



HEDAOLIULIANGCEYAN YINYONGYUFENXI

LEIDABO CESUYI

# 雷达波测速仪 河道流量测验应用与分析

王文华 主编



甘肃科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

雷达波测速仪河道流量测验应用与分析 / 王文华主编  
. -- 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2016.8  
ISBN 978-7-5424-2349-8

I. ①雷… II. ①王… III. ①雷达波形—流速仪  
IV. ①S932.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 207495 号

出 版 人 王永生  
责任编辑 陈 檠 (0931-8773238)  
封面设计 王 昌  
出版发行 甘肃科学技术出版社 (兰州市读者大道 568 号 0931-8773237)  
印 刷 甘肃澳翔印业有限公司  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 9.75  
字 数 150 千  
插 页 1  
版 次 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷  
印 数 1 ~ 400  
书 号 ISBN 978-7-5424-2349-8  
定 价 26.00 元

## 《雷达波测速仪河道流量测验应用与分析》编委会

项目负责人：赵映东

技术负责人：王汉卿

主 编：王文华

参编人员：张春林 凡炳文 仲复捷 黄晓明 马龙剑

张 涛 张德栋 王 东 张正海 桑鹏图



## 前言

随着甘肃省中小河流水文监测系统项目建设，许多新型的、自动化的水文仪器和设备在水文测报中得到了应用，这不仅提高了测验的时效性和安全性，同时，也改善了水文站测验设施设备落后的状况。然而，这些水文新仪器、新设备，尽管得到了大量的安装和使用，但是实际应用效果怎样？存在什么问题？能否达到项目建设应用目的、取得应有的投资效益？这就需要广大水文职工认真学习掌握新仪器的性能和操作技能，做好新仪器、新设备在应用初期的试验研究工作，积累工作经验，将对更加全面地利用好新设备、新仪器的功能，促进仪器改进，加快水文测报自动化步伐产生重大的意义。

目前，我省乃至北方的大洪水流量测验手段仍主要靠浮标法。由于北方河流比降大，流速高，特别是一些流域植被差的中小河流，产汇流时间短，暴雨洪水过程陡涨陡落，峰顶持续时间短，水流对铅鱼、流速仪的冲击力大，还有水体中漂浮物的影响，致使流速仪法施测流量无法进行。对大洪水时的流量测验，浮标法有时仍然是一种唯一的方法。而 S3-SVR II 型无线遥控雷达波数字化测流系统（以下称“雷达波测速仪”）的研发推出、不断完善，为洪水流量测验工作提供了一种新的设备和方法。因此，做好“雷达波测速仪”的应用试验研究，对提高洪水流量测验精度、缩短测报时间，特别是应对中小河流特殊水情流量测验、中小河流山洪预警、防汛抗洪，做好水文支持具有重要作用。



## 项目的必要性

中小河流水文监测系统项目建设，要求新设水文站测验报汛工作由固守断面向无人职守、有人看护、自动测报、巡测管理的方式转变，而这一转变则要求在水文测报工作中必然要采用新技术、新仪器。随着多普勒雷达波测速技术的不断成熟，造价的不断降低，雷达波测速技术在水文领域得到了广泛应用。

在甘肃省中小河流水文监测系统项目建设中，对于洪水测验，既建设了浮标法流量测验设施，也采用了雷达波测速仪流量测验设备。通过实地测试，提前发现和解决雷达波测流在安装运行中可能遇到的问题，为雷达波测流在全省范围内安装和使用积累经验，做好技术准备是很有必要的。

为了积极稳妥地在水文工作中推广雷达波测流系统的使用，在各类流量精度的水文站就雷达波测流的使用方法、测速误差、流量测验精度等方面进行比测试验，从雷达波测流的基本原理、专用缆道和仪器的安装、无线遥控测流软件安装及步骤，通过实地比测数据分析及遇到的问题及故障等方面进行分析总结，评价“雷达波测速仪”的稳定性、适用性及其数据采集的准确性，数据传输的可靠性，是十分必要的。

## 项目的创新性

“雷达波测速仪”是一种新型的非接触式河道流量测验系统，通过用它与转子流速仪比测分析雷达实测水面流速误差及流量测验精度，经过雷达波测速仪摆动测速等试验对仪器提出了改进意见和使用注意事项，为雷达测流系统在水文流量测验中的应用提供可借鉴的经验。

