

高精度基准平面建立方法分析*

于殿泓^{1,2} 李琳² 卢秉恒¹

(1 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

(2 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘要 基准平面的确立, 是进行表面参数评定的基础; 建立理想的基准平面, 在几何量形位公差检测及相关工程测量方面具有重要作用. 为了建立高精度的激光扫描基准平面, 对扫描平面形成过程中光束的传播进行了详细分析; 根据光学矢量反射定律, 推导出了扫描误差的理论公式; 在此基础上揭示了误差补偿的基本原理, 导出了用于补偿扫描机构产生的扫描误差的理论公式; 提出了据此准则进行设计的扫描机构的模型. 分析表明, 用激光及其扫描装置建立光学基准面时, 扫描误差是不可避免的, 这种误差不加补偿, 则最终将引入基准光学平面影响基准精度, 进而降低参数的评定精度; 借助于所推导的误差补偿公式, 是可以补偿这种误差的, 这对于建立高精度的扫描基准平面具有理论指导意义.

关键词 基准平面; 扫描机构; 误差; 五棱镜; 补偿

中图分类号 O435.1-39 **文献标识码** A

0 引言

在表面参数评定中, 评定基准面的确定是进行表面参数评定的基础, 该基准面的精确性直接影响表面参数评定的精确性^[1]. 作为表面参数的一种评定方法, 光学(激光)方法广泛被用于机械安装、校准、准直及平面度测量, 此时五棱镜这种光学附件常常被用到. 五棱镜为双面反射镜, 可以使入射光束垂直转向, 当五棱镜绕入射光束之轴线转动时, 出射光束可扫描出一个与入射光束垂直的平面. 一般反射镜及直角棱镜等在一定条件下也可以使光束垂直转向, 但光束的入射角一旦改变, 反射角亦随之而改变, 因而入射光束与出射光束之间的夹角发生变化. 五棱镜则不同, 光束在其主截面内的转向角度只与两反射面的夹角有关, 即使入射光束与入射面并非严格垂直, 其出射光束亦可精确垂直转向^[2,3]. 因此五棱镜与一般反射镜及直角棱镜相比, 具有转向准确、调整简单、使用方便等优点, 被广泛用于光轴垂直转向及通过光学扫描建立基准平面等方面. 应用此方法建立光学基准平面时, 基准面的精度主要取决于这样几个方面: 自动铅直激光束精度; 扫描器五棱镜制造精度; 所使用光电探测器本身的精度; 扫描扰动产生的扫描误差. 本研究主要着眼于扫描机构本身所引入的扫描误差.

1 五棱镜的扫描误差及其分解

理想的五棱镜的一个光学特性是: 仅用于光轴垂直转向时不会产生转向误差, 即使入射光线与入射面并非严格垂直, 出射光线仍能实现垂直转向, 这一特性, 在采用光学方法进行机械安装校准及准直等测量工作中, 得到广泛应用. 当利用五棱镜及其扫描机构进行光学扫描建立基准平面时, 在理想状态下, 出射光束可以扫描出一个理想的光学平面作为基准平面, 然而, 这种理想状态实际中是不存在的, 由于五棱镜的安装误差及回转轴的转动误差等是不可避免的, 即当五棱镜(扫描机构)的回转轴与入射光轴的不重合时, 将会导致扫描产生的光学平面在一定公差范围内起伏, 从而影响基准平面的精度, 如图1. 所以, 回转机构带动五棱镜转动扫描光学平面时, 必然存在一定的误差, 应该采取相应补偿方法给予削弱或消除^[4,5].

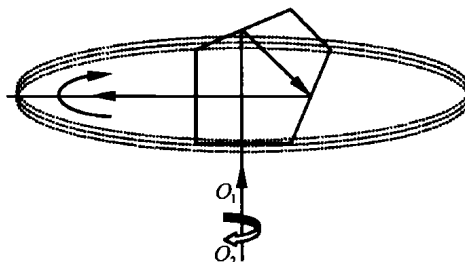


图1 五棱镜的扫描误差

Fig. 1 Scanning error of pentagonal prism

仔细对扫描情况进行分析表明, 扫描光学平面时, 对入射于五棱镜的光束进行分解, 可分别得到在主截面内和垂直于主截面的平面内的光束传播情况, 即实际光束分解为 xOz 面和 xOy 面的分量光束, 如图2.

