提高镭射光柱卡纸色标光检测信号识别精度研究

陈锦华[1]，何邦贵[1]，段正红[2]，金琨[2]，张吕良[2]，夏家良[3]，王琪[3]
（1.昆明理工大学 机电工程学院，昆明 650500；2.大理美登印务有限公司，云南 大理 671000；
3.云南九九彩印有限公司，昆明 650000）

摘要：目的 针对凹版印刷以镭射光柱纸作为承印物，镭射光柱对色标检测传感器产生干扰，致使镭射光柱纸不能使用传统套印工艺进行印刷，提出一种可直接在镭射光柱区域直接印刷套准色标的新工艺与技术方案。**方法** 对色标传检测感器检测原理进行分析，分析镭射光柱纸的特点以及对色标传感器造成的干扰。根据镭射光柱光谱反射率曲线来进行滤光镜片的选取，同时也加入衰减镜片以及消光膜进行组合实验测量电压，实验使用松德凹印机组进行。以白卡纸套印电压作为参考，选取不同镜片组合进行生产打样。**结果** 镜片组合可以滤除镭射光柱，色标传感器能准确检测色标光信号，上机打样满足高精度多色套印，且不需要复杂的镂空、遮盖工艺，节省了一组色序，并节省了 2%的承印物原材料。**结论** 对色标检测传感器检测原理的分析以及对镭射光柱纸的光谱反射率曲线的测量，实现了使用滤光镜片组合对镭射光柱的滤除，证明了套准标记可直接印刷在镭射光柱区域的可行性。同时，提高了承印物的利用率，减低了油墨使用量。

关键词：镭射光柱纸；色标检测传感器；套印色标；滤光镜片
中图分类号：TS835 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2023)09-0275-07
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.033

Improvement of Identification Accuracy of Color Label Light Detection Signal in Laser Column Paperboard

CHEN Jin-hua[1], *HE Bang-gui*[1], *DUAN Zheng-hong*[2], *JIN Kun*[2], *ZHANG Lyu-liang*[2], *XIA Jia-liang*[3], *WANG Qi*[3]

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Dali Meideng Printing Co., Ltd., Yunnan Dali 671000, China; 3.Yunnan Jiujiu Color Printing Co., Ltd., Kunming 650000, China)

ABSTRACT: In the gravure printing with laser column paper as the printing material, the laser column interferes with the color label detection sensor, causing the laser column paper unable to be printed by the traditional overprinting process. Therefore, the work aims to propose a new process and technology solution to print the registration color label directly in the laser column area. The detection principle of the color label sensor was analyzed, and the characteristics of the laser column paper and the interference caused to the color label sensor were analyzed. The filter lenses were selected based on the spectral reflectance graph of the laser column, and the attenuating lenses and extinction films were also combined for the experimental measurement of voltage, which was carried out by the Songde gravure printing machine set. Different combinations of lenses were selected for production proofing with the ivory board overprint voltage as a reference. The

收稿日期：2022−08−21
基金项目：云南省科技计划项目（2019DC005）；云南九九彩印有限公司合作项目（649320200029）；大理美登印务有限公司合作项目（2022K0004A）
作者简介：陈锦华（1993—），男，硕士生，主攻机械创新设计与制造。
通信作者：何邦贵（1963—），男，教授，主要研究方向为机械创新设计与制造、包装印刷新材料等。

combined lenses could filter out the laser column, the color label sensor could accurately detect the color light signal, and the onboard proofing met the high precision multi-color overprinting. In addition, complicated hollowing and masking process were not required, which saved a set of color sequence and 2% of printing raw materials. The analysis on the detection principle of the color label detection sensor and the measurement of the spectral reflectance curve of the laser column paper enable the filtering of the laser column by a combination of filter lenses and demonstrate the feasibility of printing the registration label directly in the laser column area. At the same time, the utilization of printing materials is improved and the amount of ink used is reduced.

