

doi: 10.7690/bgzdh.2014.09.017

## 水陆车辆喷水推进器流场流速和含气量的实车测试技术

刘新广

(中国兵器工业计算机应用技术研究所六室, 北京 100089)

**摘要:** 针对水陆车辆喷水推进器流场流速和含气量的实车测试难题, 研究测试方法并研制传感器。分析问题的主要原因, 根据流体力学理论, 提出在喷水推进器喷口实施测试方案, 并研制探针式流速和含气量传感器、压阻式流速传感器、电极板式含气量传感器。测试结果表明: 该技术能解决由于车辆强烈的振动、喷水推进器周围空间狭小、测试时不能破坏喷水推进器的流场从而导致现有的流速测试传感器或仪器无法使用的难题, 设计的水陆车辆喷水推进器流场流速和含气量的实车测试技术方案在某水陆车上实施, 测试精度能达到满意的效果。

**关键词:** 水陆车; 实车测试; 流速和含气量传感器

**中图分类号:** TJ810.6 **文献标志码:** A

## Real Vehicle Test Technology of Flow Field and Flow Velocity and Air Content of Amphicar's Hydraulic Propeller

Liu Xinguang

(No. 6 Research Laboratory, Computer Application Technology Institute of China North Industries Group Corporation, Beijing 100089, China)

**Abstract:** To solve the real vehicle test's difficult problem of the flow field and the flow velocity and the air content of the amphicar's hydraulic propeller, a test method was studied and a sensor was manufactured. According to the theory of the hydrodynamics, a resolution was executed on hydraulic propeller's spout and probe-style's flow velocity and the air content sensor, and the piezoresistive flow velocity sensor and the electrode plate air content sensor were manufactured after analyzing the problem's main reason. The test indicated that this technology could solve the existing flow rate test sensor or instrument unable using problem arising from the fierce shaking and the narrow space around the hydraulic propeller and the actual flow field cannot be damaged while testing. The real vehicle test technology of the flow rate and the air content of the amphicar's hydraulic propeller were implemented on some amphicar and the test precision was satisfied.

**Keywords:** amphicar; real vehicle test; flow velocity and air content sensor

### 0 引言

水陆车在水上是以设置在它尾部的 2 台喷水推进器推进航行的。现有的通用流量及含气量测试传感器或仪器(包括电磁流量计、超声波流量计、激光流量计等非接触式流量仪和高速成像仪), 无法使用于水陆车辆喷水推进器流场流速和含气量的实车测试。笔者提出在喷水推进器喷口实施测试, 并研制探针式流速和含气量传感器、压阻式流速传感器、电极板式含气量传感器。

### 1 原因分析

如图 1、图 2, 喷水推进器 2 装在车 1 的尾部, 左右各一台。喷水推进器 2 产生推力的大小与其喷口向后喷射射流的质量流量成正比, 而质量流量为喷水推进器 2 的喷口射流流速与喷口截面积之积。欲测试水陆车在水上的实际最大推力, 将车置于合

适的静水水域, 车尾朝岸边, 并用绳索依次将车辆、拉力计串联于岸边的固定桩, 之后使 2 个喷水推进器达到最高转速, 同时记录拉力计的示值。测试过程称为拖桩牵引力测试。喷水推进器安装于车辆之前, 将其连接在一大型闭合充水管道的试验台上进行测试, 结果表明, 喷水推进器的流速/流量达到了设计指标。但喷水推进器装车以后往往会损失质量流量。科研人员猜疑喷水推进器从其进口吸入了空气而丢掉推力, 因为空气的密度比水的小得多, 使喷水推进器质量流量减小, 导致推力损失。要澄清, 必须针对喷水推进器进行实车航行测试。

水陆车辆喷水推进器流场流速和含气量的实车测试极具难度。原因是: 1) 待测车辆条件限制苛刻。车内喷水推进器外露部分(图 1 车体 1 中虚线以上部分)很少, 而且车内喷水推进器周围空间狭小; 不许在实车的喷水推进器系统上钻孔, 焊接物件, 必须

收稿日期: 2014-04-10; 修回日期: 2014-05-04

作者简介: 刘新广(1956—), 男, 陕西人, 大学本科, 高级工程师, 从事机械设计及制造研究。

实车航行测试；不许在喷口处设置大型测试仪器支架，要设置支架，则应使其不能严重影响后滑板的收放，不妨碍关门、不妨碍喷口挡板(当车辆转向或倒车，通过关闭挡板来实现)的运动。这些限制导致现有的通用流量及含气量测试传感器或仪器无法安装于实车上。

