

航海业务知识丛书
(航海仪器部分)

多普勒声纳导航

金 受 琪 编



人 民 交 通 出 版 社

151330

航海业务知识丛书
(航海仪器部分)

多普勒声纳导航

金受琪 编



人民交通出版社

2024/09

内 容 提 要

多普勒声纳是根据多普勒效应原理制造的一种测速和计程的精密仪器。该仪器不仅能测定船舶前进或后退的速度，同时能精确地测定船舶横向移动的速度。其独立工作性能类似于惯性导航系统，现正逐渐为海军舰艇、大型民用船舶所采用。

全书共分十章，其主要内容除对多普勒声纳导航系统的工作原理、工作方式作了深入浅出的介绍外，还紧紧围绕着航海实际工作的需要，用通俗的语言对该仪器的组成与操作方法作了具体的阐述。对船舶驾驶人员和从事航海仪器研制的人员均有一定参考价值。

在编写过程中，张翼平、姚仲良、王志桂、郭成森、叶君常等都曾提供不少宝贵意见，在此一并致以谢意。

航海业务知识丛书

（航海仪器部分）

多普勒声纳导航

金受琪 编

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092₃₂ 印张：1.875 字数：41 千

1982年9月 第1版

1982年9月 第1版 第1次印刷

印数：0001—2,100 册 定价：0.39元

前 言

随着交通运输事业的发展，迫切需要有一支与其相适应的、具有一定科学文化水平的职工队伍。搞好全员培训，加强职工技术教育，实为当务之急。当前矛盾是：学习不能都进学校，在职自学又缺少合适的书籍。因此中国航海学会为普及和提高广大海员的航海科学技术水平，以适应航海事业现代化的需要，特倡议组织编写航海知识丛书。中国航海学会编辑委员会与人民交通出版社于1980年在上海组成了航海知识丛书编审委员会，由陈有义、印文甫同志分别担任正副主任，王世忠、赵国维同志任秘书。编审委员会开展工作以来，已组织了企事业、学校的专业人员在业余时间分别进行编写，丛书将先后出版，陆续与读者见面。

航海知识丛书根据专业性质分为《航海业务知识丛书》和《轮机业务知识丛书》两套。为了方便海员学习，力求结合实际，通俗易懂，并以小册子形式分专题出版。希望这两套丛书能不断为海员们业务技术学习作出贡献，同时也希望广大海员和航运单位大家共同来支持它和扶植它，使这两套丛书在不断更新中成为广大海员所喜爱的读物。

目 录

第一节	概述	1
第二节	多普勒效应	2
第三节	多普勒声纳测速、计程原理	10
第四节	詹纳斯 (Janus) 配置	14
第五节	发射频率的选择和工作方式	19
第六节	绝对船速与相对船速的测定	22
第七节	测速误差因素分析及消除方法	24
第八节	多普勒声纳导航系统的组成和操作	37
第九节	多普勒声纳导航系统的应用	45
第十节	展望	50
附 录	在传播介质运动条件下并顾及发射和接收波束 方向有差异时航速公式的推导	51

第一节 概 述

多普勒声纳是根据多普勒效应原理制造的一种精密的测速和计程仪器。通常计程误差仅有0.2%到0.5%，比其它一般计程仪，如水压式或电磁式计程仪等精度高5~2倍。

多普勒声纳不仅能够测定船舶前进或后退的速度，同时还能测定船舶向左或向右横移的速度。因此将它和陀螺罗经提供的精确指向结合起来组成多普勒声纳导航系统，就可以随时显示船舶的准确的推算地理坐标位置（经、纬度），从而有效地引导船舶在各种气象条件下航行。这种导航系统在不依赖外部设备的独立工作性能方面类似惯性导航系统。它不依靠岸上或空中导航台、天体和自然物标，所以不受岸上或空中导航台工作不正常或发生故障的影响，也不受视距不良等气象条件的限制。这一优点对于战斗舰艇来说，尤其在战时是极为重要的。

