

密近交会在确定小行星质量中的应用评估*

唐怀金^{1,2†} 李 凡^{1,2} 傅燕宁^{1‡}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 小行星是太阳系的重要组成部分,目前已经发现的小行星已超过七十万颗,估计总数超过一百万.小行星密近交会事件是一种重要天象,可用于确定小行星的质量.为此需要做好准确的搜索和评估工作.现有的方法仅能评估密近交会事件中小行星对测试粒子的二体引力效应,在力学模型精确性和所提供信息的充分性两方面都不能完全满足指导观测的需要,为此发展了一种新的搜索和评估方法,引入信噪比指标刻画质量待定的小行星对作为测试粒子的小质量小行星的引力效应在观测上的体现,继而得出预估质量精度以量化某次密近交会事件对确定小行星质量的作用,并给出最佳的观测时间段以指导实际观测.利用该方法,系统地搜索评估了2000年至2030年间小行星交会事件,涉及773颗等效直径在50 km以上的小行星.

关键词 小行星, 方法: 数值, 历表

中图分类号: P185; **文献标识码:** A

1 引言

目前已经发现的小行星已超过七十万颗,截至MJD57600时,四十多万颗已完成编号.现今小行星已经成为各国深空探测的热点,例如我国嫦娥二号探测器实现近距离探测4179号图塔蒂斯近地小行星^[1],美国Dawn黎明号探测器也实现了对谷神星与4号灶神星的近距离探测和质量测定^[2],欧空局Gaia项目也包含对小行星的观测^[3].另外国际上还有许多小行星探测计划在筹备中^[2].

虽然小行星数量巨大,但是大量发现小行星并对其跟踪观测却是近代以来才开始兴起的.这是因为小行星体积小、反照率低和距离远,从而不易观测.多数小行星质量小,易受大质量天体的引力摄动.在与大质量小行星发生极密近交会时,会受到大质量小行星强烈的引力摄动.如果密近交会事件发生在不可观测的时间段,且大质量小行星的质量未知或者精度不高,可能导致小行星历表出现较大偏差,这将影响对小行星的跟踪观

2017-05-03收到原稿, 2017-05-31收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11178006、11533004、11273066)资助

[†]tanghj@pmo.ac.cn

[‡]fyn@pmo.ac.cn

测^[4], 甚至导致小行星丢失. 因此, 为了保持跟踪观测, 需要准确预报小行星密近交会事件, 及时对发生密近交会事件后的小行星进行密集观测以重新定轨, 同时提高大质量小行星的质量精度以减小小质量小行星的历表误差.

目前质量已知的小行星中大多数质量精度较低, 只有约50%的质量精度好于20%^[5]. 主带小行星质量参数精度低也制约着太阳系高精度行星历表的研制. 据估计, 主带小行星的总质量为 $(12.25 \pm 0.19) \times 10^{-10} M_{\odot}$, 约为2.5倍谷神星的质量^[6]. 每10年火星历表因主带小行星质量的不确定性而产生的误差为数公里. 这比金星的历表误差大2个数量级, 能够被VLBI (Very Long Baseline Interferometry)明显地观测到^[7]. 因此美国、法国和俄罗斯在研制太阳系高精度行星历表时都比较细致地考虑了主带小行星的引力摄动. 比如美国DE430历表包含343颗小行星、法国INPOP13c历表包含139颗小行星与小行星环、俄罗斯EPM2011历表包括301颗最大的小行星与小行星环^[8]. 随着对精度要求的不断提高, 会有更多的大质量小行星加入太阳系高精度行星历表的研制中. 综上可知大质量小行星的质量精度已成为制约小行星历表精度与太阳系高精度行星历表精度的关键因素.

