

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.008

热敏式近地表无线风速廓线仪研究

刘海洋 常佳丽 侯占峰 陈智 宣传忠 商晓彬

(内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 针对常用风速廓线仪线路连接复杂、体积和功耗大、测量精度与自动化程度低且无法实现数据的实时记录与处理,致使研究退化草地近地表风速变化规律、地表粗糙度及其抗风蚀能力等诸多困难等问题,基于热敏电阻和无线传感网络技术,设计了具有体积小、功耗低、测量精度高的热敏式风速传感器和具有自动风向识别与无线数据传输功能的近地表风速廓线仪,实现了环境温度、湿度、大气压力、近地表风速等数据的自动采集、无线传输和实时处理等功能。试验表明:该风速廓线仪的旋转启动风速为 3.7 m/s,风速测量范围为 0~16 m/s,精度不低于 0.3 m/s,最大响应时间为 3 s,一次充电可连续工作 7 h 以上,能够准确反映近地表风速随高度的变化规律,风速廓线的指数拟合度在 0.9 以上;软件系统可实现对最多 6 个风速廓线测点的循环自动采集与处理,在射频功率最大、空中传输速率为 2.4 kb/s 时,35 字节的数据包有效传输距离不低于 500 m,6 个节点完成一次数据传输所需时间不超过 10 s。该系统具有功耗低、使用方便、操作简单、自动数据采集等优点,能够满足近地表风速变化规律的研究需要。

关键词: 风速廓线仪;热敏电阻;自动采集;无线传输;实时数据处理

中图分类号: TP274+.5; S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0068-10

Investigation on Near-surface Wireless Wind Speed Profiler Based on Thermistors

LIU Haiyang CHANG Jiali HOU Zhanfeng CHEN Zhi XUAN Chuanzhong SHANG Xiaobin
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: Currently, wind speed profilers in common use have many problems, such as complex wiring, large volume, high power consumption, low measurement accuracy and automation level. They are also unable to achieve the real time recording and data processing. These bring many difficulties to study the variation law of near surface wind velocity, terrain roughness and its ability to resist wind erosion of degraded grassland. A thermal wind speed sensor which had small volume, low power consumption, high precision measurement was developed, and a near-surface velocity profiler with functions of automatic wind-direction recognition and wireless data transmission was designed, which can realize data automatic collection, wireless transmission and real-time data processing of environmental temperature, humidity, atmospheric pressure and near-surface wind speeds. Experiment results showed that the rotating start-up wind speed of the profiler was 3.7 m/s, and the measurement range of the wind sensor whose maximum response time was no more than 3 s was 0~16 m/s with accuracy not less than 0.3 m/s. It can work continuously more than 7 h with one time charge, reflecting the change rule of the near-surface wind speed in height accurately with goodness of fitting of wind speed profiles above 0.9. The system can circularly scan up to six testing points, automatic collect and process wind speed data. The length of data packet was 35 bytes, the effective transmission distance can reach 500m and the data transfer time for six testing points was less than 10s under the conditions of 2.4 kb/s transfer rate and maximum transmitting power. The system had advantages of low power consumption, easy to use, simple operation, automatic data acquisition, which can satisfy the needs of studying the change rule of near-surface wind speed.

Key words: wind profiler; thermistor; automatic acquisition; wireless transmission; real-time data processing

收稿日期: 2017-04-25 修回日期: 2017-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361058,41661058)

作者简介: 刘海洋(1985—),男,讲师,博士,主要从事测试控制技术与装备智能化研究,E-mail: haiyang0615@163.com

通信作者: 侯占峰(1980—),男,副教授,主要从事测试控制技术与装备智能化研究,E-mail: njau-hzf@163.com

引言

在土壤风蚀研究中,风速廓线仪作为一种方便、快捷地测量近地表风速随高度变化规律的仪器得到了广泛的应用和发展,然而由于风速传感器的体积、功耗及特殊的测量环境等因素导致其研究进展相对缓慢。

美国国家海洋大气局(NOAA)分别于1980年和1989年通过布设6部和32部风速廓线仪组建了风速廓线实验网^[1-2];芬兰维萨拉公司和NOAA联合研制了LAP-3000型风廓线仪系统,可提供连续的边界层大气数据,并生成风场的廓线图^[3];德国SCINTEC公司研制的SFAS系列风廓线仪用来对500 m以下低层大气的风向、风速和扰动进行远程测量^[2];2003年,日本建立了一个由31部风速廓线仪组成的风速廓线观测网^[2];2004年,中电集团十四所研制生产了对流层Ⅱ型风廓线仪^[2,4]。然而,上述几种风速廓线仪主要用于高空气象方面的研究,无法满足土壤风蚀研究的需求。

2003年,中科院寒区旱区环境与工程研究所采用风杯式风速传感器组设计了可实现9路风速、风向自动采集的风速廓线仪^[2,5-6];2004年,内蒙古农业大学以皮托管为敏感元件研制了满足风洞近地表风速廓线同步采集的风速廓线仪^[3,5,7]。但实验发现:风杯式传感器在强风作用下误差较大,且在风沙

环境中易发生卡滞现象;皮托管由于气压的沿程损失和堵塞等现象,影响了风速的测量精度;有线连接还造成线路连接复杂、易出现折弯和折断等问题。2012年,内蒙古农业大学采用无线传感网络技术成功设计了RW-64型热膜式无线风速廓线仪^[2,8],但其热敏元件功耗过高且不具备温度自动补偿功能,受环境温度影响较大;另外,缺少风向自动校准装置,导致风速测量不准确。

针对上述问题,本文集成单片机控制系统、温湿度传感器、大气压力传感器、无线数据传输模块和8路风速传感器,设计一种近地表无线风速廓线仪及其测试系统,以实现最多6个测点的环境温湿度、大气压力及近地表8路风速数据的循环采集、无线传输和实时处理,并绘制各测点处的近地表风速廓线图。

1 系统总体设计

该系统采用星形网络拓扑结构设计,主要由数据采集节点、中心汇聚节点和数据处理软件3部分组成。数据采集节点由温湿度传感器、大气压力传感器、FS5热敏探头、信号采集处理电路、单片机控制模块和无线数据传输模块等6部分组成^[8-10]。系统总体结构如图1所示^[11-12]。

