

1

绪 论

在现代对地观测技术和全球应用的双重驱动下，全球离散格网从传统的空间数据索引、地图定位框架与地理现象表达，开始向多源空间数据融合、地理综合分析、公共地理服务等新功能进行全方位地拓展。因此，构建一种适用多类型数据无缝融合的全球格网框架模型已成为国际 GIS 学术界一个新的研究热点。本书针对这一国际学术前沿和实际应用需求，提出了一种全球退化四叉树离散格网模型（Degenerate Quadtree Grid, DQG），对 DQG 模型的建模原理及多类型数据融合应用的若干基本理论和关键技术进行研究，主要包括：全球退化四叉树离散格网剖分建模及索引编码、基于全球 DQG 格网的多类型数据统一表达模式、多

类型数据 LOD (Level of Details) 同步建模及高效自适应融合算法、DQG 格网变形分布及融合精度评价;并用全球和我国部分地区多分辨率地形、影像和矢量地图数据,设计和开发了相应的原型实验系统。该模型有望为大范围(或全球)环境变化监测、灾害应急决策、大型工程设计、国防安全和国家公共地理信息服务等的综合分析与科学决策,提供一个多源数据无缝整合的新模式。

1.1 研究意义

全球离散格网是基于(椭)球面的一种可以无限细分,但又不改变形状的地球体拟合格网,当细分到一定程度时,可以达到模拟地球表面的目的[周启鸣, 2001]。它具有离散性、层次性和全球连续性特征,既符合计算机对数据离散化处理的要求,又摒弃了地图投影的束缚,有望从根本上解决传统平面模型在全球空间数据管理与多尺度操作上的数据断裂、几何变形和拓扑不一致性等问题[Dutton, 1999; Kolar, 2004; 胡鹏等, 2005]。目前,随着空间数据采集技术的飞速发展和全球经济一体化的不断深入,单一类型的空间数据已无法满足日益增长的应用需求,许多应用领域如全球环境变化监测、灾害应急预案、资源可持续开发、大型工程设计、国防安全乃至战争等,越来越频繁地使用大范围(甚至全球)多分辨率、多类型数据(如 DEM、影像和矢量数据等)进行综合分析,以获得单一数据类型无法达到的、更高质量的决策结果[Chen & Meer, 2005; Carrara, *et al*,

2008]。全球离散格网规则的层次剖分结构,使不同空间分辨率的格网之间具有严格的变换关系,为分布不均匀、尺度不等的地理现象数据融合提供了统一的表达模式,而现代矩阵理论和场论则为统一描述和表达复杂、多样的地理现象提供了可靠的理论基础[周成虎等,2009]。因此,在现代对地观测技术和全球应用的双重驱动下,全球离散格网系统的功能从传统的空间数据索引、地图定位框架与地理现象表达,开始向多源空间数据融合、地理综合分析、公共地理服务等新功能进行全方位的拓展[Masser, *et al*, 2008; 陈军等, 2009; Osterom & Stoter, 2010]。所以,发展一种适用于多类型数据无缝融合的全球格网框架模型及相关技术,已成为目前国际 GIS 学术界一个新的研究热点。

近年来,国际学术界和相关应用部门从不同的侧面对全球离散格网进行了深入研究。2000年3月和2004年8月,由美国地理信息与分析中心(NCGIA)组织,在美国加利福尼亚州分别召开了第一、二届“*International Conference on Discrete Global Grids*”学术讨论会,专门进行了全球离散格网理论方法的探讨与成果交流;2014年开放地理信息联盟(OGC)成立了全球离散格网标准化工作组,以促进DGG在跨领域(或学科)互操作的进展;2015年北京大学与解放军信息工程大学成立了“全球离散格网联合实验室”,以推动我国在该领域的研究进展和应用示范。另外,在地理、测绘、GIS、计算机、数据库管理及其他相关专业领域的主要国际学术期刊和会议上,有关全球离散格网模型的研究论文和报告也明显增多。从近期研究成果来看,为了克服经纬度格网非均匀性和极点奇异性的缺陷,目前多数全球离散格网模型是

