

气垫船的稳性和适航性

张新华

第六机械
工业部第七研究院第七〇八研究所

1978年3月

气垫船的稳性和适航性

前 言

稳性和适航性问题,是气垫船进入海上实用的技术关键,也是气垫技术发展过程中一个最感棘手的问题。其复杂性是简单分析方法所难以处理的。这是因为气垫船在波浪上运行时,受到气动力和水动力的组合作用,而这些力往往具有很强的非线性特性。另外,围裙在波面上运动时,其挠性会导致气垫系统几何形状的不断变化,结果使气垫内的空气动力和空气静力发生变化。很明显,这些力的交叉耦合作用很大程度上受到围裙型式的影响,也受到风扇——供气系统响应特性的左右。气垫船的这种特性是它区别于常规船舶的主要方面,它向舰船科研工作者提出了新的难题,但同时也为他们开辟了施展才能的前景。

气垫船经过初期的研究试制和后来的实艇使用阶段,目前已进入改进性能和寻求最佳设计方案的发展时期,其稳性和适航性问题正在逐步得到认识和解决。尽管这一课题具有如上所述的独特性和复杂性,但并不意味着在设计阶段不能预估并改进艇的性能。在正常的设计程序中,目前世界各国的实践是,将大量的模型试验和计算机模拟计算结合起来以获取所需要的设计数据。在新艇的设计中正普遍地采用此种方法。若计算分析与模型试验能在合理的范围内符合,那么将换算法则用于运动矩阵方程,便可确定实艇的运动性能和稳性。只要新设计艇对原型艇的改动不大,上述设计方法是令人满意的,并可与模型试验取得良好的一致性。若两型艇的围裙型式及艇的几何形状相去甚远,就需要针对该型艇的特点另外进行大量的模型试验和模拟计算。

为能对实艇性能作出符合实际的预报,并在设计阶段通过分析计算使性能得以提高,就必须对气垫船的稳性和适航性的产生机理和影响因素有所认识,从而寻求改进措施。本文拟综合有关资料,作一初步介绍,进而试图探讨一下气垫船的稳性和适航性的特点、主要参数的分析计算方法、影响稳性和适航性的主要因素及提高稳性和适航性的措施及趋向。文中的分析主要针对全垫升式气垫船,但由于侧壁式究其实质在内部、外部气动特性等方面与全垫升式完全相同,两者的稳性和适航性特点可认为基本上是一致的,因而本文所提出的分析方法和技术措施原则上也应该是适用于侧壁式气垫船的。

笔者对气垫技术只是初步涉猎,囿于水平和见闻,加之时间短促,提出的看法未必恰当,诚望批评、教正。

本文撰写过程中,曾经袁随善、金平仲二同志审阅初稿,并得到王渊潮、何声宪、刘友勤、刘积骅、陈善汾、程焱南、程蕴明等同志的支持和帮助,特此致谢。

目 录

前 言

第一部分 稳 性

一、气垫船的稳性特点	(1)
二、静稳性分析计算	(2)
周边射流式艇的静横稳性	(2)
周边射流式艇的静纵稳性	(3)
增压室式艇的静稳性计算	(4)
三、动稳性分析	(5)
升沉稳性	(5)
纵摇和横摇稳性	(7)
提供纵摇、稳摇稳性的基本方法	(8)
四、埋艏问题	(12)
埋艏及其产生机理	(12)
抗埋艏措施	(14)
与埋艏和倾复有关的几个动力因素	(18)
五、海损稳性和浮力储备标准	(20)
海损稳性标准	(20)
海损完整稳性要求	(21)
浮力储备标准	(23)
保证海损完整稳性的结构措施	(24)

第二部分 适 航 性

一、气垫船的适航性分析、研究方法概论	(25)
二、基本运动方程	(28)
三、适航性与波浪条件的关系	(30)
四、适航性与主要设计参数的关系	(38)
五、失速和压力脉动	(46)
六、改善及控制适航性的措施	(47)
主要符号表	(50)
主要参考文献	(51)

第一部分 稳 性

一、气垫船的稳性特点

气垫船是表面效应船，依靠艇底与效应表面之间形成的高压气垫支持艇重，在陆上或水面垫升航行。垫航时气垫船稳性的最主要特点是，由于艇所赖以垫航的气垫气流的不对称性，艇具有不稳定的固有特性。气流的不对称性是在有表面效应影响的条件下射流的不平衡运动所引起的，而这种不平衡运动正是周边射流和气垫气流本身的非线性柯达特性的典型表现。这一点可通过对气垫流型的分析来说明。

气垫船艇底的气流主要由三种典型的流型组成：周边射流、环形涡流和横流。周边射流除去有平衡运动外，还有两种不平衡运动，一种称为射流过给，一种称为射流欠给。通常情况下，周边射流在射流两边压力差的作用下弯曲，这时的压力差由曲线射流中空气质点的离心力来平衡。在艇的运动的某个阶段，当航态或气垫压力发生变化时，周边射流就无法保持平衡。在艇飞高较低的一边，射流分裂，部分射流空气进入气垫，部分射流空气逸入大气，此种流态称为射流过给。但在艇飞高较大的一边，由于气垫压力无法在水平方向保持平衡，结果气垫“破裂”，部分气垫空气以较大的射流曲率逸入大气，形成射流欠给，此时的射流称为欠给射流。射流过给的结果是引起飞高较低一边的气垫压力的损失，射流欠给的结果是对气垫压力进行补偿，两者的差值很大，所以引起压力分布的不均匀，使艇产生不平衡倾侧运动。这是影响稳性的因素之一。

在射流过给的一边，射流分裂后向气垫迴流的那一部分射流由于受空气粘性作用的影响，从周围的气垫中带走部分空气，结果便在射流帷幕旁边于艇底产生稳定的环形涡流。由于涡流中空气质点速度的影响，靠近环形涡流的压力低于艇底面中心的压力。飞高很小时，环形涡流在射流帷幕中占据的空间很小，对流型的影响实际上可忽略不计。随着飞高的增加，涡流直径加大，并稍稍向地面倾斜成椭圆形，结果在艇底占据更大空间，对艇底流速和压力的影响随之增加，艇底压力分布的差异（即压力梯度）增大。当前进速度很大时，艏部过给射流分裂而成的环形涡流对压力梯度的影响更大，根据理论计算和模型试验，高进速时艏涡的压力系数根据艏部形状、飞高等因素的不同情况，可能小于零，其不利影响甚至可使艏部气垫压力出现负值。

在射流欠给的一边，由于气垫压力的变化使得水平压力不足以维持射流的动量流量，结果便气垫内部出现紊流扩压，即产生横流。根据流态模拟试验，此横流可更具体地划分为紊流扩压段和粘性槽流段两个部分。紊流扩压段接着环形涡流以后发生，是由作为过给射流的分叉射流的环形涡流演变而成的，其长度约为气垫深度的2—3倍（此流态分析模型假设气垫长度比艇底飞高一个大一个量级）。伴随紊流扩压有一显著的横流总压损失。紧接着紊流扩压便是称为粘性槽流的平衡横流，占据了艇底的绝大部分空间，在此区间可近似地认为压力与粘性力求得平衡。在垫升或前进飞升的非平衡条件下，紊流扩压以及与此有关的扩压压力升高，使得气垫压力在原来由于射流过给和环形涡流的影响已呈不均匀分布的情况下，进一步加大了压力梯度。这种压力梯度随着航速的增加而加大，达到某一临界速度时气垫压力就会出现十分可观的负纵向压力梯度，导致纵向

