

文章编号 1004-924X(2005)06-0715-06

基于激光技术的振动定位器质量调态的研究

余成波,陶红艳,张 莲,徐 霞

(重庆工学院 远程测试与控制技术研究所,重庆 400050)

摘要:精密加工制作的振动定位器,是现代武器系统中定位、定向的关键器件,其质量调态是球型振动件加工的重要步骤。对基于激光技术的振动定位器质量调态进行了研究,系统地介绍了激光束调态的原理,振动件加工缺陷层的分布、形式和理论构成,去除缺陷的计算以及激光束工作时间的确定等问题。对应用激光束进行质量调态前后的缺陷情况的对比分析得出,机械加工后的球型振动件的振动分裂频差在0.5 Hz以上,而应用激光束进行质量调态的分裂频差为0.004 Hz,表明该方法是有效的。

关键词:质量调态;激光束;振动定位器;球型振动件

中图分类号:TH825;TN247 **文献标识码:**A

Research of vibration locator mass adjustment based on laser technology

YU Cheng-bo, TAO Hong-yan, ZHANG Lian, XU Xia

(Institute of Remote Test & Control, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China)

Abstract: The vibration locator developed by precision work has excellent performance. It is an important key component of finding location or direction in the modern weapon system. The mass adjustment for a vibration locator is an importance step of processing the spherical vibration part. The vibration locator mass adjustment based on laser technology was put forward in this paper. The principle of the laser beam balance was introduced and the distribution, modality and construction of the vibration part processing defect-layer were discussed, and an arithmetic to eliminate the defect and confirm the laser beam time was given. The contract test results show that the vibration split frequency difference of the spherical vibration part is higher than 0.5 Hz, but the split frequency difference required by making locator should be 0.004 Hz. It is proved that the method is effective.

Key words: mass adjustment; laser beam; vibration locator; spherical vibration part

1 引言

由精密加工制作的振动定位器,具有优良的性能,是近年来发展起来的一种新型固体定位器,

可广泛应用于船舶、兵器等武器装备中,是现代武器系统中定位、定向极其重要的关键器件^[1,2,7-9]。由于此振动定位器无任何运动部件,即使在长时间工作环境条件下,也没有任何运动损耗,因而它具有连续长时间工作的独有优点,其工作寿命可

收稿日期:2005-09-01;修订日期:2005-09-11.

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(No. 7978)。

达 10 年以上,且在整个工作寿命期间,也不再需要标校,特别适合于空间飞行器等空间应用场合下工作,也非常适合于需长时间储存,又不需经常标校的武器系统中。

振动定位器由球型振动件、静电激励罩、敏感读出基座 3 部分组成^[1]。3 大部分采用不锈钢材料,通过精密加工而形成;球型振动件经质量平衡调整后,同静电激励罩、敏感基座装配在一起,并整体密封在一个高真空的容器中,形成一个完整而独立的角度或角速度传感器。静电激励罩上的分散电极与振动件球面形成多个球面电容器,高压静电通过此电容器,对振动件进行静电激励而产生微振动,同时对振动模式进行误差修正。振动定位器在静电激励作用下,使球型振动件产生微小振动,从而使其具有定位器进动的基本效应,其质量调态是球型振动件加工的重要步骤,为此提出了基于激光技术的振动定位器质量调态的研究。

2 振动定位器的振动模式

球型振动件受激会产生多种形式的振动,与球壳有关的振动就有 $n=1,2,3,4$ 阶直至更高阶的振动,而与支撑轴相关的振动分别有:挠性振动、弯曲振动、以及沿着支撑轴的振动。球型振动件振动的几种主要形式如图 1、2、3 所示^[1]。

