

基于负载灰度图映射模型的云集群负载评估方法

董静宜¹ 王 鹏¹ 秦永波^{2,3} 江炳坤^{2,3} 陈 磊¹ 任 超¹

(成都信息工程学院并行计算实验室 成都 610225)¹

(中国科学院成都计算机应用研究所 成都 610041)² (中国科学院研究生院 北京 100049)³

摘 要 为了快速评估云计算中百万节点的整体负载状态,通过分析负载均衡本质与图像均衡特征的对应关系,以熵和信息论为基础,构建了集群负载信息向灰度图的映射模型,完成了负载均衡研究向图像均衡分析的转换。通过图像压缩、信息熵、haar 小波变换方法对图像进行分析,提出了一种基于图像处理的集群负载评估方法。实验表明,该方法可以较快地评估出集群均衡性,由此得到的集群负载状态值为负载均衡算法的改进提供了新的思路。

关键词 云计算,负载评估方法,负载灰度图映射模型

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Load Evaluation Method about Cloud Computing Cluster Based on the Load Grayscale Mapping Model

DONG Jing-yi¹ WANG Peng¹ QIN Yong-bo^{2,3} JIANG Bing-kun^{2,3} CHEN Lei¹ REN Chao¹

(Parallel Lab, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)¹

(Chengdu Institute of Computer Application, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)²

(The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)³

Abstract To assess the overall load status of millions of nodes in cloud computer quickly, this paper constructed a mapping model that loads information map to grayscale image based on the entropy value and information theory. A conversion was completed from load balance to graphic equalizer by analyzing the relationship. There are some experiments by using image compression, image entropy, haar wavelet to analyze image. A load evaluation method was proposed. The experiments show that this method can assess cluster balance quickly and thoroughly. A new load status value is provided for further study of load balancing algorithm.

Keywords Cloud computing cluster, Load evaluation methods, Load grayscale mapping model

由 Google 提出和文献[1]定义的云计算体系架构都是基于不可信节点的资源共享平台。节点数目的增长及节点性能的不可靠,对集群信息处理能力、资源利用率及系统可靠性都提出了新的挑战。本文主要针对节点数目非常庞大的云环境进行负载评估方法的讨论。

监控节点状态、合理分配资源的负载均衡机制成为云集群可靠运行的关键因素^[2,3]。在云环境中,传统的负载均衡算法将面临三大问题:节点负载状况定义、负载信息获取、获取信息后的节点选择算法^[4]。

考虑到云计算中节点性能较低的情况,在定义节点负载状况时,需要同时考虑机器本身的最大处理能力及当前机器综合负载值(包括 CPU 占用、内存占用、磁盘访问时间、网络带宽等),可以参考文献[5]。

设计负载信息获取方法时,云计算中节点数目十分庞大,为了避免网络风暴及收集信息服务器的 I/O 和处理性能瓶颈,需要考虑区域划分,如按照机柜进行网段划分,设置多个信息收集服务节点,层层管理数目庞大的集群。

现阶段信息收集后的节点选择算法均是根据单节点负载信息进行排序或归类^[6]选择最佳节点,没有考虑集群整体或区域性的负载状况。这在传统集群中较为适用,但是对于划分管理区域的云集群却不合适。比如,某个区域整体已经处于饱和状态,但是有可能存在已经释放资源的空闲节点,当使用传统算法进行任务分配时,很可能选择此节点,从而造成局部的负载超载影响系统的整体性能。

针对上述依据传统单节点负载分配算法在云计算中的局限性,本文试图提出了一种集群整体负载状态评估方法。通过图像映射直观展现集群全局负载状态,并通过图像压缩、信息熵、haar 小波变换图像处理方法评价整体集群负载状况。同时通过观察图像可以较早地预测到集群中某一区域负载超标的可能性,避免局部不均衡引起的系统性能的降低,为云计算负载均衡算法的改进提供新的思路。

