

# 基于包装材料数字图像的 RGB 颜色空间色差 评价方法研究

吴桂兵<sup>1</sup>, 丁碧军<sup>1</sup>, 程晓地<sup>1</sup>, 张钦<sup>1</sup>, 陈阳<sup>1</sup>, 陈焜<sup>1</sup>, 罗红兵<sup>1\*</sup>, 王岩<sup>2</sup>

(1.湖北中烟工业有限责任公司 红安卷烟厂, 湖北 红安 438400;

2.河南中心线电子科技有限公司, 郑州 450000)

**摘要:** **目的** 解决包装材料复杂颜色区域色差评价, 目测检验方法存在判定标准复杂、结果一致性差等问题。**方法** 提出一种基于包装材料高清数字图像的 RGB 颜色空间色差评价方法。通过搭建高清数字图像采集装置, 获取包装材料标准样(上限、中限、下限)的全幅数字图像。通过采用 RGB 颜色空间降维的方法, 对标准样测试区域的颜色空间进行离散边界拟合, 构建标准样品测试区域的三限样 RGB 色差模型, 与测试样对应测试区域的颜色空间进行对比; 根据颜色空间模型的一致性判定测试样色差是否合格。**结果** 对比多种离散边界拟合模型, 采用滚球法边缘拟合模型的包含率和多出率分别达到 100%、78.9%, 模型拟合效果最佳。通过对包装材料色差缺陷样验证测试, 采用上述色差评价方法准确率达到 100%。**结论** 本文提出的滚球法颜色空间边缘拟合模型和色差评价方法, 可实现对包装材料复杂颜色区域的色差合格性判定, 有利于提高企业生产的智能化检测水平。

**关键词:** 包装材料; 数字图像; RGB 颜色空间; 三限样 RGB 色差模型; 离散边界拟合; 色差评价

中图分类号: TB484.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)15-0169-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.15.019

## Color Difference Evaluation Method of RGB Color Space Based on Digital Images of Packaging Materials

WU Guibing<sup>1</sup>, DING Bijun<sup>1</sup>, CHENG Xiaodi<sup>1</sup>, ZHANG Qin<sup>1</sup>,  
CHEN Yang<sup>1</sup>, CHEN Tian<sup>1</sup>, LUO Hongbing<sup>1\*</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>

(1. Hong'an Cigarette Factory, Hubei China Tobacco Industry Co., Ltd., Hubei Hong'an 438400, China;

2. Henan Central Line Electronic Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the problems of color difference evaluation of complex color areas of packaging materials, complex criteria and poor consistency of results in visual inspection methods. In this paper, an RGB color space color difference evaluation method based on high-precision digital images of packaging materials was proposed. By setting up a high-precision digital image acquisition device, the full digital image of the standard sample of packaging materials (upper limit, middle limit and lower limit) was obtained. By using the method of RGB color space dimensionality reduction, the color space of the test area of the standard sample was fitted with discrete boundary, and the three-limit sample RGB color difference model of the test area of the standard sample was constructed, and the color space of the corresponding test area of the test sample was compared. The color difference qualification of the test sample was judged according to the consistency of the color space model. Compared with various discrete boundary fitting

收稿日期: 2024-03-19

基金项目: 湖北中烟工业有限责任公司科研项目(2023JSJC3HA2C052)

\*通信作者

models, the inclusion rate and excess rate of the rolling ball method edge fitting model reached 100% and 78.9%, respectively, and the model fitting effect was the best. Through the verification test of color difference defect samples of packaging materials, the accuracy of the above color difference evaluation method reached 100%. The rolling sphere color space edge fitting model and color difference evaluation method proposed in this paper can realize the color difference qualification judgment of complex color areas of packaging materials, which is conducive to improving the intelligent detection level of enterprise production.

**KEY WORDS:** packaging materials; digital image; RGB color space; three-limit sample RGB color difference model; discrete boundary fitting; color difference evaluation

卷烟包装外观质量是卷烟产品质量的重要内容,外观包装的优劣直接影响消费者吸食卷烟的感受,其质量状况对品牌发展具有重要影响。为保证进入市场环节产品的质量,卷烟制造企业在生产过程中设置多层次的质量检验,其中包含烟卷包装条与盒的色差及外观质量检验<sup>[1-2]</sup>。其中,包装材料色差指由于印刷材料和印刷工艺差异等原因,使得印刷品与原稿之间在色彩领域形成的色彩差异;为满足产品发展的需要,卷烟企业对卷烟条(盒)印刷的材料质量及印刷工艺要求也在不断的提高,转移类卡纸和复合类卡纸材料及烫印工艺等技术生产的卷烟条与盒包装纸印刷品越来越多。若采用传统的人工感官检验,存在判定标准复杂、结果一致性差等问题,亟须通过探索研究为质量检测业务数字化提供借鉴的方法和路径<sup>[3]</sup>。

现阶段卷烟加工企业针对卷烟包装色差主要采用主观目测法和色度法,主观目测法是在特定光源(D65)条件下检验员人为地对比卷烟包装标准样和测试样,依据检验员的视觉来评价包装之间的颜色差异和外观缺陷,对不同批次包装材料的色差和外观缺陷进行定性地评估<sup>[4]</sup>。色度检测法主要使用的检测装置是分光光度色差仪。分光光度色差仪主要是针对颜色上面可见光谱的每个波长光的反射率来进行测量<sup>[5]</sup>。但这些技术存在着受主观影响、检测条件苛刻、时效性差不足、无法溯源等问题。

在行业需求和技术发展迅猛的情况下,利用机器视觉技术来逐渐替代传统的印品质量检测方法,是未来印刷行业检测的发展趋势。近年来,机器视觉检测技术已在印钞、PCB、标签、软包装等行业有了较为深入的应用<sup>[6-9]</sup>。李超等<sup>[10]</sup>开发了一种基于机器视觉识别的色差检测装置,使用该装置对高光性镭射商标纸色差进行检测,提高了测量效率及精度;钟宇等<sup>[11]</sup>基于计算机视觉和机器学习建立了一种真伪卷烟包装鉴别模型,利用计算机视觉对卷烟包装进行图像处理 and 特征向量提取,分别以相似性度量模型、机器学习模型对特征向量进行分类并判定卷烟真伪。最终检测准确率达到 98.53%。李郇等<sup>[12]</sup>提出了一种基于卷烟小盒内部粘胶痕迹形态差异的卷烟真伪鉴别方法。基于深度学习异常检测方法并对 1 294 个待测样本进行鉴别。结果表明,当使用测试集样本的最大预测概

率平均值作为阈值时,所有模型均具备一定的真伪识别能力。高春芳等<sup>[13]</sup>设计一种卷烟包装质量在线检测系统,检测系统采用机器视觉检测技术,对烟包内的内衬纸、内框纸以及烟包外观存在的缺陷进行检测,能有效识别烟支、内框纸、内衬纸和烟包外表面存在的缺陷,缺陷识别剔除率达 99%以上。张翼鹏等<sup>[14]</sup>采集卷烟产品包装材料的近红外光谱图,结合 Gram-Schmidt 正交化方法,建立色差分析模型,用于计算待测样品与参考样品的相似度,作为评估待测样品与参考样品是否存在色差的依据。

