

# 气垫船资料汇集

第六机械工业部 第七研究院第七〇八研究所

一九七七年十二月

PDG

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 高长宽比侧壁式气垫船的适航性能·····    | 1  |
| 气垫船在规则波上的升沉和纵摇响应特性····· | 17 |
| 气垫船对规则波的升沉响应的线性理论·····  | 35 |
| 周边射流式气垫船的升沉运动·····      | 42 |
| 气垫船的兴波阻力·····           | 50 |
| 侧壁式气垫船艏封形状对艇性能的影响·····  | 57 |
| 侧壁式气垫船水中推进性能·····       | 63 |
| 气垫船的技术措施·····           | 71 |

# 高长宽比侧壁式气垫船的适航性能

David D. 莫兰, James A. 法国, Joseph J. 里奇

海军舰船研究与发展中心

## 摘 要

本文论述了同高长宽比侧壁式气垫船(XR-5)垂直平面动力学有关的实验结果,并提出了对规则和规则波浪的气垫压力时间和空间的分布。实验数据表明,波浪从模型底下越过时会发生畸变。整个实验包括纵摇和升沉振盪以获得稳定性导数。约束模型在迎浪中的波浪激振力和力矩用瞬时波和规则波两种方法加以确定;这两个方法得出的结果极为一致。迎浪中的规则波适航性传递函数紧密相关于不规则波中导出的波谱分析结果。以约束模型结果为依据的垂直平面频域模拟同规则波适航性传递函数也密切相关。

## 引 言

美国海军侧壁艇研究与发展规划中艇的几何特性是多种多样的。其基本参数之一即为长宽比,它根据艇所承担的任务对艇的设计加以分类。大吨位的侧壁艇要求用高长宽比来改善艇的阻力特性。对于重量一定的艇来说,高长宽比增加了艇长,还会产生一些与艇的阻力无直接关系的效益。一般地说同样排水量的艇,艇略长一些对适航性是有好处的。而且增加长宽比也有益于横向稳定性。对于钢性侧壁气垫船来说,增加长宽比则意味着,艏艉封门的空气逸流面积同整个周长比起来相对的要更小,因此也就减少了升力系统功率的消耗。

本文的研究涉及于长宽比为6.5的侧壁艇适航性的各个方面。具体设计定为XR-5,由海军舰船研究与发展中心承担,并已做了二种缩尺的模型研究。一个模型的总长为15英尺,此模型一直是海军研究计划的课题之一,以此为艇的设计确定适航性能。海军研究与发展中心另外也承担了设计、制造和试验一45英尺长的载人模型。此模型同前者几何形状相似,并已在侧壁艇试验场作过性能试验。

侧壁艇不规则波上的适航性测试方法同排水量船的一样。丹尼斯和皮尔逊最早对船舶动力运用了迭加原理。他们指出,在线性水动力的假定下可以采用规则波频的响应因子来预报不规则波浪的运动响应。

不规则波浪的直接实验和应用迭加理论于规则波得出的结果对解决侧壁式气垫船的运动性能预报都是行之有效的。唯一有待于解决的是侧壁艇能够作为一种线性系统的范围问题。

侧壁艇适航性的预报方法是各物理系统直接的时域分析。这些系统互相作用,产生对已知的随时间而定的波浪激振的响应,这种现象可以在实验中观察到。此方法对规则或不规则波浪激振都是适用的,但是由于它本来就是非线性的,因此它对不规则波浪的响应的分析才最为有效。采用这个方法避免了对系统线性度的检验,而只要形成公式以表明动力系统各个作用的数学模型确实有效就可以了。卡普兰第一个提出了这种运动模拟模型,代表海军的低长宽比的侧壁艇

(SES-100A 和 SES-100B)。海军舰船研究与发展中心也已提出了一个 XR-5 的对比分析模型，其部分工作是探索高长宽比侧壁艇独特的物理特性。时域分析模拟的有效性取决于艇气垫系统数学模拟的精确程度。下面的各节将介绍这些情况，使对其有个必要的了解。

科文——克鲁科夫斯基 (Korvin-Kroukovsky) 首创了排水量船规则波适航性响应的分析预报。他们发明了一种切片理论来预报艇的运动，这种预报方式适合于进行数学计算。这种原始的切片理论一直是改进特别是格里茨马 (Gerritsma) 和比尤克马 (Beukelma) 所进行的工作的基本依据，并也是许多新的理论表达式，如奥格弗 (Ogilvie) 和塔克 (Tuck) 的瘦长体理论和萨尔维森 (Salvesen)，塔克和费尔丁森 (Faltinsen) 的研究的基本依据。目前还没有其它相类似的理论表达式能说明侧壁艇的适航性运动和负荷，除非到某一天能够用线性化理论来预报侧壁艇侧壁上的水动力负荷。采用某一方法，频域响应也能预报，并且能比较容易分析确定水动力惯性和阻尼系数。格里茨马采用水动力系数 (或稳定性导数将该方法公式化以用于排水量艇。这些系数和导数得自于纵摇——升沉振动和约束模型波浪激振实验。表明艇运动的微分方程的稳定性导数为系数，这种方法直接适用于预报侧壁艇的频域运动响应特性，而且事实上在本文的分析研究中已有应用。采用该理论对已知的一组实验导出的稳性导数进行推导而得到的垂直平面规则波响应因子给出于文章的后面部分，并同相应的规则波上的适航性数据作了对比。

### 艇 的 基 本 特 性

目前的实验研究所用的高长宽比侧壁艇为一只 15 英尺 (4.6 米) 长的模型，该模型的实艇为 45 英尺 (13.7 米) 长的载人试验艇 XR-5。

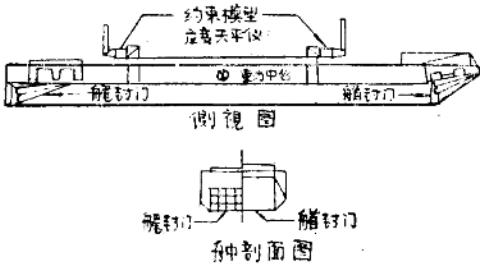


图 1 XR-5 模型的结构

该模型的结构见图 1。其艏艉封门为半刚性、半平板型，三层气室结构，由轴流式风扇直接供气。从图 1 可以看到气垫由封门内的气道供气。风扇有 8 个，位于主气室上。艏艉封门各有二组牵索以调整其高度，使封门保持最佳下放位置。侧壁为全艇长，两边垂直，并且除了艏部段外，壁底有  $45^\circ$  的壁底倾角。

### 压 力 和 兴 波 特 性

高长宽比艇——如 XR-5 的响应特性分析模型的发展提出了一些特殊的要求。气垫系数非线性模型，如卡普兰 (Kaplan)，拉维斯 (Lavis)，爱特·奥 (et. al)，多克托思 (Doctors)，莫兰 (Maran) 和贝尔宇航公司所采用的要求根据各系统的特性加以改进，而这些特性是气垫长高比

很大的侧壁艇持有的。其第一个要求就是分析侧壁式气垫船气垫压力空间上的分布情况。其二是重新分析艇影响后的波场,这种波场反过来又影响艇的响应。

侧壁艇气垫压力的空间变化一般地在目前的用来预报艇运动的动力响应模型上是不计算进去的。压力分布通常假设为空间一致,艇下压力由于来波而增加这一效应一般也一直忽略不计。

