



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102945570 B

(45) 授权公告日 2014. 03. 05

(21) 申请号 201210480368. 3

的研究. 《系统仿真学报》. 2004, 第 16 卷 (第 3 期),

(22) 申请日 2012. 11. 23

审查员 唐田田

(73) 专利权人 华东师范大学

地址 200241 上海市闵行区东川路 500 号

(72) 发明人 朱良峰 潘信 孙建中

(74) 专利代理机构 上海蓝迪专利事务所 31215

代理人 徐筱梅 张翔

(51) Int. Cl.

G06T 17/05 (2011. 01)

(56) 对比文件

CN 102750734 A, 2012. 10. 24,

CN 102750733 A, 2012. 10. 24,

WO 2012115689 A1, 2012. 08. 30,

张立强等. 三维地形数据的简化和空间分析

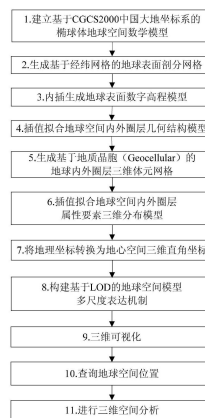
权利要求书3页 说明书13页 附图7页

(54) 发明名称

一种全空间三维数字地球模型的构建方法

(57) 摘要

本发明公开了一种全空间三维数字地球模型的构建方法,包括以下步骤:建立基于 CGCS2000 中国大地坐标系的椭球体地球空间数学模型;生成基于经纬网格的地球表面剖分网格;内插生成地球表面数字高程模型;插值拟合地球空间内外圈层几何结构模型;生成基于地质晶胞(Geocellular)的地球内外圈层三维体元网格;插值拟合地球空间内外圈层属性要素三维分布模型;将地理坐标转换为地心空间三维直角坐标;构建基于 LOD 的地球空间模型多尺度表达机制;三维可视化;查询地球空间位置;进行三维空间分析。本发明的自动性高、适应性强,能够快速、自动的将包含内外圈层的地球空间实体模型在三维空间中重构出来,以三维可视化的形式在计算机显示屏上展现出来并支持各种专业的空间分析。



1. 一种全空间三维数字地球模型的构建方法,其特征在于:建立基于CGCS2000中国大地坐标系的椭球体地球空间数学模型,依次生成地球表面数字地形模型、地球空间内外圈层几何结构模型和地球空间内外圈层属性要素三维分布模型,然后将这些模型放置到地心空间三维直角坐标系中,建立基于细节层次模型的地球空间模型多尺度表达机制,以三维可视化的形式在计算机显示屏上展现出来并进行专业的三维空间分析;其具体步骤是:

步骤1、建立基于CGCS2000中国大地坐标系的椭球体地球空间数学模型

基于一个统一的坐标系即CGCS2000中国大地坐标系定义一个统一的椭球体地球空间,以支持地球空间中任意一点的地理坐标即地理纬度 ϕ 、地理经度 λ 、高程 H 与地心空间三维直角坐标 X 、 Y 、 Z 的相互转换;

步骤2、生成基于经纬网格的地球表面剖分网格

沿着地球椭球面上的经线和纬线,按照固定的经纬度间隔 $5^\circ \times 5^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,分别对地球椭球体表面进行剖分,生成具有4种细节层次的地球表面网格,统一记为 M_{grid} ;

步骤3、内插生成地球表面数字高程模型

以美国地质调查局开发维护的GTOP030全球地表数字高程模型中的地形数据集为基本样本点,加入近年新获取的实测地形高程控制点,形成一个散点数据集 P_{surface} ,集合了地球表面高程插值拟合的样本数据;使用 P_{surface} 中的样本点插值拟合地球表面剖分网格 M_{grid} 中各个结点的高程,生成具有4种细节层次即网格间隔分别为 $5^\circ \times 5^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的地球表面数字高程模型,统一记为 M_{surface} ;在进行地形插值时,使用距离反比加权法、最邻近点法、自然邻近点法、径向基函数法或克里金法;

步骤4、插值拟合地球空间内外圈层几何结构模型

地球的内外两个圈层具有明显不同的结构特征和物理化学性质,需要使用不同的模型和方法来拟合各个圈层及其亚层的控制界面和属性参数特征;

(1) 地球内圈层

地球的内圈层可划分为地壳、地幔、地核三个基本圈层,并可进一步细分为若干亚层;基于现有的地球内部圈层分层模型,首先通过内插的方式计算出内圈层控制界面上各个结点的理论高程值,其各个结点与地球表面剖分网格 M_{grid} 的结点一一对应;然后在实际观测数据的约束下对理论高程值进行修正,拟合出内圈层控制界面的几何形态;最后将所有的内圈层控制界面自上而下堆叠起来,生成具有4种细节层次即网格间隔分别为 $5^\circ \times 5^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的地球内圈层几何结构模型,统一记为 $M_{\text{geometry-inner}}$;

由于地球内圈层的顶面即地壳的顶面与地球表面重合,地球内圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-inner}}$ 顶面结点的高程应与地球表面数字高程模型 M_{surface} 对应结点的高程完全一致;如果两者不一致,则逐个修改 $M_{\text{geometry-inner}}$ 顶面结点的高程,使其与 M_{surface} 对应结点的高程完全相同;

(2) 地球外圈层

根据气温变化及密度情况,地球的外圈层即大气圈自下而上分为对流层、平流层、中间层、热成层、外逸层五个基本圈层,各层结构形态比较简单,层间具有连续的分界面;基于这种大气空间分层模型,通过内插的方式计算出外圈层控制界面上各个结点的理论高

程值,其各个结点与地球表面剖分网格 M_{grid} 的结点一一对应;然后在实际观测数据的约束下对理论高程值进行修正,拟合出外圈层控制界面的几何形态;最后将所有的外圈层控制界面自上而下堆叠起来,生成具有4种细节层次即网格间隔分别为 $5^\circ \times 5^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的地球外圈层几何结构模型,统一记为 $M_{\text{geometry-outer}}$;

由于地球外圈层的底面即对流层的底面与地球表面重合,地球外圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-outer}}$ 底面结点的高程应与地球表面数字高程模型 M_{surface} 对应结点的高程完全一致;如果两者不一致,则逐个修改 $M_{\text{geometry-outer}}$ 底面结点的高程,使其与 M_{surface} 对应结点的高程完全相同;

步骤5、生成基于地质晶胞的地球内外圈层三维体元网格

对于地球的内圈层,以内圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-inner}}$ 中自上而下堆叠起来的间隔为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的正方形网格为空间基准,使用三维空间离散化方法对各个亚层顶面正方形网格和底面正方形网格所围成的空间进行剖分,生成用地质晶胞体元充填的三维实体模型;然后对三维实体模型在纵向上进行细分加密,生成逼近实际控制界面的地球内圈层三维体元网格 $M_{\text{volume-inner}}$;

对于地球的外圈层,以外圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-outer}}$ 中自上而下堆叠起来的间隔为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的正方形网格为空间基准,使用三维空间离散化方法对各个亚层顶面正方形网格和底面正方形网格所围成的空间进行剖分,生成用地质晶胞体元充填的三维实体模型;然后对三维实体模型在纵向上进行细分加密,生成逼近实际控制界面的地球外圈层三维体元网格 $M_{\text{volume-outer}}$;

步骤6、插值拟合地球空间内外圈层属性要素三维分布模型

基于现有的地球空间属性要素分布数值模式,首先使用内插的方式计算出地球内外圈层三维体元网格 $M_{\text{volume-inner}}$ 和 $M_{\text{volume-outer}}$ 上各个地质晶胞结点的属性要素理论值;然后在实际观测数据的约束下对属性要素理论值进行调整、优化,拟合出各个体元网格位置处的属性要素值,生成地球空间内外圈层属性要素三维分布模型,分别记为 $M_{\text{property-inner}}$ 和 $M_{\text{property-outer}}$,以反映各种属性要素在三维地球空间内的变化特征;在进行属性要素插值时,选用距离反比加权法、最邻近点法、自然邻近点法、径向基函数法或克里金法;

步骤7、将地理坐标转换为地心空间三维直角坐标

按照前述步骤生成的地球表面数字高程模型 M_{surface} 、内圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-inner}}$ 、外圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-outer}}$ 、内圈层属性要素三维分布模型 $M_{\text{property-inner}}$ 和外圈层属性要素三维分布模型 $M_{\text{property-outer}}$,其几何坐标数据都是基于地理坐标的,将这些地理坐标变换为地心空间三维直角坐标;在CGCS2000中国大地坐标系下,由地理坐标即地理纬度 ϕ 、地理经度 λ 、高程 H 变换为地心空间三维直角坐标 X 、 Y 、 Z ,由以下公式计算:

$$X = (N+H) \cos \phi \cos \lambda ;$$

$$Y = (N+H) \cos \phi \sin \lambda ;$$

$$Z = [N(1-e^2) + H] \sin \phi ;$$

式中: N 为东西圆曲率半径, $N=a / (1-e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}$; a 为地球长半轴, $a=6378137\text{m}$; e^2 为第一偏心率平方, $e^2=0.00669438002290$;

使用上述公式,将地球表面数字高程模型 M_{surface} 、内圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-inner}}$ 、外圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-outer}}$ 、内圈层属性要素三维分布模型 $M_{\text{property-inner}}$ 和外圈层属性要

素三维分布模型 $M_{\text{property-outer}}$ 的几何坐标逐一变换为地心空间三维直角坐标,变换后的模型分别记为 M'_{surface} 、 $M'_{\text{geometry-inner}}$ 、 $M'_{\text{geometry-outer}}$ 、 $M'_{\text{property-inner}}$ 和 $M'_{\text{property-outer}}$;

步骤 8、构建基于细节层次模型的地球空间模型多尺度表达机制

经过步骤 7 坐标变换后的地球空间模型可分为两类:一类是三维矢量模型即 M'_{surface} 、 $M'_{\text{geometry-inner}}$ 和 $M'_{\text{geometry-outer}}$;一类是三维体元模型即 $M'_{\text{property-inner}}$ 和 $M'_{\text{property-outer}}$;需要使用细节层次模型方法对这些复杂的三维模型进行不同程度的简化,然后存储到服务器端的空间数据库中,通过部署在服务器端的 Web 服务来处理客户端发送的地球空间模型传输和可视化请求;