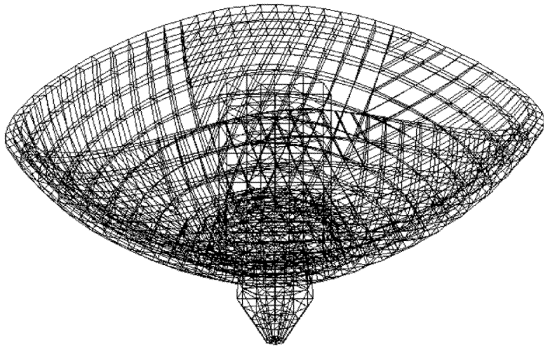


图 1 球型振动件的二阶模式振动 $n=2$

Fig. 1 Second-order mode vibration of spherical vibration part $n=2$

振动定位器设计中的一项重要内容是球型振动件的结构优化设计,其中最主要的就是需要用有限元模拟法或近似解析法精确分析出球型振动

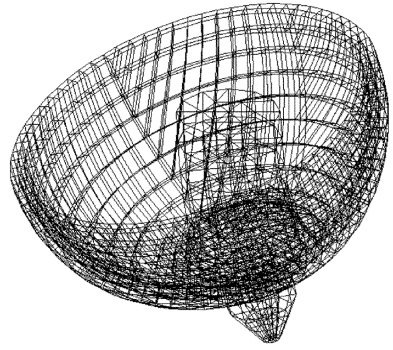


图 2 球型振动件的三阶模式振动 $n=3$

Fig. 2 Third-order mode vibration of spherical vibration part $n=3$

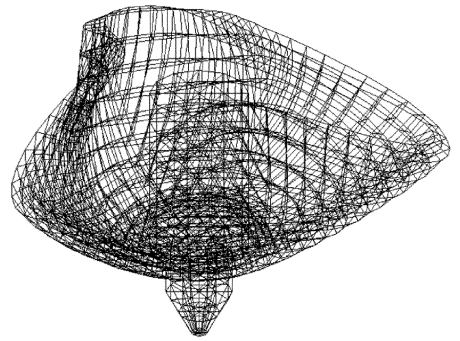


图 3 球型振动件的弯曲振动模式

Fig. 3 Bending vibration mode of spherical vibration part

件的各阶振动模式,计算出各阶振动频率,并在设计中最大限度地优化各项结构参数,使球型振动件的各阶振动频率处于最佳状态,以使振动定位器工作在最优状态。进行优化设计后的球型振动件振动频率数据如表 1。

表 1 球型振动件的主要振动频率参数

Tab. 1 Main vibration frequency parameters of the spherical vibration part

物理定义	参数值
直径(mm)	30
$n=2$ 的弯曲频率(Hz)	4 502
芯轴弯曲频率(Hz)	6 274
$n=3$ 的弯曲频率(Hz)	10 765
$n=4$ 的弯曲频率(Hz)	19 899
$Q, 10^6$	9-12

