第 28卷第 5期
2008年 10月

大 地 测 量 与 地 球 动 力 学
JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS

Vol 28 No. 5
Oct , 2008

文章编号: 1671-5942(2008)05-0001-05

2000中国大地坐标系及其与 WGS84的比较*

魏子卿
(西安测绘研究所,西安 710054)

摘 要 阐述 2000中国大地坐标系(CGCS2000)的定义和实现及其与 WGS84的比较。CGCS2000是地心大地坐标系,采用 GRS80椭球,由 2000国家 GPS大地网的点在历元 2000.0的坐标和速度实现。CGCS2000与 ITRF一致,同 WGS84相容。

关键词 2000中国大地坐标系;地心大地坐标系; 2000国家 GPS大地网; WGS84; GRS80椭球
中图分类号: P227 **文献标识码**: A

CHINA GEODETIC COORDINATE SYSTEM 2000 AND ITS COMPARISON WITH WGS84

Wei Ziqing

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

Abstract This paper addresses the reason why a geocentric coordinate system is adopted for us, and expounds the definition and realization of the China Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000) and compares it with WGS84. The CGCS2000 is a geocentric system adopting the GRS80 ellipsoid, and is realized by coordinates and velocities at epoch 2000.0 of the points of the national GPS geodetic network 2000. It is consistent with ITRF and compatible with WGS84.

Key words: China Geodetic Coordinate System 2000; geocentric geodetic system; national GPS geodetic network 2000; WGS84; GRS80 ellipsoid

1 前言

作者在本刊第 26卷第 2期曾发表"关于 2000中国大地坐标系的建议"一文[1]。现在,2000中国大地坐标系已正式启用[2]。本文拟就 2000中国大地坐标系的个别方面作进一步的阐述和探讨。

2 我国为什么要采用地心大地坐标系?

大地坐标系,是大地测量的基础,与地球科学的其他学科,与陆海空导航,乃至与经济、社会和军事活动均有密切关系。大地坐标系是适应一定社会、经济和科技发展需要和发展水平的历史产物。直至 20世纪 60年代,受科技水平的限制,人们不得不使用经典大地测量技术建立起来的局部大地坐标系,它的基本特点是非地心的、二维的。50年代后期,随着人造地球卫星的上天,人类进入空间时代,大地测量科学也由经典时代进入空间时代。随着空间大地测量的兴起,产生了全球大地坐标系,它的基本特点是地心的、三维的。相对局部坐标系,全球坐标系有许多优点。它支持空间飞行器的定轨和测控,支

* 收稿日期: 2008-07-29
作者简介:魏子卿,男,1937年生,院士,近期研究方向是大地坐标系和大地边值问题. E-mail: ziqingw@public.xa.sn.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

持现代测量技术和卫星导航等空间技术的应用,方便世界各国大地坐标系的统一。全球大地坐标系是大地坐标系的发展趋势。

半个世纪以来,空间大地测量得到突飞猛进的发展,以 Doppler、VLBI、SLR和 GPS为代表的空间大地测量技术,为古老的大地测量学带来了崭新的面貌。当今空间大地测量已取代三角测量、导线测量等成为主要的大地测量技术。此外,GPS在导航、交通运输以及其他许多领域的应用也很普及。

空间技术极大地推动了大地坐标系的发展。正是空间技术催生了地心大地坐标系,同时它又为建立地心大地坐标系提供了有力的手段。有了空间技术,才有地心坐标系的产生和发展。可以说,没有空间技术,就没有 WGS系列的坐标系,就没有 ITRF系列的参考框架。国际上如此,我国也不例外。正是有了空间技术,我国才建立了全国卫星多普勒网,全国一、二级 GPS网,国家 A、B级 GPS网,中国地壳运动观测网络,以及其他许多形变监测网。又正是这些不同的空间网,为我国建立地心大地坐标系奠定了坚实的基础,提供了必要的条件,才有今日的2000中国大地坐标系。

