

近地天体防御模拟推演分析与启示

李海涛, 辛晓生

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 防范近地天体撞击、加强近地天体防御科学研究与技术验证和演习演练已成为国际社会高度关注的课题。系统梳理了国际上已组织开展的历次近地天体防御模拟推演, 重点对代表性较强的2019年和2021年国际近地天体防御模拟推演进行了概要介绍, 对比分析了2次推演的参演单位、场景假定、推演流程和结果, 并结合这2次推演对涉及近地天体防御的监测预警、撞击风险评估和在轨处置等各相关力量的组织流程和关键能力进行了初步讨论, 提出了对中国加强近地天体防御工作、组织开展天体防御模拟推演的启示及思路建议。

关键词: 近地天体防御; 模拟推演; 启示

中图分类号: P185.7; TP3

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)04-0443-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230059

引用格式: 李海涛, 辛晓生. 近地天体防御模拟推演分析与启示[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(4): 443-452.

Reference format: LI H T, XIN X S. Analysis of and inspiration from planetary defense exercises[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(4): 443-452.

引言

近年来, 多颗近地天体以小于地-月距离, 甚至小于地球同步轨道高度的距离飞掠地球。2013年2月俄罗斯车里雅宾斯克地区发生小行星坠入地球大气层导致空爆事件, 造成了大量人员伤亡和财产损失^[1]。类似的火流星事件在中国云南、吉林等地也多次发生。近地小行星防御已受到世界各国的广泛高度关注^[2-3]。

美国空军早在2008年举办了“未来演习2009”桌面演习项目^[4], 首次针对近地天体撞击防御开展针对性模拟推演, 旨在提升美国军方及政府部门、研究机构对近地天体撞击事件的重视, 明确各方职责范围, 识别应对能力短板。之后, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)与美国联邦应急管理局(Federal Emergency Management Agency, FEMA)联合于2013—2016年先后组织了3次模拟推演, 推演侧重于演练近地天体撞击灾害公共信息传播、突发事件应对和灾后救援等方面^[5]。自2015年起, 依托两年一次的国际行星防御大会(Planetary Defense Conference, PDC), 在NASA下属行星防御协调办公室(Planetary Defense Coordination Office, PDCO)指导下, 由喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)近地天体研究中心(Center for Near

Earth Object Studies, CNEOS)和联合国外层空间事务厅(United Nations Office for Outer Space Affairs, UNOOSA)国际小行星预警网(International Asteroid Warning Network, IAWN)联合牵头, 常态化组织开展国际近地天体防御模拟推演, 迄今举办了5期。该系列推演旨在全面演练和评估近地天体防御决策指挥流程和应对措施, 并通过推演暴露国际近地天体防御工作存在的问题。

本文概述了历次国际近地天体防御模拟推演的基本情况, 重点介绍了2019年和2021年2次模拟推演的具体情况并进行对比分析。通过梳理与近地天体防御相关的监测预警、撞击风险评估和在轨处置等各相关力量的组织流程和关键能力, 提出对中国加强近地天体防御工作、组织开展近地天体防御模拟推演的启示及思路建议。

1 国际近地天体防御模拟推演基本情况

国际近地天体防御模拟推演自2015年起, 每两年一次的国际行星防御大会常态化组织开展, 负责推演目标近地天体轨道设计、物理性质设定和观测数据仿真等相关推演想定场景设计。推演主要参加单位包括UNOOSA空间任务规划咨询小组(Space Missions

Planning Advisory Group, SMPAG)、NASA戈达德航天飞行中心(Goddard Space Flight Center, GSFC)、艾姆斯研究中心(Ames Research Center, ARC)、桑迪亚国家实验室(Sandia National Laboratory, SNL)、劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)和洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)等3个美国国家实验室,以及私营航天公司代表——美国宇航公司(Aerospace Corp.)。根据推演想定场景,各方结合专业领域优势参与模拟推演工作,各方主要分工负责详见表1。

CNEOS对历次模拟推演的基本情况进行了汇总并公布在官方网站(<https://cneos.jpl.nasa.gov/pd/cs>)。从假想目标天体情况、监测预警过程、在轨处置和撞击灾害评估等方面对历次推演进行了概略总结(2023年模拟推演情况目前尚未完整公布)如表2所示。对比可

表1 国际近地天体防御模拟推演参演方分工

Table 1 Participants and responsibilities of PDEs

参加单位	推演分工
行星防御协调办公室(PDCO)	指导协调
近地天体研究中心(CNEOS)	推演场景设计
国际小行星预警网(IAWN)	
空间任务规划咨询小组(SMPAG)	近地天体抵近探测和偏转/核爆等在轨处置任务设计
戈达德航天飞行中心(GSFC)	
艾姆斯研究中心(ARC)	近地天体撞击概率和毁伤效应分析
桑迪亚国家实验室(SNL)	
劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)	撞击导致的大气层和地面效应模拟和连带人员财产损失分析
洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)	
美国宇航公司(Aerospace Corp.)	提供采用核爆装置实现近地天体偏转的仿真计算模型
美国宇航公司(Aerospace Corp.)	参与抵近探测和在轨处置任务设计

