

文章编号:1002-2082(2009)03-0491-05

ZEMAX 辅助分析斜方棱镜面形误差 对出射光平行度的影响

刘爱敏^{1,2}, 高立民¹, 吴易明¹, 马娜^{1,2}, 李研^{1,2}

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 介绍一种根据出射光平行度要求计算斜方棱镜面形误差的方法。根据忽略局部光圈数的简化分析模型, 获得面形误差对应光圈数与相关球面半径的关系, 通过几何处理方法, 求得一定面形误差对应的球面半径与平面倾角的关系, 将斜方棱镜的工作面倾斜一定角度, 运用折射定理, 将具体面形误差转化为相应平面的倾斜角度, 得到出射光相对于理想光轴的倾斜角度及其关系式, 并在ZEMAX中建立斜方棱镜的两种模型。根据ZEMAX仿真结果, 给出了各个工作面形误差分配方案, 得出随着光束口径的增大, 斜方棱镜反射工作面和折射工作面面形误差对出射光偏折角影响规律不同等结论。

关键词: 斜方棱镜面形误差; ZEMAX 辅助分析; 出射光平行度

中图分类号: O435; TP391.73

文献标志码: A

ZEMAX auxiliary analysis for effect of rhombic prism surface shape error on parallelism of emergent beam

LIU Ai-min^{1,2}, GAO Li-min¹, WU Yi-ming¹, MA Na^{1,2}, LI Yan^{1,2}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A calculation method to calculate the surface shape error of rhombic prism according to parallelism demand of emergent beam is introduced. The relation of the surface shape error to f-number and relevant spherical radius was achieved according to the reducing analysis model ignoring the local f-number. Two kinds of rhombic prism model are established by ZEMAX. According to the simulation results from ZEMAX, the correctness and limitation of the former methods are proved and analyzed. The results are used to analyze the effect of the surface shape error of the rhombic prism on parallelism of the emergent beam. The assignation plan of the surface shape error for each working surface is presented. A conclusion that the effects of surface shape errors of the refractive and reflective surfaces on the deviation angle of the emergent beam are different with the increase of the incident beam diameter is achieved.

Key words: surface shape error of rhombic prism; ZEMAX auxiliary analysis; parallelism of emergent beam

引言

测角仪器内部的斜方棱镜可用于平行光路中将光轴沿与之垂直的方向上平移一定距离, 使仪器

的两部分协同工作。如果斜方棱镜存在面形误差, 就会影响出射光束平行度, 进而影响其测量精度。平行光入射时, 若不考虑面形误差, 斜方棱镜的安

收稿日期: 2008-09-06; 修回日期: 2008-10-24

作者简介: 刘爱敏(1984—), 女, 河南汝州人, 硕士研究生, 主要从事光学设计和光学系统分析。E-mail: liuaimin1232003@163.com

装倾斜误差及棱镜其他加工误差均不影响出射光的平行度^[1-2]。测角误差分配于光束平行度的角量值与斜方棱镜面形误差的精确关系,无法通过经验值直接给出。因此,定量研究斜方棱镜面形误差对出射光平行度的影响对测角系统具有重要意义。

1 一种根据出射光平行度要求计算斜方棱镜面形误差的方法

该方法的基本思路:①简化处理,获得面形误差对应光圈数 N 与相关球面半径 R 的关系;②通过几何处理方法,求得一定面形误差对应球面半径 R 与平面倾角 α 的关系;③将斜方棱镜的工作面倾斜一定角度 α ,运用折射定理,得到出射光相对于理想光轴的倾斜角度 θ 及其关系式,即可根据一定平行度要求确定面形误差对应的光圈数。具体计算过程如下。

1.1 光圈数 N 与对应棱镜口径 D 、球面半径 R 的关系

棱镜加工时面形误差包含光圈数 N 和局部光圈数 ΔN ,一般给定的 N 值为 ΔN 的 5 倍^[3]。在分析面形误差时,由于光学元件表面面形较复杂,需建立既简单又能反映主要问题的分析模型。一般局部光圈数 ΔN 较小,为简化分析可忽略其影响,只考虑光圈 N ,之后根据 N 值确定 ΔN 的值。光圈数 N 与对应棱镜口径 D 、球面半径 R 的关系式为

$$N = \frac{D^2}{4R\lambda} \quad (1)$$

1.2 相关几何处理方法

相关几何处理方法如图 1 所示。PM、PA、PB 均为平面示意图,PA、PB 与 PM 的夹角均为 α 角,一球面分别与 PA、PB 相切于点 A、B,球心为 O 点,

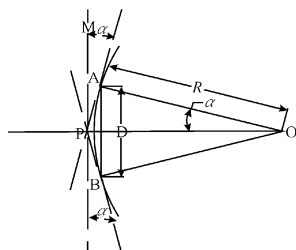


图 1 面形误差对应的球面半径 R 与角度 α 的关系
Fig. 1 Relation of angle α and spherical radius corresponding to surface shape error

