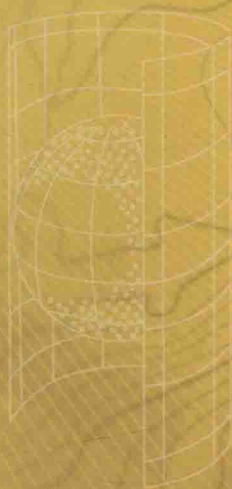
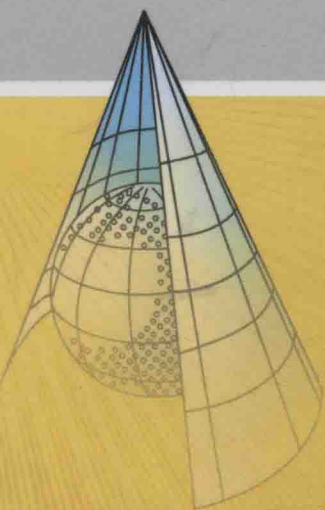


高等学校教材

地图投影 原理与方法

Principles and Methods of Map Projection

吕晓华 李少梅 编著



测绘出版社

©吕晓华 2016

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容提要

本书全面、系统地介绍了地图投影的原理与方法。主要内容包括绪论,地球椭球体与大地控制,球面坐标及球面上某些曲线方程,地图投影基本理论,地球椭球面在球面上的投影,方位投影、圆柱投影和圆锥投影,伪方位投影、伪圆柱投影、伪圆锥投影和多圆锥投影,高斯-克吕格投影及其衍生投影,其他地图投影,月球地图投影和空间地图投影,地图投影判别、地图投影选择和区域地图数学基础设计以及地图投影变换。

本书可作为高等院校地理、地质、测绘、地理信息、生态林业、资源环境、城市规划、土地管理等专业的本科生教材,也可作为相关专业科研院所、生产单位科研技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

地图投影原理与方法 / 吕晓华, 李少梅编著. — 北京: 测绘出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-5030-3969-0

I. ①地… II. ①吕… ②李… III. ①地图投影—研究 IV. ①P282.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 246225 号

责任编辑	李莹	封面设计	李伟	责任校对	孙立新	责任印制	陈超
出版发行	测绘出版社			电 话	010-83543956(发行部)		
社 址	北京市西城区三里河路 50 号				010-68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010-68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	184mm×260mm						
印 张	15.25			字 数	491 千字		
版 次	2016 年 10 月第 1 版			印 次	2016 年 10 月第 1 次印刷		
印 数	0001-1000			定 价	48.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3969-0

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

序

地图投影是地图学的重要分支学科之一,它所构成的地图数学基础是地图的基石,是地图学的科学属性的重要标志和基础。

随着科学技术特别是数学科学和计算机科学技术的发展,地图投影的理论越来越科学化和体系化,地图投影的方法和种类越来越多样化,地图投影的应用越来越普适化。可以说,在地图科学领域,地图投影是理论最科学、体系最完备、方法最现代、应用最普遍的一门分支学科。

当前,全球已步入大数据时代,“大数据”与“地理时空数据”融合构成基于统一时空基准的“时空大数据”,为地图投影的进一步发展和多样化应用创造了广阔的空间。因为人类的一切活动都是在一定时间和空间进行的,所有大数据都是于活动时空中产生,与位置直接或间接相关联,具有反映地理世界的空间结构和空间关系及其随时间变化的特性,而基于地图投影构成数学基础的地图正是反映这种特性的科学工具。所以,具有与用户的强交互性、动态多维性、最直观和最快捷的可视性特点的地理时空大数据的可视化,更需要有相应的地图投影和构成地图数学基础的方法。

本书作者吕晓华、李少梅两位教授长期从事地图投影理论和方法的研究与教学。在科学技术特别是现代信息技术快速发展和地理时空大数据的背景下,站在新的时代起点,回顾和总结地图投影学科发展的辉煌和成果,梳理历史脉络,直面机遇和挑战,把握未来发展,在继承基础上创新,遵循认知规律,构建知识体系,突出基本理论和方法,拓展并深化应用显得尤为重要。全书共安排了16章内容,分别介绍了地图投影的概念和实质、研究对象和任务及发展回顾,地球椭球体与大地控制,球面坐标及球面上某些曲线方程,地图投影基本理论,地球椭球面在球面上的投影,方位投影、圆柱投影、圆锥投影等区域地图常用投影,伪方位投影、伪圆柱投影、伪圆锥投影和多圆锥投影等小比例尺区域地图、洲地图和世界地图常用投影,国家大、中比例尺地形图常用的高斯-克吕格投影及其衍生投影,还包括哈默-爱托夫投影、温克尔投影、组合投影、多焦点投影、变比例尺投影、双方位投影和双等距离投影等用于专门用途地图的投影,用于航天遥感影像处理和探月工程中月球制图的空间地图投影和月球地图投影,地图投影判别、地图投影选择和设计及地图投影变换等内容。全书系统地论述了地图投影的原理、方法和应用,内容丰富,重点突出,由浅入深,简明易懂,逻辑性强,便于学习,是一本兼具通识性和专业性的好教材和参考书。

