

地下介质三维模型中界面的描述方法

李迎春 徐果明 徐涛

(中国科学技术大学地球和空间科学系,合肥 230026)

[摘要] 介质模型可分为离散模型和连续模型. 离散模型,使用规则网格或不规则网格将空间离散化,网格内介质参数不变. 对连续模型,可用解析函数描述,或者由插值方法得到介质参数的空间分布. 连续模型描述,要素之一是界面的描述方法. 本文借助计算机图形学和计算机辅助几何设计中发展起来的曲线和曲面技术,使用参数形式的 Coons 曲面、Bezier 曲面、B 样条曲面和三角形面片,描述三维地质构造. 结合地震勘探采集系统设计的实际需要,给出一种三角形面片的模型描述方案.

[关键词] 三维模型; Coons 曲面; Bezier 曲面; B 样条曲面; 三角形面片

[中图分类号] P315 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 10042903(2002)0320445207

0 引言

地震模拟技术^[1]主要有积分变换法、波动方程法和射线追踪法. 积分变换法使用的模型是横向均匀介质模型或者球对称介质模型. 人们已经对一维介质模型做了比较充分的研究. 考虑体波、面波和自由振荡,一维非均匀地球模型的理论地震图的计算方法已经建立^[2],例如利用 Cagniard 方法和 Fourier 变换方法研究体波和面波,用 Cagniard 方法和 Fuchs 方法研究有很多均匀平面层组成的介质. 波动方程法是将波动方程离散化,利用数值方法求解方程,主要有有限差分方法和有限元方法. 波动方程法使用的是网格模型,计算量主要取决于网格的多少. 考虑一个三维地质模型^[3],大小为 3000 m × 3000 m × 3000 m,网格间距为 10 m,网格节点数达到 2.7×10^7 . 要使计算结果精度高,则要求更小的网格和更小的时间步长,此方法的使用主要受计算机内存和速度的影响. 比较而言,射线追踪法的计算速度较快,波动方程法能得到方程的完全解,如能得到更精确的振幅值和波形. 波动方程法和射线追踪法可适用于任意复杂的介质. 射线追踪法是建立在射线级数展开基础上的高频近似方法,要求介质性质在一个波长范围内变化不大.

上面几种方法所用的介质模型可分为离散模型和连续模型. 对离散模型,使用规则网格或不规则网格将空间离散化,网格内介质参数不变. 连续模型的物性参数和它的一阶、二阶导数在模型单元内连续变化. 连续模型的界面为物性参数或者它的一阶、二阶导数的不连续面. 构造连续模型的一种方法是通过解析函数得到物性参数的分布,或者由空间的一些离散点的数值,利用线性或者样条函数插值得到模型. Aki^[4](1977)等利用地震台阵记录的地震波到时反演地球内部的三维速度结构,用的是分区均匀的离散速度模型. 刘福田^[5](1989)等在球面坐标系中,用三维空间的六面体网格节点的速度,线性插值得到速度的空间函数,速度界面取为球面,用此模型进行了层析成像方面的研究. 射线追踪^[6-8]有很多种算法,所用

[收稿日期] 2001211218; **[修回日期]** 2002204230.

[基金来源] 国家自然科学基金项目(49974008)资助.

[作者简介] 李迎春,男,1978年生,江苏阜宁人,2000年毕业于中国科学技术大学地球和空间科学系,现在同单位攻读硕士学位. 主要研究地球物理数值模拟和科学计算可视化.

的介质模型也分为连续模型和离散模型. Langan^[9]用了速度梯度为常数的速度块模型, Cer2
veny^[10]等用三次样条插值得到速度分布, 马争鸣^[11](1991)等在二维模型中用 B 样条函数得
到速度函数, 三次样条表示介质分界面, 范会吉^[12](1992)等用最小二乘拟合方法插值得到
速度分布. 文献^[13]介绍了用反正切多项式描述界面. 冯锐^[14](1993)等用网格模型进行了地
震与重力的联合反演, 介质划分为大量的三角形或者四边形单元, 用双线性函数插值得到单
元内部速度, 在间断面, 节点赋予两个速度值. Michelini^[15](1995)利用参数形式的三次 B 样
条函数得到速度分布. 李松林^[16](1997)等用一系列点描述界面, 每一个点赋予两个速度值,
分别对应上层和下层的速度, 介质中每一点的速度由所在的梯形四个顶点的速度二维线性
内插得到, 用此模型进行了速度分布和界面的联合反演.

