维普资讯 http://www.cqvip.com

第21卷 第3期 重庆交通学院学报 2002年9月
Vol.21 No.3 JOURNAL OF CHONGQING JIAOTONG UNIVERSITY Sep., 2002

WGS-84至工程坐标系的转换参数获取

冯 晓[1]，周 平[2]，刘 星[3]，徐 光[1]

（1. 重庆交通学院 道路工程系，重庆 400074；2. 重庆市勘测院，重庆 400023；
3. 重庆大学 B区土木学院，重庆 400045）

摘要：随着直接由GPS相对定位获取高精度的工程坐标成为可能，由GPS测定WGS-84坐标系的坐标（或坐标增量）至用户定义的工程坐标系坐标（或坐标增量）所需的转换参数的获取方法以及精度日益为人们所重视．提出了研究这一问题的必要性．在给出不同条件下坐标转换参数的获取技术的基础上，对转换参数的精度的影响因素进行了分析，对转换网的要求提出了定性的观点．

关 键 词：GPS定位；卫星网；地面网；坐标转换
中图分类号：P221 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-716X(2002)03-0083-04

过去的10余年GPS主要以静态相对定位用于控制测量，以高精度地确定边长，坐标系的差异较少为人们所关注．最近两年随着GPS快速高精度初始化使流动作业失锁问题基本解决，导致了实时动态（RTK）测相伪距相对定位技术的成熟，使得数秒钟的观测坐标增量相对精度达到1—2cm．这预示着GPS应用范围将扩大到为数众多的低等级控制点、图根点、碎步点的测量，各种设计建（构）筑物的施工放样与纵横断面测量，以及某些较快速度移动变形体的动态监测中．

要求GPS能够直接输出实际工程问题中所选择的任何坐标系统的坐标（或坐标增量）已经成为必然要求．实现这一要求的前提条件是应当通过GPS测量直接获取WGS-84任意用户坐标系的足够精度与可靠度的转换参数．为此需要研究不同工程问题中WGS-84测量基准对国家大地测量基准或工程坐标系统的转换参数获取的必要的精度与可靠度的问题．在实际应用中，转换参数的质量将在与同一坐标系的其它成果的联测或比较中反映出来，它直接影响GPS观测成果的通用性和外部符合程度．这一问题在现行规范中仅有原则性的规定[2]，一般要求是目标坐标系控制点在GPS作业区的均匀分布，而对用点等级、困难条件下的处理，转换网最大可控范围等问题均未作说明．实际工程中，往往难以找到足够、位置合适的目标坐标系已知点可供构成转换网，或常会根据具体工程需要定义某个独立的工程坐标系统．笔者对这类问题作了一定的探讨与分析，并对这一问题做出某些界定和引入．

1 工程坐标系的选择

大范围工程和研究中的计算表面，目前主要使用逼近大地水准面的旋转椭球面或其上的某个高斯投影平面．高斯平面坐标系统基准的选择主要包括选择适当的参考椭球、参考椭球的适当定位和选择适当高斯投影方式．工程中选择计算表面的目的首先在于控制水平长度变形和角度变形，使计算值更接近于观测值；其次是观测值到计算表面的投影化算简便微小；第三是使这种条件能够适合于范围更广的地区．在实际应用问题中，一般只对参考椭球部分定位参数和高斯投影方式上进行有限的比选．

1.1 选择参考椭球

在我国大部分地区，原则上可在格拉索夫斯基、WGS-84、西安-80三种参考椭球进行选择．由于椭球参数对坐标系与实际地表吻合程度影响甚微，工程实际中选用这两种椭球的任何一种应当说都有足够精度．

1.2 椭球定位方式

工程坐标系基准要素中，在椭球定位上可以进行局部技术性调整，以使椭球面与工程区域重要基准表面（如平均高程面）的差距最小，从而使该区的边长与角度的投影变形最小．实际中可视具体情况主要有以下几种处理方案．

（1）直接选择国际协议总椭球WGS-84坐标系．该系总椭球中心与地球质心重合，旋转轴与地

收稿日期：2001-09-05
作者简介：冯 晓(1960－)，男，重庆人，副教授，工学博士，主要研究GPS定位技术，高等级公路测设新技术及路线CAD等．

维普资讯 http://www.cqvip.com

球平均旋转轴（协议北极）相重合，赤道面通过地球质心并与旋转轴相垂直.

