



测绘地理信息科技出版资金资助
CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

THE PRINCIPLE OF SPACE MAP PROJECTION

任留成 编著

空间地图投影原理



测绘出版社

. 014009738

P282.1
03

测绘地理信息科技出版资金资

空间地图投影原理

The Principle of Space Map Projection

任留成 编著



P282.1
03

测绘出版社

· 北京 ·



北航

C1695967

© 任留成 2013

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 简 介

本书对空间地图投影理论进行了系统研究,形成了完整的理论体系,并探讨了空间地图投影理论在遥感图像制图方面的应用研究,奠定了空间投影理论与应用的研究基础。

全书共分八章,包括绪论、空间地图投影基本理论、卫星地面轨迹投影、空间方位投影、空间圆柱投影、空间斜轴墨卡托投影、空间斜轴圆锥投影、空间地图投影在遥感图像制图中的应用等。

本书可供地图制图、航测、遥感、气象、地理、国土资源、水利、探矿等相关专业的教师、研究生、本科生以及从事空间数据处理的科学工作者和技术人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

空间地图投影原理/任留成编著. —北京:测绘出版社, 2013. 8
ISBN 978-7-5030-3008-6

I. ①空… II. ①任… III. ①地图投影—研究 IV. ①P282.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 150367 号

责任编辑	沈万君	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍	责任印制	喻 迅
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 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	三河市世纪兴源印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm						
印 张	12.5			字 数	260 千字		
版 次	2013 年 8 月第 1 版			印 次	2013 年 8 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1500			定 价	42.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3008-6/P·651

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

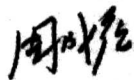
序

地图学是一门古老的学科,也是人类认识自然的基本科学方法和手段之一,并随着时代的发展而不断创新和革新,电子地图、数字地图、网络地图等新的地图业态层出不穷,地图学的功能也更向地理知识的服务方向漂移。特别是当代遥感技术的快速发展,为认识地球、监测全球环境变化等提供了海量、适时的数据,因此,全球尺度的遥感和地图研究成为当今科学界的重要研究方向和热点内容。

空间地图投影是全球尺度地图学和遥感研究的科学基础之一,涉及现代数学、天体力学、制图学以及航天遥感等多学科方向,成为研究前景广阔而又富有挑战性的研究领域。早在 1974 年,美国地质测量局的科尔沃科雷塞斯(A. P. Colvocoresses)教授就提出了空间地图投影概念,随后学界对以 SOM 为代表的空间地图投影开展了广泛的研究,出版了系列学术论文与专著。当今,空间地图投影已发展成为一门将理论与技术结合起来、系统地研究各种遥感图像数据处理和遥感制图的交叉领域。

我国空间地图投影理论与方法的研究尚处于探索性研究阶段,具有影响力的代表性成果也较为鲜少。从 20 世纪 80 年代开始,杨启和、胡毓钜教授等一批地图制图学学者就涉足于该领域的研究,并取得了一定的研究成果,特别是在 SOM 投影、等角空间投影和空间地图投影的快速解算等方面成果更为显著。近十几年来,任留成教授一直潜心空间地图投影理论的研究,涉猎空间地图投影理论和应用等方面。该书是任留成教授长期从事于这一领域研究的高度结晶,从基础理论到各种空间地图投影的建立、从遥感图像投影分析到空间地图投影在遥感图像处理及遥感制图中的应用等,都有很详细的论述,特别是在空间地图投影理论的系统化、空间斜轴圆锥投影和空间地图投影在遥感图像处理中的应用等方面的研究,填补了国内外空白。

随着世界全球化进程加快,对全球性问题的关注和研究成为人类社会共同点,全球变化、气候变暖等问题更是需要在全局尺度上开展。因此,这本关于空间地图投影专著的出版,可谓地球科学研究领域中的一件盛事,也期望有更多的学者一同来开展这方面的研究。



2012 年 1 月于北京

前 言

当前,航天遥感进入到一个能够动态、快速、准确、多手段提供多种对地观测数据的时代。航天遥感获取的图像数据应用发展迅速,涉及领域甚广,尤其在遥感制图领域更具特色。进入 21 世纪,遥感信息极大地丰富起来,各类遥感图像数据不断涌现,对它们的处理和投影变换的研究也日趋深化,甚至成为当前的热门研究课题。