失稳。

如上所述, 我们可将气垫船偏离平衡位置时艇底的流场分为以下几个区间: 过给射流帷幕→环形涡流→横流(包括紊流扩压段和粘性槽流段)→欠给射流。在艇发生倾侧的情况下横流的影响最为可观, 它可达到如此强烈的程度, 以致于周边射流在气垫船离表面较高的一边接触不到表面, 部分气垫空气从射流下方逸出艇外。在离表面较低的一边, 由于触到艇底的环形涡流

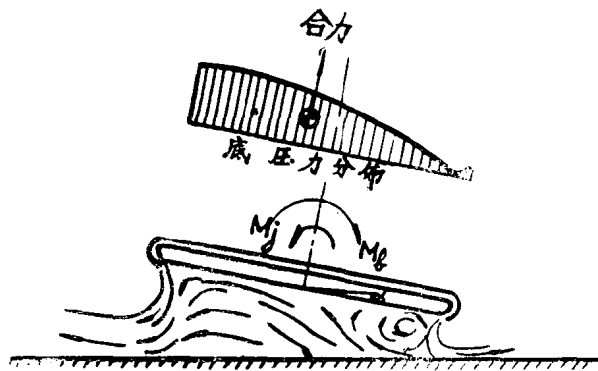


图 1

的存在, 就会发生熟悉的失压现象。但在离表面较高的一边, 由于效应表面与倾斜的艇底所形成的扩压段里横流的作用, 气垫压力增加。艇底压力产生的合力位于中心线左侧, 所以产生一个不稳定力矩 M_0 。由于高的一边射流静压大于低的一边, 结果在高的一边就有较小的喷气升力, 因而产生一个稳定力矩 M_j 。一般说来, M_0 大于 M_j (图 1), 因而倾斜周边射流式气垫船在有表面效应影响的情况下总是不稳定的。

综上所述, 由于射流不平衡运动所产生的环形涡流和横流的影响, 艇底流型是不对称的。流型的这种不对称性会产生不稳定倾侧力矩, 引起艇的颠簸运动。所以除去飞高很小时气流不对称性不足以影响艇的稳性外, 一般说来, 在垫升或有进速飞行时气垫船总是不稳定的, 这是气垫船的固有特性。

下面分别就气垫船的静稳性、动稳性、埋艏以及海损稳性标准和浮力储备等几个方面, 介绍并初步探讨一下分析计算方法和改进措施。

二、静稳性分析计算

为便于分析, 按照常规船舶的通用方法, 可将气垫船的稳性分为静稳性和动稳性。静稳性是艇对以缓慢的方式作用其上的力和力矩的扰动的位移响应, 一般说来气垫船的这种静态稳性可以得到保证, 而且不管如何总可以在一定的限度内对其进行调节。

周边射流式艇的静横稳性

参照常规船舶的经验, 周边射流式艇的静横稳性通常根据静横稳性系数 $C_{\phi\phi}$ 和横稳心高度 GM 来衡量。静横稳性系数是零倾角时艇复原力矩对倾角 ϕ 的偏导数, 表示为

$$C_{\phi\phi}^0 = \left. \frac{\partial C_{\phi\phi}}{\partial \phi} \right|_{\phi=0} \quad (1)$$

与静横稳性系数最大值相对应, 有一个最佳飞高, 此最佳飞高通过下式确定:

$$\left(\frac{h}{b} \right)_{\text{最佳}} = (1 + \sin \phi) \frac{t}{b} \quad (2)$$

由式可见, 此最佳飞高与外喷口宽度 t 及横倾角 ϕ 有关, 而与稳定隔裙的位置无关。

与每一个飞高 $\frac{h}{b}$ 相对应, 有一个提供最大静横稳性的最佳外围裙喷口宽度值, 当宽度 $\frac{t}{b}$ 较最佳值减小时, 静横稳性变坏。此最佳宽度值公式为:

$$\left(\frac{t}{b}\right)_{\text{最佳}} = \frac{h \cdot b}{2(1 + \sin \phi)} \quad (3)$$

横稳心高度 GM 定义为重心和压力稳心之间的距离，其公式为：

$$GM = Z_p \cot \phi - y_g \quad (4)$$

根据此式，为保证艇具有正的静横稳性，重心高度的布置应满足下述条件：

$$y_g < Z_p \cot \phi \quad (5)$$

式中

$$Z_p = \frac{M_r}{P_\phi} \quad (6)$$

其中 M_r 为横倾复原力矩，表示为：

$$M_r = C_{\phi\phi} G b \quad (7)$$

式中 $C_{\phi\phi}$ 为横倾复原力矩无因次系数，表示为：

$$C_{\phi\phi} = C_{\phi\phi}^\phi \quad (8)$$

至此，可按下式计算静横稳心高度精确值：

$$GM = M_r \frac{\cot \phi}{P_\phi} - y_g \quad (9)$$

静横稳心高也可取与气垫宽度 b 有关的无因式形式：

$$GM \approx C_{\phi\phi}^\phi - y_g \quad (10)$$

由上可见，无因次静横稳心高度由于计及了气垫船的重心位置，因而为更普遍的静横稳性标准。

综合上述公式，可得通用的静横稳性衡准式，此衡准式通常以数值形式表示，它是每横倾一度压力中心相对于重心的无因次横向位移，以气垫宽度 b 的百分比表示：

$$\frac{\frac{Z_p}{b} \cdot 100\%}{\phi^\circ} = \frac{Z_p}{\phi^\circ} 100\% \quad (11)$$

根据试验验证，证明此衡准式是正确的。过去有人认为，每倾斜一度压力中心的位移需要等于气垫宽度的 1.5%，现在认为每倾斜一度压力中心位移值只要在气垫宽度的 0.3—0.6% 范围内就足够了。

通过上述计算分析可以看出，气垫船垫升航态下的静横稳性主要取决于飞高和垫升系统的参数。飞高决定了艇的重心的垂向高度，此高度是对气垫船稳性影响最大的一个参数。根据国外某些艇的数值计算和模型试验结果，周边射流式艇当飞高极小，比如 $\frac{h}{b} = 0.003$ 时，艇处于中性平衡状态。从飞高 $\frac{h}{b} \approx 0.002—0.003$ 开始，气垫产生的静横稳性随飞高 $\frac{h}{b}$ 比值的增大而迅速增加，

当到达某一飞高时，静横稳性达最大值，然后随着 $\frac{h}{b}$ 的增大静横稳性逐渐下降。

对于采用稳定隔裙的周边射流式艇来说，稳定隔裙沿船宽的位置对艇的静横稳性有重要的影响。隔裙的布置越靠近艇的纵中剖面，稳性越好。

周边射流式艇的静纵稳性

与静横稳性分析一样，可以以静纵稳心高度 GM_L 作为衡量静纵稳性的度量。静纵稳心高 GM_L 为艇重心到纵向压力稳心之间的距离，其公式表示为：

$$GM_L = (x_g - x_p) \cot \theta - y_g \quad (12)$$

为保证艇具有静纵稳性，重心沿高度的布置需满足下列条件：

$$y_g < (x_g - x_p) \cot \theta \quad (13)$$

与分析静横稳心高时一样，也可导出与艇长 L 有关的无因次静纵稳心高公式：

$$\overline{GM}_L = \frac{(x_g - x_p)}{L} \cot \theta - \frac{y_g}{L} \quad (14)$$

在上面的无因次静纵稳心高公式中， $\frac{x_g - x_p}{L}$ 为艇的定心，它是表征气垫船静纵稳性的主要参数之一。可以看出，艇的定心随力臂 $\frac{x_g}{L}$ 和 $\frac{x_p}{L}$ 变化。设计时，围裙的布置应力求保证提供运行时所必需的定心。若通过相应的围裙布置还不能圆满地做到这一点，则必须修改总布置，用改变力臂 $\frac{x_g}{L}$ 的办法来获取必要的定心。适合于气垫船正常运行要求的定心值宜通过试验确定。

