

shuǐ yì
水翼艇译文集

第 4 集

舰艇资料编辑室

一九七九年六月

前

言

水翼艇是一种航速高、适航性好的新型快艇，尤以具有控制系统的全浸式水翼艇的性能最为优异。与同等排水量的滑行艇、气垫艇相比，水翼艇不仅在风浪中失速小，保证艇在汹涌中能高速航行；而且艇的纵摇、横摇、升沉运动最小，为武备系统提供了必要的稳定平台，从而提高了武器的命中率和艇的全天候作战能力。为此，美国和西欧等国近年来一直致力于全浸式水翼艇在军事上的应用。至今，水翼猎潜艇、水翼炮艇和水翼导弹艇已相继投入现役。

全浸式水翼艇的水翼系统本身并无自稳性，必须借助控制系统，根据艇的运动和波浪的起伏，自动调节水翼攻角或襟翼角，以改变水翼的升力，使艇获得良好的稳性和适航性。因此，全浸式水翼艇性能的优劣，不仅取决于水翼系统的设计，而且与控制系统的设计亦是密切相关的。六十年代以来，随着空间技术的发展和计算机的广泛应用，促进了控制理论的进一步发展，出现了现代控制理论，并已日趋成熟，目前已在空间技术、惯性导航、原子能、化工等领域推广使用。国外也发表了一系列关于最优设计、现代控制理论应用于水翼艇控制系统设计的技术报告，并对水翼艇数字式控制系统的兴趣日益俱增。

本译文集着重介绍国外水翼艇控制系统的设计和试验研究，共收集了七篇文章。其中，“水翼艇自动控制系统的发展”一文，概括地介绍了水翼艇控制系统发展的过程，从机械式的攻角控制演变到现今的电子自动控制系统，并指出了将来最有前途的系统是基于数字计算机的控制系统。

“加拿大水翼方案的水动力和模拟”与“AG(EH)水翼艇艏翼升力的最佳控制，卷Ⅰ：水动力”两文，分别以加拿大“勃拉斯·特·奥尔”号和美国“普朗维尤”号水翼猎潜艇为对象，给出了描绘艇的性能和控制系统设计所必须的水翼系统水动力的估算和有关试验资料。“AG(EH)水翼艇艏翼升力的最佳控制，卷Ⅱ：控制”与“水翼艇最小控制功率设计”两文在研究“普朗维尤”号艇的控制功率和加速度组成的性能指标的基础上，探讨了水翼艇控制系统的最优设计。“随机最佳控制在水翼艇问题中的应用”一文，描述了由线性运动方程和性能指标所描绘的随机系统最优控制问题的解决办法，然后应用这个原理，研究了带自控制的 PHM 水翼艇 1/20 缩尺动力模型的控制失灵模型及其控制失灵时艇的性能的新型试验设备，其中包括 PHM 水翼艇 1/20 缩尺模型及其仪器装置。文中列有试验研究结果，并指出了试验设备的进一步应用和发展方向。这些文章具有一定的实用价值，可供有关科技人员科研时参考。

本译文集在编译过程中，曾得汪硕、李百齐、李永其、郭值学等同志的大力配合和热情指导，在此深表谢意。

由于编者专业和外文水平有限，译文集定有不少错误和缺点，欢迎读者批评指教。

编 者

一九七九年六月

目 录

水翼艇自动控制系统的发展	(1)
简介	(1)
引言和背景	(1)
机械控制系统	(2)
人控系统	(4)
气动控制系统	(5)
电子控制系统	(6)
自控系统的进一步发展	(9)
参考文献	(16)
加拿大水翼方案的水动力和模拟	(17)
提要	(17)
1. 引言	(17)
2. 水翼系统的水动力	(17)
3. 模拟	(20)
4. “勃拉斯·特·奥尔”号翼航适航性试验	(23)
5. 结论	(25)
附录——稳定导数	(26)
参考文献	(35)
AG(EH)水翼艇艏翼升力的最佳控制 卷 I: 水动力	(36)
提要	(36)
序言	(36)
结论	(36)
符号	(37)
1. 参考艇的外形	(41)
2. 名称	(42)
3. 总的翼升力、俯仰力矩和襟翼铰链力矩	(42)
4. 定常特性	(44)
4.1 升力曲线斜率	(44)
4.2 剩余升力	(46)
4.3 翼的俯仰力矩斜率	(47)
4.4 翼的剩余俯仰力矩	(49)

4.5 与实艇资料的比较	(51)
4.6 襟翼铰链力矩	(51)
4.7 由襟翼引起的翼俯仰力矩	(52)
5. 不定常载荷特性	(53)
5.1 琼斯翼运动和阵风函数	(53)
5.2 升沉升力	(54)
5.3 升沉力矩	(55)
5.4 俯仰升力	(57)
5.5 俯仰力矩	(58)
5.6 襟翼升力	(59)
5.7 襟翼铰链力矩	(60)
5.8 由襟翼运动引起的翼铰链力矩	(61)
5.9 由翼升沉引起的襟翼铰链力矩	(61)
5.10 由翼俯仰运动引起的襟翼铰链力矩	(62)
5.11 轨圆运动升力	(62)
5.12 由轨圆运动引起的翼力矩	(65)
5.13 由轨圆运动引起的襟翼铰链力矩	(69)
5.14 摘要	(70)
6. 空泡特性	(70)
6.1 安装角升力空泡	(70)
6.2 襟翼升力空泡	(72)
6.3 襟翼操纵方式	(76)
6.4 轨圆运动影响	(76)
表、图	(77)
附录 A: 艇体升力气动力中心	(128)
附录 B: AG(EH)艇翼数据图	(128)
附录 C: 襟翼铰链力矩导数评定	(128)
附录 D: Hystad 模型空泡特性分析	(128)
附录 E: AG(EH)拖曳水池数据分析	(128)
参考文献	(128)
AG(EH)水翼艇艏翼升力的最佳控制 卷 II: 控制	(130)
提要	(130)
符号表	(130)
1. 引言	(131)
2. 摘要	(131)
3. 结论	(131)
4. 今后的工作	(132)
5. 系统模型	(132)

