

第66卷第3期
2025年5月

天文学报
ACTA ASTRONOMICA SINICA

Vol. 66 No. 3
May, 2025

doi: [10.15940/j.cnki.0001-5245.2025.03.007](https://doi.org/10.15940/j.cnki.0001-5245.2025.03.007)

小行星碰撞概率的分析方法的研究*

郑航^{1,2} 朱青峰^{1,2,3†} 宋叶志^{4‡} 李旭志^{1,2} 徐小慧^{1,2}
邱锦盛^{1,2} 赵峻涵^{1,2}

(1 中国科学技术大学物理学院天文学系 星系宇宙学重点实验室 合肥 230026)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

(3 深空探测(天都)实验室 合肥 230088)

(4 中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘要 针对目前已有的小行星碰撞监测系统之间结论不一致的现状, 研究了变化线碰撞监测系统所用到的线性近似方法, 得出此方法获得的轨道分布相对于理论轨道分布的偏离随着轨道传播时间增加而逐渐显著的结论. 使用蒙特卡洛方法计算了6个小行星实例的碰撞概率, 与已有的蒙特卡洛碰撞监测系统的结果比较, 差别最大为2.1倍标准差. 对小行星2020 VV在2056年10月内的碰撞样本进行了细致分析, 描绘了碰撞样本随时间和空间的分布图像, 获得了和已有的碰撞监测系统一致的结论. 关于不同碰撞监测系统间的比较, 得出的结论是蒙特卡洛碰撞监测系统和变化线碰撞监测系统目前各有优劣: 前者不会引入线性近似方法带来的误差, 但计算成本高; 后者所用到的线性近似方法将带来误差, 但可以找出一些碰撞概率低的、可能会被前者遗漏的虚拟碰撞源, 并且计算成本相对较低.

关键词 小行星: 近地小行星碰撞监测, 天体测量学与天体力学, 方法: 数据分析

中图分类号: P135; 文献标识码: A

1 引言

近地天体(Near Earth Object, NEO)碰撞监测(impact monitoring, IM)目前已有多 种分析方法^[1]. 1999年, 比萨大学(University of Pisa)的碰撞监测系统CLOMON使用贯穿置信区域(confidence region, CR)最狭长方向的1维空间, 即变化线(Line Of Variations, LOV)^[2], 来进行碰撞概率分析. 后来的CLOMON2相比CLOMON第1代, 使用新的天体测量误差模型^[3]. 美国国家航天局喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的Sentry使

用与CLOMON相同的分析方法^[4]计算碰撞概率. Sentry-II进行了改进, 使用蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)方法在6维轨道参数空间中抽样. 为了在可接受的计算资源消耗下获得精度较高的结果, Sentry-II使用重要性抽样(importance sampling)的方法, 对易碰撞的轨道参数空间区域进行重点抽样^[5]. 此外, 还有欧洲航天局(European Space Agency, ESA)近地天体协调中心(The ESA NEO Coordination Centre, NEOCC)的AstOD, 由SpaceDyS开发, 使用与CLOMON2类似的算法, 但具有不同的计算引擎^[6], 适用于不同的操作系统.

2024-05-06收到原稿, 2024-08-02收到修改稿

* 中国科学院战略性先导科技专项(XDB 41000000)资助

† zhuqf@ustc.edu.cn

‡ syz@shao.ac.cn

这3个小行星碰撞监测系统均采用国际小行星中心(Minor Planet Center, MPC)收集的观测结果进行碰撞监测分析. CLOMON2、Sentry-II和AstOD的预警信息分别发布在NEODyS, Center for NEO Studies (CNEOS)和NEOCC, 后文提到的碰撞监测系统, 均以信息发布网站名指代.

传统碰撞监测的时间尺度是100 yr左右, 传播时间过长会导致轨道非常弥散以至于无法准确预测, Fuentes-Munoz等^[7]提出了千年的大时间尺度上小行星碰撞风险的评估方法. 传统碰撞监测系统所考虑的目标特点是观测数据比较充分, 可以通过最小二乘(Least Squares, LS)定轨过程获得精度较高的轨道, 定轨信息可用于描述小行星轨道分布, 进而分析小行星碰撞概率. 如果目标观测数据较少, 例如观测弧不足1°, 则不能获得较高精度的轨道和轨道分布, 分析方法也需要做出改变. 在可以通过最小二乘定轨收敛求解的情况下, 置信区域会呈现出2维盘状的特征, 导致轨道分布置信区域无法用变化线代表, 可以使用2维变化线处理^[8]; 在最小二乘定轨不收敛的情况下, 可以通过允许区域(The Admissible Region, AR)^[9]分析轨道分布. 此特殊情况的碰撞监测系统有喷气推进实验室的Scout^[10], 相关信息发布在CNEOS. 比萨大学的NEOScan^[11], 相关信息发布在NEODyS, 还有赫尔辛基大学(University of Helsinki)的NEORANGER^[12].

