际切削加工后,经三坐标测量机检测得知透镜一组件加工精度达到平面度 0.002mm,圆柱度 0.003mm,垂直度 0.001mm,满足设计指标要求。

6 结束语

通过分析薄壁光机部件装夹变形难控制,建立装夹力计算模型,应用非接触式测量技术检测变形,分析装夹变形测量结果,结合验证试验得出如下结论:

- a. 对静态装夹、机床启动瞬间、切削加工中三种工况下的装夹预紧力进行分析计算,机床启动瞬间的螺钉预紧力作为理论最小装夹预紧力。
- b. 应用非接触式在线测量技术能明显提高光机部件装夹变形的检测精度,结合建立高精度平面,根据检测结果有针对性调整拧紧力矩,可实现光机部件的高精度加工。
- c. 运用非接触在线测量技术降低了对人工操作技能的依赖,能明显提高检测精度及效率,适用于批量化产品的生产。

参考文献

- 1 邱民朴,马文坡. 空间红外推扫成像系统探测器光学拼接方法[J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(6): 51~58
- 2 杨金川,张建富,李杰,等. 薄壁平面件真空多孔吸具的力学特性与优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(4): 31~37
- 3 王军,耿世民,张辽远. 薄壁壳体件装夹变形机理有限元分析与控制[J]. 兵工学报, 2011, 32(8): 1008~1013
- 4 郑耀辉,王江涛,王明海,等. 基于装夹方案的夹紧力及加工变形仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016, 514(12): 133~136
- 5 Lei W T, Hsu Y Y. Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part II: errors estimation. [J] International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(10): 1163~1170
- 6 潘浩,韩保辉,江希龙. 光机部件精密定心加工有限元仿真及应用[J]. 航天制造技术, 2016(2): 66~69
- 7 胡培秋. 千分表类量具示值误差测量值的不确定度分析[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(2): 119~120