

论我国大地测量基础建设

魏子卿¹

(1 西安测绘研究所, 西安市雁塔路中段 1 号, 710054)

摘要: 概述了我国大地控制网、高程控制网和地球重力场等基础建设的基本情况、需求分析与任务建议。提出我国空间大地网应由连续运行参考站、一级网、二级网和三级网组成; 一、二等水准网复测和高程基准再定义; 为精化大地水准面, 要补测重力点和加测 GPS/水准点。

关键词: 国家大地控制网; 国家高程控制网; 地球重力场; 国家大地测量基础建设

中图法分类号: P228

大地测量的基本任务是建立和维持国家大地控制网、高程控制网以及确定地球重力场。国家大地控制网、高程控制网和地球重力场是国家大地测量的基础建设。伴随测绘事业的发展, 我国大地测量的基础建设已经取得巨大成绩^[1]。至 20 世纪后半叶, 我国已经建成了全国规模的天文大地网、水准网和天文重力水准网。近年来, 我国又建立了初具规模的 GPS 大地网。但是, 我国大地测量的基础建设与发达国家相比, 还有很大差距, 还不能满足国家现代化建设的需要, 且还存在一些问题。

1 基本情况

1.1 大地控制网

从 1951 年到 1975 年, 我国建成了全国天文大地网。该网包括近 20 万个三角点/导线点。1982 年完成了包括一、二等点和部分三等点共计 48 433 点的整体平差。结果表明, 基本边长 (22km) 的相对中误差为 1:26 万, 方向中误差为 $\pm 0.9''$; 推算的 1 000km 的相对中误差为 1:250 万, 方向中误差为 $\pm 0.1''$ 。我国天文大地网的质量堪称当时世界一流水平。但是, 随着时间的推移, 天文大地网暴露出来的问题越来越多, 越来越严重。主要问题有如下几点。

1) 标志破坏问题。我国天文大地网的测量标志, 据统计已有 30% 遭破坏。在经济发达地区, 还不止 30%。测量标志被破坏, 意味着天文

大地网(至少是部分环节)的完整性受损。

2) 实用价值问题。目前 GPS 大地网已成为主要的大地网形式。GPS 大地网是地心的、三维的、精度在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 量级, 而天文大地网是非地心的、二维的、精度在 10^{-5} 量级。两类大地网的坐标系、维数和精度的不一致性, 导致天文大地网在 GPS 测量中使用不便。因而, 天文大地网的使用价值将越来越小。

20 世纪 80 年代, 国际上的大地网开始向空间大地网过渡。在 90 年代, 我国布设了包括 534 点的全国 GPS 一、二级网和由 756 点组成的 A、B 级网, 后来又建成包括 25 个连续运行的基准站、56 个基本站和大约 1 000 个区域站的地壳运动观测网络。这些大地控制网在经济建设、国防建设以及在地震监测中已发挥了重要作用。但是, 从国家中、长期发展的要求来看, 我国现有的 GPS 大地网, 在规模上和规格上都还不能满足经济建设和国防建设日益增长的需要。

1.2 高程控制网

我国从 1951 年开始布设水准网, 截止 1975 年共施测一等水准约 5 万 km, 二等水准约 14 万 km。这部分水准被称为第一期水准。我国于 1974 年重新制定了测量规范, 于 1976 年重新布设一等水准网, 到 1984 年完成布设一等水准 93 360 km, 构成 100 个闭合环; 在 1981~1990 年间又重新布设了二等水准, 路线长 136 368 km。这次布设的一、二等水准被称为第二期水准。为维持高程控制网和研究地壳垂直运动, 我国从

1991年开始二期一等水准网复测,1998年完成,路线长85 452 km,构成77个闭合环。这次水准复测通常被称为第三期水准。2000年又进行了三期水准的动态平差,参加平差的一等水准计208 110 km,二等水准71 050 km,三等水准3 510 km。总计路线长282 670 km。平差后1 km水准测量中误差为 ± 1.14 mm。

我国高程基准面的使用情况见文献[2]。我国高程控制网的主要问题有如下几点。

1) 复测问题。水准点的高程受地表沉降和地壳运动的影响。所以,大地测量法式规定一、二等水准应每20年进行复测,以保持高程控制网的现势性。在我国第二、三期水准跨越的20年间,第三期水准中,仅复测一等水准85 452 km,余下的已经20年没有复测了。