目前能用于确定小行星质量的方法中精度较高的是动力学方法. 使用的受力体有火星^[9]、天然卫星^[5]、人造探测器^[10], 以及与之发生密近交会的小质量小行星. 可以利用前3种受力体确定质量的小行星数量有限, 因此目前主要是利用小行星密近交会事件提高大质量小行星的质量精度. 早在1966年至1968年, Hertz就通过一次交会事件确定出(4) Vesta的质量^[11], 2010年Zielenbach利用密近交会事件定出15号小行星的质量为 $(1.62 \pm 0.05) \times 10^{-11} M_{\odot}$, 对提高15号小行星的质量精度起到了重要作用^[12], 2011年他又完成104颗大质量小行星质量的确定, 其中有38颗小行星的质量是首次确定^[13]. 2014年Goffin利用密近交会事件拟合出230颗小行星的质量, 其中49颗是首次确定^[14]. 上述工作充分表明利用密近交会确定小行星质量的方法具有广泛的应用价值, 这种方法的应用需要对小行星密近交会事件做好准确的搜索与评估工作.

当前主要有两类模型评估密近交会事件对提高大质量小行星质量精度的作用: 偏转角模型与平运动改变量模型. 偏转角是早期预报小行星密近交会时主要使用的指标, 力学模型包含大质量小行星与测试粒子的二体效应^[15]. 作为高精度天体测量的代表, Gaia项目中也包含了对小行星及其密近交会事件的观测, 同样使用了偏转角作为密近交会的评估指标^[16-17]. 另外一个常用的指标是测试粒子由于密近交会造成的平均角速度改变量, 使用的力学模型仅包含太阳以及大质量小行星与测试粒子^[18-20]. 上述指标所使用的背景引力场考虑得不够充分, 这有碍于搜索和评估工作的准确性. 同时密近交会阶段大质量小行星对测试粒子的摄动效果只有通过一段时间的累积才能充分体现. 针对这些不足, 本文改进了现有的搜索评估方法.

近年来国际上许多相关研究机构建立了种类齐全的小行星数据库^[21], 这对于我们的研究工作提供了充分的数据支持与历表服务. 特别是国际天文学联合会(IAU)建立小行星观测数据库(MPC)¹, 用以收集全球小行星观测数据, 这为定量研究小行星动力学提供了充分的观测基础. 在本文的工作中, 小行星历表数据来自喷气推进实验

¹<http://www.minorplanetcenter.net>

室(JPL)小行星轨道数据库², 体积数据来自日本JAXA小行星数据库^[22], 质量数据主要来自DE历表文件与INPOP历表文件.

第2节介绍我们改进的小行星密近交会事件的搜索评估方法, 第3节对一个具体密近交会事件进行分析, 展示评估过程与结果, 第4节给出搜索评估结果, 并对该结果进行讨论分析.

2 密近交会搜索与评估

交会中的两颗小行星一般质量差别很大. 为了方便起见, 本文把小行星分为两类, 一类是待测质量的大质量小行星, 它们在交会中是摄动体, 记为M; 另一类是作为测试粒子的小质量小行星, 本文以已编号的小质量小行星作为测试粒子, 它们在交会中是受摄体, 记为T. 本文积分小行星历表采用的1阶后牛顿力学模型包含太阳、大行星、矮行星以及16个大质量的主带小行星, 其与JPL研制DE430历表时采用的力学模型相同^[23], 积分算法也采用JPL研制DE历表时采用的Adams算法.

在Carpino与Knezevic实际拟合小行星质量的工作中就发现不同时刻的观测资料对拟合小行星质量的作用是不同的^[18]. 本文在改进密近交会模型时, 利用信噪比指标可提前刻画不同时刻大质量小行星对测试粒子引力摄动在观测上的体现, 指导今后的实际观测以及更有效地使用观测资料.

2.1 相对作用强度与初筛

令 a_M 为主摄小行星在背景引力场中的加速度, a_T 为测试粒子在背景引力场中的加速度, R 为测试粒子与主摄小行星之间的距离. 定义相对作用强度指标如下:

$$F = \frac{|a_M - a_T|}{GM/R^2}, \quad (1)$$

其中 G 为万有引力常数, M 为主摄小行星质量.

初筛的目的是尽可能给出所有有可能用于提高小行星质量精度的密近交会事件, 指标的设定遵循从宽原则, 最小距离是常用的初筛指标^[15,19-20]. 本文处理的主摄小行星数量大, 质量跨度大. 实验发现以相对作用强度小于10000作为初筛指标效果较好.

