

近地小行星撞击事件处置规则与处置流程

洪 宇 陈永强 蔡铤彬 常 笑
徐 良 景红宝

(宇航动力学国家重点实验室 西安 710043)

摘 要 针对中国近地小行星防御研究在处置规则、协同机制、运行流程等方面存在的不足,为了应对小行星防御和灾害救援方面不断提升的需求,提出一种小行星防御仿真推演策略。根据国内外小行星防御发展现状,分析了中国小行星防御方面存在的差距。从机制建立和协同应急处置的角度出发,分析了国内外小行星防御仿真推演情况。基于国内外研究现状,设计了一套小行星防御仿真推演方案,提出了中国开展小行星防御演练的组织架构,包括指导层、事件处置层和业务支撑层等三个层次,为小行星防御演练提供基本的组织支撑;给出了小行星撞击事件的应急响应机制和一般处置规则设想,为事件的处置和组织架构中各层次运行提供了规则基础;初步设计了演练场景,对机制和规则进行了验证,为近地小行星防御工作组织及实施提供了参考。

关键词 近地小行星, 应急响应机制, 防御演练, 协同机制

中图分类号 P353

Near-Earth Asteroid Impact Event Disposal Rules and Processes

HONG Yu CHEN Yongqiang CAI Tingbin CHANG Xiao
XU Liang JING Hongbao

(State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043)

Abstract In response to the shortcomings in the areas of disposal rules, coordination mechanisms, and operational procedures in China's research on the defense of near-Earth asteroids, a simulation strategy for asteroid defense is proposed to meet the increasing demand for asteroid defense and disaster relief. Based on the current development status of asteroid defense at home and abroad, the gaps in China's asteroid defense are analyzed. From the perspectives of mechanism establishment and coordinated emergency response, the simulation and deduction of asteroid defense at home and abroad are analyzed. Based on the current research status at home and abroad, a set of asteroid defense simulation and deduction plans are designed, and an organizational structure for China's asteroid defense exercises is proposed, including three levels: guidance layer, event disposal layer, and business support layer, providing basic organizational support for asteroid defense exercises. The emergency response mechanism and gen-

2023-06-08 收到原稿, 2023-10-08 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

eral disposal rules for asteroid impact events are proposed, providing a rule basis for the disposal of events and the operation of each level in the organizational structure. The simulation scenarios are initially designed to verify the mechanisms and rules, providing a reference for the organization and implementation of near-Earth asteroid defense work.

Key words Near-Earth asteroid defense, Emergency response mechanism, Defense, Coordination mechanism

0 引言

距离地球轨道的最小距离在 0.3 天文单位 (Astronomical Unit, AU, $1 \text{ AU} = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$) 范围以内的小行星在天文学上被称为近地小行星 (Near Earth Asteroid, NEA). 近地小行星可根据轨道分为 4 类: 阿莫尔型 (Amors), 近日点距离在 1.017 AU 和 1.3 AU 之间; 阿波罗型 (Apollos), 半长轴大于 1.0 AU, 近日点距离小于 1.017 AU; 阿登型 (Atens), 半长轴小于 1.0 AU, 远日点距离大于 0.983 AU; 地内型 (Atiras), 远日点距离小于 0.983 AU^[1,2]. 近地小行星的轨道距离地球近, 尤其是阿波罗型和阿登型小行星的轨道与地球轨道交会, 存在与地球碰撞的可能^[3]. 一般认为, 如果小行星轨道与地球轨道最小距离小于 0.05 AU, 且小行星等效直径大于 140 m 就被称为具有潜在碰撞风险的小行星 (Potentially Hazardous Asteroid, PHA)^[4].

公开数据显示, 小行星撞击地球并带来灾难性后果的事件历史上曾多次发生. 6500 万年前, 一颗直径约 10 km 的小行星撞击墨西哥尤卡坦半岛, 导致 95% 的海洋生物和包括恐龙在内 75% 的陆地生物灭绝^[5]. 1908 年, 小天体撞击引起的通古斯大爆炸造成约 2 000 km² 树木被摧毁. 2013 年 2 月 15 日, 一颗直径约 18 m 的小行星在俄罗斯车里雅宾斯克上空爆炸, 导致约 1500 人受伤, 3000 多栋房屋受损^[6,7]. 2023 年 2 月, 一颗名为 2023 CX1 的小行星在距离法国海岸约 3 km 的地方进入大气层, 燃烧并坠入诺曼底附近海域. 2023 CX1 是人类第 7 次成功预测的小行星撞击事件, 被欧洲航天局称为全球小行星预警能力迅速发展的标志.

为了联合应对小行星撞击威胁, 国际上开展了一系列研究来规避未来可能的小行星撞击风险. 这些研究涵盖小行星防御的组织机构、理论研究、系统建设、处置试验等多个方面, 且取得了丰硕成果. 同时,

为了有效应对近地小行星撞击威胁, 美国、国际宇航联合会 (IAA) 等国家和组织开展了一系列小行星防御推演, 用于测试和优化小行星撞击事件的应对流程和协同处置机制. 中国小行星防御工作在系统建设和应对机制方面与国外相比均有较大差距^[8], 这就要求在加紧推进系统建设的同时, 也需要参考国际成熟经验, 开展国内小行星防御仿真推演工作, 为小行星防御工作发展奠定基础.

本文研究了国内外小行星防御发展现状, 从组织架构、系统建设、处置理论、处置规则等方面, 分析了小行星防御方面存在的差距. 从机制建立和协同应急处置的角度出发, 综述了国内外小行星防御仿真推演现状, 分析在仿真推演方面存在的差距. 基于国内外现状, 设计了一套小行星防御仿真推演方案, 给出了中国小行星防御的组织架构、应急响应机制和一般处置规则设想; 初步设计了仿真推演场景, 用于对机制和规则进行验证.

1 小行星撞击风险防御研究现状

1.1 国外现状

目前, 与行星防御有关的联合国机构包括联合国和平利用外层空间委员会 (Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, COPUOS)、联合国外空司 (United Nations Office for the Outer Space Affairs, UNOOSA)、国际小行星预警网络 (International Asteroid Warning Network, IAWN) 以及空间任务规划咨询组 (Space Mission Planning Advisory Group, SMPAG). 其中联合国外空司是联合国和平利用外层空间委员会的秘书处, 在行星防御方面, 联合国外空司认为行星防御对保卫人类安全至关重要, 一直致力于加强国际对话, 并积极推进国际小行星防御工作. UNOOSA 代表所有成员国, 在发生确定撞击威胁的情况下, 协调 IAWN 和 SMPAG 工作. IAWN 是一

个虚拟网络,把搜索、监测、提取潜在威胁目标 (Potentially Hazard Object) 特征及确定撞击概率的各国机构连接起来, NASA 的行星防御协调办公室 (Planetary Defense Coordination Office, PDCO) 当前主导了 IAWN 的工作. SMPAG 负责协调各国航天局,为应对小行星撞击威胁做准备,中国国家航天局于 2018 年正式加入该组织,同步加入了 IAWN.

