

现代大地测量参考系统^{*}

宁津生

(武汉大学 测绘学院 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 湖北 武汉 430079)

Modern Geodetic Reference Systems

NING Jin-sheng

(Ministry of Education Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The definition of modern geodetic reference system and the relationship between different systems are discussed. Three reference systems for representing geometrical positions; the national geodetic reference system of China 1980, the World Geodetic System 1984 (WGS 84), the International Terrestrial Reference System (ITRS), and one system for representing physical positions, i. e. a height reference system; the National Vertical Datum of China 1985, are mainly concerned. The concepts of frame and datum in geodesy are also discussed.

Key words geodetic reference system; frame; datum

摘 要: 概述现代大地测量参考系统的定义及不同参考系统之间的关系。主要讨论我国当代大地测量界常使用的 3 种用以表示几何位置的参考系统: 1980 年国家大地坐标系、全球大地测量系统 1984 (WGS 84)、国际地球参考系统 (ITRS), 和一种用以表示物理位置、高程的参考系统: 1985 年国家高程基准。并讨论大地测量中框架和基准的概念。

关键词: 大地测量参考系统; 框架; 基准

1 引 言

我国当代大地测量界常常要面对 3 种用以表示几何位置的参考系统。对以国家建设为目标的测绘工作来说, 需要采用我国法定的 1980 年国家大地坐标系来表示点位坐标。在利用 GPS 定位时, 又要用到全球大地测量系统 (WGS 84)。而在以科学研究为目标的大地测量工作中, 要获得极高的定位精度, 又常常采用国际地球参考系统 (ITRS)。虽然这几种参考系统在概念上的差别并不大, 但它们的具体实现却相差很大。本文主要

介绍这 3 种大地测量参考系统, 并作为补充简略介绍我国 1985 年国家高程基准即黄海高程系统。然后讨论大地测量中常用的几个概念: 参考系统、框架和基准。最后对我国及国际大地测量参考系的现状做些讨论。

2 大地测量参考系统的定义

为了说明大地测量参考系统是如何定义的, 首先简要解释 3 个概念: 地球质心、地球自转轴和大地水准面。地球质心是指固体地球、海洋和大气的共同质心。地球在相对惯性空间高速自转,

收稿日期: 2001-11-05; 修回日期: 2001-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40074005)

作者简介: 宁津生 (1932-), 男, 安徽芜湖人, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要研究方向为大地测量。

* 武汉大学测绘学院郭俊义教授帮助收集及整理了材料。

通过地球质心,并指向旋转角速度方向的轴线称为地球的自转轴。长期的科学研究表明,地球的自转是非常稳定的,自转速率、自转轴相对空间和地球本身的方向变化(日长变化、岁差-章动和极移)非常小。大地水准面是表征地球形状与大小的物理面,它是人为定义的、满足如下2个条件的闭合曲面:①处处与铅垂线垂直;②与海洋面非常接近。由于与海洋面非常接近的标准并不惟一,所以大地水准面的定义也有一定的随意性。大地水准面是一个重力位的等值面,所以,只要定义了大地水准面上的一个点,则整个大地水准面就定义了。大地水准面的形状非常接近相对于短轴旋转对称的椭球,短轴基本上与地球的自转轴重合。这些概念是建立大地测量参考系统的基础。

确定一个地球椭球是建立用以表示几何位置的大地测量参考系统的关键。地球椭球是近似表示地球的一个质体,它在绕短轴相对惯性空间自转,其表面为自身重力位的等值面。地球椭球的重力场称为正常重力场,其重力位和重力分别称为正常重力位和正常重力。地球椭球的形状和大小完全由4个参数确定: GM (G 为万有引力常数, M 为质量)与实际地球的相等; U_0 (表面的正常重力位)与大地水准面上的重力位相等; J_2 (动力形状因子)与实际地球的相等; ω (自转角速率)与实际地球的相等。地球椭球的4个参数中, U_0 常由 a (长半轴)代替, J_2 常由 f (扁率)代替。地球椭球相对于实际地球的位置由其中心位置和短轴方向确定。要尽力做到其中心位于地球的质心,其短轴指向地极。地极通常定义为地球自转轴在某一段时间内的平均位置。地球椭球的表面事实上是大地水准面的近似,它是与大地水准面符合得最好的旋转椭球面。

