

小行星防御在轨处置技术研究进展

吴伟仁^{1,2}, 唐玉华^{1,2}, 李明涛^{3,4}

(1. 深空探测实验室 北京 100195; 2. 探月与航天工程中心 北京 100195; 3. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 101499;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 近地小行星撞击是人类社会面临的重大灾难性威胁, 实施在轨处置是防范化解近地小行星撞击风险的最佳途径。系统梳理了近地小行星防御在轨处置技术的发展现状, 对核爆、动能撞击、引力牵引、离子束偏移、激光烧蚀、拖船、质量驱动、表面喷涂等在轨处置技术的关键技术、优缺点、适用场景等进行了全面综述, 提出了近地小行星防御在轨处置技术的发展建议。

关键词: 近地小行星; 行星防御; 在轨处置; 动能撞击; 在轨验证

中图分类号: P185.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)04-0345-12

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230111

引用格式: 吴伟仁, 唐玉华, 李明涛. 小行星防御在轨处置技术研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(4): 345-356.

Reference format: WU W R, TANG Y H, LI M T. Research progress in asteroid defense on-orbit disposal technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(4): 345-356.

引言

近地小行星撞击是人类社会面临的重大灾难性威胁。历史上近地小行星撞击地球的事件多次发生, 造成地球气候环境的变化, 甚至引发物种灭绝。科学界普遍认为, 6 500万年前一颗直径约10 km的近地小行星撞击地球, 导致了包括恐龙在内全球75%物种的灭绝^[1]。人类发展史上, 多次发生的区域性小行星撞击事件, 给人类生产生活带来了极大的危害, 1.2万年前新仙女木事件可能导致了北美克劳维斯人的灭绝^[2]; 明代甘肃庆阳陨石雨事件可能导致了大规模的人员伤亡^[3]; 1908年通古斯大爆炸焚毁了超过2 000 m²的原始森林^[4-6]; 2013年车里雅宾斯克事件导致接近1 500人受伤、3 000栋房屋受损^[7-9]。

从统计学角度看, 近地小行星撞击地球事件在未来发生的可能性极大。开展行星防御是构建人类命运共同体、赓续人类文明的必然要求^[10-11]。在远古时期, 亮星陨落被认为是不祥之兆, 但人类只能通过祈祷寻求上天的佑护。随着现代科学技术的进步, 人们对小行星陨落事件有了更科学的认知, 特别是航天技术的发展为防范化解小行星撞击风险提供了可能^[12]。以美国为代表的西方国家早在20世纪90年代就开展了小行星防御研究, 对动能撞击^[13]、核爆^[14]等技术手段进行

探索。2000年以来, 又先后提出了引力牵引^[15-16]、离子束偏移^[17]、拖船^[18]、激光烧蚀^[19-20]等多种技术手段。2013年车里雅宾斯克事件给人类社会带来极大的震撼, 引起了航天和天文界的高度关注, 小行星在轨处置技术进入快速发展时期, 提出了以“以石击石^[21]”“穿透棒^[22]”为代表的新概念在轨处置技术, 与传统处置手段共同形成了10余种在轨处置技术体系。2022年, 美国实施了全球首次小行星防御在轨试验——双小行星重定向测试(Double Asteroid Redirection Test, DART)^[23], 是人类在小行星防御领域取得的又一重大突破。随着小行星防御技术的不断发展, 人类必将掌握小行星撞击风险应对主动权, 为人类在地球上长远生存发展保驾护航。

本文首先根据航天器与小行星作用的方式, 对小行星防御在轨处置技术进行梳理分类; 分别对瞬时和持续作用在轨处置技术的发展现状方面进行全面综述; 从多角度对已有小行星防御在轨处置及关键技术进行分析; 最后提出近地小行星防御在轨处置技术的发展建议。

1 在轨处置技术分类

小行星在轨处置的目标是将小行星摧毁或者偏转

其轨道,以消除或减轻对地球的撞击威胁。摧毁是通过爆炸或撞击等方式将小行星破坏为小尺寸碎块,在大气层中烧蚀,从而消除或减轻小行星撞击灾害;

偏转是通过对小行星施加作用力,使得小行星远离地球^[24-27]。小行星在轨处置技术存在多种分类方式,如图1所示。

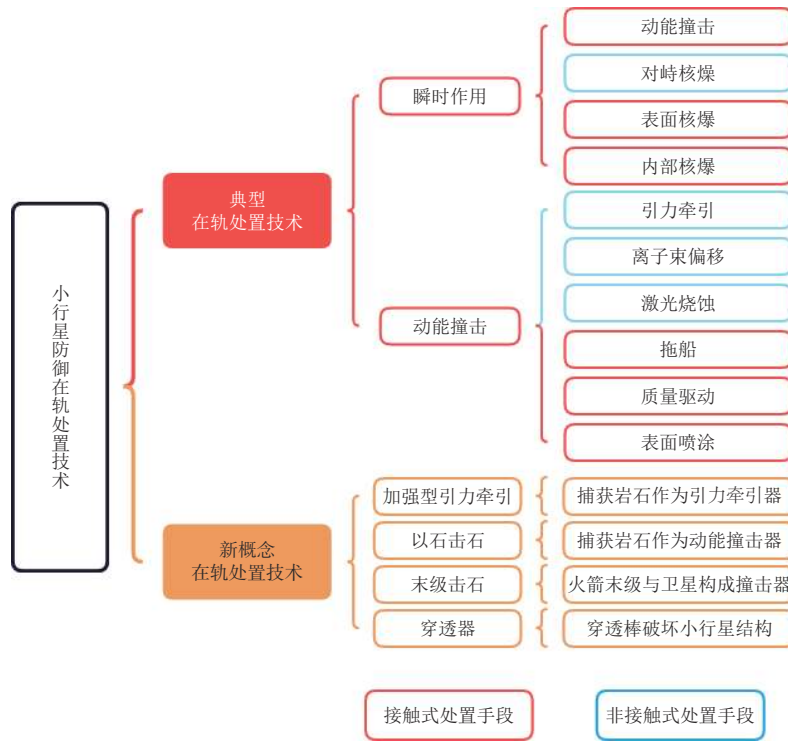


图1 近地小行星主要在轨处置技术分类

Fig. 1 Classification of near-Earth asteroid on orbit disposal technology

1) 按照航天器与小行星作用的方式,可分为瞬时和持续作用处置技术。瞬时作用处置技术指航天器与小行星的作用时间极为短暂,甚至为一瞬间,比如核爆或动能撞击;持续作用处置技术指航天器在较长的时间尺度对小行星持续施加微弱的作用力,从而缓慢改变小行星的轨道,比如引力牵引、离子束偏移、拖船、质量驱动等。

