

胶体金读数仪在快速检测中的应用研究进展

宋昀鹏*, 李 灏, 丁子元, 任涵玮, 徐 扬

(天津市水产技术推广站, 天津 300221)

摘 要: 胶体金免疫层析技术以其成本低、操作简单、灵敏度高等优点在微生物、重金属和真菌毒素检测等方面应用广泛。胶体金读数仪作为胶体金免疫层析技术与现代自动化检测技术交叉得到的新产物, 以其检测迅速、可定量、直观反映检测结果等特点在食品安全快速检测中备受关注。本文详细介绍了胶体金读数仪中信号采集模块、信号处理模块、人机交互模块和附加模块4部分的功能结构, 及其在农兽药、食品添加剂、真菌毒素、微生物和综合检测等方面的应用, 并分析了胶体金读数仪在可追溯系统方面的应用潜力和在智能化和多功能化方面的未来发展方向, 为胶体金读数仪的进一步研究提供借鉴。

关键词: 胶体金读数仪; 快速检测; 定量分析

Research advance of application of colloidal-gold strips readers in rapid detection

SONG Yun-Peng*, LI Hao, DING Zi-Yuan, REN Han-Wei, Xu Yang

(Tianjin Aquatic Technology Extending Stations, Tianjin 300221, China)

ABSTRACT: Due to the advantages of low cost, simple operation and high sensitivity, gold immunochromatography assay was widely used in the detection of microorganisms, heavy metals, mycotoxins and so on. As a combination of colloidal gold immunochromatography and modern automated detection technology, colloidal-gold strips readers had gained more attention by its characteristics, such as rapid detection and quantitative and intuitive reflection of the results. This paper introduced the construction of colloidal-gold strips readers, including signal acquisition module, signal processing module, communication module and additional module. The applications of colloidal-gold strips readers in the detection of agricultural and veterinary drugs, food additives, mycotoxins, microbial and comprehensive testing were also introduced. Furthermore, the potential applications of colloidal-gold strips readers in traceability system and the future development directions of intelligence and multi-function were analyzed, providing a reference for further study of colloidal-gold strips readers.

KEY WORDS: colloidal-gold strips readers; rapid detection; quantitative analysis

1 引 言

近年来, 食品中致病菌超标、农兽药残留、食品添加剂过量和重金属含量超标等问题层出不穷, 对食品安全分析检测方法提出了新挑战^[1]。当前用于微生物、食品添加剂及农兽药残留等食品安全检测的技术主要分为: 光学分

析法^[2]、免疫学快速检测法^[3,4]、电化学快速检测法^[5,6]、PCR检测技术^[7,8]和纳米材料快速检测技术^[9,10]等。这些方法能快速并准确分析食品中的各项待检指标, 捍卫食品安全。其中免疫学快速检测法中的胶体金免疫层析技术因具有成本低、操作简便、灵敏度高及稳定性强等诸多特点而广受关注^[11]。

*通讯作者: 宋昀鹏, 工程师, 主要研究方向为水产养殖。E-mail: 714114684@qq.com

*Corresponding author: SONG Yun-Peng, Engineer, Tianjin Aquatic Technology Extending Stations, Tianjin 300221, China. E-mail: 714114684@qq.com

胶体金免疫层析(gold immunochromatography assay)技术是当前新兴的一种结合免疫分析技术、侧向层析技术、胶体金标记技术的快速检测手段。自 1990 年 Beggs 等第一次将胶体金免疫层析试纸条(简称:金标试纸条)应用于人绒毛促性腺激素的测定,金标试纸条在之后二十几年的发展中日益成熟^[12]。金标试纸条主要是借助毛细管作用使样品垫上的待测物经金标结合垫移动至层析膜上;当待测物经过层析膜上的检测线(T线)与质控线(C线)时会与上面的配体(抗原或抗体)特异性结合;最终通过目测 T 线与 C 线的显色情况,在短时间内得到待测物的浓度,从而实现定性和半定量检测^[13]。但目测在很多方面存在缺陷,例如:(1)光线影响和长期用眼会引起视觉疲劳,导致误判;(2)被检测物质浓度处于临界状态时难以目测;(3)目测得到的定性结果可能受观察者的主观影响;(4)肉眼观察结果无法为检测单位提供电子数据记录。因此,金标试纸条实验结果的数据化就显得尤为重要。

