

文章编号: 1000-7598-(2006)12-2294-05

多尺度数字高程模型

唐新建^{1,2}, 任伟中², 王川婴², 朱同林^{1,3}

(1.华中科技大学, 武汉 430074; 2.中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 3.华南农业大学 信息学院, 广州 510642)

摘 要: 以岩土工程边坡数值模拟仿真可视化研究对象, 分析、研究了数字高程模型(DEM)和样条函数。将非均匀 B 样条曲面拟合和准均匀 B 样条小波多尺度分解结合起来, 实现多尺度 DEM 地形建模方法, 设计了相应的算法。实验结果表明, 其建模造型效果逼真, 多尺度分辨率明显, 是一种高效实用的建模方法。

关 键 词: 多尺度 DEM; 样条函数; 小波

中图分类号: TB 115 **文献标识码:** A

Multi-scale digital elevation model approach

TANG Xin-jian^{1,2}, REN Wei-zhong², WANG Chuan-ying², ZHU Tong-lin^{1,3}

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Information College, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The real-time modeling and rambling on the multi-scale and different resolution digital elevation model (DEM) are very important in the geographic information system (GIS) technique; but, simultaneously, it is also of difficulties in algorithmic programming. Herein both DEM and spline functions are analyzed and studied in rather detailed fashion with more attentions to the visualization and numerical simulation of geotechnical slope objects. By banding together both the approaches, which are nonuniform B-spline surface fitting and quasi-uniform B-spline wavelet multi-scale decomposition, the modeling multi-scale digital elevation model (MsDEM) is performed; and the related algorithm is derived. The proposed approach, MsDEM, is applied to a visualized simulation of the slide DEM, which is based on the field data of Hanjiaya slope located in mountains in one constructing Wuhan-Shiyan Highway. The results manifest that the algorithm modeling is realistic and the multi-scale resolution is visible. The proposed modeling approach is efficient and promising.

Key words: muti-scale digital elevation model (MsDEM); spline function; wavelets

1 引 言

数字高程模型(Digital Elevation Model—DEM)是一种表示地形在三维空间中连续起伏状态的数字模型^[1], 是各种信息的载体, 是地理信息系统(geographic information system—GIS)技术中最重要的内容。近年来, 随着岩土力学学科的高速发展, 岩土力学学科信息化、数字化, 以及学科交叉研究的深入, 如岩体地层, 岩土边坡工程、滑坡治理的数值模拟仿真, 边坡工程地质的信息管理和可视化研究^[2,3,11,17], 对 DEM 提出了更多的要求, 同时也扩展了它的应用范围。DEM 已成为现代岩土力学与工程的重要研究内容之一。

根据不同数据集的不同特性, DEM 可以使用一

个或多个函数对地形进行表示。这个数学函数通常被认为是内插函数。这种对地形或地形表面进行表达的各种处理可认为是地形或地形表面重建或建模, 重建的地形表面就是 DEM 表面。因此, 地形表面的数字重建就是 DEM 表面重建或 DEM 表面生成。当 DEM 表面建模后, 模型上任一点的高程信息可从 DEM 表面上获得。DEM 表面可以用以下数学函数来描述:

$$z = f(x, y)$$

实现这个表达式最常见的是通用多项式函数:

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + \cdots + a_{10}x^4 + a_{11}y^4 + a_{12}x^3y + a_{13}x^2y^2 + a_{14}xy^3 + a_{15}x^5 + \cdots$$

对于某个特定建模程序, 在建立 DEM 实际表面时,

收稿日期: 2006-02-08

作者简介: 唐新建, 男, 副研究员, 从事小波分析方法及其在岩土工程中的应用, 滑坡治理的数值模拟仿真。

一般只使用函数的其中几项, 并不一定需要这个函数中的所有项, 而某一项的选择则由系统设计者或实现者根据某一特定的地形模型考虑确定。

通用多项式中每一项图形都有自己的特征, 通过对这些特定项的选用, 可建立具有独特特征的 DEM 地形表面。不过要对一完整的自然景物(如山体、高边坡和滑坡等)选择适当多项式进行描绘而使其效果与实际景物非常接近, 往往是一件十分困难的事。但我们可以退一步去想, 假设所有自然景物表面在每一局部区域都用低于某固定次数(如二次或三次)的多项式来逼近或拟合, 然后用已知数据来求出局部区域的多项式系数, 这就可利用所谓样条插值方法(本文用三次 B 样条方法)。普通的三次 B 样条方法对端点也就是边界效果差, 而在岩土工程中的高边坡、滑坡数值仿真中对边界描绘有要求, 这使三次 B 样条的使用受到限制。因此, 引发作者使用准均匀样条函数来对已获取的规则或不规则网格数据进行拟合, 以获得满意效果模型。

