

基于长期多历元资料的加速星识别研究*

刘颖钊^{1,2†} 夏芳¹ 陈悦¹ 傅燕宁¹

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 已有观测研究发现, 约50%的双星系统具有超过百年的轨道周期, 这类具有长周期特性的双星系统通常子星间距离较大, 因此被称为宽距双星。由于其长周期特性, 如果仅依赖短时间跨度的高精度观测数据, 难以得到这类双星的精确轨道参数, 甚至在识别环节也面临挑战。为此, 构建了多历元星表, 在数据拟合过程中引入了基于观测误差和时间因子的新型加权算法, 有效提高了早期低精度观测数据的利用价值。基于匀速直线运动的零假设, 采用卡方显著性检验对星表样本进行筛选, 最终识别出2214颗不符合零假设的加速星, 其中1565颗此前尚未被识别, 可作为新的宽距双星候选源。与现有双星星表进行交叉验证表明, 所发展的基于早期星表的识别方法可实现对宽距双星的高效识别。

关键词 天体测量: 天体测量位置, 星表: 多历元星表, 自行: 长期自行, 恒星: 加速星, 恒星: 双星: 宽距双星

中图分类号: P129; 文献标识码: A

1 引言

天体测量研究的主要目标之一是实现对运动天体的高精度定位, 并在此基础上建立在一定时间范围内适用的实用亮星参考架。而在高精度要求下, 传统的单星匀速直线运动模型将不再适用于描述双星系统子星的运动。由于已知恒星中超过一半以双星形式存在^[1], 其中亮星比例更高, 高精度、高密度的亮星参考架的实现与维护需要考虑双星系统轨道运动的影响。因此, 对于需要应用此类参考架的部门而言, 双星轨道拟合工作尤为重要。

Tokovinin^[2]的研究表明, 大约半数的双星系统轨道周期长度超过100 yr。对于这类长周期(>100 yr)系统而言, 即使两个子星足够亮且观测

到的角距离大于典型望远镜的角分辨率, 其轨道的确定仍具有挑战性, 这是因为可靠轨道的确定需要较高轨道覆盖率的运动学资料。实际上, 即使在尝试识别这类长周期宽距双星时, 也会由于其短时间内观测结果近似于匀速直线运动, 导致识别存在困难。

为了克服这个困难, 在过往的研究中, 观测资料的联合拟合已成为识别双星和拟合双星系统轨道的重要途径。例如Kervella等^[3]利用恒星长期自行异常(Proper Motion Anomaly, PMa)搜寻太阳系邻近区域内的恒星伴星, 利用Gaia DR2 (Gaia Data Release 2)^[4]和Hipparcos^[5]星表的数据, 计算了Hipparcos星表中99%恒星的PMa, 并对其中PMa较大的恒星开展了伴星搜寻工作。尽管Gaia DR2仅基于22个月的数据, 存在一定的局限性, 但

2024-12-26收到原稿, 2025-04-17收到修改稿

* 国家自然科学基金项目(12473074)资助

† yzliu@pmo.ac.cn

与Hipparcos星表结合后,能够获得高精度的PMa.而Makarov^[6]的两历元双星定轨工作,通过对历元差为24.25 yr的Gaia DR2星表和Hipparcos星表中的共有双星进行初步的轨道拟合,对1295个宽距双星系统进行了初步定轨,虽然Hipparcos星表数据精度相对Gaia较低,并且拟合中使用的模型未考虑长时间跨度带来的切平面变化等其他因素,但其提供的双星轨道参数估计值仍有参考价值^[7-8].

尽管观测资料的联合拟合已经在宽距双星系统研究中取得了一定进展,但到目前为止,联合长期多历元资料系统识别加速星的工作尚不多见.原因在于早期资料精度相对较低,难以在以往研究中发挥作用.因此,亟需开展的工作是充分发挥这些早期低精度资料在宽距双星识别中的作用.本文收集了历元早于Hipparcos星表的历史观测资料,并结合近期高精度的短期观测资料,编制了一个时间跨度更长且历元更多的多历元星表.研究了合理提高低精度资料权重的方案,进而对能找到具有长时间跨度观测资料的恒星的长期自行进行拟合,基于匀速直线运动模型的零假设,利用统计方法寻找不符合该模型的加速星,作为宽距双星子星的候选源.

本文第2节阐述多历元星表的编制过程,第3节介绍数值模拟探讨合理的权重分配方案,第4节通过拟合呈现加速星的识别结果,并对这些结果进行了统计分析与评估,第5节为总结与展望.

