

文章编号:1002-2082(2008)06-1013-04

# 高精度角度加工技术研究

王松伟<sup>1,2</sup>, 蒋军彪<sup>2,3</sup>, 姚合宝<sup>1</sup>, 朱冠芳<sup>1</sup>, 刘 宾<sup>1</sup>

(1. 西北大学, 陕西 西安 710069; 2. 西安北方捷瑞光电科技有限公司, 陕西 西安 710111;  
3. 中国兵器工业 203 研究所, 陕西 西安 710111)

**摘要:** 激光陀螺不仅对合光棱镜角度精度有极高的要求, 而且对角度和尺寸的一致性有严格的限制。为了加工这种高精度角度光学元件, 提出通过手修工装母体复制出成盘加工工装, 再复制出光学零件的加工方法, 并分析了测角仪的测量精度、面形之间的匹配误差和平行的测量误差所引入的角度加工误差情况, 提高了面形加工的平面度, 避免了局部不规则现象, 控制了温差对面形变化的影响。另外通过降低平行测量的误差以及减小闭合角度之间的叠加误差等具体措施也可以提高光学元件加工效率和角度加工精度。

**关键词:** 激光陀螺; 光学元件加工; 光胶垫板; 匹配误差; 角度加工误差

中图分类号: TN205; TH161

文献标志码: A

## High precision angle processing

WANG Song-wei<sup>1,2</sup>, JIANG Jun-biao<sup>2,3</sup>, YAO He-bao<sup>1</sup>, ZHU Guan-fang<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>

(1. Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Xi'an North Jierui  
Photoelectric Science and Technology Limited Company, Xi'an 710111, China;  
3. The No. 203 Research Institute of China Ordnance Industry, Xi'an 710111, China)

**Abstract:** The prism for coupling beam in ring laser gyro has a strict requirement on angle accuracy and its consistency. In order to process optical elements with high-precision angles, a new process is introduced, in which the optical element was processed by the matrix angles copied from the angles of manually repaired matrix. The impact of the goniometer accuracy, the matching error of the surface profiles and parallelism measurement error on angular machining error was analyzed. It is concluded that this process can improve the process efficiency and the machining accuracy by improving the flatness of the optical surface, avoiding local irregularity, controlling the impact of temperature difference effect and reducing the errors of parallelism measurement.

**Key words:** laser gyroscope; machining of optical element; polishing pad; matching error; machining accuracy of angle

## 引言

随着光电技术的迅猛发展, 加工精度已经成为人类社会科技发展水平的一个重要标志, 其中加工精度主要包含 2 个方面: 形状精度和表面光滑程度<sup>[2]</sup>。形状的加工精度将会影响光学零件的角度精

度, 特别作为光学工具使用长方体和立方体, 它们都是用来加工诸如屋脊角等直角零件的一种精密工具, 这类工具对角度误差的要求极高, 例如长方体的角度误差一般需控制在 2" 以内<sup>[2]</sup>; 而表面粗糙度将会对光学零件的性能产生直接的影响, 表面粗

收稿日期: 2007-11-28; 修回日期: 2008-01-09

作者简介: 王松伟 (1979—), 男, 河南洛阳人, 西北大学硕士研究生, 主要从事超光滑表面的加工和检测技术研究。

E-mail: wangsongwei@yahoo.cn

糙度和疵病将引起入射光被散射,而散射光将导致成像光束光强的减弱,增加一些无用信号,甚至产生错误信号<sup>[3]</sup>。激光陀螺所用的合光棱镜就是这种既对表面质量有比较严格限制,又对角度精度有极高要求的光学元件,并且还要求角度和尺寸具有高度的一致性,这种高精度角度光学元件的加工对传统的加工方法提出了严峻的挑战。因此,本文主要介绍了这种高精度角度光学元件的加工方法,以及在加工过程中的每一环节,引入了角度加工误差情况,并给出了一些提高角度加工精度的具体措施。

### 1 高精度角度的加工方法

高精度角度的光学元件往往对角度的一致性和尺寸的一致性有着严格的要求限制,因此高精度角度的光学元件通常采用成盘加工的方法来实现,而成盘加工就需要成盘加工工装,而这些成盘加工工装的获得还要借助于工装母体的复制来实现,最初工装母体的加工只能够通过手修的方法来完成。实际上最终的光学元件的精密角度是在最初工装母体角度的基础上通过多个环节的连续复制而得到的。因此,在每个加工工序中只有严格地控制面形和平行才可能加工出高精度角度的光学元件。但是在实际加工过程中,由于测角仪器测量精度的限制以及平行和面形的之间的匹配误差,导致了高精度光学元件的角度加工变得十分困难。下面分析测角仪的测量精度以及平行和面形的测量误差分别对最终加工结果产生的影响情况。