在虚拟地景环境的建立和应用过程中, “实时”是一个重要的效果指标, 其数据准备过程中地形模型的简化是关键技术之一。以 DEM 为数据源的简化方法很多, 从结果数据类型看, 简化方法大致可以分为 3 类: 1 类简化结果数据为三角网(TIN)^[1], 第 2 类简化结果数据为按树结构存放的不等距规则网^[6]。第 3 类是简化结果数据为与原始数据结构相同的等距规则网。在第 3 类方法中, 可以是简单的隔行抽取, 也可以是双线性内插, 卷积内插。文献[4, 7, 8]利用二进制和多进制小波对 DEM 数据进行了有损压缩, 这是将数字高程规则网格 DEM 看为一个 M 行 N 列图像, 每格网格焦点的高程值看为该像素点的灰度值, 根据图像的频率特征, 将 DEM 简化完全转换为二维图像的简化问题, 取得一定的效果, 但简化后的数据仍为一些离散的互相独立的数值, 不便于进行图形形状的变换, 影响数值仿真模型的视觉效果。为克服这个问题, 我们用准均匀样条小波来简化准均匀样条的控制点, 这样不仅保持了少数关键点的控制全局性质, 而且简化了控制点的个数, 光顺原样条曲面^[15], 且又可用多尺度、多分辨率功能来自动调节简化结果, 并保持原模型视觉效果。

2 B 样条曲线曲面

当 DEM 表面建模后, 模型上任一点的高程信息就可以从 DEM 表面上获得。因此, DEM 表面建模类似曲面几何造型, 从而可直接讨论非均匀 B 样

条曲线曲面造型方法。在实际应用中, 二阶连续的曲线曲面已能使工程问题得到较满意的解决, 因此本文只讨论三次 B 样条, 而采用三次非均匀 B 样条。

2.1 非均匀 B 样条曲线曲面

B 样条的递推定义具有普遍意义, 为计算非均匀 B 样条基函数, 对于任一整数, 应用 DeBoor 递推公式:

$$\left. \begin{aligned} B_{j,0}(x) &= \begin{cases} 1, & t_j \leq x < t_{j+1} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \\ B_{j,k}(x) &= \frac{x-t_j}{t_{j+k}-t_j} B_{j,k-1}(x) + \frac{t_{j+k+1}-x}{t_{j+k+1}-t_{j+1}} B_{j+1,k-1}(x), \quad k > 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 k 表示 B 样条的幂次; t 为节点; 下标 j 为样条序号。

非均匀 B 样条^[9~12]的节点矢量可采用 Riesenfeld 的算法确定, 节点的分布与各 B 样条曲线段的长度直接相关。设顶点数为 $n+1$, 三次 B 样条曲线段总数为 $n-2$, 相应地应有 $n-2$ 组基函数。为构成该 $n-2$ 组基函数所需的节点矢量, 假设 $l_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为多边形边长; L 为边长的总和, $L = \sum_{i=1}^n l_i$ 。由此, 为计算三次非均匀 B 样条基函数所用的节点矢量为 $(0, 0, 0, 0, l_1+l_2, \dots, \sum_{i=1}^j l_i, \dots, \sum_{i=1}^{n-2} l_i, L, L, L, L)/L$

用三次非均匀 B 样条曲线进行插值计算。首先根据给定的型值点构造节点矢量, 基函数则根据该节点矢量上相关的节点集分别计算, 而后求得反算多边形顶点的方程组, 外加两个端点条件, 使方程组数与欲求顶点数相等。解该方程, 即可求得非均匀 B 样条曲线的控制顶点。非均匀 B 样条曲面是非均匀 B 样条曲线向二维的拓广, 当同一参数方程各截面上型值点的分布规律比较接近时, 应用非均匀 B 样条曲面方可取得满意的结果, 并且节点数目可以是任意正整数。本文地形表面造型的第一步采用非均匀 B 样条进行插值和拟合。

