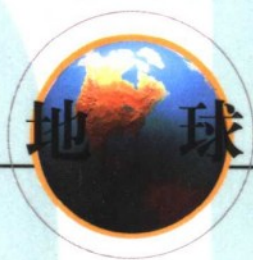


国家“十五”重点图书

数字地球基础丛书



# 三维空间数据的实时获取、 建模与可视化

李清泉 杨必胜 史文中 李必军 胡庆武 著



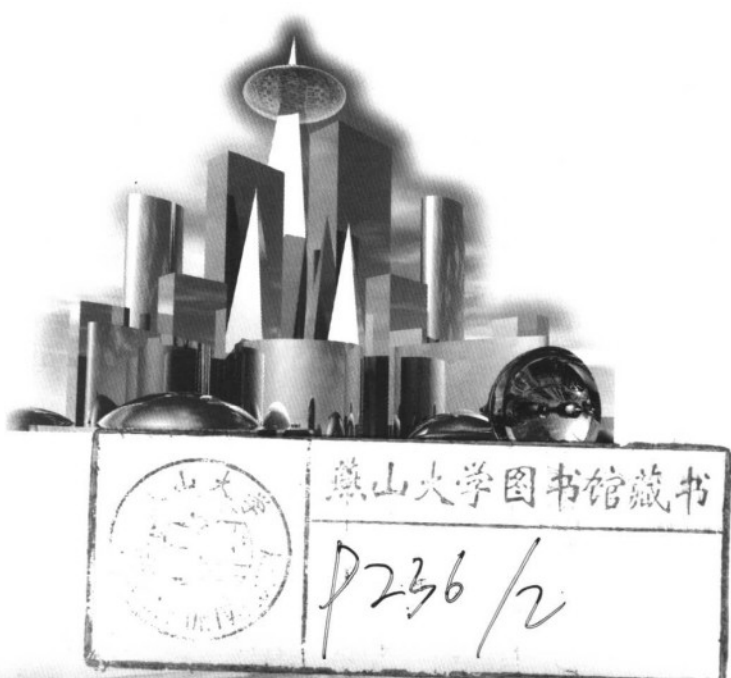
全国优秀出版社  
武汉大学出版社

国家“十五”重点图书

数字地球基础丛书

# 三维空间数据的实时获取、 建模与可视化

李清泉 杨必胜 史文中 李必军 胡庆武 著



燕山大学图书馆藏书  
P236 / 2

全国  
武汉



0620313

图书在版编目(CIP)数据

三维空间数据的实时获取、建模与可视化/李清泉等著. —武汉: 武汉大学出版社, 2003. 12

国家“十五”重点图书

(数字地球基础丛书)

ISBN 7-307-04031-X

I. 三… II. 李…[等] III. 三维—空间测量—数据处理 IV. P236

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 079021 号

责任编辑: 瞿 嵘 责任校对: 黄添生 版式设计: 支 笛

---

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

印刷: 武汉市科普教育印刷厂

开本: 787×1092 1/16 印张: 18.75 字数: 406 千字 插页: 3

版次: 2003 年 12 月第 1 版 2003 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-04031-X/P·66 定价: 45.00 元

---

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题者, 请与当地图书销售部门联系调换。



**李清泉**，男，1965年1月生于安徽省天长县，武汉大学教授，博士生导师。分别于1985、1988、1998年获得原武汉测绘科技大学工程测量专业学士、硕士和摄影测量与遥感专业博士学位。先后主持和参加了十多项国家自然科学基金项目、国家863计划项目和省部级各种基金项目，在国内外学术期刊和国际学术会议上发表学术论文50余篇，指导博士研究生10余名，硕士研究生20余名。目前的研究兴趣为地理信息技术与通信技术集成的理论和方法、移动GIS、激光测量技术、三维空间数据的表达等。

E-mail: [lqq@wtusm.edu.cn](mailto:lqq@wtusm.edu.cn)

# “数字地球”系列丛书 学术指导委员会

顾 问：徐冠华

主 任：李德仁

委 员：(按姓氏笔画排序)

宁津生 叶嘉安 刘先林

刘纪远 李 琦 林宗坚

陈 军 杨崇俊 周成虎

龚健雅 童庆禧

## 序

地球空间信息技术是当今世界各国研究的热点之一,信息的获取、处理及应用是其研究的三大主题。三维空间信息的快速获取与自动处理技术是“数字地球”、“数字城市”亟需解决的关键技术,是地球空间信息技术的核心和发展前沿。