对于三维矢量模型 M'_{surface} 、 $M'_{\text{geometry-inner}}$ 和 $M'_{\text{geometry-outer}}$,使用静态 LOD 方法,在服务器端的空间数据库保存三维矢量模型的 4 个副本,每一副本对应某一特定的分辨率即网格间隔分别为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 和 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,所有副本构成一个金字塔结构;在数据传输和实时显示时,根据当前的场景条件如模型到视点的距离、投影后的模型在图像空间所占的像素面积及光照强弱选用合适的细节层次模型;

对于三维体元模型 $M'_{\text{property-inner}}$ 和 $M'_{\text{property-outer}}$,首先在服务器端的空间数据库中保存一个网格间隔为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的全细节的体元模型,然后从这个全细节的体元模型出发,使用渐进网格法进行模型简化,在服务器端实时生成不同尺度的低细节程度的模型;

步骤 9、三维可视化

经过步骤 8 处理后的地球空间模型统一存储在服务器端的空间数据库中;基于 Web 服务,服务器接收到客户端发送的地球空间模型请求;然后根据客户端提供的空间参数,通过 LOD-Rree 空间索引进行模型检索,获取特定范围和细节程度的模型数据,然后通过网络渐进传输到客户端;客户端建立数据缓存,在计算机显示器上绘制出地球空间模型,以不同的颜色和亮度代表不同的圈层和属性要素;

步骤 10、查询地球空间位置

在客户端,利用鼠标来查询地球空间任意位置处的空间坐标;由于通过计算机鼠标拾取捕捉到的空间坐标是基于地心空间三维直角坐标系的,而地心空间三维直角坐标不便于理解和交流,故需要将其变换为地理坐标;在 CGCS2000 中国大地坐标系下,由地心空间三维直角坐标 X 、 Y 、 Z 变换为地理坐标即地理纬度 ϕ 、地理经度 λ 、高程 H ,由以下公式计算:

$$H=P/\cos \phi - N;$$

$$\lambda = \text{tg}^{-1}(Y/X);$$

$$\phi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{Z + (e')^2 b \sin^3 \theta}{P - e^2 a \cos^3 \theta}\right);$$

式中: a 为地球长半轴, $a=6378137\text{m}$; b 为地球短半径, $b=6356752.31414\text{m}$; N 为东西圆曲率半径, $N=a / (1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}$; e^2 为第一偏心率平方, $e^2=0.00669438002290$; $(e')^2 = (a^2 - b^2) / b^2$; $P = (X^2 + Y^2)^{1/2}$; $\theta = \text{tg}^{-1}(Za/Pb)$;

步骤 11、进行三维空间分析

在客户端,通过鼠标和键盘传统的交互设备对显示器上显示的地球空间模型进行常规的可视化展示与专业的三维分析,包括三维观察、交互定位、属性查询、模型剖切、隧洞开挖、体积量算、虚拟漫游与内外圈层无缝切换。

一种全空间三维数字地球模型的构建方法

技术领域

[0001] 本发明涉及地球空间信息技术领域中的数字地球技术,具体地说是一种全空间三维数字地球模型的构建方法,该方法针对地球空间探测数据进行处理,能够解决包含地球内外圈层的三维数字地球模型重构和分析过程中所遇到的各种难题。

背景技术

[0002] 自 1998 年时任美国副总统的 Al Gore 在加利福尼亚科学中心首次提出“数字地球”的概念并勾绘出其远景目标以来,数字地球的基础理论及实现技术在全球范围内取得了重要进展,涌现出一系列技术成熟、功能强大的数字地球软件系统,如 Google Earth、NASA World Wind、Microsoft Virtual Earth、ESRI ArcGIS Explorer 等。作为第一代数字地球系统的典范,这些系统不仅具有浏览、查询、发现空间对象和空间现象的功能,还为地学研究和教育提供了一个探索、发现、分析、交流的平台,具有增强科学的能力。目前,数字地球模型已广泛融入社会大众的日常生活、科学家的科学研究与学术交流、教育工作者的教学实践之中。

[0003] 以 Google Earth 为代表的第一代数字地球模型只能提供并可可视化展示地球表层信息模型,它们对以地理空间实体为研究对象的地理科学研究具有很大的帮助。但是,当将这些现有的数字地球模型应用到地球科学其它学科(如气象学、地质学、地球物理学等)研究或进行地球系统多学科综合集成研究时,会发现其在模型设计和功能实现上存在着很大的不足。主要问题涉及以下两个方面:

[0004] (1) 现有的数字地球模型对地球空间的表达存在着维度缺陷,难以全面的描述和表达真三维的地球空间信息。第一代数字地球模型都是建立在对地球表面的格网剖分这一空间数据模型基础上的,它们对地球空间的剖分基准是地球表面,认为地球表面可看作是由不同级别、不断细分的格网镶嵌套合、无缝连接而成,在每个格网单元上都可叠置对应的图形、图像、模型等空间实体。这种地球空间表达方式实质上只是一种二维剖分表达,仅停留在地球表面,主要是针对地理空间实体的建模、可视化及分析来设计的,未涉及地表以上的大气空间和地表以下的地质空间,很难应用于地球内外圈层空间中三维实体的建模与分析,无法满足航空航天、气候气象、地质矿产、大型工程建设等领域的需求。

[0005] (2) 现有的数字地球模型的三维可视化与空间分析能力较弱,无法对真三维地球空间实体进行高级体可视化展示和专业的三维空间分析。利用空间信息的多尺度表达与自适应可视化技术,第一代数字地球系统能高效的进行 2 维矢量图形、栅格影像、2.5 维数字高程模型、3 维矢量模型的网络传输和可视化,但难以进行大规模三维体元数据的快速传输与可视化。三维体元数据广泛应用于地质空间和大气空间物理化学属性要素的建模与分析。另外,第一代数字地球模型大多不具备现代地球科学研究所亟需的真三维空间分析功能,无法对大气空间和地质空间内的三维体元模型进行浏览、查询、剖切、钻探等操作,难以对地球空间对象的时空关系、属性要素的三维展布、地球空间内的流体运动等进行可视化的模拟与分析。

[0006] 20 世纪 70 年代以来,随着一系列地球观测计划和深部探测计划相继启动,人类对地球的认知与活动范围已扩展到整个地球空间,包括地表、地下、大气层和电离层等。第一代数字地球模型的缺陷使三维地球空间信息的有效表达与可视处理受到严重的制约,也使其在地质、地球物理、海洋、气象等众多领域中的深入应用受到很大的限制。现代地球科学研究迫切需要对具有真三维特性的地球空间实体和现象进行统一的组织、表达、管理、建模、可视化、分析和应用,构建空间维度完整、空间分析功能完善、能显示和分析具有多源、异构、海量特性的三维地球空间信息的新一代全空间数字地球模型显得极为必要。

发明内容

[0007] 数字地球模型是一个以地球坐标为依据的、具有多分辨率的海量数据和多维显示的虚拟地球模型,它需要将地球空间内的所有信息都进行数字化。以地球表面为界,地球空间可划分为外圈层和内圈层两部分。地球的外圈层主要由大气组成,称作大气空间。地球的内圈层是指地表以下的固体地球部分,称作地质空间。地球的内外两个圈层具有明显不同的结构特征和物理化学性质,需要使用不同的数值模型和计算方法来拟合各个圈层及其亚层的控制界面和属性参数特征。所谓全空间三维数字地球模型,是指在一个统一的坐标系支撑下,将地球内外圈层的几何结构特征模型和物理化学属性特征模型放置在一个统一的椭球体地球空间中,并将这些模型以三维可视化的形式在计算机显示屏上展现出来,以支持专业的三维分析及应用。

[0008] 本发明的目的是针对现有数字地球模型构建技术的不足而提供一种使用地球空间探测数据自动构建全空间三维数字地球模型的方法,该方法能够快速、自动的将包含内外圈层的地球空间实体模型在三维空间中重构出来,然后在计算机显示屏上展现出来并支持专业的三维空间分析。其要解决的技术问题可分解为四个方面:要解决地球表面数字高程模型的插值拟合问题;要解决地球空间内外圈层几何结构模型的插值拟合问题;要解决地球空间内外圈层属性要素三维分布模型的插值拟合问题;要解决地球空间三维模型的多尺度表达问题。

[0009] 本发明所采用的具体技术方案是:

[0010] 一种全空间三维数字地球模型的构建方法,该方法首先建立基于 CGCS2000 中国大地坐标系的椭球体地球空间数学模型,然后依次生成地球表面数字地形模型、地球空间内外圈层几何结构模型和地球空间内外圈层属性要素三维分布模型,接着将这些模型放置到地心空间三维直角坐标系中,建立基于 LOD (细节层次模型)的地球空间模型多尺度表达机制,以三维可视化的形式在计算机显示屏上展现出来并进行专业的三维空间分析。本发明的具体工作步骤如下:

[0011] 第一步建立基于 C GCS2000 中国大地坐标系的椭球体地球空间数学模型

[0012] 建模过程的第一步,就是基于一个统一的坐标系(CGCS2000 中国大地坐标系)定义一个统一的椭球体地球空间,以支持地球空间中任意一点的地理坐标(地理纬度 φ ,地理经度 λ ,高程 H)与地心空间三维直角坐标(X, Y, Z)的相互转换。

[0013] CGCS2000 (英文全名为 China Geodetic Coordinate System 2000)中国大地坐标系是全球地心坐标系在中国的具体体现,是中国当前最新的国家大地坐标系。CGCS2000 的坐标原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心,Z 轴由原点指向历元 2000.0 的地球

参考极的方向,该历元的指向由国际时间局给定的历元为 1984.0 的初始指向推算,定向的时间演化保证相对于地壳不产生残余的全球旋转, X 轴由原点指向格林尼治参考子午线与地球赤道面(历元 2000.0)的交点, Y 轴与 Z 轴、X 轴构成右手正交坐标系。CGCS2000 采用广义相对论意义下的尺度。CGCS2000 中国大地坐标系采用的地球椭球参数如下:地球长半轴 $a=6378137\text{m}$;地球短半径 $b=6356752.31414\text{m}$;扁率 $f=1/298.257222101$;第一偏心率平方 $e^2=0.00669438002290$;地心引力常数 $GM=3.986004418\times 10^{14}\text{m}^3\text{s}^{-2}$;自转角速度 $\omega=7.292115\times 10^{-5}\text{rad s}^{-1}$ 。

