

基于 Surfer 的数据网格化与体积计算精度分析

罗亦泳<sup>①</sup>, 张立亭<sup>①</sup>, 陈竹安<sup>①</sup>, 杨伟<sup>②</sup>  
(<sup>①</sup>东华理工大学地测学院, 江西抚州 344000 <sup>②</sup>中国海警高等专科学校, 浙江宁波 315801)

**【摘 要】** 本文从理论上对 Surfer 的主要数据网格化方法与体积计算原理进行研究, 并采用检查点法、残差均方根与体积相对中误差等精度评定指标对网格数据与体积计算精度做定量分析, 通过实验证实利用改进谢别像法与径向基函数法对稀疏源数据网格化精度较高。同时采用梯形规则、辛普森规则与辛普森 3/8 规则进行体积计算, 当三种规则体积计算结果相近时数据网格化间距最优, 此时体积计算精度较高。最后将这种体积计算方法用于土方计算, 将结果与传统方法对比并参见国家标准, 实验证明基于 Surfer 的体积计算方法用于工程中土方计算精度可靠性。

**【关键词】** Surfer 数据网格化; 插值方法; 精度分析; 体积计算规则

**【中图分类号】** TP391 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1009-2307(2009) 05-0097-03

1 引言

目前 surfer 软件提供的数据网格化功能已经广泛运用于各领域规则数据生成, 工程领域中已利用 surfer 的体积计算功能进行各种工程量计算, 如土石方量计算、库容计算、土地整理中工程量计算和固体矿采剥工程量计算, 加上 Surfer 具有空间分析和强大的平面与三维图绘制等可视化功能, 因此受到广泛关注。当前已有许多关于 surfer 的数据网格化与体积计算的论文, 但他们绝大多数是从应用角度出发, 没有从理论层面对 surfer 的数据网格化与体积计算精度和可靠性做系统的分析, 严重制约着 surfer 的强大规则数据生成与体积计算功能的推广性和可信度, 因此对 surfer 的数据网格化与体积计算从理论角度进行研究显得十分必要。本文利用检查点法<sup>[1]</sup>、源数据残差均方根对网格数据生成方法做适宜性评价和网格数据精度估计, 并推导 surfer 的体积计算公式同时做误差分析, 通过实验证明 surfer 的数据网格化与体积计算的可靠性, 为 surfer 的推广和应用提供一定的理论支持。

2 基于 surfer 的数据网格化方法选择与精度估计

数据网格化精度是影响 surfer 的等值线图、二维和三维图以及空间分析精度的最主要因素, Surfer 提供所有常用的十二种数据网格化方法, 其中高精度数据网格化方法主要有反距离加权插值、Kriging 线性插值三角网法、移动平均插值、局部多项式插值、改进谢别德法、径向基函数插值法。在参考文献 [2] 中已经讨论前五种插值方法精度, 并证实当源数据间隔较小时插值方法对插值精度影响较小, 当源数据间隔较大时 Kriging 与局部多项式插值精度较优, 所以本文分别采用 Kriging 局部多项式插值、改进谢别德法与径向基函数插值法等四种方法对较大间隔的源数据进行数据网格化实验并做精度对比分析, 采用检查点法和残差均方根对 surfer 的数据网格化方法进行评价及网格

数据精度估计, 具体做法如下:

1) 构建曲面函数  $Z_1 = 0.1x \sin(y/40)$ <sup>[2]</sup> 和  $Z_2 = \sqrt{\frac{1}{100}}x^3 - y^2$  其中  $(D1 = D_2, 0 \leq x \leq 100, 0 \leq y \leq 100, Z_2 > 0)$ , 并在区域  $D_1, D_2$  上分别以 10m, 20m 间隔采集离散点作为数据网格化的源数据, 以 1m 的行列间距分别利用四种插值方法对源数据进行数据网格化, 然后在区域  $D_1, D_2$  上采集  $n$  个 (根据范围和变化程度而定, 本文  $n = 16$ ) 均匀分布的离散点作为插值方法精度评价<sup>[3]</sup>及网格数据精度估计的样点。根据源数据利用 surfer 的残差统计功能结合 excel 编程计算出源数据与对应网格数据间的残差均方根 ( $RMS$ ), 具体计算公式参见 (1), 利用  $RMS$  可以评价生成网格数据与源数据的一致性; 利用检查点法, 根据用于网格数据精度估计的  $n$  个样点计算出网格化数据的近似中误差 ( $\sigma$ ), 具体公式见 (2), 当  $\sigma$  越小表明网格数据精度越高。曲面函数  $Z_1$  实验结果见表 1 函数  $Z_2$  实验结果见表 1。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (R_i - Z_i)^2}$$
 (1)