传统碰撞监测系统之间碰撞概率计算结果不一致: CNEOS中累计碰撞概率最高的3个目标在NEOCC中没有给出预警, 而两个系统共有的预警目标, 碰撞概率也存在区别(截至2024年4月15日). 本文针对此情况, 分析了变化线碰撞监测系统会引入的误差, 也使用蒙特卡洛方法计算了一些小行星实例的碰撞概率, 对已有碰撞监测系统的结果进行验证. 第2节介绍了本文所使用的小行星碰撞概率计算方法及其不确定度分析. 第3节分析了变化线碰撞监测系统所用到的线性近似方法会引入的误差. 第4节使用蒙特卡洛方法计算一些小行星实例的碰撞概率, 也对小行星2020 VV的2056年10月内的碰撞样本进行了细致分析. 第5节为全文总结.

2 碰撞概率计算方法

高风险小行星可以到达很接近地球的距离, 此情况称为接近(close approach, CA), 一般判断为接近的距离阈值为0.05 AU. 接近发生时, 需要建立合适的参考系来研究小行星与地球的关系, 一般以目标平面(Target Plane, TP)^[13]为基础建立参考系及其坐标系.

2.1 目标平面

目标平面是过地心的平面, 目标平面坐标系以地心为原点. 目标平面的法向与小行星的地心速度平行. 更具体地, 目标平面存在两种定义: 第1种称为目标平面或B平面(B-plane), 它垂直于小行星无穷远处的地心无摄相对速度 V_∞ 方向. 无穷远指在地球的引力影响范围之外, 且接近已经发生; 第2种称为改良目标平面(Modified target plane, MTP), 它垂直于小行星最接近地球时的速度 V_{CA} 方向. 参考几何示意图1, CA是小行星轨迹上最接近地球的点, B-plane和MTP经过地心, B-plane垂直于 V_∞ , MTP垂直于 V_{CA} . 这两种目标平面的主要区别在于: MTP上, 小行星因地球引力作用而产生的偏转可以直接显示出来, 因为小行星轨迹在目标平面上的交点就是小行星最接近地球的点; 而B平面上, 引力作用的信息被隐藏. 对于相对速度较大或与地球距离较远的接近事件, 小行星轨道偏转非常小, 两种目标平面之间的区别可以忽略不计. 后文将使用MTP分析小行星碰撞.

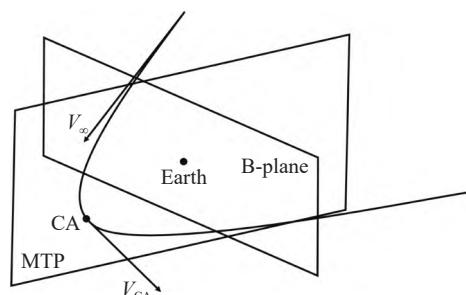


图 1 目标平面几何示意图

Fig. 1 Geometric figure of target plane

2.2 轨道分布和置信区域

小行星的轨道是通过观测数据计算获得的.

观测数据存在不确定性, 所以小行星的轨道亦存在不确定性, 可以通过Gauss分布估计轨道的分布^[4]. 记轨道标称解为 \mathbf{X}^* , 则此Gauss分布以 \mathbf{X}^* 为平均值, 以 $\mathbf{\Gamma}$ (定轨协方差矩阵) 为协方差矩阵:

$$q(\mathbf{X}) \sim N(\mathbf{X}^*, \mathbf{\Gamma}). \quad (1)$$

其中 q 是概率密度分布函数, \mathbf{X} 是轨道参数, N 为 Gauss 分布标准分布函数. 轨道参数空间中的置信区域由最小二乘定轨的目标函数变化量给出, 是小行星碰撞分析的轨道参数研究空间. 置信区域的定义是使目标函数变化量小于某个阈值的参数空间:

$$\frac{\Delta \mathbf{X}^T \mathbf{\Gamma}^{-1} \Delta \mathbf{X}}{m} < \frac{\chi^2}{m}, \quad (2)$$

其中 m 是观测点数目, $\Delta \mathbf{X}$ 是轨道参数向量与标称解的差, χ^2 是人为决定的限制置信区域大小的参数.

