

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412959

基于激光的非接触式地下管道的测径方法*

鲍晓华¹, 王明亮¹, 周虎³, 郭帅²

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院 合肥 230009;
3. 乐山职业技术学院智能制造学院 乐山 614013)

摘要:针对现有地下管径测量方法中存在的测量精度以及可靠性差等问题,提出了一种激光测距结合几何关系的测量方法。在管道中放入激光设备,通过对激光位置的特殊摆放,在管道内部往管径内壁3个方向发射激光,进行测距,经过推导得出管径的大小与激光测量距离的公式,实现城市地下管径的测量,并提出了一种通过对齐减少测量误差的方法,在这种情况下又做了分区实验,加强了理论推导的正确性与可行性。制作了样机,在实验室模拟环境下与实际管道进行了实验。实验表明,在实验室理想环境下,测量在最佳状态时,400、600、800 mm管径的绝对误差在 ± 10 、 ± 9 、 ± 6 mm之内,相对误差在2.5%、1.5%、0.75%之内,在分区实验中,测量结果仍然准确。在实际环境中,误差相较于实验室环境下偏高,但仍能满足测量需求。该设备能够实现地下管径快速准确的测量,且可靠性高测量结构简单,成果可望用于地下管径的测量。

关键词:激光测径仪;管径;非接触式测量;485通信

中图分类号: TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Non-contact laser-based method for measuring underground pipeline diameter

Bao Xiaohua¹, Wang Mingliang¹, Zhou Hu³, Guo Shuai²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
3. Intelligent Manufacturing Academy, Leshan Vocational and Technical College, Leshan 614013, China)

Abstract: To address the issues of poor accuracy and reliability in existing underground pipe diameter measurement methods, this paper proposes a new approach that combines laser ranging with geometric relationships. A laser device is positioned inside the pipeline, and by strategically placing the laser, it emits beams in three directions towards the inner wall of the pipe. The distances are measured, and a formula is derived to calculate the pipe diameter based on the laser measurements. This method enables accurate measurement of urban underground pipelines, and a technique for reducing measurement errors through alignment is introduced. Partition experiments were conducted to verify the correctness and feasibility of the theoretical derivation. Prototypes were developed, and experiments were performed using actual pipelines in a simulated laboratory environment. Results show that, in an ideal laboratory setting, the absolute errors for pipe diameters of 400, 600, and 800 mm are within 10, 9, and 6 mm, respectively, with relative errors of 2.5%, 1.5%, and 0.75%. The measurement accuracy remained high even in partition experiments. Although the error in real-world environments is slightly higher than in the lab, it still meets practical measurement requirements. The system enables fast and accurate measurement of underground pipe diameters with high reliability and a simple measurement structure, making it suitable for field applications.

Keywords: laser caliper; pipe diameter; non-contact measurement; 485 communication

0 引 言

地下管径作为一个重要的参数,当发生暴雨等自然灾害天气,管径的大小对于排水量至关重要。当知道地下管径的参数之后,可以对城市排水量进行仿真,当雨量较大,可以提前进行防范,保障居民的生命、财产等安全。但是城市长时间的发展过程中,地下管网连接十分错综复杂,也没有一个较好的方法对城市地下管径进行测量。

但随着传感器技术的发展,利用传感器进行测量成为了解决关键问题的关键技术^[1]。在测量领域主要有相机测距^[2]与激光测距^[3]两种主要的方式。相机测距相对价格比较昂贵,而激光测距价格低,携带方面,且测量精度高,非常适合地下管网管径的测量^[4]。

Vasconcelos 等^[5]在获取到 3 个不同位置标定板的姿态后,建立相应的约束方程来去优化相机与二维激光测距仪的参数。Nguyen 等^[6]利用环境交互式 3D 建模,对单点激光测距仪与相机进行外参标定。万光南^[7]提出了水下利用声学测距的方法,可以实现中远距离的准确测量。胡波等^[8]提出了基于图像的水下三点激光测距,利用光学成像和激光三角原理^[9-11]结合进行测距。

针对激光测距,王鹤等^[12]通过分析激光斑是否在相机中看到,建立相应约束方程进行求解;臧春华等^[13]提出了基于激光线扫描三维重构的管道直径及圆度的测量系统,利用了机器视觉、三位重构技术等;陈建康^[14]利用两束平行激光与水下进行结合,通过相机拍摄图片上的两光斑像素距离和目标间的距离函数进行水下的测量。在移动港巷系统中高效货物海运的系统中,利用三光束的检测系统^[15-16]。在系统中利用 3 个一维激光测距仪按照等腰三角形的排列,平行的射出激光束,结合了红外激光相机成像,实现了集装箱之间距离的测量。单目三点视觉测量系统^[17-18]利用了 3 种不同颜色的平行激光束,按照等边三角形进行排列照射在目标物体的表面,利用图像进行距离的测量。但是由于测量系统和物体之间可能会存在夹角,所以测量误差可能会急剧增加。

