

地心坐标系与站心坐标系中的速度转换及误差传播*

伍吉仓^{1,2)} 邓康伟¹⁾ 陈永奇¹⁾
(1) 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港
(2) 同济大学测量与国土信息工程系, 上海 200092)

摘要 详细推导了由地心坐标系中到测站坐标系中的速度转换公式及误差传播公式, 并且计算了 931 个 GPS 测站点在球面测站坐标系与椭球面测站坐标系中速度分量之间的差别。结果表明, 测站高度对速度归算影响的相对变化量在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 量级(对于厘米级的速度分量而言, 可以忽略不计), 球面站心坐标系和椭球面站心坐标系下的速度分量差别主要表现在测站速度的北分量上, 通常为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 量级, 可以忽略不计。但是, 对于垂直速度分量较大的测站, 两者的差别比较明显。

关键词 地心坐标系 球面站心坐标系 椭球面站心坐标系 速度 误差传播

中图分类号: P226+.3 文献标识码: A

VELOCITY TRANSFORMATION AND ERROR PROPAGATION BETWEEN GEOCENTRIC COORDINATE SYSTEM AND SITE-CENTRIC COORDINATE SYSTEM

Wu Jicang^{1,2)}, Conrad Tang¹⁾ and Chen Yongqi¹⁾

(1) *Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong*
(2) *Department of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092*

Abstract In this paper, the equations of the velocity transformation and error propagations between the geocentric coordinate system and site-centric coordinate system are given in detail. These equations are applied to transform velocities of 931 GPS stations in China between these two systems. The numerical results show that the effect of station's altitude on the velocity transformation is in a relative scale of $10^{-4} \sim 10^{-3}$, they can be ignored. The velocity difference between spherical site-centric coordinate system and ellipsoidal one presents itself mainly in the north component, it is generally in a scale of $10^{-5} \sim 10^{-6}$ and can be ignored. However, for those stations with larger vertical movements, the difference between sphere and ellipsoid on the velocity transformation is significant.

Key words: geocentric coordinate system, site-centric coordinate system (sphere), site-centric coordinate system (ellipsoid), velocity, error propagation

* 收稿日期: 2004-10-28

基金项目: 中国香港特别行政区研究基金委员会项目(代码: A. 34. 37. PF70); 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量开放实验室项目

作者简介: 伍吉仓, 教授, 主要从事大地测量数据处理和地壳形变物理机制反演理论和方法研究

1 引言

GPS 技术在国内外已经广泛地应用于板块运动和地壳形变监测,如美国的南加州、日本、中国的青藏和华北^[1-15]等地区。一般而言,通过多期 GPS 观测结果平差可以得到各期观测站在地固坐标框架(如 ITRF2000)中的地心坐标及精度。如果再假设测点运动是匀速的,则两期的点位变化量除以两期观测的时间间隔就可以得到测点在地心坐标系中的速度矢量及精度^[3-15]。但在分析问题时,往往需要知道测点在测站坐标系中的速度分量和精度,即常说的测站北方向和东方向的速度。为了得到统一的速度场,一般要把测站速度归算到统一的球面或椭球面上。由于测站的高度不同,或者选取的归算面不同,归算后的速度将会有所变化。

本文详细推导了由地心坐标系中的速度到测站坐标系中的速度转换公式及误差传播公式,并且通过数值计算讨论测站高程和归算面选取对归算速度的影响。首先给出地心坐标、球坐标及大地坐标之间的转换关系,接着推导地心坐标系与测站坐标系中的速度转换,在此基础上讨论测站高程和投影面对速度归算的影响。最后把得到的公式运用于我国境内 931 个 GPS 测站点测站速度的归算,得到一些有益的结论。