本文针对当前包装材料色差检测方法中实物标准样无法长期保存、色差检测无法标准化、数字化等问题,提出一套基于包装材料数字图像的 RGB 颜色空间色差评价方法,实现卷烟包装材料色差检验的数字化与智能化。本文的研究与应用将为实现卷烟包装材料质量全面数字化检测提供理论支撑,具有重要的行业应用推广价值。

## 1 实验

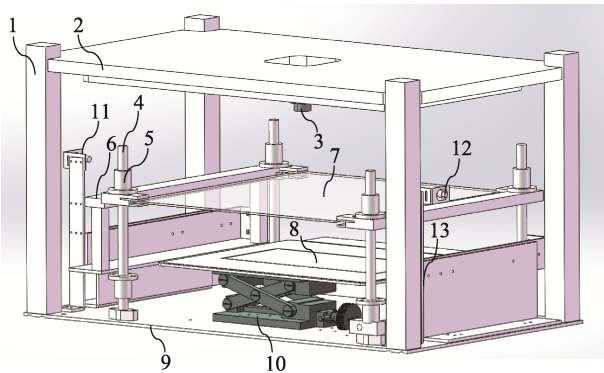
### 1.1 材料

包装材料来自于湖北中烟卷烟加工企业,包装材料类型包括红金龙-蓝底、红金龙、红金龙-小盒、黄鹤楼。每种包装材料包括标准样(上限、中限和下限)、测试样。中限标样是设计人员设计出最想要的效果;上限标样和下限标样是定标人员经过反复打样确认,为生产所能接受的极限色差。包装材料均保存在 25 °C 环境温度的恒温恒湿箱内,以降低外界因素对图像数据的影响。

### 1.2 图像采集系统

为了保证图像采集的精度和稳定性,本文设计了包装材料数字化检测仪 CPT2200,可实现卷烟小盒包装、条盒包装的自动检测。该系统有效解决了现有卷烟包装色差人工检测费时费力、标准不统一、检测准确率较差、无法获取精准数字图像的问题,实现了卷烟包装材料色差的定量分析,仪器内部结构如图 1 所示。包装材料数字化检测仪有如下特点:实现烟盒包装材料的自动无损检测;适用于各规格烟盒的色差检

测(小盒、条盒及包装盒);平台式非接触式设计,获取图像时,不需要翻转,也不会与玻璃碰触而损坏样本或刮损玻璃面,操作流程简单;采用节能稳定的三波长光源,提供稳定的光源条件,亦不需要特别的维护,品质不会因长时间的扫描而损耗,保证了每次取图的图像品质;高分辨率彩色线型 CCD,能清晰撷取实物外形及细致的特征,精准呈现实物原貌,借以代替实物的观察。



1.立柱;2.线光源;3.线阵相机;4.硬轴;5.直线轴承;6.相机焦距基准;7.高透光学玻璃;8.包装材料载物台;9.底板;10.电动升降台;11.传感器发射端;12.传感器接收端;13.传感器支架。

图 1 图像采集设备  
Fig.1 Image acquisition equipment

包装材料数字图像采集流程如下:

1) 样品放置。将待采集的包装材料精确放置于包装材料载物台的指定位置。包装材料模板与测试样品处于完全相同的采集环境,以减少环境因素对图像质量的影响。

2) 样品压合。通过传感器触发,电动升降台将上升至预设的高透光学玻璃处的传感器极限上限位。这一步骤确保包装材料被高透光学玻璃完全压合,从而避免因包装材料部分翘起而导致在采集数字图像时出现不必要的亮斑或阴影。

3) 图像采集。线光源与线阵相机组合工作,沿着包装材料载物台的最右边开始,匀速运动至最左边。在此过程中,相机将捕获包装材料的详细图像信息,完成数字图像的采集。

4) 样品更换。待数字图像采集完毕后,电动升降台将下降至传感器极限下限位,此时操作人员可安全取出已采集的包装材料,并进行下一轮样品的更换。

常规材质和光柱材质包装材料的数字图像见图 2 和图 3。

### 1.3 三限样 RGB 色差模型

在卷烟加工行业中,颜色一致性是评估产品质量的重要指标之一。为了量化评估卷烟表面颜色的差异,基于湖北中烟卷烟加工企业提供的标准样(上限、中限和下限),本文开发了一种新型的 RGB 颜色空间

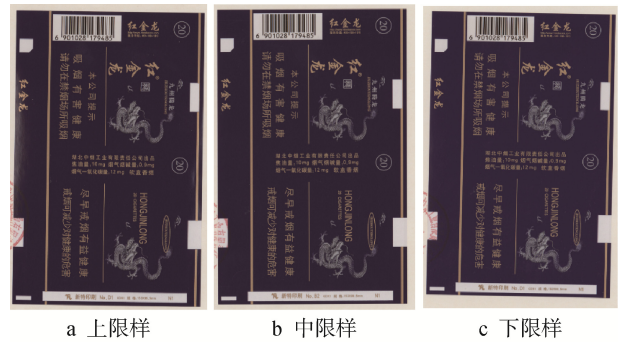


图 2 红金龙-蓝底三限样  
Fig.2 Three-limit samples of Red Golden Dragon with blue background

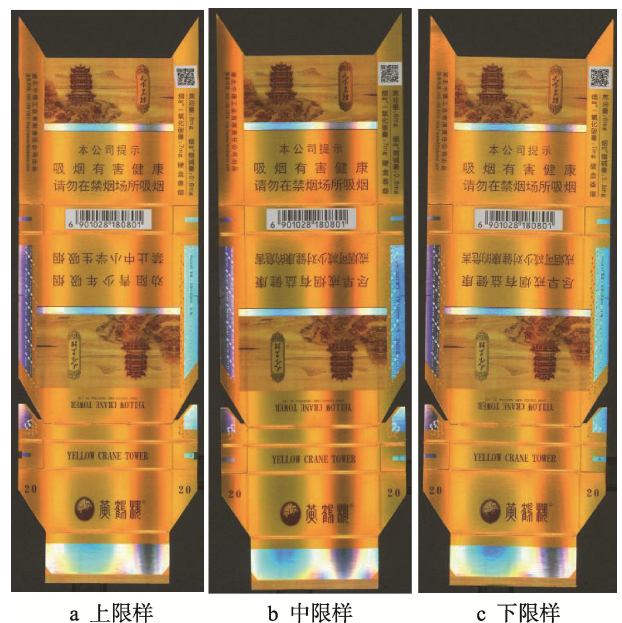


图 3 黄鹤楼三限样  
Fig.3 Three-limit sample of Yellow Crane Tower

色差评价方法,即三限样 RGB 色差模型,具体方法如下。

标准三限样应具有相同的区域特征,以便进行后续的 RGB 值提取。在选定的区域内,分别提取上限、中限和下限的 RGB 值。RGB 值代表了红、绿、蓝 3 种颜色的强度,是描述颜色的基础参数。将提取的 RGB<sub>上</sub>、RGB<sub>中</sub>和 RGB<sub>下</sub>的三维点导入到 RGB 三维空间象限中。这些点按照上限、中限和下限的顺序排列,构成一个连续闭合的三维空间模型。该模型可以视为一个三维的颜色范围空间。当测试样品的 RGB 值位于该三维空间模型内时,认为测试样品与标准样在颜色上无显著差异,即无色差。反之,若测试样品的 RGB 值超出该模型范围,则判断存在色差。进一步地,根据测试样品在三维空间模型内的分布情况,可以进一步分析测试样品是否超出上限或下限。三限样 RGB 色差模型为卷烟加工行业提供了一种有效的颜色差异评估方法。通过构建基于 RGB 颜色空

