

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.z1.07

# 天然卫星观测及轨道改进研究进展

张会彦<sup>1</sup>, 严 丹<sup>2,3</sup>, 鄢玉荣<sup>4</sup>, 乔荣川<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600; 3. 中国科学院 大学, 北京 100049; 4. 深圳市国家气候观象台, 深圳 518040)

**摘要:** 在介绍天然卫星光学观测及轨道理论研究的背景和意义的基础上, 分析了国内外研究现状和趋势, 讨论了该领域的研究方法, 最后重点介绍了本课题组在该领域近年来的研究进展。指出加强对天然卫星观测资料的积累, 开展应用性较强的定量理论研究工作, 既有基础理论研究的意义, 也将在未来深空探测中具有潜在应用价值。

**关键词:** 天然卫星; 光学观测; 轨道研究

**中图分类号:** P128      **文献标识码:** A

## 1 引 言

1610 年, 伽利略发现了木星的四颗卫星 (以后称为 Galileo 卫星), 从此, 人类开始了对天然卫星的观测; 借助于新的技术和手段, 新的卫星依然不断被发现。早在 19 世纪纽康 (Newcomb) 就指出研究天然卫星运动的重要性, 强调任何卫星历表的改进都必然包含着天文常数及行星质量的重新讨论。1874—1928 年被认为是天然卫星观测和轨道研究的全盛时期<sup>[1]</sup>。到 20 世纪 30 年代以后, 天然卫星的观测和研究相对较为沉寂。直到 20 世纪 60 年代末, 随着行星际航天时代开始, 才又引起人们对天然卫星观测和研究的兴趣。在其后的多次 IAU 国际天文学联合会大会上, 天然卫星研究工作与深空探测计划一起被多次讨论。大会呼吁全球更多学者在天然卫星的观测和轨道研究方面投入更多精力和望远镜观测时间, 同时指出, 随着外太阳系探测工程的逐步开展, 对这类自然天体的高精度历表需求将越来越多。由此, 越来越多的国家参与到了天然卫星观测和研究工作中。到 20 世纪 70 年代后期, 世界上主要国家, 如美、苏、英、法、日、中等, 都开展了相应的观测和研究工作<sup>[2]</sup>。

几十年过去了, 目前国际上太空探测正在以前所未有的速度迅猛发展, 如此众多的航天工程引起了人们对包括太阳系小天体在内的外空间环境越来越多的关注。随着大行星卫星运动理论研究工作的不断深入, 对天然卫星的动力学模型精度和位置观测精度也提出更高的要

资助项目: 国家自然科学基金 (U1331112, U1431227, 11173027, 11573029)

通讯作者: 张会彦, zhanghy@shao.ac.cn

求。作为太阳系的重要成员, 天然卫星的天体测量工作对太阳系的起源和演化、近地小天体以及系外行星的探测研究都有着重要的意义<sup>[3]</sup>。然而, 天然卫星数目众多、轨道周期较长且受外力影响复杂, 对卫星系统运动理论的研究需要长周期、大样本的观测, 以获取满足时域和空域更长、更宽覆盖的天体测量数据。对各行星的天然卫星系统进行原始观测和资料积累, 开展应用性较强的定量理论研究工作, 既有基础理论研究的意义, 也将在国家空间战略中具有高度前瞻性。

## 2 国内外研究现状与趋势

21 世纪是人类向外太空 (特别是太阳系空间) 发展和进军的伟大时代。随着国际国内空间探测事业的广泛开展和飞速发展, 人们对太阳系天体的关注和研究 (包括对太阳系天然卫星等小天体的运动理论的研究和位置观测) 有增无减。同时, 世界各主要航天大国纷纷出台了的空间探测战略和计划。例如美国先后出台了“新探空计划”和“全球探测战略”; 欧空局提出“曙光女神”计划, 我国也先后发布了“中国至 2050 年空间科技发展路线图”。

天然卫星的高精度定位观测方面, 除了各个地面天文台的观测设备更多地投入到该领域数据收集工作中外, 深空探测器的空间观测资料也为进一步提高该类自然天体的轨道精度做出巨大贡献。IMCCE (Institut de Mecanique Celeste et de Calcul des Ephemerides) 建立了 NSDC (Natural Satellites Data Center) 数据库, 用于收集、整理全世界的天然卫星观测资料, 这也为轨道理论研究者提供了丰富的数据保障<sup>[2]</sup>。