KEY WORDS: laser column paper; color label detection sensor; set color label; filter lens

电子无主轴传动技术在凹印套印控制系统中具有广泛应用，该技术具有响应迅速快、套印精度高、套准时间短、占地面积小[1-2]等优点。为了提高印刷效率，在无轴传动的基础上，不停机收放卷技术也随之出现，弥补了因手动换卷造成而出现的大量时间浪费，提高产能[3]，可根据印后工艺加工要求还可以加入烫金、模切、紫外线油墨印刷工艺以及二维码在线喷印工艺等功能[4]。其中，套印精度高和时间短主要得益于凹印机组的套印控制系统[5]，每个套印控制系统单独控制一个色组，在印刷完前一色序后，后一色序套准标记先通过色标检测传感器，检测到的信号送入套印系统，套印系统处理后发出补偿信号，控制印辊纵向电机保证印刷线速度与上一色序一致，横向电机接收到补偿信号后，带动丝杆调整印辊的轴向位置，最终满足生产要求。蒋恩松等[6]提到套印误差主要由色变检测传感器发出调制光，再根据反射光强弱来判断。王良等[7]提到色标检测传感器广泛应用于印刷、食品、造纸以及纺织业中，可对印刷在某种背景色中的色标进行检测。叶子解等[8]提到检测套印色标与色标检测传感器发出光的波长、入射角度以及功率有光，承印物本身以及套印色标反射光强不同来分别判断。色标检测传感器是凹印套印的基础，套印色标能否被精确识别直接影响印品成品率[9]。在传统卷烟包装印刷中，承印物大多数为白卡纸，色标检测传感器能精确识别印刷在白色背景上的套准色标。目前，随着环保意识的提高以及防伪性能的要求，镭射光柱卡纸成为了大多数卷烟包装的选择，但由于镭射光柱对色标检测传感器的影响使得套印色标无法被精确检测，最终无法套印导致废品率上升。王宏伟等[10]提到使用带有银边为 15 ~ 20 mm 的镭射光柱纸进行凹印套印，但银边占整个印刷品的 2.00% ~ 2.78%，增加了原材料浪费。在镭射光柱纸研究中，黄敏等[11]使用 3D 激光共聚焦显微镜放大 3 000 倍，可知镭射光柱纸彩虹效果是由于其衍射光栅周期性结构所导致。Nadal 等[12]提到镭射光柱纸表面镀有一层珠光涂层材料，该层形成的衍射光栅结构导致镭射光柱产生。陈锦华等[13]提出利用模切位置进行套印色标的印刷，并以基准色块作为第一色，对镭射光柱进行覆盖，套印色标需要经过遮盖、镂空来体现，增加工艺难度，且需要单独一组色序作为基准色块，对于色序组数较少的凹印机组难以实现。

结合上述研究现状和成果可知，不仅对凹印套印系统和色标检测传感器进行了大量的研究，也对镭射光柱纸表面彩虹效果进行研究，但对使用滤色镜片进行镭射光柱的滤除没有可以参考的文献以及方法。在目前研究成的基础上，通过对镭射光柱纸光谱测量，根据光谱分布区间来选择合适的滤光镜片，然后配合不同的衰减镜片以及消光膜。把套准标记位置移动至镭射光柱区域，通过实验选择出合适的镜片组合对镭射光柱进行滤除，避免色标检测传感器产生干扰，提高承印物利用率，降低原材料消耗。

1 凹印套印检测原理分析

凹印在烟标印刷中占主要地位，套准色标形状以楔形套印色标为主，规格一般是一头宽为 1 mm、另外一头宽为 4 mm、长为 10 mm、间距 L 为 20 mm。由于在横向位置宽度不一样，不仅能用在纵向进行套印，也能在横向进行套印。色标检测传感器有 2 个光电眼检测原理，如图 1 所示，套印色标反射，由透镜聚集的光源，经过光电转换后输出脉冲信号，两光路原理一致，两光路镜头相距约为 20 mm。偏差检测时：以前一色序的套印色标为基准，当后一色序的套印色标经过时，两路光电检测系统同时产生两色标脉冲信号[14]。H_1、H_2 距离小于 20 mm 时，前一色序滞后于后一色序；H_1、H_2 距离大于 20 mm 时，前一色序超前于后一色序；H_1、H_2 距等于 20 mm 时，前一色与后一色序满足凹印套印要求。

