第30卷 第1期　　武汉大学学报·信息科学版　　Vol.30 No.1
2005年1月　　Geomatics and Information Science of Wuhan University　　Jan. 2005

文章编号:1671-8860(2005)01-0042-05　　文献标识码:A

# 中国陆海任意点垂线偏差的快速确定及精度分析

孙凤华[1]　吴晓平[2]　张传定[2]

(1　西安测绘信息技术总站,西安市西影路36号,710054)
(2　信息工程大学测绘学院,郑州市陇海中路66号 450052)

**摘　要**:采用全国1 489个高精度天文大地点作为外部精度检核点,对由1′×1′垂线偏差数字模型快速确定我国任意点垂线偏差的精度进行了估计。结果表明,我国垂线偏差子午和卯酉分量的精度:东部地区分别为±0.94″和±0.99″,西北地区分别为±1.71″和±1.28″,西南地区分别为±1.95″和±2.00″。全国垂线偏差总体精度优于±1.5″。由1′×1′垂线偏差数字模型及相应软件确定任意点结果一般只需2s。

**关键词**:垂线偏差;数字模型;快速确定;精度分析
**中图法分类号**:P223.7

垂线偏差($\xi,\eta$)在大地测量和空间技术等方面有着重要用途[1~3],但迄今为止,我国还没有一套全国性高精度、高分辨率的结果可供应用。本文中所述的垂线偏差快速确定,是指当给出任意点坐标后,在计算机及相应数字模型和软件的支持下,能够在很短时间内(如5s)高精度地获得相应点的垂线偏差结果。然而,若按照传统的方法,由于在理论、软件和数据等方面都存在一些复杂的问题,即使在高速计算机上也难以实现。为了满足应用需要,1998～2002年建立的我国陆海垂线偏差快速确定系统,较好地解决了快速确定垂线偏差等问题。由此获得的垂线偏差相应系统为CGS2000(为本文采用的地心坐标系统的代码)。本文阐述了快速确定我国陆海任意点垂线偏差的方法和相应精度等。

## 1　任意点垂线偏差的快速确定方法

根据重力场理论和移去恢复方法[1,2],对于任意点相对于CGS2000的垂线偏差子午分量$\xi$和卯酉分量$\eta$则可表示为:

$$\xi = \xi_g + \Delta\xi \tag{1}$$

$$\eta = \eta_g + \Delta\eta \tag{2}$$

式中,$\xi_g$、$\eta_g$分别为重力垂线偏差子午分量和卯酉分量;$\Delta\eta$和$\Delta\xi$分别为将重力垂线偏差转换为CGS2000垂线偏差子午和卯酉分量的改正值。

在目前条件下,按式(1)和式(2)还不能够在短时间内(如5s)方便经济地得到任意点高精度的垂线偏差结果。根据研究可采用以下技术途径加以解决:首先采用最佳的数据和方案,将全国每间隔1′(约1.8km)处的所有点(称为1′×1′数字模型点或模型点)的垂线偏差值都计算出来,并存入数据库,即建立1′×1′数字模型;其次,编制由数字模型内插任意点结果的应用软件;最后应用时将该区域的1′×1′数字模型装入计算机内插软件内并操作该软件即可。由于这样做是将复杂的计算工作提前完成,因而使计算速度很快;又由于数字模型的分辨率很高,相邻模型点数值相差很小,因而又使内插误差很小,以至可以忽略,自然精度就高。因此,达到了高精度并快速和便于应用的目标。

### 1.1　全国1′×1′重力垂线偏差数字模型的建立

根据地球重力场理论和相关的研究[8~10],地面任意点(如1′×1′模型点)的重力垂线偏差$\xi_g$和$\eta_g$可由如下三部分组成,即

$$\xi_g = \xi_M + \xi_{\delta g} + \xi_h \tag{3}$$

$$\eta_g = \eta_M + \eta_{\delta g} + \eta_h \tag{4}$$

式中,$\xi_M$、$\eta_M$分别为地球重力场模型贡献的垂线偏差子午和卯酉分量(称模型垂线偏差);$\xi_{\delta g}$、$\eta_{\delta g}$分别为近区域剩余重力异常和地形改正贡献的垂

