

## 分析测试

# 基于图像辨识的六价铬水质 在线检测系统的开发

李文, 郭凯\*, 王利民, 徐洋

(北方工业大学机电工程研究所, 北京 100084)

**摘要:**针对化工、农业等行业的重金属检测需求,提出了基于图像颜色辨识的有色溶液浓度测定原理,利用顺序注射技术和图像辨识技术,设计了重金属六价铬水质在线监测系统,实现水质六价铬测定。按照国标法配置了 9 组不同浓度的溶液,设计了 CCD 相机检测池,利用六价铬水质自动在线监测仪和 CCD 相机在国标方法检测的同时进行图像采集。对图片数据进一步分析,建立了 RGB 特征值与浓度的多元线性回归模型。实验结果表明,在测量浓度为 0~1.0 mg/L 范围内,相对标准偏差小于 2%,检出限为 0.006 mg/L,基于图像辨识的检测系统具有较高的精确度。系统运行稳定,可精准、高效分析不同地表水样的六价铬,为环境保护和污水排放提供了新的技术支持。

**关键词:**六价铬;图像辨识;顺序注射;阴影补偿;多元线性回归

**中图分类号:**TH741

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2021)01-0232-07

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.01.047

## Development of on-line detection system for chromium( VI ) in water based on image recognition

LI Wen, GUO Kai\*, WANG Li-min, XU Yang

(The Research Institute of Mechanical and Electrical Engineering, North China University of Technology, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A concentration determination principle for color solution is developed based on image recognition, in order to meet the demand for detection of heavy metals in the chemical industry and agriculture. By utilizing sequential injection and image recognition technologies, a water quality on-line detection system for chromium( VI ) is designed to realize the determination of chromium( VI ) in water. In accordance with China's national standard method, nine groups of solutions with different concentrations are configured, and a CCD camera detection pool is designed and established. A self-designed automatic on-line water quality detection monitor for chromium( VI ) is used to detect these nine groups of solutions, while CCD camera is simultaneously used for image acquisition. Upon the analysis on the collected images, a shadow compensation method is proposed to improve the image quality, and a multiple linear regression model between RGB eigenvalues and concentrations is established. Experimental results show that the repeatability of this system is less than 1.5% in the range of 0.0-1 mg·L<sup>-1</sup> and the detection limit is 0.006 mg·L<sup>-1</sup>. Compared with China's national standard method, this system has higher precision. The system runs stably, and can analyze accurately and efficiently chromium( VI ) in different surface water samples, which provides new technical support for environmental protection and sewage discharge.

**Key words:** chromium ( VI ); image recognition; sequential injection; shadow compensation; multiple linear regression

重金属污水来源包括农药化肥的使用以及冶金、造纸、电镀等化工生产行业,污染成分主要有汞、铜、铅、锌、砷、镍、铬等<sup>[1-2]</sup>。六价铬作为地表水体环境重金属污染程度的核心评价指标,监测水体六价铬具有重要意义。目前六价铬测定方法有分光光度法、原子光谱法、质谱法、电化学分析法<sup>[3]</sup>。原子光谱法设备昂贵,操作费用较高;质谱法具有灵敏度

高、精度好、检出限低等优点,但是设备价格昂贵,易受污染,推广受限;电化学分析法应用不成熟,仍有待完善<sup>[4]</sup>。分光光度法经预处理的水样在高温高压下氧化消解,加入掩盖剂消除干扰离子,再加入缓冲液调节 pH,最后显色剂与试样中被测组分进行络合反应显色,最后通过特定波长下测定显色溶液的吸光度。国标方法重复性和再现性好,精度高<sup>[5-6]</sup>,

收稿日期:2020-03-18;修回日期:2020-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51205005);北京市科技创新服务能力建设(PXM2017-014212-000013)

作者简介:李文(1975-),男,博士,副教授,研究方向为机器人技术、智能传感器, lw@ncut.edu.cn;郭凯(1994-),男,硕士生,研究方向为智能传感器,通讯联系人, 18811752676@163.com。

但也存在显色剂不够稳定、选择性不好,无法消除样品多成分的干扰<sup>[7]</sup>。目前市面上测定重金属6价铬的仪器对于化工生产和农业污染排放标准而言,量程小、检出限高、精度一般,而且废液排量高、监测不稳定,依赖进口,维护成本高,体积大、供电方式单一等局限性,并不能满足环境、地表水质监测领域对于水质重金属检测设备的要求<sup>[8-11]</sup>。因而,对于量程大、检出限低、重复性好、稳定性高、集成度高和废液排量低的水质重金属监测设备的研制具有重要意义。

