

声学译丛

# 水声学

(水声工程专辑)

## 2

上海市物理学会声学工作委员会主编  
上海市科学技术翻译馆出版

## 目 录

1. 发声器和震鸣器促进深海的探测····· J. B. Hersey 等 ·····( 1 )
2. 用深海测探潜艇曲斯特号测量声速····· K. V. Mackenzie·····( 7 )
3. 多普勒频移海流计····· J. D. Chalupnik 等·····( 13 )
4. [SONAR]D-60 型测深仪····· 清水 浩一 ·····( 16 )
5. 新型深水测探潜艇 ····· ( 19 )
6. 等温层跟踪器····· E. C. LaFond ·····( 20 )
7. 泥底的回声测厚····· M. L. Somer 等 ·····( 23 )
8. 提高声纳系统的探测能力和精确度····· M. Federici ·····( 24 )
9. 混响法测量水中声功率的研究和应用····· W. L. Breed 等 ·····( 29 )
10. 数字声阵定向····· V. C. Anderson ·····( 33 )
11. 8 型摄鱼仪····· 宫川 清等 ·····( 36 )
12. 拖网渔轮用新式超声鱼探机····· P. R. Hopkin 等·····( 40 )
13. 拖网渔业中的水下遙测仪····· F. H. Stephens, Jr.·····( 45 )
14. 鱼体目标强度的测量····· D. H. Cushing 等 ·····( 48 )
15. 海豚对水下物体的听觉····· W. N. Kellogg·····( 53 )

# 发声器和震鳴器促进深海的探測

J. B. Hersey, H. E. Edgerton, S. D. Raymond, G. Hayward

对于空气中的数据傳輸，人們可以从光、紅外線、声、无线电波这些方法中选择一种来进行。但是，在水中只能有一种选择——声的方法。声在水中的傳輸十分有效，在适当的“声道”中，即使是一个很小的爆炸声也能在几千哩以外收听到。

水声设备中迅速发展的方面有：周期性发出“乒乓”声的信号而能够被收听设备跟踪的自由漂浮的水声标、潜艇探测器、按照声指令从海面上控制的水声仪器、遙測經過声道到达海面的信息的水下装置和船用的普通回声测深仪等。然而，在这里我們只介紹其中的两种器件，即 EG&G 公司与 Woods Hole 海洋研究所共同研制的声納发声器 (sonar pinger) 和声納震鳴器 (sonar thumper)。

## 声納发声器

把一套设备沉入水中而又要使它恰好处在海底上方某一个所需的位置是十分困难的：鋼纜会伸长，鋼纜长度計和水深計时常不够精确，以及鋼纜很难笔直地悬挂在船的下面，所有这一切都不允許单根据水的深度减去放出的鋼纜长度来决定水下设备离开海底的距离。

然而，在下沉的设备上安装一个声納发声器，就能精确而又简单地解决这个问题（见图1）。这个发声器定期发出一个“乒”声（短脉冲），它的一部分直接傳送到船上，而另一部分自海底反射至船上。两个脉冲被船上的声納接收机所接收，并且用記錄器（图2）或示波器連續監視。

用两个脉冲之間的时间差可以直接測得发声器到海底的距离，因为：

$$D = VT/2$$

式中：D = 发声器到海底的距离（呎）；

V = 水中的声速（約 5000 呎/秒）；

T = 直达信号和反射信号之間的时间間隔（秒）。

例如，如直达脉冲和反射脉冲相隔 1/2 秒，則发声器到海底的距离是 1250 呎。監視脉冲的工作者能够利用电话指揮絞盘的工作者，从而將设备保持

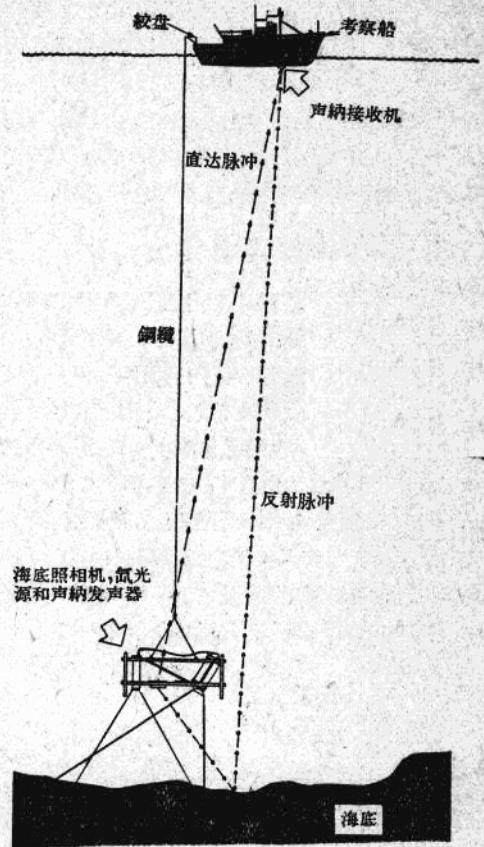


图1 电池供电式声納发声器是精确測定水下设备（如深海照像机等）位置的理想仪器，它不需用電纜和船上連系

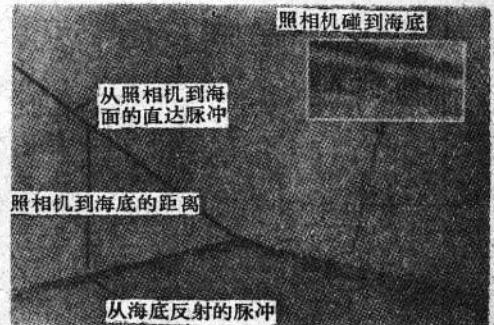


图2 按图1的布設得到的照相机到海底距离的記錄

在海底上面任意一个所需的距离。通常同时应用三种监视方法：取得永久性记录供以后研究用的记录器；取得距离的瞬时“放大”指示的示波器；辅助上述两种方法用的耳机。

应该注意，船上的接收机在判断直达脉冲和反射脉冲时可能会发生混乱。例如，如在直达脉冲到达1/2秒以后接收到反射声脉冲，这似乎表明发声器和海底间的距离是1250呎，但是，这些声脉冲实际上可能是在直达脉冲到达1 1/2秒以后到达的，这就表明发声器到海底的距离是3750呎。为了解决这个“相移”问题，应使发声器每次把第10个脉冲储备。此后，在直达脉冲和反射脉冲的显示图中观察被漏掉的脉冲的位置，就能够消除这种混乱。

### 发声器电路

可以在海洋中任意深处使用的EG & G型声纳发声器SP-9由激励器、脉冲变压器和换能器三个基本单元构成。装在耐压容器内的激励器由一个可以多次充电的银锌电池供电，这个电池能良好地供电16小时。由电池供电的晶体管电源产生一个直流高压，它对4微法的电容 $C_1$ 充电(图3)。精密直流计时器 $M$ 的触点 $S_1$ 每秒闭合一次，“点燃”有控制栅的冷阴极充气管 $V_1$ ，使它通过脉冲变压器 $T_1$ 的初级线圈放电。计时器的触点 $S_2$ 每10秒钟打开一次，这就如上面所论及的，把第10个脉冲储备。

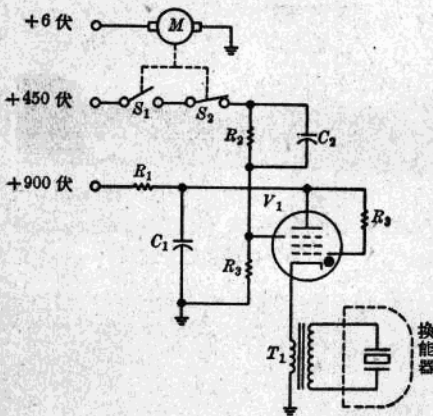


图3 声纳发声器电路

$T_1$ 装在充油的弹性套内，弹性套是一个两端都用橡皮密封的人造树脂管子。变压器的匝数比是这样选定的，它使连接到换能器上的变压器次级线圈中产生8千伏的脉冲。换能器由一组ADP晶体构成，这些晶体装在充蓖麻油的用弹性橡皮膜覆

盖的铝盒中。对于1/2毫秒左右的脉冲来说，脉冲变压器的次级线圈和换能器的晶体构成一个在12千赫左右振荡的调谐电路。这样就产生了声纳脉冲，它通过油和橡皮膜向水中发送。1/2毫秒的脉冲对确定发声器位置的分辨率在3呎以内。

因为只有一部分入射声能从海底作相干反射，故如果换能器向前发送和向后发送的能量比是1，则直达信号通常比反射信号强10倍左右。为了使接收到的两个信号具有相近的强度，需要用安装在换能器容器中的一层酚醛塑料膜和一块1/2吋厚的铝板使直达信号衰减。

