

## 地球公转轨道危地小行星天基光学监测仿真研究

王新涛, 郑建华, 李明涛

引用本文:

王新涛, 郑建华, 李明涛. 地球公转轨道危地小行星天基光学监测仿真研究[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(11): 2563–2571.

WANG Xin-tao, ZHENG Jian-hua, LI Ming-tao. Study on observation simulation for space-based potentially hazardous asteroids warning mission on Earth trailing heliocentric orbit[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(11): 2563–2571.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2563>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 近地小行星基本物理性质的测光研究

Photometry studies of physical properties for Near–Earth asteroids

*光学精密工程*. 2020, 28(11): 2549–2562 <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2549>

### 低轨卫星硅太阳能电池阵输出功率衰减估计

Degradation estimation for output power of silicon solar array of low earth orbit satellite

*光学精密工程*. 2017, 25(12z): 180–186 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172514.0180>

### 低轨高分辨率遥感卫星姿态机动对月定标方法

Lunar calibration method through attitude maneuver of low–earth–orbit and high–resolution remote sensing satellites

*光学精密工程*. 2020, 28(9): 1913–1923 <https://doi.org/10.37188/OPE.20202809.1913>

### 基于涨落分析的暗弱运动目标关联检测

Dim moving target detection based on fluctuation analysis

*光学精密工程*. 2020, 28(11): 2517–2526 <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2517>

### 基于GPU的小行星光学观测图像实时处理

A method of real–time data reduction of asteroid optical observation image based on GPU

*光学精密工程*. 2020, 28(11): 2527–2534 <https://doi.org/10.37188/OPE.20202811.2527>

文章编号 1004-924X(2020)11-2563-09

# 地球公转轨道危地小行星天基光学监测仿真研究

王新涛<sup>1,2</sup>, 郑建华<sup>1,2</sup>, 李明涛<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 101499;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 小行星监测预警是开展行星防御的前提, 针对地基望远镜无法监测来自太阳方向小行星的问题, 本文论证了地球公转轨道天基光学望远镜任务概念。考虑地球第三体引力摄动, 建立了望远镜轨道维持模型; 考虑小行星视星等约束和望远镜视场约束, 建立望远镜对小行星的可见性模型, 评估了地球公转轨道光学望远镜的观测和预警效能。仿真结果表明: 施加约 580 m/s 的速度增量可使望远镜 6 年内的漂移距离相对初始状态不超过 6%; 对构建的危地小行星数据库, 在极限视星等为 24 的条件下, 地球公转轨道光学望远镜在 6 年内可观测 84.5% 直径超过 140 m 的危地小行星, 能够对来自太阳方向的危地小行星进行有效预警。地球公转轨道望远镜对危地小行星具有较好的观测预警效能。

**关键词:** 行星防御; 危地小行星; 天基光学监测; 地球公转轨道; 轨道维持

**中图分类号:** P185.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202811.2563

## Study on observation simulation for space-based potentially hazardous asteroids warning mission on Earth trailing heliocentric orbit

WANG Xin-tao<sup>1,2</sup>, ZHENG Jian-hua<sup>1,2</sup>, LI Ming-tao<sup>1,2\*</sup>

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing 101499, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

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

**Abstract:** Monitoring and early warning of asteroids are the premise of planetary defense. To monitor and provide early warning of asteroids from the Sun direction, an Earth trailing heliocentric orbiting optical telescope mission was proposed. Furthermore, considering the third-body gravitational perturbation of the Earth, an orbit maintenance model was established for the telescope. Considering apparent visual magnitude constraints of asteroids and field of view constraints of the telescope, an observation model for potentially hazardous asteroids was established. The observation and early warning efficiency of the telescope were evaluated. Simulation results showed that with delta-v of approximately 580 m/s, the orbit drift distance of the telescope did not exceed the initial state by 6% within 6 years. The telescope, under the condition of limited apparent visual magnitude of 24, could observe 84.5% of potentially hazardous asteroids with a diameter of more than 140 m. It could also

**收稿日期:** 2020-04-02; **修订日期:** 2020-05-12.

**基金项目:** 北京市重大科技专项资助项目 (No. Z181100002918004); 空间科学预先研究项目资助 (No. XDA1502030502, No. XDA15014900); 民用航天预研项目资助 (No. D020302, No. D020304); 青促会优秀会议和中科院创新交叉团队项目资助

provide effective early warning for potentially hazardous asteroids from the Sun direction. Thus, the optical telescope on an Earth trailing heliocentric orbit exhibited good observation and early warning performance.

**Key words:** planetary defense; potentially hazardous asteroids; space-based optical monitoring; Earth trailing heliocentric orbit; orbit maintenance

## 1 引言

危地小行星轨道与地球轨道存在交叉,存在与地球碰撞的可能,历史上地球曾多次遭到小行星撞击,对小行星进行监测预警具有重要意义<sup>[1]</sup>。地基望远镜易受大气、天气等因素影响,只能在晴朗的夜晚进行观测,导致地基望远镜的观测时间短,且无法对来自太阳方向的小行星进行预警;天基探测具有布置灵活、不受大气和天气影响、覆盖范围大等优点<sup>[2]</sup>,天基监测是小行星监测预警领域的发展趋势。