本书的出版,必将进一步推动地图投影的教学、科研和应用,可喜可贺。

中国工程院院士

王家驹

2016年10月

前 言

地球曲面和地图平面之间的矛盾构成了地图最基本的矛盾,解决这一矛盾的数学法则构成了地图的数学基础,这是地图最基本的特性之一,是地图科学性和精确性的重要体现。地图所采用的特殊数学法则便是地图投影。

地图投影是研究将地球椭球面(或球面)描写到地图平面上,建立地图数学基础的一门科学,它在地图制作和应用中起着“基础”和“骨架”作用,是地图编制前首要考虑的问题,同时它又是现代地图学的重要组成部分。

初期的地图投影是研究用几何方法构成地图上的经纬线网格,但当人们认识到从地球曲面到地图平面的转换中不可能完全准确无误时,又更加关注研究投影的“变形”。随着人们对地球形状和大小认识的不断深化,以及现代数学方法的广泛应用,地图投影的方法和类型进一步丰富,地图投影研究不断深入。

科学技术迅猛发展,信息技术不断应用于地图学,使地图学呈现许多现代特征,地图的制图技术、出版方法以及应用领域都发生了重大变革,推动着地图投影理论、方法与应用的不断拓展和深化。从广义上讲,地图投影是实现空间信息定位和可视化的基础,是空间信息的定位模型和基础框架。地图投影是研究空间信息(多源数据)在某一制图表面(平面或曲面)上描写,并进行空间数据处理的理论和方法,其任务是建立空间数据(多源数据)的统一坐标格网(平面格网或曲面格网)。传统意义上静态、二维、矢量的地图投影理论与方法已难以描述其自身发展,这也是学科发展的必然趋势。但地图投影作为地图的数学基础,只要地理空间信息的模拟产品——地图存在,它作为地理信息的定位基准、地图科学的基础理论,就永远不会过时。

站在新的时代起点,回顾地图投影的发展历程,坚持继承与创新,注重知识体系,突出原理方法,拓展深化应用,为读者提供一本兼具通识性和专业性的原理方法类教材或参考书,这正是本书编写的根本遵循。

本书立足地图与地理空间信息的数学基础基本属性,以传统静态的地图投影建立与应用为主线,较为系统地论述了地图投影的原理与方法。全书共由 16 章及附录组成。

第 1 章绪论,从地图投影的产生切入,介绍地图投影的概念和实质、研究对象及任务,并重点回顾地图投影的发展历史,分析信息化时代地图投影面临的机遇和挑战。

第 2 章地球椭球体与大地控制,包括地球的形状和大小、地理坐标系统、大地测量系统、地球椭球面上几个圈线的曲率半径、地球面上的经线和纬线弧长、地球面上等角航线及其弧长、地球椭球面上的梯形面积等内容,这是地图投影的相关基础知识。

第 3 章球面坐标及球面上某些曲线方程,介绍地球球半径、球面坐标系、球面上的大圆线和小圆线方程,这是研究斜轴、横轴地图投影及其有关应用的必备知识。

第 4 章地图投影基本理论,系统阐述地图投影方程,地图投影变形及变形椭圆,角度变形公式和长度比、面积比公式,地图投影条件,地图投影方程的极坐标形式,地图投影变形表示方法和地图投影分类,本章内容是地图投影的重要基础理论。

第 5 章地球椭球面在球面上的投影,包括地球椭球面在球面上投影的一般方程,椭球面在球面上的等角投影、等面积投影以及等距离投影,这是研究满足较高精度要求的中等比例尺横

轴及斜轴投影时采用双重投影方法的必然途径。

第 6、7、8 章,方位投影、圆柱投影和圆锥投影,这是区域地图常用的投影类型,分别论述各类投影建立的原理及一般公式,等角、等积和等距投影及其应用,各类投影若干性质分析,并对双重方位投影、透视圆柱投影及任意圆锥投影的探求进行研究。

第 9、10 章,伪方位投影、伪圆柱投影、伪圆锥投影和多圆锥投影,这是小比例尺区域地图、洲地图和世界地图常用的投影,分别阐述各类投影的概念、建立原理、一般公式和典型代表性投影的变形及应用情况。

第 11 章高斯-克吕格投影及其衍生投影,包括高斯-克吕格投影的原理、公式和应用及通用横墨卡托投影,并分析探讨高斯-克吕格投影的衍生投影——双标准经线等角横圆柱投影、高斯-克吕格投影族。

第 12 章其他地图投影,包括哈默-爱托夫投影、温克尔投影、组合投影、多焦点投影、变比例尺投影、双方位投影和双等距离投影,这些投影构成条件、方法特殊,是为编制满足专门用途要求的地图而建立,在地图投影不同发展阶段具有代表性。

第 13 章月球地图投影和空间地图投影,包括用于月球制图的主要投影和适用于卫星遥感图像处理的空间斜墨卡托投影及卫星轨迹投影等,这是随着航天遥感技术和探月工程的不断发展,地图投影开辟的新的研究方向。

第 14、15 章,地图投影判别、地图投影选择和区域地图数学基础设计,概述地图投影类型、性质和常数的判定方法,分析地图投影选择应考虑的因素,阐述区域地图数学基础设计的思路与方法步骤,归纳总结我国编制区域地图常用的投影类型及主要参数。

第 16 章地图投影变换,包括地图投影变换概述、地图投影解析变换和数值变换方法等内容,这是随着地图制图数字化、智能化和地理信息系统建立、地图数据库建设而发展起来的地图投影新的研究领域。

