

河 猫 比 测 报 告

1.5MHz “河猫”与传统旋桨式机械流速仪测量结果对比及总结

测于 2004 年 3 月 9 日

中国丹江口市汉江黄家港水文站

作者：John V. Sloat 首席水文专家 SonTek/YSI, Inc., 美国

陈耀祖 高级工程师 SonTek/YSI, 上海, 中国

为长江水利委员会汉河水文水资源勘测局准备



汉江黄家港水文站上游丹江口水库大坝

简介

2004 年 3 月 9 日，在黄家港水文站进行了流量、流速及水深比测，比测设备：采用 SonTek 1.5MHz ADP “河猫”集成系统与传统机械旋桨式流速仪。

声明：本文使用的术语“ADP”或声学多普勒剖面仪与术语“ADCP”或声学多普勒水流剖面仪具有相同的定义。

测量工作由长江水利委员会汉河水文水资源勘测局的工程师、SonTek/YSI 中国公司的工程师（Mark Tepper 和陈耀祖）以及 SonTek/YSI 的首席水文专家 John Sloat 操作。本次比测的目的是对比现有的机械测量技术和较新的声学多普勒技术，以便更好地了解新型声学多普勒技术以及用它替代机械技术所产生的好处。

本次比测对比了走航式“河猫”测得的“总流量”与由机械旋桨式流速仪——采用传统 ISO/USGS 中点法（在 USGS WSP 2175 vol. 1&2, Ranz 及其它中有描述）测得的“总流量”。此外，“河猫”测量了 14 个测量点的水深和平均流速，其测量点与机械流速仪的传统测量点完全相同，且测量时间同步，这 14 个测量点等距离分布在河流断面上。

本文将陈述以下内容：比测中使用的 1.5MHz “河猫”的基本配置；机械流速仪的配置；比测期间进行的测量类型，包括用于采集数据的技术；每个测量技术所得到的结果（数据）和结论。需要声明的是，“河猫”数据由 SonTek 工程师采集，而机械流速仪数据由长江水利委员会汉江水文水资源勘测局的工程师测量。另外，本文所列出的数据未经修改或编辑，所代表的是比测中的真实数据。

设备配置

1.5MHz ADP “河猫”集成系统

由定义可知，“河猫”是河流调查者声学多普勒剖面仪（ADP）的一个独特配置。SonTek/YSI 公司用于大型、小型河流流量测量的河流调查者 ADP 配置有三种系统：标准系统、小型系统与“河猫”集成系统。应本文读者的要求，SonTek/YSI 公司将会很高兴地提供专门为 ADP 河流调查者开发的这三种河流调查者配置的其它信息。对于本次比测，SonTek/YSI 公司选择“河猫”配置，主要是因为它的灵活性和可使用多种安装配置。

“河猫”配置包括一个含换能器的主机、一个水密电子控制盒和 2 个密封的铝制船体（见图 1）。图 1 中显示了一个可供选择的 DGPS 天线，用户可根据河道的具体条件用 ADP 或 DGPS 数据优化测量结果。DGPS 信号由“河猫”的电子设备进行内部处理，从而省却了需要采用多路复杂的外部电路与剖面仪的连接以及对无线调制解调器的二次设置等带来的麻烦。



图 1 在汉江比测的 1.5MHz ADP “河猫”

SonTek/YSI 公司是目前世界上唯一一家能生产这种自带船体的 ADCP、同时将底跟踪与 DGPS 二种不同的参考系统统一由仪器内部的电子控制部件处理的公司。除了可配备本例的铝制船体外，“河猫”还可配置稍大些、更轻的光纤玻璃钢三体船船体（见图 2）。



图 2 采用光纤玻璃钢三体船的“河猫”

ADP 换能器主机：体积小（半径 10 厘米）、重量轻（3.5 公斤）。换能器主机内装有罗盘/倾斜传感器、温度传感器、压力传感器和超声波收发装置。换能器主机通过高频通信电缆与水密电子控制盒相连接。

