

文章编号: 1000-8349(2004)02-0115-07

# 近 10 年我国天体测量的发展

金文敬<sup>1</sup>, 李东明<sup>2</sup>, 夏一飞<sup>3</sup>, 朱 紫<sup>3</sup>, 陈 力<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 3. 南京大学 天文系, 南京 210093)

**摘要:** 简述天体测量学研究的内容以及与各相关学科之间的关系; 描述近 10 年来国际天体测量研究的进展和前沿课题; 叙述我国天体测量研究的历史背景和研究基础, 以及近 10 年来在国家自然科学基金委员会和其他科学组织支持下取得的成果, 并对今后 10~20 年我国天体测量的发展提出初步看法。

**关键词:** 天体测量学; 光学天球参考架; 评述; 星团; 银河系; 太阳系天体

**中图分类号:** P129      **文献标识码:** A

## 1 研究内容与国际动态

天文学是研究天体起源和演化的一门学科, 而天体测量学是天文学的分支学科之一, 它是一门测量天体位置、运动、大小的理论、方法及应用的学科。其最重要的任务是根据天文学研究和相关学科发展的需要, 以天体测量星历表的形式建立准惯性的天球参考架。主要研究内容包括: 天体的位置、自行、视差、有关天文常数的精确测定, 以及用天体测量参数研究星团和银河系的结构和运动。天体测量学的发展与天文学中其他分支学科的发展是紧密相联的; 地球科学、空间科学的需求也极大地推动了天体测量的发展。天体力学为天体测量学提供了理论基础, 天体物理研究得到的天体物理性质也是进行天体测量研究不可缺少的知识。另一方面, 天体测量学的成果为天体物理学、天体力学、地球科学、空间科学等领域提供了研究工作必需的基本参考架和天体测量参数的数据库。未来的天体测量学在从毫角秒级向微角秒级精度发展进程中将提供更丰富的观测资料, 这不仅可以满足天文学、地球科学、空间科学研究工作的需求, 而且还可为天体物理学、天体演化学和宇宙学新理论的问世作出贡献。

随着科学技术的发展, 天体测量学的研究手段和内容有了不少变化。例如: 观测仪器从子午环、等高仪、天体照相机等经典仪器发展为甚长基线干涉仪、天体测量卫星和以电荷耦合器件 (CCD) 为终端设备的观测仪器; 过去一台仪器仅局限于二维、球面上的方位测量, 而现在

**收稿日期:** 2003-08-28; **修回日期:** 2003-12-29

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (10333050 和 10373021); LAMOST 工程课题 (合同号 00BJK003); 中国科学院知识创新重要方向资助项目 (KJ CX2-SW-T1)

已走向三维(包括距离)测量时代;在建立光学参考架时,过去以亮星作为基本星,现在却是利用遥远的河外射电源作为基准点;过去的观测局限于光学波段,而现在的目标是把河外射电参考架扩充至红外、X射线和 $\gamma$ 射线等波段。

20世纪90年代以来,基本天体测量学的最大成就是河外射电参考架的建立和依巴谷星表的问世。目前国际上采用的准惯性天球参考架是1997年第23届IAU(International Astronomical Union)大会发布的国际天球参考架。它包括全天608颗射电源的位置,其精度平均为 $\pm 0.25$  mas,参考架的指向稳定在 $\pm 0.014$  mas以内<sup>[1]</sup>。1989年依巴谷卫星的成功发射开辟了空间天体测量的新纪元。作为依巴谷卫星的主要成果——依巴谷星表于1997年正式发表。它包括了近12万颗恒星的基本天体测量参数:位置、自行和视差,并从1998年起取代沿用了10余年的FK5星表,成为光学基本参考架。尽管位置精度不及河外基准射电源,但由于星数众多和全天均匀分布,光学参考架,即依巴谷参考架在天文、空间、测地研究领域仍然被广泛应用。

当代基本天体测量的前沿领域有4个:一是亚毫角秒乃至微角秒精度的天体测量,这是天文学研究和深空探测的需要,它将由21世纪初发射的天体测量卫星来实现;二是红外乃至多波段天球参考架的创建;三是依巴谷星表向暗星的扩充和射电参考架的加密;四是利用天体测量参数研究星团和银河系的结构和运动<sup>[2]</sup>。在今后10余年内地面天体测量仍将起重要作用。与空间天体测量相比,地面天体测量虽然观测精度低,但也有不可忽视的优势:丰富的暗星观测历史资料;投资少,见效快,安排灵活;特别是在CCD测量技术被广泛应用后,地面测量与空间测量之间更具有互相补充的作用。空间天体测量卫星发射前需要地面天体测量做大量细致的准备工作。另外,长周期变化的天体(如变星、双星和太阳系行星等)、密集的星团、暗天体(如晚型的M型矮星、白矮星和棕矮星)及联网观测的天象(如行星和小行星掩星)仍然需要地面观测。目前地面天体测量急需解决的课题除参考架向暗星方向扩充外,各种参考架的连接、太阳系天体运动的监测等也是主要的研究内容。