其中,FS5是一种具有体积小、测量精度高且功耗极低的薄膜流量传感器敏感元件,由2个铂电阻

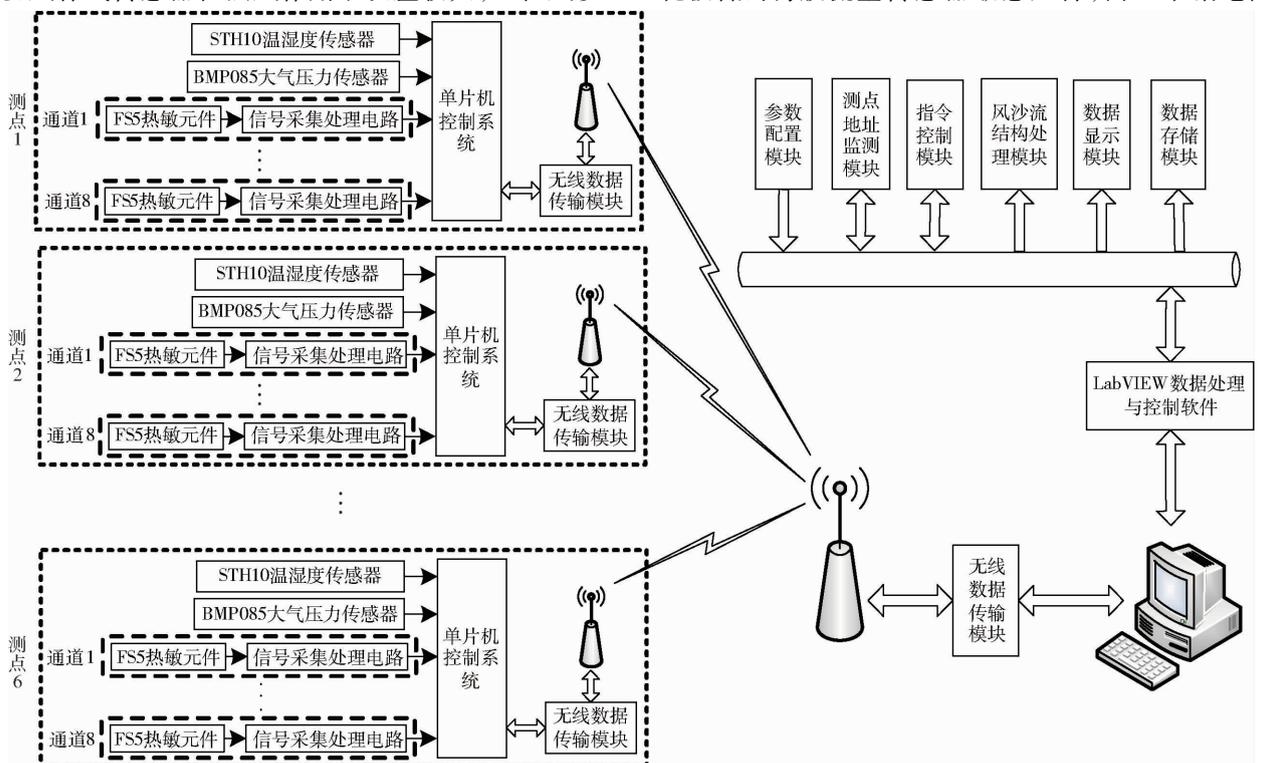


图1 系统总体结构

Fig. 1 Overall structure of system

RH 和 RS 组成, RH($45\ \Omega$) 被用作加热元件, 用来测量流体速度, RS($1\ 300\ \Omega$) 为热敏元件, 用来测量环境温度, 并对传感器进行温度补偿。FS5 热敏元件和信号采集处理电路组成的热敏式风速传感器, 采用恒温式测量方法对环境风速进行采集; 8 路风速传感器分别被安装在不同的的高度上, 以实现近地表风速数据的采集, 其电压输出端分别连接到模拟数据选择器的 8 个输入端。单片机控制系统集成了一个由 16 位 AD 转换器 LCT1864 和模拟数据选择器 CD4051 组成的模数转换电路, 实现 8 通道风速信号的循环采集; 同时完成控制指令的接收和传感器组的数据读取、处理、打包与发送等功能。无线数据传输模块包括分别与 PC 机和单片机相连的收发模块, 主要完成无线链路的建立、数据和指令的无线传输、数据包的 CRC 校验等功能。上位机软件实现参数配置、控制指令和数据包的发送与接收、数据的实时处理、显示与存储等。

2 系统硬件设计

系统硬件设计主要包括楔形风速廓线仪结构设计、热敏式风速传感器设计和无线数据采集器设计 3 部分。

2.1 风速廓线仪结构设计

风速廓线仪整体结构采用 Solidworks 2010 软件设计制作, 主要由楔形外壳、底盘、导向板、旋转机构、风速传感器探头和双切边双轴承组成, 其内部结构及实物如图 2 所示^[3,8]。

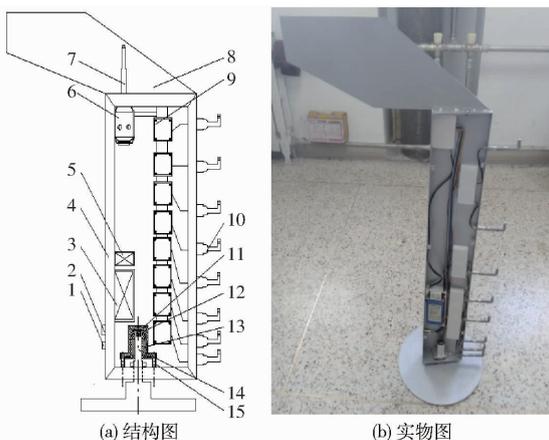


图 2 风速廓线仪

Fig. 2 Structure charts of wind speed profiler

1. 电源开关 2. 充电口 3. 大容量锂电池 4. 廓线仪外壳
5. 电压转换模块 6. 无线发送模块 7. 天线 8. 风向标 9. 热膜传感器
10. 传感器探头 11. 轴承端盖 12. 集流环 13. 双切边双轴承
14. 垫片 15. 带底盘旋转轴

风速廓线仪由旋转部分和固定底座组成, 两者间通过旋转轴和双切边双轴承互相连接。整体采用

铝合金材料制成, 楔形结构高约 70 cm, 沿高度方向按照对数规律分布 8 路风速传感器, 分别采集 2、4、8、16、24、32、48、64 cm 高度处的风速数据^[5-6,8]。廓线仪旋转部分质量 2.23 kg, 导向板重心距廓线仪转轴 63.4 mm 且受力面积约 $4.64 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$, 压力轴承内径 12 mm, 经计算知: 当导向板所受力矩达到 $1.98 \times 10^{-4}\ \text{N}\cdot\text{mm}$ (风速 3.2 m/s) 时, 廓线仪旋转部分即可旋转; 由于机械部件间的摩擦和压力轴承的阻力作用, 试验发现当风速达到 3.7 m/s 时仪器才开始转动。

为减小机体本身对周围流场稳定性和均匀性的影响, 提高风速测量的准确性, 旋转部分设计成楔形细长体结构且在导向板的气流导向作用下可随风向自由旋转, 以保证风速传感器探头能够始终正对来风方向进行测量。