数为插值条

的分布在

三次 Coon

1.2 Bezi

Bezier

且控制

最基本

结

面：

几种自由曲面构造的模型进行计算时,计算量都比较大.如计算一条直线与双参数曲面的交点时,可以利用数值方法进行迭代计算得到交点.虽然在初值点的选取和迭代方法上进行了改进^[27-31],计算成本仍然较高.对 Bezier 曲面和 B 样条曲面,还可利用它们的几何性质来计算交点^[32].这种算法的根据是:如果一条直线和曲面的凸包不相交,直线和曲面一定不相交,不断细分曲面,可得到交点.但这种计算的成本也是很高的.在地震勘探采集系统的设计中,为了要统计各个检波器所在采集点的覆盖次数,对地下介质进行射线追踪的射线可达数千万条,因而此系统对射线追踪的计算速度要求特别高.为此,我们设计了一种三角形面片的方案,射线追踪的计算速度特别快,而且也能满足采集系统的设计中对射线追踪精度的要求.模型的空间位置用三角形面片描述,三角形上每一点的法线方向根据三角形三个顶点上的法线方向用点的三角形面积坐标插值确定.如图 1,三角形 $T_1 T_2 T_3$ 中, T_1 点、 T_2 点和 T_3 点的坐标给定,则平面 $T_1 T_2 T_3$ 中每一点有一个面积坐标.对点 P ,面积坐标为 (u_1, u_2, u_3) ,

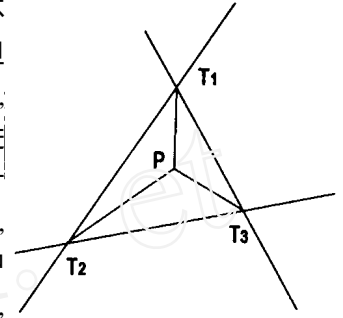


图 1 (Fig. 1)

$$u_1 = \frac{PT_2 T_3}{T_1 T_2 T_3}, u_2 = \frac{T_1 P T_3}{T_1 T_2 T_3}, u_3 = \frac{T_1 T_2 P}{T_1 T_2 T_3} \quad (3)$$

$[PT_2 T_3]$ 表示三角形 $PT_2 T_3$ 的有向面积,即 P, T_2, T_3 是逆时针方向旋转时, $[PT_2 T_3]$ 就是三角形 $PT_2 T_3$ 的面积,当 P, T_2, T_3 顺时针方向旋转时, $[PT_2 T_3]$ 是负数,绝对值是三角形 $PT_2 T_3$ 的面积.令 s 为 P 点对三角形的三个面积坐标的绝对值之和,如果 s 等于 1,则 P 点在三角形内,如果 s 大于 1,则 P 点在三角形外.用这种方法,很容易判断射线与表面上的哪一个三角形相交.相邻的三角形有两种关系:光滑连接和不光滑连接.对需光滑连接的三角形,先确定其中三角形每个顶点的法向量,再插值得到面上每点的法向量.如图 2,对三角形 ABC ,与 A 点相邻的有六个三角形,由这六个平面的法向量根据一定的法则加权平均得到 A 点的法向量,同样得到 B 点、 C 点的法向量.由 A 点、 B 点和 C 点的法向量利用面积坐标插值得到三角形 ABC 上每点的法向量.这样得到的法向量分布在三角形的边上是连续的,例如在三角形 ABC 和三角形 ABD 中,在三角形 ABC 中计算得到 AB 边上的法向量与在三角形 ABD 中计算得到 AB 边上的法向量相同.模型中也有两个面不连续的情况,如果以 FAD 为分界线,两边的法向量不连续变化,那么在计算三角形 ACF 、三角形 ABC 和三角形 ABD 中点的法向量时,点 A 的法向量只能由面 1、2、6 的法向量加权平均得到.同样,计算 FAD 左边的三角形时,点 A 的法向量由面 3、4、5 的法向量加权平均得到.

