

不同光学天文参考架的比较*

郭素芬, 吕国梁[†]

(新疆大学 物理科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 天文参考架是天体测量的基础. 从最早的FK5参考架, 后来的伊巴谷参考架, 到现在的*Gaia*参考架, 光学参考架的精度越来越高. 本文对近年来实现的光学参考架进行了总结分析, 详细介绍了伊巴谷参考架和*Gaia*参考架, 总结了参考架的连接方法. 研究表明: *Gaia*实现的光学参考架在精度和轴稳定性上已经达到了射电参考架的水平.

关键词: 天体测量; 自行; 类星体; 参考系

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2022.02.07.0002

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2022)02-0129-05

引文格式: 郭素芬, 吕国梁. 不同光学天文参考架的比较[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 39(2): 129-133.

英文引文格式: GUO Sufen, LYU Guoliang. A comparison of different optical reference frames[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2022, 39(2): 129-133.

A Comparison of Different Optical Reference Frames

GUO Sufen, LYU Guoliang

(School of Physical Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017)

Abstract: Astronomical reference frame is the foundation of astrometry. From FK5 system, Hipparcos reference frame to *Gaia* reference frame, the precision of optical reference frames had been improved. This paper gives a detailed description of the Hipparcos and *Gaia* reference frames, summarizes the differences and the link between reference frames. We conclude that, with the *Gaia*-CRF, the optical reference frame has nearly the same precision of radial reference frame.

Key words: astrometry; proper motions; quasars; reference systems

0 引言

天体物理研究离不开天体精确的位置、自行数据, 而这些天体测量数据的描述依赖于具体的参考系. 天文参考系由坐标系原点和坐标轴的指向来定义, 其具体实现称为参考架. 参考架一般由参考系中一些天体的坐标来定义, 这些天体相对于参考系是不动的. 定义参考架的天体越多, 参考架的轴稳定性越好. 实现惯性参考系是天体测量最重要的任务之一.

传统的天文参考系是由地面光学望远镜的观测数据解算得到的, 其基本平面是某历元的平赤道面, 赤经零点是同样历元的动力学平春分点, 这些是根据太阳系动力学所描述的天体的位置和运动建立起来的, 因此是动力学参考系. 这样定义的参考系和地球的岁差-章动参数有关, 因此和历元有关, 数据的解算过程中需要将不同历元的数据转换到某一历元, 此时恒星的位置和自行的系统差中往往会混入岁差常数的误差, 从而引起参考系的旋转^[1]. 这类星表中最著名的是FK系列星表(The Fundamental Catalogue, FK), 其中的FK5^[2-3]星表(The Fifth Fundamental Catalogue, FK5)是该系列的最后一个星表. FK5星表在1991年发布完成, 其中包括1 535颗来源于FK系列中的上一个星表FK4中的基础星^[2], 3 115颗扩充星^[3]. 相对于FK以前的系列, FK5系统采用了新的时间系统和岁差-章动参数(IAU 1976决议推荐), 改进了总岁差表达式, 消除了以前星表中的区域性误差. FK5基础星的自行误差为 $0.7 \text{ mas}\cdot\text{yr}^{-1}$. FK5参考架的自行系统内部并不能保持一致, 呈现出随星等范围、空间指向、光谱型等变化的非刚性特征^[4], 后来被国际天球参考系代替.

* 收稿日期: 2022-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(12003025).

作者简介: 郭素芬(1986-), 女, 博士, 主要从事天体物理的研究.

[†] 通讯作者: 吕国梁(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事天体物理的研究, E-mail: guolianglv@163.com.

