



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

龚自正^{1*}, 李明², 陈川¹, 赵长印³

1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;

2. 中国空间技术研究院, 北京 100094;

3. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210033

* 联系人, E-mail: gongzz@263.net

2019-08-22 收稿, 2019-11-06 修回, 2019-11-06 接受, 2019-11-07 网络版发表

国家安全重大基础研究计划(61331103)、国家国防科工局空间碎片专项(KJSP2016040103)和中国空间技术研究院研究发展课题资助

摘要 小行星撞击地球事件在历史上经常发生, 多次导致地球环境灾变和生物灭绝, 是可能导致人类毁灭的重大潜在威胁之一, 是国际社会普遍关注的热点问题. 同时, 近地小行星是近期太空探索与资源开发利用最有价值的目标之一, 也是远期太空探索“天然的跳板”, 是人类增进与展示新技能的试验场, 是太空航海时代大国开疆扩土、争取战略资源、竞相抢占的“太空岛屿”, 必将引领、催生地月经济圈、地外天体采矿、太空制造等太空经济全产业链发展, 开辟航天事业新时代. 开展小行星研究, 将深化人类对太阳系和宇宙乃至生命起源与演化等最根本也最前沿科学问题的认识, 具有重大的科学意义. 小行星撞击地球的防御问题, 也是国际宇航界面临的重大技术挑战之一, 与国家安全密切相关, 是大国必争的战略和技术制高点. 开展近地小天体监测预警防御研究, 在攸关全球安危的重大事件面前掌握自主决策权, 履行大国义务、体现大国担当, 不仅是树立、提升我国负责任大国形象, 争夺我国在国际航天事务中的主导权和话语权的必须举措, 而且是人类保护自身生存与发展的必然选择, 是构建人类命运共同体的重要体现. 因此, 其重要性、必要性和迫切性不言而喻. 本文系统梳理、评述了小行星监测预警、安全防御、资源利用领域的国内外现状与发展趋势, 探讨、归纳了所涉及的前沿科学问题、关键技术及相关法规与国际合作问题. 分析了我国在该领域存在的问题与差距, 基于我国发展需求分析, 从顶层布局、系统规划、科学研究、技术发展、工程实施、政策法律构建及国际合作等方面系统地提出了我国的发展目标与建议. 中国正在从航天大国走向航天强国, 在小行星监测预警、安全防御、资源利用相关问题上应该有大国思维, 有长远眼光, 须尽快从各个层面开展行动.

关键词 近地小行星, 监测预警, 安全防御, 探测资源利用

我们居住的地球从诞生起就时时刻刻面临着各种各样的威胁, 小行星撞击地球就是其中的重大威胁之一. 2019年7月25日, 表面上看似平凡而宁静的一天, 地球却与一场“灭顶之灾”擦肩而过, 一颗名为2019 OK的

小行星差点让地球不“OK”. 由于小行星撞击地球事件频发, 将诱发巨大劫难. 科技共同体和国际社会将其作为影响人类社会和文明可持续发展的一个重大科学问题来应积极应对.

引用格式: 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

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, doi: [10.1360/TB-2019-0425](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0425)

1 小行星撞击地球事件: 危害、机遇与挑战

1.1 近地小行星

小行星(minor planet, 或asteroid)是指围绕太阳运行, 尺寸在1 m~800 km内(体积和质量比行星和矮行星小), 且不易释放出气体和尘埃的天体. 太阳系中有海量的小行星, 主要分布在火星与木星轨道之间的小行星带和海王星外的柯伊伯带(图1).

在天文学上, 定义距离地球最小距离在0.3 AU (4.5×10^7 km, 1 AU= 1.496×10^8 km)范围内的小行星为近地小行星(near Earth asteroid, NEA). 截至2019年8月11日, 已发现的近地小行星超过20000颗, 其中直径超过140 m的有7991颗, 超过1 km的有886颗(<http://cneos.jpl.gov/stats/>).

根据近地小行星相对太阳的平均轨道半径 a 和近日距离 q 及远日距离 Q , 将近地小行星分为4种类型(表1): 地内型(Atiras)、阿登型(Atens)、阿波罗型(Apollos)和阿莫斯型(Amors, 地外型). 各类轨道相对地球轨道的几何位置如图2所示, 其中Apollos型和Atens型近地小行星的轨道与地球的轨道相交, 因此存在撞击地球的可能.

近地小行星有可能与地球的轨道发生近距离接触(即到达距离地球很近的位置, 但并未发生碰撞)而改变其轨道模型, 比如编号为99942的近地小行星Appophis在2029年与地球近距离接触之后将由Atens型变为Apollos型.

对于距离地球最小轨道距离(minimum orbit intersection distance, MOID)在0.05 AU(7.5×10^6 km, 约20倍地月距离)范围内, 直径大于140 m的小行星, 定义其为对地球构成潜在威胁的近地小行星(potentially hazardous asteroid, PHA), 目前已经发现的PHA约占已经发现的近地小行星总数的1/10. 之所以有这样的规定, 是因为当小行星与地球距离 7.5×10^6 km时, 就有可能被地球的强大引力俘获, 改变运行轨道奔地球而来直至相撞. 而直径140 m以上的小行星, 撞击地球的威力足以造成区域性灾难, 毁掉一个中等大小的国家. 国际天文联合会(International Astronomical Union, IAU)所属的小天体中心(Minor Planet Center)网站(<http://minorplanetcenter.net>)公布的已发现的近地小行星数量及分类见表1. PHA的轨道由于受到太阳系大天体的轨道摄动影响而在空间中不断变化, 地球自身的轨道也是如此, 因此某颗近地小行星的MOID并不是固定不变的, PHA的成员

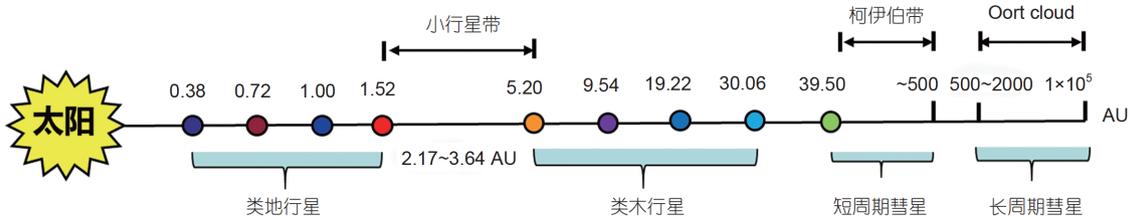


图1 (网络版彩色) 太阳系中的小行星带和柯伊伯带
Figure 1 (Color online) Asteroid and Kuiper belts in the solar system

表1 近地小行星分类及数量^{a)}

Table 1 Classification and number of near-Earth asteroids

类别	描述	天文定义	数量
NEA	近地小行星	$q < 1.3$ AU	20000
Atiras	轨道完全在地球轨道之内的小行星(以163693命名)	$a < 1.0$ AU, $Q < 0.983$ AU	18
Atens	穿越地球轨道的NEA, 其主半轴小于地球(以2062Aten命名)	$a < 1.0$ AU, $Q > 0.983$ AU	1284
Apollos	穿越地球轨道的NEA, 其主半轴大于地球(以1862Apollo命名)	$a > 1.0$ AU, $q < 1.017$ AU	9520
Amors	与地球逼近的NEA, 轨道在地球轨道之外、火星轨道之内(以1221Amor命名)	$a > 1.0$ AU, 1.017 AU $< q < 1.3$ AU	6618
PHA	潜在碰撞威胁小行星	MOID < 0.05 AU	1876

a) q 为近日点距离, Q 为远日点距离, a 为相对太阳的平均轨道半径, MOID为与地球的最小轨道距离

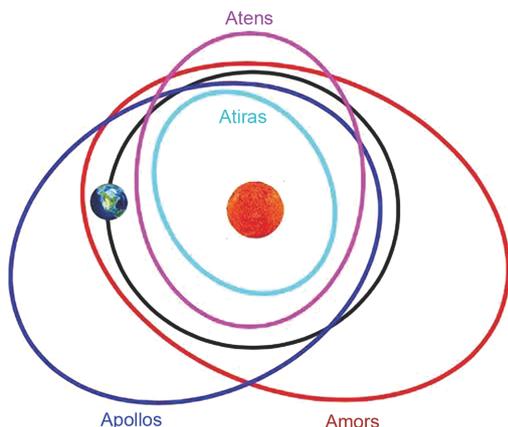


图2 (网络版彩色)近地小行星轨道类型对比图
Figure 2 (Color online) Comparison of near-Earth asteroid orbits

也不是固定不变的。

1.2 小行星撞击地球事件频发

地球在宇宙中看似宁静,但却无时无刻不处于危险之中。格林尼治时间2019年7月25日凌晨1时22分,一颗名为2019 OK的小行星,以24.5 km/s的速度,从距离地球只有 7.2×10^4 km的地方“擦肩而过”(http://asteronomy.com/news/2019/07/a_large_asteroid_just_zipped_between_Earth_and_the_Moon)。这个距离约为地球和月球之间距离的1/5,这颗小行星的直径大约在57~130 m之间。天文学家直到它抵达近地点之前一天才发现它。假如它撞上地球,产生的爆炸威力相当于 1×10^{11} kg TNT当量,约是广岛原子弹(约 2×10^7 kg TNT当量)的5000倍,虽然不足以造成全球性灾难,但足以摧毁一座大城市。

无独有偶,2019年8月10日,一颗直径大约570 m的小行星2006QQ23在距离地球0.049 AU的高空以4.65 km/s的速度飞越地球,它属于潜在威胁近地小行星。历史上,小行星撞击地球事件频发。6500万年前一颗直径约10~13 km的小行星以约20 km/s的速度撞击在墨西哥尤卡坦半岛,形成直径为198 km的陨石坑,造成50%~60%地球生物灭绝,被认为是造成恐龙灭绝的原因^[1,2]。1908年6月30日,一颗直径大约在30~50 m的小行星以30~40 km/s的速度撞击地球,在俄罗斯西伯利亚埃文基自治区通古斯河上空发生爆炸,爆炸当量相当于 2×10^{10} kg TNT,威力是广岛原子弹的1000倍,超过2000 km²的8000万棵树被焚毁。1976年3月8日,一颗小行星以15~18 km/s的速度撞击地球,在我国吉林市上空

19 km处发生爆炸,碎片散落在吉林市近郊500 km²范围内,在地面收集到3000余块总重2 t的陨石,其中最大的一块陨石重达1770 kg,是世界上已知最重的陨石,这是目前世界上观测到的最大的陨石雨^[3]。2013年2月15日,一颗直径大约15~17 m、编号为KEF-2013的小行星以18.6 km/s的速度进入大气层,在俄罗斯车里雅宾斯克地区上空90 km处发生爆炸,爆炸当量相当于 2.5×10^8 kg TNT,该撞击事件共造成1600余人受伤,1000多间房屋受损,经济损失达10亿卢布^[4]。2014年11月5日在我国内蒙古锡林郭勒盟地区,2017年10月4日在我国云南香格里拉,2018年6月1日在我国云南西双版纳连续发生火流星事件,所幸都未造成人员伤亡。这3次火流星事件引起了我国政府、民众以及相关科研组织的高度关注。

类似于通古斯的大爆炸事件约100年发生1次,类似于2019 OK量级的小行星撞击地球事件约几千年发生1次,类似于6500万年前发生的恐龙灭绝事件约每1亿年发生1次。

小行星撞击地球的危害主要是超高速撞击引起的地震、海啸、环境灾变,以及事件引起民众的恐慌和骚动。其危害程度取决于其穿过大气层后的剩余质量和速度,这两个参数与小行星初始质量、初始速度、小行星结构以及撞击角度有关。小行星运行速度约为45 km/s,地球围绕太阳公转的速度是30 km/s,假如正面相撞,相对速度可能达到75 km/s,即使小行星从后面“追”上地球,速度也可达15 km/s。图3给出了小行星撞击地球的过程^[4]。小行星超高速进入地球大气层,在大气层中形成极强的高温高压冲击波,先是引起大气分子电离发光,进而在超高速气动力和气动热相互作用下发生爆炸解体。直径较小的解体碎块会在大气层烧为灰烬;直径较大的解体碎块则会撞击到地球表面,在短时间内急剧释放其携带的巨大动能。若撞击靶区是陆地,则使撞击区域的靶岩破碎、熔化乃至气化,形成陨石坑,同时,撞击产生的冲击波诱发强烈的地震和海啸,引发森林大火。地表岩石产生的各种气体(如SO₂, CO₂)、尘埃和森林燃烧的灰烬弥漫充斥整个大气层,遮住阳光,可使地球整年平均温度下降几摄氏度^[5,6]。若撞击靶区是海洋,则会激起几百米的巨浪和强烈的海啸与地震,沿岸数千千米的地区将沦为一片汪洋。大量的海水蒸发、溅射,大量的海底沉积物与岩石粉尘抛射到平流层中滞留,海洋中大量生物死亡。由于地球72%的表面积被海洋覆盖,海底的撞击坑很难被发现:

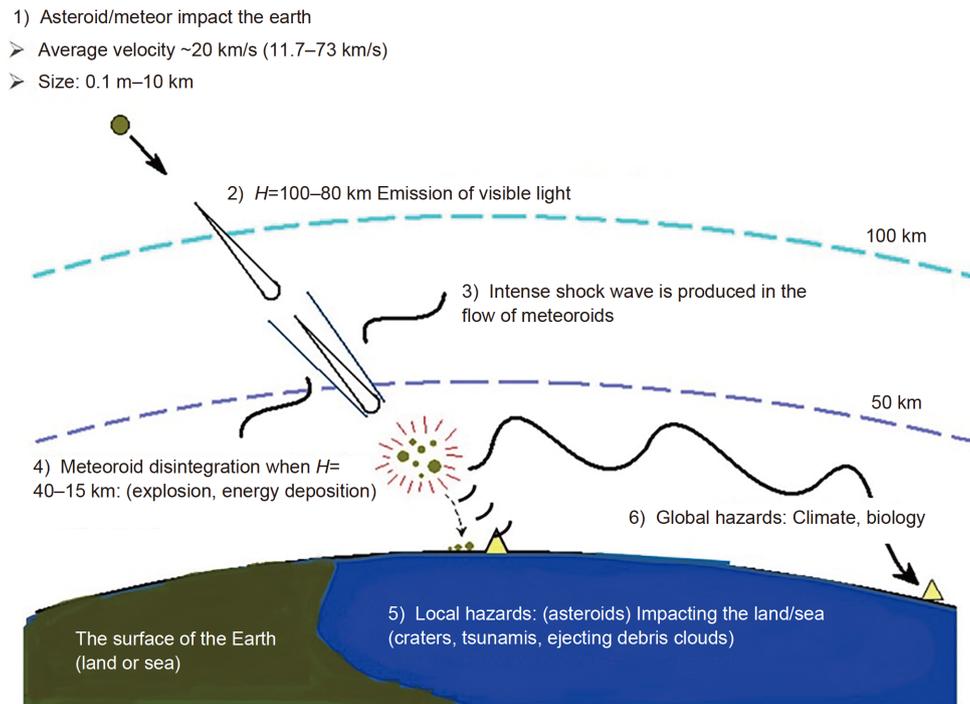


图3 (网络版彩色)小行星撞击地球的过程示意图^[4]

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of the process of an asteroid hitting the Earth^[4]

地球内力作用产生的板块运动、火山爆发、地震活动及其引发的海啸,破坏和摧毁了一些撞击坑;地球外力的搬运、沉积等作用掩埋了一些撞击坑,使地球表面残留的撞击坑非常稀少.迄今全世界已经证实发现了190个陨石坑,直径从几百米到几十千米,少数超过100 km,年龄从5万年到20亿年,主要分布在北美、欧洲及大洋洲大陆^[7].