2) 基准问题。大地水准面是理想的高程基准,平均海面是大地水准面的近似。根据初步研究,定义1985高程基准的青岛平均海面高出大地水准面约26 cm^[3]。据报道,中国沿岸海面平均年升高1.4~2.0 mm,黄海海面年上升率为2.8 mm。青岛水准原点年上升速率为 2.2 ± 0.5 mm^[3]。如果这些数据可靠,目前青岛验潮站的平均海面相对大地水准面可能高出50 cm以上。

海南岛的高程是通过三角高程方法传递的^[4],其高程基准由大陆到附近岛屿的传递问题,值得进一步研究。

1.3 地球重力场

1955~1957年间,我国建立第一个国家重力控制点网,包括27个基本重力点和82个一等重力点。基本点的联测精度为 ± 0.15 mGal,累积误差不超过 ± 0.3 mGal;一等点的联测精度为 ± 0.25 mGal,累积误差不超过 ± 0.4 mGal。1985国家重力基本网是我国第二个重力基本网,包括6个基准点、46个基本点和5个引点。重力平差值的中误差平均为8 μ Gal,最大为13 μ Gal。后来我国又布设了一等网163点,重力值中误差平均为12 μ Gal,最大为20 μ Gal。1999年我国开始布设第三个重力基本网,包括21个基准点、126个基本点和105个引点,基准点的测定精度应优于5 μ Gal,基本点的联测精度应优于10 μ Gal。基本网平差后的中误差预计不大于5~10 μ Gal^[5]。新基本网近期将取代1985重力基本网。

我国测绘、地质和物探部门为了各自的需要,几十年来进行了大量的重力测量,测绘部门掌握数十万点的重力数据。据不精确统计,目前我国尚存在46万 km²空白区,在12个1°×1°、800个

20'×20'、48%的5'×5'格网内没有重力点。

在20世纪80年代,我国利用天文重力水准的资料绘制了全国高程异常图,平均分辨率在东部为1.5°×1.5°,西部为2.5°×2.5°。边远点相对大地原点的高程异常误差最大达 ± 3.3 m^[6]。近年,利用地球重力场模型、5'×5'的平均重力异常和卫星测高数据,研制成功覆盖我国大陆和海域的CQG2000(似)大地水准面^[7],大陆部分的分辨率标称为5'×5',在东部实际为15'×15',西部实际为30'×30'。在东经102°以东地区中误差为 ± 0.3 m,以西地区中误差为0.4~0.5 m。近来,利用地球重力场模型、1'×1'的平均重力异常和平均地形高数据,又得到标称分辨率为1'×1'的似大地水准面和垂线偏差。高程异常的精度在102°以东为0.18 m,以西为0.29 m~0.32 m;全国平均为0.22 m。子午和卯酉垂线偏差的精度在102°以东分别为0.94"和0.96",在102°以西分别为1.71"~1.95"和1.28"~2.08";全国平均分别为1.47"和1.41"。

2 需求分析

2.1 大地控制网

大地控制网的实用目的是为城市测量、矿山测量、工程测量、地籍测量和测制地形图提供大地控制,为军事工程、数字化战场、导弹机动发射、信息化战争提供大地测量保障。我国现有的GPS网的点间距大部分地区在80 km左右,大约每16个1:5万图幅一个点。大地点密度小,实际使用不便,空间大地网需要加密。

精化大地水准面是大地测量的重要任务之一,它实际上是将重力大地水准面拟合于GPS大地水准面。为得到GPS大地水准面,需要一定密度的GPS/水准点,而GPS/水准点则是测量水准的大地点。还有,在当今信息社会,由大地网体现的地理框架已成为国家空间数据基础设施的基础。位置信息已不再仅为测绘人员所用,而日益成为许多产业部门、政府部门甚至社会公众的重要信息源。

2.2 高程控制网

水准测量参考于本地等位面的铅垂线。水准高在生活中广泛使用,所以在地形图上历来标示正常高或正高。现在人们说用GPS代替水准,是指三、四等和等外水准,而不是一、二等水准,也决不意味着水准测量会被GPS淘汰。它仍是一种有前途的测量技术,这是因为:①当今GPS测定

