第 47 卷 第 4 期 天 文 学 报 Vol.47 No.4
2006 年 10 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Oct., 2006

岁差常数改正及 FK5 和 Hipparcos 自行系统*

朱 紫

(南京大学天文系 南京 210093)

摘要 许多研究结果表明，FK5 和 Hipparcos 自行系统的关系，与 VLBI 和 LLR 所测定的岁差常数改正值不相符合．利用建立在 FK5 系统上的 PPM 和 ACRS 自行数据的分析，通过多个子样本的考察，发现不论由 PPM 或 ACRS 自行资料，都无法给出一致的岁差改正值和分点运动改正值．从而表明， FK5 自行内部的系统差是产生这种问题的主要因素．

关键词 天体测量，参考系，星表

中图分类号： P 123; **文献标识码**： A

1 引言

根据 1997 年第 23 届 IAU 大会 (京都) 的决议， 1998 年 1 月 1 日起，采用河外致密射电源构成的国际天球参考系 (ICRS), 并由依巴谷星表取代沿用 10 多年的 FK5 星表，成为 ICRS 在光学波段的实现． FK5 和 Hipparcos 分别定义了光学波段上两种不同类型的参考系，前者，坐标轴的空间指向和 J2000.0 动力学分点相固连；后者，参考系的轴指向与建立在以河外射电源为背景的 ICRS 相固连．需要指出的是，尽管 Hipparcos 和 FK5 参考系的原点和基本面都采用了 J2000.0 平春分点及 J2000.0 平赤道面，但概念是不同的．对 Hipparcos 系统而言，仅仅是在星表历元 J2000.0 借用了该历元时刻的分点和平赤道面为天体球面坐标计量的起点，并用 VLBI 、 HST 、地面照相观测以及光学 EOP 观测方法把基于 FK5 系统的 Hipparcos 初始参考架，联系至 ICRS[1,2]．由于 Hipparcos 参考系是建立在国际天球参考系 ICRS 之上，它的坐标轴在其平均观测历元 J1991.25 相对 ICRS 的指向误差为 $\pm 0.6\,\mathrm{mas}$, 坐标系的旋转误差为 $\pm 0.25\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$[1,3], 因而， Hipparcos 系统定义了一个光学波段上的准惯性参考系． FK5 参考系为一动力学系统，并通过岁差常数和分点运动改正值的精确测定过渡到惯性天球参考系．

Fricke 通过选取 512 颗 FK4 和 FK4 Sup 中的星的运动学分析，得到了 FK4 系统的日月岁差改正和分点运动改正 [4,5]．基于 Fricke 的工作， IAU 1976 给出了新的日月岁差常数采用值 $p = 50290.966\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$ (J2000.0)．1984 年起， FK5 系统取代了 FK4

2005-09-29 收到原稿， 2005-11-24 收到修改稿

* 国家自然科学基金 (10333050) 资助项目

系统. FK4 到 FK5 之间的转换主要考虑了采用新的时间系统和 IAU 1976 天文常数系统等. VLBI 和 LLR 的研究很快发现, IAU 1976 岁差常数实际上被高估了, 得出 FK5 系统的日月岁差改正值 $\Delta p \approx -3.0\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$[6,7]. 近年来, 高精度 VLBI 的观测给出 $\Delta p = -2.997 \pm 0.008\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$[8]. Miyamoto & Sôma(M&S) 利用 ACRS 星表 (Astrographic Catalogue Reference Stars, FK5 系统) 的自行资料, 得到 FK5 系统的日月岁差改正值 $\Delta p = -2.7 \pm 0.3\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$[9], 这个结果与 VLBI 和 LLR 的观测结果相吻合. Vondrak[10] 等用光学纬度观测给出岁差改正值为 $\Delta p = -2.16 \pm 0.05\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$.

比较 FK5 系统和 Hipparcos 系统, 可以得到 FK5 和 Hipparcos 参考架之间的旋转关系 [11], 这一旋转关系包括了在 Hipparcos 平均观测历元 J1991.25 时两个系统间坐标轴指向偏差的旋转和两系统之间旋转速率, 分别以旋转矢量 $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ 和旋转速率矢量 $\boldsymbol{\omega}$ 来表示, 有 [11]

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_0 &= (\varepsilon_{0x}, \varepsilon_{0y}, \varepsilon_{0z}) = (-18.8 \pm 2.3, -12.3 \pm 2.3, +16.8 \pm 2.3) \\ \boldsymbol{\omega} &= (\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (-0.10 \pm 0.10, +0.43 \pm 0.10, +0.88 \pm 0.10) \end{aligned}\right\}, \tag{1}$$

其中, $(\varepsilon_{0x}, \varepsilon_{0y}, \varepsilon_{0z})$ 和 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 分别为赤道直角坐标系中的 3 个分量, 它们的单位分别为 mas 和 $\mathrm{mas\,yr^{-1}}$.