5.1 概述	(132)
5.2 海情	(132)
5.3 非定常水动力	(133)
5.4 功率控制	(135)
5.5 装置	(136)
5.6 最佳化	(138)
6. 系统趋势	(139)
6.1 增益趋势	(140)
6.2 开环响应	(141)
6.3 以航向为函数的闭环性能	(141)
6.4 速度响应	(141)
6.5 高度增益的变化	(141)
7. 水翼出水和艇体碰水	(141)
8. 控制器评述	(143)
表、图	(143)
附录 A: 液压功率的计算	(162)
参考文献	(163)
水翼艇最小控制功率设计	(165)
提要	(165)
1. 引言	(165)
2. 系统模型	(166)
2.1 通用的纵摇升沉动力学模型	(166)
2.2 忽略纵摇的简化动力学模型	(169)
2.3 功率消耗	(170)
3. 不规则海浪	(171)
3.1 升力谱	(171)
3.2 多项式近似	(173)
4. 最佳控制系统	(174)
4.1 最佳方法	(174)
4.2 攻角控制系统	(175)
4.3 襟翼控制系统(固定翼)	(177)
4.4 前缘调整片(可旋翼)	(179)
4.5 尾缘调整片(可旋翼)	(179)
5. 航向变化	(185)
5.1 升力谱随航向的变化	(185)
5.2 艇的响应	(190)
6. 纵摇-升沉联合控制	(191)
6.1 运动方程	(191)

6.2 由上洗产生的纵摇力矩	(192)
6.3 介	(193)
6.4 价值函数	(193)
6.5 最佳控制系统	(194)
7. 海情变化的影响	(196)
7.1 升力谱	(196)
7.2 控制系统效果	(196)
8. 结论	(196)
附录 A: 水动力方程	(196)
A.1 水动力的一般方程	(197)
A.2 小调整片近似	(200)
A.3 前缘调整片	(200)
附录 B: 详细的纵摇回路考虑	(200)
附录 C: 由拱度产生的襟翼固定力矩	(200)
参考文献	(201)
随机最佳控制在水翼艇问题中的应用	(203)
摘要	(203)
1. 前言	(203)
2. 随机过程的描述	(203)
3. 最佳控制问题的阐述	(204)
4. 应用于单独翼问题	(208)
非二次浸深项的影响	(209)
控制补偿函数的影响	(210)
5. 应用于水翼艇	(211)
6. 结论	(213)
附录 水翼艇的运动方程	(214)
术语表	(214)
参考文献	(215)
带自控的 PHM 水翼艇 1/20 缩尺动力模型的	
控制失灵模拟	(216)
内容提要	(216)
引言	(216)
模型装置的描述	(217)
结果的讨论	(218)
结论	(221)
建议	(221)
附录 座标变换和运动学关系的推导	(234)
参考文献	(235)

水翼艇自动控制系统的发展

R.J. 约翰斯顿 W.C. 欧耐尔

简 介

现代水翼艇是人类超脱阿基米德原理, 解决海上运输问题信念的产物。发展水翼的飞行和稳定性能的企图是人类智慧和科学工程技巧相结合的惊人的实例。本文是献给那些正致力于使水翼艇成为实用海军舰艇和运输系统的人们。

水翼艇的发展是两个学派努力的结果。一个学派根据表面割划原理, 用变浸湿面积的方法来使水翼艇稳定, 另一学派研究各种方法用来控制全浸式水翼的攻角和升力。从改变艇的纵倾以控制水翼攻角开始, 经过用独特的改进后的机械手段控制攻角, 直到今天较复杂的电子自动控制系统是后一学派的进展过程, 这是本文所希望介绍的。象这样的文章如不讨论翼面正确控制的计算方法是不能算完整的。最后, 本文将介绍基于数字计算技术的最有希望的未来控制系统。

引言和背景

应用水翼的主要原因当然是想把艇体升出水面, 克服艇体兴波阻力和摩擦阻力对高速的限制。当艇体升出水面而艇的重量全部由水翼支承时, 我们不能再依靠艇体提供保持艇的姿态和稳定性所需的恢复力。因此稳定和控制的力必须由水翼系统来提供。这些力可以通过升力面的主动控制或具有固有稳性的水翼配置的被动控制来获得。

为了回顾水翼控制的发展史, 了解一下提供水翼稳定和控制的两个基本概念之间根本区别是很重要的。可能最好是先讨论水翼艇两种基本水翼系统。第一种是割划式水翼系统, 升力面穿过气水界面, 如图 1 所示。这种系统是固有稳定的, 水翼提供的升力直接随水翼浸深而变, 就是说, 如艇的吃水变深了, 就有较多的升力在起作用, 因而升力也就增大, 产生使艇回到原来的平衡位置的趋势。这个现象叫做“面积自稳性”。同样, 当艇横倾, 外侧水翼升力增加而内侧水翼升力减少, 产生了使艇回到原来位置的恢复力矩。稳定度或刚度可以通过变化割划处的标定角度来改变。可以看出, 割划式水翼系统是固有稳定的, 而与水表面紧密关联的。固有稳定度直接正比于和海面的关联程度。

另一种基本配置是全浸式水翼系统, 升力面完全在气水界面下, 如图 2 所示。这样, 水翼系统实际上和水面的相对位置无关, 需要一些控制系统才能保持一定的飞高。也就是说, 对全浸水翼系统, 水翼和水面基本上是不关联的。人们不禁要问: 既然全浸式水翼需要复杂的控制系统, 为什么还要选择它呢? 理由是, 有了全浸式水翼提供的升力的自动控制, 水翼系统就可以与水面不相关联, 因而在高海况下能平稳地工作并具有较强的适应性。

