

土星卫星运动的现代理论和 CCD 观测定标归算

沈凯先 乔荣川 刘建荣

(中国科学院陕西天文台 临潼 710600)

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

(中国科学院天文联合开放实验室上海基地 上海 200030)

摘 要

在目前土卫 CCD 观测中,采用亮卫星的理论值定标的方法已被广泛采用,然而如何尽可能减小理论引入的误差对定标的影响仍是一个有待研究的问题。在最新研究中,采用 3000 多个最新的 CCD 观测对 4 个土卫现代理论作实算分析和比较,并由对归算结果的初步分析得出一些有价值的结论。

关键词 土星卫星 — 天体测量 — CCD — 定标法

分类号 P185.58

1 引 言

自 20 世纪 60 年代末航天事业开展以来,土星运动理论的研究和定位观测在国际上已取得显著进展。卫星定位观测技术和方法不断得到改进,观测的精度大大提高,一些新的卫星运动理论相继问世。80 年代末两个包括了土星主要卫星的运动理论分别由 Taylor 和 Shen^[1](1988) 和 Dourneau^[2](1987) 完成,这两个新理论都建立在大量观测的基础上,曾被称为 80 年代末两个‘最佳理论’。90 年代初,又有两个新理论相继提出,它们分别由 Harper 和 Taylor^[3](1993) 以及 Vienne 和 Duriez^[4~7](1991,1991,1992,1995) 完成。前者使用了 100 多年观测资料,并在理论中增加了一些摄动项,主要是太阳摄动项;而后者则是一个全新的二阶理论,包含了大量长周期项和短周期项。据称其内部符合可达几 km,这样的精度即使是用于未来的空间观测资料也是足够的。

60 年代末照相技术替代了延续近百年的目视观测,新的观测手段大大提高了观测的精度,从而奠定了新理论发展的基础。然而随着航天事业的发展,特别是 1997 年‘Cassini’土星飞行计划的执行,对卫星定位精度的要求甚高。目前理论精度已迅速提高,而观测

的精度相对落后, 这样, 观测新技术和新方法的应用以提高观测的精度就变得十分迫切。80 年代 CCD 新技术开始在自然卫星的观测中采用, 这一技术的优点很快显现出来, 到 90 年代 CCD 观测的定位精度已经超过照相的精度, 采用 CCD 技术替代照相观测已成为必然。然而, 目前 CCD 观测也存在一些尚未完全解决的问题。90 年代以来, 我们在上海天文台佘山站使用 1.56m 望远镜镜开展土卫的 CCD 定位观测, 取得相当数量资料。1999 年, 我们在《Astron. Astrophys.》^[8] 上发表了 1994~1996 期间所获得的观测结果, 并对解决 CCD 观测的定标问题作了探讨, 提出了一个‘多理论法’ (Multi-theories method)。2000 年, 我们又与法国学者 Dourneau 合作开展进一步的研究, 并完成一篇论文^[9]。该文综合上述 4 个现代土卫理论, 对 CCD 定标时采用‘多理论法’的合理性以及在‘理论定标法’中最佳理论的选用作了实算分析。这里我们对这一研究成果作一简要陈述。

2 现代土星卫星运动理论

(1) Taylor-Shen(T-S) 理论

T-S 理论^[1] 发表于 1988 年, 它综合了 60 年代以来发表的一些主要理论, 其摄动项包括了振幅大于 0.01" 的短周期项。这是第一个为对土星的八个主要卫星的运动轨道同时作改进而建立的理论。在轨道拟合改进时采用了 1966~1983 年取得的 14000 多个照相观测资料, 包括 Pascu 未发表的一批高质量照相资料。理论给出了 8 颗主要土卫新的轨道根数和一些重要参数的改正。但由于资料覆盖的时间仅 20yr, 未给出新的平运动值。其历表的定位精度在 600~1200 km, Hyperion 在 2500 km 以上。

(2) Dourneau 理论

1987 年法国波尔多大学 Dourneau 的博士论文^[2] 也给出了土卫主要卫星的运动理论。1993 年 Dourneau^[10] 才正式发表了经过修改的理论。理论采用了一百多年取得的 22000 个定位资料, 其中大量是 60 年代以前的目视观测, 而照相资料中有 30% 的资料是由 Veillet 和 Dourneau^[11] 在 1980~1985 期间获得的。这个理论也给出了八颗主要卫星的改进根数。由于采用了一百多年的资料, 获得新的平运动值。而几个很小参数的改进也有很好的收敛。如: Enceladus ($\gamma = 0.0262$)、Dione ($\gamma = 0.0139$)、Rhea ($e = 0.000265$)、Titan ($\omega = 0.5118/\text{yr}$)。理论还给出四个内卫星和 Hyperion 天平动的主要参数以及共振对 Mimas-Tethys、Enceladus-Dione 的振幅、周期和位相的改正。摄动包括的项与 T-S 理论基本相同。历表的定位精度最好的可达 350 km。但 Mimas 和 Iapetus 在 1000 km 左右, 而 Hyperion 可达 2500 km, 与 T-S 理论接近。

