

食品质量追溯中 RFID 多标签识别防碰撞算法

Anti collision algorithm of RFID multi-tags identification in food quality traceability

姚金玲¹ 刘 婕² 闫雪峰³

YAO Jin-ling¹ LIU Jie² YAN Xue-feng³

(1. 天津职业大学, 天津 300410; 2. 天津理工大学天津市先进机电系统设计与

智能控制重点实验室, 天津 300384; 3. 天津职业技术师范大学, 天津 300110)

(1. Tianjin Vocational University, Tianjin 300410, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Electromechanical System Design and Intelligent Control, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300110, China)

摘要:针对食品质量追溯中批量标签识别存在的标签碰撞问题,结合帧时隙 ALOHA 算法和最小均方误差预编码技术提出了一种 RFID 多标签识别防碰撞算法。该算法在进行多标签识别前,先通过预编码技术对待识别标签进行分组,有效降低多标签间的碰撞。仿真试验表明,改进算法有效提升了 RFID 多标签识别性能,具有一定的实用价值。

关键词: RFID; 标签识别; 防碰撞算法; 帧时隙 ALOHA 算法; 最小均方误差

Abstract: Aiming at the problem of tag collision in batch tag recognition in food quality traceability, a RFID multi tag recognition anti-collision algorithm was proposed by combining frame slotted ALOHA algorithm and minimum mean square error precoding technology. Before multi label recognition, the algorithm uses precoding technology to group the tags, which can effectively reduce the collision between tags. The simulation results show that the improved algorithm can effectively improve the performance of RFID multi tag recognition, and has a certain practical value.

Keywords: RFID; tag recognition; anti-collision algorithm; frame slotted ALOHA algorithm; minimum mean square error

随着信息技术的快速发展,射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术由于其非接触式信息交互、安全可靠信息传输、灵活快捷标识追溯等优点而被广泛用于工业、农业和商业等领域^[1]。在食品质量追溯

过程中,尤其是在运输和仓储中,需要对整车货品标签进行批量识别。多标签识别是 RFID 最为明显的优势,但当多个标签同时发送标识信息时,其发送信号会在数据传输到读取器时发生干扰形成碰撞^[2]。碰撞不仅会降低系统的识别效率,还会导致识别时间变长,一定程度上限制了 RFID 技术的应用。

国内外学者对基于 RFID 标签冲突检测的防碰撞算法进行了大量研究,并取得了一定的成果,大部分防碰撞算法研究集中在 ALOHA 算法和二叉树算法。王祖良等^[3]提出了一种用于农产品可追溯性的标签防碰撞自适应动态帧时隙 ALOHA 算法,该方法适用于设计的农产品追溯系统,大大提高了识别效率。与广泛采用的国际标准相比,吞吐量提升了 30%。潘雪峰等^[4]提出了一种结合动态帧时隙 ALOHA 算法和生日悖论概率理论的 RFID 系统防碰撞算法,该方法可以有效提高标签识别的准确性,减少识别过程的时间,提高射频系统信道的利用率及系统性能。尚弘^[5]提出了一种基于搜索树的轻量级防碰撞方法,并设计了一种新的查询响应模式(单查询—双响应),可以提高标签识别的效率。结果表明,采用双响应模式和计数器触发的单查询模式可将整体通信开销减少 42%。贺晓霞等^[6]提出了一种基于锁定位的并行二进制分区(LPBS)防碰撞算法,该算法减少了读取器和标签之间发送的位数,同时降低了竞争时隙。仿真结果表明,大多数情况下,该算法在吞吐量和延迟方面均优于传统的防碰撞算法。但是,上述研究并没有完全消除空闲时隙,造成一部分时间和资源浪费,具有一定的局限性。

在食品质量追溯过程中,多标签识别是追溯的关键,而多标签识别不可避免地会产生碰撞。针对目前防碰撞算法查询时间过程会产生大量的冗余,增加通信开销,文章拟结合帧时隙 ALOHA(Frame Slotted ALOHA,

基金项目:天津市自然科学基金项目(编号:17JCQNJC04700);天津市教委科研计划资助项目(编号:2017KJ105, JW1718)

作者简介:姚金玲(1982—),女,天津职业大学讲师,硕士。

E-mail: yjling6@21cn.com

收稿日期:2021-01-08

FSA)算法和最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)预编码技术,提出一种 RFID 多标签识别防碰撞算法,即预编码帧时隙 ALOHA 算法,旨在为 RFID 多标签技术的发展提供依据。