在目前的研究中,气垫压力分布对艇的动力响应和伴随波系的作用根据 XR-5 在规则波和不规则波上的条件作了考查。全部实验结果已由里奇(Ricci)和莫兰给出。

对于规则波激振,模型气垫内的空间和时间平均压力对频率的相依性相当明显。随着遭遇频率增加,气垫平均压力的下降是较为显著的,这表明,由侧壁提供的艇排水比例有了增加。艏艉封门逸气的增加以及偶然的侧壁底下空气逸出则是这一特性的根本原因。

气垫压力的下降同侧壁增加了浮力和艏艉封门增加了静升力及动升力是互相关联的。马格纳森(Magnuson)和沃尔夫(Wolff)证明了艇的吃水随着频率而变化,变化方式同压力测量一致。

图 2 给出了规则迎浪中气垫压力测量时谐波分析的典型结果。艏部压力偏离平均气垫压力的幅度比艉部的要明显得多。因此,压力变化幅度是空间分布的。艏部气垫的压力在遭遇到波浪共振频率时倾向于出现偏移,而艉部气垫压力的变化幅度在高频时则要更大一些(特别在二倍于所遭遇到的波浪频率时)。

通过考查同压力信号的谐波分量有关的相位,气垫压力空间分布的实质就清楚地表现出来。每个相位角以位于艇重心处的伴随波系作为参考点。因此,各个相位角之间的差异反映了相对于艏部气垫压力的艉部气垫压力相位滞后的程度。这种情况最明显的特点就是,艏部气垫压力之间相位差异的变化周期在所试验的遭遇频率范围内是从 0 至  $2\pi$ ,而对某一个遭遇频率来说,压力变化互相为半周期异相。

侧壁艇气垫压力空间和时间的分布导致产生垂直方向的激振和绕艇横轴的激振力矩。这个力和力矩并不是模型的全部激振力。对这一点本文后面还将加以讨论。气垫压力分布对艇在波浪上运动的直接影响可以从所测量的压力信号的谐波含量中计算出来。

按照以下二方程,以实测的压力空间分布就能很容易的求出仅由压力产生的激振力和力矩。

$$F_p(t) = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} p(x,t) dx \tag{1}$$

$$M_p(t) = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} p(x,t) x, dx \tag{2}$$

式中无因次力  $F_p$  和力矩  $M_p$  以单位宽度表示。压力  $p$  由气垫静压力标准化  $p = \tilde{p}/p_0$ , 无因次座标  $x = \tilde{x}/L$  的原点在艇的重心上,向前为正。

在计算由压力引起的加速度中采用了激振力和力矩。用这种方法求出的升沉和纵摇加速度只适用于假想模型的加速度,而这种加速度仅在沒有出现其它产生加速度或减速度的装置如侧壁、艏艉封门或其它动力分量时才得出。

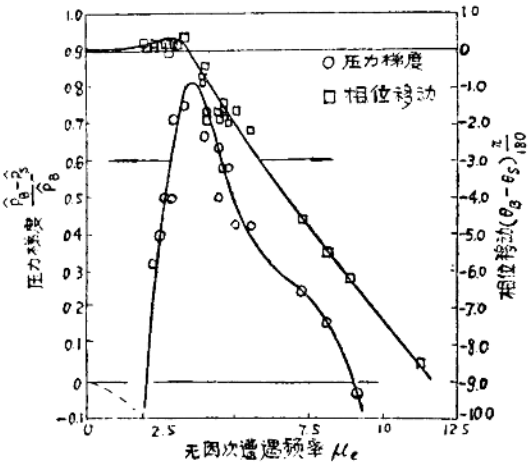


图 2 气垫压力谐波幅度

压力引起的加速度的一次谐波幅度(包括垂向加速度和角加速度)由莫兰从已知的气垫压力的谐波分量中计算出,其主要结果列于图3。图中同时也列出了低于这些数值的垂向和角加速度数值的实际下降情况。这些数据由模型艏部及重心处的加速度头测出。全部加速度都以模型比例给出。

列于图3的从规则波实验中测出的气垫压力分布中求出的垂向加速度同在整个频率范围内测出的模型加速度从定性上讲是一致的。所求出的垂向加速度同在遭遇频率的高频端测出的加速度峰值更紧密相符。由于加速度的高频峰值不能用对艇在规则迎浪中的运动有影响的其它任何机因来解释,因此这是对比中最令人满意的一个方面。计算得出的加速度可大于或小于实测的模型加速度,并且当仅与压力激振对比时可得出下面推断,即所忽视的动力系统的部件在低频时倾向于增大实际的加速度响应,而在高频时减低加速度响应。

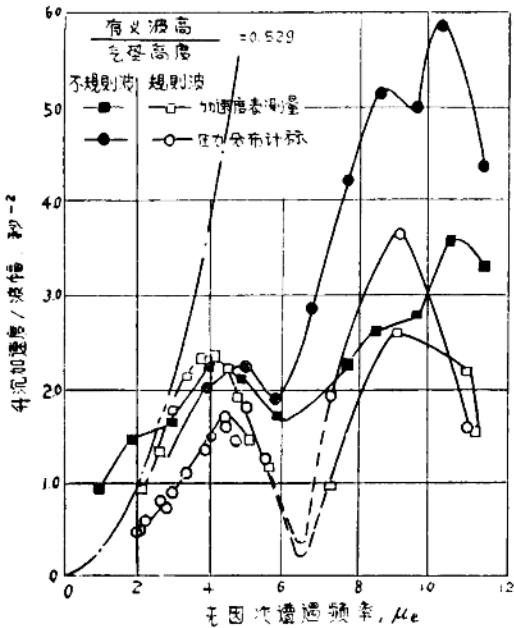


图3 实测升沉加速度同从气垫压力分布求出的加速度的对比

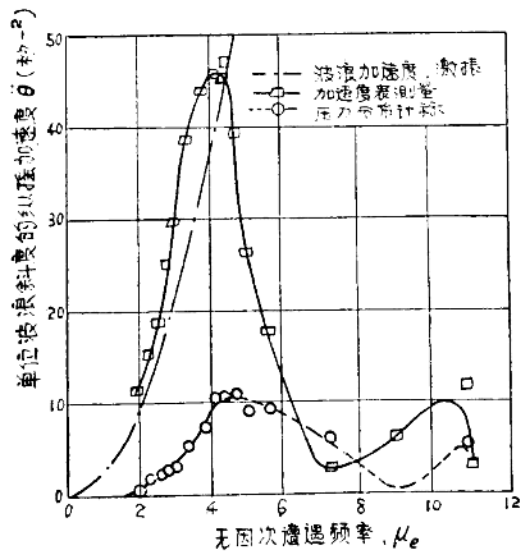


图4 实测纵摇加速度同气垫压力分布求出的加速度的对比

图3也列出了同不规则波升沉激振力研究有关的数据。恰如所料,首先,加速度和无因次压力之间的相位程度相当高;其次,差异出现在相应于波长差不多等于气垫长度的频率上。第三,传递函数在相应于艇升沉自然周期的频率时达到最大值。传递函数中的次峰一般出现在发生波浪泵吸的频率上。这些次峰对于所研究的较好海况下截然不同。角加速度曲线——如图4所示者——反映了在实测加速度和求出的角加速度之间存在着较大的差异。从气垫压力分布中求出的角加速度一般的要大大低于实测值。压力分布仅是定性地预报了实测角加速度中的次峰(高频)。这就表明,对XR-5来说,在纵摇动力中起决定性作用的是艇艏艉封门及侧壁,而不是气垫压力。这个结论已由振盪实验得到了证实。

