

IERS 地球参考系统、大地测量常数及其实现*

陈俊勇

(国家测绘局,北京 100830)

摘要 介绍了国际地球自转服务局(IERS, International Earth Rotation Service)所定义的地球参考系统、大地测量常数及其实现, IERS 规范(2003)中一些新的内容,特别是 IERS 采用国际地球参考系统 2000(ITRS2000)后的一些新进展。对 ITRS2000 的实现,即国际地球参考框架 2000(ITRF2000)的定义、主要参数、及其应满足的条件进行了研究,重点指出了它和历史上各个 ITRF_{yy} 的不同、特色及其联系。

关键词 IERS 规范(2003) 国际地球参考系统 2000(ITRS2000) 国际地球参考框架 2000(ITRF2000) 大地测量常数

中图分类号:P227 文献标识码:A

TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEM, GEODETIC CONSTANTS AND THEIR REALIZATION

Chen Junyong

(State Bureau of Surveying & Mapping, Beijing 100830)

Abstract Terrestrial reference systems, geodetic constants and their realization defined by IERS are introduced in the paper. Some new contents in the IERS Convention 2003, especially the new developments after the employment of International Terrestrial Reference System 2000 (ITRS2000) are emphasized. The realization of ITRS2000, i. e. the definition, main parameters of International Terrestrial Reference Frame 2000 (ITRF2000) and conditions which ought to be satisfied by the frame are studied. The differences between ITRF2000 and the previous ITRF_{yy} in the history and respective characteristics are pointed out. Besides, the relationships including their transformation parameters among the previous ITRF_{yy} are also given in the paper.

Key words: IERS Convention(2003), International Terrestrial Reference System 2000 (ITRS2000), International Terrestrial Reference Frame 2000(ITRF2000), geodetic constants

1 前言

IERS 的参考系统和产生程序都是基于国际科学组织的决议和决定^[1],天体系统基于 IAU(国际天文联合会)的决议(A4(1991), B2(1997), B1

(2000));地球系统基于 IUGG 决议 2(1991);天体和地球系统之间的转换基于 IAU 决议 B1(2000);时间坐标的定义、时间系统的转换、光传播模型和大尺度物质运动也都基于 IAU 的决议(A4(1991)和 B1(2000))。

* 收稿日期:2005-05-10

作者简介:陈俊勇,1933年生,中国科学院院士,大地测量学家,主要研究方向为天文大地测量,已发表专著10部,论文170多篇

IERS 规范(2003)和 IERS 以前的标准和规范的主要差别来自采用了第 24 次 IAU2000 年大会的有关决议。这些决议澄清和扩展了 IERS 所采用的一些参考系统的某些概念,还引入了应用于参考系统之间转换方面的一些重要修订。IERS 规范(2003)的一些改变主要是由下面几个因素所引起的^[1]:IERS 采用了 ITRF2000;IAU 采用了新的章动岁差理论,为了与章动模型保持一致而修改了原来采用的固体潮模型,使用了新的大地位模型。

2 大地测量常数和潮汐改正

2.1 IERS 所采用的大地测量常数

表 1 所列的大地测量常数都依据 SI(国际度量衡单位,1998)单位给出,亦即对地心系统采用“地心坐标时间”(TCG)作为时间坐标。对于月地质心系统采用“质心坐标时间”(TCB)作为时间坐标。

表 1 IERS 数字标准^[2,3]

