

国际地球参考框架建立与维持的研究进展

门葆红¹, 董文亮², 孙付平³, 刘 帅³

(1. 信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450001; 2. 61711 部队, 新疆 喀什 844000;
3. 信息工程大学 导航与空天目标工程学院, 郑州 450001)

摘 要: 针对现代大地测量学对毫米级国际地球参考框架的需求, 该文简单回顾了国际地球参考框架的发展概况, 系统地介绍了国际地球参考框架建立方法及基准约束的演变情况; 在此基础上, 详细阐述了两种国际地球参考框架维持方法, 即线性模型和非线性模型维持方法的框架点坐标位移模型改进情况、地球质心运动模型改进情况, 及监测网和并置站的布设情况; 最后, 给出了国际地球参考框架的改进计划, 指出了动态实时维持是下一步的研究重点, 对参考框架维持方法的研究具有一定的参考价值。

关键词: 国际地球参考框架; 建立; 维持; 改进计划

【中图分类号】P22

【文献标识码】A

【文章编号】1009-2307(2016)02-0020-06

DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2016.02.004

Progress on the establishment and maintenance of ITRF

Abstract: Since international terrestrial reference frame(ITRF) has the most stringent definitions and the highest accuracy, it is used as the reference to establish other reference frames. This paper briefly reviewed the development of ITRF and systematically introduced the establishment methods and constraint evolution of the datum of ITRF. On this basis, two methods that maintain the ITRF were elaborated, which were linear maintenance model and the nonlinear maintenance model. Then, the improvement of point coordinate displacement model and geocentric motion model, the distribution of monitoring network and co-locations states of ITRF were introduced. Finally, this paper gave the improvement plan of ITRF, and pointed out that the key issues should be studied was the methods to maintain the reference frame dynamically and in real-time. The results would provide reference for the research on the maintenance of reference frame.

Key words: international terrestrial reference frame; establishment; maintenance; improvement plan

MEN Baohong¹, DONG Wenliang², SUN Fuping³, LIU Shuai³ (1. School of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; 2. Troops 61711, Kashi 844000, China; 3. School of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

0 引言

研究全球性、大尺度范围内的地球动力学现



作者简介: 门葆红(1966—), 女, 河南洛阳人, 副教授, 硕士, 主要从事测绘科研和教学工作。

E-mail: 2234141997@qq.com

收稿日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41374027)

象需要毫米级精度的参考基准。目前, 实现精度最高的地球参考框架——国际地球参考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)的精度已达厘米级, 可以基本满足高精度应用大地测量学厘米级的需求, 但还不能满足毫米级的地球动力学研究的需求。因此, 现代大地测量学面临一个重要的任务, 即更新和精化 ITRF, 最终建成毫米级的 ITRF。近二、三十年来, 科学家围绕 ITRF 的理论和实践开展了许多卓有成效的工作。此外, 全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、卫星激光测距(Satellite

Laser Ranging, SLR)、甚长基线干涉测量技术(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)以及星载多普勒接收机定位和地面跟踪定轨的集成系统(Doppler Orbitograph and Radio Positioning Integrated by Satellite, DORIS)等空间大地测量技术的改进及观测数据的持续累积,也直接或间接地推动了 ITRF 建立和维持的研究^[1]。

1 ITRF 发展概况

1.1 地球参考系定义的完善

地球参考系统是与地球固联共同旋转,且在空间中随地球运动的空间参考系统。建立地球参考系统的目的之一是分离地球的整体运动和局部运动,进而对其进行深入研究。国际地球自转服务(International Earth Rotation Service, IERS)协议的主要任务是定义参考系统并给出实现这一理想定义的模型和方法。它的前身是 MERIT 项目所形成的一系列文档(目前最新的 IERS 协议是 IERS 2010)。IERS 协议采纳了多个国际学术团体的若干建议。地球参考系统就以国际大地测量和地球物理学联合会(International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG)的 2 号决议(2007)为基础。最新的 IERS 2010 指出,ITRS 的定义应满足以下条件^[2]:

1)坐标原点是地心,它是整个地球(包括海洋和大气)的质量中心。

2)长度单位是 m(SI),与地心局部框架的地心坐标时(Geocentric Coordinate Time, TCG)保持一致,符合国际天文学联合会(International Astronomical Union, IAU)和 IUGG(1991)决议,由相应的相对论模型得到。

3)初始方向值采用国际时间局(Bureau International de l'Heure, BIH)给出的 BIH1 984.0 方向。

4)定向随时间的演变采用相对于整个地球的水平板块运动无净旋转的(No-Net-Rotation, NNR)条件。

1.2 ITRF 的更新

从第 23 届 IUGG 大会开始,Reference Frame 成为了国际大地测量协会(International Association of Geodesy, IAG)的第一委员会,该委员会主要开展世界各国在地心参考系方面的研究和协调工作^[3]。地球参考框架(Terrestrial Reference Frame, TRF)的研究主要集中在大地测量参考框架的定义、建立、维护和改造;用于大地测量参

考框架的地面和空间大地测量;有关参考框架数据处理和分析、参数估计等方面。

地球参考框架已经从最初的参心、局部、静态、百米量级的参考框架,发展到现在基于空间大地测量技术获得的地心、全球、动态、厘米甚至毫米量级且不断精化的参考框架。ITRF 是目前理论背景最完善、构建方法最全面、实现精度最高的全球参考框架,并为其他全球和区域参考框架提供基准^[4]。它是基于多种空间技术(GPS、SLR、VLBI 和 DORIS 等)得到的分布于全球的多个地面站的站坐标集和速度场。框架点的速度场是通过多年数据计算得到的。自 1988 年起, IERS 已经发布了 ITRF88、ITRF89、ITRF90、ITRF91、ITRF92、ITRF93、ITRF94、ITRF96、ITRF97、ITRF2000、ITRF2005 和 ITRF2008 共 12 个版本的参考框架。其中,ITRF2005 和 ITRF2008 是最具代表性的两个参考框架,也是 ITRF 日渐成熟的标志。

ITRF2005 第一次采用时间序列作为输入数据,第一次采用紧组合方法,即同时估计测站坐标和地球定向参数(Earth Orientation Parameter, EOP),给出了 608 个站的位置和速度,以及与参考框架一致的地球自转参数。ITRF2008 的数据处理策略和方法与 ITRF2005 基本一致,改进主要体现在输入数据采用的是 4 个技术中心提供的重新处理的坐标时间序列,以 SINEX 格式存储文件。且它采用最新的模型和软件重新处理了所有历史数据,极大地提高了早期解的质量,为建立参考框架提供了长期、高精度、一致的站坐标时间序列^[5]。

2 ITRF 建立方法的演变

2.1 ITRF 的建立方法

实现一个地球参考系,就是建立一个与之相应的地球参考架。地球参考系从定义到实现需要以下几步工作^[6]:

1)给出理论定义和协议约定。

2)建立地面观测台站,并用空间大地测量技术进行观测。

3)根据前面对协议地球参考系的一些约定,采用国际推荐的一组模型和常数,对观测数据进行数据处理。解算出各观测台站在某一历元的站坐标。即建立一个协议地球参考架。

4)对于影响地面台站稳定的各种形变因素进行分析处理,建立相应的时变模型,以维持该协

议地球参考架的稳定。

ITRF 原点、尺度和定向的确定采用了不同的空间大地测量技术。之所以这样是为了综合利用各种技术的优势,以实现效益的最大化。SLR 主要用于定义原点,并和 VLBI 数据一起定义尺度;VLBI 主要用于定义尺度,对原点、定向及其随时间的演变不敏感;虽然 GPS 高程方向测量精度较低,对区域相关误差敏感等系统误差的影响,并不适合用于确定原点和尺度,但它是惟一一种分布最密集、最均匀的技术,对于联系组合多种技术进而生成参考框架具有十分重要的作用。定向不能通过任何观测手段得到,也不能任意选定或者由协议给出。定向随时间的演变相对于地球表面的水平运动应符合无整网旋转的 NNR 条件,即相对于整个地球的水平板块运动无净旋转。