同样, 在回顾水翼控制系统发展史之前, 弄清组成控制系统的几个部门是适宜的。一个动升力运载工具(如水翼艇)的控制系统可分为五个职能部门, 即: 传感器、计算机、作动系统、执行机构和艇本身。艇和控制系统对两种输入有反应, 即: 指令输入和外部干扰输入(如海浪干扰)。图 3 给出了典型方块图。

在介绍了这些简要背景之后,我们将评论水翼控制系统的进程,这些评论都反映了这个领域里的先驱者的智慧,他们是在没有什么参照的情况下工作的。

机械控制系统

回顾自控系统的历史,首先是介绍早期先驱者的创始和发展时的概况。作者可能在介绍时漏掉或忽略了一些对水翼控制系统有贡献的人士,如果在下文中不能正确地反映发展的历史,请归咎于作者的无知,决不是作者有意忽略。

下面我们来介绍水翼之父巴伦·冯·斯契特尔(Baron Von Schertel)的情况。诚然,他是现代水翼之父,在他之前还有一些先行者,如1905年的弗兰尼尼(Forlanini),1907年的克鲁可(Crococo),和1919年的亚历山大·格雷汉姆·贝尔(Alexander Graham Bell)。所有这三个探索者基本上研究了不同的割划式水翼系统。我们也知道巴伦·冯·斯契特尔的成功也是在割划式水翼方面。但是,他的早期工作是有关全浸式水翼的。引用他自己的话(参考文献1):“为了尽可能地脱离波浪表面的干扰影响,我决定搞全浸式水翼。”可见,巴伦·冯·斯契特尔早期的工作志在发挥水翼接近水表面时升力减少的表面效应所产生浸深稳定性的作用。实际上,巴伦曾经在五条试验艇上进行过这方面研究。经过一些不称心的试验,他开始深信只有采用自动升力控制和浸深传感器才是保证全浸水翼稳定性的唯一有希望的途径。他于是试验了几种机械浸深传感器形式。这些新设想在静水中工作得很好,但在小风浪中似乎不特别好。从巴伦的历史可以看出,他化了八年在六条试验艇上进行了试验。后来,他变得不耐烦了,为了较快地得到解答,于是便从全浸水翼原理转向割划式水翼系统,今天,在这方面的的工作是人们所熟知的了。

另一种熟知的机械控制形式是M. A. 克雷格(Craig)生先发展的格伦贝格(Grunberg)系统。从三十年代中期开始,他的工作主要在法国进行。现在,克雷格先生生活在美国的新泽西。格伦贝格系统是用一个全浸水翼放在后面作为主要升力面。前面,用两个称为前稳定器的滑板,前稳定器基本上在水面上。这些滑板不仅提供前面的升力和某些横向稳定性,而且是迎面来波传感器。当艇产生纵倾,它会改变攻角,因而控制了主水翼。后面全浸水翼同样可以应用浸深减少升力也减少的原理。

为了进一步说明格伦贝格系统,我们引用克雷格本人的注释,系统设计的目的是通过工作条件(变速、重量、重心纵向横行)变化时攻角的固有变化来实现升力控制和相关的静纵稳定性。绕横轴振荡的阻尼是非常满意的,因此,这个系统也是纵向动稳定的。

另一方面,格伦贝格系统与割划式水翼不同,不必保证横向稳定性,而割划式水翼则用同一方法来实现横向稳定性和升力控制。当然,实用中,横向稳定性是完全必须的,在这个系统的定义中并不包含横向增稳和获得横向稳定性的方法,由于横向增稳和升力控制这两种作用的相互独立,我们可以一点不受这个概念的限制,使这种配置从某些约束中解脱出来,设计得更富有适应性。

在横向稳定性的最初试验中,选择了分开的办法,前稳定器一分为二,一个放在左舷,一个放在右舷,距离足够大用以保证横稳性。这个想法作过较充分的试验并应用在一条专业商用艇上,见图4。这种思想也曾用于改善水上飞机波浪上降落性能。这个早期的努力指明了不少希望,这些希望在后来的电子控制系统中得到实现。

成功地应用全浸式水翼的早期探索者之一是知名的英国人克历斯多弗·克霍(Christopher

Hook)先生。他的开发工作可追溯到第二次世界大战以前,他一直给水翼界带来新思想和新概念。事实上,霍克先生可能是第一个全浸式水翼设计者,把他的概念引进美国的第一线。霍克的探索第一次为人们所知是在1951年,霍克先生在纽约小艇展览会上展出了一条名叫“红虫”号的小船,从那时起他的探索第一次为人们所熟悉。“红虫”号的第二型是霍克先生命名的“阿克腊斯”号,见图5。“阿克腊斯”号于1954年给海军作了表演,并列入水翼登陆艇发展计划。霍克先生的早期思想可以从今天的电子控制全浸式水翼布局中体现出来。这位探索者称他的系统为“水鳍”。“水鳍”的特征是具有前触角系统,这个系统提供迎面来波的预报,使之有足够时间来改变水翼的攻角。触角系统的前水面滑行部分由一个浮体和后踵部分(trailing heel)组成。一般说来只有后踵部分和水面接触。后踵是出色的弹簧装置,对水表面波起衰减作用。浮体具有浮力,对于大波起反应,进一步,触角的运动和水翼攻角变化关系可以调整和校正。触角和水翼支柱间的联结有阻尼器,用以提供总的触角控制运动的阻尼效应。

除了在水面上滑行的霍克传感器外,还具有一个机械式调偏联动机构。这个机构和操纵杆联接起来,驾驶员可以控制艇的飞高,同时用水翼的差动控制来实现高速时的倾侧回转。回转时的特点是内侧水翼浸深大些,外侧水翼浸深保持不变。偏调机构有这样的好处,倾侧急转弯时外侧水翼翼梢不致出水。

