doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.008

全自动多通道农田无线集沙仪研究

刘海洋　常佳丽　陈　智　宣传忠　司志民　宋　涛
（内蒙古农业大学机电工程学院，呼和浩特 010018）

摘要：针对用于研究农田土壤风蚀的集沙仪自动化程度较低，不能实时记录集沙量数据且不具有无线传输和组网功能，给研究土壤风蚀起沙过程中不同阶段的沙粒运移特性带来诸多困难等问题，基于无线传感网络技术，以气流对冲式风沙分离器为基础，设计了研究农业土壤风蚀专用的全自动多通道无线集沙仪，实现了土壤风蚀量的自动采集、无线传输和实时数据处理等功能。实验表明，系统可实现对最多 6 个测点，每个测点 8 通道风蚀数据的循环自动采集，传感器最大响应时间为 2 s；集沙仪每个集沙盒最大集沙量为 180 g，旋转启动风速为 3.4 m/s，平均集沙效率达到 85% 以上，称重传感器 10 h 连续测量误差在 ±0.04 g 以内且测量精度达 0.01 g；在射频功率最大、空中传输速率为 1 kb/s 时，32 字节的数据包有效传输距离在 1 000 m 左右，通信建立时间小于 5 s。该系统具有低功耗、使用方便、操作简单、自动数据采集等优点，能够满足研究农田土壤风蚀的需要。

关键词：集沙仪；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(2016)06-0053-08

Design of Automatic Multi-channel Wireless Agricultural Sand Sampler

Liu Haiyang　Chang Jiali　Chen Zhi　Xuan Chuanzhong　Si Zhimin　Song Tao
(*College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Huhhot* 010018, *China*)

Abstract: Currently, the automation level of sand samplers used for farmland soil wind erosion is very low. In addition, they can't record the sediment data real-timely and have no functions of wireless transmission and networking. So it brings many difficulties and other issues to the study on motion characteristics of the soil wind erosion particles at different stages in the transport process. To solve these problems, a new type of automatic multi-channel wireless sand sampler based on wireless sensor network technology and the reverse hedge sand separator was designed. It was dedicated to study agricultural soil wind erosion and realize these functions of automatic acquisition of quantity of soil wind erosion, wireless transmission and real-time data processing. The results showed that the system can circularly scan up to six testing points, the eight channels of each testing point and automatically collect wind erosion data, and the maximum response time was no more than 2 s. The rotating start-up wind speed of the sand sampler was 3.4 m/s, and the maximum weighing range was 0 ~ 180 g; the precision of weighing sensors was up to 0.01 g and 10 hours continuous measurement error was within ± 0.04 g with sampling efficiency more than 85%. The length of data packet was 32 bytes and the effective transmission distance can reach 1 000 m under the conditions of 1 kb/s transfer rate and maximum transmitting power. Communication setup time was less than 5 s. The system had advantages of low power consumption, easy to use, simple operation and automatic data acquisition, it can meet the needs of research on farmland soil wind erosion.

Key words: sand sampler; automatic acquisition; wireless transmission; real-time data processing

收稿日期：2015-11-30　修回日期：2016-01-05
基金项目：国家自然科学基金项目(41361058、41161045)
作者简介：刘海洋(1985—)，男，博士生，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：陈智(1962—)，男，教授，博士生导师，主要从事测试控制技术与装备智能化研究，E-mail：sgchenzhi@imau.edu.cn

引言

集沙仪是观测风沙流结构和研究风沙移动规律所必需的仪器,主要采集风蚀过程中随风搬运的沙尘颗粒,在环境监测和土壤风蚀研究中被广泛应用[1-2]。自 Bagnol 设计了最早用于野外风沙观测的垂直长口形集沙仪以来,多种不同类型和用途的集沙仪相继问世[1,3-4]。WILSON 等[5]设计了能够保证进风管正对侵蚀风向且能完成单点采集不同高度沙样的 MWAC 集沙仪;GREELEY 等[6]设计了目前国外常用的楔形被动集沙仪;MERVA 等[7]对 Bagnold 的集沙仪进行改进,设计了可旋转的通风集沙仪;FYREAR[8]设计了带有导向装置的 BSNE 集沙仪;李长治等[9]设计了平口式集沙仪;SHAO 等[10]设计了由真空泵驱动的垂直集成集沙仪;董治宝等[11]设计制作了主要适用于风洞实验研究的 WITSEG 多路集沙仪;李振山等[12]设计了用于测量风沙流中输沙量垂线分布的垂直点阵集沙仪;付丽宏等[13]设计了旋风分离式沙尘集沙仪;顾正萌等[14]设计了新型主动式竖直集沙仪;夏开伟[3]设计了全自动高精度集沙仪;宋涛等[1]设计了反向对冲式集沙仪。

