

2000 国家大地坐标系框架体系建设及其进展

宁津生¹ 王 华^{1,2} 程鹏飞^{1,3} 成英燕² 文汉江² 秘金钟²

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,400079

2 中国测绘科学研究院,北京,100830

3 国家测绘产品质量检验检测中心,北京,100830

摘 要:2000 国家大地坐标系是我国新一代地心坐标系,启用至今有近 7 a 的时间,推广使用已经全面展开。本文主要评述 2000 国家大地坐标系坐标框架体系建设中取得的进展,介绍了 2000 国家大地坐标系框架点的精化情况,并重点描述在框架维持关键技术中建立的 2000 国家大地坐标系板块运动模型和格网速度场模型,给出了 2000 国家大地坐标系坐标框架更新的建议。

关键词:2000 国家大地坐标系;坐标框架体系;进展

中图法分类号:P221

文献标志码:A

国务院批复自 2008 年 7 月 1 日起,全国启用 2000 国家大地坐标系(简称为 CGCS2000)。至今,现有测绘成果向 CGCS2000 转换的工作已基本完成^[1-8],全国范围的 CGCS2000 使用已全面展开。

为保持 CGCS2000 框架的高精度和现势性,国家测绘地理信息局和总参测绘导航局开展了 CGCS2000 框架精化与维持系列工作:对 CGCS2000 框架点进行精化,获得框架点精确坐标和速度值;依此开展了基于框架点速度值的板块运动速度场模型建立方法研究,建立 CGCS2000 板块模型,构建中国大陆格网速度场模型;开展了 CGCS2000 框架点周期性 with 稳定性分析,对 CGCS2000 非线性运动建模方法开展研究,并取得了可喜进展。

1 CGCS2000 框架精化

CGCS2000 坐标框架是 2000 国家大地坐标系的具体实现,其精度反映了我国地心坐标系的精度。CGCS2000 的启用时间是 2008 年,但其参考历元是 2000.0,即其框架点坐标对应的历元距今已过十余年。由于框架点受诸如板块运动的影

响,其点位会随着时间的变化,而且当前历元距离参考历元的时间差越长,框架点位的坐标变化也越大,因此,为保持 CGCS2000 框架点坐标的精确性,必须对 CGCS2000 框架进行精化^[9]。

1.1 CGCS2000 框架数据处理

最初的 CGCS2000 坐标框架分为三个层次^[4-5]:第一层次为 CGCS2000 框架的“骨架”——国家 GPS 连续运行基准站网(简称为国家级 CORS),共计 34 个点,其坐标精度为 mm 级,速度精度为 1 mm/a;第二层次是 2000 国家 GPS 大地控制网,由全国 GPS 一、二级网,国家 GPS A、B 级网以及地壳运动监测网和地壳运动观测网络工程网(CMONC)(简称为网络工程)联合平差所得,共计 2 500 多个点位,其坐标精度为 3 cm;第三层次是经与 2000 国家 GPS 大地控制网联合平差后得到的全国天文大地网,作为 CGCS2000 框架的加密,共计约 5 万个点位^[3],尽管约有半数点位的平面精度优于 10 cm,但由于天文大地网的整体精度相对较低,在高精度的 CGCS2000 应用中,难以满足用户需求,因此,CGCS2000 框架精化主要是利用第一层次和第二层次的框架点进行。

国家测绘地理信息局 CGCS2000 推广项目

收稿日期:2014-12-29

项目来源:国家 863 计划资助项目(2013AA122501);国家测绘地理信息局基础测绘项目(B2551)。

第一作者:宁津生,教授,博士生导师,中国工程院院士,现主要从事地球重力场的理论、方法与技术的科研和教学工作,代表成果为适合于中国局部重力场的全球重力场模型 WDM89 和 WDM94、高分辨率中国重力大地水准面等,著有《地球形状及其外部重力场》和《地球重力场模型理论》等专著七部,在国内外学术刊物和学术会议上发表论文 200 余篇。E-mail:jshning@sgg.whu.edu.cn