空间地图投影理论研究自 20 世纪 70 年代开始以来,已经成为该领域内的重要研究方向,是图像数学基础研究的前沿课题,是遥感专题分析制图等成图质量与精度的重要保证,也是遥感快速、高精度制图的技术支撑。

针对空间地图投影理论的不完善状况,本书试图研究并整理出一套相对完整的系统理论,探求建立适合卫星遥感图像的空间地图投影的理论和方法,并为空间地图投影的应用进行一些探索性的研究。本书重点在于研究空间地图投影的基本理论、卫星轨迹线投影、空间方位投影、空间圆柱投影、空间斜轴圆锥投影、图像投影性质分析和空间地图投影的制图应用等。

作者几十年来在该领域进行坚持不懈的学术研究,取得了丰硕的科研成果。本书在作者科研成果的基础上,结合国内外同行学者的研究成果编写而成。在撰写过程中,许多内容受到博士生导师杨启和教授和博士后合作导师朱重光研究员的学术思想启发,特别是朱老师在百忙之中审阅了书稿。在此,向他们表示衷心的感谢!同时特别感谢中国科学院地理科学与资源研究所副所长周成虎研究员的关心和指导,并为该书作序。还要感谢高俊院士和王家耀院士在我完成学业过程中的大力支持和帮助。

本书的写作得到了国家自然科学基金项目“空间地图投影系统理论及其应用研究”(No. 41071287)的资助。本书的出版得到了测绘地理信息科技出版资金的资助。

由于作者水平有限,错漏之处在所难免,希望各位专家和广大的读者批评指正!

作者

2013 年 1 月于北京

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 空间地图投影概述	1
§ 1.2 地图投影学科性质的演变	4
§ 1.3 空间地图投影发展简史	6
第 2 章 空间地图投影基本理论	8
§ 2.1 空间地图投影的一般概念	8
§ 2.2 长度变形和面积变形	9
§ 2.3 角度变形	11
§ 2.4 空间地图投影分类	17
§ 2.5 利用算子微分研究投影变形理论	20
第 3 章 卫星地面轨迹投影	30
§ 3.1 球面上的卫星地面轨迹方程式	30
§ 3.2 卫星地面轨迹在投影中的影像	32
§ 3.3 卫星地面轨迹圆柱投影	34
§ 3.4 卫星地面轨迹圆锥投影	38
第 4 章 空间方位投影	43
§ 4.1 框幅式像片的空间外透视方位投影模型	44
§ 4.2 椭球的倾斜像面空间透视投影正反解变换	48
§ 4.3 空间斜方位投影公式	53
§ 4.4 动态空间正图像透视投影正反解	59
第 5 章 空间圆柱投影	65
§ 5.1 空间墨卡托投影	66
§ 5.2 空间高斯—克吕格(横轴椭圆柱)投影	74
§ 5.3 空间割圆柱投影	83
§ 5.4 等角空间投影	86

第 6 章 空间斜轴墨卡托投影	97
§ 6.1 SOM 投影模型原始构想	97
§ 6.2 SOM 投影数学模型 I	99
§ 6.3 SOM 投影数学模型 II	111
§ 6.4 SOM 投影与等角空间地图投影之间的分析比较	122
§ 6.5 三轴椭球的空间斜轴墨卡托投影	129
第 7 章 空间斜轴圆锥投影	149
§ 7.1 空间斜轴圆锥投影的几何原理	149
§ 7.2 侧视区域中心线轨迹投影	150
§ 7.3 空间斜轴圆锥投影公式	155
§ 7.4 反解变换	158
§ 7.5 投影变形	158
§ 7.6 应用举例	159
第 8 章 空间地图投影在遥感图像制图中的应用	162
§ 8.1 卫星图像投影性质分析	162
§ 8.2 卫星图像的数学基础	166
§ 8.3 利用分带投影方法研究卫星图像的连轨问题	169
§ 8.4 利用二面投影原理研究单张像片的连续制图问题	173
§ 8.5 卫星图像投影之间的转换	175
§ 8.6 空间投影的制图应用	183
参考文献	191

