

关于 YZ-III 型遥测波浪仪浮标的设计*

李世山 陆蔼庆 曹洁玉 于新生
(中国科学院海洋研究所)

关键词 遥测波浪仪,垂摆式自平衡系统,随船和定点两用

提要 本文论述了 YZ-III 型遥测波浪仪测波浮标的总体及结构设计。该测波浮标在结构上具有即可定点系留使用,也可以随船使用的特点。垂摆式的自平衡系统,具有独特的结构形式和良好的随动性能。本文还论述了浮标的随波性能及浮标的系留方式。浮标升沉达到随波状态时的周期不大于 1.03s。在强流区定点系留浮标时,作者建议采用一种有助于克服强流影响的系留方式。

我们研制的 YZ-III 型遥测波浪仪,是一种小型、多用途(可以定点系留使用,也可以随船使用)、国产化的自记式测波仪。自 1986 年以来,先后有 12 台测波仪,分别在渤海、东海以及西太平洋中部海域,在石油平台、黄河口海港工程、海洋观测站以及海洋调查船等不同环境条件下作长期或短期使用。取得了大量的波浪资料,也考验了仪器。

近三年的使用,证明了该仪器具有性能稳定、使用方便的特点。“是目前我国唯一的既能船用测波、又能定点锚系测波的新型测波仪¹⁾。

YZ-III 型遥测波浪仪在浮标的设计上具有多用途的特点。波浪传感器输出波高模拟量,使传感器成为一个具有独立功能的单体。为加速度计设计的垂摆式自平衡系统,从结构上脱离了传统使用的双环式结构形式,并具有良好的随动性能和较强的抗震能力,为 YZ-III 型遥测波浪仪具有良好的测量性能奠定基础。

本文仅对浮标的总体及结构设计进行论述。

一、浮标的总体设计

所谓浮标,是对 YZ-III 型遥测波浪仪(以

下简称波浪仪)在水中工作部分的总称。其功能测量浮标所处水面的升沉变化过程,并

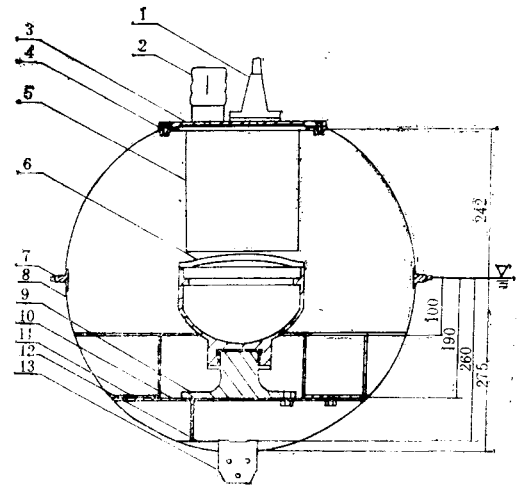


图 1 浮标总体图

Fig 1 Schematics of the buoy constructure

- 1.天线 2.灯; 3.顶盖; 4.顶部法兰盘; 5.电路盒;
6.波浪传感器; 7.轴 8.浮体; 9.螺栓形座; 10.支撑板; 11.电池(盒); 12.加强板; 13.系留环

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1615 号; 本文承李磊高级工程师审阅、指正, 谨致谢意。

1) 中国科学院海洋研究所, 1988。科学技术成果鉴定证书, (88) 中科海成鉴字第 003 号。

通过发送电路将测量信号发送出来。它由浮体、波浪传感器、发送电路、电源及短链等部件组成。浮体是一个载体，传感器等部件分别安装在各相应位置上。浮标的总体布置见图 1。

浮标的主要参数及性能 浮体直径 55cm，型高 51.7cm，吃水（距基线）27.5cm，排水量 44.5kg，重心高度（距基线）16.6cm，浮心高度（距基线）17.2cm，初稳性高 0.152m，固有摇摆周期（实测 0.5s，固有升沉周期（实测）0.9s，波高测量范围 0.3—20m，周期测量范围 2—15s。