针对GB 7464—198中对于6价铬的标准限值的要求,根据6价铬分析原理,设计顺序注射法的微试剂水质监测设备,试剂法显色后,根据图像识别技术,建立基于图像辨识的重金属微试剂水质在线监测系统。该监测系统极大地提高了系统检测精度和减少了试剂用量的同时,具有量程可调、集成度高、废液排量少、环保节能、检测效率高、实时数据交互的特点,适应于多种环境的水质在线监测,为环境保护、地表水质监测和化工生产排放提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

#### 1.1.1 仪器

ZSB-LS型立式注射泵,液量准确误差 $\leq 1\%$ ,液量精确度在 $3\% \sim 7\%$ ,最小进液精度 $0.0025\text{ mm}^3/1.0381\text{ }\mu\text{L}$ ;QHF-SV01型多通道切换阀岛,采用特种氟塑料,适用于各种腐蚀性液体,阀芯采用多向自适用平面贴合可靠性高; $1.5\text{ MPa}$ 高压电磁阀;CCD工业相机XCG-5005CR;光源;支架OPTES3000-1;微型线性电机;50 mL量筒;50、100、250 mL容量瓶;电磁搅拌器;移液管;0.1  $\mu\text{L}$ ~10 mL的单道可调量程移液器;分辨率为0.1 mg的XP205高精度电子天平;干燥器;人机交互屏。

#### 1.1.2 试剂

超纯水;重铬酸钾( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,分析纯);1+7盐酸溶液;95%乙醇溶液;二苯碳酰二肼( $\text{C}_{13}\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}$ ,分析纯);以上主要试剂和物质可从国家标准物质平台购买。

6价铬标准贮藏液配制:使用电子秤取干燥的重铬酸钾粉末 $0.2829\text{ g}$ ,加水在烧杯中,使用磁力搅拌器使其溶解,然后移入 $1000\text{ mL}$ 的容量瓶中,用超纯水稀释至标线,得到浓度为 $100\text{ mg/L}$ 的6价铬溶液,此溶液在 $2\sim 5^\circ\text{C}$ 的试剂储存箱中可保留

1周。配置6价铬标准物质时可按要求稀释到相应浓度即可。

显色剂制备:用电子秤称取 $0.2\text{ g}$ 干燥的二苯碳酰二肼( $\text{C}_{13}\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}$ ),用磁力搅拌器搅拌至完全溶解于 $80\text{ mL}$ 的95%乙醇溶液后,移入量筒并加入超纯水,稀释至 $100\text{ mL}$ 。

### 1.2 6价铬测定原理

二苯碳酰二肼分光光度法原理是,水中6价铬具有强氧化性,在酸性溶液中与显色剂二苯碳酰二肼发生显色反应形成紫红色配合物<sup>[12]</sup>。在一定浓度范围内,该紫色配合物的色度与6价铬的含量呈线性关系。溶液的吸光度与浓度的光系符合朗伯-比尔定律,如式(1),且在 $540\text{ nm}$ 波长处有最大吸收;以此建立溶液吸光度与6价铬之间的工作曲线,实现水中6价铬的测定。

$$A = \lg(1/T) = KBC =$$

$$-\lg[(\text{Sample} - \text{Dark})/(\text{Reference} - \text{Dark})] \times 100\% \quad (1)$$

式中, $A$ 为水样的吸光度; $T$ 为介质透射率; $K$ 为摩尔吸收系数; $B$ 为光程; $C$ 为浓度;Reference为白参照的光电信号;Dark为黑参照的光电信号;Sample为试剂显色完毕后的光电信号。

基于图像辨识技术的测定原理是通过工业相机采集物质溶液图像,提取图像的颜色特征值,并对图像颜色特征值进行提取和计算,分析待测物质浓度与特征值间的数学关系,从而测定待测物质浓度的方法。

图像颜色辨识工业应用中常用的颜色模型有RGB颜色模型和HIS颜色模型,其中R、G、B分别代表红色、绿色、蓝色3种分量,H、S、I分别表示色调、饱和度以及亮度<sup>[13-14]</sup>。在人的主观感知上,HIS颜色模型更符合观测到的颜色变化,而RGB颜色模型能从本质上反映出颜色的改变。本文中利用自主设计的微控技术顺序注射平台,按照检测流程将试剂注入到反应池中进行显色反应过后,将显色后的溶液注入到检测池中,以纯净水和空白试剂作参比,在稳定光源下由CCD相机获取不同浓度的6价铬溶液显色反应后的图像,分析建立基于RGB、HSI颜色模型的颜色特征值与6价铬浓度的标准工作曲线,根据工作曲线计算对应6价铬浓度值。