通讯作者:王华,副研究员。E-mail:wanghua@casm.ac.cn

组采用非基准方法,对国家 GPS 连续运行基准站网和网络工程中基本网、区域网的 1999~2009 年的观测数据进行数据处理,包括了国家 GPS 连续运行基准站网的 34 个点(29 个 CMONC 站、CHAN 站、KUMN 站以及两个国家测绘地理信息局的站点)的观测数据;对基本网中共 56 个点位的 1998、2000、2002、2003、2005、2006 年 6 期观测数据,区域网中共 1 630 个点的 1999、2001、2004、2007、2009 年 5 期观测数据进行处理,对测站坐标约束较为松弛,进行类似于自由网平差的解算,得到自由网解成果。此后,项目组根据自创的 7 参数分类监督法选点原则,筛选出全球 92 个 IGS 站作为基准网平差解算的基准控制点,在基本网与区域网的平差中,利用均匀化原则,从 92 个 IGS 站中选取我国周边 16 个站和国内 24 个基准站点为框架站。在此基础上,对自由网解算结果进行坐标参考框架转换,最终得到精确、可靠的 CGCS2000 坐标框架站点在 ITRF2005 框架下的坐标及其速度值,以其作为建立我国 CGCS2000 格网速度场的数据基础。

1.2 精度统计

本次计算数据共有站点 1 720 个,剔除观测期数少、精度较差以及速度异常的站点后,获得了剩余的 1 027 个站点的坐标和速度值。CGCS2000 框架点数据处理的坐标和速度场都达到了较高的精度,为 CGCS2000 坐标框架精化与维持后续工作奠定了很好的基础。

基准网精度为站点基线相对精度达到 10^{-9} 。基本网和区域网精度为:基线相对精度达到 3×10^{-9} ;站点基线解水平方向重复性 $3 \sim 5$ mm,垂直方向重复性 $10 \sim 15$ mm;站点坐标精度为 N 方向平均 0.87 mm,E 方向平均 0.90 mm,U 方向平均优于 4 mm;站点速度场相对精度为 N 方向平均 0.12 mm/a,E 方向平均 0.13 mm/a,U 方向优于 0.4 mm/a。

1.3 加密 CGCS2000 框架

截至 2014 年 2 月,美国国家大地坐标系基准框架 NAD83(2011)中,拥有 mm 级的 CORS 站点 1 900 多个。而我国作为 CGCS2000 坐标框架最高精度层次的国家级 CORS 站点数量较少,仅有 34 个,即使将框架第二层次的 2000 国家 GPS 大地控制网算在内,也不足 2 600 个点,其密度距维持高精度国家地心坐标框架还有一定距离^[1],加密 CGCS2000 坐标框架势在必行。

根据国家测绘地理信息局 CGCS2000 推广项目组统计的数据显示,截至 2011 年底,我国省

级 CORS 系统的站点数量已达 1 161 个,对于这些已经建成投入使用的省级 CORS 站点,如果按照国家级 CORS 站的选取和建设标准^[1-2,10],将符合条件的省级 CORS 站点升级纳入到国家级 CORS 站网中,不仅可以促进这些 CORS 站点的资源共享,提高利用效率,节约成本,也将极大地丰富 CGCS2000 框架点中的 CORS 站数量。

2012 年完成的中国大陆构造环境监测网络是由 260 个连续观测站和 2 000 个不定期观测站构成,以 GNSS 观测为主,VLBI、SLR 及精密重力和水准测量等技术手段为辅。将其纳入国家 CORS 系统,可为中国大陆地壳运动监测、我国现代大地基准的建立与维持、重力场形态及变化及空间气象等系列科学问题提供基础资料和产品^[11]。

目前在建的国家现代测绘基准体系基础设施建设一期工程是我国迄今为止规模最大,以维持国家大地坐标框架为主要目的的国家级 CORS 系统建设、国家一等水准网建设和卫星大地控制网建设工程。工程将在全国范围建成 360 个(含新建、改造现有的)国家 CORS 基准站及 4 500 个点组成的卫星大地控制网,并开展国家现代高程控制网建设,通过与 CORS 基准站和卫星大地控制网的结合,监测大范围高程变化,实现全国范围的现代高程基准传递。同时补充和完善国家重力基准,在已有绝对重力点分布的基础上,选择 50 个与新建 CORS 基准站并置的重力基准点,构成便于长期保存的分布合理的国家绝对重力基准基础设施。

综上,可以预计在不久的将来,作为 CGCS2000 坐标框架的 CORS 站点数量将会极大增加,满足维持高精度 CGCS2000 的密度要求。

2 CGCS2000 维持

CGCS2000 坐标框架是由其框架点在参考历元 2000.0 时的坐标和速度来定义的,即一旦 CGCS2000 框架点坐标、速度都确定下来,按照通常使用的线性模型,CGCS2000 框架将是确定的。但实际上,由于框架点会受到板块运动等影响,并非都表现为线性的运动变化,因此,按照线性模型推算 CGCS2000 坐标框架点当前历元的坐标将会带有误差,并且此误差会随着时间而增大^[9]。这也是 CGCS2000 启用后,必须进行 CGCS2000 框架维持与更新的原因所在。