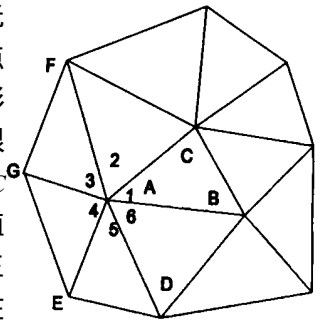


图 2 (Fig. 2)

2 模型实例

图 3 (a)和(b)分别显示了 Coons 曲面和 Bezier 曲面,图中黑点为控制点. Coons 曲面通过控制点,Bezier 曲面不通过控制点. (c)是三角形描述的模型,其中共用了 356 个三角形,(d)

为由一炮点发出射线,最下面的面为反射界面,其它的界面为透射界面.

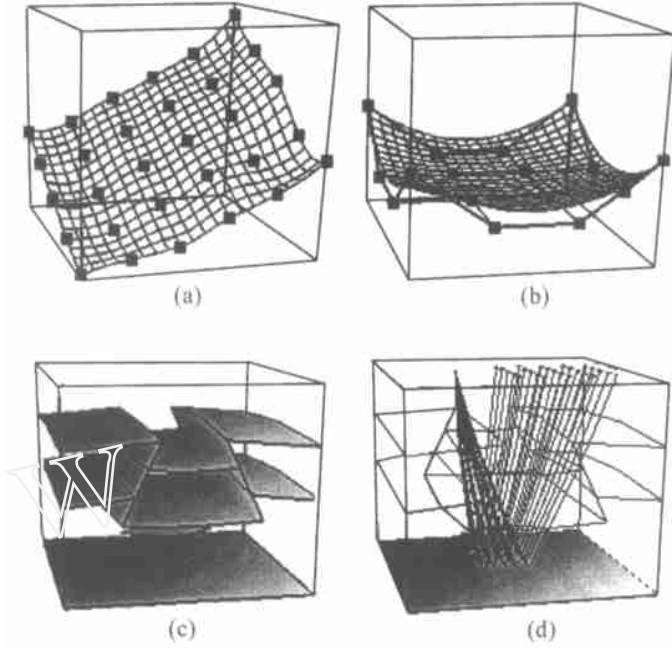


图3 不同曲面模型

Fig.3 Different curve&face model

(a) Coons 曲面, (b) Bezier 曲面, (c) 三角形曲面模型, (d) 三角形曲面模型中的射线追踪

3 小结与讨论

利用 Coons 曲面、Bezier 曲面、B 样条曲面和三角形面片描述三维地质构造,使用的是参数形式的曲面.采用参数形式,可克服数据点分布不规则的困难.利用这些技术,可方便的实现在计算机上交互的建立地质模型.在给出的三角形面片模型中,计算射线追踪的速度较快,因为其中的基本单元是平面,直线与平面的相交问题和点与平面的关系问题的计算较简