2 胶体金读数仪

胶体金读数仪是胶体金免疫层析技术与自动化检测技术交叉得到的新产物^[14]。Chandler 等^[15]于 1999 年提出利用便携式仪器将检测信号的 4 级显色强度进行数字转化可实现半定量检测。较早开发胶体金读数仪的美国 Alexeter Technology 公司于 2007 年就生产检测生化威胁物质的 BTA Test Strip Reader,现已与 Tetrance 公司联合生产该产品的第 3 代。随着胶体金读数仪的不断发展,国内外均有大量的相关报道。这些胶体金读数仪实现定量检测均需要信号采集模块、信号处理模块、人机交互模块和附加模块 4 个部分的紧密配合。

2.1 信号采集模块

信号采集是胶体金读数仪检测的第 1 步,当前信号采集的光电探测器主要分为以下 2 种:反射型光敏电阻传感器和光纤传感器、成像原理的图像传感器。

2.1.1 光敏电阻传感器和光纤传感器

该类传感器基于光反射原理,基于此原理,研究人员研制出了不同特点的胶体金读数仪。Suhyeon 等^[16]利用绿色 LED(发光二极管)作为光源,硅光电二极管作为光电探测器采集反射光,研制出胶体金试纸条读数仪。实验证明,该读数仪能有效检测乙型肝炎病毒抗原试剂盒的实验结果。黄立华等^[17]研制出的金标免疫试纸条反射式光度计以绿光激光器为照明光源,通过扫描金标试纸条上的胶体金分布得到待检物的浓度。王洋^[18]在前人基础上提出的金标读数仪采用了类似反射型光纤传感器的原理,以绿光 LED 作为发射光源,以光电二极管接收试纸条反射光,并通过步进电机带动检测系统扫描试纸条待检区域,采用多种算法对检测波形进行分析处理,从而获得待测样品的浓度。不仅简化了光路设计,还提高了检测精度,实现了数据采

集和分析的优化。陈建国^[19]提出的前列腺炎快速检测仪采用反射型光纤传感器,光源发出的光射向试纸条表面,反射光由接收光纤收集,并传输至光探测器转换成电信号输出。实验结果表明,该测试仪能实现对前列腺炎试纸条的有效检测。专利《一种胶体金免疫层析试纸条的检测系统》^[20]利用多个透镜和反射镜对光束进行汇聚,由光电探测器接收并将其转换成电信号实现定量检测。但该类传感器由于其工作原理产生的一些系统误差不可避免。例如,为尽可能完整地采集反射光,设计者一般需要将多级光敏元件与多级聚焦透镜合用,但由此产生的噪声会直接影响检测结果。而且,光纤传感器会因为入射光照射的不全面性和试纸条生产工艺的差异性使检测结果不稳定。

