

## 水下拖曳体有关问题的初步探讨\*

宋文洋 陈荣贵 赫崇本  
(山东海洋学院)

六十年代以来,在海洋科学研究领域中,由于各种现代化观测手段的广泛采用,使各学科都有了很大的发展。当我们将各种观测手段所获资料进行仔细对比分析时,将会发现调查船仍然是目前海洋调查的基本工具。为获得准同时的海洋观测资料,船用走航自记仪器是当前的一个重要发展方向之一。在走航过程中它能测出表层稍深(300—400米)的断面资料。目前,一般采用潜水载体来完成上述任务。潜水载体可分为自航和拖曳式两种<sup>[4,5,6]</sup>。近代新发展的拖曳式仪器运载装置拖曳体,对于在走航船上收集各种资料极有价值的工具。拖曳体是由于拖曳声纳有希望应用于军事上才引起人们重视的。因此,这一设计所取得的成果很快就为海洋研究所应用。从六十年代末、七十年代初以来,英、美、加、德、苏、日等国家先后研制了不同类型的拖曳式海洋仪器运载装置——拖曳体。这些装置有的仅能进行水平拖曳,有的可以水平定深拖曳,有的为“锯齿形”剖面轨迹,同时也能够水平和定深拖曳<sup>[4,5,7]</sup>。

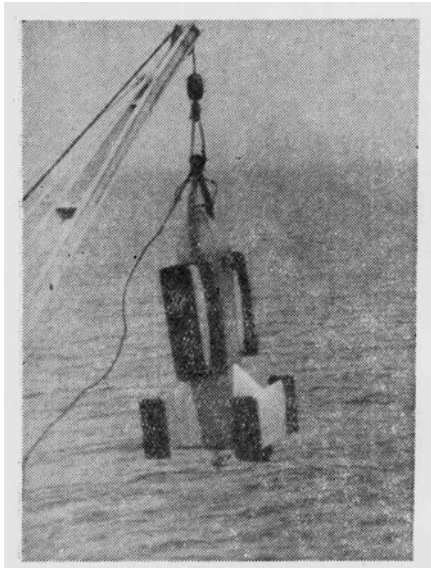


图 1

各种类型的拖曳体主要依靠机翼产生的比自重大许多倍的负升力而达到下潜的目的。控制系统有的采用电磁阀和液压传动(加拿大),也有的采用电磁离合器和机械传动(中国)。下潜系统在控制指令的作用下,实现了机翼的冲角增减来改变负升力的大小,使拖曳体在一定的周期内上升、下降。山东海洋学院从1972年开始研制拖曳体,经过海上实验证明是一种可取的观测手段<sup>1)</sup>。

本文论述的拖曳体目前运载了温、盐、深传感器(见图1),所测得的量值讯号通过“耦合电路”经单芯电缆传输到船上,再经过滤波器使三个信号分开,按时序分别输出,其形式有:数字显示、打印、图示和纸带穿孔,然后将数据送计算机进行处理<sup>2)</sup>。本文重点讨论拖曳体的流体动力布局以及微调平衡的方法。

法。

\* 本文介绍的拖曳体是为“船用走航温、深自记仪”配套的。先后参加研制和试验工作的还有山东海洋学院张春桥、王树温、陈立魁、洪忠瑜、吴葆仁、郑守峰、刘安国等;国家海洋局一所郭苏东、金敬东、贺毓信、冀建章、曾宪模、初乃良等;国家海洋局北海分局张子玉(现在山东海洋学院),李长连、蓝文锡、甄宝廉等。

1) 见宋文洋、洪忠瑜、郑守峰、吴葆仁、刘安国、陈荣贵,《船用走航温、盐、深自记仪》一文。中国海洋湖沼学会1978年学术年会论文报告,1—20。

2) 见洪忠瑜,1979。用穿孔纸带现场记录海洋参数。海洋仪器,3: 57—64。  
本刊编辑部收到稿件日期: 1980年4月24日。

## 一、拖曳体的动力布局

从拖曳系统来看,除了拖曳体各部结构之外,还包括拖缆。一般认为船在拖曳时,拖曳体的反作用对船速没有影响,拖缆的作用仅看作是对拖曳体的一个附加力,可以忽略不计。我们仅从拖曳体在一定拖曳速度有足够的稳定性角度出发,对它的动力布局初步分析如下:

**1. 机身** 本文介绍的拖曳体拖曳速度不高,其机身形状的截面为矩形沿纵轴中心线对称。由于尾翼所产生的力矩与臂长成正比,所以机身的长度不能小于拖曳体稳定性所要求的量值。拖曳体机身位于机翼的中央,在机翼上安装侧向挡板可以减少机翼和机身间的干扰。