2 地心坐标、球坐标及大地坐标之间的关系

如图 1 所示,地心坐标用 (X, Y, Z) 表示,球坐标用 (r, φ, λ) 表示,大地坐标用 (B, L, H) 表示。

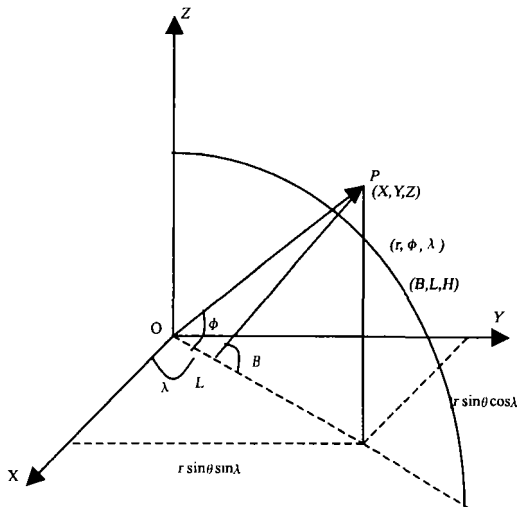


图 1 地心坐标、球坐标和大地坐标

Fig. 1 Geocentric, sphere and geodetic coordinate systems

由地心坐标计算球坐标公式为:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ \varphi &= \arcsin\left(\frac{Z}{r}\right) \\ \lambda &= \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

一种近似由地心坐标计算大地坐标的方法为^[16]:

$$\begin{cases} B = \arctan \frac{Z + e'^2 b \sin^3 \theta_1}{p - e'^2 a \cos^3 \theta_1} \\ L = \arctan \frac{Y}{X} \\ H = \frac{p}{\cos B} - N \end{cases} \quad (2)$$

式中,

$$\begin{cases} p = \sqrt{X^2 + Y^2} \\ \theta_1 = \arctan \frac{Za}{pb} \\ N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}} \end{cases} \quad (3)$$

a, b 为参考椭球的长半轴和短半轴, e, e' 为参考椭球的第一和第二偏心率, N 为卯酉圈曲率半径。

3 地心坐标系与测站坐标系中的速度转换

假定通过两期 GPS 观测求出了各个测站点在 ITRF 框架中的坐标和速度,现在需要求出测站坐标系中的北方向和东方向的速度。由于测站坐标系是以所在处的水准面为基础的,所以严格来说必须知道测站点的垂线方向,这使得问题变得复杂。解决此问题的方法有两个:一是把测站点归算到以地球平均半径为半径的球面上,二是把测站点归算到平均椭球体上,然后再以球面和椭球面的法线来建立“测站坐标系”,用上述方法建立的测站坐标系分别称之为球面测站坐标系和椭球面测站坐标系。

3.1 球面测站坐标系中的速度

由于坐标平移不会影响速度矢量的分量,这里我们仅考虑坐标轴旋转。地心坐标系先绕 Z 轴顺时针转 λ 角,再绕新的 Y 轴逆时针转动 $90^\circ - \varphi$ 角,再将 X 轴反向,就得到球面测站坐标系。即:

$$\begin{bmatrix} V'_N \\ V'_E \\ V'_U \end{bmatrix} = S_1 R_Y(90^\circ - \varphi) R_Z(\lambda) \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

另一方面,我们要求水平速度要归算到平均半径的球面上,所以测站北、东速度分量还要乘以一个比例

系数, 即:

$$\begin{bmatrix} V_N \\ V_E \\ V_U \end{bmatrix} = \frac{R}{r} \begin{bmatrix} V'_N \\ V'_E \end{bmatrix} \quad (5)$$

上两式中, (r, φ, λ) 是测站点的球坐标, 可以按式 (1), 通过地心坐标计算得到; V_E, V_N, V_U 是球面测站坐标系中的东分量、北分量、和径向分量的速度; V_X, V_Y, V_Z 是测站坐标系中站点的 3 个速度分量; R 是地球的平均半径, 取 6 371 km; R^X, R^Y, R^Z 是绕 X 轴、 Y 轴和 Z 轴旋转对应的旋转矩阵, S_1 是将 X 轴反向的转换矩阵, 这 4 个量分别定义如下:

$$R^X(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R^Y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R^Z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 α 为旋转角度。转动的角度正负规定是: 从原点出发面向旋转轴正向观看, 顺时针旋转为正, 逆时针旋转为负。

