

落体旋转对绝对重力仪位移测量影响研究^{* 1}刘延飞^{1,2)} 邹彤^{1,2)} 郭唐永^{1,2)} 张亿^{1,2)} 陈玉秀^{1,2)}(1) 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉 430071
(2) 中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地,武汉 430071

摘 要 研究因落体旋转而造成落体位移测量的两种类型的误差:反射器折射率误差和反射器绕落体质心发生旋转造成的误差,并对两种类型的误差与反射器尺寸、落体旋转角速度的关系进行了研究阐述。

关键词 绝对重力仪;反射器;落体;旋转;误差

中图分类号:TH762

文献标识码:A

EFFECT OF DISTANCE BY ROTATION OF FALLING OBJECT
IN ABSOLUTE GRAVIMETERLiu Yanfei^{1,2)}, Zou Tong^{1,2)}, Guo Tangyong^{1,2)}, Zhang Yi^{1,2)}, and Chen Yuxiu^{1,2)}(1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071
(2) Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, Wuhan 430071

Abstract Two types of errors in the measured distance of the test masses are studied, when the masses of absolute gravimeters has been rotate in the freefall. The one is caused by refractive indices of the retro reflector, the other is due to the retro reflector rotate by the center of mass. The relationship between both errors and the size of the reflector and the rotation of the test mass are researched.

Key words: absolute gravimeter; retro reflector; falling mass; rotation; error

1 引言

激光干涉绝对重力仪中用于计算绝对重力加速度 g 的时间-位移信息对的位移是做自由落体运动的测试块(即落体)质心的位移。为了对落体质心位移进行精密测量,落体由光学反射器和壳体组成^[1,2]。其中光学反射器对测量光束进行反射使之与参考光束发生干涉,得到落体质心的位移;壳体用于保护反射器以及调整落体质心。

释放瞬间,落体的支撑点不可能严格同步脱开,落体所受支承反作用力的合力不通过落体质心,在

惯性空间中做自由落体运动时绕其质心产生一个旋转角速度^[3]。由于落体质心位移根据激光干涉仪两光束的光程差得到,落体转动时光学反射器与落体质心的运动不相同,使测量的位移与落体质心的实际位移不相等,从而对绝对重力仪的测量精度产生影响。

本文研究因落体旋转而造成的落体位移测量的两种类型的误差:反射器折射率误差和反射器绕落体质心发生旋转造成的误差,并在测量结果中进行校正,以提高绝对重力仪的测量精度。

* 收稿日期:2012-10-23

基金项目:科技部高精度绝对重力仪研究与产业化示范项目(2012YQ100225)

作者简介:刘延飞,男,1988 年生,硕士研究生,研究方向:观测技术。E-mail:liuyanfei2040@163.com

2 光学反射器工作原理

落体的光学反射器的工作面通常如图 1 所示。其中, O 为反射器顶点, AOB 、 AOC 、 BOC 为反射面且两两垂直, 等边三角形 ABC 是入射面。反射器有角隅棱镜和角隅反射腔两种。反射器为角隅棱镜时, 光线在棱镜的反射面发生全反射; 若反射面为三面镜子, 且反射器内部无光学介质, 此时反射器为角隅反射腔, 光线在反射面发生镜面反射。计算光路时后者可以看做是角隅棱镜介质折射率为 1 时的情形。入射光满足反射器孔径限制条件时, 出射光与入射光平行反向, 且与入射角无关^[4]。本文研究都是在光线入射到有效反射区 $EFGHIJ$ ^[5], 且满足反射器全反射的孔径限制的条件下的进行的^[6]。

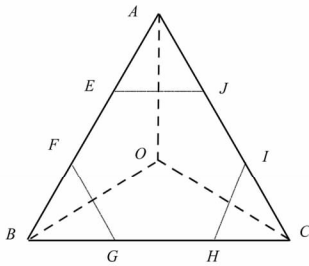


图 1 光学反射器

Fig. 1 Retro reflector

3 落体旋转误差

落体发生旋转时对落体质心位移测量的误差有两种类型: 由反射器的折射率决定; 反射器绕落体质心旋转产生。值得注意的是: 落体旋转还会使棱镜顶点在水平方向上发生偏移, 由于光线的入射点和出射点关于棱镜顶点具有对称性, 而入射光线的空间位置不变, 所以出射光线也将在水平方向上发生偏移, 从而使干涉光束的衬比度变差。