直径较小的(米级)小行星则在穿越地球大气层时

在空中爆炸,形成火流星,爆炸后散落的陨石碎片同样能够造成人员伤亡.从1988年至今,全球共发生723次火流星事件,平均每个月有2次火流星事件.

表2给出了不同直径小行星撞击地球的能量、频率和相应的效应描述^[8].

除了地球撞击事件,太阳系中其他星体同样频繁地发生撞击事件.最著名的是1994年7月17日,苏梅克-列维九号彗星在经过木星时被木星引力“撕裂”成21个

表2 不同直径小行星撞击地球事件描述^[8]

Table 2 Description of asteroids impact events with different diameters^[8]

事件类型	小行星直径(m)	等效能量($\times 10^9$ kg TNT)	发生时间间隔(年)
流星雨/火流星	15	0.25	0.5
空爆	20	1	200
局部范围	50	10	2000
地区范围	140	300	30000
洲际范围	300	2000	100000
低全球灾难	600	20000	200000
全球灾难	1000	100000	700000
高全球灾难	5000	10000000	30000000
灭绝性灾难	10000	100000000	100000000

碎片,以 2.1×10^4 km/s速度撞击木星表面,这是人类首次直接观测到的太阳系天体撞击事件^[9]。在月球表面,同样存在着密密麻麻的撞击坑,直径1 km左右的撞击坑约33000个。火星表面也有很多撞击坑。

1.3 小行星飞掠事件频繁

小行星飞掠地球时,在距离地球轨道一定范围内易受到地球轨道摄动影响而撞向地球,因此小行星飞掠地球存在较大撞击地球的概率。小行星飞掠地球事件非常频繁。根据欧洲航天局(European Space Agency, ESA)公布的数据,在一年内发生小行星飞掠地球事件就高达110次(<http://neo.ssa.esa.int/risk-page>)。更为重要的是,飞掠地球的小行星轨道距离地球较近,且轨道具有周期性,这使得小行星已成为继月球之后深空探测的重点,是深空探测任务的优选目标,是人类太空资源开发利用的主要对象。

一般情况下,飞掠或撞击地球的小行星来自于太阳系内部。但是,被命名为2017U1(aka.Oumuamua,奥陌陌)的小行星是世界上首颗,也是目前唯一一颗被确认来自太阳系外飞掠地球的小行星(<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=6983>),该小行星每隔30年就会撞向太阳系。

1.4 小行星撞击地球:灾难与福祉相依,挑战与机遇并存

小行星撞击地球是概率很小但风险极高的事件,其特点是:(1) 瞬间发生、危害严重、社会影响大;(2) 通过监测预警能力的加强,可对小行星撞击事件的时间、地点及影响程度提前预报;(3) 可以防御有足够预警时间的小行星撞击事件。

针对小行星撞击的这3个特点,简单来说,防御小行星撞击地球问题可以归纳为如下几个步骤:(1) 小行星搜索和监测;(2) 小行星撞击风险评估;(3) 潜在危险小行星应对策略制定;(4) 高风险小行星主动防御任务实施。

小行星撞击地球诱发的巨大劫难,是地球上全部生物物种和人类面临的巨大威胁之一,是涉及地球生物物种和人类社会持续发展的一个重大科学问题,国际社会应积极应对。特别是1994年彗木撞击事件和2013年俄罗斯车里雅宾斯克小行星撞击事件,使得这一问题得到了国际社会的高度重视。彗木撞击事件后,联合国于1995年第一次举行了“预防近地天体撞击地

球”国际研讨会。1999年,联合国第3次外空会议通过了“维也纳空间与人类发展宣言”,阐述了“解决、改善与近地天体有关活动的国际协调的必要性”。2001年,联合国和平利用外层空间委员会(简称外空委)设立了近地天体行动小组(行动小组14)。2004年,联合国外空委在科技小组委员会上设立了近地天体议题。2013年,第68届联合国大会批准成立国际小行星预警网(International Asteroid Warning Network, IAWN)和空间任务咨询小组(Space Mission Planning Advisory Group, SMPAG),联合国外空委作为SMPAG的秘书处,负责加强协调全球近地天体监测和危险天体防御。2016年12月6日,联合国大会在A/RES/71/90号决议中将每年的6月30日设定为国际小行星日,以提高公众对小行星撞击地球危险的认识。2009年以来,国际宇航科学院(International Academy of Astronautics, IAA)每两年举办一次行星防御会议(Planetary Defense Conference, PDC),这是小行星监测预警、轨道偏转防御和撞击地球危害评估领域最有影响力的会议。

1991年,NASA(National Aeronautics and Space Administration)召开了首届国际近地小行星防御大会。2001年,美国成立近地小行星项目办公室(The NEO Program Office),设在NASA的JPL(Jet Propulsion Laboratory)实验室。2005年,美国国会通过了乔治布朗近地天体监测预警防御法案。2016年,NASA成立了小行星防御协调办公室(Planetary Defense Coordination Office, PDCO)。2018年6月,美国国家科学技术委员会颁布了《国家近地天体防御战略和行动计划》。

此外,日本于1996年成立了以“近地天体”为核心任务的日本空间安全协会(Japanese Space guard Association)。英国于2001年成立了国家小行星与彗星信息中心。2004年ESA成立了NEO任务咨询委员会(Near-Earth Object Mission Advisory Panel, NEOMAP),同时提出了自己的小行星监测预警与防御项目(NEO shield)。俄罗斯于2007年成立了小行星/彗星危害工作组,2013年车里雅宾斯克事件之后,成立了俄小行星防御研究委员会。德国、英国等也都先后成立近地天体监测预警防御中心。中国国家航天局于2018年代表中国政府正式加入IAWN(the International Asteroid Warning Network)和SMPAG(Space Missions Planning Advisory Group),成为该组织的第18个成员国。

除了以联合国外空委、NASA,ESA为首的专业航天部门外,国际天文联合会小行星中心(Minor Planet

Center, The International Astronomical Union)、空间探索者协会小行星威胁减缓小组、太空防卫基金会(Space Guard Foundation)、B612基金会等组织和机构也在国际小行星监测预警与防御领域的政策引导和技术研发方面发挥了重要作用。

小行星撞击地球既能带来灾难,也能给人类带来福祉。比如,小行星撞击地球形成大量可供开采的金、铁、钻石、煤等矿山,同时迫使人类不断提高预测及防御小行星撞击的能力。墨西哥尤卡坦半岛直径180 km的希克苏鲁伯撞击坑(Chixulub crater)形成了大型的铜矿床;南非维特握特斯兰德盆地的弗里德佛撞击坑形成了多个大型的金矿床和金伯利型金刚石矿床;加拿大萨德贝里地区直径超过100 km的萨德贝里撞击坑形成了超大型的铜镍矿和铂金族元素矿。同时,小行星已成为继月球之后深空探测的重点,是人类太空资源开发利用的主要对象。2017年7月20日,一颗绕日周期1.9年、直径452~1011 m的小行星2011UW-158与地球擦肩而过,近地点距离 2.4×10^6 km,其主要成分是铁、镍、钴、铂和水,铂金的含量高达 5.8×10^4 t,市值达1.7万亿美元,而地球上每年能开采的铂金在200 t左右。未来如果人类将这颗小行星牵引到月球附近进行采矿作业,将有用金属运回地球,其资源价值将非常可观。与此同时,近地天体中蕴含的水、有机成分、矿物质、稀有金属是重要的资源,能够在载人深空探测、太空产业中作为推进剂和原位利用的原料而发挥重要作用,给人类开展深空探测提供了重要“跳板”,已经成为人类太空资源开发利用的主要对象。2017年,高盛的研究报告指出,未来20年太空经济行业规模有望达到数万亿美元。

2019年6月,中国科学技术协会在第21届年会上发布了20个对科学发展具有导向作用、对技术和产业创新具有关键推动作用的重大前沿科学问题和工程技术难题,“近地小天体调查、防御与开发问题”入选。学术界对这一问题的重要而深远的意义达成共识:(1)研究近地小天体将深化人类对太阳系乃至宇宙演化、生命起源、地外生命信息探寻等最根本也最前沿科学问题的认识;(2)小行星监测预警、安全防御和资源利用是国际航天界面临的重大技术挑战,是人类航天事业新的增长点,必将牵引航天技术进步,带动相关高新技术发展与转化;(3)近地小天体的探测和资源利用,将会显著降低人类深空探测与开发的成本,已成为深空探测的新兴热点,是太空航海时代大国开疆扩土、争取

战略资源、竞相抢占的“太空岛屿”,必将引领、催生地月经济圈、地外天体采矿、太空制造等太空经济全产业链发展,开辟航天事业新时代;(4)近地小天体撞击地球的防御问题,与国家安全密切相关,是大国必争的战略和技术制高点;(5)开展近地小天体监测预警与防御研究,是履行大国义务,体现大国担当,树立、提升我国负责任大国形象,争夺我国在国际航天事务中的主导权和话语权的重要举措;(6)近地小天体监测预警与防御研究,是人类保护自身生存与发展的必然选择,是构建人类命运共同体重要而具体的体现。

2 小行星监测预警

2.1 小行星监测预警技术

针对小行星的监测预警手段包括多种技术和系统,按照观测点位置可以分为地基监测系统和天基监测系统。从技术原理上,地基和天基探测可分为光学观测、红外波段观测和雷达探测^[9]。近距离空间探测器探测(如飞越探测、伴飞探测、附着探测、采样返回探测等)也被视为监测预警的重要补充。

随着技术的快速发展,目前已经从小行星表面光谱观测和光学成像发展到多波段遥感探测,从表面探测发展到通过磁场、重力场探测数据推演内部结构,从近距离飞掠、低空绕飞、表面软着陆探测发展到取样返回。

光学观测是目前小行星监测的最主要方法,其依靠小行星表面反射的太阳光,通过在不同时间对同一片星空进行重复照相观测,确定小行星的位置。地基光学观测设备作用距离远,建设、运行成本低,但易受干扰,对观测条件要求高。2019 OK小行星事件和车里雅宾斯克撞击事件未被提前预报,其原因就在于它们的轨道方向沿太阳矢量方向,地基光学望远镜无法在太阳光的强背景下发现一个百米直径的暗弱目标。另外,目前的地基光学望远镜主要分布在北半球,南半球的观测数据较少,在观测数据上也有一定的几何偏差。

天基光学望远镜由于可灵活分布于LEO轨道、地日拉格朗日点、金星轨道等位置,能克服大多数干扰因素,弥补地基监测系统存在的太阳光照区域观测死角问题,大大提高了探测效率。

红外观测作为一种特殊的光学观测方法,具有更低的天光背景,在光谱分析和白天观测方面有较大的优势,并且能够用于辨识行星表面的材料、估算温

度、反照率等参数。

地基雷达探测是通过天线主动向小行星发射大功率信号,并接收目标的回波信号,通过分析接收信号的多普勒频移、回波时延等信息,得到小行星表面各部分的距离和视向速度,进而实现对小行星的成像。但受功率限制,目前地基雷达探测距离范围较小,仅能观测距离地球0.3 AU范围内的天体。

2.2 监测预警现状

2.2.1 国外监测预警现状

(1) 地基。地基小行星监测预警项目开始于1992年美国的Space Guard Survey项目。美国在1994年彗木撞击后,加大了在行星监测、防御技术研究等相关领域的资金投入及基础设施建设,已经组建完成了天地一体化监测网络,是搜寻、监测近地天体的技术领跑者,也是主要贡献者。1995年,美国国会通过法案,支持开展近地天体监测、预警和防卫。1998年,NASA开始实施“太空卫士”计划,每年投入400万美元,计划在10年内发现90%直径大于1 km的近地小行星。2005年,美国国会通过“乔治布朗近地天体授权法案”,授权NASA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。2005年5月,美国启动5个近地天体搜索计划,分别是卡特林那巡天系统(Catalina Sky Survey, CSS)^[10]、林肯近地小行星研究项目(Lincoln Near-Earth Asteroid Research, LINEAR)^[11]、泛星计划(Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System, Pan-STARRS)^[12]、Spacewatch(<http://spacewatch.lpl.arizona.edu/>)和NEAT^[13]、探索信道望远镜(Discovery Channel Telescope, DCT),以及下一代近地天体巡天计划-大型综合巡天望远镜(Large Synoptic Survey Telescope, LSST)等。此外,位于智利泛美天文台的3.6 m口径DECam望远镜也投入使用。这5个系统均为地基光学望远镜,发现了目前已知的近20000颗近地天体中的90%^[14]。

林肯近地小行星研究计划(The Lincoln Near-Earth Asteroid Research, LINEAR)由NASA和美国空军共同资助,台站部署于墨西哥哥白沙导弹基地的研究站,由MIT(Massachusetts Institute of Technology)负责运行,旨在进行近地小行星探测、识别和定轨等工作,主要用于发现直径1 km以上的近地小行星。1996年,LINEAR计划正式具备近地小天体探测能力,当时使用的是有效像元数为 1960×2560 的CCD(charge coupled device)的一套1 m口径的天文望远镜,随后又增加了一套1 m

口径望远镜和一套0.5 m口径望远镜,使LINEAR计划的巡天能力增加了20%。从1998年起,每年绝大多数新的近地小行星探测数据都出自LINEAR计划,直到2005年,这一地位才被卡特琳娜巡天系统所取代。

卡特琳娜巡天系统是继LINEAR计划后又一著名的近地小行星监测项目,其目标是确认90%以上直径大于140 m的近地天体。CSS项目位于亚利桑那大学,由3台分别位于美国亚利桑那州境内的1.5 m口径卡特林那施密特望远镜(f/2)、0.68 m口径施密特望远镜(f/1.7)和位于澳大利亚赛丁泉天文台的0.5 m口径乌普萨拉施密特望远镜(f/3)组成。这3个站点都使用相同的热电低温成像敏感器和软件系统。近几年来,每年新发现的近地小行星中,2/3以上来自该监测系统。CSS系统目前只能观测20~20.5星等的天体,且几乎集中在天球赤道。与以往分布于北半球的小行星观测项目不同,CSS系统的天文观测点覆盖了南北半球,观测能力能够达到 -30° 以下的偏角,填补了以往小行星观测网的盲点。

值得特别注意的是,CSS系统对近几年引起世界关注的小行星撞击事件均做出了准确预报。2008年10月,2008TC3小行星(直径3 m)坠入大气层,在其进入大气层前20 h被CSS系统发现并发出警报,最终该小行星散落在苏丹北部地区。2013年2月,车里雅宾斯克陨石事件中,一颗直径15~17 m的小行星在约30 km高空发生爆炸。18 h之后,另一颗小行星2012DA14在与地球相距 3.4×10^4 km的地方高速掠过,均被CSS系统观测到。2014年1月,CSS系统观测到2014 AA小行星(直径4 m),作为2014年的首次小行星撞击事件,该小行星在进入大气层之后烧毁。