美国的 NEOCam 任务计划在日地 L1 点对小行星进行监测,计划于 5 年内发现 2/3、10 年内发现 90% 以上直径超过 140 m 的危地小行星<sup>[3]</sup>。为发现并跟踪对地球有威胁的小行星,美国民间组织 B612 基金会提出运行在类金星轨道的哨兵任务概念,计划在 6.5 年内发现 90% 以上超过 140 m 的小行星<sup>[4]</sup>。R. Michelsen 等人提出运行在地球轨道的 Bering 任务,构建基于最佳尺寸分布的小行星数据库,分析可见性时采用最小轨道交叉距离进行剪枝减少计算量,分析对比了地基和天基望远镜对小行星的发现能力<sup>[5]</sup>。A. Mainzer 等人采用模型生成的小行星数据库,对比日地 L1 点轨道与类金星轨道望远镜,仿真结果表明日地 L1 轨道与类金星轨道望远镜对直径 140 m 以上的危地小行星具有相当的观测效能<sup>[6]</sup>。2005 年,美国国会通过“乔治布朗近地天体授权法案”,授权 NASA 在 2020 年对 90% 直径超过 140 m 的小行星进行探测、跟踪、分类和物理特性获取<sup>[1]</sup>,但目前仅完成了约 30%。

本文针对来自太阳方向危地小行星的监测预警问题,提出在地球公转轨道部署光学望远镜进行监测。首先对地球公转轨道望远镜的轨道稳定性进行仿真,得到了轨道维持所需的速度增量;然后以小行星视星等和望远镜视场作为约束条件建立小行星可见性模型,仿真分析了位于地球公转

轨道光学望远镜对危地小行星的观测和预警效能。

## 2 不同轨道望远镜对来自太阳方向小行星监测视场分析

除了地基望远镜,还可以利用天基望远镜监测小行星,天基望远镜的轨道通常选择在日地系统 L1 点轨道或类金星轨道<sup>[1]</sup>。不同轨道的光学望远镜对来自太阳方向的小行星监测视场如图 1 所示。

地基天文观测受制于地球大气特性,如尘埃、大气辉光等<sup>[7]</sup>,只能在晴朗的夜晚进行观测,因此太阳方向是地基光学望远镜的观测盲区。车里雅宾斯克陨石事件发生在白天,在进入大气层前所有地基望远镜都没有发现该小行星<sup>[8]</sup>。来自太阳方向的小行星在飞越地球前,地基望远镜对其没有观测能力。

日地 L1 点位于日地连线距地球  $150 \times 10^4$  km 处,有利于对地通信,对来自太阳方向的小行星具有一定的观测能力,但最多只能为地球提供约  $(150 \sim 180) \times 10^4$  km 的预警范围<sup>[3]</sup>。

类金星轨道位于地球内侧,有利于发现位于地球轨道内侧的小行星;但类金星轨道的周期与地球相差较大,望远镜与地球的相位关系时刻变化,大部分时间距离地球较远。当小行星对地球产生威胁时,地球不一定在类金星轨道光学望远镜的视场内,因此无法为地球提供实时预警。

本文提出的地球公转轨道光学望远镜位于地球前方或后方约  $1\ 058 \times 10^4$  km 处,视场始终指向地球方向。地球公转轨道与地球始终保持近似的相位关系,因此对监测来自太阳方向的小行星具有得天独厚的优势,可为地球提供最远超过千万公里的预警距离。由于视场始终指向地球方向,望远镜部署在地球前方或者后方对小行星的监测效能是相当的。这里以将望远镜部署在地球后方为例开展仿真。

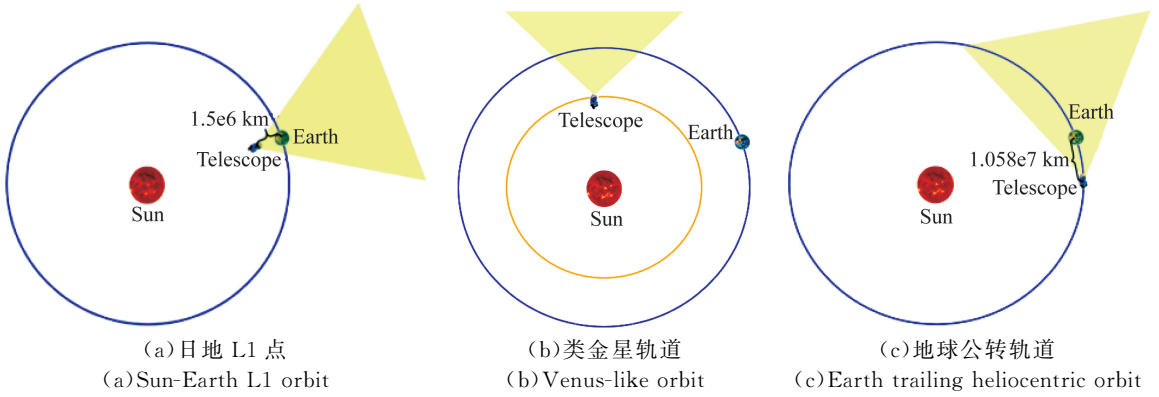


图 1 光学望远镜示意图

Fig.1 Schematic of telescope

### 3 地球公转轨道特性分析

如果只考虑太阳的中心引力,望远镜与地球相位差始终保持恒定,但由于距离地球较近,来自地球较大的第三体引力摄动会使望远镜轨道偏离预期。为使望远镜相对地球保持近似恒定的距离,需施加速度增量进行轨道维持。