3.1 反射器折射率误差

落体旋转会引起光线入射角发生变化, 为计算折射率对测量光束的影响, 将下落过程中反射器旋转前后的顶点重合。图 2 为以光线垂直入射为初始状态反射器旋转的情形, 其中 O 为反射器顶点, D 、 D' 、 Q 为旋转前的入、出射点及二者的中点, D_1 、 D'_1 、 Q_1 为旋转后的入、出射点及二者的中点, α 为反射器旋转的角度, β 为旋转后入射光在入射面的折射角, OQ' 为旋转后反射器的高。

由光线在反射器内的行进长度等于顶点到入、出射点中点距离的两倍^[7,8], 当反射器顶点重合时, 光线在空间中的光程增量为:

$$\Delta x = 2nh\cos\beta - 2h\cos\alpha + 2h - 2nh \quad (1)$$

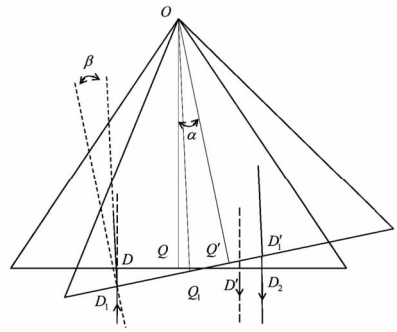


图 2 落体旋转前后的光束变化

Fig. 2 Change of the ray path by the rotation of retro reflector

根据反射器的光学特性, 出射光线在水平方向上的偏移量为:

$$|D'D_2| = 2h\cos\alpha(\tan\alpha - \tan\beta) \quad (2)$$

式中, h 为反射器高 OQ 的长, n 为反射器的折射率。

当 $n=1$ 时, $\Delta x=0$ 。即: 当反射器为角隅反射腔时, 反射器不存在折射率误差; 此时由于 $\alpha=\beta$, 所以 $|D'D_2|=0$, 即: 出射光不发生水平偏移。

3.2 反射器绕落体质心旋转误差

反射器绕落体质心旋转, 改变入射角的同时, 叠加在反射器自由落体运动上的旋转运动使反射器与落体质心的运动状态不再保持一致。图 3 中, O 为反射器顶点, M 为落体质心, γ 为落体在惯性空间中旋转的角度。以质心 M 点为原点建立球面坐标系, O 点坐标可以表示为 $\rho(r, \theta, \varphi)$, 适当选取坐标系可以使角 φ 的初始值为 0, 则旋转前后 O 点坐标分别为 $\rho_0(r, \theta_0, 0)$ 、 $\rho_t(r, \theta_0 + \omega_1 t, \omega_2 t)$ 。由于自由落体运动过程中, 落体在惯性空间中不受除重力外的其他力, 所以 ω_1 、 ω_2 不变。

根据球面坐标系与直角坐标系的转换关系, 反射器顶点因落体旋转而产生的位移在水平方向和竖直方向的分量分别为:

$$\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} = r[\sin^2(\theta_0 + \omega_1 t) + \sin^2\theta_0 -$$

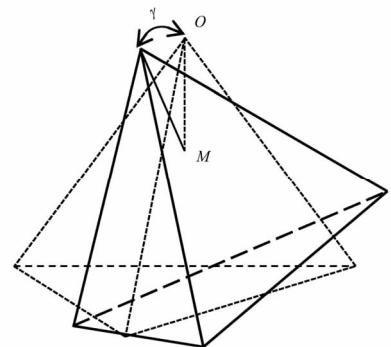


图 3 反射器绕落体质心的旋转

Fig. 3 Retro reflector rotate about center of the mass

$$2\sin(\theta_0 + \omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \sin\theta_0]^{1/2} \tag{3}$$

$$\Delta z_t = r\cos(\theta_0 + \omega_1 t) - r\cos\theta_0 \tag{4}$$

式(3)决定了反射器顶点在水平方向的偏移量;式(4)给出了反射器顶点在竖直方向上相对质心的位移,其对测量光束的光程影响为 $\Delta z_t n$ 。 Δz_t 符号为正时,测量值比落体质心实际位移小;符号为负时,测量值比落体质心实际位移大。

