

# 结合中值滤波的彩色自蛇模型在遥感图像放大的研究<sup>①</sup>

赵四能<sup>1,2</sup>, 张 丰<sup>1,2</sup>, 杜震洪<sup>1,2</sup>, 刘仁义<sup>2</sup>, 刘 南<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(浙江大学 浙江省资源与环境信息系统重点实验室, 杭州 310028)

<sup>2</sup>(浙江大学 地理信息科学研究所, 杭州 310027)

**摘 要:** 研究了彩色自蛇模型的形成过程, 对遥感 TM 图像进行了后处理放大处理, 采用最邻近点插值、双线性插值、三次样条插值、双立方插值、双二次插值。针对插值放大后的图像的边缘出现锯齿化和模糊化问题, 由于彩色自蛇模型本身不仅具有边缘锐化功能, 它可以消除边缘锯齿化和边缘模糊化问题, 而且具有去噪的能力。采用彩色自蛇模型进行后处理, 并对处理后的残余斑点进行研究, 结果采用了中值滤波的方式取得更好的效果, 并对含噪的遥感图像也有较好的放大效果, 实验结果证明该方法适于遥感图像的放大处理。

**关键词:** 遥感图像放大; 插值; 彩色自蛇模型; 非线性扩散; 边缘增强; 中值滤波

## Color Self-Snake Model with Median Filter in Remote Sensing Image to Magnification

ZHAO Si-Neng<sup>1,2</sup>, ZHANG Feng<sup>1,2</sup>, DU Zhen-Hong<sup>1,2</sup>, LIU Ren-Yi<sup>2</sup>, LIU Nan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Zhejiang Provincial Key Lab of GIS, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

<sup>2</sup>(Department of Geographic Information Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** This paper extends the nonlinear partial differential method in the field of the remote sensing image to magnification the scope of application, and research the post-processing on the remote sensing TM image magnifying using nearest neighbor interpolation, bilinear interpolation, cubic spline interpolation, cubic interpolation, biquad interpolation. For the reason that enlarge image causes jaggging and fuzzying using interpolate algorithm, we address the model of color self-snake which has not only the function of sharpening edge and eliminating jagged edges but also the function of the direction of diffusion, that is to say the ability of denoising. In addition, the residual spots generated by post-processing was put on median filtering method then achieved better magnifying result, also for the remote sensing images which contain noise. Experiment shows the method is suitable for amplification about remote sensing image processing.

**Key words:** remote sensing image magnification; interpolation; color self-snake model; nonlinear diffusion; edge-enhancement; median filter

图像放大有其自身的实用价值, 多光谱、高光谱遥感图像由于存在大量的波段, 同时由于传输信道带宽的限制, 使得各波段的分辨率限制较大, 为了获取有限分辨率的地物目标信息和边缘轮廓, 往往需要有效的方法改变已有图像的大小, 并使改变后的图像拥有更好的视觉效果, 为往后的分析研究提供便利。由于图像在形成、传输、接收和处理的过程中, 噪声存在于各个环节, 影响了图像质量, 使图像目标信息模

糊, 边缘特征淹没, 给往后的目标识别、边缘提取检测、地物分离等带来了困难。特别对含噪声的图像进行放大后处理并有效的去除噪声的影响, 也是一个需要解决的问题。

通常数字图像放大就是指增大原始图像的尺寸, 增加网格点密度, 对新增的网格点赋予合适的灰度值, 也就是进行插值, 它的基本思想就是用一些已知的光滑函数比如最近邻插值、双线性插值和双三次插值等

① 基金项目: 国家自然科学基金(410012227); 教育部博士点基金(200803350017); 浙江省自然科学基金(Y5090130)

