

# 光柱镭射纸的光谱和色度测量分析

黄 敏<sup>1</sup> 王灵芳<sup>1</sup> 刘 瑜<sup>1</sup> 崔桂华<sup>2\*</sup> 李双劲<sup>3</sup> 刘浩学<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600  
<sup>2</sup> 温州大学物理与电子信息学院, 浙江 温州 325035  
<sup>3</sup> 深圳科彩印务有限公司, 广东 深圳 518118

**摘要** 为了分析不同分光光度计测量光柱镭射纸颜色的精度, 选用 X-Rite 7000A 积分球式、X-Rite MA68 II 多角度、X-Rite Spectro Eye45/0 三种不同测量条件的仪器分别对光柱镭射纸的光柱方向和垂直光柱方向进行测量, 比较不同仪器测量结果的稳定性和可靠性。数据分析表明, 在 X-Rite 7000A 的大孔径和包含镜面反射光的测量模式下, 光柱镭射纸不同位置的光谱均方差较小, 沿着光柱方向的色度值变化不大, 而垂直于光柱方向的色度值满足线性变化的关系, 并且在同一位置测试纸张旋转 180° 测量所得的色度值基本相同。通过分析垂直于光柱方向不同位置的色度值, 提出了一种推算光栅条纹相对刻划方向的方法。

**关键词** 测量; 视觉与色彩; 光柱镭射纸; 光栅条纹; 光谱测量; 色度测量

中图分类号 O432.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0633002

## Measurement and Analysis of the Spectral and Chromaticity Values of Pillars of Light Pattern Holographic Paper

Huang Min<sup>1</sup> Wang Lingfang<sup>1</sup> Liu Yu<sup>1</sup> Cui Guihua<sup>2</sup> Li Shuangjin<sup>3</sup> Liu Haoxue<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Printing and Packing Engineering, Beijing Institute of Graphics Communication, Beijing 102600, China  
<sup>2</sup> School of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China  
<sup>3</sup> Limited Company of Shenzhen Kecai Printing, Shenzhen, Guangdong 518118, China

**Abstract** In order to analyze the accuracies of the color measurement for pillars pattern of holographic paper with different spectrophotometers, the X-Rite 7000A integrating sphere, X-Rite MA68 II multi-angle and X-Rite Spectro Eye45/0 three different instruments with different geometries are selected to measure the positions of along and perpendicular to the pillars. The data analysis indicates that the X-Rite 7000A with the large area view and specular component includes mode shows the smaller spectral mean square error on different positions. The chromaticity values of holographic paper along the pillars measured by X-Rite 7000A are similar while perpendicular to the pillars the chromaticity values fit a good linear relationship. It is found that the chromaticity values are very similar with the same position by rotating 180° and the graving direction of the grating can be deduced by the chromaticity values from different positions perpendicular to the pillars.

**Key words** measurement; vision and color; holographic paper; holographic pattern; spectral measurement; chromaticity measurement

**OCIS codes** 330.1690; 330.1710; 330.1730

## 1 引 言

镭射纸以其绚丽的亮彩虹效果在包装印刷领域

得到了广泛的应用,特别是在高档烟、酒包装印刷领域。但其亮彩虹效果也给印刷品的品质检测带来了

收稿日期: 2014-01-27; 收到修改稿日期: 2014-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(61308081)、北京市教委青年拔尖计划(CIT&TCD201404127)、青年英才计划(YETP1465)

作者简介: 黄 敏(1979—),女,博士,副教授,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: guihua.cui@gmail.com

一定的困扰,颜色测量仪器在纸基不同位置测量得到的光谱和色度信息无法用来准确表征镭射纸上不同位置的颜色,也无法用来准确评判不同批次镭射纸的颜色差异。鉴于此,目前对镭射纸基的颜色质量检测大多还是依赖于目视评价。美国的 Nadal 等<sup>[1]</sup>由珠光涂层的散射机理得出,珠光涂层材料的彩虹效果是由于照明方向与观察视角不同而引起的。武汉大学的黄新国等<sup>[2-4]</sup>对镭射纸的颜色测量方法开展了大量的研究工作,提出采用漫反射光在镭射纸上不同位置或是同一位置不同方向测量,用离均色差表征镭射纸的色度值可提高颜色测量的精度。西安理工大学的曹从军等<sup>[5]</sup>用 GCMS-3B 型变角度分光测色机对镭射纸上固定位置在不同角度下呈现不同颜色的特性进行了比较分析,发现镭射复合材料上固定的点在不同角度下呈现不同的颜色和较高的光泽度。

使用不同测量条件的分光光度计采集光柱镭射纸不同位置和相同位置不同方向的光谱和色度信息,比较不同分光光度计测量光谱的离均差,同时提出了一种精确测量镭射纸颜色的方法。通过采集到的光谱数据和色度值,分析光柱镭射纸的光栅刻划条纹周期和方向等参数。

## 2 基本理论

### 2.1 光栅方程

目前市场上的镭射纸,其实就是激光全息图。一张普通全息图记录的空间频率都比较高,每毫米包含有几千条干涉条纹,每对干涉条纹都是一个接近波长级的光孔,衍射能力很强。某种程度上,可以把全息图,特别是全息光学元件看成是准平面衍射光栅或者体全息光栅<sup>[6-7]</sup>,满足(1)式所示的光栅方程

$$d(\sin i + \sin j) = k\lambda, \quad (1)$$

式中  $d$  为光栅周期,即一个条和一个空的宽度之和,与可见光波长相同的量级, $i$  和  $j$  分别为光线的入射角和衍射角, $k$  是衍射级数。图 1 为反射光栅(全息图)的入射和衍射光路示意图。

### 2.2 光柱镭射纸结构

由于光栅的衍射作用,光柱镭射纸在不同观察角度可呈现彩虹带的效果(图 2 所示),其中  $L$  为某一方向光柱镭射纸的两条相邻彩虹光柱的间隔,光柱镭射纸放大 500 倍的观测效果图也列在图 2 右侧。

