

近地小行星防御策略分析

刘雪奇^{1,2,3}, 孙海彬¹, 孙胜利¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 上海科技大学, 上海 201210)

摘要: 近年来, 各国针对近地小行星的威胁及相应防御策略的研究越来越多。调研了国内外近地天体观测发展现状和多种近地小行星撞击地球的防御策略, 通过比较分析防御策略的实现原理、关键技术和存在的问题, 对各种策略的适用性、可行性和有效性进行了评估。通过对各种策略的分析和总结, 结合我国近地小行星防御策略的研究现状, 尝试性提出了采用多种策略组合的方式对有潜在威胁的小行星采取相关有效方案, 为航天器的研制和防御策略的实施争取更多的时间。

关键词: 小行星; 防御策略; 动力冲击; 太阳能集热; 低推力推进

中图分类号: P185

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)06-0557-07

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2017.06.009

引用格式: 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, 2017, 4(6): 557-563.

Reference format: 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.

0 引言

随着空间技术的飞速发展, 人类对月球、火星、小行星、彗星等太阳系天体进行了全方位、多手段的探测, 研究了各天体的地质特性、运行轨道以及所处的空间环境等。而小行星作为一类围绕太阳运动的小天体, 因其数量较多、地质特征各异、运行轨道特殊等特点, 逐渐受到研究人员的重视。太阳系内的小行星大多分布在火星和木星轨道之间, 也有一些小行星存在于距离太阳更近以及与地球轨道有交叉地方, 天文学上把轨道在离太阳1.3 AU范围内, 离地球轨道距离小于0.3 AU的小行星统一称为近地小行星。而这种小行星的轨道距离地球比较近, 尤其是阿波罗型和阿登型小行星的轨道与地球轨道交会, 与地球存在碰撞的可能。如果小行星轨道与地球轨道的最小距离小于0.05 AU, 一般就认为是具有潜在碰撞风险的小行星, 对地球安全和人类的生存将构成巨大的威胁。目前已被确认的超过1.6万颗近地天体中1 838颗被认为具有“潜在危险性”^[1]。据报道, 直径大于1 km的小行星撞击地球后会使得地球发生巨大爆炸并触发海啸, 全球气候随之改变, 人类将面临灭绝的威胁。

6 500万年前, 一个直径10 km的小行星撞击墨西哥尤卡坦半岛海岸曾导致了恐龙等地球上近75%的物种灭绝。1908年6月30日, 俄罗斯西伯利亚通古斯地区一次小行星碰撞地球引发的大爆炸, 毁灭了大约2 000 km²的西伯利亚森林。1976年, 在我国吉林市上空发生过

陨石爆炸事件, 产生的陨石碎片散落在附近500 km²的范围内。2008年, 小行星TC3进入苏丹北部上空大气层发生爆炸, 释放出总计高达(1.1~2.1) kt当量的能量, 相当于一枚低级别小型核弹的威力。2013年, 俄罗斯车里雅宾斯克(Chelyabinsk)发生的陨石爆炸事件造成1 500人受伤, 1 000多间房屋受损, 此次爆炸当量约为350×10⁴ t, 相当于1945年广岛原子弹爆炸当量的30倍^[2]。此外, 还有许多小规模的小行星坠落和陨石雨事件。设想如果类似通古斯大爆炸的小行星撞击事件发生在人口稠密地区, 其所造成的后果难以设想。然而, 相比于地震、洪水等自然灾害, 近地小行星撞击地球所引发的灾害有其自身的特点: 瞬时性、可预测性和可防御性等。因此, 针对近地小行星的天文观测, 建立预警机制以及相应的防御策略, 将能够有效降低小行星撞击地球的风险, 规避小行星撞击给地球和自然界物种所带来的威胁。

近期, 以美国、欧洲为代表的航天大国都提出了近地小行星的观测和防御计划。而在国际上提出的各项小行星防御技术中, 除撞击技术已在“深度撞击”实验任务中得到验证外, 其它多数技术处于概念和设想阶段, 尚未进行在轨验证和工程实际应用。

本文主要通过对国内外近地小行星防御技术现状和发展趋势进行调研, 从不同防御技术途径的基本原理出发, 对比分析了各种途径的优缺点、适用性、成熟度等特征。在我国现有技术基础上, 结合空间技术发展形势, 借鉴国外小行星防御技术的现状与发展思

