

# 论我国“1:1万数字高程模型的更新与建库”\*

朱庆 李志林 龚健雅 眭海刚

(武汉测绘科技大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129号,430079)

**摘要** 结合生产实验对 DEM的数据源、数据精度与质量控制、数据采集的技术与策略、空间分辨率、地形建模、产品分类和数据组织等方面进行全面的讨论,以期为推进有关工作的进一步完善和在全国实施“1:1万数字高程模型的更新与建库”方案提供理论与技术支持。

**关键词** 数字高程模型;摄影测量;不规则三角形网络;4D产品

**分类号** P231.5 P201

国家测绘局提出,我国在今后一段时间内的测绘技术发展目标是要为“4D”产品的规模化生产服务。数字高程模型 DEM作为“4D”产品之一,首次被纳入国家测绘生产计划以组织规模生产。这里的“4D”产品分别指数字线划图 DLGs(digital line graphs)、数字高程模型 DEMs(digital elevation models)、数字正射影像 DOQs(digital orthophoto quadrangles)和数字栅格地图 DRGs(digital raster graphics)要进行这些数字产品的规模化生产,并保证数字产品不仅在生产系统内部而且在其他用户系统之间的共享和自由流通,首先必须制定相关的作业规范和标准以对生产流程和产品进行必要的指导、监督和检查。数字高程模型也是国家重要的基础地理信息,广泛用于各种表面分析和正射影像生产。与基本比例尺地形图相对应,DEM产品也按1:1万、1:5万等比例尺系列组织生产。过去建立 DEM只能满足特定的行业和专业部门的应用需求,未成为一种像地图那样的标准产品。现在,DEM必须成为一种标准产品并满足全国各种专业应用的需要。由于数字产品与常规的线划地图相比有许多新的特点,相应的生产方式将有较大的改变,对于 DEM生产的一些关键问题如空间分辨率和质量控制等必须制定专门的规范。

## 1 方案设计

### 1.1 数据源

DEM的数据源包括平面位置和高程数据两种信息,可直接在野外通过全站仪或者 GPS进行

测量,也可间接地从航空影像或者遥感图像以及现有地形图上得到。具体采用何种数据源一方面取决于这些数据源的可获得性,另一方面取决于 DEM的比例尺、精度要求和数据量大小。

对于1:1万比例尺的 DEM生产,由于涉及范围广,数据量十分庞大,因此,采用 GPS和全站仪野外直接测量的办法都不实用,只有在少数特别困难的地区采用<sup>[5,10]</sup>。而基于遥感的方法因为高程精度有限也不适合作为数据源。

现有的各种比例尺的地形图为 DEM的生产提供了可靠的、基本的数据源。理论上讲,从1:500至1:1万比例尺的地形图均可用于生产1:1万比例尺的 DEM。从现有地形图上采集 DEM涉及两个问题:地图符号的数字化及这些数字化数据往往不满足现势性要求。

显然,航空摄影测量是高精度大范围 DEM生产最有价值的数据库。利用该数据库,可以快速获取或更新大面积的 DEM数据,从而满足对数据现势性的要求。为了生产1:1万 DEM,有关航空摄影的各项要求应与常规测绘1:1万比例尺地形图的要求一致。

### 1.2 数据精度

作为最重要的质量控制指标,DEM产品的精度(用从 DEM线性内插的检查点高程与相应高程“真值”之差的均方根误差 RMS表示)十分重要。决定 DEM精度的一个重要因素就是源数据的比例尺和空间分辨率。比如,如果从现有地形图上采集数据,则只有大于或等于1:1万比例尺的基本图才能采用。要讨论 DEM的精度首先应考虑其与不同数据库及分辨率之间的关系。由于

收稿日期:1998-06-02 朱庆,男,32岁,教授,现从事数字地面模型和 GIS的理论与应用研究。

\* 国家自然科学基金资助项目,编号 49631050

等高距常用来描述现有地形图的空间分辨率,因此本文主要探讨 DEM 格网间距与相应比例尺地形图的等高距之间的关系

因地形起伏的复杂程度不同,若同时采集数字等高线数据和特征点线如地性线和断裂线等,则进一步产生的 DEM 精度可以达到 1/6~ 1/14 等高距;若不采集特征数据,仅由等高线产生的 DEM 精度将降低 40%~ 60%,而只有 1/3~ 1/5 等高距。同时,考虑特征后最大数据残差的幅度和频度都将大大减小,对于地形破碎地区,这种效果更加显著。

