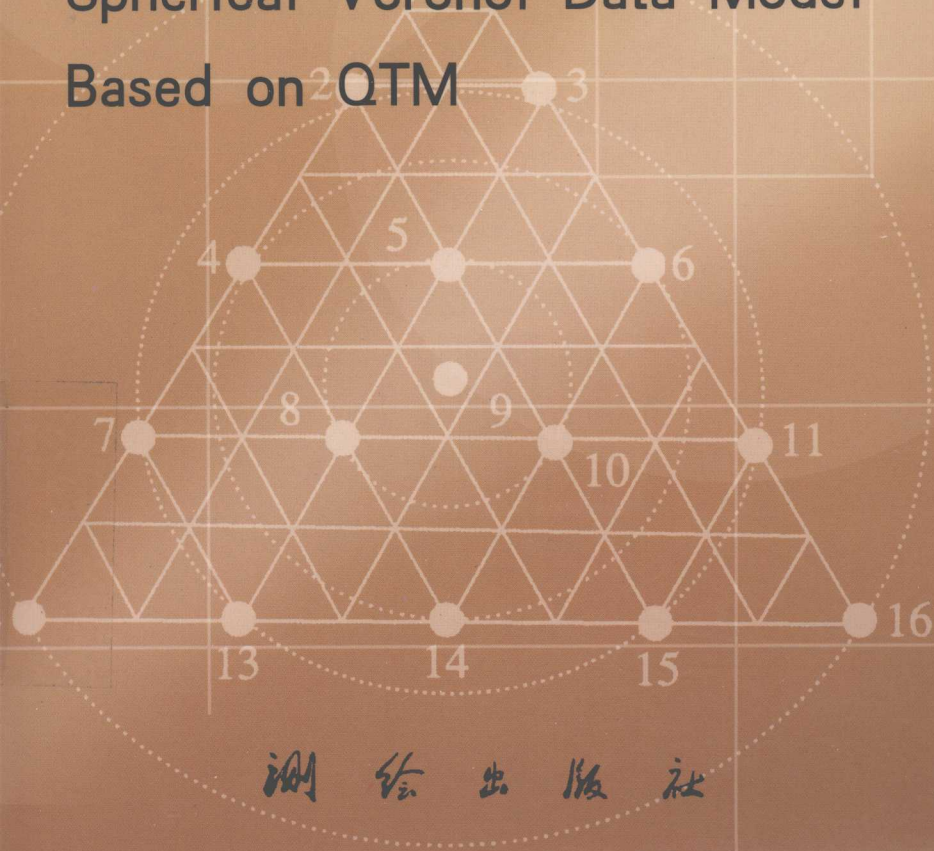


测绘科技专著出版基金资助

# 基于 QTM 的 球面 Voronoi 数据模型

赵学胜 著

Spherical Voronoi Data Model  
Based on QTM



测绘出版社

测绘科技专著出版基金资助

基于 QTM 的球面 Voronoi 数据模型  
Spherical Voronoi Data Model Based on QTM

赵学胜 著

测绘出版社

· 北 京 ·

## 内 容 简 介

本书以球面四元三角网层次结构为基础,结合球面 Voronoi 图的局部稳定性特征,把球面空间和球面实体有机地融合起来,试图构建一个具有层次性的球面动态数据模型。重点就球面数字空间的表达模式及其概念数据模型、经纬度坐标与 QTM 格网地址码的快速转换算法、球面任意实体 Voronoi 图的动态生成算法、球面空间数据的层次存储结构和动态索引机制等若干问题进行了探讨。最后应用 VC++ 语言在 OpenGL 平台上验证了相关方法的正确性和可行性。

## 图书在版编目(CIP)数据

基于 QTM 的球面 Voronoi 数据模型/赵学胜著. —北京:

测绘出版社, 2004. 4

ISBN 7-5030-1227-7

I. 基... II. 赵... III. 空间测量: 动态摄影测量—数据模型 IV. P236

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 012088 号

## 测绘出版社出版发行

地址: 北京复外三里河路 50 号 邮编: 100045

电话: (010)68512386 68531558 网址: [www.sinomaps.com](http://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: 148mm×210mm 印张: 5.25 字数: 187 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷 印数: 0001~5000 册

