

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180062

色彩管理在纸张数码打样中的应用研究

王 辉¹, 宋亚丽¹, 刘 乐¹, 高玉杰¹, 曹江涛², 刘娜娜²
(1. 天津科技大学造纸学院, 天津 300457; 2. 青岛运城制版有限公司, 青岛 266100)

摘要: 基于 GMG 和 CGS 色彩管理软件对数码打样质量的影响进行研究, 比较打样纸张未经过色彩管理和分别经过 GMG、CGS 色彩管理的质量差别, 同时比较两款软件打样性能的优异性. 结果表明: 经过 GMG 和 CGS 色彩管理之后, 数码打样纸的色域扩大, 色彩再现和阶调复制能力显著提高, 印刷相对反差值增大, 网点扩大减小, 整体打样质量较好; 就两款软件比较而言, CGS 比 GMG 色彩校正过程更简捷和准确, 在色彩再现、阶调复制、减少网点扩大方面表现更突出, 打样质量更高.

关键词: 数码打样; 色彩管理; GMG; CGS

中图分类号: TP391.41; TS805.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2019)05-0074-07

Application of Color Management in Paper Digital Proofing

WANG Hui¹, SONG Yali¹, LIU Le¹, GAO Yujie¹, CAO Jiangtao², LIU Nana²

(1. College of Papermaking Science and Technology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
2. Qingdao Yuncheng Plate-making Co., Ltd., Qingdao 266100, China)

Abstract: The impact of GMG and CGS color management software on the quality of digital proofing was studied and compared. The performance of proofed paper was also compared that without color management. The results indicated that the gamut of digitally proofed paper was expanded, the color reproduction and tone reproduction both significantly improved, the relative contrast value was increased, the dot gain was reduced and the overall proofing quality was better than without GMG and CGS color management. The comparison between the two software shows that CGS is simpler and more accurate than GMG during color correcting process and performs better in color reproduction, tone reproduction and dot gain reduction, and thus can provide better proofing quality for digital proofing.

Key words: digital proofing; color management; GMG; CGS

近年来, 随着图像信息技术的不断发展, 数字印刷技术也日趋完善. 数码打样在实际印刷生产过程中的应用也越来越广泛, 已经成为印刷过程中不可或缺的重要部分, 打样质量的好坏直接决定客户能否在最终稿件上签字. 数码打样不同于传统打样, 是指采用数码打样输出设备和数码打样控制软件组成的数字化成像系统, 利用同一数字页面完成图文数据计算、色彩空间的转换和匹配、控制数据处理和数据交换功能, 实现图文信息色彩再现与印刷生产质量的控制. 数码打样消除了传统打样的诸多技术瓶颈, 满足印刷生产优质高效的发展要求^[1-2]. 同时, 色彩管理

技术的发展使得人们对数码打样质量的认知上升了一个新的高度; 通过色彩管理可以展现图文信息的真实色彩效果, 实现最大程度的仿真色彩再现, 即“所见即所得”. 要实现 ICC(颜色特性文件)色彩管理技术必须通过 3C 控制要素来完成, 3C 控制要素为设备校准(calibration)、特征描述(characterization)及颜色转换(conversion). 其中颜色转换是色彩管理数码打样中最重要的组成部分, 是影响数码打样准确性的关键因素, 决定了印品的复制精度以及最终颜色再现的质量^[3-4].

目前市面上的色彩管理软件较多, 其打样性能各

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-05-03

作者简介: 王 辉(1992—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生; 通信作者: 高玉杰, 教授, yujie@tust.edu.cn

有优劣,不同软件应用的对比研究较少,没有明确的数据对比.本文基于 GMG、CGS 色彩管理软件对数码打样质量的影响情况进行研究,对打样纸张未经过色彩管理和分别经过 GMG 和 CGS 色彩管理软件处理后的效果进行分析比较,通过分光光度计扫描 ECI2002 色表,利用 ProfileMaker 软件生成 ICC 特性文件,分析观察各自生成的 ICC 特性文件的色域大小,通过色差、阶调再现、印刷相对反差值、网点扩大这几个印刷参数对打样质量进行表征,最终得出未经过色彩管理和经过色彩管理对数码打样质量的影响.本研究结合青岛运城制版有限公司实际打样过程,对实际印刷打样具有一定的指导意义,同时为比较不同色彩管理软件性能的差异提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