2.2 准均匀 B 样条曲线曲面

利用迭代公式(1)可以推导由节点矢量 $(0, 0, 0, 0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \dots, 1-\frac{1}{n}, 1, 1, 1, 1)$ 生成 $n+1$ 个三次 B 样条基函数 $B_0^{(j)}, B_1^{(j)}, \dots, B_{n+2}^{(j)}$, 并有分段函数解析表达式, 构成准均匀 B 样条基函数。

若已知曲线的 $n+3$ 个控制点 $P_i (i=0, 1, \dots, n+2)$, 则其准均匀 B 样条曲线的表达式为

$$f(t) = \sum_{i=0}^{n+2} P_i B_{i3}(t), \quad t \in [0, 1] \quad (2)$$

然而在实际基础高程数据中, 一般说来, 只知道一些关键点的高度值, 即型值点的值, 控制点往往不知道, 这需要通过型值点来反求控制点。设型值点为 $Q_i (i=1, 2, \dots, 2^j+1)$, 控制点为 $P_i (i=0, 1, \dots, 2^j+2)$, 反求控制点方程组为

$$P_0 B_{0,3}(x_i) + P_1 B_{1,3}(x_i) + \dots + P_{2^j+2} B_{2^j+2,3}(x_i) = Q_i, \quad i=0, 1, \dots, 2^j+2 \quad (3)$$

同两个边界方程 $P_0 - 2P_1 + P_2 = 0$, $P_{2^j+2} - 2P_{2^j+1} + P_{2^j} = 0$ 联立, 即可求出控制点。

准均匀 B 样条曲面是从曲线推广到曲面。给定型值点 $Q_{ij} (i=0, 1, \dots, m; j=0, 1, \dots, n)$, 利用求准均匀 B 样条曲线的控制点的方法, 逐行求出控制点, 得到一个控制点矩阵 $P_{ij} (i=0, 1, \dots, m+2; j=0, 1, \dots, n+2)$ 求出控制点后, 即求得曲面的显式表示:

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^{m+2} \sum_{j=0}^{n+2} P_{ij} B_{i3}(x) B_{j3}(y) \quad (4)$$

让 x 和 y 分别在 $[0, 1]$ 上取一些值, 得到一些网格的高程值 $f(x_i, y_j)$, 这些网格组成 DEM 的表面形状。

3 准均匀 B 样条小波

3.1 B 样条小波

对任意的函数 f , $g \in V^j$, 取单位内积:

$$\langle f, g \rangle = \int_0^1 f(x) \overline{g(x)} dx$$

在此内积下, V^{j-1} 在 V^j 中存在惟一的 正交补空间 W^{j-1} 。则 V^j 中的任一函数 f_j 可分解为低分辨率部分 $f_{j-1} \in V^{j-1}$ 和细节部分 $g_{j-1} \in W^{j-1}$, 使得

$$f_j = f_{j-1} + g_{j-1}$$

存在常数 c_k 和 d_k , 使

$$f_j = \sum c_k B_k^{(j-1)} + \sum d_k W_k^{(j-1)}$$

这里 V^j 的基函数 $B_0^{(j)}, B_1^{(j)}, \dots$ 为尺度函数; $W_0^{(j-1)}, W_1^{(j-1)}, \dots$ 为三次 B 样条小波; d_k 是小波系数。

3.2 准均匀 B 样条小波多尺度分解

准均匀 B 样条介于均匀 B 样条和非均匀 B 样条之间, 属于非均匀 B 样条。准均匀 B 样条函数保留了均匀 B 样条局部参数控制的特点, 同时又具有 Bézier 曲线函数的端点性质, 克服了 B 样条函数不过端点(边界点)的缺点。准均匀 B 样条的构造比非均匀 B 样条简单得多, 而且多尺度小波分解算法容