(2) 直接选择我国西安-84椭球和西安原点定位方案. 参考椭球的旋转轴与地球平均旋转轴平行，赤道面与协议总椭球赤道面也平行. 在西安原点，该坐标系的大地坐标和天文大地坐标相等，大地高为零（参考椭球表面与大地水准面相切），该坐标系由覆盖国土面积的控制网天文大地联测综合平差后的的数值确定.

(3) 与工程控制区重要控制面吻合的工程补偿坐标系方案. 一般选用西安-80椭球参数. 椭球的定位与国家参考椭球定位方式相仿. 原点可选在工程控制区中部. 这时，修改椭球长半轴的改正量可采用下式确定[2]：

$$a_L = a + d_{a,a} = (a/N)h_n, h_n = h + \xi \quad (1)$$

式中，h 为自定义参考椭球面在控制区的平均高程；ξ 为该地大地水准面差距；N 为该地参考椭球卯酉圆半径. 在高纬度地区，改变参考椭球面长轴所移动表面位置并不明显，需要同时改变短轴长度才能使其与平均高程面最接近.

1.3 选择高斯设影方式

通过选择中央子午线位置于工程控制区中部，可以最大限度地减小观测值投影到高斯面上的变形. 高斯面作为平面平差计算表面，实地以铅垂线和测站水平面为基准的观测值应该与高斯平面对应元素的投影误差在允许范围以内. 但并非每一种特定情况下都需调整高斯投影中央子午线位置.

1.4 准高斯平面坐标系（小区域平面坐标系）

小区域平均平面坐标系的计算表面是与该区域水准面综合差距最小的数学平面，可以认为它是一种特殊的高斯投影面. 到高斯面的两次投影可以近似用沿铅垂线的正射投影而不加任何改正. 各点的以水平面和铅垂线为基准的观测值直接认为是小区平均平面上的. 坐标系的X轴方向可为小区中部某点的真正方向，或为任意指定方向.

1.5 WCS-84真三维坐标系统

在许多情况下，使用工程坐标系或直接使用WCS-84椭球或高斯坐标不失为一种更好的选择；某些工程问题中，甚至可以直接使用WCS-84真三维坐标系[3]. 某些独立工程项目使用这种坐标系更便于使用GPS技术. 工程坐标系统的选取是工程的一个十分重要的问题. 坐标系的合理选择，不仅可以通过充分利用现有测量成果减少工作量和不必要的浪费，还可以减少投影变形或避免投影改正，使计算成果与实地更加接近，在工程放样中将投影误差的影响减少到最小程度.

2 坐标系定义网

坐标系统是通过一组点的已知坐标来确定的，可为平面坐标、大地坐标或天文坐标等，这一组点可称为坐标系定义网. 任何一种工程坐标系均是由一组控制点的坐标值来加以固定的. 这些点的坐标值一般可以假定或由测定近似值后的某些平差方式决定. 一般地，在地球表面固定一个坐标系有以下方案：

2.1 自定义工程平面直角坐标系

(1) 完全无约束最简定义网. 由一点的假定平面坐标、该点的铅垂线、一个假定方向确定，没有尺度因子.

(2) 边长约束最简定义网. 由一点的假定平面坐标、该点的铅垂线、一个假定方向和一条边长确定；或由两点的假定坐标确定. 与GPS联测可解算尺度因子. 这样标定平面坐标系统，可视为一种特殊的高斯平面坐标系统，不妨称其为一种准高斯平面坐标系.

(3) 独立网坐标系统. 由一组地面点的观测值通过平差定义的一个平面坐标或参考椭球坐标系统.

2.2 自定义工程地理坐标系统

地理坐标系统的定义需要选择参考椭球和椭球定位两个环节. 椭球定伦的最简单的方法是指定（或测定）一个点的地理坐标和大地高程，以及一个方向的大地方位角. 实际中一般通过（大地、天文、重力、水准以及惯性方法）测定一组点大地坐标和大地高的近似值，由某种平差方法确定.

2.3 引用坐标系统

在坐标系定义过程中，若使用其它坐标系的已知点作为项目的坐标系定义网，则所建坐标系统可称为引用坐标系统. 如在建立工程坐标系统时直接使用国家、城市甚至于国际协议坐标系统. GPS定位提供了一个直接建立WCS-84控制的方法. 如直接使用该坐标系作为工程坐标，则GPS的相对测量成果不需进行任何转换.

