

高动态范围图像分层阶调映射改进算法

王琪, 位春傲, 谢德红, 李蕊
(南京林业大学, 南京 210037)

摘要: **目的** 针对高动态范围图像分层阶调映射算法中显著边缘处产生的光晕和阶调逆转问题, 提出了一种分层阶调映射的改进算法。 **方法** 首先通过对图像分层后的基础层图像和细节层图像进行分析, 确认导致光晕和阶调逆转的异常信号特征; 然后依据其异常信号特征, 从细节层图像梯度的角度予以识别、修正, 再在修正梯度的基础上, 建立对应图像的正规化方程; 最后利用共轭梯度算法求解正规化方程。 **结果** 抑制了细节层图像的异常信号, 去除了映射结果图像中的光晕和阶调逆转。 **结论** 该算法不仅可以有效地抑制原分层映射算法中的光晕和阶调逆转现象, 还可保有与原分层映射算法同等的细节再现能力。

关键词: 高动态范围图像; 分层映射; 光晕; 阶调逆转; 梯度修正

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)07-0108-05

Improved Layered Tone Mapping Algorithm of High Dynamic Range Image

WANG Qi, WEI Chun-ao, XIE De-hong, LI Rui
(Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: Targeting at the halo or gradient reversal artifacts appearing on salient edges in the layered tone mapping algorithm of high dynamic range images, an improved layered tone mapping algorithm was proposed. In this algorithm, firstly the abnormal signal characteristics causing halo and gradient reversal artifacts were determined by analyzing the base layer image and detailed layer image obtained via image decomposition. Then the artifacts were recognized and corrected from the gradient of detailed layer image according to the abnormal signal characteristics, and the regularization equation was subsequently established for the corresponding image based on the corrected gradient. At last, conjugate gradient method was adopted to solve the regularization equation. The abnormal signals in detailed layer image were inhibited, and halo or gradient reversal was removed from the resulting mapping image. The proposed algorithm could not only effectively inhibit halo and gradient reversal artifacts in the original layered tone mapping algorithm, but also preserve the detail reproduction capacity as the original algorithm did.

KEY WORDS: high dynamic range image; layered mapping; halo; gradient reversal; gradient correction

随着成像技术和计算机图形图像技术的发展, 对于高动态范围(high dynamic range, HDR)图像, 可以通过同一视角下多幅曝光不同的图像融合生成。通常, 生成HDR图像的动态范围在10 000:1左右, 远高于目前典型输出设备(如CRT、LCD以及打印机)在100:1左右的动态范围。为了保持HDR图像在典型输出设备上再现原有的视觉效果, 需要研究一种动态范围压

缩算法, 此压缩算法通常称为阶调映射算法。

目前, 主要存在全局阶调映射、局部阶调映射和基于分层模型的阶调映射等3种HDR图像阶调映射算法。全局阶调映射是像素点对点映射, 利于保持图像整体的明暗效果, 避免光晕和阶调逆转现象的产生, 同时处理速度也快, 但细节信息丢失相对较多, 呈现模糊效果。在局部阶调映射中, 像素点的映射需要

收稿日期: 2014-09-05

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划(201310298043); 江苏省高等学校大学生实践创新训练计划省级重点项目(201310298043Z)

