

便携式断面流量测量系统设计与实现

李先瑞^{1,2}, 许 斌¹, 倪文军¹, 张 磊¹

(1. 交通运输部 天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要:为便于进行明渠间流速流量及水深测量,设计一种便携式断面流量测量系统。根据现场环境对流速和测量水深要求,设计量程为 20 kPa 高频压力敏感元件的压力传感器,在基于标准恒流源条件下,灵敏度优于 0.25% FS;设计量程 10 m/s 三叶锁存型霍尔效应磁敏传感器旋桨,利用水流动力推动旋桨运动获得旋桨转数,启动速度优于 0.02 m/s,精度优于 2%;基于 ARM Cortex®-M3 内核作为逻辑处理单元,选用 12 位 A/D 转换器,实时存储并通过 NB-IoT 低功耗广域网上传数据至管理中心。该测量装置便于携带、质量轻,可单人单手操作、现场实时测量。

关键词:流量;流速;水深;测量系统

中图分类号: TP216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2023)06-0208-08

水资源看似用之不尽,实则危机已现。现如今工业用水、农业用水以及居民生活用水量日益剧增,国家水资源越来越紧张,另外水污染也使可利用的水资源越来越少^[1-3]。如何打赢打好碧水保卫战,严格控制水资源利用已是亟须解决的问题,而解决这些问题的根本是如何准确测量水的流量流速,从而实时掌握来水、取水、用水和排水动态,保证信息的准确性和实时性。因此,明渠流量的实时监测和精确测量显得非常重要。

文献[4-6]提出采用雷达或超声等非接触式水位计进行水深的测量工作,该方式可靠性高,测量过程中不会产生淤堵,但该方式在测量过程中有一定盲区和发射角,该局限性决定其只能测量某些渠道断面;文献[7-9]提出使用 ADCP(声学多普勒流速剖面仪)进行流速和水深测量,其测量一次即可获得剖面上若干层水流速度的三维分量和方向,但针对直线明槽式检定精度较差。

为实现明渠流量流速及水深测量的便捷性和准确性,本文介绍一种便携式流速水深测量装置,可实现灌溉明渠的水深、流速及流量测量,并将测量结果实时传输至管理系统,使用便捷。

1 明渠测量综述

在应用流速仪进行灌溉明渠测量时,需要保证测流断面内测点流速不超过流速装置的测速量程,并且垂线出水深不小于用一点法测速的必要深度;除此之外,测流过程中水位需平稳,保证一次测流的起讫时间内水位涨落差不大于平均水深的 2%^[10-11]。考虑到种种原因,在进行灌溉明渠测量时,主要涉及流速测量、水深测量和断面测量 3 个方面^[12-14]。

1.1 流速测量

在进行流速测量时,主要的影响因素有测速时间、三叶锁存霍尔效应磁敏传感器脉冲数、流速仪旋转螺距以及摩阻系数 4 部分,对应的测点流速公式如式(1)所示。在进行流速测量时,单个测点的测速时间不宜少于 100 s,若遇到流速变化率较大或垂线上测点较多的情况,可将单个测点的测速时间设置为 60~100 s^[15-17]。测量过程中应保持测量装置平行于水流流向且旋桨迎着水流方向,旋桨中心与测点的偏距不超过水深值的 1/20。

$$V = KN/t + c \quad (1)$$

式中: V 为测点流速, m/s; K 为流速装置旋转螺

收稿日期: 2022-11-09

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(TKS210106, TKS220307)。

作者简介: 李先瑞(1991—),男,天津人,交通运输部天津水运工程科学研究所,中级工程师,硕士,研究方向为水运仪器研究与设备研发;通信作者许斌(1980—),男,湖北武汉人,交通运输部天津水运工程科学研究所,高级工程师,博士,研究方向为水运仪器研究与设备研发;倪文军(1971—),男,天津人,交通运输部天津水运工程科学研究所,正高级工程师,研究方向为水运设备和精密传感器;张磊(1975—),男,天津人,交通运输部天津水运工程科学研究所,中级工程师,研究方向为水运设备和精密传感器。

距, m/r; N 为转数; t 为测速时间; c 为摩阻系数, m/s。

根据式(1)即可测出单个测点的平均流速,再根据该处垂线选取的测量方法^[18-19],测出各个垂线的平均流速。

一点法:

$$V_m = V_{0.6} \quad (2)$$

二点法:

$$V_m = (V_{0.2} + V_{0.8})/2 \quad (3)$$

三点法:

$$V_m = (V_{0.2} + V_{0.6} + V_{0.8})/4 \text{ 或} \\ V_m = (V_{0.2} + V_{0.6} + V_{0.8})/3 \quad (4)$$

