

XKVMS-03 型表面流场测量及分析系统简介

(重庆西南水运工程科学研究所研制)

一、系统原理

XKVMS-03 表面流场测量及分析系统是基于粒子图像测速法 (PIV) 原理, 运用图像处理、模式识别与快速时序处理等技术开发研制的新一代表面流场测量及分析系统。该系统是国内首款通过计量部门计量认证的表面流场测量系统。其测量原理图如图 1 所示。

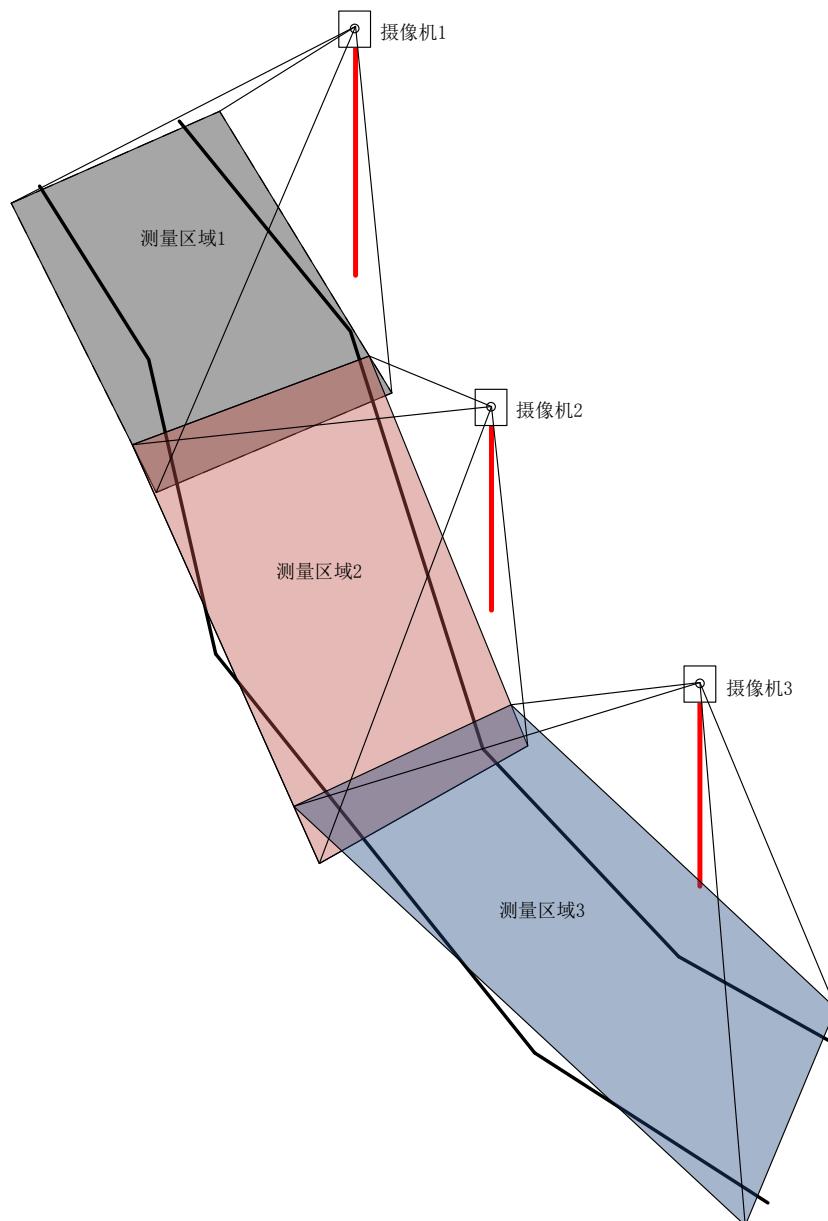


图 1 测量原理

如图 1 所示，对于需测量表面流场的河工模型而言，仅需利用支撑杆将摄像装置固定于模型侧边，调整摄像机视场使之覆盖测量区域即可进行测量。该系统不仅安装方便、灵活，而且可通过改变摄像机俯仰角度达到调整摄像区域大小的目的，整套系统**自校正、免标定**，即装即测，效率高。

在调研国内现有流场测量技术现状的基础上，创新性地设计了具有良好仿射变换鲁棒性的局部特征配准算法模块，有效提升了系统在示踪粒子高速运动、旋转、遮挡情况下的追踪能力。同时，算法设计沿用了具有自主知识产权的局部特征二值化并行处理框架，实现了高效率的多通道高分辨视频联合分析。同时，系统采用了基于区域表征的流速数据存储和融合方式，有效地去除了测量次数与测量精度在数据尺寸上的相关性。