泛星计划(Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System, Pan-STARRS)是一个正在进行中的天体监测计划,由4个口径1.8 m的望远镜组成阵列进行观测,其中PS1望远镜设置在夏威夷茂宜岛海勒卡拉火山顶,其他观测点可能位于夏威夷毛纳基山天文台或海勒卡拉火山(Haleakala)。这4座望远镜将同步观测同一天区,可产生相当于口径3.6 m望远镜的分辨率。泛星计划由夏威夷大学天文研究所(Institute of Astronomy)负责运行,将建立一个星等最暗可达24等的天体数据库,对整个天区进行观测,预期可以发现许多新的天体。其第一座原型望远镜(PS1)已于2010年5月13日正式进行全时科学观测。

探索信道望远镜是美国本土的第五大天文光学望远镜,2012年投入使用,主要目标是柯伊伯带小天体调

查、彗星研究、小型星系的结构和演化研究、恒星群研究。望远镜选址在美国亚利桑那州快乐杰克森林保护区内,观测站海拔2360 m。DCT望远镜是地基可见光-近红外监测系统,主镜口径为4.2 m,角度分辨率可以达到0.04 rad,光学系统能够满足两种不同的成像模式。DCT望远镜可以作为可见光和近红外高分辨率成像仪或光谱仪,未来可升级成视场达到2°的广角观测系统。可以切换到特种巡天功能模式,与其他巡天望远镜不同的是,在满月等月球相当明亮的夜空,DCT望远镜仍有相当高的观测效能。

正在建设中的大型综合巡天望远镜选址于智利北部帕穹山,海拔2682 m。LSST采用独特的三片式消象散保罗-贝克/梅森施密特广角光学系统,能够有效消除广角系统所带来的象散。LSST主镜口径高达8.36 m,集光率(Etendue)高达319 m²平方度。LSST望远镜另外一个突出优势在于其视场高达3.5°(9.6平方度),相比之下,在地球观测太阳和月球的视直径仅为0.5°(0.2平方度)。较宽的视场角使得LSST望远镜能够每3天实现一次全天域的观测,而目前的其他望远镜需要用几年的时间才能完成这一任务。LSST望远镜预计于2020年完成工程“首光”测试,2021年完成科学观测“首光”测试,并于2022年正式投入使用。其主要科学目标包括:(1) 侦测暗能量和暗物质;(2) 寻找太阳系中的小天体,尤其是近地小行星和古柏带天体;(3) 侦测光学瞬变现象,尤其是新星和超新星;(4) 观测银河系。具有高效全天域观测能力的LSST望远镜建成后,将成为世界上性能最强的小天体观测设备。

目前美国的地面光学望远镜正向着更大口径、更大视场和更快反应方向发展。

此外,美国还建设有两个用于行星探测的地基雷达站,一个是位于美国加勒比海地区波多黎各的阿雷西博射电望远镜(Arecibo Observatory),可以探测3.5×10⁷ km范围内直径大于1 km的小行星。另一个是位于美国加州戈尔德斯通的NASA/JPL金石太阳系雷达(Goldstone Solar System Radar),可以探测1.5×10⁷ km范围内直径大于1 km的小行星^[15]。

ESA于2009年启动了“太空态势感知”计划,利用20个成员国的地面雷达和光电设备监测人造天体、空间碎片和潜在威胁天体,该计划每4年投入5000万欧元,同时建设fly-eye望远镜和试验台(test-bed)望远镜来开展全天的扫描巡天^[16]。日本依托空间防卫联合会,组织国内大量米级口径的光电设备开展近地天体巡天监测,

并将3.5 m口径的大视场望远镜作为下一代近地天体监测设备^[17]。俄罗斯一直利用ISON, INASAN国际网和国内的MASTER光电网与雷达设备开展近地天体搜寻监测。车里雅宾斯克事件加快了其建设新的1.6 m口径大视场巡天望远镜AZT-33VM的计划^[18]。韩国也正在建设用于近地天体搜索和物理特性研究,分布在南半球的由3个1.6 m口径大视场望远镜组成的24 h监测网KMTNet。

(2) 天基。目前天基小天体观测成果来自空间天文望远镜对小天体的偶尔观测,观测分辨率很高,例如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也在近地小天体观测中起到了很好的补充作用。而专门用于观测近地小天体的空间设施只有加拿大国家航天局(Canadian Space Agency, CSA)和加拿大国防研发局(Defense Research and Development Canada, DRDC)发射的近地观测卫星(Near Earth Observation Surveillance Satellite, NEOSSAT),还无法形成天基监测网络,但为天基小行星监测预警开了个好头。

日本“光”卫星(Astro-F)是JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)联合欧洲国家和韩国部分研究机构研制的红外波段天基观测卫星,于2006年2月21日发射升空。该卫星为太阳同步地球轨道,主要任务是对全天域开展近红外、中波红外、远波红外3种不同谱段的观测。在5年零9个月的任务过程中,“光”卫星发现的太阳系小行星数量超过50万颗。2011年,日本根据“光”卫星的观测数据发布了世界上最大的太阳系小行星数据库。

广域红外探测器(wide-field infrared survey explorer, WISE)^[19]是NASA负责的天基红外望远镜,于2009年12月发射。虽然WISE探测器并不是专门为近地小行星监测预警而设计的航天器,但通过拓展任务NEOWISE的成功开展,该探测器在小行星及彗星观测方面取得了重要成果。2011年6月,WISE发现了首颗地球特洛伊小行星2010 TK7。整个NEOWISE任务期间,WISE探测器新发现34000颗小行星,其中135颗为近地小行星,包括19颗高危小行星。

加拿大NEOSSAT于2013年发射,是国际上第一颗专门用于搜寻、监测近地天体的天基望远镜。它是一个本体尺寸0.9 m×0.65 m×0.35 m的微小卫星,部署于800 km的LEO轨道。其主要载荷是一个15 cm口径的反

射式马克苏托夫望远镜, 镜头遮光罩向外延伸0.5 m, 能够实现19.5~20等星的观测(曝光时间100 s), 但目前还无法形成天基监测网络^[20,21].

ESA于2013年12月19日从库鲁航天中心成功发射“盖亚”探测器(Global Astrometric Interferometer for Astrophysics, GAIA), 即全球天体物理学干涉测量仪. 其任务是以前所未有的精度对银河系内数十亿计的恒星的位置、距离和运动情况进行高精度观测. “盖亚”探测器主载荷是两套三片式消象散反射式望远镜, 主镜口径1.45 m×0.5 m. “盖亚”探测器位于日地L2点, 以利萨如轨道运动, 以避免太阳被地球遮蔽, 在约5年的任务中将可观测到视星等最暗为20等的天体, 探测多达50万个类星体, 将对现有近地天体监测网起到重要的补充作用.

此外, 美国还有两个天基小行星监测望远镜计划. 其中, “哨兵”(Sentinel)是红外波段望远镜, 原计划于2019年由猎鹰-9运载火箭发射至金星太阳轨道, 其任务目标是探测识别90%以上直径超过140 m的近地小天体. “哨兵”将搭载一套50 cm口径的望远镜, 通过1.5 m高增益天线向地面发送科学探测数据. 与NASA的Near-Earth Object项目中的空间望远镜不同, “哨兵”望远镜将始终背对太阳, 因而将不受阳光的影响.

NEOCam(The Near-Earth Object Camera)是JPL负责的一个新立项的天基近地小天体红外监测系统项目, 其任务目标是配合其他天基探测器一起完成美国国会提出的探明90%以上直径大于140 m的小行星的最终目标. NEOCam将在轨工作4年, 其配置有一套红外波段望远镜和一套热红外波段的宽视场相机. 其特色是利用红外观测, 不依赖于小天体的反照率, 能够更精确地确定目标小行星的大小, 也能够对低反照率的小天体进行有效探测. 计划部署于日地L1点, 4年任务周期中, 2/3的潜在高风险近地小行星将从相机观测范围内经过, NEOCam能够对其进行有效探测、定位. 同时NEOCam将开展小行星物理特性的研究, 力求在发现高危小行星时, 能够指导小行星防御途径的选择.

2.2.2 我国监测预警现状

1928年, 中国科学院紫金山天文台张钰哲先生在国内第一个发现小行星, 开创了我国小天体观测研究的先河. 早期紫金山天文台利用紫金山园区中的40 cm双筒折射望远镜开展小行星的观测和研究, 1995年紫金山天文台开始建设位于盱眙的天文观测站的1 m口径施密特型近地天体望远镜(104/120 cm-CNEOST), 并

于2006年底投入使用, 已经加入国际联测网, 台站编号D29^[22], 是具有很高巡天效率的光学成像望远镜. 紫金山天文台已成为国际小行星联测网中有影响的台站之一, 截至目前已对超过1300个近地小行星进行了观测, 发现了17个新近地小行星, 其中2个是新潜在威胁小行星(2016 VC1, 2017 BL3). 紫金山天文台多次参加小行星的国际联合观测. 2012年, 由紫金山天文台牵头组织了盱眙近地天体望远镜、美国基特峰天文台90 cm望远镜和智力泛美天文台60 cm望远镜等设备, 对小行星“图蒂斯塔”进行联合观测, 取得了支撑我国嫦娥二号拓展任务的重要数据, 为我国首次实现对小行星的飞掠探测提供了重要保障. 2018年, 我国政府加入联合国下设的国际小行星监测网(the International Asteroid Warning Network, IAWN), 紫金山天文台的近地天体望远镜为主干设备.

除了紫金山天文台系统开展了小行星及彗星观测研究工作外, 我国其他单位和天文台也开展了太阳系小天体的观测工作, 如中国科学院国家天文台、山东大学天文台等. 我国目前有多个台站具备小行星观测能力, 均可探测亮于 $V=20$ 等的天体, 各观测站及设备如表3所示, 这是我国组建近地天体地基观测网络的基础. 而我国已建成的位于贵州的500 m口径射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope, FAST), 目前主要用于接收射电天文信号, 暂时没有主动探测功能.

在天基观测方面, 中国空间技术研究院霍卓玺及其合作者提出国际首创的构建天基异构星座的近地小天体普查与定位系统, 命名为CROWN(Constellation of Heterogeneous Wide-field Near-Earth Object Surveyors).

CROWN拟在距日0.6~0.8 AU的类金星轨道上部部署数颗小卫星, 其中包括1颗搭载窄视场光学-红外望

表3 我国主要观测站及设备

Table 3 Major observatories and equipment in China

观测站	望远镜口径(m)	视场
盱眙观测站	1.04	3°×3°
兴隆观测站BATC	0.6	1.5°×1.5°
德令哈观测站	1.2	18'×18'
南山观测站	1.02	1.5°×1.5°
长春观测站	0.4	1°×1°
洪河观测站	0.9	0.75°×0.75°
姚安观测站	0.5(3台)	4.6°×4.6°

远镜的机动主星以及多颗搭载宽视场光学波段望远镜的微小卫星,通过分布式异构卫星星座,在视场、分辨率、灵敏度、巡天模式、星上计算等多个层面与环节采取异构设计,实现普查与详查相结合的天基任务模式,如图4所示.该星座能够覆盖200平方度以上视场天区,实现小行星精确定轨以及跟踪详查.该系统计划在3~5年内,完成90%以上10 m量级直径的近地天体普查,对其中的高价值、高风险目标进行定位、跟踪观测、定轨,系统性解决近地天体普查问题.该系统与地面观测系统协同,对有潜在威胁的目标开展监测与撞击预警.优化观测策略,服务原位资源开发,目标选取兼顾系外天文活动监测(如凌星、引力透镜、超新星爆发、伽马射线暴等),为系外行星搜寻、高能天体物理、星系宇宙学等方面研究提供大量高质量观测数据.同时,小行星天基普查基于异构星座,成本低,可分步或组合实施,规模、效率、性能具有可伸缩性,有望成为国际首个近地天体普查星座.以微小卫星为主的低成本模式还可成为国际、国内合作开展空间科学研究的平台,有望形成高校、科研院所、社会力量乃至国际开展合作的纽带.

2.3 监测预警趋势与我国差距

2.3.1 监测预警技术趋势

目前小行星观测体系以地面望远镜为绝对主力,据估算已经完成90%以上直径超过1 km的近地天体的探测,未来还将通过升级地基系统实现90%以上直径超过300 m的近地天体的探测,但对于更小的目标(140 m以下),则无法通过地基系统在合理期限内完成系统性探测.根据太阳系小天体形成和演化模型推算,直径10~140 m之间的近地天体总数应在 1×10^5 数量级,其中大部分还尚未发现.原因主要有两方面:(1)地基系统本身能力受大气条件、台址位置制约.即便是使用地球上最强大的望远镜,由于近地小天体反射光在进入地球大气层后发生抖动,测量精度会受到一定限制;(2)部分近地天体轨道处于地球与太阳之间,使用地基系统观测时,相位角不利于探测.地基监测系统最大的“死角”是太阳光照区域.当小行星从太阳方向飞来时,由于“逆光”,地面望远镜看不到它们(如2019 OK).因此,国际上普遍认可,单纯依靠地基系统无法系统性普查百米及更小的目标,未来应大力发展天基系统.

天基小行星监测预警系统除了可灵活分布于LEO

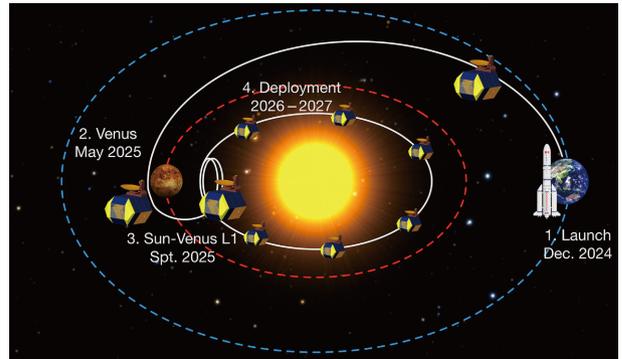


图4 (网络版彩色)近地天体普查与定位系统任务图

Figure 4 (Color online) Mission map of near-Earth celestial survey and location system

轨道、金星轨道、地日拉格朗日点等特殊位置外,还能够很好地弥补地基监测系统存在的太阳光照区域观测“死角”的问题,具有监测范围广、追踪手段多样、轨道预测准确等突出优势.因此,天基望远镜发展潜力被普遍看好,是目前各国都在大力发展建设的方向之一.未来以地基望远镜组网巡天长期观测为主,以天基望远镜开展针对性特性巡天为辅的天地一体化监测是小行星监测预警技术发展的大势所趋.当然,天基监测系统也存在成本高、在轨维护困难、受宇宙辐射等影响较大、单卫星有效载荷配置单一等问题.

综上所述,小行星监测预警国际现状和发展趋势可概括为:

(1) 地基监测预警系统起步早,相对成熟.自1992年起,各个国家和地区地基小行星预警项目层出不穷,均取得了显著成果,并以此为基础,形成了若干较权威的近地小行星数据库并公开发布.

(2) 天基监测预警系统已有在轨任务,但整体起步晚.由于成本、风险、维护等问题,天基观测预警系统发展相对较慢,目前部分天基小天体观测成果来自空间天文望远镜的扩展或者额外观测.专门用于观测近地小天体的天基设施只有加拿大国家航天局的NEOSAT卫星.已立项或开展方案设计任务包括美国的“哨兵”探测器和“NEOCAM”探测器.

(3) 监测预警发展趋势:由于地基监测系统的固有缺陷,主要是易受日光影响,且全球南北分布不均,无法做到全空域、全天时监测预警.目前的发展趋势是与天基观测预警系统结合,互为补充、取长补短.

