

文章编号 1004-924X(2009)02-0286-06

激光光束入射角度变化对角锥棱镜测量精度的影响

刘万里^{1,2}, 欧阳健飞¹, 曲兴华¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:为了掌握激光束入射角变化对激光跟踪仪中角锥棱镜测量精度的影响规律,详细分析了角锥棱镜的工作原理和反射特性,计算了角锥棱镜在不同入射角下的实际有效反射面积,并建立了角锥棱镜有效反射面积随光束入射角变化的理论公式,进而得到角锥棱镜测量精度随光束入射角变化的规律。实验结果表明:角锥棱镜测量精度随入射角增大而减小,在最大允许入射角处发生突变。在最大允许入射角为 $\pm 35.26^\circ$ 时,其测量误差达到 0.050 mm ;而在 $\pm 20^\circ$ 内时,其测量精度优于 0.010 mm ;入射角在 $\pm 15^\circ$ 内其测量精度最高,稳定性最好。所得结论证明了当角锥棱镜入射角在 $\pm 20^\circ$ 内工作时能满足了激光跟踪仪的测量精度要求,这对角锥棱镜设计和实际测量工作具有指导意义。

关键词:角锥棱镜;测量精度;入射角;有效反射面积;激光跟踪仪

中图分类号:TH703 文献标识码:A

Effect of incident laser beam angle varying on cube corner retro-reflector measurement accuracy

LIU Wan-li^{1,2}, OU YANG Jian-fei¹, QU Xing-hua¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to describe the relationship between the incident angle of Cube Corner Retro-reflector (CCR) and the measurement accuracy of CCR used in laser tracker system, the working principle and reflective characteristic of CCR were analyzed. A novel approach was proposed to determine the effective reflection area of CCR with an arbitrary incident angle and then the formula of ray cross section of CCR with varying incident angle was derived according to the effective reflection area. Accordingly, the relationship between CCR measuring accuracy and incident angle was established. The experimental results demonstrate that the CCR measuring accuracy reduces as the increase of incident angle, the CCR measuring error is the largest when the maximal incident angle is reached. The measuring error of CCR at maximal incident angle of $\pm 35.26^\circ$ is 0.050 mm , but the measuring accuracies of CCR are better than 0.010 mm when the incident angle are within $\pm 20^\circ$, and the measuring accuracy and the stability are best only when the incident angles are within $\pm 15^\circ$. The results show that

收稿日期:2008-02-19;修订日期:2008-03-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50475038)

CCR can maintain the manufacture specifications of laser tracking system only when the incident angles are within $\pm 20^\circ$, which provides a very useful guidance for design and application for CCR.

Key words: Cube Corner Retro-reflector (CCR); measurement accuracy; incident angle; effective reflection area; laser tracker

1 引言

角锥棱镜是一种高精度的光学元件,广泛应用于激光测量、激光通信和光学变换等领域。激光跟踪系统所用目标反射器主要由角锥棱镜固定在一个球体内组成^[1-2]。其最大的特点是:当一束平行光垂直于底面入射,依次经过 3 个直角反射面的反射后,从与入射方向相反的方向出射;且当棱镜绕过其顶点的折射面法线转动时,不会引起出射光线方向的变化,而且光线在棱镜内的光程是一个常量。但是,随着入射光束与底面夹角的改变,反射后出射光束会导致激光跟踪系统测量精度明显降低,其原因是角锥棱镜反射器的有效反射面积随光束入射角增大而减小,进而影响其测量精度。目前,多数文献通常只给出了光束垂直入射角锥棱镜时的激光跟踪系统的测量精度,并未详细讨论角锥棱镜反射器光束入射角度变化对激光跟踪系统测量精度和接收功率的影响^[3-4]。本文通过分析角锥棱镜反射器有效反射面积和光束入射角的关系,推导出角锥棱镜反射器测量精度随入射角度变化的关系,通过实验得到了激光跟踪系统测量精度随入射角变化的规律。本工作对角锥棱镜反射器设计和实际测量工作具有重要的指导意义。

2 角锥棱镜反射特性

2.1 角锥棱镜反射特性矢量表示

如图 1 所示:激光跟踪系统所用目标反射器由角锥棱镜固定在一个球体内,球心与角锥棱镜反射器顶点重合,由 3 块两两垂直的空心直角反射镜胶合而成。它的光学原理是:从入射面以任意方向入射的光线,依次经过 3 个直角反射面的反射后,从与入射方向相反的方向出射,入射至空心角锥棱镜反射器中心的光则沿原路返回。当棱镜绕过其顶点的折射面法线转动时,出射光线不变,且光线在棱镜内的光程是常数^[5-6]。