2) 按照航天器与小行星的接触方式,可以分为接触式和非接触式处置技术。一般来说,接触式处置技术对小行星的目标特性更为敏感,比如动能撞击等;非接触式在轨处置技术受目标特性影响更小,比如引力牵引、激光烧蚀等。

2 瞬时作用在轨处置技术

2.1 核爆处置技术

核爆是利用核装置的巨大能量摧毁小行星结构或者使小行星轨道发生偏转^[28-29]。其处置小行星主要有3种方式:对峙、表面和内部核爆。

对峙核爆是在距离小行星表面一定距离处引爆核

装置,通过核爆产生的高能射线将小行星表面物质升华,产生一定的推力,使得小行星轨道产生偏转避免撞击地球。表面核爆是在小行星表面引爆核装置,从而将小行星摧毁。内部核爆是在小行星内部引爆核装置,将小行星摧毁。

普遍认为对峙核爆是相对较为安全的处置手段^[30];内部核爆对小行星的摧毁效率更高,但实施难度大,主要在于如何将核装置安置于小行星内部。美国科学家提出了利用动能撞击器首先在小行星表面形成撞击坑,然后将核装置部署在撞击坑内再引爆超高速小行星拦截飞行器(Hypervelocity Asteroid Interception Vehicle, HAIIV)的方案^[31],如图2所示。

核爆产生的能量 Y_0 可描述为

$$Y_0 = Y_{WT} m_{wh} \quad (1)$$

其中: Y_{WT} 为当量质量比率; m_{wh} 为核弹的当量。

核爆的优势:①能量极高,可在较短的预警时间内处置近地小行星撞击风险;②处置方式简单、直接,适用场景较广。核爆的弊端:①在研制、试验、发射等环节存在安全风险;②处置效果不确定度大,

受小行星表面材质和结构影响很大; ③核爆产生的碎块仍然可能对地球构成一定的威胁, 从而造成次生灾

害; ④受到国际法的约束, 开展核爆处置小行星试验阻力较大^[32-34]。



图 2 超高速拦截飞行器 (HAIV) 概念^[31]

Fig. 2 Concept of hypervelocity asteroid intercept vehicle (HAIV)^[31]

出于安全性等考虑, 核爆一般作为其它处置手段无效时才被迫采取的措施。目前尚未有关于核爆处置小行星的在轨验证计划。美国提出了实施不携带核弹头的模拟核爆处置小行星在轨验证构想, 希望在未来开展其它处置技术在轨验证时, 开展核爆处置小行星的附带技术验证, 对核爆处置小行星进行真实爆炸之外的全流程模拟, 以提升核爆处置小行星技术的成熟度^[35]。

联合国空间任务咨询组 (Space Mission Planning Advisory Group, SMPAG) 将核爆处置小行星技术成熟度评价为 5~7 级^[36], 仍需突破关键技术, 包括携核航天器的安全技术、高速交会条件下实时引爆技术、核爆处置小行星的能量与动量传递机理、核爆对小行星的毁伤效应建模、核爆产生碎块次生灾害评估、核爆处置小行星的地面等效试验技术。

2.2 动能撞击处置技术

动能撞击是通过航天器以一定的角度高速撞击小行星, 使小行星轨道产生偏转, 从而远离地球。从技术成熟度和可操作性等方面, 被认为是目前最简单、可行的处置技术手段^[13,37]。

动能撞击处置效果受小行星材质和结构等因素影响较大^[38]。一般用动量传递因子 β ^[39-40] 来表征撞击效率, 动量传递因子定义为小行星的动量改变量与撞击

器动量的比值。动量传递因子与小行星特性参数、撞击器参数、撞击场景参数等密切相关, 难以在地面准确建立数学模型和进行等效试验, 需通过空间试验对动量传递因子模型进行标定^[41], 其撞击原理如图 3 所示。

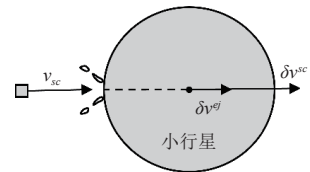


图 3 动能撞击基本原理图

Fig. 3 Basic principle diagram of kinetic impact

动能撞击对小行星速度改变量 δv 可描述为

$$\delta v = \beta \frac{m_{sc}}{m_{sc} + m_{ast}} \delta v_{sc} \quad (2)$$

其中: m_{sc} 为撞击器质量; m_{ast} 为小行星质量; δv_{sc} 为撞击速度。

2005 年, 美国“深度撞击” (Deep Space) 任务利用一颗 372 kg 的撞击器以 10.3 km/s 相对速度撞击“坦普尔一号” (9P/Tempel 1) 彗星, 初步验证了动能撞击小天体技术的可行性^[42-43]。2022 年, 美国实施的 DART 任务如图 4 所示。利用一颗重量约 570 kg 的撞击器, 以约 6.3 km/s 的相对速度撞击了“狄迪莫斯” (Didymos) 双小行星系统中直径 160 m 的子星“狄莫弗斯” (Dimorphos),

并通过地基望远镜对撞击后双小行星系统的绕转周期改变量进行监测。数据分析表明,撞击试验非常成功,将双小行星系统的绕转周期缩短了32 min,远远超过了此前预期的10 min;撞击对小行星的速度改变量约为2.7 mm/s,动量传递因子约为2.2~4.9,相关成果发表在Nature上。这次试验也获得了Science等评选的2022年世界10大科学突破^[23,38-40,44-45]。

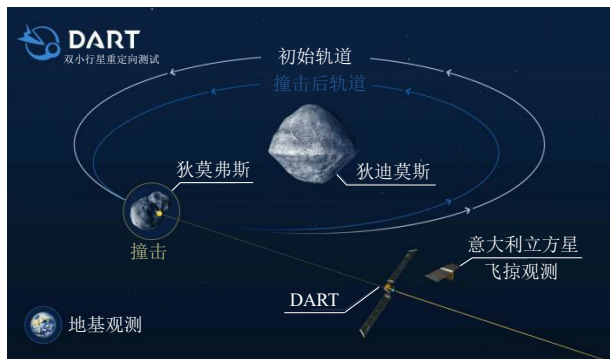


图4 “双小行星重定向测试”任务
Fig. 4 Double asteroid redirection test mission

尽管DART任务试验非常成功,但并未完全验证成功处置真实小行星撞击场景所能达到的效果:DART撞击的“狄迪莫斯”双小行星系统有丰富的光学、光谱和雷达观测资料,轨道、类型、自转、大小等目标特性信息较为明确,而在真实行星防御场景下,可能只有极为有限的目标特性信息,对成功撞击小行星提出了更大的技术挑战;DART任务试验对象的主星尺寸780 m、子星尺寸160 m,相对尺寸较大更容易实施撞击,而实际上几十米级的小尺寸小行星撞击地球的概率更高、更暗弱处置难度也更大;DART任务为便于评估实施效果,选择双小行星系统作为试验对象,评估其相对绕转周期的变化,而真实行星防御场景需要评估小行星轨道相对地球距离的变化。