路，初步探讨发展有效的、适用于我国国情的小行星防御发展建议。

1 小行星监测研究现状

自20世纪70年代以来，美国国家航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）一直在研究近地天体（Near-Earth Objects, NEOs），并于90年代发起了一项被称为“太空保卫”的调查，对近地天体进行了初步探索。目前小行星探寻工作已取得丰硕成果，但仍有许多危险性较大的小行星未被观测到，直径越大的小行星撞击地球所引发的灾害越严重，具体可参见表1。据估计在直径超过1 km的近地天体中，90%以上已经被发现，但直径为100 m左右的近地天体只有10%被发现，直径为40 m左右的近地天体被发现的还不到1%。因此，美国国会要求NASA到2020年要发现90%以上的直径大于140 m的近地小行

星（Brown Jr计划）^[3]。

1992年，NASA开始进行关于近地天体识别、表征和跟踪以及潜在减灾策略的科学研讨会和研究，并于1998年启动了“近地天体观测计划”。在已发现的近地天体中，大部分（约95%）归功于美国宇航局的近地天体观测项目，其中位于美国亚利桑那州的“卡特林那巡天系统”和夏威夷的“Pan-STARRS项目”被指定用于近地天体探测。据美国宇航局网站报道，2013年6月18日晚上，科学家们借助夏威夷大学的Pan-STARRS-1望远镜设备发现了第1万颗近地小行星2013 MZ5；巡天系统中莱蒙山天文台的天文学家于2016年10月13日发现了第1.5万个近地天体“2016 TB57”。1.5万颗近地天体被发现是一个重要的里程碑，也标志着自2013年以来第1万颗飞向地球的小行星被探测到并登记以来，发现的近地天体的数量增长了50%。

表1 NEO撞击事件分类^[2]

Table 1 Classification of the NEOs impact

事件类型	撞击体直径/m	撞击能量/MT*	平均间隔/a
空爆	25	1	200
地方规模	50	10	2 000
区域规模	140	300	30 000
大陆规模	300	2 000	100 000
小于全球灾难阈	600	20 000	200 000
可能全球灾难	1 000	100 000	700 000
大于全球灾难阈	5 000	10 000 000	3千万
大规模灭绝	1 000	1 000 000 000	1亿

注：*为百万吨TNT当量。

1991年和1993年，“伽利略”（Galileo）计划在探测木星的旅途中顺访了两颗小行星Gaspra（951）和Ida（243），并对他们进行了近距离多波段光谱探测，发现Ida小行星有一颗小卫星。2003年5月日本Muse-C计划发射的Hayabusa探测器前往1998 SF36，首次从小行星采样矿物标本返回地球。2005年9月27日，欧空局宣布，为了保护地球免受撞击，将开始尝试改变近地小行星轨道的名为“堂吉诃德”的计划。到2016年，意大利近地天体协调中心的埃托雷·佩罗齐表示：“过去几年中近地天体的发现率一直很高，全球每周平均发现30颗新的近地天体。”

中国科学院在1999年也组建“近地天体探测和太阳系动力学研究”团组，2006年10月在江苏省盱眙县建立紫金山天文台近地天体观测站，并成功安装了1.2 m施密特近地天体望远镜。在紫金山天文台、国家天文台及中科院国家基金委天文联合基金的大力支持下，作为LAMOST银河系反银心方向数字巡天计划的前哨部

分——盱眙近地天体望远镜银河系反银心方向数字巡天计划观测任务于2011年3月8日顺利完成，该项目的顺利完成，作为中国实测天文学发展历程上的标志性事件，提升了中国在天体物理学基础前沿研究领域的原始创新能力及在国际同行中的地位和影响力^[4]。

根据国际小行星中心网站发布，截至2017年9月8日，通过全球联测，科研人员已经发现1 838颗“潜在威胁近地小行星”，并且还存在大量的近地小行星未被发现。然而，对于这么多的小行星，当前国内外的研究水平大多处于观测、监视阶段，而对于小行星的防御还处于概念设想和初步发展阶段，因此小行星防御策略的分析和评估是一个十分有意义的课题。减缓、避免近地小行星撞击地球的过程主要可分为以下两个部分：首先发现近地小行星，并对小行星的特征进行分析和检测；然后确定撞击风险，做出有效的防御措施。行星防御协调办公室（Planet Defense Coordination Office, PDCO）制定了一个特征流程图（见图1）^[5]，

