

深圳市 1 km 高分辨率厘米级高精度 大地水准面的确定

宁津生¹, 罗志才^{1,3}, 杨沾吉², 陈永奇³, 张天纪²

(1. 武汉大学 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 湖北 武汉 430079; 2. 深圳市规划与国土资源局测绘地籍处, 广东 深圳 518028; 3. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港)

Determination of Shenzhen Geoid with 1 km Resolution and Centimeter Accuracy

NING Jirsheng¹, LUO Zhircai^{1,3}, YANG Zhanji², CHEN Yongqi³, ZHANG Tianji²

(1. *The Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China*; 2. *Land Planning Department of Shenzhen, Shenzhen 518028, China*; 3. *Department of Land Surveying and Geomatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China*)

Abstract: The geoid of Shenzhen with one kilometer resolution, has been constructed with remove restore technique, using 65 GPS/leveling data with accuracy better than 2 cm, 5 213 discrete gravity data, digital terrain model with 100 m resolutions and global earth's gravity field model WDM94. The modeled geoid heights were compared with the observed ones derived from 29 GPS/leveling data that not applied to the construction of Shenzhen geoid. The test results show that the standard deviation of the differences is ± 1.4 cm.

Key words: geoid; gravity; GPS/leveling; earth's gravity field model; digital terrain model

摘 要: 利用 65 个精度优于 2 cm 的 GPS 水准数据、5 213 个实测重力点数据、100 m 分辨率的数字地形模型和 WDM94 地球重力场模型, 采用移去恢复技术计算了深圳市 1 km 分辨率的大地水准面模型。将该模型大地水准面高与由 29 个 GPS 水准得到的大地水准面高进行比较, 其差值的标准差为 ± 1.4 cm。

关键词: 大地水准面; 重力; GPS 水准; 地球重力场模型; 数字地形模型

1 引 言

高精度高分辨率局部或区域大地水准面不仅为测绘学、地球物理、地球动力学及海洋学等地球科学的研究和应用提供基础地球空间信息, 而且也是当今构建数字中国必不可少的基础信息之一。为了适应目前深圳市经济建设与科技高速发

展的需要, 深圳市规划与国土资源局于 2000 年立项建立深圳市 1 km 分辨率的厘米级大地水准面, 其覆盖范围为: 在深圳格网坐标下, 南北方向 8 km 至 60 km, 东西方向 79 km 至 179 km, 这将为构建数字深圳提供重要的基础地球空间信息, 并且也为深圳市工程建设中的地质勘探提供重力数据。为此, 深圳市规划与国土资源局委托武汉

大学测绘学院、国家测绘局第一大地测量队等 8 个单位于 2001 年完成了深圳特区高精度 GPS 水准测量、1 km 分辨率的陆地和海洋重力的数据采集任务。

本文首先简述了计算深圳市大地水准面所采用的数据资料, 其次讨论了深圳市大地水准面的计算方法和计算结果, 最后给出了利用独立的(未参加大地水准面的计算)高精度 GPS 水准数据对该大地水准面的检核结果。

2 数据资料及其处理

2.1 重力数据及其归算

采用的重力数据包括: (1) 利用 Lacoste & Romberg G 和 D 型重力仪实测的深圳特区陆地上 3 608 点的重力数据, 其分辨率为 1 km, 重复测点检核的符合精度均优于 0.1 mGal; (2) 利用 Lacoste & Romberg S 型海洋重力仪实测的 1 262 个点的海洋重力数据, 其分辨率也为 1 km, 精度约为 1.6 mGal; (3) 收集到的与深圳接壤的香港地区 298 个陆地重力数据和 45 个海洋重力数据, 其分辨率分别为 2 km 和 2 km 至 4km。图 1 为总共 5 213 个重力点的分布情况。

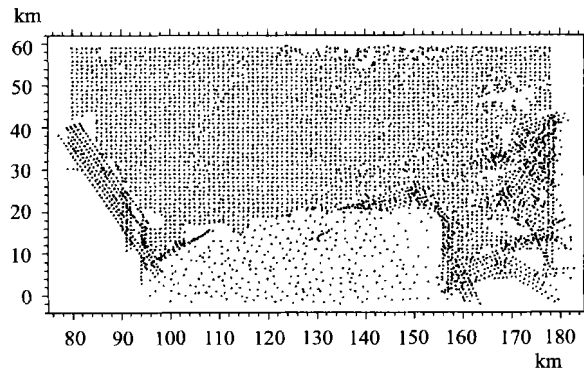


图 1 深圳及其周边地区重力点的分布

Fig. 1 Distribution of discrete gravity points over Shenzhen and its surrounding area