国际天球参考系^[5] (International Celestial Reference System, ICRS)是目前天体测量使用的基本参考系. IAU规定ICRS的原点在太阳系质心(Solar-System Barycenter, SSB),其坐标轴固定于遥远的银河系外的源^[1,6]. ICRS的具体实现称为国际天球参考架(International Celestial Reference Frame, ICRF). 为了和FK5参考系保持一致, IAU规定ICRS的主平面尽量靠近J2000.0历元的平赤道面, 赤经零点尽量靠近J2000.0历元的动力学春分点^[1,6]. 由遥远的河外射电源实现的ICRS,其坐标轴相对于遥远的河外源固定,与太阳系内的动力学模型和地球的岁差-章动参数无关,因此是一个运动学准惯性参考系,该参考系下的观测模型都应在相对论框架下建立.

在*Gaia*发布以前,ICRS的最精确实现是由甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)手段在射电波段测得的一组河外源的精确位置完成的,即ICRF. ICRF1^[7]是第一个ICRF星表,包括608颗河外射电源,其中212颗是位置和结构较为稳定的定义源. ICRF1源的位置精度约为0.25 mas,轴稳定性约为20 μ as. ICRF2^[8-9]是ICRS的第二次实现,在2009年IAU大会上正式通过. ICRF2数据来源于30年间的VLBI河外射电源观测,包括3 414颗致密的河外射电源,其中有295颗称为定义源,定义源的位置精度达到了40 μ as,轴的稳定性达到了10 μ as. ICRF2中射电源的数目比ICRF1更多,且定义源的全天分布更均匀. ICRF3^[10]是ICRS在射电波段的最新实现,数据来源于近40年的VLBI观测. ICRF3中包括:8.4 GHz的4 536颗河外源,其中303颗是定义源,其在全天的分布较为均匀;24 GHz的824颗源;32 GHz的678颗源. 因为ICRS的轴固定于不随时间改变的河外源的位置,因此ICRF是和历元无关的,但是为了确保与别的参考架进行连接时的精度和准确性,最好归算到同一历元. 为了和同时期的*Gaia*^[11]光学参考架进行连接,ICRF3被解算到J2015.0历元. ICRF3的精度约为0.03 mas,其中有500颗8.4 GHz的源在位置精度为0.03~0.06 mas水平.

目前ICRS在射电波段的实现——ICRF具有最高的精度,但是很多射电源在光学波段比较暗弱,甚至没有光学对应体,为了提高光学观测及数据解算的精度,在光学波段实现ICRS是非常必要的. 伊巴谷星表是ICRS在光学波段的首次实现. 随着*Gaia*数据的发布,*Gaia*建立了自己的参考架,毫无疑问,这是光学波段目前精度最高的星表,因此是光学波段ICRS的又一实现. 本文将对常用的天体测量光学参考架进行总结分析,将在后续章节进行详细介绍.

1 伊巴谷参考架HCRF

伊巴谷参考架是由伊巴谷天体测量卫星的观测数据解算后实现的,伊巴谷卫星是全球首个天体测量卫星,于1989年8月由欧洲航天局发射,在轨运行至1993年3月. 相对于地基观测,空间测量可以避免大气折射、大气抖动和地球运动的影响,并且可以观测到所有天区. 伊巴谷卫星具有两个观测视窗,组成了大角度观测,将大角度观测的同一个目标的观测数据联系起来可以高效地获得绝对视差,从而建立天球参考架. 伊巴谷最终发布的星表中包括117 955颗银河系内天体的位置、自行、星等数据^[12-13]. 在*Gaia*发布数据之前,依巴谷星表是光学波段最精确的天体测量星表.

由于伊巴谷的观测时间短和观测仪器的精度有限,伊巴谷星表中很多双星和多星系统的自行是不准的,因此,为了使用伊巴谷星表作为ICRS在光学波段的实现,IAU 2000决议中排除了伊巴谷星表中的双星和多星系统,将剩下的星表作为伊巴谷天球参考框架(HCRF),这是ICRS在光学波段的初次实现. HCRF在伊巴谷卫星的平均历元J1991.25附近具有最好的光学参考架实现,因为HCRF是由恒星建立的参考架,而恒星普遍具有自行,所以偏离平均观测历元J1991.25越远,HCRF精度越低.