以便在即将发生的近地天体影响的情况下简化获取相关信息的过程；通过EO和雷达传感器的一组观测来达到实现特定目标的近地物体表征过程，一些目标可

以通过多种观察来实现。通过对小行星的监测和评估，就可以更好地做出对应的防御策略，进而对各种防御策略进行分析。

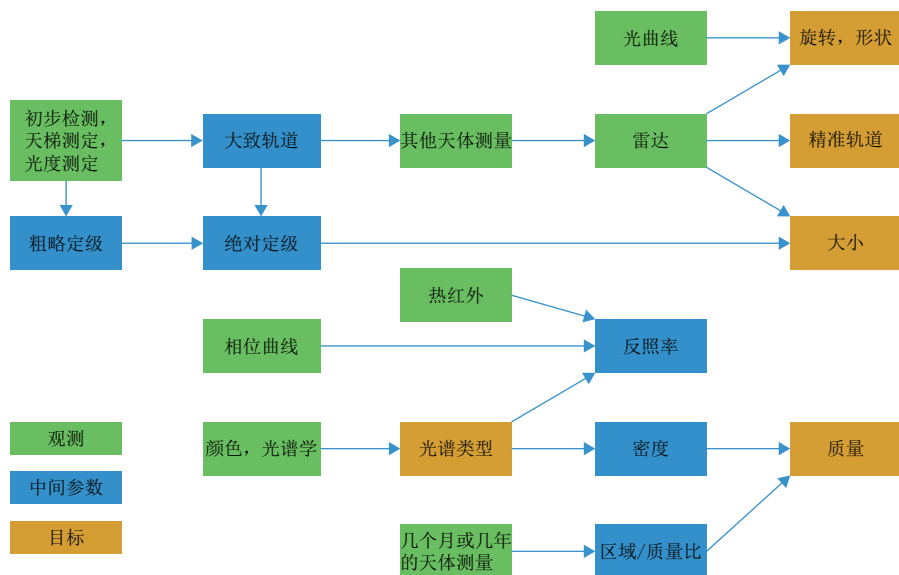


图1 近地物体表征过程^[5]

Fig. 1 Characterization process of NEOs

2 小行星防御策略分析

2.1 近地小行星防御途径概述

对于威胁地球的大型小行星，很多人认为对其唯一合理的防御方式是使用核武器。然而，核武器对人类所构成的威胁远远大于其对人类所减轻的危害。因此，对于小行星的防御，研究非核战略显得十分必要。要实现小行星的偏转只需要改变它的速度（速度的方向和大小），而其速度的变化取决于冲击前的时间长度和冲击的作用模式。如果小行星的危害被较早期发现（有较长的预警时间），研究人员可以选择作用时间较长的防御方案，那么可以选择较小的速度改变量长时间持续作用；然而，对于预警时间较短的小行星，则需要较大的速度改变量，采用较大的作用力来改变速度，从而在短时间内实现小行星的快速偏转运行。所以，根据小行星防御时间不同，可以将防御策略分为短期快速防御和长期缓慢防御^[6]。短期快速防御方案可采用如核拦截方案、动力冲击器策略；而长期缓慢防御策略则可以采用如太阳能集热方案、低推力推进方案、质量驱动方案和引力拖拽策略。以下分别对这几种策略进行详细介绍分析。

2.2 防御途径介绍分析

2.2.1 核拦截器策略

最有效并且最可靠的偏转近地天体的方法之一就是利用核爆炸，其中来自中子和X射线沉积的能量加

热了小行星的表面层，并产生快速的流体喷射，将大部分星形团块推向相反的方向。由于中子在固体中的平均自由程较长，因此每个传递能量的中子比X射线更高效^[7]。

核弹拦截技术是一种相对比较直接的防御策略，通常采用核装置使得威胁地球的近地小行星改变运行轨道，而不是通过核爆直接摧毁。如果对来袭的小天体进行直接核弹攻击，或许可将它炸碎，但是爆炸产生的大量的碎片仍将按照原来的撞击轨道冲向地球，那将引发更加可怕的灾难。姜宇等^[8]提出对于将要撞击地球的小行星，在其撞击地球以前，通过高速碰撞将该小行星撞击成大量碎片，进入大气层的部分碎片会烧毁，不至于造成严重灾难。此外，Lomov等^[7]通过对核爆炸产生的能量喷射物的模拟表明，偏转速度很大程度上取决于小行星物质的性质。

