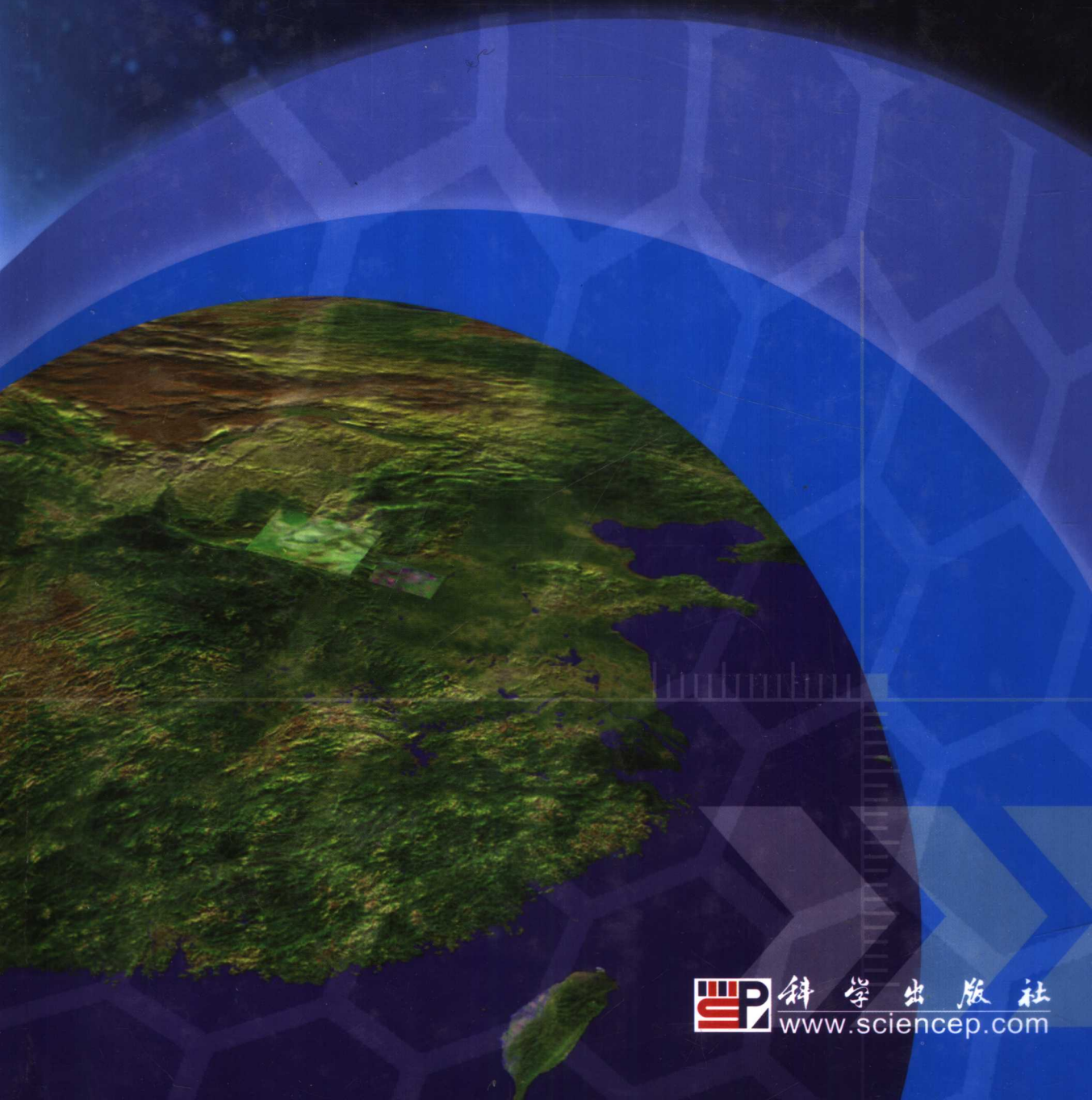


地球空间信息球面离散网格

——理论、算法及应用

张永生 贲进 童晓冲 著



科学出版社
www.sciencep.com

地球空间信息球面离散网格 ——理论、算法及应用

张永生 贵进 童晓冲 著

国家自然科学基金项目(40671163)资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对地球空间信息球面离散网格的理论和实际问题进行了系统的研究,为全球海量地球空间信息的组织、管理和应用设计了新的技术框架。全书共分九章,分别论述球面网格数据模型的研究方法,基于地理坐标的球面网格,施奈德等积多面体投影,球面等积网格生成算法,球面六边形网格系统层次关系的建立,局部高精度网格生成算法,球面网格系统的应用技术,椭球面上的网格系统以及球面离散网格应用系统的设计方法。