后来霍克先生在佛罗里达州密阿迈的密阿迈造船公司继续搞水翼艇。图6给出一条用霍克系统的登陆艇模型。这条艇名叫“ $d\alpha/dt$ ”,它直接使用霍克系统为美海军显示攻角控制布局。这条艇使美海军树立信心,并进一步委托密阿迈造船公司建造一条LCVP“海罗贝托”号的足尺模型。图7是“海罗贝托”号应用霍克原理在海上稳定飞行时的照片。虽然在波浪上非常成功,但触角系统直接从小型模型放大时,作为实船的操纵系统来说显得大而笨拙。霍克先生曾声称他的系统可以用另外形式的触角系统,而不一定需要如图所示的大尺寸触角。无论如何,这些机械系统的试验研究确实为电子控制系统的设计提供了基础。运动方程、高度传感器的要求以及横向控制的需要等都在他早期试验中得到,后来,当电子学成为更为可靠更适用于水翼艇的时候,这些都直接应用到电子控制系统中去了。图8给出“海罗贝托”号改用电子控制系统后的照片。

霍克先生一直在积极地促进水翼艇的发展,最近,在1973年一月,他发表了关于水翼船最新思想的报告(文献2)。

现在让我们转到另一个出色的设计师,他在水翼艇的机械控制系统方面做了相当重要的工作。他就是哥登·贝克(Gordon Baker)先生,50年代早期,他进行了各种形式水翼艇的重要试验;他的早期引起广泛注意的试验艇是割划式水翼艇,名叫“长人”号。这条艇用等弦长V形水翼来稳定飞行姿态。鉴于割划式水翼布局和海面紧密关联以及顺浪性能不佳,贝克先生把他的注意力转到全浸攻角控制系统方面。图9就是这种艇“高尾”号的航行图。

“高尾”号是三翼布局,一个翼在前,两个翼在后,每个翼的攻角由独立的伺服液压缸控制。艇长22英尺,排水量6,000磅。

这条艇有一个前伸机械式传感器与前水翼前方的水面接触。此外,有两个机械式传感器与后翼前方的水面接触。前传感器对前翼、后传感器对后翼都设计成具有近乎最佳的超前量。前传感器控制纵摇和升沉,而后传感器控制纵摇、升沉和横摇。

机械式计算机是“高尾”号控制系统的基本组成部分。这个计算机由加法减法联动环节、乘法杆和函数单元组成。计算机的输入是:

三个传感器的位移

前水翼操舵角

伺服压力

升高、纵摇、横摇和海况的人为调整

计算机的输出是:

传感器收缩的控制

到液压系统的攻角控制指令

飞高

“高尾”号成功地在 4 到 6 英尺波浪上航行。该艇确被美海军评价为最佳的机械控制水翼艇。这个评价是 1960 年作出的, 此时电子控制系统的研制已经进行了。事实上, 设计者在总结报告里建议“高尾”号应用一些电子部件(文献 3)。现主要精力已集中于电子学的应用上了。

贝克先生的开发工作还必须包括他在机械控制计算机方面的出色成绩。这个计算机是用来计算和改变水翼船全浸式水翼的攻角控制的。图 10 表示他的帆船达到 40 英里/小时的可观速度。这是第一次将任何型式的计算机装在攻角控制的水翼船上。计算机从桅杆支索支撑处获得输入力, 这些力用来计算后翼的正确攻角, 使艇不致纵倾到顶头 (pitch-pole)。其主要目的不是起增稳作用, 而是利用水翼攻角抵消帆力所产生的倾复力矩。

现还在使用的一个更新的机械系统是“赛维斯基襟翼”, 由载维逊试验室的载尼尔·赛维斯基 (Daniel Savitsky) 博士所提出, 用于大西洋水翼公司名叫“飞云”号的水翼艇和南朝鲜海军水翼艇上。赛维斯基襟翼是一个后缘襟翼, 联结于支柱后缘, 稍稍偏一个角度。这个襟翼与水翼上后缘襟翼机械地联接起来, 如图 12 所示。在标定飞行高度, 这个襟翼部分浸在水下, 襟翼上的水动力矩与水翼后缘襟翼的弹簧和水动力矩平衡。如果艇吃水越深, 赛维斯基襟翼浸深越大, 襟翼的力矩也增大, 使水翼襟翼偏转, 因而升力增加, 使艇回到原来的飞高。这个机构附有配重和振动吸收器(阻尼), 这样基本上对高频小波不反应, 只对低频大波起作用。

人 控 系 统

如不考虑人控可能性, 我们就不能考察全浸水翼系统控制的背景。全浸水翼具有接近水面时升力减少的固有升力控制特性。我们感兴趣的是这样的概念, 安排一个人在横向和纵向控制回路之中, 艇能否飞行? 一些试验者根据这个思路给驾驶员以操纵杆让他来控制艇。

研究人控技术的早期试验者之一是美海军的 H. C. 理查逊(H. C. Richardson) 上校。1908 年他造了一条带全浸翼的小船。1911 年他和 N. 瓦艾特(N. White)先生在上面加上人控系统(见图 11)。这条船由一摩托艇拖着, 时速 6 节, 以这个速度在戴勒维谒河航行, 这条船证明是可以人控的。

40 年代末和 50 年代初, 另一些试验者继续进行人控试验。汉查特水翼公司出售一种全浸式水翼和人控的小船(图 13)。

密阿迈造船公司建造了一条小试验艇, 带有手控和机械控制系统(图 14)。前触角提供飞高和纵倾控制, 并可以由驾驶调整操纵杆加触角提供的飞高输入信号, 使艇能如飞机一样起飞和降落。倾侧回转时用踏板提供前翼的差动控制, 横向控制由前翼的上反角和支柱给以配合。这条艇在中等海况下证明是成功的。

提供人控问题最多答案的艇可能是吉勃斯和科克斯公司的 BIW 艇(图 15)。这条出色的艇将

在本文自动控制一节里较充分地描述。它有这样的特点，其电子控制系统容许由人来互不相关地控制横向、纵倾和/或飞高。这条艇以 25 节速度范围航行，在长岛海峡差不多所有海况都可以操作，这些试验的一个重要的结论是人能够感觉和操纵横向运动。然而，遭遇波列时，控制飞高和纵倾运动的要求超过人的响应能力。当电子系统能有效地解决控制问题时，将人放在控制回路中去，就没有什么特别的优越性了。这个概念在以后的设计中被放弃了。

