

近地小行星观测技术分析

孙海彬^{1,2}, 孙胜利^{1,2}

(1. 中国科学院 智能红外感知重点实验室, 上海 200083; 2. 中国科学院 上海技术物理研究所 上海 200083)

摘要: 数量庞大的近地小行星对地球安全构成了重大潜在威胁, 受现阶段小天体观测技术水平限制, 仍有大量危险性小行星尚未发现。瞄准我国近地小行星空间观测技术发展需求, 通过综合分析国内外近地小行星观测现状及相关技术水平, 并结合天/地基小行星观测平台能力对比, 从我国近地小天体观测技术基础出发, 提出了我国空间红外小行星观测技术方案。采用可见-红外融合探测的技术方案开展小行星搜寻与光谱详察, 并通过空间小行星观测平台与地面观测装备网络协同观测, 为推动形成我国天体一体化小行星观测体系奠定基础; 同时通过对多种小行星撞击地球的防御策略以及小行星利用价值综合分析, 为我国开展近地小行星观测、预警、防御等任务提出了初步建议。

关键词: 近地小行星; 空间观测; 红外技术

中图分类号: P185

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)02-0197-09

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20180314001

引用格式: 孙海彬, 孙胜利. 近地小行星观测技术分析[J]. 深空探测学报, 2020, 7(2): 197-205.

Reference format: SUN H B, SUN S L. Research on the near-Earth asteroid observation technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(2): 197-205.

引言

小行星作为围绕太阳运动的一类特殊的天体, 由于其数量较大、个体特征迥异、运行轨道特殊等特点, 对人类探究宇宙演化和起源、寻求新的生存空间以及保护地球安全等活动有重要的科学意义。太阳系内的小行星大都运行在火星和木星轨道之间, 称为主带小行星; 也存在一些距离太阳更近并与地球轨道有交叉的小行星, 天文学上通常把这种离地球轨道更近(小于0.3 AU)的小行星统一称为近地小行星(Near Earth Asteroid, NEA)^[1]。其中直径大于140 m且与地球轨道交会距离小于0.05 AU的小天体称为潜在威胁天体(Potentially Hazardous Objects, PHOs), 对地球安全和人类的生存将构成巨大威胁。根据此标准, 目前已确认的超过1.7万颗近地天体中有近1 700颗应被认为具有“潜在危险性”^[1-2]。这些小行星撞击地球后将会诱发气候、生态与环境的剧烈灾变, 体积较大的小行星甚至可能导致地球上物种的灭绝, 如: 恐龙灭绝事件等^[2-4]。小行星撞击地球所引发的灾害是瞬时的, 但此类灾害具有可预测、可防御的特点^[2,5]。因此, 针对近地小行星的观测网络、危险预警机制的建立以及相应的防御

策略的规划、实施, 将能够有效降低小行星撞击的危害程度、规避小行星撞击给地球和自然界物种所带来的威胁。

以美欧为代表的航天大国很早就开展了近地小行星的观测和防御计划, 尽管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。美国国会要求美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, 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)^[6], 美国在整合大量地基望远镜的同时, 部署了广域巡天望远镜NEOWISE和下一代NEOCam空间小行星观测望远镜, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)于2009年也启动了“太空态势感知”计划, 统筹20个成员国开展空间碎片和潜在威胁天体观测任务, 以便更精准地搜寻具有“潜在危险性”的小行星^[7-8]。比较典型的小行星探测计划如: 美国的“尼尔-舒梅克号”(Near Earth Asteroid Rendezvous-Shoemaker)、“黎明号”(Dawn)、OSIRIS-Rex(“Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security Regolith Explorer)探测器, 日本“隼鸟号”(Hayabusa)、“隼鸟2号”(Hayabusa 2),

收稿日期: 2018-03-14 修回日期: 2018-05-28

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所创新专项(CX-211); 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室开放课题(CASIR-201801)

ESA的“罗塞塔号”(Rosetta)等^[9]。2015年中国的“嫦娥2号”探测器在拓展任务中近距离飞越“战神”小行星(4179 Toutatis),实现了我国在近地小行星抵近探测领域的突破^[10]。

现阶段,我国近地小天体观测仍以地面可见光观测设备为主,且仅有一个小天体观测专用平台,无小天体空间观测设备。本文以小行星的潜在威胁为切入点,综合分析小行星观测及防御技术现状及发展趋势,结合我国小天体观测技术基础和发展需求,提出我国开展小天体空间红外观测技术初步方案,为我国构建天地一体的小天体观测预警技术系统,自主开展近地小行星观测、预警、防御技术研究提供参考。

1 小行星的潜在威胁分析

人类赖以生存的地球时刻面临着多种威胁,而小行星的撞击是所有潜在威胁当中可能造成地球毁灭的最严重威胁种类之一。2005年11月在伦敦举行的“近地天体”研讨会上,英国天文学家莫尼卡·格拉迪曾指出“近地小行星和地球相撞是时间问题,而不是会不会的问题”。小行星撞击地球将可能引发多种难以抵抗的灾难,如:全球性森林火灾,大气层环境改变,全球温度大幅度变化,大规模地震、海啸等。