将图 2 所示光柱镭射纸沿纸基的光柱方向和垂直光柱方向,划分为不同的测量区域(图 3 所示),沿着光柱方向为  $x$  方向,垂直于光柱方向为  $y$  方向。

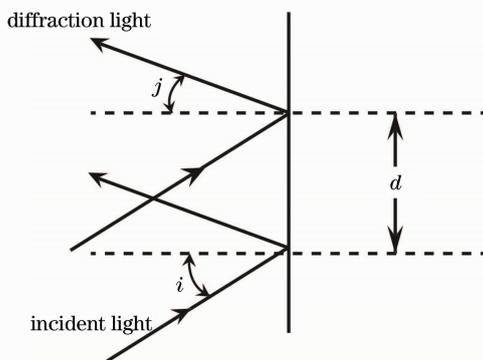


图 1 反射光栅光路图(全息图)

Fig. 1 Light path of reflective grating (hologram)

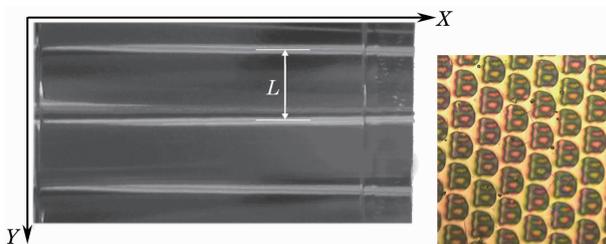


图 2 光柱镭射纸外观效果

Fig. 2 Appearance of the pillars of light pattern

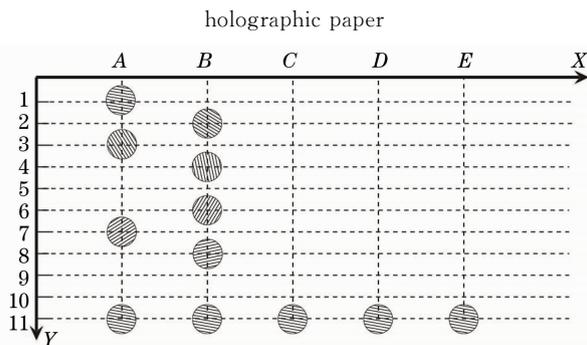
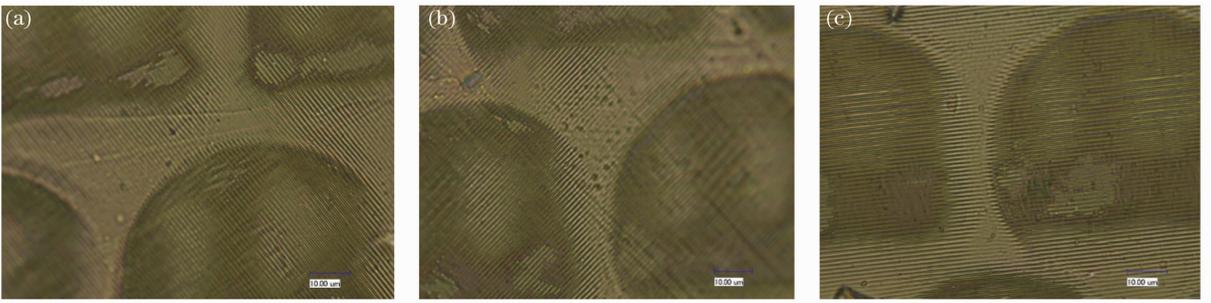


图 3 光柱镭射纸上不同测量位置处光栅条纹

Fig. 3 Grating at different positions of the holographic paper

用三维景深显微镜对图 3 所示的不同测量区域放大 3000 倍,观察镭射纸上不同位置处的光栅条纹周期和刻划方向,图 3 为不同位置处光栅刻划条纹示意图。可见,光柱镭射纸沿着光柱方向( $x$  方向)的光栅条纹刻划方向相同,垂直于光柱方向( $y$  方向)的光栅条纹刻划方向在两条相邻光柱带之间(位置 1~11 处)逐渐的顺时针旋转。图 4 为不同位置的实测测量图,图 4(a)~(c)分别为放大 3000 倍拍摄到图 3 中  $y$  方向坐标为 2、6 和 9 位置处的刻划光栅条纹分布。通过测量可知,光柱镭射纸的光栅条纹周期  $d$  为  $1 \mu\text{m}$ 。

图 4 垂直于辐射纸光柱方向( $y$ 方向)不同位置处的光栅刻划条纹Fig. 4 Grating of the holographic paper at the position of perpendicular to the pillars ( $y$  direction)

### 3 光谱测量

#### 3.1 颜色测量仪器和测量条件

实验选用三种不同几何测量条件的颜色测量仪

器,分别为 X-Rite 7000A 积分球式、X-Rite MA68 II 多角度、X-Rite Spectro Eye45/0 分光光度计,三种分光光度计的几何测量条件如图 5 所示。

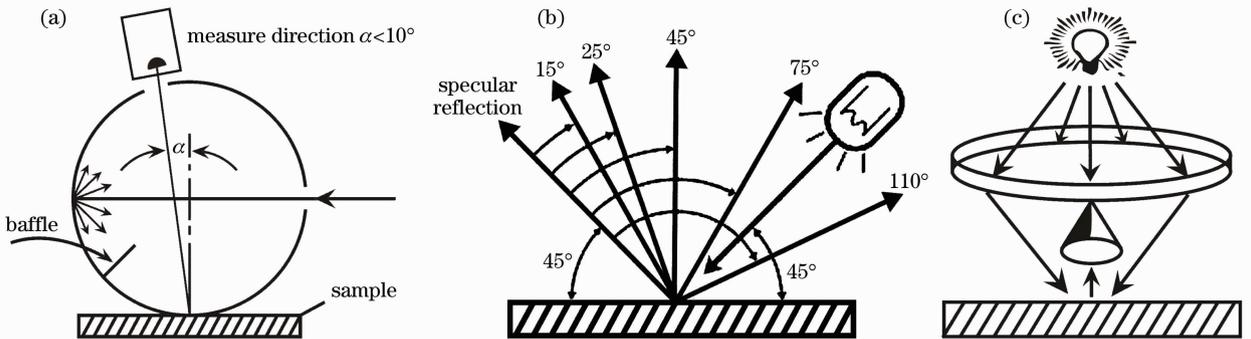


图 5 不同分光光度计的几何测量条件。(a) X-Rite 7000A; (b) MA68II; (c) Spectro Eye 45/0

Fig. 5 Geometry of different spectrophotometers. (a) X-Rite 7000A; (b) MA68II; (c) Spectro Eye 45/0