**收稿日期**:2004-10-02。
**项目来源**:国家杰出青年科学基金资助项目(40125013)。

线偏差子午和卯酉分量(称剩余重力异常和地形改正垂线偏差)；$\xi_h$、$\eta_h$ 分别为完全布格重力异常垂直梯度贡献的垂线偏差子午和卯酉分量(称布格异常垂直梯度垂线偏差)，它是垂线偏差的高频改正项。

模型垂线偏差 $\xi_M$、$\eta_M$ 的计算公式为：

$$\begin{aligned}
\xi_M^{ij} &= \sum_{m=0}^{N}(xE_m^i \cos m\lambda_j + xF_m^i \sin m\lambda_j) \\
xE_m^i &= -\frac{fM}{R^2\gamma_i}\sum_{n=0}^{N}\left(\frac{R}{r_i}\right)^{n+2}\overline{C}_{nm}^{*}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\varphi}\overline{P}_{nm}(\sin\varphi_i) \\
xF_m^i &= -\frac{fM}{R^2\gamma_i}\sum_{n=0}^{N}\left(\frac{R}{r_i}\right)^{n+2}\overline{S}_{nm}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\varphi}\overline{P}_{nm}(\sin\varphi_i)
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
\eta_M^{ij} &= \sum_{m=0}^{N}(yE_m^i \cos m\lambda_j + yF_m^i \sin m\lambda_j) \\
yE_m^i &= -\frac{fM}{R^2\gamma_i}\sum_{n=0}^{N}\left(\frac{R}{r_i}\right)^{n+2} m\,\overline{S}_{nm}\frac{1}{\cos\varphi}\overline{P}_{nm}(\sin\varphi_i) \\
yF_m^i &= \frac{fM}{R^2\gamma_i}\sum_{n=0}^{N}\left(\frac{R}{r_i}\right)^{n+2} m\,\overline{C}_{nm}^{*}\frac{1}{\cos\varphi}\overline{P}_{nm}(\sin\varphi_i)
\end{aligned} \tag{6}$$

式中，$N$ 是地球重力场模型的最高阶数；$(r,\varphi,\lambda)$ 为计算点地心向径、地心纬度和经度；$fM$ 是地球引力常数与地球质量乘积；$R$ 为地球平均半径；$\gamma$ 是地球平均正常重力；$\overline{C}_{nm}^{*}$、$\overline{S}_{nm}$ 为 $n$ 阶 $m$ 次完全正常化位系数；$\overline{P}_{nm}(\sin\varphi)$ 为完全正常化伴随 Legendre 函数。地球重力场模型采用 DQM2000B[6] 和 EGM96。$\xi_{\delta g}$、$\eta_{\delta g}$ 为：

$$\xi_{\delta g} = \frac{1}{4\pi\gamma}\iint_{\sigma}(\overline{\Delta g} + \overline{C} - \overline{\Delta g}_M)\frac{\mathrm{d}S(\psi)}{\mathrm{d}\psi}\cos A\mathrm{d}\sigma \tag{7}$$

$$\eta_{\delta g} = \frac{1}{4\pi\gamma}\iint_{\sigma}(\overline{\Delta g} + \overline{C} - \overline{\Delta g}_M)\frac{\mathrm{d}S(\psi)}{\mathrm{d}\psi}\sin A\mathrm{d}\sigma \tag{8}$$

式中，$\overline{\Delta g}$ 为平均空间重力异常；$\overline{C}$ 为平均局部地形改正；$\overline{\Delta g}_M$ 为平均模型重力异常；它们均为已经准备好的数据。$S(\psi)$ 为司托克斯函数；$A$ 为积分面元 $\mathrm{d}\sigma$ 相对于计算点的方位角，积分面元 $\mathrm{d}\sigma$ 的大小，本文全部为 $1'\times1'$ 网格所围的面积。

