

# 近地小行星远距离逆行轨道监测布局与效能评估

张 崑<sup>1</sup>, 李润道<sup>2</sup>, 施晓廉<sup>1</sup>, 武 迪<sup>2</sup>, 袁 渊<sup>1</sup>, 王 伟<sup>1</sup>

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 201109; 2. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

**摘 要:** 针对近地小行星地基监测系统对日不可见盲区限制、监测体系发现与编目能力不足等问题, 提出了天基远距离逆行轨道4星监测系统解决方案, 据此量化分析了天基监测系统对上述问题的解决能力, 建立了配套的效能评估模型, 给出了对应评估软件的实现流程, 按照可见光和红外谱段完成了各要素整合后得到评分。通过分析评估, 印证了远距离逆行轨道监测布局对地基监测系统不可见盲区全时可见的补偿效能, 以及对目标发现编目能力的提升, 可为后续天基监测体系的建设提供设计参考。

**关键词:** 近地小行星; 天基监测; 远距离逆行轨道; 系统布局; 盲区补偿; 效能评估

**中图分类号:** V57

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2024)02-0184-11

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230087

**引用格式:** 张崑, 李润道, 施晓廉, 等. 近地小行星远距离逆行轨道监测布局与效能评估[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11 (2): 184-194.

**Reference format:** ZHANG W, LI R D, SHI X L, et al. Layout analysis and efficiency evaluation of space-based DRO monitoring system for near-Earth asteroids[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11 (2): 184-194.

## 引 言

近地小行星是指距太阳最小距离小于1.3个天文单位 (Astronomical Unit, AU) 的小行星<sup>[1]</sup>, 其运行或交会过程中可能会受到大行星牵引而发生轨道变化, 因此导致其存在撞击地球的风险。同时, 近地小行星亮度暗弱、分布广泛, 撞击地球具有一定的突发性, 据统计近地小行星撞击地球的风险、危害程度与其等效直径紧密相关<sup>[2]</sup>, 一般而言直径越大, 危害越大。

为有效应对近地小行星所带来的撞击风险, 首先需要具有对具有撞击风险的目标小行星具有搜索、发现、定位、定轨、编目等能力, 计算获得撞击概率, 进而支撑后续撞击预警、在轨处置、灾害救援和国际合作等事务。前述搜索、发现等工作属于近地小行星监测的范畴, 主要分为地基和天基两套系统, 二者相结合可形成天地协同监测体系。

地基监测系统主要依托地面光学、雷达台站等装置实现目标的搜索与跟踪。当前, 中国仅有1台近地小行星监测专用光学设备, 国际贡献率为0.13%左右<sup>[3]</sup>。地基监测系统受太阳背景辐射和大气散射影响, 可见光台站在太阳方向存在近80°张角的不可见盲区; 地球大气中的水、二氧化碳、臭氧等对红外辐射的吸收影

响到红外台站监测效率。此外, 地基站点的布设和天气因素也将影响到监测的时间分辨率和时效性<sup>[4]</sup>。

天基监测系统由于布局灵活、无大气影响, 可通过轨道优化、红外谱段等监测设备搭载等手段对地基监测系统的局限性进行补偿, 提升监测体系的综合效能<sup>[5]</sup>。目前, 中国尚未部署天基监测系统。

综上所述, 近地小行星撞击威胁是当前国际社会共同关注的热点问题, 中国在近地小行星监测方面, 地基或天基系统当前均存在较大的缺口和差距。因此, 天基监测系统优化轨道布局, 与地基系统协调发展, 相互支撑, 实现盲区补偿、发现能力强化, 是提升监测体系综合效能的重要途径和手段。

在监测设备能力一定的情况下, 天基监测系统效能主要取决于监测系统运行轨道和监测设备的选择与设计。除本文将要分析的地球远距离逆行轨道 (Distant Retrograde Orbit, DRO) 外, 还存在日地L1点Halo轨道、地球领航拖尾轨道、类金星轨道等备选轨道<sup>[6-8]</sup>。由于DRO轨道具备在远离地球位置顺光观测地球, 进而补偿地基对日不可见盲区且获得较长短临预报时间的特点<sup>[8]</sup>, 有必要开展深入分析以印证其效能, 国内外对此研究相对较少。

# 1 系统布局分析

## 1.1 地球DRO轨道特征

地球DRO是考虑太阳和地球组成的限制性三体问题中的稳定周期轨道, 具有顺行绕日、逆行绕地运行的特征<sup>[9-10]</sup>。在日地旋转坐标系中, 地球DRO轨道为一绕地运行的环绕型周期轨道, 地球绕日周期和轨周期可以具有比例关系 $p:q$ , DRO与地球的距离可通过调节共振比进行调整, 共振比为1:1和50:49的轨道如图1所示, 这两条轨道近日点和地球距离不同, 分别为2 000万km和1 000万km。

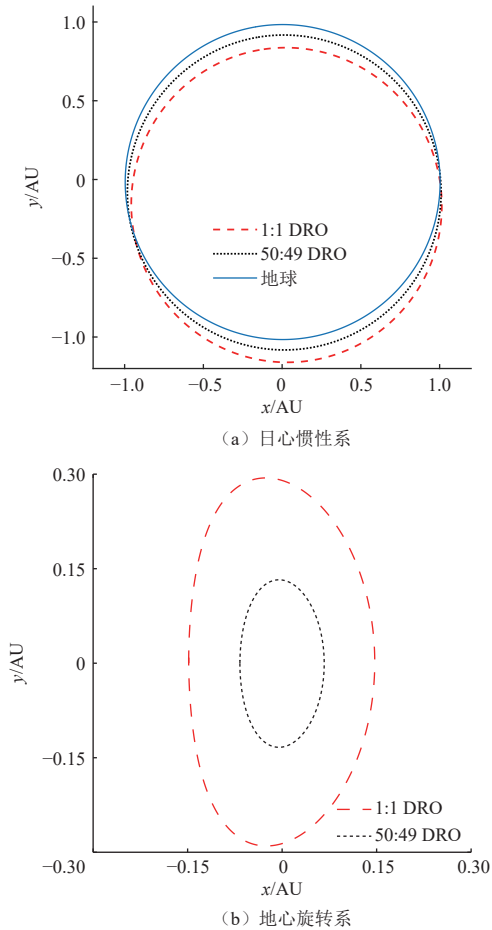


图1 地球DRO轨道仿真  
Fig. 1 Simulation of Earth DRO

根据地基不可见盲区补偿任务设定, 近地小行星监测系统需运行至近日点距离地球约1 000万km的位置, 因此选择共振比接近50:49的DRO轨道, 此时可近似认为地球DRO轨道的轨道周期接近地球绕日周期。通过组网设计, 可实施环绕地球型监测任务, 提升整体的监测效能。此外, DRO轨道是一族稳定的周期轨道, 轨道维持代价较小, “嫦娥五号”“阿尔忒弥斯”(Artemis)等任务已验证了月球DRO的轨道转移