2.1.2 成像原理的图像传感器

该类传感器主要是通过半导体图像传感器获取试纸条图像。该方法一般采用图像传感器 CCD(charge coupled device)或 CMOS(complementary metal oxide semiconductor)作为光电成像器件^[21,22]。研究人员根据 2 类传感器的不同特点研发出了不同类型的胶体金读数仪。郭翼^[23]根据 CMOS 工作可靠性高、传输速度快、价格低并具有开窗功能的特点研制出了瘦肉精速测金标仪。该金标仪检测瘦肉精试纸条的实验结果与国标法 GC-MS 对比,整体上实现了痕量检测。程华等^[24]发明的一种颜色识别传感器 TCS 3200(含 CMOS 的集成电路)胶体金免疫层析试纸条定量分析应用较为广泛,实现了自动检测、显色度分析和数据存储等功能。专利《全自动胶体金检测方法》^[25]中的位移系统自动将 CCD 或 CMOS 图像采集器调整到最佳位置后进行图像采集,并用软件对图像进行分析并判定检测结果。汪曩等^[26]报道的胶体金试纸条光电检测仪以降噪声性能好的线阵 CCD 作为图像传感器将 A/D 转换器和 FIFO 缓存器等相结合,完成了数据采集、模数转换和储存的一体化,解决了 CCD 数据高速传送的关键问题,实现了农药残留的快速检测。成像原理的图像传感器的最大优势是光学系统设计简单,不需要外加光源和机械装置,且采集图像和处理图像时间短,检测精密度较高。

2.2 信号处理模块

信号处理是定量分析的第 2 步。在建立定量检测算法模型时,首先要对采集的信号进行相关处理,嵌入式处理器在其中起着核心作用。

作为微处理器的一种,嵌入式处理器就是嵌入式系统的核心。胶体金读数仪采用嵌入式处理器的代表产品是 Nios, ARM/ARM Cortex; 嵌入式控制器的代表产品是单片机。ARM 的架构系统可以构建功能强大的软、硬件嵌入式处理平台,已被广泛应用在许多嵌入式系统中^[27],在此基础上研究人员设计出了不同类型的胶体金读数仪。万宇平等^[28]研发的胶体金读数仪采用现场可编程门阵列主控的 32 位 Nios II 快速处理器。康健^[29]提出的农产品质量快速检

测仪采用 ARM11 核心处理器, 表现出很好的图像兼容性和操作效率。张怀雯^[14]将 STM32F40 系列处理器(ARM Cortex-M7 内核)融入免疫层析试纸检测仪, 实现了低能耗、高速、集成度高等优点。刘蕾等^[30]提出的基于一维 CCD 的免疫层析试纸条检测系统采用的是单片机-传感器模式架构, 具有稳定性好、外围电路简单, 且易实现嵌入式应用等优点。王淑杰^[31]设计的免疫 C 蛋白检测仪采用单片机作为微处理器, 将其较强的处理功能和抗干扰能力强的特性融入检测仪中, 该检测系统性能表现出较高的重复性和精确度。这些嵌入式处理器整合相关部件进行信号预处理、图像特征值提取和检测结果定量表示等, 实现了信号处理模块的主要功能。

信号预处理。图像传感器自身条件限制、光源等原因使获取的图像总是不可避免地产生光电噪声和白噪声等, 这些噪声使得扫描曲线产生小波动而变得粗糙。试纸条生产工艺、试纸条显色等受到的影响会导致污点的产生, 这些污点使扫描曲线上出现点状尖峰。噪声和污点都会对系统的检测结果造成影响。朱峰等^[32]设计的三聚氰胺定量检测仪采用多项拟合移动平滑法进行曲线平滑处理来除去多种噪声。熊保平等^[33]设计的金免疫层析试纸条定量检测系统使用多副图像平均法和 PDE 去除试条图像的噪声。良好的预处理能为图像特征值的确定奠定基础, 但预处理过程中损失的像素应考虑在仪器设计过程中, 使之达到相对平衡。

图像特征值提取。准确地分析图像特征值能更好地达到定量分析的目的。郑宇等^[34]设计的尿素酶快速定量检测仪中采用 k-means 均值聚类算法实现 2 条色带特征值的提取。汪曩等^[26]设计的胶体金试纸条光电检测系统在读取 CCD 传送的信号时采用经典边缘检测, 通过自动定位插槽固定检测带位置来实现。孙永生^[35]提出的基于机器视觉的 β 类药物残留检测系统中对图像进行灰度校正和中值滤波等预处理, 再根据滤波后试纸条图像中显色的特点选择灰度积分投影算法进行特征值提取, 特征值提取通过特征区域像素的统计而实现, 特征值的提取与信号预处理共同决定着最终浓度的范围。