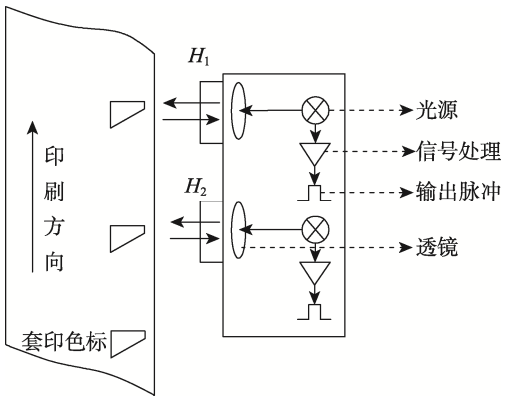


图 1 双光电眼检测原理
Fig.1 Principle of double photoelectric eye detection

色标检测传感器信号输出如图 2 所示，色标检测光电传感器以第 1 色的套印色标 H_1 作为基准。其产生的脉冲信号为主脉冲，检测第 2 色时，该套印色标所产生的脉冲信号为副脉冲 H_2，主副脉冲之间的时间差$\Delta t=t_1-t_2$。当纵向套印出现误差时，印刷品图文纵向会发生重叠，Δt 值发生变化与预先设置的值不一致，如果 H_2 超前或者滞后，则表明存在套印误差，时间差Δt 越大，套印误差越大。当横向套印出现误差时，横向发生变化，横向误差通过检测套印色标中的 h_1 和 h_2 对应输出脉冲宽度来计算承印物位置，当 h_1 等于 h_2 时，套印准确。当 h_1 不等于 h_2 时，印刷品图文横向会发生重叠[15-16]。

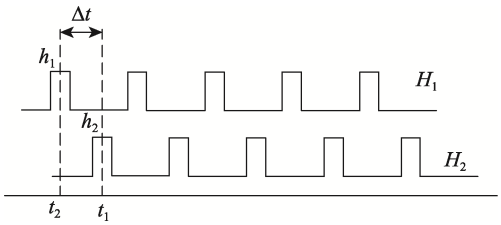


图 2　凹印套印色标波形示意图
Fig.2 Waveform diagram of registration color label in gravure printing

色标检测传感器在检测镭射光柱纸时，信号输出如图 3 所示，色标检测光电传感器以第一色的套印色标 H_1 作为基准，在检测 H_2 时，会受到镭射光柱纸的影响产生杂波，使得在凹印套印过程中出现误判Δt 难以恒定，难以满足套印要求，产生大量废品。

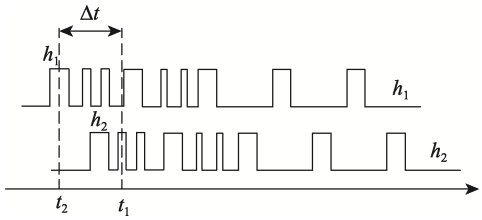


图 3　镭射光柱纸套准信号波形示意图
Fig.3 Waveform diagram of registration signal in laser column paper

2　镭射光柱纸光谱测量与镜片选择

2.1　光谱测量

镭射光柱是由每毫米中有几千条干涉条纹的激光全息所产生，衍射能力非常强，条纹周期约为 1 μm，光栅方程见式（1）。

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

式中：d 为光栅周期；i 和 j 分别为光线的入射角和衍射角，如图 4 所示；k 为衍射级数；λ 为波长[17]。镭射光柱纸由于光栅衍射原因，在不同角度进行观察会呈现出彩虹光带效果，如图 5 所示，这样不遵循一般光反射的特性。在凹印机组进行印刷时，色标检测传感接收到镭射光柱纸衍射光信号，使得套印信号混乱且无法准确识别套印色标，进而导致凹印套印系统难以发出补偿信号，直接在镭射光柱区域印刷套印色标就变得难以实现。

使用一张未印刷大小为 755 mm×755 mm 规格的镭射光柱纸进行测量，沿 x 方向，以 150 mm 为间隔进行测量，一共测量 5 个点，沿 y 方向，以 70 mm 为间隔进行测量，一共测量 9 个点，光柱镭射纸放大 30 倍的观测图，如图 6 所示。