Tab. 1 IERS numerical standard

符号	数 值	不确定性	资料来源	名 称
C	$299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$	定义的	文献[2]	光速
G	$6.673 \times 10^{-11}\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}\text{ s}^{-2}$	$1 \times 10^{-13}\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}\text{ s}^{-2}$	文献[2]	引力常数
GM_{\oplus}	$3.986\,004\,418 \times 10^{14}\text{ m}^3\text{ s}^{-2}$	$8 \times 10^5\text{ m}^3\text{ s}^{-2}$	文献[1]	地心引力常数(EGM96)
a_E^*	$6\,378\,136.6\text{ m}$	0.10 m	文献[1]	地球赤道半径
$1/f^*$	$298.256\,42$	$0.000\,01$	文献[1]	地球扁率
$J_{2\oplus}^*$	$1.082\,635\,9 \times 10^{-3}$	1.0×10^{-10}	文献[1]	地球动力构形因子
ω	$7.292\,115 \times 10^{-5}\text{ rad s}^{-2}$	变动不定	文献[1]	地球标称平均角速度
g_E^*	$9.780\,327\,8\text{ ms}^{-2}$	$1 \times 10^{-6}\text{ ms}^{-2}$	文献[1]	地球平均赤道重力
W_0	$6\,2636\,856.0\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$	$0.5\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$	文献[1]	地球大地水准面的位
R_0^{**}	$6\,363\,672.6\text{ m}$	0.1 m	文献[1]	地球大地位比例因子

注: * a_E , $1/f$, $J_{2\oplus}$ 和 g_E 的数值相应于“零潮汐”的数值; ** $R_0 = GM_{\oplus}/W_0$ 。

2.2 潮汐改正

地球周围的引力位是可以直接观测的,它是外部物体的潮汐引力位和地球位的联合。潮汐位(外部)既包含不依赖时间的部分(永久性潮汐),也包含了依赖时间的部分(周期性潮汐)。

大地测量中有一部分值受到潮汐的影响,如地面点位受到潮汐位所引起的固体地球形变的影响而产生位移,这一类位移也包括了永久性部分和时变部分。

移去观测点位中潮汐所贡献的时变部分,这样所得到的测站位置是处于“平均潮汐”(简称“平均”)的地壳,相应的位是“平均潮汐”位。由潮汐位所产生形变的永久性部分仍存留在平均地壳中。与之关联的大地位的永久性变化,以及潮汐位的永久性部分也包括在平均潮汐位中。这些都相应于真正的平均值,没有由于潮汐力所引起的周期性变化,例如,平均潮汐大地水准面,就相应于没有“非引力位扰动”(如洋、流、风)的平均海面。总之,相应于“平均潮汐”的量是定义在涉及平均潮汐地壳或平均潮汐大地水准面上的。

从平均潮汐位中移去了外部位的永久性部分,这样的位就称为“零潮汐”位,这就是严格的“大地

位”。但永久性潮汐所引起的永久性形变的贡献仍存在于“零潮汐”位中,若将它也移去,这样就得到“无潮汐”位(在此作一重要注记:不像讨论位的情况,“零潮汐”这一术语应用于地壳和“平均潮汐”应用于地壳是一个意思)。

“无潮汐”值,即所有潮汐效应均按模型在某一大地测量值中移去。由于扰动源是永久存在的,因此一个真实的“无潮汐”量是观测不到的。应用于大地位和应用于地壳点位移的潮汐模型是基于标称勒夫数。参考的大地位模型和地球参考框架,它们是由应用这些模型而移去潮汐的贡献,则称之为“通用无潮汐”量。因为响应于永久性潮汐部分的形变,其特征是以长期勒夫数为标志,这一勒夫数本质上不同于标称的勒夫数,因为“通用无潮汐”勒夫数的数值并不相应于真的无潮汐值。若没有潮汐摄动,真的无潮汐值是可以观测到的。

IUGG, IAU 和 IAG 都曾以大会决议形式建议“将地球永久性潮汐所产生的间接影响予以移去”,也就是采用“零潮汐”值。然而总的来说,大地测量界在分析空间大地测量数据时,至今仍没有采用这一建议,因此在测站坐标及其有关的分析报告中所列的数据仍是相应于“通用无潮汐”值。