三维空间信息获取,其实质是空间定位数据采集。纵观测绘科技发展史,人类在认识自然和改造自然的过程中,发现和发明了一系列定位方法、定位工具,使人类能够认识地球及其之外的空间。随着科学技术的发展,测绘技术的信息革命使得数据采集从利用地面测量仪器进行局部测量到利用各种星载、机载和舰载传感器实现对地球表面及其环境的几何(空间信息)、物理等数据的采集;从单纯提供测量数据和资料到实时/准实时地提供随时空变化的地球空间信息,其应用已经扩展到与空间信息有关的诸多领域。如何解决信息获取的实时性与准确性已成为空间信息技术发展的瓶颈。

三维空间数据模型是三维地理信息系统、三维空间信息技术中的数据处理与管理部分的核心,为数字城市研究与发展提供了基础。三维空间数据模型是这几年发展起来有难度的领域。其主要原因有几个方面:其一是三维空间关系数据模型的发展还不十分完善;其二是大量的三维空间数据处理在现有的硬件设备条件下,还不能令人十分满意。

三维空间信息可视化是一个发展较为迅速的领域,该领域的发展有赖于计算机图形技术、制造技术的发展,以及与虚拟现实技术的集成。该部分技术的发展为数字城市、数字地球的发展提供了一个十分重要的基础。

本书结合几位年轻作者近十年来长期从事上述三个方面的理论和应用研究,首先在总结现有数据获取技术的基础上,介绍了当前研究热点——激光测量技术和多传感器集成技术及其应用。接着,综述了三维空间实体/对象以及三维GIS,提出了面向对象的三维空间数据模型(OO3D模型)。在此基础上最后介绍了三维模型的可视化技术、LOD模型及动态多分辨率模型等。在书中,作者对其研究成果“LD激光自动测量系统”和“三维可视化GIS原型系统SpaceInfo”的理论及应用进行了介绍。

本书的内容属于一个综合性的多领域交叉学科,从数据获取技术到数据处理与建模,再到可视化,它的构成高度体现了多学科的综合这一特性,归纳为一个较完整的空间信息技术。本书除对传统技术作了总结和提炼,还提出了新的研究方向,例如,激光技术(地面或机载)的发展及应用、多传感器集成技术、三维空间数据模型等均体现了最主要领域的新的发展方向。

从科学技术发展的趋势来看,三维空间信息技术是一门新的学科,系统地总结和提出主要技术才刚刚开始。其中,激光技术、多传感器集成技术、数据建模技术将是今后研究的主要领域。希望通过本书的出版来推动三维信息技术的发展和在各行各业中的应用。

**李德仁**

2003年4月于武昌珞珈山

# 前 言

地球空间信息科学是对地球空间信息进行采集、量测、分析、存储、管理、显示及传播的一门科学。它以卫星定位及其他常规数据获取技术、遥感技术及地理信息系统技术为主要内容,并以计算机技术及通信技术为主要支撑的一门综合性科学。

三维空间信息技术是地球空间信息学的重要组成部分,是当前地球空间信息学的热点研究领域,也是数字地球和数字城市建设的重要技术基础。三维空间信息技术涉及三维空间信息的获取、处理、管理以及应用的各个方面,国内外许多学者长期进行研究,取得了一系列理论和应用成果,但是在三维空间数据获取、三维空间数据模型方面的研究一直进展不大,前者与传感器、电子、激光、航天等领域技术发展密切相关,后者与数据结构、图形学、拓扑学等联系很紧,而三维空间数据可视化问题是近几年随着计算机技术、虚拟现实技术和数字城市应用需求发展起来的,这三个方面构成三维空间信息技术的核心和发展前沿。作者近十年来长期从事上述三个方面的理论和应用研究。本书结合作者长期研究工作的积累,进行了系统的归纳和整理,从三个侧面对三维空间信息技术进行了描述:1)三维空间数据获取;2)三维空间数据模型;3)三维数据可视化。

## (1) 三维空间数据获取

第一章至第三章主要讨论三维空间数据的获取,首先简要介绍了三维空间数据的主要特征,包括时间特征、空间特征、完整性等。另一方面,我们也总结了三维空间数据获取的主要特点与趋势,包括集成化、实时化、动态化、数字化与智能化。