(4) 国外监测预警的规划目标:美国国家航空航天局、欧洲航天局对小行星监测项目提出了相对明确的任务目标.NASA:2030年前至少确认90%以上直径大

于140 m的天体; ESA: 今后的观测望远镜应对直径小于1 km的近地小行星具有敏感性.

2.3.2 我国的差距

国际近地天体监测预警领域目前的态势是: 美国主导、欧洲紧跟, 俄日独辟蹊径, 正在完善近地天体监测网络.

相比而言, 国内在小行星监测预警研究方面与国外差距较大. 我国地基观测设备口径小、数量少、站址单一、探测能力有限, 目前只能对亮于20星等的近地天体(相当于直径300 m以上的小天体)进行监测, 也仅能对少量近地天体进行碰撞预警. 天基观测项目尚处于论证阶段. 总体上, 缺少有效的观测网络进行完备监测, 无法实现系统样本的预警和预报.

3 小行星撞击防御

小行星撞击地球的防御是指在能够对近地小行星提前预警的前提下, 将小行星分裂成碎片或者改变小行星轨道避免其撞击地球. 因此, 小行星撞击地球防御问题包括: (1) 建立可靠的小行星撞击风险评估体系; (2) 发展有效的偏转/摧毁技术; (3) 实施可行的安全防御任务.

3.1 小行星撞击风险评估

小行星撞击地球的危害程度取决于其穿过大气层后的剩余质量和速度, 这两个参数与小行星初始质量、初始速度、撞击角度以及小行星结构有关.

目前, 评估危险小天体的撞击风险通常有两个指数: 一个是杜林危险指数(Torino scale), 一个是巴勒莫危险指数(Palermo technical impact scale), 这两个指数考虑了由近地小天体的尺寸和轨道参数确定的与地球的碰撞概率和碰撞所带来的实际危害. 其中, 杜林指数由Binzel教授在1995年提出^[23], 分为0~10之间的11个整数等级值, 分别用5种颜色标识, 如表4所示. 杜林指数虽然划分较粗, 但易于被大众所了解, 被广泛用于面向公众传达危险小天体的撞击威胁严重程度.

巴勒莫指数的计算则更为严谨, 主要用于专业技术人员的学术交流, 其数值PS(Palermo scale)计算公式如下^[24]:

$$\begin{cases} PS = \lg R, \\ R = P_1 / (f_B DT), \\ f_B = 0.03 \times E^{-4/5}, \end{cases} \quad (1)$$

表4 杜林危险指数

Table 4 Torino scale

危险指数	颜色标识及含义	撞击事件描述
0	白色: 无危险	撞击概率为0, 撞击危害几乎为0
1	绿色: 正常	撞击概率极低
2		接近地球, 但不会异常接近
3	黄色: 需注意	1%或以上概率造成小范围冲撞损毁
4		1%以上概率造成区域性冲撞损毁
5		可能造成区域性严重破坏, 但未确定是否必然发生
6	橙色: 威胁	可能造成全球性灾难, 但未确定是否必然发生
7		在1个世纪内可能造成全球性灾难, 但未确定是否必然发生

其中, R 表示相对风险; P_1 表示撞击概率; DT 表示距离撞击的时间, 单位为年; E 代表撞击能量, 计算时等效为TNT炸药当量. 根据美国喷气推进实验室公布的数据, 筛选出巴勒莫指数最高(即撞击危害最高)的7颗对地球构成潜在威胁的近地小行星(Potentially Hazardous Asteroid, PHA), 如表5所示^[25].

随着运动轨道的变化, 巴勒莫危险指数和杜林危险指数也是变化的. 目前在编以及跟踪的小天体杜林危险指数均为0.

3.2 防御技术

根据预警时间长短以及目标小行星尺寸的不同, 主动防御技术可分为3大类^[26,27]: (1) 针对短预警时间、大尺寸PHA, 利用核爆炸摧毁或者改变其轨道; (2) 针对长预警时间、大尺寸PHA, 或者短预警时间、小尺寸PHA, 利用航天器直接撞击, 改变其轨道; (3) 长预警时间PHA, 利用长期作用力改变其轨道, 即通过接触式或非接触式作用力使PHA产生微小速度变化, 随着时间推进, 演化为较大的轨道变化.

能够通过长期作用改变PHA的技术手段包括: 质量驱动、拖船、太阳光压、引力牵引、激光驱动、离子束等^[17,28]. 这些手段一般适用于防御预警几年甚至几十年的小行星.

3.2.1 核爆防御技术

核爆是唯一可应对短预警时间(一般小于5年)、大尺寸小行星撞击的技术^[29]. 核爆炸防御方式有两种: 一是利用核爆装置直接炸毁PHA; 二是利用爆炸产生的

表5 巴勒莫指数最高的7颗小行星^[25]Table 5 Seven asteroids with the highest Palermo index^[25]

小行星	直径(m)	撞击时间	撞击概率	巴勒莫指数	杜林指数	相对速度(km/s)
2006QV89	37.0	2019/9/9	1/11428	-3.79	0	12.32
2009JF1	16.0	2022/5/6	1/4464	-3.75	0	26.41
2008UB7	71.0	2060/10/31	1/36101	-3.83	0	21.57
99942 Apophis	375	2068/4/12	1/531914	-3.67	0	12.62
2010RF12	9.0	2095/9/5	1/16	-3.26	0	12.29
1979XB	860.0	2113/12/14	1/1840000	-3.28	0	26.04
2000SG344	46.0	2071/9/16	1/2096	-3.63	0	11.26

直接或间接作用力改变PHA轨道,避免其与地球相撞。根据PHA尺寸、材质、结构的不同,可选择表面爆炸、对峙爆炸以及穿透爆炸3种方式。

(1) 表面爆炸。针对小体积的PHA,可以采用作用能量较大的表面爆炸或浅地下爆炸的方式,使PHA分裂成数块碎片。Lomov等人^[30]已经论证了一定当量核爆炸产生的能量足以完全破坏PHA内部结构的完整性。其缺点是不适用于防御疏松多孔或者碎石堆式的PHA,且PHA被炸毁分裂形成的碎片数量、大小、轨道不可控,依旧存在撞击地球的风险。

(2) 对峙爆炸。对峙爆炸是在距离PHA表面一定距离时引爆核装置,爆炸产生的热中子、X射线以及 γ 射线辐射PHA表面,产生高温,引发PHA表面物质的喷射,喷射时产生的推力使PHA发生偏转^[31]。此外,爆炸产生的部分碎片与PHA发生撞击,传递动能。两种作用效果叠加,实现防御目的。仿真结果显示,1000 kg TNT当量的核弹在距离一个平均半径为1 km的PHA表面23 m的位置爆炸,能够产生1 cm/s的速度增量^[32]。对峙爆炸是规避爆炸碎片威胁的有效方法之一,适用于防御体积较大的PHA。

(3) 穿透爆炸。穿透核爆炸是指核装置穿入PHA内部一定深度处发生爆炸。该方法的优势在于,除了核爆炸产生的爆炸能量外,爆炸引起的表面冲击波能够扩大作用威力,穿透深度很浅的爆炸就足以改变PHA的运行轨道。穿透核爆炸摧毁特定目标所需的爆炸能量比表面爆炸所需能量减少15%~25%。

美国小行星偏离研究中心和爱荷华州立大学提出超高速小行星拦截器任务(Hypervelocity Asteroid Intercept Vehicle, HAIV),计划对该技术进行在轨验证^[29]。HAIV任务由一个撞击引导器和一个携带核爆装置的跟随器两部分组成,如图5所示。撞击引导器撞击目标

小行星,并在小行星表面制造一个浅坑,随后跟随器进入浅坑并引爆核爆装置。该任务原计划于2019年8月2日发射,同年12月1日实施爆炸试验,目前因故仍在论证设计中。

核爆防御技术的优点是:(1)唯一可应对短预警时间、大尺寸小行星撞击,无需长期的轨道操作;(2)有最高的有效能量密度。其缺点是:(1)爆炸后产生的碎片仍具备撞击威胁;(2)空间核设施引发政治和全球安全问题。以小行星防御为目的核爆炸技术是否违反了《外层空间条约》中“禁止在外层空间部署核武器”的规定,仍存在很大的争议。

3.2.2 动能撞击防御技术

动能撞击防御技术是指撞击器以一定的速度和角度撞击小行星,使其自旋状态和轨道发生改变。撞击器可以选用航天器、火箭甚至可操控的小行星^[33]。这一技术的关键在于掌握动能撞击过程的动态响应和动能撞击的能量传递规律。

动能撞击防御方法技术简单、启动迅速、灵活性高、作用效果明显,是一种实际可行且已在NASA的Deep Impact任务中得到验证的成熟技术^[34]。

Deep Impact任务于2005年1月12日用德尔他-2火箭发射,在约6个月时间内经过 4.3×10^8 km的深空飞行,同年7月4日飞至Tempel-1号彗星彗核附近。随后,一枚重约370 kg的铜制小型撞击器(impactor)与飞跃舱(fly-by)分离,撞击器以约10 km/s的速度与彗核发生碰撞。撞击点精度达到1 m,碰撞过程持续约3.7 s,碰撞释放约19 GJ的动能,相当于4.5 t TNT当量。在本次撞击后的3年时间内,Tempel-1号彗星位置变化了约10 km^[34]。这是人类首次用撞击器撞击彗星,为人类防御地球遭遇小天体撞击危险积累了宝贵经验,也为探究太阳系起源提供了新的线索和重要数据。“深度撞击”飞行过

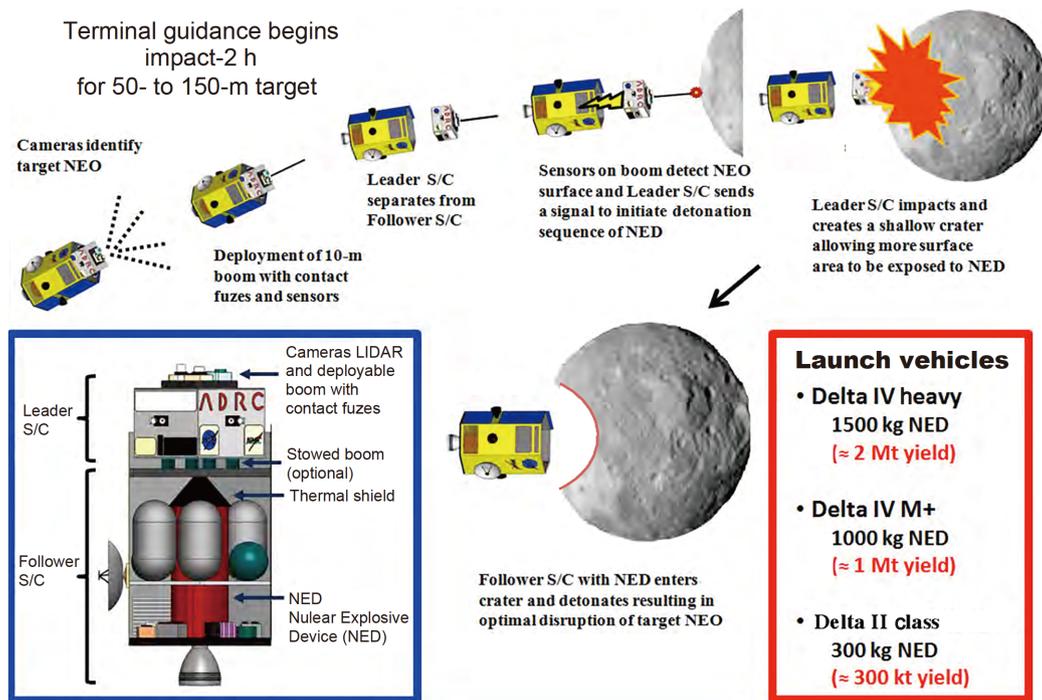


图5 (网络版彩色)HAIV任务概念及撞击动作时序
Figure 5 (Color online) Overview of HAIV mission and time series of impact action

程如图6所示。

除此之外, ESA的唐吉珂德任务(DON QUIJOTE)计划、美国JPL实验室预计在2021年3月撞击小行星Bennu的ISIS计划、NASA和ESA合作开展的包括撞击迪蒂莫斯B的“双小行星再定向测试”和观测撞击效果的“小行星撞击监视器”两项任务的小行星撞击与偏转评估计划(Asteroid Impact and Deflection Assessment, AIDA)等, 都是针对动能撞击技术的在轨验证试验。

动能撞击防御技术的优点是: (1) 技术成熟度高; (2) 作用效果明显; (3) 无需长期的轨道操作。其缺点是: (1) 需要知道目标的准确的天体质量、尺寸、密度、速度等特性参数; (2) 对多孔的、疏松度高的小行星效应复杂; (3) 对火箭运载能力要求高; (4) 有效性随小行星尺寸的增大而减小; (5) 由于运载火箭技术的限制, 航天器到达目标小行星需要几个月甚至几年的时间, 无法对预警时间较短的小行星产生有效响应^[35-37]。

3.2.3 引力牵引技术

引力牵引技术是指航天器在距小行星一定距离的位置上保持平衡, 通过航天器与小行星之间产生持续的万有引力作用, 使小行星产生持续的速度变化量, 进而改变小行星的运行轨道。这是一种非接触式缓慢防

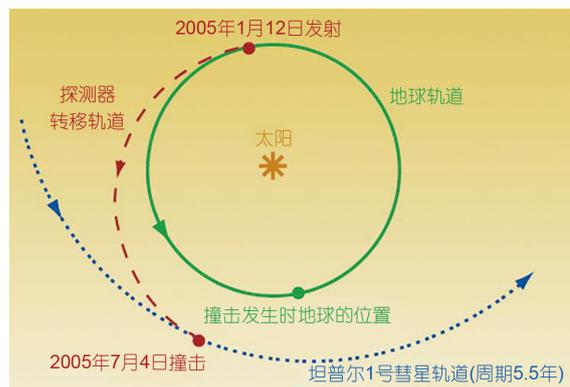


图6 (网络版彩色)“深度撞击”飞行过程示意图
Figure 6 (Color online) The flight process diagram of “deep impact”

御技术, 通过航天器位置的选择和提供补偿航天器重力推力, 一个小的稳定的摄动力可作用于小行星的任何方向。

研究表明, 一个10 t的航天器可以对直径100 m的小行星产生 $7 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$ 的加速度, 使小行星每年的速度改变量约为 $3.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ ^[38,39]。对于引力牵引技术, 增大作用力效果和航天器姿态控制技术是亟待解决的问题。增加航天器质量是增大引力的最有效方

式,但是航天器质量的增大会增加发射成本。

2004年6月,直径(270±60) m的近地小行星阿波菲斯(编号99942, Apophis)被发现.它每7年穿过地球轨道1次,近日点为0.746 AU,质量约为 2.7×10^{10} kg,对地球产生周期性的威胁.为此,NASA启动了阿波菲斯探测和防御平台计划(Apophis Exploration and Mitigation Platform, AEMP). AEMP计划采用两种防御技术.第一个防御技术是采用引力牵引法,计划2021年2月采用猎鹰(Falcon)9号火箭发射质量为560 kg的探测器,利用霍尔推力器使其悬停在距阿波菲斯270 m的位置,经过1年的引力牵引作用使得阿波菲斯轨道发生偏转,阻止阿波菲斯2036年与地球碰撞.第二个防御技术是小行星反照率改变法,这是一个长期的防御策略,使阿波菲斯轨道发生偏转以避免其在2036年后的未来撞击地球.