大地位也可以在平均潮汐、零潮汐和无潮汐 3 种不同情况下实现。与此有关的参数值见表 1。处理永久性潮汐的不同过程之间的关系参见图 1 和图 2。

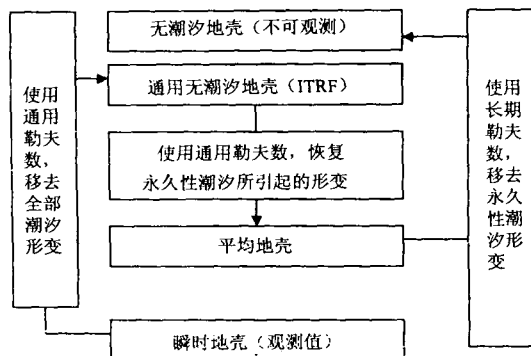


图 1 对大地测量观测值进行潮汐改正的几种方式

Fig. 1 Treatments of geodetic observations to account for tidal correction

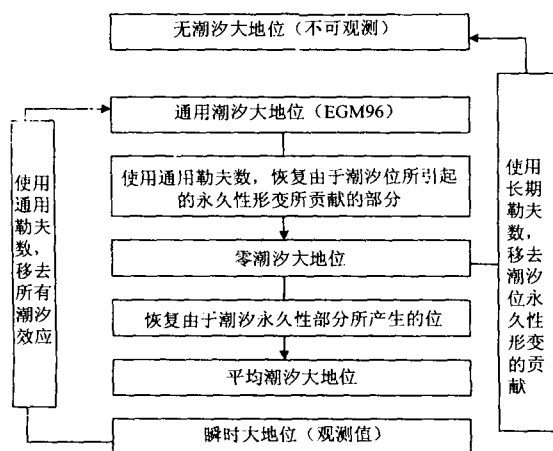


图 2 在大地位中处理不同潮汐效应的方式

Fig. 2 Treatment of observations for tidal effects in the geopotential

3 通用地球参考系统 (CTRS) 和通用地球参考框架 (CTRF)

3.1 基本概念

地球参考系统 (TRS) 是一个空间参考系统, 它联系着在空间作周日运动的地球。在这样的坐标系中, 与地球固体表面有联系的点的位置, 由于地球物理的作用 (如板块运动, 潮汐形变…), 其坐标随时间会有小的变化。地球参考框架 (TRF) 是在 TRS 的某一个特定坐标系统 (笛卡儿坐标系统, 地理坐标系统, 投影坐标系统…) 中具有精确坐标的一组物理点。这样的 TRF 被认为是 TRS 的实现。

3.2 通用地球参考系统 (CTRS)

理想的 TRS 应是定义为一个与地球紧密结合并一起转动的三面体。在牛顿框架中, 这一物理空间应视为欧氏三维仿射 (affine) 空间。在这种情况下, 这样的参考三面体就是欧氏仿射框架 (O, E)。O 是空间一个点, 称为原点。E 是关联的矢量空间的一个基础。目前对 E 采用的是右手、直角、基本矢量等长的规定。和基本矢量共线的 3 套单位矢量就表示了 TRS 的方向, 而这些矢量的公共长度就是 TRS 的比例尺。

这里所考虑的系统的原点应是位于 (接近) 地球质心 (地心)、定向于赤道、Z 轴指向极, 而比例尺应接近于 SI 的米 (m)。除了笛卡儿坐标系, 还可以使用其他坐标系, 例如地理坐标系。

通用地球参考系统 (CTRS) 是由提供了该系统原点、比例尺、定向以及它们的时变量的有关规范、算法和常数来定义的。

3.3 通用地球参考框架 (CTRF)

CTRF 是由一组物理点所定义的, 这些点在一特定的坐标系统内具有被精确测定的坐标。CTRF 是理想的通用地球参考系统 (CTRS) 的实现。当前有两种类型的坐标框架, 即动力的和动态的, 这取决于在求定坐标时是否采用动力学模型。

4 国际地球参考系统 (ITRS)