建立在基于正多面体的球面格网上,即把球体内接正多面体的边投影到球面上作为大圆弧段,由大圆弧段构成球面三角形(或四、五、六边形)覆盖整个球面;然后对球面多边形进行递归细分,形成全球连续的、近似均匀的球面层次格网结构。这样既有效避免了经纬度格网表达全球地形数据时出现的数据冗余问题,又克服了变间隔经纬网 [Bjørke, *et al*, 2004; Seong, 2005] 和球面不规则 TIN 格网 [Lukatela, 2000] 无法进行层次关联的缺陷 [Kolar, 2004]。成果主要应用包括:全球空间数据的层次剖分与索引 [Goodchild, *et al*, 1991; Otoo & Zhu, 1993; Dutton, 1996; Bartholdi & Goldsman, 2001; 袁文等, 2005; 贲进等, 2006; Vince & Zhang, 2009; Ma, *et al*, 2009; Crider 2009; Yuan, *et al*, 2010; Harrison 2012; Zhou, *et al*, 2013; Holhoş & Roşca, 2014; Amiri, *et al*, 2014, 2015]、全球环境与土壤监测模型 [White, 2000; Ottoson & Hauska, 2002; Suess, *et al*, 2004; Hasenauer, *et al*, 2006; Batalis, *et al*, 2006]、全球动态数据结构 [Goodchild & Yang, 1992]、全球气象与水文模拟 [David, *et al*, 2002; Williamson, 2007; Skamarock & Menchaca, 2010; Düben, *et al*, 2012; Peixoto & Barros, 2014]、空间数据质量与制图综合模型 [Dutton 1999; Gregory, *et al*, 2008; Sousa & Oliveira, 2012]、全球导航模型 [Lee & Samet, 2000]、全球格网定位系统 [Clarke, *et al*, 2002; Sahr, 2003; Sahr, *et al*, 2008]、海洋监测 [Kidd, *et al*, 2003; Hersh & Maidment, 2014]、全球气候耦合模型 [Randall, *et al*, 2002]、全球数字拓扑推理 [胡鹏等, 2001]、球面格网计算 [袁文等, 2011; 童晓冲等, 2009]、地球物理模型 [Thuburn, 1997]、全球海量影像

管理 [Lugo & Clarke, 1995; Teanby, 2006; Vince & Zheng, 2009; Marschallinger, *et al.*, 2014; Dumedah, *et al.*, 2014] 和全球地形可视化与操作模型 [白建军, 2005; Zhao, *et al.*, 2008; Yu & Gong, 2012; Chen, *et al.*, 2013] 等。

但是, 基于多面体的全球离散格网模型多采用三角形、菱形和六边形层次结构作为全球空间数据管理的基础, 难以符合地球椭球体的要求, 和现代测量所采集的像元数据也不吻合 [周成虎等, 2009]。所以, 大多数模型非常适合全球 DEM 的表达, 而处理影像和矢量地图数据效率较低, 不利于新旧基础数据的接续和不同类型数据的集成操作, 难以作为多源数据的基础融合框架。为此, 在深入分析全球经纬度格网和多面体格网优缺点的基础上, 作者提出了一种新的全球离散格网系统——全球退化四叉树 (Degenerate Quadtree Grid, DQG) 离散格网结构。该格网是以球面正八面体剖分为基础, 但细化结构类似经纬度格网, 不同的是涉及极点的格网退化为三角形, 而这种退化是层次和规则的, 同层次格网单元是近似均匀的, 并具有一致的方向性 (uniform orientation)、径向对称性 (radial symmetry)、平移相和性 (translation congruence) 等特性; 既可以直接利用以经纬度格网为参考系的各种新旧数据源, 又避免了经纬度格网的非均匀性和极点奇异性问题, 且格网结构极其规则, 易于构建空间邻近关系和检索机制 [赵学胜等, 2009]。本书主要探讨全球退化四叉树格网结构的建模原理、编码与搜索算法以及在全球多源空间数据融合中的应用。