气 动 控 制 系 统

另一种非常重要的控制全浸式水翼的方式是控制水翼系统的通气状况。苏珀拉玛公司在这类控制系统的研制中是居于首位的，该公司称它为“充气控制系统”。这个方法建立在水翼表面引入空气后升力减少的原理上，空气是通过翼展方向一排小孔引进的。如在通气孔处的局部压力足够低，大气压就能把足够的空气通过通气孔引进，这种通气称为“自然”通气。如需用压缩空气，则称之为“强制”通气。水翼上表面（低压）通气使升力减少，而下表面（高压）通气则使升力增加。“充气”代替其他的升力控制手段（如后缘襟翼或全动翼），它不能执行或替代自动驾驶仪和相关的传感器的功能。

为应用这种简单的升力控制方法，斯切脱尔(Schertel)设计了气动和惯性传感装置，通过操纵气阀来控制水翼的通气量。

“充气”系统的第一个实艇试验是在 PT 50 载客水翼艇“鳍状肢”号上进行的。该艇原来的割划式后翼改成了带有通气孔增稳的全浸式后翼。“鳍状肢”号的控制系统在机械上是非常简单的。机械信号来自陀螺（装在一平面上使之同时感应横摇和纵倾），信号通过气动放大，经适当地阻尼后作动推动杆来启动水翼空气阀。观察者认为，对乘客来说，“鳍状肢”号在 3 英尺浪上的运动要比一般 PT50 在 1 英尺浪上的运动还要舒适。运动性能的改进（特别是横向）可能是由割划式水翼改成全浸式后取得的，因为没有和海面的紧密关联了。由充气系统提供的增稳性可以用这样的事实来证明，这就是当充气系统关掉，艇就不能保持翼航。

美海军和苏珀拉玛公司订了检验充气控制系统的合同，将全浸式水翼系统安装在 PT-3 船体上，重新设计为 ST-3A。图 16 是水翼系统的照片，图中不仅清楚地显示通气气孔，同时也显示出支柱上数字式浸深传感器的气孔和支柱水翼交界处的低压气孔，这些气孔是为提供控制系统的气动放大器所需的真空度而设。每个翼的气动机械控制系统控制 50% 和 70% 弦长处两组气孔的空气流量。50% 弦长处的孔仅在需要大校正力时才用。

ST-3A 成功地证明了不论在静水或汹涛中全浸式水翼能用充气系统实现稳定和控制。

用自然通气只要消耗很小的控制功率就可控制水翼升力，这种方法非常简单。在选择充气或常规升力控制方法的比较研究时，有两个因素必须慎重考虑，就是可应用的升力控制范围和由充气引起的阻力增加，后者实质上相当于升力扰流片，单用自然通气只能改变升力系数 0.2 左右，但总阻力将增加 5%。

苏珀拉玛公司用模型试验继续研制“充气”概念，这些试验针对这两个问题，并希望在性能上有所改进。遗憾的是工作进展较缓慢，因为这种试验费用较高，同时使目前的试验设备达到了极限。

大型水翼艇(1,000 吨)的水翼和襟翼都是非常大的。对这种艇来说，“充气”升力控制和缓慢的攻角调整联合起来可能用来替代后缘襟翼。这应当在比较研究中认真考虑。

充气系统另一个令人感兴趣的应用是其有潜力用平稳控制的方式从亚空泡状态过渡到超空泡状态。目前正在荷兰卫格宁根水池进行从 50 节到 60 节过渡的试验计划。

电 子 控 制 系 统

如前所述,水翼艇的增稳研究向应用电液系统方面发展。在水翼艇的早期研究中,电子装置还处在幼年时代,还不太可靠。由于可靠性方面的改进,电子学的应用推广了。实际上,根据美海军水翼艇经验,这种自动驾驶仪使艇出问题最少。

首批应用电子自动驾驶仪作为增稳的水翼艇之一是“手灯”号(图 17),大约在 1953 年由水翼艇公司建造。这个研究水翼艇的研究机构由万尼瓦·布什(Vannevar Bush)博士创立,为美海军早期水翼艇计划提供了不少有用的成果。直接应用斯伯里公司建造的飞机自动驾驶仪(斯伯里 A-12 陀螺驾驶仪)。这个陀螺驾驶仪控制艇的横摇、纵倾和偏航,回转控制还可作倾侧回转。这条艇应用串列全浸翼,前后翼都在中线处分离。用一个静压探头来保持水翼浸深不变,“手灯”号在玛利兰州艾耐普利斯的查斯艾皮克湾作了一系列试航检验。当艇在速度 20 节以下时,给以陀螺增稳为基础的控制原理的适用性提供了令人鼓舞的实例。

早到 50 年代中期,美海军另外一些发展电液系统的计划已在进行。密阿迈造船公司从“海罗贝托”号上拆下了霍克触角,装上模拟计算机,并在前支柱上设置阶梯电阻式高度传感器,见图 7。这种传感器是吉勃斯和科克斯公司用在 BIW 艇(图 15)上阶梯接触式高度传感器的进一步发展,液压伺服作动筒用来接受计算机输出信号,提供攻角增稳的作用力。在这条艇上,后翼是固定的,而所有控制措施都用在两个前翼上。“海罗贝托”号的海上试验证明必须要在后翼上施行纵倾控制。密阿迈造船公司自动驾驶仪的第二种形式是在执行美陆军飞行 DUKW 计划中得到证明的,这条艇如图 18 所示。后来,AVCO 公司建造了一条 3,000 磅带轮登陆艇 LVHX-1,这就是飞行 DUKW 计划的产品。AVCO 艇是第一个用超声高度传感器代替阶梯电阻式传感器的艇。