得,历次推演虽然科目和流程基本类似,但通过假想的目标天体物理特性和轨道的多样化设计,尽可能涵盖各类防御场景,撞击效应建模和评估精细度也在不断提升。

表2 历次国际近地天体防御模拟推演基本情况

Table 2 Basic facts about recent PDEs

项目	2015年模拟推演	2017年模拟推演	2019年模拟推演	2021年模拟推演	2023年模拟推演
假想目标天体情况	石质小行星,发现时直径估计为150~250 m,处置后撞击地球碎块直径约80 m	碳质小行星,发现时直径估计为200~280 m;抵近探测后确认为双小行星,主星直径约为270 m、的辅星直径约为90 m	石质小行星,发现时直径估计为100~300 m,最终确认为140 m,处置后撞击地球碎块直径约60 m	石质小行星,发现时直径估计为300~700 m,最终确认约为105 m	碳质小行星,发现时直径估计为300~80 m,抵近探测后确定为550~860 m
预警时间	6年	9年	8年	6个月	12年
监测预警手段	地基光学、红外、雷达,抵近探测	地基光学、红外,抵近探测	天地基光学、红外和地基雷达,抵近探测	天地基光学、红外和地基雷达	天地基光学(和地基雷达?),抵近探测
在轨处置手段	开展动能撞击和核爆偏转两种处置方案设计和装备研制,实际实施了动能撞击处置任务	作为两个推演分支,分别实施了动能撞击和核爆偏转两种在轨处置任务,均成功偏转(或摧毁)双小行星	开展动能撞击和核爆偏转两种处置方案设计和装备研制,实际实施了动能撞击处置任务	时间限制各种处置手段均不可行	开展动能撞击和核爆偏转两种处置方案设计和装备研制
撞击地球区域	在轨处置前确认为中国南海,在轨处置后确认为孟加拉国首都达卡	在轨处置前确认为日本东京附近,在轨处置后解除撞击地球风预警	在轨处置前确认为美国中部丹佛市;在轨处置后确认为美国东部纽约市	欧洲德国、捷克和奥地利交界区域	非洲尼日利亚或贝宁
撞击灾害评估	仅仿真分析进入大气速度和进入角,得出空爆结论	开展了撞击效应建模和受灾人口数目分析	开展了详尽的撞击效应建模和受灾人口及财产损失分析		

注:截至目前CNEOS官网尚未完整公布2023年模拟推演的基本情况。

2 近两次国际近地天体防御模拟推演

2019年和2021年开展的2次国际近地天体防御模拟推演,分别针对撞击区域为美国纽约和欧洲中部、撞击预警时间分别为8年和6个月的小行星撞击,在推演流程和应急处置设计等方面具有一定的代表性。

2.1 2019年国际近地天体防御模拟推演

2019年4月底,第6届国际行星防御大会期间在美国马里兰州的学院公园市举行了2019年国际近地天体防御模拟推演^[6]。

2.1.1 假定场景

2019年3月26日,位于美国夏威夷州毛伊岛哈来亚卡拉峰(Haleakala Summit),近地天体巡天观测项目

“全景巡天望远镜和快速响应系统”(Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System, Pan-STARRS)的1.8 m口径光学望远镜新发现了1颗近地小行星。该小行星发现时距地球0.38 AU,其有关信息在发现后第一时间迅速上报至国际小行星中心(Minor Planet Center, MPC),被命名为“2019 PDC”。在后续2 d的时间内,世界各地参与近地天体观测的光学望远镜相继组织对该小行星进行跟踪观测,确认了其轨道参数,其绕日公转轨道周期约为2.7年,未来10年内将会多次近距离飞越地球。CNEOS初步判定该小行星最可能将于8年后,即2027年4月29日与地球相撞。考虑到该小行星轨道的不确定性,撞击概率初步评估为1/50000。

同时根据测光观测结果, 初步确认该小行星绝对星等为 (21.7 ± 0.4) ; 但该小行星物理特性尚不清楚, 由绝对星等反算得到的小行星直径不确定度较大, 初步判定其直径范围 $100 \sim 300 \text{ m}$, 由此可能会造成区域性 (几百千米范围) 乃至洲际性 (几千千米范围) 的撞

击灾难。

2.1.2 推演过程

推演共持续5天时间。设定推演场景时间分别为2019年4月29日、2019年7月29日、2021年12月30日、2024年9月3日和2027年4月19日。推演流程如图1所示。