6 500万年前,一个直径10 km的小行星撞击在尤卡坦上,引发了全球性森林火灾和强烈的地震、海啸,扬起的尘埃长时间遮住了阳光,使得地球温度下降了16 °C^[11],导致了地球上70%的物种灭亡,其中最典型的就恐龙。1908年,俄罗斯西伯利亚通古斯地区的一次小行星碰撞地球引发的大爆炸毁灭了约2 000 km²的西伯利亚森林^[12];2008年,小行星TC3进入苏丹北部上空大气层时发生爆炸,释放出总计高达1.1~2.1 kt当量的能量,相当于一枚小型核弹的威力^[1,12];2013年,在俄罗斯Chelyabinsk发生的一起陨石爆炸事件直接造成了约1 500人受伤,1 000多间房屋受损,仅仅18 h之后,又有一颗直径50 m、重143 kt的小行星(2012DA14)在离地球2.77万km处飞过^[2,4,13]。在这些潜在威胁的近地小行星中,曾最受关注的是2004年7月发现的阿波菲斯(Apophis)小行星(约3个半足球场大),虽然经过多年的持续观察已经排除其2029年撞击地球的可能性,但仍会近距离飞越地球,进一步的观测表明其在2036年和2068年撞到地球的概率分别约为1/25万和1/3万^[3,14-15]。

天文观测表明每天都有众多的小行星、行星碎片冲入大气层,但是由于其体积太小(直径远小于140 m),这类小天体在经过地球表面大气层时由于摩擦基本燃

烧殆尽,大部分对地球没有威胁。表1列出了随着近地小行星直径的增加,其撞击地球引发的灾害规模、产生的撞击能量以及撞击事件发生概率的变化趋势。伴随人类探索太空脚步不断加快,航天器的安全运行、尤其是空间站等大型空间设施的安全也越来越重要,而小行星的撞击则会对航天器造成毁灭性的破坏,甚至可能引起连锁的太空爆炸。美国和俄罗斯先后开展了太空碎片的捕获实验,同时对威胁性小行星的可能危害提出了多种积极的系统性防御方案^[16-18]。中国航天事业正处于发展黄金期,空间站的建设也已经初具规模,我们在发展航天事业的同时,有必要积极开展空间设施的防护工作,拓展有关空间碎片、小行星等的观测、监视、预警以及防御相关工作,为航天事业保驾护航。

表1 近地天体撞击事件分类^[3]
Table 1 Kinds of the NEO impacts^[3]

| 事件类型 | 撞击体直径/m | 撞击能量/MT | 平均间隔/年 |
|---------|---------|---------|--------|
| 空爆 | 25 | 1 | 200 |
| 地方规模 | 50 | 10 | 2 000 |
| 区域规模 | 140 | 300 | 3万 |
| 大陆规模 | 300 | 2 000 | 10万 |
| 小于全球灾难阈 | 600 | 2万 | 20万 |
| 可能全球灾难 | 1 000 | 10万 | 70万 |
| 大于全球灾难阈 | 5 000 | 1千万 | 3千万 |
| 大规模灭绝 | 1万 | 1亿 | 1亿 |

注:MT为百万吨TNT当量

2 近地小行星的观测现状分析

2.1 近地小行星观测现状

国际小行星中心(Minor Planet Center, MPC)作为全球小行星观测网络的神经中心,负责收集和发布来自全球46个国家提供的小行星、彗星等观测数据、轨道信息等资料,据MPC统计,截至2018年1月人类共进行了近18.28亿次观测,发现小行星75万多颗,其中近地小行星1.7万多颗^[1,19-20]。

近些年,NASA组建的近地天体研究中心(Center for Near Earth Object Studies, CNEOS)是世界范围内较有影响力的小行星观测组织之一,图1是CNEOS发布的近地小行星观测的相关数据^[21]。如图1(a)所示,截至2018年1月28日,全球共发现近地小行星17 627颗,其中直径大于140 m的约8 035颗,直径大于1 km的约886颗,随着观测技术手段的不断进步,最近10年内近地天体发现的数量迅速增长。同时表中也可以看出:已探明的小行星中,直径大于1 km的小行星

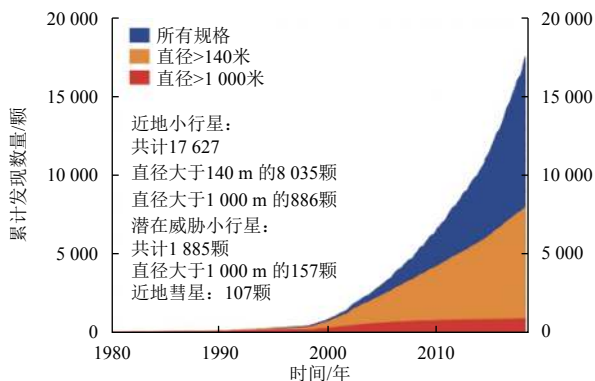
数量自2010年以来基本维持不变，侧面也说明了我们的观测技术手段亟需变革。而图1(b)中数据表明：虽然人类每年观测发现的近地小行星总体数目不断增加，但在世界范围内，近地小行星的观测数据主要由少数几套观测系统提供，如：麻省理工学院林肯实验室的LINEAR (Lincoln Near Earth Asteroid Research) 项目、亚利桑拿大学月亮和行星实验室的CSS (Catalina Sky Survey) 系统以及由NASA资助的位于夏威夷毛伊岛的Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System) 系统等，而其它相关的观测设备提供的数据相对较少。上述提供大部分数据的3套天文观测系统都是地基光学望远镜系统，为了克服地基观测系统受大气层影响导致探测灵敏度下降的问题，近几年，欧美等国家也在积极探索和尝试天基观测设备，并已经初步开展了相关实验验证。相比于光学观测系统，红外天文观测系统具有探测灵敏度高、探测范围广等诸多优点，美国于2009年已经发射了近地天体大视场红外巡天探测卫星 (NEO-WISE) [21]，并在积极布局下一代小天体空间观测望远镜NEO Cam。此外，雷达设备作为比较常用的探测手段也被应用于小行星的探测监视工作中[22-23]。