如果 FK5 和 Hipparcos 均为刚性参考系, 那么理论上旋转速率矢量 $\boldsymbol{\omega}$ 应该能够反映出 FK5 系统的分点岁差改正, 即有

$$\left.\begin{aligned} \omega_x &= 0 \\ \omega_y &= -\Delta p \sin\varepsilon \\ \omega_z &= +\Delta p \cos\varepsilon - (\Delta\lambda + \Delta e) \end{aligned}\right\}, \tag{2}$$

这里, ε 为黄赤交角, $\Delta\lambda$ 和 Δe 分别为行星岁差改正及分点运动改正. 将 VLBI 和 LLR 日月岁差改正值的测定结果 $\Delta p \approx -3.0\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$ 代入上式, 很明显, (2) 式给出的结果将和 (1) 式中旋转速率矢量 $\boldsymbol{\omega}$ 值相矛盾. 针对这一问题, 许多研究者从 FK5 和 Hipparcos 自行系统分析着手, 分别研究了 FK5 和 Hipparcos 系统之间的问题, 以试图解开或解释两个系统之间的关系与岁差常数改正值相冲突的矛盾.

Mignard & Fraeschlé (M&F) 分别比较了 FK5 和 Hipparcos 、 PPM (Catalogue of Positions and Proper Motions,FK5 系统) 和 Hipparcos 之间的位置及自行的整体旋转, 并分析了 FK5 相对 Hipparcos 系统的区域性误差等问题 [12], 但他们的工作并没有给出关于 FK5 和 Hipparcos 自行系统差与岁差常数改正值这一矛盾的令人信服的解释. 基于 M&F 的工作, Schwan[13] 对 FK5 和 Hipparcos 系统差问题做了更细致研究. 作者曾经分别利用 Hipparcos 和 ACRS 自行数据的银河系运动学分析, 发现在考虑了岁差改正之后, 两个自行系统之间仍然具有明显差异, 这种差异恰好反映了由各自自行系统所得到的银河系运动学参数的差别 [14]. 进一步的研究发现, 无论 PPM 还是 ACRS, 即使考虑了岁差改正问题之后, 它们的自行分别相对 Hipparcos 系统之间, 均存在非常显著的区域性误差、星等差和光谱型差 [15]. 为了解释 FK5 和 Hipparcos 自行系统之间的关系与岁差改正值的矛盾, 在 Walter & Hering (W&H) 的最新工作中 [16], 首先假设 Hipparcos 框架相对于

惯性参考架存在某种偏离，并用运动学分析方法给出 Hipparcos 参考系到惯性参考系的改正；再考虑经过改正后的 Hipparcos 自行系统与 FK5 自行系统之间是否满足公式 (2) 的岁差改正关系，并把不满足 (2) 式的 “残余” 部分归结于 FK5 自行系统的附加改正.

星表的自行系统不仅体现了由其定义的参考系的惯性特征，同时它对银河系运动学和动力学等问题的研究具有关键性影响. 本文将采用两个基于 FK5 系统的大型天体测量星表 PPM 和 ACRS, 并运用运动学分析方法，研究其自行系统对岁差常数改正值测定的影响. 同时，结合过去对 FK5 和 Hipparcos 自行系统的研究结果，进一步讨论两个系统之间的关系等问题.

2 利用 PPM 和 ACRS 自行测定岁差常数改正

利用 FK5 系统的自行资料计算岁差常数改正值的基本原理如下：在以太阳系质心为原点的 FK5 参考系中，观测所获得的恒星自行应包含下列几个方面： (1) 太阳本动的影响； (2) 恒星本动引起的自行贡献； (3) 银河系自转对恒星自行的贡献； (4) 岁差采用值的误差和分点测量误差的影响. 在一理想的惯性参考系下，对太阳附近恒星样本的自行统计分析，能够得到恒星样本群相对这一惯性参考系的各种运动分量，包括星群整体的刚性旋转和较差旋转等；另外还可以同时获得太阳本动速度. 由于 FK5 参考系相对惯性参考系只存在刚性旋转运动，并且引起这种旋转的原因正是岁差常数误差和分点测定误差，因而根据银河系运动学特征，可以从星群相对惯性参考系的刚性旋转分量中，分离出银河系自转成分和 FK5 参考系相对惯性参考系的旋转成分，从而得到 FK5 系统的岁差改正和分点运动改正.

采用上述原理， Fricke[4,5] 和 M&S[9] 分别研究了 FK4 和 FK5 系统的岁差改正问题, 他们所用的方法几近相同. 略有区别的是，Fricke 运用的是简单的二维银河系运动模型 (Oort-Lindblad 模型), 认为银河系在运动学上，只存在沿银道面方向上的旋转运动. 而 M&S 则采用了三维 Ogorodnikov-Milne 运动学模型. 另外，受到 FK4 和 FK4 Sup 星表星数的限制， Fricke 只能不加分类地从中选取了 512 颗恒星样本. 由于缺乏视差资料， Fricke 在分析计算中，采用了视差因子来替代恒星的距离参数. 根据 512 颗恒星自行的运动学分析结果， Fricke 给出了对 FK4 系统的改正： $\Delta p = 1.10 \pm 0''.15/\mathrm{cent}$ 和 $(\Delta\lambda + \Delta e) = 1.20 \pm 0''.16/\mathrm{cent}$. 有关 Fricke 工作的进一步讨论在文 [17] 中给出.