收稿时间: 2011-04-16; 收到修改稿时间: 2011-05-30

根据一定的光滑性要求逼近原始图像。该放大模式的缺陷是放大后的图像存在边缘模糊和虚假的人工痕迹, 如果图像放大较高倍数时, 斑点、方块效应和灰度偏移等现象将会更加严重<sup>[1]</sup>, 并且各插值算法特性不同, 其中双线性插值有比较严重边缘锯齿化, 双二次插值有比较严重边缘模糊化, 而最近邻插值两方面都比较严重。小波内插法<sup>[2]</sup>效果较好, 不过图像会变得模糊、存在交替投影, 小波变换本身方向性差并发生扰频现象, 高频子带会丢失细节信息。分形插值的缺点是图像边缘会产生模糊。目前用偏微分方程处理图像已是一种比较精细的图像处理方法, 文献[1]提出了基于 PDE 的线性图像放大方法, 其放大模型是高斯热扩散方程, 该法一定程度解决了灰度偏移现象。高斯扩散本身没有局部自适应能力, 所以其放大图像存在边缘模糊, 清晰度和亮度减弱等问题。文献[3-4]分别采用了自蛇和彩色蛇模型作后处理, 并与文献[5]采用的方向扩散得到的结果进行对比研究, 认为彩色蛇模型会有更好的效果。文献[6]对 P-M 模型、TV 模型、自蛇模型、改进的自蛇模型进行了去噪研究。由于自蛇模型不仅对图像水平集进行平滑, 相当于沿曲率方向作方向扩散, 而且还有增强边缘的功能。并且矢量图像的边缘并不一定与各分量图像边缘相一致, 彩色自蛇模型特点是采用统一的彩色边缘函数来控制每一分量图像的扩散过程, 把各分量图像的非线性滤波过程关联起来, 比各分量图像单独运用自蛇模型更有效的保护及增强彩色图像的边缘, 本文针对遥感图像的特点, 使用彩色自蛇模型, 在该模型基础上对最邻近点插值、双线性插值、三次样条插值、双立方插值、双二次插值方法进行了对比研究, 并增加中值滤波过程, 实验结果显示, 图像的边缘锯齿化和边缘模糊化问题得到了很好解决, 有效提高了图像质量。在增加噪声的情况下, 该方法能有效克服噪声的影响, 也得到较好的图像质量。

### 1 从各向异性扩散到自蛇模型 (Self-Snake)

朱宁等人<sup>[1]</sup>提出采用热传导原理, 将图像的灰度值看作平面物体的温度分布, 把放大图像的灰度值看作由一些固定点提供热量的热传导过程, 对待填补像素值的确定过程比作为一个热扩散过程, 利用热传导过程的数学模型, 计算每个点处的灰度值, 最终实现图像放大。该模型不考虑图像自身的特性

和各部分差异, 认为放大过程中各部分的变化、处理过程、演化速度都相同, 是一种线性 PDE 图像放大方法。

为了改进线性方法的弊病, 从图像结构的特征出发, 减少对图像中物体边界的扩散, 达到去除噪声和更好地保持物体的边界。Perona 和 Malik<sup>[7]</sup>首先提出了各项同性非线性扩散方程称为 Perona-Malik 方程 (P-M 方程), 该方程的伟大就在于“传导系数”随图像  $P(x, y, t)$  的梯度变化而变化, 将图像滤波(扩散)与边缘检测( $(|\nabla P|)$  的计算)两个过程结合起来。

$$\begin{cases} \frac{\partial P(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}(g(|\nabla P|)\nabla P) \\ P(x, y, 0) = P_0(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\text{div}$  为散度算子,  $\nabla$  为梯度算子, 扩散系数  $g(\cdot)$  的取值随当前时刻  $t$  的图像  $P(x, y, t)$  变化而调整取值,  $g(\cdot)$  的取值不仅依赖于图像空间的位置  $(x, y)$ , 而且依赖时间  $t$ , 使得扩散过程始终依赖于图像的局部特性。该方程具备保护边缘的能力, 在图像平坦区域, 传输系数会自然增大, 平滑该区域的噪声; 在靠近图像边缘, 传输系数相应减小, 控制了边缘的模糊化。但该扩散容易导致横跨边缘的扩散, 使放大后部分地方也会出现模糊。起初 M. Kass 等人提出了图像分割 snake 模型<sup>[8]</sup>, 也称为活动轮廓模型 (active contour), 其过程是通过最小化一个封闭曲线的“能量”泛函。由于该模型的依赖项过多给求解带来了困难, V. Caselles 等人在解决此问题提出了不含自由参数的 GAC 模型 (geodesic active contour 测地线活动轮廓模型), 如果让图像的所有水平集线同时按 GAC 模型运动, 也就是使它自身的所有水平集按蛇模型运动, 所以称之为自蛇 (self-snake) 模型<sup>[9]</sup>

