

无参考图像质量评价算法性能分析^{*}

陈楚燕¹ 解天鹏²

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院 广州 510310)(2. 中国科学院光电研究院 北京 100094)

摘 要 图像质量评价是计算机视觉和图像处理领域的一个热门问题,具有重要的研究价值和广阔的应用前景。根据所需原始图像信息的多少,客观图像质量评价方法主要分为全参考图像质量评价方法、部分参考图像质量评价方法和无参考图像质量评价方法。但是在实际应用过程中,参考图像往往难以获取或是不存在,因此需要对无参考图像质量评价算法进行研究。近年来,很多无参考图像质量评价算法被相继提出,但是国内还没有相关文献对这些算法的性能进行系统的分析和比较。基于此,论文首先选取了七种具有代表性的无参考图像质量评价算法并对其进行了简要介绍,然后全面介绍并总结了常用的图像质量评价算法性能验证数据库以及算法性能指标,最后,对七种算法的性能进行了详细的分析和比较。

关键词 无参考; 图像质量评价; 图像质量数据库; 算法性能

中图分类号 TP391 **DOI**:10.3969/j.issn.1672-9722.2016.02.035

Performance Analysis of No-reference Image Quality Assessment Algorithm

CHEN Chuyan¹ XIE Tianpeng²

(1. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510310)

(2. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

Abstract Image quality assessment is a hot issue in the field of computer vision and image processing, and it has great research value and application prospect. According to the required knowledge of the original image, object image quality assessment methods are mainly divided into no-reference methods, reduced-reference methods and full-reference methods. But in practical application, the reference image is hard to achieve or even not exist. Therefore, it is necessary to do research in no-reference methods. Many no-reference methods have been proposed in recent years but no article has systematically analyze and compare these methods. Seven representative no-reference methods are chosen to do the job mentioned before and introduced some typical image quality databases and algorithm performance indicators. In the end, the seven algorithms are analyzed and compared in detail.

Key Words no-reference, image quality assessment, image quality database, algorithm performance

Class Number TP391

1 引言

视觉信息是人类获取外界信息的重要手段,大约占据了人类所获取全部信息的 75%。视觉信息即图像信息,与其他信息获取方式相比,图像信息比语言文字更加生动、形象、高效,人眼可以通过图像在短时间内获取大量信息。数字图像在获取、存储、传输、显示等过程中都有可能引入失真,从而导致图像质量的下降。因此,如何准确地衡量图像质量的好坏,成为了计算机视觉和图像处理等领

域的一个热门而具有挑战性的问题^[1]。

总的来说,图像质量评价方法可以分为主观评价方法和客观评价方法。主观评价方法由人类观察者对一系列图像进行观测、比较,并根据事先确定的标准对其质量进行评分。客观评价方法通过设计数学模型实现对图像质量好坏的预测。由于人类视觉系统(Human Visual System, HVS)是视觉信息的最终接收者和解译者,因此主观评价方法是最为可靠的图像质量评价方法,但是该方法费时费力,难以应用于实际。根据评价过程中所需“原

^{*} 收稿日期:2015 年 8 月 11 日,修回日期:2015 年 9 月 27 日

作者简介:陈楚燕,女,研究方向:测绘工程和图像处理相关领域。解天鹏,男,硕士,研究方向:图像处理、激光雷达几何检校和数据处理。

始图像”信息的多少,客观评价方法可以分为三种,分别是全参考(Full-Reference,FR)图像质量评价方法、部分参考(Reduced-Reference,RR)图像质量评价方法、无参考(No-Reference,NR)图像质量评价方法。在实际应用过程中,原始图像往往无法获取或是根本不存在,这就需要在不借助任何原始图像信息的条件下对图像的质量进行预测。

无参考图像质量评价方法是图像质量评价领域的研究热点和难点。在过去的十几年中,无参考图像质量评价取得了很大的进展,一系列富有成效的算法被相继提出,但是国内还没有相关文献对这些算法的性能做过系统的评估与比较。因此,本文主要针对七种被广泛引用的、且被实验证明具有较好性能的无参考图像质量评价算法,旨在通过对这七种有代表性的算法的性能进行分析和比较,使图像质量评价领域的研究人员对无参考图像质量评价算法的研究现状和算法性能优劣有一个清楚的、定量的认识。同时,通过本文对不同算法性能的分析、比较和讨论,希望能够引发出一些新的无参考算法设计思路。

