

光柱镭射纸及其印刷品的颜色质量评价方法

黄 敏¹, 李泽阳¹, 石冰洁¹, 崔桂华^{2*}, 史春洁¹, 刘浩学¹

¹北京印刷学院印刷工程与包装学院, 北京 102600;

²温州大学物理与电子信息学院, 浙江 温州 325035

摘要 为了准确、稳定地测量分析光柱镭射纸张及其印刷品的颜色,在分析了纸张微观结构的基础上,选用积分球式分光光度计,在纸张(或印刷品)的不同光柱周期内进行采样,同时在纸张(或印刷品)固定位置处旋转不同角度采样。将采集到的数据进行数学统计分析,建立了两种光柱镭射纸和印刷品的颜色色度值测量和色差计算方法。与现有方法相比,该测量方法在提高了工作效率的同时,也较大地提高了测量精度。该方法可为包装印刷企业的纸张、印刷品质量检测提供高效且客观的评价手段。

关键词 视觉; 颜色测量; 光柱镭射纸; 光栅条纹; 光柱周期

中图分类号 O432.3 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0233001

Color Quality Evaluation Methods for Holographic Paper and Its Printings with Light Pillars

Huang Min¹, Li Zeyang¹, Shi Bingjie¹, Cui Guihua², Shi Chunjie¹, Liu Haoxue¹

¹ School of Printing and Packaging Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China;

² College of Physics & Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China

Abstract In order to measure and analyze the color of holographic paper and its printings with light pillars accurately and stably, the integrating sphere spectrophotometer is selected to collect colorimetric values within different periods of light pillars and different angles in fixed position of holographic paper (or printings) based on analyzing the microstructure of paper. The collected values are analyzed to build up two color measurement and analysis methods for holographic papers and printings. Compared with the existing methods, the measurement methods not only improve the working efficiency, but also greatly improve the accuracy of the measurement. Those methods can provide an efficient and objective evaluation way for the quality inspection of packaging and printing enterprises.

Key words vision; color measurement; holographic paper; grating stripe; period of light pillars

OCIS codes 330.1690; 330.1710; 330.1730

1 引 言

光柱镭射纸由于其亮彩虹效果,给包装印刷行业的颜色测量和生产控制带来了很大的麻烦。对镭射纸及其印刷品的颜色测量和评价,目前还没有相应的测量标准和行业规范。实际生产中,对样品的颜色质量评价大多依赖于主观评价;不同企业和公司的测量方法各不相同,主要是结合客户方的需求,通过测量镭射纸张及其印刷品固定位置处的一个点或是几个点,来判断样张是否合格。该测量方法需要人为确定测量位置,可重复性差,同时具有一定的片面性,只能反映纸张或印刷品中被测量区域的颜色特性,不能较好地反映纸张或印刷品的整体质量。

万晓霞等^[1-3]对镭射纸的颜色测量方法开展了大量的研究工作,提出采用漫反射光测量镭射纸上不同位

收稿日期: 2016-09-05; **收到修改稿日期:** 2016-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61675029,61308081)、北京市科委科技新星人才计划(Z151100000315076)

作者简介: 黄 敏(1979—),女,博士,教授,主要从事显示设备、输出设备的颜色色差评价、测量及色彩管理技术等方面的研究。E-mail: huangmin@bigc.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: gcui@wzu.edu.cn

置(可取不同的三个位置)或是同一位置不同方向(0°与 90°)的色度值,并取平均色度值以提高颜色测量的精度。孙鹏等^[4]搭建漫射照明积分球式分光光度计,冯之幸等^[5]设计穹顶光源,搭建漫反射测量装置进行颜色测量,上述测量结果能反映出纸张在不同测量角度和位置的颜色差异性,但是搭建的漫射光系统成本较高,同时只能采集单个点的信息进行比对,测量误差较大。徐艳芳等^[6]提出采用线光源扫描的方式进行镭射纸的颜色测量,可一次扫描纸张的颜色信息,但是会受到颜色转换精度误差的影响。

本文在前期分析光柱镭射纸和印刷品微观周期结构的基础上^[7],选用积分球式的分光光度计采集样品的色度值,通过对测量数据的周期性分布规律进行分析,并结合企业的实际应用需求,建立了两种光柱镭射纸和印刷品的颜色色度值测量分析方法。结果表明,计算结果与目视评价结果较为一致,可应用于实际生产质量检测 and 过程控制。

2 微观结构分析

将光柱镭射纸在 KEYENCE VK-X200K 3D 激光共聚焦显微镜下放大 3000 倍,观察其微观结构,如图 1 所示。可见,引起光柱镭射纸的亮彩虹效果,正是图 1(a)中光柱镭射纸的准平面衍射光栅周期性结构分布引起不同角度观察到的颜色视觉效果^[8-9],其光栅条纹周期约为 1 μm,满足的光栅方程为