本文提出了一种新的管径的测量方法,利用多个激光模块之间的配合,将测量的数据带入到推导的公式中,得到管径的数值,并提出了一种通过两个并排激光测量到管径的距离是否相同来提高其精度的方法,并做了对比试验来去验证理论的正确性。

1 非接触式激光测量的系统结构

非接触式激光测量系统的系统结构示意图如图 1 所示。主要由激光盒、主板、从板、直流电机驱动器、直流电机、显示屏等组成。其中,激光盒上包含 4 个激光模块,

用来进行对齐与测量。非接触式激光测量系统的实物如图 2 所示,包含了连接杆和设备外壳等构成。

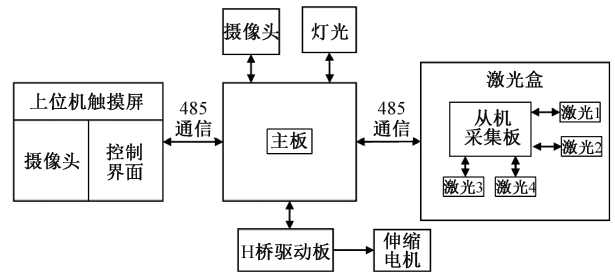


图 1 非接触式激光测量结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of non-contact laser measurement structure



图 2 非接触式激光测量结构实物

Fig. 2 Physical diagram of non-contact laser measurement structure

激光模块采用了红点可见光,响应频率为 1~10 Hz,最大量程为 30 m,精度为 ± 1 mm,供电电压为 3~3.3 V 直流。在激光盒中共有 4 个激光模块,分别在左侧两个(激光 1 和激光 2),上侧一个(激光 3),右侧一个(激光 4),左侧的两个激光模块测量到管径的距离后,比较两者是否相同来判断激光盒轴线与管道的轴线是否平行,进而使得测量精度提高。当两者的差值为 0 或者很小之后,保持激光盒不动,随后上侧和右侧激光模块分别进行测量,在对 3 个方向的距离测量之后,通过算法即可将管径算出。

2 原理分析与测量误差的减少

当设备放入管道中进行测量时,其原理是利用激光盒上三侧的 3 个激光分别测量到管壁的距离,但是并不能把激光盒放在最佳状态进行测量。因此,在实际的测

量过程中就会产生误差。即使有影像采集,也只能粗略的调整,并不能很大程度减少误差。

2.1 理想情况下测量原理

当激光盒的轴线与管道的轴线平行时,激光盒上的激光模块往管道内壁进行测距,分别为上、左、右3个激光模块,即测量出激光盒到管道的顶端、管道的左壁、管道的右壁的距离,在测量出这3个数据之后,经过理论的推导即可估算出管径,其管径计算原理如图3所示。

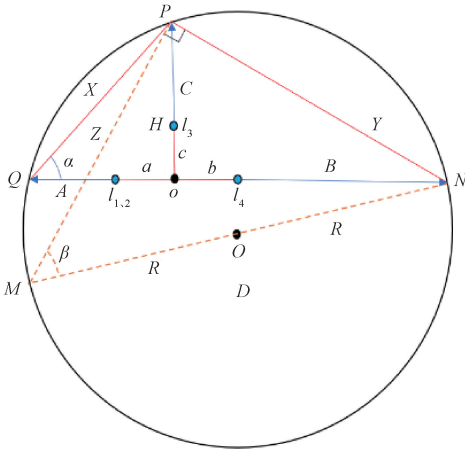


图3 管径计算原理

Fig. 3 Schematic diagram of pipe diameter calculation

图3中,点o为激光盒的位置,点O为圆心的位置,可以在管道中的任意位置, $l_{1,2}$ 、 l_3 和 l_4 为3个激光的位置,他们直接的距离关系如图3所示, $l_{1,2}$ 和点o之间的距离为a, l_4 和点o之间的距离为b, l_3 和点o之间的距离为c, l_1 测量到管道壁的距离A, l_2 测量到管道壁的距离B, l_3 测量到管道壁的距离C。因此可以求出 $\triangle PQN$ 的边长X和Y。公式为:

$$\begin{cases} X = \sqrt{(A+a)^2 + (C+c)^2} \\ Y = \sqrt{(B+b)^2 + (C+c)^2} \end{cases} \quad (1)$$

在 $\triangle MNP$ 中, MN 为过圆心O的线段,由于 $\triangle PQN$ 与 $\triangle MNP$ 拥有共同的弧 \widehat{PN} ,由于同弧所对应的圆周角相同,所以 $\angle \alpha$ 计算公式为:

$$\angle \alpha = \arctan\left(\frac{C+c}{A+a}\right) \quad (2)$$

又因为直径所对的圆周角为直角,所以 $\angle MPN$ 为直角,因此 $\triangle MPN$ 可解。已知Y和 $\angle \beta$,利用正弦函数可求得管道的直径为:

$$D = \frac{Y}{\sin \beta} = \frac{\sqrt{(B+b)^2 + (C+c)^2}}{\frac{C+c}{\sqrt{(A+a)^2 + (C+c)^2}}} = \sqrt{(B+b)^2 + (C+c)^2} \times \sqrt{\frac{(A+a)^2}{(C+c)^2} + 1} \quad (3)$$

