

小行星2024 RW1撞击分析: 从轨道确定到陨落预报

赵洁凝^{1,2}, 耿淑娟¹, 王楷铎^{1,2}, 李明涛^{1,2*}

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: limingtao@nssc.ac.cn

2025-01-13 收稿, 2025-02-24 修回, 2025-02-26 接受, 2025-02-28 网络版发表

国防科工局空间碎片与近地小行星防御科研专项-近地小行星时空协同监测与目标特性反演技术研究(KJSP202320105)资助

摘要 北京时间2024年9月5日0时39分, 一颗直径大约1.2 m的小行星闯入地球大气层, 在菲律宾东北侧约25 km高度处发生空爆. 这颗小行星被命名为2024 RW1, 由美国卡特琳娜巡天系统发现, 是人类提前预警的第9颗撞击地球的小行星, 也是第1颗被提前预警撞击亚洲的小行星. 我们利用自主开发的危地小行星撞击风险预报系统的短临预报场景子系统SHARP-IIS, 基于国际小行星中心实时汇聚更新的观测数据, 开展了对2024 RW1的观测数据处理、轨道确定、轨道递推和陨落预报的全流程分析. 与美国宇航局实际观测数据相比, 使用SHARP-IIS预测的空爆时刻最小误差为0.5 s, 空爆位置最小误差低于20 km. 对小行星2024 RW1从发现至撞击的全流程分析, 验证了SHARP-IIS的正确性和精度, 可为未来我国开展近地小行星的短临预报与威胁预警相关工作提供重要参考.

关键词 小行星撞击, 短临预报, 轨道确定, 轨道递推, 陨落预报

近地小行星撞击是全人类共同面对的重大潜在灾难. 作为一种来自外太空的非传统灾害, 全面监测与精准预警是应对小行星撞击威胁的关键^[1,2]. 只有通过及时监测和预警这些潜在风险, 才能实施有效的小行星防御或疏散措施, 如动能撞击、激光烧蚀等, 从而减少或避免撞击所带来的严重后果^[3-5]. 美国 and 欧洲分别发展了小行星撞击短临预报系统 NEA Scout^[6]和Meerkat^[7], 我国还没有公开发布的小行星撞击短临预报系统.

小行星2024 RW1于UTC时间2024年9月4日5时43分41秒(北京时间2024年9月4日13时43分41秒)由美国卡特琳娜巡天系统(Catalina Sky Survey, CSS)发现, 随后该目标以临时编号CAQTDL2提交国际小行星中心(Minor Planet Center,

MPC)待确认页, 经测算, 其撞击地球的概率超过30%. 之后, 美国、智利、澳大利亚的多个天文台的光学望远镜对该小行星开展了后随观测, 并将观测数据实时汇聚到MPC网站上. 截至该小行星陨落前, 共有来自9个站的43条观测数据. 美国宇航局NEA Scout系统和欧空局Meerkat系统确认了该小行星撞击地球事件, 并预测陨落区域为菲律宾东北侧. 这是第9颗提前预警到撞击地球的小行星, 也是第1颗提前预警到撞击亚洲地区的小行星, 为检验我国近地小行星撞击预警能力提供了绝佳的机会. 我国紫金山天文台使用海外台站、盱眙观测站和阿里站的光学望远镜亦对2024 RW1进行了跟踪观测, 并且在撞击事件发生后将数据上传到MPC.

中国科学院国家空间科学中心在国防科工局空间碎片与近地小行星防御科研专项的支持下, 初步开发了自主知识产权的危地小行星撞击风险预报系统(System for Hazardous Asteroids Risk Prediction, SHARP), 中文简称“锐警”系统. 其中的短临预报场景子系统(SHARP-Imminent Impactor Scenario, SHARP-IIS)主要针对新发现的临近撞击地球的小行星, 能够根据MPC上汇聚更新的光学观测数据, 开展小行星的轨道确定、轨道递推和陨落预报, 为预警小行星撞击风险提供支持.