得到的小行星光变曲线，进而反演出小行星的形状特征和轨道特点。美国Pan-STARRS系统 (见图2) 是现阶段比较先进的地基光学探测平台，望远镜采用1.8 m口径R-C系统，系统视场角约为3°，探测器组件由60个独立的CCD按8×8阵列拼接组成，每个CCD单元由64个600×600像素单元组成，使得系统的像素达到1.4亿[24]。作为一个能够对更广阔领域天体进行天文测量和光度测定的巡天系统，通过对比同一天区不同时间内区域特征的变化发现彗星、小行星及变星，尤其是有撞击地球潜在威胁的近地天体等[25]。从图1(b)中可以看出，从2011年起，Pan-STARRS系统所提供的观测数据逐年增加，到2015年，该系统提供的数据几乎占整体数据的45%，是继LINEAR和CSS系统之后，在小行星观测领域美国研制的最先进的巡天系统。

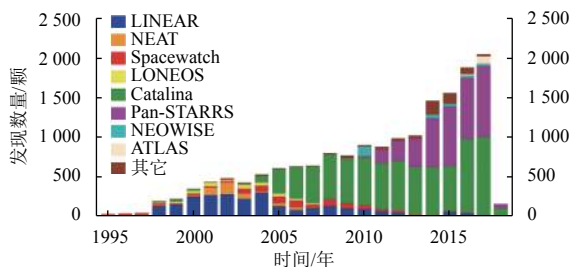


图2 美国Pan-STARRS观测系统
Fig. 2 Pan-STARRS of the USA

美国的卡特琳娜巡天系统 (Catalina Sky Survey, CSS) 是较为典型的地基巡天系统，由口径1.5 m、1.0 m和0.7 m的3个望远镜组成，如图3(a)~图3(c)所示，3个望远镜分别位于3处观测站：亚利桑那州莱蒙山 (Mountain Lemmon)、毕吉诺山 (Mountain Bigelow) 和澳大利亚的赛丁泉天文台 (Siding Spring Survey, SSS) [26]。其中1.5 m口径的望远镜设计F数为1.6，视场角为2.25°，探测器像素达1.11亿；1.0 m望远镜采用卡塞格林反射系统，设计F数为2.6，视场角为0.54°，探测器规模为2K×2K；而0.7 m望远镜则采用施密特系统，设计F数为1.8，视场角为4.4°，探测器像素同样能够达到1.11亿，3个望远镜的设计指标和工作内容相辅相成。CSS系统的主要作用是探索发现彗星、小行星和搜索近地小行星，尤其是直径超过140 m的近地天体，美国国会授权CSS团队编目90%以上直径超过140 m的近地天体[26]。此外，该实验室 (月球行星实验室) 同时负责另一个天文观测系统 (Spacewatch系统) 的研制和运行，该系统由0.9 m口径和新建的1.8 m口径望远镜组成，主要任务就是搜索太阳系的小天体，系统是第一个用CCD相机来搜索小行星和彗星进行日常观测的系统[27]。



(a) 近地小行星探测统计 (最近一次发现日期：2018年1月28日)



(b) 近地小行星探测统计 (截止2018年2月1日)

图1 CNEOS发布的近地天体观测数据[21]

Fig. 1 Observation data of NEO issued by CNEOs[21]

2.2 典型的近地小行星观测系统性能分析

小行星地基光学观测平台通常采用地面光学观测

2000年左右在对近地小行星观测贡献最大的

LINEAR系统是麻省理工林肯实验室(Lincoln Laboratory)中由美国空军和NASA共同资助的研究项目,其首要任务是论证发展地球同步轨道卫星监视技术,同时探测、监视和编目对地球有威胁的近地小行星^[28]。近地小行星的探测监视主要依托位于林肯实验室的一对1 m口径的地基光电深空探测望远镜(Ground-based Electro-Optical Deep Space Surveillance, GEODSS),望远镜采用卡塞格林反射系统,探测器采用装备实验室自主研制的CCD。LINEAR项目在早期为MPC提供了大量的近地天体观测数据(参见图1(b))。



(a) 1.5 m 口径望远镜 (b) 1.0 m 口径望远镜 (c) 0.7 m 口径望远镜

图3 美国卡特琳娜巡天系统(CSS)

Fig. 3 CSS of the USA

国际上在小行星观测领域还有其它一些观测跟踪系统和相关项目,如:Lowell Observatory Near-Earth-Object Search(LONEOS)计划、喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的近地小行星跟踪系统(NEAT)以及ESA的La Sagra巡天望远镜和位于特纳里夫岛(Tenerife)的1 m口径望远镜,帕洛玛小行星和彗星搜寻,欧洲NEO搜寻、追踪和物理观测计划(European NEO Search, Follow-up and Physical Observation Programme, EUNEASO)等。然而,考虑不同观测系统主要任务的差异,同时受系统设计参数以及观测位置等条件的限制,其它各种观测系统提供的近地小行星相关数据相对较少。