在对 FK5 系统岁差改正问题的研究中，为了克服 FK5 星数太少的问题， M&S 采用了大型照相天体测量星表 ACRS 的高精度部分 ACRS Part 1. 该星表由美国海军天文台的 Corbin & Urban 编制 [18], 含有 250052 颗星，覆盖全天，自行平均精度为 $4.6\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$. 在样本选取上，他们筛选了大约 25000 颗日心距 $r \geq 0.5\,\mathrm{kpc}$ 的 K-M 型巨星，认为该类恒星处于动力学的稳态，在运动学上只表现出沿银盘方向上的银河系自转运动. 由 K-M 型巨星的分析， M&S 给出 $\Delta p = -2.67 \pm 0.28\ \mathrm{mas\,yr^{-1}}$ 和 $(\Delta\lambda + \Delta e) = -1.16 \pm 0.26\ \mathrm{mas\,yr^{-1}}$. 另外，同样采用 Fricke 所使用过的 512 颗星，但利用 FK5 的自行数据， M&S 还试图重新计算经 FK4 岁差改正后，由这 512 颗星所定义的、残留于 FK5 系统的岁差误差影响. 结果显示，用这 512 颗星的子样本根本无法再检测出任何 FK5 系统岁差测量的误差值.

这个结果是显而易见的，原因在于恒星自行由 FK4 向 FK5 系统的转化过程中， Fricke 给出的 FK4 系统的岁差改正和分点运动改正已经完整地反映在 FK5 的自行系统中，而光行差 E 项随时间的变率及时间单位的改变 (儒略世纪数替代回归世纪数) 对 FK5 自行系统几乎不产生影响.

为了检验由 FK5 自行系统所定义的岁差改正和分点运动改正，本文将同时对 ACRS Part 1 和 PPM 自行系统进行运动学的统计研究. 采用多种子样本群分类, 分析自行系统对岁差测定可能存在的各种影响. PPM 星表包括 PPM North 和 PPM South 等，由海德堡天文历算所编制, 星数分别为 181731 颗和 197179 颗, 自行平均误差各是 $\pm 4.3\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$ (北天) 和 $\pm 5.5\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$ (南天)[19,20]. 在分析处理中，和 M&S 的工作相同，将采用分光视差作为恒星的日心距离参数.

在处理模型上，我们仍然采用三维运动学模型. 有关三维运动学模型，文 [9] 和文 [21] 都有详细的推导和说明，本文毋庸细述. 利用自行资料，可以同时测定 9 个运动分量：包括 3 个太阳本动速度分量，在银道直角坐标系中记为 (u_0, v_0, w_0); 3 个刚性旋转分量，它们在赤道直角坐标系中表达为 $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$; 3 个银河系较差旋转分量，其银道直角坐标形式写为 $\left(D_{32}^{+}, D_{13}^{+}, D_{12}^{+}\right)$. 根据本节开始时的讨论，刚性旋转量 $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ 既包含了银河系自转中的刚性旋转成分，其银道直角坐标分量表示为 $\left(D_{32}^{-}, D_{13}^{-}, D_{21}^{-}\right)$, 也包含了 FK5 自行系统的岁差常数改正及分点运动改正，它们满足下列关系

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0548755604 & +0.4941094279 & -0.8676661490 \\ -0.8734370902 & -0.4448296300 & -0.1980763734 \\ -0.4838350155 & +0.7469822445 & +0.4559837762 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_{32}^{-} \\ D_{13}^{-} \\ D_{21}^{-} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\Delta p \sin\varepsilon \\ \Delta p \cos\varepsilon - (\Delta\lambda + \Delta e) \end{pmatrix}, \tag{3}$$

其中， $\varepsilon = 23^\circ.4392911111\,(\mathrm{J2000.0})$ 为黄赤交角；系数矩阵为银道 — 赤道坐标系转换矩阵，它由银道对赤道升交点的赤经 α_N 、银道对赤道升交点的银经 ℓ_N 和银赤交角 i 来确定. 对应于 J2000.0 平赤道，有

$$\alpha_N = 282^\circ.85948, \quad \ell_N = 32^\circ.93192, \quad i = 62^\circ.87175\,. \tag{4}$$

利用自行资料，我们通过运动学方程来计算旋转矢量 $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$, 再由公式 (3) 来解算出银河系刚性旋转矢量 $\left(D_{32}^{-}, D_{13}^{-}, D_{21}^{-}\right)$ 和岁差改正及分点运动改正. 从公式 (3) 可以发现， 3 个方程中共有 6 个未知量，因此无法直接求解方程. 在研究岁差改正问题时，我们简单地令 $D_{32}^{-} = D_{13}^{-} = 0$, 相应地，有 $D_{32}^{+} = D_{13}^{+} = 0$, 亦即回到 Oort-Lindblad 运动学模型下. 这时 D_{21}^{-} 等价于 Oort 常数 B, 而 D_{12}^{+} 则等价于 Oort 常数 A. 另外，行星岁差改正 $\Delta\lambda$ 和分点运动改正 Δe 的影响无法分离，只能得到两者的叠加值 $(\Delta\lambda + \Delta e)$. 经过上述考虑后，公式 (3) 中只剩下 3 个待定量 $\left(D_{21}^{-}, \Delta p, (\Delta\lambda + \Delta e)\right)$.

