

噪声不敏感的柱状图特征描述符及其在图像检索中的应用

刘淑琴 彭进业

(西北大学信息科学与技术学院 西安 710127)

摘要 基于内容的图像检索方法往往将图片的内容表示成柱状图,根据图片柱状图之间的相似性进行图片的检索。数码图片中包含的噪声使得柱状图变得平滑,从而使图片之间变得更为相似,这增加了返回结果中包含的图片数量。为了进一步提高图片检索的性能,提出了一种对噪声不敏感的柱状图特征描述符,并应用该特征描述符进行图像之间的相似性匹配。首先将图片中的噪声描述为平稳附加高斯白噪声,并给出了相应的柱状图表示;然后通过随机变量的原点矩定义了柱状图的特征描述符,并分析了如何应用特征描述符恢复原始图片的柱状图。在算法的性能验证过程中,将提出的方法与 4 种相关算法进行比较,应用两个真实的图片数据库的图像检索实验验证了所提方法的有效性。

关键词 图像检索,柱状图,噪声,特征描述符

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.1.065

Noise Insensitive Feature Descriptors for Histogram and Application in Image Retrieval

LIU Shu-qin PENG Jin-ye

(College of Information Science and Technology, Northwestern University, Xi'an 710127, China)

Abstract Content based image retrieval methods usually represent images as histograms, and retrieve images based on similarity between images. The noise in digital photography makes its histogram even more smoothing, and at the same time, makes two images more similar, which increases the number of result images during retrieving. In order to improve the performance of image retrieval, this paper proposed a feature descriptor, which is insensitive to noise for histogram, and computed similarities between images based on the proposed feature descriptor. We described the noise in an image as stationary additive Gaussian white noise, and gave its corresponding histogram. Then, we defined the feature descriptor of histogram by the general moments of random variable, and analyzed how to recover original histogram of an image using the proposed feature descriptor. During the validation of the proposed method, we compared it with four popular related algorithms, and validated its efficiency according to image retrieval experiments in two real image databases.

Keywords Image retrieval, Histogram, Noise, Feature descriptor

图像数据库自 20 世纪 80 年代出现以来,便引起了学术界和工业界的广泛关注^[1]。早期的图像检索方法对每张图片进行标注,然后根据标注的文本进行图像的检索^[2]。随着成像技术的发展以及互联网的普及,涌现出了许多海量的图像数据库。由于这些图像数据库规模非常大,对每个图片进行标注是行不通的,因此研究人员提出了基于内容的图像检索方法(Content-Based Image Retrieval, CBIR)^[3,4]。在 CBIR 中,研究人员对图像的实际内容进行分析并形式化描述出来,当用户输入查询图片时,通过对比查询图片和待检索图片的相似性在图像数据库中找到最相似的图片^[5]。图片的内容通常由一系列特征表示出来,如颜色、材质、主要对象的类型等,图片间的相似性计算通常在图片的特征空间中进行。

由于图片之间的相似性度量没有客观的评价标准,只能从主观的角度出发,CBIR 系统往往根据大多数用户的直观感觉对相似的图片进行检索。于此同时,CBIR 系统还要满足对用户检索的快速响应,这导致图片的内容通常采用有损的低层次特征来描述,如图片的颜色或者灰度。研究表明,柱状图

相似性是人类视觉的主要特征^[6]。即使两张图片的内容有差异,但是如果它们的柱状图是相似的,那么它们在感观上也被认为是相似的;反之,如果它们的柱状图差别很大,那么这两张图片几乎不可能是相似的。图片柱状图的另一个优势是仅与图片的灵活变形有关,而与图片的变换、旋转和缩放等操作无关,因此不需要关注图片内部的几何形状^[7-9]。

用于保存图片内容的柱状图的存储结构效率非常低,对于彩色图片,RGB 柱状图的向量长度为 2^{24} ,其中包含了大量无用的细节信息。对柱状图中的细节进行压缩,只保留图片的主要特征可以大大提高计算效率。为了对柱状图的细节进行压缩,Yu 等人^[10]用粗粒度的柱状图代替完全彩色的柱状图(每个柱中包含更广的颜色信息),Liu 等人^[11]将柱状图表示为适当的功能基系数。用户对功能基中系数的个数可以进行自定义,因此该方法可以在压缩程度和准确性之间进行权衡。图片的柱状图表示方法和随机变量的概率密度函数是相互关联的^[12,13]。

