

doi: 10.7690/bgzd.2020.03.008

## 全自动无人售货与自动贩卖系统

马培立<sup>1</sup>, 张乃欣<sup>2</sup>, 陈哲<sup>3</sup>, 吴杰<sup>4</sup>, 杨雪<sup>5</sup>

(1. 南京工程学院自动化学院, 南京 211167; 2. 南京工程学院计算机工程学院, 南京 211167;  
3. 南京工程学院艺术与设计学院, 南京 211167; 4. 南京四只小熊软件科技有限公司技术研发部, 南京 211167;  
5. 南京工程学院创新创业学院, 南京 211167)

**摘要:** 为解决无人超市以及无人配送车制作成本较高的问题, 设计一套全自动无人售货与自动贩卖系统。通过 FaceID 人脸识别、会员记录、大数据销售、无线防盗等关键技术, 实现客流进出控制, 利用手机售货、RTK 高精度定位、惯性导航控制算法来精确避障完成无人配送车售货, 结合 Spring Boot 设计开发无人超市售货管理系统, 实现货物的自动贩卖、配送一体化。实验结果表明: 该全自动无人售货与自动贩卖系统能有效为无人售货超市增长 60%~80% 的收益, 具有推广价值。

**关键词:** 无人超市; 无人配送车; 自动售卖; RTK 高精度定位; 新零售

**中图分类号:** TP27 **文献标志码:** A

## Fully Automatic Unmanned Vending and Selling System

Ma Peili<sup>1</sup>, Zhang Naixin<sup>2</sup>, Chen Zhe<sup>3</sup>, Wu Jie<sup>4</sup>, Yang Xue<sup>5</sup>

(1. School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;  
2. School of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;  
3. School of Arts & Design, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;  
4. Department of Technology Research & Development, Nanjing Four Bears Software Technology Co., Ltd., Nanjing 211167, China; 5. School of Innovation & Entrepreneurship, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the high production cost of unmanned supermarkets and unmanned delivery vehicles, a fully automatic unmanned vending and selling system was designed. By using the key technologies such as face recognition based on FaceID, membership record, big data sales, wireless anti-theft technology and so on, the control of incoming and outgoing customers traffic was achieved. Meanwhile, the unmanned delivery vehicle can avoid obstacles and accomplish the delivery task accurately by taking the advantage of mobile sales platform, RTK high-precision positioning, and the control algorithm of inertial navigation system. We design and develop this sales management system of unmanned supermarket by using Spring Boot, and achieve the integration of automatic sales and delivery of goods. The experimental results show that this fully automatic unmanned vending and selling system can effectively increase the income of the unmanned supermarkets by 60% to 80% so that it has great promotional value.

**Keywords:** unmanned supermarket; unmanned delivery vehicles; automatic vending; RTK high precision positioning; new retail

## 0 引言

无人超市属于一种新型的超市营销模式<sup>[1]</sup>。

2016 年初, 瑞典出现了无人便利店 Nraffr, 之后日本便利店巨头罗森、韩国乐天、美国亚马逊相继推出无人超市, 而后中国阿里巴巴推出另一种无人超市形式——淘咖啡。现阶段主流无人超市技术核心一般为视觉传感、压力传感以及物联网支付, 但面临运营成本高、销售范围小的困境, 导致无人超市无法大批量推广。

针对目前市场上存在的无人超市以及无人配送车制作成本较高的问题, 笔者设计了一套全新的方

案, 利用较为低廉的标记方法, 降低单件商品的销售成本。

相较于市面上的无人超市, 该无人超市除了充分利用现有的视觉传感、压力传感, 以及物联网支付等技术, 还实现了 FaceID<sup>[2]</sup>与大数据<sup>[3]</sup>结合, 实时记录并分析了顾客的行为信息, 结合 RF 技术, 保证一账号对一人的高效无人购物设计。在无人配送车方面, 舍弃了高成本的多线激光雷达技术<sup>[4]</sup>, 通过自主设计避障算法、惯导算法, 结合 RTK, 实时控制无人配送车安全运动。在增大配送范围的同时, 以低成本实现无人配送服务的需求。

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-11-30

基金情况: 南京工程学院挑战杯项目(TZ20180014)

