

# 大范围远距离分布式爆炸声波测试系统

王毛凯<sup>1,2</sup>, 赖富文<sup>3</sup>, 赵永峰<sup>1,2</sup>, 孔凡胜<sup>3</sup>, 王文廉<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051; 3. 中国人民解放军 63853 部队, 吉林 白城 137000)

**摘要:** 针对爆炸场远场声波信号特性测试, 提出一种基于北斗卫星导航系统和 LoRa 无线通信技术的大范围远距离分布式爆炸声波测试系统。该系统以 FPGA 为核心控制器, 利用存储测试技术实现了爆炸声波信号的采集存储; 利用北斗卫星导航系统的授时、定位功能, 实现了远距离分布式测量中的时间同步和节点定位; 利用 LoRa 的线性扩频调制技术, 组建了大范围、远距离、低功耗的分布式传感网络。实验结果表明, 此分布式测试系统在获取有效数据的同时实现了 100 ns 的时间同步和 2 m 的定位精度以及 2 km 的大范围网络覆盖。

**关键词:** 大范围; 时间同步; 节点定位; LoRa; 分布式传感网络

中图分类号: TN709

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211671

中文引用格式: 王毛凯, 赖富文, 赵永峰, 等. 大范围远距离分布式爆炸声波测试系统[J]. 电子技术应用, 2022, 48(2): 36–40.

英文引用格式: Wang Maokai, Lai Fuwen, Zhao Yongfeng, et al. Large-scale and long-distance distributed explosion sound wave test system[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(2): 36–40.

## Large-scale and long-distance distributed explosion sound wave test system

Wang Maokai<sup>1,2</sup>, Lai Fuwen<sup>3</sup>, Zhao Yongfeng<sup>1,2</sup>, Kong Fansheng<sup>3</sup>, Wang Wenlian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education,  
North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. National Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
3. 63853 Unit of People's Liberation Army of China, Baicheng 137000, China)

**Abstract:** A large-scale and long-distance distributed explosion sound wave test system based on BeiDou satellite navigation system and LoRa wireless communication technology is proposed for the characteristics test of the acoustic signal in the far field of the explosion field. The system uses FPGA as the core controller and acquisition and storage of explosion sound wave signals is realized by using stored testing technology. Time synchronization as well as node positioning information in long-distance distributed measurement is achieved by the timing and positioning function of BeiDou satellite navigation system. On the other hand, linear spread spectrum modulation technology of LoRa is used to form a large-scaler distributed sensor network with long-distance and low power consumption. The experimental result indicates that the proposed distributed test system acquired valid data at the same time realizes time synchronization of 100 ns, positioning accuracy of 2 m and large-scale network coverage of 2 km.

**Key words:** large-scale; time synchronization; node positioning; LoRa; distributed sensor network

## 0 引言

冲击波在传播的过程中不断衰减为声波、次声波<sup>[1-3]</sup>。对冲击波传播特性的研究是衡量弹药毁伤效果的重要手段。目前虽然着重于爆炸场近场冲击波特性研究<sup>[4-5]</sup>, 但是爆炸场远场的声波、甚至次声波的特性以及与测试节点空间位置信息的关系也逐渐引起人们的重视。可是现有的爆炸场近场冲击波测试方法难以适用于爆炸场远场的声波测量<sup>[6-7]</sup>, 如爆炸场近场的同步测试, 可以采用断线同步法或者光信号同步法统一各测试节点的时基。但是对于大范围、远距离的声波测量, 同步使用的电

缆现场布设不便, 并且干扰噪声大, 使得断线同步法难以适用; 爆炸光随着距离的衰减导致光电器件不能接收到稳定的爆炸光信号, 并且需要排除地面反射光的干扰, 使得光信号同步法也力不能及<sup>[8-10]</sup>。大范围带来的不仅仅是各个测试节点的时间同步问题, 如何组建一个无线传感器网络也是一个巨大的考验, 随着无线传感器网络的发展, 大多数冲击波场无线测试系统都是采用 ZigBee 或 WiFi 无线传感器网络原理<sup>[11-12]</sup>。基于 ZigBee 的无线传感器网络传输速率低, 距离近, 只能适用于近距离的无线传输; 基于 WiFi 的无线传感网络虽然传输速率快,