[0014] 第二步生成基于经纬网格的地球表面剖分网格

[0015] 沿着地球椭球面上的经线和纬线,按照固定的经纬度间隔($5^\circ\times 5^\circ$ 、 $1^\circ\times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$),分别对地球椭球体表面进行剖分,生成具有 4 种细节层次(LOD, Level of detail)的地球表面网格,统一记为 M_{grid} 。

[0016] 第三步内插生成地球表面数字高程模型

[0017] 以美国地质调查局开发维护的 GTOPO30 全球地表数字高程模型中的地形数据集为基本样本点,加入近年新获取的实测地形高程控制点,形成一个散点数据集 P_{surface} ,集合了地球表面高程插值拟合的样本数据。使用 P_{surface} 中的样本点插值拟合地球表面剖分网格 M_{grid} 中各个结点的高程,生成具有 4 种细节层次(网格间隔分别为 $5^\circ\times 5^\circ$ 、 $1^\circ\times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$)的地球表面数字高程模型,统一记为 M_{surface} 。

[0018] GTOPO30 是美国地质调查局(USGS)开发维护的一个基于规则经纬网格的全球地表数字高程模型,它采用的经纬网格间距是 30 弧秒(0.0083333333333333° ,大约 1 千米),能满足构建精细的全球地表数字地形模型的需要。

[0019] 在进行地形插值时,可使用距离反比加权法、最邻近点法、自然邻近点法、径向基函数法或克里金(Kriging)法等常用的插值算法。

[0020] 第四步插值拟合地球空间内外圈层几何结构模型

[0021] 以地球表面为界,地球空间可划分为外圈层和内圈层两部分。地球的外圈层主要由大气组成,称作大气空间。地球的内圈层是指地表以下的固体地球部分,称作地质空间。地球的内外两个圈层具有明显不同的结构特征和物理化学性质,需要使用不同的模型和方法来拟合各个圈层及其亚层的控制界面和属性参数特征,下面分别描述。

[0022] (1) 地球内圈层

[0023] 对于地球的内圈层,可划分为地壳、地幔、地核等三个基本圈层,并可进一步细分为若干亚层,如:全球地壳可划分为 7 个亚层,包括冰、水、软沉积层、硬沉积层、上地壳、中地壳和下地壳;地幔可分为上地幔和下地幔两个亚层;地核可分为外核和内核两个亚层。为了从宏观上定量的描述地球内圈层的几何结构特征,地球科学家编制了一系列的地球分层模型(如布伦模型、初步地球参考模型 PREM)。基于这些现有的地球内部圈层分层模型,本发明首先通过内插的方式计算出内圈层控制界面上各个结点(这些结点与地球表面剖分网格 M_{grid} 的结点一一对应)的理论高程值;然后在实际观测数据的约束下对理论高程值进行修正,拟合出内圈层控制界面的几何形态;最后将所有的内圈层控制界面自上而下堆叠起来,生成具有 4 种细节层次(网格间隔分别为 $5^\circ\times 5^\circ$ 、 $1^\circ\times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$)的地球内圈层几何结构模型,统一记为 $M_{\text{geometry-inner}}$ 。

[0024] 由于地球内圈层的顶面(即地壳的顶面)与地球表面重合,地球内圈层几何结构模

型 $M_{\text{geometry-inner}}$ 顶面结点的高程应与地球表面数字高程模型 M_{surface} 对应结点的高程完全一致。如果两者不一致,则逐个修改 $M_{\text{geometry-inner}}$ 顶面结点的高程,使其与 M_{surface} 对应结点的高程完全相同。

[0025] (2) 地球外圈层

[0026] 根据气温变化及密度情况,地球的外圈层(大气圈)自下而上分为对流层、平流层、中间层、热成层、外逸层等五个基本圈层,各层结构形态比较简单,层间具有连续的分界面。基于这种大气空间分层模型,本发明通过内插的方式计算出外圈层控制界面上各个结点(这些结点与地球表面剖分网格 M_{grid} 的结点一一对应)的理论高程值;然后在实际观测数据的约束下对理论高程值进行修正,拟合出外圈层控制界面的几何形态;最后将所有的外圈层控制界面自上而下堆叠起来,生成具有 4 种细节层次(网格间隔分别为 $5^\circ \times 5^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$) 的地球外圈层几何结构模型,统一记为 $M_{\text{geometry-outer}}$ 。

[0027] 由于地球外圈层的底面(即对流层的底面)与地球表面重合,地球外圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-outer}}$ 底面结点的高程应与地球表面数字高程模型 M_{surface} 对应结点的高程完全一致。如果两者不一致,则逐个修改 $M_{\text{geometry-outer}}$ 底面结点的高程,使其与 M_{surface} 对应结点的高程完全相同。

[0028] 第五步生成基于地质晶胞(Geocellular)的地球内外圈层三维体元网格

[0029] 对于地球的内圈层,本发明以内圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-inner}}$ 中自上而下堆叠起来的正方形网格(网格间隔为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$) 为空间基准,使用三维空间离散化方法对各个亚层顶面正方形网格和底面正方形网格所围成的空间进行剖分,生成用地质晶胞(Geocellular)体元充填的三维实体模型;然后对三维实体模型在纵向上进行细分加密,生成逼近实际控制界面的地球内圈层三维体元网格 $M_{\text{volume-inner}}$ 。

[0030] 对于地球的外圈层,本发明以外圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-outer}}$ 中自上而下堆叠起来的正方形网格(网格间隔为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$) 为空间基准,使用三维空间离散化方法对各个亚层顶面正方形网格和底面正方形网格所围成的空间进行剖分,生成用地质晶胞(Geocellular)体元充填的三维实体模型;然后对三维实体模型在纵向上进行细分加密,生成逼近实际控制界面的地球外圈层三维体元网格 $M_{\text{volume-outer}}$ 。

[0031] 第六步 插值拟合地球空间内外圈层属性要素三维分布模型

[0032] 地球圈层内部不仅具有复杂的结构形态,还蕴含着随空间位置变化的属性特征要素,如描述地球外部圈层大气空间环境要素属性的大气密度、温度、压力、成分及变化等,描述地球内部物理化学属性的地震波反射速度、弹性模量、重力分布等。为了从宏观上定量的描述地球空间属性要素的平均分布状态,地球科学家编制了各种空间属性要素分布的数值模式,如:描述地球内圈层属性要素分布的初步地球参考模型 PREM;描述地球外圈层电离层等离子体的 IRI2001 模式;描述外圈层中性大气的 MSIS2000 模式等。本发明基于这些数值模式生成地球空间内外圈层属性要素三维分布模型。

[0033] 基于现有的地球空间属性要素分布数值模式,本发明首先使用内插的方式计算出地球内外圈层三维体元网格(包括 $M_{\text{volume-inner}}$ 和 $M_{\text{volume-outer}}$) 上各个地质晶胞结点的属性要素理论值;然后在实际观测数据的约束下对属性要素理论值进行调整、优化,拟合出各个体元网格位置处的属性要素值,生成地球空间内外圈层属性要素三维分布模型(分别记为

$M_{\text{property-inner}}$ 和 $M_{\text{property-outer}}$), 以反映各种属性要素在三维地球空间内的变化特征。在进行属性要素插值时, 同样可选用距离反比加权法、最邻近点法、自然邻近点法、径向基函数法或 Kriging 法等常用的插值算法。

[0034] 第七步将地理坐标转换为地心空间三维直角坐标

[0035] 按照前述步骤生成的地球表面数字高程模型 M_{surface} 、内圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-inner}}$ 、外圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-outer}}$ 、内圈层属性要素三维分布模型 $M_{\text{property-inner}}$ 和外圈层属性要素三维分布模型 $M_{\text{property-outer}}$, 其几何坐标数据都是基于地理坐标的, 需要将这些地理坐标变换为地心空间三维直角坐标。

[0036] 在 CGCS2000 中国大地坐标系下, 由地理坐标 (地理纬度 φ , 地理经度 λ , 高程 H) 变换为地心空间三维直角坐标 (X, Y, Z) , 可由以下公式计算:

[0037]

$$X = (N+H) \cos\varphi \cos\lambda;$$

[0038]

$$Y = (N+H) \cos\varphi \sin\lambda;$$

[0039]

$$Z = [N(1-e^2)+H] \sin\varphi;$$

[0040] 式中: N 为东西圆曲率半径, $N = a / (1 - e^2 \sin^2\varphi)^{1/2}$; a 为地球长半轴, $a = 6378137\text{m}$; e^2 为第一偏心率平方, $e^2 = 0.00669438002290$ 。

[0041] 本发明使用上述公式, 将地球表面数字高程模型 M_{surface} 、内圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-inner}}$ 、外圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-outer}}$ 、内圈层属性要素三维分布模型 $M_{\text{property-inner}}$ 和外圈层属性要素三维分布模型 $M_{\text{property-outer}}$ 的几何坐标逐一变换为地心空间三维直角坐标, 变换后的模型分别记为 M'_{surface} 、 $M'_{\text{geometry-inner}}$ 、 $M'_{\text{geometry-outer}}$ 、 $M'_{\text{property-inner}}$ 和 $M'_{\text{property-outer}}$ 。

[0042] 第八步 构建基于 LOD 的地球空间模型多尺度表达机制

[0043] 经过第七步坐标变换后的地球空间模型 (包括 M'_{surface} 、 $M'_{\text{geometry-inner}}$ 、 $M'_{\text{geometry-outer}}$ 、 $M'_{\text{property-inner}}$ 和 $M'_{\text{property-outer}}$) 都是三维模型。这些三维模型可分为两类: 一类是三维矢量模型 (包括 M'_{surface} 、 $M'_{\text{geometry-inner}}$ 和 $M'_{\text{geometry-outer}}$); 一类是三维体元模型 (包括 $M'_{\text{property-inner}}$ 和 $M'_{\text{property-outer}}$)。这些模型的几何形状复杂、数据量大, 在现有的微型计算机平台下, 地球空间三维模型的快速存取、及时更新、实时渲染等各个环节都面临着很大的考验。为了提高三维地球空间模型的存取效率、显示速度, 减少模型绘制时间, 增强三维数字地球模型与用户交互的实时性, 本发明借鉴多尺度表达的思想, 将复杂的三维模型进行不同程度的简化并存储到服务器端的空间数据库中, 然后再采用 LOD (Level of detail, 细节层次模型) 方法进行管理, 通过部署在服务器端的 Web 服务来处理客户端发送的地球空间模型传输和可视化请求。