为了综合利用这些空间技术,就需要研究多种空间大地测量数据的组合处理模型。法国的 IGN 是目前 IERS 下负责 ITRF 数据处理和发布的官方组织,所用软件是 CATREF;德国的 DGF1 是从事多种空间大地测量数据组合处理的研究机构之一,对 ITRF 的建立和维持也做出了很大贡献。这两个机构所采用的数据组合处理模型仅有细微不同,主要体现在附加约束的处理上。DGF1 是在法方程叠加之后附加约束,而 IGN 是在法方程叠加之前添加约束。

技术组合处理分为同种技术之内的组合和技术之间的组合两种。同种技术之内的组合,目前主要由各种技术的服务组织(例如 IGS, IVS, ILRS 等)来完成,其目的是给某种技术提供统一的解,用于建立 ITRF 参考框架,进而为 ITRS 产品服务。换言之,同种技术之内的组合是建立 ITRF 参考框架的基础。不同技术之间的组合是生成 ITRF 参考框架的重要一环,可以充分利用不同空间技术的优点建立更加精确的 ITRF。

2.2 ITRF 的基准定义及约束的演变

只有找到一个与参考框架相匹配的基准才能建立相应的参考框架。参考框架的基准定义就是要确定 TRF 数据组合中的起算数据。在某给定历元,固定一个 TRF 需要 7 个参数,若要定义 TRF 的时间演化还需要附加以上 7 个参数的时间导数。确定了这 14 个参数就建立了 TRF 的原点、尺度和定向及其时间演化,即所谓的“基准定义”。

ITRF2008 的原点由 SLR 确定,与 ITRF2005 较为一致,其长期稳定性优于 1cm。ITRF2008 的尺度由 VLBI 和 SLR 共同确定,精度优于 1.2ppb,

定向与 ITRF2005 一致。表 1 给出了不同版本 ITRF 的基准定义及实现方法的发展变化情况。

表 1 ITRFyy 的基准定义及实现

Tah 1 The Datum Definition and Realization of ITRFyy

ITRF 解	观测技术	历元	原点	尺度	定向	定向随时间演变
ITRF88	V/S/L	1988.0	ITRF0	ITRF0	BIH EOP	AM0-2
ITRF89	V/S/L	1988.0	S	S	BIH EOP	AM0-2
ITRF90	V/S/L	1988.0	S	S	BIH EOP	AM0-2
ITRF91	V/S/L/G	1988.0	S	S	BIH EOP	NNR-NUVEL1
ITRF92	V/S/L/G	1988.0	S	S	BIH EOP	NNR-NUVEL1A
ITRF93	V/S/G	1993.0	S	S	IERS EOP	IERS EOP
ITRF94	V/S/G	1993.0	S/G	S/G/V	ITRF92	NNR-NUVEL1A
ITRF96	V/S/G/D	1997.0	S/G	S/G/V	ITRF94	ITRF94
ITRF97	V/S/G/D	1997.0	S/G	S/G/V	ITRF96	ITRF96
ITRF2000	V/S/G/D	1997.0	S	S/V	ITRF97	NNR-NUVEL1A
ITRF2005	V/S/G/D	2000.0	S	V	ITRF2000	ITRF2000
ITRF2008	V/S/G/D	2005.0	S	V/S	ITRF2005	ITRF2005

注: V/S/L/G/D 分别表示 VLBI、SLR、LLR、GPS 和 DORIS。

目前 ITRF 组合中采用内部约束实现技术内组合,采用最小约束实现技术间组合^[7]。

3 ITRF 维持方法及模型改进

3.1 ITRF 的维持方法

由于地球不是刚体,地壳在不停地运动,加之观测误差,因此理想的参考框架或理想的坐标系统,即某种绝对不变的坐标系统,或取定位与定向绝对不变的旋转椭球体是不可能实现的。只能通过不断测定参考框架站点的坐标,建立在尽可能长的时期内保持稳定的参考系统,同时维持定位和定向稳定的旋转椭球体。由此可见,参考框架需要不断的维持^[8]。