并且使用中继可以使传输距离增大,但是也难以实现爆炸场远场大范围的网络覆盖。

针对目前爆炸场远场声波无线测试系统的不足,本文提出一种基于北斗卫星导航系统(以下简称北斗系统)和LoRa的大范围远距离分布式爆炸声波测试系统。该系统能够精确地在爆炸场远场处测量爆炸产生的各种声波参量,实现测试节点的时间同步并且还具有测试节点定位功能,同时实现大范围的网络覆盖。

## 1 系统的组成与工作原理

大范围远距离分布式爆炸声波测试系统传感器网络结构如图1所示,包括分布式测试节点、中继以及主控计算机。

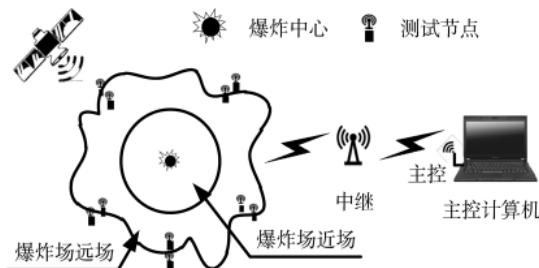


图1 大范围远距离分布式声波测试系统结构图

测试节点分布在爆炸场远场处,其主要工作内容是接收爆炸场远场的声波信号,并且利用北斗卫星导航系统的授时、定位功能统一各节点时基、确定各节点位置坐标。与常规的无线传感网络不同,这里采用内部组建LoRa网络传输信号实现了大范围的网络覆盖和低功耗的高效采集工作。主控计算机作为管理节点,为用户提供应用界面,通过上位机软件和外挂微控制单元(Microcontroller Unit, MCU)可与单个或者多个测试节点进行信息交互和数据传输。

## 2 测试节点的设计与实现

信号的采集与存储是测试节点的核心工作,其结构原理图如图2所示,测试节点主要由采集信号微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)传声器、模拟

信号调理电路、数据采集和存储电路、存储芯片、时钟晶振以及负责授时、定位功能的北斗模块和LoRa无线模块等部分组成。

MEMS传声器具有低噪声、高灵敏度的特点,响应频率为6 Hz~20 kHz,适用于声波测量;A/D转换器选用AD7482,可以完成12 bit的信号采集;时钟采用20 MHz的有源晶振;FPGA使用Xilinx Spartan-6系列芯片,具有模块化多线程的工作模式,能够保证系统的工作效率和数据的传输速度;北斗授时、定位模块支持北斗卫星导向系统,模块本身的定位精度可达到2 m,配合时钟晶振时间精度可达到200 ns;LoRa模块使用基于SX1268射频芯片的E22-400T22S模块,符合IEEE 802.15.4g标准,最远传输距离可达到2 km,适用于大范围的网络覆盖。

分布在爆炸场远场处的测试节点以可编程控制器FPGA芯片作为中心控制器,通过A/D变换器将调理好的声音信号转化为数字信号;SDRAM在FPGA的控制下实现声波信息的存储与读取;同时完成北斗授时、定位模块的协议控制,配合时钟晶振获取声波的时间信息以及测试节点的位置信息。测试节点可以通过LoRa模块与上位机软件进行信息交互,实现远距离状态检测以及存储数据的传输。

### 2.1 分布式测试节点的时间同步与定位

分布在爆炸场远场的各个测试节点之间是相互独立的,没有统一的时间基准,并且各个测试节点的精确位置也是未知的。为了对存储的数据进行系统分析,本系统利用北斗卫星导航系统的授时、定位功能统一各个测试节点的时间基准并记录下各个测试节点的位置信息。

北斗卫星导航系统是我国自行研制的全球卫星导航系统。北斗授时、定位模块是其用户段组成部分,其通信接口采用通用异步收发传输器(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART),每秒会输出一次秒脉冲(Pulse Per Second, PPS)以及一组串行数据。串行数据遵从NMEA-0183标准协议。采用ASCII码来传递协调世界时(Universal Time Coordinated, UTC)以及位置等信息。