[0044] LOD 是指生成或绘制细节程度逐渐变化的一组目标模型。LOD 模型可分为两类: 静态 LOD 模型和动态 LOD 模型。由于三维地球空间模型的复杂性, 本发明针对三维矢量模型和三维体元模型这两类模型的不同特点, 分别使用静态 LOD 与动态 LOD 这两种方法。

[0045] 对于三维矢量模型 (包括 M'_{surface} 、 $M'_{\text{geometry-inner}}$ 和 $M'_{\text{geometry-outer}}$), 本发明使用静态 LOD 方法, 在服务器端的空间数据库保存三维矢量模型的 4 个副本, 每一副本对应某一特定的分辨率 (网格间隔分别为 $5^\circ \times 5^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$), 所有

副本构成一个金字塔结构；在数据传输和实时显示时，根据当前的场景条件（如模型到视点的距离、投影后的模型在图像空间所占的像素面积及光照强弱等）选用合适的细节层次模型。

[0046] 三维体元模型（包括 $M'_{\text{property-inner}}$ 和 $M'_{\text{property-outer}}$ ）可以方便地进行简化操作。因此，本发明首先在服务器端的空间数据库中保存一个全细节的体元模型（网格间隔为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ），然后从这个全细节的体元模型出发，使用动态 LOD 方法中的渐进网格法进行模型简化，在服务器端实时生成不同尺度的低细节程度的模型。在模型网络传输和可视化时，根据模型中心与视点的距离大小确定调用具有何种层次细节的模型，而不必每次都选用全细节的三维体元模型。这样可以极大的降低数据传输流量和场景中的体元数量，而且能够保证模型几何数据的一致性和视觉的连续性，可以实现相邻 LOD 模型间的平滑过渡。

[0047] 第九步三维可视化

[0048] 经过第八步处理后的地球空间模型（包括三维体元模型和三维矢量模型两类）统一存储在服务器端的空间数据库中，其中：三维体元模型在数据库中只存储单一尺度（网格间隔为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ）的高精度模型，三维矢量模型在数据库中存储 4 个细节层次的模型。这些模型最终需要在客户端的显示器上进行可视化与分析。基于 Web 服务，服务器接收到客户端发送的地球空间模型请求；然后根据客户端提供的空间参数（包括场景范围和视点位置）通过 LOD-Rree 空间索引进行模型检索，获取特定范围和细节程度的模型数据，然后通过网络渐进传输到客户端；客户端建立数据缓存，在计算机显示器上绘制出地球空间模型，以不同的颜色和亮度代表不同的圈层和属性要素。

[0049] 在客户端进行三维地球空间模型的可视化时，为了完整、连续的显示海量三维地球空间信息，增强用户对大规模地球空间信息的理解，本发明使用“焦点+场景”（Focus-context）可视化技术，让用户不仅可以看到其感兴趣的对象的几何细节，同时还可以看到其周围信息的一个整体印象。

[0050] 第十步查询地球空间位置

[0051] 在客户端，可利用鼠标来查询地球空间任意位置处的空间坐标。由于通过计算机鼠标拾取捕捉到的空间坐标是基于地心空间三维直角坐标系的，而地心空间三维直角坐标不便于理解和交流，故需要将其变换为地理坐标。

[0052] 在 CGCS2000 中国大地坐标系下，由地心空间三维直角坐标 (X, Y, Z) 变换为地理坐标（地理纬度 φ ，地理经度 λ ，高程 H ），可由以下公式计算：

[0053]

$$H = P / \cos \varphi - N;$$

[0054] $\lambda = \text{tg}^{-1}(Y/X)$ ；

[0055]

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{Z + (e')^2 b \sin^3 \theta}{P - e^2 a \cos^3 \theta} \right);$$

[0056] 式中： a 为地球长半轴， $a=6378137\text{m}$ ； b 为地球短半径， $b=6356752.31414\text{m}$ ； N 为东西圆曲率半径， $N=a/(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}$ ； e^2 为第一偏心率平方， $e^2=0.00669438002290$ ； $(e')^2=(a^2-b^2)/b^2$ ； $P=(X^2+Y^2)^{1/2}$ ； $\theta=\text{tg}^{-1}(Za/Pb)$ 。

[0057] 第十一步进行三维空间分析

[0058] 在客户端,可通过鼠标和键盘等传统的交互设备对显示器上显示的地球空间模型进行常规的可视化展示与专业的三维分析,如三维观察、交互定位、属性查询、模型剖切、隧洞开挖、体积量算、虚拟漫游与内外圈层无缝切换等。通过这些操作,可为全方位、多角度的认识和理解地球空间内外圈层结构特征与属性变化规律提供强有力的支持。

[0059] 本发明能够快速、自动的将包含内外圈层的地球空间实体模型在三维空间中重构出来,并以三维可视化的形式在计算机显示屏上展现出来,同时支持各种专业的三维空间分析。与背景技术相比,本发明的有益效果是:自动性高,能充分挖掘地球空间探测数据所揭示、隐含的地球空间信息,自动利用现有的全球数字高程模型、地球空间几何结构模型以及地球空间属性要素分布数值模式,自动生成地球表面数字高程模型、地球空间内外圈层几何结构模型和地球空间内外圈层属性要素三维分布模型,从而达到自动构建三维数字地球模型的目的;本发明的适应性强,不仅具有地球表面地形建模分析的功能,还可进行地球内外圈层几何结构模型与属性要素场模型的三维重建与可视化分析,能够进行地球内外圈层与地球表面的无缝集成与可视化。

附图说明

[0060] 图 1 是本发明流程示意图;

[0061] 图 2 是本发明按照 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 的经纬度间隔对地球表面进行剖分后生成的地球表面剖分网格;

[0062] 图 3 是本发明实施例实现的全空间三维数字地球模型全貌在计算机上展示的效果截图;

[0063] 图 4 是本发明实施例实现的地球表面数字高程模型与地表遥感影像叠加显示的效果截图;

[0064] 图 5 是本发明实施例实现的地球内圈层几何结构模型与地表三维模型叠加显示的效果截图;

[0065] 图 6 是本发明实施例实现的地球内圈层属性要素(纵波波速)三维分布模型剖切显示的效果截图;

[0066] 图 7 是本发明实施例实现的地球内部虚拟漫游与空间属性查询效果截图;

[0067] 图 8 是本发明实施例实现的地球内外圈层模型叠加并进行剖切的效果截图。

具体实施方式

[0068] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0069] 参阅图 1 所示,本发明首先建立基于 CGCS2000 中国大地坐标系的椭球体地球空间数学模型,然后依次生成地球表面数字地形模型、地球空间内外圈层几何结构模型和地球空间内外圈层属性要素三维分布模型,接着将这些模型放置到地心空间三维直角坐标系中,建立基于 LOD 的地球空间模型多尺度表达机制,以三维可视化的形式在计算机显示屏上展现出来并进行专业的三维空间分析。本发明可在微机平台、OpenGL 图形库下采用 Microsoft Visual C++ 语言开发实现,具体实施方式如下:

[0070] 第一步建立基于 CGCS2000 中国大地坐标系的椭球体地球空间数学模型

[0071] 建模过程的第一步,就是基于一个统一的坐标系(CGCS2000 中国大地坐标系)定义一个统一的椭球体地球空间,以支持地球空间中任意一点的地理坐标(地理纬度 φ ,地理经度 λ ,高程 H)与地心空间三维直角坐标(X, Y, Z)的相互转换。

[0072] CGCS2000(英文全名为 China Geodetic Coordinate System 2000)中国大地坐标系是全球地心坐标系在中国的具体体现,是中国当前最新的国家大地坐标系。CGCS2000的坐标原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心, Z 轴由原点指向历元 2000.0 的地球参考极的方向,该历元的指向由国际时间局给定的历元为 1984.0 的初始指向推算,定向的时间演化保证相对于地壳不产生残余的全球旋转, X 轴由原点指向格林尼治参考子午线与地球赤道面(历元 2000.0)的交点, Y 轴与 Z 轴、 X 轴构成右手正交坐标系。CGCS2000 采用广义相对论意义下的尺度。CGCS2000 中国大地坐标系采用的地球椭球参数如下:地球长半轴 $a=6378137\text{m}$;地球短半径 $b=6356752.31414\text{m}$;扁率 $f=1/298.257222101$;第一偏心率平方 $e^2=0.00669438002290$;地心引力常数 $GM=3.986004418\times 10^{14}\text{m}^3\text{s}^{-2}$;自转角速度 $\omega=7.292115\times 10^{-5}\text{rad s}^{-1}$ 。

[0073] 第二步生成基于经纬网格的地球表面剖分网格

[0074] 沿着地球椭球面上的经线和纬线,按照固定的经纬度间隔($5^\circ\times 5^\circ$ 、 $1^\circ\times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$),分别对地球椭球体表面进行剖分,生成具有 4 种细节层次(LOD, Level of detail)的地球表面网格,统一记为 M_{grid} 。

[0075] 图 2 是按照 $5^\circ\times 5^\circ$ 的经纬度间隔对地球表面进行剖分后生成的地球表面剖分网格,其它 3 种细节层次的地球表面网格(经纬度间隔分别是 $5^\circ\times 5^\circ$ 、 $1^\circ\times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$)可视作是对图 2 网格的细分。

[0076] 第三步内插生成地球表面数字高程模型

[0077] 以美国地质调查局开发维护的 GTOPO30 全球地表数字高程模型中的地形数据集为基本样本点,加入近年新获取的实测地形高程控制点,形成一个散点数据集 P_{surface} ,集合了地球表面高程插值拟合的样本数据。使用 P_{surface} 中的样本点插值拟合地球表面剖分网格 M_{grid} 中各个结点的高程,生成具有 4 种细节层次(网格间隔分别为 $5^\circ\times 5^\circ$ 、 $1^\circ\times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$)的地球表面数字高程模型,统一记为 M_{surface} 。