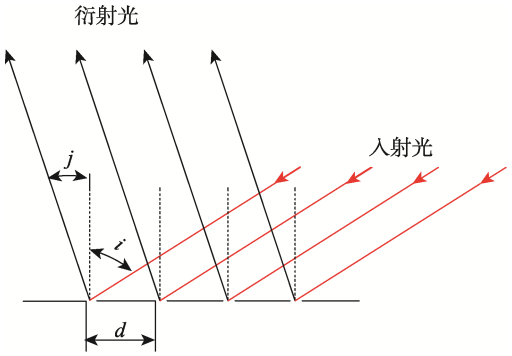


图 4　反射光栅光路
Fig.4 Light path of reflective grating

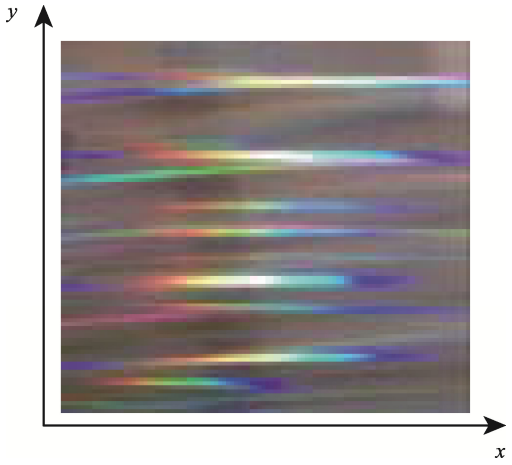


图 5　镭射光柱纸
Fig.5 Laser column paper

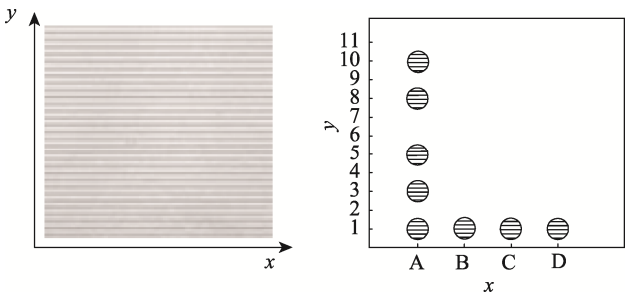


图 6　镭射光柱纸光栅条纹
Fig.6 Grating fringe of laser column paper

在印刷时，镭射光柱纸的运动方向是沿 y 方向，并垂直于镭射光柱方向相进行印刷，且色标检测传感器垂直照射于承印物之上。选用 Xrite SpectroEye 分光光度计对镭射光柱进行光谱信息测量，如图 7 所示，满足印刷条件，故分光光度计应在 0°接收衍射光。从仪器采集到的光谱反射图可知，接收波长为 380 ~ 730 nm、380 ~ 430 nm 时衍射光反射率下降，430 ~ 580 nm 的衍射光反射率最低约为 20%，580 nm 后开始上升，最高可达到 130%左右。

图 7　分光光度计
Fig.7 Spectrophotometer

衍射光主波长探测到的光谱从 560 nm 开始上升，在波长为 650 ~ 700 nm 时达到峰值，在采集仪器显示的数据中，部分数据光谱能量超过 100%，这是由于设备接受到的能量由反射光谱和衍射光谱能量组成，如图 8 所示。虽然光谱能量会随采样位置的变化而有所不同，但总体差异较小。

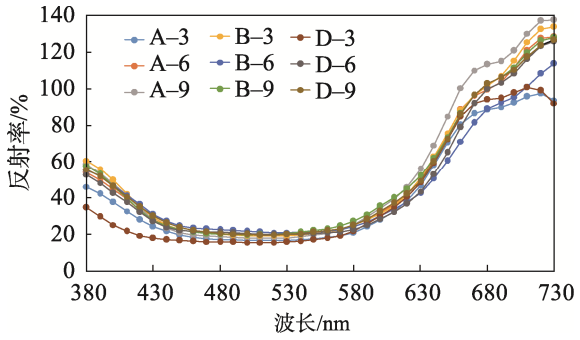


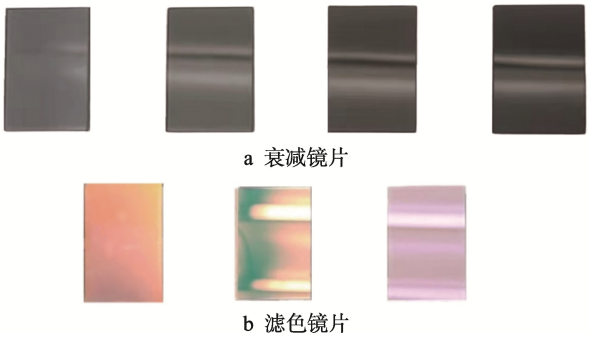
图 8　光谱能量信息
Fig.8 Spectral energy information