2.2 风速传感器电路设计

为满足近地表风速廓线的长时间连续野外监测, 研制了具有体积小、功耗低、响应速度快和测量精度较高等优点的风速传感器, 其电路原理图如图 3 所示, 传感器电路如图 4 所示^[9,11,13]。

其中, P1 端口为电源输入端与信号输出端, 电压范围 12 ~ 18 V; 电容 C1、C2 和 L7809 组成的稳压电路为传感器电路提供标准的 9 V 工作电压; P2 端口连接热敏探头 FS5 的加热电阻 (RH)、温度敏感电阻 (RS) 与模拟地 (GND), 并与 R2、R3、R5、R6 和 Q2 一起组成惠斯通电桥^[13]; 电桥的输出电压差经过放大器 TS922 放大后作为反馈信号为由 R1、R4 和 Q1 (NPN 型) 组成的电流放大电路提供基极电压, 以调节 BC817 发射极电流和流过加热器 (RH) 的电流大小。

通过对电路的测试分析发现: 在静风下, 放大器 TS922 引脚 1 的输出电压在 1.83 ~ 1.86 V 之间, 在 16 m/s 的风速下, 其输出电压在 4.0 ~ 5.5 V 之间。为了便于采用 16 位 AD 转换器进行数据采集, 设计了由电容 C4、C5 和 HT7318 组成的 1.8 V 稳压电路; 然后, 通过仪表放大器 AD623 形成减法器电路, 将 TS922 的输出电压减去 1.8 V 后作为传感器的输出电压。另外, C3、C6 和 C8 均为滤波电容, 分别对不同位置处的电压信号进行平滑滤波, 为了保障传感器的输出响应时间, 电容值不易选取过大。

试验测得: 该传感器的连续稳定工作时长不低于 10 h, 自上电至输出稳定所需时长不超过 8 s, 风速响应时间 2 ~ 3 s; 0 ~ 6 m/s 风速下的测量精度不低于 0.1 m/s, 最大输出偏差小于 30 mV, 6 ~ 16 m/s 风速下的测量精度不低于 0.3 m/s, 最大输出偏差小于 60 mV。

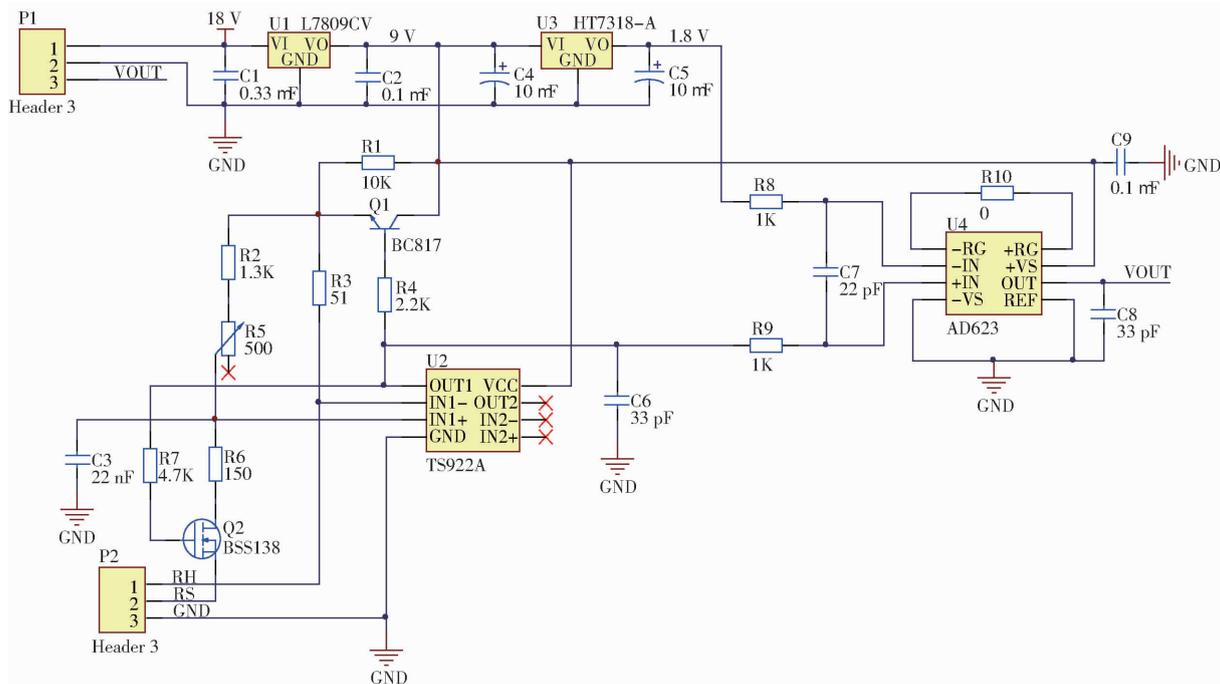
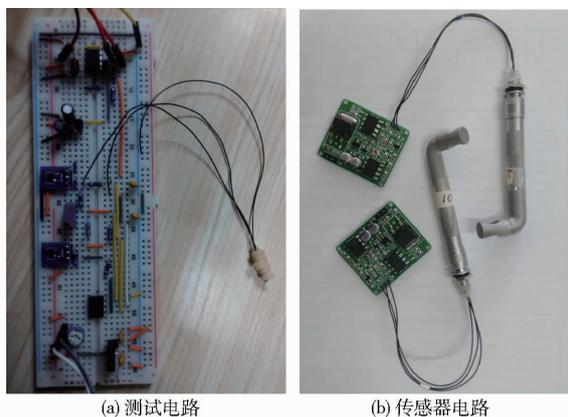


图 3 风速传感器电路图

Fig. 3 Circuit schematic of wind velocity sensor



(a) 测试电路

(b) 传感器电路

图 4 风速传感器电路实物图

Fig. 4 Pictures of wind velocity sensor

2.3 无线数据采集器设计

2.3.1 系统硬件组成

系统分别采用数字温湿度传感器 SHT10 和大气压力传感器 BMP085 对环境温湿度和大气压力进行采集；核心控制单元采用片内集成 MAX810 专用复位电路、30 KB 的 Flash 存储器 and 768 字节 RAM 的 STC12C5630AD 单片机^[14]，用来接收和发送上位机的指令与数据；采用模拟数据选择器 CD4051 模块和具有 16 位分辨率的单通道差分输入 AD 转换器 LTC1864 设计多通道 AD 转换电路，通过单片机控制其实现 8 路风速信号的循环选择与采集；同时，采用低功耗无线模块 E32-TTL-100 对数据进行传输，该模块内嵌高速低功耗单片机和高性能 LoRa 扩频芯片 SX1278^[14]，发射功率仅 100 mW，工作频段 410 ~ 441 MHz，可设置 32 个信道，信道带宽