1.2 国内外研究现状分析

1.2.1 全球离散格网剖分模型

目前 DGG 建模方法主要归纳为以下几种类型：经纬度格网模型、正多面体格网模型、自适应格网模型 [白建军等, 2011; 赵学胜等, 2012]。

1.2.1.1 经纬度格网模型

经纬度格网是使用最早、最为普遍的一种用于制图和表达的空间剖分方案。许多现存数据的格式、处理算法大都是以经纬度格网为基础。经纬度格网主要分为等间隔和变间隔经纬网两种。

(1) 等间隔经纬网 (Equal Latitude - Longitude Grid) 是目前应用最广泛的一种格网模型, 该格网系统按照地理经线和纬线对空间进行剖分 (如图 1.1 所示), 优点在于格网编码简单, 易于实现, 不需要复杂的地理坐标转换。代表性研究与应用主要有: 美国佐治亚州技术学院的 Virtual GIS、美国国家航空航天局 (NASA) 的虚拟行星探索工程 VPEP 和 World Wind 虚拟地球、美国海军研究生院的 NPSNET 系统、美国 SRI 公司的 TerraVision 地形浏览器、Google Earth (谷歌)、MSN Virtual Earth (微软)、美国地质调查局的 GTOPO30 (如图 1.2 所示) 和 ETOPO5 数据集、

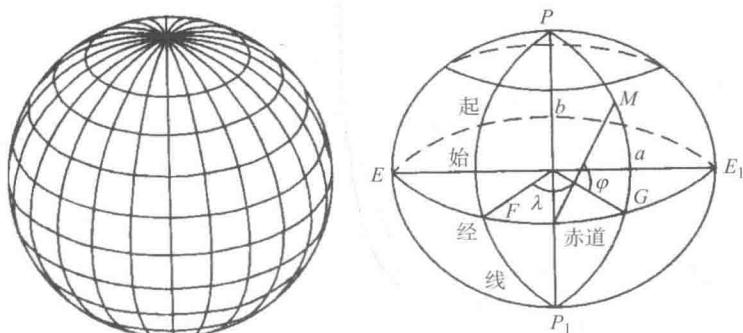


图 1.1 等经纬度格网

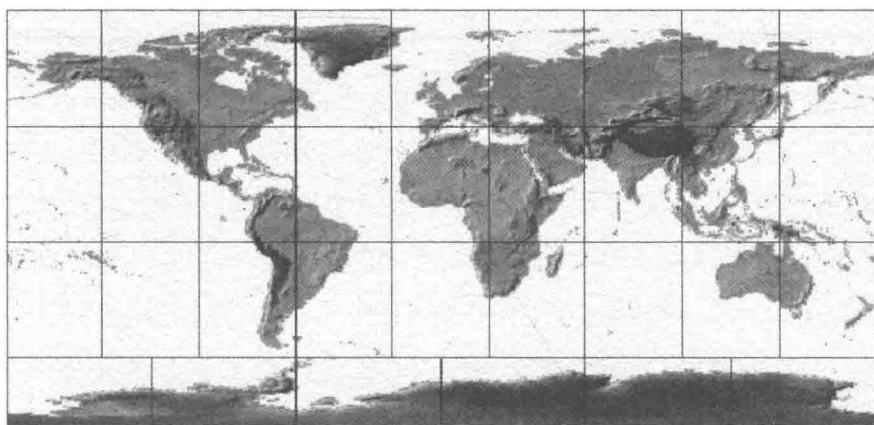


图 1.2 基于经纬度划分的全球 GTOPO30 数据块

美国国防制图局和美国 NASA/哥达德宇航中心的 JGP95E5 数据集、全球四叉树系统 [Tobler, 1986]、EQT (Ellipsoidal Quadtrees, 椭球四叉树) [Ottozon & Hauska, 2002]、三维虚拟地球系统 GeoSphere VR [张立强, 2004]、空间信息多级格网 [李德仁等, 2006]、基于地图分幅拓展的全球剖分模型 (Extended Model based on Mapping Division, EMD) [程承旗等, 2010] 等。等间隔经纬度格网缺陷在于：格网单元面积随着纬度不同变化越来越

大,相同剖分层次格网单元面积的量级也不尽相同,对多分辨率空间数据的分析效率和准确性产生了不同程度的影响,尤其对南北两极附近的分析计算带来很大的不确定性;格网单元形状具有非均匀性,两极单元为三角形,其他区域单元为四边形,面积和形状的差异导致了大量冗余数据。