在获悉该小行星撞击事件后, 我们利用SHARP-IIS对2024 RW1撞击事件进行了实时分析, 包括观测数据处理、轨道确定、轨道递推和陨落预报, 并且

引用格式: 赵洁凝, 耿淑娟, 王楷铎, 等. 小行星2024 RW1撞击分析: 从轨道确定到陨落预报. 科学通报, 2025, 70: 2190–2196

Zhao J, Geng S, Wang K, et al. Asteroid 2024 RW1 impact analysis: from orbit determination to impact prediction (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 2190–2196, doi: 10.1360/TB-2025-0041

根据MPC的数据更新对预报分析进行更新;通过与撞击发生后美国宇航局实际监测的空爆数据比较,检验了自主开发的SHARP-IIS的正确性和预报精度。

在MPC待确认页公布数据两小时后,本文基于已有的17组观测信息对其进行初轨确定和轨道改进。17组观测信息的观测弧段仅约2小时,属于短弧段,传统的Gauss和Laplace定轨方法难以适用,需采用适合短弧的定轨方法。Milani等人^[8,9]提出可行域方法后,优化算法在短弧初轨确定中逐渐得到广泛应用。Ansalone和Curt^[10]将观测首末时刻斜距作为优化变量,运用遗传算法进行求解,在天基平台模拟观测数据上取得了较高的精度,但未在实际观测数据上应用。Hinagawa等人^[11]对该方法的终止条件和适应度函数等进行调整,并将其成功应用于地球同步轨道卫星的初轨计算。李鑫冉和王歆^[12-14]基于轨道六根数,将其分解成两个三参数优化问题,采用遗传算法对地基空间目标进行初轨确定,在近圆轨道上得到了较好的应用。此外,李鑫冉和赵海斌^[15]针对近地小行星的模拟数据,基于不同进化算法,采用三参数优选法进行初轨计算,发现该方法在小偏心率问题中表现良好,而在偏心率较大的情况下,需要分区域寻找最优解。这些研究表明,在处理短弧段观测数据的初轨确定问题上,尤其是在数据量较少的情况下,优化算法具有显著优势。本文在Ansalone和Curti方法的基础上,进一步考虑了小行星的绝对星等属性,从而有效约束了求解范围,提高了计算效率。

MPC提供的观测信息为UTC时间和J2000.0站心赤道坐标系下小行星相对观测站的赤经赤纬,地面站的站址用国际地球参考系(International Terrestrial Reference System, ITRS);本文使用的行星星历为DE430星历,为太阳系质心力学时(Barycentric Dynamical Time, TDB)和国际天球坐标系(International Celestial Reference System, ICRS);最终小行星轨道根数为协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)和J2000.0日心平

黄道坐标系。在计算过程中需要使用同一坐标系,涉及坐标系转换和坐标时转换,在转换过程中需要考虑岁差、章动、地球自转和极移等因素的影响。极移、章动修正量和世界时与协调世界时差值等参数通过国际地球自转和参考系统服务(International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS公报)获取。将MPC提供的角度信息: t_i 时刻小行星相对观测站的赤经(α_i)、赤纬(σ_i)信息按式(1)转换为该小行星相对于每个观测站的观测方向单位矢量 $\mathbf{L}_i$:

$$\mathbf{L}_i = \begin{pmatrix} \cos\sigma_i \cos\alpha_i \\ \cos\sigma_i \sin\alpha_i \\ \sin\sigma_i \end{pmatrix}. \quad (1)$$

小行星光学观测几何关系可以表示为

$$\mathbf{r}_i = \rho_i \mathbf{L}_i + \mathbf{R}_i, \quad (2)$$

其中, ρ_i 为小行星相对观测站的距离, $\mathbf{R}_i$ 为观测站相对地心的位置矢量, $\mathbf{r}_i$ 为小行星相对地心的位置矢量。若 t_i 和 t_j 时刻小行星相对观测站的距离 ρ_i 和 ρ_j 已知,则根据式(2)可以得到两个时刻小行星相对地心的位置矢量 $\mathbf{r}_i$ 和 $\mathbf{r}_j$,进一步通过求解兰伯特问题得到对应的小行星速度矢量,进而求出小行星轨道。

设该小行星观测数据中首末时刻分别为 t_0 和 t_n ,对应时刻下小行星与观测站的距离为 ρ_0 和 ρ_n 。通过求解 ρ_0 和 ρ_n 构成的兰伯特问题,可得到一组轨道根数,将得到的轨道根数在动力学模型下递推至各观测时刻 t_i ,可得到各时刻小行星观测方向单位矢量计算值 $\mathbf{L}_i^*$,该方向应与由观测数据直接计算得到的 $\mathbf{L}_i$ 一致。该阶段,轨道动力学模型考虑地球中心引力、太阳与月球的第三体引力摄动。