研究人员指出,在完成DART撞击任务后,未来动能撞击在轨验证任务的发展方向为撞击单体小行星而非双星系统中的子星、撞击更小的目标(50~100 m)、更高速的撞击(10~15 km/s)、直接测量日心轨道的变化^[35]。鉴于小行星特性对处置效果具有较大的影响,美国行星科学建议美国下一次行星防御在轨验证任务为获取对小行星实施快速响应应抵近的特性^[46]。

动能撞击处置技术的优势:简单、相对成熟、技术可行性好、适用场景较广,对中小尺寸近地小行星处置效果较好。动能撞击处置技术的劣势为处置效果的不确定性大,效果受小行星表面材质等因素影响较大,由于其为瞬时作用,实施后处置效果无法改变,

短期预警时间场景下,难以处置中大尺寸小行星。

当撞击能量密度超过一定阈值时,动能撞击也可能将小行星撞碎。美国学者提出利用多撞击器对直径150 m以下的小行星进行摧毁任务的概念^[31],并指出应该区分动量撞击(Kinetic Impact)和动能撞击(Kinetic-energy Impact),前者目标是为了偏转小行星的轨道,后者目标是为了将小行星撞碎。但由于动能撞击效果预测极其困难,该提法并未被广泛接受。

此外,为提高短时预警条件下动能撞击防御小行星的快速响应能力,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)提出了FASTKD的任务概念,希望能够将地面上贮存或者研制中的同步轨道通信卫星改造为动能撞击器,对预警时间较短的小行星实施快速拦截^[47]。通过部署天基拦截器也是提高动能撞击响应速度的途径^[48-49]。

SMPAG将动能撞击处置小行星的技术成熟度评价为5~7级^[36],但距离工程上成功应用仍存在一定技术差距,需要开展相关技术攻关和试验验证,主要包括暗弱目标的高精度导航技术、超高速撞击高精度制导控制技术、超高速撞击的地面等效验证技术、动能撞击处置小行星效果预测建模技术、动能撞击处置小行星效果的观测评估技术。

3 持续作用在轨处置技术

3.1 引力牵引处置技术

引力牵引是利用航天器运行在小行星附近,通过万有引力牵引改变小行星的轨道,从而使得小行星远离地球。最早由美国华裔宇航员卢杰在2005年提出^[15],发表在Nature上,后续多国学者对其开展了理论分析与数值仿真研究^[50-51]。

引力牵引处置技术包括2种形式:悬停在小行星前方或者后方固定的位置;运行在小行星前方或者后方的悬浮轨道上。一般而言,航天器与小行星的距离为1~2个小行星半径。在小行星不规则引力场作用下,引力牵引航天器的轨道是不稳定的,需要利用电推进系统实施实时轨道控制。

悬停引力牵引航天器的作用原理如图5所示,悬停引力牵引航天器对小行星的作用力大小为

$$F_{GT} = \frac{Gm_{ast}m_{sc}}{r^2} = 2T \cos \alpha \quad (3)$$

其中: T 为发动机推力; α 为发动机安装斜角。

引力牵引处置技术的优势:航天器不与小行星表面接触,受小行星特性影响小;可在轨调控处置效果,处置精度高。引力牵引处置技术的劣势:由于牵

引航天器重量有限,作用力十分微弱,一般需要10年甚至20年以上的处置时间才能有效偏转中等以上尺寸小行星轨道,实施周期长;航天器需要精准控制相对小行星的轨道,对导航制导控制技术要求极高;对倾角较高的目标小行星,航天器轨道转移能力要求高。

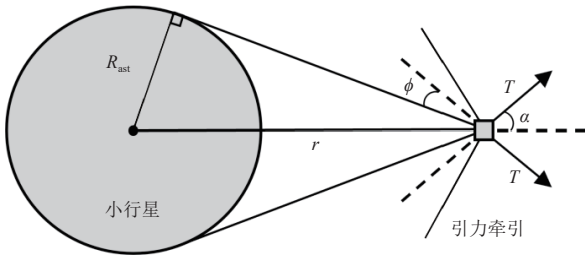


图5 引力牵引
Fig. 5 Gravitational traction

SMPAG将引力牵引处置小行星的技术成熟度评价为3~6级^[36],工程实施还需要突破以下关键技术:①不规则小行星附近长期伴飞的高精度相对导航;②不规则小行星附近长期伴飞的高精度制导控制;③高比冲大推力电推进;④持续微弱牵引力作用下处置效能评估。

3.2 离子束偏移处置技术

离子束处置技术是指通过航天器离子推进系统喷射高速离子流到小行星表面,推动小行星改变轨道,使得小行星远离地球^[17]。

离子束处置航天器需要悬停在小行星运行轨道前方或者后方一定距离处,悬停距离与电推进的离子束聚焦能力相关,离子束聚焦能力越强,悬停距离就越远,因此推进系统聚束能力是离子束偏移的核心关键技术。离子束偏移属于非接触式防御技术,对小行星特性信息不敏感。在喷射离子束的同时,航天器也会获得加速度,为将航天器保持在小行星附近,还需在航天器另外一端施加反方向的轨道机动^[52-54],离子束偏移原理如图6所示。

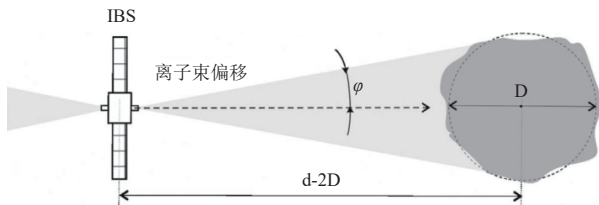


图6 离子束偏移
Fig. 6 Ion beam

离子束航天器产生的推力大小为

$$F_{\text{IBS}} = \frac{1}{2}T = \frac{1}{2}C_{\text{HET}}P_{\text{in}} \quad (4)$$

其中: C_{HET} 为推力功率比;而 P_{in} 为推进系统的输入功率。

离子束处置技术的优势:航天器不与小行星表面接触,受小行星特性影响小;可在轨调控处置效果,处置精度高。离子束处置技术的劣势:对导航制导控制技术要求高,将航天器精确维持在小行星附近难度较大;在现有电推进系统的推力和聚束能力条件下,处置中等以上尺寸航天器仍然需要较长的实施周期;对倾角较高的目标小行星,航天器轨道转移能力要求高。

