

五角棱镜在建立大尺寸平面基准中的应用

郝 群 赵 洋 曹 芒 李达成

(清华大学精密仪器系, 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 100084)

摘 要 从五角棱镜的原理和特性出发, 叙述了利用五角棱镜扫描建立大平面基准过程中, 由于加工角差和当五角棱镜相对入射光束有相对运动时其出射光束的横移对平面基准的影响, 提出了用衍射成像技术消除光束横移, 数据计算修正棱镜的角度差的影响。

关键词 五角棱镜, 平面基准, 衍射成像。

1 引 言

光学方法在形状尺寸测量方面的应用, 主要是利用光线或者视线(光轴)作为测量的基准线, 通过光机扫描机构将该光线或视线在空间扫描, 构成测量基准平面^[1]。理想情况下, 这个基准平面的尺寸是无限的, 故很适合作为大尺寸量的测量基准。在大尺寸测量基准建立中, 折转 90° 的五角棱镜是重要的光学器件: 入射光经过五角棱镜后转折 90° 出射, 而出射光与入射光间的夹角不随入射角的变化而改变^[2]。因此, 只要入射光束的方向是固定的, 当五角棱镜旋转时, 出射光束的方向始终保持与入射光束垂直, 形成一个光束平面。

本文分析了应用五角棱镜角度在建立测量基准时引起的误差: 角度差和出射光线的横移对所建立的基准面的影响, 提出了如何利用五角棱镜出射光的固定方向性, 运用衍射成像技术和数值计算建立大尺寸测量基准的方法。

2 五角棱镜的光学特性

2.1 五角棱镜角度制造误差对出射光束的影响

图 1 所示是五角棱镜的工作原理图, 根据光的折射定律和反射定律可以推导出光束经五角棱镜后的转向角 α_6 与入射角 α_1 之间的关系^[3]。

$$\alpha_6 = 180^\circ - \beta + \alpha_1 - \sin^{-1}\{n \sin [2\theta - \beta + \sin^{-1}(\sin \alpha_1/n)]\} \quad (1)$$

式中 n 为五角棱镜材料的折射率, β , θ 为五角棱镜内角, 当五角棱镜为理想情况时, 即 $\beta = 90^\circ$, $\theta = 45^\circ$ 时, 由(1)式得 $\alpha_6 = 90^\circ$ 。可见, 五角棱镜的转向角为严格的 90° , 且与光束的入射角无关; 当五角棱镜存在有加工误差时, 五角棱镜的转向角不再为严格的 90° ; 此时五角棱镜的转向角 α_6 与入射角 α_1 的大小有关。对(1)式微分, 在 α_1 很小的情况下有:

$$\delta\alpha_6 = \left[1 - \frac{\cos(2\theta - \beta)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(2\theta - \beta)}} \right] \delta\alpha_1 \quad (2)$$

由(2)式, 当五角棱镜的加工角差很小时, $2\theta - \beta$ 接近于 0, $\delta\alpha_6/\delta\alpha_1$ 为一很小的数, 因此, $\delta\alpha_1$ 对 $\delta\alpha_6$ 的影响是微小的。实际加工五角棱镜时, 其加工角差在 1' 内是容易做得的。此时设五角棱镜加工角为 $\beta = 90^\circ 1'$, $\theta = 44^\circ 58'$, 其材料折射率 $n = 1.5163$ 计算时, 在入射角变化 5° 范围内, 转向角的变化量仅为 $0.08''$ 。

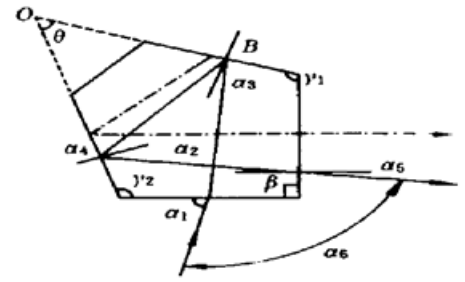


Fig. 1 The geometry of a laser beam traversng a pentagonal prism

2.2 光束入射角的变化与出射光束位置间的关系

光学棱镜可以折转入射光线的方向, 在实际的光路中相当于一个平行玻璃板, 虽然从五角棱镜出射的方向保持与入射光线固定的角度不变, 但是

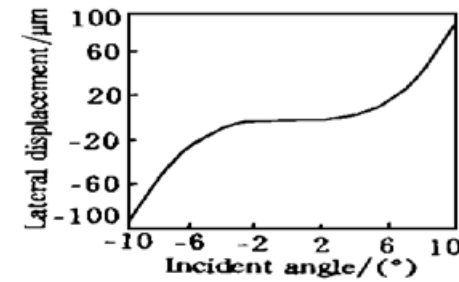


Fig. 2 Curve of lateral displacement of the exit beam versus the change of the incident angle in the range of 10°