2 多历元星表

2.1 多历元位置资料

由于识别加速星的目的是筛选出加速度较小的宽距双星子星候选源,想要识别出相对较小的加速度,需要观测资料的时间跨度足够长.所以,多历元星表的母样本,首要要求是拥有距今时间足够长的观测历元位置资料.基于这个要求,我们对观测历元早于Hipparcos星表的观测资料进行了系统调研,筛选出多个观测年代较早的观测星表.

在综合考虑所选星表的观测年代、恒星数量、标准误差等信息后, NPM1.0 (Lick Northern Proper Motion Program: NPM1 Catalog)星表因

为观测年代符合要求且在早期星表中含有最全面的观测资料被选作母样本.该星表由加州Lick天文台从上世纪60年代开始进行观测并于1987年发布^[9],使用的观测资料最早可追溯到1947年,是至今仍在执行的北部天区恒星自行测量项目(Northern Proper Motion Program)所发布的第1批资料,包含大量恒星在J2000参考系的位置和自行资料,同时还提供了方便与其他星表交叉识别的参考信息,包括星等和沿用至今的编号.

本文将局限于讨论母样本中的恒星,它们在多个历元时刻的位置资料来源如下:

1. GSC (Guide Star Catalog)系列的GSC2.2星表^[10]提供每个恒星20世纪80年代后期在J2000参考系下的位置资料;

2. Tycho-2^[11]星表提供每个恒星1990年附近时刻在国际天球参考系(International Celestial Reference System, ICRS)下的位置资料;

3. UCAC (US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog)系列的UCAC5^[12]星表提供每个恒星1998—2000年之间在J2000参考系下的位置资料;

4. 2MASS (The Two Micron All Sky Survey)^[13]星表提供历元时刻为2000年在J2000参考系下的位置资料;

5. WISE (The Wide-field Infrared Survey Explorer)任务给出的AllWISE^[14]星表提供历元时刻为2010.5589在J2000参考系下的观测资料;

6. URAT1 (The U.S. Naval Observatory (USNO) Robotic Astrometric Telescope)^[15]星表提供每个恒星2013年附近时刻在ICRS参考系的位置资料;

7. Gaia 3期数据^[4]提供3个历元时刻(2015.0、2015.5、2016.0)在ICRS参考系下的位置资料.

其中, Gaia、2MASS、AllWISE星表均将星表内恒星位置归算至各自观测时段内的某个历元时刻,尽管这些位置不是由对应时刻直接观测所得,然而作为匀速直线运动模型拟合所得的结果,在同样模型的零假设下的拟合中,仍将其视为观测资料.

2.2 交叉匹配

多历元星表需要的是同一个恒星在长时间跨

度下多个历元的位置, 所以我们需要保证星表间匹配结果的准确性, 避免出现一个恒星在另一个星表中匹配多个恒星的情况. 同时, 由于NPM1.0星表年代较久, 考虑到恒星长期自行, 若交叉匹配半径较小, 则可能导致未匹配现象. 因此, 本研究采用以下方案: 首先进行较大角距离的交叉匹配, 从而避免未匹配现象, 随后基于交叉匹配结果, 利用星等信息对比排除错误匹配项.

在实施上述方案时, 为了减少较大角距离交叉匹配的次数, 我们需要引入一个测光精度高的测光星表作为中间星表. 在中间星表与NPM1.0进行大角距离的交叉匹配后, 利用星等筛选并排除错误匹配的结果, 获得NPM1.0星表恒星在中间星表上的位置, 再使用这个位置资料与其他星表进行匹配和筛选. 这个中间星表选定为APASS (AAVSO (The American Association of Variable Star Observers) Photometric All-Sky Survey) 星表^[16], APASS星表提供了V波段视星等和J2000参考系下J2000.0历元的位置信息, 该星表覆盖约99%的天空, 是一个覆盖范围较广, 星等测量较为准确的测光星表.

在进行交叉匹配时, 首先将APASS星表与NPM1.0星表在J2000参考系下的位置资料进行角距离为15''的交叉匹配, 这个交叉匹配是在X-match网站¹依靠SIMBAD (the Set of Identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data) 星表^[17]参与完成的, 选择较大的角距离是基于NPM1.0星表中恒星最大自行约200–250 mas·yr⁻¹^[9]和两星表历元差约为50 yr的情况. 首次交叉匹配后, 针对一个样本匹配多个结果的现象, 利用两星表的星等信息对比, 筛选并排除错误匹配项.

至此, 成功获得与NPM1.0星表恒星一一对应的APASS星表位置和V波段星等资料, 而2.1节中提到的其他星表都提供了恒星在J2000.0历元时刻的位置, 考虑到其他星表的观测年代与APASS星表更为接近, 后续的交叉匹配均基于APASS星表提供的位置.