#### 3.1 轨道维持模型

在任务寿命期内,间隔一定时间对望远镜施加控制速度增量,使得望远镜保持在目标轨道附近,直至达到设计寿命。用  $t_0$  和  $rv_0$  表示望远镜初始时刻的状态,施加第一次速度增量的时刻为  $t_1$ ,大小为  $\Delta v_1$ ,之后每一次的速度增量都需要两个参数来描述:

$$\mathbf{x}_i = [t_i, \Delta v_i]. \tag{1}$$

因此望远镜轨道维持总设计参数为:

$$\mathbf{x} = [t_0, rv_0, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_n]. \tag{2}$$

目标为望远镜在设计寿命内轨道维持所需的速度增量最小:

$$J(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \Delta v_i \rightarrow \min. \tag{3}$$

为防止出现漂移量过大(超过  $120 \times 10^4$  km)的情况,须添加约束:

$$\varphi(\mathbf{x}) = |d - d_0| - 1.2 \times 10^6 \leq 0, \tag{4}$$

其中  $d$  为望远镜与地球的距离。

对于两次速度增量之间的轨道,望远镜在太阳中心引力和地球第三体引力摄动下的状态方

程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} = -\frac{\mu_s}{r^2} \mathbf{r} - \mu_E \left( \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_E}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_E|^3} + \frac{\mathbf{r}_E}{|\mathbf{r}_E|^3} \right), \end{cases} \tag{5}$$

其中:  $\mu_s, \mu_E$  分别为太阳和地球的引力系数,  $\mathbf{r}$  和  $\mathbf{r}_E$  分别为望远镜和地球在惯性系中的位置矢量<sup>[9]</sup>。

#### 3.2 轨道维持模型求解

上述轨道维持模型的解空间较大,因此在求解时采用部分一整体的优化方法。首先对速度增量进行逐次优化,求解时先利用遗传算法进行全局搜索,并将遗传算法得到的解利用序列二次规划算法 SQP 进行局部寻优,目标函数选取为施加速度增量后望远镜的漂移量达到  $120 \times 10^4$  km 所需的时间最大,即:

$$J_i(\mathbf{x}_i) = t'_i - t_i \rightarrow \max, \tag{6}$$

其中  $t'_i$  为施加速度增量  $\Delta v_i$  后望远镜漂移量达到  $120 \times 10^4$  km 的时刻。

重复上述过程直至时间达到望远镜的设计寿命,最终得到望远镜轨道维持设计参数的局部最优解  $\mathbf{x} = [t_0, rv_0, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_n]$ ;然后将得到的局部最优解作为初值,利用序列二次规划算法 SQP 进行整体优化,优化参数  $\mathbf{x} = [t_0, rv_0, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_n]$ ,目标为总的速度增量和望远镜相对地球的漂移量加权最小:

$$J(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \Delta v_i + P \times d \rightarrow \min, \tag{7}$$

其中:  $P$  为惩罚因子,采用固定值 4 000;  $d$  为望远

镜相对地球的距离。

优化结果表明,在 6 年内施加 8 次共 580.1 m/s 的速度增量,可使望远镜相对初始状态的漂移距离不超过 635 798.9 km(为入轨时望远镜相对地球距离的 6%),望远镜与地球的距离随时间变化情况如图 2 所示。定义日地旋转坐标系的原点在地球质心, $R$  轴为地球在日心惯性系中位置矢量的方向, $N$  轴指向地球轨道角动量方向, $T$  轴与其他两轴构成右手坐标系,轨道维持后的望远镜在日地旋转坐标系中的运动轨迹如图 3(a)和图 3(b)所示。地球公转轨道望远镜是可控的,具体的速度增量施加时刻和大小如表 1 所示。

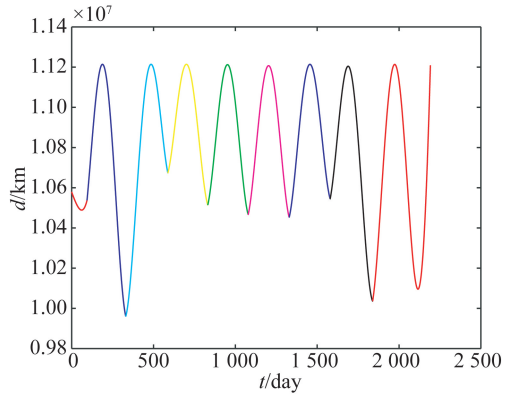


图 2 轨道维持后望远镜相对地球的距离随时间的变化  
Fig. 2 Orbit drift distance of the telescope relative to the Earth after orbit maintenance