1 RFID 多标签识别技术基础

1.1 RFID 系统构成及工作原理

RFID 系统由标签、天线、读取器和后台数据库系统 4 部分组成(图 1)。每个标签都有一个唯一的 ID 号,该 ID 号使用电磁波和天线进行数据交换和能量传输^[7]。天线是位于 RFID 系统标签和读取器之间的数据收发器。读取器是 RFID 系统的信息传输站,负责读取和写入标签信息。后端数据库系统由中间件和信息处理等内部组件组成,对信息进行采集、分类、分析等^[8],还可以控制阅读器和电子标签之间的双向标识。

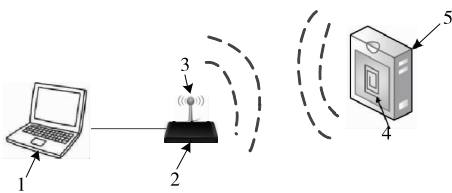


图 1 RDIF 系统结构
1. 后台数据库 2. 读取器 3. 天线 4. RFID 标签 5. 待识别食品

Figure 1 RDIF system structure

RFID 的基本工作原理:在后台数据库系统的控制下,读取器通过天线将特定频率的电磁信号发送到标签,标签接收到该信号后,便会通过改变自身的阻抗来存储 ID,信息被调制并反射回来。阅读器通过天线接收反射信号,对标签信息进行解调和解码,然后将其发送到数据库系统。后台数据库系统将根据接收到的信息执行相应的动作。

由于电子标签和读取器通过非接触进行信号传输,因此在进行多数据传输时有干扰的可能,严重时会导致传输失败^[9]。RFID 系统碰撞可分为标签—标签碰撞、标签—读取器碰撞、读取器—读取器碰撞 3 类。文章主要针对标签—标签碰撞问题进行相关算法和 RFID 多标签识别防碰撞算法改进。

1.2 帧时隙 ALOHA 算法

RFID 多标签识别防碰撞算法包括基于树搜索的算法系列和基于 ALOHA 的算法系列。帧时隙 ALOHA (FSA)算法与时隙 ALOHA 算法的最大区别为时隙 ALOHA 算法将识别周期划分为不同的时隙间隔^[10]。FSA 是一个由多个时隙组成的帧,并且该时隙由多个时间段组成。在数据传输过程中,每个帧的大小由系统确定。如果标签需要发送数据,读取器将随机生成一些时隙发送给标签^[11]。整个过程的时隙数据就是唯一的标识

号。标签还具有一个时隙计数器,一段时间后,时隙计数器增加 1。如果时隙计数器的值等于帧中时隙的随机数,则标签可以发送数据,并且在数据发送过程中不会产生冲突。图 2 为帧时隙 ALOHA 算法。

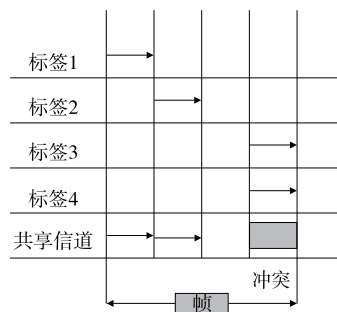


图 2 帧时隙 ALOHA 算法通信原理

Figure 2 Frame slotted ALOHA algorithm communication principle

为系统设置特定的帧长 L ,待识别标签个数 n ,当读取器与标签进行通信时,标签随机选择时隙返回序列码信息的概率 $p = 1/L$ 。由于该算法基于二项式分布, m 个标签在同一时隙中响应读取器的查询命令的概率如式(1)所示^[12]。

$$P(X = m) = C_n^m \times \left(\frac{1}{L}\right)^m \times \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-m} \quad (1)$$

如果该时隙没有标签响应读取器的查询命令时,则该时隙为空闲时隙 I ,即 $m = 0$,概率如式(2)所示。

$$P_i(L, n, 0) = \left(1 - \frac{1}{L}\right)^n \quad (2)$$

如果时隙中对查询命令的响应仅一个标签,则该时隙为成功的时隙 S ,即 $m = 1$,概率如式(3)所示^[13]。

$$P_s(L, n, 1) = \left(\frac{n}{L}\right) \times \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-1} \quad (3)$$