## 项目的主要任务

采用“雷达波测速仪”与 LS25-1 型机械转子式流速仪同步进行流



量测验,主要有以下几个任务:①了解“雷达波测速仪”的设备性能及其可靠性,掌握其使用方法;②通过比测试验结果分析雷达波无线遥控测流系统在实操和测验过程中存在什么问题?如何解决?③测试“雷达波测速仪”水面流速测量的精度;④测试“雷达波测速仪”在各类精度水文站上进行河道流量测验的精度;⑤通过比测试验分析结果说明“雷达波测速仪”在甘肃省中小河流水文监测项目建设中是否适合大范围推广使用。

## 项目的研究成果

项目试验了摆动等因素对雷达波测速精度的影响,估算了雷达波测速仪流量测验不确定度。根据《河道流量测验规范》(GB50179-93)的有关规定,以转子流速仪实测水面流速和河道流量的测验结果为标准,分析了雷达实测水面流速误差及河道流量测验精度,提出了“雷达波测速仪”的使用条件和范围,以及仪器改进意见。



# 目 录

|          |                      |    |
|----------|----------------------|----|
| <b>1</b> | <b>雷达波测速仪测流系统</b>    |    |
| 1.1      | 雷达波测速仪测流系统简介 .....   | 1  |
| 1.1.1    | 系统组成 .....           | 1  |
| 1.1.2    | 系统性能 .....           | 2  |
| 1.1.3    | 技术规格 .....           | 3  |
| 1.2      | 雷达波测速仪测流系统工作原理 ..... | 6  |
| 1.2.1    | 雷达波测速仪测速 .....       | 6  |
| 1.2.2    | 流速测量与计算 .....        | 6  |
| 1.3      | 测流系统软件安装 .....       | 7  |
| 1.3.1    | 软件安装 .....           | 7  |
| 1.3.2    | 流量测验操作 .....         | 12 |
| 1.4      | 测流操作注意事项 .....       | 15 |
| 1.4.1    | 建立水文站流量测验文件 .....    | 15 |
| 1.4.2    | 检查核对参数设置 .....       | 15 |
| 1.4.3    | 校正起点距 .....          | 16 |
| 1.4.4    | 选择测流方法 .....         | 16 |
| 1.4.5    | 修改水位数据 .....         | 16 |
| 1.4.6    | 数据存贮 .....           | 17 |
| 1.4.7    | 故障处理 .....           | 17 |
| 1.5      | 雷达波测速仪安装与维护 .....    | 17 |
| 1.5.1    | 雷达波测速仪安装 .....       | 17 |
| 1.5.2    | 充电 .....             | 17 |
| 1.5.3    | 仪器保养 .....           | 18 |



|          |                      |    |
|----------|----------------------|----|
| <b>2</b> | <b>流量模型</b>          |    |
| 2.1      | 流量 .....             | 19 |
| 2.2      | 流速 .....             | 20 |
| 2.2.1    | 流速脉动 .....           | 20 |
| 2.2.2    | 河道中流速分布 .....        | 21 |
| 2.3      | 流量模型 .....           | 23 |
| <b>3</b> | <b>流量测验方式方法</b>      |    |
| 3.1      | 流量测验方式 .....         | 25 |
| 3.1.1    | 根据水文站的运行管理情况分类 ..... | 25 |
| 3.1.2    | 根据水文站的渡河设施分类 .....   | 26 |
| 3.2      | 方式选择的一般原则 .....      | 26 |
| 3.3      | 流量测验方法 .....         | 27 |
| 3.3.1    | 流量测验方法分类 .....       | 27 |
| 3.3.2    | 流速面积法 .....          | 28 |
| <b>4</b> | <b>断面测量</b>          |    |
| 4.1      | 断面测量内容 .....         | 33 |
| 4.2      | 断面测量基本要求 .....       | 33 |
| 4.2.1    | 测量范围 .....           | 33 |
| 4.2.2    | 测量时间 .....           | 33 |
| 4.2.3    | 测量精度要求 .....         | 34 |
| 4.2.4    | 测点布设 .....           | 34 |
| 4.2.5    | 水位观测 .....           | 36 |
| 4.3      | 水深测量 .....           | 36 |
| 4.3.1    | 测深杆测深 .....          | 36 |
| 4.3.2    | 测深锤测深 .....          | 36 |
| 4.3.3    | 铅鱼测深 .....           | 36 |
| 4.3.4    | 超声波测深 .....          | 37 |
| 4.4      | 水深测量注意事项 .....       | 38 |