图 5(a)所示的 7000A 积分球式分光光度计采用漫反射照明,在某一固定角度接收输出光,光谱范围为 360~750 nm。有包含镜面反射(SCI)和排除镜面反射(SCE)两种测量条件;两种反射测量孔径:大测量孔径(LAV)-(25.4 mm)圆形和小测量孔径(SAV)-(7.5 mm×10 mm)椭圆形可供选择。光谱采样间隔为 10 nm。

图 5(b)所示的 MA68 II 多角度分光光度计光源的照明方向与样品法线夹角为 45°,接收方向分别为与镜面反射光夹角 15°、25°、45°、75°、110°五个角度。光谱范围为 400~700 nm,光谱采样间隔为 10 nm。

图 5(c)所示的 Spectro Eye45/0 分光光度计采用环形照明,光源与被测样品的夹角为 45°,接收方向为 0°,光谱范围为 380~730 nm,光谱采样间隔为 10 nm。

#### 3.2 不同位置测量的光谱信息

选用 3.1 所述的三种分光光度计分别测量图 3 所示光柱辐射纸上不同位置(如 A-4 到 E-4, A-1 到

A-11 等)处的光谱信息,如图 6 所示。其中(a),(c) (e)分别为 7000A、MA68II 和 Spectro Eye 沿着辐射纸光柱方向( $x$ 方向)采集到的不同位置处光谱曲线,(b),(d),(f)分别为 7000A、MA68II、Spectro Eye 在垂直于光柱方向( $y$ 方向)采集到的不同位置处光谱曲线。其中(a),(b)中 7000A 的测量条件为包含镜面反射(SCI),大测量孔径(LAV)-(25.4 mm)圆形。(c),(d)为 MA68II 在图 5(b)所示 110°处采集到的光谱信息。

由(1)式的光栅方程可知,入射角  $i$  为 45°,周期  $d$  为 1  $\mu\text{m}$  的光栅条纹对应于不同衍射级次的衍射主波长与衍射角度的变化关系如图 7 所示。可知, Spectro Eye 分光光度计在 0°接收衍射光时,对应于光栅 1 级衍射光主波长 690~720 nm,而 MA68 II 分光光度计在 110°的测量角度对应于图 7 所示的 65°衍射角,其主波长为 3 级衍射的 530~550 nm 和 4 级衍射的 400~410 nm。