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Summarizing of space map projection	1
§ 1.2	Evolving of the characteristics of map projection subject	4
§ 1.3	Developing history of space map projection	6
Chapter 2	General Theory of Space Map Projection	8
§ 2.1	Distortion concept and definition of space map projection	8
§ 2.2	Length distortion and area distortion	9
§ 2.3	Angular distortion	11
§ 2.4	Classification of space map projection	17
§ 2.5	Researching on projection distortion theory based on operator differential	20
Chapter 3	Projection of Satellite Ground Track Lines	30
§ 3.1	Equation of satellite ground track on sphere	30
§ 3.2	Mapping of satellite ground track in map projection	32
§ 3.3	Cylindrical projection of satellite ground track	34
§ 3.4	Conic projection of satellite ground track	38
Chapter 4	Space Azimuthal Projection	43
§ 4.1	Space perspective azimuthal projection model of photographic image with view point outside	44
§ 4.2	Direct and inverse transformation of the “Tilted Camera” space perspective projection of the ellipsoid	48
§ 4.3	Formula of space oblique azimuthal projection	53
§ 4.4	Direct and inverse transformation of the perspective projection of dynamic space elevation image	59
Chapter 5	Space Cylindrical Projection	65
§ 5.1	Space Mercator projection(SM)	66

§ 5.2	Space Gauss-Krüger projection(STM)	74
§ 5.3	Space secant cylindrical projection	83
§ 5.4	Conformal space cylindrical projection(CSP)	86
Chapter 6	Space Oblique Mercator Projection(SOM)	97
§ 6.1	The original idea of SOM	97
§ 6.2	Mathematic model I of SOM	99
§ 6.3	Mathematic model II of SOM	111
§ 6.4	Analysis and comparison between some existed space map projection	122
§ 6.5	Space oblique Mercator projection of the ellipsoid with three axis	129
Chapter 7	Space Oblique Conic Projection(SOC)	149
§ 7.1	Geometric principle	149
§ 7.2	Projection of the central line of side-glance area	150
§ 7.3	Formula of space oblique conic projection(SOC)	155
§ 7.4	Inverse transformation	158
§ 7.5	Projection distortion	158
§ 7.6	Examples of application	159
Chapter 8	Applications of Space Map Projection in the Cartography of Remote Sensing Image	162
§ 8.1	Analysis of the projection characteristic of satellite image	162
§ 8.2	Mathematic fundamental of satellite image	166
§ 8.3	Researching on the problem of connecting images of satellite in the same stripe by the method of dividing stripes	169
§ 8.4	Researching on the continuous cartography by the principle of two-lane projection	173
§ 8.5	The transformation between satellite image projection	175
§ 8.6	Space map projection applied to the cartography of satellite image	183
References		191

第1章 绪 论

§ 1.1 空间地图投影概述

1.1.1 概述

人造地球卫星的上天,开创了人类航天遥感科学研究和技术应用的新局面,从此,人们就拥有了从外层空间来探索和测绘地球及其他星球的新手段,测绘技术也开始进入空间(航天)测绘的新阶段。卫星遥感图像数据的大量涌现,为地图制图提供了丰富的资料来源,促使卫星遥感制图不断发展,与之相应地也开辟了地图投影学科的一个崭新研究领域——空间地图投影(space map projection)。卫星遥感制图所要研究的地图投影变换问题基本包括两个方面:一是要解决由星载探测器所获得的地理信息用什么投影方式记录在图像平面上,形成人们所需的影像地图或地形图,显然重点是为空间卫星摄影或扫描图像寻找和设计适宜的投影方案,这部分称为“空间地图投影建立”;二是将遥感图像转换成常规的地图投影(即把图像已有的投影方式变换成新编地图产品方式或影像产品所选用的地图投影),其重点在于解决投影变换的方法,这部分称为“图像投影变换”。

