

海流速度剖面测试仪的拖箱试验

C.E. Abbott, Mapine Profites Inc.

李山鹰 译

曾耀明 校

提 要

为测试海洋中垂直柱状体上的海流速度和方向, 提供了一种装有速度传感器的自动剖面测定装置, 该装置通过沿一根遥测系泊钢丝绳自动上下滑动采集数据。为了测试该系统的精确度, 先在一个巨大的淡水箱里将一完整的测试装置以各种速度和从不同冲角拖曳。本文就转动式和电磁式两类速度传感器及其测试结果做了论述。

引 言

在深水中, 作用在结构物上的海流产生的力往往超过波浪产生的力, 这种波浪力随深度增加而呈指数规律递减。对这些海流作了观测, 发现它们不仅在深水中表现出极大的可变性, 常常在一柱状水域内数次改变方向, 而且在潮汐或风暴期间随时间发生巨大变化。因为大多数海上设计和施工在深水中都要受海流的影响, 为更好的决定结构, 就要作各种垂直剖面测试。

为了测试一个垂直柱状体上的海流, 在自动测试设备上同时安装了两种海流速度传感器(电磁式和 Savonius 转子) 以获得海洋300米深度内的剖面。当剖面仪沿一根系泊钢丝绳上下滑动时, 可记录任何深度上的海流大小及方向。

所用的海流传感器有两种截然不同的形式。最简单、最经济的是 Savonius 转子。其结构仅为一个由海流驱动的自由转动转子。可由图 1 的照片上看到工作状态的测试设备, 其头部两边安装了两个转子。这种方法的主要缺点是: 作为一种机械传感器元件, 会因轴承磨损而造成精确度下降。同时, 因为转子的灵敏度具有径向对称性受到“泵效应”的影响, 从而波浪区近洋面的海流的大小反应过高。尽管有这些缺点, 但固定水平面海流测试仪还是普遍采用了转子。

第二种是电磁式(EM)传感器。总的来讲, 它克服了转子的一些缺点。这种传感器没有会磨损或可能会卡住的活动部件, 并有双轴对称性, 能辨别海流的方向。不过, 价格昂贵是这种传感器的主要缺点。图 2 是测试设备的侧视图, 在它头部正下方装有 EM 传感器的探头。图 1 中所示转子的头部整流罩和前面的电子仪器外壳都旋转了90°, 以简化 EM 传感器的安装。

虽然许多科学工作者已将两种速度传感器分别安装在固定水平海流仪上, 进行了测试及用于现场。但因多变量剖面仪(MVP)独特的性能, 当用这种新的方式进行测试时, 仍需进行额外的试验以验证精确度。

剖 面 测 定

多变量剖面仪不是固定在一个深度上, 而是沿一根垂直张紧的钢丝绳上下滑动。由于这

个运动,速度的垂直分量就传给了传感器。显然,在计算海流的水平分量时,必须考虑到速度的垂直分量。

为了测定方向,MVP尾部叶片在海流中变动不定,头部指向上流。在尾部则安装了一只罗盘以记录方向。剖面测定的另一种结果是,仪器时常能在水柱中的定向切变区内迅速移动。从理想上,剖面仪可以对海流方向的任何变化迅速作出反应。但是,实际上测试设备的体积使得反应时间比即时时间约慢半分钟。这样就造成一种可能,某些情况下,传感器可能被MVP的尾部所屏蔽。

最后,在做剖面测试时,测试设备不能保持等速或水平状态上。在向上作剖面测定时,浮力变化使得设备的前部较高,故必须考虑传感器对倾角的反应。MVP数据采集系统中包括一个用来测试该参数的倾角传感元件。在校正中,横摆在标定中被视为非重要因素,这是因为滚轴(Roller block)体总成将MVP横摆幅度限制在非常小的范围之内。

为了测试每一种传感器的精确度,并评价在测量时测试装置的屏蔽及倾斜影响,需将整个测试设备拖入测试箱中。共进行了四百多次拖曳试验,测试速度从5厘米/秒到150厘米/秒,并做了各种倾角和方位角测试。总结这些试验,得到了精确度为 ± 2 厘米/秒的总标定系数,同时,对各种传感器的相对优点作了评价。