图 6 为各仪器采集到的光谱能量,其中 Spectro Eye 和 MA68II 分光光度计中除包含了反射光谱外

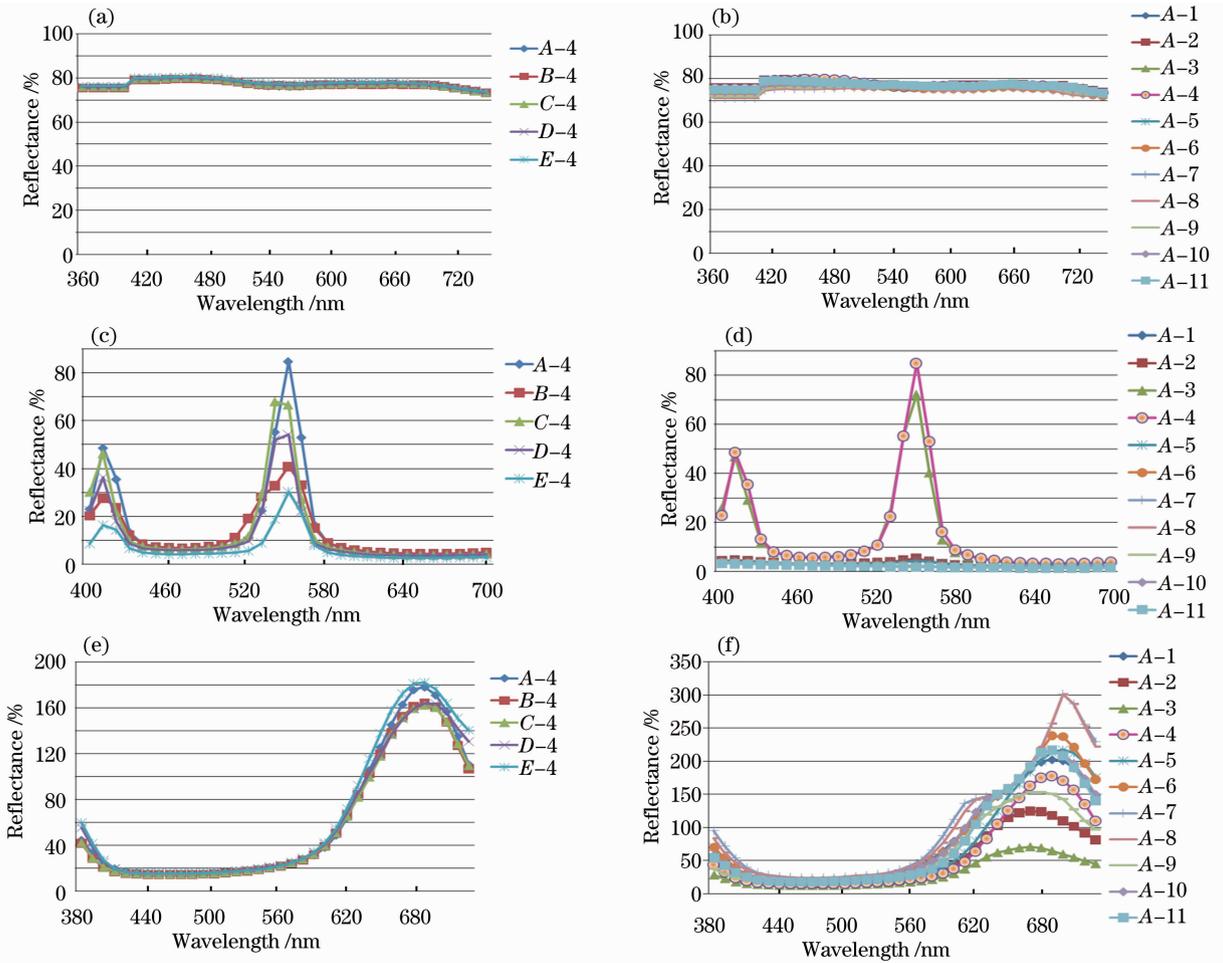


图 6 沿着和垂直于光柱辐射纸的光柱方向采集到的反射/衍射光谱信息

Fig. 6 Reflective/diffractive spectral energy from the position along and perpendicular to the pillars of holographic paper

低,因此最大值在 90%左右。

### 3.2.1 沿着光柱方向的光谱信息

由图 6 可见,沿着光柱辐射纸的光柱方向,除图 6(c)所示 MA68 II 测量的光谱数据外,不同位置(A, B, C, D, E)处的光谱信息较为一致。图 6(a)所示的 7000A 分光光度计,由于采用的漫反射照明,接收到的为均匀照明后的光谱信息,因此,其光谱曲线起伏较小,接近非彩色。图 6(e)所示的 Spectro Eye 分光光度计,由于采用环形照明,光源的照明方向为 45°,接收方向为 0°,因此接收到的光谱信息也较为均匀,但反射/衍射能量峰值在长波段,表现为红色色调。

用光谱均方差对不同仪器对辐射纸的测量精度进行分析,将光柱基辐射纸上某一位置的光谱反射率  $\rho_{xy_i}$  与该位置处(x 或 y 方向)的光谱均值比较<sup>[8]</sup>,计算公式如下

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\rho_{xy_i} - \bar{\rho}_i)^2}{n}}, \quad (2)$$

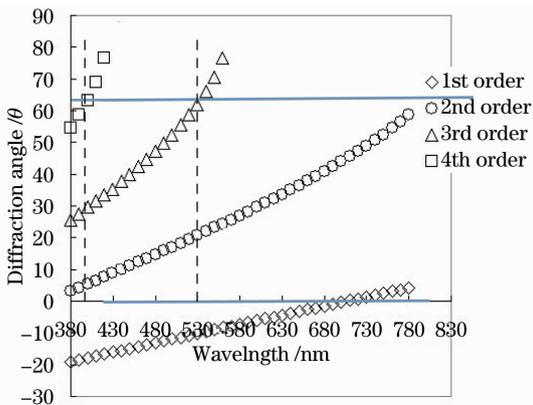


图 7 光栅条纹不同衍射级次的衍射主波长与衍射角度的变化关系( $i=45^\circ, d=1 \mu\text{m}$ )

Fig. 7 Relationship between the diffractive angle and dominant wavelength of the grating for different diffractive orders ( $i=45^\circ, d=1 \mu\text{m}$ )

还含有衍射光谱能量,这就是图 6(e)的光谱能量峰值超过 100%的原因,由于 MA68II 分光光度计在 110°时采集到的是 3、4 级衍射光,能量相对较

式中  $\rho_{xy_i}$  分别是光柱基镭射纸上某一位置处的光谱反射率,  $\bar{\rho}_i$  为该位置所在  $x$  或  $y$  方向光谱均值。(2) 式中  $x$  为图 3 中沿着光柱方向的  $A \sim E$  采样点,  $y$  为

垂直于光柱方向的  $1 \sim 11$  采样点,  $i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$ 。  $n$  为光谱采样点数, 对应于实验中的  $400 \sim 700 \text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$ , 共 31 个波段。计算结果如表 1 所示。

表 1 三种仪器沿彩虹带( $x$  方向)方向(每行 5 个采样点)的测量光谱均方差

Table 1 Spectral mean square error of the three spectrophotometers along the pillars of the rainbow ( $x$  direction, 5 positions per row)

Row	7000A				MA68 II					Spectro Eye
	LAV-IN	LAV-EX	SAV-IN	SAV-EX	15°	25°	45°	75°	110°	45°/0°
1	0.21	0.60	0.27	0.84	8.26	12.57	1.88	0.39	0.20	7.68
2	0.27	1.07	0.49	1.31	15.48	66.69	52.44	8.92	1.43	16.83
3	0.33	1.22	0.50	1.97	12.61	67.77	52.64	16.28	5.10	9.72
4	0.33	1.20	0.46	1.74	8.69	70.21	45.19	15.54	4.36	3.52
5	0.21	1.09	0.21	1.03	12.21	88.05	34.59	11.60	2.37	10.55
6	0.13	0.92	0.22	0.90	5.29	22.04	3.61	0.34	0.13	16.98
7	0.10	0.72	0.18	0.75	2.29	1.04	0.37	0.08	0.12	10.85
8	0.11	0.66	0.29	0.83	4.17	1.41	0.36	0.15	0.15	11.43
9	0.12	0.95	0.31	1.11	5.81	2.01	0.46	0.18	0.12	11.09
10	0.16	1.25	0.28	1.10	5.52	2.79	0.08	0.19	0.13	10.80
11	0.21	1.32	0.41	1.02	7.18	9.93	2.39	0.47	0.17	23.85
Mean	0.20	1.00	0.33	1.14	7.96	31.32	17.64	4.92	1.30	12.12