### 发声器的使用方法

在确定水下照相机的位置的时候，可将发声器固定在照相机框架上，如图4中所示。曾经把照相机沉到深度大于25000呎的海中；不管船在漂动和摇晃以及海底外形发生变化，照相机有一个多小时都恰好保持在距海底只有几呎的地方。自动电子闪光灯照相机每隔几秒钟就拍照一次。发声器的线路还能够做成每次正在拍照时发出一个脉冲，于是就能记录拍照的精确时刻和对应的离开海底的距离。



图4 深海照相机(右)和闪光灯(左)，发声器装在附近。它们一起从考察船上沉入水中

为了确定海水采样瓶的位置，发声器就固定在他本身的架子上。将发声器恰好系在采样瓶下面，不管海水有多深，也可以恰好在水底上面几呎的地方采到海水的样品，并且不会发生将采样瓶陷到淤

泥中去的危險。

在采取深海海底的岩心样品时，钻探机什么时候接近海底以及什么时候碰到海底是难以确定的。有时候就采集不到样品，因为钻探机被急流从船旁冲开，根本没有到达海底。有时，经过努力确实使钻探机到达了海底，然而鋼纜却由于放出太多而绞在一起。但是用了发声器，就能不断地监视钻探机到海底的距离，而钻探工具也能够以所要求的速度和时刻沉到海底，并且不需要放出过多的鋼纜。

利用地热探头测量海底冲积物的温度时，发声器就搁在离开探头几呎的海底上，探头则埋在海底内逐渐达到热平衡。如果連到船上的鋼纜繃得太紧使发声器离开了海底，它就警告操作人員多放出一段鋼纜。

为了进行詳細的海底地形测量，安装在船上的回声测深器不能給出足够的清晰度，因为它们离开海底有几千呎。但是利用离开海底不远的声納发声器，通过记录直达脉冲和海底反射脉冲，就能够給出对着发声器的那部分海底的詳細輪廓。

在测量区域中，用两个或更多的对 12 千赫灵敏的接收水听器能够指示出发声器在水平面上的精确位置。声脉冲到达水听器所需的时间表明发声器离开每个水听器的距离，因此可以精确地对海底进行測繪，以及精确地确定实验设备的位置。

事实上，只要必須将设备沉到深海的海底，声納发声器就能使操作精确，否則就变成盲目摸索；发声器还有助于保証貴重设备的安全，这就大大提高了操作人員的信心。

### 声納震鳴器

对地壳进行地震探测用的声波，直到最近还是用炸药在地面或地下的爆炸来产生。记录下地下各分界面反射的声波，就揭示出沉积物和岩石的地质结构。

地震探测也已经用来勘探海底的地壳，但是由于水是良好的傳声体，所以不需要在海底上面或海底内来激发声波；可以在接近海面的水中产生声波。压力波通过海水向下傳送到海底，象在一般的回声测深技术中的情况一样被反射回来。然而，声波还透入海底，并且从海底下层反射回来。

用于海洋地震测量的炸药虽能将較多的能量送入水中，并且比今天任何其他方法的透入深度要大，可是它仍然有缺点：在搬运和使用时都有危險，并且在某些地区（例如拥挤的海港）根本不能使用。再

者，每爆炸一次都要化錢，因而考察一次要化費很多錢。

近年来，研制成功許多用于对海底下层进行連續測繪的新声源。其中包括：水中电火花放电器，利用混合气体爆炸的气体爆炸器以及磁致伸縮器件。虽然用这些器件不能得到炸药所达到的透入深度，但是当船向前开动时这些器件允許以足够高的重复率一小时又一小时地連續得到海底下层的剖面图。

由于上述每一种系統都各有其优缺点，本文作者研制了一种新器件，它能够以整齐的低频重复脉冲的形式将大量声能送入水中，这种器件简单、安全、牢固、可靠，并且相当便宜。我們把这种器件称为“震鳴器”。

### 震鳴器的工作情况

将船上的 110 伏或 220 伏交流电变换为直流高压以后，对 10 个并联連接的总容量为 160 微法的大电容充电（图 5）。电容器箱內有一个触发电路，按照指令向换能器放电。

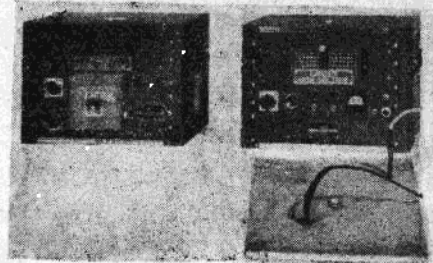


图 5 EG & G 型 ST-8 声納震鳴器：电源（左），电容器和触发电路箱（右），换能器（前）

实际的换能器（图 5 和图 6）由一个直径为 18 吋、厚 1/4 吋的扁平鋁板构成，鋁板被彈簧紧压在扁平形线圈所在的平面上。当电流脉冲通过线圈时，

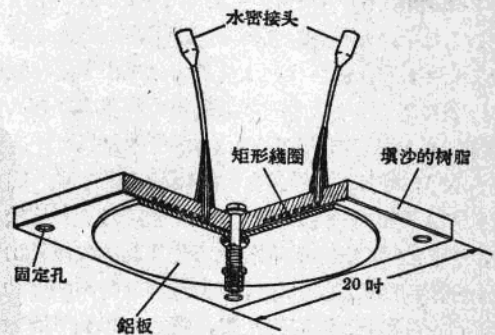


图 6 声納震鳴器的换能器

线圈中磁场的强弱变化使铝板中感生出涡流，这个涡流产生的磁场又使铝板离开线圈。

如果在空气中激发没有用螺栓固定的震鸣器的换能器，则铝板将飞入空中高达 30 呎 (图 7)。然而，在水中大部份能量作为压力波辐射出去，所以铝板仅仅移动半吋左右。电声转换效率估计为 10%。以在距离 1 碼处所进行的测量为参考，峰值声压约  $1/2 \sim 1$  兆达因/厘米<sup>2</sup>。



图 7 在空气中激发没有用螺栓固定的震鸣器，铝板飞入空中高达 30 呎

图 8 表明用如图 6 所示的震鸣器得到的典型的压力-时间曲线图，它是 1960 年 1 月在 Woods Hole 的考察船 R. V. Atlantis 号上照下来的。图中左边的第一个峰是直达脉冲，它的持续时间约为 1/2 毫秒，相当于 1 千赫左右的基频。第二个峰是海面的反射(换能器大约在 6 呎深处，接收水听器悬挂在它下面 6 呎的地方)。可以看到，由于水-空气界面的反射，这个脉冲是倒相的。在海面反射以后大约 3 毫秒，随着板迅速运动所产生的空化的破裂，出现了一个小尖峰。后来设计的换能器使用稍厚的板，并改进了线圈的几何形状，于是就大大减小了这种效应。还可以看到，由于换能器的板大约以 125 赫的频率振动，因而就引起了一串衰减的正弦波。

所以，震鸣器的频谱含有高频和低频两种。高频不能象低频一样透入海底。由于高频的波长较短，它们能够给出海底和任何可能出现的浅滩结构的十分清晰的图象。反之，低频没有这样高的分辨率，可是它们透入海底比较深。通过可以调节的滤波器和双通道记录器以后，则一个通道能够调节到

显示出高频的海底详图，而另一个通道则显示出更深海底下层的低频反射信号。

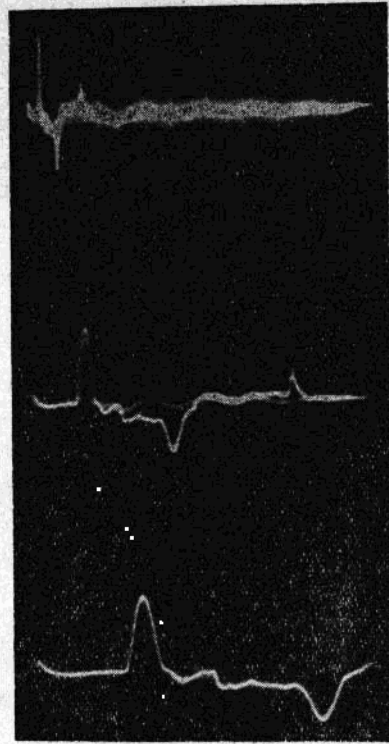


图 8 声纳震鸣器的压力波波形在示波器上的描述。水平扫描频率(毫秒/间隔)分别是: 5(上)、1(中)、0.5(下)