因此,管道的直径得以求解。

2.2 激光盒出现偏移的分析

当激光盒子放入管道中,可以通过影像采集来去判断激光盒的大致位置,但这并不能够让激光盒处于最佳的位置进行测量,所以就会产生误差。误差的产生主要是由两种情况下造成。首先是激光盒的上仰,这会造成激光盒上侧的激光模块(激光3)测量结果偏大,对最终的测量造成影响;其次是激光盒发生左右偏移时,激光1和激光4测量值之和会偏大,也会对最终测量造成影响。

1) 激光盒上仰

正常情况下,激光盒的上激光测得的距离应为 L_1 ,但是由于可能会出现操作的问题,出现了激光盒上仰,使其理测得的距离由 L_1 变为了 L_2 ,如图4所示。

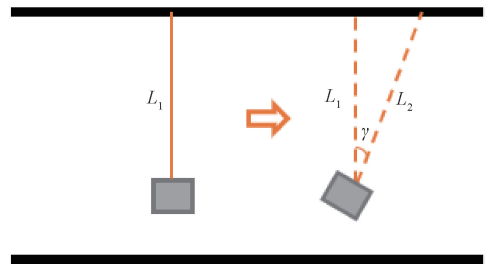


图4 激光盒上仰示意图

Fig. 4 Schematic diagram of laser box tilting upwards

由图4可知,激光盒的上仰会造成激光模块测量的距离并不是实际的距离,而是一个斜边的距离,假设倾斜的角度为 γ ,可得其偏差为:

$$\Delta L = L_2 - L_1 = L_1 \times \left(\frac{1}{\cos \gamma} - 1\right) \quad (4)$$

由式(4)可知,激光盒上仰造成的误差会造成激光模块测量数值的偏大,假设激光盒的左右模块测量的数据不变,而由式(3)可知,这也就造成C值的偏大。最终使得测量管径的结果偏小。

2) 激光盒左右偏移

正常情况下,激光盒侧面的左右激光测得的距离之和和两激光模块的距离之和应为 L_3 ,而当激光盒发生左右偏移时,这时侧面的两个激光所测量的距离都会比实际数值大,总的距离之和变为了 L_4 ,如图5所示。

由图5可知,激光盒的左右偏移会造成测量数据的值偏大,并不是激光模块到管道的实际距离,是一个倾斜的距离,假设倾斜的角度为 θ ,可知其偏差为:

$$\Delta L = L_4 - L_3 = L_3 \times \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right) \quad (5)$$

由式(5)可知,激光盒的左右偏移造成的误差会造成激光模块测量的数值偏大,假设激光盒的上激光测量的数据准确,而由式(3)可知,这种情况会造成A和B的值都偏大。最终使得测量管径的结果偏大。

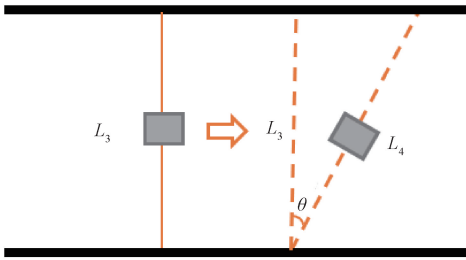


图 5 激光盒左右偏移示意图

Fig. 5 Schematic diagram of left and right deviation on the laser box

2.3 减少误差的方法

对于激光盒的上仰造成的激光 3 测量数据偏大,进而造成了最终测量管径偏小、激光盒的左右偏移造成的激光 1 和激光 4 数据偏大,并最终造成了测量管径偏大,都是造成管径的测量不准确的重要原因。为了能够减少这两个重要因素造成的误差,提出了在侧面加装一个激光模块,对其添加了对齐功能。即在激光盒的左侧装有平行的激光模块,如图 6 所示。



图 6 激光盒左侧示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the left side of the laser box

当激光盒放入到管道中时,并不知道激光盒的实际位置以及姿态,而常见的就是上述分析的两种情况,造成测量结果的偏小与偏大,而当侧面装有两个激光模块时就可以很好的解决这一问题。在实际工程应用中发现,左右偏移是造成误差更重要的原因,减少左右偏移对最终管径测量的准确性起到重要作用,左右偏移的示意图如图 7 所示。

在进行测量计算时,左侧的两个激光模块先进行测量。若发生偏移时,激光 1 测量距离加上到原点的距离为 $A + a$,而实际应为 $(A + a) \times \cos \sigma$,由于激光 1 与激光 2 的距离是一定的,激光 1 与激光 2 所测量距离的差值也很容易算出,因此可以求出角 σ 为:

$$\sigma = \arctan\left(\frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2}}\right) \quad (6)$$

