

2000中国大地坐标系^{*}

魏子卿

(西安测绘研究所, 西安 710054)

摘 要 2000中国大地坐标系是我国新一代大地坐标系。在扼要叙述我国新一代大地坐标系建立的背景和基本原则之后, 详细介绍2000中国大地坐标系的定义和实现, 给出参考椭球的定义常数和导出常数, 以及相关的正常重力公式, 最后对坐标系进行几点说明。

关键词 2000中国大地坐标系 (CGCS2000); 地心大地坐标系; 参考椭球; 正常重力公式; 常数

中图分类号 P227

文献标识码 A

CHINA GEODETIC COORDINATE SYSTEM 2000

Wei Ziqing

(Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054)

Abstract The China Geodetic Coordinate System 2000 is a new generation of the national geodetic coordinate system. Having explained briefly the background and the basic principles of setting up the new generation national geodetic coordinate system, this paper expounds its definition and realization, gives the defining constants and derived constants of the reference ellipsoid used and the related formulas for the normal gravity, and finally addresses several items noting on the coordinate system.

Key words China Geodetic Coordinate System 2000; geocentric geodetic coordinate system; reference ellipsoid; normal gravity formulas; constant

1 引言

如所周知, 20世纪50年代, 为满足测绘工作的迫切需要, 我国采用了1954年北京坐标系, 后来随着天文大地网布设任务的完成, 通过天文大地网整体平差, 于80年代初我国又建立了1980西安坐标系。应当肯定, 1954北京坐标系和1980西安坐标系在我国的经济建设和国防建设中发挥了巨大作用。同时也应当看到, 随着情况的变化和时间的推移, 这两个以经典测量技术为基础的局部大地坐标系, 目前已经不能适应科学技术特别是空间技术发展, 不能适应我国经济建设和国防建设需要。我国

大地坐标系的更新换代, 是经济建设、国防建设、社会发展和科技发展的客观需要。

以地球质量中心为原点的地心大地坐标系, 是当今空间时代全球通用的基本大地坐标系。以空间技术为基础的地心大地坐标系, 是我国新一代大地坐标系的适宜选择。地心大地坐标系可以满足大地测量、地球物理、天文、导航和航天应用以及经济、社会发展的广泛需求。多年以来, 我国测绘、地震部门和科学院有关单位为建立我国新一代大地坐标系作了大量基础性工作, 近年又先后建成全国GPS一、二级网, 国家GPS A、B级网, 中国地壳运动观测网络和许多地壳形变网, 为地心大地坐标系的实现奠

* 收稿日期: 2008-09-30

作者简介: 魏子卿, 男, 1937年生, 中国工程院院士, 近期主要研究大地坐标系和大地边值问题。E-mail: ziqingw@public.xa.sx.cn

定了较好的基础。我国大地坐标系更新换代的条件业已具备。

我国新一代大地坐标系建立的基本原则是:

- 1) 坐标系应尽可能对准 IIRF(国际地球参考架)^[1];
- 2) 坐标系应由空间大地网在某参考历元的坐标和速度体现;
- 3) 参考椭球的定义参数选用长半轴、扁率、地球地心引力常数和地球角速度,其参数值采用 IUGG(国际大地测量与地球物理联合会)或 IERS(国际地球旋转与参考系服务局)的采用值或推荐值。

2000中国大地坐标系 (China Geodetic Coordinate System 2000 CGCS2000), 国人又称之为 2000 国家大地坐标系,是我国新一代大地坐标系,现已在全国正式实施^[2]。本文意在介绍 2000中国大地坐标系的定义和实现,给出参考椭球的定义常数和导出常数以及相关的正常重力公式,并对坐标系作几点说明。

2 2000中国大地坐标系

2.1 定义

2000中国大地坐标系符合 IIRS(国际地球参考系)的如下定义^[1]:

- 1) 原点在包括海洋和大气的整个地球的质量中心;
- 2) 长度单位为米 (S)。这一尺度同地心局部框架的 TCG(地心坐标时)时间坐标一致;
- 3) 定向在 1984.0 时与 BH(国际时间局)的定向一致;
- 4) 定向随时间的演变由整个地球的水平构造运动无净旋转条件保证。

以上定义对应一个直角坐标系,它的原点和轴定义如下(图 1):

