

基于 SOFA 的时间和坐标系统转换实现

张彦芬¹ 张永战¹ 周星宇²

(1.山西省测绘工程院,山西 太原 030002;2.武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉 430079)

摘要 时间和坐标系统统一是使用不同测量成果的前提,因此有必要开展和实现时间与坐标系统的转换研究。本文基于基础天文标准库(SOFA)中关于时间系统及历法的部分程序集,实现了多种时间系统之间的相互转换以及天球坐标系 GCRS 与地球坐标系 ITRF 的转换。

关键词 时间系统;坐标系统;SOFA

中图分类号 P222 **文献标识码** A **文章编号** 2095-7319(2019)01-0080-04

0.引言

大地测量学研究的对象是随时空变化的,大地测量的观测量也与时空密切相关。例如,在天文观测中,时间系统提供了天文导航系统跟踪、测量天体即定位、定向时所需要的标准时间,一般在太阳系质心天球参考系 BCRS 下描述;在卫星导航技术中,时间系统是描述卫星运行位置的重要参数,且一般使用地心天球参考系 GCRS 下坐标表示空间位置;而在日常生活中,历法及时间基准的有效制定对人们的生产生活十分重要,而描述地面物体的运动一般采用地心地固坐标系 ITRS。因此,时间及坐标系统及其相互间转换的研究是具有现实意义的。

基础天文标准库 SOFA 是 IAU 赞助的项目,旨在为天文计算提供权威有效的算法程序和常数数值,包括 C 版^[1-3]和 Fortran 版。本文所采用的 SOFA 主要由两部分组成:天文库和矢量/矩阵运算库。其中天文库有 176 个子程序,可以进行时间计算、星历表计算、天文历法计算、岁差章动计算、恒星空间运动计算以及主要星表系统的转换等功能;矢量/矩阵运算库有 55 个子程序,可以进行矢量和矩阵的各类操作。

1.时间系统

1.1 时间系统

时间系统对时间测量的标准进行了规定,包括起算基准和尺度基准。任何一个具有稳定周期的可观测、可复现的连续运动,都可以作为计量时间的方法。多种时间系统的定义,就是根据满足上述条件的周期运动实现的。目前在科学研究和工程应用中所涉及的时间系统主要分为两大类:一类是以国际单位制秒长为基

准的原子时系统,另一类是以地球自转为基准的世界时系统。

1.1.1 原子时系统

定义国际单位制秒长是建立原子时系统的基础。目前国际计量局将铯 133 原子基态的两个超精细能级在零磁场下跃迁辐射震荡 9192631770 周所持续的时间定义为国际单位制秒长。国际单位制秒长可根据定义在任意地方予以实现,其中在大地水准面上实现的国际单位制秒长称为 TAI 秒长。TAI 是根据遍布世界各地 50 多个国家计时实验室按照国际单位制秒长定义制作的 300 多座原子钟的测量数据经加权平均得到的,是目前稳定度最高、最均匀的时间系统。出于研究太阳系天体运动的目的,1976 年 IAU 定义了太阳系质心力学时 TDB 和地球动力学时 TDT,随后在 IAU 1991 决议中,将 TDT 重新命名为 TT,且同时定义了广义相对论框架下的时空统一参考系。在全球惯性参考系 BCRS 和局部惯性参考系 GCRS 中,相对应的坐标时分别为 TCB 和 TCG。虽然对 TCB 和 TCG 进行了定义,但为了保持以往重要工作的连续性,IAU 同意继续使用 TDB 和 TT,因此在 BCRS 中用作历表和动力学方程的时间基准是 TDB 而非 TCB,同样 GCRS 中的时间基准是 TT 而非 TCG。TDB 与 TCB、TT 与 TCG 之间均存在简单的线性变换关系,且在地球质心处,TDB 与 TT 速率十分接近,而在大地水准面上,TT 与 TAI 速率相同。