基于该方案, 使用APASS星表恒星坐标, 与

2.1节中提到的其他全部星表进行交叉匹配. 匹配双方均使用星表中包含的J2000.0历元时刻的位置, 使用5''作为交叉半径.

完成全部交叉匹配后, 对多历元星表进行基于星等的筛选, 以排除一个样本匹配多个样本的情况. 以测光精度最高的APASS星表为基准, 对比不同星表中同一恒星的V波段星等, 剔除星等差异超过星表中星等误差 1σ 的结果. 其中, Gaia星表的G星等需转换V波段星等后进行比对, 转换公式为^[18]:

$$G - V = -0.0176 - 0.00686(G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}}) - 0.1732(G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}})^2, \quad (1)$$

其中 G 为Gaia星表给出的视星等, V 为V波段的视星等, G_{BP} 、 G_{RP} 分别为Gaia星表给出的蓝光波段和红光波段的星等, 均由Gaia星表提供.

在转换过程中, 需考虑误差的传递, 误差传递公式如下:

$$z = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2)$$

$$m_z^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 m_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 m_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2 m_n^2, \quad (3)$$

其中 m_z 为总误差, m_1 、 m_2 、 \dots 、 m_n 分别为 x_1 、 x_2 、 \dots 、 x_n 的误差, 在本研究的转换中, 需要考虑的是 G_{BP} 、 G_{RP} 的误差.

2.3 修正系统差

将错误匹配结果排除之后, 还需在考虑旋转系统差前提下将所有星表的位置资料转换到ICRS下, 本研究的处理方案是:

- 对于位置资料在J2000参考系下的星表 (NPM1.0^[9]、GSC2.2^[10]、UCAC5^[12]、2MASS^[13]、AllWISE^[14]), 虽然J2000参考系与ICRS参考系的旋转系统差相对于交叉匹配角距离5''是高阶小量, 不影响交叉匹配, 但是在后续工作中, 这个旋转系统差相对于星表自身误差不可忽略. 因此, 需要将上述星表的位置资料从J2000参考系转换到ICRS

¹<http://cdsxmatch.u-strasbg.fr/>

参考系, 这个转换可以依靠Astropy²中提供的转换程序进行;

2. 精度最高的Gaia星表虽然已经在ICRS参考系下, 但与ICRS的旋转系统差相对于自身误差不可忽略, 根据Gaia星表给出的与ICRS旋转系统差^[19], 对Gaia星表的位置资料进行旋转修正;

3. 对于多历元星表中的其他在ICRS参考系下星表(URAT1^[15]、Tycho-2^[11]), 它们与ICRS参考系的旋转系统差远小于其自身位置资料的系统误差, 可忽略不计.

完成上述旋转之后, 我们成功将所有星表资料归算至ICRS参考系下, 从而完成多历元星表的制作. 最终生成的多历元星表包含样本6310个, 每个样本共计有10个历元时刻的观测位置, 历元顺序如下: NPM1.0 (1960s)、GSC2.2 (1980s)、Tycho-2、UCAC5 (1990s)、2MASS (2000s)、AllWISE、URAT1、Gaia DR1、Gaia DR2、Gaia DR3 (2010s).

多历元星表包含的各个星表历元和标准误差情况如表1所示. 其中, 历元给出范围的星表, 每个恒星有单独的观测历元. NPM1.0星表中所有恒星的位置标准误差均估计为150 mas, 其余星表中每个恒星有自己的观测标准误差, 表中标准误差为该星表恒星标准误差大致数量级. 多历元星表数据已保存于中国虚拟天文台(Chinese Virtual Observatory, China-VO)论文数据贮藏库³的多历元星表文件中. 其中, 第1列为恒星GaiaID, 2-51列为10个星表中收集到的数据, 每个星表包括5栏数据, 按序分别是历元时刻、赤经(单位 $^{\circ}$)、赤经标准误差(单位mas)、赤纬(单位 $^{\circ}$)、赤纬标准误差(单位mas), 52-55列为Gaia DR3星表的视差(单位mas)、视向速度(单位 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)、赤经自行(单位 $\text{mas} \cdot \text{yr}^{-1}$)、赤纬自行(单位 $\text{mas} \cdot \text{yr}^{-1}$).

3 多历元观测资料权重分配方案

拟合中最常见的权重 w 分配方案是 $w = \frac{1}{\sigma_i^2}$, 其中 σ_i 是每个观测数据的标准误差. 然而, 由于多

历元星表中观测资料标准误差差异很大, 最大差距可达到4个数量级, 直接使用该方案NPM1.0星表中的数据难以发挥作用. 因此, 需要在根据标准误差分配权重的基础上进行合理改进.