就具体的数据获取方法,我们将其归纳为两大类:点方式数据获取技术、面状方式数据获取技术。在介绍几种获取三维空间数据的主要技术基础上,着重介绍激光测量技术,包括激光单点测量技术和激光扫描测量技术及其应用,以及多传感器集成的空间数据获取技术和应用系统。

## (2) 三维空间数据模型

第四章至第七章主要讨论三维空间数据模型。三维空间数据模型是三维地理信息系统、三维空间信息技术中的数据处理与管理部分的核心。在这部分中,我们首先综述了三维空间实体/对象以及三维GIS。三维空间数据模型从以下几个方面给予了总结:概念模型;基于栅格的数据模型;基于矢量的三维空间模型;混合结构的三维模型。我们还提出了面向对象的三维空间数据模型(OO3D模型)。该模型的设计较之早期提出的TEN及SSM模型在数据量及速度方面更为优化。三维数据模型为数字城市研究与发展提供了基础。



### (3) 三维空间数据可视化

第八章至第十一章主要介绍三维空间数据可视化。存于计算机内的三维空间数据与人机界面是通过三维可视化技术加以实现的。三维可视化技术可分为三维模型之可视化、LOD 模型及动态多分辨率模型。在此基础上介绍了我们基于三维数据模型、三维可视化技术而研发出的三维 GIS 原型系统 SpaceInfo。三维可视化技术可广泛地应用于地质、矿山、海洋、水利、气象、军事以及数字城市等领域。

从科学技术发展的趋势来看,三维空间信息科学技术是一门新的学科,从学科本身的生命周期来讲,系统地总结和提出主要技术才刚刚开始;从整体而言,三维信息获取部分发展的相对比较完善,有些技术已发展了较长的一段时间。其中,激光技术、多波段传感器的集成、多分辨率及高光谱技术将是今后研究的主要领域。

三维空间数据模型是这几年才有缓慢发展得领域。其主要原因有几个方面,其一是三维空间关系数据模型发展得还不十分完善;其二是大量的三维空间数据处理在现有的硬件设备条件下,还不能令人十分满意;此外,与 CAD 计算的集成、三维拓扑空间数据模型的发展将是需要进一步研究的课题。相对而言,三维空间数据可视化是一个发展较为迅速的领域,该领域的发展有赖于三维动画、游戏软件的发展,以及与虚拟现实技术的集成。该部分技术的发展为数字城市、数字地球的发展提供了一个十分重要的基础。

本研究得到了国家自然科学基金项目(编号:69833010)和国家 863 计划项目(编号:2001AA131020)的资助。感谢李德仁院士在百忙中对本书进行全面审阅,并提出宝贵修改意见,感谢张正禄教授、孙家柄教授、杜道生教授对本书各章节的审阅。

本书的研究虽然取得了一些进展,但对于空间信息技术这一领域无疑是初步的。由于水平所限,书中可能有许多疏漏和不足之处,敬请批评和指正。

著 者

2003 年 3 月

---

# 目 录

---

<b>第一部分 三维空间数据获取</b> .....	1
<b>第一章 三维空间数据及其获取方法分类</b> .....	2
1.1 三维空间数据及其信息.....	2
1.2 三维空间数据特性.....	3
1.2.1 时间特性.....	4
1.2.2 空间特性.....	4
1.2.3 尺度特性.....	5
1.3 三维空间信息获取技术.....	5
1.3.1 点方式数据获取技术 .....	6
1.3.2 面状方式数据获取技术 .....	12
1.3.3 图/像扫描数字化技术 .....	14
1.4 现代三维空间数据获取的主要特征.....	19
<b>第二章 激光测量技术</b> .....	21
2.1 激光技术起源.....	21
2.2 激光单点测量技术.....	23
2.2.1 全站仪简介 .....	23
2.2.2 全站仪作业模式及流程 .....	25
2.2.3 全站仪作业流程 .....	26
2.2.4 无反射棱镜全站仪 .....	28
2.2.5 测量机器人简介 .....	29
2.2.6 卫星定位和全站仪集成技术.....	30
2.3 激光扫描测量技术.....	31
2.3.1 激光扫描技术的发展 .....	31
2.3.2 激光扫描技术的原理及其应用 .....	35
2.3.3 CYRAX2500 激光扫描系统 .....	42