多普勒声纳的重要特点之一，是它所测的速度和所计的航程是相对于海底的速度和航程。通常叫做“绝对速度”和“绝对航程”，也就是说它所测的速度和所计的航程包括海流对船舶航行的影响在内，这是目前常用的水压式或电磁式等一般计程仪做不到的。然而，大多数多普勒声纳目前仅能在水深不超过460米的条件下测定相对于海底的速度，只有极少数多普勒声纳才能在1,000米水深条件下测定“绝对速度”。如果船舶航行海区的水深超过测“绝对速度”所允许的工作深度时，多普勒声纳可以转换为另外一种工作方式，即测相对于海水的船速和计相对于海水的航程。不过，这种

工作方式的测速和计程精度均要有所下降。

多普勒声纳的另一特点是它可以测定浅水和低速时的航速。测速的最浅水深允许在0.3~0.5米，可以测得的最低航速是0.01节（即0.005米/秒）。这一性能在操纵大型船舶靠码头，起抛锚和系浮筒时显得特别重要。例如船舶操纵上要求，100,000吨以上的船舶靠码头的速度最大不得超过0.06米/秒。对于这样缓慢移动的速度，人们用视觉是无法估算准确的，其它仪器，除了专门的靠岸声纳等也是测不出的，而多普勒声纳却能准确地测定出来。

此外，不少型号的多普勒声纳，在测速的同时还可以测深，并且能够提前发出可能搁浅的警报；当它与NNSS系统卫星导航仪组合在一起工作时，可以向卫星导航仪输入精确的航速脉冲信号，因而能有效地弥补卫星导航仪由于航速误差引起较大定位误差的缺陷。

早在1955年美国等国家就开始研究试制多普勒声纳，但是由于它的工作深度、精度和可靠性等方面均未达到一定的要求，所以一直未能得到广泛的应用。直到1966年以后，经过深入研究和改进，使得上述主要性能获得显著提高，用户才日益增多。现在国际上已经有比较多的海军舰艇，大型民用油（货）轮以及多种考察、勘探船上装备了多普勒声纳，并且取得了比较令人满意的使用效果。

第二节 多普勒效应

由于多普勒声纳是根据多普勒效应原理制造的，所以必须首先介绍什么是多普勒效应。

多普勒效应是奥地利物理学家多普勒（C.J.Doppler）于1842年首先发现的一种物理现象，即在声源（发声体）和

听者（接收者）二者之间有相对运动时，听者接收到的声波频率将不同于它们之间处在相对静止状态时的频率。

随着科学技术日新月异的发展，人们对于声波和电磁波的产生、发射和接收都已经能够控制得比较好了，这种原理在各方面的应用也就越来越广泛。尤其在导航领域中的应用，现在除了用于多普勒声纳以外，还有用于航空的多普勒雷达，人造地球卫星导航（NNSS系统），以及多普勒测速装置等多方面。

说明多普勒效应最明显的例子是高速行驶火车的汽笛声调的变化。当我们坐在一列高速行驶的火车上，如对面开来一列火车拉着汽笛从我们车旁急驶而过时，我们会感觉到汽笛的声调突然由高变低。

声调的高低表明声波频率的高低。声波频率越高，声调越高；声波频率越低，声调越低。听觉能分辨的声波从频率约20周/秒到20,000周/秒，女高音唱出的最高音频率很高，男低音唱出的最低音的频率很低。所以我们感觉到的火车汽笛声调的由高变低，实际上是传到我们耳朵里的声波的频率由高突然变低。这种现象就是多普勒效应的一种现象。产生这种现象的根本原因是鸣着汽笛的火车——声源，相对我们听者是运动的。如果声源相对于听者是静止的，就没有这种频率改变的现象，例如舞台上演奏着优美动听的音乐，即使我们坐在最后一排，也不会感觉有丝毫“走调”的现象。

凡是声源和听者有相对运动时，听者收到的声波频率和二者相对静止时收到的频率发生改变的现象叫做多普勒效应。下面就来分四种情况具体分析产生这种现象的原因及其规律（这里先假设传播声波的介质相对于地是静止的，关于传播介质相对于地是运动的情况放在附录中说明）。