参考椭球面（或高斯投影面）与工程区符合程度则是可以被投影误差检查显示出来. 实际工程问题对坐标系以及坐标系精度的要求主要表现为对投影误差的有效限制，例如可通过选择参考椭球、椭球定位、选择高斯投影方式基本消除两项投影误差，从而使地面以垂线为基准的观测值与投影值的差值可以控制允许的范围内或忽略不计.

3 坐标系转换网

坐标系定义网与坐标系转换网在有时是不同的. 一般后者只是前者的一部分，有时是全部. 自定义坐标系统时，坐标系定义网与坐标系转换网可以而且常常是完全重合的. 但当自建的独立坐标系定义网的网点较多时（如超过5个点时），转换网一般没有必要选择全部地面坐标系定义网点.

但在引用坐标系的情况下，当已存在满足工程要求的坐标系统的若干已知控制点时，不必要重新建立坐标系定义网，而是通过在已知控制点中选取部分点（2-4点）作为坐标系转换网，用于与GPS联测以获取两坐标系的转换参数. 这种方式建立的

维普资讯 http://www.cqvip.com

GPS 转换网可称为选择性转换网，其转换参数的精度与所选点的位置与精度相关.

4　两坐标系转换参数的获取

两坐标系转换参数的取得可以通过取得该网的全部或部分控制点在另一坐标系中的坐标来反算，这些重合的控制点可称为坐标系转换网. 两坐标系之间的转换参数根据已知坐标的种类、转换的精度分别采用不同模型求解.

4.1　三维直角坐标解算

4.1.1　三维直角坐标的 7 参数解算法

设 n 为转换网点数

$$U_T = \delta X_T, U_S = \delta X_s, \delta X_s = \delta X_T + Z + l \quad (2)$$

$$\delta X_T = (\delta X \quad \delta Y \quad \delta Z)_T^T, \quad \delta X_s = (\delta X \quad \delta Y \quad \delta Z)_s^T \quad (3)$$

此方法需要已知转换网各点在用户坐标系下三维坐标观测值及其方差协方差阵，和在协议地心坐标系下的对应值. 此法需要通过地面方法求取前者，并需获得各点的对参考椭球面的大地高，为此必须已知精确的大地水准面差距，在实际中相当困难. 向量 Z 包含 7 个转换参数：

$$Z = (\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, \omega_x, \omega_z, m)^T \quad (4)$$

4.1.2　三维直角坐标差的四参数解算法

设 n 为转换网点数，n_1 为网中观测基线数，则以基线向量为观测量的误差方程为：

$$V_{\Delta T} = C \cdot \delta X_T, \quad V_{\Delta s} = C \cdot \delta X_S,$$

$$C\delta X_s = C\delta X_T + CRY + l_\Delta \quad (5)$$

其中，$l_\Delta = \Delta X_T - \Delta X_s$ 为两坐标系下的基线增量观测值之差；C 为 $3n_1 \times 3n$ 的基线端点组成的矩阵，元素为 ± 1，0；R 为各网点地面坐标近似值转换矩阵：$\underset{3n\times 4}{R} = (\underset{3\times 4}{R_1} R_2 \cdots R_n)^T$，其中 R_i 由为第 i 点的坐标变换矩阵[4]. 此方法由于使用两坐标系下的基线向量坐标增量作为观测量，可使坐标系转换参数减少三个平移参数，使参数变为 4 个，即

$$Y = (\omega_x, \omega_y, \omega_z, m)^T$$

4.2　两维平差法确定转换参数

地面网范围较小时（如小于 10km），使用地理坐标或高斯平面坐标进时两坐标系的中心偏移和三个转角的影响十分微小，两尺度误差影响有时也可忽略. 可以根据情况按照下三种方式联合平差求解转换参数未知数 Y.

(1) 二维大地坐标（或之差）的联合平差法（四参数解算）. 适用于较大面积的控制网建立，可求解未知数 $Y = (\omega_x, \omega_y, \omega_z, m)^T$，在百平方公里级符合较好.

(2) 高斯平面坐标（或之差）联合平差法（两参数解算）. 适合于十平方公里以下的小区控制或工程控制. 可求解未知数 $Y = (m, \delta\alpha)^T$.