$$\frac{\partial P}{\partial t} = |\nabla P| \text{div} \left( g(|\nabla P|) \frac{\nabla P}{|\nabla P|} \right) \quad (2)$$

将式(2) 展开为两项, 得

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -g(|\nabla P|)k|\nabla P| + \nabla g(|\nabla P|) \bullet \nabla P = F_{diff} + F_{shock} \quad (3)$$

$$F_{diff} = g(|\nabla P|)|\nabla P| \text{div} \left( \frac{\nabla P}{|\nabla P|} \right) \quad (4)$$

$$F_{shock} = \nabla g(|\nabla P|) \bullet \nabla P$$

其中  $g(|\nabla P|)$  为边缘停止函数<sup>[10]</sup>,  $K$  为曲率,  $F_{diff}$  为

带边缘停止的方向扩散项,  $F_{shock}$  为有边缘增强作用的冲击项<sup>[9]</sup>, 它是由 Osher 和 Rudin<sup>[11]</sup>提出的一种图像增强方法, 也称为冲击滤波器(shock filter)。由于它可产生逆扩散效应, 因而具有增强边缘的功能。由式(3)可以看出, self-snake 模型既可以平滑图像, 也可以有效抑制边缘模糊化, 有效增强边缘。

从以上各模型可以认识到, 采用方向扩散能抑制边缘锯齿化效应, 而采用“自蛇”模型在抑制边缘锯齿化和模糊化效应两方面都有较好性能。self-snake 模型中含有  $F_{diff}$  和  $F_{shock}$  项, 使该模型具有曲率运动和边缘增强双重功能, 不仅得到光滑的水平集而且得到陡峭的边缘以满足放大图像的要求。

## 2 从自蛇模型到彩色自蛇模型

对彩色图像的滤波, 传统的方法是对各分量图像分别进行滤波, 再合成彩色图像。如果采用非线性滤波, 此种方法是行不通的, 因为它要求平滑的同时保护图像的边缘不被模糊化, 但彩色图像的边缘不一定与各分量的边缘相一致, 为了关联各分量同时保护边缘的目的, 需要把上述的非线性扩散后处理过程推广到彩色图像。文献[4]中采用的是对 RGB 分量图像分别独立地进行方向扩散, 并提出将彩色图像作为 5 维空间中的单一簇(manifold)处理方法, 就察觉不到差别。但彩色自蛇模型更能保证彩色图像和各分量图像的水平集之间的任何差异, 不会导致后处理输出图像的形状失真(或模糊化), 因此采用该模型如(5)所示, 并进行彩色图像放大的后处理, 是更为理想的方法。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \text{div} \left\{ g_{color} \frac{\nabla P(i)}{|\nabla P(i)|} \right\} |\nabla P(i)|, i=1, \dots, m \quad (5)$$

从上式偏微分方程组, 可把函数  $g_{color}$  作为纽带联系各个分量, 同时还要综合考察彩色矢量图像<sup>[12]</sup>

$$P(x, y) = \{P^{(1)}(x, y), \dots, P^{(m)}(x, y)\} \quad (6)$$

的变化, 可定义矩阵

$$A = \begin{vmatrix} M & F \\ F & N \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial P^{(i)}}{\partial x} \right)^2 & \sum_{i=1}^m \frac{\partial P^{(i)}}{\partial x} \frac{\partial P^{(i)}}{\partial y} \\ \sum_{i=1}^m \frac{\partial P^{(i)}}{\partial x} \frac{\partial P^{(i)}}{\partial y} & \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial P^{(i)}}{\partial y} \right)^2 \end{vmatrix} \quad (7)$$