由于激光模块测量距离的偏大,若此时直接代入

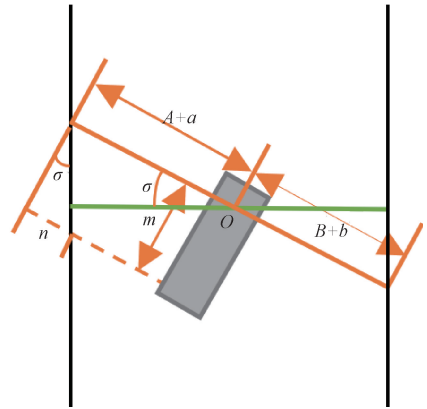


图 7 激光盒左侧偏移误差分析示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the offset error analysis on the left side of the laser box

式(3),则计算的结果偏大,但管径的真实值为:

$$D = \sqrt{(B + b)^2 \cdot \cos^2(\sigma) + (C + c)^2} \times \sqrt{\left(\frac{A + a}{C + c}\right)^2 \cdot \cos^2(\sigma) + 1} \quad (7)$$

为了使得误差值较小,就要控制 σ ,使其接近于 0,此时误差也接近于 0。在实际的工程应用中,由于人为因素,总会发生抖动,要使得 σ 十分小,十分困难。因此设定了一个角度,当 σ 小于这个角度时,就认为已经对齐,此时上位机发出蜂鸣声,保持激光盒不发生抖动,紧接着激光 3 和激光 4 分别测量,再利用激光 1 和激光 2 的差值求出 σ ,代入式(7)修正方程,即可求出管径。

3 实验验证及结果分析

根据上述理论的提出,为了验证所提出的方法的可行性与有效性,制作了测量装置对提出的方法进行验证。先对实验室理想环境下的 400、600、800 mm 管径进行了垂直(激光盒轴心垂直于管道横切面)、左右偏移、上仰 3 种情况进行实验,之后再对管径进行分区测量,将管径横截面分为了 A、B、C、D 4 个区域,在测径仪垂直的情况下,分别在 4 个区域中测量 20 组数据来去检测非接触式激光测径仪的准确性与稳定性。再对实际环境中的 3 种情况进行了实验,由于实际工况管径在地下,很难将管径进行较为准确的分区,因此通过了摄像头对管道进行了粗略的分区,进行同样的实验验证方法的正确性。

3.1 实验室测量实验

为了验证方法的可行性,对 400、600、800 mm 管径进行了实验室的测量,且对每种管道的 3 种情况下(垂直、上仰、左右偏移)随机的测量了 20 组数据。最后将每种管径进行了分区处理,在每种管径在测径仪垂直的状况

下,对4个区域同样的也随机测量20组数据。测径仪的3种测量姿态示意如图8所示。

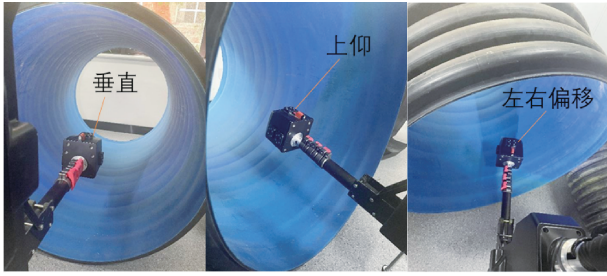


图8 测径仪的姿态示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the attitude of the caliper