$\xi_h$、$\eta_h$ 的计算公式为：

$$\xi_h = \frac{1}{4\pi\gamma}\iint_{\sigma}[-(\overline{h} - \overline{h}_p)L(\overline{\Delta g}_B)]\frac{\mathrm{d}S(\psi)}{\mathrm{d}\psi}\cos A\mathrm{d}\sigma \tag{9}$$

$$\eta_h = \frac{1}{4\pi\gamma}\iint_{\sigma}[-(\overline{h} - \overline{h}_p)L(\overline{\Delta g}_B)]\frac{\mathrm{d}S(\psi)}{\mathrm{d}\psi}\sin A\mathrm{d}\sigma \tag{10}$$

式中，$\overline{h}_p$、$\overline{h}$ 分别为计算点和流动点平均地形高程；$\overline{\Delta g}_B$ 为平均完全布格重力异常；$L(\Delta g_B)$ 为完全布格重力异常垂直梯度；其他符号同前。

在实施式(7)～式(10)的计算中，采用全国陆地和海洋 60 多万个实测重力点及 $1'\times1'$ 平均地形高程(由 $1''\times1''$DEM 生成)等数据建立的 $1'\times1'$ 平均重力场有关数字模型[7]。将近区域 $\sigma$ 划分成中心区和外区两部分，其中，中心区采用奇异积分解析方法计算，外区采用离散高斯积分计算。近区域 $\sigma$ 的积分半径，对于全国不同的分区分别采用根据实际数据经过试算后的结果。

按照以上方法，在全国陆地和海洋范围内计算了各 $1'\times1'$ 网格点处的重力垂线偏差 $\xi_h$、$\eta_g$，即建立了我国陆海 $1'\times1'$ 重力垂线偏差数字模型。

### 1.2　全国 1′×1′CGS2000 垂线偏差数字模型的建立

由于重力垂线偏差数字模型存在有坐标系统不明确和精度不高等问题，而已有的 900 个天文/大地点，其垂线偏差精度高达±0.5″。因此，可将这些点作为控制点，对 $1'\times1'$ 重力垂线偏差数字模型进行控制拟合，得到精度高、坐标系统相应于 CGS2000 的垂线偏差数字模型。笔者将全国按 6°×8°范围划分成若干个分区，并在此基础上按以下方法计算式(1)和式(2)中的 $\Delta\xi$、$\Delta\eta$：

$$\begin{aligned}
\Delta\xi(\Delta\eta) = {} & a_0 + a_1(B - B_m) + a_2(L - L_m) + \\
& a_3(B - B_m)^2 + a_4(B - B_m)(L - L_m) + \\
& a_5(L - L_m)^2 + a_6(B - B_m)^3 + \\
& a_7(B - B_m)^2(L - L_m) + \\
& a_8(B - B_m)(L - L_m)^2 + \\
& a_9(L - L_m)^3 + a_{10}(B - B_m)^4 + \\
& a_{11}(B - B_m)^3(L - L_m) + \\
& a_{12}(B - B_m)^2(L - L_m)^2 + \\
& a_{13}(B - B_m)(L - L_m)^3 + a_{14}(L - L_m)^4
\end{aligned} \tag{11}$$

式中，$B_m$、$L_m$ 分别为计算分区中心点纬度和经度；$B$、$L$ 分别为计算点大地纬度和经度；$a_0$，$a_1$，…，$a_{14}$ 为常系数，它们根据控制点的 $\Delta\xi^*$ 和 $\Delta\eta^*$ 及坐标列出形如式(11)的方程组，然后按最小二乘法解算得到。实际计算中，共有 5 种转换模型同时应用。各分区并不是统一采用某一种转换模型计算，而是对于不同的分区可能采用不同的转换模型，至于哪个分区究竟应该采用哪个模型，要根据精度估计结果，由计算机自动确定。最终选择精度最佳的模型进行该分区的计算。因此，这是一种动态控制拟合的方法。

完成全国范围全部 $1'\times1'$ 网格点 $\Delta\xi$、$\Delta\eta$ 计算工作后，按式(1)和式(2)即可完成所有网格点 CGS2000 结果的计算。

