

电 磁 测 流 法

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ МОТОДУ

謝海观 Ше Хэй-куань 編譯

編者按 电磁测流法在国际地球物理年(1957—1958)的海洋观测中曾有着广泛地应用。中国科学院海洋研究所曾于1957年在黄渤海的测流工作中应用过,但由于有潮海区海深较浅,海底地形变化较大,因而K值很不稳定。现在发表谢海观同志編譯的这篇文章,供有志于从事这方面研究的同志参考。

电磁测流法是海洋测量技术的最新成就之一。利用电磁测流計(下简称 ЭМИТ)不仅可以在測站上測量海流,而且更主要的是可以在行船时測量海流。因此 ЭМИТ 的应用,能够在短时期内积累大面海区的海流資料,在海流的研究上是有很大意义的。

本文主要根据苏联有关刊物的报导,介绍了电磁测流法的原理,ЭМИТ 的构造和电磁测流法的特点。

一、电磁测流法的原理

电磁测流法是以法拉第电磁感应定律为基础的,当导体在磁場中移动并切断磁力綫时,导体内将感应出电动势,后者的大小与导体的运动速度及磁場强度成正比。

根据法拉第定律,导体的运动速度 V , 单位长度导体内所感应的电动势 e (方向与 V 垂直)和磁場强度 H 之間具有如下的向量关系:

$$e = V \cdot H$$

e 的方向将垂直于 V 和 H 所在的平面。 e 的正向可根据右旋螺钻法則确定之,如果螺柄的旋轉方向表示从 V 經 90° 到 H 的方向¹⁾,那末螺钻的前进方向即 e 的正值指向。

因此,在知道了 V 和 H 值之后,就可以确定 e 值。反之,若測得导体内所感应的电动势 e 值之后,就可以确定导体在已知磁場内的运动速度。这就是电磁测流法的理論根据。

如果水平的測量导体处在海流之中并和后者一起在地球磁場中移动,而且导体的长度方向垂直于海流的流向。在这种場合下,导体和海流一起在水平方向上移动,因此导体内所感应的电动势仅仅与地球磁場垂直分强度有关,并可写出如下的关系式:

$$E = lVH_z \cdot 10^{-8}$$

式中 E ——測量导体内所感应的电动势,以伏特計;

V ——导体运动的速度,也就是海流的速度,以秒厘米計;

H_z ——地球磁場的垂直分强度,以奧斯忒計;

l ——导体的有效长度,也就是垂直于导体运动方向的导体长度,以厘米計;

1) V 与 H 互相垂直,从 V 到 H 的方向有二:从 V 經 90° 到 H 和从 V 經 270° 到 H 。我們这里指的是前者,不是后者。

10^{-8} ——与所采用的测量单位有关的常数。

从地球磁场图查得当地的磁场垂直强度 H_z 和测得电动势 E 之后, 就可以确定出流速 V :

$$V = \frac{E}{H_z \cdot l \cdot 10^{-8}}$$

为了测量导体内的电动势, 必须用电线把导体的两端连接到测量仪器上。电路应该配置成这样: 电路中的一部分对地球磁场来说是不动的。否则我们将得到由测量导体、连接

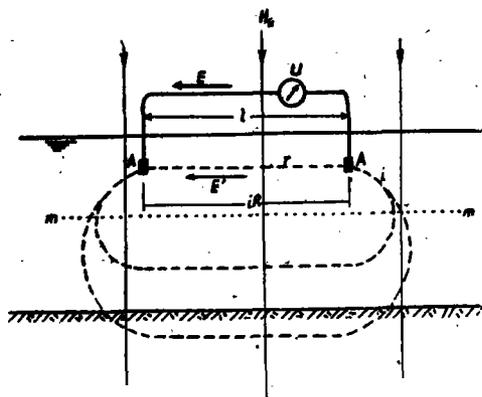


图 1 测量的原理图

测量导体内所感应的电动势用向量 E 表示。为了测定 E 值, 把电位计 U 接入电路中。测量导体的长度等于 l , 导体两端与海的接触点是 A, A 。

由于海流中的海水和放在海流中的测量导体同时在地球磁场中移动, 所以 $A-A$ 点之间所感应的电动势 E' 应该等于测量导体内所感应的 E , 即 $E' = E$ 。电动势 E' 将与不动水层和海底组成闭合电路 (如图 1 的虚线所示), 它包括两区: $A-A$ 电极之间的内区 (其电阻以 r 表示) 和 $A-A$ 电极之间的外区 (其电阻以 R 表示)。电路的总电阻为 $r+R$, 电流 $i = \frac{E}{r+R}$ 。由于电路中产生电流 i , 所以有一部分 E' 用来克服内区的电阻, 这就使外区电路上的电压降低 iR , 其值等于 E' 的一部分。这个在海中因海流本身而造成的电位差 iR 将附加到测量导体的两端。由于 iR 的方向与 E 的方向相反, 所以测量仪器测得的电位 U 不等于 E , 而是比 E 值小 iR , 即

