

天球参考系及其现状

魏学 金文敬 须同祺

(中国科学院上海天文台)

提 要

本文综述了以牛顿力学为基础的天球参考系工作；讨论了不同天球参考系中的联接；介绍了现代一些重要的地面与空间天体测量计划；简要讨论了天球参考系工作中有待于进一步研究的课题。

一、引 言

为了研究天体的运动，必须建立一个时空参考系。定义并通过实测建立时空参考系，从而能够用力学理论对天文观测作合理的解释，是天体测量学的基本任务之一。

物理学家可以这样陈述他的定理，“建立这样一个参考系，相对于该参考系物体的运动服从某某规律”。对于天体测量学家来说，事情远非这样简单。为了使一个参考系能够成为力学研究的基础，它必须满足如下条件：能够通过实际观测实现，同时又是惯性的，或者可以用严格的数学表达式描述该系统与惯性参考系的关系。在天体测量学中，以牛顿力学为基础的参考系从定义到具体实现大致可以分为五个步骤^[1]：

1. 定义理想的惯性参考系：假定一组天体的运动可以用在某个坐标系中写出的运动方程的解来描述，这些运动方程定义的不动点与常向量便给出了理想惯性参考系的动力学定义；若假定遥远的河外天体相对于理想惯性系是静止(无旋转)的，满足一定条件的一组河外天体的位置便给出了理想惯性参考系的运动(几何)学定义。

2. 选取满足一定条件的天体(基本天体)组成参考架，作为理想惯性参考系的具体体现。

3. 指定(定义)一组参数描述参考架的构形。

4. 通过实际观测确定基本天体的坐标及其随时间的变化规律，如星表、射电源表与历表等。

5. 星表的扩充与加密：由于有限的基本天体不足以提供确定任意天区天体的坐标所需的定标星，有时只能采用二级参考天体的坐标值。

由此可见，“参考系”一词在天体测量学中具有比在物理学中更丰富的内涵，正因为这种差异，也由于参考架(Reference Frame)、坐标系(Coordinate System)与参考系(Reference System)等术语在天体测量学与物理学中都没有明确而一致的定义，它们的使用引起了一些

1992年4月25日收到。

国家八五重点基础研究资助项目。

争议^[2-4]。严格讲, 只有在天体测量学中使用一个新的名词区别这一差异, 才可能消除这几个术语引用中的混乱。但是, 在本文中, 我们尽量按韩春好等人的建议^[2,3]使用这三个术语。

本文对以牛顿力学为基础的天球参考系工作进行简要回顾。

二、恒星参考系

一个可以作为天球参考系基础的坐标系必须是可实现与可复制的^[5,6], 亦即, 对于一颗恒星在该坐标系的坐标值, 两个观测者以同样的程序工作时, 将会得到相同的结果。这就促使天文工作者去寻求一些自然现象所确定的方向和平面用于定义坐标系的基本轴和基本面, 例如重力方向(地平坐标系)与天极方向(赤道坐标系)等。实用的坐标系应该具有下列条件:

1. 在此系统中, 可以方便地对恒星坐标进行直接而精确的测量。

2. 恒星坐标应当与观测者的地理位置无关。

3. 最好是惯性系, 或者该系统与惯性系的关系可以精确确定, 并且, 这一关系随时间只有很小的缓慢变化。

恒星在赤道坐标系中坐标与观测地点无关, 并且, 赤道坐标系与惯性参考系的关系可以由力学理论给出严格的数学表达式^[6]。赤道坐标系描述惯性参考系的精度取决于定义它的三个欧拉角的时间变化——(1) 黄赤交角的长期变化速率; (2) 岁差常数的采用值; (3) 春分点运动——的测定与计算精度。

恒星参考系是由星表具体实现的。基本星表的编纂是一项极其繁琐的工作, 首先要定义作为星表根据的物理模型, 并选用一组常数描述它, 即定义协议参考系统, 一般情况下, 基本星表建立在太阳系动力学理论所定义的动力学参考系上, 如 FK3、FK4 等, 而 FK5 星表考虑了银河系运动学效应, 其岁差是解算恒星自行得到的, 因此, 它是部分运动学的。然后根据大量的观测数据计算基本恒星的位置与自行等参数, 具体实现恒星参考系。表 1 给出了近 50 年来出版的基本星表。