* 中国博士后科学基金资助项目(361002); 西安理工大学博士启动基金资助项目(102-220175)

Tel: 029-82665065 Email: dhyu0401@163.com

收稿日期: 2004-05-08

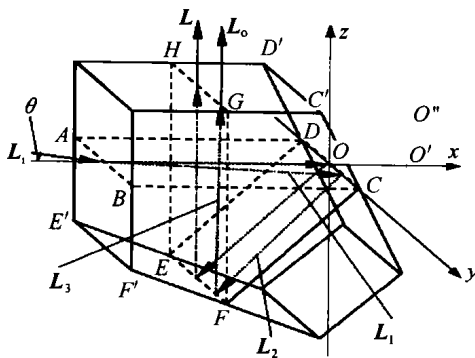


图2 光线在五棱镜中传播

Fig. 2 Light transmission in the prism

1.1 光束在水平截面内传播

这里首先分析当五棱镜在垂直于主截面的平面(xOy 平面)内有微小摆动时,对扫描所产生的光学平面有何影响.

图2中,在理想情况下,五棱镜绕坐标系中 x 轴旋转,即可扫描出一光学基准平面,该基准面重合于平面 $EFGH$.而当扫描机构存在一定误差,假设五棱镜绕着平行于 z 轴的某一直线 $O'O''$ 摆动时,可以等价在水平面(xOy 平面)内光束的非理想入射,即可以假设实际入射光束与理想入射光束呈 θ 角偏摆,这时入射光束与折射光束均位于平面 $ABCD$ 内,再经过第一反射面 $CC'D'D$ 和第二反射面 $FEE'F'$ 反射后,若出射光束最终位于 $EFGH$ 平面内,则扫描基准面无误差.

分析中要用到平面 $ABCD$ 、 $CDEF$ 和 $EFGH$,这三个平面可以用如下方程来描述

$$\text{平面 } ABCD: z=0$$

$$\text{平面 } CDEF: x-z=0$$

$$\text{平面 } EFGH: x-\sqrt{2}a=0$$

式中, a 为五棱镜的有效入射口径,即 $a=\bar{AB}$.

设在棱镜内部传播的各光束的单位矢量分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 ,入射光束和出射光束的单位矢量分别为 L_i 、 L_o ,如图2.

根据折射定律,入射光束(L_i)和法线(x 轴)构成的平面和 $ABCD$ 平面是同一平面,所以折射光束单位矢量 L_1 应位于 $ABCD$ 平面内,且 L_1 可表示为

$$L_1 = l \cdot i + m \cdot j \quad (1)$$

这里, l 、 m 分别为 L_1 在 x 轴和 y 轴上的方向余弦,且有 $l^2 + m^2 = 1$.

根据五棱镜的几何关系可知,第一反射面的法线矢量为

$$n_1 = -i \cdot \cos 22.5^\circ - k \cdot \sin 22.5^\circ \quad (2)$$

由光束反射定律的矢量表达式^[6]

$$P_2 = P_1 - 2n(P_1 \cdot n) \quad (3)$$

式中, P_1 、 P_2 分别为入射光线和反射光线的单位矢量, n 为法线方向单位矢量.因此可以得到经五棱

镜第一反射面反射而得的反射光束的单位矢量 L_2 为

$$\begin{aligned} L_2 &= L_1 - 2n_1(L_1 \cdot n_1) = l \cdot i + m \cdot j - 2[(l \cdot i + \\ & m \cdot j)(-i \cos 22.5^\circ - k \sin 22.5^\circ)] \cdot \\ & (-i \cos 22.5^\circ - k \sin 22.5^\circ) = l \cdot i + m \cdot j + \\ & 2l \cos 22.5^\circ(-i \cos 22.5^\circ - k \sin 22.5^\circ) \end{aligned}$$

$$L_2 = -\frac{\sqrt{2}}{2}l \cdot i + m \cdot j - \frac{\sqrt{2}}{2}l \cdot k \quad (4)$$

根据直线和平面重合的判别式:当 $l_0 \cdot A_0 + m_0 \cdot B_0 + n_0 \cdot C_0 = 0$,且有一个公共点时,直线和平面重合.可知 L_2 与平面 $CDEF$ 重合.