(3)检测结果的定量表示。试纸浓度特征曲线是指同一种胶体金试纸在不同浓度(y)下, 有一个显色度比值(x , T 线与 C 线的显色程度比值)。如果是利用光敏元件采集试纸反射的光信号, x 为 T 线与 C 线的光密度比值; 如果是图像传感器采集试纸的显色图像, x 为 T 线与 C 线的灰度比值。通过采集多个点(x, y)可以拟合绘制成试纸条的浓度特征曲线。在待测样品的检测过程中, 通过得到显色度比值可以推算出对应的 y 值, 从而达到定量检测的目的。

2.3 人机交互模块

为了实现对仪器的良好控制, 人机交互模块的设计在整个胶体金读数仪设计中起着关键的作用。人机交互模

块包括显示屏、按键和微型打印机等。其中胶体金读数仪显示屏中应用较多的液晶显示屏又分为 LED 显示屏、有机发光二极管 (organic light-emitting diode, OLED) 显示屏和薄膜晶体管 (thin film transistor, TFT) 显示屏等, 这些显示屏因其亮度高、显示清晰、体积小、寿命长、且价格低等更占优势^[36-38]。胶体金读数仪常规的键盘有机械式按键和电容式按键 2 种。将显示屏与按键结合一体得到的电阻触摸屏是便携式胶体金读数仪的理想选择。康健^[29]采用 LCD 电阻触摸屏作为输入和输出设备, 代替了传统的物理按键与只能作为显示屏用的单色 LCD, 操作更为简便、减少了人为操作误差的产生。微型打印机能支持检测结果现场打印, 满足用户对信息量的需求, 更便于保存管理。目前应用比较普遍的是针式打印机与热敏打印机。杜民等^[39]设计的甲胎蛋白免疫金标试纸条定量检测仪中将触摸式键盘与 LCD 显示器和微型打印机整合集合于一体, 实现了检测过程直观、快速等优点。柳州^[40]将热敏型微型打印机、无线数据收发和摄像头等融入胶体金智能农残检测仪, 实现了信息的快速输出和共享。人机交互模块的设置对胶体金读数仪友好型用户界面的实现提供了可能。

2.4 附加模块

胶体金读数仪扩展功能的实现依赖于附加模块的设计, 例如 GPRS 传输、二维码扫描(RFID 模块)和卫星定位等。杨文涛等^[41]报道的胶体金快速检测仪集成了 ARM 主板、USB 摄像头、GPRS 无线模块和打印机等硬件模块。通过图像采集、识别处理和分析检测获得检测数据, 最后将数据进行现场打印或借助 GPRS 上传至远程中心服务器存储和管理。实现了图像采集、处理、检测判断和分析等一系列过程的自动化处理, 在人机交互的智能化和数据监控的可行性上有新的突破。专利《一种胶体金读卡仪》设置了 RFID 模块和网络传输模块, 其中测试卡的二维码中包含了检测物质、生产厂家、有效期和检测灵敏度等信息^[42]。专利《一种胶体金读卡仪》设置了卫星定位单元, 用于获取当前的测试位置信息和时间; 设置了测试区温湿度控制单元, 用于确保检测环境的稳定性; 设置了外部拍摄单元, 用于记录测试过程从而形成完整的证据链^[43]。郭翼^[23]提出的瘦肉精速测金标仪采用单片机-传感器模式架构, 将 CMOS 图像采集、RFID 模块识别和实时测量功能集成一体。这些附加模块功能复杂化的表现对应的是客户实际需求的不改变。

3 胶体金读数仪的应用

国内外研制成功的胶体金读数仪产品不胜枚举。从检测对象上分为针对农兽药、食品添加剂、真菌毒素、微生物和综合检测等的仪器。在微生物方面有梅剑春研制的嵌入式胶体金免疫层析试纸定量分析仪, 可用于细菌的检