这些集沙仪各有其独特的优点,为风蚀研究提供了重要的测试手段。目前国内外常用的集沙仪以人工取沙称量方法为主,在取沙和称量过程中,会造成部分集沙量损失,影响测量和研究结果的准确性[13];同时,由于不能实时记录集沙量数据,给研究起沙过程中不同阶段的沙粒运移特性带来诸多不便。针对上述问题,本文设计一种具有自组网功能的全自动多通道无线集沙仪,集成 STC12C5630AD 单片机、高精度称量传感器、WLK01L39 无线数据传输模块和气流对冲式风沙分离器于一体,实现每 5 s 对最多 6 个测点,以及单测点 8 路土壤风蚀量的循环采集、无线传输和实时处理,并绘制各测点处的风沙流结构变化曲线图等。

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、中心节点和数据处理软件 3 部分组成。数据采集节点由风沙分离器、传感器模块、信号调理采集电路、单片机控制模块和无线数据传输模块等 5 部分组成[15-16]。系统总体结构如图 1 所示[17-18]。

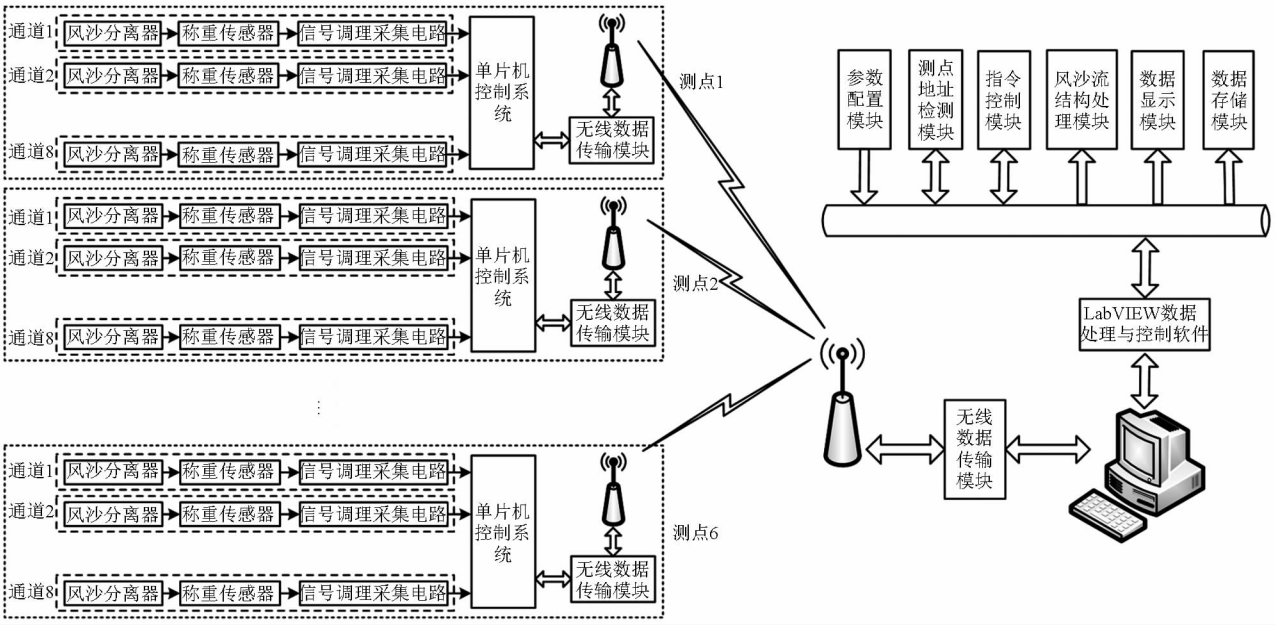


图 1 系统的总体结构

Fig. 1 Overall structure of system

其中,风沙分离器采用气流反向对冲降速原理实现对风蚀过程中随风搬运的沙尘颗粒的收集,并对气流进行降速,使出口风速大幅降低,减小对称重传感器的干扰;悬臂梁称重传感器将集沙量的质量信号通过桥式应变片电阻的变化转换为电压变化,获得被测物的质量;信号调理采集电路将桥式电路中传感器输出的微弱电压信号放大 128 倍后通过 24 位高精度 A/D 模块转换成数字量,并存储到内部数据寄存器中,完成集沙量的数据采集;单片机控制系统通过串行通信方式与无线收发模块和 8 通道称重模块连接,完成入网请求信息、确认信息和数据采集指令的发送和接收,并对传感器组的数据进行读取、处理、打包和发送;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,主要完成信

道建立、数据和指令的无线传输、数据包的 CRC 校验等功能；上位机软件实现星型网络的建立、参数配置、测点监测与管理、控制指令和入网信息的发送与接收、风蚀数据的实时处理等。