SMPAG将离子束偏移处置小行星的技术成熟度评价为3~6级^[36],工程实施还需要突破以下关键技术:离子束定向聚束、小行星附近长期伴飞的高精度相对导航、小行星附近长期伴飞的高精度位置保持控制技术、离子束处置小行星效能评估。

3.3 激光烧蚀处置技术

激光烧蚀是指通过航天器携带的高能量激光器,烧蚀小行星表面物质产生推力,从而推动小行星改变轨道,使得小行星远离地球^[19-20]。

激光强大的聚焦性,使得航天器无须过于接近小行星表面,降低了撞击小行星表面的风险。激光独特的能量传递过程,不会改变航天器的自身轨道,降低了对轨道保持控制要求。其难点是研制高脉冲能量的空间激光器,目前技术成熟度还有待提升^[55-60]。

激光烧蚀对小行星产生的作用力大小为

$$F_{\text{LA}} = \eta_{\text{LA}}C_{\text{m}}P_{\text{in}} \quad (5)$$

其中: η_{LA} 为光电转化效率; C_{m} 为推力耦合系数,与小行星表面材料有关; P_{in} 为激光器输入功率。

激光烧蚀处置技术的优势:不与小行星表面接触,受小行星特性影响小;在轨调控处置效果,处置精度高;对轨道保持控制要求低。激光烧蚀处置技术的劣势:高能量空间激光器技术尚不成熟,还有待进一步发展;其处置能力取决于激光器水平,处置中等以上尺寸近地小行星的难度大;对倾角较高的目标小行星,航天器轨道转移能力要求高。

SMPAG将激光烧蚀处置小行星的技术成熟度评价为3~6级^[36],工程实施还需要突破以下关键技术:高性能空间脉冲激光器、激光烧蚀小行星的冲量传递规律、小行星附近长期伴飞的相对导航控制、激光烧蚀小行星的处置效能评估。

3.4 拖船处置技术

拖船是指通过航天器捕获或者附着在小行星表面,直接对小行星施加作用力,推动改变小行星的轨

道,使得小行星远离地球^[18,61]。

拖船技术的难点:小行星处于自转中,需要对小行星实施消旋才能实现有效方向的作用力传递,否则就只能根据小行星自转间歇性施加推力,影响作用效率;长期附着在微重力的小行星表面并且施加推动力面临机构机构、能源、热控等技术难题;很多小行星为碎石堆结构,难以找到长期附着的稳定表面,目前尚未有航天器在小行星表面长期附着。

拖船技术的优势:处置精度高,可在轨调控处置效果;手段直接,发动机推力直接作用于小行星,作用效率高;可应用于小行星资源开采。拖船处置技术的劣势:技术成熟度相对较低、受小行星表面材质和地形地貌影响较大、对倾角较高的目标小行星,航天器轨道转移能力要求高。

尽管当前小行星探测采样技术、电推进技术等已经具有较好基础,但在小行星表面长期附着操作仍然面临许多挑战,SMPAG将拖船处置小行星的技术成熟度评价为1~2级^[36]。拖船技术的工程实施还需突破以下关键技术:小行星的消旋定向、长期稳定附着小行星的结构机构、长期稳定附着小行星的导航制导控制、拖曳小行星的作用力传递机理与规律。

3.5 质量驱动处置技术

质量驱动是指通过航天器附着在小行星表面上,利用挖掘机构获取小行星表面物质(石块等),并高速抛射出去,推动改变小行星的轨道,使得小行星远离地球^[61-62]。

在质量驱动处置技术作用下,小行星获得的动量 I_{md} 可表述为

$$I_{md} = v_e m_{launch} \quad (6)$$

其中: v_e 为抛射速度; m_{launch} 为抛射质量。

质量驱动处置技术需要在小行星表面施工难度极大,微重力环境下挖掘、高速抛射等技术尚不成熟,并且受小行星表面材质和地形地貌影响较大。SMPAG将质量驱动处置小行星的技术成熟度评价为1~2级^[36]。总体而言,该技术成熟度较低、工程实施难度大,在小行星防御领域价值有限,应用前景一般。

3.6 表面喷涂处置技术

表面喷涂是指通过航天器在小行星表面喷涂具有不同反照率的材料或者利用激光等改造小行星表面的物质,从而改变小行星对阳光的吸收和反射,通过调控小行星热辐射压力的方式改变小行星轨道,使得小行星远离地球^[57,63-64]。

表面喷涂技术本质是对雅科夫斯基效应的利用,

由于雅科夫斯基效应十分微弱,一般需要的作用时间较长。以贝奴(Bennu)小行星为例,雅科夫斯基效应(图7)在12年时间尺度对其轨道的影响仅185 km^[65]。SMPAG将表面喷涂处置小行星的技术成熟度评价为1~2级^[36]。总体而言,该技术成熟度较低,在小行星防御领域价值有限,应用前景一般。

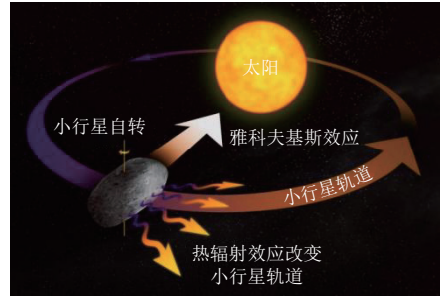


图7 雅科夫斯基效应

Fig. 7 Yarkovsky effect

4 新概念在轨处置技术

4.1 加强型引力牵引处置技术(Enhanced Gravity Tractor)

针对引力牵引作用力微弱、工程实施周期长等弊端,美国曾提出利用航天器捕获岩石构成加强型引力牵引器,快速改变小行星轨道的技术方案^[66-67],拟在2013年NASA提出的“小行星重定向任务(Asteroid Redirection Mission)”(该任务计划从一颗碎石堆小行星上捕获一块重量约500~1 000 t的岩石,并将其拖曳到地月空间,但于2017年被取消)实施^[68-70]。

加强型引力牵引处置技术是通过增加牵引器的重量,进而增强引力牵引效应,来实现更快的轨道偏转效果。根据仿真结果,加强型引力牵引方案可将工程实施时间缩短为传统型引力牵引方案的1/10。其弊端在于只适用于碎石堆结构小行星的防御。

加强型引力牵引处置技术尚处于概念设计阶段,工程实施还需要突破小行星表面岩石的抓取技术、操控百吨级岩石长期伴飞小行星的导航制导控制技术、小行星表面材质与结构的预测等关键技术。