2 *Gaia*参考架

*Gaia*天体测量卫星是欧洲航天局于2013年12月发射的新一代天体测量卫星^[14],科学目标是精确测量银河系内10亿多颗天体的位置、自行等信息,从而建立银河系的三维地图. *Gaia*最终数据释放后,将会对天文学研究产生深远的影响,如可以为变星、热亚矮星^[14-15]研究提供新的数据,联合其他观测手段^[16-17]可以对超大质量黑洞进行研究,为银河系结构及形成、演化的研究提供有力的数据支持等.

*Gaia*卫星采用的也是两个视场的大角度观测,由于观测技术的提高和仪器性能的提升,相比于伊巴谷卫星,*Gaia*卫星在观测精度上提高了2个数量级,观测数目上提高了4个数量级^[18],观测深度上也具有非常显著的提高,其能够观测到G星等暗至21等的天体,预计将会观测到数百万颗类星体. *Gaia*数据处理中的天体测量全局迭代解以相对论框架下的GERM^[19]为核心模型. 有了河外源精确的坐标和海量的观测数据,*Gaia*建立了自己

的参考架,其预期建立的最终天球参考架将会达到微角秒级的精度,可以和ICRF比肩.

*Gaia*采用的参考系为太阳系质心天球参考系(Barycentric Celestial Reference System, BCRS)^[20],坐标原点位于太阳系质心,轴指向和ICRS轴指向平行,时间坐标为TCB.根据IAU 2006决议,该参考系保持为运动学无旋转参考系.*Gaia*目前已经发布了3期数据,*Gaia* DR1、*Gaia* DR2和*Gaia* EDR3.

2.1 *Gaia* DR1参考架

欧洲航天局在2016年9月释放了*Gaia*第1期数据*Gaia* DR1^[21-22],该数据解算自2014年7月到2015年9月的观测数据,由于观测时间较短,*Gaia* DR1并不完备,极限星等为20.7等,虽然给出了11亿颗天体的毫角秒精度坐标信息,但只有2百万颗天体具有位置、视差和自行(五参数数据).这些具有五参数的源是*Gaia*和伊巴谷星表、第谷星表的共同星,解算时使用了伊巴谷星表和第谷星表,此部分数据称为TGAS星表(Tycho-*Gaia* Astrometric Solution).*Gaia* DR1^[21-22]建立的参考历元为J1991.25和J2015.0,即参考架中的位置和自行解算到J1991.25历元和J2015.0历元的指向位置,J2015.0是*Gaia*的平均观测时间,解算到J1991.25是为了和伊巴谷星表、第谷星表的连接.在解算位置和自行时,参考架和ICRF进行了校准,在J2015.0历元,精度好于0.1 mas^[21],相对于ICRF的旋转小于0.03 mas·yr⁻¹.*Gaia* DR1中有2 191颗ICRF2源的光学对应体,它们的位置误差普遍好于3.35 mas.银河系光行差效应引起的Z轴在J2000.0到J2015.0之间的偏差约为0.01 mas^[23].*Gaia* DR1和ICRF2的连接表明,*Gaia* DR1使用河外源实现了准惯性参考架.

2.2 *Gaia*-CRF2参考架

*Gaia*在2018年4月发布了第二期数据*Gaia* DR2^[24],建立的参考架为*Gaia*-CRF2^[25](The *Gaia* Celestial Reference Frame, *Gaia*-CRF2).DR2使用了*Gaia*卫星从2014年7月到2016年3月共21个月的观测数据,归算历元为J2015.5,总计有16亿天体具有五参数,G波段极限星等达到了21.3等.定义*Gaia*-CRF2使用了556 869颗河外源,这些类星体来源于MIRAGN^[26],其中在ICRF3中的源有2 820颗.定义*Gaia*-CRF2的类星体空间分布较为均匀^[25],但是参考架的稳定性依赖于这些类星体样本的可靠性.由于*Gaia*-CRF2的实现只依靠河外源的精确位置,这些位置在*Gaia*数据的解算过程中设置为没有旋转,因此,*Gaia*-CRF2是第一次在光学波段通过河外源建立的参考架,其实现了光学波段的ICRS.