1 MHz，最大数据包长 58 字节，内部自动完成通讯协议转换和数据收发控制。

2.3.2 系统硬件设计

该采集器的硬件电路采用 Altium Designer Winter 09 制作，电路原理图与实物图分别如图 5 和图 6 所示^[13-14]。

该硬件电路主要由控制器电路、复位电路、串口通信电路、稳压电路、数据存储电路和无线收发器接口等组成。其中，C1、C2、C3、C4 和 U1、U2 组成系统稳压电路，U2 输出的 3.3 V 电压分别为由 R6、C10、U7 和 R4、R5、C9、U6 组成的温湿度传感器电路和大气压力传感器电路供电；由 R3、R7、R8、D1 和 U8 组成的无线收发模块接口电路通过串口通信方式完成单片机与无线模块之间的数据传输；由 C8、P4、U4 和 U5 组成的 8 通道风速数据采集电路通过三线式串行通信方式完成单片机与风速传感器组之间的数据通信；单片机控制电路完成上位机指令信息的接收与应答，对传感器组的控制和数据的读取、处理、打包等任务，其 P1 口 6 个端口 (P1.0 ~ P1.2 和 P1.5 ~ P1.7) 分别连接 8 路模拟数据选择器 CD4051 的 3 个控制输入端 (A、B、C) 和模数转换器 LTC1864 的移位时钟输入端、数据输出端、转换控制端，从而实现对 8 路风速数据的实时采集与处理；D1 和 D2 分别为无线收发指示灯和数据采集指示灯，当无线模块收发数据时，D1 闪烁，在单片机对传感器组进行数据读取时，D2 闪烁，用来指示采集器的工作状态。

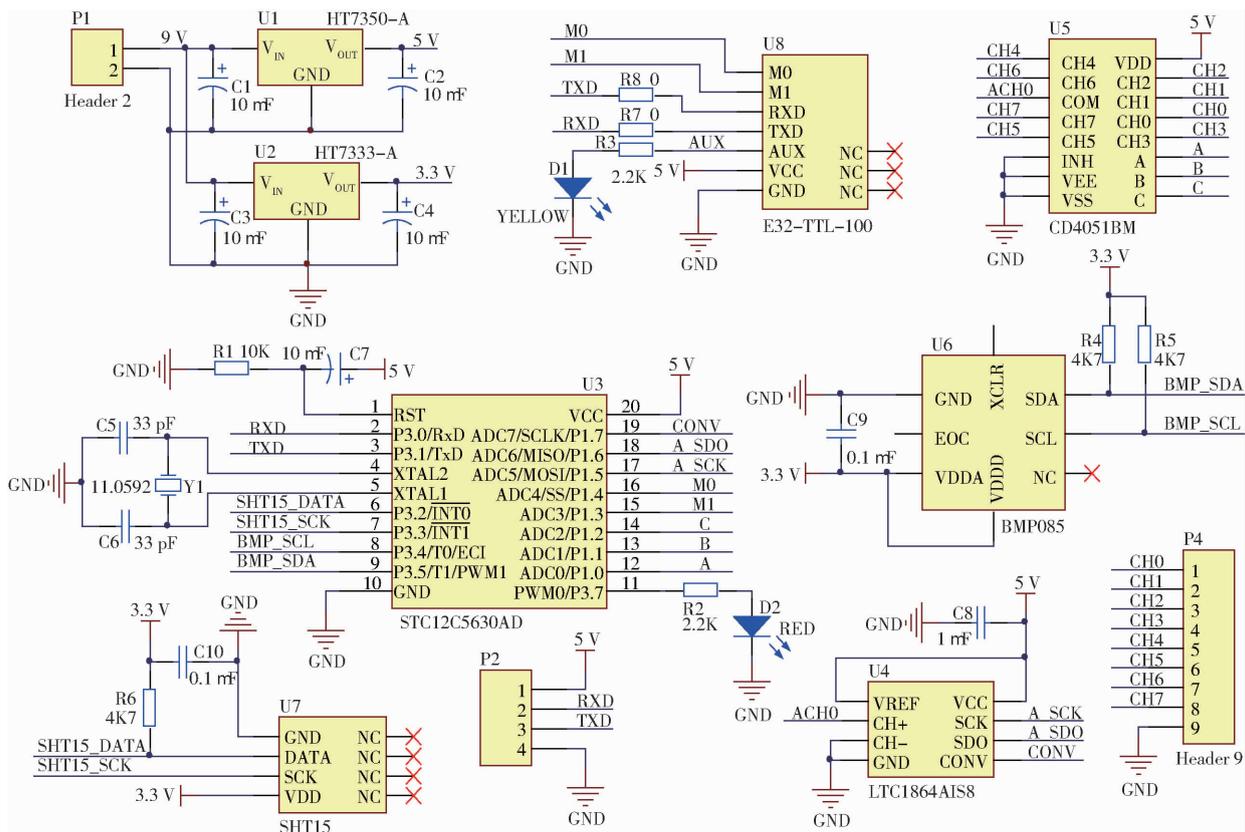


图5 无线数据采集器原理图

Fig.5 Principle diagram of wireless data acquisition unit



图6 无线数据采集器

Fig.6 Device of wireless data acquisition unit

另外,系统采用带USB接口的无线模块直接与PC机的串口相连,完成无线模块间指令和数据的收发功能,并将数据包传输给上位机数据处理软件。

3 系统软件设计

系统软件设计由数据采集器程序设计和上位机中心节点软件设计组成。数据采集器程序采用的集成开发环境为Keil- μ Vision5,上位机软件采用LabVIEW设计^[5,11]。

3.1 无线数据通信策略

在星型网络中,当多个采集节点同时向中心节点发送数据时会发生“拥堵”现象,导致部分采集节点发送的数据包无法被中心节点所接收;同时,在土壤风蚀研究当中,为了准确分析各个测点的风速廓

线与风沙流分布间的变化规律,对数据采集的同步性要求较高。因此本文采用“同步采集,异步传输”的通信机制解决上述问题^[15-16],无线模块的数据传输过程如图7所示。

其中,所有模块的信道号均设置为17H(该值可选择0~31);M代表中心节点,地址设置为FF FF,A、B、C代表3个不同的风速廓线采集节点,地址分别设置为00 01、00 02和00 03。