2 无参考图像质量评价算法

目前有很多全参考、半参考图像质量评价算法都已经取得了较为精确的预测结果,然而在大部分实际应用中,参考图像往往是无法获取或是难以获取的,因此需要开发无参考图像质量评价算法。

无参考图像质量评价方法,就是在不需要任何参考图像信息的条件下对失真图像的质量进行评价。对于人类观察者来说,这是一项轻而易举的工作,人眼在无需任何参考的情况下,便能够很容易地区分图像质量的好坏并指出其中可能存在的错误。然而,无参考图像质量评价方法却是该领域的一个难题,其原因可能是人类的大脑掌握了大量的关于图像应该是什么样、不应该是怎样的先验知识^[2]。

在过去的十几年中,很多学者对无参考图像质量评价的问题进行了深入的研究,并提出了各种不同的算法,本文主要讨论以下七种具有代表性的无参考图像质量评价算法,如表 1 所示。

下面分别对这七种算法进行简要的介绍:

2010 年,Moorthy A K 等人提出了一种基于自然场景统计模型的 BIQI(Blind Image Quality Index)方法^[3],首先通过测量自然场景统计信息的变化来进行失真分类,然后进行图像质量评价。一旦完成样本训练,将不再需要待评价图像的关于失真的先验知识。该方法是模块化的,可以扩展到任

意数量失真类型的情况。

表 1 无参考图像质量评价算法

算法简称	算法全称
BIQI	Blind Image Quality Index
BLIINDS-II	BLind Image Integrity Notator using DCT Statistics
BRISQUE	Blind/Referenceless Image Spatial QUality Evaluator
Curvelet-QA	No-reference image quality assessment in curvelet domain
DIIVINE	Distortion Identification-based Image Verity and INtegrity Evaluation
NIQE	Natural Image Quality Evaluator
SSEQ	Spatial-Spectral Entropy-based Quality index

2011 年,Saad M A 等人提出了一种基于图像离散余弦变换系数的自然场景统计模型的 BLIINDS-II (BLind Image Integrity Notator using DCT Statistics)方法^[4],利用 DCT 统计特性的图像完整性检测器进行图像质量评价。

2012 年,Mittal A 等人提出了一种 BRISQUE (Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator)方法^[5],这是一种的基于自然场景统计模型(Natural Scene Statistics,NSS)的无参考图像质量评价算法,它不是通过计算特定失真类型的特征,而是利用局部归一化亮度系数的场景统计信息来量化由失真引起的“非自然性”,该算法计算复杂度很低,可以满足实时应用的需求。另外,与之前提出的无参考图像质量评价算法有所不同,该算法是在空间域上进行的,因此不需要进行坐标框架的变换(离散余弦变换、小波变换等)。

2014 年,Liu L 等人提出了一种 Curvelet 域的无参考图像质量评价方法^[6],首先对图像进行 Curvelet 变换,然后从中提取统计特征,包括 Curvelet 系数的对数直方图顶点的坐标、Curvelet 域内方向和尺度的能量分布等。该算法计算复杂度较低,与人类主观评分具有较好的一致性。

2011 年,Moorthy A K 等人提出了一种 DIIVINE(Distortion Identification-based Image Verity and Integrity Evaluation)的无参考图像质量评价方法^[7],该方法的核心思想是,自然场景图像具有某种统计特性,而图像失真会改变这一特性,使其变得“不自然”,利用自然场景统计模型对这种“不自然”进行描述,就可以测定其失真程度并进行图像质量评价。与针对特定失真的评价方法不同,该方法可以对存在多种失真类型的图像进行评价。

2013 年,Mittal 等人提出了一种 NIQE(Natural Image Quality Evaluator)方法^[8],利用自然图

像统计规律的可测量偏差来进行图像质量评价,该方法无需失真图像人类主观评分库的训练。

2014 年,Liu L 等人提出了一种通用的无参考图像质量评价指标 SSEQ^[9] (Spectral Entropy-based Quality index),利用失真图像的局部空间和光谱信息熵的特征来进行质量评价。