卫星遥感图像包括瞬间静态摄影图像(如框幅式图像等)、沿星下点周围扫描图像(如 TM、SPOT 图像等)以及侧视雷达(SAR)图像等,这些图像是地球表面缩小的表象,表现了地面的客观现实,信息量非常丰富,在农业区划、国土整治、自然资源调查和地理考察等方面起着非常大的作用,特别是对缺少地形图或地形图现势性较差的地区,可用这些卫星影像进行某些内容的判读和分析,进而获得某些信息的定量指标。但是,卫星影像不能代替地形图,因为卫星影像属地面的中心投影,像点位置将受像片倾斜、地面起伏、地球旋转和弯曲以及透视压缩等因素的影响而有所偏移,像片比例尺也不一致,而且利用遥感图像也只能看到地球的不足二分之一部分,要想利用卫星图像看到地球的全貌,必须考虑卫星图像的连续制图问题。因此,开展卫星遥感图像制图问题的研究很有理论意义和实用价值。

卫星遥感制图是一种动态的制图过程,是卫星遥感研究和应用不可缺少的部分,在现代空间测绘技术应用中起着日趋重要的作用。卫星遥感制图可以分为遥感图像数据制图处理和遥感图像数据制图应用两个部分。遥感图像数据制图处理主要是研究遥感图像数据的辐射校正、几何纠正、图像增强、图像分类等方法,以及对地图要素

的分析、识别、提取等手段,其中的几何纠正部分主要是消除或限制图像的各种几何误差和进行必要的图像投影变换,以满足规定比例尺的制图精度要求。

每一张地图都有相应的地图投影作为其数学基础,日趋广泛的卫星图像制图也必将建立适合自身特点的空间地图投影作为数学基础。因此,建立卫星图像的数学基础是卫星遥感制图亟待解决的科学问题。

卫星图像的数学基础包括几何控制基础和适合卫星图像的空间地图投影系统。空间地图投影是适合于各类动态传感器构像的一种地图投影系统,它顾及了地球形状、卫星运动、地球自转、轨道进动等因素对点位的影响,时间成为投影的参数,是四维空间的地图投影;空间地图投影是在对卫星遥感图像数据粗制处理基础上,采用解析法建立的一种区别于传统地图投影的全新动态投影。空间地图投影系统能使同一飞行轨道的带形图像处于统一坐标系内,适宜于卫星图像的连续制图。

空间地图投影是空间遥感制图的数学基础,是卫星遥感制图形成和发展不可缺少的重要组成部分,对其进行深入的研究是今后空间制图的一个重要发展方向,也必将会推动空间测绘事业的快速发展。

我国已经发射了 100 多颗人造地球卫星,也将要发射一系列资源卫星和多用途军事应用卫星等,对这些卫星图像数据的应用处理和制图是摆在我们面前的首要任务,因此,建立与之相应的数学基础具有非常重要的科学意义和现实意义。

1.1.2 空间地图投影的研究对象和任务

随着航天技术的发展和新型卫星的发射,动态传感器(如多光谱扫描仪、线阵固体扫描仪和侧视雷达等)在卫星摄影定位、探测和测图中得到了广泛应用。事实上,动态传感器是地球观测最有效的手段,也是今后卫星测图最有发展前景的传感器。这种传感器的整幅影像由逐点或逐行(列)扫描成像构成,在整幅影像的扫描过程中,卫星的飞行、轨道的进动与地球的自转完全处于两个不同的惯性系,存在着相对运动,使得像点与对应地面点的几何位置关系都与时间发生联系。静态的地图投影无法满足卫星图像投影的需要,同时,由于地球与卫星的相对运动、传感器成像的几何状态、卫星的姿态、高度、速度的变化、地形起伏等因素的影响,图像将不可避免地产生变形,这会直接影响到图像的分析应用。因此,开展空间地图投影的研究,并用于遥感图像的几何校正处理和遥感连续制图,具有非常重要的意义。

遥感图像从空间分辨率、光谱分辨率到时间分辨率也都有了极大的提高。与传统的测图方式相比,卫星遥感具有成图周期短、现势性强的优势,因此卫星遥感图像正在成为 GIS 中越来越重要的数据源。卫星遥感的日益实用化,标志着遥感和地图制图正在走向大融合。

