

# 苹果内部品质分级机械手设计与试验

彭彦昆<sup>1,2</sup> 马莹<sup>1,2</sup> 李龙<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 国家农产品加工技术装备研发分中心, 北京 100083)

**摘要:** 为检测苹果内部品质, 基于可见/近红外光谱检测技术并结合分拣机械手, 设计了苹果内部品质分级机械手。该装置主要由夹持机构、近红外光谱采集系统、控制系统等组成。机械手稳定夹持苹果后采集苹果的近红外光谱数据, 上位机软件中的预测模型对光谱数据进行分析处理, 并显示光谱曲线和预测结果。为建立苹果可溶性固形物含量预测模型, 基于该装置采集了苹果在 650 ~ 1 100 nm 波长范围内的光谱数据, 通过国家标准测量法测得苹果样本的可溶性固形物含量, 采用 SG 卷积平滑 (SG-smooth)、标准正态变量变换 (SNV) 和多元散射校正 (MSC) 对光谱数据进行预处理, 并结合可溶性固形物含量测量值建立偏最小二乘 (PLSR) 模型。结果表明, 采用多元散射校正方法预处理后的建模效果最优, 其预测模型的校正集和预测集相关系数分别为 0.978 2、0.970 1, 均方根误差分别为 0.274 6、0.326 3°Brix。选取 20 个同品种苹果样本对该装置的稳定性和准确性进行了测试, 可溶性固形物含量预测值与测量值相关系数为 0.957 3, 均方根误差为 0.422 4°Brix。试验结果表明, 苹果内部品质分级机械手在夹持苹果的同时可以实现对苹果可溶性固形物含量的准确预测。

**关键词:** 苹果; 机械手; 无损检测; 光谱分析; 可溶性固形物; 可见/近红外光谱

**中图分类号:** TP241; S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0307-06

## Design and Experiment of Apple Internal Quality Sorting Manipulator

PENG Yankun<sup>1,2</sup> MA Ying<sup>1,2</sup> LI Long<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National R&D Center for Agro-processing Equipment, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of apple internal quality inspection, the apple internal quality sorting manipulator was designed based on the visible/near infrared spectroscopy detection technology and the sorting manipulator. The device consisted of three parts: clamping mechanism, near infrared spectroscopy acquisition system and control system. The manipulator clamped the apple and collected the near-infrared spectral data of the apple. The spectral data was analyzed by the predictive model in the upper computer software, and the spectral curve and predicted result were displayed. Based on this device, the visible and near-infrared reflection spectra of apple in the range of 650 ~ 1 100 nm were collected. Totally 200 apples were used for the experiment, including 150 apples in the prediction set and 50 apples in the verification set. The soluble solids content of the apples was measured by temperature-compensated refractometer after the collection of spectral information. The collected spectra were pretreated by Savitzky - Golay smooth (SG-smooth), standard normal variable transformation (SNV) and multiplication scattering correction (MSC). The partial least-squares prediction model of the apple's SSC was established with spectral data as independent variable and soluble solids as dependent variable. The prediction result that preprocessed with the multi-scattering correction (MSC) method was the best. The correlation coefficients of the calibration set and the verification set of the prediction model were 0.978 2 and 0.970 1, respectively, and the root mean square errors were 0.274 6°Brix and 0.326 3°Brix, respectively. Finally, the accuracy of models was tested. The reflect spectra of 20 samples were collected, and then the real values of these samples' SSC were measured. The prediction model could give satisfactory results with the correlation coefficient of 0.957 3 and the root mean square error of prediction of 0.422 4°Brix. The results indicated that this device can satisfy the requirements of apple

收稿日期: 2018-07-24 修回日期: 2018-08-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400905-5)

作者简介: 彭彦昆(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农畜产品无损检测技术与装置设计研究, E-mail: ypeng@cau.edu.cn

internal quality detection with high accuracy and good performance.