### 1.3　任意点垂线偏差快速确定软件

具备有全国范围$1'\times1'$垂线偏差数字模型后，即可在此基础上设计由数字模型快速确定任意点垂线偏差的应用软件，进而实现快速确定任意地区任意点垂线偏差的目标。首先，可根据数字模型每个$1'\times1'$网眼四个角点上都有计算值的特点，按双线性内插（或其它）数学模型编制计算网眼内任意点垂线偏差的软件。其次，实际应用时可根据用户所需要的区域，把相应区域的$1'\times1'$垂线偏差数字模型输入计算机（软件）内，按软件帮助和提示操作即可。由于计算工作量很小，因而很快，试验结果表明，一般的计算均可在2s内完成。

## 2　任意点垂线偏差精度分析

### 2.1　全国任意点重力垂线偏差精度估计

1）采用如上所述的全国较合理分布的900个高精度天文大地点作为外部精度检查点。按式(12)和式(13)估计相应区域的重力垂线偏差精度$m_\xi^g$、$m_\eta^g$：

$$m_\xi^g=\pm\sqrt{\frac{[\Delta_\xi\Delta_\xi]}{n}},\quad \Delta_\xi=\xi_{标准}-\xi^g_{计算}\tag{12}$$

$$m_\eta^g=\pm\sqrt{\frac{[\Delta_\eta\Delta_\eta]}{n}},\quad \Delta_\eta=\eta_{标准}-\eta^g_{计算}\tag{13}$$

式中，$\xi_{标准}$、$\eta_{标准}$为检查点实测天文大地垂线偏差；$\xi^g_{计算}$、$\eta^g_{计算}$为根据以上全国$1'\times1'$重力垂线偏差数字模型和内插软件得到的检查点的计算垂线偏差；$n$为精度估计区域内垂线偏差检查点总数。其结果如表1所示。

2）采用全国较合理分布的1 489个一等天文大地点（含900个拉普拉斯点）作为外部精度检查点，按照(12)和(13)式及相应的方法，对由全国$1'\times1'$重力垂线偏差数字模型计算的任意点结果进行精度估计。其结果见表2。

**表1　全国任意点重力垂线偏差精度估计结果/(″)**

Tab.1　Result of Precision Estimation of the Vertical Deflection with the Meridian Component

| | 区　域 | 检查点数 | 差值最大 | 差值最小 | 差值平均 | 中误差 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 子午分量 | 102°以东 | 483 | 3.37 | −4.23 | −0.24 | ±1.04 |
| | 102°西 36°北 | 187 | 9.08 | −15.47 | −0.51 | ±2.93 |
| | 102°西 36°南 | 230 | 12.21 | −8.15 | 0.59 | ±2.87 |
| | 全　国 | 900 | 12.21 | −15.47 | −0.08 | ±2.11 |
| 卯酉分量 | 102°以东 | 483 | 4.31 | −4.31 | 0.19 | ±1.10 |
| | 102°西 36°北 | 187 | 5.69 | −7.62 | −0.05 | ±1.86 |
| | 102°西 36°南 | 230 | 11.69 | −5.62 | 0.36 | ±2.32 |
| | 全　国 | 900 | 11.69 | −7.62 | 0.18 | ±1.65 |

**表2　用全国1 489个一等天文点估计的全国重力垂线偏差精度结果/(″)**

Tab.2　Result of Precision Estimation for National Vertical Deflection of Gravity Through Utilizing 1 489 First-order Astro-geodetic Points

| 垂线偏差分量 | 区域 | 检查点数 | 差值最小 | 差值最大 | 平均差值 | 中误差 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 子午垂线偏差 | 全国 | 1 489 | −15.465 | 12.209 | −0.116 | ±1.831 |
| 卯酉垂线偏差 | 全国 | 1 489 | −7.617 | 11.694 | 0.116 | ±1.510 |

由表1、表2可看出，不同区域重力垂线偏差均有一定的系统误差。全国任意点重力垂线偏差子午和卯酉分量的总体精度分别为±1.83″和±1.51″。不同区域的重力垂线偏差均有一定的系统误差。