### 1.3 系统设计

根据提出的水质6价铬测定原理,设计了基于图像识别技术的微试剂铬离子水质在线监测系统,系统结构设计的核心在于反应池结构设计、CCD图

像检测池结构设计、微控技术顺序注射平台的原理设计、沉淀反应检测流程设计。

### 1.3.1 反应池结构设计

自主设计消解池结构包含石英反应管、密封垫、光源、检测管和反应池骨架。石英反应管通过密封垫固定在反应池骨架上,同时密封垫可减少环境光的干扰;石英反应管通过密封接头连接聚四氟与多通道切换阀相连,实现进液与排液。光源(540 nm)与检测管(硅光电池)通过支架固定在检测管两端轴线上,提高了检测精度;开始实验后,立即开启光源进行预热,待显色反应完后立即开始检测。结构示意图如图 1 所示。

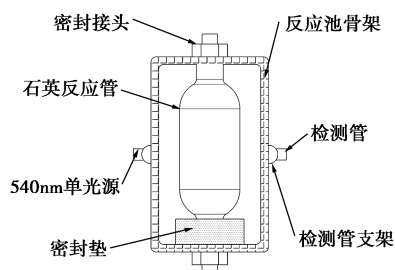


图 1 反应池结构示意图

### 1.3.2 CCD 图像检测池结构设计

检测池包括石英比色管、平行光源、CCD 相机和检测池外壳。为了减少环境光变化对图像的影响,检测池外壳用铝合金材料制作并氧化成黑色,对干扰光源有一定的吸收效果。石英比色管通过固定架固定在反应池支架上,石英比色管底部通过密封接头与聚四氟乙烯管连接;为了将光均匀地打到溶液表面,减少光的漫反射和镜面反射,减少图像阴影,用光源支架将平行光源固定在垂直于溶液液位面的检测池正上方,用相机支架将相机固定在光源上方。检测池结构示意图如图 2 所示。

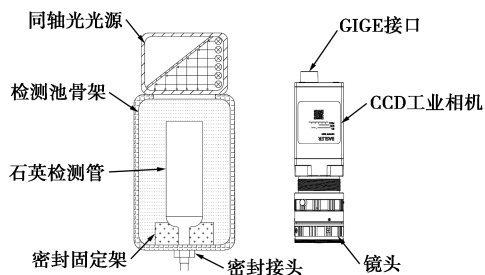


图 2 检测池结构示意图

### 1.3.3 基于微控技术顺序注射平台的原理设计

针对水质 6 价铬测定要求,设计了基于微控技术的顺序注射平台,如图 3 所示,由数据处理显示与

系统控制模块、水样预处理模块、顺序注射模块、反应池模块、检测池模块构成<sup>[15]</sup>。系统控制模块主要由工控机和系统控制器组成,其中系统控制器为基于 STM32 的控制板,具有采集、控制、传输、监控和通信等功能,是平台的控制核心,工控机主要运行机器视觉系统图像采集、处理和数据分析算法程序,通过有线串口和系统控制模块通信。顺序注射模块主要由阀岛、注射泵、储液环和其他配合的试剂管路构成,系统控制模块可以通过 RS232 串口和阀岛、注射泵等主要器件通信,并通过继电器控制各个电磁阀互相配合,实现各种检测中需要的试剂循序进样。水样预处理模块主要由活性炭、高密过滤棉芯构成,可以过滤初步过滤水样中的悬浮物和杂质,需视被测水样的污染情况来确定更换水样预处理模块的时间。检测池是在化学反应后进行图像采集的检测结构,反应池是各种试剂混合以及进行化学反应的重要模块。

