DOI:10.13203/j.whugis1998.02.001
第23卷第2期 武汉测绘科技大学学报 Vol.23 No.2
1998年6月 Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping June 1998

推算我国高精度和高分辨率似大地水准面的若干技术问题*

陈俊勇 李建成

(国家测绘局办公室,北京市百万庄,100830)

摘 要 讨论我国新一代高精度高分辨率似大地水准面的特点及其可能的精度和分辨率,列出了采用移去恢复法时的实用公式,介绍了计算斯托克司公式的严格方法和高程异常推估点的精度评定。

关键词 似大地水准面;GPS水准;移去恢复法

分类号 P223.0

确定大地水准面是重要的基础测绘工作之一。我国在60年代前后主要采用天文重力水准技术,布设了我国第一代高程异常控制网,简记为HACN60(Height Anomaly Control Network 1960)。在此控制网的基础上推定了我国似大地水准面图,简记为CLQG60(Chinese Local Quasi Geoid 1960),这就是我国使用至今的似大地水准面。据估算,其精度大体在±3~5m(相对于西安大地原点),而分辨率大体在2°×2°至5°×5°[4]。面向我国在21世纪的发展,CLQG60显然是不能适应这一要求的,推算具有良好精度和较高分辨率的新一代似大地水准面(简记为CLQG90)是我国当前大地测量的一项重要任务。

作为我国似大地水准面基础的具有10^{-7}~10^{-9}量级相对精度的我国高程异常控制网(HACAN90,A级和B级GPS水准网)[5]已经完成;全球最新(GSFC/DMA EGM)[12]和我国目前最优的重力位模型(WDM94)和重力大地水准面,已于1996年提供使用;国内外30″×30″的地形资料已经具备;卫星测高资料包括ERS-1,ERS-2和T/P等在我国的海域资料[2],已有可能获得。不足的方面是我国的地面重力资料在分辨率和精度方面都很不理想。但总的来说,推算我国新一代似大地水准面的基本条件已经具备。

推算新一代似大地水准面(CLQG90)的主要目的是改善我国似大地水准面的精度和分辨率,但改善的程度要根据我国今年15~20年经济、社会和科技发展的需求,顾及我国使用大地水准面这一基础资料的历史,要结合我国当前的测绘技术水平、作业能力和投资强度等因素,综合加以考虑。由此提出以下几个方面的原则:1)尽早提供。CLQG90应力争在"九五"期间向社会提供使用,也就是说,在适度的精度和分辨率要求下尽快完成CLQG90的推算工作。2)有效使用期。考虑到当今科学技术的日新月异和我国建设事业的迅速发展,CLQG90可以定为满足21世纪前10年的需求。3)精度和分辨率。由于我国各地区经济发展的程度差异很大,因此可以允许CLQG90在不同地区的精度和分辨率有一定差异。但总体来说,CLQG90的精度应力求高于±1m,发达地区为±20~30cm;分辨率应力求高于30′×30′,在发达地区为5′×5′。4)坐标系统。从便于实用和约定俗成地使用我国测绘资料出发,CLQG90仍应属于我国局部坐标系统,即一方面应和西安80坐标系或北京54坐标系一致,另一方面必须和黄海85高程系统一致,并继续采用似大地水准面。5)推算技术。以GPS水准测定的国家高程异常控制网HACN90为基础,结合重力场模型、地面和海洋重力资料、地形资料、卫星测高资料和已有的天文重力水准资料进行综合推算。6)覆盖范围。考虑到今后我国海洋事业的发展需求,CLQG90的覆盖面应扩大到我国的近海海域。

1 似大地水准面CLQG90的精度和分辨率

1.1 高程异常控制网HACN90的分辨率

新一代中国似大地水准面CLQG90的基础是高程异常控制网HACN90,它分为二个等级布设,其中A级高程异常控制网是用国家A级GPS定位标准施测,同时用高于二等水准测量精度测定正常高。A级高程异常网的主要目的是在全国

收稿日期:1997-08-25.陈俊勇,男,65岁,教授,中国科学院院士,现从事卫星大地测量研究。

* 国家测绘局九五重点科技攻关资助项目,编号C95-04-01。

大跨度地高精度传递高程异常，以减少误差积累。目前已完成的 A 级高程异常控制网点为30个，均匀分布于中国大陆，平均边长为700km，它的相对精度为 10^{-9} 量级[5]。HACN90的另一部分为 B 级高程异常控制网(用国家 B 级GPS定位标准施测，用高于四等水准测量精度测定正常高)。在我国东部、中部和西部，该网点的分辨率分别为80km，130km和250km左右，因此全国大陆上的 B 级高程异常控制网点总数约为750个[1]。