本书可供地球空间信息科学、遥感科学与技术、地理信息系统、对地观测、信息资源开发、空间信息系统集成、资源与环境、国土资源调查、测绘、卫星应用技术、地理影像情报等学科领域的研究开发者、管理者阅读参考,也可作为相关专业大学高年级学生和研究生的教学用书或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

地球空间信息球面离散网格:理论、算法及应用/张永生等著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018777-2

I. 地… II. 张… III. 地理信息系统-研究 IV. P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 041013 号

责任编辑:韩 鹏 谢洪源 / 责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2007年4月第 版 开本:787×1092 1/16

2007年4月第1次印刷 印张:10 1/2

印数:1—3 000 字数:230 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序 一

网格技术和地球空间信息技术已经呈现出前所未有的快速发展态势,将两者结合起来形成的空间信息网格则是一个十分紧迫而又具有挑战性的命题。一定意义上讲,空间信息网格是一个既体现地球科学历史传承同时又充盈着当代信息科学气息的研究领域。说它体现历史传承,是因为网格作为一种对地理空间进行位置划分的方法,很早就已出现,并沉淀了丰厚的理论与技术遗产。说它充盈着当代气息,是因为随着信息科技的进步和信息化社会对地球空间信息资源利用的日益普及,使得空间信息网格的研究内容更加丰富,并与现代信息技术手段和信息基础设施建设同步发展,其最终目标是要最大限度地实现资源共享和信息互通。

众所周知,地理(地球)空间信息以地图形式在纸介质上表示已有几千年的历史。当电子计算机问世后,要把空间数据交给计算机去处理和管理,人们就自然地想到了“地图数字化”的道路,于是出现了用离散而且有拓扑关系的坐标点串来描述点、线、面、体各种空间要素的相应方法和技术。但数字地图绝不是空间数据在计算机中表示的唯一方法,更不是在信息网格中表示的唯一方法。从网格计算所要求的资源共享和协同计算的观点出发,我们所采用的空间数据表示方式,应当更加有利于解决当前普遍存在于 GIS 中的“四个不一致”(即时间基准不一致、空间基准不一致、数据格式不一致、语义不一致)引起的问题。为此,我们提出了空间信息多级网格的思想:按不同经纬网格大小将全球、全国范围划分为不同粗细层次的网格,每个层次的网格在范围上具有上下层涵盖关系。每个网格以其中心点的经纬度坐标(网格中心点)来确定其地理位置,同时记录与此网格密切相关的基本数据项(如经纬度、全球地心坐标、各类投影参数下的坐标)。落在每个网格内的地物对象(细部地物)记录与网格中心点的相对位置,以高斯坐标系或其他投影坐标系为基准。根据实际地物的密集程度确定所需要的网格尺度(分层密度),如地物稀疏的地方只需要粗网格,而地物密集的地方(如城市)则需要细网格存储空间与非空间数据。网格的划分根据区域大小和应用的效率,既可以采用经纬度网格,也可以采用方里网格,在全球范围甚至采用球面网格。

在我看来,空间信息网格的研究可划分为广义和狭义两个层面。广义空间信息网格是指在网格技术支撑下,在信息网格上运行的天、空、地一体化地球空间数据获取,以及信息处理、知识发现和智能服务的新一代整体集成的实时、准实时空间信息系统。狭义空间信息网格则指在网格计算环境下的新一代网格地理信息系统,在地球表面建立网格体系是其中一个重要的问题。

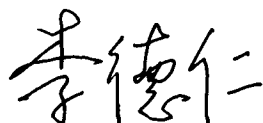
《地球空间信息球面离散网格——理论、算法及应用》一书作者所在的研究团队围绕建立球面网格相关的理论和技术问题进行了持续探索和研究,该书即是他们研究成果的总结。全书用简洁的语言循序渐进地论述了球面离散网格的概念、生成算法、层次编码、层次关系建立等内容;对球面多分辨率六边形网格系统所做的分析具有理论创新性,并初

步解决了在球面六边形网格上建立层次结构的难题,这是该书的闪光点之一。

目前,空间信息多级网格的研究刚刚起步,究竟采用什么样的网格划分方案最理想、是否必须在椭球面,而不是投影面上建立网格等诸多问题尚无定论。该书作者建立的球面六边形网格体系是一种比较适合于全球研究使用的新颖方案,与传统基于经纬度的地理网格划分有很大的区别,需要学术界对这个问题展开必要而深入的讨论。我赞成作者不落窠臼的创新思想,鼓励学术界的“百花齐放,百家争鸣”。