当棱镜与入射光线之间有相对位移或者转动时, 其出射光束存在着横向位移, 对于五角棱镜, 1) 入射光线相对位移大小与出射光束位移量相等; 2) 当入射光束的入射角发生改变时, 从棱镜出射的光束将产生位移, 该位移量的大小可由下式表示:

$$\Delta d = (2 + \sqrt{2}) D \sin \alpha_1 \left(1 - \frac{n \cos \alpha_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_1}} \right) \quad (3)$$

式中 D 为五角棱镜的通光口径。实验中采用五角棱镜的通光口径为 20 mm, 棱镜的材料是 K₉ 玻璃, 其折射率 $n = 1.5163$, 图 2 是入射角和横移量之间的关系曲线。

3 利用五角棱镜建立平面测量基准

以准直激光作为测量的基准线, 利用五角棱镜构成的光机扫描机构将该稳定的准直激光束在空间扫描, 构成测量基准平面。理想情况下, 这个基准平面的尺寸是无限的, 从上面的理论分析可知, 由于五角棱镜加工角差的影响, 出射光束和入射光束的夹角不是严格的 90° 角; 在五角棱镜的扫描过程中, 从五角棱镜出射的光线方向不变, 但在垂直光线的方向上有移动。如果直接以其出射激光束的轴线作为基准, 势必引入测量误差。

3.1 五角棱镜加工角度差的修正

从(1)式可知, 对于五角棱镜, 当其加工的角度差确定后, 其入射光与出射光的关系也就确定了。因此如果能够事先测量出这个角度的话, 就可以通过数值计算, 将锥面还原成一个平面, 如图 3 所示。

以五角棱镜回转中心作为原点, 则五角棱镜加工角差引起的转向角偏差形成的光锥面误差为

$$\Delta P = \rho \tan \delta\phi \quad (4)$$

$$\delta\phi = 90^\circ - \beta - \arcsin [n \sin (2\theta - \beta)] - \left[1 - \frac{\cos (2\theta - \beta)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 (2\theta - \beta)}} \right] \delta\alpha_1 \quad (5)$$

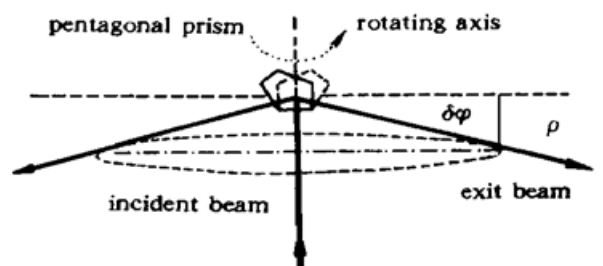


Fig. 3 Cone scanning surface when the pentagonal prism is not perfect

3.2 利用位相板衍射技术消除光束的横向位移

当五角棱镜在空间扫描时：1) 光轴与回转轴平行、但不同轴。此时随五角棱镜回转扫描角度的不同，光束将沿轴向上下跳动。2) 光轴与回转轴之间有一个夹角，由该夹角引起的出射光的横移量可由(3)式求得。在这种情况下，如果直接以该激光束的轴线作为基准，通过测定该光束的能量中心位置进行测量，从前面的分析可知：由于五角棱镜出射光束的横移，对光机扫描机构提出了很高的要求。因此如果能够只利用准直光束的方向性建立测量基准，就可以获得一个高精度的测量基准。利用位相板技术产生的衍射条纹形成的黑线作为基准，便可以达到该目的。

图 4 表示用一维非对称 π 相位阶跃位相板作准直测量的原理图。在透明平板一半面上镀

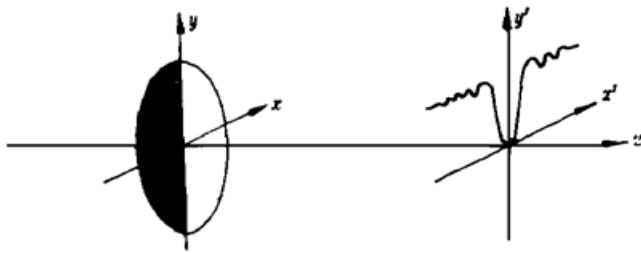


Fig. 4 The diffraction pattern of a one-dimensional asymmetrical phase plate which has a π -phase difference between its right and left parts by coating

