



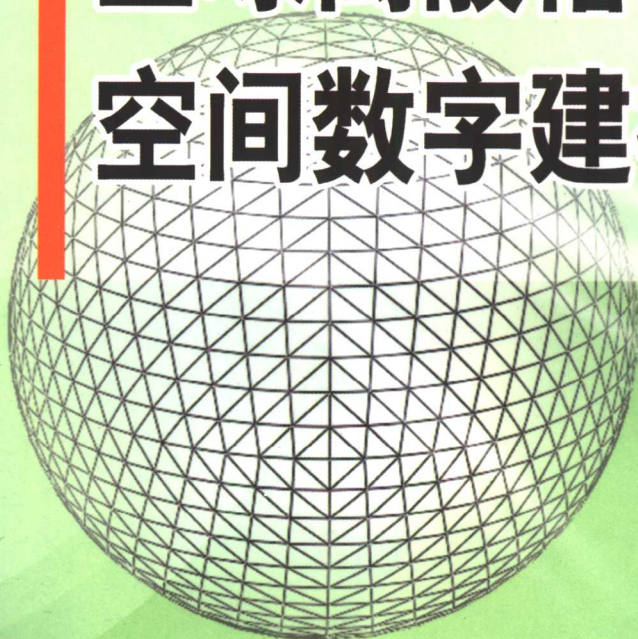
测绘科技专著出版基金资助

CEHUI KEJI ZHUANZHU CHUBAN JIJIN ZIZHU

SPATIAL DIGITAL MODELING OF THE GLOBAL DISCRETE GRIDS

赵学胜
侯妙乐 著
白建军

全球离散格网的空间数字建模



测绘出版社

测绘科技专著出版基金资助

全球离散格网的空间数字建模

Spatial Digital Modeling of the Global Discrete Grids

赵学胜 侯妙乐 白建军 著

测绘出版社

• 北京 •

内容简介

本书主要讨论了全球离散格网的空间数字建模理论及其应用。全书由三部分组成:第一部分综述了全球离散格网的国内外研究现状,分析了目前存在的一些问题及发展趋势;第二部分重点探讨了球面格网的剖分方法、格网编码与邻近索引机制、几何变形分布规律与收敛性分析、球面实体的格网概念模型与度量计算、球面离散空间的基本拓扑性质及其空间关系推理等方面的基本原理与方法等;第三部分初步分析了全球离散格网在影像处理、DEM表达和全球地形可视化等方面的应用模式与操作算法等。

本书适合于测绘技术、地理信息系统、遥感技术、计算机、资源环境、数据库管理及相关学科的本科生、研究生、高校教师及相关研究人员使用。

© 赵学胜 侯妙乐 白建军 2007

图书在版编目(CIP)数据

全球离散格网的空间数字建模/赵学胜,侯妙乐,白建军著. —北京:测绘出版社,2007.5
ISBN 978-7-5030-1665-3

I. 全... II. ①赵...②侯...③白... III. 地理信息系统—系统建模 IV. P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 053181 号

责任编辑:贾晓林/封面设计:赵培璧

测绘出版社 出版发行

地址:北京市西城区复外三里河路 50 号 邮编:100045
电话:(010)68512386 68531558 网址:www.sinomaps.com

北京通州区次渠印刷厂印刷 新华书店经销
成品尺寸:169 mm×239 mm 印张:12.25 字数:240 千字

2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷

印数:0001—2000 册

ISBN 978-7-5030-1665-3/P·447

定价:30.00 元

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

前 言

随着空间技术和信息技术的不断进步,特别是遥感与全球定位技术的飞速发展,使我们能够获得有关地球及其各种资源环境和社会现象的多分辨率的、海量的、实时的对地观测数据。这为人类进行全球经济的可持续发展研究、资源环境变化监测、灾害预警预报、国家安全和“数字地球”构建等领域,提供了丰富的空间基础数据。但如何对全球海量数据进行有效地表达和管理(如,快速检索、动态更新和空间分析等等)就成为国内外学术界和应用部门面临的一大难题。目前 GIS 与相关技术的发展及相互集成中存在的问题,以及从“数字地球”到“数字城市”及其他应用所提出的要求,需要人们打破几千年来传统的以地图方式表示地理空间数据和信息的框框,去探求地理空间数据与全球开展的网格计算相适应的空间数据处理新方法。全球空间信息格网就是在这样的背景下提出的,并立即成为国内外地学及其他相关学科研究的热点领域之一。