为满足 Stokes 理论, 实测地面重力观测值应归算到大地水准面上, 这里实际上采用的是我国 1956 黄海高程基准面上的空间重力异常, 即

$$\Delta g_{FA} = g - \gamma + FA \quad (1)$$

其中, g 为实测绝对重力值; γ 为正常重力; FA 为空间改正, 并且

$$\gamma = 978\,032.68(1 + 0.005\,302\,4\sin^2 B - 0.000\,005\,8\sin^2 2B) \quad (2)$$

$$FA = 0.308\,6(1 + 0.000\,7\cos 2B)h - 0.72 \cdot 10^{-7}h^2 \quad (3)$$

这里, B 是以 WGS84 为参考椭球的大地纬度; h 为正常高。

海洋上的空间重力异常还应在式(1)的计算结果中加上下面的改正数, 即

$$\Delta C = -0.086\,1h \quad (4)$$

2.2 GPS 水准数据

在深圳特区原有一、二、三等水准点的基础上, 建立了由 73 个点组成的 GPS 水准控制网, 其中包括新埋 GPS 水准点 14 个, 其平均间距约 10 km, 并按二等水准测量的精度与原有一、二等水准点进行了联测。其中由于对原框架网中的 5 个点(横岗山、大南山、笔架山、英管山和求水坳)实施精密水准测量的难度极大, 故仅用于将本 GPS 网纳入原深圳 GPS 城市控制网。实测(GPS 水准)大地水准面高为

$$N = H - h \quad (5)$$

其中, 大地高 H 相对于 WGS84 椭球, 参考系为 ITRF93-1 996.365; 正常高 h 以我国 1956 年黄海高程系统为基准。实测数据的处理结果表明, 由此得到的大地水准面高的精度优于 2 cm。图 2 为这些 GPS 水准点的分布情况。

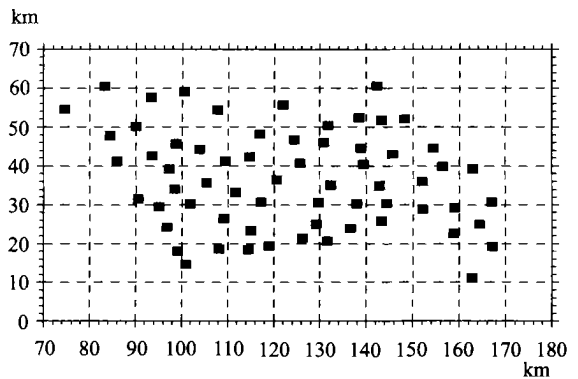


图 2 深圳地区 65 个高精度 GPS 水准点的分布

Fig. 2 Distribution of 65 high quality GPS/leveling stations in Shenzhen

2.3 数字地形模型(DTM)

高分辨率的数字地形模型包含了地球重力场的高频信号, 是计算高分辨率高精度大地水准面的重要信息, 为此, 利用深圳特区 1:1 万数字地形图、广东省国土厅信息中心提供的 100 m 分辨率的 DTM 及香港地区 100 m 分辨率的 DTM, 建立了深圳及其周边地区分辨率为 100 m 的 DTM, 该

DTM 的覆盖范围为: 深圳格网坐标南北方向 - 1 km 至 69 km, 东西方向 70 km 至 190 km。其高程最大值为 969.1 m, 最小值为 - 137.5 m, 平均高程为 57.2 m。

2.4 全球高阶重力场模型

当采用移去-恢复技术计算局部或区域大地水准面时, 需要选择最适合本地区的高阶全球重力场模型作为参考重力场。EGM96^[1] 被认为是目前世界上同阶次模型(360 阶)中最好的, WDM94^[2] 是原武汉测绘科技大学自行研制的 360 阶全球重力场模型, 而 GPM98CR^[3] 是 720 阶全球重力场模型, 因此, 在深圳大地水准面的计算中, 利用上述实测高精度重力和 GPS 水准数据对这 3 个重力场模型进行了比较和评价。比较结果表明, 在表示深圳局部重力场方面 WDM94 略优于 EGM96 和 GPM98CR, 因而选择 WDM94 作为计算深圳高精度大地水准面的参考重力场模型^[4]。