对3种情况下的3种管径分别进行20组随机测量,测量的结果如图9~11所示。

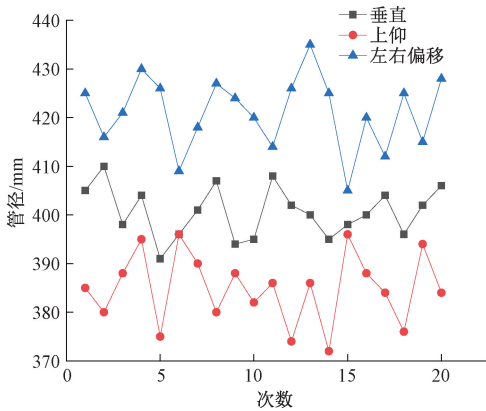


图9 400 mm 管径实验室测量结果

Fig. 9 Laboratory measurement results of 400 mm pipe diameter

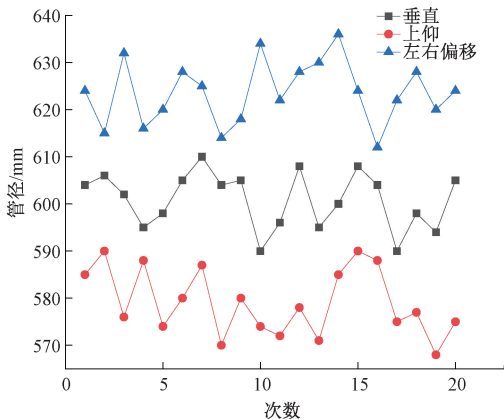


图10 600 mm 管径实验室测量结果

Fig. 10 Laboratory measurement results of 600 mm pipe diameter

由图9~11可知非接触式激光测径仪在3种不同管径和3种不同测量姿态下的测量结果的整体趋势。在垂

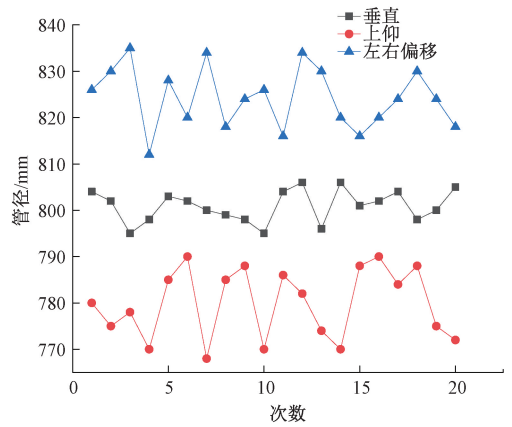


图11 800 mm 管径实验室测量结果

Fig. 11 Laboratory measurement results for an 800 mm pipe diameter

直情况下,测量的结果在实际值附近波动,且误差较小,而当出现激光盒上仰或者出现激光盒左右偏移的情况下,会导致测量结果的偏小与偏大,这与理论推导相对应,证明了理论推导的正确性。虽然上述激光盒在垂直的情况下测量较为准确,但是上述垂直情况下的测量是在管道中心附近测量,其并没有验证其在接近管道壁的测量结果情况,因此将管道的横截面进行了分区处理,将管道的横截面分为了A、B、C、D 4个区域,在不同的管径下分别测量不同区域,随机的测量20组数据。管径的分区示意图如图12所示。

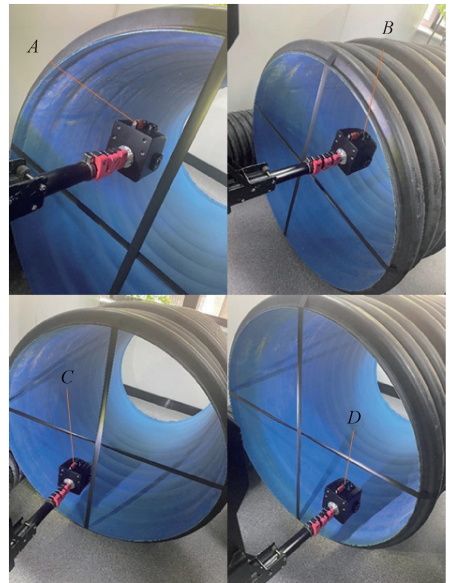


图12 管径的横截面分区示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the cross-sectional partition of the pipe diameter

对管径进行分区之后,对400、600、800 mm管径的4个区域分别进行了实验室的测量,其测量的结果如图13所示。

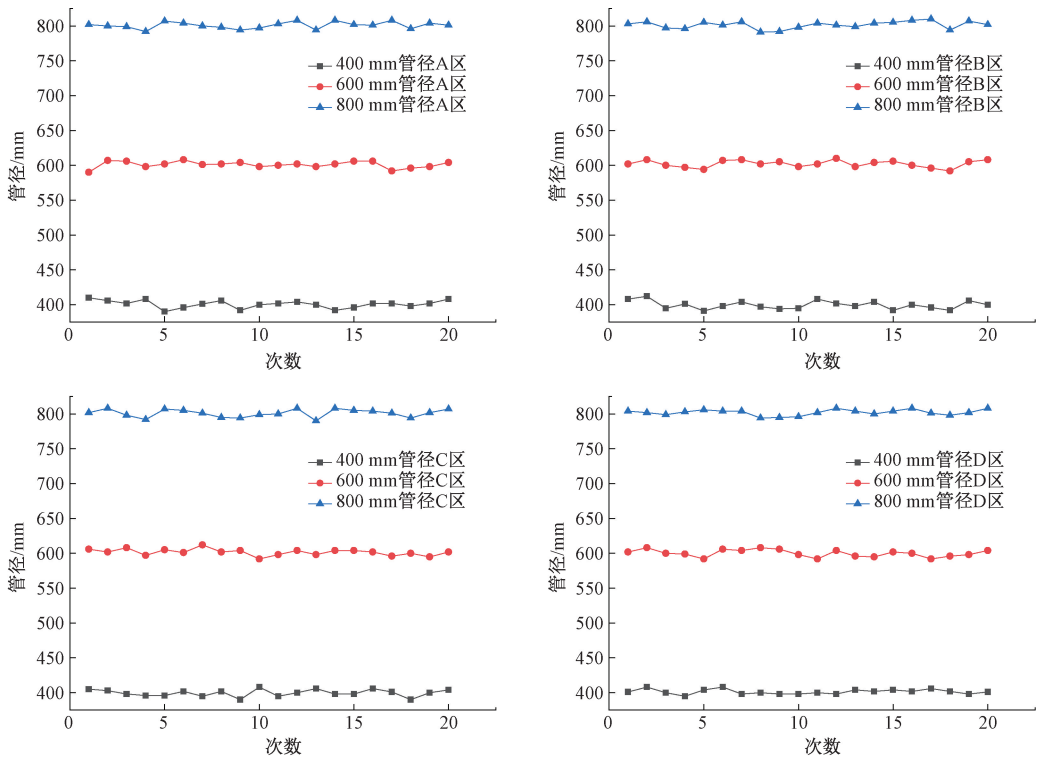


图 13 不同区域测量结果

Fig. 13 Measurement results in different regions

由图 13 可知,在不同的管径下,当测量区域发生变化时,其测量的结果仍然是在真实值的附近有一定小的波动,但是其测量的结果仍然是正确的,这证明了非接触式激光测径仪原理推导的正确性与可行性。