20 世纪 80—90 年代, 在 IAU 的呼吁和土星空间探测需求的推动下, 土星卫星运动理论研究有了长足的发展, 到 20 世纪末已达到相当高的精度。其中英国和中国学者合作建立的“Taylor-Shen”理论<sup>[4]</sup>, 成为首个土星主要卫星的轨道理论模型, 也是当时四个主要土卫现代理论 (Taylor 和 Shen (1988)<sup>[4]</sup>, Dourneau(1993)<sup>[5]</sup>, Harper 和 Taylor (1999)<sup>[6]</sup>, Duriez 和 Vienne (1997)<sup>[7]</sup>) 之一, 得到公认并被广泛采用。除研究土星卫星系统, 人们对土星以外的太阳系其他外行星系统 (如天王星和海王星系统) 的研究兴趣也日益增加。天王星卫星运动理论的研究进展相对较慢, 1987 年 Laskar 与 Jacobson 一起完成了天王星五颗主要卫星的总理论 GUST86<sup>[8]</sup>, 该理论模型较为全面, 将天王星卫星运动理论研究向前大大推进一步, 至今仍有沿用。2013 年, Emelyanov 等人使用更全面数据 (含地面照相底片、CCD 观测资料以及 Voyager2 飞船获得的空间观测资料), 时间跨度长, 如含 220 a 的 Titania 和 Oberon 的观测资料, 160 a 的 Ariel 和 Umbriel 的观测资料和 60 a 的 Miranda 的观测资料, 建立了新的轨道模型, 给出了从 1787 年到 2031 年这五颗主要卫星的历表<sup>[9]</sup>。海王星卫星轨道理论研究, 需解决一些卫星特殊摄动的计算困难, 如对海卫一的摄动计算及海王星极的岁差运动影响等, 考虑不全会引起所求得的偏导数矩阵成病态, 而使轨道改进收敛不好。Jacobson 在 1987 年和 1990 年分别使用当时可获得的观测资料对海卫一的轨道进行了改进; 而 1990 年的轨道模型当时是作为 Voyager 工程的支撑数据使用, 正因为此位置误差, 这个历表没能为该工程任务提供准确的数据<sup>[10]</sup>。究其原因, 主要是当时可使用的观测资料非常有限, 精度也不高; 另

一方面,海卫一和海王星的一些物理参数(如GMs,及海王星的J2值)的精度也有限。随着技术的发展,对海卫一地面观测资料越来越多,精度也越来越高。近些年来,相继出现一些新的历表,如Emelyanov等人(2013)<sup>[9]</sup>,Jacobson(2009)<sup>[10]</sup>和Zhang等人(2014)<sup>[11]</sup>分别提出的模型。

中国科学院国家授时中心沈凯先、乔荣川研究小组自20世纪80年代中期就开始从事天然卫星的照相观测及轨道理论研究工作,从1999年开始持续发表土卫、天卫和海卫的大量高精度CCD天体测量观测资料,并不断地在国际前沿领域开展天然卫星轨道理论的研究工作。公开发表的高精度观测资料被英、法、俄收入天然卫星数据库中,用作建立太阳系卫星历表的重要资料来源。暨南大学彭青玉研究小组在大量观测天然卫星CCD图像资料的基础上,从计算机软件设计底层开始编程,致力于研究高精度测定大行星及其暗卫星位置的图像处理与分析方法等<sup>[12]</sup>。近年来以唐正宏研究员为首的上海天文台天体测量团组,也积极参加了天然卫星的观测和资料分析研究工作,并在天体测量仪器研制方面取得了一定成果。与此同时,上海天文台建立的底片库收录了全国百余年照相观测底片资料,其中含天然卫星照相底片。目前与国家授时中心研究小组合作,利用相关硬件设备和独立研制的图像处理软件,重新归算了部分天然卫星目标位置。研究发现对底片进行数字化后,结合最新高精度参考星表,可以明显提高目标的定位精度,同时也有可能发现过去资料归算处理时遗漏的观测目标。