1995年,中国科学院紫金山天文台提出了“中国近地天体探测”(Chinese Near Earth Object Survey, CNEOS)计划,并于1998年正式启动,2006年紫金山天文台在盱眙观测站建成了一台口径1 m的施密特望远镜(口径在全球排名第6),配备4 K × 4 K漂移扫描CCD探测器,像素高达1 600万以上。截止2012年8月,利用该望远镜观测了149 971颗小行星,发现了1 279颗临时编目小行星,编目了251颗小行星^[29]。此外,为保证“嫦娥2号”卫星飞越探测任务的顺利进行,中国科学院月球与深空探测总体部联合组织了国内多

家天文台(主要有国家天文台、紫金山天文台和上海天文台),从2012年5月份起利用地基光学望远镜对4179号小行星进行连续接力观测,获取了大量的精确观测数据,为“嫦娥2号”卫星飞越探测小行星的轨道设计提供了重要依据,也开创了我国小行星抵近探测的新局面^[10]。

在小行星天基观测方面,美国于2009年发射了搭载0.5 m口径望远镜的天基近地天体大视场红外巡天探测卫星(NEOWISE)。该卫星于2009—2011年间发现了几百颗近地小行星和彗星^[30],经过两年休眠后NEOWISE于2013年后又重新开始工作,是现阶段国际上主要的小行星天基观测系统之一。加拿大于2013年2月搭载发射了0.15 m口径望远镜的近地目标监视卫星(Near-Earth Object Surveillance Satellite, NEO-SSat),主要用于监视近地小行星和空间碎片^[31-32]。德国的Asteroid Finder卫星主要任务也是探测小行星^[3,33]。由于受反射角度的影响,小行星反射的太阳光更容易进入位于日地间拉格朗日点L1处,甚至更靠近太阳到金星轨道的天基望远镜,因此,NASA提出发射日地间拉格朗日点L1和类似金星轨道的天基近地小天体探测望远镜^[34],如:计划运行在类金星轨道的近地天体巡天航天器NEO Survey,搭载了0.5 m口径的红外望远镜^[35]。天基光学观测系统通常采用被动探测方式,具有可观测距离较远、获取目标天体的几何特征更精确、系统载荷技术容易实现、具备长期连续监测的能力等优势,当然,天基观测系统也有自身的一些缺陷,如:技术不够成熟,运行和维护成本相对地基观测系统较高。

除光学观测手段外,微波探测也是现阶段小行星探测常用的手段之一。目前,微波探测技术主要依靠大型地基雷达观测平台^[22-23],雷达观测一般通过天线等微波发射装置向小行星发射一定频率的电磁波并接收其反射回波,进而探测小行星体积、运行状态等特征,并通过长时间连续观测、推演,进一步判定小行星运行轨道的具体特征。雷达观测精度较高,可大幅度提高近地小行星的定轨精度,在较短观测弧段内就能得到近地小行星较精确的轨道,对于特别重要的探测范围内的目标的高精度测距、形状、大小特性的解译极其重要。1993年Hudson等人建立了从延迟多普勒图像推演小行星形状模型的方法,经Magri等人完善后^[36],现已成为利用雷达探测手段建立小行星形状模型的主要方法。通过雷达探测可以得到小行星的表面性质,还可以对小行星做延迟多普勒成像观测,进而确定小行星大小、旋转速度、表面硬度等信息。

NASA计划采用微波技术监测小行星运行规律，如对小行星2004 BL86的监测，同时提出了对天体进行雷达监测的重要性，使用位于波多黎各的阿雷伯西射电望远镜对小行星进行雷达监测^[36]；中国在贵州境内建立了目前世界上口径最大的单天线射电望远镜：500 m口径射电望远镜（Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST），在天文观测领域发挥了非常重要的作用。通过长期雷达观测，结合光学观测图像，将能够获得更多小行星起源和形态的信息，对小行星预警以及对后期防御策略提供重要依据。但雷达观测的作用距离有限，仅能观测距离太阳0.3 AU内的小行星，并且需要提前知道小行星的方位，进而导致雷达探测技术很难用于发现小行星，射电望远镜等一般用于观测电磁信号特征特别强的星体活动。

2.3 小结

从上述观测平台比较分析来看，现阶段国内外小行星观测仍主要依靠地基光学观测平台，且在不断完

善地基观测网络，如拓展观测系统波段、功能及加快全球组网布局等，然而地基观测系统始终难以克服观测距离、系统分辨率等主要指标受大气层的影响较为严重的难题，造成了观测系统有效观测时间短，只能在晴朗的夜空观测，容易受到天气、大气、气象等因素影响，一年有效观测时间仅约1/5；且存在观测盲区，无法观测来自太阳方向的小行星等不足。天基观测平台则可以最大限度地摆脱大气层的影响，且不受观测站点固定的限制，使得观测平台可在目标特征获取和观测覆盖性等方面发挥较大优势，且连续观测时间长，理论上可以 7×24 h观测，是未来一段时间内各国竞相发展的小行星观测技术方向。相对于现阶段比较常用的可见光观测技术，红外天文观测具有红外观测对空间暗弱天体观测能力更强、能够获得更加丰富的小行星光谱信息等绝对优势，因此红外波段望远镜是天基观测系统的首选波段^[36]。表2系统地比较分析了各类观测平台的技术优势与不足。