五点法:

$$V_m = (V_{0.0} + 3V_{0.2} + 3V_{0.6} + 2V_{0.8} + V_{1.0})/10 \quad (5)$$

根据式(2)~式(5)测出一条垂线的平均流速 V_m ,若需要进行断面测量,则继续采取上述方式测量其他垂线的平均流速即可,从而可求得部分面积的平均流速。

两测速垂线间平均流速:

$$V_{i,i+1} = (V_i + V_{i+1})/2 \quad (6)$$

水边平均流速:

$$V_{0.1} = \alpha V_1, V_{n,n+1} = \alpha V_n \quad (7)$$

式中: i 为垂线序号, $i=1,2,\dots,n$, n 为测线总数; $V_{i,i+1}$ 为第 i 和 $i+1$ 两条垂线间断面平均流速, m/s; V_n 为第 n 条垂线平均流速, m/s; α 为岸边流速系数,规则土渠为 0.67~0.75,梯形断面混凝土渠段为 0.8~0.9,不平整洁岸边为 0.8,光滑陡岸边为 0.9,死水边为 0.6。

1.2 水深测量

在进行水深测量时,目前该便携式流速水深测量装置采用高频压力敏感传感器进行测量,并在中间测杆上标有刻度值,便于进行比较和修正,如图 1 所示。

在进行测试过程中,应保持测杆处于垂直状态,以免造成传感器和实际刻度的误差;另外,如有壅水现象,需保证水流稳定后再进行测量。根据便携式流速水深测量装置测得的水尺零点与各测线处渠底的高差,根据式(8)计算出每条测线处的实际水深值。

$$H_n = h \pm \Delta h_n \quad (8)$$

式中: H_n 为第 n 条垂线处的实际水深值, m; h 为测量装置测的深度, m; Δh_n 为第 n 条垂线处渠底与水尺零点的高差, m。



图 1 测杆刻度效果

1.3 断面测量

在测出各测点和垂线的平均流速和水深后,即可计算出灌溉明渠的面积。

$$A_{i-1,i} = (H_{i-1} + H_i) b_{i-1,i}/2 \quad (9)$$

$$A_{0,1} = H_1 b_{0,1}/2 \quad (10)$$

$$A_{n,n+1} = H_n b_{n,n+1}/2 \quad (11)$$

式中: $A_{i-1,i}$ 为第 $i-1$ 和第 i 两条垂线间的面积, m^2 ; H_{i-1} 为第 $i-1$ 条垂线的实际水深, m; H_i 为第 i 条垂线的实际水深, m; $b_{i-1,i}$ 为第 $i-1$ 和第 i 两条垂线间的断面宽, m。

根据断面面积和垂线间流速,根据式(12)和式(13)即可测得两条垂线间流量和整个断面间流量。

$$q_{i-1,i} = V_{i-1,i} A_{i-1,i} \quad (12)$$

$$Q = q_{0,1} + q_{1,2} + q_{2,3} + \dots + q_{n-1,n} \quad (13)$$

式中: $q_{i-1,i}$ 为第 $i-1$ 和第 i 两条垂线间的流量, m^3/s ; $V_{i-1,i}$ 为第 $i-1$ 和第 i 两条垂线间的流速, m/s; $A_{i-1,i}$ 为第 $i-1$ 和第 i 两条垂线间的断面流量, m^2 ; Q 为断面流量, m^3/s 。

2 测量装置设计

2.1 总体设计

便携式流速水深测量装置主要由前端传感装置、中间测杆和后端表头 3 部分组成。前端传感装置主要包括高频压力敏感传感器、三叶锁存型霍尔效应磁敏传感器、三叶旋桨、触底托盘等;中间测杆主要包括可伸缩测杆、锁紧接头、弹簧线等;后端表头主要包括微处理模块、电源模块、人机交互模块、通信模块、数据处理模块等。装置组成框架如图 2 所示。