在设计浮标时，我们特别注意考虑两点，浮标的重心高度和浮标的转动惯量。浮标的稳性与其重心高度有直接关系。适当降低浮标的重心高度，有助于增强浮标在波浪上的抗倾翻能力^[1]，浮标的固有摇摆周期与其转动惯量的平方根成正比^[2]。若减小浮标的转动惯量，可缩短浮标的固有摇摆周期，从而提高浮标对短周期波的响应性能，扩大浮标的响应范围。因此，在作浮标的总体布置时，我们尽量降低各部件的位置高度，并使其尽量地向浮标纵轴集中和保持对纵轴的对称性（保证浮标的均衡性）。电池(11)是浮标中最大的载荷，总重 11.5kg。将其置于基线以上 8.5cm 的平面上。每两块电池一组，分别装在五个电池盒内。电池盒呈正五边形环绕纵轴。电路盒(5)悬挂在浮标顶盖(3)的下方，锚灯(2)与天线(1)分体装配，以利降低天线座的高度，短链长为 1m，重 9kg，悬挂在浮标下方的系留环(13)上。

短链是浮标总体中不可缺少的一部分。它不仅能使浮标总体的重心降低，还能有效地稳定浮标在波浪上的运动状态。

二、浮体的设计

波浪仪的浮体，既是载体，也是测量体。波浪传感器是通过浮体随波升沉运动进行工作的。因此，浮体升沉性能的优劣，直接影响着波浪仪的工作性能。我们认为，在浮体的设计上，要注意考虑四点基本要求。(1) 在波浪仪的频

响范围(2—15s)内，要有良好的随波性能；(2) 结构上，应满足波浪仪在作定点系留测量和随船测量时不同工作条件的要求；(3) 有较强的抗碰撞能力和纵向抗拉强度，其大小和总重量要便于随船使用；(4) 各部件的安装要稳固，需定期更换的部件(如电池)，要易于装卸。

浮体用厚 1.8mm 的不锈钢板(材质 1Cr18Ni9Ti)经冲压、焊接而成型。在结构上有三个特点。

1. 具有可作定点系留和随船使用的结构

浮体底部有一个系留环，用以悬挂短链和作定点系留时使用。在浮体的最大横截面(即静水线面)上，装有两个对称的轴(见图 1)，另外制作了一个“U”形环。随船使用时，把“U”形环装在两对称轴上，用卸扣和转环把系留绳与“U”形环顶端的眼环相连接。因此，勾住“U”形环，可以把浮标吊起来。(图 2)

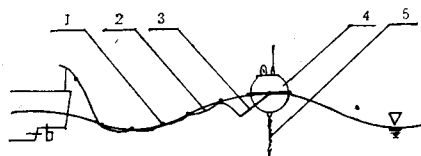


图 2 船用浮标系留结构示意图

Fig. 2 Schematics of the buoy mooring used on vessel

1. 小浮球； 2. 系留绳； 3. “U”形环； 4. 浮标； 5. 短链

实际使用时，在靠近“U”形环顶端的系留绳上，增加一些浮力(例如加小浮球)，将“U”形环在水中拉起来，使其与水面夹角不大于 30°，浮体在“U”形环间可以绕轴转动，靠自身重力保持正浮状态。这种结构形式简便实用，已为 1986—1988 年三次随“科学一号”远洋考察船使用所证明，即使在 6 级海况下，浮标的放出与回收作业也很方便、安全。在三个航次中测得的最大波高为 6.2m。取得的大洋波浪记录曲线如图 3 所示。

在船上使用时，可依据海况及船长情况调整放出绳索的长度。一般情况下，放出绳索的长度约为船长的 1.5 倍。在大风浪、高海况下还可适当放长些，以减少因船体摇晃牵动绳索