4.1 国际地球参考系统 (ITRS) 的定义

按 IUGG 的决议 (NO. 2, 维也纳, 1991), IERS 负责对 ITRS 进行定义、实现和改进。该决议中建议 TRS 有如下定义:

1) 通用地球参考系统 (CTRS) 的定义: 它是空间旋转的 (从地球外部看)、地心非旋转的 (在地球上) 似笛卡儿系统;

2) 地心非旋转系统和 IAU 决议所定义的地心参考系 (GRS) 是等同的;

3) CTRS 和 GRS 的坐标时是地心坐标时 (TCG);

4) 该坐标系统的原点是地球质量 (包括陆地, 海洋和空气) 中心;

5) 相对于地表的水平位移而言, 该系统没有全球性的残余旋转。

4.2 国际地球参考系统 (ITRS) 应满足的条件

1) 坐标原点是地心, 它是整个地球 (包含海洋和大气) 的质量中心;

2) 长度单位为 m。这一比例尺和地心局部框架的 TCG 时间坐标保持一致, 符合 IAU 和 IU-

GG1991 年的决议,它是由相应的相对论模型得到的;

3)它的方向初始值是由国际时间局(BIH)给出的 1984.0 的方向;

4)在采用相对于整个地球的水平板块运动没有净旋转条件下,确定方向的时变。

5 国际地球参考框架(ITRF)

5.1 用国际地球参考框架(ITRF)实现 ITRS

ITRS 的实现由 IERS 的 ITRS 产品中心(ITRS-PC)负责,并由 ITRF 这一名称来完成它的实现。当前实现的过程是联合解算各种 TRF 的计算结果,这些结果是 IERS 分析中心利用各种空间大地测量技术,例如 VLBI,LLR,SLR,GPS 和 DORIS 等观测成果形成的。

个别的 TRF 解算包括站坐标及其移动速度,以及相应的完全方差矩阵,它们都以 SINEX 格式表示。生产 ITRF 的解算联合模型本质上基于将各个 TRF 进行坐标系统的转换公式,转换时常利用各坐标系统中的公共点。由于他们代表了 ITRF 联合解算中的关键因素,在 ITRF 联合解算中他们应该具有较好的精度和较好的几何分布。

目前几乎每年在 ITRF 技术报告^[4]中都公布一次 ITRF 的解算成果。其数值(yy)相应于特定的 ITRF yy ,它表示上一年的数值已应用于构成这一给出的特定的国际地球参考框架。例如 ITRF99 表示已采用了所有截止于 1998 年底的 IERS 数据,由此解算了构成 1999 年的测站位置及其移动速度的框架。

IERS 采用以下几个计算步骤来推算 ITRF:1)对由各分析中心提供的各个 TRF 加以定义。应该知道每一个分析中心所采用的特殊的惯用改正值;2)在基准固定的情况下,将各个 TRF 联合起来求定 ITRF。这意味着 ITRF 只采用一组惯用改正值。因此对各个分析中心所提供的它自己的 TRF 中所采用的改正值,均由 IERS 统一将其归算到 ITRF 所采用的值;3)为了用户能得到 ITRS 中最佳的点位值,对用户使用的改正值要正确定义。在这方面,目前的情况如下:一是关于固体潮:所有分析中心都采用一种通用的无潮汐改正,例如第一次颁布的 MERIT 标准,因此 ITRF 也作了同样选择,即它是一个“惯用的无潮汐”框架^[1,2];二是相对论比例因子:所有分析中心都采用 TT 比例因子。所以 ITRF 也作了同样的选择(除了 ITRF94,96,97)。这里要指出的是,按 IAU 决议 B1.9(第 24 次 IAU 大会,曼彻斯特,2000),若 ITRS 为了和 TCG 保持一致,