且设 AB 之间距离为 D ,则由几何关系可知,距离 D 、球半径 R 及角度 α 之间有如下关系:

$$R = D / (2 \cdot \sin\alpha) \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式可得:

$$N = \frac{\sin\alpha \cdot D}{2\lambda} \quad (3)$$

式中 λ 为检测光圈数的入射光波长。

1.3 算法主要部分

将斜方棱镜 4 个工作面编号,如图 2 所示。分别分析单个工作面有 α 角倾斜时,出射光相对于理想光轴的倾斜角度 θ 与 α 角的关系。

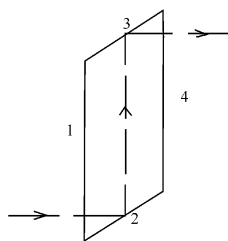


图 2 斜方棱镜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rhombic prism

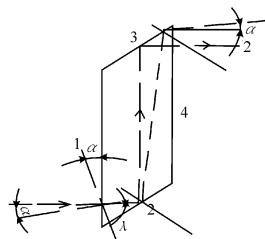


图 3 折射面 1 倾斜 α 角

Fig. 3 Tilt angle α in refractive surface 1

当折射面 1 倾斜 α 角(图 3 所示)时,根据折射定理,有:

$$n \sin(\alpha - \gamma) = \sin\theta \quad (4)$$

$$\sin\alpha = n \sin\gamma \quad (5)$$

α 、 γ 为小角度时,由(4)式和(5)式可得:

$$\theta = (n - 1)\alpha \quad (6)$$

同理,当反射面 2 和 3 分别有 α 角倾斜时,关系式如下所示:

$$\sin\theta = n \sin 2\alpha \quad (7)$$

根据小角度近似,有

$$\theta = 2n\alpha \quad (8)$$

折射面 4 倾斜有 α 角时,有

$$n \sin\alpha = \sin\gamma' \quad (9)$$

$$\theta = \gamma' - \alpha \quad (10)$$

根据小角度近似,有

$$\theta = (n - 1)\alpha \quad (11)$$

在(4)式~(11)式中, n 为棱镜玻璃材料的折射率, γ 为折射面1倾斜后入射光从折射面1进入棱镜后的折射角, γ' 为折射面4倾斜后出射光的折射角。由以上分析可知,2个反射面2和3的影响关系式相同,2个折射面1和4的影响关系式也基本相同。

分别将(8)式、(11)式代入(3)式,且取小角度近似,则有:

$$N = \frac{\theta \cdot D}{2(n-1)\lambda} \quad (12)$$

$$N = \frac{\theta \cdot D}{4n\lambda} \quad (13)$$

(12)式和(15)式分别为折射面1或4的关系式;反射面2或3单独作用时,面形误差与出射光相对于理想光轴倾斜角度 θ 的关系式。

当检测光圈数的入射光波长 λ 取为555 nm,棱镜玻璃材料取K9(折射率 $n=1.518$),入射光与出射光平行度要求为 $\theta \leq 5''$ (取 $\theta=5''$),得到光圈数与棱镜口径 D (单位为mm)的关系为

$$N = 4.1933 \times 10^{-2} D \quad (14)$$

$$N = 7.1545 \times 10^{-3} D \quad (15)$$

由以上计算可知,平行度要求相同,且有效通光口径相同时,对折射面1和4面形误差要求比反射面2和3面形误差要求的精度因子低得多;后者约为前者5~6倍(N 越小,面形误差越小,加工难度越大)。

该算法将具体面形误差转化为相应平面的倾斜角度,与面形误差引起入射点处光线倾斜相对应,并进行简化处理。计算单个工作面面形误差独立作用的精度要求时,该算法对误差分析有一定的指导作用。以上分析过程中只有第三部分涉及斜方棱镜的形式,若能验证其正确性,则相类似的处理方法同样适用于任何形式的棱镜。

表1 斜方棱镜模型 I ZEMAX 验证结果

Table 1 Simulation results of rhombic prism model I proved by ZEMAX

表面序号	实际口径(有效口径)/mm	入射光口径/mm	口径所对应光圈数	对应半径/mm	在通光口径边缘处 $\theta/('')$
1	117.75(37)	36.99	1.55	3.953 27e005	4.999 6
2	52.326(52.326)	36.99	0.374	3.276 76e006	4.999 0
3	52.326(52.326)	36.99	0.374	3.276 76e006	4.999 0
4	117.75(37)	36.99	1.55	3.953 27e005	4.999 6