测绘业的根本任务就在于测定并描绘地面点的精确坐标位置。同样,卫星遥感图像的应用首先要解决的就是将图像数据记录在一定的数学框架之内,即一定

的地图投影系统内,从而建立像点和地面点的一一对应关系。传统的航空摄影测量是瞬时曝光的静态摄影,即地面点、透视中心和投影面都是固定的,可以采用静态的中心透视投影(即共线方程)。而卫星摄影是动态的过程,整幅图像是由传感器逐点或逐行(列)扫描构成的,由于地球曲率、地球自转、卫星飞行、轨道进动等因素的影响,遥感图像会产生比较复杂的几何畸变。因此,对卫星遥感图像进行几何纠正显然不能使用静态投影。同时,传统摄影测量中的相对定向的方法对卫星图像也不适用,首先因为卫星图像不是透视投影,其次是卫星图像间不存在重叠。

空间地图投影能很好地模拟卫星动态成像的物理过程,可将传统地图投影中地球形状、透视中心和投影面三者固定的关系转换成随时间变化的函数关系,是适合于遥感图像处理的动态投影。从理论上讲,该投影能消除卫星飞行、轨道进动、地球弯曲等因素所造成的图像几何畸变,既考虑卫星成像的物理过程,又摆脱对卫星轨道、姿态参数精度的依赖关系,直接实现从原始数据到精纠正的直接简易校正法,并能依据少量地面控制点,直接建立遥感图像与地图投影系统之间、影像点与地面点之间严格的数学关系。这种投影能以连续无误的比例尺表示卫星同一飞行轨道的不同图幅的地面轨迹,以等角性质表示卫星扫描的图像,并能由已知图幅外推处于同一飞行轨道上其他未知图幅的位置,这对遥感图像数学基础的转换、遥感图像的自动连续制图以及缺少地面控制点地区的图像制图具有十分重要的意义。另外,纵观我国的各种系列地图,都有其特定的投影作为数学基础,例如,地形图采用高斯-克吕格投影,海图采用墨卡托投影。这是在长期反复的实践中,根据地图性质、用途、目的而形成的,对地图的生产、应用起着重要的作用。

遥感图像处理中的空间地图投影研究是进行卫星动态成像数据处理的一项关键内容,是遥感数字图像信息的高精度连续制图、空间定位从理论到实践的一项重要保证,是卫星图像几何校正方法的新尝试,对我国即将发射的卫星图像接收、处理、应用将产生积极的指导意义。

空间地图投影研究的对象是:研究通过遥感数据所获得的地理信息在平面上描写的理论与方法,以及这些理论和方法的应用问题,并且还要研究不同空间地图投影之间、空间地图投影与静态地图投影之间的自动转换、图上量算和制图作业等问题。

空间地图投影研究的重要任务就是建立卫星遥感图像数据制图的数学基础,把遥感图像数据的坐标系统转化为统一的动态空间地图投影系统。它的一般任务有:

(1)研究各种卫星遥感数据所对应的空间地图投影建立的理论和方法,以及它的计算与展绘问题。

(2)确定空间地图投影变形的分布规律和大小,明确它的应用与范围,以及选择最佳投影方案和评价投影质量的准则。

(3)解决不同遥感制图数学基础变换的理论和方法,以及适应这种理论和方法所需的各种数学模型及其电算问题。

(4)解决卫星地面轨迹线和扫描带在地图上描绘的理论和方法以及投影的判别问题。

(5)研究空间地图投影在遥感图像处理中的应用问题。

(6)探求基于空间地图投影的空间制图问题。

§ 1.2 地图投影学科性质的演变

随着卫星遥感制图和制图自动化的迅速发展,古老的地图投影学科已不能适应现代测绘工程的需求。空间地图投影的诞生,弥补了静态地图投影的不足,从而也使“地图投影”这一早期术语的内涵得到不断的丰富和发展。

自大约公元前 640 年至今,地图投影的发展已经经历了两千多年的历史,纵观这一漫长的历史时期,可以将地图投影大致划分为静态地图投影和动态地图投影两个阶段(吴忠性 等,1989)。以往的地图投影基于静止的条件,地球、透视中心(假如有一个)和投影平面相互间的关系是完全固定的,投影关系是地球经纬度或直角坐标与地图坐标之间的关系。到目前为止,静态地图投影学从最初简单的几个投影,发展至今已经成为一门比较完善、独立和系统的数学制图学学科,所探求的地图投影也已基本满足地图制图学的需求。