3 大地水准面的计算

3.1 计算方法

在综合利用高阶重力场模型、局部重力数据和高分辨率 DTM 确定局部或区域大地水准面的实际计算中, 移去-恢复技术被公认是目前的标准算法, 得到各国学者的广泛应用, 因此, 这也是本项目所采用的计算方法, 即^[5-9, 12]

$$N(\varphi_p, \lambda_p) = N_{GM}(\varphi_p, \lambda_p) + N_{RES}(\varphi_p, \lambda_p) + N_T(\varphi_p, \lambda_p) \quad (6)$$

其中, N_{GM} 是由 WDM94 重力场模型计算至 360 阶的大地水准面, 即^[10]

$$N_{GM} = \frac{GM}{r \cdot \gamma} \sum_{n=2}^{n_{max}} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \quad (7)$$

这里, GM 为地心引力常数; γ 为计算点的正常重力; a 是参考椭球的长半径; φ , λ 和 r 分别是计算点的地心纬度、经度和向径; \bar{C}_{nm} 和 \bar{S}_{nm} 为完全规格化系数; $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ 是完全规格化综合 Legendre 函数; $n_{max} = 360$ 。

N_T 为 DTM 的间接影响, 按下式计算^[11]

$$N_T(\varphi_p, \lambda_p) = -\frac{\pi G \rho}{\gamma} h_p^2 - \frac{G \rho}{6 \gamma} \iint_{\sigma} \frac{h^3 - h_p^3}{r^3} dx dy + \frac{3G \rho}{40 \gamma} \iint_{\sigma} \frac{h^5 - h_p^5}{r^5} dx dy + \dots \quad (8)$$

这里, h 和 h_p 分别为流动点和计算点的高程。

N_{RES} 为剩余大地水准面, 由剩余重力异常按 Stokes 积分公式计算, 即^[10]

$$N_{RES}(\varphi_p, \lambda_p) = \frac{R}{4\pi \gamma} \iint_{\sigma} \delta g(\varphi, \lambda) S(\varphi_p, \lambda_p, \varphi, \lambda) \cos \varphi_d \varphi_d \lambda \quad (9)$$

这里, $S(\varphi, \lambda_p, \varphi, \lambda)$ 为 Stokes 核函数, $\delta g(\varphi, \lambda)$ 为剩余重力异常, 并按下式计算

$$\delta g = \Delta g_{FA} - \Delta g_{GM} + TC \quad (10)$$

其中, Δg_{FA} 为实测空间重力异常; Δg_{GM} 是由重力场模型计算的模型重力异常; 地形改正 TC 按下式计算^[10, 12]

$$TC(i, j) = -GM \iint_{E, h_j}^{h_i} \frac{\rho(x, y, z)(h_{ij} - z)}{r^3 (x_i - x, y_j - y, h_{ij} - z)} dx dy dz \quad (11)$$

这里, GM 为地心引力常数; $\rho(x, y, z)$ 是流动点的地壳密度; h_{ij} 为计算点 (x_i, y_i) 的高程; E 代表积分区域; $r(x, y, z) = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。

Stokes 核函数有各种不同的近似表达式, 而根据不同的表达式可采用不同的计算模型, 这里应用严密的球面核函数和 1D-FFT 技术计算, 其计算模型为^[12~14]

$$N_{RES}(\varphi_p, \lambda_p) = \frac{\Delta \varphi \Delta M}{4\pi \gamma} \sum_{n=0}^N F^{-1} \{ F \{ \delta g(\varphi_n) \cos \varphi_n \} F \{ S(\varphi_p, \varphi_n), \Delta \lambda \} \} \quad (12)$$

上述公式也用于 DTM 对大地水准面的直接影响的计算。此外, 实际计算时采用 100 m 分辨率的 DTM 和 1 km 格网重力异常用于上述计算。

3.2 计算结果与分析

首先, 按上述方法计算了深圳市 1 km 格网的重力大地水准面。然后利用 1 km 格网重力大地水准面内插上 65 个 GPS 水准点上的大地水准面高, 并将内插值与实测值进行比较, 表 1 给出了其统计结果。从该表可以看出, 重力大地水准面与 GPS 水准之间存在明显的系统偏差。为此, 采用下面的模型来消除两者之间存在的系统偏差, 即^[5, 8]

$$N_{obs}(x, y) = N_G(x, y) + a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 y^2 + \dots \quad (13)$$