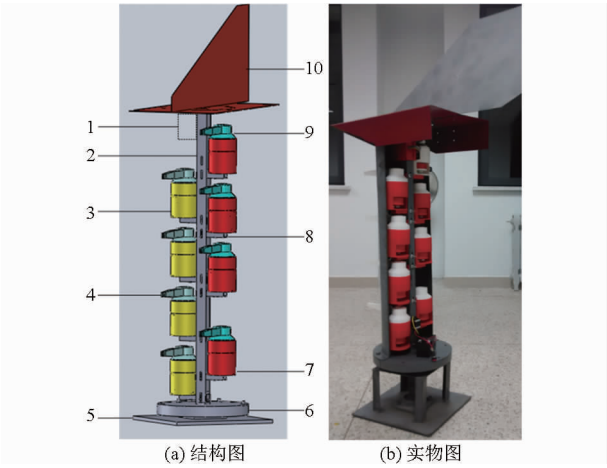
2　系统硬件设计

该系统的硬件部分主要包括多通道集沙仪结构设计、传感器信号调理电路设计和无线数据采集器设计等 3 部分[19-20]。

2.1　多通道集沙仪结构设计

该集沙仪主要以反向对冲式风沙分离器为基础，在三维软件 Solidworks 2010 中设计制作。由无线收发采集器、支持杆、集沙盒、固定底盘、旋转底座、称重传感器组、悬挂架、风沙分离器、导向板和 12 V 电池等组成[1,21-22]。集沙仪结构如图 2a 所示。

风沙分离器是集沙仪的主要部件，其与集沙盒、称重传感器和称量盒共同组成该集沙仪的基本采集单元（沙尘收集器），用来收集沙蚀物。风沙分离器安装在集沙盒上部，集沙盒下部固定悬臂梁称重传感器，传感器一端固定在集沙盒底座上，另一端固定称量盒，每个称量盒的最大集沙量为 180 g[22]（图 2b）；导向板起气流导向作用，保证风沙分离器的进风口始终正对来风方向；旋转底座安装在 2 个密封性较好的调心轴承上并和固定底盘连接，使集沙仪可随风向自由旋转。



(a) 结构图　　(b) 实物图

图 2　多通道集沙仪结构图

Fig. 2　Structure graph of multi-channel sand sampler

1. 无线收发器装置　2. 支持杆　3. 集沙盒　4. 进风口　5. 固定底盘　6. 旋转底座　7. 称重传感器　8. 悬挂架　9. 风沙分离器　10. 导向板

该集沙仪高为 70 cm，沿高度方向分布 8 个高度为 12 cm 的沙尘收集器，收集垂直地面方向上 8 个高度（2、8、19、32、36、49、53、66 cm）的沙尘量[21-22]；分离器进沙口宽为 7.5 mm，高为 10 mm，可收集粒径较小的粉粒（0.1 ~ 0.5 mm），进沙口风速与参照风速之比为 93.27%，具有较好的等动力特性，在 9 ~ 18 m/s 风速下，平均集沙效率达到 85.59%[1]。由于分离器的体积约束，在集沙仪结构上将 8 个分离器分成 2 列安装，间距 5 cm，2 列分离器进风口中心点间距 12.5 cm。集沙仪旋转部分质量 21.4 kg，导向板重心距集沙仪转轴 29.82 cm 且受力面积约 0.1 m^2，调心轴承内径 2.5 cm，经计算知：集沙仪力矩达到 5.6 N/mm（风速 1.46 m/s）时即可旋转；由于机械部件间的摩擦和调心轴承的阻力作用，实验发现当风速达到 3.4 m/s 时仪器才开始转动。为了测量近地表风沙量的分布与风速间的关系，需将最下方风沙分离器的进沙口中心置于距地表 0.8 ~ 2 cm 的位置，为保证旋转机构能够顺利旋转，需用保护外壳将旋转底座封闭后置于地下 33 cm 处。

2.2　传感器信号调理电路设计

由于悬臂梁称重传感器输出的电压信号比较微弱，受外部噪声干扰较大，因此需设计信号调理电路对称重传感器输出信号进行处理，电路原理图如图 3 所示[23-24]。

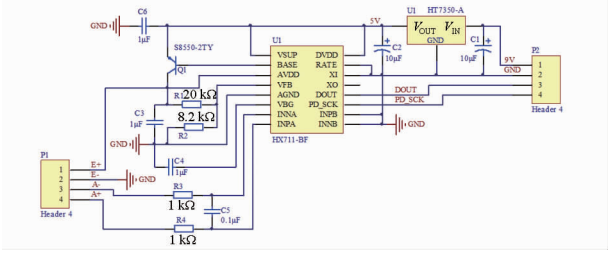


图 3　传感器信号调理电路原理图

Fig. 3　Principle schematic of sensor signal conditioning circuit

称重传感器采用量程 0 ~ 300 g、精度 0.01 g 的小体积悬臂梁传感器，其综合误差在 0.05% 以内，灵敏度（1.0 ± 0.1）mV/V，零点输出 ± 0.1 mV/V，非线性度为每 3 min 0.05%，零点漂移为每 1 min 0.05%。同时，采用 HX711 高精度 A/D 转换芯片对传感器输出的信号进行滤波、放大和数字化；桥式传感器的差分输出连接到 HX711 的通道 A，可编程增益设置为 128，数据输出速率 10 Hz；通过串口管脚 PD_SCK 和 DOUT 与 MCU 进行数据传输。