### 3 天然卫星光学观测及轨道改进工作

目前国际上可提供大行星历表服务的主要有美国喷气推进实验室(JPL)和法国巴黎天文台力学与历表计算研究所(IMCCE)等。积累各大行星天然卫星的地面和空间观测资料,对于进一步改进卫星本身的轨道和历表可提供很好的数据基础,进而为我国独立开展深空探测、提供高精度天然卫星历表服务打下坚实理论基础。

对于天然卫星光学观测及轨道改进研究的工作内容,可用以下框图来描述,如图1所示。首先,为了保证观测顺利开展及保证观测所得图像的质量,在实施观测前充分做好准备工作是非常重要的。对于天然卫星的观测首先要获取目标的预报位置及亮度信息等。目前国际上有很多的研究团组和单位可以提供天然卫星的预报信息,如JPL和IMCCE,以及我们自己的观测预报软件等。在观测过程中需要详细记录观测中的天气变化、曝光时间(曝光时间一般写入FITS文件头)等信息,根据天气情况调整曝光时间和观测计划,以保证获取观测资料的星像质量。完成观测后需要对观测资料进行数据处理,即CCD图像处理,主要包括图像预处理、参考星识别与匹配、目标星识别和底片模型建立及目标星位置、星等归算四部分。经过长时间和多观测站观测资料的积累,进而开展相应目标的轨道理论研究,确定其轨道模型,完成轨道改进工作。目前主要轨道改进依赖于更长期、更多观测站、更高精度(包括资料分析,如星像中心定位方法、参考星表的改进等因素,也包括观测所使用仪器的更新,如更高分辨率的观测设备的使用等)的观测资料的累积,另外针对部分目标,在对其轨道进行计算时也使用了新的相关模型,并通过与其他模型历表进行比较的形式验证模型的