表2 斜方棱镜模型 II ZEMAX 验证结果

Table 2 Simulation results of rhombic prism model II proved by ZEMAX

利用斜方棱镜模型 II 验证: $\theta=5''$, $R=D/(2\alpha)$ (D 为有效口径), $\lambda=555$ nm

表面序号	实际口径(有效口径)/mm	入射光口径/mm	口径所对应光圈数	对应半径/mm	在通光口径边缘处 $\theta/('')$
1	117.75(117.75)	36.99	4.94	1.258 1e006	1.872
2	52.326(52.326)	36.99	0.374	3.276 76e006	5.004
3	52.326(52.326)	36.99	0.374	3.276 76e006	5.004
4	117.75(117.75)	36.99	4.94	1.258 1e006	5.004

2 在 ZEMAX 中建立斜方棱镜模型并分析上述计算法的正确性

常规斜方棱镜在光轴垂直方向平移的距离、棱镜尺寸、通光口径、重量等方面均有要求,不失一般性,采用如图2所示的基本形状。在ZEMAX分别建立两种斜方棱镜模型^[4],如图4和图5所示。

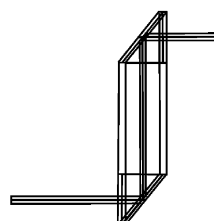


图4 斜方棱镜模型 I

Fig. 4 Model I of rhombic prism

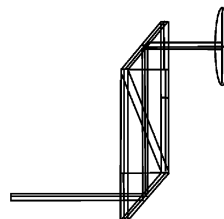


图5 斜方棱镜模型 II

Fig. 5 Model II of rhombic prism

斜方棱镜模型 I 由3部分组成:2个直角棱镜和1个长方体玻璃板,该模型将折射面1和4有效通光部分分离出来,仅有效通光部分的面形可变,为验证前述算法而建立。斜方棱镜模型 II 中整个折射面1和4面形均可变,与实际应用中的斜方棱镜符合。两模型尺寸相同,材料相同(K9),当单个工作面有面形误差时,ZEMAX 仿真结果如表1和表2所示。

由表 1 和表 2 可知,斜方棱镜模型 I 的仿真结果与前述计算结果基本吻合。斜方棱镜模型 II 的仿真结果表明,由于折射面 1 的有效口径(ZEMAX 中可改变面形的口径)与实际口径一致,因此仿真结果与计算结果不一致。以上结果说明该算法在一定范围内的正确性,同时也反映出其弊端,即前述计算得出的结果对应的是最大有效通光口径充分利用时,口径边缘处的光线的偏折情况;如果平行度要求的通光口径不在此位置,前述计算结果就不能给出有效结果。有必要建立与实际应用结合的模型(斜方棱镜模型 II),全面分析有一定平行度要求时,斜方棱镜各个工作面面形误差的分配情况。

3 ZEMAX 综合分析斜方棱镜面形误差对出射光平行度的影响

根据实际应用,对斜方棱镜提出以下技术要求:1)有效通光口径不小于 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$;2)出射光束与入射光束平行度最大误差不大于 $5''$ 。斜方棱镜采用斜方棱镜模型 II,具体尺寸见表 2。一般棱镜各面的光圈高低是随机的,相互之间可能互相抵消一部分,实际面形误差引起的角度误差要小于极端情况^[5]。为使加工中的各种情况都能满足技术要求,应根据极端情况给出各个面的加工要求,使各个面的面形误差引起的出射光线偏折的方向一致。根据仿真结果,图 6(a)和图 6(b)满足上述两种情况要求。

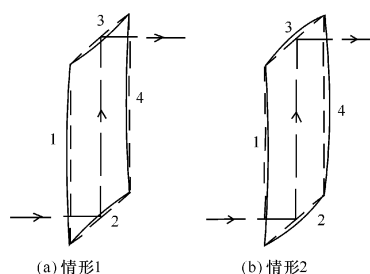


图 6 满足要求的斜方棱镜

Fig. 6 Oblique space prism

在这两种情况中,各个工作面对应的光圈符号恰好相反。在以下仿真中,斜方棱镜各工作面光圈符号均按图 6(a)给出,采用斜方棱镜模型 II 作为仿真模型。采用试值法,先给出光圈数 N 值,根据(1)式计算出对应球面半径,再由仿真结果判断是否满足平行度要求,若不满足,继续试值,达到或超过平行度要求(参考前述计算结果对试值过程具有一定指导性)为止。试值起点为:折射面光圈取 $N_1=1$ (中等精度),反射面取 $N_2=0.5$ (高精度),光束口径为 $5\sqrt{2}$ 圆形光束,其他条件与前述的仿真过程相同。具体试值及相关仿真结果如表 3 所示。