对于正方形 DEM,考虑特征数据与否,其精度差别满足如下的关系式:

$$\Delta e = e_g - e_c = A + B + d^2 \quad (1)$$

其中,  $d$  为格网间距;  $A$ 、 $B$  为常数。如果包括重要的地形特征数据, DEM 精度与格网间距大小呈线性关系;反之,这种关系变得十分复杂,并且 DEM 精度将随格网间距的增大迅速降低。

为了保证 1:1 万比例尺 DEM 具有与传统相应比例尺的基本地形图一致的精度指标,根据我国已有的测量规范,1:1 万 DEM 的绝对精度应满足以下规定:如果以现有基本比例尺地形图为数据源,则 DEM 产品的 RMS 不得低于半个等高距;如果以航空影像为数据源,则 DEM 产品的 RMS 为  $\pm 3.0$  m。

为了评价 DEM 产品的精度,可以参照美国国家测绘局的有关规定,以现有的标准地形图为基准,计算最少 28 个检查点(边沿部分 8 个点,中间 20 个点)的均方根误差<sup>[1]</sup>。检查点的高程通过 DEM 线性内插和从地形图上人工量算(该值可以被认为是“真值”)得到。

### 1.3 数据采集

由于 1:1 万 DEM 的主要数据来源是航空影像和现有线划地形图<sup>[3]</sup>,所以本文只讨论从这两种数据源采集 DEM 数据的方案。

#### 1) 现有地形图数字化方案

从不同比例尺的地形图上采集 DEM 数据,最基本的问题都是对地形图要素如等高线进行数字化处理,如手扶跟踪数字化或者半自动扫描数字化,然后再用某种数据建模方法内插 DEM。从现有地形图采集数据,等高线和重要的地形特征点、线一定要一并数字化<sup>[7]</sup>。

#### 2) 航空摄影测量方案

以摄影测量的方法采集数据关键在于如何恰当地确定采样数据的密度和分布<sup>[3]</sup>。结合我国实际生产现状,推荐以下数据采集方案。

(1) 由于用解析的方法采集较密集的规则格网点的工作量太大,不利于大规模生产,因此,宜按常规的测图方法采集数字化等高线数据和地形特征数据。数据采集的结果不仅用于后续的数据建模以生产标准的 DEM 产品,同时也可以继续用于绘制常规的地形图以满足其他需要<sup>[5]</sup>。特别地,对于平坦地区,采集粗分辨率的格网点数据加特征线数据也不失为有效可靠的方式。根据前面的精度分析,如果加测特征数据,则可以采集较粗分辨率的格网数据,从而大大减少采样工作量。

(2) 用全数字相关技术直接生产标准的 DEM,常常需要进行大量复杂的编辑工作以剔除错误的结果并适应地形特征才能满足一定的精度要求。因此,建议用数字相关方法先采集大量的规则格网点作为初始值并通过粗差自动检测与剔除处理,再用解析的方法加测部分重要的地形特征点、线数据,进而混合内插生产标准 DEM<sup>[6]</sup>。

### 1.4 空间分辨率

DEM 的空间分辨率指 DEM 格网点之间的最小空间距离,一般也称格网间距。空间分辨率的大小直接决定了 DEM 的空间完整性或者说 DEM 的地形描述精度。在坡度较大的地区, DEM 精度将随分辨率的增大迅速降低<sup>[7]</sup>。空间分辨率越高,DEM 表达的地形表面越细腻逼真,相应的数据冗余量和工作量也就越大;反之,地形则越简化。理论上讲,数字高程模型的空间完整性必须在最小的地形单元以下。但顾及不同的精度需求,不同的地貌类型(平地、丘陵和山地)有限的计算机容量和尽量小的数据冗余要求等,必须恰当地定义数字高程模型的基本空间分辨率。当然,不同的区域宜根据实际情况考虑采用不同的数据源、不同的作业方式甚至不同的空间分辨率。

为了将原始采样数据所固有的信息完整地体现在最终的 DEM 产品当中,设计格网间隔的大小务必考虑其与采样数据分布之间存在的必然联系。对于不同比例尺的地形图和不同地貌类型应采用什么样的等高距,原则上讲,1:1 万 DEM 产品的空间完整性应与 1:1 万地形图的相当。因此,设计 DEM 的空间分辨率便应研究其与等高线地形图的等高距之间的关系。文献 [3] [4] 对此进行了专门研究,并得出如下关系:

$$d = K \cdot CI \cdot \cot T \quad (2)$$

其中  $K$  为常数(考虑特征时在 1.0 到 2.0 之间,没有特征时在 1.0 到 1.5 之间);  $d$  为 DEM 的空间分辨率;  $CI$  为等高距;  $T$  为地面的平均坡度。