作者简介: 王琪(1971—), 女, 河南上蔡人, 博士, 南京林业大学副教授, 主要研究方向为数字化印前、色彩控制技术。

依据其像素与邻域像素的相对关系,因而细节得以某种程度的保留,但却无法确保图像整体明暗关系及某些局部像素之间的关系,从而经常在显著边缘处出现光晕或阶调逆转现象。近年来,有些学者提出了许多优秀的分层映射算法^[1-3],它们通常具有良好的细节再现能力。此类算法的思想实质是利用图像分层模型把图像分解成至少2层图像:一层为动态范围非常小的图像(也称作细节层图像),主要包含原HDR图像中的细节纹理;另外一层为动态范围非常大的图像(也称作基础图像),主要包含原HDR图像中的显著边缘。然后,利用全局映射算法对基础层图像的动态范围进行压缩处理,同时对细节层图像的细节做一些增强处理。理论上,此处理既可使重新合成的图像细节模糊最小化,也可避免显著边缘处产生阶调逆转或光晕。实际上,能否避免光晕主要取决于图像分层的效果。例如,如果分解在基础层图像中的显著边缘没有保持其原有的边缘锐度,对应细节层图像中的对应位置就会产生逆转或震荡信号,压缩或拉升处理后的合成图像随之就会产生阶调逆转或光晕现象^[3]。然而,在图像分层研究中,保持边缘锐度一直是具有挑战性的课题。近些年提出的一些优秀的图像分层算法,如低曲率图像简化(low curvature image simplified, LCIS)^[1]、双边滤波器(bilateral filter, BLF)^[2,4-5]、加权最小二乘法(weighted least square, WLS)^[3-6]、 L_0 梯度范数^[7]、引导滤波器(guided filter, GF)^[8]和非局部中值滤波(non-local mean filter, NL-MF)^[9]等,在边缘锐度保持方面有了很大的改善,并被用于HDR图像映射中。由于HDR图像映射时,基础层图像的动态范围通常压缩程度较大,因此,细节层图像增强处理会导致逆转或震荡信号的放大。尽管在阶调映射中运用如上述的优秀图像分层算法,但在图像的显著边缘处仍然会出现光晕或阶调逆转现象。Bae等人^[10]在图像风格仿真算法中提出,在图像分层的基础上修正细节层的异常信号,重建高质量的分层图像,但其识别方法容易造成异常信号的误判。

针对图像分层基础上阶调映射中产生的光晕和阶调逆转问题,提出改进算法。该算法从梯度角度,对细节层图像的逆转或震荡信号进行识别、修正,并利用共轭梯度法求解其梯度的正规化方程,从而修正细节层图像,以实现压缩光晕和阶调逆转。

1 基于图像分层的阶调映射

假设 $I(x,y)$ 表示HDR图像的像素值, $B(x,y)$ 和

$D(x,y)$ 分别表示利用图像分层算法所得的基础层图像和细节层图像,那么它们的关系为:

$$\begin{aligned} B(x,y) &= F(I(x,y)) \\ D(x,y) &= I(x,y) - B(x,y) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $F(\cdot)$ 为图像分层算法。然后,利用映射算法对基础层图像的动态范围进行压缩:

$$B_c(x,y) = TM(B(x,y)) \quad (2)$$

式中:TM(\cdot)为阶调映射函数。对细节层图像进行增强处理:

$$D_c(x,y) = (D(x,y))^\alpha \quad (3)$$

式中: α 为增强系数。最后,重新合成满足典型输出设备动态范围要求的低动态范围图像 $I_c(x,y)$:

$$I_c(x,y) = B_c(x,y) + D_c(x,y) \quad (4)$$

2 改进算法

光晕通常出现在图像显著边缘的明暗交界处,表现为交界处的亮边界呈现更亮光环,而暗边界则显现更暗的黑环。阶调逆转通常也是出现在显著边缘的明暗交界处,表现为明暗程度颠倒^[3]。如上所述,在基于图像分层的阶调映射中,光晕和阶调逆转主要是由于图像分层算法,在分解显著边缘时基础层图像中没有完全保持原有边缘锐度,导致细节层图像中随之产生逆转或震荡信号,再在分别压缩和拉升处理下所导致的。图像分层与光晕和阶调逆转现象的关系见图1。在图1a中,分层算法对信号进行分解后,基础层的显著边缘处信号变得比较平滑时,会引发细节层信号产生振荡,从而最终导致光晕的产生。其中,双边滤波器^[2]的图像分层算法相对容易产生此现象。在图1b中,分层算法对信号进行分解后,基础层信号变得比较锐时,则会引发细节层信号出现逆转,从而最终导致阶调逆转的产生。例如, L_0 梯度范数^[7]的图像分层算法会产生此现象。

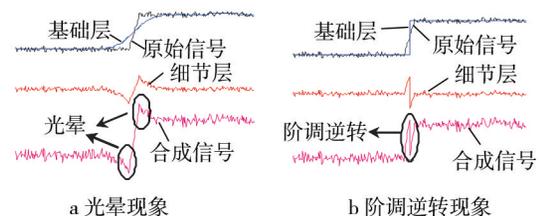


图1 图像分层与光晕和阶调逆转现象的关系

Fig.1 The relationship between image decomposition and halo or gradient reversal

由此可见,不同的图像分层算法在显著边缘处产

生不同现象(光晕或阶调逆转)。根据对产生原因的分析可知,如果去除细节层图像中的逆转或震荡信号,则可以有效地压缩光晕和阶调逆转。因此,改进算法首先要识别细节层图像中的逆转和震荡等异常信号。