## 2 产生角度误差的原因分析

### 2.1 测角仪器自身的测量误差

因为最初的工装母体只能通过手修来加工,手修的过程中除了对加工者的技术有较高的要求之外,还需要通过测角仪对加工的角度进行反复测量,但由于测角仪测量精度的限制,在加工工装母体时便引入了角度误差  $\alpha_1$ 。

### 2.2 面形匹配误差引入的角度误差

利用工装母体加工成盘加工工装时,由于所用光胶垫板的面形  $N_1$  和所加工的成盘加工工装的最终面形  $N_2$  之间很难完全相同,设检测面形所使用的激光干涉仪的波长为  $\lambda$ ,那么由于面形匹配误差引起成盘加工工装在光胶垫板中间位置和边沿位置之间的高度差为  $\Delta h_1$ ,根据等倾干涉的基本原理

可得:  $\Delta h_1 = \Delta N \cdot \frac{\lambda}{2} = |N_2 - N_1| \cdot \frac{\lambda}{2}$ 。具体情况如图 1 所示。

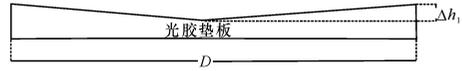


图 1 面形匹配误差引入的角度加工误差

Fig. 1 Machining error of angle induced by matching error of apparent shape

从而可得由于面形匹配误差引起成盘加工工装角度误差为

$$\alpha_{2-1} \approx \tan(\alpha_{2-1}) = \frac{\Delta h_1}{D/2} = \frac{2\Delta h_1}{D} = \frac{|N_2 - N_1| \cdot \lambda}{D}$$

同样,在利用成盘加工工装加工高精度角度光学零件的过程中,由于光胶垫板的面形  $N_1$  和所加工零件的最终面形  $N_3$  之间也很难完全相同,从而会引入角度加工误差:

$$\alpha_{2-2} \approx \tan(\alpha_{2-2}) = \frac{\Delta h_2}{D/2} = \frac{2\Delta h_2}{D} = \frac{|N_3 - N_1| \cdot \lambda}{D}$$

所以,在加工高精度角度的过程中,由于面形的匹配误差引入的角度加工误差为

$$\alpha_2 = \alpha_{2-1} + \alpha_{2-2} = (|N_2 - N_1| + |N_3 - N_1|) \cdot \frac{\lambda}{D}$$

并且随着角度复制次数的增加,由面形匹配误差引入的角度加工误差将会增大。

### 2.3 平行测量误差引入的角度误差

除了面形匹配误差之外,平行测量误差也将引入角度加工误差,设在加工成盘加工工装的过程中,光胶垫板上成盘加工工装对称两点之间的平行测量误差为  $H_1$ ,具体情况如图 2 所示。

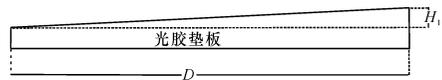


图 2 平行测量误差引入的角度加工误差

Fig. 2 Machining error of angle induced by parallel measurement error

平行测量误差引起成盘加工工装角度的误差为

$$\alpha_{3-1} \approx \tan(\alpha_{3-1}) = H_1/D$$

同样,在加工高精度角度光学元件的过程中,由于平行测量误差  $H_2$  引入的角度加工误差为

$$\alpha_{3-2} \approx \tan(\alpha_{3-2}) = H_2/D$$

所以,在加工高精度角度的过程中,由于平行

测量误差引入的角度加工误差为

$$\alpha_3 \approx \alpha_{3-1} + \alpha_{3-2} = (H_1 + H_2) / D$$

并且随着角度复制次数的增加,由角度测量误差引入的角度加工误差也会增大。

光学元件是通过工装母体对成盘加工工装进行复制,再由成盘加工工装对光学元件进行复制而得到的,因此最终所得到的光学元件的角度误差是所有过程量的一个累积误差,最终的角度加工误差应该为

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = \alpha_1 + (|N_2 - N_1| + |N_3 - N_1|) \cdot \frac{\lambda}{D} + \frac{H_1 + H_2}{D}$$

正是由于最终光学元件的误差是一个累积误差,导致光学元件的角度精度控制在 $5''$ 以内变得非常困难,特别是加工的工序越多,累积误差越大,这也是设计各种工装时必须保证加工工序最简单的主要原因。

