

文章编号: 1000-8349(2006)03-0210-13

# 双星轨道拟合的研究进展

任树林<sup>1,2</sup>, 傅燕宁<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 双星轨道拟合是天文学的一项基础性研究工作。其主要目的是给出双星系统的二体轨道参数, 这些参数不仅是高精度、高网格密度星表参考架的必要组成部分, 而且也为理解各种有关观测现象提供了必要的动力学基础; 更重要的是, 双星轨道拟合可以直接估计恒星物理和星系天文学等领域极有应用价值的恒星质量参数。因此, 长期以来双星轨道拟合工作一直受到研究者的广泛关注。近年来, 随着高精度的恒星运动学观测资料的大量积累, 双星轨道拟合更成为天体测量和天体力学的一个共同的热点课题, 有关研究也有了长足的进展。综述了双星轨道拟合的历史及现状, 其中着重介绍了目前所用的主要观测资料和各种具体的拟合模型、拟合方法; 简要描述了几种主要的双星星表; 展望了今后双星轨道拟合工作的发展趋势。

**关键词:** 天体力学; 天体测量; 双星; 综述; 轨道拟合

**中图分类号:** P129

**文献标识码:** A

## 1 引 言

双星系统的基本动力学模型是二体问题, 其对应的运动方程是可积的, 积分常数一般取为质心的位置、速度和二体运动的轨道参数。一方面, 由这些积分常数可以在理论上给出子星的位置和速度; 另一方面, 通过观测可以获取反映子星实际运动状态的数据资料。因此, 可以利用二体运动模型对观测资料进行最小二乘拟合, 从而给出描述二体运动的轨道参数, 相应的过程称为双星轨道拟合。

双星轨道拟合是建立在天体测量基础上的一个天体力学经典课题, 它具有多方面的重要意义。双星轨道拟合可以提供星表参考架所必需的数据, 从而对天体测量学的基础和应用研究都具有重要意义。我们知道, 天体测量的一个主要目标是天体的高精度定位, 由此实现的各种天文参考系也是该学科对其它学科和实用部门的主要贡献之一。在光学波段, 天文参考系需要由星表来具体实现, 因为在高精度要求下, 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, 所以一个高精度参考系的实现及维护, 必须包含其中双星系统的轨道信息<sup>[1]</sup>。由于有超过一半的恒星是双星<sup>[2]</sup>, 因此对需要高网格密度的星表参考架的应用

**收稿日期:** 2005-09-20; **修回日期:** 2006-03-09

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (10473025, 10233020)

部门而言, 双星轨道拟合工作显得尤为重要。

如果有适当的高质量观测资料, 那么通过轨道拟合还可以很好地确定恒星的质量和视差等参数, 这对恒星演化和银河系质量分布等方面的研究均具有重要价值。

自 1650 年发现了第一颗双星  $\zeta$  UMa 到 18 世纪中期, 偶然发现了约数十颗双星, 引起了许多天文学家的注意<sup>[3]</sup>。在 18 世纪末期, Herschel 对双星进行了大量的观测研究, 并在此基础上先后给出了第一和第二双星星表 (分别发表于 1782 年和 1784 年)。当时人们普遍认为这些双星是相互之间的没有物理关联的光学双星, 但早在 1767 年, Michell 就提出了存在相互间有某种物理联系的双星, 即所谓物理双星。1803 年, Herschel 认同了该观点, 并且认为他所观测到的双星有些就是物理双星。此后, 对双星的研究越来越多, 被证认的物理双星系统的数目也不断增加, 并出现了许多不同的双星星表。同时, 对双星系统的轨道研究也逐步展开。近年来, 随着高精度观测资料的快速积累, 双星轨道拟合业已成为天体测量和天体力学的一个共同的热点课题, 有关研究有了长足的进展, 同时也促进了天体物理相应领域的发展。为此, 双星及聚星专业委员会 (IAU Commission 26) 拟于 2006 年 8 月 22~25 日在布拉格召开关于双星的会议 (IAU Symposium 240 “Binary stars as critical tools and tests in Contemporary astrophysics”), 将对当前以及未来有关双星系统的研究工作展开具体讨论<sup>[4]</sup>。

在本文的第二节拟简要而较全面地介绍双星轨道拟合工作的基础知识和研究内容; 第三节介绍双星轨道拟合工作的进展情况, 其中对各主要的双星测量星表、双星轨道星表及双星质量星表的最新版本作具体描述; 第四节展望双星轨道拟合工作的发展趋势。

## 2 概 况

双星通常由它们被发现或证认所使用的观测手段来分类。一方面, 由于不同类型的双星系统 (比如食双星、分光双星、天体测量双星和目视双星等) 对应的观测资料不同, 有关的具体轨道拟合过程是不相同的; 另一方面, 随着观测技术的发展, 对同一目标的多手段观测日渐增多, 这使得具有多种高精度观测资料的双星系统越来越多, 因此对不同观测资料的联合拟合将变得越来越重要。

下面分别就不同类型的双星简要介绍有关轨道拟合工作的历史和现状, 并描述近年来联合拟合各种观测资料给出双星轨道和质量参数的一些主要研究情况, 同时还简单介绍在双星轨道拟合工作中用到的一些数值优化方法。

### 2.1 双星的分类

#### 2.1.1 食双星

食双星 (Eclipsing Binary, 简称 EB), 通过其亮度或谱线位置的周期性变化, 可以知道它实际上是由存在交食现象的两颗子星组成的。食双星的轨道面一般接近视线方向, 并具有较短的交食周期 (约 90% 的食双星周期小于 10 d<sup>[2]</sup>)。