再来分析光线在五棱镜内第二次反射的情况.根据矢量分析法,容易得出第二反射面 $FEE'F'$ 的法线单位矢量为

$$n_2 = i \cdot \sin 22.5^\circ + k \cdot \cos 22.5^\circ \quad (5)$$

经该反射面反射后,反射光束的单位矢量 L_3 为

$$\begin{aligned} L_3 &= L_2 - 2n_2(L_2 \cdot n_2) = -\frac{\sqrt{2}}{2}l \cdot i + m \cdot j - \frac{\sqrt{2}}{2}l \cdot k \\ & - 2\left[(-\frac{\sqrt{2}}{2}l \cdot i + m \cdot j - \frac{\sqrt{2}}{2}l \cdot k)(i \sin 22.5^\circ + \right. \\ & \left. k \cos 22.5^\circ)\right](i \sin 22.5^\circ + k \cos 22.5^\circ) = -\frac{\sqrt{2}}{2}l \cdot \\ & i + m \cdot j - \frac{\sqrt{2}}{2}l \cdot k + \sqrt{2}l(\sin 22.5^\circ + \cos 22.5^\circ) \\ & (i \cdot \sin 22.5^\circ + k \cos 22.5^\circ) \end{aligned}$$

$$L_3 = m \cdot j + l \cdot k \quad (6)$$

容易判别, L_3 与平面 $EFGH$ 重合.因 L_3 和出射光束 L_o 以及其法线(平行于 z 轴)所构成的平面即为平面 $EFGH$,所以出射光束此时始终位于理想的扫描光学平面内.亦即,在五棱镜绕 x 轴旋转扫描出一光学平面时,即使该棱镜存在有绕平行于 z 轴的某一直线的微小摆动,出射光束仍位于扫描所产生的理想平面内,扫描光束不产生波动起伏,当然也就不产生扫描误差.

1.2 光束在垂直截面内传播

以上分析了入射光束分解于五棱镜的 xOy 平面时的扫描情况,这里讨论五棱镜在主截面(xOz 平面)内有微小摆动时的扫描情况,如图3.

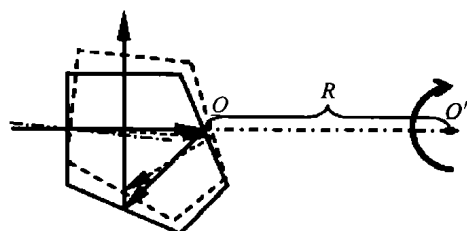


图3 五棱镜的误差补偿原理

Fig. 3 Compensating principle of pentagonal prism

通过对图3进行分析可以知道,当五棱镜绕 O'

点有顺时针的微小角度摆动时,这一摆动能够分解为两个平移和一个转动,即五棱镜向上和向右的平移及绕 O 点顺时针的转动,误差运动的分解如图 4、图 5.

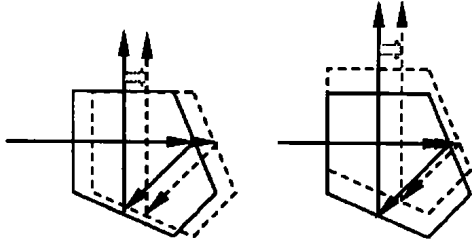


图 4 棱镜平移引入的误差
Fig. 4 Decomposition of the error (displacement)

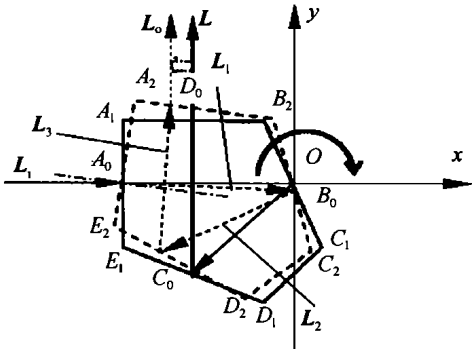


图 5 棱镜转动引入的误差
Fig. 5 Decomposition of the error (rotation)

由图 4 可知,五棱镜向上和向右平移时,出射光束随之向右平移;由图 5 可知,五棱镜绕 O 点顺时针转动时,出射光束随之向左平移.显然,当出射光束的左、右平移量相等时,光束的出射位置误差将被完全抵消.