**2. 机翼** 机翼对拖曳体的纵向稳定性和侧向稳定性均有影响,它的流体动力布局就是如何选择展弦比,尖削比,翼剖面及其表面上流态等。

一般机翼的升力  $Y_1$  和阻力  $X_1$  为

$$Y_1 = C_l \cdot S \frac{\rho V^2}{2} \quad (1.1)$$

$$X_1 = C_d \cdot S \frac{\rho V^2}{2} \quad (1.2)$$

式中  $S$  为机翼的有效面积;  $\rho$  为流体的密度;  $V$  为拖曳速度;  $C_l = f_1(\alpha)$  和  $C_d = f_2(\alpha)$  分别为升力和阻力系数,随机翼的冲角  $\alpha$  而改变。

在一定的拖曳速度和有效机翼面积下,机翼的升力随冲角  $\alpha$  的增加而增加,其阻力亦随之增加,但增加得比较小。当  $\alpha$  增至临界冲角之后,升力不但不增加,反而急剧下降。由此可见,只要冲角范围不超过临界角,就能调节负升力的大小。

显然,在选择机翼的翼剖面时,希望有大的  $C_l$  值,尽可能小的  $C_d$  值。也就是升阻比  $K = \frac{C_l}{C_d}$  愈大愈好,同时要注意  $C_l = 0$  时的力矩系数  $C_{m_0}$  之值愈小愈好,压力中心位置变动也要尽量小。

机翼升阻比不仅取决于冲角  $\alpha$ ,也取决于机翼的展弦比。对于尖削比  $\eta = 1$  (翼根的弦长与翼尖的弦长之比)长方形的平面的机翼展弦比  $\lambda = \frac{l}{b}$ ,展弦比愈大,升阻比愈高,随着拖曳体机翼翼展  $l$  的增大,机翼结构中的应力也急剧增加,同时使用时也不方便,因此在本装置中机翼的展弦比  $\lambda < 1$ 。

根据上述原则,在考虑了拖曳速度与飞机相比很小的条件下,我们选择的翼剖面为  $NACA 23015$ ,其冲角变化范围为  $-5^\circ - +15^\circ$ 。

对展弦比较小的机翼,不但在机翼本身的断面周围,而且沿翼面发生三维的流动,将由上面的高压区绕过翼端流到下面的低压区。在翼端增加侧向挡板,可以阻止流过翼端的水流。通过风洞试验可以看出,加挡板的翼尖上的绢条没有涡动。因之在翼端处的挡板相当于增加了机翼的有效翼展,同时,翼型的临界冲角  $\alpha_{kp}$  变大。如用  $\lambda < 1$  的标准翼型  $NACA 23015$ ,翼弦  $b = 0.81 \text{ m}$  试验时,未加挡板  $\alpha_{kp} = 16^\circ$ ,而加挡板(长  $0.88 \text{ m}$ ,宽

0.28 m)(见表 1)时  $\alpha_{kp} = 19^\circ$ , 实际上这样也提高了机翼冲角的使用范围<sup>1)</sup>。

拖曳体有无纵向静稳定性, 由纵向力矩  $M_z$  与冲角  $\alpha$  之间的关系  $M_z = f(\alpha)$  来决定。 $M_z$  为通过不旋转拖曳体的横轴  $OZ$  (见图 2 俯视图) 所形成的力矩, 它是机翼、机身、水平尾翼等各力矩的总合。由于升力系数  $C_l$  与  $\alpha$  为线性关系, 所以亦可用纵向力矩系数  $m_z = f(C_l)$  的函数关系表示。为便于计算机翼的力矩, 从拖曳体的纵向力矩中, 把水平尾翼的纵向力矩分离出来, 即把拖曳体的纵向力矩当作无水平尾翼的拖曳体纵向力矩 ( $M_{z_1}$ ) 与水平尾翼的纵向力矩 ( $M_{z_0}$ ) 之和来研究。因此, 拖曳体纵向力矩系数  $m_z$  可用下式表示, 即

$$m_z = \frac{M_z}{qSb_a} = m_{z_1} + m_{z_0} \quad (1.3)$$

式中  $q = \frac{\rho V^2}{2}$  为机翼的流压;  $S$  为机翼的有效面积;  $b_a$  为机翼的平均翼弦, 当尖削比  $\eta = 1$  时翼的翼弦  $b = b_a$ ;  $m_{z_1}$  为无水平尾翼的拖曳体纵向力矩系数;  $m_{z_0}$  为水平尾翼的纵向力矩系数。

机翼力矩是无水平尾翼的拖曳体纵向力矩的主要部分。机身纵向力矩远小于机翼力矩, 通常是在机翼力矩内加以适当修正量计算。因此无水平尾翼拖曳体的纵向力矩系数

$$m_{z_1} = m_{z_1} - (\bar{X}_0 - \bar{X}_w)C_l \quad (1.4)$$

式中  $m_{z_1}$  为与  $C_l$  无关的机身和机翼的纵向力矩系数;  $\bar{X}_0$  为无水平尾翼的拖曳体焦点位置;  $\bar{X}_w$  为重心位置; 无水平尾翼的拖曳体的升力系数  $C_l$  取作机翼升力系数。

