测深仪测量水下物体竖直变量的方法及应用

邢义
（中交天津港湾工程研究院有限公司）

摘　要：为了解决当前水下竖直测距受环境条件影响大、技术难度高、误差较大及设备成本过高的问题，设计了一种由激光测距仪与机械结构相结合的测深仪，该测深仪包括仪器框架、悬挂线、动滑轮组、定滑轮组、升降台和激光测距仪。绕过动定滑轮组的悬挂线经由仪器框架顶部引出连接至水下待测物体，通过测深仪底部的激光测距仪实时检测到升降台移动的距离，进而换算出水下待测物体的水下竖直变量。经试验测量，该测深仪测量误差率在 0.8% 以内，测量精度满足施工现场需求，且结构简单、运行稳定、适应多种环境、不怕海水腐蚀，具有显著优势。

关键词：水下物体；竖直变量；激光测距仪；测深仪

0　引言

随着人类对海洋资源的不断开发与利用，水下物体竖直变量的测量技术日益受到人们的关注。水下环境的复杂性和特殊性使传统测量方法难以满足高精度、高稳定性的需求。因此，研究和开发新型的测深仪测量水下物体竖直变量成为了当前的重要课题。

水下竖直变量的精确掌握对于众多领域来说是不可或缺的基础。在海洋科学领域，它有助于深入了解海洋地质结构、海底地貌特征；在水利工程中，准确的水下测量数据能为水坝建设、航道规划等提供重要依据；在航海领域，清晰知晓水深等竖直信息更是保障船舶航行安全的关键要素。而测深仪的出现和不断发展，为水下物体竖直变量的测量提供了更多的选择和可能性。

本文通过对现有的水下物体竖直变量测量技术进行分析，同时结合施工现场作业需求，设计出一种精度高、抗干扰性强、稳定性强、且能适应较大水体变化及水深范围的测深仪，能够稳定、高效地获取水下竖直变量信息，为相关研究和应用提供有力支持。

1　水下物体竖直变量测量技术

1.1　现有测量技术的分类与特点

目前，主流的水下物体竖直变量测量技术大致可分为声波测量技术、光学测量技术、电磁测量技术以及惯性测量技术四大类。

声波测量技术以其在水下良好的传播性能而广受欢迎。声波测量技术通过发射声波并接收其反射或回波来计算物体的竖直变量。这种方法具有测量范围大、不受光线条件限制的优点，因此在深海探测和水下导航等领域得到了广泛应用。然而，声波测量技术在水中传播时会遭到吸收和扩散损耗，还会受到海洋噪声干扰，海水对声波多次反射也会产生混响干扰，需要精确校准以提高测量精度。

光学测量技术是利用光信号进行测量的方法，激光测距仪和光学相机是常用的光学测量工具。光学测量技术具有高精度、高速度的特点，适用于对水下物体进行精确的定位和跟踪。然而，由于水下光线的衰减和散射作用，光学测量技术在浑浊水域或深海环境中的应用受到一定限制。

电磁测量技术是利用电磁场原理进行测量的方法。电磁测量技术具有响应速度快、抗干扰能力强的特点，适用于对水下物体进行实时、动态的测量。然而，电磁场在水下的传播距离有限，且易受到水下金属物体等干扰因素的影响，因此在某些应用场景中会受到限制。

惯性测量技术是基于牛顿力学原理，通过测量物体在惯性坐标系中的加速度和角速度来推算其竖直变量。惯性测量技术具有自主性强、不受外部干扰的优点，适用于长时间、大范围的测量任务。然而，惯性测量技术也存在误差累积的问题，需要定期校准和修正。

1.2　施工现场需求

当前的水下物体竖直变量测量技术虽然在一定程度上能够满足实际需求，但在测量精度、稳

定性、抗干扰性等方面仍存在诸多不足。目前常用的测深仪有声学测深仪和光学测深仪，这 2 种测深仪在水下抗干扰性和稳定性方面都有一定缺陷。海水特性复杂，不止对声波和光线有吸收、散射作用，还具有一定的腐蚀性，对电子仪器设备的使用寿命有一定影响，在施工过程中更换声学测深仪或光学测深仪需要重新校准，时间较长影响工期。

因此，需要设计一种结构简单、读数方便、测量稳定、抗干扰性强、且能够适应海水下复杂环境的测深仪。本文采用先进的激光测距仪与简便的机械结构相结合的方式，不但能够克服主流的水下物体竖直变量测量技术在进行水下测量时存在的诸多困难，还能解决老式机械设备在测量水深时测量读数不便捷，容易导致测量误差之类的问题。