其中，P2 端口连接外部电源和 AD 转换器数据输出端口；电容 C1、C2 和 HT7350 组成的稳压电路将输入的 9 V 电压稳定至 5 V，为信号调理电路提供标准工作电源；P1 端口的 E + 、E - 和 A + 、A - 分别连接称重传感器的电源输入端和信号输出端；HX711 内部稳压电路通过片外 PNP 管 S8550 和分压电阻 R1、R2 向称重传感器和 A/D 转换器提供稳定的低噪声模拟电源（即 AVDD 和 GND 电压），该

电压由 1.25 V × (R_1 + R_2)/R_2 计算,其中 R_1、R_2 为分压电阻 R1、R2 的阻值。

2.3 多通道无线数据采集器设计

该采集器的硬件电路采用 Altium Designer Winter 09 制作,如图 4 所示[23-24]。

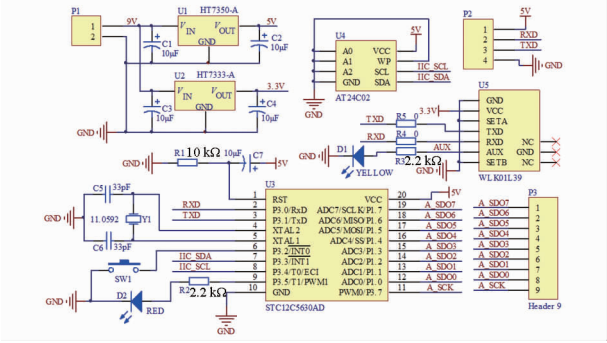
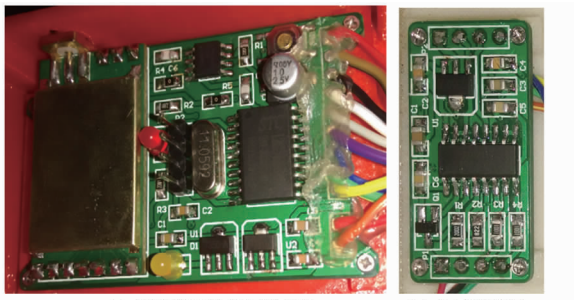


图 4 多通道无线数据采集器原理图

Fig. 4 Principle schematic of multi-channel wireless data acquisition unit

系统核心控制单元采用片内集成 MAX810 专用复位电路、30 kB 的 flash 存储器和 768 字节 RAM 的 STC12C5630AD 单片机,用来接收和发送上位机的指令与数据;同时,采用具有 GFSK 调制方式的 WLK01L39 无线模块对数据包进行传输,该模块集成了高性能低功耗射频芯片 A7139 和高速单片机,最大输出功率 20 dBm,工作频段 470 ~ 510 MHz,中频带宽 100 kHz,最大数据包长 64 字节,开阔通信距离可达 1 000 m 左右;采用标准 UART 协议,自带 CRC 校验,内部自动完成通信协议转换和数据收发控制。

该硬件部分主要由控制器电路、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 电压主要给无线收发模块供电;由 R3、R4、R5、D1 和 U5 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;单片机控制电路的时钟频率为 11.059 2 MHz,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 口的 8 个端口(A_SDO0 ~ A_SDO7)和 P3.7 端口分别连接集沙仪 8 个信号调理电路的数据输出端口 DOUT 和时钟控制端口 PD_SCK(共用一个时钟控制端口),实现不同高度集沙量数据的实时采集;SW1 和 U4 组成数据存储器控制电路,存储 8 路传感器的校正参数、初始化数据及最新采集到的集沙量数据等;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。采集器硬件电路如图 5 所示[24]。



(a) 多通道无线数据采集器 (b) 传感器信号调理电路

图 5 多通道无线数据采集器

Fig. 5 Device of multi-channel wireless data acquisition

另外,系统采用带 USB 接口的 WLK01L39 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 系统软件组成

系统软件设计主要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-μVision 4,上位机中心节点软件采用 LabVIEW 2013 设计[17-18,20]。