便携式流速仪使用时,先进行 NB-IoT 网络连接,连接成功后设置相关参数,然后即可进行测量。

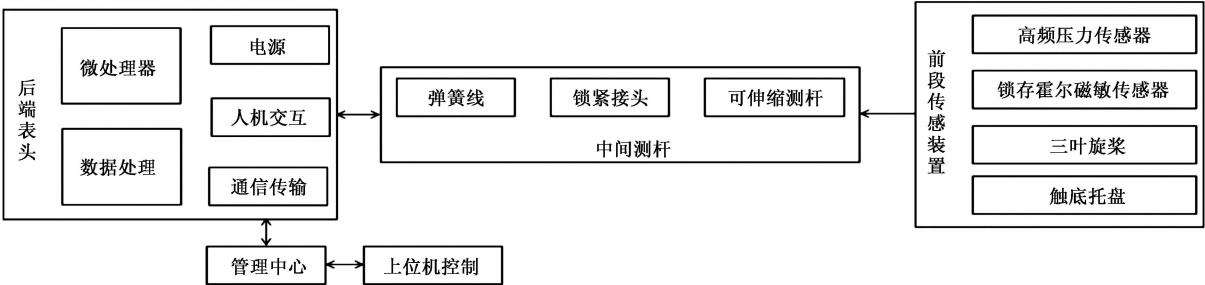


图 2 测量装置组成框架

根据上述灌渠测量要求,在测量过程中根据渠道水深设置相应测点数以及渠道深度,然后即可逐个进行测点测量,测量过程中显示瞬时流速、平均流速、测量水深、当地经纬度、测量时间等,测量完毕将上述数据保存在本地,同时通过 NB-Iot 网络传输至管理系统,本地数据可方便测试人员记录查看,管理系统可进一步计算出渠道断面的流量。

2.2 机械结构设计

考虑到现场使用的便捷性和可操作性,流速水深测量装置整体设计需满足一人单手操作。机械结构主要包括三叶旋桨及支撑结构、传感器固定座、可伸缩测杆和后端表头。

考虑到水流推力和装置整体结构的影响,旋桨桨叶设计为 3 个,桨叶迎水面需圆滑,旋桨直径 $\phi 60\text{ mm}$,如图 3 所示。旋桨中心轴两侧套有轴承,两侧用螺纹固定。每片旋桨上放置一个磁铁,当其靠近锁存型霍尔效应磁敏传感器时获得感应信号,从而计算脉冲数。

传感器固定座需考虑便捷性、密闭性以及感应稳定性。在固定座底部有锁存型霍尔效应磁敏传感器和高压压力敏感传感器内螺纹固定孔,安装时只需旋转拧入指定深度即可,螺纹固定孔内外均有密封垫圈进行放水保护;固定座上部分有隔离接头,接头一侧连接传感器,另一侧与中间测杆弹簧线连接。

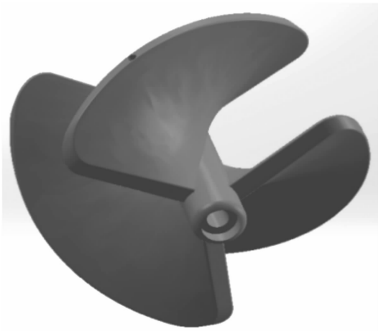


图 3 旋桨结构

考虑到目前设计的便携式流速水深测量装置测量深度为 0~3 m,若采用一节测杆不便于携带和测量。因此设计三节测杆,测杆两侧开卡箍槽,实现可伸缩功能,便于现场操作和携带。

后端表头考虑到内部电路结构和电池摆放,以及现场阳光照射等问题,设计结构如图 4 所示。正面设计显示和控制区,显示区上部稍微伸出一部分以免阳光照射影响,表头与中间测杆采用螺纹连接,简单实用。



图 4 测量装置表头

2.3 电路设计

2.3.1 微处理器

微处理器采用 STM32F103C8T6,该芯片具有 72 MHz 频率、高性能 ARM Cortex-M3 32 位 RISC 内核,提供两个 12 位 ADC,3 个通用 16 位定时器以及一个 PWM 定时器,2 个 I2C 和 SPI,2 个 USART、1 个 USB。器件采用 2.0~3.6 V 电源供电,温度适用范围为 $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。全面的省电模式允许设计低功耗应用,满足本次研究应用的要求。微处理器主要实现数据的采集处理和人机交互的控制,为该测量装置的核心。

2.3.2 数据处理模块

考虑到前端高压压力敏感传感器采集的信号仅为 mV 值信号,该信号受干扰影响较大且易失

真,因此该信号需用有稳定的电流源供电、充足的滤波和抗干扰处理,以及精准的信号采样功能。

基于上述要求,经过多方测试和比对,最终采用 AD7793 为核心器件构建外围电路,电路图如图 5 所示。该芯片内置精密低噪声、低漂移内部带隙基准电压源,芯片最高分辨率可达 23 位,芯片内部具有低噪声可编程增益仪表放大器,提供 3 路差分信号输入,提供 1 mA 的稳定电流源,在增益设置为 64、更新速率为 4.17 Hz 时,均方根噪声仅为 40 nV。