ITRF 正则化的点位在 ITRS 中的严格表达还应采用下式进行改正:

$$\bar{X}_R = (1 + L_G) \bar{X}_{ITRF} \quad (1)$$

式中 $L_G = 0.696\ 929\ 013\ 4 \times 10^{-9}$;三是地心位置:ITRF 的原点是按基准定义确定的,在任何情况下,它应作为涉及地壳的地球形状的原点。为了获得真正的地心位置,按照 ITRS 的定义,ITRF 的点位必须进行由地心运动所引起的改正 $\bar{O}_G(t)$ ^[5],即:

$$\bar{X}_{ITRS} = \bar{X}_{ITRF} + \bar{O}_G(t) \quad (2)$$

5.2 计算 ITRF 的 IERS 地面控制网

IERS 地面控制网开始是采用由全球各个不同分析中心向 IERS 提供的所有一切追踪仪器的点位资料来定义的。近年来这一初始的 IERS 地面控制网已经有了很大扩展,包括了多种新的系统,因此目前在 IERS 中有各种技术类型的点:激光测距(SLR)(L),激光测月(LLR)(M),VLBI(R),GPS(P),DORIS(D),光学天文测量(A)(过去 BIH 曾使用过),PRARE(X),潮汐站(T),气象传感器(W)等。

IERS 地面控制网不仅应用于确定地面坐标,也应用于海洋和气象方面某些参数的确定。如在潮汐站上设置 IERS 的仪器,如 GPS 或 DORIS,对 GLOSS 项目(Global Sea Level Observing System)提供数据方面起了重要作用。

IERS 地面控制网也应用于收集精确的地面气象数据,特别是气压,以便从对流层传播延迟中导出原始的对流层参数。这一数据是从 GPS,VLBI 和 DORIS 等空间技术的无线电测量数据处理中推估而得的。

目前有的洲或国家将本地区的地面基准网并入 IERS 的地面控制网,如欧洲参考框架(EUREF)中的永久性 GPS 网,以及美国的 GPS 连续运行参考站网(CORS)。

5.3 ITRF 的历史及其基准定义的演变

ITRF 的历史要追溯到 1984 年,当时第一次采用 VLBI,LLR,SLR 和 Doppler/TRANSIT 的观测值,建立了一个联合 TRF(当时称 BTS84)^[6]。BTS84 是在 BIH 所涉及的框架内实现的,BTS84 当时是国际 MERIT(Monitoring of Earth Rotation and Inter-comparison of Techniques)完成计算的^[7]。MERIT 于 1988 完成了 BTS87 后结束,当年 IUGG 和 IAU 创建了 IERS。到 2004 年为止,IERS 已发布了 ITRF 的 10 个版本,开始是 ITRF88,一直到 ITRF2000。ITRF 点位及其速度的精度方面,在科学性和完整性方面,ITRF 的后一个版本都要优于前者。

从 ITRF88 至 ITRF93,ITRF 基准定义可以归

结为以下几条:1) 原点和比例尺:由所选择的 SLR 站的平均值来定义;2) 定向:定义于 BTS87 的定向,但 ITRF93 的定向及其变化速率和 IERS 的 EOP 保持一致;3) 定向的时间演变:ITRF88 和 ITRF89 没有估算全球速度场,所以曾经建议使用 AMO-2 模型^[8]。从 ITRF91 至 ITRF93,曾经考虑使用联合的速度场。ITRF91 的定向速率和 NNR-NUVEL-I 模型保持一致,而 ITRF92 则和 NNR-NUVEL-IA 模型^[9~11]保持一致,ITRF93 则和 IERS 的 EOP 系列保持一致。

自 ITRF94 以来,在 ITRF 的联合解算中,每一个别技术计算的完全方差矩阵都予以采用。当时 ITRF94 联合解算中的基准情况如下:原点采用某些 SLR 和 GPS 解算的权平均值来定义;比例尺采用 VLBI,SLR 和 GPS 解算的权平均值来定义,解算中加了 0.7 ppb 的改正,以符合 IUGG 和 IAU 的要求,即以 TCG(地心坐标时间)时间框架替代 IERS 研究中心使用的 TT(地面时间);定向与 ITRF92 保持一致;定向时间演变:为了使速度场和 NNR-NUVEL-IA 模型保持一致,采用了多于 7 个的转换参数,这样 ITRF96 就和 ITRF94 保持一致。采用了 14 个转换参数使 ITRF97 和 ITRF96 保持一致^[12,13]。