基于柱状图的 CBIR 方法对图片中的噪声非常敏感,额

到稿日期:2015-04-07 返修日期:2015-05-28 本文受国家自然科学基金项目(61170306)资助。

刘淑琴(1986—),女,博士生,主要研究方向为图像检索、智能计算;彭进业(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为图像处理、人工智能等。

外的噪声使得柱状图变得平滑,平滑度与噪声的数量成正比。由于添加噪声的柱状图变平滑,这使得检索结果中包含更多的相似图片,从而降低了图像检索的性能^[14]。然而,在数码照片中,噪声是不可避免的,在图像检索时必须对噪声进行考虑。本文提出了一种对噪声不敏感的柱状图特征描述符,并应用该特征描述符进行图像之间的相似性匹配。首先将图片中的噪声描述为平稳附加高斯白噪声,并给出了相应的柱状图表示。接下来,通过随机变量的原点矩定义了柱状图的特征描述符,并分析了如何应用特征描述符恢复原始图片的柱状图。

1 噪声模型

在数码照片中,噪声是不可避免的。当在光线暗的情况下拍摄图片时,数码设备通常采用高的 ISO 或者长的曝光时间,这两种方法都对背景噪声进行了放大,有时甚至会导致背景的能量大于信号的能量。此外,数码照片中还存在着热噪声。

本文主要考虑热噪声和数码摄影设备中的电子噪声,这两种噪声都可以建模成均值为 0 和标准差为 σ 的平稳附加高斯白噪声,并且噪声 n 与原始的图片 f 是没有关联的。平稳附加高斯白噪声的柱状图 h_n 可以表示为:

$$h_n(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中, t 为灰阶度的索引。

本文根据图片的大小对所有的柱状图进行归一化,使其和为 1。如果原始的图片为 f ,噪声为 n ,那么包含噪声的图片为 $g=f+n$,它的柱状图 h_g 为图片 f 的柱状图和噪声 n 的柱状图的卷积:

$$h_g(t) = (h_f * h_n)(t) \quad (2)$$

2 对噪声有抵抗力的柱状图表示

本节提出一种图像柱状图表示方法,该柱状图中的描述符不易被附加高斯白噪声干扰。这些描述符基于柱状图的统计原点矩,在概率论中是描述概率密度函数特征的常用方法。令 h 为随机变量 X 的概率密度函数,那么 h 的 p 阶中心距公式为:

$$m_p^{(h)} = \int x^p h(x) dx \quad (3)$$

其中,阶层 $p=0,1,2,\dots$ 。

当 $p=0$ 时, $m_0=1$; 当 $p=1$ 时, m_1 为随机变量 X 的所有样本的均值,即 $m_1=\bar{X}$ 。在一般情况下, h 的各阶原点矩的值不一定是有限的,然而当概率密度函数 h 为归一化的柱状图时,所有的中心距 m_p 都存在并且是有限值。另一方面,由于任何一个紧支撑概率密度函数都可以由其原点矩进行准确的重构,因此原点矩能完全并且无冗余地描述概率密度函数或者柱状图。

然而,图片的柱状图容易受到噪声的影响,含有噪声的图片的柱状图是对原始图片的柱状图附加噪声得到的。依据卷积式(2)和原点矩式(3),可以推导出含有噪声的图片的柱状图的原点矩公式:

$$m_p^{(g)} = \sum_{k=0}^p \binom{p}{k} m_k^{(n)} m_{p-k}^{(f)} \quad (4)$$

其中, $m_k^{(n)}$ 表示噪声 n 的 k 阶原点矩, $m_{p-k}^{(f)}$ 表示原始图片 f 的

$p-k$ 阶原点矩,它们的计算见式(3)。

由于噪声 n 服从均值为 0 的高斯分布(见式(1)),将其代入到式(3)可得

$$m_p^{(n)} = \sigma^p (p-1)!! \quad (5)$$

其中,符号 $k!!$ 表示阶层为 2,即 $k!!=1 \times 3 \times 5 \times \dots \times k$ (k 为奇数)。我们定义 $(-1)!!=0!!=1$ 。对于任意的奇数 p ,由于高斯分布是对称的,因此有 $m_p^{(n)}=0$,将其代入到式(4)可得

$$m_p^{(g)} = \sum_{k=0}^{\lfloor p/2 \rfloor} \binom{p}{2k} \sigma^{2k} (2k-1)!! \cdot m_{p-2k}^{(f)} \quad (6)$$