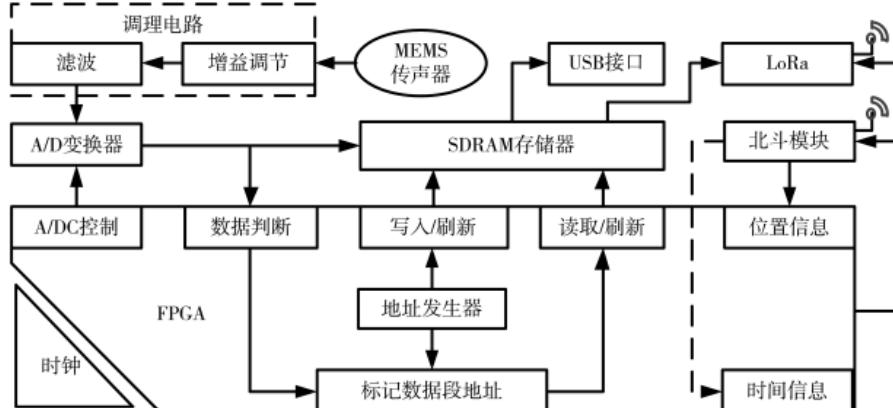


图2 测试节点结构图

各个测试节点遵从 UART 协议与北斗授时、定位模块进行通信,然后利用 FPGA 模块化多线程的特点对北斗模块的输出信号串行数据、秒脉冲进行处理,具体工作状态转换图如图 3 所示。

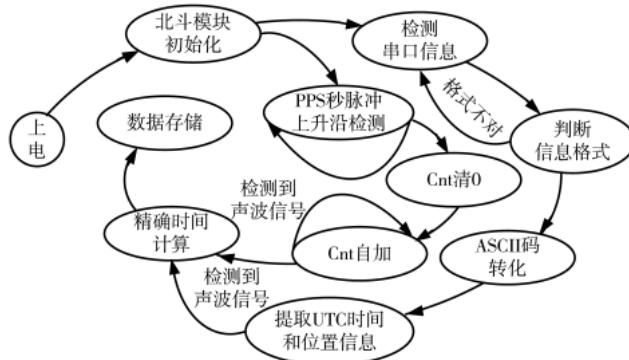


图 3 测试节点工作状态转化图 1

测试节点上电之后,首先对北斗模块进行初始化,结合北斗模块的输出特性,对接收的串行数据译码,获得 UTC 时间(统一各个测试节点的时间基准)和位置信息。同时利用 PPS 秒脉冲信号配合时钟晶振,每当检测到 PPS 秒脉冲的上升沿时,晶振脉冲计数器(Counter, Cnt)清 0,其余时刻保持自加状态,进一步提升时间精度。当检测到爆炸声波信号时,将精确的时间和位置信息存储下来。

## 2.2 分布式测试节点的大范围网络覆盖

为了使分布在爆炸场远场的测试节点能够实现远距离状态检测以及数据传输,必须形成大范围的网络覆盖。如图 4 所示,本系统采用基于非授权频谱的 LoRa 广域网通信技术,通过不断改变主机的地址实现对各个测试节点的控制,并且具有传输速率快、安全性高以及组网便捷等特点。

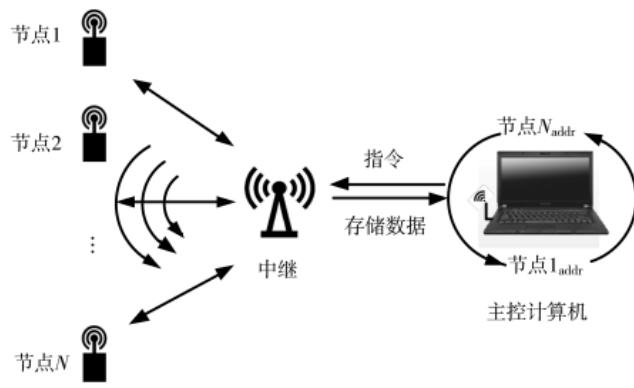


图 4 LoRa 网络结构图

地面效应会降低无线信号的传输功率,改变天线的带宽和匹配电阻,降低数据传输距离、传输速率以及可靠性。LoRa 的调制解调器采用线性扩频调制提高接收机的灵敏度,从而获得较长的通信链路。同时还利用纠

错编码技术,在传输信息中加入了冗余,能够有效地抵抗多径衰落,提高传输的可靠性。

为了保证系统能够长时间有效地工作,进一步降低功耗,避免发生网络拥堵现象尤为重要。为了实现这一目标,本系统对测试节点(从机)和主控计算机(主机)设置了不同的工作模式。对于测试节点(从机)而言,其工作状态转换图如图 5 所示。