表2 几种观测系统的对比

Table 2 Comparison of several kinds of observation systems

| 参数 | 观测平台 | | 观测波段 | | |
|-------|----------------|----------------|----------|--------------|-------------|
| | 地基观测系统 | 天基观测系统 | 可见光观测系统 | 红外观测系统 | 微波雷达观测系统 |
| 观测距离 | 受大气扰动影响，观测距离受限 | 摆脱大气干扰，探测距离更长 | — | — | 受一定的电磁信号干扰 |
| 系统分辨率 | 受大气层影响 | 摆脱大气影响，分辨率更高 | 高分辨率 | 中等分辨率 | — |
| 观测范围 | 受观测位置、平台等限制 | 不受站点位置限制，机动性更强 | — | — | 定方向观测 |
| 观测对象 | 近地及深空 | 深空探测更具优势 | 反射强度大的星体 | 暗弱天体 | 电磁信号特征较强的星体 |
| 观测误差 | 误差较大 | 误差较小 | 误差较大 | 误差较小 | 误差较小 |
| 技术成熟度 | 技术比较成熟 | 起步阶段（天文观测领域） | 比较成熟 | 发展空间较大 | 相对成熟 |
| 系统拓展性 | — | — | 波段受限 | 根据需要选择不同红外波段 | — |

3 近地小行星空间红外观测技术分析

3.1 近地小行星空间红外观测方案分析

美国在2006年提出了近地天体望远镜（NEOCam）计划，利用红外望远镜对地球轨道附近的潜在威胁小天体进行监测，目前该计划已经完成背景型号研究进入工程立项阶段，预计2025年将被发射到日地系统L1点轨道。NEOCam相机拟采用 $2\ 048 \times 2\ 048$ 面阵的中长波红外（ $3\sim 5\ \mu\text{m}$ $6\sim 10\ \mu\text{m}$ ）探测器，实现对暗弱小天体的观测；利用50 cm口径望远镜实现 $3.4^\circ \times 3.4^\circ$ 天区覆盖^[37]。该相机将力争在5年内探明2/3以上直径大于140 m的潜在威胁小天体，10年内完成90%以上（NEOCam轨道及相机构型参见图4）。

美国民间组织也曾提出在类金星轨道部署“哨兵”计划，载荷也是红外望远镜，同样致力于对直径140 m的小行星进行监测，但该计划已经取消。我国钱学森空间技术实验室提出了CROWN计划，通过在类金星轨道设置6~8颗微小卫星，开展对潜在威胁小天体的搜寻与光谱详察^[38]。

从相机运行的轨道来看，日地L1点位于日地连线距地球约150万km处，对来自太阳方向的小行星具有一定的观测能力，极大地弥补了地基观测的盲区。而类金星轨道位于地球内侧，有利于发现位于地球轨道内侧的小行星，但类金星轨道的周期与地球相差较大，且大部分时间距离地球较远，造成当小行星对地球产生威胁时，地球不一定在类金星轨道光学望远镜

的视场内。因此,从小行星有效预警的角度来看,日地L1点更适合开展近地小行星观测预警工作。

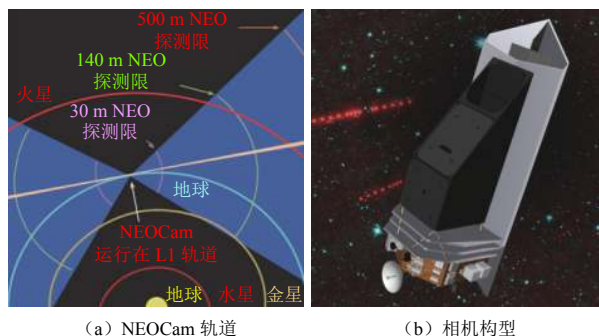


图4 NEOCam轨道及相机构型^[8]
Fig. 4 The orbit and structure of NEOCam^[8]

从相机的功能来看,中长波红外波段更有利于实现暗弱小天体的观测,对发现潜在威胁小天体具有绝对的优势。短波红外波段(尤其是 $1.5\sim 3\ \mu\text{m}$)是获取小天体中可能存在的水、有机物等物质光谱信息的有效波段,对分析小天体组份将发挥重要作用,而天体组分分析是开展小天体危害评估的重要环节。此外,可见光波段在相同相机口径下可实现的观测星等显著优于红外波段,从小行星探测与普查的角度来讲,可见光是空间小行星观测相机不可缺少的波段。

因此认为:在日地L1点设置覆盖可见-红外波段的大视场小行星观测相机不仅能够有效开展小行星观测与光谱分析,同时也能够对危险小行星的实施危害评估并进行及时预警。

3.2 近地小行星空间红外观测技术发展趋势分析

近地小行星空间观测技术正处于蓬勃发展阶段,红外天文观测技术及空间红外探测技术对小天体空间观测技术发展具有巨大的推动作用,促使小天体空间观测技术发展向更大口径、更多手段、天地一体等方向发展。

1) 观测系统光学口径将逐步增大

光学系统的口径是提升系统观测星等(灵敏度)、决定系统小天体搜寻能力的核心指标。各国相继研制了不同类型的超大口径光电仪器,如:JWST-6.5 m,这类超大口径空间光学系统将显著提升红外天文观测水平,并极有可能颠覆人类的认知世界。各类其它空间光电仪器也逐步突破了大口径、高灵敏度、高分辨率技术,如:应用于敌对侦查的4 m碳化硅反射镜等,显著提升了系统的观测能力。空间小行星观测系统也必将通过更大口径来实现对极暗弱危险型小行星的探测与详察。