由图 4 可以推得,五棱镜的平移量与由此引起的出射光束的平移量大小相等.在图 3 中,设点 O 与点 O' 的距离为 R ,当五棱镜绕 O' 点顺时针偏转一微小角度 θ 时,五棱镜的上移量为 $R \sin \theta$,由此所引起的出射光束右移量亦为 $R \sin \theta$;同时五棱镜的右移量为 $R(1 - \cos \theta)$,而由此所引起的出射光束右移量亦为 $R(1 - \cos \theta)$.因而由五棱镜上移和右移所引起的出射光束的总右移量为 $d_2 = R(1 - \cos \theta + \sin \theta)$.

在图 5 中,设五棱镜的折射率为 n ,有效入射口径为 a ,棱镜绕 O 点顺时针转过的微小角度为 θ ,此时折射光束的折射角为 α .以 O 为坐标原点,以入射光线(或其延长线)为 x 轴,建立直角坐标系,棱镜转动后,在棱镜中的每段光束分别用其单位矢量 L_1 、 L_2 、 L_3 表示,入射光束与出射光束分别用单位矢量 L_0 和 L 表示;棱镜转动之前(理想位置)的出射光束用单位矢量 L 表示.分析图 5 能够得出,五棱镜顺时针转动时,引起出射光束向左平移,该平移量为^[7]

$$d_1 = \frac{\sqrt{2}}{4} a \left| \frac{\cos \theta \sin(\theta - \alpha)}{\sin 22.5^\circ \cos \alpha} + \frac{\cos(45^\circ + \theta) \sin(\theta - \alpha)}{\sin 22.5^\circ \cos \alpha \cos(22.5^\circ + \theta)} \right|$$

$$\frac{\sin 22.5^\circ \cos \alpha - \cos \theta \sin(22.5^\circ + \theta)}{0.5 \sin 22.5^\circ \cos \alpha} \Big|$$

由于 θ 为微小量,且有 $\sin \theta = \sin \alpha$,所以 $\theta \approx n \cdot \alpha$,用泰勒级数展开法则可求得

$$d_1 \approx \left| 1.631 \left(1 - \frac{1}{n}\right) a \cdot \theta - 1.707 \cdot a \cdot \theta \right| = \left[1.707 - 1.631 \left(1 - \frac{1}{n}\right) \right] \cdot a \cdot \theta \quad (7)$$

该式即为五棱镜绕 O 点顺时针转动量 θ 与由此所产生的出射光束左移量 d_1 之间的量化关系表达式.

2 五棱镜扫描误差的补偿公式

因为已求得出射光束因棱镜平移而产生的移动量 d_2 ,且 d_1 与 d_2 方向相反,所以当 $d_1 = d_2$ 时,实际出射光束相对于理想出射光束的偏移量(扫描误差)即可抵消为零.

由于 $d_1 \approx [1.707 - 1.631(1 - (1/n))] \cdot a \cdot \theta$,
 $d_2 = R(1 - \cos \theta + \sin \theta) \approx R \cdot \theta$

所以,在满足 $d_1 = d_2$ 的条件下,可求得 R 与 a 、 n 之间的关系为

$$R \cdot \theta = [1.707 - 1.631(1 - (1/n))] \cdot a \cdot \theta$$

故有

$$R = [1.707 - 1.631(1 - (1/n))] \cdot a \quad (8)$$

以上关系表明,在图 3 情况下,当入射光束正中射入五棱镜时(假定五棱镜的最大入射口径为 a ,折射率为 n),如该棱镜绕着位于入射光轴延长线上且距入射光束在第一个反射面上的人射点之距离为 R 的一点做微小角度摆动时,出射光束不会产生扫描误差.

