

## 基于数字成像设备的光谱测量精度评价

王晋

(包头轻工职业技术学院, 包头 014035)

**摘要:** **目的** 构建基于数字成像设备的光谱测量系统,获得“快速、精确、低成本”的光谱反射比测量结果。**方法** 通过数码相机获取印刷用色表ECI2002的1485个色块的3通道RGB值,根据与待测样本的相似程度对训练样本赋予不同的权重,并引入空间向量余弦度,对可以表征颜色信息的光谱反射比进行重建;同时,针对该测色系统进行镜头畸变校正、光源均匀性校正以及重复性校正。**结果** 在训练样本数为10时,平均色差可以控制在0.62以下,均方根误差可以控制在0.01以下,运算时间可以控制在1 min内。**结论** 构建的数字成像测量系统既可以提高测量精度,又可以提高测量效率,具有工程应用价值。

**关键词:** 数字成像; 颜色测量; 光谱; 测量精度

**中图分类号:** TS801.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)13-0133-06

## Accuracy Evaluation of Spectral Measurement Based on Digital Imaging Equipment

WANG Jin

(Baotou Light Industry Vocational Technical College, Baotou 014035, China)

**ABSTRACT: Objective** To construct a spectral measurement system based on digital imaging equipment, and to achieve "fast, accurate, low-cost" spectral measurement results. **Methods** Three-channel RGB values were obtained from each color with the color table ECI2002 by a digital camera. Different weights were assigned according to the similarity of samples and the cosine similarity were introduced, to reconstruct the spectral reflectance which could represent the original color information. Meanwhile, lens distortion correction, light uniformity correction and system repetitiveness correction were proposed for the color measurement system. **Results** The proposed method brought the average color difference to below 0.62, RMS to below 0.01 and controlled the computation time within 1 min when the number of training sample was 10. **Conclusion** The digital imaging measurement system constructed in this paper could enhance the measurement accuracy and improve the efficiency, save the time, and therefore has engineering application potential.

**KEY WORDS:** digital imaging; color measurement; spectrum; measurement accuracy

在信息可视化及其工业应用需求日益普及中,产品的彩色化正在成为一种发展潮流和增值途径,使得工业应用对颜色品质需求日益提升,寻找高精度和低成本的颜色测量和评价方法已经成为颜色研究领域的前沿与热点。而对颜色最详尽的描述是颜色的绝

对光谱功率分布,通常用光谱仪测量光谱的辐射强度。对许多仪器来说,当具有一定的参考对象时,只需测量相对光谱功率分布,就可以进行颜色的定量描述。目前,市面上较为普遍的测色仪器都多少存在数据采集效率低、体积大、价格昂贵、不能联机测量等问

收稿日期: 2014-02-16

作者简介: 王晋(1978—),女,内蒙古人,硕士,包头轻工职业技术学院讲师,主要研究方向为印刷及色彩管理。

题<sup>[1]</sup>。对此,以数字成像测色为研究目标,采用数字成像测色理论的基本方法和颜色转换模型,通过数字成像设备获取RGB 3通道信号,对表征颜色信息的光谱反射比进行重建,并对其转换精度进行分析评价。

### 1 理论与方法

通常来说,数字成像系统是由1个3通道相机和1套滤光片组成的,并且整个数字成像系统可以用线性化模型来表示,特别是当数字成像系统的通道数比较多时,数字成像的过程线性化程度会更高。光谱反射率重建的过程示意图1。

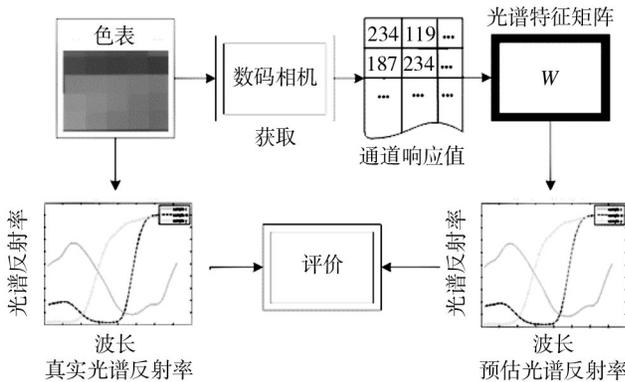


图1 光谱转换过程示意

Fig.1 Spectral conversion process

一般地,通过已知成像系统的3通道响应值  $u$ , 重建出物体的光谱反射率  $r$  的模型可以描述如下:

$$r = F(u) \tag{1}$$

设定可见光范围400~700 nm, 取样间隔10 nm, 共  $N=31$  维<sup>[2]</sup>, 对于3通道的相机, 设备响应可以由式(2)计算得出<sup>[2]</sup>:

$$v = Mr + n \tag{2}$$

式中:  $v$  为  $3 \times 1$  维的设备响应矩阵;  $M$  为  $3 \times N$  维的光谱响应矩阵;  $r$  为  $N \times 1$  维的目标颜色光谱响应矩阵;  $n$  为  $3 \times 1$  维的常数矩阵。可以注意到, 光谱响应矩阵  $M$  包含了所有经过滤色片的透射光, 探测器的光谱灵敏度, 以及光源光谱辐射的影响。

另外,  $u$  为相机响应,  $u = v - n$ , 式(2)可以写成:

$$u = Mr \tag{3}$$

计算光谱反射率  $r$ , 就是找出  $N \times 3$  的转换矩阵  $W$ , 这个矩阵可以使  $u$  转换成反射光谱估计值  $\hat{r}$  :

$$\hat{r} = Wu \tag{4}$$

在光谱反射率重建中, Wiener estimation (维纳估计法) 是在全部系统信号以及数据符合正态分布的情况下推导出来的<sup>[3]</sup>。在实际应用中, 在数字成像系统符合线性化的条件下, Wiener estimation 的效果也很好, 并且已经成为了一项标准的转换算法。Wiener Estimation 的核心是使训练样本的预测光谱反射率与实际光谱反射率的 Mean square error 均方根误差最小:

$$E\{[r - \hat{r}]^T\} \{[r - \hat{r}]\} \rightarrow \min \tag{5}$$

即:

$$J = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \|\hat{r}_i - r_i\|^2 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \|Wu_i - r_i\|^2 \tag{6}$$

式中:  $J$  为均方根误差;  $L$  为训练样本的个数。则有:

$$W = (ru^T)(uu^T)^{-1} \tag{7}$$

在传统的 Wiener estimation method 中, 全部训练样本都被赋予了相同的权重, 而笔者认为, 与测试样本越相近的训练样本, 在重建待测样本的光谱反射率时起到的作用更大。可以根据与待测样本的相似程度对训练样本赋予不同的权重<sup>[4-5]</sup>。这样可以使转换矩阵包含更多对待测样本有利的信息。

在此, 引入 Cosine Similarity 空间向量余弦度<sup>[6]</sup>的概念。在几何学中 Cosine Similarity 可用来衡量2个向量方向的差异, 余弦度取值范围为  $(-1, 1)$ 。余弦度越大表示2个向量的夹角越小; 余弦度越小表示2个向量的夹角越大。在二维空间中, 向量  $a(x_1, y_1)$  与向量  $b(x_2, y_2)$  的夹角余弦公式为:

$$\cos \theta = \frac{x_1x_2 + y_1y_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \tag{8}$$

2个  $n$  维样本点  $a(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n})$  和  $b(x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n})$  的 Cosine Similarity 可以表示为:

$$\cos(\theta) = \frac{a \cdot b}{|a| |b|} \tag{9}$$

在本实验里, 借用这一概念来衡量待测样本之间的差异。对于2个3维样本点  $u(x_{11}, x_{12}, x_{13})$  和  $u_i(x_{21}, x_{22}, x_{23})$ , 可以使用类似于 Cosine Similarity 的概念来衡量它们之间的相似程度。

$$\delta = \cos(\theta) = \frac{\sum_{k=1}^3 X_{1k}X_{2k}}{\sqrt{\sum_{k=1}^3 X_{1k}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^3 X_{2k}^2}} \tag{10}$$

通过增加样本权重,实际光谱反射率  $r_i$  和预测光谱反射率  $\hat{r}_i$  之间的均方根误差可以表示为:

$$J = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \|\partial_i \hat{r}_i - \partial_i r_i\|^2 \tag{11}$$

将式(7)带入式(11)可以有:

$$J = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \|W\partial_i u_i - \partial_i r_i\|^2 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \|W\bar{u}_i - \bar{r}_i\|^2 \tag{12}$$