2.3 蒙特卡洛方法

小行星的动力学模型涉及N体问题, 轨道不可解析, 通过解析方法直接获得置信区域内所有轨道未来的状态是不可能的, 只能通过数值积分的方法分析置信区域中有限数目的轨道. 蒙特卡洛方法可以被用于分析小行星碰撞概率^[14].

根据上文描述, 在观测数据比较充分的情况下, 小行星的轨道可以通过最小二乘定轨获得标称解, 进而确定轨道分布. 记轨道参数空间中可以发生碰撞的区域为 F . 区域 F 也被称为虚拟碰撞源 (Virtual Impactor, VI), 定义为可以发生碰撞的轨道参数空间的子集^[6]. 碰撞概率为:

$$P_{\text{Impact}} = \int_F q(\mathbf{X}) d\mathbf{X}, \quad (3)$$

其中 P_{Impact} 是碰撞概率的精确表达. 在置信区域内进行抽样, 样本被称为虚拟小行星 (virtual asteroid, VA). 然后对每个样本进行轨道动力学传播, 判断其是否可以碰撞地球, 这相当于判断虚拟小行星样本是否处于区域 F 中. 通过:

$$\hat{P}_{\text{Impact}} = \frac{N_{\text{VI}}}{N_{\text{VA}}}, \quad (4)$$

得到所求碰撞概率的估计值. (4)式中 N_{VA} 是 VA 的数目, N_{VI} 是 VI 中 VA 的数目. 参考文献[15], 本文所使用的蒙特卡洛抽样属于对二项分布的随机变量的重复抽样, 使用样本估计变量的分布参数:

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= \bar{X} \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \\ \hat{\sigma}^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 分别是变量的期望和标准差的无偏估计, n 是样本数目, X_i 是样本, \bar{X} 是样本均值. 对于本文来说, 碰撞样本 X_i 取 1, 非碰撞样本 X_i 取 0. 有了这样的符号约定, 碰撞概率的估计值也可以表达为:

$$\hat{P}_{\text{Impact}} = \bar{X}. \quad (6)$$

根据文献[15]对中心极限定理的描述, 独立同分布的变量的均值 \bar{X} 的分布随着样本数目增大将无限逼近Gauss分布:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\bar{X} - \mu}{\sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}} \leq x \right) = \Phi(x), \quad (7)$$

其中 μ 和 σ 分别是变量的期望和标准差, $\Phi(x)$ 是标准Gauss累积分布函数. 通过(5)式估计 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$, 然后代入(7)式获得样本均值 \bar{X} 所趋近的Gauss分布的标准差 $\sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}$ 的估计, 此亦为样本均值 \bar{X} 的不确定度的估计:

$$\hat{\sigma}_{\hat{P}_{\text{Impact}}} = \hat{\sigma}_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}. \quad (8)$$

(6)式和(8)式分别是估计小行星碰撞概率及其不确定度的表达式.

3 变化线碰撞监测系统误差

NEOCC和NEODyS碰撞监测系统使用变化线方法分析碰撞概率, 在2维变化线空间上抽样, 分析变化线样本与地球的接近距离, 寻找变化线上与地球的接近距离的极小值点. 通过线性近似

方法估计每个局部极小值点在接近历元的轨道分布^[16], 将轨道协方差矩阵转化为接近历元的轨道协方差矩阵:

$$\boldsymbol{\Gamma}(t) = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Gamma}(t_0)\boldsymbol{\Phi}^T, \quad (9)$$

其中 $\boldsymbol{\Phi} \equiv \frac{\partial \mathbf{X}(t)}{\partial \mathbf{X}(t_0)}$, 是状态转移矩阵^[17-18], t 和 t_0 分别是时间变量和初始时间. 依照前文描述的轨道分布计算方法, 将接近历元的轨道协方差矩阵作为接近历元的轨道分布参数, 由此获得接近历元的轨道分布, 再通过线性关系获得小行星在目标平面上落点和接近历元的轨道参数的映射^[16], 进而获得落点的分布. 然后在目标平面上对处于碰撞截面内的落点分布积分, 即可获得小行星碰撞概率.