需要说明的是, 采用三维运动学模型可以用来检验上述附加限制性条件 $D_{32}^{-} = D_{13}^{-} = 0$ 是否成立. 在下面将要讨论的实际计算中，这个附加限制条件都得到了验证.

我们将着重关注岁差改正问题，尽管在对每组子样本的分析时，同时给出了岁差改正计算结果、太阳本动速度及银河系自转常数. 有关银河系运动学问题和运动学参数的分析和讨论，可以在大量的相关文献中找到，因此本文不予详解.

为了和 M&S 的结果直接比较，我们分别分析 PPM 和 ACRS 星表中的 K-M 型巨星. 同时，考虑到岁差常数应该体现参考系的整体特性，而不应该仅仅由该系统内某种特定的子样本群来定义，所以，在对 PPM 和 ACRS 自行的分析中，尽可能将各种类型的所有星一并处理. 另外，在处理时需要恒星的视差数据，因此对无视差资料来源的星都被排除在分析之外.

在所有样本组的处理中，恒星距银道面的高度均被限制在 $|z| \leq 0.5\,kpc$. 为了检验星等差所产生的可能影响及近距星速度弥散度对参数估计带来的问题等，我们分别给出了子样本群在日心距 $0.0\,\mathrm{kpc} < r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$ 、$0.1\,\mathrm{kpc} \leq r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$ 、$0.2\,\mathrm{kpc} \leq r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$ 等的结果. 由于现有样本中 $r > 0.7\,\mathrm{kpc}$ 的数星很少, 因此日心距下限最大的一组为 $0.7\,\mathrm{kpc} \leq r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$. 在计算各参数值时采用了最小二乘估计，并运用逐步迭代方法和剔除少数速度残差大于 2.6σ 的样本，最终给出稳定的参数解. 对于 PPM 和 ACRS 的所有已知视差的星及 K-M 型巨星，表 1 分别给出了相应的运动学参数和岁差改正测定值.

表 1 分别利用 PPM 和 ACRS Part1 自行事件测定岁差常数改正

Table 1 Kinematical solutions of precession corrections derived from the proper motions of stars in PPM and ACRS Part 1 catalogues

	No. of stars	u_0 (km/s)	v_0 (km/s)	w_0 (km/s)	D_{12}^{+} (mas/yr)	D_{21}^{-} (mas/yr)	Δp (mas/yr)	$\Delta\lambda + \Delta e$ (mas/yr)
Solutions from all PPM stars								
$0.0\,\mathrm{kpc} < r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$	202701	6.10±0.01	7.59±0.01	2.78±0.01	2.24±0.04	−1.23±0.03	−4.00±0.08	−1.20 ± 0.09
$0.1\,\mathrm{kpc} \leq r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$	155197	7.65±0.04	12.34±0.04	6.40±0.04	2.23±0.05	−1.19±0.04	−3.37±0.10	−1.30 ± 0.10
$0.2\,\mathrm{kpc} \leq r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$	104497	9.21±0.08	14.64±0.08	7.71±0.08	1.92±0.06	−1.42±0.05	−3.33±0.13	−1.66 ± 0.14
$0.3\,\mathrm{kpc} \leq r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$	79375	9.73±0.13	16.85±0.11	8.79±0.12	1.96±0.06	−1.48±0.06	−3.37±0.15	−1.85 ± 0.16
$0.4\,\mathrm{kpc} \leq r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$	58139	10.84±0.18	18.82±0.16	9.68±0.17	1.98±0.07	−1.40±0.07	−3.69±0.18	−2.17 ± 0.19
$0.5\,\mathrm{kpc} \leq r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$	39680	11.41±0.25	19.99±0.22	10.68±0.23	2.10±0.09	−1.20±0.09	−3.85±0.23	−1.97 ± 0.24
$0.6\,\mathrm{kpc} \leq r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$	23027	10.67±0.38	20.55±0.33	11.01±0.35	2.27±0.12	−1.49±0.12	−3.97±0.33	−2.20 ± 0.34
$0.7\,\mathrm{kpc} \leq r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$	10871	9.87±0.62	20.75±0.55	11.21±0.57	2.74±0.18	−1.35±0.19	−4.91±0.52	−2.39 ± 0.55
Solutions from all stars in ACRS Part 1								
$0.0\,\mathrm{kpc} < r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$	154070	5.72±0.02	10.51±0.02	4.53±0.02	2.80±0.05	−1.54±0.04	−2.27±0.10	0.04±0.10
$0.1\,\mathrm{kpc} \leq r \leq 1.0\,\mathrm{kpc}$	128790	8.12±0.04	12.32±0.04	6.51±0.04	2.38±0.05	−1.77±0.04	−2.12±0.11	−0.11 ± 0.11

表 1　(续)

Table 1　(continued)

