

# 一种彩虹全息凹印卷料的多光谱颜色测量技术

陈伟

(上海烟印厂, 上海 200125)

**摘要:**目的 针对彩虹全息凹印卷料品的颜色测量问题,研究一套专用的光源和多光谱成像系统。方法 基于衍射抑制模型,设计一种穹顶光源,采用类似积分球的照明方式,使入射光线能在 $(-\pi/2 \sim \pi/2)$ 均匀入射,遍布全息印刷品的照射表面。采用多光谱 CCD 相机,在一个 CCD 相机中形成 12~36 个光谱通道,相当于将传统的 RGB 三通道相机扩大为 36 个通道的相机。结果 穹顶光源使得光源内部的发光强度均匀,对全息印刷品表面的衍射光线有明显抑制作用,削弱了衍射光栅的色散作用,通过多光谱相机成像获得了产品在多个通道的光谱特性。结论 结合穹顶光源设计的多光谱成像系统很好地获取了多光谱颜色表达,测量精度在 2 个色差范围内。

**关键词:** 彩虹全息; 凹印卷料; 穹顶光源; 多光谱颜色测量

**中图分类号:** TS801 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)11-0209-05

## A New Measurement Method for Multi-spec Color of Rainbow Holographic Product in Roll-to-roll Printing

CHEN Wei

(Shanghai Cigarette Print Factory, Shanghai 200125, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to develop a special light source and multi-spec imaging system to solve the color measurement problem of rainbow holographic in roll-to-roll printing. The special dome light source was designed based on the diffraction inhibition model to achieve uniform light incidence $(-\pi/2 \sim \pi/2)$  on the irradiated surface as integrating sphere. The multi-spec CCD camera, which was similar to the traditional RGB three-channel camera, can generate 12~36 spectral channels images. The dome light source achieved uniform light intensity, had apparent inhibiting effect on diffraction light on surface of holographic printed product, and weakened the dispersion effect of diffraction grating. And spectral characteristics in multiple channels of product were obtained by multi-spec camera imaging. The multi-spec imaging system with dome light source design has good color expression, which can achieve accuracy within two degrees of color difference.

**KEY WORDS:** rainbow holographic; roll-to-roll printing; dome light source; multi-spec color measurement

激光彩虹全息印刷即激光全息印刷,它基于衍射光栅的原理,利用一束激光以及从这束激光分出的参考光从不同角度照射一个立体模型,模型的反射光线通过狭缝干涉,形成包含模型全息信息的干涉条纹,再通过镍板压制在相应的印品上形成激光全息印刷<sup>[1-3]</sup>。由于这种全息光栅特性,在对其进行颜色测量时,采集表面图像上由于彩虹全息信息会出现随机干涉条纹,大大增加了全息印刷产品的颜色测量难度。特别是针对卷对卷凹印(凹印卷料),因为在印刷

过程中无法进行抽样检查,所以很难进行有效的过程控制,往往一大卷料在印刷完成后,才会发现其色差的问题,这样往往会造成批量的缺陷或者质量下降。

基于上述原因,文中针对全息印刷品的成像特点,从光源到颜色测量,提出一套完整的解决方案。设计一种全息印刷品的专用全息穹顶照明光源,基于穹顶光源设计激光全息凹印卷料产品的颜色测量方法,构建一个多通道线扫描 CCD 成像系统,通过计算表面光谱反射率,对激光全息产品的颜色进行检测和控制。

收稿日期: 2016-11-15

作者简介: 陈伟(1966—),男,工程师,主要研究方向为凹印卷料的检测技术。

# 1 实验

## 1.1 激光彩虹衍射抑制模型的原理

激光彩虹全息印刷品的微观表面通常由凹凸不平的各种衍射条纹构成,被拍摄的物体表面的发光强度及其相位信息往往被记录在这些浮雕状的衍射条纹之中。可见光入射时,光线在全息印刷品表面会产生漫反射、镜面反射、衍射现象<sup>[5-6]</sup>。

衍射光栅按衍射方式的不同可分为透射式和反射式<sup>[7-8]</sup>。在包装印刷领域,通常使用反射式衍射光栅以达到防伪包装的要求。反射式光栅就是在常用的镀铝、镀铜反射膜上刻出一系列平行的斜槽,入射光经过斜槽时发生反射,产生干涉现象。反射式平面光栅见图 1<sup>[9]</sup>。