1.1.2 世界时系统

以地球自转为基准,以太阳中心为参考点,当太阳中心连续两次经过某地的上子午圈的时间间隔称之为

一个真太阳日,将其均匀分割为小时、分和秒的时间系统称之为真太阳时。然而,由于地球围绕太阳的轨道为椭圆,近地点角速度大、远地点角速度小,且黄道在赤道上的投影不均匀,真太阳时不均匀。建立平太阳,其周年视运动轨迹位于赤道平面,它在赤道上的运动角速度恒定等于真太阳的平均角速度,该时间系统称为平太阳时。平太阳时的起始点为平正午,将平太阳时的起始点从平正午移到平子夜,这样的平太阳时称为民用时。世界各地的平正午或平子夜时间是不同的,各地的民用时也不同,将格林尼治零子午线处的民用时称为世界时 UT。地球的极移现象,造成地球自转速度不均匀,在 UT 的基础上加入地球极移改正得到 UT1。由于受到季节性变化、潮汐摩擦等相关地球物理作用的影响,地球自转速率长期变慢,因此 UT1 秒长是不均匀的,这就使得稳定度极高的 TAI 与低稳定度的 UT1 之间存在不断地变化,带来使用的不便性。为了协调 TAI 和 UT1 这两类基准不同的时间系统,引入了 UTC。UTC 的秒长与 TAI 一致,通过加入跳秒使 UT1 与 UTC 间的差距保持在 0.9s 以内,使其与 UT1 在时刻上尽量保持一致,兼顾了地球自转变慢的效应,而 UTC 与 TAI 之间仅存在跳秒的差异。

1.2 历法及记日法

1.2.1 历法

历法规定了年、月、日的长度以及它们之间的关系,是规定时间序列的一套法则。历法主要分为阳历、阴阳历和阴历。

阳历又称公历,是依据太阳周年视运动而制定的,将太阳中心连续两次通过春分点所经历的时间间隔定义为一个回归年。阳历分为儒略历和格里历两种。儒略历历法规定,一年划分为 12 个月,其中 1、3、5、7、8、10、12 为大月,每月 31 天;4、6、9、11 为小月,每月 30 天;2 月在平年为 28 天、在闰年为 29 天(年份能被 4 整除的为闰年,不能被 4 整除的为平年)。罗马教皇格里高利对儒略历中设置闰年的规定做了修改,规定对世纪年而言只能被 400 整除的世纪年才算闰年,这就是格里历,也就是现在通用的公历。

阴历是根据月相的变化周期(朔望月)而制定的一种历法。该历法规定:单月 30 日,双月 29 日,每月平均 29.5 日,与朔望月的长度 29.53059……日很接近。以新月始见为月首,12 个月为一年,共 354 日。而 12 个朔

望月的长度为 354.36708……日,比阴历年多出 0.36708 日。30 年要多出 11.0124 日。因此,每 30 年要设置 11 个闰年,规定第 2、5、7、10、13、16、18、21、24、29 年的 12 月底各加上一天,共 355 日。

阴阳历是一种可以同时兼顾阴历和阳历特点的历法。阴阳历中的年以回归年为依据,月以朔望月为依据,大月为 30 日,小月为 29 日,平均每月为 29.5 日。每 19 年中有 7 个为闰年。闰年中增加一个月,称为闰月。我国长期使用阴阳历,自 1912 年后又采用阳历,但阴阳历也未被废止,同时在民间被使用,称为农历。