性质。

## 1.2 效能评估要素分析

### 1.2.1 对日不可见盲区补偿

对日不可见盲区是指地基可见光台站在日地连线方向上, 对日的不可观测区域, 其原因是太阳的强背景辐射影响造成目标不可见。一般划分为该方向上顶角 $\alpha=80^\circ$ 左右的圆锥形区域, 如图2所示。

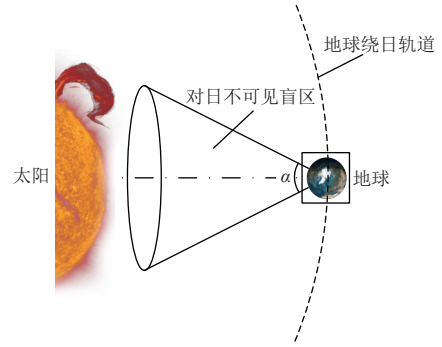


图2 地基不可见盲区示意图  
Fig. 2 Diagram of ground-based invisible area

根据近地小行星监测场景不少于5 d的短临预报时间要求, 并设定目标小行星平均飞行速度为20 km/s, 则短临预报距离约为860万km (以地球为中心, 目标小行星径向切入条件下距地距离)。兼顾不可见盲区全域监测时效性, 选择日地连线方向距地1 000万km的DRO轨道作为任务轨道开展分析。

### 1) 盲区补偿可见性

#### (1) 天基可见光谱段

天基监测以实现不可见盲区的全时可见性和高时效性为目标。根据视星等与绝对星等的关系, 对于相同的观测距离, 当目标小行星相对于监测系统处于顺光位置 (在太阳-探测器连线的延长线上) 时, 监测系统的监测能力最强, 而偏离顺光位置越远 (监测相位角越大) 则能力越弱<sup>[4]</sup>。对日不可见盲区和短时预警圈相交区域位于地球和所选DRO近日点之间, 故监测系统距离DRO近日点越近, 对于盲区补偿能力越强。因此, 监测系统阵列在DRO上等时间间隔分布的情况下, 若距离DRO近日点最近的两套监测系统位置关于日-地连线对称, 则整个系统对盲区的观测能力最弱, 此时整个系统中各探测器所处的位置被称为最恶劣位置。相反地, 当某套监测系统位于DRO轨道近日点时, 整个系统对盲区的探测能力最强, 此时整个系统中各监测系统所处位置被称为最佳位置。4星系统为例对上述位置关系如图3所示。

为保障对不可见盲区的全时可见性, 在选取系统参数时, 对最恶劣位置情况的观测能力进行分析。考

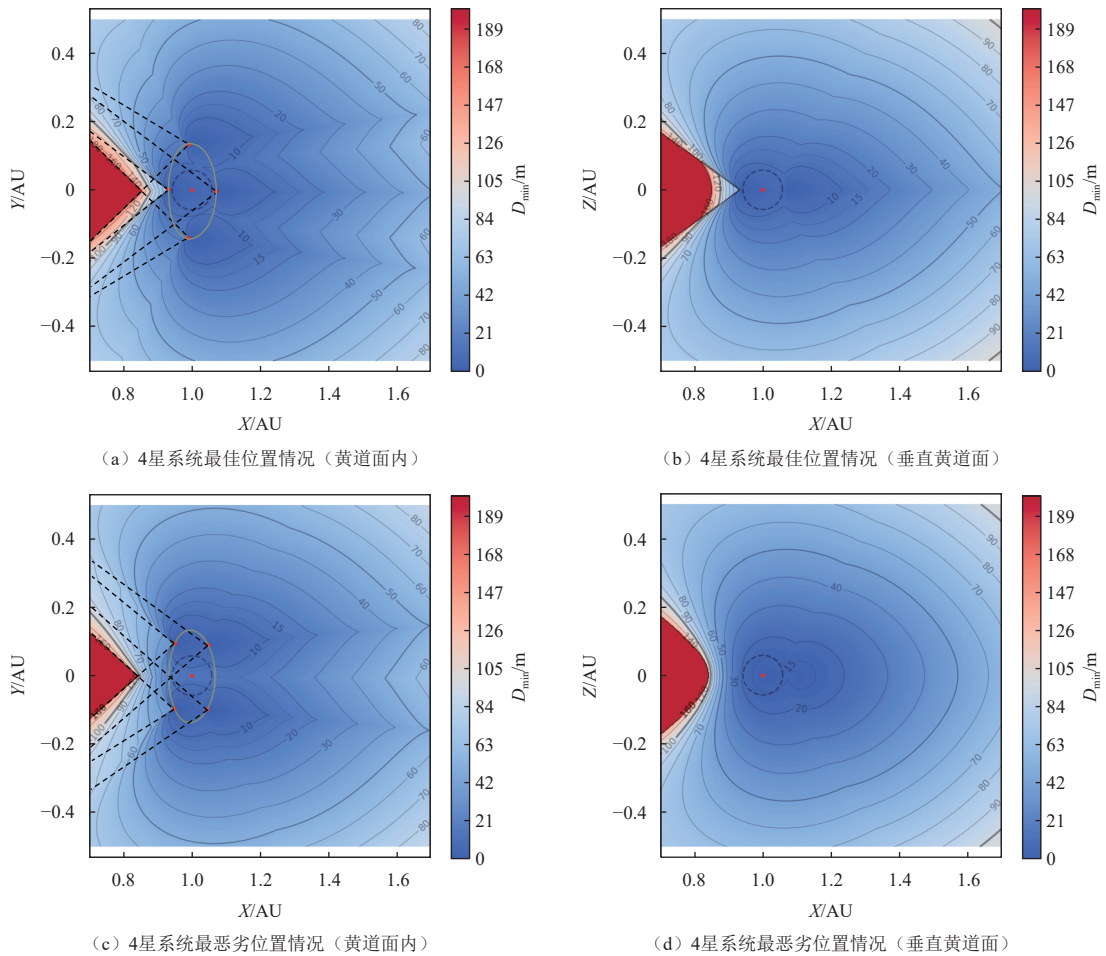


图3 4星系统最佳和最恶劣位置可见光监测能力

Fig. 3 Capability of monitoring visible band for four-satellite networking at best and worst positions

虑可见光监测设备极限探测能力 $24.5 m_V$  ( $m_V$ 表示视星等), 几何反照率为0.14, 按照多系统组网, 等间隔布局情况进行仿真分析, 结果如图4所示, 其中4星系统最恶劣情况见图3。