如果时隙中对多个同时标记响应阅读器的查询命令,则该时隙为碰撞时隙 C ,即 $m > 1$,该概率如式(4)所示。

$$P_c = 1 - P_i - P_s \quad (4)$$

一个帧长时间内,成功识别标签的时隙数目如式(5)所示^[14]。

$$E = L \times P_s = n \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-1} \quad (5)$$

算法系统的吞吐量如式(6)所示^[15]。

$$S = \frac{E}{L} = P_s \quad (6)$$

对式(6)进行求导,则

$$\frac{dS}{dn} = \frac{1}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-1} + \frac{n}{L} \left(1 - \frac{1}{L}\right)^{n-1} \ln\left(1 - \frac{1}{L}\right) \quad (7)$$

整理可得:

$$n = -\frac{1}{\ln\left(1 - \frac{1}{L}\right)}. \quad (8)$$

当 n 为无穷大时,将式(8)按泰勒级数展开,得到最优帧长^[16]:

$$L \approx -\frac{1 + \frac{1}{n}}{1 + \frac{1}{n} - 1} = n + 1 \approx n. \quad (9)$$

当帧长 $L = n$ 时,系统的最大吞吐率 S 如式(10)所示^[17]。

$$S_{\max} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} \approx 0.367. \quad (10)$$

因此,在处理大量标签识别问题时,帧长等于标签数时,识别效率最高,识别时间最短。但是,帧时隙也有其缺点。如果标签数量较多,则不能将帧长度增加到任意长度值,即帧时隙是有限的。当帧长达到最大时,随着标签的增加,效率逐渐下降。如果标签数远小于帧长度,则空闲时隙较多,造成大量的时隙浪费。

2 改进帧时隙 ALOHA 算法

2.1 预编码技术

考虑到噪声在信息传输过程中的影响,采用最小均方误差预编码技术对帧时隙 ALOHA 算法进行改进,以最小化实际传输符号与接收器估计输出值之间的差异,从而找到最优的预编码矩阵^[18]。

$$\operatorname{argmin}_E \|s - \beta^{-1}s\|^2, \quad (11)$$

$$\begin{cases} \{F_{\text{MMSE}}, \beta\} = \operatorname{argmin}_E \|s - \beta^{-1}s\|^2 \\ E \|F_s\|_2 \leq P_t \end{cases}, \quad (12)$$

式中:

β ——功率影响系数;

P_t ——系统的总发射功率, W 。

当式(12)成立时,实际传输信号与接收机估计输出信号的差异最小。

根据式(12)建立拉格朗日函数,得到该函数的解:

$$F_{\text{MMSE}} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \delta\mathbf{I})^{-1}, \quad (13)$$

式中:

$\mathbf{H}$ ——信道矩阵;

$\delta, \mathbf{I}$ ——功率控制因子和单位矩阵。

为了提高系统性能并降低误码率,已知子矩阵 $\bar{\mathbf{H}}$, MMSE 预编码矩阵为:

$$\bar{\mathbf{P}} = \bar{\mathbf{H}}^H (\bar{\mathbf{H}}\bar{\mathbf{H}}^H + \frac{\delta_n^2}{\delta_s^2}\mathbf{I})^{-1}, \quad (14)$$

式中:

$(\cdot)^H$ ——共轭转置运算;

$(\cdot)^{-1}$ ——求逆运算;

δ_s^2 ——发射信号的总功率, W ;

δ_n^2 ——噪声功率, W 。

功率归一化因子 β 为^[19]:

$$\beta = \sqrt{N_t/T_r(P\bar{P}^H)}, \quad (15)$$

式中:

$Tr(\cdot)$ ——迹运算。

此时预编码矩阵为:

$$\mathbf{P} = \beta\bar{\mathbf{P}}. \quad (16)$$

预编码模型方框图如图 3 所示。

信道矩阵 $\mathbf{H}$ 由 N_t 根发射天线和 N_r 根接收天线组成 $N_t \times N_r$, 通过天线优化算法对信道矩阵进行选取。

2.2 预编码帧时隙 ALOHA 算法

基于预编码技术提出了预编码帧时隙 ALOHA (MMSE-FSA 算法), 该算法将一些预设时隙组合为一帧 f_s , 并将读取器工作辐射区的标签数设置为 N 。当识别认证标签时, 标签随机且独立选择 $1 - f_s$ 个时隙发送响应信号。