在地基监测方面,美国建有成体系的光学望远镜,发现了目前已知的超过 30 000 颗近地天体中的 90%^[9];此外,美国还建有两个行星探测地基雷达站用于开展小行星特性分析工作^[10],其中阿雷西博目前已经损毁.天基方面, NASA 的 Spitzer 和哈勃望远镜、日本的光卫星、美国的广域红外探测器、欧洲航天局的盖亚探测器等天文观测卫星在近地小天体观测中起到了很好的补充作用^[8].软件工具方面,国外近地小行星在轨处置任务分析与设计软件在现有深空任务分析工具的基础上,结合在轨处置任务需求逐渐有针对性地发展起来^[11],主要包括通用深空任务轨道设计软件工具 (General Mission Analysis Tool, GMAT)^[12,13]、NASA/JPL 近地小行星偏转应用程序 (NASA/JPL NEO Deflection App, NDA)^[14]、小行星任务设计软件工具 (AMiDST)^[15,16]、端到端近地小行星威胁减缓软件 (END-TO-END NEO threat mitigation software suite) 等^[17,18].

在轨处置方面,近地行星防御技术有两个最基本的方式:一是改变近地行星轨道使之避开地球;二是使近地行星分裂成碎片.目前,国际上提出主要的近地行星防御技术包括核爆、撞击、拖船、质量驱动、引力牵引、激光烧蚀、太阳光压和离子束牵引等^[19]. NASA 和 ESA 牵头开展了小行星撞击和偏转评估 (Asteroid Impact and Deflection Assessment, AIDA) 任务,用于支撑行星防御战略规划,开发小行星

偏转技术与所需能力^[20]. 2022 年 9 月 26 日, DART 撞击器成功撞击迪迪莫斯双星系统的小卫星迪莫菲斯,使迪莫菲斯的轨道周期缩短了 32 min,成功验证了小行星偏转技术,动能撞击小行星理论得到了实践检验.

当前,近地小行星防御应对处置阈值设置和处置基本规则方面,各国尚无统一意见.联合国在其框架下形成了原则性的指导意见,美国根据联合国指导意见制定了国内的处置策略和国家层面发展战略.

小行星撞击风险是指小行星撞击地球的概率与撞击所致危害的乘积.由于撞击概率计算的复杂性,撞击危害通常用小行星的等效直径来表征,按照等效直径大小将小行星撞击所致危害分为 1000 m, 140 m, 50 m, 10 m, 10 m 以下五个等级,具体见表 1.为了有效评估小行星撞击风险,常用都灵风险指数和巴勒莫风险指数表征风险大小.

为了有效应对小行星撞击各类风险, SMPAG 于 2017 年发布了近地小行星威胁处置的基本准则,将碰撞预警分为以下 3 个等级.

(1) 撞击概率超过 1% 且等效直径大于 10 m(如果仅有光度测量数据,则亮度达到绝对星等 28).

(2) 撞击时间 20 年内,撞击概率大于 10%,直径大于 20 m(如果仅有光度测量数据,则亮度达到绝对星等 27).

(3) 撞击事件 50 年内,撞击概率大于 1%,直径大于 50 m(或如果仅有光度测量数据,则亮度达到绝对星等 26).

为了将 SMPAG 准则进一步细化为具体规则,美国政府于 2021 年颁布了《近地物体撞击威胁紧急协议报告》,该报告在 SMPAG 准则的基础上提出了详细的行动基准,分加密监视和在轨处置两个部分.细化的行动基准见表 2.

表 1 小行星撞击所致危害
Table 1 Hazards caused by asteroid impacts

序号	等效直径/m	灾难等级	发生时间间隔/a	举例
1	>1000	全球性灾难	>700000	6500万年前的撞击事件
2	140~1000	洲际灾难	>30000	—
3	50~140	大城市级灾难	>2000	1908年俄罗斯通古斯事件
4	10~50	小城镇级灾难	>200	2013年车里雅宾斯克事件
5	<10	空爆和火流星	0.5	2023年法国2023 CX火流星事件

表 2 《近地物体撞击威胁紧急协议报告》行动基准

Table 2 Operational benchmarks for the emergency agreement on the threat of near-earth object impacts

基准	条件分类	具体条件
严密监视	威胁基准	SMPAG第一等级预警
	时间基准	撞击发生前3年
在轨处置	威胁基准	50年内发生且概率大于10%
	可行性基准	技术上可行且防御后撞击概率降低, 同时等待精密观测结果将降低防御成功率
	危害基准	撞击造成美国100人以上伤亡, 或撞击损失大于防御成本

1.2 中国现状

在国家战略层面, 2020 年, 中国启动行星防御论证; 2021 年 4 月底, 国家航天局首次对外宣布中国小行星防御系统建设计划^[8]; 2022 年 4 月 25 日, 外交部发布消息表示将组建近地小天体防御系统旨在应对近地小天体撞击这一全人类面临的共同风险。

在地基观测方面, 中国科学院紫金山天文台的 1 m 口径望远镜是仅有的 1 台近地小行星监测专用设备, 已加入国际联网并支持日常编目工作, 可监测直径 300 m 以上的近地小行星^[8], 至 2021 年共发现 33 颗近地小行星, 国际编目贡献率为 0.13%. 中国另有 32 台望远镜也可兼顾近地小行星监测^[21]. 此外, 中国在探月工程的推动下建成全球布站的深空测控网, 在大口径射电望远镜研制方面取得重大突破, 未来可以利用雷达探测近地小行星, 进一步提高小行星探测能力^[22].

考虑到地基天文观测受制于地球大气特性^[23], 太阳方向是地基光学望远镜的观测盲区. Wang 等^[24,25]提出了位于地球前方或后方布设地球公转轨道光学望远镜, 该视场始终指向地球方向, 可为地球提供最远超过千万公里的预警距离, 有效弥补观测时间不足和无法观测来自太阳方向小行星的影响. Tang 等^[26]提出了在地月系统 L4/L5 点部署红外望远镜观测网络, 继承月球探测工程的技术基础, 可与地球领航轨道、类金星轨道等深空轨道构成互补.