一点相对地球椭球的位置由经度 L 、纬度 B 和大地高 h 来表示。定义经度时需要定义一个零经度子午线,或称起始子午线。引进一个直角坐标系,中心位于椭球中心, x 轴位于地球椭球的赤道面内,并指向初始子午线, z 轴沿地球椭球的短轴指向北方, y 轴由右手法则确定,则一点的位置也可以用直角坐标 x, y, z 表示。

在前空间大地测量时代,地球椭球只能主要以区域性大地测量工作为基础建立,其大小、形状及位置通常全部或部分根据与国家或地区的大地水准面或似大地水准面符合最好的原则(最小二乘)确定。地球椭球的位置、形状和大小由大地原

点的大地坐标 L, B ,垂线偏差 ξ, η ,大地水准面高 N ,以及椭球大小和形状参数(长半轴 a 、扁率 f)来确定。

进入空间大地测量时代以来,测量精度不断提高,目前在全球尺度上已达到几个厘米的量级。在这种精度的基础上,以前无须考虑的地球动力学因素现在必须加以考虑。现代大地测量参考系统的确立可分为如下4个步骤:①建立一个3维直角坐标系的3条坐标轴与位于地球上或地球内部一组可观测点之间的关系,从而完全确定这个3维笛卡尔坐标系的位置和方向;②建立距离与一个可观测量之间的关系,从而确立长度的单位;③引进一个近似表示地球大小与形状的几何形体,即地球椭球;④定义高程系统,即确立重力场在定位中的作用。

对于第1步,学术界的共识是定义地球质心为3维笛卡尔坐标系的中心, z 轴指向作为约定而定义的北极,通常为国际地球自转局(IERS)定义的国际参考极(IRP), x 轴指向作为约定而定义的起始子午线,通常为IERS定义的起始子午线, y 轴则根据与 x, z 轴形成右手系的规则确定。但是这种看起来简单的几何过程由于地球的动力学行为而变得非常复杂。地球的质心在相对地表运动,地球的自转速率以及自转轴相对于空间及相对于地球本身都在变化(日长变化、岁差-章动和极移),地面点由于板块运动、地震、火山活动、冰后回弹、固体潮、海潮负荷等各种地球物理因素影响在作相对运动。建立现代大地测量参考系统必须考虑这些因素。一种方法是将笛卡尔坐标系的坐标轴固联于一组选定点的瞬时位置。处理地球自转变化及板块运动时通常采用这种做法。其他类型的运动则通过将笛卡尔坐标系的坐标轴固联于所选定的点在某一历元的瞬时位置而予以考虑。

对于第2步,长度单位“米”通过光速来定义,即真空中的光速为299 m/s, 792 m/s, 458 m/s。这虽然将长度单位定义成了一个可观测测量,即真空中光在1/299 s, 1/792 s, 1/458 s走过的距离,但并不是具体的实现。不同的大地测量参考系采用了不同的技术来测量长度,例如因瓦尺、光电测距仪、GPS、VLBI、SLR等。虽然每种手段都总是尽力标定而符合上述定义,但观测量总是具有不确定性,因而使得不同的大地测量参考系统之间存在尺度的差异。在将前空间大地测量时代建立的大

地测量参考系统与现代利用空间大地测量技术建立的大地测量参考系统进行比较时可以发现, 老系统存在百万分之一量级的误差。而现代测距技术已达到十亿分之一量级的精度水平。

第3步是选择一个地球椭球, 使它相对3维笛卡尔坐标的位置如前所述。我们知道, 在现代技术水平上, 确立地球椭球的4个参数中, GM 和 J_2 可由分析人造卫星轨道确定, ω 由一般天文观测确定, a 则由激光、多普勒或雷达测高等技术测定。这样测得的地球椭球对全球大地水准面都可达到一定程度的最佳符合。一点的位置可用3个笛卡尔坐标 x, y, z 或3个大地坐标 L, B, h 表示, 2组坐标可以互相转换。大地坐标更符合我们关于水平和垂直方向尺度的直觉。