全球离散格网(global discrete grid)是基于球面的一种可以无限细分,但又不改变其形状的拟合格网,当细分到一定程度时,可以达到模拟地球表面的目的,它具有层次性和全球连续性特征,既避免了平面投影带来的角度、长度和面积的变形及其空间数据的不连续性,又克服了许多限制 GIS 应用的约束和不定性,即在地球上任何位置获取的任何分辨率的(不同精度的)空间数据都可以规范地表达和分析,并用确定的精度进行多分辨率操作;既能从根本上解决平面模型在全球多尺度空间数据管理上的数据断裂、变形和拓扑不一致性等问题,又能方便地在网格计算环境下实现对空间信息资源的整合、共享与利用。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模型进行了研究,在地理、GIS、数据库管理、测绘及其他相关专业领域的主要国际学术会议和国际刊物上,有关这方面的研究论文或工作报告也逐渐增多。

作为一个新兴的研究领域,尽管国际学术界和相关应用部门,对其理论方法和实际应用研究取得了一定的进展,但这些成果从整体上看却是分散的、实验性的。在作者所能检索到的国内外相关资料中,关于全球离散格网方面的科学技术文献仅限于国内外一些学术期刊上发表的研究论文,还没有专门论述全球离散格网建模原理与应用的专著。这就让人们很难系统地了解 and 把握有关全球离散格网的剖分标准、变形特征、编码索引、建模原理与应用分析等关键问题,在一定程度上限制了全球离散格网理论与技术的研究进展与应用普及。

自 1998 年以来,作者及其研究小组对球面格网单元的剖分方法、格网层次编码特征与邻近索引机制、多层次格网单元的几何变形分布规律与收敛性分析、球面实体的格网空间概念模型与度量计算、球面格网空间的基本拓扑性质进行了较为

系统的研究,并初步探讨了全球离散格网模型在分辨率影像处理、全球 DEM 的无缝表达和空间关系推理等方面的计算和操作方法,完成了多篇以全球离散格网建模为研究方向的博士论文。在其间的学术交流、科研与教学过程中,作者查阅了大量的国内外相关文献资料,也积累了一些经验,深感全球离散格网的理论与技术对我国新一代空间基础框架建设的重要性。因此,在众多学术前辈、同行和朋友的鼓励和帮助下,终于完成了这本专著,希望藉此推动我国在全球离散格网理论与技术方面的研究进展。在本书的撰写过程中尽可能力求知识全面,紧跟本领域的发展步伐。但由于作者水平有限,书中难免挂一漏万,也不乏失误之处,恳请各位学术前辈和同行见谅,并不吝批评赐教。如果本书的出版,能抛砖引玉,引起更多的专家和学者关注该领域的研究,作者也就达到目的,心满意足了。

书中引用和参考了大量的国内外文献,笔者对各位作者表示真挚的谢意!如有引用不当或曲解原意之处,敬请原谅并祈指教!

本书的主要内容在研究和整理过程中,得到了国家基础地理信息中心陈军教授和香港理工大学李志林教授的精心指导,值此书稿完成之际,谨向两位教授表示衷心的感谢!同时感谢国家基础地理信息中心的蒋捷研究员、赵仁亮博士、刘万增博士,北京大学的孙敏副教授,中南大学的周晓光副教授,对本书相关研究提出的意见和建议!感谢中国矿业大学(北京)博士研究生孙文彬、阎超德、臧德彦及硕士生王志鹏、潘娜娜、崔马军等同学,他们分别参与了本书的资料整理、数据处理、文字校核和插图绘制等工作!

感谢国家自然科学基金(NO:40471108、40025101、69833010)和国家基础测绘项目(NO:1469990511009)的资助,使我们能够顺利进行相关课题的研究。