为了保证参考架无旋转的同时尽可能的和ICRF接近,对*Gaia* DR2和ICRF2进行了连接.*Gaia* DR2和ICRF2的连接在G<18时的误差为0.12 mas^[25].

2.3 *Gaia*-CRF3参考架

*Gaia*于2021年底发布了第3期数据的早期版本EDR3^[27],该星表使用了*Gaia*卫星从2014年7月到2017年5月共35个月的观测数据,归算历元为J2016.0,包含具有五参数或六参数的14亿颗天体,其中用来实现光学参考架的河外源有161万颗,作为参考架定向的ICRF3源有2 269颗,这些源用来将*Gaia* EDR3参考架(*Gaia*-CRF3)与ICRS对准.作为定义*Gaia*-CRF3轴的源有将近43万颗.由于*Gaia* DR3还没有完全释放,*Gaia*-CRF3也没有发布,就目前发布的EDR3来看,河外类星体的数量远超*Gaia*-CRF2,因此在参考架精度和轴的稳定性上将会有所提升.

3 ICRS的误差来源

由于太阳系质心绕着银河系的旋转具有加速度,这会引起天体视自行的变化,即引起长期光行差效应^[28],这和天体本身的自行不可区分,产生的视自行的量级在5 μ as·yr⁻¹.由于定义参考架的河外源在全天分布均匀性不足,这种长期光行差效应在河外射电源上的作用会导致参考架的基准点产生旋转.除此之外,有些射电源的结构不稳定会造成源的观测中心难以定准,也会对参考架的精度和轴的稳定性产生影响,因此射电源需要长期监测.

4 参考架的连接

参考架的连接可以通过比较同一颗源在不同参考架中的位置、自行来进行,也可以通过比较在两个参考架中计算的不同地球定向参数来进行.由于参考架的定向偏差和旋转是微小量,因此在公式推导过程中只考虑了一阶量^[29].

通过位置进行连接的计算公式为^[29]:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha\cos\delta &= -(\varepsilon_{0x} + \tau\omega_x)\cos\alpha\sin\delta - (\varepsilon_{0y} + \tau\omega_y)\sin\alpha\sin\delta + (\varepsilon_{0z} + \tau\omega_z)\cos\delta, \\ \Delta\delta &= (\varepsilon_{0x} + \tau\omega_x)\sin\alpha - (\varepsilon_{0y} + \tau\omega_y)\cos\alpha.\end{aligned}$$

通过自行进行连接的计算公式为^[29]:

$$\begin{aligned}\Delta\mu_\alpha\cos\delta &= -\omega_x\cos\alpha\sin\delta - \omega_y\sin\alpha\sin\delta + \omega_z\cos\delta, \\ \Delta\mu_\delta &= \omega_x\sin\alpha - \omega_y\cos\alpha.\end{aligned}$$

其中: $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\delta$ 分别是两个参考架中同一颗源的赤经差和赤纬差, $\Delta\mu_\alpha$ 和 $\Delta\mu_\delta$ 分别是两个参考架中同一颗源的自行差在赤经和赤纬上的分量, ω_x 、 ω_y 、 ω_z 分别是参考架的相对旋转在 x 轴、 y 轴、 z 轴的分量, ω_{0x} 、 ω_{0y} 、 ω_{0z} 分别是初始参考历元两个参考架的定向偏差在 x 轴、 y 轴、 z 轴的分量, τ 为参考架的历元差.根据上述公式,使用最小二乘方法可解出具体的定向偏差和旋转分量,具体计算前,要对数据进行去相关和标准化.