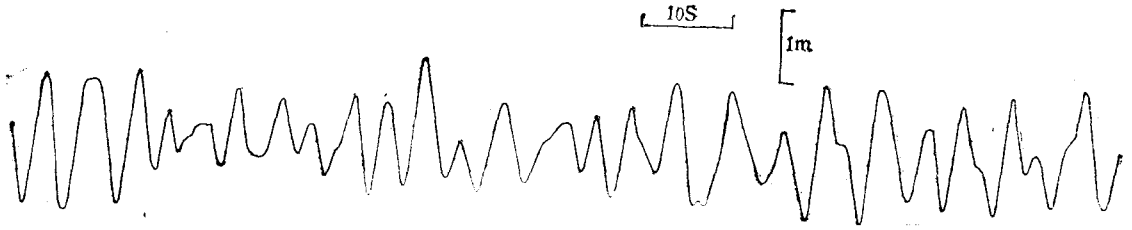


图 3 大洋波浪记录曲线

Fig. 3 Recording chart of the ocean wave

对浮标造成的冲击。

为避免绳索下沉而加给浮标的拉力,把一些小浮球系在绳索上,使其浮在水面。

2. 有较强的抗碰撞能力、纵向抗拉力且体积小、重量轻

浮体底部的加强板(见图 1)增大了系留环处的受力面积,与浮体中部的防撞圈、顶部法兰盘相配合,增强了浮体的整体刚度。加强板周边处是浮体受拉时应力集中的部位,按此处球壁的法向截面积计算(取抗拉强度 $\sigma_0 = 55\text{kg}/\text{mm}^2$),可承受 $1.5 \times 10^4\text{kg}$ 的纵向拉力。这个量值远大于浮标在水中可能受到的最大纵向拉力。

浮体防撞圈处的外径为 59cm,浮标总重 44.5kg。这样的体积和重量,使用一般的水文绞车即可工作。

3. 各种部件安装稳固、装卸操作简便

浮体顶部有一个直径为 20cm 的圆口,开口大,便于进行浮体内各部件的安装。浮标内可装 10 块电池,每两块插装在一个特制的塑料电池盒中,用一块塑料压板,套在立于两块电池中间的一根螺柱上,再旋上花篮螺母,即可压住电池并固定在电池盒中。采用螺纹连接方式固定波浪传感器,在两底面间加一层厚 2—3mm 的胶垫圈可以有效地防止螺扣松动。发送、调制及锚灯电路板,插装在电路盒中。

三、波浪传感器的设计

由于浮标的体积小、重量轻,所以它对小波动的反应也很灵敏,这一性能对扩大浮标的频

响范围是有利的。但是,浮标易受小波动的干扰,发生高频摇晃现象,对加速度计的工作产生不利影响。为适应小型浮标的工作特点,波浪传感器中的自平衡系统要具有较高的随动性能。

在测量波浪的传感器中,都有一个自平衡系统。当传感器随浮标倾斜或摇摆时,该系统始终使加速度计的姿态保持在铅直方向上。为避免自平衡系统受波浪的作用而发生共振,其固有摆动周期应远离所测波浪的周期范围(2—15s)。若按固有周期的长短划分自平衡系统,30s 以上的为长周期摆型,1s 以下的为短周期摆型。浮沉摆式加速度计^[3]和弦式传感器^[4]的以及我们为加速度计设计的自平衡系统都是短周期摆型的。但是,在自平衡系统的结构上,它与前两种完全不同。它们的自平衡系统都是双环式的结构形式。

我们曾将浮沉摆式加速度计用于 YZ-III 型遥控遥测波浪仪^[5]。在 YZ-III 型波浪仪的样机浮标上,我们也曾用它进行过试验。但是,试验结果不理想。主要有二个问题:(1)自平衡系统不适应浮标在随波升沉过程中出现的高频、大倾角摇晃,以致于在短周期波的作用下,加速度计的工作状态不稳定,受到“冲击”,记录出现“零漂”现象;(2)自平衡系统的结构不能承受较大的冲击与震动,容易发生机械性故障。对于小型浮标来说,整机运输或随船使用都可能使浮标受到较大的震动和冲击。此外,传感器的底座结构也不便于在小型浮体上安装。

