

高精度激光倾角测量技术研究*

乐开端¹ 曹建安¹ 周翔¹ 张文定²

(1 西安交通大学激光红外研究所,西安 710049)

(2 西安华腾光电有限责任公司,西安 710043)

摘要 本文提出了一种高精度激光电子二维倾角测量技术,该技术利用液体表面多次光反射,将倾角变化转换成激光光斑的位移,并通过多次光学反射实现光学放大,从而实现了倾角和倾角变化的高精度测量.利用本技术实现的倾角测量仪器具有测量精度高、体积小等优点,经过标定试验系统测量精度达到2.5".高精度激光电子二维倾角测量系统可广泛应用于水坝安全监测工程、各种建筑和检测领域.

关键词 倾角测量;PSD;大坝安全监测

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

0 引言

倾斜角传感器可广泛应用于工业生产、国防科技、建筑安全等领域.目前倾斜角传感器多采用重力摆的结构.主要技术是利用新型SMR敏感元件,将倾斜角度的变化转换成电信号输出.另外一种倾角测量采用电感测量传感器,用于确定可以相对于固定外壳移动的物体的位置,从而实现倾角测量.另外一类电磁式倾角传感器由于其原理上限制,其体积和测量精度相矛盾,系统结构复杂、易受电磁干扰.德国霍斯特塞德尔两合公司的发明特征在于,移动体包括测量传感器,该传感器产生在限制区域上延伸的交变磁场;交变磁场穿过至少一个与外壳连接的导体回路并沿测量长度延伸.通过电路对正向和反向线路之间的电压差值求平均值并将其馈送到输出.电感传感器用于测量固定外壳和轴之间的角度.但这类倾角测量方法其测量精度均低于30".满足不了高精度倾角测量的要求^[1-4].本文提出的激光高精度倾角测量技术利用液面自动安平原理,加上多次反射放大,解决了上述技术的缺点,实现了高精度倾角测量.

1 测量原理

装置的基本原理是利用液体表面在重力作用下平衡时可形成绝对水平面,利用该水平面或其漂浮物表面一次或多次反射折射来实现光学位移放大,从而实现高精度倾角测量.系统原理示意图如图1,光源发出的光经过光学系统准直后入射到液体表

面上,液体表面与一反射镜构成多次反射光学系统,该光学系统对反射面的角度变化形成多次反射放大,并将角度变化转换成光点的位置变化,通过PSD上光点的位置变化信号输出,从而解调出反射面的角度变化.上反射面与测量装置固定,由于下反射面是漂浮于液面上的反射镜,根据重力原理可知道下反射面始终是保持水平的,因此只要得到有上表面的变化信号,就可测量其倾角或者倾角变化.

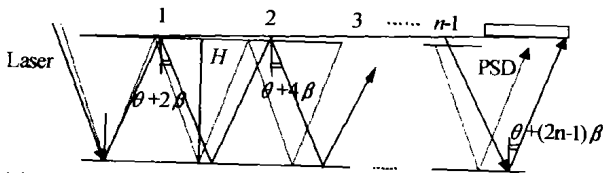


图1 光路原理图

Fig.1 Principle diagram of inclination angle measurement

利用反射定律、光路结构三角关系可得到光点在光电传感器(如PSD、CCD等)上的位移D与倾角beta的关系为

$$D = \sum_{j=1}^{j=n-1} 2H \tan(\theta + 2j\beta) + H \tan(\theta + (2n-1)\beta) - (2n-1)H \tan(\theta) \quad (1)$$

激光入射光点至PSD接收光点的位置距离为

$$L = 2nH \tan(\theta) \quad (2)$$

如图1所示,上式中n表示下表面反射光反射次数.H为上下反射表面的间距.theta为入射光源与重力方向间的夹角.

式(1)决定测量系统的分辨率,式(2)决定了测量仪器的尺寸大小.式(1)一共有四个参数H、n、theta、beta,其中theta相对固定保持不变,beta为其变化量.n和H也在设计生产时被唯一确定,而函数D可由PSD得到的信号中经过处理后得到,因此目标参数beta亦可被唯一确定.此beta值也就是本文想要获取的大坝水平倾角度数,比较以前的记录,就可以得到倾角的变化曲线.

*国家自然科学基金(编号:50275115)、西安交通大学行动计划项目资助

Tel:029-82683733 Email:yuekd@263.net

收稿日期:2003-10-03

2 倾角测量实验

2.1 系统结构

高精度激光倾角测量具体实施原理结构框图如图 2. 腔体装的液体上漂浮一块镀有反射膜的反射镜, 这样入射光相对腔体不变, 由于重力的作用, 液体的表面相对腔体随着倾角的变化而变化. 通过激光出射角度的变化可以测量出液体表面的倾斜度, 从而得出被测物体的倾斜角. 如图所示, 上玻璃板用于液体的密封, 其下表面镀的反射薄膜与液面上的反射镜配合也起到光学放大的作用. 激光器选用半导体激光器, 通过聚焦准直, 以适应 PSD 光电器件的要求. PSD 电信号输出至信号处理电路. 先经过放大电路将信号放大, 经过模数转换由单片机进行计算和通讯处理, 将测量出的角度信号传向远方进行显示和用于控制.