3 图像质量评价算法性能验证数据库

图像质量评价数据库的建立对于图像质量评价算法的性能验证具有重要意义。

目前为止,较为常用的、公开的图像质量评价

数据库有七个,分别是:TID2008^[10] (2013 年扩展为 TID2013^[11])、CSIQ^[12]、LIVE^[13]、IVC^[14]、Toyama-MICT^[15]、WIQ^[16]、Cornell A57^[17]。其中,TID2008、TID2013、CSIQ 和 LIVE 属于较大规模的数据库,具有较多的失真图像数量和失真类型;IVC 和 Toyama 是两个中等规模的数据库;WIQ 和 A57 是两个小规模的黑白图像数据库。

关于这几个图像库的参考图像数量、失真图像数量、失真种类、图像类型(彩色或黑白)、图像文件格式、图像尺寸、主观评价者人数等具体信息,表 2 对其进行了总结。

表 2 图像质量评价数据库

数据库	参考图像数	失真图像数	失真种类	图像类型	图像文件格式	图像尺寸	主观评价者人数
TID2013	25	3000	24	彩色	bmp	512×384	971
TID2008	25	1700	17	彩色	bmp	512×384	838
CSIQ	30	866	6	彩色	png	512×512	35
LIVE(release2)	29	779	5	彩色	bmp	大小不一	161
IVC	10	185	4	彩色	bmp	512×512	15
Toyama-MICT	14	168	2	彩色	bmp	768×512	16
WIQ	7	80	5	灰度	bmp	512×512	60
Cornell A57	3	54	6	灰度	bmp	512×512	7

TID2008 图像质量评价数据库由乌克兰国立航空航天大学信号接收、传输与处理学院的高级研究员 Nikolay Ponomarenko 建立,该数据库包括 25 幅参考图像和 1700 幅失真图像(17 种失真类型,4 个失真等级),其主观评价值的范围为[0.2,7.3]。TID2013 数据库是 TID2008 数据库的扩展,包括 25 幅参考图像和 3000 幅失真图像(24 种失真类型,5 个失真等级)。

CSIQ 数据库由奥克拉荷马州立大学计算感知和图像质量实验室(Computational Perception and Image Quality Lab)建立,该数据库包括 30 幅参考图像和 866 幅失真图像(6 种失真类型),其主观评价值的范围为[0,1]。

LIVE 数据库由德州大学奥斯汀分校(University of Texas at Austin)的图像与视频工程实验室(Laboratory for Image and Video Engineering,LIVE)建立,该数据库包括 29 幅参考图像(如图 1 所示)和 779 幅失真图像,包含 5 种失真类型:JEEG2000(JP2K)压缩失真、JPEG 压缩失真、高斯白噪声(White Noise,WN)、高斯模糊(Gaussian blur,Glur)和快速衰退瑞利通道失真(Fast FadingRayleigh channel,FF)。LIVE 数据库提供了所有图像的差异主观平均意见分数(Difference Mean Opinion Score,DOMS),该评分

值的范围为[0,100],取值越小,表明图像质量越好(参考图像的 DMOS 值为 0)。



图 1 LIVE 库中的 29 幅参考图像

IVC 数据库由法国 IRCCyN 实验室的研究人员建立,该数据库包括 10 幅参考图像和 235 幅失真图像,包含 4 种失真类型:JPEG 压缩失真、JPEG2000 压缩失真、局部自适应决策编码(LAR coding)失真和模糊(Blurring)。主观评价结果由 15 名观测者通过双刺激损伤测量法(Double Stim-

ulus Impairment Scale, DSIS) 进行实验获得。

Toyama-MICT 数据库由日本富山大学多媒体信息和通信技术实验室的研究人员建立,该数据库包括 14 幅参考图像,168 幅失真图像(JPEG 和 JPEG2000 两种失真类型,6 个失真等级)。

WIQ 数据库由瑞典布莱金厄理工学院和印度尼西亚古纳德尔玛大学的研究人员合作建立,该数据库共包括 7 幅原始图像,80 幅失真图像。图像的主观评分通过两组实验获得,每组实验都由 30 名观测者对 40 幅失真图像和 7 幅参考图像进行评价,评价方法采用双刺激连续质量评价法(Double Stimulus Continuous Quality Scale, DSC-QS)^[18]。