### 震鸣器电路

从船上发电机得到的 110 伏或 220 伏交流电压由变压器  $T_1$  升高到 4000 伏 (图 9)，再由一个每臂使用 27 个 400 伏二极管的全波整流线路所整流，然后将电能供给以  $C_1$  表示的 10 个电容器。为了激发震鸣器，将一个外部键控的接触器闭合，于是引起有控制栅的冷阴极充气管触发电路中的电容器通

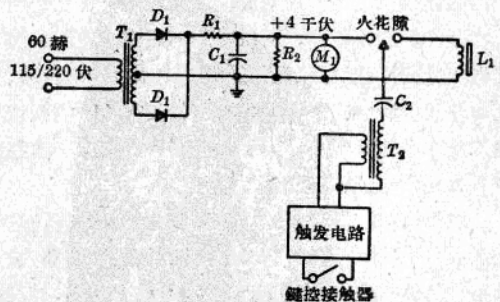


图 9 声纳震鸣器电路

过变压器  $T_2$  的初级线圈放电。 $T_2$  的次级线圈中产生的极高压使火花隙中的空气电离而导电。于是，电容器  $C_1$  通过和换能器线圈  $L_1$  串联的火花隙放电。电流达到 1600 安左右的峰值。

尽管电容器储能的理论值可由下式给出：

$$W = \frac{CE^2}{2} = \frac{1}{2} \times (160 \times 10^{-6}) \times 4000^2 = 1280 \text{ 瓦秒}$$

但是在实际工作中，由于线路的损耗和发电机电压调节不良，这个能量通常约减小到每个脉冲 1000 瓦秒。

### 震鳴器的使用方法

通过一次激发所接收到的一串回声，包括来自大块岩层的反射声以及许多较小物体（如海底下层的卵石和岩层的裂缝）的散射声。因此，如果测量地点的几何形状是复杂的，那么从单独的一次记录中就不可能作出精确的解释。幸而我们的仪器和技术对于帮助地球物理学家来解释这些接收到的回声是有效的。

一种技术是，在迅速进行重复探测的时候移动接收器和声源，因而能够从许多局部的详图中描绘和分辨出广大的地质构造。连续探测能够和自相关器比较，也可以从图形记录器上看出。这样，即使在出现过多的噪声和局部侧面反射声的情况下，也可使人绘出下层结构的显著特征来。当然，在确定各层厚度的精确数值时却需要知道这些层中的声速与水中声速的关系。对于能够得到样品并能进行直接测量的海底冲积层，测定声速比较简单。然而，对于

下面的各个岩层的情形则不同，除非能以现有的地质学知识推测出它们的成份才行。有时，可以在不同方向的某段距离上注意感兴趣的特殊构造，于是，这些记录将指示出一个被很薄的冲积层所覆盖的地方。在这个地方，我们往往就能取得海底物质的样品。

采用与震鸣器声源有关的常用的地震折射技术也可以知道不同岩层中的声速。在这里，我们将接收机向离开声源的方向移动，直到看到来自各层的折射信号为止。接收水听器可以拖在一根装在另一艘船上的长电缆的一端，也可以装在能够用无线电把信号送回到船上的声浮标上。

为了在以后进行分析，可以从示波器上将震鸣器的回声信号拍摄下来，或者把它记录在磁带上。磁带记录的优点是可以同一数据进行多种分析，特别是在录好的磁带中含有原始回声所有的频率时更要如此。

在 Woods Hole 使用了一个利用化学传真纸的记录器。图 10 是当记录纸移动时记下的重复回声；可以看出，正如上面所谈到的，这些回声是彼此相关的。海底下层结构的层次也能够看到。使用的接收系统由一个压电水听器、一个 WHOI 型手提式放大器和 PGR 型图形记录器所构成。

我们利用这个系统已经得到海底下面几百呎的记录，正在进行的降低接收噪声的工作无疑会扩大这个距离的范围。因为穿透深度大都取决于接收的条件以及所遇到的各种地质状况，所以不可能给出最大的穿透深度。当然，以上的讨论是指目前的



图 10 用震鸣器在 Narragansett 灣中所得到的海底下层的回声记录

1000 瓦秒輸入的震鳴器的。我們現在正在建造一個 5000 瓦秒輸入的震鳴器，它將使穿透深度大大增加<sup>①</sup>。

### 震鳴器的其他應用

震鳴器聲源還能夠應用於：深海或淺海的回聲探測、研究聲傳播、與無線電水聲浮標一起作水聲導航、潛艇探測、模擬導彈落水的沖擊，或者用於需要強低頻聲源的任何場合。能夠沉入很深水中的電池供電的震鳴器已經建成（圖 11）。它的能源來自兩個 6 伏的鉛蓄電池，它和一個 115 伏、400 赫的晶體管變流器一起裝在一個鋼筒內。第二個鋼筒內裝着高壓變壓器。升壓到 4 千伏的高壓經過整流以後儲存在電容器中。如上所述用一個觸發的火花隙使電容器通過換能器放電。由於水下震鳴器相當於海面裝置的容量的一半，它的換能器的輸入能量只有 500 瓦秒。在內部裝一個和聲納發聲器類似的計時器，使它每隔 10 秒鐘放電一次，電池就能使這個裝置工作 4~6 個小時。



圖 11 電池供電的震鳴器正在從考察船上沉入水中（這套設備能在 1200 呎以內的深度工作）

所以，水下震鳴器不需要用電纜和海面上相連，它完全是自給的。然而，用一根 5 安培的電纜，它就

能夠由海面上 115 伏、400 赫的船用發電機來供電。如果需要的話，同一條電纜也夠用來鍵控這個裝置。用一個可以壓縮的氣囊將相當於器件所在深度的靜水壓力的氣壓加到換能器板的背面。當板迅速離開線圈的時候，這個空氣使板兩邊的壓力平衡。目前的方案可以在 1200 呎的深度工作，而正在進行試驗的設計方案則能沉到水下 9000 呎處。

水下震鳴器的應用包括：地震測繪，在水較深或者海底地形複雜而需要將聲源設置在海底附近的場所；作為水下“信標”，為水下設備的導航或定位使用；作為研究水聲傳播用的深水聲源。

由於震鳴器換能器本來就是一個非飽和器件，所以能夠製造功率很高的震鳴器。正在討論這類真正龐大的震鳴器：它們可能是船殼本身的一部分。在海面上還可用震鳴器換能器進行布陣，以獲得具有指向性的壓力波。

### 參考文獻

- [1] Ron. A., "An Investigation of the Sonar Transducer", MIT Thesis, May, 1960.
- [2] Edgerton. H. E., "Uses of Sonar in Oceanography", Electronics, June, 1960.
- [3] Edgerton H. E. and Cousteau J. Y., "Underwater Camera Positioning by Sonar", Review of Scientific Instruments, December, 1959.
- [4] Hersey J. B., "Tests of the Edgerton Thumper in Vineyard Sound from Atlantis", WHOI technical memorandum # 1-60, March, 1960.  
(張叔英譯自美國《ISA Journals》1961 年第 8 卷第 1 期第 72~77 頁，吳剛校)

① 關於大容量震鳴器在海底地質探測中的應用可以參閱：Marine Sciences Instrumentation, Vol. 1, pp. 283~288, 1961——譯者注



# 用深海測探潛艇曲斯特号測量声速

K. V. Mackenzie

## 引言

深海測探潛艇在近代水声学研究中的一个优点,就在于它能把測探人員和精密儀器帶到至今难于进行声速測量的深层海域。原先利用深海測探潛艇曲斯特(Trieste)号在現場进行声速測量的計劃正在 NEKTON 研究計劃<sup>[1]</sup>中繼續执行。NEKTON 計劃还扩展了原先的研究<sup>[2]</sup>, 潛入关島附近的极深水域进行測探。关島附近的几次潛航, 还提供了使用规范局速度仪来測量水深对声速的影响的良好机会<sup>[3,4]</sup>。图 1 說明 5000 米以上的深水中的測量結果所以能提供極多資料的原因。在极深的海域, 例如 Challenger Deep 用威尔逊<sup>[5]</sup>和桑原<sup>[2]</sup>方程計算出来的声速差接近于 7 米/秒。

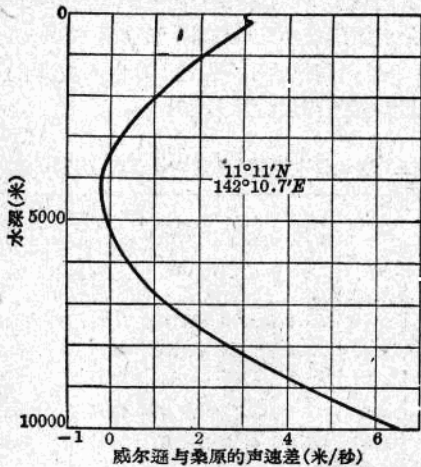


图 1 关島附近威尔逊和桑原的声速与水深之間的計算差数

也在水面附近作了一些測量, 以便在現場核對淺水中水温对声速的影响。关島附近的表层水温近于 30°C。为把測量工作扩展到較低的水温中去, 随后又在白令海用水面船舶上放下的速度仪来測量。这些水面附近的測量的意义可由图 2 說明。在 1 个大气压力和 35‰ 盐度下, 由于水温影响而发生的声速差是这样显示的: (1) 根据桑原表<sup>[2]</sup>画出桑原表和