附录列出地图投影中常用的数学公式,地图投影常用符号释义一览表以及地球椭球面上由赤道至纬度 B 的经线弧长 S_m 、经差 $30'$ 的纬线弧长 S_p 、经差 1 弧度、由赤道至纬度 B 的梯形面积 F 的值,这些表中的计算值以及书中涉及的算例都是基于克拉索夫斯基椭球体,便于读者自学验证或作为实践教学参考。

全书内容精练、体系严密、重点突出。既注重原理、强调方法,又结合应用;既以传统经典的投影为主,也力求体现信息化时代地图投影的创新与发展。章节编排结构合理,由浅入深,利于启发引导;公式推导逻辑性强,符号规范,简明易懂;数据准确,图表精准、恰当。每章附有思考题,便于自学。

李少梅教授编写了本书第 6、7、14 章,并进行全书审校。吕晓华教授编写了其余章节并负责全书统稿及内容审定。博士生孙卫新参加了有关内容的研究与验证,本科生李清鹏、郭玮等承担了大部分插图的绘制工作。本书的编写自始至终得到了孙群教授的全面指导和帮助。王家耀院士在百忙中审阅了全书,提出了宝贵意见,并为本书作序。在编写过程中参考或引用了有关专家、学者的相关文献,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请读者不吝赐教。

本书的出版得到解放军信息工程大学地理空间信息学院的资助。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 地图投影的概念和实质	1
1.2 地图投影的研究对象和任务	3
1.3 地图投影发展回顾	6
思考题	10
第 2 章 地球椭球体与大地控制	11
2.1 地球的形状和大小	11
2.2 地理坐标系统	14
2.3 大地测量系统	15
2.4 地球椭球面上几个圈线的曲率半径	18
2.5 经线弧长和纬线弧长	21
2.6 地球面上等角航线及其弧长	23
2.7 地球椭球面上的梯形面积	24
思考题	25
第 3 章 球面坐标及球面上某些曲线方程	26
3.1 地球球半径	26
3.2 球面坐标系	27
3.3 球面上的大圆线和小圆线方程	30
思考题	32
第 4 章 地图投影基本理论	33
4.1 地图投影方程	33
4.2 地图投影变形	34
4.3 变形椭圆	36
4.4 角度变形公式	39
4.5 长度比公式	44
4.6 面积比公式	46
4.7 地图投影条件	46
4.8 地图投影方程的极坐标形式	49
4.9 地图投影变形表示方法	50
4.10 地图投影分类	53
思考题	58

第 5 章 地球椭球面在球面上的投影	59
5.1 椭球面在球面上投影的一般方程	59
5.2 椭球面在球面上的等角投影	60
5.3 椭球面在球面上的局部等角投影	62
5.4 椭球面在球面上的等面积投影	65
5.5 椭球面在球面上的等距离投影	66
思考题	67
第 6 章 方位投影	68
6.1 方位投影概念及一般公式	68
6.2 透视方位投影	71
6.3 等角方位投影	76
6.4 等面积方位投影	78
6.5 等距离方位投影	80
6.6 双重方位投影	82
6.7 方位投影分析	86
思考题	88
第 7 章 圆柱投影	90
7.1 圆柱投影概念及一般公式	90
7.2 等角正圆柱投影	91
7.3 墨卡托投影的应用	93
7.4 等面积正圆柱投影	95
7.5 等距离正圆柱投影	97
7.6 横轴和斜轴圆柱投影	98
7.7 透视圆柱投影	102
7.8 圆柱投影的探求	105
思考题	108
第 8 章 圆锥投影	109
8.1 圆锥投影概念及一般公式	109
8.2 等角正圆锥投影	113
8.3 等面积正圆锥投影	119
8.4 等距离正圆锥投影	123
8.5 斜轴和横轴圆锥投影	126
8.6 任意性质正圆锥投影的探求	128
8.7 正轴圆锥投影若干性质分析	133
8.8 圆锥投影的应用	138
思考题	140

第 9 章 伪方位投影、伪圆柱投影和伪圆锥投影	141
9.1 伪方位投影	141
9.2 伪圆柱投影	145
9.3 伪圆锥投影	152
思考题	155
第 10 章 多圆锥投影	156
10.1 多圆锥投影概念及一般公式	156
10.2 普通多圆锥投影	157
10.3 改良多圆锥投影	158
10.4 广义多圆锥投影	161
思考题	165
第 11 章 高斯-克吕格投影及其衍生投影	166
11.1 高斯-克吕格投影的原理和公式	166
11.2 高斯-克吕格投影的应用	171
11.3 通用横墨卡托投影	175
11.4 双标准经线等角横圆柱投影	176
11.5 高斯-克吕格投影族	178
思考题	181
第 12 章 其他地图投影	182
12.1 哈默-爱托夫投影	182
12.2 温克尔投影	184
12.3 组合投影	185
12.4 多焦点投影	186
12.5 变比例尺投影	188
12.6 双方位投影和双等距离投影	190
思考题	193
第 13 章 月球地图投影和空间地图投影	194
13.1 月球地图投影	194
13.2 空间地图投影	196
思考题	204
第 14 章 地图投影判别	205
14.1 地图投影判别概述	205
14.2 地图投影类别判定	205
14.3 地图投影性质判定	207