ADP 的水密电子控制盒中，包括 24 伏的电源、一个内置 RS-232 接口的无线调制解调

器（用于与岸上的计算机进行通信）、一根通信天线和用于数据处理的电子线路板。铝制支架用于将铝制船体与水密电子控制盒、换能器主机紧密相连。“河猫”的总重量约为 12.5 公斤。

流量数据由“河猫”通过 RS-232 无线调制解调器不断地传送到在测船视野范围内的位于岸上的笔记本电脑上。同时笔记本电脑与一个 RS-232 基站无线调制解调器相连，并与“河猫”进行不间断的通信联系。使用笔记本电脑和位于岸上的基站无线调制解调器，通过对“河猫”的程序控制，用于收集/处理 SonTek ADP 采集来的流量数据。图 3 显示了 1.5MHz“河猫”，及在汉河上用于比测的测船。



图 3 用于汉江黄家港水文站比测的 SonTek 1.5MHz ADP “河猫”

SonTek ADP 窄带数字信号处理

“河猫”系统使用了一个高速数据信号处理器和一个 8 位数模（A/D）转换器快速处理窄带数字信号。这是一种高级窄带处理技术，经验证，可为每个深度单元提供准确、独立的流速估算，无需垂直过滤。这使“河猫”在河床陡变剧烈的区域内测量时，也无任何误差，这在 1981-1989 年间由 RDI 公司开发的窄带系统中有所记载。对于操作者来说，这种窄带信号处理方式的好处是其易操作性（与宽带信号处理相比）。

有效的单一工作模式只需对仪器设置一次即可成功地完成整个河流断面测量。而宽带固有的特性需要操作者根据河道的动态条件（水深/流速）设置特定的模式。无论是在设置系统方面，还是在需要懂得宽带处理、流速的不确定误差、误差极限等理论以及需要经过训练的高级人员来操作系统方面，宽带系统使整个测量过程复杂化了。

窄带相对于宽带系统的最大操作优势是，窄带处理允许用户由浅水至深水、由缓流至急流（或由急至缓）连续测量流量（保持恒定精度）。也就是，对于 1.5MHz “河猫” 来说，只要仪器深度在 0.9 ~ 25 米之间、流速为 0 ~ 10 米/秒，“河猫” 均能准确地计算出流量，而不必担心深度/速度的动态变化。相反，对于一个给定的单一频率，宽带比窄带似乎有着更宽的操作范围。而实际上，从操作的角度看并不是这样的。宽带信号处理需要用户，只能在一个单一的动态范围内测量（对于准确的测量，严重限制了速度和深度范围），否则就得在现有的操作模式极限被超出时，不得不中断测量，更改测量模式设置。

机械旋桨式流速仪

旋桨式流速仪是根据水流对流速仪转子冲击形成的角速度比例来测量流速。“旋桨式”流速仪的转子是通过旋桨旋转而转动的。转子的旋转数通过一个接触丝（位于水流仪内）的电路来计数的。电脉冲会产生一个可听得见“滴答声”或将“滴答声”转换到一个外部记数器上。图 4 显示了一个比测中使用的旋桨式机械流速仪，流速仪连接于一个铅鱼上。



图 4 用于汉江比测的机械旋桨式流速仪和铅鱼

机械流速仪和铅鱼与一部船用绞车相连接。绞车由一个绞轮、钢缆、手动曲柄和吊杆组成。将船定位在测量断面上的一个静止测点上，仪器和铅鱼被降至河底以测量水深。仪器而后被升至特定的测量深度（通常是 0.2、0.6、0.8 水深），在此测量流速。通过位于绞车缆绳上的刻度记号或用于测量缆绳走线距离的计数器可获得深度。测量每一条垂直上的各测点流速，将其平均得到该垂线的平均流速。那么该垂线的部分流量则根据水深、平均流速和垂线宽度计算而得。图 5 显示了完整的机械流速仪的测流装置，其中包括用于汉江黄家港水文