## 2 近10年国内研究进展

我国天体测量工作者利用佘山40 cm照相天体仪长期积累的照相底片作了多方面的研究:天琴RR型变星自行、疏散星团成员的证认、目视双星历表以及银河系距离尺度和星团运动学的研究等。尽管我国没有子午环,但是在建立我国独立的世界时系统的同时,用时间和纬度测定仪器,如光电中星仪、目视等高仪和光电等高仪,通过合理安排观测纲要,也开展了不少天体测量工作。中国的3部星表:光电中星仪授时总星表、目视等高仪综合星表和光电等高仪总星表与世界上优秀的子午环星表相比,光电中星仪授时总星表和光电等高仪总星表的精度是名列前茅的,它们曾为FK5基本参考架的建立作出了贡献。另外,利用精确的天体测量资料建立行星卫星运动的精密理论,以及利用飞船的空间探测资料进行“行星和地球动力学特性的比较研究”工作也正在逐步开展,并已取得了较好的成果。

进入20世纪80年代后,为了更好和持久地支持我国科学技术的基础研究工作,我国成立了国家自然科学基金委员会。在自由申请的基础上,通过专家评审,国家自然科学基金委员会择优资助重大、重点和面上项目。从“七五”计划至“十五”计划,天体测量的重点课题:

“天文参考系的准确定义及其实现”、“高精度天文参系研究”、“高精度天体测量学参数的测定及动力学应用”和“依巴谷参考系的扩充和应用”已连续 4 次得到基金委的资助; 还有一些课题也得到了面上项目资助。近 10 年来我国天体测量研究工作所取得的成果如下:

### (1) 天球参考系的理论和应用

在相对论框架中给出了长度的天文单位的基本概念和定义, 为天文单位的精确推算提供了理论依据<sup>[3]</sup>。无旋转原点的研究是第 24 届 IAU 大会所决议的采用天球历书原点和地球历书原点的基础工作, 它为今后微角秒天球参考架的建立和维持打下了基础。章动是天球参考架与地面参考架之间的转换参数之一, 在二阶扁率精度下, 给出了包含海洋和大气的、形状微椭且旋转对称的、处于非流体静止平衡态的粘弹性地球的章动序列, 成为 2000 年国际上 4 个章动理论模型之一<sup>[4]</sup>。依巴谷星表向暗星扩充, 即建立暗天体参考架, 不仅在银河系研究中具有广泛应用, 而且在宇宙飞船导航、近地天体探测、空间目标监测、地面望远镜光纤观测等领域也是必不可少的参照。已完成的工作主要有: 河外射电源光学定位, 实现依巴谷参考架和射电参考架的高精度连接, 对此上海天文台和乌克兰尼古拉耶夫天文台还进行了合作研究, 目前该课题已经扩展为由多个国家参与的国际合作项目; 用依巴谷星表推算 FK5 的系统差并讨论其对地球指向参数的影响, 结果已在全国大地测量天文点的平差中使用; 图像复原技术在 CCD 观测中的应用提高了 CCD 光学定位精度<sup>[5]</sup>; 施密特底片处理技术的分析研究以及 CCD 联合平差技术的应用, 将与漂移扫描技术一起在大科学工程大天区面积多目标光纤光谱望远镜 (LAMOST) 所需的标准天区和输入星表中发挥作用。还有小角旋转法在编制光学星表、最大似然估计在星团成员星证认中的应用等。

### (2) 星团和银河系运动学及动力学特性的研究

银河系球状星团和疏散星团的运动学与动力学性质是银河系演化模型的关键约束之一。其中球状星团的空间运动及轨道特性与其金属丰度之间的相关性, 直接影响到银河系形成模型的建立, 因此精确测定星团的空间运动和轨道参数具有重要意义。利用佘山底片历元间隔长的优势, 获取更多球状星团的高精度绝对自行和空间运动, 结合已知的星团距离及视向速度, 就能计算并探讨这些星团在给定的银河系引力势中的运动轨道。已经给出 4 个球状星团的绝对自行测定和空间轨道计算, 其中 M10 的计算结果表明, 该星团具有明显的盘族 (而非以前认为的晕族) 星团运动特征<sup>[6]</sup>。已整理汇集了迄今最完整的、具备绝对自行与视向速度数据的 144 个疏散星团样本, 计算得出这些星团的三维空间速度。另外对银河系疏散星团的空间分布、运动学性质及其与银盘演化的关系进行了统计分析。