3.3 误差确定

自由落体运动过程中,落体在竖直平面 Γ 内的旋转角速度分量为 ω_1 ,在平面 Γ 内入射面法线 \vec{N} 与竖直方向夹角的变化速率为 ω_1 。设测量开始时入射角为 α_0 ,将其正交分解为平面 Γ 内的角 α_1 和垂直于平面 Γ 的竖直平面内的角 α_2 。则 $\alpha_0 = (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)^{1/2}$ 。所以 $\alpha_1 = \sqrt{(\alpha_1 + \omega_1)^2 + \alpha_2^2}$

由于 \vec{N} 的旋转角速度在水平面内的分量对 θ_t 没有影响,所以,落体下落过程中反射器绕质心旋转时,式(1)重写为:

$$\Delta x_t = 2nh\cos\beta_t - 2h\cos\alpha_t + 2h - 2nh \tag{5}$$

其中, $\sin\alpha_t = n\sin\beta_t$;脚标 t 表示随时间变化。

落体下落过程中因旋转而产生的两种类型的误差最终都会形成落体质心位移的误差。由于测量光束在空间中的总光程增加时测量值比落体质心的实际位移小。最终转换成位移信息的误差为:

$$\Delta S = \frac{1}{2}(\Delta x_t + \Delta z_t)$$

ΔS 为测量值比落体质心位移减小的量。

4 结论

激光干涉绝对重力仪落体旋转引起两种类型的位移误差。光学反射器相对落体质心旋转引起的误差直接叠加在落体位移信息的测量结果中。光学反射器随落体旋转时,角隅反射腔的介质折射率为 1,对落体位移不产生折射率误差;而角隅棱镜则会产生一个与介质折射率和激光入射角相关的位移误差。通过对下落过程中落体旋转参数的监测,以及对反射器的尺寸标定,可以对位移误差进行估计,并在测量结果中进行校正,从而提高了绝对重力仪的测量精度。

参 考 文 献

1 吴琼. 高精度绝对重力仪关键技术研究[D]. 中国地震局地球物理研究所,2011.
2 胡华,等. 新型高精度绝对重力仪[J]. 物理学报,2012,61(9):1-8.
3 考隆凯维奇,萨波列夫,杜布尼晓夫. 激光干涉量度学[M]. 北京:科学出版社,1998.
4 匡萃方,冯其波,刘欣. 用矢量方法分析角锥棱镜的反射特性[J]. 应用光学,2004,25(2):25-27.
5 Eckhardt H D. Simple model of corner reflector phenomena[J]. Appliedoptics,1971,10(7):1 559-1 566.
6 袁景和,等. 微正方形角锥棱镜定向发射特性[J]. 光学学报,2000,20(7):973-978.
7 魏光辉,等. 四面体光学棱镜[J]. 北京理工大学学报,2003,23(4):428-432.
8 李宏棋. 角隅和直角内圆锥面全反射激光谐振腔[D]. 华中科技大学,2007.

(上接第 60 页)

2 刘静,等. 机载激光雷达扫描揭示海原断裂带微地貌的精细结构[J]. 科学通报,2013,58(1):41-45.
3 Zielke Olaf, et al. Slip in the 1857 and earlier large earthquakes along the Carrizo Plain, San Andreas Fault[J]. Science,2010,327:1 119-1 122.
4 李峰,等. 机载 LiDAR 点云城市建筑物面片的提取研究[J]. 大地测量与地球动力学,2013,(2):124-127.
5 Ackermann Friedrich. Airborne laser scanning: Present status and future expectations[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,1999,54:64-67.

6 Baltsavias E P. Airborne laser scanning: Existing systems and firms and other resources[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,1999,54:164-198.
7 李树楷,刘彤,尤红建. 机载三维成像系统[J]. 地球信息科学,2000,(1):23-27.
8 程垒. 国产 AOE 机载激光雷达飞行作业技术研究[D]. 山东科技大学,2008.
9 李密,等. 高精度激光脉冲测距技术[J]. 红外与激光工程,2011,40(8):1 469-1 473.
10 朱晓,杨克成,李再光. 机载激光测深试验[J]. 中国激光,1998,A25(5):470-472.