完整的 CGCS2000 坐标框架体系不仅包括

框架点的坐标,而且需要有相应的板块运动模型和速度场模型。同时,为确保推算当前历元坐标的精确性,还需考虑框架的非线性运动。

2.1 CGCS2000 板块模型

CGCS2000 启用时,是对应于 ITRF97 框架、2000.0 历元的静态框架,并没有与框架对应的板块运动模型。而框架本身历经十余年,实际点位已经偏离了原 CGCS2000 在 2000.0 历元下定义的坐标值,这会给那些广泛利用 GNSS 技术进行精确定位(如 ITRF2005 框架和当前历元)的应用带来不便。若要进行历元归算或转换,必须要有高分辨率、高精度的速度场资料及板块运动模型,以便实施从当前历元的点位至 2000.0 历元的归算。为此,国家测绘地理信息局和总参测绘导航局的大地测量学者们开展了我国板块划分和 CGCS2000 板块运动模型和速度场模型构建研究。

国家测绘地理信息局 CGCS2000 推广项目组利用长达 10 余年的网络工程观测数据,以 CGCS2000 框架精化得到的站点 ITRF2005 框架下高精度的速度场为数据基础,构建了中国 20 个二级板块运动模型 CPM-CGCS2000,并利用此板块模型将框架点归算到 CGCS2000 下,通过对此板块模型的外部检核验证,该板块模型平均精度为 1.72 mm/a,最好的板块拟合精度为 0.69 mm/a。与国际上现有的几个成熟的模型 ITRF2005、APKIM2005、PB2002 以及 NUVEL1A 相比,在整个中国地区,CPM-CGCS2000 相较于现有模型更能精确反映站点的水平运动,并且精度提高了 2~5 倍,详细的数据结果分析参见文献[12]。

文献[13-14]利用相同的数据源,将中国大陆二级活动块体划分为 18 个,并给出了相应的块体欧拉矢量。数据结果在文献[13]中也有详细描述。

两局建立的板块运动模型都是适用于 CGCS2000 的高精度模型,精度都在 cm 级,均优于现有的国际成熟板块运动模型,可用于不同框架及不同历元下 GNSS 站坐标到 CGCS2000 的高精度归算,满足我国 CGCS2000 的各种民用与军用需求。

2.2 CGCS2000 格网速度场模型

由于国家连续运行基准站网的分布密度不够,无法全面反映我国 CGCS2000 坐标框架的动态变化,因此,有必要建立中国大陆地壳运动速度场模型。

国家测绘地理信息局 CGCS2000 推广项目组以前期 CGCS2000 坐标框架精化得到的

ITRF05 框架下 1 025 个站点的速度作为建立速度场模型的数据源,采用反距离加权插值法、块体欧拉矢量法和局域欧拉矢量法、有限元插值法、最小二乘配置 5 种方法,在块体划分的基础上,选择各块体上最优模型,计算了中国大陆 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 及 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的格网点速度,并用 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的格网点速度建立了速度场模型,中国大陆内任意点的速度可以用其周围的 4 个格网点速度的平均值表示。用格网速度场模型计算网络工程 1 025 个站点速度,并求出差值,模型精度为 E 方向 0.78 mm/a, N 方向 0.95 mm/a。

文献[13]中也给出了利用相同数据源建立的 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 及 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 格网速度场模型,其模型精度也达到了 mm 级。

与板块运动模型的用途一样,两局建立的格网速度场模型精度都在 mm 级,而且使用方便,可以满足民用与军用对 CGCS2000 的高精度需求。

2.3 CGCS2000 非线性速度场模型

前文提到,由于框架同时受到线性和非线性运动影响,仅建立线性的速度场模型并不能十分精确地反映框架点的时序特征,因此,需要对 CGCS2000 框架点的非线性运动建模。

国家测绘地理信息局 CGCS2000 推广项目组基于自适应的奇异谱分析方法进行 CGCS2000 坐标框架非线性运动进行分析研究,完成了 CGCS2000 非线性速度场建模,实测数据实验表明,CGCS2000 非线性速度场模型较传统方法具有更高的精度、自适应性和可靠性,显著提高了框架点运动建模与预报精度。