式中,  $\bar{u}_i = \partial_i u_i, \bar{r}_i = \partial_i r_i$ , 于是式(7)变为:

$$W = (\bar{R}\bar{U}^T)(\bar{U}\bar{U}^T)^{-1} \tag{13}$$

## 2 实验

### 2.1 设备和材料

实验采用佳能 EOS 60D 数码相机(总像素数为

650万,有效像素数为629万,感光元件CCD);色表采用ECI2002。关掉相机本身的色彩管理功能,拍照时采用全自动曝光模式<sup>[8]</sup>,在标准光源D50下进行拍摄,存储格式为RAW<sup>[9]</sup>。其中,色表ECI2002是采用HP Deskjet Ink Adv 2010 4色彩色打印机在分辨率300 dpi下打印输出;ECI2002包含的所有色块的光谱值由X-Rite i1Isis 测量得到,每个色块的RGB值由Matlab提取得到<sup>[10,11]</sup>。

### 2.2 实验步骤

实验构建的具体流程见图2。首先,进行测试标版的设计制作,打印机进行校准,打印测试标版;然后,对自制测试标版进行仪器的校准,测量颜色相关信息。同时,进行照相机的设置,拍摄及优化筛选,并提取图像的颜色信息进行优化;最后,对所采集到的颜色信息进行相关算法转换,与实际测量的颜色信息进行分析评价<sup>[12]</sup>。

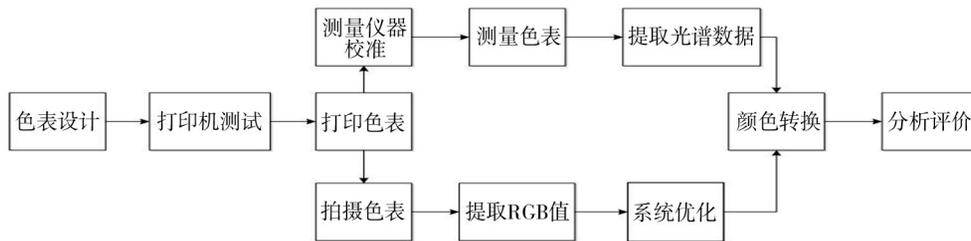


图2 实验流程

Fig.2 Experimental flowchart

### 2.3 系统优化

由于数字成像受成像设备自身的影响,环境因素及人为因素较大。上述系统在颜色测量时存在环境光照不均匀、数码相机自身设置不同产生误差及人为操作多样性等问题,因此,实验对所提取的数据做了镜头畸变校正、光源均匀性校正和重复性校正。

#### 2.3.1 镜头畸变校正

由于数码相机获取的照片与理想模型所成的图像之间存在着误差,这种误差在像点的位置上表现,通常把这种误差称为相机镜头的非线性畸变。导致相机镜头非线性畸变的原因有CCD的制造误差、透镜曲面误差和组合透镜误差<sup>[13]</sup>。该部分校正可以在RadCor2.06软件中完成,见图3。

#### 2.3.2 光源均匀性校正

由于实验条件限制,无法做到均匀的光照环境,

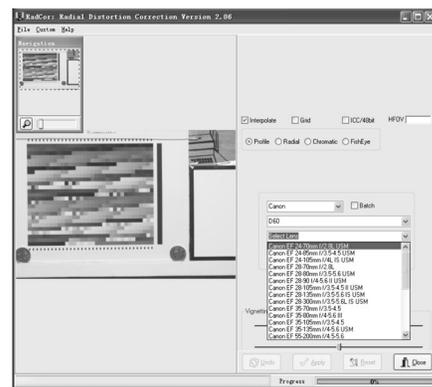


图3 镜头畸变校正

Fig.3 Distortion correction of lens

拍摄的数字图像不均匀,因此必须校正测量数据。实验通过对纸白进行校正,使纸白图像显示为均匀的图像。首先,以纸白中心区域为参考点,计算参考3通道值。然后,根据纸白区域所有像素与参考的数值比

例,生成校正矩阵,计算公式如下:

$$\text{COR} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \vec{C}_{i,j} \quad (14)$$

式中:COR为校正矩阵; $m$ 和 $n$ 分别为纸白中间参考区域的长宽像素点; $\vec{C}_{i,j}$ 为对应像素点 $(i,j)$ 上的3通道值。图4为校正前后的纸白。