**3. 水平尾翼** 主要作用是产生必要的静稳定性和减振力矩, 使拖曳体有充分的纵向稳定性, 并保证各种扰动有足够的阻尼力。水平尾翼的升力与通过拖曳点的横轴 ( $OZ$  轴) 之间产生一个力矩, 此力矩与无水平尾翼拖曳体的力矩相平衡, 使拖曳体在拖曳过程中保持水平平衡状态。水平尾翼所产生的力矩等于水平尾翼的升力  $Y_0$  与力臂  $L_0$  的乘积, 即

$$M_{z_0} = -Y_0 L_0 = -C_{l_0} \cdot S_0 \cdot \frac{\rho V_0^2}{2} \cdot L_0 \quad (1.5)$$

式中  $L_0$  为拖点到水平尾翼压力中心的距离;  $C_{l_0} = f(\alpha_0)$  为水平尾翼的升力系数, 随着冲角  $\alpha_0$  变化而变化;  $V_0$  为流向尾翼的流速;  $S_0$  为尾翼的有效面积;  $\rho$  为流体的密度。

由于机翼和机身引起的尾流方向与拖曳速度的方向不同而形成洗流角  $\varepsilon$ , 以及在尾部区域中因机翼和机身的阻力引起的拖曳速度的阻滞, 减少了拖曳体的稳定性。因此, 在拖曳体的流体动力布局时, 必须设法减少尾部区域流体的偏离倾向和拖曳速度所受到的阻滞对水平尾翼的影响。机翼尾流的洗流角和速度的阻滞, 随尾翼与机翼间的相互位置而不同。为此, 一般把尾翼装得离机翼远些, 同时也要相对高一些。根据实验来看, 从拖点  $O$  即机翼翼弦  $1/4$  处到水平尾翼的压力中心, 其间的距离  $L_0$  不应小于  $1.1b$  (此处  $b$  为翼弦), 水平尾翼的铅直距离不应小于  $b$ , 如图 2 所示。显然, 拖点的位置对拖曳体的稳定性也有一定的影响。

从公式 (1.5) 可以看出, 在其它条件相同时水平尾翼产生的力矩与尾翼面积对拖点  $O$

1) 参加该项实验工作的还有山东海洋学院郑守峰、刘安国等。

产生的静力矩  $S_0 L_0$  成正比。静力矩太小则纵向稳定性不够, 静力矩太大结构上又不允许。因此, 拖曳体的水平尾翼的静力矩数值不应超过一定的限度。根据式 (1.3) 和 (1.5) 中的  $m_{z_0}$  得水平尾翼纵向力矩:

$$M_{z_0} = m_{z_0} q S b_a = -C_{l_0} S_0 q_0 L_0 \quad (1.6)$$

当水平尾翼的升力系数  $C_{l_0} = f(\alpha_0)$  在线性条件下, 则

$$C_{l_0} = \frac{dC_{l_0}}{d\alpha_0} \cdot \alpha_0 \quad (1.7)$$

曲线  $C_{l_0} = f(\alpha_0)$  的斜率  $a_0 = \frac{dC_{l_0}}{d\alpha_0}$  随着尾翼展弦比的增大而增加。

水平尾翼的冲角

$$\alpha_0 = \alpha + \varphi + \varepsilon \quad (1.8)$$

式中  $\alpha$  为机翼的冲角;  $\varphi$  为水平尾翼的安装角, 在本设计中使  $\varphi = 0$ ;  $\varepsilon$  为尾流的洗流角。将式 (1.7) 和式 (1.8) 分别代入 (1.6) 则得出水平尾翼力矩系数:

$$m_{z_0} = \frac{M_{z_0}}{q S b_a} = -\frac{S_0 L_0}{S b_a} K C_{l_0} = -K A \frac{dC_{l_0}}{d\alpha_0} (\alpha + \varphi + \varepsilon) \quad (1.9)$$

式中  $K = \frac{q_0}{q}$  为流体速度阻滞系数,  $q_0, q$  分别为尾翼和机翼的流压;  $S$  为机翼的有效面积;  $b_a$  为机翼的平均翼弦;  $A = \frac{S_0 L_0}{S b_a}$  为水平尾翼静力矩系数。