基于以上理由,我愿向读者推荐这本书,并期望作者所在的研究团队继续在这一研究领域进行开拓和创新。

中国科学院院士
中国工程院院士
国际欧亚科学院院士



序 二

科学技术的进步迅速改变着人类的生存环境与交流方式,在经济、文化、科学、教育和军事各领域逐渐出现了一些新的信息需求。譬如,身居不同地点的人们意欲在一个虚拟的环境中相聚,一起讨论、交流共同关心的问题,就需要构建适当的协作环境(collaborative environment);伴随庞大科学工程和精细、动态、实时计算任务的增加,海量信息处理对高效计算能力的需求日益紧迫,亟待建立像电网模式一样充分发挥计算资源效能的设施;在大型指挥决策系统中提供电子地图、公用态势图、虚拟环境可视化的保障能力,期望通过综合集成工程(meta-synthetic engineering)采用计算机协助人类大脑,发挥各自的优势,最终实现指挥、管理自动化的目标。

上述这些新需求的共同特点是要将正确的信息,在准确的时间、精确的地点,传递给被确认的使用者。网格就是在这样的背景下提出的。它是想用术语来概括信息时代的一种环境,多元(源)信息可以超越时、空的限制而为用户提供最满意的服务。它将所有数据、信息与空间地理位置联系起来,实现全球数据和信息的互连互通,实现跨地区的远程操作。

网格的概念目前在各部门和技术领域中虽有不同的解释,但都源于对信息资源全球化的需求和对知识共享的渴望。同时,信息技术特别是计算机网络技术初步提供了实现这一目标的可能。地理空间数据是科学探索和生存的重要资源,地理空间信息是发现新知识的重要基础,这一庞大的领域对网格环境的迫切需要就是很自然的了。

这里的核心问题是建立(在充分利用原有环境、平台的基础上,这一点十分重要)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。但是为了突出这一新环境的特点选用了区别于以往的术语——网格(grid)。另外,对中国来说,很重要的原因是网格在历史上就是一个与空间位置捆绑在一起的名词,最早出现在中国古代地图上,称为“计里画方”,随后出现在近代地形图上,称为方里网或坐标网。此外,网格还有文化上的继承性,例如中国围棋的棋盘(一种模拟战场)也是供指挥家运筹帷幄,发展空间概念的一种网格环境。这一先天的优势有利于网格概念的现代化。

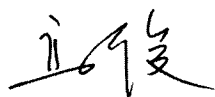
在网格技术逐渐引起人们的重视后,一个重要的问题就是网格环境首先需要一个新的地理空间基础平台。这个工作传统上是测绘科学与工程领域的任务。我们国家在建立地理信息基础平台时缺少面向全球思考,这些年由于科学研究和国家安全的急需,我们的测绘工程也做了大量以全球为对象的调整工作,但它的重要性在社会上和科技界都未引起足够的重视。

测绘科技在承担新的地理空间基础框架的建设中,面临着一系列重大任务。其中,在地球表面建立网格框架是大家较关心的问题之一,目前尚无定论。《地球空间信息球面离

散网格——理论、算法及应用》一书作者所在的研究团队长期专注于该领域的研究,从1999年开始在国家863计划信息领域项目的支持下,开始探索“基于全球空间网络的遥感信息协同处理平台”的理论和 technical 问题,取得了一些有益的成果和结论。随后,在国家自然科学基金、测绘遥感信息工程国家重点实验室研究基金、资源与环境信息系统国家重点实验室研究基金、国防卫星应用课题的资助下,围绕地球空间信息球面离散网格的数据模型、编码技术、六边形层次网格空间信息管理方案,以及与地球观测数据应用结合的相关技术,进行深入探讨和综合实验,取得了一定的进展。该书便是对相关理论、技术成果的总结。与目前已有的地球空间信息网格的建模方法相比,本书所介绍的方案无疑是一种新的尝试。作者在研究中体现的创新思想,相信会对本领域的研究者有所启迪。