Bae等^[10]认为,当细节层图像中梯度与原始图像中梯度的方向不一致或细节层图像梯度的幅度大于原始图像梯度幅度时,则判断细节层图像中出现了异常信号(如逆转或震荡信号),并给细节层图像的梯度强行规范上下限,以消除异常信号。为此,建立修正后细节层图像的梯度场 $V=(V_x, V_y)$ 。 x 方向的梯度 V_x 为:

$$V_x = \begin{cases} 0 & \text{sign}(\partial D/\partial x) \neq \text{sign}(\partial I/\partial x) \\ \partial I/\partial x & |\partial D/\partial x| > |\partial I/\partial x| \\ \partial D/\partial x & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

y 方向的梯度 V_y 与式(5)中 x 方向的梯度定义相同。式(5)中, $\partial I/\partial x$ 和 $\partial D/\partial x$ 均以前向差分表示:

$$\partial I(x, y)/\partial x = I(x, y+1) - I(x, y) \quad (6)$$

$$\partial D(x, y)/\partial x = D(x, y+1) - D(x, y) \quad (7)$$

由式(5)可知,当细节层图像的梯度与原始图像梯度方向相反时,认为细节层出现了逆转信号,设新细节层对应位置梯度为0;当 $|\partial D/\partial x| > |\partial I/\partial x|$ 时,认为细节层出现了震荡信号,设新细节层图像对应位置梯度为原始图像梯度;当 $|\partial D/\partial x| < |\partial I/\partial x|$ 时,则认为细节层梯度属正常情况,不予修正。联立式(6)(7)(1),比较原始图像和细节层图像梯度幅度的大小:

$$\partial I(x, y)/\partial x - \partial D(x, y)/\partial x = B(x, y+1) - B(x, y) \quad (8)$$

式(8)中,由于无法判断 $B(x, y+1) - B(x, y)$ 的符号,在细节层的任何区域均有可能出现细节层梯度幅度大于原始图像梯度幅度的情况。由此,当 $|\partial D/\partial x| > |\partial I/\partial x|$ 时,不能认定细节层出现了震荡信号。除此之外,细节层图像即使出现了震荡信号,只要震荡信号的变化率小于原始图像的变化率,即可满足 $|\partial D/\partial x| < |\partial I/\partial x|$ 的条件,但仍会产生明显的光晕现象,见图1a。针对此情况,在式(5)的基础上,对细节层中震荡信号的识别做出修正,即考虑像素的邻域信息,设置阈值,判定局部梯度幅度大于阈值的为震荡信号,具体修正为:

$$V_x = \begin{cases} 0 & \text{sign}(\partial D/\partial x) \neq \text{sign}(\partial I/\partial x) \\ T \cdot \text{sign}(\partial I/\partial x) & \frac{1}{n} \sum_{x \in \Omega_1} |\partial D/\partial x| > T \\ \partial D/\partial x & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

式中: n 为邻域 Ω_1 中像素的数目; $\frac{1}{n} \sum_{x \in \Omega_1} |\partial D/\partial x|$ 为局部梯度大小; T 为阈值,设置为更大邻域范围内 Ω_2 的

局部梯度大小, $T = \frac{1}{m} \sum_{x \in \Omega_2} |\partial D/\partial x|$, $m > n$ 。

式(9)修正的只是细节层图像梯度,而非直接修正细节层图像信息本身,因此,接下来的工作就是由梯度图像求解图像本身。求解的方程应该满足^[11-12]:

$$\arg \min_D \|\nabla D' - V\|_2^2 \quad (10)$$

式中: D' 为需要求解的目标细节层图像; D 为原图像分解所得的细节层图像; V 为公式(9)修正后的细节层图像梯度; $\|\cdot\|_2^2$ 为 L_2 范数; ∇ 为梯度操作符号, $\nabla D' = [\partial D'/\partial x, \partial D'/\partial y]$; ε 为 D' 和 D 实际的差别。由式(10)建立正规化方程:

$$D' = \arg \min_D (\|\nabla D' - V\|_2^2 + \lambda \|D' - D\|_2^2) \quad (11)$$

式中: $\|\nabla D' - V\|_2^2$ 为梯度项; $\|D' - D\|_2^2$ 为数据项; λ 为正规化项的系数,用于平衡梯度项和数据项, λ 越大,数据项起的作用越大。最小化公式(11)等同于求解如下的泊松方程^[13]。