1 集群负载图像映射模型的构建

集群负载均衡的本质就是保证集群中各个节点的负载状

到稿日期:2011-04-27 返修日期:2011-09-15 本文受国家自然科学基金(60702075),四川省青年科学基金前期资助(09ZQ026-068),第 41 批中国博士后科学基金(20070410385),第 45 批中国博士后科学基金(20090451420),四川省教育厅自然科学重点项目(07ZA014),中组部“西部之光”计划项目资助。

董静宜(1986—),女,硕士生,主要研究方向为并行计算、云计算;王 鹏(1975—),男,博士后,教授,主要研究方向为量子计算、并行计算、云计算。

况一致,减少负载过重或过轻的节点。集群中的均衡性可以用节点间的负载相关性来描述。节点间负载相关性越大,集群整体负载越均衡。这种离散点之间相关性的描述在计算机数字图像中也经常被提到。例如:相邻像素的相关性越大,图像中亮度变化越小。本文推测负载均衡性与图像均衡性存在某种联系,下面从数字图像的概念入手进行分析。

1.1 均衡性在集群负载及图像中的对应关系

计算机为了处理图像,用离散的二维像素矩阵表示出一幅图。如果用一个像素代表集群中的一个节点,节点的负载值 L 代表像素的灰度值,那么一个100万台节点的集群就可以描述成一幅空间分辨率为 1000×1000 、灰度级分辨率为 L 级的图像。对集群负载状况的评估也就可以转换为对图像均衡性的评估。为了与集群均衡性相对应,本文假设图像的均衡性与图像像素相关性,也就是图像亮度变化的剧烈程度一致。即图像像素相关性越小,图像亮度变化越大,图像越不均衡,相对应的集群也越不均衡。

观察图1,第一幅图只有1个灰度值,也就是亮度变化为0;第二幅图有4个灰度值,且4个灰度值较集中地分布在4个块中,存在亮度变化,但是亮度变化较小;第三幅图存在9个灰度值,每个灰度值也占据了较集中的一块,亮度值变化明显大于第二幅图;最后一幅图每个像素灰度值都不同的杂乱图,亮度值变化最为剧烈。从左到右,图片像素间的相关性从高到低,图像亮度值取值变化从0到剧烈,根据假设,图像越来越不均衡。那么第四幅图像对应的集群由于节点负载值千差万别,也一定处于不均衡状态。

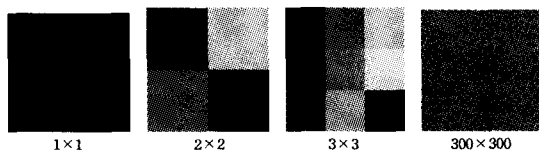


图1 不同亮度灰度图

1.2 均衡性对应关系的理论支撑

上述从负载均衡的本质与图像均衡特征入手,找到了负载均衡程度与图像均衡性的相对应关系。接下来要找到理论上的支撑,即表面上相似的负载均衡程度与图像均衡性是否存在本质上的内在联系。下面将用到熵及信息论的知识,通过熵作为桥梁,将集群负载均衡性与图像均衡性联系在一起。

熵是一种描述系统混乱程度的状态参数,在集群系统中也不例外,熵描述了集群系统的不均衡状态,并与集群系统均衡程度呈现反比例关系,最大熵值对应着集群负载不均衡态^[7]。

同时熵应用到图像数据中就是信息熵。在图像数据编码中,信息熵表示图像数据中的平均信息量,即不同灰度值出现概率的统计^[8]。平均信息量越低,不同灰度值出现得越少,则用来表示图像的灰度值的取值范围也越小,从而图像越易处于均衡状态。