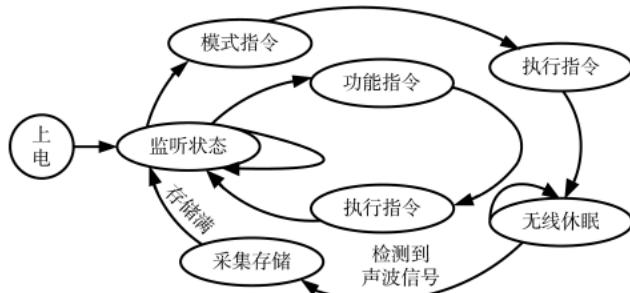


图 5 测试节点工作状态转化图 2

上电之后,LoRa 模块处于传输模式,则测试节点一直处于监听状态。测试节点根据接收到的不同指令,进入不同的的工作状态。

当测试节点接收到功能指令时,如参数设置、状态检测、数据读取等,执行指令之后会回到监听状态;当测试节点接收到模式更改指令时,会改变输出引脚的高低电平,使得 LoRa 进入休眠模式,此时工作电流为微安级,等到存储结束,LoRa 模块重新回到传输模式,使得测试节点再次进入监听状态,进而系统降低功耗。

在系统的工作过程中主控计算机需要与单个或者多个测试节点进行信息交互。为了使系统能够有条不紊地工作,避免发生网络拥堵无法通信的现象,主控的控制流程设计如图 6 所示。

根据 LoRa 模块的特性,在保证 LoRa(主控)模块与测试节点的 LoRa 处于传输模式状态的情况下,MCU 根据控制软件发送的 AT 指令,使得 LoRa 模块进入配置模式,然后更改 LoRa 主机地址,更改成功后,再次进入传输模式,然后将参数信息提取出来发送给指定的从机,通过对从机反馈回来的信息进行分析,判断指令是否执行完成。