2) 多手段、多平台协同提升整体观测能力

单一手段很难满足对多类型小行星的普查与筛选,可见光、红外、雷达等手段均具有各自独特的优势(参见表2);单一平台观测范围受限,不同轨道点、不同轨道区间对小行星的观测均具有各自的优势,如:日地L1点有效观测来自太阳方向的小行星,类金星轨道更利于发现地球轨道内侧的小行星、空间站平台能够长期稳定开展多种探测试验等。多手段、多平台协同工作将从整体上极大地提升小行星观测效能。

3) 天地一体、数据互联趋势更加显著

地基望远镜具有成熟度高,大口径望远镜建设风险小、生命周期长、易于全球布网等绝对优势,但有效观测时间短、存在观测盲区、红外光谱信息获取能力有限,而天基观测可以补充地基监测盲区、开展精确定轨、开展光谱详察等工作。因此,只有通过天地一体、数据互联形成优势互补,才能够更加有效地开展小行星观测预警工作。

4 危险型近地小行星的防御策略

近地小行星观测技术发展使得人类能够更早地发现对地球安全构成威胁的小行星,以便采取适当措施降低、避免地球受到来自小行星的撞击危害。各国研究人员针对小行星的防御提出了多种建设性方案,鉴于当前世界空间科技发展水平,对于威胁地球的大型小行星和预警时间较短的小行星,最简单、最直接也是最有效的防御方案是使用核武器摧毁威胁性星体。然而,核爆炸及次生碎片对地球和人类将会造成新的威胁,因此,对于小行星的防御,研究非核爆方案显得十分必要。非核方案侧重于从不摧毁小行星的出发点进行设计,通常的方案是将小行星偏转出撞击地球的轨道,而行星的轨道一般由其自身的质量和运行速度决定。在小行星表面安装特定设备抛射行星表面物质,在改变小行星质量的同时会产生一个反向作用力进一步促进行星轨道变化;而改变小行星运行速度(包括方向和大小)的方案一般依据小行星的威胁预警时间,对于有较长预警时间的小行星,可采用小作用力长时间积累作用的方案,通过持续作用达到改变行星速度进而改变其运行轨道的目的,而对于预警时间较短的小行星,要求在短时间内速度改变量较大,这就需要较大的作用力来达到相应的速度改变量实现小行星的快速偏转。

根据小行星预警时间的不同可以将小行星防御策略分为短期快速防御和长期缓慢防御。根据现阶段技术特征,短期快速防御方案一般可采用:核拦截器、

动力冲击器(航天器撞击)策略;而长期缓慢防御策略则可以采用如:太阳能集热器、低推力推进、质量驱动器和引力拖拽等策略。各种防御策略方案详见文献[1~2]、[39]。目前,在所提出的各种防御技术方案中,除了动力冲击技术已在美国“深度撞击”(Deep Impact)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^[1-2,40-42]。小行星的防御工作还有待提出更多较易操作、防御效果更好的方案,为人类面临自然灾害时降低灾害威胁提供必要的应对措施。

5 结束语

通过对小行星观测技术现状的对比分析可看出,虽然我国小行星观测工作也在逐步开展,但是与欧美国家相差较远。具体表现为:

1) 观测能力不足:地基光学观测系统种类和站点部署远落后于欧美国家,小行星天基观测系统仍处于论证阶段,行星观测团队力量不足,每年发现的小行星数目相对较少,对危险小行星的持续观测能力和预警能力亟待提升。

2) 观测技术水平不能满足需求:目前国内天文观测基本依靠地基可见光观测系统,受红外探测器探测率的限制,国内红外天文观测系统的研制工作仍处于初期阶段,我国天基小行星观测系统仍为空白。

3) 信息处理和传播效率不足:现阶段我国有多家天文台等专业天文研究机构,诸多科研院所也在进行小行星的观测等研究,但现阶段仍缺少负责收集、整理、发布相关信息的权威性组织,致使国内小行星观测研究领域存在信息比较零散、资源共享率较低、信息不对称等诸多问题。

小行星观测预警技术与国家安全紧密相连,为了能够在小行星观测领域取得长足发展,有必要从多方面积极开展小行星观测领域相关工作:

首先,应积极发展我国小行星观测平台建设,针对性建设小行星观测站点;建立常态化小行星观测平台,同时形成对特殊星体的持续跟踪探测;完善小行星观测预警技术人员培养机制,不断壮大小行星观测技术团队,在小行星观测预警领域代表中国发声。

其次,在建设行星地基可见光观测系统平台的同时,努力发展红外天文观测系统,提升我国红外天文观测系统技术水平,建设可见红外协同观测技术平台;在我国航天技术飞速发展的基础上,通过借鉴国际空间天文观测技术,结合我国空间光学(可见-红外)探测技术发展水平,积极发展我国天基(红外)天文观测系统(平台),为进一步探测发现小行星提

供技术支撑;在我国先进射电望远镜的基础上,建立可见-红外-微波一体化探测平台。

在努力发展小行星观测预警技术的同时应着力建设信息收集和处理平台,形成小行星观测数据和设备共享机制,建立小行星观测数据权威发布机构,同时积极吸收民间机构和组织积极参与小行星观测、预警系统建设,努力扩大小行星观测预警平台建设的影响力。