图4中的虚线圈为860万km的短临预报界面, 且画出了每套监测系统所在轨道位置和太阳保护角, 考虑到可见杂光抑制能力, 本文采用 $70^\circ$ 作为太阳保护角参考值进行分析。由图4可知, 在3星系统最恶劣的情况下, 即使对于20 m等效直径的目标也不能保证盲区全时可见; 在5星系统最恶劣的情况下, 20 m等效直径目标的盲区全时可见能力尚显冗余; 在4星系统最恶劣情况下, 在满足20 m等效直径目标的条件下, 对盲区全时可见能力匹配较好。因此, 综合考虑监测设备能力提升和工程实现, 宜选择4星系统开展布局设计。

## (2) 天基红外谱段

红外谱段监测设备极限监测能力, 设定为日地连线方向, 远离太阳端地球延长线距地球1 AU位置, 目标等效直径为140 m。按照4星系统布局情况进行仿真

分析, 结果如图5所示。

由图5可知, 在4星系统组网布局条件下, 在红外谱段可实现10 m等效直径目标的盲区全时可见, 其间考虑红外监测系统对太阳光的敏感性, 本文采用 $90^\circ$ 的太阳保护角进行分析。后续若采用可见-红外一体化监测设备, 则可充分发挥2种谱段的特长, 满足10 m左右等效直径监测目标所在盲区的全时可见<sup>[11]</sup>。

## 2) 盲区补偿时效性

补偿时效性是指完成不可见盲区监测遍历所需时间<sup>[12]</sup>。以监测系统在日地连线方向上, 日地间位置为起点, 第一视角下运行50 d的盲区投影情况。为了便于分析, 可见光谱段和红外谱段监测设备按共口径一体化设计, 两谱段视场重叠。

按照4星系统配置进行仿真, 监测设备视场为20平方度(对应 $4.5^\circ \times 4.5^\circ$ 视场)能力, 如图6所示。

图6中盲区轨道投影的坐标代表监测设备指向地球方向(地球处于视场中心)时, 第一视角下目标的张角, 其中横轴所在平面为黄道面, 纵轴指示垂直于黄道面

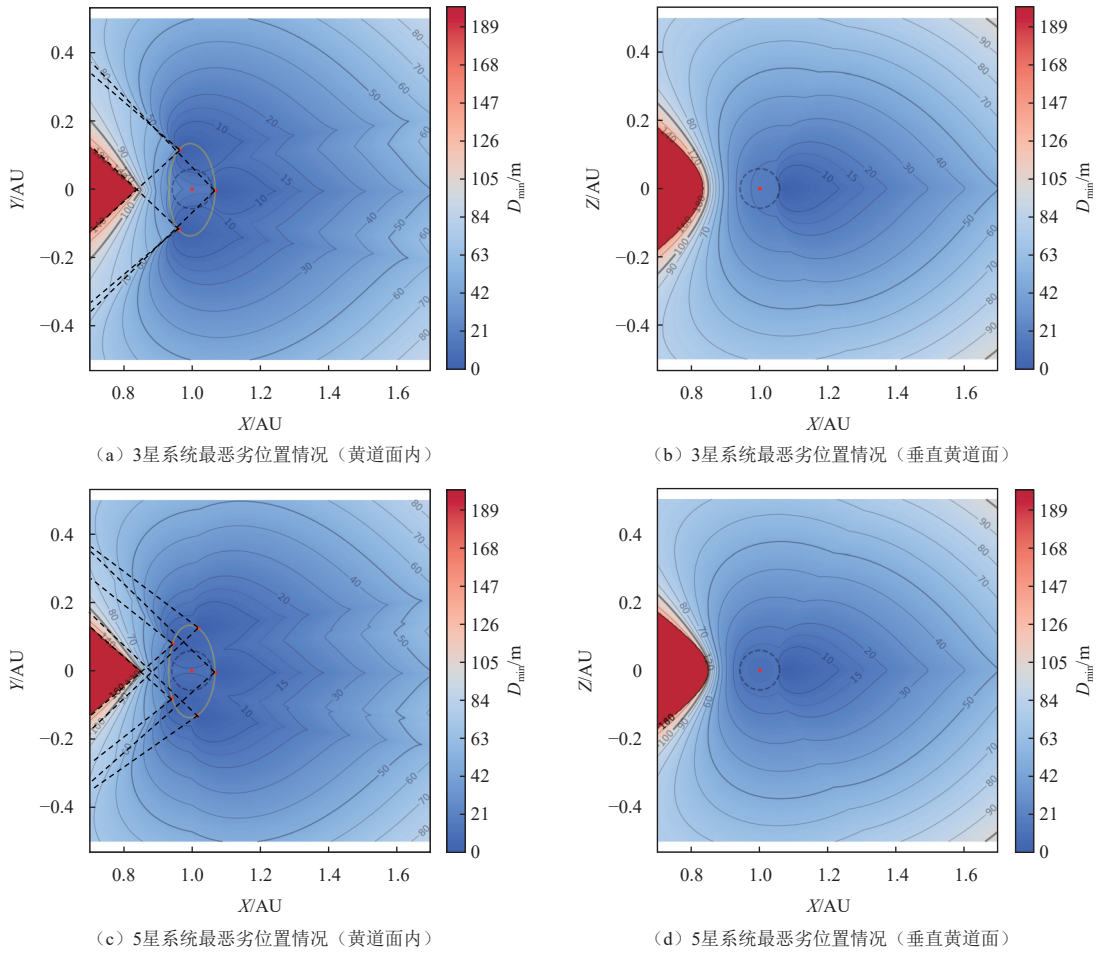


图 4 多系统组网布局下可见光监测情况

Fig. 4 Monitoring of visible band for multi-system networking

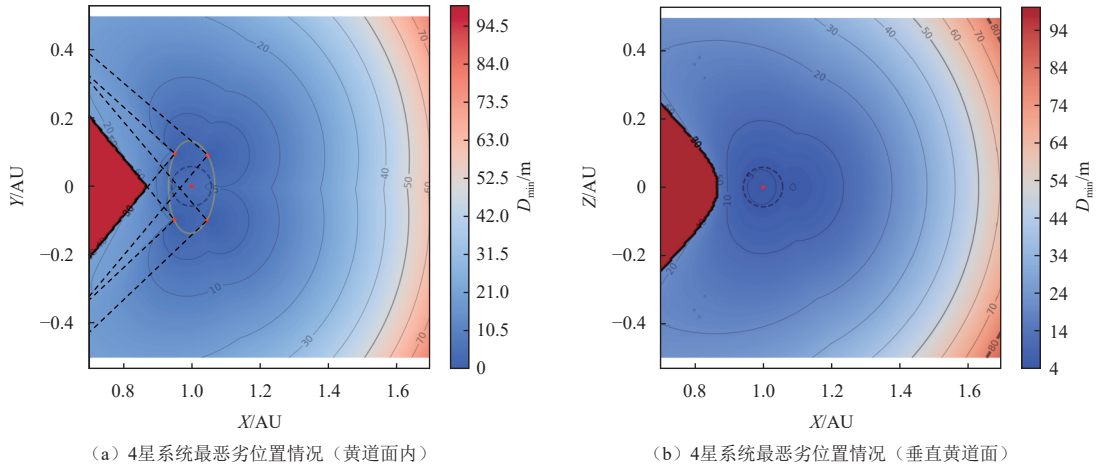


图 5 4星系统组网布局下红外监测情况

Fig. 5 Monitoring of infrared band for four-satellite networking

的方向。

监测系统所关注的补盲区域是地基设备对日不可见盲区(以地球为顶点的圆锥)和地球短时预警区(以地球为中心,半径860万km的球体)相交的部分,补盲区域的边界面分别由对日不可见盲区和短时