作者简介: 马培立(1991—), 男, 江苏人, 学士, 从事图像处理以及无人零售研究。E-mail: mp19725440@gmail.com。

# 1 系统结构及其流程

## 1.1 无人超市

### 1.1.1 整体结构设计

蜂群式无人零售系统是笔者提出的新型无人零售方式。如图 1 所示，无人超市主体作为蜂巢，无人零售车作为蜂群，扩展了原本单一无人超市的销售覆盖范围。

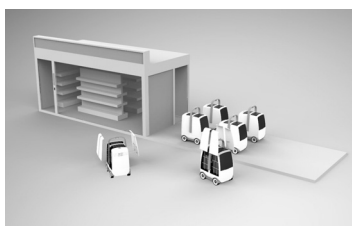


图 1 蜂群式无人零售方案

如图 2 所示，无人超市主要由识别系统、销售系统、防盗系统组成。识别系统主要包括 FaceID 人脸识别系统和 Zxing<sup>[5]</sup> 二维码识别系统，并将会员信息传入 Mysql 数据库；销售系统由基于 Spring Boot 编写的后台、收银前端、压力传感验证装置构成；

防盗系统则是利用 RF 检测，获取物品是否消磁，从而控制闸机是否开启以及是否记录人脸信息。



图 2 无人超市整体结构设计

### 1.1.2 系统工作流程

无人超市工作流程主要如图 3 所示：当顾客通过微信公众号绑定个人信息后，可以通过 FaceID 人脸识别或者自动生成的 2 二维码扫描进入。用户在选购商品结束后使用自主收银系统进行结算付款，并将消磁商品放入指定位置以便于核实质量，同时 FaceID 将再次进行人脸信息核实，采购商品信息记录用于大数据分析，实现个性化定制商品推送消息。最后通过 RF 检测门<sup>[6]</sup>，实现客流进出控制。

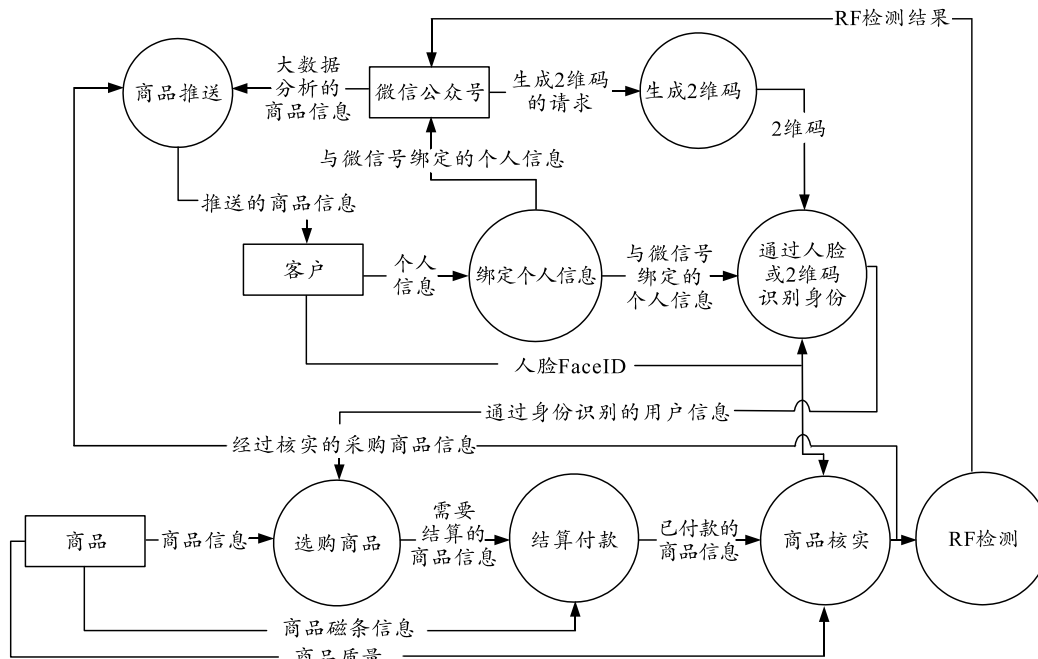


图 3 无人超市工作流程

## 1.2 无人配送车

### 1.2.1 整体结构设计

如图 4 所示，无人配送车主要是由千寻系统、驱动系统、避障系统、惯性导航系统组成。千寻系统<sup>[7]</sup>主要包括 RTK (real time kinematic) 信号处理板卡以及千寻基站，获取厘米级定位精度；驱动系统

