

# 现代地心坐标系的发展与展望

白 鸥, 朱筱虹

(西安测绘研究所, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**综合论述了北美、欧洲、俄罗斯、澳大利亚和中国地心坐标系的发展现状, 介绍了 GPS 测量、甚长基线干涉测量、激光测卫和激光测月方法在重力测量和制作似大地水准面细部高程测图中的应用, 论述了地心坐标系对于卫星大地测量、全球导航和地球动态研究、精密武器系统定位、纸质和数字地图产品的精度提高等方面的重要意义, 并就它的未来发展趋势做出几点预测。

**关键词:**地心坐标系; 卫星大地测量; 国际地球参考框架 (ITRF)

## 1 引 言

地心坐标系, 以地球质心为坐标原点, 3 个相互正交的坐标轴分别指向 3 颗恒星所构成的坐标系, 即要求椭球体的中心与地心重合。人造地球卫星绕地球运行时, 轨道平面时时通过地球的质心。参考坐标系不能满足精确推算轨道与跟踪观测的要求, 对于远程武器 (以垂线为准的惯性坐标系的弹道实际上是在以参考椭球定义的地心坐标系中设计和计算) 和各种宇宙飞行器的跟踪观测都是使用地心坐标系。长期以来, 由于不能精确测定地心的位置, 因而较少使用地心坐标系。随着现代科技的发展, 特别是全球卫星定位技术的发展和运用, 世界上许多发达国家和中等发达国家都已在多年前就开始使用地心坐标系。建立精确的地心坐标系对于卫星大地测量、全球性导航和地球动力学研究、精密武器系统定位、纸质和数字地图产品的精度的提高等都具有重要意义。

## 2 现 状

### 2.1 北美

1986 年北美大陆 (美国、加拿大、墨西哥) 完成了各自国家领土的大地网平差。平差的结果是用新的 NAD83 坐标系取代了美国境内原来的 NAD27 坐标系。NAD83 坐标系采用三角测量、导线测量、方位角测量、多普勒测量、甚长基线干涉测量 (银河系外无线电信号测量), 人卫激光测量等多种方法获得。

美国大地网由 25 万个点组成, 包括卫星大地网、三角测量、导线测量控制点组成。在北美大地网平差和 NAD83 坐标系使用后不久, 开始使用 GPS 技术建立大地网。但是美国和加拿大专家都认为这一新坐标系的唯一缺点是不能获得正高, 即无法用 GPS 技术测定参考椭球表面的高程。为

了最大限度地利用 GPS 技术, 开展了重力测量和制作似大地水准面细部高程图工作。

GPS 测量、甚长基线干涉测量、激光测卫和激光测月及重力测量和精细似大地水准面测定等得到进一步完善。综合利用上述技术表明, NAD83 地心坐标系与地球质心的重合度大约为 2m, 空间坐标轴定向为  $0.03''$ , 网的最大变形为  $0.0871 \times 10^{-6}$ 。这些数据是在用 GPS 技术建立局部坐标系时得到的。

美国局部网的精度很高, 但没有列入国家坐标系 NAD83。局部大地网控制点精度更高, 为此得到“高精度大地网”的名称。这些控制网点之间相互位置的精度大约为 1:1 000 000, 而 NAD83 控制点相对位置的精度为 1:100 000。

为了改变这种局面, 美国国大地测量局决定建立新的 NAD83。新的 NAD83 仍然保持与地球质心的相对位置和与平面直角坐标系各个轴的相对定向。但是该网的规模要随着国际 GPS 会战的结果而改变。会战在“国际地球参考系” (ITRS) 计划范围内进行。结果得到国际地球参考框架“ITRF”。

ITRF 是一系列大地控制点组成的网。在这些大地控制点上测定了地心直角坐标到地球质心的计算值。根据 1991 年国际大地与地球物理联合会 (IUGG) 第二次会议决议, 在 ITRF 框架内可实现一种“理想”的 ITRS 坐标系。在这项决议里将 ITRS 定义为测定坐标原点、尺度、定向和协议地球参考坐标系 (CTRS) 随时间变化的模型和技术条件总和。通过 ITRF 建立的坐标系, 能测定国际大地网控制点的坐标和运动的速度。