从上述公式可以看出,噪声图片柱状图的原点矩等于原始图片的原点矩加上一些附加项,这些附加项包含原始图片的柱状图的低阶原点矩与标准差 σ 的多次方的乘积。式(7)一式(11)分别为噪声图片 g 的 1 至 5 阶原点矩。

$$m_1^{(g)} = m_1^{(f)} \quad (7)$$

$$m_2^{(g)} = m_2^{(f)} + \sigma^2 \quad (8)$$

$$m_3^{(g)} = m_3^{(f)} + 3\sigma^2 m_1^{(f)} \quad (9)$$

$$m_4^{(g)} = m_4^{(f)} + 6\sigma^2 m_2^{(f)} + 3\sigma^4 \quad (10)$$

$$m_5^{(g)} = m_5^{(f)} + 10\sigma^2 m_3^{(f)} + 15\sigma^4 m_1^{(f)} \quad (11)$$

为了获取对噪声有抵抗能力的描述符,需要消除描述符中的参数 σ 。对于式(8)所示的 2 阶原点矩,进行变换可得

$$\sigma^2 = m_2^{(g)} - m_2^{(f)} \quad (12)$$

对于含有其它阶原点矩的代数表达式,根据式(12)将对应的 σ^2 替换为 $m_2^{(g)} - m_2^{(f)}$,便可以消除相应公式中的参数 σ 。

为了对图片的柱状图进行描述,定义如下所示的描述符(特征):

$$I_p = \sum_{k=1}^{\lfloor p/2 \rfloor} (2k-1)!! \cdot \binom{p}{2k} \cdot m_{p-2k} (-m_2)^k \quad (13)$$

于是,对于任何整数 $p \geq 0$,描述符 I_p 都与图片的噪声相互独立,并且与噪声变量无关。换句话说,任何含有噪声的图片的 I_p 值都与原始图片是相同的,既不需要对图片进行去噪声化,也不需要去噪声的方差进行估计。

本文应用描述符 I_p 来表示图片的柱状图特征,并用于基于内容的图像检索。由于 I_p 对噪声具有抵抗力,因此该方法是图片柱状图的完全描述。给定一系列描述符 I_p ,其中 $p=1,2,\dots$ 并且 $I_0=1$,可以依据式(13)恢复原始图片中除了 $m_2^{(g)}$ 以外的所有阶原点矩。由于 I_p 对噪声是不敏感的,因此从本质上说我们无法恢复噪声的标准差参数 σ 。此外,由于 $m_2^{(g)}$ 受 σ 的影响,因此也无法恢复二阶原点矩 $m_2^{(g)}$ 。

然而,当方差是自由参数时,我们也可以恢复图片的柱状图的完整形状。令 $I_2=0$,并且其他的描述符 I_p ($p \neq 2$) 都是有效的,那么序列 I_p ($p=1,2,\dots$) 可以描述图片在任何高斯平滑下的柱状图,而差别仅在于 I_2 这一个自由度。在实际应用中,我们仅用这些特征描述符的有限集合,并且特征描述符的个数由用户根据数据库中图片的相似性来确定。需要进行区分的相似图片越多,那么所需的柱状图描述符也越多。如果数据库中相似的图片很少,那么仅需要少量的特征描述符来描述图片的柱状图。一般情况下,仅仅需要 6 到 10 个特征描述符,这提供了很大的压缩比。

使用特征描述符 I_p 序列描述图片柱状图的直观含义为:所有 I_p 的联合零空间通过高斯模型进行描述,因此 I_p 系列定义了给定柱状图与最近的高斯分布之间的距离,即 I_p 序列测量出了柱状图中的非高斯成分。最后,如果将上述所有公