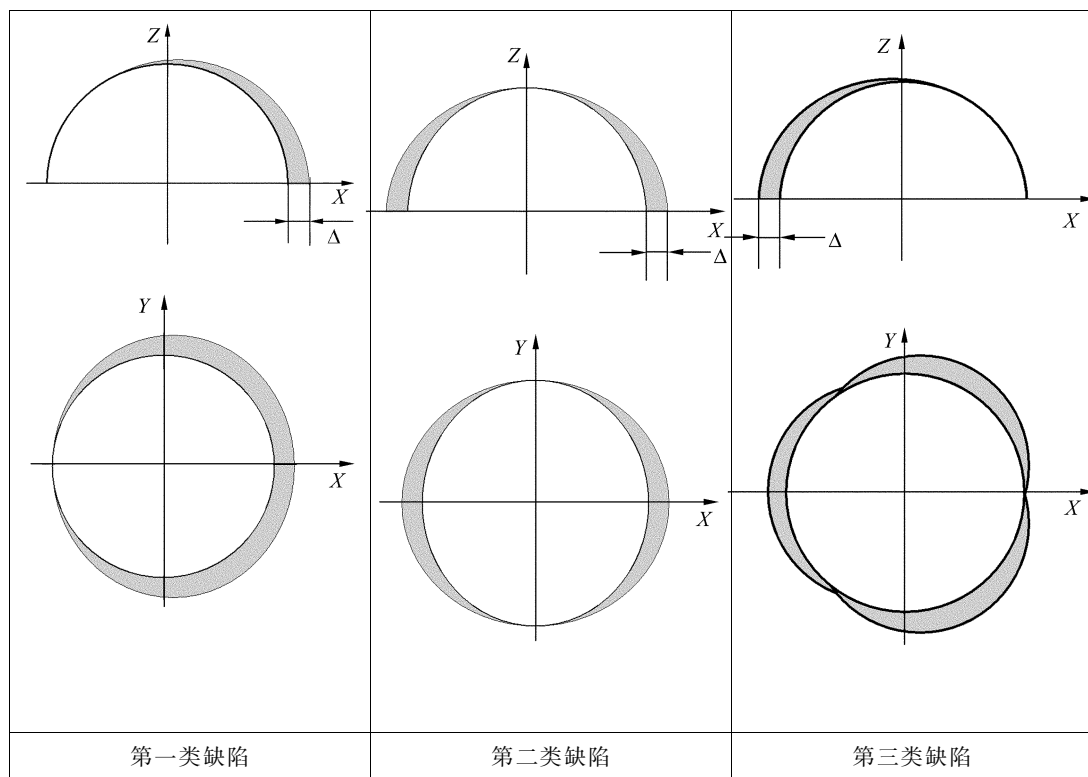
3 球型振动件的加工及缺陷形式

球型振动件的加工经过多次、反复的研磨处理,最终加工成带双端轴柄的球型振子。虽然在加工过程中,采取了许多先进的加工技术,使加工的零件达到了相当的精度,其表面物理尺寸精度达到了微米级,表面光洁度达到了 $0.05 \mu\text{m}$ 量

级,但从振动力学的角度分析,加工的精度还达不到制作高精度定位器的要求,如经机械加工后的球型振动件其振动的分裂频差在 0.5 Hz 以上,而制作定位器所要求的分裂频差应在 0.01 Hz 以下。由此可见,单纯通过机械加工的方式尚不能完全满足制作高精度定位器的需要。球型振动件缺陷的分布图形如表 2 所示。

表 2 球型振动件缺陷的分布

Tab. 2 Defect distribution of spherical vibration part



除了上述 3 种主要缺陷形式之外,还有一种缺陷形式——称为第四类缺陷。第四类缺陷造成的影响与球型振动件 2 阶模式振动效应类似,其主要的表现是造成球型振动件振动时的振动频率分裂,即通常所说的频差。

4 激光束调态的基本原理

由于球型振动件在加工过程中不可避免地存在加工工艺误差,因而实际加工制作的球型振动件球面不可能是理想的轴对称形状。为提高振动定位器的精度,必须对加工后的球型振动件进行

物理方式调态,使其尽量达到理想的振动形式,这也就是通常所说的质量调态。

振动件加工中产生的质量缺陷对振动模式的影响,可依据傅里叶函数进行展开处理,质量缺陷可用傅里叶函数 $p(\varphi)$ 表示。即:

$$p(\varphi) = p_0 + p_1 \cos(\varphi - \varphi_1) + p_2 \cos(\varphi - \varphi_2) + p_3 \cos(\varphi - \varphi_3) + p_4 \cos(\varphi - \varphi_4) + \dots, \quad (1)$$

其中: p_1, p_2, p_3, p_4 分别为第一、二、三、四类缺陷的幅度大小; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 分别为第一、二、三、四类缺陷的方位角位置。

球型振动件的外壳参数决定了缺陷值幅度的大小和方位角位置 φ 。通过对非理想对称球壳的

振动力学分析可知,对于球壳 n 种振动形式,第 $2n$ 、 n 、 $n+1$ 和 $n-1$ 种谐波影响波形的椭圆,而对于 2 阶模式振动,第四类缺陷更重要。但是,各阶振动的影响是不一样的。而谐波零和 $2n$ 的差值,这时是 p_4 ,可导致振动件固有频率出现频差,也可破坏驻波。其他 3 类谐波可导致振动件质量中心的运动,这时,部分能量传到芯轴上或散射了。这就是振动系统的损耗,这些附加的损耗取决于波形的定向。

振动件的调态分为 2 个步骤,第一步就是确定缺陷不平衡质量($p_1 \cdots p_4$)的大小和 4 类缺陷谐波的位置($\varphi_1 \cdots \varphi_4$),第二步就是根据调态算法用激光束去掉不平衡的质量。

首先根据第四类缺陷谐波确定调态参数。通过激光束去掉球型振动件外壳上 4 个点的多余质量,通过试验确定出频差减小的数量与处理时间之间的直接比例关系曲线。在第一次试验中确定出了激光刻蚀速度、质量去掉的多少和频差减少的速度。例如,频差平均值 0.3 Hz 时,调态第四类缺陷时多余质量约为 30 μg 。第四种缺陷调态时频差变化可参见图 4。