IERS 所定义的地球参考框架是一个线性参考框架,由参考历元台站的位置和线性速度实现,但实际上,地球是一个复杂的变形体,不仅存在线性变形,而且还存在滞弹性变化和跳跃性变化。如何建立适当的模型来描述在各种负载时变影响之下,地球上的点相对于惯性空间在线性地球参考框架下的位置、速度以及重力位,是非常具有挑战性的。现在 ITRF 的维持方法采用线性速率模型,未来的发展趋势是用测站坐标时间序列的非线性速率模型进行近实时的维持。

1) 线性模型维持方法

ITRF 的线性速率主要顾及板块水平运动线性速率,但同时也给出垂直运动的线性速率。目前 ITRF 的速度采用的模型依然是线性的,站点在历元 t 时

刻的位置为 $\vec{X}(t) = \vec{X}_0 + \vec{X}(t - t_0)$, 式中的 \vec{X} 表示速度。但是大量观测站坐标分量的时间序列表明, ITRF 框架中的许多观测站的坐标是随时间变化的, 而且很多站的运动都是非线性的, 许多站的年周期垂向位移达几厘米。为了真实反映框架点的点位情况, 并便于研究地壳运动等, 可以利用长期参考框架、周参考框架和瞬时参考框架相结合的方式。

2) 非线性模型维持方法

ITRF 目前已经认识到, 站坐标时间序列的不连续对它在地球动力学研究等方面的应用产生了负面影响, 并在 2010 年开始的 DOGE_x 项目中开始研究探测 GPS 站坐标的跳变, 以得到均一化的时间序列。此外, 文献 [9] 指出, 将来建立和维持 ITRF 时必须考虑除阶梯函数跳变以外的震前、震后形变及各种缓慢变化。

参考框架改进和维持的关键在于确定框架点的实时动态变化规律。因此, 采用不同技术分析中心官网发布的框架点坐标时间序列, 建立坐标时间序列预估模型, 就可以实现 ITRF 的近实时动态维持。难点就在于建立测站坐标非线性预估模型。

仔细观察 ITRF 框架点坐标分量时间序列图可以发现, 几乎每个图中都会有明显的长周期运动趋势、周期性运动趋势和非线性运动趋势, 以及跳变和间断, 还有许多野值。因此, 建立测站坐标预估模型应该注意的步骤是: 剔除原始观测数据中的粗差, 剔除各种观测噪声, 根据观测日志分析跳变产生原因, 划分建模历元数据段, 提取长周期项、周期项及短周期项, 进而拟合建模。可以借鉴文献 [10] 在研究加利福尼亚地震后 GPS 台站坐标时间序列拟合模型, 以及文献 [11] 在研究 2000 中国大地坐标框架维持时建立的 4 种非线性模型。

3.2 ITRF 框架点坐标位移模型改进

ITRF 维持的关键在于框架点坐标的更新。框架点坐标位移对参考框架维持的影响最大, 因此, 采用更加精确可靠的位移模型有助于提高 ITRF 的精度。IERS Conventions(2010)^[2] 给出了由多种效应引起的 ITRF 框架点位移模型, 包括 3 个种类: ① 框架点在地壳上的协议位置模型; ② 其他框架点位移模型, 具体指与环境负载变化有关的非潮汐运动(范围非常广); ③ 外部环境对各观测仪器内部参考点产生影响的位移模型。前两种位移由地球物理模型或源自地球物理模型的网格卷积结果来描述; 第三种位移是以实验为依据, 该现象会影响大地测量观测仪器的观测结果。