### 2.2　全国任意点CGS2000垂线偏差精度估计

1）采用如上所述的全国合理分布的900个高精度天文大地点作为外部精度检查点，一定区域内任意点CGS2000垂线偏差估计精度为：

$$m_\xi^{\mathrm{CGS}}=\pm\sqrt{\frac{[\Delta_\xi\Delta_\xi]}{n}},\quad \Delta_\xi=\xi_{标准}-\xi^{\mathrm{CGS}}_{计算}\tag{14}$$

$$m_\eta^{\mathrm{CGS}}=\pm\sqrt{\frac{[\Delta_\eta\Delta_\eta]}{n}},\quad \Delta_\eta=\eta_{标准}-\eta^{\mathrm{CGS}}_{计算}\tag{15}$$

式中，$n$为精度估计区域内垂线偏差检查点总数。其结果如表3所示。

2）采用全国较合理分布的1 489个一等天文大地点作为外部精度检查点和式(14)、式(15)及相应的轮流检查点方法。对由全国$1'\times1'$ CGS2000垂线偏差数字模型计算任意点相应结果进行精度估计，其结果见表4所示。

3）采用全国较合理分布的589个一等天文大地点作为外部精度检查点，以及类似于式(12)和式(13)及相应的方法，对由全国$1'\times1'$ CGS2000垂线偏差数字模型计算任意点相应结果进行精度估计，其结果见表5所示。

表 3　全国任意点 CGS2000 垂线偏差精度估计结果/(″)

Tab. 3　Result of Precision Estimation for CGS2000 Vertical Deflection with the Meridian Component

| | 区　　域 | 检查点数 | 差值最大 | 差值最小 | 差值平均 | 中误差 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 子午分量 | 102°以东 | 483 | −0.04 | 3.37 | −3.79 | ±0.94 |
| | 102°西 36°北 | 187 | 0.00 | 5.66 | −7.05 | ±1.71 |
| | 102°西 36°南 | 230 | 0.05 | 8.01 | −8.77 | ±1.95 |
| | 全　　国 | 900 | −0.01 | 8.01 | −8.77 | ±1.48 |
| 卯酉分量 | 102°以东 | 483 | 0.03 | 3.50 | −4.31 | ±0.99 |
| | 102°西 36°北 | 187 | −0.04 | 3.50 | −4.62 | ±1.28 |
| | 102°西 36°南 | 230 | −0.05 | 7.05 | −6.77 | ±2.00 |
| | 全　　国 | 900 | −0.01 | 7.05 | −6.77 | ±1.37 |

表 4　用全国 1 489 个一等天文点估计的全国 CGS2000 垂线偏差精度结果/(″)

Tab. 4　Result of Precision Estimation for CGS2000 Vertical Deflection Achieved Through Utilizing 1 489 First-Order Astro-geodetic Points

| 垂线偏差分量 | 区域 | 检查点数 | 差值最小 | 差值最大 | 平均差值 | 中误差 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 子午垂线偏差 | 全国 | 1 489 | −8.767 | 5.944 | −0.009 | ±1.361 |
| 卯酉垂线偏差 | 全国 | 1 489 | −6.721 | 7.220 | −0.008 | ±1.307 |

表 5　用 589 个一等天文点检核全国任意点 CGS2000 偏差精度/(″)

Tab. 5　Result of Precision Estimation for CGS2000 Vertical Deflection Achieved Through Utilizing 589 First-Order Astro-geodetic Points

| | 区　　域 | 检查点数 | 差值最大 | 差值最小 | 差值平均 | 中误差 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 子午分量 | 102°以东 | 429 | −0.096 | 4.082 | −5.390 | ±1.198 |
| | 102°西 36°北 | 109 | −0.063 | 4.848 | −4.540 | ±1.635 |
| | 102°西 36°南 | 51 | 0.556 | 4.464 | −3.148 | ±1.671 |
| | 全　　国 | 589 | −0.036 | 4.848 | −5.390 | ±1.332 |
| 卯酉垂线 | 102°以东 | 429 | −0.117 | 3.602 | −4.193 | ±1.224 |
| | 102°西 36°北 | 109 | −0.403 | 3.624 | −4.445 | ±1.397 |
| | 102°西 36°南 | 51 | 0.215 | 8.214 | −4.519 | ±2.068 |
| | 全　　国 | 589 | −0.142 | 8.214 | −4.519 | ±1.346 |