表 1 各个星表对应历元与标准误差
Table 1 Epochs and standard errors
corresponding to each star catalog

Catalog	Epoch	Standard error/mas
NPM1.0	1960s	150
GSC2.2	1980s	100
Tycho-2	Around 1990	50
UCAC5	1998-2000	10
2MASS	2000s	70
AllWISE	2010.5589	5
URAT1	2013-2015	5
Gaia DR1	2015.0	0.1
Gaia DR2	2015.5	0.05
Gaia DR3	2016.0	0.025

在对拟合中的权重分配方案进行探究时, 首先考虑直线运动模型

$$\begin{cases} x = x_0 + v_{x_0}(t - t_0), \\ y = y_0 + v_{y_0}(t - t_0), \\ z = z_0 + v_{z_0}(t - t_0), \end{cases} \quad (4)$$

或矢量形式

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0(t - t_0), \quad (5)$$

其中 t_0 是时间零点. 该模型有6个独立的模型参数, 即

$$\begin{cases} \mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0), \\ \mathbf{v}_0 = (v_{x_0}, v_{y_0}, v_{z_0}), \end{cases} \quad (6)$$

其中速度参数对观测数据的敏感度可通过图1表示. 图中的 x 是位置, t 是时间, σ 是位置的标准误差, v_{x_0} 是实际速度, δ 是误差 σ 所导致的速度参数误差. 则由图1可以得到速度参数对观测数据的敏

²<https://docs.astropy.org/en/stable/coordinates/index.html>

³<https://nadc.china-vo.org/res/r101535/>

感度的偏微分关系:

$$\frac{\partial v_{x_0}}{\partial x} = \frac{1}{t - t_0}, \quad (7)$$

其中, ∂x 可理解为 σ , 而 ∂v_{x_0} 则为 δ , 由此可见, 观测数据对模型参数的限制不仅依赖于其标准误差, 还与时间因子相关. 因此, 为了更合理地设置权重需考虑时间因子, 在设置权重时, 应以 $\frac{\sigma}{t - t_0}$ 代替观测数据标准误差 σ .

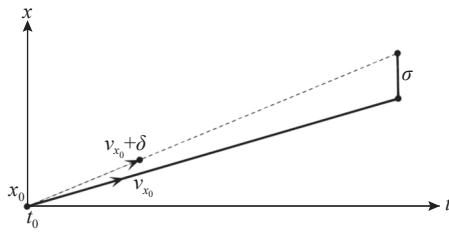


图 1 考虑直线模型的速度误差分析图

Fig. 1 Velocity error analysis considering the straight line model

为验证上述方法的有效性, 进行了数值模拟实验, 首先, 采用如下方法生成接近多历元星表数据的模拟数据:

1. 参考多历元星表内恒星的实际数据的统计范围, 生成在对应范围内随机的6参数, 即赤经自行、赤纬自行、视向速度、初始视差、初始赤经和初始赤纬(pmra_0 、 pmde_0 、 rv_0 、 plx_0 、 RA_0 、 DEC_0).

2. 将第1步中得到的6参数转换为三维坐标下的初始位置(x_0 , y_0 , z_0)和速度(v_{x_0} , v_{y_0} , v_{z_0}).

3. 计算出模拟样本在多历元星表中各个历元时刻的三维坐标($x_0 + v_{x_0}t_i$, $y_0 + v_{y_0}t_i$, $z_0 + v_{z_0}t_i$), 将三维坐标转换回观测值(RA_0 , DEC_0)的形式.

4. 根据各个坐标所对应历元时刻的不同, 结合表1给出的对应标准误差, 赋予服从高斯分布的随机数作为模拟数据误差.

生成模拟数据之后, 因拟合目标为寻找不满足匀速直线运动模型的加速星, 故将位置作为已知量, 长期自行作为待求量进行最小二乘拟合. 使用方法如下:

1. 在真值(pmra_0 , pmde_0)的邻域内设置待求参数(pmra , pmde)的初始猜测值, (rv_0 , plx_0 , RA_0 , DEC_0)设置为已知量, 使用上述6参数计算得到各

历元时刻的赤经、赤纬理论值(RA_C , DEC_C).

2. 将上一步得到的(RA_C , DEC_C)与观测值(RA_0 , DEC_0)进行对比, 目标函数为

$$\chi_t^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O - C)^2}{\sigma_{f_i}^2}, \quad (8)$$

其中 O 为观测值(RA_0 , DEC_0), C 为理论值(RA_C , DEC_C), σ_{f_i} 是用于分配权重的参数, 权重 $w = \frac{1}{\sigma_{f_i}^2}$. χ_t^2 是以(pmra , pmde)为变量的函数, 利用 minisize 函数反复迭代, 计算到 χ_t^2 变化小于 10^{-10} 时, 获得使 χ_t^2 取最小值的(pmra , pmde).

