

文章编号: 1002-2082(2010)01-0124-04

# 五角棱镜补偿法加工工艺研究

刘 昕, 苏 瑛, 支西玲, 杨崇民, 刘新武, 樊春丽

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 由于五角棱镜两B棱的投影夹角对第二光学平行差影响倍率较大且加工过程中无法测量该夹角, 从而导致棱镜加工合格率较低。通过分析侧面垂直度误差及 $\Delta 45^\circ$ 对五角棱镜光学平行差的影响, 提出一种新的五角棱镜加工工艺方法: 利用最后一个加工面对前3个已加工面存在的角度误差进行一次性补偿, 从而降低了对各加工面的加工误差要求。实践证明: 该方法能够有效地提高五角棱镜加工的合格率和生产效率, 减小加工难度, 并能显著降低对加工和检测设备的精度要求。

**关键词:** 五角棱镜; 光学平行差; 误差补偿

中图分类号: TN205

文献标志码: A

## Error compensation for pentagonal prism

LIU Xin, SU Ying, ZHI Xi-ling, YANG Chong-min, LIU Xin-wu, FAN Chun-li

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The projection angle of two B-edges of pentagonal prism has a great effect on the second optical parallelism; however, it cannot be measured during on line processing, which results in low qualification rate. By analyzing the impact of perpendicular error of the side face and angle error of  $45^\circ$  on the optical parallelism of pentagonal prism, this paper provides a new process for producing pentagonal prism, which modified the angle error of the last face to compensate the angle errors of three processed faces so as to release the strict requirements for process error of these surfaces. By using this process, qualification rate and productivity was raised, the complexity of the process was reduced, and the strict requirements for the machine and measurement equipments were released.

**Key words:** pentagonal prism; optical parallelism error; error compensation

## 引言

五角棱镜具有将光线折转 $90^\circ$ 的特性, 在光学系统中有着广泛的应用。随着光学技术的发展, 对五角棱镜的光学平行差这一主要技术指标也提出了更高的要求, 这就增加了五角棱镜的加工难度, 尤其是第二光学平行差更难得到保证: 由于五角棱镜的第二光学平行差定义为两B棱在理想位置平面上的角度偏差的2.4倍<sup>[1]</sup>, 同时加工过程中无法测量监控两棱角度差, 因而生产中常因第二光学平

行差超差导致零件合格率偏低。

本文着重分析了五角棱镜各个工作面相对于基准侧面的垂直度误差对第二光学平行差分别产生的影响, 并给出一种新的 $45^\circ$ 误差测量方法, 从而提出一种新的五角棱镜工艺流程。

## 1 光学平行差影响因子分析

五角棱镜(如图1所示)光学平行差存在如下关系式<sup>[1]</sup>:

收稿日期: 2009-07-14; 修回日期: 2009-09-22

作者简介: 刘昕(1977—), 男, 陕西人, 助理工程师, 主要从事光学冷加工工艺及检测工作。E-mail: meteora@163.com

$$\theta_1 = 2 \times \Delta 45^\circ - \Delta 90^\circ \quad (1)$$

$$\theta_1 = 2.4 \times \gamma_B \quad (2)$$

式中:  $\Delta 45^\circ$ 和  $\Delta 90^\circ$ 分别表示  $45^\circ$ 和  $90^\circ$ 角度差;  $\gamma_B$ 表示两  $B$  棱在通过此两棱标准位置的平面上的相对偏转角。

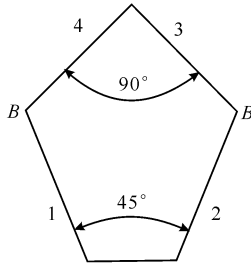


图1 五角棱镜主视图

Fig. 1 Front view of pentagonal prism

通过(1)式和(2)式可看出,令  $\Delta 90^\circ = 2 \times \Delta 45^\circ$ 且  $\gamma_B = 0$ ,即可使光学平行差为零。该方法的关键之处在于分析  $\gamma_B$  的影响因素以及  $\Delta 45^\circ$  简便测量方法。