$\Delta c_T$  的回归曲綫之間的差数; (2) 画出 Del Grosso 方程<sup>[6]</sup>; (3) 画出威尔逊 33~37‰ 盐度的方程<sup>[5]</sup> (粗曲綫); (4) 画出威尔逊 0~37‰ 盐度的方程<sup>[7]</sup> (細曲綫)。威尔逊<sup>[5,7]</sup> 显示的水温影响与 Del Grosso 所显示的大不相同。在 30°C 左右, 威尔逊和 Del Grosso 測量数据之間的实际差数小于水温影响所显示的, 因为在 1 个大气压力、0°C 和 35‰ 盐度下, 威尔逊声速<sup>[7]</sup>是 1449.30 米/秒, 而 Del Grosso 的是 1448.6 米/秒。在 0°C 附近的高盐度的淺水中, 威尔逊和 Del Grosso 之間的声速差可能最大。

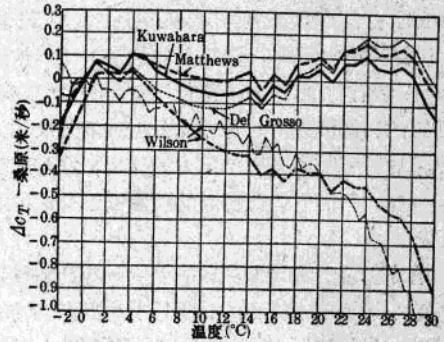


图 2 按照桑原表、Del Grosso 方程和威尔逊的二个方程画出的  $\Delta c_T$  的回归曲綫之間的声速差

$$\begin{aligned} \text{—} \Delta c_T &= 4.6374T - 0.05383T^2 + 0.0002543T^3 \\ \text{---} \Delta c_T &= 4.618T - 0.0523T^2 + 0.00023T^3 \\ \text{- - -} \Delta c_T &= -0.088 + 4.6640T - 0.05539T^2 + 0.0002836T^3 \\ \text{---} \Delta c_T &= 4.6233T - 0.054585T^2 + 0.0002822T^3 - 5.07 \times 10^{-7}T^4 \end{aligned}$$

o: 米/秒    T: °C

本文将首先描述深海測探潛艇曲斯特号所进行的測探, 然后說明白令海中所进行的淺水測量。

## 深海測探潛艇的測量

### 儀器用法

深海測探潛艇曲斯特号的一般描述見參考文獻 [1] 和 [8]。为了获得本文所述的測量数据, 曾經在深海測探潛艇的尾部裝設了一个专用的框架, 用螺栓固定。速度仪、南生瓶和溫度計都安装在这个伸出深海測探潛艇舷外的框架上, 以便最大限度地减少深海測探潛艇所可能产生的干扰。

速度仪用平型的金属伞遮蔽,以防止撒出的铁质散弹堆积在声程上。虽然预计散弹可能比深海测探潜艇沉降得更快,但事实上并不始终如此。浮箱中的汽油冷却时,深海测探潜艇就失去浮性而下沉。沉降速度就通过发出铁质散弹来控制。很明显,散弹局部地受到涡流的支持,深海测探潜艇将穿过一些散弹而下沉,此后随着深海测探潜艇沉降速度的减低,一些散弹将象雨滴一般落向深海测探潜艇。一部分散弹会堆积在速度仪上,但不至于干扰声程。在南生瓶和水温计的架子上也曾发现散弹。

每一只南生瓶上按常规附装着三只颠倒温度计<sup>[9]</sup>。从深海测探潜艇的艇室里暂时将一只开关接通,使电流进入螺线管,就能颠倒南生瓶。当螺线管工作时,中央的连杆就前后摆动,交替地把左右两侧的南生瓶颠倒。当一只南生瓶颠倒时,它几乎转动180°,使端阀关闭,采进水样,并使温度计颠倒。

附有保护罩的颠倒温度计,是用高强度的玻璃制成的。这些温度计完全包装在高强度的玻璃罩里,以免被海水压碎。温度计内通常的空气位置中有80%灌有甘油,以减弱任何内破裂的能量。不附保护罩的特制温度计也是用高强度玻璃制成的,这样的温度计直接承受海水压力的作用,水银球部分受到压缩,因而它们颠倒时的读数高于有保护罩的温度计。

有保护罩的和无保护罩的温度计都是按船上所读得的平衡温度来校正的。另外有小型辅助性的非颠倒式固定温度计,以提供测量时的温度。深度D(米)用下式计算:

$$D = (T_u - T_w) / \rho Q$$

式中  $T_u$  表示现场的无保护罩温度计上的温度,  $T_w$  表示现场的有保护罩温度计上的温度,  $\rho$  表示水柱的平均密度(克/毫升),  $Q$  表示实验室中精确校准所确定的系数。

$Q$  的数值随压力而稍有改变。

在极深的水域中进行测量时,安装了20只无保护罩的温度计:刻度0~6°C的用于冰点校准,50~85.8°C的用于深水测量。它们的 $Q$ 值约为0.0074,这就使它们能在10900米的最大深度处测定深度。

通常把重力加速度 $g$ 看作是恒量,不受水深的影。然而,在近代的深海声学测量中,在确定深度和压力的关系方面,重力随水深而发生的变化逐渐显著起来。地球的 $g$ 值在深度2900公里以内一直是向下逐渐增加的。参考文献[9]给出海洋中 $g$ 值随水深而发生的变化如下:

$$g = g_0 + 2.202 \times 10^{-4} Z \quad (1)$$

式中 $g$ 为水深 $Z$ (米)处的重力加速度, $g_0$ 为海面处的重力加速度。加速度 $g$ 和 $g_0$ 的单位是厘米/秒<sup>2</sup>。

对最大水深10900米的计算,得出一个由于水深变化而发生的总变化值为2.400厘米/秒<sup>2</sup>。据本文作者估计,随海洋中水深而发生的变化将不同于等式(1)。曾用了一只G型的大地重差计到现场进行测定。这种仪器的量程是6.000厘米/秒<sup>2</sup>,灵敏度是 $1 \times 10^{-6}$ 厘米/秒<sup>2</sup>。

### 结果

原定的潜测计划要求交替地测取数据以及逐步加大潜航深度,以便得到更大的深潜记录。测取声速数据的第一次潜航直到1960年6月21日才实现。测取声速数据的最大潜航深度是5760米。在第76次潜航时,有一只南生瓶发生内破裂。深海测探潜艇虽没有受到损伤,但全部无保护罩的温度计都钝化了。因此,这一次潜航的深度数据是根据曲斯特号的正规深度指示器读出的。

速度仪的输出量是用电子计数器测定的。曾反复几次测量了它的频率,每次各测10秒钟。当深海测探潜艇相当稳定时,把南生瓶颠倒,来读取每组的数据。所使用的全部温度计都在试验以后经美国海军水道测量局重新加以校准。无保护罩的温度计用高达9000磅/吋<sup>2</sup>的压力校准。用最后校准的一批温度计对数据作最后加工整理。

表1 深海测探潜艇曲斯特号潜航所得的数据

潜航编号	深度(米)	纬度(°北)	温度(°C)	盐度(‰)	2号速度仪的声速(米/秒)	3号速度仪的声速(米/秒)
77	105	13.5	26.92	34.79	1540.78	1540.78
77	140	13.5	25.83	35.01	1538.86	1538.87
54	191	32.5	9.06	34.08	1488.7	—
77	330	13.5	13.77	34.47	1507.79	1507.75
76	1180	12.7	4.15	34.67	1485.60	1490.23
54	1209	32.5	3.38	34.53	1480.40	—
75	1302	13.4	3.54	34.50	1485.00	1484.86
75	2504	13.4	1.77	34.69	1498.00	1494.20
75	2598	13.4	1.75	34.66	1499.67	1495.93
75	2598*	13.4	1.72*	34.66	1499.42	1495.64
76	5120	12.7	1.46	34.67	1542.43	—
76	5760	12.7	1.44	34.66	1554.68	—