接下来针对以上加工误差的来源,提出一些提高角度加工精度的具体加工办法,从而使光学元件角度的加工精度得到一定程度的提高。

### 3 提高角度加工精度的方法

要提高角度的加工精度,必须从3个方面进行控制:1)提高工装母体手修时的角度精度;2)保证所加工元件的面形与光胶垫板面形的一致性;3)减小平行的测量误差。

对于工装母体手修时,要兼顾闭合角度之间的相互关联性,避免出现前2个面的角度公差叠加到第3个面的加工过程,例如如图3所示。

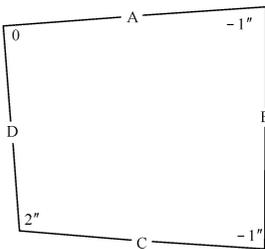


图3 闭合角度之间的关联误差

Fig. 3 Correlative error between closed angles

要保证图3中A, B, C, D各面之间的夹角互为 $90^\circ$ ,公差为 $\pm 1''$ 。但是,如果A面和B面之间的角度在加工过程中引入了一 $1''$ 的角度误差,B面和C面之间的角度在加工过程中也引入了一 $1''$ 的角度误

差,那么D面与A面之间的角度误差即便为0,也必然导致C面与D面之间要引入 $2''$ 的角度误差。因此在加工过程中,各面之间公差的正负都要提前进行精确的计算。

对于面形一致性的控制,要避免边沿局部不规则现象的发生,对于光圈数较多的情况下,局部不规则的现象将很难被检测出来,因此要尽可能地将被加工元件以及光胶垫板的光圈数量控制在最小,这样可以很明显地检测到局部不规则现象,从而避免由于面形误差引起角度加工误差。

另外,在采用干涉法对被加工元件的面形进行检测时,由于受检测环境气流、温度变化等因素的影响和外部条件的限制,检测结果可信度大大降低<sup>[4]</sup>。因此,要注意检测前被加工工件清洗的水温和检测的时间,一般情况下,刚用较低温度的水清洗之后,被加工元件将会表现出单件光圈较高,而整盘的光圈相对较低,放置一段时间之后,单件高光圈的现象会有所改善,而整盘的光圈也会有一定程度的升高(具体升高的情况与下盘清洗的水温有较大关系),因此在检测面形时,一定要在光圈稳定之后进行检测,避免由此造成面形的测量误差,并最终导致角度的加工误差。

对于平行的控制,要对整个面的多个位置进行重复测量,以保证整个面高度的一致性和测量的准确性。

### 4 加工的技术指标和结果

以上述理论分析为基础,在加工过程中通过控制工装母体的角度精度使之在 $1''$ 以内,利用 $\Phi 200$  mm光胶垫板,分别使被加工元件的面形控制在 $\lambda/4$ 之内,平行测量误差在 $1 \mu\text{m}$ 之内,可以保证加工的成盘加工工装的角度误差在 $3''$ 之内,并按照同样的工艺指标要求,最终复制出了角度误差在 $5''$ 以内的棱镜,图4为该棱镜的图片。

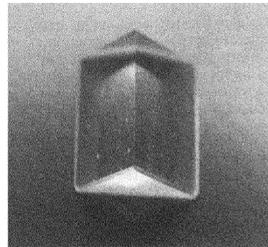


图4 被加工的棱镜图片

Fig. 4 Picture of machined prism

在1"测角仪下,测得棱镜顶角的角度为 $90^{\circ} \pm 5''$ ,而2个直角面和斜面的之间的夹角均在 $45^{\circ} \pm 5''$ 之内。

## 5 结束语

高精度角度的加工需要高精度的工装母体,而工装母体的手修更需要操作者有较高的加工技术和较多的加工经验;另外,在加工过程的每一个环节,都需要精密的测量仪器,而测量的误差必然也将累积在最终的加工误差中。因此,随着科技的发展,更高精度检测仪器的不断涌现,以及对高精度角度加工工艺认识的不断深入,高精度的角度加工将变得不再困难。

### 参考文献:

[1] 高宏刚,陈斌,曹健林.超光滑表面加工技术[J].光学精密工程,1995,3(4):7-14.

GAO Hong-gang, CHEN Bin, CAO Jian-lin. Fabricating technology for supersmooth surfaces[J]. Optics and Precision Engineering, 1995,3(4):7-14. (in Chinese)

[2] 许求真,李艳芬.一种测量高精度角度误差的新方法[J].光学技术,1993(1):42-47.

XU Qiu-zhen, LI Yan-fen. A new method to test high-accurate angle [J]. Optical Technique, 1993 (1):42-47. (in Chinese)

[3] HUI Fang, PEI Ji-guo, JING Chi-yu. Surface roughness and material removal in fluid jet polishing[J]. Applied Optics, 2006,45(17):4012-4019.

[4] 吴时彬,扬力,伍凡,等.Φ630石英轻质抛物面反射镜的二维动态哈特曼检验[J].应用光学,1998,19(4):33-35.

WU Shi-bin, YANG Li, WU Fan, et al. 2D dynamic Hartmann test for lightweight Φ630 quartz parabolic mirror [J]. Journal of Applied Optics, 1998,19(4):33-35. (in Chinese)