在近地小行星在轨处置方面, 开展了动能撞击偏转小行星动量传递规律的建模与仿真、基于激光烧蚀驱动移除空间碎片地面试验及半物理仿真系统的激光偏转防御技术可行性等研究^[27], 在动能撞击方面具备基本的效能评估能力; 提出了以石击石^[28]、末级击石^[29]等加强型动能撞击防御方案构思, 为防御大尺寸潜在威胁近地小行星提供了除核爆之外的新选项; 开

展了核爆防御近地小行星的作用机理数值仿真, 获得了不同核爆条件下的近地小行星偏转规律^[30], 同时开展了典型核设施在近地小行星撞击条件下的安全评估分析^[21]. 2023 年 4 月 25 日, 深空探测实验室在首届深空探测国际会议中公布, 中国将在 2030 年前实现对小行星的动能撞击试验.

在近地小行星撞击灾害评估方面, 中国空气动力研究与发展中心超高速所开展了地球玄武岩材料和陨石材料的烧蚀试验^[31,32], 其高焓膨胀管风洞产生的气流速度可以达到第二宇宙速度^[33]. 通过超高速所研究的小行星进入与撞击效应分析评估软件 AICA^[34], 可以研究能量沉积、空爆高度、4 psi 超压损伤半径和 3 级烧伤半径等模型输出参数对输入参数的敏感性^[35]. 超高速所也对陨石音爆的影响开展了研究^[36]. 在法律方面, 对小行星防御的适用性、合法性^[20,37]方面进行了研究.

目前, 中国在小行星撞击风险处置领域尚处于理论探索和项目论证阶段, 在具体的政策和处置规则层面还没有官方的指导文件, 参考文献^[22]根据联合国和平利用外层空间委员会和美国发布的处置准则和实践经验, 给出了中国小行星撞击风险的处置建议. 该建议主要考虑撞击概率、撞击灾害、监测预警能力需求、在轨处置能力需求、监测预警和在轨处置以及成本效益等 6 个方面, 给出了如下处置决策的阈值.

(1) 撞击事件在 50 年内.

(2) 撞击概率大于 10%.

(3) 直径大于 30 m 且撞击人口稠密区, 直径大于 140 m 且撞击东亚地区, 直径大于 300 m 且撞击地球任何地区.

总体而言, 国外在小行星防御方面做了大量的研究工作, 积累了丰富经验. 中国在小行星防御系统建设和理论研究方面取得了一定成绩, 但较国外还存在

一定差距,主要表现在监测预警能力还不够完善,在轨处置还处于理论设想阶段,灾害评估只进行了有限的计算机仿真和地面试验,在监测预警、在轨处置、灾害救援等方面还没有建立有效的运行机制来支撑小行星防御的实施.考虑到小行星防御工作的特殊性,仿真推演由于能够为小行星防御的协同运行机制优化、处置规则合理性测试和灾害救援协同效果评估等工作常态开展提供理想的平台,从而得到了国际社会的广泛认同.因此,本文在充分借鉴国外小行星防御工作经验基础上,将研究侧重于小行星防御应急处置全流程推演方法方面,通过现状分析,找到小行星防御仿真推演工作的薄弱之处,针对性开展研究.

2 小行星防御仿真推演现状

当前,国内外在近地小行星防御领域开展了一系列研讨与演练,可以作为中国开展小行星防御演练工作的参考.

2.1 国外仿真推演现状

国际宇航科学院 (International Academy of Astronautics, IAA) 行星防御会议 (Planetary Defense Conference, PDC) 参与者众多,专业性较强.该会议每两年举办一届,自 2009 年以来已经举办 7 届会议.在最近 5 届会议期间 (2015—2023 年),国际宇航科学院组织开展了小行星撞击假想事件的桌面演练^[38],包含监测预警、撞击危害评估、在轨处置任务设计等方面,构成检验国际社会行星防御能力的重要平台.

美国 NASA 也多次组织美国国内的行星防御研讨会,促进了研究机构之间的学术交流,包括:潜在威胁小行星特性、进入与撞击危害评估会议 (2015 年)^[39],海洋撞击与海啸效应研讨会 (2017 年)^[40],通古斯事件研讨会 (2018 年)^[41].2017 年,针对 TC4 小

行星可能的撞击,NASA 行星防御协调办公室组织美国各科研机构开展了监测预警与危害评估演练^[42].2013—2022 年,NASA 和美国联邦应急管理局 (Federal Emergency Management Agency, FEMA) 组织了 4 届行星防御桌面演练 TTX-1~TTX-4^[42],设定假想撞击事件,对撞击危害开展评估.历次演练情况见表 3.

2022 年 2 月 23—24 日,第 4 次行星防御 (PD) 机构间桌面演练 (TTX-4) 在约翰·霍普金斯大学应用物理实验室 (APL) 举办,参与者包括当地应急管理人员以及联邦、州和地方机构人员,用于规划近地天体撞击情景的准备和应对.演练信息见表 4.

2.2 中国仿真推演现状

中国于 2018 年召开了以小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术为主题的第 634 次香山科学会议,聚焦研讨小行星安全防御问题.2018—2020 年组织召开了第三届全国行星防御研讨会.2021 年 10 月召开了第一届全国行星防御大会^[22],2023 年 3 月举办的第五届全国青年行星论坛、4 月召开的中国航天大会以及 7 月举办的第二届全国行星防御大会均在小行星防御方面开设了专门平台,为小行星防御研讨交流起到了促进作用.在演练方面,2022 年 11 月航天局牵头开展了小行星防御的桌面推演,为行星防御开展了有益探索.

2.3 存在的差距

从以上分析可以看出,小行星防御仿真推演是有效应对小行星撞击威胁的重要一环.国外小行星防御仿真推演工作起步较早,参与人员众多,组织架构和职责分工界面清晰,演练目标明确,场景设计针对性强,利用推演较好地检验了其处置流程和各部门之间协同机制.与国外相比,中国的小行星防御仿真推演工作在组织架构设计、运行机制和处置规则制定方面

表 3 历次演练情况
Table 3 Overview of previous drills

演练	预警时间	主题
2013年TTX-1	1个月	增进联邦应急管理局对小行星撞击事件性质的了解,并推演在侦测到小行星撞击事件后,预警的演变过程
2014年TTX-2	7年	增进各参与机构对威胁小行星的性质和预警演变过程的了解;分析灾害预警和响应程序的启动条件及使用策略
2016年TTX-3	4年	增进灾害响应部门对预警信息的特点、演变过程以及影响因素的了解
2022年TTX-4	6个月	增进参与部门对小行星防御过程的理解;引导州政府和地方政府参与事后处置程序演练,并对沟通机制开展测试

表 4 第 4 次行星防御机构间桌面演练信息
Table 4 Information on the fourth inter-agency desktop exercise for planetary defense