上述对实验室环境下的管径进行测量,当激光盒垂直管径时,测量的数据比较稳定,在实际值上下有一定的浮动,且浮动误差比较小,并对最终的管径大小的算法估计并无影响;当激光盒上仰时,由于激光盒上的激光 3 测量的值偏大造成的最终数值偏小;当激光盒发生左右偏移时,造成的激光 1 和激光 4 的数值都偏大,并最终造成了管径测量值的偏大,图 9~11 均可以证明结论推导的正确性,后又进行了分区实验,更加证明了理论推导的正确性与可行性。

3.2 实际环境测量实验

上述实验对实验室理想环境下的工况进行了测量,印证了理论推导的正确性与可行性。但是实际工作环境比较复杂,管道内壁可能会存在各种各样的问题,对激光模块的测距产生一定的影响,进而对测量结果产生一定的影响。因此,非常有必要对实际工况下的情况进行测量。

在实际环境下,同样对图 8 中 3 种情况随机的测量了 20 组数据,其测量的结果如图 14~16 所示。

由图 14~16 可知,非接触式激光测径仪在实际工作

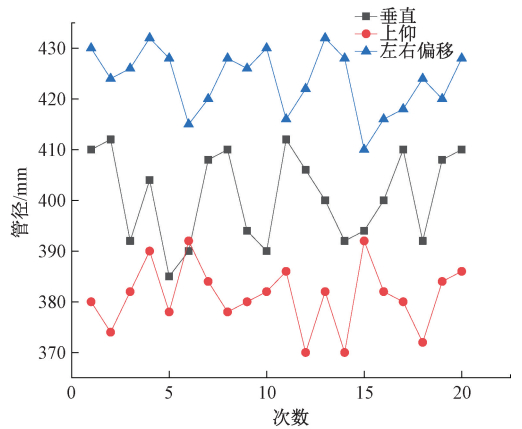


图 14 400 mm 管径实际环境测量结果

Fig. 14 Measurement results for a 400 mm pipe diameter in a real-world environment

环境下的 3 种不同的姿态下测量结果的趋势与在实验室理想环境下的结果相同,但是其由于测量环境比较差,导致激光模块的测量不够精确,进而导致了测量结果较实验室理想环境测量情况下分散性较大,即数据的波动情况较大,但其结果仍然非常准确,并于理论相对应。

在上述实验的基础上,也对实际管道进行了分区测量,由于实际环境下的分区操作比较困难,仅通过摄像头进行了粗略的分区,其分区示意图如图 17 所示。

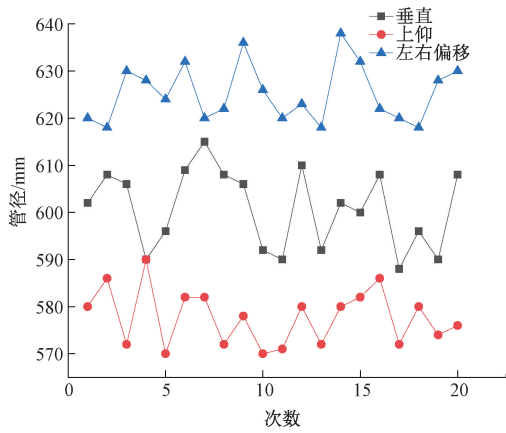


图 15 600 mm 管径实际环境测量结果

Fig. 15 Measurement results for a 600 mm pipe diameter in a real-world environment

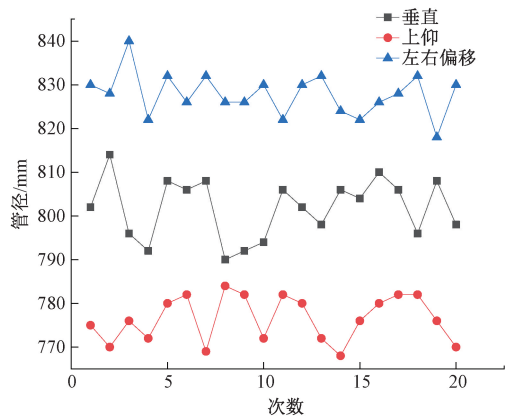


图 16 800 mm 管径实际环境测量结果

Fig. 16 Measurement results for an 800 mm pipe diameter in a real-world environment



图 17 实际环境管径的横截面分区示意图

Fig. 17 Schematic diagram of the cross-sectional partition of the actual environmental pipe diameter