4.2 “以石击石”加强型动能撞击处置技术

2020年, Li团队论证提出了“以石击石”加强型动能撞击处置技术^[21],如图8所示。通过航天器捕获百吨级重量的岩石,构成加强型动能撞击器,显著提升撞击体的重量,从而提高对小行星的撞击效应。岩石可来自独立的小尺寸小行星,也可以是其它碎石堆小行星上的岩石。仿真结果表明,相比传统动能撞击,“以石击石”可将小行星的轨道偏转效果提升一个数量级。

“以石击石”难点在于如何寻找到合适的岩石作为捕获对象,以及如何捕获岩石。尽管小尺寸小行星的理论群体数量巨大(直径米级的近地小行星数量高达上亿颗),碎石堆小行星也可以作为岩石的候选母体(已经抵近探测的小行星大部分为碎石堆小行星),太阳系小天体之间近距离交会机会众多,为选取合适的岩石提供了机会。但截止目前,人类编目的米级尺寸近地小行星仍然极为有限,对已经发现的小行星是否为碎石堆结构也了解有限,限制了“以石击石”技术在现阶段的应用。

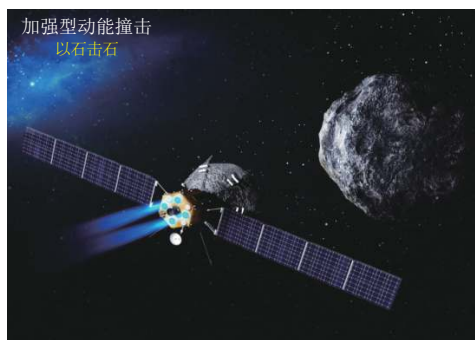


图8 以石击石
Fig. 8 Enhanced asteroid deflector

“以石击石”处置技术目前尚处于概念设计阶段,工程实施还需要突破目标岩石的遴选技术、岩石捕获技术、百吨级岩石操控技术、操控百吨级岩石撞击小行星的高精度导航制导控制技术。

4.3 “末级击石”加强型动能撞击处置技术

2021年,国内团队论证了“末级击石”加强型动能撞击技术^[71],如图9所示。提出通过航天器与火箭末级的一体化设计,构成加强型动能撞击器,从而显著提升撞击体的重量,最终提升防御效果。仿真结果表明,相比传统动能撞击,“末级击石”可将小行星的轨道偏转效果提升至3倍,可显著提升防御直径140 m级近地小行星的能力。

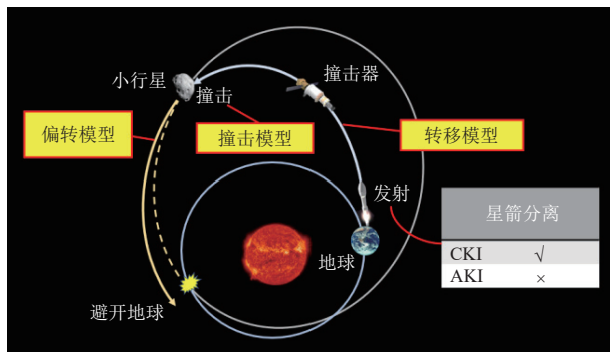


图9 末级击石
Fig. 9 Assembled kinetic deflector

美国于2008年试验过利用一颗小卫星携带火箭末级撞击月球南极的任务^[72],星箭一体化设计在中国也有过探索实践,因此“末级击石”总体技术成熟度较高,是当前面对中等及以上尺寸小行星撞击威胁时的较优选项。其难点在于撞击器质量增加后导航制导控制技术难度也随之上升。

“末级击石”处置技术目前尚处于概念设计阶段,工程实施还需要突破航天器与火箭末级一体化设计、航天器操控火箭末级的姿轨控系统设计和操控火箭末级撞击小行星的高精度导航制导控制等关键技术。

4.4 “穿透棒”摧毁处置技术

2022年,美国学者提出了“穿透棒”摧毁处置技术,如图10所示。针对预警时间较短的小行星,在小行星抵达地球前,通过释放若干携带含能材料的穿透棒,对小行星实施摧毁,将小行星化为碎块,在大气层中烧蚀,从而减轻小行星撞击危害。目前“穿透棒”技术已经获得NASA先进概念研究项目支持,正在开展深入研究^[22]。



图10 穿透棒
Fig. 10 Penetrating rod

“穿透棒”处置技术工程应用还需要突破含能穿透棒设计、穿透棒在轨部署、穿透棒自寻的制导、穿透棒毁伤小行星效能评估、次生灾害评估等关键技术。

4.5 其它新概念在轨处置技术

2019年,美国学者提出了电磁牵引处置技术^[73],航天器携带超导线圈产生磁体,与部署在小行星上的磁铁相互作用,从而利用电磁力牵引改变小行星的轨道。仿真显示电磁牵引具有很高的效率,但对超导技术提出了很高要求,此外需要将磁铁部署在小行星上对小行星表面操作提出了更高的要求。2021年,意大利学者提出了电磁牵引和引力牵引联合处置技术概念^[74]。此外,美国、巴西和加拿大组成的联合研究团队在

2020年提出了通过千米长度的系绳将一个小尺寸小行星与一个大尺寸小行星连接,从而改变系统质心最终偏转小行星轨道的方法^[75]。

5 综合分析与发展建议

5.1 在轨处置技术手段综合分析

从技术成熟度、场景适应性、处置能力、处置精度、次生灾害、对目标特性敏感程度等多角度对上述小行星在轨处置技术进行初步量化分析,为评判各处置技术手段的应用前景提供初步参考。首先将各项指标权重均设置为1,各指标满分为5,最低分为-5,对各处置技术进行评分,如表1所示。可以得出初步结论:动能撞击、末级击石、核爆、引力牵引和离子束偏移处置技术的应用前景较好;拖船、激光烧蚀、加

强型引力牵引、以石击石和穿透棒等处置技术的应用前景次之;质量驱动和表面喷涂等处置技术,由于技术成熟度、对目标特性敏感等,应用前景较为一般。

本文给出的指标体系和评分具有主观性,仅代表作者团队的认识,尤其是关于技术成熟度,以及部分新概念在轨处置技术的评价。实际上对在轨处置技术的评估是综合的、复杂的,需要体系化的研究、分析和计算。后续根据技术发展情况,通过深入研究指标体系构成、各指标的权重关系,构建更为合理的指标评价体系。通过系统调研和深入分析,对指标权值进行更为客观的量化。在此基础上,对各种处置技术的应用前景进行更精准、可信的量化分析评估。表1给出的处置技术评估指标、评分、排序和部分结论会有所变化。

