

# 自校准深基坑水位测量仪设计

陈 林, 王利恒\*, 张祚淏

(武汉工程大学 电气信息学院, 武汉 430205)

**摘 要:** 设计了一种自动校准深基坑水位测量仪, 由控制器、激光传感器、可控升降电机、合金设计板等组成。控制器控制主从电机升降, 形成角度差, 激光传感器在一定维度下对深基坑内表面扫描, 获取测量数据, 再建立相关模型, 计算出传感器与水位平面的角度, 控制器控制激光传感器与水位面保持垂直, 实现自校准功能。本设计能克服震动、机体偏置等一些外界因素带来的测量点漂移, 从而达到精准测量的目的。

**关键词:** 深基坑; 自校准; 激光传感器; 可控升降电机

**中图分类号:** TN209; TH761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)01-0053-04

## Design of Self-calibration Water Level Measuring Instrument for Deep Foundation Pit

CHEN Lin, WANG Liheng\*, ZHANG Zuohao

(School of Electrical and Information, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, CHN)

**Abstract:** An automatic calibrated deep foundation pit water level measuring instrument was designed, which was composed of a controller, a laser sensor, a controllable lifting motor, an alloy design board, etc. The controller controlled the lifting of the master-slave motor to form an angle difference. The laser sensor was in a certain dimension. The inner surface of the deep foundation pit was scanned to obtain the measurement data, and then the relevant model was established to calculate the angle between the sensor and the water level. The controller controlled the laser sensor to be perpendicular to the water level to realize the self-calibration function. This design had overcome the drift of measuring points caused by some external factors such as vibration and body offset, so as to achieve the purpose of accurate measurement.

**Key words:** deep foundation pit; self-calibration; laser sensor; controllable lifting motor

### 引 言

目前, 激光测距已经步入成熟阶段, 具备精度

高、距离远、发射角度小、方向性好、能够适应恶劣环境等特点<sup>[1]</sup>。激光测距广泛应用于建筑行业, 尤其在深基坑水位测量中占有主导地位<sup>[2]</sup>。一般的水

收稿日期: 2021-08-13

作者简介: 陈 林(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事智能仪器仪表方面的研究; (E-mail: 1824794384@qq.com)

王利恒(1973—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事智能仪器仪表方面的研究; (E-mail: 958900865@qq.com)

张祚淏(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事模式识别与智能控制方面的研究。

\*通讯作者

位测量仪有手持式、支架式、井口放置式等<sup>[3-5]</sup>,手持式水位测量仪靠人工手持测量,仅靠人眼观察很难使激光点打到水位面,测量的水位值具有不确定性;实际工业现场中,支架式和井口放置式水位测量仪容易处于整体失稳、围护结构滑移失稳、围护结构底部地基承载力失稳等情况,这就容易导致激光点打到井壁或激光束与水位面存在非垂直关系<sup>[6-9]</sup>。如图 1 所示,激光点打到井壁或者其他地方,最终采集到的水位高度与实际水位高度存在很大误差,且测量精度达不到误差毫米级工业要求,无法保证现场施工安全。

文章中设计了一种自动校准深基坑水位测量仪,使测量仪以二维扫描式进行数据采集,然后建立数学模型进行计算分析,STM32 控制器确定测量仪旋转角度,保持激光传感器与水位面垂直,确保得到稳定的水位值<sup>[10-11]</sup>。