第4步是建立高程系统。这只需明确指定一个零高程点。将这个点用精密水准联测到一个标石上, 确定这个标石的高程后, 其他位置的高程就可由这个标石起用水准测量测得, 这个标石叫水准原点。高程系统中有重力场的影响, 需要根据所采用的是正高或正常高系统对几何水准作不同的重力场改正。

3 大地测量参考系统的几种具体实现

这里概略介绍3种用以表示几何位置的大地测量参考系统: 我国1980年国家大地坐标系、WGS 84和ITRS。

我国的1980年国家大地坐标系主要是前空间大地测量意义下的参考系统^{*}。它采纳了1975年国际大地测量协会推荐的地球椭球(IAG-75椭球)。极点采纳我国在1949到1977年期间36个台站的观测资料归算得到的1968年极原点, 即JYD 1968.0。起始子午线采纳格林尼治子午线。地球椭球中心的位置是根据椭球面与我国似大地水准面符合得最好的原则(最小二乘)确定的。大地原点位于我国中部的陕西省泾阳县永乐镇。

WGS 84是美国国防部建立的GPS系统采纳的大地测量参考系。它最初是利用TRANSIT大地测量卫星系统的多普勒观测确定的。后来进行了2次更新。第1次更新是1994年, WGS 84完全根据GPS观测重新确定, 称为WGS 84(G 730), 其中G代表GPS, 730表示进行了730个星期的观

测。第2次是1996年, 方法与前一次一样, 称为WGS(G 873), 其中G仍代表GPS, 873代表进行了873个星期的观测。

WGS 84(G 873)的中心、指向和尺度是根据15个GPS跟踪站的坐标确定, 其中5个跟踪站由美国空军维护, 10个由美国国家图像与制图局(NIMA)维护。将来, WGS 84还可能随跟踪站的增加或已有跟踪站天线的移动或更换而进一步改进。由于GPS卫星的广播星历是相对于WGS 84的, 所以利用广播星历适时定位得到的便是WGS 84坐标, 这使WGS 84得到了广泛的应用。但是, 高精度定位工作中通常不采用WGS 84, 这是因为高精度定位需要已知的高精度控制点。各种高精度差分GPS定位技术均需要一个或多个高精度控制点, 以消除系统误差。所以, 要采用WGS 84进行高精度定位, 必须预先建立一个比较密集的高精度WGS 84控制网。另一个影响高精度GPS定位的因素是WGS 84中跟踪站的地壳运动速度不向GPS用户提供。

WGS 84符合IERS定义的协议地球参考系(CTRS), 即: ①中心在地球质心; ②采用广义相对论下地固参照系中的尺度; ③指向符合IERS(事实上是其前身国际时间局, 简称BIH) 1984.0指向; ④指向随时间的变化使它相对地壳没有整体转动。这与ITRS是一致的。

ITRS是20世纪80年代后期引进的, 目的是促进需要高精度定位的科学研究地开展, 例如监测地壳及地球自转轴的运动。ITRS的具体实现称为国际地球参考框架(ITRF)。从1988年起, IERS基本上每年都发表ITRS的一种实现, 即ITRF 88, ITRF 89, ..., ITRF 2000。

ITRS是第1个将板块运动及其他地壳运动考虑在内的国际大地测量参考系统, 具体做法是同时给定控制点的坐标和速度。由板块运动理论不难理解给出速度的必要性。根据板块运动理论, 地球表层的岩石圈由大约20块基本上为刚体的板块构成, 这些板块在做相对的横向运动, 位于不同板块上的点之间的相对运动速度有的达每年150 mm, 这用GPS是很容易探测到的。

既然地球表层的各板块在做相对运动, 那么必然要提出这样一个问题: 板块运动的“绝对”速度应该怎样表示呢? 由于没有“绝对”不动的点作参考, 所以要表示板块运动的“绝对”速度, 必须已

^{*} 这里讲的也并非完全是前空间大地测量意义下的参考系统, 因为所采纳的地球椭球参数实质上是由空间大地测量技术确定的。

经知道一些点的“绝对”速度,从而可作为参考点。这是个类似先有鸡还是先有蛋的难题。目前,建立 ITRS 时解决这一难题的办法是假设地球表层作为整体在平均意义下相对地球内部没有运动,换句话说,地球表层相对 ITRS 的总角动量等于零,即一个板块的角动量刚好由其他板块的角动量所抵消。这事实上是前面提及的 IERS 定义的 CTRS 的第 4 点内容的具体化。