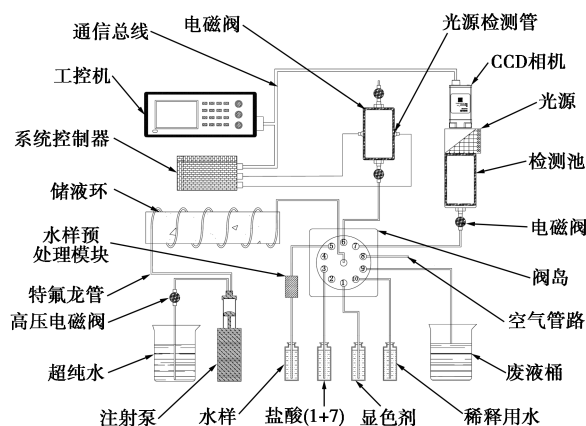


图 3 顺序注射平台原理示意图

系统控制模块主芯片为 STM32F103RCT6,引入  $\mu\text{C}/\text{OS III}$  实时操作系统,建立了通讯任务、人机交互任务、流程控制任务、图像采集任务、AD 采集任务(分光光度法)、运行状态监控任务。 $\mu\text{C}/\text{OS III}$  实时操作系统具有稳定性高、实时性好的特点,通过抢占式任务调度算法,可保证所有任务按预定要求稳定运行,从而保证检测流程高效准确执行。

系统控制模块通过 RS232 串口模块按照阀岛和注射泵的通讯控制指令与之进行通讯,由主板控制继电器板从而实现对电磁阀的控制,实现试剂精确进样;主控板通过 RS232 转 USB 或 TTL 转 USB 模块与工控机软件进行通信,上位机软件控制 CCD 相机进行图像采集,并对采集的图像进行预处理和分析,图像采集结束后控制顺序注射模块进行排空

清洗等操作。

### 1.3.4 检测流程设计

检测控制流程的设计作为整个系统的核心对于测定精确度、系统稳定性、检测效率有显著的影响,

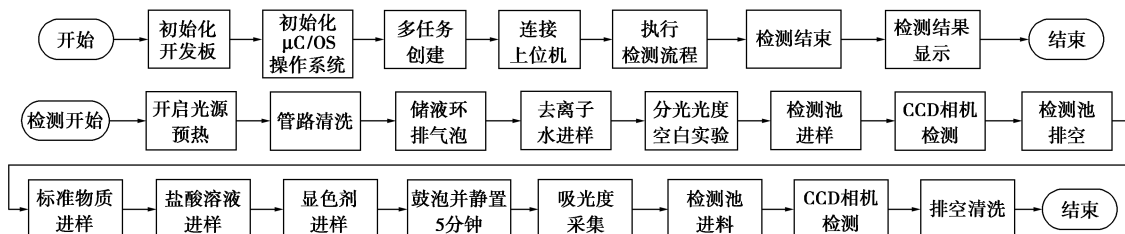


图 4 检测流程图

国标方法在分析时要将硫酸和磷酸依次加入溶液中,过程烦琐,且配置显色剂用到的丙酮为有毒、易挥发溶剂,对操作人员有害,对环境造成二次污染。针对以上问题,本文中采用(1+7)盐酸代替硫酸和磷酸,用 95% 乙醇代替有毒溶剂丙酮,经验证<sup>[2-3]</sup>,此改进方法可简化检测流程,减少二次污染,且可达到与国标方法相同的效果。

### 1.4 图像预处理流程

CCD 相机采集到的图像由液面、石英比色管、检测池外壳等背景信息组成,包含较多与结果无关的背景信息,为了排除其余信息的干扰并减少计算机计算量,提高检测效率,使用 OpenCV 库函数提取实验需要的 ROI 区域。如图 5(a) 所示,由于 CCD 相机在图像采集和信号传输的过程中会受其他电磁信号干扰产生噪声<sup>[16-17]</sup>,高斯滤波是指用高斯函数作为滤波函数,用一个模板(或称卷积、掩模)扫描图像中的每一个像素,用模板确定的邻域内像素的加权平均灰度值去替代模板中心像素点的值,广泛应用于图像预处理,对于去除高斯噪声有很好的效果,高斯函数为:

$$G(x,y) = [1/(2\pi\sigma^2)]e^{-(x^2+y^2)/(2\sigma^2)} \quad (2)$$

在进一步处理前先使用 OpenCV 提供的 GaussianBlur() 函数进行滤波,去除噪声干扰,然后进行形态学开、闭处理,消除图像中的亮点<sup>[18]</sup>。

由于测量池特殊结构、溶液挂壁以及溶液中气泡等因素影响,在平滑滤波后,图像中还存在较明显的高亮区域和阴影区域,这些区域导致图片颜色特征值数据一致性降低,进而影响检测结果。为提高图像数据一致性,结合 Python 和 OpenCV 的部分库函数和算法,提出一种阴影补偿方法<sup>[19-20]</sup>,主要步