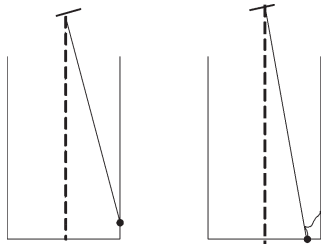


图 1 失稳态测量实际测量图

Fig.1 Actual measurement diagram of instability measurement

### 1 系统结构设计

文中设计了一种自动校准深基坑水位测量仪,系统主要由 STM32 控制器、激光传感器、可控升降电机和自动校准平台组成,系统组成结构如图 2 所示。

控制器控制两个主电机,在初始角 30°下带动从电机在二维空间里向相反方向运动,激光以圆弧运动方式在深基坑内进行连续性扫描并采集第

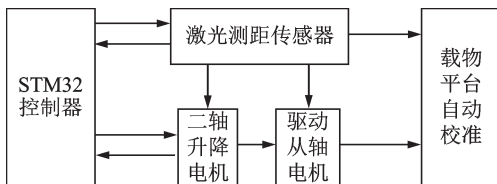


图 2 水位测量仪系统组成结构图

Fig.2 Structural schematic of water level measuring instrument system

一阶段数据<sup>[12]</sup>,控制器记录得到的数据组通过数学模型处理后,缩小激光传感器第二次扫描范围,使之二次扫描处于水位面之间,得到的最小距离值即为水位至传感器的距离值  $h_s$ ,通过计算得到  $D_s$  水位值,深基坑水位测量仪测量整体架构如图 3 所示。

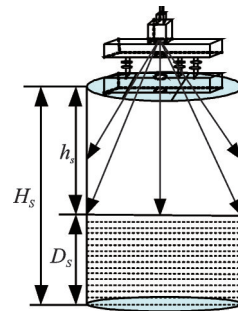


图 3 激光水位测距架构图

Fig.3 Framework of laser water level ranging

自校准过程调节设计主要集中控制两个主电机的运动方向,从电机主要作为支撑点,与两个主电机三点成面,使整个运动过程在同一个平面上进行,传感器会从不同的方向获取数据集,将测量完的两个数据集进行比对,弥补因井内复杂结构产生的误差,同时从电机起到支撑上下合金板的作用,保证整个测量结构稳定,减小系统误差。测距和自校准调节结构如图 4 所示,平面结构如图 5 所示。

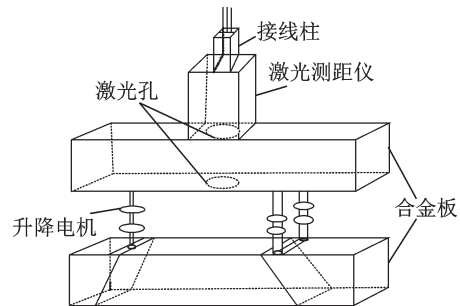


图 4 自校准三维结构图

Fig.4 Diagram of self-calibration 3D structure

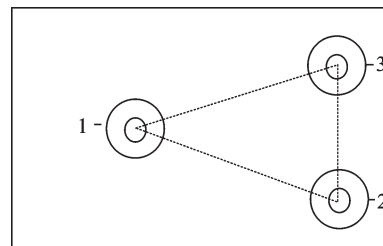


图 5 自校准平面结构图

Fig.5 Schematic of self-calibration plane structure

由自校准水位测量仪的运动形式建立空间坐标系,当从电机3受主电机2控制时,此时整个结构在坐标系XOZ平面上是上下运动的,过程如图6;当从电机3受主电机1控制时,此时从立体角度交换X、Y轴,整个机构在坐标系YOZ上是上下运动的,如图7所示。

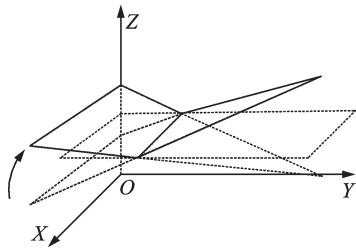


图6 横向运动空间坐标系图

Fig.6 Spatial coordinate system diagram of transverse motion

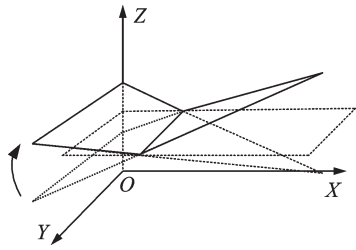


图7 纵向运动空间坐标系图

Fig.7 Spatial coordinate system diagram of longitudinal motion

## 2 自校准模型建立和研究

深基坑工程中水位测量十分关键,随着测量技术的不断发展,虽然测量本身的误差减小了,但深基坑结构复杂,另外工地作业震动力度大,测量时极易受到外界因素影响而导致测偏,采取自校准水位测量方式,得到数据组经过分析即可确定水位真实值,控制器控制准确测量时的角度,确保正在工作的水位测量仪不会因为外界因素影响而出现数据不稳的情况<sup>[13-15]</sup>。