电子自动驾驶仪的一个转折点是美航运局的但尼逊计划。格鲁曼飞机工程公司(现称格鲁曼公司)通过子公司动力研制公司与航运局订立合同设计建造和试验一条混合型水翼艇“但尼逊”号,见图 19。

这条 60 节的艇使用一付全浸式可控后翼和两付用襟翼增升的割划式前翼。电子控制系统用来增稳。模拟计算机结合了一个电子控制操舵方式,操舵方式实质上是航向固定装置。后翼不带增稳系统的海上试验,证明了自控系统对航海性能的改善。

“但尼逊”号试验的结果应用于格鲁曼公司设计的美海军“普朗维尤”号(AGEH-1)上,见图 20。“普朗维尤”号是全浸飞机式布局水翼艇,采用全自控系统。

格鲁曼公司与盖莱特公司合作设计建造了一系列电子控制自动驾驶仪,用于商用艇“海豚”号和美海军艇“旗竿”号(PGH-1),见图 21。“旗竿”号的计算机是由微型组件结构组成,应用模拟技术,通过电液作动筒控制三个水翼的攻角。最初“旗竿”号在提交海军时曾带有超声高度传感器。最近,海军将此高度传感器改成森特斯脱兰特公司的雷达型传感器,用以消除噪音和大雨时的干扰。

同样在 50 年代中期,吉勃斯和科克斯公司与麻省理工学院特雷泼试验室合作研制带有模拟计算机和超声高度传感器的自动驾驶仪。这一研制导致了“海脚”号(图 22)电子控制系统的设计和安装试验。今天水翼艇的自控系统就是在这种自动驾驶仪的基础上发展和完善起来的。

“海脚”号证实了全浸式自控水翼系统在海上的适用性和优越性，并提供了数据，这些数据成为“高点”号(PCH-1)(图 23)设计的基础。现有的全部美海军水翼艇的自控系统在作用上都是非常相似的。图 3 表示的作用方块图基本上可适用于任何艇。

每一个美海军水翼控制的部件如表 1 所列，虽然是由不同的机构所设计，但仍显示出许多相似之处。这些艇最初的差异在于艇运动的控制和艇的操舵方面，这些差异在海上试验的控制原理的发展过程中逐步趋于消失，由于 PCH-1 的控制系统在所有美海军水翼艇的控制系统中具有代表性，故这些进展将在 PCH-1 从原有布局到改进后布局的变化中简要地描述出来。

PCH-1 原有的布局是由前翼控制飞高，后翼内襟翼控制纵倾，后翼外襟翼差动作用控制横摇，操舵由前支柱后缘襟翼来实现。驾驶员根据横倾角和偏航角速度的函数表来选择水平回转、协调回转或倾斜回转。

试验时发现需要更大的操舵面。因此，在前翼下面加装了一个铲形舵，用以提供更大的侧向力，此后在涵涛中发现控制横摇的外襟翼经常打到头，说明需要更大的横向控制能力。用改进自动驾驶仪使内外襟翼同步的方法可提供更大的横摇力，从而，用全部后升力面来产生控制的升力。现在纵摇控制是用左右襟翼同相偏转来控制，而横摇是用差动作用来控制，这称为“升降副翼”控制。直到最近改进和大修前，PCH 基本上一直保持这种布局，在改进和大修期间安装了一套新的自控系统，这个新的控制系统在作用上差不多与“图库姆卡里”号(PGH-2)(图 24)相同。而且控制得同样好，说明 PCH-1 控制系统进展的简单方法是描述“图库姆卡里”号的控制系统。

“图库姆卡里”号与所有美海军水翼艇一样，由前翼控制高度，主翼控制纵倾，主翼的升力差动控制横摇。然而就操舵而言，“图库姆卡里”号主翼的升力差动则用所谓“横摇操舵”(roll-to-steer)方法。即操舵指令使艇横摇，整个前翼支柱偏转，偏转角为横摇角的函数，使前支柱近似地对准来流方向(如同风标一样)。回转力是由升力矢量的分量来提供，而不是用支柱或舵来提供。这种回转方法消除了支柱上大攻角状态和可能发生的通气现象，而达到完全协调回转。用这种系统在正常情况下可达到 80/秒的回转速度，而已证明最大回转速度可达 120/秒。在“图库姆卡里”号交货后的另一特点是把中间单独的升沉加速度器改成两个(直接安装在每个主翼上)，这样可以单独地校正每个翼上的干扰力。这对改善讨厌的“横向摇动”(roll jiggle)特别有效，这种“横向摇动”是在遭遇陡顶浪时两个翼在波的不同部位时发生的。“横摇操舵”与在每个主翼上安装单独的加速度器的措施在“图库姆卡里”号上是如此的成功，以致不仅在“高点”号上，而且在“普朗维尤”号上也都采用了。

“图库姆卡里”号控制系统同时取消了纵摇和横摇速度陀螺，而在自动驾驶仪里用电子系统来替代它们的作用，还取消了水手回转，简化了控制系统。

如上所述，“高点”号最近进行了全面的大修和改进。两个主要的改进项目是：将固定前支柱改为全动前支柱，用“横摇操舵”方式改善操纵性，安装与“图库姆卡里”号基本一样的全自动控制系统。改进后的 PCH-1 自控系统的作用方块图如图 25 所示。

讨论电子控制系统如不叙述商用艇方面的工作，不能算是完整的讨论。早期用此系统的载客艇是“维多利亚”号，该艇由玛利兰造船和船坞公司建造，并由西北水翼公司经营。在海军试验艇“海脚”号成功试验的基础上，吉勃斯和科克斯公司对艇进行了设计。自动驾驶仪由通用电气公司的防御电子部制造。这条艇的重要性在于它是第一艘水翼艇，供美海岸救生查缉队在普盖特海峡输送人员时使用。