式中的原点矩换为中心矩,上述公式仍然成立。此时,不需要对图片的柱状图进行任何的归一化操作就可以得到图片整体亮度的方法的不变性。

3 实验结果与分析

3.1 对比算法与图片数据库

将本文提出的对噪声有抵抗能力的柱状图描述符应用于图片数据库中的图片检索,并与如下4个CBIR算法进行对比。

- 颜色空间特征^[5]:该方法将图像内容看成由若干对象组成的集合,首先利用图像分割得到主要对象,然后根据对象的颜色、位置和形状特征计算图像间的内容相似度,再进行检索。

- 矩方法^[13]:该方法通过紧凑的勒让德染色性分布矩来存储图片的色彩内容,大大减少了图片柱状图的特征数。

- 多纹理基元^[11]:该方法基于纹理基元理论,通过柱状图来表示共生矩阵的属性,将原始图片描述为形状描述符。该方法是一种视觉属性描述符,并不需要对图片进行分割,也不需要进行模型的训练。

- 特征选择^[9]:图片的低层次视觉特征与高层的语义之间存在着鸿沟,为了弥补这种语义鸿沟,Rashedi等人^[9]采用同时进行特征适应和特征选择的方法,提出了一种混合的元启发式蠕虫智能搜索技术用于特征参数的提取。

实验采用两个公开的图片数据库 Oxford 和 Holidays。Oxford 图片数据库包含 5063 张图片和 55 个用户查询,Holidays 图片数据库包含 1491 张图片和 500 个用户查询。这两个图片数据库的详细信息分别见文献^[15,16]。

3.2 实验结果

首先,我们通过实验对比了5种算法在 Oxford 和 Holidays 两个图片数据库中进行图片检索的 MAP(Mean Average Precision)。MAP 是所有查询的 AP(Average Precision)值的平均值。图1和图2分别为5种算法在 Oxford 和 Holidays 数据库中进行查询的 MAP。这两幅图中的横轴为对数坐标,表示柱状图的特征维度,即用来表示图片柱状图的描述符(见式(13))的个数。在特征维度的选取中,我们选取了从 I_1 到 I_{k+1} (I_2 除外)的 k 个特征描述符。从实验结果可以看出,本文提出的方法可以在很少的特征维度下达到较高的 MAP 值,并且其 MAP 值始终高于其它4种方法。在其它4种方法的对比中,特征选择方法^[9]和多纹理基元方法^[11]优于其它两种方法。

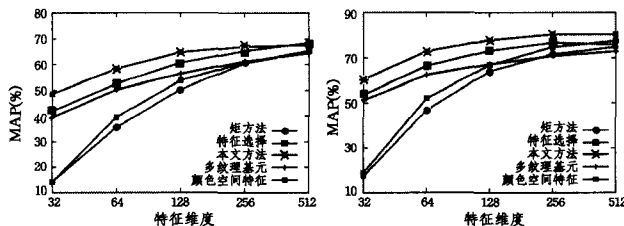


图1 在 Oxford 数据库中算法的 MAP 值对比

图2 在 Holidays 数据库中算法的 MAP 值对比

MAP 值衡量了图像检索的准确率。接下来,通过实验对比了5种算法在两个图片数据库中进行图片检索的召回率,即检索结果正确结果的数量与全部正确结果数量的比值。在

图3和图4所示的实验结果中,坐标横轴仍然为特征的维度,此处采用线性坐标。从实验结果可以看出,本文提出的方法具有最高的检索召回率,文献^[9]提出的特征选择方法次之,并且这两种方法都明显优于其它3种方法。

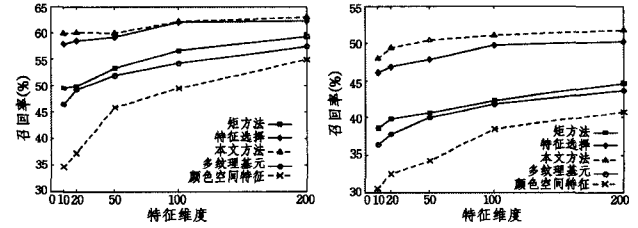


图3 在 Oxford 数据库中算法的召回率对比

图4 在 Holidays 数据库中算法的召回率对比

在颜色空间特征、矩方法、多纹理基元和特征选择4种方法的对比中,特征选择方法和多纹理基元方法要优于其它两种方法。为此,我们将本文提出的方法与特征选择方法和多纹理基元方法进行了对比,比较了算法在不同规模的图片库下图片检索的 MAP 值变化情况,实验结果见图5和图6。这3种方法的 MAP 值在 Oxford 和 Holidays 两个图片库下都随着图片库规模的增大而减小。此外,特征选择方法和多纹理基元方法的 MAP 值相接近,都明显小于本文提出的特征描述符方法。