2.3.4	LD 激光自动测量系统 .....	45
2.3.5	激光扫描数据中建筑物特征提取研究介绍 .....	49
<b>第三章</b>	<b>多传感器集成空间信息获取技术 .....</b>	<b>56</b>
3.1	多传感器集成空间信息获取的理论、形式与发展 .....	56
3.1.1	多传感器集成的理论 .....	56
3.1.2	多传感器集成空间数据采集系统的分类 .....	60
3.1.3	多传感器集成技术的发展趋势 .....	64
3.2	地面车载测量系统 .....	65
3.2.1	地面车载测量系统的产生与概念 .....	65
3.2.2	车载测量系统的集成及其关键技术 .....	66
3.2.3	地面车载移动测量系统的功能及应用 .....	76
3.2.4	地面车载移动测量系统产品 .....	81
3.3	机载激光扫描集系统 .....	83
3.3.1	机载激光扫描集系统的集成及关键技术 .....	83
3.3.2	机载激光扫描系统精度分析 .....	86
3.3.3	系统产品介绍 .....	89
3.3.4	机载激光扫描系统展望 .....	91
3.4	星载测图系统 .....	92
<b>参考文献</b>	.....	<b>94</b>
<b>第二部分</b>	<b>三维空间数据模型与三维 GIS .....</b>	<b>96</b>
<b>第四章</b>	<b>三维空间实体与三维 GIS .....</b>	<b>98</b>
4.1	空间实体分类及其表示 .....	98
4.1.1	三维空间实体分类 .....	98
4.1.2	三维空间实体定义 .....	100
4.1.3	空间目标的三维表示 .....	101
4.2	三维 GIS 软件与应用 .....	102
4.2.1	三维 GIS 的主要研究内容 .....	102
4.2.2	三维 GIS 软件的综述 .....	103
4.2.3	三维 GIS 应用 .....	105
4.3	三维 GIS 对空间数据模型的要求 .....	106
4.3.1	GIS 中的数据模型特性 .....	106

---

4.3.2	三维 GIS 对三维数据模型的基本要求	107
<b>第五章</b>	<b>三维空间数据模型</b>	<b>109</b>
5.1	三维空间数据模型概述	109
5.2	三维空间数据概念模型	112
5.3	基于体的三维空间数据模型	113
5.3.1	基本的二维及三维模型	113
5.3.2	八叉树模型	115
5.3.3	八叉树模型的编码方法	116
5.3.4	八叉树模型的生成	119
5.4	基于表面的三维空间数据模型	123
5.4.1	基本的三维矢量模型	123
5.4.2	四面体格网	127
5.4.3	TEN 模型与数据结构	129
5.4.4	TEN 模型的生成	131
5.5	混合结构的三维空间数据模型	143
5.5.1	八叉树与 TEN 的混合模型	143
5.5.2	八叉树与 TIN 的混合模型	146
5.6	三维空间拓扑关系	148
5.6.1	空间实体的关系	148
5.6.2	三维拓扑数据模型	149
5.6.3	三维 FDS 模型	149
5.6.4	简化的空间模型(SSM)	150
5.7	三维空间数据模型讨论	151
<b>第六章</b>	<b>面向对象的三维空间数据模型</b>	<b>153</b>
6.1	面向对象模型的基本概念	153
6.2	OO3D 模型的概念模型	154
6.3	OO3D 模型的逻辑模型	157
6.4	OO3D 模型的形式化描述	160
6.5	基于 OO3D 模型的三维目标重建	161
6.5.1	面模型的三维重建	161
6.5.2	体模型的三维重建	163
6.6	OO3D 模型与其他模型的比较	165