因此,初轨确定问题可归纳为式(3)所示的最优化问题,即需要找到一组(ρ_0, ρ_i),使得各观测时刻实际观测方向单位矢量和计算值夹角和最小。

$$\min_{(\rho_0, \rho_i)} \sum_{i=1}^n \cos^{-1}(\mathbf{L}_i \cdot \mathbf{L}_i^*), \quad (3)$$

式中, (ρ_0, ρ_i)为优化变量, n 是采用的观测数据数量。(ρ_0, ρ_i)的初值及范围通过下式进行计算:

$$\begin{cases} H = V_i - 5 \log(r_{si} \cdot \rho_i) \\ \quad - 2.5 \log[(1 - G)\phi_1(\kappa) + G\phi_2(\kappa)], \\ \phi_1(\kappa) = e^{-3.33 \tan^{0.63}(\kappa/2)}, \\ \phi_2(\kappa) = e^{-1.87 \tan^{1.22}(\kappa/2)}, \end{cases} \quad (4)$$

其中, V_i 为 t_i 时刻的视星等, H 为小行星绝对星等, G 为斜率参数,取0.15, κ 为小行星相对日心的位置矢量 $\mathbf{r}_{si}$ 和小行星相对观测站的位置矢量 $\rho_i \mathbf{L}_i$ 的夹角, r_{si} 为小行星相对太阳的距离。小行星2024 RW1绝对星等范围取[32, 33],假设完全顺光观测时(即 $\kappa=0^\circ$)小行星相对观测站的距离为 $\rho_i^{\min}$,以 $\rho_i^{\min}$ 为初值迭代求解式(4)得到不同绝对星等下的 ρ_i ,进而得到 ρ_i 的范围,为 $[\rho_i^{\min}, \rho_i^{\max}]$ 。

初轨确定主要是为了快速获得初始轨道解,绝对星等范围越小,求解速度越快。本文参考MPC的数据,设置了绝对星等为[32, 33]的约束范围。此外,我们也进行了更广泛的绝对星等范围测试,即使绝对星等范围为[22, 34],算法依然能够稳定收敛,但收敛时间会有所延长。考虑到在优化变量范围较大的全局优化问题中,遗传算法能够较稳健地定位到最优解所在的参数区间,因此利用遗传算法快速求解初定轨问题,得到小行星2024 RW1轨道的初始解。

目前,该系统主要用于分析小行星临近地球的短临预报场景,因此以地球为中心的兰伯特问题求解初轨方法是适用的。未来如果要推广到更广泛的场景,需要分别考虑日心和地心兰伯特问题求解初轨确定的初始猜想,而后计算各观测时刻实际观测方向单位矢量和计算值的夹角和,选择偏差最小的情况进行后续轨道改进分析。

在得到初始轨道后,将初始观测时刻该小行星相对太阳的位置速度($\mathbf{r}_{s0}, \mathbf{v}_{s0}$)作为初值,在轨道动力学模型下进行递推,该阶段轨道动力学模型考虑太阳引力、八大行星引力摄动、月球引力摄动和相对论效应,从而得到不同观测时刻 t_i 下小行星相对太阳的位置速度($\mathbf{r}_{si}, \mathbf{v}_{si}$),进一步将其转换为相对观测站的距离 ρ_i ,并考虑光学信号传播时间:

$$dt = \rho_i / c, \quad (5)$$

其中, c 为光传播速度. 由此, 可将 $(t_i - dt)$ 时刻小行星相对太阳的位置速度转换为该时刻小行星相对观测站的观测方向信息. 标称轨道应满足各观测时刻观测数据残差平方和最小. 因此, 轨道改进可归纳为以下最优化问题:

$$\min_{\beta} \sum_{i=1}^n [y_i - f(t_i, \beta)]^2, \quad (6)$$

其中, y_i 是 t_i 时刻观测方向信息即 $[\alpha_i, \sigma_i]$, β 是拟合参数(初始时刻位置速度 $(\mathbf{r}_{s0}, \mathbf{v}_{s0})$), $f(t_i, \beta)$ 为通过轨道递推函数计算的方向数据 $[\alpha_i^*, \sigma_i^*]$. 考虑到遗传算法在逼近最优解的最后阶段收敛非常缓慢, 甚至无法收敛到精确的最优解, 因此在进行轨道改进时选择使用在数据量较大时计算效率更高的最小二乘算法进行求解. 基于最小二乘算法产生的雅可比矩阵与残差方差能够计算协方差矩阵 $\text{cov}(\beta)$, 用于衡量拟合参数的不确定性, 便于后续撞击概率的计算:

$$J_{i,j} = \frac{\partial f(t_i, \beta)}{\partial \beta_j}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, 6, \quad (7)$$

$$\text{cov}(\beta) = \sigma^2 (J^T J), \quad (8)$$

其中, σ^2 是残差方差, J 是雅可比矩阵.

随着 MPC 观测数据的更新, 本文先后基于 17 组、30 组、42 组观测数据计算初始观测时刻 2024 RW1 的轨道信息, 分别计算得到的小行星 2024 RW1 在撞击前的轨道如表 1 所示, 第 4 行为 Horizons System 提供的星历信息. 由表 1 可以看到, 采用 42 组观测数据得到的轨道根数与 Horizons System 的星历信息非常接近, 定轨精度随着观测数据组数的增加而增加.

为进一步对 2024 RW1 的撞击时间、

撞击位置进行预测, 本文基于轨道确定阶段求得的初始观测时刻小行星的位置速度, 利用高精度轨道动力学模型进行轨道递推. 该过程采用的时空基准与前文一致, 主要考虑地球非球形引力摄动和太阳、月球引力摄动等因素, 如式(9)所示:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{NonSphere}} + \mathbf{F}_{3\text{rd}} + \mathbf{F}_E, \quad (9)$$

其中, $\mathbf{F}_{\text{NonSphere}}$ 是地球非球形引力摄动, $\mathbf{F}_{3\text{rd}}$ 是太阳和月球引力摄动, $\mathbf{F}_E$ 为地球引力. 由于近地小行星在距离地球表面几百公里内的运行时间极短, 大气影响对小行星到达大气层边界的时间和位置速度影响较小, 因此, 为提高计算速率, 在模型中未考虑大气影响. 同时由于该小行星此时距离地球较近, 因此未考虑金星、木星等天体的引力及相对论效应.

在轨道递推阶段, 小行星轨道运行至距地表 100 km (即大气层边界处) 时停止. 经计算, 基于 17 组、30 组、42 组观测数据所得到的 2024 RW1 抵达距离地表 100 km 高度的时刻分别为 UTC 时间 2024 年 9 月 4 日 16 时 30 分、16 时 33 分、16 时 39 分. 同时, 计算结果显示, 2024 RW1 将从菲律宾上空进入地球大气层.

之后, 本文基于大气层边界处的位置、速度, 计算了基于 17 组、30 组、42 组数据下 2024 RW1 的大气进入过程, 并对该小行星的空爆时刻与空爆位置进行预测.

首先, 需要根据已知信息对 2024 RW1 的物理性质进行推断或假设. 观测数据显示, 2024 RW1 绝对星等约 32.17, 假设其反照率为平均反照率 0.15, 则根据绝对星等、反照率、直径之间的经验关系可推断^[16], 2024 RW1 直径约 1.2632 m. 考虑到近地小行星群体中 S 类

小行星数量最多, 可合理假设 2024 RW1 为石质小行星, 其密度按照石质小行星的经典密度进行计算, 取为 3500 kg/m³. 由于石质小行星的强度变化范围可能较大, 本文依次假设其强度为 0.1、1、5、10 和 15 MPa, 分组进行计算. 在小行星大气进入过程中, 主要考虑减速、烧蚀、解体, 采用煎饼模型模拟小行星的解体过程^[17], 计算小行星从大气进入至空爆时刻的速度、位置随时间的变化, 模型中的形变因子取 4. 小行星弹道方程、烧蚀方程及半径变化方程如下^[18]:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{C_d \rho A V^2}{2m} - \frac{\mu}{r^2} \sin \theta, \quad (10)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{C_p \rho A V}{2m} - \frac{\mu}{r^2} \cos \theta + \frac{V}{r} \cos \theta, \quad (11)$$

$$\frac{dh}{dt} = V \sin \theta, \quad (12)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{C_h \rho A V^3}{2Q}, \quad (13)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{V \cos \theta \cos \psi}{r \cos \phi}, \quad (14)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{V \cos \theta \sin \psi}{r}, \quad (15)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{V \cos \theta \cos \psi \tan \phi}{r}, \quad (16)$$