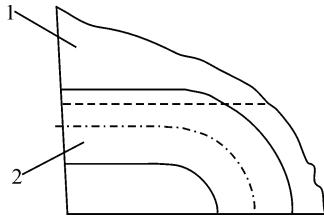


图 1 水陆车辆喷水推进器在车辆尾部的位

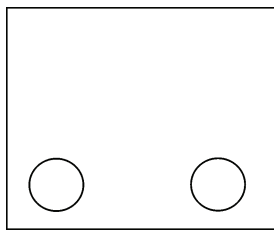


图 2 图 1 的左视图

2) 技术难度大、复杂。如图 1，由于喷水推进器的流道弯曲，且从进口到出口逐渐收缩。因此，流场是非均匀的，即在喷水推进器的流道上任一截面上不同点的流速是不同的，而就每一点，不同时刻流速也不同；而且流量及含气量传感器放入喷水推进器内会破坏流场。现有的通用流量及含气量测试传感器或仪器无法胜任。

3) 车辆的工作环境恶劣。车辆在水上工作时，车体的振动强烈，最高达到 1.5~2 g/600~700 Hz。斟酌测试仪器的抗振力及密封保护、传感器抗振能力、抗海水侵蚀能力、传感器抗喷水中的异物(如沙粒、小鱼、虾和海藻等)的冲击能力，现有的通用流量及含气量测试传感器或仪器不能抵抗这种强烈的振动和冲击力。

## 2 水陆车辆喷水推进器流场流速和含气量的实车测试技术

### 2.1 测试方案

由流体力学知：在淹没水流中，水流会同周围流体发生掺混，逐渐形成紊流。其中，由喷口边界向内外扩展的紊动掺混部称为紊流边界层混合区。中心部分未受到掺混影响，保持原来的出口流速，称为水流的核心区。从出口至核心区终的一段，称为水流的初始段。紊流充分发展以后的水流，称为

水流的主体段。在初始段和主体段之间还有一个过渡段，较短，在分析中常忽略。而在圆形断面淹没水流中，初始段长度  $L_0$  由下式推算：

$$L_0=14r_0$$

式中  $r_0$  为圆形断面的半径。

若将传感器设置在离开喷口面小于  $L_0$ ，忽略边界发散很小的误差，此处的流速可认为是喷口处的流速。

急流的概念来自于明渠水流，其判定可依据弗劳德数<sup>[1]</sup>：

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

式中： $\bar{h}$  为断面平均水深，此处为特征长度； $v$  为流速。

当  $Fr > 1$  时，水流为急流，此时干扰波不能向上游传播。

对某水陆车辆的喷水推进器，按上式计算  $Fr \approx 6.5 > 1$ 。故喷流为急流，在喷水推进器喷 2 的喷口后设置传感器，传感器造成的干扰波不会向喷水推进器 2 传播。将传感器置于喷水推进器喷口后，是解决水陆车辆喷水推进器流场流速和含气量的实车测试的关键技术。由此，设计出下述水陆车辆喷水推进器流场流速和含气量的实车测试技术方案。

如图 3，传感器安装架 5 的上部与车体 1 尾甲板上部联接，传感器安装架 5 的下部用联接件 3 联接在车体 1 尾甲板下部，传感器环 4 联接在传感器安装架 5 的大孔上，传感器环 4 的轴线与喷水推进器 2 的喷口的中心线重合，传感器信号调理盒 4-1 联接在传感器环 4 外圆且靠近传感器环 4 后端，传感器信号调理盒 4-1 在传感器环 4 的直径延长线上。

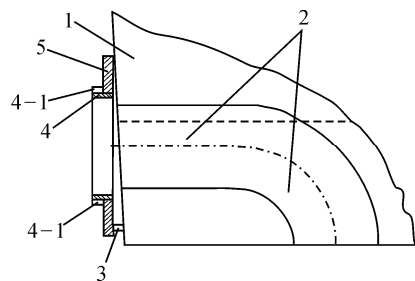


图 3 传感器安装架与车体尾甲板联接、传感器环 4 传感器安装架联接的示意图

在传感器环 4 上联接探针式流速及含气量传感器或电极板式含气量传感器或压阻式流速传感器或压阻式流速传感器与电极板式含气量传感器组成的复合传感器<sup>[2]</sup>；各传感器的感受点或面，对着喷水

推进器喷 2 的喷口，连接电缆(图中未画)依次从传感器环 4 上的放大调理盒 4-1 经水陆车辆的尾上部、水陆车辆的炮塔口进入车内与放置在车内的数据采集器(图中未画)连接。