预警区边界的一部分构成。为方便观察其透视关系,在图中用边界面上的曲线表示补盲区域的边界,其中红色曲线表示边界中由短时预警区边界构成的部分,是球面上的一部分,蓝色曲线表示边界中由盲区边界构成的部分,是一个圆锥面。

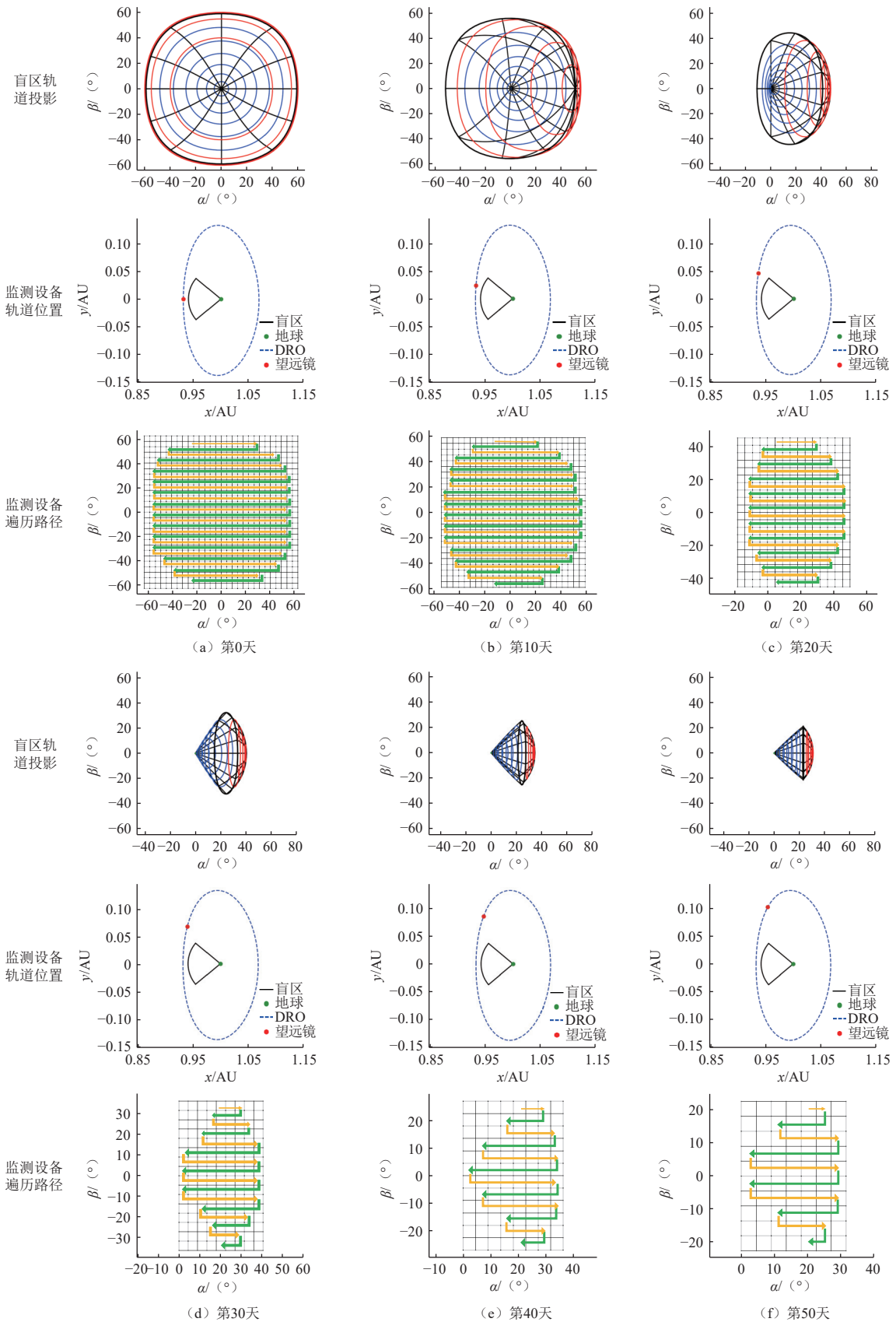


图 6 监测系统对盲区时效性仿真

Fig. 6 Simulation of time efficiency of invisible area by monitoring system

考虑监测设备与相邻视场的机动时长为25 s, 成像曝光时间按10 s记, 对各时段盲区遍历时间进行统计, 结果如表1所示。分析统计可知, 对于不可见盲区补偿时效性, 地球DRO轨道具备1天内遍历3次能力, 结合监测设备角分辨率, 可满足成目标的发现判读和定轨编目的需求。

表 1 监测系统对盲区时效性统计  
Table 1 Statistics on time efficiency of invisible area by monitoring system

时段	耗时/min		时段	耗时/min	
	1次遍历	3次遍历		1次遍历	3次遍历
第0天	354.7	1 064.0	第30天	59.5	178.5
第10天	324.3	973.0	第40天	38.5	115.5
第20天	134.2	402.5	第50天	28.6	85.8

1.2.2 目标发现率

1) 目标样本约定

目标发现率是指在一定的监测环境下, 面对一定样本的目标小行星, 在一定时间内按照一定的发现判据所发现的目标小行星数与样本总数的比例<sup>[13]</sup>。

为便于比较分析, 本文选择了2035年1月1日0时—2045年1月1日0时, 10 a时间内进入过以地球为中心, 860万km为半径的预警区域中一次及以上的小行星为目标小行星样本总数, 共筛选出84 029颗<sup>[4]</sup>, 对其直径分布情况统计如下, 主要集中在25~75 m区间内, 如图7所示。

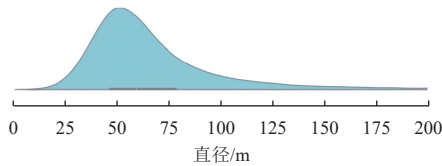


图 7 目标小行星样本直径分布

Fig. 7 Diameter layout of target asteroid samples

2) 目标发现率分析

监测系统采用4星系统开展分析, 发现策略与判据是以1 d内对同一目标观测到3次以上, 兼顾目标几何可见性和辐射可见性达到门限值而实施。其中: 1套监测系统负责实施不可见盲区值守, 另外3套监测系统负责黄道面内120° × 120°天区监测, 4套系统动态更迭运行, 场景设置如图8所示。