我们认为,用于小型浮标的波浪传感器应满足以下基本要求。(1)加速度计要有较好的

低频性能和较大的超载能力(不小于 10g);(2)自平衡系统的固有摆动周期应小于浮体的固有摆动周期,单侧摆角不小于 40° ;(3)结构的耐震颠性应满足“海洋仪器基本环境试验方法”中规定的“连续冲击试验”要求;(4)便于在小型浮体上进行安装和拆卸。因此,我们选择了适用的加速度计,重新设计了波浪传感器。

1. 加速度计的选择

在目前众多的垂直型加速度计中,我们认为 CYJ-1 型差容式加速度计的性能和结构适于我们的选择。其主要特点是:低频性能好、过载能力强、稳定性高以及体积和重量较小。在外型结构上,稍作改动就能满足我们的设计要求。考虑到过载能力,我们选择加速度计的量程为 $\pm 1.5g$ 或 $\pm 2g$ 。

2. 传感器的结构设计

波浪传感器的总体结构如图 4 所示。

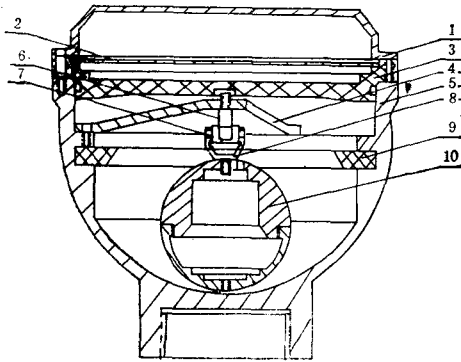


图 4 波浪传感器总体图

Fig. 4 Schematics of the sensor constructure

1. 顶盖; 2. 电路板; 3. 有机玻璃盖; 4. 三角支架;
5. 壳体; 6. 上叉形架; 7. 轴承架; 8. 下叉形架;
9. 限位保护圈; 10. 摆体

传感器的壳体形如一碗形容器。一个三角支架固定在壳体的内壁上。自平衡系统悬挂在三角支架下,有机玻璃盖有两个作用,使容器密封和固定电路板。

(1)壳体设计 壳体是用铅合金铸造,经精密加工而成的。壳体的内壁,下部呈球面状,上部为二层不同直径的圆柱面。底座上带有 $M60 \times 2.5$ 的螺纹,用以将传感器旋在浮体内

的螺栓形安装座上。

(2)自平衡系统的设计 利用万向节的工作原理,设计了一种垂摆式的自平衡系统。垂摆由万向节、摆杆及摆体三部分组成。加速度计置于摆体内的圆柱形空腔里。万向节可使垂摆在 360° 范围内任意摆动。考虑到加工与装配上的方便,对万向节作了特殊设计。它由轴承架和叉形架组成。在轴承架上,相互垂直地安装了两对精密微型轴承。上、下叉形架分别用螺栓固定在两对轴承的内轴套上,可在 360° 范围内绕轴承架作相对运动。轴承架和叉形架用高强度金属材料加工而成。上、下叉形架是相同的,可简化加工过程,其杆部带有螺纹。上叉形架与三角支架相连,下叉形架与摆体相连。在垂摆工作过程中,叉形架的杆部(即摆杆)受到拉力和剪切力的作用,是垂摆中受力较大的一环。摆体外形为一圆球体,球体分为上、下两半球,用螺纹旋合。上半球壁厚,下半球壁薄,借以提高垂摆的重心高度,利于缩短垂摆的等效摆长。垂摆的摆心(即万向节的转动轴心)与壳体内球面的球心位置相重合。摆体下端与球面的间隙为 1mm 。在垂摆摆动过程中,这一间隙保持不变。我们用甲基硅油作为阻尼剂。垂摆的偏角可达 45° 。在此偏角范围内,垂摆能正常工作。偏角大于 45° 时,有一限位保护圈对垂摆起限位保护作用。此圈用软橡胶制作,镶嵌在内壁上。偏角大于 45° 时,摆体与胶圈相接触,垂摆的摆动受到限制。传感器受到突然的横向冲击,垂摆发生猛烈时胶圈对摆体的运动起缓冲作用。保护圈的效果很明显,由于它的作用,可以允许传感器横向放置,并且,如果传感器发生翻转或滚动时,其内部结构和引线也不会损坏。