- [4] Aki K, Christofferson A, Husebye E S. Determination of the three dimensional seismic structure of the lithosphere[J]. *J. Geophys. Res.*, 1977, 82:277 ~ 296.
- [5] 刘福田,李强,吴华,等.用于速度图像重建的层析成像法[J].*地球物理学报*,1989,32:46 ~ 61.
- [6] 杨文采,李幼铭.应用地震层析成像[M].北京:地质出版社,1993.
- [7] 张钊,刘洪,李幼铭.射线追踪方法的发展现状[J].*地球物理学进展*,2000,15:36 ~ 45.
- [8] Cerveny V. 三维结构中完全地震射线追踪[A].见: Durk J. Doornbos,地震学算法理论[M],北京:地震出版社,1992.
- [9] Langan R T, Lerche I, Culter R T. Tracing of rays through heterogenous media: An accurate and efficient procedure [J]. *Geophysics*, 1985, 50:1456 ~ 1465.
- [10] Cerveny V. 地震学中的射线方法[M].刘福田译,北京:地质出版社,1986.
- [11] 马争鸣,李衍达. 二步法射线追踪[J]. *地球物理学报*, 1992, 34:501 ~ 508.
- [12] 范会吉,刘启元. 分块三维速度模型生成及理论地震图的计算[J]. *地球物理学报*, 1992, 35:721 ~ 732.
- [13] 朱介寿. 地震学中的计算方法[M]. 北京:地震出版社,1988.
- [14] 冯锐,陶裕录. 地震—重力联合反演中的非块状一致性模型[J]. *地球物理学报*, 1993, 36:463 ~ 475.
- [15] Micheline, A. An adaptive grid formalism for traveltimes tomography[J]. *Geophys. J. Int.*, 1995, 121:489 ~ 510.
- [16] 李松林,吴宁远,宋占隆,等. 速度分布和界面位置的联合反演[J]. *地震学报*, 1997, 19:383 ~ 392.
- [17] 苏步青,刘鼎元. 计算几何[M]. 上海:上海科技出版社,1981.
- [18] 王得人,杨忠华. 数值逼近引论[M]. 北京:高等教育出版社,1990.
- [19] 孙家广,杨长贵. 计算机图形学[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
- [20] Goystdal H, Reinhardsen J E, Astebol K. Computer representation of complex 3D geological structures using a new "solid modeling" technique [J]. *Geophysical Prospecting*, 1985, 33(8):1195 ~ 1211.
- [21] Mao W J, Stuart G W. Rapid multiwave type ray tracing in complex 2D and 3D isotropic media [J]. *Geophysics*, 1997, 62(1):298 ~ 308.
- [22] 毛小平,黄延祜. 体元结构模型在三维地震模型正演模拟研究中的应用[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(6):833 ~ 840.
- [23] 刘洪,高红伟,李幼铭,等. 三维复杂地质模型剖分及显示[A]. 寸丹集,庆祝刘光鼎院士工作 50 周年学术论文文集[M]:196 ~ 205,北京:科学出版社,1998.
- [24] 孟小红,王卫民,姚长利,等. 地质模型计算机辅助设计原理与应用[M]. 北京:地质出版社,2001.
- [25] 高红伟,李幼铭. 约束 Delaunay 剖分及其在构造地质模型中的应用[J]. *现代地质*, 1999, B(增刊):87 ~ 91.
- [26] Kajija J. Ray tracing parametric patches, Proceeding of SIGGRAPH '82 [J]. *Computer Graphics*, 1982, 16(3):245 ~ 254.
- [27] Toth D, On ray tracing parametric surfaces, Proceeding of SIGGRAPH '85 [J], *Computer Graphics*, 1985, 19(3):171 ~ 179.
- [28] Joy K I, Bhetanabhotla M N. Ray tracing parametric surface patches utilizing numerical techniques and ray coherence, Proceeding of SIGGRAPH '86 [J]. *Computer Graphics*, 1986, 20(4):279 ~ 285.
- [29] Barth W, Sturzlinger W. Efficient ray tracing for Bezier and B-spline surfaces [J]. *Computers & Graphics*, 1993, 17(4):423 ~ 430.
- [30] Kaihuai Qin, Minglun Gong. A new method for speeding up ray tracing NURBS surfaces [J]. *Computers & Graphics*, 1997, 21(5):577 ~ 586.
- [31] Manocha D, Krishnan S. Algebraic pruning: a fast technique for curve and surface intersection [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 1997, 14(9):823 ~ 845.
- [32] Nishita T, Sederberg T W. Ray tracing Trimmed Rational Surface Patches, Proceeding of SIGGRAPH '90 [J]. *Computer Graphics*, 1990, 24(4):337 ~ 345.

(下转第 455 页) (to be continued on p. 455)