2.3.3 通信传输模块

为实现测试过程的数据实时传输至管理中心,保证稳定的上传率和覆盖率。远程数据传输采用有人 WH-NB73-G 网络模块,其增益比 LTE 提升 20 dBm,具有较高的覆盖率,可覆盖地下车库、深井等应用场景。其功率低,接收功率仅 0 mA,待机功率仅有 1 mA,可使供电电池使用时间提升数天;其支持电信、移动、联通 NB-Iot 网络,信号范围广;其借助现有基站设备,无需重新建网,节省成本。具体电路图如图 6 所示。

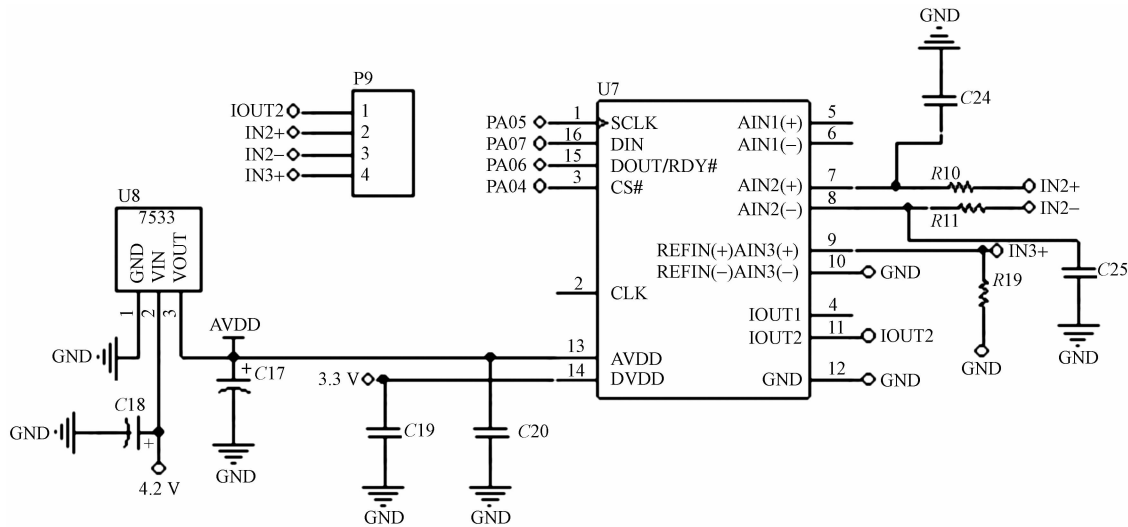


图 5 数据处理模块电路图

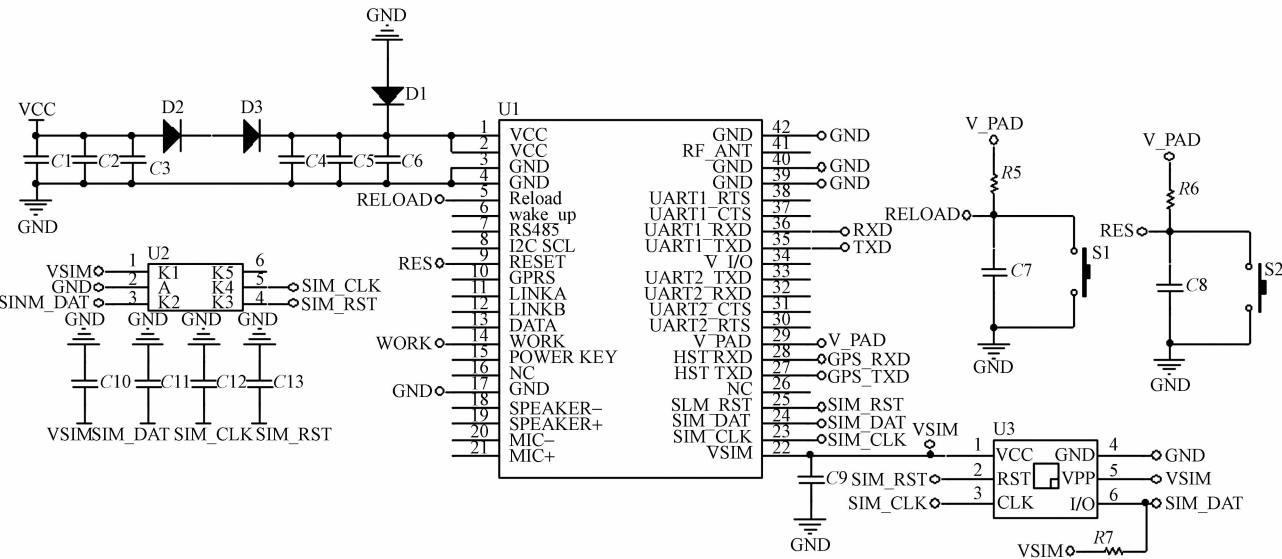


图 6 通信传输模块电路图

2.3.4 高频压力传感器

鉴于目前所设计的便携式流速水深测量装置的水深范围为 0~3 m,因此设计了表压传感器,压力范围为 0~30 kPa。通过集成工艺将压阻式高频

压力敏感元件集成在单晶硅膜片上,制成高精度硅压阻芯片,芯片一面为被测压力连通的高压腔,另一面为与大气连通的低压腔。将此芯片的周边固定封装于 $\phi 3\text{ in}(1\text{ in}=25.4\text{ mm})$ 外壳之内,引出电

极引线。并实时对压力传感器进行宽温度范围的零点和灵敏度温度性能补偿,改善压力传感器受外界温度的影响。