探针式流速及含气量传感器、电极板式含气量传感器、压阻式流速传感器，均在喷水推进器 2 的喷口流场中设置多点，多点的测试数据的平均值就是流场物理量(流速、含气量)值。

### 2.2 传感器

#### 1) 探针式流速、含气量传感器<sup>[3]</sup>。

如图 4，长探针 8、短探针 7 固定在截面为流线型(如图 4 中阴影)的固定杆 6 上，短探针 7 朝长探针 8 倾斜，其尖靠近长探针 8，短探针 7 的尖距长探针 8 的尖有一设定距离。如图 5，2 根固定杆 6 成“十”字形联接于传感器环 4，在每根固定杆 6 布置数个测点(如图 5 中黑点)，每个测点按前述设置一对长探针 8、短探针 7；从一号固定杆 6 中引出的连接长探针 8、短探针 7 的导线与探针传感器信号放大调理盒 9 连接。

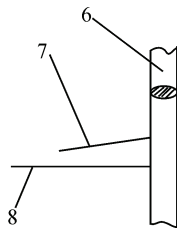


图 4 探针式流速、含气量传感器的探针与其固定杆联接的示意图

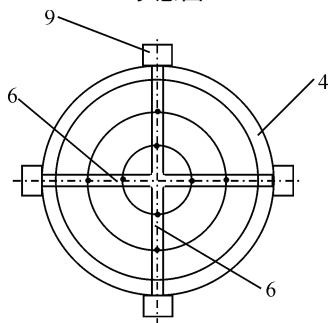


图 5 探针式流速、含气量传感器的结构

当流场中的气泡通过探针尖时，信号为 1，水通过针尖时信号为 0。可用计算机采样计数得到含气率，信号经电路处理后可记录其变化过程。

采样频率可以根据流速除以最小气泡尺寸确定。设定分辨的最小气泡尺寸为 0.1 mm，模型试验中应用时，流速约为 8 m/s，采样频率可取 80 kHz；原型观测时，流速约为 35 m/s，采样频率可取 350 kHz。

探针式流速、含气量传感器是利用长探针 8、短探针 7 先后感知气泡，测量分析含气气泡信号的相关关系，得出流速。

流速测量采用前后 2 个含气探针采样记录气泡信号，然后分析气泡信号的相关系数  $R$ ，如图 6。

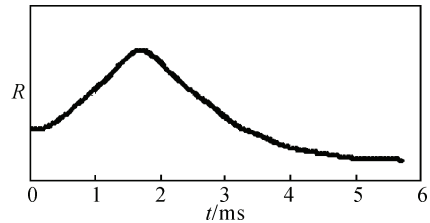


图 6 探针式流速、含气量传感器的原理说明

相关系数即相关函数，是按统计学中数学期望推导来的，其表达式为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{2t} \int_{-t}^t x(t)y(t+\tau)dt$$

其中  $x(t)$  和  $y(t+\tau)$  是指气泡接触探针头部探针上产生的信号。

气泡从接触探针头部到离开，经过了一段时间，探针上产生的信号就有相应的宽度。对  $n$ (大于 400) 个气泡信号进行分析，求出每个气泡在长探针 8 和短探针 7 上有最大相关值时的时间差。在  $n$  个相关值时的时间差序列中，必然会有 1 个最大相关值以及相应的时间差。相关函数的最大值表明在时间  $\tau$  内撞击长探针 8 和短探针 7 的气泡是同 1 个气泡。流速测量采用前后 2 个探针采样记录气泡信号，分析气泡信号的相关系数  $R$ (如图 6)，由气泡信号相关系数的最大值得出气泡经过 2 个探针的延迟时间  $t$ ，去除短探针 7 的头距长探针 8 的头的距离，得出相应的流速值。

对应喷水推进器 2 的喷口适当布置数点，测得数点的流速和数点的含气量(体积百分比)，取数点的流速的平均值作为喷口的流速，取数点的含量(体积百分比)的平均值作为喷口流场的含气量(体积百分比)，则喷口水的流量为

$$Q=vS(1-c)$$

式中： $Q$  为喷口水的流量； $v$  为喷口的平均流速； $S$  为喷口截面积； $c$  为喷口流场的含气量(体积百分比)。

#### 2) 压阻式流速传感器。

如图 7，所述压阻式流速传感器流速探头 11 固定在截面为流线型(如图 4 中阴影)的固定杆 10 上。如图 8，2 根固定杆 10 成“十”字形联接于传感器

环 4，在每根固定杆 10 布置数个测点(如图 8 中的黑点)，每个测点按前述设置一探头 11，在探头 11 的头端置压阻传感片；从固定杆 10 中引出的连接探头 11 的导线与探头传感器信号放大调理盒 12 连接。