<b>第七章 三维空间数据模型集成</b> .....	168
7.1 空间数据模型集成的概念 .....	168
7.2 几种基本的模型集成方法 .....	169
7.2.1 边界表示与 CSG 模型 .....	169
7.2.2 TIN 与 CSG 的集成模型 .....	174
7.2.3 矢量栅格集成的三维空间数据模型 .....	176
7.3 数字城市三维模型 .....	179
7.4 地形模型与地物模型的无缝集成 .....	183
7.4.1 地形模型与地物模型 .....	183
7.4.2 地形模型和地物模型的集成 .....	184
7.4.3 混合模型构造的主要步骤 .....	185
7.4.4 混合模型的数据存储结构 .....	186
7.4.5 三角网的存储结构 .....	187
7.5 数字城市模型的数据管理 .....	188
7.5.1 建筑物模型的数据管理 .....	188
7.5.2 道路模型的数据管理 .....	189
<b>参考文献</b> .....	191
<b>第三部分 三维空间信息可视化</b> .....	194
<b>第八章 三维模型的可视化</b> .....	196
8.1 三维图形生成的原理 .....	196
8.1.1 三维图形生成流程 .....	196
8.1.2 坐标变换 .....	197
8.1.3 投影变换原理 .....	198
8.1.4 投影空间和投影变换 .....	201
8.2 光照模型原理与算法 .....	205
8.2.1 明暗效应处理 .....	205
8.2.2 光照模型 .....	207
8.2.3 光线跟踪 .....	209
8.3 纹理模型与纹理映射 .....	216
8.4 三维可视化开发工具和几个典型的软件 .....	218
8.4.1 OpenGL .....	218
8.4.2 DirectX .....	220
8.4.3 Vega .....	221

---

<b>第九章 LOD 模型的动态可视化</b> .....	223
9.1 LOD 模型的概念、意义 .....	223
9.1.1 概念 .....	223
9.1.2 LOD 模型分类 .....	224
9.2 LOD 模型的研究进展 .....	225
9.2.1 LOD 模型的建立 .....	225
9.2.2 LOD 模型的构造算法 .....	226
9.3 基于三角网结构的 LOD 模型算法 .....	229
9.3.1 进度格网模型的构造 .....	231
9.3.2 进度格网模型算法的流程示意图 .....	231
9.4 基于格网结构的 LOD 模型算法 .....	233
9.4.1 基于三角形二分树结构 LOD 模型的算法 .....	233
9.4.2 基于四叉树结构 LOD 模型的算法 .....	236
<b>第十章 动态多分辨率模型的构造与可视化</b> .....	238
10.1 多分辨率地形模型的构造与实现 .....	238
10.1.1 基于视点的混合数据结构 LOD 模型的算法 .....	240
10.1.2 LOD 模型的误差分析和计算 .....	246
10.1.3 LOD 模型构造中缝隙的修正处理 .....	249
10.1.4 实验结果 .....	250
10.2 多分辨率影像模型的构造与实现 .....	252
10.2.1 多分辨率纹理模型的建立 .....	254
10.2.2 多分辨率纹理模型的生成算法 .....	255
10.2.3 纹理模型与几何模型间的映射 .....	256
10.2.4 实验分析 .....	259
10.3 三维模型快速动态可视化算法的设计与实现 .....	261
10.3.1 空间索引的建立与应用 .....	261
10.3.2 基于空间索引结构的三维模型剪切 .....	263
10.3.3 实验结果 .....	267
<b>第十一章 三维模型构造与可视化原型系统</b> .....	269
11.1 系统应用背景 .....	269
11.2 系统功能与开发环境 .....	270

---

11.3 系统设计与实现	272
11.3.1 系统的体系结构	272
11.3.2 系统的功能介绍	273
11.4 算法设计	276
11.4.1 交互操作	276
11.4.2 三维数据引擎	279
11.5 应用实例	281
11.5.1 大范围内数字城市模型的建立	281
11.5.2 地下管线的三维可视化	284
11.5.3 虚拟规划	285
参考文献	286