在对实际工况下的管径进行了粗略的分区后,也对其进行了实验室工况下同样的实验,其测量的结果如图 18 所示。

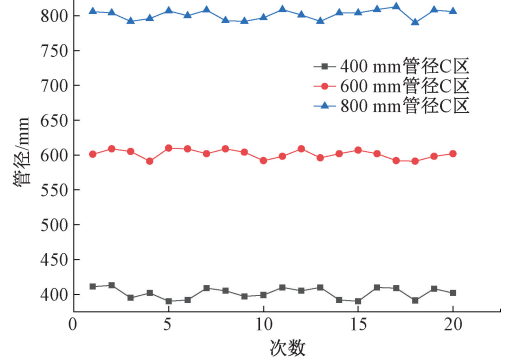
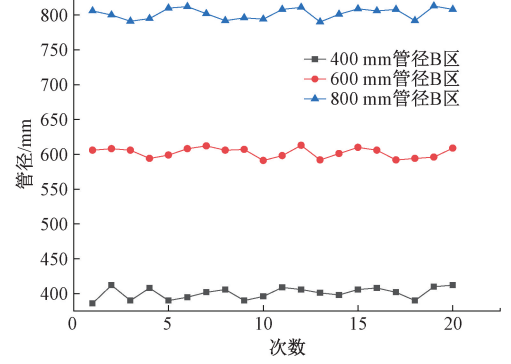
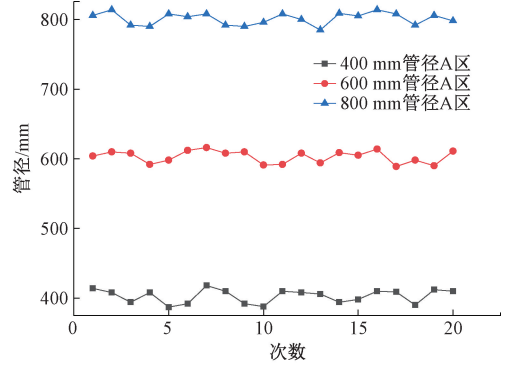


图 18 实际环境不同区域测量结果

Fig. 18 Measurement results from various areas in the real-world environment

由图 18 可知,在不同的区域测量的情况下,其测量

结果仍然是在真实值附近有一定的波动,这证明了理论推导的正确性与可行性。

上述实验首先在实验室理想工况下进行了垂直、上仰、左右偏移 3 种情况下的测量,证明了在垂直情况下测量结果的准确性,并在此基础上进行了分区实验,将管道的横截面分为了 4 个区域,在不同的管道中不同的区域分别进行了随机的 20 组测量,其测量结果仍然非常准确,这更加印证了理论推导的正确性与可行性。然后在实际工况下进行了同样的实验,其测量结果相对于实验室情况下分散性较大,但是其测量结果仍然十分准确,其测量的趋势也与实验室理想工况下相同。

4 结 论

本文提出了将多个激光模块与激光三角测距相结合的方法,对地下管网的管径进行测量,分析了测量的原理,推导了测量的公式,并分析了可能存在测量结果不准确的原因,分别为激光盒存在上仰、左右偏移两情况,并提出了一种通过在激光盒侧面加一个激光模块,在测量前进行对齐,使激光盒的轴心与管道切面垂直,进而减少误差。搭建了实验平台测量了 400、600、800 mm 管径在垂直、上仰、左右偏移 3 种情况下在实验室与实际环境下的测量结果,并在两种工况下分别进行了分区实验。

实验结果表明,当激光盒与的位置较佳时,测量的结果比较稳定,在实际值附近浮动;当激光盒发生上仰时,上述分析了上仰造成的测量结果最终会造成偏小,实验结果也表明了理论推导的正确性;而激光盒发生左右偏移时候,推导出会造成测量值的偏大。实验结果也证明了在实验室环境下与实际环境下结果方向的一致性,同时对管道进行了区域划分,证明管道在不同的区域中测量的结果也具有相同的测量结果,这更加证明了理论推导的正确性,具有很大的工程实用价值。

参考文献

[1] 余联想,郑明魁,欧文君,等. 多传感器融合的移动机器人室外激光 SLAM 算法优化与系统实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(2): 48-55.
YU L X, ZHENG M K, OU W J, et al. Optimization and system implementation of outdoor laser SLAM algorithm for mobile robot based on multi-sensor fusion[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(2): 48-55.

[2] 胡琦,叶世榕,余振宝,等. 相机标定参数对双目视觉测距精度的影响分析[J]. 测绘地理信息, 2023, 48(6): 62-67.
HU X, YE SH R, YU ZH B, et al. Analysis of the influence of camera calibration parameters on ranging accuracy of binocular vision[J]. Journal of Geomatics,

2023,48(6): 62-67.