伴随着航天图像的出现,地图投影也从静态转向动态。从 1974 年美国科学家科尔沃科雷塞斯(A. P. Colvocoresses)教授提出空间地图投影概念开始,以空间地图投影为主导的空间数学制图学迅速崛起,地图投影学学科性质也发生了新的变化,具体体现在以下几点。

1. 从简单的几何透视方法发展到数值方法和抽象数学方法

地图投影这一术语来源于它在早期发展阶段用几何透视方法将地球面上经纬线投影于平面。随着科学技术的发展,简单地用几何透视方法已远远不能满足编制各种类型地图的需要,于是数学分析方法在地图投影学中得到了广泛的运用。空间地图投影的出现,使得投影模型的建立更为复杂,高等数学方法已不能满足空间地图投影建模的需要,从而抽象数学方法(如算子方法等)逐渐运用到地图投影学中。由于数值方法和抽象数学方法的介入,探求地图投影的方法更加丰富多彩,地图投影学从理论到应用都得到长足的发展。

2. 从地面发展到空间

地图投影从以往的地面投影逐渐发展成为从地球走向月球和其他行星,现在已经有月球地形图、月球地质图和火星一览图等。因为利用宇航技术获取的地理信息是从空间、用动态的方法得到的,设计投影方案时有必要考虑时间参数,因而

选择地图投影最好采用空间地图投影,特别是对控制点极少的海洋区域进行测图时,利用空间地图投影是最恰当的投影选择。

3. 从静态发展到动态

传统的地图投影都是静止条件下的地球到地图平面的几何映射,但卫星图像是在时间变化过程中所获取的地球(或星球)影像,为卫星图像设计地图投影应当考虑动态因素。因此,地图投影研究和教学开始从单纯的静态投影转向静态和动态投影共同发展的方向。由于空间地图投影是一种动态投影,时间变量成了投影参数,地图投影便从三维投影发展到四维投影。

4. 从单学科发展到多学科相互渗透、相互交叉

地图投影学即数学制图学,是地图学发展到地图学与基础数学相结合的产物。空间地图投影的兴起,又使该学科发展成为地图学与现代数学、物理学、天体力学、电磁学、航天摄影测量以及卫星遥感技术等多学科的相互综合,形成一门交叉学科。

5. 从主框架发展到辅助坐标网

常规的地图投影是作为一种地图框架,随后在里面填绘专题要素。轨道卫星上连续扫描记录装置的研制,在某种意义上推翻了这一概念。例如,陆地卫星(Landsat)上的扫描装置,以数字方式连续记录图像数据,在将其制作成影像地图之前需要进行一系列几何校正和相应的图像投影变换。经过几何校正的影像,是以带有扫描仪、轨道航天器和地球三者相对运动特征的空间斜轴圆柱投影(SOM投影)作为数学基础的(罗宾逊等,1989),也就是说,专题要素的获取在先,SOM投影作为辅助坐标网在后。

6. 坐标表示形式从地心系发展到多种坐标系并用

静态投影主要是采用相对地球静止的地心直角坐标系和极坐标系等,空间地图投影采用的不仅包括地心直角坐标系和极坐标系,而且还经常采用天体坐标系以及随卫星运动而变动的活动标架等多种坐标系。

7. 地图投影变换从传统的人工方法发展到机助自动变换

传统的人工投影变换方法是将被测地物经过照相、晒蓝,然后拼贴在按新投影展好的经纬线网上。自从计算机应用到制图领域,原始资料图的投影变为新编地图的投影可通过计算机自动实现。遥感图像信息作为新的地图资料信息源,信息量丰富而且复杂,图像投影变换只能借助计算机来实现。

纵观现代测绘,如何把遥感图像处理技术与地图自动化技术紧密地结合在一起,用以生产更多、更新颖的地图产品,则是卫星遥感制图的目的和发展方向,也是地图投影研究的发展趋势。