间的三维模型,可以直观地展示颜色范围,并准确判断测试样品与标准样之间的色差情况。

### 1.3.1 色差模型降维拟合

在处理复杂的三维空间模型时,特别是在面对标准三限样构成的三维 RGB 色差模型时,直接进行三维拟合往往面临极大的挑战。同时,分析三维点在三维空间模型中的分布情况更是一项复杂而精细的任务。为了简化这一过程,本文提出了一种基于 RGB 数据整数特性的降维处理方法,以 B 象限为参考系,将三维 RGB 色差模型拟合转换为二维模型拟合。具体流程如下。

1) 数据排序。以 B 象限为基准参考系,从 RGB<sub>上</sub>、RGB<sub>中</sub>和 RGB<sub>下</sub>三维数据中读取所有 B 值,并将其存储在列表 B\_list 中。随后,对 B\_list 内的 n 个数据进行排序,确保它们按照从大到小的顺序排列。

2) 基于 B 值的降维与二维拟合。以 B<sub>0</sub> 为例,在 RGB<sub>上</sub>、RGB<sub>中</sub>和 RGB<sub>下</sub>三维数据中查找所有 B 值为 B<sub>0</sub> 的三维点。接着,对这些三维点进行降维处理,通过去除 B 值,将其转化为 RG 二维数据。随后,

利用统计方法和数值分析工具,对 RG 二维数据进行二维区域拟合。

3) 离散边界拟合模型的评估与选择。在二维拟合过程中,包含率和多出率是 2 个关键的指标。包含率衡量的是所拟合的区域是否能够全部包含 RG 象限内的点;而多出率则反映了 RG 象限内的点在所拟合区域中的占比情况。基于这 2 个指标,本文对比多种离散边界拟合模型,包括单矩形、单圆形、单椭圆形、复合矩形+圆形、复合矩形+椭圆形以及滚球法等。经过对比分析,选定滚球法作为最佳离散边界拟合方式,该方法在包含率和多出率上均表现出较好的性能(如图 5 所示)。

4) 循环遍历与三维模型拟合:在完成 B<sub>0</sub> 二维区域拟合后,循环遍历 B\_list 中的每个 B 值,并重复上述降维和二维拟合过程。通过不断迭代,最终完成了对整个三维空间模型(即三限样 RGB 色差模型)的拟合。这一过程不仅提高了拟合的效率和准确性,还有效降低了数据处理的复杂性和难度。

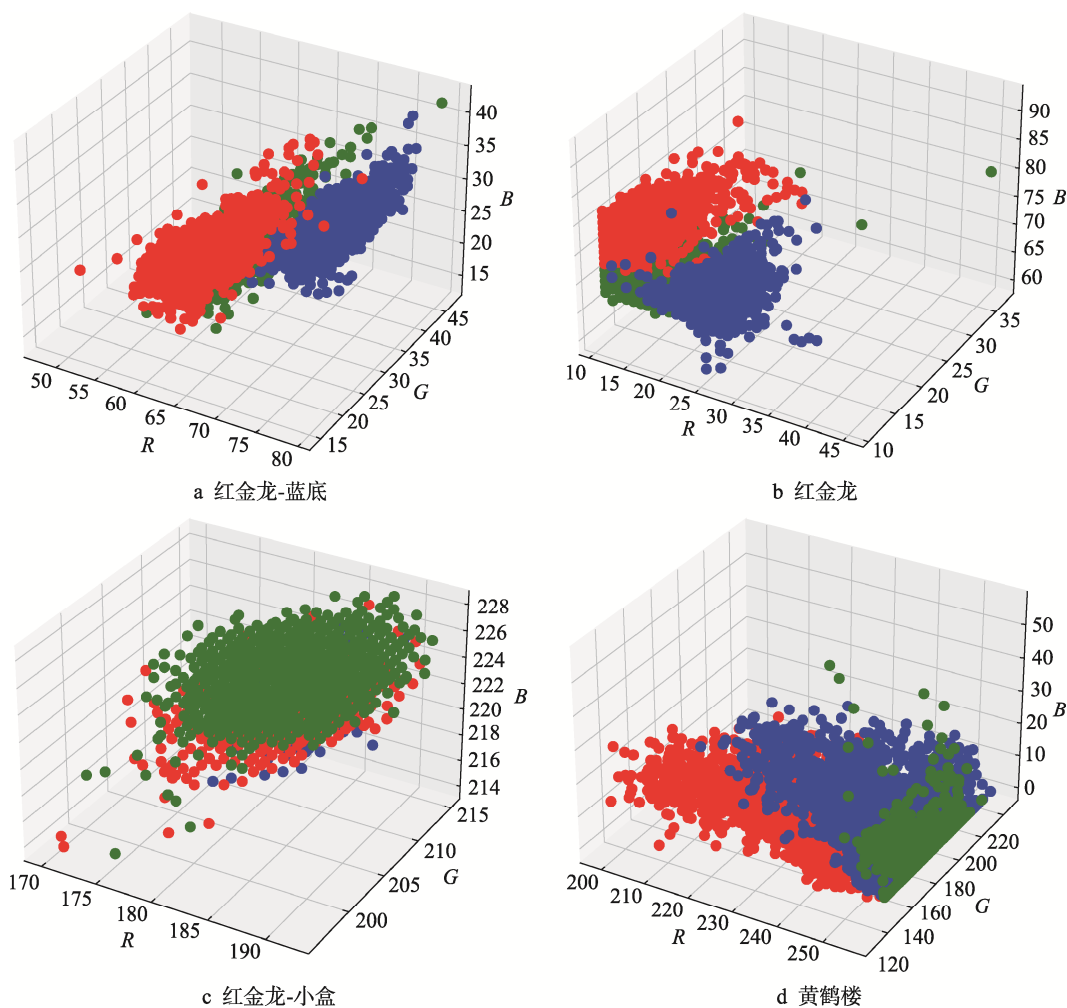


图 4 上、中和下限的 RGB 点分布图  
Fig.4 RGB dot distribution map of upper, middle and lower limits  
注:蓝色代表下限、绿色点代表中限、红色代表中限。