在硅膜片(N型)定域扩散 4 条 P 杂质电阻条,并接成全桥,其中两条位于压应力区,另两条处于拉应力区,相对于膜片中心对称。硅柱形敏感元件也是在硅柱面某一晶面的一定方向上扩散制作电阻条,两条受拉应力的电阻条与另两条受压应力的电阻条构成全桥,并引出两根感应线。最终将电源线和感应线共计 4 根线与测杆弹簧线连接接入 PCB 板中,为数据处理模块提供信号数据。

经测量,设计的高频压力传感器在 3 V 恒流源供电下,灵敏度优于 0.25%FS。

2.3.5 锁存霍尔磁敏传感器

在旋桨进行转动过程中,当小型磁敏靠近锁存霍尔磁敏传感器,并与感应部分成垂直状态时,可获取磁敏信号,并将其传送给微处理器进行信号分析。

经多方比对和测试,采用 CC6201 型传感器。该传感器具有微功耗、高灵敏度全极性,并具有门锁输出的霍尔开关传感装置,内部电路包含了霍尔薄片、电压稳压模块、信号放大处理模块、动态失调消除模块、锁存模块以及 CMOS 输出级,工作频率可达 45 Hz,可满足 ± 40 Gs 范围内的磁敏触发。

2.4 软件设计

系统软件基于 Keil5 软件平台开发环境,使用 C 语言进行编程,采用模块化结构设计,主要包括 OLED 显示模块、按键操作模块、ADC 采集模块、电量采集模块、流速采集模块、测量深度采集模块、数据存储模块、通信传输模块等,具体流程如图 7 所示。

根据图 7 选择测点方式进行测量,在根据该流程测量测点、垂线、断面的流速和水深,最后将数据通过 NB-Iot 网络模块上传至管理中心,由管理中心统计并计算出流量。