1.2.2 记日法

儒略日 JD 是一种不涉及年月等概念的长期连续记日法,其起始时间为公元前 4713 年 1 月 1 日 12 时,之后逐日增加。

简化儒略日 MJD 是采用 1858 年 11 月 17 日平子夜为起点计时的一种连续计时法,其与儒略日的关系为: $MJD=JD-2400000.5$ 。

年积日 DOY 是一年中的连续计时法,将每年的 1 月 1 日计为第一日,依次类推。

2. 基于 SOFA 的时间系统的转换

2.1 时间系统及历法的转换

由于互相转换的时间系统较多,而文章篇幅有限,因此文中就不具体给出每个转换之间的详细推导过程及公式,只给出本次研究所实现转换功能的时间系统及历法的名称。基于 SOFA 程序集实现了国际原子时 TAI 与地球时 TT,国际原子时 TAI 与协调世界时 UTC,国际原子时 TAI 与经极移改正的世界时 UT1,太阳系质心坐标时 TCB 与太阳系质心动力学时 TDB,地心坐标时 TCG 与地球时 TT,太阳系质心动力学时 TDB 与地球时 TT,极移改正的世界时 UT1 与地球时 TT,极移改正的世界时 UT1 与协调世界时 UTC,格里历与儒略历之间的转换^[4]。

2.2 时间系统及历法的转换实现

根据上述待转换系统,本文开发了时间系统与历法的转换软件,软件界面(如图 1—图 4 所示),其中,图 1—图 3 为 2016 年 12 月 4 日不同时刻在各时间系统之间的转换实例,图 4 为 2016 年 12 月 4 日格里历转换为儒略日的实例。限于文章篇幅,不再给出更多示例图。