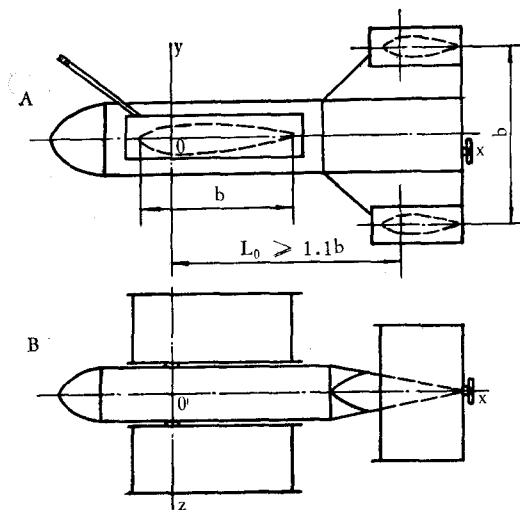


图 2 A 侧视图; B 俯视图。

据实验数据  $A = 1.6-1.9$ , 即水平尾翼的静力矩  $S_0 \cdot L_0$  与机翼的有效面积和机翼的平均翼弦乘积的比值约在 1.6—1.9 之内, 在此条件下, 拖曳体可以得到满意的纵向稳定性 (见表 1)。

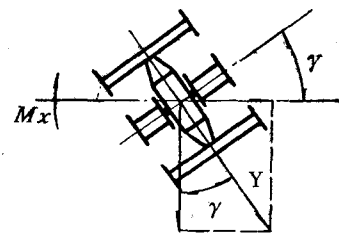


图 3

**4. 定倾中心的稳定性** 定倾中心稳定性的特性取决于重心和浮心重合与否。本文介绍的拖曳体在水中, 重心在浮心的下面, 但重量和浮力不相等, 而且机尾上倾, 不处于水平平衡状态。如表 1 中 IV 号拖曳体空气中重量  $\approx 190$  公斤, 在水中重量 40 公斤, 即重量大于浮力, 此时 150 公斤的重量与浮力 150 公斤耦合产生定倾中心稳定性的条件, 剩余的 40 公斤的重量与定倾中心稳定性的条件同时存在, 而使拖曳体下沉。为了使拖曳体改变机尾上倾的初始状态, 在拖曳过程中, 纵向平衡主要依靠尾翼产生向下的流体动力力矩,

使拖曳体消除机翼上倾的初始条件而处于水平平衡状态。此时,重心处于新的位置并与浮心都落在共同法线上,在这种新的状态下,拖曳体仍有上述定倾中心的稳定性。

设水平拖曳的拖曳体由于某种偶然原因突然倾斜角度为  $\nu$  (见图 3), 此时, 负升力在水平面上所产生的分力  $Y \sin \nu$  使拖曳体向左侧滑。由于侧滑又必然在机身和垂直尾翼上产生作用力。一种稳定的拖曳体, 这些力的合力会使拖曳体在新的流向上固定下来, 而使侧滑趋于终止。同时, 因拖曳体具有定倾中心的稳定性, 此时由于浮力和重力将不作用在一条垂直线上, 它们形成了力偶, 并且具有力臂。力偶矩  $M_x$  可使拖曳体恢复成初始状态。

**5. 拖曳系统** 包括拖曳体和拖缆。本文仅初步讨论拖曳体的稳定性并简述拖缆有关的问题。

**拖曳体稳定性** 拖曳体的纵向稳定性是按  $m_z = f(C_l)$  的关系来评定。根据 (1.4) 和 (1.9) 中  $m_{z_1}$  和  $m_{z_0}$  可以计算拖曳体的纵向力矩系数:

$$m_z = m_{z_1} + m_{z_0} = m_{z_1} - (\bar{X}_0 - \bar{X}_w)C_l - K A a_0 (\alpha + \varphi + \varepsilon). \quad (1.10)$$

当曲线  $C_l = f(\alpha)$  在线性范围内时, 式中冲角  $\alpha$  可用  $C_l$  表示, 即

$$\alpha = \alpha'_0 + \frac{\partial \alpha}{\partial C_l} C_l = \alpha'_0 + \frac{C_l}{a} \quad (1.11)$$

式中  $\alpha'_0$  为机翼升力系数  $C_l = 0$  时的冲角;  $a = \frac{\partial C_l}{\partial \alpha}$  值是曲线  $C_l = f(\alpha)$  的斜率, 随着机翼展弦比的增大而增加。

尾流处的洗流角  $\varepsilon$  是机翼和机身洗流角  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  之和, 即

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (1.12)$$

或

$$\varepsilon = D C_l + \varepsilon_2 \quad (1.13)$$

式中  $D = \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial C_l}$

将式 (1.11) 和 (1.13) 代入式 (1.10) 则得拖曳体的纵向力矩系数:

$$m_z = m_{z_1} + m_{z_0} = m_{z_1} - (\bar{X}_0 - \bar{X}_w)C_l - K A a_0 \left( \alpha'_0 + \frac{C_l}{a} + \varphi + D C_l + \varepsilon_2 \right) \quad (1.14)$$

或

$$m_z = m_{z_\Sigma} - (\bar{X}_0 - \bar{X}_w)C_l - K A a_0 \left( \frac{1}{a} + D \right) C_l \quad (1.15)$$