2.2 信噪比与评估

为量化某次密近交会事件对提高大质量小行星质量精度的作用, 并给出最佳的观测时段以指导实际观测, 本文将计算主摄小行星对测试粒子引力摄动的可观测效应. 为此首先要确定积分起始时刻, 然后计算出信噪比指标, 最后基于信噪比指标得出预估质量精度与最佳观测时段. 具体的评估流程如下.

第1步是确定积分起始时刻, 积分起始时刻应在主摄小行星的引力摄动产生显著作用之前, 这样可以比较充分地体现密近交会过程中主摄小行星对测试粒子累积的引力摄动效应. 但是如果积分起始时刻与密近交会时刻的间隔过远, 由太阳系大天体的背景引力场干扰与各种非动力学效应导致的历表误差就会很大. 因此我们首先计算出密近交会附近间隔为1 d时间网格点上的相对作用强度值. 由于经历密近交会时, 相对作用强度变

²<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi/>

化速度很快, 因此不难参考距离密近交会足够远时间段($\lg F$)确定合理的积分初始时刻, 为明确起见, 我们把 $\lg F - \lg F$ 首次大于1的时刻定为积分起始时刻.

第2步是计算信噪比指标. 其中信号为主摄小行星质量取值不同时其累积摄动效应引起的测试粒子观测位置之差. 因为地面观测所得的绝大部分是方位资料, 所以我们仅考虑这种资料, 又因为本文工作不针对具体观测站点, 因此, 把主摄小行星的两个不同质量取值下算出地心视方向之间的夹角定义为反映该质量差别的信号 $S(M, M \pm \Delta M)$, 其中 M 为猜测值, ΔM 为质量改变值. 误差包含两个部分. 一部分是观测误差, 本文取10 mas, 这是当前大多数情况下地面光学望远镜观测小行星所能达到的观测精度. 另一部分源自动力学模型的误差, 主要是太阳系行星历表的误差, 由此导致的方位误差. 计算方法如下: 我们使用两套广泛使用的太阳系高精度行星历表, 即DE430与INPOP13c分别计算测试粒子的方位, 并把所得结果之间的夹角称为由背景场不确定性导致的误差. 我们把上述两种误差的均方根称为噪声 N .

第3步是计算预估质量精度指标与最佳观测时间段. 信噪比大于3是判断能否分辨引力摄动的标准. 通过不断地调整 ΔM , 计算密近交会后5 yr内信噪比最大值等于3时的临界质量差值 ΔM_0 , 并把 $\Delta M_0/M$ 作为预估质量精度指标. 然后将 ΔM 设置为 ΔM_0 的1.1倍, 便可获得信噪比大于3的时间段, 以此作为最佳观测时间段.

对于同一密近交会事件, 既可以在交会事件之前开始考虑摄动的累积效应并计算交会事件之后的信噪比指标, 也可以在交会事件发生之后逆向考虑累积摄动效应并计算交会事件之前的信噪比指标. 早期Carpino与Knezevic的拟合工作中也使用了双向拟合^[18].

3 案例展示

本节通过一个具体的密近交会事件说明我们的搜索和评估结果, 该事件所涉及的主摄小行星为(88) Thisbe, 中文名称尽女星, 其等效直径为 (195.59 ± 2.72) km. 目前已经定出的质量有 $(1.05 \pm 0.179) \times 10^{19}$ kg^[24]、 $(1.83 \pm 0.109) \times 10^{19}$ kg^[25]、 $(1.53 \pm 0.31) \times 10^{19}$ kg^[5]. DE430历表中采用的质量值是 1.732×10^{19} kg. 测试粒子为88021号小行星, 交会时刻为2019-05-11TDB10:50, 最小距离为0.00193 au, 密近交会时二者相对速度为 $1.65 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 密近交会时相对作用强度为75.97, 偏转角指标为608.44 mas.