项目	信息		
推演日期	2022年2月23—24日		
概述	由NASA行星防御协调办公室赞助, 多方参与开展一天半的桌面演练, 模拟小行星撞击美国大陆. 重点推演小行星撞击事件的事前预防、处置防护以及灾后救援等多个过程, 从预警、危害建模、在轨处置、灾害救援等多个方面检验和检测事件处置能力		
推演构想	推演始于天文学家发现一颗小行星, 命名为2022 TTX, 可能在6个月后撞击地球. 同时随着推演的展开, 确认这颗小行星将撞击地球, 其大小足以对美国本土造成严重的区域破坏		
参与机构与职责	NASA	行星防御协调办公室	演练过程管理, 以及与FEMA协调
		近地天体研究中心	设计了小行星威胁情景; 为中小企业提供小行星探测、轨道确定和撞击概率等方面的信息
		艾姆斯小行星威胁评估项目	模拟小行星撞击损害效应; 评估小行星撞击造成的损害
		戈达德太空飞行中心	模拟太空任务的发射; 为专家组提供小行星减缓和侦察任务
	应用物理实验室(约翰霍普金斯大学)		跨单位组织、主持和领导演练的规划、执行和文件编制; 为演练提供小行星、洲际弹道导弹(ICBM)缓解和法律/政策影响方面的专家
	劳伦斯·利弗莫尔国家实验室		使用核爆炸装置(NED)模拟小行星减缓
	州紧急行动中心		在州一级主持和领导执行
	当地县第一反应社区		在地方一级领导规划和执行
场景设置	场景1	目标: 测试机构人员对天体撞击威胁和自身职责的理解; 测试各参与单位间信息沟通机制 时间: 发现目标后的12天至影响前约6个月 要素: NASA按照预案发布小行星撞击通知, 与此同时社交媒体上开始出现关于小行星撞击的错误信息. 分析解决方案以及使用核爆进行行星防御的国际法和条约考虑约束. NASA GSFC确认偏转方案不可行, 且发射飞跃探测器以及破坏装置的时间不足. 同时公布持续观测能力	
	场景2	目标: 检验各参与机构早期的准备活动 时间: 撞击前2个月 要素: 社交媒体出现错误信息及应对; 小行星撞击威胁信息进一步明确, 但大小和材质仍然不确定, 威胁评估主要来自可能的地面撞击、爆炸冲击波以及热烧伤, 爆炸半径约160 km	
	场景3	目标: 检验州一级的灾害应对准备 时间: 撞击前6天 要素: 确定受影响的县市范围; 小行星撞击危害信息基本明确, 受灾人口数十万, 建筑物和基础设施受到爆炸破坏	
	场景4	目标: 撞击后的态势分析 时间: 撞击后几十小时 要素: 分析撞击对环境造成的影响, 同时协调灾害救援安保等	

还存在差距, 需在以上几个方面开展针对性研究, 并设计专门的场景对设计进行检验、优化和完善.

3 小行星撞击防御演练构想

重点从演练要素的设计入手, 开展国内小行星防御推演思路设计, 利用推演检验和优化各项应急处置

机制. 演练流程覆盖监测预警、威胁评估、在轨处置、灾害救援和灾后评估等环节. 通过演练找出在技术能力、协同机制等方面的短板弱项, 建立科学合理的多部门应急处置协同机制, 促进中国近地天体防御能力的有效提升, 有效化解近地小行星撞击风险. 为细化事件处置应对流程, 同时检验事件协调处置组织架构、基本规则和协同机制在具体应用场景中的适用效

果,下面将分别从组织架构、协同机制、处置一般规则和场景设置 4 个方面介绍推演设计思路。

3.1 演练组织架构

参考文献 [21] 给出了中国近地小行星撞击事件的应对处置组织架构,包括决策指导层、组织协调层、执行层 3 个层次,各层之间制定工作机制以确保工作的顺利开展,同时设立专家委员会对各层工作开展支撑和指导。决策指挥层和组织协调层负责重大事项的决策和资源协调,执行层负责处置决策的具体实施,包括监测预警、在轨处置、灾害救援、国际合作等方面。在充分参考组织架构设计的基础上,给出小行星模拟撞击演练的组织架构设计(见图 1)。

(1) 指导层是整个模拟演练的组织指挥核心,完成流程规划、事件导调、过程组织、事后总结等工作。

(2) 事件处置层是模拟演练的主体,在接受任务后,完成整个小行星撞击事件的处置和评估,包括指挥决策组、协调调度组、监测预警组、威胁评估组、在轨处置组、处置评估组、灾后救援组、国际合作组等。

(3) 业务支撑层是整个模拟演练的业务后台,负责完成事件处置过程中各项计算、评估等技术支持和业务指导。

3.2 小行星防御事件的协同处置机制

小行星防御应急响应机制是指为应对小行星撞击灾害事件而建立起来的一套应急工作制度、规则与实施程序。

小行星防御主要分为三个阶段:一是观测与特征研究阶段。该阶段主要通过各类观测手段,发现可能威胁地球安全的小行星,并确定其轨道,掌握其几何与质量特征,在长时间的观测过程中确定其物理化学特征。二是偏离与摧毁阶段。在发现小行星对地球的威胁超过标准门限阈值后,采用人工手段化解小行星撞击地球的风险。根据观测积累的情况,确定化解风险的手段,设计在轨处置任务并执行。三是进入与危害应对阶段。当小行星撞击风险已经来不及通过偏离与摧毁手段来化解时,需要开展小行星进入危害风险应对,对进入过程解体爆炸与轨迹进行分析,评估小行星撞击或空爆对地面的危害,采取措施应对风险,尽可能保障人身安全。其中,小行星防御应急响应机制在确定发现存在撞击威胁的小行星后启动,具体流程如图 2 所示。