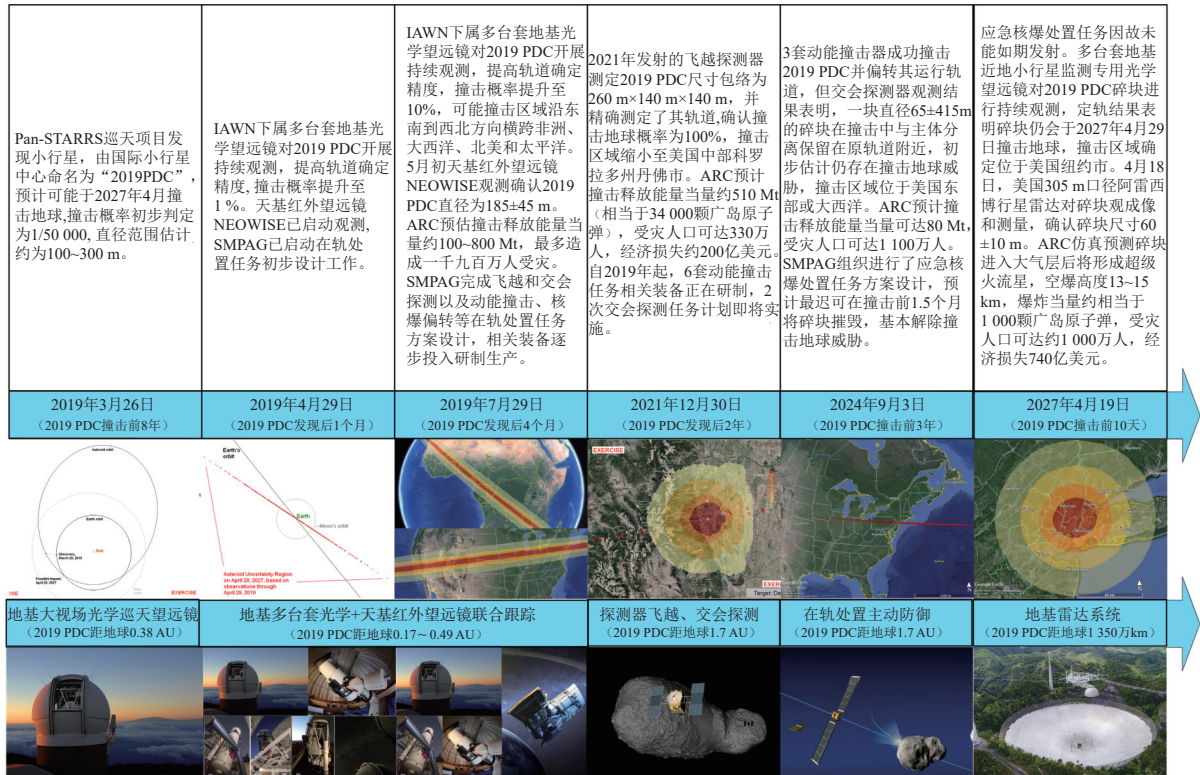


图1 2019年国际近地天体防御模拟推演主要流程

Fig. 1 Major scenarios and progress of 2019 PDE

1) 推演第1天 (2019年4月29日, 预警后1个月) 经过世界各地参与近地天体观测的光学望远镜一个月时间集中观测, 进一步提高了2019 PDC的轨道确定精度, 该小行星撞击地球概率已升至1%。美国“近地天体宽视场红外巡天探测器”(NEO Wide-field Infrared Survey Explorer, NEOWISE) 天基红外望远镜已启动跟踪观测, SMPAG也启动了在轨处置任务初步方案设计。

2) 推演第2天 (2019年7月29日, 预警后4个月) 通过多台套地基米级口径近地天体监测专用光学望远镜持续观测, 2019 PDC的轨道确定精度得到进一步提高, 该小行星撞击地球概率已升至10%, 可能的撞击区域沿东南到西北方向横跨非洲、大西洋、北美和太平洋。5月初NEOWISE天基红外望远镜的观测结果确定2019 PDC直径为 $(185 \pm 45) \text{ m}$, 自转周期约为12 h, 但光谱类型和成分尚无法确定。ARC初步判断

撞击事件释放能量当量可达 $(100 \sim 800) \text{ Mt}$, 最多可能造成1 900万人受灾。

SMPAG推荐采用动能撞击或者核爆偏转2种在轨处置方式, 动能撞击偏转指发射撞击器直接与近地天体相撞, 改变近地天体的飞行速度从而偏转其运行轨道; 核爆偏转指发射核爆装置与近地天体交会, 在近地天体表面一定高度处引爆核装置, 核爆产生的X射线烧蚀近地天体表面物质形成的高速气流冲击近地天体, 从而改变近地天体飞行速度进而偏转其运行轨道。SMPAG建议于实施在轨处置任务之前, 开展近地天体抵近探测任务, 对近地天体质量、成分等物理性质及轨道、自转状态等进行更精确的测量, 以确保在轨处置任务的有效性, SMPAG组织相关单位完成了初步的任务方案设计。

3) 推演第3天 (2021年12月30日, 预警后2年) 2021年6月发射的飞越探测器对2019 PDC的成像

和光谱观测结果表明该小行星为石质细长椭球体形密接双小行星,尺寸包络 $260\text{ m} \times 140\text{ m} \times 140\text{ m}$,根据密度和体积可更准确地估计其质量约为 $5 \times 10^6\text{ t}$ 。此外,2019 PDC的轨道通过对飞越探测器定轨和对器载相机成像数据处理得到进一步精化,撞击地球概率确定为100%,撞击区域缩小至美国中部科罗拉多州丹佛市。ARC分析2019 PDC进入大气层速度为 19.1 km/s ,空爆高度为 $6\sim 9\text{ km}$,爆炸当量约为 510 Mt (相当于3.4万颗广岛原子弹),预计受灾人口达330万人,经济损失约200亿美元。

自2019年起,共安排6套动能撞击任务系统(3套主份、3套备份)研制,预计16个月后发射。交会探测飞行器计划几个月后发射,同时搭载核爆装置。同时,临时改换其它已在轨飞行的行星际探测器的预定探测目标,计划实施与2019 PDC的交会探测。

4) 推演第4天(2024年9月3日,撞击前3年)

由于各种有关核爆装置使用争议问题没有得到及时解决,核爆处置任务未能实施。最终,共有3套动能撞击器成功撞击2019 PDC。同时临时改换任务目标的行星际探测器实现与2019 PDC交会,并对动能撞击效应进行了抵近观测。观测表明第1套动能撞击器撞击2019 PDC时,一块直径为 $(65 \pm 15)\text{ m}$ 的碎块与小行星主体分裂,依然保留在原轨道附近;其余两套动能撞击器撞击了2019 PDC主体,成功使得2019 PDC主体偏离原轨道。碎块的准确速度难以判定,交会探测器成像结果虽然无法准确判定碎块速度,但初步估计撞击区域依然位于美国东部或大西洋。ARC初步判断碎块撞击地球的能量当量最大可达 80 Mt ,受灾人口可达1 100万人。由于轨道几何约束,动能撞击实际发生位置与太阳角距离小于 45° ,此时地基光学望远镜无法对其实施观测。

SMPAG组织进行了应急核爆处置任务设计,考虑利用一发猎鹰重型运载火箭发射 170 kg 300 kt 当量核爆装置对碎块进行核爆摧毁并完成了任务初步方案设计。仿真研究表明,在撞击前 $60\sim 120\text{ d}$ 利用该核爆装置对直径 $50\sim 80\text{ m}$ 小行星实施在轨处置极大可避免其对地球造成严重威胁。