在模拟中, 因已知样本的真实自行, 所以可以直接用拟合结果与真实的自行对比来评判拟合的优劣. 为了比较不同的权重分配方案, 把 $\sigma_{f_i} = \sigma_i$ 的权重分配方案记作方案一(F1). 方案二(F2)是在分配权重时考虑时间因子,

$$\sigma_{f_i} = \frac{\sigma_i}{t_i - t_0}, \quad (9)$$

其中 t_0 取误差最小的观测数据所在历元, t_i 为当前观测数据的历元. 经 10000 组数据测试, F2 拟合得到的自行相对真实自行的偏差绝对值 Δ_2 的平均值比 F1 拟合得到的偏差绝对值 Δ_1 的平均值小 40%, 且对 97% 样本有 $\Delta_2 < \Delta_1$, 测试数据的偏差对比如图 2 所示, 横坐标为 Δ_2 与 Δ_1 的比值, 由此可知, F2 优于 F1. 根据上述结果, 确定 F2 为拟合多历元数据的权重分配方案.

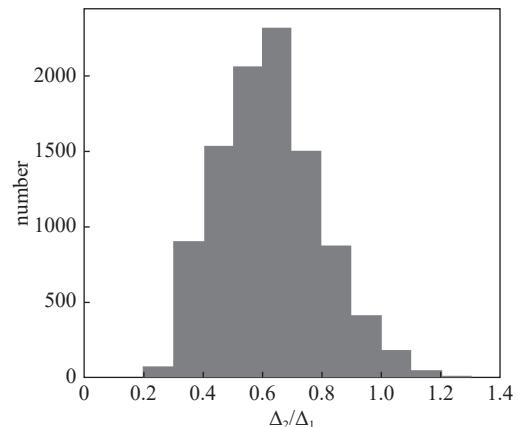


图 2 Δ_2 与 Δ_1 的对比

Fig. 2 The comparison of Δ_2 with Δ_1

4 多历元观测资料拟合结果与分析

4.1 多历元观测资料拟合结果

数值模拟实验完成后, 采用第3节使用的拟合方法且以F2为权重分配方案对多历元星表的观测数据进行拟合。以精度最高的Gaia DR3的赤经、赤纬作为初始赤经和赤纬, 将Gaia DR3历元时刻设置为初始时刻。同样, 由于近期数据观测精度高, 短期自行更为可靠, 故将Gaia DR3自行设置为长期自行初始猜测值。经计算, 对于多历元星表内恒星, 视向速度对视差和自行的影响可忽略不计。即使是影响最大的恒星, 运动100 yr视差和自行积累的变化也均不足Gaia DR3给出的视差和自行误差的10%。因此, 视向速度和视差也使用Gaia DR3给出的视向速度和视差。以此为出发点拟合得到了6310个样本的长期自行结果。

为验证拟合所得长期自行的可靠性, 我们将结果与TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution)

星表^[20]和APOP (Absolute Proper Motions Outside the Plane)星表^[21]给出的自行进行对比, 分别发现有98%和97%的样本偏差在标准误差的 3σ 范围内, 表明我们的拟合结果可靠。

卡方检验可用于评估模型和观测值的符合程度, 选择该方法对多历元星表中的加速星进行筛选, 零假设为恒星做匀速直线运动。将拟合所得到的目标函数 χ^2_t 归一化获得卡方检验值 χ^2 , 置信水平取99.9%。如果所得的 χ^2 值超过置信水平99.9%所对应的标准值, 则零假设不成立, 恒星为加速星。

上述拟合的自由度 $N = 16$, 置信水平取99.9%时的 χ^2 值约为39.252, 有2214个样本的 χ^2 大于该值, 表明其有99.9%的概率不符合恒星做匀速直线运动的零假设。而置信水平取0.1%的 χ^2 值为3.942, χ^2 小于该值的样本被视为匀速星, 样本中有229个样本 χ^2 小于这个值。加速星与匀速星样本已分别保存于China-VO论文数据贮藏库, 文档示例分别如表2与表3所示, 所有自行单位均为 $\text{mas} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。

表 2 加速星星表示例. 2–6列分别为拟合所得的自行, 卡方检验值及自行的标准误差.

Table 2 Sample of accelerating star catalog. Columns 2–6 are the fitted proper motions, chi-square values and the standard errors of proper motions.

GaiaID	pmra	pmde	χ^2	σ_{pmra}	σ_{pmde}
Gaia DR3 6329108341902775296	6.510328262	-28.0338551	42.35856628	8.218743319	8.21909273
Gaia DR3 3615672420902533120	-19.35526398	4.432875206	43.75579218	1.810253181	1.808955923

表 3 匀速星星表示例. 2–6列分别为拟合所得的自行, 卡方检验值及自行的标准误差.