2.2　滤光镜片选择

从上述可知，滤光镜片选用截止滤光镜片，可以让指定的某一段范围中的光束透过，对不在这一范围内的光束产生抑制。抑制短波光束的滤光片称为长波通滤光片，相反，则称为短波通滤光片[18]。使用表 1 中实验材料，短波通滤光镜片的中心波长分别为 500、550、600 nm，中性密度滤光片的衰减率分别为 30%、40%、50%和 60%，如图 9 所示，进行组合，其中一组使用消光膜，另外一组不使用消光膜。首先，使用 0%的消光膜与 3 种滤光片以及不同参数的衰减镜片进行组合使用，然后是使用 25%的消光膜与 3 种滤光片以及不同参数的衰减镜片进行组合使用。

表 1　500 nm 滤光镜片有消光膜电压测量
Tab.1 Voltage measurement of 500 nm filter lenses with extinction film　　V

衰减镜片	0%	30%	40%	50%	60%
白色	2.39	1.83	1.28	0.71	0.64
黄色	1.99	1.51	0.97	0.63	0.56
红色	3.27	2.31	1.60	0.95	0.64
棕色	3.27	2.23	1.60	0.95	0.64
黑色	3.31	2.27	1.64	0.99	0.68



a 衰减镜片

b 滤色镜片

图 9　不同镜片
Fig.9 Different lenses

3　实验与分析

3.1　电压测量

首先，对松德凹印机组上的色标传感器尺寸进行测量，设计打印镜架安装镜片。一个完整的滤光设备由架子、衰减片、滤光镜片和消光膜共 4 个部分组成，如图 10 所示。凹印机组光色标检测传感器的信号输出必须要查阅其说明手册，在其“COLORCON UNIT BOX”部分找到信号输出的接线端子，位于“JUNCTION BOX”盒子中，盒子的工作电压为 12 V，盒子内有 T1、T2、12 V+等 3 个接线端子，把示波器接到 T1 与 12 V+等 2 个端子上进行信号读取，进行电压信号的读取。

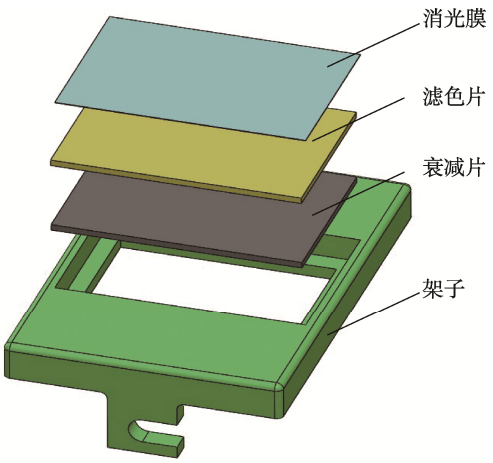


图 10　镜片安装示意图
Fig.10 Installation diagram of lenses

3 种滤光镜片与消光膜组合，一组带有消光膜，一组不带消光膜，共 6 组。将已有的 6 个组分别与 4 种中性衰减镜片进行组合，安装在凹印机色标检测光电传感器上进行实验。使用中心波长为 500、550 和 600 nm 的滤光镜片分别与 4 种衰减镜片进行组合实验。

先对有消光膜组进行实验，表 1 中选用 500 nm 滤光镜片，不使用衰减镜片，红色、棕色和黑色油墨电压值较高，电压值为 3.0 ~ 3.5 V；其次是白色油墨，电压值为 2.0 ~ 2.5 V，黄色油墨电压值最小，为 1.5 ~ 2.0 V。使用衰减率分别为 30%、40%、50%、60%的衰减镜片，5 种颜色的电压均在减小。使用 550 nm 的滤光镜片后（表 2），在未使用衰减镜片时，红色、棕色和黑色油墨电压值较高，电压值为 6.0 ~ 7.0 V；白色油墨的电压值为 5.0 ~ 6.0 V，黄色油墨电压值为 4.0 ~ 5.0 V，电压值明显高于表 1 中的电压值，但加装衰减镜片之后，电压降低程度大于表 2 中的电压。使用 600 nm 的滤光镜片后（表 3），不使用衰减镜片的电压值在 3 组实验中最高，加装衰减镜片后电压值下降幅度最大。

表 2　550 nm 滤光镜片有消光膜电压测量
Tab.2 Voltage measurement of 550 nm filter lenses with extinction film　V