经实际测试和计算,自平衡系统的主要性能为,固有摇摆周期(空气中) 0.45s ,最大倾斜角度 45° 。

另外,在摆动周期 0.45s 、最大倾斜角 45° 、垂摆重量 0.7kg 、摆杆直径 0.4cm (45Mn 钢, $\sigma_s = 63\text{kg/mm}^2$)、垂向最大加速度 100m/s^2 (相

当于 10g) 及设计摆长 7.2cm 等条件下, 计算了摆杆的抗拉强度和最大张力, 得到: 摆杆抗拉力 $F_c = 791\text{kg}$, 最大张力 $F_{zh} = 10\text{kg}$ 。结果表明, $F_L \gg F_{zh}$ 。

1987 年 4 月, 在中国船舶工业总公司第七研究院七〇七研究所进行了三项试验: (1) 倾斜试验; (2) 摇摆试验; (3) 连续冲击试验。按照“海洋仪器基本环境试验方法”¹⁾中的有关规定, 对波浪传感器进行了严格的检验。试验 (1)、(2) 是检验自平衡系统的静态和动态性能, 试验 (3) 是检验传感器结构的耐震颠性能。各项试验都获得成功。其中特别要提及的是“连续冲击试验”。按规定, 试验的条件是垂直加速度为 100m/s^2 , 冲击次数为连续 1000 次。试验结果令人满意²⁾。

四、浮标的随波性能

浮标的随波性能, 是浮体升沉特性和传感器中自平衡系统随动性二者的综合反应, 也是反映浮标测量性能的一项重要指标。

将浮标实体在上海交通大学的船模水池中进行试验。根据试航仪记录的试验资料, 可以分析浮体的升沉特性, 但是, 尚不能用以说明传感器中自平衡系统的随动性能。

浮标随波升沉时, 其升沉加速度不断地变化。作者认为, 分析加速度曲线形状的变化, 有可能获得对浮标随波性能的认识。

水池造波机造出的是规则波。造波机在一种工作状态下, 产生一系列等幅等频的正弦波。不同工作状态, 波的振幅和周期不同, 但是波的基本形状 (正弦波) 不变。浮标随规则波升沉运动, 若是达到随波状态, 也就是浮标跟随波面升沉, 并且与水面间无相对运动时, 那么浮标的升沉加速度曲线应该是一条与水池波浪同频的等幅正弦曲线。不同的波浪条件, 曲线的振幅和周期发生变化, 但基本形状不变。