测 试 装 置

用于测试两种传感器的拖曳设备安装在NSTL试验站(地址为 Bay St. Louis Ms)的水箱中,其尺寸为 $3.6 \times 3.6 \times 137$ 米,箱里充满了淡水。测试设备被刚性联在跨在箱上的拖曳托架上。图3是拖曳装置的示意图。剖面测试仪浸没在拖曳箱的中等深度附近,用一根3米长,直径为7厘米的垂直管子将其联到拖曳台上。用一根4米长的管子调节所需尾部仰角。从MVP尾部到拖曳托架外角有两条绳,在高速测试时起稳定部件的作用。

进行实验时,工作人员可以在托架上记录来自测试装置的数据,并记下托架的速度。拖曳托架上的数字读数决定于移动距离和消耗的时间,得出平均参考速度的时间,精度可达 $\pm 0.1\%$ 。

根据剖面仪的数据输出特性,将实时信号耦合到拖曳托架上,该系统 MVP 信号传输经过一单圈绝缘线圈,通过滚轴体总成,然后穿过拖曳托架上的螺旋管传感器。这样操作人员不仅可在操作时记录数据,而且还可记录箱中剖面仪的倾斜角位置及开机前罗盘读数。

转 子 传 感 器

安装及操作

图1照片中的转子是挪威卑尔根的 Aanderaa Instruments 仪器公司生产的,用于 RCM-4 型海流仪。它们为 Savonius 型,长度系数 43.1 厘米,起动门限为 2.1 厘米/秒²。将其安装在 MVP 的前端,其头部伸进流体中。剖面测试装置的一个优点是转子的起动门限可被剖面仪的垂直速度克服。但是这个优点由于它在具有水平分量的矢量和中出现而被抵消,而且以后用深度(用压力传感器)对时间的矢量减去。

使用两台转子是为了提供备份。每台转子都用低摩擦轴承支承,塑料轴中成型的磁铁通过钼质管端盖帽固定,其磁力驱动一个光盘。然后汇总采样期间电路的电脉冲并作记录。

为保护转子,以前曾研究过用四根支撑罩(four posted cage),防止转子损坏,该罩

影响转子流量,给译码造成困难。本文中的试验机使用的是安装在转子后边的单支撑杆,这样就把阻碍海流的因素减到了最小。

实验及结果

有四个剖面仪上安装了转子,对八个转子作了测试。为得到转子转数,传感器电路采用了11条线的光盘,总周期为8秒。方程1是每一转子平均转数的标准式。

$$R = c/td \quad \text{转/秒} \quad (1)$$

式中 R = 转子转数/秒

c = 数据记录器的速度道中的十进制记数

t = 总周期 = 8 秒

d = 光盘传感器元件上线数 = 12

操作时,对十个 c 值作了标准记录,然后取其平均值。方程2的线性表达式适用于四个支架速度和固定倾角。同样也适用于另一个速度通道中的数据。因此我们对任一个转子都有:

$$V = aR + b \quad \text{厘米/秒} \quad (2)$$

a 是长度系数, b 是转子起动门限。

总的说来,表1所示的每秒32,64,96和128厘米的速度是66次试验的汇总。在试验时用将MVP尾部向上或向下调的方法对三种倾斜角作过研究。包括仪器水平和角度约为 $\pm 27^\circ$ 的位置。