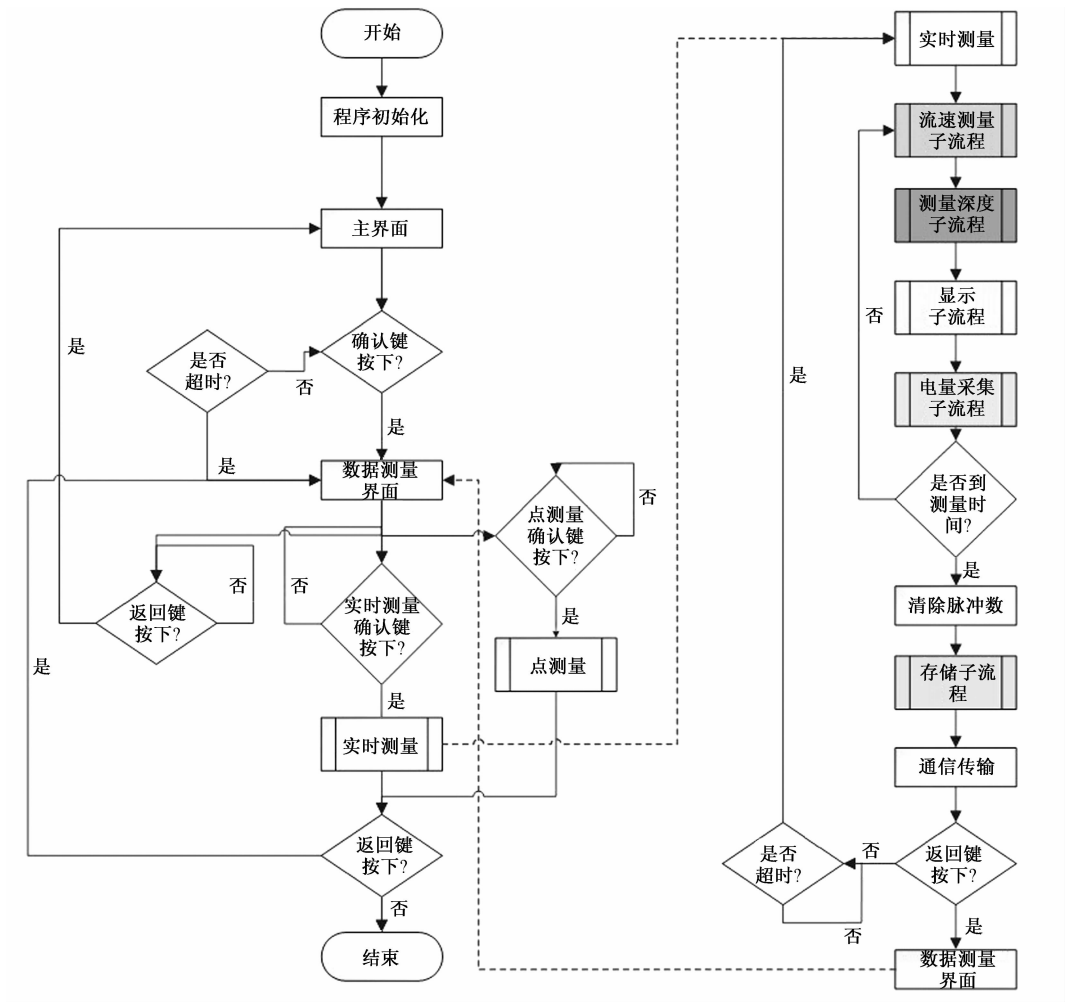


图 7 软件系统流程

3 实验环境与分析

3.1 实验环境

流速设备检定水槽长 40 m,宽 2 m,深 1.5 m。检定车定速设置范围 0.02~2 m/s,精度最大误差 0.008 m/s;定位设置范围 3~73 m,精度 0.01 m。距离在 1 m 以上,定位速度固定 0.29 m/s(频率为 5 kHz),距离低于或等于 1 m,定位速度固定 0.06 m/s(频率为2 kHz),车速变化率低于 1%。各项技术指标均能满足便携式流速水深测量流速装置的检定要求。流速装置检定水槽及现场检定如图 8 所示。



图 8 流速装置检定水槽及现场检定

3.2 实验分析

实验主要测试流速率定检测和测量深度率定检测两个方面。其中流速率定检测过程中,将测量装置固定在标准检定车上,流速 K 设置成 1.000,C 设置成 0.000,设置检定车不同的速度,获取测量装置上的流速值,每组速度测试 5 组数据,然后求得平均值,见表 1。

根据检定车平均流速和测量装置测得的平均流速拟合数据曲线,如图 9 所示。流速曲线换算出流速的率定 K 为 0.108 3,C 为 0.026 5,曲线的相关性为 0.996 9。

将 K、C 值输入到便携式流速水深测量装置中并保存,然后再在检定水槽中比较检定水槽检定车

表 1 流速率定数据

测量装置 平均流速/ (m·s ⁻¹)	检定车平均流速/(m·s ⁻¹)					
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	平均值
0.03	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.058
0.05	0.23	0.25	0.25	0.25	0.25	0.246
0.08	0.53	0.51	0.53	0.53	0.53	0.526
0.1	0.73	0.71	0.7	0.7	0.7	0.708
0.3	2.36	2.33	2.41	2.36	2.37	2.366
0.72	6.26	6.43	6.5	6.39	6.4	6.396
0.82	7.35	7.45	7.45	7.41	7.42	7.416