因此检测控制流程设计根据 GB7464—198 中的技术要求,并在此基础上以提高采样精度、检测精度、检测效率和降低试剂消耗、废液排量为目的对检测流程进行改进,检测流程如图 4 所示。

骤如下:

(1) 将 RGB 图片分离为 R、G、B 3 个通道,记为  $R^*$ 、 $G^*$ 、 $B^*$ 。

(2) 分别求取  $R^*$ 、 $G^*$ 、 $B^*$  3 个通道的平均灰度,以  $R^*$  为例:

$$R_{\text{mean}} = \sum R(x,y)/(x \times y) \quad (3)$$

式中, $R_{\text{mean}}$  为  $R^*$  通道的平均灰度; $R(x,y)$  为像素点  $(x,y)$  处的像素值; $x,y$  为图片的像素宽度和高度。

(3) 根据图片大小将 3 个通道图像分为  $M \times N$  个子块,求出各子块的平均值,得到子块的亮度矩阵  $V_{mn}$ :

$$V_{mn} = \begin{pmatrix} V_{11} & \cdots & V_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & \cdots & v_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

(4) 用矩阵  $V$  中的元素减去原图  $R^*$  通道的平均灰度,得到子块的亮度插值矩阵  $E_{mn}$ :

$$E_{mn} = V_{mn} - R_{\text{mean}} = \begin{pmatrix} v_{11} - R_{\text{mean}} & \cdots & v_{1n} - R_{\text{mean}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} - R_{\text{mean}} & \cdots & v_{mn} - R_{\text{mean}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

(5) 用 OpenCV 中的立方插值法将矩阵  $E_{mn}$  调整为与原图大小一样的亮度分布矩阵  $I_r$ 。

(6) 用原图各通道矩阵减去相应的亮度分布矩阵得到校正后的各通道矩阵  $R_c$ 、 $G_c$ 、 $B_c$ ,以  $R^*$  为例:

$$R_c = R^* - I_r \quad (6)$$

(7) 最后合并  $R_c$ 、 $G_c$ 、 $B_c$  3 个通道,得到阴影补偿后的图片。

图像处理前后效果如图 5 所示,其中图 5(a) 为 CCD 相机拍摄的原图,图 5(b) 为提取的 ROI 区域,图 5(c) 为高斯滤波后的效果图,图 5(d) 为阴影补偿后的效果图。

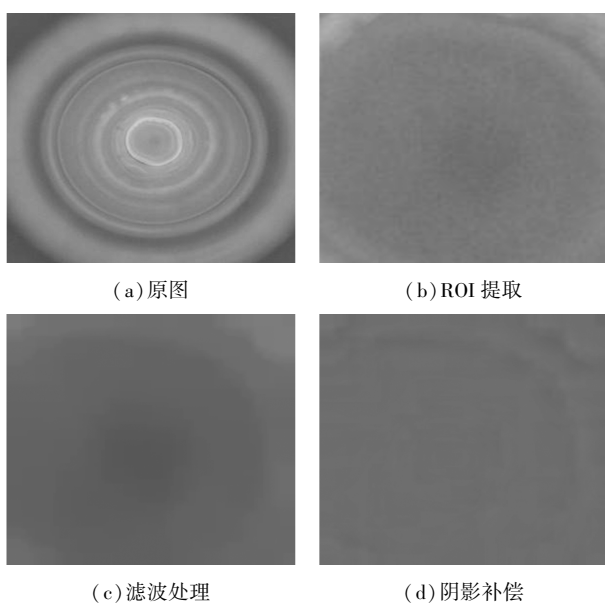


图 5 图像预处理效果图

为了直观体现图像预处理效果,将处理前后的图像转换为灰度图像,以像素点坐标 $(x,y)$ 建立网格,灰度值作 $z$ 轴,用 Origin 9 绘制其 3d-surface 效果图如图 6;用 OpenCV 计算图像 RGB 三通道特征