根据小行星防御的处置流程,小行星防御应急响应机制主要包括响应前的预防准备机制和预警监测

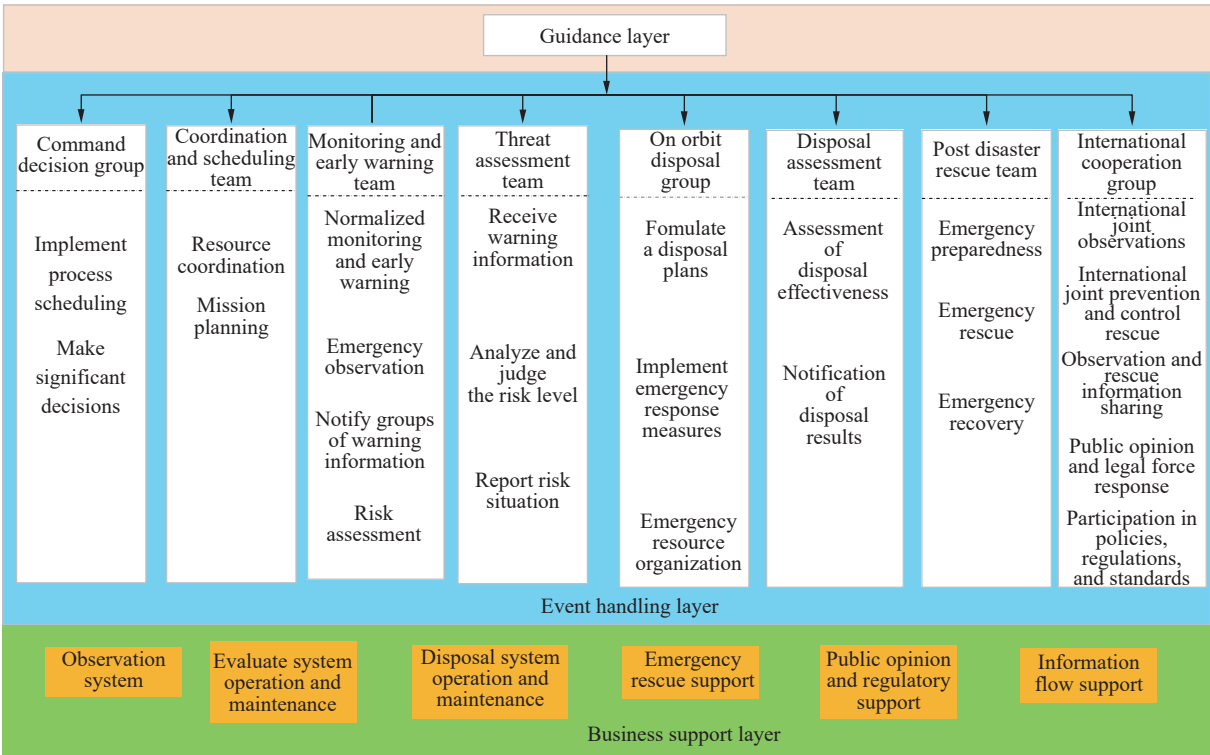


图 1 近地小行星防御演练组织架构

Fig. 1 Organizational structure for the defense drill against near-Earth asteroids

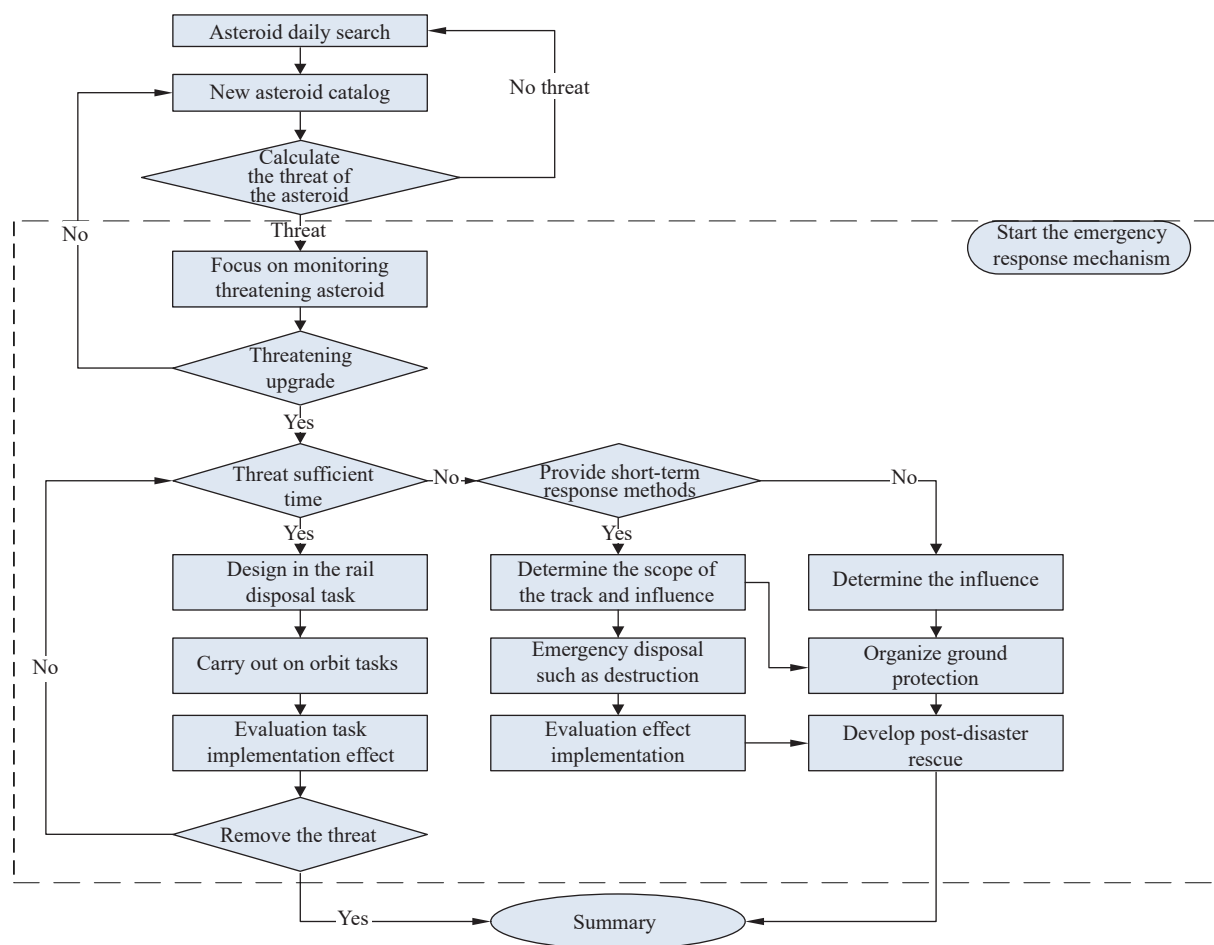


图 2 小行星防御应急响应机制

Fig. 2 Asteroid defense emergency response mechanism

机制, 以及响应后的信息通报机制、联席会商机制、联合处置机制、灾害应对机制。

(1) 预防准备机制. 预防准备是降低小行星危害、提高防御成功率的基础, 其重要程度并不亚于灾害救援. 一方面要组织观测单位开展近地小行星的日常搜索, 以及小行星发现后的轨道确定和威胁评估, 及时发现威胁小行星; 另一方面是开展小行星防御的其他工作, 如研究关键技术、修建防御设施、研制小行星在轨处置设备、开展近地小行星防御演练、公众宣传等活动, 提高小行星防御的应对处置能力。

(2) 预警监测机制. 预警监测是小行星防御的重要环节, 是确定是否启动小行星防御的判断依据. 当发现威胁的小行星后, 观测单位将威胁情况通报给相应处置机制, 由处置机制组织观测单位进行联合监测, 掌握威胁小行星的轨道、材质、尺寸、形状和撞击威胁, 复核确认后启动小行星防御应急响应机制。