作者

2006 年 10 月于北京

目 录

第 1 章 概述	(1)
§ 1.1 网格与地理格网	(1)
§ 1.2 传统平面格网的局限性	(4)
§ 1.3 全球离散格网的研究现状及评述	(7)
§ 1.4 本书的研究内容及章节安排	(18)
第 2 章 全球离散格网的剖分及编码方法	(20)
§ 2.1 全球离散格网的评价标准	(20)
§ 2.2 正多面体格网的特征	(21)
§ 2.3 三角格网的层次剖分与编码方法	(23)
§ 2.4 菱形格网的层次剖分与编码方法	(31)
§ 2.5 六边形格网的层次剖分与编码方法	(33)
§ 2.6 不同剖分方法的对比分析	(37)
§ 2.7 本章小结	(39)
第 3 章 全球离散格网的邻近搜索算法	(40)
§ 3.1 邻近三角形的定义及分类	(40)
§ 3.2 三角形固定方向编码的邻近搜索	(41)
§ 3.3 连续编码的邻近搜索	(46)
§ 3.4 菱形编码的邻近搜索	(51)
§ 3.5 本章小结	(56)
第 4 章 全球离散格网的近似性特征分析	(57)
§ 4.1 球面 QTM 格网的几何变形	(57)
§ 4.2 球面 QTM 格网的细化改进与变形分析	(59)
§ 4.3 椭球面三角格网的变形分析	(63)
§ 4.4 本章小结	(67)
第 5 章 全球离散格网的基本拓扑性质	(68)
§ 5.1 球面的几何特征	(68)
§ 5.2 基于流形的球面三角格网空间的形式化表达	(70)
§ 5.3 球面三角格网空间的基本拓扑性质	(76)
§ 5.4 本章小结	(86)

第 6 章 全球离散格网空间的拓扑关系描述与计算	(87)
§ 6.1 球面格网拓扑关系的描述	(87)
§ 6.2 球面格网拓扑关系的计算	(92)
§ 6.3 基于四元组模型的球面格网拓扑关系语义规则表	(100)
§ 6.4 本章小结	(105)
第 7 章 全球离散格网空间的数据模型及操作	(106)
§ 7.1 球面数字空间的特征	(106)
§ 7.2 基于球面数字空间的实体概念模型	(108)
§ 7.3 线状实体的插值与综合	(112)
§ 7.4 面状区域的编码充填与区域扩张	(114)
§ 7.5 球面格网的距离计算及应用	(117)
§ 7.6 本章小结	(124)
第 8 章 基于全球离散格网的多分辨率影像表达	(125)
§ 8.1 平面影像到 QTM 格网的转换	(125)
§ 8.2 QTM 格网数据的无损压缩	(129)
§ 8.3 基于 QTM 格网的多分辨率影像表达	(137)
§ 8.4 本章小结	(140)
第 9 章 基于全球离散格网的数字地形建模	(141)
§ 9.1 全球 QTM 格网的高程获取	(141)
§ 9.2 全球地形的 QTM 格网表达	(145)
§ 9.3 多层次 DEM 的自适应无缝建模	(149)
§ 9.4 全球 DEM 格网的数据结构	(151)
§ 9.5 本章小结	(152)
第 10 章 基于全球离散格网的地形可视化	(154)
§ 10.1 开发工具的选择	(154)
§ 10.2 全球地形格网的数据组织	(155)
§ 10.3 全球地形格网的 LOD 简化模型	(157)
§ 10.4 全球地形格网的快速显示	(164)
§ 10.5 全球地形动态可视化实验系统设计	(169)
§ 10.6 本章小结	(175)
参考文献	(176)

Contents

Chapter 1	Introduction	(1)
§ 1.1	Grid and Geographic Grid	(1)
§ 1.2	Limitation of the Traditional Planar Grid	(4)
§ 1.3	Research Situation and Comment on the Global Discrete Grid	(7)
§ 1.4	Research Contents and Chapter Arrangement	(18)
Chapter 2	Partition and Coding Methods of the Global Discrete Grid	(20)
§ 2.1	Appraisal Standards of the Global Discrete Grid	(20)
§ 2.2	Characters of the Plato Polyhedral Grid	(21)
§ 2.3	Hierarchical Partition and Coding Method of the Triangular Grid	(23)
§ 2.4	Hierarchical Partition and Coding Method of the Diamond Grid	(31)
§ 2.5	Hierarchical Partition and Coding Method of the Hexagon Grid	(33)
§ 2.6	Comparing Analysis among Different Partition Methods	(37)
§ 2.7	Summary	(39)
Chapter 3	Neighbor Search Algorithm of the Global Discrete Grid	(40)
§ 3.1	Definition and Classification of Neighbor Triangles	(40)
§ 3.2	Neighbor Searching of the Triangles with Fixed Direction Coding	(41)
§ 3.3	Neighbor Searching of the Triangles with Continuous Coding	(46)
§ 3.4	Neighbor Searching of the Triangles of Diamond Coding	(51)
§ 3.5	Summary	(56)
Chapter 4	Approximate Character Analysis of the Global Discrete Grid	(57)
§ 4.1	Geometric Distortion of Spherical QTM Grid	(57)
§ 4.2	Refinement Improvement and Distortion Analysis of	