二、技术特色

1、不限定示踪粒子，经济便携

采用局部特征配准方法，提高了对无约束的微小示踪粒子的追踪与自动识别能力，使得示踪粒子可就地取材（纸屑、浮漂均可），极大提高了测试便捷性，同时有效降低了测试成本。

2、摄像机免标定，即装即测

引入视场虚拟三维重建模块，从而摆脱了同类产品对于摄像机安装方式的限定，实现了“即时安装即时测量”，极大减少了测量前期的准备工作，增强了系统对于测量环境的适应性。

3、测量精准，复现率高

整合流速区域积累与趋势预测算法，有效提高了短时单次测量的稳定性，从而使系统测量结果的复现性明显优于同类产品。

4、不限次数据融合，可应用于超大规模模型测量

支持不同测量时间和网格尺寸的测量数据不限次数融合，使系统具有超大规模模型的整体测量能力。

5、自由视角，光照变化适应能力强

摄像机角度和架设位置可由用户自行选择，不仅使测量区域的选择更加灵活，而且可通过改变摄像机朝向，降低阳光、灯光照射产生的反光影响，提高系统对于光照变化的适应能力。

三、主要功能

- 1、恒定流场及非恒定表面流场测量；
- 2、多次测量结果的智能融合；
- 3、测量结果的自动及手动优化，包括平滑、填补、限速等；
- 4、多种格式输出，包括图片、动画、测量数据（Excel 及 CAD 格式）；
- 5、与其他产品测量数据的无缝整合。

四、技术参数

- 1、支持 8 通道同时测量；
- 2、单通道测量范围可达 6 米×4.5 米；
- 3、流速测量范围：0~5m/s；
- 4、流速精度为：[0.01~0.05]m/s 范围内优于 10%，（0.05~1.5]m/s 范围内优于 5%；（重庆市计量质量检测研究院计量测试认定）
- 5、流速方向精度：优于 0.5°；（重庆市计量质量检测研究院计量测试认定）
- 6、示踪粒子类型不限定，支持纸屑、木屑、标准浮漂等；
- 7、支持无线、有线摄像机连接方式。

五、系统配置

- 1、表面流场测量及分析系统软件 1 套；
- 2、高速笔记本 1 台；
- 3、1080p 高清网络摄像机 8 个；
- 4、高速视频采集器 1 台；
- 5、4m 摄像机支架 8 根；
- 6、30m 高速网络电缆 8 根；
- 7、使用说明书 1 本；
- 8、相关辅件 1 套。

六、后续服务

- 1、提供现场安装指导与人员培训；
- 2、提供两年内免费保修服务；
- 3、提供五年内免费升级服务。

XKVMS-03 型表面流场测量分析系统

计量测试报告

一、计量设备与原理

我单位研发的 XKVMS-01 型大范围表面流场测量分析系统在重庆市计量质量检测研究院进行了计量认定。

计量设备采用重庆市计量质量检测研究院与华气厚普机电设备股份有限公司联合研发的“基于伺服电机控制系统的流速仪检测装置”（以下简称“流速检测装置”），该设备流速检测范围为 0~4m/s，检测精度为 $\leq 0.5\%$ 。