ITRF 系统与国际天体坐标系 (ICRF) 有关, 采用的是国际地球自转服务局 (IERS) 制定和推荐的地球定向参数 (EOP)。

第二版 NAD83 采用了 GPS 测量、甚长基线

干涉测量和人卫激光测量资料。结果网的尺度达到  $0.0871 \times 10^{-6}$ ，参考椭球面上高的精度提高到 0.6 米。1994 年出台了第三版 NAD83。它考虑到了 ITRF89 的观测成果。此后根据 ITRF93 计划中的永久 GPS 观测站的观测成果再一次对第三版 NAD83 进行改造。

上世纪 80 年代中期，国际地球自转局(IERS)建议在高精度大地测量中使用“国际地球参考系”(ITRS)的观测成果。同时建议对地球两极和地壳板块运动进行监测。根据 ITRS 计划，1983 年第一次完成了全套工作。

这项工作的结果得到的坐标系称之为“国际地球参考框架(ITRF)”。然后每年都对该框架进行国际性会战。第一个通用参考坐标系是 ITRF88。目前总共建立了十个版本的坐标框架，最新版本是 ITRF2000。国际 ITRS 计划仍在继续，今后还会有新的 ITRF 出现。

美国国防部制图局(DMA，现在的国家地理空间情报局 NGA)一直致力于建立全球地心坐标系 WGS-84 的研究。该坐标系采用了 ITRS 计划中 GPS 会战的成果。

美国国防部将 GPS 星座轨道参数作为“可预测的”，或者“实际”参数，即先验参数。这些参数可与在 WGS-84 坐标系中测定 GPS 永久测站的地面控制网联测。美国空军的作战检查处经常发布卫星的预测轨道和时钟参数。这些星历都装载在卫星上，不断对外发布，保障实时 GPS 测量。用户提出申请就可从国家地理空间情报局(NGA)获得卫星的预测轨道和时钟参数。

1987 年以利用多普勒测量成果和海军导航卫星系统(NNSS，代号 Transit)为基础建立了最初 WGS-84 坐标系，它与 NAD83 相当。以后 WGS-84 坐标系进行了改造。1994 年以后 WGS-84 坐标系以采用国际 GPS 会战数据为主，称为 WGS-84(G 730)。这里的 G 代表 GPS，730 代表自 1994 年 1 月起国际 GPS 会战中 GPS 观测周的数量。

由于 GPS 星座发布 WGS-84 的轨道参数，所以以该坐标系工作的大地测量和导航接收机就可以获得广播星历。最新版本的 WGS-84(G 873)采用了 1996 年 29 日从零度子午线至格林尼治子午线进行为期 873 周的国际 GPS 会战成果。WGS-84(G 873)的坐标原点、定向和尺度是相对 15 个固定卫星观测站测定的。其中 5 个属于空军，10 个属于 NGA。

## 2.2 欧洲

欧洲一直在努力建立欧洲统一的地心坐标系。原来欧洲各国使用本国的坐标系。有些坐标系在边界地区进行联测。随着 GPS 测量技术、甚长基线干涉测量、激光测月和激光测卫以及 DORIS 无线电测量方法的发展，为准确地测定和监测地球旋转参数、大陆板块构造运动和建立高精度基础地面控制大地网提供了可能性。

1990 年国际大地测量学协会(IAG)欧洲参考框架(EUREF)委员会通过决议，建议所有欧洲国家坐标系在向 EUREF 过度时应与 1989 年国际地球参考坐标系 ITRS 保持协调一致，并在稳定的欧亚板块上建立 EUREF 的大地网控制点。欧洲地心坐标系被称之为欧洲全球参考坐标系 89(ETRS89)。根据 IAG 的决议以后又建立了 10 个参考坐标系，最后一个是 ETRS 2000。