用依巴谷星表的自行资料, 开展了关于 O-B5 型早型星、经典造父变星及 K-M 型巨星的银河系天文学研究, 并对银河系自转常数值重新确定、经典造父变星运动学问题以及太阳相对于不同星族的运动特征等进行了研究<sup>[7]</sup>。

### (3) 大行星和天然卫星运动及力学特性的研究

20 世纪 90 年代以来, 太阳系空间探测 (如对木星系统和火星的一系列探测) 取得了许多令人振奋的结果, 这为行星和天然卫星动力学特性的研究提出了若干新课题, 这些课题的解决不仅对太阳系起源和演化等基本理论具有科学意义, 而且还对航天事业的发展具有直接应用价值。随着我国空间事业的发展, 太阳系大行星 (包括月球) 必将成为直接探测的对象。为顺利实施这些空间计划, 需对行星和天然卫星的动力学参数及特性进行全面的了解和系统研

究。已完成的工作主要有：利用伽利略飞船的探测结果建立了木星的4颗伽利略卫星的内部结构模型，计算了它们的动力学和形状参数；对地球、金星和火星的动力学特性进行了比较研究；有关木卫三内部模型和动力学参数的论文发表后，得到国外同行的认同和引用<sup>[8]</sup>。近年来，对火星的空间探测又成为太阳系研究的热点之一，为此对火星自转动力学的研究现状作了详细评述。同时精确测定了8颗土星卫星和5颗天王星卫星的精确位置，并对各种卫星运动理论进行了比较<sup>[9]</sup>。

历经长期努力工作，国家天文台云南天文台已完成子午环的研制，并于2002年通过仪器鉴定。该仪器在安装漂移扫描装置后，观测的极限星等达到17 mag，进行相对观测可以开展有关课题的研究。

### 3 今后工作设想

天体测量学科属于基础研究，结合国家需求和学科本身可持续发展的特点，我们认为今后天体测量中长期发展方向是：

#### (1) 光学天球参考架的研究

空间观测对于天体测量学的发展具有划时代的意义。20世纪末各国空间研究中心和宇航局纷纷提出第二个天体测量卫星计划，欧洲空间局和美国喷气推进实验室分别主持的GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) 和SIM (Space Interferometry Mission) 将在2010年和2009年发射<sup>[10,11]</sup>，它们测定的天体位置精度均为微角秒量级。未来的空间天体测量不仅在观测精度上有3个数量级的提高，而且还可改变传统天体测量单一位置观测的方式，对天体同时进行天体测量、测光和分光的测定。

由于大气反常折射，地面大角度测量的极限精度约为 $0.''04$ ，而小角度的相对测量精度可达 $0.3\text{ mas}$ ，因此地面观测的作用不可忽视。2000~2002年继依巴谷后天体测量的重大发展是一些高精度加密星表，如UCAC2 (US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog)<sup>[12]</sup>、CMC13 (Carlsberg Meridian Catalogue)<sup>[13]</sup>、SDSS (Sloan Digital Sky Survey，目前仅发表早期观测资料)<sup>[14]</sup>、NPM2 (Northern Proper Motion)、GSC2.2 (Guide Star Catalog)<sup>[15]</sup>等的发表。另外还有2MASS (Two Micron All Sky Survey)<sup>[16]</sup>、DENIS (DEep Near-Infrared Survey of the Southern Sky) 等红外星表，以及光学和红外的证认。

具体课题有：1) 在广义相对论框架的微角秒精度的天文参考系中，归算GAIA观测资料的理论模型、检测广义相对论以及发现木星质量的地外行星等；2) 测定天体物理学感兴趣天区14~22 mag星的位置和自行；3) 通过国际合作开展特殊天体，如天琴RR型变星<sup>[17]</sup>、脉泽源等位置、自行和距离的精确测定。另外我国正在进行探月计划，已具备开展空间天体测量计划的技术和条件，可在适当时候实施我国的天体测量卫星计划。

#### (2) 星团和银河系动力学的研究

这是与天体物理学交叉的课题。银河系疏散星团包含几十至数千颗恒星，其成员具有相同的化学组成和空间运动，是研究盘族恒星系统结构和演化的良好样本。对疏散星团成员运动学参数的高精度测定，结合其金属丰度的观测资料，将提供星团动力学状态和银盘整体结构演化、银盘加热机制等的重要信息。银河系球状星团巨大的成员数和同时、同地形成的特点