时隙中标签数量 k 的概率为:

$$p(f_s, N, k) = C_N^k \left(\frac{1}{f_s}\right)^k (1 - f_s)^{N-k}. \quad (17)$$

时隙中标签数为 1 的概率为:

$$p(f_s, N, 1) = C_N^1 \left(\frac{1}{f_s}\right)^1 (1 - f_s)^{N-1} = \left(\frac{n}{f_s}\right) \left(1 - \frac{1}{f_s}\right)^{N-1}. \quad (18)$$

如果标签数量为 1, 此时隙中没有碰撞, 可以成功完成标签标识。因此, 根据式(19)可以正确识别帧中的标签时隙数。

$$f_{\text{success}} = f_s \cdot p(f_s, N, 1) = f_s \cdot \left(\frac{n}{f_s}\right) \left(1 - \frac{1}{f_s}\right)^{N-1} = n \cdot \left(1 - \frac{1}{f_s}\right)^{N-1}. \quad (19)$$

则碰撞时隙数为:

$$f_{\text{collision}} = f_s - f_{\text{success}}. \quad (20)$$

2.3 MMSE-FSA 算法工作流程

假设读取器在工作辐射区有天线, 则工作辐射区可以识别很多标签, 标签数量为 N , MMSE-FSA 算法步骤如下:

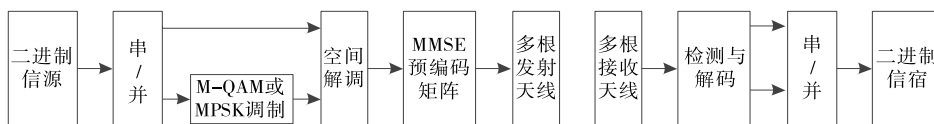


图 3 预编码模型

Figure 3 Precoding model

① 当读取器的工作辐射区中有标签进入,就会广播一个请求命令,RFID 系统开始识别认证。

② 识别前对所有未识别的标签进行分组,并通过预编码技术进行预处理。通过式(14)建立预编码矩阵,发射机发送信号为:

$$x = s_m P e_k, \quad (21)$$

式中:

s_m ——发射信号映射;

e_k ——信号映射的调制符号;

x ——通过发射信道 $\bar{H}$ 完成信号发射。

接收信号为:

$$y = \bar{H}x + n. \quad (22)$$

③ 使用 FSA 算法对接收信号进行识别。

④ 检查是否识别了堆栈中的所有标签。如果未识别完,执行③,否则继续执行下一步。

⑤ 确定所有标签后,算法完成。

改进算法的流程图如图 4 所示。

3 仿真试验及结果分析

3.1 仿真试验设置

仿真设备为联想 PC 机,操作系统为 Windows 7 64 位旗舰版,Intel i5 2450m CPU,2.5 GHz 频率,8 GB 内存和 Matlab r2018a 作为仿真平台。将 MMSE-FSA 算法(帧时隙 ALOHA 算法和最小均方误差预编码技术相结合)与帧时隙 ALOHA 算法、后退二进搜索树算法(Regressive-style Binary Search Tree, RBST)^[20] 进行时隙总数、吞吐量、冲突时隙和识别时间分析。RBST 算法引入标签状态计数器进行分组,利用前、后向搜索方法来减少标签的搜索范围。标签数量 N 在 $[0, 1\ 000]$ 变化,50 为一

个间隔。

3.2 仿真结果分析

MMSE-FSA 算法、帧时隙 ALOHA 算法和 RBST 算法所需总时隙数比较结果见图 5。由图 5 可知,MMSE-FSA 算法的总时隙数随标签数量的增加呈线性增加,但是与帧时隙 ALOHA 算法和 RBST 算法相比,具有明显的优势。当标签总数从 0~1 000 变化时,帧时隙 ALOHA 算法生成的时隙曲线总数呈指数增长。RBST 算法生成的时隙曲线总数呈线性增长。当标签数为 1 000 时,改进算法所需的时隙总数约为 800,比帧时隙 ALOHA 算法少 4 000,比 RBST 算法少 1 000。因此,MMSE-FSA 算法总时隙数变化最为缓慢,符合预期效果。