根据 Charles H. Bennett 对 Maxwell's Demon 的重新解释,信息熵和系统熵是密切相关的;二者符号相反,取值呈正比关系。

如上分析可以得到以下结论:集群系统负载越均衡,熵值

越小,对应的集群负载映射灰度图信息熵也越小,平均信息量越低,则集群负载映射灰度图像越均衡(亮度变化越小)。这样就从理论上证明了负载均衡与图像均衡的相对应关系。

综上所述对负载均衡性的研究就可以转换为对图像均衡性的研究,只要将集群负载信息映射到一张灰度图上,就可以找到一种间接评估集群均衡的方式:通过图像均衡性来评估集群负载均衡性。

1.3 负载图像映射模型的建立

上面证明了负载均衡程度与图像均衡性存在相对应关系。下面将建立集群负载信息向灰度图的映射模型,为负载均衡性的研究提供基础。首先阐述图像数字化过程,然后找到一一对应关系,建立映射模型。

计算机为了处理物理图像,将图像转换为数字图像。同样为了分析集群整体负载状况,本文将整体负载值也转换为数字图像。图像的数字化包括采样和量化,相对应集群负载值的数字化也需要采样和量化。对应分析如下:

(1)图像数字化中,采样为空间坐标 (x, y) 的数字化,量化为幅值的数字化。

采样:图像在空间上的离散化处理。采样后的空间单元称为像素。

量化:灰度值的离散化处理。量化后的灰度等级就称为灰度级。

(2)相对应集群负载数字化中,采样为节点位置的数字化,量化为负载值的量化。

采样:集群在空间上的离散化处理。节点已是离散变量,所以这一步仅需要将节点按照坐标(机柜, IP)进行空间划分。采样后每个节点为一个像素单元。

量化:负载值的离散化处理。节点的负载值通常是节点多个资源的综合负载,通过归一化处理,并根据资源的重要程度设定权值,最终得到一个综合负载。负载值的取值范围称为负载级。本文为了简化研究对象采用灰度图,将负载值量化到0到255,则负载级为256,其中0最暗(全黑),255最亮(全白)。

通过采样和量化,云计算集群节点负载值将被映射为一张数字灰度图像,如 100×100 的图像对应于一个1万个节点的云计算集群。

2 集群负载图像均衡性分析

基于上述集群负载图像映射模型,集群负载状况被映射为一张灰度图。对集群负载均衡性的研究转化为对图像均衡性的研究。下面通过 Matlab 模拟仿真^[9]对图像均衡性进行研究,进而评估集群均衡性。主要分析图像压缩比、图像信息熵、图像 haar 小波变化与图像均衡性的关系。引入以上图像处理方法的原因如下:

(1)图像压缩

本文引入图像压缩方法,是因为压缩后图像的大小与图像像素相关性有关。依据1.1节图像像素相关性图像均衡性的关系,可以推测图像中相邻像素的相关性越强,图像的信息量越小,数据冗余越大,图像信息压缩的潜力越大,系统的

负载均衡度越好,反之图像的压缩比越小,系统的负载均衡度越差。

图像压缩^[14]实质就是去除图像数据的冗余性,而图像冗余主要是空间冗余和编码冗余。空间冗余即图像数据的相关性可以通过图像压缩比反映出空间冗余情况,进一步反映图像的均衡性。

(2) 图像信息熵

本文引入信息熵的概念,是因为信息熵是一个概率统计量,而负载均衡过程又可以被模拟成一个概率统计过程(均衡负载的主要目的是在并发访问峰值时,减少用户等待的响应时间,保证集群各节点负载程度均衡性,减少负载过重或过轻的节点,本质上就是保证集群中每个节点被访问的概率大致相同),所以可以用信息熵来度量负载过程中的平均信息量。但是信息熵具有局限性,它只统计了负载状态的出现概率,忽略了负载状态的大小。所以将信息熵应用在图像均衡性辅助性评估中。