$$U = E - iR$$

大家知道, 当用补偿法测量 U 值时, 在完全补偿的情况下, 测量导体电路中的电流将等于零, 因而仪器将给出 $(E - iR)$ 值, 因为在任何一段上 E 都不会因产生电流而消耗掉。从此得知, 用 ЭМИТ 测得的流速将小于实际的流速。

若用系数 K 表示实际流速 V 和测得流速 V' 之间的关系, 则:

$$V = KV'$$

或

$$E = KU = K(E - iR)$$

iR 值取决于闭合电路外区电阻 R 和内区电阻 r 之间的比值, 也就是取决于流速垂直分布的性质。 $\frac{R}{r}$ 值越小, 或海流速度沿深度的消失越快, 则 iR 值越小, 这就是说, 流速消

失层的厚度与总海深的比值越小,测量成果就愈精确。在海洋深度较大的地区上,通常具有上述的条件,因此电磁测流法适用于深水地区。现有的资料表明:在深度大于 100 米的海区上, K 值接近于 1,而且其值与海流的性质无关。在深度小于 100 米的地区上, K 值在很大程度上取决于流速分布的特性和海底的电导率。例如在深度小于 10 米的有潮海区上, K 值各处不同,约在 1.5 到 15 或更大些的范围内变动,平均约为 10。在深为 10—100 米的地区上, K 的平均值小于 2,个别情况下达到 3。在深度大于 150 米的地区上, K 值小于 1.10。深海的 K 值约为 1.04。

二、ЭМИТ 的构造

ЭМИТ 包括三部分:无极化电极,电缆和记录设备。现分述如下。

1. 电极

电极是 ЭМИТ 构造中最复杂、但也是最重要的一部分,它是用来使电缆末端与海水接触。

在用 ЭМИТ 测流时不能应用普通的金属电极,因为这类电极具有很大而不稳定的因有电位差,其值往往超过海流所产生的电动势¹⁾,因此在实践中采用专门的无极化电极。无极化电极的工作原理如下:许多金属在自己的溶液中具有较大的电流交换现象和较稳定的电位。

目前在苏联所采用的无极化电极主要有:(1)以铂为底的银—氯化银电极;(2)带有多孔玻璃光阑的银—氯化银电极;(3)普通的银—氯化银电极;(4)铜制的电极等等。它们的构造都很类似,今以以铂为底的银—氯化银电极(或称凝胶体电极)为例,介绍如下。

凝胶体电极的构造如图 2 所示。电极的总长度为 27 厘米,外径为 5 厘米,在空气中的重量为 600 克。

电极的保护筒就是用有机玻璃制成的圆筒。圆筒的盖上有口,以便把电缆穿入电极内部。圆筒的底上有一些小孔,以便使电极内部与海水接触。

电极的工作部分是包围在螺旋铂丝上的、表面已经氯化的纯银层。螺旋铂丝与焊在它上面的铜丝一起焊入玻璃管中,而玻璃管则固定在电极壳头部的巢孔中,并使从玻璃管出起的,连接电极和电缆的电线与周围液体隔离开来。螺旋铂丝上的银用氯化银填料围住,同时用琼胶凝胶体使它和海水隔离开来。

电极壳的下部有内隔墙,在隔墙上有一些小孔,它们是用来使凝胶体和海水互相接触。电极壳最下面的圆锥部分用玻璃棉堵塞,以防止凝胶体的接触面受到损坏、弄脏或干涸。

在电极的头部装有连接电极出口和电缆的接触器以及不透水

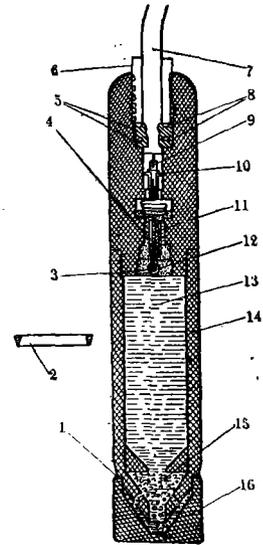


图 2 凝胶体电极的剖面图
1—橡皮圈; 2—安全圈;
3—氯化银填料; 4—
пипени 填料; 5—橡皮垫圈;
6—压紧螺帽; 7—电缆;
8—黄铜垫圈; 9—焊在
电缆上的电插销; 10—电
插孔; 11—带有螺旋铂丝
的玻璃管; 12—螺旋铂丝;
13—凝胶体; 14—电极
外壳(用有机玻璃制成的);
15—玻璃棉; 16—罩。