1.2 高程异常控制网HACN90中 A 级网的精度估算

1)大地高精度。设 s 为该 A 级网中相邻点间的平均距离，则GPS所连测的 A 级网边长的精度为 $5\text{mm}\pm 0.03\times 10^{-6}s$[5]。按经验和约定俗成，$A$ 级网边长两端大地高高差约为边长误差的2倍，则有 $10\text{mm}\pm 0.06\times 10^{-6}s$。由此 A 级网中2点间大地高的相对误差 $m_{A\Delta h}$ 可写为

$$m_{A\Delta h(\text{m})} = \pm 0.0020\sqrt{L_{1(\text{km})}} \quad (1)$$

式(1)是相应于 A 级网平均边长为700km时，设其中某一网点相对西安大地原点距离为 L_1(沿 A 级网边长累计)，$m_{A\Delta h}$ 则为该点相对西安大地原点的大地高(差)的精度。

2)正常高精度。A 级网点至西安大地原点的正常高可分为2个部分进行传递，第一部分是该网点利用一等水准的长距离传递，其误差累积为 $m_{\Delta H_1(\text{m})} = \pm 0.001\sqrt{L_{2(\text{km})}}$，式中，$L_2$ 为该 A 级点至西安大地原点正常高传递中所采用一等水准路线的长度。正常高传递的第二部分为利用四等水准路线的部分，其误差累积为 $m_{\Delta H_2(\text{m})} = \pm 0.01\sqrt{L_{3(\text{km})}}$，式中，$L_3$ 为该 A 级点至西安大地原点正常高传递中所采用四等水准路线的长度。设 A 级网点相对西安大地原点正常高(差)的精度为 $m_{\Delta H}$，在通常情况下 L_3 为 L_2 的1/10，则综合上面的 $m_{\Delta H_1}$ 和 $m_{\Delta H_2}$ 后，可用下式计算正常高的这一传递误差：

$$m_{\Delta H(\text{m})} = \pm 0.0033\sqrt{L_{2(\text{km})}} \quad (2)$$

3)高程异常精度。HACN90中 A 级网点在WGS84系统中的高程异常值 ζ_{A84} 是 A 级网点在WGS84中的大地高和相应正常高之差，因此其相应高程异常的误差 $m_{A\xi 84}$，顾及式(1)和式(2)后为：

$$m_{A\xi 84} = \sqrt{m_{A\Delta h}^2 + m_{\Delta H}^2} \quad (3)$$

若利用上式估算HACN90中 A 级网点相对于西安大地原点高程异常值精度时，可以概略地在式(1)和式(2)中取 $L_1\approx L_2\approx L$，则式(3)可写为：

$$m_{A\xi 84(\text{m})} = 0.0039\sqrt{L_{(\text{km})}} \quad (4)$$

这就是 A 级(GPS水准)高程异常控制网点(相对西安大地原点)的高程异常在WGS84系统中的精度评估公式，式(4)中 L 为网点沿 A 级网边长至西安大地原点的长度累计。现以最远点考虑，粗略地取 $L=3\,000\text{km}$，则有 $m_{A\xi 84}=\pm 0.21\text{m}$。

1.3 高程异常控制网HACN90中 B 级网的精度估算

在CLQG90中，其高程异常控制点主要是由HACN90中的750个 B 级网点构成，其精度评估同上一节一样，也可分为3个部分进行。

1)大地高精度。设 s_1 为该 B 级网中相邻点间的平均距离，根据前面所述，可以将 s_1 分为两种基本情况，一是在中国中部和东部，取100km左右，一是在中国西部取250km左右。B 级网中GPS边长精度一般不低于 $5\text{mm}+0.3\times 10^{-6}s_1$，并设 L_4 是 B 级点之间沿 B 级网线路的距离，则该网中网点间大地高高差的误差 $m_{B\Delta h}$ 为：

$$m_{B\Delta h} = \begin{cases} \pm 0.007\,0\sqrt{L_{4(\text{km})}}\,(s_1 = 100\text{km}) \\ \pm 0.010\,1\sqrt{L_{4(\text{km})}}\,(s_1 = 250\text{km}) \end{cases} \quad (5)$$

