

任意网格模型的相似度评估

唐杰, 张福炎

(南京大学计算机科学与技术系, 南京 210093)



摘要: 提出了一种任意网格模型相似度评估机制及其实现方法。该算法以对称 Hausdorff 距离为基础, 综合考虑了网格模型的几何相似性和外观相似性。在相似度计算过程中, 采用平均单元格数据结构管理网格模型中的三角片, 并根据三角片的大小自适应选择单元格的大小, 保证了算法具有较快的运行速度。

关键词: 三角网格; 多分辨模型; 几何造型; 网格简化

文章编号: 1004-731X (2005) 01-0016-04 **中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A

Evaluation of Similarity between Arbitrary Meshes

TANG Jie, ZHANG Fu-Yan

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing Jiangsu 210093, China)

Abstract: An algorithm to evaluate similarity between arbitrary meshes is presented. Based on symmetric Hausdorff distance, the algorithm calculates both geometric similarity and appearance similarity. Uniform grid is adopted to manage triangles of each mesh, and the size of grid cell is adjusted adaptively according to the average triangle size, so high computing speed is ensured.

Key words: triangle mesh; multi-resolution; geometric modeling; mesh simplification

引言

网格模型具有简单的数学描述, 较好的通用性和灵活性, 且可以实现硬件设备加速, 因而广泛用于真实感图形显示、如数控加工刀具轨迹计算和干涉检查、快速原型制造 (RPM)、医用图像、地理地形绘制、计算机游戏等许多应用邻域。尤其是近年来, 随着逆向工程技术的不断发展, 高精度的坐标测量机的不断普及, 为了加快产品开发速度, 降低开发成本, 越来越多的复杂模型是由坐标测量机输出的散乱点集重构的三角网格模型来描述。许多网格模型不仅具有几何属性, 还具有颜色、纹理等其它属性。

网格模型相似度评估是对两个任意网格模型的相似程度进行判定, 包括几何相似性和外观相似性。网格模型相似度评估的应用十分广泛, 主要有简化网格模型^{[1][2][3]}与原始网格模型之间误差的评估、网格模型的搜索匹配^[4]、网格模型的识别^[5]等。Cignoni^[6]等给出了一种计算两个网格模型之间几何误差的方法, 他们采用均匀单元格来储存三角片, 但单元格的大小需由用户指定, 因而在计算不同三角片大小的模型时, 计算效率差异较大。张丽艳等^[7]也提出了一种计算空间点集到网格模型的误差计算方法来评估由散乱点集重构网格模型时产生的误差。李庆等^[5]则在网格模型的识别中利用距离角度图进行网格模型的匹配。

综上所述, 虽然目前国内外学者对网格模型的相似度进行了许多研究, 但这些研究大多集中于网格模型的几何相似性上, 因而仍然缺乏一个有效的可以综合考虑网格几何相似性和外观相似性的评估机制和评估方法。本文提出一种任意网格模型相似度评估机制及其实现方法。该算法以对称 Hausdorff 距离为基础, 综合了考虑网格模型的几何相似性和外观详细性。在相似度计算过程中, 采用平均单元格数据结构管理网格模型中的三角片, 并根据三角片的大小自适应选择单元格的大小, 保证了算法具有较快的运行速度。

1 网格模型相似度

为了能够量化地评估两个网格模型之间的相似程度, 有必要建立一种衡量两个网格模型之间差异的误差评估机制, 也就是说, 给定两个网格模型 M 和 M' , 我们希望建立一个映射 $E: M \times M' \rightarrow R$, 而 $E(M, M')$ 能够量化地评估 M 与 M' 之间的相似程度。 $E(M, M')$ 越小, 表明 M 与 M' 越接近。

1.1 三角网格模型的几何相似性评估

目前常用对称 Hausdorff 距离来评估两个网格模型之间的几何相似度。

定义 1: 三维空间中一点 x 到网格模型 M 的距离 d_E 定义为:

$$d_E(x, M) = \min_{y \in M} (d(x, y)) \tag{1}$$

其中 $d(x, y)$ 为点 x 和点 y 的欧氏距离。

收稿日期: 2003-12-26 修回日期: 2004-02-12

作者简介: 唐杰(1971-), 男, 江苏南京人, 博士, 在读博士后, 研究方向为 CAD/CAM、计算机辅助几何设计、计算机图形学; 张福炎(1939-), 男, 江苏常州人, 教授, 博导, 研究方向为计算机图形学, 多媒体技术。