\* 30分钟以后

经过加工整理以后的数据,按水深的递增次序排列在表1中。在圣地亚哥附近<sup>[2]</sup>所作的第54次

潜航所得的数据也列入表中<sup>[11]①</sup>。在第75次潜航中,2号速度仪和3号速度仪在1302米处的读数相符,而在較大的三个水深处却比3号速度仪低3.8米/秒左右;在下一潜航中(第76次),1180米水深处的读数反而比3号速度仪高4.6米/秒。其原因除了3号速度仪的声程长度发生了物理变化之外,别无其他合理的解释。这一点特别使人惊奇,因为3号速度仪在潜航前和潜航后都曾在圣地亚哥进行校准,读数都一致,而恰恰是3号速度仪与声速的计算值不符。很不巧,由于电缆发生故障,3号速度仪并没有在第54次和第76次潜航中始终使用。

与表1的数据相对应的声速的计算值列入表2,声速的实测值与计算值之间的差数也列入表中。Del Grosso数值是在他的方程中加上 $1.815 \times 10^{-2}D$ 以后计算出来的。威尔逊方程的数据是由NEL的

M. A. Pedersen 用他设计的一套方法,应用 Burroughs 220 式计算机计算出来的。他计算了点上特定水柱的压力,同时考虑了由于水深而引起的重力增加以及随纬度不同而发生的变化。采用了苏联“勇士”号第25航次1957年8月20日在3689号站所测取的海洋学数据,作为观测点上的水文资料,以提供足够的数。但是,对于各个计算点则使用了实测的数据。这一步骤比表格中查取压力数的做法更为精确。表1所示的数据在早先的威尔逊曲线求律方程<sup>[6]</sup>的盐度范围以内。跟他稍后的著作<sup>[7]</sup>相比,这里存在着一个不大的标准推定误差。可以设想,早先的威尔逊方程也许对于目前的数据更为精确。表2的实测数据却指明更接近于后来的威尔逊方程。

表2 根据深海探测潜航艇曲斯特号潜航资料所得的声速计算值

潜航编号	水深(米)	桑原(米/秒)	Del Grosso(米/秒)	威尔逊	威尔逊	声速计算值-桑原(米/秒)	声速计算值-Del Grosso(米/秒)	声速计算值-威尔逊6月(米/秒)	声速计算值-威尔逊10月(米/秒)
				1960年6月(米/秒)	1960年10月(米/秒)				
77	105	1538.02	1541.21	1540.95	1540.73	+2.76	-0.43	-0.17	+0.05
77	140	1536.34	1539.50	1539.34	1539.07	+2.53	-0.63	-0.47	-0.20
54	191	1485.57	1488.73	1488.70	1488.86	+3.13	-0.03	-0.00	-0.16
77	330	1505.15	1508.28	1508.09	1508.15	+2.62	-0.51	-0.32	-0.38
76	1180	1484.77	—	1486.66	1486.53	+0.83*	—	-1.06*	-0.93*
54	1209	1481.77	—	1483.61	1483.61	-1.37	—	-3.21	-3.21
75	1302	1484.17	—	1485.91	1485.77	+0.76	—	-0.98	-0.84
75	2504	1498.39	—	1498.96	1498.81	-0.39*	—	-0.96*	-0.81*
75	2598	1499.95	—	1500.50	1500.30	-0.28*	—	-0.83*	-0.63*
75	2598**	1499.86	—	1500.38	1500.16	-0.44*	—	-0.96*	-0.74*
76	5120	1543.64	—	1543.59	1543.44	-1.21	—	-1.16	-1.01
76	5760	1554.79	—	1555.04	1554.90	-0.11	—	-0.36	-0.22

\* 计算这些声速差时,采用2号速度仪和3号速度仪的平均数,但右上角注有\*的数值是单独采用2号速度仪时所得的声速差

\*\* 30分钟以后测定的

表2表明,除了一个例外情形,所有实测数值都比Del Grosso或威尔逊的计算值小。粗看起来,这些差数似乎与Hayes的卓越著述<sup>[10]</sup>不相符合,但事实上它们却相符。Hayes报告的图3可以用一条直线来作约计:以水面为0,在2500米处的实测声速比威尔逊所预计的数值<sup>[6]</sup>大0.5米/秒。然而,如果对于在2500米的Hayes位置,采取额定值为 $T=13.20^{\circ}\text{C}$ ,  $S=38.40\%$ ,  $P=260$ 公斤/厘米<sup>2</sup>,则根据Hayes所采用的威尔逊的6月方程,将计算出1546.657米/秒的值<sup>[6]</sup>;而根据威尔逊的10月方程,可以计算出1547.573米/秒的值,这一数值可能

更适合于38.4%的盐度,虽然这一盐度已经超出威尔逊的最大盐度值37%。这是0.92米/秒的差数。这一修正说明Hayes的测量值始终比威尔逊的计算值低<sup>[7]</sup>,并且与表2最后纵行中所显示的深层处的结果大致相符。四个较浅层的数值很难严格相比,因为Hayes的数据波动很大,但它们不超出观测差数的范围。值得注意的是,Hayes的数据在900米附近“降低”了变化的速度,这种情形与表2中1180米和1302米的数据相符。2500米左右的数据

① 注意:191米的温度是根据最后的温度计校准的。1209米水深处的温度未经改变

經過 0.9 米/秒的修正以後，與 Hayes 的數據很靠近。5120 米的數據與 Hayes 的修正數據的外推值相符。最後一點 (5760 米) 比前面幾點更接近於威爾遜數據。

300 米、400 米和 900 米附近的 Hayes 數據中聲速的降低可能是深海散射層所造成的。第 54 次潛航時，曾在 1209 米深的海底上觀測到聲速的降低。據觀測，這一海底上有密集的海盤車和旧管子等等<sup>[1]</sup>。生物集中活動的地區也可能改變聲速與溫度、鹽度、深度和壓力的比例關係。深海測探潛艇曲斯特號預計在 1961 年 6~7 月使用。將在水面護航船上用回聲測深儀測定散射層的位置，然後對這些散射層進行測量工作。同時將詳細觀察散射層中的浮游生物和碎石。

### 重力測量

在深海測探潛艇上只進行了一次重力測量。在關島 Agana 處的美國海軍航空站船舶修理廠 (SRF) 建立了一個重力站。SRF 站的  $g$  值是 978.5376 厘米/秒<sup>2</sup>，海拔是 3 米。重力計在潛航前後都曾經在 SRF 站立即進行檢查。本文作者在 6 月 7 日到 8 日的 40 小時內於關島、火奴魯魯和聖地亞哥標準站進行測量，測定了 1.035 的標度因子。第 78 次潛航的位置是在關島西方的斜坡上，北緯  $13^{\circ}27'.0$ ，東經  $144^{\circ}32'.1$ ；水深為 2286 米，海底的  $g$  值是 978.9331 厘米/秒<sup>2</sup>，這比 SRF 站的陸岸值增加了 0.3955 厘米/秒<sup>2</sup>。由式(1)得出，水深 2286 米處增加 0.5034 厘米/秒<sup>2</sup>。這些數值大致是相符的。必須首先對 SRF 數值適當地修正固體和水團分布 (包括關島的基數)，以求得潛航點水面的重力值  $g_0$ ，才能進行精確的檢驗。因為重力隨水深而發生的變化方面的不確定性在計算聲速上所造成的差數僅僅小於 0.1 米/秒，所以在要求精確時，在深水中目前最好還是使用式(1)。

### 北方水域中的淺水測量

**工作程序** 在白令海測量時，速度儀是從 Marysville (EPCER 857) 號上用防水電纜逐個松落下去的。在速度儀上方約 30 吋的防水電纜上安裝了一個附有三隻有保護罩的溫度計的南生瓶。速度儀放在測試深度上 20 分鐘以後就得到一個海底溫度圖 (BT)。圖上顯示出溫度與深度的關係。根據 BT 圖，選定了測取數據用的最後深度。只有把速度儀放在最後操作深度上 20 分鐘以後，才開始測量。每次共測 10 秒鐘，再重複幾次。用速度儀測得足夠的數據以後，就松落一個重物，使南生瓶顛轉。

立即取得第二個 BT 圖，以便確定溫度結構是否有變化。

**結果** 有些數據組明顯地顯示比其他數據組有更大的波動。這往往是跟鄰近的內波有關，正如 BT 圖上的雙綫所顯示的那樣。每個描圖是在松落速度儀和收回速度儀時作出的。總時間是 3~5 分鐘。圖 3 是用同一隻速度儀所得到的兩個 BT 圖綫的復制圖。速度儀在測取數據時的深度用箭頭標明。左邊的 BT 圖是在第 7 航次取得的，最小的標準推定誤差  $\sigma$  僅為 0.02 米/秒。在操作深度上很難觀測到內波的跡象。右邊的 BT 圖是和一組被廢棄的數據同時取得的，後一組數據之所以被廢棄是因為其標準推定誤差高達 1.00 米/秒。曾經試圖在 BT 圖綫上出現重合段的時候確定速度儀的位置。速度儀對於內波的敏感程度比海底溫度記錄器要大得多。