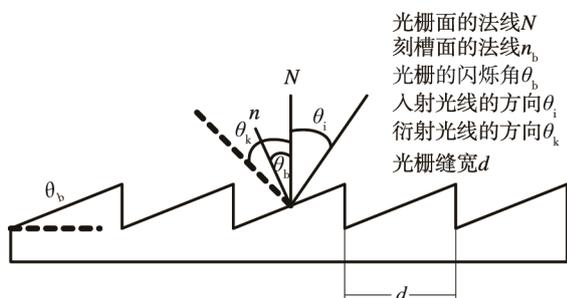


图 1 反射式平面光栅

Fig.1 Sketch map of reflective planar grating

平面反射式光栅方程见式(1)。

$$d(\sin \theta_k \pm \sin \theta_i) = k\lambda \quad (1)$$

式中:  $d$  为光栅缝宽;  $k$  为整数,代表衍射级次;  $\theta_i$  为入射角,即入射光线和光栅法线的夹角;  $\theta_k$  为衍射角,即衍射光线和光栅法线的夹角。可见光入射时,激光全息印刷品表面,由方程可知,在相同的入射角  $\theta_i$  下,衍射角  $\theta_k$  随着波长变化而变化。可见光中包含各种不同波长的光,经过光栅衍射后,不同波长的光按照不同的方向彼此分开形成光栅光谱,这就是衍射光栅的色散作用<sup>[10-11]</sup>。

当波长为  $\lambda$  的入射光照射到衍射光栅上时,衍射级次为  $k$ ,可以根据式(1)计算出衍射角为:

$$\theta_k = \arcsin\left(\frac{k\lambda}{d} - \sin \theta_i\right) \quad (2)$$

式中:  $\theta_i$  为入射角,且  $\theta_i \in (-\pi/2 \sim \pi/2)$ ;  $\theta_k$  为衍射角。在衍射光栅主极大位置上,衍射发光强度模型为:

$$I_\theta = I_0 \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2 \times \left[\frac{\sin(N\beta)}{\sin \beta}\right]^2 = N^2 I_0 \left(\frac{\sin u}{u}\right)^2 \quad (3)$$

当可见光入射角为  $45^\circ$  时,衍射光线主极大位置的衍射发光强度分布见图 2。不同波长的光在衍射光栅的作用下有不同的衍射角,彼此分开形成光栅光谱,观察角度不同,发光强度分布不同,有明显波峰波谷。

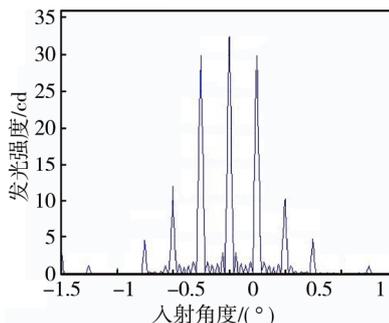


图 2 入射光以  $45^\circ$  角入射时衍射发光强度的分布  
 Fig.2 Diffraction intensity distribution of incident light at  $45^\circ$  incident angle

当可见光入射光线在衍射光栅表面均匀入射,即入射角在  $-\pi/2 \sim \pi/2$  内变动时,衍射光线主极大位置的发光强度分布见图 3。由图 3 可以看出,当入射光线在  $-\pi/2 \sim \pi/2$  遍布整个照射表面时,衍射光线的发光强度在空间立体范围内的分布都比较均匀,衍射发光强度比较稳定,无明显波峰波谷。这表明,当入射光充满整个表面空间时,在衍射光栅的作用下,任意角度均无特定的光谱分布,衍射发光强度在全角度分布均匀,衍射光栅的色散作用得到有效抑制。

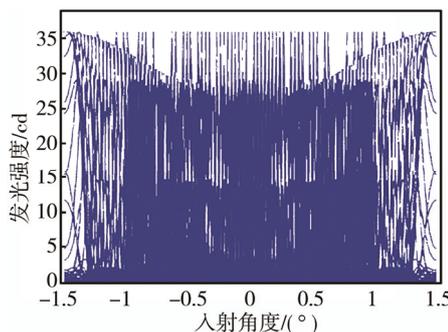


图 3 全角度照射下衍射发光强度的分布  
 Fig.3 Diffraction intensity distribution under full-angle irradiation

