

文章编号 1004-924X(2012)08-1870-07

基于模糊控制的快速自动安平激光扫平仪

徐逢秋, 许贤泽*, 乐意, 李忠兵
(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:研制了一套全新的自动安平机构,以解决传统激光扫平仪无法同时兼顾安平精度、范围和速度的问题。首先,改进了传统自动安平仪器中的倾角传感器,设计了一种带有补偿环节的电子水泡以满足仪器的精度要求;其次,基于 PID 控制方法设计了用于实现仪器自动安平的闭环控制系统,同时引入模糊控制思想,使其达到了仪器自动安平的速度要求;最后,优化了仪器机械结构,有效增大了仪器的安平范围。实验测试结果表明,该扫平仪在 $-10^{\circ}\sim+10^{\circ}$ 的安平精度达到 $10''$,且自动安平时间小于 10 s。传统的激光扫平仪相比,设计的安平仪具有安平精度高、扫描范围大和安平速度快等特点。

关键词:激光扫平仪;电子水泡;自动安平;模糊控制

中图分类号:TH761;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1870

Fast automatic rotating laser construction based on fuzzy control

XU Feng-qiu, XU Xian-ze*, LE Yi, LI Zhong-bing

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

* Corresponding author, E-mail: hncxu@whu.edu.cn

Abstract: As traditional rotating laser construction can not give all considerations to the speed, range and the precision of leveling, this paper developed a new self-leveling mechanism to solve the problem above mentioned. Firstly, by improving the angle sensor in a traditional rotating laser construction, a kind of electronic bubble with the compensative function was designed to meet the accuracy requirement. Then, based on the PID controlling method, a closed loop control system for the self-leveling was designed, while the fuzzy control method was induced to the index of leveling speed. Finally, the general layout of the system was optimized, and the range of self-leveling was enlarged. The experimental result indicates that the leveling accuracy is $10''$ and the leveling time is less than 10 s while the inclining angle is from -10° to $+10^{\circ}$. In conclusion, the new construction has the characteristics of higher leveling precision, larger leveling ranges and faster leveling speeds as compared with the traditional one.

Key words: rotating laser construction; electronic bubble; self-leveling; fuzzy controlling

收稿日期:2012-03-28;修订日期:2012-04-16.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011CB707904)

1 引言

激光扫平仪是在传统光学扫描仪的基础上发展起来的一种激光扫描仪器,它具有更高的扫平精度和更远的作业距离,使用起来更加方便、灵活。因此被广泛用于大地测量、工程测量以及大型安装与挖掘等方面。例如在户外矿井的勘测中,常常利用激光扫平仪和光电接收器件掌握施工目标的高度、位置以及倾斜度信息,从而对挖掘设备进行闭环控制。自动安平激光扫平仪的安平精度、安平范围是两个十分重要的指标,而这两个指标是相互制约的,在一些设计中,不能兼顾这两个方面^[1]。如水准仪器^[2]中,采用光学自补偿技术^[3]可以达到很高的安平精度,但是在使用过程中,需要人为调节角螺旋使其达到大致水平的状态。采用微机械陀螺仪的机载摄影稳定平台^[4],在安平过程中具有较高的响应速度,然而其稳定精度不高。为了克服以上自动安平系统的缺点,需要设计一种以电子水泡为水平倾角传感器的自动安平补偿机构^[5]。本文在传统水平仪基础上,模拟双轴倾角传感器的形式^[6],采用玻璃水泡设计一种电子水泡传感器,该方法使仪器达到了较大的安平范围和较高的安平精度。传感器信号采用差分输出形式,增加补偿电路,有效抑制环境对传感器精度的影响^[8],使扫平仪具有较好的环境适应能力。安平速度也是评价自动安平系统的重要指标,这一指标受到传感器,机械结构和控制算法等多方面的影响^[9-10]。由于水泡对倾角响应的滞后性以及扫平仪的振动噪声会对扫平仪的安平速度和动态平衡造成很大的影响,本文基于模糊控制思想PID算法,引入自适应滤波技术^[11],设计了自动安平程序,不仅使扫平仪达到安平时间短、精度高、范围宽的要求,还满足了扫平仪在使用过程中的动态特性要求。