起始运动中,电机1处于高水平位,电机2和从电机3属于低水平位,起始角 $\alpha$ 为 $30^\circ$ ,使测距结构做升降运动,每次转动的角度用 $\theta$ 表示,其运动方式如图8所示,以激光传感器发射点为原点O建立直角坐标系,传感器到井壁距离为固定值 $x_0$ ,运动分为三个过程,每一幅代表一个阶段。

第一阶段起始点为C,向井下扫描,控制器存储扫描的距离值 $L$ 和扫描的次数 $N_0$ ,此过程激光点从C运动至D只有长度 $L$ 在增大,运动到D时取得最

大距离值,可建立数学模型,令移动点坐标 $(x_0, x_0 \tan(\sum_1^k k\theta + 60^\circ))$ , $k$ 代表测量的总次数, $k$ 的值取正整数,根据直角坐标系距离长度计算公式可以得出以下公式:

$$L = x_0 \sqrt{1 + \tan^2\left(\sum_1^k k\theta + 60^\circ\right)} \quad (1)$$

$$k = \frac{k(k-1)}{2} \quad (k \geq 1, \text{且} k \text{为整数}) \quad (2)$$

$$\beta = \sum_1^k k\theta + 60^\circ \quad (3)$$

由以上公式可知, $x_0$ 是常数,旋转角度 $\theta$ 是固定值, $\beta$ 是随着 $k$ 的增加而变大,故 $\tan^2\left(\sum_1^k k\theta + 60^\circ\right)$ 是增函数,即 $L$ 是测量次数 $k$ 的函数,且随着 $k$ 的增加函数值变大,最大值 $L_{\max}$ 是控制器记录水位面和井壁的接触点D的距离值,带入公式(1),得到公式(4),可计算出从起始点C运动到接触点D转动的角度 $\beta$ ,第一阶段测量C至D的距离值,产生一个最大测量值 $L_{\max}$ 和角度 $\beta$ ,至此第一阶段完成。

$$L^2 = x_0^2 \left(1 + \tan^2\left(\sum_1^k k\theta + 60^\circ\right)\right) \quad (4)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{L_{\max}^2 - x_0^2}}{x_0} - 60^\circ\right) \quad (5)$$

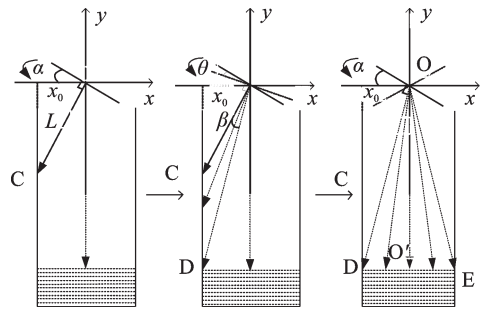


图8 基坑测量模型图

Fig.8 Model schematics of foundation pit measurement

通过第一阶段可得出第二阶段起始角度为 $(60^\circ + \beta)$ ,这一阶段是图8中激光点从D运动至E的过程,激光扫描的范围在水位面上。由图可知当激光器完全处于与水位面垂直时,测量的距离最短,为水位需要测量值。从D至E的扫描测量过程中,模型坐标系的纵坐标是不发生变化的, $y_0$ 是固定值,横坐标为变量,可令移动点坐标为 $(\frac{-y_0}{\tan(60^\circ + \beta + \sum_1^n n\theta)}, -y_0)$ ,根据直线距离公式可得到以下公式:

$$L' = y_0 \sqrt{\frac{1}{\tan^2\left(60^\circ + \beta + \sum_1^n n\theta\right)} + 1} \quad (6)$$

$$\gamma = 60^\circ + \beta + \sum_1^n n\theta \quad (7)$$

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (n \geq 1, \text{且} n \text{为整数}) \quad (8)$$