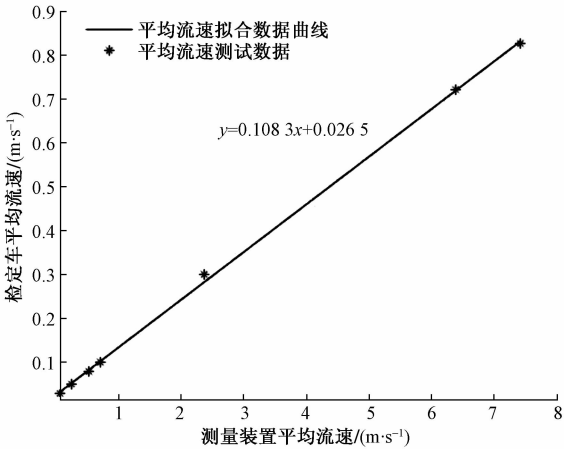


图 9 流速检定曲线

流速和便携式流速水深测量装置流速的误差值,见表 2。

根据测试结果显示,便携式流速水深测量装置的旋桨流速启动速度为 0.03 m/s,%FS 误差值最大为 0.80%,能够准确测量出水流的平均流速值。

在水深率定检测过程中,将测量装置固定在升降装置上,水深 K 设置成 1.000,C 设置成 0.000,设置升降装置的高度,获取测量装置上的水深值,每组水深值测试 5 组数据,然后求得平均值,见表 3。

表 2 流速误差对比

检定车平均 流速/(m·s ⁻¹)	率定后装置平均 流速/(m·s ⁻¹)	精度/满量 程/%FS
0.02	0.00	0.20
0.03	0.03	0.00
0.05	0.05	0.00
0.08	0.08	0.00
0.10	0.11	0.10
0.30	0.33	0.30
0.50	0.52	0.20
0.80	0.78	0.20
1.00	0.92	0.80

表 3 水深率定数据

升降装置 水深/m	测流装置 传感器值	升降装置 水深/m	测流装置 传感器值
0.30	457	0.65	18 118
0.35	2 797	0.70	20 488
0.40	5 332	0.75	23 107
0.45	7 707	0.80	25 979
0.50	10 267	0.85	27 950
0.55	12 608	0.90	31 154
0.60	15 221		

根据升降装置的水深和测得的测流装置传感器值拟合数据曲线,如图 10 所示。水深曲线换算出水深的率定 K 为 0.000 02, C 为 0.297 1,曲线的相关性为 0.999 6。

将 K 、 C 值输入到便携式流速水深测量装置中并保存,然后再在检定水槽中比较检定水槽检定车流速和便携式流速水深测量装置水深的误差值,见表 4。

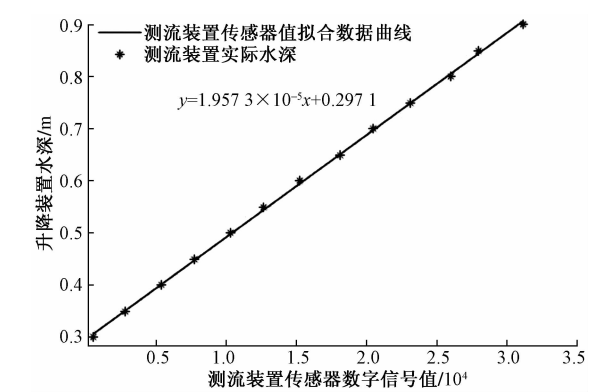


图 10 测量深度检定曲线

表 4 水深误差对比

升降装 置水深 /m	率定后 装置水 深/m	精度/满 量程/ %FS	升降装 置水深 /m	率定后 装置水 深/m	精度/满 量程/ %FS
0.20	0.21	0.33	0.60	0.57	1.00
0.25	0.24	0.33	0.65	0.62	1.00
0.30	0.28	0.67	0.70	0.67	1.00
0.35	0.32	1.00	0.75	0.72	1.00
0.40	0.36	1.33	0.80	0.78	0.67
0.45	0.41	1.33	0.85	0.83	0.67
0.50	0.46	1.33	0.90	0.88	0.67
0.55	0.52	1.00			

根据测试结果,便携式流速水深测量装置的水深测量最小值为 0.2 m,测得的水深误差值最大 0.04 m,%FS 误差值最大为 1.33%,能够准确测量出渠道的水深值。

4 结论

本文设计了一种便携式流速水深测量装置,利用高精度高频压力敏感元件压力传感器、三叶锁存型霍尔效应磁敏传感器以及整体便携式结构设计,可应用于现有灌溉明渠测量中测量流速、水深以及断面流量,并可实时传输测量数据至管理中心。其流速测量精度优于 0.80%FS,水深测量精度优于 1.33%FS,具有较高的精确性和准确率。该装置已在河南小开河和黄河下游部分渠道进行现场应用。

参考文献

[1] 黄昌硕,耿雷华,颜冰,等. 水资源承载力动态预测与调控:以黄河流域为例[J]. 水科学进展,2021,32(1):59-67.