**Key words:** apple; manipulator; nondestructive detection; spectrum analysis; soluble solids; visible/near infrared spectroscopy

## 0 引言

苹果是我国重要的经济作物,栽培面积广,总产量居世界前列<sup>[1]</sup>。苹果具有营养价值高、生态适应性强、耐性好和供应周期长等优点,深受消费者欢迎,成为我国国民膳食结构中的重要组成部分<sup>[2]</sup>。我国苹果的采后商品化处理能力仅为其总产量的15%,与发达国家相比存在较大差距<sup>[3]</sup>,是制约我国苹果产业发展的因素之一。

对苹果的品质进行检测并分级,可以提高苹果商品化处理能力,提高商品市场竞争力。目前在线检测装置的分选执行机构大多采用料斗/果盘翻转,使被测物体落下,或者采用挡板使不同级别的被测物滚落至不同区域<sup>[4-8]</sup>,这样的分选机构机械结构复杂,自由度较低,运行不够灵活。利用机械手对水果进行分选,可以实现更为灵活的分选操作。BLASCO等<sup>[9]</sup>利用气吸式机械手吸附水果转动,基于机器视觉技术采集水果不同角度的图像,并根据水果表面缺陷对水果进行评价及分选;ISHII等<sup>[10]</sup>研制的果实分选机器人系统利用图像处理技术对水果进行检测分级,由吸盘机械手执行分选操作。以上研究只是根据水果的外部品质由机械手执行分选操作,但内部品质也是水果评价的重要指标。近红外光谱技术能够无损、高效、快速地对水果的内部品质进行预测<sup>[11]</sup>,能够满足现场检测和在线分析的要求,已在提高水果生产自动化水平方面发挥了重要作用<sup>[12-15]</sup>。近红外光谱仪的小型化和便携化为近红外无损检测技术应用到不同生产领域提供了可能性<sup>[16-19]</sup>。

本文将近红外无损检测技术与分拣机械手相结合,设计苹果内部品质分级机械手,在夹持的同时采集苹果近红外光谱信息,并对其内部品质进行预测,为设计水果内部品质在线检测装置提供思路。

## 1 机械手设计

### 1.1 结构组成及工作原理

苹果内部品质分级机械手主要由夹持机构、近红外光谱采集系统、控制系统3部分组成,图1为装置示意图。夹持机构完成抓取苹果和释放苹果的动作,近红外光谱采集系统完成近红外光谱信息采集,控制系统在苹果夹持和光谱信息采集中起到连接动作和控制过程的作用。

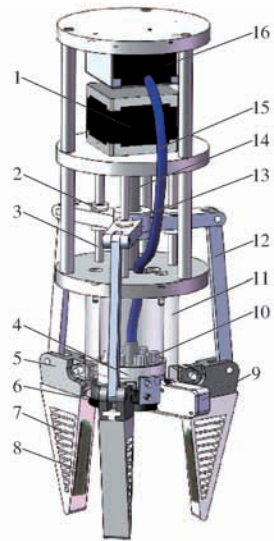


图1 装置硬件示意图

Fig. 1 Schematic of device hardware

1. 步进电机 2. 直线轴承 3. 滑轨 4. 反光灯杯 5. 手指安装座 6. 遮光胶垫 7. 软胶手指 8. FSR408型膜片式压力传感器 9. 微动开关 10. 卤钨灯珠 11. 安装套筒 12. 连杆 13. 丝杠螺母 14. 丝杠 15. 光纤 16. STS-NIR型光谱仪

装置工作流程如图2所示,机械手自上而下接近在水平面上放置的苹果,当近红外光谱采集系统的遮光胶垫贴在苹果表面时,微动开关被触发,步进电机驱动夹持机构工作,带动软胶手指夹持苹果。为防止伤害苹果,软胶手指内侧设有膜片式压力传感器,当夹持力达到膜片式压力传感器设定阈值时,步进电机停止转动,手指停止增大夹持苹果的夹持力。遮光胶垫贴在苹果表面后形成圆形光谱采集区域,来自光源的光经苹果表面反射增大后被光纤接收并由光谱仪采集光谱信息。微动开关触发的同时单片机向上位机发送信号,光谱仪采集近红外光谱信息。上位机软件根据内置的苹果可溶性固形物含