我国为什么要采用地心大地坐标系?简单说来,以传统大地测量为基础的局部二维大地坐标系已不能适应空间技术的发展,唯有以空间技术为基础的地心三维大地坐标系,才能适应大地测量的发展,才能适应空间技术应用的需要,才能适应经济社会发展地需要。科技、经济、社会发展的需求呼唤一个地心三维的高精度大地坐标系,同时近年我国空间技术的发展成就又为我们提供了采用这样一个大地坐标系的条件。

3 2000中国大地坐标系的定义和实现

2000中国大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS2000),国人称之为 2000国家大地坐标系。作为一个现代地球参考系,它符合国际地球参考系(ITRS)的下列条件[3]:

1)它是地心的,地心被定义为包括海洋和大气的整个地球的质量中心;

2)长度单位是米(SI)。这一尺度同地心局部框架的 TCG(地心坐标时)时间坐标一致,由适当的相对论模型化得到;

3)它的定向初始由在 1984.0国际时间局(BIH)的定向给定;

4)定向的时间演变由整个地球上水平构造运动无净旋转条件保证。

CGCS2000为右手地固正交坐标系,其原点和轴向的定义是:原点在地球的质量中心;Z轴指向IERS参考极(IRP)方向;X轴为 IERS参考子午面(IRM)与通过原点且同 Z轴正交的赤道面的交线;Y轴与 Z、X轴构成右手正交坐标系。

CGCS2000的参考椭球为一旋转椭球,其几何中心与坐标系的原点重合,其旋转轴与坐标系的 Z轴一致。参考椭球面在几何上代表地球表面的数学形状。

CGCS2000的参考椭球在物理上代表一个等位椭球(水准椭球),其椭球面是地球正常重力位的等位面。

参考椭球的 4个常数是[1,2]:

长半轴: $a = 6\,378\,137.0$ m

扁率: $f = 1/298.257\,222\,101$

地心引力常数: $GM = 3\,986\,004.418 \times 10^8$ m^3 s^{-2}

地球自转角速度: $\omega = 7\,292\,115.0 \times 10^{-11}$ rads^{-1}

值得指出,这里 a、f采用的是 GRS80值[4],GM、ω采用的是 IERS推荐值[3]。

CGCS2000通过 2000国家 GPS大地网的点在历元 2000.0的坐标和速度具体体现。2000国家 GPS大地网由中国地壳运动观测网络(包括基准网、基本网和区域网),全国 GPS一、二级网,国家 GPS A、B级网和地壳形变监测网等空间网(共 2 518点)经联合平差得到。平差数据截止至 2001年底。联合平差分两步进行。第一步,将中国地壳运动观测网络的数据与全球 100多个 IGS站的数据(H文件形式)进行联合平差,平差中将 47个 IGS核心站在历元 2000.0的 ITRF97坐标和速度施以1σ约束,使中国地壳运动观测网络纳入 ITRF框架,该网络的平差坐标的平均中误差为 $\sigma_x = 0.070$ cm, $\sigma_y = 0.110$ cm, $\sigma_z = 0.090$ cm;水平速度误差为 1~4 mm/a。第二步,将 4个网的单时段基线解进行整体平差。此时,固定 IGS站、基准网和基本网的站坐标,给予区域网站的纬度、经度和高度坐标分别给予 5 mm、5 mm和 10 mm的约束,以保证平差坐标体现的框架对准 ITRF97。通过整体平差得到 2000国家 GPS大地网的坐标精度是:坐标平均中误差 $\sigma_x = 0.84$ cm, $\sigma_y = 1.82$ cm, $\sigma_z = 1.30$ cm; $\sigma_B = 0.40$ cm, $\sigma_L = 0.52$ cm, $\sigma_h = 2.31$ cm。位置平均中误差 $\sigma_p = 2.42$ cm。基线长度(不计短于 20 km的基线,平均长度为 106 km)平均误差 0.03×10^{-6}①。这