表 1 美海军水翼控制系统部件

	PCH-1		“高点”号	AGEH-1	PGH-1	PGH-2
	原	有				
传感器						
纵倾	垂直陀螺		垂直陀螺	垂直陀螺	垂直陀螺	垂直陀螺
横摇	垂直陀螺		垂直陀螺	垂直陀螺	垂直陀螺	垂直陀螺
飞高	超声		超声/雷达	超声	雷达	超声
升沉加速度	伺服加速仪		伺服加速仪	伺服加速仪	伺服加速仪	伺服加速仪
横摇角速度	速度陀螺		由横摇角通过 电子线路微分得	速度陀螺	速度陀螺	由横摇角通过 电子线路微分得
纵摇角速度	速度陀螺		由纵倾角通过 电子线路微分得	速度陀螺	速度陀螺	由纵倾角通过 电子线路微分得
偏航角速度	速度陀螺		速度陀螺	速度陀螺	速度陀螺	速度陀螺
执行机构						
升力	后缘襟翼		后缘襟翼	全动翼	全动翼	后缘襟翼
舵	后缘襟翼加铲形舵		全动前支柱	全动后支柱	全动后支柱	全动前支柱
计算机	模拟固体电子 插入组件		模拟固体电子 插入组件	模拟固体电子 插入组件	模拟固体电子 插入组件	模拟固体电子硬拉线 绕在适当位置的组件
作动系统	3,000 磅/英寸 ² 液压 泵, 减容积多余度		3,000 磅/英寸 ² 液压 泵, 减容积多余度	3,000 磅/英寸 ² 液压 泵, 减容积多余度	3,000 磅/英寸 ² 液压 泵, 减容积多余度	3,000 磅/英寸 ² 液压 泵, 减容积多余度
制造厂	波音公司		波音公司	格鲁曼公司	格鲁曼公司	波音公司

另一艘早期电子控制的水翼艇是“企业”号(图 26)。这条艇由船舶系统公司建造,由北美水翼公司经营。水翼为鸭式布局,每个翼都有襟翼控制。文献 4 详细地描述了这条艇。40 英尺长,8 吨重的“企业”号证明可载 27 人在纽约港航行。自动驾驶仪由斯伯里-皮德蒙特公司建造,使用一台艾麦超声高度传感器。该艇试航成功,并在纽约和密执安湖进行了示范表演,在 $2\frac{1}{2}$ ~3 英尺海浪上工作得很好。

格鲁曼宇航公司在西德汉堡勃罗姆和沃斯船厂建造了一艘“海豚”级的水翼艇。这艘商用水翼艇的自动驾驶仪由盖莱特公司的空中研究部制造。驾驶仪使用艾麦超声传感器。这条艇在西德、加那利群岛、佛罗里达海峡和维尔京群岛作了广泛的表演。

目前正在波音公司建造的是一条新的商用级艇称为“喷水水翼”号。该艇使用波音公司自己的电子控制系统和超声高度传感器。艇可载 250 人,该艇的设计是以成功的海军水翼艇“图库姆卡里”为基础的号。

意大利墨西拿的罗德里奎茨船厂近来经售一种第二代水翼艇,用汉米尔顿一标准自控系统增稳。由于该种艇基本上用割划式水翼,所以稳定系统能增强和改善航行的性能,具有提高航海性能的能力,这些系统同时用于 RHS 70 和 RHS 140 载客艇上。

自控系统的进一步发展

现在,水翼艇控制的两个方面正在积极地向前发展,这就是升力控制装置和数字式自动驾驶仪。

升力控制

在升力控制装置方面,重点是发展简单的控制系统和减少作动时所需的功率。七种达到升力控制目的的可能方法如图 27 所示。图上还附有每个方法所需功率和全动攻角控制所需功率的比值。选择水翼升力控制装置时,必须对机构简便性、可靠性、作动功率、升力控制范围、现场经验以及费用等作平衡判断。攻角控制和襟翼控制已经证实可用于现有水翼艇。然而这些系统所使用的轴承寿命不长。波音公司正积极地制订一个研究计划,希望使轴承使用寿命至少提高到 2,000 小时。

另一些升力系统特别对大的水翼艇(约 1,000 吨)更有希望,它们是:(a) 后缘调整片,整个水翼偏转时所需的工作动力由小后缘襟翼上的水动力提供。(b) 延伸襟翼,是一种平衡襟翼,置于水翼下,使襟翼处于高压区内,用以避免铰链线处的空泡。(c) 充气控制,如上所述。

自动驾驶仪

如前所述,所有的美海军水翼控制系统都感受同样的运动参数,如图 25 所示。控制系统具有四个伺服放大器(每个翼上一个,舵上一个),通过电液伺服阀控制四个操纵面。自动驾驶仪只是成形网络,逻辑和交联因艇而变。这个现实从逻辑上导致水翼控制标准化的可能性。从控制工程师的观点来看,这种标准化基本上已经确立,因为 PCH-1 型、PGH-2、AGEH 和新的 PHM 的方块图几乎难以区别。虽然系统对控制工程师来说是相似的,但对电子工程师来说系统决不要求保持相同。现在,所有水翼自动驾驶仪对每条艇都是用模拟电路,用的是 60 年代插入组件技术,由于它的坚固和成功使之成为永久不变的了。这种永久性,由于新的技术强调采用已经证实的目前的硬件,故这种永久不变已经确立。

为了使水翼艇的自动驾驶仪标准化并引进最新工艺,1972 年开始了水翼通用数字式自动驾驶仪发展计划 (HUDAP)。HUDAP 计划的目的是发展高度可靠的水翼自动驾驶仪,它具有足够的适应性,将用于所有的现在和将来的水翼艇上,而且也具有足够的能力把自控和船的其它职能结合起来。

数字计算机带有高密度数字集成电路,通过使用软件可具有极大的适应性,通过多回路单元制造和差错允许的布局可提高可靠性,这些优点已使数字计算机选定为通用自动控制系统的主要电子部件。这些计算机具有足够的工作速度,足够的适应性满足日益增长的要求,外形尺寸和功率在使用上都非常经济,可靠性比任何模拟式或机械组件都要好。