式 (1) 中  $m$  表示源数据点数,  $R_i$  表示第  $i$  个源数据点插值后高程,  $Z_i$  表示第  $i$  个源数据原始高程。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (R_k - Z_k)^2}$$
 (2)

式 (2) 中  $n$  表示用于估计网格数据精度的样点数,  $R_k$  表示第  $k$  个样点插值后高程,  $Z_k$  表示第  $k$  个样点原始高程。

表 1 函数  $Z_1$  的网格数据残差均方根与估计中误差

源数据间隔		克里金 (Kriging)	改进谢别德法 (Modified Shepard method)	局部多项式插值 (Local Polynomial)	径向基函数插值法 (Radial Basis Function)
10m	$\sigma$	0.036826	0.002920	0.028341	0.001114
	$RMS$	0.00486	0.000247	0.028409	0.0002589
20m	$\sigma$	0.02384	0.009076	0.017876	0.014522
	$RMS$	0.00758	0.000216	0.023037	0.000242

表 2 函数  $Z_2$  的网格数据残差均方根与估计中误差

源数据间隔		克里金 (Kriging)	改进谢别德法 (Modified Shepard method)	局部多项式插值 (Local Polynomial)	径向基函数插值法 (Radial Basis Function)
10m	$\sigma$	1.473692	0.901005	2.550897	0.816505
	$RMS$	0.199124	0.010509	2.386256	0.0111584
20m	$\sigma$	1.753417	0.915907	2.865437	1.157901
	$RMS$	0.194638	0.008972	2.104143	0.008524



作者简介: 罗亦泳 (1982-), 江西抚州人, 东华理工大学硕士研究生, 大地测量学与测量工程专业, 主要研究方向测绘数据处理。  
E-mail: lhy82@163.com

收稿日期: 2008-03-26  
基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (40574008); 江西省自然科学基金资助 (0650007); 江西省教育厅科技项目 (GJ08301); 东华理工大学 2007 年度研究生创新专项资金资助项目 (DYCA07007)

2) 从表 1、2 可知改进谢别德法与径向基函数插值法生成网格数据精度高并且优于 Kriging 与局部多项式插值法, 更适合稀疏数据网格化, 由本文实验与参考文献 [2] 得到在稀疏源数据数据网格化的精度由高到低排列顺序为“改进谢别德法、径向基函数插值法 > Kriging 局部多项式插值法 > 反距离加权插值、线性插值三角网法、移动平均插值”, 利用密集源数据生成网格数据时插值方法影响很小。

3 基于 Surfer 的体积计算精度论证及可视化

本文先从理论上对 Surfer 的体积计算原理及误差传播理论进行分析, 最后通实验并将实验结果与利用 CASS 的土方计算结果进行对比分析, 从理论与实验证明 Surfer 的体积计算功能的高精度与可靠性。

3.1 surfer 的体积计算原理及误差分析

Surfer 同时采用梯形规则、辛普森规则、辛普森 3/8 规则<sup>[4]</sup>对生成的网格数据分别进行体积计算, 最后取平均值。梯形规则是各领域中常用的面积与体积计算算法, 具体公式见 (3)、(4)。辛普森规则就是用拟合二次抛物线替代曲边梯形曲线边, 再用积分求曲边梯形面积并用网格数据点高程表示, 将这种方法进行推广得到沿网格数据第  $i$  行做断面的断面面积公式, 如公式 (5) 所示, 利用二重积分思想并再次结合辛普森规则可以得到辛普森规则体积计算公式,