ESPON Sure Color P7080 型大幅面喷墨打印机、ESPON Ultra chrome HDX 型油墨,日本爱普生公司; Eye-one io 型分光光度计、X-rite eXact 型分光密度计,美国爱色丽公司;爱普生数码打样专用纸(定量 190.90 g/m²,白度 98.76%,L = 94.41, a = -0.76, b = -3.05, 75°光泽度 57.43%),北京华利志诚科技有限公司;色彩管理软件 GMG Color Proof 5,德国 GMG 公司;色彩管理软件 ORIS Color Tuner//Web 3.1,德国 CGS 公司;特性文件生成软件 ProfileMaker Pro5.0,美国格林达麦克贝斯公司;图文处理软件 Photoshop CC2018、Illustrator CC2018,美国 Adobe 公司.

1.2 实验方法

1.2.1 实验印刷测试版的设计

印刷最主要的任务是色彩再现及还原,因此测试版的设计应当包括最好的网点形状、实地密度、网点扩大、油墨叠印率、灰平衡表现、套印精度等关键评价要素^[5].本实验使用的测试版如图 1 所示.用印前图文处理软件 Photoshop、Illustrator 对测试版进行设计及排版,其中放置了 ECI2002R 图表,用来生成 ICC 特性文件,还放置了能够反映肤色以及带有极高光或暗调细微层次、中性色调、记忆色、高光和暗调渐变等的色调图像,此外还有各级阶调梯尺,C、M、Y、K 四色实地色块,印刷测控条等,以便监控印刷状态,获取相关参数数据,对打样质量进行评价.

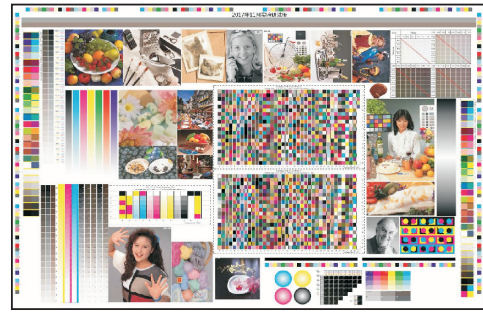


图 1 数码打样测试版

Fig. 1 Test plate of digital proofing

1.2.2 数码打样流程及参数设置

在进行数码打样之前必须确保打印设备保持良好的运行状态.数码打样流程如图 2 所示.

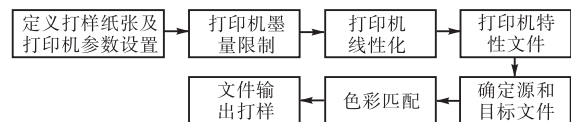


图 2 数码打样流程

Fig. 2 Process of digital proofing

打印参数设置:分辨率为 720 dpi × 1 440 dpi;打印方向为双向.

测量条件:D50 光源、2°视场、M0 滤镜模式.

1.3 数码打样质量的评价

本实验对数码打样输出的测试版进行测试,通过色域和色差参数比较出未经过色彩管理和经过 GMG、CGS 色彩管理软件校正后的色彩表现能力;分别测量数码打样纸未经过色彩管理和经过 GMG、CGS 色彩管理软件校正后的 C、M、Y、K 四色阶调密度,通过阶调再现、印刷相对反差、网点扩大对打样质量进行客观评价.

测试版的色域和色差按照 ISO 12647—7:2013 国际数码打样参考标准进行测定;印刷相对反差和网点扩大按照 ISO 12647—2:2013 国际胶印参考标准进行测定.

2 结果与讨论

2.1 色域比较

色域是评价色彩再现能力的重要参数,是打印机、油墨、打印介质和实现数字图文转化为打印机可识别的语言的特殊连接,色域越大,色彩再现能力越强^[6].实验通过分光光度计分别对打印机输出的未经过色彩管理和经过 GMG、CGS 色彩管理的 ECI2002 色表进行扫描,利用 ProfileMaker 软件生成 ICC 特性

文件,色域值比较见表 1,色域范围比较如图 3 所示.从表 1 可知:未经过色彩管理的数码打样纸色域容量值明显小于经过 GMG 和 CGS 色彩管理软件的色域容量值,而 CGS 软件所表现的色域容量值比 GMG 软件要稍大.