信息熵是信息论中用于度量信息量的一个概念^[14]。信息熵计算公式如下:

$$H(X) = -\sum p(X_i) \log_2 [p(x_i)] \quad (1)$$

根据式(1),当 256 级灰度出现的概率相等时,可以达到图像的最大熵值 8,所以灰度图的信息熵的取值范围为 1~8。

(3) haar 小波分解

根据 1.1 节的假设,图像的均衡性可以用图像亮度变化的剧烈程度描述,而图像不均衡对应着图像的高频部分,均衡对应着图像的低频部分。小波变换能够将图像的高低频分开,由此本文引入小波变换,对负载映射图的局部均衡性进行评估。

2.1 试验环境

试验中,如果不做特殊说明,将以 1000×1000 像素大小的 8 位灰度图作为研究对象,映射 100 万台节点的集群。节点负载值取值范围对应的像素取值范围为 0~255。试验中选择标准无损压缩工具 WinRAR 对图像进行压缩^[10]分析。

2.2 试验步骤及结果分析

2.2.1 图像压缩比、图像信息熵与图像均衡性关系试验

我们将 1000×1000 大小的图片进行 1 到 50 等分的像素相关性切割,分别统计不同等分灰度级别下图像的压缩比和信息熵。图 2 为压缩比趋势图。

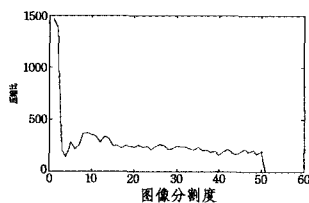


图 2 灰度分割图图像压缩比趋势

图 2 中 1 到 5 的压缩比变化比较大,从 5 开始到 50,压缩比变化趋势较缓,到最后杂乱图,压缩比逼近 1。从图 3 可以直观看出,5 以后的图片均衡性(亮度变化)趋近于一致。所以压缩比也趋近于一致。这验证了图像压缩比对图像均衡性具有很好的整体评估作用。理想条件下数据压缩比的取值范

围为:1 到文件大小。当整幅图只有一个像素时,压缩比最大,接近文件大小;当整幅图没有相近像素时,压缩比最小,趋近于 1。但是实际环境中,由于压缩后文件还存在描述压缩相关信息的文件头,因此最大压缩比只能趋近文件大小,而无法压缩的图由于文件头的增加,最小压缩比会低于 1 并趋近于 1。本试验中,对 1000×1000 的灰度图进行压缩的实际压缩比取值范围为:1~1500。

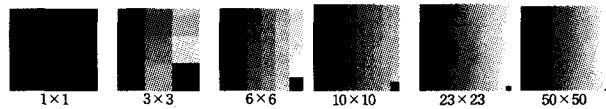


图 3 灰度分割图

图 4 是上述 50 幅图像的信息熵趋势图,可以看到信息熵随着灰度值取值数量的增加也不断增加,直到趋近 8,而 8 正好是图像的最大熵值。

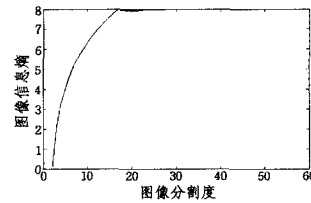


图 4 灰度分割图图像信息熵趋势

根据信息论,信息熵越低,平均信息量越低,则压缩比越大。而根据对图 1 和图 2 的对比,图像分割度到 5 以后,信息熵还在不断增加,而压缩比基本趋于不变。这说明信息熵只能评估微观的混乱程度即图像平均信息量,并不能评估出图像整体的均衡性,相比较,图像压缩比更能全面地评估出图像的整体均衡性。从而图像压缩比也就能更全面地评估出集群负载状态的整体均衡性。

2.2.2 局部不均衡对图像压缩比与信息熵的影响试验

针对图 3 中的 3×3 图像进行了进一步的深入分析,通过局部不均衡的引入,观察局部不均衡对图像压缩比、信息熵与图像均衡性的影响。3×3 图像中有 9 块均衡块。