如公式 (6)。辛普森 3/8 规则就是用拟合三次抛物线代替曲边梯形曲线边, 公式推导方法类似辛普森规则体积计算公式推导, 具体公式见 (7)、(8)。

$$S_i = \frac{\Delta x}{2} [h_{i1} + 2h_{i2} + 2h_{i3} + \dots + 2h_{im-1} + h_{in}] \quad (3)$$

$$\text{Volume} = \frac{\Delta y}{2} [S_1 + 2S_2 + 2S_3 + \dots + 2S_{n-1} + S_n] \quad (4)$$

$$S_i = \frac{a}{3} [h_{i1} + 4h_{i2} + 2h_{i3} + \dots + 2h_{im-1} + h_{in}] \quad (5)$$

$$\text{Volume} = \frac{b}{3} [S_1 + 4S_2 + 2S_3 + \dots + 2S_{n-1} + S_n] \quad (6)$$

$$S_i = \frac{3\Delta x}{8} [h_{i1} + 3h_{i2} + 3h_{i3} + \dots + 2h_{im-1} + h_{in}] \quad (7)$$

$$\text{Volume} = \frac{3\Delta y}{8} [S_1 + 3S_2 + 3S_3 + \dots + 2S_{n-1} + S_n] \quad (8)$$

(3) - (8) 式中  $h_{ij}$  为第  $i$  行  $j$  列网格数据点高程,  $m$ 、 $n$  为网格数据文件列、行数,  $S_i$  为第  $i$  个横断面面积,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  为网格数据列、行间距, (3)、(4) 式系数均为 [1, 2, 2, ..., 2, 2], (5)、(6) 式系数均为 [1, 4, 2, ..., 2, 2], (7)、(8) 式系数均为 [1, 3, 3, 2, 3, 3, 2, ..., 3, 3, 2],  $\text{Volume}$  为体积。

根据体积计算公式利用误差传播定律<sup>[5]</sup>可得到 surfer 的三种体积计算误差公式, 见表 3。

表 3 不同体积计算规则误差公式

计算规则	梯形规则	辛普森规则	辛普森 3/8 规则
误差公式	$\pm \sqrt{\frac{(2m-3)(2n-3)}{4}} \Delta x \Delta y \sigma$	$\pm \frac{2}{9} \sqrt{\frac{(5m-6)(5n-6)}{4}} \Delta x \Delta y \sigma$	$\pm \frac{3}{32} \sqrt{\frac{(11m-19)(11n-19)}{4}} \Delta x \Delta y \sigma$

3.2 基于 surfer 的体积计算实验对比分析

首先对 2.1 中函数  $Z_1$ 、 $Z_2$  在区域  $D_1$ 、 $D_2$  上做二重积分作为 Surfer 的体积计算精度评价的真值,  $V_1 = 36022.8 \text{ m}^3$ ,  $V_2 = 196349.5 \text{ m}^3$ , 再用 surfer 根据 2 中介绍的四种方法生成网格数据及计算体积并求出误差, 并与常用的 Cass 土方计算软件结果做比较, 具体误差如表 4 所示。

表 4 体积计算误差

网格数据生成方法	改进谢别德法 (Kriging)	局部多项式插值法 (Shepard method)	径向基函数插值法 (Radial Basis Function)	Cass 土方计算法	Cass 中土方计算法
$Z_1$					
10m	-56.0	-1.8	63.6	-0.6	503.3
20m	-182.6	28.5	38.7	46.3	501.5
$Z_2$					
10m	-10885.4	-2765.1	-9805.4	-2803.5	-5580.2
20m	-7266.2	-3072.7	-7846.5	-3173.6	-5994.6

表 5 不同网格数据间隔对三种体积计算规则精度影响

网格数据间隔 (m)	2	6	10	14	20
改进谢别德法					
梯形规则	-7.7	-64.8	-187.7	-383.7	-753.5
辛普森规则	0.1	-3.2	0.9	-52.5	-150.9
辛普森 3/8 规则	0.1	0.4	-16.4	-48.9	21.7
径向基函数法					
梯形规则	-7.4	-64.9	-187.7	-383.6	-753.5
辛普森规则	0.1	-3.3	0.9	-52.4	-150.9
辛普森 3/8 规则	0.1	0.3	-16.3	-48.8	21.7