节点地址被设置为FF FF的中心节点在整个通信过程中具有广播监听功能,其发送的指令可以被同一信道内的所有节点接收,同时可以监听(接收)任意节点发送的数据。通信过程中,中心节点M首先通过“广播通信”方式发送数据同步采集指令(FF FF+信道号+指令包),网络中的所有采集节点接收到该指令后进行数据采集、处理与打包;等待5 s后,中心节点M再通过“定点通信”方式依次发送带有采集节点地址的数据请求指令(测点地址+信道+指令包),地址相同的采集节点接收到该指令后立即将数据包发送至中心节点M,此时中心节点M等待500 ms,并通过“网络监听”方式接收相应节点返回的数据包。

指令格式及功能如下:

(1)数据同步采集指令:控制所有采集节点进行数据同步采集,格式为:FF FF 17 F9 00 00 FA。

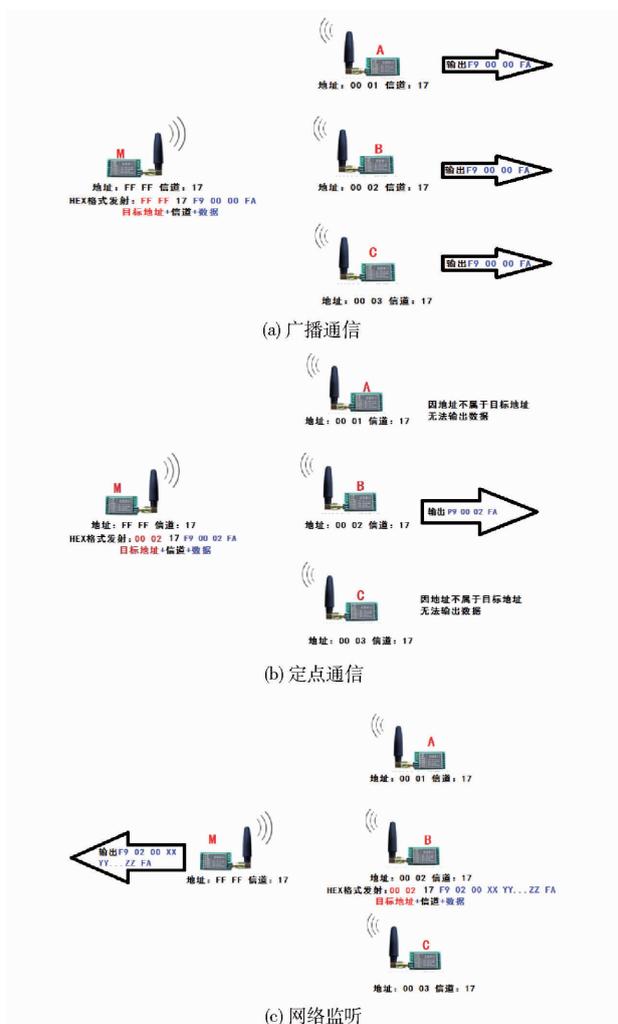


图 7 无线数据传输过程示意图

Fig. 7 Schematics of wireless data transmission process

(2)数据请求指令:控制相应测点发送数据包至中心节点,格式为:测点地址 17 F9 测点地址 FA。

3.2 数据采集器程序设计

数据采集器(采集节点)主要完成指令的接收、数据的采集、处理、存储和数据包的无线发送等功能。采集器程序流程图如图 8 所示^[10,12,15]。

上电后,采集节点仅需完成无线模块的功能初始化即可进入正常工作模式,等待中心节点的控制指令;在接收到数据同步采集指令后完成温度、湿度、大气压力及 8 通道风速数据的采集、处理、转换和打包等任务;在接收到数据请求指令后,将数据包通过串口发送给无线收发模块,再发送至中心节点,完成数据自动采集功能。

为降低电源波动及外部噪声对风速传感器输出信号的影响,采用均值法对数据进行处理。首先对传感器的输出电压连续采集 20 次,然后将 20 个数据进行从大到小排列,取中间 18 个数的平均值作为传感器的输出值,最后将其转换成相应的风速值。然而,采集器完成一次上述数据处理过程约 280ms,

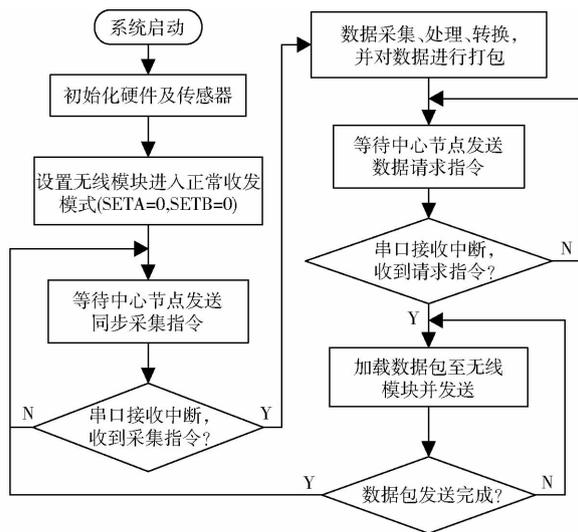


图 8 采集器程序流程图

Fig. 8 Flow chart of data acquisition unit

完成 8 通道风速数据的采集与处理约为 2.3s。因此,为了实现数据同步采集,程序首先完成 8 路风速数据的循环采集,然后再采用均值法对 8 路数据进行分别处理。由于数据选择器的通道开关及信号传播延时时间的最大值为 1 μs,AD 转换器的采样频率为 250 kHz,则实现单通道单次数据采集所需时间约为 5 μs,实现 8 通道 20 次循环数据采集所需时间约为 800 μs,相对于风速变化可忽略不计,满足风速数据同步采集的要求。

无线数据传输的数据包长 34 字节,各部分的存储内容及所占用的字节数如表 1 所示^[9]。

3.3 上位机软件程序设计

该系统可在 10 s 内完成 6 个风速测点的实时监测与数据传输、处理。软件界面如图 9 所示^[9,12]。

表 1 无线传输的数据包格式

Tab. 1 Format of wireless transmission data packet

序号	名称	字节编号	存储内容或默认值
1	目标地址	0 ~ 1	00 xx
2	信道号	2	23
3	包头	3	249
4	节点编号	4	目标地址的低字节
5	信号类型	5	0:风速;1:集沙量
6	温度	6 ~ 7	高字节为整数位,低字节为小数位
7	湿度	8 ~ 9	高字节为整数位,低字节为小数位
8	大气压力	10 ~ 12	字节 1 为千位和百位,字节 2 为十位和个位,字节 3 为小数位
9	风速(集沙量)	13 ~ 28	存储 1 ~ 8 路风速或集沙量数据,高字节为十位和个位,低字节为小数位
10	保留域	29 ~ 32	0
11	包尾	33	250