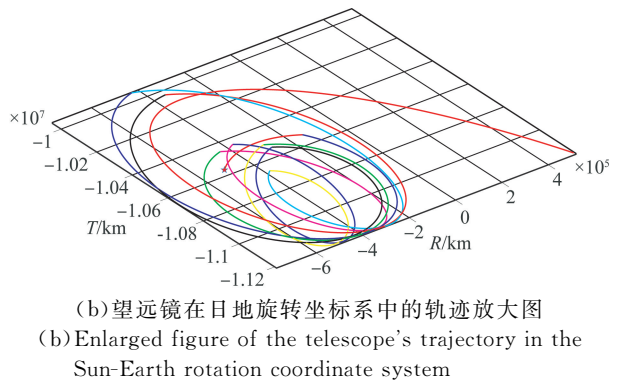
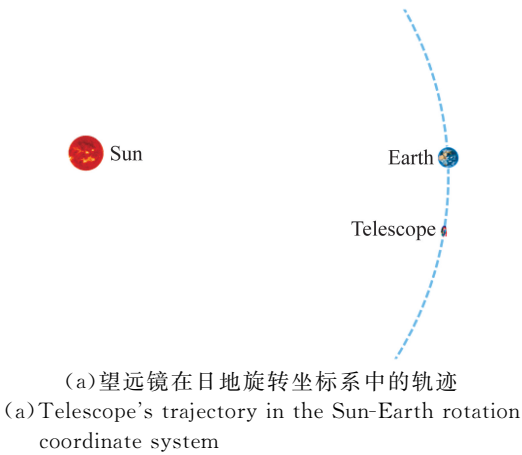


图 3 轨道维持后望远镜在日地旋转坐标系中的轨迹

Fig. 3 Trajectory of the telescope after orbit maintenance in the Sun-Earth rotation coordinate system

表 1 轨道维持时刻和速度增量大小

Tab. 1 Time and value of delta\_v

时刻/d	$T_0+93.7$	$T_0+330.3$	$T_0+587.5$	$T_0+831.5$	$T_0+1\ 078.4$	$T_0+1\ 328.7$	$T_0+1\ 579.0$	$T_0+1\ 838.5$
大小/( $m \cdot s^{-1}$ )	63.4	70.9	76.9	70.6	72.7	70.9	78.6	76.2

## 4 小行星观测模型

### 4.1 星等约束

太阳系中小行星的绝对星等定义为如果将小行星放到距离太阳 1AU 的距离处,在“太阳中心”(此时为  $0^\circ$  相位角)观测到的小行星视星等,小行星的绝对星等由星体的直径和反照率决定,具体关系如式(8)所示:

$$D=1\ 329 \times 10^{-H/5} / \sqrt{pv}, \quad (8)$$

其中: $D$  为小行星直径(km), $H$  为绝对星等, $pv$  为反照率,反照率是指从太阳看小行星的亮度与相同大小和相同距离的白色漫反射球之间的比率,星体全吸收  $pv=0$ ,全反射  $pv=1$ ,本文中  $pv=0.15^{[5]}$ 。

视星等是指观测者用肉眼看到的或者 CCD 得到星体亮度,数值越小亮度越高,反之越暗。视星等由小行星的绝对星等、小行星与望远镜的距

离和两者之间的相位关系决定,太阳、望远镜和小行星之间的相位关系如图 4 所示,具体的计算公式如式(9)所示:

$$\begin{cases} V = H + 5 \log(r \times \Delta) - \\ 2.5 \log[(1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)] \\ \Phi_1(\alpha) = e^{-3.33 \tan(\alpha/2)^{0.63}} \\ \Phi_2(\alpha) = e^{-1.87 \tan(\alpha/2)^{1.22}} \end{cases}, \quad (9)$$

其中: $V$  是小行星的视星等, $r$  是小行星与太阳质心的距离,单位为 AU; $\Delta$  是小行星与望远镜的距离,单位为 AU; $\kappa$  是太阳-小行星-望远镜形成的夹角,单位为 rad; $G$  是斜率参数,其值取决于光被小行星表面上的粒子散射的方式<sup>[10]</sup>。由于极少数小行星测得了  $G$  的数值,对于大多数小行星  $G$  的假设为 0.15。假设望远镜的极限视星等为  $V_{\max}$ ,小行星某时刻的视星等为  $V$ ,则小行星的视星等可见条件为:

$$V \leq V_{\max}. \quad (10)$$

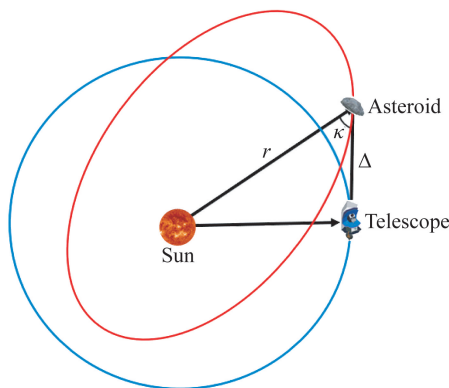


图 4 太阳、望远镜、小行星的相位关系

Fig. 4 Phase relationship between sun, telescope and asteroid

### 4.2 视场约束

望远镜的极限视场中心始终由望远镜指向地球方向,视场为矩形,采用方位角  $\alpha$  和俯仰角  $\beta$  进行描述,方位角  $\alpha$  为望远镜和小行星的连线在望远镜轨道平面内的投影与望远镜极限视场中心方向的夹角,俯仰角  $\beta$  为望远镜和小行星的连线在垂直于望远镜轨道平面内的投影与望远镜极限视场中心方向的夹角。假设望远镜极限视场角  $\alpha_{\max}, \beta_{\max}$ ,望远镜极限视场如图 5 所示。