4 图像质量评价算法的性能指标

国际电信联盟的视频质量专家组(Video Quality Experts Group, VQEG)认为,评价客观算法的预测性能需要考虑以下三个方面的因素^[19]:

1) 准确性:客观评价结果与主观评价结果的偏离程度。

2) 单调性:客观评价结果与主观评价结果具有一致的变化趋势。

3) 一致性:对于不同类型和内容的图像,算法能够保持预测的准确性。

本文使用以下三个性能指标对无参考图像质量评价算法的性能进行评估:

1) 斯皮尔曼序列相关系数(Spearman Rank Order Correlation Coefficient, SROCC)

$$SROCC = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N \star (N^2 - 1)} \quad (1)$$

其中, $d_i = R_{X_i} - R_{Y_i}$ ($1 \leq i \leq N$), X_i 和 Y_i 分别为第 i 幅图像的主观评分和客观评分, N 为图像总数, R_{X_i} 为 X_i 在 N 个主观评分中的排序(按从大到小或从小到大的顺序排列), R_{Y_i} 为 Y_i 在 N 个客观评分中的排序。SROCC 又称为秩相关系数,用于评价客观算法的单调性,其取值范围为 $[-1, 1]$, 当 SROCC 为 1 时,表明主客观评分值的变化趋势完

全一致。因此, SROCC 取值越大,说明客观算法评价结果与主观质量评分的一致性越好。

2) 皮尔逊线性相关系数(Pearson Linear Correlation Coefficient, PLCC)

$$PLCC = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}) \star (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \star \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

X 是图像的主观评分值, Y 是图像的客观评分值经过非线性回归映射后的得分值, \bar{X} 和 \bar{Y} 分别

为 X 和 Y 的期望, $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$, $\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N}$, N 为用

于性能分析的图像总数。PLCC 用于评价算法预测的准确性,其取值范围为 $[-1, 1]$, PLCC 值越接近于 1, 表示主客观评分之间相关性越好,客观算法预测的准确性越高。

3) 均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (3)$$

N 为图像总数, X_i 和 Y_i 分别为第 i 幅图像的主观评分值和客观评分值。RMSE 用于评价客观算法评价结果与主观质量评分之间的差异大小,取值非负。RMSE 的值越小,说明总体上主客观评分之间的差异越小,当 $RMSE = 0$ 时,客观评价与主观评价完全一致^[20]。

5 算法性能分析与比较

本文使用影响力最大、应用最广泛的 LIVE 数据库对七种无参考图像质量评价算法的性能通过 SROCC、PLCC 和 RMSE 三个指标进行评价,评价结果如表 3 所示。对 LIVE 数据库内五种不同类型的失真图像,各算法的 SROCC、PLCC 和 RMSE 的计算结果分别如表 4~6 所示。每种指标里性能最好的两种算法的计算结果,在表格中使用加粗字体进行了显示。

表 3 各算法性能指标计算结果

性能指标	无参考图像质量评价算法						
	BIQI	BLIINDS-II	BRISQUE	Curvelet-QA	DIIVINE	NIQE	SSEQ
SROCC	0.8190	0.9124	0.9429	0.9303	0.9174	0.9135	0.9348
PLCC	0.7422	0.9241	0.9365	0.9328	0.9116	0.9147	0.9383
RMSE	15.9547	9.0473	8.3295	8.3337	9.9347	NaN	8.0039

表4 SROCC 计算结果

	JPEG2K	JPEG	White Noise	Gaussian Blur	FF	All
BIQI	0.8557	0.7858	0.9715	0.9107	0.7625	0.8190
BLIINDS-II	0.9323	0.9331	0.9463	0.8912	0.8519	0.9124
BRISQUE	0.9442	0.9213	0.9891	0.9534	0.9042	0.9429
Curvelet-QA	0.9376	0.9117	0.9876	0.9650	0.9005	0.9303
DIIVINE	0.9352	0.8921	0.9828	0.9551	0.9096	0.9174
NIQE	0.9172	0.9382	0.9662	0.9341	0.8594	0.9135
SSEQ	0.9420	0.9510	0.9784	0.9483	0.9035	0.9348