莫兰和谢克特(Schechter)用同样方法研究了全浮式气垫船气垫压力的空间分布,发现压力引起的纵摇加速度和实测纵摇加速度密切相关。由此可见,模型侧壁和艏艉封门的动力特性是相当重要的,不过对这一点还没做过验证。为了同目前的实验结果进行有意义的对比,应当研究



艇侧壁在变形的自由表面上的响应情况。

当波浪从艇气垫下越过时，因艇下是一高压的气垫，波浪的幅度和相位因而就发生变化，从而引起自由表面的变形。以前，艇对波浪的作用在侧壁艇动力系统分析中是不加区别并忽略不计的。曾经做过这样的假设——被称为傅汝德——克雷洛夫假定：艇在波浪上航行时，波浪的形状并不发生变化，并且艇后的波形同艇艏前的完全一样。目前的研究表明，这一假定对高长宽比侧壁艇并不有效。

在对艇及艇在波浪中的动力特性进行数学模拟中人们才认识到对艇下的自由表面的性质应当有所了解：任何动力模型都有二个重要的特点，即封闭于艇硬结构同自由面之间的空气的体积和封闭结构同封闭结构下的自由面之间的周边面积——即通常所称的逸流面积。在这些区域的自由面的实际特性必须以艇在一波场上运行的时域和空域来加以研究。

在XR-5模型的标准适航性实验中，相对于纵摇和升沉模型的水面高度在沿艇纵中线上的6个点上作了测量。这6个点为模型气垫内3个，艏封前1个，艏封后1个，一个参考波高在远离于模型前的点测出( $x=3.18$ )。所有的水面高度均由超声传感器测出。

在艇各个纵向位置 $x$ 的波高 $h(s, t)$ 均从所测的相对距离(超声波传感器输出)和艇的升沉和纵摇运动求出。

在分析规则波实验数据中，艇下所遭遇到波浪的谐波含量通过取一求出的波高的傅立叶变换式计算出，从而得出如下 $n$ 次谐波为：

$$\eta(x) = |\eta| e^{-i\phi\eta} \quad (3)$$

模型前测出的波高并不受艇的影响。这个激振信号即为

$$\xi = |\xi| e^{-i\phi\xi} \quad (4)$$

此数作为一参考信号，通过用标准化的波幅或波浪响应函数

$$\frac{\eta}{\xi} = \frac{\eta}{\xi} e^{-i(\phi\eta - \phi\xi)}$$

对模型兴波扰动加以检验。

莫兰已给出了波浪测量的全部结果，这些测量是在规则波上四种航速时进行的。在每一航速时，标准化的第一次谐波高度(响应函数，如方程5所定义的)均作为艇遭遇频率的函数。图5列出了表示全部数据的基本性质的典型结果。

模型随波浪运动，而对低频伴随波略有影响；在顺艇长全部点上，标准化的波幅基本一致。由于水面的响应时间小于遭遇周期，波面在一遭遇周期中达到平衡，这个结果是在预料中的。气垫压力对平均波面的畸变这样也仅为局部的了。这种改变相对于模型遭遇周期来说一般是稳定的，而且也并不表现为波幅改变。

规则波实验中出现的最有趣的特点就是遭遇频率为3——7之间的波高特性。虽然在这个频率时，艇艏艉波幅有了增加，但是艇纵向中心处的波幅反而下降了。

很明显，波幅发生很大的空间变化是确实存

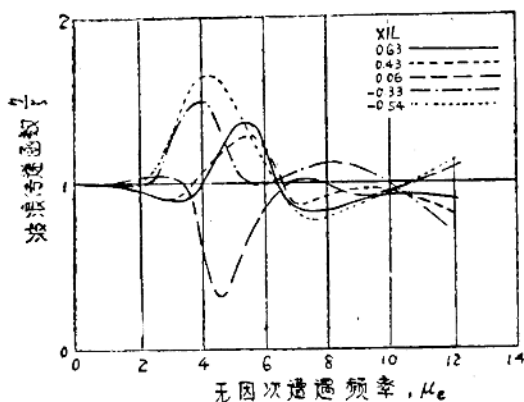


图5 在模型气垫的几个点上测出的模型对规则波的波幅传递函数

在的。这个改变具有非稳态的波浪标准振荡的现象，以致于波浪在艏部同相于所遭遇的规则波场，在模型纵向中心附近异相于所遭遇的波场。

同样的模型在不规则波浪上运动的波浪改变也作了测量。其一典型结果列出于图 6，图 7。

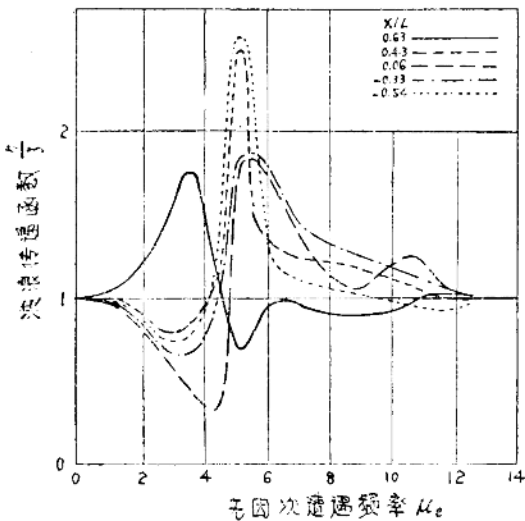


图 6 在模型气封的几个点上测出的模型对不规则波浪的波幅传递函数

图 7 的结果是遭遇频域内的波浪谱，图 6 的为传递函数。

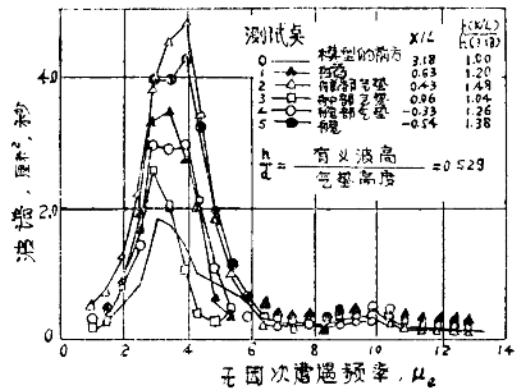


图 7 模型气垫的几个位置上的波浪遭遇谱

毫无疑问，艇增加了来波的能量。在模型的纵摇频率范围内，接近艏气垫区的来波接受了大部分能量。压力观察结果表明，较低频率时艏部的气垫压力变化比艏部者要远远强烈得多。因此气垫内的非稳态压力对波浪的产生起着很大的决定作用。在艇艏的测量中可以看到，逸出艇后的波浪仍具有相当大的能量；另外，在艏气垫区和模型前也可以看到，来波能量的增加是相当可观的。艇艏端有义波高的增加，原因在于由于艏封门的相对运动而产生的非稳态波浪。对于非稳态波上的运行，波浪在艏前向外扩散，因此，也即视为对周围不规则波场的一种附加激振。艏封的运动、侧壁激起波浪、非稳态气垫压力激起波浪、以及以前提出的由于非稳态艏波前移产生的波场增加——这些作用合并起来，就导致了艏封后的波浪能量得到较大的增加。

在接近气垫的纵向中心处，相对运动是微小的，并且波场也仅略增高于周围的波浪。艇艏部气垫压力变化了于艏部的气垫压力。对于艇内的波浪来说，同艏封相比，侧壁基本不激起波浪。就是对波浪进行明显的干扰，艏部气垫的有义波高值仍是很小的。最后，艏部测出的有义波高很大，产生的原因就是艇有很大的相对运动以及平艏封同波面接触的动力响应特性。