5) 推演第5天(2027年4月19日,撞击前10 d)

应急核爆处置任务因敏感性和相关争议问题悬而未决(主要集中于为防御近地小行星撞击而实施外层空间核爆是否符合国际法^[7])最终未能如期发射。在过去3个月,多台套地基近地天体监测专用光学望远镜设备对2019 PDC撞击后残留的碎块进行持续观测,精确轨道测定结果表明该碎块仍会在4月29日撞击地球,撞

击区域确定位于美国纽约市。

4月18日,美国 305 m 口径阿雷西博行星雷达首次近距离对2019 PDC碎块实现了成像和测量,进一步确认了其尺寸为 $(60 \pm 10)\text{ m}$ 。ARC仿真预测结果表明撞击时间为2027年4月29日12:01:38(美国东部时间),碎块进入大气层速度约为 19 km/s ,进入角 77° 。碎块进入大气层后预计形成超级火流星,空爆高度 $13\sim 15\text{ km}$,爆炸当量约 15 Mt (相当于1 000枚广岛原子弹),受灾人口可达约1 000万人,经济损失740亿美元。

2.2 2021年国际近地天体防御模拟推演

2021年4月底,第7届国际行星防御大会期间(线上视频会议)在奥地利维也纳举行了2021年国际近地天体防御模拟推演^[8]。

2.2.1 假定场景

2021年4月19日,隶属于Pan-STARRS近地天体巡天观测项目的 1.8 m 口径光学望远镜新发现了1颗近地小行星。该小行星在发现时距地球 0.38 AU ,其有关信息在发现后第一时间迅速上报至MPC,并被命名为“2021 PDC”。在后续2 d时间内,世界各地参与近地天体观测的光学望远镜相继组织对该小行星进行跟踪观测,确认了其轨道参数,并初步判定该小行星将于6个月后,即2021年10月20日,与地球相撞。考虑到该小行星轨道的不确定性,撞击概率初步评估为 $1/2\ 500$ 。同时,根据测光观测结果,初步确认该小行星绝对星等为 (22.4 ± 0.3) 等,但该小行星物理特性尚不清楚,由绝对星等反算得到的小行星直径不确定度较大,初步判定其直径范围 $35\sim 700\text{ m}$,由此可能会造成局部性(几千米范围)乃至洲际性(几千千米范围)的撞击灾难。

2.2.2 推演过程

推演共持续4 d时间。设定推演场景时间分别为2021年4月26日、5月2日、6月30日和10月14日。推演流程如图2所示。

1) 推演第1天(4月26日,预警后1周)

经过世界各地近地天体观测光学望远镜一周时间的集中观测,进一步提高了2021 PDC的轨道确定精度,该小行星撞击地球概率已升至5%,可能的撞击范围覆盖全球 $2/3$ 的区域。ARC综合撞击概率和撞击能量分析,初步判断撞击事件最多可造成8 600万人受灾。

2) 推演第2天(5月2日,预警后2周)