使其成为研究恒星形成、演化和动力学的理想实验室,也成为研究银河系形成与演化的活化石。银河系形成模型的建立与球状星团的空间运动及轨道特性和其金属丰度之间的相关性有着密切的联系。

银盘上不同区域的恒星和星团运动情况可作为银盘引力势分布的探针,其中近银心区的运动学性质对银河系中心黑洞的研究具有关键意义。银盘形状翘曲的起源和维持机制至今仍未解决,已成为当天体物理学的热门课题<sup>[18]</sup>。在观测检验上,通过年轻恒星的空间分布及其运动情况可以很好地确定银盘气体的分布。太阳附近大样本恒星天体测量数据的获得将有助于高精度测定本地质量体密度和面密度。通过与银河系引力势模型比较,能够为银盘中不可见物质的研究提供有力的观测依据。

尽管依巴谷的测定视差精度约 1 mas,其结果与地面的长期观测结果仍有分歧,如昴星团的距离有 10% 差异。这主要是因为相对精度为 10% 的星仅占总星数 18%。另外由于卫星运行时间和极限星等的限制,观测银河系距离尺度基准的毕星团和昴星团的成员星以及天琴 RR 型变星的数量也不够多。地面望远镜配置 CCD 后测定视差精度为  $\pm 1$  mas,现正在进行的有美国海军天文台 1.55 m 望远镜的视差计划、QUEST (QUasar Equatorial Survey Team) 天琴 RR 型变星巡天计划等。用近百年间距的底片得到的精确自行也可以提高测定移动星团距离的精度。

大施密特望远镜拍摄底片的扫描和 CCD 观测得到的数字化星像数据库,以及空间望远镜的观测资料是天文学家的共同财富,综合使用这些星像和我国长期的观测资料对开展我国全波段天文学有重要意义。

主要研究课题有: 1) 采用天体测量长期的观测资料精确测定疏散星团和球状星团所在天区星的自行,用更大的样本进行星系动力学的研究; 2) 采用大样本研究银河系结构和运动模型、检测翘曲现象和暗物质; 3) 通过天琴 RR 型变星绝对星等和移动星团平均视差的测定,研究银河系距离尺度的基准。

### (3) 太阳系天体的精密定位及其内部结构和运动的研究

太阳系是人类的近邻,也是人类对宇宙认识的起始点。1969 年 7 月人类登上了月球,21 世纪中叶人们期望踏上火星。太阳系天体的空间探测是研究太阳系的重要手段。20 世纪 50 年代先驱者 3 号和 4 号、月球 2 号和 3 号,60 年代探测器号、徘徊者 4 号对月球进行了探测;水手号和海盗号对火星进行了探测;旅行者和伽利略号对木星及其卫星系统进行了探测等。目前,美国和欧洲一系列的探测计划即将执行,如火星探测漫游者号、木星冰卫星的轨道器等。

行星和卫星的轨道运动周期长,需要地面台站的长期观测。日月食以及行星卫星交食则需要国际联网观测。另外,CCD 天体测量的发展使人们能观测太阳系中更暗的卫星和近地小行星,为今后安全发射飞船和预测近地小行星及空间垃圾撞击地球事件提供资料。利用行星和卫星空间探测资料研究其内部结构、运动和演化是人类登上另一行星的重要保证,也是认识自然的重要手段。

主要研究内容有: 1) 精确测定行星及其卫星位置,参加国际联测,发挥我国研究人员的作用; 2) 用我国测定行星和卫星的定位结果以及国际行星和卫星空间探测资料研究其测地和物理特性,并积极参与欧洲空间局 NEIGE (NETlander Ionospheric and Geodesic Experiment) 计

划中有关火星岁差和章动的研究；3) 配合国防部门对近地小行星、空间目标和碎片进行监测。

在我国加强基础研究的科技政策下，我国天体测量研究通过国家自然科学基金委员会和其他科技组织给予了具体的实施和研究经费的保证；“八五”、“九五”等5年计划制订了详细的科研项目进程；通过国际合作和人员交流以及参加国际学术会议，我国天体测量研究已纳入国际研究的前沿领域并在某些项目上保持领先水平。天体测量学是一门与国民经济发展密切相关的学科，如高精度加密的天球参考架、近地天体和碎片的监测等，因此在发展基础研究的同时也应开展与国民经济密切相关的服务项目。随着空间和新技术的发展，测量精度将从毫角秒提高至微角秒级，大样本天体测量参数的广泛应用也使所取得的成果更显著，从而把我国天体测量的研究推上一个新台阶。