增压室式的静稳性计算

增压室式气垫船以法国的筒裙系统为代表，此种筒裙系统零速或低速时的静稳性根据气垫系统的阿基米德浮力确定。小倾角时的复原力偶由下式计算：

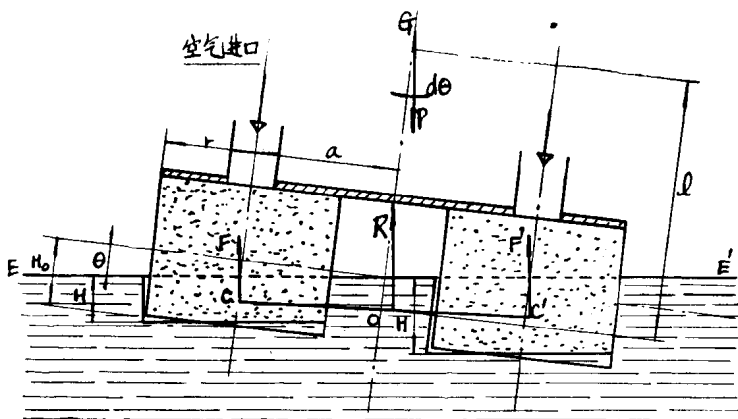


图 2

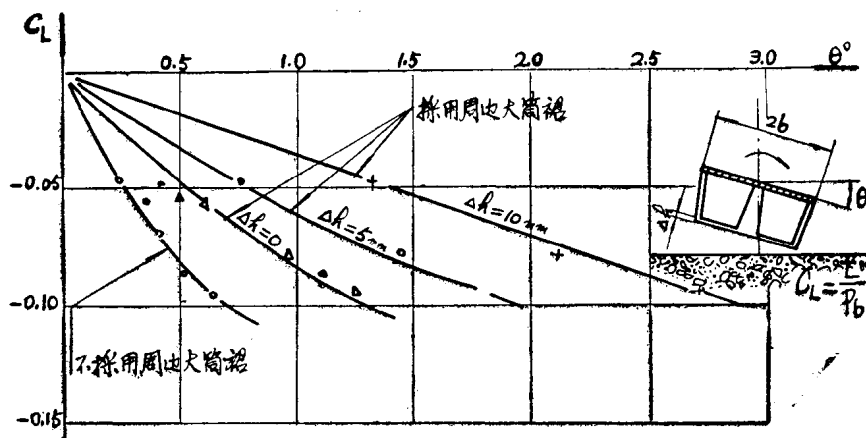


图 3

$$\frac{L}{P_b} = \frac{l}{b} - \frac{bX}{4(H_0 + h)} \quad (15)$$

系统及符号说明如图 2 所示, 此节符号请注意不与本文其它章节者相混。式中的 X 为气垫在水中的压力模数, 定义为:

$$X = \frac{1}{\rho_0 g} \frac{\partial P}{\partial H_0} \quad (16)$$

当艇越过阻力峰而垫升航行时, 复原力偶则按下式计算:

$$\frac{L}{P_b} = \left(\frac{l}{b} - \frac{b}{4h} \right) \theta \quad (17)$$

此复原力偶即艇的稳性系数, 图 3 举例给出了一条艇的稳性系数试验值。图中还表示出了周边大筒裙对艇

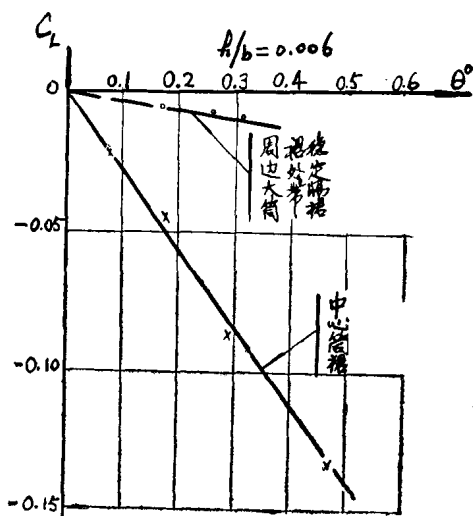


图 4

的静稳性的影响。另外, 图 4 表示了这种艇的静稳性与飞高之间的关系。

三、动 稳 性 分 析

升沉稳性

气垫船的动稳性是气垫系统本身的一种瞬时特性, 就是说, 是艇对作用其上的扰动力的频率响应。这时的外界扰动力的作用时间与艇的自然摇摆周期相比很短, 因而可认为作用力是动态的。就大多数正在营运的气垫船而言, 可将气垫当作是由若干个作升沉运动的分气室组成的而考虑其动态特性, 因而艇作升沉运动时的稳性对于艇的总的稳性具有基本的应用价值; 据此可求出纵摇和横摇稳性。另外, 由于升沉稳性可以揭示出气垫的气动特性与升力系统的机械特性之间的相互关系, 因而不仅对于稳性分析, 就是对于艇的适航性能的研究也具有最基本的重要性。

气垫船在波面上运动时, 由于波浪泵气和逸流面积变化的影响, 会产生相对于支持表面的垂向位移。此时气垫压力便发生变化以抵消位移的影响。即使在艇的静稳性足够情况下, 仍然会发生这种压力的变化过程。由于飞高的变化, 会同时产生气垫体积的变化和压力的变化, 风扇则对所需的压力进行补偿, 但这种补偿并不能同步发生。另外, 垂向位移的速度也并不是无限小, 风扇对压力的补偿会产生相位差, 或产生对位移的滞后, 以致使得压力与由于运动所引起的惯性力不可能在稳定条件下取得平衡, 从而会引起振荡运动。此种运动能否受到阻尼, 则视气垫系统的特性而定。

气垫船的升沉不稳定性除与上面谈到的风扇——气垫系统的滞后特性有关外, 还受到周边射流和气垫气流本身的非线性柯达效应的影响。在升沉运动的某一个阶段, 由于气垫体积的变化, 引起气垫气流外逸而使周边射流的动量得到加强, 但气垫压力却无法在水平方向保持平衡, 结果引起气垫“破裂”, 逸流射流达不到效应表面, 这种流态称为“欠给射流”*, 产生于艇向下运动

* 这儿所说的“欠给射流”和“过给射流”, 与上一节谈到者在流型的基本特性上是一致的, 不同的是上一节所述“欠给”和“过给”射流是艇的几何对称舷边或船艏的两种互相不平衡的流态, 而此节所说的“欠给”和“过给”射流却是交替产生于同一个部位的运动的不同阶段。

时。在这整个变化周期内，当气垫压力的变化率使得水平压力不足以维持周边射流的动量流量时，便会出现另一种补充流态，称为“过给射流”。此种流态产生于艇向上运动时。此时周边射流分裂，部分射流空气汇成一股补偿气流流入气垫，两种流态随着艇的升沉交替出现。此种现象类似于“射流”和“活塞”的交替效应，是升沉谐和振荡运动的阻尼机理。由上述一种流态到另一种流态的转换并不是同步发生的。周边射流柯达特性会引起滞后效应，从而在上述两种流态之间便会出现一个滞止阶段，在这种滞止阶段气垫内的压力变化由空气本身的可压缩性和周边射流的形状来平衡。射流过给会引起气垫压力损失，射流欠给会使气垫压力得到补偿，前者的量值远大于后者。根据理论计算和模拟试验结果，在稳态振荡的一个完全周期内，压力损失与压力补偿之比约为三。气垫系统的这种非线性特性在强迫振荡运动情况下表现为动力平衡位置的变化，引起艇的垂向升沉运动。