(3) 信息通报机制. 信息通报是缩短应急响应时间、提高小行星防御效率的关键手段, 确保各方准确及时掌握小行星威胁信息, 为小行星防御的决策处置提供信息支撑. 主要是将小行星威胁信息及时通报有关国家部门, 明确小行星的基本信息、撞击时间、灾害影响等情况, 确保各部门能根据威胁等级开展应对工作, 与此同时协同舆论发声部门共同发布信息, 做好防护准备, 防止社会恐慌。

(4) 联席会商机制. 联席会商是开展小行星防御处置决策的重要方式, 能够有效联合各方力量共同制定可行的小行星防御方案, 为联合处置提供依据. 在联合处置机制的协调下, 处置实施部门、应急管理部门、工业部门、科研院所等单位协商小行星防御应对手段, 根据小行星特性设计在轨处置方案, 分析灾害影响并确定应急救援预案, 制定小行星防御的全流程规划。

(5) 联合处置机制. 联合处置要根据国家有关部门的小行星防御决策结果组织实施, 是确保小行星防御成功的关键环节. 联合处置机制按照小行星防御规划流程, 协调各有关组织联合开展小行星防御处置, 对小行星进行偏置或摧毁, 并根据观测到的情况评估处置效果; 对于来不及开展在轨处置的威胁小行星, 则由决策部门评估可用的处置手段及其影响后果后组织实施, 并及时发布灾害预警.

(6) 灾害应对机制. 灾害应对是对小行星进入地球后造成的灾害开展防护和救援, 是拯救人民生命、减少国家财产损失的重要举措. 应急管理部门根据掌握的危害情况确定灾害等级, 联合灾害防护和救援力量组织地面防护和灾害救援, 必要时组织人员疏散, 对次生灾害进行评估与处置, 同时及早组织力量稳定社会秩序, 开展灾后重建.

3.3 小行星防御事件的一般处置建议

在演练过程中, 以中国小行星撞击事件的处置阈值为主要参考^[8], 同时考虑联合国发布的文件以及各国实践经验, 从日常编目、加密跟踪、在轨处置三个方面给出中国小行星防御事件处置基本建议, 作为演练阶段演进的基本依据. 建议主要考虑小行星等效直径、撞击概率、发生时间以及监测预警和处置能力等方面. 各阶段阈值设置见表 5.

小行星撞击事件方案拟制和应对策略选择优先考虑以下内容.

(1) 监测预警. 监测预警组通过专用的天基、地基设备, 例行执行巡天搜索, 使用精测望远镜对近地小行星进行跟踪, 以获取足量数据, 进行近地小行星定轨编目, 定期向协调调度组推送编目数据. 监测预警组在新发现小行星后, 及时向协调调度组通报新发现的近地小行星定轨信息, 并持续观测其理化特性参数.

(2) 撞击风险评估. 协调调度组接收近地小行星撞击风险预报后, 及时组织威胁评估组开展近地小行星撞击风险评估. 根据监视机构提供的小行星轨道及其理化特性参数, 开展撞击概率计算、撞击落点预报、撞击效应分析等, 对撞击风险进行预警分级, 为撞击灾害评估、在轨处置提供输入.

(3) 撞击灾害评估. 协调调度组组织威胁评估组、近地小行星撞击灾害评估研究相关专家, 根据观测数据、撞击概率和撞击可能区域, 对撞击预警目标开展撞击能量估算, 并对近地小行星撞击导致的空爆、撞击成坑、海啸、地震等灾害以及超压冲击波、热辐射等次生效应开展仿真计算分析, 建立灾害评估模型, 并估算由此造成的人员、财产损失, 支撑在轨处置任务决策, 以及灾害应急响应和救援保障.

(4) 在轨处置. 在轨处置任务准备阶段, 在轨处置组完成在轨处置任务总体方案设计、论证, 指导各系统研制建设, 形成在轨处置方案, 并向指挥决策组报批, 同时在处置过程中协调处置评估组开展在轨处置任务效果评估.

(5) 灾害防护救援. 对于未能提前预警或者在轨处置未达到预期的近地小行星撞击事件, 由应急管理部牵头组织开展撞击灾害防护工作, 其余各部门支撑应急管理部开展救援方案设计、灾害发展趋势分析和次生灾害评估等工作.

(6) 舆情处置. 对外发布近地小行星风险预警后, 同步开展舆情信息收集, 分析舆情风险点, 梳理可能发展趋势, 协调相关媒体实施发声引导, 减小近地小行星撞击预警事件的负面舆论影响.

3.4 演练场景设置

考虑演练过程的连续性, 设置用一次事件的处置, 演练尽可能多的项目和内容, 从不同阶段考虑设

表 5 各阶段阈值设置
Table 5 Threshold settings for each stage

处置	预警	条件	具体条件
日常编目	蓝色预警	基本条件	10年内撞击概率小于1%
		危害条件	等效直径小于140 m
严密监视	黄色预警	基本条件	20年内发生且概率大于10%
		危害条件	且等效直径大于30 m
在轨处置	红色预警	基本条件	50年内发生且概率大于10%
		危害条件	直径大于30 m且撞击人口稠密区; 直径大于140 m且撞击东亚地区; 直径大于300 m且撞击地球任何地区

置多个场景, 不同场景重点演练不同的重点内容. 演练过程力求将组织协调、事件处置、舆论应对等多方面内容覆盖完整.

场景 1

2024 年 3 月 2 日, 中国天文学家发现小行星 2024 PD 将在 2031 年, 即 7 年后撞击地球. 轨道如图 3 所示^[43], 红色轨迹为小行星轨道, 蓝色轨迹为地球轨道, 红色点为目标, 蓝色点为地球, 黑色点为撞击点.

经过 2 个月的观测, 确认撞击概率上升到 63%, 撞击风险走廊是一个狭长的条带, 跨越整个北半球, 包括中国大部分区域. 潜在的损害仍然非常不确定, 因为小行星的估计大小在 50~600 m 之间, 存在很大的不确定性, 这可能会导致局部或者大范围区域受到影响. 经进一步分析, 撞击点在中国的可能性为 19%.

中国国家航天局发布小行星撞击通知, 与此同时社交媒体上开始出现关于小行星撞击的错误信息.

根据以上基本信息, 各小组以大于 1 倍地球半径为原则, 制定偏转速度增量, 开展偏转方案设计. 同时, 监测预警组考虑继续加密观测, 确定小行星详细信息, 包括材质、密度、直径等.