DEM 的应用常常不再考虑地形特征,根据

式 (2) 可以推算, 1: 1 万比例尺 DEM 的空间分辨率如果在 7 m 到 42 m 之间, 则 DEM 的精度与常规 1: 1 万等高线地形图的精度相当。大量的研究表明, 自然地形起伏满足随机分形规律, 也就是说高山区和平坦地区只占整个地球陆地面积的很少部分, 而绝大部分为丘陵或浅丘陵地区, 即地面坡度一般在  $2^{\circ}$ ~ $25^{\circ}$  之间, 由此可得到类似文献 [11] 关于 DEM 的分辨率与等高距和地面平均坡度之间的关系, 如表 1 所示

表 1 等高距、地面坡度和等价 DTM 的分辨率

Tab. 1 Contour Intervals, Terrain Slope and Equivalent DTM Resolutions

等高距 /m	1	2	10
坡度 / $^{\circ}$	2	15	45
分辨率 /m	28~ 42	7~ 11	10~ 15

考虑一般地形情况和各种误差影响, 笔者认为主要 DEM 产品的基本格网间距采用 10 m 比较合适。这种分辨率的 DEM 产品在精度上将可以满足绝大部分常规 1: 1 万比例尺地形图用户的应用要求; 同时, 一个标准图幅 (如  $6\ 410\ \text{m} \times 4\ 620\ \text{m}$ ) 的 DEM, 数据量约 1 M 字节, 进一步应用也比较简单。当然, 如果同时使用地形特征数据库, 则建议采用 20 m 的基本空间分辨率, 二次应用则相对要复杂一些, 并应有配套的专门处理软件, 而其他空间分辨率则可以作为辅助产品, 以满足特殊的应用需要。

### 1.5 地形建模

DEM 是表示地形表面起伏的一个数字阵列, 根据 DEM 并按特定的方法用某种数学函数进行的地形表示一般也称为地面重建或者地形建模。目前两种主要的建模方法是基于三角形网络方法和基于正方形格网方法<sup>[3,9]</sup>。基于三角形网络方法由于使用灵活, 特别适合于考虑各种地形特征, 被广泛用于高精度的地形建模; 而基于正方形格网的方法则因结构简单, 数据检索与处理方便易行而被广泛用于大规模的地形建模。1: 1 万 DEM 以省为单位进行生产将覆盖全国范围, 并面向多专业应用, 因此宜采用后一种建模方法, 即为规则间隔的正方形格网点或经纬网点阵列, 每一个格网点具有惟一表示相应位置处高程的值。这样, 一般只要简单地用 DEM 网格单元相邻的 4 个顶点形成的双线性面来描述其间的地形表面即可。对于特殊应用, 可以使用特征数据加格网数据的混合模型。而从随机分布的原始采样数据到标准栅格阵列的转换通常称为随机栅格转换, 这种转换主要是数据内插, 对于内插方法的选择主要

有精度和效率两个指标。笔者建议采用基于顾及特征的不规则三角形 (TIN) 的方法来完成地形建模和随机栅格转换。

为了保证所有分幅的 DEM 数据镶嵌在一起能完整覆盖整个研究区域, 每一幅 DEM 数据的采集范围不得小于标准内图廓线的最大矩形范围。为了避免相邻 DEM 之间的接边问题, 应充分利用相关的所有采样数据建立 TIN 以保证重叠部分的数据完全一致。

特别地, 在从 TIN 到随机栅格转换之前, 为了保证 DEM 产品的质量, 还应探测并剔除采样数据中可能存在的粗差, 如现有地形图数字化过程中高程赋值错误。同时, 还应充分利用等高线图本身所隐含的各种地形特征信息, 如山顶、山底、鞍部等。

### 1.6 产品分类

根据所采用数据源的不同, DEM 产品分为 A、B 两大类。A 类产品指利用航空影像经解析摄影测量或全数字摄影测量采集数据并进一步由 TIN 建模技术内插生成的标准正方形格网数据。B 类产品指利用现有基本地形图经扫描数字化采集数据或直接用 DLG 并进一步由 TIN 建模技术内插生成的标准正方形格网数据。每一类产品又根据其空间分辨率的不同分为 6 个等级, 如 5 m、12.5 m、25 m 或  $0.25''$ 、 $0.5''$ 、 $1.25''$ 。所有类别的 DEM 产品均采用一致的数据结构。