ITRS 的所有具体实现 ITRF 88, ITRF 89, …, ITRF 2000 都是由处于稳定板块内部的一些观测站的坐标和速度维持,其中的坐标是指某一历元的。例如,若已知 t_0 时刻的坐标,则 t 时刻的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= x(t_0) + v_x(t - t_0) \\ y(t) &= y(t_0) + v_y(t - t_0) \\ z(t) &= z(t_0) + v_z(t - t_0) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, v 为速度。各期 ITRF 的 t_0 均不同,可参阅有关文献。

ITRF 2000 主要是利用 VLBI 和 SLR 观测建立的。主要特点是其方向随时间的变化是以它相对 NNR-NUVELIA 没有纯转动的原则定义的。ITRF 2000 考虑到了各种应用的需要,如大地测量、制图、导航等,尤其是用作世界各国,特别是会员国的国家大地测量坐标系的需要。所以,ITRF 2000 不仅包含正在运行的空间大地测量仪器,还包含有用的标志,以方便测量工作。

最后列出上述 3 种大地测量坐标系所采用地球椭球的参数以供参考,见表 1。

表 1

Tab. 1

	长半轴/m	扁率(无量纲)
我国 80	6 378 140	1/298.257
WGS 84	6 378 137.0	1/298.257 223 563
ITRS	6 378 136.49	1/298.256 45

1 点在各种坐标系中的坐标可以互相转换。
2 个坐标系之间的关系由 7 个参数确定。直角坐标转换公式为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_s & R_z & -R_y \\ -R_z & D_s & R_x \\ R_y & -R_x & D_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, X, Y, Z 和 X', Y', Z' 为 2 组直角坐标; T_x, T_y, T_z 表示坐标平移; R_x, R_y, R_z 表示绕 3 条坐标轴的转动; D_s 表示尺度的不同。各种坐标系之

间的转换参数可以在维持这些坐标系的机构的官方文件中找到。

前面介绍的是几种用以表示几何位置的大地测量参考系统。最后介绍一种用以表示物理位置,高程的参考系:1985 年黄海高程系统即 1985 国家高程基准。1985 年黄海高程系统是以 1985 年推算的黄海验潮站平均海水面作为我国高程的起算点,即零高程点。由精密水准测量联测得到水准原点的高程为 72.260 4 m。其他地方的高程可由水准原点起用水准测量测得。我国的高程系统采用的是以似大地水准面为起算面的正常高,要对水准测量加相应的重力场改正。

四 关于参考系统、框架和基准

在大地测量中,参考系统、框架、基准几个概念常常使用。这里我们对这几个概念作些解释,并分别给出一些例子。

参考系统的概念在上文中一直使用,它是为了表示位置坐标而定义的类似于标尺作用的参照物的称谓。例如:若将椭球体看做参照物,则椭球表面的经线、纬线、法线及相应刻度共同构成参考系统;若将 3 条笛卡儿坐标轴看做参照物,则坐标中心、坐标轴及其刻度共同构成参考系统。

在参考系统的具体实现中,我们不可能把椭球体或者笛卡尔坐标这类人为定义的东西具体标出来,而只能代之以用固定在地球上的一组标记及其坐标和其他一些参数间接地表示出来,这组标记就是一个框架。换言之,框架就是参考系统的具体实现。例如,ITRF 就是 ITRS 的具体实现。

在大地测量中,基准,顾名思义,是测量工作的起点和初始数据,任何测量都要与基准相一致。对用以表示几何位置的前空间大地测量时代的经典大地测量参考系统,如我国的 1980 年国家大地坐标系,基准就是坐标原点,其大地坐标 L, B , 垂线偏差 ξ, η , 大地水准面高 N , 以及椭球长半轴 a 和扁率 f 。任何点的大地坐标、垂线偏差、大地水准面高均可从基准出发通过测量某些量得到。对于像 ITRS 这样的现代大地测量参考系统来说,基准像我国 1980 年国家大地测量坐标系那样定义是不合适的,所以基准一词的意义必须作一定的引申。在这种情形下,基准的合理定义是“完全确定参考系统的必须因素”。ITRS 的基准则为原点、尺度、指向及其随时间的变化。对于我国的 1985 年黄海高程系统,基准就是水准原点及其高