[2] 张礼兵,胡亚南,金菊良,等. 基于系统动力学的巢湖流域水资源承载力动态预测与调控[J]. 湖泊科学,2021,33(1):242-254.

[3] 李宁,芦红. 基于聚类分析的水资源利用区划方法[J]. 沈阳工业大学学报,2021,43(4):425-431.

[4] 张甲栋. 高滩水文站雷达水位计与人工观测水位比测分析[J]. 陕西水利,2021(5):84-85,88.

[5] 周程风,金鑫,宋颖,等. 基于数据拟合分析坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. 科技与产业,2022,22(1):350-356.

[6] 刘恒,刘康,刘远林,等. 一种基于物联网的超声流量测量及实验标定[J]. 科学技术与工程,2021,21(19):8011-8017.

[7] 韩继伟,邵军,符伟杰,等. 基于微纳气泡示踪的拖曳法 ADCP 流速测试[J]. 水文,2021,41(2):63-68.

[8] 刘开春. ADCP 测验成果在测速垂线优化中的应用[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(8):46-49.

[9] 刘正伟,陆德智,朱云武,等. 一种底座式 ADCP 流量自动监测探头支撑装置的研制与应用[J]. 水文,2016,36(2):82-84.

[10] 张永超,赵录怀,李斌. 基于多电导式流速测量传感器的河流流速流量测量系统[J]. 传感器与微系统,2021,40(4):93-95.

[11] 史雪薇,谭超,董虓霄,等. 超声多普勒谱修正的油水两相流流速测量[J]. 机械工程学报,2017,53(24):77-84.

[12] 何生荣,周冬生,金福一,等. 转子式流速仪:GB/T 11826—2019[S]. 北京:中华人民共和国水利部,2019.

[13] 谢崇宝,张昕,李铁光,等. 灌溉渠道系统量水规范:GB/T 21303—2017[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2017.

[14] 赵军霞,雒仪. 浅析 RTK 测绘系统在水文大断面测量中的应用:以元龙水文站为例[J]. 江西水利科技,2020,46(4):280-285.

[15] 郝洪柱,孔德仁,王伟魁,等. 基于五点法的单幅光学干涉条纹相位提取[J]. 激光与红外,2020,50(8):1002-1008.

[16] 王安然,蒋延付,郑博文,等. 一种基于电容积分的时差法超声波流量计飞行时间测量方法[J]. 中国测试,2021(8):44-50.

[17] 樊洁云,张亮,方立德,等. 烟气超声流量计时间测量准确度校准方法研究[J]. 中国测试,2020,46(2):28-33.

[18] 吴永妍,陈永灿,刘昭伟. 明渠收缩过渡段流速分布及紊动特性试验[J]. 水科学进展,2017,28(3):346-355.

[19] 郜国明,马子普,李书霞,等. 冰盖对层流垂线流速分布的影响研究[J]. 人民黄河,2018,40(7):15-17.

Design and Implementation of Portable Sectional Flow Measurement System

LI Xianrui^{1,2}, XU Bin¹, NI Wenjun¹, ZHANG Lei¹

(1. Tianjin Institute of Water Transportation Engineering Science, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;
2. School of Precision Instrument and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to facilitate the measurement of flow velocity, flow and water depth between open channels, a portable section flow measurement system is designed. According to the requirements of the on-site environment for flow velocity and measurement water depth, a pressure sensor with a design range of 20 kPa high-frequency pressure sensitive element is designed. Under the condition of a standard constant current source, the sensitivity is better than 0.25%FS; the design range is 10 m/s. The err effect magneto-sensitive sensor propeller, the water flow is used to drive the propeller motion to obtain the propeller rotation speed, the startup speed is better than 0.02 m/s, and the accuracy is better than 2%. Based on the ARM Cortex ©-M3 core as the logic processing unit, 12 bit A/D converter, real-time storage and upload data to the management center through NB-Iot low power wide area network. The measuring device is easy to carry, light in weight. It can be operated by one person and one hand, and it can be measured in real time on site.

Keywords: flow; velocity; water depth; measuring system