### 1.1 $\gamma_B$ 影响因素分析

如图2所示,粗实线表示理想五角棱镜,双点划线表示存在误差的五角棱镜。由于加工过程中各工作面相对于基准侧面存在垂直度误差,从而导致实际所得  $B$  棱 ( $E'J, B'G$ ) 与对应的理想  $B$  棱 ( $EJ, BG$ ) 形成夹角,两夹角在理想  $B$  棱构成的平面(简称平面  $A$ ) 内的投影角度和即为  $\gamma_B$ 。以棱  $E'J$  为例,图中点  $M$  为点  $E'$  在平面  $A$  的投影点,  $\angle EJM$  为  $\angle EJE'$  在平面  $A$  的投影角。在  $\triangle EJM$  中,线段  $EJ$  垂直于  $EM$ ,且线段  $EJ$  的长度即五角棱镜的厚度是已知的,只需求得线段  $EM$  的长度即可得到该棱的投影角度。

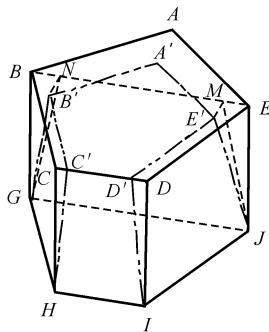


图2 第二光学平行差分析示意图

Fig. 2 Schematic diagram of second parallelism

为方便分析,作如下定义:

a) 点  $G, H, I, J$  构成的平面为基准侧面;

b) 基准侧面沿棱镜内部与工作面所构成的二面角为该工作面的侧面角,并用  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  分别表示工作面 1, 2, 3, 4 的侧面角度;

c)  $\Delta \gamma_1, \Delta \gamma_2, \Delta \gamma_3, \Delta \gamma_4$  分别表示各工作面侧面垂直度误差,并令  $\Delta \gamma_i = \gamma_i - 90^\circ (i=1, 2, 3, 4)$ 。

图3所示为五角棱镜棱  $EJ$  的局部俯视图,点  $E'$  所在两条边及其延长线交平面  $A$  于点  $P$  和  $Q$ 。实际加工中  $\angle QPE', \angle PQE'$  误差远小于  $1^\circ$ , 正弦运算后该误差影响可忽略,为简化计算考虑,取  $\angle QPE' = 45^\circ, \angle PQE' = 67.5^\circ$ , 可得:

$$\angle EJM = \arctan(EM/h) \quad (3)$$

$$EM = EP - MP \quad (4)$$

$$MP = (EP - EQ) \times \sin 45^\circ \quad (5)$$

$$EP = d1 / \sin 45^\circ \quad (6)$$

$$EQ = d2 / \sin 67.5^\circ \quad (7)$$

$$d1 = h \times \tan \Delta \gamma_3 \quad (8)$$

$$d2 = h \times \tan \Delta \gamma_2 \quad (9)$$

式中  $h$  为五角棱镜厚度。

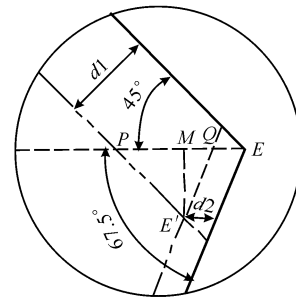


图3  $EJ$  棱主视图

Fig. 3 Front view of  $EJ$  edge

联立求解(3)式~(9)式可得:

$$\angle EJM = \arctan(0.7654 \tan \Delta \gamma_2 + 0.4142 \tan \Delta \gamma_3) \quad (10)$$

则可知:

$$\gamma_B = \arctan(0.7654 \tan \Delta \gamma_1 + 0.4142 \tan \Delta \gamma_4) + \arctan(0.7654 \tan \Delta \gamma_2 + 0.4142 \tan \Delta \gamma_3) \quad (11)$$