式中  $m_{z_\Sigma}$  为  $m_z$  与  $C_l$  无关的系数部分, 即

$$m_{z_\Sigma} = m_{z_1} - K A a_0 (\alpha'_0 + \varphi + \varepsilon_2) \quad (1.16)$$

为了确定哪些因素决定拖曳体的纵向稳定性, 可利用式 (1.15) 求  $m_z$  对  $C_l$  的导数, 在一级近似值中, 假定阻滞系数  $K$  与  $C_l$  无关, 则

$$\frac{\partial m_z}{\partial C_l} = -(\bar{X}_0 - \bar{X}_w) - K A a_0 \left( \frac{1}{a} + D \right) \quad (1.17)$$

由此可见, 拖曳体纵向稳定性与无水平尾翼的拖曳体的焦点位置 ( $\bar{X}_0$ )、重心位置 ( $\bar{X}_w$ )、机翼和水平尾翼的展弦比 ( $a$  和  $a_0$ )、尾翼上受机翼洗流 ( $D = \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial C_l}$ ) 有关。水平尾

翼静力矩系数  $A = \frac{S_0 L_0}{S b_a}$  的量值对拖曳体纵向稳定性有重要影响。

拖曳体旋转时对纵向力矩也有一定的影响。在纵向扰动运动中能使拖曳体形成某一个角速度  $\omega_z$  而旋转。由于旋转运动而产生的旋转阻力矩称为减振力矩。其方向永远与旋转方向相反, 而且还有力地消除旋转的角速度, 使拖曳体在拖曳过程中具有良好的纵向稳定性。拖曳体减振力矩是水平尾翼、机翼和机身等减振力矩之和, 其中最大的减振力矩由距旋转轴最远的水平尾翼产生。现仅就水平尾翼减振力矩系数<sup>[1]</sup>作一讨论, 即

$$m_{z_0} \omega_z = -a_0 \frac{S_0 L_0^2}{S b_a^2} \cdot \sqrt{K} \cdot \bar{\omega}_z \quad (1.18)$$

式中  $\bar{\omega}_z = \frac{\omega_z \cdot b_a}{V}$  为无因次的角速度。

由式 (1.18) 可以看出, 水平尾翼的减振力矩系数与无因次的角速度成正比。它受水平尾翼面积  $S_0$  与机翼面积  $S$  的比值及无因次力臂  $L_0/b_a$  的影响很大, 也就说减振力矩与臂长  $L_0$  的平方成正比。

综上所述, 可以看出拖曳体的重心位置改变时, 其纵向稳定性有很大的影响; 水平尾翼面积的改变, 除了对纵向稳定性的影响外, 还能促使拖曳体减振力矩的改变; 增大力臂  $L_0$  就会增大减振力矩及静稳定性。

为保证拖曳体有充分的侧向稳定性, “横向稳定力矩  $M_x$ ” 与 “航向稳定力矩  $M_y$ ” 之间应有一定的比例关系<sup>[1]</sup>。例如, 航向稳定性过大, 因倾斜产生的侧滑消失得很快, 拖曳体也来不及消除倾斜, 使倾斜继续增大, 偏离本身的原来方向, 此时称为“螺旋不稳定”。如果“横向稳定性”过大, 倾斜不但不会很快的恢复初始状态, 反而会出现向反方向的倾斜, 产生反方向的侧滑。这种现象会重复进行下去, 使拖曳体既有侧倾又有左右偏航运动, 此时称“摇摆不稳定”。在表 1 中的拖曳体 (I, II) 均发生过上述两种现象。

**拖曳用电缆** 拖曳系统的拖曳力, 也就是拖缆上的张力, 是与拖曳体的下沉力、重量、浮力、惯性力、拖曳点运动及拖缆阻力有关的, 而且随局部拖缆角的变化而变化。实验表明, 拖曳过程中拖缆上能产生超负载力的脉动张力。此力发生在拖缆松弛后重新成为紧张状态的过渡瞬间。

一般要求拖曳系统的阻力小, 而下沉力必须大。由于圆截面拖缆的阻力大, 拖曳体的拖速和下潜深度就受到限制。为了克服拖曳电缆阻力, 近代发展了各种类型的拖曳电缆导流罩。一般绞合裸缆法向阻力系数为 1.20, 而导流罩法向阻力系数为 0.45—0.15。由此可见, 将拖曳电缆截面改成对称机翼形状导流罩就可以减少阻力 3—6 倍。采用流线型拖缆, 可以提高拖曳速度, 其主要目的是为了增加下沉深度。