为获得目标发现率的定量化统计分析结果, 根据场景设置、样本数量、发现率统计完整性和统计精度等条件, 以10 a为统计时长、0.01 a为时间步长对其发现效能进行仿真分析。两个谱段下其发现率所得结果如图9~11所示。

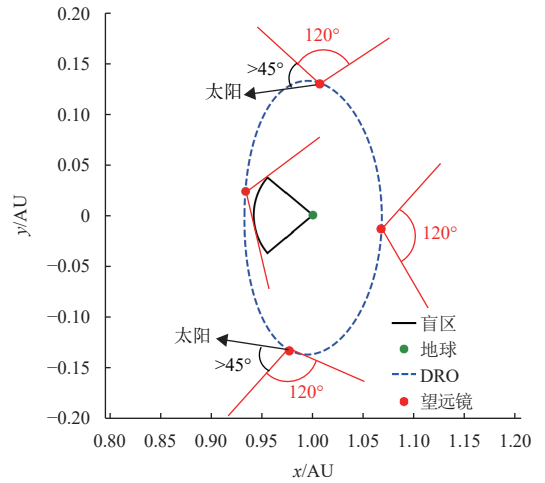


图 8 地球DRO轨道4星系统在轨监测场景示意图

Fig. 8 Diagram of on-orbit monitoring scenario of four-satellite networking of Earth DRO

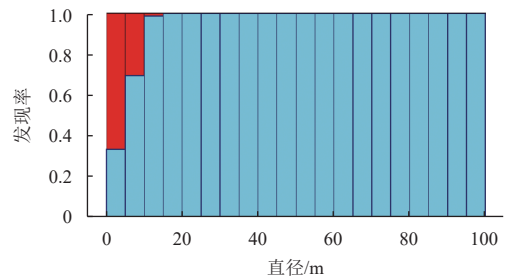


图 9 4星系统可见光谱段下发现目标情况统计

Fig. 9 Statistics of discovered targets in visible band of four-satellite networking

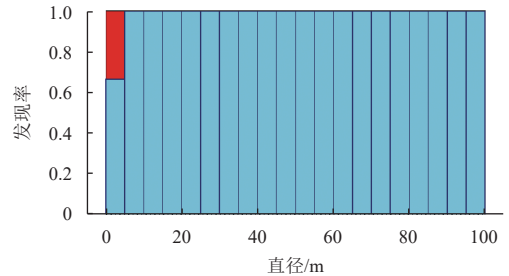


图 10 4星系统红外谱段下发现目标情况统计

Fig. 10 Statistics of discovered targets in infrared band of four-satellite networking

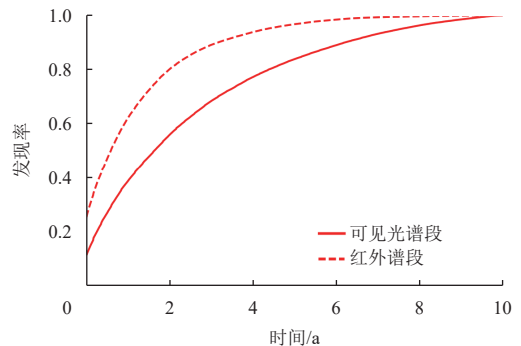


图 11 4星系统可见光和红外谱段目标发现率随时间变化情况

Fig. 11 Change of target discovery rate in visible and infrared band of four-satellite networking over time

根据上述分析,在4星系统下,无论是所发现目标的尺寸、数量还是发现效率,红外谱段对目标的发现能力要略强于可见光谱段,10 a时段内可见光谱段发现率为99.9875%,红外谱段为99.9976%,二者差距主要体现在后者对光照要求相对较低,更易达到发现门限,结合两个谱段可进一步优化目标发现率和虚警率。

### 1.2.3 轨道维持代价

#### 1) 算法流程

天基监测系统的运行轨道距离地球较近,需要同时考虑太阳中心引力和地球引力的共同作用。地球DRO轨道和日地L1点Halo轨道具有不同的运动规律,为使监测系统始终运行于设定的目标轨道附近并和地球保持一定的相对位置关系,需要视情况施加速度增量进行轨道维持,而维持量的大小与频次与轨道特性和设计相关。为简化起见,本文仅考虑脉冲模型进行轨道维持,以此评估两类轨道维持所需的速度增量情况。

任务实施期间,在合适的时刻多次施加控制脉冲,使得天基监测系统始终位于目标轨道附近。设在初始时刻 $t_0$ ,系统位置为 $\mathbf{r}_0$ ,速度为 $\mathbf{v}_0$

$$x_i = \{t_i, \Delta \mathbf{v}_i\}, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式(1)为所有优化变量的集合, $t_i$ 为第 $i$ 次脉冲的施加时刻, $\Delta \mathbf{v}_i$ 为此次脉冲产生的速度增量, $N$ 为所需的总脉冲个数。轨道维持优化的目标即总速度增量最小,即

$$J = \sum_{i=1}^N \|\Delta \mathbf{v}_i\| \quad (2)$$

同时使任意时刻的监测设备的位置与目标轨道位置的距离小于给定值 $d_{\max}$

$$\|\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_{\text{tar}}(t)\| \leq d_{\max} \quad (3)$$

其中: $\mathbf{r}(t)$ 和 $\mathbf{r}_{\text{tar}}(t)$ 分别为设备和目标轨道在 $t$ 时刻的位置矢量。

长期监测任务的脉冲个数较多,优化变量总数多,难以采用进化类算法快速求解,本文采用逐次优化的方法将上述问题转化为多个单脉冲轨道维持优化的问题进行求解。设监测系统从初始状态开始,轨道递推至第一次脉冲施加时刻 $t_1$ ,轨道瞬时改变量为 $\Delta \mathbf{v}_1$ ,而后轨道演化至 $t_{1f}$ 时监测系统与目标轨道位置距离达到给定值 $d_{\max}$ ,优化变量为 $x_1 = \{t_1, \Delta \mathbf{v}_1\}$ ,优化指标修改为

$$J = p \|\Delta \mathbf{v}_1\| - (t_{1f} - t_0) \quad (4)$$

其中: $p$ 为罚函数项,即该优化问题优化目标是使第

一个脉冲最小的同时,使监测系统能够尽可能长时间维持在目标轨道附近。此后,第二段优化问题则以第一段的脉冲时间后瞬时作为起始点,类似地建立单脉冲优化问题,并以此类推。当最终轨道演化的时刻 $t_{1f}$ 超过任务时长时,轨道维持策略结束。调节罚函数的大小可得到近优解,评估不同监测系统轨道维持的代价。若罚函数过大,单段优化倾向于寻找速度增量小而轨道维持时间短的结果,此时轨道维持策略所需的脉冲个数多而单次脉冲较小,较多脉冲个数的问题难以寻找近优解;若罚函数过小,单段优化倾向于寻找速度增量大而轨道维持时间长的结果,此时轨道维持所需的脉冲个数较少,易于求解分析。因此,实际求解中可以将罚函数值首先设为0,估计脉冲个数,而后逐步增大罚函数值获得速度增量最小的近优解。