表 1 基本星表一览

名 称	作 者 及 年 代	星 数
GC	B.Boss, 1937	33342
FK3	A. Kopff, 1938	1535
N30	H.R.Morgan, 1952	5268
FK4	W.Fricke, A.Kopff, 1963	1535
FK5	W.Fricke et al., 1988	1535
FK5 Extension	T.E.Corbin, H.Schwan, 1990	3117

用一本基本星表严格定义惯性参考系是不可能的, 但是, 我们可以认为, 在某一观测精度下, 基本星表定义的系统是惯性参考系的近似。为了使基本系统最大限度地逼近惯性参考系, 必须精确测定基本系统的零点改正与岁差常数。

太阳系天体的观测资料一直被用于确定星表零点改正; 月掩星观测也为星表零点的确定

提供了重要资料；由于人造卫星的运动周期短，利用人卫观测确定星表零点有许多优点；基于测距资料的现代历表也可以用来研究光学星表的零点改正与自行系统的误差^[7, 及其参考文献]。

分析恒星自行归算岁差常数是建立惯性参考系的主要手段，将恒星本动速度看作正态分布，可以用最小二乘法分析自行的系统分量(视差动与银河自转效应等)与基本参考系统三条轴的旋转速度(即岁差常数改正等)，这样得到的系统是惯性参考系的一种良好近似。正态分布并不能准确地描述恒星本动速度，正确地说明它，并应用本动速度分布函数的已知特性，可以显著地改进岁差改正数的结果^[8]。另外，确定岁差常数的方法还有：分析行星观测资料，北极管观测以及分析以河外源为背景的恒星自行资料等。

三、河外参考系

只有具有点源特征的一类星体与其他致密河外射电源才是定义射电参考系的理想天体。

无论类星体或其他强河外源，对射电天体测量学特别有利的一个共同特征是，它们都具有平坦的连续谱，即功率谱流不变或仅随频率的增大而缓慢增大。另一方面，类星体的结构对射电天体测量/大地测量结果的影响，可能达到零点几毫角秒^[9, 10]。多数类星体的射电结构具有时变。尽管如此，目前，还没有检测到类星体的自行。许多作者利用较差 VLBI 技术，致力于研究角距很小的类星体对相对位置的变化^[11-14]，与其说这些工作是测定类星体自行，倒不如认为是检测射电参考系与射电天体测量的稳定性更为恰当。这些工作给出了类星体位置变化的上限为每千年几毫角秒。

射电参考系是通过射电源表实现的，因而，编制精确的射电源表是建立河外参考系的一个重要步骤。随着技术水平的提高和观测的增加，射电源表的源数已由早期的几十个增加到几百个，位置精度也由几十毫角秒提高到亚毫角秒量级。表 2 列出了部分已发表的射电源表^[15]。早期的射电源表之间的系统差大致在毫角秒量级。

目前，归算最完善的射电源表是 IERS 射电源表系列，它们是由许多射电源表综合分析得到的。按照射电源表的精度、密度以及与 IERS 系统的符合程度，IERS 数据处理中心将参加分析的射电源表分为维持(maintenance)、加密(densification)与比较(comparison)三类，最后得到的 IERS 射电源表中的射电源分为基本(primary)源、辅助(secondary)与补充(complementary)源三种。在采用新的资料改进已有射电的精度，或者增加新射电源时，IERS 综合分析过程能保证初始定义的轴方向保持不变。

现在，IERS 射电源表系列已有四本，表 3 给出了这些射电源表的主要指标。最新的 IERS 射电源表，RSC(IERS)91 C 01，是 1991 年 GSFC 与 JPL 用综合解给出的两个射电源表的基础上编制而成的。另外六个射电源表作为比较射电源表参加了归算。该射电源表共有 396 颗射电源，赤纬跨度为 $-80^{\circ}-85^{\circ}$ ，图 1 给出了这些射电源的分布。