(2) 变间隔经纬网 (Adjusted Latitude - Longitude Grid) 克服了等间隔经纬网同一剖分层次单元面积变异较大的问题,实现了同一剖分层次下格网单元面积近似相等。代表性研究与应用主要有:美国国家图像制图局 (NIMA) 的数字地形高程数据 DTED (Digital Terrain Elevation Data) (单元面积近似相等)、基于 WGS84 椭球体的 FFI 格网 (单元面积更加均匀) [Bjørke, *et al.*, 2003]、单元面积完全相等的变间隔经纬网 [Seong, 2005]、国际卫星云气候项目的 ISCCP GRID、美国国家气候研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 的 POP (Parallel Ocean Program) GRID 和 ORCA GRID、GeoFusion Inc. 的 GeoFusion 系统、全球退化四叉树格网 (DQG) [崔马军等, 2007]。相对于等间隔经纬网,DTED 格网剖分方式只在某种程度上减少了数据冗余,但格网单元仍具有不均匀性,Bjørke 和 Seong 提出的格网模型保证了绝大多数格网单元面积相等 (如图 1.3 所示),单元等面积特性在地统计学和小波分析方面极具优势,但格网单元间的邻近关系更为复杂。基于退化四叉树剖分的球面格网具有格网单元形状变异收敛、结构简单、易于邻近查找等特性,但如何结合需求应用仍需深入研究。

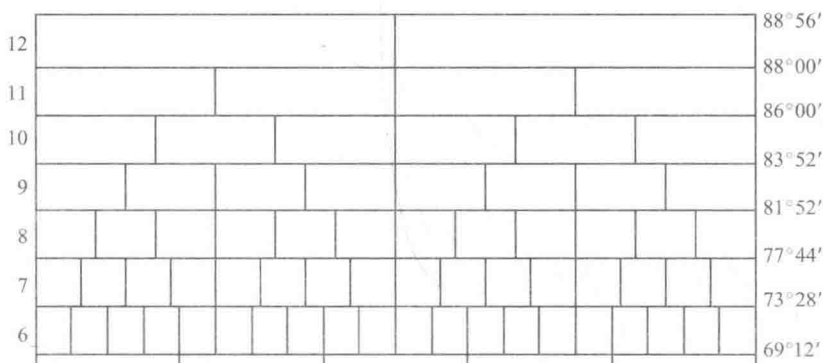


图 1.3 等面积单元的变经纬格网结构
(从 69°12' ~ 88°56') [Bjørke, *et al*, 2003]

1.2.1.2 正多面体格网模型

正多面体球面格网 (Polyhedron Tessellation Grid) 建模的基本思路是: 首先, 将理想多面体的边投影到球面, 形成球面多边形作为全球剖分的基础; 接着, 对球面多边形进行递归剖分, 形成连续的、近似均匀的球面层次格网系统。基于正多面体剖分的球面格网避免了数据冗余问题, 克服了无法进行层次关联的缺陷 [Kolar, 2004], 具有规则性、层次性和全球连续性特点, 格网单元地址码隐含着空间位置以及比例尺和分辨率信息, 在处理全球多分辨率海量空间数据方面极具潜力。以 O-QTM (Octahedral - Quaternary Triangular Mesh, 八面体四分三角形格网) [Dutton, 1996]、SQT (Sphere Quadtree, 球面四叉树) [Fekete, 1990] 为代表, 其特点主要体现在对地球表面进行无缝嵌套的、多层次格网剖分, 使全球空间数据能忽略投影的影响, 格网单元具有各向同性的特点 [Goodchild & Yang, 1992], 大多数格网系统采用了

基于正多面体（四面体、立方体、八面体、十二面体和二十面体）的剖分方案 [White, *et al*, 1998]（如图 1.4 所示）。其中，普遍采用的球面剖分单元主要有球面三角形、菱形（四边形）和六边形（如图 1.5 所示），这三种剖分单元的几何结构特征主要体现在以下几个方面：