从这个实验中得出的基本结论就是，自由面的实际性质可能同用简化假设所预想出的根本不同。因此，应当在以后的模型试验中仔细地研究自由面的实际特性，使得在运动模拟模型中能考虑更实际的自由面特性。

### 约束模型实验

进行约束模型实验的目的是为了获得 XR-5 的各类导数和波浪激振力及力矩。这些量值代入于计算艇运动的线性频域模拟程序。另外进行这个实验也有助于鉴定二种用以确定激振力和力矩的实验方法：规则波方法和瞬时波方法。此外，也做了振荡实验，其目的是要能求得侧壁和增压



风扇对全部稳定性导致的作用。这些用以研究艇动力学的实验方法对模拟完整的侧壁艇系统是至为重要的。

约束模型实验包括约束模型振盪和不改变模型拖曳装置的约束模型波浪激振实验。试验在海军舰船研究与发展中心 2 号拖架进行，采用 1 号平面运动机构，即一个能产生 3 种不同的频率、在各支柱间可改变相位角的垂直平面振动器，如古德曼 (Goodman) 所描述的那样。垂向力和轴向力由应变天平系统测量，见图 1。

## 振盪实验

振盪为绕静态实验确定的平衡纵倾和升沉位置为中心，幅值为 1/3 英寸 (0.85 厘米) 的正弦曲线扰动。在升沉振盪中，支柱同时移动，这样模型始终同水面保持平行。纵摇振盪时各个支柱位相相差 180 度，这样重心保持不动。这种纵摇也即为固定于波面上的惯性座标系统中所定义的纵摇。振盪结果同正弦曲线参考信号相乘得出同相位 (取决于浮力和加速度) 和异相位 (取决于速度) 力和力矩。然后这些数据根据惯性质量力矩和浮力加以修正。这些结果画出了相对于频率的曲线，并得出各种速度的不依靠频率的稳定性导致。

升沉振盪包括了升沉加速度有关项 (附连质量)，升沉率有关项 (阻尼)，耦合项和浮力项。全部结果已由法因 (Fein) 和默里 (Murray) 已列成表格；这里给出了几个主要的典型例子。图 8 给出了升沉“附连质量”导致  $Z_w$ 。在所选的座标系统中，负的  $Z_w$  表明了通常在正向“附连质量”。其数值用  $1/2\rho L^3$  来除，进行无因次化。列出的结果是对于标准风扇流量作了 3 种艇速，对于增加增压风扇流量只作了高速一种情况，对只有侧壁而言只作了傅汝德数  $F_n=0.72$  时的结果。侧壁效应通过正常风扇流量下将模型放在平衡状态提升艏艉封门而获得。这并不包括由于气垫压力引起的舢内较低水线的作用，但能对侧壁效应提供一个上限值。 $Z_w$  项的数值随速度下降，但保持正向。风扇流量增加后的点  $E_w$  (由三个增压风扇来提高正常流量) 的幅度是较大的，和由这种情况下的较高气垫刚度所预料出现的那种结果一样。仅有侧壁的试验点数值是微小的，并且是负的。这是可以预期的，但它表明侧壁对  $Z_w$  项的作用很小。而气垫和风扇作用对这个依赖于加速度的效应起着决定性的作用。

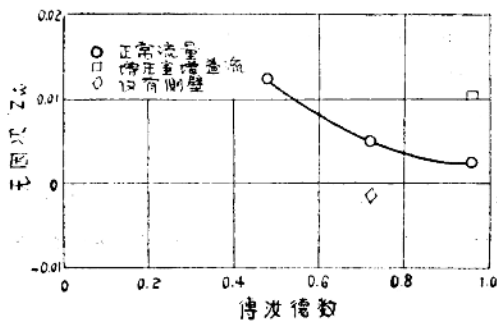


图 8 加上升沉的质量导致

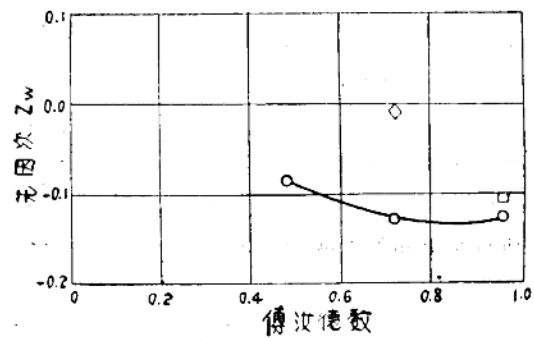


图 9 升沉阻尼导致

图 9 的升沉阻尼项  $Z_w$  通过用  $1/2\rho L^2 u$  来除达到无因次化，其负值表明阻尼为正。正常风扇流量值在高阻尼时变化不大。气垫附加逸气对此项数值并无影响。侧壁效应在中等傅汝德数下是相当微小的。这就表明：升沉阻尼主要在艏艉封门，而不是侧壁的粘滞作用。由于平坦的封门在航行时产生一很大的恢复力，这个理由是充足的。

纵摇振荡结果产生了纵摇加速度有关项(附连惯性力矩),纵摇率有关项(阻尼),耦合项和浮力项。全部结果由法因和默里给出,纵摇阻尼项  $M_a$  以用  $1/2\rho L^4 u$  进行无因次化的艇体轴向座标给出于图 10。对于正常流量,  $M_a$  随速度发生很大的变化,并随着傅汝德数的增加而变成负值(正向阻尼)。艇的两侧壁对此项的作用大约为总作用力的 60%。这表明对高长宽比来说,侧壁对纵摇动力比对升沉动力有更大的影响。

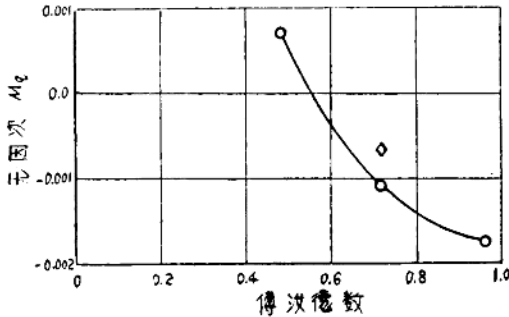


图 10 纵摇阻尼系数

### 波浪激振实验

在波浪激振实验中,模型以平衡状态约束住在波浪上拖曳运动,以测量合力和力矩。这些结果用迎浪时的适航性分析是完全可行的。其方法就是采用在实验结果范围之内的模型的线性响应。正弦规则波波幅大约为 3 英寸(0.076 米),周期从 1.25 秒至 3.4 秒。选择这个频率范围是要实际选择一个造波机能造出的波长。

戴维斯(Davis)和扎尼克(Zarnick)最早将瞬时波方法用于船舶模型的运动中。在所有的相关频率中,波浪都具有能量,以此就能在艇越过波浪时测出艇在所有范围内的运动响应。这个方法也被用来代替规则波实验以确定艇的运动,而且已经可以看出这二者基本上是一样的。这里运用了戴维斯和扎尼克,格斯顿(Gersten)和约翰遭(Johnsen)论述的正弦曲线线性变化瞬时波来解决波浪激振力和力矩问题。在这种情况下,瞬时方法更为有利的理由就是:由于一次瞬时波运行能够代替规则波运行达 20 次之多,所以它减少了试验时间。由于对力——而不是运动——作了测量,采用约束模型就避免了产生早期瞬时波试验所碰到的一些问题。这样就能有效地进行傅汝德数接近 1.0,频率接近纵摇共振的试验。

瞬时波由磁带输入给造波机造出,波浪的峰点相当接近于造波机,所以运行的时间中就包括了随着波浪向外扩散的整个频率范围。图 11 表示的为傅汝德数为 0.96 时遭遇到的瞬时波的波