	No. of stars	u_0 (km/s)	v_0 (km/s)	w_0 (km/s)	D_{12}^{+} (mas/yr)	D_{21}^{-} (mas/yr)	Δp (mas/yr)	$\Delta\lambda+\Delta e$ (mas/yr)
0.2 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	86004	10.45±0.09	15.10±0.08	8.01±0.09	2.17±0.06	−2.01±0.06	−1.71±0.14	−0.22 ± 0.15
0.3 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	66128	11.36±0.14	17.65±0.12	9.11±0.13	2.25±0.07	−2.19±0.07	−1.37±0.17	−0.20 ± 0.18
0.4 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	48860	12.48±0.20	19.70±0.17	9.97±0.18	2.39±0.08	−2.20±0.08	−1.51±0.20	−0.29 ± 0.21
0.5 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	33532	13.38±0.27	20.88±0.24	11.36±0.25	2.50±0.10	−2.13±0.10	−1.79±0.25	−0.29 ± 0.26
0.6 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	19029	13.55±0.42	21.86±0.37	11.95±0.39	2.74±0.14	−2.40±0.13	−1.49±0.35	0.09±0.37
0.7 kpc $\leq r\leq$ 1.0 kpc	8081	13.21±0.73	22.24±0.64	13.69±0.68	3.17±0.21	−2.42±0.22	−2.73±0.59	−0.68 ± 0.62
Solutions from K-M giants in PPM								
0.0 kpc$< r\leq$ 1.0 kpc	56962	6.27±0.09	15.02±0.08	6.17±0.09	2.59±0.08	−0.72±0.07	−4.15±0.17	−2.57 ± 0.18
0.1 kpc $\leq r\leq$ 1.0 kpc	56232	7.58±0.11	17.17±0.10	7.29±0.11	2.77±0.08	−0.86±0.07	−3.91±0.17	−2.51 ± 0.18
0.2 kpc $\leq r\leq$ 1.0 kpc	52926	8.47±0.14	19.64±0.13	8.24±0.14	2.57±0.08	−1.09±0.07	−3.86±0.17	−2.57 ± 0.18
0.3 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	47009	8.95±0.18	20.93±0.16	8.98±0.17	2.62±0.09	−1.23±0.08	−3.88±0.19	−2.50 ± 0.20
0.4 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	38138	10.80±0.23	22.21±0.20	9.85±0.22	2.49±0.10	−1.09±0.09	−4.36±0.22	−2.77 ± 0.23
0.5 kpc $\leq r\leq$ 1.0 kpc	27998	11.33±0.31	22.16±0.27	10.87±0.29	2.58±0.12	−0.92±0.11	−4.48±0.26	−2.50 ± 0.27
0.6 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	16751	10.64±0.46	22.34±0.39	10.96±0.42	2.63±0.15	−1.21±0.14	−4.64±0.36	−2.76 ± 0.38
0.7 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	7540	10.00±0.77	23.04±0.66	10.91±0.71	3.33±0.22	−1.14±0.22	−5.64±0.57	−3.10 ± 0.60
Solutions from K-M giants in ACRS Part 1								
0.0 kpc$< r\leq$ 1.0 kpc	48215	6.52±0.11	15.63±0.10	6.50±0.11	2.72±0.09	−1.19±0.08	−2.28±0.18	−1.19 ± 0.19
0.1 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	47886	8.10±0.12	18.16±0.11	7.54±0.12	2.74±0.09	−1.24±0.08	−2.33±0.18	−1.27 ± 0.19
0.2 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	45518	9.55±0.15	20.70±0.14	8.65±0.15	2.63±0.09	−1.49 ± 0.08	−2.24±0.19	−1.31 ± 0.20
0.3 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	40660	10.54±0.19	21.77±0.17	9.47±0.18	2.65±0.10	−1.73±0.08	−2.21±0.21	−1.34 ± 0.21
0.4 kpc $\leq r\leq$ 1.0 kpc	33526	12.19±0.24	22.78±0.21	10.34±0.23	2.59±0.11	−1.79±0.09	−2.57±0.23	−1.50 ± 0.24
0.5 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	24717	13.07±0.33	22.83±0.28	11.66±0.31	2.62±0.12	−1.78±0.11	−2.64±0.28	−1.24 ± 0.29

表 1 (续)

Table 1 (continued)

	No. of stars	u_0 (km/s)	v_0 (km/s)	w_0 (km/s)	D_{12}^{+} (mas/yr)	D_{21}^{-} (mas/yr)	Δp (mas/yr)	$\Delta\lambda+\Delta e$ (mas/yr)
0.6 kpc$\leq r\leq$ 1.0 kpc	14657	13.39±0.49	23.06±0.42	12.11±0.45	2.67±0.16	−2.18±0.15	−2.40±0.38	−0.94 ± 0.40
0.7 kpc $\leq r\leq$ 1.0 kpc	5960	13.57±0.88	23.79±0.75	13.35±0.81	3.33±0.25	−2.23±0.26	−3.42±0.64	−1.49 ± 0.67

根据表 1 给出的结果，我们分析日月岁差改正 Δp 的测定值和行星岁差改正与分点运动改正 $(\Delta\lambda+\Delta e)$ 的测定值，发现如下问题：