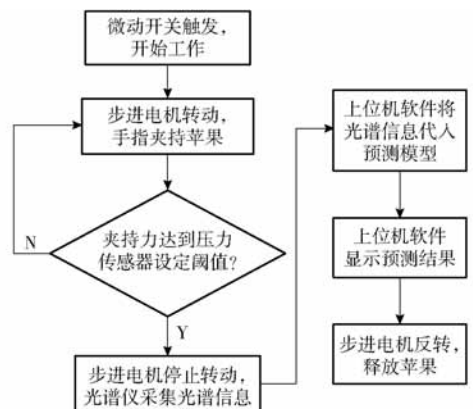


图2 装置工作流程图

Fig. 2 Working flow chart of device

量预测模型对光谱信息进行分析,并实时显示预测结果。

## 1.2 夹持机构

夹持机构由步进电机提供驱动力,丝杠机构将步进电机的旋转运动转换为直线运动。丝杠螺母与 3 个手指通过连杆连接,由步进电机驱动在丝杠上作往复运动,从而带动 3 个手指张合。通过控制步进电机的旋转角控制手指的张合角,实现苹果夹持和释放。

为避免手指在夹持过程中对苹果造成伤害,手指选用柔软的软胶材料,采用 3D 打印技术制作,可以适应不同大小和不同形状的苹果。为了提高手指的夹持性能,手指的结构选用 Fin Ray 结构<sup>[20]</sup>,如图 3a 所示。该结构采用仿生鱼鳍原理设计,当向该结构施加压力时,其不会沿着推力方向弯曲,而是向着推力的反方向弯曲而包裹住施力物体。该结构适用于机械手夹持不同形状的物体,结构简单紧凑,有良好的夹持性能<sup>[21]</sup>,夹持效果如图 3b 所示。

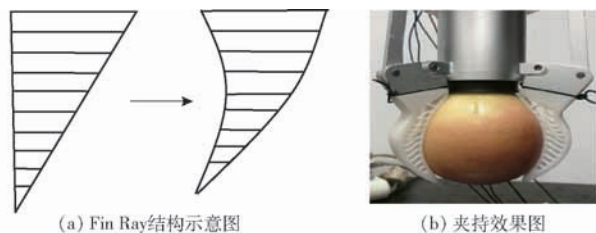


图 3 手指结构图

Fig. 3 Schematics of fingers

灵敏的夹持力控制也是避免对被夹持物造成伤害的重要因素。选用 FSR408 型膜片式压力传感器作为手指接触力检测元件。当接触压力达到所设定的阈值时,信号转换模块输出一个高电平信号,步进电机停止转动,夹持机构停止增大夹持力。

## 1.3 近红外光谱采集系统

近红外光谱采集系统主要由光谱仪、光源、光纤组成。

机械手空间有限,为使结构更为紧凑,光谱仪体积应尽可能小。根据这一要求选择海洋光学 STS-NIR 型光谱仪,其尺寸为 40 mm × 42 mm × 24 mm,质量 68 g,光学分辨率为 0.5 nm,波长范围为 650 ~ 1 100 nm。评判水果内部品质指标的近红外光谱集中在 700 ~ 900 nm 之间<sup>[22]</sup>,此光谱仪可以满足对果蔬内部品质的预测。考虑到装置的空间布局,采用反射光测量,光源发出的光由被测物反射后经光纤传递进入光谱仪,完成光谱信息采集。

光源主要由遮光胶垫、卤钨灯珠、反光灯杯组成。遮光胶垫的材质为橡胶,可以根据样品的形状贴合在样品表面,防止光的溢出,降低由样品外形差

异带来的误差。考虑到空间和发热问题,选择 6 个 2 W 小卤钨灯珠组成环形光源。

## 1.4 控制系统

控制系统在苹果夹持和光谱信息采集中起到连接动作和控制过程的作用,主要由计算机、STC89C52 单片机、FSR408 型膜片式压力传感器、信号转换模块、步进电机以及步进电机驱动器组成,其示意图如图 4 所示。当苹果接触遮光胶垫使微动开关闭合后,单片机向步进电机驱动器发送信号,步进电机转动,手指开始夹持苹果。当夹持力达到压力传感器设定阈值时,单片机将步进电机驱动器的使能端置为低电平,步进电机停止运行,保持夹持状态。同时通过串口向上位机发送信号。上位机软件控制光谱仪采集光谱信息,并将光谱信息输入预测模型计算预测结果,上位机软件界面显示光谱图像及检测结果,如图 5 所示。