## 1.2 一种新型设计的穹顶光源

为了消除全息印刷品表面彩虹信息对 CCD 成像后图像的干扰,需要对印刷品表面衍射光栅的衍射特性进行有效抑制。基于上节的衍射抑制模型,设计了一种全息印刷品的专用成像光源——穹顶光源,使入射光线能在  $-\pi/2 \sim \pi/2$  均匀入射,遍布全息印刷品的照射表面,从而获得均匀的衍射发光强度,抑制衍射光栅的色散作用。穹顶光源横截面衍射光栅见图 4。

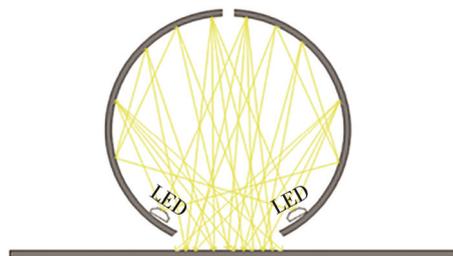


图 4 穹顶光源光学原理

Fig.4 Optical principle sketch map of dome light

### 1.3 多光谱成像系统器材与颜色测量过程

针对凹印卷料彩虹全息印刷品的颜色测量问题进行实验,采用 1.2 节描述的穹顶光源,以及以该光源为照明基础的专用多光谱测量 CCD 相机(Chromasens 公司的 TruePixa 相机),如图 5a 所示,包含 4 个镜头,每个镜头前面安装不同的滤光片(蓝色、普通透明、浅黄、绿色),每个镜头成像后都能得到 1 幅彩色的 RGB3 通道图像,因此每种颜色会产生 12 个不同的刺激响应<sup>[12]</sup>。

十二通道颜色测量系统见图 5b。十二通道线性扫描 CCD 相机固定在成像系统最顶端,角度为 0°,调整条形光源的角度为 45°左右。测量时印刷品放在线性扫描移动平台上,移动平台在丝杠导轨的带动下从前到后完成印刷品的扫描过程,得到 12 幅多光谱图像,并进一步可以插值成 36 幅多光谱图像。

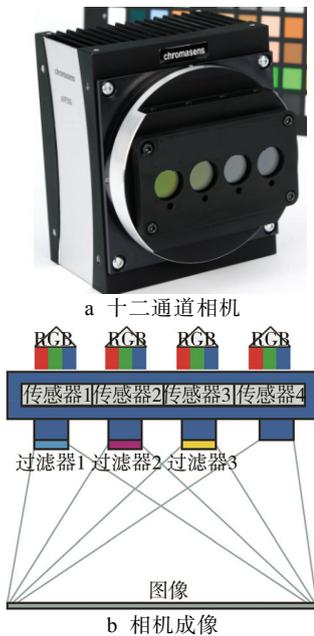


图 5 十二通道 CCD 相机  
Fig.5 12-channel CCD camera

## 2 实验对比

### 2.1 常规光源与穹顶光源成像对比

基于全新设计的全息穹顶光源与常规光源,在同样条件下,针对生产现场实际印刷的激光全息印刷品来进行成像对比的结果。图 6—9 为 2 组光源的对比成像效果,通过目视对比,可以充分说明全息穹顶光源对于激光全息产品的表面衍射光线有很好的抑制效果。