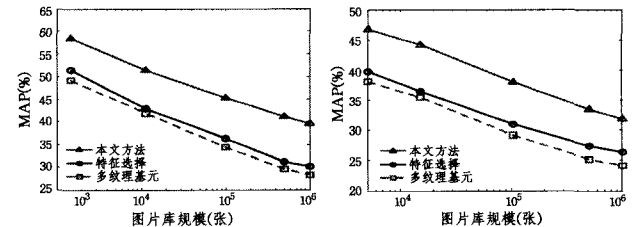


图5 在 Oxford 数据库中算法在不同图片库规模下的 MAP 对比

图6 在 Holidays 数据库中算法在不同图片库规模下的 MAP 对比

结束语 在基于内容的图像检索方法中,传统的图片匹配方法往往匹配图片的柱状图之间的相似性,而忽略了图片内部包含的噪声。然而在数码照片中,噪声是普遍存在的。本文提出了一种对噪声不敏感的柱状图特征描述符,并应用该特征描述符进行图像之间的相似性匹配。首先将图片中的噪声描述为平稳附加高斯白噪声,并给出了相应的柱状图表示。接下来,通过随机变量的原点矩定义了柱状图的特征描述符,并分析了如何应用特征描述符恢复原始图片的柱状图。在算法的性能验证过程中,将本文提出的方法与4种相关算法相比较,应用两个真实的图片数据库进行图像检索实验,验证了本文方法的有效性。

参考文献

[1] Li Xiang-yang, Lu Dong-ming. Study of Color Based Retrieval for Image Database[J]. Journal of Computer Research and Development, 1999(3):359-363 (in Chinese)
李向阳,鲁东明. 基于色彩的图像数据库检索方法的研究[J]. 计算机研究与发展, 1999(3):359-363

[2] Cui Chao-ran, Ma Jun. An Image Tag Recommendation Approach Combining Relevance with Diversity[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(3):654-663 (in Chinese)