四、动力学参考系

动力学参考系是利用太阳系内的自然或人造天体实现的。根据力学理论给出的运动学方

表 2 部分射电源表的主要指标

作者	仪器	基线长度(km)	源数	精度(mas)	参考文献
Wade	CEI	35	36	20—40	[16]
Kaplan	CEI	35	16	10	[17]
Morabito	Mark I	8 000—11 000	836	300	[18, 19]
Perley	VLA	<27	700	20—100	[20]
Fanslow	Mark I	8 000—11 000	117	1—5	[21]
Ma, 1986	Mark II	800—6 000	85	0.2—13	[22]
Robertson	Mark II	800—6 000	26	0.5	[23]
Ma, 1988	Mark II	800—11 000	101	0.2—9	[24]
Sovers	Mark I	8 000—11 000	128	0.5—7	[25]
IERS	综合		396	0.3—2.4	[26]

表 3 IERS 射电源表的主要指标(精度以 mas 为单位)

名称	基本源 精度个数	辅助源 精度个数	补充源 精度个数	总源数	赤纬范围	参考文献
RSC(IERS)88 C 01	23	/	/	228		[27]
RSC(IERS)89 C 01	/ 20	/ 177	/ 12	209	-45°—85°	[28]
RSC(IERS)90 C 01	0.3 51	2.4 40	4.6 137	228	-80°—85°	[29]
RSC(IERS)91 C 01	0.3 57	2.4 122	2.2 217	396	-85°—85°	[26]

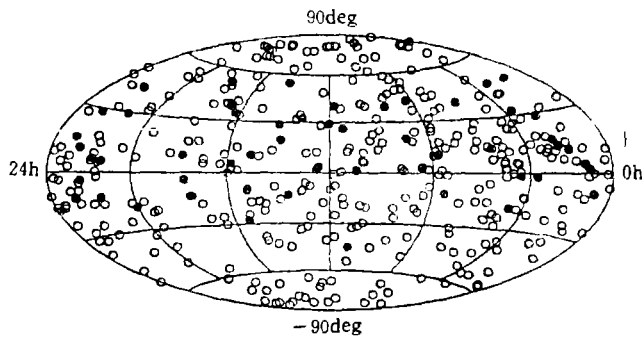


图 1 396 颗 RSC(IERS)91 C 01 射电源的分布

程与观测资料, 利用数字积分方法, 可以计算太阳系天体的位置, 以这些天体不同历元的位置作为基准点, 就定义了动力学参考系, 这样的参考系, 特别是利用新技术资料得到的动力学参考系, 是一种独立的参考系统。

在新技术出现以前, 行星历表建立在光学(子午环)观测的基础上, 所用的观测资料, 在本质上, 是相对于恒星参考系进行较差观测得到的^[30], 因此, 归算过程中产生的系统差与恒星参考系的系统差, 都会影响行星与月亮的观测位置, 从而进入历表。现在, 我们可以反

过来估算以前历表中的误差，应用理论公式，可以估算最近确定的恒星参考系改正对光学历表的影响。另外，用现代历表与光学历表直接进行比较，也可以用来分析光学历表的精度。

光学历表都是参照 FK4 系统建立的，现在已经知道，FK4 系统的改正为：岁差改正： $1''.10/$ 百年，分点改正： $0''.525$ ，分点运动： $1''.275/$ 百年。对于不同类型的观测（目视及照相观测等），这些改正对历表的影响不同，但大致可以估计出，建立在 FK4 系统上的历表在本世纪大约具有 $1''$ 左右的误差^[30]。

1984 年以前的历表与最近编制的历表之间确实存在角秒量级上的系统差。在一系列的研究中^[31及其参考文献]，Stumpff 等人发现 Newcomb 理论与 JPL 历表中的地月运动相差 $1''/$ 百年，他们认为这一差异是以下三种因素之一（或更多）引起的：Fricke 的岁差改正，现代历表中地球的惯性运动或者 Newcomb 瞬时平春分点运动不准确。最近的研究结果倾向于第三种可能：利用 LLR 与 VLBI 观测资料研究地球定向的工作^[32-34]证实了 Fricke 岁差改正的合理性，并且，在 JPL 与 CfA 独立编制的历表中，地球平运动的系统差小于 $0''.01/$ 百年^[35]。

与光学历表不同，现代历表特别是内行星与月亮历表的编制，几乎只涉及到高精度的测距资料：行星表面的雷达回波、空间飞行器上应答器的射电测距以及月面反射器的激光测距，相对位置与惯性运动的计算，甚至参考架的定向，都不依赖任何天球参考系，光学资料只在外行星历表的编制中用到。