正确和可行性。

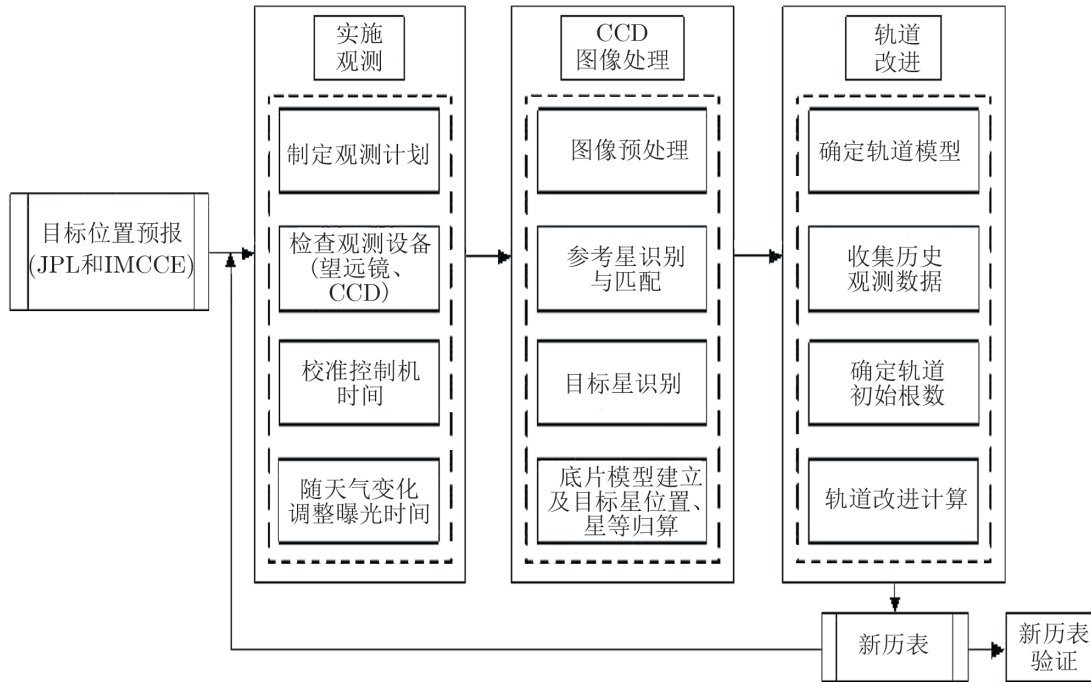


图 1 天然卫星光学观测及轨道改进工作流程框图

### 4 观 测

如前所述, 20 世纪 80 年代中期以沈凯先和乔荣川研究员为首的课题组率先在国内开展该领域研究, 研究目标涉及到土星、天王星、海王星、火星和木星, 表 1 给出了国内开展各类目标研究的起始时间。该类观测目标据其自身亮度、位置等特点分别用不同望远镜观测。主要为国内光学望远镜, 如上海天文台佘山观测站 1.56 m 望远镜 (配备照相底片、CCD), 上海天文台江南天池观测站 25 cm 望远镜 (伽利略卫星的掩食观测), 国家天文台兴隆观测站 80 cm、1 m 和 2.16 m 望远镜, 云南天文台凤凰山观测站 1 m 望远镜及高美谷观测站 2.4 m 望远镜 (天然卫星暗弱目标观测), 国家授时中心 35 cm 和新建造的 50 cm 望远镜。

观测经历了天文照相底片观测、CCD 观测, 数据处理中也伴随着恒星星表的不断完善、星像中心定位方法的不断优化, 而每一阶段所提供的观测资料都具备较高精度。观测资料经过数据归算, 并将其与历表进行比较, 确认观测数据无误后在国际核心期刊上以论文形式公开发表, 这些资料均已被收录在 IMCCE 的天然卫星数据库中, 作为公开资料, 供全世界该领域学者使用。表 2 列出了近些年已发表的观测资料, 具体数据处理方法及观测系统参数均可在相应文献中查阅。

表 1 各大行星及其卫星观测起始年份

观测目标	开始观测年份
土星及其部分卫星	1985
天王星及其部分卫星	1990
海王星及其部分卫星	1996
火星及其部分卫星	2008
木星及其部分卫星	2009
* 土星照相底片再处理	2014

表 2 已发表观测资料统计

观测目标	观测资料时间跨度	观测资料数量
土卫 1-8	1994 年—1995 年 <sup>[13]</sup>	451
土卫 1-8	1997 年—2000 年 <sup>[14]</sup>	1 167
土卫 1-8	1987 年—1990 年 <sup>[15]</sup>	(底片数字化)
土卫 9	2003 年—2004 年 <sup>[16]</sup>	115
土卫 9	2005 年—2008 年 <sup>[17]</sup>	1 173
天卫 1-5	1995 年—1997 年 <sup>[18]</sup>	864
天卫 1-5	1998 年—2007 年 <sup>[19]</sup>	2 358
海卫 1	1996 年—2006 年 <sup>[20]</sup>	943
海卫 1	2007 年—2009 年 <sup>[21]</sup>	1 095
海卫 2	2006 年—2007 年 <sup>[22]</sup>	112

## 5 轨道改进

Taylor-Shen (T-S)<sup>[4]</sup> 理论综合了 20 世纪 60 年代以来发表的关于土卫主要卫星的一些理论,并在摄动项中包含了振幅大于 0.01 mas 的短周期项,也是率先对土星的 8 个主要卫星的运动轨道同时做改进而建立的理论。轨道改进拟合中采用了 1966—1983 年可使用的 14 000 个照相观测资料,其历表的定位精度在 600~1 200 km, Hyperion 在 2 500 km 以上。该理论也成为当时盛行的土卫轨道四大理论之一。其后随着观测资料的更新,不断涌现出更新的轨道模型,这些模型均可在 IMCCE 网站上得到。

随着观测资料不断增多,课题组在土卫九和海卫一的轨道理论研究方面取得了长足的进展。分别于 2005 年和 2012 年使用数值积分方法,对可获得的土卫九 1904—2003 年的观测数据进行拟合,完成了其轨道理论改进。对于海卫一,在 Jacobson 所建立的轨道的基础上,采用新的极模型,在计算中获得较好的收敛,完成了新的轨道改进。比较了 Jacobson (2009) 和 Zhang 等人 (2014) 两种 Triton 轨道模型,其表现出很好的吻合度,仅有 1 mas 的差异,该历表也成为目前 IMCCE 在海王星轨道模型中可使用的三大模型之一<sup>[11]</sup>。

另外,在对大行星质量重新计算方面,我们在 1994 年曾通过对 Titan、Rhea 和 Iapetus 这 3 颗土星卫星的观测数据做数值拟合来改进轨道,以求解土星质量和形状参数<sup>[23]</sup>。2007