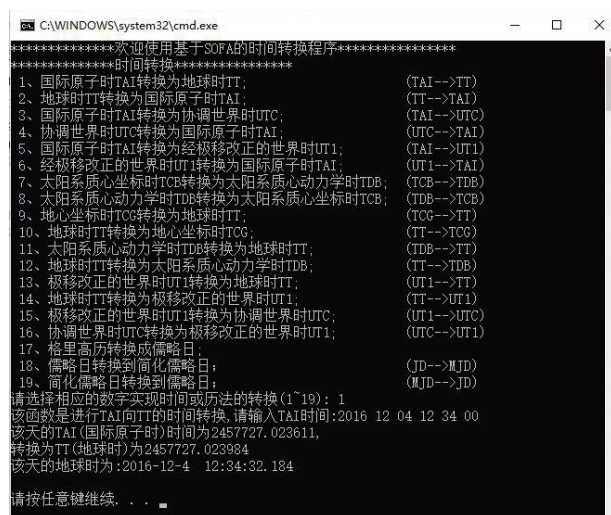


图1 TAI转TT实例

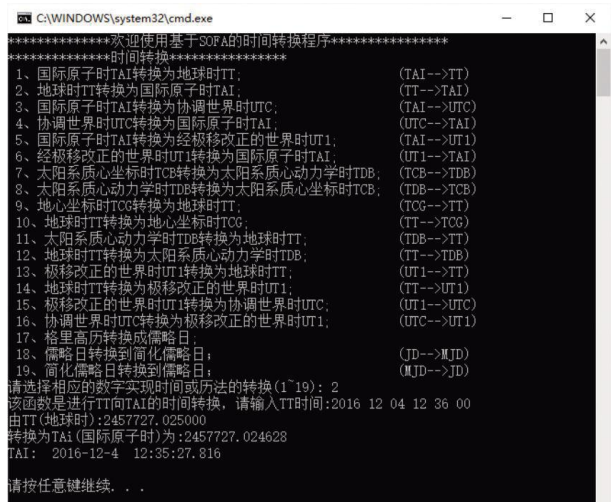


图2 TT转TAI实例

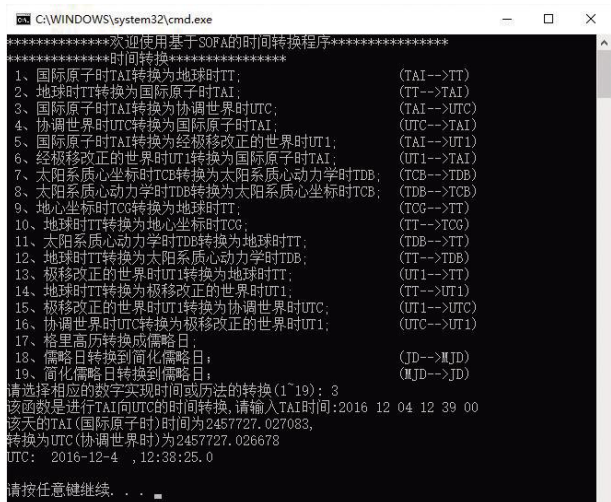


图3 TAI转UTC实例

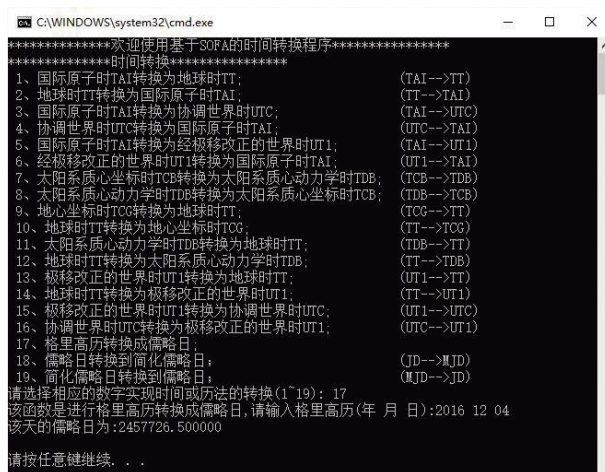


图4 格里历转JD实例

3. 坐标系统转换

目前 GCRF 与 ITRF 之间转换有两种方法:基于春分点的转换方法和基于无旋转原点 NRO 的转换方法。本文使用基于无旋转原点的转换方法,下面对这种方法进行介绍。

3.1 转换原理

基于无旋转原点的转换方法,包括以下 3 个过程:(1)GCRS 转为天球中间参考系。(2)天球中间参考系转换为瞬时地球坐标系。(3)瞬时地球坐标系转换为 ITRS,具体转换流程(如图 5 所示):

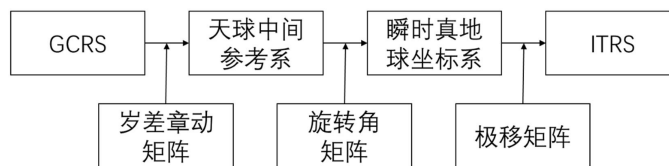


图5 基于无旋转原点的转换流程

坐标转换如公式(1)所示

$$[ITRS] = W(t) \cdot R(t) \cdot Q(t) \cdot [GCRS] \quad (1)$$

其中, $W(t)$ 是极移矩阵; $R(t)$ 是将天球中间参考系转换到瞬时真地球坐标系的旋转角矩阵, 旋转角为 CIO 到 TIO 的角距 ERA; $Q(t)$ 是将国际天球坐标系转换为天球中间参考系的岁差-章动旋转矩阵。

3.2 系数矩阵计算

调用 SOFA 库中函数 `iauXys06a(JD,0,&x,&y,&s)` 计算得到天球中间极的坐标 x 、 y 和 CIO 定位参数 s , 式中 JD 为观测时刻对应的儒略日, s 的单位为弧度, 函数使用的是 IAU2006 岁差模型和 IAU2000A 章动模型。继续调用 `iauC2ixys(x,y,s,Qt)` 函数, 输入刚刚计算得到的参

数可求得 $Q(t)$ 矩阵。

地球旋转矩阵 $R(t)$ 是指瞬时天球坐标系它的 Z 轴(地心至 CIP 方向)旋转角而形成的旋转矩阵。调用 SOFA 库中函数 $iauEra00(JD,0)$ 得到观测时刻地球相对于参考历元 J2000.0 时的地球旋转角,使用的是 IAU 2000 模型,得到的旋转角单位为弧度。计算中用到的儒略日是 UT1 对应的儒略日,需要在 UTC 的基础上加上 $(UT1-UTC)$, $(UT1-UTC)$ 可从 IERS 官网下载得到,这里给出的 $(UT1-UTC)$ 是一天的平均值。接下来调用函数 $iauRz(\theta, R_t)$ 可计算得到旋转矩阵 $R(t)$ 。