Pan-STARRS近地天体巡天观测项目通过回溯其历史观测数据发现,2014年曾成功获取2021 PDC观测数据,但在当时数据处理系统并未及时做出响应。进一

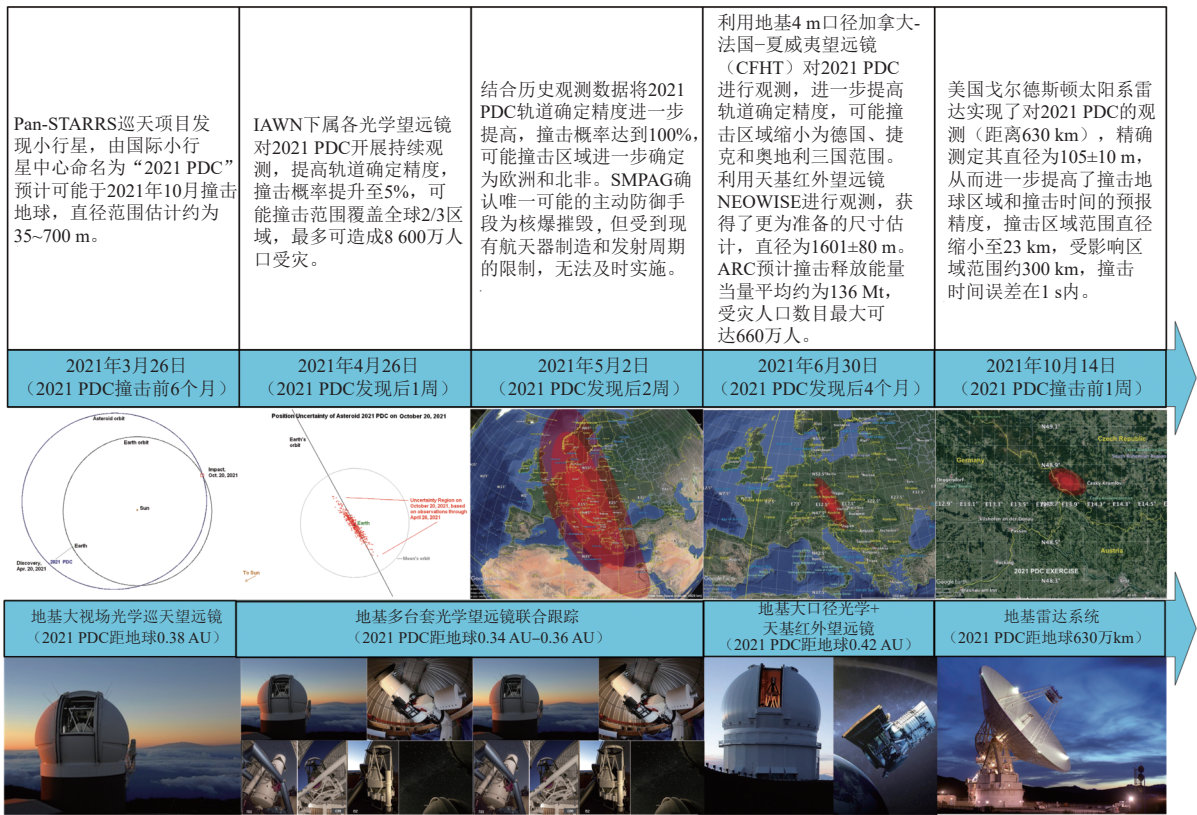


图2 2021年国际近地天体防御模拟推演主要流程
Fig. 2 Major scenarios and progress of 2021 PDE

步综合利用时间跨度达到7年的累积观测数据进行定轨预报，可以判定该小行星6个月后撞击地球概率达到100%，撞击区域为欧洲和北非。

同时，SMPAG组织GSFC等相关机构开展了小行星在轨处置任务分析。分析结果表明，利用引力偏转方式无法满足在轨处置时效性要求，而利用动能撞击偏转方式则因为时间因素制约且速度增量要求过大也不可行。唯一可行的在轨处置方式为核爆偏转。任务设计结果表明，可送达小行星附近的核爆装置当量可达4.5 Mt，足够摧毁直径在100~210 m范围内的小行星目标。基于64%的核爆摧毁概率计算，采取核爆处置方式可将小行星撞击受灾人口数目降低20%。为提高核爆处置的有效性，先期发射小行星抵近探测飞行器对小行星尺寸、构成等相关的物理性质进行精确测量是十分必要的。但受到现有航天器研制和火箭快速发射能力限制，无法在6个月时间内实现核爆处置任务发射，因此最终所有在轨处置方案均判定为不可行。

3) 推演第3天（6月30日，撞击前4个月）

通过地基米级口径近地天体监测专用光学望远镜以及包括4 m口径的加拿大-法国-夏威夷在内的大口径天文光学望远镜持续开展地面观测，2021 PDC的轨道

进一步精化，撞击地球的可能区域缩小至德国、捷克和奥地利。同时，美国NEOWISE天基红外望远镜通过大量曝光成像结果叠加，实现了对2021 PDC的探测，获得了2021 PDC更准确的尺寸估计值，直径（160 ± 80）m。ARC评估判定2021 PDC的大气进入速度约15.2 km/s，进入角50°~55°，撞击释放能量当量平均约为136 Mt，受灾人口数目最大可达660万人。

4) 推演第4天（10月14日，撞击前1周）

在2021 PDC撞击地球前1周，美国戈尔德斯顿太阳系雷达（Goldstone Solar System Radar, GSSR）实现了对2021 PDC的探测（探测距离6.3 × 10⁶ km），雷达成像结果精确测定2021 PDC直径为（105 ± 10）m。同时精确的轨道测量进一步提高了撞击地球时间和区域的预报精度：撞击时间确定为10月20日17:02:25（格林尼治协调世界时），误差为1 s；撞击区域范围缩小至23 km，受影响区域范围约300 km。

2.3 2次模拟推演情况对比

2019年和2021年2次国际近地天体防御模拟推演在想定场景和推演流程上存在一定不同，但也具有规律性和共同之处，2次推演主要对比情况如表3所示。负责灾害应急救援工作的相关机构或组织（如美国相关政府机构FEMA）并未参加2次推演，所以2次推演流

程均中止于小行星撞击前1周左右, 后续的危害应对、人员疏散及应急救援等方面的演练工作并未开展, 这

也是公开的近几年国际近地天体防御模拟推演的主要缺项。

表 3 2019年和2021年两次国际近地天体防御模拟推演对比
Table 3 Comparison between 2019 PDE and 2021 PDE

Table with 3 columns: 对比项目 (Comparison Item), 2019年模拟推演 (2019 Simulation), 2021年模拟推演 (2021 Simulation). Rows include 参演方 (Participants), 假想目标小行星特性 (Hypothetical Asteroid Characteristics), 监测手段 (Monitoring Methods), 在轨处置手段 (On-orbit Disposal Methods), 撞击地球区域 (Impact Area), and 预计受灾情况 (Expected Impact Consequences).