年, 重新使用土卫九 1905 年—2006 年的位置数据对土星质量进行了求解<sup>[24]</sup>。虽然仅由离主星较远的土卫 9 单颗星求解不令人信服, 但我们使用了覆盖一个世纪的足够长时间的资料很好地弥补了这一不足, 并获得有价值的结果。改进后的轨道与实测数据的差值为 0.3~0.8 as, 主要取决于观测资料的目标定位精度, 该结果与 JPL 历表轨道精度相当。

## 6 总结与展望

天然卫星地面光学观测, 将继续向目标定位精度更高、时间跨度更长、地域跨度更广的方向发展, 地面观测资料与空间探测获得的观测资料结合, 将为今后改进天然卫星和大行星历表奠定坚实的数据基础。随着各种图像处理 and 星像中心定位算法的不断完善, 轨道理论模型将得到更好的改进, 为实现高精度天然卫星定轨和常数解算工作奠定理论基础。本课题组也将继续关注更多的天然卫星目标 (如不规则天然卫星等) 的原始观测资料采集, 并优化目前资料处理方法, 针对亮源附近暗弱目标的星像中心定位问题着重进行研究, 进而提高该类目标的定位精度, 为轨道理论进一步研究提供更高精度观测资料。在充足的各个天然卫星观测资料的基础上, 将逐步完成各个目标的历表归算, 进而完成我国天然卫星星历表库的建设。

### 参考文献:

- [1] Sinclair A T, Taylor D B. *A&A*, 1985, 147: 241
- [2] <http://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress-report/42-178/178C.pdf>, 2009
- [3] Emel'Yanov N V, Arlot J E. *A&A*, 2008, 487(2): 759
- [4] Taylor D B, Shen K X. *A&A*, 1988, 200: 269
- [5] Dourneau G. *A&A*, 1993, 267: 292
- [6] Harper D, Taylor D B. personal communication, 1999
- [7] Duriez L, Vienne A. *A&A*, 1997, 324: 366
- [8] Laskar J, Jacobson R A. *A&A*, 1987, 188: 212
- [9] Emelyanov N V, Nikonchuk D. *MNRAS*, 2013, 436: 3668
- [10] Jacobson R A. *AJ*, 2009, 137(5): 4322
- [11] Zhang H Y, et al. *MNRAS*, 2014, 438: 1663
- [12] Peng Q Y, et al. *AJ*, 2012, 144(6): 170
- [13] Qiao R C, et al. *A&AS*, 1999, 137: 1
- [14] Qiao R C, et al. *A&A*, 2004, 422: 377
- [15] Yan D, et al. *MNRAS*, 2016, 457: 2900
- [16] Qiao R C, et al. *MNRAS*, 2006, 454: 379
- [17] Qiao R C, et al. *MNRAS*, 2011, 413: 1079
- [18] Shen K X, et al. *A&A*, 2002, 391: 775
- [19] Qiao R C, et al. *MNRAS*, 2013, 428: 2755
- [20] Qiao R C, et al. *MNRAS*, 2007, 376: 1707
- [21] Qiao R C, et al. *MNRAS*, 2014, 440: 3749
- [22] Qiao R C, et al. *MNRAS*, 2008, 391: 1791
- [23] 沈凯先, 乔荣川, 张雪芳. *天文学报*, 1994, 35(2): 120

[24] 沈凯先, 乔荣川. 时间频率学报, 2007, 30(2): 138

## The Progress of Natural Satellite Observation and Orbit Improvement Research

ZHANG Hui-yan<sup>1</sup>, YAN Dan<sup>2,3</sup>, YAN Yu-rong<sup>4</sup>, QIAO Rong-chuan<sup>2</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatoty, Shanghai 200030; 2. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600; 3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049; 4. Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040)

**Abstract:** This paper introduced the research background, significance of the natural satellites and orbital theory research. At the same time, the domestic and foreign research progress and trend of this field also were presented here. This article discussed the research methods and showed the valuable results and achievements of our research group. This research work requires more and more natural satellite observations and original data. Based on the large amount of data, continuing the quantitative theoretical research work will make the meanings of both the basic theory research and potential applications in future space exploration.

**Key words:** natural satellite; optical observation; orbital theory research