表5 PLCC 计算结果

	JPEG2K	JPEG	White Noise	Gaussian Blur	FF	All
BIQI	0.8414	0.7603	0.9732	0.9118	0.7342	0.7422
BLIINDS-II	0.9493	0.9505	0.9614	0.9375	0.9079	0.9241
BRISQUE	0.9472	0.9330	0.9883	0.9463	0.9142	0.9365
Curvelet-QA	0.9465	0.9281	0.9850	0.9694	0.9186	0.9328
DIIVINE	0.9409	0.9097	0.9744	0.9393	0.9128	0.9116
NIQE	0.9370	0.9564	0.9773	0.9525	0.9128	0.9147
SSEQ	0.9464	0.9702	0.9806	0.9607	0.9198	0.9383

表6 RMSE 计算结果

	JPEG2K	JPEG	White Noise	Gaussian Blur	FF	All
BIQI	13.7871	17.0133	5.3804	9.6562	15.5515	15.9547
BLIINDS-II	8.1730	7.7658	6.5009	8.0696	9.7141	9.0473
BRISQUE	8.3625	9.3782	3.5294	7.5636	9.4359	8.3295
Curvelet-QA	7.8055	9.0166	3.7666	5.2569	8.7205	8.3337
DIIVINE	8.5703	10.6070	5.2137	8.0663	9.6520	9.9347
SSEQ	7.8285	5.8467	4.3211	6.0027	8.5418	8.0039

从表格中可以看出, BRISQUE 和 SSEQ 具有最好的算法性能, 其次是 Curvelet-QA 算法, 只比前两种算法的性能稍逊一筹; BLIINDS-II、DIIVINE、NIQE 这三种算法具有大致相当的性能, 而 BIQI 的性能是最差的。对七种算法的性能进行排序, 从好到坏依次是: (BRISQUE≈SSEQ)>Curvelet-QA>(BLIINDS-II≈DIIVINE≈NIQE)>BIQI。

6 结语

无参考图像质量评价是一个开放的、具有广阔应用前景的研究领域, 同时也是一个需要长期研究的复杂课题。本文介绍了七种具有代表性的无参考图像质量评价算法, 总结了常用的图像质量评价数据库以及算法性能评价指标, 在此基础上, 对七种算法的性能进行了详细的分析和比较。本文的研究, 旨在让相关研究人员对无参考图像质量评价的研究现状和算法性能优劣有一个定量的认识。同时, 希望能够带来一些新算法设计上的启发。

参考文献

[1] 梁狄林. 无参考图像质量评价算法研究[D]. 无锡: 江南

大学, 2013.
LIANG Dilin. The Research On No Reference Image Quality Assessment Alogrithm[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
[2] Wang Z, Bovik A C. Modern Image Quality Assessment[M]. Morgan & Claypool Publishers, 2006.
[3] Moorthy A K, Bovik A C. A two-step framework for constructing blind image quality indices[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2010, 17(5): 513-516.
[4] Saad M, Bovik A C, Charrier C. DCT statistics model-based blind image quality assessment[C]//Image Processing (ICIP), 2011 18th IEEE International Conference on. IEEE, 2011: 3093-3096.
[5] Mittal A, Moorthy A K, Bovik A C. No-reference image quality assessment in the spatial domain[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2012, 21(12): 4695-4708.
[6] Liu L, Dong H, Huang H, et al. No-reference image quality assessment in curvelet domain[J]. Signal Processing: Image Communication, 2014, 29(4): 494-505.
[7] Moorthy A K, Bovik A C. Blind image quality assessment: From natural scene statistics to perceptual quali-