采用核拦截器能让威胁地球的小行星产生足够的速度改变，并且这种策略是最直接可行的一种参考方案，但这种技术所固有的可怕风险很可能会引起政治和全球安全问题，这将可能导致小行星偏转策略的研究以发展核武器为基础，使得核武器的发展远超出作为改变行星运行轨道的技术手段的意图。

2.2.2 动力冲击器策略

实现小行星偏转最简单的手段之一是采用大规模抛射体进行攻击，这些抛射体可以是另一个小行星、火箭或者火箭推动的其它物体，然而，此方案也存在十分棘手的问题是击碎小行星后产生大量碎屑可能增

加与地球碰撞的危险。通过对小行星Gaspara^[9]和Ida^[10]的观测图像表明,它们已经反复被大型物体击中,撞击物体在其表面上留下了大型的陨石坑,而明显地没有完全破坏它们;最近,张韵等^[11]通过数值仿真实验,针对两种结构的小行星,分析遭遇脉冲偏离后的小行星及其碎片的轨道演化情况,发现动能撞击方法能够有效规避撞击后的最大剩余碎片和大多数碎片。因此,动力冲击策略将可能是一种比较有潜力的可行性策略。

动力冲击器是减轻小行星危害的一种较简单的方式:物体通过撞击小行星把本身的动量转移到小行星上,这种碰撞被模拟为简单的非弹性碰撞。碰撞导致小行星速度的变化需要乘以一个动量增强因子^[12],增强因子是由于在冲击期间排出物质的爆炸产生的。

采用动力冲击器来改变小行星运行轨道方案有其独特的优点:可快速启动且具有较高的成功概率,此外,很重要的一点是此方案是唯一得到在轨验证的防御策略。因此,针对预警时间较长的小行星,动力冲击器策略也许是目前最成熟的小行星防御策略。当然,这种策略也存在一些问题:①保证撞击作用有效的必要条件是:小行星尺寸不能过大或预警时间足够长,此外,还应考虑到小行星的自转导致作用力的合力方向的不确定性^[7];②中型小行星则需要提供足够大的冲击力,将大型动力冲击器送入撞击轨道需要足够的燃料驱动以及先进的航天技术,财力耗费巨大;③要及时对小行星做出应对策略就要建立全球的监测网,需要国际间的合作,从而会涉及到各国的利益,需要长时间的协调解决,短期内无法建立一个完善的全球监测体系。

2.2.3 太阳能集热器策略

19世纪,俄罗斯工程师伊凡·雅科夫斯基(Ivan Yarkovsky)对粉饰小行星的方面研究比较深入,他算出如何仅仅通过改变它的颜色而改变一块太空岩石的轨道。小行星通过太阳能收集器吸收大量的太阳热量后再将热量散发进太空。这种热辐射带有动力,反过来将会向小行星施加一个将它推向反方向的力^[5],进而改变小行星的运行轨道。

太阳能集热器(如图2所示)可采用太阳帆,通过飞船携带太阳帆前往目标小行星,将太阳帆安装在小行星表面,太阳帆设备一旦安装完成并展开后,就会借助太阳风的力量,阻碍小行星的飞行,从而使其逐渐偏离原有的运行(撞击)轨道。在某些情况下,这个太阳帆甚至还可以被用来实现对这颗天体轨道某种程度的遥控。

1993年,Melosh等^[13]提出使用反射镜将太阳能聚焦到小行星表面一小部分区域上,所产生的热使行星表面材料升华。升华过程将产生气体和灰尘的射流,

进而产生连续的推力,这个推力最终将有可能改变小行星的运行轨道,类似于彗星从地面喷射物质从而驱动改变运行轨道的情况。从概念上讲,类似与太阳能集热器方案的想法是使用由核反应堆或太阳能阵列供电的激光束来诱导表面材料升华。