Table 3 Sample of uniform motion star catalog. Columns 2–6 are the fitted proper motions, chi-square values and the standard errors of proper motions.

GaiaID	pmra	pmde	χ^2	σ_{pmra}	σ_{pmde}
Gaia DR3 2972096375031886464	-0.659968721	-2.074	1.817766754	0.423472677	0.423476464
Gaia DR3 2989235772741630720	3.39415657	-7.013852638	3.351558704	0.396780965	0.39702421

将这些样本与已有的加速星表进行交叉匹配, 参与的星表包括Gaia DR3非单星星表(Gaia DR3 Part 3. Non-Single Stars, Gaia DR3 NSS)^[22]、El-Badry等人制作的Gaia宽距双星星表^[23]、Tian等人制作的Gaia超宽距双星星表^[24]、还有Brandt^[25]

基于Hipparcos和Gaia数据制作的加速星表。完成与上述加速星表匹配后, 匹配结果显示被本研究识别为加速星的2214个样本中, 有649颗已被上述星表的一个或多个识别为双星或加速星。而其他1565颗恒星尚未被识别, 可作为宽距双星星候

选源.

4.2 多历元观测资料拟合结果的检验

为评估本文方法对寻找不同类别潜在双星的有效性, 选取了部分双星星表, 与研究结果进行交叉匹配, 情况如下:

1. Gaia DR3 NSS中的I/357/tbooc星表^[22], 提供了134598个系统的天体测量双星轨道模型参数, 多历元星表与该星表匹配获得样本33个, 其中加速星24个, 匀速星1个.

2. 与El-Badry等人制作的Gaia宽距双星星表^[23]匹配得到样本26个, 其中加速星24个, 匀速星0个.

3. 与Tian等人制作的Gaia超宽距双星星表^[24]匹配得到样本212个, 其中加速星62个, 匀速星3个.

结果显示, 本研究所用方法对宽距双星识别效果较好, I/357/tbooc星表中有极少数样本被判断为匀速星, 而对超宽距双星识别效果较差. 为探究上述情况的原因, 对各个星表中的相关数据进行了进一步的分析.

3个星表中, I/357/tbooc星表提供了最完善的双星轨道信息^[22], 将该星表与多历元星表匹配上的恒星相关信息进行提取和处理后, 获得了这些恒星的角半长径与周期, 这些恒星的双星系统轨道角半长径与周期分布如图3. 图中横坐标为周期 T , 单位为天, 纵坐标为角半长径 a , 单位为mas, \times 为被判定为有99.9%概率做加速运动的恒星, \bullet 为其他匹配上的恒星.

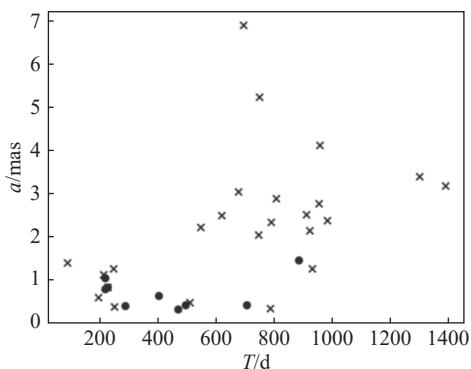


图3 与I/357/tbooc匹配恒星的角半长径与周期分布

Fig. 3 The distribution of the angular semi-major axis and period of the stars matched with I/357/tbooc

如图3所示, 这些双星系统的角半长径都在1 mas甚至0.1 mas的量级, 而多历元星表中年代最早的观测数据标准误差为150 mas, 90年代的数据标准误差在10 mas的数量级, 远大于该星表样本的双星角半长径. 从图中点分布亦可看出, 被判断为加速星的恒星和其他恒星难以进行有效区分. 因此, 由于早期星表较大的误差, 本研究对周期较短、角半长径较小双星的识别有一定的局限性, 这类双星的识别更适合依靠高精度的观测资料.

针对匹配结果较好的宽距双星星表^[23], 计算26个恒星在不同时刻的运动理论位置 C 和实际观测位置 O 的偏差, 结果如图4所示. 图中横轴为历元, 纵轴为该历元的 $|O - C|$ 的对数, \times 为赤经, \bullet 为赤纬. 由图4可以看出, 在离拟合时刻较近的历元偏差较小, 而稍远一些偏差逐渐增大, 到了早期资料部分, 出现了较大的偏差且偏差大于观测误差. 因此, 在加入了早期资料之后, 本研究观测资料的时间跨度足以发现宽距双星长期自行异常.