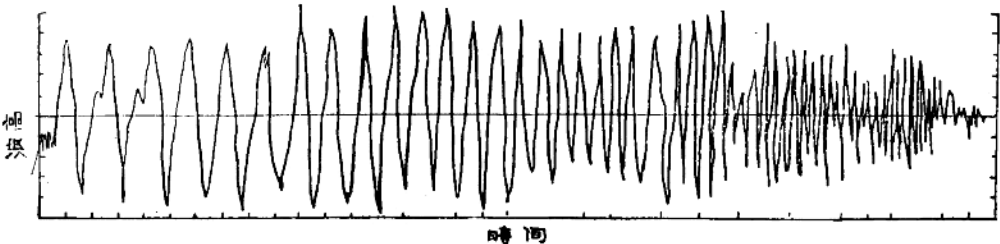


图 11 瞬时波时史

高。这些波浪的幅度有一些变化，但这些效应也同样经常出现在造波机造出的规则波上。

垂向力和纵摇力矩的幅线和相位的量值是值得注意的。这些量值由对时史进行傅立叶分析得出。应当认识到，振盪实验并没有改变吃水方向。因此垂直向下作用的力仍然是正向的。波高向上为正，和一般情况相同。这样随着频率逐渐降低至零，升沉力相位角就会接近 180 度。在趋向零频率时，纵摇力矩相位角就会接近 270 度。无因次遭遇频率  $\mu_e$  定义为  $\sqrt{L/g}$  和遭遇频率  $\omega$  的乘积，式中  $L$  是模型气垫长。所测量的力和力矩 ( $F$  和  $M$ ) 用下式无因次化，

$$H = \frac{L \cdot F}{h_{10} \cdot m \cdot g}$$

$$M_\psi = \frac{\tilde{M}}{h_{10} \cdot m \cdot g}$$
(6)

式中  $h_{10}$  是波高， $m$  是模型设计质量。用来对瞬时波结果进行无因次化的波高是各个波率的波高。这增加了结果中的离散。

模型速度为 9 和 12 节时两种实验方法的波浪激振实验结果列于图 12—19。对于傅汝德数为 0.72 的情况，二种方法是非常一致的，直到  $\mu_e = 8$  以前只有很小的一点离散。超出那个值后，瞬时波结果出现一些离散，但还是反映了规则波试验结果的总的趋向。纵摇导致的力矩和相位在  $\mu_e = 7$  时出现一个零点，此值完全由瞬时波得到确定。图 15 的低频瞬时波数据表明如同预料的那样，其结果外插到相应于 270° 的相位角。

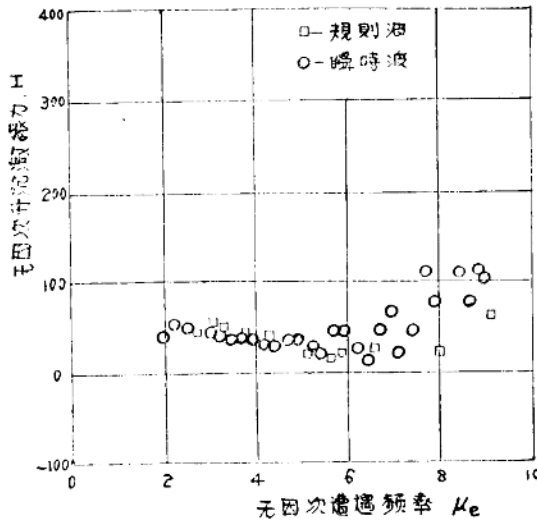


图 12 无因次升沉激振力  $F_n = 0.72$

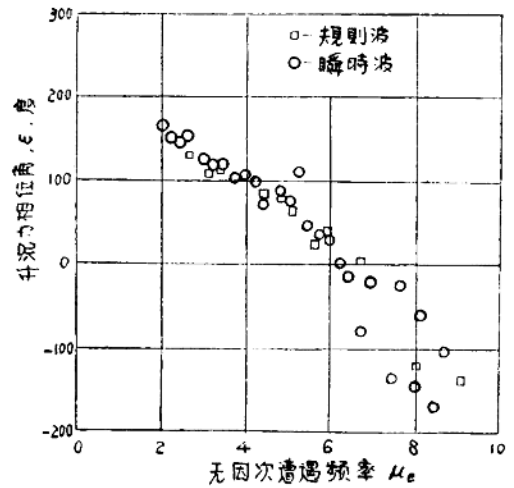


图 13 升沉力相位角  $F_n = 0.72$

在傅汝德数为 0.96 时，结果同样表明：两种方法的数据是相当一致的。在  $\mu_e = 8$  时，图 18 的升沉激振力矩中的一零点是尤为明显的。图 17 和图 19 表明，瞬时波结果的离散并不大于规则波。

测量激振力和力矩完全适用于采用瞬时方法。这样做同戴维斯和扎尼克设想出瞬时法的所有线性系统假设是没有矛盾的。采用瞬时法能够得到许多与频率有关的数据。采用目前使用的“拖车”分析法，瞬时法可作为一种改进实验效益的方法而应用于各种类型的船只。波浪激振力和力矩的结果同振盪结果一起输入于模拟程序。