在此,我向读者们推荐这本书,希望大家共同探讨空间信息网格技术并促进它的发展。

中国科学院院士



前言

互联网的普及拉近了信息技术与人们日常生活的距离,依托于互联网浏览工具向普通大众提供地理信息服务的 Google Earth 全球三维搜索系统,第一次以较低的技术门槛和非常形象、直观的方式向公众展示了一个真实的三维地球,操之在我的互动模式使得人们可以根据自己的浏览习惯在名川大山间翱翔,在摩天楼群中俯瞰。随着地表影像更新周期的缩短,人们越来越惊异地发现,自己生活、工作周边环境的变化,在对这个三维地球的深层浏览中都能不同程度地体现,与人们生活、出行、职业需要息息相关的其他辅助信息,也日益丰富地链接到色彩斑斓的地球影像的适当位置。与 Google Earth 有异曲同工之妙的还有 NASA 发布的更加专业的 World Wind,该软件能够根据用户当前的视点位置从网络地图服务器(Web Map Server, WMS)上自动下载各类信息,例如陆地卫星(LANDSAT)获取的影像数据、航天飞机雷达地形测绘任务(SRTM)获取的地形数据、由各种传感器数据合成的全球真彩色纹理数据、地球观测系统(EOS)卫星上中分辨率成像光谱仪(MODIS)获取的关于自然灾害活动的数据等。这些令人兴奋的地球空间信息服务平台,其海量地理空间数据的组织、管理和调度,都不可避免地需要从全球的角度来构造全新的空间数据模型,以便更加高效、便捷、无缝地存取全球尺度各级分辨率的数据。为此,大批学者提出了多种多样的数据模型和数据组织方案。其中,地球空间信息球面网格系统是一种广受重视的新颖思路。

所谓球面网格是指构成地球表面的许多区域,在每块区域中都有一个单独的点与之关联,两者的组合定义为单元。根据应用目的不同,任何数据对象均可与区域、点或单元关联。如果仅仅定义了区域的边界,则其中心构成一组与之关联的点集;如果只定义了点,则这些点的 Voronoi 图可以构成一组与之关联的区域。例如,所有国家的国界就构成了一个全球网格,全部海岸线也将整个地球划分为若干部分。这些都是“政治网格”或“自然网格”。适用于地球空间信息管理的则是规则网格,其基本原理是将球面(参考椭球面)递归剖分为面积、形状近似相等且具有多分辨率层次结构的网格单元,同时采用每个单元对应的地址编码代替地理坐标在球面上进行各种操作。因为不同层次的网格单元在记录位置信息的同时也携带了比例尺和精度信息,所以,球面网格系统具有处理多比例尺数据的潜力。从数据质量的角度思考,任何地球空间数据都具有一定精度,可用一系列分辨率不同的网格与之匹配。层次递归的思想由来已久,我国古代道家学派的代表人物庄子(约公元前 369~前 286 年)曾有“一尺之棰,日取其半,万世不竭”的论述,但是直到 20 世纪 80 年代末才有学者将其应用于球面多分辨率数据模型中。

很多学者尝试在地理坐标系的基础上建立球面网格系统,研究重点也各有侧重,大致可分为等角划分网格、等面积网格和基于树结构的适应性网格三类。这些网格构造方法各具特色、各有优缺点。设计出各项指标都很优秀的网格系统一直是地学领域研究人员孜孜以求的目标。但是,由于球面具有特殊的几何属性,因此任何一个网格系统都不可能

是完备无缺的。在实际应用中,对各种指标的要求不尽相同,合理的网格系统应该根据实际需要在各种标准之间取得平衡。研究表明,设计一个球面网格系统需要确定以下五个相互独立的要素:理想多面体、多面体的定位、多面体表面的层次剖分、平面与球面的对应关系和点在网格单元中的分布。基于我们对球面网格系统的认识和分析,本书针对球面剖分方法、六边形网格系统建立、单元编码算法、局部高精度网格生成等学术前沿问题进行了系统的研究,将球面网格与遥感数据管理的需求相结合,试图设计一种新型的全球多分辨率空间数据模型。

近十年来,我们的研究得到国家 863 计划信息领域、航天航空领域多个项目的支持,先后开展了“基于数字地球框架的遥感影像信息系统”、“基于全球空间网络的遥感信息协同处理平台”相关的理论和技术问题研究,取得了一些成果和结论。随后,在国家自然科学基金、测绘遥感信息工程国家重点实验室研究基金、资源与环境信息系统国家重点实验室研究基金、国防卫星应用课题的资助下,围绕地球空间信息球面离散网格的数据模型、编码技术、六边形层次网格空间信息管理方案,以及与地球观测数据应用结合的相关技术,进行深入探讨和综合实验,取得了一些新的进展。本书就是对这些工作中与球面网格系统密切相关部分内容的总结。