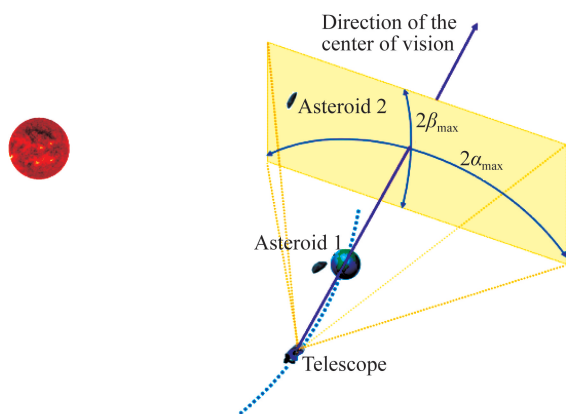


图 5 望远镜的极限视场

Fig. 5 Telescope's extreme field of view

采用望远镜的极限视场对小行星的可见性进行仿真,因此小行星出现在极限视场内的条件为:

$$\begin{cases} \alpha \leq \alpha_{\max} \\ \beta \leq \beta_{\max} \end{cases}. \quad (11)$$

### 4.3 小行星星历模型

近地天体是轨道近日点在 1.3 AU 以内的太阳系小天体,包含小行星和彗星两类,其中近地小行星占绝大多数。与地球轨道的最短距离在 0.05 AU 以内且绝对星等小于 22 等(相当于直径大于 140 m)的近地小行星被定义为危地小行星<sup>[11]</sup>,撞击时可对地球造成区域级破坏<sup>[12]</sup>。仿真时所用的危地小行星数据库是从 MPC(Minor Planet Center)中获得的 1 971 颗危地小行星在日心黄道 J2000 坐标系下的轨道根数和绝对星等<sup>[13]</sup>,为快速地获得小行星在任意时刻的位置速度,小行星的轨道动力学模型如式(12)所示:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} = -\frac{\mu_s}{r^2} \end{cases}, \quad (12)$$

其中: $\mathbf{r}, \mathbf{v}$  为小行星在日心惯性坐标系的位置速度, $\mu_s$  为太阳引力常数。

## 5 望远镜效能仿真分析

假设望远镜入轨日期为 2026-05-18,寿命为 6 年,以 MPC 中获得的 1 971 颗危地小行星的星历和绝对星等为数据库;望远镜的极限视场角  $\alpha_{\max} = 45^\circ, \beta_{\max} = 45^\circ$ ,仿真位于地球后方  $1\ 058 \times 10^4$  km 处地球公转轨道光学望远镜的观测与预警效能。

### 5.1 观测效能

首先仿真了数据库中小行星在望远镜极限视场内可见弧段的最大持续时间,如图 6 所示,横坐标为小行星的标号,纵坐标为小行星在望远镜视场内连续可见弧段的最大持续时间,其中可见的危地小行星共 1 665 颗,可见的小行星中可见弧段最大持续时间不足一天的仅有 1 颗,其持续时间为 0.7 d。数据库中几乎全部危地小行星可见弧段的最大持续时间都在 1 d 以上。

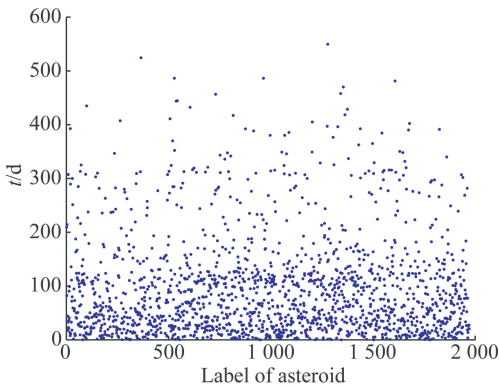


图 6 数据库中小行星可见弧段的最大持续时长

Fig. 6 Maximum duration of asteroids' visible arcs in the database

假设望远镜的瞬时视场为  $3^\circ \times 6^\circ$ , 瞬时视场内停留时长为  $180 \text{ s}^{[14]}$ , 极限视场角  $45^\circ$ , 采用如图 7 的扫描方式, 望远镜在  $81\,000 \text{ s}$  (不足 1 d) 可完成上述极限视场的扫描。采用瞬时视场仿真时可见的小行星为 1 665 颗, 因此利用极限视场替代瞬时视场开展监测效能评估是合理的。

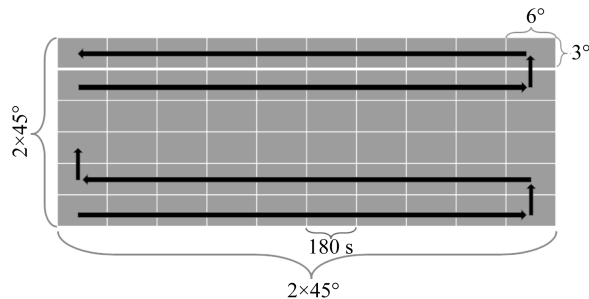


图 7 望远镜扫描方式示意图

Fig. 7 Scanning method of the telescope

其次, 仿真了望远镜极限视星等对观测效能的影响, 仿真不同极限星等下望远镜观测到的小

行星数量, 结果如图 8 所示, 横坐标为时间, 纵坐标为不同时间望远镜观测到的小天体数量与数据库中 小天体总数的比值, 由图可知  $V_{\max} = 24$  时 6 年内可观测数据库中 84.5% 的危地小行星, 比  $V_{\max} = 25$  时少 7.0%, 比  $V_{\max} = 23$  时多 12.4%; 仿真极限视星等为 24 时, 数据库中小行星首次被观测到和可见时的平均视星等, 如图 9 所示, 横坐标为小行星的视星等区间, 纵坐标为可见时的视星等在该区间中的小行星数量与可见小行星总数的比值, 可知大多数危地小行星首次发现时的视星等在  $(23, 24]$  区间内, 可见时的平均视星等集中在  $(22, 24]$  区间。综合望远镜的观测效能、极限视星等的技术实现难度和观测时对极限视星等的利用效率, 将望远镜的极限视星等设置为 24 是合理的, 以下仿真的极限视星等均为 24。