由图1可知, 在密近交会最小距离时刻(88) Thisbe小行星对88201号小行星的引力作用比背景场的潮汐作用小两个数量级. 在整个密近交会阶段相对作用强度值变化幅度很大, 本文以相对作用强度的对数作为确定积分起始时间的指标. 如图2所示, 计算5 yr内信噪比最大值等于3时赋予(88) Thisbe的临界质量差 ΔM_0 , 进而确定预估精度值, 结果约为1.40%, 这个结果好于目前(88) Thisbe小行星的质量精度. 取1.1倍 ΔM_0 作为 ΔM 可得出信噪比大于3的最佳观测时段为2023-08-05至2023-10-06. 反向预报的结果是预估精度值1.79%, 最佳观测时段从2014-11-28至2014-09-26.

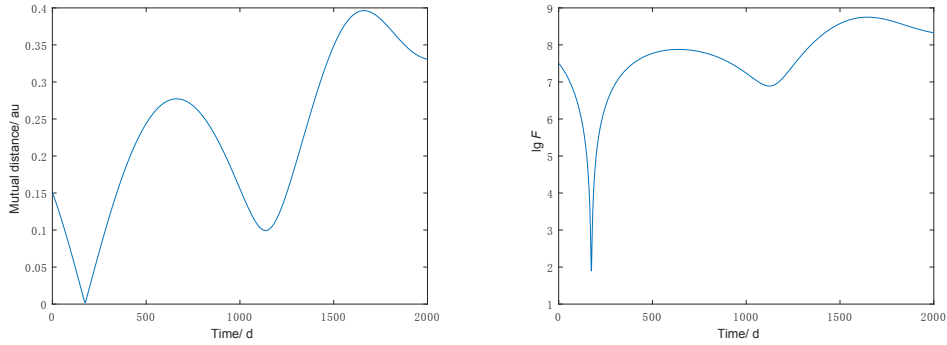


图 1 左图是(88) Thisbe与88021号小行星相互距离随时间的变化图, 右图是相对作用强度的对数 $\lg F$ 随时间的变化图. 两张图的时间起算点均为密近交会174 d前的2018年11月19日.

Fig. 1 The time evolutions of mutual distance between (88) Thisbe and asteroid (88021) (left panel) and the corresponding $\lg F$ (right panel). The time origin is 2018 Nov. 19, about 174 d before the encounter.

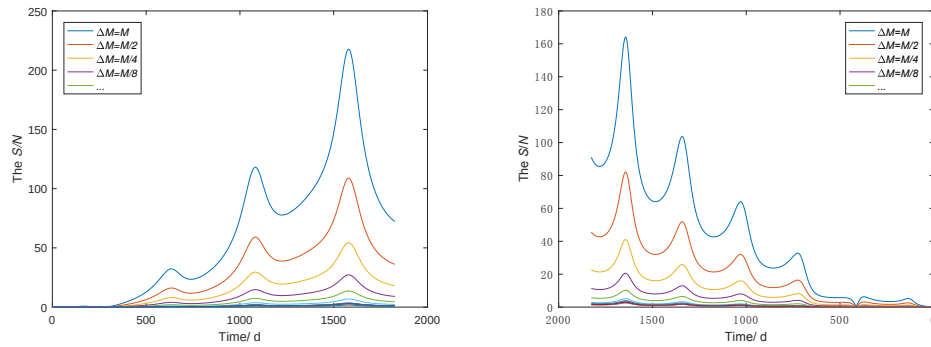


图 2 左图是按照正向时间轴进行评估的信噪比(S/N)图, 右图是按照反向时间轴进行评估的信噪比图, 左图积分起始时刻为2018年11月19日, 右图积分起始时刻为2019年11月2日. 两图的时间起算点都为密近交会时刻2019年5月11日, ΔM 取值范围从 ΔM_0 至 M .

Fig. 2 The time evolutions of signal-to-noise ratio (S/N) follow the normal timeline (left panel), and the time evolutions of S/N go the reverse timeline (right panel). The starting time of integral is 2018 Nov. 19 (in the left panel), and the starting time of integral is 2019 Nov. 2 (in the right panel). The time origin of both panels is 2019 May 11, and the span of ΔM is from ΔM_0 to M .