历史经验和天文观测数据表明小行星撞击地球是必然事件,且造成的危害将是难以估量的,而探测预警小行星的主要目的之一就是保卫地球免受小行星撞击危害。通过地基和天基观测手段相结合,光学和微波观测相互补,积极推动世界各国建立小行星观测数据共享框架,进一步推进小行星观测工作快速发展;并在现有技术条件下,积极探索威胁性小行星防御方案策略。共同防御小行星撞击地球事件的发生是全人类共同面临的威胁,积极发展壮大小行星研究队伍,集思广益,发散思维,提出更多可开发的防御方案,为保护人类赖以生存的地球做出积极的贡献,同时也为人类发展航天事业,探索宇宙奥秘保驾护航。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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. Research on defense technology approach on planetoid crash Earth[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(2):87-95.
- [3] 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. Defend Earth—touring near Earth asteroid and defense approach of aerolite crash[J]. Natural Forum, 2010, 32(3):166-173.
- [4] 杨志根,林清.地球上的天体撞击事件[J].科学前沿,2007,53(4):12-16.
YANG Z G,LIN Q. Incidences of astrometry crash in the Earth[J]. Science Advance, 2007, 53(4):12-16.
- [5] NASA. Planetary defense coordination office[EB/OL]. [2018-03-14]. <https://www.nasa.gov/planetarydefense/overview>
- [6] RON C. The day the dinosaurs died[J]. Astronomy, 1996, 24(4):34-41.
- [7] 李俊峰,曾祥远.不规则小行星引力场内的飞行动力学[J].力学进展,2017,47(1):429-451.
LI J F,ZENG X Y. Flight dynamics over irregular asteroids[J]. Advances in Mechanics, 2017, 47(1):429-451.
- [8] 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]. *Yunnan Observatory Journal*, 2002(3): 17-20.
- [9] 徐伟彪, 赵海斌. 小行星深空探测的科学意义和展望[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(11): 1182-1190.
- XU W B, ZHAO H B. Deep space exploration of asteroids: the science perspectives[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(11): 1182-1190.
- [10] 黄江川, 王晓磊, 孟林智. 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.
- HUANG J C, WANG X L, MENG L Z. The approach stage and imaging technology of CHANG E II satellite flyover the 4179 planetoid[J]. *Science China Press: Science Technology*, 2013, 43(5): 478-486.
- [11] 欧阳自远. 小行星撞击地球的“祸”与“福”[J]. *地球资源导刊*, 2013(5): 86-92.
- OUYANG Z Y. The disaster and blessing of asteroid impact Earth[J]. *Earth Resource Guide*, 2013(5): 86-92.
- [12] CHYBA C F, THOMAS P J, ZAHNLE K J. The 1908 Tunguska explosion-atmospheric disruption of a stony steroid[J]. *Nature*, 1993(361): 40-44.
- [13] BROWN P G, ASSINK J D, ASTI L, et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors[J]. *Nature*, 2013, 503(7475): 238-241.
- [14] CHESLEY S R. Potential impact detection for near-Earth asteroids: the case of 99942 Apophis (2004MN 4)[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2005, 1(S229): 215-228.
- [15] 邬静云. 太阳帆绳系小行星动力学与控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- WU J Y. Research on the dynamics and control of a tethered system formed by an asteroid and a solar sail[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [16] CARLOS M R, SHEN H J, JESICK M, et al. Catching a rolling stone: dynamics and control of a spacecraft and an asteroid[C]//IAA-PDC13-04-27, Flagstaff. [S.l.]: IAA, 2013.
- [17] 马楠, 贵先洲. 国外空间碎片清除计划[J]. *国际太空*, 2013(2): 64-69.
- MA N, GUI X Z. The removal plan from space debris in abroad[J]. *International Space*, 2013(2): 64-69.
- [18] 张玉军, 冯书兴. 主动式空间碎片清理研究[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2010, 21(6): 78-82.
- ZHANG Y J, FENG S X. Research on active space debris removal[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2010, 21(6): 78-82.
- [19] The International Astronomical Union Minor planet center. Minor planet center[EB/OL]. [2018-03-14]. <https://www.minorplanetcenter.net>.
- [20] NASA. Discovery statistics[EB/OL]. [2018-03-14]. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>.
- [21] MAINZER A. NEOWISE observations of near-Earth objects: preliminary results[J]. *The Astrophys Journal*, 2011(743): 56-172.
- [22] OSTRO S J, GIORGINI J D. The role of radar in predicting and preventing asteroid and comet collisions with Earth in mitigation of hazardous comets and asteroids[M]. UA: Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, Mass, 2004.
- [23] OSTRO S J, GIORGINI R. The role of ground-based radar in near-Earth object tracking, characterization and threat mitigation[C]//Near-Earth Object Study. Vail. Colorado: [s.n.], 2006.
- [24] PAN-STARRS. The panoramic survey telescope and rapid response system[EB/OL]. [2018-03-14]. <http://pswww.ifa.hawaii.edu/pswww>.
- [25] OFFICE OF AUDITS. NASA's efforts to identify near-Earth objects and mitigate hazards[R]. USA: NASA, 2014.
- [26] THE UNIVERSITY OF ARIZONA. Catalina sky survey-about CSS[EB/OL]. [2018-03-14]. <https://catalina.lpl.arizona.edu/about>.
- [27] THE UNIVERSITY OF ARIZONA. Spacewatch-telescopes[EB/OL]. [2018-03-14]. <http://spacewatch.lpl.arizona.edu/>.
- [28] THE UNIVERSITY OF ARIZONA. The experimental test site at White Sands Missile range. [EB/OL]. [2018-03-14]. <https://www.ll.mit.edu/About/facilities?tag=536>.
- [29] VADUVESCU O, BIRLAN M, TUDORICA A, et al. Euro near-recovery follow-up and discovery of NEAs and MBAs using large field 1-2 m telescopes[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59(13): 1632-1646.
- [30] PMO. Near earth object telescope[EB/OL]. [2018-03-14]. <https://http://www.pmo.ac.cn/jgsz/yjsz/xxkxhsktcyjb/jdttwyj/>.
- [31] MANIZER A. NEOWISE observations of near-Earth objects: preliminary results[J]. *The Astrophys Journal*, 2011(743): 156-172.
- [32] NEO. NEOSat: Canada's sentinel in the sky[EB/OL]. [2018-03-14]. <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/neosat/>.
- [33] BRAND W, FRANK P L, ROBERT S, et al. The near Earth object surveillance satellite[J]. *Photonic Applications in Astronomy, Biomedicine, Imaging, Materials Processing, and Education*, 2004, 5578(1): 1-32.
- [34] ROSS F, OLAF E, THIMO G J, et al. A space-based mission to characterize the IEO population[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 90(1): 33-40.
- [35] NASA. Near-Earth object survey and deflection analysis of alternatives, report to congress[R]. USA: NASA, 2007.
- [36] 张翔, 季江徽. 近地小行星地基雷达探测研究现状[J]. *天文学进展*, 2014, 32(1): 24-39.
- ZHANG X, JI J H. Research status on Erath based-Rader explore near Earth asteroid[J]. *Progress in Astronomy*, 2014, 32(1): 24-39.
- [37] ROBERT J, ALESSANDRO M, TIMOTHY S, et al. Earth and space-based NEO survey simulations: prospects for achieving the space guard goal[J]. *Icarus*, 2003, 161(1): 17-33.
- [38] NEO. NEOCam: finding asteroids before the find us[EB/OL]. [2018-03-14]. <https://neocam.ipac.caltech.edu/>.
- [39] NEO. CROWN: constellation of heterogeneous wide -field NEO Surveyors[EB/OL]. [2018-03-14]. http://www.qxslab.cn/stare/content/details179_1325.html.
- [40] 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.
- 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.
- [41] SANCHEZ P, COLOMBO C, VASILE M, et al. Multi-criteria comparison among several mitigation strategies for dangerous near-