表 1 不同色域容量比较

Tab. 1 Comparison of different gamut volume

处理情况	色域值
未经过色彩管理	334 445
GMG 色彩管理	824 876
CGS 色彩管理	850 709

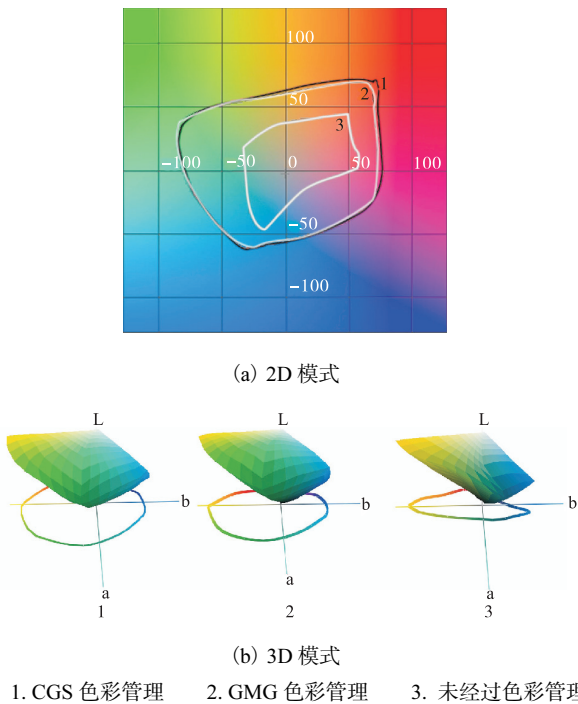


图 3 不同色域范围比较

Fig. 3 Comparison of different gamut scope

从图 3 两种不同的视觉模式图中可以很直观地发现:未经过色彩管理的数码打样纸的色彩再现范围最小,色彩再现能力较差;经过色彩管理之后,数码打样纸的色域明显扩大,CGS 相较于 GMG 软件色域要稍大,在品红-黄范围内色彩再现能力更为出众.

2.2 色差比较

色差是评价打印样张与标准样张差别的重要指标,ISO 12647—7 数码打样参考标准规定:数字样与模拟印刷条件的颜色相比,C、M、Y、K 基础色与其对应的目标色之间色差(ΔE)不得大于 5.表 2 为色差程度的鉴定标准.实验对测试版进行输出打样,用分光光度计对打样文件中放置的 ISO 12647—7 数码标准打样测控条进行扫描,得出 C、M、Y、K 四色在 0~100%范围内的色差,色差比较如图 4 所示.

表 2 色差程度的鉴定标准

Tab. 2 Identification standards of color difference degree

鉴定标准	$\Delta E(L^*a^*b^*)$	鉴定标准	$\Delta E(L^*a^*b^*)$
微量	0~0.5	明显	>3.0~6.0
轻量	>0.5~1.5	很大	>6.0~12.0
能感觉到	>1.5~3.0	截然不同	>12.0