图 4 控制系统示意图

Fig. 4 Schematic of control system

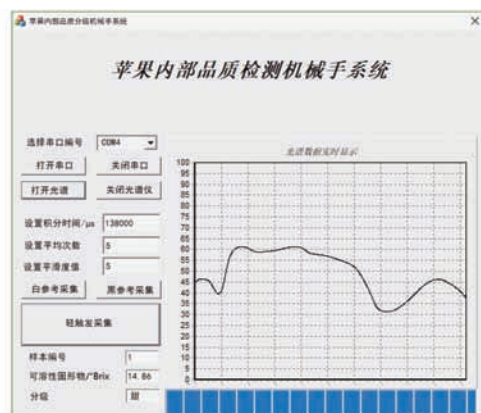


图 5 上位机软件界面图

Fig. 5 Host computer software interface

## 2 苹果可溶性固形物含量预测模型的建立

### 2.1 试验材料

试验材料为烟台红富士苹果,购于北京市某超市。挑选没有损伤和缺陷的样本共 200 个,运到实验室后进行清洗、编号,放置于冰箱内。试验前置于室温 24 h,使苹果样品温度与环境温度一致,避免温度等因素对试验结果产生影响<sup>[23]</sup>。

### 2.2 光谱信息采集

打开光源及光谱仪,预热 20 min 使设备达到稳定工作状态,打开上位机软件对检测参数进行设置,包括积分时间、平均次数、平滑度等。为保证所建预



测模型更好地适应实际工作环境,在机械手末端执行器夹持苹果的过程中进行光谱信息采集。分别采用标准白板和标准黑板贴在遮光胶垫上校正光谱仪后,进行样本光谱采集,每个苹果样本采集4次光谱,采集位置为苹果赤道带附近,每采集一次旋转90°,取4次光谱的平均值作为该样本的光谱信息。

### 2.3 标准理化值的测定

采集完光谱信息后,参照文献[24],采用 RA-620 型数字阿贝折射仪立即对苹果的可溶性固形物含量进行测量。每个样本从测量点切去一定厚度的果肉,用手持式榨汁机榨取果汁,将果汁滴于折光仪镜面,读取并记录可溶性固形物含量,测量结果如表1所示。

表1 苹果可溶性固形物含量统计

Tab.1 Statistics of apple's SSC

样本组	数量/个	可溶性固形物含量/°Brix			
		最小值	最大值	平均值	标准差
校正集	150	9.71	16.17	12.83	1.052
预测集	50	10.42	15.94	12.84	1.032

