

文章编号: 0494-0911 (2005)01-0006-04

中图分类号: P228

文献标识码: B

# 中国大地坐标系建设主要进展

杨元喜

(西安测绘研究所, 陕西 西安 710054)

## Main Progress of Geodetic Coordinate System in China

YANG Yuan-xi

**摘要:** 世界各发达国家及我国周边国家大多启用了新的地心坐标系, 而且地心坐标系的精度在不断精化。我国地心坐标系的建立也已处于重要关头, 中国学者除紧跟国际大地坐标系的发展动态外, 也认真研究了我国现有法定坐标系存在的问题, 探讨了我国新一代地心坐标系发展的目标, 及坐标系的定义、建立和维持等种种理论问题和实践问题。在建立我国的地心坐标系方面, 国家测绘局和总参测绘局都已迈出了重要步伐, 建立了 2000 国家 GPS 大地控制网, 为建立新一代地心坐标系打下了坚实基础; 初步完成了全国天文大地网与地面大地网联合平差, 平差在地心坐标系中完成, 为地心坐标系提供了密集的坐标框架点。针对 1954 北京坐标系和 1980 西安坐标系转换到地心坐标系后地形图的改正问题, 学者们也作了翔实的研究, 并提出了具体改化方案。为了维持地心坐标系, 地心运动的监测与求解也引起了关注, 并获得初步结果。坐标转换理论与实践也有较丰富的研究成果。

**关键词:** 坐标系; GPS 大地控制网; 地形图; 地心坐标系; 联合平差

### 一、概 述

大地测量的主要任务之一是测量和绘制地球的表面形状。为了表示、描绘和分析测量成果, 必须建立大地坐标系。现行的大地坐标系统又分为局部坐标系和地心坐标系。若以参考椭球和局部地区大地水准面最为密合为原则建立大地坐标系, 则由于这些大地坐标系的原点与地球质心不重合, 一般称之为局部坐标系或参心坐标系; 若依据空间大地测量为主要手段建立大地坐标系, 且要求坐标系原点与地球质心重合, 则称之为地心大地坐标系。

地心坐标系的建立包括地心坐标系的定义、地心坐标系的实现以及地心坐标系的维持。建立地心坐标系, 首先必须从理论上给出地心坐标系的定义, 包括坐标系的原点、轴向、尺度的约定和坐标系随时间的变化, 以及有关的模型、常数等。坐标系一般以高精度的参考框架来实现, 参考框架由一组分布合理的地面站的地心坐标和速度组成, 一组自治的站坐标集隐含了一个坐标系的原点、坐标轴的指向以及一个尺度参数, 即隐含了一个地心坐标系。但是, 从地球动力学的观点来看, 地面点坐标因板块运动、地壳形变、潮汐负荷等因素的影响而发生变化, 因此对于一个高精度的坐标系必须考虑该坐标系的维持问题, 即需按一定的复测策略保证站坐标和速度的不断精化。显然, 建立地心坐标系的关键在于如何

得到参考框架点的地心坐标和速度<sup>[1]</sup>。

ITRS 是目前国际上最精确、最稳定的全球性地心坐标系, 它的定义遵循 IERS 定义协议地球坐标系的法则, 即 ITRS 的原点位于地心, 地心定义为包括海洋和大气的整个地球的质量中心; 它的尺度单位是在引力相对论意义下的局部地球框架内定义的米; 它的定向由 BIH1984.0 给出, 定向的时间演化相对于地壳不产生残余的全球性旋转。ITRS 通过国际地球参考框架 ITRF 来实现, ITRF 是基于多种空间技术(GPS, SLR, VLBI, DORIS)得到的地面站的站坐标集和速度场, ITRF 的参考框架点已达 300 多个, 并且是全球分布的。ITRF 所有框架点的速度场通过多年数据计算得到。

### 二、主要发达国家及周边地区大地坐标系统建设的进展

采用地心坐标系是国际测量界的总趋势。北美、欧洲、澳大利亚等发达国家和地区都相继建成了地心坐标系。北美早在 1986 年就完成了北美大地坐标系 NAD83 的建立, 对遍布美国、加拿大、墨西哥以及中美地区的 26 万余个大地点进行了整体平差, 获得了 26 万余点的地心坐标<sup>[2]</sup>。NAD83 努力使它它与 WGS84 为同一地心坐标系。在 GPS 技术强有力的支持下, 美国不断更新地心坐标的精度。1984 年建立了 WGS84 (即所谓的世界大地坐标系