第一颗食双星是 1670 年 Montanari 在博洛尼亚发现的, 称为 Algol, 到 1889 年, Vogel 通过观测研究才证认了其食双星<sup>[3]</sup>; 而利用食双星模型拟合光变曲线从而给出双星系统相关参数的历史则可以追溯到 20 世纪初, 当时的拟合模型为 Russell 给出的模型。在此基础上, Kopal<sup>[5]</sup>、Wilson 和 Devinney<sup>[6~8]</sup> 等研究者发展了该模型, 使得现有的拟合模型中已成功

地包括了许多物理因素的影响,拟合结果与观测资料的符合程度也较高,同时,由此获得的大量恒星物理参数已大大加深了人们对恒星的认知。一般说来,有关食双星的观测资料是其随时间变化的星等或亮度极小时刻。目前,相应量的理论计算中除考虑了双星的轨道运动外,通常还考虑了下述几种因素的影响<sup>[5]</sup>:子星的形状<sup>[3]</sup>、视向速度<sup>[9,10]</sup>、反射效应<sup>[11]</sup>、临边昏暗效应<sup>[12]</sup>、自转<sup>[13]</sup>以及大气性质<sup>[14,15]</sup>等。

针对不同的食双星模型,研究者开发了许多专用的拟合软件,如:StarLight Pro 软件,考虑的因素有食双星的质量比、形状、轨道倾角、温度、临边昏暗等因素<sup>[16]</sup>;Wilson-Devinney Code,这是Wilson等人基于Wilson和Devinney等人发展的WD模型开发的Fortran程序包<sup>[17]</sup>,其中对上述诸多因素均作了考虑;在众多前人模型的基础上,Andrej等人进一步开发了PHOEBE程序包,用于模拟食双星的光变资料及视向速度资料<sup>[18]</sup>,该程序包试图计及已知的各种因素、考虑各种现有模型、采用各种拟合算法,并拟保持不断更新。

食双星拟合研究不仅可以给出双星的轨道参数,还可以给出有关恒星的各物理参数,如Williamson等人2004给出了食双星AY Cam的轨道、半径及质量等参数<sup>[19]</sup>;2001年Ostrov利用对CASLEO的2.15m望远镜的光变及分光资料的拟合给出了大麦哲伦云中的食双星MACHO\* 05:34:41.3 - 69:31:39的轨道及物理参数<sup>[20]</sup>。

在食双星星表方面,Svechnikov等人2004年给出了半接食双星(Semi-detached eclipsing binaries)系统的轨道及其它物理参数的星表<sup>[21]</sup>。为了便于开展食双星的观测研究,Bob Nelson等人发布了截至2005年9月的1400多个食双星的周期及光度极小时刻的星历表,同时也给出了这些食双星的历史观测资料<sup>[22]</sup>。

### 2.1.2 分光双星

分光双星(Spectroscopic Binary, SB),是指通过光谱观测和分析得到的双星系统。若仅能观测到双星系统中一颗子星的光谱,则称该双星系统为单谱线分光双星(Single-lined Spectroscopic Binary, SB1),若能观测到两颗子星的光谱,则称其为双谱线分光双星(Double-lined Spectroscopic Binary, SB2)。

通过对恒星光谱的观测和分析,可以得到双星系统子星的视向速度,而通过对视向速度的拟合,则可以进一步给出双星的谱轨道参数,包括:轨道周期( $P$ )、质心视向速度( $\nu$ )、子星的视向速度振幅( $K_1$ 、 $K_2$ )、偏心率( $e$ )、近星点角距( $\omega$ )和过近星点时刻( $T$ )。若双星系统为双谱线的分光双星,通过拟合还可以定出两子星的质量比等信息。

1891年Rambaut最早利用光谱资料给出了 $\beta$  Aur的轨道<sup>[23]</sup>,开始了利用光谱资料确定双星系统轨道的历史。近几十年来,得益于高精度的光谱观测,Griffin等人对大批量的双星进行了分光观测,得到其分光轨道<sup>[24~27]</sup>,并在此基础上,对这些恒星的轨道进行了统计研究<sup>[28~31]</sup>,给出了分光双星轨道周期分布、周期-偏心率关系等一些统计结果。

在大量观测和研究的基础上,Batten等人1989年发布了第八分光双星轨道星表<sup>[32]</sup>,共给出了1406对分光双星的观测及研究信息。由于观测资料的不断增加,2000年,IAU指定一个工作组专门负责更新该星表。2004年,在第八分光双星轨道星表的基础上,Pourbaix等人<sup>[33]</sup>发布了第九分光双星轨道星表,并保持不断更新,具体情况见第3节。

### 2.1.3 目视双星或天体测量双星

所谓目视双星(Visual Binary, VB)或天体测量双星(Astrometric Binary, AB),指的是

通过对恒星位置的观测和分析得到的双星系统。这种双星系统的观测资料通常是恒星在天球切平面上的位置,称为天体测量资料。天体测量资料可以是双星子星之间的角距离 (angular separations) $\rho$  和位置角 (position angles) $\theta$ ,也可以是单个或两个子星的绝对位置。

用来拟合目视双星或天体测量双星的轨道参数通常是:轨道周期( $P$ )、半长径( $a$ )、偏心率( $e$ )、轨道倾角( $i$ )、近星点角距( $\omega$ )、升交点角距( $\Omega$ )和过近星点时刻( $T$ )。

1827年 Savary 最早利用天体测量的相对位置资料给出了  $\xi$  UMa 的轨道<sup>[23]</sup>。20世纪后期,由于一些地面观测技术的成熟(如干涉测量)、空间探测器的发射(依巴谷卫星)等,获取了大量高质量的天体测量资料,在此基础上,天体测量双星的轨道研究工作有了长足的进展。