定价: 15.00 元

如有印装问题, 请与我社发行部联系

## 前言

随着空间技术和信息技术不断进步,现代数据采集技术得到了飞速的发展,使人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、海量的对地观测数据。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、气象预报、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,没有被充分利用起来。美国前副总统阿·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。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难题之一。

目前国际上各类 GIS 系统广为采用面向点、线、面空间实体的矢量模型和面向空间连续铺盖的栅格模型。在矢量模型中,其实体本身的表达缺乏层次特征,是依照定义的关系来综合或组织空间实体,变化只对空间实体本身而不受空间划分的影响,当空间实体在一个特定层次变化时,这种变化就无法传递到邻近层次,很难进行多尺度海量数据的操作分析;而在栅格模型中,数据是面向空间划分的,适合层次管理,但是一个空间实体在其层次结构中,可能存储在不同的叉结点中,当一个实体在空间稍作移动,数据结构就需要做大范围的改变(Pang 和 Shi, 1998),非常不利于局部数据的频繁更新和拓扑结构的动态维护;所以,为了有效地存储、管理和分析全球海量数据及其变化,就需要在一个相当基本的层次上重新构建 GIS 的空间数据模型,即构建一个具有连续性、层次性和动态性的全球数据模型。

针对这一学术前沿和实际应用需要,本书以球面四元三角网(quaternary triangular mesh)层次结构为基础,结合球面 Voronoi

图的局部稳定性特征,把球面空间和球面实体有机地融合起来,构建一个具有层次性的球面动态数据模型。试图为我国的环境监测、海洋资源开发、气象预报、边界安全等应用领域的大范围空间数据处理,提供一个基础的概念模型和系统设计模式。本文重点就球面数字空间的表达模式及其概念数据模型、经纬度坐标与 QTM 格网地址码的快速转换算法、球面任意实体 Voronoi 图的动态生成算法、球面空间数据的层次存储结构和动态索引机制等若干问题进行了探讨。最后应用 VC++ 语言在 OpenGL 平台上验证了相关方法的正确性和可行性。

全球动态数据模型的构建,涉及的问题比较多,本文仅仅选择了球面动态建模中的几个问题进行了初步探讨,希望能起到抛砖引玉的作用,还有许多问题需要进一步深入的研究,比如:球面空间实体的关系表达、逻辑数据模型和物理数据模型的构建、全球多尺度空间数据管理系统的应用模式和设计方法、球面层次格网的空间度量计算、空间分析方法及空间决策系统等等;另外还需要应用全球 DCW 数据(1:100 万)和部分多尺度区域数据进行系统的研制实验;研究如何利用现有大型数据库(如 ORACLE)进行全球海量信息管理,并在此基础上,构建具有 QTM 层次的空间数据库,其中包括全球多尺度空间数据的分类层次组织方法及关联方法等等。

本书是在我的博士导师陈军教授精心指导下完成的,值此书出版之际,谨向陈军老师表示衷心的感谢!感谢李志林博士给本人提供了在香港理工大学学习和研究的机会,并对本人在资料收集、文章写作方面给予的无私指导和帮助表示感谢。感谢中国矿业大学北京校区测绘系的老师们和国家基础地理信息中心课题组的同事们多年来对我工作、生活和学业的关心和帮助!最后,感谢关爱我的家人和朋友们!

由于本人的水平有限,文中定有不少错误之处,敬请同行专家和读者批评指正!