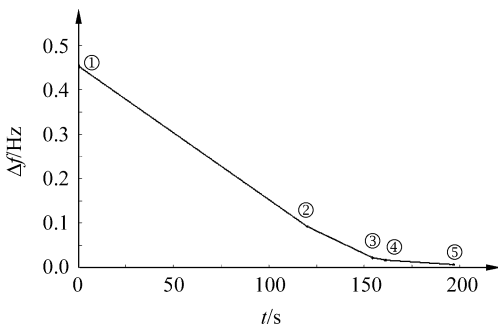


图 4 激光束调态中振动件频差的变化

Fig. 4 Change of frequency difference of vibration part in laser beam adjustment

4.1 不平衡缺陷质量的确定

在开始进行其他 3 类缺陷调整前,首先要评定第一类缺陷多余质量的大小。根据振动力学分析,考虑到第一类缺陷是振动件形状的几何误差,第一类缺陷的影响会造成球型振动件中心相对对称轴发生位移。这时外壳最大的不平衡处就是使球面的中心向反时针方向位移。球面反方向位移时振动件外壳的厚度差为最大,而不平衡质量可用公式表述为:

$$M_{\max} = \frac{2\pi}{3}(R^3 B + r^3 b)\rho, \quad (2)$$

其中: R, r 为球面半径; B, b 为球面中心相对对称轴的径向位移; ρ 为材料密度。

根据上述已知的不平衡质量计算公式和检测得到的球面几何位移值,就可确定需去除的第一类缺陷的最大多余质量。

与第四类缺陷相比,随着去掉缺陷质量的增加,调态方法必须进行相应的变化,即最初从边缘的点去掉质量变为从外球面去掉质量。其它的变化就是调节激光束作用的点。

4.2 需去除质量的计算

根据图 4 给出的缺陷形状可近似计算出振动件需去掉的质量。

假设球型振动件壁厚按正弦波规律变化,那么,调态时需去掉的质量可用以下公式近似地表达:

$$m = n\pi R^2 \Delta / 12\rho(4\cos\beta_n - 5\cos\beta_n/2), \quad (3)$$

其中: n 为缺陷形状序号($n=1, 2, 3$); R 为振动件外球面半径; Δ 为去掉的最大厚度; ρ 为材料密度

4.3 激光束刻蚀时间的确定

用激光束进行质量调态时,球型振动件是静止的,完成刻蚀后再转到另一点刻蚀,刻蚀最深段时处理时间最长,刻蚀的量也就最大,去除的质量最多。在整个调态过程中,每一点刻蚀的时间取决于质量去掉的多少,最终的计算取决于刻蚀量。

每一段的具体刻蚀时间可按以下公式计算:

$$t_i = t_{\max} / 4[1 + \cos(2n\alpha_i + \varphi)], \quad (4)$$

式中, t_{\max} 为最深段激光刻蚀时间; α_i 为振动件当前角位置; φ 为缺陷位置相对光阑挡板轴的角度。

4.4 大功率激光器^[4-5]

调态刻蚀采用高效率二极管泵浦 Nd:YAG 薄片激光器,采用高效均匀泵浦耦合技术,在峰值功率 1.008 kW,占空比 25%,电光效率大于 45%的二极管激光阵列泵浦下,用 1 块 1 mm 厚的 Nd:YAG 薄片激光介质,获得了峰值功率 404 W,平均功率 101 W 的准连续激光输出,光-光效率达到 40%,电光效率超过 18%。

5 调态的结果

采用激光束对球型振动件加工缺陷进行调态

处理具有较多的优点,如调态时间较快,调态后对振动件表面质量影响较小,调整时去除质量的计算较为准确。但同时采用激光束调态也存在一定的缺陷,其中最主要的问题就是质量缺陷的计算量较大;再有,由于激光束调态是采用连续方式进行的,且调态工作过程是采取先调第四类缺陷,再调第一、二、三类缺陷方式轮换进行,因而每一次调整过程的准确性对下一次调整均有相互的影响,因而激光束调态较之其他调态方式,对缺陷误差的检测、去除质量的计算以及刻蚀工作量的准确性均有较高的要求。在采用激光束调态之前,最常用的调态方法是化学调态法。化学调态法的原理与激光束调态法类似,也是通过计算找到缺陷量及缺陷方位,再用几种混合的强酸腐蚀掉多余的质量。但化学调态工作周期长,制做掩模复杂,而且调态精度差, Δf 一般都在 0.01 Hz 以上,用化学调态法做完一个球型振动件的调态工作一般需要 5 个工作日。由此可看出采用激光束对球型振动件进行质量调态的优势。表 3 给出了一个球型振动件调态前后的主要性能变化情况。

表 3 球型振动件的调态前后的参数变化

Tab. 3 Parameter change of a spherical vibration part before and after adjustment

步骤	加工工序名称	$\Delta t(\text{min})$	$\Delta f(\text{Hz})$	$\Delta t/\Delta f(\text{min/Hz})$
1	机械加工		0.46	
2	激光刻蚀	120	0.089	0.0030
3	激光刻蚀	32	0.019	0.0019
4	激光刻蚀	8	0.012	0.0018
5	在真空中冷却	35	0.004	