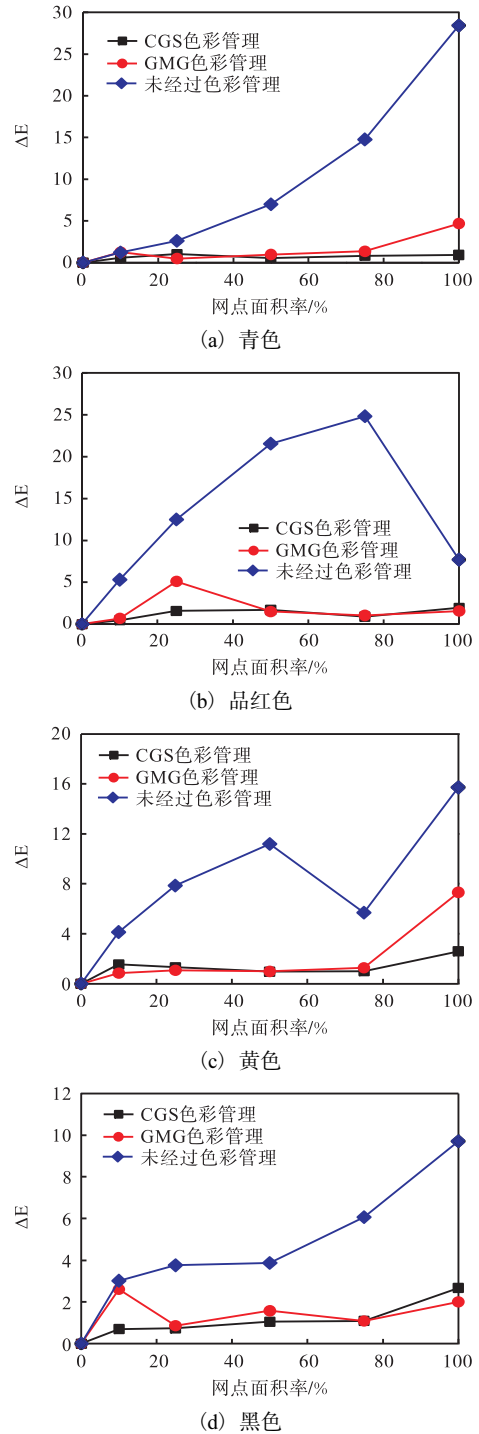


图 4 不同颜色色差比较

Fig. 4 Color difference comparison of different colors

由图 4 可知:未经过色彩管理的 C、M、Y、K 四色整体色差较大,最大色差超过 5,不满足打样色差

标准. 在相同情况下, 经过色彩管理之后的打印样张比未经过色彩管理的打印样张色差显著减小, 与原稿的一致性较高, 最大色差基本都在 5 以下, 符合打样色差标准. 这是因为 GMG 和 CGS 色彩管理软件带有的色彩转换引擎和多次色彩循环校正系统对打印样张与原稿之间的色差进行优化, 使得数码打样色彩表现效果与源文件较为一致.

对 GMG 和 CGS 色彩管理而言: 在青色色差比较中, 经过 GMG 和 CGS 色彩管理的打印样张在网点面积率 10% ~ 80% 范围内几乎没有差别, 在 80% ~ 100% 范围内 CGS 样张的色差小于 GMG 样张; 在品红色色差比较中, 经过 GMG 和 CGS 色彩管理的打印样张在网点面积率 50% ~ 100% 范围内差别较小, 在 10% ~ 50% 范围内 CGS 样张的色差小于 GMG 样张; 在黄色色差比较中, 经过 GMG 和 CGS 色彩管理的打印样张在网点面积率 10% ~ 80% 范围内差别较小, 在 80% ~ 100% 范围内 CGS 样张的色差小于 GMG 样张; 在黑色色差比较中, 经过 GMG 和 CGS 色彩管理的打印样张在网点面积率 10% ~ 80% 范围内 CGS 样张的色差小于 GMG 样张, 在 80% ~ 100% 范围内 CGS 样张的色差大于 GMG 样张.

总体来看, 经过 GMG 和 CGS 色彩管理之后色差降低都较为明显, 而且都能达到理想的打样效果. GMG 软件的校正循环需要 5 次以上才能满足色差需求, 步骤繁琐, 耗费时间较多; 而 CGS 软件的校正循环一般需要 3 次就能达到要求, 相对快捷准确, 因此 CGS 色彩管理在处理色差性能方面更为优秀.