近年来,在地面上对双星进行天体测量观测的技术主要是干涉测量技术,它具有精度高的特点。其中斑点干涉较为常用,对于一些装备于大望远镜的斑点干涉,其精度可达毫角秒的量级<sup>[34]</sup>。斑点干涉技术首先由法国天文学家 A. Labeyrie 于 1970 年提出<sup>[36]</sup>。关于斑点干涉测量方法的具体描述可见文献<sup>[36~39]</sup>。斑点干涉技术问世后不久, Gezari 等人<sup>[40~42]</sup>尝试把它应用到双星的观测中去,这些工作显示斑点干涉测量对双星的研究非常有价值。1977年, McAlister 等人<sup>[35]</sup>提出了更为科学的研究计划,并在 CHARA (The Center for High Angular Resolution Astronomy) 工作组中制定了长久的针对双星系统的干涉测量计划,在 1977 到 1998 年间对近 10 000 对恒星进行了观测研究<sup>[43]</sup>,给出了基于干涉测量的双星测量星表,如 Third Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars<sup>[44]</sup>等。

最近几年利用斑点干涉测量法针对双星系统进行观测和研究的工作有很多,如 Mason 等人发布了近 10 批关于双星的斑点干涉的测量资料。基于这些观测资料, Mason 等人对一些此前被认作为问题双星的系统进行了分析,给出了其中部分双星系统的轨道<sup>[45,46]</sup>。

1997年,依巴谷星表(Hipparcos Catalogue)的出版<sup>[47]</sup>,提供了一大批高精度的天体测量数据。依巴谷星表有大约 12 万颗星,但由于观测时段的限制,仅给出了 235 对双星的轨道参数<sup>[6]</sup>。为了能使依巴谷资料更好地用于双星轨道拟合工作,依巴谷工作组在提供其主要星表的同时给出了经过预处理的位置观测数据 Intermediate Astrometric Data (IAD) 和可以提供位置信息的测光观测资料 Transit Data(TD)。Leeuwen 等人<sup>[48]</sup>(1998)和 Quist & Lindegren<sup>[49]</sup>(1999)分别详细介绍了 IAD 和 TD,并初步讨论了如何结合其它观测资料改进依巴谷星表数据的问题,其中使用的主要的模型就是双星轨道模型。

自 1998 年以来,国际上与依巴谷 IAD 及 TD 直接有关的研究工作主要包括:发展联合拟合依巴谷数据和其它不同性质观测资料的方法<sup>[23,50]</sup>;结合地面观测资料得到更多的依巴谷双星解<sup>[50~54]</sup>或证认双星或恒星-行星系统<sup>[55]</sup>。

## 2.2 联合拟合

通常一种观测只能从一个侧面反映双星的位置及运动信息(如:天体测量资料描述恒星在天球切平面上的运动,而视向速度资料描述的是恒星在视线方向的运动;一些时间跨度较长的历史观测资料可以限定双星轨道的全局性态,而由当前先进的仪器设备获得的观测资料虽然时间跨度较短,但精度比较高,可以用来提高双星轨道的定轨精度),因此要对双星系统进行多种手段的反复观测。相应地,不同观测资料之间的联合拟合,也已成为给出或改进双星系统轨道的重要途径。在双星轨道拟合工作中,通常使用的联合拟合方法有下面几种<sup>[23]</sup>:

(1) 将针对不同数据资料的目标函数进行直接相加得到联合拟合的目标函数, 即:

$$\chi^2 = \chi_1^2 + \chi_2^2 + \dots, \quad (1)$$

Morbey 在 1975 年的最早使用了这种目标函数, 并通过联合天体测量及视向速度资料给出了双星系统伯纳姆 (Burnham) 1163 的轨道<sup>[56]</sup>。1992 年, Morbey 对联合天体测量及视向速度资料的方法进行了较为详细的描述, 并对其所用的一些优化算法进行了讨论<sup>[57]</sup>。2000 年, Pourbaix 搜集了近 40 个同时具有天体测量资料和双谱线的视向速度资料的双星系统, 用该方法拟合得到了这些双星系统的轨道及相关信息<sup>[58]</sup>。

(2) 首先对某一种观测资料进行拟合, 并得到双星系统的部分轨道参数, 在此基础上再对其它观测资料进行拟合, 从而得到双星系统的其它轨道参数。如 Pourbaix<sup>[51,59]</sup> 等人在前人利用视向速度资料定出的部分轨道参数 (如周期和偏心率等) 的基础上, 对一些双星系统的依巴谷观测数据进行拟合, 并由此得到了其它轨道参数 (半长径和轨道倾角等), 从而给出了相关恒星的完整轨道解。

(3) 分别拟合不同数据给出 (部分) 轨道参数, 然后根据每种观测资料及其拟合过程的精度对相同参数 (如分光双星和天体测量双星有四个共同的参数: 轨道周期、偏心率、近星点角距和过近星点时刻) 的不同拟合结果赋以适当权重, 并取相应的加权平均值作为最终结果。显然, 这种方法要求每种数据均能有效地用来拟合以得到 (部分) 轨道参数。

实际上, 上述联合拟合方法都是在对具体系统的拟合研究中发展起来的。一个联合拟合方法是否恰当, 取决于参与联合拟合的具体观测资料和所考虑系统的轨道特征, 因此, 目前系统讨论联合拟合方法的工作尚不多见。

### 2.3 双星系统的质量参数

质量是恒星演化研究的重要参数。双星轨道拟合是目前获得恒星质量参数的唯一可靠来源<sup>[2]</sup>。基于这些质量资料, 可以给出主序恒星的经验质光关系, 进而可以对其它恒星的质量做初步估计, 这对恒星物理和星系天文学研究具有重要意义。

通过拟合上述不同类型的双星系统的观测资料, 可以分别对恒星质量作不同程度的限制。通过对双星系统的单谱线观测资料的拟合, 可得质量函数:

$$f(M_1, M_2, i) = M_2^3 \sin^3 i / (M_1 + M_2)^2. \quad (2)$$

其中,  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $i$  分别指的是主星质量、伴星质量及轨道倾角。通过对双星系统的双谱线观测资料的拟合, 可以进一步给出双星系统子星的质量比:

$$q \equiv \frac{M_1}{M_2} = \frac{K_2}{K_1}, \quad (3)$$

以及

$$(M_1 + M_2) \sin^3 i = (K_1 + K_2)^3 (1 - e^2)^{3/2} (2\pi G/P)^{-1}, \quad (4)$$