定义 2: 网格 M 到 M' 的单向 Hausdorff 距离 d_s 定义为:

$$d_s(M, M') = \max_{x \in M} (d_E(x, M')) \quad (2)$$

定义 3: 网格 M_0 到 M 的对称 Hausdorff 距离 d_H 定义为:

$$d_H(M, M') = \max(d_s(M, M'), d_s(M', M)) \quad (3)$$

如果两个网格模型 M 和 M' 之间的对称 Hausdorff 距离小于 ε , 可知: 对于 M 上的任意一点 x , 必有一点 $y \in M'$, 使得 $d(x, y) < \varepsilon$, $d(x, y)$ 是点 x 到 y 的欧氏距离; 同时, 对于任意一点 $y \in M'$, 也必有一点 $x \in M$, 使得 $d(x, y) < \varepsilon$ 。因而两个网格模型之间的 Hausdorff 距离实际上就是这两个网格模型之间的最大误差 L_∞ 。

1.2 三角网格模型的外观相似性评估

网格模型 M 也可能不仅仅包含几何形状信息, 还包含其它附属信息, 如颜色, 纹理等。如果仍然用 1.1 节中的方法来评估带附属信息的网格模型之间的相似度, 则虽然能较好地反映其几何形状上的相似度, 却不能真实地反映其它附属信息之间的相似度。因而, 有必要建立一种能够正确评估带附属信息的三角网格模型之间相似度的方法。

Paul S.Heckbert^[8]对两个 $m \times n$ 像素的位图 I 与 I' 之间的误差给出了如下的评估方法:

$$\|I - I'\| = \frac{1}{m \times n} \sum_{u=0}^m \sum_{v=0}^n \|I(u, v) - I'(u, v)\|^2 \quad (4)$$

式中 $I(u, v)$ 为位图在 (u, v) 处的 RGB 向量 (r, g, b) , $\|I(u, v) - I'(u, v)\|$ 为向量 $I(u, v)$ 与 $I'(u, v)$ 之间的欧氏距离。

Hugues Hoppe 等^[9]在研究带属性网格简化时, 将网格模型所包含的信息分为几何信息和非几何信息, 在评估网格差异时, 先分别考虑几何形状和其它信息的误差, 再将这两种误差综合起来作为网格模型的整体误差。本文作者提出了一种网格模型外观相似度评估方法, 定义如下:

定义 4: 给定两个网格模型 M, M' , 则 M 到 M' 的外观相似度定义为:

$$\|M - M'\| = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n \|I_j - I'_j\|^2 \quad (5)$$

式中 I_j 为 M 上第 j 个采样点处的 RGB 向量 (r, g, b) , I'_j 为 M' 上距离采样点 j 最近的点处的 RGB 向量 (r, g, b) , $\|I_j - I'_j\|$ 为向量 I_j 与 I'_j 之间的欧氏距离, n 为采样点的个数。该相似度是单向的。

定义 5: 给定两个网格模型 M, M' , 则 M 与 M' 之间的外观相似度定义为:

$$S = \max(\|M - M'\|, \|M' - M\|) \quad (6)$$

2 网格模型相似度计算

有了网格模型相似度的定义后, 本节讨论如何快速、准确地计算网格模型相似度。

2.1 算法概述

算法的主要步骤是:

Step1: 读入三角网格模型 M 和 M' ;

Step2: 建立平均单元格, 并将 M 和 M' 中的三角片分配至每个单元格;

Step3: 在 M 上抽取采样点集 S ;

Step4: 对每个 $v \in S$, 计算其到 M' 的最小距离 d_i ;

Step5: 若有颜色或纹理属性, 计算每个采样点的属性差 s_i ;