14.4 地图投影常数判定	208
思考题	210
第 15 章 地图投影选择和区域地图数学基础设计	211
15.1 地图投影选择应考虑因素分析	211
15.2 区域地图数学基础设计	214
15.3 我国编制区域地图常用的投影	217
思考题	218
第 16 章 地图投影变换	219
16.1 地图投影变换概述	219
16.2 地图投影的解析变换	220
16.3 地图投影的数值变换	221
思考题	222
参考文献	224
附录 1 地图投影中常用的数学公式	226
附录 2 书中常用符号释义和地球椭球面上经纬线弧长及梯形面积	229

第1章 绪论

1.1 地图投影的概念和实质

经过长期的观察与测量,人们了解到地球的形状近似球体,更确切地说是一个近似以椭圆短轴为旋转轴旋转而成的椭球体。这种形体只有现在所做的地球仪大致可以保持与之相似。因此,为了了解地球上的各种信息并加以分析,最理想的方法是将庞大的地球缩小,制成地球仪,直接进行观察研究。这样,其上各点的几何要素——距离、方位,各种特性曲线以及面积等可以保持不变。然而,一个直径 30 cm 的地球仪,相当于地球直径的四千二百万分之一;即使直径 1 m 的地球仪,也只相当于地球直径的一千二百七十万分之一。在这么小的球面上是无法表示庞大地球上的复杂事物的,并且,地球仪难于制作、成本高,也不便于量测使用和携带保管。但如果将地球转换到平面上,即制成地图,则可以解决上述问题。地图比例尺可大可小,表示的内容可详可略,表示的区域也可大可小。因此,地图可以详细表达地球面上的各种自然及社会经济要素和现象,并且地图的制作、拼接、图上作业以及携带保管都很方便。

由于地球(或地球仪)面是不可展的曲面,而地图是连续的平面,因此,用地图表示地球的一部分或全部,就产生了一种不可克服的矛盾——球面与平面的矛盾。如强行将地球表面展成平面,那就如同将橘子皮剥下铺成平面一样,不可避免地要产生不规则的裂口和褶皱,而且其分布又毫无规律可循。而地图又必须是连续的、平整的平面,不允许有重叠和裂口。因此,为了将不可展球面上的图形变换到一个连续的地图平面上,就诞生了“地图投影”。解决曲面和平面矛盾的投影法则构成了现代地图的数学基础,这是地图的一个最基本特性。没有数学基础的地图,将失去地图严密的科学性和实用价值,也就不可能获得正确的方位、距离、面积以及各要素的空间关系。

实际上,自从人们把地球表面(部分或全部)描绘到平面上,平面与曲面的矛盾就存在了。不过,由于当时人类活动的范围有限,并没有认识到这个问题。由于生产力发展和科学技术水平的进步,一方面,要求地图反映人们已知世界的范围,解决简单的距离、方位和比例尺问题;另一方面,海上航行开始要求解决地球曲面与地图平面的关系问题,且航海的发展又逐步扩大了眼界,发展了实用天文学,测量了经纬度,人们开始想办法把经纬线绘在地图上,并以此为依据来标绘地理位置。于是,出现了最初的投影方法。

最初的投影方法是采用几何透视方法,这种方法是建立在透视学原理基础之上的。即假设地球按比例尺缩小成一个透明的地球仪那样的球体,在其中心安放一个点光源(在透视学上称之为视点),把地球表面上的经线、纬线连同控制点及地形、地物图形,投影到与地球表面构成相切关系的平面上,如图 1-1 所示,这是最简单也最容易理解的地图投影几何透视法,称为球心透视投影。此外,还可以将视点放在地球表面上某一点或球外某一位置,用同样的透视方法,也可以将地球面上的经线和纬线投影到平面上,这种投影方法称为球面透视投影和外心透视投影。

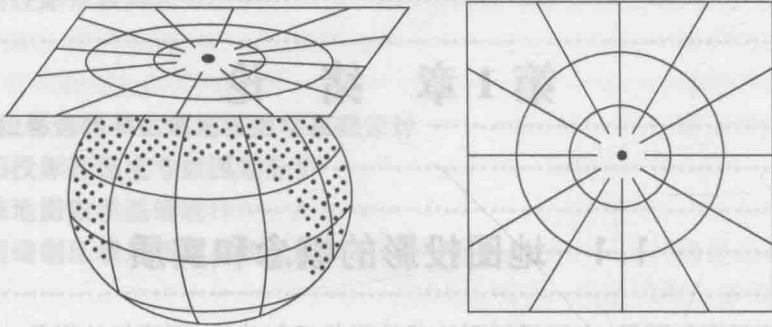


图 1-1 透视方位投影

上述是以平面作为投影面,用透视方法进行投影。除此之外,还可以用圆锥面或圆柱面作为投影面。即将圆锥面或圆柱面切或割在地球面上某一位置,仍用透视方法,将地球面上的经线和纬线投影到圆锥面或圆柱面上,再沿着圆锥面或圆柱面的某条母线切开展成平面,即得到圆锥投影或圆柱投影,如图 1-2、图 1-3 所示。