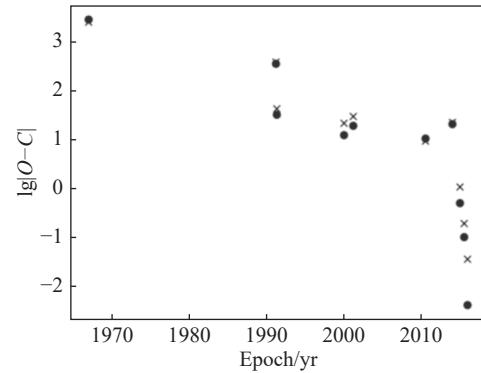


图4 26个宽距双星在不同历元时刻偏差平均值

Fig. 4 The average deviations of 26 wide binaries at different epochs

而针对超宽距双星星表^[24], 大部分样本未被判断为加速星. 推测原因在于超宽距双星的子星距离极大, 周期极长, 多历元星表50 yr的历元差已经不足以发现超宽距双星的长期自行异常. 为验证这一假设, 本文对多历元星表与El-Badry等人的宽距双星星表^[23]和Tian等人的超宽距双星星表^[24]匹配样本的子星距离进行了统计, 统计结果如表4.

如表4所示, 超宽距双星星表样本普遍子星距

离极大, 远大于宽距双星星表中的样本. 假设超宽距双星星表的样本子星质量均为太阳质量, 并且子星距离等于两倍轨道半长径. 则与超宽距双星星表交叉匹配得到的212个样本的周期平均数约为710万年, 中位数约为510万年. 考虑到双星系统的

实际半长径值必然大于假设值, 即使无法获得子星质量, 亦可推断这些超宽距双星的周期数量级约为百万年, 而本研究的多历元星表时间跨度仅为约50 yr, 因此难以发现其长期自行的异常.

表 4 El-Badry等^[23]的宽距双星星表与Tian等^[24]的超宽距双星星表样本子星距离对比

Table 4 The component star distance comparison between wide binaries catalog of El-Badry et al.^[23] and ultrawide binaries catalog of Tian et al.^[24]

Distance of component stars	Average number	Median number
Distance of component stars (wide binaries)/au	6066	2131
Distance of component stars (ultrawide binaries)/au	79719	74742

综上所述, 本研究在处理多历元观测资料和识别加速星方面, 对周期较短或极长的双星系统存在局限性, 但对于周期较长的宽距双星能够准确识别.

5 总结与展望

本研究整合了NPM1.0、GSC2.2、Tycho-2、UCAC5、2MASS、AllWISE、URAT1、Gaia DR1、Gaia DR2、Gaia DR3提供的10个历元时刻的位置资料, 其时间跨度约为50 yr, 编制了一个包含6310个样本的多历元星表. 使用结合时间因子和误差的权重分配方案对多历元星表的数据进行了联合拟合, 发现了2214颗加速星, 其中649颗已被识别, 1565颗尚未被识别. 通过与已知双星星表的交叉匹配及对匹配结果的进一步分析, 验证了本研究的方法可以对周期较长、子星距离较大的宽距双星进行有效识别.

上述2214个样本的V波段星等范围为6.934–12.825, 样本分布的天区范围为赤纬 -16° – 90° , 将样本的位置转换至黄道坐标系下, 如图5所示. 未来研究中, 可利用小口径望远镜对样本进行系统性的自主观测, 从而获取新的位置数据.

在将来的研究中, 首先对于判定为加速星但尚未被识别的1565颗恒星, 可将其视为宽距双星

候选源, 开展进一步研究. 不仅可以收集这些恒星更多的观测资料, 对其轨道进行更精确的拟合, 还可以对这些恒星进行自主观测, 寻找这些样本可能存在的未被发现的伴星.

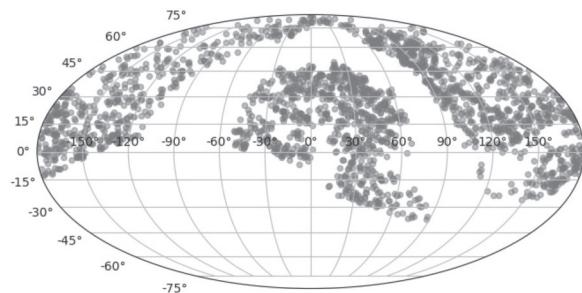


图 5 加速星样本在黄道坐标系下的分布

Fig. 5 Distribution of accelerating star samples in the ecliptic coordinate system

另一方面, 基于本项工作的原理和流程, 未来可寻找其他与NPM1.0类似的早期观测资料, 例如vizier中收录的早期CPD (Cape Photographic Durchmusterung)、CPC (Cape Photographic Catalog)资料. 更值得利用的资料是早期底片的数字化资料, 比如上海天文台的数字化底片资料^[26], 该单位已经将大量早期观测的天文底片数字化, 目前相关数据已通过中国天文数字底片数据库⁴形式发布. 本文预期, 在将来的研究中利用这些资料可

⁴<https://nadc.china-vo.org/data/data/legacyplate/f>

以构建包含更多恒星且覆盖范围更广的多历元星表, 寻找更多的潜在宽距双星样本进行研究.