2 扫平仪自动安平模型建立

为使激光扫平仪形成旋转的水平激光束,在仪器主轴顶端设置一五角棱镜使出射激光偏转 90° ,同时激光器安装在主轴中心。如果激光器与

主轴同轴度良好且五角棱镜不存在加工误差,则扫平仪可以形成一激光平面,且与主轴轴线方向垂直。因此激光扫平仪工作过程中的自动安平就是将主轴轴线方向调节至与大地水平面垂直。

图1为扫平仪自动安平机构的结构图,它通过双轴平衡机构,使主轴在能够绕水平面上两个正交的方向(x 方向和 y 方向)转动。双轴平衡机构的外环固定在工作台上,内环通过一对轴线在 x 方向上的轴承固定在外环上,主轴通过一对轴线在 y 方向上的轴承固定在内环上,因此它具有两个自由度。

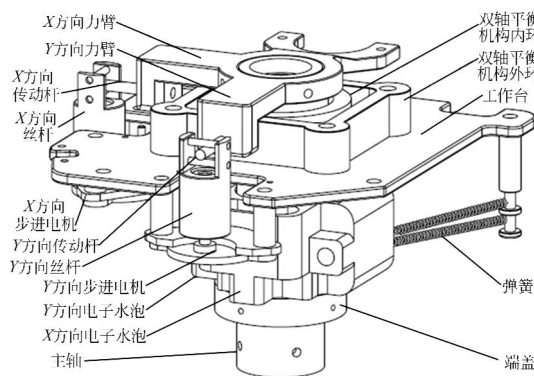


图1 扫平仪自动安平机构装配图

Fig. 1 Assembly diagram of self-leveling machine in the rotating construction laser

安平机构在两个方向通过正切机构将动力传递给主轴,正切机构两力臂是相互正交的。水平传感器通过端盖固定在主轴底部,输出的两路信号分别对应于两个伺服机构,即表征主轴在两正交方向上的偏离程度。

引入直角坐标系对该自动安平机构进行建模,如图2所示。在坐标系中, $x-y$ 平面为水平面,扫平仪主轴 OP 方向与 z 轴方向存在一定偏差,假设其夹角为 γ 。主轴在 $x-z$ 平面上的投影 OP_1 以及在 $y-z$ 平面上的投影 OP_2 与 z 轴的夹角分别为 α 和 β 。故主轴的方向向量的表达式如式(1):

$$L = (\cos \gamma \tan \beta, \cos \gamma \tan \alpha, \cos \gamma) \quad (1)$$

采用的水泡传感器可以反映主轴的初始角度,其两个分量的输出分别对应于主轴与 $y-z$ 平面的夹角 α 以及主轴与 $x-z$ 平面的夹角 β 。

激光扫平仪的伺服机构通过 x 方向和 y 方

向的力矩为主轴提供绕 x 轴方向及 y 轴方向旋转的动力。两伺服机构的作用点分别为位于 $x-z$ 平面内的 D_1 以及位于 $y-z$ 平面内的 D_2 , 作用于 z 轴方向。 OD_1 垂直于 OP_1 , OD_2 垂直于 OP_2 , 设 OD_1 和 x 轴夹角为 β , OD_2 与 y 轴夹角为 α 。两作用点与主轴相对静止, 故伺服机构在 D_1 、 D_2 两点上的实际作用距离分别为 d_1 , d_2 , 设伺服机构两作用点至坐标原点的距离相等, 即 $OD_1 = OD_2 = d$, 则 d_1 , d_2 表达式为:

$$d_1 = d \times \tan \beta, \quad (2)$$

$$d_2 = d \times \tan \alpha. \quad (3)$$

实际中, 水平传感器输出信号电压无法与实际的偏差角度一一对应, 故需要在控制环节引入模糊控制器, 以达到扫平仪自动安平精度要求。

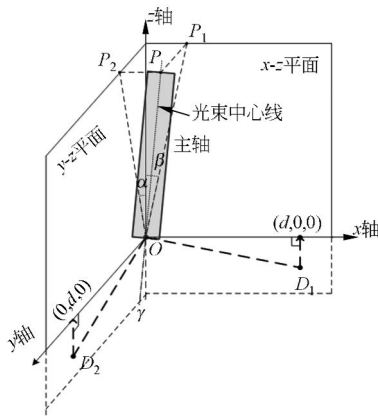


图 2 安平原理图

Fig. 2 Diagram of leveling principle

3 电子自动安平机构

3.1 倾角传感器

本文采用电子水泡作为激光扫平仪的水平传感器, 其结构示意图如图 3 所示。其下方是一个红外 LED, 波长为 880 nm; 中间是一个玻璃水泡; 上方是两枚 Pin 红外光敏二极管反向并联。

由于光在空气和透明液体介质中传播时衰减特性不同。对于单色光, 当光束沿垂直于介质表面方向 x 入射到介质中, 根据朗伯定律, 光的强度经过厚度为 L 的介质后强度为:

$$I_L = I_0 \cdot e^{-\alpha L}. \quad (4)$$

式中: I_L 和 I_0 分别表示在 $x=L$ 与 $x=0$ 处的光强, α 为消光系数。实际中, 液体的消光系数远大

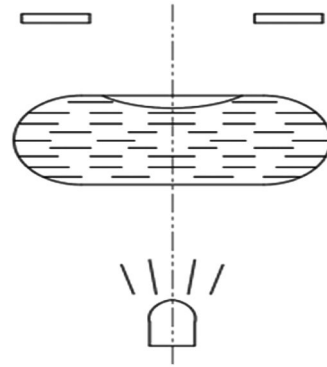


图 3 传感器结构图

Fig. 3 Diagram of sensor structure

于气体的消光系数。故当水泡不处于平衡位置时, 输出信号会有变化。

顶部两反相并联的硅光电池输出信号为电流形式, 当仪器偏离平衡位置时, 其角度量以电流信号呈现。为便于后级的数据采集, 通过 I-V 转换电路得到误差电压。由于两路硅光电池的电流输出特性不一致, 故需要在添加电压补偿环节, 消除零点误差, 如图 4 所示。

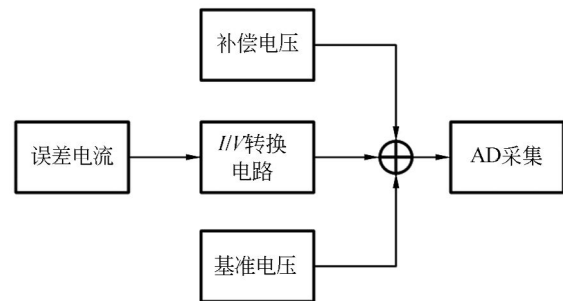


图 4 误差信号调理电路的原理框图

Fig. 4 Block diagram of error signal conditioning circuit

因此, 误差电流经 I-V 转换电路得到的电压信号可以反映仪器偏离平衡位置的角度量。通过朗伯定律, 只能定性的表明误差电流会随着水泡中心的偏离程度而变化, 而误差电流和角度量的映射关系无法定量的表征。故需要采用模糊控制的方法, 实现仪器的自动安平。

3.2 自动安平算法设计

输出信号的范围和精度受到很多外界因素的影响。例如: 选择普通水泡的精度, 水泡内液体的折射率, 后级电路的补偿系数等等。故采用模糊控制的思想, 对自动安平算法进行设计。