- ty[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2011, 20(12):3350-3364.
- [8] Mittal A, Soundararajan R, Bovik A C. Making a “completely blind” image quality analyzer[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2013, 20(3):209-212.
- [9] Liu L, Liu B, Huang H, et al. No-reference image quality assessment based on spatial and spectral entropies[J]. Signal Processing: Image Communication, 2014, 29(8):856-863.
- [10] Ponomarenko N, Lukin V, Zelensky A, et al. TID2008—a database for evaluation of full-reference visual quality assessment metrics[J]. Advances of Modern Radioelectronics, 2009, 10(4):30-45.
- [11] Ponomarenko N, Ieremeiev O, Lukin V, et al. Color image database TID2013: Peculiarities and preliminary results[C]//Visual Information Processing(EUVIP), 2013 4th European Workshop on. IEEE, 2013:106-111.
- [12] Larson E C, Chandler D M. Most apparent distortion: full-reference image quality assessment and the role of strategy[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(1):011006-011006-21.
- [13] Sheikh H R, Wang Z, Cormack L, et al. LIVE image quality assessment database release 2[J]. 2005.
- [14] Le Callet P, Autrusseau F. Subjective quality assessment IRCCyN/IVC database[J]. 2005.
- [15] Horita Y, Shibata K, Kawayoke Y, et al. Mict image quality evaluation database[J]. [2012-06-03]. <http://mict.eng.u-toyama.ac.jp/mictdb.html>, 2011.
- [16] Engelke U, Kusuma M, Zepernick H J, et al. Reduced-reference metric design for objective perceptual quality assessment in wireless imaging[J]. Signal Processing: Image Communication, 2009, 24(7):525-547.
- [17] Chandler D M, Hemami S S. VSNR: A wavelet-based visual signal-to-noise ratio for natural images[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2007, 16(9):2284-2298.
- [18] 刘德磊. 基于分形分析的图像质量评价[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
- LIU Delei. Image Quality Assessment Using Fractal Analysis[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [19] Video Quality Experts Group. Final report from the Video Quality Experts Group on the validation of objective models of video quality assessment, Phase II (FR_TV2)[J]. ftp://ftp.its.bldrdoc.gov/dist/itu-vidq/Boulder_VQEG_jan_04/VQEG_PhaseII_FRTV_Final_Report_SG9060E.doc, 2003, 2003.
- [20] 解天鹏, 许妙忠, 丛铭, 等. 基于 Contourlet-GSSIM 的无参考遥感图像质量评价研究[J]. 测绘通报, 2015, 1:015.
- XIE Tianpeng, XU Miaozhong, CONG Ming. Research on No-reference Remote Sensing Image Quality Assessment Based on Contourlet-GSSIM[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015, 1:015.

~~~~~  
(上接第 310 页)

了云计算中针对数据中心的调度方式,必须具备高效、合理的资源调度管理方案,以及快速的用户作业处理两个特性。本文分析了基于特征粒子算法在资源调度在云计算中的应用与实现,该算法在节点的全局统筹方面具有很大的优势,无论是在搜索过程,还是在负载均衡方面,均具有特殊的优势。

#### 参 考 文 献

- [1] L. Smarr, C. Catlett. MetaComputing[J]. Communications of the ACM, 1992, 35(6):452.
- [2] Dean J, Ghemawat S. MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters. OSDI'04: Sixth Symposium on Operating System Design and Implementation, 2004:137-150.
- [3] Wickremasinghe B, et al. CloudAnalyst: A CloudSim-based Tool for Modeling and Analysis of Large Scale Cloud Computing Environments[C]//Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and.
- [4] I. Foster. Internet Computing and the Emerging Grid [D]. Nature Web Matter, December 7, 2000.
- [5] Jeffrey Dean, Sanjay Ghemawat. MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters[C]//OSDI, 2004.
- [6] Sabata B, Chatterjee S, Davis M, et al. Taxonomy for specifications[C]//Proceedings of the 3rd International Workshop Object-Oriented Real-Time Dependable System, 1997:100-107.
- [7] Rodrigo N. Calheiros, Rajiv Ranjan, Cesar A. F. De Rose, and Rajkumar Buyya, CloudSim: A Novel Framework for Modeling and Simulation of Cloud Computing Infrastruct users and Services. Technical Report, GRIDs-TR-2009-1, Grid Computing and Distributed Systems Laboratory, The University of Melbourne, Australia, March 13, 2009.
- [8] 李立. GridSim 网格仿真工具研究[J]. 电脑知识与技术, 2007, (7):43-44.
- LI Li. Research of GridSim Grid Simulation Tool[J]. Computer Knowledge and Technology (Academic Exchange), 2007, (7):43-44.