其中,  $K_1$ 、 $K_2$  分别表示两成员星的视向速度振幅,  $e$  为偏心率,  $P$  为轨道周期,  $G$  为万有引力常数。这样就可以得到  $M_1 \sin^3 i$ ,  $M_2 \sin^3 i$ 。通过对食双星的光变资料的拟合, 通常可以得到双星系统的轨道倾角  $i$ 。对于目视双星或天体测量双星, 有三种不同情况。(1) 如果

知道目视双星 (VB) 子星的相对位置 ( $\rho$ 、 $\theta$ )，则可以得到双星系统轨道的倾角  $i$ ；(2) 如果知道某一个子星的绝对运动，则不仅可以得到双星系统轨道倾角  $i$ ，同时也可以根据开普勒第三定律得到双星系统的总质量 (这类双星系统简称 AB1)；(3) 如果知道两个子星的绝对运动，就可以得到每个子星的质量 (这类双星系统简称 AB2)。通过综合不同的观测数据，有多种途径可以给出双星系统中每颗子星的质量。具体可见表 1。

表 1 可给出恒星质量的各种联合途径一览<sup>[60]</sup>

	VB	SB1	SB2	EB	AB1	AB2
VB		—	$M_1$ 、 $M_2$	—	$M_1$ 、 $M_2$	$M_1$ 、 $M_2$
SB1				—	—	$M_1$ 、 $M_2$
SB2				$M_1$ 、 $M_2$	$M_1$ 、 $M_2$	$M_1$ 、 $M_2$
EB						$M_1$ 、 $M_2$

在双星系统质量参数的研究中，一项堪称经典的工作是 1980 年 Popper 利用双星轨道拟合方法给出了近百个精度较高的恒星质量数据<sup>[61]</sup>，并就如何利用食双星、分光双星和目视双星等不同类型的观测资料限定子星质量作了具体的阐述。目前，综合食双星 (EB) 的光变资料及双谱线分光双星 (SB2) 的观测资料给出的双星系统各子星质量是恒星质量的主要资料来源。其中包括 Popper<sup>[62]</sup>、Andersen<sup>[63]</sup>、Imbert<sup>[64]</sup> 等人给出的数百颗恒星的质量。

得益于地面的干涉测量及空间探测，天体测量观测精度不断提高、观测资料不断增加，通过综合 VB 或 AB1 和 SB2 的方法给出质量的恒星数目也有所增加。Soederhjelm<sup>[53]</sup> 综合目视双星资料及依巴谷绝对位置资料，得到 25 个短周期双星系统子星的质量；此外，2000 年 Pourbaix 等人也给出了多颗恒星的质量<sup>[58]</sup>。然而，由于观测的限制，许多双星系统的一些与质量相关的参数如距离、轨道半长径等还不能很好地确定。尽管在恒星质量方面做了大量工作，得到可靠质量数据的恒星目前仍仅有数百颗。这对于有些研究工作是远远不够的，因此恒星质量经常需要通过其它方法估计，利用恒星的质量—光度关系 (Mass-Luminosity Relation, MLR) 就是一条重要途径。基于利用双星轨道拟合给出的恒星质量，Andersen<sup>[65]</sup>、Griffiths<sup>[66]</sup>、Osman<sup>[67]</sup>、Henry<sup>[68,69]</sup>、Malkov<sup>[70,71]</sup> 等人得到了一系列关于恒星的经验质光关系，据此可以估计其它恒星的质量。

## 2.4 数值优化方法

一般说来，拟合问题最终都可以归结为求解某种在相关参数空间中反映理论和观测符合程度的目标函数的最小值的问题，有关方法统称为优化方法。目标函数通常可写为：

$$\chi^2 = \sum \left\{ \frac{(O - C)^2}{\sigma_o^2} \right\}, \quad (5)$$

其中， $O$  为观测值， $\sigma_o$  为观测误差， $C$  为理论计算值。无论具体形式如何，双星轨道拟合的目标函数都是多元非线性函数，其所依赖的拟合参数可多达十余个 (质心运动参数、轨道参数和质量参数)，因此求其最小值是相当困难的。作为双星轨道拟合中的共同难点问题，多有文献对此进行了讨论。通常的步骤是首先利用全局优化方法确定轨道解所在的区域，再用局部优化方法给出轨道解。

常用于双星轨道拟合的局部优化方法有: BFGS 方法, 1998 年 Pourbaix 基于该方法给出了 HR 466 的轨道参数<sup>[50]</sup>; Levenberg - Marquardt 方法, 2003 年 Pourbaix 将其用于天体测量双星的轨道拟合<sup>[72]</sup>; Gaussfit 方法, 上世纪末, Jefferys 等人发展了该方法, 并将其具体应用于双星轨道拟合<sup>[52,53,73,74]</sup>。上述几种方法已经发展得相当成熟, 在《Numerical Recipes》<sup>[75]</sup>等参考文献中均有详尽的描述。相对而言, 关于双星轨道拟合的全局寻优则比较困难。下面简单介绍两种比较有效且常用的全局优化方法。