#### 2) 维持代价分析

采用归一化单位使天文单位和地球轨道周期分别为1和 $2\pi$ ,初始时刻的DRO和地球轨道参数分别为

$$\mathbf{r}_0 = [-0.157 \ 392 \ 636, 0.902 \ 709 \ 548, 0.0]^T$$

$$\mathbf{v}_0 = [-1.071 \ 424 \ 423, -0.186 \ 809 \ 053, 0.0]^T$$

$$\mathbf{r}_E = [-0.171 \ 743 \ 027, 0.985 \ 014 \ 761, 0.0]^T$$

$$\mathbf{v}_E = [-0.985 \ 199 \ 677, -0.171 \ 775 \ 269, 0.0]^T$$

按照上述分段优化方法仿真,结果表明6 a时间内共施加8次脉冲,速度增量为36.64 m/s,10 a时间内共施加17次脉冲,速度增量为104.09 m/s,可使监测系统和DRO目标轨道的距离始终小于 $d_{\max} = 1.2 \times 10^6$  km。监测系统轨道和目标DRO轨道之间的距离随时间变化、监测系统和地球之间的距离变化曲线如图12所示。结果表明地球DRO轨道适宜实施长期的近地小行星监测任务。

## 2 效能评估

通过系统布局仿真,完成了地球DRO轨道对日不可见盲区、目标发现率和轨道维持代价3个效能要素的分析,需开展系统效能评估,对后续工程实施提供指导性的意见。本文将通过对要素的评估描述,采用权重赋值、指标整合等方式,建立评估模型,以完成系统布局方案的整体效能评估。

### 2.1 评估要素描述

#### 2.1.1 对日不可见盲区补偿

根据前文论述,在5 d短临预报要求下,设地基对日不可见盲区空域为 $A_0$ ,天基监测系统可遍历空域为 $A$ ,则天基监测系统对日不可见盲区补偿情况可表示为

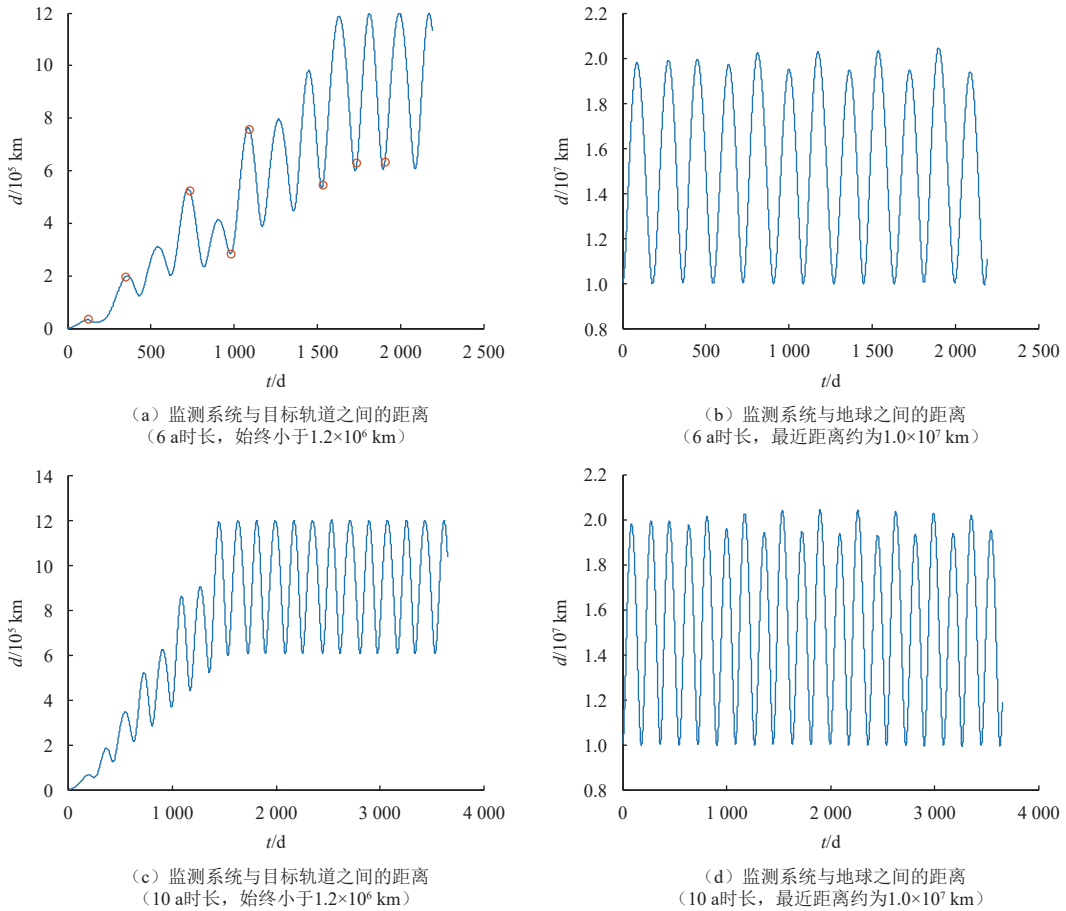


图 12 地球DRO轨道监测系统与目标轨道以及地球之间距离

Fig. 12 Distance from Earth DRO monitoring system to target orbit and to the Earth

$$K = \frac{A}{A_0} \quad (5)$$

### 2.1.2 目标发现率

目标小行星发现率要素评估<sup>[1]</sup>可表示为

$$R = \frac{\text{sum}(n)}{N} \quad (6)$$

其中:  $n$ 为监测天数,  $\text{sum}(n)$ 为 $n$ 天内目标小行星累积监测发现数量(不重复);  $N$ 为参与监测发现率评估的近地小行星总数。

### 2.1.3 轨道维持代价

根据前文论述, 天基监测系统轨道维持代价要素评价可表示为

$$C = \Delta v(D) \quad (7)$$

其中:  $D$ 为需要进行维持的轨道偏差距离阈值;  $\Delta v$ 为速度增量。

## 2.2 要素整合方式

由于对日不可见盲区补偿情况、目标发现率、轨道维持代价等要素具有不同的评价体系, 本评估模型

采用归一化后线性整合方式进行评估, 即

$$\begin{aligned} Score_{\text{sum}} = & k_1 Score_{\text{compensate}} + k_2 Score_{\text{cover}} + k_3 Score_{\text{maintain}} + \\ & k_4 Score_{\text{satellites}} = (k_1 K + k_2 R) \times 100 + \\ & k_3(100 - pC) + k_4 \frac{100}{N_0} \end{aligned} \quad (8)$$