**致谢** 鲁春林、沈凯先和唐正宏对本文部分内容提出了宝贵意见，黄乘利提供了火星 NEIGE 研究计划的有关资料，特致谢意。

### 参考文献:

- [1] Gontier A M, Bail K Le, Feissel M *et al.* A&A, 2001, 375(2): 661
- [2] Wenjing Jin, Platais I. In: Han R ed. Report on Astronomy, Transactions of the International Astronomical Union Vol. XXVA, CA, USA: Astronomical Society of the Pacific, 2003: 30
- [3] Huang T Y, Han C H, Yi Z H *et al.* A&A, 1995, 298(2): 629
- [4] Huang C L, Jin W J, Liao X H. Geophys. J. Int., 2001, 146: 126
- [5] Tang Z H, Wang S H, Jin W J. AJ, 2001, 121(2): 1199
- [6] Chen L, Geffert M, Wang J J *et al.* A&AS, 2000, 145(2): 223
- [7] Zhu Z. PASP, 2000, 112(774): 1103
- [8] Zhang C Z. Earth, Moon, Planets, 2000, 84: 115
- [9] Shen K X, Dourneau G, Qian R C *et al.* A&A, 2001, 367(3): 1061
- [10] <http://astro.estec.esa.nl/GAIA/>
- [11] <http://sim.jpl.nasa.gov/>
- [12] <http://ad.usno.navy.mil/ucac/>
- [13] Evans D W, Irwin M J, Helmer L. A&A, 2002, 395(1): 347
- [14] Stoughton C, Lupton R H, Bernardi M *et al.* AJ, 2002, 123(1): 485
- [15] <http://www-gsss.stsci.edu/gsc/gsc2>
- [16] <http://www.ipac.caltech.edu/2MASS>
- [17] Vivas A K, Zinn R, Andrews P *et al.* ApJ, 2001, 554(1): L33
- [18] Reshetnikov V, Combes F. A&A, 1998, 337(1): 9

## Development of Astrometry in China in the Most Recent Decade

JIN Wen-jing<sup>1</sup>, LI Dong-ming<sup>2</sup>, XIA Yi-fei<sup>3</sup>, ZHU Zi<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The astrometric research contents and the relationship with other subjects are described. The

development of international astrometric researches in the most recent decade and the advanced subjects are given. The four advanced research subjects are: (1) realization of sub-milliarcsecond and even microarcsecond astrometry by astrometric satellites to be launched at the beginning of 21 century for requirement of astronomical research and deep sky survey; (2) establishment of infrared and even multi-wavelength reference frames; (3) extension of Hipparcos catalogue to faint stars and densification of the ICRF (International Celestial Reference Frame); (4) research work of cluster and Galactic structure, kinematics and dynamics by mean of astrometric parameters. The historic background and current basis of astrometric research in China, as well as the results obtained under the supporting of National Natural Science Foundation and other scientific organizations, are indicated. Our preliminary suggestions for astrometric research in China in the next 10–20 year are submitted as follows:

(1) The research work for optical reference frame includes: 1) precise reduction model for GAIA observational data in general relativistic framework with accuracy of micro-arc-second, detection of general relativity theory as well as astrometric search of Jupiter-mass planet around nearby stars; 2) determinations of positions and proper motions for stars with magnitudes 14–22 in sky areas with astrophysical interests; 3) observations of special objects such as RR Lyrae variables, maser sources etc. to determine their positions, proper motions and distances. In addition, the project of lunar survey is being implemented in China with the technology and condition being available to launch an astrometric satellite. It will be undertaken in the near future.

(2) The research work of star clusters and Galactic dynamics includes: 1) determinations of proper motions of memberstars in clusters by century-old photographic plates and modern epoch observations to study galactic dynamics in use of a larger sample; 2) research work of galactic structure and kinematics, detection of warp and dark matter; 3) determinations of the absolute magnitude of RR Lyrae variables and average parallax of moving clusters to study the distance scale of Galaxy.

(3) The determinations of positions, interior structures and motions for celestial objects in the solar system includes: 1) determinations of positions of planets and their satellites, and participation of international campaign for observing objects in the solar system; 2) research work of geodesy and physical characteristics for these objects by using positional observation data from our own observational results and space exploration data in the world as well as studying precession and nutation of the Mars which is a part of research contents of the NEIGE project operated by ESA; 3) monitoring near earth objects such as asteroid, certain space targets, space debris etc. in collaboration with related division of the Ministry of National Defence.

**Key words:** astrometry; optical celestial reference frame; review; clusters; Galaxy; celestial bodies in solar system