本书的完成凝结了许多人的关爱和心血。衷心感谢中国科学院院士、中国工程院院士、国际欧亚科学院院士李德仁先生多年来对后辈的关爱和扶持,并亲自为本书作序。衷心感谢中国科学院院士高俊先生长期给予作者的指教和鼓励,审阅书稿并欣然为本书作序。特别感谢中国科学院院士薛永祺先生对作者研究工作的持续指导和帮助。由衷感谢中国工程院李德毅院士、王家耀院士、许其凤院士、沈荣骏院士的关心和指教。十分感谢国际欧亚科学院院士钱曾波先生的长期教诲与关怀。衷心感谢中国测绘科学研究院前任院长林宗坚教授的指教和热情帮助。作者还要对解放军信息工程大学副校长王亚弟教授的关心和支持,北京大学程承旗教授与作者对球面网格理论的探讨和合作研究,武汉大学龚健雅教授给予的友情帮助,一并深表谢忱。

本书的完成,罗睿博士、邓雪清博士、张云彬博士、黄小波教授、戴晨光副教授也有直接贡献。本书的出版,得到国家自然科学基金、解放军信息工程大学测绘学院学术著作出版基金的资助。科学出版社谢洪源先生、韩鹏先生对本书出版给予了大力支持并付出艰辛劳动。本书写作过程中,借鉴和参考了国内外同行的研究成果及有益经验,引用了大量的参考文献,谨在此表示诚挚的谢意。

我们深知,本书所反映的研究工作进展,还只是构建地球空间信息球面离散网格系统的一个侧面。由于作者学术视野、专业水平和研究深度所限,难免挂一漏万,书中错漏和不当之处敬请广大读者批评指正。

目 录

序一

序二

前言

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 空间信息网格	2
1.3 现有平面数据模型的局限	2
1.4 球面数据模型的引入	3
1.5 球面网格模型研究现状	4
1.5.1 基于地理坐标系的球面网格	5
1.5.2 基于多面体剖分的球面网格系统	9
1.6 需要进一步研究的问题	19
1.7 本书的主要内容与结构安排	19
第二章 基于地理坐标系的球面网格	21
2.1 引言	21
2.2 表示地形和影像的平面网格	21
2.2.1 规则网格	22
2.2.2 多分辨率金字塔	23
2.2.3 四叉树和二叉树剖分网格	23
2.2.4 不规则三角网格	24
2.2.5 多分辨率 TIN	24
2.2.6 各种方案的分析与组合	25
2.3 瓦片四叉树及其在球面上的扩展	25
2.4 数据组织方案	28
2.4.1 瓦片数据	29
2.4.2 属性数据	30
2.4.3 存储方案	31
2.5 球面地形数据处理	32
2.5.1 球面动态 LOD 算法	32
2.5.2 地形裂缝的处理	33
2.5.3 异步数据加载	34
2.6 实验及分析	35
2.7 小结	38

第三章 施奈德等积多面体投影	39
3.1 引言	39
3.2 基本原理	40
3.2.1 正变换公式	41
3.2.2 逆变换公式	44
3.3 其他多面体投影的计算	45
3.4 算法实现	45
3.5 计算结果	48
3.6 误差分析	48
3.7 小结	51
第四章 球面等积网格生成算法	52
4.1 引言	52
4.2 网格族及其命名	52
4.3 基本思想	53
4.4 坐标系统的定义	56
4.5 ISEATI 网格族	58
4.6 ISEADI 网格族	60
4.7 ISEAH I 网格族	61
4.8 ISEAH II 网格族	63
4.9 ISEAH I/II 网格族	64
4.10 网格族与网格系统	65
4.11 实验结果及分析	66
4.12 基于球面网格的栅格数据存储方案	73
4.13 小结	74
第五章 球面六边形网格系统层次关系的建立	75
5.1 引言	75
5.2 广义平衡三元组结构分析	75
5.3 平面六边形网格系统的编码	77
5.4 ISEAH I-3 网格系统的编码	81
5.5 地理坐标与单元地址码的相互转换	83
5.5.1 地理坐标转换为单元地址码	83
5.5.2 单元地址码转换为地理坐标	86
5.6 球面单元位置关系的计算	86
5.6.1 单元邻近搜索	86
5.6.2 单元层次检索	92
5.7 实验结果与分析	93
5.8 小结	96