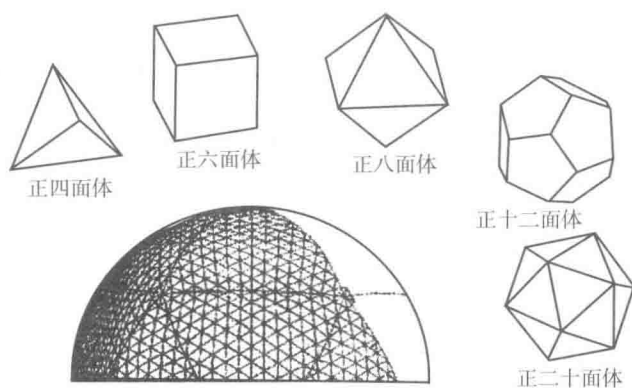


图 1.4 基于五种正多面体的球面剖分

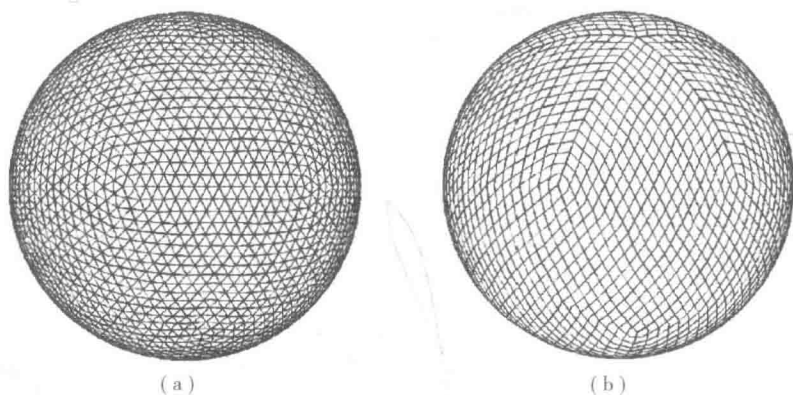


图 1.5 三种格网的层次剖分

(a) 球面三角形格网；(b) 球面菱形格网

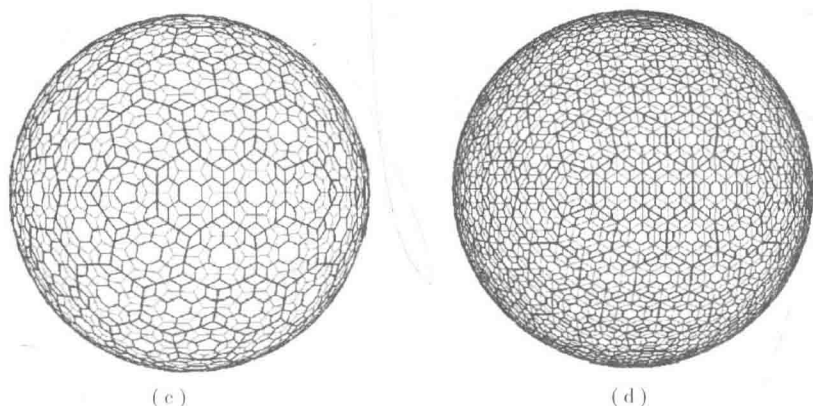


图 1.5 三种格网的层次剖分 (续)

(c) 球面 A3 的六边形格网; (d) 球面 A4 的六边形格网

(1) 三角形格网单元特点。具有层次性、近似均匀性和统一性,在极地处理上独具优势,在地学分析中易于对地形进行单点建模,广泛应用于全球空间数据索引、表达与建模。最大的缺陷在于几何结构复杂、单元方向的不确定性及不对称性,而且单元之间的邻近关系随着位置不同变异较大,增加了邻近搜索与空间分析的难度。

(2) 菱形格网单元特点。具有方向一致性、径向对称和平移相和性,几何结构与正方形单元类似,比三角形或六边形结构更为简单,不受多面体到球体或椭球体映射方法的制约,可直接采用多种平面四叉树算法,易于进行邻近搜索等空间操作 [White, 2000]。剖分具有嵌套性,可用于数据集中与分散的 Kalman 滤波预测模型 [Huang & Cressie, 1997]。