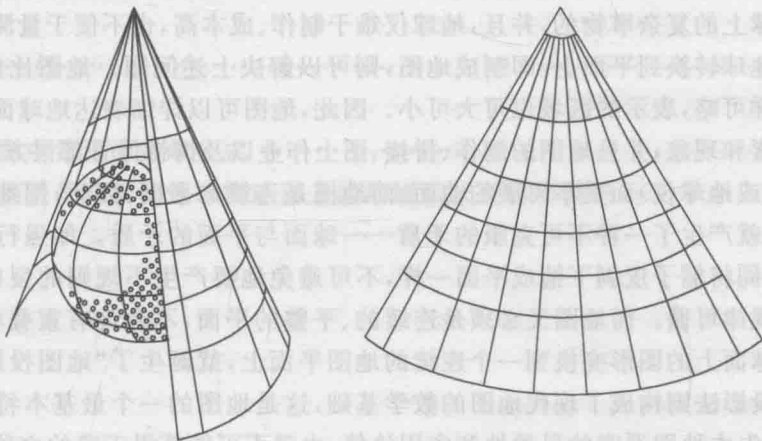


图 1-2 透视圆锥投影

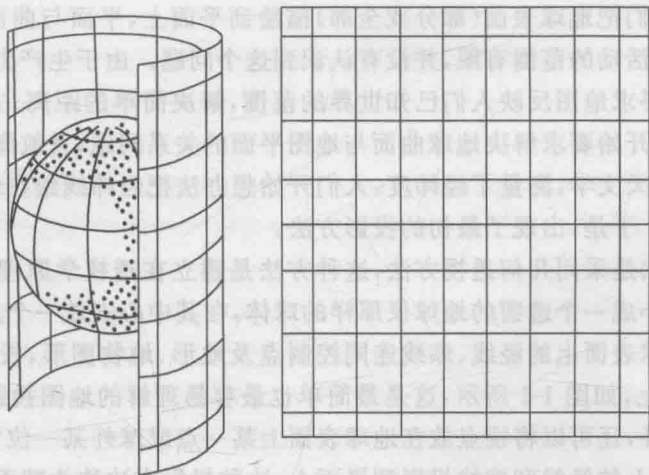


图 1-3 透视圆柱投影

几何透视法只能解决一些简单的由球面到平面的变换问题,具有很大的局限性,例如,往往不能将全球投影下来。随着数学分析这一数学分支学科的出现,人们开始普遍采用数学分析方法来解决地图投影问题。

数学分析法是建立在地球椭球面上的经纬线网与平面上相应的经纬线网相对应的基础之上的,如图 1-4 所示。

地球椭球面称为原面,承影面称为投影面。用 B, L 或 B, l 表示地球椭球面上点的地理坐标,用 x, y 表示投影点在投影平面上的直角坐标,通过数学分析方法,在原面与投影面之间建立起点的——对应函数关系,即

$$\left. \begin{array}{l} x = f_1(B, L) \\ y = f_2(B, L) \end{array} \right\} \text{或} \left. \begin{array}{l} x = f_1(B, l) \\ y = f_2(B, l) \end{array} \right\} \quad (1-1)$$

式(1-1)为地图投影的一般方程。当给定不同的具体条件时,就可以得到不同种类的投影公式。

到目前为止,有近 260 种地图投影,但归纳起来,建立投影的方法不外乎是几何透视法或数学分析法两大类。

大多数的数学分析法往往是在透视投影基础上,建立球面与投影面之间点的函数关系,因此两种投影方法有一定的联系。不论是几何透视法,还是数学分析法,这些将地球表面上的经纬线及各要素等变换到地图平面上的方法统称为地图投影。地图投影的实质就是建立地球表面上的点的坐标 (B, L) 与地图平面上点的坐标 (x, y) 之间——对应的函数关系。

实际上,目前很少有地图投影是真正采用几何学原理的所谓“投影”,绝大多数都是用数学方法来解决地球表面到平面的变换问题。所以,地图投影学又称数学制图学(吴忠性等,1989)。“地图投影”这一名词,严格从字面理解,它只包含几何透视法,但这一名词沿用已久,并不妨碍它的发展,随着学科的发展,地图投影又被赋予了新的更丰富的内涵。

1.2 地图投影的研究对象和任务

采用地图投影这一方法,虽然解决了球面与平面之间的矛盾,但在平面上完全无误地表示地球的各个部分是不可能的,这是由于地球面是一个不可展的曲面,在平面上表示它的一部分或全部,都会不可避免地产生失真现象,即是说它们之间必有差异,这种失真现象称为地图投影变形。如图 1-5 所示,黑色表示的三个网格是地球表面同纬度带上相同经差和纬差所构成的区域,它们在地球表面上应具有相同的形状和大小,但在投影平面上,却产生了明显差异,这就是地图投影变形所致。

总体来讲,地图投影存在三种变形:一是长度变形,即投影后的长度与原面上对应的长度不相同了;二是面积变形,即投影后的面积与原面上对应的面积不相等了;三是角度变形,即投影前后任意两个对应方向的夹角不相等了。这三种变形,对某一投影来说可能同时存在,而且在不同点位其大小不同,但我们可以通过一定的方法使某种变形不存在,另一些变形减小或分布均匀一些,或按某一特征规律分布。哪一种地图投影都不是万能的,均有其优缺点,也都有了一定的局限性,因此应根据地图的用途要求来选择和研究满足需要的地图投影。