3.1 上位机软件程序设计

该系统可在 5 s 内完成 6 个风速测点和 6 个集沙量测点的实时测监与数据传输、处理。软件界面如图 6 所示,程序流程如图 7a 所示[19,21,23]。



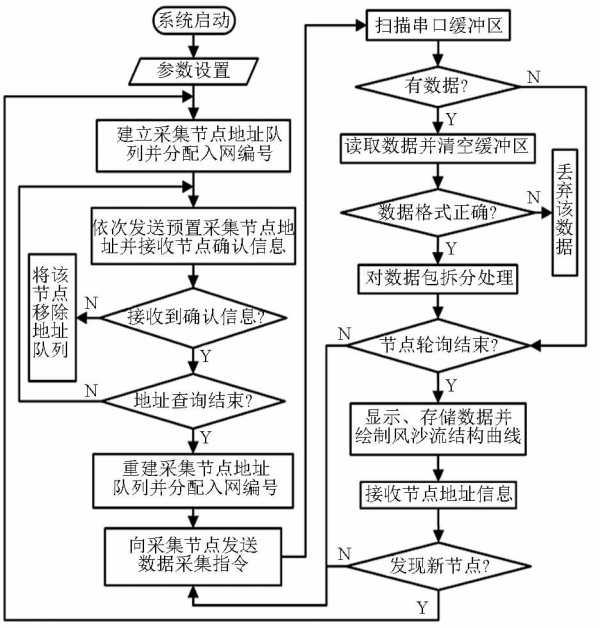
(a) 参数配置

(b) 数据处理显示界面

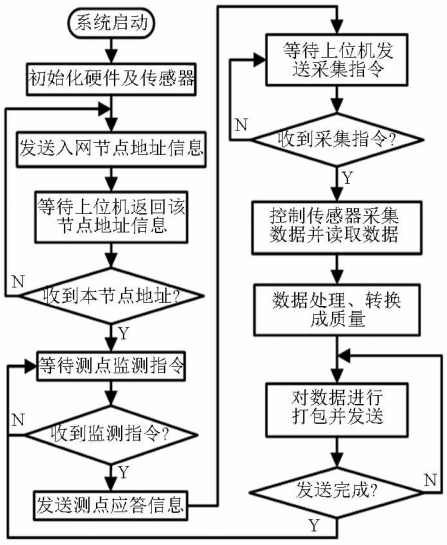
图 6 数据处理软件界面

Fig. 6 Software interface of data processing system

系统启动后,首先需要对通信端口、测点个数、测点地址和传感器组的高度分布等参数进行设置,



(a) 上位机软件工作流程



(b) 采集控制器工作流程

图 7　系统程序流程图

Fig. 7　Flow chart of system program

软件自动将设置的节点地址送入地址队列，并分配节点数据在软件中的显示通道号(0 ~ 5，分别对应 6 路显示区)。然后，将地址队列中的地址数据依次加载到监测指令中并通过无线模块发送出去(系统中的所有指令信息都能被采集节点接收，仅地址匹配的采集节点会发送应答信息或数据包)；每个地址发送完毕后等待 100 ms 并读取串口缓冲区，若接收到相应采集节点返回的确认信息，则保留该节点地址，若接收不到确认信息，则将该节点地址移出地址队列；在所有地址查询结束后重新建立地址队列并分配显示通道号，完成星型网络的初步建立。最后，软件系统向网络中的节点发送数据采集控制指令，所有采集节点在接收到该指令后同时对风蚀数据进行采集、打包，并在接收到数据请求指令后将数据包发送给中心节点，完成数据的同步采集、异步传输功能。在所有节点数据传输结束后，中心节点每隔 200 ms 读取一次串口缓冲区，连续读取 10 次(即 2 s)，用来接收新节点发送的入网请求(测点应答信息)；在收到入网请求信息后，将新采集节点的地址存入地址队列，然后重新对网络中的节点进行检测并重复上述过程，完成星型网络的自组网和采集节点的控制与数据采集。

总之，中心节点在每轮数据采集前监测网络中的所有节点并剔除故障节点，在每轮数据采集后检测新节点并将其加入网络中。

组网过程中使用到的指令及其格式说明如下：①测点监测指令：用来监测网络中的测点是否与中心节点处于连接状态，格式为："249 测点地址 0 250"。②测点应答信息：用来响应中心节点发送的监测指令，格式为："249 测点地址 信号类型 250"。③采集控制指令：用来控制网络中的所有测点进行数据采集，格式为："249 0 0 250"。④数据请求指令：用来控制相应的测点发送数据包到中心节点，格式为："249 测点地址 1 250"。

上位机软接收到各采集节点发送的数据包后，首先完成数据包的解析，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蚀数据进行处理，绘制出各测点处的风沙流结构曲线；通过测点地址查询分配的显示通道号，将数据显示到相应的区域并存储到数据库中。

3.2　数据采集器程序设计

数据采集器(采集节点)主要完成入网请求发送，称量系统的控制，数据的读取、处理、存储和数据包的无线发送等。程序流程如图 7b 所示[19-20,23]。

新入网的采集节点在完成硬件和传感器初始化后，向上位机中心节点发送入网请求(测点应答信息)，中心节点在每轮数据循环结束后接收网络中新节点的入网请求信息，在收到该信息后返回测点监测指令，并将其加入地址队列，同时根据接收到的信号类型信息(0：风速数据，1：集沙量数据)分配相应的显示通道号，完成节点自动入网功能。然后，采集节点进入正常工作状态，等待中心节点发送测点监测指令并发送应答信息；在接收到数据采集指令后完成 8 通道风蚀数据的采集、处理、转换和数据打包等任务；最后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，并发送给中心节点，完成数据自动采集功能。

无线数据传输的数据包长度为 32 字节，各部分存储的内容及所占用字节数说明如下[16]：①包头(1 字节)：默认值 254；②采集器编号(1 字节)：1 ~

248。③信号类型(1 字节):0 代表采集的数据为风速,1 代表采集的数据为集沙量。④温度和湿度(各 2 字节):高字节为整数位,低字节为小数位。⑤大气压力(3 字节):第 1 个字节为千位,第 2 个字节为十位和个位,第 3 个字节为小数位。⑥集沙量(风速)(16 字节):当信号类型为 0 时,存储 1 ~ 8 路风速数据,高字节为十位和个位,低字节为小数位;当信号类型为 1 时,存储 1 ~ 8 路集沙量数据的 16 位 A/D 值。⑦保留(5 字节):默认为 0。⑧包尾(1 字节):默认值 255。