求得上式的本征值  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,  $\lambda_1 > \lambda_2$ ;

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left( M + N \pm \sqrt{(M-N)^2 + 4F^2} \right) \quad (8)$$

以及其对应的本征矢:

$$\vec{v}_1 = (\cos \theta, \sin \theta); \vec{v}_2 = (-\sin \theta, \cos \theta) \quad (9)$$

式中

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2F}{M-N} \quad (10)$$

所以, 沿  $\vec{v}_2$  的积分曲线可作为矢量图像的水平集, 而差值  $(\lambda_1 - \lambda_2)$  与灰度图像的梯度模值  $|\nabla I|^2$  的意义相类似, 用它作为矢量图像的“边缘检测器”, 因此(5)式中的  $g_{color}$ , 可进一步表示为

$$g_{color} = g(\lambda_1 - \lambda_2) \quad (11)$$

文献[11]给出了具体的数值实现过程, 本文不再详述。采用彩色自蛇模型放大算法步骤如下:

- 1) 先进行初始化操作, 读入待插值放大的彩色图像。
- 2) 令  $\lambda = \sqrt{2} - 1$ , 迭代步长  $\Delta t = 0.05$
- 3) 接着计算彩色图像的第一基本形式矩阵 A 的各元素 M, N 和 F, 根据(8)式计算本征值, 得到边缘函数表达式  $g(\lambda_1 - \lambda_2)$ 。
- 4) 再进行计算各分量图像中各像素的修正值。
- 5) 进一步恢复各分量图像锚点像素值, 使它与原图像中的值相等, 这样保证后处理只改变插值点的像素值。
- 6) 重复第 3) 步, 直到获得满意效果。

## 3 实验结果与分析

本文选用 EARDAS 软件自带的美国科罗拉多州 canon city 的 TM 遥感图像, 选取 3、4、5 三个波段合成初始彩色图像, 并进行缩小 4 倍处理(图 1), 为了更好的表现各算法的性能, 统一放大 4 倍(实验参数: 时间步长  $\Delta t = 5$ , 迭代次数  $N = 100$ ), 分别采用最

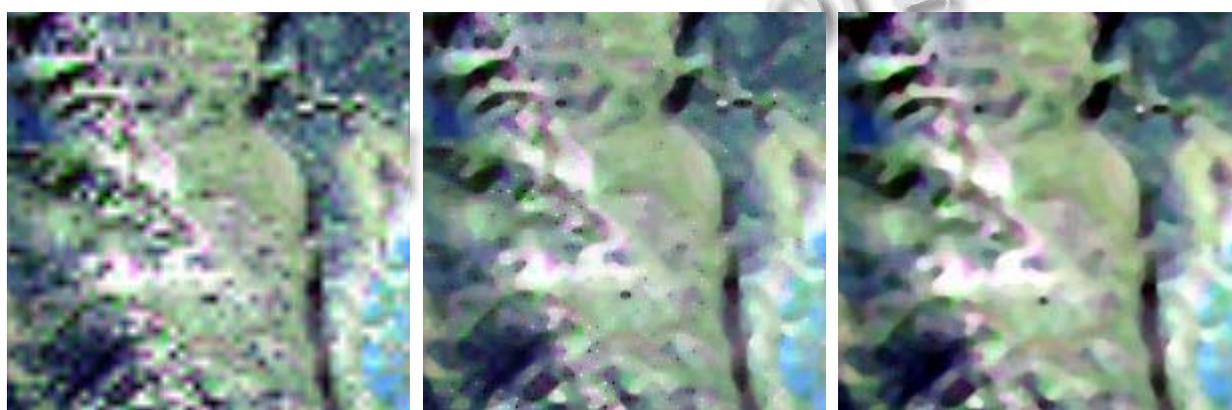
邻近点插值(nearest)、双线性插值(bilinear)、三次样条插值(spline)、双立方插值(cubic)、双二次插值(biquad), 再用 MSE(均方误差)、SNR(信噪比)、PSNR(峰值信噪比)指标计算放大 4 倍后的图像与最初的原图进行比较分析。由于篇幅有限, 只给