	Spherical QTM Grid	(59)
§ 4.3	Distortion Analysis of Ellipsoidal Triangular Grid	(63)
§ 4.4	Summary	(67)
Chapter 5	Basic Topology Characters of the Global Discrete Grid	(68)
§ 5.1	Geometric Characters of Spherical Surface	(68)
§ 5.2	Formalization Expression of Spherical Triangular Grid Space Based on Manifold	(70)
§ 5.3	Basic Topology Characters of the Spherical Triangular Grid Space	(76)
§ 5.4	Summary	(86)
Chapter 6	Topological Relationship Description and Calculation of the Global Discrete Grid	(87)
§ 6.1	Topological Relationship Description of the Spherical Grid ...	(87)
§ 6.2	Topological Relationship Calculation of the Spherical Grid ...	(92)
§ 6.3	Semantic Rules of Spherical Grid Topology Based on Quaternion-model	(100)
§ 6.4	Summary	(105)
Chapter 7	Data Models and Operations of the Global Discrete Grid System	(106)
§ 7.1	Characters of the Spherical Digital Space	(106)
§ 7.2	Entity Concept Model Based on Spherical Digital Space	(108)
§ 7.3	Interpolation and Generalization of Linear Entity	(112)
§ 7.4	Code Filling and Area Expansion of the Spherical Area	(114)
§ 7.5	Distance Calculation and Application of the Spherical Grid	(117)
§ 7.6	Summary	(124)
Chapter 8	Multi-Resolution Image Expression Based on the Global Discrete Grid	(125)
§ 8.1	Transformation from Planar Image to QTM Grid	(125)
§ 8.2	Lossless Compression of QTM Grid Data	(129)
§ 8.3	Multi-Resolution Image Expression Based on QTM Grid ...	(137)

§ 8.4	Summary	(140)
Chapter 9	Digital Terrain Modeling Based on the Global Discrete Grid ...	(141)
§ 9.1	Elevation Values Acquirement of the QTM Grid Point	(141)
§ 9.2	QTM Grid Expression of the Global Terrain	(145)
§ 9.3	Adaptive Seamless Modeling of the Multi-level DEM	(149)
§ 9.4	Data Structure of Global DEM Grid	(151)
§ 9.5	Summary	(152)
Chapter 10	The Global Terrain Visualization Based the Discrete Grid	(154)
§ 10.1	Selection of the Development Tools	(154)
§ 10.2	Data Organization of the Global Terrain Grid	(155)
§ 10.3	LOD Simplified Model of the Global Terrain Grid	(157)
§ 10.4	Fast Display of the Global Terrain Grid	(164)
§ 10.5	Experiment System Design of the Global Terrain Dynamic Visualization	(169)
§ 10.6	Summary	(175)
References		(176)

第1章 概述

随着空间技术和信息技术的不断进步,特别是遥感(Remote Sensing,RS)与全球定位系统(Global Position System,GPS)技术的飞速发展,使我们能够获得有关地球及其各种资源环境和社会现象的多分辨率的、海量的、实时的对地观测数据。其数据量之大,仅美国国家数据中心一天的新数据量就达到 TB 量级。全球海量数据的不断获取和更新,为人类进行全球经济的可持续发展研究、资源环境变化监测、灾害预警预报、国家安全和“数字地球”构建等等领域,提供了丰富的空间基础数据。但是,令人遗憾的是,这些数据大部分都被存储在电子数据仓库中,没有被充分利用。美国前副总统戈尔在“数字地球”一文中明确指出:“问题的根源在于信息的处理和显示方法。”(Gore,1998)所以,如何对全球海量数据进行有效地利用和管理(如快速检索、动态更新和空间分析等等)是目前国内外学术界和应用部门面临的一大难题(Wright et al,1997;Gold,1997;Gold et al,2000)。从目前GIS与相关技术的发展及相互集成中存在的问题,以及从“数字地球”到“数字城市”及其他应用所提出的要求来看,需要人们打破几千年来传统的以地图方式表示地理空间数据和信息的框框,去探求地理空间数据与全球开展的网格计算相适应的空间数据处理新方法(李德仁等,2003)。全球空间信息格网就是在这样的背景下提出的,并立即成为国内外地学及其他相关学科研究的热点领域之一。