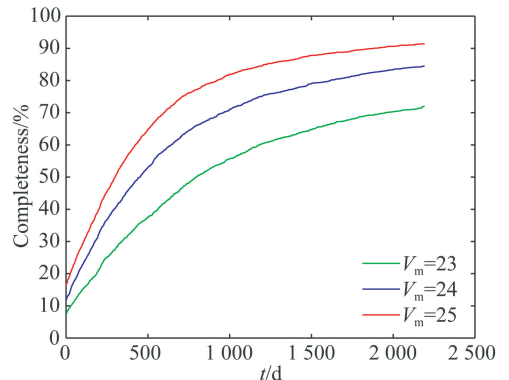


图 8 不同极限视星等下观测到小行星的比例

Fig. 8 Number of asteroids observed with different limited apparent visual magnitude

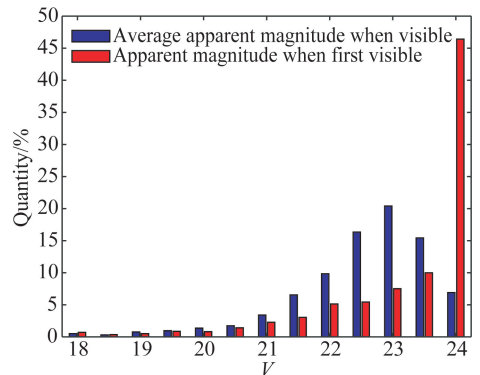


图 9 数据库中小行星首次被观测到的视星等和可见弧段内的平均视星等

Fig. 9 Apparent visual magnitude of the asteroids in the database when it was first observed and the average apparent visual magnitude when visible

然后,仿真了数据库中小行星 6 年内被望远镜连续可见弧段的数量,如图 10 所示,横坐标为可见弧段数,纵坐标为具有该可见弧段数的小行星数量与数据库小行星总数的比值。仿真结果表明数据库中 70.0% 的危地小行星都具有多个可见弧段。较多的可见弧段有利于对小行星进行定轨<sup>[15]</sup>。

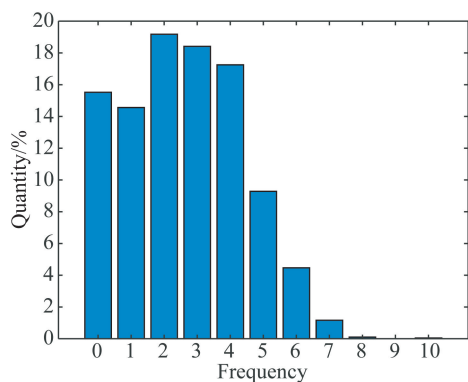


图 10 数据库中小行星可见弧段的数量

Fig. 10 Number of visible arcs of the asteroids in the database

之后,统计了望远镜对数据库中不同轨道元素(半长轴、偏心率)小行星的观测能力,仿真结果如图 11 所示,结果表明望远镜对数据库中半长轴小于 2 AU 的危地小行星有较好的观测能力。数据库中部分小行星不可见的原因有两个,一是小行星未进入望远镜视场内,二是小行星的视星等超过 24。半长轴为 1 AU 附近出现较多的不可见小行星,原因是这些小行星与望远镜的半长轴接近,与望远镜形成共振,未进入望远镜视场内,导致望远镜对其不可见;半长轴和偏心率较大的小行星,进入视场时与望远镜距离较远亮度较低无法被识别<sup>[16-17]</sup>,导致未被观测到。

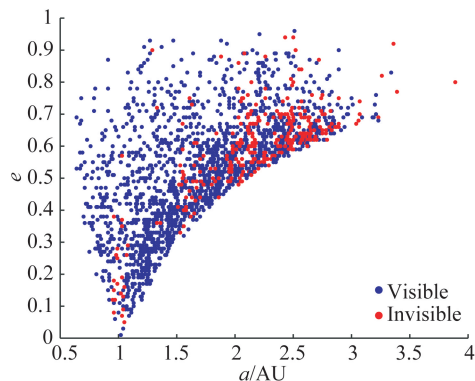


图 11 地球公转轨道光学望远镜对数据库中不同轨道元素小行星的观测能力

Fig. 11 Telescope's ability to observe asteroids with different orbital elements in the database