由前文对扫平仪自动安平模型分析可知, 扫

平仪主轴可绕两正交方向转动,具有两个自由度。在各个转动方向上,各有一个电子水泡与主轴的偏离角度对应,需对两个方向上的伺服机构分别采用模糊 PID 控制。程序设计时可以采用相同的参数。

数字 PID 控制器的表达式为式(5),由表达式可知,该方法的使用需要以大量内存空间为代价,故选用增量式 PID 作为系统的控制方法。

$$U(k) = K_P E(k) + K_I \sum_{n=1}^{n=k} E(n) + K_D (E_k - E_{k-1}) \quad (5)$$

以增量式 PID 作为系统的调节方式,具体表达式为:

$$U(k) = U(k-1) + K_P [E(k) - E(k-1)] + K_I E(k) + K_D (E(k) + E(k-2) - 2E(k-1)) \quad (6)$$

式中: $E(k)$, $U(k)$ 分别表示控制系统中被控对象的输入偏差和伺服机构的控制量。 K_P , K_I , K_D 分别为其比例、积分、微分控制作用的参数。

PID 调节中积分部分作用在系统开环频率特性的低频段,可以改善控制系统的稳态性能;微分部分作用于系统开环频率特性的中频段,用以改善控制系统的动态性能。由于电子水泡传感器具有滞后性,故控制过程中应强调其低频特性,在实际使用中,将微分控制参数与一个权重因子 α 相乘,以减少控制系统对高频部分的敏感程度,使得安平过程更加平稳。

常规 PID 控制器不具有在线整定参数的功能,因此难以满足以电子水泡作为水平传感器的伺服系统的安平精度,最终影响仪器的安平精度。本文引入了模糊控制概念,将模糊控制与增量式

PID 控制结合起来,根据不同范围的 $E(k)$ 选择 PID 参数 K_P , K_I , K_D , 实现对常规 PID 控制器的参数 K_P , K_I 的在线自整定。

应用模糊理论建立参数 K_P , K_I , K_D 与偏差绝对值的单变量模糊控制系统实现模糊控制。本文采用二维模糊控制器来完成,其参数确定方法如式(7)。

$$\begin{cases} K_P = f_1(E, EC) \\ K_I = f_2(E, EC) \\ K_D = f_3(E, EC) \end{cases} \quad (7)$$

为了方便处理和实现,式中输入偏差 E 、输入偏差变化率 EC 及输出参数 K_P , K_I , K_D 的隶属函数均采用线性函数。

本文激光扫平仪自动安平算法设计的模糊控制 PID 结构图如图 5 所示。

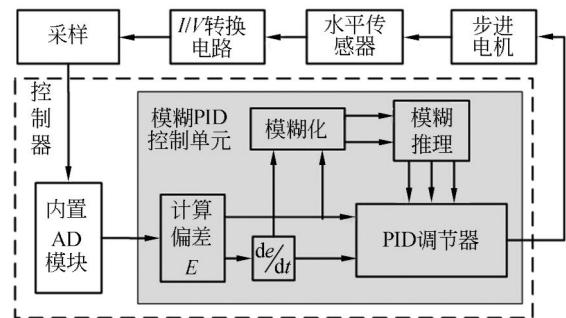


图 5 模糊 PID 控制器结构图

Fig. 5 Structure of fuzzy PID controller

图中,通过模糊推理控制 PID 参数调节,控制系统的输入偏差 E 达到趋于零目标,保证自动安平激光扫平仪的安平精度。控制系统的最终表达式为

$$T_n = T_{n-1} + f_1(V_n, V_n - V_{n-1})(V_n - V_{n-1}) + f_2(V_n, V_n - V_{n-1})(V_n - V_0) + \alpha f_3(V_n, V_n - V_{n-1})(V_k + V_{k-2} - 2V_{k-1}) \quad (8)$$