- [3] 邱志刚,沈萌萌,贾春荣,等. 激光测距技术研究现状及发展趋势[J]. 激光杂志, 2023, 44(8): 1-8.
DI ZH G, SHEN M M, JIA CH R, et al. Laser distance measurement technology research status and development trend[J]. Laser Journal, 2023, 44(8): 1-8.
- [4] 储昭碧,李子朋,高金辉. 一种基于双目相机与单点激光测距仪的标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 232-239.
CHU ZH B, LI Z P, GAO J H. A calibration method based on binocular camera and single point laser rangefinder[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 232-239.
- [5] VASCONCELOS F, BARRETO J P, NUNES U. A minimal solution for the extrinsic calibration of a camera and a laser-rangefinder [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(11): 2097-2107.
- [6] NGUYEN T, GRASSET R, SCHMALSTIEG D, et al. Interactive syntactic modeling with a single-point laser range finder and camera [C]. 2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2013:107-116.
- [7] 万广南. 基于激光和超声的水下目标探测方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
WAN G N. Research on underwater target detection based laser and ultrasound [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [8] 胡波,张云菲,吴超鹏,等. 基于图像的水下三点激光测距方法研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(10): 122-131.
HU B, ZHANG Y F, WU CH P, et al. Research on image-based underwater three-point laser ranging method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(10): 122-131.
- [9] 石照耀,李美川,孙衍强,等. 齿轮线激光三维测量仪的研制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(4): 95-103.
SHI ZH Y, LI M CH, SUN Y Q, et al. Development of three-dimensional gear measuring instrument with line laser [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 95-103.
- [10] 石照耀,王涛. 齿轮三维测量技术中线结构光测头位姿的优化方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 44-53.
SHI ZH Y, WANG T. Optimization method of probe position of linear structured light in three-dimensional gears measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 44-53.
- [11] 崔永俊,张强. 基于激光三角法的火炮身管内径测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(9): 26-30.

- CUI Y J, ZHANG Q. Design of gun barrel inner diameter measurement system based on laser triangulation [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(9): 26-30.
- [12] 王鹤, 李泽明. 激光测距仪与相机信息融合过程中位姿标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(4): 151-158.
- WANG H, LI Z M. Calibration method of laser range finder and camera in information fusion process [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 151-158.
- [13] 臧春华, 王海舰, 高兴宇, 等. 基于激光线扫描三维重构的扩径管道直径及圆度测量方法[J]. *机电产品开发与创新*, 2021, 34(3): 79-81.
- ZANG CH H, WANG H J, GAO X Y, et al. Measurement method for diameter and roundness of expanded pipelines based on laser line scanning 3D reconstruction [J]. *Development and Innovation of Mechanical and Electrical Products*, 2021, 34(3): 79-81.
- [14] 陈建康. 双激光水下目标二维探测研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- CHEN J K. Double laser underwater target detection-research of two-dimensional [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [15] KIM Y K, KIM Y, JUNG Y, et al. Developing accurate long distance 6-DOF motion detection with 1-D Laser sensors: Three-beam detection system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(8): 3386-3395.
- [16] KIM Y K, KIM K S, KIM S. A portable and remote 6-DOF pose sensor system with a long measurement range based on 1-D laser sensors [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5722-5729.
- [17] 衡靓靓. 水下视觉测距系统的设计与实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
- HENG L L. Design and application of underwater visual ranging system [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014.
- [18] HU K, WANG T Y, SHEN CH W, et al. Overview of underwater 3D reconstruction technology based on optical images [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(5): 949.

作者简介



鲍晓华 (通信作者), 分别在 1999 年、2002 年和 2007 年于合肥工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为合肥工业大学教授, 主要研究方向为电机设计理论和技术、电机电磁场理论分析及计算、大型电机及高速电机的可靠性技术。

E-mail: baoxh@hfut.edu.cn

Bao Xiaohua (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Hefei University of Technology in 1999, 2002 and 2007, respectively. He is currently a professor at Hefei University of Technology. His main research interests include theory and technology of motor design and theoretical analysis and calculation of electromagnetic field of motor.



王明亮, 2022 年于安徽理工大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为步进电机控制、管径测量算法。

E-mail: 2022170512@mail.hfut.edu.cn

Wang Mingliang received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2022. He is currently a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include stepper motor control and pipe diameter measurement algorithm.



周虎, 2009 年于华侨大学获得学士学位, 2012 年于电子科技大学获得硕士学位, 现为乐山职业技术学院讲师, 主要研究方向为永磁同步电机控制, 机器人控制。

E-mail: 361852119@qq.com

Zhou Hu received his B. Sc. degree from Huaqiao University in 2009, M. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2012. Now he is a lecturer at Leshan Vocational and Technical College. His main research interests include permanent magnet synchronous motor control and robot control.



郭帅, 2006 年于同济大学获得学士学位, 2008 年、2012 年于浙江大学获得硕士学位、博士学位, 现为合肥工业大学副研究员, 主要研究方向为排水管网外来水量评估技术研究、给排水管网无损检测与健康修复技术研究。

E-mail: guoshuai@hfut.edu.cn

Guo Shuai received his B. Sc. degree from Tongji University in 2006, M. Sc. degree from Zhejiang University in 2008, and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2012. He is currently an associate researcher at Hefei University of Technology. His main research interests include research on external water volume assessment technology of drainage pipe network and non-destructive testing and health restoration technology of water supply and drainage pipe network.