用式 (7)、(8)、(9)、(5) 代入式 (4) 得:

$$\begin{bmatrix} V_N \\ V_E \\ V_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R}{r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\cos\lambda\sin\varphi & -\sin\lambda\sin\varphi & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\lambda\cos\varphi & \sin\lambda\cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (10)$$

式 (10) 即为由地心坐标系中的速度分量到球面测站坐标系中速度分量的转换公式。

3.2 椭球面测站坐标系中的速度

我们选择的是平均椭球体, 椭球体的中心与地心坐标系原点重合, 短对称轴与 Z 轴重合。测站点对应于平均椭球体上的坐标相当于我们通常定义的大地坐标, 所以我们可以按照上面相同的方法, 把地心坐标系中的站点速度分量转换成椭球面测站坐标系中的速度分量, 再乘上其比例因子, 就可以从测站高度归算到椭球面高度。即:

$$\begin{bmatrix} V_N \\ V_E \\ V_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_M & 0 & 0 \\ 0 & k_N & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_N \\ V_E \\ V_U \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\cos L \sin B & -\sin L \sin B & \cos B \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos L \cos B & \sin L \cos B & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (11)$$

这里 k_N, k_M 是测站点对应椭球面上点处的卯酉圈半径 R_N 、子午圈半径 R_M 与测站处的相似椭球面的卯酉圈半径 R'_N 、子午圈半径 R'_M 之比值。设 a, b 为平均椭球的长、短半轴, 又设测站的大地高为 H , 则在测站处的相似椭球面的长、短半轴分别是: αa 和 αb , 其中^[17]:

$$\alpha = 1 + \frac{H}{\sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}} \quad (12)$$

式中, B 为测站点的大地纬度。由于:

$$R_N = \frac{a^2}{(a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B)^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

$$R_M = \frac{a^2 b^2}{(a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B)^{\frac{3}{2}}} \quad (14)$$

所以比例因子:

$$k_N = \frac{R'_N}{R_N} = \frac{1}{\alpha}, \quad k_M = \frac{R'_M}{R_M} = \frac{1}{\alpha} \quad (15)$$

参考式 (12), 可见对于归化到平均椭球体表面的站心坐标系中的北东向速度而言, 比例因子 k_N, k_M 与测站的纬度和大地高有关。图 2 绘制了大地高为 1 km、2 km、5 km 和 10 km 时比例因子随纬度变化的情况。

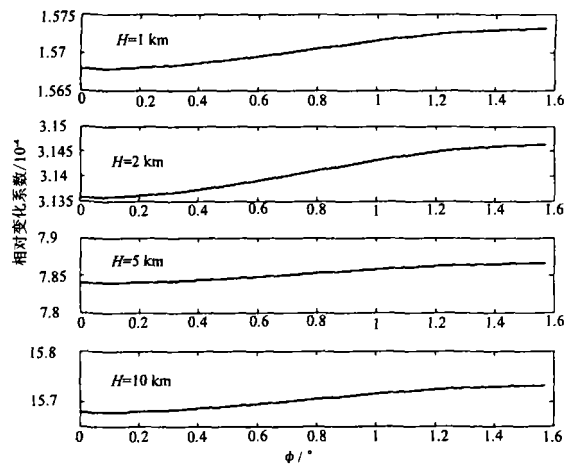


图 2 速度归算相对变化量与高程和纬度的关系

Fig. 2 The relative changes of velocity transformation related to altitude and latitude

图 2 中的纵坐标为 $\alpha - 1$ 。从图 2 中可见, 比例因子引起的相对变化量主要取决于站点的高度, 随高度的增加而增大。当站点的高度在 1 km 时, 相对变化量约为万分之一; 当站点的高度在 10 km 时, 相对变化量约为千分之一。这样对于厘米级大小和毫米级精度的速度而言, 从测站高度归算到椭球面高度所产生的速度变化通常可以忽略不计。对