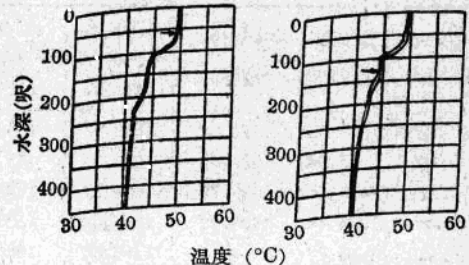


圖 3 兩個 BT 圖的復制圖。圖上顯示溫度與深度的關係。箭頭標明速度儀在測取數據時的位置

全部測量結果列入表 3。對應的計算值列入表 4。鹽度值低於 33‰。可以預料，威爾遜的 10 月方程<sup>[7]</sup>將比他的 6 月方程<sup>[5]</sup>更為適合。他的 6 月方程是根據 33~37‰ 鹽度得出的。差數由平均聲速的標準誤差的平方倒數比例分擔，然後再分均。這些結果給出 (實測 - 計算) 的平均值是：桑原 +3.05；Del Grosso -0.19；威爾遜 (6 月) +0.17；威爾遜

表 3 北方水域的數據

航次	緯度 (°北)	水深 (米)	溫度 (°C)	鹽度 (‰)	2 號速度儀的聲速 (米/秒)	3 號速度儀的聲速 (米/秒)
1	61.0	21	6.19	31.19	1470.28	—
2	61.0	29	6.55	31.22	—	1472.11
3	61.0	24	6.43	31.22	—	1471.77
4	50.4	63	4.94	32.64	—	1468.53
5	50.4	11	9.66	32.26	—	1485.60
6	50.8	11	9.68	32.23	—	1485.43
7	50.8	23	9.49	32.27	—	1485.07

表4 北方水域的計算声速

航次	桑原 (米/秒)	Del Grosso (米/秒)	威尔逊 1960年6月 (米/秒)	威尔逊 1960年10月 (米/秒)	实测 - 桑原 (米/秒)	实测 - Del Grosso (米/秒)	实测 - 威尔逊(6月) (米/秒)	实测 - 威尔逊(10月) (米/秒)
1	1467.81	1471.11	1470.17	1471.15	+2.47	-0.83	+0.11	-0.87
2	1469.44	1472.74	1471.80	1472.77	+2.67	-0.63	+0.31	-0.66
3	1468.87	1472.18	1471.24	1472.21	+2.90	-0.41	+0.53	-0.44
4	1465.28	1468.49	1468.37	1468.65	+3.25	+0.04	+0.16	-0.12
5	1482.37	1485.60	1485.28	1485.81	+3.23	0.00	+0.32	-0.21
6	1482.40	1485.64	1485.33	1485.84	+3.03	-0.21	+0.10	-0.41
7	1481.96	1485.20	1484.88	1485.33	+3.11	-0.13	+0.19	-0.31

(10月)-0.37。从这些结果来看, Del Grosso 和威尔逊(6月)的方程同样适合,而且要比威尔逊(10月)的方程稍胜一筹。

速度仪的校准

速度仪需要定期校准。用蒸馏水加入特制的校准槽内<sup>[13]</sup>。温度是用标准的白金电阻温度计和K型电位计测定的,精确度达0.001°C。校准槽的特点在于能由阀门注入小量的热水或冷水,以精确地把温度控制在±0.002°C以内。按下降的次序(从35°到1°C),尽量减少气泡的形成,测定了一批非连续的温度。只有在达到平衡状态以后才进行测量。

给出声速c的等式是

$$c = \frac{K(1+\alpha T)}{1/f - \Delta t} \quad (2)$$

式中K表示有效声程长度,α表示不锈钢的热膨胀系数,T表示温度,f表示频率(赫),Δt表示仪器的有效时间延迟(秒)。对应于每个T都测定频率f:每次测10秒钟,在1号速度仪上测三次,然后在2号速度仪上测三次,再回到1号速度仪上测三次,如此循环反复,直到每一只速度仪取得15~24个读数为止。许多次的计数都保持恒定;有时它改变1~2。这说明,稳定度高于35000分之一。2号速度仪的Δt值是4.598×10<sup>-7</sup>秒,3号速度仪的Δt值是4.406×10<sup>-7</sup>秒。α值是1.64×10<sup>-5</sup>/°C。采用了Greenspan和Tschiegg<sup>[12]</sup>所给出的声速值,并且对每一个温度求出有效声程长度K,然后把这些声程长度进行平均。这些速度仪的声程长度约为20.5厘米。11个温度(35°~1°C)的平均声程长度的标准误差,在校准良好时低于0.5×10<sup>-3</sup>厘米。建议可以采用1×10<sup>-3</sup>的标准误差作为良好校准的判别准则。每次都对水中的杂质含量(ppm)进行测定。必须用蒸馏水漂洗水槽,以保证最后一次灌水

(70加侖)中的杂质含量很低,以利于校准。为了获得精确的校准,必须经常检查杂质含量。在几次用蒸馏水稀释圣地亚哥饮用水(530 ppm)时,从测量数据得出:20°C时,每100 ppm能使声速增加0.35米/秒。要使杂质含量不超过5 ppm并不困难。

在测取重要的数据组前后,都进行全面的校准。声程长度随时间而改变,说明速度仪的部件由于操作而稍有松动。早先的一份报告<sup>[2]</sup>和Hayes<sup>[11]</sup>都提到过同样的困难。速度仪在今年年初送回规范局,由Greenspan和Tschiegg进行校验,并严格固定声程。他们对仪器进行了校正,然后在每一个螺栓垫板上钻了两个孔,绞锥好孔以后轻轻地压紧不锈钢的销钉,定住位置。他们又加装了二块机械护板。可以相信,经过这样处理以后,声程长度改变的麻烦将会彻底消除。

讨论

有好几种可能误差会影响任何有关声速、温度、

表5 蒸馏水中的声速

温度 (°C)	Del Grosso (米/秒)	Greenspan 和 Tschiegg (米/秒)	威尔逊 (米/秒)	Brooks (米/秒)
0.00	—	1402.74	1403.01	—
5.00	1427.0	1426.50	1426.75	—
10.00	1448.0	1447.59	1447.85	—
15.00	1466.5	1466.25	1466.51	—
20.00	1483.1	1482.66	1482.92	—
22.00	—	1488.63	1488.89	1488.54
23.00	—	1491.50	1491.75	1490.99
24.00	—	1494.29	1494.54	1493.70
25.00	1496.8	1497.00	1497.25	1496.52
30.00	1509.9	1509.44	1509.66	—
35.00	1520.9	1520.12	1520.29	—

盐度、深度或压力的等式的检查。在这些不确定的小误差中，有一种属于校准速度仪用的蒸馏水中的声速。表 5 给出 Del Grosso<sup>[6]</sup>、Greenspan 和 Tschiegg<sup>[12]</sup>、威尔逊<sup>[13]</sup> 和 Brooks<sup>[14]</sup> 的结果。在实验室中对蒸馏水进行的测量中存在 0.2~0.5 米/秒的差数。本文作者采用了 Greenspan 和 Tschiegg 的数值<sup>[12]</sup>。

温度、盐度、压力或深度的测定都容易发生误差。即使在理想的条件下，即当相应的附有颠倒温度计的南生瓶恰好是在测定声速的同时被颠倒时，仍然可能产生相当大的误差。文献<sup>[9]</sup>给出颠倒温度计的温度误差约为 0.02°C，盐度误差为 0.02‰，深度误差为 0.5%。Reid<sup>[10]</sup>建议采用很大的盐度误差(0.04‰)和深度误差(1%)。在使用海底温度记录器观测时，数据中的温度误差一般要大得多。声速  $c$  可以表达如下<sup>[12]</sup>：

$$c = c_{0,35,0} + \Delta c_T + \Delta c_S + \Delta c_D \quad (3)$$

式中  $c_{0,35,0}$  表示 0°C、盐度 35‰、深度 0 时的声速。 $T$ 、 $S$ 、 $D$  分别表示温度、盐度和深度。标准误差  $\sigma_c$  则为：

$$\sigma_c = [\sigma_{c_{0,35,0}}^2 + (\partial c / \partial T)^2 \sigma_T^2 + (\partial c / \partial S)^2 \sigma_S^2 + (\partial c / \partial D)^2 \sigma_D^2]^{1/2} \quad (4)$$