一、声源和听者都是静止时

听者在接收声源发射的声波时，他所接收到的频率可以按下述方法计算。

设每秒钟进入听者耳朵的波列长度为 L （这里指的就是声波分布的长度），如图 2-1 所示。声波的波长为 λ ，则每秒钟进入听者耳朵里的声波周数为 L/λ 。如图 2-1， $L/\lambda = 3$ 周，这也就是听者接收到的频率 f_R 。因此 f_R 可按下式计算。

$$f_R = \frac{L}{\lambda}$$

在声源和听者都是静止时，每秒进入听者耳朵里的波列长度实际上等于声波在介质中传播的速度 C ，即 $L = C$ ，

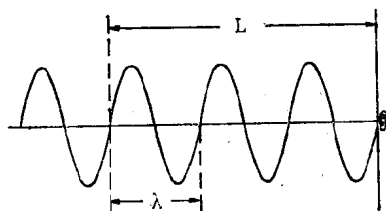


图 2-1

所以

$$f_R = \frac{L}{\lambda} = \frac{C}{\lambda}$$

而声源的发射频率 $f_T = C/\lambda$ ，所以听者收到的频率 f_R 与声源发射频率 f_T 相等。

在图 2-2 甲中，假定听者位于 a_1 ，声源位于 S_1 ，二者都是静止不动的， a_1 距 S_1 为 C 米（声速为 C 米/秒）。如果声源

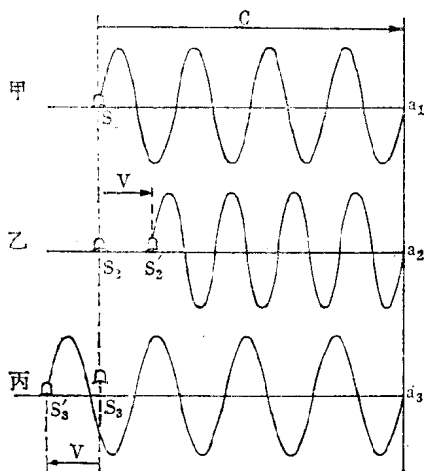


图 2-2

发射的频率 f_T 为40周/秒（图中只画了4周，每1周表示实际的10周），即每秒钟发射40个周波，则位于 a_1 点的听者收到的接收频率也应是40周/秒。因为声源和听者都是静止不动的，当声速为 C 米/秒时，每秒钟通过听者耳朵里的波列长度应为 C 米。现在声源1秒内所发出的40个周波是分布在长为 C 米的波列中，所以每秒通过听者耳朵里的声波为40个周波，也就是听者收到的接收频率 f_R 为40周/秒。

二、声源运动，听者不动

当听者不动，声源以速度 V 向听者接近或背离运动时，情况就不同了。

如图2-2乙，开始听者位于 a_2 ，声源位于 S_2 ，声源以速度 V 米/秒向听者接近。由于 a_2 距 S_2 为 C 米（波速为 C 米/秒），所以经过1秒钟听者在 a_2 开始收到声源在 S_2 所发出的声波。同时声源经过1秒钟，在1秒末的时刻已经运动到 S'_2 点，在这1秒钟内声源发出的声波总周数（或振荡次数）和它在静止状态时是完全相同的，即40个周波。但是由于声源这时已由 S_2 运动到 S'_2 并在 S'_2 处发出了1秒钟内最后一个波。所以，声源在这1秒钟内所发出的40个周波是分布在 $S'_2 a_2$ 的一段波列里，比原来的波列长度 C 减少了一段 $S_2 S'_2$ （即声源在这1秒内接近听者的距离）。因此声波被“压缩”了，波长变短了，这时的波长 λ' 应为

$$\lambda' = \frac{C - V}{f_T}$$

由于传播声波的介质没有改变，听者又是静止不动的，所以相对于听者的声波速度没有改变，也就是1秒钟内进入听者耳朵里的波列长度仍然等于 C 米，所以根据频率 $f = \text{波速} / \text{波长}$ 的公式得到

$$f_R = \frac{C}{\lambda'} = \frac{C}{\frac{C-V}{f_T}} = f_T \cdot \frac{C}{C-V}$$

$$= f_T \cdot \frac{C}{1 - \frac{V}{C}} \quad (2.1)$$

这个问题也可以这样来理解,从图2-2乙可以看出 $S'_2 a_2 < S_2 a_2$, 但声速在一定介质中传播速度是不变的,所以在 a_2 的听者不要等到第2秒末,即从第1秒末开始收到声波,只要经过少于1秒钟的时间就听到了声波在第1秒钟内所发出的40个周波的全部声波。由于在少于1秒时间内听到了声源1秒钟发出的全部40个周波的声波,所以接收到的频率(周/秒)比原来高。