ESA在其近地小行星防护盾计划(Near-Earth Objects Shield, NEOShield)中,提出了多引力拖车编队的解决方案来增强引力作用效果以及任务灵活性^[40],同时提出了撞击和引力牵引的技术组合方案.

引力牵引防御技术的优点是:(1)不需要考虑小行星的组成、转动、形貌等特征;(2)不需要航天器在小行星表面着陆.其缺点是:(1)对航天器长时间位置姿态控制要求高;(2)作用力效果越大,需要的航天器质量越大,发射成本越大.

3.2.4 太阳光压技术

太阳光压技术是指利用Yarkovsky效应^[41],太阳照射面的物质受热向外辐射光子,热光子辐射对小行星产生微弱的反作用力,改变小行星运行轨迹.Yarkovsky效应对天体产生的作用力属于非引力摄动,是小行星轨道无法精确预测的最主要原因,其原理示意图如图7所示^[41].

一般来说,天体旋转的黄昏面(dusk)比拂晓面(dawn)温度更高,并释放更多的热光子,所以Yarkovsky效应作用力的合力指向拂晓面(dawn).这个力的方向将由天体的形状、转速、旋转轴以及成分等决定,通常施加在天体上的加速度方向垂直于天体的自转轴和与太阳的连线矢量.基于Yarkovsky效应,可人为改变小行星表面反射率和导热系数,进而改变Yarkovsky效应作用力大小,实现对小行星轨道偏转,这需要航天器在小行星表面进行喷涂任务. AEMP计划中的第二个防御技术就是携带可增加或者减少反照率的两种工业粉末,采用表面反照率处理系统(surface albedo treatment system, SATS),用摩擦枪(tribo)把粉末喷涂于小行星阿波

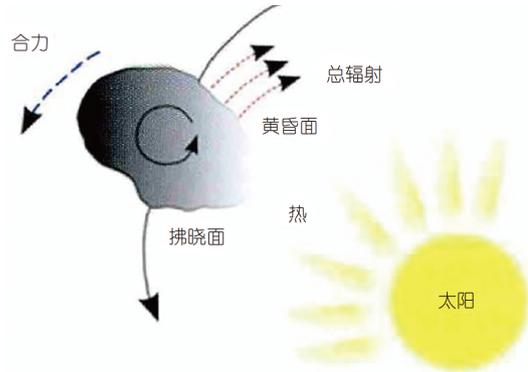


图7 (网络版彩色)Yarkovsky效应示意图
Figure 7 (Color online) Diagram of Yarkovsky effect

菲斯表面.由于静电吸附,粉末附着在小行星表面,改变全部或者部分小行星表面反照率,利用Yarkovsky效应改变小行星轨道.

可以考虑在空间部署一个反射器将太阳光反射到小行星上,利用太阳光压对小行星施加作用力.也可以在小行星表面放置可转动的太阳帆,以增强太阳光压的作用效果.

虽然太阳光压技术在原理上是可行的,但是(1)Yarkovsky效应仅能产生微弱的作用力,偏转作用周期长达几十年甚至上百年时间;(2)小行星不规则的形状和表面导致作用力合力方向难以准确确定,限制了该技术方案的实际应用.

3.2.5 拖船技术

拖船技术是指将一个装有推进系统的航天器着陆并锚定在小行星表面,利用航天器发动机产生的推力对小行星施加作用力,逐渐地改变小行星的运行轨道.

为了提高作用效果,通常需要在小行星表面部署多个航天器同时工作,也可考虑部署太阳帆或者核能发动机. Sanchez等人^[26]、Bombardeli和Bau^[42]、Colombo等人^[43]也论证了该方法的可行性.由于多数小行星处于高速运动以及旋转中,且小行星表面状况不明,因此航天器在小行星表面的着陆定锚技术是该防御技术亟待解决的问题.此外,在小行星自转及滚动工况下,航天器必须使用多向推力器或采取有效的工作时序,才能够保证作用力起到防御作用.

拖船防御技术的优点是可长期产生较大的作用力,其缺点是:(1)受小行星外形和自旋影响;(2)需要大量推进剂,对推进技术提出了挑战.

3.2.6 激光烧蚀驱动技术

激光烧蚀驱动技术是指使用强激光照射小行星表

面,利用表面烧蚀产生的等离子体喷射所带来的反作用力,使小行星自旋状态和轨道发生改变.大量研究认为,激光烧蚀驱动技术是一种高效的太空碎片清除技术^[44-47],基于同样的作用机理可用于小行星防御.激光驱动技术是一种非接触式防御方法,其关键在于烧蚀驱动小行星机理、对驱动效果的影响因素、驱动的动力学模型.

NASA研发了基于激光驱动技术防御小行星的DE-STAR系统和DE-STARLITE系统^[48],该系统利用太阳能作为能源供给,同时具备碎片或行星的消旋、清除功能.根据仿真结果,一套100.6 m宽的激光阵列DE-STAR系统,足以让直径100.6 m的小行星从 3.219×10^6 km的距离上偏离;而一套20 kW的DE-STARLITE系统可以使直径304.8 m的小行星在15年内偏移12874.8 km.陈川等人^[25,49]提出了通过抵近伴飞小行星进行持续激光驱动的小行星偏转防御阵列,并以7颗威胁最大的小行星为对象计算了激光阵列防御系统的偏转防御效果.

目前国内外都没有激光烧蚀驱动防御技术验证试验计划.激光烧蚀驱动防御技术的优点是:(1)机动灵活,可部署于地球低轨、地球同步轨道、月球或者地月拉格朗日点;(2)可长期远距离作用.其缺点是对激光器功率、使用寿命等性能要求高.

3.2.7 质量驱动技术

质量驱动技术是指在小行星表面部署一个着陆器,将小行星表面物质向外喷射产生反作用力,进而改变小行星轨道^[17,28].

同拖船技术一样,该防御技术的作用效果与小行星的自旋特性有关.该方法最早设想应用于天体采矿任务,Snively和Oneill^[50]在1983年提出将该技术应用于行星偏移任务.后来,Olds等人^[51]提出了小型模块化的质量驱动器解决方案以应对更为复杂的任务.着陆器可选用太阳能、核能或环状电磁体等能源供给装置,持续、长久驱动钻取和喷射装置,不必从地球携带大量的推进剂.质量驱动技术用于行星防御同样需要较长的预警时间.实现这一技术需要精准的导航和轨道定位技术实现自主会合和着陆、高可靠性复杂表面锚定技术、微重力工况下自主采矿及物质弹射技术以及研发长期稳定的能源供给设施等.

这一技术的优点是:(1)对小行星运行速度影响大;(2)不需要携带大量推进剂.缺点是:(1)需要在小行星表面长期工作,对其形状和材料敏感;(2)技术难度大,

成熟度低.

3.2.8 离子束偏移技术

离子束偏移技术是指安装在航天器上的离子推力器定向产生高指向精度、高速度的离子束,对目标小行星表面进行持续照射,对小行星产生持续作用力,进而改变小行星的运行轨道.

相比引力牵引技术,离子束偏移技术优势在于不受航天器质量限制.以直径200 m小行星为例,1 t高效率、高比冲离子束航天器的作用效果等同于20 t引力牵引航天器的牵引效果^[52].此外,基于离子束引导所需的电推进等关键技术已经相对成熟,可能很快会有利用该技术的小行星防御演示验证任务.

离子束偏移技术的优点是:(1)不受小行星外形、材质等因素影响;(2)不受航天器质量的限制.其缺点是作用力较弱,需长期作用.

3.3 防御技术发展趋势与我国差距

3.3.1 防御技术发展趋势

从可行性角度看,核爆技术是理论上最直接、防御效果最明显、可行性最高的防御方法.动能撞击技术是唯一完成了在轨演示验证的技术.质量驱动技术所需的采矿技术在月球采矿任务中已经实施.离子束偏移技术所需的电推进等关键技术已经相对成熟,在能源系统满足需求的前提下具备一定可行性.激光烧蚀驱动技术则在地面实验室进行了驱动、消旋等关键技术的验证,距离在轨演示验证任务还需一段时间.其他技术则处于概念设计阶段,仍有多个关键技术需要解决,防御效果如何还需进一步的理论论证和实验研究.

从预警时间、作用时间、目标星规模、成熟度、成功率等关键要素对不同防御技术防御效能评估的对比分析见表6.

综上所述,国外防御技术的现状和发展趋势可概括为:

(1)几乎对所有防御技术,尤其是对可行性最高的核爆、动能撞击技术进行了深入研究,完成了大部分关键技术攻关;

(2)针对特定高撞击风险的小行星,研究、设计了多项防御任务;

(3)实施了深度撞击任务(deep impact),对动能撞击技术进行了完美的工程验证;

(4)在研究成果积累、基础设施完善、研究队伍

表6 不同防御技术对比分析

Table 6 Summary of defense technology

序号	技术途径名称	小行星尺寸	预警所需时间	与小行星接触情况	优点	缺点	技术成熟度
1	核爆	大尺寸 小尺寸	时间短	接触(碰撞); 非接触	无需长期的轨道操作; 最高的有效能量密度; 较高的动量传递性能; 当前技术是可用的; 唯一可应对短预警时间、大尺寸小行星情况的技术	爆炸产生的碎片依然可能威胁地球; 考虑到发射可能失败,需要在运载中进行特殊的防护; 对小行星的物理特性敏感; 空间核设施引发政治及安全问题	7~8
2	动能撞击	大尺寸 小尺寸	时间长 时间短	接触(碰撞)	技术简单、成熟度高; 无需长期的轨道操作; 作用效果明显; 已经过在轨验证	需要目标的准确的天体质量、尺寸、密度、速度特性; 对多孔型小行星不适用; 对火箭运载能力要求高; 对轨道精度要求高; 有效性随着小行星尺寸的增大而减小	9
3	引力牵引	小尺寸	时间长	非接触	只需要小行星质量特性; 不需要考虑小行星的组成、转动、形貌等特征; 不需要航天器在小行星表面着陆	需要大质量的航天器,对运载要求较高; 理论上需要航天器与小行星距离越小越好,与小行星碰撞的可能性高; 对航天器长时间位置姿态控制要求高	5~6
4	激光驱动	小尺寸 大尺寸	时间长	非接触	机动灵活,可部署于月球、地球低轨、地球同步轨道或者日地拉格朗日点; 可长期远距离作用,避免航天器同小行星发生碰撞; 能量获取近似无限	技术成熟度低; 对激光器性能要求高; 系统规模庞大; 技术成熟度低	4~5
5	拖船	小尺寸	时间长	接触(着陆)	同比引力拖车等非接触技术,可产生较大的作用力	技术成熟度低; 可靠性要求高; 受小行星外形和自旋影响; 对小行星材质敏感	4~5
6	太阳光压	小尺寸	时间长	非接触	航天器可距离小行星较远,避免同小行星发生碰撞; 可长期远距离作用	技术成熟度低; 可靠性要求高; 作用力微弱,作用周期需几十年甚至上百年; 受小行星形状和表面导致影响	3~4
7	质量驱动	大尺寸	时间长	接触(着陆)	产生反作用力的物质来自小行星本身,可以认为是无限的,可以免去从地球携带大量推进剂	技术成熟度低; 可靠性要求高; 对小行星形状和材料敏感	3~4
8	离子束牵引	小尺寸	时间长	非接触	同比引力牵引技术,在航天器质量较小的情况下可对小行星产生更大的作用效果; 航天器可距离小行星较远,避免同小行星发生碰撞; 不受小行星外形材质等因素影响	技术成熟度低; 可靠性要求高; 作用力较弱,需长期作用	5~6

培养等方面等都打下了坚实基础;

(5) 呈现两个发展趋势: 一是有针对性地推进核爆、动能撞击等较成熟防御技术在轨演示验证, 同时结合深空探测、空间碎片移除等领域需求对共性的关键技术进行攻关和开展地面及在轨演示验证, 如美国的超高速小行星拦截器(Hypervelocity Asteroid Intercept Vehicle, HAIV)计划。二是单一防御技术均有各自的适用范围和优缺点, 不能覆盖数量众多、特性各

异的小行星目标。因此, 以提高防御效能、降低工程实施难度为目的, 取长补短, 开展多个技术组合协同防御方案是未来小行星防御技术发展的必然趋势。

3.3.2 我国的差距

相比国外而言, 我国研究水平、研究基础和研究成果的影响力都存在很大差距。具体表现为: (1) 有关研究基本上停留在很浅的概念研究和纸面上的方案设计阶段, 成果显示度不高, 在国际上没有发言权和影响

力; (2) 研究多为各相关单位自发行为, 研究工作零星、分散, 缺乏统一的部署规划; (3) 基础设施短缺, 研究基础十分薄弱, 没有代表性的团队; (4) 尚无针对特定PHA防御的宇航任务设计和实施计划, 尚不能为可能会发生的小行星撞击威胁提供防御决策咨询; (5) 尚无行动计划和发展路线图. 这些差距严重影响了面临小行星撞击威胁时我国自主决策和话语权, 与我国的负责任、有担当的大国形象严重不符.

4 小行星资源利用

小行星资源开发和利用是指对小行星进行近距离综合探测, 对其资源进行识别、获取并加以利用的过程. 小行星的探测与开发利用是外太空试验场技术的集中体现, 也是近年来各航天大国的热点目标之一.

小行星资源利用主要有3种方式: (1) 采样返回, 带到地球上使用; (2) 在小行星现场进行就位处理利用, 即原位资源利用(*in situ* resource utilization, ISRU); (3) 将小行星(10 m以下)捕获运送到环绕月球、地球或载人空间站的安全轨道上加以利用.

4.1 小行星探测概况

小行星探测是开展资源开发和利用的前提, 也是对具有撞击威胁的小行星进行防御的基础. 对小行星的探测任务从实施难度上分为初级、中级、高级3个阶段和层次: (1) 初级是实现对小行星外形及部分物理特性的观测, 探测活动以“飞越探测”为主; (2) 中级是实现对小行星物理特性等的深入观测与分析, 探测活动以“绕飞-附着-采样”为主; (3) 高级是对小行星运动进行控制或对其物质进行开发利用, 探测活动以“偏转-操控-利用”为主.

国际上小天体探测已历经30余年, NASA, ESA, JAXA先后完成了各有特色的小天体探测任务, 任务目标从单目标到多目标, 任务周期从3年的近地小天体探测到10年左右的主带小天体探测, 实现了弱引力场下航天器精准控制、大速度增量需求的电推进等关键技术的演示验证, 取得了小行星飞越、近地小行星绕飞、近地小行星取样、彗星撞击、慧发取样返回、彗星着陆等标志性成就. 目前, 成功实施的小行星探测任务共计7次. 其中, Dawn探测器(美国)仍在围绕Ceres飞行, Hayabusa-2(日本)和OSIRIS-Rex(美国)的采样返回任务正在实施中. 另外, 还有一些非小行星探测器在完成主任务之后, 也飞越并探测了一些小行星, 例如我国

CE-2探测器在拓展任务期间成功飞越小行星4179 Toutatis.

4.1.1 美国小行星探测计划

美国是小天体探测活动的先行者和技术领先者, 至今已成功发射小天体探测器7个, 飞掠12个小行星, 完成环绕附着1次. 肩负小行星采样返回任务的OSIRIS-REs探测器目前还在星际飞行中. 探测器信息如表7所示.