$$\lambda D' - \nabla^2 D' = \lambda D - \text{div} V \quad (12)$$

式中: ∇^2 为拉普拉斯操作, $\nabla^2 D' = \partial^2 D'/\partial x^2 + \partial^2 D'/\partial y^2$; $\text{div} V$ 为目标梯度场 V 的散度, $\text{div} V = \partial V_x/\partial x + \partial V_y/\partial y$ 。鉴于图像是离散数据,需要对公式(12)进行离散化表示。其中, $\nabla^2 D'$ 和 $\text{div} V$ 的离散化表示形式分别为式(13)和(14)。那么,式(12)的离散化表示方式则为式(15)。

$$\nabla^2 D'(x, y) \approx D'(x+1, y) + D'(x-1, y) + D'(x, y+1) + D'(x, y-1) - 4D'(x, y) \quad (13)$$

$$\text{div} V \approx V_x(x, y) - V_x(x-1, y) + V_y(x, y) - V_y(x, y-1) \quad (14)$$

$$(4 + \lambda)D'(x, y) - D'(x+1, y) - D'(x-1, y) - D'(x, y+1) - D'(x, y-1) = b(x, y) \quad (15)$$

式(15)中, $b(x, y) = \lambda D(x, y) - \text{div} V(x, y)$ 。由此,式(15)改写成矩阵形式就如同求解如下方程。

$$AD' = b \quad (16)$$

式中:

$$A = \begin{pmatrix} 4 + \lambda & -1 & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 4 + \lambda & -1 & 0 & -1 & \dots & -1 \\ 0 & -1 & 4 + \lambda & -1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 4 + \lambda & -1 & \dots & -1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 4 + \lambda & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & \dots & 4 + \lambda \end{pmatrix}$$

由于矩阵 A 是典型稀疏、对称的正定矩阵,这里选用共轭梯度算法^[13-14]求解出细节层图像 D' 。最后,

再在求得 D' 的基础上更新基础层图像:

$$B' = I - D' \quad (17)$$

3 测试结果分析

为了测试改进算法对去除光晕和阶调逆转的有效性, 实验选取具有显著边缘的 HDR 图像 rend04_o80A 和 window, 并且设置测试条件为: 最大显示亮度为 100 cd/m^2 、分辨率为 30 像素(视角的 LCD 显示器)。在改进算法中, 为了能够很好地再现较亮和较暗场景的细节信息, 选用文献[15]中的动态 S 曲线作为基础层的映射函数; 根据视觉知识可知, 基础层图像中像素值的变化会影响细节模糊程度变化, 因而当基础层图像中的像素值降低时, 则拉升细节层图像对应信号(即取 $\alpha=1.5$); 反之, 则压缩细节层图像对应信号(即取 $\alpha=0.8$)。此外, 改进算法的参数分别为 $m=12, n=2, \lambda=0.01$ 。

改进算法对双边滤波分层映射算法^[2]中光晕的抑制效果见图2。图2中, 测试图像为 HDR 图像 rend04_o80A, 其动态范围为 61 027:1, 且包含明暗交替的显著边缘, 具体见图 2c 中上图的方框区域。图 2a 和图 2b 分别为双边滤波分层映射算法和改进算法的效果; 图

2c 为原始 HDR 图像、双边滤波分层映射算法以及改进算法效果在第 295 列的一维信号图。由图 2 可知, 经改进算法处理后, 显著边缘处具有光晕特征的信号被抑制, 表明改进算法可有效地抑制双边滤波分层映射算法产生的光晕; 其他部分的细节信号高度重合, 则表明改进算法在细节清晰性再现上与双边滤波分层映射算法具有同等的优越性。由此可见, 提出的改进算法既可有效地抑制光晕现象, 也具有原有映射算法的细节再现能力。

改进算法对 L_0 梯度范数分层映射算法^[7]中阶调逆转的抑制效果见图3。在图3中, 测试图像为 HDR 图像 window, 其动态范围为 8249:1, 且包含明暗交替的显著边缘, 具体见图 3c 中上图的方框区域。图 3a 和图 3b 分别为 L_0 梯度范数分层映射算法和改进算法的效果; 图 3c 为原始 HDR 图像、 L_0 梯度范数分层映射算法以及改进算法效果在第 248 行的一维信号图。由图 3 可知, 经改进算法处理后, 显著边缘处逆转信号被修正, 表明改进算法可有效地抑制 L_0 梯度范数分层映射算法所产生的阶调逆转; 其他部分的细节信号则高度重合, 表明改进算法可保持 L_0 梯度范数分层映射算法在细节清晰性再现上的优越性。由此可见, 改进算法可在保持细节清晰性的同时, 达到实现修正阶调逆转的目的。