如上所述，风扇特性对气垫船的升沉稳性影响很大。这种影响主要表现在滞后效应上，即当艇产生偏离平衡位置的升沉位移时，风扇对气垫的压力和流量的响应往往是滞后的，从而使艇底产生与质量——弹簧系统类似的振荡运动。因而在气垫船的分析设计阶段，往往用与风扇特性密切相关的气垫刚度来衡量艇的升沉稳性之好坏。

若不考虑三维效应，不考虑气垫横流和气动力对艇体的作用，可用下列简化分析方法求得艇作升沉运动时的气垫刚度：

$$\frac{\partial L}{\partial Z} = S \frac{\partial P_o}{\partial Z} \quad (18)$$

上式也可写成：

$$\frac{1}{\rho_w g} \cdot \frac{\partial P_o}{\partial Z} = \frac{\frac{cV_o}{\rho_w g} \cdot \frac{\partial P_o}{\partial Q}}{1 - \frac{cV_o}{\rho_w g} \cdot \frac{\partial P_o}{\partial Q} (1 + \rho_w g K_s)} \quad (19)$$

式中 K_s = 围裙的弹簧柔量。由上式可以看出，根据这儿采用的简化理论，升沉运动气垫刚度取决于无因次项 $\frac{cV_o}{\rho_w g} \cdot \frac{\partial P_o}{\partial Q}$ 和 $\rho_w g K_s$ ，而与气垫压力的绝对值无关。

如果为了使问题简化而只考虑围裙变形为零的情况，则式(19)可写成如下容易辨认的形式：

$$\frac{\partial P_o}{\partial Q} = \frac{\frac{Q}{h} \frac{\partial P_o}{\partial Q}}{1 + \frac{Q}{P_o} \frac{\partial P_o}{\partial Q}} \quad (20)$$

在具体进行设计分析时，则可从艇的运动特性方程中得出升沉稳性衡准式。通常情况下，为保证艇的升沉稳性必须满足下述条件：

$$\frac{sh}{2P_o C_o} \left[1 - \frac{\frac{2P_o}{Q}}{\frac{\partial P_o}{\partial Q}} \right] > 1 \quad (21)$$

此式适用于气垫阻抗 $C_o \neq 0$ 的总的情况。对上式作适当变换便可列出如下的升沉稳性衡准式：

$$\frac{1}{2} \left(\frac{h}{h_s} \right) \left(1 + \frac{P_A}{P_o} \right) \left[1 - \frac{\frac{2P_o}{Q}}{\frac{\partial P_o}{\partial Q}} \right] > 1 \quad (22)$$

若考虑气垫船在波浪中遭遇偏离平衡状态的小幅度扰动时的升沉——压力耦合运动，则可将下式作为升沉稳性衡准式：

$$\frac{rh(P_a + P_0)}{h_c} \left[\frac{1}{2P_0} - \frac{1}{Q_0 \left(\frac{\partial P}{\partial Q} \right)} \right] > 1 \quad (23)$$

法国的增压室式筒裙系统的每一只锥筒都为整个气垫提供升沉刚度，因而其稳性是很好的。对于这种围裙形式，在进行初步估算时，可按下列条件衡量艇的升沉运动动稳性：

$$\frac{h_s}{h} < \frac{rP_a}{\Delta P_0} \quad (24)$$

式中 $\Delta P = P - P_0$ = 气垫压力。

上列三个公式可在初步设计阶段用来估算艇能遭遇的波浪高度的上限，从此三个衡准式中可看出影响升沉稳性的因素及改进措施为：

1，对围裙高度必须作出限制。一般说减小裙高可使升沉稳性改善。

2，一般说来，增加裙底间隙，即增加净飞高可使升沉稳性改善，但并不是在所有裙底间隙即飞高下艇的稳性都好。根据计算和试验，发现在某一个飞高变化区间里艇的升沉稳性会丧失。图5给出了用与飞高曲线相对应的增益率梯度来表示的升沉稳性曲线。若该梯度在各处均为负值(曲线1)，则艇的升沉稳性良好。但实际上，与飞高相对应的增益率曲线在许多情况下有峰点(如曲线2)，其斜率不是在各处均为负值，因而在某一个飞高变化范围内升沉稳性丧失。图中 a 点左边和 b 点右边的斜率为负值，艇在这些区间内升沉稳性良好。在 a 点和 b 点艇具有中和稳性，在 a 点和 b 点之间，升沉稳性丧失。所以当以 a 和 b 之间的平均飞高垫航时，气艇船会产生非线性垂向振动，其振幅保持不变，大小决定于飞高 a 和 b 。

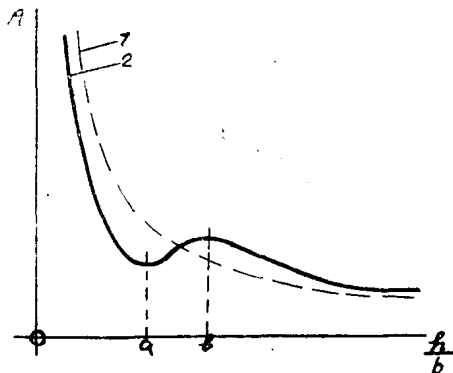


图 5

3，采用较陡的风扇特性曲线可使稳性改善。但却会使适航性变坏，因而必须对两者作出综合平衡。关于这个问题留待适航性一节具体探讨。

4，减小气垫压力可使升沉稳性改善。

5，增大空气流量也可使升沉稳性改善。

纵摇和横摇稳性

气垫船的纵摇和横摇稳性以纵摇和横摇刚度作为度量的标准。特定围裙系统和艇型所需要的刚度牵涉到一系列设计参数的相互配合，诸如囊压，裙高，裙底间隙等。另外，刚度究竟取什么样的需要值，在很大程度上取决于设计者和使用者在与操纵性有关的问题上的协商意见。

就采用稳定隔裙的周边射流式艇而言，最常用的横摇刚度计算公式为：

$$K_\phi = - \frac{b}{8h} \quad (25)$$

将上式作适当变化，引进围裙高度项，则所得近似表达式便可用来表示艇的某些基本特性：

$$\frac{h_s}{b} = \frac{\frac{h_s}{L}}{\frac{h}{L}} \cdot \frac{1}{8K_\phi} \quad (26)$$

这种横摇刚度计算公式所提供的以每度横摇所引起的压力中心的移动表示的横摇刚度值 K ，在不同的艇型和运行条件下变化范围很大。根据法国和英国的气垫船横摇刚度典型曲线，其值变化范围视横摇角和围裙设计特点的不同而为 0.20—2.0。美国在设计中也应用了类似的数据。设计中，横摇刚度通常以裙高与艇宽或气垫宽度之比值来度量，如上式。根据已在营运的艇的经验，裙高与艇宽之比在 0.10—0.20 范围内时可提供较好的横摇刚度。有的设计者取裙高与气垫宽度比值的变化范围为 $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{5}$ 。由此可得到一个参考性的设计参数，即为保证艇具有足够的横摇稳性，裙高不得大于气垫宽度的 $\frac{1}{5}$ 。此条件也适用于静稳性计算。但这儿必须指出，所谓好的横摇