1) 海流所产生的电动势很小。当流速 $V = 70$ 厘米/秒, $H_z = 0.5$ 奥斯忒和测量电缆的长度 $l = 100$ 米时,电动势 $E = V \cdot H_z \cdot l \cdot 10^{-9} = 70 \cdot 0.5 \cdot 10000 \cdot 10^{-9} = 3.5$ 毫伏。

的封閉設備。电极头部的构造如图 3 所示。

为了防止凝胶体的干涸，电极应该保存在盛着海水的木桶或瓷桶中，或者把罩套上，同时罩内应该装着测量地区的海水。在把电极沉入海中时，才把罩取下。总之，电极的下部应该总是处在液体之中，它们与空气的接触时间应该尽量短。

2. 测量电缆

对测量电缆的要求有二：第一，电缆应该承受住拖曳时所产生的负荷，而负荷与船速、

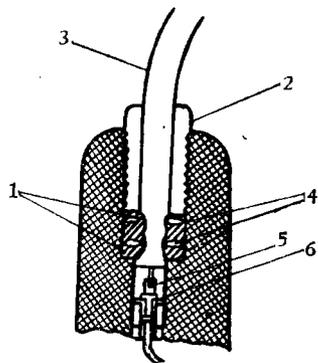


图 3 电极头部的剖面图

- 1—橡皮垫圈；
- 2—压紧螺帽；
- 3—电缆；
- 4—黄铜垫圈；
- 5—电插销；
- 6—电插孔。

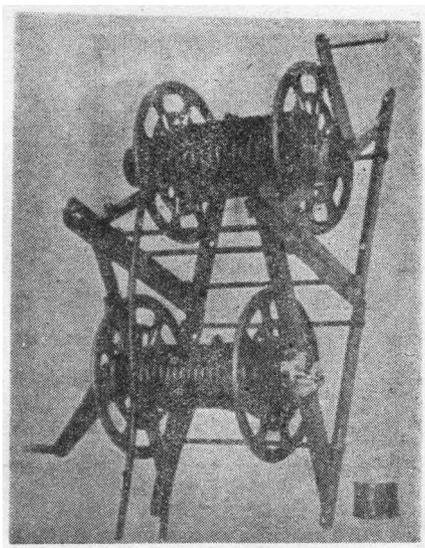


图 4 手摇绞车

电缆的长度、直径和重量有关。当电缆长度为 250 米、直径为 1.2—1.4 厘米和船速为 15 节时，电缆的负荷可达 150—180 公斤。第二，电缆的绝缘电阻应该比电极的内电阻大许多倍，其值不应小于 10^6 欧姆/公里。

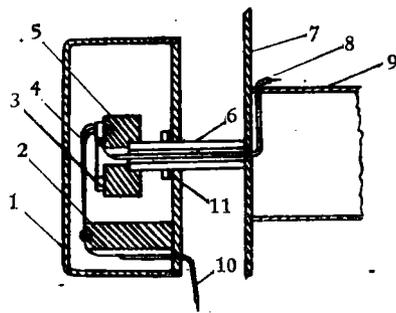


图 5 绞车上的接触设备

- 1—安全盖；2—电刷的绝缘器；
- 3—测量电流的圆圈；4—电刷；
- 5—绝缘器；6—绞车鼓轮的中轴；
- 7—鼓轮的侧板；8—连接电缆的出口；
- 9—绞车鼓轮；10—连接操纵屏和控制屏的出口；
- 11—衬片。

电缆的长度视船只的长度 L 和导体长度 l 而定。其中，有一个电极是用长为 $1.5L$ 的电缆拖曳着，另一个电极用长为 $1.5L + l$ 的电缆拖曳着。在实践中取 l 为 100 米，即前者长 100 或 150 米，后者长 200 或 250 米。

利用上述的封闭接触器使电缆和电极连接起来。电缆卷在二个构造相同的手摇绞车的鼓轮上（如图 4 所示）。在必要时绞车可以拆开分别安置在不同的地方。电缆在船上的一端连接到绞车上的接触设备（如图 5 所示）。