- 1) 原点:地球的质量中心;
- 2) Z轴:指向 IERS参考极方向;

- 3) X轴: IERS参考子午面与通过原点且同 Z轴正交的赤道面的交线;
- 4) Y轴:完成右手地心地固直角坐标系。

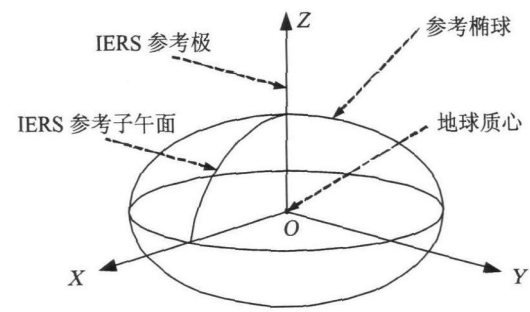


图 1 CGCS2000定义的示意图
Fig 1 Sketch for the definition of CGCS2000

CGCS2000的参考椭球为一等位旋转椭球。等位椭球(或水准椭球)定义为其椭球面是一等位面的椭球^[3]。CGCS2000的参考椭球的几何中心与坐标系的原点重合,旋转轴与坐标系的 Z轴一致。参考椭球既是几何应用的参考面,又是地球表面上及空间正常重力场的参考面。等位旋转椭球由 4 个独立常数定义。CGCS2000 参考椭球的定义常数是^[4]:

- 长半轴 $a = 6\,378\,137.0\text{ m}$;
- 扁率 $f = 1/298\,257\,222.101$;
- 地球的地心引力常数(包含大气层) $GM = 3\,986\,004.418 \times 10^8\text{ m}^3\text{ s}^{-2}$;
- 地球角速度 $\omega = 7\,292\,115.0 \times 10^{-11}\text{ rad s}^{-1}$ 。

根据以上 4 个定义常数,利用文献[3,4]给出的公式,可以算出一系列导出常数。常用的导出几何常数列于表 1,导出物理常数列于表 2。

2.2 实现

CGCS2000由 2000 国家 GPS大地网^[5]在历元 2000.0 的点位坐标和速度具体实现。2000 国家 GPS大地网是下列 GPS网经联合平差得到的一个全国规模的 GPS大地网(图 2):

表 1 CGCS2000参考椭球的导出几何常数
Tab 1 Derived geometrical constants for the CGCS2000 ellipsoid

常数名	值	常数名	值
短半轴 b	6 356 752 314.1 m	轴比 b/a	0.996 647 189 319
线偏心率 E	521 854 009 700.25 m	子午圈一象限弧长 Q	10 001 965 729.3 m
极曲率半径 c	6 399 593 625.9 m	椭球体积 V	1 083 207 319 783.546 km ³
第一偏心率平方 e ²	0.006 694 380 022 90	椭球表面积 S	510 065 621.718 km ²
第一偏心率 e	0.081 819 191 042 816	平均半径 R ₁	6 371 008 771.4 m
第二偏心率平方 e' ²	0.006 739 496 775 48	同面积之球的半径 R ₂	6 371 007.180 9 m
第二偏心率 e'	0.082 094 438 151 917	同体积之球的半径 R ₃	6 371 000.790 0 m

表 2 CGCS2000参考椭球的导出物理常数
Tab 2 Derived physical constants for the CGCS2000 ellipsoid

常数名	值	常数名	值
椭球面正常位 U_0	62 636 851. 714 9 $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	赤道正常重力 γ_e	9 780 325 336 1 ms^{-2}
2阶带谐系数 J_2	0 108 262 983 225 8×10^{-2}	极正常重力 γ_p	9 832 184 937 9 ms^{-2}
4阶带谐系数 J_4	-0 237 091 125 614 1 $\times 10^{-5}$	平均正常重力 γ	9 797 643 222 4 ms^{-2}
6阶带谐系数 J_6	0 608 346 525 889 2 $\times 10^{-8}$	$m = \omega^2 a^2 b / (GM)$	0 003 449 786 506 78
8阶带谐系数 J_8	-0 142 681 100 979 8 $\times 10^{-10}$	$k = b \gamma_p / a \gamma_e - 1$	0 001 931 852 619 31
10阶带谐系数 J_{10}	0 121 439 338 334 3 $\times 10^{-13}$	地球质量 M (包括大气)	5 973 331 96 $\times 10^{24} \text{ kg}$