通常, 非潮汐负载位移在整个组合时段内仅有细微变化, 且这些模型并不精确, 故而在计算协议瞬时位置时一般不考虑。相反, 与之对应的非潮汐负载位移则以信号的形式嵌入到大地测量时间序列的结果中。但这些信号可以被提取出来, 并能用于与后处理参考模型的比较。尤为重要, 在组合多种空间大地测量台站坐标时间序列单日解时, 也应该采用相同的推荐模型。与 IERS 2003 协议相比, IERS 2010 协议改进了许多参考点位移模型, 具体情况见表 2。

3.3 地球质心运动模型的发展

为了得到地心运动的量级和各种观测技术监测地心运动的能力, IERS 于 1997—1998 年进行了一次会战, 并得出结论: 地心运动是可以监测到的, 但量级很小, 任何部分都小于 1cm^[12]。但随着大地测量观测精度的不断提高, 地心运动已经成为建立和维持地心参考框架的主要误差源^[13]。因此, 深入研究地心运动, 解决 ITRF 原点定义和实现间的不一致, 为地球动力学研究提供高精度的地心参考框架是非常重要的。

现在已经能够以毫米级的精度确定地球质心位置。不同历元确定的地球质心是不同的, 通过在同一个参考框架下比较不同历元地球质心位置的变化就可以确定和描述地球质心运动。文献 [14] 分别利用 Fourier 和小波变换分析了由 CHAMP 得到的地心运动序列, 在 TX、TY 和 TZ 3 个方向上, 6a 的平均值分别为 0.8、2.2、7.9mm, 地心运动趋势分别为 0.495、-0.004、1.309mm/a; 文献 [15] 利用 IGS 提供的重新处理的周解, 采用一阶形变法反演了 2000—2009 年的地心运动, 结果表明: X、Y、Z 方向的周年项振幅分别为 3.72、3.06、8.95mm。鉴于地心运动的复杂性, 不同学者给出了不同的研究结果, 至今还没有一个理想的地球质心运动模型, 仍然需要进一步研究。

3.4 ITRF 的监测网和并置站

空间大地测量技术的地面监测网是建立和维持地球参考框架的基础。最理想的情况应该是全球均匀分布, 但由于很多现实因素的影响, 目前建立的监测网分布并不均匀, 南半球测站(非洲和南美洲)分布稀疏, 北半球(特别是欧洲和北美地区)则相对密集。文献 [5] 指出, 南北半球的分布不均匀将导致 ITRF 的 Z 方向不稳定。在 IUGG2011 大会, 文献 [16] 也指出欧洲和北美地区的区域相关误差对 ITRF 有明显影响。会议认为,

应该对地面监测网进行改造和加密, 实现全球均匀分布的地面监测网。

表 2 不同 IERS 协议中参考点位移模型的比较

Tah 2 Comparison of Reference Point Coordinate Model in Different IERS Conventions

现象	量级	IERS2003 协议	IERS2010 协议	不同协议之间的精度和差异/改进
地球固体潮	dm	来自 Dehant 和 Mathews 的协议	无变化	无变化
海洋负载	cm	来自 Scherneck (几个潮汐模型) 的负载效应; 没有常规实现	来自 Scherneck (几个潮汐模型); 由 Agnew 软件(342 个分潮汐)实现	
S1-S2 大气压力负载	mm	无法使用	通过 vanDa 实现 Ray & Ponte (2003)	新模型
协议平均点	几百 mas	线性模型	从 1976 年至 2010 年使用立体模型; 2010 年以后采用线性模型	几十 mas
极潮	径向 2cm, 切向几 mm	离心效应相对于协议平均极 (2003)	离心效应相对于协议平均极 (2010)	协议极的变化: 影响可能会达到 1mm
海洋潮汐负载	径向 2mm, 切向小于 1mm	无法使用	Desai(2002)	新模型
仪器参考点: 温度和压力效应	约 1mm	不确定	参考温度和压力: GPT 模型, Boehm 等(2007)	使用平均(在原地的)温度测量和 GPT 之间: 由天线热变形引起的站高度误差小于 0.5mm
VLBI 天线热变形	VLBI 延迟大于 10ps, 对于坐标的影响为几个 mm	Nothnagel 等(1995)	Nothnagel(2009)	根据 GPT 模型定义的参考温度; 每年的尺度变化减小幅度为 1mm
GNSS 天线相位中心偏移	dm	不确定	Schmid 等(2007)	尺度的相对精度为 10^{-9} ; 对流层天顶延迟和 GPS 轨道一致性改善