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{C_d \rho V^2}{2\rho_m R}, \quad (17)$$

其中, $V, \theta, h, m, \lambda, \phi, \psi, R$ 分别表示小行星的速度、进入角、高度、质量、经度、纬度、航向角、半径; 进入角为小行星速度矢量与当地水平线的夹角, 航向角为速度在水平面的投影与东方向的夹角. $C_d, \rho, A, \mu, r, C_b, Q, C_h, \rho_m$ 分别为阻力系数、大气密度、小行星迎风截面积、地球引力常量、小行星地球轨道半径、升力系数、烧蚀热、热流系数、小行星密度. 小行星发生空爆后, 假设小行星解体为若干质量不等的碎片, 进一步计算碎片在大气飞行中的速度与位置变

表 1 2024 RW1 小行星轨道根数(2024-09-04 05:43:41UTC, J2000.0 日心平黄道坐标系)

Table 1 Orbital elements of asteroid 2024 RW1 (2024-09-04 05:43:41UTC, J2000.0 heliocentric ecliptic coordinate system)

观测数据组数	轨道半长轴(km)	偏心率	轨道倾角(°)	升交点赤经(°)	近日点幅角(°)	平近点角(°)
17	392926874.4797	0.7214	0.5351	162.4497	249.6319	350.0496
30	386726267.9108	0.7165	0.5330	162.4516	249.6239	349.7834
42	375757443.3781	0.7073	0.5284	162.4564	249.6148	349.2816
Horizons	375612414.2746	0.7073	0.5284	162.4570	249.6233	349.2741

化,直至碎片完全烧蚀或降落地表.计算结果如表2所示,其中最后一行数据为近地小行星研究中心(Center for Near-Earth Object Studies, CNEOS)发布的天基监测数据.

最终,2024 RW1于UTC时间2024年9月4日16时39分32秒达到峰值亮度,该时刻小行星的经度、纬度如表2所示.由表2可以看出,与CNEOS发布的天基监测数据相比,利用42组观测数据,解

体强度为15 MPa时,结果吻合较好,空爆时间预测误差约为0.5 s,而空爆位置误差约为18.5 km.需要说明的是,CNEOS发布的数据只保留至小数点后1位,因此可以认为SHARP-IIS预报结果较为准确.

由表2可知,强度是影响空爆位置预测准确性的重要因素.为进一步分析定轨精度及2024 RW1的强度,本文根据42组观测数据得到的标称轨道及其协方差

矩阵,假设定轨得到的小行星位置、速度服从联合正态分布,并假设小行星强度在0.1~20 MPa范围内服从均匀分布,采用蒙特卡罗方法计算1000个撞击场景,得到每个场景的空爆时刻与位置.从结果中筛选出小数点保留1位后与CNEOS空爆位置一致的场景,而后对该部分场景的日心轨道根数与强度进行了分析.轨道根数分布如图1所示.图1中,纵坐标表示各区间轨道根数出现的统计

表 2 本文预测与CNEOS数据的空爆时间和位置对比

Table 2 Comparison of predicted airburst time and location between this paper and CNEOS data

观测数据组数	解体强度(MPa)	空爆时刻	经度(°)	纬度(°)	高度(km)	与CNEOS距离差(km)
17	15	16:30:25.4	124.8111	18.3518	25.35	205.7
30	15	16:33:25.4	124.3387	18.3012	25.28	155.7
42	15	16:39:31.5	122.9818	18.1475	25.16	18.54
42	10	16:39:31.3	122.9710	18.1355	27.84	17.07
42	5	16:39:31.1	122.9540	18.1168	32.03	15.83
42	1	16:39:30.6	122.9193	18.0785	40.59	17.99
42	0.1	16:39:29.9	122.8763	18.0310	51.24	26.59
CNEOS		16:39:32	122.9	18.0	25.0	