表1中可看到斜率 a 显然与倾斜角有关,此外在左右侧转子之间的显示是反向的。还可看出对读数使用了线性表达式,略去了倾角的作用,造成的误差,其值约为10%左右。

经分析,认为左、右偏差是由支撑杆造成的。Van Leer, 等人^[1]在四柱罩中也发现过同样的情形。从图1中可看出转子的转动方向相反,这就是说,使用尾部支撑杆,转子周围的流体是多少会受到一些阻碍。为了计入这种影响,我们采用了一个包括倾斜角项,也包含了左、右两侧读数之间的符号变化的表达式。

$$V_c = (a_2 X_2 + b_2)R + a_1 X_1 + b_1 \quad \text{厘米/秒} \quad (3)$$

倾斜角在 -30 到 30° 的范围中,我们发现使用下列系数最佳

$$a_1 = 7.05 \quad a_2 = 11.09$$

$$b_1 = 9.53 \quad b_2 = 31.45$$

$$X_1 = \cos\beta$$

$$X_2 = \cos(\beta + 10^\circ) \text{对左侧转子为} \cos(\beta - 10^\circ)$$

使用这些系数就把有效值误差降到了0.75厘米/秒。分析方程(3),假定 $\beta = 0$,则上边的表达式就化简为:

$$V_c = 42.28V + 2.48 \quad \text{厘米/秒} \quad (4)$$

与上述(Aanderaa转子)的特征系数非常相近。

为了评价转子的水平方位响应,也做过一些尝试,但是由于拖箱狭小,限制了所允许的测试角范围。角度在 $\pm 10^\circ$,使MVP保持水平,都没什么影响。这个实验的结果易使人误解,因为 90° 时会产生一股沿着转子轴线的水流,其输出将会下降到零(将会是一个余弦响应)。

在剖面测试期间,转子检测出水平和垂直速度的矢量和。所以,倾斜传感器的读数就不能说明转子的总矢量,在将前边的方程式用于实地数据时,要求B式则应为:

$$B = \text{倾斜角} - \arcsin V_v/V_z \quad (5)$$

这里 V_v = 从深度变化率得到的MVP垂直速度

V_z 是从方程 2 得到的速度

这个新的角度是一个近似值, 因为根据方程 (3), V_z 的值是不正确的, 但是, 在这样的计算中该误差是微不足道的。

引起较大误差的原因是在必须从方程 (3) 的 V_c 中减去下降速度。由于这个速度是以压力数据得到的, 而即使在深度变化为 8 厘米, 取样间隔为 15 秒的最佳状态时都会产生 0.16 厘米/秒的速度下降误差。

EM 传 感 器

安装及操作

电磁海流测试仪是由 Marsh-McBirney, Inc. of Gaithersburg MD 生产的一种双轴装置。其型号为 OEM512。它检测出射入水中的自感电流的偏转, 偏转量近似与海洋流速成比例。正偶电极使这种设备在水平面上具有两维灵敏度。图 2 说明安装在 MVP 头部的 EM 探头的位置。传感元件是安装在密封主管帽端上突出物, MVP 前部所有的电子元件都封装在密封室中, 直径 3.8 厘米的探球安装在长 23 厘米、直径 1 厘米的连杆上。

轴的方向是沿着测试装置的柱体流动就从 EM 电子装置中产生 Y 输出 (流进前部为 - Y), X 轴与测试装置垂直 (流进右侧为 - X)。

实验及结果

EM 探头检测比前述的转子检测稍微广一些, 部分原因是因为 EM 传感器具有区别正、反向海流的能力。

整个检测期间装置的采样间隔都是 6 秒, 在标准状态下, EM 传感器 X 和 Y 输出量分别被记录下来, 而后每套装置再对每种情形取平均值。

每次开始测试时, 记录静止的 X 和 Y 读数, 以使上次工作所用的水已平静下来。我们还可从这些读数中检测出任何零速度基线漂移, 这种漂移可能是 MMI 电子装置中所固有的, 这是由于电池电压下降或电子元件的不稳定性造成的。但是, 从未记录过。

在记录数据期间, 每次正向试验结束时, 工作人员要重新等待水箱中的水平静下来, 然后再进行反向测试。使用这样的操作程序, 在 8 天内完成 334 次正、反测试, 测试速度从每挡 15 厘米/秒增加到 120 厘米/秒。