主要是由直流无刷电机以及步进电机组成，分别控制无人配送车的驱动以及转向；避障系统包含单线激光雷达、单点激光雷达和超声波传感器，通过避障算法实现实时避障；惯性导航系统主要是通过 IMU (inertial measurement unit) 采集控制，并利用 AHRS<sup>[8]</sup> (attitude heading reference system) 姿态解算实时避障。



图 4 无人车整体结构设计

### 1.2.2 系统工作流程

无人配送车流程如图 5 所示:当无人车上电后, ROS 系统自动链接千寻基站, 通过千寻不断校准 GPS 信息, 最终达到厘米级精度。信号校准完毕后, 无人配送车利用直流无刷电机驱动前进, 前方的步进电机控制转向。通过单线激光雷达、单点激光雷达、超声波传感等实时对路况进行分析, 自主判断减速、避障等情况。当发生千寻 GPS 信号丢失的情况时, 无人配送车会自动切换到惯导模式, 以保证无人配送车安全行驶。

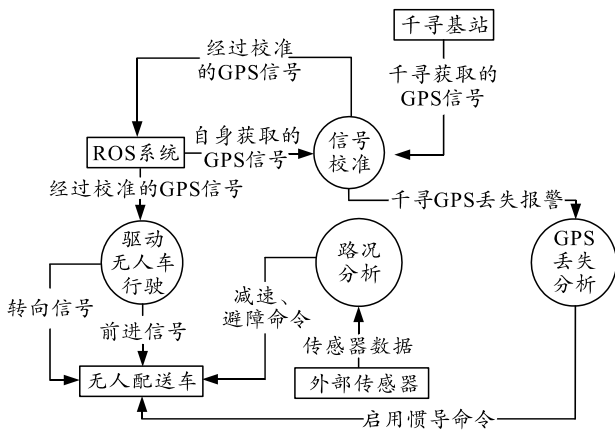


图 5 系统工作流程

## 2 系统关键组成部分设计

### 2.1 无人超市

#### 2.1.1 识别系统

图 6 为顾客识别系统<sup>[8]</sup>, 基于 Dlib 进行开发, 利用人脸活体检测技术识别视频流中的人脸, 将识别出的人脸与无人超市数据库中的人脸信息进行比较, 以此判定是否为注册用户, 并将信息返回闸机控制是否开启。当客户请求扫码进入时, 数据库会根据注册用户编号以及请求时间加密生成 2 维码, 并将其发送到微信公众号。客户通过 Zxing 扫码后, 后台会将数据解密, 并读取 2 维码当中的编号、时间信息以及数据库中该客户最后请求时间信息, 通过对比该 2 维码是否有效, 以判断是否开启闸机。

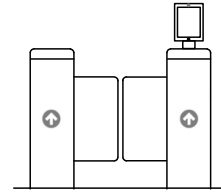


图 6 识别系统

#### 2.1.2 收银系统

图 7 为收银柜台, 基于 Linux 系统, 通过 PyQt 设计收银界面, 当用户将商品扫码消磁后, 放入右侧指定区域。后端传入商品价格对应质量信息, 通过压力传感器读取实际质量进行比较, 从而保证商品的安全性, 在上方的摄像头同样具有识别功能, 通过 FaceID 将人脸信息与采购商品对应, 并通过大数据将个人购物信息进行分析处理, 实现商品推送。而防盗系统主要是利用 RF 检测, 获取物品是否消磁信息, 从而控制闸机是否开启以及是否记录人脸信息。



图 7 收银设备

### 2.2 无人配送车

#### 2.2.1 千寻以及驱动系统

图 8 为千寻系统, 主要通过 4G 网络获取差分信号, 并传给诺瓦泰 61TD 板卡进行 GPS 信号解密, 最后将高精度 GPS 数据传给 ROS 工控机, 通过实时坐标点与目标坐标点的运动学解算, 实现无人配送车的驱动。驱动系统部分主要由 MCU 单片机、电机驱动板、步进电机、直流无刷电机组成。MCU 单片机获取到 ROS 系统高精度信息后, 通过连接 4 个电子调速器, 对无人配送车的无刷直流电机进行驱动。车辆前轮处存在一个步进电机, 通过连接拉线式位移传感器, 控制线材实现高精度转向调节。