站比测的船只。



图 5 用于汉江黄家港水文站比测的机械旋桨式流速仪测流装置

比测技术

在 1.5MHz “河猫”与机械旋桨式流速仪比测中使用了不同的测量方法，这是为了更好地对比总流量、水深和平均流速这三个项目。在做水深和平均流速比测时，两个仪器被紧挨着安装在船边，并采取特定的测量间隔同时采集数据。测量总流量，“河猫”采用“走航式”方法，通过测船往返地穿过河流连续采集深度、位置和流速数据；同时，旋桨式流速仪采用标准方法测量断面流量。以下章节详细描述了在同步比测期间，走航式测量与定点测量的测量方法及其结果。

用 1.5MHz “河猫”与旋桨式流速仪进行水深和平均流速的定点测量

比测中，同时使用 1.5MHz “河猫”与旋桨式流速仪测量汉江黄家港测流断面上的 14 条垂线的“水深”和“平均流速”。两个仪器同时安装，并同时采集数据。这样做是为了使水深和平均流速达到更接近、更直接的对比。

在每条垂线上，先用机械流速仪测量水深（使用铅鱼和绞车），然后将流速仪定位在一个测点（0.6 水深）或两个测点（0.2 和 0.8 水深），计算该测点的平均流速。每个测点测量的平均时间为 100 秒。如果该条垂线只测量一个测点，测值就作为平均流速。如果测量两

个测点 (0.2 和 0.8 水深), 那么该垂线的平均流速为两个测点的平均值。

1.5MHz “河猫”采集数据的时间与机械流速仪测量是同步的。使用 RiverSurveyor 软件采集 100 秒数据, 并将数据储存到一个独立的测量文件中“河猫”以每 0.25 米为一个采样单元对速度剖面进行垂直积分, 并对每个采样单元进行平均, 得到垂线的平均流速。“深度”水深值由采集期间 3 个波束实测的深度的平均而得。附录 1 中给出了用“河猫”实测的每条垂线数据文件的注释。

两种仪器所测水深和平均流速实测的对比结果极其相近。两种仪器间的平均深度差为 0.06 米。考虑到用铅鱼测深方法的精度为 0.1 米, 这个差值可忽略不计。另外, 河流的最大水深约为 8 米, 平均水深约为 5~6 米, 这使得平均后的水深差小于 1%。两种仪器的平均速度差为 0.02 米/秒, 其误差在“河猫”与机械流速仪的测量精度范围内, 这样的差别可忽略不计。附录 1 列出了二种仪器完整的水深和平均流速的测量结果。

由“河猫”与机械旋桨式流速仪测量的流量分别为 1460 和 1449 立方米/秒。两种仪器所测流量的百分比差为 0.75%。附录 2 列出了 1.5MHz “河猫”(走航式)与机械旋桨式流速仪的流量对比结果。

1.5MHz “河猫”走航式流量测量

用“河猫”做了两个航次的流量测量。这两次测量紧跟在机械流速仪的定点测量之后。“河猫”在开始航向对岸进行测流前, 首先将其固定在离岸边 5~6 米处, 用 RiverSurveyor 软件采集 5-10 秒的有效数据。这样做的主要原因是为了用在测量起始点上采集的数据来估计和补偿测量起始点到实际岸边的这部分没有实测的流量。在某种意义上来说, 测船越固定, 所测量的距岸边的开始测量距离越准确, 所产生的用于估计未测水流的数据就越具有代表性。另外, 通过采集 5-10 秒有效数据, 根据该点附近所测得的速度数据可更好地估算未测区域的流速。

正式开始采集数据, 保持“河猫”平稳地穿过汉江向对岸驶去。在测量过程中, “河猫”的速度通常可比实际水的流速稍高一些。另外, 每次测量中要尽可能地保持拖船速度和河猫的航向不发生突变, 以获取最准确的测量。“河猫”一旦到达对岸, 尽可能将其固定, 并采集 5-10 秒的有效数据。这与测量开始时所描述的原因相似。

两次测量的测量历时分别为 16'25" (分'秒") 和 22'50"。实际上, 对于有着相近几何形状的河流, 测量时间通常在 15'和 30'之间。该断面的最大水深将近 8 米, 平均水深接近 5~