6 结束语

振动定位器的研制是一个复杂工作,其关键是球型振动件的加工。为了达到制作高精度定位器的要求,在精密机械加工的基础上,还得进行精确的缺陷质量调整。由于对采用激光束进行质量调整的工作刚刚开始,还有很多问题不是十分清楚,这一切均有待于在今后的工作中去探索和发现。相信随着研究工作的进一步深入,目前存在的问题一定能够得到发现和解决,振动定位器的研制水平肯定会进一步提高。

参考文献:

- [1] LOPER E J, LYNCH D D, STEVENSON K M. Design of small spherical resonator gyroscope [Z]. Goleta, California.
- [2] 王大春. 微型振动定位器[M]. 特种电子元器件文集, 2002.
WANG D CH. *Micro-vibration localizer* [M]. Corpus of Special Type Electronic Apparatus, 2002. (in Chinese)
- [3] 方针. CPLD 技术在振动定位器中的应用[M]. 中国惯性技术学会第五次学术交流会议论文集, 2004.
FANG ZH. *The application of CPLD technology in vibration localizer* [M]. The fifth Science Conference's Analects of China Inertia Technology Academy, 2004. (in Chinese)
- [4] 姚震宇. 100 W 二极管泵浦 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 强激光与粒子束, 2004, 9:116-118.
YAO ZH Y. 100 W diode pump Nd:YAG slice laser[J]. *Intense Laser and Particle Beam*, 2004, (9):116-118. (in Chinese)
- [5] 王伟平. 激光束光强分布对材料激光加热的影响[J]. 强激光与粒子束, 2001, (3):.
WANG W P. Effects of light distribution of laser beam on the material laser heating[J]. *Intense Laser and Particle Beam*, 2001, (3):313-316. (in Chinese)
- [6] 沈蓓军, 王润文, 路敦武, 等. 准分子激光深层光刻蚀在 LIGA 工艺中的应用[J]. 光学精密工程, 1998, 6(2):56-60.
SHEN B J, WANG R W, LU D W, et al. The application of excimer laser deep lithograph in LIGA process[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(2):56-60. (in Chinese)
- [7] 吴晗平. 激光光束质量的评价与应用分析[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2):128-132.
WU H P. Evaluation and applied analysis of laser beam quality[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2):128-132. (in Chinese)
- [8] 魏仁选, 姜德生, 周祖德. 准分子激光脉冲直写刻蚀速率与能量密度的关系[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2):231-234.

WEI R X,JIANG D SH,ZHOU Z D. Relationship between average etching velocity and laser pulse energy density during excimer laser direct etching[J]. *Optics and Precision Engineering*,2004,12(2):231-234. (in Chinese)

[9] 梁静秋,姚劲松. 准分子激光刻蚀技术在微机械中的应用研究[J]. *光学精密工程*,1999,7(5):63-66.

LIANG J Q,YAO J S. Application of the excimer laser etching technology in micromachine[J]. *Optics and Precision Engineering*,1999,7(5):63-66. (in Chinese)

[10] 张立国,陈迪,杨帆,等. SU-8 胶光刻工艺研究[J]. *光学精密工程*,2002,10(3):266-269.

ZHANG L G,CHEN D,YANG F,*et al.* Research on SU-8 resist photolithography process[J]. *Optics and Precision Engineering*,2002,10(3):266-269. (in Chinese)

作者简介:余成波(1965—),男,教授,重庆人,工学博士,主要从事测试计量技术与仪器研究,先后承担主持过国家自然科学基金项目、国家“8910”“9910”工程重点项目、国家 863 项目、国家“九五”国防重点预研项目、重庆市科委及教委等国家、省部级项目 40 余项。在《仪器仪表学报》、《光学学报》、《Optics & Laser Technology》等国内外重要期刊公开发表论文 80 余篇(其中被 SCI、EI、ISTP 三大检索收录 10 篇);获实用新型专利 4 项;在高等教育出版社、清华大学出版社等出版了《传感器与自动检测技术》、《信号与系统》、《信息论与编码》、《数字图像处理及 MATLAB 实现》等 15 部著作。1989 年荣获国家科技进步二等奖 1 项、1990 年荣获中国兵器工业总公司科技进步三等奖 1 项、1998 年荣获重庆市科学技术进步三等奖 1 项、2003 年荣获重庆市科学技术进步三等奖 1 项。yuchengbo@tom.com