高程的精度,在短距离上还不足以与水准测量匹敌;②将GPS大地高转换为水准高的前提是必须知道(似)大地水准面高。可见,为了实现用GPS代替水准,首先又必须进行水准测量。

维持一个由一、二等水准网组成的国家高程控制网,是今后测绘部门的一项长期任务。我国一、二等水准合计约23万km,水准标石约5.3万个,即在每一1:5万比例尺地形图图幅中,平均有1~3个国家高程控制点^[5]。20世纪90年代仅复测了大部分一等水准,80年代施测的二等水准并没有复测。为了满足经济建设和国防建设各方面的需求,一、二等水准复测是很有必要的。

2.3 地球重力场

这里所说的地球重力场,主要指大地水准面。大地水准面是实现高程现代化的基础。所谓高程现代化就是通过精化大地水准面和提高GPS大地高的测定精度,实现用GPS代替水准测量^[8]。如前所述,我国的大地水准面近年已取得很大进展,但是精化大地水准面的任务远未完成。将来,卫星重力测量会大幅度提高100km以上的中、长波长大地水准面的精度,而要提高短波长大地水准面的精度,还离不开地面重力数据和GPS水准数据。所以,要精化大地水准面,除进行GPS/水准测量外,还必须进行大量的重力加密测量。

3 任务的建议

3.1 空间大地网

我国空间大地网应包括连续运行的参考站(continuously operating reference stations, CORS)、一级网、二级网和三级网。CORS是大地网的主干骨架,支持静态定位、动态定位和导航服务,支持监测地壳形变以及研究大气中的水汽分布与电离层中的自由电子分布等。CORS应在全国范围均匀布设,站距一般为150~250km,平均为200km。CORS水平位置的中误差应不超过±5mm,椭球高(大地高)的中误差不超过±10mm,速度的中误差不超过±1mm/a。所有CORS站应用一等水准进行联测,并与重力基本网进行联测,重力中误差不超过30 μ Gal;根据需要,部分CORS站配备GPS差分设备。所有CORS站应配备卫通设备,将观测数据定期传输至数据中心。

一级网是CORS网的加密,用于低等级测量的控制,亦为研究地壳运动提供数据。一级点间距为75~125km,平均为100km。水平位置的中

误差应不超过±10mm,椭球高的中误差应不超过±20mm。一级点应与水准点重合,或者进行二等水准联测。一级点还应进行重力联测,重力中误差不超过50 μ Gal。一级网应每3~5年进行复测,速度中误差不超过±2mm/a。

二级网是CORS站和一级网的加密,为似大地水准面和三级网提供控制。二级点间距为25~50km,平均为±35km。水平位置的中误差应不超过±20mm,椭球高的中误差应不超过±30mm。二级点应与水准点重合,或者进行三等水准联测。二级点应尽可能水平和垂直均匀分布,以满足精化似大地水准面的需要。

一、二级网与CORS站共同构成国家最高精度的空间大地网。一、二级网应当在全国范围内大致均匀布设,考虑到大地水准面在不同地区的精度要求可能不同,在不同地区的密度可以有适当差别。

三级网是局部的用户加密网,是直接为城市建设、地籍测量、工程建设和测图目的服务的区域网。点间距允许较大变动,但应不超过25km。水平位置的中误差一般应不超过±50mm,椭球高的中误差不超过100mm。

以上技术规格是参照国内外的作业经验提出的。一级网、二级网和三级网分别类似于美国的联邦基本网(FBN)、合作基本网(CBN)和用户加密网(UDN)。按照上述技术规定,全国应布设CORS站240个,一级点960个,二级点7037个,密度达到每34.5km×34.5km一个点,即大约每3.3个1:5万图幅一个点。

网络工程现有的25个基准站基本上符合CORS站的要求;A、B级网、一、二级网和网络工程的区域网(合计约2300个点)中的部分点大致符合新一、二级网的精度要求,而另一部分点可能达不到新二级网的精度要求。考虑到新一级网要求复测,建议现有GPS网按新技术标准进行复测,并将其扩展至8000个点左右。