2)正常高精度。B 级网点中正常高仍用水准联测求定，其精度仍可用式(2)进行评估。

3)高程异常的精度。类同于式(3)和式(4)，在HACN90中 B 级网的2点之间，沿 B 级网线路时，其高程异常差的精度，在WGS84系统中可相应于式(5)写为：

$$m_{B\xi 84(\text{m})} = \begin{cases} \pm 0.007\,7\sqrt{L_{4(\text{km})}}\,(s_1 = 100\text{km}) \\ \pm 0.010\,6\sqrt{L_{4(\text{km})}}\,(s_1 = 250\text{km}) \end{cases} \quad (6)$$

但 B 级网点之间长距离传递高程异常时，实际上应是尽可能利用 B 级网点邻近的 A 级网点和 A 级线路来传递，因此同传递水准测量中的正常高一样，B 级网点相对于西安大地原点的高程异常可分为2个部分，一部分是利用 A 级网来传递，这时应用式(4)的误差积累公式，另一部分是利用 B 级网自身的线路来传递，这时应用式(6)来评估其误差积累。因此 B 级网点高程异常相对于西安大地原点的误差评估公式为：

$$[m_{B\xi 84(\text{m})}]^2 = [0.003\,9\sqrt{L_{(\text{km})}}]^2 +$$

$$0.0077\sqrt{L_{4(\mathrm{km})}}]^2 \quad (s_1=100\mathrm{km}) \tag{7}$$

$$[m_{B\xi 84(\mathrm{m})}]^2=[0.0039\sqrt{L_{(\mathrm{km})}}]^2+[0.0106\sqrt{L_{4(\mathrm{km})}}]^2 \quad (s_1=250\mathrm{km}) \tag{8}$$

式中 L 表示 B 级网点高程异常传递中所采用 A 级网线路的总长度；L_4 表示这一传递中采用 B 级网线路的总长度。根据 B 级网的布网密度，可以概略地在上两式中取 $L_4\approx 1/5L$，则式(7)和式(8)可分别改化为：

$$m_{B\xi 84(\mathrm{m})}=\pm 0.0052\sqrt{L_{(\mathrm{km})}} \quad \text{(中国中部、东部)} \tag{9}$$

$$m_{B\xi 84(\mathrm{m})}=\pm 0.0061\sqrt{L_{(\mathrm{km})}} \quad \text{(中国西部)} \tag{10}$$

若以中国西部最远的 B 级点考虑，即取 $L=3000$km，代入式(10)得其高程异常值相对西安大地原点的精度为 $m_{B\xi 84(\mathrm{m})}=\pm 0.33$m。对中国中部和东部的 B 级点考虑，则利用式(9)，其相应精度不会低于±0.23m。由此可见，在中国大陆地区包含 A 级和 B 级 GPS 水准网的 HACN90，其网点的相应高程异常值的精度不低于±0.2～0.3m。

2　移去控制点高程异常中的重力和地形影响

在 HACN90 基础上推算我国新一代似大地水准面 CLQG90 时，原则上应利用 FFT 技术，以通用的移去恢复法进行[7,13]。因此要按下式移去 HACN90 网点处高程异常中的重力和地形的影响。

$$\zeta_{0\gamma}=\zeta_0-\zeta_{0s}-\zeta_{0g}-\zeta_{0t} \tag{11}$$

式中，ζ_0 为 HACN90 网点处高程异常值，ζ_{0s}为重力场的长中波影响，ζ_{0g}为附近地面重力的中短波影响，ζ_{0t}为地形的短波影响，$\zeta_{0\gamma}$为残差高程异常。上式中的 ζ_{0s}可按下式计算：

$$\zeta_{0s}=\frac{GM}{r\gamma}\sum_{n=2}^{360}\left(\frac{a}{r}\right)^n\sum_{m=0}^{n}(\overline{C}_{nm}\cos m\lambda_0+\overline{S}_{nm}\sin m\lambda_0)\overline{P}_{nm}(\sin\varphi_0) \tag{12}$$