# 目 录

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第一章 球面数据模型概述             | (1)  |
| § 1.1 引言                 | (1)  |
| § 1.2 平面数据投影模型的局限性       | (3)  |
| § 1.3 球面数据模型的研究现状及评述     | (7)  |
| § 1.4 本书的研究目标和研究内容       | (19) |
| § 1.5 本书的结构安排            | (23) |
| 第二章 球面数字空间的构建及概念数据模型     | (26) |
| § 2.1 球面数字空间的特征          | (27) |
| § 2.2 球面 QTM 数字空间的建立     | (30) |
| § 2.3 基于球面数字空间的实体概念模型    | (38) |
| § 2.4 本章小结               | (43) |
| 第三章 QTM 地址编码与经纬度坐标的快速转换  | (44) |
| § 3.1 现有转换算法评述           | (44) |
| § 3.2 “行列逼近”算法的基本原理      | (50) |
| § 3.3 “行列逼近”算法的具体算法和程序框图 | (54) |
| § 3.4 本章小结               | (57) |
| 第四章 球面格网三角形的邻近搜索         | (58) |
| § 4.1 邻近三角形的定义           | (58) |
| § 4.2 邻近三角形的搜索原理         | (60) |
| § 4.3 边邻近三角形的搜索算法        | (61) |
| § 4.4 角邻近三角形的搜索          | (67) |
| § 4.5 线形实体的存储与自动综合       | (71) |
| § 4.6 面状区域的编码充填与区域扩张     | (74) |
| § 4.7 本章小结               | (77) |

|                                             |              |
|---------------------------------------------|--------------|
| <b>第五章 球面格网 Voronoi 图的生成算法 .....</b>        | <b>(79)</b>  |
| § 5.1 Voronoi 图生成算法回顾 .....                 | (79)         |
| § 5.2 球面 Voronoi 图的基本定义 .....               | (82)         |
| § 5.3 球面格网 Voronoi 图的生成算法 .....             | (84)         |
| § 5.4 球面 QTM 的多层次膨胀计算 .....                 | (90)         |
| § 5.5 球面格网 Voronoi 图的误差来源和控制 .....          | (93)         |
| § 5.6 本章小结 .....                            | (95)         |
| <b>第六章 基于 QTM 的球面 Voronoi 图层次数据结构 .....</b> | <b>(96)</b>  |
| § 6.1 层次数据结构的研究评述 .....                     | (96)         |
| § 6.2 基于 QTM 格网的动态数据结构 VDSQ .....           | (99)         |
| § 6.3 层次数据的动态操作 .....                       | (106)        |
| § 6.4 本章小结 .....                            | (115)        |
| <b>第七章 球面空间邻近关系的细化推算 .....</b>              | <b>(117)</b> |
| § 7.1 空间关系的研究简述 .....                       | (117)        |
| § 7.2 球面区域四交模型 .....                        | (120)        |
| § 7.3 球面空间关系的层次计算 .....                     | (123)        |
| § 7.4 层次继承推理 .....                          | (127)        |
| § 7.5 本章小节 .....                            | (129)        |
| <b>第八章 实验分析 .....</b>                       | <b>(131)</b> |
| § 8.1 实验系统设计 .....                          | (131)        |
| § 8.2 实验结果分析 .....                          | (136)        |
| § 8.3 误差计算与特征分析 .....                       | (142)        |
| § 8.4 实验小结 .....                            | (149)        |
| <b>第九章 研究总结与进一步工作展望 .....</b>               | <b>(151)</b> |
| <b>参考文献 .....</b>                           | <b>(155)</b> |

# 第一章 球面数据模型概述

## § 1.1 引言

从 20 世纪 50 年代以来,随着空间技术和信息技术不断进步,现代数据采集技术得到了飞速的发展。从人造地球卫星、航天飞机、宇宙探测,大洋深钻以及地磁、地震、生物地球化学探测、遥感应用、全球定位系统(GPS)、卫星通信、数字光缆和覆盖全球的 Internet 网等方式中,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、海量的对地观测数据。这些数据在飞速批量地传输、分析和处理着(陈述彭,1999),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( $1\text{TB}=10^6\text{ MB}$ )。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、气象预报、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。但是,令人遗憾的是,这些数据大部分都被存储在电子数据库中,没有被充分利用起来。美国前副总统阿·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)是目前国内外学术界和应用部门面临的一大难题(Wright 和 Goodchild, 1997; Gold, 1997; Gold 和 Mostafavi, 2000)。