4.1 FK5和ICRS的连接

伊巴谷星表中包含了FK5中的1 535颗基本星,因此可以对FK5和伊巴谷星表进行连接,再结合伊巴谷参考架本身建立在ICRS上的精度,来实现FK5和ICRS的连接^[30].连接时要删除双星,并把FK5的位置归算到伊巴谷的平均观测历元J1991.25.结果表明FK5和伊巴谷系统的轴有较明显的旋转,即岁差常数改正,此外,FK5的局部位置误差达到了150 mas,自行误差达到了3 mas·yr⁻¹.

4.2 HCRF和ICRF的连接

伊巴谷的极限V星等为12.3 mag,观测不到河外源(除了3C272),由于ICRS是通过河外源建立的,因此伊巴谷和ICRS不能直接进行连接.可以通过:(1)使用VLBI或VLA对一些伊巴谷星表中可观测到的射电星进行观测,通过这些星的位置来连接;(2)使用North and South Proper Motion (NPM and SPM)等自行星表中的共同星来连接;(3)使用地球定向参数来进行连接.连接结果表明:在J1991.25历元,伊巴谷参考系到ICRF1轴指向精度为0.6 mas·yr⁻¹,在0.25 mas·yr⁻¹内无旋转^[31].

4.3 Gaia-CRF和ICRF的连接

由于Gaia卫星可以观测到大量的河外类星体,其中很多都属于ICRF的定义源,所以可以通过共有的类星体将Gaia-CRF直接与ICRF进行连接.实际上Gaia数据在解算时,已经通过河外源和ICRF进行了对准.数据解算完成后,可以通过Gaia-CRF和ICRF共有源的位置来估算两个参考系之间是否具有相对旋转和偏移.使用类星体数据将Gaia-CRF1和ICRF进行连接后得到:Gaia-CRF1在10 μ as·yr⁻¹内无旋转,和ICRF2的轴连接误差在10 μ as水平^[32].Gaia DR2和ICRF3的连接在 $G < 18$ 时的误差为0.12 mas^[25],在 $G = 20$ 时的误差为0.5 mas,大尺度系统差为20~30 μ as.

5 结论

从FK5、伊巴谷到Gaia参考架,光学波段的天文参考架精度越来越高,包含的河外源的数量也越来越多,这给我们提供了越来越精确的天体测量参考基准,极大方便了后续的光学望远镜观测.本文的研究表明:Gaia实现的光学参考架在毫角秒量级内可以达到VLBI实现的射电参考架的水平.

参考文献:

- [1] 刘佳成,朱紫.2000年以来国际天文学联合会(IAU)关于基本天文学的决议及其应用[J].天文学进展,2012,30(4):411-437.
- [2] FRICKE W, SCHWAN H, LEDERLE T, et al. Fifth fundamental catalogue(FK5). part 1. the basic fundamental stars[J]. Veröffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg, 1988, 32: 1-106.
- [3] FRICKE W, SCHWAN H, CORBIN T, et al. Fundamental Catalogue(FK5), Part II: The FK5 extension-new fundamental stars[J]. Veröffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg, 1991, 33: 1-20.
- [4] 朱紫.伊巴谷参考架惯性特征[J].天文学进展,2001,19(2):302-306.
- [5] ARIAS E F, CHARLOT P, FEISSEL M, et al. The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS[J]. Astronomy and Astrophysics, 1995, 303: 604-608.
- [6] BERGERON J. Proceedings of the twenty-first general assembly[J]. Transactions of the International Astronomical Union, Series B, 1991, 21: 11-82.