于归算到球面的情况,引起的速度相对变化系数与归算到椭球面的相当,当 $r - R = 1 \text{ km}$ 时,相对变化系数为: $\frac{r-R}{R} = \frac{1}{6371} = 1.57 \times 10^{-4}$; 当 $r - R = 10 \text{ km}$ 时,相对变化系数为: $\frac{r-R}{R} = \frac{10}{6371} = 1.57 \times 10^{-3}$ 。

4 速度转换中的误差传播

由式(10)和式(11),忽略高程归算对速度的影响,设在地心坐标系中速度分量的方差阵为 Σ_c ,而测站坐标系中的速度分量的方差阵为 Σ_L ,则:

$$\Sigma_L = T \Sigma_c T^T \tag{16}$$

式中:

$$T = \begin{bmatrix} -\cos L \sin B & -\sin L \sin B & \cos B \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos L \cos B & \sin L \cos B & \sin B \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\Sigma_L = \begin{bmatrix} \sin^2 B \cos^2 L \sigma_1^2 + \sin^2 B \sin^2 L \sigma_2^2 + \cos^2 B \sigma_3^2 & 0.5 \sin B \sin 2L (\sigma_1^2 - \sigma_2^2) & 0.5 \sin 2B (\sigma_3^2 - \sin^2 L \sigma_2^2 - \cos^2 L \sigma_1^2) \\ 0.5 \sin B \sin 2L (\sigma_1^2 - \sigma_2^2) & \sin^2 L \sigma_1^2 + \cos^2 L \sigma_2^2 & 0.5 \cos B \sin 2L (\sigma_2^2 - \sigma_1^2) \\ 0.5 \sin 2B (\sigma_3^2 - \sin^2 L \sigma_2^2 - \cos^2 L \sigma_1^2) & 0.5 \cos B \sin 2L (\sigma_2^2 - \sigma_1^2) & \cos^2 B \cos^2 L \sigma_1^2 + \cos^2 B \sin^2 L \sigma_2^2 + \sin^2 B \sigma_3^2 \end{bmatrix} \tag{19}$$

所以,为了能得到较好的测站速度分量精度分布,在设计 GPS 测量网时,要尽可能保证点位精度是各向同性的。

5 球面测站坐标系和椭球面测站坐标系下速度分量的差别

由于测站高度对速度归算的影响很小,并且在坐标换算中, $\lambda = L$ 。对比式(10)和式(11),归算到球面测站坐标系下和椭球面测站坐标系下速度分量的差别主要取决于 B 和 φ 的差别。

忽略测站高度对速度归算的影响,由式(11),得椭球面测站坐标系下的速度分量:

$$\begin{aligned} V_N &= -\sin B \cos L V_X - \sin B \sin L V_Y + \cos B V_Z \\ V_E &= -\sin L V_X + \cos L V_Y \end{aligned} \tag{20}$$

根据式(10)得球面测站坐标系下的速度分量:

$$\begin{aligned} V'_N &= -\sin \varphi \cos \lambda V_X - \sin \varphi \sin \lambda V_Y + \cos \varphi V_Z \\ V'_E &= -\sin \lambda V_X + \cos \lambda V_Y \end{aligned} \tag{21}$$

则两者差别为(顾及 $\lambda = L$):

$$\begin{aligned} \Delta V_N &= V_N - V'_N = -(\sin B - \sin \varphi) \cos L V_X - (\sin B - \sin \varphi) \sin L V_Y + (\cos B - \cos \varphi) V_Z \\ \Delta V_E &= V_E - V'_E = 0 \end{aligned} \tag{22}$$

设 $\Delta B = B - \varphi$ 则 $\varphi = B - \Delta B$ 。实际上^[17]:

$$\Delta B = \arccos \left(\frac{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}{\sqrt{a^4 \cos^2 B + b^4 \sin^2 B}} \right) \tag{23}$$