模拟退火算法<sup>[75,76]</sup>(Simulated Annealing Method)。该方法是通过模仿物理系统的退火过程设计出来的。具体应用到双星轨道拟合中, 需要一个不断减小的参数  $c(> 0)$  来控制寻优过程(类似于物理系统的温度)。当  $c$  处于某个值时, 我们可以通过一随机迭代过程找到当前的最优解, 其具体步骤如下: 首先, 随机给定一条初始轨道并计算目标函数的值 ( $\chi_i^2$ ); 然后, 通过随机取定轨道参数的增量得到一条新的轨道, 其对应的目标函数值记为  $\chi_{i+1}^2$ , 如果

$$P_r = \exp(-(\chi_{i+1}^2 - \chi_i^2)/c) > \varepsilon \quad (6)$$

( $\varepsilon$  为在  $[0,1)$  区间中服从均匀分布的随机数), 则把新的轨道作为下次迭代过程的初始轨道, 反之, 下次迭代过程的初始轨道仍取为原轨道。通过若干步随机寻走后就可以得到一条相对较优的轨道, 并将其作为下一个“ $c$ ”值的类似过程的初始轨道。为了能够找到全局极小解, 控制参数  $c$  必须缓慢地减小。实际上, 控制参数的初值及减小方式需要视不同的情况通过试验给出<sup>[76]</sup>。1994 年, Pourbaix 利用该方法给出了 BD19°5116 等三个双星系统的轨道解<sup>[76]</sup>。

网格法<sup>[72,77]</sup>。该方法的基本步骤是: 首先, 赋予线性参数一个合理的猜测值, 同时把非线性参数的空间网格化; 其次, 从每个初始网格点出发寻找关于所有参数的局部极小解; 最后, 通过对这些局部极小解进行比较得到最优解。2000 年, Zuker 等人利用该方法获得了双星系统 HD10697 的轨道和质量<sup>[77]</sup>。

### 3 双星星表

近几十年来, 经过不断的观测和拟合研究, 发现并确认的双星系统越来越多。由于计算机网络技术的发展, 文献检索、结果发布和更新越来越方便, 加之 IAU 已成立了多个有关双星观测或研究的工作组, 他们以及一些长期致力于双星轨道拟合工作的单位或个人及时以各种星表形式发布与双星观测和轨道拟合有关的进展情况, 因此, 最新的轨道拟合研究的结果一般都能在一些在线星表中集中体现出来, 这大大地方便了进一步的研究工作。下面就其中主要的星表分别予以简要介绍。

#### 3.1 双星测量星表

##### 3.1.1 华盛顿双星星表<sup>[78]</sup>

美国海军天文台的华盛顿双星星表(The Washington Double Star Catalog, WDS), 是目前世界上关于双星系统的主要天体测量数据库。到目前为止, 共收录了约 100 000 个双星系统的近 700 000 个数据。它除了给出每个双星系统的位置、自行、星等、光谱型等基本信息外, 更为重要的是还给出了每次观测的观测者、观测历元、以及观测资料(位置角和角距离)等信息。

目前, 有关双星的天体测量数据在不断增加, 而 WDS 的主要目标就是给出当时最完整的有关数据, 以便开展双星轨道拟合工作。WDS 创建于 1984 年, 在 1997 年经历了一次较大的更新 (Worley & Douglass 1984, 1997)。1984 年, Worley 等人在 IDS(the Index Catalogue of Visual Double Stars) 等双星星表的基础上, 结合一些历史的观测资料给出了 WDS; 1997 年他们把 WDS 与 SIMBAD 数据库联系在一起, 并更新了星表中双星系统的位置及星等数据。现在的 WDS 包含了双星系统的各种观测资料, 主要是: CHARA 的斑点观测 (给出了 7122 个双星系统)、华盛顿的斑点观测 (7140 个双星系统)、第谷 -2 星表 (12755 个双星系统)、第谷双星星表 (25232 个双星系统)、依巴谷星表 (13141 个双星系统)、华盛顿基本星表 (36207 个双星系统) 以及一些天文工作者发布的信息。将来随着大批资料如 2MASS、UCAC 星表等的释放和相关研究的进一步开展, WDS 的数据量还将显著增加。

### 3.1.2 双星干涉测量星表

双星干涉测量星表 (Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars)<sup>[79]</sup> 始于 1982 年, 当时的测量资料主要来自于 CHARA 的斑点干涉, 不久便又收录了其它干涉测量资料, 同时也收录了自 1896 年以来非干涉测量的天体测量资料及一些由光度测量资料经处理后得到的天体测量资料。上世纪 80 年代共发布了两个版本即第一、第二星表。目前, 该星表由美国海军天文台负责, 并在最近发表了第三和第四星表。由于观测资料的不断增加, 第四星表也在不断更新, 目前共收录了约 19000 个干涉双星系统的近 70000 组天体测量数据及近 30000 组由光度测量得到的天体测量数据。该星表具体包括了星名、位置、观测历元、位置角及误差、角距离及误差、星等、参考文献及其它相关信息。

## 3.2 双星轨道星表

### 3.2.1 目视双星轨道星表<sup>[34]</sup>

由于观测精度的提高, 关于目视双星的研究有了很大的发展。首先是干涉测量方法的成熟, 尤其是装备在大望远镜上的斑点干涉仪器得到了大批量高质量的观测资料 (精度达到毫角秒量级), 使得我们能够了解周期更短、角半长径更小的双星系统。自 1980 年以来, 几乎所有发表的轨道星表都包含了斑点干涉资料的贡献。同时, 其它技术如长基线干涉法、光学干涉、多孔径观测等技术也已经成熟, 为目视双星系统的观测提供了更多的手段。

自 1934 年以来, Finsen、Worley、Hartkopf 和 Mason 等人陆续对目视双星轨道星表 (Catalog of Orbits of Visual Binary Stars) 进行了多次更新。目前的第六目视双星轨道星表不仅包含了前面星表中的双星系统, 同时也收录了自 1980 年以来文献中存在轨道信息的所有目视双星系统。到 2004 年 7 月 12 日为止, 共含有 1817 个双星系统的轨道信息。值得一提的是, 由于所拟合的观测资料或所采用的拟合过程不同, 一些双星系统有两组互不相同但权重相当的轨道参数, 为了供后续研究参考, 该星表一并予以收录, 所涉及的双星系统共有 81 个。该星表具体包括: 双星系统的名称、星等、轨道参数、轨道等级等信息, 同时还给出了双星系统 2005~2009 年的星历表。这里轨道等级指的是根据观测设备的性能、观测的次数、观测数据对轨道的覆盖率等指标给轨道确定的优劣等级。