$$d(\sin i + \sin j) = k\lambda, \tag{1}$$

式中 d 为光栅条纹周期,即一个条和一个空的宽度之和,与可见光波长的量级相同。 i 和 j 分别为光线的入射角和衍射角, k 为衍射级数, λ 为波长。

图 1(b)为条纹的纵向刻划深度,其大小影响衍射光强的强弱,并与纸张表面的反射铝层共同作用,影响纸张的明暗视觉效果。

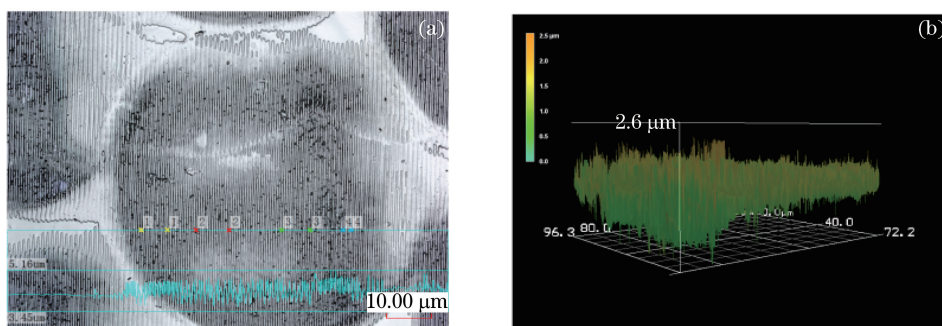


图 1 光柱镭射纸平面和纵向微观结构

Fig. 1 Superficial and lengthways microstructure of holographic paper

由于不同的印刷设计需求,在使用光柱镭射纸张为基底材料进行印刷的过程中,印刷品墨层厚度会有所不同。图 2 所示为光柱镭射纸张[图 2(a)]和两种不同墨层遮盖的印刷品[图 2(d)和(g)]外观图,以及将其

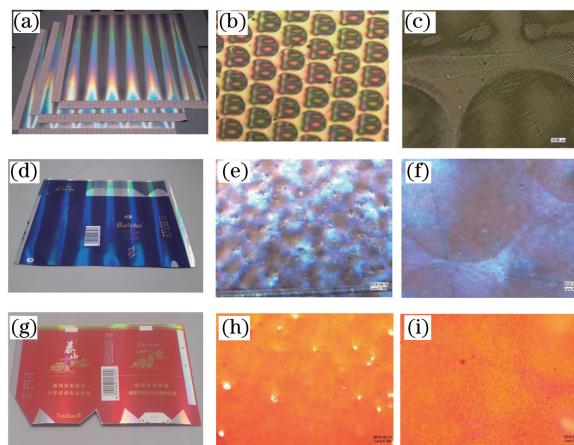


图 2 光柱镭射纸和印刷品的视觉和微观效果

Fig. 2 Visual and microcosmic effect of holographic paper and its printings

分别放大 500 倍[图 2(b)(e)(h)]和 3000[图 2(c)(f)(i)]倍的微观结构图。图 2(d)中的印品(白沙条盒)墨层较薄,对纸张的光柱遮盖效果不是很明显,图 2(g)中的印品(泰山宏图)墨层较厚,对纸张有较强的遮盖效果,因此放大 500 倍[图 2(h)],3000 倍[图 2(i)]后已基本看不出光栅条纹的影像。

3 光柱辐射纸色度值分布规律

研究表明,选用积分球式分光光度计[如 X-Rite SP64 测量参数为 D65 光源照明,国际照明委员会(CIE) 1964 观察者,包含镜面反射光(SCI),4 mm 测量孔径]沿着光柱辐射纸垂直光柱方向测量,和将光柱辐射纸依次旋转不同的角度测量,得到的色度值均有一定的周期变化,其数值存在一定的对应关系^[7]。

项目研究过程中收集并测量了来自不同厂家的 28 种辐射纸张,对采集到的色度值进行了对比分析。以图 3(a)和(b)中的数据[图 3(a)为第一种纸的色度值,图 3(b)为第二种纸的色度值]为例进行分析说明。测量时,分别沿着垂直于纸张光柱方向测量 41 个采样点,相邻采样点间距为 2.5 mm;同时选择纸张上任一处固定位置,从 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ (每间隔 5° 采样)旋转不同的角度测量该位置处的 73 个色度值,将两种测量方法得到的色度值变化折线汇总,如图 3 所示。

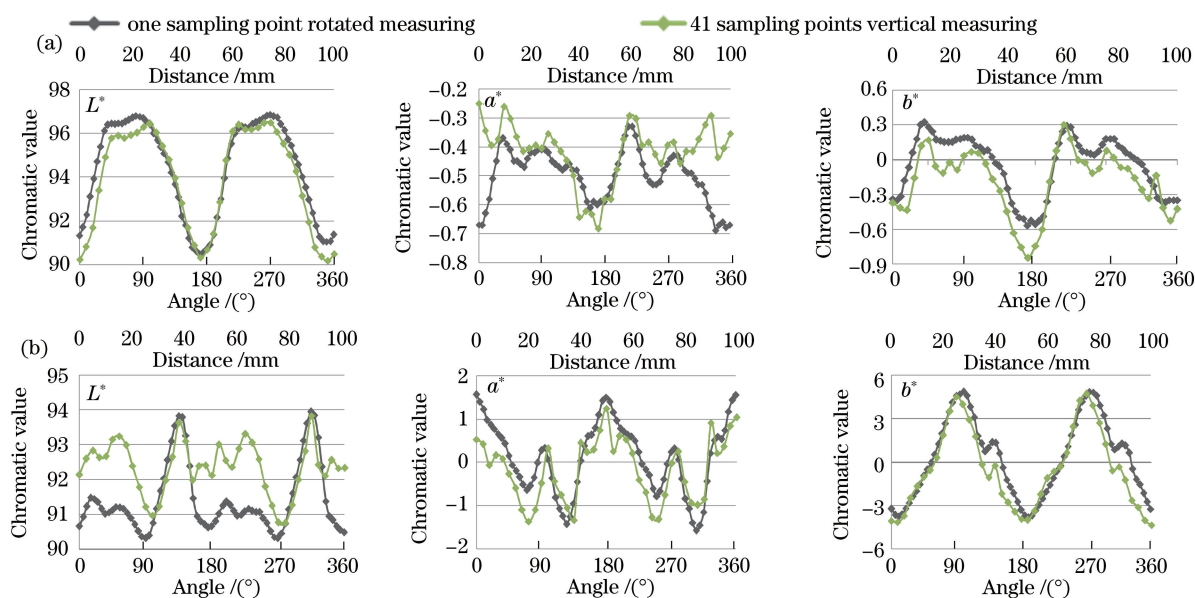


图 3 垂直光柱多点采样与旋转一点采样的色度值汇总图

Fig. 3 Chromatic values from vertical multi-sampling and rotated single sampling measurement methods