### 3.2.2 垂直于光柱方向的光谱信息

三种仪器垂直于光柱方向采集到的光谱信息[图 6(b)、(d)、(f)]表现出了一定的差异性, 这种现象可由图 3 和图 4 所示垂直于光柱方向不同光栅条纹的刻划方向得到解释, 固定颜色测量仪器与测量镭射纸的相对位置, 亦即固定了颜色测量仪器的照明光源和探测仪器接收位置。图 3 所示垂直于光柱方向( $y$  方向)的  $1 \sim 11$  不同测量位置处, 入射角和衍射角随着光栅条纹刻划方向的变化而发生变化, 当光栅条纹偏转到某个角度时, 由图 6(d)看出除 A-

3 与 A-4 两点以外的位置, 由于光栅条纹为反射光栅, 反射光和衍射光几乎不能到达 MA68 II 光电探测器件, 因此接收到的能量信息很低(小于 10%)。图 6(b)和图 6(f)所示的 7000A 和 SpectroEye 分别为漫反射光和环行光照明, 因此在垂直于光柱方向采集到的光谱信息变化差异远小于图 6(d)所示的 MA68 II 测量的光谱变化差异。利用(2)式计算得到的三种仪器垂直彩虹带方向的测量光谱均方差如表 2 所示。

表 2 三种仪器垂直彩虹带( $y$  方向)方向(每列 11 个采样点)的测量光谱均方差

Table 2 Spectral mean square error of the three spectrophotometers perpendicular to the pillars of the rainbow ( $y$  direction, 11 positions per column)

Column	7000A				MA68 II					Spectro Eye
	LAV-IN	LAV-EX	SAV-IN	SAV-EX	15°	25°	45°	75°	110°	45°/0°
A	1.01	0.96	1.25	1.61	15.86	119.62	61.88	21.49	6.47	20.96
B	1.09	1.20	1.13	1.20	19.44	94.52	51.87	15.97	4.30	23.49
C	1.21	0.85	1.33	1.27	15.89	104.07	73.46	20.87	5.96	20.47
D	1.19	1.03	1.45	1.56	18.50	105.90	63.57	17.25	4.67	23.24
E	1.31	1.08	1.54	1.80	20.28	134.78	53.39	18.05	4.47	28.74
Mean	1.16	1.02	1.34	1.49	18.00	111.78	60.84	18.73	5.18	23.38

由表 1、表 2 可见, X-Rite 7000A 的 LAV-IN 测量条件的测量精度相对较好, 光谱均方差较小。同时仪器在沿光柱方向的测量稳定性高于垂直于光柱方向, 沿着镭射纸的光柱方向采集到的光谱能量信息较为接近, 垂直于光柱方向采集到的光谱能量信

息差异较大。X-Rite MA68 II 在不同测量角度采集到的光谱衍射级数不同, 能量差异较大, 造成不同测量角度处的光谱均方差有较大的偏差。

实际测量镭射纸时, 通常并未严格确定采样点的位置, 并未注意颜色测量仪器与镭射纸的相对放

置位置等细节,从而造成不同的采样点位置和对同一采样点不同的采样次数、颜色测量数值有较大的偏差。为进一步探讨分光光度计测量光栅辐射纸的稳定性,改变颜色测量仪器与辐射纸的相对位置,研究其光谱信息变化规律。

### 3.3 改变测量方向的光谱信息

改变辐射纸与分光光度计的相对方位,即固定颜色测量仪器,对图 3 所示辐射纸上的不同测量点,分别将纸张旋转  $90^\circ$ ,采集光谱信息。如图 8 所示。