|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 4.5 宽度 ( 起点距 ) 测量的规定与要求 ..... | 39 |
| 4.5.1 宽度测量一般规定 .....          | 39 |
| 4.5.2 使用平面交会法的规定 .....        | 39 |
| 4.5.3 使用极坐标交会法的规定 .....       | 39 |
| 4.6 宽度测量方法 .....              | 40 |
| 4.6.1 平面交会法 .....             | 40 |
| 4.6.2 极坐标交会法 .....            | 42 |
| 4.6.3 定位法 ( GPS 法 ) .....     | 43 |
| 4.6.4 建筑物标志法 .....            | 46 |
| 4.6.5 地面标志法 .....             | 46 |
| 4.6.6 直接量距法 .....             | 47 |
| 4.6.7 断面索法 .....              | 47 |
| 4.6.8 缆道测距 .....              | 47 |
| 4.6.9 测距仪法 .....              | 78 |
| 4.7 断面资料的整理与计算 .....          | 48 |
| 4.7.1 计算河底高程及绘制大断面图 .....     | 48 |
| 4.7.2 断面面积的计算 .....           | 48 |
| <b>5 流速仪法与雷达波法流量测验</b> .....  |    |
| 5.1 流速仪法流量测验 .....            | 50 |
| 5.1.1 转子流速仪工作原理 .....         | 50 |
| 5.1.2 流速仪法测流原理 .....          | 52 |
| 5.2 流速仪 .....                 | 53 |
| 5.2.1 旋杯式流速仪 .....            | 53 |
| 5.2.2 旋桨式流速仪 .....            | 54 |
| 5.3 雷达波测速仪测流 .....            | 56 |
| 5.3.1 缆道位置 .....              | 56 |
| 5.3.2 钢丝绳 .....               | 57 |
| 5.3.3 标记起点距开始位置 .....         | 57 |



## 6 水文测验误差

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 6.1 误差的基本概念.....        | 58 |
| 6.1.1 测量误差的必然性.....     | 58 |
| 6.1.2 测量误差的普遍性.....     | 59 |
| 6.1.3 水文测量的误差及其研究 ..... | 59 |
| 6.2 测量误差来源.....         | 60 |
| 6.2.1 模型（也称方法）.....     | 60 |
| 6.2.2 测量仪器设备.....       | 60 |
| 6.2.3 观测者 .....         | 60 |
| 6.2.4 自然环境.....         | 60 |
| 6.2.5 被测对象.....         | 61 |
| 6.2.6 数据处理.....         | 61 |
| 6.3 测量“值”的概念.....       | 61 |
| 6.3.1 真值.....           | 61 |
| 6.3.2 观测值.....          | 62 |
| 6.3.3 估计值.....          | 62 |
| 6.3.4 平均值.....          | 63 |
| 6.3.5 数学期望值.....        | 64 |
| 6.4 测量误差分类.....         | 64 |
| 6.4.1 粗差 .....          | 64 |
| 6.4.2 系统误差.....         | 64 |
| 6.4.3 偶然误差.....         | 65 |
| 6.5 偶然误差的统计性质.....      | 66 |
| 6.6 真值的统计学定义.....       | 67 |
| 6.7 测量误差的表示形式.....      | 68 |
| 6.7.1 绝对误差.....         | 68 |
| 6.7.2 相对误差.....         | 69 |
| 6.7.3 平均误差.....         | 70 |
| 6.7.4 方差.....           | 70 |
| 6.7.5 均方差.....          | 72 |