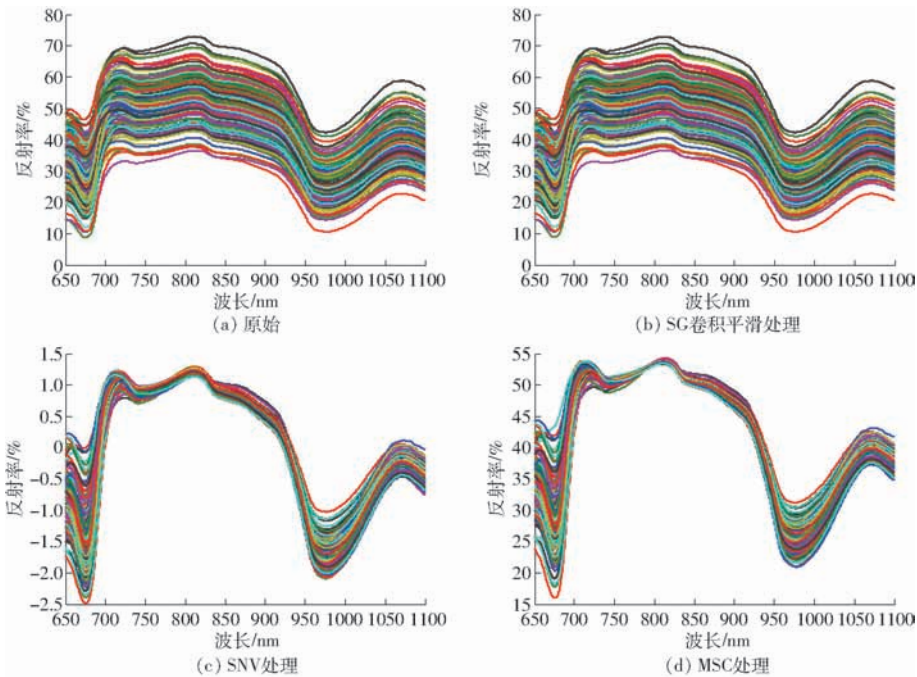


图6 200个苹果样本反射光谱曲线

Fig.6 Reflectance spectra of 200 apple samples

本间散射所导致的基线平移和偏移现象。经过预处理之后的光谱曲线如图6b~6d所示。

### 2.4.2 苹果可溶性固形物含量预测模型

以经过预处理之后的光谱数据和按国家标准测量法所测得的可溶性固形物含量理化值作为自变量和因变量,采用偏最小二乘回归法(Partial least squares regression, PLSR)建立回归模型。将样品按3:1的比例随机分为校正集与验证集。用校正集相

## 2.4 建模结果与分析

### 2.4.1 光谱预处理

200个苹果样本的原始反射光谱曲线如图6所示,选取650~1100nm波长下的光谱数据进行预处理和建模。本装置检测苹果的内部品质是基于反射光谱,选择苹果样本光谱的反射率作为光谱信息的研究参数,反射率计算公式<sup>[25]</sup>为

$$R = \frac{I_s - I_b}{I_w - I_b} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $R$ ——苹果样本的反射率

$I_s$ ——苹果所反射的光谱强度

$I_w$ ——标准白板反射的光谱强度

$I_b$ ——标准黑板所反射的光谱强度

原始光谱曲线如图6a所示。选用5点SG卷积平滑(Savitzky-Golay smooth, SG-smooth)的预处理方式降低光谱采集过程中随机白噪声的干扰,选用标准正态变换(Standard normal variable transformation, SNV)和多元散射校正(Multiplicative scattering correction, MSC)预处理方式可以消除样

关系数  $R_c$ 、预测集相关系数  $R_p$ 、校正集均方根误差  $R_{MSEC}$  和预测集均方根误差  $R_{MSEP}$  评定建模效果,相关系数越高,均方根误差越低,所建立的预测模型越稳定。建模结果如表2所示,采用多元散射校正预处理方法所得苹果可溶性固形物含量建模效果最优。

## 3 试验验证

选取20个苹果样本对机械手进行外部验证,以

表 2 不同预处理后的建模结果

Tab. 2 Modeling result with different pretreatments

预处理方法	因子数	$R_c$	$R_{MSEC}/$ $^{\circ}\text{Brix}$	$R_p$	$R_{MSEP}/$ $^{\circ}\text{Brix}$
无	8	0.902 4	0.524 6	0.897 2	0.627 5
SG-smooth	9	0.915 6	0.438 5	0.902 7	0.543 9
SNV	9	0.952 2	0.324 8	0.947 7	0.342 9
MSC	9	0.978 2	0.274 6	0.970 1	0.326 3

检验可溶性固形物含量预测模型的稳定性和准确性。预热至光源稳定后,用机械手末端执行器夹持苹果并采集光谱数据。随即用标准测量法检测苹果可溶性固形物含量的真实值,通过对比预测值与真实值,分析装置的检测性能。预测效果如图 7 所示,苹果可溶性固形物含量预测模型的相关系数为 0.957 3,均方根误差为 0.422 4 $^{\circ}\text{Brix}$ 。