4 实验与分析

4.1 传感器精度及稳定性测试

在室温 20℃下,将单片机开发板、300 g 量程的称重传感器和信号调理电路连接成称量系统电路进行测试,电源电压 9 V。采用国标 F2 级标准砝码 10 mg、20 mg、40 mg、50 mg、100 mg、200 mg、500 mg、1 g、2 g、5 g、10 g、20 g、50 g、100 g 等 14 种规格对传感器进行标定测试,分别记下传感器在不同砝码质量作用下输出的 A/D 转换值。1 号传感器的标定数据如表 1 所示,8 路称重传感器的标定曲线如图 8 所示。同时,将 100 g 标准砝码置于传感器托盘上,连续测量 10h,对其稳定性进行测试。实验结果表明该传感器具有极好的线性度,测量精度达到 0.01 g,长期测量误差在 ±0.04 g 以内,如图 9 所示。

表 1 1 号传感器标定数据表

Tab.1 Calibration data of weighing sensor 1

砝码质量/g	A/D 值	砝码质量/g	A/D 值
0	39 643	10.00	94 763
0.02	39 750	15.00	122 653
0.04	39 767	20.00	150 537
0.09	39 915	25.00	178 371
0.10	39 924	30.00	206 337
0.15	40 126	40.00	262 088
0.20	40 358	50.00	320 836
0.25	40 622	60.00	373 592
0.30	40 830	70.00	429 335
0.40	41 360	80.00	485 071
0.50	41 933	90.00	540 822
0.70	43 032	100.00	596 573
1.00	44 680	110.00	652 378
1.50	47 421	120.00	708 239
2.00	50 183	130.00	763 962
3.00	55 744	140.00	819 717
4.00	61 310	150.00	875 431
6.00	72 451	160.00	931 222
8.00	83 605	170.00	986 936

4.2 分离器出口风速对传感器的干扰测试

实验过程中保持分离器出风口垂直于称量托盘安装,将低速微型风洞产生的 0 ~ 15 m/s 风速注入分离器进风口,测量出风口与称量托盘在不同距离下,出口风速对称量系统的影响,实验数据如表 2 所示。

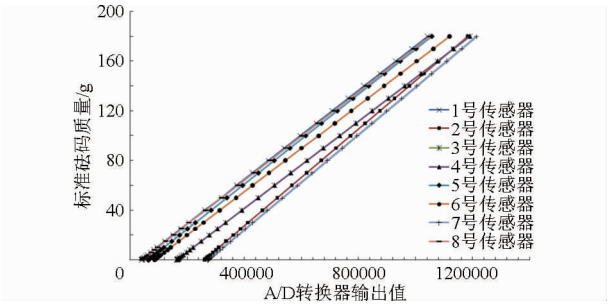


图 8 称重传感器标定曲线

Fig. 8 Calibration curves of weighing sensors

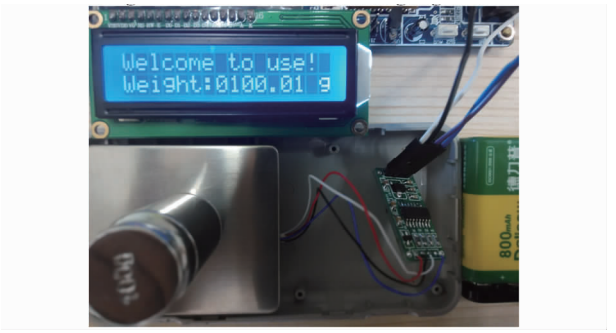


图 9 称量系统测试结果

Fig. 9 Test result of weighing system

表 2 不同高度、入口风速下称重传感器的输出值

Tab.2 Output values of weighing sensor under different heights and wind velocities at inlet g

高度/mm	入口风速/(m·s⁻¹)					
	2	4	8	10	12	14
15	0	0	0.01	0.03	0.04	0.06
20	0	0	0	0.03	0.04	0.05
25	0	0	0	0.02	0.03	0.03
30	0	0	0	0.02	0.02	0.03
35	0	0	0	0.01	0.01	0.02
40	0	0	0	0	0	0.01

实验测得,在入口风速分别为 2、4、8、10、12、14 m/s 时,分离器出口平均风速分别为 0.05 、0.12、0.32、0.37、0.43、0.57 m/s,降低了 97.5%、97%、96%、96.3%、96.4%、95.9%,结果表明该分离器的降风速作用比较明显。

从表 2 中可以得出:随着入口风速的增大,分离器出口风速对传感器的干扰作用增大;当分离器出风口与传感器托盘距离大于 15 mm,入口风速小于 8 m/s 时(或分离器出风口与传感器托盘距离大于 40 mm,入口风速小于 14 m/s 时),分离器出口风速对传感器的影响可以忽略不计;在入口风速大于 8 m/s 时,同一风速下,分离器出风口距传感器托盘