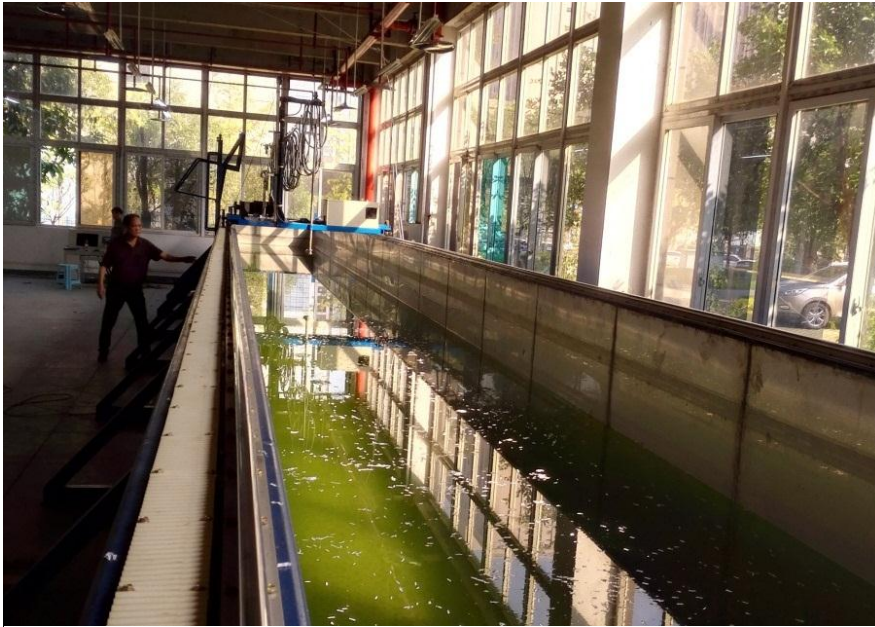


图 1. 基于伺服电机控制系统的流速仪检测装置

流速计量测试的基本原理为：①**流速大小的测试**：将待检系统摄像装置安装于流速检测装置的运动滑台上，流速检测系统水槽水体表面撒上示踪粒子（纸屑或浮漂），示踪粒子保持静止，运动滑台以设定速度移动，根据相对运动关系，摄像系统获取的运动影像即为示踪粒子以与运动滑台相反方向等速度值运动，通过后续处理，即可得到摄像系统中设定区域的流速分布。通过比较摄像系统中分布式流速值与流速检测装置设定流速值，即可实现对流场测量系统流速大小的计量认定。②**流速方向的测试**：摄像机的运动方向为 x 方向， y 方向无速度分量，通过将测量结果中 y 方向速度值与 x 方向速度值进行处理，即可获得速度矢量角度值。

二、计量工况

计量流速范围为 0.01~1.5m/s，流速检测系统水槽总长度为 50m，由于运动滑台存在一定的加速段，为此需选取其中的匀速段进行试验。摄像机摄取实时视频采用无线传输的形式发送至视频采集终端，编码方式为 H.264。



图 2. 现场试验图

计量工况设计如下表所示。

表 1. 计量工况

序号	设定速度	示踪粒子	测量区域	测量区域 (滑台初始位置为 0m)	测量时间
1	0.01m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
2	0.02m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
3	0.05m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
4	0.1m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
5	0.2m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
6	0.3m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
7	0.4m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
8	0.5m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
9	0.6m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
10	0.7m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
11	0.8m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
12	0.9m/s	纸屑	1.7m×2.5m	20m~30m	10s
13	1.0m/s	纸屑	1.7m×2.5m	25m~35m	10s
14	1.5m/s	纸屑	1.7m×2.5m	25m~40m	10s

三、整体测量精度分析

在 1.7m×2.5m 的测量范围内，待检系统同时对 425 个测量点进行测量，得到 425 个速度测量值（单位：m/s）。

定义某测量值 v_i 的绝对误差 $d_i = |V - v_i|$ ，其中 X 为该次测量的真值，对该次测量的最大测量误差 η 、均值 E 、算术平均误差 δ 、算数平均相对误差 γ 和标准误差 σ 进行分析，其计算公式为如下：

$$E = (\sum v_i) / n \quad (1)$$

$$\delta = (\sum d_i) / n \quad (2)$$

$$\gamma = \left(\frac{\delta}{X}\right) \times 100\% \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{(\sum d_i^2) / n} \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan \frac{v_x}{v_y} \quad (5)$$

其中， v_x 、 v_y 分别 x 与 y 方向的速度分量， $i = 1, 2, \dots, n$ ， n 为测量点数。

结果如表 2 所示。

表 2. 整体测量精度分析

序号	设定流速 X (m/s)	均值 E	标准误差 σ	算术平均 误差 δ	算数平均 相对误差 γ	最大角度偏 差 φ (°)
1	0.01	0.0108	0.0031	0.0009	9.0%	0.21
2	0.02	0.0218	0.0037	0.0019	9.5%	0.19
3	0.05	0.0536	0.0085	0.0048	9.6%	0.23
4	0.1	0.1006	0.0044	0.0027	2.7%	0.35
5	0.2	0.2044	0.0079	0.0055	2.75%	0.12
6	0.3	0.3113	0.0134	0.0114	3.80%	0.13
7	0.4	0.4182	0.0220	0.0183	4.57%	0.28
8	0.5	0.5194	0.0241	0.0203	4.06%	0.29
9	0.6	0.6187	0.0228	0.0197	3.28%	0.37
10	0.7	0.7228	0.0296	0.0249	3.55%	0.29
11	0.8	0.8238	0.0284	0.0250	3.12%	0.36
12	0.9	0.9281	0.0383	0.0318	3.53%	0.28
13	1.0	1.0362	0.0429	0.0378	3.78%	0.23
14	1.5	1.4615	0.0795	0.0732	4.88%	0.37

四、单个测量点测量精度分析

在对整体测量精度进行分析的基础上，在 425 个测量点中随机选择 A 和 B 两个点进行分析，其坐标为(1.35, 1.25)、(1.75, 2.25)。

定义：绝对误差 $d = |V - v|$ ，相对误差 $\gamma = \left(\frac{d}{v}\right) \times 100\%$ ，其中 V 为该次测量的真值， v 为该次测量值。