§ 1.1 网格与地理格网

网格(grid)技术是近年来逐渐兴起的一个研究领域,它的出现被认为是掀起互联网继传统因特网、万维网之后的第三次浪潮(李德仁等,2003;陈述彭等,2004)。对于“网格”,美国 Argonne 国家实验室的资深科学家、美国网格计算项目的领导人 Foster,曾在1998年主编的题为《网格:21世纪信息技术基础设施的蓝图》一书中明确提出:“网格是构筑在互联网上的一组新兴技术,它将高速互联网、高性能计算机、大型数据库、传感器、远程设备等融为一体,为科技人员和普通老百姓提供更多的资源、功能和交互性。”但网格技术并非横空出世,也并非完全意义上的科技发明与创造,它的出现从根本上体现了人们对于“共享资源和协同解决问题”的迫切需求,是现代信息技术发展和进化的产物,也代表了信息技术发展的方向。目前,网格技术已在地学等领域得到应用,如地球系统网格(Earth System Grid II,ESG)项目,主要目标是解决从全球地球系统模型分析和发现知识所面临

的巨大挑战,为全球变化研究提供一个无缝的、强大的虚拟协同环境(ESG ORG, 2002)。此外,还有用于地震研究的美国国家地震仿真网格(NEES Grid)等(金江军等,2004)。

在这里,“网格”是一种术语,用来概括信息时代的一种环境,是一种技术的、人文的环境。在这个环境中,多元信息可以超越时空的限制而为用户提供最满意的服务。这里的核心问题是一个为信息化服务的新环境或新平台,因此起个什么名称并不重要。例如,我们曾选用过很多术语来表述一些最重要或最基础性的东西,如框架(frame)、基础设施(infrastructure)、系统(system)、网络(net)等等,为了突出这一新环境的特点而选用了区别于以往的术语——网格(grid)。了解了网格的含义,就不要再使用前几年误译的“栅格”(对应 raster)等术语,那将造成更广泛的混乱(高俊,2004)。

地理格网是按一定的数学法则对地球表面进行划分而形成的格网(通常是指以一定长度或经纬度间隔表示的格网)。地理格网在我国有着悠久的文化传统:中国上古时代的“井田制”应是地理格网系统的最好体现,“田”为四周封闭的格网,而“井”则是四周没有边界的格网。我国地图学家在 11 世纪所完成的《华夷图》和《禹迹图》成为当时的杰作。《禹迹图》大约绘制在公元 1100 年以前,在图中,明确运用地理格网辅助快速量测和分析,比例尺是每格相当于百里,此图为宋代制图学家的最大成就(陈述彭,1990)。古代的格网地图,是为了适应于定位精度不高的、粗略的地理分布现象,如裴秀的计里画方、元代的格网地图等,它把空间不确定性因素控制在相应的尺度范围内。

现代地图方里网也是一种建立在某种地图投影基础上的格网系统,它将制图区域按平面坐标或按经纬度划分为格网,以格网为单元描述或表达其中的属性分类、统计分级以及变化参数,即在二维上表达动态时空变化的规律。国内外地图学者已有很多研究,例如,我国地形图上的方里网是建立在每个 6° 高斯投影带上的,这点与美国类似,但因没有格网编码,缺少全球格网的概念,下一步如何改革,还有待讨论(高俊,2004)。而目前的 GIS 数据几乎都是以某种地图投影作为其数学基础,是与地理数据存在映射关系的函数集。

地理格网与网格技术中“网格”是两个不同的概念。前者主要立足于对地球空间的划分、空间数据的组织以及检索等技术;而网格技术则主要强调广域网上整体资源的整合与利用。网格技术与地理格网之间又有着密切的联系,由于网格技术所处理的信息 80% 与空间位置有关,空间信息是各种社会信息(自然、社会、经济等属性信息)的载体或支撑框架。所以,地球空间信息网格就构成了网格技术的基础内容之一。但是从网格技术所要求的资源共享和协同计算观点看,目前 GIS 还不能适应网格计算的要求,这主要表现在:① 同一空间区域内不同主题的数据获取时间可能不一致,在进行网格分析时,数据如果简单叠加,就会产生时间基准不

一致等问题；②多种比例尺、多种空间参考和多种投影类型所带来的空间基准不一致的问题；③空间数据种类繁多，数据格式不一致所引起的问题等等(李德仁等，2005)。

目前，网格技术与空间信息结合(空间信息格网)的研究刚刚开始。主要以欧美为主，已有政府、公司和研究所进入实验和使用阶段(李德仁等，2003)。其中英国政府已投资 1 亿英镑，用以研发“英国国家格网”(NK National Grid)(如图 1.1 所示)；1999 年，美军国防信息系统局向国防部递交了一份报告，提出建设全球信息网格(Global Information Grid,GIG)的建议，美国国防部在 2003 年投入 23 亿美元用于美军的网络化建设，预计在 2020 年初步完成成为美军服务的 GIG 体系，这是目前网格工程化规模最大的一个项目，各国对此都给予了很大的关注。同时，为了配合本土反恐任务和支持美国军方的 GIG 计划，将 UTM (Universal Transverse Mercatol Projection)参考系的格网方案重新确定为国家标准，称为“美国国家格网”(United States National Grid)(如图 1.2 所示)(FGDC,2001)。