以一定厚度的膜层，使其通过左右两部分的光产生位相差 π ，这样非对称位相板的两部分相当于两块直边衍射屏，但位相差 π 。当用同一平行光照明时，两块直边衍射的合成衍射场分布为(略去常数)：

$$E(x', y', z) = \left[F \left[\sqrt{\frac{2}{\lambda z}} x' \right] - F(-\infty) \right] + \left[- F \left[\sqrt{\frac{2}{\lambda z}} x' \right] - F(-\infty) \right] \exp(i\pi) \quad (6)$$

其中 $F(x)$ 是菲涅耳积分，可见，对于轴上点($x' = 0$)， $E(x', y', z) = 0$ ，即得暗中心线。因此接收屏上有对称于暗中心线的光强分布，这样就可把这条中心暗线作为中心位置在空间组成准直基准。经过该位相板后的衍射光束有如下特点：

1) 光束是一个具有中心黑线的对称衍射图样，该衍射图样是以通过此黑线中心的光轴为轴的轴对称图样。利用衍射图样的对称性，可以高精度确定出黑线的位置。

2) 当入射光波是平行平面波，且方向确定时，如果入射光波平移时，黑线和衍射图样在空间上不变。

因此利用位相板技术产生的衍射黑线作为测量基准，可以消除五角棱镜出射光束的横移对测量基准的影响。

4 用五角棱镜扫描建立平面基准和平面度测量的原理

图 5 所示是利用五角棱镜扫描建立平面基准的原理图。从激光光纤准直系统发出和准直激光束经过一个由五角棱镜构成的光学机械扫描机构，照射在位相板上，当旋转五角棱镜扫描头时，则位相板的衍射图样形成了一个扫描平面。利用 CCD 光电测头测量出该光学基准面与被测面间的偏离量。在该系统中，所用的五角棱镜在中国计量科学院进行了标定：其 90° 折转角误差为 $0.8''$ ，标定精度为 $0.1''$ ，用该数值对测量数据

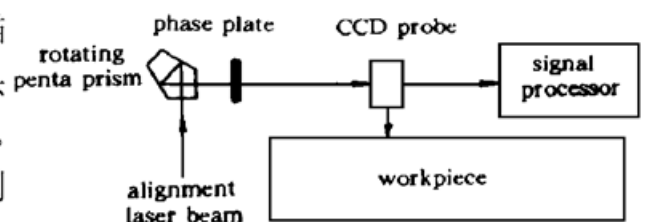


Fig. 5 Principle diagram of measuring flatness with a scanning pentagonal prism

进行修正。用该实验装置在现场测量 $8\text{ m} \times 8\text{ m}$ 工件的平面度, 测量的重复性达到 $4.5\ \mu\text{m}$ 。

结束语 用一准直光束作为测量的基线, 通过五角棱镜的 90° 折转光学特性构成的光机扫描系统, 扫描出一个测量所需要的参考基准面在大尺寸测量中是一种行之有效的方法。从文中论述可见, 五角棱镜的制造误差和工作状态将会给测量带来一定的误差, 由五角棱镜的角度差带来的误差是一个固定的系统误差。它可以通过预先对所用的五角棱镜进行标定, 在数据处理中予以修正。在五角棱镜扫描过程中引起的光束的横移可以利用光学衍射成像技术予以消除, 同时位相板成像技术的应用提高了测量的精度。实验结果表明, 该系统通过上述方法处理后, 可以建立高精度的测量基准。

参 考 文 献

- [1] Fancis, T. Farago, *Handbook of Dimensional Measurement*. London: Industrial Press Inc., 1968
- [2] 董艳玲, 大型工件平行度、垂直度激光测量系统的研制. [博士论文], 北京: 清华大学, 1989
- [3] 连铜淑, 反射棱镜共轭理论, 北京: 北京理工大学出版社, 1988
- [4] M. Born, E. Wolf, *Principle of Optics*. London: Pergamon Press, 1965. 1430

Application of Penta Prism in Establishing the Datum Plane for Measuring Flatness in Large Scale Dimension

Hao Qun Zhao Yang Cao Mang Li Dacheng

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100080)

(Received 11 January 1997; revised 14 August 1997)

Abstract According to the operating principle and characteristic of pentagonal prism, it is analyzed that the fabrication error of the prism angles and the effect of lateral displacement of exit beam when the prism has a motion relative to the incident beam on the accuracy of the datum plane to be established. The Fresnel diffraction imaging technique is used to eliminate the effect of the lateral displacement and data calculating is used to calibrate the fabrication error of the angles.

Key words pentagonal prism, datum plane, diffraction imaging.