MMSE-FSA 算法、帧时隙 ALOHA 算法和 RBST 算法的吞吐量比较结果见图 6。由图 6 可知,当读取器辐射区域内标签数相同时,MMSE-FSA 算法的吞吐量高于帧时隙 ALOHA 算法和 RBST 算法的。当标签数为 1 000 时,MMSE-FSA 算法的吞吐率为 0.8,比帧时隙 ALOHA 算法和 RBST 算法的分别提高了 340%,58%。在辐射范围内,MMSE-FSA 算法的吞吐量可以保持在 0.8 左右,识别效率有了较大提升。

图 7 为 MMSE-FSA 算法、帧时隙 ALOHA 算法和 RBST 算法碰撞时隙数的比较结果。由图 7 可知,如果标签总数相同,MMSE-FSA 算法产生的碰撞时隙数最少,

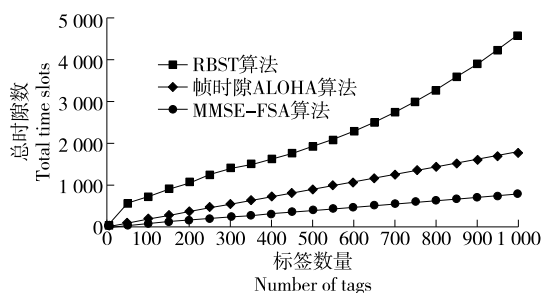


图 5 不同算法总时隙数变化曲线

Figure 5 Different algorithms total time slots change curve

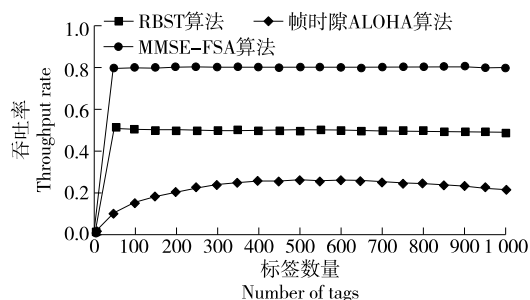


图 6 不同算法吞吐量率变化曲线

Figure 6 Different algorithms throughput rate change curve

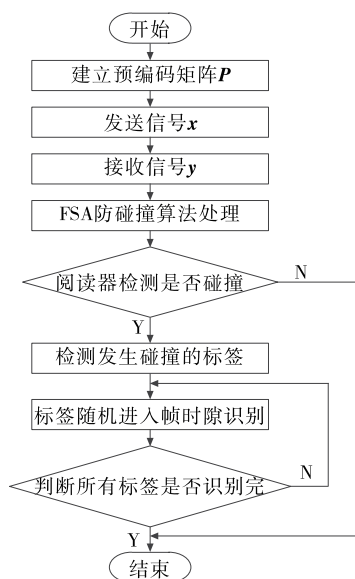


图 4 改进算法流程

Figure 4 Improved algorithm flow

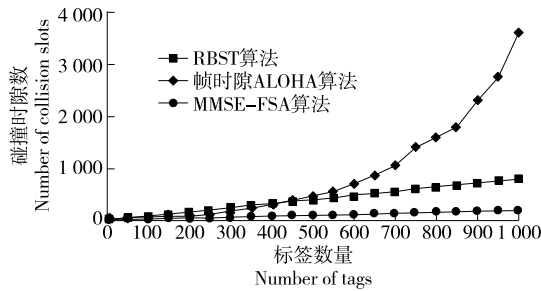


图7 不同算法碰撞时隙数变化曲线

Figure 7 Different algorithms number of collision slots change curve

当标签总数从0~1 000变化时,MMSE-FSA算法碰撞时隙数变化最为缓慢。当标签数为1 000时,MMSE-FSA算法相比于RBST算法碰撞时隙数减少了830个,比帧时隙ALOHA算法少3 200个。

图8为MMSE-FSA算法与帧时隙ALOHA算法和RBST算法的识别时间比较结果。由图8可知,当标签总数从0~1 000变化时,MMSE-FSA算法识别时间变化最为缓慢,比帧时隙ALOHA算法和RBST算法花费的时间短。当标签数为1 000时,MMSE-FSA算法的识别时间相比于RBST算法的降低了3.7 s,比帧时隙ALOHA算法的降低了8.2 s。MMSE-FSA算法有效降低了识别时间,相对于帧时隙ALOHA算法和RBST算法,其识别速度有了较大提升。