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(如图 1-1)。但是,由于目前还没有一个真正的球面数据模型,一些全球数据分析系统不得不套用传统的平面数据模

型,即通过地图投影把球面数据变换到平面上进行分析和处理(如图 1-2)。例如:全球数字地图 DCW——Digital Chart of World (采用 Plate Carree 投影,在具体应用中部分采用横轴 Mercator 投影)(Frank,1992)、全球资源环境监测系统(采用 Lambert 等面积方位投影,如图 1-3)(White 等,1992)、我国的地图投影系统(中小比例尺采用 Lambert 投影,大比例尺采用高斯-克吕格投影,如图 1-4)和目前正在进行的全球测图计划(采用 ITRF94 参考系及几种投影的组合),等等。

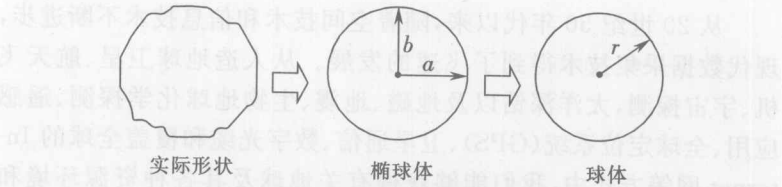


图 1-1 地球几何形状的数学抽象表达

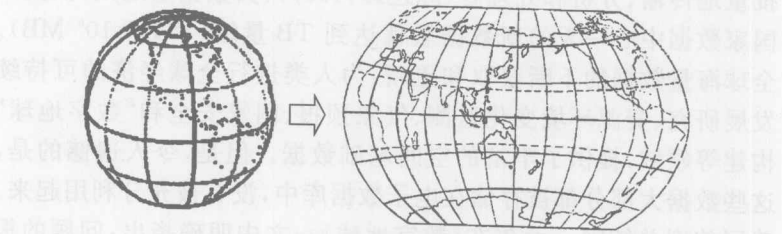


图 1-2 球面数据在平面上的投影表达

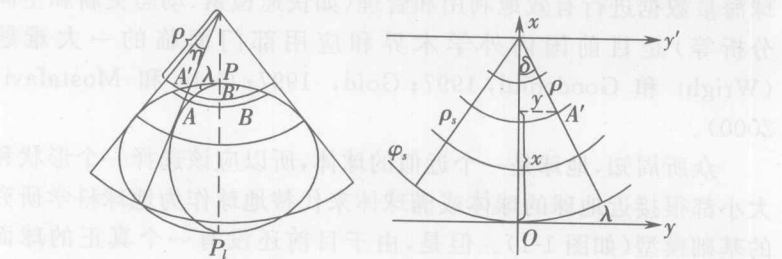


图 1-3 Lambert 投影示意图

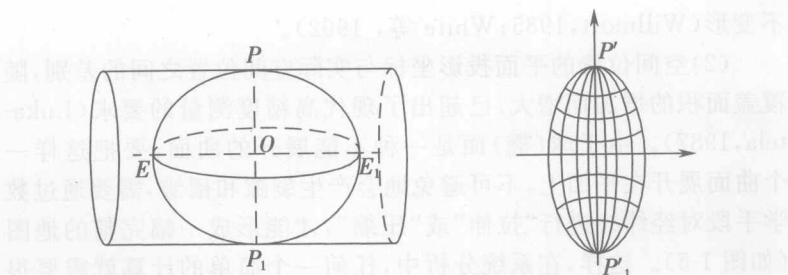


图 1-4 高斯-克吕格投影示意图

## § 1.2 平面数据投影模型的局限性

平面数据投影模型(目前 GIS 软件所采用的)大部分都是起源于数字制图和影像处理,是基于单尺度的静态数据模型。它适合表达和处理地球表面的局部区域数据和低精度计算(Dutton, 1991),即涉及的数据覆盖面积有限、数据量相对较少、且数据也比较稳定。但是,随着应用范围的不断扩大,特别是在处理全球范围的环境资源和社会信息的动态变化时,平面静态数据模型的内在局限性也越来越明显,主要表现在以下几个方面。