① 有关数据引自 GJB 6304-2008《2000中国大地测量系统》

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

样,CGCS2000的实现精度是:在参考历元 2000.0,水平坐标与高程坐标的精度分别好于 1 cm和 3 cm,水平速度的精度约 3 mm/a。

值得注意的是,在 CGCS2000的实现中,没有天文大地网的地位。这是因为,就其精度和坐标的一致性而言,作为常规大地测量产物的天文大地网没有资格参与 CGCS2000的实现。应该承认,"CGCS2000坐标系通过空间大地网(包括 GPS连续运行网, GPS A、B级网和 GPS一、二级网和区域网)与天文大地网的组合实现"的说法[1]不够准确,也欠妥当。天文大地网与空间网的组合(通常通过联合平差),不能被认为是在现代意义上实现地心大地坐标系的一种方法,而应视为进行坐标转换(由局部坐标系转换到地心坐标系,或者相反)的一种方法。

当我们说"2000国家 GPS大地网在历元 2000.0的坐标和速度代表 CGCS2000的实现"时,我们给坐标赋予了时间标记,这是与这样的事实相联系的,即地球表面上一点的坐标受板块运动和潮汐影响在时间上和空间上是变化的。图 1是中国大陆速度场略图,显示点的运动速度一般为 3～5 cm/a、运动方向呈顺时针旋转趋势。如此显著的点位变化,对于精密应用(例如 cm级精度要求),显然是不可忽略的。顾及位置变化的模型是:

$$\vec{X}(t) = \vec{X}(t_0) + \dot{\vec{X}}(t_0)(t - t_0) \qquad (1)$$

式中,$\vec{X}(t)$是任意历元 t时的坐标 x、y、z;$\vec{X}(t_0)$为参考历元 t_0(t_0 = 2000.0)时的坐标 x、y、z;$\dot{\vec{X}}(t_0)$为参考历元 t_0时的速度。

这一模型用来将参考历元的站坐标归算至不同于参考历元的观测历元。例如,在 GPS网平差中,假定 t为网的观测历元,要求计算观测历元 t的未知点坐标,那么,应利用式(1)将起始点坐标由参考历元 t_0 = 2000.0归算至观测历元 t。在实际工作中,人们往往不注意这一点,实有提醒的必要。