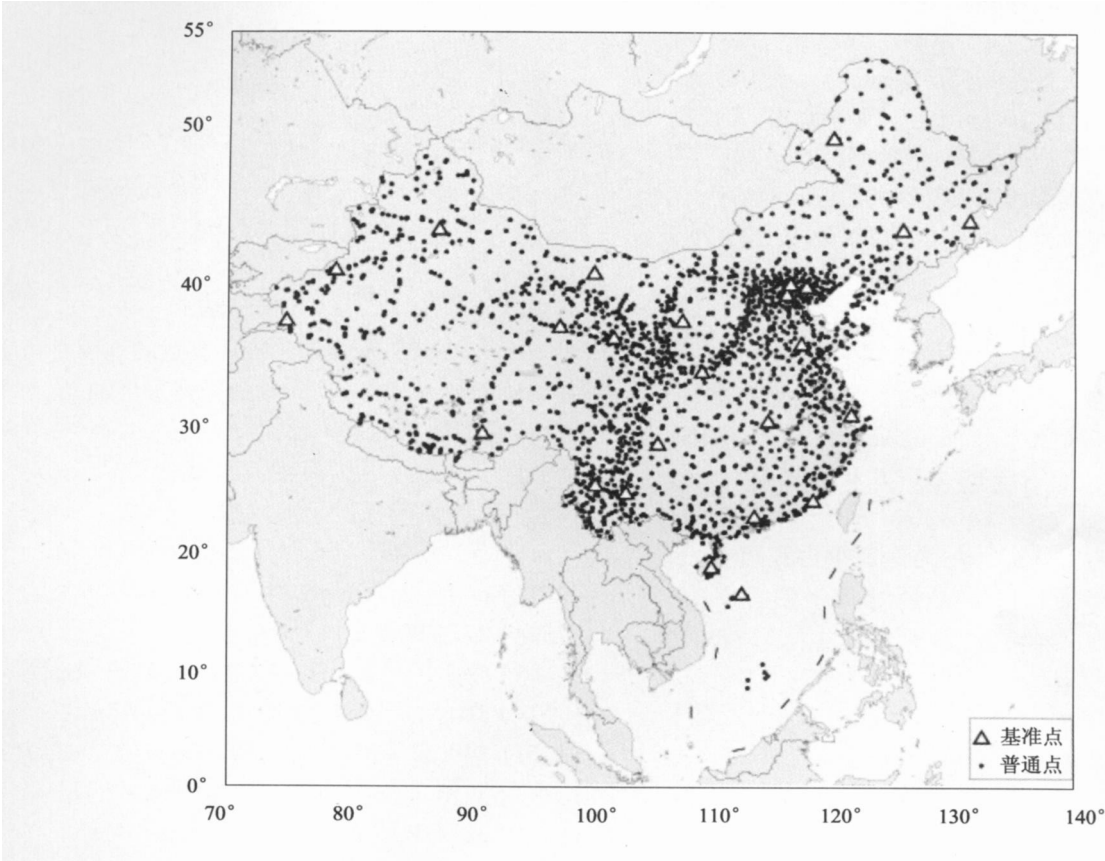


图 2 2000国家 GPS大地网的点位分布图
Fig 2 Distribution of points of the national GPS geodetic network 2000

- 1) 全国 GPS一、二级网 (534点), 1991— 1997 年布设;
- 2) 国家 GPS A B级网 (818点), 1991— 1996 年布设;
- 3) 地壳运动监测网 (336点), 包括全国 GPS地壳运动监测网 (21点), 1994、1996和 1999年进行 3 次观测; 还包括 9个区域性地壳形变监测网, 1988— 1998年施测;
- 4) 中国地壳运动观测网络 (1 081点), 包括基准网 (25点)、基本网 (56点)和区域网 (1 000点)。基准网自 1999年 1月连续观测; 基本网和区域网于 1999、2000和 2001年进行 3次施测。基本网每次