易设计, 本文中 DEM 地形的初次造型利用三次非均匀 B 样条得到。对于一般地形来说, 坡长(即曲线弧长)基本上可决定其突变和缓变的程度。若以这种“弧长”参数均匀取网格型值点, 假定原来控制点为 n , 且 $2^{j-1} + 1 \leq n < 2^j + 1$, 则我们取 $2^j + 1$ 型值点, 这样冗余量会最少, 分辨率效果明显。本文造型第 2 步是从非均匀 B 样条曲面上取均匀网格型值点作网格曲面造型的。

准均匀 B 样条小波的实质是低一层的 $2^j + 2$ 个样条基函数被其高一层的 $2^{j+1} + 2$ 个样条基函数线性表示。设离散数据 C_j 是由 m 个采集点构成的列向量 $C_j = [c_0^{(j)}, c_1^{(j)}, \dots, c_{n-1}^{(j)}]^T$, 其中 j 是非负整数。在 DEM 建模中, 将采集点想象为三维空间中曲线的控制点。如果要求用 $m_1 (m_1 < m)$ 个采集点的低分辨率数据 C_{j-1} 描述 C_j , 并用 D_{j-1} 捕捉丢失的细节数据, 则问题关键是合理地选择矩阵 $[P_j], [Q_j]$ [13, 14], $[A_j]$ 和 $[B_j]$, 使得

$$C_j = [P_j] C_{j-1} + [Q_j] D_{j-1} \quad (5)$$

$$C_{j-1} = [A_j] C_j, D_{j-1} = [B_j] C_j \quad (6)$$

式中 $[P_j], [Q_j], [A_j]$ 和 $[B_j]$ 分别是 $m \times m_1, m \times (m - m_1), m_1 \times m$ 和 $(m - m_1) \times m$ 阶矩阵。 $[P_j]$ 的阶 m 不是任意取数, 而是形如 $2^j + 2$ 的正整数。即对式(2)的 t_i 分别取 $0, \frac{1}{2^j}, \frac{2}{2^j}, \dots, \frac{2^j}{2^j}$, 获得 $2^j + 1$ 型值点 $f(t_i)$, 然后反求 $2^j + 2$ 个控制点。这样满足小波分解的 $2^j + 2$ 个控制点要求。

准均匀三次 B 样条曲线的小波分解算法为

$$[P_j | Q_j] \begin{bmatrix} C_{j-1} \\ D_{j-1} \end{bmatrix} = C_j \Rightarrow \begin{bmatrix} C_{j-1} \\ D_{j-1} \end{bmatrix} = [P_j | Q_j]^{-1} C_j \quad (7)$$

求解方程组(7)的方法是, 通过适当地交换带状矩阵 $[P_j]$ 和 $[Q_j]$ 的各列, 将系数矩阵 $[P_j | Q_j]$ 转换为一个带状矩阵, 然后快速求解所得的新的线性方程组。

4 工程应用

由上述讨论可见, 若准均匀 B 样条曲线有 $2^j + 3$ 个控制点, 则经过一次小波光滑后, 近似部分将有 $2^{j-1} + 3$ 个控制点, 其细节部分将有 $2^{j-1} + 2$ 个控制点。用张量积扩充基的方法, 将小波分解从准均匀三次 B 样条曲线推广到准均匀三次 B 样条曲面。

图 1 是某山区高速公路工程建设中的一高边坡滑坡治理地形图, 本文对其中一场区进行了多尺度

多分辨率可视化建模, 包括 OpenGL 光照和渲染。取元数据为 84×46 (图 2(a)), 先进行非均匀 B 样条曲面拟合, 然后从曲面中按弧长均匀获得 131×67 型值点, 由这些型值点进行准均匀 B 样条 DEM 造型, 在普通 PC 机(PIII, 512M)和 VC60 软件下的运行时间仅为 10 多秒种。而再分别进行小波压缩成 67×35 , 35×19 , 19×11 和 11×7 , 所需的时间越来越少。因此本算法的 DEM 建模是高效、快速的, 若将程序再优化, 可以达到实时速度。图 2(b)~(f) 中是进行 5 次多分辨率的分解, 有明显的不同分辨率效果, 也有不同的逼真和真实感效果。我们利用