(1) 无论是对所有星的测量还是由 K-M 型巨星的测量，用 PPM 自行和用 ACRS 自行所获得的 Δp 及 $(\Delta\lambda+\Delta e)$ 均存在非常明显的系统差. 这一系统差 $|\Delta p_{\rm PPM}-\Delta p_{\rm ACRS}|$ 和 $|(\Delta\lambda+\Delta e)_{\rm PPM}-(\Delta\lambda+\Delta e)_{\rm ACRS}|$ 均略大于 $1\,{\rm mas\,yr^{-1}}$. 这一结果显示出 PPM 自行与 ACRS 自行之间是有显著系统差的，尽管两者都是建立在 FK5 系统之上. 事实上，由于 FK5 星数太少， PPM 和 ACRS 都不得不通过一个中间星表 IRS (International Reference Stars[22], 含 36027 颗星) 而构筑到 FK5 之上. 在编辑星表过程中，要使得 PPM 或 ACRS 的坐标框架精确校准到 FK5 系统上是非常困难的. 根据 Röser 的分析，在 PPM 的平均观测历元，它的坐标轴指向相对 FK5 系统的偏差可能在 5 mas 量级，而在自行方面则有可能在 $2\,{\rm mas\,yr^{-1}}$ 左右 [23]. 因此，无论是 PPM 还是 ACRS, 都不能完全代表 FK5 参考系.

(2) 在 PPM 和 ACRS 星表中，我们分别各选取了两组样本，即取全部的星为一组，而取 K-M 型巨星为另外一组. 对于每组样本，我们又分别设定了从 $0.0\,kpc<r\leq 1.0\,kpc$ 到 $0.7\,{\rm kpc}\leq r\leq 1.0\,{\rm kpc}$ 的 8 个子样本区间. Δp 和 $(\Delta\lambda+\Delta e)$ 随着日心距区间的设定呈现某种规律性的变化，其原因可能非常复杂.

对于日心距较小的近距星，由于恒星横向速度弥散度和日心距成反比，他们对运动学参数的估计值可能会产生更多的扭曲. 另一方面，我们采用了依据恒星速度场在太阳附近一阶展开的数学模型，这样，对于日心距比较大时，数学模型所产生的偏差可能会更为突出. 再者，就日心距大的恒星而言. 为了尽可能地减少模型上的误差和低精度横向速度资料的影响，我们对所有的样本组均设置了 $r\leq 1.0\,{\rm kpc}$ 的限制.

另外，不同星等的恒星和不同类型的恒星在不同日心距 r 的区间里，所占样本的比率也不同. 例如，由于观测星等的限制，绝对星等亮的早型星在离日心距比较远时，会占有更高的比率. 由此，随区间 r 设置的改变，自行系统的星等差、光谱型差和不同类型恒星运动学上的差异等因素，将会在 Δp 和 $(\Delta\lambda+\Delta e)$ 的测定上面反映出来. 有关 PPM 和 ACRS 自行系统的星等差和光谱型差等问题，作者曾做过专门的研究 [15].

(3)VLBI 和 LLR 获得了高精度的 FK5 系统日月岁差改正测定值 $\Delta p\approx -3.0\,{\rm mas\,yr^{-1}}$, 这个结果已得到广泛认可. 在我们上面的结果中，对于 PPM 系统，似乎利用所有星所得到的 Δp 比采用 K-M 型巨星所得的结果更为接近 VLBI 的测量值；而对于 ACRS 自行而言，由 K-M 型巨星所获得的值则更接近 VLBI 的观测结果. 但根据前面的讨论，从表 1 所给出的四组测量中，我们很难判断哪一结果能更真实地反映 FK5 系统的岁差改正.

(4)M&S 利用 ACRS 中的 K-M 型巨星的自行数据得到 $\Delta p = -2.67 \pm 0.28\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$ 和 $(\Delta\lambda + \Delta e) = -1.16 \pm 0.26\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$, 他们选取的样本区间为 $r \geq 0.5\,\mathrm{kpc}$. 同样利用 ACRS 中的 K-M 型巨星和样本空间，我们得到了几乎相同的结果 $\Delta p = -2.64 \pm 0.28\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$ 及 $(\Delta\lambda + \Delta e) = -1.24 \pm 0.29\,\mathrm{mas\ yr^{-1}}$, 尽管所使用的样本数目略有区别. 这里样本数的略有差异是缘于星表交叉认证上的微小不同，交叉认证的目的则是为了得到 ACRS 星的分光及光度资料. 虽然这个结果中的 Δp 和 VLBI 的观测基本相符，但相对我们的表 1 中大量计算结果而言，似乎这一结果只是一个特例，它是否能如实体现 FK5 自行系统的岁差改正也很难让人断言.

顺便一提，和 M&S 在处理方法上略有不同的是，他们在计算中对赤经和赤纬自行采用了不同的常数权重，取赤经自行权重为赤纬自行权重的一半；而我们在计算过程中采用了等权处理方法. 其主要原因是，通过仔细地自行精度分析，很难让我们找出采用这种不等权处理的充分理由.

总之，经过对 ACRS 和 PPM 自行系统的大量分析，对不同的样本群得出了不同的岁差改正值. 除了 ACRS 和 PPM 各自的自行系统与 FK5 之间可能存在系统差外，他们各自系统内部的问题可能起主导作用. 关于 ACRS 和 PPM 自行内部和外部系统差问题，将在下面进一步讨论.