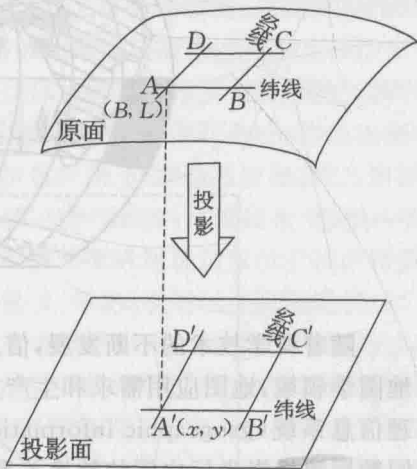


图 1-4 原面与投影面的投影关系

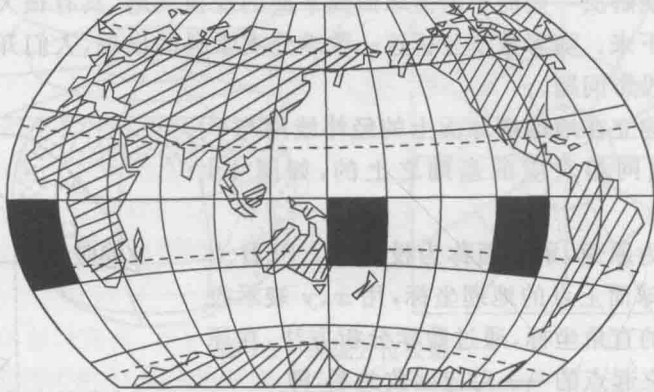


图 1-5 地图投影变形

随着科学技术的不断发展,信息技术、网络技术、计算机技术、现代测量技术等广泛应用于地图学领域,地图应用需求和生产方式发生了历史性变革(王家耀,2000)。数字地图制图、地理信息系统(geographic information system, GIS)开发、地图数据库建设等迫切需要建立不同数据源投影坐标之间的转换关系,这对地图投影变换的理论和方法提出了新的要求。

因此,地图投影主要是研究将地球椭球面(或球面)描写到地图平面上的理论、方法与应用,以及地图投影的变形规律。此外,还研究不同地图投影之间的转换和图上量算等问题。

在传统制图实践中,实现地球表面到地图平面的转换,并不需要将所有点按式(1-1)逐点变换,而只需要将地球表面上的一些主要点,如大地控制点、图廓点、经纬线交点等变换到平面上,并连接经纬线交点得到经纬线,形成制图网,构成地图骨架,使地图具有严格的数学基础。在数字制图条件下,则可按式(1-1)逐点实现数学基础和地图内容要素的转换。因此,地图投影的主要任务是建立地图的数学基础,它包括把地球表面上的地理坐标系转换成平面坐标系,建立制图网——经纬线在平面上的表象。

地图测制的最初过程,可概略地分为两步:一是选择一个非常近似于地球自然形状的规则几何体来代替它,然后将地球表面上的点位按一定法则转换到此规则几何体上;二是将此规则几何体表面(不可展曲面)按一定数学法则转换为地图平面,如图 1-6 所示。前者是大地测量学的任务,后者是地图投影学的任务。

地图投影与其他学科如数学、测量学、航海、航空以及天文学等有着密切的关系。

数学是研究地图投影极为重要的工具,地图投影是数学在地图制图学领域的重要应用,是利用现代数学方法最为成功的地图学分支学科,并伴随着数学的发展而不断进步。历史上许多地图投影的创立者和对地图投影理论作出重大贡献者,往往都是数学家,如拉格朗日(J. L. Lagrange, 1736—1813)、高斯(C. F. Gauss, 1777—1855)、蒂索(N. A. Tissot, 1824—1897)等。最初的投影是建立在初等数学——几何学的原理上,大多运用透视法建立经纬线网。近代数学的出现,使地图投影发展有了一次飞跃——广泛运用数学分析法建立更严密的投影,并探求了许多满足特殊用途要求的新的复杂投影。

大地测量为测制地图提供地球参考椭球体的大小、形状及有关参数,并建立大地原点,提供大地控制点的精确地理坐标;而大地测量在大地原点的基础上所建立的各级三角点,则需要应用地图投影计算出它们的平面直角坐标。各级三角点又是测制地形图的控制基础。