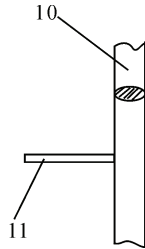


图 7 压阻式流速传感器的探头与其固定杆联接的示意图

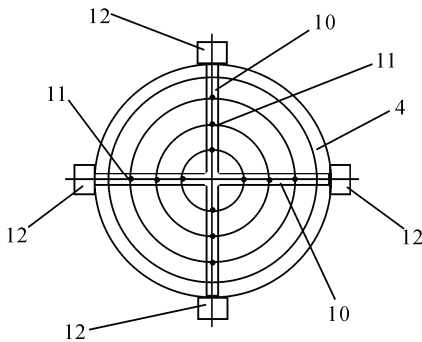


图 8 压阻式流速传感器的结构

由流体力学知，流场中流体的动压满足关系式： $p = \frac{1}{2} \rho v^2$ ，式中  $p$  为压力， $\rho$  为流体的密度， $v$  为流体的流速。由此可见，如果设法能测取流场中某处的压力  $p$ ，就能算出水流流速  $v$ 。而  $v$  与喷口截面面积  $S$  之积就得到喷水推进器喷口流量。采用压阻传感器可来测  $p$ ，因为压阻传感器的阻抗随着它承受的压力变化而变化，压阻传感器将此变化转换为电信号，通过检测换算，得到水流流速。

3) 电极板式含气量传感器。

如图 9，在坚固基板 13 上制作出长条形电极 14，引线 14-1 与长条形电极 14 连接；基板 13、长条形电极 14、引线 14-1 组成电极板。如图 10，2 块所述电极板平行间隔一距离且对称于传感器环 4 的 1 条直径联接在传感器环 4 上组成 1 对电极，另 2 块所述电极板平行间隔一距离且对称于传感器环 4 的另 1 条直径联接在传感器环 4 上组成另 1 对电极，2 对电极成“十”字形联接；引线 14-1 与电极板传感器信号调理盒 15 连接。

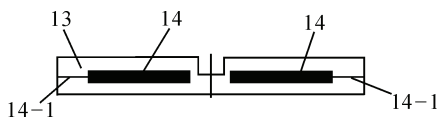


图 9 电极板式含气量传感器的电极板的结构

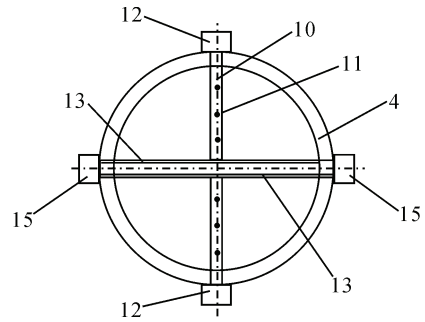


图 10 电极板式含气量传感器的结构

水的导电率远大于空气的导电率，水掺空气后的混合流体的电阻率比水的高，比空气的低。通过检测穿过 2 个形电极板之间的水气混合流体的电阻值，测出含气量。

根据 Maxwell(迈克斯韦尔)理论<sup>[4-5]</sup>，汽水混合流的含气量  $C$ (体积百分比)可以用电极间的电阻  $R_C$  和  $R_0$  来表征：

$$C = \frac{R_C - R_0}{R_C + \frac{R_0}{2}}$$

式中： $R_0$  为清水电阻； $R_C$  为水气混合流电阻。

通过对汽水混合流和清水 2 种状态下的极间电阻的测量，换算得出相应的含气量  $C$ 。

压阻式流速传感器与电极板式含气量传感器组成的复合传感器的构成如图 11，在 1 根固定杆 10 布置数个测点(如图中的黑点)，每个测点按前述设置一探头 11，将这根固定杆 10 沿传感器环 4 的 1 条直径联接在传感器环 4 上；从固定杆 10 中引出的连接探头 11 的导线与探头传感器信号放大调理盒 12 连接。2 块所述电极板平行间隔一距离且对称于传感器环 4 的另 1 条直径联接在传感器环 4 上组成 1 对电极，引线 14-1 与电极板传感器信号调理盒 15 连接，该对电极与该固定杆 10 成“十”字形联接。