## 第一部分 三维空间数据获取

人类在适应和改造大自然的过程中,无时无刻不在对大自然及其环境进行定位与描述。远古时候,人类根据太阳、月亮的活动规律,利用描述性的语言对其活动空间进行定性表达;指南针、罗盘定位技术及早期的天文观测技术出现后,空间数据的表达出现了一次突破,开始有了一维方向,但仍需要补充属性数据;随着测绘技术的发展,人类发明了地图,地图的出现是空间数据表达方式的又一次突破,它用二维方式表达目标,并逐步发展到辅助以等高线、注记、色彩等描述信息来表达空间目标;现代测绘技术的发展,又使空间信息的表达出现三维、实时、动态、数字化等新特征。翻开人类历史,作为空间信息获取基本技术的测量学,早在公元前就已有记载。公元前 14 世纪,在幼发拉底河与尼罗河流域,古人们就进行过土地的测量。中国汉代司马迁的《史记》中,记载夏禹治水时有“左准绳,右规矩”的测量记录,这里的“准”、“绳”、“规”和“矩”系测量手段(工具)。这句话突出表明,在我国古代,人们已开始利用原始的测量工具、手段、方法进行空间信息的采集。在古埃及,发达的土地测量孕育了几何学。而古希腊数学家欧几里德(Euclid,公元前 385—公元前 323 年)的几何学在铸造人类的逻辑思维体系方面,起了特殊而突出的作用。近代意义上的测量学,是近代科学的重要组成部分,端源于伽利略(Galileo,公元 1564—1642 年)和牛顿(Isaac Newton,公元 1642—1727 年)时代。地学信息和地图都是测量的产物。经典的测量学被定义为“研究地球形状大小及确定空间点位的科学”,而现代测量学则定义为“研究空间数据采集、传输、处理、转换、存储、分析、制图、显示和应用的科学和技术”。无论是经典测量学,还是高新科技武装的现代测量学都是研究将地形(含地物和地貌)测绘成图。现实客观世界的地表是非常复杂的,但是,任何复杂的地表空间物体都可以抽象,即从体到面,从面到线,从线到点,所以,复杂的地表形体的最终表现不过就像测量学定义所言,只是“确定空间点位”(即定位)的科学了。所谓定位,实质就是确定位置;所谓科学,就是确定某点相对于某一坐标系(框架)的三维坐标,从动态的角度去看,还要考虑点的三维运动速度。

近 20 来,由于微电子技术、光电技术、航天技术、遥感技术和计算机技术等科技的迅速发展,大大地促进了空间信息获取技术的发展,并使之与其他学科交叉融合,形成许多全新的数据获取技术。本部分在介绍几种获取三维空间数据的主要技术基础上,着重介绍激光测量技术,包括激光单点测量技术和激光扫描(又称激光雷达, Laser Scanning, 以下统称激光扫描)测量技术及其应用,以及多传感器集成的空间信息获取技术应用系统和产品。



# 第一章 三维空间数据及其获取方法分类

## 1.1 三维空间数据及其信息

“数据”指的是源数据或原始数据,是未加工的原始资料,是人们直接或间接对客观事物的观测结果。数字、文字、符号、图形和影像等都是数据。“三维空间数据”是人类对客观世界(这里主要指地球表面物体)的几何描述,通过一定测量手段、技术、方法获得。

那什么是信息呢?信息(Information)是一个抽象概念,它用数字、文字、符号、图像、语言等介质来表示事件、事物、现象等的内 容、数量或特征。可以认为,信息是事物的特征及诸事物之间的相互联系的一种抽象反映,这种反映能被人们认识和理解,并可作为知识用来识别事物或进行推理,从而达到认识世界、改造世界的目的。控制论创始人、信息革命的先驱维纳认为:“信息是人们在适应外部世界并且反作用于外部世界的过程中,人与外部世界进行交换的内容。”信息论奠基人香农则认为:“信息可定义为在通信的任何可逆重编码(或翻译)中那些保持不变的东西。”原苏联情报学家哈依洛夫认为:“信息是存储、传递和转换的对象和知识。”日本学者吉田贞夫认为:“信息是人与人之间传播着的一切符号系列化知识。”

信息是物质的普遍属性之一,无处不在,无处不有,是物质存在的方式和运动的规律与特点。管理学家认为信息是解决问题的答案。如果一个数据、一条消息解决了决策者的问题,它就是信息。如果还要对数据和消息进行加工处理才能解答决策者的问题,它就仍然只是数据或消息,而不是信息。一般科学工作者对信息的理解是:“信息是数据和数据再加工的产品。”它是人们或系统提供关于现实世界新的事实和知识,作为生产、管理、经营、分析和决策的依据。信息具有客观性、适用性、可传输性和共享性等特征。

信息和数据是内容和形式的关系,两者相互联系、相互依存,又互相区别。信息来自数据,是通过对数据进行处理之后获得的知识。数据是客观对象的表示,信息则是数据内涵的意义,是数据的内容和解释。信息以数据的某种形式来表现,而数据则是表示信息的某种手段。例如,从测量所记录的数据中可以抽取出目标和物体的形状、大小和位置等信息;从遥感卫星图像数据中可以提取出各种几何(图形)和物理(专题属性)数据;从实地调查的大量数据中则可以提取出各种专题属性信息。

空间信息是指与所研究对象的空间三维分布有关的信息,它表示地表物体及其环境固有的地理位置、形体特征、相互关系。从实体到空间数据、再到空间信息的发展,反映了人类认识