[0078] GTOPO30 是美国地质调查局(USGS)开发维护的一个基于规则经纬网格的全球地表数字高程模型,它采用的经纬网格间距是 30 弧秒(0.0083333333333333° ,大约 1 千米),能满足构建精细的全球地表数字地形模型的需要。

[0079] 在进行地形插值时,可使用距离反比加权法、最邻近点法、自然邻近点法、径向基函数法或 Kriging 法等常用的插值算法。

[0080] 第四步插值拟合地球空间内外圈层几何结构模型

[0081] 以地球表面为界,地球空间可划分为外圈层和内圈层两部分。地球的外圈层主要由大气组成,称作大气空间。地球的内圈层是指地表以下的固体地球部分,称作地质空间。地球的内外两个圈层具有明显不同的结构特征和物理化学性质,需要使用不同的模型和方法来拟合各个圈层及其亚层的控制界面和属性参数特征,下面分别描述。

[0082] (1) 地球内圈层

[0083] 对于地球的内圈层,可划分为地壳、地幔、地核等三个基本圈层,并可进一步细分为若干亚层,如:全球地壳可划分为 7 个亚层,包括冰、水、软沉积层、硬沉积层、上地壳、中

地壳和下地壳；地幔可分为上地幔和下地幔两个亚层；地核可分为外核和内核两个亚层。为了从宏观上定量的描述地球内圈层的几何结构特征，地球科学家编制了一系列的地球分层模型(如布伦模型、初步地球参考模型 PREM)。基于这些现有的地球内部圈层分层模型，本发明首先通过内插的方式计算出内圈层控制界面上各个结点(这些结点与地球表面剖分网格 M_{grid} 的结点一一对应)的理论高程值；然后在实际观测数据的约束下对理论高程值进行修正，拟合出内圈层控制界面的几何形态；最后将所有的内圈层控制界面自上而下堆叠起来，生成具有 4 种细节层次(网格间隔分别为 $5^\circ \times 5^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)的地球内圈层几何结构模型，统一记为 $M_{geometry-inner}$ 。

[0084] 由于地球内圈层的顶面(即地壳的顶面)与地球表面重合，地球内圈层几何结构模型 $M_{geometry-inner}$ 顶面结点的高程应与地球表面数字高程模型 $M_{surface}$ 对应结点的高程完全一致。如果两者不一致，则逐个修改 $M_{geometry-inner}$ 顶面结点的高程，使其与 $M_{surface}$ 对应结点的高程完全相同。

[0085] (2) 地球外圈层

[0086] 根据气温变化及密度情况，地球的外圈层(大气圈)自下而上分为对流层、平流层、中间层、热成层、外逸层等五个基本圈层，各层结构形态比较简单，层间具有连续的分界面。基于这种大气空间分层模型，本发明通过内插的方式计算出外圈层控制界面上各个结点(这些结点与地球表面剖分网格 M_{grid} 的结点一一对应)的理论高程值；然后在实际观测数据的约束下对理论高程值进行修正，拟合出外圈层控制界面的几何形态；最后将所有的圈层控制界面自上而下堆叠起来，生成具有 4 种细节层次(网格间隔分别为 $5^\circ \times 5^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)的地球外圈层几何结构模型，统一记为 $M_{geometry-outer}$ 。

[0087] 由于地球外圈层的底面(即对流层的底面)与地球表面重合，地球外圈层几何结构模型 $M_{geometry-outer}$ 底面结点的高程应与地球表面数字高程模型 $M_{surface}$ 对应结点的高程完全一致。如果两者不一致，则逐个修改 $M_{geometry-outer}$ 底面结点的高程，使其与 $M_{surface}$ 对应结点的高程完全相同。

[0088] 第五步生成基于地质晶胞(Geocellular)的地球内外圈层三维体元网格

[0089] 对于地球的内圈层，本发明以内圈层几何结构模型 $M_{geometry-inner}$ 中自上而下堆叠起来的正方形网格(网格间隔为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)为空间基准，使用三维空间离散化方法对各个亚层顶面正方形网格和底面正方形网格所围成的空间进行剖分，生成用地质晶胞(Geocellular)体元充填的三维实体模型；然后对三维实体模型在纵向上进行细分加密，生成逼近实际控制界面的地球内圈层三维体元网格 $M_{volume-inner}$ 。

[0090] 对于地球的外圈层，本发明以外圈层几何结构模型 $M_{geometry-outer}$ 中自上而下堆叠起来的正方形网格(网格间隔为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)为空间基准，使用三维空间离散化方法对各个亚层顶面正方形网格和底面正方形网格所围成的空间进行剖分，生成用地质晶胞(Geocellular)体元充填的三维实体模型；然后对三维实体模型在纵向上进行细分加密，生成逼近实际控制界面的地球外圈层三维体元网格 $M_{volume-outer}$ 。

[0091] 第六步插值拟合地球空间内外圈层属性要素三维分布模型

[0092] 地球圈层内部不仅具有复杂的结构形态，还蕴含着随空间位置变化的属性特征要素，如描述地球外部圈层大气空间环境要素属性的大气密度、温度、压力、成分及变化等，描

述地球内部物理化学属性的地震波反射速度、弹性模量、重力分布等。为了从宏观上定量的描述地球空间属性要素的平均分布状态,地球科学家编制了各种空间属性要素分布的数值模式,如:描述地球内圈层属性要素分布的初步地球参考模型 PREM;描述地球外圈层电离层等离子体的 IRI2001 模式;描述外圈层中性大气的 MSIS2000 模式等。本发明基于这些数值模式生成地球空间内外圈层属性要素三维分布模型。

[0093] 基于现有的地球空间属性要素分布数值模式,本发明首先使用内插的方式计算出地球内外圈层三维体元网格(包括 $M_{\text{volume-inner}}$ 和 $M_{\text{volume-outer}}$) 上各个地质晶胞结点的属性要素理论值;然后在实际观测数据的约束下对属性要素理论值进行调整、优化,拟合出各个体元网格位置处的属性要素值,生成地球空间内外圈层属性要素三维分布模型(分别记为 $M_{\text{property-inner}}$ 和 $M_{\text{property-outer}}$),以反映各种属性要素在三维地球空间内的变化特征。在进行属性要素插值时,同样可选用距离反比加权法、最邻近点法、自然邻近点法、径向基函数法或 Kriging 法等常用的插值算法。

[0094] 第七步将地理坐标转换为地心空间三维直角坐标

[0095] 按照前述步骤生成的地球表面数字高程模型 M_{surface} 、内圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-inner}}$ 、外圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-outer}}$ 、内圈层属性要素三维分布模型 $M_{\text{property-inner}}$ 和外圈层属性要素三维分布模型 $M_{\text{property-outer}}$,其几何坐标数据都是基于地理坐标的,需要将这些地理坐标变换为地心空间三维直角坐标。

[0096] 在 CGCS2000 中国大地坐标系下,由地理坐标(地理纬度 φ ,地理经度 λ ,高程 H) 变换为地心空间三维直角坐标 (X, Y, Z) ,可由以下公式计算:

[0097]

$$X = (N+H) \cos\varphi \cos\lambda;$$

[0098]

$$Y = (N+H) \cos\varphi \sin\lambda;$$

[0099]

$$Z = [N(1-e^2)+H] \sin\varphi;$$

[0100] 式中: N 为东西圆曲率半径, $N = a / (1 - e^2 \sin^2\varphi)^{1/2}$; a 为地球长半轴, $a = 6378137\text{m}$; e^2 为第一偏心率平方, $e^2 = 0.00669438002290$ 。

[0101] 本发明使用上述公式,将地球表面数字高程模型 M_{surface} 、内圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-inner}}$ 、外圈层几何结构模型 $M_{\text{geometry-outer}}$ 、内圈层属性要素三维分布模型 $M_{\text{property-inner}}$ 和外圈层属性要素三维分布模型 $M_{\text{property-outer}}$ 的几何坐标逐一变换为地心空间三维直角坐标,变换后的模型分别记为 M'_{surface} 、 $M'_{\text{geometry-inner}}$ 、 $M'_{\text{geometry-outer}}$ 、 $M'_{\text{property-inner}}$ 和 $M'_{\text{property-outer}}$ 。

[0102] 第八步构建基于 LOD 的地球空间模型多尺度表达机制

[0103] 经过第七步坐标变换后的地球空间模型(包括 M'_{surface} 、 $M'_{\text{geometry-inner}}$ 、 $M'_{\text{geometry-outer}}$ 、 $M'_{\text{property-inner}}$ 和 $M'_{\text{property-outer}}$)都是三维模型。这些三维模型可分为两类:一类是三维矢量模型(包括 M'_{surface} 、 $M'_{\text{geometry-inner}}$ 和 $M'_{\text{geometry-outer}}$);一类是三维体元模型(包括 $M'_{\text{property-inner}}$ 和 $M'_{\text{property-outer}}$)。这些模型的几何形状复杂、数据量大,在现有的微型计算机平台下,地球空间三维模型的快速存取、及时更新、实时渲染等各个环节都面临着很大的考验。为了提高三维地球空间模型的存取效率、显示速度,减少模型绘制时间,增强三维数字地球模型与用户交互的实时性,本发明借鉴多尺度表达的思想,将复杂的三维模型进行不同程度的简化

并存储到服务器端的空间数据库中,然后再采用 LOD (Level of detail, 细节层次模型) 方法进行管理,通过部署在服务器端的 Web 服务来处理客户端发送的地球空间模型传输和可视化请求。

[0104] LOD 是指生成或绘制细节程度逐渐变化的一组目标模型。LOD 模型可分为两类:静态 LOD 模型和动态 LOD 模型。由于三维地球空间模型的复杂性,本发明针对三维矢量模型和三维体元模型这两类模型的不同特点,分别使用静态 LOD 与动态 LOD 这两种方法。

[0105] 对于三维矢量模型(包括 M'_{surface} 、 $M'_{\text{geometry-inner}}$ 和 $M'_{\text{geometry-outer}}$),因为其在放大和缩小的过程中允许有跳跃的出现,本发明使用静态 LOD 方法,在服务器端的空间数据库保存三维矢量模型的 4 个副本,每一副本对应某一特定的分辨率(网格间隔分别为 $5^\circ \times 5^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$),所有副本构成一个金字塔结构;在数据传输和实时显示时,根据当前的场景条件(如模型到视点的距离、投影后的模型在图像空间所占的像素面积及光照强弱等)选用合适的细节层次模型。