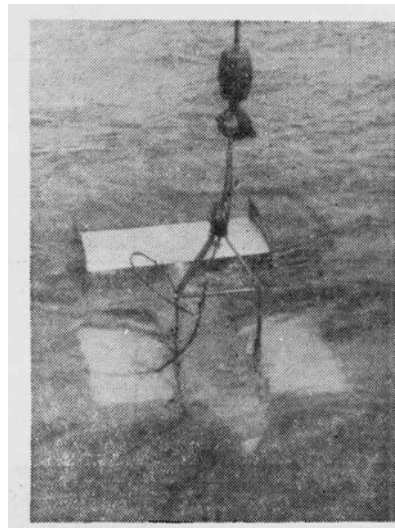


图 4

表 1 几种拖曳体的主要参数与实验结果比较

拖曳体种类 编 号		海上实验模型	海上实验样机		试用样机	加拿大
		I	II	III	IV	Batfish Story
几何 尺寸	体长 $L$ (米)	2.060	1.95	1.95	1.868	1.30
	宽 $B$ (米)	1.078	1.07	1.07	1.058	0.70
	高 $H$ (米)	0.430	0.885	1.020	1.020	0.94
	水平尾翼间距 $h$ (米)	单尾翼	单尾翼	0.80	0.80	0.565*
	拖点与水平尾翼压力中心距 $L_0$ (米)	0.78	0.90	0.90	1.00	0.81*
机 翼	翼展 $l$ (米)	0.70 ( $2 \times 0.35$ )	0.69 ( $2 \times 0.345$ )	0.69 ( $2 \times 0.345$ )	0.70 ( $2 \times 0.35$ )	0.50* ( $2 \times 0.25$ )
	翼弦 $b$ (米)	0.81	0.81	0.81	0.81	0.51*
	有效面积 $S$ (米 <sup>2</sup> )	0.567	0.558	0.558	0.567	0.255*
	挡板尺寸	未加挡板	$0.87 \times 0.24$	$0.87 \times 0.24$	$0.88 \times 0.28$	$0.57 \times 0.10$
	冲角变化范围(度)	$-4^\circ - +11^\circ$	$-4^\circ - +11^\circ$	$-4^\circ - +11^\circ$	$-5^\circ - +15^\circ$	
水平 尾翼	翼展 $l_0$ (米)	0.50	0.90	0.90	0.825	0.51*
	翼弦 $b_0$ (米)	0.45	0.47	0.47	0.47	0.30*
	有效面积 $S_0$ (米 <sup>2</sup> )	0.225	0.425	0.85 ( $2 \times 0.425$ )	0.776 ( $2 \times 0.388$ )	0.306* ( $2 \times 0.153$ )
	挡板尺寸	$0.47 \times 0.43$	$0.50 \times 0.20$	$0.50 \times 0.20$	$0.50 \times 0.22$	$0.33 \times 0.10^*$
水平尾翼静力矩系数 $A$		0.38	0.85	1.69	1.69	1.90
实 验 结 果		偏航, 翻滚, 运动状态不正常。产生“螺旋和摇摆不稳定”。	俯仰, 纵向稳定性不好, 不下潜, 运动状态不正常。产生“螺旋和摇摆不稳定”。	纵轴对称性不好, 产生侧倾, 经调整后侧向稳定性和纵向稳定性良好。	纵向稳定性和侧向稳定性好, 运动状态正常。	运动状态正常。

\* 根据 Batfish story, Hermes Electronics Limited in Canada, 有关数据估算, 未见详细资料仅供参考。

综上所述可以看出, 流体动力布局合理, 拖曳体既有纵向稳定性又有侧向稳定性。本文介绍的拖曳体 (表 1:IV) 经海上多次试验证明其稳定性是良好的, 拖曳状态正常, 如

图 4 所示。但拖曳体的动力布局是一个非常复杂的工作, 对其作用过程的解答也是复杂的。因此, 前面的论述仅是从我们实践的经验中提出的一些概括性的意见。这对设计拖曳体的动力布局将会是有帮助的。

## 二、调整静力平衡和动力平衡

拖曳体在拖曳过程中, 流体动力中心位置如有移动就会引起拖曳体侧倾。当拖曳体有足够的稳定性时, 若发生倾斜可以自动恢复正常的运动状态。在侧向力矩超过一定限度时, 也能引起拖曳体侧倾。为此, 拖曳体必须有附加的静力平衡装置和微调动力平衡装置。

一般使拖曳体具有浮力和内装可调压载物以求获得准确的静力平衡并改进定倾中心的稳定性<sup>[5]</sup>。

目前, 微调动力平衡的方法有襟翼补偿法, 调整拖曳点, 垂直翼微调舵, 调整机翼的有效面积和安装角等。1968 年以来, 我们对拖曳体的稳定性及其有关补偿装置进行了研究。微调动力平衡装置产生侧向补偿力矩的必要条件是: 量值能随机翼的冲角和速度的变化而增减, 其关系应与机翼负升力变化一致, 否则即使在某一特定条件下运动状态正常, 而在其它的情况下稳定性降低。