衰减镜片	0%	30%	40%	50%	60%
白色	5.27	2.14	1.44	0.95	0.56
黄色	4.23	1.83	1.20	0.90	0.44
红色	6.63	2.79	1.84	1.11	0.72
棕色	6.79	2.95	1.92	1.14	0.73
黑色	6.84	2.99	1.97	1.19	0.77

表 3　600 nm 滤光镜片有消光膜电压测量
Tab.3 Voltage measurement of 600 nm filter lenses with extinction film　V

衰减镜片	0%	30%	40%	50%	60%
白色	7.92	2.97	2.18	1.25	0.74
黄色	5.54	2.37	1.58	0.94	0.55
红色	8.91	3.76	2.38	1.45	1.19
棕色	10.10	3.96	2.77	1.61	1.02
黑色	10.14	4.01	2.81	1.65	1.07

对不带消光膜的镜片组进行实验，实验顺序与上述实验相同。3 种滤色片与 4 种衰减片进行组合，得到的结果见表 4—6。首先，对 500 nm 滤光镜片进行实验，不带消光膜的电压数据要明显高于带有消光膜的实验组，同样红色、棕色和黑色油墨的电压值较高，白色的电压值其次，黄色的电压值最低。然后，分别使用 550 nm 与 600 nm 滤光镜片进行实验，同样在使用衰减镜片后，各个颜色油墨的电压值迅速降低。3 组不带消光膜的电压值均高于 3 组带消光膜的电压值。

表 4　500 nm 滤光镜片无消光膜电压测量
Tab.4 Voltage measurement of 500 nm filter lenses without extinction film　V

衰减镜片	0%	30%	40%	50%	60%
白色	4.63	3.07	2.23	1.11	0.80
黄色	3.67	2.43	1.76	0.88	0.72
红色	6.07	3.79	2.63	1.43	1.03
棕色	6.15	3.79	2.63	1.38	1.03
黑色	6.19	3.83	2.67	1.42	1.07

表 5　550 nm 滤光镜片无消光膜电压测量
Tab.5 Voltage measurement of 550 nm filter lenses without extinction film

衰减镜片	0%	30%	40%	50%	60%
白色	7.54	2.72	1.92	1.20	0.71
黄色	5.94	2.21	1.60	0.88	0.63
红色	9.29	3.36	2.48	1.44	0.95
棕色	9.53	3.52	2.56	1.52	0.95
黑色	9.57	3.57	2.60	1.57	1.00

表 6　600 nm 滤光镜片无消光膜电压测量
Tab.6 Voltage measurement of 600 nm filter lenses without extinction film

衰减镜片	0%	30%	40%	50%	60%
白色	10.70	3.76	2.77	1.58	1.00
黄色	7.30	2.77	1.78	1.03	0.76
红色	11.70	4.36	2.77	1.78	1.16
棕色	12.70	4.73	3.37	1.98	1.28
黑色	12.75	4.77	3.41	2.02	1.32

由上述实验可知，5 种不同颜色的油墨，其中黄色油墨在 5 种颜色中电压值最小，因此保证黄色能够被准确识别非常重要。使用白卡纸进行套印时，电压值为 1 ~ 4 V 能保证套印色标能够被准确识别。因此，根据白卡纸的套准电压来挑选出黄色油墨电压为 1 ~ 4 V 的实验组，并在凹印上进行后续的生产实验。

3.2　上机实验

在使用白卡纸进行凹版印刷时，色标传感器检测到色标，且能正常识别的电压区间为 1 ~ 4 V。从 3.1 节实验中找出满足该电压需求的镜片配合方案，分别如下：

1）在带有消光膜的前提下，使用 500 nm 滤光镜片，所有油墨色组不需要衰减镜片；使用 550 nm 滤光镜片，所有油墨色组均需要安装 30%的衰减镜片；使用 600 nm 滤光镜片，白色油墨色组需要安装 30%的衰减镜片，黄色和红色油墨色组需要安装 30%的衰减镜片，棕色和黑色油墨色组需要安装 40%的衰减镜片。

2）在不带有消光膜的前提下，使用 500 nm 滤光镜片，白色油墨色组需要配合 30%的衰减镜片使用，黄色油墨色组不需要衰减镜片，红色油墨需要配合 40%的衰减镜片使用，棕色和黑色油墨不需要配合衰减镜片使用；使用 550 nm 滤光镜片，所有油墨色组均需要配合 30%的衰减镜片使用；使用 600 nm 滤光镜片与使用 550 nm 滤光镜片的情况相同。