基于上述认识, 我们在试验中从传感器的加速度计输出端直接记录了升沉加速度曲线。按照水池的造波能力, 在 0.81—2.74s 间, 共进

行了 18 组不同状态的试验。记录的升沉加速度曲线如图 5 所示。

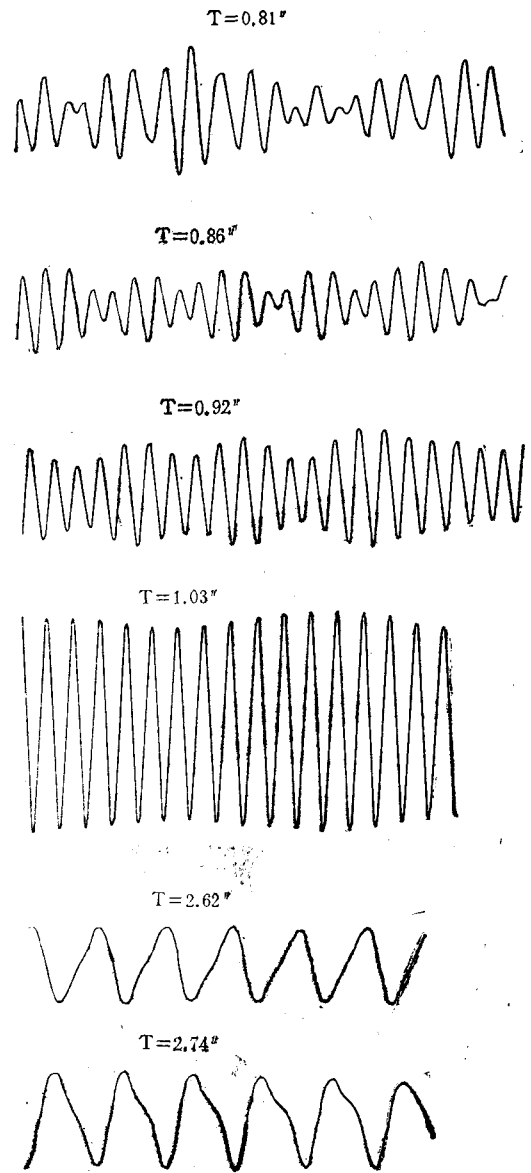


图 5 升沉加速度曲线

Fig. 5 Chart of the acceleration of heave and set

从图 5 上看, 当波周期 $\leq 0.92\text{s}$ 时, 曲线不等幅, 并有“波群”现象, 尤以 0.81s 时“群波”现

- 1) 国家海洋局南海分局, 1988. 海洋仪器管理手册, 252—262。
- 2) 中国船舶工业总公司第七研究院七〇七研究所, 1987. 试验报告, (87)0036 号。

象最为显著。随波周期增大,曲线上的“波群”现象逐渐减弱。当波周期达到 1.03s 时,“波群”现象基本消失,曲线成为与水池波浪同频的等幅正弦曲线,其后,直至波周期到 2.35s 加速度曲线都呈等幅等频正弦曲线状。

在试验中,我们还观察到,在波周期 ≤ 0.92 s 时,浮标发生“拍击”水面现象(即浮标与水面间有相对运动),并且,“拍击”现象时轻时重。在 0.81s 时,“拍击”现象最显著。随波周期增大“拍击”现象逐渐减轻,至 1.03s 时,“拍击”现象不再发生。波周期继续增大(直至 2.74s),浮标的升沉运动状态就越来越平稳。这一情况正好与升沉加速度曲线形状的变化相对应。作者认为,在波周期 ≤ 0.92 s 时,浮标的升沉运动可能有“共振”发生,表现在浮标的运动状态上,就是出现“拍击”现象,反应在升沉加速度曲线的形状上,就是出现“波群”,另外,“波群”和“拍击”现象时轻时重相对应,说明这一“共振”是有阻尼的。

根据以上分析可以看出,浮标的升沉运动达到随波时的最小周期不大于 1.03s。

在图 5 上,当波周期为 2.62s 和 2.74s 时,曲线的形状发生了畸变。2.74s 的曲线与 2.62s 的相比,畸变还大了些。似乎随波周期增大,畸变有加重之势。

据了解,水池的造波机,在造波周期 > 2.5 s 时,波面形状的对称性不够好,有点畸变,并随周期增大而加重。浮标的升沉运动反映了这一事实。由此可以说明,当周期 ≥ 2.62 s 时,浮标已具有很好的随波性能。

在静态下,我们测得浮标的固有升沉周期为 0.9s。这个测量结果说明,在波周期 ≤ 0.92 s 时浮标所出现的运动现象是合理的。因为,当波周期与浮标的固有升沉周期相近时,浮标的升沉运动可能会出现“共振”现象。

指标规定,浮标的周期测量范围下限为 2s。浮标在周期为 1.03s 时可达随波状态。所以,浮标的随波性能满足测量要求。

五、传感器在浮标中的位置设计

应该把波浪传感器置于浮标的纵轴线上,但是,其位置高度如何?设计时,使传感器垂摆的摆心(万向节的转动轴心)与浮标体的球心位置相重合,并依此决定传感器在浮标上的位置高度。