连续观测 10昼夜, 区域网连续观测 4昼夜。平差数据截止于 2001年底。

联合平差从中国地壳运动观测网络平差开始。它的平差分两步进行。第一步进行单时段 (一般为 24 h) 基线解。第二步将得到的所有单时段基线解与全球 100多个 IGS站的 H文件数据进行整体平差, 此时将全球分布的 47个 IGS核心站的 ITRF97 坐标和速度施以 1σ 的约束, 得到该网络点位三维坐标和速度的最小二乘解及协方差矩阵。坐标分量的平均中误差为 $\sigma_x=0.070 \text{ m}$, $\sigma_y=0.110 \text{ m}$, $\sigma_z=0.090 \text{ m}$; 速度分量误差为 $1 \sim 4 \text{ mm/a}$ 。最后用得到的速度将平差坐标归算到历元 2000.0 作为随

后诸网联合平差的基准数据。对于其余 3 个 GPS 网, 分别同样首先进行单时段基线解, 然后将它们的单时段基线解与先前得到的中国地壳运动观测网络的站坐标解一起进行联合平差, 平差中固定 IGS 站、基准网和基本网的站坐标, 对区域网站的南北、东西和高度坐标分量分别给予 5 mm、5 mm 和 10 mm 的约束。通过平差得到 2000 国家 GPS 大地网的最后坐标。主要精度统计数据是:

坐标平均中误差: $\sigma_x = 0.84$ mm, $\sigma_y = 1.82$ mm, $\sigma_z = 1.30$ mm, $\sigma_B = 0.40$ mm, $\sigma_L = 0.52$ mm, $\sigma_h = 2.31$ mm;

位置平均中误差: $\sigma_p = 2.42$ mm;

基线长度 (不计 20 km 以内的基线, 平均长度为 106 km) 平均误差: 0.0301×10^{-6} 。

以上平差数据显示, CGCS2000 的实现精度, 在历元 2000.0 时, 位置精度好于 3 mm; 水平速度约 3 mm/a。

3 CGCS2000 正常重力公式

3.1 椭球面上正常重力公式

椭球面上正常重力由 Somigliana 公式^[3,6]给出:

$$\gamma_0 = \gamma_e \frac{1 + k \sin^2 B}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} \quad (1)$$

式中: $k = b \gamma_p / a \gamma_e - 1$; γ_e 、 γ_p 为赤道重力和极重力; a 、 b 为椭球长半轴和短半轴; e^2 为第一偏心率 (平方), B 为大地纬度。 γ_e 、 γ_p 和 k 之值见表 2, e^2 之值见表 1。

实践中, 通常将封闭式 (1) 展成级数^[3,4]。对于 CGCS2000 级数展开式是 (单位: m s^{-2}):

$$\begin{aligned} \gamma_0 = & 9.7803253361(1 + 0.005279042631 \sin^2 B + \\ & 0.000023271799 \sin^4 B + \\ & 0.000000126218 \sin^6 B + \\ & 0.000000000730 \sin^8 B + \\ & 0.000000000004 \sin^{10} B) \end{aligned} \quad (2)$$

该式的误差为 $0.001 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$ 。传统的简化级数式, 对于 CGCS2000 是 (单位: m s^{-2}):

$$\gamma_0 = 9.7803253361(1 + 0.00530244 \sin^2 B - 0.00000582 \sin^2 2B) \quad (3)$$

该式的误差小于 $0.1 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-2}$ 。

3.2 椭球外部正常重力公式

椭球外部任意点的正常重力, 由以下公式给出^[4,7]:

$$\gamma = \sqrt{\gamma_u^2 + \gamma_\beta^2} \quad (4)$$

式中:

$$\gamma_u = -\frac{1}{w} \left[\frac{GM}{\bar{u} + E} + \frac{\omega^2 \bar{a} E}{\bar{u} + E} \frac{q}{\bar{q}} \left(\frac{1}{2} \sin^2 \beta - \frac{1}{6} \right) \right] +$$

$$\frac{1}{w} \omega^2 u \cos^2 \beta \quad (4a)$$

$$\gamma_\beta = -\frac{1}{w} \left[-\frac{\omega^2 \bar{a}}{\sqrt{\bar{u} + E}} \frac{q}{\bar{q}} + \omega^2 \sqrt{\bar{u} + E} \right] \sin \beta \cos \beta \quad (4b)$$