1995 年 EUREF 委员会分会建议考虑建立欧洲大地网与永久性 GPS 观测站协调性的问题。为此得到了永久性大地网(EUREF Permanent Network, EPN)，其观测数据提供给国际地球自转和坐标系统局，以便保障 EPN 数据与 ITRF 的全球坐标系整合。有 30 多个欧洲国家测绘局和科研机构参加了这项工作。设在布鲁塞尔皇家天文台的 EUREF 的 EPN 中央局组织协调这项工作。从 2001 年 1 月 1 日起国际地球自转局改名为国际地球自转和坐标系局(International Earth Rotation and Reference Systems Service)。

最近几年来，特别是在建立 ITRF2000 中广泛地采用现代卫星大地测量技术：GPS/GLONASS 观测、甚长基线无线电干涉测量(银河系外无线电信号测量)、激光测月和激光测卫、无线电技术系统 DORIS。

卫星集成的多普勒轨道无线电技术系统(DORIS)是一种双频大地测量系统，1990 年由法国宇航局和国家测绘局(国家地理研究所)研制成功并投入使用。DORIS 与其他无线电导航系统不同，系统本身安装在卫星上，但自动摆发射器则在地面上工作。DORIS 的地面站均匀地分布在地球表面和大型岩石板块上。系统可准确地测定卫星的轨道，以便测定 55 个大地控制点的地心坐标、研究现代地壳运动、用星载精密测高仪监测海洋卫星的轨道。DORIS 安装在 SPOT 地形测量卫星上，以及海洋测量卫星 Topex /Poseidon、Jason、ENVISAT 和 Cryosat。DORIS 测量控制点

坐标的精度达 1-3cm, 测定地球的极移——0.001-0.002", 测定由地壳构造运动引起的大地控制点位移的速率达 1cm/a。

### 2.3 俄罗斯

根据 2000 年 7 月 28 日第 568 号总统令《关于建立统一的国家坐标系》，俄罗斯从 2002 年 7 月 1 日起实行坐标系 CK-95, 取代原来的坐标系 CK-1942。该总统令还指出, 今后轨道飞行中的各项大地测量保障和解决导航任务中将一律采用统一国家地心坐标系 PZ-90。

CK-95 坐标系是在两个阶段的平差基础上建立的。1995 年天文大地网 (A Г C)、多普勒大地网 (Д Г C)、卫星大地网 (К Г C) 进行联合平差之后测定了由 134 个控制点 (相邻距离为 400~500km) 组成的网。1996 年对 1995 年时期的 A Г C 进行了最终平差。这次平差中将第一阶段获得的由 134 个控制点的网作为基础网。CK-95 的参考椭球为克拉索夫斯基参考椭球, 坐标系原点是它的中心点。CK-95 控制点的位置由空间直角坐标 X、Y、Z, 大地坐标—纬度 B、经度 L 和高度 H, 以及用高斯-克吕格投影获得的平面直角坐标 x, y 给出。Z 轴读数椭球旋转轴一致, X 轴位于零子午线平面上, 大地高 H 是克拉索夫斯基参考椭球面上的正高与似大地水准面高的总和。大地控制点的正高以 1977 波罗地海高程系测定。

克拉索夫斯基参考椭球面上似大地水准面的高用天文重力水准测量方法测定, 其天文重力水准网覆盖全国, 包括 2897 个天文点。计算似大地水准面的高差时采用了 1:100 万或更大比例尺的重力测量数据。测定高差的精度: 10000~20000km 时为 0.06~0.09m, 1000m 时为 0.3~0.5m。