3 CGCS2000 框架更新

在国家测绘地理信息局和总参测绘导航局大地测量学者的努力下,CGC2000 板块运动模型和速度场模型均已建立,至此,CGC2000 框架体系已经初步实现。但坐标框架的精化与维持是一项长期、持续性的工作。当点位参考历元和当前历元的周期很长时,利用模型化(估计)速度归算参考历元的坐标到当前历元的预测坐标,通常会呈现点位计算值和预测值之间的偏差,或者使用速度归算的点位坐标不准确,不能反映框架点所在位置的地球物理现象或区域影响时,则需要重新精化框架,有必要时,需要重新确定新的参考历元,也即该坐标框架的更新。

框架的更新意味着其相应的坐标、板块模型及速度场都需要相应的更新。更新周期取决于框

架的实现精度,并非固定不变的。当框架的坐标误差或速度场误差随时间累积已无法满足用户需求时,即可进行坐标框架的更新。

以美国国家大地坐标系框架基准 NAD83 (2011, MA11, PA11) 为例,其参考历元为 2010.0,由固定于北美板块的 NAD83 (2011) 框架、固定于马里亚纳板块的 NAD83 (MA11) 框架、固定于太平洋板块的 NAD83 (PA11) 三个独立参考框架组成^[8]。NAD83 (2011, MA11, PA11) 的前身为 NAD83 (CORS96)、历元 2002.0,其框架的更新仅仅时隔 8 a。国际地球参考框架 ITRF 更新的得更频繁,从 ITRF2000、ITRF2005 到 ITRF2008,8 a 中完成了两次框架更新,精度也越来越高。

我国 CGCS2000 启用至今,成果转换工作已经完成,建立了 CGCS2000 框架维持所需的板块运动模型和速度场模型,同时也具备了框架更新的技术手段和条件。对于 CGCS2000 坐标,其点位平均中误差为 2 cm,速度误差为 3 mm/a,以 CGCS2000 当前框架实现精度计算,10 a 后,框架点的坐标误差已经超出了框架本身的实现精度,需要考虑框架的更新。地图更新周期与比例尺有关^[13],其中对于 1:500、1:1 000 地图,10 a 后点位变化超过了制图精度,对于注重绝对位置变化而言需要更新;但对于同样比例尺的采用相对独立的地方坐标系的工程与城市建设用图,只关注地物的相对位置而非绝对位置,可以不更新。对于 1:5 000 比例尺地图,50 a 后需要更新,而 1:10 000 地图则 90 a 后才需要更新。

4 结 语

我国大地基准建设虽然起步晚,但发展迅速,CGCS2000 框架点坐标已更新完毕,板块运动模型和速度场模型也已建立。随着 CGCS2000 框架中 CORS 站点数量的不断增加,站点分布的逐渐均匀化,纳入 CGCS2000 框架体系的 CGCS2000 板块运动模型和速度场模型应进行定期更新,以维持 CGCS2000 的动态、高精度的优点。建议国家测绘地理信息局成立 CGCS2000 框架 CORS 网数据处理中心和数据分析中心,对 CGCS2000 框架 CORS 观测数据进行常态化的处理与分析,实现 CGCS2000 的实时与高精度维护。同时,应当建立 CGCS2000 框架服务体系,实现国家级框架服务功能并对外提供产品服务。

参 考 文 献

- [1] Chen Junyong. Chinese Modern Geodetic Datum: Chinese Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000) and its Frame[J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3): 269-271(陈俊勇. 中国现代大地基准—中国大地坐标系统 2000 (CGCS2000)及其框架[J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 269-271)
- [2] Chen Junyong, Zhang Peng, Wu Junli, et al. On Chinese National Continuous Operating Reference Station System of GNSS[J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(4): 366-369(陈俊勇, 张鹏, 武军郦, 等. 关于在中国构建全球导航卫星国家级连续运行站系统的思考[J]. 测绘学报, 2007, 36(4): 366-369)
- [3] Chen Junyong, Yang Yuanxi, Wang Ming, 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(陈俊勇, 杨元喜, 王敏, 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)
- [4] Yang Yuanxi. Main Progress of Geodetic Coordinate System in China[J]. *Bulletin of Surveying and mapping*, 2005(1):6-9(杨元喜. 中国大地坐标系建设主要进展[J]. 测绘通报, 2005(1):6-9)
- [5] Yang Yuanxi. China Geodetic Coordinate System 2000[J]. *Bulletin of Science*, 2009, 54(16):2271-2276(杨元喜. 2000 中国大地坐标系[J]. 科学通报, 2009, 54(16):2 271-2 276)
- [6] Cheng Yingyan, Cheng Pengfei, Bei Jinzhong, et al. Current ITRF Based Provincial and Municipal CORS Conversion to CGCS2000[J]. *Bulletin of Surveying and mapping*, 2011(7):1-3(程鹏飞, 成英燕, 秘金钟, 等. 基于现框架下的省市级 CORS 站到 CGCS2000 的转换[J]. 测绘通报, 2011(7):1-3)
- [7] Cheng Yingyan, Cheng Pengfei, Gu Dansheng, et al. 3D Four Parameters Coordinate Transformation Model for Map[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 747-751(成英燕, 程鹏飞, 顾旦生, 等. 三维 4 参数模型实现地图到 CGCS2000 的转换[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(6): 747-751)
- [8] Cheng Pengfei, Wen Hanjiang, Cheng Yingyan, et al. Parameters of the CGCS2000 Ellipsoid and Comparisons with GRS80 and WGS 84[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 38(3):189-194(程鹏飞, 文汉江, 成英燕, 等. 2000 国家大地坐标系椭球参数与 GRS80 和