(1)首先对一个均衡模块进行破坏,分别进行一个杂点及多个杂点的干扰,并对杂点出现的位置进行控制,观察杂点处于均衡模块中间及边缘造成的压缩比与信息量之间的关系。通过表 1 试验数据可以分析出,不均衡出现在局部均衡的中间位置与出现在边缘位置相比,信息的不确定性更小,压缩比更大。

表 1 单个模块不均衡数据分析表

干扰种类	干扰位置	压缩比	信息熵
1 杂点	中间	135.5197181	3.1699
	边缘	135.171668	
3 杂点	中间	136.2026696	3.1701
	边缘	135.8695652	
10 杂点	中间	31.5885902	3.1711
	边缘	31.54972236	
100 杂点	中间	30.88803089	3.2184
	边缘	30.61380683	

(2)然后对多个均匀模块进行破坏。通过表 2 试验数据可以看到图像均衡性与图像压缩比的正比例关系及压缩比与信息熵之间的反比例关系,但是却无法具体分析出局部不均衡。

表2 多个模块不均衡数据分析表

干扰类型	原始大小	压缩后大小	压缩比	信息熵
1 局部随机	1000000	120058	8.329308	4.0235
2 局部随机	1000000	231064	4.327805	4.6739
3 局部随机	1000000	342148	2.922712	5.2461
4 局部随机	1000000	453036	2.20733	5.7708
5 局部随机	1000000	451894	2.212908	6.2593
6 局部随机	1000000	560861	1.782973	6.7221
7 局部随机	1000000	561911	1.779641	7.1626
8 局部随机	1000000	451688	2.213918	7.5849
9 局部随机	1000000	450875	2.21791	7.9937

通过上述两个试验发现,图像压缩比仅能对图像进行整体性的评估,无法反映局部负载不均衡的情况。

2.2.3 haar 小波变换对局部不均衡性的评估试验

图像的高低频是对图像像素间亮度变化的一种度量方法^[11]。通过将小波分析方法应用到负载映射图中,可以较好地 从图像局部均衡性的评估得到集群负载均衡性的评估。

1. 小波变换概念介绍

通常不同小波的选择会对处理结果产生不同的影响。试验使用 haar 小波对图像进行分析^[12]。

1 幅图像经过小波分解后会得到不同频率特性和方向特性的 4 幅细节图^[14]:低频分量图(C^1 ,集中了原图的 90%以上的能量^[13])、水平边缘分量图($D^{1,h}$,保留了水平方向损失的信息)、垂直边缘分量图($D^{1,v}$,保留了垂直方向损失的信息)、对角边缘分量图($D^{1,d}$,对应 45°和 135°方向损失的信息),如图 5 所示。

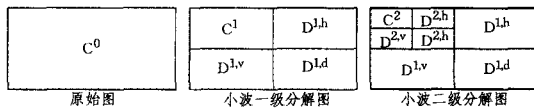


图5 二维小波分解图

(2) haar 小波变换对负载映射图的分析

通过 matlab 的 wavemenu 工具,对图像进行多分辨率的 haar 小波变换。在不断的分解中,概貌图越来越粗,细节图越来越细。图 6 是由图 3 中 3×3 图像进行 5 级小波变换得到的多分辨率图。L1-L5 是分解级数。第一列为逼近原始图像的低频图,第二列为水平细节图,第三列为对角线细节图,最后一列为垂直细节图。细节图中的亮色区域正好是原始图中像素相关性最小的位置,也就是图像中最不均衡的位置。

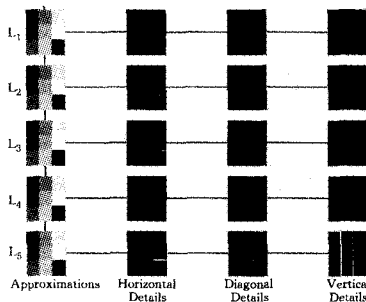


图6 图像的多分辨率小波分解图

通过观察图像发现,三列高频细节图随着级数的不断增加,细节越来越突出,不均衡性越来越明显;相反低频图则越来越失真。上述现象与小波原理完全吻合。

对应负载均衡图,水平方向代表同一机柜的节点,那么通过水平细节图,就可以推测出某一机柜的负载均衡状况;垂直方向代表相邻机柜的节点,通过垂直细节图也可以评估出机柜间的负载均衡性。例如在由 100 万台节点(1000×1000)、1000 个机柜组成的集群中,可以推测出 660-670 机柜的内部整体负载不均衡。