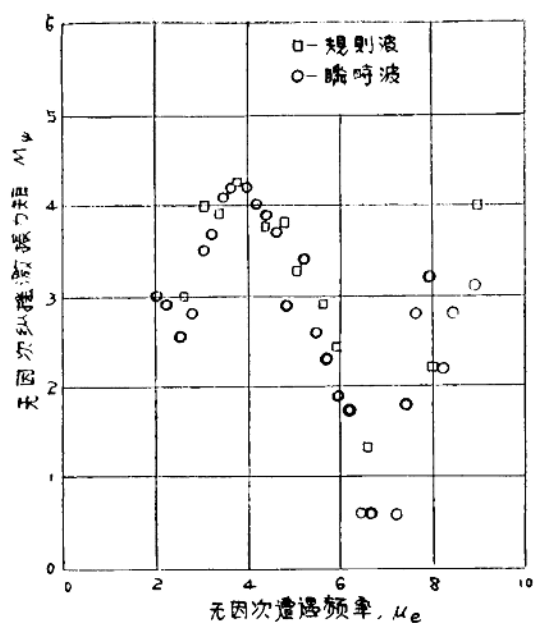


图 14 无因次纵摇激振力矩  $F_n=0.72$

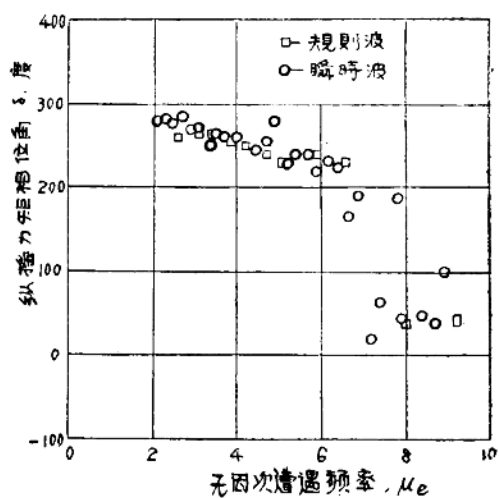


图 15 纵摇力矩相位角  $F_n=0.72$

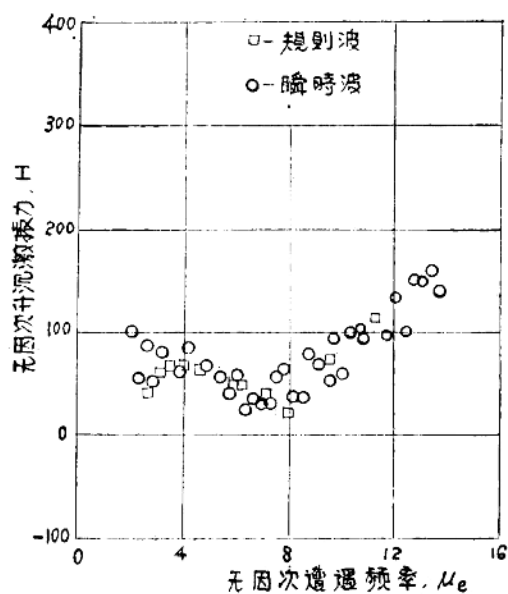


图 16 无因次升沉激振力  $F_n=0.96$

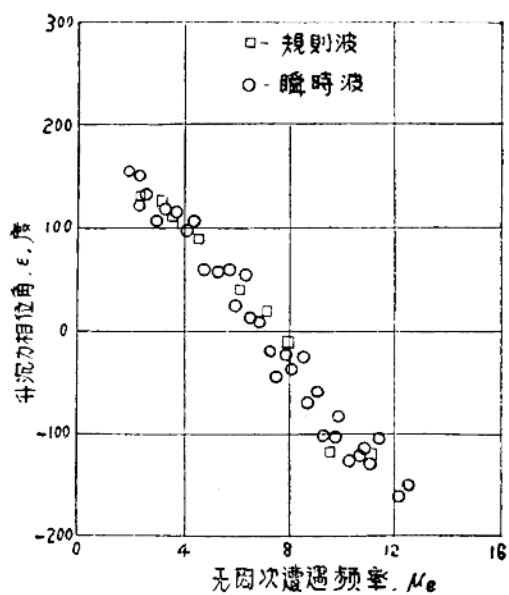
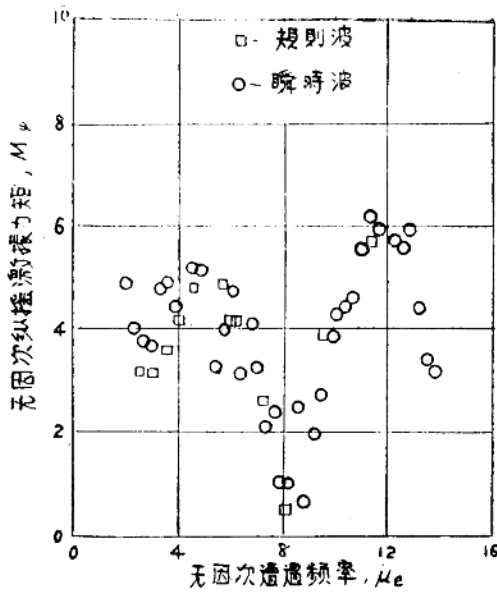
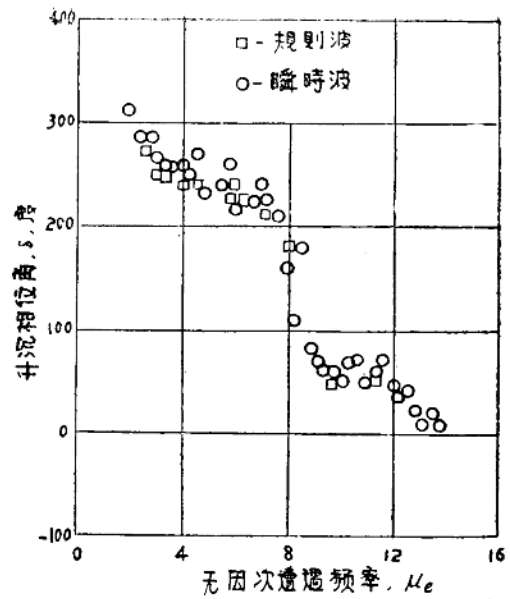
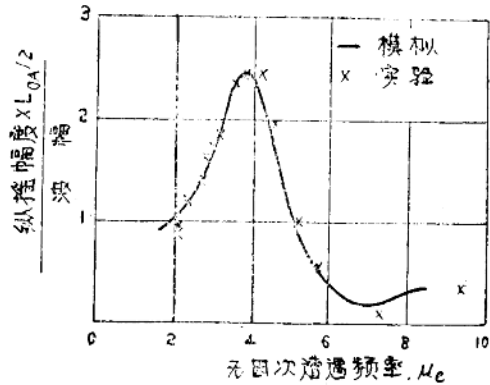
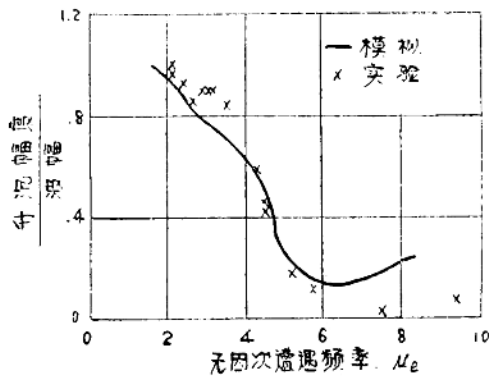


图 17 升沉力矩相位角  $F_n=0.96$

图 18 无因次纵摇激振力矩  $F_n=0.96$ 图 19 升沉力矩相位角  $F_n=0.96$ 

## 波浪上运动的基本特性

为了形成激振实验的约束模型振动器和自由模型的规则波适航性实验之间的确定的联系，建立了一条以经验为依据的 XR-5 数学模型。为此目的，采用了马格纳森和梅室勒(Messalle)推导出的二自由度模拟法。给出预报的形式为无因次传递函数。此函数在图 20、21 中同规则波适航性实验的结果作了比较。

图 20 运动模型与实测的换算  $F_n=0.72$ 

二自由度(升沉和纵摇)数学模型的主要输入为实验确定的稳定性导数以及波浪激振力和力矩。为进行简化，稳定性导数的频率取为恒定。然而，进一步完善的模拟可能象计算波浪激振力和力矩依赖于频率一样要包括依赖于频率的导数。

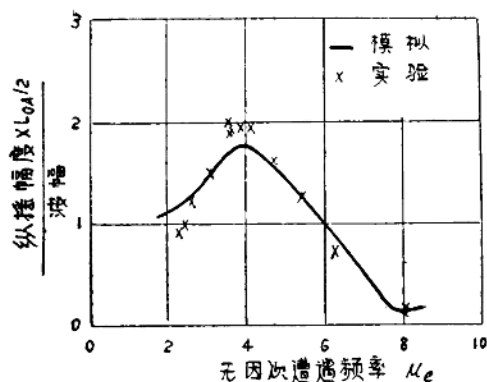
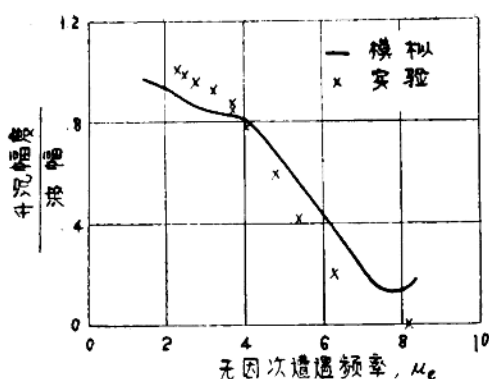