式中各  $\sigma$  分别代表对应于  $T$ 、 $S$ 、 $D$  量的标准误差。

$\sigma_{c_{0,35,0}}$  的数值可以取作 0.1 米/秒。取一近似值， $(\partial c / \partial T)$  的值从 0°C 左右时约 0.1 米/秒降低到 30°C 时的 0.04 米/秒(在  $\sigma_T = 0.02^\circ\text{C}$  时)。 $\sigma_S = 0.04\text{‰}$  时， $(\partial c / \partial S) \sigma_S$  的值为 0.05 米/秒。 $(\partial c / \partial D) \sigma_D$  的值为在水面为 0，随深度的增加而增加。2000 米处， $\sigma_D = 0.005D$  时，典型值是 0.18 米/秒。曾经试图在每一个稳定情况下，同时颠倒 2~3 只南生瓶，以减少  $T$ 、 $S$ 、和  $D$  的误差。估计测量中的标准误差在 0.10~0.20 米/秒之间。不会对由于压力而产生的声程长度的缩短进行修正，因为据估计在 6000 米处，它仅为 0.06 米/秒。

Hayes<sup>[10]</sup>和本文作者都曾遭到由于声程长度改变而引起的困难。当我们考虑这些误差，以及式(4)所给出的误差和蒸馏水中的不确定值时，现场实测的数值可说是证实了 Del Grosso 或威尔逊的 0 深度数值。Garrison 等人<sup>[16]</sup>近来所作的一些长声

程声速测定与 Del Grosso 和威尔逊的测定相符。Hayes 和本文作者都证明：随着深度的增加，威尔逊方程<sup>[7]</sup>和实测声速就发生不大的有系统的偏离，实测声速就会小于方程所给出的值。需要对全部深度进行更精确的实验性现场测定。8000 米以上深度中的测定对于获得与检验水深对声速的影响数据将有很大价值。值得再进行一些重力测量。

## 参 考 文 献

- [1] J. Piccard and R. S. Dietz, Seven Miles Down (G. P. Putnam's Sons, Inc., New York, 1961).
- [2] K. V. Mackenzie, J. Acoust. Soc. Am. **32**, 100 (1960).
- [3] M. Greenspan and C. E. Tschiegg, Rev. Sci. Instr. **28**, 897 (1957).
- [4] C. E. Tschiegg and F. E. Hayes, J. Acoust. Soc. Am. **31**, 1038 (1959).
- [5] W. D. Wilson, J. Acoust. Soc. Am. **32**, 641 (1960).
- [6] V. A. Del Grosso, U. S. Naval Research Lab. Rept. No. 4002 (1952).
- [7] W. D. Wilson, J. Acoust. Soc. Am. **32**, 1357 (1960).
- [8] M. Lomask and R. Frassetto, J. Acoust. Soc. Am. **32**, 1028 (1960).
- [9] H. U. Sverdrup, M. V. Johnson, and R. H. Fleming, The Oceans (Prentice-Hall, Inc., New York, 1949).
- [10] F. E. Hayes, J. Acoust. Soc. Am. **33**, 85 (1961).
- [11] J. S. Black, U. S. Navy Electronics Lab. Rept. No. 784 (1957).
- [12] M. Greenspan and C. E. Tschiegg, J. Acoust. Soc. Am. **31**, 75 (1959).
- [13] W. D. Wilson, J. Acoust. Soc. Am. **31**, 1067 (1959).
- [14] R. Brooks, J. Acoust. Soc. Am. **32**, 1422 (1960).
- [15] R. O. Reid, "Physical and chemical properties of sea water," Natl. Acad. Sci.-Natl. Research Council. Publ. 600, 10 (1959).
- [16] G. R. Garrison, P. C. Kirkland, and S. R. Murphy, J. Acoust. Soc. Am. **33**, 361 (1961).  
(沈毅译自美国《J. Acoust. Soc. Am.》1961年第33卷第8期第1113~1119页，施彬校)

# 多普勒頻移海流計

J. D. Chalupnik, P. S. Green

## 引 言

虽然已經試驗过各种类型的海流計，它們能測量(1)海流对靜止部件的动压力；(2)导电液体在磁場中流动时所产生的电动势；(3)水流对热导綫的冷却效应；(4)声脉冲在一段給定距离上的傳播時間等。然而，目前常用的海流計仍然是带有水动翼輪的机械装置。

翼輪装置对流速变化反应很慢，并且只能在一定的流速范圍內工作。它們体积大，又不能給出連續的讀数。測定水流对靜止部件的动压力的仪器在測量范圍方面受到限制。电磁式海流計的測量范圍亦受限制，而且价格昂貴。热导綫风速計式的装置使用起来很困难，并且需要經常清除在导綫上形成的薄膜。不久以前发表的超声海流計，它的电子設備很复杂，而且价格昂貴。苏倫特罗普(Suellentrop)提出了一种超声海流計的改进方案，可以同时測出流速和声速。

本文描述了一种新的利用多普勒頻移的仪器。它可以在海水中或者在其他含有不均匀体的液体中測量流速。

## 工作 原 理

当一束超声能量輻射入非均质液体中时，液体中的不均匀体把部分能量散射回发射器。这样的回声信号称为体积混响。假如不均匀体在声束方向上有淨运动，則体积混响信号的頻率就会由于多普勒效应而偏移。如果散射体相对于液体是靜止的，那么，观察到的多普勒頻移就正比于液体相对于海流計的流速。多普勒頻移海流計是一种連續声的声納装置，利用装在发射換能器旁边的接收換能器来接收体积混响信号，然后檢测出发射和接收信号之間的頻移。可以設想，絕大多数有用的散射体都处于近乎自由悬浮的状态，并且随着水流一起运动。

假如海水中含有足够多的散射体，就可以把多普勒頻移原理应用于測量海洋的海流速度。由于瑞利散射是随着頻率的四次方而增大的，因此只需考

慮高頻的問題；可以选择 2.5 兆赫和 10 兆赫作为工作頻率。有很多理由說明应当采用較高的工作頻率，这时，主要的不利因素是高頻晶体管电路本身所遇到的困难。在海洋微生物、細小物体和微气泡大量存在的情况下，对于 10 兆赫來說，尺寸等于或大于一个波长 ( $\lambda=0.15$  毫米)的散射体是很多的。

在換能器組(一收一发)靜止而目标(散射体)在运动的情况下，体积混响信号的頻率是：

$$f_{v_x} = \frac{(c - v_x)}{c + v_x} f \quad (1)$$

式中  $f_{v_x}$  是接收換能器处体积混响信号的頻率， $v_x$  是沿換能器組軸向的流速， $c$  是介质中的声速， $f$  是发射頻率。令发射声波的方向为速度  $v_x$  的正方向。接收信号和发射信号相拍，拍頻就是多普勒頻率。多普勒頻率由下式決定：

$$\Delta f = f - f_{v_x} = f - \frac{(c - v_x)}{c + v_x} f = \frac{2v_x}{c + v_x} f \quad (2)$$

由于流速很小于  $c$ ，因而多普勒頻移可以近似写成

$$\Delta f = \frac{2v_x}{c} f \quad (3)$$

为方便計，引入多普勒頻移装置的归一化灵敏度如下：

$$\varphi = \frac{2}{c} \times 10^6 \quad (4)$$

其单位为 赫/兆赫/米/秒。海水的归一化灵敏度約为 1300 赫/兆赫/米/秒。改写式(3)，得到：

$$\Delta f = \varphi v_x f' \quad (5)$$

式中  $f'$  是以兆赫为单位的发射頻率。 $f'$  希望取得尽量高些以获得良好的分辨率。归一化灵敏度  $\varphi = \varphi(c)$  取决于水中的声速。因此，若要很准确地測量流速(誤差小于  $\pm 5\%$ )，則似乎必須确定或估計測量点上的声速。虽然海洋中声速的变化范圍很大，但仍然可能在任何測量点上把声速估計得足够准确，以保証滿足流速測量的要求。

10 兆赫时的灵敏度約为 13000 赫/米/秒，因而可使仪器的測量范圍达到 1 毫米/秒~10 米/秒。如果需要的話，略再改进就可以把流速的測量范圍扩

展到更高和更低。

在进行准确的测量时,发射频率必须保持恒定。发射频率的短期或长期不稳定性都可能引起误差。只有在声波从开始辐射直到返回接收器为止的时间内频率发生变化的情况下,才会有短期不稳定性引起的误差。声波往返时间的量级为1毫秒,因此,只有速度极高的频率漂移才会引起显著的误差。振荡频率长期漂移所引起的多普勒信号的误差正比于发射频率的误差。