[0106] 三维体元模型(包括 $M'_{\text{property-inner}}$ 和 $M'_{\text{property-outer}}$)可以方便地进行各种简化或细分操作。因此,本发明首先在服务器端的空间数据库中保存一个全细节的体元模型(网格间隔为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$),然后从这个全细节的体元模型出发,使用动态 LOD 方法中的渐进网格法进行模型简化,在服务器端实时生成不同尺度的低细节程度的模型。在模型网络传输和可视化时,根据模型中心与视点的距离大小确定调用具有何种层次细节的模型,而不必每次都选用全细节的三维体元模型。这样可以极大的降低数据传输流量和场景中的体元数量,而且能够保证模型几何数据的一致性和视觉的连续性,可以实现相邻 LOD 模型间的平滑过渡。

[0107] 第九步三维可视化

[0108] 经过第八步处理后的地球空间模型(包括三维体元模型和三维矢量模型两类)统一存储在服务器端的空间数据库中,其中:三维体元模型在数据库中只存储单一尺度(网格间隔为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)的高精度模型,三维矢量模型在数据库中存储 4 个细节层次的模型。这些模型最终需要在客户端的显示器上进行可视化与分析。基于 Web 服务,服务器接收到客户端发送的地球空间模型请求;然后根据客户端提供的空间参数(包括场景范围和视点位置)通过 LOD-Rree 空间索引进行模型检索,获取特定范围和细节程度的模型数据,然后通过网络渐进传输到客户端;客户端建立数据缓存,在计算机显示器上绘制出地球空间模型,以不同的颜色和亮度代表不同的圈层和属性要素。

[0109] 在客户端进行三维地球空间模型的可视化时,为了完整、连续的显示海量三维地球空间信息,增强用户对大规模地球空间信息的理解,本发明使用“焦点+场景”(Focus-context)可视化技术,让用户不仅可以看到其感兴趣的对象的几何细节,同时还可以看到其周围信息的一个整体印象。

[0110] 第十步查询地球空间位置

[0111] 在客户端,可利用鼠标来查询地球空间任意位置处的空间坐标。由于通过计算机鼠标拾取捕捉到的空间坐标是基于地心空间三维直角坐标系的,而地心空间三维直角坐标不便于理解和交流,故需要将其变换为地理坐标。

[0112] 在 CGCS2000 中国大地坐标系下,由地心空间三维直角坐标 (X, Y, Z) 变换为地理坐标(地理纬度 ϕ , 地理经度 λ , 高程 H),可由以下公式计算:

[0113]

$$H=P/\cos\varphi - N;$$

[0114] $\lambda = \operatorname{tg}^{-1}(Y/X)$;

[0115]

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{Z + (e')^2 b \sin^3 \theta}{P - e^2 a \cos^3 \theta}\right);$$

[0116] 式中:a为地球长半轴, $a=6378137\text{m}$;b为地球短半径, $b=6356752.31414\text{m}$;N为东西圆曲率半径, $N=a/(1-e^2\sin^2\varphi)^{1/2}$; e^2 为第一偏心率平方, $e^2=0.00669438002290$; $(e')^2=(a^2-b^2)/b^2$; $P=(X^2+Y^2)^{1/2}$; $\theta = \operatorname{tg}^{-1}(Za/Pb)$ 。

[0117] 第十一步进行三维空间分析

[0118] 在客户端,可通过鼠标和键盘等传统的交互设备对显示器上显示的地球空间模型进行常规的可视化展示与专业的三维分析,如三维观察、交互定位、属性查询、模型剖切、隧洞开挖、体积量算、虚拟漫游与内外圈层无缝切换等。通过这些操作,可为全方位、多角度的认识和理解地球空间内外圈层结构特征与属性变化规律提供强有力的支持。

[0119] 下面介绍本发明的具体实施例:

[0120] 按照本发明的技术流程图各步骤,在微机平台、OpenGL图形库下采用Microsoft Visual C++语言开发实现了一个全空间数字地球系统。图3是该系统实现的全空间三维数字地球模型全貌在计算机上展示的效果截图。图4是在该系统中利用地形高程数据建立高精度地表三维模型,将高分辨率的遥感影像与地球表面数字高程模型融合起来,还原原始的地表三维形态,可从各个视角进行观察分析。

[0121] 图5是该系统实现的地球内圈层几何结构模型与地表三维模型叠加显示的效果截图。本图将以探测点、剖面线为基本形态的零散的、局部的地球内圈层勘查资料解释结果在三维空间中综合起来,重现地球内部圈层分界面和地质实体的空间形态和组合关系,逼真再现了地球内圈层的几何结构形态。

[0122] 图6是该系统实现的地球内圈层属性要素(纵波波速)三维分布模型剖切显示的效果截图。本实施例以地球内圈层几何结构框架为空间基准,应用三维空间离散化技术(体素化、细分),生成由地质晶胞(Geocellular)组成的三维体元网格,建立基于地质晶胞、蕴含地球内部圈层控制界面几何框架信息的三维实体模型;然后,应用地球空间属性要素三维模型重构方法,基于内圈层物理化学属性参数数值模式和实测数据,生成覆盖整个地质空间的地球内部圈层属性要素(此处为纵波波速)三维分布模型。

[0123] 图7是在该系统中进行地球内部虚拟漫游与空间属性查询的效果截图。本实施例将地球内外圈层三维模型用三维图形图像生动地表现出来,实现对地球内外圈层三维实体模型的可视化及实时漫游,提供对地球内部圈层三维实体模型进行几何变换、三维交互定位与空间属性查询、任意剖切、虚拟钻探、开挖、隧道生成与虚拟漫游等可视化模拟功能,提供包括体积、面积、距离计算等的三维量算功能,为全方位、多角度的认识和理解地球深部圈层结构特征与属性变化提供强有力的支持。

[0124] 图8是在该系统中进行地球内外圈层模型叠加并进行剖切的效果截图。本实施例展示了大气空间各个亚层的分界面以及温度场模型,同时将其与地球内部圈层三维结构模型进行集成显示并剖切。在本实施例中,综合集成了地球表面模型、内部圈层模型和外部

圈层模型。我们可在一个统一的坐标体系、数字地球平台和操作界面上对这些模型进行管理、分析,实现包含内外圈层的地球空间信息的无缝整合,便于理解现象、发现规律和传播知识。