并置站是将 2 种不同技术测量结果组合起来的关键, 因此, 它的数量、分布和局部约束的质量也是限制 ITRF 精度的主要因素。即使每种技术的数据质量有了很大的提高, ITRF 组合解的精度也会受到局部连接向量 (Local Ties) 的影响。ITRF2000 包含 101 个并置站, 但并非所有局部连接向量都被用于计算 ITRF2000。在组合中包含约 200 个局部连接向量^[5]。ITRF2005 只有 45% 的并置站以 SINEX 形式提供方差协方差矩阵, 另外 55% 的局部联系是通过文献 [7] 提出的方法转换成 SINEX 格式的文件。在 ITRF2008 中, 63% 的

局部连接具有方差—协方差信息。ITRF2008 主要通过 GPS 站实现不同技术的并置, 其中 GPS-SLR、GPS-VLBI、GPS-DORIS、VLBI-SLR、VLBI-DORIS、SLR-DORIS 的连接向量个数分别为: 48、44、45、8、10、10^[5]。目前空间大地测量技术的绝对精度已很难实现较大改善, 要想建立更高精度的 ITRF, 就必须增加并置站的数量, 提高局部连接的绝对精度。

4 ITRF 改进计划

与以往版本相比, ITRF2008 取得了很大进步, 但个别技术(如 DORIS)解的精度仍然不够高, 且其并置站的分布不够合理。自 ITRF2008 发布以来, 一些新建站因为大地震的影响出现了一定程度的位移。不仅如此, ITRF2008 还有了很多改进: ①增加了 5a 的累积观测值; ②增加了新的并置站和局部连接; ③改进了个别技术解的处理方法; ④可以使用自洽的后处理解; ⑤可以采用改进后的负载效应模型。考虑到这些原因, IERS 已经着手建立 ITRF2013^[17], 其将会有很大改进。这就要求 IERS 技术中心提供给每种技术尽可能长的时间序列, 最好能够涵盖每种技术的观测历史, 例如从 20 世纪 80 年代就开始记录的 VLBI 和 SLR 数据。而且, 除了 IERS 2010 协议中已给出的模型外, 不能改正其他任何地球物理流体负载效应。但是, 按照预想, 在 ITRF 生成前, 每种技术分析中心的解需要采用 IERS 全球地球物理中心 (GGFC) 提供的特殊的负载模型对非潮汐大气负载效应进行改正。因此, 有必要对这一额外非潮汐负载效应模型的相关性(如水文和海洋环流)进行评估。

ITRF2013 中的时间序列贡献解(每日/每周)应该是 SINEX 格式, 并且必须符合下面的一个约束条件: ①解的约束可以移除; ②松约束的解(约束水平位: $\sigma > 1\text{m}$); ③自由奇异法方程。SINEX 文件格式与 SINEX2.01 版本一致, 且包含每天/周的数据(站坐标和 EOP)。

根据 ITRF2005/ITRF2008 的经验可知, 新的 ITRF 需要更新的模型有: ①IVS 需要考虑建立由天线热膨胀引入的尺度偏差模型和可能的重力效应模型; ②建立适当的 SLR 站范围偏差模型, 尽可能地减小框架尺度效应; ③建立更新的 GNSS 力学模型以减小轨道模型误差及其对站坐标的影响; ④采用更加合理的 DORIS 处理方法以减小各分析中心之间的尺度差异。

IERS 中心使用局部连接至今已有 10~20a 时间了。应该以 SINEX 格式提交最新的测量值的最小二乘平差结果和完整的方差—协方差信息。测量中尽量不要移动 GNSS 接收机天线, 以避免天线重新回到原点时出现站坐标不连续情况。