机翼有效面积的改变, 调整两侧机翼安装角, 是满足动力平衡补偿力矩的必要条件, 并且能产生足够大的力矩, 其它方法都有一定的局限性。调整机翼有效面积和安装角补偿方法的基本理论, 首先由赫崇本教授提出。本文将重点讨论由于两侧机翼初始条件不同而产生不同的侧向力矩来补偿流体动力中心位置误差引起的拖曳体侧倾。

由 (1.1) 式知机翼的负升力:

$$Y_1 = C_l \cdot S \cdot \frac{\rho V^2}{2},$$

当拖曳体机翼两侧条件不同时, 其负升力的全增量  $\Delta Y_1$  等于各参数变化所引起的增量之和, 即

$$\Delta Y_1 = \frac{\partial Y_1}{\partial C_l} \Delta C_l + \frac{\partial Y_1}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial Y_1}{\partial V} \Delta V, \quad (2.1)$$

所以

$$\Delta Y_1 = \frac{S \rho V^2}{2} \Delta C_l + \frac{C_l \rho V^2}{2} \Delta S + C_l S \rho V \Delta V. \quad (2.2)$$

当  $C_l = f(\alpha)$  在直线范围内, 则升力系数的变化  $\Delta C_l$  为

$$\Delta C_l = \left( \frac{dC_l}{d\alpha} \right) \Delta \alpha. \quad (2.3)$$

设拖曳体速度  $V = \text{常数}$ , 将式 (2.3) 值代入式 (2.2) 则得

$$\Delta Y_1 = \frac{S \rho V^2}{2} \left( \frac{dC_l}{d\alpha} \right) \Delta \alpha + \frac{C_l \cdot \rho V^2}{2} \Delta S, \quad (2.4)$$

式中  $S$  为两侧机翼的有效面积之和;  $\Delta S$  为两侧机翼有效面积的误差;  $\alpha$  为机翼冲角, 其工作范围  $-5^\circ - +15^\circ$  之间变化;  $\Delta \alpha$  为两侧机翼冲角的误差, 亦即两侧机翼安装角的误



差;  $C_l$  为机翼的升力系数;  $\frac{dC_l}{d\alpha}$  为机翼  $C_l = f(\alpha)$  曲线的斜率;  $\rho$  为流体的密度;  $V$  为拖曳速度。

由式 (2.4) 可以看出, 调整机翼两侧的安装角  $\Delta\alpha$  和有效面积  $\Delta S$ , 可以改变侧向力, 用它们能补偿流体动力误差而引起的拖曳体倾斜。

若调整机翼的有效面积  $\Delta S$ , 使安装角  $\Delta\alpha = 0$  时, 则式 (2.4) 可写成下式:

$$\Delta Y_1 = C_l \cdot \Delta S \cdot \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.5)$$

如果拖曳体纵轴对称性差, 实验时就会产生侧倾, 增加有效面积  $\Delta S$  补偿以后, 能使拖曳体达到动态平衡。

改变机翼有效面积后, 外观上即不对称, 调整也不太方便, 因此在试用样机时必须使  $\Delta S = 0$ , 采用调整安装角  $\Delta\alpha$  的办法, 则式 (2.4) 又可写成

$$\Delta Y_1 = \left( \frac{dC_l}{d\alpha} \right) \Delta\alpha \cdot S \cdot \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.6)$$

如试用样机 IV(见表 1) 翼型为 *NACA 23015*, 拖曳体纵向稳定性和侧向稳定性均良好, 拖动状态正常。为了验证调整安装角的补偿作用, 需将机翼一侧的安装角从  $11^\circ$  改变到  $14^\circ$ , 即  $\Delta\alpha = 3^\circ$ 、 $\Delta C_l = 0.2$  而一侧有效面积  $S/2 = 0.283\text{m}^2$ , 当拖曳速度  $V = 7.5$  节时, 才使拖曳体倾斜。根据式 (2.6) 计算, 此时侧向负升力  $\Delta Y_1 = 41.4\text{kg}$ , 其侧向力矩为  $14.2\text{kgm}$ 。

### 三、结 语

本文介绍了通过海上实验及理论分析研制的拖曳体。同时对拖曳体的流体动力布局及其微调装置进行了阐述。该拖曳体经过多次海上实验结果表明: 在拖速 6—10 节时, 稳定性良好, 下潜力大, 阻力较小, 可以控制机翼冲角的大小来增减下潜力, 改变下潜深度, 使其行驶于“锯齿形”的剖面上, 随深度的变化自动记录温、盐度。如拖速 8.5 节, 放缆 200 米, 拖曳体的下潜深度即可达 98 米。为了解决在走航过程中, 使测量仪器顺利地潜到预定深度, 采用近代新发展的水下拖曳体是很受欢迎的。

为了使拖曳体在一定的拖曳速度时具有足够的稳定性, 其外壳形状沿纵轴应是对称的, 机翼要求越过其表面的流体尽量保证为二维空间运动, 水平尾翼应具有必要的静稳定性和减振力矩。同时拖曳体应具有“定倾中心”的特性, 这样能增进侧向稳定性。