由表 4、表 5 中的数据看出,由全国 1′×1′ CGS2000 垂线偏差数字模型计算任意点垂线偏差子午和卯酉分量的精度,均为±1.3″。说明若公布全国垂线偏差总体精度为±1.5″是有依据的。

## 2.3　沿海及海洋任意点垂线偏差精度估计

采用我国沿海及附近岛屿 80 个一等天文大地点及南海若干岛屿 10 个天文大地点作为外部精度检查点,以及以上(12)～(15)式及相应的方法。对由全国垂线偏差数字模型计算我国沿海及海洋任意点相应结果进行精度估计,其结果见表 6、表 7。

由表 6、表 7 中的数据,以及与陆地类似情况进行一定对比后的结果,笔者的基本看法是,由全国垂线偏差数字模型计算沿海及海洋任意点垂线偏差的精度为:沿海及附近岛屿优于±1.0″,近海区域为±1.5″,远海有一定资料区域为±4.0″。

表 6　中国沿海及附近岛屿垂线偏差精度估计结果/(″)

Tab. 6　Result of Precision Estimation for the Seashore Area and Vicinal Islands

| | 区　　域 | 检查点数 | 差值最大 | 差值最小 | 差值平均 | 中误差 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 子午分量 | 北纬 18°～28° | 26 | 0.864 | −1.854 | −0.414 | ±0.905 |
| | 北纬 28°～36° | 20 | 1.292 | −1.367 | 0.075 | ±0.777 |
| | 北纬 36°以北 | 34 | 1.342 | −2.126 | −0.351 | ±0.985 |
| | 中国沿海及附近岛屿 | 80 | 1.342 | −2.126 | −0.265 | ±0.911 |
| 子午分量 | 北纬 18°～28° | 26 | 2.067 | −1.827 | −0.012 | ±0.955 |
| | 北纬 28°～36° | 20 | 1.681 | −0.849 | 0.471 | ±0.767 |
| | 北纬 36°以北 | 34 | 1.477 | −1.737 | 0.090 | ±0.756 |
| | 中国沿海及附近岛屿 | 80 | 2.067 | −1.827 | 0.152 | ±0.831 |

**表7 南海若干岛屿垂线偏差精度估计结果(利用10个天文大地点)/(″)**

Tab.7 Result of Precision Estimation of the Vertical Deflection Achieved Through Utilizing 10 First-Order Astro-geodetic Points

| | 差值最大 | 差值最小 | 差值平均 | 中误差 |
|---|---|---|---|---|
| 重力垂线偏差子午分量精度估计 | 6.71″ | −7.87″ | 1.18″ | ±4.00″ |
| 重力垂线偏差卯酉分量精度估计 | 4.69 | −8.82 | −0.53 | ±3.98 |
| 模型垂线偏差子午分量精度估计 | 10.39 | −7.41 | 2.81 | ±5.00 |
| 模型垂线偏差卯酉分量精度估计 | 6.06 | −8.11 | −2.37 | ±4.59 |

注:外部精度检核点(天文大地点)10个;采用DQM2000B地球重力场模型。

## 3 结语

1) 外部精度检查结果表明,快速确定我国不同区域任意点垂线偏差的精度分别为:东部(包括沿海及附近岛屿)区域优于±1.0″;西部(包括一般海域)区域优于±2.0″;全国垂线偏差总体精度为±1.5″。

2) 由本文方法确定任意点垂线偏差的时间一般只需2s。

3) 随本文同时建立的数字模型还有全国1′×1′高程异常、全国1′×1′平均空间和布格重力异常、全国1′×1′平均地形高程及全国1′×1′地形改正等数字模型。它们统称为2000中国重力场与大地水准面模型,简称为CGGM2000。