场景 2

时间定位为 2024 年 6 月 15 日 (撞击前 7 年). 中国东部地区上空爆炸一个火球, 该火球通过社交媒体作为小行星撞击事件被广泛传播, 急需官方发布权威消息. 各小组展开发布信息发布的讨论, 最后由国际合

作组宣布事件为普通火流星.

中国国家航天局通过导调信息告知参与者, 2031 年 2024 PD 有 100% 的机会影响中国, 撞击点中心位于青藏高原北部地区, 冲击概率为 100%; 影响日期 2031 年 3 月 16 日 10:00 BJT; 影响区域包括青海省、西藏自治区、四川省、甘肃省等地, 近似尺寸为 50~210 m; 发生影响时的预期损害程度为局部区域, 撞击速度为 $11.087 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$; 撞击将造成地面设施大面积受影响, 人员生命安全受到一定威胁. 各小组讨论制定处置方案, 建议采用撞击偏转方式, 发射、撞击、偏转方案, 如图 4 所示.

场景 3

时间定位为 2029 年 3 月, 距离撞击时间还有 24 个月, 通过发射撞击器, 目标偏离原始轨道 $1.132 R_e$, 处置成功. 各组根据处置结果, 进一步严密监视状态, 积极发布消息, 缓解社会紧张情绪.

事件导入: 通过继续观测发现, 撞击后目标碎裂为几个小块, 其中最大的一块直径 120 m 的部分从距离地球 $0.132 R_e$ 的距离上飞掠. 等效直径 30~40 m 的数块小陨石将撞击中国西南部. 小行星速度为 $12.31 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$; 进近仰角 64° (与垂直面 26°); 接近方向 37° (从 NNE). 当地需要做好紧急处置准备, 包括紧急疏散人员, 准备应急救援物资.

场景 4

时间定位为 2031 年 3 月, 撞击后 3 天. 重点开展以下情况演练.

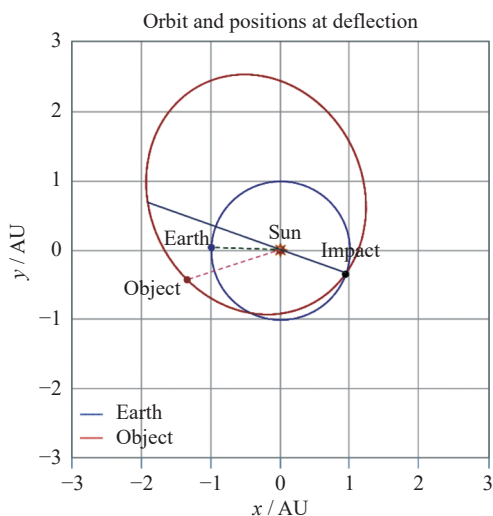


图 3 小行星撞击输入态势

Fig. 3 Asteroid impact input situation

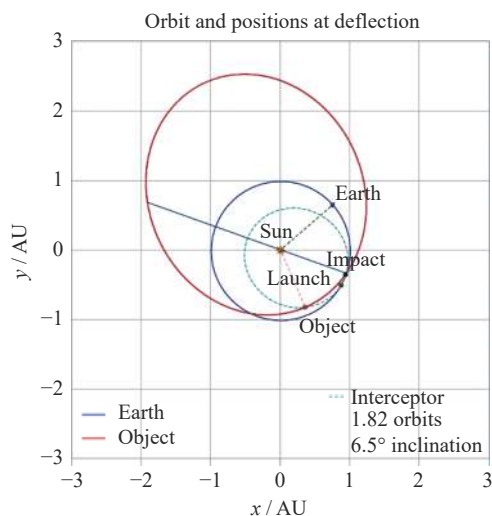


图 4 小行星防御偏转方案

Fig. 4 Asteroid defense deflection scheme

- (1) 通过多种渠道汇总信息, 研判撞击影响.
- (2) 对撞击所造成的环境影响开展评估.
- (3) 及时发布官方权威消息.
- (4) 积极组织灾后救援和自救.

由于撞击影响, 8 块直径 1 m 的陨石中的 3 块将以 $13.2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度飞向地球, 西南地区北部方圆 500 km 的范围出现大量火流星, 将给该区域安全带来威胁. 拟采用加强跟踪观测、应急疏散人员等方式应急处置. 事件处置部门、应急管理部门相互配合, 实施救援和疏散.

4 结语

根据国内外小型星防御发展现状, 重点研究了国际上比较有影响力的几个小行星防御仿真推演情况, 分析了其组织架构和场景设置, 给出了仿真推演的一般流程. 参考国际仿真推演经验, 立足中国特色给出了开展小行星防御演练的建议, 从组织架构模拟、流程演练、处置评估、灾害救援、舆论应对等多方面协同角度, 为小行星防御和灾害救援工作提供了一套协同应对方案. 通过流程模拟, 可有效提升多部门协同应对效率, 推动近地小行星防御工作的组织和实施.