3 近2次国际近地天体防御模拟推演分析

2019年和2021年举行的2次国际近地天体防御模拟推演对除撞击灾害应急救援外的近地天体防御主要实施流程和应对措施进行了演练。以下对推演过程中反

映的问题以及推演结果进行概要分析。

3.1 近地天体防御实施流程

从近几年模拟推演来看, 近地天体防御实施流程主要可以分为监测预警、撞击风险评估、在轨处置和应急救援等4个方面, 如图3所示。

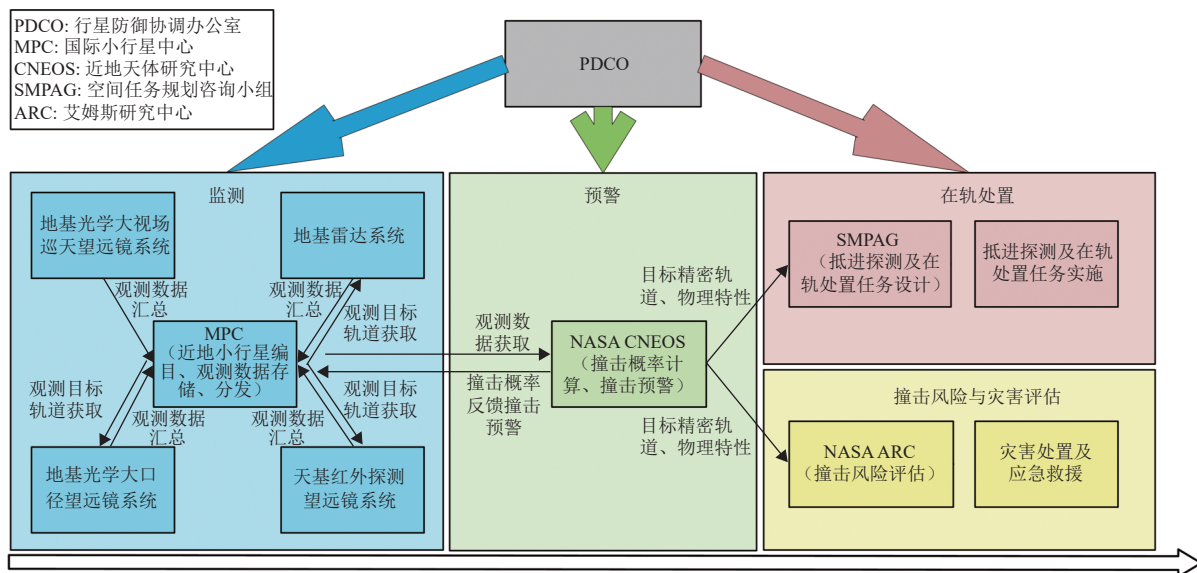


图 3 近地天体防御主要实施流程

Fig. 3 Major procedures of near-Earth planetary defense

3.1.1 监测预警

监测预警的主要任务是对全天区进行持续搜索探测, 编目管理现有近地天体数据库, 同时识别新发现

的近地天体, 并基于持续的加密后, 随观测对其可能撞击地球的概率进行预报预警。该任务主要由世界各地分属多个国家的多台米级口径望远镜承担, 设备共

同纳入IAWN, 并依托MPC进行观测数据汇总和发布。目前国际上主要的近地天体监测项目都来自美国, 包括卡特琳娜巡天项目(Catalina Sky Survey, CSS)、Pan-STARRS巡天项目、小行星地球撞击最后预警系统(Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System, ATLAS)等, 每年近97%新发现的近地天体均来自于这3个巡天观测项目^[9]。

在巡天项目每日例行的巡天观测过程中, 后端数据处理系统也在实时对观测得到的数据进行处理, 当初步确认目标可能为一颗新发现的近地天体时, 目标观测结果和初始轨道将第一时间发布MPC网站, 同时IAWN所属的世界各地光学望远镜迅速组织对新发现的近地天体开展后随观测, 并将观测结果同步发布MPC网站。与此同时, CNEOS利用MPC汇总的数据实时对新发现的近地天体进行精密轨道确定和撞击地球概率计算, 当撞击概率大于1%后, 及时发出告警, 以便进一步组织后续地基加密观测和包括撞击风险评估和在轨处置任务分析在内的应急响应行动^[10-11]。随着监测数据的更新, 撞击概率也会进行持续更新。随着轨道确定精度的提高, 撞击概率可能会进一步提高, 也会因为排除了部分撞击轨道的可能性转而减小^[12]。

3.1.2 撞击风险评估

专业机构负责对近地天体开展撞击风险告警和灾害评估。根据撞击概率、近地天体轨道和物理性质等信息, 开展高超声速空气动力学和撞击效应建模计算, 研判可能的撞击区域及造成的灾害效应, 并对人员财产损失进行评估^[13]。

3.1.3 在轨处置

在监测预警系统发出警告的同时, SMPAG为主协调组织主要航天国家开展抵近探测和在轨处置任务方案设计。根据已有近地天体的轨道和物理性质, 结合现有运载火箭和航天器研制能力, 寻求最佳的在轨处置任务方案。目前, 主要可供选择的在轨处置方案包括引力偏转、动能撞击和核爆摧毁。

特别说明的是随着近地天体监测数据的补充更新, 获取的近地天体轨道和物理性质信息会得到精化, 结果的不确定性会进一步降低, 撞击预警、撞击风险评估及在轨处置设计也需要持续动态更新。

3.2 监测预警关键能力

根据2021年模拟推演情况, 可以看出全球布局联动的米级口径大视场光学望远镜观测网是近地天体监测预警的基础。借助于大视场巡天观测能力, 美国年发现的近地天体数目占世界年总发现数目的96%以上。但是受限于米级口径望远镜观测能力, 对于较为

暗弱的目标的后随精测需要依赖4 m以上大口径望远镜。2021年模拟推演中, 由于6—10月小行星距离和观测几何限制, 需利用地基4 m口径CFHT望远镜进行跟踪观测。同时由于地基观测波段的限制, 红外波段的近地天体观测只能依赖天基红外望远镜。利用近地天体红外波段观测数据可进一步降低近地天体物理性质特别是其尺寸的不确定度, 2次模拟推演中, 均利用美国NEOWISE天基红外望远镜观测数据将小行星的直径由几百米缩小至几十米的误差范围。此外虽然地基雷达探测能力具有一定的局限性, 但其对准确测量近地天体尺寸及自转、形状、表面物质成分等物理性质具有极其重要的价值, 对近地天体准确编目和撞击短临预报具有不可替代的作用。2次模拟推演中地基雷达在小行星撞击前10 d左右、距地球 $6 \times 10^6 \sim 1.3 \times 10^7$ km处实现了对其成像测量, 精确测定了小行星轨道, 进一步缩小了撞击地球区域范围; 同时精确测定了小行星尺寸, 提高了撞击效应建模和受灾人口数据估计精度。