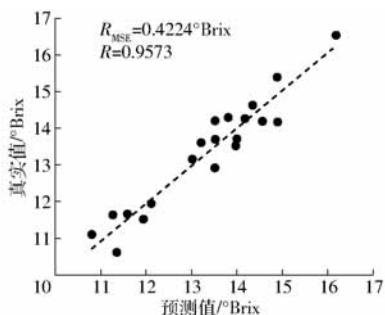


图 7 苹果可溶性固形物含量预测模型预测效果

Fig. 7 Prediction results of apple soluble solids model

## 4 结论

(1)设计了一种苹果内部品质分级机械手,主要由夹持机构、近红外光谱采集系统、控制系统等组成,分别完成夹持苹果、采集苹果光谱信息和控制动作的任务。

(2)基于所设计的苹果内部品质分级机械手,采集苹果在 650~1 100 nm 波长范围内的可见/近红外反射光谱。采用 SG 卷积平滑、标准正态变量变换和多元散射校正对原始光谱曲线进行预处理,建立苹果可溶性固形物含量预测模型。不同预处理方法建模结果表明,采用多元散射校正方法预处理后的建模效果最优,其预测模型的校正集和预测集相关系数分别为 0.978 2、0.970 1,均方根误差分别为 0.274 6、0.326 3 $^{\circ}\text{Brix}$ 。

(3)对苹果内部品质分级机械手预测模型的稳定性和准确性进行测试。结果显示,可溶性固形物含量预测值与测量值相关系数为 0.957 3,均方根误差为 0.422 4 $^{\circ}\text{Brix}$ 。

(4)该苹果内部品质分级机械手将近红外无损检测技术与分拣机械手相结合,可以实现苹果可溶性固形物含量的预测,预测精度和稳定性较好,在机械手夹持苹果的同时可对苹果的内部品质进行预测。

## 参 考 文 献

- [1] 赵德英,袁继存,徐锴,等. 近 10 年来国内外苹果产销分析[J]. 中国果树,2016(3):87-93.  
ZHAO Deying, YUAN Jicun, XU Kai, et al. Apple production and sales analysis at home and abroad in the past 10 years[J]. China Fruits, 2016(3):87-93. (in Chinese)
- [2] 陈学森,韩明玉,苏桂林,等. 当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见[J]. 果树学报,2010,27(4):598-604.  
CHEN Xuesen, HAN Mingyu, SU Guilin, et al. Discussion on today's world apple industry trends and the suggestions on sustainable and efficient development of apple industry in China[J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(4):598-604. (in Chinese)
- [3] 宋哲,王宏,里程辉,等. 我国苹果产业存在的主要问题、发展趋势及解决办法[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):4-8.  
SONG Zhe, WANG Hong, LI Chenghui, et al. The main problems, development trends and solutions of apple industry in China[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016,44(9):4-8. (in Chinese)
- [4] 白小凯. 苹果霉心病在线检测分选试验平台设计与实现[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.  
BAI Xiaokai. Design and implementation of sorting test platform for online detection of moldy core in apples[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [5] 李龙,彭彦昆,李永玉. 苹果内外品质在线无损检测分级系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(9):267-275.  
LI Long, PENG Yankun, LI Yongyu. Design and experiment on grading system for online non-destructive detection of internal and external quality of apple[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(9):267-275. (in Chinese)
- [6] 满尊. 鲜枣品质在线光谱无损检测与分选系统研究[D]. 太谷:山西农业大学,2016.  
MAN Zun. The study of on-line nondestructive detecting and sorting system of the quality of fresh jujube based on near infrared spectroscopy[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [7] SOFU M M, ER O, KAYACAN M C. Design of an automatic apple sorting system using machine vision[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 127(C):395-405.
- [8] BANEH N M, NAVID H, KAFASHAN J. Mechatronic components in apple sorting machines with computer vision[J]. Journal of Food Measurement & Characterization, 2018(2):1-21.