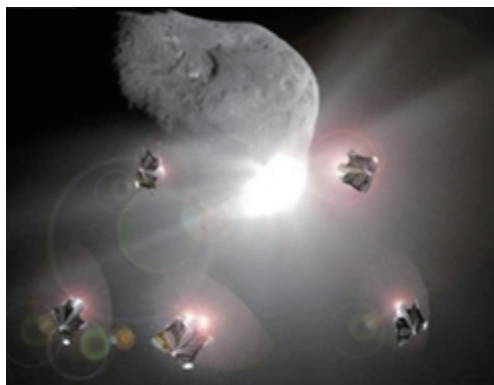


图2 太阳能集热器

Fig. 2 Solar collector

太阳能集热器策略原理简单,并且发射太阳能集热器成本相对较低,具有一定的可行性。当然,也存在一些问题:①这种方案针对的都是预警时间有相当长的一段预警时间的小行星,但是越长也意味着小行星离地球越远,反射镜必须在每个操作条件下聚焦太阳的光,因此必须主动控制曲率,所需要的航天技术及精确度等方面都要求更高,以防止过大的累计误差导致偏转失误,反而增加小行星与地球碰撞的可能;②此类方案要生效需要的作用时间很长可能要数十年之久,这对预警和监测都有更高的要求。因此,此类方案的可行性有待于不断发展的航天实验来验证并做进一步的改进。

2.2.4 低推力推进策略

针对有潜在威胁的小行星,另一个简单的缓解策略是将飞船着陆在小行星上,并使用其推进系统将小行星推出与地球撞击的轨道,可以使用传统的化学推进或低推力推进系统。

化学推进系统可提供非常大的推力,但是排气的最大速度比低推力推进系统的离子化等离子体的速度低约10倍,要实现小行星线性动量的相同变化就需要更多的推进剂。因此,基于高推力化学驱动的策略相对于具有低推力发动机的策略效率较低。传统的火箭是通过尾部喷出高速的气体实现向前推进的,离子推进器也是采用同样的喷气式原理,但是它并不是采用燃料燃烧而排出炽热的气体,不采用化学燃烧方式,而是通过电能作用于工质激发高速离子流向后推进。它所喷出的是一束带电粒子或是离子,它所提供的推动力或许相对较弱,但关键的是这种离子推进器所需

要的燃料要比普通火箭少得多。只要离子推进器能够长期保持性能稳定,它最终将能够把太空飞船加速到更高的速度。与传统的化学推进方式相比,离子推力器需要的工质质量小,是已经实用化的推进技术中最适合长距离航行的,低推力推进如图3所示。



图3 低推力推进

Fig. 3 Low thrust propulsion systems

低推力需要解决诸多关键技术支撑,如:低推力推进,核能发电,自主会合和着陆,锚定系统^[14]等。因此,此类方案的实施仍然存在一些问题:①低推力推进器策略的有效实施需要较长的预警时间;②太空核能发电需要较先进的技术来运作和维护,一旦在太空出现核泄漏事故更加难以应付;③自主会合与着陆系统需要精准的导航和轨道定位技术提供保障;④要实现低推力推进系统长期稳定工作需要一套稳定完善的锚定系统。此外,在旋转的小行星上,低推力系统不会保持恒定的指向,使得此类方案的实行需要攻克较多的技术难关。

2.2.5 质量驱动器策略

质量驱动系统通过将小行星外壳质量射入空间而产生小行星速度矢量的变化,一些表面物质由挖掘装置挖掘并通过电磁轨道枪加速进入太空。NASA一项名为“模块化小行星偏转弹射”的项目包含了此策略的内容,其具体的设想是:发射一批核动力驱动的机器人前往小行星表面,一旦着陆之后它们就会开始“吞食”小行星表面岩石,然后将吞下的岩石使用电磁炮技术高速弹射进入太空。

这种策略的优点是用于改变小行星线性动量的物质是从小行星上获得的,而不是从地球上运载。质量驱动器策略需要考虑以下主要关键技术:自主会合和着陆、微重力自主采矿、大功率轨道枪、核能发电、锚定系统。与低推力系统类似,这种方案同样需要小行星有较长的预警时间、开发准确的导航和轨道定位技术实现自主会合和着陆、长期稳定地克服微重力并实现自主采矿的装置和大功率轨道弹射装置、先进的技术来运作和维护核能发电设备和稳固的锚定系统。