3　FK5 和 Hipparcos 自行系统

鉴于 Hipparcos 卫星空间观测的特性，一般认为 Hipparcos 为一理想的刚性参考系，并且具有很好的内部一致性. 如果 FK5 系统同样为一刚性框架，那么两个自行系统就可以用公式 (2) 直接联系起来，即 FK5 系统的岁差改正和分点运动改正便决定了 FK5 系统相对 Hipparcos 系统的坐标旋转速率 $\boldsymbol{\omega}$; 反过来，当这一旋转速率矢量确定之后，就可以直接求出 FK5 系统的岁差改正值. M&F 和 Schwan 等人分别直接比较了 FK5 和 Hipparcos 自行系统，但得到的旋转速率量 $\boldsymbol{\omega}$ 根本无法解释 VLBI 关于岁差改正的高精度测量结果 [12,13]. 考虑到 FK5 星数比 Hipparcos 星数少得多等原因，M&F 又采用了 PPM 与 Hipparcos 比较，得到 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{PPM-Hip}} = (-0.68 \pm 0.03, 0.83 \pm 0.03, 0.25 \pm 0.03)$. 在考虑岁差常数改正问题时，M&F 试图仅用分量 ω_y 来试算 Δp, 并将 Hipparcos 系统向 ICRS 的连接精度值 $0.25\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$ 也直接代入计算，得出 $\Delta p = -2.2 \pm 0.6\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$, 因而认为这一结果与 VLBI 和 LLR 的测定结果并不矛盾. 显然，此方法和解释是存在一些非常明显的问题. 作者曾经分别用 PPM 、 ACRS 与 Hipparcos 自行系统做过分析，发现无论 PPM 或 ACRS, 都无法通过它们自行系统相对 Hipparcos 系统的整体旋转来解释岁差常数改正问题 [14,15].

在最近的研究中，W&H 试图采用另外一种思路来理解 FK5 自行与 Hipparcos 自行及岁差常数的关系. 他们首先分析了 Hipparcos 自行，并和银河系自转常数联系起来. 在 Hipparcos 自行系统中，扣除了 Oort 常数 B 的影响后，所残留的刚性旋转成分被假设为 Hipparcos 系统的非惯性旋转. 因此在 ICRS 框架下考虑 Hipparcos 系统时，Hipparcos 系统应该进一步将这部分的剩余旋转改正掉. 利用 Kerr & Lynden-Bell 给出的 IAU 1985

银河系运动学常数 [24], 得到 Hipparcos 相对 ICRS 系统的剩余旋转矢量，这一剩余旋转在 z- 轴方向达 $-0.71\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$. 用改正后的 Hipparcos 自行与 FK5 比较， W&H 所得到的两系统之差，仍然不能用 VLBI 的岁差改正值来解释. 这时 W&H 认为，需要对 FK5 自行系统再加一个额外的改正，使得改正后的 FK5 自行与改正后的 Hipparcos 自行之间的系统差，最终能解释 VLBI 给出的 FK5 岁差常数改正 [16].

采用上面方法， W&H 似乎给出 FK5 自行、 Hipparcos 自行和 VLBI 岁差常数改正值关系的自恰解释，但其中仍然存在许多未理清楚的疑点，甚至可以说他们将问题搞的更为复杂了. 首先， W&H 用他们称之为 Oort 常数的 “标准值” 来推算 Hipparcos 系统的剩余旋转就存在概念性问题. 众所周知， IAU 1985 推荐的 Oort 常数是根据 Kerr & Lynden-Bell 对早期相关研究结果的一种简单平均，其中包含了利用早期地面自行所得到的 Oort 常数值. 因此，这种 Oort 常数的 “标准值” 本身，就可能隐含了由于岁差常数采用值所带来的不确定因素. 再者，银河系自转常数仅只反映了特定星群在太阳附近的运动学特征，不同类型的星群所给出的 Oort 常数是不同的，这早已被人们所认知. 另外，W&H 实际上强行将与 VLBI 观测得到的岁差改正值相矛盾的那部分 FK5-Hipparcos 自行系统差，归结于 FK5 的问题，并对 FK5 自行施以系统改正.

作者曾经比较系统地分析过 PPM 和 ACRS 相对于 Hipparcos 自行的系统差，并在 PPM 和 ACRS 自行的区域性误差、星等差和光谱型差等方面，都有过比较详细的研究，指出了过去地面自行系统存在的严重问题 [15]. 这些问题的存在，使得 FK5 系统实际上是一种非刚性的参考系. 正是这种非刚性特征，才使得我们在上一节所给出的由 PPM 或 ACRS 自行所确定的岁差改正和分点运动改正值，都存在较大的不确定性. 因此， FK5 自行系统的内部问题，才是造成我们无法简单地用岁差改正来联系 Hipparcos 自行系统的主要问题.

另外， Hipparcos 系统的惯性精度也是非常值得关注的问题. 在 Hipparcos 向 ICRS 连接计划所采用的各种方法中，要么在数量上缺乏大量可用于连接的观测样本，要么在质量上缺乏高精度的位置和自行数据，而最终的连接结果也只是采用了多种连接方法所得结果的综合. 所以，在 Hipparcos 星表正式发表之后，一些相关连接的研究仍在继续.