### 3.2.2 分光双星轨道星表<sup>[33,80]</sup>

近半世纪以来, 发布的分光双星的轨道星表 (The Catalogue of Spectroscopic Binary Orbits) 有: 1967 年 Batten 编辑的第六星表; 1978 年 Batten, Fletcher, Mann 等人编辑的第七星表;



1989 年 Batten, Alan, Fletcher, MacCarthy 等人编辑的第八星表 (SB8, 包含 1469 个双星系统)。

由于分光双星的观测资料和研究成果增加很快, 因此, 为了便于分光双星的统计研究等工作及时开展, 2000 年 IAU 第 24 届大会指定由 Tokovinin 领导的工作组负责对 SB8 进行更新, 给出了新的第九星表 (SB9)。到 2005 年 4 月, SB9 已包含 2400 多个分光双星系统的轨道信息。与 SB8 不同的是, SB9 不再发布印刷版本, 而是在互联网上公布资料, 其网址为: <http://sb9.astro.ulb.ac.be>。

SB9 星表给出了每个分光双星系统的位置、分光轨道及误差、星等等信息, 并对其研究历史作了简单描述。更为重要的是, SB9 同时还对近 600 个双星系统给出了视向速度的观测数据, 为以后联合其它资料进行轨道改进的工作提供了方便。

### 3.3 双星质量星表

1995 年, Belikov 对 1968~1988 年间的双星系统的动力学质量 (即通过双星轨道拟合给出的恒星质量) 进行了系统的搜集, 给出了恒星质量星表《Stellar Mass Catalogue》(SMAC), 共包含了 360 个恒星的质量<sup>[81]</sup>。同时标明了这些质量数据的来源以及得到的过程。

近年来, 经过搜集和整理得到的质量星表还有: 1999 年, Svechnikov 在《Catalog of DMS-type eclipsing binaries》中给出了 113 个不相接食双星系统的子星质量<sup>[82]</sup>; 2003 年, Pribulla 在《Catalogue of field contact binary stars》中给出了 361 个相接双星系统的质量<sup>[83]</sup>; 2005 年, Dryomova 在《Approximate elements of eclipsing binaries》中给出了 33 个猎犬 RS 型食双星系统的子星质量<sup>[84]</sup>等。

除了以上介绍的较常用的双星星表外, 在 CDS 和最新的文献中还有一些有关双星的星表, 如: Catalog of Components of Double and Multiple stars(CCDM)<sup>[85]</sup>, The CHARA Catalog of Orbital Elements of Spectroscopic Binary Stars<sup>[86]</sup>等, 这些星表也颇具参考价值。

## 4 展 望

目前, 由于干涉测量技术的成熟, 地面的干涉观测仪器的精度已经达到或好于 1 毫角秒, 如: 欧洲南方天文台的 VLTI、剑桥多孔径综合光学望远镜 (COAST)、美国海军天文台的 NPOI<sup>[87]</sup> 等的观测精度均在 1 毫角秒左右。而 CHARA 的望远镜阵及悉尼大学恒星干涉仪观测精度甚至分别可达 200 微角秒<sup>[88]</sup> 和 75 微角秒<sup>[89]</sup>。这批干涉观测仪器的使用, 可以得到大批高质量的天体测量资料, 利用这些资料来获得或改进双星轨道根数将是今后轨道拟合工作的主要内容之一。更加值得期待的是即将发射的多个空间探测器能获得更高精度的观测资料。这些空间探测器中最值得关注的是 NASA 拟于 2011 年发射的 SIM Planet Quest 和 ESA 拟于 2011 年发射的 Gaia。表 2 分别列出了 SIM Planet Quest 和 Gaia 的主要性能指标。作为比较, 表 2 中同时给出了依巴谷卫星的相应指标。可以看出, 这两颗卫星所搭载的空间望远镜性能较依巴谷卫星上的又有大幅度提高。例如, Gaia 装备有多种天文观测仪器, 可对恒星分别进行天体测量观测、光度观测以及光谱观测。就天体测量观测而言, 由于它对恒星非线性运动具有很强的探测能力, 因而可以发现更多的天体测量双星<sup>[90]</sup>。对于光度测量来说, 它不仅探测约 7 000 000 个食双星的光度变化, 同时还可以探测到非食双星由于反射效应引

起的光度变化; 而光谱观测所能探测的双星系统的周期范围也得到了扩充, 这与位置观测互补。与这些空间探测器相关的研究工作, 尤其是关于双星的研究工作仍在不断深入开展, 其主要内容包括有针对性地分析研究探测目标、发展或完善数据处理方法等。

表 2 依巴谷、SIM Planet Quest、Gaia 的探测能力一览<sup>[90,91]</sup>

指 标	依巴谷	SIM Planet Quest	Gaia
探测器寿命 /yr	4	5	5
发射年份	1989	2011	2011
观测恒星数目	120 000	10000	1000 000 000
极限星等	12	20	20
天体测量精度	1 mas	3 $\mu\text{as}$ ( $V=20$ mag)	4 $\mu\text{as}$ ( $V=12$ mag) 10 $\mu\text{as}$ ( $V=15$ mag) 200 $\mu\text{as}$ ( $V=20$ mag)
测光波段数	3(宽波段)		5~16
视向速度误差 /km $\cdot$ s <sup>-1</sup>			$\approx 1(I_c = 14)$ $\approx 10(I_c = 16)$
目标观测次数	$\approx 110$		$\approx 82$ (天体测量观测) $\approx 200$ (中波测光观测) $\approx 100$ (光谱观测)