程值。国际上重力基准的演化值得追溯一下。在绝对重力测量成为可能, 但非常困难的年代, 于 1909 年用当时最精确的数台可倒摆建立了波茨坦系统, 即测定了一个点的绝对重力。直到 1971 年, 国际上的重力点都是直接或者间接地与波茨坦系统进行相对重力测量建立的。波茨坦的这个绝对重力值可说是重力基准。出现了更精确的自由落体绝对重力仪后, 国际上于 1971 年建立了国际重力标准网(IGSN 71)。这个标准网中, 8 个台站是用绝对重力仪建立的, 其他还有 1 800 多个台站是通过相对重力仪测量确定的。这个标准网中的每个台站都可以当作基准点用相对重力测量确定其他位置的重力。在这个意义上, 这个标准网实质上是一个基准网。这个基准网也可以称之为一种重力基准。后来, 由于绝对重力仪精度的进一步提高和普及, 建立足够精确的绝对重力点以服务于相对重力测量已不像以前那样困难。我国也建立了自己的绝对重力网, 作为我国大地测量工作的重力测量基准, 国家任何重力测量必须与这个基准相容。

以上是我们对大地测量参考系统、框架和基准 3 种概念的一些理解, 对否? 现提出来供大家议论。

5 讨 论

GPS 是大地测量技术的革命, 它几乎改变了大地测量的一切, 而 ITRS 的出现则使得充分利用现代高精度空间大地测量技术变为现实。在不久的将来, ITRS 的某一实现, 例如 ITRF 2000, 很可能为许多国家采纳为国家大地测量坐标系。事实上, GPS 所采纳的 WGS 84 也在接近 ITRS, 例如, WGS 84(G 730) 和 WGS 84(G 873) 分别与 ITRF 92 和 ITRF 96 基本一致。

在利用 GPS 进行大地测量精密定位时, 通常

不采用广播星历, 而是采用事后拟合的精密星历。除 NIMA 提供的 WGS 84 中的精密星历外, 国际 GPS 服务(IGS)也在提供 ITRS 中的精密星历。这使得在 ITRS 中进行大地测量精密定位成为可能, 也为各国采用 ITRS 作为国家大地测量坐标系提供了技术保证, 因为 GPS 已经成为几乎惟一的大地测量定位手段。

像我国 1980 年国家大地坐标系这种前空间大地测量时代的经典参考系统相对现代空间大地测量技术来说已出现了许多不足, 主要是尺度的误差、尺度的不均匀使得其不能满足现代厘米级测量的要求。作为我国下一代国家大地坐标系, 是进一步改进我国 1980 年国家大地坐标系(北美就在一直改进其 NAD 83), 还是采纳 ITRS, 是我国大地测量界必须要面对的问题。这事实上是要在测绘工作的连续性与将来测量工作的便利性及精度之间做出抉择。

参考文献:

- [1] IERS. IERS Technical Note 21[A] . IERS Conventions (1996) [C] . Paris: Observation de Paris, 1996.
- [2] NIMA. NIMA Technical Report: Department of Defense World Geodetic System 1984[R] . [s. l.] : [s. n.] , 1996.
- [3] SNAY R A, SOLER T. Modern Terrestrial Reference System (Part 1)[J] . Professional Surveyor, 1999, (12).
- [4] SNAY R A, SOLER T. Modern Terrestrial Reference System, Part 2: The Evolution of NAD 83[J] , Professional Surveyor, 2000, (2).
- [5] SNAY R A, SOLER T. Modern Terrestrial Reference System, Part 3: WGS 84 and ITRS[J] . Professional Surveyor, 2000, (3).
- [6] SNAY R A, SOLER T. Modern Terrestrial Reference System, Part 4: Practical Considerations of Accurate Positioning[J] . Professional Surveyor, 2000, (4).
- [7] BOUCHER C, ALTAMIMI Z. ITRF and Its Relationship to GPS [J] . GPS World Magazine, 1996, 7(9).