### 2.2 多光谱测量与传统分光光度计测量对比

基于新设计的穹顶光源,采集多光谱相机形成的多通道(12—36)通道图像见图 10。

由于当前颜色测量的标准主要采用 XRite 公司的分光光度计测量,为了对比新设计的全息穹顶光源以

及多通道颜色测量相机,针对同样的色卡,对 XRite 分光光度计进行同样的测量,其光谱曲线差异见图 11。

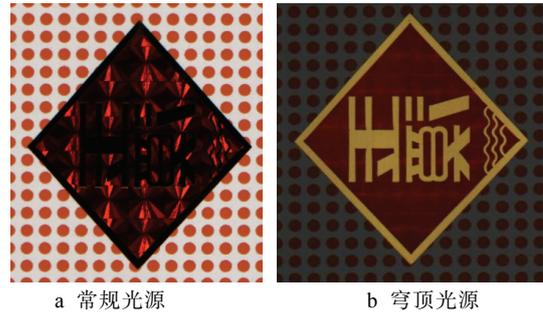


图 6 玉溪烟标成像对比  
Fig.6 Comparison of Yuxi cigarettes image



图 7 黄鹤楼镭射烟标成像对比  
Fig.7 Comparison of Huanghelou cigarettes laser image



图 8 黄鹤楼金卡烟标成像对比  
Fig.8 Comparison of Huanghelou cigarettes gold card image



a 常规光源



b 穹顶光源

图9 红河辐射烟标成像对比

Fig.9 Comparison of Honghe cigarettes laser image



12~36颜色通道

图10 36通道 CCD 图像示例

Fig.10 36-channel CCD camera Images

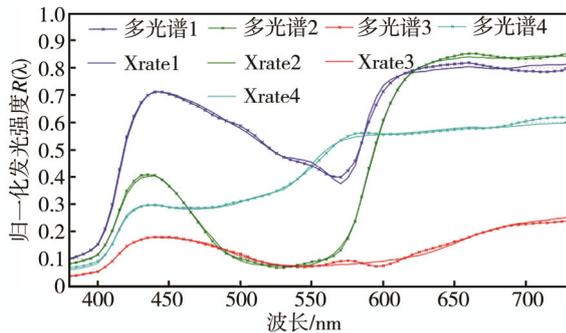


图11 十二通道 CCD 成像系统和 Xrite 光谱对比

Fig.11 Comparison spectrum of 12-channel CCD camera and Xrite

针对 1300 块 Pantone 色卡进行对比, 结果表明: 采用多光谱 CCD 颜色测量技术, 平均精度(NBS)约为 1, 重复性为 0.04。可见 2 种不同方式下, 测量出来的光谱曲线基本相同, 但是采用文中设计的颜色测量

系统, 由于在本质上颜色测量使用了高速线阵相机, 使在线颜色测量成为了可能, 所以多光谱颜色测量技术, 在凹印过程控制中, 首先作为一种在线颜色测量设备被使用<sup>[13]</sup>。相对于类似 XRite 等离线测量装置, 其可以同时可以进行超过 100 个色块的实时颜色测量, 具备极大的实用性, 使得在线颜色测量成为可能。

### 2.3 多光谱测量与传统凹印在线测量系统对比

传统凹印在线检测系统, 只能实现一般缺陷检测, 一般配合 2 个 4 K 彩色三线 CCD 线扫描相机、普通光学成像镜头、普通光源的视觉系统硬件组成, 幅面达到 850 mm, 速度为 200 m/min, 缺陷检测的相机分辨率一般小于 0.2 mm, 针对刀丝缺陷检测宽度小于 0.4 mm。

由于凹印印刷除了出现色差缺陷, 还会有刀丝、飞墨等印刷缺陷<sup>[14]</sup>, 所以多光谱相机会配合高速高精度相机同时使用, 综合完成全部缺陷的检测、监控, 并反馈给操作工人进行调整<sup>[15]</sup>。高精度颜色测量凹印在线检测系统能检测刀丝检测+颜色测量(100 个测量点), 一般配合 2 个 7 K 相机+1 个多光谱颜色测量相机、1 套颜色测量专用高速光学成像镜头及滤镜套件、1 套专用高速光学成像镜头、1 条标准 D50 漫反射专用颜色测量穹顶光源的视觉系统硬件组成, 幅面达到 850 mm, 速度为 250 m/min, 缺陷检测的相机分辨率一般小于 0.063 mm, 针对刀丝缺陷检测宽度小于 0.1 mm。

### 3 结语

针对彩虹全息印刷品的颜色测量问题, 设计了一种专用全息照明光源, 并以该光源为照明基础构建了 12 通道多光谱成像系统。在该环境下, 可以采用光谱反射率的比较方式, 对全息印刷品进行颜色测量。实验证明, 文中提出的多光谱颜色测量方法, 可以消除光柱影响, 有效解决全息印刷品的颜色测量难题。同时, 在这个理论基础, 针对卷料凹印的烟包产品, 开发出一套多光谱在线颜色测量系统, 方便卷对卷的生产工艺进行使用。实践证明, 该方式相比传统的 XRite 等手持式色差仪, 可以一次性读取超过 100 个区域的多光谱曲线以及 Lab 数值, 用于在线的色相判定和印刷跟踪功能, 具有很强的推广价值。