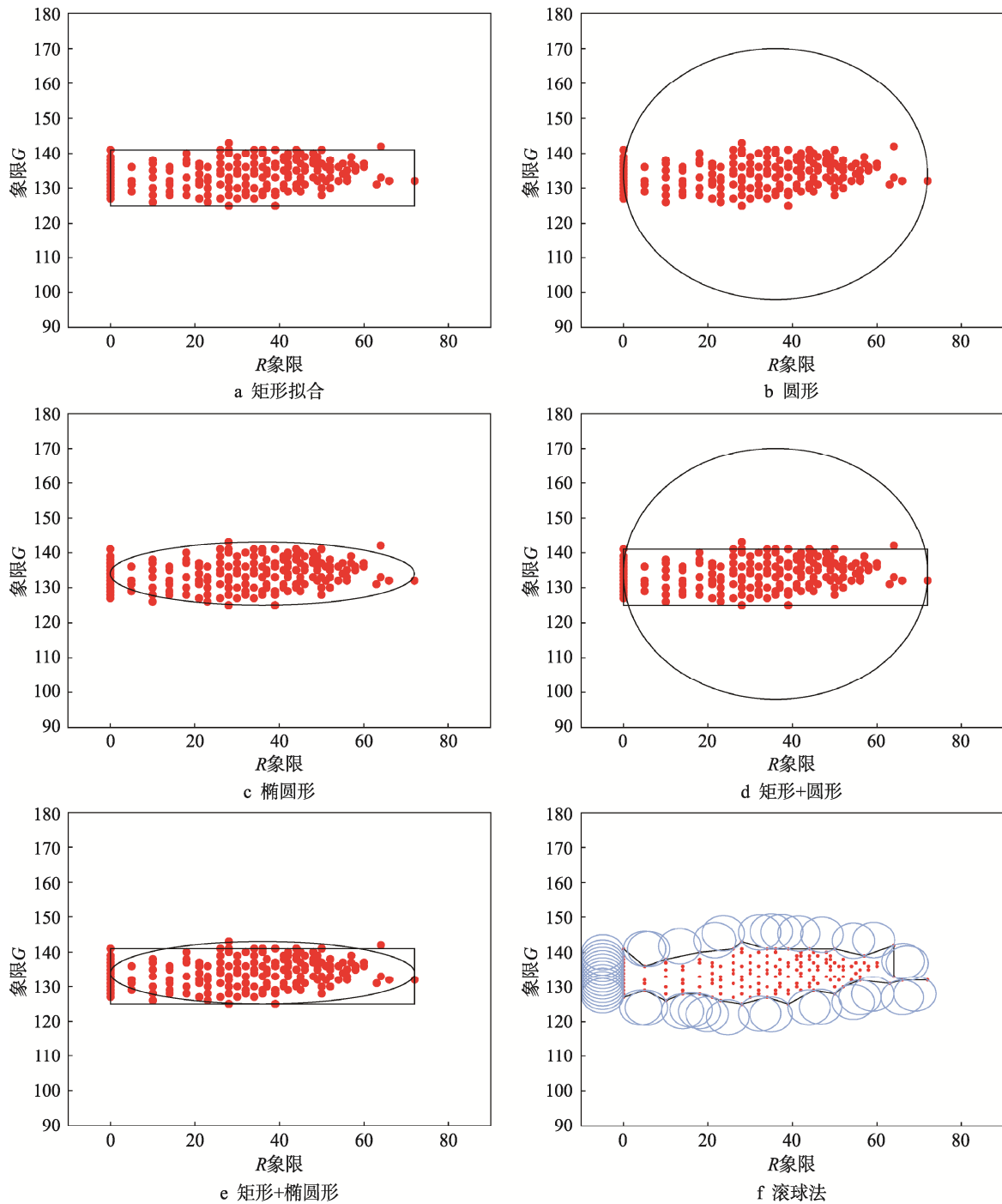


图 5 不同离散点边缘拟合方式

Fig.5 Schematic diagram of edge fitting methods of different discrete points

### 1.3.2 离散边界拟合模型-滚球法

在边缘不规则、复杂等情况下,滚球法<sup>[15]</sup>是一种快速、高效的边界点提取算法。若一个半径为  $a$  的圆,绕二维点进行滚动,其滚动的轨迹形成的点为轮廓点。需要注意的是,该圆在滚动过程中不能包含其他二维点,具体步骤如下。

1) 对于任一待判断二维点  $p(x,y)$ , 根据预先设定滚动圆半径  $a$ , 计算距点  $p$  距离小于  $2a$  内的所有点, 即为点集  $M$ 。

2) 选取点集  $M$  中任意点  $p_1(x_1, y_1)$ , 根据  $p$ 、 $p_1$  和滚动圆半径  $a$ , 计算出 2 个圆心坐标  $o_1(x_{o1}, y_{o1})$  和  $o_2(x_{o2}, y_{o2})$ , 如图 6 所示。圆心  $o_1$  和  $o_2$  的计算见式 (1) ~ (4)。

$$x_{o1} = x + \frac{1}{2}(x_1 - x) - H \times (y_1 - y) \tag{1}$$

$$y_{o1} = y + \frac{1}{2}(y_1 - y) - H \times (x - x_1) \tag{2}$$

$$x_{o2} = x + \frac{1}{2}(x_1 - x) + H \times (y_1 - y) \tag{3}$$

$$y_{o2} = y + \frac{1}{2}(y_1 - y) + H \times (x - x_1) \quad (4)$$

其中:  $(x_{o1}, y_{o1})$ 和  $o_2(x_{o2}, y_{o2})$ 分别为图 6 中  $o_1$  和  $o_2$  的坐标;  $(x_1, y_1)$ 和  $(x, y)$ 分别为图 6 中的  $p_1$  和  $p$  点坐标。

$$H = \sqrt{\frac{a^2}{S^2} - \frac{1}{4}} \quad (5)$$

$$S^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \quad (6)$$

3) 对于点集  $M$  中除  $p_1$  点外的其他点, 分别计算到圆心  $o_1$  和  $o_2$  的距离。若所有点到  $o_1$  或者  $o_2$  的距离均大于  $a$ , 则标记点  $p$  为轮廓点, 终止该点判断。

4) 若除  $p_1$  点外的其他点到圆心  $o_1$  和  $o_2$  的距离不全大于  $a$ , 则遍历点集  $M$  内所有点转换为  $p_1$  点, 重新计算圆心坐标, 并按照步骤 3 对点  $p$  进行判断。若存在一点使点  $p$  标记为轮廓点, 并判断点  $p$  为轮廓点, 否则判断点  $p$  为非轮廓点。

边缘区域拟合算法中滚动半径  $a$  的选定是非常关键的, 会影响到是否能够拟合成功以及拟合的程度。考虑到  $RG$  象限内点的分布情况, 选定  $a$  为 0.1、0.2、0.3、0.4 进行判定, 最终选定  $a$  为 0.2 为最佳的拟合滚动半径, 具体见图 7。