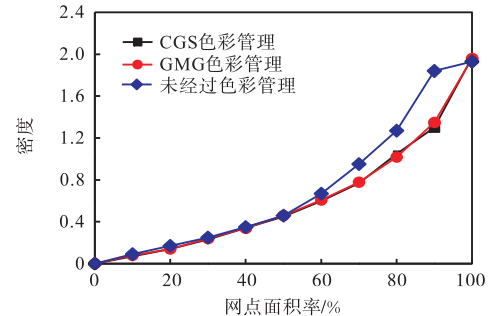
2.3 纸张数码打样的质量评价

2.3.1 印刷阶调再现

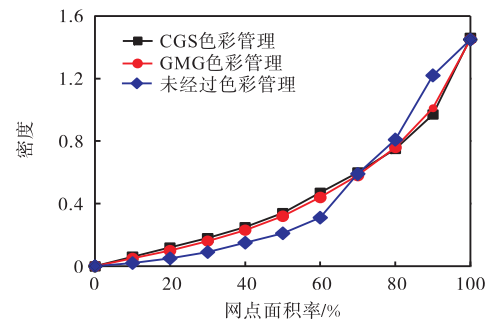
阶调再现能够准确地反映打印样张与原稿之间深浅明暗层次的变化, 是衡量印刷质量好坏的重要标准之一. 样张的颜色层次越接近原稿的层次, 样张与原稿的颜色匹配程度越高^[8]. 实验用分光密度计对测试版中的 C、M、Y、K 四色阶调梯尺的密度进行测量, 未经过色彩管理和经过 GMG、CGS 色彩管理的 C、M、Y、K 四色阶调再现性的比较如图 5 所示.

由图 5(a)可知: 未经过色彩管理样张和经过色彩管理样张的青色阶调在网点面积率 0 ~ 50% 范围内较为一致, 说明在此范围内不经过色彩管理也能实现阶调再现的准确性; 在 50% ~ 100% 范围内未经过色彩管理的青色阶调有明显的拐点, 曲线不平滑, 阶调层次性差, 而经过色彩管理之后能够很好修正阶调曲线, 平滑曲线, 实现较好的层次性. GMG 色彩管理和

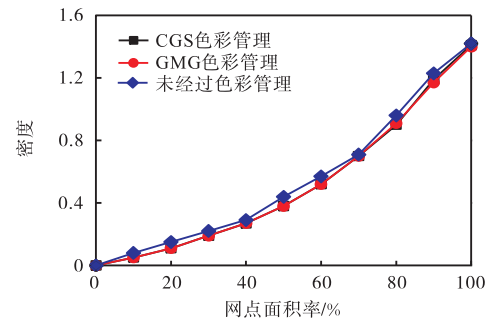
CGS 色彩管理在整个青色阶调范围内几乎一致, 说明这两款软件能够较好地控制青色油墨输出, 保证青色阶调再现的准确性.



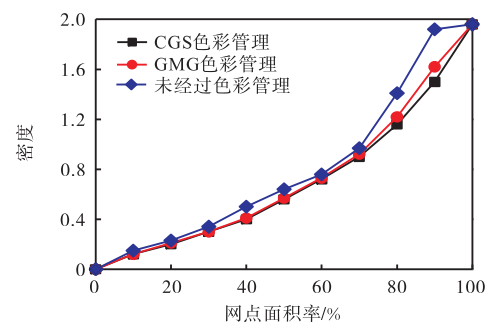
(a) 青色



(b) 品红色



(c) 黄色



(d) 黑色

图 5 不同颜色阶调再现的比较

Fig. 5 Comparison of tone reproduction of different colors

由图 5(b)可知: 未经过色彩管理的样张在整个品红色阶调曲线上有较多拐点, 明暗过渡较差, 经过色彩管理之后阶调再现曲线较为平滑, 层次还原性较好; 经过 CGS 色彩管理的样张的品红色阶调再现曲线在网点面积率 0~70% 范围内要高于 GMG 色彩管理样张的阶调曲线, 而在 70%~100% 范围内低于 GMG 色彩管理样张的阶调曲线. 说明 CGS 色彩管理输出的样张在浅、中色阶调再现优于 GMG 色彩管理, 在深色调范围内稍逊于 GMG 色彩管理软件输出的样张.

由图 5(c)可知: 未经过色彩管理样张的黄色阶调曲线在网点面积率 40%~70% 范围内有明显拐点, 阶调还原性较差, 其余范围内的阶调再现稍微好一些, 说明黄色油墨本身的阶调还原效果比 C、M、K 三色要好. 经过色彩管理修正之后其层次再现更加突出, 而且 GMG 色彩管理和 CGS 色彩管理样张的阶调曲线重合, 说明在黄色阶调再现上两款软件表现一致, 都能很好地确保黄色油墨阶调再现的一致性.

由图 5(d)可知: 未经过色彩管理打印样张的黑色阶调再现曲线不够平滑, 特别是在网点面积率 70%~100% 范围内跨度较大, 导致样张暗调区域过渡较差, 经过色彩管理之后可以很好地修正此范围内的层次过渡问题, 使黑色阶调还原更为准确; 经过 GMG 色彩管理的样张在 80%~100% 范围内的密度大于 CGS 色彩管理的样张, 但 GMG 色彩管理的样张在此范围内出现拐点, 说明在此范围内的阶调再现性比 CGS 色彩管理表现差一些.