测。在农兽药方面有, 美国 CHARM SCIENCES 公司生产的检测农兽药残留的 ROSA 试纸条读取仪、康健^[29]研制的农产品质量快速检测仪等。在食品添加剂方面, 有郭翼研制的瘦肉精速测金标仪和张洪才研制的盐酸克伦特罗便携式光电型传感器^[44]等。在真菌毒素方面, 有美国 Envirologix Inc 公司推出的检测黄曲霉毒素、呕吐毒素、伏马毒素和玉米赤霉烯酮的 Quick Scan System 胶体金试纸定量检测仪等。在综合检测方面, 有美国 Alexeter Technology 和 Tetrance 公司联合生产的检测生化威胁物质 BTA Test Strip Reader、北京华慧达科技有限公司研制的检测食品安全、病毒、农药残留的 KRD-100 免疫层析试纸分析仪和深圳拓能达科技有限公司研制的检测生化指标、食品安全、微生物、毒品、环境污染的 TND09-M-J 金标免疫层析试纸条分析仪。这些胶体金读数仪的研发和运用为快速检测行业提供了有力的技术支持。

另外, 胶体金读数仪还可以作为食品安全追溯系统中的重要环节。居莹^[45]研发的孔雀石绿胶体金试纸条在水产品溯源系统中建立的水产品溯源和预警平台能有效降低水产品中孔雀石绿残留的危害。将胶体金读数仪用于胶体金试剂卡的数据采集、网络传输和实时定位还能加快食品安全溯源和预警平台运行的速度, 更好地对各个溯源点进行详细的记录和控制, 并且在数据采集过程中能提供完整的证据链, 提高溯源系统的可信度。

4 结论与展望

胶体金读数仪是胶体金免疫层析技术的衍生物, 主要包括信号采集模块、信号处理模块、人机交互模块和附加模块 4 个部分。通过检测样品对胶体金试剂板上检测线与质控线的反应结果的光密度和灰度值的检测, 实现了检测样品的定量判断。随着食品安全快速检测行业的发展, 胶体金读数仪在满足实验结果的准确、快速读取的前提下, 正逐渐向智能化和功能多样化的方向发展。在追求食品安全透明化的今天, 食品安全全程可追溯是一种必然趋势, 而胶体金读数仪会是追溯系统中不可或缺的一部分。