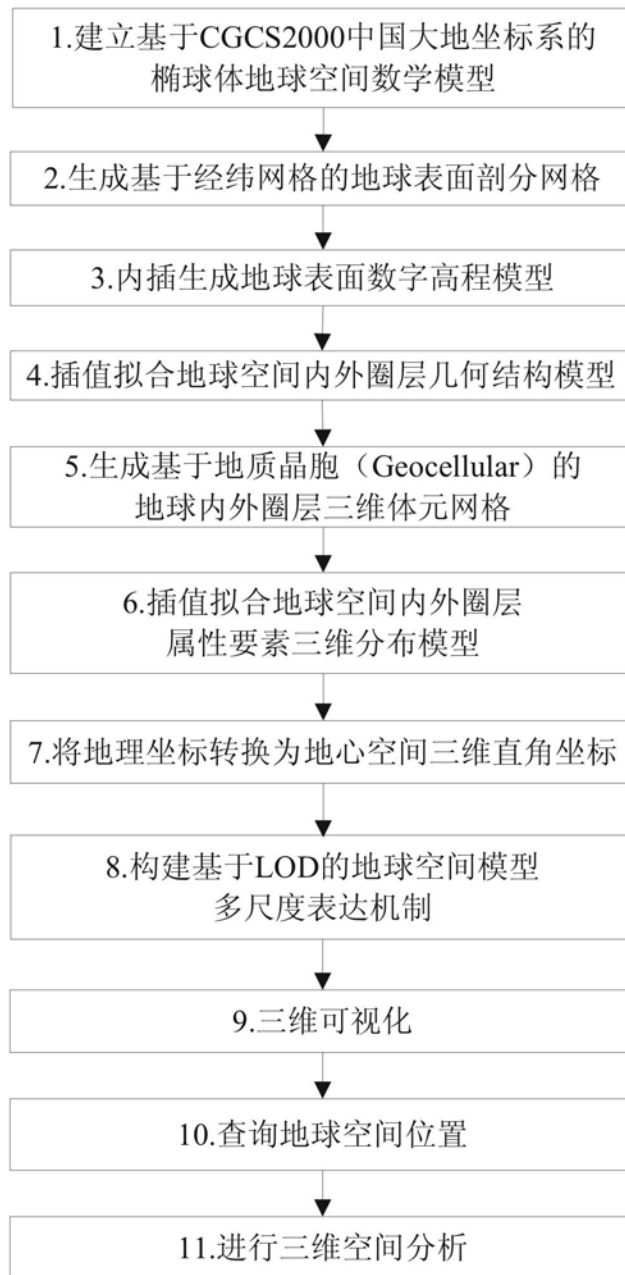


图 1

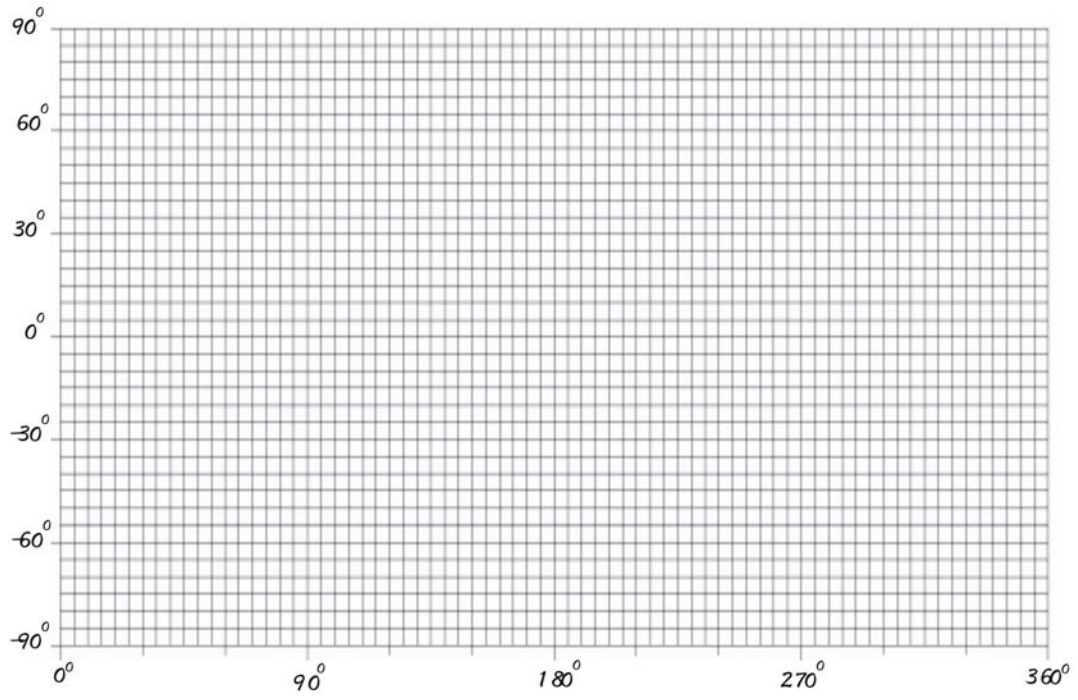


图 2

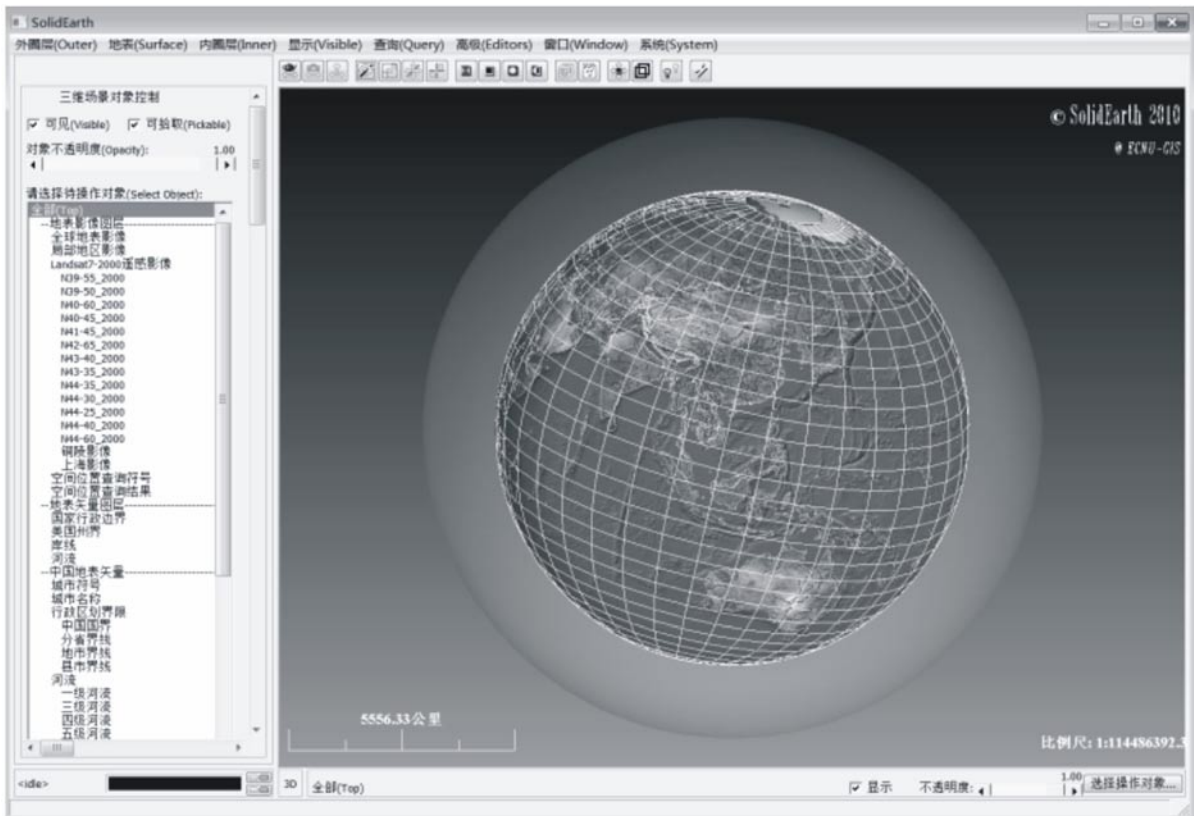


图 3

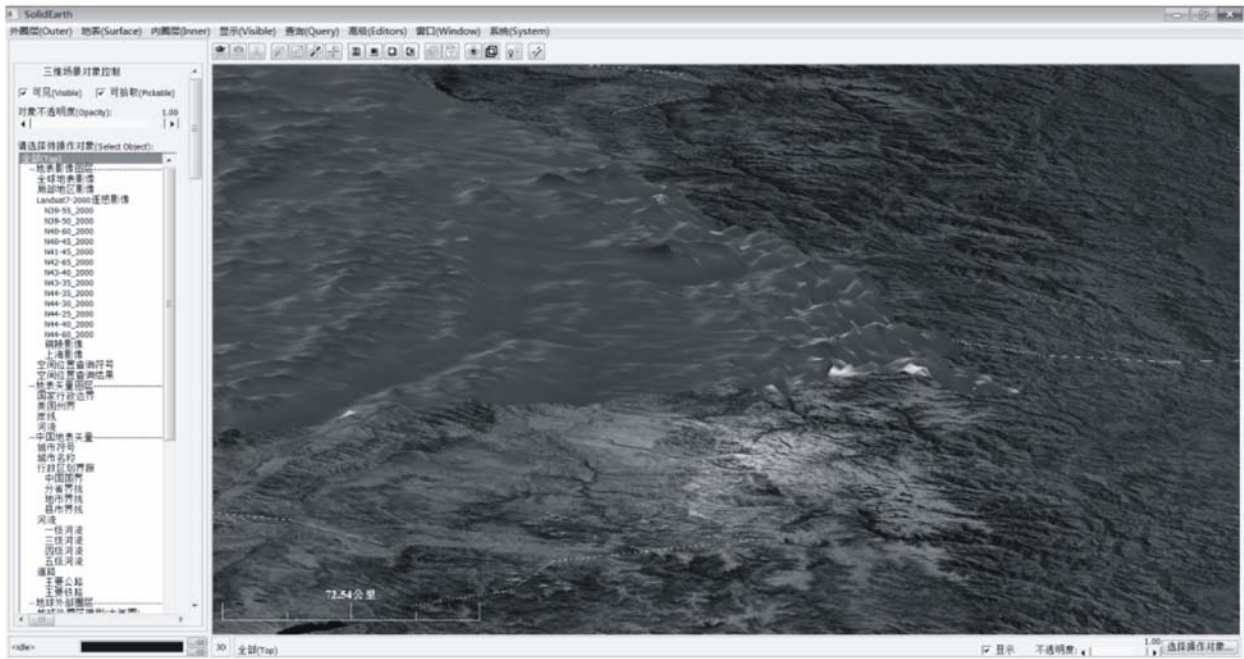


图 4