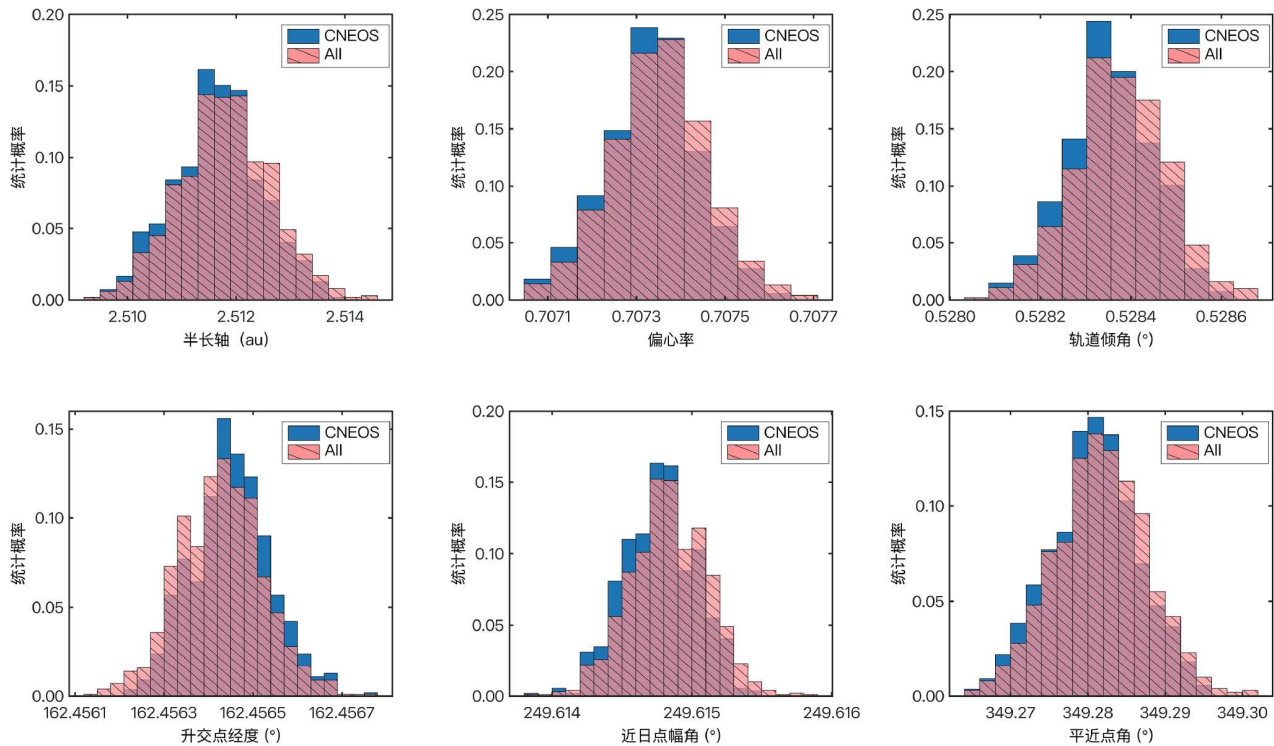


图 1 (网络版彩色)日心轨道根数分布对比

Figure 1 (Color online) Comparison of the distribution of heliocentric orbital elements

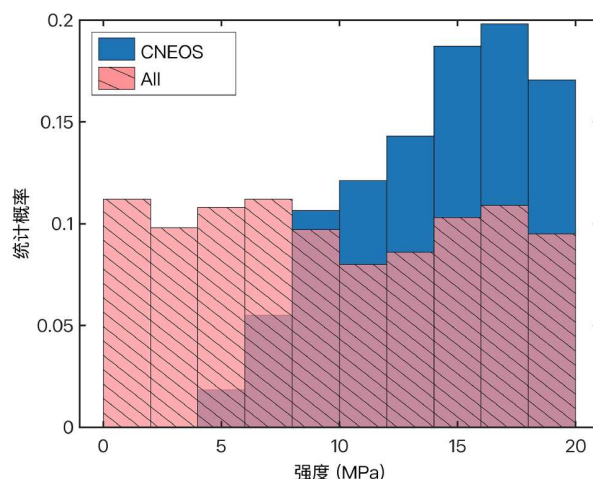


图 2 (网络版彩色)强度分布对比

Figure 2 (Color online) Comparison of the distribution of impact energies

概率。可以看出, 在空爆位置与CNEOS一致的场景下, 各轨道根数的分布相比于所有场景的分布, 更加集中于标称解(即所有场景分布的中心位置)附近, 进一步验证了标称解的合理性。