参考文献

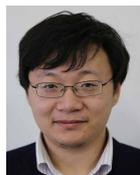
- [1] 石亚丽, 袁涛, 任婷婷, 等. 生物传感器在食品安全快速检测中的应用研究[J]. 粮食与油脂, 2012, 2: 5-9.
Shi YL, Yuan T, Ren TT, *et al.* Review on utilization of biosensor in fast detection technique of food safety [J]. J Cereal Oil, 2012, 2: 5-9.
- [2] 赵龙, 廖新艳. 食品安全快速检测技术的应用和不足[J]. 现代食品, 2016, 6(11): 62-63.
Zhao L, Liao XY. Analysis on the application and deficiency of food safety rapid detection technology [J]. Mod Food, 2016, 6(11): 62-63.
- [3] 乐涛. 多西环素残留免疫学快速检测技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
Le T. Development of immunological rapid detecting technology for doxycycline residues [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [4] 周阳. 食品中单增李斯特菌快速检测方法的建立与应用[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014.
Zhou Y. The establishment and application of *Listeria monocytogenes* rapid detection method in food [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2014.
- [5] 梁淑玉. 电化学快速检测 PAEs 方法的初步研究[D]. 株洲: 中南林业科技大学, 2012.
Liang SY. A preliminary study on the method of rapid detection of PAEs by electrochemistry [D]. Zhuzhou: Central South University of Forestry and Technology, 2012.
- [6] 蒋雪松, 王维琴, 卢利群, 等. 电化学免疫传感器快速检测农产品中的毒死蜱[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 278-283.
Jiang XS, Wang WQ, Lu LQ, *et al.* Electrochemical immunosensor for rapid detection of chlorpyrifos in agricultural products [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2014, 30(12): 278-283.
- [7] 钟伟军, 赵明秋, 邓中平, 等. 荧光定量 PCR 快速检测食品中沙门氏菌方法的建立及初步应用[J]. 中国预防兽医学报, 2008, 30(3): 220-224.
Zhong WJ, Zhao MQ, Deng ZP, *et al.* Establishment and preliminary application of real-time PCR method for detection of *Salmonella* in food [J]. Chin J Prev Vet Med, 2008, 30(3): 220-224.
- [8] 胡瑞丽, 任芳芳, 吴洋洋, 等. 基于多重 PCR 的主要食源性致病菌的快速检测[J]. 上海农业学报, 2015, 31(4): 34-39.
Hu RL, Ren FF, Wu YY, *et al.* Rapid detection of foodborne pathogenic bacteria based on multiple PCR [J]. Acta Agric Shanghai, 2015, 31(4): 34-39.
- [9] 李先富. 纳米材料再食品污染物快速检测中的应用研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2014.
Li XF. Study and application of nano-materials in the rapid detection of food contaminants [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2014.
- [10] 林晓丽, 饶辉, 熊勇华, 等. 胶体金试纸条快速检测食品中磺胺二甲噻啉残留[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 366-369.
Lin XL, Rao H, Xiong YH, *et al.* Rapid detection of sulfadimidine residue in food by colloidal gold strips [J]. Food Sci, 2010, 31(24): 366-369.
- [11] 汪霄峰. 食品安全快速检测技术现状及应用[J]. 现代食品, 2016, 3: 23-25.
Wang XF. Present situation and application of rapid detection technology of food safety [J]. Mod Food, 2016, 3: 23-25.
- [12] Beggs M, Novotny M, Sampedro S, *et al.* A self-performing chromatographic immunoassay for the qualitative determination of human chorionic gonadotrophic (HCG) in urine and serum [J]. Clin Chem, 1990, 36: 1084-1085.
- [13] Zhang JL, Guo Y, Hu SS, *et al.* An adhesion molecule-based colloidal gold immunochromatography assay strip for rapidly and specifically detecting chicken antibodies against *Mycoplasma gallisepticum* [J]. Res Vet Sci, 2011, 90(3): 379-384.
- [14] 张怀雯. 便携式免疫层析试纸检测仪的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
Zhang HW. A portable device for quantitatively detecting the immunochromatographic test strip [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014.
- [15] Chandler J, Gurmin T, Robinson N. The place of gold in rapid test [J]. IVD Technol Mag, 2000, 3.