其中, $a_i (i = 0, 1, 2, 3, \dots)$ 为未知参数; x 和 y 为深圳格网坐标; N_{obs} 和 N_G 分别为实测大地水准面高和重力大地水准面高。采用最小二乘法解算

模型式(13)中的未知参数,并且根据模型显著性检验的结果表明,模型式(13)中只取 a_0, a_1, a_2, a_3 和 a_5 即可。

消除系统偏差后的大地水准面高与实测大地水准面高之间仍然存在差异,称为残差大地水准面高。为了充分利用高精度 GPS 水准数据,并且使重力大地水准面尽可能与 GPS 水准符合,因此本项目利用加权平均法对残差大地水准面高进行格网拟合,得到 1 km 格网的残差大地水准面。最后,消除系统偏差后的大地水准面与残差大地水准面之和得到 1 km 格网大地水准面的最后结果,图 3 为该大地水准面的等值线图,该图显示了深圳市大地水准面的变化趋势,从西北到东南方向其变化幅度达 4.5 m,总的看来深圳市大地水准面的变化较平缓。加权平均法的计算模型为

$$\Delta N(i, j) = \begin{cases} \sum_{k=1}^n \Delta N(\varphi_k, \lambda_k) \cdot \left(\frac{1}{r_k}\right)^m / \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{r_k}\right)^m, & r_k \neq 0 \\ \Delta N(\varphi_k, \lambda_k) & , r_k = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中, i, j 表示格网的行和列; r_k 为已知点至拟合点的距离; m 称为拟合度,一般取整数。

表 1 重力大地水准面高与由 GPS 水准得到的大地水准面高之差的统计结果

Tab. 1 Statistics of the differences between gravimetric geoid heights and those from GPS/leveling m

最大值	最小值	平均值	均方根	标准差
0.955	0.303	0.529	0.539	±0.107

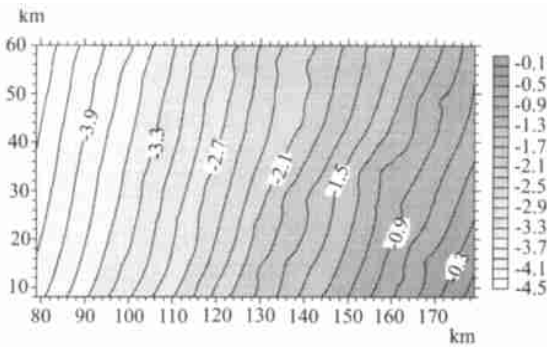


图 3 深圳市 1 km 格网大地水准面的等值线图

Fig. 3 Combined geoid of Shenzhen with 1 km grid

4 大地水准面的外部检核

为了对深圳市 1 km 格网大地水准面的精度

进行外部检核,在深圳市范围内按国家 GPS B 级网和二等水准测量的精度要求实测了 29 个 GPS 水准点,其分布见图 4。数据处理结果表明,其大地水准面高的精度优于 2 cm,可作为深圳市 1 km 格网大地水准面的外部检查点。

利用 1 km 格网大地水准面内插上述 29 个 GPS 水准检查点的大地水准面高,并与实测值进行比较,表 2 和表 3 分别列出了大地水准面高和大地水准面高差的统计比较结果。这两个表的结果表明,深圳市 1 km 格网大地水准面高和大地水准面高差的精度(标准差)分别为 ±0.014 m 和 ±0.019 m,其相对精度总体上优于 $1 \times 10^{-6} D$ 。根据《城市测量规范》(CJJ 8-99)对三、四等水准测量的限差要求,比较表 3 还可以看出,深圳市 1 km 格网大地水准面的精度可满足三、四等水准测量的要求。

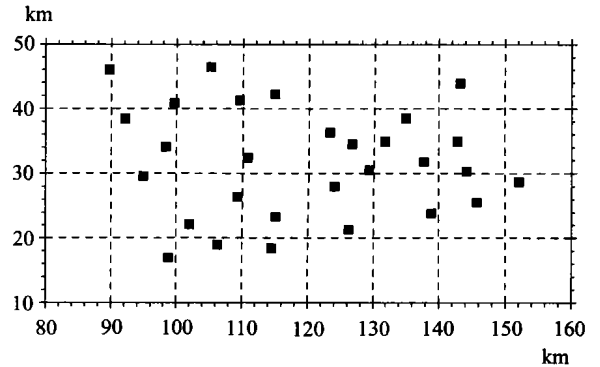


图 4 29 个 GPS 水准检查点的分布

Fig. 4 Distribution of 29 GPS/leveling check points

表 2 模型大地水准面高与由 GPS 水准得到的大地水准面高之差的统计结果

Tab. 2 Statistics of the differences between modeled geoid heights and those from GPS/leveling m