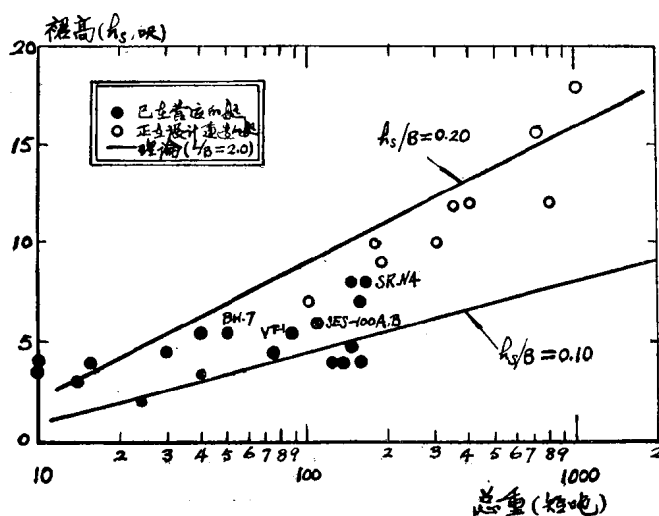


图 6

刚度或足够的横摇稳性，应当理解为在目前的围裙设计水平上兼顾到操纵性时的刚度，而不能将其作为根限条件。图 6 图示了上述横摇稳性标准在实艇设计中的应用情况，有助于确定给定主要尺度的艇的离地飞高或波浪间隙这样的基本参数。通常假设，艇在正常运行情况下可超越的波高约比气垫深度低 10—20%。就现已达到的围裙设计水平而论，图 6 中给出的围裙高度经实验证明可提供较好的横摇稳性和操纵性。但经验也表明，具体从事围裙设计时，几何形状或囊与指内压力比的微小变化均可使纵摇和横摇性能发生显著的变化，

因而着手任何特定设计时都需要认真借助于模型试验。

提供纵摇、横摇稳性的基本方法

在实艇设计中，气垫船的纵摇和横摇稳性一般是根据三种基本方法通过选用适当的围裙型式及改进围裙设计而提供的。此三种基本方法为：气垫分隔，压力中心移动，压力提高，分别代表了三种现有的典型围裙系统。下面分别予以讨论。

一、气垫分隔，作用机理如图 7 所示。本文开始，探讨气垫船的稳性特点时曾谈到，由于环形涡流和横流等不平衡流型的存在，气垫气流具有不对称的特性因而使艇产生不稳定力矩。气垫分隔方法就是对付横流，提高艇的纵摇、横摇稳性的一种措施。此法采用向下喷射的空气射流或充气式柔性隔裙将气垫进行纵向和横向分隔，阻止横流的扩散，从而为艇提供倾侧复原力矩。此种方法普遍应用在英国 BHC 和美国 Bell 公司的所有艇上。稳定隔裙参数对艇稳性的影响主要表现在隔裙的横向及纵向位置和隔裙的裙底间隙上。这些问题一般比较熟悉，这里不作探讨。

二、压力中心移动，作用机理如图 8 所示。这种方法是英国 HDL 公司和 VT 公司的环囊——



图 7

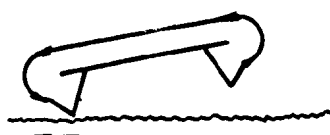


图 8

挂指型围裙系统提供纵摇和横摇稳性的机理，VT1，VT2艇就采用了此法。VT围裙采用此法时，围裙形状允许艇向下倾斜的一边的气垫面积有一个向外侧的运动，随着面积的变化所引起的压力中心的移动使得艇产生所需要的复原力矩，无需使用稳定隔裙便能提供很好的纵摇、横摇刚度。之所以具有好的刚度，主要归因于挂指的外缘与水平轴之间的夹角，此角度不允许超过 45° ；同时还因为艇艏和两舷挂指的末端与水面之间没有任何间隙。艇横摇时，倾斜一舷的围裙与水面的接触点可有效地使挂指向上弹起并向外侧滑动。随着摇摆角增大，气垫面积发生变化，从而使压力中心向倾斜一舷移动，结果便产生一个复原力矩。此情况示如图9。

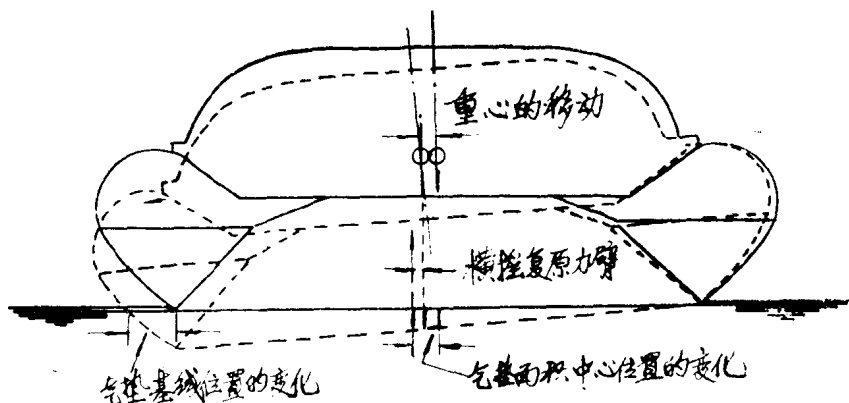


图 9

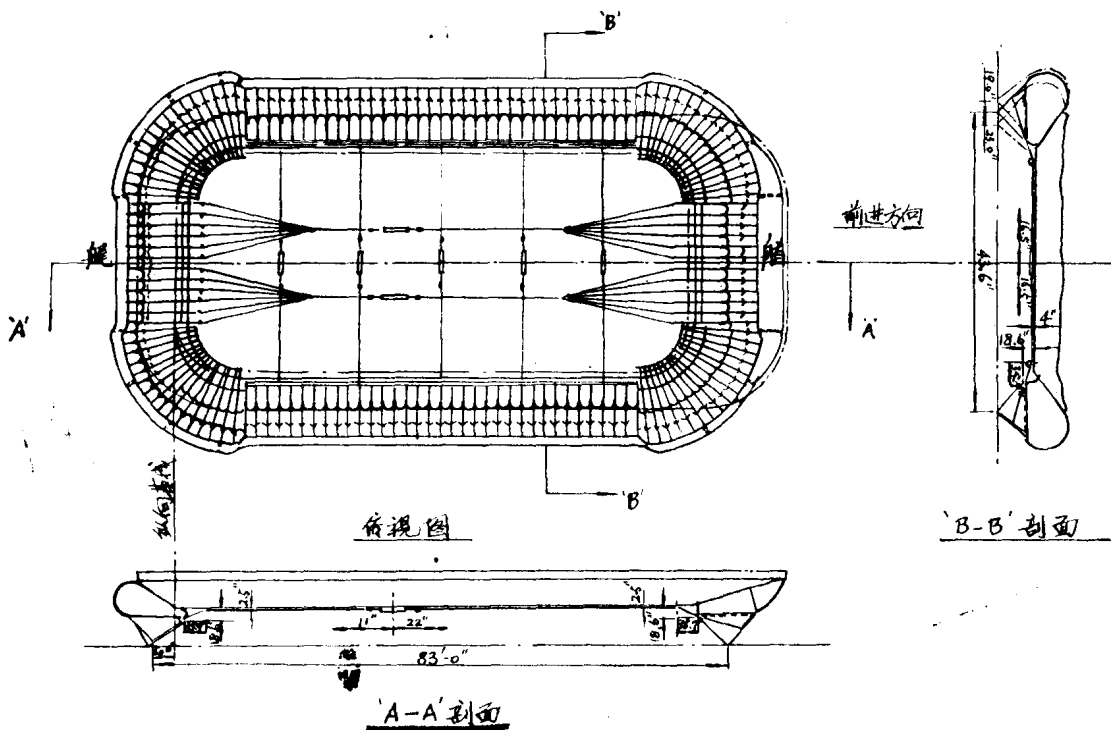


图 10

另外，VT围裙系统还采用了围裙偏移装置以主动控制艇的纵摇，横摇。围裙偏移装置详情见图10。由图可见裙的挂指在每舷分成五组与围裙偏移杆相连，偏移杆由与安在浮箱下的五个双