最后,为评估能对地球造成不同程度破坏的危地小行星的观测能力,仿真望远镜对数据库中不同尺寸区间小行星的观测完整度。观测完整度的定义为任务周期内可见的小行星数量与小行星总数的比值。仿真结果如图 12 所示,横坐标代表不同的小行星尺寸区间,纵坐标为望远镜对数据库中位于该尺寸区间的危地小行星观测完整度。望远镜对能造成地球区域级破坏的直径 140 m 以上的危地小行星的观测完整度为 84.5%,其中对直径在 140~300 m,300~500 m 及 500 m 以上的危地小行星观测完整度分别为 76.3%,87.1%,97.2%。地球公转轨道光学望远镜对尺寸相对较大的危地小行星观测完整度较高,因为当小行星与望远镜的相位关系相同时,尺寸较大的小行星相对望远镜更亮。

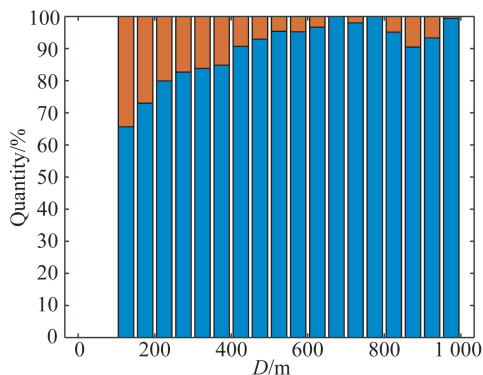


图 12 望远镜对数据库中不同尺寸区间小行星的观测完整度

Fig. 12 Completeness of observations for asteroids in different size intervals in the database

## 5.2 预警效能

望远镜的极限视场角为  $45^\circ$ ,望远镜和地球的距离  $d$  与望远镜可完全覆盖地球周围空间的半径  $r$  如图 13 所示, $d$  与  $r$  存在如下关系:

$$r = d \times \sin 45^\circ. \quad (13)$$

望远镜位于地球后方  $1.058 \times 10^4$  km 时,由式(13)可知,此时望远镜恰好可以对地球周围 0.05 AU 的空间实现全覆盖。

预警率的定义是危地小行星进入地球 0.05 AU 范围内并被观测到的次数与危地小行星进入地球 0.05 AU 范围内的总次数的比值。仿真了 6 年内地球公转轨道光学望远镜对数据库中距离地球小于 0.05 AU 的危地小行星的预警率,结果表明望远镜对距离地球小于 0.05 AU 的危地小行星的预警率为 100%。也就是说,地球公转轨道望远镜对地球周围 0.05 AU 范围内的空间具有极好的覆盖。

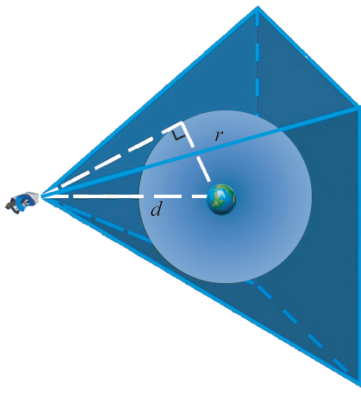


图 13 望远镜可完全覆盖地球周围空间的大小

Fig. 13 Size of the space around the earth that telescope can completely cover

计算地球周围不同位置处小行星相对地球公转轨道光学望远镜视星等为 24 时的尺寸,得到望远镜对不同尺寸危地小行星的预警范围,望远镜能为直径为 20, 30, 40, 48, 60, 90, 140 m 来自太阳方向的危地小行星提供最远约 215, 485, 650, 752, 875, 1 095, 1 345  $\times 10^4$  km 的预警距离,如图 14 所示。

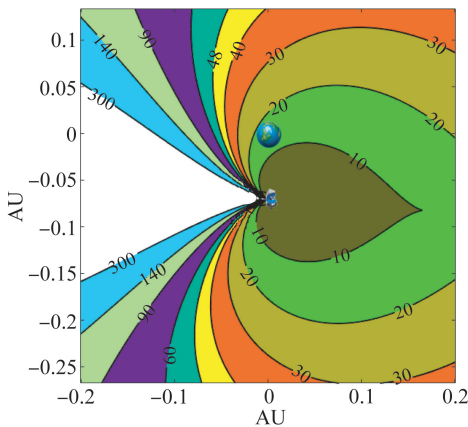


图 14 望远镜对不同尺寸危地小行星的预警范围

Fig. 14 Early warning range of the telescope for potentially hazardous asteroids of different diameters

## 参考文献:

- [1] 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[J]. 科学通报, 2020, 65(5): 346-372.  
GONG Z ZH, LI M, CHEN CH, et al.. The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning, security defense[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(5): 346-372. (in Chinese)

## 6 结 论

地基望远镜易受到大气环境和光线的影响,只能在晴朗的夜晚进行观测,有效观测时间严重不足;并且无法对来自太阳方向的小行星进行监测预警,本文提出地球公转轨道光学望远镜任务,利用其独特的位置对危地小行星进行监测。