4 总结

星表自行系统不仅决定了恒星参考系的惯性特性，同时也对利用自行观测资料研究银河系问题起关键性作用. 根据对 FK5 系统的 PPM 和 ACRS 自行的大量分析，以及对 FK5 和 Hipparcos 自行系统关系的研究，给出下列几点总结：

(1) 在一理想的惯性参考系中考察 PPM 和 ACRS 自行系统，采用银河系运动学分析方法，分别对多种不同样本群计算了相应的岁差改正和分点运动改正. 分别由 PPM 和 ACRS 得到的结果反映出，两个自行系统所给出的岁差改正值存在明显的系统差，表明在整体上两自行系统相差大约 $1.5\,\mathrm{mas\,yr^{-1}}$.

(2) 无论 PPM 还是 ACRS, 岁差改正的测定值都明显地依赖样本群的选取. M&S 给出的岁差改正与现代 VLBI 的观测值相符甚好，但这个结果仅仅是用 ACRS 部分样本所

得出的一个特例.

(3) FK5 和 Hipparcos 自行系统之间，不能简单地用岁差改正和分点运动改正来联系. 只有当 FK5 为一种理想的刚性参考系，并且 Hipparcos 系统被严格地建立在 ICRS 系统之上，这种简单的关系才能成立.

(4) 过去我们通过 PPM 和 ACRS 自行分析发现，以 FK5 为代表的早期地面自行系统，存在比较严重的区域性误差、星等差和光谱型差. 从本文对 FK5 岁差改正的测定结果中，再次突显这种问题的存在，从而进一步证明 FK5 在一定意义上是一种非刚性的参考系.

(5) 在考量 FK5 和 Hipparcos 关系时，除了岁差改正问题和 FK5 内部系统问题之外，Hipparcos 参考系向 ICRS 的外部连接精度问题必须给予充分关注. 尽管目前我们尚没有足够的手段来准确判断 Hipparcos 系统是否存在较大的剩余旋转，但必要的相关研究有助于我们对这一参考系的深入理解. 这也正如同过去对基本参考系的研究一样，使我们能够发现一些可能的问题和寻找解决问题的方法.

致谢　上海天文台金文敬研究员对本文的初稿进行了非常仔细的阅读与认真修改，为本文的完善提出了许多宝贵的建议和意见，作者对此深表感谢！

参 考 文 献

1　Lindegren L, Kovalevsky J. A&A, 1995, 304: 189
2　Kovalevsky J, Lindegren L, Perryman M A C, et al. A&A, 1997, 323: 620
3　Perryman M A C, Lindegren L, Kovalevsky J, et al. A&A, 1997, 323: L49
4　Fricke W. AJ, 1967, 72: 1368
5　Fricke W. Veröffen. Astron. Rechen-Inst., 1977, 28: 52
6　McCarthy D D, Luzum B J. AJ, 1991, 102: 1889
7　Williams J G, Newhall X X, Dickey J O. A&A, 1991, 241: L9
8　McCarthy D D, Capitaine N. IERS Technical Note, 2002, No.29: 9
9　Miyamoto M, Sôma M. AJ, 1993, 105: 691 (M&S)
10　Vondrak J, Ron C. Precession-Nutation Estimates from Optical Astrometry 1899.7-1992.0 and Comparison with VLBI Results. In: Kenneth J, et al. ed. Towards models and constants for sub-microarcsecond astrometry, Proc. of IAU Coll. 180. Washington DC: U.S. Naval Observatory, 2000, 248
11　ESA, The Hipparcos and Tycho Catalogues, 1997, ESA SP-1200
12　Mignard F, Fraeschlé M. A&A, 2000, 354: 732 (M&F)
13　Schwan H. A&A, 2001, 367: 1078
14　Zhu Z, Yang T G. AJ, 1999, 117: 1103
15　Zhu Z, PASP, 2000, 112: 1103
16　Walter H G, Hering R. A&A, 2005, 431: 721 (W&H)
17　Vityazev VV. Astron & Astrophy Transactions, 2002, 21: 1
18　Corbin T E, Urban S E. Astrographic Catalog Reference Stars. Washington DC: USNO, 1991
19　Bastian U, Röser S. Catalogue of Positions and Proper Motions—South. Heidelberg: Astron Rechen-Inst, 1993
20　Röser S, Bastian U. Catalogue of Positions and Proper Motions—North. Heidelberg: Astron Rechen-Inst, 1989
21　Zhu Z. Ap&SS, 2000, 271: 353

22 Corbin T E. International Reference Stars. Washington DC: USNO, 1991
23 Röser S. Reference catalogues—present status and future prospects. In: MacGillivray H T, et al. ed. Astronomy from Wide-Field Imaging, Proc IAU Symp. 161. Dordrecht: Kluwer, 1994, 261-270
24 Kerr F J, Linden-Bell D. MNRAS, 1986, 221: 1023

Precessional Correction and the Proper-Motion Systems of FK5 and Hipparcos

ZHU Zi
(*Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing* 210093)

Abstract Comparing proper motions of the FK5 and Hipparcos, several authors declared that the two proper-motion systems are inconsistent with the value of the precessional correction obtained from VLBI and LLR observations. Based on the proper-motion data from the PPM and ACRS catalogues which are constructed on the FK5 system, the discrepant values of the precessional correction and of the correction of the equinoctial motion, derived from the different subsets of stellar samples, have be found. One of the reasons for those discrepancies should be mostly due to the internal biased proper-motion system of the FK5.

Key words astrometry, reference systems, catalogs