图2显示了强度分布。与所有场景的分布相比, 空爆位置与CNEOS数据一致的场景对应的强度分布更集中于

15~20 MPa的范围。这表明在煎饼模型下, 该小行星具有较高的解体强度。

2024 RW1作为第9颗提前预警撞击地球的小行星, 第1颗提前预警撞击亚洲的小行星, 为验证近地小行星撞击短临预报系统提供了宝贵的机会。本文利用自主开发的危地小行星撞击风险预报系统的短临预报场景子系统(SHARP-IIS)

对该小行星进行了实时的观测数据处理、轨道确定、轨道递推和陨落预报。与美国宇航局实际观测数据相比, 本文预测的空爆时刻最小相差为0.5 s, 空爆位置最小误差低于20 km, 验证了我国自主开发的SHARP-IIS的正确性和精度, 可为未来我国开展近地小行星的短临预报与威胁预警提供重要参考。

参考文献

- Wang K, Zhou Q, Liu Y, et al. Research on space-based kinetic impactor disrupting small-sized asteroids under short warning time conditions. *Acta Astronaut*, 2024, 219: 291–299
- Wang K, Li M, Zhou Q, et al. Targets selection and mission optimization of kinetic impact deflection test mission for small size asteroids. *Adv Space Res*, 2023, 72: 3477–3498
- Gong Z Z, Li M, Chen C, et al. The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning, security defense and resource utilization (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 346–372 [龚自正, 李明, 陈川, 等. 小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术. *科学通报*, 2020, 65: 346–372]
- Zhao J, Zhang R S, Li M T, et al. Six-degree analysis framework for near-Earth asteroids monitoring and warning (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 981–992 [赵坚, 张如生, 李明涛, 等. 近地小行星监测预警六度分析框架. *科学通报*, 2023, 68: 981–992]
- Liu H G, Zhao H B, Zhou J L. Survey, defense and resource development of NEO (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 757–763 [刘慧根, 赵海斌, 周济林. 近地小天体调查、防御与开发. *科学通报*, 2020, 65: 757–763]
- Farnocchia D, Chesley S R, Micheli M. Systematic ranging and late warning asteroid impacts. *Icarus*, 2015, 258: 18–27
- Gianotto F, Cano J L, Conversi L, et al. Meerkat Asteroid Guard-ESA's Imminent Impactor Warning Service. In: Flohrer T, Moissl R, Schmitz F, eds. 2nd NEO and Debris Detection Conference. Darmstadt, Germany: ESA Space Debris Office, 2023. 49
- Milani A, Gronchi G F, Vitturi M D ' M, et al. Orbit determination with very short arcs. I admissible regions. *Celestial Mech Dyn Astr*, 2004, 90: 57–85
- Milani A, Gronchi G, Knezevic Z, et al. Orbit determination with very short arcs: II. Identifications. *Icarus*, 2005, 179: 350–374
- Ansalone L, Curti F. A genetic algorithm for Initial Orbit Determination from a too short arc optical observation. *Adv Space Res*, 2013, 52: 477–489
- Hinagawa H, Yamaoka H, Hanada T. Orbit determination by genetic algorithm and application to GEO observation. *Adv Space Res*, 2014, 53: 532–