### 1. 平面投影的复杂性和变形性

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。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。

(1)球(椭)面和平面是截然不同的两个几何空间概念。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,1985;White 等, 1992)。

(2)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(Lukateła,1987)。由于球(椭)面是一种不能展开的曲面,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 1-5)。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。

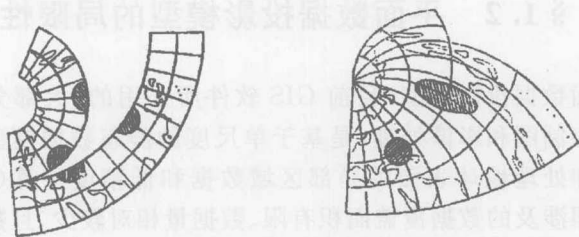


图 1-5 球面投影产生的裂隙和改正

(3)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。

(4)不同的国家和地区,为了使各自范围内的区域在投影后,其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或重叠,导致全球空间数据实体的不连续性。

## 2. 缺乏多尺度数据的集成管理

建立在传统模型基础上的计算方法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 的地图等。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,如图 1-6 所示。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,很难满足球面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。

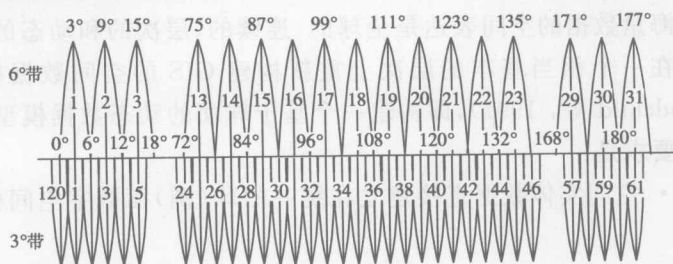


图 1-6 高斯投影对地球进行 6°带和 3°带分带划分

### 3. 很难满足局部数据的快速更新

数据的及时更新是保证数据质量的一项基本要求,也是今后 GIS 工作的一项主要内容(Walter 和 Fritsch 1998)。在传统的平面数据模型中,为了满足空间数据的快速检索查询,其数据库不仅包含空间实体的位置和属性信息,还包含拓扑关系数据(陈军和崔秉良,1997;Gold,1997),在采集空间位置和属性数据的同时构建实体拓扑关系并保存在数据库中。而拓扑关系的数据结构非常复杂,用来表示拓扑关系的数据在总数据量上占有很大比例。在局部的数据更新中,不仅要保证空间位置数据、属性数据的一致性,而且要保证拓扑关系的一致性。而局部实体的位置变化可能导致整个拓扑关系的重建(Gold,1989;1992;1994;Yang 和 Gold,1995;1996;陈军和崔秉良,1997)。由此可见,应用传统 GIS 数据模型,构建和存储全球海量数据集的拓扑关系是非常困难的(Ed-

wards, 1993)。更重要的是,现代数据采集技术使全球地理数据在不断地进行更新,而且更新周期越来越短,所以,利用传统数据模型维护全球不断变化的拓扑关系几乎是不可能的。

综上所述,由于传统 GIS 数据模型的内在局限性,无法满足全球 GIS 在动态海量数据处理和多分辨率操作上的应用要求。其问题的根源是使用平面静态数据模型来表达和处理球面空间的动态海量数据。为了有效地在全球范围内存储、提取和分析不断更新的全球海量数据,从根本上解决传统数据模型的局限性,保证地球海量数据的空间表达是全球的、连续的、层次的和动态的,就需要在一个相当基本的层次上重新构建 GIS 的空间数据模型 (Goodchild 等, 1991),即构建一个基于球面的动态数据模型,其基本要求是:

- 空间实体数据直接建立在统一的球(椭)面数字空间框架上;
- 能进行多尺度、多分辨率海量数据的层次计算和操作;
- 具有空间关系的动态维护能力。

这样,球面动态数据模型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、分析,相对容易地集成不同层次的多类型数据,并用确定的精度进行多分辨率操作。另一方面由于计算机硬件性能的飞速提高,尤其是 OpenGL、VRML (Virtual Reality Modelling Language)、DirectX/3D 等三维图形开发工具的出现 (Gahegan 1999),使得采用曲面坐标直接在球(椭)面上操作全球数据成为可能,这也是全球数据的管理和可视化发展的必然趋势。