(3) 六边形格网单元特点。不同于三角形和菱形单元,六边形单元具有统一的邻近关系,每个格网单元只存在六个边邻近六边形单元,任意两个相邻单元中心点之间的距离都相等。具有较

高的空间覆盖效率和角度分辨率、邻接一致性和最大单元兼容性，在动态建模方面独具优势 [Thuburn, 1997; 贲进等, 2006]。最大缺陷在于不可嵌套性，上一剖分层次中的格网单元没有完全包含下一剖分层次的单元，这对格网模型多分辨率的操作和应用产生不利的影响。

1.2.1.3 自适应格网模型

球面自适应格网 (Adaptive Subdivision Grid) 是根据球面实体对象的特征对球面进行剖分得到的格网模型。Lukatela [1987] 建立的 Hipparchus 系统采用球面 Voronoi 多边形剖分，实现了基于 TIN 模型的全球地形可视化表达 (如图 1.6 所示)。球面 Voronoi 生长点的分布取决于应用标准及实际需求，如数据空间分布、系统操作类型和剖分单元面积限制等。Hipparchus 系统格网单元可按照实体要素的空间分布状况 (比如密度) 自适应调整，从而生成自适应或不规则格网。球面 Voronoi 格网还用于全球海量地形

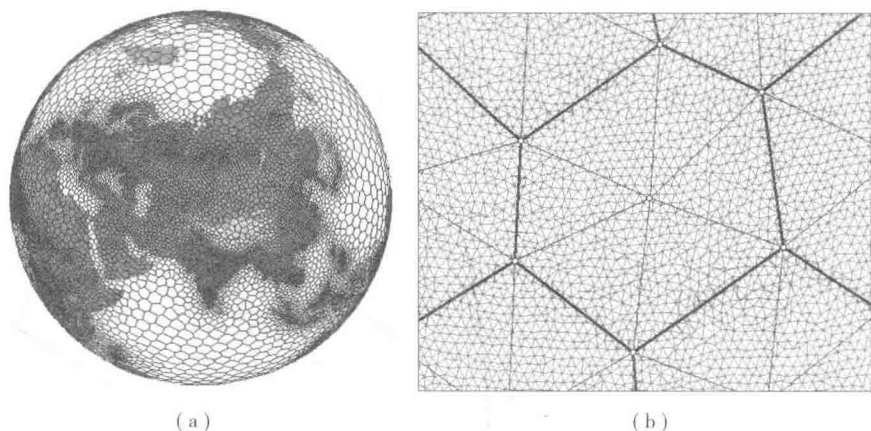


图 1.6 Hipparchus 系统的自适应格网划分 [Lukatela, 1987]

(a) 全球 Voronoi 剖分; (b) 内部 TIN 结构

数据的 LOD 模型 [Kolar, 2004]、全球海洋潮汐流动模拟模型 [Abolfazl & Gold, 2004]。与规则或半规则部分格网相比, Voronoi 自适应格网优势在于具有动态稳定性, 可依据实际需求为格网模型提供更多的剖分方案; 但 Voronoi 自适应模型难以进行层次递归剖分, 由于空间对象层次是基于显式定义的实体关系, 空间实体的变化无法在邻近层次之间进行传递, 严重制约了全球海量数据的多尺度关联等空间操作。

1.2.2 基于全球离散格网的数字高程模型研究

由于地图分带投影的影响, 传统数字地面高程模型会出现数据断裂、不连续的问题。为了克服数据断裂问题, 近年来全球离散格网被广泛地应用到全球地形无缝建模领域。尽管国内外学者针对该问题做了大量的研究, 但随着全球高分辨率地形数据的快速获取、地形格网数据量的急剧增加, 如何在保证地形格网精度的前提下提高三维空间分析及可视化渲染效率已成为全球 DEM 建模研究亟须解决的关键问题之一。

1.2.2.1 地形格网简化模型

地形格网简化是在保证地形精度的前提下尽可能地减少地形格网的数目, 从而达到减少 DEM 数据量的目的。其具体做法为: 根据地形起伏程度确定地形格网所采用的分辨率; 平坦区域采用低分辨率格网模拟地表起伏; 陡峭区域采用高分辨率格网表达地形特征。为此, 需要根据地形节点评价测度判断地形格网是否需要继续进行再分 [韩玲, 邹永玲, 2007]。许兆新等 [2008] 以