最大值	最小值	平均值	均方根	标准差
0.026	- 0.022	- 0.001	0.014	±0.014

5 结论与建议

本文利用 65 个高精度 GPS 水准数据、5 213 个实测重力点数据、100 m 分辨率的数字地形模型和 WDM94 地球重力场模型,采用移去-恢复技术计算了深圳市 1 km 分辨率大地水准面。外部检核的结果表明,深圳市 1 km 分辨率大地水准面高和大地水准面高差的精度(标准差)分别为

表3 1 km 格网大地水准面高差之精度统计
Tab. 3 Relative accuracy of geoid height differences

基线长度 / km	最大值 / m	最小值 / m	平均值 / m	均方根 / m	标准差 / m	高差 个数	相对 精度 ($1 \times 10^{-6} D$)	$\frac{12\sqrt{L}}{L}$ ($1 \times 10^{-6} D$)	$\frac{20\sqrt{L}}{L}$ ($1 \times 10^{-6} D$)
0~ 5	0.031	- 0.010	0.008	0.017	± 0.015	5	3.57	7.59	12.65
5~ 10	0.048	- 0.038	0.003	0.019	± 0.019	47	2.45	4.38	7.30
10~ 15	0.035	- 0.039	0.005	0.019	± 0.019	54	1.51	3.39	5.66
15~ 20	0.042	- 0.044	0.000	0.019	± 0.019	60	1.10	2.87	4.78
20~ 25	0.039	- 0.036	0.002	0.018	± 0.018	55	0.81	2.53	4.22
25~ 30	0.045	- 0.042	0.003	0.018	± 0.018	49	0.66	2.29	3.81
30~ 35	0.030	- 0.046	- 0.005	0.019	± 0.018	43	0.58	2.11	3.51
35~ 40	0.037	- 0.039	0.002	0.020	± 0.020	31	0.53	1.96	3.27
40~ 45	0.034	- 0.022	0.009	0.017	± 0.014	25	0.39	1.84	3.07
45~ 50	0.029	- 0.022	0.001	0.015	± 0.015	16	0.33	1.74	2.90
> 50	0.043	- 0.038	0.012	0.026	± 0.024	21	0.49	1.66	2.76
统计结果	0.048	- 0.046	0.003	0.019	± 0.019	406	0.76	三等水 准测量	四等水 准测量

± 0.014 m和 ± 0.019 m,其相对精度总体上优于 $1 \times 10^{-6} D$ 。利用该成果并结合GPS技术可以极大地改善传统高程测量的作业模式,取代过去费用高、周期长的传统低等级水准测量(如三、四等水准测量),满足大比例尺自动测图的需要。但需要说明的是,在实际应用中GPS测定大地高必须达到相应的精度要求。

此外,本项目还利用2 km格网的空间重力异常(其他数据相同)计算了深圳市2 km分辨率大地水准面,其大地水准面高和大地水准面高差的外部检核精度分别为 ± 0.019 m和 ± 0.026 m,这表明深圳市1 km分辨率大地水准面的精度优于2 km分辨率大地水准面的精度,但两者在量级上没有太大差别。因此,在局部或区域大地水准面的精化中,应根据大地水准面所要达到的分辨率和精度要求,进一步研究高精度GPS水准、重力等多种数据的最优组合和匹配问题,如GPS水准点的密度和分布、实测重力数据的分辨率和精度等,以达到投入少、收效大的目的。

参考文献:

- [1] PAVLIS N K. EGM96: The NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model[R]. [s. l.]: [s. n.], 1996.
- [2] NING Jir sheng, LI Jiar cheng, CHAO Ding Bo, et al. The Research on the Earth's Gravity Field Model WDM94 Complete to Degree 360[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1994, 19(4): 283-291. (in Chinese)
- [3] WENZEL G. Ultra High Degree Geopotential Models GPM98A, GPM98B and GPM98C to Degree 1800 [R]. [s. l.]: [s. n.], 1998.
- [4] LUO Zhi cai, CHEN Yong qi. Evaluation of Geopotential Models EGM96, WDM94 and GPM98CR in Hong Kong and Shenzhen[J]. Journal of Geospatial Engineering, 2002, 4(1): 21-30.
- [5] LUO Zhi cai, CHEN Yong qi. Precise Determination of Hong Kong Geoid Using Heterogeneous Data [A]. Proceeding of FIG XXII International Congress [C]. Washington, D C: [s. n.], 2002.
- [6] MORITZ H. Local Geoid Determination in Mountainous Areas[R]. Columbus: The Ohio State University, 1983.
- [7] LI Jiar cheng. The Spectral Methods in Physical Geodesy[D]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1993. (in Chinese)
- [8] YANG Zhar ji. Precise Determination of Local Geoid and Its Geophysical Interpretation[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 1999.
- [9] SIDERIS M G, FORSBERG R. Review of Geoid Prediction Methods in Mountainous Regions [A]. Determination of the Geoid, Present and Future [C]. New York: Springer Verlag, 1990.
- [10] HEISKANEN W A, MORITZ H. Physical Geodesy [M]. Graz: Institute of Physical Geodesy, Technical University, 1967.

- [11] WICHENCHAREN C. The Indirect Effects on the Computation of Geoid Undulations[R]. Columbus: The Ohio State University, 1982.
- [12] LI Ye cai. Optimized Spectral Geoid Determination [R]. [s.l.]: The University of Calgary, 1993.
- [13] HAAGMANS R R N, de MIN E, van GELDEREN M. Fast Evaluation of Convolution Integrals on the Sphere Using 1D FFT, and a Comparison with Existing Methods for Stokes' s Integral[J]. Manuscr Geod, 1993, 18, 227-241.
- [14] SIDERIS M G, SHE Bürbin. A New High resolution Geoid for Canada and Part of the U. S. by 1D FFT Method [J]. Bulletin Geodesique, 1995, 69: 92-108.

《测绘学报》撰稿要求及格式

1. 论文内容应论点明确,层次清楚,结构严谨,术语准确,语句精炼,数据可靠,图表清晰,不涉及国家政治、经济及技术秘密。

2. 论文摘要应反映新内容、作者强调的观点及论文的主要结论。中文摘要字数在 200 左右,英文摘要可尽量详写,字数不超过半页。第 1 个关键词列出该文主要工作或内容所属二级学科名称;第 2 个关键词列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称;第 3 个关键词列出该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称;第 4 个关键词列出在前三个关键词中没有出现的,但被该文作为主要研究对象的事或物质的名称,或者在题目中出现的作者认为重要的名词。

3. 分类号应根据论文内容按中国图书馆图书分类法进行编号。

4. 论文的章节标题不超过 3 级,一级用“1”,二级用“1.1”,三级用“1.1.1”,顶格书写。注解标在同页下部,并划一横线与正文隔开。数字、量和单位应符合国家标准(用规定的符号)。外文字母应用铅笔标明文种、大小写、正斜体、上下标。表格尽可能用三(横)线表。

5. 论文中的图名、表注请同时用中、英文标注。

6. 文章前言务必简要介绍该论文的科研背景、国内外同类课题研究进展评述等内容。文章中引用他人成果时只介绍其结论,并详细标明其出处。

7. 为便于对外进行测绘科技交流,本刊今后将提供一定比例的版面刊登全稿以英文撰写的论文,欢迎国内外测绘专家向本刊寄投英文稿件。来稿的内容、格式、篇幅等与中文相应(英文稿请附 2000 字以内的详细中文摘要)。

8. 论文格式为“标题/作者及单位,地点,邮编/英文(标题,作者及单位,摘要及关键词)/摘要及关键词、分类号/正文/参考文献”。

9. 参考文献按正文引用先后排序,必须是公开发表的资料,参考文献全部用英文表达。

10. 来稿一式两份。来稿字数(包括文字,图表所占篇幅折合为字数)控制在 8000 字之内。打印稿或用钢笔、圆珠笔单面横写在 16 开方格稿纸上,字迹要清楚、规范,请在随稿信件中务必写清作者姓名、单位(大学应列出下属院系名或研究所名)、邮政编码、详细地址、电话号码,以及第一作者个人信息(性别、出生年份、职称、学位、是否博导等)。

11. 请注明科研课题项目所属资助基金及编号。

12. 本刊《博士论文摘要》栏目继续征稿,欢迎广大测绘及其相关学科的博士毕业生投稿,要求中英文标题,字数 800 字左右,并附简短个人信息和指导教师签名。