最初的实验数据指出速度低于 150 厘米/秒时, 探头输出与拖曳速度不成线性关系。已注意到在接近 60 厘米/秒时, 用 MMI 校正系数, 预测值偏差大 ($\pm 10\%$)。图 4 表明了这种情况。用黑点表残差值, 亦即用理论系数计算的速度和实际拖曳速度之间的差。当 MVP 成水平位置, 水流通过轴时, 下曲线急剧下降到 60 厘米/秒附近, 上曲线表示将 MVP 向左侧拖曳成 40° 水平方位角的结果。由六个测试探头得到了相似的结果。这种情况相信是在 60° 厘米/秒左右时出现了流量分离所引起的^[4]。来自同一厂家的直径较大的传感器在相应的速度范围中显然没有表现出这种情况^[3]。图 5 是在速度近于 60 厘米/秒的最不利情况下, 水平方位角响应的极坐标图。由于箱宽有限, 无法作较大的轴外用角测试。

为了适应图 4 和图 5 表示的观察结果, 使用下式,

$$V = AS = BS^2 + CSF + D \quad \text{厘米/秒} \quad (6)$$

这里A、B、C、D是系数,当方程6适用于从每个探头收集的数据时,则A、B、C、D是常数、S是在对倾斜角 β 的Y作了校正之后,X和Y轴的矢量和。

$$S = [X^2 + (Y/\cos\beta)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

这里,F包含了方位角响应曲线补偿项

$$F = \text{abs}[\sin(2\text{atan}(X\cos\beta/Y))] \quad (8)$$

结式系数如表2所示。求出的每套系数分别用于正向和反向测试以及6个传感器,均方根误差范围为0.8厘米/秒到1.8厘米/秒。图6列举的海流测试和计算之间的残差,是通过其中的一个传感器在倾斜和方位角都在 $\pm 30^\circ$ 的范围内正向测试时得出的。所有的传感器都获得类似的结果。

将上述方程式用于剖面测试仪获得的实地读数时,必须减去垂直剖面速度,即修正方程7中的 $(Y/\cos\beta)$ 。得:

$$Y_m = Y/\cos\beta - \text{abs}[\tan\beta(V_v/300)] \quad (9)$$

V_v 是MVP的垂直剖面速度

图7是应用表2的系数后,传感器倾斜响应的极坐标图。可看出其在正负Y流量上与中等倾角吻合较好。就像在向上的剖面测试中一样,最大偏差总是出现在当进行一个向上剖面测试,流体进入MVP头部时。这是传感器上电子室屏蔽的结果。误差近似于30%或6厘米/秒(在典型的速度为20厘米/秒剖面测试中)。这就使得向上的剖面测试最不准确。此外,在接近 160° 处有剖面测试仪造成的某些明显阴影。在向上作剖面测试时,因沿MVP轴的高频,也发现这种效应。上述方程没有解决对由测试仪引起的屏蔽效应进行补偿的问题。

小 结

根据装在多变量剖面测试仪上的几种转子和EM速度所作的大量实验,我们可得出以下结论:只有在有限的条件下,速度才能精确到 ± 2 厘米/秒。

仅仅当流体进入测试设备的前部且轴承具有最小摩擦时,转子才能最好地提供可以预测结果,而无需事先校正。

如果开始时对每个传感器都进行过单独校正,即使由于测试装置在向上作剖面测试中造成的阴影降低了其性能,但EM传感器还是可以提供所需精度。EM传感器所需的附加校正进一步提高了其价格,但因其无运动机械部件,故其长期稳定性比转子更好。

参 考 文 献

1. Van Leer, J.C., W. Duing, R. Erath, E. Kennelly, and A. Speidel, 1974: The Cyclesonde: An Unattended Vertical Profiler for Scalar and Vector Quantities in the Upper Ocean, Deep-Sea Research, 21, 385-400.
2. Ocean Currents Measurement System; Aanderaa Current Meter User's Guide. US Department of Commerce, NOAA, Office of Marine Technology, 1974.
3. Directional Sensitivity of Oceanographic Flow Sensors. Marsh McBirney, Inc. Gaithersburg, MD, Technical Note 5, 1982.
4. Lavelle, J.W., R.A. Young, D.J.P. Swift, and T.L. Clarke, Near-Bottom Sediment Concentration and Fluid Velocity Measurements on the Inner Continental Shelf, New York, Journal of Geophysical Research, 83, C12, 6052-62, 1978.