Step6: 则 M 到 M' 单向 Hausdorff 距离为 $\max(d_i)$; M 到 M' 的单向外观相似度按 5 式计算;

Step7: 类似地, 重复 Step3 到 Step6 计算 M' 到 M 的单向 Hausdorff 距离和单向外观相似度;

Step8: 计算网格模型几何相似度和外观相似度。

2.2 平均单元格

为了描述物体更多的细节, 目前的网格模型一般比较庞大, 三角片的数量一般也比较多, 这类海量数据处理的关键之一是算法的效率。为了分析两个网格模型之间的相似度, 就要计算每个采样点到三角网格模型的最近距离。如果直接计算, 则其计算的复杂度为 $O(n_s * n_t)$, 其中 n_s 为一个网格模型采样点的个数, n_t 为另一个网格模型的三角片的个数。这样的效率将是非常低的。为此, 本文采用平均单元格法以提高算法的效率。

平均单元格的构造过程为: 首先确定 M 和 M' 的外接包围盒的范围; 其次根据三角片的数量和模型的形状将长方体包围盒划分成 $l \times m \times n$ 个小立方体栅格, 最后根据每个三角片的位置将 M' 中的三角片分配给一个立方体栅格, 并将该三角片的序号追加到该立方体栅格对应的存放三角片的线性链表中。分配三角片的依据是若该三角片与一个单元格相交, 则将该三角片分配给该单元格。需要注意的是当计算 M 到 M' 的相似度时, 平均单元格中存放 M' 中的三角片; 而当计算 M' 到 M 的相似度时, 平均单元格中存放 M 中的三角片。另外, 单元格的大小决定了每个单元格中三角片的数量, 单元格过大造成每个单元格中三角片过多, 单元格过小造成一个三角片被多个单元格所共有, 这都会影响算法效率。因此本文采用一种自适应调整方法, 将单元格的边长设为三角片平均边长的 1.2, 实验证明该方法可以有效提高算法速度约 15-20%, 而每个采样点所计算的三角片数约在 30-40 个之间。

2.3 点到三角片的距离

给定空间中一点 v , 以及一个三角片 $v_0v_1v_2$, 根据点 v 在该三角片所在平面上的投影的位置, v 到该三角片的距离 d_i 定义为如下三种情况 (如图 1 所示, 图中的 6 条虚线分别垂直于三角片的三条边):

a) 当 v 的投影落在在区域 1 中时, d_i 为点到该三角片所处的平面的距离; 到 v 距离最近的点为 v 在该平面上的投影;

b) 当 v 的投影落在区域 2 中时, d_t 为点到相应的边的距离; 到 v 距离最近的点为 v 在该边上的投影;

c) 当 v 的投影落在区域 3 中时, d_t 为点到相应的顶点的距离。到 v 距离最近的点为相应的顶点。

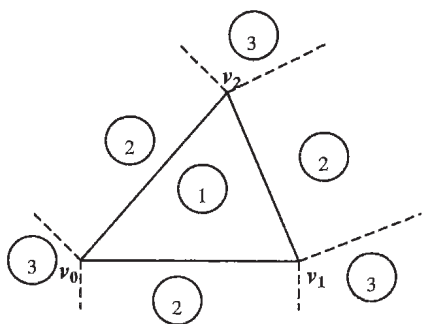


图 1 点到三角片的距离

2.4 点到网格模型的距离

点到网格模型的距离是计算网格模型相似度的关键步骤, 它的计算准确性和效率直接影响整个算法的准确性和效率。本文利用平均单元格和点到三角片的距离实现了一种快速、准确的点到三角片的计算方法。

给定一个采样点和已划分好的平均单元格结构, 确定好该采样点所在的单元格后, 设单元格边长为 $size$, 计算点到网格模型的距离算法如下:

1. $Level \leftarrow 0$;
2. 依次计算该点到其所在单元格的所有三角片的距离, 记其中最小的一个为 d_{min} ;
3. $Level++$;
4. 依次计算该点到其所属单元格外面的第 $Level$ 层的单元格所包含的所有三角片的距离 d , 若 $d < d_{min}$, 则 $d_{min} \leftarrow d$;
5. 若 $d_{min} > Level \times size$; 转至 3;
6. 直到 $d_{min} < Level \times size$