按照上面同样的分析方法,可以得到:当声源背离听者运动时,接收到声波的波长应为

$$\lambda'' = \frac{C+V}{f_T} \quad (\text{参看图 2-2 丙})$$

于是接收到的声频为

$$f_R = \frac{C}{\frac{C+V}{f_T}} = f_T \cdot \frac{C}{C+V} = f_T \cdot \frac{1}{1 + \frac{V}{C}} \quad (2.2)$$

合并式(2.1)和(2.2), 得到

$$f_{R1} = \frac{f_T}{1 \mp \frac{V}{C}} \quad (\text{声源} \begin{matrix} \text{向} \\ \text{背} \end{matrix} \text{着听者运动}) \quad (2.3)$$

其中 f_{R1} 表示声源运动听者静止时的接收频率。由式(2.3)可以看出,当听者不动,声源背着或向着听者运动时,听者接收的频率,在声源发射频率 f_T 和声速 C 一定的条件

下，只取决于声源运动速度 V 。

当声源与听者接近时，由于式(2.3)中分母小于1，所以接收到的频率比原来静止时声源的频率要高，接近的速度越快，接收频率也越高；

当声源背离听者运动时，接收到的频率比原来静止时声源的频率要低，背离的速度越快，接收频率也越低。

因此实际上接收频率 f_{R1} 变化的大小，可以反映声源相对于听者的运动方向（接近或背离）以及速度的大小。若 $f_{R1} > f_T$ ，说明声源接近听者运动；若 $f_{R1} < f_T$ ，说明声源背离听者运动。而且根据 f_{R1} 与 f_T 的大小，可以计算出接近或背离速度的大小。

三、听者运动，声源不动

如图2-3乙，假定声源静止在 S_2 ，听者在 a_2 ，并以速度 u （米/秒）向 S_2 方向运动。声速仍然为 C （米/秒）。从相对运动的观点来看，如果将听者看作不动，则声波相对于听者的传播速度将变为 $C+u$ ，因为除了声波本身的速度 C 以外还具有和听者运动方向相反，大小相等的速度 u ，因此，这时运动的听者接收到的声频 f_R 应为

$$f_R = \frac{C+u}{\lambda} \quad (2.4)$$

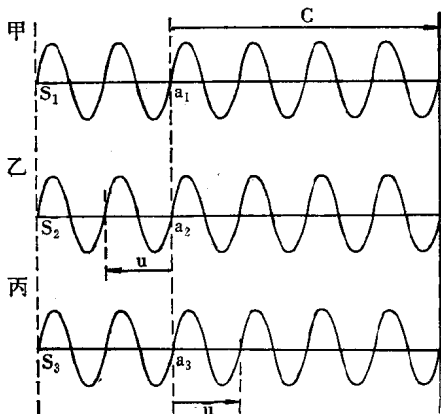


图 2-3

这个问题也可以理解为：每秒钟进入听者耳朵里的波列长度由原来声源和听者相对静止时的 C 米变为 $C + u$ 米。

按照同样的分析方法，如图2-3丙，声源静止在 S_3 ，听者在 a_3 并以速度 u （米/秒）背离 S_3 运动，则这时声波相对于听者的速度为 $C - u$ ，所以这时听者接收频率 f_R 应为

$$f_R = \frac{C - u}{\lambda} \quad (2.5)$$

合并式(2.4)和(2.5)，得到当声源不动，听者运动时的接收频率 f_{R2} 为

$$f_{R2} = \frac{C \pm u}{\lambda} \quad (\text{听者} \begin{matrix} \text{向} \\ \text{背} \end{matrix} \text{着声源运动}) \quad (2.6)$$