地形粗糙度作为节点评价测度（简化标准）进行格网简化 [万定生, 龚汇丰, 2005; 郑海鸥等, 2006]; 王玉琨等 [2008] 根据视点相关的节点评价函数和多属性节点评价函数简化地形格网; Hamann [1994] 以地表曲率为评价测度, 采用顶点去除法移除局部平坦区域顶点, 达到简化地形格网的目的。

地形格网简化算法从数据组织管理层面降低了地形的数据量。而 LOD (Level of Details) 模型是提高地形可视化表达效率的有效手段。LOD 模型是根据地形细节层次调整地形格网的分辨率。表达重要地形细节时, 将靠近视点或陡峭地面的区域用高分辨率的地形格网进行显示; 当表达次要地形时, 将远离视点或平坦地面区域用低分辨率地形格网进行表示。地形 LOD 模型多以四叉树 [Peter, *et al*, 1996] 或二叉树结构 [Thomas, 2003; Lindstrom & Cohen, 2009] 为基础。代表性成果: 渐变型格网模型 [Hoppe, 1996]、层次四叉树结构模型 [Lindstrom & Cohen, 2009]、合并和分裂三角形队列简化模型 [Duchaineau, *et al*, 1997]、视点相关的简化模型 [Rottger, *et al*, 1998]、LOD 算法和不可见性剔除混合模型 [Mortensen, 2000]、LOD 算法和 IBR 混合模型 [Chen, *et al*, 1999]。

1.2.2.2 裂缝消除方法的研究现状

规则地形简化多以二叉树和四叉树为基础。尽管二叉树能消除三角形间的裂缝和 T 形连接, 但地形块数据拼接算法复杂。因此, 四叉树在地形简化中应用更广泛。四叉树结构非常规则, 方便应用数组进行存储管理, 便于地形分块细分和纹理映射。但四叉树结构在不同分辨率地形的拼接处会出现裂缝问题 [淮永建,

郝重阳, 2002]。因此, 消除四叉树邻近格网间的裂缝已成为多分辨率地形表达的关键问题 [邢伟等, 2004]。裂缝消除的方法主要有:

(1) 垂直边缘法

垂直边缘法 (Vertical Skirt) 称为增加“裙”法, 即在每一层的内外边界上增加一个“裙” [周杨等, 2007; 胡爱华等, 2009]。如图 1.7 所示, 左上图为不同分辨率地形接边处产生裂缝的情况, 右图为增加“裙”后的情况, 以不同分辨率的接边顶点 (a, b) 和 (c, d, e) 为基准, 平面坐标位置 (x, y) 保持不变, 以高度 H 垂直向下增加顶点 (a_1, b_1) 和顶点 (c_1, d_1, e_1) , 使得在边界上构成一个垂直向下的面, 称之为“垂直裙”——即在块的边界上建立一个由地表到水平面的垂直外包体。这样即使当存在块间裂缝时, 由于裂缝被“垂直裙”挡住, 视觉上也不会产生“空洞”。构建“垂直裙”的具体方法是对地形块的四个边界建立四个索引数组, 用于依次存储每个边界上被送入需绘制的顶点, 最后分别将数组中保存的顶点与对应边界上首尾顶点的水平面投影点组合在一起, 按照多边形方式进行绘制。

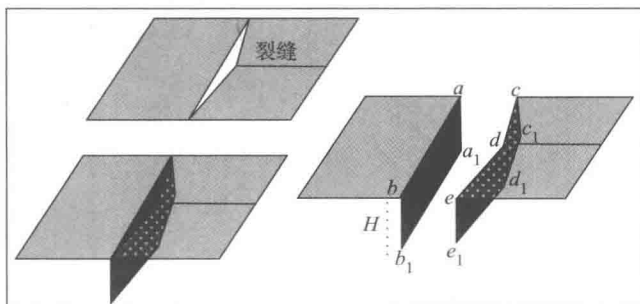


图 1.7 增加“裙”消除裂缝 [周杨等, 2007]