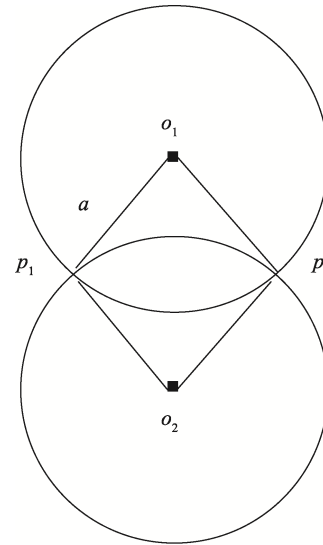


图 6  $o_1$  和  $o_2$  示意图  
Fig.6 Schematic diagram of  $o_1$  and  $o_2$

### 1.3.3 三限样 RGB 色差模型色差评价方法

基于三限样 RGB 色差模型的主要功能: 判断测试样品是否存在色差; 存在色差的情况下, 判断测试样品为超上限或超下限。其色差流程如下。

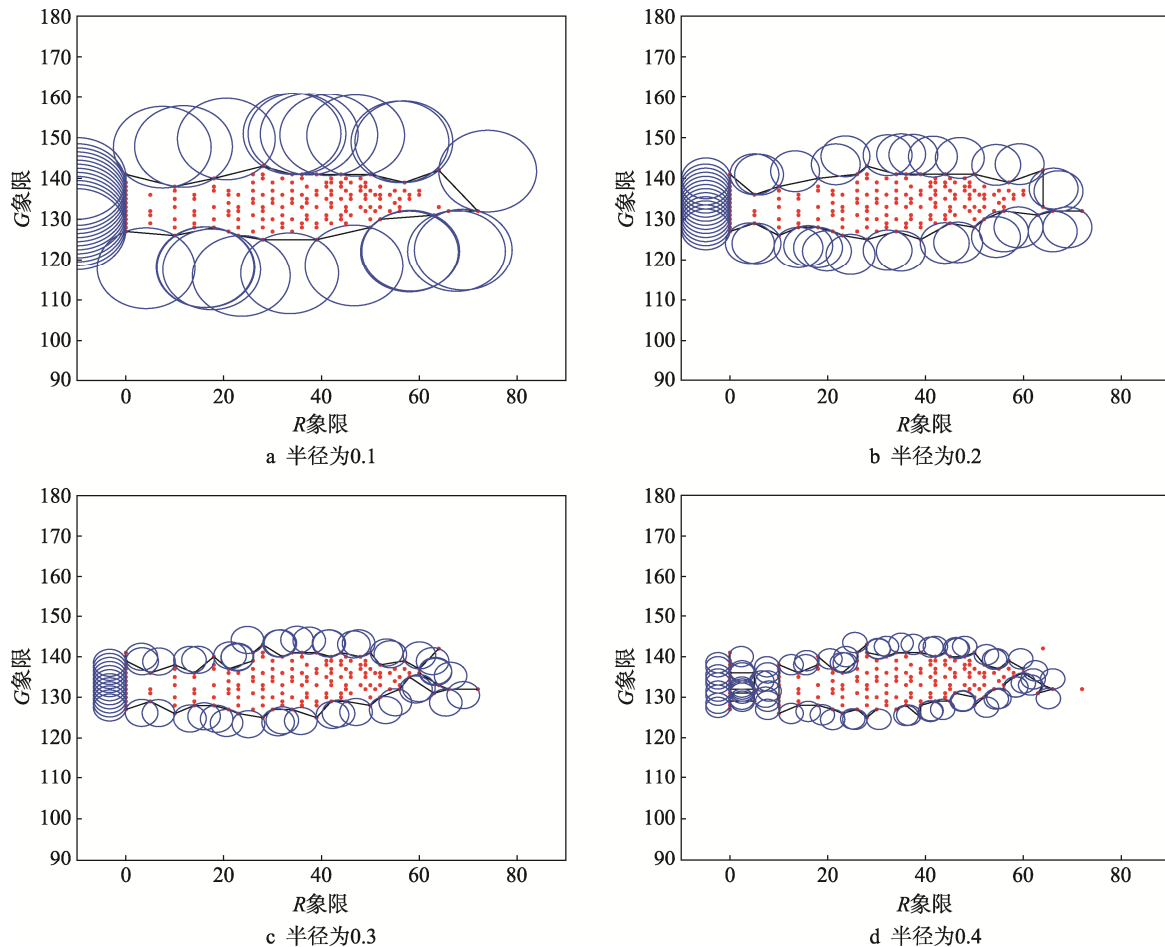


图 7 不同滚动半径下的滚动半径边缘区域  
Fig.7 Edge region of rolling radius under different rolling radius

1) 建立三限样 RGB 色差模型 (以红金龙区域 1 为例, 三限样表示为 SXY, 外轮廓表示为 WLK, 测试样表示为 CSY, 测试样超出表示为 CSYCC)。

数据收集: 设标准三限样在区域 1 的 RGB 值集合为  $Z_{SXY} = \{(R_{i(SXY)}, G_{i(SXY)}, B_{i(SXY)})\}_{i=1}^n$ , 其中  $n$  为样本数量,  $Z$  为 RGB 值。

排序与降维: 按  $B$  值排序  $Z_{SXY}$ , 得到  $B_{n(SXY)} = \{B_{1(SXY)}, B_{2(SXY)}, \dots, B_{n(SXY)}\}$ , 其中  $B_{i(SXY)}$  表示排序后的第  $i$  小的  $B$  值, 对应的  $RG$  值命名为  $M$ 。

降维处理: 对于每个  $B_{j(SXY)}$ , 提取对应的  $M_{j(SXY)} = \{(R_{i(SXY)}, G_{i(SXY)}) | B_{i(SXY)} = B_{j(SXY)}\}$ , 然后通过滚球法拟合得到  $M_{j(WLK)}$ 。

2) 测试样品色差及超象限判定。

测试样品数据: 测试样品在相同区域的 RGB 值集合为  $Z_{CSY} = \{(R'_{i(CSY)}, G'_{i(CSY)}, B'_{i(CSY)})\}_{i=1}^m$ , 其中  $m$  可能与  $n$  不同。

**B 值比较:** 检查  $B'_{\min(CSY)}$  (测试样中的最小  $B$  值) 与  $B_{1(SXY)}$  (三限样中的最小  $B$  值) 的关系, 以及  $B'_{\max(CSY)}$  与  $B_{n(SXY)}$  的关系, 判断是否超上下限。

**逐级比较:** 每个  $B'_j$  找到对应的  $M_{j(CSY)} = \{(R'_{i(CSY)}, B'_{i(CSY)}) | B'_{i(CSY)} = B'_j(CSY)\}$ , 并查询  $M'_{j(CSY)}$  中的每一点是否位于  $M_{j(WLK)}$  内。超出部分定义为  $M'_{j(CSYCC)}$ 。

**色差判定:** 计算总的超出点数  $\sum |M'_{j(CSYCC)}|$ ; 若  $\sum |M'_{j(CSYCC)}| = 0$ , 则无色差; 否则有色差; 超出率计算可表示为  $\frac{\sum |M'_{j(CSYCC)}|}{m}$ , 用于衡量色差程度。

其中超上限/下限判断:  $B'_{\min(CSY)} < B_{1(SXY)}$  表示偏下限;  $B'_{\max(CSY)} > B_{n(SXY)}$  表示偏上限。

单个  $B$  值下的点比较 (以  $B'_1$  为例):

$$M'_{1(CSYCC)} = \{(R'_{i(CSY)}, G'_{i(CSY)}) \in M'_{1(CSY)} | (R'_{i(CSY)}, G'_{i(CSY)}) \notin M_{1(WLK)}\}$$

总色差超出率 ( $r$ ):

$$r = \frac{\sum_{j=1}^m |M'_{j(CSYCC)}|}{m} \quad (7)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 数字图像采集质量验证

通过分析重复采集的数字图像在相同区域和不同区域的变化情况, 验证数字图像采集质量的稳定性和均匀性。

采用白色标准样卡对图像采集质量均匀性进行

验证。对白色标准样卡数字图像, 以每 100 像素进行正方形划分, 以中心区域为标准参考, 对比其他区域  $R$ 、 $G$ 、 $B$  3 个通道数据变化情况, 具体数据见图 8。