图 21 运转模拟与实测的换算  $F_n=0.96$

所给出的二种速度下的升沉和纵摇之间是非常一致的。自然频率和阻尼的预报与测量值也是极为一致的。船部的相对运动没有进行对比，因为早先研究的在船封区的波浪畸变反过来会影响这种相关性。这些项在稳定性导数数据中和数学模拟中都没有反映出来。XR-5 模拟可能会进一步加以完善以研究这几项问题。

用于适航性数学模拟的数据导出于规则波和不规则波。负荷和运动的频率响应函数，即相对于来波的幅值放大因子和相位滞后通过规则波实验得出。对于常规舰船，圣丹尼(St. Denis)和皮尔逊(Pierson)证明了，通过合适的波谱的线性迭加，这些传递函数可用来预报不规则波浪的响应特性。确定不规则波浪的统计响应则一直是先前侧壁艇模型实验的基本任务。由于对运用线性迭加预报不规则波浪的响应缺乏信心，所以对频率响应函数的研究也就没有深入展开。

里奇(Ricci)和马格纳森进行 XR-5 实验的目的之一，是要确定规则波试验数据的谱波分析得出的传递函数是否与不规则波试验数据的波谱分析得出的传递函数一致，从而着手研究高长宽比侧壁艇响应的线性问题。此外，还比较了从不规则波浪测出的运动直方图得出的有义响应(最高的三分之一响应的平均值)和通过实测运动谱作积分而求出的有义响应，以及通过试验规则波传递函数在所产生的波谱上线性迭加而求出的有义响应。

图 22, 23 比较了从规则和不规则波迎浪实验得出的传递函数。其资料给出了纵摇，升沉，在船部及在纵向重心处的相对船运动和垂向加速度。纵摇由正常波浪坡率( $2\pi a/\lambda$ )加以标准化，其它则由波幅标准化。选定的波谱在纵摇共振的频率范围内能产生足够的能量以保证有足够的运动来精确地计算传递函数。选择其它能量值极为不同的波谱是为对线性问题作深入的研究。

总之，这些对比表明，以上传递函数之间的相关性是非常之好的。纵摇和升沉也是如此。船部的相对运动由于来波畸变非线性引起的微小差异是合乎事实的。对于较低频率，加速度相关性很好，并且考虑到在较高频率范围内缺少波谱能量，可以预料，对较高频率，加速度相关性也会是非常之好的。

表 1 列出了从双幅度直方图求出的有义响应，所测能谱的积分得出的有义响应，对于所产生能谱的规则波传递函数线性迭加，然后对预报能谱积分得出的有义值的对比情况。为了表明所遭遇的波浪相对于艇几何形状的数值，波高由气垫深度加以标准化。升沉和船相对运动由波高标准，而纵摇由艇半长对波高的比加以标准化，而文中的图示仅表明由于纵摇所造成的船垂向位移。加速度单位为  $g$ 。预报的运动(实测的能谱，预报的能谱)同统计测量(双幅度直方图)是一致的。



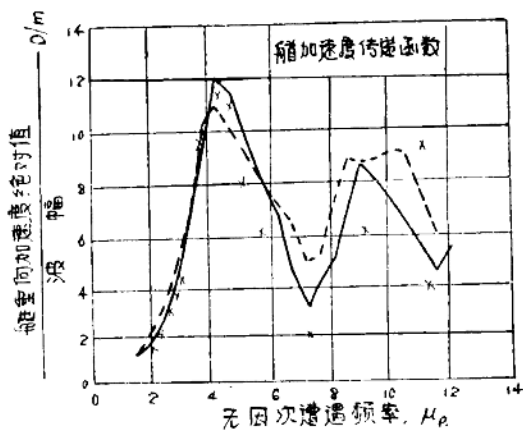
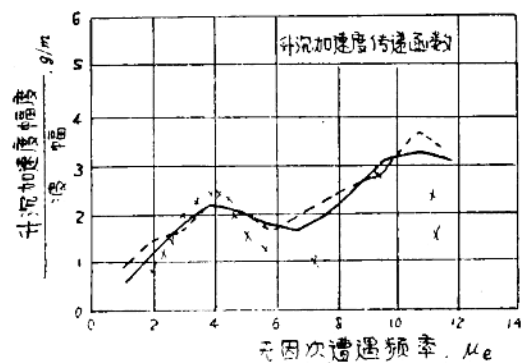
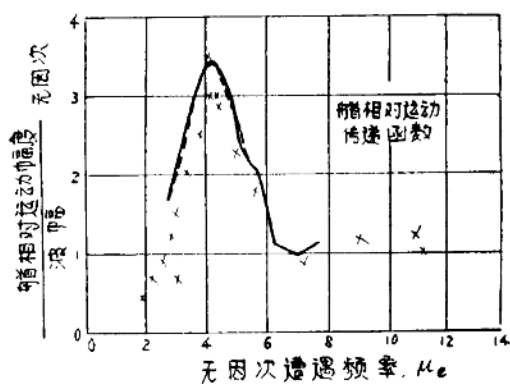
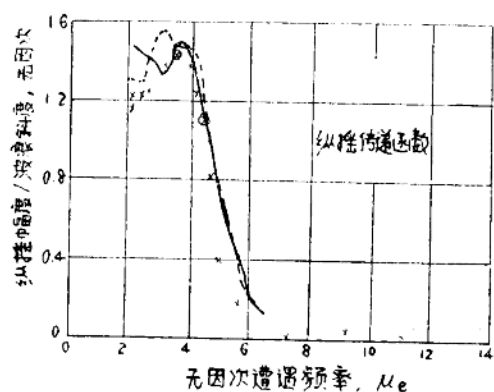
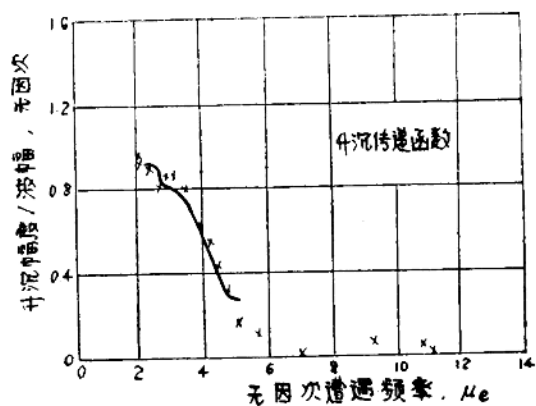
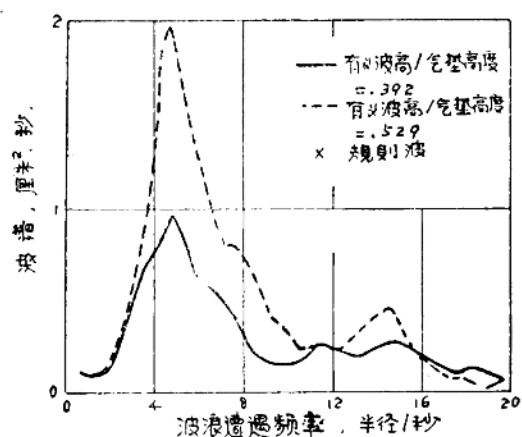


图 22 规则波及不规则波中测出的响应传递函数  $H_n^2 = 0.72$

由于没有精确确定高频率的传递函数，因而仅只有预报能谱加速度的预报明显不足。

另外也可用所出现的不规则海况，根据那些特殊的有义波高来检验对可能的“最坏海况”的运动响应。在纵摇自然频率范围中，所产生的波谱具有很大的能量，因而它对艇的作用力就会超