Standish 完整地论述了 DE200/LE200 历表所用的观测资料^[36]，雷达测距的误差主要是行星表面的地形引起的，大约在公里量级，雷达闭合技术(Radar closure)可将这一误差减小一个量级，激光测月的误差取决于光束的脉冲宽度、仪器效应以及信噪比等，精度已由 60 年代末的米级提高到厘米级。空间飞行器测距资料的精度大约在几米到几十米之间，光学/射电观测资料的精度在几百至几千公里之间。

行星(月球)历表是由太阳系天体运动方程的数字积分给出，因此，它决定于以下三个方面的因素：运动方程、数字积分程序以及一组初始条件与有关常数。在惯性参考系中写出的运动方程体现了我们对自然规律的理解，数字积分程序是经过严格检查的，具有足够的精度，因此，现代历表定义的动力学参考系是惯性参考系的良好近似，只有初始条件与有关常数的选取，影响历表描述太阳系真实运动的精确程度，反过来，初始条件与部分常数是在对观测资料的拟合过程中确定的，另外一部分常数是通过其他手段确定的。

历表的动力学分点与黄赤交角是由 LLR 资料确定的。LLR 观测资料不仅直接受到地球自转的影响，而且受太阳对月球轨道摄动的影响也很大，因此，LLR 资料可以用来确定赤道面与黄道面，从而定义历表的动力学分点与黄赤交角。

五、参考系联接

各种技术的观测在其“自然”参考系中处理，不仅简单而且精度也高。可是，许多学科的研究中需要综合运用不同观测技术的资料，这时，实现不同参考系之间的联接是十分重要的，表 4 总结了联接不同参考系的主要手段^[37]。

表 4 参考系联接

光学/射电参考系: • 共同天体(射电星、脉泽源)的光学/射电观测
射电/历表参考系: • 较差 VLBI • 毫秒脉冲星 • VLA • 月掩射电星
光学/历表参考系: • 太阳系天体 • 月掩星

射电/光学参考系的联接可以通过两个参考系中共同天体的射电/光学观测来实现。现有的研究表明,射电参考系与恒星参考系之间的一致性在几十到几百毫角秒之间。一些正在实施的射电/光学参考系联接计划的结果将会以更高的精度($0''.03$)实现射电/光学参考系联接^[38]。

多种途径可以实现射电/动力学参考系联接。利用较差 VLBI 技术观测宇宙飞船与类星体,可以确定射电/动力学参考系的相对定向,由此得到的结果表明, JPL 射电参考系与 DE200 动力学参考系的符合好于 20mas ^[37]。脉冲星观测提供了一种联接射电/动力学参考系的方法,这一方法的最高精度已经达到 10mas ,特别是较差 VLBI 技术的应用,可望获得更高的精度^[39]。太阳系天体的射电观测以及月掩射电星观测等也可以用于射电/光学参考系联接。

六、一些重要的天球参考系计划

基本系统向暗星扩充:将 FK5 系统扩充到 9.5mag 恒星的 FK5 扩充星表(3117 颗恒星)业已完成^[40]。IAU 第 8,24 委员会的一个工作小组正着手编制暗星表(约 3000 颗星),将 FK5 系统扩充到 13mag 恒星^[41]。UNSO 南天计划与 HAMBERG 北天计划将把基本系统扩充到几百万颗 $13-14\text{mag}$ 恒星^[38]。汉堡天文台已经开始研制用于 Skymap 2000 计划用的大口径天体测量望远镜,这一计划将把恒星网络扩充到 $17-18\text{mag}$ 恒星^[42]。

CONFOR 计划:原苏联、德国与南斯拉夫的 CONFOR 计划的目标是建立 FK5 系统与射电参考系的联接^[43]。作为这一计划的组成部分,两个星表的观测工作正在进行^[44],RRS2 星表(子午观测)包括 238 个射电源视场中的 2575 颗恒星,每个视场中有 9—13 颗;另一个星表(照相观测)包括每个视场中 20—30 颗 $12-14\text{mag}$ 的恒星。