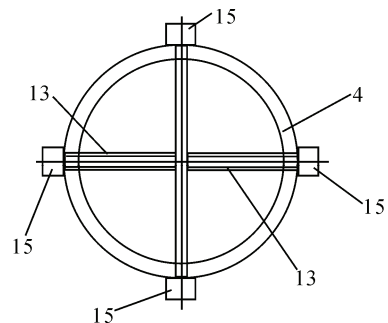


图 11 压阻式流速传感器与电极板式含气量传感组成的复合传感器的结构

研制的探针式流速、含气量传感器如图 12，研制的压阻式流速、电极板含气量复合传感器如图 13

所示。

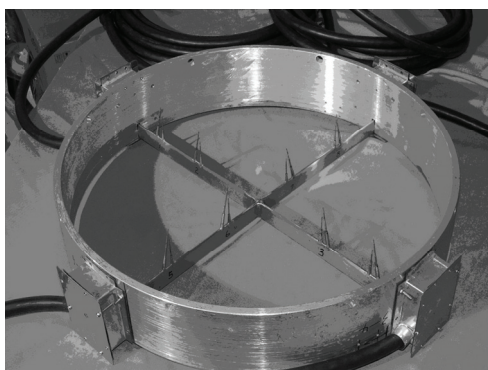


图 12 探针式流速、含气量传感器实照

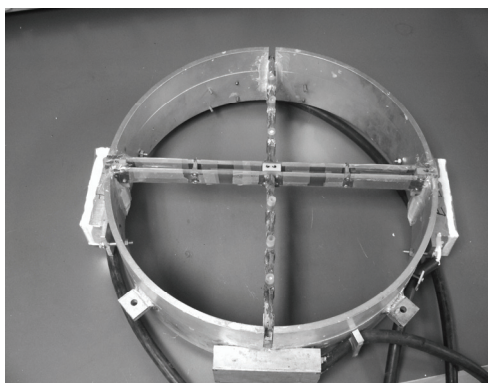


图 13 压阻式流速、电极板含气量复合传感器实照

因国内无符合要求的试验校准设备和环境，对设计制作的传感器试验校准比较复杂、艰难。为此，笔者专门研制了传感器试验校准台，完成了对设计制作的传感器试验和校准。试验校准台的研制，将另篇论述，文中不赘述。

### 3 实车测试效果

应用图 12 所示的探针式流速及含气量传感器环，对某型号车辆进行多次实车测试。首次测毕，将传感器环相对传感器安装架 5(如图 3)在垂直平面内转动一角度后再次测试，以后各次测试均相对前次转动一角度进行。取多次测试数据的平均值，从而获得喷水推进器的流速、含气量和流量值。应用图 13 所示的压阻式流速传感器与电极板式含气量传感器组成的复合传感器环，同理操作测试。通

过实车测试，获得了可信的测试数据。

通过实车测试，比较探针式流速及含气量传感器和压阻式流速传感器与电极板式含气量传感器组成的复合传感器可知：前者结构简单，但探针较细，容易损坏，有效测试次数较少，适用于流速较低且有效测试次数需求较少的情况；后者结构复杂，但结实耐用，有效测试次数较多，适用于流速较高且有效测试次数需求较多的情况。

所述测试技术解决了由于车辆强烈的振动、喷水推进器周围空间狭小、测试时不能破坏喷水推进器的流场从而导致现有的流速测试传感器或仪器无法使用的难题，设计的水陆车辆喷水推进器流场流速和含气量的实车测试技术方案在某水陆车上实施，测试精度达到满意的效果。

### 4 结论

根据流体力学理论，笔者克服了实车测试条件和恶劣的工作环境限制，设计了测试方案，研制了测试传感器。在喷水推进器喷口，安装研制的探针式传感器或压阻式流速传感器与电极板式含气量传感器组成的复合传感器，在国内首次测出车辆喷水推进器流场的流速、含气量、喷口流量。该测试技术既可应用于其他水陆车的研制及改进，又可应用于大管径流场的含气量、流速、流量的测试。

### 参考文献：

- [1] Horst Stocker. 物理手册[M]. 吴锡真, 李祝霞, 陈师平, 译. 北京: 北京大学出版社, 2004: 156-171.
- [2] 王道梦, 任章. 基于小波变换的二阶传感器故障诊断研究[J]. 兵工自动化, 2013, 32(5): 74-78.
- [3] 陈先朴, 蔡华, 西汝泽, 等. 针式掺气流速仪. 水利量测技术论文选集第四集[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005, 8: 37-42.
- [4] 时启燧, 郭志杰, 黄荣彬, 等. 水利水电科学研究院科学研究论文集第 13 集: 自然参汽水浓度和速度量测方法的试验研究[C]. 北京: 水利水电科学研究院, 1983: 23-27.
- [5] 黄凡. 深海水平时谐电流段在空气层产生的磁场[J]. 兵工自动化, 2013, 32(9): 9-11.