出了双线性插值部分的图片,从图2(选取左上部分)为双线性插值后的图像及通过彩色自蛇处理和中值滤波的结果分析来看,双线性插值后的图像较差,其他方法实验结果观察,插值后都存在大量的锯齿和块状物,通过彩色自蛇处理后消除了锯齿问题,并取得了很好的边缘,较好的解决了边缘锯齿和模糊化问题,但还是存在部分斑点残余,本文通过实验采用了中值滤波、维纳滤波等方法,表一可以看到,维纳滤波的MSE除双线性插值都低于中值滤波,PSNR、SNR除双线性插值都高于中值滤波,但图上的斑点并未完滤除,

影响图像质量,不适于彩色自蛇处理后的平滑,因篇幅问题,图像不再给出。所以采用中值滤波较适于并能完全消除残余斑点。



图1 为缩小4倍后的TM影像

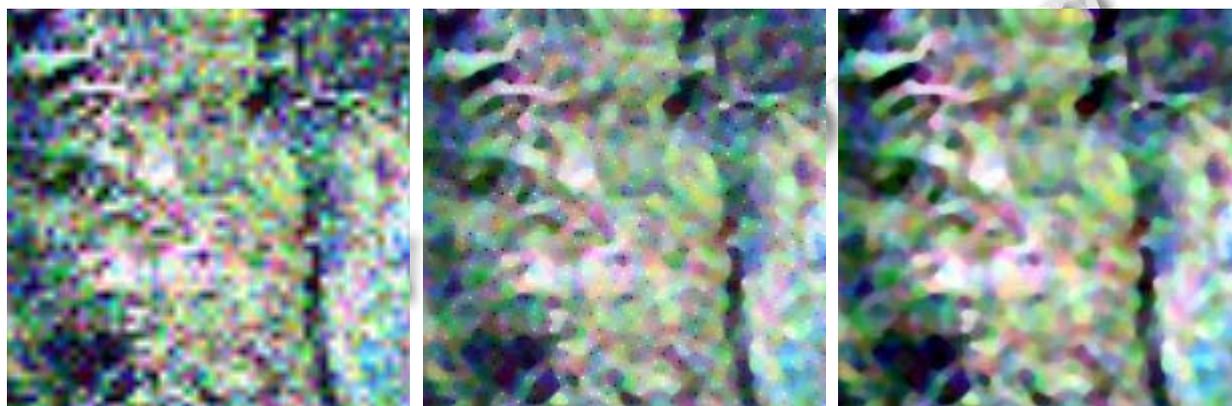


(a)双线性插值图像

(b)彩色自蛇处理后结果

(c)中值滤波后结果

图2 双线性插值图像及处理、结果



(a)增加0.03 高斯白噪声后的双线性插值图像

(b)彩色自蛇处理后结果

(c)中值滤波后结果

图3 增加0.03 高斯白噪声后的双线性插值图像及处理结果

表1 各插值算法计算后的结果

| 指标      | 无噪      |         | 中值滤波    |         |         | 维纳滤波    |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | PSNR①   | PSNR②   | MSE     | SNR     | PSNR    | MSE     | SNR     | PSNR    |
| nearest | 14.9150 | 16.2980 | 38.4021 | 12.1646 | 16.4466 | 38.3952 | 12.1662 | 16.4482 |
| spline  | 17.2983 | 16.3483 | 40.0107 | 11.8079 | 16.0900 | 39.9405 | 11.8233 | 16.1053 |

|          |         |         |         |         |         |         |         |         |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| cubic    | 16.4665 | 16.2094 | 39.6170 | 11.8939 | 16.1760 | 39.6135 | 11.8948 | 16.1768 |
| bilinear | 15.9158 | 16.2346 | 38.6932 | 12.0990 | 16.3810 | 38.8432 | 12.0655 | 16.3475 |
| biquad   | 15.9618 | 15.6296 | 44.0255 | 10.9780 | 15.2601 | 43.6828 | 11.0460 | 15.3280 |