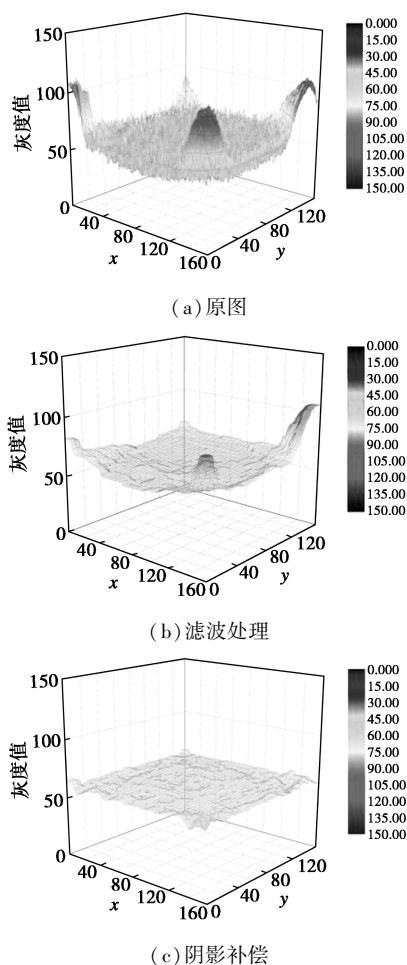


图 6 灰度图像 3d-surface 渲染图

值直方图并用 Python 绘制图像各像素通道处理前和处理后的直方图如图 7。

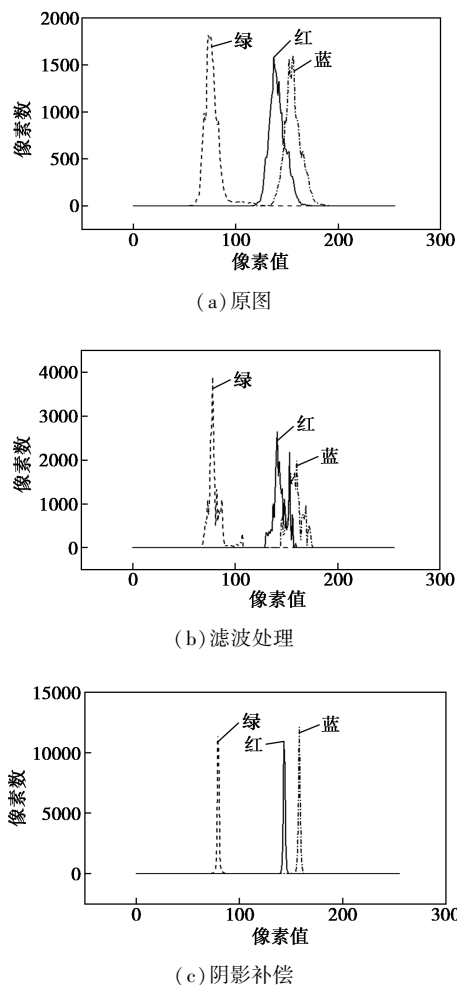


图 7 RGB 特征值直方图

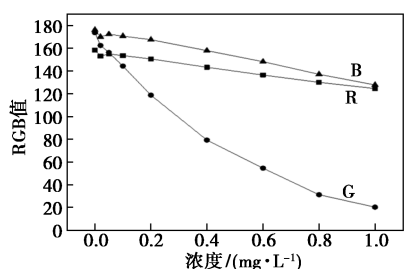
由图像一致性仿真图和像素直方图可见图像一致性在高斯滤波、形态学处理和阴影补偿后得到明显改善。

## 2 结果与分析

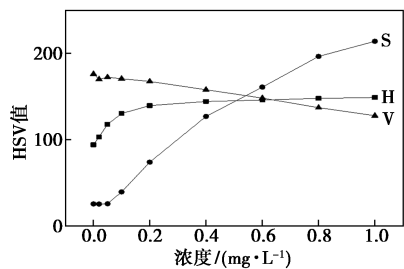
### 2.1 颜色特征值的选取与回归模型

#### 2.1.1 颜色特征值的选取

标准工作曲线的建立和回归分析与颜色特征值的选取密切相关,颜色特征值的选取也直接影响着 6 价铬浓度测量的灵敏度和确定性<sup>[21]</sup>。按照国标方法配置 0~1.0 mg/L 6 价铬标准溶液 9 组,在设计好的顺序注射平台上开展实验,在显色反应后,将溶液输送到图像检测池中,对溶液图像进行采集。测得 RGB 与 HSV 色域空间下各颜色特征值与 6 价铬浓度之间的变化规律如图 8 所示。



(a) 浓度与 RGB 特征值关系



(b) 浓度与 HSV 特征值关系

图 8 颜色特征值浓度关系图

分析图 8 可知,RGB 色域空间 3 个特征值均随溶液浓度增大而减小,具有明显的线性关系;HSV 色域空间下虽然 3 个特征值各自呈现出一定规律,而并无整体规律。因此选择 R、G、B 特征值进行线性回归分析。