单个测量点测量精度分析结果如表 3 所示。

表 3. 单一测试点测量精度分析

序号	真值 X	测量值 x		绝对误差 d		相对误差 γ	
		A	B	A	B	A	B
1	0.01	0.0109	0.0108	0.0009	0.0008	9%	8%
2	0.02	0.0194	0.0203	0.0006	0.0003	3%	1.5%
3	0.05	0.0499	0.0504	0.0001	0.0004	0.2%	0.8%
4	0.1	0.0992	0.0989	0.0008	0.0011	0.8%	1.1%
5	0.2	0.1996	0.2049	0.0004	0.0049	0.2%	2.4%
6	0.3	0.3065	0.3066	0.0065	0.0066	2.16%	2.2%
7	0.4	0.4121	0.4109	0.0121	0.0109	3.02%	2.72%
8	0.5	0.5217	0.5030	0.0217	0.0030	4.34%	0.6%
9	0.6	0.6222	0.6033	0.0222	0.0033	3.7%	0.55%
10	0.7	0.7158	0.7046	0.0158	0.0046	2.26%	0.66%
11	0.8	0.8288	0.8085	0.0288	0.0085	3.6%	1.06%
12	0.9	0.9377	0.9148	0.0377	0.0148	4.18%	1.64%
13	1.0	1.0407	1.0145	0.0407	0.0145	4.07%	1.45%
14	1.5	1.5284	1.4764	0.0284	0.0236	1.89%	1.57%