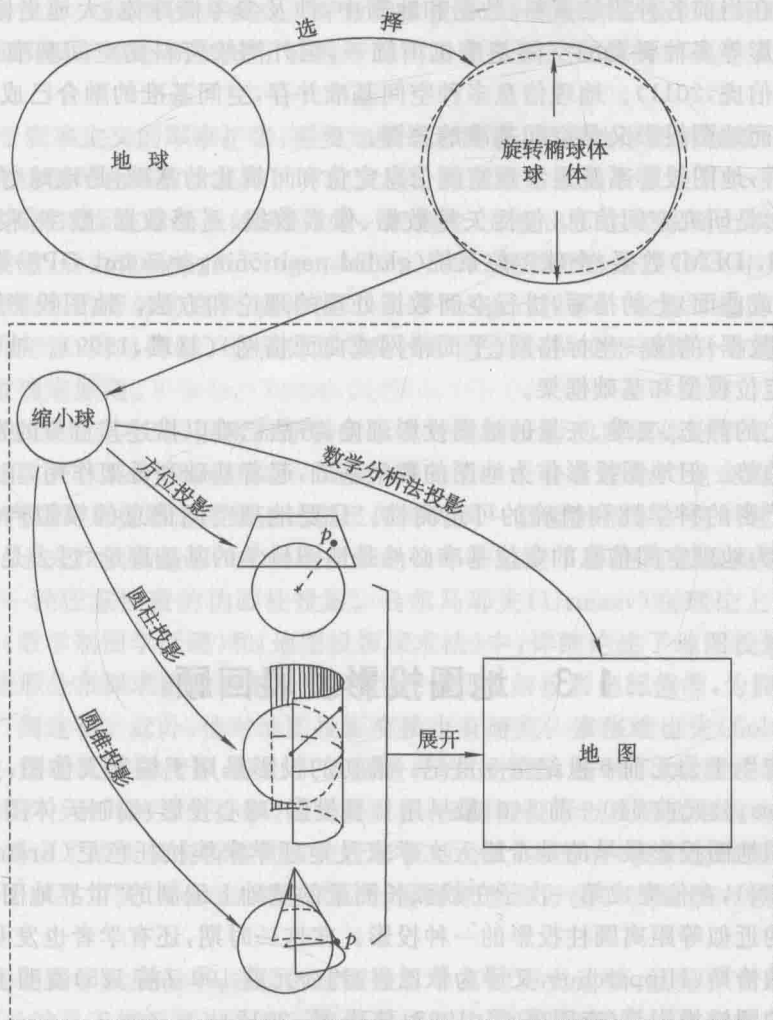


图 1-6 地图测制过程中地图投影的主要任务

地图编制与地图投影同属于地图学的重要组成部分。地图投影为地图编制建立地图数学基础,构建制图网并作为地图的控制基础,读图者从地图上读取所需的某些信息或数据,则要根据地图坐标网和投影变形特点,才能得到正确的结果;而地图应用需求的增加、地图品种的丰富以及地图编制技术的发展,又不断地对地图投影提出新的要求。

在航海、航空及天文学方面,需要利用地图投影来编制所需要的专门地图。例如,为便于海上领航,最早设计的等角圆柱投影用于航海图,也适用于航空图。在当代航天领域,地图投影常用于绘制星际关系位置图和飞船着陆星球图。例如,在宇宙飞船阿波罗 11 号(Apollo 11)登月中,使用的不仅有大大比例尺着陆图,而且有小比例尺的可见月面的月半球图。同时,航海、航空及航天等领域的发展,又推动着地图投影向新的方向发展。

地图生产走上全数字化成图方式后,伴随着现代测量技术的发展,制图资料的来源、需求和使用方式都发生了重大变化,突破了传统手工模拟制图的资料单一性特点,而呈现出多维性、多源性和时效性等(王家耀,2010),具有不同数学基础的制图资料的数据处理与转换成为地图数字化生产中必须解决的首要问题。因历史沿革和受科技、经济发展水平制约,基础测绘

施测年代不同,在当前各种测绘资料、数据和地图中,涉及参考椭球体、大地坐标系统、陆地高程系统、地图投影等多种要素的空间基准也不统一,国外测绘资料的空间基准更是千差万别(杨培,2006;尉伯虎,2011)。地理信息多种空间基准并存,空间基准的融合已成为多源数据应用的重要前提,而地图投影又是空间基准的关键。

从广义上讲,地图投影系统是实现空间信息定位和可视化的基础,是地球空间数据的基础框架。地图投影是研究空间信息,包括矢量数据、像素数据、遥感数据、数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据、全球定位系统(global positioning system, GPS)数据等,在某一制图表面(平面或曲面)上的描写,进行空间数据处理的理论和方法。地图投影的任务是建立空间数据(多源数据)的统一坐标格网(平面格网或曲面格网)(赵琪,1999)。地图投影的本质是空间信息的定位模型和基础框架。

传统意义上的静态、二维、矢量的地图投影理论、方法已难以描述其自身的发展,这也是学科发展的必然趋势。但地图投影作为地图的数学基础,起着基础和骨架作用,正是地图投影才使得地图具有严密的科学性和精确的可量测性。只要地理空间信息的模拟产品——地图存在,地图投影作为地理空间信息的定位基准必然是地图科学的基础理论,过去是,今后也是(胡鹏等,2001)。

1.3 地图投影发展回顾

地图投影产生于公元前6世纪至5世纪。最初的投影是用于编制天体图,如希腊天文学家塞利斯(Thales,公元前640—前546)最早用日晷投影(球心投影)编制天体图。在绘制地球表面地图时使用地图投影最早的是希腊天文学家及地理学家埃拉托色尼(Eratosthenes,约公元前275—前194),在他完成第一次子午线弧长测量的基础上编制的“世界地图”中,使用了经纬线互相垂直的近似等距离圆柱投影的一种投影。在这一时期,还有学者也发明了一些投影,如天文学家喜帕恰斯(Hipparchus,又译为依巴谷,约公元前190—前125)发明了球面投影、正射投影及简单的圆锥投影等(李国藻等,1993;孙达等,2012)。