收稿日期: 2004-07-07

作者简介: 杨元喜(1956-), 男, 江苏姜堰人, 教授, 博导, 主要从事动态大地测量研究。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

统 1984); 1996 年作了进一步改进, 标以 WGS84 (G873), 历元为 1997. 0; WGS84 (G873) 与 ITRF2000 的符合程度在  $5\text{ cm}^{[3,4]}$ 。2001 年美国又对 WGS84 进行了再次精化, 取名为 WGS84 (G1150)<sup>[4,5]</sup>。WGS84 (G1150) 与 ITRF2000 的符合程度在  $1\text{ cm}^{[4,5]}$ 。美国已经建成 GPS 连续运行网(CORS), 有 300 余个永久 GPS 跟踪站。

欧洲参考系 ETRS 及南美洲参考系 SIRGAS 都是洲级坐标系, 它们是地区性地心坐标系。在定义上, 它们也遵循 IERS 定义协议地球坐标系的法则, ETRS 和 SIRGAS 的建立者明确指出这两种坐标系与 ITRS 同属于一个坐标系, 它们要做的工作就是如何使这种地区性坐标系与 ITRS 尽可能的一致。现在, EUREF 的框架点数已接近 ITRF, EUREF 是 ITRF 在欧洲大陆的加密, 而 SIRGAS 是 ITRF 在南美洲的加密。EUREF 的维持基于欧洲 60 多个永久观测站的站坐标时间序列, 而 SIRGAS 的维持基于分布南美大陆以及周边两个岛屿上的若干个 IGS 站的速度场以及板块运动模型(这主要针对没有重复观测的框架点而言), 它的发展方向是基于南美大陆上的 GPS 永久观测站的速度场。需特别指出的是, EUREF 是固联于欧洲板块的, 因此它的速度场在计算时扣掉了欧亚板块的整体运动。

我国周边国家大地坐标系的建设也取得了长足进展。从 2000 年 4 月起, 日本启用新的大地基准 JGD2000, 该系统采用国际地面参考系统(ITRS)的定义, 历元为 1997. 0; 蒙古建立了新的大地坐标框架 MONREF97, 该系统与 WGS84 基本一致; 韩国于 1998 年推出了新型的地心坐标系统 KGD2000, 历元为 2000. 0; 新西兰建立了 NZGD2000. 0; 马来西亚也建立了 NGRF2000<sup>[5,6]</sup>。

目前国际上多数发达国家和地区都已着手将传统局部大地坐标基准向全球统一的地心坐标基准过渡, 其主要手段均基于空间大地测量技术, 如 VLBI、SLR 和 GPS, 其中利用 GPS 连续运行站建立地心坐标框架最为普遍。在此基础上, 将局部或区域传统地面大地控制网纳入其中, 进行联合处理, 获得其高精度、高密度的控制点地心坐标。

### 三、我国地心坐标系建设的主要进展

中国学者对我国新一代地心坐标系的建立一直给予高度关注。学者们对中国现有大地坐标系存在的问题进行了充分的讨论, 对建立我国新一代地心坐标系的可行性和方法也作了详细研究和描述<sup>[2,3,7~10]</sup>。

陈俊勇、魏子卿、顾旦生等大地测量学家已建议, 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>[2,3,9,10]</sup>。

此外, 中国学者对相应于新坐标系的参考椭球也作了详细描述<sup>[3,9]</sup>。

在实现我国的地心坐标系方面不外乎 3 种方法: ① 通过公共点将原有控制点的参心坐标转换成地心坐标; ② 直接布测新的空间大地网, 在全球已知高精度地心坐标的大地点控制下直接解算新测点的地心坐标; ③ 将原有地面网点与新测的空间网点进行整体平差, 求得统一的控制点的地心坐标。

我国法定的国家大地坐标系为 1954 北京坐标系和 1980 西安坐标系, 这两个坐标系是通过地面三角网经过逐级平差及整体平差获得的, 简称 54 坐标系和 80 坐标系。54 坐标系和 80 坐标系均属参心坐标系, 即坐标轴原点位于参考椭球中心。54 坐标系和 80 坐标系的最大特点是短距离精度高、控制点密度大, 它们在国家国民经济建设、国防建设中均发挥了重要作用<sup>[11]</sup>。为了与国际通用的地心坐标发生联系, 可采用上述第一种方法, 即利用部分公共点将 54 坐标系或 80 坐标系直接转换到地心坐标系。然而由于我国地面大地控制网采用逐级控制, 地面网点坐标的累积误差较大, 无论采用何种坐标转换模型, 均不可避免地带来误差, 小则分米级, 大则数十米级<sup>[12]</sup>。这种坐标转换法仅适合于局部地区的坐标转换, 不能用于全国范围的地心坐标系的建立。