- [7] MA C, ARIAS E F, EUBANKS T M, et al. The international celestial reference frame as realized by very long baseline interferometry[J]. *The Astronomical Journal*, 1998, 116: 516-546.
- [8] FEY A L, GORDON D, JACOBS C S, et al. The second realization of the international celestial reference frame by very long baseline interferometry[J]. *The Astronomical Journal*, 2015, 150(2): 58.
- [9] MA C, ARIAS E F, BIANCO G, et al. The second realization of the international celestial reference frame by very long baseline interferometry[J]. *IERS Technical Note*, 2009, 35: 73-81.
- [10] CHARLOT P, JACOBS C S, GORDON D, et al. The third realization of the international celestial reference frame by very long baseline interferometry[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 644: 1-28.
- [11] PRUSTI T, DE BRUIJNE J, BROWN A G, et al. The *Gaia* mission[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, 595: 1-28.
- [12] PERRYMAN M, LINDEGREN L, KOVALEVSKY J, et al. The Hipparcos catalogues[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1997, 323(1): 49-52.
- [13] VAN LEEUWEN F. Validation of the new Hipparcos reduction[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 474(2): 653-664.
- [14] YU J L, LYU G L. The new progress of subdwarf star studies[J]. *Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English)*, 2020, 37(4): 435-447.
- [15] LEI Z, ZHAO J, NÉMETH P, et al. Hot subdwarf stars identified in *Gaia* DR2 with spectra of LAMOST DR6 and DR7. I. Single-lined spectra[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, 889(2): 117.
- [16] ÁLVAREZ-MUÑIZ J, BATISTA R A, BOLMONT J, et al. The giant radio array for neutrino detection(GRAND): science and design[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, 63(1): 1-43.
- [17] 朱春花, 翟楠楠, 沈冬祥, 等. 超大质量黑洞产生的高能中微子探测及巨型中微子射电探测阵列的选址[J]. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(2): 127-131.
- [18] TURON C, LURI X, MASANA E. Building the cosmic distance scale: from Hipparcos to *Gaia*[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2012, 341(1): 15-29.
- [19] SERGEI A KLIONER. A practical relativistic model for microarcsecond astrometry in space[J]. *The Astronomical Journal*, 2003, 125(3): 1580-1597.
- [20] SOFFEL M, KLIONER S A, PETIT G, et al. The IAU 2000 resolutions for astrometry, celestial mechanics, and metrology in the relativistic framework: explanatory supplement[J]. *The Astronomical Journal*, 2003, 126(6): 2687-2706.
- [21] LINDEGREN L, LAMMERS U, BASTIAN U, et al. *Gaiadata* release 1-astrometry: one billion positions, two million proper motions and parallaxes[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, 595: 1-32.
- [22] BROWN A G A, VALLENARI A, PRUSTI T, et al. *Gaiadata* release 1-summary of the astrometric, photometric, and survey properties[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, 595: 1-23.
- [23] LIU N, ZHU Z, LIU J C, et al. Overall properties of the *Gaia* DR1 reference frame[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 599: 1-6.
- [24] LINDEGREN L, HERNÁNDEZ J, BOMBRUN A, et al. *Gaia* data release 2: the astrometric solution[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, 616: 1-25.
- [25] MIGNARD F, KLIONER S A, LINDEGREN L, et al. *Gaia* data release 2: the celestial reference frame(*Gaia*-CRF2)[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, 616: 2-30.
- [26] SECREST N, DUDIK R, DORLAND B, et al. Identification of 1.4 million active galactic nuclei in the mid-infrared using WISE data[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2015, 221(1): 12.
- [27] LINDEGREN L, KLIONER S A, HERNÁNDEZ J, et al. *Gaia* early data release 3: the astrometric solution[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 649: 1-35.
- [28] 刘佳成, 刘牛. 银河系光行差及其对天文参考架的影响[J]. *天文学报*, 2020, 61(1): 10.
- [29] LINDEGREN L, KOVALEVSKY J. Linking the Hipparcos catalogue to the extragalactic reference system[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1995, 304: 189-201.
- [30] MIGNARD F, FROESCHILE M. Linking the FK5 to the ICRF[J]. *Highlights of Astronomy*, 1998, 11(1): 313-316.
- [31] KOVALEVSKY J, LINDEGREN L, PERRYMAN M A C, et al. The Hipparcos catalogue as a realisation of the extragalactic reference system[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1997, 323: 620-633.
- [32] LIU J C, ZHU Z, LIU N. Link between the VLBI and Gaia reference frames[J]. *The Astronomical Journal*, 2018, 156(1): 13.