主要设备及材料：凹印机采用松德（SAY820C8）凹印机组；纸张采用 225 g/m^2×735 mm 的无银边镭射光柱纸。

使用在镭射光柱区域进行套印色标印刷的印版，按照上述镜片配合进行上机实验。首先观察松德凹印机组上位机中显示的套准信号，镭射光柱是否还会对色标检测传感器产生影响而出现杂乱的脉冲波形信号；再查看印品套印精度是否满足该产品的生产需要。通过加装滤光镜片、衰减镜片以及消光膜，可过滤镭射光柱，杜绝其对色标检测传感器的影响，套印色标能被准确识别，满足高精度多色套印影响。

为进一步验证光柱镭射纸取消银边工艺的效果，使用无银边镭射光柱纸进行 20 个月的上机实验，并统计出各类去除银边光柱镭射纸使用情况，见表 8。

表 7　去除银边光柱镭射纸使用情况
Tab.7 Use of silver-edge removed laser paper

原纸张幅宽/mm	现纸张幅宽/mm	单纸卷质量/kg	节约比例/%	纸卷数量/卷	节约质量/kg
750	735	0.9	2.00	785	14 420

在使用滤色镜片工艺下，也实现了不需要银边进行生产，不仅减少了整个纸张的 2.00%的浪费，且减少了一个序油墨的使用，未使用新工艺前每卷纸使用 0.3 kg 油墨，使用新工艺实现第 1 色序油墨的全部节省，每 16 卷纸节约人工 0.5 h。同时，去除银边后，承印物两侧都能进行套印色标印刷，故不需要区分银边的位置，增加了镭射光柱纸对凹印机的通用性。总共节省纸张约 14 420 kg、节省人工 24.5 h、节省油墨 235.5 kg。实验成品见图 11。

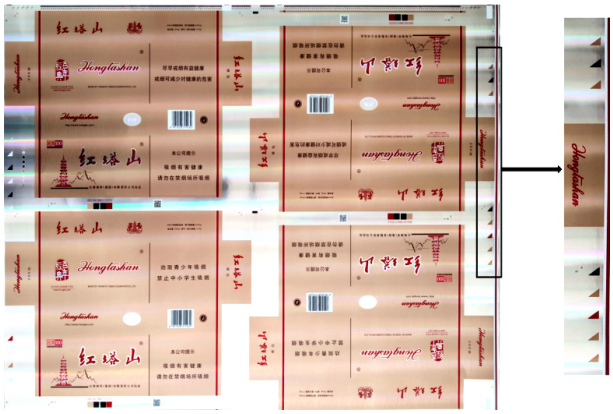


图 11　印刷套准色标
Fig.11 Printing of registration color label

4　结语

相较前文中提到使用印刷基准色块作为第 1 色序，对纸张镭射光柱进行光电信号掩盖，使用滤光镜片辅助印刷工艺，能完全节省 1 个色序印刷单元组，也不需要复杂的色序组之间的相互镂空、遮盖工艺来提供套印色标。同时，节约每批次印刷工序的第 1 色序调墨、安装刮墨刀、安装供墨车及辅助装置的操作工劳务时间。不考虑油墨对镭射光的遮挡效果，以及凹印机组的色组数不足造导致无法满足生产色组数的问题。通过 20 个月的上机实验，实现了在凹印印刷纸张镭射光柱区域进行套印标记印刷，降低了承印物卷筒纸的消耗约 14 420 kg，彻底节省油墨约 235.5 kg，节省了 1 个色序的调墨和安装印版的时间，且新工艺也可在其他凹印印刷品牌类似印品中进行推广使用。

参考文献：

[1] LEE K M, FOONG S. Lateral Optical Sensor With Slip Detection for Locating Live Products on Moving Conveyor[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 7(1): 123-132.

[2] RAJA A S, SANKARANARAYANAN K. Performance Analysis of a Colorimeter Designed with RGB Color Sensor[C]// International Conference on Intelligent & Advanced Systems IEEE, 2007: 305-310.

[3] LIU Shan-hui, MEI Xue-song, KONG Fan-feng et al. A Decoupling Control Algorithm for Unwinding Tension System Based on Active Disturbance Rejection Control. Mathematical Problems in Engineering, 2013(6): 1798-1803.