则 d_{min} 为点到该网格模型的距离, 同时还可确定网格模型上距离该点最近的点的位置。

步骤 5 是为了防止图 2 所示的情况发生。图 2 中 T_1 和 T_2 为两个三角片, T_1 属于第 1 层单元格, T_2 属于第 2 层单

元格, d_1 和 d_2 分别是采样点 v 到 T_1 和 T_2 的最小距离, 且 $d_1 > d_2$ 。当计算完 v 到第一层单元格所属的三角片后, 得到最小距离为 d_1 。若此时终止计算, 显然得到的结果并不正确, 因为还存在 T_2 , 使得 v 到 T_2 的距离 $d_2 < d_1$ 。因此, 必须继续计算下去, 直到计算出的最小距离小于 $Level \times size$ 。这样才能确保结果的正确性。

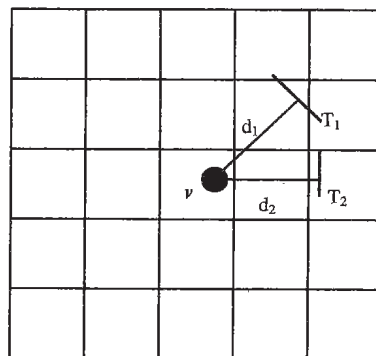


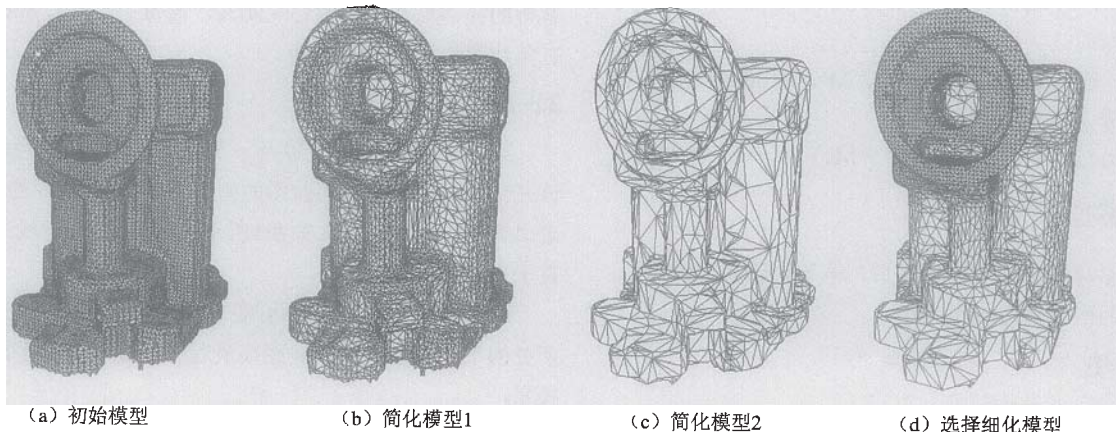
图 2 平均单元格

3 实验结果

本文算法已用 C++ 语言实现。为验证算法的有效性, 我们测试了许多模型, 做了大量实验。图 3 和图 4 为其中两例。图 3a 所示为一油泵的网格模型, 拥有 45,478 个三角片。图 3b 为有 22000 个三角片的简化模型, 图 3c 为 4000 个三角片的简化模型, 图 3d 为选择细化的网格模型。它们与初始网格模型的几何相似度测量结果分别如图 3e、图 3f、图 3g 所示。

图 4 为一地球网格模型的相似度测量结果, 4a 为有 73728 个三角片的原始网格模型, 4b 为线框图, 4c 为一简化模型, 4d 为其线框图, 4e 为几何相似度的分布图, 4f 为外观相似度的分布图。

我们在 Intel Pentium IV 1.6GHz, 256M RAM 的微机对上对图 3 个图 4 中的模型进行了计算, 结果如表 1 所示, 由表中可以看出, 我们的算法与 metro 相比, 在时间上具有一定的优越性, 且解决了 metro 不能反映外观相似性的问题。