分布函数的等高面可以被用于描述分布轮廓,

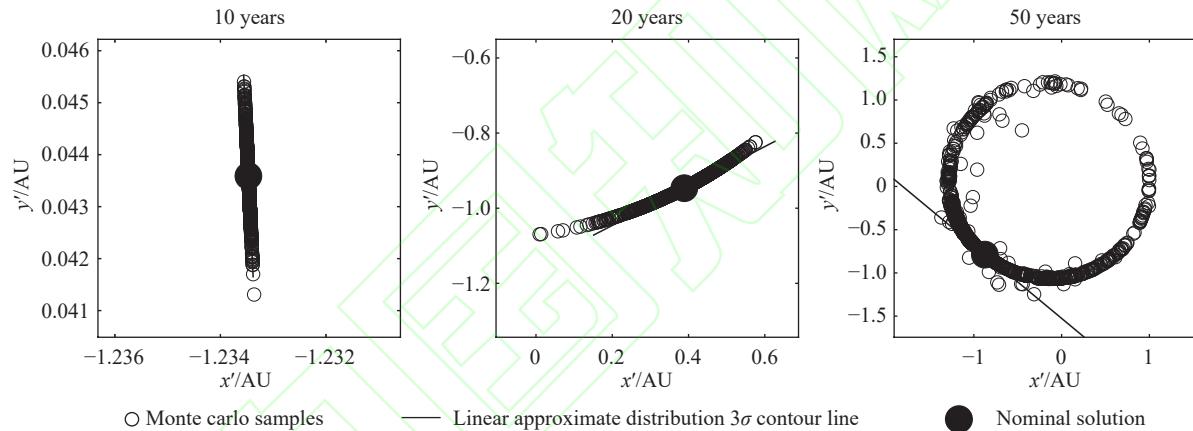


图 2 小行星2020 VV在轨道平面上的虚拟小行星坐标分布

Fig. 2 VAs' coordinate distribution of asteroid 2020 VV in orbit plane

变化线碰撞监测系统在通过线性近似方法获得接近历元的轨道分布之后, 又通过线性关系获得小行星在目标平面上落点和该时刻轨道参数的映射, 这也将导致误差. 这部分误差由小行星轨道分布几何特点决定, 不同的轨道之间各不相同. 变化线方法还会引入另一个误差: 在变化线上初步寻找虚拟碰撞源的过程中, 是在变化线上选择样本, 而使用变化线来代替置信区域也是一个近似. 在小行星观测数据相对较少, 定轨精度不高的情况下, 置信区域会比较宽, 变化线代替置信区域带

这个几何对象上的每一个点概率密度值相同. 图2为线性近似方法获得的小行星2020 VV轨道分布等高面和蒙特卡洛样本在空间中的分布, 显示了定轨历元10、20、50 yr后的轨道分布情况. 图像中平面是小行星2020 VV的轨道平面, 原点是日心, x' 方向是轨道在黄道面上的升交点方向. Cartesian类型轨道参数中速度被取为分布的期望值. 蒙特卡洛样本是数值积分获得的, 其分布可以被视为理论上的轨道分布. 定轨历元之后较短时间内, 比如10 yr, 线性近似方法获得的轨道分布与理论轨道分布高度重合; 随着轨道动力学传播时间变长, 线性近似方法获得的轨道分布与理论轨道分布区别逐渐显现, 50 yr后的线性近似结果已经明显地偏离了理论轨道分布.

来的误差会更高^[6].

4 碰撞概率分析实例

选择NEOCC风险列表中累计碰撞概率最大且在CNEOS中也给出了预警的6个小行星(2023年6月27日)进行碰撞概率计算. 按照前文所描述的蒙特卡洛方法计算碰撞概率, 计算过程分为3部分: 定轨、抽样、样本轨道动力学传播以及估计碰撞概率. 本节使用的轨道计算工具是开源的小行星轨道计算软件OrbFit¹.

¹ <https://adams.dm.unipi.it/~orbmaint/orbfit/>

从国际小行星中心获取这6个小行星观测数据记录来定轨。定义轨道参数差异指标 δ :

$$\delta \equiv |\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2| = \sqrt{\sum_{i=1}^6 (X_{1i} - X_{2i})^2}, \quad (10)$$

其中 \mathbf{X}_1 和 \mathbf{X}_2 是轨道参数向量。轨道参数向量需要进行无量纲化处理, 距离量纲为1 AU, 角度量纲为1 rad。表1中显示了6个小行星定轨结果及其与国

际小行星中心和喷气推进实验室(JPL)的Horizon的差异指标分别为 δ_{MPC} 和 δ_{Horizon} , 其中 a 、 e 、 i 、 Ω 、 ω 、 M 是轨道参数, MJD是定轨历元。定轨结果之间差异非常小, 差别最大的目标的差异指标 δ 为 10^{-3} 量级。图3为6个小行星定轨残差随日MJD的分布。所有小行星的定轨残差均在数个角秒内。综合以上与权威结果的比较以及残差的分布, 认为定轨结果可靠。