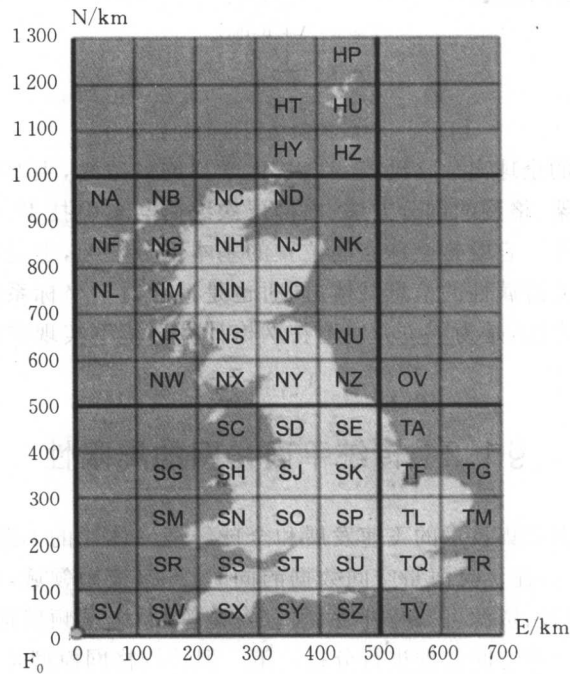


图 1.1 英国国家格网带划分
F₀ 为国家格网的假设原点

通过建立空间信息格网，可为长期困扰 GIS 业界专家的一系列重大技术问题提供一体化的解决思路，如海量空间数据快速处理问题、海量空间数据存储问题、

地理信息分布式大规模计算问题、VR(Virtual Reality)GIS 实时性问题、GIS 互操作问题、GIS 应用系统快速开发问题等。空间信息格网是 GIS 向深度和广度发展的必然趋势(金江军等,2004)。

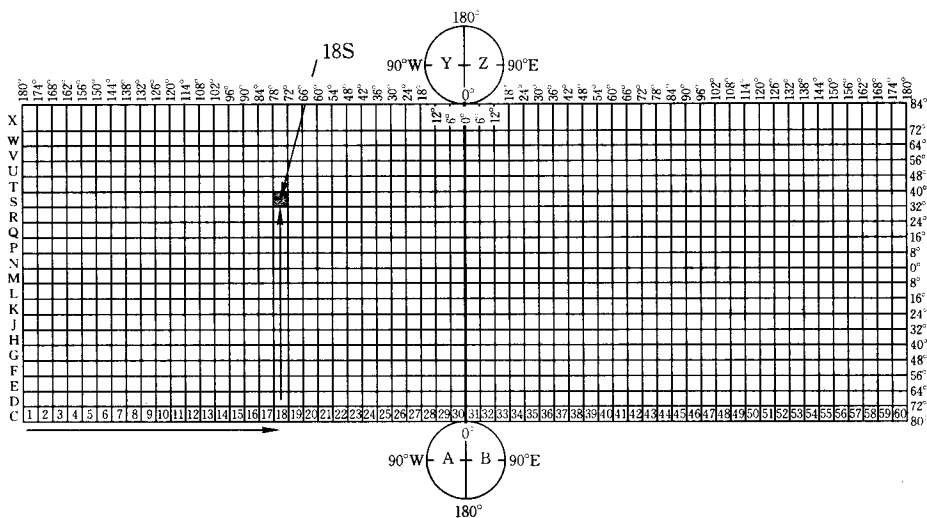


图 1.2 美国国家格网带的初始划分

本书所探讨的全球离散格网模型属于地学格网的范畴,主要包括椭球面格网空间参考框架、格网的剖分方法、格网层次编码与索引技术、格网空间的拓扑推理与应用计算等。它既是全球空间位置的基本剖分框架,也是特定空间位置范围内自然、社会、经济属性的信息载体,同时也是适合时空坐标系变化的空间信息的一种新的表示方法,是为了更方便地在网格计算环境下实现空间信息资源的整合、共享与利用。