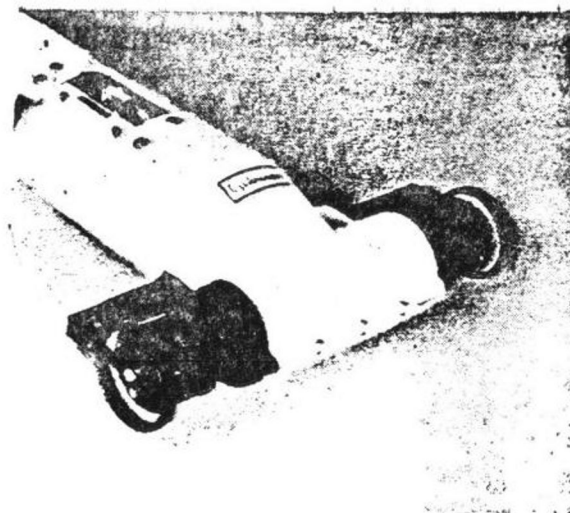


图 1 MVP的头部，转子安装在其两边

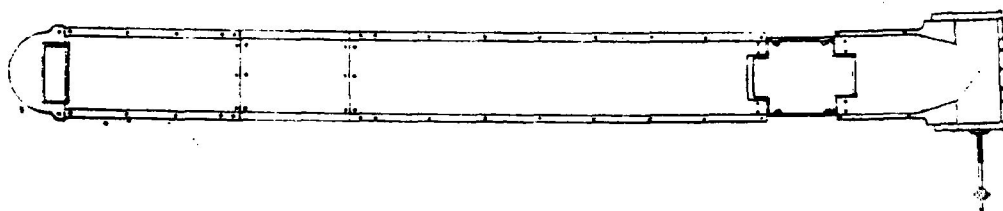


图 2 MVP侧视图，在测试设备正下方安装了EM速度传感器

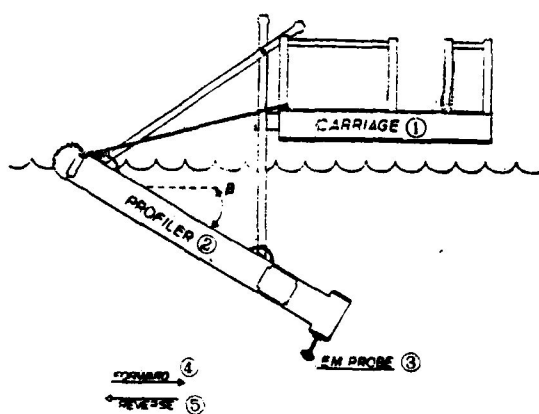


图 3 试验箱中，拖曳MVP的结构草图

①拖曳车；②剖面测试仪；③电磁传感器；④向前；⑤向后

表 1 对四台车在左、右两侧安装了转子的装置进行测试各种倾角的转子常数及临界偏移

仪器号	左 边 转 子		右 边 转 子		倾 斜 角
1	40.55	2.30	42.54	2.25	-27.36
1	42.44	2.08	42.70	2.01	-0.50
1	42.15	3.84	39.66	4.44	25.92
2	39.47	3.91	41.56	4.07	-28.12
2	42.06	2.10	42.50	1.91	0.04
2	41.73	3.84	39.95	4.03	29.55
3	40.07	4.37	41.87	4.02	-26.90
3	42.25	2.62	42.36	2.31	0.00
3	42.61	3.03	41.18	2.06	29.60
4	40.69	3.21	41.95	2.35	-27.60
4	42.16	3.08	41.31	3.30	-0.30
4	42.91	2.15	39.68	3.21	26.75