由表 3 可见,两种测量方法得到的纸张 $L^* a^* b^*$ 色度值变化趋势较为一致,但考虑到多点采样受纸张均匀性的影响,两种方法的变化折线不可能完全重合。根据文献^[7]的图 3 中对光柱辐射纸的微观结构变化规律分析可知,这两种测量方法都能真实反映光柱辐射纸的色度值。

以下选取部分测试结果,对两种测量方法的测量精度进行详细说明。

3.1 垂直于纸张光柱方向不同位置测量

3.1.1 光柱辐射纸色度值测量及分析

选取三张同一品牌(用于印制同一种印刷品)不同批次的光柱辐射纸进行纸张的色差计算,其中 Paper 1 代表标样, Paper 2 为企业在使用过程中评判为目视合格的测试样, Paper 3 为目视偏暗测试样(不合格)。使用项目组搭建的光柱辐射纸颜色自动测量平台^[10]采集纸张色度值(沿着垂直于光柱的方向每张纸测量 60 个采样点,采样点的间距为 2.5 mm)。

测量得到 Paper 1、Paper 2、Paper 3 的原始色度值变化折线如图 4 所示。

由于测量仪器在标样和测试样上采样的起始位置不同,而垂直于纸张光柱方向采集到的色度值有较大差异,因此需要将两组数据调整到同样的周期位置处,再一一对应计算,比较色差。如图 5 所示,以 L^* 值峰值出现位置进行对齐。

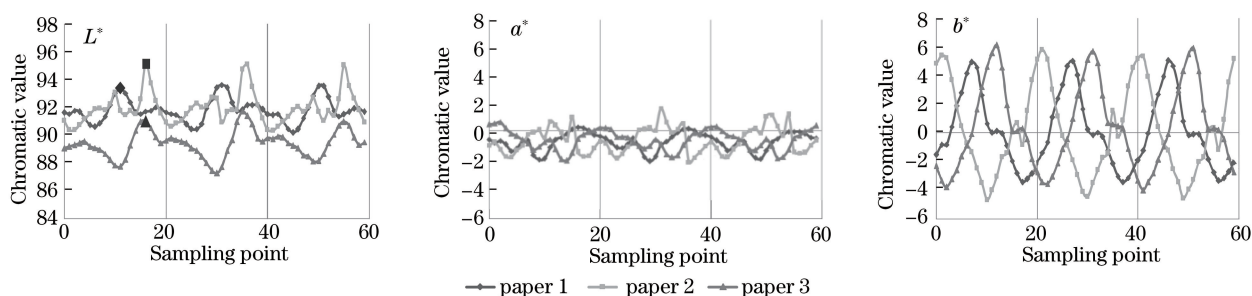


图 4 三张纸采样点原始 L^* , a^* , b^* 色度值变化折线图

Fig. 4 Distribution of original L^* , a^* , b^* values of three holographic papers

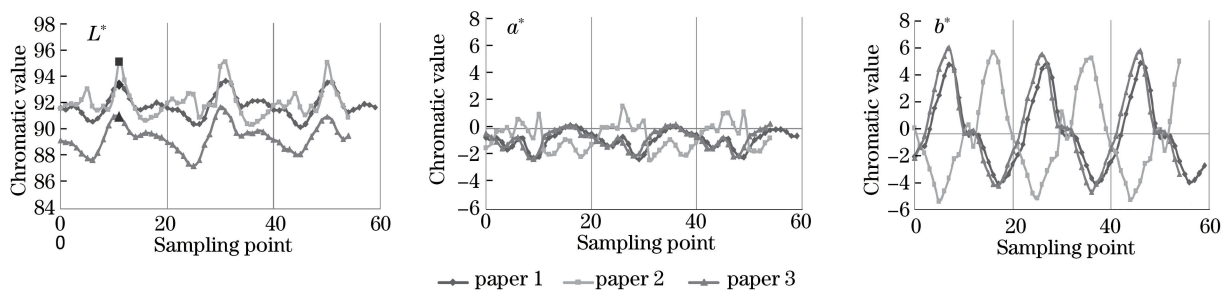


图 5 三张纸采样点调整后的 L^* , a^* , b^* 色度值变化折线图

Fig. 5 Distribution of L^* , a^* , b^* values of three different papers after data alignment

进一步,发现 Paper 2 上各采样点的色度值变化折线与其他样张相比,呈现镜像翻转。由光柱辐射纸微观结构及测色示意图可以做出解释,如图 6 所示。

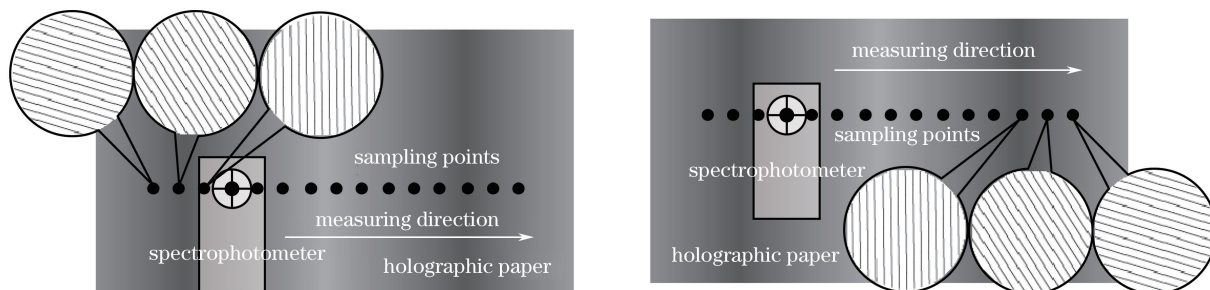


图 6 (a) 光柱辐射纸微观结构及测量示意图; (b) 纸张翻转 180° 后测量示意图

Fig. 6 (a) Microstructure and measurement diagram of holographic paper; (b) measurement diagram of holographic paper after rotating 180°