或者写成

$$\begin{aligned} f_{R2} &= \frac{C}{\lambda} \pm \frac{u}{\lambda} = \frac{C}{\lambda} \left(1 \pm \frac{u}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{C} \right) \\ &= f_T \left(1 \pm \frac{u}{C} \right) \quad (\text{听者} \begin{matrix} \text{向} \\ \text{背} \end{matrix} \text{着声源运动}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

由以上分析可以看出，当声源不动，听者运动时，只要紧紧地掌握声波相对于听者的波速变化，那末，接收频率的变化就一目了然了。

四、声源和听者均在运动

因为声源不动，听者运动时，由式(2.7)得到接收频率 $f_{R2} = f_T \left(1 \pm \frac{u}{C} \right)$ （听者_{向背}着声源运动），式中 f_T 是声源静止时的发射频率。当声源也运动时，这时听者接收声源的发射频率不再是声源静止时的发射频率 f_T ，而是接收它运

动状态的发射频率，所以 f_T 应换以式 (2.3) 的 $f_T \cdot \frac{1}{1 \mp \frac{V}{C}}$

(声源^向背^着听者运动)。于是得到声源和听者均在运动时，听者接收的频率 f_R

$$f_R = \left(f_T \cdot \frac{1}{1 \mp \frac{V}{C}} \right) \left(1 \pm \frac{u}{C} \right)$$

$$= f_T \cdot \frac{C \pm u}{C \mp V} \quad (\text{听者与声源相互} \begin{matrix} \text{接近} \\ \text{背离} \end{matrix})$$

(2.8)

注：若听者与声源同向运动，应按式 (2.3) 和式 (2.7) 决定正负号。

由公式 (2.8) 可以明显地看出：

声源与听者相互接近时，听者接收到的频率比原来相对静止时的频率高，相互接近的速度越快，即 u 及 V 越大，则接收频率也越高。

声源与听者相互背离时，接收到的频率比原来相对静止时的频率低，相互背离的速度越快，接收的频率也越低。而且根据 f_R 与 f_T 以及 u (或 V) 的大小，可以具体计算出接近或背离的 V (或 u) 的大小。

现在用这个结论来解释前面提出的火车汽笛声调变化的现象就很容易了。

由于开始对面开来的火车和我们是相互接近的，所以我们听到对面火车汽笛的声波频率比两车相对静止时要高，也就是听到的声调高。而当对面火车擦过我们车旁后，变为相互背离的运动，这时我们听到的频率比两车相对静止时要低，也就是听到的声调低。因此对面火车擦过我们身边时，我们才感觉到火车汽笛声突然由高变低。

这里还要进一步指出，如果声源和听者的运动方向不在声源和听者瞬时位置的连线（或其延长线）上，如图2-4，则应以声源速度 V 和听者速度 u 在声源与听者瞬时位置连线 RS 上投影的速度分量 $V\cos\alpha_1$ 及 $u\cos\alpha_2$ 代替 V 和 u 运用上述各式计算接收多普勒频率。至于 V 和 u 在声源和听者瞬时位置连线垂直方向的速度分量 $V\sin\alpha_1$ 和 $u\sin\alpha_2$ 在这时是不产生任何多普勒效应的，所以是无关的。

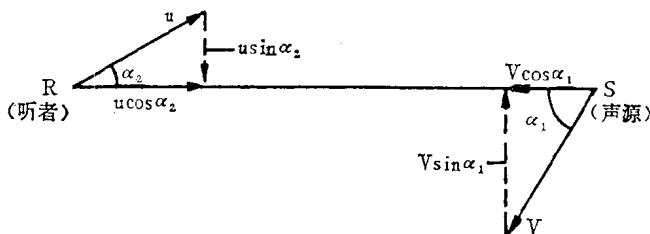


图 2-4

多普勒声纳就是根据这个道理，利用式(2.8)的结论来求得船舶相对于海底的航速（有时是相对于海水的航速）。具体道理，请看下节说明。

第三节 多普勒声纳测速、计程原理

如图3-1，在船体底部装置一个发射换能器，按着固定倾角 α （通常与龙骨夹角为 60° ）方向斜向海底发射超声波（通常频率为150千赫到600千赫）。同时在同一位置，同一方向上装置另一个接收换能器，专门接收由发射的超声波接触海底以后漫反射返回的回波。发射的超声波并非一条直线而是一束波束，其轴线如图3-1为 OP 。当波束接触海底后，海底各点漫反射的回波的方向和强度是不同的，然而总