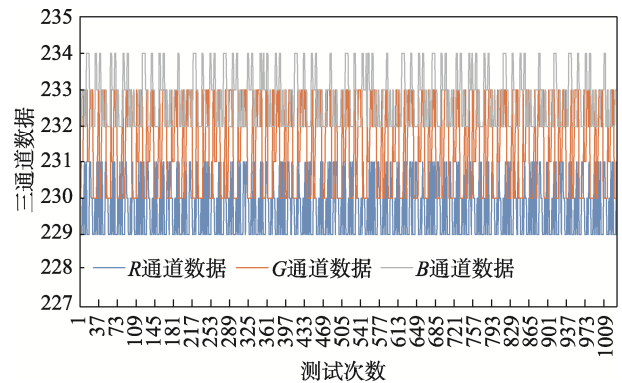


图 8 白色标准样卡不同区域的均匀性验证  
Fig.8 Verification of uniformity in different areas of the white standard sample card

从图 8 可知, 白色标准样卡不同区域 RGB 数据中,  $R$  通道数据和  $G$  通道数据变化范围在 3 以内,  $B$  通道数据变化范围在 2 以内, 图像采集质量的均匀性较高。

采用白色标准样卡对图像采集质量重复性进行验证。对白色标准样卡数字图像进行图像采集, 重复 100 次。以第 1 张图像为模板图像, 对图像进行每 100 像素正方形划分, 将中心区域作为标准参考, 对比剩余图像的相同区域  $R$ 、 $G$ 、 $B$  3 个通道数据变化情况, 具体数据见图 9。

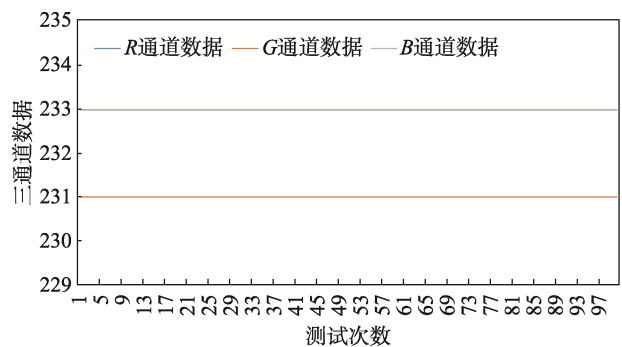


图 9 白色标准样卡相同区域的均匀性验证  
Fig.9 Verification of uniformity in the same area of the white standard sample card

从图 9 可知, 白色标准样卡相同区域 RGB 数据,  $R$  通道数据、 $G$  通道数据和  $B$  通道数据变化范围均在 0 以内, 图像采集质量的均匀性较高。

综上, 通过对比数字图像在相同区域和不同区域的变化情况, 验证数字图像采集质量的稳定性和均匀性。

### 2.2 三限样 RGB 色差模型验证

本研究以红金龙-蓝底图像为例, 旨在通过对比不同的离散边界拟合方法, 找到一种既能高效包含目标区域内所有点, 又能减少多余点被包含在内的最优

拟合模型。本研究选取了6种不同的离散边界拟合方法，即矩形拟合、圆形拟合、椭圆形拟合、矩形与圆形组合拟合、矩形与椭圆形组合拟合以及滚球法。这些方法在二维平面上对离散点集进行边界拟合，并计算其包含率 and 多出率。包含率表示目标区域内（*R*、*G* 象限）的点被拟合边界所包含的比例。包含率越高，说明拟合边界越能准确地覆盖目标点集。多出率表示拟合边界内除了目标点集外，还包含了多少额外的非目标点。多出率越低，说明拟合边界越精确，没有过多地包含非目标点。

表1 二维拟合区域测试  
Tab.1 Two-dimensional fitting region test

实验对象	实验对象	包含率/%	多出率/%
随机二维区域	矩形	98.8	85.4
	圆形	100	95.8
	椭圆形	89.9	83.2
	矩形+圆形	100	95.8
	矩形+椭圆形	98.8	86.4
	滚球法	100	78.9

从表1的数据分析中，可以观察到在离散边界拟合的多种模型中，圆形拟合和滚球法在包含率上均达到了100%，即它们能够完全包含所有位于*R*、*G*象限内的离散点。然而，在评估拟合模型性能时，除了包含率外，多出率也是一个重要的指标，它反映了拟合边界内非目标点（即多余点）的比例。在对比不同

模型的多出率时，滚球法表现出了显著的优势，其多出率仅为78.9%，这意味着在完全包含目标点集的同时，滚球法所拟合的边界内包含的多余点数量最少。因此，从减少多余点被误包含的角度来看，滚球法相较于其他方法更为优越。综合考虑离散边界拟合模型的包含率和多出率，滚球法拟合模型在保持高包含率的同时，具有最低的多出率，即能够在准确覆盖目标点集的同时，最大限度地减少非目标点的误包含。

### 2.3 三限样 RGB 色差模型指标验证

为了验证三限样 RGB 色差模型在烟盒色差检测中的有效性，本文选取了常规烟盒材质中的红金龙-蓝底、红金龙、红金龙-小盒，以及光柱烟盒材质中的黄鹤楼作为测试对象。首先，基于标准三限样，分别构建了红金龙-蓝底\_三限样 RGB 色差模型、红金龙\_三限样 RGB 色差模型、红金龙-小盒\_三限样 RGB 色差模型及黄鹤楼\_三限样 RGB 色差模型。

在常规烟盒材质的测试中，针对每种烟盒类型（红金龙-蓝底、红金龙、红金龙-小盒）分别准备了正常测试样、超上限样和超下限样各10张。通过图像采集设备，获取对应数字图像，并使用相应的三限样 RGB 色差模型进行测试。测试过程中，关注模型是否能够准确地区分正常测试样、超上限样和超下限样，从而验证模型的有效性。

对于光柱烟盒材质，选取了黄鹤楼品牌作为测试对象。获取黄鹤楼的正常测试样、超上限样和超下限样各10张，并通过图像采集设备获取对应数字图像。随后，使用黄鹤楼\_三限样 RGB 色差模型进行测试，以验证该模型在光柱烟盒材质色差检测中的适用性。

表2 常规材质三限样 RGB 色差模型色差检测  
Tab.2 RGB color difference model color difference detection of three-limit sample of conventional material

实验对象	三限样 RGB 色差模型 色差检测情况	三限样 RGB 色差模型 色差偏上、下限情况	总色差平均 超出率/%	时间/s
红金龙-蓝底正常样 1~10	均无	无	0	2.1
红金龙-蓝底超上限样 1~10	均有	均偏上	28	2.1
红金龙-蓝底超下限样 1~10	均有	均偏下	19	2.2
红金龙正常样 1~10	均无	无	0	2.2
红金龙超上限样 1~10	均有	均偏上	19	2.1
红金龙超下限样 1~10	均有	均偏下	17	2.1
红金龙-小盒正常样 1~10	均无	无	0	2.1
红金龙-小盒超上限样 1~10	均有	均偏上	21	2.2
红金龙-小盒超下限样 1~10	均有	均偏下	18	2.2