## 3 实验及数据分析

为了验证系统可靠性,进行实验验证。首先进行同步性验证,实验原理图如图 7 所示。利用信号发生器作为信号源对测试节点进行脉冲触发,读取触发时刻的时间信息。

进行了多次同步性实验,都获得了有效数据,取了 3 次实验数据,如表 1 所示。

使用同一脉冲信号对 3 个测试节点进行同时触发,同步性误差的主要来源为各个测试节点的 PPS 秒脉冲上升沿之间的时间差与时间晶振的误差。由表 1 可知,

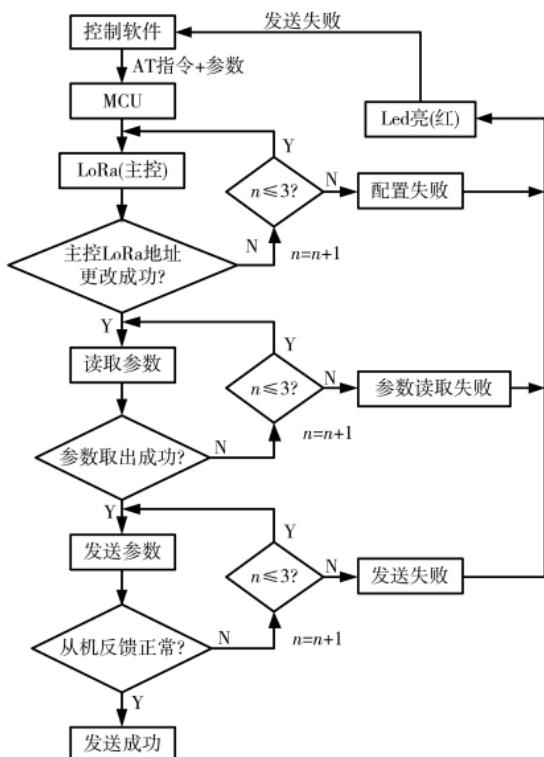


图 6 主控控制流程图

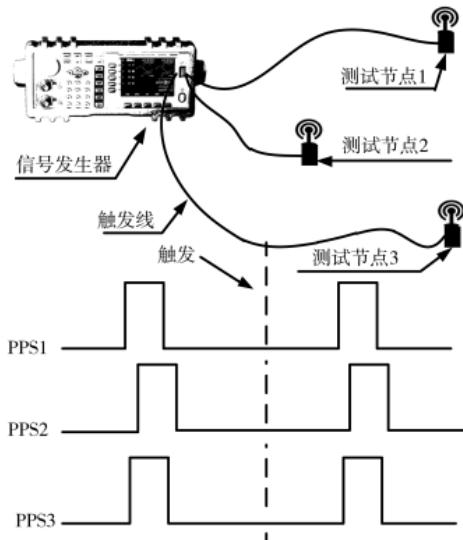


图 7 同步性实验原理图

表 1 测试结果

实验次数	测试节点	触发时间
第 1 次	1	9:45:45.092620550
	2	9:45:45.092620450
	3	9:45:45.092620500
第 2 次	1	10:15:32.783660900
	2	10:15:32.783660850
	3	10:15:32.783660850
第 3 次	1	10:32:15.618397700
	2	10:32:15.618397600
	3	10:32:15.618397650

同步性误差的最大值为 100 ns，很好地验证了系统的同步性。

现场实验如图 8 所示，测试节点贴点，并且节点间的距离为 100 m，中继与距离测试节点 3 之间的距离 1 km 处，高度为 3 m。主控计算机放置在距离中继 1 km 处，形成 2 km 的网络覆盖。



图 8 现场实验示意图

通过主控计算机对现场测试节点进行参数设置和数据读取，得到 3 个测试节点的位置坐标，如表 2 所示。

表 2 测试节点位置坐标

测试节点	大地坐标	
	经度	纬度
1	112.456 016 7	38.000 260 2
2	112.456 280 5	37.999 366 3
3	112.456 856 8	37.998 568 4

通过对实验所得的节点坐标进行处理，得到测试节点 1 与测试节点 2 之间的距离为 101.9 m，测试节点 2 与测试节点 3 之间的距离为 102.0 m。与实验布置的节点间距最大误差为 2 m，在北斗模块的位置精度范围内。并且对其中一个测试节点进行鞭炮触发，图 9 为读取到的声波曲线以及触发的时间信息。可以清楚地看到声波压强值为 38.3 Pa，正压持续时间 0.22 s。与近场冲击波特性曲线相比较，超压明显减小，并且持续时间增长。

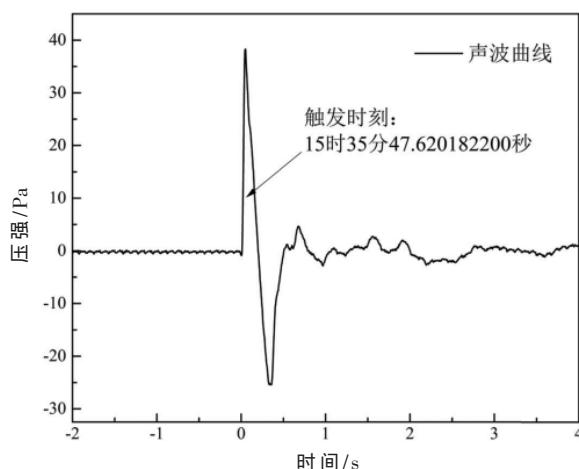


图 9 测试声波曲线

#### 4 结论

针对目前远场爆炸声波特性的测试，本文设计并研制出基于北斗卫星导航系统和 LoRa 无线通信技术的大

范围远距离分布式爆炸声波测试系统，实现了2 km 的大范围网络覆盖以及分布式测试节点的准确定位，而且统一了时间基准(精度可达纳秒级)。最后，通过实验验证了系统的有效性。

#### 参考文献

- [1] 程宇腾.温压炸药在不同环境下爆炸冲击波的仿真与试验研究[D].南京:南京理工大学,2017.
- [2] 贾维敏.利用次声波对常规导弹爆炸效果探测的方法[J].火力与指挥控制,2005(S1):69–71.
- [3] 华雨,李兴隆.静爆冲击波在空气中的传播规律[J].兵器装备学报,2016,37(7):168–172.
- [4] 王文廉.同时测速测压的存储式冲击波测试系统研究[D].太原:华北工学院,2004.
- [5] 王文廉,张晋文,赵晨阳,等.爆炸场压力测试多存少取技术研究[J].振动与冲击,2014,33(24):54–57.
- [6] 朱金瑞,王代华.一种可编程高可靠性存储时爆炸冲击波测试系统[J].兵器装备工程学报,2019,40(2):153–157.
- [7] 轩春青,轩志伟,赖富文.压力测试中多次触发连续存储技术的研究[J].传感技术学报,2019,32(10):1473–1476.
- [8] 陈青青,王代华,翟永.GPS 同步技术在冲击波存储测试