### 1.7 数据组织

1: 1 万 DEM 按 GB/T 13989-9《国家基本比例尺地形图分幅和编号》规定的图幅范围为单位组织数据。格网点所对应的平面位置坐标类型包括高斯平面坐标 (南北 X、东西 Y) 和大地坐标 (经度、纬度) 两种, 都纳入国家 1980 年大地坐标系。格网点高程系 8 国家高程基准。DEM 文件建议按国家交换格式进行存储。

DEM 不同于正射影像数据, 其应用往往不仅是以一个图幅范围的数据为单位进行处理, 而经常需要在整个区域内对任意数据进行漫游。如果 DEM 产品仍然严格地按分幅范围进行数据组织, 因每一幅 DEM 的边界不规则, 而在数据漫游过程中将会产生 DEM 的镶嵌问题。所以, 建议标准 DEM 产品以规定的分幅范围的最大外接矩形为限, 相邻 DEM 之间可以有不同程度的数据重叠。

由于空间分辨率的局限, 纯粹是规则格网结构的 DEM 对地形特征总有不同程度的平滑作用, 特别是在地形比较破碎或者地形起伏较大的

地区,往往难以实现地形表面的逼真重建,因此,笔者建议将采集到的地形特征数据也与 DEM 同时另行建库,以便满足各种特殊需要。

## 2 实验结果

为了客观评价上述方案的可行性和 DEM 产品的整体精度,以均方根误差 RMS(从 DEM 产品内插的采样点与野外测量的检查点之间的统计)为主要指标组织进行了生产实验。实验区处在珠江三角洲,包括两个标准图幅范围(以下分别用图 28和图 29表示),实验数据的基本情况如表 2所示。检查点数据直接从野外测量获得,可忽略其中的误差。为了考察不同因素对 DEM 产品精度的影响,分别从以下 3方面进行了分析比较

1) 作业方案的影响 全数字自动摄影测量:采样分辨率为 10 m;交互式数字摄影测量:采样分辨率为 25 m;解析测图仪立体切准格网点;解析测图仪测绘等高线;地图扫描数字化

2) DEM 内插方法的影响 先构三角网再插格网可以考虑特征;直接内插格网不能考虑特征。

3) 同等高距对内插 DEM 的影响。图 28 用 1 m 等高距,图 29 用 5 m 等高距

实验结果见表 3 表 4,其中数据采集方式共分为 6 种:(1)全数字化自动采集格网点;(2)全数字化交互式采集格网点和特征线;(3)BC 立体切准采集格网点;(4)BC 采集 DLG;基于 TIN 的方法内插 DEM;(5)BC 采集 DLG;移动曲面法内插 DEM;(6)现有地图扫描矢量化;基于 TIN 的方法内插 DEM

表 2 实验数据描述

Tab. 2 Description of Test Data

数据源	比例尺	数据分布
航空影像	1: 25 000	等高线+ 特征
		格网点+ 特征
现有地形图	1: 10 000	等高线+ 特征
野外测量	1: 5 000	平地 120点,
		丘陵 80点,山地 40点

由于野外实测的检查点数量有限,为了更加客观地评价各种数据采集方案的优劣,同时也利用 BC 解析测图仪采集的大量 10 m 间隔的标准格网点作为检查点进行了统计分析,用于每一项统计分析的数据点数都在 5 万到 20 万个点以上。有关结果见表 4

从实验分析可以看出,同样是平地和丘陵地区,采用不同的生产作业方案,DEM 产品的精度相差很大。利用 BC 解析测图仪通过立体切准直接采集的 DEM 精度最好,但因其效率最低,不宜

表 3 实验结果 /m

Tab. 3 The Result /m

	采集方式	检查点数	中误差	最大偏差	剔除大于 3 倍中误差的点后的精度
图 28 平地	(1)	80	3.24	7.4	3.23
	(2)	80	1.39	3.2	1.34
	(3)	80	0.96	2.43	0.96
	(4)	80	0.86	3.34	0.76
	(5)	80	0.88	3.34	0.80
	(6)	80	0.87	3.34	0.80
图 28 丘陵	(1)	83	3.30	18.78	2.60
	(2)	83	1.84	9.14	1.24
	(3)	83	1.14	4.17	1.05
	(4)	83	1.16	3.17	1.16
	(5)	83	1.18	3.17	1.18
	(6)	83	1.12	2.55	1.12
图 29 平地	(1)	72	1.86	5.14	1.86
	(2)	72	1.24	4.26	1.16
	(3)	72	0.85	3.12	0.77
	(4)	72	1.52	4.18	1.52
	(5)	72	2.00	4.55	2.00
	(6)	72	1.53	4.17	1.53
图 29 山地	(1)	7	1.27	2.34	1.27
	(2)	7	1.46	2.84	1.46
	(3)	7	0.86	1.56	0.86
	(4)	7	2.55	5.36	2.55
	(5)	7	3.77	8.36	3.77
	(6)	7	2.94	6.67	2.94