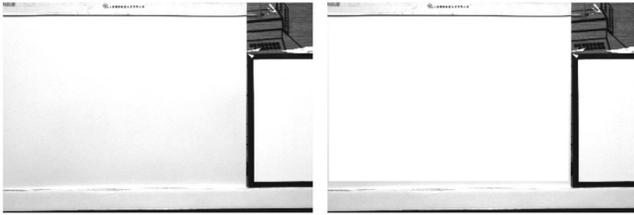


图4 纸白的校正对比

Fig.4 Contrast correction of paper

根据计算得到的校正矩阵,对所有图像的色靶区域进行均匀性校正。公式如下:

$$P'_{(i,j,k)} = P_{(i,j,k)} \times \text{COR}_{(i,j,k)} \quad (16)$$

式中: $i=1,2,\dots,n$ ;  $j=1,2,\dots,m$ ;  $k=R,G,B$ ;  $P_{(i,j,k)}$ 为像素点上的 $k$ 通道值; $P'_{(i,j,k)}$ 为校正后的数值。

### 2.3.3 重复性校正

由于拍摄环境不能保证完全一致,会导致不同色靶之间存在数值上的整体差异,拍摄时在色表的右侧放置了白板作为参考区域重复拍摄(见图5),用于校正不同图像之间的差异。

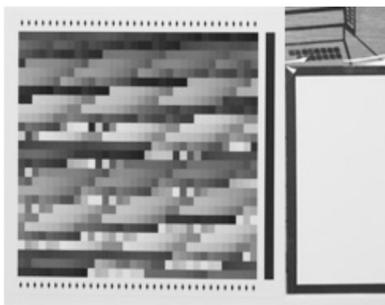


图5 拍摄色表布局

Fig.5 Arrangement for Shooting color table

首先,选取各图像右侧白版的相同区域,共 $m \times n$ 个像素,计算该区域内3通道的平均值:

$$\vec{W}_k = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \vec{C}_{i,j} \quad (17)$$

式中: $\vec{W}_k$ 为第 $k$ 张图像的平均3通道值; $m$ 和 $n$ 分别为选取区域的横、纵像素个数; $\vec{C}_{i,j}$ 为对应像素点 $(i,j)$ 上的3通道值。

然后,计算各图像的白版区域平均3通道值与参照值的比值,调整图像所有像素点的3通道值。公式如下:

$$\text{IMG}'_i = \text{IMG}_i \times \frac{\vec{W}_i}{\sum_{k=1}^P \vec{W}_k} \quad (18)$$

式中: $\vec{W}_i$ 为需要校正的目标图像; $P$ 为图像数量; $\text{IMG}_i$ 为目标图像的原始数据; $\text{IMG}'_i$ 为经过校正的图像数据。

## 3 实验结果

将用X-Rite i1 Isis平台式自动测色仪测量的光谱作为基准,比较分析自制色表ECI2002重建光谱反射率的精度。为了使光谱的反射率重建精度和色度精度最高,需要选出ECI2002最适合的训练样本个数 $L$ 。首先建立ECI2002色表中光谱反射率精度、色度精度与训练样本个数 $L$ 的关系,反射率精度用root mean square(RMS)表示<sup>[14,15]</sup>,色度精度用色差公式CIE2000表示,具体数据见表1。综合考虑运算速度与计算精度,对于ECI2002训练样本, $L$ 为10时最为合适。

图6为ECI2002色卡在 $L$ 为10个训练样本时,随机样本颜色的实际光谱反射率曲线与该实验所得光谱反射率曲线的对比图。可以看出,提出的试验方法效果比较好,重建的光谱反射率曲线与实际光谱反射率曲线极为接近。由于考虑到了相机输入响应的相关性,在传统的WE法的基础上进一步完善了算法,使得转换精度有所提高。对相机的输入响应进行了相应的镜头畸变校正、光源均匀性校正和重复性校正,以及图片以RAW格式存储,为算法的准确性做了较好的准备。

综合比较实验提出的测量光谱反射率的方法与X-Rite i1 Isis平台式自动测色仪的测量结果,在精度上,该实验方法重建的光谱反射率与测量结果基本一致,且平均色差比较基本可以控制在0.62以下,精度较高;在时间上,采用Matlab2012计算1485个色块的时间基本可以控制在1 min以内,而X-Rite i1 Isis平台

表1 ECI2002反射率重建精度、色度比较(不同训练样本数)