采用最小二乘法计算出的点 A 与真值相关系数 r_A 的值为 0.9999，点 B 与真值相关系数 r_B 的值为 0.9998。

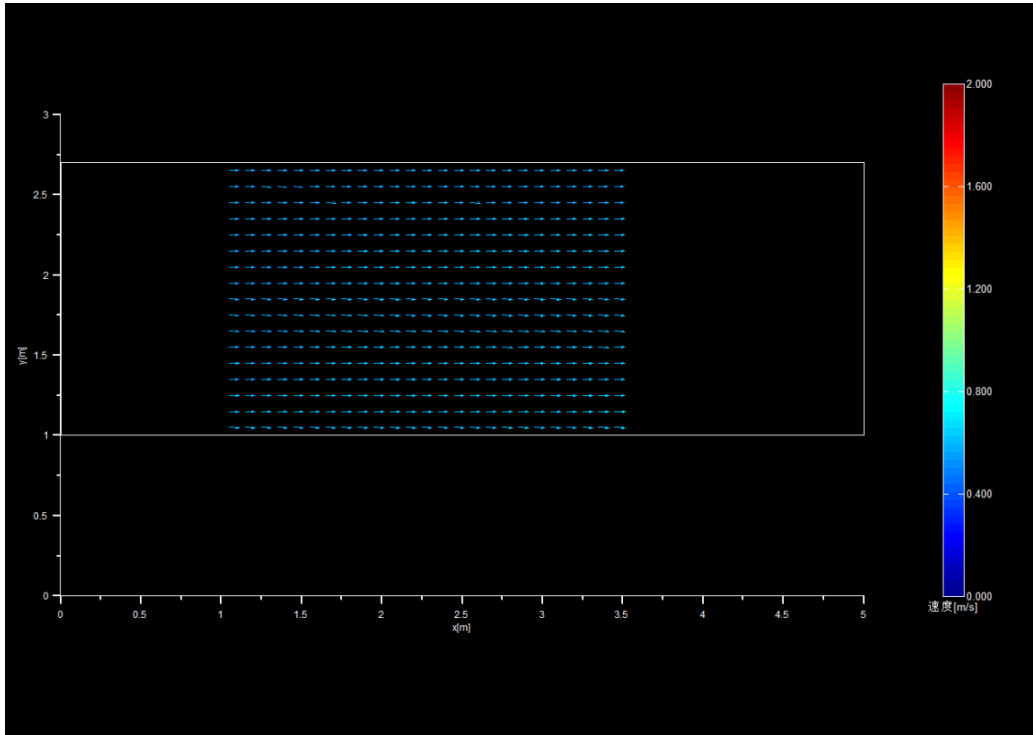


图 3. 0.6m/s 流场图

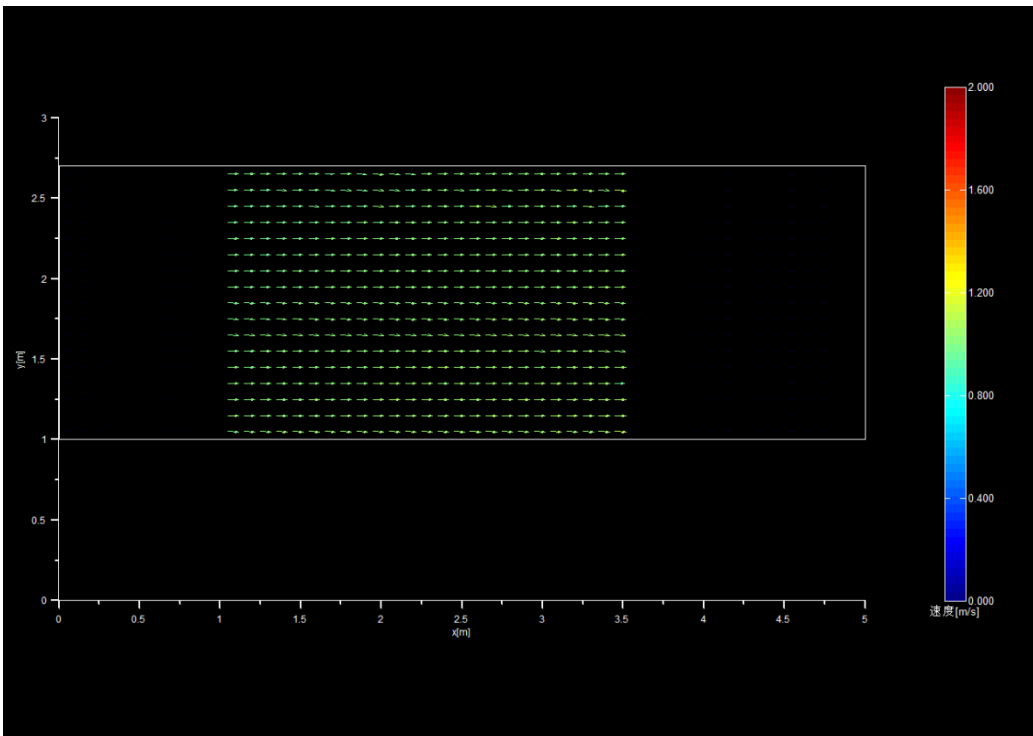


图 4. 1.0m/s 流场图

五、结论

通过对待检系统的计量检测，得出如下结论：

- (1) 通过对整体流速测量结果与单个测量点测量结果的统计分析可知，待

检系统的测量精度达到如下指标：[0~0.05m/s]范围内为 10%，(0.05 m/s ~1.5m/s) 范围内为 5%；0~1.5m/s 范围内，流速测量角度偏差均小于 0.5°。

(2) 通过对待检系统流场测量过程的分析可知，该流速测量测量还具有以下特点：①测量点密。待检系统在 1.7m×2.5m 的测量范围内，可同时对 425 个测量点进行测量，能够对流体的局部细微流态进行反映。②测量过程简易：待检系统具备自适应全自动校正功能，测试前无需校准，即安装即测量；③测量时间短：对于 1.7m×2.5m 的测量范围内 425 个测量点的流速测量仅需 10s。