越近，出口风速对传感器的干扰越强。因此，为减小分离器出口风速对称重传感器的冲击干扰作用，在设计集沙仪时，分离器的出风口与称量托盘间的距离应在 45 mm 左右。

4.3　集沙效率测试

实验时，将集沙仪置于 0FDY－1.2 型可移动风蚀风洞的实验段横截面（宽 1 m、高 1.2 m）中间[11]，进风口正对风洞来风方向，最下方分离器进沙口中心点距风洞底面 2 cm 高，通过排沙器将直径小于 2 mm，质量 10 kg 的砂粒注入风洞，调节排沙器转速为 29 r/min，输沙量为 17 g/s，排沙时长约 10 min，如图 10 所示；在不同风速下，集沙仪 8 个高度收集的集沙量如表 3 所示。



图 10　集沙效率实验

Fig. 10　Experiment of sampling efficiency

表 3　不同风速下集沙仪 8 个高度上的集沙量

Tab. 3　Sediment yield at eight heights of sand sampler at different wind velocities　　g

高度/cm	风速/(m·s^{-1})				
	6	9	12	15	18
2	10.54	22.04	20.47	19.19	17.32
8	1.57	2.06	2.12	2.17	2.15
19	0.17	0.57	0.65	0.71	0.77
32	0.01	0.31	0.37	0.52	0.48
36	0	0.04	0.12	0.14	0.16
49	0	0.01	0.04	0.04	0.05
53	0	0	0.01	0.01	0.01
66	0	0	0	0	0

集沙效率是衡量集沙仪性能的重要指标[19]，是集沙仪实测沙量与实际输沙量之比[1,11]。该集沙仪分离器进沙口内径高度为 10 mm，相较风洞实验段高度 1 200 mm，仅占 0.833%，故对表 4 数据分析时可忽略进气口高度的影响，作近似计算。近地表风沙流结构近似符合幂函数分布[13]

$$q = az^b \tag{1}$$

式中　q——任一采集高度的集沙量，g

a、b——常系数　　z——采集高度，cm

再将集沙量 q 积分，可得 1～66 cm 高度上的总输沙量 $Q = \int_1^{66} q\mathrm{d}z$（即实测输沙量），如表 4 所示。

表 4　不同风速下垂直方向上的实测输沙量

Tab. 4　Sediment discharge in vertical direction at different wind speeds

风速/(m·s^{-1})	系数		R	实测输沙量/g
	a	b		
6	10.56	－1.072	0.995 3	38.19
9	22.05	－1.197	0.999 4	62.99
12	20.48	－1.145	0.999 4	64.30
15	19.20	－1.104	0.999 1	65.21
18	17.33	－1.059	0.998 9	64.25

由于该集沙仪离器进沙口宽度为 7.5 mm，故在该宽度上的理论输沙量为 75 g（即实际输沙量）。

实验结果表明：在沙尘启动风速 6 m/s 的作用下，集沙效率仅为 50.91%；当风速大于 9 m/s 时，集沙效率分别为 83.99%、85.73%、86.95% 和 85.67%，平均集沙效率为 85.59%。

该集沙效率相较常用集沙仪的集沙效率偏低，造成这种差异的因素很多，如：排沙过程的不均匀性，集沙仪结构与体积对风洞实验段气体流场稳定性的干扰等因素造成实际集沙量比理论值偏小等；另外，检验方法不同，得出的集沙效率也不同[11]。

5　结论

（1）系统在最大射频功率下，32 字节的数据包传输距离在 1 000 m 左右，通信建立时间短，工作稳定；采用同步采集、异步传输的方法，实现了对多测点，单点 8 通道集沙量实时、准确的无线传输。

（2）集沙仪旋转启动风速为 3.4 m/s，每个集沙盒最大称量范围为 180 g；称量系统具有良好的线性度、响应时间短且稳定性好，精度达 0.01 g，测量最大误差在 ±0.04 g 以内。

（3）分离器的降风速比均在 95% 以上，出口风速对传感器的干扰较小，保证了测量影结果的准确性和可靠性，平均集沙效率在 85.5% 以上。

参　考　文　献

1　宋涛，陈智，麻乾，等. 分流对冲式集沙仪设计及性能试验[J]. 农业机械学报，2015，46(9)：173－177，197.
SONG Tao, CHEN Zhi, MA Qian, et al. Design and performance experiment of shunt-hedging sand sampler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 173－177, 197. (in Chinese)

2　王金莲，赵满全. 集沙仪的研究现状与思考[J]. 农机化研究，2008(5)：216－218.