综上所述, 经过色彩管理之后能够确保各色油墨的阶调再现的一致性, 使纸张在数码打样过程中输出与原稿较为一致的明暗深浅层次. 对两款色彩管理软件输出的样张而言, 两款软件的输出样张整体阶调还原性都满足打样需求, 处理 C、M、Y 三色油墨阶调再现的能力差别不大; 但 CGS 软件在处理黑色油墨的阶调再现性上比 GMG 软件表现更为突出, 阶调还原性程度更高.

2.3.2 印刷相对反差

印刷相对反差(简称 K 值)是衡量最佳墨量、控制实地密度和网点扩大的重要参数^[9]. 未经过色彩管理和经过 GMG、CGS 色彩管理 C、M、Y、K 四色样张的相对反差值见表 3. 由表 3 可知: 未经过色彩管理的 C、M、Y、K 四色 K 值都小于经过色彩管理的 K 值, 其阶调再现性差, 网点扩大严重, 经过色彩管理校正以后, C、M、Y、K 四色油墨的 80% 网点密度与

实地密度差别较大, 网点扩大减小, 层次清晰, 颜色明暗过渡拉得开, 阶调再现性较好; 就经过两款色彩管理软件样张的比较而言, K 值差别不大, 说明 GMG 和 CGS 色彩管理软件在处理 K 值方面性能一致, 无明显优劣, 都能够很好地控制打样的最佳密度, 增大印刷相对反差, 减小网点扩大, 更好地对色彩进行还原.

表 3 印刷相对反差值的比较

Tab. 3 Comparison of printing relative contrast value

处理情况	颜色	80% 网点密度	100% 网点密度	K 值
未经过 色彩管理	C	1.27	1.93	0.34
	M	0.81	1.45	0.44
	Y	0.96	1.42	0.32
	K	1.41	1.96	0.28
GMG 色彩管理	C	1.02	1.96	0.48
	M	0.76	1.45	0.48
	Y	0.91	1.40	0.35
	K	1.22	1.96	0.38
CGS 色彩管理	C	1.05	1.97	0.47
	M	0.75	1.46	0.49
	Y	0.90	1.41	0.36
	K	1.16	1.96	0.41

2.3.3 网点扩大

数码打样是直接印刷方式, 其网点扩大是与数字原稿中的网点相比较的, 在数码打样纸上印刷出来后, 网点在尺寸方面的增加^[10]. 未经过色彩管理样张和经过 GMG、CGS 色彩管理样张的 C、M、Y、K 四色网点扩大的比较如图 6 所示.

数码打样的网点扩大主要是由于油墨在纸张上出现铺展和渗透导致的, 这种现象不可避免, 在打样过程中应尽量减少这种现象出现. 本研究中的网点扩大的大小主要是由纸张和油墨自身的性质决定的, 从图 6 可以看出, 未经过色彩管理和经过色彩管理的网点扩大曲线趋势是一致的, 其网点扩大主要出现在理论网点面积率 20%~80% 范围内, 其中 40%~80% 范围内最为严重, 四色油墨的网点扩大排序为: 黑>青>黄>品红.

未经过色彩管理样张的四色油墨网点扩大值较大, 其中青色网点扩大最大值在 20% 左右, 品红色网点扩大最大值在 11% 左右, 黄色网点扩大最大值在 16% 左右, 黑色网点扩大最大值在 27.5% 左右; 样张的整体层次丢失, 色彩偏差在同等网点面积率下较大, 经过色彩管理之后网点扩大值明显减少, 样张的整体阶调和层次较为分明, 色彩还原性较好.