六、应用案例

该系统已在向家坝长河段非恒定流河工模型、蜀河水电站工程航运整体水工模型等十余个物理模型中进行了应用，测量结果如下图所示。

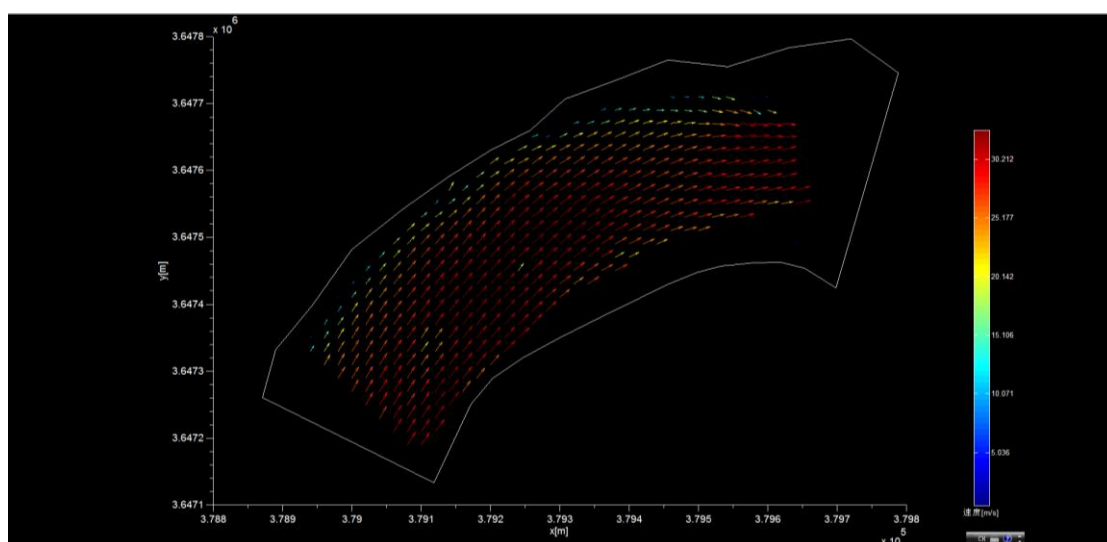


图 5.蜀河水电站工程航运整体水工模型 (Q=5000m³)

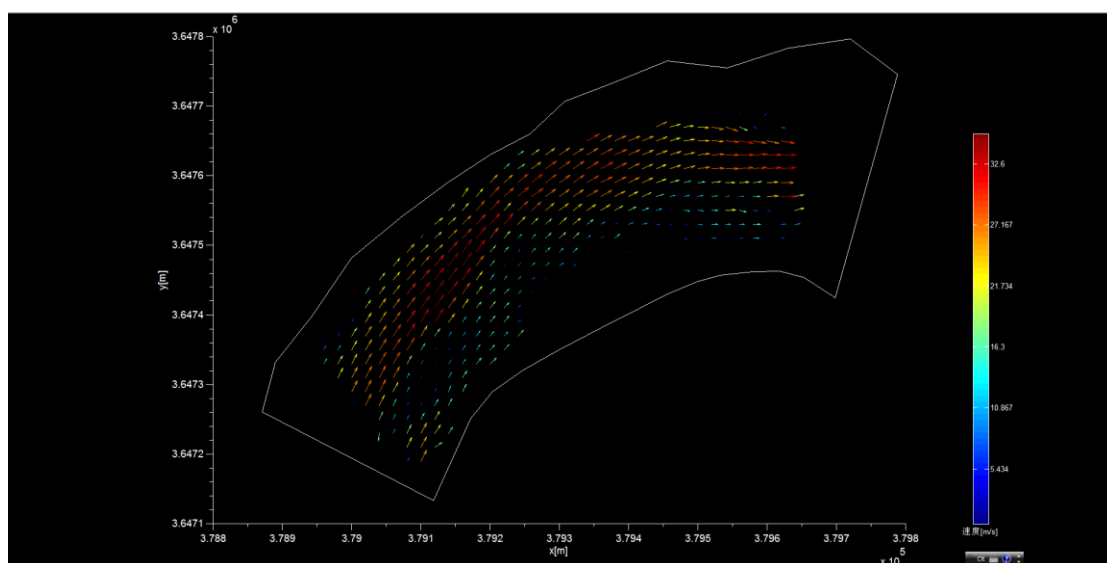


图 6.蜀河水电站工程航运整体水工模型 (Q=3000m³)