尽管目前许多 GIS 软件系统能进行平面投影和经纬度坐标的转换,如 Arc/Info、MGE 等,甚至少数 GIS 软件在其数据库中存储了球面经纬度坐标,从原理上看能够处理全球范围内的问题。

但是,通过给一定的平面投影赋予经纬度坐标仅仅是对全球覆盖的一种简单的“登记”,在数据管理和分析中,其核心还是以平面坐标为基准,没有从根本上摆脱平面投影模式的限制(Goodchild等,1991);另外,少数 GIS 软件在其数据库中存储了球面坐标。这样,在原理上能处理全球范围内的问题,但是非均质的地理坐标、数据操作的复杂性和在确定球面点及其位置的内在模糊性,特别是在数据质量不高的情况下,继续限制 GIS 的应用。因而,为了彻底摆脱平面模型的束缚,有效地处理全球不断更新的空间数据,并满足不同用户在不同层次的需要,将空间数据直接制作在球(椭)面上,构建球面动态数据模型,则是目前全球 GIS 亟待解决的关键问题之一。

### § 1.3 球面数据模型的研究现状及评述

目前,全球空间数据的处理和分析模型相对较少,而用不同的标准可以划分为不同的类型。本文以空间实体的位置表达模式为标准,把全球数据分析模型划分为 3 种类型进行评述,即矢量类型(包括经纬度表达)、球面格网(spherical tessellation)类型和 Voronoi 球面剖分类型(White 等,1992)。

#### 1. 矢量类型

##### (1) 经纬度表达

地球表面上任何一点的矢量位置可以用球面坐标来表达,如用经纬度坐标( $\varphi, \lambda$ )、球面极坐标( $a, z$ )或球面直角坐标( $x, y$ )。以上三种坐标系中目前最常用的是经纬度坐标系(如图 1-7)。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,来建立与笛卡儿直角坐标系相对应的投影方程式,从而获得地图投影的数学基础。若直接应用经纬度坐标作为计算球面度量和空间关系的基础,则具有实体表达直接简单、占用较少存储空间等优点。但也存在以下问题:

- 在球面空间数据分析中必然涉及大量的椭球三角函数(包括  $\sin, \cos, \arctan$  等)计算,而且需要复杂的编程技术来判断数字不稳定区域,并需要用相应的算法进行调整。这些对系统操作有不利的影响,大大降低了系统的效率。

- 应用经纬度坐标表达公式进行投影数据变换时,在两个极点附近会出现振荡(即不收敛),极大地影响了球面空间关系推导结果。

- 在数据结构上,利用“经(纬)四边形”构建大面积的覆盖或地球数据库,其缺点是单元网不能根据数据密度和大小进行改变,而高纬度地区的覆盖则受限制或效率不高,在大多数情况下不得不用难处理的角度坐标(而应用 Cartesian 三维坐标,问题就可以得到简化,但是涉及区域椭球面的约束就不存在了)。

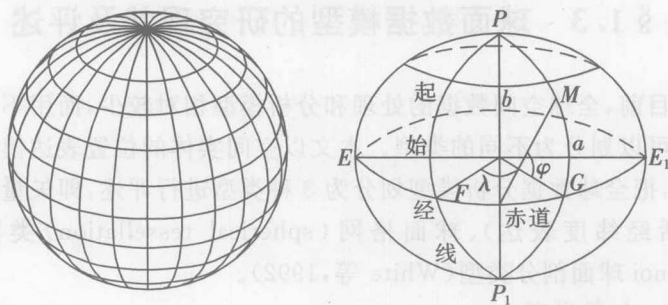


图 1-7 球面经纬度坐标的定义

总之,由于其内在的局限性,很少直接利用经纬度坐标构建球面数据模型。

## (2) 球面位置的“方向余弦”表达

由于经纬度表达具有计算复杂、两极不稳定的局限性,加拿大大学者 Lukatela (1987)提出用“方向余弦”代替经纬度坐标来表达球面上的一个点,并以此为基础构建了一个真正的球(椭)面数据模型。这是目前为数不多的、不利用投影变换而直接建立基于椭球面的全球数据模型。“方向余弦”即为方向角的余弦函数(三个