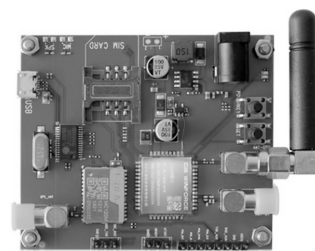


图 8 千寻板卡以及 4G 通信模块

### 2.3 惯性导航算法

IMU 是可以检测加速度与旋转运动的传感器。笔者利用 IMU 对无人车信号丢失情况进行处理。笔者主要讨论基于 MEMS (micro electromechanical system) 的六轴惯性传感器结合扩展卡尔曼滤波的方法, 通过 AHRS 姿态解算获取实时信息, 保证在数据丢失的情况下能累计较小的误差, 直到获取正确的位置信标。

$$C_b^n = \begin{bmatrix} (w^2 + x^2 - y^2 - z^2) & 2(xy - wz) & 2(xz + wy) \\ 2(xy + wz) & (w^2 - x^2 + y^2 - z^2) & 2(yz - wx) \\ 2(xz - wy) & 2(yz + wx) & (w^2 - x^2 - y^2 + z^2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

采用欧拉角的形式表示  $b \sim n$  系的坐标变换矩阵:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos p \cos g + \sin p \sin g \sin \beta & \sin g \cos \beta & \sin p \cos g - \cos p \sin g \sin \beta \\ -\cos p \sin g + \sin p \cos g \sin \beta & \cos g \cos \beta & -\sin p \sin g - \cos p \cos g \sin \beta \\ -\sin p \cos \beta & \sin \beta & \cos p \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

在静态情况下, MARG (mediterranean amphibious ready group) 算法通过采集加速度和磁力计的测量数据来得到载体的绝对姿态:

俯仰角:

$$p = -\arcsin(a_x^b / g) \quad (3)$$

翻滚角:

$$\beta = \arctan(a_y^b / a_z^b) \quad (4)$$

式中,  $a_x^b$ 、 $a_y^b$  和  $a_z^b$  的值可由加速度计精确得到, 且地球重力加速度  $g$  为常量。

偏航角:

$$\gamma = \arctan(H_y / H_x); \quad (5)$$

$$H_x = h_x^b \cos p + h_y^b \sin p \sin \beta + h_z^b \sin p \cos \beta; \quad (6)$$

$$H_y = h_y^b \cos \beta - h_z^b \sin \beta. \quad (7)$$

其中  $h_x^b$ 、 $h_y^b$  和  $h_z^b$  的值可由磁阻传感器测得。

在每一个卡尔曼滤波周期中, 包括状态预测、状态估计和增益矩阵、误差自相关矩阵计算流程。卡尔曼滤波详细操作如下:

1) 初始化状态向量  $\hat{x}_{0|0}$  及误差自相关矩阵  $P_0$ 。

状态向量中对四元数的初始化应满足归一化, 一般取  $[0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ , 误差自相关矩阵  $P_0$  为非零的矩阵, 可取  $nI$ , 其中,  $n \neq 0$ ,  $I$  为单位矩阵。

2) 由观测信号  $z(n)$  计算新息过程。

$$a_n = z_n - C_n \hat{x}_{n|n-1} \quad (8)$$

3) 一步预测误差自相关矩阵。

AHRS 的惯性导航系统算法可以依据观测数据, 利用反馈修正信号和降低噪声, 并结合扩展卡尔曼滤波的方法, 提高系统的稳定性和鲁棒性。

有许多表示车辆方向的公式, 如方向余弦矩阵 (direction cosine matrix, DCM)、欧拉角和四元数。

采用四元数  $Q=[w,x,y,z]^T$  表示  $b \sim n$  系的坐标变换矩阵, 其中上标  $n$  表示导航坐标系, 下标  $b$  表示车身坐标系。