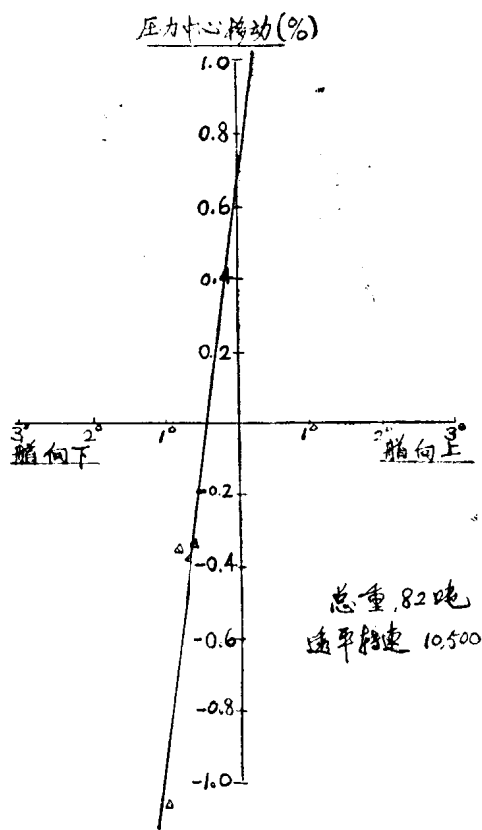


图 11

向作动筒相连的钢索带动以控制横摇。另外有二个双向作动筒操纵船艏挂指以控制艇的纵摇航态。采用压力中心移动法的 VT2 艇的纵摇和横摇刚度示如图 11, 图 12。

三、压力提高, 作用原理如图 13 所示。法国的增压室式筒裙系统采用此法, 通过各个筒裙或锥形气室的基本升沉刚度为艇提供纵摇和横摇稳性。但由于艇底平面上或周边喷口下面压力室内的任何压力变化均易于产生倾侧力矩, 所以法国的 SEDAM 公司也曾考虑过采用柔性隔片或附加分隔射流对各个筒裙的气垫进行分割(图 14)。但这种方法效果不显著, 所获得的复原力偶比采用并列放置并各自独立供气的锥形筒裙方案时小得多。在筒裙系统中, 各中心小筒裙飞高与周边大筒裙飞高的相对位置(即飞高差)对整个系统的稳性影响很大。若中心小筒裙比周边筒裙长, 刚度就大; 中心小筒裙短于周边筒裙, 刚度就小。据此, 法国发

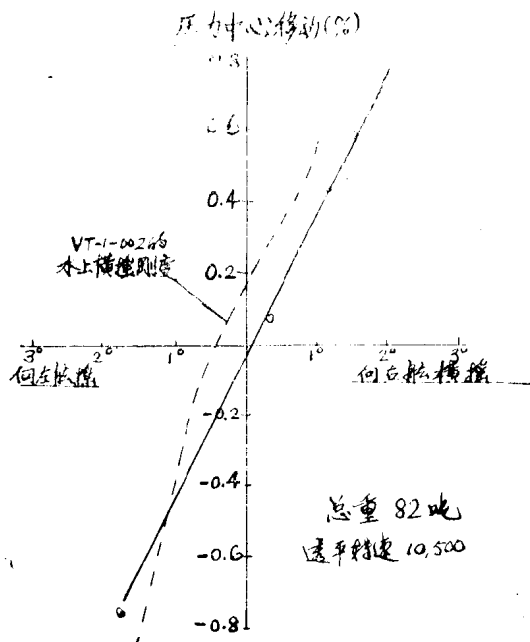


图 12



图 13

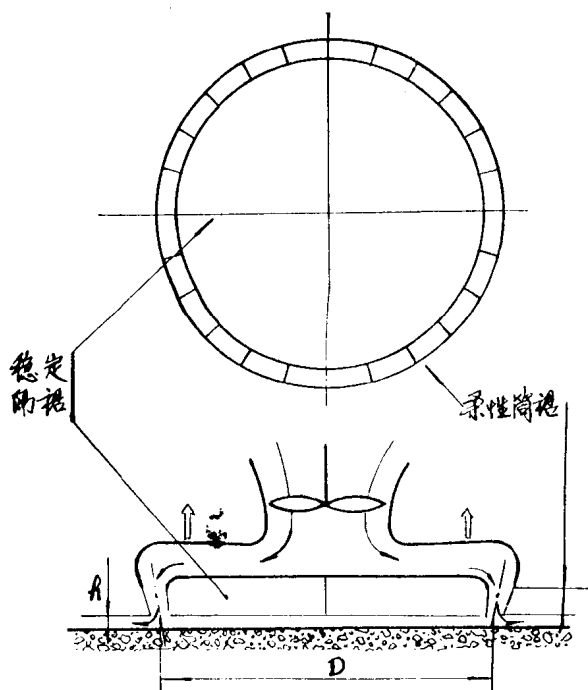


图 14

明了一种飞高调节方法，通过驾驶员的操作，采用压力囊以调节周边大筒裙与中心小筒裙之间的高度差，其调节范围为 0.50—1.0 英寸。另外，也可根据需要主动地调节作为供气系统特性和围裙材料弹性的函数的气垫刚度（此刚度定义为 $K = -\frac{dF}{dh}$ ）。用于 N500 后，法国式筒裙系裙的陆上和水上稳性如图 15, 16 所示。