由图 6 可知,颜色测量仪器的测量方向保持不变,由于纸张摆放方向不同导致光柱辐射纸光栅相对于测色仪器的位置恰好旋转 180° 。这就意味着,原本第一个采样点的色度值其实是最后一个采样点的色度值,只是测量顺序发生了变化,应将 Paper 2 上各采样点的色度值翻转 180° 再进行比较计算,如图 7 所示,经过翻转后,纸张的色度值变化规律较为一致。

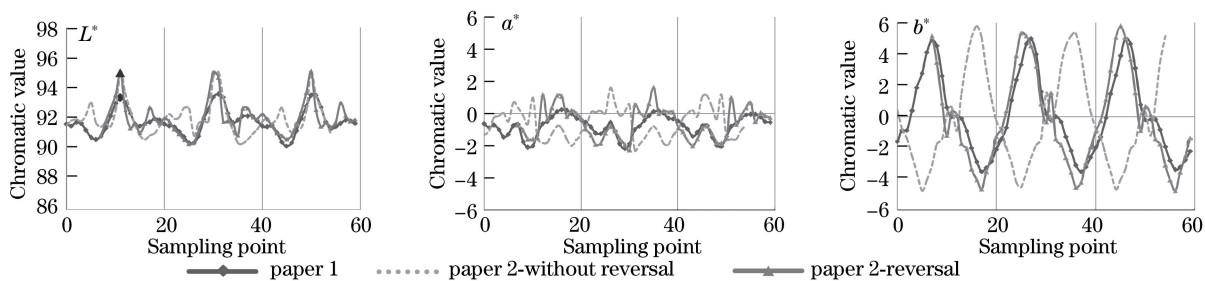


图 7 Paper 2 L^* , a^* , b^* 色度值经“翻转”后的变化折线图

Fig. 7 Distribution of L^* , a^* , b^* values of Paper 2 after reversal

进一步地,以两张另一品牌同一批次的合格纸张(编号为 Paper 4 和 Paper 5)进行方法的验证。测量色度值变化折线如图 8(a)所示,可见,其采样点的色度值 L^* 值由于受镀铝层均匀性的影响,峰值位置不是很明显。选用 L^* 值对齐的方式,调整后的变化曲线如图 8(a)所示,计算纸张 4 和 5 间的 CIELAB 色差为 3.36,与目视结果并不一致。选择以 a^* 值或 b^* 值对齐的方式调整,调整后的变化曲线如图 8(b)所示。

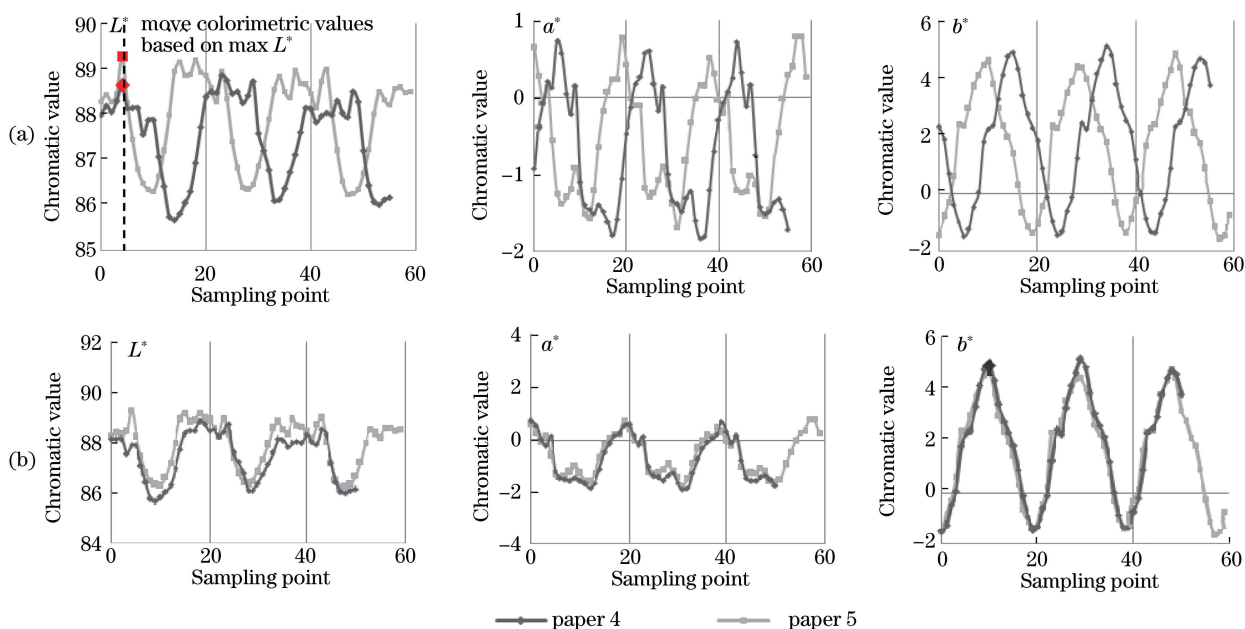


图 8 Paper 4 与 Paper 5 采样点调整后的 L^* , a^* , b^* 色度值变化折线图

Fig. 8 Distribution of L^* , a^* , b^* values of Paper 4 and Paper 5 after data alignment