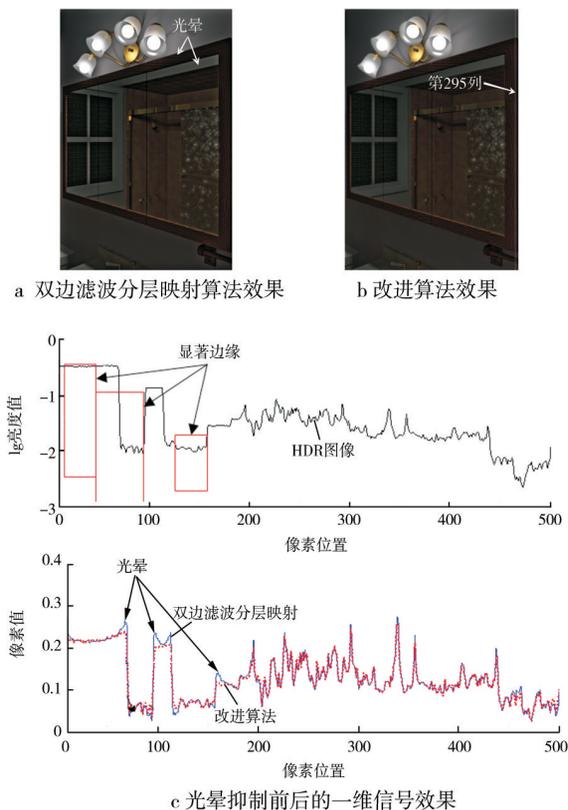


图2 改进算法对双边滤波分层映射中光晕的抑制效果
Fig.2 HDR image rend04_o80A: halo inhibition in BLF decomposition by the proposed algorithm

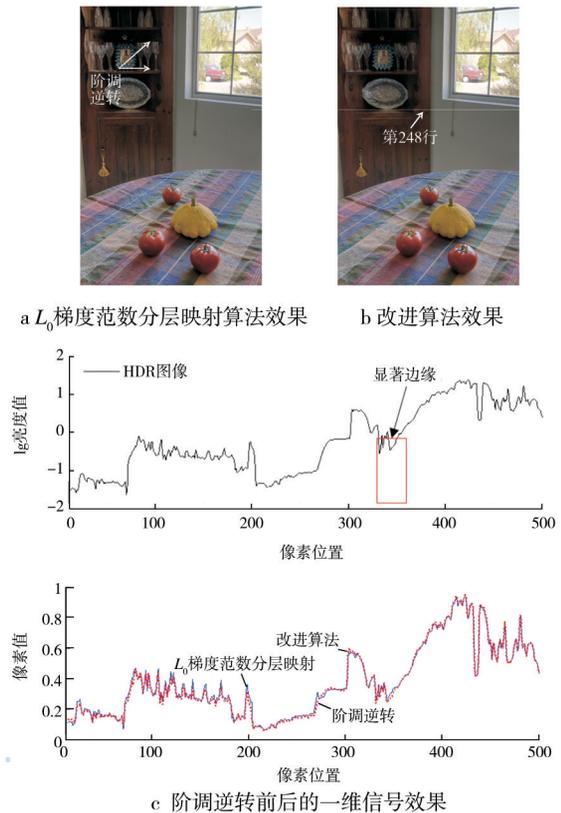


图3 改进算法对 L_0 梯度范数分层映射中阶调逆转的抑制效果
Fig.3 HDR image window: gradient-reversal inhibition in L_0 gradient minimization decomposition by the proposed algorithm

4 结语

提出了一种抑制光晕和阶调逆转现象的HDR图像分层阶调映射的改进算法,此算法对细节层图像中造成光晕和阶调逆转异常信号的梯度进行了有效控制、修正,并通过正规化方法由梯度求解出新的细节层图像和基础层图像,以用于后续映射处理。经测试证明,该算法在去除光晕和抑制阶调逆转方面取得了一定的成效,且能保持原有映射算法的细节再现能力。但是,由于在重建细节层的过程中要求解正规化方程,计算效率相对较低。

参考文献:

- [1] JACK T, GREG T. LCIS: A Boundary Hierarchy for Detail-preserving Contrast Reduction[C]// International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles, 1999: 83—90.
- [2] DURAND F, DORSEY J. Fast Bilateral Filtering for the Display of High-dynamic-range Images[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 257—266.
- [3] FARBMAN Z, FATTAL R, LISCHINSKI D, et al. Edge-preserving Decompositions for Multi-scale Tone and Detail Manipulation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1—10.
- [4] SU Z, LUO X N, DENG Z J, et al. Edge-preserving Texture Suppression Filter Based on Joint Filtering Schemes[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2013, 15(3): 535—548.
- [5] SU Z, LUO X N, ARTUSI A. A Novel Image Decomposition Approach and Its Applications[J]. Visual Computer, 2013, 29(10): 1011—1023.
- [6] GU B, LI Wu-jing, ZHU Min-yun, et al. Local Edge-preserving Multiscale Decomposition for High Dynamic Range Image Tone Mapping[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(1): 70—79.
- [7] XU L, LU C W, XU Y, et al. Image Smoothing Via L-0 Gradient Minimization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): 1—11.
- [8] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided Image Filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397—1409.
- [9] CHOUDHURY A, MEDIONI G. Hierarchy of Nonlocal Means for Preferred Automatic Sharpness Enhancement and Tone Mapping[J]. Journal of the Optical Society of America a-optics Image Science and Vision, 2013, 30(3): 353—366.
- [10] BAE S M, PARIS S, DURAND F E. Two-scale Tone Management for Photographic Look[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 637—645.
- [11] FATTAL R, LISCHINSKI D, WERMAN M. Gradient Domain High Dynamic Range Compression[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 249—256.
- [12] PEREZ P, GANGNET M, BLAKE A. Poisson Image Editing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 313—318.
- [13] KIM J H, KIM H, KO S J. New Visualization Method for High Dynamic Range Images in Low Dynamic Range Devices[J]. Optical Engineering, 2011, 50(10): 1—8.
- [14] XIE Z F, LAU R H, GUI Y, et al. A Gradient-domain-based Edge-preserving Sharpen Filter[J]. Visual Computer, 2012, 28(12): 1195—1207.
- [15] KUANG J T, JOHNSON G M, FAIRCHILD M D. iCAM06: A Refined Image Appearance Model for HDR Image Rendering[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2007, 18(5): 406—414.
- [16] 潘光华, 柏子游, 王冬梅. 高低瓦楞辊齿形尺寸参数研究[J]. 包装工程, 2014, 35(9): 47—51.
- [17] PAN Guang-hua, BAI Zi-you, WANG Dong-mei. Research on Tooth Size Parameters of High and Low Corrugated Roller[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(9): 47—51.
- [18] TOKUNO M. Deformable Pneumatic Corrugator Roll Cuts down on Roll Crushing[J]. TAPPI, 1981(3): 64
- [19] 邓帮华, 王群, 张永会, 等. 用于瓦楞辊防护的WC-12Co涂层组织和性能研究[J]. 热喷涂技术, 2011(3): 60—65.
- [20] DENG Bang-hua, WANG Qun, ZHANG Yong-hui, et al. The Microstructure and Performance of WC-12Co Coatings Used on the Corrugated Roller[J]. Thermal Spray Technology, 2011(3): 60—65.
- [21] 生利英. 45钢瓦楞辊表面强化处理工艺的研究[J]. 热加工工艺, 2010(24): 256—257.
- [22] SHENG Li-yin. Study on Surface Strength Treatment Process for Corrugated Roller of 45 Steel[J]. Hot Working Technology, 2010(24): 256—257.

(上接第47页)

WEI Xiao-ling, LI Bo, CHEN Rui, et al. Dynamics Simulation of Corrugated Roller Based on Solidworks and Adams[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 77—79.

- [14] 吴斌方, 袁博, 严明霞, 等. 基于UG和ANSYS软件的瓦楞辊振动与模态分析[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 55—58.

WU Bin-fang, YUAN Bo, YAN Ming-xia, et al. Vibration and Modal Analysis of Corrugated Roller Based on UG and ANSYS Software[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 55—58.

- [15] DENIEIS J. The Case for Semi-automatic Transmissions[J]. Automotrve Engineer, 1997, 22(10): 28—31.

- [16] 郭彦峰, 张艳, 王家民. 瓦楞辊参数化设计及CAD系统[J]. 包装工程, 2004, 25(5): 179—181.

GUO Yan-feng, ZHANG Yan, WANG Jia-min. The Corrugated Roller Parametric Design and CAD System[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(5): 179—181.