表1 在轨处置技术综合比较

Table 1 Comparison of different on orbit disposal technologies

分类	处置技术	成熟度	适用场景	处置能力	处置精度	次生灾害	目标特性敏感度	总得分
瞬时作用处置技术	动能撞击	5	5	4	3	-1	-2	14
	核爆	4	5	5	2	-2	-2	12
持续作用处置技术	引力牵引	3	3	3	4	0	-1	12
	离子束偏移	3	3	3	4	0	-1	12
	激光烧蚀	1.5	3	3	4	0	-3	8.5
	拖船	2	3	3	4	0	-3	9
	质量驱动	1	2	2	3	0	-4	4
	表面喷涂	1	2	2	2	0	-4	3
新概念在轨处置技术	加强型引力牵引	2	2	4	4	0	-4	8
	以石击石	2	2	4.5	2.5	-1	-3	7
	末级击石	4	5	5	3	-1	-3	13
	穿透棒	2	3	4	2	-2	-3	6

5.2 在轨处置技术发展建议

小行星在轨处置技术发展程度不一、适应场景不同、处置能力和精度各有特点,为建立有效保障处置能力,建议采取“夯实基础、重点突破;由点到面、完善体系”的技术发展思路和“科学规划、分阶段验证、逐步健全工程体系”的工程实施路线,全面推进在轨处置技术体系化发展。

1) 加强近地小行星在轨处置技术领域的基础研究和关键技术攻关,增强技术储备

小行星在轨处置技术体系复杂,处置手段众多,但总体上仍然处于早期发展阶段,大部分在轨处置技术手段还处于理论研究阶段,仅针对动能撞击处置技术开展了初步的在轨验证,距离防御真实小行星撞击威胁存在较大的技术差距。小行星在轨处置技术涉及的学科交叉广,包括航天工程、天文学、行星科学、力学、控制科学、系统工程等学科,需要开展多学科交叉研究。因此,需要加强近地小行星在轨处置技术

的基础研究和关键技术攻关,探索新概念行星防御机理与方案,夯实在轨处置技术基础,为实施在轨验证工程、形成在轨处置体系能力建立深厚的技术储备。

2) 开展应用前景较好的处置技术在轨验证方案论证,加快推进以动能撞击处置技术为代表的在轨验证任务的实施,初步建立处置能力

由于小行星防御的独特性,无法在地面上对小行星在轨处置技术开展完整的真实尺度试验,要形成面对真实近地小行星撞击威胁的实战能力,必须开展在轨演示验证试验,通过真实尺度的小行星防御技术试验任务,验证在轨处置的技术能力,掌握处置小行星的规律。因此需要优选具有较好应用前景的在轨处置技术,论证在轨处置技术方案,加快实施以动能撞击为代表的较成熟处置技术的在轨演示验证技术试验,牵引深空暗弱目标的高精度导航技术、超高速撞击高精度制导控制技术、瞬时作用处置效果建模评估技术等关键技术的发展,建立初步的近地小行星在轨处置

技术的工程实施体系,形成针对小尺寸近地小行星初步的瞬时作用、有效偏转在轨处置能力。

3) 持续完善小行星在轨处置技术和基础设施,形成较为完善的在轨处置能力体系

立足人类未来在地球上的长远生存发展,持续深化小行星在轨处置技术研究,完善其工程实施体系,分阶段推动多种在轨处置技术方案的在轨演示验证。

在完成瞬时作用在轨处置技术在轨验证的基础上,开展持续推离在轨处置技术的在轨验证,牵引不规则小行星附近长期伴飞/附着的高精度相对导航技术、不规则小行星附近长期伴飞/附着的高精度制导控制技术、高比冲大推力电推进技术、持续微弱作用力长期作用技术、持续微弱力作用下处置效能建模评估技术等关键技术发展,完善近地小行星在轨处置技术的工程实施体系,形成对近地小行星的持续作用、精准偏转处置能力。

进一步结合在轨处置技术发展水平,适时完成多手段协同处置近地小行星的在轨验证,拓展快速响应在轨特性获取能力,完善工程实施体系,丰富在轨处置手段,提升在轨处置能力,逐步建成“手段丰富、高效精准、快速响应”的在轨处置能力体系和工程实施体系,形成能够在真实场景下处置不同预警时间(长期、中期、短期)、不同尺寸(小、中、大)、不同材质(碳质、岩石质、金属质)、不同结构(碎石堆、独石)小行星撞击事件的能力,并牵引行星科学、太空资源开发利用等科学研究与应用协同发展。

6 结束语

自20世纪90年代以来,伴随着彗木相撞和车里雅宾斯克事件的发生,小行星撞击威胁日益引起全世界的关注。以欧美为代表的西方国家在近地小行星防御领域开展多种处置技术概念和方案的理论研究和探索,并实施了动能撞击处置技术的在轨验证。但距离真实应对近地小行星撞击还存在较大的技术差距,需要持续推进关键技术攻关和在轨验证任务实施。面向未来,建议全面推进在轨处置技术体系发展,通过实施在轨验证任务掌握处置小行星的科学技术并逐步完善基础设施,全面提升人类面对真实小行星撞击威胁的处置应对能力。

参 考 文 献

- [1] O'KEEFE J D, AHRENS T J. Impact production of C02 by the Cretaceous/Tertiary extinction bolide and the resultant heating of the Earth[J]. *Nature*, 1989, 338(6212): 247-249.
- [2] PINTER N, SCOTT A C, DAULTON T L, et al. The Younger Dryas impact hypothesis: a requiem[J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 106(3-4): 247-264.
- [3] 郭安宁, 赵乘程, 张向红, 等. 历史记载亡人最多的明朝甘肃庆阳陨石雨事件[J]. *地震工程学报*, 2015, 37(1): 119.
GUO A N, ZHOA C C, ZHANG X H, et al. The Meteorite shower of Ming dynasty in Qingyang, Gansu—an event causing largest number of death in historical records[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2015, 37(1): 119
- [4] LONGO G. The Tunguska event[A]. Comet/asteroid impacts and human society: an interdisciplinary approach[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 303-330.
- [5] FOSCHINI L. A solution for the Tunguska event[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1998: 342: L1.
- [6] GLADYSHEVA O. The Tunguska event[J]. *Icarus*, 2020, 348: 113837.
- [7] BOROVIČKA J, SPURNÝ P, BROWN P, et al. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor[J]. *Nature*, 2013, 503(7475): 235-237.
- [8] OZAWA S, MIYAHARA M, OHTANI E, et al. Jadeite in Chelyabinsk meteorite and the nature of an impact event on its parent body[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 5033.
- [9] REDDY V, SANCHEZ J A, BOTTKER W F, et al. Chelyabinsk meteorite explains unusual spectral properties of Baptistina asteroid family[J]. *Icarus*, 2014, 237: 116-130.
- [10] 龚自正, 李明, 陈川, 等. 小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术[J]. *科学通报*, 2020, 65(5): 346-372.
GONG Z Z, LI M, CHEN C, et al. The frontier science and key technologies of asteroid monitoring and early warning, security defense and resource utilization[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(5): 346-372.
- [11] 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.
- [12] ANTHONY N, EMAMI M R. Asteroid engineering: the state-of-the-art of near-Earth asteroids science and technology[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 100: 1-17.
- [13] IVASHKIN V V, SMIRNOV V V. An analysis of some methods of asteroid hazard mitigation for the Earth[J]. *Planetary and Space Science*, 1995, 43(6): 821-825.
- [14] AHRENS T J, HARRIS A W. Deflection and fragmentation of near-Earth asteroids[J]. *Nature*, 1992, 360(6403): 429-433.
- [15] LU E T, LOVE S G. Gravitational tractor for towing asteroids[J]. *Nature*, 2005, 438(7065): 177-178.
- [16] SCHWEICKART R, CHAPMAN C, DURDA D, et al. Threat mitigation: the gravity tractor[EB/OL]. (2006-8-15)[2023-7-12]. <https://arxiv.org/abs/physics/0608157>.
- [17] BOMBARDELLI C, PELÁEZ J. Ion beam shepherd for asteroid deflection[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2011, 34(4): 1270-1272.
- [18] SCHWEICKART R L, LU E T, HUT P, et al. The asteroid tugboat[J]. *Scientific American*, 2003, 289(5): 54-61.
- [19] GIBBINGS A, VASILE M, HOPKINS J M, et al. Potential of laser-induced ablation for future space applications[J]. *Space Policy*, 2012, 28(3): 149-153.