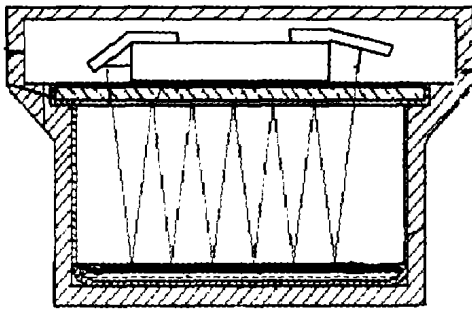


图 2 激光倾角测量装置的原理图
Fig. 2 Diagram of inclination angle measurement instrument

2.2 信号处理

由 PSD 光电器件的原理得到, 照射在 PSD 器件上光斑的重心坐标 D_x 、 D_y 为^[5]

$$\frac{(X_2 + Y_1) - (X_1 + Y_2)}{X_1 + X_2 + Y_1 + Y_2} = \frac{2D_x}{L} \quad (3)$$

$$\frac{(X_2 + Y_2) - (X_1 + Y_1)}{X_1 + X_2 + Y_1 + Y_2} = \frac{2D_y}{L} \quad (4)$$

式中 X_1, X_2 和 Y_1, Y_2 为 PSD 上每个电极的输出电流, L 为光敏面的尺寸. L 一经选定, 产品型号即可确定. 那么 D_x, D_y 的数值容易得到, 代入式(1)即可得到倾角 β_x, β_y . 信号中值滤波及上述运算由单片机完成.

3 精度分析

如图 3, 系统设计 $H = 50 \text{ mm}$, $n = 6$ 次, $\theta = 8^\circ$ 时, 由计算机仿真得到 β 在 0 到 10 秒之间的变化曲线为一条直线, 由此可知 D 与 β 的线性度较好. 图 4 为 $H = 50 \text{ mm}$, $n = 6$ 次, $\theta = 8^\circ$ 时, 由计算机仿真得到 β 在 0 到 1 秒之间的变化的 β - D 曲线, 由曲线得知, 选择的 S1880 型 PSD, 测量面积为 $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$, 分辨率为 $6 \mu\text{m}$, 从图中能够看到其对应的最小角度

分辨率约为 0.34 秒. 那么, 本文在单片机程序中, 就可以通过实验进行标定, 得到 D 和 β 的对应查找表, 利用查找表法求得倾角.

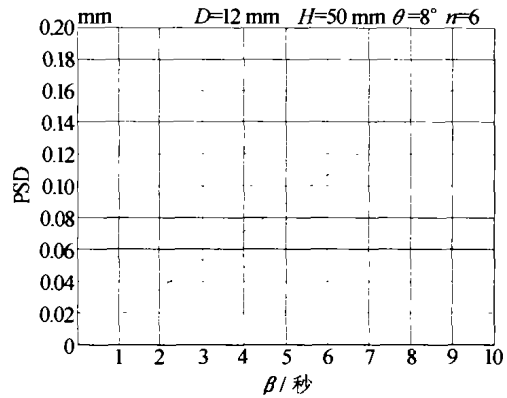


图 3 倾角一位移关系图
Fig. 3 Curve between inclination angle and displacement

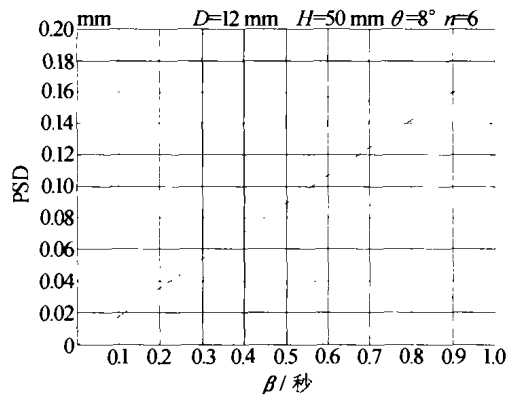


图 4 β - D 关系曲线
Fig. 4 Curve of β - D

通过其他对 H, n, θ 几个参数对测量精度的影响分析计算得知, 对精度影响最大的是 H 的制造及装配精度, n 的影响虽大但是非常容易控制, 而 θ 的影响较小. 由于 H 为上玻璃片的下表面与下玻璃片的上表面间的距离. 由于本文是采用制造好以后标定的办法确定 H 值, 因此 H 的精度容易保障, 本文就需要重点放在安装后 H 的变形上. 这个变形主要是一个热胀冷缩. 另外, 由于腔体内装的是液态水银, 它有可能腐蚀腔体, 而造成液面的变化, 并且水银也有可能因为氧化而发生液面变化. 针对以上主要问题, 本文采取如下实施办法和措施: 1) 采用膨胀系数小, 符号相反、可以互补材料伸缩. 2) 将腔体内的空气抽出, 灌入约 1.5 个大气压的氦气, 可以防止水银氧化. 3) 下腔体的材料本文还需要选择一个不与水银发生化学反应的材料制作, 且较为容易进行加工.