4 结果与讨论

表1给出了部分交会结果, 其中Time是密近交会时刻, M 为主摄小行星编号, Test为测试粒子编号, Distance为最小距离, Speed为密近交会时刻的相对速度, F_D 为最小距离时的相对作用强度值, P 为预估质量精度, BT与ET为最佳观测时段的开始与结束时刻, AM为测试粒子在最佳观测时间的视星等^[26]. 在2000年至2030年间, 有超过4000起密近交会事件能够在交会5 yr内产生可观的摄动效应. 全部结果见网页<http://ddl.escience.cn/f/H0rF>.

表 1 2000年至2030年部分小行星密近交会事件

Table 1 Some close encounters among minor planets from the year 2000 to 2030

Time (TDB)	M	Test	Distance/au	Speed/(km·s ⁻¹)	F_D	$P/\%$	BT	ET	AM/mag
2019-05-11 10:50	88	88021	0.001925	1.649466	75.97372	1.404	2023-08-05	2023-10-06	17.89
2018-03-04 01:54	14	115030	0.0002560	6.013525	0.31121	1.648	2022-08-12	2022-10-03	18.39
2020-08-26 23:50	10	129353	0.002807	3.711678	17.17689	1.868	2024-09-13	2024-11-11	19.05
2018-01-17 14:47	3	48718	0.000577	5.595799	1.01445	2.161	2022-03-29	2022-06-09	18.24
2018-01-31 12:03	19	125910	0.000718	1.488068	7.29024	2.478	2020-08-29	2022-03-10	19.49
2019-07-16 22:27	94	427341	0.000746	1.617772	4.62184	2.478	2023-06-06	2023-08-13	19.99
2019-09-23 12:46	48	254981	0.002340	1.787726	50.35868	2.625	2023-11-02	2024-01-29	20.00
2019-09-16 00:45	48	181181	0.001093	2.235667	5.68685	3.626	2023-11-25	2024-02-04	19.49
2020-09-11 04:27	15	426760	0.004122	3.952353	416.36918	4.333	2025-04-30	2025-06-22	19.93
2020-08-05 18:42	16	261298	0.001864	3.182668	36.25588	5.066	2024-07-27	2024-10-03	20.61
2020-01-06 09:31	511	168125	0.002474	7.298295	64.68463	5.945	2024-02-06	2024-03-29	19.5
2019-12-01 17:05	16	222229	0.002187	3.778263	74.2715	5.994	2022-03-21	2022-05-19	18.3
2019-08-25 23:03	19	79699	0.003201	1.084354	647.04727	6.531	2024-08-10	2024-08-24	19.08
2020-09-21 00:13	104	42056	0.001026	1.829785	42.46809	6.726	2024-09-02	2024-11-07	18.78
2019-10-18 15:04	52	8660	0.004733	2.620749	425.20321	7.239	2024-06-09	2024-08-20	15.74
2020-09-15 18:04	29	119139	0.001537	3.513357	59.01157	7.312	2023-11-08	2023-12-30	18.53
2019-12-29 22:31	11	302750	0.001978	2.746842	288.32518	7.922	2024-06-28	2024-08-28	19.20
2019-02-15 19:12	39	90026	0.001350	1.135093	37.84987	8.899	2020-11-14	2021-01-14	18.86
2018-07-11 15:18	94	115559	0.004625	1.096241	835.68912	9.119	2023-06-11	2023-07-11	19.75

积分起始时刻测试粒子的历表误差对实际拟合主摄小行星的质量是重要参数, 积分起始时刻前后测试粒子尚未受到主摄小行星显著的引力摄动, 因此应在积分起始时刻之前进行密集观测以尽量减小积分起始点测试粒子的历表误差. 最佳观测时段是主摄小行星对测试粒子引力摄动的可观测效应最大的时间段, 也应进行密集观测.

本文使用的力学模型中主带小行星仅考虑了16颗大质量小行星与主摄小行星. 对于测试粒子与多个主摄小行星发生密近交会事件, 通过调研发现这种事件发生概率小, 本文不予考虑. 对于其他大质量小行星所产生的引力摄动, 仅需考虑加入引力摄动效应较大的小行星. 对于如太阳风、Yarkovsky效应等非动力学效应对小行星造成的历表误差在短期内可忽略不计.