由于 T 是正交矩阵,即: $TT^T = I$, 是单位矩阵。显然,根据式(16),如果 Σ_c 为对角阵,并且对角线上的元素都相等(等精度),则 Σ_L 也是对角阵,且 $\Sigma_L = \Sigma_c$ 。但如果 Σ_c 不是对角矩阵,或者虽然为对角阵,但对角线上的元数不都相等(速度分量之间有相关性或非等精度),则得到的站心坐标系下的方差阵具有非零的非对角元素。

如果在地心坐标系中,速度的方差阵为对角矩阵,则:

$$\Sigma_c = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 \end{bmatrix} \tag{18}$$

根据式(16),导出在测站坐标系下速度分量的方差阵为:

按此公式,我们绘制了 B 在 $[0, \frac{\pi}{2}]$ 区间内变化时, ΔB 的变化曲线,如图 3 所示。显然,当 B 在 $[0, -\frac{\pi}{2}]$ 区间内变化时, ΔB 的变化曲线与此类似。

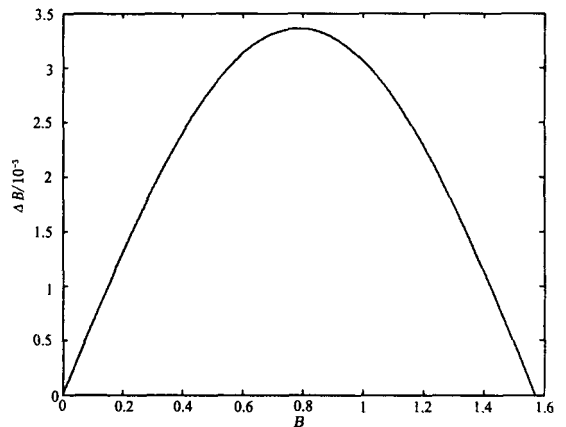


图 3 ΔB 随纬度变化的曲线

Fig. 3 The change of ΔB with latitude

从图 3 中可以看到, ΔB 是一个微量,可取 $\sin \Delta B \approx \Delta B$, $\cos \Delta B \approx 1$, 于是有:
 $\sin \varphi = \sin(B - \Delta B) = \sin B \cos \Delta B - \cos B \sin \Delta B \approx \sin B - \cos B \Delta B$

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \cos(B - \Delta B) = \\ &= \cos B \cos \Delta B + \sin B \sin \Delta B \approx \\ &= \cos B + \sin B \Delta B \end{aligned} \quad (24)$$

代入式(21)得:

$$\begin{aligned} \Delta V_N &= -\cos B (\cos L V_X + \sin L V_Y) \Delta B - \sin B V_Z \Delta B \\ \Delta V_E &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

由于 $V_U = \cos B (\cos L V_X + \sin L V_Y) + \sin B V_Z$, 所以:

$$\Delta V_N = -V_U \Delta B \quad (26)$$

对于地壳运动而言(欧拉运动), $V_U = 0$, 所以, $\Delta V_N = 0$ 。但是由于误差的存在, 或实际上可能存在的径向运动, V_U 一般不等于零, 考虑到 ΔB 在 10^{-3} 量级(图3), ΔV_N 应该在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级。如果计算得到的 ΔV_N 比较大, 说明垂直方向(法线方向)的速度分量较大, 原来得到的地心坐标中的速度在垂直方向的精度较差, 或者存在粗差(天线高量错)。

我们按式(10)、(11)分别计算了我国境内931个GPS站点在两种测站坐标系下的北速度分量, 并且比较了它们的差别, 其差别在各指定区间出现的频次如图4所示。从图4中可以看出, 绝大部分站点的 ΔV_N 都很小, 表示没有明显的垂直运动分量; 但是, 其中有18个站点的 $\Delta V_N > 1.0 \times 10^{-4}$, 该18个站均位于华北盆地内部沿黄河北岸的邢台、石家庄、天津一带, 有必要对它们的数据处理作进一步检查: 要么是该地区有明显的沉降运动, 要么是这些点的数据可能有错误。如果是后者, 在后续的应变分析中, 可以人为地剔除这些点, 然后比较计算结果的差别, 这项工作将在另文中给出。