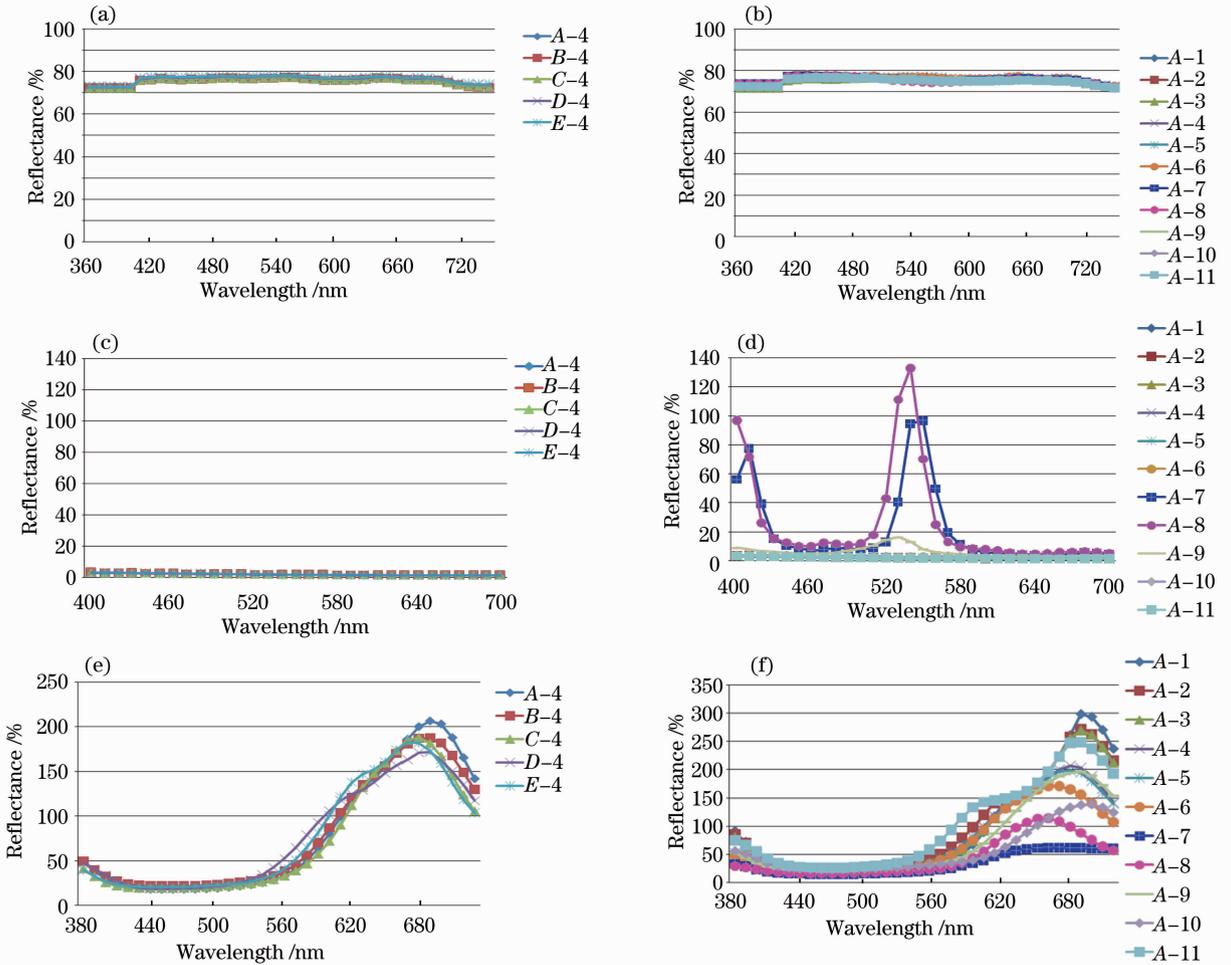


图 8 沿着光柱辐射纸的光柱和垂直于光柱方向采集到的反射/衍射光谱信息

Fig. 8 Reflective/diffractive spectral energy from the position along and perpendicular to the pillars of holographic paper

由图 8 可见,将辐射纸旋转  $90^\circ$  之后,MA68 II 测量的光谱信息变化最大,图 8(c) 所示采集到的光谱能量很低,表明辐射纸旋转后光栅条纹也相应旋转了  $90^\circ$ ,图 3 中位置 4 系列的反射/衍射光方向偏离仪器的探测口,没有光能量进入探测器。图 8(d) 所示位置 A-7、A-8 的光谱能量较高,而图 6(d) 所示的出现峰值能量的位置 A-3、A-4 处光谱能量信息大幅下降。分析  $y$  系列( $y=1\sim 11$ )的光栅条纹刻划规律可知,3、4 位置处的光栅刻划条纹与 7、8 处的光栅刻划条纹方向垂直,旋转  $90^\circ$  造成光谱能量信息交替出现极大和极小的变化。

### 4 改变测量方向的色度信息

由图 6 和图 8 可见,MA68 II 在光柱辐射纸的不同位置光谱信息测量值变化很大,因此分析同一位置不同测量方向(即固定光柱辐射纸的位置,旋转纸张在不同方向测量)颜色色度信息变化时,选用 7000A 的 LAV-IN 测量条件和 Spectro Eye 进行分析,测量条件为 D65 光源,  $10^\circ$  视场。表 3 为测量方向以间隔  $45^\circ$  旋转,在  $0^\circ\sim 360^\circ$  间采集到 C-2、C-6 位置处 8 个方向的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  色度信息,同时给出了 8 个方向 CIELAB 色差的离均色差 (MCDM,  $M_C$ ) 值<sup>[9]</sup>。其中

$$M_C = \frac{\sum_{i=1}^N [(L_i^* - \bar{L}^*)^2 + (a_i^* - \bar{a}^*)^2 + (b_i^* - \bar{b}^*)^2]^{1/2}}{N}, \quad (3)$$

式中  $L_i^*, a_i^*, b_i^*$  为第  $i$  次的测量结果,  $\bar{L}^*, \bar{a}^*, \bar{b}^*$  为  $N = 8$  个方向测量结果的平均值。同时用

CIEDE2000<sup>[10]</sup> 色差公式计算  $M_C$  值, 计算结果如表 3 所示。

表 3 相同位置不同方向的色度值和色差比较

Table 3 Comparisons of chromaticity values and color differences of the same position with different orientations

X-Rite 7000A											
C-2	$L_{10}^*$	$a_{10}^*$	$b_{10}^*$	$\Delta E_{ab}^*$	$\Delta E_{00}$	C-6	$L_{10}^*$	$a_{10}^*$	$b_{10}^*$	$\Delta E_{ab}^*$	$\Delta E_{00}$
0°	90.26	-0.11	-1	0.22	0.19	0°	89.6	-0.33	-0.67	0.38	0.43
45°	90.17	0.42	-2.1	1.33	1.42	45°	89.75	-0.66	0.26	1.28	1.41
90°	89.96	-0.43	-1.06	0.29	0.36	90°	89.95	-0.02	-0.85	0.17	0.14
135°	90.06	-0.72	0.11	1.16	1.28	135°	89.85	0.61	-2.05	1.36	1.48
180°	90.13	-0.15	-0.74	0.2	0.2	180°	89.65	-0.3	-0.81	0.27	0.34
225°	90.12	0.37	-2.01	1.22	1.31	225°	89.74	-0.55	0.17	1.15	1.24
270°	89.93	-0.29	-0.88	0.18	0.17	270°	89.99	0.13	-1.18	0.42	0.44
315°	89.97	-0.68	0.24	1.27	1.36	315°	89.83	0.42	-1.93	1.16	1.23
Mean	90.08	-0.2	-0.93	0.73	0.79	Mean	89.8	-0.09	-0.88	0.77	0.84