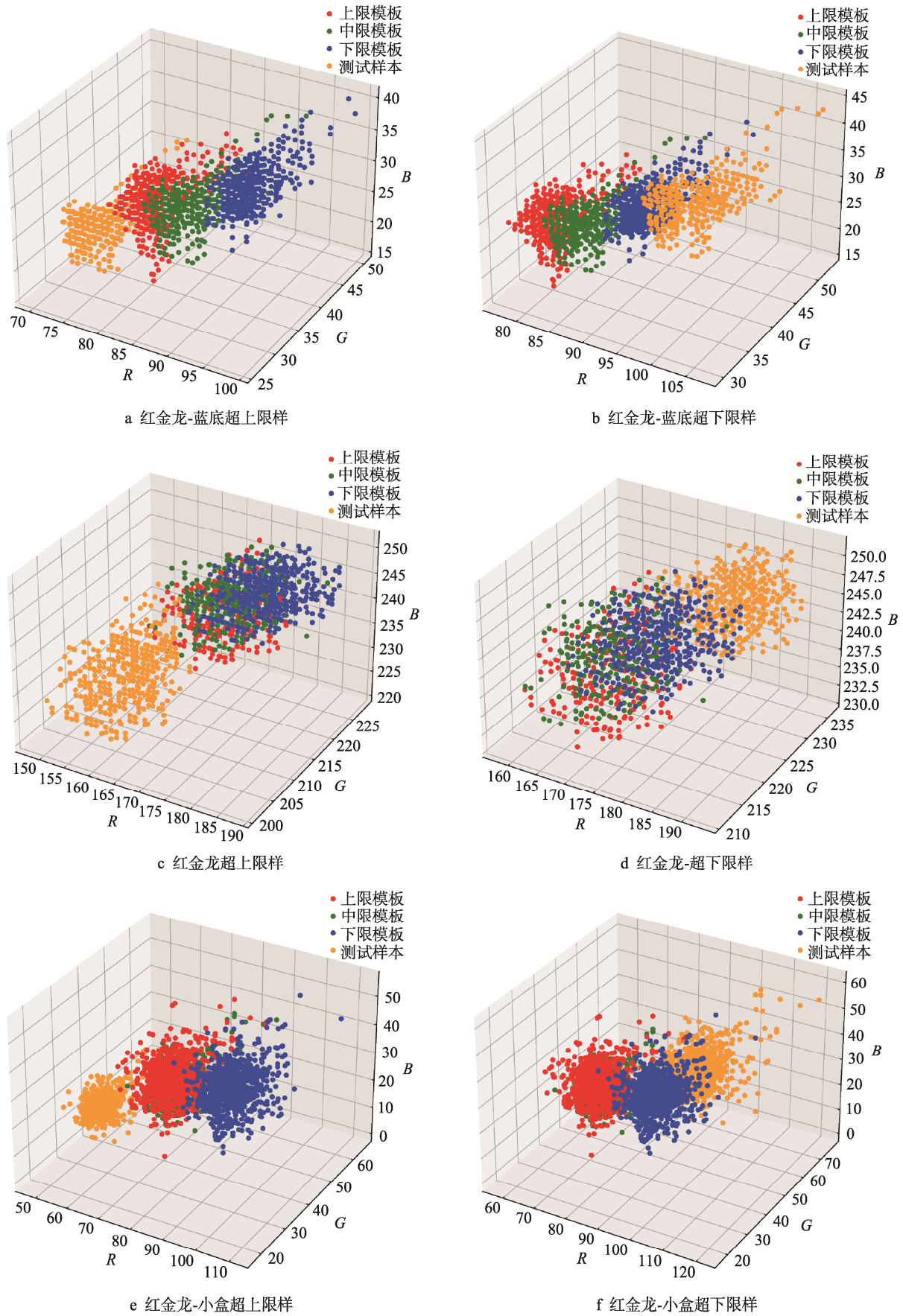


图 10 测试样超限 RGB 点分布  
Fig.10 Overrun RGB dot distribution map of test sample

表3 黄鹤楼\_三限样 RGB 色差模型色差检测  
 Tab.3 RGB color difference model color difference detection for three-limit sample of Yellow Crane Tower

实验对象	三限样 RGB 色差模型检测情况	三限样 RGB 色差模型色差偏上、下限情况	总色差平均超出率/%	时间/s
黄鹤楼正常样 1~10	均无	无	0	3.1
黄鹤楼超上限样 1~10	均有	均偏上	13	3.2
黄鹤楼超下限样 1~10	均有	均偏下	18	3.2

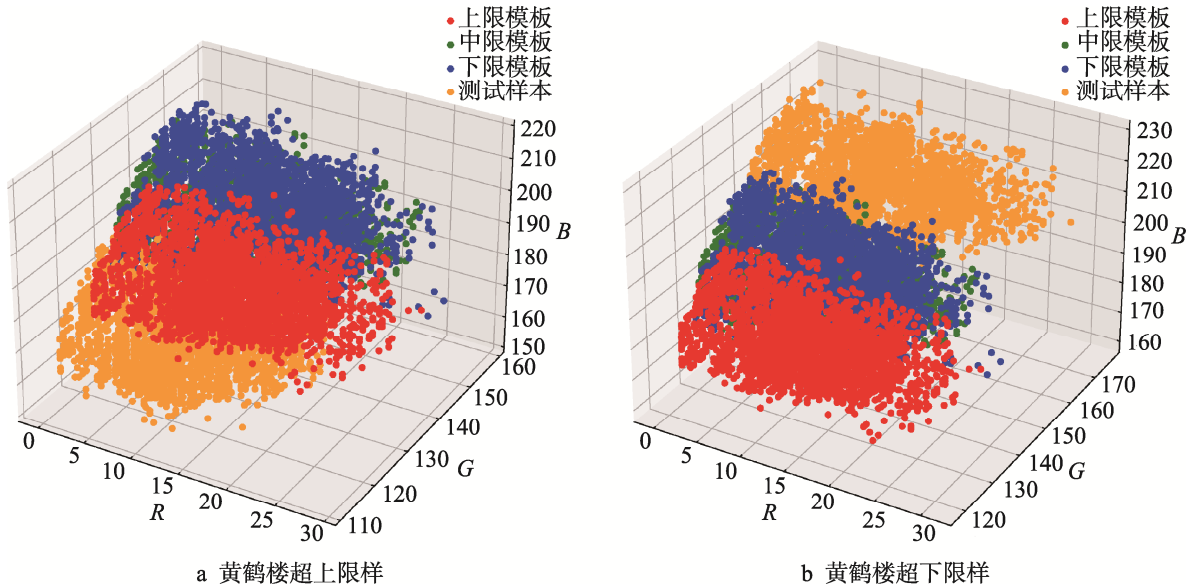


图 11 测试样超限 RGB 点分布  
 Fig.11 Overrun RGB dot distribution of test sample

从表 2 和图 10 可知，针对常规烟盒材质，该模型能够准确地判断出正常样本的无色差，并且在超上限或超下限的色差样本中，模型不仅能够检测出色差，还能正确判断对应的超上、下限情况。具体来说，对于红金龙-蓝底、红金龙和红金龙-小盒的超上限样和超下限样，模型的总色差超出率分别为 28%和 19%（红金龙）、19%和 17%（红金龙-小盒）、21%和 18%（红金龙-蓝底），且无漏检现象发生。因此，本研究证明了在常规烟盒材质的包装上，应用三限样 RGB 色差模型进行色差判断是可行的。