3.1.2 色差计算

将以上调整后的各样张上采样点色度值一一对应比较,计算 CIELAB 色差,并计算所有采样点的色差平均值,作为样张的最终色差结果。结果汇总如表 1 所示。其中, P1&P3 表示标样 Paper 1 与偏暗试样 Paper 3 比较,P1&P2-without reversal 表示标样 Paper 1 与测试样 Paper 2 的采样点色度值未经翻转的比较,P1&P2-reversal 表示标样 Paper 1 与试样 Paper 2 的采样点色度值经翻转后比较,P4&P5 表示 Paper 4 与 Paper 5 比较。

表 1 采样点色度值经平移后计算的平均色差

Table 1 Mean ΔE_{ab}^* of sampling points chromatic value after translation

	P1&P3	P1&P2-without reversal	P1&P2-reversal	P4&P5
ΔE_{ab}^*	2.62	4.72	1.37	0.69

结合企业在实际应用时的目视色差判断结果,由表 1 可知,Paper 1 与 Paper 2 的实际 CIELAB 色差为 1.37,而不是 4.72;Paper 1 与 Paper 3 的 CIELAB 色差为 2.62,Paper 4 与 Paper 5 的 CIELAB 色差为 0.69 (以 L^* 值对齐的方式其计算色差为 3.36,为误判)。为了提高颜色测量和色差计算的精确度,该方法需要将标样和试样的原始及“翻转”后的色度数据,分别调整到同样的周期位置处,进而将采样点一一对应比较计算色差,从而计算平均色差值,取其中最小的平均色差值作为样张的最终色差结果。项目研究过程中使用该方法对来自不同厂家的 28 种镭射纸张和 26 种印刷品的色差比较测试结果均符合目视色差判断结果(注:该结果来源于企业专业质检人员对纸张和印刷品的目视评判)。

3.2 纸张固定位置旋转测量

在实际应用中,企业在印刷过程中为提高工作效率,一般需要定点测量印刷品固定位置处的颜色信息,从而快速判断标样和测试样的色差大小。进一步地,进行纸张和印刷品的固定位置的颜色测量和分析。

3.2.1 不同样张色度值比较

由图 3 的比较结果可知,在纸张(印刷品)固定位置处旋转不同角度测量得到的色度值也以一定的周期变化。在每种样张上任一固定位置处,旋转测色仪器,从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 每间隔 5° 均匀采样。将采集得到的 73 个

数据,分别使用以下方法 1、2、3 随机取样 30 次,模拟任意采样(仪器摆放和试样的相对夹角)可能出现的结果,比较不同方法的测量精度(以最大 CIELAB 色差表示,色差值越大,测量精度越差;色差值等于 0 为理想状态,表明不同旋转测量次数间的测量误差为 0)。

方法 1:随机取出 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 任一角度处的色度值,分别与其他任一角度处的色度值比较,计算 CIELAB 色差,记录最大色差;

方法 2:计算两个垂直角度处(如 $0^{\circ}\&90^{\circ}, 5^{\circ}\&95^{\circ}, 10^{\circ}\&100^{\circ}, \dots$)色度值的平均值,随机取一计算平均值与其他计算平均值比较,计算 CIELAB 色差,记录最大色差;

方法 3:计算 4 个连续且依次间隔 45° 角处($0^{\circ}\&45^{\circ}\&90^{\circ}\&135^{\circ}, 5^{\circ}\&50^{\circ}\&95^{\circ}\&140^{\circ}, \dots$)色度值的平均值,随机取一计算平均值与其他计算平均值比较,计算 CIELAB 色差,记录最大色差。

以三种光柱辐射纸(编号为 Pa-1, Pa-2, Pa-3)和三种光柱辐射印刷品(编号为 Pr-1, Pr-2, Pr-3)的测量和计算结果进行方法 1、2、3 的比较,结果如表 2 所示(随机取样 30 次)。

表 2 测量三种光柱辐射纸及其印刷品固定位置不同角度得到的最大色差值

Table 2 Maximum ΔE_{ab}^* from one fixed position with different angles of three holographic papers and printings