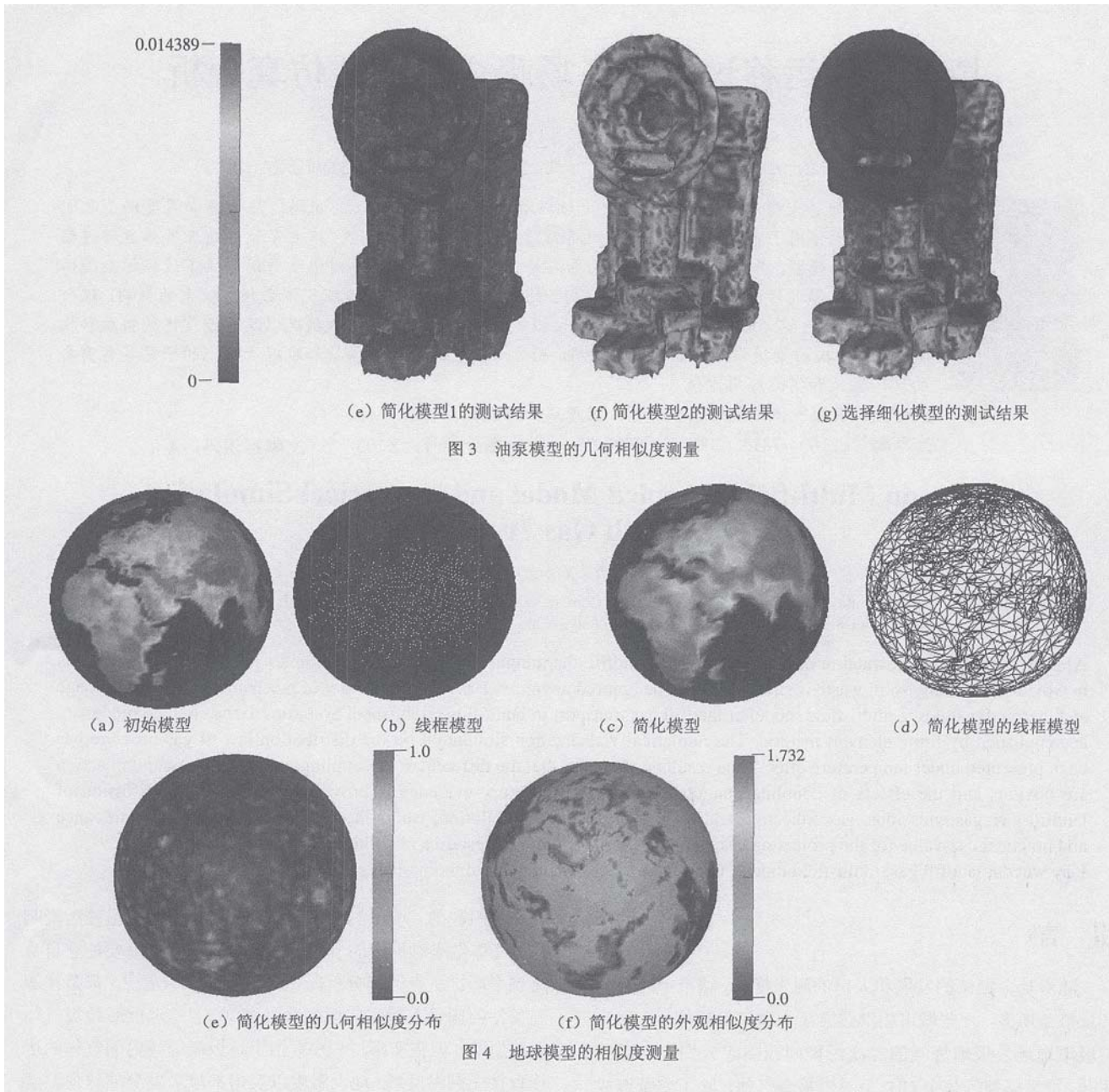


表 1 网格模型相似度计算结果

模型	三角片数		外接包围盒	采样点数	几何相似度	外观相似度	时间 (s)
	模型 1	模型 2					
油泵	45478	5000	0.7×0.56×0.81	50,000	0.01032	—	11.54
地球	73728	20000	2×2×2	100,000	0.000167	1.462×10 ⁻⁵	23.87
metro ^[6] 计算出的结果							
油泵	45478	5000	0.7×0.56×0.81	50,000	0.01033	—	13.221
地球	73728	20000	2×2×2	100,000	0.000167	—	19.637