6 米。这完全在 1.5MHz “河猫” 的测量范围内。（根据不同的河流特性，1.5MHz “河猫” 正常的最大范围约为 22~25 米）。两次测量中，船速与流速的实际比值在 2~3 之间，比要求的略高一些（小于 1 为佳）。但在本例中，测量结果未受到船速较快的负面影响，这主要归功于测船的平稳操纵和均质的水流。

图 6 和图 7 显示了两个航次测量结果的图形显示（来自于 RiverSurveyor 软件）。每个显示中，船跟踪窗口显示了测船的航线（蓝线），绿线（速度矢量）表明所选断面的水流相对均匀。

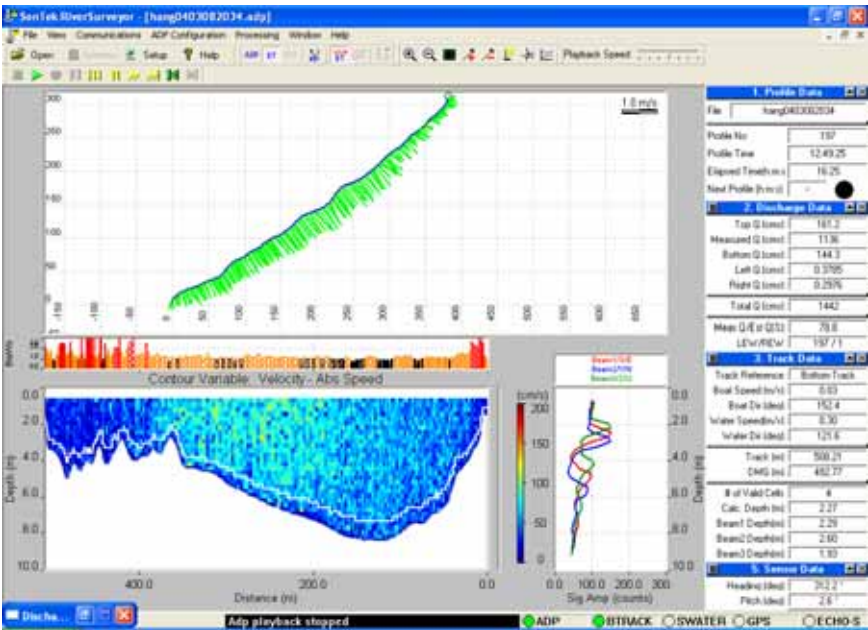


图 6 RiverSurveyor 软件显示屏幕，显示了第一个航次流量测量的结果

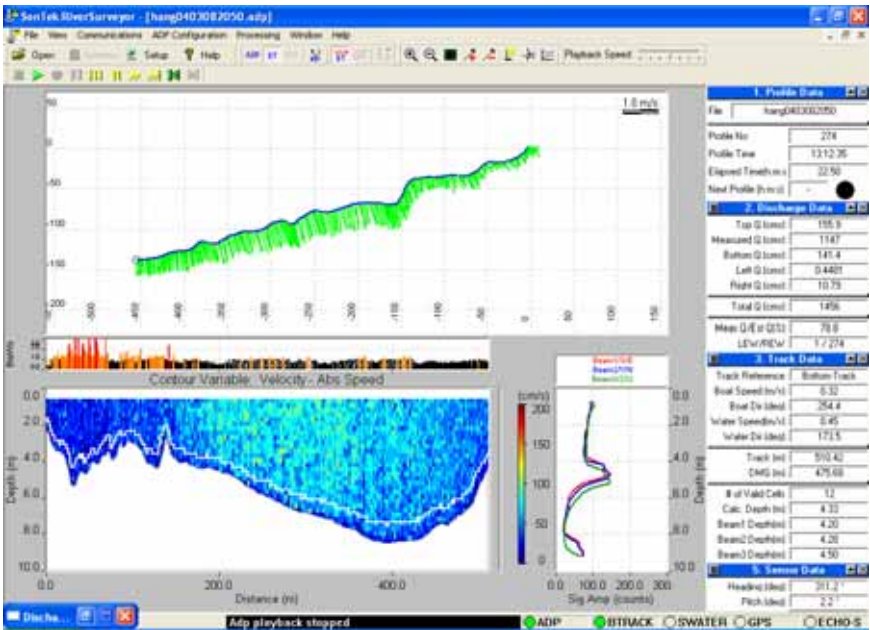
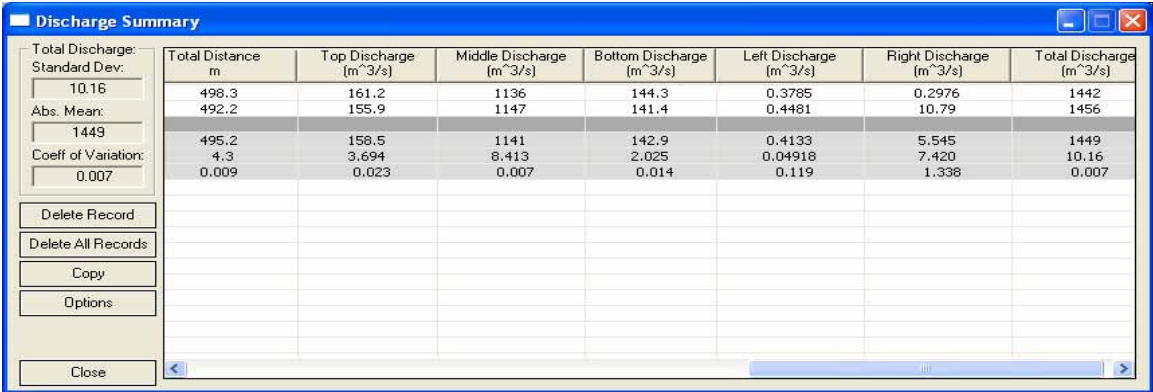


图 7 RiverSurveyor 软件显示屏幕，显示了第二个航次流量测量结果

图 8 给出了两次测量的结果小结（由 RiverSurveyor 软件自动输出）。在此郑重声明，本文中所列出的数据未经编辑或修改。所列结果完全与野外所采集的数据相同。

1.5MHz “河猫”走航式流量测量的结果表明所测平均流量为 1449 立方米/秒。两个连续流量测量间的均方差为 0.7%。在一般的测量中，如果二次测量的均方差在 5% 内，那么，这样的测量则被认为是有效的。由此可见，“河猫”的表现异常出色，远远超出了最小要求。