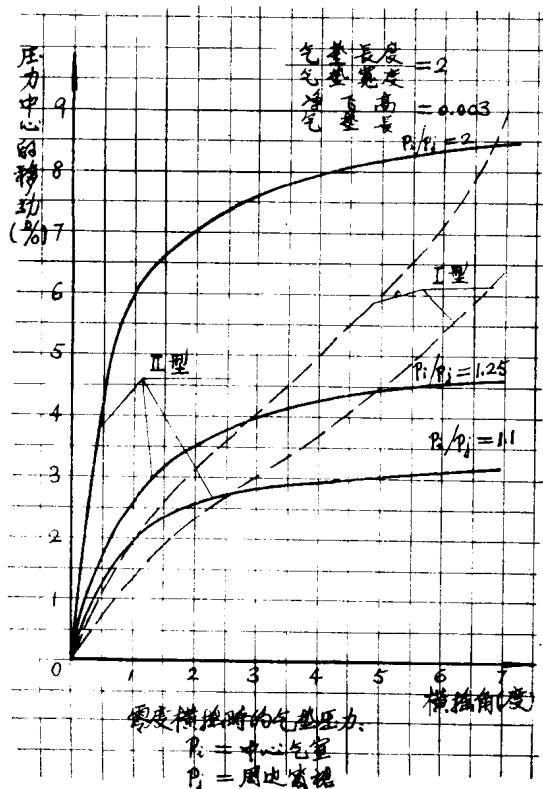


图 15

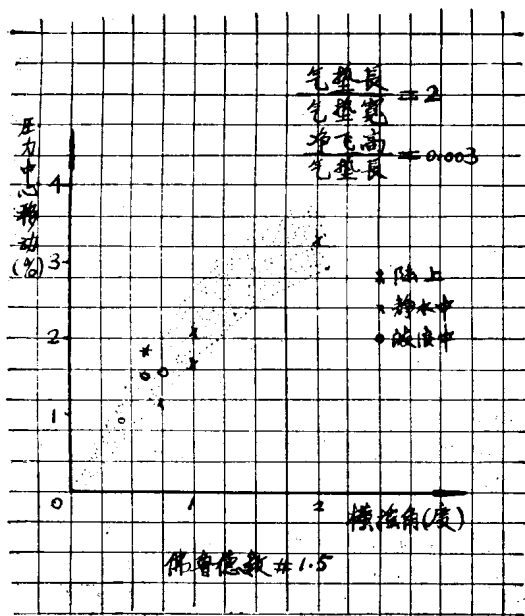
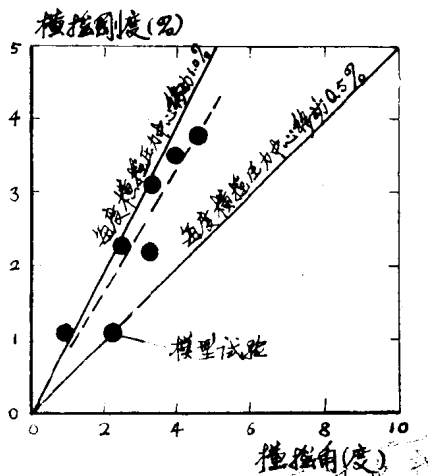
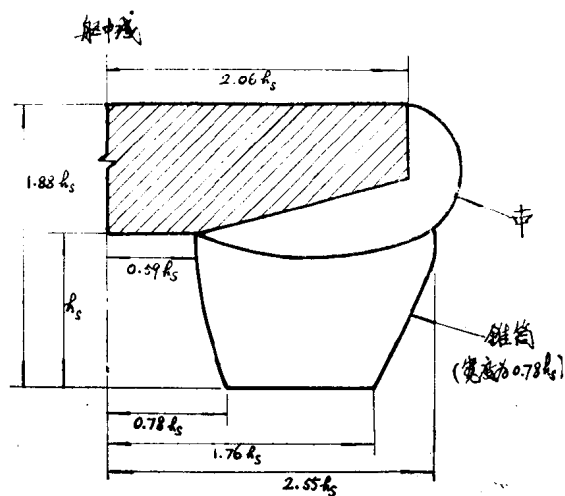


图 16

上述三种基本方法可结合起来一起使用。如英国 BHC 和美国的 Bell 公司就结合了第一, 第二两种方法, 而美国的 Aerojet 则结合了第一和第三两种方法。Aerojet 的周边囊筒形围裙系统, 艇的基本稳性由周边小筒的压力提供, 进入气垫的气流由共同的供气囊供给, 遭遇波浪时供气囊也能提供附加刚度。另外, 美国还提出了一种深筒围裙方案, 其几何形状和横摇刚度示如图 17。其横摇刚度约为每度横摇



图

压力中心移动 0.85%，此值属于可接受的范围。

四、埋 艏 问 题

埋艏及其产生机理

埋艏现象是气垫船(包括全垫升式和侧壁式)的一种突出的不稳定特性。全垫升艇如 SRN5, SRN6, SKMR-1, CC-5, PP5; 侧壁艇如 Aqua-GEM, XR-1, SES-100A, SES-100B 等均出现过这种纵向失稳现象, 其中有些艇倾复, 有些只发生埋艏, 有些经受了局部纵摇失稳但却未发生危险。目前, 世界各国都在致力于寻求消除埋艏现象的方法, 但对于埋艏的原因及与埋艏有关的各种因素似尚缺乏深入的符合实际的研究。这里, 我们打算综合有关资料, 首先探讨一下产生埋艏的原因及与其有关的各种因素, 然后提出克服或限制这种现象的途径。

过去通常认为埋艏是艇高速航行时特有的纵向失稳现象。但据我们对国外报道的某些实艇的试验经验来分析, 发现埋艏现象不仅产生于超过临界航速的高速运行条件, 也发生于艇由垫升航态向排水航态过渡的阶段。另外, 不仅在波涛中, 就是在静水中也会产生埋艏。

先来分析航态变换阶段的纵向失稳问题。由垫升航态到排水航态的过渡阶段, 艇的稳性通常很差, 这是因为支承艇的水动力等于零, 艇的质量完全由气垫压力支持。由于前面所分析过的在有表面效应的情况下气垫船流型不对称性的影响, 此时复原力矩发生了较正常航态时更大的变化。由于复原力矩特性的变化, 横稳性变得很低, 几乎等于零。在此过渡阶段, 航速一般低于临界速度, 艇处于亚临界区间, 艇艏往往发生水花喷溅, 引起了水和空气之间的动量交换, 从而使艏部气垫压力降低而产生负纵向压力梯度。另外, 此时围裙, 特别是艏裙, 与水接触产生的湿水阻力使艇受到附加埋艏力矩的作用。气垫内部的压力和流量变化要求很快, 如果供气系统的响应滞后比较严重, 不能适应迅速变化的航态对流量和压力特性的要求, 艇就会滞留在这种低稳性区而产生埋艏, 甚或引起较严重的倾侧。关于这个问题, SES-100A 和 SES-100B 的实艇试航经验提供了很好的例证。当艇在静水中由全垫升航行过渡到部分垫航而准备停车排水航行时, 发生了埋艏。在埋艏的整个过程中, 由产生水花喷溅时开始, 纵向气垫压力梯度逐渐加大, 在 4—5 秒时间内, 纵摇角达到 -6° 。由上述分析可以看出, 在过渡阶段: (1) 水花喷溅引起了水和空气之间的动量交换, 使艏部气垫压力降低而出现较大的压力梯度, (2) 供气系统的流量压头特性不能适应航态迅速变化的要求, 出现了较严重的滞后效应, (3) 围裙湿水阻力的增大产生了附加埋艏力矩。正是这些因素的共同作用招致了艇的埋艏。但由于过渡段的埋艏所造成的后果不及高速时埋艏那么严重, 所以尚未引起很大的重视。

气垫船高速航行时埋艏的原因, 除与上述诸因素也有关外, 最重要的, 也是最富特征的是, 高进速时的流型变化和外部动力因素的共同作用。

当艇以高速垫升飞行时, 气流流型便根据航速的量值不断变化。对于前进飞升的气垫船来说, 艇周围的流型有三个明显的区间(亚临界、过渡区间, 超临界)和两个临界前进速度(第一、第二临界速度)(图 18)。在亚临界, 在艇的前进方向, 艏部射流空气受外界自由气流的作用而向上方流动, 围绕气垫船于艏部形成一大团旋涡。当在水上飞行时, 这种典型的艏部旋涡就变成大量水花喷溅。此时由于水花喷溅引起的水和空气的能量交换使艏部气垫压力降低, 同时由于艏部气垫内的环形涡流的作用(因为在有进速影响的情况下, 艏部射流往往过给, 所以在艏部气垫区形成环形涡流)也使艏部垫压低于艇底面中心的气压, 出现小的纵向压力梯度。但由于此时压力梯