§ 1.2 传统平面格网的局限性

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,在不断获得全球多分辨率、多比例尺海量空间数据的同时,许多应用领域,如全球环境变化监测、气象模拟预报、资源可持续开发、国家安全等,越来越频繁地使用大范围,甚至全球多尺度的地理空间数据进行分析决策。但传统格网模型是起源于数字制图和影像处理的平面模型,是通过地图投影把椭球(或球)面格网铺展成平面格网(如正方形栅格或其他面片形状)进行分析和处理的,适合表达和处理地球表面局部区域数据,以及进行低精度的计算(Lukatela,2000)。但在处理大范围,甚至全球的空间数据时,其内在的局限性越来越明显,主要表现在以下几个方面:

(1) 人们对地球椭球体的空间三维坐标向二维坐标进行投影转换的理论和方

法研究已有 100 多年的历史,地图投影的种类也有 600 多种,其中有计算公式的达 200 多种(Frank et al,2001)。投影类型的丰富为空间数据处理提供了极大的自由度,使局部复杂的球面数据能够在平面上更加方便地处理。但同时也给全球数据的管理和分析带来了诸多不利的影响,如不同的国家和地区,为了使各自国家范围内的区域在投影后,各种变形能满足一定的精度,所采用的投影方法也各种各样。这样在边界上容易出现空间数据的断裂和重叠,导致全球空间数据实体的不连续。

(2) 为达到覆盖整个地球的目的,使地球数据能在平面上进行描述(即建立平面地图的坐标格网),就需要把获取的球面数据进行一系列平面投影转换,在转换过程中位置、方向和面积大小将会出现不同程度的变形,并且目前还没有一个投影方法能同时保持距离和面积的不变形(Willmott et al,1985;White et al,1992)。

(3) 空间位置的平面投影坐标与实际空间位置之间的差别,随覆盖面积的增加而增大,已超出了现代高精度测量的要求(Lukatela,1987)。由于椭球(或球)面是一种不可展开的曲面,要把这样一个曲面展开在平面上,不可避免地会产生裂隙和褶皱,需要通过数学手段对经纬线进行“拉伸”或“压缩”,才能形成一幅完整的地图(如图 1.3 所示)。这样,在系统分析中,任何一个简单的计算就需要很多“改正数”来解决平面坐标与实体实际几何位置的差别,大大降低了系统的处理效率。

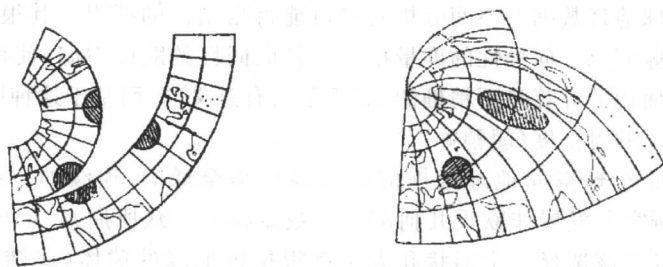


图 1.3 球面投影产生的裂隙和改正

(4) 大地坐标系(即全球时空基准与框架)总是随着技术的进步而不断精化,它的变化对传统空间数据表达的数字地图带来至今无法解决的问题(李德仁等,2004a)。特别要指出的是,由于 GPS 技术和整个卫星大地测量、卫星重力测量等技术的飞速发展,全球时空基准与框架不断精化,其周期越来越短,最终必将走向实时动态化。因此,以存储某一坐标系下的坐标串为主要方式的空间信息系统是适应不了这种变化的。

(5) 用常规平面概念理解空间数据的真实特性(特别是忽视平面空间与球面数据区域在概念上具有本质的差别),经常导致把平面上常规量算和分析技术盲目移植到全球数据管理系统中。比如,平面两点的距离是欧氏距离,而在球面上则是大弧距离。

(6) 传统平面格网模型已不能满足全球海量数据的多分辨率(层次)表达需求。例如,利用逐步层次显示技术,从亚洲范围视图逐步放大到北京天安门局部细节视图,在每一步放大过程中,空间三维椭球面向二维平面转换的机理和参数都不相同(林宗坚,1999);另一方面,不同的分辨率可能选择不同的投影方法和不同的分带标准。例如,我国小比例尺地图采用 Lambert 投影,如 1:100 万的地图;而大、中比例尺地图则采用高斯-克吕格投影,如 1:50 万~1:5 000 的地图;另外,在同一投影系统中,1:5 万的地图采用 6°带,而 1:1 万的地图则采用 3°带。这说明现有模型的数据结构和表达模式是以平面投影为基础的,从本质上看是单一尺度的,很难满足全球海量数据从宏观到微观(或从微观到宏观)多分辨率计算和操作的要求。