随着测站个数和它们在全球分布的改善,ITRF 网也不断改善和提高。ITRF88 网有 100 个测站,其中 22 个是公共站(即一个测站有 2 种以上测量技术,如 VLBI,SLR,LLR 等)。而 ITRF2000 网则有 500 个测站,101 个公共站。

6 ITRF2000

ITRF2000 是供 21 世纪地球科学应用和地球参考系的标准坐标框架。ITRF2000 的形成除了由 VLBI,LLR,SLR,GPS 和 DORIS 这些主要的核心站参与计算以外,还采用地区性的 GPS 网进行加密,如阿拉斯加、南极、亚洲、欧洲、南北美洲和太平洋地区的区域性 GPS 网。ITRF2000 联合平差上述单项解算成果时,常采用移去、松弛、最小约束等平差技术。

6.1 ITRF2000 基准定义的特点

ITRF2000 基准定义有以下几方面的特点:

1) 比例尺:在 ITRF2000 与 VLBI 和 SLR 二者解的权平均值之间,其比例尺及其变率均设为零。不同于 ITRF97 的比例尺,它是置于 TCG 框架内表示,而 ITRF2000 则置于 TT 框架内表示;

2) 原点:SLR 解的权平均值与 ITRF2000 之

间,其平移分量及其变率均设为零;

3) 定向:ITRF2000 的定向和 ITRF97 在 1997.0 时刻的定向保持一致,它的变化速率通常和地质模型 NNR-NUVEL-IA 保持一致^[9~11]。这就意味着采用了“无净转”这一条件,以和 ITRS 的定义保持一致。

此外,在确立 ITRF2000 的定向及其变率时,采用了一些具有在大地测量方面高质量的 ITRF 的测站,它们必须满足以下标准:第一,该测站已进行了至少 3 年的连续观测;第二,该测站要远离板块边界和形变带;第三,在 ITRF2000 联合平差后的成果中,该测站年位移速度的精度要优于 3 mm;第四,该测站移动速度在 3 种不同解算中,其年速度残差要小于 3 mm。

这里要特别指出的是:ITRF2000 的成果表明,它和地质模型 NUVEL-IA 的相对板块运动^[14]有很大的不一致,虽然在解算 ITRF2000 时限定它的定向速率和 NNR-NUVEL-IA 的定向速率之间的差异在 1 mm/a 的水平,也限定局部地区的点位变动速度在 ITRF2000 和 NNR-NUVEL-IA 之间的差异不超过 3 mm/a。此外,用 ITRF2000 速度来估算的与用 NNR-NUVEL-IA 模型预测的板块运动的角速度,也可能有较大的差异。

6.2 ITRF2000 和其他 ITRF_{yy} 间的转换参数

ITRF2000 换算到以前各个 ITRF_{yy} 的转换参数列于表 2。IERS 常使用下式进行两个参考框架间的转换,即采用 7 参数进行欧几里德坐标系转换:这 7 个参数包括 3 个平移量,一个比例因子,3 个旋转角,分别标记为 $T_1, T_2, T_3, D, R_1, R_2, R_3$ 。设在第一个参考系统中的坐标矢量 X_1 转换到第二个参考系统中的坐标矢量 X_2 时,采用 7 参数坐标转换有如下形式:

$$X_2 = X_1 + DX_1 + RX_1 \quad (3)$$

$$D = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0 & -R_3 & R_2 \\ R_3 & 0 & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