$v_x$  方向的改变仅仅会使  $4f$  产生  $180^\circ$  的相位差。因此,如果既要测定流速又要测定流向的话,就必须把回声信号和一个参考信号相拍。参考信号和发射信号之间的频率差应该大于测量到的最大多普勒频率,

$$\delta f = (f^* - f) + \frac{2v_x}{c} f \quad (6)$$

式中  $f^*$  是参考频率(在讨论时先假设大于  $f$ ) 而  $\delta f$  是新的差频。在流速等于零时,差频并不等于零,而是等于偏移频率  $f^* - f$ 。 $\delta f$  小于偏移频率时就表示  $v_x$  是负的,也就是说,水流流向换能器组。如果用尾翼定向,使海流计面向海流,就不需要再测定流向了。

发射频率用10兆赫还有一个优点:可以控制被测海流的区域。在10兆赫时,衰减约为20分贝/米,这就有效地限制了仪器的作用区域。由于接收和发射换能器之间有一小段距离,因而在紧靠换能器组的正前方有一段没有回波的区域。换能器的声束很窄,所以声束截面是很小的。由于这些因素,测量区在换能器组前方约40厘米到70厘米间的一段狭窄区域。在这段区域内没有障碍,水流的情况并未因为有了海流计而受到影响。

由于海流计没有可动部件,反应速度只受声波从测量点传播到接收器所需的时间(小于1毫秒)的限制,因此,几乎能够立即反映出流速的变化。有湍流时会发生频谱扩展和快速的频移现象,从而当能够对被测海流中的湍流情况提供可靠的数据。

### 海流计的构造

海流计包括下列四个组成部分:用来激励发射换能器的振荡器、调谐到振荡频率(10兆赫)的接收放大器、检波器和带有发射极输出器的声频级。这些部件都密封在水密容器中。仪器的电源电压为1.5伏,除了电池以外,全部密封在一个长12厘米、直径为3.2厘米的圆筒内。晶体换能器装在圆筒的

一端,而连接线从圆筒的另一端引出。图1是海流计的全貌。

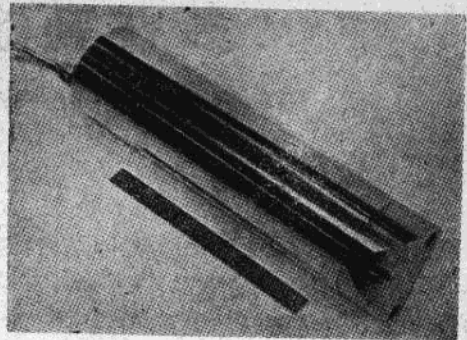


图1 多普勒频移海流计

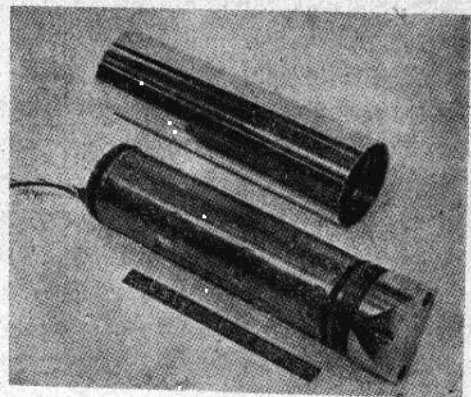


图2 海流计的结构图

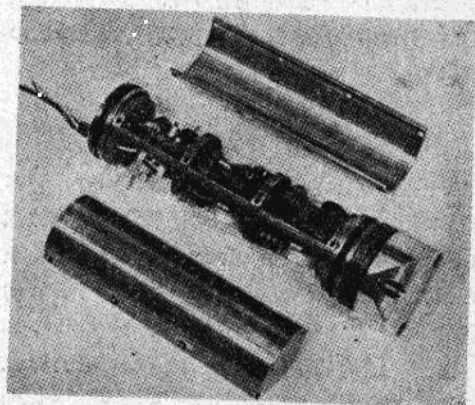


图3 电子元件排列图

由图2和图3可以看到,内屏蔽将振荡级和放大级完全隔开,两端用圆环密封的外壳有足够的强度以承受水压。1.5伏的电源线和声频信号的输出线都穿过塞满小圆环的管子,以防导线周围漏水。

发射和接收换能器都是直径为6.5毫米、厚约0.25毫米的标准商品钛酸钡圆片,厚度共振频率约



为 10 兆赫。在 10 兆赫时，换能器声束半开角的理论值为  $1.7^\circ$ ，而实际测量值为  $2.5^\circ$ ，如图 4 所示。两个换能器圆片的中心之间相距 24 毫米<sup>①</sup>，背面都衬在 0.8 毫米厚的树脂接线上。

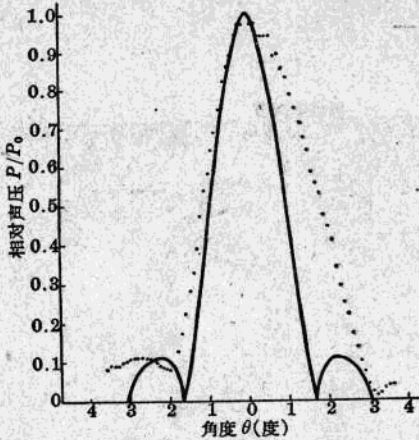


图 4 10 兆赫换能器声压指向性图案  
(实线为理论曲线)

振荡器设计上的特点是使用了一只隧道二极管作为有源元件。隧道二极管体积小并且在高频下有优异的恒流特性，因此，它比普通晶体管更为适用。虽然在 10 兆赫时换能器的阻抗是很低的，然而隧道二极管仍能把峰间值为 2 伏的电压加到换能器上。

调谐放大器级采用了高频合金扩散管，所用的电压比额定电压低得多。放大器共有三级，每级增益约为 20 倍。发射和接收换能器之间有足够的声耦合以提供参考频率，因此，就不再需要通过电路相加。多普勒频率就是 10 兆赫载频上的调幅频率。

用高灵敏度的反向二极管检波器把多普勒信号和 10 兆赫的载频信号分开，然后再将多普勒信号放大。在 1 毫米/秒~10 米/秒的流速范围内，多普勒频移为 13~130000 赫。这种形式的数据还可以再进一步处理，以便记录于磁带记录器上或供数据收集站遥测。

多普勒频移海流计耗电很少，电源电压为 1.5 伏，只消耗 50 毫安电流；用一节可以充电的手电筒电池就能连续工作 48 小时左右。

### 实验结果

多普勒频移海流计在实验室内的流速管中已进行过试验。结果表明，为了得到足够强的混响信号，需要在 Palo Alto 的自来水中加入一些散射体，但是，只要水中的散射体足够多，仪器就能很好地工

作。得到的多普勒频移和流速管中测得的流速很符合。为了在海水中测试仪器的性能，又在旧金山海湾的 Palo Alto 游艇港进行了试验。游艇港水中有足够多的反射信号的散射体，所以仪器性能与预期的相同。虽然信号噪声比很低，但目前还在进行减低噪声的工作。

### 结 论

本文描述了一种利用连续声体积混响的多普勒效应来测量流速的海流计。仪器能否正常工作取决于海水中是否有足够多的散射体。可以设想，在工作频率为 10 兆赫时，海水中的散射体是足够多的，因而仪器能够满意地工作。虽然本文描述的仪器限于测量 1 毫米/秒~10 米/秒范围内的流速，但是我们有理由认为，只要稍加改进就可以得到更大的测量范围。看来，由于仪器对流速的变化反应极快，它应该能够给出海流中可靠的湍流指数。

### 符 号

$c$	声速(米/秒)
$f, f^*$	发射频率(赫)
$f'$	发射频率(兆赫)
$4f$	多普勒频移(赫)
$\delta f$	差频(赫)
$f_{v_x}$	散射声频率(赫)
$P/P_0$	相对声压,无量纲
$v_x$	换能器组轴向上的流速(米/秒)
$\theta$	角度(度)
$\varphi$ <sup>②</sup>	归一化灵敏度(赫/兆赫/米/秒)

### 参 考 文 献

- [1] J. W. Johnson and R. L. Wiegel, "Investigation of Current Measurement in Estuarine and Coastal Water", September 1958, California State Water Pollution Control Board Publication #19, Sacramento, California.
- [2] G. A. Klotzbaugh, "Theory of Continuous-Tone Reverberation" J. Acoust. Soc. Am., 27, No. 5, September, 1955.

(许振夏译自美国《Marine Sciences Instrumentation》1962年第1卷第194~199页,吴刚校)

① 原文误为 8 毫米——译者注

② 原文误为  $\gamma$ ——编者注