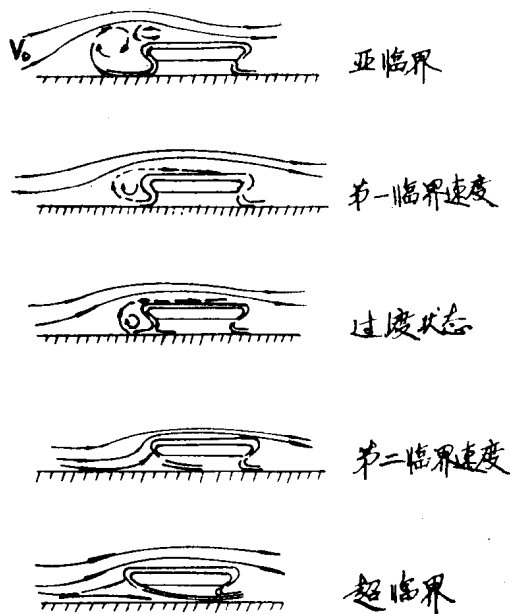


图 18

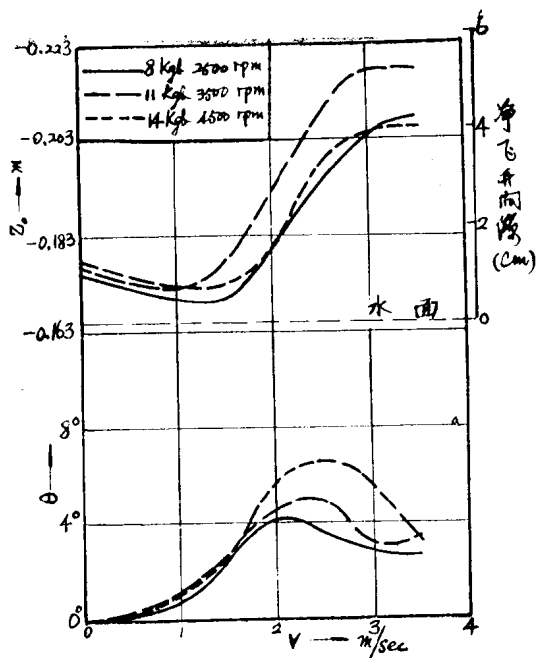


图 19

度较小，所以对艇的航态的影响不太明显。

当速度达到第一临界速度时，外界自由气流触到艇的上表面，射流空气被挤在紧靠上表面处成一股顺着流线流动。艇在水上达到第一临界速度时，扑打到艇艏的水花喷溅就消失。此时，艇的稳定性有所改善。而当速度达到第二临界速度时，外界气流从艇底经过，艇艏由射流空气形成的分离气泡消失，艇导边前面的静压与自由气流的动压相等，紧靠射流以后的局部底压力大大降低，甚至可成为负压。这时，由于进速的决定的影响，前面所分析过的紊流扩压及与此有关的扩压压力升高现象更趋严重，艏部气垫的压降十分可观，纵向负压力梯度很大，结果产生一个负纵倾力矩即埋艏力矩，使艇的航态发生很大变化。在这种过分承受埋艏力矩作用的不利情况下，如果有严重的外部扰动力作用于艇艏，诸如围裙水动阻力的激增、偏航角的增大、横摇运动的影响、操作方法的不当、供气系统的滞后效应等，便可能使艇产生严重的埋艏，甚或引起倾复。

为了使上述分析具有足够的说服力，我们可以引用国外有关的模型试验结果来证明。图 19 绘出了气垫船模型在水上有进速飞升时的动稳性试验结果。由图中可以看出，在水上，随着进速的增加，坐标系原点 OB 向下移动(相当于艏部抬起)，达到峰速之前其值降到最小(此时仍相当于艏部抬起)，然后此座标原点重又向上移动(相当于减小正纵倾角)。这表明，达到峰速之前，艏部有向上抬起的趋势，过峰速后艏部则逐渐下落，正纵倾角相应减小，到某一临界区间便产生埋艏。

根据上述分析，埋艏发生之前，当艇在亚临界区间航行时，由于与航态过渡阶段基本相同的原因，气垫内部已经出现负纵向压力梯度，已经有埋艏力矩作用在艇上。但由于，第二临界压力梯度较小，第二艇艏上表面由于进速的影响产生负压力即升力，抵消了部分埋艏力矩的影响，所以艇虽然有小幅度的纵摇振荡运动，但还不至于发生埋艏。可是随着进速的增大，由于艏部流型在外界自由气流的作用下发生了更大变化，负纵向压力梯度陡然加大，从而使埋艏力矩成为矛盾的主

要方面。图 20 示出了 SES-100A 艇埋艏过程中气垫压力的分布情况，由图中可以看出，埋艏过程中后部气垫的压力相对说来一直保持不变，而艏部气垫压力却迅速降低，压降达 50% 左右。此压力梯度在图中以阴影部分表示。由此可以得出结论：对于具有动力不稳定固有特性的气垫船来说，高进速时的埋艏是一个复杂的过程，受到多种因素的共同作用，不是一种原因可以使然

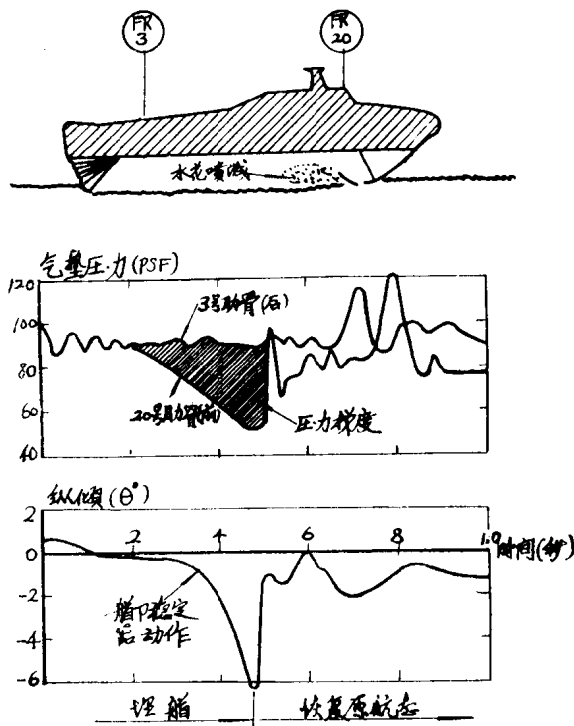


图 20

的，其中高速是气垫出现较大的负纵向压力梯度的主要外因，是艇发生埋艏的诱发因素。而真正起决定作用的内因则是艇本身气垫系统的特性，诸如风扇的压头流量特性，供气方式，气垫刚度，提供纵摇复原力矩的方法及其效果，围裙的结构特点，艇体的几何形状等。不少研究者认为埋艏的发生是因为高速航行时围裙触水产生了较大的埋艏力矩，因而主要注意力放在减小围裙阻力以防止埋艏的发生上。我们认为这似乎只抓住了矛盾的次要方面。因为埋艏之所以发生，其前提条件是艇本身由于气艇压力分布的不均匀过分地遭受到埋艏力矩的作用而使纵摇加剧，在这种航态下如果围裙水动力加大，再加上上面提到的其它外界因素的共同作用，外因作用于内因，才会发生令人讨厌的埋艏。当然，象囊指型围裙系统，减小围裙湿水阻力当艇纵摇加剧时对于防止进一步艏倾有作用。但光靠此并不能有效地提高埋艏边界。

而对于 VT 围裙，其特点就是保持与水面接触

以提供纵摇、横摇力矩，但却未发生过严重的埋艏事故，这说明埋艏的主要原因不在于围裙的阻力，所以抗埋艏措施主要的也应从其它途径去探寻。

抗埋艏措施

下面提出一些抗埋艏的措施和思路，供讨论。

一、如前面所分析的，气垫本身的负纵向压力梯度是艇发生埋艏的根本内因，因而最根本的改进措施应该是从控制、调节气垫压力分布上着手。可采用的方法有：

1. 改进供气方式。埋艏过程中，由于负纵向压力梯度的存在，艏部气垫的压力和流量总是小于后部气垫。为了补偿艏部压力和流量的不足，可改变现在由周边供气的方法而采用使供气气流由艏部流向艉部的方式。英国的 VT 围裙就是采用此法。在 VT1 和 VT2 艇上，大部分供气气流是通过艏部挂指进入气垫的，然后从艉部围裙逸出。这样当波浪由气垫下方通过而引起波浪泵气时，艏部气垫空气不致为波浪泵出，即使有气流被泵出，但由于艏部连续不断地有大量气流补充，从而可减小艇的纵摇运动。另外，VT 围裙的艉裙挂指较艏裙者短，它的末端与水面之间的间隙可允许尽量多的气垫空气由艉部逸出，从而保证使艏部及两舷的围裙与水面保持接触，沿艇的周边几乎完全使气垫封闭，这样艏部不会产生过大的压力和流量损失，难以产生引起埋艏的严重的负纵向压力梯度。这种供气方法对于消除埋艏，效果是显著的。

2. 主动调节气垫压力和流量。气垫船在波浪上垫升航行时，其气垫系统的几何形状多少带