3.2 高程控制网

在高程控制网方面,主要任务是:精化和完善高程基准,完成一、二等水准的复测,以便使高程控制网更好地为各种工程建设提供高程控制,为地理信息系统提供高程框架,为精化大地水准面提供基础。笔者提出以下几点建议。

1)在青岛和榆林验潮站,建立GPS连续运行站,监测黄海和南海海平面和陆地的垂直变化;利用青岛验潮站最近38年或19年的验潮数据(如可能,外加卫星测高数据),计算黄海平均海

面,重新定义高程基准。

2) 1976~1990 年布设的二期水准,即 93 360 km 一等水准和 136 368 km 二等水准,全部进行复测,使 1:5 万图幅平均有 2~3 个高程控制点,以便满足多方面的需要,特别是精化大地水准面的需要。

3.3 地球重力场

在重力场建设方面,主要任务是:加密重力点,加密 GPS/水准点,构制 cm 级的大地水准面。这里所说的 cm 级,既指点之间的相对精度,也指相对参考椭球的绝对精度。建议:

1) 按 $5' \times 5'$ 平均重力异常 3~5mGal 的要求,用地面测量或航空重力测量,消灭重力空白区,补测和加密少点区。据初步估算,为此要补测 12 万多个重力点。

2) 按规定密度要求,布测 GPS/水准点。研究表明,假定 GPS/水准误差(相对)为 0.02m,欲得到 5cm 和 10cm 的相对似大地水准面,对于不同的地形,GPS/水准点间的距离应符合表 1 要求。

表 1 5cm 和 10cm 似大地水准面对 GPS/水准点间距要求

Tab. 1 Requirements of 5 cm and 10 cm Quasi-geoid for Spacing of GPS/ Leveling Points

地形类别	GPS/水准点之间的距离/km	
	5cm 大地水准面	10cm 大地水准面
平原	27	45
丘陵	20	33
小山区	14	22
中山区	10	16
大山区	7	12
特大山区	6	10

由表 1 可见,前面建议的一、二级网的密度(1 点/34.5km \times 34.5km)尚不足以有效地满足 5cm 大地水准面的要求。为了构制 5cm 大地水准面,还应在一、二级网的框架内布测适当数量的 GPS/水准点。在丘陵和山区,更是如此。

参 考 文 献

- 1 魏子卿. 我国大地测量的回顾与任务思考. 大地测量与天文地球动力学进展, 2002
- 2 国家测绘局. 中华人民共和国国家大地测量图集, 1986
- 3 董鸿闻, 顾旦生. 中国大陆现今地壳垂直运动研究. 测绘学报, 2002, 31(2): 100~103
- 4 李建成, 姜卫平. 长距离跨海高程基准传递方法的研究. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6): 514~517
- 5 陈俊勇, 文汉江, 程鹏飞. 中国大地测量学发展的若干问题. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6): 475~482
- 6 Wei Z Q, Jiao W H. Determination of Geopotential of Local Vertical Datum Surface. Geospatial Information Science, 2003, 6(1): 1~4
- 7 陈俊勇, 李建成, 宁津生. 我国大陆高精度、高分辨率大地水准面的研究与实施. 测绘学报, 2001, 30(2): 95~100
- 8 魏子卿. 高程现代化问题. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(5): 377~380
- 9 GPS Survey Manual. <http://www.ngs.noaa.gov/PROJECT/GPSmanual/>, 2000

作者简介: 魏子卿, 研究员, 博士生导师, 中国工程院院士。主要研究方向为卫星大地测量、卫星导航和地球动力学。

E-mail: ziqingw@public.xa.sn.cn

On National Geodetic Infrastructure

WEI Ziqing¹

(1 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, 1 Mid-Yanta Road, Xi'an, China 710054)

Abstract: This paper outlines the basic situations, requirements and proposes tasks of the national geodetic infrastructure. It is proposed that the national space geodetic network consists of continuously operating reference stations, the first, second and third order sub-networks.

Key words: national geodetic control network; national vertical control network; Earth's gravity field; national geodetic infrastructure

About the author: WEI Ziqing, researcher, Ph. D supervisor, member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields are in satellite geodesy, satellite navigation and geodynamics.

E-mail: ziqingw@public.xa.sn.cn