2.2.6 引力拖拽策略

引力拖拽策略指利用小行星和航天器之间的相互吸引力,将小行星拖离,从而避免与地球相撞。为了按照所需的方式使小行星偏转,航天器在拉动期间应保持恒定的悬停位置,这个概念由Lu&Love^[15]提出,是修改小行星轨道的一种手段,克服了小行星表面组成、形态和旋转速度所固有的不确定性特点。

基于引力拖拽策略的原理,只需要考虑小行星质量特性,不需要考虑其形状、结构、物质组成等特征;不需要考虑着陆问题,航天器相对于小行星的位置比较灵活,对航天技术的要求较低;航天器上只需要搭载驱动和定位控制设备,不需要搭载复杂的航天设备,监测和维护成本较低。

引力拖拽策略同时也需要以下主要关键技术来保障顺利实施:不均匀重力场中的自主近端运动控制、核发电、低推力推进。要对小行星产生有效的吸引力,需要相对于小行星有一定质量的航天器,同时要使航天器在与小行星之间相互作用的不均匀重力场中自主的运动,核能发电进而产生低推力来保持长期稳定的运动。因此,需要小行星有较长的预警时间,考虑到引力作用无法对小行星进行精准控制,盲目的干预反而可能增加小行星与地球碰撞的几率,考虑到引力作用,此类方案并不能对大型的小行星产生比较好的偏转作用。

2.3 防御策略小结

以上6种对于近地小行星的防御策略分别有各自的优缺点,适用情况也各不相同,以下分别从适用性、可行性和有效性3个方面对各种防御策略进行对比总结:

1) 从适用性方面来讲,采用核拦截器的防御属于短期快速防御策略,对于体型较小的小行星来说,动力冲击器策略也属于短期快速防御策略,而对于那些大型小行星来说,短期内动力冲击器无法实现小行星的偏转,只能在有长时间预警的情况下作为长期缓慢防御策略的一种,另外4种策略都是对于有较长预警时间的小行星的长期缓慢防御策略。

2) 从可行性方面来讲,核拦截器策略是最直接的、可行性高的一种防御方案,但这种技术所固有的风险很可能会出现政治和安全问题,采用动力冲击器策略可以快速启动而且具有较高的成功概率,是唯一得到在轨验证的防御策略;而太阳能集热器策略原理简单,并且发射太阳能集热器成本相对较低,具有一定可行性;低推力推进器、质量驱动器和引力拖拽策略则都需要长期稳定的核能驱动和先进的航天技术作支撑,需要相当长的时间才能形成一套完善的防御系统。

3) 从有效性方面来讲,对于小行星中那些体积相

对较小的、有一定预警时间的小行星来说，核拦截器无疑是目前最简单有效的防御策略，既不会对地球产生次加危害又能够有效地使小行星偏转或摧毁；动力冲击器策略已在NASA的“深度撞击”任务中测试，并且计划在后续ISIS^[4]等任务中进行进一步验证；其余的防御策略均是用于有长期预警时间的小行星偏转，对

小行星的偏转作用都是一个长期缓慢的过程，而能否产生有效的偏转效果很大程度取决于之后航天技术能否解决各种策略需要攻坚的技术难题，同时也需要进一步的试验验证。

各种小行星防御策略需要解决的关键技术点以及目前存在的比较棘手的问题见表2。

表2 各种防御策略关键技术及存在问题
Table 2 Key techniques and problems of various defensive strategies

策略	关键技术	存在问题
核拦截器	精准控制	技术所固有的风险很可能会出现政治和安全问题；使偏转战略的发展以核武器为基础，而不仅仅是作为技术手段。
动力冲击器	高精度目标，增强因子	需要有较长的预警时间，小行星自转带来合力方向不确定性；耗费巨大的财力；需要建立全球的监测网；需要国际间的合作，这就会涉及到各国的利益，短期内无法建立一个完善的体系。
太阳能集热器	自适应光学，部署和控制超光镜，自主轨道控制，精确自主指向	需要有较长的预警时间；所需要的航天技术及精确度等方面都要求更高；要生效需要的作用时间很长可能要数年之久；这对预警和监测都有更高的要求。
低推力推进	低推力推进，核能发电，自主会合和着陆，锚定系统	需要有较长的预警时间；太空中的核能发电需要先进的技术来运作和维护；需要开发准确的导航和轨道定位技术；需要一套稳定完善的锚定系统。
质量驱动器	自主会合和着陆，微重力自主采矿，大功率轨道枪系统，核能发电，锚定系统	需要有较长的预警时间；需要开发准确的导航和轨道定位技术实现自主会合、着陆和偏转轨道的精确控制；需要长期稳定的克服微重力实现自主采矿装置和大功率轨道弹射装置；需要先进的技术来运作和维护核能发电设备和稳固的锚定系统。
引力拖拽	不均匀重力场中的自主近端运动控制，核发电，低推力推进	需要有较长的预警时间；需要核能发电进而产生低推力来保持长期稳定的运动；不能对大型的小行星产生比较好的偏转作用。