图 7 是由图 3 中 9×9 图像进行 5 级小波变换得到的多级分辨率图。观察图像发现,高频细节图并不是随着级数的不断增加而越来越突出细节,而是在三级分解图中达到顶峰,随后高频分解图又失去了细节描述。

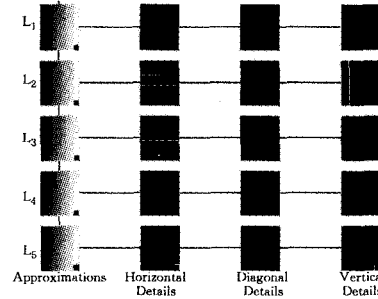


图7 9×9 图像的多分辨率小波分解图

根据 2.2.1 节的试验,知道图像 9×9 的整体均衡性要大于 3×3 的整体均衡性。可以推测,小波分解级数并不是越大越好,而是与图像整体均衡性有关。当图像整体较均衡时,小波分解级数只需要 2 到 3 级就可以定位到局部不均衡处;当图像整体不均衡时,小波分解级数越高,局部不均衡的定位越准确。

3 负载评估方法提出

通过上述 3 个试验,发觉将图像信息熵、图像压缩比、小波变换,3 者综合可以对图像均衡性(负载均衡性)进行较为全面的评估。图像压缩比可以得到宏观的负载图像整体均衡性评估,图像信息熵可以对负载图像微观的混乱程度(平均信息量)进行较好的评估,图像的小波变换可以对图像局部均衡性进行评估(需要整体均衡性的辅助)。

根据上面提出的负载图像映射模型及对图像均衡性的试验分析,下面提出一种基于图像分析的集群负载评估方法。针对具备监控系统的云集群来说,具体实现方法如下:

- (1)采集某一时间所有节点的负载信息。
- (2)对每个节点的负载情况值进行 0~255 的量化。

为了与灰度图的对应,将每个节点的当前负载情况分为 256 个等级,通过权重求出综合负载值,并将负载值映射到 0~255。

(3)将每个节点的负载量化值看作是图像中的一个像素的灰度值。

(4)将云计算集群所有节点的负载量化值以“机柜”为行坐标,“ip”为列坐标,映射为一张大小为 m 字节的灰度图。

(5)对这张灰度图进行无损压缩,得到压缩后图像大小 n 。

(6)计算负载映射灰度图像的压缩比 m/n 。压缩比越大负载越均衡。

根据试验,100 万台节点的负载状态级别暂时划分为 3 个:

均衡(压缩比范围:1000~1500),较均衡(压缩比范围:100~1000),不均衡(压缩比范围:1~100)。

(7)计算图像信息熵。信息熵越小,越可能处于较均衡状态。

根据试验,100万台节点映射图的信息熵的取值范围为:1~8。

(8)根据步骤(6)划分的图像整体均衡性,设定小波变换的分解级数,如表3所列。

表3 图像均衡性与小波分解级数对应表

图像整体均衡性	小波分解级数
均衡	2~3
较均衡	3~4
不均衡	4~5

然后对图像进行指定级数的 haar 小波变化,根据不同分辨率的高频细节图定位局部不均衡处。

通过此方法可以快速评估出大型集群的负载均衡状况。此方法中得到的几个参数可以应用到负载均衡算法中的决策中,通过对集群整体性的评估得到全局的负载策略。

4 负载评估方法实验分析

为了对负载评估方法进行验证,下面将此方法应用到100台真实节点的实验平台上。

实验通过将100台节点的综合负载数据按照(机柜,IP)存入二维矩阵中,将矩阵映射为一张灰度图,通过亮度、压缩比、信息熵快速评估集群负载的状况。

实验中以5行(5机柜),20列(1机柜20台)的规则将100台节点的负载值映射到5×20的矩阵中,最终映射为灰度图。图8中的(a)图为100台节点上没有应用运行时的状态,即负载较轻的状态;图8中的(b)图为启用20台服务器承载应用时的状态,即负载不均衡的状态。