在观测资料方面, 历史的底片资料的处理期待着有所突破。随着电子扫描技术的进一步发展和普及, 现在已可以将早期的照相底片资料转化为有利用价值的数字化资料, 并有望在不远的将来这种转化可以以较小的代价批量进行, 这势必大大改进较长周期双星系统的轨道拟合工作。通过上面的介绍可以看出, 双星系统的观测资料的形式将越来越丰富, 因此, 需要发展适当的联合拟合方法, 以便更好地给出双星系统的轨道和其它物理参数。这将是今后双星轨道拟合工作的又一重要内容。

可以预见的是, 随着各方面观测资料的积累、联合拟合方法的合理运用, 我们可以给出或改进大量双星系统的轨道参数和其它物理参数。在此基础上, 可以进一步开展的工作有: 双星系统轨道性质的统计研究<sup>[92,93]</sup>; 编制和维持更高精度、更高网格密度的星表<sup>[62]</sup>; 利用各种轨道拟合过程得到的恒星质量等物理参数, 研究多星系统和星团的稳定性或者动力学演化过程<sup>[94~96]</sup>, 检验恒星的演化模型<sup>[97]</sup>等。

**致谢** 感谢金文敬教授关于文章结构、专业术语等方面的具体建议; 感谢陈力教授、朱紫教授、黄天衣教授的建设性意见; 感谢鲁春林教授在数据及星表方面的帮助。

### 参考文献:

- [1] Mason B D. ASP Conf. Ser., 1999, 174: 41
- [2] Binney J. Michael Merrifield Galactic Astronomy, Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1998
- [3] Kopal Z. Close Binary System, London: University of Manchester, 1959
- [4] <http://ad.usno.navy.mil/iaus240/iaus240.html>, 2006
- [5] Wilson R E. PASP, 1994, 106: 921

- 
- [6] Wilson R E, Devinney E J. *AJ*, 1971, 166: 605~619
- [7] Wilson R E. *AJ*, 1979, 234: 1054~1066
- [8] Wilson R E. *ApJ*, 1990, 356: 613
- [9] Hill G. *ASP Conf. Ser.*, 1993, 38: 127
- [10] Van Hamme W, Wilson R E. *Memorie della Societa Astronomia Italiana*, 1994, 65: 89
- [11] Wilson R E. *ApJ*, 1990, 356: 613
- [12] Van Hamme W. *AJ*, 1993, 106: 2096
- [13] Rucinski S M. *AJ*, 1992, 104: 1968
- [14] Linnell A P. *ApJ*, 1991, 379: 721
- [15] Milone E F, Stagg C R, Kurucz R L. *ApJS*, 1992, 79: 123
- [16] <http://members.cox.net/astro7/binstar.html>, 2005, 9
- [17] <ftp://ftp.astro.ufl.edu/pub/wilson/>, 2005, 9
- [18] <http://www.fiz.uni-lj.si/phoebe/>, 2005, 9
- [19] Williamon R M, Sowell J R, Van Hamme W. *AJ*, 2004, 128:1319~1323
- [20] Ostrov P G. *MNRAS*, 2001, 321: L25
- [21] Svechnikov M A, Perevozkin E L. *VizieR On-line Data Catalog: V/121*, 2004
- [22] [http://www.aavso.org/observing/programs/eb/omc/nelson\\_omc.shtml](http://www.aavso.org/observing/programs/eb/omc/nelson_omc.shtml)
- [23] Torres G. *ASP Conf. Ser.*, 2004, 318:123
- [24] Griffin R F. *Obs.*, 1991, 111: 291
- [25] Griffin R F. *Obs.*, 2000, 120: 1
- [26] Griffin R F. *Obs.*, 2004, 124: 190
- [27] Ahmad A, Jeffery C S, Fullerton A W. *A&A*, 2004, 418: 275
- [28] Griffin R F. *ASP Conf. Ser.*, 1992, 32: 98
- [29] Batten A H. *Astronomical Society of India, Bulletin*, 1990, 18: 285
- [30] Jorissen A, Famaey B *et al.* *The Environment and Evolution of Double and Multiple Stars, Proceedings of IAU Colloquium 191*, 2004, 21: 71
- [31] Fisher J, Schröder K P, Smith R C. *The Environment and Evolution of Double and Multiple Stars, Proceedings of IAU Colloquium 191*, 2004, 21: 65
- [32] Batten A H, Fletcher J M, MacCarthy D G. *Publications of the Dominion Astrophysical Observatory*, 1989, 17: 1
- [33] Pourbaix D *et al.* *A&A*, 2004, 424: 727~732
- [34] <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html>
- [35] McAlister H A. *ApJ*, 1977, 215: 159
- [36] Labeyrie A. *A&A*, 1970, 6: 85
- [37] Dainty J C. *MNRAS*, 1978, 183: 223
- [38] Saha S K. *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 1999, 27: 443
- [39] Koehler R. *ASP Conf. Ser.*, 2004, 318: 25
- [40] Gezari D Y, Labeyrie A, Stachnik R V. *ApJ*, 1972, 173L: 1
- [41] Labeyrie A, Bonneau D *et al.* *ApJ*, 1974, 194L: 147
- [42] Beddoes D R, Morgan B L *et al.* *Journal of Optical Society of America*, 1976, 66: 1247
- [43] <http://www.chara.gsu.edu/chara/speckle.html>
- [44] Hartkopf W I, McAlister H A, Mason B D. *AJ*, 2001, 122: 3480
- [45] Mason B D, Martin C *et al.* *AJ*, 1999, 117: 1890
- [46] Mason B D, Hartkopf W I. *AJ*, 2001, 121: 3224
- [47] Perryman M A C, Mignard F *et al.* *A&A*, 1997, 323L: 49
- [48] Leeuwen F V, Evans D W. *A&AS*, 1998, 130: 157~172
- [49] Quist C F, Lindegren L. *A&AS*, 1999, 138: 327
- [50] Pourbaix D. *A&AS*, 1998, 131: 377~382