(3) Harper-Taylor(H-T) 理论

H-T 理论^[3] 发表于 1993 年, 未包括 Hyperion。1999 年 Taylor^[12] 完成了他的最新的 Hyperion 理论。我们把它们总称为 H-T 理论。理论归算中采用了 Strugnell 和 Taylor 的‘土卫观测表’^[13] 中 1874~1989 年的 51000 个资料, 并新增了约 10000 多个新资料, 是目前采用资料最多的。归算中还对照相和目视观测作了不等权处理。理论给出新历元 (JD 2426000.5) 的轨道根数、卫星的 Ω 和 ω 的长期变率, 并由此推出四颗内卫星的质量、 J_2 、 J_4 、共振对的周期和位相, 土星赤道平面的升交点黄经 (168.8387°) 和黄道面交角

(28.0653°)。理论增加了一些摄动项，特别是太阳摄动项。Harper 称其历表定位精度为 350 km，已达目前观测的极限。

(4) TASS (Theorie Analytique Des Satellites de Saturn) 理论

法国里尔 (Lille) 大学天文实验室的 Vienne 和 Duriez^[4~6] 于 1991~1992 年发表了称为 ‘TASS’ 的新土卫理论 (缺 Hyperion)，这一理论实际上是 Duriez 于 1979 年完成的 4 个外行星理论^[14](TGP) 在土卫的移植。理论采用了一组新的根数变量，由于其推导可程序化，因而它包括了大量摄动项，特别是长周期项。摄动展开到质量 (M) 和扁率 (J_2) 的一阶、偏心率 (e) 和倾角 (i) 的 6 次，(M 、 J_2) 二阶的 4 次和三阶的一次。据称内部符合为几 km，好于经典理论十倍，这样的精度即使对 Cassini 空间飞行的需要也可满足。1997 年 Duriez 和 Vienne^[15] 发表了 Hyperion 的理论，并完成了一个包括所有主要卫星的 TASS 最新版本 TASS 1.7。Vienne 认为先前的理论由于在处理共振项上的困难，在动力学上是不一致的。声称 TASS 是在一个统一的参考系上建立的，其参数具有最好的动力学一致性 (Coherent)，特别是质量、变率系数和半长径。

3 CCD 观测的定标 (Calibration) 问题

定标问题是目前 CCD 观测中未能解决好的一个主要问题。目前大尺寸 CCD 芯片仍然难以制造，观测自然卫星的望远镜一般都采用长焦距，实际的可观测到的视场就只有 4~6'，在这样一个小视场中很难找到足够的参考星来给待测卫星定位，卫星位置直接由 CCD 芯片上测量的直角坐标归算。但 CCD 芯片经常要从望远镜上装卸，它在望远镜上的位置并不固定，必须事先测定 CCD 芯片的坐标换算比例尺和芯片的方向，也即需要定标 (Calibration)。为此，许多学者提出各种不同的方法。目前采用最多的是有由 Jones 等人 (1989)^[16] 提出的双星定位和由 Colas 与 Arlot (1991)^[17] 采用的星团观测定位。但实践表明这两种方法都存在难以解决的问题：双星的空间张角一般不大。这样，测量误差会引起相当大的定位误差。目前主要被采用的双星是 61 Cygni，然而在观测中发现由于该双星相当亮，使得很难在 CCD 片上得到清晰的圆对称的星像。即使曝光时间短到 0.1s，星像仍然都是饱和和非对称的，导致测量存在很大误差，一般要加经验改正 (见：乔荣川等人 (1996)^[18]、Beurle 等人 (1993)^[19])。星团用作定标时的主要问题是：Harper (1997)^[20] 发现在分别对星团 M15 和 M92 的 40~60 颗星拟合星表后得到的定标值不一致。综上所述，这两种方法都不很好。虽然其他学者也提出过别的方法，但也都不太理想。Colas 和 Arlot (1991)^[21] 在对火星卫星资料归算时首次采用了由卫星理论位置进行定标 (Bright moons method)，这可大大简化观测的事后处理，减轻观测的工作量，避免由于天气变化使定标目标丢失的可能，且上面几种方法存在的问题也大多可以避免。这一方法以后为许多学者所采用，近年来我们在作 CCD 定标时也都采用这一方法。然而这样作的问题也很明显，Pascu 等人 (1987)^[22] 已指出，采用卫星理论定位必然会将理论的误差全部带进定标值中。1999 年在《Astron. Astrophys. Suppl. Ser.》上发表了我们在 1994~1996 年间取得的土星卫星 CCD 观测资料^[8]，文中提出一个 ‘多理论定标法’，即采用上述 4 个