3. 记录设备

记录设备包括四部分。

第一部分即电位计。工业部门所生产的电位计，其零点都是在刻度盘开始的地方，这对于 ЭМИТ 来

說是很不方便的。因此可以用改变电阻值的办法来調整刻度盘的零点,使它移到刻度盘的中央。在应用 Θ MIT 测流时,通常选用刻度盘灵敏度为 ± 5 毫伏或 ± 10 毫伏的电位計。在低緯地区需要配备灵敏度較高的电位計,这是因为該区 H_z 值較小的緣故。在高緯地区可以用灵敏度較低的电位計,因为在这种場合下可以在不改变測量電纜(即測量导体)长度的情况下扩大流速測量的范围。此外,在电位計上还安装一个操縱时鐘的繼电器,它和笔尖相連,因而笔尖将自动地在記錄紙上做出时间的标号。

第二部分是操縱屏和控制屏,它的电路图如图 6 所示。

在地球磁場的北半球工作时,電纜是这样连接的:长電纜(200 或 250 米)与电位計的正极相連,短電纜(100 或 200 米)与負极相連。在南半球的連接法正好相反。这样連接的結果将使笔尖偏离零点的方向与由于海流而引起的船只航差的方向相符。例如,如果笔尖偏到零点右边时,則說明海流是流向航向的右边。

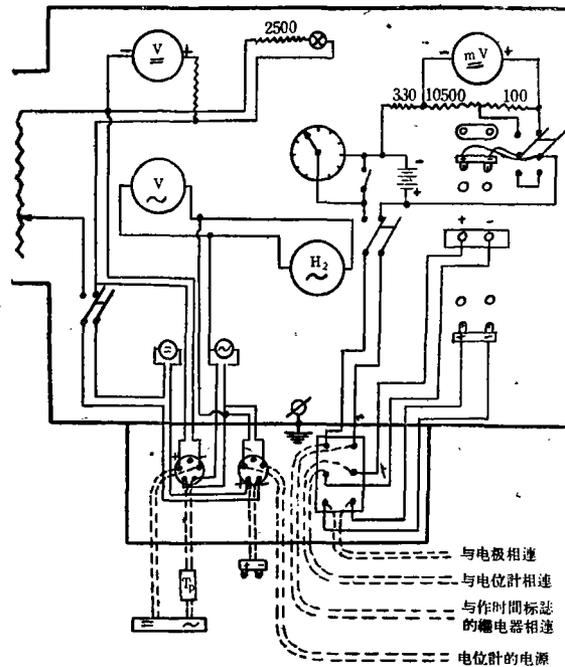


图 6 操縱屏和控制屏电路图

第三部分是变流器(电)。第四部分是变压器。

三、用 Θ MIT 测流的特点

地球磁場分布、海底电导率 and 海流垂直结构的特殊情况,使 Θ MIT 的应用具有下列的特点。

1. H_z 在磁赤道上为零,在磁极上最大。因此,在其他条件相同的情况下, Θ MIT 用在高緯地区比用在低緯地区精确。根据电磁测流法的实质和地球磁場图的精度,可以得出这样的結論:在 H_z 小于 ± 0.1 奥斯忒的地区上,电磁测流法的精度已經很低;而在磁赤道附近的地区上,就不能用 Θ MIT 测流。

2. 由于每次测量只能得出一个与航向垂直的海流分量,因此为了取得海流全量,必须在成某个角度的二个航向上进行二次测量。二个航向的交角值在理論上是沒有限制的,

但精度最大和計算最方便的交角值是 90° 。

在实践中,船只的調度可按下列的方式进行:

(1) 輪換地把航向改变 90° (图 7a)。这时航向的变化是这样的: OK (主航向) $\rightarrow OK + 90^\circ \rightarrow OK \rightarrow OK - 90^\circ$ 。主航向上的行船時間視海流分布的复杂程度而定,一般采用 25 分钟或 55 分钟。 $OK \pm 90^\circ$ 航向上的行船時間一般采用 5 分钟。