$$w = \sqrt{\frac{\bar{u} + E \sin^2 \beta}{\bar{u} + E}} \quad (4c)$$

$$u = \left\{ \frac{1}{2} \left[\bar{x} + \bar{y} + \bar{z} - E + \sqrt{(\bar{x} + \bar{y} + \bar{z} - E)^2 + 4E\bar{z}} \right] \right\}^{1/2} \quad (4d)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{z \sqrt{\bar{u} + E}}{u \sqrt{\bar{x} + \bar{y}}} \right] \quad (4e)$$

$$q' = 3 \left\{ 1 + \frac{\bar{u}}{E} \right\} \left[1 - \frac{u}{E} \tan^{-1} \left(\frac{E}{u} \right) \right] - 1 \quad (4f)$$

$$q = \frac{1}{2} \left[\left(1 + 3 \frac{\bar{u}}{E} \right) \tan^{-1} \left(\frac{E}{u} \right) - 3 \frac{u}{E} \right] \quad (4g)$$

$$q = \frac{1}{2} \left[\left(1 + 3 \frac{\bar{b}}{E} \right) \tan^{-1} \left(\frac{E}{b} \right) - 3 \frac{b}{E} \right] \quad (4h)$$

式中 \bar{x} 、 \bar{y} 和 u 、 β 、 λ 分别代表计算点的地固直角坐标和椭球坐标系坐标; b 为参考椭球短半轴, E 为线偏心率, 它们的值见表 1。

封闭式 (4) 可按高度 h 展成级数^[6,7]。对于 CGCS2000 至 h 的 4 次项的级数式是:

$$\begin{aligned} \gamma = & \gamma_0 - (3.08338788871 \times 10^{-6} + 4.429743963 \\ & \times 10^{-9} \cos^2 B - 1.9964614 \times 10^{-11} \cos^4 B) h + \\ & (7.2442777999 \times 10^{-13} + \\ & 2.116062 \times 10^{-15} \cos^2 B - 3.34306 \times 10^{-17} \cos^4 B - \\ & 1.908 \times 10^{-19} \cos^6 B - 4.86 \times 10^{-22} \cos^8 B) h^2 - \\ & (1.51124922 \times 10^{-19} + 1.148624 \times 10^{-21} \cos^2 B + \\ & 1.4975 \times 10^{-23} \cos^4 B + 1.66 \times 10^{-25} \cos^6 B) h^3 + \\ & (2.95239 \times 10^{-26} + 4.167 \times 10^{-28} \cos^2 B) h^4 \end{aligned} \quad (5)$$

式中 γ_0 为椭球面正常重力 (单位为 m s^{-2}), 按式 (2) 计算; B 为计算点的大地纬度, h 为它的大地高 (单位为 m)。

用式 (5) 计算正常重力的误差, 当 h 达到 20 km 时, 小于 $0.1 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$; 当 h 达到 70 km 时, 小于 $1 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$ 。

4 关于 CGCS2000 的几点说明

关于 CGCS2000 扼要作以下几点说明:

1) CGCS2000 的定义和 IIRS 的定义一致。CGCS2000 实现的实质是使 CGCS2000 框架对准 IIRF97。相对 IIRF97, CGCS2000 的实现精度, 对于水平坐标达到 1 mm 量级 (见第 2 节)。因此可以认为 CGCS2000 与 IIRF97 (IIRF2000 和 IIRF2005) 在 mm 级水平上是一致的。但是, 倘若一点的

CGCS2000 坐标精度达不到 cm 级水平, 这两个坐标系的坐标不可认为是一致的。

2) CGCS2000 的定义和 WGS84^[8,9] 实质上是一致的。它们采用的参考椭球非常接近, 仅扁率存在微小差异 (1/298 257 222 101 对 1/298 257 223 563^[8,9])。扁率差异引起椭球面上的纬度和高度坐标变化最大达 0.105 mm, 正常重力变化最大达 $0.016 \times 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$ ^[8,9]。在当前的测量精度范围内, 忽略这样小的坐标和重力变化是容许的。WGS84 (G1150)^[10] 是 WGS84 的最近 (2002 年) 一次实现。实现精度 (相对 IIRF2000), 对于每一坐标分量为 1 cm 量级^[10], 与 CGCS2000 的实现精度 (相对 IIRF97) 大体相当。因此可以说, CGCS2000 与 WGS84 (G1150) 相容至 cm 级水平。但是, 倘若一点的坐标精度达不到 cm 水平, 则不可认为 CGCS2000 和 WGS84 的坐标是相容的。