综上所述,地球椭球面属于非欧氏空间,当 GIS 应用于处理较大尺度的空间问题时,尤其在处理全球尺度的问题上,这种建立在平面欧氏几何学基础上的 GIS 系统,在基础的长度、面积等几何量算上,则出现明显的偏差,从而使 GIS 系统的有效性和准确性受到置疑(周成虎,2004)。另外,椭球面是不可展曲面,在集合上椭球面和平面是不同胚的,即同一空间数据在平面和椭球面所蕴涵的空间关系有时是不等价的(Sahr et al,2003)。所以,利用平面空间的拓扑概念、理论和操作算法来进行全球地理数据的空间分析时将可能得出错误的结果。其根本原因就是,平面投影将球面上各向异性的度量扭曲为各向同性的欧氏空间,使得大区域内的距离、方位、面积的计算是不精确的,甚至是没有意义的,而基于这种度量的空间分析也缺乏必要的可信度(胡鹏等,2001)。

为了保证全球空间地理数据的空间表达是全球的、连续的、层次的和动态的,就需要研究和发展非欧氏几何的空间数据模型。众所周知,地球是一个近似的球体,所以应该选择一个形状和大小都很接近地球的球体(或椭球体)来代替地球作为地球科学研究的基础模型。而全球离散格网(Global Discrete Grid, GDG)是基于球面的一种可以无限细分,但又不改变其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(周启明,2001),它具有层次性和全球连续性特征,既避免了平面投影带来的角度、长度和面积的变形及其空间数据的不连续性,又克服了许多限制 GIS 应用的约束和不定性,即在地球上任何位置获取的任何分辨率的(不同精度的)空间数据都可以规范地表达和分析,并能用确定的精度进行多分辨率操作,已成为国际 GIS 学术界一个新的研究热点。它有望从根本上解决平面模型在全球多分辨率空间数据管理上的数据断裂、变形和拓扑不一致性等问题(Dutton,1999;2000;Gold et al,2000;Lukatela,2000)。

§ 1.3 全球离散格网的研究现状及评述

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模型进行了研究。在地理、GIS、数据库管理、测绘及其他相关专业领域的主要国际学术会议和国际刊物上,有关这方面的研究论文或工作报告逐渐增多。如:2000年3月和2004年8月,由美国国家地理信息与分析中心(NCGIA)组织,在美国California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层次剖分及建模方法的探讨与成果交流。会议议题涉及地球全球格网的设计方案、格网系统的互用性、误差及变形、数据分级与编码、空间分析与应用等。另外,国际GIS权威杂志《International Journal of Geographic Information Science》《Photogrammetric Engineering & Remote Sensing》和《Cartography and Geographic Information Science》在近两年也相继发表了多篇相关的研究论文。

为了方便分析,本节以全球离散格网的几何形状与剖分方法为标准,把球面格网模型划分为4种类型进行评述,即等经纬度格网(equal-latitude & longitude grids)、变经纬度格网(adjusted-latitude & longitude grids)、正多面体格网(polyhedron tessellation grids)和自适应格网(Adaptive subdivision grids)。

1.3.1 等经纬度格网模型

等经纬度格网是指经线和纬线按固定间隔在地球上相互交织所构成的格网,它是地学界应用最早、也是目前应用最广泛的一种地球空间坐标格网,如图1.4所示。近年来,国内外学者对此传统格网又进行了一些新的探索研究。如,美国乔治亚州技术学院研制的VGIS(Virtual GIS)(Koller et al, 1995; Lindstrom et al, 1997; Faust et al, 2000),它首先将整个地球按经纬度分成32个 $45^{\circ} \times 45^{\circ}$ 的区域,每个区域再作为一个四叉树的根节点,按经纬度逐层细分,细分后的每个区域建立一个局部坐标系,如图1.5所示。区域内的数据用投影后建立的规则格网来表达。由于该方法在局部区域仍然采用平面投影来模拟表达曲面地形,这样不可避免会带来投影误差,而且随着分辨率的提高,该系统采用的局部坐标系会达到数万个,既增加了系统的数据转换负担,又不利于数据的实时处理。类似的还有美国国家航空航天局(NASA)开发的虚拟行星探索工程VPEP(Virtual Planetary Exploration Project)(Hitchner, 1992)、美国海军研究生院(Naval Postgraduate School)研发的NPSNET系统(Falby et al, 1993)和SRI公司开发的TerraVision地形浏览器(Reddy et al, 1999)等。Gerstner(1999)对基于经纬度表达的地形数据进行了数据压缩,该方法很好地顾及到了球面曲率的影响,能连续地、可视化地