参考文献

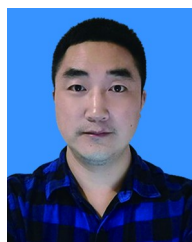
- [1] YEOMANS D K. Near-Earth Objects: Finding Them Before They Find Us[M]. Princeton: Princeton University Press, 2013
- [2] NASA. Near-Earth Object Survey and Deflection Analysis of Alternatives, Report to Congress[R]. NASA, 2007
- [3] MA Pengbin, BAOYIN Hexi. Research status of the near-Earth asteroids' hazard and mitigation[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, **3**(1): 10-17
- [4] National Research Council (US). Defending Planet Earth: Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies[M]. Washington: National Academies Press, 2010
- [5] O'KEEFE J D, AHRENS T J. Impact production of CO_2 by the Cretaceous/Tertiary extinction bolide and the resultant heating of the Earth[J]. *Nature*, 1989, **338**(6212): 247-249
- [6] BROWN P G, ASSINK J D, ASTIZ L, *et al.* A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors[J]. *Nature*, 2013, **503**(7475): 238-241
- [7] MICHELI M, WAINSCOT R J, DENNEAU L. Detectability of Chelyabinsk-like impactors with Pan-STARRS [J]. *Icarus*, 2018, **303**: 265-272
- [8] GONG Zizheng, LI Ming, CHEN Chuan, *et al.* The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning, security defense and resource utilization[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(5): 346-372
- [9] KOSCHNY D, BUSCH M, DROLSHAGEN G. Asteroid observations at the Optical Ground Station in 2010—Lessons learnt[J]. *Acta Astronautica*, 2013, **90**(1): 49-55
- [10] ZHANG Xiang, JI Jianghui. Ground-based radar detection of near-earth asteroids[J]. *Progress in Astronomy*, 2014, **32**(1): 24-39
- [11] SONG Guangming, WU Qiang, CHEN Chuan, *et al.* Advances on mission analysis and design software for active planetary defense against near earth asteroids[J]. *Space Debris Research*, 2021, **21**(2): 27-34
- [12] NASA Glenn Research Center Space Science Projects Office. LTTT Suite Optimization Tools, in: A. Timothy Reckart (Ed.), 23 April 2012[EB/OL]. <http://microgravity.grc.nasa.gov/SSPO/ISPTProg/LTTT/>, 2012-05
- [13] General Mission Analysis Tool (GMAT). National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center[EB/OL]. (2012-05). <http://gmat.gsfc.nasa.gov/index.html>
- [14] MELAMED N. Development of a handbook and an on-line tool on defending Earth against Potentially Hazardous Objects[J]. *Acta Astronautica*, 2013, **90**(1): 165-172
- [15] VARDAXIS G, WIE B. Near-Earth object intercept trajectory design for planetary defense[J]. *Acta Astronautica*, 2014, **101**: 1-15
- [16] VARDAXIS G, WIE B. Development of an asteroid mission design software tool for planetary defense[C]//3rd Planetary Defense Conference. Flagstaff, USA, 2013
- [17] CANO J L, BELLEI G, MARTÍN J. NEO Threat mitigation software tools within the NEO shield project and application to 2015 PDC[C]//4th IAA Planetary Defense Conference-PDC 2015. Frascati, Roma, Italy, 2015
- [18] CANO J L, BELLEI G, MARTÍN J. Integrated END-TO-END NEO threat mitigation software suite[C]//64th International Astronautical Congress. Beijing, China, 2013
- [19] WANG Yuheng, SONG Rui, CHEN Linghui, *et al.* Research trends and reflections on international near-earth asteroid security defense[J]. *Space Debris Research*, 2018, **18**(4): 1-10
- [20] LI Honglin, DANG Lifang. Progress of U. S. -European joint near-earth asteroid defense mission[J]. *Space Debris Research*, 2021, **21**(2): 35-39
- [21] WU Weiren, GONG Zizheng, TANG Yuhua, *et al.* Response to risk of near-earth asteroid impact[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, **24**(2): 140-151

- [22] LI Haitao, LIU Jianjun, CHEN Shaowu, *et al.* Discussion on the requirements and feasibility of constructing China's near-Earth asteroids radar system[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2021, **51**(2): 325-346
- [23] MA Pinzhong. Design and research of space telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, **2**(6): 67-74
- [24] WANG Xintao, ZHENG Jianhua, LI Mingtao. 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
- [25] WANG Xintao, ZHENG Jianhua, LI Mingtao, *et al.* Warning of asteroids approaching Earth from the sunward direction using two Earth-leading heliocentric orbiting telescopes[J]. *Icarus*, 2022, **377**: 114906
- [26] TANG Yuhua, WU Weiren, LI Mingtao, *et al.* Near-Earth asteroids observation system in cislunar space[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2022, **52**(7): 1169-1185
- [27] SONG Guoming, CHEN Chun, GONG Zhizhong, *et al.* Experimental study on momentum coupling law of interaction between pulse laser and asteroid like material[C]// Dubai: The 71th International Astronautical Congress, 2021
- [28] LI Mingtao, WANG Yirui, WANG Y L, *et al.* Enhanced kinetic impactor for deflecting large potentially hazardous asteroids via maneuvering space rocks[J]. *Scientific Reports*, 2020(10): 1-15
- [29] WANG Y R, LI M T, GONG Z Z, *et al.* Assembled kinetic impactor for deflecting asteroids by combining the spacecraft with the launch vehicle upper stage[J]. *Icarus*, 2021, **368**: 114596
- [30] LI Yi, LIU Sen, CHEN Hong, *et al.* Application of NTS in near-Earth asteroid impact and defense[R]. Mianyang: First National Planetary Defense Symposium, 2018
- [31] LUO Yue, WANG Lei, DANG Leining, *et al.* Arcjet ablation experiment to simulate the Chelyabinsk asteroid entry[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, **52**(5): 1362-1370
- [32] SUN Haihao, LUO Yue, DANG Leining, *et al.* The Melting Ablation Analysis of Meteorite in High Temperature Flow[R]. Internet: 7th Planetary Defense Conference, 2021
- [33] GONG Hongming, CHANG Yu, LIAO Zhenyang, *et al.* Development and Test Capability of Ultra-High-Speed High Enthalpy Expansion Pipe Wind Tunnel[R]. Nanjing: 3rd National Planetary Defense Symposium, 2020
- [34] LIU Sen, DANG Leining, ZHAO Junyao, *et al.* Hypervelocity issues of Earth impact by asteroids[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, **50**(6): 1311-1327
- [35] DANG Leining, LIU Sen, BAI Zhiyong, *et al.* Sensitivity research on models of Earth entry and impact effects by asteroids[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, **53**(1): 278-292
- [36] WANG Zonghao, DANG Leining, LIU Sen. Meteorite sonic boom research strategy and ballistic range test[J]. *Space Debris Research*, 2020, **20**(3): 1-8
- [37] GONG Jian, ZHANG Wei. Analysis on legitimacy of near-earth objects defense[J]. *Space Debris Research*, 2019, **19**(3): 50-56
- [38] Cneos[EB/OL]. (2015-01-01)[2020-04-20]. <https://cneos.jpl.nasa.gov/pd/cs.html>
- [39] Sensitivity to uncertainty in planetary defense risk assessment [EB/OL]. (2015-07-08) [2023-06-03]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160008942/downloads/20160008942.pdf>
- [40] Asteroid Generated Tsunami: Summary of NASA/NOAA Workshop [EB/OL]. (2017-01-01) [2023-06-05]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170005214/downloads/20170005214.pdf>
- [41] Tunguska Workshop: Applying Modern Tools to Understand the 1908 Tunguska Impact [EB/OL]. (2018-12-01) [2023-06-08]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002302/downloads/20190002302.pdf>
- [42] REDDY V, KELLEY M S, FARNOCCHIA D, *et al.* Near-Earth asteroid 2012 TC4 observing campaign: results from a global planetary defense exercise[J]. *Icarus*, 2019, **326**: 133-150
- [43] NASA/JPL NEO Deflection App[EB/OL]. [2023-06-08]. <https://cneos.jpl.nasa.gov/nda/nda.html>

作者简介



洪宇 男, 1973年6月出生于陕西省渭南市. 现为宇航动力学国家重点实验室正高级工程师, 主要研究方向为航天测控工程、太空交通管理、外空政策法规等.
E-mail: whpcyq_heartgoon@foxmail.com



陈永强 男, 1988年7月出生于甘肃省陇南市. 现为宇航动力学国家重点实验室工程师, 主要研究方向为太空交通管理.
E-mail: whpnice@foxmail.com