图 1 角锥棱镜反射器

Fig. 1 Cube corner retro-reflector

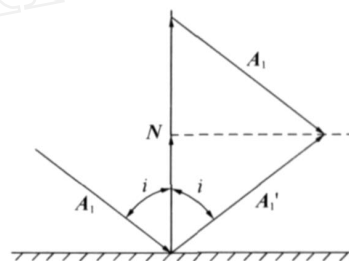


图 2 反射定律矢量图

Fig. 2 Vector diagram of reflection law

如图 2 所示,设 A_1 、 A_1' 、 N 分别为入射光线、反射光线和法线单位矢量,则几何关系有^[7]:

$$A_1 + (-A_1') = -2(A_1 \cdot N)N, \quad (1)$$

于是对于反射光线有:

$$A_1' = A_1 - 2(A_1 \cdot N)N, \quad (2)$$

如图 3 所示,以空心角锥棱镜反射器的 3 直角边为直角坐标系 $O-XYZ$,入射光线 A_1 经过 3 次反射后,最后从角锥棱镜反射器中出射。设 3 条直角边长度为 1,则该光线依次经过的 3 次平面的法线方向单位矢量为: $N_1 = -i, N_2 = -j, N_3 = -k$ 。令 $A_1 = -ai - bj - ck$,由前面反射定律的矢量表达式知入射光线 A_1 经过面 反射有:

$$A_2 = A_1 - 2(A_1 \cdot N_1)N_1 = ai - bj - ck, \quad (3)$$

同理,光线经过面 和 反射有:

$$A_3 = A_2 - 2(A_2 \cdot N_2)N_2 = ai + bj - ck, \quad (4)$$

$$A_4 = A_3 - 2(A_3 \cdot N_3)N_3 = ai + bj + ck, \quad (5)$$

由式(5)可以看出入射光线与出射光线反向且平行。

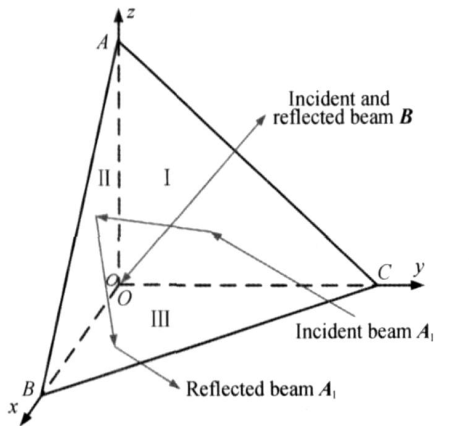


图 3 反射定律矢量图

Fig. 3 Vector diagram of reflection law

2.2 角锥棱镜有效反射面积

由上述的角锥棱镜的特点可知,当光束以垂直于面 ABC 方向入射至角锥棱镜时,其入射点不同,在棱镜内部反射顺序也不尽相同,但最终将在由顶点 O 所引的与入射光线相平行的对称轴的对称点上出射。根据几何光学的作图原理^[8-9],求得当光束沿垂直面 ABC 方向入射时,其反射光束的区域为一正六变形 $abcdef$,如图 4 所示的阴影部分。其特征是,以面 ABC 的中心为对称中心,入射光束和出射光束对称。实际上,只有在入射光束和出射光束交叠区域内,即正六变形 $abcdef$ 区域内,入射的光束才能在角锥棱镜内部经三次反射后再由面 ABC 平行反向出射,而在此区域之外入射的光线不能被反射面三次反射。因而,在此区域之外的入射光线将不能被有效地返回,称该阴影区域为角锥棱镜的有效反射区,设角锥棱镜的直角边为 l ,可以求出角锥棱镜的有效反射面积为:

$$S_{\max} = \sqrt{3}/3, \quad (6)$$

角锥棱镜顶点 O 到面 ABC 的垂足 O' 的距离为 $d = l/\sqrt{3}$,当入射光线在面 ABC 入射时,其出射光线为倒置的面 $A'B'C'$,通过光线的孔径为面的内切圆。因圆心为 O' ,半径 $r = l/\sqrt{6}$,故其最大接收角为:

$$= \arctan \left(\frac{r}{d} \right) = 35.26^\circ. \quad (7)$$

当入射角度超过 35.26° 时,总有一部分光线

在一个或两个反射面折射,造成光能损失增大,严重影响了激光跟踪测量系统的测量精度。

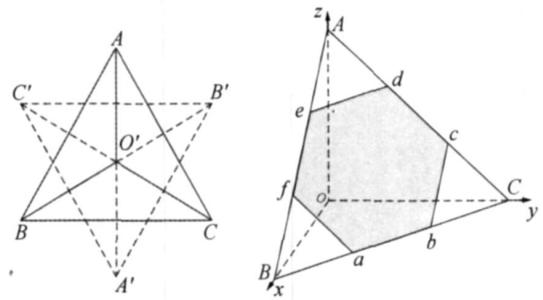


图 4 角锥棱镜有效反射面积

Fig. 4 Effective area of CCR

3 入射角对角锥棱镜测量精度的影响

求角锥棱镜用在激光跟踪仪中光束入射角度变化对其测量精度的影响规律,实际上就是求当光束从角锥棱镜底面入射时将以多大面积出射。

激光跟踪仪测距方程的一般形式为^[10]:

$$P_r = \frac{P_t R^4}{16 \tau_1 \tau_2 D^2}, \quad (8)$$

式中, P_r 为接受激光功率; P_t 为发射激光功率; λ 为发射激光的波长; S 为角锥棱镜有效的反射面积; R 为角锥棱镜的接受孔径; τ_1 为大气传输系数; τ_2 为光学系统传输系数; D 为激光跟踪仪到角锥棱镜中心的距离。

由式(8)可以看出,角锥棱镜有效反射面积严重影响激光跟踪仪测距的接收功率,进而影响了激光跟踪仪的测量精度,而角锥棱镜有效反射面积与光束入射角有关。

3.1 光束入射角对角锥棱镜测距的影响

角锥棱镜只在 3 种情况下形成定向逆反射:

- (1) 当光束在角锥棱镜内部发生 3 次反射时,可形成定向逆反射;
 - (2) 当光束沿某一垂直面入射时,此时角锥棱镜相当于二面角锥棱镜反射器,在角锥棱镜中只发生 2 次反射,也可形成定向逆反射;
 - (3) 当光束沿着某一直角边入射时,此时光束只在某一相应的垂直面内发生 1 次反射,也可形成逆反射。
- 下面根据不同光束的入射情况,推导角锥棱镜的有效反射面积的计算公式。

当光束斜入射于底面 ABC 时,其倾斜角可用 θ 表示,其中 θ 表示入射光线与底面法线的夹角, θ' 表示入射光线在底面上的投影与角锥棱

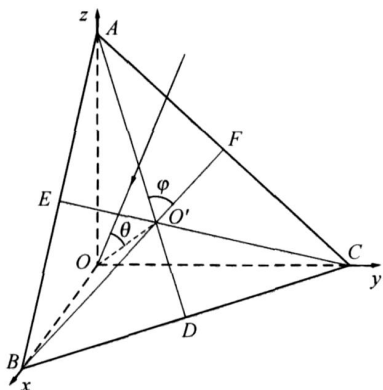
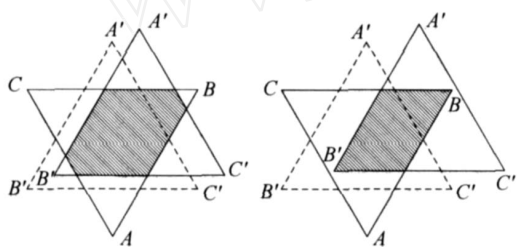


图 5 入射角度与角锥棱镜入射面几何关系图

Fig. 5 Relationship between CCR incident plane and beam incident angle

镜顶点 O 在底面上的投影 O 和 A 点(或 B 点,或 C 点)的连线间的夹角。如图 5 所示,入射光束的方位角以底面重心为中心旋转 2 角度,有效反射面积呈现周期变化,周期数为 3,且每个周期又是对称的。因此,这里只需讨论 /3 范围内的有效反射面变化情况。



(a)有效反射面为六边形 (b)有效反射面为四边形
(a)Effective reflection area in hexagon (b)Effective reflection area in quadrilateral

图 6 光束斜入射时的有效反射面

Fig. 6 Effective reflection areas of varying incident angles

当 和 满足关系式 $0 < \arctan(1/2\sqrt{2}\cos\theta) < 45^\circ$ 时,角锥棱镜的有效反射面为六边形,如图 6(a)所示,则角锥棱镜有效反射面积 可表示为:

$$= \frac{(3\cos^2\theta - 2)^2}{3\cos^2\theta}, \quad (9)$$

当 增大,且满足 $\arctan(1/2\sqrt{2}\cos\theta) > 45^\circ$ 时,角锥棱镜的有效反射面为四边形,如图 6(b)所示,其 可表示为:

$$= \frac{4\cos^2\theta}{27} \left[\sqrt{2} + 2\tan\theta \sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \right]^2 \cdot \left[\sqrt{2} - 2\tan\theta \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right]^2, \quad (10)$$