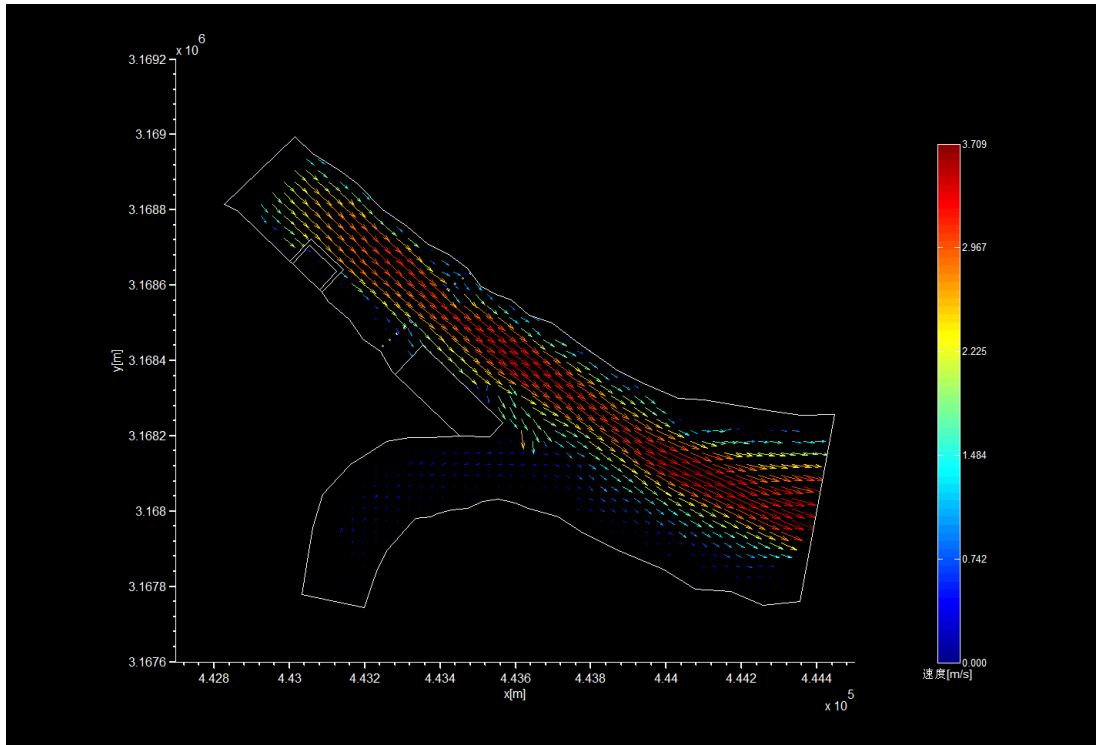


图 7.金沙江横江汇合口流场图 ($Q_{\text{金}}=11000\text{m}^3$ 、 $Q_{\text{横}}=300\text{m}^3$)

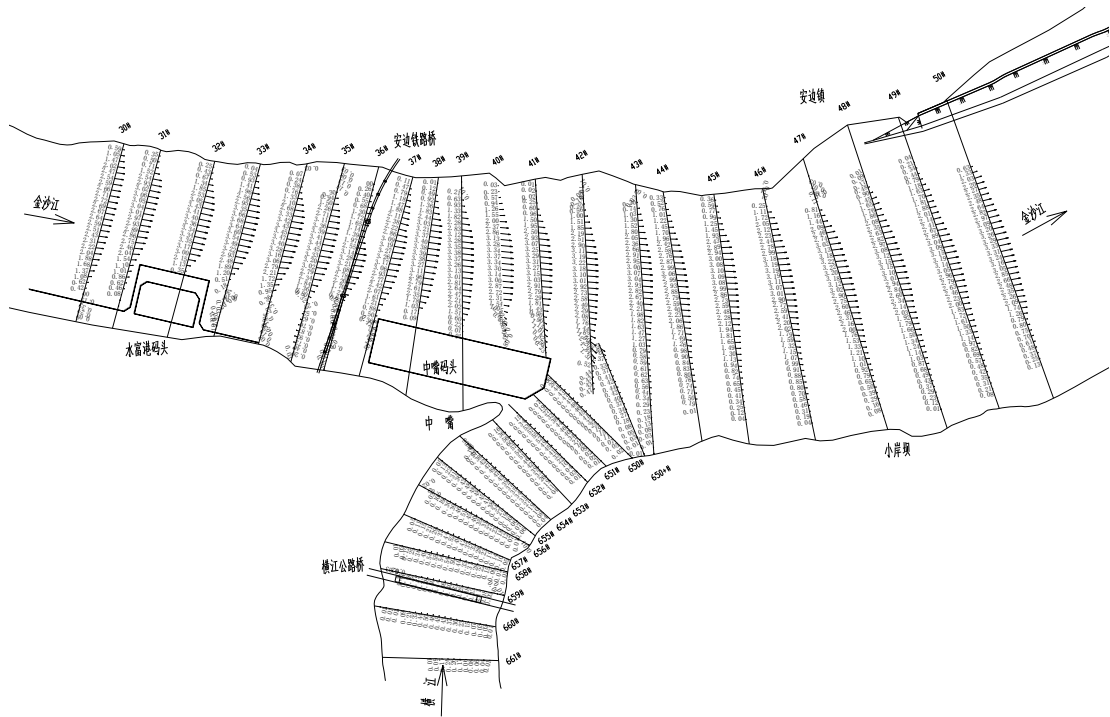


图 8.金沙江横江汇合口流速断面图 ($Q_{\text{金}}=11000\text{m}^3$ 、 $Q_{\text{横}}=300\text{m}^3$)