理论综合定标, 目的在于尽可能平滑由采用单理论引入的误差。方法得到法国学者的肯定。2000 年我们与 Dourneau (法) 合作对理论定标法展开进一步分析, 采用 3000 多个 (包括我们取得的 500 多个) 近年获得的 CCD 观测资料作实算, 对由 4 个理论定标归算 $O-C$ 的 RMS , 并作了分析比较。研究结果的论文已在《*Astron. Astrophys.*》上发表^[22]。

4 结 论

Titan、Rhea、Tethys、Dione 是 4 个理论和观测精度最好的卫星, 一般都采用它们来作理论定标。我们分别用 4 个理论归算定标值, 然后归算相对 $O-C$ 平均差的 RMS 。由归算结果看, 四个理论精度分级是很清楚的: TASS 理论居首 ($0.015''$), H-T 和 Dourneau 理论其次 ($0.03''$), T-S 理论居后 ($0.04''$)。但这四个理论都能给出满意的精度 (RMS 为 $0.07 \sim 0.08''$), 其差异只在 $0.02''$ 之内。归算还表明采用‘多理论定标法’归算很接近 TASS 的归算。我们的结论是: 采用 TASS 作理论定标引入的理论误差是足够小的, ‘多理论定标’也可得到较理想的结果。到目前, 问题还不能说得到解决, 相信我们已作的一系列实算分析将推动 CCD 观测技术的进一步改进和发展。

参 考 文 献

- 1 Taylor D B, Shen K X. *Astron. Astrophys.*, 1998, 200: 269
- 2 Dourneau G. 1987, Thesis de doctorat d'Etat, Bordeaux, France: Universite de Bordeaux I
- 3 Harper D, Taylor D B. *Astron. Astrophys.*, 1993, 268: 326
- 4 Duriez L, Vienne A. *Astron. Astrophys.*, 1991, 243: 263
- 5 Vienne A, Duriez L. *Astron. Astrophys.*, 1991, 246: 619
- 6 Vienne A, Duriez L. *Astron. Astrophys.*, 1992, 257: 351
- 7 Vienne A, Duriez L. *Astron. Astrophys.*, 1995: 297: 588
- 8 Qiao R C, Shen K X, Liu J R et al. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1999: 137: 1
- 9 Shen K X, Dourneau G, Qiao R C et al. *Astron. Astrophys.*, 2001, 367: 1061
- 10 Dourneau G. *Astron. Astrophys.*, 1993, 267: 292
- 11 Veillet C, Dourneau G. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1992, 94: 291
- 12 Taylor D B. 2000, personal communication
- 13 Strugnel P R, Taylor D B. *Astron. Astrophys.*, 1990, 83: 289
- 14 Duriez L. 1979, Thesis, Bordeaux
- 15 Duriez L, Vienne A. *Astron. Astrophys.*, 1997, 324: 366
- 16 Jones D H P, Sinclair A T, Williams I P. *M.N.R.A.S.*, 1989, 237: 15p
- 17 Colas F, Arlot J E. *Astron. Astrophys.*, 1991, 252: 402
- 18 乔荣川, 沈凯先. 陕西天文台天文台台刊, 1996, 19: 1
- 19 Beurle K, Harper D, Jones D H P et al. *Astron. Astrophys.*, 1993, 240: 159
- 20 Harper D et al. *Astron. Astrophys.*, 1997, 121: 65
- 21 Coals P, Arlot J E. *Astron. Astrophys.*, 1991, 252: 402
- 22 Pascu D, Seidelman P K, Schmidt R S et al. *A. J.*, 1987, 93: 963

Contemporary Theories of Motion for Saturn's Major Satellites and CCD Calibration

Shen Kaixian Qiao Rongchuan Liu Jianrong

(Shanxi Astronomical observatory, The Chinese Academy of Science, Lintong, Shanxi 710600, china)

(Chinese National Astronomical Research Center. United Laboratory for Optical Astrometry, The Chinese Academy of Science, China)

Abstract

In the CCD technique in astrometry, the method of bright moons has been in common use in calibration, which suffers from inducing the systematic errors of the brighter moons ephemerides. Minimizing the errors is a problem to be solved. In our recent research the more than 3000 CCD data and the 4 contemporary theories of saturnian satellites were used in calculation for analysis and comparison, some valuable conclusions have been given. This paper show a brief description of our study .

Key words Saturn's satellites—astrometry—CCD—calibration methods