根据设计,在工作状态下浮标是一个自由漂浮体,浮标的排水量保持不变。因此,在浮标摇摆时,漂心(水线面的重心)位置是不变的,且此漂心与球心位置相重合,也就是说,在我们的设计状态下,浮标的球心点处将不会因浮标摇摆的影响而产生垂向的和横向的位移,所以把垂摆的摆心置于球心位置处,可为自平衡系统提供一个最佳工作条件。

六、关于浮标的系留

测量时,应使浮标在水中的吃水深度保持不变,否则会因浮标与水面间的相对升沉运动而影响对波高的测量精度。在实际情况下,当浮标受系留绳索的牵拉时,会有一个垂向的力作用于浮标,使浮标的吃水状态发生变化,因此,必须考虑在不同使用条件下的浮标系留问题。

在随船使用波浪仪时,浮标近似为一自由漂浮体。浮标的结构及所采用的系留方式,经多次使用已被证明是有效的¹⁾,即使在六级海况、船漂移速度较快(1—1.5 节)的情况下,浮标的升沉运动状态仍很平稳,未观察到浮标被“淹没”现象。

波浪仪作定点系留使用时,当浮标受流的作用并达到平衡状态时,系留绳索是倾斜的。此时有一个附加的垂向力作用于浮标,使浮标的吃水增大,出现浮标“浸水”现象。流速越大,“浸水”现象越严重,甚至影响浮标随波起伏。因此,在强流区如何定点系留测波浮标,是一个需

1) 中国科学院海洋研究所,1988。YZ-III 型遥测波浪仪随船使用情况报告。鉴定会文件。

要解决的问题。

作者认为,可参照随船使用时的情形,采用“子母”浮标的系留方式在强流区定点系留测波浮标。一个锚定的柱状浮力浮标漂浮于水面,用“自浮式”绳索将测波浮标系在浮力浮标上,形成与船用时相似的系留结构。“子母”浮标间绳索的长度,可根据投放点的水深、海况以及波高情况而定,还要考虑到投放海区的海上交通情况。

参 考 文 献

- [1] 梅琴生, 1965。船舶稳性实用基础。人民交通出版社, 6—14。
- [2] 上海交通大学 140 教研组, 1977。船舶摇摆。上海交通大学。
- [3] 中国科学院哈尔滨地球物理研究室, 1976。浮沉摆式加速度计在走航雷达测波仪中的运用。海洋仪器 2: 23—36。
- [4] 青岛仪器仪表研究所, 1976。重力测波仪。海洋仪器 2: 1—22。
- [5] 陆蔼庆等, 1984。YZ-I 型遥控遥测波浪仪。海洋科学(6): 36—38。

THE DESIGNING PROGRAM OF MODEL YZ-III WAVE TELEMETER BUOY

Li Shishan, Lu Aiqing, Cao Jieyu and Yu Xinsheng
(*Institute of Oceanology, Academia Sinica*)

Key words: Wave telemeter, Balance system, Vertical pendulum. Moored remote location

Abstract

Model YZ-III wave telemeter is a kind of wave buoy measuring with an accelerometer.

The paper mainly describes the buoy construction. The case of the buoy is a ball of 55 cm diameter, 51.7 cm height and 27.5 cm draught.

It could be moored or deployed from ship. The pendulum self-balance system is of unique structure with 0.45 sec. eigenperiod and 45° maximum pitch angle that it has good follower vibration resisting test of 1000 successive times in 100m/sec², acceleration, which proves that the system is well antiknock in construction.

In the paper we also discussed the property of buoy following waves and approach of mooring. The buoy still follows the wave well after the period reaching 1.03 sec. When mooring in a strong current a special approach of mooring was suggested to reduce the influence of the current.

* Contribution No. 1615 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.