HUDAP 的优点很多,包括下列几点:

通过标准化和应用数字式部件提高了系统可靠性;

具有多回路差错容许的全多余度,每秒 10 次检查系统每一元件好坏的预定程序,当故障发现时,可自动转向后备电路;

不牺牲可靠性,易于管理的可能性增加,用于(a)与运动控制有关的任务,(b)与其它重要的船系统有关的附加任务;

只需改变软件,在不损害可靠性的情况下,在布局上有极大的灵活性;

维护保养能力改善;

对逐步扩大的海军水翼舰队的后勤支援上可大大节约;

减少艇员和支援人员的训练费用。用标准化硬件,不仅减少对支援人员和艇员的训练时间,而且变更人员的工作也不致减少熟练程度。减少或便利故障检修和维护。由于有计算机的辅助,提高了维护保养性能;带有诊断程序用以处理排除故障和孤立差错问题,由一个不太熟练的工作人员用更改单个组件便可完成。有缺陷的组件可以用备用组件替代,而不需要调谐和校准。最后,如数字电路充分应用,就不需要如同模拟电路那样要周期调节和校准。

HUDAD 设计成有充分的记忆力、速度和输入输出电路,在完成主要任务之外,进一步完成如下附加任务:

自动航向或航迹用的简单数据传递的导航分界、自动或预定程序规避操纵的导航分界、或导航计算机或传感器传输(惯性平台)中央处理装置的主动参与的导航分界;

故障避免系统中的数据传递或雷达控制;

警报或显示系统中的数据传递或自动作用,或联动安全控制(如燃气轮机启动);

扩大计算能力,使艇的燃料管理、重量以及平衡计算和自适应控制成为可能。艇上基于特定规则的任何任务(基于可用的输入)均可由 HUDAP 计算机来处理。

简而言之,HUDAP 是将来水翼艇自动控制的顶点。它将在艇上形成一个核心。通过这一核心,作战艇上的控制、导航和武备系统可形成一个整体。

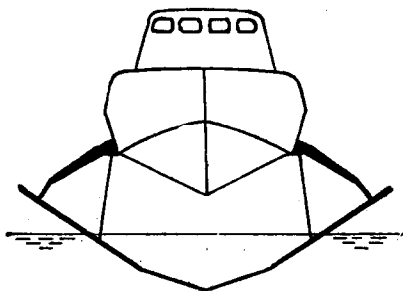


图 1 割划水翼系统

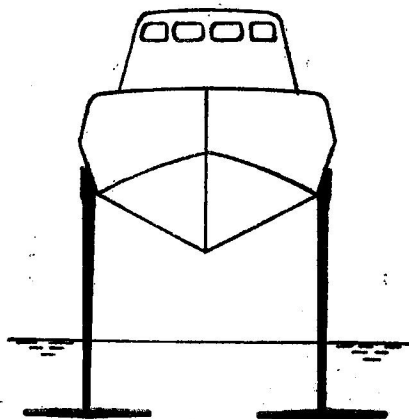


图 2 全浸水翼系统

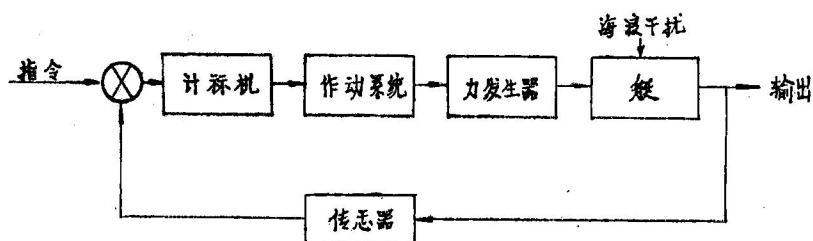


图 3 水翼控制系统方块图

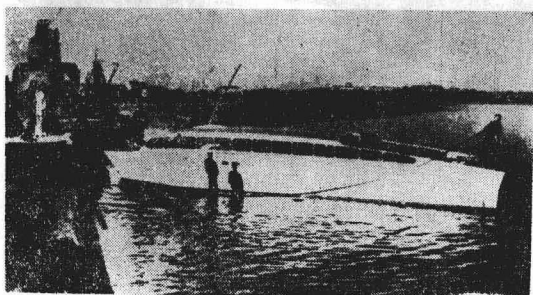


图 4 “阿魁文”号

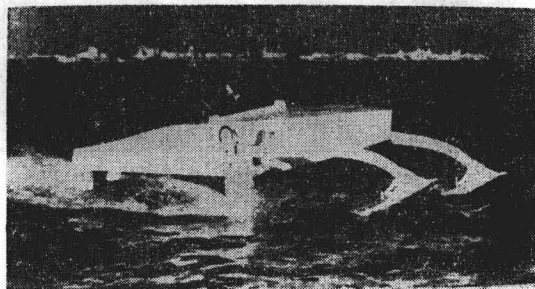
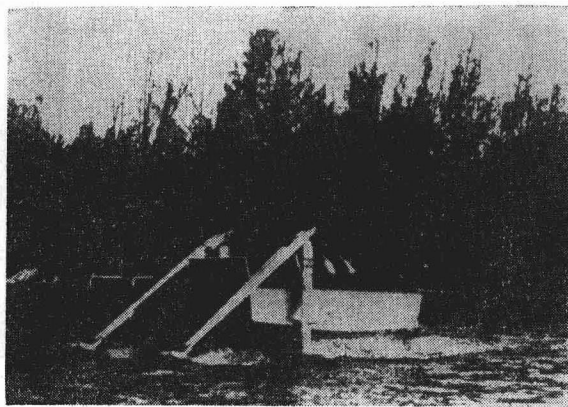


图 5 “阿克腊斯”号和“水鳍”系统

图 6 “ $\frac{da}{dt}$ ”号