致谢 感谢斯特拉斯堡天文数据中心(<https://cds.unistra.fr/>), VizieR (<https://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR>), CDS CrossMatch (<http://cdsxmatch.u-strasbg.fr/>)等网站, 为本研究提供了从早期到当代的观测资料、单个恒星样本的详细信息以及便捷的交叉匹配工作平台.

参 考 文 献

- [1] Binney J, Merrifield M. *Galactic Astronomy*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1998: 359–361
- [2] Tokovinin A. *AJ*, 2014, 147: 87
- [3] Kervella P, Arenou F, Mignard F, et al. *A&A*, 2019, 623: A72
- [4] Gaia Collaboration. *A&A*, 2018, 616: A1
- [5] Lindegren L, Mignard F, Söderhjelm S, et al. *A&A*, 1997, 323: 53
- [6] Makarov V V. *AJ*, 2020, 160: 284
- [7] Kaplan G H. IAU General Assembly, 2015, 29: 2255042
- [8] 陈健, 夏芳, 傅燕宁. 天文学报, 2018, 59: 83
- [9] Klemola A R, Jones B F, Hanson R B. *AJ*, 1987, 94: 501
- [10] Barry M L, Mario G L, McLean B J, et al. *AJ*, 2008, 136: 735
- [11] Høg E, Fabricius C, Makarov V V, et al. *A&A*, 2000, 355: 27
- [12] Zacharias N, Finch C, Frouard J. *AJ*, 2017, 153: 166
- [13] Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. *AJ*, 2006, 131: 1163
- [14] Kirkpatrick J D, Schneider A, Fajardo-Acosta S, et al. *ApJ*, 2014, 783: 122
- [15] Zacharias N, Finch C, Subasavage J, et al. *AJ*, 2015, 150: 101
- [16] Henden A A, Levine S, Terrell D, et al. American Astronomical Society Meeting Abstracts. Washington DC: American Astronomical Society, 2015, 336: 16
- [17] Wenger M, Ochsenbein F, Egret D. *A&AS*, 2000, 143: 9
- [18] Gaia Collaboration. *A&A*, 2018, 616: A10
- [19] Gaia Collaboration. *A&A*, 2018, 616: A2
- [20] Michalik D, Lindegren L, Hobbs D. *A&A*, 2015, 574: A115
- [21] Qi Z X, Yu Y, Bucciarelli B, et al. *AJ*, 2015, 150: 137
- [22] Vallenari A, Brown A G A, Prusti T, et al. *A&A*, 2023, 674: A1
- [23] El-Badry K, Rix H W. *MNRAS*, 2018, 480: 4884
- [24] Tian H J, El-Badry K, Rix H W, et al. *ApJS*, 2020, 246: 16
- [25] Brandt T D. *ApJS*, 2021, 254: 42
- [26] Shang Z J, Yu Y, Wang L L, et al. *RAA*, 2024, 24: 055010

Identifying Accelerating Stars Based on Long-term Multi-epoch Data

LIU Ying-zhao^{1,2} XIA Fang¹ CHEN Yue¹ FU Yan-ning¹

(¹ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(² School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT Previous observational investigations have revealed that roughly 50% of binary systems have orbital periods over a century. Binary systems with such long periods typically have large angular distances between the component stars, hence called wide binaries. It is then difficult to derive their precise orbital parameters by using only high precision observational data collected in recent several decade years. In fact, even identifying them as non-single stars is sometimes a challenge. Combining recent high precision and some early low precision star catalogs, we compile a multi-epoch star catalogue. And, based on observational errors and a time factor, we develop a novel weighting scheme, with which the weights of early low precision observational data in our least-square fitting are reasonably increased. Based on the null hypothesis of uniform rectilinear motion, the chi-square significance test is applied to the stars in the multi-epoch star catalog. As a result, 2214 accelerating stars, of which 1565 are new, are identified as candidates for wide binary stars. Upon cross-matching with existing binary star catalogs, the result suggests that the detection methodology based on early star catalogs and developed in this study shows remarkable superiority in terms of the identification efficiency of wide binary star systems.

Key words astrometry: astrometric position, catalogs: multi-epoch catalogs, proper motions: long-term proper motions, stars: accelerating stars, stars: binaries: wide binaries