本文仿真分析了地球公转轨道望远镜轨道维持所需的速度增量,施加约 580 m/s 的速度增量可使望远镜相对地球距离的漂移量不超过  $635\ 798.9 \times 10^4$  km(为入轨时望远镜相对地球距离的 6%);建立了小行星的光学可见性模型,仿真表明数据库中几乎所有危地小行星可见弧段的持续时间在 1 d 以上,因此在保证合理性的前提下可忽略复杂的观测策略利用望远镜的极限视场快速评估观测效能;通过仿真不同极限视星等下观测到危地小行星的数量、危地小行星可见时的视星等,综合视星等实现的技术难度,证明极限视星等设置为 24 是合理的,此时望远镜对数据库中危地小行星的观测完整度为 84.5%;以  $45^\circ$  视场角和 24 极限星等为条件进行仿真,地球公转轨道光学望远镜在 6 年内可观测到数据库中 84.5% 直径超过 140 m 的危地小行星,能对来自太阳方向直径为 48 m 的危地小行星提供最远约  $752 \times 10^4$  km(0.05 AU) 的预警距离,表明地球公转轨道光学望远镜能有效地监测危地小行星。需要指出的是,本文利用 MPC 中已经发现的危地小行星作为数据库,实际上还有大量的危地小行星有待发现,下一步将采用小行星数量模型构建出来的大样本作为小行星数据库,对观测与预警效能开展进一步仿真分析。

- [2] 乔凯, 王治乐, 丛明煜. 空间目标天基与地基监视系统对比分析[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 744-746.  
QIAO K, WANG ZH L, CONG M Y. Analysis on space based and ground based surveillance system to space target[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 744-746. (in Chinese)
- [3] DUNHAM D W, REITSEMA H J, LU E, et al.. A concept for providing warning of earth impacts by small asteroids[J]. *Solar System Research*, 2013, Vol. 47, No. 4, pp. 341-351.

- [4] REITSEMA H J, LU E T. *Sentinel: A Space Telescope Program to Create a 100-year Asteroid Impact Warning* [M]. Cham:Springer, 2015.
- [5] MICHELSEN R, HAACK H, ANDERSEN A C, et al.. Asteroid and NEA detection models[C]. *International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Istanbul, Turkey: IEEE*, 2003.
- [6] MAINZER A, GRAV T, BAUER J, et al.. Survey simulations of a new near-earth asteroid detection system[J]. *The Astronomical Journal*, 2015, 149(5): 172.
- [7] 马品仲. 空间望远镜研究与“哈勃”介绍[J]. *光学精密工程*, 1994, 2(6):67-74.
- MA P ZH. Design and research of space telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994, 2(6):67-74. (in Chinese)
- [8] 许仁华. 小行星撞击地球,能提前防御吗? [EB/OL]. <https://zhidao.baidu.com/daily/view? id = 4532,2015-06-02>.
- [9] 李建军,王大轶. 摄动因素对火星环绕段轨道长期影响研究[J]. *深空探测学报*, 2017, 4(1):77-81.
- LI J J, WANG D Y. The analysis for long-term influence of perturbations on orbit around mars[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(1): 77-81. (in Chinese)
- [10] MUINONEN K, BELSKAYA I N, CELLINO A, et al.. A three-parameter magnitude phase function for asteroids[J]. *Icarus*, 2010, 209(2): 542-555.
- [11] 杨志涛,刘静. 近地天体预警防御综述[J]. *天文研究与技术*, 2019, 16(4):508-516.
- YANG ZH T, LIU J. Summary of Near-Earth Objects Warning and Defense[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2019, 16(4):508-516. (in Chinese)
- [12] 马鹏斌,宝音贺西. 近地小行星威胁与防御研究现状[J]. *深空探测学报*, 2016, 3(1):10-17.
- MA P B, BAOYIN H X. Research status of the near-Earth asteroids' hazard and mitigation [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(1): 10-17. (in Chinese)
- [13] Minor Planet Cente. [EB/OL]. [https://www.minorplanetcenter.net/db\\_search](https://www.minorplanetcenter.net/db_search).
- [14] NA C Y, ESPOSITO L W. Bulletin of the american astronomical society [J]. *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #27*, 1995,1071(27): 27.
- [15] 王翔. 基于多弧段测量数据的低轨空间目标精确确定轨方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- WANG X. *STudy on the Precise Orbit Elements Determination of Low-Orbital Space Target Based on Multi-Arc Measured Data* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [16] 高扬,赵金宇,刘俊池,等. 中高轨道目标的地基光电监视[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10):2584-2590.
- GAO Y, ZHAO J Y, LIU J CH, et al.. Ground-based photoelectric surveillance for mid-high orbit target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2584-2590. (in Chinese)
- [17] 李振伟,张涛,孙明国. 星空背景下空间目标的快速识别与精密定位[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2):589-599.
- LI ZH W, ZHANG T, SUN M G. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2):589-599. (in Chinese)

#### 作者简介:



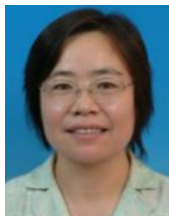
王新涛(1995—),男,山东青岛人,博士研究生,2017年于北方工业大学获得学士学位,主要从事小行星观测与卫星轨道动力学研究。E-mail: wangxintao17@mails.ucas.ac.cn

#### 通讯作者:



李明涛(1982—),男,河南商丘人,研究员,博士生导师,2005年于西北工业大学获学士学位,2010年于中国科学院研究生院获博士学位,主要从事航天动力学与控制、行星防御与利用方面的研究。E-mail: limingtao@nssc.ac.cn

#### 导师简介:



郑建华(1966—),女,河南许昌人,研究员,博士生导师,1996年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事中俄联合火星探测任务,空间科学任务论证系统的建设和空间科学探测任务的论证,卫星自主导航、小卫星编队飞行动力学与控制技术、深空探测器节能轨道设计技术等方面的研究。E-mail: zhengjianhua@nssc.ac.cn