我国 20 世纪 70 年代建成的 SLR 站, 80 年代后期建成 VLBI 站, 对初步建立我国的地心参考系也起了重要作用。步入 20 世纪 90 年代后, 我国有关测绘部门抓住机遇, 在全国范围内(台湾省除外)布设了全国 GPS 一、二级网, 建立了我国地心坐标系的基本参考框架, 框架点的地心精度约  $0.1\text{ m}$ 。经过多年努力, 有关部门又完成了 GPS 一级网与地面网的第一次联合平差, 建立了接近 5 万点的 1995 北京大地坐标系 BGS1995。它属地心坐标系, 地面任一点在这一地心坐标系中的精度约为  $1.0\text{ m}^{[13]}$ 。

我国台湾地区也建成了一个由 8 个 GPS 永久跟踪站组成的地心参考框架, 通过对 IGS 站的紧约束, 这一框架与 ITRF 一致, 精度在厘米级。

继全国 GPS 一、二级网后, 国家测绘局还布测了国家 GPS A、B 级网, 中国地震局与总参测绘局及

国家测绘局一起又布测了地壳运动观测网络 GPS 网。这些网包括各类型的高精度 GPS 点 2 000 多个, 经过与国际 IGS 站的统一处理可以构成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 年初步完成了我国三类 GPS 网的联合平差, 取名为“2000 国家 GPS 大地控制网”, 历元为 2000.0。通过对各 GPS 网的观测数据进行统一平差, 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 站和高精度的网络工程 GPS 点坐标基准转换; 平差中采用了双因子抗差估计方法探测和控制相关观测量的异常影响; 采用了方差分量估计, 改善了各子网在整体网平差中的权比。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  $3\text{ cm}^{[14]}$ , 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 GPS A、B 级网尽管点位分布较均匀, 但是点的密度太低, 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, 2003 年总参测绘局已初步完成了平差计算与分析, 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 50 000 点的地心坐标, 其地面网点的 3 维点位中误差为亚米级。其中 38 693 点小于  $0.2\text{ m}$ , 占  $80.2\%$ , 44 384 点小于  $0.3\text{ m}$ , 占  $92.1\%$ , 1 101 点大于  $0.5\text{ m}$ , 约占  $2.3\%$ , 平均  $0.15\text{ m}$ 。水平位置中误差, 42 312 点小于  $0.2\text{ m}$ , 占  $87.2\%$ , 45 550 点小于  $0.3\text{ m}$ , 占  $93.8\%$ , 763 点大于  $0.5\text{ m}$ , 约占  $1.6\%$ , 平均  $0.12\text{ m}$ 。大地高中误差, 20 747 点小于  $0.2\text{ m}$ , 占 3 维平差点 (23 412 点) 的  $88.6\%$ , 22 412 点小于  $0.3\text{ m}$ , 占  $95.7\%$ , 35 点大于  $0.5\text{ m}$ , 约占  $1.5\%$ , 平均  $0.14\text{ m}$ 。外部检核点位中误差约为  $0.4\text{ m}^{[15]}$ 。进一步的分析和改进仍在进行中。一个基本结论是, 在 2000 国家 GPS 大地控制网控制下, 联合平差后的我国天文大地网点的 3 维坐标精度一般优于  $0.5\text{ m}$ 。联合平差后的地面网点可作

为中国 2000 坐标框架的加密。

在高精度地心坐标系的建立与维持方面, 我国与国际水平还有一定的差距。国内现有的地心坐标系点位精度还不高, ITRS, ETRS 坐标系的精度已达  $1\text{ cm}$ , 而我们地心坐标系参考框架点的绝大部分精度仍在分米级; 再次, ITRF 或 EUREF 等都有永久 GPS 观测站对其进行维持, 而国内地心坐标系尚未考虑坐标系的维持。

#### 四、大地坐标系的更新对地形图的影响

更新一个国家的坐标系统是一项非常复杂的问题, 它涉及到点位新坐标的获取, 与地理信息有关的图件资料的更改等问题。大地坐标系是测制地形图的基础, 大地坐标系的改变必将引起地形图要素产生位置变化或产生变形。若图上要素的变化量大于人眼的分辨率, 则必须考虑旧地形图的改正。一般来说, 由于局部坐标系的原点偏离地心较大 (接近  $200\text{ m}$ ), 则采用地心坐标系后, 无论是 1954 北京坐标系还是 1980 西安坐标系的地形图均须作必要的改正<sup>[9]</sup>。陈俊勇、魏子卿等详细研究了大地坐标系的更新对地形图的影响。