凹印在线颜色测量是对印刷品表面光谱反射率进行稳定测量, 所以这给未来这款产品的发展定义了更加广阔的前景。建立同色同谱的颜色控制方法: 通过结合 Lab 测量值, 避免了目视颜色相同但实质不同或目视颜色不同但实质相同的问题。自动油墨供给: 通过光谱反射率, 可以推导出油墨的问题, 并给控制油墨供给提供了可能。颜色控制体系的建立: 将凹印

在线颜色测量设备结合相同体系下的离线颜色测量设备,就能够建立统一的颜色控制体系。

#### 参考文献:

- [1] 马升涛. 反射型阶梯光栅的衍射特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
MA Sheng-tao. A Study on the Reflection Echeion Grating Diffraction Characteristics[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [2] 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(S1): 41—44.  
WAN Xiao-xia, LIU Zhen, HUANG Xing-guo, The Spectral Reflectance Model of Coloring Images on Holographic Papers[J]. China Printing and Packaging Study, 2010(S1): 41—44.
- [3] 戚永红. 激光全息包装材料在包装印刷中呈色性能的探讨[C]// 第十届全国包装工程学术会议交流论文集, 2006: 320—322.  
QI Yong-hong. Research on the Color Characteristic of Laser Materials for the Printing Package[C]// 10th National Conference on Packaging Engineering, 2006: 320—322.
- [4] 杨鑫, 李勇, 王辉, 等. 利用数值再现实现彩虹全息色差评价[J]. 光子学报, 2013, 42(3): 332—335.  
YANG Xing, LI Yong, WANG Hui, et al. Color Difference of Computer Generated Rainbow Hologram Based on Numerical Reconstruction[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(3): 332—335.
- [5] 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, 2004, 25(5): 170—171.  
CAO Cong-jun, ZHENG Yuan-lin. Research on Measurement of Chromatic Characteristics on Holographic Foil Materials[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(5): 170—171.
- [6] 刘翠萍, 于佳, 黎旭艳, 等. LED 用于彩色全息图照明的色度研究[J]. 光子学报, 2012, 41(2): 218—221.  
LIU Cui-ping, YU Jia, LI Xu-yan, et al. Colorimetric Research on LED Displaying Color Holograms[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(2): 218—221.
- [7] 邢德财. 几种介质光栅的衍射特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2008.  
XING De-cai. Study On Diffraction Characteristics of Several Dielectric Gratings[D]. Chendu: Sichuan University, 2008.
- [8] 巴音·贺希格. 衍射光栅色散理论与光栅设计制作和检验方法研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2004.  
BAYIN H. The Study On The Dispersion Theory, Design, Manufacture, And Efficiency Test Of Diffraction Gratings[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [9] 王莹. 多光谱图像色彩再现关键技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.  
WANG Ying. The Study of the Multispectral Image Color Reproduction Technologies[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [10] 樊叔维, 白亮, 周庆华. 衍射光栅闪耀特性的矢量理论仿真研究[J]. 光学学报, 2012, 32(S1): 105—106.  
FAN Shu-wei, BAI Liang, ZHOU Qing-hua. Research on Blaze Properties of Diffraction Gratings with Vector Simulation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(S1): 105—101.
- [11] 彭飞, 张德兴, 张攀, 等. 多重结构对体全息光栅衍射角带宽的拓展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 46—50.  
PENG Fei, ZHANG De-xing, ZHANG Pan, et al. Diffraction Angular Bandwidth Broadening of Volume Holographic Grating by Multiplex Structures[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 46—50.
- [12] 丁国华, 朱元泓, 李博, 等. 基于不同色块数量的光谱重构对比[J]. 包装工程, 2012, 33(3): 14—18.  
DING Guo-hua, ZHU Yuan-hong, LI Bo, et al. Comparison of Spectrum Reconstruction on Different Number of Color Block[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(3): 14—18.
- [13] 王夏. 彩色印刷图像质量检测系统的开发研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.  
WANG Xia. Development Of Quality Detection System Of Color Printing Image[D]. Xi'an: Xi'an University of technology, 2006.
- [14] 刘海娟. 基于图像处理的印刷品缺陷检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
LIU Hai-juan. Research on Defect Detection of Printed Matter Based on Image Processing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [15] 王岩松, 金伟其. 基于映射色差的表面检测方法研究[J]. 北京: 北京理工大学学报, 2010(1): 74—78.  
WANG Yan-song, JIN Wei-qi. Surface Inspection Based on Color Clustering of Mapping Chromatism[J]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010(1): 74—78.