3 补偿原理的实现模型

根据上述误差补偿原理,可设计出符合该原理的光学平面扫描机构(如图 6).该机构的转动轴系

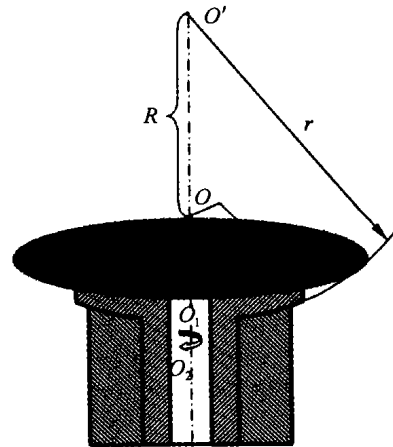


图 6 实现补偿原则的模型示意图
Fig. 6 Model realizing the compensating principle

是端面为球形支撑的圆柱轴系, 圆柱轴起定向作用, 可限制轴系的径向摆动; 球形支撑的作用是支撑整个转动体并定心, 也就是说, 即使整个轴系由径向摆动, 其轴心线也总是通过球形支撑的球心. 由于该机构的球心 O' 点即为补偿转动点, 因此轴系转动扫描光学平面时可实现扫描误差的补偿. 在使用过程中, 由于球面半径 r 及补偿距离 R 均保持不变, 所以即使轴系存在磨损, 也不会产生扫描误差. 这样, 当轴系转动时, 五棱镜即可扫描出高精度的光学平面. 基于同一原理, 也可设计出用于扫描垂直平面的机构.

4 结论

根据所研究的高精度基准平面建立方法, 从理论上解决了用五棱镜回转扫描建立高精度基准平面的问题. 这种方法在实际中应用于平面度测量时, 与传统的平面度测量方法相比, 具有以下优点:

1) 基准面精度高, 可实现高精度测量; 2) 基准面唯一, 测量结果唯一, 不存在因拟合基准平面算法不同而引起的同一组测量值所得测量结果不同的问题; 3) 易于实现自动化, 测量效率高; 4) 测量装置用途广泛, 可用于大平面的平面度测量.

参考文献

- 1 Temsamni A B, Vandenplas S, Biesen L V. Optimal model for the diffraction effect in the ultrasonic field of piston transducers. *Journal of Computational Acoustics*, 2001, **9** (2): 461~476
- 2 Gong Xiangdong, Li Jingzhen, Li Shanxiang, et al. Optical phased array beam deflector drive study. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 307~309
- 3 高立民, 罗长洲, 陈良益. 一种新型光电准直经纬仪. *光子学报*, 2003, **32**(5): 622~624
Gao L M, Luo C Z, Chen L Y. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32** (5): 622~624
- 4 Shoji Takechi, Kazuhiro Aoyama, Toshiharu Nomoto. Studies on the block positioning metrics system for the hull erection stage. *J Mar Sci Technol*, 2002, **15**(6): 158~165
- 5 房启勇, 施浣芳, 高洪尧. 直角棱镜平面反射衰减在激光光束诊断中的应用研究. *光子学报*, 2003, **32** (10): 1120~1124
Fang Q Y, Shi H F, Gao H Y. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32** (10): 1120~1124
- 6 安连生. *应用光学*. 北京: 北京理工大学出版社, 2002. 3~8
An L S. *Applied Optics*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. 3~8
- 7 Yu Dianhong, Sun Shangxiang. Scan error compensation of pentaprism for establishing reference plane. *Journal of Tool Engineering*, 2000, **34**(1): 37~39

Analysis on Method Establishing High Accuracy Datum Plane

Yu Dianhong^{1,2}, Li lin², Lu Bingheng¹

¹ School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

² School of Mechanical & Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048

Received date: 2004-05-08

Abstract Establishing datum plane is the base assessing surface parameter. It is important to set up perfect datum plane in engineering measurement as well as geometry parameters' shape and positional error inspection. In order to establish high precision laser scanning plane, the laser beam transmission is anatomized in the formation of the scanning plane. Based on the vector law of refraction in optics, the scanning error's academic formula is deduced. The essential principle on the error compensation is given. The academic formula is deduced which is used to compensate the error of the scanning equipment. According to the academic formula, the model of the scanning equipment is designed. The analysis indicates that when the plane is set up by means of laser scanning equipment, scanning error is unavoidable; if the error were not compensated, it would come into the datum optical plane and would influence on the accuracy of the datum plane, thereby the parameter evaluation accuracy would be played down; by means of the error compensation formula, the scanning error can be compensated. The research is of theoretical significance to establish a high precision scanning datum plane.

Keywords Datum Plane; Scanning Equipment; Error; Pentagonal Prism; Compensate



Yu Dianhong received his B. S. and M. S. degrees from Shannxi Institute of Mechanical Engineering, China, in 1985 and 1988, respectively, and his Ph. D. degree from Xi'an University of Technology, China, in 2001. He is an associate professor in the School of Mechanical and Instrumental Engineering at Xi'an University of Technology. Currently, he is engaging the postdoctoral study in the School of Mechanical Engineering at Xi'an Jiaotong University. His current research interests include stereolithography, MEMS and photoelectric detection.