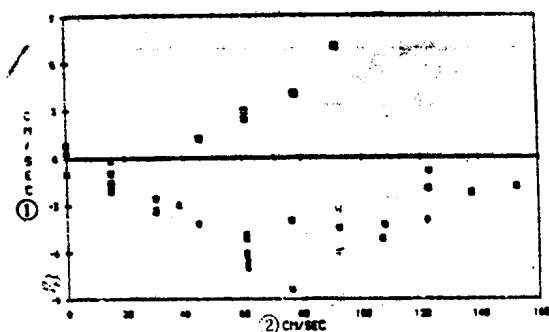


图 4 在两个方位角中，用一般系数预测的输出与EM传感器实际输出偏差
①厘米/秒；②厘米/秒

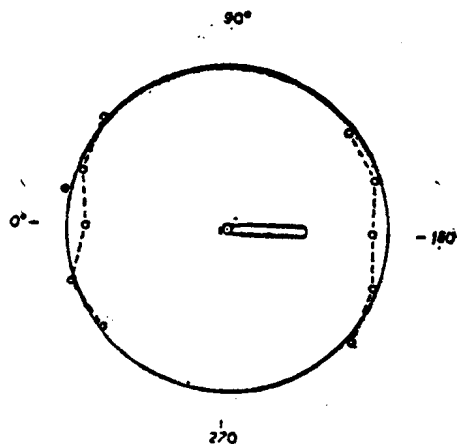


图 5 计入了 MVP 体的影响和余弦校正以后在60厘米/秒时，
EM传感器水平响应的极坐标图

表 2 六个EM传感器在正、反两个方向测试时得出的多项式系数，
误差单位为厘米/秒

试 验	1	2	3	4	5	6
向 前						
A	376.2	360.7	358.2	346.4	372.2	345.8
B	-193.7	-155.6	-141.7	-101.3	-161.1	-115.1
C	-41.1	-35.3	-41.8	-34.9	-46.7	-36.8
D	-0.9	-0.8	-0.9	-0.0	-1.1	-0.1
标准误差	1.0	1.0	0.8	1.2	1.2	0.8
向 后						
A	359.3	359.8	348.8	334.6	349.8	333.9
B	-163.9	-162.2	-122.8	-87.9	-134.6	-105.2
C	-31.9	-36.6	-24.8	-26.7	-28.9	-20.0
D	0.1	0.3	0.6	1.0	6	1.4
标准误差	1.7	1.4	1.6	1.8	1.8	1.6

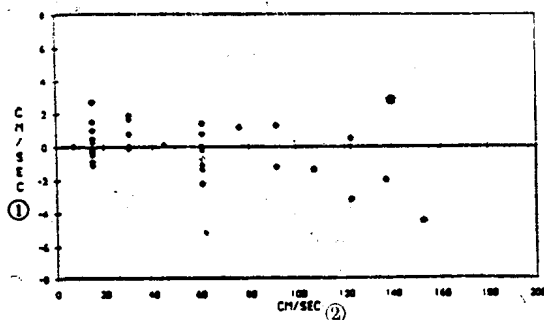


图 6 用表2的系数预测的输出与EM传感器的实际输出偏差。对所有的倾斜角和检测方位角作了正向试验
①厘米/秒；②厘米/秒

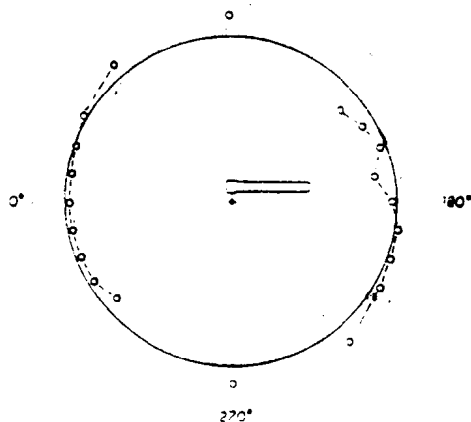


图 7 在60厘米/秒时EM传感器垂直响应的极坐标图，计入了MVP影响，并作了余弦校正