- WGS84 的比较[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 38(3):189-194)
- [9] Wei Ziqing. Re-approaching the Geodetic Coordinate System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(8):883-886 (魏子卿. 大地坐标系新探[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(8):883-886)
- [10] Liu Jingnan, Liu Hui, Zou Rong, et al. Some Thoughts on the Establishment of Nationwide Continuously Operating Reference Stations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11):1 261-1 265 (刘经南, 刘晖, 邹蓉, 等. 建立全国 CORS 更新国家地心动态参考框架的几点思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(11):1 261-1 265)
- [11] Cheng Pengfei, Wang Hua, Cheng Yingyan. New Progress of International Geodetic Datum from FIG2012 International Surveyor Conference [J]. *Bulletin of Surveying and mapping*. 2012(S1): 1-4(程鹏飞, 王华, 成英燕. 从 2012 国际测量师联合会大会上看国际大地基准的新进展[J]. 测绘通报, 2012(S1):1-4)
- [12] Cheng Pengfei, Cheng Yingyan, Mi Jinzhong, et al. CGCS2000 Plate Motion Model[J]. *Acta Geodatica et Cartographia Sinica*, 2013, 42(2):159-167 (程鹏飞, 成英燕, 秘金钟, 等. CGCS2000 板块模型构建[J]. 测绘学报, 2013, 42(2):159-167)
- [13] Wei Ziqing, Liu Guangming, Wu Fumei. China Geodetic Coordinate System 2000: Velocity Field in Mainland China[J]. *Acta Geodatica et Cartographia Sinica*, 2011, 40(4): 403-410 (魏子卿, 刘光明, 吴富梅. 2000 中国大地坐标系: 中国大陆速度场[J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 403-410)
- [14] Wu Fumei, Liu Guangming, Wei Ziqing. Velocity Field Model of CGCS2000 Based on Euler Vector of Local Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(4):432-435 (吴富梅, 刘光明, 魏子卿. 利用局域欧拉矢量法建立 CGCS2000 速度场模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(4):432-435)

System Construction and Its Progress of China Geodetic Coordinate System 2000

NING Jinsheng¹ WANG Hua^{1,2} CHENG Pengfei^{1,3} CHENG Yingyan²
WEN Hanjiang² BEI Jinzhong²

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 400079, China

2 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

3 National Quality Inspection and Testing Center for Surveying and Mapping Products, Beijing 100830, China

Abstract: China Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000) is national new geocentric coordinate system of China, it has been adopted nearly 7 years since July 1, 2008, and it is being applied fully in different fields. The progress made in the construction CGCS2000 framework was reviewed in this paper, the refinement of CGCS2000 framework was introduced, and especially the plate motion model and grid velocity field model which modeled in the CGCS2000 frame maintaining were focused on description, the update recommendation about CGCS2000 frame was given at the end of this paper.

Key words: China Geodetic Coordinate System 2000; the system construction of CGCS2000; development

First author: NING Jinsheng, professor, Chinese Academician of Academy of Engineering, mainly engages in the theory, methods and technology of the Earth's gravity field of scientific research and teaching work. His representative achievements are local gravity field of global gravity field models WDM89 and WDM94 which suitable for China, high resolution Chinese gravity geoid. He is the author of "the shape of the Earth and its external gravity field", "the Earth's gravity field model theory" and others all about seven books, and he has published more than 200 papers in journals and academic conferences. E-mail: jshning@sgg.whu.edu.cn

Corresponding author: WANG Hua, associate research fellow. E-mail: wanghua@casm.ac.cn

Foundation support: The National 863 Program of China, No. 2013AA122501; Foundmental Surveying and Mapping of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation of China, No. B2551.