4 结论

网格模型相似度评估广泛应用于简化网格模型与原始网格模型之间误差的评估、网格模型的搜索匹配、网格模型的识别等领域。网格模型的相似度不仅仅是网格模型之间的几何误差,还包括网格模型的外观相似度,如颜色、纹理分布的相似度。本文提出一个有效的可以综合考虑网格几何相似

性和外观相似性的评估机制和实现算法。该算法以对称 Hausdorff 距离为基础,综合了考虑网格模型的几何相似性和外观详细性。在相似度计算过程中,采用平均单元格数据结构管理网格模型中的三角片,并根据三角片的大小自适应选择单元格的大小,保证了算法具有较快的运行速度。实验证明了本文算法的有效性和结果的正确性。

(下转第 24 页)

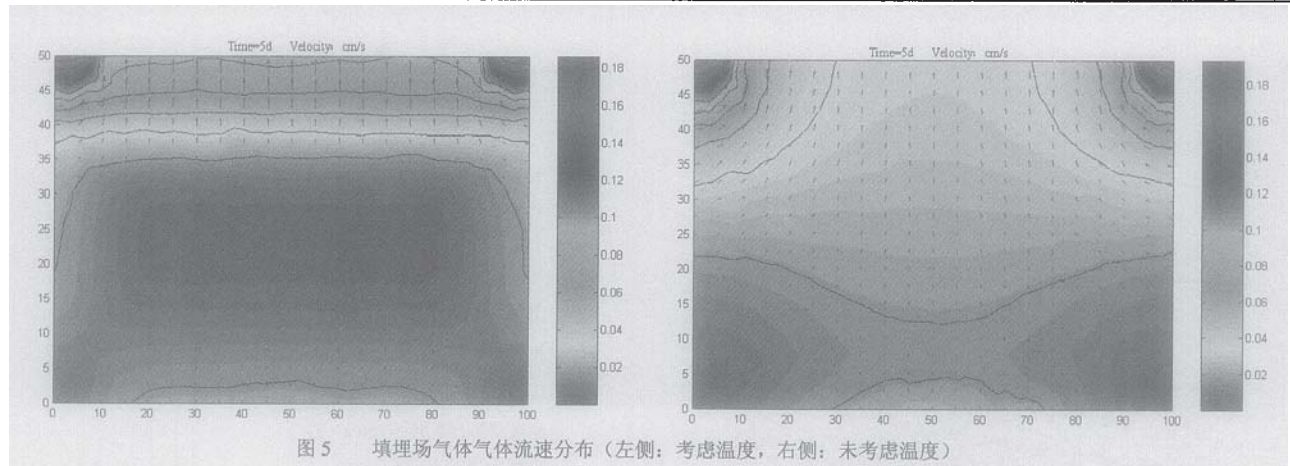


图5 填埋场气体流速分布 (左侧: 考虑温度, 右侧: 未考虑温度)

4 数值结果分析

通过数值模拟结果可以看出, 温度在填埋场气体运移中有重要影响, 主要体现在以下几方面:

(1) 本文基于流体动力学及传热学基本理论, 通过垃圾填埋场中温度场和渗流场耦合机理的研究, 建立了可压缩垃圾填埋气体运移耦合的数学模型, 并采用有限元格式对该耦合模型进行数值求解, 利用编制的有限元程序进行动态可视化模拟;

(2) 从污染气体压力分布可以看出, 考虑温度的气体压力的变化较未考虑温度情况下的气体压力变化快, 即气体压力梯度变化加快, 增大了填埋场内气体的对流, 气体的排放速度增加, 这与气体流速分布(图5)相吻合, 因此, 在填埋场的气体控制系统的优化设计及环境影响预测和评价时必须考虑温度对气体运移的影响;