的平均起来可以把回波方向看作是波束轴线 OP 的反方向 PO 。另外，即使船舶在前进，由于超声波在水中速度（约1500米/秒）大大超过船舶速度，所以在某一瞬间发射的超声波接触海底后漫反射回到接收换能器的过程中，船舶前进的距离是很小的，因此在图3-1中可以将 O 点看作不变来分析。

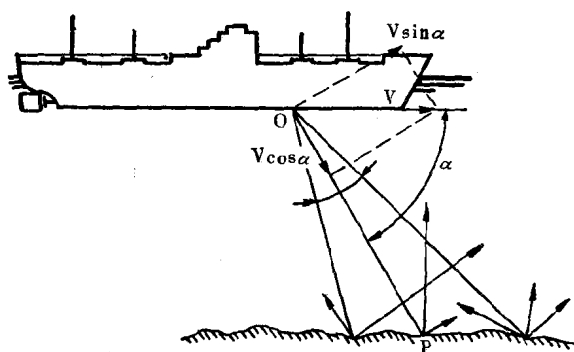


图 3-1

现在假定船舶前进的速度为 V ，可以将其分解为沿着发射波束轴线方向的分量 $V \cos \alpha$ 和垂直于发射波束轴线方向的分量 $V \sin \alpha$ 。由于发射换能器和船舶具有相同速度，所以类似“声源”的发射换能器是以速度 $V \cos \alpha$ 沿着波束轴线 OP 方向对类似“听者”的海底作接近运动。假定海底有个接收器，它所接收到的频率 f'_R ，根据式(2.3)应为

$$f'_R = f_T \cdot \frac{1}{1 - \frac{V \cos \alpha}{C}} = f_T \cdot \frac{C}{C - V \cos \alpha} \quad (3.1)$$

其中 f_T 为发射换能器的发射频率， V 为船舶航速， C 为水中声波速度。

同时,当波束接触到海底,海底这时又相当于一个静止不动的发射器,将漫反射的回波“发射”给船上的接收换能器,它所“发射”的频率应为 f'_R 。因此这时船上的接收换能器就又相当于一个以速度 $V\cos\alpha$ 沿着波束轴线方向向“声源”——海底接近运动的“听者”。它所接收的频率 f_{Rf} 根据式(2.6)应为

$$f_{Rf} = f'_R \left(1 + \frac{V\cos\alpha}{C} \right) \quad (3.2)$$

将式(3.1)中 f'_R 代入式(3.2)就得到船上接收换能器接收到的频率 f_{Rf}

$$\begin{aligned} f_{Rf} &= \left(f_T \cdot \frac{C}{C - V\cos\alpha} \right) \left(1 + \frac{V\cos\alpha}{C} \right) \\ &= f_T \cdot \frac{C}{C - V\cos\alpha} \cdot \frac{C + V\cos\alpha}{C} \\ &= f_T \cdot \frac{C + V\cos\alpha}{C - V\cos\alpha} = f_T \cdot \frac{1 + (V/C)\cos\alpha}{1 - (V/C)\cos\alpha} \end{aligned} \quad (3.3)$$

至于另一航速分量 $V\sin\alpha$,由于它是垂直于波束轴线方向的,不产生任何多普勒效应,所以是无关的。

现在可将式(3.3)作如下的变换

$$\begin{aligned} f_{RT} &= f_T \cdot \frac{1 + (V/C)\cos\alpha}{1 - (V/C)\cos\alpha} \\ &= f_T [1 + (V/C)\cos\alpha][1 - (V/C)\cos\alpha]^{-1} \\ &= f_T [1 + (V/C)\cos\alpha][1 + (V/C)\cos\alpha \\ &\quad + (V/C)^2\cos^2\alpha + \dots] \end{aligned}$$

(根据二项式定理展开)

$$= f_T [1 + (2V/C)\cos\alpha + (2V/C)^2\cos^2\alpha + \dots]$$

由于 $V \ll C$,所以在 $(2V/C)^2\cos^2\alpha$ 项以后的各项相对于1是