表 2 含噪情况下的计算结果

| 含噪       | 含 0.01 高斯白噪声 |         | 中值滤波    | 含 0.03 高斯白噪声 |         | 中值滤波    | 含 0.05 高斯白噪声 |         | 中值滤波    |
|----------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
|          | PSNR①        | PSNR②   | PSNR    | PSNR①        | PSNR②   | PSNR    | PSNR①        | PSNR②   | PSNR    |
| nearest  | 13.9678      | 15.8328 | 16.0362 | 12.5493      | 14.8720 | 15.1459 | 11.6065      | 14.0791 | 14.3784 |
| spline   | 16.4345      | 15.7097 | 15.7154 | 15.0252      | 14.9102 | 14.9343 | 14.7004      | 14.1683 | 14.1988 |
| cubic    | 15.6078      | 15.6577 | 15.7946 | 14.7039      | 14.9084 | 15.0851 | 13.9790      | 14.3473 | 14.4637 |
| bilinear | 15.2841      | 15.8394 | 16.0443 | 14.3376      | 15.1665 | 15.4556 | 13.6284      | 14.5894 | 14.9275 |
| biquad   | 15.3052      | 15.0032 | 14.9337 | 14.2890      | 14.3245 | 14.3003 | 13.8715      | 13.8671 | 13.8373 |

说明：表中各指标 PSNR 等，为分别计算 R、G、B 分量的图像的 PSNR，再求平均值

PSNR①表示插值后的图像与初始图像的计算结果 PSNR②表示插值后的图像再运用彩色自蛇处理后的计算结果

为了分析该模型在有噪情况下的性能，分别增加了方差为 0.01、0.03、0.05 的高斯白噪声，通过对比大量计算后的图像，图 3（选取左上部分）为增加 0.03 噪声并插值后的图像及通过彩色自蛇处理和中值滤波的结果，可以看到噪声的干扰一定程度上影响了放大后图像的质量，通过彩色自蛇处理后，斑点比无噪时要更多，但是边缘锯齿化和边缘模糊化问题在有噪情况的图像也能得到很好的消除，说明彩色自蛇模型具有滤波的功能，再进一步通过中值滤波能较好的消除斑点。从表 1、表 2 分析我们可以看到除双二次插值外的其它插值方法的 PSNR 在彩色自蛇处理和中值滤波后表现较好，但是随着的噪声的加大 PSNR 表现都很快变差，最邻近点插值下降最快，但是双线性插值在不断加大的噪声中表现出了较好的适应能力，最终处于最好水平，比较适应于遥感图像的放大处理，三次样条插值、双立方插值后的图像 PSNR 处于中间状态，无噪、含噪时也有较明显方块效应，通过彩色自蛇处理后，边缘锯齿化和边缘模糊化问题较双线性插值差。最后分析一下双二次插值，该方法效果总体不是很理想，一直处于较低的水平，不适于遥感图像中的使用。

#### 4 总结

本文采用以上各种插值方法，再通过彩色自蛇处理后，都可以较好的解决了遥感图像放大后的边缘锯齿和边缘模糊化问题，使放大后的图像具有光滑的水

平集和陡峭的边缘。并通过中值滤波后可以得到较好的图像质量，噪声的影响始终是一个很大的问题，本文增加了噪声的影响（从 0.01 到 0.05 的高斯白噪声），也能得到较好的边缘保持能力，因为彩色自蛇模型本身不仅具有边缘锐化功能可以抑制插值放大后出现的边缘锯齿化和边缘模糊化问题，而且具有方向扩散的功能，本身就具有去噪的能力，所以本方法在有噪声的遥感图像放大的后处理中是更效的，针对后期存在少量残余斑点，本文引进了中值滤波方法，较完美的解决了图像斑点问题，为多光谱、高光谱遥感图像的后处理提高的一套有效的方法。