表 2 中所列的 ITRF2000 和其他 ITRF_{yy} 之间的转换参数的数值,在以前的 IERS 技术报告上都曾发表过,但这里要指出一点,这些参数是经过加权的平差值,它和当时推算这些框架时的公共测站的点的个数和位置严重相关,因此采用不同的公共测站来推算转换参数时,其结果很可能同表 2 所列值会有不同。

表 2 由 ITRF2000 至以前的 ITRF 的转换参数(ppb 表示 10^{-9} , 速度按每年计(/a))

Tab. 2 Transformation parameters from ITRF2000 to previous ITRF

ITRF	T_1 (cm)	T_2 (cm)	T_3 (cm)	D (10^{-9})	R_1 (mas)	R_2 (mas)	R_3 (mas)	历元
ITRF97	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
变化速率	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF96	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
变化速率	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF94	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
变化速率	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF93	1.27	0.65	-2.09	1.95	-0.39	0.80	-1.14	1988.0
变化速率	-0.29	-0.02	-0.06	0.01	-0.11	-0.19	0.07	
ITRF92	1.47	1.35	-1.39	0.75	0.00	0.00	-0.18	1988.0
变化速率	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF91	2.67	2.75	-1.99	2.15	0.00	0.00	-0.18	1988.0
变化速率	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF90	2.47	2.35	-3.59	2.45	0.00	0.00	-0.18	1988.0
变化速率	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF89	2.97	4.75	-7.39	5.85	0.00	0.00	-0.18	1988.0
变化速率	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF88	2.47	1.15	-9.79	8.95	0.10	0.00	-0.18	1988.0
变化速率	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	

ITRF 解算结果以笛卡儿赤道坐标系(X, Y, Z)来表示。如有需要可转换至涉及椭球的地理坐标(λ, φ, h)。这时推荐采用 GRS80 椭球($a = 6\,378\,137.0, e^2 = 0.006\,694\,380\,022\,90$)^①。

References

- McCarthy D D and Petit G. IERS Conventions(2003)[J]. IERS Conventions Centre, BKG, Frankfurt, Germany. 2004.
- Mohr P J and Taylor B N. J. Phys. Chem. Ref. Data. 1999, 28(6):1713.
- Groten E. Report of the IAG Special Commission SC3, Fundamental Constants[J]. X III IAG General Assembly, 1999.
- Boucher C, Altamimi Z and Sillard P. The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97)[R]. IERS Technical Note, 1999, (27). Paris.
- Ray J (ED.). IERS analysis campaign to investigate motions of the geocenter[J]. IERS Technical Note, 1999, 25, 121. Paris.
- Boucher C and Altamimi Z. Towards an improved realization of the BIH terrestrial frame[A]. The MERITS/COTES Report on Earth Rotation and Reference Frames [C]. Vol. 2, Mueller I. I. (ed.), OSU/DGS, Columbus, Ohio, USA. 1985, 2.
- Boucher C and Altamimi Z. Towards an improved realization of the BIH terrestrial frame[A]. The MERIT/COTES Report on Earth Rotation and Reference Frames [C]. Mueller (ED.), OSU, Clombus, 1985, 2, 3 289—3 292.
- Minster J B and Jordan T H. Present-day plate motions [J]. JGR, 1978, 83, 5 331—5 354.
- Argus D F and Gordon R G. No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model Nuvel-1[J]. Geophys Res. Lett., 1991, 18, 2 038—2 042.
- DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Current plate motions[J]. JGR, 1990, 101, 425—478.
- DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions[J]. Geophys Res. Lett., 1994, 21, 2 191—2 194.
- Boucher C, Altamimi Z and Sillard P. Results and Analysis of the ITRF96[R]. IERS Technical Note, 1998, 24. Paris.
- Boucher C, Altamimi Z and Sillard P. The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF1997)[R]. IERS Technical Note, 1999, 27. Paris.
- Altamimi Z, Sillard P and Boucher C. ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Application[J]. JGR, 2002, 107(B10): 10.1029/2001JB000561.

① <http://maia.usno.navy.mil/conv2000.html>