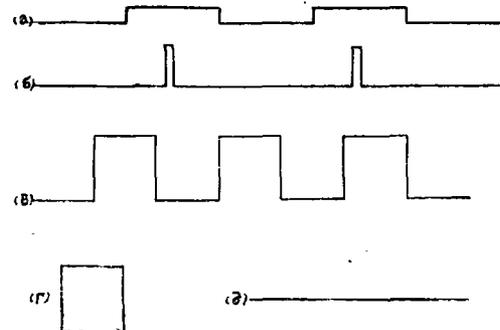


图 7 船只調度的方式图

(2) 把航向改变 180° (图 7b)。这时航向的变化是这样的: $OK \rightarrow OK + 90^\circ \rightarrow OK - 90^\circ \rightarrow OK$ 。各个航向上的行船時間与前同。

(3) 如果航行的主要任务是研究海流的話,就可采用图 7b 所示的方式来調度船只。此时各边上的行船時間为 5—15 分钟。

(4) 当需要在某一点进行較长期的測量时,可采用方形的船只調度方式(图 7c)。各边上的行船時間可在 5—30 分钟的范围內选用。

(5) 当仅需要确定海流所引起的航差时,船只可以一直向前行駛,不必改变航向(图 7d)。

3. 如上所述,在深度大于 100 米的地区上,测得的流速和流向是相当精确的。在浅水区会給出比实际小的流速。海底电导率越小和流速沿深度的消失越慢,則其誤差越大。但浅水区和海流結構对流向的測定毫无影响。

用 ЭМИТ 测得的流速和流向是电极所在深度的流速和流向。在加深电极的位置时,可以测得更深处的流速和流向。

4. 由于两电极是用不同长度的電纜拖曳着,所以它們是处在不同的深度上,設其差值为 Δh_k 。因而在测得的电动势 E 中包括着地球磁場水平分強度 H_{xy} 所激起的电动势 E_{xy} 。 E_{xy} 值可根据下式求之:

$$E_{xy} = H_{xy} \cdot V_s \cdot \Delta h_k \cdot \sin \alpha$$

式中 E_{xy} ——电动势; H_{xy} ——地球磁場的水平分強度; V_s ——船速; α ——磁子午綫与航向(磁航向)之間的角度; Δh_k ——两电极所处深度的差值。

为了便于計算起見,上式可变换成:

$$E_{xy} = 0.1 H_{xy} \cdot V_s \cdot \Delta h_k \cdot \sin \alpha$$

式中 H_{xy} 以奧斯忒計; Δh_k 以米計; V_s 以米/秒計。

在这种情况下,所得的 E_{xy} 将以毫伏計,其符号根据右旋螺钻法則來定。当航向为 $0-180^\circ$ 时, E_{xy} 为負值;当航向为 $180-360^\circ$ 时, E_{xy} 为正值。

根据上式还可以制成專門的图表,以便計算。

5. ЭМИТ 所用的无极化电极具有温度和盐度的效应。这种效应是由于两电极所在

地的溫度和鹽度的不同而產生的。這種效應改變着電極本身的電動勢,因而使測到的數值含有誤差。但是,在一般時情況,兩電極所在地的溫度和鹽度的差別是不大的,所以對於測流來說,沒有多大影響。

6. 在 ЭМИТ 正常運用的情況下(深度大於 100 米, H_z 大於 0.2 奧斯忒,沒有相鄰的兩股海流),測量的總誤差一般不會大於 5%。在不利的情況下(當有強大的相鄰海流或在流速隨深度而增加的場合下),測量的總誤差約為 10%。

記錄紙上讀數的精度(以流速值表示),一般來說,取決於該地的磁緯度和電位計的靈敏度。在用刻度盤為 ± 5 毫伏的電位計時,讀數的精度與 H_z 之間的关系如下表所示:

H_z (以奧斯忒計)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5—0.7
讀數的誤差(以秒公分計)	± 5	± 2.5	± 2	± 1	$< \pm 1$

當用刻度盤為 ± 10 毫伏的電位計時,表中的誤差值將增加一倍。

當波浪增大或航向不穩定時,讀數的精度就要降低。因此,用 ЭМИТ 測流的精度與船隻類型及舵手的工作能力也有關。

參 考 文 獻

- [1] В. В. Новыш, 1955: Геоэлектромагнитный метод измерений морских течений. Труды ГОИН'а, Вып. 30.
- [2] В. В. Новыш, 1955: Руководство по применению ЭМИТ'а и обработке материалов.
- [3] В. В. Новыш, 1957: Измерения глубинных течений при помощи ЭМИТ'а. Труды ГОИН'а, Вып. 40.
- [4] Н. Н. Сысоев и В. Г. Волков, 1957: Руководство по электромагнитному методу измерения скорости морских течений на ходу судна. Труды ИОАН'а, том XXIV.