Tab.1 Comparison of reflectance reconstruction accuracy and chromaticity for ECI2002 (different amount of training samples)

训练样本数 $L$ /个	ECI2002					
	平均色差	标准色差	最大色差	平均RMS	标准RMS	最大RMS
5	0.99	3.42	88.54	0.008	0.018	0.395
10	0.62	0.61	4.54	0.006	0.005	0.039
15	0.62	0.54	4.77	0.006	0.004	0.027
20	0.64	0.53	4.87	0.007	0.004	0.029
25	0.65	0.52	4.80	0.007	0.004	0.030
30	0.66	0.54	4.20	0.007	0.004	0.029
35	0.67	0.55	4.50	0.007	0.004	0.030
40	0.68	0.55	4.64	0.007	0.004	0.031
45	0.68	0.54	4.22	0.008	0.004	0.031
50	0.69	0.53	4.03	0.008	0.004	0.031
55	0.69	0.53	4.17	0.008	0.004	0.031
60	0.69	0.53	4.22	0.008	0.004	0.032
65	0.7	0.53	4.24	0.008	0.004	0.032
70	0.7	0.54	4.27	0.008	0.004	0.032
75	0.7	0.53	4.21	0.008	0.004	0.032
80	0.71	0.53	4.14	0.009	0.004	0.032
85	0.71	0.54	4.15	0.009	0.004	0.033
90	0.71	0.54	4.11	0.009	0.004	0.032
95	0.72	0.55	4.03	0.009	0.004	0.032
100	0.72	0.55	4.02	0.009	0.004	0.032

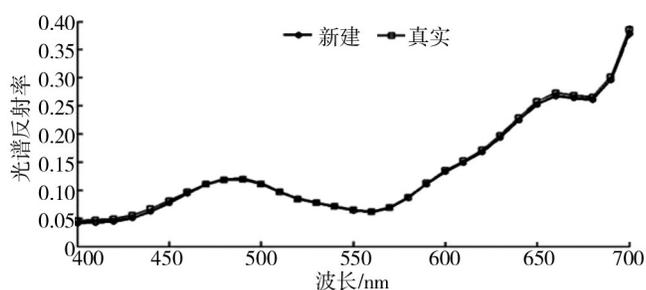


图6 ECI2002光谱反射率曲线与实际曲线比较

Fig.6 Spectral reflectance for ECI2002 compared with the actual curve

式自动测色仪的测量,从加载测试文件到测量结束,至少需要2 min以上。由此可见,该实验提出的方法可以节省时间,提高效率,具有工程应用价值。

#### 4 结语

试验在数字成像的基础上,引入空间向量余弦度

的概念对训练样本赋予不同的权重,作为衡量与待测样本的相似程度,建立了色彩转换模型与彩色测量系统;针对该测色系统进行了镜头畸变校正、光源均匀性校正以及重复性校正,获得了精确的基于数字成像设备的颜色测量结果,实现了颜色测量系统的“快速、精确、低成本”。另外,实验还有一些不足之处,比如,数码相机本身的感光器件以及A/D转换性能也会对RGB的获取产生一定影响,对于精度要求较高的设备,则需要对该方法进行进一步的修正。

#### 参考文献:

- [1] 冀利利,孔玲君.基于划分子空间的数码相机颜色空间转换方法研究[J].包装工程,2013,34(12):107—110.  
JI Li-li, KONG Ling-jun. Color Space Conversion Method of Digital Camera Based on Subspace Partition[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(12): 107—110.
- [2] NIU J, ZHANG X D, WANG Q. Study on the Color Representing Accuracy of Spectrum with Different Wavelength Range and Interval[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013