中国由 1980 西安坐标系更换为地心 3 维坐标系, 地面大地纬度和大地经度的变动区间分别为  $-1.6'' \sim +0.7''$  和  $-6.4'' \sim -3.0''$ , 二者平均绝对值分别为  $0.57''$  和  $4.4''$ ; 地面点高斯平面坐标  $x$  值和  $y$  值的变动区间分别为  $-48.6\text{ m} \sim +22.7\text{ m}$  和  $-115.7\text{ m} \sim -75.7\text{ m}$ , 二者平均绝对值分别为  $16.31\text{ m}$  和  $106.9\text{ m}$ 。因此, 中国坐标系的更换在  $1:5$  万比例尺地形图及更大比例尺地形图中点 (含图廓点) 的地理位置的改变值已超过制图精度, 必须重新给予标记。但是, 西安 80 坐标系转换成地心坐标系, 对中国境内各种比例尺地形图任意两点的长度 (包括图廓线的长度) 和方位变动在制图精度以内, 因此可以忽略不计<sup>[3]</sup>。

中国 1954 北京坐标系转换到地心坐标系对地形图的影响也有翔实的研究成果<sup>[9, 10]</sup>。在地图要素坐标的变化方面, 在  $56^\circ\text{N} \sim 16^\circ\text{N}$  和  $72^\circ\text{E} \sim 135^\circ\text{E}$  范围内, 由 1954 北京坐标系改变为新一代地心坐标系, 将引起纬度变化  $-1.5'' \sim -3.0''$ , 纬度变化的绝对值平均  $1.3''$ ; 经度变化  $-4.0'' \sim -6.0''$ , 经度变化的绝对值平均变化  $2.1''$ 。相应地, 高斯平面  $x$  坐标变化  $-77\text{ m} \sim -18\text{ m}$ , 平均变化  $-47.8\text{ m}$ ;  $y$  坐标变化  $-63\text{ m} \sim 111\text{ m}$ ,  $y$  坐标变化的绝对值平均  $50.1\text{ m}$ 。假定地图的最小分辨率为  $0.1\text{ mm}$ , 那么在平均意义上, 在  $1:50$  万甚至在  $1:100$  万比例尺的地形图上,

$x$  和  $y$  坐标都可能发生看得出来的变化。这意味着,对于所有系列比例尺的地形图,由坐标系更新引起的图廓点、方里网以及图上要素的高斯坐标和经纬度的变化,都需要加以考虑<sup>[9, 10]</sup>。

在图廓线的变化方面,坐标系更新引起东西图廓的方位变化(绝对值)平均为  $0.4''$ ,南北图廓线的变化(绝对值)平均为  $1.2''$ 。一般说来,人眼难以分辨。因此可以认为,新旧两种坐标系相应图廓线是平行的。对于任何系列比例尺地形图,图廓线长度变化都远小于人眼的长度分辨率,可以不必顾及。该结论与 1980 西安坐标系到地心坐标系转换后地形图图廓线变化的结论是一致的。如此,坐标系更新对图廓线的影响,仅表现在它们的平行位移:南北图廓线南移,南移量由南而北逐渐变小;东西图廓线在我国西部地区西移,西移量由西而东逐渐减小至 0,而在东部地区东移,东移量由西而东逐渐增大。东西部分界在  $94^{\circ}\text{E}$  经线附近<sup>[9]</sup>。

关于图廓线平移的陈述,同样适用于方里网<sup>[9, 10]</sup>。

文献[9],文献[10]给出了旧图的改化方案。

## 五、不同坐标系转换研究

不同坐标系统的相似变换法一般不足以将两标系统间的差异纳入坐标转换模型,因而低精度的标系统到高精度的标系统的转换往往不能保证统一后的坐标框架的高精度。文献[16]研究了将相似变换与回归逼近相结合,以便顾及低精度大地网中的局部误差积累和变形,从而提高统一后的坐标框架的精度。