- [20] GIBBINGS A L. Laser ablation for the deflection, exploration and exploitation of near Earth asteroids[D]. Scotland: University of Glasgow, 2014.
- [21] LI M, WANG Y, WANG Y, et al. Enhanced kinetic impactor for deflecting large potentially hazardous asteroids via maneuvering space rocks[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-9.
- [22] LUBIN P, COHEN A N. Asteroid interception and disruption for terminal planetary defense[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(3): 1827-1839.
- [23] RIVKIN A S, CHENG A F. Planetary defense with the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission and prospects[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1003.
- [24] National Research Council. Defending planet Earth: near-Earth-object surveys and hazard mitigation strategies[M]. US: National Academies Press, 2010.
- [25] ADAMS R B, ALEXANDER R, BONEMETTI J, et al. Survey of technologies relevant to defense from near-Earth objects: 20050081838[R]. USA: NASA, 2004.
- [26] WIE B. Astrodynamics fundamentals for deflecting hazardous near-earth objects[C]//Proceedings of 60th International Astronautical Congress. Deajeon: IAC, 2009.
- [27] LI M, WANG K. Progress of planetary defense research in China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(4): 830-835.
- [28] BELTON M J S. About deflecting asteroids and comets[A]. Mitigation of hazardous comets and asteroids[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 113-140.
- [29] DEARBORN D. 21st century steam for asteroid mitigation[C]//Proceedings of 2004 Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids. Frascati, Roma, Italy: IAA, 2004: 1427.
- [30] SYAL M B, DEARBORN D S P, SCHULTZ P H. Limits on the use of nuclear explosives for asteroid deflection[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 90(1): 103-111.
- [31] WIE B, ZIMMERMAN B, LYZHOFT J, et al. Planetary defense mission concepts for disrupting/pulverizing hazardous asteroids with short warning time[J]. *Astrodynamics*, 2017, 1: 3-21.
- [32] DEARBORN D S, BRUCK M. Limits on the use of nuclear explosives for asteroid deflection[C]//Proceedings of Planetary Defense Conference. Bucharest, Romania: Lawrence Livermore National Laboratory, 2011.
- [33] BARBEE B W, FOWLER W T. Spacecraft mission design for the optimal impulsive deflection of hazardous Near-Earth Objects (NEOs) using nuclear explosive technology[C]//Proceedings of Planetary Defense Conference. Washington DC: [s.n.], 2007.
- [34] KOPLow D A. Legal aspects of the use of nuclear explosive devices in planetary defence[M]. Leiden: Brill Nijhoff, 2021: 226-245.
- [35] BARBEE B, ABELL P A, BINZEL R P, et al. Future spacecraft missions for planetary defense preparation[J]. *Bulletin of the AAS*, 2021, 53(4): 1-8.
- [36] SMPAG. Planetary defense roadmap: current mitigation-related research and priorities for future actions[R]. USA: NASA, 2023.
- [37] DALY R T, ERNST C M, BARNOUIN O S, et al. Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence[J]. *Nature*, 2023, 616(7957): 443-447.
- [38] SYAL M B, OWEN J M, MILLER P L. Deflection by kinetic impact: sensitivity to asteroid properties[J]. *Icarus*, 2016, 269: 50-61.
- [39] CHENG A F, AGRUSA H F, BARBEE B W, et al. Momentum transfer from the DART mission kinetic impact on asteroid Dimorphos[J]. *Nature*, 2023, 616(7957): 457-460.
- [40] CHENG A F, STICKLE A M, FAHNESTOCK E G, et al. DART mission determination of momentum transfer: model of ejecta plume observations[J]. *Icarus*, 2020, 352: 113989.
- [41] JUTZI M, MICHEL P. Hypervelocity impacts on asteroids and momentum transfer I. Numerical simulations using porous targets[J]. *Icarus*, 2014, 229: 247-253.
- [42] A'HEARN M F, BELTON M J S, DELAMERE W A, et al. Deep impact: excavating comet Tempel 1[J]. *Science*, 2005, 310(5746): 258-264.
- [43] HARKER D E, WOODWARD C E, WOODEN D H. The dust grains from 9P/Tempel 1 before and after the encounter with Deep Impact[J]. *Science*, 2005, 310(5746): 278-280.
- [44] LI J Y, HIRABAYASHI M, FARNHAM T L, et al. Ejecta from the DART-produced active asteroid Dimorphos[J]. *Nature*, 2023, 616(7957): 452-456.
- [45] REICHERT S. DART hits the bullseye[J]. *Nature Physics*, 2023, 19(4): 471.
- [46] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Origins, worlds, and life: a decadal strategy for planetary science and astrobiology 2023-2032[R]. [S. l.]: National Academies Press, 2022.
- [47] FALKE A, ATKINSON K, CHAPUY M. Hijacking a satellite for short-warning asteroid deflection—FastKD mission, design and implementation[C]//Proceedings of 7th IAA Planetary Defense Conference. Vienna, Austria: IAA, 2021.
- [48] PASQUALE A, LAVAGNA M, RENK F. Cislunar departure exploitation for planetary defense missions design[C]//Proceedings of 7th IAA Planetary Defense Conference. Vienna, Austria: IAA, 2021.
- [49] 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 asteroid observation system in cislunar space[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2022, 52(7): 1169-1185.
- [50] WIE B. Hovering control of a solar sail gravity tractor spacecraft for asteroid deflection[C]//Proceedings of the 17th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. [S. l.]: AAS, 2007.
- [51] WIE B. Dynamics and control of gravity tractor spacecraft for asteroid deflection[J]. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2008, 31(5): 1413-1423.
- [52] PATTERSON M, BENSON S. NEXT ion propulsion system development status and performance: NASA/TM-2008-214988[R]. USA: AIAA, 2007.
- [53] SOVEY J S, RAWLIN V K, PATTERSON M J. Ion propulsion development projects in US: space electric rocket test I to deep space 1[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(3): 517-526.
- [54] LEDKOV A S, ASLANOV V S. Active space debris removal by ion multi-beam shepherd spacecraft[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 205: 247-257.
- [55] GIBBINGS A, VASILE M, WATSON I, et al. Experimental analysis of laser ablated plumes for asteroid deflection and exploitation[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 90(1): 85-97.
- [56] VASILE M, GIBBINGS A, WATSON I, et al. Improved laser ablation model for asteroid deflection[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 103: 382-