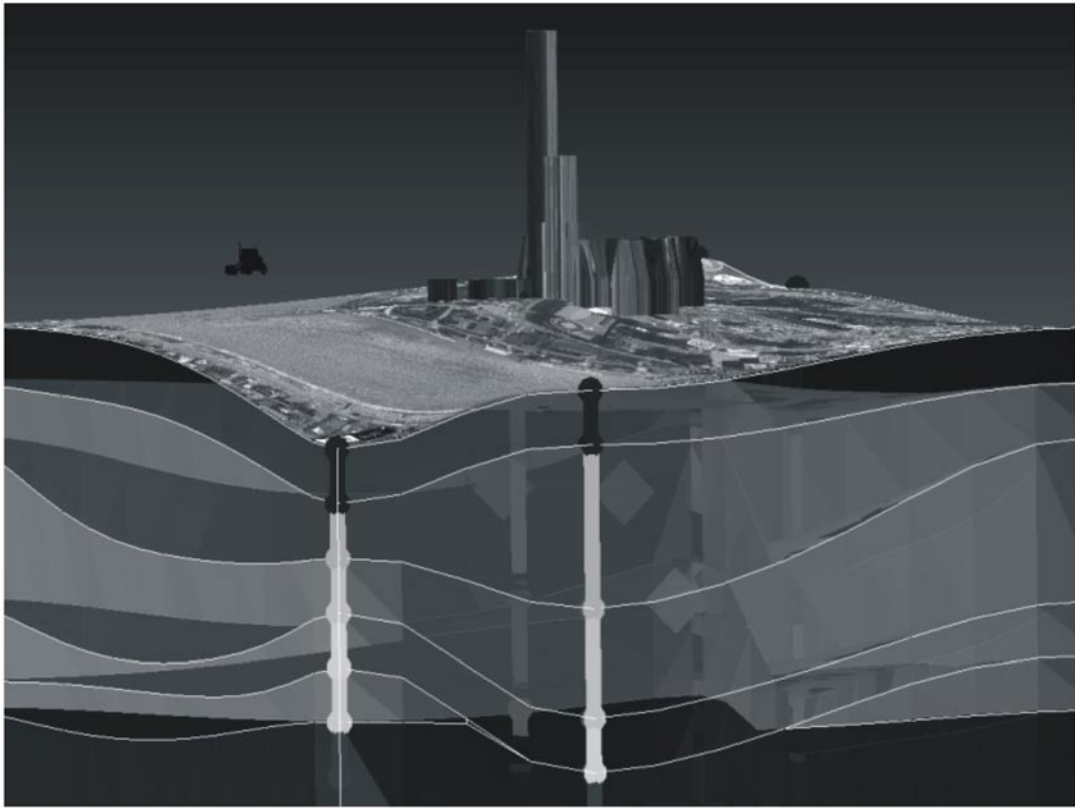


图 5

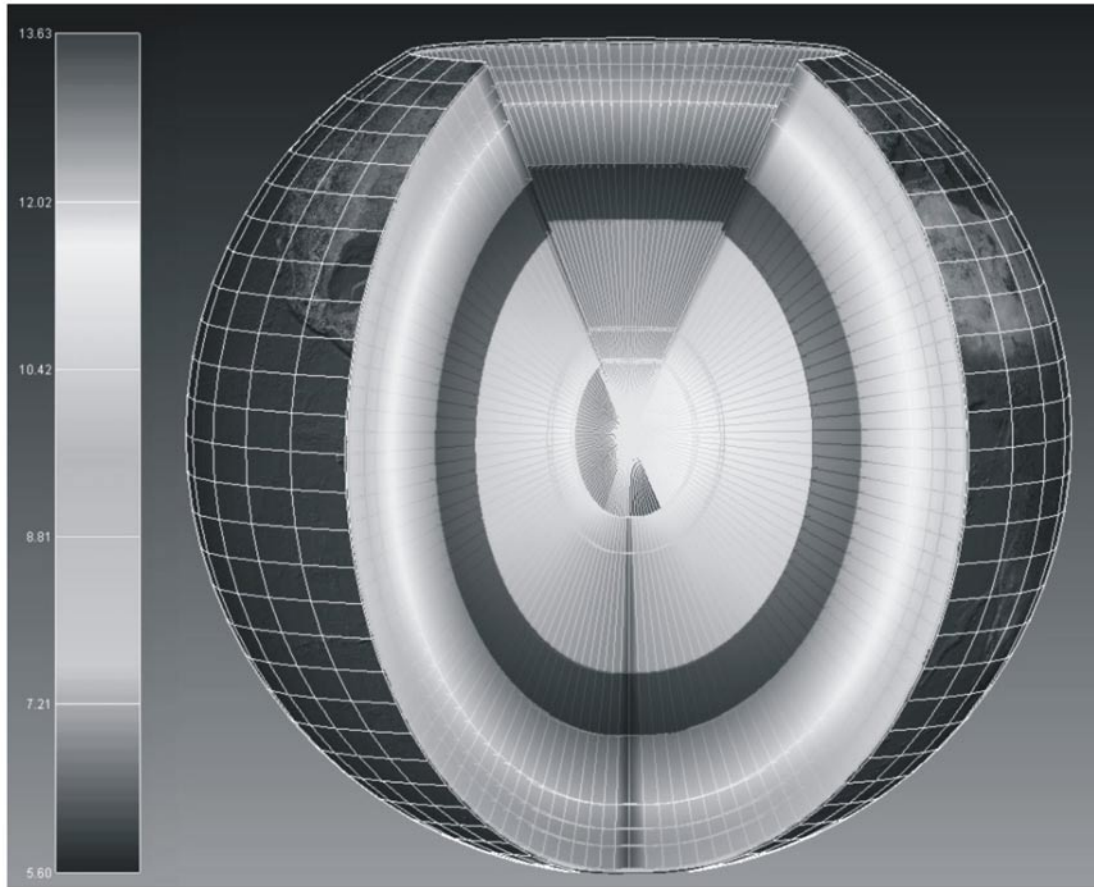


图 6

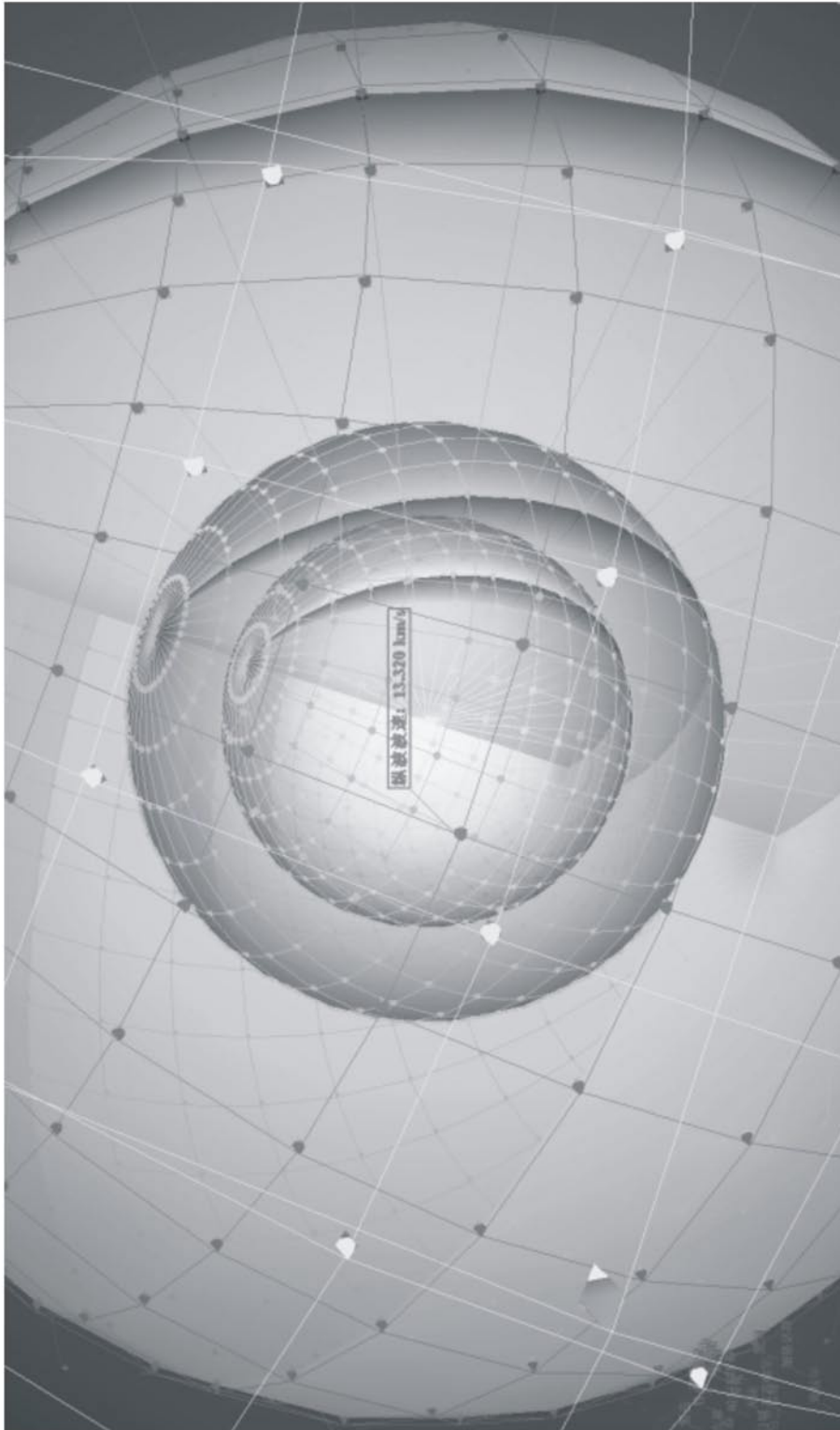


图 7

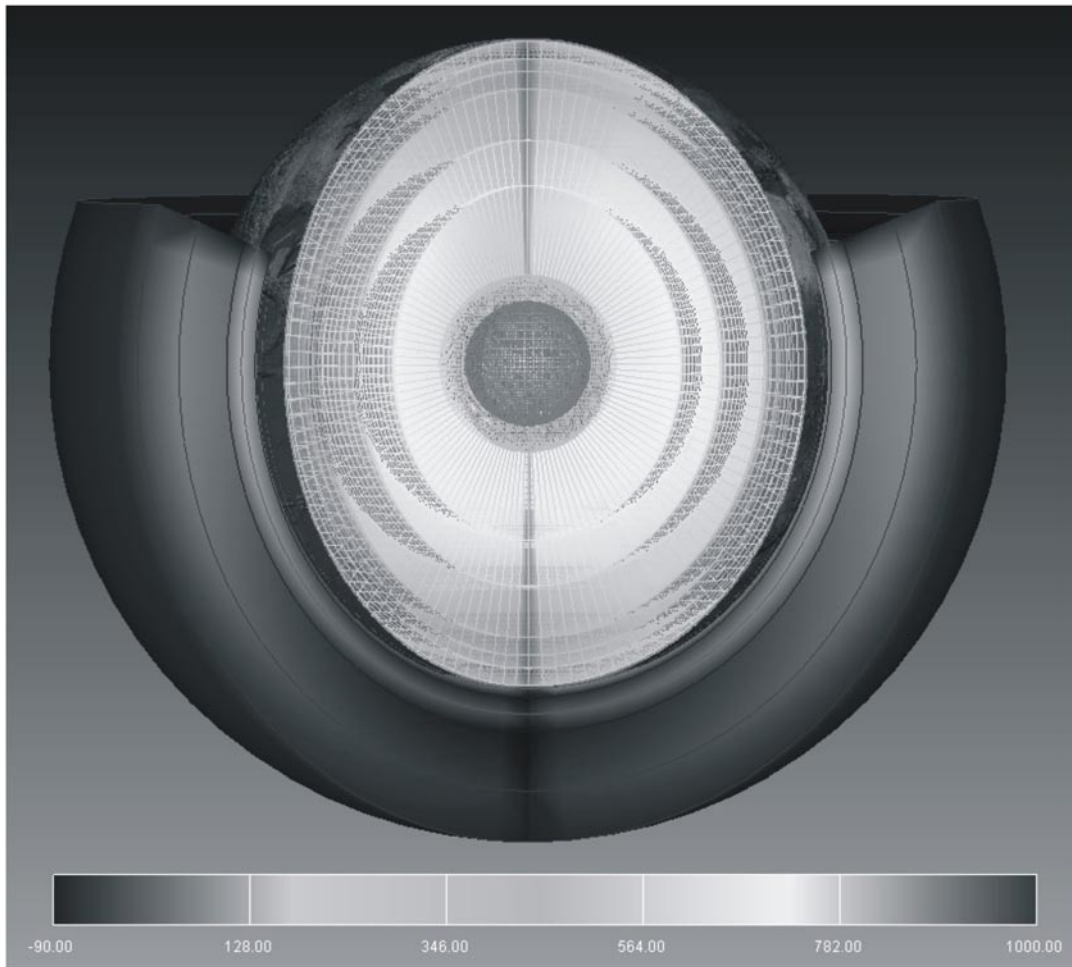


图 8