式中: T_n 代表进给量, V_n 为传感器的输出电压值, V_0 是调节的目标电压, α 为 D 调节权重因子。为了将 T_n 和 V_n 量化成具体的数字量,需要将 V_n 和 T_n 进行归一化。扫平仪采用步进电机作为伺服机构的运动单元,设计中将进给量 T_n 量化成步进电机运动步数,并将电压值 V_n 量化为 $0 \sim 1024$ 的数字量。

4 扫平仪性能分析

4.1 扫平仪自动安平的速度

自动安平速度是评价电子安平的一个重要指标。考虑到水平传感器采用的电子水平的滞后性,本文设计每次传感器输出信号采集的时间间隔为 0.5 s ,并将每次调节后得到的误差电压输出

由测量数据可知,扫平仪自动安平机构引入的补偿误差为0。由于采用的测量标尺最小测量单位为1 mm,故测量数据的极限偏差小于0.5 mm。激光的往返距离为140 m,故自动机构引入的安平误差小于0.6",这有效减小了扫平仪在使用过程中的扫平误差。

4.2.3 扫平仪扫平误差

扫平仪扫平误差指的是激光扫描平面上任意点与激光出射点的连线相对水平面的最大夹角。在检验扫平仪时,需从0、90、180、270°4个方向来检测扫平仪是否达到设计要求^[13]。将扫平仪放置在测试旋转台上,开机后使扫平仪自动安平,扫平仪4个方位各放置一个垂直标杆。从起始位置,旋转五角棱镜使激光束转过90、180、270°,分别记录下激光在4个标尺上的位置,得到扫平仪在4个方向上的相对偏差测量数据。对3台经过调校的扫平仪进行测量4个方向上,扫平仪安平的角度误差 Δ_j 如式(11):

$$\Delta_j = x_j / D. \quad (11)$$

获得了在4个方位上的测量数据,利用式(12)可以计算出各台扫平仪的安平误差 e ,测试结果见表2。

$$e = \left| \frac{\sum_{j=0}^4 \Delta_j}{4} \right| + \sqrt{\left(\frac{\Delta_0 - \Delta_2}{2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_1 - \Delta_3}{2} \right)^2}. \quad (12)$$

由测试结果可知,三台样机均达到了10"安平精度,证明本文的自动安平补偿方法能够满足

设计要求。

表2 3台样机基线实验结果

Tab.2 Testing results of three prototypes

编号	方位 $j/(\circ)$	相对偏差 X_j/mm	安平误差 $\Delta_j/(\prime)$	扫平仪误差 $e_j/(\prime)$
S_1	0	2.2	6.286	8.710
	90	1.3	3.714	
	180	-2.4	-6.857	
	270	-2.7	-7.714	
S_2	0	3.0	8.571	9.197
	90	1.8	5.143	
	180	-1.7	-4.857	
	270	-2.6	-7.429	
S_3	0	1.9	5.429	9.302
	90	2.8	8.000	
	180	-2.5	-7.143	
	270	-2.0	-5.714	

5 结 论

本文针对传统自动安平激光扫平仪无法同时达到快安平速度、高安平精度和大安平范围的问题,设计了一种基于模糊PID控制的自动安平方法,并将其用于激光扫平仪的自动安平中。实验测试结果表明,该扫平仪安平范围为 $-10^\circ \sim 10^\circ$,安平精度达到10",且自动安平时间小于10 s,满足了安平范围大、安平精度高、安平速度快的设计要求。

参考文献:

- [1] LEICA G A. A self-compensation rotating construction laser and method for measure a tile of an axis of rotation of a construction laser; US. PCT/EP2009/0588 07[P]. 2009-07-10.
- [2] 叶晓明,刘经南. 数字式电子水准仪的载码相位法原理[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2007,32(2): 180-183.
YE X M, LIU J N. Carrier code phase method for digital electronic level[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(2): 180-183. (in Chinese)
- [3] YAN Z L, WANG J J, CHAI H J. Influence of water level fluctuation on phreatic line in silty soil model slope[J]. *Engineering Geology*, 2010, 113(5):90-98.
- [4] 邱宝梅,王建文. 嵌入式机载摄影稳定平台的设计[J]. 仪器仪表学报,2009,30(9):1982-1984.
QIU B M, WANG J W. Design of embedded stabilized platform for aerial photography [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(9): 1982-1984. (in Chinese)
- [5] 佟刚,王涛,吴志勇,等. 高精度倾角传感器在测量车载平台变形中的应用[J]. 光学精密工程,2010, 18(6):1347-1352.
TONG G, WANG T, WU ZH Y, et al.. Application of high accuracy inclinometer to deformation measurement for vehicular platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1347-1352. (in Chinese)
- [6] 陈向坚,李迪,白越,等. 模糊神经网络在自适应双

- 轴运动控制系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2011,19(7):1643-1650.
- CHEN X J, LI D, BAI Y, *et al.*. Application of type-II fuzzy neural network to adaptive double axis motion control system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(7):1643-1650. (in Chinese)
- [7] LINESH J, SUDEESH K, RADHAKRISHNAN P, *et al.*. Liquid level sensor using etched silica fiber [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010,52(4):883-886.
- [8] SOSNA, CHRISTOPH B, RAINER L, *et al.*. A temperature compensation circuit for thermal flow sensors operated in constant-temperature-difference mode [J]. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010,59(6):1715-1721.
- [9] 李建荣,高慧斌,王志乾,等. 光电测量设备的实时调平补偿方案[J]. 光学精密工程, 2010,18(7):1543-1546.
- LI J R, GAO H B, WANG ZH Q, *et al.*. Real-time compensative leveling in photoelectric measuring equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(7):1543-1546. (in Chinese)
- [10] 姜伟伟,高云国,冯栋彦,等. 大型光电设备基准平面自动调平系统 [J]. 光学精密工程, 2009,17(5):1039-1044.
- JIANG W W, GAO G Y, FENG D Y, *et al.*. Automatic-leveling system for base-plane of large-size photoelectric equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(5):1039-1044. (in Chinese)
- [11] 陈茂胜,金光,安源,等. 采用自适应 PI 控制的单框架控制力矩陀螺角动量飞轮系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011,19(5):1075-1080.
- CHEN M SH, JIN G, AN Y, *et al.*. Design of angular momentum wheel in SGCMG using adaptive compensation PI control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(5):1075-1080. (in Chinese)
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 激光扫平仪校准规范[R]. 2007-05-28.
- [13] 胡国元,何平安,郑建平,等. 激光扫平仪的误差分析与智能检测[J]. 光学与光电技术, 2005,3(8):58-60.
- HU G Y, HE P A, YUN J P, *et al.*. Error analysis and auto test in laser roating level[J]. *Optic & Optoelectronic Technology*, 2005,3(8):58-60. (in Chinese)

作者简介:



徐逢秋(1990—),男,江西丰城人,博士研究生,2011年于武汉大学获得学士学位,主要从事测控技术、精密仪器及机械等方面的研究。E-mail:hncxu@whu.edu.cn



乐意(1988—),男,江苏盐城人,博士研究生,2010年于武汉大学获得学士学位,主要从事测控技术、精密仪器及机械等方面的研究。E-mail:ly1988720@yahoo.com.cn



许贤泽(1967—),男,湖北京山人,博士,教授,博士生导师,主要从事精密仪器及机械、光谱仪器的研制方面研究工作。E-mail:xuxianze@whu.edu.cn



李忠兵(1986—),男,湖北恩施人,博士研究生,2009年于武汉大学获得学士学位,主要从事精密仪器及机械、图像处理方面的研究。E-mail:lllzzzbbb@yahoo.cn

(本栏目编辑:李自乐)