如前所述, 俄罗斯在轨道飞行器和导航任务中均采用 PZ-90 地心坐标系。PZ-90 以地球质心为坐标原点, 通过相隔 1500-2000 千米均匀分布的卫星大地控制网点来实现。卫星的坐标通过观测俄罗斯大地测量卫星 GEO-1K、全球导航定位卫星 GLONASS 和大地测量卫星 Э т а л о н 获得。目前正在卫星大地网 (К Г C) 控制点上利用 GEO-1K 和 GLONASS/GPS 综合观测数据对 PZ-90 进行现代化改造。第一阶段将把 6-7 个 К Г C 控制点代入现行的 ITRF 坐标系国际网 (实际上 ITRF 国际网与 WGS 84 相似), 第二阶段再把它们代入该系列的另一坐标系 ITRF2000。

### 2.4 澳大利亚

澳大利亚在 1966 年前全国的基准并不统一,

有几个不同的基准并存。整体平差后统一到参心基准 AGD 66 (1966 年澳大利亚大地测量基准) 上。后来针对 AGD 66 的不足, 80 年代又进行了一次重新平差, 建立了新的参心基准 AGD 84 (与 AGD 66 有 6 m 的偏差), 但有些州仍采用 AGD 66, 从而使全国的基准又出现了新的不统一。1994 年澳大利亚地心基准 GDA 94 (与 ITRF 92 一致) 建立完成, 这一基准已被用作澳大利亚及其海岛的地图和海图生产的新基准, 到 2000 年, 全国范围的大地参考系都已过渡到新的地心坐标系。澳大利亚采用地心基准的现实意义就在于简化导航应用, 与海图基准一致和解决全国基准的不统一等问题。参心系向地心系的过渡方法, 则由各州确定, 或采用联合平差或采用坐标转换方法实现。

### 2.5 中国

我国目前的大地坐标系统是基于西安 1980 坐标系下完成的全国天文大地网的整体平差获得的, 有 3 个全国性的网, 60 余个 GPS 永久性跟踪站和近千个 SLR 和 VLBI 站。而西安 80 坐标系的问题是: 坐标系统采用的是二维坐标系统; 非地心椭球定位; 定义我国现行大地坐标系统的物理和几何常数, 需要更新和改善; 椭球短轴的指向。另外, 我国坐标框架也存在着一些问题, 如全国天文大地网点被毁了约 1/3, 精度低, 二维平面与目前三维成果不匹配、实时或准时定位不能满足等问题。

我国已先后建立了全国 GPS 一、二级网, 国家 GPSA、B 级网, 以及地壳运动观测网络 GPS 网。这些网包括各类型的高精度 GPS 点 2000 多个, 经过与国际 IGS 站的统一处理构成了我国地心坐标系的基本框架。总参测绘局、国家测绘局、中国地震局通力合作已于 2003 年初步完成了我国 3 类 GPS 网的联合平差——“2000 国家 GPS 大地控制网”, 历元为 2000.0。通过对各 GPS 网的观测信息进行统一平差, 消除了其间的不符值, 建立了基于 ITRF97 坐标框架的全国范围的 GPS 控制网, 解决了各个网的基准统一问题, 增强了统一后各 GPS 网的精度和可靠性。平差中以 IGS 站和网络工程点作为坐标框架, 在其他网中适当加入尺度和 3 个坐标旋转参数, 这些参数可以吸收各 GPS 网中存在的尺度系统误差、定向误差及地壳运动引起的点位误差等与基准有关的误差, 使它们在整网平差时自动向 IGS 站和高精度的网络 GPS 点坐标基准转换。如此, 2000 国家 GPS 大地控制网标定

的坐标系统具有很好的现势性，且平均点位坐标精度优于 3 cm，所构成的框架点坐标暂称为“中国 2000 坐标系”。由于地壳运动观测网络的 GPS 点位分布不均匀，全国 GPS 一、二级网和国家 GPSA、B 级网尽管点位分布较均匀，但点密度太低，不足以作为我国地心坐标系统的框架。为此，总参测绘局与国家测绘局先后进行了全国天文大地网与空间 GPS 网的联合平差，联合平差是在 2000 国家 GPS 大地控制网基础上进行的，坐标系统采用中国 2000 地心坐标系。平差计算了全国天文大地网近 5 万个点的地心坐标，其地面网点的三维点位中误差优于 0.3m<sup>[2]</sup>。2000 国家 GPS 大地控制网为建立新一代地心坐标系打下了基础。