方向角均表示为位置法线和参考轴的夹角,如图 1-8 的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。现实世界的实体被抽象为点、线(一维实体表示为被一条线穿过的一系列有序单元)、面(二维实体表示为一个顺时针环绕的边界线和区域内部一系列单元的集成编码,和仅用一系列顶点组成的简单边界线比较起来,此结构更能有效地推导空间关系);对与地表有关的任意形状和任意大小实体进行无限制的数学表达,有效地进行并集和交集操作;无任何区域的数字不稳定性和退化的全球覆盖;并建立地表、航空和卫星运动的时空关系模型(Lukatela, 1989;Zheng 等, 1994)。在此基础上开发了基于球面数字定位模型的实用软件包——HIPPARCHUS 系统。

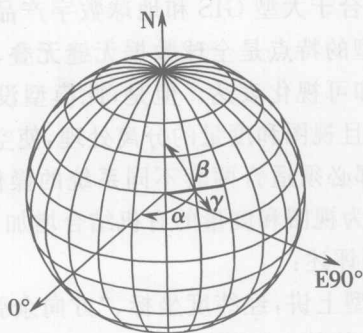


图 1-8 “方向余弦”的定义

“方向余弦”模型的优点是:

- 消除了球面和投影平面的变形差异,提供了基于矢量代数的几何算法。实体的方向余弦计算出来以后,空间关系的计算则不需要应用三角函数,而是应用向量代数,仅仅是浮点数的加、减、乘、除和偶尔平方。这样计算速度快,比“经纬度坐标”更易编程和更易检验。

- 在地球任何地方都稳定,高纬度地区的算法并不因此复杂化,也可正常处理实体的复杂空间拓扑关系。

- 索引机制是根据球面点集分布所定义的 Voronoi 单元,由

于这些点是由它们的法线定义的,所以剖分方法完全避免了退化为任意球面奇异点的可能。

HIPPARCHUS 系统是一种基于球面的空间定位模型,但处理海量数据时也存在以下不足:其数据表达缺乏层次性,空间关系的计算还是采用了传统 GIS 矢量模型中的“线交”模式,不利于空间关系的动态变化和自动提取,而且还增加了实体与 Voronoi 边的求交运算。

此外,胡鹏等(2001)将地图投影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论点,即视图采用等距离切圆柱投影,度量空间是椭球面几何系统。并在此基础上,建立适合于大型 GIS 和地球数字产品的全球空间数学基础模型。该模型的特点是全球数据无缝无叠,能够进行二维和三维的空间度量和可视化表达。但是,此模型没有从根本上摆脱地图投影的限制,且视图和度量的分离处理,使空间数据在数据库的存储和检索中都必须适合两套不同系统的操作需求,增加数据结构的复杂性,也为视图和度量的有机结合增加了困难。

### (3) 矢量模型评述:

- 从概念模型上讲,经纬度坐标、“方向余弦”坐标都是用矢量形式表达球面实体的空间位置,并以空间实体为对象,具有概念明确、占用存储空间小等优点,且能直接表达空间实体坐标。

- 单纯的矢量坐标仅仅表达球面上点的几何位置,而缺乏其位置精度和实体分辨率的信息。在进行球面实体多分辨率的管理和操作时,必然涉及目前还没有得到解决的地图综合问题。

- 从数据结构上看,全球数据模型要求利用层次结构来有效管理海量数据。在矢量模型的层次结构划分中,是依照定义的关系来综合或组织空间实体。这样,空间实体的变化只对空间实体本身,而不受空间划分的影响。实体层次的维持是用显式定义的实体关系而不是空间的递归划分,当空间实体在一个特定层次变化时,这种变化就无法传递到邻近层次。