Total Distance m	Top Discharge (m³/s)	Middle Discharge (m³/s)	Bottom Discharge (m³/s)	Left Discharge (m³/s)	Right Discharge (m³/s)	Total Discharge (m³/s)
498.3	161.2	1136	144.3	0.3785	0.2976	1442
492.2	155.9	1147	141.4	0.4481	10.79	1456
495.2	158.5	1141	142.9	0.4133	5.545	1449
4.3	3.694	8.413	2.025	0.04918	7.420	10.16
0.009	0.023	0.007	0.014	0.119	1.338	0.007

图 8 RiverSurveyor 软件流量数据列表

结论

2004 年 3 月 9 日，在汉江黄家港水文站对 SonTek 1.5MHz ADP “河猫”系统与传统机械旋桨式流速仪进行了流量、流速和水深的比测。测量工作由长江水利委员会汉江水文水资源勘测局的工程师、SonTek/YSI 中国的工程师（Mark Tepper 和陈耀祖）以及 SonTek/YSI 首席水文专家 John V. Sloat 负责。

用走航式“河猫”测量的“总流量”与由机械旋桨式流速仪——采用传统 ISO/USGS 中点流量测量方法（在 USGS WSP 2175 vol. 1&2, Ranz 及其它中有描述）同步测得的“总流量”进行了对比。另外，用“河猫”的固定测量模式测量了 14 条垂线的水深和平均流速，布设的垂线与机械流速仪的传统垂线完全相同，且测量时间同步，这 14 条垂线等距离分布在河流断面上。