当光束沿某一直角面入射,且 和 满足 $\theta = \arctan(1/\sqrt{2}\cos\theta)$ 时,设入射光线和垂直

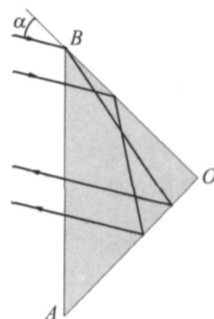


图 7 入射角度与直角边 OB,OA 的几何关系

Fig. 7 Relationship between incident angle and side OB, OA

反射面 OBC 的夹角为 ,如图 7 所示,得到 与角锥棱镜有效反射面积 的关系为:

$$= \begin{cases} \sin^2 & 0 < \theta < 45^\circ \\ \cos^2 & 45^\circ < \theta < 90^\circ \end{cases}, \quad (11)$$

当光束沿某一直角边垂直入射于某一直角面,角锥棱镜已不是 3 次反射,而是单次反射光束,其有效反射面积为单个垂直面的面积,则 为

$$= 0.25. \quad (12)$$

4 实验

如图 8 所示,本文利用 FARO SI 型激光跟踪仪和海克斯康 G9128 三坐标测量机分别对水平和垂直光束入射角变化时角锥棱镜测量精度进行了实验。实验中,首先将 1.27 cm(0.5 in)的角锥棱镜安装在三坐标磁性球座内,保证角锥棱镜与激光跟踪仪的跟踪头保持同一高度和光学中心位置不动。然后使激光垂直入射到角锥棱镜反射器底面上,令三坐标测量机依次顺时针、逆时针带动角锥棱镜反射器绕水平轴和垂直轴旋转,每次旋转角度为 5°,直至激光跟踪仪不能接收到反射光束为止,并分别记录每次激光跟踪仪测量的坐标值。

测量结果如图 9 和图 10 所示,在最大允许入射角 $\pm 35.26^\circ$ 时,其测量误差达到 0.050 mm,且测量误差变化很大,测量误差达到 0.030 ~ 0.050 mm,甚至成线性关系变化。而当入射角在 $\pm 20^\circ$ 以内时,可获得较好的测量精度,测量误差均在 0.010 mm 以下。入射角在 $\pm 15^\circ$ 测量稳定

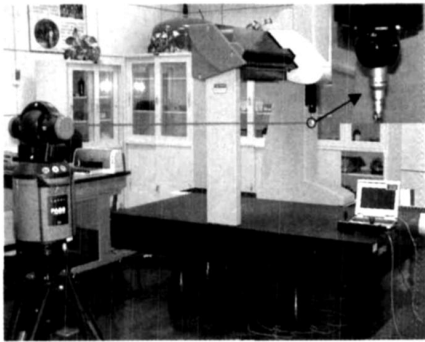
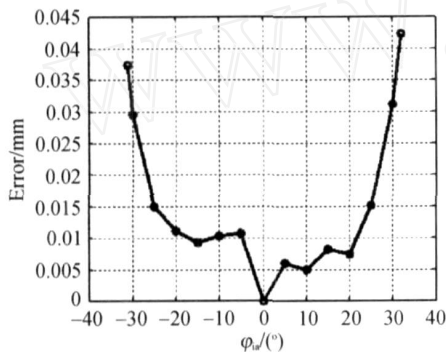
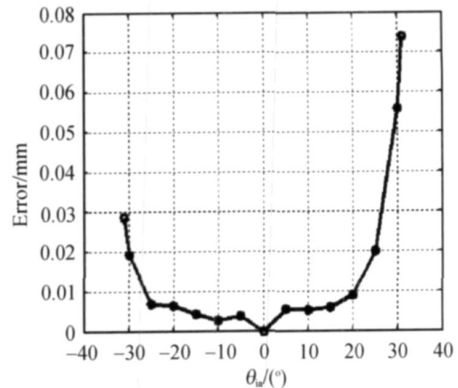


图 8 实验布置

Fig. 8 Experimental layout

性最好,测量精度高,获得了很高的测量精度。所以角锥棱镜入射角变化对测量误差具有较大影响。因此,在现场测量时对工作人员的熟练程度要求较高,只有保证角锥棱镜的入射角在 $\pm 20^\circ$

图 9 水平入射角 ϕ_w 变化测量误差曲线Fig. 9 Measured results by fixed angle ϕ_w 图 10 垂直入射角 θ_w 变化测量误差曲线Fig. 10 Measured results by fixed angle θ_w