式中，R 是地球平均半径；φ_0、λ_0 是控制点的地心纬度和经度；360 表示采用 360 阶次的地球重力场模型。$\overline{C}_{nm}$和 $\overline{S}_{nm}$表示一给定重力场模型的规格化系数；$\overline{P}_{nm}$是规格化勒让德函数，n 和 m 表示重力场的阶次。式(11)中的 ζ_{0t}和 ζ_{0g}可分别按下式计算：

$$\zeta_{0t}=-\frac{\pi k\rho}{\gamma}H_0^2-\frac{k\rho R^2}{6\gamma}\iint_{\sigma_0}\frac{H^3-H_0^3}{l^3}\mathrm{d}\sigma \tag{13}$$

$$\zeta_{0g}=(R/4\pi\gamma)\iint_{\sigma_0}\Delta g S(t)\mathrm{d}\sigma \tag{14}$$

式中，ρ 为积分域内地形的质量密度；GM 为引力常数；H_0 为 HACN90 网点的正常高；H 为积分域内流动点正常高；σ_0 为积分域，表示以控制点为中心的球冠，其半径为 ψ_0(角距)；γ 为平均正常重力值；l 为控制点与流动点之间的直线距离，即 $l=2Rt$，而其中 t 的严格球面计算公式为：

$$t^2=\sin^2\frac{\varphi_0-\varphi}{2}+\sin^2\frac{\lambda-\lambda_0}{2}\cos\varphi_0\cos\varphi \tag{15}$$

式(14)中 S 为斯托克司函数，用 t 表示可写为：

$$S(t)=t^{-1}-4-6t+10t^2-(3-6t^2)\ln(t+t^2) \tag{16}$$

式(14)中的 Δg 的计算公式见(17)式，它是流动点的空间异常(也可以是栅格平均空间异常)Δg_F 减去重力场影响 Δg_S 和地形影响 Δg_T 后的值，即

$$\Delta g=\Delta g_F-\Delta g_S-\Delta g_T \tag{17}$$

上式中的空间异常 Δg_F 的计算公式为：

$$\Delta g_F=g-\gamma+0.3086H-0.72\times 10^{-7}H^2+\Delta g_A \tag{18}$$

式中，g 是地表上流动点实测重力值(已做潮汐改正)；γ 是椭球表面上相应点的正常重力值；Δg_A 是大气改正，其表达式如下：

$$\Delta g_A=0.8658-9.727\times 10^{-5}H+3.482\times 10^{-9}H^2 \tag{19}$$

式(17)中的 Δg_S 和 Δg_T 分别是相应于由地球重力场模型和地形算得的重力异常值，可分别按下两式计算：

$$\Delta g_S=\frac{GM}{r^2}\sum_{n=2}^{360}(n-1)\left(\frac{a}{r}\right)^n\sum_{m=0}^{n}(\overline{C}_{nm}\cos m\lambda+\overline{S}_{nm}\sin m\lambda)\overline{P}_{nm}(\sin\varphi) \tag{20}$$

$$\Delta g_T=\frac{1}{2}k\rho R^2\iint_{\sigma}\frac{(H-H_0)^2}{l^3}\mathrm{d}\sigma \tag{21}$$

上两式中符号意义同前，式中，φ、λ 和 H 相应于流动点的纬度、经度和正常高。式(12)、(13)、(14)、(20)、(21)均可化为卷积形式，用 FFT 技术计算，以同时获得多点的推估成果。若仅对单点进行推估，根据研究，以 Meissl 方法[11]推算的结果比较好[3]。

3　计算 ζ_{0g}的严格方法

长期以来，计算式(14)中 ζ_{0g}往往采用近似方

法，现介绍两种严格方法。

1）一维 FFT 计算 ζ_{0g}的严格公式。ζ_{0g}可以直接采用球面公式进行计算，即

$$\zeta_{0g}(\varphi_0,\lambda_0)=\frac{R}{4\pi\gamma}\sum_{j=0}^{N-1}\sum_{i=0}^{M-1}\Delta g(\varphi_j,\lambda_i)\cos\varphi_j\cdot S(\varphi_0,\lambda_0,\varphi_j,\lambda_i)\Delta\varphi\Delta\lambda \quad (22)$$