图8 100台节点负载映射图

通过观察可以看到图(a)较亮较均衡,图(b)上沿颜色较深,其他部分较亮较均衡,观察与实验前提相符:即图(a)对应的集群负载较轻较均衡,图(b)对应的集群第一个机柜中的20台节点负载较重造成集群整体不均衡。下面通过压缩比与信息熵进行分析。

表4 100台节点均衡数据分析表

图像	信息熵	压缩比
(a)	3.0441	2.5946857
(b)	3.9816	2.5156379

观察表4可以看到,图(a)信息熵较小于图(b),图(a)压缩比大于图(b)。根据上节得出的结论:信息熵越小,图像越

易趋于均衡;图像越均衡,图像压缩比越大。通过结论可以反推出图(a)较图(b)均衡,且从图像中能直观看出负载较重处。

实验表明,图像负载映射评估方法能够较好地应用到实际环境中。由于节点数目较少造成矩阵行数较少,本实验不适用多级 haar 小波变换进行分析。节点越庞大,由于可以应用到小波变换,评估效果会更好。

结束语 本文提出的集群负载评估方法可以对系统的负载均衡情况较快给出整体评估,同时兼顾了局部不均衡状态的评估。但是由于按(机柜,IP)映射的集群矩阵节点间的空间相关性较弱,因此不能忽略由于映射成图像造成的数据相关性对图像压缩比的影响。集群负载图像映射一方面直观地展示出了图像的均衡性,另一方面由于空间相关性的影响造成了评估方法的不精确性。如何能将集群节点间关联程度转换成空间相关性,从而降低映射过程中的扰乱信息的干扰,后期还需要深入的研究。

在相应的构建方法中,负载值量化等级、映射行列规则、压缩算法、压缩比与均衡度的映射关系、信息熵的计算方法、小波变换等,也需要在工程实践中不断验证与完善。

参考文献

- [1] 王鹏. 云计算关键技术与应用实例[M]. 北京:人民邮电出版社, 2009
- [2] 刘鹏. 云计算[M]. 北京:电子工业出版社, 2010
- [3] Gun Jiani, Bhuyan LN. Load balancing in a cluster-based web server for multimedia applications[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(11):1321-1334
- [4] 薛军,李增和,王云岚. 负载均衡技术的发展[J]. 小型微型计算机系统, 2003, 24(12):2100-2103
- [5] 王春娟,董丽丽,贾丽. Web 集群系统的负载均衡算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(2):102-104
- [6] 陈亮,王加阳. 基于粗糙集的负载均衡算法研究[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(1):101-104
- [7] 张学文. 组成论[M]. 北京:中国科学技术大学出版社, 2003
- [8] 周荫清. 信息理论基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002
- [9] 初青瑜. Matlab 在图像处理中的应用[J]. 信息技术与信息化, 2010(4):55-62
- [10] 李雷定,马铁华,尤文斌. 常用数据无损压缩算法分析[J]. 电子设计工程, 2009, 1(17):49-53
- [11] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京:科学出版社, 2001
- [12] 韩明华,叶如意. 基于小波变换的图像分解与重构编码的实现[J]. 微机发展, 2003, 13(11):125-127
- [13] 刘杨. 基于小波变换的图像压缩级数[J]. 多媒体技术, 2007, 24(263):112-118
- [14] 胡学龙,许开宇. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2006