由表 1、2、4 证实  $RMS$ 、 $\sigma$  与体积计算精度的一致性, 同时证明评价指标  $RMS$ 、 $\sigma$  的合理性。表 4 表明利用改进谢别德法与径向基函数插值法进行数据网格化及体积计算精度较高, 相对误差在 1.6% 以内, 远优于传统的 Cass 土

方计算精度, 大大低于国家施工组织设计规范制定的相对误差标准 3%<sup>[6]</sup>, 证实 Surfer 进行数据网格化和体积计算精度的可靠性。

表 5 为利用 2m 间隔的源数据采用改进谢别德法与径向基函数法生成间隔为 2-20m 的网格数据, 并根据 2-20m 不同间隔的网格数据利用 surfer 的三种体积计算规则分别计算体积并且求出误差, 由表 5 可知当网格数据间隔很小时, 三种体积计算规则结果几乎一样, 随着网格数据间隔的增加, 三种体积计算规则结果误差和之间差异迅速增加, 由于各工程领域的工程表面大部分是不规则曲面, 所以采用辛普森规则与辛普森 3/8 规则比梯形规则更符合实际, 可以提高计算精度。因此, 当三种体积计算规则结果相近时的数据网格化间距为最优, 不仅减轻由于数据网格化间隔过小而带给 surfer 的计算负担, 更大提高体积计算精度。

3.3 基于 surfer 的三维可视化

由于 surfer 具有强大的 3D 表面图绘制功能, 利用网格数据可以生成精细的三维表面图, 方便地实现对体积计算体的三维可视化。本文利用 surfer 依据 2 中实验生成的网格数据对构造的曲面函数  $Z_1$  和  $Z_2$  进行可视化, 相应三维图如图 1、2 所示, 具体操作参见文献 [6]。

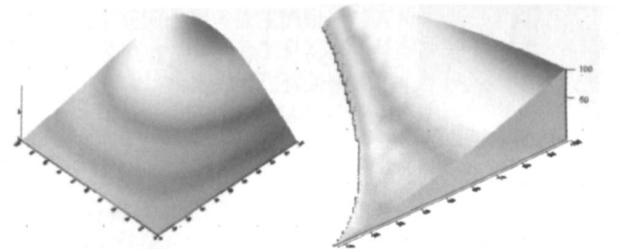


图 1 函数  $Z_1$  可视化图      图 2 函数  $Z_2$  可视化图

4 结束语

通过对 surfer 的数据网格化方法、体积计算原理和精度进行理论分析与实验, 得到以下结论:

①通过实验并利用  $RMS$  和  $\sigma$  对 Surfer 的不同数据网格化方法精度做定量分析, 证实改进谢别德法、径向基函数插值法精度高并且优于传统的 Kriging 局部多项式插值法, 适合稀疏源数据网格化; ②同时利用三种体积计算规则并且以计算结果之间差异大小衡量数据网格化间隔的合理性, 当差异很小时计算结果为最优, 这样不仅提高计算速度, 更保证体积计算精度; ③采用辛普森与辛普森  $3/8$  规则进行体积计算比传统利用微小平面集代替实际不规则工程曲面更符合实际, 并且以最优间距对源数据进行网格化, 实验表明 Surfer 的体积计算精度远高于国家工程领域制定的  $3\%$  的相对误差标准, 证实 Surfer 用于工程领域体积计算的可靠性。

参考文献

[ 1 ] 周兴华, 姚艺强, 赵吉先. DEM 内插方法与精度评定 [ J ]. 测绘科学, 2005, 30( 5): 86-88.

[ 2 ] 吴敬文, 周丰年, 赵辉. 基于格网节点的土方量计算方法研究 [ J ]. 测绘通报, 2006, ( 11): 43-45.

[ 3 ] 尤淑掌, 严泰来. 基于神经网络面插值的方法研究 [ J ]. 测绘学报, 2000, 29( 1): 30-34.

[ 4 ] (美) 玛蒂尔达. 数值方法 [ M ]. 陈渝, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002-06 263-284.

[ 5 ] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础 [ M ]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003. 98.

[ 6 ] 王京卫, 丁宁, 赵同龙. 场地平整中土石方量计算的三维可视化方法 [ J ]. 测绘工程, 2006, 15( 6): 15-19.