表 4 RMS 比较 /m

Tab. 4 Comparison of the RMS Result /m

	不同采集方式的比较结果			
	(1)	(2)	(3)	(4)
图 28 全部	2.99	1.61	2.33	1.50
图 28 平地	3.49	1.21	1.33	1.31
图 28 丘陵	2.66	1.52	1.26	1.26
图 29 全部	7.03	3.80	3.36	3.36
图 29 平地	2.47	1.17	1.50	1.49
图 29 山地	5.94	2.79	2.58	2.52

推广使用。对于由 BC 按常规生产程序采集的数字等高线数据和重要的特征点线数据,采用基于 TIN 的方法(考虑特征)内插标准 DEM 比直接内插(如移动曲面法)的精度有明显改善,这与前述的理论分析是相符的。特别地,利用微机数字摄影测量系统先采集较粗分辨率的格网点和地形特征线信息,再利用基于 TIN 的方法进一步内插生成标准的正方形格网 DEM 也比常规测图方法生产

的结果要好,而且由于自动相关不需人工切准,使得采样工作更加简便,有利于提高生产效率。如果只是简单地用全数字化摄影测量系统自动采集DEM产品往往不能满足精度指标,主要原因是出现许多粗差,因此有必要进行相当的编辑工作,特别是要考虑地形特征。当然,由于局限于实验地区的地形情况(最大高差仅350m左右,地形起伏相对比较简单),这些结果还不能充分反映复杂的山区地形,有待于进一步实验分析。

致谢:李德仁、梁宜希、叶柄楷、周一、刘先林、郑卫萍、刘凤德等专家和广东省国土厅航测大队在工作中给予了大力支持,在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- 1 USGS. National Mapping Program Geospatial Data Standard—Standards for Digital Elevation Models (DEMs)
- 2 基础地理信息更新与建库暂行标准——“1:10 000数字高程模型 DEM生产技术规定(暂行本)”, 1998
- 3 Li Z. Sampling Strategy and Accuracy Assessment for Digital Terrain Modelling [Ph. D. Thesis]. UK: University of Glasgow, 1990
- 4 Li Z. A Comparative Study of the Accuracy of Digital Terrain Models (DTMs) Based on Various Data Models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1994, 49 (1): 2~ 11
- 5 Balce A E. Determination of Optimum Sampling Interval in Grid Digital Elevation Models (DEMs) Data Acquisition. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1987 (53): 323~ 330
- 6 龚健雅. 建立我国的基础地理信息框架. 中国测绘, 1997 (4)
- 7 Li Z. Variation of the Accuracy of Digital Terrain Models with Sampling Interval. Photogrammetric Record, 1992 (14): 113~ 128
- 8 朱庆, 陈楚江. 不规则三角网的快速建立及其动态更新. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23 (3): 204~ 207
- 9 朱庆. 分形理论及其在数字地形分析和逼真地面重建中的应用: [学位论文]. 北京: 北方交通大学, 1995
- 10 Ackermann F. Techniques and Strategies for DEM Generation, Digital Photogrammetry—An Addendum to the Manual of Photogrammetry. ASPRS, 1996
- 11 Li Z. Scale Issues in Geographical Information Science. In: Proceedings of International Workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS, Hong Kong, 1997

## Review on the Scheme for “The Updating and Database Building of 1: 10 000 Digital Elevation Models”

Zhu Qing Li Zhilin Gong Jianya Sui Haigang

(National Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,  
W T U S M, 129 Luoyu Road, Wuhan, China)

**Abstract** The state bureau of surveying & mapping of China has planned to speed up its development of spatial data infrastructure (SDI) in the coming few years. This SDI consists of four types of digital products, i. e., digital orthophoto, digital elevation models, digital line graphs and digital raster graphs. For the DEM, a scheme for the database building and updating of 1: 10 000 digital elevation models has been proposed and some experimental tests have also been accomplished. This paper describes the theoretical and/or technical background and reports some of the experimental results to support the scheme. Various aspects of the scheme are discussed such as accuracy, data sources, data sampling, spatial resolution, terrain modeling, data organization, etc.

**Key words** DEM; photogrammetry; TIN; four-D products