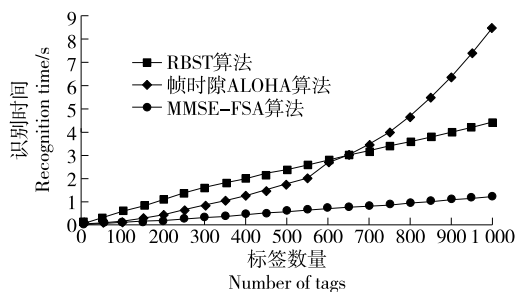


图8 不同算法识别时间变化曲线

Figure 8 Different algorithms identification time change curve

综上,MMSE-FSA算法完成了对大量标签识别认证过程,采用最小均方误差预编码技术对帧时隙ALOHA算法进行了改进,不仅降低了时隙总数、碰撞数,而且识别时间也得到了进一步的改善,稳定性较好,具有一定的实际意义。

4 结论

文中提出了一种结合帧时隙ALOHA算法和最小均方误差预编码技术的RFID系统防碰撞算法。当标签总数为1 000时,改进帧时隙ALOHA算法显著提升了系统吞吐量,降低了标签识别时间,减少了碰撞时隙数量。

考虑到当前的试验设备和数据规模,文中提出的食品RFID标签冲突检测的防碰撞算法仍处于起步阶段,仅对[0,1 000]内标签进行了仿真分析,后续应对大规模识别数据进行研究,以适应未来不断变化的应用环境。

参考文献

- [1] 赵利平, 吴德刚. 基于小波与模糊相融合的苹果分级算法[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 142-145.
- [2] 赵训铭, 刘建华. 射频识别(RFID)技术在食品溯源中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(2): 212-216.
- [3] 王祖良, 郭建新, 张婷, 等. 农产品质量溯源 RFID 标签批量识别[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 150-157.
- [4] 潘雪峰, 曹加恒. 一种改进的动态帧时隙 ALOHA 算法[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(6): 95-99.
- [5] 尚弘. 一种基于搜索树的轻量级 RFID 标签防碰撞方案[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2018, 30(6): 789-796.
- [6] 贺晓霞, 贾小林. 基于锁位的并行二进制分割防碰撞算法研究[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(4): 247-251.
- [7] 王宁, 尤美虹. 果品溯源现状及 RFID 溯源系统探析[J]. 物流工程与管理, 2019, 41(10): 93-95.
- [8] 刘芳, 刘玉坤, 林森, 等. 基于改进型 YOLO 的复杂环境下番茄果实快速识别方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 229-237.
- [9] 陈卫军, 黄永灿. 食品标签冲突检测的防碰撞控制[J]. 计算机应用与软件, 2015, 36(4): 417-421.
- [10] 于蒙, 李雄, 杨海潮, 等. 基于图像识别的苹果的等级分级研究[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(7): 39-43.
- [11] 刘国斌, 车宇彤. 农业信息化与农业现代化融合发展研究[J]. 情报科学, 2019, 37(1): 148-155.
- [12] 王冉冉, 刘鑫, 尹孟, 等. 面向苹果硬度检测仪的声振信号激励与采集系统设计[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(1): 111-118.
- [13] 于文妍, 杨坤林. 四旋翼无人机串级模糊自适应 PID 控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2019, 12(1): 227-231.
- [14] 张树生, 马静雅, 岑强, 等. 煤矿综采工作面巡检机器人系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 136-140.
- [15] 王志中. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J]. 机械设计与制造, 2018, 12(1): 242-244.
- [16] 杨欣潼, 张婷, 白丽平, 等. 社区居家养老服务的预约调度与路径规划问题研究: 基于改善蚁群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(5): 1 212-1 224.
- [17] 姚源果, 贺盛瑜. 基于交通大数据的农产品冷链物流配送路径优化研究[J]. 管理评论, 2019, 31(4): 240-253.
- [18] 王淑云, 孙虹. 随机需求下冷链食品多温共配路径优化研究[J]. 工业工程与管理, 2016, 21(2): 49-58.
- [19] WANG Zu-liang, ZHANG Ting, FAN Ling-yan, et al. Dynamic frame-slotted ALOHA anti-collision algorithm in RFID based on non-linear estimation[J]. International Journal of Electronics, 2019, 106(11): 1 769-1 783.
- [20] 樊文静, 张姗姗, 田智慧. 基于后退式二进制搜索的 RFID 防碰撞算法的研究[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(5): 191-194.