3) CGCS2000 和 1954 年北京坐标系或 1980 西安坐标系, 在定义与实现上有根本区别。局部坐标和地心坐标之间的变换是不可避免的。坐标变换可以通过联合平差实现, 而一般通过一定变换模型实现。当采用模型变换时, 变换模型的选择应依精度要求而定。对于高精度 (好于 0.5 m) 要求, 可采用基于最小曲率法^[11] 或其他方法的格网模型; 对于中等精度 (0.5 ~ 5 m) 要求, 可采用七参数 (3 个平移、1 个尺度和 3 个旋转) 模型; 对于低精度 (5 ~ 10 m) 要求, 可采用四参数 (3 个平移和 1 个尺度) 或三参数 (3 个平移) 模型。

4) CGCS2000 的实现为 2000 国家 GPS 大地网在历元 2000.0 的点位坐标和速度, 即是说, CGCS2000 框架由大约 2 500 个 GPS 点在历元 $t = 2000.0$ 的坐标 $\vec{X}(t)$ 和速度 $\dot{\vec{X}}(t)$ 构成。这些点在历元 $t \neq t_0$ 的坐标 $\vec{X}(t)$ 按下式计算:

$$\vec{X}(t) = \vec{X}(t_0) + (t - t_0) \dot{\vec{X}}(t_0) \quad (6)$$

如果速度 $\dot{\vec{X}}(t_0)$ 未知, 还应根据周围已知点的速度内插得到, 或按现成的板块运动模型计算。这方面的细节已超出本文的范围。

地面上一点的坐标, 受地壳运动和潮汐影响, 在时间上和空间上都是变化的。数据表明, 中国大陆不同点在 IIRF 框架内的运动速度为 3 ~ 5 cm^[9], 运动方向大致从西北向东南。在 cm 级精度要求的应用 (如 GPS 网平差) 中, 记住要将已知点的坐标从历元 t_0 归算至观测历元 t 。

致谢 CGCS2000 椭球的导出常数和椭球面正常重

力公式的系数由李迎春副研究员进行了认真检核。

参 考 文 献

1 Dennis D McCarthy and Gera Peti (eds). IERS Convention (2003) [R]. IERS Technical Note No. 32, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie Frankfurt am Main 2004

2 国家测绘局. 国家测绘局公告 (2008 年第 2 号). 2008 年 6 月 27 日中国测绘报.

2 State Bureau of Surveying and Mapping Announcement of the State Bureau of Surveying and Mapping No. 2 of 2008. China Surveying and Mapping News, 27 June 2008

3 Moritz H. Geodetic reference system 1980 [J]. Journal of Geodesy, 2000, 74: 128—133

4 魏子卿. 关于 2000 中国大地坐标系的建议 [J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(2): 1—4

4 Wei Ziqing. Proposal concerning China geodetic coordinate system 2000 [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006, 26(2): 1—4 (in Chinese)

5 陈俊, 等. 2000 国家大地控制网的构建和它的技术进步 [J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 1—8

5 Chen Junyong et al. Establishment of 2000 national geodetic control network of China and its technological progress [J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1): 1—8 (in Chinese)

6 Hofmann-Wellenhof B and Moritz H. Physical geodesy [M]. second edition, Springer Wien New York, 2006

7 魏子卿. 正常重力公式 [J]. 测绘学报, 2003, 32(2): 95—101

7 Wei Ziqing. Normal gravity formulae [J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(2): 95—101 (in Chinese)

8 National Imagery and Mapping Agency. Department of defense world geodetic system 1984. Its definition and relationships with local geodetic systems [R]. National Imagery and Mapping Agency technical report 8350.2 Third Edition

9 魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较 [J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5): 1—5

9 Wei Ziqing. China geodetic coordinate system 2000 and its comparison with WGS84 [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(5): 1—5 (in Chinese)

10 Addendum to NIMA TR 8350.2 Implementation of the World Geodetic System 1984 (WGS84) Reference Frame G1150 [EB/OL]. http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350_2/Addendum%20NIMA%20TR8350_2.Pdf

11 Briggs I C. Machine contouring using minimum curvature [J]. Geophysics, 1974, 39(1): 39—48