其中:  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 和 $k_4$ 为评估要素权重系数;  $p$ 为轨道维持相关归一化参数, 适当取值使得 $pC$ 取值在 $[0, 100]$ 区间内;  $N_0$ 为不同轨道布局下的监测系统数量。根据评估要素的重要性, 本文令 $k_1=0.4$ 、 $k_2=0.4$ 、 $k_3=0.1$ 、 $k_4=0.1$ 。

## 2.3 软件实现

效能评估软件将构建灵活、可扩展的评估指标体系和评估指标模型; 能建立涵盖多种评估方法的评估方案, 基于仿真推演系统生成的数据, 对监测系统和设备效能进行分析评估; 评估结果能够输出显示, 生成评估报告, 并与仿真推演系统进行集成测试。系统主要实现以下功能: 评估指标体系及方案管理功能; 评估指标分析计算功能; 评估结果显示功能。软件运行流程如图13所示。

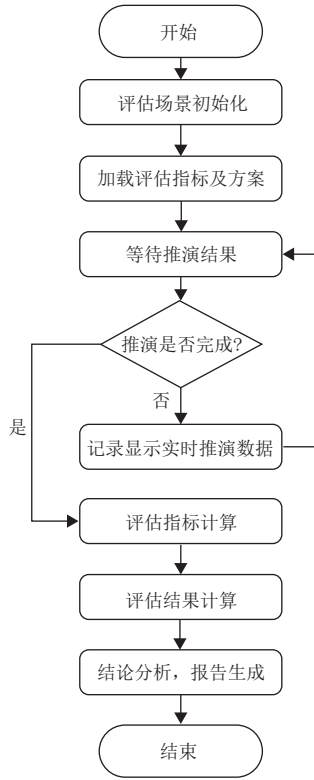


图 13 效能评估软件工作流程图

Fig. 13 Flowchart of efficiency evaluation software

1) 评估场景初始化。

场景可通过人工可视化输入与场景文件读取两种方式加载, 场景内容包括场景对象 (监测设备、目标小行星等)、场景环境 (地球、太阳、星空背景等)、场景时间 (开始、结束时间、步长等)、坐标系定义 (J2000惯性系、地固系) 等。

2) 加载评估指标, 加载评估方案。

根据评估的目标与需求, 从数据库中加载相应的评估指标与评估方案, 指标与方案采用插件化设计, 支持定制、裁剪。

3) 向仿真推演平台发送指令, 启动推演与等待推演结果。

4) 若推演未完成, 记录实时推演数据并显示。

5) 推演完成后, 从共享资源池获得数据库记录相关推演结果数据、设备性能数据、目标数据等, 进行评估指标计算。

6) 对计算出的评估指标归纳, 完成系统与设备效能进行评定。

7) 基于评定结果, 生成评估报告。

评估结果以雷达图、柱状图、曲线图及表格等图表形式展示。本文所提出的效能评估模型雷达图如图14和图15所示。图中数据为各要素评估分值。效能

评估分析如表2所示, 表中列出了各评估要素的原始数值和整合评分等。

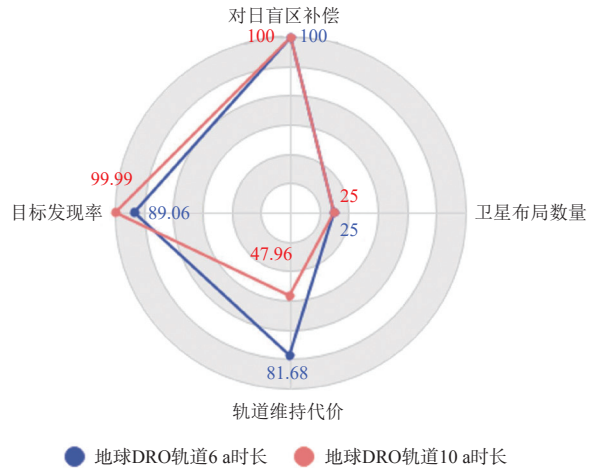


图 14 地球DRO轨道可见光谱段监测效能  
Fig. 14 Monitoring efficiency in visible band of Earth DRO

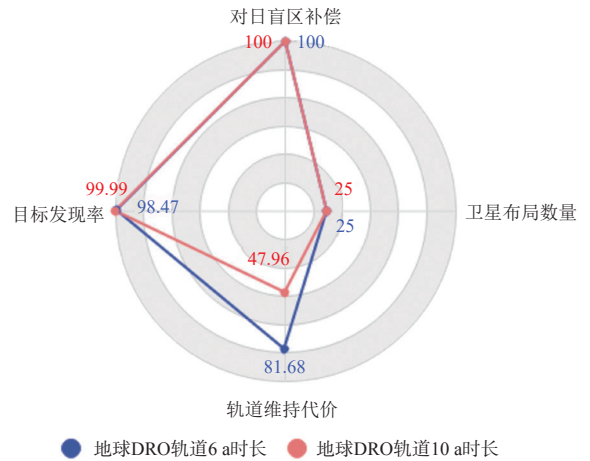


图 15 地球DRO轨道红外光谱段监测效能  
Fig. 15 Monitoring efficiency in infrared band of Earth DRO

表 2 地球DRO不同轨道监测效能评估分析  
Table 2 Evaluation analysis of diverse orbital monitoring efficiencies of Earth DRO

谱段	不可见盲区补偿率/%	目标发现率/%		轨道维持代价/(m·s <sup>-1</sup> )		布局数量	整合评分	
		6 a	10 a	6 a	10 a		(k <sub>1</sub> =0.4, k <sub>2</sub> =0.4, k <sub>3</sub> =0.1, k <sub>4</sub> =0.1, p=0.5)	
		6 a	10 a	6 a	10 a		6 a	10 a
可见光	100	89.06	99.99	36.64	104.09	4	86.29	87.28
红外	100	98.47	99.99	36.64	104.09	4	90.06	87.28

根据表2可知, 通过4系统组网可以满足可见光谱段和红外谱段对盲区全时全域可见, 以及对太阳方向等效直径10 m量级危地小行星5 d短临预报要求; 6 a时间内, 可见光谱段和红外谱段分别达到89.06%和98.47%的目标发现率, 在轨轨道维持代价约40 m/s, 10 a时间内, 可见光谱段和红外谱段分别达到99.987 5%和99.997 6%的目标发现率, 在轨轨道维持代价约100 m/s;