- 394.
- [57] EHRESMANN M. Asteroid control through surface restructuring[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 178: 672-680.
- [58] VETRISANO M, COLOMBO C, VASILE M. Asteroid rotation and orbit control via laser ablation[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(8): 1762-1782.
- [59] THIRY N, VASILE M, MONCHIERI E. Mission and system design for the manipulation of phos with space-borne lasers[C]//Proceedings of 2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2016.
- [60] SONG Y J, PARK S Y. Estimation of necessary laser power to deflect near-Earth asteroid using conceptual variable-laser-power ablation[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 43: 165-175.
- [61] BAZZOCCHI M C F, EMAMI M R. Asteroid redirection mission evaluation using multiple landers[J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 2018, 65: 183-204.
- [62] OLDS J, CHARANIA A, SCHAFFER M G. Multiple mass drivers as an option for asteroid deflection missions[C]//Proceedings of 2007 Planetary Defense Conference. Washington, DC: NASA, 2007.
- [63] SPITALE J N. Asteroid hazard mitigation using the Yarkovsky effect[J]. *Science*, 2002, 296(5565): 77-77.
- [64] AGGARWAL R, BHALLA D, DATTA D A, et al. Deflection of near-Earth asteroids by altering the surface albedo and increasing the net surface radiation to intensify the Yarkovsky effect in space[C]//Proceedings of 7th IAA Planetary Defense Conference. Vienna, Austria: IAA, 2021.
- [65] DEO S N, KUSHVAH B S. Yarkovsky effect and solar radiation pressure on the orbital dynamics of the asteroid (101955) Benu[J]. *Astronomy and Computing*, 2017(20): 97-104.
- [66] MAZANEK D D, REEVES D M, HOPKINS J B, et al. Enhanced gravity tractor technique for planetary defense[C]//Proceedings of IAA Planetary Defense Conference. Frascati, Roma, Italy: IAA, 2015.
- [67] MAZANEK D D, REEVES D M, ABELL P A, et al. Enhanced gravity tractor derived from the asteroid redirect mission for deflecting hypothetical asteroid 2017 PDC[C]//Proceedings of International Academy of Astronautics (IAA) Planetary Defense Conference 2017. Tokyo: IAA, 2017.
- [68] MAZANEK D D, MERRILL R G, BROPHY J R, et al. Asteroid redirect mission concept: a bold approach for utilizing space resources[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 117: 163-171.
- [69] GATES M, MUIRHEAD B, NAASZ B, et al. NASA's asteroid redirect mission concept development summary[C]//Proceedings of 2015 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2015: 1-13.
- [70] GATES M, STICH S, MCDONALD M, et al. The asteroid redirect mission and sustainable human exploration[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 111: 29-36.
- [71] WANG Y, LI M, GONG Z, et al. Assembled kinetic impactor for deflecting asteroids by combining the spacecraft with the launch vehicle upper stage[J]. *Icarus*, 2021, 368: 114596.
- [72] STRONG J, MORGOWICZ B, TOMPKINS P, et al. Transport and use of a Centaur second stage in space[C]//Proceedings of SpaceOps 2010 Conference Delivering on the Dream Hosted by NASA Marshall Space Flight Center and Organized by AIAA. Huntsville, Alabama: AIAA, 2010.
- [73] BROWN W. A novel push-pull asteroid magnetic tractor (MT)[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 156: 371-374.
- [74] CIRELLI R, GONZALO GÒMEZ J L, COLOMBO C. Gravitational-magnetic tug: combined gravitational and magnetic interactions for asteroid deflection[C]//Proceedings of 7th IAA Planetary Defense Conference. Vienna, Austria: IAA, 2021.
- [75] VENDITTI F C F, MARCHI L O, MISRA A K, et al. Dynamics of tethered asteroid systems to support planetary defense[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2020, 229: 1463-1477.

作者简介:

吴伟仁(1953—),男,中国工程院院士,研究员,博士生导师,主要研究方向:航天测控通信与系统总体设计。

通信地址:北京市海淀区东冉北街9号(100195)

Research Progress in Asteroid Defense On-Orbit Disposal Technology

WU Weiren^{1,2}, TANG Yuhua^{1,2}, LI Mingtao^{3,4}

(1. Deep Space Exploration Laboratory, Beijing 100195, China;

2. Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100195, China;

3. National Center for Space Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101499, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Near-Earth asteroid impact is a major catastrophic threat facing human society. Planetary defense is an inevitable requirement for building a community with a shared future for mankind and continuing human civilization. Implementing on-orbit disposal is the best way to prevent and resolve the risk of near-Earth asteroid impact. This paper systematically combed the development status of near-Earth asteroid defense on-orbit disposal technologies, comprehensively summarized the key technologies, advantages and disadvantages, and application scenarios of nuclear explosion, kinetic impact, gravitational traction, ion beam, laser ablation, tug, mass driver, surface spraying and other on-orbit disposal technologies, and puts forward suggestions for the development of near-Earth asteroid defense on-orbit disposal technology.

Keywords: near-Earth asteroids; planetary defense; on-orbit disposal; kinetic impact; on-orbit demonstration

Highlights:

- Development status of near-Earth asteroid defense on-orbit disposal technology is summarized systematically.
- Advantages, disadvantages, and application scenarios of 8 typical on-orbit disposal technologies and 4 new concept on-orbit disposal technologies are systematically investigated.
- Suggestions for the development of near-Earth asteroid defense on-orbit disposal technology are proposed.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]