光学/射电参考系计划:河外光学/射电参考系的一项重要全球联合观测计划是由 de Vegt 等人提出的^[45,46],目前已经得到 347 个河外源的 VLBI 观测位置,以及 54 颗射电星(含 6 颗脉泽源)的射电(VLA)位置^[47]。光学观测正在汉堡与新西兰(UNSO 南天天文台)进行。

Hipparcos 计划:ESA 1989 年 8 月发射的天体测量卫星——Hipparcos 卫星将在二年半到三年的时间内测定 12 万颗恒星的位置($\pm 0''.002$)、自行($\pm 0''.002/\text{yr}$)与视差($\pm 0''.002$),这一计划不仅大大提前了恒星位置、自行与视差的精度,更重要的是 12 万颗恒星构成的均匀的天球参考系。

HST 计划:1990 年 4 月升空的 Hubble 空间望远镜(HST)总科学任务的 15%是天体测量观测,它将恒星视差测定的极限星等提高到 20mag ,而且精度比地面观测高 1—2 个量级,同时,也为参考系联接提供了有力手段^[48]。由于安装故障,HST 发射两年以来,天体

测量工作没能按计划进行, NASA 将于 1993 年 10 月修复 HST, 使其达到原来计划的性能。

空间 VLBI 计划: 目前, 两个空间 VLBI 计划正在筹备之中, 一个是原苏联的 RADIOASTRO 计划(预计在 1994 年发射一个 10 米天线)^[40], 另一个是日本的 VSOP 计划(预计在 1995 年发射)^[50]。IVS 及其前身 QUASAT 计划因没有取得经费而搁浅。空间 VLBI 计划在天体测量中的应用主要在于参考系联接^[51,52], 最近, IVGG/IAG 成立了一个特别研究小组(SSG 2.109)专门负责研究空间 VLBI 计划在天体测量学领域的应用^[63]。

七、结 束 语

新技术的出现, 观测精度的提高, 不仅是对天球参考系工作的有力促进, 同时, 也为地面天体测量学提出了新的任务。空间望远镜的发射, 大口径地面天文望远镜的研制, 使越来越多的暗天体成为天文研究的对象, 为了满足天文研究的要求, 需要改进与扩充基本系统, 增加全球恒星网络的密度, 提高极限星等。这不仅要依靠空间技术, 地面天体测量也应发挥充分的作用, 例如, 探索新的观测方法, 使得能够对低纬甚至赤道天区天体进行绝对观测, 以便更好地联接南北半球的观测, 消除系统误差, 从而改善现有的恒星参考系^[54]; 拓宽观测技术, 使 CCD、光干涉仪等技术在建立高精度的天球参考系中发挥作用。

射电干涉测量技术的出现, 为建立天球参考系提供了新的手段, 受 VLBI 灵敏度的限制, 适于用作建立河外参考系的射电源比较少。VLBA 将把射电天体测量观测的极限流量降至 50mJy, 这样, 将有几个致密射电源成为建立河外参考系的理想目标。

参 考 文 献

- [1] Kalavesky, J. and Muller, I. I., in Reference Frames, ed. by J. Kolavesky et al., p. 1, (1989).
- [2] 韩春如, 博士论文, 南京大学, (1990).
- [3] Han, C. H., Huang, T. Y. and XU, B. X., in IAU Symp. No. 141, p. 99, (1990).
- [4] Eichhorn, H., in IAU Colloq. No. 127, p. 97, (1990).
- [5] 冒蔚等, 基本星表和天球参考系, 科学出版社, (1990).
- [6] Eichhorn, H., Astronomy of Star Position, Friderick Ungar Pub. Co., (1974).
- [7] 魏学, 天文学进展, 6 (1988), 232.
- [8] Wei, X., *Vistas in Astronomy*, 31 (1988), 672.
- [9] Tang, G. Q., PhD Thesis, Chalmers Uni. of Tech., (1988).
- [10] Ulevestad, J. S., in IAU Symp. No. 129, p. 429, (1988).
- [11] Bartel, N., *Nature*, 319 (1986), 733.
- [12] Morabito, D. D., *A. J.*, 90 (1985), 1004.
- [13] Marcaide, J. M. and Shapiro, I. I., *A. J.*, 88 (1983), 1133.
- [14] Shapiro, I. I., *A. J.*, 84 (1979), 1459.
- [15] Ma, C., in Reference Frames, ed. by J. Kovalesky et al., p. 43, (1989).
- [16] Wade, C. and Johnston, K. J., *Astron. Astrophys.*, 156 (1977), 1.
- [17] Kaplan, G. H. et al., *A. J.*, 87 (1982), 570.
- [18] Morabito, D. D. et al., *A. J.*, 91 (1986), 1038.
- [19] Morabito, D. D. et al., *A. J.*, 92 (1986), 546.
- [20] Perly, R. A., *A. J.*, 87 (1982), 859.
- [21] Fanslow, J. L. et al., *A. J.*, 89 (1984), 987.
- [22] Ma, C. et al., *A. J.*, 91 (1986), 1456.