小波的多尺度关系, 在取全景时可以用低分辨率; 而取局部细节时又可采用取高分辨率。



图 1 高边坡地形图
Fig.1 A slope surface

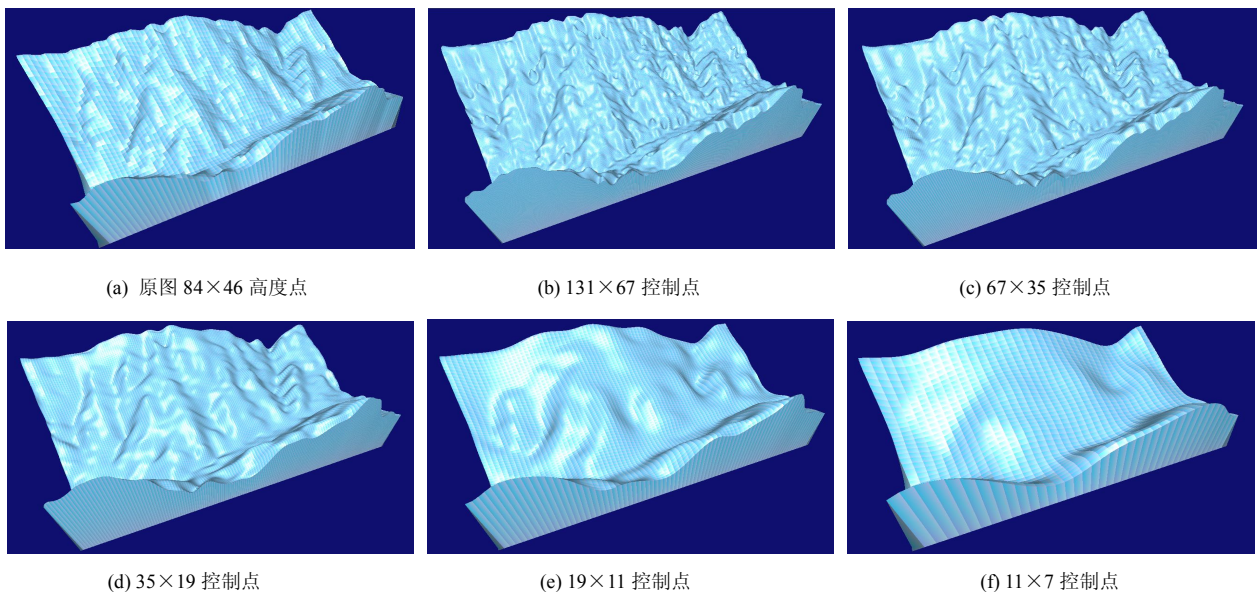


图 2 某高边坡多尺度 DEM 模型视图
Fig.1 Multi-scale DEM modeling view of a slope DEM surface

5 结 语

文中提出的多尺度 DEM 地形建模方法, 克服了 DEM 整体内插中选用较多参考点、多项式出现振荡现象、不易获得稳定解、分块内插和逐点内插求解复杂、计算量大等的不足。同时也考虑了 DEM 曲面突变和缓变对分辨率的不同要求, 以及海量数据对算法速度的要求, 实现了全自动和批量处理, 并利用多项式的性质设计快速算法, 达到实时处理能力。

需要指出, 利用插删节点算法^[16]解决了任意 NUBS 曲线及任意节点的小波多分辨率分解, 而且分解后的主要部分和细节部分的型值点是上一层型值点的一部分。由于型值点没有重建计算, 一般难于保持形状不变, 特别是极值点、拐点、扭点等关键型值点在自动化选点下难于保证保留下来, 隔点

删除分辨效果不如准均匀 B 样条小波, 速度也无法跟准均匀 B 样条小波相比。

在岩土工程中应用和建立 DEM 模型要考虑其工程特点: (1) 在岩土工程发生过程中地下各层局部(包括地表和地下)会动态地变化; (2) 岩土工程研究的往往是多层 DEM 模型; (3) 它要求的 DEM 是多参数的模型, 它具有空间多源信息功能, 此时的 DEM 不再是单一的高程数据模型, 它包含有工程地质、水文地质、岩土力学地质勘察资料多类数据, 数据量大。用准均匀 B 样条小波建立 DEM 模型能满足其要求, 并在动态可视化处理方面显示其优点, 相信本文方法将在上述涉及的许多领域都有重要的应用。