根据表 3 中的仿真结果,能基本达到或略微超过要求的是:1)折射面光圈取 $N_1=1.8$,反射面取 $N_2=0.5$;2)折射面光圈取 $N_1=1.7$,反射面取 $N_2=0.5$ 两种情况。结合实际加工的情况,选择第一种情况,具体的仿真结果如表 4 所示。

表 3 具体试值过程的仿真结果

Table 3 Simulation results of process to select suitable values

试值编号	折射面光圈数/ N_1	折射面对应半径/mm	反射面光圈数/ N_2	反射面对应半径/mm	光束口径边缘处 $\theta/(\prime)$
1	1	6.245 52e006	0.5	2.466 7e006	3.924
2	1.5	6.245 52e006	0.5	2.466 7e006	4.608
3	2	3.122 76e006	0.5	2.466 7e006	5.292
4	1.8	3.469 74e006	0.5	2.466 7e006	5.04
5	1.7	3.673 846e006	0.5	2.466 7e006	4.896

表 4 各个归一化光束口径处的仿真结果

Table 4 Simulation results at each aperture of normalized beam

归一化 光束口径	折射部分引起光线偏折角度/ (\prime)			反射部分引起光线偏折角度/ (\prime)			总偏折角 (\prime)
	折射部分 (面 1 和 4 共同作用)	折射面 1	折射面 4	反射部分 (面 2 和 3 共同作用)	反射面 2	反射面 3	
0.1	2.484	1.224	1.26	0.252	0.144	0.144	2.736
0.2	2.484	1.224	1.26	0.504	0.252	0.252	2.988
0.3	2.484	1.224	1.26	0.756	0.396	0.396	3.24
0.4	2.484	1.224	1.26	1.008	0.504	0.504	3.492
0.5	2.484	1.224	1.26	1.26	0.648	0.648	3.744

续表 4

归一化 光束口径	折射部分引起光线偏折角度/($''$)			反射部分引起光线偏折角度/($''$)			总偏折角 /($''$)
	折射部分 (面 1 和 4 共同作用)	折射面 1	折射面 4	反射部分 (面 2 和 3 共同作用)	反射面 2	反射面 3	
0.6	2.484	1.224	1.26	1.512	0.756	0.756	3.996
0.7	2.484	1.224	1.26	1.764	0.9	0.9	4.0284
0.8	2.484	1.224	1.26	2.016	1.008	1.008	4.536
0.9	2.484	1.224	1.26	2.268	1.152	1.152	4.788
1	2.484	1.224	1.26	2.556	1.26	1.26	5.04

表 4 中,总偏折角一列为所有工作面均有面形误差情况下的综合作用结果,其余列均为所述工作面面形误差单独作用结果。从仿真结果可得出以下结论:随着光束口径的增大,折射部分引起光线偏折角度基本处于稳定;反射部分引起光线偏折角度呈线性逐渐增加,变化幅度稳定,每次增幅约为 $0.000\ 07^\circ(0.252'')$;折射部分和反射部分单独引起的出射光线偏折角度之和为总偏折角度,两者具有独立性及可加性,当符号不同时互相抵消。折射部分中,折射面 1 和 4 对出射光线偏折角贡献因子略微有些差别,基本相等,且光束口径变化时基本处于稳定。反射面 2 和 3 对出射光线偏折角贡献因子相同,且光束口径变化时两者都呈线性增长,两者单独作用之和基本等于共同作用时偏折角值,两者具有独立性及可加性,符号不同时互相抵消。

4 结论

通过分析比较上述计算法和 ZEMAX 仿真法可以看出:计算法能够基本给出单个工作面面形误差的独立作用规律,在一定程度对 ZEMAX 仿真及误差分析具有指导意义。ZEMAX 辅助分析法验证了该算法的正确性以及局限性,并验证了各个工作面面形误差的独立性和可加性以及不同光束口径处面形误差的作用规律。两者结合使我们能够直接根据光束平行度要求,可明确给出满足任意要求的面形误差分配方案。

参考文献:

- [1] 李士贤,李林. 光学设计手册[M]. 修订版. 北京:北京理工大学出版社,1996.
LI Shi-xian, LI Lin. Optical design manual [M]. Revised version. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [2] 高立民, 罗长州, 陈良益. 五角棱镜在方位对准中的应用[J]. 应用光学, 2003, 24(1): 5-7.
GAO Li-min, LUO Chang-zhou, CHEN Liang-yi. Application of penta prism in azimuth laying [J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24 (1): 5-7. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 光学仪器设计手册编辑组. 光学仪器设计手册:上册[M]. 北京:国防工业出版社,1971.
Editorial group of design manual of optical instruments. Design manual of optical instruments: first half volume [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1971. (in Chinese)
- [4] ZEMAX Development Corporation. ZEMAX optical design program user's guide january 2003 [M]. USA: ZEMAX Development Corporation, 1995.
- [5] 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)