从表 3 和图 11 可知，针对光柱烟盒材质，由于光柱材质对图像的影响，本研究首先采用 K-means 聚类算法将真实底色与光柱进行分离，随后仅使用真实底色进行三限样 RGB 色差模型的检测。在消除光柱影响后，三限样 RGB 色差模型能够准确地判断出正常样本的无色差且不存在误判。同时，在有色差的情况下，模型能够检测出色差并正确判断超上限或超下限。具体来说，对于黄鹤楼的超上限样和超下限样，模型的总色差超出率分别为 13%和 18%，且无漏检现象发生。这表明，在光柱烟盒材质的包装上，结合 K-means 聚类和三限样 RGB 色差模型进行色差判断是有效的。

综上所述，本文验证了三限样 RGB 色差模型及

其与 K-means 聚类算法结合在常规烟盒和光柱烟盒材质包装上的色差检测性能，证明了该模型的可行性和必要性。

### 3 结语

本研究旨在提升烟盒包装材料的色差检测效率与准确性，同时实现卷烟包装材料质量全面数字化检测。通过结合标准样的三限样概念，提出了 1 种三限样 RGB 色差模型应用于常规烟盒包装材料和光柱烟盒包装材料的色差检测。该方法不仅能够精确判别测试样品的色差，还能迅速判别是否超出预设的上限或下限，确保烟盒包装材料数字化检测的精准性。

实验结果表明，开发的图像采集设备在稳定性方面表现出色，无论是在不同区域还是相同区域，均能达到预设的稳定阈值，完全符合实际生产需求。在三限样 RGB 色差模型的降维拟合方面，以滚球法为离散边界拟合模型，该方法在保证包含率 and 多出率最优的同时，确保了色差检测的准确性。在三限样 RGB 色差模型验证方面，对常规烟盒包装材料和光柱包装材料的色差检测均无误且正确判别超上或下限情况。

本文提出的三限样 RGB 色差模型对数字图像的烟盒包装材料的色差检测在准确率和偏上、下限均有

很好表现,搭配图像采集系统,能够实现自动化程度高、成本低的数字图像色差仪。今后的研究重点是为了弥补部分烟厂没有标准三限样,将进一步细致研究三限样RGB色差模型,在确定标准中限样的基础上,规范化选定对应的上限标样和下限样,进一步实现三限样RGB色差模型色差检测的可行性。

#### 参考文献:

- [1] 李琦. 卷烟条包外观缺陷检测系统的设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.  
LI Q. The Design of Cigarettes Pack Appearance Defect Detection System[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.
- [2] 胡群, 王黎, 李万珣, 等. 烟草制品包装和标签履约情况综述及对我国卷烟包装影响的思考[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(2): 96-100.  
HU Q, WANG L, LI W X, et al. An Overview of Worldwide Tobacco Product Packaging and Labeling with Regard to FCTC Implementation and Implication on Cigarette Packaging in China[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2012, 18(2): 96-100.
- [3] 冯秋歌, 吴禄慎, 王晓辉. 基于视觉的印刷字符缺陷自动检测方法[J]. 南昌大学学报(工科版), 2018, 40(4): 385-389.  
FENG Q G, WU L S, WANG X H. Design of Automatic Printing Character Defects Detection System Based on Machine Vision[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2018, 40(4): 385-389.
- [4] 熊琳, 陈涛. 机器视觉技术在纺织品及服装研究中的应用[J]. 中国纤检, 2023(6): 110-112.  
XIONG L, CHEN T. Application of Machine Vision Technology in Textile and Clothing Research[J]. China Fiber Inspection, 2023(6): 110-112.
- [5] 裘柯槟, 陈维国, 周华. 用光谱成像技术与分光光度法测量织物颜色的比较分析[J]. 纺织学报, 2020, 41(11): 73-80.  
QIU K B, CHEN W G, ZHOU H. Comparison of Spectral Imaging and Spectrophotometry in Fabric Color Measurement[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(11): 73-80.
- [6] 左才, 张勇斌, 齐元胜, 等. 基于机器视觉的印刷品表面划痕缺陷检测[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2023(5): 42-48.  
ZUO C, ZHANG Y B, QI Y S, et al. Detection of Surface Scratch Defects of Printing Products Based on Machine Vision[J]. Print and Digital Media Technology Research, 2023(5): 42-48.
- [7] 耿金华, 吴嘉聪, 林炜龙, 等. 基于机器视觉和虚拟仪器的汽车油漆色差在线检测系统研究[J]. 信息技术与信息化, 2022(8): 48-51.  
GENG J H, WU J C, LIN W L, et al. Research on On-Line
- Detection System of Automobile Paint Color Difference Based on Machine Vision and Virtual Instrument[J]. Information Technology and Informatization, 2022(8): 48-51.
- [8] 孙文涛, 郝鹏飞, 王瑞鹏. 机器视觉在AMB丝印机中的应用[J]. 电子工业专用设备, 2023, 52(5): 50-54.  
SUN W T, HAO P F, WANG R P. Application of Machine Vision in AMB Screen Printing Machine[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2023, 52(5): 50-54.
- [9] 王耀南, 刘学兵, 张辉, 等. 机器视觉技术在包装行业研究进展与应用综述[J]. 包装学报, 2022, 14(2): 1-14.  
WANG Y N, LIU X B, ZHANG H, et al. Research Progress and Application Review of Machine Vision Technology in Packaging Industry[J]. Packaging Journal, 2022, 14(2): 1-14.
- [10] 李超, 范多青, 李娥贤, 等. 基于机器视觉识别的高光性镭射商标纸色差测量方法研究[J]. 昆明学院学报, 2019, 41(3): 30-33.  
LI C, FAN D Q, LI E X, et al. Study on Measurement Method of High-Lightness Laser Label Paper Color Difference Based on Machine Vision Recognition[J]. Journal of Kunming University, 2019, 41(3): 30-33.
- [11] 钟宇, 徐燕, 刘德祥, 等. 基于计算机视觉和机器学习的真伪卷烟包装鉴别[J]. 烟草科技, 2020, 53(5): 83-92.  
ZHONG Y, XU Y, LIU D X, et al. Authentication of Packeted Cigarettes Based on Computer Vision and Machine Learning[J]. Tobacco Science & Technology, 2020, 53(5): 83-92.
- [12] 李邨, 梁洲源, 马慧宇, 等. 基于正常样本学习的真伪卷烟小盒胶痕鉴别方法[J]. 烟草科技, 2023, 56(9): 91-99.  
LI D, LIANG Z Y, MA H Y, et al. Cigarette Authentication Via Glue Lines on Packet Label Based on Normal Sample Learning[J]. Tobacco Science and Technology, 2023, 56(9): 91-99.
- [13] 高春芳. 基于智能传感器技术的卷烟包装质量在线检测系统设计[J]. 装备制造技术, 2023(7): 227-229.  
GAO C F. Design of Online Inspection System for Cigarette Packaging Quality Based on Intelligent Sensor Technology[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(7): 227-229.
- [14] 张翼鹏, 李超, 赵敏, 等. 基于近红外光谱法的卷烟包装材料色差分析[J]. 烟草科技, 2016, 49(2): 75-81.  
ZHANG Y P, LI C, ZHAO M, et al. Analysis of Color Difference of Cigarette Packaging Material Based on Near-Infrared Spectroscopy[J]. Tobacco Science & Technology, 2016, 49(2): 75-81.
- [15] WIDYANINGRUM E, PETERS R Y, LINDENBERGH R C. Building Outline Extraction from ALS Point Clouds Using Medial Axis Transform Descriptors[J]. Pattern Recognition, 2020, 106: 107447.