3.3 撞击风险评估关键能力

撞击风险评估的2个主要关键能力为撞击效应建模和撞击灾害评估。撞击效应建模主要指根据撞击概率、近地天体轨道和物理性质等信息, 利用高超声速空气动力学模型和撞击模型, 对近地天体进入大气层后空爆导致的冲击波超压、热辐射以及撞击地表导致的地震、海啸等各种效应强度进行分析计算。撞击灾害评估则指根据撞击各种效应造成的毁伤能力, 结合撞击区域预报和人口分布情况, 对受灾人口数目和可能造成的人员财产损失进行评估^[14]。2种能力的基础是对近地天体轨道以及包括尺寸、构成等的物理性质的准确测定和建模。撞击风险和灾害评估结果可直接用于指导在轨处置任务方案设计和应急灾害救援行动。

3.4 在轨处置关键能力

在轨处置主要手段包括引力偏转、动能撞击以及核爆偏转或摧毁, 所需关键技术主要包括超高速航天器精确导航制导、抵近探测器远距离操控和自主控制、动能撞击及核爆效能建模仿真和评估、动能撞击器/核爆装置的快速发射和在轨预置等^[15-16]。其中, 核爆装置的快速发射技术是2021年模拟推演中在轨处置任务无法实施的关键制约因素; 而动能撞击效能评估的失误则导致2019年模拟推演中在轨处置后遗留形成了直径约60 m的小行星碎块, 同时撞击区域由人口较少的科罗拉多州转移至人口密集的纽约市, 反而加剧了撞击可能造成的损失。

4 思考与启示

通过对近2次国际近地天体防御模拟推演在监测预警、撞击风险评估和在轨处置等近地天体防御主要流程的想定推演过程进行分析研究,可提供以下思考启示。

1) 常态化组织实施近地天体防御演习

国家层面应常态化组织实施近地天体防御演习、理顺指挥隶属关系、完善组织指挥流程、摸清防御处置底数、识别系统差距短板。充分发挥不同单位在指挥控制、监测预警、态势感知、发射测控、在轨操控等领域优势,闭环近地天体防御演习全流程。通过相关演习演训,推动国家相关能力和装备的建设、集成和应用,促进近地天体防御力量全面发展。

2) 建立独立自主监测预警体系

应依托现有光学射电天文观测网、态势感知系统和深空测控网,建立独立自主的地基光学、雷达联合监测预警系统。光学系统方面,对标国际光学望远镜性能指标,建造10 m以上的大口径望远镜,提高对近地天体的跟踪精测能力。同时可以配套建设多台米级口径大视场光学望远镜,建立大视场望远镜巡天预警机制。雷达系统方面,可考虑依托中国现有深空测控网喀什35 m深空测控设备,配置大功率X频段和Ka频段发射机,构建发射天线阵列,与其它深空测控设备和中国科学院射电天文观测网大口径射电望远镜配合,共同组成雷达探测系统,开展地基雷达对同步轨道带目标的跟踪测量演示验证;后续通过建设多台35 m天线设备,扩大喀什深空发射阵的规模,分阶段实现对距地球 $1.5 \times 10^7 \sim 7.5 \times 10^7$ km范围内近地天体跟踪测量,达到或优于美国近地天体雷达探测系统的探测能力^[17]。此外,2022年北京理工大学雷达研究所利用分布式相参雷达深空探测技术^[18],联合相关单位提出并开展建设“超大分布式孔径雷达高分辨率深空域主动观测设施”,该设施第1期系统由4台16 m分布式孔径雷达组成,已成功获得了对月球观测的雷达图像,设施远景计划由多部25~30 m孔径的分布式雷达组成,预计可有效提升中国近地小行星防御、行星形成机理探索能力^[19]。

为弥补地基观测盲区,需要进一步建立天基红外巡天探测系统^[20],研制发射红外巡天探测望远镜,提高近地天体发现探测能力和精度,同时可兼顾地月空间目标监视,与地基雷达探测系统配合,对地月空间目标进行精密监测跟踪。

3) 发展应急处置装备快速研制和应急发射能力

为有效应对近地天体撞击地球风险,快速及时地

对可能撞击地球的近地天体实施在轨处置,需要发展相应装备的快速研制采购和应急发射能力。充分发挥各航天工业部门的航天器研制能力,并进一步提升现有发射场系统和测控系统支持在轨处置系统进入太空能力,为及时实施撞击近地天体在轨处置任务、有效应对近地天体撞击威胁提供可靠支持。

4) 发展近地天体抵近操作和在轨处置能力

基于现有空间操控及高速高精度制导导航能力,积极开展近地天体抵近操控和在轨处置关键技术研究,并尽快启动相关主动防御技术在轨演示验证试验任务^[21],为有效防御近地天体撞击威胁奠定工程技术基础。同时,应加强以近地天体核爆处置为代表的在轨处置方式方面的国际法研究,积极参与国际组织相关规则制定,充分做好国际法理研究准备,有效维护国家利益和人类安全。