Random times	Method 1						Method 2						Method 3					
	Pa-1	Pa-2	Pa-3	Pr-1	Pr-2	Pr-3	Pa-1	Pa-2	Pa-3	Pr-1	Pr-2	Pr-3	Pa-1	Pa-2	Pa-3	Pr-1	Pr-2	Pr-3
1	5.58	6.69	7.43	2.97	3.10	0.85	2.10	1.79	2.47	0.90	1.50	0.43	0.74	0.95	1.01	0.29	0.33	0.19
2	8.27	6.07	5.25	2.71	3.35	0.73	1.61	2.12	2.47	0.90	1.30	0.26	0.60	0.90	0.85	0.36	0.26	0.21
3	6.84	4.59	8.90	1.88	3.28	0.58	1.61	2.14	2.19	1.57	1.28	0.32	0.61	1.07	0.83	0.28	0.31	0.20
4	8.20	4.59	6.20	2.02	2.41	0.67	2.39	2.00	3.05	1.01	0.94	0.24	0.69	0.96	0.73	0.42	0.32	0.18
5	5.00	6.67	6.19	1.80	3.83	0.72	1.50	1.58	2.89	1.28	1.35	0.30	0.78	0.80	0.98	0.44	0.39	0.26
6	6.64	6.95	8.33	2.71	2.80	0.45	2.42	1.82	2.27	1.52	1.20	0.34	0.61	0.90	0.90	0.50	0.33	0.29
7	8.77	5.22	8.32	3.27	2.55	0.47	2.37	1.95	2.78	1.52	1.38	0.26	0.51	0.92	0.75	0.49	0.37	0.22
8	7.44	4.31	5.51	2.42	2.89	0.67	1.63	1.91	2.57	1.37	1.20	0.34	0.61	0.98	0.79	0.26	0.30	0.17
9	6.21	4.55	7.18	2.01	3.57	0.82	1.49	2.08	2.96	1.02	1.42	0.27	0.84	1.06	0.79	0.28	0.28	0.30
10	5.19	5.22	8.50	2.06	3.16	0.52	1.70	1.99	3.01	0.81	0.91	0.32	0.51	0.74	0.85	0.39	0.40	0.19
11	8.57	7.12	7.92	2.08	3.07	0.49	2.07	2.14	1.94	0.95	1.13	0.26	0.65	1.19	0.92	0.50	0.32	0.20
12	6.16	3.85	7.69	2.36	3.04	0.84	2.27	2.30	2.21	0.95	1.19	0.37	0.84	0.99	0.88	0.28	0.44	0.16
13	5.84	6.95	6.10	1.93	3.27	0.48	2.10	1.65	2.92	1.42	1.39	0.47	0.72	0.87	1.20	0.30	0.26	0.16
14	4.68	6.63	7.11	3.27	3.80	0.67	1.46	1.83	2.30	1.03	1.03	0.25	0.59	0.98	0.87	0.28	0.28	0.16
15	7.77	6.95	6.72	2.45	3.05	0.80	2.25	2.03	2.44	1.26	1.13	0.34	0.69	1.14	0.75	0.42	0.41	0.20
16	5.44	7.12	6.17	2.02	2.94	0.55	2.08	2.09	1.88	1.51	1.41	0.31	0.51	1.11	0.80	0.28	0.35	0.18
17	7.78	5.04	5.47	2.09	2.94	0.63	2.02	2.29	1.87	1.03	1.44	0.32	0.84	0.68	0.67	0.28	0.32	0.17
18	5.88	4.50	7.57	2.09	3.80	0.76	2.46	2.26	2.47	1.09	1.28	0.27	0.50	0.68	0.80	0.42	0.44	0.24
19	7.44	6.18	7.30	2.19	3.10	0.84	1.74	1.63	1.81	0.94	1.28	0.34	0.75	0.89	0.82	0.42	0.44	0.22
20	4.68	5.22	7.92	2.99	2.96	0.82	2.50	2.05	3.16	1.39	1.20	0.27	0.69	1.00	0.78	0.34	0.32	0.16
21	6.51	4.90	7.69	1.80	2.91	0.47	1.50	2.19	2.51	1.52	1.44	0.31	0.65	0.80	0.98	0.49	0.26	0.23
22	8.71	4.52	6.52	2.70	3.80	0.59	1.72	1.76	1.77	1.28	1.54	0.24	0.53	1.13	0.87	0.32	0.38	0.18
23	8.65	6.07	5.71	2.02	3.29	0.50	2.60	1.51	3.26	1.32	1.21	0.31	0.67	0.96	0.75	0.50	0.44	0.21
24	6.51	4.26	8.32	2.36	3.53	0.54	1.81	1.64	1.87	1.28	1.28	0.33	0.70	0.99	0.92	0.36	0.40	0.19
25	5.74	7.29	5.51	2.81	2.74	0.46	2.57	1.91	1.87	0.94	0.93	0.31	0.68	0.93	0.82	0.49	0.33	0.20
26	6.51	4.97	7.55	2.06	3.26	0.64	2.51	2.26	2.19	1.39	1.29	0.24	0.53	0.74	1.09	0.41	0.27	0.17
27	8.54	5.74	6.19	1.79	3.27	0.72	2.49	1.89	3.10	0.87	1.37	0.34	0.72	0.84	0.75	0.49	0.44	0.16
28	5.97	5.01	8.24	2.70	3.56	0.60	1.67	1.94	2.01	1.37	1.09	0.35	0.62	1.11	0.82	0.34	0.39	0.26
29	8.69	7.20	7.98	3.06	3.26	0.49	2.64	2.19	2.52	1.52	1.42	0.46	0.51	1.08	0.89	0.48	0.27	0.18
30	5.37	7.39	4.75	3.27	3.80	0.66	2.60	1.73	1.77	1.33	1.03	0.26	0.59	0.92	0.76	0.50	0.33	0.18
Mean	6.79	5.73	7.01	2.40	3.21	0.64	2.06	1.96	2.42	1.21	1.25	0.31	0.65	0.94	0.85	0.39	0.35	0.20

由表 2 可见,方法 1 测量得到的纸张 CIELAB 色差值较大,纸张的每一次 CIELAB 色差测量结果均大于 5.0;选用方法 3 测量得到的光柱辐射纸张和印刷品的 CIELAB 色差都在 1.0 以内,小于方法 1、2 测量得到的

CIELAB 色差,测量精度有了较大的提高,同时也在人眼视觉可分辨色差阈值范围^[11],满足精细印刷的要求。

3.2.2 同一样张不同位置处色度值比较

采用方法 3 分别在上述三种纸张及其印刷品上固定点 A 以外的任意两个位置 B、C 处测量,利用其 4 个角度的平均色度值计算两两位置处(A & B、A & C、B & C)的 CIELAB 色差,以研究不同测量位置对测量结果的影响,如表 3 所示。

表 3 方法 3 测量纸张和印刷品其他位置处的色度值比较

Table 3 Chromatic value comparison of holographic paper and printings for different positions measured by method 3