表 1 6个小行星定轨结果以及差异指标

Table 1 Orbit determination results for 6 asteroids and difference indicator

Asteroid ID	a/AU	e	$i/^\circ$	$\Omega/^\circ$	$\omega/^\circ$	$M/^\circ$	δ_{MPC}	δ_{Horizon}	MJD
2020 VW	0.84	0.35	3.04	221.62	41.42	357.09	3.0×10^{-4}	6.7×10^{-4}	60200
2017 WT28	0.90	0.13	5.77	243.06	35.89	114.09	3.4×10^{-3}	5.9×10^{-4}	59000
2006 JY26	1.01	0.08	1.44	43.48	273.67	199.26	1.7×10^{-4}	3.8×10^{-3}	58600
2020 VV	1.12	0.12	0.35	19.65	332.62	74.75	7.6×10^{-6}	7.2×10^{-6}	59200
2020 CQ1	1.44	0.32	2.80	134.35	342.79	41.71	6.5×10^{-5}	6.9×10^{-4}	60200
2022 SX55	0.86	0.40	8.88	354.47	225.16	45.58	9.4×10^{-3}	3.4×10^{-3}	59800

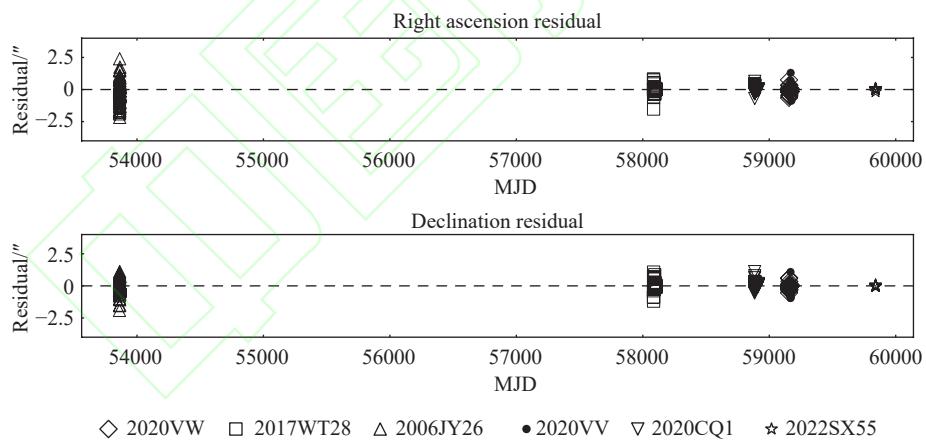


图 3 6个小行星定轨残差

Fig. 3 Orbit determination residuals of six asteroids

通过定轨信息, 获得小行星轨道分布, 即(1)式所给出的多维Gauss分布。在此分布上抽样获得虚拟小行星, 每个小行星抽样数目为 10^4 。传播虚拟小行星样本的轨道100 yr (到2124年1月1日), 判断其是否会与地球发生碰撞, 记录碰撞样本。计算碰

撞概率及其不确定度, 综合CNEOS和NEOCC给出的相关目标的预警信息, 结果如表2, 其中MC和Uncertainty列分别是本文计算的碰撞概率以及碰撞概率不确定度, CNEOS和NEOCC列是两个已有碰撞检测系统的碰撞概率。比较3个结果,

对所有的目标来说, 本文和CNEOS的结果都比较接近, 差别最大的目标是2006 JY26, 差别为 2.1σ . CNEOS使用的方法是蒙特卡洛方法的变体^[5], 本质也是蒙特卡洛方法, 因此与本文结果相近也符合预期. NEOCC是变化线碰撞监测系统, 与另外两个蒙特卡罗方法获得的结果相比, 2017 WT28和2020 VV差别显著, 其他目标比较接近.

表 2 6个小行星碰撞概率分析结果
Table 2 Results of 6 asteroid impact probability analysis

Asteroid ID	MC	CNEOS	NEOCC	Uncertainty
2020 VW	0.0065	0.0070	0.0078	0.00080
2017 WT28	0.0140	0.0120	0.0070	0.00117
2006 JY26	0.0067	0.0050	0.0068	0.00082
2020 VV	0.0024	0.0023	0.0052	0.00049
2020 CQ1	0.0047	0.0046	0.0045	0.00068
2022 SX55	0.0036	0.0040	0.0043	0.00060

选择小行星2020 VV进行进一步细致分析, 样

本数提升为 10^5 再次计算. 得到的碰撞概率为 2.22×10^{-3} , 不确定度为 1.49×10^{-4} , 与CNEOS结果差别为 0.2σ . 为了研究小行星2020 VV的碰撞样本特征, 做出小行星2020 VV的碰撞样本接近日期分布图4, 横轴是日期, 直方图按照月份分条. 由图可知, 在37个不同的月份内存在可碰撞的虚拟小行星样本, 碰撞样本最多的月份为2056年10月.