§ 1.3 空间地图投影发展简史

人造地球卫星首次发射迄今已 40 多年,但与之相适应的空间地图投影的研究和发展尚属起步阶段。空间地图投影是近代新兴的数学制图学研究领域,既没有完善的理论体系,也没有足够的、适合于各类卫星图像制图应用的空间地图投影。

关于空间地图投影的研究是从单张航天像片理论研究开始的。如框幅式像片等属整幅图像都在同一瞬间曝光形成,是瞬间静态摄影,这些图像适合用传统的透视投影或方位投影来描述。在 SOM 投影出现之前,卫星图像的数学基础只有单张航天像片理论,苏联科学家布加耶夫斯基等著有专著《单张航天像片理论》,该书比较系统地总结了前人的成果,详细阐述了单张航天像片的理论和投影方法,论述了将摄影像片和非摄影像片变换为给定的地图投影的问题、像片量测的数学处理问题以及从单张像片上向地图传递地物信息的问题。该书涉及单张航天像片的几何方面的理论主要包括:像片投影、各类坐标系统的关系、定向元素、像片比例尺、地面和像面角度的关系、几何变形等,可以说该书是这方面的权威著作。此外,美国、中国和澳大利亚等国的科学家对单张航天像片理论也有很多研究,1981 年美国的斯奈德(J. P. Snyder)教授发表了《地球的透视投影》,为模拟航天像片提出了地球透视投影的三角方程,研究了单张倾斜像面的航天像片的构像模型;1990 年澳大利亚的迪金(R. E. Deakin)发表了《地球的倾斜像面透视投影》,针对斯奈德教授的问题,提出了利用矢量方法导出单张像片的投影公式的技巧;1996 年埃及的阿纳(W. N. Hanna)发表了《旋转椭球的垂直透视投影》,研究了单张像片正负图像的地图坐标解析式。我国的科研工作者对单张航天像片理论的研究取得了一些进展,时晓燕、胡毓钜教授于 1994 年发表了《倾斜相机式投影的几何解法及其与外心投影的比较》,该文根据透视投影的基本原理,给出了关于倾斜相机式投影的几何解法,在此基础上分析了倾斜相机式投影与外心投影的异同,提出了二者比较的一致性条件。另外,国内外还有很多学者在这方面做了不少工作,不再一一赘述。

单张航天像片投影作为空间方位投影也属于空间地图投影的一种情形。

对单张航天像片投影公式进行分析研究表明:当投影点远离中心点时,其长度局部比例尺将显著加大且变化迅速,投影变形值甚至大于其他投影(如高斯—克吕格投影)的几倍或几十倍(布加耶夫斯基等,1984)。因此,仅研究单张航天像片投影理论并不能满足卫星遥感制图的要求。

为满足卫星遥感动态测图的需要,美国地质测量局的科尔沃科雷塞斯教授于 1974 年在《PE&RS》上发表了《SOM 投影——一种适用于 Landsat 卫星图像应用的新型地图投影》一文,首次提出空间地图投影概念,从此,地图投影学又开辟了一个新的研究领域——空间地图投影(space projection)。科尔沃科雷塞斯教授描述

了 SOM 投影的几何模型,并未推导其相应的数学公式,他建议制图工作者致力于研究其数学模型及编程计算,并指出数学问题是这项研究中最重要的问题,而且断言空间地图投影有可能发展成为自动制图系统不可缺少的一部分,在该系统中可使像素分别与地球上的位置相联系。直到 1977 年,才由两位科学家琼金斯(J. L. Junkins)和斯奈德各自独立地导出了 SOM 投影公式。琼金斯的投影公式通用性强,可应用于非圆形轨道,但是公式较复杂,也不等角;斯奈德的投影公式简单,且近似等角投影,适用于(陆地卫星)圆形轨道。美国 20 世纪 80 年代已将 SOM 投影系统用于卫星 MSS 图像的连续制图。2004 年,美国科学家赫斯勒(John W. Hessler)对 SOM 投影进行了综述,其中谈到斯奈德从 1972 年美国发射第一颗陆地资源卫星 ERTS(Landsat-1)时就开始思考如何建立相应的动态空间地图投影问题。