X-Rite Spectro Eye											
C-2	$L_{10}^*$	$a_{10}^*$	$b_{10}^*$	$\Delta E_{ab}^*$	$\Delta E_{00}$	C-6	$L_{10}^*$	$a_{10}^*$	$b_{10}^*$	$\Delta E_{ab}^*$	$\Delta E_{00}$
0°	81.88	56.54	39.64	15.72	6.37	0°	79.56	56.65	43.36	8.87	3.91
45°	73.5	50.2	35.25	6.44	2.19	45°	72.89	55.41	37.26	4.53	2.41
90°	75.63	47.19	38.52	5.65	1.84	90°	63.45	35.43	26.4	22.79	10.57
135°	77.06	45.97	37.72	4.98	2.33	135°	77.92	56.45	45.23	9.11	3.25
180°	68.93	22.65	19.11	26.57	10.13	180°	79.33	53.01	38.94	5.34	3.44
225°	68.99	34.19	29.57	11.98	5.72	225°	72.62	51.85	35.99	3.17	2.09
270°	70.73	50.23	33.7	7.27	3.82	270°	70.02	48.16	35.39	6.21	3.71
315°	77.89	44.38	39.27	6.30	3.56	315°	78.37	53.59	46.55	9.19	4.15
Mean	74.33	43.92	34.1	10.62	4.50	Mean	74.27	51.32	38.64	8.65	4.19

由表 3 可见, SpectroEye 对辐射纸不同方向测量的色度值变化较大, 平均 CIELAB 色差为 10.6 和 8.7, 超过了印刷包装行业的色差容限, CIEDE2000 色

差值也达到 4.5 和 4.19, 属于不可接受色差范围<sup>[11-12]</sup>, 因此采用 Spectro Eye 进行辐射纸的颜色测量受测量方向的影响很大, 不易控制, 不建议使用。

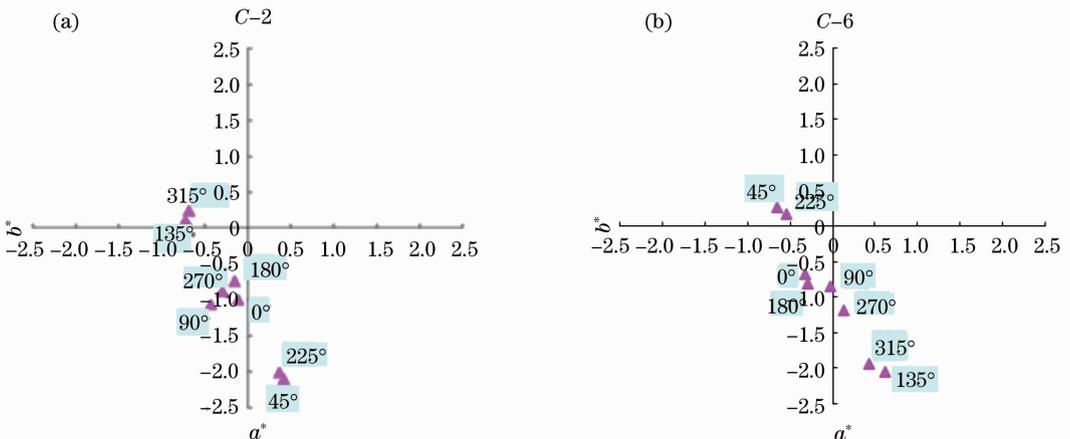


图 9 7000A 测量光柱辐射纸 C-2, C-6 位置不同方向的  $a^*, b^*$  色度值变化

Fig. 9 Variation of  $a^*, b^*$  chromaticity values at the position of C-2, C-6 with different orientations measured by 7000A

7000A 的 LAV-IN 测量条件下对光柱镭射纸不同方向测量,离均色差在  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  位置处较小,仅 0.2 左右;而在  $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $225^\circ$ 、 $315^\circ$  位置处均大于 1。表 3 中不同方向测量镭射纸的  $L^*$  较为接近,将上述两种仪器测量光柱镭射纸 C-2、C-6 位置处不同方向的  $a^*$ 、 $b^*$  值绘制于图 9(a)、(b)所示。

可见光柱镭射纸在每间隔  $180^\circ$  处的色度值较为接近,由于 C-2、C-6 处的光栅条纹刻划方向垂直,因此测量这两个位置处不同旋转角度处的  $a^*$ 、 $b^*$  色度值出现了镜像的规律。亦即,C-2 处纸张  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、... 方向的色度值与 C-6 处  $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、... 方向的色度值较为接近。在进行镭射纸色度评价时,在保证颜色测量仪器和测量底板夹角保持不变的情况下,沿着光柱方向的色度值差别很小,垂直光柱方向由于光栅的偏转方向不同,色度值有一定的差异性,下一步可根据工业上的应用需要制定相应的测量标准。

固定光柱镭射纸,用 7000A 测量图 3 所示 55 个位置的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  色度值, $a^*$ 、 $b^*$  色度值测量结果如图 10 所示。

## 5 结 论

选用 X-Rite 7000A 积分球式、X-Rite MA68 II 多角度、X-Rite Spectro Eye 三种测量条件的分光光度计对印刷包装行业常用光柱镭射纸进行光谱测量和色度测量,测量过程中在保证颜色测量仪器和测量底板的夹角保持不变,将光柱镭射纸在沿光柱方向和垂直于光柱方向划分成不同的测量区域。对沿着光柱方向和垂直于光柱方向的信息进行分析研究,可以得到如下结论:

1) 固定颜色测量仪器与镭射纸的相对位置,使用三种分光光度计进行测量,X-Rite 7000A 积分球式分光光度计的大口径包含镜面反射光条件的测量精度相对较好,光谱均方差较小;

2) 固定颜色测量仪器与镭射纸的相对位置,使用 X-Rite 7000A 积分球式与 X-Rite Spectro Eye45/0 分光光度计,得到沿着彩虹带光柱方向不同位置的测量光谱均差比垂直于彩虹带方向不同位置的光谱均差更小。同时从光柱镭射纸的  $a^*$ 、 $b^*$  色度值分布可以看出沿着光柱方向  $a^*$ 、 $b^*$  值差异不大,坐标点分布较为集中,垂直于光柱方向, $a^*$ 、 $b^*$  色度值的变化符合线性方程  $b^* = m \times a^* + n$  的拟合关系;