注:xx 代表 1 ~ 248 中的任意值。



(a) 参数配置



(b) 数据处理显示界面

图9 数据处理软件界面

Fig. 9 Interfaces of data processing software

软件启动后,首先需要通信端口、测点个数、测点地址和传感器组的高度分布等参数进行配置,软件自动将设置的节点地址送入地址队列,并为相应测点分配数据显示通道号(0~5,分别对应6个显示区)。然后,软件按照设定好的无线数据通信策略控制各采集节点完成风蚀数据的采集、处理打包与无线模数据传输等过程。最后,上位机软件对各采集节点返回的数据包进行解析,并根据数据类型信息对数据进行处理;采用最小二乘法对风速数据进行处理,绘制出各测点处的近地表风速廓线,将数据及图形显示到相应的区域。

4 试验与分析

4.1 热敏风速传感器组标定

采用美国 TSI 公司生产的 testo-425 精密型热线风速仪对所设计的风速传感器进行标定,该风速仪的分辨率达 0.01 m/s,精度为 0.03 m/s,是专门用于监测通风管内风速的体积流量型风速计。

标定时,将风速传感器固定于低速微型风洞试验段中心位置且距离出口 10 cm 处,通过调节变频器来改变风洞试验段中心风速,在净风作用下对风速传感器进行标定,如图 10 所示^[8]。

由热敏式风速传感器的输出特性可知,该传感器对低风速较为敏感,且测量精度随风速的增大而减小。因此,在 0~10 m/s 和 10~16 m/s 的风速下,标定间隔分别选择为 0.5 m/s 和 1.0 m/s,共选取



图10 风速传感器标定试验装置

Fig. 10 Testing devices for calibrating wind velocity sensors

26 种不同的风洞中心风速。

调节风洞中心风速至某一稳定值,首先采用 testo-425 热线风速仪对距传感器探头前方 2 cm 处的风速进行测量,连续采集 20 组数据,并将其平均值作为风洞中心风速;然后采用 NI USB-6002 多功能高速数据采集卡对风速传感器的输出电压进行采集,连续读取 20 组数据,并将其平均值作为标定值;最后,以风速传感器的平均输出电压值为横坐标,以 testo-425 风速仪的平均风速为纵坐标,采用最小二乘法对数据进行三次多项式拟合,以获得风速传感器的标定曲线及其标定方程^[2,8]。

1 号风速传感器的标定数据如表 2 所示,风速传感器组的标定曲线和拟合方程分别如图 11 和表 3 所示。

表2 1号风速传感器标定数据

Tab. 2 Calibrated data of wind velocity sensor 1

风速/(m·s ⁻¹)	电压/V	风速/(m·s ⁻¹)	电压/V
0	0.655 3	4.95	2.423 5
0.25	1.234 7	5.40	2.488 9
0.43	1.411 4	6.11	2.543 9
0.76	1.568 1	7.06	2.611 3
1.19	1.655 2	7.60	2.676 5
1.49	1.757 8	8.29	2.745 8
1.65	1.859 4	8.82	2.785 8
1.96	1.923 0	9.80	2.864 4
2.34	2.027 0	10.72	2.910 4
2.61	2.129 2	12.18	3.002 4
2.91	2.178 3	13.50	3.120 7
3.57	2.252 1	14.37	3.155 8
4.28	2.355 9	15.37	3.243 1

从图 11 和表 3 中可以得出:该风速传感器组的输出特性曲线与热敏风速传感器的输出特性曲线基本一致;采用三次多项式拟合所得到的拟合曲线能够准确反映出风速与传感器输出电压间变化规律,且拟合度均在 0.995 以上;风速传感器组的输出特

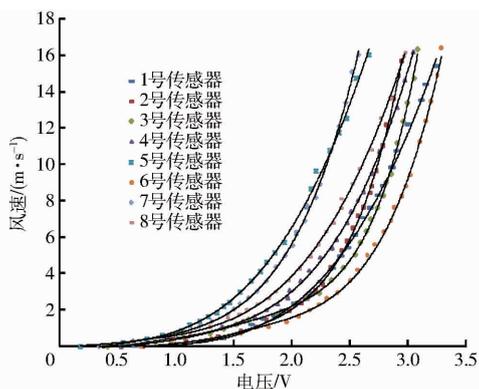


图 11 风速传感器组标定曲线

Fig. 11 Calibration curves of wind velocity sensors

表 3 风速传感器组拟合方程

Tab. 3 Fitting equations of eight wind velocity sensors

编号	拟合方程	拟合度 R^2
1 号	$y = -0.558x^3 + 6.182x^2 - 6.806x + 1.994$	0.998
2 号	$y = 0.495x^3 + 7.871x^2 - 7.541x + 1.716$	0.998
3 号	$y = 0.793x^3 + 0.570x^2 - 0.089x - 0.004$	0.998
4 号	$y = 7.337x^3 - 7.760x^2 + 4.688x - 0.768$	0.998
5 号	$y = 0.324x^3 + 1.279x^2 - 0.979x + 0.194$	0.997
6 号	$y = -0.004x^3 + 2.277x^2 - 1.033x + 0.23$	0.996
7 号	$y = 0.690x^3 - 0.686x^2 + 0.569x - 0.188$	0.999
8 号	$y = -1.409x^3 + 9.146x^2 - 10.01x + 3.023$	0.995

性均呈单调递增趋势,且 0 ~ 6 m/s 范围内变化较快,呈非线性关系;在 6 ~ 16 m/s 范围内变化较慢,基本呈线性关系。

4.2 风洞试验测试

室内环境温度 16.5℃,测试时长 4 h。试验时,将风速廓线仪置于 OFDY-1.2 型可移动风蚀风洞的试验段中心位置处,风速传感器探头正对风洞来风方向,最下方探头距风洞底面 2 cm;同时,将 testo-425 热线风速仪的探头置于风洞试验段距风速廓线仪前方 20 cm 位置处,以测量风洞中心风速,如图 12 所示^[2,8]。



图 12 风速廓线仪风洞测试

Fig. 12 Experiments of wind speed profiler in wind tunnel

由于风洞横截面宽 1 m,高 1.2 m,风速廓线仪最大迎风面积为 0.056 m²,占风洞试验段截面积的 4.7% (小于 5%),符合风洞测试要求,机体对风洞

试验段流场的影响较小。测试过程中,首先调节变频器改变风洞中心风速,连续读取 20 组 testo-425 热线风速仪采集的数据,并将其平均值作为风洞中心风速;然后,分别在风洞中心风速为 3、6、9、12 m/s 的条件下,对仪器在 4 种不同中心风速下测得的 8 路风速数据进行采集处理;最后,上位机数据处理软件采用最小二乘法对测得的风速数据进行指数拟合,以获得近地表风速廓线及其拟合方程。风速廓线仪测得的风速廓线及其指数拟合方程如图 13 和表 4 所示。