经过评估系统初步分析, 监测系统评估分数可见光谱段6 a为86.29、10 a为87.28, 红外谱段6 a为90.06、10 a为87.28分。

### 3 结 论

通过考察当前国内外近地小行星防御任务态势与技术发展现状, 基于DRO轨道开展天基监测效能分析的研究相对较少, 深入开展相关研究工作具有一定的参考意义; 本文通过天基监测场景建模, 实现了对不可见盲区补偿时效性第一视角建模仿真, 具有一定的新颖性, 得到了较好的仿真效果, 对监测系统综合效能评估和布局方案的最终确定提供了支撑。本文基于DRO轨道绕地运行监测形态和根数设计的灵活性, 量化分析了4星系统在轨监测效能, 印证了DRO轨道对盲区补偿全时可见性和5 d短临预报能力, 获得了红外谱段较可见光谱段监测能力更强的评估结论。

近地小行星天基监测系统设计还存在多类型的备选轨道, 如日地L1点Halo轨道、地球领航拖尾轨道、类金星轨道、地月平动点逆周期轨道等, 监测设备谱段还可选择微波、多光谱等类型, 针对系统布局优化均值得开展进一步分析和比较论证, 以获得更全面、更具工程实施性的方案。此外, 效能评估系统的构建还可考虑更多的影响因素, 如不可见盲区覆盖的系统机动能力、监测设备能力等, 以提升评估模型的科学性和完备性, 需持续关注 and 开展相关工作。

### 参 考 文 献

- [1] 徐波, 雷汉伦. 探测小天体[M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
XU B, LEI H L. Exploration of asteroid [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [2] 吴伟仁, 龚自正, 唐玉华, 等. 近地小行星撞击风险应对战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 140-150.  
WU W R, GONG Z Z, TANG Y H, et al. Response to risk of near-Earth asteroid impact[J]. Engineering, 2022, 24(2): 140-150.
- [3] 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 Z, LI M, CHEN C, et al. The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning, security defense and resource utilization[J]. Science Bulletin, 2020, 65(5): 346-372.
- [4] 冒雨萌, 赵海斌, 李彬. 不同测站近地小行星地基观测效能评估研究[J]. 天文学报, 2021, 62(6): 94-102.  
MAO Y M, ZHAO H B, LI B. Ground-based observation efficiency evaluation of near-Earth asteroids in different observation stations[J]. Acta Astronomica Sinica, 2021, 62(6): 94-102.
- [5] 唐玉华, 吴伟仁, 李明涛, 等. 地月空间近地小行星观测系统研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52(7): 1169-1185.  
TANG Y H, WU W R, LI M T, et al. Near-Earth asteroids observation system in cislunar space[J]. Scientia Sinica: Information, 2022, 52(7): 1169-1185.
- [6] 王新涛, 郑建华, 李明涛. 地球公转轨道危地小行星地基光学监测仿真研究[J]. 光学精密工程, 2020, 28(11): 2564-2571.  
WANG X T, ZHENG J H, LI M T. 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): 2564-2571.
- [7] 阮宁娟, 刘志敏, 郑永超. 天基近地天体探测技术与实践[J]. 空间碎片研究, 2022, 22(1): 18-31.  
RUAN N J, LIU Z M, ZHENG Y C. Space-based NEO detection: technology and practice[J]. Space Debris Research, 2022, 22(1): 18-31.
- [8] 杨旭, 赵柯昕, 甘庆波, 等. 近地小行星地基光学监测系统预警能力分析[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(12): 1307-1313.  
YANG X, ZHAO K X, GAN Q B, et al. Analysis of ground-based and space-based optical observation system warning capability of near-Earth asteroids[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(12): 1307-1313.
- [9] 杨驰航, 符弘岚, 张皓. 远距离逆行轨道上的近距离自然及受控编队[J]. 航空学报, 2023, 44(5): 229-241.  
YANG C H, FU H L, ZHANG H. Natural and non-natural close formation flight on distant retrograde orbit[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(5): 229-241.
- [10] 陈冠华, 杨驰航, 张晨, 等. 地月空间的远距离逆行轨道族及其分岔研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2576-2588.  
CHEN G H, YANG C H, ZHANG C, et al. Distant retrograde orbits and its bifurcations in Earth-Moon System[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2576-2588.
- [11] MYHRVOLD N. Comparing NEO search telescopes[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2016, 128(962): 045004.
- [12] QI Y, TANG Y, QIAO D, et al. Detection system of near Earth objects based on the axial orbit in the Sun-Earth circular restricted three-body problem[J]. Acta Astronautica, 2023, 208: 155-166.
- [13] SHAO M, TURYSHEV S G, SPANGELO S, et al. A constellation of SmallSats with synthetic tracking cameras to search for 90% of potentially hazardous near-Earth objects[J]. Astronomy & Astrophysics, 2017, 603: A126.

作者简介:

张崑(1976-), 男, 研究员, 主要研究方向: 深空探测及空间科学总体及载荷应用技术。

通信地址: 上海市闵行区元江路3666号(201109)

Email: zw1229@126.com

施晓廉(1989-), 男, 工程师, 主要研究方向: 卫星姿控软件系统设计、空间小行星监测地面仿真。本文通信作者。

通信地址: 上海市闵行区元江路3666号(201109)

E-mail: 851223979@qq.com

# Layout Analysis and Efficiency Evaluation of Space-Based DRO Monitoring System for Near-Earth Asteroids

ZHANG Wei<sup>1</sup>, LI RUNDAO<sup>2</sup>, SHI Xiaolian<sup>1</sup>, WU Di<sup>2</sup>, YUAN Yuan<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;

2. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** To address such the problems as the limitation of the invisible zone of the ground-based monitoring system for near-Earth asteroids and the insufficient discovery and cataloguing capabilities of the monitoring system, a solution of a space-based distant retrograde orbit 4-satellite monitoring system was proposed. Then, the space-based monitoring system's to solve the problems mentioned above was quantified and analyzed, and a corresponding model for evaluating the efficiency of the system was set up. A process for the implementation of the corresponding evaluation software was given and an integration of the scoring of various elements was completed in accordance with the visible and infrared spectrum. By analyzing and evaluating, the efficiency of the distant retrograde orbit monitoring layout in compensating for the full-time visibility of the invisible zone of the ground-based monitoring system was verified, as well as the enhancement of the capability of target discovery and cataloguing. This research could provide design reference for subsequent construction of space-based monitoring system.

**Keywords:** near-Earth asteroid; space-based monitoring; DRO; system layout; invisible zone compensation; efficiency evaluation

## Highlights:

- A whole efficiency evaluating model of space-based monitoring system on DRO is set up.
- A first perspective modeling and simulation for time efficiency of the invisible zone compensation is carried out.
- A software for efficiency evaluation involving each elements, such as invisible zone compensation, target discovery and cataloguing, orbit maintenance and so on, is worked out.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]