参 考 文 献

- [1] 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉大学出

- 版社, 2001. 29—57.
- [2] 李绍军, 冯夏庭, 张希巍, 等. 边坡完全性评估的三维智能信息系统开发应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3 419—3 426.
- LI Shao-jun, FENG Xia-ting, ZHANG Xi-wei, et al. Study on development and application of three-dimensional intelligent information system for slope safety assessment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 3 419—3 426.
- [3] 白世伟, 王明华. 汉十高速公路韩家垭边坡工程地质信息管理和可视化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 597—1 600.
- BAI Shi-wei, WANG Ming-hua. Study on Engineering Geology information management and visualization of Hankou-Shiyan Expressway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1 597—1 600.
- [4] 万刚, 朱长青. 多进制小波及其在 DEM 数据有损压缩中的应用[J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 36—40.
- WANG Gang, ZHU Chang-qing. Application of multiband wavelet on amplifying DEM with loss of feature information[J]. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, 1999, 28(1): 36—40.
- [5] 齐敏, 郝重阳, 佟明安. 三维地形生成及实时显示技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(4): 269—275.
- QI Min, HAO Chong-yang, TONG Ming-an. The research development of 3D terrain generation and real-time display techniques[J]. **Journal of Image and Graphics**, 2000, 5(4): 269—275.
- [6] 万华根, 黄永明, 彭群生. 基于等高线非均匀分割的快速山体造型方法[J]. 计算机研究与发展, 1998, 35(8): 739—743.
- WAN Hua-geng, HUANG Yong-ming, PENG Qun-sheng. A quick terrain modeling approach based on non-uniform subdivision of contours[J]. **Computer Research and Development**, 1998, 35(8): 739—743.
- [7] Zhu Zhifan, Raghu Machiraju, Fry B, et al. Wavelet-based multiresolution representation of computational field simulation datasets[A]. **Proceedings Visualization'97**[C]. Phoenix AZ, USA: IEEE Computer Society press, 1997. 151—158.
- [8] Gross M H, Gattietal R. Fast multiresolution surface meshing[A]. **Proceedings Visualization'95**[C]. Atlanta GA, USA: IEEE Computer Society press 1995. 135—142.
- [9] 王昱, 朱长青, 史文中. B 样条与磨光样条在基于矩形格网的 DEM 内插中的应用[J]. 测绘学报, 2000, 29(3): 240—244.
- WANG Yu, ZHU Chang-qing, SHI Wen-zhong. Application of B spline and smoothing spline on interpolating the DEM based on rectangular grid[J]. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, 2000, 29(3): 240—244.
- [10] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 306—331.
- [11] 贺怀建, 白世伟, 赵新华, 等. 三维地层模型中地层划分的探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 637—639.
- HE Huai-jian, BAI Shi-wei, ZHAO Xin-hua, et al. Discussion on strata partition in three dimension strata model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 637—639.
- [12] Piegl L, Tiller W. The NURBS Book[M]. New York: Springer, 1995.
- [13] Eric J S, Tony D D, David H S. Wavelets for computer graphics[J]. A Primer, Part 1. **IEEE Computer Graphics and Applications**, 1995, 15(3): 76—84.
- [14] Eric J S, Tony D D, David H S. Wavelets for computer graphics[J]. A Primer, Part 2. **IEEE Computer Graphics and Applications**, 1995, 15(4): 75—84.
- [15] 孙延奎, 朱心雄. B 样条曲线的小波光顺法[J]. 工程图学学报, 1998, (4): 51—58.
- SUN Yan-kui, ZHU Xin-xiong. Wavelet-Based fairing of b-spline curves[J]. **Journal of Engineering Graphics**, 1998, (4): 51—58.
- [16] 刘建, 关右江, 秦开怀. 任意 NUBS 曲线的小波分析和造型技术[J]. 中国图像图形学报, 2002, 7(9): 894—900.
- LIU Jian, GUAN You-jiang, QIN Kai-huai. Multi-resolution NUMS curves with arbitrary number of control points[J]. **Journal of Image and Graphics**, 2002, 7(9): 894—900.
- [17] 钟登华, 李明超, 王刚, 等. 基于三维地层模型的岩体测量可视化分级[J]. 岩石力学, 2005, 26(1): 11—16.
- ZHONG Deng-hua, LI Ming-chao, WANG Gang, et al. Visualization of rock mass quality classification based on 3-D strata model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 11—16.