$$M = \tan^2\left(60^\circ + \beta + \sum_1^n n\theta\right) \quad (9)$$

同理可知  $L'$  只与测量次数  $n$  有关,且  $N$  是增函数, $M$  会随着  $N$  增大而增大, $1/M$  是减函数,随着  $N$  减小,当  $N$  是无穷大时  $\lim_{N \rightarrow \infty} 1/M = 0$ ,此时取得最小值  $L'_{\min} = y_0$ ,即  $y_0$  是水位平面到激光传感器的准确距离。激光点从 C 运动至 D 再到  $O'$ ,整个扫描的角度不大于  $90^\circ$ ,所以可以得到不等式(10),控制器记录取得最小值的次数  $N$ ,由第一阶段可知  $\beta$ ,计算出旋转角  $\theta$  如公式(11),同时可知道  $N\theta$  是第二阶段的控制角,控制器确定起始角为  $(60^\circ + \beta + N\theta)$ ,此时激光传感器与水位面保持垂直,并且测量的距离值为激光传感器至水位面的最短距离,通过差值计算得到精确水位高度。

$$60^\circ + \beta + N\theta \leq 90^\circ \quad (10)$$

$$\theta \leq \frac{30^\circ - \beta}{N} \quad (11)$$

深基坑结构复杂,为保证测量精确度,完成第一个过程后,系统会保持现状,实现一段时间内连续稳定的数据采集阶段,此后自校准深基坑水位测量仪会进行一个误差补偿测量过程,电机 1 驱动从电机 3,与电机 2 做相反向运动,过程运动与第一过程同理,起始角度  $\alpha$  是  $30^\circ$ ,完成一个周期扫描,控制器记录好数据,然后两个过程都会取得一个最低点,控制器比较两组距离值,再通过均值运算可以得到精确水位高度,精确度在毫米级,符合工业级要求。控制器将记录好精确水位值,计算出准确的角度值,不会因为外界因素的干扰,影响精确的测量度。

### 3 实验验证

通过自校准基坑水位测量仪的设计,对深度 5 m、井口半径 0.2 m 的深基坑进行现场测量实验,

如图 9 所示。



图 9 现场测量实验

Fig.9 Field measurement experiment

测量的数据集用 MATLAB 仿真如图 10 所示,其中红色线为理想化数据曲线,黑色线为 XOZ 运动方向实际数据曲线,蓝色线为 XOY 运动方向实际数据曲线,测量过程中具有往复性,所以大于  $90^\circ$  的角都依次累加角度, $90^\circ$  时表示已经确定了测量角度并保持姿态持续测量, $90^\circ$  时数据量多,代表的都是水位值。

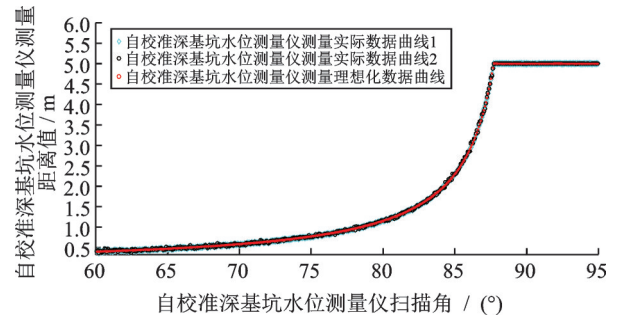


图 10 MATLAB 仿真数据分析图

Fig.10 Diagram of MATLAB simulation data analysis

自校准过程实质是使激光测距传感器始终与水位面保持垂直姿态,能够准确地获取数据,减少因外界影响造成的误差,通过图 11 可以看出,当控制器获取到最低点距离值时再通过数学模型计算出角度,然后保持传感器始终与水位面垂直,这里测量的水位值是 5 m,采集到的最大值是 5.005 m,此时是接触到水位面,非垂直关系,经过反复运动后找到垂直水位面的值,当水位测量仪扫描的角度为  $90^\circ$  时两个运动方向的测量精度都保持在 0.003 m 内,达到了较高的测量标准,而且长时间保持稳定,不会出现偏差,即使出现了偏差会自动校准,保持很好的测量效果。 (下转第 63 页)