- Earth objects[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2009, 32(1): 121-142.
- [42] LU E T, LOVE S G. Gravitational tractor for towing asteroids[J]. *Nature*, 2005, 438(7065): 177-178.

作者简介：

孙海彬(1986–)，男，博士，助理研究员，主要研究方向：近地天体观测技术、防御概念研究。

通讯地址：上海市虹口区玉田路500号(200083)

电话：(021)25051147

E-mail: sunhaibin@mail.sitp.ac.cn

孙胜利(1970–)，男，研究员，博士生导师，主要研究方向：空间光电仪器及定量化。

通讯地址：上海市虹口区玉田路500号(200083)

电话：(021)25051169

Research on the Near-Earth Asteroid Observation Technology

SUN Haibin^{1,2}, SUN Shengli^{1,2}

1. Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of technical Physics of The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A huge number of Near-Earth-Asteroids (NEA) pose potential threat to the security of earth. There are also large numbers of hazardous asteroids have not yet been found due to our observation technology. Aiming at the development of near Earth Asteroid space observation technology, this paper analyzes the status and level of NEAs observation technology domestic and overseas, and combining the comparison of the capabilities between the space / ground asteroid observation platform, we promote our scheme of space infrared asteroid observation based on our technology. The scheme plan to research asteroids and get its spectrum information through VIS-IR technology, through cooperative observations with space platform and ground equipment network, and then construction an integrated asteroid observation system of our country. At the same time, through the comprehensive analysis of defense strategies and utilization value of asteroids, some preliminary suggestions about the NEA's observation, early warning, defense and other missions in china are proposed.

Keywords: Near Earth Asteroid; space observation; infrared technology

Highlights:

- The disaster induced by the asteroid's impact on the earth is discussed, for example the relationship between the degree and frequency of the disaster induced by asteroid impact with the individual characteristics of asteroid, and so on.
- The characteristics of many asteroids observing platforms are analyzed, for example: Pan-STARRS, CSS, etc. the advantages and disadvantages of various observation technologies/platforms are systematically discussed, and then comparative analysis the space/ground observation platform and visible / infrared / radar observation technology.
- Based on our space exploration technology and the international asteroid space exploration scheme, we promote our scheme of space infrared asteroid observation, VIS-IR technology were used to research asteroids and get its spectrum information, and then analyzed the development trend of asteroid space exploration technology.
- Analysis the shortage of our technology on asteroid observation, early warning and defense, and put forward suggestions for developing our own asteroid observation and early warning defense technologies, such as the establishment of a national small observation data center, construction an integrated asteroid observation system and so on.

[责任编辑：高莎，英文审校：朱恬]