- 12 Li X R, Wang X. Genetic algorithm for initial orbit determination with too short Arc (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2016, 57: 66–77 [李鑫冉, 王歆. 基于遗传算法的极短弧定轨. *天文学报*, 2016, 57: 66–77]
- 13 Li X R, Wang X. Genetic algorithm for initial orbit determination with too short Arc (continued) (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2016, 57: 181–187 [李鑫冉, 王歆. 基于遗传算法的极短弧定轨(续). *天文学报*, 2016, 57: 181–187]
- 14 Li X R, Wang X, Xiong Y. A combination method using evolutionary algorithms in initial orbit determination for too short arc. *Adv Space Res*, 2019, 63: 999–1006
- 15 Li X R, Zhao H B. Study on evolutionary algorithms for initial determination of near-earth asteroids with too-short-arc (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2021, 53: 902–911 [李鑫冉, 赵海斌. 近地小行星极短弧定轨的进化算法研究. *力学学报*, 2021, 53: 902–911]
- 16 Bowell E, Hapke B, Domingue D, et al. Application of photometric models to asteroids. *Asteroids II*, 1989: 524–556
- 17 Chyba C F, Thomas P J, Zahnle K J. The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid. *Nature*, 1993, 361: 40–44
- 18 Dang L N, Liu S, Bai Z Y, et al. Sensitivity research on models of Earth entry and impact effects by asteroids (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2021, 53: 278–292 [党雷宁, 柳森, 白智勇, 等. 小行星进入与撞击效应评估模型敏感性研究. *力学学报*, 2021, 53: 278–292]

Summary for “小行星2024 RW1撞击分析: 从轨道确定到陨落预报”

Asteroid 2024 RW1 impact analysis: from orbit determination to impact prediction

Jiening Zhao^{1,2}, Shujuan Geng¹, Kaiduo Wang^{1,2} & Mingtao Li^{1,2*}

¹ National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: limingtao@nssc.ac.cn

On September 5, 2024, at 00:39 China Standard Time (CST), an asteroid named 2024 RW1, approximately 1.2 meters in diameter, entered Earth's atmosphere and exploded at an altitude of 25 kilometers northeast of the Philippines. The asteroid was detected by the Catalina Sky Survey (CSS) on September 4, 2024, at 5:43 UTC, making it the 9th asteroid successfully predicted to impact Earth in advance. Furthermore, it was the first such asteroid with a predicted impact in Asia. The asteroid's discovery and rapid follow-up observations led to an estimation of its impact probability exceeding 30%, based on data aggregated by the International Astronomical Union's Minor Planet Center (MPC).

This study employed China's self-developed System for Hazardous Asteroids Risk Prediction (SHARP) to conduct a comprehensive analysis of the 2024 RW1 event. SHARP incorporates the Imminent Impactor Scenario module (SHARP-IIS), designed specifically for short-term impact prediction. By utilizing real-time observational data from the MPC, SHARP-IIS performs processes such as observational data processing, orbit determination, orbit propagation, and impact prediction. The system's performance was validated using observational data from the National Aeronautics and Space Administration (NASA), achieving a minimal airburst timing error of just 0.5 seconds and a minimal positional error of less than 20 kilometers, demonstrating its precision and reliability.

The initial orbit of 2024 RW1 was calculated using 17 observational data, covering an observation arc of approximately two hours. Due to the short arc, we used the distances of the asteroid relative to the observatory at the initial and final observation times as optimization variables and employed a genetic algorithm to perform initial orbit determination. After that, based on the initial orbit, the least squares algorithm was used for precise orbit determination, generating the orbital elements of the asteroid. Subsequently, considering the gravitational influence of the Earth, Sun, and Moon, as well as the Earth's non-spherical gravitational effects, orbit propagation was performed using 17, 30, and 42 sets of observational data. The predicted times for the asteroid reaching the atmospheric boundary were 16:30, 16:33, and 16:39, respectively.

For impact prediction, the physical properties of the asteroid, such as absolute magnitude, diameter, and density, were inferred or assumed based on observational data. The pancake model was employed to simulate the asteroid's disintegration process during atmospheric entry. The results show that the disintegration strength has a strong influence on the airburst time and location. When the disintegration strength was assumed to be 15 MPa, the predictions were closest to the monitoring data released by NASA's Center for Near-Earth Object Studies (CNEOS), with an airburst time error of 0.5 seconds and location error of 18.5 kilometers.

The successful prediction of 2024 RW1's trajectory and impact, completed two hours before the event, highlights the accuracy and precision of SHARP-IIS. The analysis demonstrates the capability of SHARP-IIS in real-time prediction, which is crucial for short-term prediction and threat warning. As the first successful demonstration of its application, this study demonstrates the potential for China's autonomous systems in planetary defense and emphasizes the necessity of continued improvements to enhance future prediction reliability and adaptability to different scenarios.

asteroid impact, short-term prediction, orbit determination, orbit propagation, impact prediction

doi: [10.1360/TB-2025-0041](https://doi.org/10.1360/TB-2025-0041)