(3) 高斯平面坐标（或之差）联合平差法（单参数解算）. 单转换参数问题适合于面积更小的一般性控制，是两参数解算时比例因子为一的特殊情况. 联合平差可求解未知数 $Y = \delta\alpha$、$m = 1$.

5　坐标系转换参数的精度

坐标系转换参数的精度主要指由于用户坐标系定义误差、卫星网观测误差等因素引起的坐标系转换参数误差. 此误差将引起使用 GPS 定位方法所得到的用户坐标系下的点位坐标的误差.

坐标系转换参数的误差是由以下真误差定义的：

设两坐标系的完全转换参数的（其中 $\delta\alpha$ 与 β 为 Hotine 模型的两个站心坐标系系统偏差）[4] 真值为：

$$\overline{C} = (\delta\overline{X}_0 \ \delta\overline{X}_0 \ \delta\overline{X}_0 \ \overline{\omega}_x \ \overline{\omega}_x \ \overline{\omega}_z \ \overline{m} \ \overline{\delta\alpha\beta})^T \quad (5)$$

转换参数的误差向量为：

$$\Delta C = (\Delta\delta X \ \Delta\delta Y \ \Delta\delta Z \ \Delta\omega_X \Delta\omega_Y \ \Delta\omega_Z \ \Delta m \ \Delta\delta\alpha\Delta\beta)^T \quad (6)$$

设转换参数观测值为：

$$C = (\delta X_0 \ \delta Y_0 \ \delta Z_0 \ \omega_X \omega_Y \ \omega_Z \ m \ \delta\alpha\beta)^T \quad (7)$$

则全部转换参数的误差可由下式表示：

$$\Delta C = C - \overline{C} \quad (8)$$

对任何用户坐标系统（包扩国家坐标系统），其对 WGS-84 的转换参数通过测量是无法得到转换参数的真值的. 由各局部转换网各自获取转换参数，则 ΔC 无法统一. 这种差异引起的用户坐标的点位误差将导致成果不能通用或对比，或者将在某些系统对接问题中表现出来.

ΔC 的大小和估计方法目前尚无深入系统的研究. 定性地说，主要取决于转换网的地面测量和 GPS 测量的观测值的精度、同时还取决于转换网取用点的数量以及在与转换参数服务区中的相对分布与位置. 这些因素还将决定转换参数的精度 ΔC 的可靠性和获取转换参数的经济性.

由于转换网的不当造成的转换参数的过大误差的危害目前尚未充分表现出来. 但随着 CPS 应用范例的扩大，数据比例的提高，坐标转换参数精度的问题必然表现出来. 其后果的严重性是可想而知的. 首先是通过转换网定义的坐标系可能会发生与设计坐标系相差太多，将会导致过大的投影误差而危及工程质量. 第二是有可能造成在转换参数服务区边缘处与地面同一坐标系的控制点成果相差较大，失去了成果间的相互校核能力，对其它工程项目完全失去可用性. 第三，在同一坐标系下的控制网的不同区域联测得的对同一坐标系的转换参数，由于各自的观测精度、联测方式的差异而使各处的转换参数存在较大的差异，将造成各自求得的地面坐标系坐标在同一点上存在较大的差异. 来自于不同控制点（或转换网）的放样与碎部测量成果缺乏一致性.

如果由 GPS 测获得的用户坐标系的测量成果若不与该系其它控制点的测量成果相比较，或工程问

维普资讯 http://www.cqvip.com

题对坐标系误差影响不敏感，则此项误差对工程的影响难以发现，坐标系定义网的优劣也难以比较.一般来说，独立的、自定义的用户工程坐标系，因为不与周边或别的测量成果发生关系，它的定义是单一的和无条件的，通过自身无法检验其优劣.

[坐标系转换参数误差与转换多选择示例]

一个对国家坐标系的转换参数精度的检验试验，选择在某山丘区的三个人Ⅱ等点控制的区域，东西长17km，南北宽15km，坐标系参数定义网选择了三种方案：(1) 方案1：选择东部四等插网中Ⅳ-1、Ⅳ-2、Ⅳ-3三点，通过GPS测定WGS-84的高斯坐标差，已知高斯坐标联合解算转换参数；(2) 方案2：选择东部四等插网中Ⅳ-1、Ⅳ-2两点联测；(3) 方案3：选择东部两三等点Ⅲ-2、Ⅲ-4和一个二等点Ⅱ-3与卫星联测；(4) 方案4：选择Ⅱ-1、Ⅱ-2、Ⅱ-3三个二等点与WGS-84联测见图1.