|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 6.7.6 中误差 .....                | 72 |
| 6.7.7 均方误差 .....               | 73 |
| 6.7.8 相对中误差 .....              | 73 |
| 6.7.9 或然误差 .....               | 73 |
| 6.7.10 极限误差 .....              | 74 |
| 6.7.11 限差 .....                | 74 |
| 6.8 不确定度 .....                 | 75 |
| 6.8.1 不确定度的概念 .....            | 75 |
| 6.8.2 不确定度的分类 .....            | 75 |
| 6.8.3 不确定度与误差的关系 .....         | 77 |
| 6.9 测量结果的评定指标 .....            | 78 |
| 6.9.1 精密度 .....                | 78 |
| 6.9.2 准确度 .....                | 79 |
| 6.9.3 精确度 .....                | 79 |
| 6.9.4 不确定度 .....               | 79 |
| 6.10 误差的传播 .....               | 79 |
| <b>7 测流系统比测试验</b>              |    |
| 7.1 测验误差 .....                 | 81 |
| 7.2 方法和精度要求 .....              | 81 |
| 7.2.1 比测 .....                 | 81 |
| 7.2.2 比测精度要求 .....             | 83 |
| 7.3 比测站及参数设置 .....             | 83 |
| 7.3.1 流量测验的精度划分 .....          | 83 |
| 7.3.2 选择比测站及其断面位置 .....        | 84 |
| 7.4 比测站水文特性 .....              | 85 |
| 7.4.1 红旗站所在流域概况及水文特性 .....     | 85 |
| 7.4.2 冶力关（二）站所在流域概况及水文特性 ..... | 87 |
| 7.4.3 王家磨站所在流域概况及水文特性 .....    | 89 |
| 7.5 比测期间的水文情势 .....            | 90 |
| 7.6 水文要素比测试验 .....             | 91 |



|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 7.6.1 宽度测量（起点距定位） .....  | 91         |
| 7.6.2 比测采用断面资料 .....     | 91         |
| 7.6.3 测量流速试验 .....       | 91         |
| 7.6.4 参数设置试验 .....       | 92         |
| 7.7 流速比测 .....           | 95         |
| 7.8 水面流速比测误差分析 .....     | 100        |
| 7.8.1 粗差分析处理 .....       | 100        |
| 7.8.2 系统误差分析处理 .....     | 101        |
| 7.8.3 偶然误差的分析处理 .....    | 106        |
| 7.8.4 水面流速比测结果 .....     | 111        |
| <b>8 流量测验比测成果分析</b>      |            |
| 8.1 流量测验比测 .....         | 113        |
| 8.1.1 水面系数比测及确定 .....    | 113        |
| 8.1.2 风对水面流速的影响 .....    | 119        |
| 8.1.3 雷达波流量测验成果 .....    | 119        |
| 8.1.4 断面流速分布合理性分析 .....  | 123        |
| 8.2 随机不确定度的分析估算 .....    | 127        |
| 8.3 流量测验误差分析 .....       | 130        |
| 8.3.1 误差分析理论依据 .....     | 130        |
| 8.3.2 雷达波测速仪测流结果分析 ..... | 132        |
| <b>9 结论与建议</b>           |            |
| 9.1 仪器性能的适应性 .....       | 136        |
| 9.2 试验结果与测验规范的符合性 .....  | 136        |
| 9.3 存在问题 .....           | 137        |
| 9.4 比测结果与讨论 .....        | 138        |
| 9.5 结语 .....             | 140        |
| <b>参考文献 .....</b>        | <b>141</b> |



# 1 雷达波测速仪测流系统

## 1.1 雷达波测速仪测流系统简介

“雷达波测速仪”测流系统是一种由雷达波测速仪和计算机组成的新型的非接触式快速流量测验系统。系统采用了雷达波多普勒水体表面测速、起点距定位移动姿态精确控制、指令信息无线数字化传输、数据实时分析处理等大量新技术，是一种自动化程度高的测流系统。

### 1.1.1 系统组成

系统由雷达波测速仪、数据处理器（计算机）、测验专用缆道、附件等组成（如图 1-1 所示）。



图 1-1 雷达波测速仪测流示意图

(1) 雷达波测速仪: 由电磁多普勒雷达波测速传感器、步进驱动器、PLC、信号无线传输及内置锂电池组成。



(2) 数据处理器：由便携式计算机、无线遥控模块、测流软件等组成。

(3) 测验专用缆道：使用“雷达波测速仪”进行流量测验须在能获取断面资料的专用缆道上进行。根据河道具体情况，可架设一个缆道，也可架设高度不同的两个缆道，高缆道用于高洪测流，低缆道用于日常测流。通常，河道断面宽度不超过 300m 时，缆道钢丝绳直径采用 4.2mm；当河道断面宽度超过 300m 时，钢丝绳应加粗，在缆道上定位行走的滑轮须相应匹配。

断面资料获取途径，一是利用测验过河设施，如缆道（铅鱼、吊箱）、测船（动力、吊船）、测桥等，二是人工涉水测量。

(4) 附件：包括平衡球、充电器、车载逆变器、便携式打印机等。

### 1.1.2 系统性能

(1) “雷达波测速仪”流量测验采用流速面积法原理。计算机遥控步进电机定位雷达波测速仪起点距，雷达快速测量水体表面流速，并无线传输信息到计算机，测流软件自动采集存储起点距对应的流速数据，结合测验断面资料计算河流流量。图 1-2 是“雷达波测速仪”工作示意图。