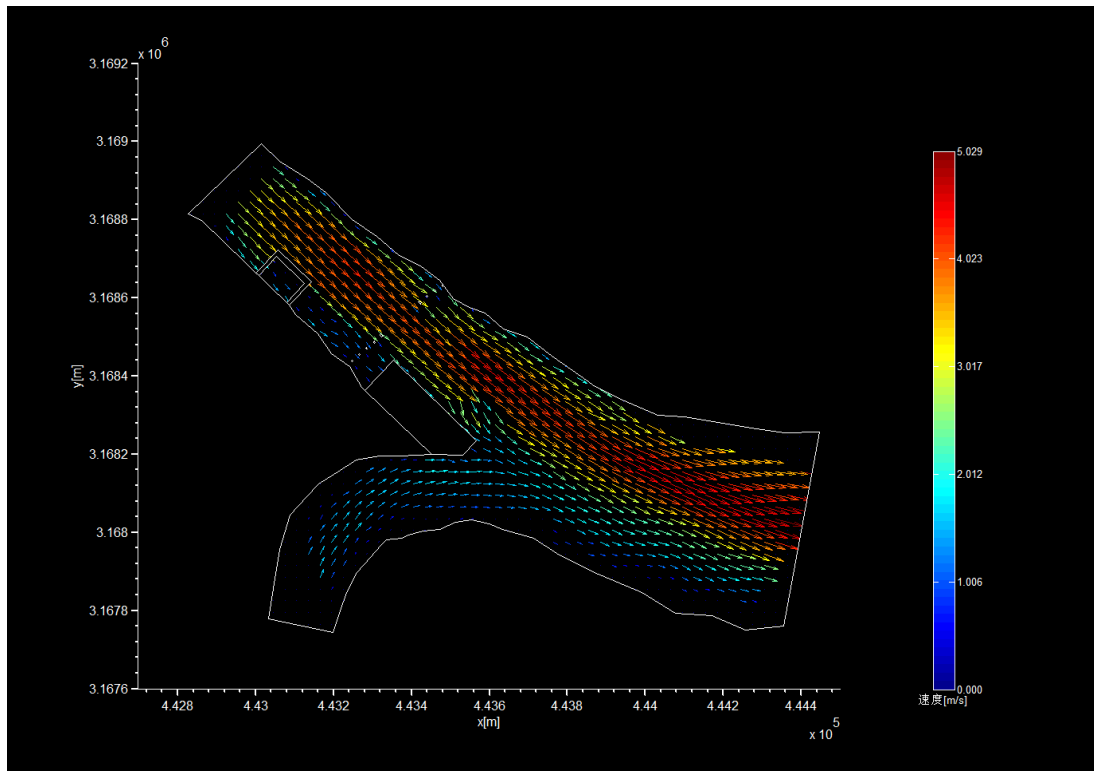


图 9.金沙江横江汇合口流场图 (Q 金=16800m³、Q 横=2560m³)

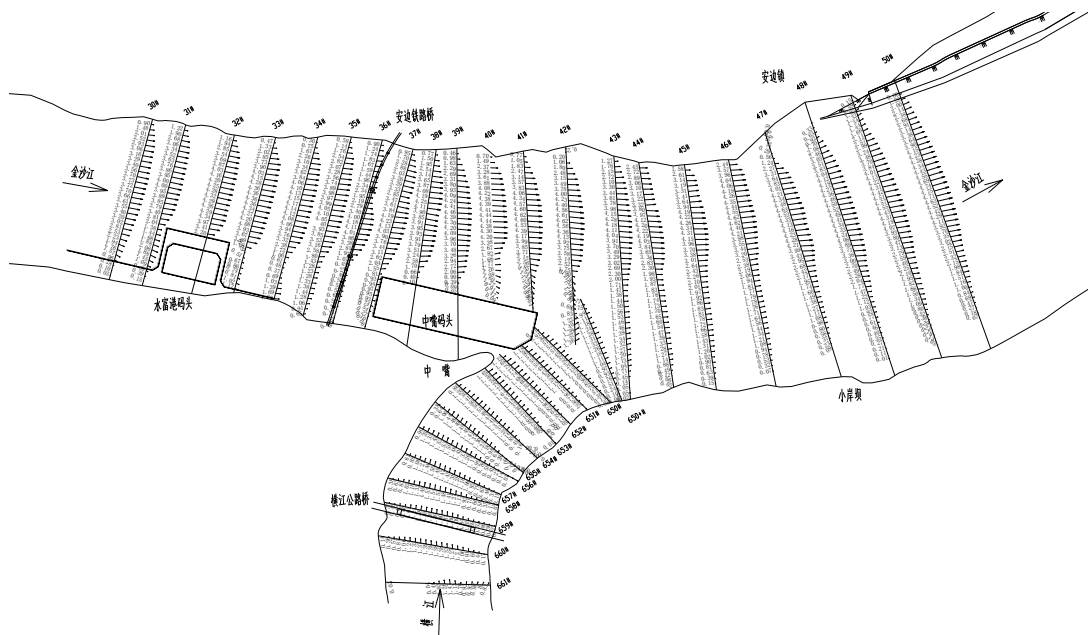


图 10.金沙江横江汇合口断面流速图 (Q 金=16800m³、Q 横=2560m³)