2　硬件结构

2.1　结构设计

测深仪的硬件结构示意图如图 1 所示，该测深仪包括：仪器框架、悬挂线、n 个动滑轮[1]、n+1 个定滑轮[2]、升降台和激光测距仪[3]。

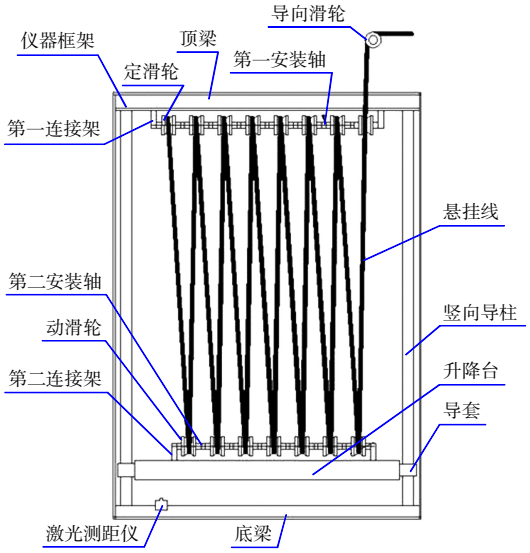

图 1　测深仪硬件结构示意图

仪器框架被设计成矩形结构，由顶部横梁、底部横梁以及两侧竖梁组成。n+1 个定滑轮以等间距的方式安装在第一安装轴上，第一安装轴稳固连接至仪器框架的顶部横梁。与此同时，n 个动滑轮也以等间距的形式安装于第二安装轴上，第二安装轴固定于升降台上。升降台被设计为能够在仪器框架内部沿高度方向自由滑动的结构。激光测距仪安装在仪器框架的底部横梁上，用于实时测量升降台的竖直变量。悬挂线依照特定的路径绕过动滑轮与定滑轮，最终从仪器框架的顶部引出经由外部导向滑轮后，与待测的水下物体相连接。测深仪还配备有外壳，该外壳包覆于仪器框架外层，外壳上开设有悬挂线引出孔以及激光测距仪的线缆引出孔。

2.2　仪器框架

仪器框架整体呈矩形，由顶梁、底梁以及 2 个侧梁构成。在仪器框架内部的两侧位置设有竖向导柱，升降台的两端借助导套滑动安装于竖向导柱上。通过导套与竖向导柱相互配合，从而实现了升降台沿导柱的上下移动。第一安装轴和第二安装轴上下相互平行排布，第一安装轴通过第一连接架稳固连接至顶梁上，第二安装轴通过第二连接架连接至升降台上。

2.3　动定滑轮组

该测深仪包含 n 个动滑轮和 n+1 个定滑轮，其中 n+1 个定滑轮以等间距的方式安装在固定于仪器框架顶梁的第一安装轴上，n 个动滑轮也以等间距的形式安装于固定在升降台的第二安装轴上，且每个动滑轮均处于其上方相邻的 2 个定滑轮之间的中线上。此外在仪器框架外部设有导向滑轮，外部导向滑轮稳固地安装于仪器框架的上方，或者通过支架固定于其他合适的位置。

工作时悬挂线从第一安装轴的最左侧定滑轮起始，向下绕过第二安装轴上最左侧的动滑轮，再向上绕过第一安装轴上自左向右的下一个定滑轮，再向下绕过第二安装轴上自左向右的下一个动滑轮，如此按照自左向右的顺序依次绕过所有定滑轮和动滑轮，最后悬挂线经过最后一个定滑轮后从仪器框架顶部引出，悬挂线的引出端经过外部导向滑轮后，用于连接待测的水下物体。

2.4　激光测距仪

激光测距仪是利用激光对目标的距离进行准确测定的仪器。激光测距仪具有重量轻、体积小、操作简单、测距速度快而准确等特点，是现有技术中成熟、工作稳定且测量精度高的常用电子传感器件。将激光测距仪固定在仪器框架的底梁上，激光射向升降台下表面，用于实时检测升降台移动的距离。在安装中将激光测距仪线缆经测深仪外壳专门设置的孔口穿过，连接至船上总控室，可将激光测距数据实时传输，以便测量员实时动