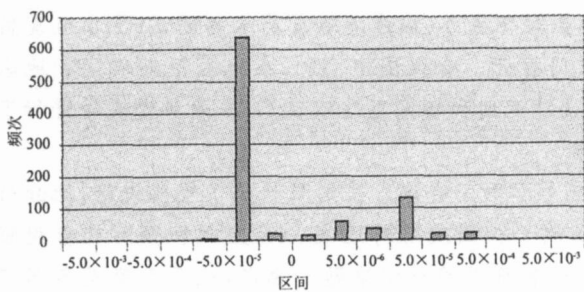


图4 ΔV_N 的区间频次分布直方图

Fig. 4 The histogram of interval frequency distribution of ΔV_N

6 结论

在将地心坐标系中的速度分量转换到测站坐标系中的速度分量时, 测站高度对速度转换影响的相对变化在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$, 且随纬度的增加而增大。对于厘米量级的速度而言, 该项影响一般可以忽略不计。从误差传播的角度分析, 要保持转换后速度的

精度, GPS 站点的点位精度最好是各项同性的。另外, 转换到球面测站坐标系和转换到椭球面测站坐标系的速度分量差别, 主要表现在北向速度分量上, 一般在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级, 测站高度的影响亦可忽略不计。但对于有明显垂直(径向)运动的站点, 差别会显著增大。

致谢 本文研究工作得到中国香港特别行政区研究基金委员会的资助(项目代码: A. 34. 37. PF70)和中科院测地所动力大地测量开放实验室资助

References

- 1 Savage J C and Lisowski M. Geodetic monitoring of the southern San Andreas fault, California, 1980–1991[J]. J. Geophys. Res., 1995, 100: 8 185– 8 192.
- 2 Larsen S and Reilinger R. Global Positioning System measurements of strain accumulation across the Imperial Valley, California: 1986–1989[J]. J. Geophys. Res., 1992, 97: 8 865– 8 876.
- 3 Kato T M, Imae M, Sasaki M, Murata M and Kunimori H. Application of space techniques to geodesy and geodynamics in Japan[J]. J. Phys. Earth, 1995, 43, 629–655.
- 4 牛之俊, 马宗晋, 陈鑫连, 等. 中国地壳运动观测网络[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 88–93.
- 4 Niu Zhijun, Ma Zongjin, Chen Xinlian, et al. Crustal movement observation network of China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002, 22(3): 88–93. (in Chinese)
- 5 Wu J C. Inverse analysis of crust deformation measurements[D], PHD Thesis, Hong Kong, The Hong Kong Polytechnic University, 1999.
- 6 周硕愚, 吴云, 施顺英, 等. 中国大陆东南边缘海现时地壳运动与地震动力学综合研究[J]. 地壳形变与地震, 2001, 21(1): 1–14.
- 6 Zhou Shuoyu, Wu Yun, Shi Shunying, et al. Integrated research on current crustal movement and earthquake dynamics in marginal sea, southeast of China continent[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 2001, 21(1): 1–14. (in Chinese)
- 7 游新兆, 杜瑞林, 王琪, 等. 中国大陆地壳现今运动的 GPS 测量结果与初步分析[J]. 地壳形变与地震, 2001, 21(3): 1–8.
- 7 You Xinzhaoh, Du Ruilin, Wang Qi, et al. GPS results of current crustal movement of China continent and primary analysis[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 2001, 21(3): 1–8. (in Chinese)
- 8 帅平, 吴云, 周硕愚. 用 GPS 测量数据模拟中国大陆现今地壳水平速度场及应变场[J]. 地壳形变与地震, 1999, 19