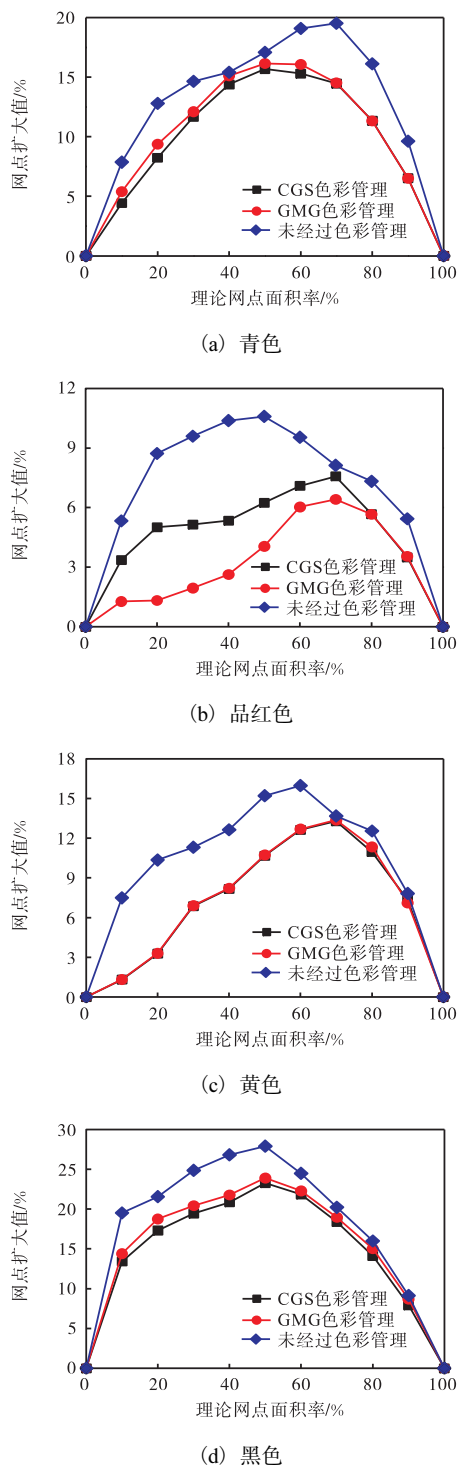


图6 不同颜色的网点扩大比较

Fig. 6 Comparison of dot gain of different colors

对 GMG 和 CGS 色彩管理软件处理的样张的比较而言:青色网点扩大中 CGS 样张在理论网点面积率 0~70%范围内的网点扩大值比 GMG 样张小;品红色网点扩大中 CGS 样张在理论网点面积率 0~80%范围内的网点扩大值比 GMG 样张大;黄色网点扩大中 CGS 样张和 GMG 样张网点扩大值几乎一

致,差别不明显;黑色网点扩大中 CGS 样张在理论网点面积率 10%~80%范围内的网点扩大值比 GMG 样张小.从总体上说,两款软件都能较好地处理打印样张的网点扩大现象,保证样张色彩的一致性. CGS 软件在处理青色和黑色网点扩大效果好, GMG 在处理品红色网点扩大效果好,但从样张的整体质量来看, CGS 软件的还原效果更准确,而且整个校正过程比 GMG 更简单.这是因为 CGS 色彩引擎采用开放的线性化模式,针对单通道、双通道、三通道以及总墨量进行准确控制,确保样张色彩匹配与还原更加精确,从而使得不同阶调范围内的网点扩大减小;同时可以节省墨量,减少打样成本.虽然 GMG 色彩管理采用 4D 色彩转换引擎,色彩还原性也较高,但其墨量限制及线性化采用封闭模式,对不同种类油墨采用内部制作的文件,使得其精准性受到一定的限制,因此经过 CGS 色彩管理的样张能够更好地控制网点扩大,保证色彩匹配的一致性.

3 结论

(1) 经过 GMG 和 CGS 色彩管理之后,数码打样纸的色域扩大,色彩再现和阶调复制能力显著提高,印刷相对反差值增大,网点扩大减小,整体打样质量较好.

(2) 对两款软件比较而言,CGS 比 GMG 色彩校正过程更简捷和准确,在色彩再现、阶调复制、减少网点扩大方面表现更突出,打样质量更高.因此在数码打样过程中推荐使用 CGS 色彩管理软件.