极移矩阵 $W(t)$ 的需要调用函数 $iauPom00(xp, yp, sp, W_t)$, 式中 x_p, y_p 为极移值,同样可从 IERS 官网下载得到,单位为弧度; sp 为 TIO 定位参数,需要调用函数 $iauSp00(JD,0)$ 计算,这里的 JD 是观测时刻 UTC 对应的儒略日,这样可以计算得到 $W(t)$ 矩阵。

在计算之前,需要先调用函数 $iauIr(double r[3][3])$ 对 $Q(t), R(t), W(t)$ 矩阵进行初始化,然后由公式(1)即可将坐标从 GCRS 转换到 ITRS 下。

3.3 计算实例

本文实现流程主要参照参考文献^[9],算例为 2012 年 2 月 14 日 GCRF 下一恒星坐标为 $X: -2267749.5891$, $Y: 5009154.2501$, $Z: 3221290.6476$, 单位为 m, 数据来自参考文献^[6]。地球自转起算数据 $X_p = 0.037128$, $Y_p = 0.258678$, 单位为 s, $UT1-UTC = -0.4623779$, 单位为 s。转换结果(如表 1 所示),与参考文献 1 中坐标转换结果基本一致,差距在于计算 $Q(t)$ 矩阵时没有考虑到天

极偏差。将算例坐标每隔 1 分钟进行一次转换,得到的轨迹(如图 6 所示),接近一个椭圆,且轨迹螺旋上升,代表了 GCRS 下恒星在 ITRS 一天的轨迹,由此实现了从 GCRS 到 ITRS 的坐标转换。

表 1 坐标转换结果

X	Y	Z
4816302.795828	-2656269.482760	3218460.462757

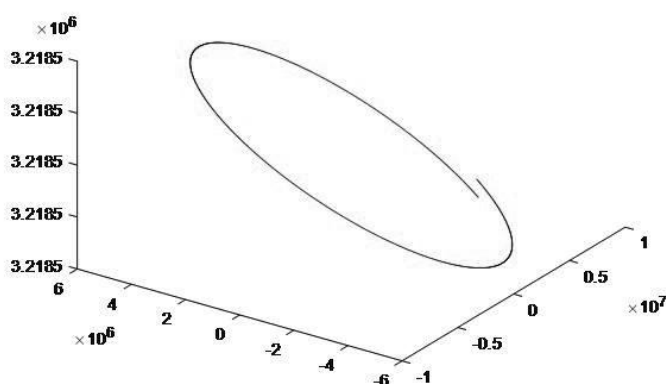


图 6 ITRS 下恒星坐标轨迹

4. 结束语

时间系统和坐标系统转换是大地测量学中的基本问题,如何精确快速实现不同系统间的相互转化具有一定的研究意义。本文基于 SOFA 程序库编制了时间系统和坐标系统转换软件,并验证了其转换可用性。但软件仍较为粗糙,如交互性较差等,有待后续继续完善。

参考文献:

- [1] 魏二虎,刘经南,严韦,等.空间 VLBI 对月球大地测量参数的可估计性[J].测绘地理信息,2008, 33(1):1-3.
- [2] 孔祥元,郭际明,刘宗泉.大地测量学基础[M].武汉:武汉大学出版社,2008.
- [3] 李征航,魏二虎,王正涛,等.空间大地测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2010.
- [4] 魏二虎,李智强,殷志祥,张帅.相对论框架下时间系统转换及 SOFA 软件的教学应用[J].全球定位系统,2013, 38(2):7-11, 18.
- [5] 陈超,葛余超,张发奇,刘雄.基于 SOFA 的 GCRS 与 ITRS 间坐标转换[J].测绘与空间地理信息,2014(2): 223-225.
- [6] 魏二虎,畅柳,杨洪洲.基于 SOFA 的 ITRS 与 ICRS 相互转换方法研究[J].测绘信息与工程,2012, 37(4).

作者简介:

张彦芬(1987—),女,硕士,工程师。主要从事大地测量与测量工程工作。