3) MA68 II 在光柱镭射纸的不同位置光谱信息测量值变化很大,并不适合作为评测镭射纸的颜色色度、分析单张镭射纸的均匀性和批量镭射纸的一致性使用,但是却可以分析得到光柱基镭射纸的内部光栅微观结构,例如:光栅常数,光栅刻划的相对方向;

4) 使用 X-Rite 7000A 对同一固定位置测量,对纸张每间隔  $45^\circ$  旋转测量一次,采集 8 个方向的色度信息,可以推测出镭射纸基不同位置的光栅条纹的相对刻划方向。

综合可知,用分光光度计对镭射纸进行颜色色度测量时,建议采用积分球式的分光光度计,选用的测量条件为大口径包含镜面反射光,测量过程中需要保证颜色测量仪器和测量底板的夹角保持不变。沿着光柱镭射纸的光柱方向(即  $\Delta x \neq 0$ ,  $\Delta y = 0$ )采集到的  $a^*$ 、 $b^*$  色度值较为接近,颜色色差较小,CIELAB 色差值在 1.0 以内。垂直于光柱方向( $\Delta y \neq 0$ ) $a^*$ 、 $b^*$  色度值在一个光柱周期内周期性变化,CIELAB 色差值最大在 3.0 以内,该规律对于所有光柱镭射纸具有普适性。对应不同的光柱镭射纸,随着采样位置沿垂直于光柱方向变化, $a^*$ 、 $b^*$  色度值的变化满足线性方程  $b^* = m \times a^* + n$  的拟合

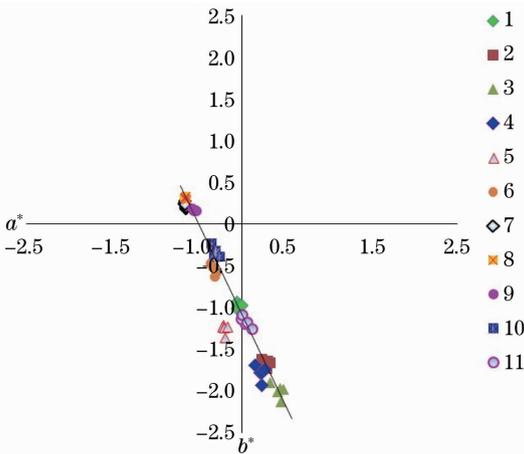


图 10 镭射纸上 55 个测量位置的  $a^*$ 、 $b^*$  散点图分布  
Fig. 10 Distribution of the  $a^*$ 、 $b^*$  values for the 55 positions from the holographic papers

由图 10 可见,光柱镭射纸的  $a^*$ 、 $b^*$  色度值分布满足一定的规律,沿光柱方向的  $a^*$ 、 $b^*$  值差异不大,散点分布较为集中,随着采样位置沿垂直于光柱方向变化, $a^*$ 、 $b^*$  色度值的变化满足图 10 所示线性方程  $b^* = m \times a^* + n$  的拟合关系,其中拟合系数  $m = -2.14$ ,  $n = -1.17$ ,拟合线性方程的相关系数  $r^2 = 0.938$ 。图 10 中,从 -1 系列到 -11 系列, $a^*$ 、 $b^*$  色度值的变化随着测量位置  $y$  的变化呈现周期性的变化。

关系,但对于不同的光柱镭射纸线性方程的参数会有一些的变化,同时拟合关系的相关系数也会有所差异。

### 参 考 文 献

- 1 M E Nadal, E A Early. Color measurements for pearlescent coatings [J]. *Color Research & Application*, 2004, 29(1): 38—42.
- 2 Xinguo Huang, Xiaoxia Wan, Zhen Liu. Optimization of the method for color measurement of printing on holographic paper [J]. *Color Research & Application*, 2013, 38(2): 130—138.
- 3 Xiaoxia Wan, Xinguo Huang, Zhen Liu. 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 Wan Xiaoxia, Liu Zhen, Huang Xinguo. The spectral reflectance model of coloring images on holographic paper [J]. *China Printing and Packaging Study*, 2010, 2(z1): 41—44.  
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(z1): 41—44.
- 5 Cao Congjun, Zheng Yuanlin. Research on measurement of chromatic characteristics on holographic foil materials [J]. *Packaging and Engineering*, 2005, 25(5): 170—171.  
曹从军, 郑元林. 镭射复合材料表面呈色性能的检测与分析 [J]. *包装工程*, 2005, 25(5): 170—171.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 Huang Min, Liu Haoxue, Liao Ningfang. Correlation of visual spectral response with aging and its effect on color discrimination [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(7): 1886—1891.  
黄 敏, 刘浩学, 廖宁放. 年龄与视觉光谱响应的相关性及其对颜色辨别的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(7): 1886—1891.
- 9 M E Maria, C Cameron Miller, H S Fairman. Statistical methods for analyzing color difference distributions [J]. *Color Research & Application*, 2011, 36(3): 160—168.
- 10 M R Luo, G Cui, B Rigg. The development of the CIE 2000 colour difference formula: CIEDE2000 [J]. *Color Research & Application*, 2001, 26(5): 340—350.
- 11 Liu Haoxue, Wu Bin, Liu Yu, *et al.*. A discussion on printing color difference tolerance by CIEDE2000 color difference formula [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 262: 96—99.
- 12 Huang Min, Liu Haoxue, Cui Guihua, *et al.*. Testing uniform color spaces using printed samples with different gloss and color difference magnitudes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0733002.  
黄 敏, 刘浩学, 崔桂华, 等. 用不同光泽和色差等级的彩色印刷样品检验均匀颜色空间 [J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0733002.

栏目编辑: 张浩佳