- [23] Roberson, D. S. et al., *A. J.*, 91 (1986), 1456.
 [24] Ma, C., in IAU Symp. No. 128, p. 73, (1988).
 [25] Sovers, O. J. et al., *A. J.*, 95 (1988), 1647.
 [26] IERS, Annual Report for 1989, (1990).
 [27] Arias, E. F. et al., BIH Annual Report for 1987, D-113, (1988).
 [28] IERS, Annual Report for 1988, (1989).
 [29] IERS, Annual Report for 1989, (1990).
 [30] Williams, I. G. and Standish, E. M., in Reference Frames, ed. by J. Kovalesky et al., p. 15, (1989).
 [31] Stumpf, P. and Lieske, J. H., *Astron. Astrophys.*, 130 (1984), 211.
 [32] Newball, X. X. et al., in IAU Symp. No. 129, (1987).
 [33] Sovers, O. J. et al., in IAU Symp. No. 133, p. 461, (1987).
 [34] Herring, T. A. et al., *J. G. R.*, 91 (1986), 4755.
 [35] Standish, E. M., Ephemeris Comparison—PEP 740 VS DE118, Interoffice Memorandum 314, 6-799, JPL, (1987).
 [36] Standish, E.M., *Astron. Astrophys.*, 239 (1990), 252.
 [37] Dicky, O. J., in Reference Frames, ed. by J. Kovalesky et al., p. 305, (1989).
 [38] 李东明, 鲁春林, 罗宝江, 天文学进展, 8 (1990), 244.
 [39] 魏 学, 博士论文, 上海天文台, (1990).
 [40] Corbin, T. E. and Schwan, H., in IAU Colloq. No. 127, p. 238, (1990).
 [41] Corbin, T. E., Comm. of WG on Star List of IAU Commission 8, (1991).
 [42] de veget, C., in IAU Symp. No. 133, p. 211, (1987).
 [43] Gobanov, V. S. et al., in IAU Symp. No. 141, p. 75, (1990).
 [44] Tel' Nyuk-Adamchuk, V. V. et al., in IAU Colloq. No. 127, p. 363, (1990).
 [45] de Vegt, C., in Proc. Hipparcos; Sci. Aspects Input Cat. Prep. II; p. 469, (1988).
 [46] Jhonston, K. J., in IAU Symp. No. 129, p. 317, (1988).
 [47] de Vegt, C., in IAU Colloq. No. 127, p. 246, (1990).
 [48] Nesterov, V. V., in IAU Symp. No. 141, p. 355, (1990).
 [49] Kardashev, N. S. and Slysh, V. I., in IAU Symp. No. 129, p. 433, (1988).
 [50] Morimoto, M. et al., NRO report, No. 183, (1989).
 [51] Adam, J., A lecture on international summer school of theoretical geodesy, Italy, (1988).
 [52] Fejes, I., in IAG Symp. No. 101, p. 158, (1989).
 [53] Adam, J., SSG 2.109 of IUGG/IAG Circular Letter No. 1, (1991).
 [54] 范 瑜, 冒 蔚, 天文学进展, 8 (1990), 207.

(责任编辑 刘金铭)

Celestial Reference Frames and Their Realization

Wei Xue, Jin Wenjing, Xu Tongqi

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academia of Sciences)

Abstract

In this paper, we review the celestial reference frames on the basis of Newtonian mechanics, discuss connections between different celestial reference frames and outline some important astrometric programmes concerning celestial reference frames.