(3) 由气体压力等直线分布可以看出, 填埋场气体压力随深度的增加而增大, 且随着时间的增长, 其压力变化相对加快, 气体压力消散程度增大, 从而表明耦合模型的非线性程度越高; 而且耦合温度的孔隙压力大于非耦合温度孔隙压力, 从而改变了多孔介质孔隙性, 致使气体渗透率增大, 因此必须考虑温度对垃圾气体运移的影响;

(4) 总之, 温度对垃圾气体的运移产生很大的影响, 考虑温度作用下的耦合动力学模型较以前未耦合温度时模

(上接第 19 页)

参考文献:

[1] Garland M, Heckbert Paul S. Surface Simplification Using Quadric Error Metrics[A]. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH[C]. Los Angeles, California, 1997. 209-216.

[2] Lindstrom P, Turk G. Fast and Memory Efficient Polygonal Simplification[A], Proceedings of IEEE Visualization'98[C]. Research Triangle Park, North Carolina, USA, 1998. 279-286.

[3] Kim Sun-Jeong, Kim Chang-Hun, Levin D. Surface simplification using a discrete curvature norm[J]. Computer & Graphics, 2002, 26(5): 657-663.

[4] Rowe J, Razdan A. A Prototype Digital Library For 3D Collections: Tools To Capture, Model, Analyze, And Query Complex 3D Data[A]. Museums and the Web 2003 (MW 2003)[C]. Charlotte, North Carolina,

型更为切合实际, 可为准确预测和预报填埋气体在土壤中的扩散状况以及气体的收集和排放、防止二次污染提供了可靠的理论依据。

参考文献:

[1] Anderson D R, Callinan J P. Gas generation and movement in landfills, Proceedings of National Industrial Solid Waste Management conference[D]. University of Houston, USA, 1990.

[2] Yong A. Mathematical model of landfill gas extraction [J]. Journal of Environment Engineering, 1989, 115 (6) : 1073-1087.

[3] Massmann J.W. Applying groundwater flow models in vapor extraction system design[J]. Journal of Environmental Engineering, 1989, 5 (1) : 129-149.

[4] 赖远明, 吴紫汪. 寒区隧道温度场, 渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21 (5): 529-533.

[5] 刘亚晨, 蔡永庆. 核废料贮库围岩介质不可逆过程热力学和热弹性[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (3): 361-365.

[6] 张正荣. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989, 133-134.

[7] 张志辉, 薛禹群. 地下水运移中自然对流的研究[J]. 水文地质工程地质, 1995, 22 (4): 16-17,21.

[8] 薛强, 梁冰, 刘晓丽. 填埋气体运移非稳定耦合渗流数学模型[J]. 岩土力学, 2002, 23 (2): 191-195.

[9] 薛强, 梁冰, 孙可明. 填埋气体迁移气-热-力耦合的动力学模型研究[J]. 应用力学学报, 2003, 20 (2): 54-60.

[10] Eva Part-Enander, Anders Sjoberg. The MATLAB 5 Handbook[M]. China Machine Press, 2000.

[11] Ronald W.Falta. Modling Advective Contaminant transport during Soil Vapor Extraction[J]. Ground water, 1993, (31): 1011-1017.

March 2003. 20-24.

[5] 李庆, 周曼丽, 柳健. 基于多分辨率格网的三维物体识别方法[J]. 电子学报, 2001, 29(7): 891-894.

[6] Cignoni P, Rocchini C, Scopigno R. Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces[J]. Computer Graphics Forum, 1998, 17(2): 167-174.

[7] 张丽艳, 周儒荣, 蔡炜斌, 周来水. 三角网格模型重建中的误差分析与显示[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(3): 282-286.

[8] Heckbert P S, Garland M. Multiresolution Modeling for Fast rendering[A]. Proc. Graphics Interface'94[C]. Banff, Canada, 1994. May, 43-57.

[9] Hoppe H. Progressive meshes[A]. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH[C]. New Orleans, Louisiana, 1996. 99-108.