态监测施工作业状态。

3　测量原理与精度

3.1　测量原理

将悬挂线的引出端与待测的水下物体相连接，当水下物体下降时，悬挂线通过外部导向滑轮带动动滑轮组向上移动，同时动滑轮组所在的升降台会跟随向上移动；当水下物体上升时，悬挂线不受力，升降台会因自身重量而下落。即升降台能够沿着竖向导柱跟随待测的水下物体上下移动。由于定滑轮改变力的方向以及动滑轮动力臂为阻力臂的 2 倍的特性，单个动定滑轮组的情况下，水下待测物体移动距离为升降台移动距离的 2 倍，而多个动定滑轮组可实现水下待测物体移动距离与升降台移动距离数倍的缩放比例，即升降台的移动距离仅在仪器框架内很短的行程范围内就可测出水下待测物体很长的移动距离。

通过测深仪底梁上的激光测距仪可以实时检测到升降台移动的距离，进而换算得出水下待测物体的竖直变量。测深仪测量水下物体竖直变量的计算原理图如图 2 所示，l_0 为定滑轮所在第 1 安装轴至升降台上的动滑轮所在第二安装轴之间的轴距的初始距离，$l_{测}$ 为水下物体移动后动滑轮中心点的竖直变量，此竖直变量即为激光测距仪所测得的升降台的竖直变量，d 为 2 个相邻定滑轮的中心距，m 为定滑轮与动滑轮之间的单条悬挂线的初始长度。通过 l_0、$l_{测}$ 和 d 可计算得出由于水下物体移动带动升降台移动后的单条悬挂线的长度，通过与悬挂线初始长度 m 作差，进而得出单条悬挂线的长度变化量，再乘以定滑轮与动滑轮之间的单条悬挂线的数量，就可以得到悬挂线的总长度变化量，即水下待测物体的竖直变量。

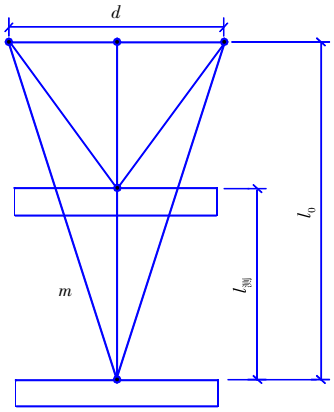

图 2　测深仪测量水下物体竖直变量的计算原理图

具体换算公式如下：

$$s=2n\left(m-\sqrt{(l_0-l_{测})^2+\left(\frac{d}{2}\right)^2}\right)$$

式中：s 为待测的水下物体的竖直变量，m；n 为动滑轮个数；式中 $\left(m-\sqrt{(l_0-l_{测})^2+\left(\frac{d}{2}\right)^2}\right)$，即为水下待测物体移动后单条悬挂线的长度变化量；$2n$ 为单条悬挂线的总数量。

3.2　测量精度

为了验证本文所设计的测深仪的测量精度，在水深为 9 m、17 m 左右的水域进行测量，以水砣直接测量的水深值作为基准值进行对比。在测量试验过程中，首先用水砣直接测量，即使用 1 个标有刻度的钢绳拴着重物（水砣），通过将水砣抛入水中，等待水砣触及底部，读取刻度上的数值来确定水深。然后使用本文所设计的测深仪测量水深，将测深仪固定在夯平船上，悬挂线引出端连接重物（水砣），由水面抛入水中，上位机读取激光测距仪读数，并换算成水下竖直变量值（即水深）。

在水深 9 m 水域分别使用水坨直接测量和使用测深仪测量，测量 5 组进行对比，对比结果如表 1 所示。由表 1 可知，本文所设计的测深仪在 9 m 水深水域测量偏差值控制在 8 cm 以下，满足现场施工需求。

表 1　水深 9 m 水域水砣直接测量与测深仪测量结果对比表

序号	水砣直接测量值/m	测深仪测量值/m	偏差值/m	误差率/%
1	9.109	9.037 1	0.071 9	0.789
2	9.110	9.036 8	0.073 2	0.804
3	9.110	9.037 9	0.072 1	0.791
4	9.110	9.036 6	0.073 4	0.806
5	9.109	9.038 0	0.071 0	0.780
平均值	9.110	9.037 3	0.072 7	0.798

同样在水深 17 m 水域分别使用水坨直接测量和使用测深仪测量，测量 5 组进行对比，对比结果如表 2 所示。由表 2 可知，本文所设计的测深仪在 17 m 水深水域测量偏差值控制在 13 cm 以下。该测深仪的主要优势在于能够适用于各种复杂环境（如水中杂质较多）的水域，稳定性和抗干扰性较强，且读数方便、结构简单更换配件容易，同时经过精度测量结果显示该测深仪的测量精度较高，满足现场施工需求。