GPS, VLBI, SLR 定位精度的不断改进,已使新的 ITRF(国际地球参考框架)点的精度达到厘米级以上,而且基于 GPS, VLBI, SLR 等空间技术标定的新的地心坐标系的精度均匀,不存在明显的误差积累。然而,对于我国这样的发展中国家,目前用以测图及工程规划、设计以及军事用途的大地控制点仍以常规地面测量控制点为主。这些地面测量控制点一般又都是基于 54 北京坐标系或 80 西安坐标系。于是为了将不同大地网统一于同一坐标基准,局部地区常采用相似变换模型,如 Bursa 模型、Molodensky 模型和 Veis 模型<sup>[17]</sup>。相似变换模型一般含 3 个平移参数、3 个旋转参数和 1 个尺度参数。由若干个(一般多于 3 个)公共点坐标求得上述 7 个转换参数后即可进行不同坐标系的转换。

实际上,基于经典大地测量网标定的标系统不可避免地存在局部变形,因为经典大地测量受局

部地球物理因素的影响,如地壳运动、局部大气影响等。此外,经典大地测量网还受累积误差的影响,于是,两标系统间经相似变换后往往还存在数米级残差。为了顾及经典大地网的局部变形,有学者提出采用两组旋转参数的坐标转换模型,如 Hotine 模型、Krakiwsky-Thomson 模型及 Vanicek-Wells 模型。利用两组旋转参数进行坐标转换也存在两个问题:首先,增加一组旋转参数将导致坐标转换模型秩亏,于是解算中常需附加条件;其次,新增加旋转参数也只能顾及大地网的平均旋转,不可能顾及到局部扭曲与累积误差。基于上述分析,两组旋转参数的坐标转换模型仍难以保证转换后的坐标框架点的精度<sup>[13]</sup>。

由于标系统间的差异主要来自于标系统的定义差,即原点位置、坐标轴向的定向和尺度的定义差,考虑坐标转换时应优先考虑标系统定义差异的转换。文献[16]提出,首先进行不同坐标系的相似变换;在相似变换的基础上,再考虑对剩余误差进行拟合,使精度较低的坐标框架点符合于精度较高的标系统的框架点坐标,使统一后的标系统框架点坐标具有较好的一致性。结果表明,该方法能有效地顾及经典大地网的局部变形和累积误差,使统一后的坐标框架点坐标具有较好的一致性。

## 六、与坐标系有关的其他研究成果

标系统的启用必然要涉及相应的参考椭球及相应的正常椭球。我国的参考椭球与正常椭球将采用同一椭球。文献[3]建议采用与 GRS80 一致的基本常数,即赤道半径  $a$ ,动力形状因子  $J_2$ ,地心引力常数  $GM$  和旋转速度  $\omega$ ;文献[9]建议采用椭球扁率  $f$  代替动力形状因子  $J_2$ 。二者只有微小差别。文献[18]给出了适用于 GRS80 椭球和 WGS84 椭球的正常重力数值常数,详细推导了正常重力的泰勒级数展开式,对于至 20 km 的大地高度,精度好于  $0.1 \mu\text{Gal}$  ( $1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$ )。

文献[11],文献[19]分别采用重复 GPS 资料和 SLR 资料探讨了地心运动问题。利用 GPS 重复观测资料对地心运动时间序列进行了抗差谱分析,研究了地心运动的周期和振幅,求得的地心年变化量约为  $20 \text{ mm}^{[11]}$ ,而用 SLR 求得的地心运动年变化率约为  $10 \text{ mm}^{[19]}$ 。两者尽管存在较大差异,但结果表明,作为坐标系原点的地心确实存在着较明显的运动。于是为了维持高精度的地心坐标系,必须高精度地测定地心的运动,并在坐标系标定中考虑地心本身的运动。

(下转第 52 页)

现设  $m_\alpha = m_\beta$ , 又因  $\cos^2 \alpha \leq 1$ , 所以上式可写成

$$m_P \leq \pm \sqrt{m_S^2 + S^2 \frac{m_\alpha^2}{\rho^2}} \quad (12)$$

若取  $m_S = \pm (2 + 2 \times 10^{-6}) \text{ mm}$ ,  $m_\alpha = m_\beta = \pm 2''$  2 ( $\approx \pm 3''$ ) 时, 当  $S = 100 \text{ m}$ ,  $m_P < 3 \text{ mm}$ ; 当  $S = 1\,000 \text{ m}$ ,  $m_P < 15 \text{ mm}$ 。