$$P_{n|n-1} = F_{n|n-1} P_{n-1} F_{n|n-1}^T + W_{n-1} \quad (9)$$

4) 新息过程自相关矩阵。

$$A_n = C_n P_{n|n-1} C_n^T + R_n \quad (10)$$

5) 卡尔曼增益计算。

$$K_n = P_{n|n-1} C_n^T A_n^{-1} \quad (11)$$

6) 状态估计。

$$\hat{x}_n = \hat{x}_{n|n-1} + K_n \alpha_n \quad (12)$$

7) 状态估计误差自相关矩阵。

$$P_n = [I - K_n C_n] P_{n|n-1} \quad (13)$$

## 3 管理与数据系统设计

### 3.1 无人售货管理系统

无人超市售货管理系统通过 Spring Boot 设计开发, 主要分为仓储销售管理模块和会员录入识别模块, 并通过 Mysql 数据库储存商品状态信息和会员注册信息。图 9 为无人超市售货管理系统划分结果, 通过分模块进行独立的设计与开发, 以降低模块的耦合度。

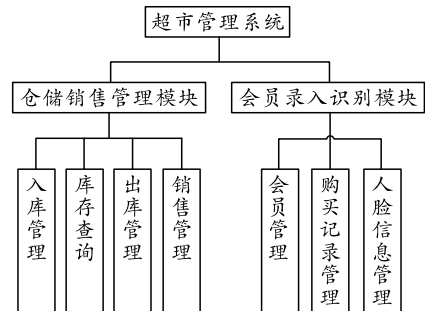


图 9 超市管理系统划分

### 3.1.1 仓储销售管理模块

货物仓储销售管理模块是无人超市的核心模块，负责记录商品的出入库信息以及售卖信息。其中出入库信息由工作人员采集获取，其余全部实现无人化操作。如图 10 所示，为了满足采集信息时的可视化操作需求，仓储销售管理部分采用 Vue.js 设计出页面及动态效果，并连接 Spring Boot 后台实时查看商品信息。

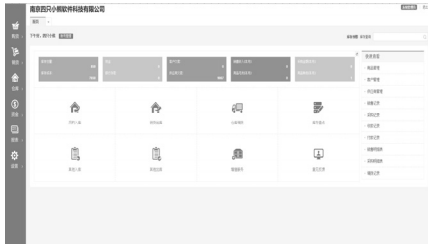


图 10 仓储销售管理模块界面

### 3.1.2 会员录入识别模块

会员录入识别模块是客户信息采集识别的重要内容，通过 Mysql 存储注册客户人脸信息以及购买记录。在进入超市时，可以通过 FaceID 人脸识别技术快速刷脸进入，在购买后将绑定的人脸与采购商品对应，通过大数据将个人购物信息进行分析处理，以实现商品推送。

## 3.2 无人售货数据系统

### 3.2.1 数据采集

文中的系统于 2018 年 4 月起在南京工程学院试运营，同时采集后台数据。投放地点为南京工程学院工程实践中心 6 号楼。在工程实践中心日常汇聚了大量学生与教师。6 号楼位于工程实践中心的中间位置，且该区域周边 1 km 内无其他校园超市覆盖。第一阶段无人超市单体首先开始营业，8 月起无人售货车同时投入使用。将 2017 年 5—10 月的有人超市数据与 2018 年该时段无人超市后台数据进行对比。系统统计结果如图 11 所示。有人超市、无人超市和自动无人售货与贩卖系统营业额数据对比如图 12 所示。