### 2.1.2 线性回归分析

以 6 价铬溶液浓度  $c$  为因变量,RGB 色域空间的 R、G、B 特征值为自变量,使用 SPSS 24 软件进行多元线性回归分析,回归模型的回归系数  $R^2$  为 0.999,调整后的回归系数  $R^2$  为 0.998;经  $F$  检验  $F$  变化量为 1 316.596,显著性在 0.01 以下,说明线性回归达到预期效果。

据表 1,可由 RGB 3 个特征值变量对应的系数得到模型预测方程:

$$c = 0.051 \times R - 0.004 \times G - 0.043 \times b + 0.143 \quad (7)$$

回归系数  $t$  检验  $R=3.829$ ,显著性为 0.012; $G=$

$-5.713$ ,显著性为 0.002; $B = -5.863$ ,显著性为 0.002。说明 R、G、B 3 特征值对 6 价铬浓度影响显著,结合表 1 结果,可见多元线性拟合效果较好。

表 1 多元线性回归系数

模型	未标准化系数		标准化系数	$t$	显著性
	B	标准误差			
A 常量	0.143	0.757	—	0.188	0.858
R	0.051	0.013	1.672	3.829	0.012
G	-0.004	0.001	-0.703	-5.713	0.002
B	-0.043	0.007	-1.983	-5.863	0.002

建立浓度残差图如图 9,残差为  $-0.03 \sim 0.02$  之间的随机值,服从均值为零的正态分布,说明多元线性回归模型合理。

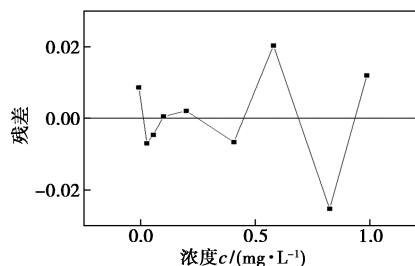


图 9 6 价铬浓度残差图

## 2.2 工作曲线、精密度

### 2.2.1 标准工作曲线

依据国标 GB 7464—1987,按照国标法配置浓度为 0、0.02、0.05、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/L 的试剂,按实验流程进行实验,显色反应后,每隔 5 s 用 CCD 相机提取 1 张图像,共 5 张图像,经图像预处理后,取 RGB 值相对标准偏差最小的 3 张图像色度平均值作为检测结果。为验证本文中方法的可行性和准确性,在提取图像的同时按国标法进行分光光度检测,检测结果以及工作曲线见表 2。

表 2 实验数据和标准曲线

浓度 $c/(mg \cdot L^{-1})$	0	0.02	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
吸光度 $a$	0.007	0.016	0.039	0.073	0.165	0.317	0.458	0.619	0.783
国标法标准曲线	$c = 0.7752a + 0.0023 (R^2 = 0.999)$								
颜色特征值									
R	158.58	153.21	155.18	153.64	150.73	143.42	136.61	130.19	124.67
G	173.81	162.52	156.37	144.43	118.89	79.37	54.66	31.36	20.44
B	176.28	170.15	172.50	170.83	167.65	158.03	148.32	137.24	127.91
色度法标准曲线	$c = 0.051 \times R - 0.004 \times G - 0.043 \times b + 0.143 (R^2 = 0.998)$								

### 2.2.2 精密度

为验证工作曲线的精密度和准确度,分别配置量程零点校正液、20%和 80%的 6 价铬标准溶液,按照实验流程,使用国标方法和本文中方法同时进行 6 次平行测定,减去零值后,计算测定结果的平均值和相对标准偏差<sup>[22]</sup>。测定结果如表 3。

表 3 精密度测定结果对比

水样/ (mg·L <sup>-1</sup> )	测定结果/ (mg·L <sup>-1</sup> )		平均值		标准 偏差	相对标准 偏差/%
0.2 国标方法	0.187	0.214	0.201	0.202	0.010	4.8
	0.210	0.196	0.204			
本文方法	0.190	0.191	0.193	0.190	0.003	1.4
	0.185	0.193	0.189			
0.8 国标方法	0.812	0.814	0.781	0.806	0.017	2.2
	0.788	0.825	0.816			
本文方法	0.803	0.803	0.801	0.803	0.003	0.4
	0.806	0.796	0.805			

实验结果表明,本文中设计的基于图像表示的 6 价铬水质在线检测方法相对标准偏差小于 2%,检出限为 0.006 mg/L,符合国标规定的性能指标,优于传统的国标方法。