3 建议与展望

采用单一的防御策略完成小行星防御任务的成功率较低，建议尝试采用几种策略组合的方式更好地实现小行星的偏转，具体可参考以下几点：

1) 对于那些预警时间比较长的小行星，可以在小行星的一侧采用引力拖拽策略，在另一侧采用太阳能集热器、质量驱动器或低推力推动策略，同时要考虑小行星的自转所带来的偏转方向的变化，以确保能长期有效地将小行星偏离与地球撞击的轨道；而对于那些预警时间相对较短需要尽快采取应对策略的小行星，主要应用动力冲击器和低推力推进策略，辅以太阳能集热器等策略，从而在短时间将小行星偏离预定轨道，然而这种方案对于大型的近地小行星可能效果不理想。

2) 考虑到技术成熟度、成本等方面，针对不同的行星要采取不同的策略应对，如：大型的小行星虽然偏转难度较大，但是这类小行星更容易被观测到，所以会有更长的预警时间，可以采用核拦截器将小行星摧毁，再对地球有碰撞危险的小型碎屑采用动力冲击器等策略实现有效的偏转。

3) 可以分时间段对小行星采取不同的应对策略，当小行星距离地球较远时，前期主要采取引力拖拽等长期缓慢防御策略，后期根据小行星偏转情况再采取短期快速防御策略对小行星的偏转进行有效的调整。

我国在近地小行星防御方面需要尽早建立观测、监控综合应用平台，能够利用多种平台（地基，天基

等）主动展开对小行星的持续观测识别其潜在威胁，在适当的时间阶段及时提出相应的防御对策；在航天技术攻坚方面加大科研投入和资金支持，如核能推动装置、自主采矿装置、大功率轨道弹射装置，稳固的锚定系统，开发准确的导航和轨道定位技术等；积极参与国际间小行星防御的项目，加强各国之间的交流与合作，在全球范围内建立小行星监测网，以应对各种突发状况。

此外，对于预警时间长达几年甚至几十年的近地小行星，我们有充分的时间进行有针对性方案的设计，特别是可以预先研究小行星的特征，以选定相对较好的防御方案，并为此研制专用的航天器，在距离地球最远处改变其轨道，而且这样也会留有足够的冗余时间，以观察第一方案是否成功，同时可再采取其它方案。而采用多种策略组合的方式能尽早对有威胁的小行星采取相关策略，为航天器的研制和防御策略的实施争取更多的时间。

参 考 文 献

[1] Minor Planet Center. latest published data[EB/OL]. (2009-11-03) [2017-11-24]. <http://www.minorplanetcenter.net/mpc/summary>.
[2] 胡中为. 保卫地球—近地天体的巡视与防御陨击的对策[J]. 自然杂志, 2010, 32(3): 166-173.
HU Z W. Defending planet Earth: near-Earth object surveys and hazards mitigation strategies[J]. Chinese of Journal Nature, 2010, 32(3): 166-173.
[3] 马鹏斌, 宝音贺西. 近地小行星威胁与防御方案研究现状[J]. 深空探测学报, 2016, 3(1): 10-17.