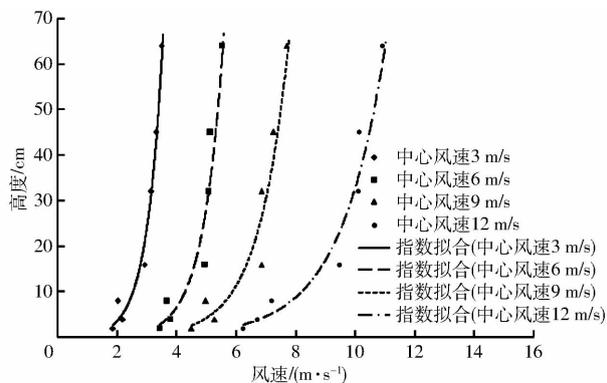


图 13 不同风速下测得的风速廓线

Fig. 13 Wind profiles measured at different wind velocities

表 4 不同风速下风速廓线的指数拟合方程

Tab. 4 Fitting equations at different wind velocities

中心风速/(m·s ⁻¹)	指数拟合方程	拟合度 R^2
3	$y = 0.089e^{1.856x}$	0.921
6	$y = 0.020e^{1.436x}$	0.905
9	$y = 0.035e^{0.952x}$	0.912
12	$y = 0.046e^{0.652x}$	0.947

从图 13 和表 4 中可以看出:8 路风速传感器基本能够准确采集到不同位置上的风速数据;采用指数拟合得到的拟合方程与该风洞试验段的风速分布规律相一致,且拟合度均在 0.9 以上;4 种不同风速下,该风速廓线仪测得的风廓线能够准确地反映近地表风速在垂直高度上的分布规律^[17-19]。

4.3 野外试验验证

将整个测试系统分别置于草地和无保护深耕农田两种地表中,在自然风的作用下,连续采集不同地表的风速廓线;采用 testo-425 热线风速仪测量距离地面 2 m 高处的瞬时风速,将其作为风速廓线的参考风速^[2,20]。野外试验测试如图 14 所示。

野外环境平均温度 24℃,平均湿度 21%,平均大气压力 880 hPa。测试时,将风速廓线仪固定于被测地表,改变接收端与仪器间的距离,并观察 PC 端数据处理软件的工作状态及风速廓线的变化规律;保持系统连续工作至接收端无法正常接收数据。在草原地表和农田地表条件下,风速廓线仪在不同参

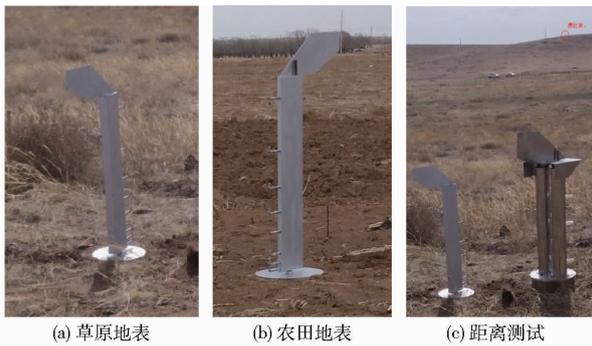


图14 风速廓线仪野外试验

Fig. 14 Field experiments of wind speed profiler

考风速下采集到的风速数据及其风速廓线分别如表5、6和图15、16所示。

表5 草原地表不同风速下8个高度上的风速

Tab. 5 Wind speed at eight heights at different wind velocities on grassland

高度/ cm	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)						
	2	3	4	6	7	9	10
2	0.22	0.32	0.96	0.45	0.35	1.32	2.24
4	0.66	0.75	1.29	0.89	1.59	2.6	3.09
8	0.78	0.8	1.34	1.42	2.74	3.36	3.36
16	0.98	1.45	2.09	2.83	3.92	5.91	6.33
24	1.45	1.96	3.21	3.67	5.06	6.83	7.56
32	1.72	2.56	4.09	4.74	5.95	8.26	9.21
48	2.01	3.11	4.27	5.76	7.15	8.66	10.07
64	0.22	0.32	0.96	0.45	0.35	1.32	2.24

表6 农田地表不同风速下8个高度上的风速

Tab. 6 Wind speed at eight heights at different wind velocities on farmland

高度/ cm	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)					
	2	3	5	9	12	13
2	0.53	0.82	1.27	3.90	4.51	5.92
4	1.18	1.14	1.54	4.12	5.16	7.15
8	1.19	1.24	2.67	5.84	6.1	8.54
16	1.48	2.24	3.89	7.17	7.96	9.59
24	1.57	2.37	4.11	7.68	8.53	10.31
32	1.69	2.54	4.24	7.87	9.39	11.25
48	2.01	2.79	4.98	8.83	11.22	12.01
64	2.12	3.09	5.36	9.12	11.99	12.73

试验结果表明:该风速廓线仪在两种不同地表下所测得近地表风速廓线能够准确反映出草原地表和翻耕农田近地表的风速分布规律^[5,19-20];在空旷无遮挡且空中传输速率为2.4 kb/s的条件下,无线数据传输距离不低于500 m(无丢包);在无外部供电的条件下,该风速廓线仪最大正常工作时长不低于7 h;该风速廓线仪及其无线数据采集处理系统能

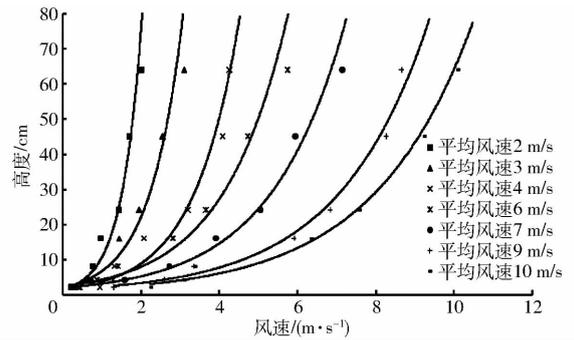


图15 草原地表不同风速下的风速廓线

Fig. 15 Wind profiles at different wind velocities on grassland

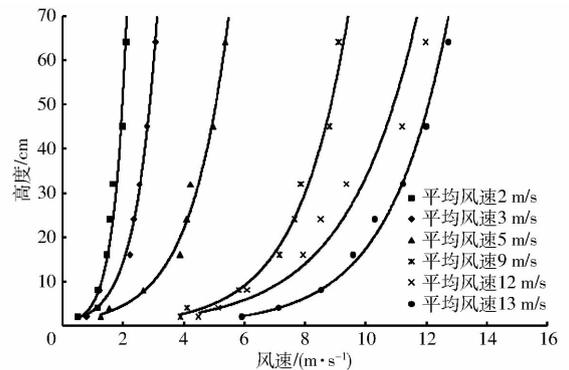


图16 农田地表不同风速下的风速廓线

Fig. 16 Wind profiles at different wind velocities on farmland

够准确、稳定地对被测环境的近地表风速廓线进行实时测量。

5 结论

(1) 设计的风速传感器具有体积小、功耗低、重复性好、响应速度快与测量精度高等优点;风测量范围为0~16 m/s,最大响应时间不超过3 s,测量精度不低于0.3 m/s。