月份	样本	总客流量	新客户量	老客户量	销售额<0.1	月份	样本	总客流量	新客户量	老客户量	销售额<0.1
5月	有人超市	8058	1025	7023	4739.45	8月	有人超市	4690	667	4023	3779.79
	无人超市	8675	1829	6846	5138.25		无人超市	4478	517	3961	3738.25
	无人车1	0	0	0	0.0		无人车1	1559	292	1267	1708.1
	无人车2	0	0	0	0.0		无人车2	1435	368	1067	1382.55
	无人车3	0	0	0	0.0		无人车3	1656	299	1357	1520.55
	无人车4	0	0	0	0.0		无人车4	1542	323	1219	1736
无人车5	0	0	0	0.0	无人车5	1849	430	1419	1612		
6月	有人超市	9658	2335	7323	6456.45	9月	有人超市	10947	1924	9023	9016.36
	无人超市	10106	2263	7843	8125.1		无人超市	10602	2015	8587	9120.2
	无人车1	0	0	0	0.0		无人车1	2635	930	1705	1599.6
	无人车2	0	0	0	0.0		无人车2	2418	1116	1302	1734.45
	无人车3	0	0	0	0.0		无人车3	2342	1023	1319	1711.2
	无人车4	0	0	0	0.0		无人车4	2573	1085	1488	1868.2
无人车5	0	0	0	0.0	无人车5	2480	1085	1395	1726.3		
7月	有人超市	4984	457	4527	3438.2	10月	有人超市	7070	977	6093	5846.4
	无人超市	4962	377	4605	3242.9		无人超市	6820	930	5890	5713.3
	无人车1	0	0	0	0.0		无人车1	2108	600	1498	1594.95
	无人车2	0	0	0	0.0		无人车2	1922	496	1426	1632.15
	无人车3	0	0	0	0.0		无人车3	2201	589	1612	1683.3
	无人车4	0	0	0	0.0		无人车4	2077	465	1612	1613.1
无人车5	0	0	0	0.0	无人车5	2339	454	1705	1663.15		

图 11 2017—2018 年 5—10 月后台统计数据

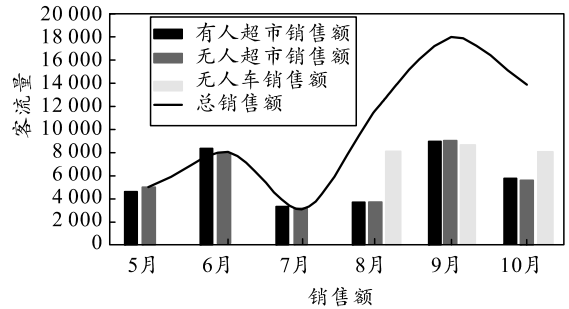


图 12 2017—2018 年销售后台统计数据对比

### 3.2.2 数据分析

分析图 11 和图 12 数据可直观发现：无人超市与有人超市的销售额相差不大，但是省去了大量的人力成本。而无人售货车从 8 月以来持续给无人超市贡献了大量的客流量，且新客户流量较多，经过调查发现，距离无人超市较远的用户经推荐了解后陆续采用该系统。单台无人售货车销售额与无人超市差距悬殊，但多台无人售货车总销售量可观。7 月份与 8 月份客流量与销售额骤减，主要是无人超市销售额降幅巨大，无人售货车小幅下降。无人超市销售额骤降的原因推测为大量师生暑期离校导致销售额总量减少，而工程实践中心汇聚的留校师生，比起在高温月份前往无人超市购物，更倾向于调用无人售货车。但由于留校师生人员数量较少，仍然不能保证无人车销售额的稳定。从而导致无人超市销售额骤降，无人配送车销售额小幅下降的情况。而 9 月份随着开学季的到来，超市的销售额有大幅增加，这与实际情况高度吻合。

## 4 结束语

笔者设计了一种全自动无人售货与自动贩卖系统，实现了无人售卖以及配送贩卖，并通过服务器实时监控货物状态信息。该系统现已实现产品化，性能稳定，收银界面友好，支持网络支付。同时配送部分前端存在 LCD 显示屏进行人机交互信息显示，并能实现全自动无人送货。无人售货以及自动贩卖部分相结合，扩大了销售范围，变相地降低成本，适用于学校、医院、社区等众多场所。对比 8 月前以及 8 月后的售卖数据，无人车销售金额基本平稳，能为无人超市贡献 15%~25% 的收益。

### 参考文献：

[1] 颜莉霞. “新零售”下特许经营单店盈利模式探析[J]. 中国商论, 2018(8): 1-2, 5.  
 [2] 申文涛, 丁晓青, 刘长松, 等. 自助通关系统中人脸识别的应用[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(10):

2796-2800, 2806.

- [3] 康俊民, 赵祥模, 徐志刚. 无人车行驶环境特征分类方法[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(6): 140-148.
- [4] 陈元枝, 邓艳, 史绍亮, 等. 基于 Zxing 的彩色 QR 码生成与识别方法[J]. 桂林电子科技大学学报, 2016, 36(4): 333-337.
- [5] 畅毅, 王亮, 黄劲松, 等. 基于 BD930 板卡的 RTK 测量系统研制[J]. 测绘通报, 2017(1): 97-101, 105.