- (2): 1~ 8.
- 8 Shuai Ping, Wu Yun and Zhou Shuoyu. The current crustal horizontal velocity fields and strain fields in the continent of China simulated with GPS data[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1999, 19(2): 1- 8. (in Chinese)
- 9 张跃刚, 胡新康. 华北地区块体及其边界相对运动[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(1): 47~ 50.
- 9 Zhang Yuegang and Hu Xinkang. Relative motion between plates and their boundaries in North China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(1): 47- 50. (in Chinese)
- 10 许厚泽, 熊熊. 东北亚大陆地壳运动的 GPS 研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2004, 24(4): 1~ 6.
- 10 Xu Houze, Xiong Xiong. Study on continental crust movement of Northeast Asia with GPS[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004, 24(4): 1- 6. (in Chinese)
- 11 石耀霖, 朱守彪. 利用 GPS 观测资料划分现今地壳活动块体的方法[J]. *大地测量与地球动力学*, 2004, 24(2): 1~ 5.
- 11 Shi Yaolin and Zhu Shoubiao. Method for division of present active crustal blocks by GPS survey data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004, 24(2): 1- 5. (in Chinese)
- 12 甘卫军, 沈正康, 张培震, 等. 青藏高原地壳水平差异运动的 GPS 观测研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2004, 24(1): 29~ 35.
- 12 Gan Weijun, Shen Zhengkang, Zhang Peizhen, et al. Horizontal crustal movement of Tibetan plateau from GPS measurements[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004, 24(1): 29- 35. (in Chinese)
- 13 黄立人. GPS 观测结果变形分析的参考框架及其合理性[J]. *测绘学报*, 2001, 30(1): 16~ 20.
- 13 Huang Liren. Reference frame and its advisability in deformation analysis of GPS observation results[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(1): 16- 20. (in Chinese)
- 14 Wang Qi, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements[J]. *Science*, 294, 574- 577.
- 15 Kao T, El-Fiky F, Oware E N and Miyazaki S. Crustal strains in the Japanese islands as deduced from dense GPS array[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25, 3 445 - 3 448.
- 16 Hofmann B, Lichtenegger H and Collins J. *Global Positioning System, theory and practice*[M]. Fifth Revised Edition, Springer-Verlag/Wien, 2001, 281- 282.
- 17 郭俊义. *物理大地测量学基础*[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994, 133- 134.
- 17 Guo Junyi. *Basics of physical geodesy*[M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1994, 133- 134. (in Chinese)

GPS 在地震监测预报中的应用研讨会在厦门召开

中国地震局监测预报司和中国地震学会形变专业委员会联合主办、福建省地震局承办的 GPS 在地震监测预报中的应用研讨会, 于 2005 年 6 月 25 日至 27 日在厦门召开。会议围绕 GPS 在地震预测研究和地球动力学研究中的应用、GPS 与地震监测预报试验场建设设计规划和研究思路以及 GPS 最新发展等进行了学术交流。来自全国的 40 多位专家学者参加了这次研讨会。

中国地震局岳明生副局长、监测预报司车时副司长等领导参加了会议。岳副局长作了重要讲话, 他分析了 2004 年 12 月 26 日印尼地震海啸对世界各国的影响, 强调了我国政府对地震灾害监测和预防的重视程度。并勉励大家珍惜国家给予的有利条件, 抓住机遇, 攻克地震预报的科学难题。他说, 地壳形变是各国研究地震预报普遍重视的方法, 但传统的形变方法存在观测效率低, 资料不连续且干扰多的弱点。GPS 观测为地壳形变研究提供了高精度、高效率、连续、大面积的监测方法, 解决了监测难题; 但 GPS 监测也还有很多问题没有解决, 需要我们去研究。最后, 他鼓励地震科技工作者要充分利用已取得的观测成果, 深入进行地震预报研究, 为我国的防震减灾做出应有的贡献。

中国地震局地震研究所 龚凯虹
2005 年 7 月 4 日