Position	Pa-1									Pa-2								
	A			B			C			A			B			C		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0°	91.45	0.86	-3.22	91.81	-1.2	4.11	92.78	-1.15	2.72	90.01	1.16	-2.09	90.28	1.34	-1.92	90.78	1.39	-2.66
45°	91.03	-0.51	1.24	93.41	-0.77	-0.55	93.75	0.27	-0.43	89.89	0.36	-1.73	90.27	0.49	-1.31	90.26	-0.56	-0.19
90°	91.67	-0.81	3.8	92.21	0.46	-2.76	91.94	0.82	-2.97	89.72	-1.58	2.35	89.91	-1.49	2.58	90.17	-1.15	3.1
135°	91.47	0.61	-0.39	92.02	-0.13	-0.39	91.53	-0.16	2.14	91.57	-1.32	0.29	91.79	-1.14	-0.09	91.97	-0.18	-0.05
Mean	91.41	0.04	0.36	92.36	-0.41	0.10	92.50	-0.06	0.37	90.30	-0.35	-0.30	90.56	-0.20	-0.19	90.80	-0.13	0.05
ΔE_{ab}^*	A & B			A & C			B & C			A & B			A & C			B & C		
	1.09			1.10			0.46			0.32			0.64			0.34		
Position	Pa-3									Pa-1								
	A			B			C			A			B			C		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0°	91.87	-0.07	3.29	92.14	-1.22	-2.22	91.77	-0.76	-0.92	77.59	1.1	60.9	77.79	0.79	61.35	77.84	0.66	61.56
45°	92.8	-0.16	-0.71	90.92	-0.39	1.97	90.21	0.49	3.54	77.8	0.53	61.77	77.57	0.45	61.93	77.44	0.68	62.06
90°	92.52	-0.69	-2.95	91.71	-0.35	2.77	93.52	-0.77	0.17	77.55	0.89	62.14	78.13	0.6	62.52	78.72	0.44	62.75
135°	91.57	-0.56	1.67	91.64	-0.66	-1.41	91.89	-1.24	-2.92	78.93	0.67	62.84	77.74	1	61.12	77.44	1.15	60.58
Mean	92.19	-0.37	0.33	91.60	-0.66	0.28	91.85	-0.57	-0.03	77.97	0.80	61.91	77.81	0.71	61.73	77.86	0.73	61.74
ΔE_{ab}^*	A & B			A & C			B & C			A & B			A & C			B & C		
	0.65			0.53			0.40			0.26			0.22			0.06		
Position	Pa-2									Pa-3								
	A			B			C			A			B			C		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0°	35.02	0.85	-29.67	34.88	1.23	-29.18	35.3	-0.14	-28.85	44.92	48.05	29.22	44.57	47.82	28.88	44.23	46.87	28.91
45°	34.78	1.72	-30.13	34.99	1.33	-29.83	35.24	1.1	-30.2	44.81	47.78	29.01	44.51	47.48	28.68	44.27	46.64	28.56
90°	34.59	0.97	-28.7	34.73	0.5	-27.89	35.35	1.19	-30.67	44.74	47.67	29.03	44.47	47.55	28.79	44.11	46.35	28.52
135°	34.21	0.53	-26.82	34.8	0.3	-27.61	34.86	-0.28	-27.42	44.69	47.59	29.13	44.5	47.39	28.88	44.37	46.66	28.58
Mean	34.65	1.02	-28.83	34.85	0.84	-28.63	35.19	0.47	-29.29	44.79	47.77	29.10	44.51	47.56	28.81	44.25	46.63	28.64
ΔE_{ab}^*	A & B			A & C			B & C			A & B			A & C			B & C		
	0.34			0.89			0.83			0.45			1.35			0.98		

由表 3 可知,使用方法 3 测量能较为有效地排除纸张光柱的影响,但考虑到纸张表面不同位置的均匀性和印刷品不同墨区墨量均匀性的影响,表中对同一纸张(印刷品)测量和计算结果中出现部分 CIELAB 色差值大于 1.0(如:Pa-1 中 A & B 与 A & C、Pr-3 中 A & C)的情况。但本文测量方法一定程度上已可用来进行纸张和印刷品的色度值测量和色差比较。

表 4 所示为 28 种光柱辐射纸张和 26 种以该纸张为基底材料的辐射印刷品 CIELAB 色差结果汇总,用 STRESS 因子^[12]评价两种测量方法得到的色差计算结果相关性,28 种光柱辐射纸张间 STRESS 值为 60%,26 种以该纸张为基底材料的辐射印刷品间 STRESS 值为 19%,说明评价光柱辐射纸时,两种测量方法之间存在一定的差别(STRESS 为 60%),从表 4 数据可以看出,垂直于纸张光柱方向不同位置测量方法的结果更接近于目视评价结果(如表 4 中 No.18 辐射纸);而测量辐射纸印刷品时,两种测量方法的结果比较吻合(STRESS 为 19%),均能获得与目视评价一致的结果。

表 4 光柱镭射纸张(印刷品)用两种测量方法得到的色差计算结果

Table 4 Color differences of the holographic paper (printings) obtained from two measuring methods