美国第一颗小天体探测器发射于1989年10月18日, 由阿特兰蒂斯号航天飞机将Galileo(伽利略号)送入预定轨道, 这是人类历史上第一次近距离、高精度的对小天体进行探测. 伽利略号探测器在飞行期间近距离飞越并利用多波段光谱观测了小行星951 Gaspra和243 Ida, 探测了小行星表面的陨石坑位置、大小和形状等几何特征以及自旋状态^[53]. 1993年8月28日, 它飞越小行星243 Ida, 固体成像照相机用6个可见光谱段对243 Ida进行了成像, 发现Ida小行星拥有卫星(Dactyl), 这是人类第一次发现拥有天然卫星的小行星.

1996年2月17日发射的NEAR-Shoemaker(尼尔-舒梅克号)探测器是国际首次小行星绕飞、着陆探测任务^[54,55]. 其使命是对433 Eros(爱神星)小行星形状、质量分布、磁场、自转、成分和地质等进行详尽探测. 探测器于1997年6月27日飞越253 Mathilde小行星并拍摄高精度照片, 2000年2月14日进入433 Eros小行星任务轨道, 7月14日进入433 Eros小行星35 km圆形极地轨道, 并在此轨道停留了10天^[56]. 2001年2月12日, 在完成探测任务后, 其经过5次减速, 成功在433 Eros小行星表面着陆. 尼尔-舒梅克号回传了近16万张照片, NASA科学家们以此确定了433 Eros小行星是S型小行星, 高度富集硅酸盐矿物质和金属, 具有多样化的表面组成. 433 Eros小行星可能是大天体撞击碎裂的残余物. 253 Mathilde是尼尔-舒梅克号探测的第二颗小行星, 该小行星近60%的表面没有颜色和反照率变化, 应该是行星形成过程中的富碳物质, 与CM群碳质球粒陨石非常相似. 但是, Mathilde的密度仅为 1.3 g/cm^3 , 仅仅是碳质球粒陨石密度的一半, 暗示Mathilde内部可能是多孔结构或者内部含有水和冰.

随后10年时间里, NASA先后发射了Deep Space1(深空1号)、STARDUST(星尘号)、Deep Impact(深度撞击器)以及Dawn(黎明号)3颗深空探测器^[57-60]. 深空1号探测器验证了包括太阳能电推进技术、自主导航技术、微小相机光谱成像技术等十余项高新技术. 星尘

表7 美国小天体探测任务

Table 7 US small object exploration mission

探测器	发射日期	飞越/着陆日期	探测天体	天体尺寸(km)
Gailileo(伽利略号)	1989/8/18	1991/10/29	951 Gaspra	18.2×10.5×8.9
		1993/8/28	243 Ida	53.6×24.0×15.2
NEAR-Shoemaker(尼尔-舒梅克号)	1996/2/17	1997/6/27	253 Mathilde	66×48×46
		2000/2/14	433 Eros	34.4×11.2×11.2
Deep Space 1(深空1号)	1998/10/24	1999/7/29	9969 Braille	2.1×1.0×1.0
		2001/9/21	19P/Borrelly	8×4×4
STARDUST(星尘号)	1999/2/7	2002/11/2	5535 Annefrank	6.6×5.0×3.4
		2004/1/2	81P/Wild	5.5×4.0×3.3
		2011/2/15	9P/Tempel	7.6×4.9
Deep Impact(深度撞击器)	2005/1/12	2005/7/4	9P/Tempel	7.6×4.9
		2010/11/4	103P/Hartley	2.2×0.5
Dawn(黎明号)	2007/9/27	2011/7/16	4 Vesta	578×560×458
		2015/2/1	1 Ceres	487.3×454.7
OSIRIS-REx	2016/9/9	2018/8/1	101955(Bennu)	0.56

号探测器的主探测器飞掠Tempel-1彗星,其返回舱携带采集到的星际尘埃和彗星微粒于2006年1月5日返回地球,这是人类第一次从彗星上采样返回。深度撞击器在2005年7月4日以37000 km/h的速度与Tempel-1彗星的慧核相撞,这是国际上第一个激起彗星表面物质的探测任务。黎明号探测器分别于2011年7月和2015年3月到达灶神星(Vesta)和谷神星(Ceres)轨道,是国际上首个两颗主带小行星探测任务,该探测器目前仍在工作。探测结果显示,灶神星有类似于类地行星的核、幔、壳结构和早期演化史,可能是遗留的原生行星(proto-planet);谷神与灶神星差别很大,表面的化学组成与C-型小行星大致相同。红外光谱探测表明,其表面含有丰富的水合矿物,暗示其内部存在大量的水。其表面存在明显的亮斑,反照率约40%,这是反射太阳光的冰或者盐类。

2016年9月9日发射的OSIRIS-REx探测器,已于2018年12月3日中午12时10分抵达了Bennu小行星,计划2020年7月实施取样任务,2021年开始返程,2023年返回地球。这是NASA第一次小行星采样返回任务,其目标是对Bennu小行星(C类)采样,采集>60 g风化物质,构建小行星全球地质地形数据库。

4.1.2 ESA小行星探测任务

ESA已成功发射小天体探测器2个,共飞掠行星或彗星5个,完成环绕附着1次。探测器信息如表8所示。

Giotto(乔托号)探测器于1986年3月14日在距离哈雷彗星500 km处拍摄到首张慧核照片,是国际上第一个拍摄到慧核照片的探测器,也是首个近距离接触两颗彗星的探测器。在执行任务过程中,乔托号探测器受到星际尘埃撞击后处于“休眠”状态,随后在1990年7月2日重新被激活,是首个“休眠”后再启动的深空任务探测器^[61]。

Rosetta(罗塞塔号)探测器发射于2004年3月2日,主要任务是探测彗星67P/Churyumov-Gerasimenko,在其飞行途中分别对小行星2867 Steins和21 Lutetia进行飞越探测,是国际上第一个彗星绕飞及彗星表面着陆原位探测的任务,是ESA目前历时最长、挑战最大的深空探测任务^[62]。2867 Steins是Rosetta计划飞越的两颗小行星中的第一颗,轨道器成像系统的探测结果显示,Steins形如钻石,其表面有一个直径约为2.1 km的撞击坑。此次飞越测定的Steins小行星大小为6.67 km×5.81 km×4.47 km。通过飞越探测,Rosetta探测器测定了21 Lutetia的质量为 $(1.700\pm 0.017)\times 10^{18}$ kg,比飞越前预估的质量 2.57×10^{18} kg小,因此Lutetia的孔隙度可能在10%~15%,其密度为 (3.4 ± 0.3) g/cm³,超过了一般的石质陨石的密度。

4.1.3 日本小天体探测任务

日本目前已成功发射深空探测器2个,飞掠小行星1个,完成取样返回任务1次,是国际上首个完成小行星

表8 ESA小天体探测任务

Table 8 ESA small object exploration mission

探测器	发射日期	飞掠日期	探测天体	天体尺寸(km)
Giotto(乔托号)	1985/7/2	1986/3/14	1P/Halley	15×8
		1992/7/10	26P/Grigg-Skjellerup	2.6
Rosetta(罗塞塔号)	2004/3/2	2008/9/5	2867 Steins	6.67×5.81×4.47
		2010/7/10	21 Lutetia	121×101×75
		2014/8/6	67P/Churyumov-Gerasimenko	4

取样返回任务的国家。

早在1996年,日本计划实施探测器名为Muses-c,以Nereus小行星为探测目标的深空探测任务,后来探测器名调整为Hayabusa(隼鸟)。隼鸟探测器发射于2003年5月9日,在2005年9月12日完成对25143 Itokawa表面取样任务后,于2007年4月从小行星出发返回地球,最终于2010年6月13日在澳大利亚成功着陆回收^[63]。隼鸟号探测器完成了对Itokawa小行星采样、验证光学导航新技术、释放表面运动机器人、进行小行星表面悬停和附着、着陆、样本采样和返回等多项既定任务,是国际上首次小行星采样返回任务和首次光学导航着陆技术验证。高分辨率的观测结果表明,25143 Itokawa整体形状非常接近于一只具有头部和身体的海獭,与其他S型小行星相比,密度明显偏低,仅为 1.95 g/cm^3 。以上各种特性都说明,25143 Itokawa不是一个单一致密的天体,而是碎石的聚集体。对返回样品在地面实验室中进行了氨基酸、多环芳香烃等有机化合物的分析测试,结果证明,Itokawa的有机化合物属于非生物成因。

在隼鸟号探测器成功的基础上,日本于2014年11月30日成功发射了以1999JU3小行星为探测目标的Hayabusa-2(隼鸟2号)探测器,其目标是对C类小行星Ryugu进行采样探测、验证小行星深层物质采样技术。隼鸟2号探测器于2018年7月到达目标小行星附近,2019年2月实施了以科学技术测试为目的的撞击实验,2019年7月第二次在1999JU3表面着陆采样,计划2019年11月离开1999JU3,2023年返回地球,是国际首次C类小行星采样返回任务。

4.1.4 我国小天体探测任务

我国首次小行星飞越观测由嫦娥-2月球探测器在2012年12月完成,中国也成为继美国、欧盟、日本后第4个实施小行星探测任务的国家,为我国深入开展小行星探测任务奠定了工程实践基础。嫦娥-2任务中,利用日地拉格朗日L2点的伴随地球绕日运动特性,在国

际上首次实现了从L2点飞越小行星的轨道转移,成功飞越4179图塔蒂斯(Toutatis)小行星。其中,最近飞越距离仅为770 m,且在 10.7 km/s 的高速交会条件下,利用星载CMOS轻小型相机获得了最高分辨率优于3 m的光学图像,并以此估算小行星的长度和宽度不超过 $4.75 \text{ km} \times 1.95(1 \pm 0.1) \text{ km}$ 。此外,还测算分析了图塔蒂斯表面撞击坑和岩块的大小和分布特征,建立了该小行星的光学多面体模型。研究结果表明,该小行星曾遭受大量小天体撞击,其中南部地区直径近800 m的大型撞击坑由直径约50 m的撞击体轰击形成,由此提出Toutatis很可能是一颗具有碎石堆结构的密近双小行星^[64]。

此外,2015年,中国空间技术研究院联合中国科学院、高校与包括Open大学、巴黎天文台在内的多个欧洲研究机构共同提出MarcoPolo-2D项目,并申请了ESA的Cosmic Vision M4计划任务,拟完成2011 SG286小行星的取样返回任务,但该任务由于多种原因被取消。在该任务中,中方承担的是轨道器及返回舱的总体负责并提供运载。

4.2 资源利用现状

4.2.1 小行星的资源与开发成本分析

(1) 小行星的资源分类。小行星的资源分为两大类:一类是其科研资源,一类是其矿产资源。

小行星的科研资源是指其科学研究价值。到目前为止,几乎所有的小行星探测任务均是为了科学探索。通过小行星探测数据,特别是采样返回样品的研究,能够建立小行星与陨石实验室研究成果之间的联系,进一步研究太阳系成因及演化等科学问题。从这个意义上说,小行星探测成果和样品是一种重要的科研资源。

小行星的矿产资源是指其应用价值和经济价值。(a) 小行星上可能含有矿产资源,特别是铂族金属资源(如铂(Pt)、铑(Rh)、钌(Ru)、铱(Ir)、钯(Pd)、铼(Re)等),具有极高的商业价值;(b) 小行星上的水或者其他

挥发物以及铁(Fe)、镍(Ni)、硅(Si)等原材料,可用于未来深空探测的能源、推进剂、建筑和制造用原材料。

小行星可能的矿产资源包括: (a) C型小行星. 含有大量的水、挥发物等, 可用于生命维持、燃料推进剂等探索工作. 使用小行星上的可用水可以降低任务成本. C型小行星也含有大量的有机分子、磷和其他可以用来种植作物的肥料. (b) S型小行星. 携带少量水, 但更具有开采价值, 因为它们含有多种金属矿产, 包括镍、钴和更有价值的金属, 如金、铂和铱. 10 m直径的S型小行星可含有约 6.5×10^5 kg的金属, 其中50 kg的金属是稀有金属, 如铂和黄金. (c) X型小行星. 很罕见, 但它的金属含量是S型小行星的10倍.

以3554号小行星Amun为例, 科学家们估算这颗直径约2.5 km的近地小行星中蕴含着价值超过20万亿美元的铂和其他金属矿藏. 因此, 小行星资源开发利用前景诱人.

(2) 近地小行星资源开采的成本与回报. 深空探测的轨道设计中, 两个重要的因素是速度增量(Δv)和飞行时间. 轨道间转移所需的速度增量越大, 用于改变速度所需要的推进剂就越多, 搭载返回的开采物质就越少, 开采的成本就越高. 飞行时间则取决于距离远近. 对于近地小行星而言, 较低的速度增量需求使得它们适合开采用于近地太空设施的建设材料, 大大降低了从地球运输补给的经济成本^[65]. 表9给出了部分近地小行星资源开采经济回报的估算^[66].

4.2.2 国外状况

美国一直在引领小行星资源开发与利用发展方向和抢占先机. 2010年起, NASA先后支持了“小行星重定

向任务”(Asteroid Redirect Mission, ARM)和“小行星机器人勘查任务”(Robotic Asteroid Prospector, RAP).

小行星重定向任务由NASA牵头, 联合国内外多所研究机构、大学和商业公司, 开展了深入论证工作. 2015年3月25日, NASA宣布其小行星抓捕任务将采用“石块拾取”方案.

小行星机器人勘查任务是美国提出的一项采用可重复使用探测器, 可在多个小行星工作的采样任务. 任务团队目前制定了2010~2070年的发展路线图, 以每15年为一个阶段: 2025年将实现12~18名宇航员在轨飞行, 可获取水、贵金属及其他科学样品; 2070年将实现96~210名宇航员在轨飞行, 可获取水、贵金属、土壤风化物、科学样品、结构材料、电磁防护等相关资源.

在政府立法保护、支持下, 一些实力雄厚的私人实体均迅速规划了各自的外空资源开发与利用路线图. 如深空工业公司(Deep Space Industries, DSI)、行星资源公司(Planetary Resources, PR)、沙克尔顿能源公司、王剑探索等纷纷计划在2030年左右实现近地小行星的矿产、水冰等资源的开发利用, 期望在未来火星探测任务中, 为其提供近地空间的太空加工制造、燃料补给, 实现人类太空移民和空间旅行等任务.