表3 4种平面转换参数获取方案分别获取的转换参数表

	转换参数				
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	M (ppm)	$\delta\alpha$ (s)
方案一	+3.82	−56.73	−145.23	1.324	0.02
方案二	+16.82	−148.97	−84.65	1.066	0.05
方案三	−45.65	−7.98	−132.56	0.998	0.01
方案四	−99.556	−113.106	−112.38	1.114	0.01

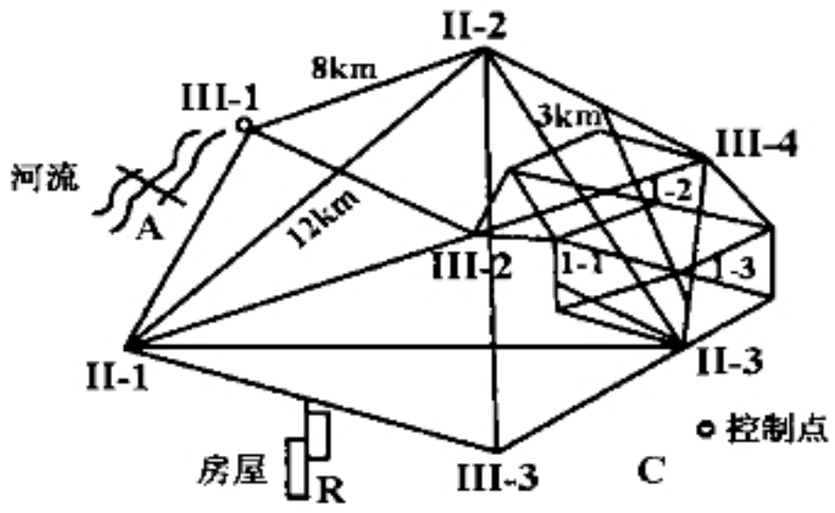


图1 转换参数的获取方式

6 结 语

使用GPS快速高精度直接测定满足工程要求的工程坐标系下的坐标而不在将基线增量作为原始观测值，在技术条件上已经具备并将很快成为主要方法. WGS-84对工程坐标系的转换参数的精度将直接决定工程坐标系的定义精度以及所输出的工程坐标系下的成果精度.

由卫星与地面联测所得的坐标系转换参数的误差，在地面网基准不动的条件下，主要由地面网测量误差和GPS联测网的定位误差两部分组成. 在因联合平差造成地面网坐标系基准变化时，转换参数将只针对实际坐标系而不是名义坐标系. 即地面网的名义坐标系（理论坐标系）、实际坐标系具有对WGS-84的不同的转换参数.

从WGS-84坐标系转换至用户参考椭球坐标系，转换参数的精度与转换网（坐标系定义网）的点数、精度、边长、位置都有较大关系. 同时还取决于GPS坐标转换参数测量本身的观测精度. 故GPS坐标转换参数测量应当从GPS应用测量相分离，成为实施前的一项专门的工作，需要专门进行精度评定，其本身具有高于一般控制与碎部测量实量工作的地位.

参考文献：

[1] Earl Burkholder F. Using GPS Results in True 3-D Coordinate System, Journal of Sruveying Engineering [J]. 1994, 119 (1): 1−8.

[2] JTJ/T 066-98，中华人民共和国交通部行业标准，公路全球定位系统（GPS）测量规范 [S]. 北京：1998.

[3] 周忠漠，易杰军. GPS卫星测量原理与应用 [M]. 北京：测绘出版社，1992.

[4] 李庆海. 卫星大地测量原理 [M]. 北京：测绘出版社，1989.

Researches on obtaiming methods of coordinate transform parameters from WGS-84 to engineering system

FENG Xiao[1], ZHOU Ping[2], LIU Xing[3], XU Guang[1]

(1. Chonqing Jiaotong University, Chonqing 400074, China;
2. Civil Institude of Chongqing University, Chongqing 400028, China;
3. B Department of Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: More attentions are paid to the precision problems to obtain coordinate transform atior atior parameters from WGS-84 System to Engineering System. Necessities to research are put forward. Based on analyzing on the influencing factors on precision of transform atior parameters, some useful methods and points of view are put forward.

Key words: GPS; position; satellite network ; ground network; coordinate transformtion

责任编辑：万仁玉