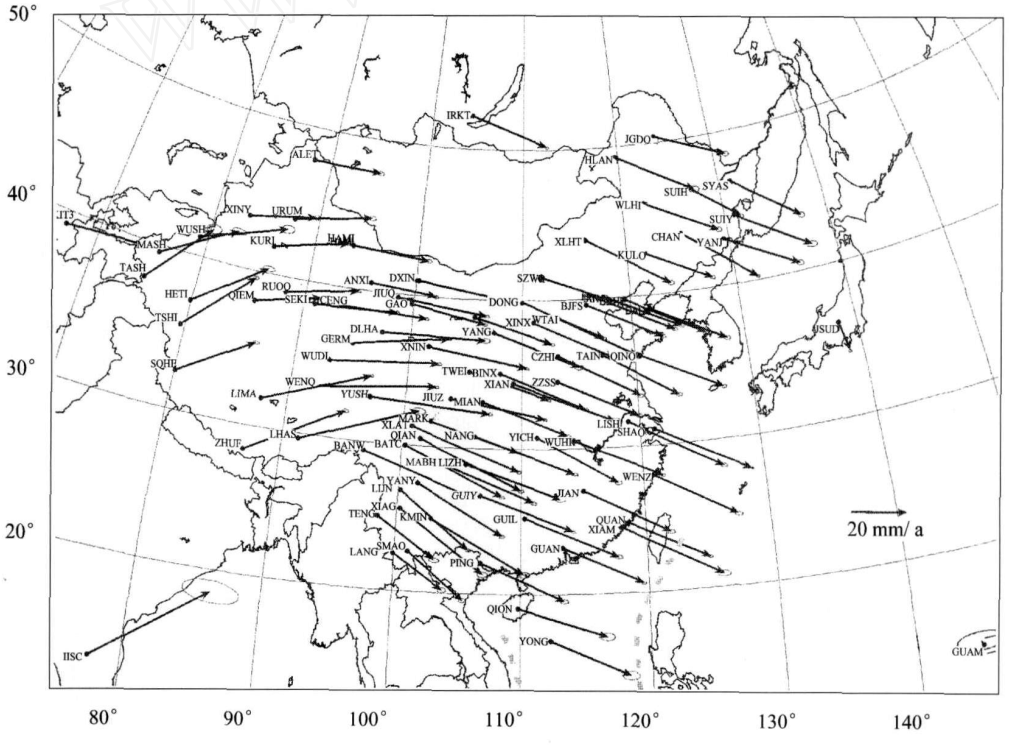


图 1　中国大陆速度场略图

Fig 1　Velocity field of China continent

4　CGCS2000与 WGS84的比较

鉴于已拥有大量 GPS数据,可以预期未来 GPS仍是主要的空间数据源之一。GPS使用 WGS84坐标系[5],CGCS2000和 WGS84是否相容?在 WGS84和 CGCS2000之间是否需要进行坐标转换?要回答这些问题,对 CGCS2000与 WGS84进行某种比较是必要的。

在定义上,CGCS2000与 WGS84是一致的,即关于坐标系原点、尺度、定向及定向演变的定义都是相同的。两个坐标系使用的参考椭球也非常相近,具体地说,在 4个椭球常数 a、f、GM、ω中,唯有扁率

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

f有微小差异：$f_{WGS84}=1/298.257\ 223\ 563$[5]，$f_{CGCS2000}=1/298.257\ 222\ 101$。其实，WGS84的初始版本，也是采用GRS80椭球，后来几经微小改进（细节可查阅有关文献），才导致WGS84椭球的扁率相对GRS80椭球的扁率产生微小的差异。

参考椭球的扁率差异df将导致同一点在两个坐标系内的大地坐标产生差异，也导致正常重力产生差异。df引起大地纬度B、大地经度L、大地高H的变化用下式表示[6]：

$$\left.\begin{aligned} dL &= 0\\ dB &= \frac{M[2-(2f-f^2)\sin^2 B]}{(1-f)}\sin B\cos B\,df \quad (\text{长度单位})\\ dH &= \frac{M}{1-f}[1-(2f-f^2)\sin^2 B]\sin^2 B\,df \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中M为子午圈曲率半径。

df引起椭球面上正常重力γ的变化，用$d\gamma=(\partial\gamma/\partial f)\,df$计算，其中$\gamma$可以表示为

$$\gamma=\frac{\gamma_e\cos^2 B+(1-f)\gamma_p\sin^2 B}{\sqrt{\cos^2 B+(1-f)^2\sin^2 B}} \tag{3}$$

（Somigliana公式[7]）

根据式(3)求γ对f的偏导数时，应记住赤道重力γ_e和极重力γ_p也是f的函数。为节省篇幅，这里我们略去了$\partial\gamma/\partial f$的式子。

在表1中，按5°的纬度间隔，列出了在赤道至两极的范围内由$df=f_{CGCS2000}-f_{WGS84}=1.643\ 484\times10^{-11}$引起的大地纬度$B$、大地高$H$和椭球面上正常重力$\gamma$的变化。由式(2)和表1的数据可以得出：

1) df不引起大地经度变化；

2) df引起大地纬度的变化范围为0（赤道和两极）至0.105 mm（$B=45°$）；

3) df引起大地高的变化范围为0（赤道）到0.105 mm（两极）；

4) df引起椭球面上正常重力的变化范围为0（两极）到$0.016\times10^{-8}\,\mathrm{m\,s^{-2}}$（赤道）。

显见，在当前的测量精度水平（坐标测量精度1 mm，重力测量精度$1\times10^{-8}\,\mathrm{m\,s^{-2}}$），由两个坐标系的参考椭球的扁率差异引起同一点在WGS84和CGCS2000坐标系内的坐标变化和重力变化是可以忽略的。

与CGCS2000通过空间网点的坐标和速度实现相仿，WGS84通过GPS监测站坐标实现，监测站坐标用来计算GPS的精密星历。1987年建立的初始WGS84参考框架是通过NNSS或TRANSIT (Doppler)站坐标实现的[5]，站坐标相对BTS（BIH地球系）存在1～2 m的不确定度，后来还发现椭球

表1 椭球的扁率变化引起的大地纬度、大地高和椭球面上正常重力的变化

Tab.1 Changes in geodetic latitude, height and normal gravity on the ellipsoidal surface caused by the change in flattening of the ellipsoid