当按上式计算 ζ_{0g}时，输入的重力值个数为 $M\times N$ 个栅格平均重力值，$\Delta\varphi$ 和 $\Delta\lambda$ 是一个栅格的纬差和经差。式中，S 仍表示斯托克司函数。计算式(22)时采用 Haagmans 方法[8]，用一维 FFT 的严格公式计算，先沿给定纬圈的球面斯托克司函数进行积分，一圈一圈地积分，如对计算点(φ_0,λ_0)来说，以纬圈 φ_0 为中央纬圈，积分时的积分域首先只沿某一流动纬度 φ_j 移动，这时的弧长只随 $\lambda_k-\lambda_i$ 的值而变动，这时以经纬度为变量的通常的二维的斯托克司积分式(22)，可改写为如下形式：

$$\zeta_{0g}(\varphi_0,\lambda_0)=\frac{R}{4\pi\gamma}\sum_{j=0}^{N-1}\Delta\varphi\Big[\sum_{i=0}^{M-1}\Delta g(\varphi_j,\lambda_i)\cos\varphi_j\cdot S(\varphi_0,\varphi_j,\lambda_0-\lambda_i)\Delta\lambda\Big] \quad (23)$$

式中，$\varphi_j=\varphi_0,\varphi_1,\cdots,\varphi_N$，即先沿某一纬圈积分，这时只以经差为变量进行积分，然后再沿经圈，以纬度为变量进行积分。从式(23)可见，该式方括号内相对于经度 λ 来说，沿纬圈进行积分时它包括了一个一维的(离散)卷积，因此可用一维 FFT 来计算。根据离散傅立叶变换的加法定律，则对于一个给定纬圈的离散斯托克司积分可用下式一维 FFT 形式给出：

$$\zeta_{0g}(\varphi_0,\lambda_0)=\frac{R\Delta\varphi\Delta\lambda}{4\pi r}F_1^{-1}\{\sum_{j=0}^{N-1}F_1[\Delta g(\varphi_j,\lambda_0)\cos\varphi_j]\cdot F_1[S(\varphi_0,\varphi_j,\lambda_0)]\} \quad (24)$$

式(24)中，F_1 和 F_1^{-1} 分别表示一维傅立叶变换和它的逆。式(24)可以用一维 FFT 按纬圈逐圈积分，由此严格算出点(φ_0,λ_0)处的高程异常 ζ_{0g}，这和式(14)的严格数值积分结果是一样的，这就是一维球面 FFT 的主要优点。此外，由于每次沿纬圈只是处理一个一维的复数阵列，相对于二维 FFT 来说就可以节约大量的计算机的存贮单元，而它的快捷计算更是斯托克司经典方法中逐点进行积分计算所不能比拟的[7,8,13]。

2)变换核函数计算 ζ_{0g}的严格公式[9]。式(14)可改写为如下形式：

$$\zeta_{0g}=\frac{R}{2\pi r}\int_{\psi=0}^{\pi}\int_{\alpha=0}^{2\pi}\Delta g(\psi,\alpha)S(\psi)\sin\psi\mathrm{d}\psi\mathrm{d}\alpha \quad (25)$$

引入一个新函数 $f(\psi)=S(\psi)\sin\psi$，顾及式(16)后，$f(\psi)$可写为：

$$f(\psi)=2\cos\frac{\psi}{2}[1-4t-12t^2+10t^3-t(3-6t^2)\ln(t+t^2)] \quad (26)$$

顾及 $f(\psi)$，则在对式(25)积分时，可改写为：

$$\zeta_{0g}=\frac{R}{2\pi r}\int_{\psi=0}^{\pi}f(\psi)[\int_{\alpha=0}^{2\pi}\Delta g(\psi,\alpha)\mathrm{d}\alpha]\mathrm{d}\psi \quad (27)$$

按中值定理，上式可进一步简化为：

$$\zeta_{0g}=\frac{R}{r}\int_{\psi=0}^{\pi}f(\psi)\overline{g}(\psi)\mathrm{d}\psi \quad (28)$$

式中 $\Delta\overline{g}(\psi)$为某一 ψ 值时 Δg 的均值，即

$$\Delta\overline{g}(\psi)=\frac{1}{2\pi}\int_{\alpha=0}^{2\pi}\Delta g(\psi,\alpha)\mathrm{d}\alpha \quad (29)$$

利用式(28)求 ζ_{0g}的优点是严格计算，无需近似假设；它类同于 Haagmans 方法，将计算 ζ_{0g}的斯托克斯积分分为相对独立的两个步骤，先按某个 ψ 对 Δg 求平均值，即式(29)；然后按单变量对 $f(\psi)$进行积分，即式(28)。此外，这一方法对原来式(14)中斯托克司函数积分时的奇异点(当 $\psi=0,\pi$)通过式(26)的转换移去了，例如当 $\psi\to0,\pi$ 时，$f(\psi)\to2$，$f(\psi)$在 $\psi\approx10°$时具有极大值$f(\psi)_{\max}=2.5$。而 $\Delta g(\psi)$显然是一个有限函数，没有奇异点[10]。利用(29)式积分时，可能遇到的一个问题是积分域的转换。