- (262):13—17.
- [3] SHEN H L, XIN J H, Spectral Characterization of a Color Scanner Based on Optimized Adaptive Estimation[J]. Opt Soc Am A, 2006, 23(7):1566—1569.
- [4] SHIMANO N. Recovery of Spectral Reflectance of Objects Being Imaged Without Prior Knowledge[J]. IEEE Transaction Son, 2006, 15(7):1848—1856.
- [5] SHEN H, WAN H, ZHANG Z. Estimating Reflectance from Multispectral Camera Responses Based on Partial Least-squares Regression[J]. Journal of Electric Imaging, 2010:020501-1—020501-3.
- [6] 陈华友,李秀美,王凤振. 基于IOWA算子和向量夹角余弦的最优组合预测模型[C]//第十届中国青年信息与管理学者大会论文集,洛阳,2008:18—22.  
CHEN Hua-you, LI Xiu-mei, WANG Feng-zhen. Optimal Combination Forecasting Model Based on IOWA Operator and Vector Cosine[C]// Tenth Chinese Young Scholars Conference Proceedings Information and Management, Luoyang, 2008: 18—22.
- [7] 司占军,李煜,顾翀. 数码相机颜色复制性能的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(5):98—102.  
SI Zhan-jun, LI Yu, GU Chong. Research on Color Reproduction Performance of Digital Camera[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(5):98—102.
- [8] 张显斗. 数字图像颜色复现理论与方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010.  
ZHANG Xian-dou. Study of Color Reproduction Theory and Method for Digital Camera.[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [9] ZHU Yuan-hong, KONG Ling-wang, MUENGER K. Color Correction of Scanning Input Data Based on LMS and RGB Subspaces[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004 (25):284—287.
- [10] 张二虎,卞正中,胡涛. 基于ICC标准的彩色扫描仪色彩检测及标定[J]. 仪器仪表学报, 2004(25):611—614.  
ZHANG Er-hu, BIAN Zheng-zhong, HU Tao. ICC Standard-Based Color Testing and Characterizing for Color Scanner [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004 (25): 611—614.
- [11] 蒋飞飞,徐兰萍,郑立扬. 基于BP神经网络的数码相机颜色特征化[J]. 包装工程, 2012, 33(5):107—110.  
JIANG Fei-fei, XU Lan-ping, ZHENG Li-yang. Color Characterization for Digital Camera Based on BP Neural Network [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5):107—110.
- [12] 朱铮涛,黎绍发. 镜头畸变及其校正技术[J]. 光学技术, 2005(1):136—141.  
ZHU Zheng-tao, LI Shao-fa. Lens Distortion and Proofreading Technology[J]. Optical Technique, 2005(1):136—141.
- [13] 张哲超. 成像系统中的光谱反射率重建[D]. 杭州:浙江大学, 2010.  
ZHANG Zhe-chao. Reconstruction of Spectral Reflectance in Image System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

## 欢迎订阅《包装工程》杂志

《包装工程》杂志1980年创刊,是国内外公开发行的全国印刷包装技术领域权威性科技期刊,连续四版全国中文核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)源刊、中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、《中国期刊网》用刊、《中国学术期刊(光盘版)》用刊、“万方数据——数字化期刊群”入编刊物、“中文科技期刊数据库”收录期刊。

**办刊宗旨:**以科技进步推动产业发展。

《包装工程》杂志立足于为本行业全面服务,是印刷包装高水平学术理论研究、先进工程技术应用研究、高新科技成果展示以及国内外印刷包装行业科技发展动态的一个理想传播渠道和交流中心。

《包装工程》杂志分为专论和信息两大部分内容。

杂志内容主要分为专论和信息两大部分。包含包装技术与工程、技术专论、视觉传达设计、工业设计、论坛以及信息与资讯等栏目。专论部分着重报道包装及印刷领域学术理论探讨,工程应用技术研究成果和项目进展,以及设计新潮和管理创新等内容;信息版块主要报道国内外包装科技动态、科研生产实践经验总结等内容。报道内容涵盖了与包装、印刷行业相

关的机械、材料、化工、电子、自动化、物流、设计艺术和管理等专业方向,年载文量近900篇。近年来,涉及包装科技领域的国家、省部级基金项目大多在《包装工程》上刊登论文。

本刊信息量大,内容丰富翔实,是包装印刷及相关行业从事经营管理、制造生产、科研、设计、信息和教育等工作的人员的必备读物。

《包装工程》杂志为大16开,2010年起改为半月刊,每期定价45.00元,全年定价1080.00元。连续出版物号ISSN 1001-3563, CN 50-1094/TB。邮发代号:78-30,全国各地邮局(所)均可订阅。逾期可随时与编辑部以及杂志在外分支机构联系补订。

《包装工程》杂志愿与您共创市场,欢迎刊登广告。

**编辑部地址:**重庆市石桥铺渝州路33号(400039)

**邮编:**400039

**电话:**023-68792836

**传真:**023-68792396

**Email:**bzgc59@126.com

**网址:**www.packjour.com