表 2　水深 17 m 水域水砣直接测量与测深仪测量结果对比表

序号	水砣直接测量值/m	测深仪测量值/m	偏差值/m	误差率/%
1	17.474	17.354 4	0.119 6	0.684
2	17.475	17.348 5	0.126 5	0.724
3	17.474	17.350 1	0.123 9	0.709
4	17.474	17.349 7	0.124 3	0.711
5	17.475	17.352 8	0.122 2	0.699
平均值	17.474	17.351 1	0.122 9	0.703

4　实施方案

在夯平船施工作业中，将抛下的石块利用振动锤进行碎石夯平，此时需要测量夯平的高程是否在预设范围值之内，只需实时测量振动锤所在高程即可得到夯平高程。工程上常使用激光测距或声波测距的方法，但在振动锤夯平过程中，会使碎石、泥沙等杂质因受冲击而漂荡在水中，这些杂质会对激光或声波产生反射、散射、吸收等影响，使得仪器不能正常工作。而本文所设计的测深仪只需用激光测距仪测量升降台在仪器框架内很短的行程距离即可，大大减少了水中杂质对测量仪器的影响。

在施工过程中将测深仪悬挂线由左向右依次绕过定滑轮和动滑轮，然后经由外部导向轮连接至振动锤，在振动锤向下移动时，悬挂线经过动定滑轮组牵引升降台向上移动，固定在仪器框架底梁的激光测距仪实时测量升降台上升的距离，经过换算公式计算得到振动锤移动距离，进而得出夯平高程是否在范围值内。而在振动锤向上移动时，亦可通过换算公式得出总悬挂线长度变化量，进而得出振动锤当前高程位置。

本文设计的测深仪所采用的机械部件均为常规机械标准件(滑轮、滑轮安装轴、悬挂线以及框架等)，结构简单、运行稳定、不怕海水的腐蚀。同时激光测距仪技术成熟、测量稳定、精确度高且有一定的防水性能，并且测深仪有外壳防护，更进一步保护激光测距仪，使该测深仪能够精确稳定地进行长期测量作业。

需要指出的是，测深仪既能够在水上作业(例如在船上或者海上平台上)，也能够在水下作业。在水下作业时，将激光测距仪的线缆引出水面，并连接至数据采集和数据分析仪器即可。激光测距仪是现有技术中成熟、工作稳定且测量精度高的常用电子传感器件，现有的激光测距仪能够实现良好的防水性能。更为关键的是，在水下作业时，由于激光测距仪测量升降台的竖直变量，而升降台的竖直变量仅在仪器框架内很短的行程范围内，再加上仪器框架外侧有外壳防护，因此在升降台的有限行程范围内，水质变化较小，基本不会受到水流、水下扩散颗粒物的影响，进而激光测距仪在水下检测到的升降台的竖直变量数据是准确的。

5　结语

随着科技的不断进步和应用领域的不断拓宽，水下物体竖直变量的测量技术正面临着前所未有的发展机遇。本文首先分析了现有的水下物体竖直变量测量技术，包括其分类和特点，同时结合施工现场情况和需求，设计了结构简单、测量准确、稳定性强、抗干扰性强并能适应夯平船施工作业时复杂水下环境的测深仪。利用动滑轮和定滑轮的特性，结合激光测距仪使用便捷、测量准确的特点，将激光测距和机械结构相结合的方式应用在测深仪中。在现场使用过程中，该测深仪不仅能在水下碎石泥沙等杂质较多的情况下准确测量夯平高程，还能实时动态反映出振动锤当前所在高程值，并且能长期稳定地进行测量作业，在需要更换测量设备时能够简单快速地更换配件，同时，经过试验测量，该测深仪的测量误差率在0.8%以内，测量精度满足现场施工需求，改善了传统激光测距和声波测距在水下杂质过多的情况下测量不准确的问题。无论是在精确性与稳定性，还是实时性与动态响应，亦或是适用性与灵活性方面，本文所设计的测深仪都展现出了显著的优势。但本文未量化动定滑轮组的最优个数，今后还需进一步研究，不断改进与完善，进一步提高测深仪的测量精度。

参考文献：

[1] 马连杰. 使用单个动滑轮省一半力的条件[J]. 物理通报，2019(7)：49–50.

[2] 冀敏，蒋平. 定滑轮中的力学原理[J]. 物理与工程，2016，26(3)：9–11.

[3] 王秀芳，王江，杨向东，等. 相位激光测距技术研究概述[J]. 激光杂志，2006，27(2)：4–5.