加工中实际的  $\Delta \gamma_i \ll 1^\circ$ , (11)式可化简为

$$\gamma_B = 0.7654 \Delta \gamma_1 + 0.7654 \Delta \gamma_2 + 0.4142 \Delta \gamma_3 + 0.4142 \Delta \gamma_4 \quad (12)$$

### 1.2 $\Delta 45^\circ$ 测量方法分析

如图4所示,过点  $A$  作辅助线平行于面 4, 面 2, 面 1 延长线相交于点  $B$ 。已知:

$$\angle \theta + \angle \alpha + \angle \lambda + \angle \gamma + \angle \beta = 360^\circ \quad (13)$$

$$\angle \lambda + \angle \gamma = 180^\circ \quad (14)$$

以面 4 为基准测量  $\angle \alpha$  和  $\angle \beta$  时,  $\angle \alpha = 22.5^\circ$

+  $\Delta 22.5^\circ$ ,  $\angle\theta = 45^\circ + \Delta 45^\circ$ ,  $\angle\beta = 112.5^\circ + \Delta 112.5^\circ$ 。化简后得:

$$\Delta 45^\circ = -1 \times (\Delta 22.5^\circ + \Delta 112.5^\circ) \quad (15)$$

根据(15)式,只需利用比较测角仪测量 $\Delta 22.5^\circ$ 和 $\Delta 112.5^\circ$ 即可得到 $\Delta 45^\circ$ 。

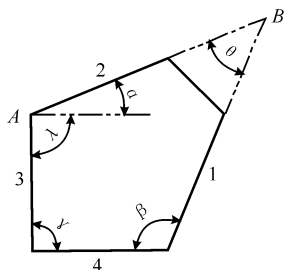


图4  $\Delta 45^\circ$ 测量方法分析示意图

Fig. 4 Schematic diagram for measuring  $\Delta 45^\circ$

## 2 工艺方法

### 2.1 工艺分析

根据(12)式可知: $\Delta\gamma_3$ 和 $\Delta\gamma_4$ 对 $\gamma_B$ 影响系数较小。综合考虑 $\Delta 45^\circ$ 的测量方法简便可行且入射面与出射面对像质和焦距影响较小等因素,选择面4作为最后加工面,对面1、面2、面3存在的加工误差进行一次补偿,即可满足光学平行差技术要求。

### 2.2 工艺流程

- 1) 精磨、抛光工作面1;
- 2) 精磨、抛光工作面2,并保证 $\Delta 45^\circ$ 符合图纸技术要求;
- 3) 精磨、抛光工作面3,控制工作面3与工作面1的夹角为 $22.5^\circ$ ;
- 4) 选择基准侧面,修改基准侧面面形为低光圈;
- 5) 测量 $\Delta 45^\circ, \Delta\gamma_1, \Delta\gamma_2, \Delta\gamma_3$ ;
- 6) 精磨修改工作面4角度,令

$$\Delta 90^\circ = 2 \times \Delta 45^\circ \quad (16)$$

$$\Delta\gamma_4 = -(0.7654\Delta\gamma_1 + 0.7654\tan\Delta\gamma_2 + 0.4142\tan\Delta\gamma_3)/0.4142 \quad (17)$$

即经过补偿后:

$$\theta_1 = 0$$

$$\theta_1 = 0$$

- 7) 上盘抛光工作面4。

### 2.3 加工允许误差分析

面1、面2、面3加工中只需控制 $\Delta 45^\circ$ 、面1和面3构成的 $\Delta 22.5^\circ$ ,不需要控制侧面垂直度误差。

面4经过补偿精磨后,棱镜的 $\theta_1$ 和 $\theta_1$ 均为零,

只需分析上盘、抛光过程中产生的误差即可。令 $\delta_{90^\circ}$ 和 $\delta_4$ 分别表示面4在上盘、抛光过程中产生的 $90^\circ$ 和侧面垂直度误差,则有:

$$|2 \times \Delta 45^\circ - (\Delta 90^\circ + \delta_{90^\circ})| \leq \theta_1 \quad (18)$$

$$2.4 \times |(0.4142\Delta\gamma_1 + 0.7654\Delta\gamma_2 + 0.7654\Delta\gamma_3 + 0.4142(\Delta\gamma_4 + \delta_4))| \leq \theta_1 \quad (19)$$