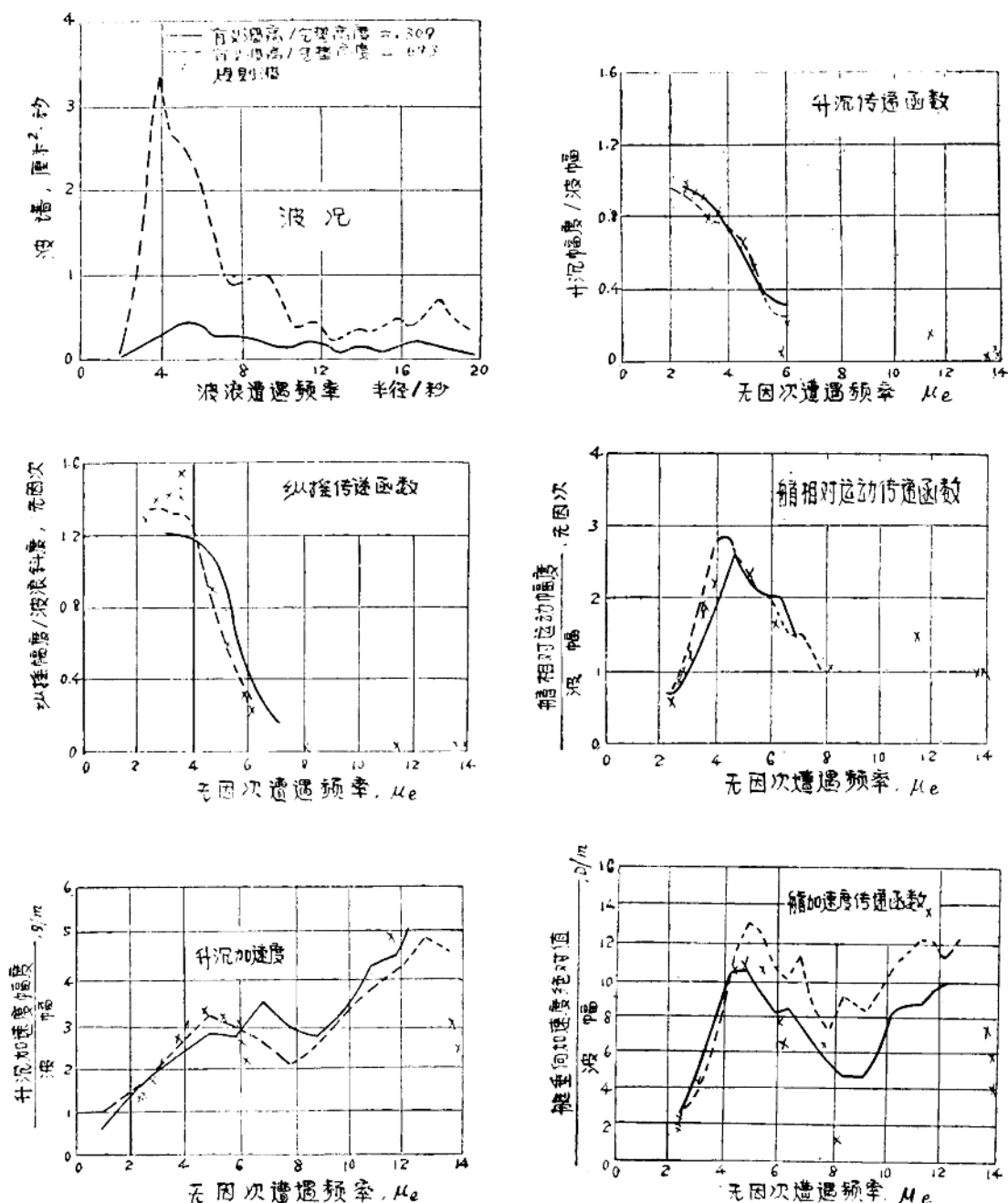


图 23 规则波及不规则波中测出的响应传递函数  $P'_n = 0.96$

过同样波高的皮尔逊——莫斯科维奇谱。

在实验中，其它几何特性也做了考查。并研究了不规则海浪中纵向重心平均吃水的增加，发现大约为有义波高的一半。实验直方图同实测统计特性导出的雷利分布作了对比，二者一致，从而进一步证实了线性迭加假设。

表 1 双 幅 度 有 义 响 应

| 傅 汝 德 数 | 有义波高/气垫深度 | 有义升沉/有义波高  |      |      | 有义相对船运动/有义波高 |      |      |
|---------|-----------|------------|------|------|--------------|------|------|
|         |           | 双幅度<br>直方图 | 实测能谱 | 预测能谱 | 双幅度<br>直方图   | 实测能谱 | 预测能谱 |
| 0.72    | 0.39      | 0.69       | 0.68 | 0.66 | 2.24         | 2.19 | 1.84 |
| 0.72    | 0.53      | 0.65       | 0.64 | 0.64 | 2.06         | 1.97 | 1.84 |
| 0.96    | 0.31      | 0.68       | 0.66 | 0.66 | 1.83         | 1.94 | 1.78 |
| 0.96    | 0.69      | 0.69       | 0.72 | 0.73 | 1.64         | 1.68 | 1.76 |

| 傅 汝 德 数 | 有义波高/气垫深度 | 有义纵摇 $L_{CA}/2$ /有义波高 |      |      | 有义垂向船运动( $G_z^*$ ) |      |      |
|---------|-----------|-----------------------|------|------|--------------------|------|------|
|         |           | 双幅度<br>直方图            | 实测能谱 | 预测能谱 | 双幅度<br>直方图         | 实测能谱 | 预测能谱 |
| 0.72    | 0.39      | 1.69                  | 1.70 | 1.50 | 0.78               | 0.80 | 0.65 |
| 0.72    | 0.53      | 1.75                  | 1.65 | 1.53 | 1.12               | 1.04 | 0.87 |
| 0.96    | 0.31      | 1.17                  | 1.17 | 1.17 | 0.59               | 0.66 | 0.47 |
| 0.96    | 0.69      | 1.28                  | 1.31 | 1.26 | 1.72               | 1.77 | 1.05 |

## 结 论

这些广泛的实验研究的主要结果是对多方面的问题进行了检定,在这些问题上,利用现有的数学模型的简化假设是不够的。实验结果表明,侧壁式气垫船动力学的物理现象比假定的要复杂得多。

通过艇下畸变波场的测量证明:傅汝德——克雷洛夫假设对在迎浪中运行的高长宽比侧壁艇是不适用的。艇气垫压力的空间分布对艇的垂向运动起着主要的作用。振盪实验结果表明,对高长宽比侧壁艇来说,艇的侧壁对纵摇动力(而不是升沉动力)有着重要的影响。波浪激振实验结果表明:瞬时波方法同规则波方法得出的结果一样,但却明显的减少了工作量。通过实验,运动传递函数也已得出,这些数据表明实验数据完全得到了证实;响应的线性迭加完全正确。规则波试验得出的传递函数和以经验为根据的模拟,不规则海浪试验得出的传递函数之间完全一致。

至今,由于缺乏实验数据,对数学模型进行简化仍是需要的。随着新的数据的出现,数学模拟法也就能进一步加以完善了。

## 参 考 文 献

- [1] St. Denis, M., and W. J. Pierson, "On the Motion of Ships in Confused Seas," Transactions of SNAME, Vol. 61, 1953.
- [2] Kaplan, P., J. Bentson, and T. P. Sargent, "A Study of Surface Effect Ship (SES) Craft Loads and Motions, Part 1—Equations of Motion of SES Craft with Six Degrees of Freedom," Oceanics Report № 71—84A, August 1971.
- [3] Korvin-Kroukovsky, B. V., and W. R. Jacobs, "Pitching and Heaving Motions of a ship in