几十年来 1954 年北京坐标系、1980 年西安坐标系在国家经济建设、国防建设和科学研究等领域发挥了重要作用。但由于当时受技术条件限制，该网采用的地球参考椭球其中心与地球质量中心不重合，1954 年北京坐标系的地球参考椭球与国际通用相比也存在较大的偏差。此外，天文大地网本身还存在点位精度较低、现势性差等问题，已经无法适应国防建设及空间技术、信息技术的发展需要。

我国大地测量学者对新一代地心坐标系的建立一直给予高度关注，并建议我国地心坐标系的定义应与 ITRS 协议（地球参考系）一致，即坐标系原点为包括海洋和大气的整个地球的质心；尺度为在引力相对论意义下局部地球框架的尺度；定向的初始值由 1984.0 时 BIH（国际时间局）定向给定，而定向的时间演化应保证相对地壳不产生残余的全球旋转<sup>[3]</sup>。随着 GPS、伽里略和我国北斗三个导航定位系统参考站的集成，把所有这些参考系统纳入一个更高层次的参考地心坐标系统的时机已成熟。它们不仅仅是具有理论优势，而且具有实际的可操作性。

### 3 展 望

建立坐标系统是现代大地测量的一个重要标志，也是当前大地测量发展战略的主要环节。随着现代大地测量学的不断发展，在未来 5~10 年内，其它国家地区都有可能相继建立起新的地心坐标系系统。

#### 3.1 精度将进一步提高

新的卫星和地面大地测量设备和方法的使

用，使大地测量基础不断地更新和完善，如 GPS/GLONASS 观测、甚长基线无线电干涉测量、激光测月和激光测卫、无线电技术系统 DORIS，因而使用改进的大地测量数据处理方法来精确地心坐标系参数和重力场参数成为可能。美国、俄罗斯等都建立了新的、更高精度和空间分辨率的全球重力场模型。

#### 3.2 由局部定位向全球定位过渡

空间大地测量在大地测量技术中的主导地位已使区域性大地测量直接或间接地纳入到全球大地测量的范畴，并使参考基准从 2 加 1 维发展到 3 维或 4 维成为现实。此外，在全球一体化发展的大背景下国际组织提出的跨国界洲际 GIS、全球测图等计划的实施需要以全球地心系为基准。欧洲参考框架（EUREF）委员会在国际大地测量学协会（IAG）建议下，将使用的统一地心坐标系并局部地心坐标系发展到欧洲全球参考坐标系 ETRS 2000。我国 1980 年国家大地坐标系的实际应用只作为一个过渡，现已完成的新一代地心坐标系与 ITRS 协议（地球参考系）一致。

#### 3.3 ITRF 将得到继续维护、更新和改造

根据 1991 年国际大地与地球物理联合会（IUGG）第二次决议，每年都对“国际地球参考框架（ITRF）”进行国际性会战，最新版本是 ITRF2005。国际 ITRS 计划仍在继续，今后还会有新的 ITRF 出现。北美 NAD 27 基准向 NAD 83（地心基准）改造时就是通过 ITRF 更新来修正和弥补大地网点的坐标的。从用户的应用需求来看，维护、更新和改造 ITRF 的目的是为了更准确地采用地心基准，确保测定坐标原点、尺度、定向和协议地球参考坐标系（CTRS）随时间变化的模型和技术条件等在与地心坐标系的种类、空间、时间等方面的“无缝”衔接。

作者注：本文得到魏子卿院士和杨元喜导师的指导和校正，在此表示感谢！

#### 参考文献：

- [1] Берек, 测量与制图, 2005 (2): 3~6.
- [2] 杨元喜. 中国大地坐标系建设主要进展[J]. 测绘通报, 2005 (1).
- [3] 魏子卿. 我国大地坐标系的换代问题[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28 (2): 138~143.