*致谢:参加本文研究的还有陈春旺、徐新强、曾安敏等,在此表示感谢。*

### 参考文献

1 陆仲连. 地球重力场的理论与方法. 北京:解放军出版社,1996
2 管泽霖,宁津生. 地球形状及外部重力场(上). 北京:测绘出版社,1981
3 海斯卡林 W A,莫里斯 H. 物理大地测量学. 卢福康,胡国理译. 北京:测绘出版社,1979
4 熊 介. 椭球大地测量学. 北京:解放军出版社,1988
5 孙凤华,孔维兵,李慧智,等. 我国陆地均匀重力测量补点问题的研究. 武汉大学学报·信息科学版,2001,26(4):349~353
6 孙凤华,陈春旺,孔维兵,等. 我国陆海1′×1′平均重力异常数字模型的建立及可靠性检验. 见:总参谋部测绘局编. 地面网与空间网联合平差论文集(四). 北京:解放军出版社,2003. 190~196
7 石 磐,夏哲仁,孙忠苗,等. 高分辨率地球重力场模型DQM99. 中国工程科学,1999,1(3):51~55
8 张传定,黄松涛,吴晓平,等. 联合重力和地形数据确定高程异常和垂线偏差. 见:总参谋部测绘局编. 地面网与空间网联合平差论文集(三). 北京:解放军出版社,1999. 179~185
9 吴晓平,夏哲仁,孙和平. 中国地区重力场与大地水准面. 北京:解放军出版社,2001
10 孙凤华,徐新强,邓 鹏. 我国陆地垂线偏差的精化计算. 测绘学院学报,1999,16(1):21~24

**第一作者简介**:孙凤华,高级工程师。主要从事地球重力场与大地水准面的研究及数据处理等工作。已发表论文40余篇。
E-mail:sfh1182@tom.com

# Fast Determination of the Vertical Deflection and Its Precision Analysis of Any Point on the Land and Sea in China

*SUN Fenghua*[1] *WU Xiaoping*[2] *ZHANG Chuanding*[2]
(1 Xi'an Technical Division of Surveying and Mapping,36 Xiying Road, Xi'an 710054,China)
(2 Institute of Surveying and Mapping,Information Engineering University,66 Middle Longhai Road,Zhengzhou 450052, China)

**Abstract**: This paper states the methods for establishing a 1′×1′ digital model of the vertical deflection and presents the data . The results of precision estimation in both the prime vertical component and the meridian component for this model achieved through adapting the 1 489 high-accuracy astro-geodetic points as check points are: ±0.94″ and ±0.99″ for the eastern

(下转第50页)

**第一作者简介**：楼立志，博士生。现主要从事大地测量与固体地球物理方面的研究。
E-mail：llz@mail.tongji.edu.cn

# Application of Simulated Geoid to GPS-Leveling Interpolation

*LOU Lizhi*[1,2] *HSU Houtze*[1]

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 174 Xudong Road, Wuhan 430077, China)

(2 Department of Surveying and GeoInformatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

**Abstract**: According to the topography-isostatic theory, an isostatic-geoid can be calculated; at the same time, the model-geoid can be derived directly from earth's gravity field model. In this paper, the "remove-restore" technique and multi-quadratic function are used to interpolate the known GPS/leveling data. The experimental results show that the accuracy of simulated geoid by practical geophysical data is better than other geoids.

**Key words**: geoid; remove-restore; multi-quadratic function

**About the first author**: LOU Lizhi, Ph.D candidate, majors in geodesy and solid geophysics.
E-mail: llz@mail.tongji.edu.cn

（责任编辑： 晓平）

（上接第 46 页）

region, respectively, ±1.71″ and ±1.28″ for the northwest region, respectively, ±1.95″ and ±2.00″ for the southwest region and the general precision for the whole country is better than ±1.5″. Generally, the determination of the vertical deflection on any point using the model and its corresponding software can be realized within 2 seconds.

**Key words**: vertical deflection; digital model; fast determination; precision estimation

**About the first author**: SUN Fenghua, senior engineer. He is concentrated on the research in data processing for the Earth gravity field and Geoid etc. His published papers are more than 40.
E-mail: sfh1182@tom.com

（责任编辑： 晓晨）