- [16] Suhyeon K, Je-kyum P. Development of a test strip reader for a lateral flow membrane-based immunochromatographic assay [J]. *Biotechnol Bioprocess Eng*, 2006, 9(127): 131.
- [17] 黄立华, 曾爱军, 张友宝, 等. 金标免疫试纸条反射式光度计的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(3): 663-667.
Huang LH, Zeng AJ, Zhang YB, *et al.* Development of reflectance photometer for gold-labeled test strip [J]. *Chin J Sci Instrum*, 2009, 30(3): 663-667.
- [18] 王洋. 高精度金标试纸条读数仪的设计与开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Wang Y. Design and development of high sensitivity gold-immunochromatographic strips reader [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [19] 陈建国. 基于 PIC 单片机的前列腺炎快速测试仪的研制[J]. *福州大学学报*, 2006, 34(5): 699-702.
Chen JG. Development of a fast tester for prostatitis based on PIC single-chip [J]. *J Fuzhou Univ*, 2006, 34(5): 699-702.
- [20] 黄文标, 王牧云, 郑臻荣, 等. 一种胶体金免疫层析试纸条用的检测系统: 中国, 201210260993.7 [P]. 2014-12-10.
Huang WB, Wang MY, Zheng ZR, *et al.* A detection system for colloidal gold immunochromatographic test paper: CN, 201210260993.7 [P]. 2014-12-10.
- [21] 周红平. CCD 图像传感器原理[J]. *中国新技术新产品*, 2009, 20: 28-29.
Zhou HP. The principle of CCD image sensor [J]. *Chin New Technol Prod*, 2009, 20: 28-29.
- [22] 潘银松, 袁祥辉, 林聚承, 等. CMOS 数字图像传感器研究进展[J]. *重庆大学学报*, 2005, 28(9): 16-18.
Pan YS, Yuan XH, Lin JC, *et al.* Development of CMOS digital image sensor [J]. *J Chongqing Univ*, 2005, 28(9): 16-18.
- [23] 郭翼. 基于 CMOS 面阵光电检测技术的瘦肉精速测金标仪[D]. 天津: 天津大学, 2012.
Guo Y. A portable colloidal gold strip sensor for clenbuterol and ractppamine based on area array CMOS and photoelectricity testing technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [24] 程华, 王树志, 陈晨, 等. 新型胶体金免疫层析试纸条定量分析仪的研制[J]. *分析仪器*, 2013, 1: 7-11.
Cheng H, Wang SZ, Chen C, *et al.* Development of a new quantitative analyzer for colloidal gold test strips [J]. *Anal Instrum*, 2013, 1: 7-11.
- [25] 马丽萍, 吴永凯, 陈小明. 全自动胶体金检测方法: 中国, 201210132692.6 [P]. 2013-7-3.
Ma LP, Wu YK, Chen XM. Automatic method of colloidal gold detection: CN, 201210132692.6 [P]. 2013-7-3.
- [26] 汪曦, 白玉洁, 张艳超, 等. 基于 CCD 的胶体金试纸条光电检测仪器设计及实验研究[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(8): 1370-1373.
Wang Y, Bai YJ, Zhang YC, *et al.* Design and research of a photoelectrical apparatus for lateral-flow based on CCD [J]. *Chin J Sensor Actuat*, 2008, 21(8): 1370-1373.
- [27] 刘啸斌, 郭兵, 沈燕, 等. 基于 ARM 处理器的嵌入式软件能耗统计模型[J]. *电子科技大学学报*, 2012, 41(5): 770-774.
Liu XB, Guo B, Shen Y, *et al.* ARM-based embedded software statistical energy model [J]. *J Univ Electro Sci Technol China*, 2012, 41(5): 770-774.
- [28] 万宇平, 欧阳文波, 贾芳芳, 等. 基于现场可编程门阵列的胶体金读数仪[J]. *分析仪器*, 2016, 1: 9-12.
Wan YP, Ouyang WB, Jia FF, *et al.* A colloidal gold readout instrument based on FPGA [J]. *Anal Instrum*, 2016, 1: 9-12.
- [29] 康健. 基于 ARM 的农产品质量快速检测仪的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
Kang J. A research of fast detector about agricultural products quality based on ARM [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [30] 刘蕾, 周蕾, 黄立华, 等. 基于一维 CCD 的免疫层析试纸条检测系统[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(2): 246-250.
Liu L, Zhou L, Huang LH, *et al.* CCD-based detection system for immunity-chromatography test strip [J]. *Chin J Sci Instrum*, 2007, 28(2): 246-250.
- [31] 王淑杰. 基于光电检测技术的免疫 C 反应蛋白检测仪研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Wang SJ. Development of CPR detector based on photoelectric detection technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [32] 朱峰, 金尚忠. 金标试纸条的三聚氰胺定量检测仪的研制[J]. *中国计量学院学报*, 2014, 25(2): 129-133.
Zhu F, Jin SZ. Development of melamine quantitative detection instrument based on colloidal gold strip [J]. *J China Univ Metrol*, 2014, 25(2): 129-133.
- [33] 熊保平, 陈一萍. 基于图像的金免疫层析试纸条定量检测系统[J]. *福建工程学院学报*, 2010, 8(1): 94-96.
Xiong BP, Chen YP. Gold immunochromatographic assay (GICA) quantitative test system based on image [J]. *J Fujian Univ Technol*, 2010, 8(1): 94-96.
- [34] 郑宇, 王侃, 张晶晶, 等. 金标试纸条的尿素酶快速定量检测仪研制[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(10): 97-102.
Zheng Y, Wang K, Zhang JJ, *et al.* Research and fabrication of detector of urea enzymes based on rapid and quantitative test reader using immunochromatographic strips [J]. *Transducer Microsystem Technol*, 2016, 35(10): 97-102.
- [35] 孙永生. 基于机器视觉的 β 类药物残留检测系统的研究与应用[D]. 杭州: 中国计量学院, 2013.
Sun YS. Research and application of the beta drugs residue detection system based on machine vision [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2013.
- [36] 刘欣铭, 张广斌, 陈骞. LED 显示屏技术综述[J]. *黑龙江电力*, 2003, 25(4): 294-296.
Liu XM, Zhang GB, Chen Q. Summary on LED display technology [J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2003, 25(4): 294-296.
- [37] 韦胜钰. OLED 显示屏检测方法分析[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2012, 30(z1): 49-51.
Wei SY. Testing of OLED displays [J]. *Electro Prod Reliability Environ Test*, 2012, 30(z1): 49-51.
- [38] 马兰. 薄膜晶体管液晶显示屏[J]. *铁道知识*, 2012, 30(z1): 49-51.
Ma L. Thin film transistor liquid crystal display [J]. *Railway Knowledge*, 2012, 30(z1): 49-51.
- [39] 杜民, 方志成. AFP 免疫金标试纸条定量测试仪的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2001, 22(6): 626-647.
Du M, Fang ZC. A instrument for AFP immune colloidal-gold strips [J]. *Chin J Sci Instrum*, 2001, 22(6): 626-647.
- [40] 柳州. 基于 Android 的胶体金智能农残检测仪的设计与实现[D]. 武汉:

- 华中科技大学, 2014.
- Liu Z. Design and implement of Jiao Tijin intelligent instrument based on android [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014.
- [41] 杨文涛, 郑立新, 李书谦. 基于 ARM 系统的胶体金快速检测仪的实现 [J]. 自动化与仪表, 2013, 3: 13-20.
- Yang WT, Zheng LX, Li SQ. Colloidal-gold strips detecting instrument based on ARM-embedded system [J]. Automat Instrum, 2013, 3: 13-20.
- [42] 孔凡林. 一种胶体金读卡仪: 中国, 201520467899.8 [P]. 2015-7-2.
- Kong FL. A colloidal gold cards reader: CN, 201520467899.8 [P]. 2015-7-2.
- [43] 张沈平. 一种胶体金读卡仪: 中国, 201320602042.3 [P]. 2013-9-27.
- Zhang SP. A colloidal gold strips reader: CN, 201320602042.3 [P]. 2013-9-27.
- [44] 张洪才, 刘春燕, 刘国艳, 等. 基于免疫胶体金试纸条检测盐酸克伦特罗的便携式光电型传感器 [J]. 分析化学, 2012, 40(6): 852-856.
- Zhang HC, Liu CY, Liu GY, *et al.* A portable photoelectric sensor based on colloidal gold immunochromagrophic strips for rapid determination of clenbuterol in pig urine [J]. Chin J Anal Chem, 2012, 40(6): 852-856.
- [45] 居莹. 孔雀石绿、2,4-D 免疫检测技术的研究 [D]. 上海: 上海师范大学, 2013.
- Ju Y. Study on malachite green and 2,4-D immunoassay [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2013.

(责任编辑: 刘 丹)

作者简介



宋昀鹏, 工程师, 主要研究方向为水产养殖。

E-mail: 714114684@qq.com