4.2.3 国内状况

中国空间技术研究院在探月三期、火星探测等深空探测任务实施中积累了丰富的工程技术经验. 其中, 钱学森空间技术实验室建立了行星宜居性及可持续探索研究团队, 从科学到技术开展了全链条研发, 已进行了原位资源利用(*in-situ* resource utilization, ISRU)技术

表9 部分近地小行星资源开采的经济回报^[66]

Table 9 Economic returns from exploitation of near-Earth asteroid resources^[66]

小行星	经济价值估计 (亿美元)	经济利润估计 (亿美元)	速度增量(km/s)	主要资源
Ryugu	950	350	4.633	镍、铁、钴、水、氮气、氢气、氨
1989 ML	140	40	4.888	镍、铁、钴
Nereus	50	10	4.986	镍、铁、钴
Didymos	840	220	5.162	镍、铁、钴
2011 UW158	80	20	5.187	铂、镍、铁、钴
Anteros	55700	12500	5.439	硅酸镁、铝、硅酸铁
2001 CC21	1470	300	5.636	硅酸镁、铝、硅酸铁
1992 TC	840	170	5.647	镍、铁、钴
2001 SG10	40	6	5.880	镍、铁、钴
2002 DO3	3	0.6	5.894	镍、铁、钴

的原理性开发和试验,包括:(1)光热水资源原位高效提取;(2)太阳能高效聚光;(3)地外人工光合作用;(4)星壤原位资源储能发电;(5)原位资源制造(3D打印、激光成型等);(6)原位资源熔融致密化处理等.中国空间技术研究院502所开展了高功能密度水基能源-推进一体化动力系统研发,研制了高能密度水基能源-推进一体化动力系统样机,包括适用于微小卫星的总重1 kg、主推力0.5 N、功率10 W样机,和适用于中高轨卫星平台的主推力100 N、比冲360 s、功率200 W的涡流冷却轨控发动机样机等.

4.3 小行星资源利用发展趋势与国内差距

4.3.1 发展趋势

(1) 小行星资源开发价值日益凸显.小行星稀有金属含量丰富,同时具有体积小、轨道易改变的特点,成为潜在的“地外矿藏”.小行星原位资源利用的实现,将大大减少从地球的物质和能源补给需求,降低未来深空探测的发射质量、成本和风险;使人类具备“脱离地球的生存能力”,成为可持续太空探索的基础;催生地月经济圈、地外天体采矿、太空制造等新兴商业领域发展;成为新航海时代大国开疆扩土、争取战略资源、竞相抢占的“太空岛屿”.

(2) 新一轮国际太空竞争热潮正在暗中涌动.小行星探测不仅存在潜在的重大原创科学成果,而且兼顾新技术演示验证,技术带动性强.小行星探测与资源开发利用正在成为太空技术试验场,以小行星为热点的新一轮国际太空竞争热潮正在暗中涌动.与冷战时期美苏太空争霸不同,此次不是太空竞赛,而是太空竞争,其主要战略意图仍然是大国间综合国力的竞争,具体体现在确保或提升大国地位,增强科技、经济与军事的国际竞争力.

(3) 开展国际合作和商业化是大势所趋.近地小行星资源开采尚处在起步阶段.小天体探测的国际趋势是对太阳系不同位置(内、外太阳系)采样和采样返回.小行星探测与资源开发利用技术复杂,从目前正在实施的小行星任务模式来看,国际合作方式已趋于主流.同时,民间资本和民营企业活跃,积极参与,国际上围绕小行星的各种商业太空活动(如小行星采矿、月球任务和太空旅行等)方兴未艾.

4.3.2 我国的差距

美、日、欧盟等航天国家和机构小行星探测与资源开发利用成果显著,发展脉络清晰,已完成S、C类小

行星多任务多方式探测,正由远距飞越观测、近距绕飞观测向着陆原位、取样返回逐次发展.

美、日、欧盟均已经规划了新的小行星取样返回、撞击探测、小行星带多目标探测、彗星取样等多类任务.比如,美国的“Lucy”特洛伊带(2021)、“Psyche”灵神星(2023);欧/美的“AIDA”近地小行星撞击与偏转评估任务;欧洲的“马可波罗”任务、D类近地小行星取样返回;日本的“隼鸟-2Mk”任务、D/P类小行星探测取样返回.

相比而言,我国与国外的差距较大,主要表现在:(1)还没有明确的小行星探测计划.(2)功利性较强、规划性较差,往往是任务牵引取代了科学牵引,任务后的科学成果不显著.(3)对小行星探测、监测数据库的建设和数据发布、科普重视不够、能力不足.

5 小行星有关的政策法律与国际合作问题

5.1 小行星有关的国际法现状

外层空间法律体系的建立始于1959年“联合国和平利用外层空间委员会”(the UN Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, UNCOPOUS,简称“外空委”)的正式成立.外空委是联合国制定外层空间法规的主要机构,它制定了一系列规范外空利用的条约,并对相关的外空利用问题做了规范.

目前联合国大会通过的以“探索和利用外层空间”为主题的决议、原则和宣言共有5个,包括《外空条约》《月球协定》《登记公约》《责任公约》《营救协定》.关于资源开发与利用的内容就是《外空条约》和《月球协定》,体现了外空资源属于全人类共同利益、自由探索和利用、禁止据为己有、保护外空环境、防止外空军事化、遵守国际法等原则和规定.

《外空条约》是规范外空活动的宪章性文件,将外空活动概括为科学考察、探索和利用,确立了适用于外空所有活动的基本原则,具体规则留待专门条约确立.《外空条约》允许非政府实体经批准从事外空活动,即条约允许商业利用外空.《外空条约》适用范围不仅包括月球本身,还包括太阳系内除地球以外的其他天体及月球轨道.但是,各国对“利用”是否包括开采外空资源有不同意见.《月球协定》至今只有18个缔约国,美国、中国等多数航天国家拒绝加入,远未获得普遍接受,对开采外空资源的规范效力十分有限.

分析《外空条约》等涉及小行星相关各领域的法

律法规可知, 现行国际法中并没有关于小行星观测预警、安全防御及资源开采的直接法律法规。

首先, 小行星安全防御涉及若干敏感法律问题, 需要构建外空使用武器、核武器的国际法律规则, 明确小行星安全防御措施在军事领域应用的合法性及其法律限制。同时, 小行星安全防御措施也可能导致对第三国的损害法律问题, 也需要平衡小行星安全防御中人类共同利益与国家安全利益的关系。

其次, 并非所有的小行星都是天体, 非天体类小行星和属于天体的小行星的法律地位和法律性质各异, 不同法律属性的小行星自然资源直接影响各国是否有权单方开采, 也影响通过捕获方式开采小行星自然资源的合法性。就现有国际法律而言, 小行星不是人类共同财产, 只是人类共有物, 外空条约不排除私人 and 实体开采小行星, 也不排除捕获、摧毁、移走小行星、获取小行星资源, 移走和提取的小行星资源都应属于私有财产。

最后, 目前在国际合作领域只有指导性意见和部分国家间的多边合作, 并无国际层面的统一机制框架。国际社会有必要在联合国框架下确立小行星观测预警、安全防御方面有实施力的国际合作模式、途径及原则, 并构建小行星自然资源开采国际机制。

需要指出的是, 2015年底, 美国通过了《2015外空资源探索和利用法》, 为私人实体进行小行星采矿提供了法律依据, 赋予了私人实体对其开采的任何小行星资源或外空资源的各项权利, 包括占有、拥有、运输、使用和出售的权利。美国的立法引发了学术界的研究和讨论, 批评和赞许的声音都有, 认为美国立法的合法性有待于国家实践确认。美国的立法带动了其他国家类似立法。比如, 卢森堡的《探索和利用外空资源法》于2017年8月生效; 阿联酋、古巴等已有立法计划, 英国、拉脱维亚等已有立法举动。美国的立法也推动了政府层面的国际谈判。2016年以来, 比利时、巴西、希腊等国提议在联合国外空委法律小组设立工作组, 讨论探索、开发和利用外空资源所涉及的法律问题。

5.2 小行星有关的法律与国际合作建议

从起步跟踪、能力赶超、军民融合、人类命运共同体、负责任大国、构建新型国际关系等多维角度来看, “小行星监测预警、安全防御及资源利用”都是非常好的国际和多边合作平台。我国应在近地天体领域运筹中国能起领导作用的多边平台, 着眼于未来, 为我

国争取话语权和发展空间。

(1) 体现大国担当。在“构建人类命运共同体”思想指引下, 主动把握历史机遇, 发挥负责任大国作用, 积极参与联合国框架内建立外空资源开发利用国际规则和制度谈判, 积极参与相关国际组织活动和国际合作。遵守国际法, 注重国际形象, 不为所欲为, 为我国航天强国建设营造良好的外部规则环境, 在人类外空治理体系中发挥积极的重要作用。

(2) 抢占发展先机。“小行星监测预警、安全防御及资源利用”为核心的外空活动涉及国家经济、国家安全、大国身份, 是大国必争的战略制高点。国家必须加大对深空探测领域的投入, 大力发展空间技术, 抢占外空资源开发利用先机才是硬道理。同时鼓励社会资本和私人实体积极参与外空资源开发利用。在发展航天硬实力的同时, 注重发展航天软实力, 为提高国际话语权、建立新的国际秩序提供强有力的技术支撑。

(3) 加快航天立法。积极应对航天市场化和商业化快速发展的趋势, 加快构建我国航天法律法规体系, 特别是规范和促进与小行星资源开发利用有关的法规、规章等。借此推动国际社会重启月球协定谈判、修订, 掌握国际立法引导、主导权。

6 前沿科学问题与关键技术

6.1 小行星监测预警方向

主要科学问题包括(不限于): (1) 小行星精确轨道预报问题; (2) 快速定轨、高精度轨道改进; (3) 小行星轨道演化动力学模型; (4) 小行星轨道共振与结构稳定性问题; (5) 小行星撞击风险预报方法等。主要关键技术包括(不限于): (1) 大口径光学望远镜技术; (2) 多光谱/红外光谱仪技术; (3) 可见光干涉测量技术; (4) 超大成像传感器阵列技术; (5) 天基平台高精度跟踪姿控技术; (6) 天地一体化组网探测技术。

6.2 小行星撞击防御方向

主要科学问题包括(不限于): (1) 小行星进入大气层的超高速空气动力学问题; (2) 小行星对地表(陆地和海洋)的超高速撞击问题; (3) 动能撞击小行星过程的动态响应和能量传递规律; (4) 动能撞击下小行星轨道的偏移问题; (5) 长期作用力作用下小行星轨道的偏移问题; (6) 多种防御技术协调作用测量和效能评估; (7) 小行星撞击危害评估方法; (8) 防御技术作用机理及地面

演示验证试验等. 主要关键技术包括(不限于): (1) 多任务多目标轨道设计问题; (2) 深空自主导航与控制技术; (3) 高效能源与推进技术等.

6.3 小行星资源利用方向

主要科学问题包括(不限于): (1) 小行星带的形成及轨道演化; (2) 小行星的物质组成、结构、状态、形貌及其形成与演化; (3) 新的太阳系原始物质与太阳系的成因和演化历史; (4) 小行星母体内部的熔融分异机制; (5) 小行星中的水和有机成分及地球生命起源; (6) 小行星蕴涵的恒星物质与恒星形成演化; (7) 小行星表面的太阳风和太阳高能粒子与太阳活动; (8) “活跃小行星”(或称冰质小行星, 也叫主带彗星)与太阳系的成因和演化等. 主要关键技术包括(不限于): (1) 轨道设计及动力学研究; (2) 导航与制导控制技术; (3) 先进电推进技术; (4) 微引力天体附着采样技术; (5) 超高速再入返回技术; (6) 以科学目标为核心的先进载荷技术; (7) 水、氧等提取技术; (8) 微引力环境下的加工成型和操作技术; (9) 小行星表面能量利用技术; (10) 小行星表面推进剂获取与制备技术; (11) 原位资源制造技术等.

7 发展目标与建议

我国正在从航天大国走向航天强国, 在小行星监测预警、安全防御、资源利用相关问题上应该有大国思维和长远眼光. 应该做好顶层规划, 同时整合现有资源, 尽快明确小行星监测预警、安全防御和资源利用政府管理部门, 尽快组建我国相应专家组; 系统部署、逐次开展关键技术攻关、基础设施建设、宇航任务设计与实施; 坚持工程和科学目标相结合并积极推动科普教育.

此领域国际合作的必要性和重要性十分突出. 国家应该支持、鼓励和深化国际合作, 积极履行我国在联合国外空委、IAWN, SMPAG等国际机构和组织中的大国责任和义务, 体现我国的能力与实力, 增加我国相关领域在国际上的发言权, 力争主导国际合作. 我国在开展相关研究和工作时, 应该遵守已有国际政策与法规, 同时也要积极介入修改现有国际政策与法规, 在强大的技术实力支撑下争取自身的合法权利, 争取主导相关国际法规的制定. 在小行星防御领域逐步组建一支高水平、国际化的技术、科研及管理队伍.

(1) 监测预警. 我国近地天体监测预警后续发展应

根据现有基础找出自己的研究亮点, 量力而行, 开展弥补国外空白的研究. 监测、预警、编目必须是天地一体化, 做到地基有基本手段, 天基有中国特色. 应该系统考虑国内布局, 充分利用、发挥已有的空间碎片监测网的作用, 以地基望远镜组网巡天长期观测为主, 以天基望远镜开展针对性特性巡天为辅. 地基望远镜组网满足全球时区覆盖, 实现不间断观测, 南北半球多纬度布站提高天区覆盖的完备性, 近地天体编目巡天和基本物理特性勘察并重, 并大力发展近地天体监测预警软件系统. 在政府发挥主导作用的同时, 要充分考虑监测预警的商业化发展.

力争在2030年实现近地天体天地一体化监测预警网络的日程运行, 执行近地天体常态化监测、预警业务. 对有严重破坏力(直径 >140 m)的天体提供长期监测和预报, 对可测天区内有局部破坏力(直径约30~50 m)的天体提前24 h预报. 建立国际协作监测体系及信息共享机制, 开展近地天体灾害评估、减缓方案及相关科学的研究, 积极开展近地天体相关的科学普及和人才培养工作.

(2) 安全防御. 尽快建立我国小行星防御应急响应机制. 组建国家小行星防御研究中心, 集中优势力量统一开展小行星防御有关研究. 构建能满足需求的小行星防御地面演示验证平台及仿真平台, 形成撞击风险预测、评估与防御任务设计、地面模拟演练能力, 支撑应对小行星撞击事件的决策和危害减缓措施. 在2025年突破小行星动能撞击防御和激光烧蚀偏转防御关键技术, 形成动能-激光偏转组合技术防御任务设计能力, 为防御特定任务提供可供选择的实施方案. 在2030年具备小行星防御技术在轨演示验证和防御任务实施能力.

(3) 资源利用. 加强任务牵引. 与我国火星探测及载人登月等重大深空探测任务紧密结合, 以近地小行星和月球原位资源利用为近期目标, 以火星原位资源利用为中长期目标, 制定符合我国国情的地外原位资源利用发展路线图. 梳理原位资源利用对深空探测任务的支撑关系, 逐级构建原位资源利用技术体系, 深层解析体系关键技术和核心问题.

加强行星科学、航天技术、重大工程结合, 推动物理、化学、工程科学等多学科交叉, 协调原位资源探测、提取、处理、转化、制造、建造等全链条发展.

力争在2025年突破水、氢、氧、金属等资源的开

发与利用技术, 实现在轨搭载验证. 在2030年实现小行星资源原位利用和在轨补给, 降低深空探测与开发成本. 在2035~2040年正式启动外空资源开发与利用项目, 实现太空加工, 并建立相应的商业模式.