参考文献:

- [1] 李雪鑫, 刘博, 刘梦珍, 等. 基于 CGS ORIS Color Tuner/WEB 的打印机的色彩管理[J]. 今日印刷, 2018(1): 60-63.
- [2] 刘传杰, 李玉梅. 色彩管理在数码打样中的应用[J]. 印刷工业, 2017(1/2): 68-71.
- [3] Zhu Y C, Chen Y Z, Zhang Z J. Influence of inkjet paper coating structure on paper properties and print performance[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 262: 269-272.
- [4] Sbarbaro D. An on-line color management system based on a non-linear predictive approach[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2002, 35(1): 399-403.
- [5] Ataefard M. Influence of paper surface characteristics on digital printing quality[J]. Surface Engineering,

- 2014, 30(7): 529-534.
- [6] 刘容, 王强, 戴俊平. 数码打样色彩质量评价方法的研究[J]. 包装工程, 2014, 35(1): 120-123.
- [7] 李鑫. 数字打样参考标准 ISO 12647-7 简述[J]. 印刷杂志, 2010(10): 34-36.
- [8] 孙中华, 董荣业. 不同阶调处的油墨色彩再现性[J]. 中国造纸学报, 2007, 22(4): 80-83.
- [9] 郭凌华, 张美云, 王兴. 高温热转移印花纸印刷质量评价探析[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 97-98.
- [10] 屈贞财, 陈广学, 唐宝玲, 等. 不同喷墨印刷纸对网点扩大影响的研究[J]. 中华纸业, 2011, 32(8): 54-57.

责任编辑: 周建军

(上接第 67 页)

- [4] Yu J, Fan C, Zhong J, et al. Evaluation of in situ simulated dredging to reduce internal nitrogen flux across the sediment-water interface in Lake Taihu, China[J]. Environmental Pollution, 2016, 214: 866-877.
- [5] Careddu N, Siotto G. Promoting ecological sustainable planning for natural stone quarrying. The case of the Orosei Marble Producing Area in Eastern Sardinia[J]. Resources Policy, 2011, 36(4): 304-314.
- [6] 韩继先, 肖旭雨. 我国骨料的现状与发展趋势[J]. 混凝土世界, 2013(9): 36-42.
- [7] Sheng B Z. The development of green building materials trend in China[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 357: 1070-1073.
- [8] Huang X, Li G, Pan X, et al. Kinetic characteristics of lightweight aggregates obtained from dredged sediment[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 126(3): 1201-1209.
- [9] Baeza-Brotons F, Garcés P, Payá J, et al. Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 82: 112-124.
- [10] 金宜英, 杜欣, 王志玉, 等. 采用污水厂污泥制陶粒的烧结工艺及配方研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1): 17-21.
- [11] 张云升, 倪紫威, 李广燕. 免烧淤泥砖的力学性能与微观结构[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 298-305.
- [12] 吴燕, 周颜, 贾瑞, 等. 一种疏浚底泥免烧陶粒的裹壳方法: 中国, CN105130235 A [P]. 2015-12-09.
- [13] 吴燕, 周颜, 贾瑞, 等. 一种利用疏浚底泥骨料制备免烧砖的方法: CN105130289 A [P]. 2015-12-09.
- [14] 吴燕, 周颜, 贾瑞, 等. 一种掺加疏浚底泥制备免烧陶粒的方法: CN105036691 A [P]. 2015-11-11.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 17431.2—2010 轻集料及其试验方法·第2部分: 轻集料试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [16] 国家建筑材料工业局. JC 239—2001 粉煤灰砖[S]. 北京: 国家建筑材料工业局标准化研究所, 2001.
- [17] 中国国家标准化管理委员会. GB 28635—2012 混凝土路面砖[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JC/T 862—2008 粉煤灰混凝土小型空心砌块[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2008.
- [19] Peng X, Zhou Y, Jia R, et al. Preparation of non-sintered lightweight aggregates from dredged sediments and modification of their properties[J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 9-20.
- [20] 张义利, 程麟, 严生, 等. 利用建筑垃圾制备免烧免蒸标准砖[J]. 新型建筑材料, 2006(5): 42-44.
- [21] Ahmari S, Zhang L. Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29(4): 323-331.
- [22] Cachim P B. Mechanical properties of brick aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1292-1297.
- [23] Bui P T, Ogawa Y, Nakarai K, et al. A study on pozzolanic reaction of fly ash cement paste activated by an injection of alkali solution[J]. Construction and Building Materials, 2015, 94: 28-34.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 233—2011 水泥石配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

责任编辑: 周建军