## 3 结论

针对水质 6 价铬测定,提出了一种基于色差-浓度测定原理的水质 6 价铬自动测定方法。利用顺序注射平台和自主设计的检测池和系统控制模块,实现了 6 价铬的快速自动测定。设计并实验进行了色域空间特征值选取,利用 SPSS 软件对浓度和 RGB 色域空间中的 R、G、B 特征值之间的关系进行了多元线性回归,建立了可靠的回归模型。通过图像处理技术对图像进行 ROI 提取、平滑滤波,提出了基于彩色图像的阴影补偿方法,减小了外界干扰,还原了图像色彩,提高了测定精度和稳定性。同时进行了国标方法检测,经过对比和验证,本文中方法可以达到 GB 7464—1987 的测定精度要求,各项参数符合 6 价铬测定要求,系统运行稳定,精准、高效分析不同地表水样的 6 价铬,为水质检测提供了新的技术思路,为环境保护和污水排放提供了新的技术支持。

### 参考文献

[1] 国家环境保护总局编委会.水和废水监测分析方法[S].北京:

中国环境科学出版社,2002.

- [2] 杨文武,张钧.水和废水中六价铬测定关键问题研究[J].环境工程,2010,28(3):108-112.
- [3] Zhao Yueqi, Sun Yuanqing, Jiang Yingnan, et al. Fluorescent probe gold nanodots to quick detect Cr(VI) via oxidoreduction quenching process[J]. Science China: Chemistry, 2019, 62(1): 133-141.
- [4] 王国琴,江俊,袁荣辉,等.六价铬的分析方法研究进展[J].理化检验:化学分册,2017,53(4):494-496.
- [5] 刘雪梅,马闯,陶嘉熙,等.二苯碳酰二肼分光光度法及其改进方法测定水体中 Cr(VI)[J].应用化工,2018,47(6):1308-1311.
- [6] 张凯歌,王云鹤,李双莹,等.二苯碳酰二肼光度法测定铬(VI):不足及改进[J].化学教育:中英文,2019,40(14):49-52.
- [7] 龚正君,陈国和,肖新峰,等.皮革工业中六价铬检测方法研究新进展[J].中国皮革,2009,38(11):47-50.
- [8] 孙颖奇,周霞,罗勇钢,等.六价铬水质在线监测仪的设计与实验研究[J].仪表技术与传感器,2017,(6):32-36.
- [9] 李刚,崔莉凤.环境水样中六价铬的分析技术进展[J].中国皮革,2011,40(21):47-50.
- [10] 卢欣春,袁颖华,孙颖奇,等.微型分光光度计的研制及其在六价铬水质在线分析仪中的应用[J].激光与光电子学进展,2018,55(12):437-443.
- [11] 周长青,汪群杰,何雅娟,等.水质监测材料设备研发与国产化探索[J].给水排水,2013,49(7):24-31.
- [12] GB 7467—1987.水质六价铬的测定二苯碳酰二肼分光光度法[S].
- [13] Altun H, Sinekli R, Tekbas U. An efficient color detection in RGB space using hierarchical neural network structure[C]. International Symposium on Innovations in Intelligent Systems & Applications, IEEE, 2011.
- [14] 杨旭强,冯勇,刘洪臣.一种基于 HSI 颜色模型的目标提取方法[J].光学技术,2006,32(2):290-292.
- [15] 李文,吕赫,徐明刚,等.多量程原位水质总磷总氮一体式在线监测仪[J].发光学报,2019,40(7):930-940.
- [16] Andreas Koschan, Mongi Abidi. 彩色数字图像处理[M].章毓晋,译.北京:清华大学出版社,2010:69-70.
- [17] Faraji H, Maclean J. CCD noise removal in digital images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9): 2676-2685.
- [18] 宋伟,左丹,邓邦飞,等.高压输电线防震锤锈蚀缺陷检测[J].仪器仪表学报,2016,37(S1):113-117.
- [19] 黄新波,张慧莹,张焯,等.基于改进色差法的复合绝缘子图像分割技术[J].高电压技术,2018,44(8):2493-2500.
- [20] 杨俊,赵忠明.基于归一化 RGB 色彩模型的阴影处理方法[J].光电工程,2007,(12):92-96.
- [21] 曹生现,王延红,郑丽婷,等.基于图像处理的水质中氨氮含量的检测研究[J].化工自动化及仪表,2014,41(8):910-914.
- [22] HJ 609—2011.六价铬水质自动在线监测仪技术要求[S].