WANG Jinlian, ZHAO Manquan. Sand sampler research analysis and reflection[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(5): 216 – 218. (in Chinese)

3 夏开伟. 全自动高精度集沙仪的野外试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2014.
XIA Kaiwei. Study on the field test of fully automated high-precision dust collector[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2014. (in Chinese)

4 BAGNOLD R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. London: Methuen & Co., 1941: 265.

5 WILSON S J, COOKE R U. Wind erosion [M]// Mkirk M J, Morgan R P C. Soil Erosion. Chichester: Wiley, 1980: 217 – 252.

6 GREELEY R, LEACH R N, WILLIAMS S H, et al. Rate of wind abrasion on Mars[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 87(B12): 10009 – 10024.

7 MERVA G E, PETERSON G. Wind erosion sampling in the north central region[C]. ASAE Paper 83 – 2133, 1983.

8 FRYREAR D W. A field dust sampler [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1986, 41(2): 117 – 120.

9 李长治, 董光荣, 石蒙沂. 平口式集沙仪的研制[J]. 中国沙漠, 1987, 7(3): 49 – 56.
LI Changzhi, DONG Guangrong, SHI Mengyi. Design of flat mouth type sand collector [J]. Journal of Desert Research, 1987, 7(3): 49 – 56. (in Chinese)

10 SHAO Y, MCTAINSH G H, LEYS J F, et al. Efficiency of sediment sampler for wind erosion measurement [J]. Australian Journal of Soil Research, 1993, 31(4): 519 – 532.

11 董治宝, 孙宏义, 赵爱国. WITSEG 集沙仪:风洞用多路集沙仪[J]. 中国沙漠, 2003, 23(6): 714 – 720.
DONG Zhibao, SUN Hongyi, ZHAO Aiguo. WITSEG sampler: a segmented sand sampler for wind tunnel test[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(6): 714 – 720. (in Chinese)

12 李振山, 倪晋仁, 刘贤万. 垂直点阵集沙仪的集沙效率[J]. 泥沙研究, 2003, 1(2): 24 – 32.
LI Zhenshan, NI Jinren, LIU Xianwan. Sampling efficiency of vertical array sand traps[J]. Journal of Sediment Research, 2003, 1(2): 24 – 32. (in Chinese)

13 付丽宏, 赵满全. 旋风分离式集沙仪设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2007(10): 102 – 105.
FU Lihong, ZHAO Manquan. Study on sand sampler of gas cyclones and swirl[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(10): 102 – 105. (in Chinese)

14 顾正萌, 郭烈锦, 张西民. 新型主动式竖直集沙仪研制[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(9): 1088 – 1091.
GU Zhengmeng, GUO Liejin, ZHANG Ximin. Development of a new type of active vertical sand trap[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2006, 40(9): 1088 – 1091. (in Chinese)

15 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, 2007, 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 CASE, 2007, 27(4): 230 – 234. (in Chinese)

16 刘卫平, 高志涛, 刘圣波, 等. 基于铱星通信技术的土壤墒情远程监测网络研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 316 – 322.
LIU Weiping, GAO Zhitao, LIU Shengbo, et al. Remote monitoring network for soil moisture based on iridium communication technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 316 – 322. (in Chinese)

17 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.

18 王丽, 张华, 张景林, 等. 基于 ZigBee 和 LabVIEW 的土壤温湿度监测系统设计[J]. 农机化研究, 2015(8): 194 – 197.
WANG Li, ZHANG Hua, ZHANG Jinglin, et al. Design of soil temperature and humidity detection system based on ZigBee and LabVIEW[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(8): 194 – 197. (in Chinese)

19 郭文川, 程寒杰, 李瑞明, 等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 181 – 185.
GUO Wenchuan, CHENG Hanjie, LI Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 181 – 185. (in Chinese)

20 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]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 241 – 246.
SUN Baoxia, WANG Weixing, LEI Gang, et al. Real-time monitoring system for paddy environmental information based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 241 – 246. (in Chinese)

21 赵满全, 付丽宏, 王金莲, 等. 旋风分离式集沙仪在风洞内集沙效率的试验研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1009 – 1014.
ZHAO Manquan, FU Lihong, WANG Jinlian, et al. Experimental study on sampler efficiency of whirl type separation sand sampler in wind tunnel[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(6): 1009 – 1014. (in Chinese)

22 冬梅, 赵士杰, 范贵生, 等. 旋风分离式集沙仪性能试验研究[J]. 农机化研究, 2012(6): 139 – 140, 222.
DONG Mei, ZHAO Shijie, FAN Guisheng, et al. Experimental study on the performance of the whirling separation sand sampler [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012(6): 139 – 140, 222. (in Chinese)

23 陈新伟, 王俊, 沈睿谦. 基于 GPRS 的远程检测无线电子鼻系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 238 – 245.
CHEN Xinwei, WANG Jun, SHEN Ruiqian. Wireless electronic nose based on GPRS and its application on Mangos[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 238 – 245. (in Chinese)

24 王玲, 邹小昱, 刘思瑶, 等. 基于 RFID 与 ZigBee 的羊场养殖信息管理系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 247 – 253.
WANG Ling, ZOU Xiaoyu, LIU Siyao, et al. Development of handheld terminal for sheep breeding information management based on RFID and ZigBee[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 247 – 253. (in Chinese)