No.	Holographic paper			No.	Holographic printings		
	Rotated	Vertical	Visual result		Rotated	Vertical	Visual result
1	0.8	0.8	Pass	1	0.2	0.3	Pass
2	0.8	0.6	Pass	2	3.7	3.4	Fail
3	0.5	0.5	Pass	3	5.8	5.3	Fail
4	0.4	0.5	Pass	4	0.6	0.9	Pass
5	0.2	0.1	Pass	5	0.3	0.3	Pass
6	0.2	0.3	Pass	6	2.1	1.3	Pass
7	0.8	0.7	Pass	7	5.7	4.5	Fail
8	3.2	2.6	Fail	8	6.4	6.7	Fail
9	1.8	0.8	Pass	9	0.6	0.5	Pass
10	1.1	1.4	Pass	10	5.3	4.1	Fail
11	0.5	0.4	Pass	11	0.9	0.7	Pass
12	1.5	0.4	Pass	12	2.5	2.6	Fail
13	0.3	0.6	Pass	13	1.6	1.9	Pass
14	0.4	0.9	Pass	14	0.4	0.5	Pass
15	0.2	0.3	Pass	15	0.2	1	Pass
16	0.5	0.6	Pass	16	0.2	0.4	Pass
17	0.7	0.7	Pass	17	0	0.9	Pass
18	<u>0.8</u>	<u>3.4</u>	Fail	18	0.4	1.4	Pass
19	0.3	0.7	Pass	19	2.5	2.7	Fail
20	1.1	0.4	Pass	20	1.4	1.6	Pass
21	0.4	1	Pass	21	0.6	0.5	Pass
22	0.3	1.1	Pass	22	4.9	5.5	Fail
23	0.1	1.1	Pass	23	1.3	1.2	Pass
24	2.2	2.6	Fail	24	0.9	0.6	Pass
25	1.2	0.5	Pass	25	0.7	0.6	Pass
26	0.5	0.5	Pass	26	1.8	2.2	Fail
27	0.5	0.6	Pass				
28	1	0.2	Pass				

Note: 1. The samples marked by black and bold font are the inferior-qualified product judged by the company with the visual assessment, which have the color differences greater than CIELAB 2.0 by our two methods. 2. The sample marked by underline font is a special paper (NO.18) with the asymmetrical distribution (with the distribution of 5 cm, 7 cm, 5 cm, 7 cm, ...) of holographic light pillars, which cannot be detected by the method of different angles in fixed position.

综上所述,垂直于纸张光柱方向不同位置测量方法采样点较多,但是考虑到了纸张的均匀性,能较全面准确地反映测试纸张的颜色信息。然而对于测量面积有限且狭小的印刷品,采样则较为麻烦,实时测量印刷样上多个版面时,工作量较大。固定位置旋转测量方法较为方便快捷,适合对匀色区域面积较小的样张进行点对点的测量比较,但测量时易受到单个采样点位置的影响,有可能误判样张整体质量(如表 4 中 No.18 镭射纸)。

4 结 论

在分析了光柱镭射纸张微观结构的基础上,选用积分球式分光光度计进行光柱镭射纸和镭射印刷品的色度测量,并提出了垂直于纸张光柱方向不同位置测量和固定位置旋转测量两种测量方法。用 STRESS 因子对两种测量方法进行了比较,结合目视评价结果,推荐对光柱镭射纸张的颜色质量评价使用垂直于纸张光柱方向不同位置测量的方法,对光柱镭射印刷品的颜色质量评价可使用固定位置旋转测量的方法。

参 考 文 献

- [1] Wan Xiaoxia, Liu Zhen, Huang Xinguo. The spectral reflectance model of coloring images on holographic papers[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2: 43-46.
万晓霞, 刘 振, 黄新国. 全息光栅基彩色图像光谱反射率模型[J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2: 43-46.
- [2] Huang X, Wan X, Liu Z. Optimization of the method for color measurement of printing on holographic paper[J]. Color Research & Application, 2003, 38(2): 130-138.
- [3] Wan X, Huang X, Liu Z. Color measurement for holographic photo paper (2010 Asian symposium: next-generation printing science and technology)[J]. Japanese Society of Printing Science and Technology, 2011, 48(1), 21-26.
- [4] Sun Peng, Xiao Chao, Wan Xiaoxia, *et al.* Spectrophotometer for chromaticity detection of laser paper: 102538970A [P]. 2012-07-04.
孙 鹏, 肖 超, 万晓霞, 等. 用于镭射纸色度检测的分光光度计: 102538970A [P]. 2012-07-04.
- [5] Feng Zhixing, Zhang Chun'e, Wang Yansong. A new method of color measurement for laser rainbow holographic printed matter[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0933001.
冯之幸, 章春娥, 王岩松. 一种激光彩虹全息印刷品的颜色测量方法[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0933001.
- [6] Xu Yanfang, Song Yuehong, Liu Yu, *et al.* Chroma characterization and detection method of grating base columnar rainbow hologram: 103196560A [P]. 2013-07-10.
徐艳芳, 宋月红, 刘 瑜, 等. 光栅基柱状彩虹全息图的色度表征与检测方法: 103196560A [P]. 2013-07-10.
- [7] Huang Min, Wang Lingfang, Liu Yu, *et al.* Measurement and analysis of spectral and chromaticity values of pillars of light pattern holographic paper[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0633002.
黄 敏, 王灵芳, 刘 瑜, 等. 光柱镭射纸的光谱和色度测量分析[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0633002.
- [8] Zhou Haixian, Cheng Yunfang. Holographic optics: design, manufacture and application [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2006: 5.
周海宪, 程云芳. 全息光学: 设计制造和应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 5.
- [9] Wang Dianmin, Ha Liuzhu, Wang Mincao. Circular-viewing rainbow holography [J]. Acta Optica Sinica, 1990, 10(11): 996-998.
王典民, 哈流柱, 王民草. 周视彩虹全息术 [J]. 光学学报, 1990, 10(11): 996-998.
- [10] Huang Min, Shi Chunjie, Liu Haoxue, *et al.* System for automatically detecting laser paper color and quality of light beam: CN204373781U [P]. 2015-06-03.
黄 敏, 史春洁, 刘浩学, 等. 一种光柱镭射纸张颜色和光柱质量自动检测系统: CN204373781U [P]. 2015-06-03.
- [11] Huang M, Liu H, Cui G, *et al.* Evaluation of threshold color differences using printed samples[J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2012, 29(6): 883-891.
- [12] García P A, Huertas R, Melgosa M, *et al.* Measurement of the relationship between perceived and computed color differences[J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2007, 24(7): 1823-1829.