B(°)	dB(mm)	dH(mm)	$d\gamma$($10^{-8}\,\mathrm{m\,s^{-2}}$)
0	0.000	0.000	0.016
5	0.018	0.001	0.016
10	0.036	0.003	0.016
15	0.052	0.007	0.015
20	0.067	0.012	0.014
25	0.080	0.019	0.013
30	0.091	0.026	0.012
35	0.098	0.034	0.011
40	0.103	0.043	0.009
45	0.105	0.052	0.008
50	0.103	0.061	0.007
55	0.099	0.070	0.005
60	0.091	0.079	0.004
65	0.080	0.086	0.003
70	0.068	0.093	0.002
75	0.053	0.098	0.001
80	0.036	0.102	0.000
85	0.018	0.104	0.000
90	0.000	0.105	0.000

高度存在系统偏差。为了维持框架的精确性和稳定性，1994、1996和2002年WGS84又先后进行3次实现[5,8]，即对GPS监测站的坐标进行3次更新，以使框架对准ITRF。使用的基本方法是，通过联合处理GPS监测站和IGS站的测量数据，解算GPS监测站的坐标，在处理中对IGS站的ITRF坐标施以强约束。以最近(2002)一次实现为例，参与处理的数据包括17个GPS监测站（其中6个USAF（美国空军）站，11个NGA（国家地球空间情报局）站）和49个IGS站在2001年2月14—28日期间的GPS数据（和气象数据），处理中将IGS站的ITRF2000坐标（用站速度将坐标从参考历元1997.0归算至观测期间）加以固定[8]。

WGS84的3次实现得到的框架，依次叫做WGS84(G730)、WGS84(G873)和WGS84(G1150)，这里“G”指示GPS测量数据被用来得到站坐标，在“G”后面的号码指示新的站坐标开始用于计算精密星历的GPS星期号。最新框架WGS84(G1150)由17个GPS监测站在历元2001.0的坐标和速度来体现。WGS84(G1150)的估计精度是：每个监测站的每一坐标分量的精度为1 cm量级（1倍标准差）[8]（作为比较，WGS84(G730)和WGS84(G873)的精度

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分别为 10 cm和 5 cm[8])。与 ITRF的符合情况是: 在 7参数调整和考虑历元差异之后, WGS84 (G1150)与 ITRF2000的 RMS差为每分量 1 cm;参考于 WGS84(G1150)的 NGA GPS精密星历与参考于 ITRF2000的 IGS GPS精密星历的随后比较,证实两个参考系是一致的。

鉴于在坐标系定义和实现上的比较,我们可以认为, CGCS2000和 WGS84(G1150)是相容的;在坐标系的实现精度范围内, CGCS2000坐标和 WGS84(G1150)坐标是一致的。

参 考 文 献

1 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.

1 Wei Ziqing. Proposal concerning China Geodetic Coordinate System 2000[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006, 26(2): 1 - 4. (in Chinese)

2 国家测绘局. 国家测绘局公告. 2008年第 2号[R]. 中国测绘报, 2008年 6月 27日.

2 State Bureau of Surveying and Mapping. Announcement of the State Bureau of Surveying and Mapping, No. 2 of 2008[R]. China Surveying and Mapping News, 27 June 2008. (in Chinese)

3 Dennis D, McCarthy and Gérara Petit(eds). IERS Conventions(2003)[R]. IERS Technical Note No. 32, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geod? sie Frankfurt am Main 2004.

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

5 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.

6 朱华统. 大地坐标系的建立[M]. 测绘出版社, 1986.

6 Zhu Huatong. Establishment of geodetic coordinate system[M]. Publishing House of Surveying and Mapping, 1986.

7 Hofmann B, Wellenhof H and Moritz. Physical geodesy (second edition)[M]. SpringerWien NewYork, 2006.

8 Addendum to NIMA TR 8350. 2: Implementation of the world geodetic system 1984 (WGS 84) reference frame G1150[EB/OL]. http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/Addendum%20NIMA%20TR8350.2.pdf/

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net