对2056年10月的碰撞样本展开分析, 图5是小行星2020 VV在2056年10月的碰撞样本的碰撞时间分布, 时间跨度在3 d之内, 样本数为 2×10^5 , 两条竖直的虚线代表两个聚集区域样本的MJD的平均值. 时间分布明显分成了2个区域, 左侧区域的MJD平均值72279.72, 右侧区域的MJD平均值72282.01, 这就是本文给出的2056年10月的2个碰撞事件预警. CNEOS上在2056年10月内同样给出了两个碰撞事件预警, MJD分别是72279.65和72282.00, 两个碰撞事件发生时间与本文得出的结果差别分别为0.07 d和0.01 d, 可以认为和本文结果一致.

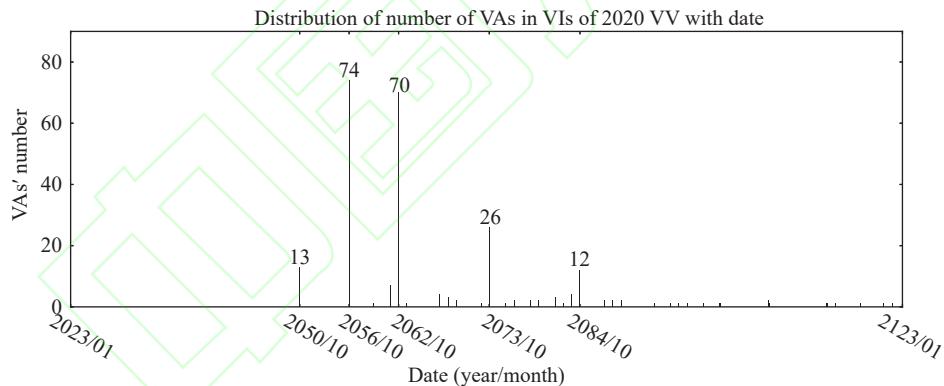


图 4 小行星2020 VV可碰撞虚拟小行星数目随接近日期的频数分布

Fig. 4 The number of impactable VAs of asteroid 2020 VV distribution of the frequency of approaching dates

理论上这2个碰撞事件属于轨道参数空间中不连续的虚拟碰撞源, 因此其碰撞结果也不连续. 图6用两个互相垂直的平面展示目标平面坐标系, 左图是目标平面, 右图是与目标平面垂直的平面. 图中坐标系是历元MJD 72281.99的轨道坐标, 此历元是所有2056年10月的碰撞样本的碰撞历元平均值. 此坐标系是标称轨道的目标平面坐标系, 原点

为地心, 目标平面的法方向 s 是标称轨道的地心速度方向, 纵坐标方向 ζ 是地球的日心速度在目标平面上的投影方向的反向, $\xi\zeta s$ 构成右手系. 左图 $\xi\zeta\eta$ 平面即为目标平面. 图中可以看到轨道的3个条状集中分布, 每个条状分布旁标出了序号, 对应3个不同的虚拟碰撞源. 根据目标平面的定义, 图像中虚拟小行星相对地球的运动速度方向大致垂

直于目标平面, 所以这些虚拟小行星相对地球有显著的垂直于目标平面的运动趋势, 也就是平行于右图平面向左的运动趋势。随着时间变化, 地球穿过3条集中的轨道分布, 就会获得3个碰撞事件。然而, 本文和CNEOS只找到2个虚拟碰撞源。先发生的是1号虚拟碰撞源, 它相对稀疏, 代表其发生概率相对较低, 对应图5的左侧集中区域; 后发生的是2号虚拟碰撞源, 对应图5的右侧集中区域。而3号虚拟碰撞源则没有被发现碰撞样本。

表3汇总小行星2020 VV在2056年10月内的虚拟碰撞源信息。与本文和CNEOS的蒙特卡洛碰撞监测系统不同, NEOCC和NEODYs这两个变化线碰撞监测系统可以找到所有的3个虚拟碰撞源。变化线碰撞监测系统分析变化线样本与地球的接近距离函数, 通过寻找函数的极值^[16]来寻找虚拟碰撞