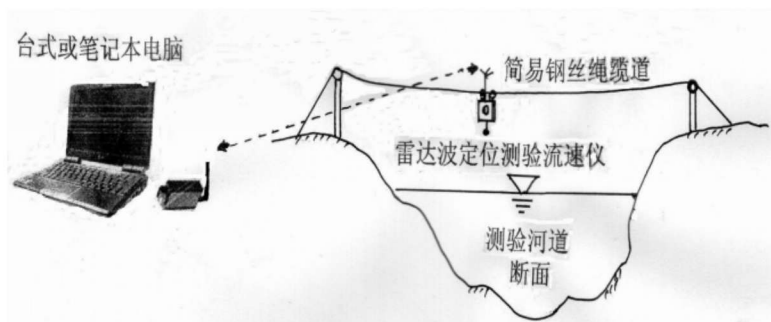


图 1-2 “雷达波测速仪”工作示意图



(2) “雷达波测速仪”主要用于大洪水流量测验。测验以非接触方式进行，系统操作简单。流速数据采集记录由计算机测流软件自动完成，有参数设置、断面垂线设置、施测流速、计算流量等操作控制界面。测验完成后可立即计算出流量，显示、打印、存储测流成果均可。

(3) 软件可实现自动测流、手动测流、起点距定位、垂线补充测流、动画演示、数据自动保存计算、报表导出、水位变化处理、水边处理、河床变化处理、死水面积处理等。测流软件按《水文测验规范》的格式要求生成<流量测验成果表>。

(4) 仪器运行电源由内置式可充式锂电池提供，测验工作不受公用电网停电等影响。电池容量大，一次充电可连续运行 5h 以上，当显示电压低的红灯亮时，还可测验 20min。

(5) 仪器有自动归位功能。当计算机关闭或出现故障，只要不再次打开计算机，200s 后仪器可自动返回到起始点，不会停留在河中位置。

(6) 雷达波测速仪体积小、重量轻、能与缆道分离，测验时可随时安装、拆卸。安装、拆卸、流量测验等操作可一人完成，一机能在多站使用，便于巡测。

### 1.1.3 技术规格

#### (1) 主要技术指标

起点距范围：-2000 ~ 2000m

测速范围：0.2 ~ 18m/s

雷达俯角：低流速 30°，常规 45°，降雨 60°

也可选 35°、40°、50°、55°

最大垂线数：50 条

最大运行速度：60m/s

测速时间：5 ~ 200s



故障自动返回时间：200s

供电方式：锂电池，24V

工作温度：-10℃ ~ 40℃

## （2）外型尺寸及重量

机壳尺寸：298mm × 298mm × 88mm

传动轮直径：69mm

仪器重量：7.2kg

平衡球重量：2.1kg

## （3）关键元器件技术规格

### ①雷达波测速传感器（雷达波探头）

流速范围：0.2 ~ 18m/s

流速精度：± 0.03m/s

平均时长：0 ~ 99.9m/s

波束宽度：12°（锥度角）

计时分辨率：0.1s

发射功率：50mw

雷达频率：Ka 波段（34.7GHz）

有效测程：0 ~ 100m

风雨模式：自动

### ②无线控制模块

无线传输：Zigbee/IEEE802.15.4

名义传输距离：2000m

频率：2.4G

发射功率：25dbm

波特率：9600



数据接口：USB（计算机端）RS232（测流仪端）

### ③步进电机

驱动方式：双极并联

相电流：3.0A

相电阻：0.8Ω

电压：2.46V

相电感：3.8mH

转动惯量： $4.8 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$

### ④驱动器

电源电压：10 ~ 40VDC

斩波频率：>35KHZ

输入信号：TTL 兼容

节能方式：电流无 CP 脉冲自动减半

最大驱动电流：3A/ 相

斩波方式：双极性恒流

信号输入：光电隔离

细分倍数：2、4、8、16、32、64

### ⑤电源

24V 锂聚合物电池

☆容量：24V10Ah

☆电池寿命：充放电 500 次

☆ 24V 转 12V 变压模块

☆运行指示灯

☆电压不足信号灯

220V 电源充电器