根据赫崇本教授提出的微调机翼安装角补偿动力误差的原理, 对可调机翼安装角装置进行了研究。经实验证明, 这种装置补偿拖曳体流体动力中心位置误差的方法是可取的。

拖曳体的稳定性是对静态条件进行考虑的, 但根据实践表明其水平尾翼的静力矩系数  $A = 1.60—1.90$  时, 可以保证动态稳定性。关于静稳定性和动稳定性之间的关系, 国外有很多学者正在研究<sup>[3]</sup>, 目前还不很清楚, 有待于从水池和海上试验中进行比较才能提出这个问题的一般规律。

随着近代海洋科学的发展, 拖曳体的使用范围愈益广泛, 从海表面下沉到海底之间均可完成各种调查任务。目前的要求是在拖曳体装置中携带温、盐、深传感器, 精确而连续

地测定“温跃层深度”,这在研究内波变化规律是一个很大的进步。当然还可以作其它的用途,如携带旁视声纳、激光 $\alpha$ 计数器、质子磁强计、荧光计、构造剖面探测装置、pH溶解氧传感器以及浮游生物取样器等<sup>[2,5]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] 列别杰夫, A. A., И. B., 斯特拉日娃, Г. И. 沙哈洛夫, 1958. 飞机空气力学。国防工业出版社, 第 472 页。
- [2] Brainard II, E. C., 1976. Towed Underwater Vehicle Applications from 1960 through 1975. Off-shore Technology Conference. Paper Number OTC 2575: 539—545.
- [3] Eames, M. C., 1967. Experimental Bodies for High-Speed Underwater Towing Research. *Canada Aeronautics and Space Journal*. 13(5): 205—208.
- [4] Peter M. Ward-Whate, 1976. An Active Towed Body System Development. Oceans '76, MTS-IEEE, Washington Section, 19C-1-19C-4.
- [5] Patrick Burr, 1969. An Instrumented Underwater Towed Vehicle. Oceanology International 69 Conference Technical Sessions Day 1: 4—23.
- [6] Richard A. Ceyer, 1977. Submersibles and Their Use in Oceanography and Ocean Engineering. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, pp. 383.
- [7] Журавлев, В. Ф., В. Т. Пака, и Г. В. Пузырев, 1969. Углубитель для буксируемых океанологических приборов. *Океанология*. 15 (1): 175—178.

## PRELIMINARY ACQUISITION OF UNDERWATER TOWED VEHICLE

Song Wenyang Chen Ronggui and He Chongben (Ho Chung-pen)

(Shandong College of Oceanology)

### ABSTRACT

The mechanism of the underwater towed vehicle is elucidated. The control system and the design features about stability of underwater towed systems are discussed. Some of the underwater towed bodies are also reviewed incidentally.

The towed body consists of the following parts: the main wing-NACA23015, the airfoil—NACA65<sub>1</sub>—012 as symmetrizable horizontal tail and the modified airfoil—NACA65<sub>4</sub>—021 as vertical tail shown in Figure 1.

The dimensions are 1.9 meters in length, 1.04 m wide, 1.0 m high. Its total weight is 190 kg in air and 40 kg in water. The effective area of main wing is 0.56 square metres.

A command signal from a shipboard controlling device monitors the submerged vehicle maintained at constant depth or running a “Sawtooth” profile. The towing depth is controlled by adjusting incident angle of the wing and angular speed of impeller mounted on the towed vehicle. The vehicle will follow the ship undulating with such arrangement.

The stability of the vehicle can be calculated only for static case. If the coeffi-

cient of static moment of the horizontal tail  $A = 1.6 - 1.9$ , it will be sufficient to ensure dynamic stability. Therefore a more detail examination of dynamic lateral stability should be made during the preliminary trails.

The towed body described in this paper provides an accurate metacentric feature and so improves the lateral stability. An adjustable device for the established angle mounted on the main wing compensates the small error about the position of hydrodynamic center.

On the suggestion from Professor He Chongben we have been developing the compensating devices and improving the stability of the vehicle since 1968. The first trial on the sea was carried out in mid-April, 1972 and a series of trials were made with double-armoured waterproof towing cable from 1972 to 1979. The results of the experiment may confirm the theoretical analysis of dynamic stability and it will be fairly easy to determine the limits of allowable error in experimenting the towed vehicle and its subsequent production.

The towed body is a very useful tool for collecting data on a moving ship. At present the towed vehicle carries sensors to measure temperature, depth and salinity only. It can be used for collecting other oceanographic data carrying a side scan sonar, proton magnetometer, seismic profilometer, dissolved oxygen sensor, plankton counter etc.

Its specific features are: high depressing force in water, light weight in air, good stability, speeds from 6 to 10 knots. The towing depth ranges from the surface to a depth of 98 meters.