由此可见, 仅顾及测角和测距误差, 全站仪极坐标法测定一点的平面精度完全可以满足一般测量工作的要求。但在此基础上形成的全站仪偏心测量, 其精度还需进一步分析。如角度偏心测量, 公式(1)中的  $S$  和  $\alpha$  分别为测站点  $A$  到偏心点  $C$  (棱镜) 的斜距和竖直角, 并非是测站点  $A$  到待测点  $P$  的斜距和竖直角; 代替的前提是测站点  $A$  到待测点  $P$  和到偏心点  $C$  (棱镜) 的距离相当, 即  $D_{AP} = D_{AC}$ ; 若不等, 将直接影响待测点的点位中误差, 影响值即为偏

差值  $\Delta D = D_{AC} - D_{AP}$ 。因此, 角度偏心测量的主要误差来源于偏心点位置的选取。同样, 对于单距偏心测量, 其主要误差来源于偏心距  $d$  和偏心角  $\theta$  的测定误差; 对于圆柱偏心测量, 其主要误差来源于半径  $R$  的测定误差和偏心点位置的选取 (即  $AC$  与  $CP$  是否垂直)。至于利用专制的两点式觇牌进行的双距偏心测量, 由于  $f$  和  $g$  可以精确量取, 其测定误差主要来源于全站仪测定  $C$  和  $D$  的误差; 但应注意: 由于  $f$  值较小 (一般为  $0.5 \text{ m}$ ), 为了保证必要的精度, 最大测程不要超过  $100 \text{ m}$ 。

# 参考文献:

- [1] 郭宗河, 郑进凤. 全站仪面积测量及其精度分析[J]. 测绘通报, 2002(3).

(上接第 9 页)

# 参考文献:

- [1] 焦文海= 莺子卿. 地心坐标系及我们的选择[R]. [s. l.]: [s. n.], 2001.
- [2] 顾旦生, 张 莉, 程鹏飞, 等. 我国大地坐标系发展目标[J]. 测绘通报, 2003 (3): 1-4.
- [3] 陈俊勇. 关于中国采用地心 3 维坐标系统的探讨[J]. 测绘学报, 2003 32(4): 283-288.
- [4] 陈俊勇. 世界大地坐标系统 1984 的最新精化[J]. 测绘通报, 2003 (2): 1-3.
- [5] 陈俊勇. 现代大地测量在大地基准、卫星重力以及相关研究领域的进展[J]. 测绘通报, 2003 (6): 1-7.
- [6] 陈俊勇. 邻近国家大地基准的现代化[J]. 测绘通报, 2003 (9): 1-3.
- [7] 陈俊勇. 改善和更新我国大地坐标系统的思考[A]. 陈俊勇主编. 大地测量论文集——祝贺陈永龄院士 90 寿辰[C]. 北京: 测绘出版社, 1999.
- [8] 魏子卿. 关于建立新一代地心坐标系的意见[A]. 地面网与空间网联合平差论文集(三)[C]. 北京: 解放军出版社, 1999.
- [9] 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.
- [10] 魏子卿, 段五杏, 杨元喜, 等. 我国大地坐标系的更新

问题[A]. 地面网与空间大地网联合平差论文集(四)[C]. 北京: 解放军出版社, 2003.

- [11] 郭海荣, 杨元喜, 焦文海. 地心运动时间序列的抗差谱分析[J]. 测绘学报, 2003 32(4): 308-312.
- [12] YANG Y. Robust Estimation of Geodetic Datum Transformation[J]. Journal of Geodesy, 1999 73: 268-274.
- [13] 杨元喜. 大地坐标系研究及实施年度进展(2002)[A]. 中国测绘学科发展蓝皮书[C]. 北京: 中国测绘学会, 2003.
- [14] 唐颖哲, 杨元喜, 宋小勇. 2000 国家 GPS 大地控制网数据处理方法与结果分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2003 23(3): 77-82.
- [15] 联合平差总体组. 地面网与空间大地网联合平差二期工程综述[A]. 地面网与空间大地网联合平差论文集(四)[C]. 北京: 解放军出版社, 2003.
- [16] YANG Y, XU T. Combined Method of Datum Transformation between Different Coordinate Systems[J]. Geospatial Information Science, 2002, 5(4): 5-9.
- [17] 朱华统, 杨元喜, 吕志平. GPS 坐标系统的转换[M]. 北京: 测绘出版社, 1994.
- [18] 魏子卿. 正常重力公式[J]. 测绘学报, 2003 32(2): 95-101.
- [19] 秦显平, 杨元喜. 用 SLR 数据导出的地心运动结果[J]. 测绘学报, 2003 32(2): 120-124.