第六章 局部网格生成及层次关系的建立	97
6.1 引言	97
6.2 局部网格的边缘	97
6.2.1 点与球面大弧投影的位置关系	97
6.2.2 点与球面多边形的位置关系	98
6.3 网格区域裁剪及局部网格的生成	101
6.3.1 球面多边形区域的跨面裁剪	101
6.3.2 局部网格生成	102
6.4 局部网格层次关系的建立及寻址	106
6.4.1 局部网格层次关系的建立	106
6.4.2 局部网格在全球网格中的寻址	107
6.5 实验结果及分析	108
6.6 小结	113
第七章 球面网格系统的应用	114
7.1 引言	114
7.2 球面网格的多分辨率显示	114
7.2.1 球面视景体剪裁与可视单元确定	114
7.2.2 基于视点的球面网格 LOD 简化	118
7.2.3 实验结果及分析	119
7.3 球面 Voronoi 图生成	120
7.3.1 球面 V 图的定义	121
7.3.2 基于六边形网格的球面实体表达模式	121
7.3.3 球面多集合 V 图生成算法	121
7.3.4 实验结果及分析	122
7.4 小结	124
第八章 椭球面上的网格系统	125
8.1 引言	125
8.2 直接椭球面剖分	125
8.3 间接椭球面剖分	127
8.3.1 基本原理	127
8.3.2 任意投影	128
8.3.3 条件投影	129
8.4 实验结果及分析	130
8.5 小结	135
第九章 原型系统设计与实验	137
9.1 引言	137
9.2 全球多分辨率地形浏览系统 GlobalView	137
9.2.1 GlobalView 的整体结构	137

9.2.2 内核模块的设计	138
9.2.3 性能测试与结果分析	139
9.3 球面离散网格系统 GridView	141
9.3.1 GridView 的设计	142
9.3.2 GridView 原型系统的实现	145
9.3.3 实验结果	146
9.4 小结	151
参考文献	152

第一章 绪 论

1.1 引 言

网格的观念起源于 3000 年前农牧社会原始部落推行的“井田制”,其中“井”表示四周没有边界的网格,“田”则代表四周封闭的网格(陈述彭,2002;邵振峰和李德仁,2005)。几千年来,城市规划一直继承着网格的理念。例如,北京的城市规划严格遵循“十”字形的中轴线,街道、四合院、交通枢纽、商业中心、社区管理等无不依此布局(陈述彭等,2004)。由此可见,网格源于地理空间的位置划分,在中国早已深入人心。

在小比例尺地图编制中采用网格最早也起源于我国。裴秀(公元 223~271 年)系统地提出了“计里画方”和“制图六体”并在中国沿用了近 2000 年;“禹迹图”和“华夷图”的石刻至今保存在西安碑林;罗洪先、朱思本编制的中国地图都使用了网格,并影响到朝鲜和日本(陈述彭等,2004)。

步入信息社会,网格(grid)的含义已经远远超出了空间位置的划分,这一古老的词汇又被赋予了新的内涵。由于网格有着极为广阔的科学、工程应用范畴,各学科、各行业都有自己的解释和任务重点,对它的认识也在不断深化之中,因此很难有一个精确的定义(高俊,2005)。概括地讲,网格就是构建在互联网上的一组新兴技术,它将高速互联网、计算机、大型数据库、传感器、远程设备等融为一体,为科技人员和普通百姓提供更多的资源、功能和服务(李德仁,2005)。互联网主要为人们提供电子邮件、网页浏览等通信功能,而网格功能则更多更强,它能让人们共享计算、存储和其他资源(Foster and Kesselman,1998)。

与网格相关的研究可大致划分为计算网格、信息网格和知识网格 3 个方面(李国杰,2001)。计算网格是网格的系统层,它为应用层(信息网格和知识网格)提供基础设施;信息网格重点研究一体化的智能信息处理技术,使用户能方便地发布、处理和获取信息;知识网格研制一体化的智能知识处理平台,使用户能方便地发布、处理和获取知识(李德仁等,2003)。

美国和欧洲是率先开展计算网格研究的国家,较具代表性的项目包括美国军方为解决战时信息互通而研制的“全球信息网格”(Global Information Grid, GIG)、美国科学基金会为解决科学计算的体系问题而资助研制的“国家高级计算机基础设施联盟网格”(National Partnership for Advanced Computational Infrastructure Grid, NPACI Grid)、美国能源部用于核武器研究的“先进战略运算创新计划网格”(Accelerated Strategic Computing Initiative Grid, ASCI Grid)和欧盟为了解决高能物理实验中资源分配问题而研制的“数据网格”(Data Grid)等。国内相关研究也在不断深入,例如清华大学的“先进计算基础设施”(Advanced Computational Infrastructure, ACI)、中国科学院计算技术研究所的“织女星网格”(Vega Grid)以及国家“863”计划提出的“中国国家网格”(China Na-