(2) 设计的风速廓线仪具有自动风向校准、携带方便、流场影响小与无线数据传输等特点,旋转启动风速为3.7 m/s,实现了8通道风速数据的准确采集与处理,测得的风速廓线符合指数分布规律,且具有较高的拟合度,能够满足对近地表风速廓线实时测量的需求。

(3) 该无线数据采集处理系统具有实时数据处理与显示、风速廓线实时动态绘制及数据自动存储与回放等功能,能够在野外环境下长期、稳定工作,在最大射频功率下,数据包的有效传输距离不低于500 m,6个节点完成一次数据传输所需时间不超过10 s,基本满足野外土壤风蚀研究的需求。

参考文献

- HU Mingbao, LI Miaoying. Development and current situation of the wind profile radar[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2010,10(5):724-728. (in Chinese)
- 2 刘海洋. 基于无线传感网络的土壤风蚀监测系统研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
LIU Haiyang. Study on the soil wind erosion monitoring system based on wireless sensor network[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 3 邵德民,吴志根. 上海的 LAP-3000 大气廓线仪[C]//首届气象仪器与观测技术交流和研讨会论文集,2001:8.
- 4 吴蕾,何平,马舒庆,等. 对流层 II 型廓线仪探测数据对比分析[C]//中国气象学会雷达气象学与气象雷达委员会第一届学术年会论文集,2005:53-54.
- 5 麻硕士,陈智. 土壤风蚀测试与控制技术[M]. 北京:科学出版社,2010.
- 6 孙悦超,陈智,赵永来,等. 阴山北麓农牧交错区草地土壤风蚀测试[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(6):143-147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130625&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.025.
- SUN Yuechao, CHEN Zhi, ZHAO Yonglai, et al. Test of grassland soil erosion of farming-pastoral zone in northern foot of Yinshan mountains[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 143-147. (in Chinese)
- 7 陈智,麻硕士,范贵生. 麦薯带状间作农田地表土壤抗风蚀效应研究[J]. 农业工程学报,2007,23(3):51-54.
CHEN Zhi, MA Shuoshi, FAN Guisheng. Effect of wind erosion resistance of soil for wheat and potato strip intercropping farmland [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3):51-54. (in Chinese)
- 8 陈智,郭旺,宣传忠,等. 热膜式无线风速廓线仪[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(9):99-102,110. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120919&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.019.
- CHEN Zhi, GUO Wang, XUAN Chuazhong, et al. Wireless hot-film wind speed profiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(9):99-102,110. (in Chinese)
- 9 赵春江,屈利华,陈明,等. 基于 ZigBee 的温室环境监测图像传感器节点设计[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(11):192-196. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121136&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.036.
- ZHAO Chunjiang, QU Lihua, CHEN Ming, et al. Design of ZigBee-based greenhouse environmental monitoring image sensor node [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(11):192-196. (in Chinese)
- 10 贾洪雷,李杨,齐江涛,等. 基于 ZigBee 的播种行表层土壤坚实度采集系统[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(12):39-46,61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151206&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.006.
- JIA Honglei, LI Yang, QI Jiangtao, et al. Design and test of soil compaction acquisition system for sowing line surface based on ZigBee[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(12):39-46,61. (in Chinese)
- 11 胡培金,江挺,赵燕东. 基于 ZigBee 无线网络的土壤墒情监控系统[J]. 农业工程学报,2011,27(4):230-234.
HU Peijin, JIANG Ting, ZHAO Yandong. Monitoring system of soil water content based on ZigBee wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(4):230-234. (in Chinese)
- 12 孙宝霞,王卫星,雷刚,等. 基于无线传感器网络的稻田信息实时监测系统[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(9):241-246. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140939&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.039.
- SUN Baoxia, WANG Weixing, LEI Gang, et al. Real-time monitoring system for paddy environmental information based on wireless sensor network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9):241-246. (in Chinese)
- 13 HEDRICH F, KLICHE K, STORZ M, et al. Thermal flow sensors for MEMS spirometric devices[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010,162(2):373-378.
- 14 陈晓栋,郭平毅,兰艳亭. 基于 780 MHz 频段的温室无线传感器网络的设计及试验[J]. 农业工程学报,2014,30(1):113-120.
CHEN Xiaodong, GUO Pingyi, LAN Yanting. Design and experiment based on wireless sensor network with 780 MHz in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(1):113-120. (in Chinese)
- 15 张春元. 实时低功耗无线传感器网络设计[J]. 仪表技术与传感器,2013(1):89-91.
ZHANG Chunyuan. Design of real-time wireless sensor network with low power consumption [J]. Instrument Technique and Sensor,2013(1):89-91. (in Chinese)
- 16 赵瑞琴,刘增基,文爱军. 一种适用于无线传感器网络的高效节能广播机制[J]. 电子学报,2009,37(11):2457-2462.
ZHAO Ruiqin, LIU Zengji, WEN Aijun. An efficient energy-saving broadcast mechanism for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica,2009,37(11):2457-2462. (in Chinese)
- 17 罗凤敏,辛智鸣,高君亮,等. 乌兰布和沙漠东北缘近地层风速和降尘量特征[J]. 农业工程学报,2016,32(24):147-154.
LUO Fengmin, XIN Zhiming, GAO Junliang, et al. Characteristics of near-surface wind speed and sand-dust flux at northeast edge of ulanbuh desert[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(24):147-154. (in Chinese)
- 18 杜鹤强,韩致文,王涛,等. 新月形沙丘表面风速廓线与风沙流结构变异研究[J]. 中国沙漠,2012,32(1):9-16.
DU Heqiang, HAN Zhiwen, WANG Tao, et al. Variation of wind profile and sand flow structure above barchan dune[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(1): 9-16. (in Chinese)
- 19 尚润阳. 地表覆盖对土壤风蚀影响机理及效应研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
SHANG Runyang. Study on mechanism and effect between earth mulching and soil wind erosion research [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007. (in Chinese)
- 20 齐志伟,童淑敏,田建川,等. 基于 Fluent 的风洞典型风蚀地表风速廓线的模拟[J]. 农机化研究,2009,31(1):35-37.
QI Zhiwei, TONG Shumin, TIAN Jianchuan, et al. The simulation of wind speed contour line of typical wind erosion surface in wind-tunnel based on Fluent[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2009, 31(1):35-37. (in Chinese)