Precision analysis of data gridding and calculation of volume based on surfer

**Abstract** Methods of the data gridding and precision of volume calculation based on surfer from the theory were studied. And precision of gridding data and volume calculation by checkpoint method, residuals  $RM S$  and relative mean error were quantitatively analyzed. Experiments show that modified Shepard's method and radial basis function are suit to grid sparse fountainhead and have higher precision. The volume is simultaneously calculated by three methods: extended trapezoidal rule, extended Simpson's rule, and extended Simpson's  $3/8$  rule. Interval of the data gridding is optimum when three kind of computed results are very close, and precision of volume calculation is higher. Finally, this new method is used in the earthwork calculation. The result is compared with traditional methods referring to national criteria. Experiments have proved that the method of volume calculation is reliable in precision.

**Key words** surfer; data gridding; interpolation method; precision analysis; volume calculation rule

LUO Yi-yong<sup>①</sup>, ZHANG Li-ting<sup>①</sup>, CHEN Zhu-an<sup>①</sup>, YANG Wei<sup>②</sup> (① Survey Department Of East China Institute of Technology, Fuzhou Jiangxi 344000, China; ② Election Department Of Public Security Marine Police Academy, Ningbo Zhejiang 315801, China)

(上接第 106 页)

优化策略”、“结点排序优化策略”和“单链结点剔除优化策略”, 取得了较好的效果。选用沈阳市 1:10 000 导航数据进行测试, 其结点为 18960 个, 最大相关结点 6 个; 起点选在沈阳市北部的“国奥现代城”(如图 1 所示)附近, 终点选在沈阳市南部的“中华园”(如图 2 所示)附近, 执行最短路径分析, 得到如图 3 所示的运算结果, 并可得到如表 1 所示的选取不同优化策略时的时间效率比较。

参考文献

[ 1 ] 王杰臣, 毛海城, 杨得志. 图的节点-弧段联合结构表示法及其在 GIS 最优路径选取中的应用 [ J ]. 测绘学报, 2000, 29.

[ 2 ] Zhan FB. Three Fastest Shortest Path Algorithms On Real Road Networks [ J ]. Journal of Geographic and Decision Analysis, 1997, 1( 1 ).

[ 3 ] 徐立华. 求解最短路问题的一种计算机算法 [ J ]. 系统工程, 1989, 7( 5 ).

[ 4 ] 龚洁辉, 白玲, 高健美. 最短路径算法的改进及其实现方法 [ J ]. 解放军测绘学院学报, 1998, 6( 2 ).

[ 5 ] 乐阳, 龚健雅. Dijkstra 最短路径算法的一种高效实现 [ J ]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24( 3 ).

[ 6 ] 唐文武, 施晓东, 朱大奎. GIS 中使用改进的 Dijkstra 算法实现最短路径的计算 [ J ]. 中国图象图形学报, 2000, 5( 12 ).

[ 7 ] 刘云翔, 陈萃, 李军, 陈宏盛. 基于城市道路网的最短路径分析解决方案 [ J ]. 小型微型计算机系统, 2003, 7( 24 ).

[ 8 ] 田洪军, 等. 空间关系中两相邻实体间最近距离算法研究 [ J ]. 测绘科学, 2008, 33( 1 ).

[ 9 ] 吴立新, 史文中. 地理信息系统原理与算法 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2003.

Optimization strategies of the Dijkstra's shortest route algorithm

**Abstract** After analysis of classical Dijkstra's algorithm, the key factors that influence the efficiency are storage space and time efficiency. Some optimization strategies of the Dijkstra's shortest route algorithm are concluded by combination of some existing algorithms, which include optimization strategy of related line, near nodes, node classification, weight value ordering, node ordering and one-chain node elimination. Examples of application prove that all the optimization strategies function well and can improve both storage space and time efficiency.

**Key words** shortest route; Dijkstra's algorithm; optimization strategies

ZHANG Jin-ming<sup>①</sup>, HONG Gang<sup>①</sup>, WEN Rui<sup>②</sup>, WANG Xue-tao<sup>③</sup> (① Institute of Surveying and Mapping Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China; ② 73603 troops, Xian 710054, China; ③ 73603 troops, Nanjing 210049, China)