几何形变转换为电信号后, 在模拟放大与滤波电路中, 本文需要选用低温漂的共模抑制比高的运算放大器尽量减小模拟信号的误差. 模拟信号转换为数字信号后, 采用中值滤波法抑制噪声及干扰. 增强系统的抗干扰能力.

本文设计了一种上下反射面间距 $H = 50$ mm, PSD 大小为 12 mm, $\theta = 8^\circ$, 反射次数 $n = 6$ 的激光倾角测量系统. PSD 的分辨率为 $6 \mu\text{m}$, 倾角 β 的分辨率为 0.34 秒, 标定系统采用西北计量局的 C2 小角度检查仪. 检查仪由一 500.000 mm 长的平台组成, 通过对一端进行升降来改变倾斜角. 标定结果如表 1 所示, 通过标定得到倾角测量最大误差为 2.5 秒.

表 1 标定实验数据表

项目 测次	升降量 L (μm)	标准角度 = $\arctg(L/500000) \times 3600$ (秒)	实测角 度 (秒)
1	-500	-206.26	-203.8
2	-200	-82.51	-81.2
3	-100	-42.25	-41.1
4	-80	-33.00	-31.6
5	-60	-24.75	-23.6
6	-40	-16.50	-16.1
7	-20	-8.25	-7.9
8	-10	-4.13	-4.0
9	-5	-2.06	-2.0
10	0	0	-0.1
11	5	2.06	2.1
12	10	4.13	4.2
13	20	8.25	8.6
14	40	16.50	17.3
15	60	24.75	25.6
16	80	33.00	34.2
17	100	42.25	43.9
18	200	82.51	84.51
19	500	206.26	208.8

4 结论

本文设计出一种高精度激光倾角测量仪, 应用

Research of High Accuracy Laser Inclination Angle Measurement

Yue Kaiduan, Cao Jianan, Zhou Xiang, Zhang Wending

1 Institute of Laser & IR Applications, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

2 Xi'an Huateng Photoelectric Instrument Ltd., Xi'an Shaanxi 710049

Received date: 2003-10-03

Abstract A new method for inclination angle measurement by laser was described in the paper. The main principle of this system was using the multi-reflection for displacement amplifier, and the inclination angle was calculated by the displacement. Numerical filter technology was used in laser inclination angle measurement system. Influence of main parameter of accuracy was analyzed in the paper, and the experiment was set up. The accuracy of the measurement system is $3''$. The system had been used in dam safety monitoring successfully in Shaanxi Province of China.

Keywords Inclination angle measurement; PSD; Dam safety monitoring



Yue Kaiduan An associate professor, was born in 1966. He graduated from Sichuan University in 1986, obtained his M. S. in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences in 1993, and obtained his Ph. D. in Xi'an Jiaotong University in 1998. Now he is working in Xi'an Jiaotong University. His major research field is ESPI, 3D-measurement, vibration measurement and laser application.

液体表面在重力作用下平衡时可形成绝对水平面原理实现倾角测量. 系统利用水平面或其漂浮物表面一次或多次反射折射实现光学位移放大, 根据需要设计反射次数, 从而达到倾角测量精度要求. 系统结构简单、体积小、性能价格比高. 通过西北计量局的 C2 小角度检查仪标定, 系统倾角测量精度达到 $2.5''$. 本系统已经成功应用于大坝安全监测的倾角测量, 并申请了发明专利.

参考文献

- 1 Wang S, Zhao D, Jiang X, et al. Laser safety monitoring considerations for the largest dam by means of the generalized three-point method. *Optics and Laser Technology*, 2001, **33**(3): 153 ~ 156
- 2 何金平, 李珍照, 施玉群. 大坝结构实测性态综合评价中的权重问题. *武汉大学学报*, 2001, **34**(3): 13 ~ 15
He J P, Li Z Z, Shi Y Q. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2001, **34**(3): 13 ~ 15
- 3 黄铭, 葛修润, 刘俊. 大坝安全监测的多点位移向量模型. *上海交通大学学报*, 2001, **35**(4): 514 ~ 517
Huang M, Ge X R, Liu J. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2001, **35**(4): 514 ~ 517
- 4 You M, Zheng Y, Xia C H, et al. Development and application of adhesive used in OTDR (optical time district reflection) monitoring technique for dams. *Proceedings of SPIE*, 2000, **4077**: 414 ~ 417
- 5 唐经源. 激光测量技术及其工业应用研究 [硕士学位论文]. 西安交通大学硕士论文, 2001. 10 ~ 34
Tang J Y. *Laser Measurement Technology and Applications in Industry*, [Master's thesis], Xi'an Jiaotong University, 2001. 10 ~ 34