我国在空间地图投影的理论和应用研究方面也取得了一定的进展,杨启和教授以及解放军测绘学院地图制图系地图投影研究小组在“七五”期间就对 SOM 投影模型进行了较深入的研究和实验(杨启和,1989),程阳于 1991 年在《测绘学报》上发表了“论等角空间地图投影”一文(程阳,1991),提出了一种严格的等角空间地图投影,他把此结果进行加工整理,于 1996 年在《Cartography & Geographic Information Systems》上发表了“The conformal space projection”一文(Yang cheng,1996)。此外,吕晓华 1991 年研究了“空间地图投影在 SPOT 卫星图像几何校正中的应用”,对杭州地区的 SPOT 1A 级图像进行处理,得到了严密的数学基础和较高的点位精度。赵琪博士研究了空间割圆柱投影等。本人在攻读博士学位期间对空间地图投影理论作了较深入的研究,完善了空间地图投影的系统理论,在中科院遥感所做博士后期间对空间地图投影的应用方面作了一些有意义的探讨,在英国和美国做访问学者期间也一直坚持在该领域的研究,曾与美国专家克拉克(K. C. Clarke)等合作,在《Cartography and Geographic Information Science》发表了相关论文。本人的研究成果大多在该书中有所体现。

总之,空间地图投影的理论研究刚刚起步,尚无形成完备的理论体系,对空间地图投影的应用研究更是处在萌芽状态,空间地图投影研究在卫星遥感图像处理与制图、空间地理信息定位系统以及“数字地球”等方面将大有潜力可为。

第2章 空间地图投影基本理论

空间地图投影与传统静态地图投影不同,是专门为遥感图像而设计的动态地图投影,时间成为其投影参数。静态地图投影的理论不适于空间地图投影,空间地图投影应该有自己相应的系统理论。本章着重讨论空间地图投影基本理论,以及如何建立空间地图投影较为完善的理论体系。主要研究内容包括:空间地图投影的长度比、面积比、方位角变形和最大角度变形公式;对空间地图投影进行分类;找出空间地图投影的等角、等面积和等距离条件;利用算子微分研究空间地图投影变形理论等。

§2.1 空间地图投影的一般概念

卫星摄影或扫描成像是一种动态的过程,整幅图像是由传感器逐点或逐行(列)扫描成像构成的。卫星图像的形成与卫星沿轨道的飞行、地球的弯曲和转动、卫星轨道面的进动等因素有关,这些因素对成像的影响,不可避免地造成遥感影像的扭曲变形。有些影响可以通过卫星轨道设计加以解决,有些影响可经地面站处理,而有些影响则与图像投影选择有着十分密切的关系。空间地图投影所要考虑的主要方面是卫星和地球的双重运动及其对制图的影响。由于卫星在空间运动,其位置 (X, Y, Z) 是时间 t 的函数,因此时间 t 就成了动态测图的一个参数。

如果静态地图投影公式为

$$x = \bar{f}_1(\phi, \lambda), \quad y = \bar{f}_2(\phi, \lambda) \quad (2.1.1)$$

则空间地图投影公式应为

$$x = f_1(\phi, \lambda, t), \quad y = f_2(\phi, \lambda, t) \quad (2.1.2)$$

式中,经纬度 λ, ϕ 及时间 t 都是投影变量。如果写成直角坐标的形式,空间地图投影公式应为

$$x = f_1(X, Y, Z, t), \quad y = f_2(X, Y, Z, t) \quad (2.1.3)$$

这是一种四维空间与二维平面之间的一一映射,函数 f_1, f_2 取决于不同的投影限制条件,在制图区域内,函数必须保持为单值、连续、有界。

若式(2.1.2)中的 $\lambda = l_1 = \text{常数}$,则经差为 l_1 的经线动态投影方程式为

$$x = f_1(\phi, l_1, t), \quad y = f_2(\phi, l_1, t) \quad (2.1.4)$$

若令 $\phi = \phi_1 = \text{常数}$,则式(2.1.2)变成纬度为 ϕ_1 的动态纬线投影方程式,即

$$x = f_1(\phi_1, \lambda, t), \quad y = f_2(\phi_1, \lambda, t) \quad (2.1.5)$$