5 结论

本文主要对近年来近地天体防御模拟推演的概况进行了介绍,重点针对代表性较强的2019年和2021年模拟推演,从参演单位、场景假定、推演流程和结果方面进行了对比讨论,并结合模拟推演过程对监测预警、撞击风险评估和在轨处置等近地天体防御全流程进行了梳理和关键能力分析,最后从常态化组织国家层面的近地天体防御演习、建立独立自主的监测预警体系、提升应急处置装备快速研制和应急发射能力以及推动近地天体抵近操作和在轨处置能力发展等方面提出了思考启示,以期对中国近地天体防御工作提供借鉴参考。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] National Science & Technology Council. National near-earth object preparedness strategy and action plan [EB/OL]. (2018-06-05)[2023-05-05]. <https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/ostp-neo-strategy-action-plan-jun18.pdf>.
- [3] 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): 140-151.
WU W R, GONG Z Z, TANG Y H, et al. Response to risk of near-Earth asteroid impact[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(2): 140-151.
- [4] United States Air Force. Natural impact hazard interagency deliberate planning exercise after action report [EB/OL]. [2023-07-06]. https://cneos.jpl.nasa.gov/doc/Natural_Impact_After_Action_Report.pdf.
- [5] NASA & FEMA. NASA-FEMA Statement on the 3rd Joint Asteroid Impact Tabletop Exercise [EB/OL]. [2023-7-6]. <https://cneos.jpl.nasa.gov/>

- pd/cs/ttx16/ttx3_final_report_1may2017_final_3.pdf.
- [6] Center for Near Earth Object Studies. Planetary Defense Conference Exercise-2019 [EB/OL]. [2023-07-06]. <https://cneos.jpl.nasa.gov/pd/cs/pdc19/>.
- [7] 弓健, 张维. 近地天体防御的合法性分析[J]. 空间碎片研究, 2019, 19(3): 50-56.
GONG J, ZHANG W. Analysis on legitimacy of near-Earth objective defense[J]. Space Debris Research, 2019, 19(3): 50-56.
- [8] Center for Near Earth Object Studies. Planetary Defense Conference Exercise - 2021 [EB/OL]. [2023-07-06]. <https://cneos.jpl.nasa.gov/pd/cs/pdc21/>.
- [9] LANDIS R, JOHNSON L. Advances in planetary defense in the United States[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 156: 394-408.
- [10] ROA J, FARNOCCHIA D, CHESLEY S R. A Novel Approach to Asteroid Impact Monitoring[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, 162(6): 277.
- [11] CHODAS P. Twenty Years of Tracking Near-Earth Objects: The Role of JPL's Center for NEO Studies (CNEOS)[C]//Proceedings of AAS/Division for Planetary Sciences Meeting. USA: AIAA, 2018.
- [12] TOMMEI G. On the impact monitoring of near-Earth objects: mathematical tools, algorithms, and challenges for the future[J]. *Universe*, 2021, 7(4): 103.
- [13] COLLINS G S, MELOSH H J, MARCUS R A. Earth impact effects program: a web - based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth[J]. *Meteoritics & planetary science*, 2005, 40(6): 817-840.
- [14] 柳森, 党雷宁, 赵君尧, 等. 小行星撞击地球的超高速问题[J]. *力学学报*, 2018, 50(6): 1311-1327.
LIU S, DANG L N, ZHAO J Y, et al. Hypervelocity issues of earth impact by asteroids[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(6): 1311-1327.
- [15] 刘雪奇, 孙海彬, 孙胜利. 近地小行星防御策略分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(6): 557-563.
LIU X Q, SUN H B, SUN S L. Analysis of defense strategies of near-Earth asteroids[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6): 557-563.
- [16] 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): 28-54.
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]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(5): 8-54
- [17] 李海涛, 刘建军, 陈少伍, 等. 构建中国近地小行星探测雷达系统的需求与技术途径探讨[J]. *中国科学(信息科学)*, 2021, 51(2): 325-346.
LI H T, LIU J J, CHEN S W, 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
- [18] 丁泽刚, 曾涛, 张光伟, 等. 分布式地基雷达深空探测技术[J]. *雷达科学与技术*, 2022, 20(1): 28-33.
DING Z G, ZENG T, ZHANG G W, et al. Deep space detection using distributed Earth-based radar [J]. *Radar Science and Technology*, 2022, 20(1): 28-33.
- [19] 刘泉华, 张凯翔, 梁振楠, 等. 地基分布式相参雷达技术研究综述[J]. *信号处理*, 2022, 38(12): 2443-2459.
LIU Q H, ZHANG K X, LIANG Z N, et al. Research overview of ground-based distributed coherent aperture radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(12): 2443-2459.
- [20] 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 Informationis*, 2022, 52(7): 1169-1185.
- [21] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). Finding hazardous asteroids using infrared and visible wavelength telescopes[R]. Washington: The National Academies Press, DC, 2019.

作者简介:

李海涛(1973-), 男, 研究员, 主要研究方向: 航天系统工程、深空测控通信技术。

通信地址: 北京市海淀区北清路26号院(100094)

电话: (010)66361118

E-mail: lihaitao@bittt.cn

辛晓生(1988-), 男, 助理研究员, 主要研究方向: 航天测控与航天器轨道动力学。**本文通信作者。**

通信地址: 北京市海淀区北清路26号院(100094)

电话: (010)66361123

E-mail: xinxiaosheng@bittt.cn

Analysis of and Inspiration from Planetary Defense Exercises

LI Haitao, XIN Xiaosheng

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The research, technology validation and exercises of planetary defense have become a hot topic and real concern for the international community. General introduction to the international planetary defense exercises (PDE) mainly organized by the United States has been given with a focus on the recent representative 2019 PDE and 2021 PDE. Comparative analysis has been carried out about the exercise participants, scenarios, procedures, and results. Discussions on the related aspects and requirements of planetary defense, such as monitoring and warning, impact risk assessment and active defense strategy, have also been performed. Inspiration and recommendations for Chinese planetary defense actions and related exercises have been proposed.

Keywords: planetary defense; tabletop exercise; inspiration

Highlights:

- General introduction to the scenarios and procedures of two recent PDEs is given.
- Comparative analysis of the two recent PDEs is carried out.
- Inspiration and recommendations for Chinese planetary defense actions and related exercises have been proposed.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]