分别代入(16)式和(17)式,可知,当

$$|\delta_{90^\circ}| \leq \theta_1 \quad (20)$$

$$|\delta_4| \leq 0.9941\theta_1 \quad (21)$$

可满足棱镜光学平行差要求。

### 2.4 加工中应注意的因素

加工过程中应该注意以下因素:

1) 基准侧面面形为低光圈且光圈道数不能多于5。应尽量避免高光面形的出现。高光面形会严重影响侧面垂直度误差的测量,从而导致补偿值出现错误。

2) 测量侧面垂直度误差时估值应尽量准确。一块棱镜的侧面垂直度误差测量应由同一操作人员连续测量,以保证测量误差的一致性。

3) 工作面4上盘时应贴合在一个面上,并依据加工机床主轴校正棱镜上盘误差,以减少抛光过程产生的角度误差,保证高精度棱镜的光学平行差要求。

4) 当侧面垂直度误差大于 $3'$ 且光学平行差要求小于 $30'$ 时,应采用(11)式以减少计算引入的误差。

### 2.5 效果分析及加工验证

上述工艺流程用简单设备即可完成,加工过程中不需要控制工作面1、面2、面3的侧面垂直度误差,只需要在加工工作面4时控制 $\Delta 90^\circ$ 和 $\Delta\gamma_4$ 即可达到光学平行差要求,并允许 $\Delta 90^\circ$ 和 $\Delta\gamma_4$ 分别存在小于 $\theta_1$ 和 $0.9941\theta_1$ 的角度误差,降低了各工作面的加工难度。

利用本工艺流程批量加工了通光口径分别为 $\Phi 24$  mm、 $\Phi 36$  mm,光学平行差要求均为 $1'$ 的两种五角棱镜,光学平行差合格率均可达到95%以上。

## 3 结束语

本文通过分析五角棱镜光学平行差的影响因素,根据分析结果提出一套新的工艺流程,实践证明该方法能很好地解决批量加工中存在的光学平行差超差问题,对生产、测量设施无特殊要求,能够很好地适应高精度、不同批量的生产方式,尤其对

于中小尺寸、高精度五角棱镜加工具有良好的效果。同时,该方法略作修改亦可适用于半五角棱镜、直角棱镜、等腰棱镜等常见棱镜的加工。

#### 参考文献:

- [1] 光学零件工艺手册编写组. 光学零件工艺手册(上) [M]. 北京:国防工业出版社, 1977.  
Editing Group of Optical Element Processing Handbook. Optical element processing handbook [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1977. (in Chinese)
- [2] 王松伟, 蒋军彪, 姚合宝, 等. 高精度角度加工技术 [J]. 应用光学, 2008, 29(6): 1013-1016.  
WANG Song-wei, JIANG Jun-biao, YAO He-bao, et al. High precision angle processing[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29 (6): 1013-1016. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 常山, 曹益平, 陈永权. 五角棱镜的光束转向误差对波前测量的影响[J]. 应用光学, 2006, 27(3): 186-191.  
CHANG Shan, CAO Yi-ping, CHEN Yong-quan. Influence of beam turning error of pentagonal prism on wave-front measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3): 186-191. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 闫亚东, 何俊华, 仓玉萍, 等. 用ZEMAX模拟五棱镜误差对平行度检测的影响[J]. 应用光学, 2007, 28(5): 649-653.  
YAN Ya-dong, HE Jun-hua, CANG Yu-ping, et al. Effect of penta prism error on parallelism detection [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(5): 649-653. (in Chinese with an English abstract)