垂直边缘法只需独立处理地形块，无须考虑相邻块的细节层次，具有很强的封装性，简化了算法设计并减少了计算耗时。但该方法只是从视觉上消除了不同层次间的裂缝，本质上并未消除裂缝。该方法只适用于不同分辨率分层加载格网的情况，不适用于同一层次不同分辨率格网简化时产生的裂缝消除。

(2) 渐变法

渐变法采用分辨率等级过渡算法，将分辨率等级转换时的地表形状突变转化为渐变 [张琦等, 2007]，改善了视觉效果，增强了地形表达的真实感。曾维等 [2009] 采用限制性四叉树——即控制邻近格网间的剖分层次差不超过 1，将平滑后的随机数据作为高程模拟数据，模拟地形起伏；许妙忠等 [2005] 通过限制相邻节点间剖分层次不超过 1 [陈少强等, 2005；胡爱华等, 2009]，通过加边或减边的方式消除了 T 形裂缝。刘丁 [2009] 使用索引顶点数组绘制 T 形裂缝区域实现了裂缝消除；谭兵等 [2003a, 2003b] 将低分辨率模型进行适当分裂，使之与相邻模型具有相同的边界（如图 1.8 所示），消除了 T 形裂缝。

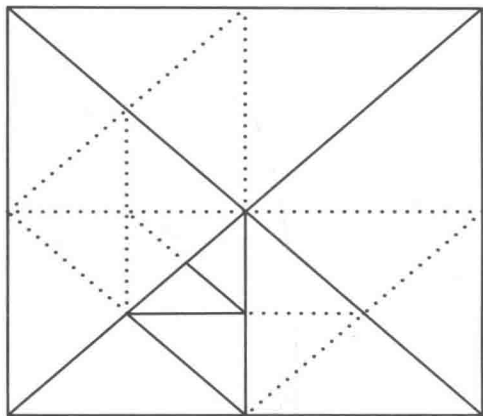


图 1.8 裂缝的产生与消除

(3) 调整高程值法

调整高程值法通过调整裂缝处节点的高程值实现无缝拼接 [赵友兵等, 2002; 芮小平, 张彦敏, 2004], 如图 1.9 所示。该方法虽然简单, 但会导致 T 形节点及地形失真, 绘制时会产生光照不连续的现象。

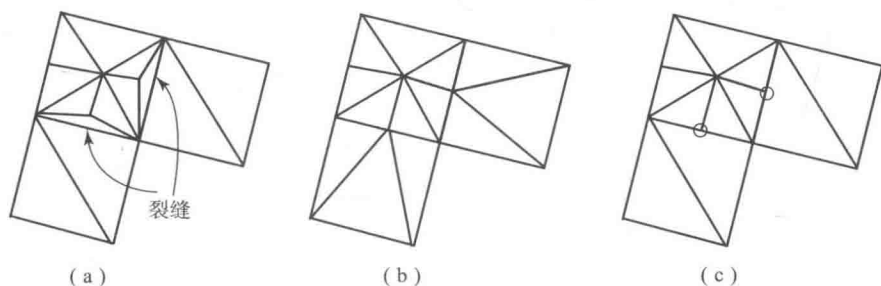


图 1.9 调整高度值法消除裂缝 [赵友兵等, 2002]

(a) 裂缝的产生; (b) 通过剖分、改变高程值消除裂缝; (c) T 形节点

(4) 其他方法

Yoon 等 [2005] 提出了簇依赖 (cluster dependencies) 的裂缝消除方法。王宏武等 [2000] 将高分辨率模型顶点移动到相邻模型的边界点上, 实现了裂缝消除。谭兵等 [2003] 设计了自适应地形格网生成和缝隙消除方法 [张小虎等, 2009]。

上述研究中的裂缝消除方法多是针对一个局部四叉树地块, 在限制性四叉树结构的基础上进行裂缝消除, 这会增加许多不必要的三角形, 降低了可视化表达的效率。若将上述方法应用到全球地形表达时, 缝隙消除方法会增加大量的需绘制格网, 尤其在南北两极处, 将会出现大量的数据冗余, 造成不必要的计算资源消耗 [李亚臣等, 2007]。