参考文献

- [1] 叶培建, 彭兢. 中国工程科学, 2006, 8: 13
- [2] Russell C T, Raymond C A. SSRv, 2011, 163: 3
- [3] Hestroffer D, Dell'Oro A, Cellino A, et al. The Gaia Mission and the Asteroids // Souchay J, Dvorak R. Dynamics of Small Solar System Bodies and Exoplanets. Lecture Notes in Physics, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, 790: 251-340
- [4] Farnocchia D, Chesley S, Milani A, et al. Asteroids Comets Meteors 2014, 2014: 177
- [5] Carry B. P&SS, 2012, 73: 98
- [6] Vladimirovna P E, Petrovich P N. IAU-GA, 2015, 29: 2256614
- [7] Standish E M, Fienga A. A&A, 2002, 384: 322
- [8] 金文敬. 天文学进展, 2015, 33: 103
- [9] Somenzi L, Fienga A, Laskar J, et al. P&SS, 2010, 58: 858
- [10] Konopliv A S, Asmar S W, Bills B G, et al. SSRv, 2011, 163: 461
- [11] Hertz H G. Science, 1968, 160: 299
- [12] Zielenbach W. AJ, 2010, 139: 816
- [13] Zielenbach W. AJ, 2011, 142: 120
- [14] Goffin E. A&A, 2014, 565: A56
- [15] Hilton J L, Seidelmann P K, Middour J. AJ, 1996, 112: 2319
- [16] Ivantsov A, Hestroffer D, Thuillot W, et al. Asteroid Masses with Gaia from Ground and Space-based Observations // EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013: 15
- [17] Desmars J, Bancelin D, Hestroffer D, et al. A&A, 2013, 554: 32
- [18] Carpino M, Knezevic Z. Determination of Asteroid Masses From Mutual Close Approaches. Proceedings of the First Italian Meeting of Planetary Science, Bormio, January 21-28, 1996
- [19] Galád A, Gray B. A&A, 2002, 391: 1115
- [20] Galád A. A&A, 2001, 370: 311
- [21] 关敏, 朱进, 高健, 等. 天文学进展, 2003, 21: 250
- [22] Usui F, Kuroda D, Müller T G, et al. LPI Contributions, 2012, 1667: 6119
- [23] Folkner W M, Williams J G, Boggs D H, et al. IPN Progress Report, 2014, 42: 196
- [24] Baer J, Chesley S, Britt D. Asteroid Masses V2.0. NASA Planetary Data System, 2009: 116
- [25] Baer J, Chesley S, Britt D. Asteroid Masses V2.0. NASA Planetary Data System, 2011: 131
- [26] Bowell E, Hapke B, Domingue D, et al. Application of Photometric Models to Asteroids // Asteroids II. Tucson: University of Arizona Press, 1989: 524-556

Application of Close Encounters in Determining the Masses of Asteroids

TANG Huai-jin^{1,2} LI Fan^{1,2} FU Yan-ning¹

(1 Purple mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT Asteroids are important part of the solar system. So far, the number of known asteroids is more than seven hundred thousand, and the total number is probably more than one million. Among many events of encounters among asteroids, those very close ones can be used to improve the precision of the masses of asteroids. To achieve this, it's necessary to search for the latter events in advance by making an accurate assessment of the effectiveness of an encounter in the mass determination. In this context, the previous dynamical models and assessing indicators are not precise enough. By using a more realistic dynamical model and introducing a properly defined Signal-to-Noise ratio, we are able to estimate the precision of the mass determination based on observations made from the Earth. Moreover, the best observation time span can be quantitatively given, which is useful in collecting observational data and planning further observations. We search systematically for the useful asteroid encounters involving one of the 773 massive asteroids with equivalent diameter larger than 50 km, for which the searched time span is from the year 2000 to 2030.

Key words asteroid, methods: numerical, ephemerides