4 推估点上高程异常值的精度估算

计算推估点上的高程异常值 ζ_p 的基础是由式(11)中推得的 ζ_{0r}，它是已移去重力和地形影响后的 HACN90 网点处高程异常的残差，它们是推估 ζ_p 的起算值。这时，首先要计算推估点高程异常的残差 ζ_{pr}。然后按第二节中的逆过程，恢复得推估点的高程异常 ζ_p。计算 ζ_{pr}可以采用各种推估方法，包括配置法，但根据试算[1]，各种推估方法的效果(精度)类似。

在似大地水准面 CLQG90 中，推估点高程异常值的精度可利用下列公式进行评估[3]：

$$m_p^2=0.019\,57c^2d^2\lambda+m_s^2+m_0^2 \quad (30)$$

式中 m_p 是在推估点上推估得到的高程异常值相对西安大地原点的精度，以 m 为单位；c 是推估点所在地区的重力代表误差；d 是推估点所在地区 HACN90 的分辨率，以 100km 为单位；λ 是栅格平均重力异常的分辨率，以(′)为单位；m_s 是地球重力模型在移去恢复法中所导致的误差，以 m 为单位；m_0 是推估点所在地区 HACN90 网点高程异常值的误差，以 m 为单位。由式(30)可导得推估点高程异常值在我国东、中、西部的精度评估值，现列于表 1。

表中 m_s 是由所采用的重力场模型的误差所

导致的，这一误差由于对控制点处的“移去”和推估点处的“恢复”而得到部分抵偿。根据试算，当球冠半径 ψ_0 大于 2.5°～3°时，较好的重力场模型在移去恢复法中对推估点高程异常所导致的误差小于±0.1m[2,3]。

表 1 推估点高程异常值的精度评估
（按目前 HACN90 布测情况）

Tab.1 Estimating the Accuracy of Height Anomaly

中国地区	λ	m_0	m_s	d	c	m_p
东部	10′	0.25	0.1	0.8	0.54	0.33
中部	10′	0.25	0.1	1.2	1.08	0.63
西部	10′	0.35	0.1	2.5	1.08	1.25
高山区	15′	0.35	0.1	2.5	1.50	1.70

表 1 表明若推估高程异常的地区处于平原或丘陵地区，在 HACN90 中推估高程异常值时，若格网重力平均异常值的分辨率为 10′～15′，在我国东部和中部可达 dm 级，西部为 m 级。

作者也曾利用国外学者的推估公式[14]，进行精度评估。由于这些公式中所考虑地区的地形比较平坦，栅格平均重力异常分辨率非常高，因此往往不顾及重力的代表误差，所以利用这些公式导出的推估点的精度评估结果都偏高。

这里顺便指出，一级天文重力水准所导得的高程异常值相对西安原点的精度为±0.027(m)·$\sqrt{L}$[4]，与式(9)和式(10)相比，精度略差。若顾及表 1 所列的推估点精度、一级和二级天文重力水准点在精度相当的条件下，可作为精度可靠的推估点使用。

若要提高我国西部山区推估点高程异常的精度，由于 c 值是不能改变的，因此，改善的途径或是提高地面格网重力异常平均值的分辨率 λ，如提高至 5′×5′，则推估高程异常值的误差 m_p 在西部或高山区就能在±1m 左右。另一种途径是提高 HACN90 在西部地区的分辨率 d，例如由 250km 提高至 150km，则 m_p 也能提高至 1m 左右。若这二方面都改进至这一水平，即 λ 提高至 5′×5′，d 提高至 150km，则 m_p 在西部地区才有可能达到 dm 级。由此可见，在我国西部地区由于地形复杂，要使推估点高程异常值的精度达到 dm 级，人们还需作出很大努力。

5 结束语

1)面向我国 21 世纪经济建设和社会发展的需要，推算我国新一代似大地水准面(CLQG90)是我国“九五”期间一项重要的基础测绘工作。目前推算的基本技术条件已经具备，要结合我国实际提出合适的目标。