- [51] Pourbaix D, Jorissen A. *A&AS*, 2000, 145: 161
- [52] Soederhjelm S, Lindegren L, Perryman M A C. *Proceedings of the ESA Symposium Hipparcos*, 1997, 251S
- [53] Soederhjelm S. *A&A*, 1999, 341: 121
- [54] Boffin H M J, Pourbaix D. *Obs.*, 2003, 123: 126
- [55] Makarov V V. *AJ*, 2004, 600: L71~73
- [56] Morbey C L. *PASP*, 1975, 87: 689
- [57] Morbey C L. *ASP Conf. Ser.*, 1992, 32: 127
- [58] Pourbaix D. *A&AS*, 2000, 145: 215~222
- [59] Pourbaix D, Boffin H M J. *A&A*, 2003, 398: 1163
- [60] Pourbaix D. <http://wwwhip.obspm.fr/gaia/dms/texts/PourbaixParisA2004a.pdf>
- [61] Popper D M. *ARA&A*, 1980, 18: 115
- [62] Popper D M. *AJ*, 1998, 115: 338
- [63] Andersen J. *A&A*, 1983, 118: 255
- [64] Imbert M. *A&AS*, 1987, 69: 397
- [65] Andersen J. *A&A Rev*, 1991, 3: 91
- [66] Griffiths S C, Hicks R B, Milone E F. *Royal Astronomical Society of Canada, Journal*, 1988, 82: 1
- [67] Osman D, Goksel K. *Ap&SS*, 1991, 181: 313
- [68] Henry T J, McCarthy D W Jr. *AJ*, 1993, 106: 773
- [69] Henry T J, Franz O, Wasserman L *et al.* *A&AS*, 1997, 191: 4406
- [70] Malkov O Yu, Piskunov A E, Shpil’Kina D A. *A&A*, 1997, 320: 79
- [71] Malkov O Yu. *A&A*, 2003, 402: 1055
- [72] Pourbaix D. <http://wwwhip.obspm.fr/gaia/dms/texts/DMS-PJ-01.ps>, 2005
- [73] Jefferys W H. *AJ*, 1980, 85: 177
- [74] Jefferys W H. *AJ*, 1981, 86: 149
- [75] William H. *Numerical recipes*, Cambridge: the Press Syndicate of the University of Cambridge, 1986. 436~448
- [76] Pourbaix D. *A&AS*, 1994, 290: 682
- [77] Zuker S, Mazeh T. *AJ*, 2000, 531: L67
- [78] Mason B D *et al.* <http://ad.usno.navy.mil/wds/wds.html>, 2006
- [79] Hartkopf W I *et al.* <http://ad.usno.navy.mil/wds/int4.html>, 2006
- [80] Pourbaix D. <http://sb9.astro.ulb.ac.be>, 2006
- [81] Belikov A N. *VizieR On-line Data Catalog: V/85A*, 1995
- [82] Svechnikov M A. <http://cdsweb.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?V/118>, 1999
- [83] Pribulla T. T. <http://cdsweb.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?V/119>, 2003
- [84] Dryomova G N, Perevozkina E L, Svechnikov M A. *A&A*, 2005, 437: 375
- [85] Dommanget J, Nys O. *A&A*, 2000, 363: 991
- [86] <http://www.chara.gsu.edu/~taylor/catalogpub/>
- [87] <http://www.eso.org/projects/vlti/community/index.html>, 2005, 5
- [88] <http://joy.chara.gsu.edu/CHARA/array.html>, 2005, 5
- [89] [http://www.physics.usyd.edu.au/astron/susi/susi\\_astron.html](http://www.physics.usyd.edu.au/astron/susi/susi_astron.html), 2005, 5
- [90] Zwitter T, Munari U. *The Environment and Evolution of Double and Multiple Stars, Proceedings of IAU Colloquium 191*, 2004, 21: 251
- [91] Lindegren L, de Bruijine J H J. *ASP Conf.*, 2005, 338: 25
- [92] Halbwachs J L, Mayor M, Udry S *et al.* *The Environment and Evolution of Double and Multiple Stars, Proceedings of IAU Colloquium 191*, 2004, 21: 20
- [93] Ruymaekers G, Cuypers J, Boffin H J. *Birth and Evolution of Binary Stars, Poster Proceedings of IAU Symposium No. 200 on The Formation of Binary Stars*, 2000, 200P: 172
- [94] Torres G, Boden A F, Latham D W *et al.* *AJ*, 2002, 124: 1716

- [95] Torres G, Stefanik R P, Latham D W. ApJ, 1997, 479: 268  
[96] Torres G, Stefanik R P, Latham D W. ApJ, 1997, 485: 167  
[97] Fekel F C, Scarfe C D, Barlow D J *et al.* AJ, 2002, 123: 1723

## Progress in Determination of Orbital Parameters of Binaries

REN Shu-lin<sup>1,2</sup>, FU Yan-ning<sup>1</sup>

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The determination of the orbital parameters of binaries is an important constituent of fundamental astronomy. It can provide orbital parameters of component stars, which are necessary for a high-precision and dense catalog of stars. Also, it is the only reliable way of determining stellar masses, a crucial parameter for many astronomical researches. A large amount of high precision data about binaries has accumulated, and it is increasing rapidly these days. As a result, the determination of the orbital parameters of binaries is now a hot joint topic between astrometry and celestial mechanics. Historical background is briefly introduced, and recent progress is reviewed, including various kinds of observational data, theoretical models, fitting methods, and published and on-line results. Future perspective is also presented.

**Key words:** celestial mechanics; astrometry; binaries; review; determination of orbit