- [9] BLASCO J, ALEIXOS N, MOLTÓ E. Machine vision system for automatic quality grading of fruit[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 85(4):415–423.
- [10] ISHII T, TOITA H, KONDO N, et al. Deciduous fruit grading robot (part 1): development of fruit providing and grading robots[J]. *Journal of JSAM*, 2003, 65:163–172.
- [11] 宋雪健, 王洪江, 张东杰, 等. 基于近红外光谱技术的水果品质检测研究进展[J]. *无损检测*, 2017, 39(10):71–75. SONG Xuejian, WANG Hongjiang, ZHANG Dongjie, et al. Research progress of fruit quality detection based on near infrared spectroscopy[J]. *Nondestructive Testing*, 2017, 39(10):71–75. (in Chinese)
- [12] 潘圆媛, 刘燕德, 孙旭东. 水果内部品质近红外动态在线检测研究进展[J]. *激光与红外*, 2010, 40(8):805–810. PAN Yuanyuan, LIU Yande, SUN Xudong. Research progress of on-line detection of fruit quality using near infrared spectroscopy[J]. *Laser and Infrared*, 2010, 40(8):805–810. (in Chinese)
- [13] 苏东林, 李高阳, 何建新, 等. 近红外光谱分析技术在我国大宗水果品质无损检测中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(6):460–464. SU Donglin, LI Gaoyang, HE Jianxin, et al. Progress in application of near infrared spectroscopy to nondestructive detection of big yield fruit[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(6):460–464. (in Chinese)
- [14] 孙旭东, 龚志远, 蔡丽君, 等. 水果糖度近红外光谱在线检测装置[J]. *中国农机化学报*, 2012, 33(2):116–120. SUN Xudong, GONG Zhiyuan, CAI Lijun, et al. Device and method of infrared thermography in surface quality detection of apples[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2012, 33(2):116–120. (in Chinese)
- [15] 王凡, 李永玉, 彭彦昆, 等. 便携式番茄多品质参数可见/近红外检测装置研发[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19):295–300. WANG Fan, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Development of portable device for simultaneous detection on multi-quality attributes of tomato by visible and near-infrared[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(19):295–300. (in Chinese)
- [16] 王转卫, 迟茜, 郭文川, 等. 基于近红外光谱技术的发育后期苹果内部品质检测[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(5):348–354. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180541&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180541&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.041. WANG Zhuanwei, CHI Qian, GUO Wenchuan, et al. Internal quality detection of apples during late developmental period based on near-infrared spectral technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5):348–354. (in Chinese)
- [17] 刘燕德, 周延睿. 便携式近红外水果内部品质检测仪原理及应用进展[J]. *中国农机化学报*, 2013, 34(4):204–209. LIU Yande, ZHOU Yanrui. Principle and application of nondestructive evaluation for fruit internal quality using portable near-infrared spectrometry[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(4):204–209. (in Chinese)
- [18] 宫元娟, 裴军强, 李宏博, 等. 便携式苹果品质快速无损检测系统设计[J]. *沈阳农业大学学报*, 2017, 48(2):238–243. GONG Yuanjuan, PEI Junqiang, LI Hongbo, et al. Design of portable quickly nondestructive detection system apple quality[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, 48(2):238–243. (in Chinese)
- [19] 邹建军, 陈通, 孙武坚, 等. 微型近红外光谱仪检测水果可溶性固形物[J]. *分析仪器*, 2016(1):71–76. ZHI Jianjun, CHEN Tong, SUN Wujian, et al. Detection of the soluble solids content(SSC) in fruit using miniature NIR spectrometry[J]. *Analytical Instrumentation*, 2016(1):71–76. (in Chinese)
- [20] CROOKS W, VUKASIN G, O'SULLIVAN M, et al. Fin Ray effect inspired soft robotic gripper: from the RoboSoft Grand challenge toward optimization[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2016, 70(3):1–9.
- [21] GANDARIAS J M, GÓMEZDEGABRIEL J M, GARCÍACEREZO A J. Enhancing perception with tactile object recognition in adaptive grippers for human-robot interaction[J]. *Sensors*, 2018, 18(3):692.
- [22] XIAO B Z, JIEWEN Z, POVEY M J, et al. Variables selection methods in near-infrared spectroscopy[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 667(1–2):14–32.
- [23] 戚淑叶. 可见/近红外光谱检测水果品质时影响因素的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016. QI Shuye. Research of influence factors on determination of fruit quality by visible and near infrared spectroscopy[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [24] GB12295—1990 水果、蔬菜制品可溶性固形物含量的测定——折射仪法[S]. 1990.
- [25] 赵杰文, 孙永海. 现代食品检测技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008.