2)对 CLQG90 的坐标系统、覆盖范围、精度和分辨率进行了重点阐述。CLQG90 的高程异常控制点精度在我国东部和中部不低于±0.25m，西部不低于±0.35m，其推估点(内插点)精度在我国东部和中部为±0.3～0.6m，在西部为±1.2～1.7m。CLQG90 的高程异常控制点的分辨率在我国东部和中部为 80～150km，在西部为 250km，推估点分辨率在上述相应地区应力求达到 20km(10′)和 60km(30′)。

3)在 GPS 水准技术上所构成的高程异常控制网 HACN90 的基础上，利用 FFT 技术，采用移去恢复法，结合重力和地形资料，推算 CLQG90。列出了有关实用公式，并介绍利用斯托克司公式计算 ζ_{0g}的二种严格方法及其实用公式：一种是采用一维 FFT 技术，一种是采用变换核函数技术。

4)估算表明，只有当地面格网重力异常平均值的分辨率 $\lambda\leqslant 5'$，高程异常控制网分辨率 $d\leqslant$ 150km 时，我国似大地水准面的高程异常推估值的精度才能达到高于 0.5m 的量级。

参 考 文 献

1 陈俊勇. 我国 GPS 水准网的布设及其精度探讨. 测绘学报，1993，22(2)：87～93

2 陈俊勇，李建成，晁定波. 用 T/P 测高数据确定中国海域及其邻海的海面地形. 武汉测绘科技大学学报，1995，20(4)：321～326

3 陈俊勇. 高程异常控制网中利用重力数据进行推估的精度评定. 测绘学报，1995，24(3)：161～167

4 国家测绘局. 中华人民共和国大地测量图集. 国家测绘局

5 李毓麟，刘经南，葛茂荣，等. 中国国家 A 级 GPS 网的数据处理和精度评估. 测绘学报，1996，25(2)：81～86

6 Duquenne H，et al. The Geoid in the Southern Alps of France. IGES Bull，1995(4)：115～130

7 Forsberg R，Sideris M G. Geoid Computations by the Multi-band Spherical FFT Approach. MG，1993，18(2)：82～90

8 Haagmans R，Min E，Gelderen E M. Fast Evaluation of Convolution Integrals on the Sphere Using ID FFT，and a Comparison with the Existing Methods for Stokes' Integral. MG，1993(18)：227～241

9 Jiang Z，Duquenne H. On Fast Integration in Geoid Determination. J. G.，1997(71)：59～69

10 Keasley A H W. Data Requirements for Determing

（下转第110页）

Research on the Expert System for Optimal Design of Survey Control Network

Deng Yuejin Zhang Zhenglu

(National Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, WTUSM, 129 Luoyu Road, China, 430079)

Abstract The presentation briefly introduces the basic principle of Expert System(ES) at first, then discusses the probability of it's application to the optimal design of survey control network. A survey Control Network Optimal Design Expert System(CONODES) is developed based on the General Adjustment Program(GAP) by using the expert system building tool—ART. The knowledge presentation and it's inference strategy are demonstrated in detail in this paper. At last, the comparison of it's advantage and disadvantage with the traditional approach for optimal design of survey control network is made.

Key words surveying control network; optimization; expert system

(上接第99页)

Precise Relative Geoid Heights from Gravimetry. JGR, 1986, 91(B9): 9193~9201

11 Meissl P. Preparations for the Numerical Evaluation of Second Order Molodensky-type Formulas. Rep. 163. Ohio State Univ.

12 Pavlis N K, Rapp R H, Lemoine F G, Kenyon S C. High Resolution Global Geopoitential Models for the Joint GSFC/DMA Model. In: Paper Presented at Gradgeo Mar96. Tokyo, 1996.

13 Sideris M G. FFT Geoid Computations in Canada. IGES Bull, 1995(4): 105~114

The Several Technical Problems on Computing the High Resolution and High Accuracy Quasi-geoid in China

Chen Junyong Li Jiancheng

(National Burear of Surveying and Mapping, Baiwanzhuang, Beijing, 100830)

Abstract In this paper, the characteristics of new-generation quasi-geoid with high resolution and high accuracy in China are discussed. The applied formulae using remove-restore techniques are presented. The rigorous methods and algorithms for computing Stokes formula and estimating the accuracy of height anomaly are also described.

Key words quasi-geoid; GPS/levelling; remove-restore