tional Grid, CN Grid)项目等。计算网络的最终目标是实现“整个网络就是一台计算机”,让用户像使用电能那样使用网络上的计算资源和信息。

尽管如此,在计算网格中却不包含空间地理范围的概念,而在人类的自然和社会活动中,80%都与所处的时空位置密切相关。为了获得这些随时间变化的地球空间信息,从20世纪70年代以来,随着信息技术、通信技术、航空(航天)遥感、导航定位技术的飞速发展,形成了以全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、遥感系统(Remote Sensing, RS)和地理信息系统(Geographic Information System, GIS)为核心的地球空间信息学(Geo-spatial information science)。但在目前网格计算环境中,地球空间信息学尚不能完全解决何时(when)、何地(where)、何种目标(what object)发生了何种变化(what change)的问题,地球空间信息系统尚未达到无缝集成和协同计算的境界。因此,网格技术与地球空间信息技术的融合成为众多专家、学者关注的焦点问题,这种融合促成了空间信息网格概念的形成(李德仁,2005)。

1.2 空间信息网格

广义的空间信息网格是指在网格技术支撑下,空间数据获取、更新、传输、存储、处理、分析、信息提取、知识发现到应用的新一代空间信息系统。狭义的空间信息网格则是指网格计算环境下的新一代地理信息系统,是广义空间信息网格的一个组成部分(李德仁,2005)。从历史发展的角度来看,狭义空间信息网格则是在“计里画方”之后网格概念对其本源的回归,但内涵已大大丰富。例如,空间数据库中广泛使用的“树”结构其实就是将特定的空间范围进行逐级网格划分,形成不同层次的网格;不同比例尺的图幅划分实际上也形成了一种多级网格(邵振峰和李德仁,2005);数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)利用采样点近似表示覆盖区域内的地形,采样点之间也可构成网格;遥感影像的单个像素也是分辨率很高的网格,因此遥感数据的处理从另一角度也可理解为网格单元的重组与转换。

狭义空间信息网格研究的内容较多,最基本的问题仍然是对地理空间的多层次划分,它既是空间位置的划分方法,也是特定空间位置范围内自然、社会、经济属性的信息载体(李德仁和邵振峰,2005)。由于地球是一个巨大的梨形椭球体,因此在其表面半径为27km的局部范围内人们根本察觉不到地球曲率的影响(陈述彭等,2004),此时的网格划分可近似认为是简单的平面问题。如果我们关注的范围进一步扩大,必然涉及球面或椭球面上的网格划分,问题则要复杂得多,传统方法和数据模型已不能完全满足实际应用的需要。

1.3 现有平面数据模型的局限

地图作为地球空间信息的载体已经有几千年的历史。计算机问世后,要把空间数据放到电子计算机中,人们自然想到“数字化”的方法。于是出现了用离散而且有拓扑关系的点串描述的各种空间要素、用规则排列的正方形网格描述的影像信息(李德仁等,2003)。尽管存储介质从纸张升级为磁盘、光盘,检索和使用方式从人工变为自动,但空间信息组织的数据模型却基本未变,通过地图投影把球面数据变换到平面处理的模式沿用

至今。随着面向全球的航天遥感应用研究与理论探索的深入,人们发现传统平面数据模型存在如下局限性(赵学胜,2004):

首先,投影非常复杂且有变形。人们对地图投影理论和方法的研究已有一百多年的历史,常用的地图投影也有几百种。丰富的投影类型满足了空间数据处理的需求,同时也给大范围数据的管理和分析带来了诸多不便。例如,用常规的平面概念理解空间数据的真实特性,经常导致将平面上常规量算和分析技术盲目移植到大范围数据管理系统中;不同国家和地区,为了使各自范围内的区域在投影后各种变形能满足一定精度要求,采用了各种各样的投影方法或参数,致使边界处容易出现空间数据的断裂或重叠,最终导致全球空间数据实体不连续。

其次,传统平面数据模型缺乏多尺度数据的集成管理。目前,我国小比例尺地形图大多采用兰勃特(Lambert)投影,大、中比例尺地图多采用高斯-克吕格(Gauss-Kruger)分带投影,两者的数学模型、转换参数都不相同。即便投影方法相同,1:5万(6度带)和1:1万(3度带)地形图之间仍然需要换带计算。以上事实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,在本质上是单一尺度的。

综上所述,传统空间数据模型的内在局限性已不能完全满足大范围甚至全球多分辨率海量数据管理的要求,问题的根源在于使用了平面数据模型表达和处理球面空间数据。为了在全球范围内有效地存储、提取和分析不断更新的海量信息,从根本上解决传统数据模型的局限性,就需要重新构建地球空间信息的数据模型。