两种仪器的所有水深和平均流速实测的对比结果都非常接近。两种仪器间的平均水深差为 0.06 米。考虑到用铅鱼测深方法的精度为 0.1 米，这个差值可忽略不计。另外，河流的最大水深约为 8 米，平均水深约为 5~6 米，这使得平均后的水深差小于 1%。两种仪器的平均速度差为 0.02 米/秒，其误差在机械流速仪和“河猫”的测量精度范围内，这样的差别可忽略不计。因此，可得出以下结论，1.5MHz “河猫”与传统机械流速仪的水深和流速比

测结果是相同的。

1.5MHz 走航式“河猫”系统测量结果表明所测平均流量为 1449 立方米/秒。两个连续流量测量间的均方差为 0.7%。在一般的测量中，如果二次测量的均方差在 5% 内，那么，这样的测量则被认为是有效的。由此可见，河猫的表现异常出色，远远超出了最小要求。

由机械旋桨式流速仪和“河猫”实测的流量分别为 1460 和 1449 立方米/秒。机械流速仪和“河猫”所测流量的百分比差为 0.75%。

感谢

SonTek/YSI 以公司的名义对 SonTek 1.5MHz “河猫”和传统机械流速仪的比测的所有参与者及给予帮助者表示衷心的感谢。特别感谢长江水利委员会汉江水文水资源勘测局的工程师，他们不仅参与了比测，还组织并准备了测验设备，使野外测量顺利进行。



图9 来自 SonTek/YSI 和长江水利委员会汉江水文水资源局的工程师合影

摄于中国丹江口市汉江黄家港水文站

附录 1 定点测量 水深和平均流速 比测结果

黄家港水文站

垂线号	河猫数据 文件名	河猫 测量水深 (米)	机械流速仪 测量水深 (米)	河猫/机械流速 仪水深差(米)	河猫 平均流速 (米/秒)	机械流速仪 平均流速 (米/秒)	机械流速仪 测点流速 (米/秒)	机械流速仪 测点相对位置	河猫/机械流速 仪平均流速差 (米/秒)
1	1805	3.09	3.15	-0.06	0.14	0.11	0.11	0.6	0.03
2	1817	4.10	4.0	0.10	0.24	0.25	0.25	0.6	-0.01
3	1829	3.48	3.3	0.18	0.39	0.38	0.43 0.32	0.2 0.8	0.01
4	1839	4.35	4.35	0.00	0.49	0.50	0.56 0.43	0.2 0.8	-0.01
5	1848	5.17	5.2	-0.03	0.68	0.67	0.73 0.61	0.2 0.8	0.01
6	1856	5.75	5.7	0.05	0.67	0.73	0.84 0.61	0.2 0.8	-0.06
7	1904	6.18	6.2	-0.02	0.68	0.68	0.79 0.56	0.2 0.8	0.01
8	1913	6.55	6.6	-0.05	0.65	0.64	0.68 0.6	0.2 0.8	0.01
9	1924	6.93	7.0	-0.07	0.65	0.69	0.75 0.63	0.2 0.8	-0.04
10	1933	7.37	7.4	-0.03	0.69	0.68	0.75 0.6	0.2 0.8	0.01
11	1944	7.82	7.9	-0.08	0.76	0.78	0.78	0.6	-0.02
12	1954	8.38	8.4	-0.02	0.65	0.63	0.63	0.6	0.02
13	2008	8.42	8.4	0.02	0.58	0.57	0.57	0.6	0.01
14	2015	7.61	7.7	-0.09	0.55	0.56	0.56	0.6	-0.01
		平均水深差(米)					平均流速差(米/秒)		
		净水深差(米)					净“平均流速”差(米/秒)		
		最大水深差(米)					最大“平均流速”差(米/秒)		
		最小水深差(米)					最小“平均流速”差(米/秒)		

附录 2 流量比测结果

“河猫”(走航式)实测流量：	1449 立方米/秒
机械旋桨式流速仪实测流量：	1460 立方米/秒
百分比差(河猫与机械流速仪流量差)	-0.76%