[4] 陈宸，杨国涛，牛佳佳，等. 卷烟商标纸生产与应用现状分析[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(6): 63-69.
CHEN Chen, YANG Guo-tao, NIU Jia-jia, et al. Current Situation of Production and Application of Cigarette Labels[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2016, 22(6): 63-69.

[5] 李婧. 凹版印刷多色套准控制系统设计[J]. 包装工程, 2021, 42(19): 277-281.
LI Jing. Design of Multi-Color Alignment Control System for Intaglio Printing[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(19): 277-281.

[6] 蒋恩松，肖辉军，孙刘杰，等. 高精度套印误差光电检测系统的关键技术[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2007, 25(6): 78-81.
JIANG En-song, XIAO Hui-jun, SUN Liu-jie, et al. Key Technology of High Precision Photoelectric Detecting System for Registration Deviation[J]. Journal of Shan'xi University of Science & Technology (Natural Science

Edition), 2007, 25(6): 78-81.

[7] 王良，李鸿. 色标传感器工作原理初探[J]. 中国井矿盐, 2008, 39(6): 28-30.
WANG Liang, LI Hong. Preliminary Approach on the Working Principle of the Color Scale Sensor[J]. China Well and Rock Salt, 2008, 39(6): 28-30.

[8] 叶子解，王子江. 色标检测光电传感器的研究[J]. 仪表技术与传感器, 1996(12): 7-9.
YE Zi-jie, WANG Zi-jiang. A Photoelectric Sensor for Color Marks Testing[J]. Instrument Technique and Sensor, 1996(12): 7-9.

[9] 陈锦华. 高精度多色无银边镭射光柱纸凹印工艺研究[D]. 昆明：昆明理工大学, 2022: 18-22.
CHEN Jin-hua. Research on Gravure Printing Technology of High Precision Multi-Color Laser Column Paper without Silver Edge[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022: 18-22.

[10] 王宏伟，蒋迎春，韦天波. 镭射卷筒纸凹印去银边定位印刷[J]. 印刷技术, 2019(7): 30-31.
WANG Hong-wei, JIANG Ying-chun, WEI Tian-bo. Laser Web Gravure Printing with Silver Edge Removed and Positioning Printing[J]. Printing Technology, 2019(7): 30-31.

[11] 黄敏，李泽阳，石冰洁，等. 光柱镭射纸及其印刷品的颜色质量评价方法[J]. 光学学报，2017，37(2): 364-372.
HUANG Min, LI Ze-yang, SHI Bing-jie, et al. Color Quality Evaluation Methods for Holographic Paper and Its Printings with Light Pillars[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 364-372.

[12] NADAL M, EARLY E. Color Measurements for Pearlescent Coatings. Color Research & Application. 2004, 29: 38-42.

[13] 陈锦华，何邦贵，杨述鑫，等. 镭射光柱纸凹印套准色标位置优化及实现[J]. 包装工程，2021，42(21): 188-193.
CHEN Jin-hua, HE Bang-gui, YANG Shu-xin, et al. Optimization and Realization of Alignment Color-Mark Position of Laser Column Paper Gravure Printing[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(21): 188-193.

[14] 孙琪. 凹版印刷机自动套色控制系统设计与应用[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 209-212.
SUN Qi. Design and Application of Automatic Register Control System of Gravure Printing Machine[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 209-212.

[15] 韩璐斌. 光电式传感器的原理及其特性[J]. 科技创新与应用, 2020(10): 77-78.
HAN Lu-bin. Photoelectric Transducer's Principles and Characteristics[J]. Technology Innovation and Application, 2020(10): 77-78.

[16] 邓瑞，侯和平，徐卓飞，等. 印刷纸带纠偏装置研究与系统开发[J]. 包装工程, 2018, 39(13): 138-143.
DENG Rui, HOU He-ping, XU Zhuo-fei, et al. Research on the Guiding Control Device of Printing Paper Tape and System Development[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(13): 138-143.

[17] 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.
WAN Xiao-xia, LIU Zhen, HUANG Xin-guo. The Spectral Reflectance Model of Coloring Images on Holographic Papers[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2(z1): 41-44.

[18] 王月花. 薄膜光学原理与技术[M]. 徐州：中国矿业大学出版社, 2020: 63-64.
WANG Yue-hua. Principle and Technology of Thin Film Optics[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2020: 63-64.

责任编辑：曾钰婵