1.4 球面数据模型的引入

投影理论解决了球面或椭球面不可展的矛盾(尽管不完美),从而建立了二维平面与实际球面三维空间的对应关系。在以纸张为主要信息载体的过去,由于纸面上只能记录二维信息,因而是必须的,除此之外别无选择。步入信息时代,“数字化”也许最符合人们长期形成的思维定势和使用习惯,却未必是空间数据在计算机中的最佳表示。在信息技术突飞猛进的今天,我们完全可以突破平面的限制,按照地球的真实方式存储、管理空间信息,至于平面地图只是空间信息发布时的一种表现方式而已。目前,球面空间数据处理和分析模型的研究已经取得了可喜进展,按照空间实体位置表达模式可划分为矢量和网格两类。

1) 矢量类型

地球表面任何一点的矢量位置可以用球面坐标唯一确定,如经纬度、球面极坐标等。一般情况下,大多数地图投影都采用经纬度坐标作为球面上点位的参数建立投影方程。采用经纬度坐标描述球面空间关系具有简单直接、占用存储空间少等优点,但在空间数据分析中也存在三角函数计算(包括 $\sin$ 、 $\cos$ 、 $\arctg$ 等)不稳定、南北极点附近投影变换不收敛、无法根据数据密度调整覆盖区域等缺陷(赵学胜,2004)。

由于经纬度表达具有上述局限性,加拿大学者 Lukatela(1987)提出用“方向余弦”(即方向角的余弦函数)代替经纬度坐标表示球面上的点,并在此基础上构建了一个真正的椭球面数据模型。这是到目前为止为数不多、不利用投影变换而直接建立的椭球面数据模

型。这种方案的突出优点是避免了投影误差,在地球上的任何地区都稳定,而且空间关系的计算无需使用三角函数,取而代之的是向量代数,计算和检验更加容易。不过,这种数据表达方式缺乏层次性,在处理海量数据时存在不足。

此外,武汉大学的胡鹏教授等(2001)将地图投影的概念由传统的曲面到平面的变换扩展为曲面到曲面的变换,提出了视图和度量分离的思路,即视图采用等距离切圆柱投影,度量空间则是椭球面几何系统。该数据模型的特点是全局数据无缝无叠,能够进行二维和三维空间数据的可视化表达。

2) 网格类型

所谓球面网格是指地球表面的许多区域,在每块区域中都有一个单独的点与之关联,两者的组合定义为单元。根据应用目的不同,任何数据对象均可与区域、点或单元关联。如果仅仅定义了区域的边界,则其中心构成一组与之关联的点集;如果只定义了点,则这些点的Voronoi图同样可以构成一组与之关联的区域。例如,所有国家的国界就构成了一个全球网格,全部海岸线也将整个地球划分为若干部分。这些都是“政治网格”或“自然网格”,适用于地球空间信息管理的则是规则网格,其基本原理是将球面(参考椭球面)递归剖分为面积、形状近似相等且具有多分辨率层次结构的网格单元,同时采用每个单元对应的地址编码代替地理坐标在球面上进行各种操作。因为不同层次的网格单元在记录位置信息的同时也表达了比例尺和精度,所以具有处理多比例尺数据的潜力。从数据质量的角度思考,任何地球空间数据都有一定精度,可用一系列分辨率不同的网格与之匹配。层次递归的思想由来已久,我国古代道家学派的代表人物庄子(约公元前369~前286年)曾有“一尺之棰,日取其半,万世不竭”的论述,但是直到20世纪80年代末才有学者将其应用于球面多分辨率数据模型中。总体而言,学术界对网格模型的研究要远远多于矢量模型。

1.5 球面网格模型研究现状

在规则网格的前提下,可将同一种剖分方法产生的不同分辨率的网格定义为“网格系统”,为了定量描述相邻层次的网格之间的关系,将第 k 层和第 $k+1$ 层单元的面积比定义为该网格系统的“孔径”(aperture)(Sahr et al., 2003; 夏宗国等, 2000),即 $\text{aperture} = \frac{S_k}{S_{k+1}}$ 。如果网格系统具有一种以上的多边形剖分单元,则孔径根据多边形不同分开定义。

不同分辨率网格之间的层次关系在设计高效数据结构方面也有非常重要的影响(Kimberling et al., 1999; Clarke, 2002)。在球面网格系统中,单元之间的层次关系大致有三种:

- (1)当且仅当第 k 层的单元可以由第 $k+1$ 层的单元组成时,该网格系统是一致的(congruent);
- (2)当且仅当第 k 层的每个单元同时也是第 $k+1$ 层单元中心时,该网格系统是对准的(aligned);
- (3)如果网格系统不具备上述性质,则它是非一致(incongruent)且非对准的(unaligned)。