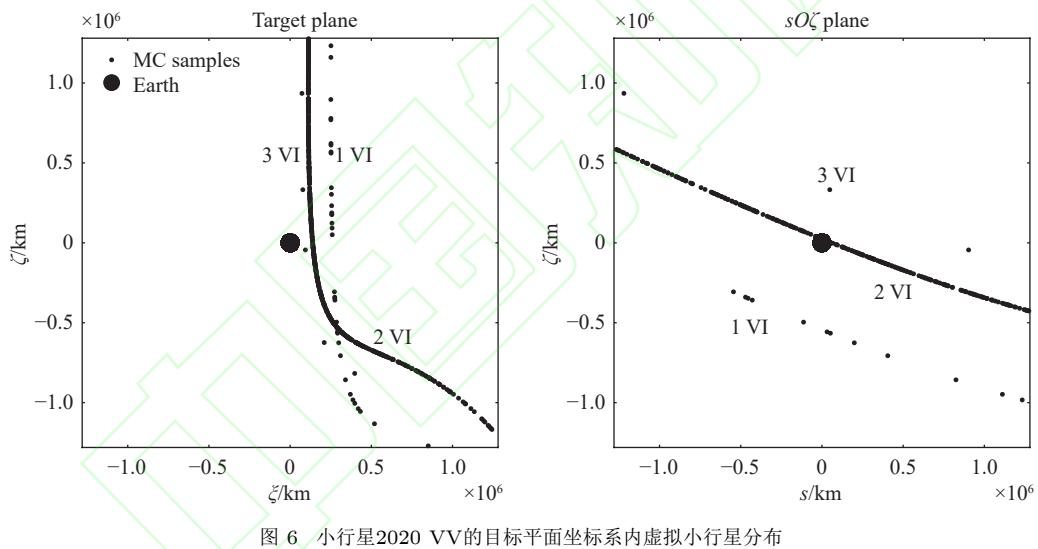


Fig. 6 Distribution of VAs on the target plane coordinate system of asteroid 2020 VV

表3 小行星2020 VV 2056年10月虚拟碰撞源
Table 3 Asteroid 2020 VV's VI in October 2056

Number	IM System			
	MJD			
	MC	CNEOS	NEOCC	NEODYs
1	72279.72	72279.65	72279.616	72279.640
2	72282.01	72282.00	72281.914	72282.002
3	-	-	72282.003	72282.128

源, 这个过程是对连续函数进行分析, 所以不会因为样本数不足而找不到虚拟碰撞源。相对地, 蒙特卡洛碰撞监测系统则可能因为样本数不足而漏掉小碰撞概率的虚拟碰撞源。

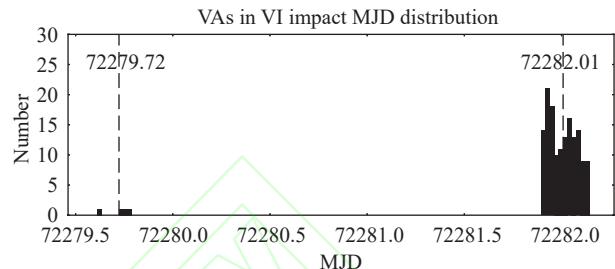


图5 小行星2020 VV 2056年10月的可碰撞虚拟小行星MJD分布
Fig. 5 Impactable VAs' MJD distribution of asteroid 2020 VV of October 2056

5 结论

通过分析变化线碰撞监测系统所用到的线性近似方法, 得出此方法获得的轨道分布相对于理论轨道分布的偏离随着轨道传播时间变长逐渐显著的结论。本文对一些小行星实例进行了碰撞分析: 选择了NEOCC风险列表累计碰撞概率最大且在CNEOS中也给出了预警的6个小行星(2023年6月27日), 通过最小二乘定轨获得小行星的轨道信