#### 参考文献

- 1 朱宁,吴静,王忠谦.图像放大的偏微分方程方法.计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(9):1941-1945.
- 2 Carey WK, Chuang DB, Hemami SS. Regularity preserving image interpolation. IEEE Trans Image Proc, 1999,8(9): 1293-1297.
- 3 祝轩,张中华,王蕾,雷文娟.基于 self-snake 模型的图像放大.西北大学学报(自然科学版),2010,40(1):73-75.
- 4 艾娜,彭进业,王大凯.彩色自蛇模型在图像放大中的应用.陕西科技大学学报(自然科学版),2008,26(3):112-116.
- 5 G.sapiro. Geometric Partial Differential Equations and Image Analysis. Cambridge University Press, 2001.
- 6 周浩,晏小飞.基于改进"自蛇"模型的图像去噪方法.科学技术与工程,2010,10(2):515-518.

（下转第 54 页）

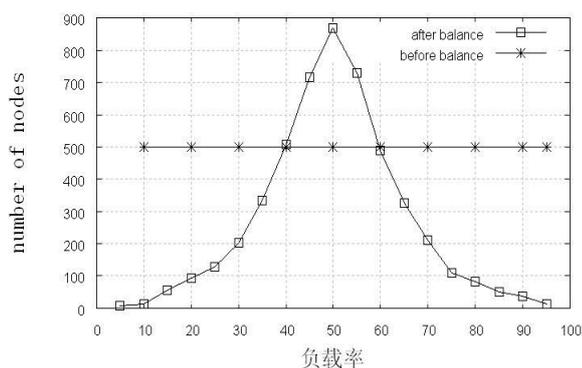


图3 负载均衡策略前后

### 3 结语

本文提出了一种负载敏感的树形混合层次覆盖网,为解决传统的结构化P2P网络的负载均衡问题提出了一种新的思路。与一些普通的多叉树的混合层次网络相比,Treap具备一个二叉堆的可合并性与可分离性,从而解决了单点失效的问题。同时,该网络也可以独立运作,提供一个动态P2P网络的基本功能。经过仿真模拟,该方案切实可行且运行良好。在此覆盖网协议的基础上,可以考虑将其与传统的结构化P2P网络相结合,深入的探讨不同负载率分布的情况下,

不同负载均衡策略的有效性。

### 参考文献

- 1 A-Theotokis S, Spinellis D. A Survey of P2P Content Distribution Technologies. ACM Computing Surveys, December,2004,36(4):335-371.
- 2 Xia Y, Chen SG, Korgaonkar V. Load Balancing with Multiple Hash Functions in P2P Networks. Proc. of the 12th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2006.
- 3 Godfrey B, lakshiminarayanan K, et al. Load Balancing in Dynamic Structured P2P Systems. Proc. of 2nd International Workshop on P2P Systems.2003.
- 4 Zhu YW, Hu YM. Towards Efficient Load Balancing in Structured P2P Systems. Proc. of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004.
- 5 熊伟,谢冬青.一种结构化P2P协议中的自适应负载均衡方法.软件学报,2009,20(3):660-670.
- 6 Martinez C, Rouva S. Randomized Binary Search Trees. Journal of ACM, 1998, 45(3).
- 7 Perona P, Malik J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine intelligence PAMI,1990,12:629-639.
- 8 M Kass, A Witkin D, Terzopoulos. Snakes: Active contour models. International Journal of Computer Vision, 1988,1(4):11.
- 9 王大凯,侯榆青,彭进业.图像处理中的偏微分方程方法.北京:科学出版社,2008.
- 10 祝轩,周明全,朱春香,等.曲率驱动与边缘停止相结合的非线性扩散及其在图像去噪中的应用.光子学报,2008,37(3):609-612.
- 11 Osher S, Rudin LI. Feature oriented image enhancement using shock filters. SIAM.J. Num. AnaL,1990,(27)919-940.
- 12 Ghung DH, Sapiro G. On the level lines and geometry of vector-valued images. IEEE, IP,2000,9(7):241-243.
- 13 陆金甫,关治.偏微分方程数值解法.第2版.北京:清华大学出版社,2004.254-256.

(上接第45页)