- MA P B, BAOYIN H X. Research status of the near-Earth asteroids' hazard and mitigation[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(1): 10-17.
- [4] 中国科学院国家天文台. 盱眙近地天体望远镜银河系反银心方向数字巡天计划顺利完成[EB/OL]. (2011-03-09)[2017-11-24]. http://www.bao.ac.cn/xwzx/kydt/201103/t20110309_3081031.html.
- [5] REDDY V, SANCHEZ J, THIROUIN A, et al. Challenges in physical characterization of dim space objects: what can we learn from NEOs[C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Maui, Hawaii, USA: Maui Economic Development Board, 2016.
- [6] 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[J]. 航天器工程, 2015, 24(2): 87-95.
- LI F, MENG L Z, WANG T, et al. Summary of near Earth asteroid defense technology[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(2): 87-95.
- [7] LOMOV I, HERBOLD E B, ANTOUN T H, et al. Influence of mechanical properties relevant to standoff deflection of hazardous asteroids[J]. Procedia Engineering, 2013, 58(4): 251-259.
- [8] 姜宇, 程彬, 宝音贺西, 等. 潜在威胁小行星碰撞防御的计算与分析[J]. 深空探测学报, 2017, 4(2): 190-195.
- JIANG Y, CHENG B, BAOYIN H X, et al. Calculation and analysis of the impact defense to the potentially hazardous asteroids [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 190-195.
- [9] 朱进, 高健, 关敏, 等. 小行星的搜寻和定轨[J]. 云南天文台台刊, 2002(3): 17-20.
- ZHU J, GAO J, GUAN M, et al. Asteroid searching and orbit determination[J]. Publications of Yunan Observatory, 2002(3): 17-20.
- [10] 徐伟彪, 赵海斌. 小行星探测的科学意义和展望[J]. 地球科学进展, 2005, 20(11): 1183-1190.
- XU W B, ZHAO H B. Deep space exploration of asteroid: the science perspectives[J]. Advance in Earth Science, 2005, 20(11): 1183-1190.
- [11] 张韵, 刘岩, 李俊峰. 小行星防御动能撞击效果评估[J]. 深空探测学报, 2017, 4(1): 51-57.
- ZHANG Y, LIU Y, LI J F. Evaluation of effects of kinetic impact deflection on hazardous asteroids[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(1): 51-57.
- [12] SANCHEZ P, COLOMBO C, VASILE M, et al. Multicriteria comparison among several mitigation strategies for dangerous near-earth objects[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2009, 32(1): 121-142.
- [13] Office of Audits. NASA's efforts to identify near-Earth objects and mitigate hazards, IG-14-030 (A-13-016-00)[R]. National Aeronautics and Space Administration, Office of Inspector General, US: NASA, 2014.
- [14] 黄江川, 王晓磊, 孟林智, 等. 嫦娥二号卫星飞越4179小行星逼近策略及成像技术[J]. 中国科学: 科学技术, 2013, 43(5): 478-486.
- [15] 崔潇潇. 美国天基空间目标监视系统[J]. 国际太空, 2011(07): 37-43.
- 作者简介:
刘雪奇(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 基于深度学习监控中的人体异常行为检测。
 通信地址: 上海市虹口区玉田路500号(200083)
 电话: (021)25051930
 E-mail: liuxq@shanghaitech.edu.cn

Analysis of Defense Strategies of Near-Earth Asteroids

LIU Xueqi^{1,2,3}, SUN Haibin¹, SUN Shengli¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: The development of observing near-Earth objects and the defense strategies of a variety of near-Earth asteroids are investigated. By comparing and analyzing the realization principle, key technology and existing problems of the defense strategies, the applicability, feasibility and effectiveness of the various strategies are evaluated. Furthermore, with the analysis and summary of these strategies, combining with the research status of near-Earth asteroid defense strategies in China, an effective strategy is put forward, which combines a variety of strategies to take the relevant effective tactics coping with the potential threat of the asteroids. For example, the kinetic impactor, the Solar collector, the mass driver, or the low thrust propeller are used on one side of the asteroid, and the gravity tractor is used on the other side, that can more effectively deflect the asteroid toward one direction, and gain time for the development of spacecraft and the implementation of defense strategies.

Key words: asteroid; defense strategies; kinetic impact; Solar collector; low thrust propulsion

High lights:

- The research status of “potentially hazardous asteroids” was reviewed, including the quantity, impact events, etc.
- Some of the key technologies for defense strategies that need to be addressed were listed: nuclear energy propulsion devices, autonomous mining devices, high-power orbit catapults, solid anchoring system, the development of accurate navigation and orbit positioning technology, etc.
- An effective defense strategy is put forward, which combines a variety of strategies. For example, the kinetic impactor, the Solar collector, the mass driver, or the low thrust propeller is used on one side of the asteroid, and the gravity tractor is used on the other side, that can more effectively deflect the asteroid toward one direction.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]