- 崔超然, 马军. 一种结合相关性和多样性的图像标签推荐方法[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 654-663
- [3] Dharani T, Aroquiara I L. A survey on content based image retrieval[C]//2013 International Conference on Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering (PRIME). IEEE, 2013: 485-490
- [4] Wen Yu-feng, Zhou Ji-liu, Zhou Yang. Implementation of CBIR engine on the distributed environment[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2007, 44(5): 995-999 (in Chinese)
文字峰, 周激流, 周扬. 分布式计算环境下 CBIR 检索引擎的实现[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2007, 44(5): 995-999
- [5] Wang Tao, Hu Shi-min, Sun Jia-guang. Image Retrieval Based on Color-Spatial Feature[J]. Journal of Software, 2002, 13(10): 2031-2036 (in Chinese)
王涛, 胡事民, 孙家广. 基于颜色-空间特征的图像检索[J]. 软件学报, 2002, 13(10): 2031-2036
- [6] Liu G H, Yang J Y. Content-based image retrieval using color difference histogram[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(1): 188-198
- [7] Pass G, Zabih R. Histogram refinement for content-based image retrieval[C]//Proceedings 3rd IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 1996(WACV'96). IEEE, 1996: 96-102
- [8] Xiaoling W. A novel circular ring histogram for content-based image retrieval[C]//First International Workshop on Education Technology and Computer Science, 2009 (ETCS'09). IEEE, 2009: 785-788
- [9] Rashedi E, Nezamabadi-Pour H, Saryzadi S. A simultaneous feature adaptation and feature selection method for content-based image retrieval systems[J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 39(2): 85-94
- [10] Yu H, Li M, Zhang H J, et al. Color texture moments for content-based image retrieval[C]//2002 International Conference on Image Processing. 2002. IEEE, 2002: 929-932
- [11] Liu G H, Zhang L, Hou Y K, et al. Image retrieval based on multi-texton histogram[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(7): 2380-2389
- [12] Mandal M K, Aboulnasr T, Panchanathan S. Image indexing using moments and wavelets[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1996, 42(3): 557-565
- [13] Yap P T, Paramesran R. Content-based image retrieval using Legendre chromaticity distribution moments[J]. IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing, 2006, 153(1): 17-24
- [14] Pyatykh S, Hesser J, Zheng L. Image noise level estimation by principal component analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(2): 687-699
- [15] Philbin J, Chum O, Isard M, et al. Object retrieval with large vocabularies and fast spatial matching[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007 (CVPR'07). IEEE, 2007: 1-8
- [16] Jegou H, Douze M, Schmid C. Hamming embedding and weak geometric consistency for large scale image search[M]//Computer Vision-ECCV 2008. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 304-317
- [17] Hua Xing-yan, Wu Zong-jia. Processing Method of Image Captured by Photo-electronic Theodolite Based on Gray System Theory[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(6): 98-100 (in Chinese)
花兴艳, 吴宗佳. 基于灰色系统理论的经纬仪噪声图像处理方法[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(6): 98-100
-
- (上接第 281 页)
- [4] Sun J, Wang X, Huang M, et al. A Cloud Resource Allocation Scheme Based on Microeconomics and Wind Driven Optimization[C]//2013 8th China Grid Annual Conference (China Grid). IEEE, 2013: 34-39
- [5] Wang An-long, He Jian-hua, Chen Song, et al. Research on QP-SO Algorithm of Double Core Disturbance[J]. Computer Engineering, 2014, 40(7): 193-196 (in Chinese)
王安龙, 何建华, 陈松, 等. 双心扰动量子粒子群优化算法研究[J]. 计算机工程, 2014, 40(7): 193-196
- [6] Liu Shi-shi, Liu Shi-da. Atmospheric Dynamics (one) [M]. The second edition. Beijing: Peking University Press, 2011: 1-10 (in Chinese)
刘式适, 刘式达. 大气动力学(上)[M]. 第二版. 北京: 北京大学出版社, 2011: 1-10
- [7] Ling S H, Iu H H C, Chan K Y, et al. Hybrid Particle Swarm Optimization With Wavelet Mutation and Its Industrial Applications[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—part B: Cybernetics, 2008, 38(3): 743-763
- [8] Jia Dong-li, Zhang Jia-shu. Niche particle swarm optimization combined with chaotic mutation[J]. Control and Decision, 2007, 22(1): 117-120 (in Chinese)
- 贾东立, 张家树. 基于混沌变异的小生境粒子群算法[J]. 控制与决策, 2007, 22(1): 117-120
- [9] Zhu Hong-qiu, Yang Chun-hua, Gui Wei-hua, et al. Particle Swarm Optimization with Chaotic Mutation[J]. Computer Science, 2010, 37(3): 215-217 (in Chinese)
朱红求, 阳春华, 桂卫华, 等. 一种带混沌变异的粒子群优化算法[J]. 计算机科学, 2010, 37(3): 215-217
- [10] Zhao Xin-chao, Liu Guo-li, Liu Hu-qiu, et al. Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Non-Uniform Mutation and Multiple Stages Perturbation[J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(9): 2060-2061 (in Chinese)
赵新超, 刘国莅, 刘虎球, 等. 基于非均匀变异和多阶段扰动的粒子群优化算法[J]. 计算机学报, 2014, 37(9): 2060-2061
- [11] Mo Yuan-bin, Liu Fu-yong, Zhang Yu-nan. Artificial glowworm swarm optimization algorithm with Gauss mutation[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(1): 121-123 (in Chinese)
莫愿斌, 刘付永, 张宇楠. 带高斯变异的人工萤火虫优化算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(1): 121-123
- [12] Wang Shuai-qun, Ao-ri-ge-le, Gao Shang-ce, et al. New Strategy Based on Selection of Mutation Operator[J]. Computer Science, 2014, 41(9): 225-228 (in Chinese)
王帅群, 敖日格乐, 高尚策, 等. 一种新的变异因子选择策略[J]. 计算机科学, 2014, 41(9): 225-228