古希腊天文学家和地理学家托勒密(Claudius Ptolemaeus,约90—168)的名著《地理学指南》的第一卷,主要讲述了地球形状、经纬度的测定和地图投影。书中除说明过去已知的圆柱投影、球心投影和正射投影的作图方法外,还拟定了伪圆锥投影和简单改良圆锥投影。托勒密的贡献,对古罗马地图的发展具有较大影响。

地图制图学的蓬勃发展是随着16世纪地理大发现扩大了地球的地理概念而日益发展起来的。由于航海的需要,欧洲杰出的地图制图学家墨卡托(Gerhardus Mercator,1512—1594)首次用正轴等角圆柱投影制作世界地图。由于这一投影具有地面上的等角航线在投影面上被描写成直线的特点,故对航行非常方便,因此这一投影至今仍用于编制海图。除此以外,这一时期的地图还使用了等距离方位投影、球面投影、心形投影、伪圆锥投影、梯形投影等。

17—18世纪,随着近代数学的发展,地图投影逐渐具有一些新的特点。这一时期较大比例尺的地形图开始使用地图投影,如西欧三角测量中曾应用了卡西尼(C. F. Cassini,1714—1784)投影和彭纳(Bonne,1727—1795)投影。此外,这一时期在地图投影理论上也有较深入的研究,德国数学家和地图学家兰勃特(J. H. Lambert,1728—1777)、瑞士数学家欧拉(Leonhard Euler,1707—1783)、法国数学家拉格朗日等学者的研究丰富了地图投影理论。兰

勃特提出了等角投影一般理论,并创立了等角圆锥投影、等面积方位投影和等面积圆柱投影。欧拉研究了等面积投影理论,并拟定了新的等面积圆锥投影。拉格朗日研究了等角双圆投影的一般理论。

19世纪由于资本主义的军事扩张,需要加强地形测量,提高地形图的精度,因而地图投影主要朝着适应大比例尺地图数学基础的方向发展。德国数学家高斯拟定了一个曲面在另一个曲面上描写(包括椭球面在球面上的描写)的一般理论,并提出了在椭球面上实现等角横切圆柱投影的基本设想,后由克吕格(J. Krüger, 1857—1923)继续研究并于1919年完成,即现在被许多国家地形图应用的著名的高斯-克吕格(Gauss-Krüger)投影。蒂索对地图投影变形的一般原理阐述最为完善,同时提出了近似计算等角投影的方法,从变形椭圆分布适宜角度提出了一系列投影常数确定原则。

19世纪末到20世纪中叶,俄国和苏联的学者对地图投影的发展作出了卓越贡献。俄国科学院院士切比雪夫(Chebyshev, 1821—1894)提出了一个著名理论:“地表的一部分描写于地图上最适宜的投影,是投影边界线上比例尺保持为同一数值的投影。”这一理论为探求新投影指出了方向。卡夫拉依斯基(Kavraisky, 1884—1954)拟定了等距离圆锥投影、等面积圆锥投影,并设计了一种任意性质的伪圆柱投影。乌尔马耶夫(Uрмаev)在理论上作出了重要贡献,在他的著作《数学制图学原理》和《地图投影探求法》中,详细论述了地图投影基本理论,提出了根据已知变形分布探求新的地图投影,利用数值法求解投影坐标值等,为探求新的地图投影开辟了一个广阔途径。此外,他对地图投影变换也有研究。索洛维也夫(Solviev)为苏联教学用图拟定了一些透视圆柱投影,提出了多重透视方位投影,编制了《制图图表》。金兹伯格(Ginzburg)拟制了一系列的方位投影、伪圆柱投影、多圆锥投影以及等变形线为卵形和椭圆形的伪方位投影,提出了两个具有价值的方位投影概括公式,并著有《投影选择集》和《小比例尺图上量测》等书。伏尔可夫(Volkov)著有《图上量测原理和方法》一书,该书较系统地阐述了地图投影问题。

我国的地图制图学发展很早,古代的地图虽有丰富的历史记载,但保存下来的实物很少。从1974年湖南长沙马王堆汉墓出土的三幅绢帛地图中,可以清楚地认识到我国2200多年前的地图风貌。在出土的三幅地图中,其中“地形图”的山脉、河流、道路、村落等要素的表示已具有某些近代地图的特点,比例尺约为1:18万,相对位置比较正确,但图上没有使用地图投影的迹象。

西晋著名地图学家裴秀(224—271)创制的科学编图方法“制图六体”,即分率、准望、道里、高下、方邪、迂直,是世界上最早的地图制图重要理论之一,标志着我国古代地图学的辉煌成就。他认为,绘制地图如没有比例尺(分率),便无法进行实地和图上距离的比较与量测,其中虽未提到地图投影,但涉及地图的数学基础。

南宋(1136年)刻在石碑上的《禹迹图》,是我国现存的最早的“计里画方”地图。图上刻写的文字记载“每方折地百里”,全国纵73列、横70行,共计5110个方格(高俊,1963)。这种“计里画方”的古代地图具有现代地图方里网的形式。

由于我国封建社会历史较长,统治者重科举轻技艺,科学技术发展缓慢,“天圆地方”说长期占统治地位,因此直到明朝末年我国地图上才开始出现经纬线网。

清朝取代明朝的统治,待政治、经济逐步稳定后,康熙帝(爱新觉罗·玄烨,1654—1722)于1708年便开始进行大规模的全国性经纬度测量和三角测量,在此基础上开展了全国性测图工