息, 进而获得轨道分布. 使用蒙特卡洛方法计算了碰撞概率及其不确定度, 与CNEOS相比, 目标的碰撞概率差别最大为 2.1σ . 选择小行星2020 VV这一两种碰撞监测系统结果差别较大的目标进行进一步细致分析, 样本数提升10倍, 计算获得的碰撞概率与CNEOS结果差别为 0.2σ . 分析了小行星2020 VV在2056年10月内的碰撞样本的时间分布和空间分布, 给出了和CNEOS一致的碰撞事件预警. 此外还发现, 变化线碰撞监测系统可以找到本应该存在的, 但没有被蒙特卡洛碰撞监测系统找到的虚拟碰撞源. 对比不同的小行星碰撞概率分析方法原理可以知道: 蒙特卡洛方法对计算资源的需求高, 理论上计算获得的碰撞概率的分辨率是抽样样本数的倒数, 要得到高分辨率的估计结果, 需要大量抽样并计算轨道传播; 变化线方法对于算力要求相对小得多, 只需要在寻找虚拟碰撞源的过程中进行相对少量的轨道传播计算. 结合本文的研究内容可以得出结论, 蒙特卡洛碰撞监测系统和变化线碰撞监测系统目前各有优劣: 前者不会引入线性近似方法带来的误差, 但计算成本高; 后者所用到的线性近似方法将带来误差, 但可以找出一些碰撞概率低的, 会被前者遗漏的虚拟碰撞源, 并且计算成本相对较低.

致谢 作者诚挚地感谢唐仲英基金会的支持.

参 考 文 献

- [1] 李鑫冉, 赵海斌, 唐玉华, 等. 深空探测学报 (中英文), 2023, 10: 357
- [2] Milani A. *Icarus*, 1999, 137: 269
- [3] Vereš P, Farnocchia D, Chesley S R, et al. *Icarus*, 2017, 296: 139
- [4] Milani A, Chesley S, Chodas P, et al. Asteroid Close Approaches: Analysis and Potential Impact Detection. Asteroids III, 2002
- [5] Roa J, Farnocchia D, Chesley S R. *ApJ*, 2021, 162: 277
- [6] Tommei G. Universe, 2021, 7: 4
- [7] Fuentes-Munoz O, Scheeres D J, Farnocchia D, et al. *ApJ*, 2023, 166: 10
- [8] Alessio D, Vigna A D. CeMDA, 2020, 10: 132
- [9] Milani A, Gronchi G F, Knezevic Z, et al. *Icarus*, 2005, 179: 350
- [10] Farnocchia D, Chesley S R, Micheli M. *Icarus*, 2015, 258: 18
- [11] Spoto F, Vigna A D, Milani A, et al. *A&A*, 2018, 614: A27
- [12] Solin O, Granvik M. *A&A*, 2018, 616: A47
- [13] Milani A, Valsecchi G B. *Icarus*, 1999, 140: 408
- [14] Chodas P W, Yeomans D K. *ccsl.proc*, 1996, 156: 1
- [15] Rice J A, Rice J A. Mathematical Statistics and Data Analysis. Thomson/Brooks/Cole Belmont, CA, 2007: 371
- [16] Milani A, Chesley S R, Sansaturio M E, et al. *Icarus*, 2005, 173: 362
- [17] 宋叶志, 黄勇, 胡小工, 等. *天文学报*, 2013, 54: 12
- [18] Song Y Z, Huang Y, Hu X H, et al. *ChA&A*, 2014, 38: 172

Research on the Analysis Method of Asteroid Impact Probability

ZHENG Hang^{1,2} ZHU Qing-feng^{1,2,3} SONG Ye-zhi⁴ LI Xu-zhi^{1,2} XU Xiao-hui^{1,2}
QIU Jin-sheng^{1,2} ZHAO Jun-han^{1,2}

(1 CAS Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(2 School of Astronomy and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(3 Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230088)

(4 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

ABSTRACT In view of the current situation of inconsistent conclusions between existing asteroid impact monitoring systems, the linear approximation method used in the change line impact monitoring system was studied, and the conclusion that the deviation of the orbit distribution relative to the theoretical orbit distribution obtained by this method gradually became significant as the orbit propagation time increased. The impact probability of 6 asteroid instances was calculated using the Monte Carlo method. Compared with the results of the existing Monte Carlo impact monitoring system, the maximum difference is 2.1 times the standard deviation. The impact samples of asteroid 2020 VV in October 2056 are analyzed in detail, and the distribution of impact samples with time and space is depicted, and the conclusions are consistent with those of existing impact monitoring systems. As for the comparison between the different impact monitoring systems, it is concluded that the Monte Carlo impact monitoring system and the change line impact monitoring system currently have their own advantages and disadvantages: the former does not introduce the error caused by the linear approximation method, but the computational cost is high. The linear approximation method used in the latter will bring errors, but it can find some virtual impact sources with low impact probability that may be missed by the former, and the computational cost is relatively low.

Key words minor planets, asteroids: near-Earth asteroids impact monitoring, astrometry and celestial mechanics, methods: data analysis