ITRF 组合中心计划沿用 ITRF2008 采用的分析策略, 包括以下几个步骤:

1) 移除原点约束 (如果有的话)。

2) 采用非潮汐的大气压力 (和其他可能的负载) 效应改正。

3) 对每种技术的时间序列进行组合 (TRF + EOP), 即堆栈每周/每日的时间序列, 并输出每种技术的完整 SINEX 文件, 包括站位置、速度和每日的 EOPs。

4) 采用明智的方法识别并丢弃异常值, 适当地处理不连续。

5) 组合每种技术的组合并加上并置站上的局部连接。在这一步, 通过重新调节单独的方差—协方差矩阵, 进而获得合适的权重。这一全球组合将会组成 ITRF2013 解。

IERS 建议技术中心和各个分析中心最迟在 2014 年 2 月 10 日提交 SINEX 格式的时间序列文件, 并计划于 2014 年 7—8 月之间发布 ITRF2013 的最终解, 但目前已经推迟发布。

5 结束语

为了逐步提高 ITRF 的更新效率, 并且不降低其精度, ITRF 的维持, 特别是动态实时维持将是下一步的重点研究发展方向。本文通过较详细地阐述 ITRF 最新研究进展情况, 为研究参考框架的维持提供一些有益的参考。

参考文献

- [1] 党亚民, 陈俊勇. 全球大地测量地心坐标参考框架最新进展[J]. 测绘科学, 2004, 29(1): 61-63.
- [2] PETIT G, LUZUM B. IERS conventions (2010) [J]. IERS Technical Note, 2010, 36: 1-95.
- [3] 党亚民, 陈俊勇. 国际大地测量参考框架技术进展[J].

测绘科学, 2008, 33(1): 33-36.

- [4] 刘经南, 魏娜, 施闯. 国际地球参考框架 (ITRF) 的研究现状及展望[J]. 自然杂志, 2013(4): 243-250.
- [5] ALTAMIMI Z, COLLILIEUX X, MÉTIVIE L. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame[J]. J. Geod., 2011, 85(8): 457-473.
- [6] 刘平, 罗伊, 范海生. 浅谈地球坐标系及 2000 国家大地坐标系[J]. 地理空间信息, 2010(3): 106-108.
- [7] ALTAMIMI Z, BOUCHER C, SILLARD P. New trends for the realization of the international terrestrial reference system[J]. Adv. Space Res., 2002, 30(2): 175-184.
- [8] 顾国华. GNSS 科学发展与前景[J]. 全球定位系统, 2008, 33(4): 1-6.
- [9] ALTAMIMI Z, COLLILIEUX X, LEGRAND J, et al. ITRF2005: a new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters[J]. J. Geophys. Res., 2007, 112(B9): 83-104.
- [10] NIKOLADIS R. Observation of geodetic and seismic deformation with the global positioning system[D]. University of California, 2002.
- [11] 董文亮. 2000 中国大地坐标框架维持关键技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2014.
- [12] RAY J. IERS analysis campaign to investigate motions of the geocenter[J]. IERS Tech. Note, 1999, 25.
- [13] DONG D, YUNCK T, HEFLIN M. Origin of the International Terrestrial Reference Frame[J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(B4).
- [14] 郭金运, 韩延本, 黄金维. 由 CHAMP 卫星监测地球质心运动分析[J]. 中国科学 (G 辑), 2008, 38(10): 1404-1413.
- [15] 魏娜, 施闯, 刘经南. 利用 GPS 数据反演地心运动[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4): 441-445.
- [16] DREWES H, SEITZ M, ANGERMANN D. Thoughts to future realizations of the International Terrestrial Reference Frame [C]//IUGG 2011 Meeting, Melbourne, 2011.
- [17] ITRF. ITRF2013 call for participation[EB/OL]. http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2013/.

(责任编辑: 贾娇)