参考文献

- 1 Miller S D, Straka W C, Bachmeier A S, et al. Earth-viewing satellite perspectives on the Chelyabinsk meteor event. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 18092–18097
- 2 O’Keefe J D, Ahrens T J. Impact production of CO₂ by the Cretaceous/Tertiary extinction bolide and the resultant heating of the Earth. *Nature*, 1989, 338: 247–249
- 3 Joint Investigation Group of Kirin Meteorite Shower. The meteorite shower rare in world history (in Chinese). *Geochim*, 1976, 21: 157–159 [中国科学院吉林陨石雨联合考察组. 世界历史上一次罕见的陨石雨. *地球化学*, 1976, 21: 157–159]
- 4 Gong Z Z, Gao K J, Song G M, et al. Research progress and prospect of hypervelocity impact and its space application (in Chinese). *Mod Appl Phys*, 2018, 9: 040101 [龚自正, 高珂佳, 宋光明, 等. 超高速碰撞研究在航天领域的应用现状与展望. *现代应用物理*, 2018, 9: 040101]
- 5 Lange M A, Ahrens T J. Shock-induced CO₂ loss from CaCO₃: Implications for early planetary atmospheres. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 77: 409–418
- 6 Chen G, Tyburczy J A, Ahrens T J. Shock-induced devolatilization of calcium sulfate and implications for K-T extinctions. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 128: 615–628
- 7 Chapman C R. The hazard of near-Earth asteroid impacts on Earth. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 222: 1–15
- 8 Harris A W. The NEO Population, Impact Risk, Progress of Current Surveys, and Prospects for Future Surveys. Technical Report, Presentation to the Survey/Detection Panel of the NRC Committee to Review Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies, 2009
- 9 Ahrens T J, Takata T, O’Keefe J D, et al. Impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter. *Geophys Res Lett*, 1994, 21: 1087–1090
- 10 Larson S, Brownlee J, Hergenrother C, et al. The Catalina Sky Survey for NEOs. *Bull Am Astron Soc*, 1998, 30: 1037
- 11 Stokes G H, Evans J B, Vigg H E M, et al. Lincoln Near-Earth Asteroid Program (LINEAR). *Icarus*, 2000, 148: 21–28
- 12 Jewitt D. Project Pan-STARRS and the outer solar system. *Earth Moon Planets*, 2003, 92: 465–476
- 13 Helin E F, Rabinowitz D L, Pravdo S H, et al. Near-Earth Asteroid Tracking (NEAT): First year results. *Bull Am Astron Soc*, 1997, 29: 960
- 14 Koschny D, Busch M, Drolshagen G. Asteroid observations at the Optical Ground Station in 2010—Lessons learnt. *Acta Astronaut*, 2010, 90: 49–55
- 15 Zhang X, Ji J H. Ground-based radar detection of near-earth asteroids (in Chinese). *Prog Astron*, 2014, 32: 24–39 [张翔, 季江徽. 近地小行星地基雷达探测研究现状. *天文学进展*, 2014, 32: 24–39]
- 16 Vaduvescu O, Birlan M, Tudorica A, et al. EURONEAR—Recovery, follow-up and discovery of NEAs and MBAs using large field 1–2 m telescopes. *Planet Space Sci*, 2011, 59: 1632–1646
- 17 Ma P B, Baoyin H X. Research status of the near-earth asteroids’ hazard and mitigation (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2016, 3: 10–17 [马鹏斌, 宝音贺西. 近地小行星威胁与防御研究现状. *深空探测学报*, 2016, 3: 10–17]
- 18 You Z, Zhao Y S. Development of space situation awareness systems (in Chinese). *Aerosp Chin*, 2009, (9): 40–44 [尤政, 赵岳生. 国外太空态势感知系统发展与展望. *中国航天*, 2009, (9): 40–44]
- 19 Mainzer A, Grav T, Bauer J, et al. NEOWISE observations of near-Earth objects: Preliminary results. *Astrophys J*, 2011, 743: 156–162
- 20 Laurin D, Hildebrand A, Cardinal R, et al. NEOSat: A Canadian small space telescope for near Earth asteroid detection. In: *Proceedings of SPIE*, 2008. 701013
- 21 Wallace B, Pinkney F L, Scott R, et al. The Near Earth Object surveillance satellite. In: *Proceedings of SPIE*, 2004. 1–7
- 22 Zhao H B. Survey and risk assessment of near Earth asteroids (in Chinese). *Acta Astronaut Sin*, 2010, (3): 324–325 [赵海斌. 近地小行星探测和危险评估. *天文学报*, 2010, (3): 324–325]
- 23 Binzel R P. The Torino impact hazard scale. *Planet Space Sci*, 2000, 48: 297–303
- 24 Chesley S R, Chodas P W, Milani A, et al. Quantifying the risk posed by potential Earth impacts. *Icarus*, 2002, 159: 423–432
- 25 Chen C. Study on the debris dynamic behavior by laser-driven active removal and its applications (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China Academy of Space Technology, 2018 [陈川. 激光驱动移除空间碎片动力学行为及应用研究. 博士学位论文. 北京: 中国空间技术研究院, 2018]
- 26 Sanchez J P, Colombo C, Vasile M, et al. Multicriteria comparison among several mitigation strategies for dangerous near-Earth objects. *J Guidance Control Dyn*, 2009, 32: 121–142
- 27 Thiry N, Vasile M. Statistical multi-criteria evaluation of non-nuclear asteroid deflection methods. *Acta Astronaut*, 2017, 140: 293–307
- 28 Li F, Meng L Z, Wang T, et al. Summary of near Earth asteroid defense technology (in Chinese). *Spacecr Eng*, 2015, 24: 87–95 [李飞, 孟林智, 王彤, 等. 国外近地小行星撞击地球防御技术研究. *航天器工程*, 2015, 24: 87–95]

- 29 Barbee B W, Wie B, Steiner M, et al. Conceptual design of a flight validation mission for a hypervelocity asteroid intercept vehicle. *Acta Astronaut*, 2015, 106: 139–159
- 30 Lomov I, Herbold E B, Antoun T H, et al. Influence of mechanical properties relevant to standoff deflection of hazardous asteroids. *Proced Eng*, 2013, 58: 251–259
- 31 Hammerling P, Remo J L. NEO interaction with nuclear radiation. *Acta Astronaut*, 1995, 36: 337–346
- 32 Michael J S B, Thomas H M, Nalin H S, et al. *Mitigation Hazards Comets Asteroids*. New York: Cambridge University Press, 2004. 113–140
- 33 Liu L, Ji J H. A numerical research on the orbital evolution of the NEAs and investigation about the effectiveness of symplectic algorithm (in Chinese). *Acta Astronaut Sin*, 1998, 39: 141–152 [刘林, 季江徽. 近地小行星轨道演化的数值研究与辛算法有效性的探讨. *天文学报*, 1998, 39: 141–152]
- 34 A'Hearn M F, Belton M J S, Delamere W A, et al. Deep impact: Excavating comet Tempel 1. *Science*, 2005, 310: 258–264
- 35 Cheng A F, Atchison J, Kantsiper B, et al. Asteroid impact and deflection assessment mission. *Acta Astronaut*, 2015, 115: 262–269
- 36 Ji J H, Liu L. The problem of the near-Earth asteroids encountering the Earth. *Sci China Ser A-Math*, 2000, 43: 1114–1120
- 37 Wie B, Zimmerman B, Lyzhoft J, et al. Planetary defense mission concepts for disrupting/pulverizing hazardous asteroids with short warning time. *Astrodynamic*, 2017, 1: 3–21
- 38 McInnes C R. Near Earth Object orbit modification using gravitational coupling. *J Guidance Control Dyn*, 2007, 30: 870–873
- 39 Lu E T, Love S G. Gravitational tractor for towing asteroids. *Nature*, 2005, 438: 177–178
- 40 Drube L, Harris A W, Hoerth T, et al. NEOSHIELD: A global approach to Near-Earth Object, impact threat, mitigation. *Proc Int Astron Union*, 2015, 10: 478–479
- 41 Spitale J N. Asteroid hazard mitigation using the Yarkovsky effect. *Science*, 2002, 296: 77
- 42 Bombardelli C, Baù G. Accurate analytical approximation of asteroid deflection with constant tangential thrust. *Celest Mech Dyn Astr*, 2012, 114: 279–295
- 43 Colombo C, Vasile M, Radice G. Semi-analytical solution for the optimal low-thrust deflection of Near-Earth Objects. *J Guida Control Dyn*, 2009, 32: 796–809
- 44 Gong Z Z, Xu K B, Mou Y Q, et al. The space debris environment and the active debris removal techniques (in Chinese). *Spacecr Environ Eng*, 2014, 31: 129–135 [龚自正, 徐坤博, 牟永强, 等. 空间碎片环境现状与主动移除技术. *航天器环境工程*, 2014, 31: 129–135]
- 45 Chen C, Gong Z Z, Yang W L, et al. Influence of geometry of space debris on laser ablation impulse (in Chinese). *Chin J High Pressure Phys*, 2018, 32: 040101 [陈川, 龚自正, 杨武霖, 等. 空间碎片几何形状对激光烧蚀冲量的影响规律. *高压物理学报*, 2018, 3: 040101]
- 46 Chen C, Yang W L, Gong Z Z, et al. Research progress in laser active debris removal of CAST. *Aerosp Chin*, 2018, 19: 3–19
- 47 Phipps C R, Bonnal C. A spaceborne, pulsed UV laser system for re-entering or nudging LEO debris, and re-orbiting GEO debris. *Acta Astronaut*, 2016, 118: 224–236
- 48 Lubin P, Hughes G B, Bible J, et al. Toward directed energy planetary defense. *Opt Eng*, 2014, 53: 025103
- 49 Chen C, Yang W L, Yu Q, et al. A laser driven relay small satellite constellation for space debris active removal and feasibility study (in Chinese). *J Astron*, 2019, 40: 156–163 [陈川, 杨武霖, 余谦, 等. 激光驱动接力移除空间碎片的小卫星星座及可行性研究. *宇航学报*, 2019, 40: 156–163]
- 50 Snively L O, Oneill G K. Mass driver III-construction, testing and comparison to computer simulation. *Space Manufactur*, 1983, 1983: 391–401
- 51 Olds J, Charania A C, Schaffer M G. Multiple mass drivers as an option for asteroid deflection missions. In: 2007 Planetary Defense Conference, Washington DC. 2007. S3-7
- 52 Bombardelli C, Urrutxua H, Merino M, et al. The ion beam shepherd: A new concept for asteroid deflection. *Acta Astronaut*, 2013, 90: 98–102
- 53 Vaughan R M, Riedel J E, Davis R P, et al. Optical navigation for the Galileo Gaspra encounter. In: AIAA/AAS Astrodynamics Conference, 1992
- 54 Prockter L, Murchie S, Cheng A, et al. The NEAR shoemaker mission to asteroid 433 Eros. *Acta Astronaut*, 2002, 51: 491–500
- 55 Dunham D W, McAdams J V, Farquhar R W. NEAR mission design. *Johns Hopkins APL Tech Dig*, 2002, 23: 18–33
- 56 Dunham D W, McAdams J V, Mosher L E, et al. Maneuver strategy for NEAR's rendezvous with 433 Eros. *Acta Astronaut*, 2000, 46: 519–529
- 57 Rayman M D, Varghese P, Lehman D H, et al. Results from the Deep Space 1 technology validation mission. *Acta Astronaut*, 2000, 47: 475–487
- 58 Desai P N, Lyons D T, Tooley J, et al. Entry, descent, and landing operations analysis for the stardust entry capsule. *J Spacecraft Rockets*, 2008, 45: 1262–1268
- 59 Owen Jr W M, Mastrodemos N, Rush B P, et al. Optical navigation for deep impact. *Adv Astronaut Sci*, 2006, 124: 1231–1250
- 60 Rayman M D, Patel K C. The Dawn project's transition to mission operations: On its way to rendezvous with (4) Vesta and (1) Ceres. *Acta Astronaut*, 2010, 66: 230–238
- 61 Wood L J, Mottinger N A, Jordan J F. Radio metric orbit determination for the Giotto mission to Comet Halley. In: American Institute of

Aeronautics and Astronautics, Aerospace Sciences Meeting, 1983

- 62 Küppers M, Vallat C, Dhiri V, et al. Science operations planning of the rosetta encounter with comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. In: SpaceOps 2010 Conference Delivering on the Dream Hosted by NASA Marshall Space Flight Center and Organized by AIAA. 2010. 2167
- 63 Kawaguchi J, Fujiwara A, Uesugi T. Hayabusa—Its technology and science accomplishment summary and Hayabusa-2. *Acta Astronaut*, 2008, 62: 639–647
- 64 Ouyang Z Y. Chang'E-2 preliminary results (in Chinese). *Chin J Nat*, 2013, 35: 391–395 [欧阳自远. 嫦娥二号的初步成果. *自然杂志*, 2013, 35: 391–395]
- 65 Giorgini E, Tosi G, Bocelli G. Molecular associations of hydrazones. X. Dihydrazones as twin-site donors. *J Crystlogr Spectrosc Res*, 1992, 22: 443–447
- 66 Mazanek D D, Merrill R G, Brophy J R, et al. Asteroid Redirect Mission concept: A bold approach for utilizing space resources. *Acta Astronaut*, 2015, 117: 163–171

Summary for “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”

The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning, security defense and resource utilization

Zizheng Gong^{1*}, Ming Li², Chuan Chen¹ & Changyin Zhao³

¹ Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

² China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

³ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China

* Corresponding author, E-mail: gongzz@263.net

The asteroid impact on the Earth has been frequently occurred in history, and it caused the earth environmental catastrophe and biological extinction more than once. It was thought to be one of the major potential threats of human safety and survival, and it's a hot issue of general concerned in the international community.

Meanwhile, near-Earth asteroids (NEA) are one of the most valuable goals for near term space exploration and resource developing and utilization, and it is also a “natural springboard” for forward space exploration. They are becoming the nature laboratory and test ground for human beings to enhance and display their new skills. They are thought to be “space islands” and the competition goal for the great powers to expand their territory, strive for strategic resources and compete to seize in the era of space navigation, during the age of nowadays space sailing. It will produce and promote the whole industrial chain of space economy development, such as economic circle of earth-moon, the mining of outer earth, and space manufacturing. Open up a new space era. Asteroid study has great scientific significance, it will deepen human understanding of the cutting-edge science for the origin and evolution of solar system, the universe, and also the life.

How to defend against asteroids impact on the earth is also one of the major technical challenges facing the international space society. It is closely related to national security, and is a strategic and technical high point for great powers.

The defense of asteroids impacting the Earth is also one of the major technical challenges facing the international space society. It is closely related to national security and is the strategic and technological commanding heights that big powers must contend for.

Monitoring, early warning and defense of NEA, are not only the necessary measures to fulfill the obligations of the great powers, embody the role of a big country, establish and improve the image of a responsible big country, compete for the right and voice of our country in international space affairs, but also the inevitable choice of human protection of its own survival and development. It is also an important embodiment for the building of a community with shared future for humanity. Therefore, its importance, necessity and urgency are self-evident.

In this paper, the present situation and development trend of NEA monitoring and warning, defense and resource utilization were comprehensive introduced and reviewed in detail. The frontier scientific problem, key technologies and relevant regulations and international cooperation issues were deeply discussed and systematically summarized. In view of the current situation of China, the problems and gaps in these fields were seriously analyzed. Based on the development requirements of China, from multiple dimensions, such as the top layout, systematic planning, scientific research, technical development, engineering implementation, construction of regulations and law, international cooperation, complete development goals and suggestions of China are proposed.

China is moving from a big space country to a powerful space country. We should have a big country's thinking and long-term vision on the utilization of resources for safety and defense of asteroid surveillance and early warning, and carry out actions at all levels as soon as possible.

near-Earth asteroid, monitoring and early warning, security defense, resource utilization

doi: [10.1360/TB-2019-0425](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0425)