内,才能获得更好的测量精度,高质量的完成测量工作。

5 结论

本文给出了光束入射角度变化对用于激光跟踪仪的角锥棱镜测量精度的影响规律。实验结果表明:角锥棱镜测量精度随入射角增大而减小,在最大允许入射角处发生突变。在最大允许入射角为 $\pm 35.26^\circ$ 时,其测量误差达到 0.050 mm;而在 $\pm 20^\circ$ 范围内时,其测量精度优于 0.010 mm,且入射角度在 $\pm 15^\circ$ 范围内其测量精度最高,稳定性最好。所以用角锥棱镜反射器进行跟踪测量时,要考虑入射角的变化对测量精度产生的影响。本文所得结论对角锥棱镜反射器设计和实际测量工作具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] LIU W L, OU YANG J F, QU X H, *et al.*. Misalignment error calibration of faro retro probe for laser tracker system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(5) :281-283.
- [2] RALPH K. Output polarization states of a corner cube reflector irradiated at non-normal incidence [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39 (8) : 1485-1495.
- [3] TAN Y D, ZHANG S L, LIU J H. Displacement self-sensing align-free He-Ne laser based on hollow cube corner prism folding cavity [J]. *Sens. Actuators A: Phys*, 2007, 11(1) :1-5.
- [4] RALPH K. Stokes polarization vector and Mueller matrix for a corner-cube reflector [J]. *Optics Communications*, 2004, 240(1) :39-68.
- [5] YUAN J H, CHANG S J, LI S, *et al.*. Design and fabrication of micro-cube-corner array retro-reflectors [J]. *Optics Communications*, 2004, 209 (1) : 75-83.
- [6] CAI Y M, FANG Z J, CHEN G, *et al.*. Effective reflection area of a cube corner retro-reflector [J]. *Chinese Journal of Lasers B*, 2000, 9(5) :429-433.
- [7] 陈浩, 谭久彬. 光束入射角对角锥合作目标激光测距的影响 [J]. *光电子·激光*, 2006, 17(8) :986-988.

CHEN H, TAN J B. Effect of beam incident angles on trihedral corner reflector laser ranging [J].

- Journal of Optoelectronics Laser*, 2006, 17 (8) : 986-988. (in Chinese)
- [8] 陆振刚, 谭久彬, 刘永猛, 等. 倾斜入射条件下衬底对金属网栅屏蔽特性影响 [J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3) : 360-367.
- LU ZH G, TAN J B, LIU Y M, *et al.*. Influence of substrate on shielding effectiveness of metallic mesh under oblique incidence condition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (3) : 360-367. (in Chinese)
- [9] 邵兵, 孙立宁, 曲东升, 等. 自由空间光通信 ATP 系统中精瞄偏转镜的设计 [J]. 光学 精密工程, 2006, 14(1) : 43-47.
- SHAO B, SUN L N, QU D SH, *et al.*. Design of fine pointing tip/tilt mirror of ATP system for free space optical communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1) : 43-47. (in Chinese)
- [10] 樊叔维. 二元光栅衍射特性的矢量理论分析 [J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3) : 30-36.
- FAN SH W. The vector theory analysis of binary gratings diffraction characteristics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3) : 30-36. (in Chinese)

作者简介:



刘万里 (1980 -), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事精密测试技术与仪器方面的研究。E-mail: liuwanni218@126.com



欧阳健飞 (1962 -), 男, 四川三台人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事精密测试技术与仪器方面的研究。E-mail: ouyang@hpu.edu.cn



曲兴华 (1956 -), 男, 山东莱州人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事精密测试技术与仪器方面的研究。E-mail: quxinghua@tju.edu.cn

下期预告

SRAM、ROM 的总剂量辐射效应及损伤分析

李豫东^{1,2}, 任建岳¹, 金龙旭¹, 张立国¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

为了研究大规模集成电路存储器的总剂量辐射效应, 分别对 SRAM、ROM 两种存储器进行了⁶⁰Co 总剂量辐射实验。结果表明这两种器件是对总剂量辐射效应敏感的器件, 失效阈值在 10 ~ 15 krad (Si) 之间。研究 SRAM、ROM 的总剂量辐射效应, 只对数据存取功能进行测试是不完善的, 器件的静态功耗电流与动态功耗电流也是总剂量辐射效应的敏感参数, 应该作为总剂量辐射效应失效阈值的有效判据。根据器件结构与实验结果, 分析了 SRAM、ROM 器件的损伤机理。