(上接第 10 页)

- ference(WCNC),2015:1297–1302.
- [45] LIANG W,XU W,REN X,et al.Maintaining sensor networks perpetually via wireless recharging mobile vehicles[C]//39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks,2014:270–278.
- [46] WU P,XIAO F,SHA C,et al.Trajectory optimization for UAVs' efficient charging in wireless rechargeable sensor networks[J].IEEE Transactions on Vehicular Technology,2020,69(4):4207–4220.
- [47] BAEK J,HAN S I,HAN Y.Optimal UAV route in wireless

(上接第 35 页)

- [9] 李龙,吕宏,蔡新展,等.一种基于光电导航的智能循迹测量小车设计与实现[J].科技创新导报,2018,15(8):3–4.
- [10] 刘婧.基于 PDMS 光栅的小车循迹应用[J].电子器件,2018,41(3):795–798.
- [11] 张沛涛,郭颖,齐航,等.基于 STM32F407 的物流搬运车设计[J].国外电子测量技术,2019,38(4):144–148.
- [12] 赵涛,陶重舜,冯佳佳,等.基于 STM32 单片机的自动喷灌机器人[J].计算机系统应用,2017,26(9):279–282.
- [13] 易先军,彭萌,耿翰夫,等.机器人超宽带室内定位系统的研究[J].自动化与仪表,2019,34(12):45–48.
- [14] 朱樟明.芯片化:实现激光雷达高性能的必要途径[J].前沿科学,2018(4):46–49.
- [15] 马争光,赵永国,刘成业,等.激光和视觉融合 SLAM 方法研究综述[J].计算机测量与控制,2019,27(3):1–6.

中的应用[J].实验室研究与探索,2017,36(10):61–64.

- [9] 翟永.冲击波存储测试系统的同步技术研究[D].太原:中北大学,2016.
- [10] 王晓楠,王代华,苏尚恩,等.冲击波测试系统中 GPS 同步技术研究[J].现代雷达,2018,40(1):81–85.
- [11] 王玉,张志杰,王文廉.爆炸场地面压力测试的 Wi-Fi 无线传感器网络实现[J].传感器与微系统,2013,32(5):108–110.
- [12] 轩春青,轩志伟,赖富文,等.基于 WiFi 的无线存储测试系统设计[J].传感技术学报,2016,29(5):758–763.

(收稿日期:2021-04-21)

#### 作者简介:

王毛凯(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:动态测量与智能仪器。

赖富文(1973-),男,博士,高级工程师,主要研究方向:武器动态测试。

王文廉(1978-),通信作者,男,博士,副教授,主要研究方向:半导体功率器件、智能仪器和动态测试等,E-mail:shmilyxwp@163.com。



扫码下载电子文档

charging sensor networks[J].IEEE Internet of Things Journal,2020,7(2):1327–1335.

(收稿日期:2021-05-29)

#### 作者简介:

陈雅倩(1997-),女,硕士研究生,主要研究方向:无线能量传输和无线充电传感器网络。

焦万果(1987-),女,博士,副教授,主要研究方向:无线传感器网络性能分析、资源管理策略与质量保障技术以及林业物联网。

周磊(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向:能量收集认知无线电传感器网络。



扫码下载电子文档

- [16] 张军宝.自然轮廓导航技术在 AGV 领域应用研究[J].中国战略新兴产业,2020(6):135.

- [17] 江毓光.Arduino 小车巡线程序的灰度阈值优化方案[J].中国信息技术教育,2020(2):89–90.

- [18] 时存,车玉秋,郭丹蕊.基于擂台赛的轮式机器人对抗策略分析[J].机器人技术与应用,2018(6):33–36.

(收稿日期:2020-10-23)

#### 作者简介:

陈栩聪(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:机器视觉、机器人运动控制。

袁飞(1984-),通信作者,男,博士,讲师,主要研究方向:无线传感器网络数据融合、移动服务机器人定位技术、深度学习,E-mail:306223928@qq.com。

梁新农(1997-),男,本科,主要研究方向:智能传感器。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所