\*\*\*\*\*

(上接第 9 页)

- [8] 李邦复. 遥测系统(上)[M]. 北京: 宇航出版社, 1999: 397-401.
- [9] 尚丽娜, 刘嫚婷. 1553B 接口信息文件自动导入软件的设计与实现[J]. 测控技术, 2014, 33(6): 120-122.
- [10] 刘洋, 李宗德, 丁雪静, 等. 基于 XTCE 的卫星遥测数据处理方法[J]. 遥测遥控, 2017, 38(2): 27-31.
- [11] 舒传华, 王竞克, 唐海波, 等. 基于遥测全帧的延时数据弥补方法研究与应用[J]. 遥测遥控, 2016, 37(4): 14-19.
- [12] 赵源, 姜小峰. 基于多线程技术的自动测试系统优化设计[J]. 计算机应用, 2014, 34(7): 2124-2128.

\*\*\*\*\*

(上接第 21 页)

#### 4 结束语

该新型主动防护拦截系统在距离防护目标十几米时对来袭弹体实现诱爆。为了明晰诱爆引发的空中爆炸给防护目标造成的防护风险, 笔者从爆炸震塌厚度、冲击波、破片 3 个角度进行分析。从结果可以看出: 目标的防护能力能够承受破坏作用造成的安全风险, 对于小于 60 ms 短延时装定的来袭弹体, 该系统可以保证在 10 m 以上实现空中诱爆, 满足防护指标要求, 能够有效控制空中爆炸带来的防护风险, 防护效果较好。

#### 参考文献:

- [1] 周平, 赵辰霄, 梅林, 等. 现代坦克主动防护系统发展现状与趋势分析[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(2): 132-136.
- [2] 李开文. 追杀低空目标的“毒刺”——美军三种近程防空武器系统[J]. 现代军事, 2003, 45(12): 26-28.

- [6] 简毅, 卢峥, 蒲永材, 等. 基于遗传优化 GRNN 神经网络的人脸识别算法[J]. 兵器装备工程学报, 2018(2): 131-135.
- [7] ZHAO L. 3D Obstacle Avoidance for Unmanned Autonomous System (UAS)[D]. University of Nevada, Las Vegas, 2015.
- [8] 许心德, 关胜晓. 未知环境下基于 VFH\* 的机器人避障[J]. 计算机仿真, 2010, 27(3): 156-160.

- [13] 睦俊华, 刘慧娜, 王建鑫. 多核多线程技术综述[J]. 计算机应用, 2013, 33(S1): 239-242, 261.
- [14] EKANAYAKE J, FOX G. High performance parallel computing with clouds and technologies[C]//Cloud Computing, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering 34. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 20-38.
- [15] CARTER N P, AGRAWAL A, BORKAR S, et al. Runnemed: An architecture for ubiquitous high-performance computing[C]//Proceedings of the 19th IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture. Shenzhen, China, 2013: 198-209.

- [3] 袁杨. “倚天”防空导弹武器系统[J]. 兵器知识, 2010, 41(4): 44-46.
- [4] 张卫东. 国外装甲车辆主动防护系统发展[J]. 国外坦克, 2008, 41(2): 7-14.
- [5] 任晓刚. 国外坦克装甲车辆主动防护系统[J]. 火力与指挥控制, 2010, 44(S1): 4-6.
- [6] 赵晓凡. 坦克装甲车辆主动防御系统研究[J]. 车辆与动力技术, 2002, 41(3): 53-57.
- [7] 罗佳, 杨世平. 一种信息系统安全风险的灰色模糊综合评估方法[J]. 微型机与应用, 2010, 38(13): 44-46.
- [8] 王世学, 李兆耿. 基于改进 ADC 模型的坦克作战效能评估[J]. 兵工自动化, 2009, 28(7): 14-16.
- [9] 付钰, 吴晓平, 严承华. 基于贝叶斯网络的信息安全风险评估方法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2006, 52(5): 631-634.
- [10] 郑全平, 钱七虎, 周早生, 等. 钢筋混凝土震塌厚度计算公式对比研究[J]. 工程力学, 2003, 20(3): 47-53.
- [11] 钱七虎. 防护工程计算原理[M]. 南京: 解放军理工大学, 2009: 70-73.