

应用地面电磁发射清除空间碎片方法*

张 晓¹, 鲁军勇¹, 侯重远², 戴宇峰¹, 王 杰¹

(1. 海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033;

2. 西安卫星测控中心 宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043)

摘 要:针对传统化学发射的空间碎片清除技术成本过高、难以实施的问题,提出应用地基电磁发射方式的空间碎片清除新方法。通过地面电磁发射的方式以低成本将射弹运送至空间,并通过释放空间微粒云团控制空间碎片离轨,进而实现对空间碎片的清除。由于取消使用占绝大部分成本的化学推进剂,所提出的应用地基电磁发射的空间碎片清除技术为空间碎片低成本清除提供了有效解决途径。

关键词:电磁发射;空间碎片清除;空间微粒云团

中图分类号:TP25 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)06-054-05

Space debris removal method utilizing earth electromagnetic launch

ZHANG Xia¹, LU Junyong¹, HOU Chongyuan², DAI Yufeng¹, WANG Jie¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

Abstract: Traditional space debris removal technology with chemical fuel is costly, and it is difficult to be implemented. An innovative method, which is based on ground electromagnetic launch technology, was proposed to remove the space debris. The projectile was launched to the space utilizing ground electromagnetic launch technology which is effective with low cost, and then the particle cloud was released out, which can make the debris can go out of its orbit. The debris was removed by the friction effect during falling out of orbit. As eliminating chemical propellant, which accounts for the majority of the cost, the proposed strategy utilizing ground electromagnetic launch technology to remove the space debris provides an effective and low cost method for space debris removal.

Key words: electromagnetic launch; space debris removal; space particle cloud

在过去的半个多世纪,空间技术飞速发展的同时,人类的太空活动也在太空中遗留下不计其数的空间碎片。这些碎片产生和运行的空间大多是目前航天器运行区域,严重污染了空间环境,威胁着空间活动的安全。目前空间碎片的尺寸横跨了从微米到米七个数量级,分布在300 km的高地高度到超过36 000 km的地球环绕轨道上,碎片数量在800~1100 km的轨道处达到峰值。目前,10 cm量级以上编目的空间碎片已经超过15 000个,这部分空间碎片,航天器可以通过主动规避方式避免撞击。1 cm量级以下的空间碎片有数百万个,虽然数量众多,但是所具有的动能较小,航天器可以通过结构防护的方式抵御撞击。处于1 cm~10 cm量级之间的空间碎片数量约有10万个,其动能较大,对航天器产生的威胁也最大,需采用外加的辅助手段加以清除。迄今为止,对于

空间碎片问题的解决还仅仅停留在预防阶段,即如何减少空间碎片的增速,对于消除已经存在的数量众多的空间碎片尚未有行之有效的方法^[1-3]。根据国外相关研究,即使人类停止一切太空活动,由于空间碎片相互碰撞等原因,数量依然会持续增加,且从2055年开始将灾难性地增长。

空间碎片的日益增多已严重威胁人类航天活动。近年来,国际社会对空间碎片清除问题日益关注,美日欧等航天大国也开始投入大量人力和经费用于空间碎片清除技术的探索性研究,并提出了数量众多的技术途径和装置设计^[4-6]。

然而,现有空间碎片清除成本极高,距离彻底解决空间碎片威胁尚有很大差距。高昂清除成本的本质来源于清除装置搭载化学火箭进入太空的成本。比如,对近地轨道而言,1 kg有效载荷的化

* 收稿日期:2016-05-01

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51407191);国防科技重点实验室基金资助项目(9140C840409140C84026);国家部委基金资助项目(613262)

作者简介:张晓(1983—),女,河南新郑人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:zhangxiao01@163.com

学火箭运载成本约为1万~6万美元^[7-9]。

只有使用比目前化学火箭运载成本低1~2个数量级的运载方式把清除装置送入太空,才能使空间碎片的清除成本相较这枚碎片进入太空的成本成为小量,从而使清除碎片在经济上变得可负担。而成本低于百万元量级的碎片清除技术,可能彻底扭转人类面对空间碎片的困局^[10-11]。

因此,彻底解决空间碎片问题的核心,在于大幅度降低碎片清除装置进入太空的运载成本。而在众多运载方式中,从地面利用电磁发射装置获得很大初速度并直接进入太空的方式,因其特有的极低成本优势(由于省去了化学火箭的多个推进级,载荷利用从地面获得的初速度直接进入太空,因而成本极低,约为化学火箭发射成本的百分之一),可能成为未来代替化学火箭运输空间碎片清除装置的最佳手段。本文介绍基于电磁发射的空间碎片清除的概念、原理和结构组成,为低成本碎片清除提供一种有效方法。

1 空间碎片清除方法现状

地基亚轨道拦截清除空间碎片是近年来各国研究的热点之一,较为成熟的清除技术包括激光清除技术、碎片收集装置、电力缆绳、薄膜帆阻力装置等。但是,这些清除技术目前还都处于理论研究和原理试验阶段,材料、检测、跟踪等多项技术难题尚未攻克,距离实用还有一段距离。

2012年,美国海军研究实验室的Ganguli提出可在低轨空间碎片飞经的区域施放人造粉尘颗粒(如钨粉),以拦截和减速空间碎片,从而使其坠入大气层,如图1所示。目前,该技术已申请美国专利并完成概念设计与特点证明,技术成熟度已达到2级。值得注意的是,该方案的提出者Ganguli在文章中并没有说明采用什么样的方式将拦截装置运送到太空。

国内学者也对这一清除技术展开了理论计算研究。2015年,装备学院以及太原卫星发射中心的李怡勇等^[7]发表了理论分析结果,理论分析结论认为该方法具有一定概念意义,但综合考虑运载发射能力和成本、粉尘颗粒大小和释放密度、碎片尺寸大小和空间密度分布等因素,该方法作用效果有限。

可见,该技术仍处于概念探索阶段。然而,如采用成本很低的电磁发射方式代替化学探空火箭来运载空间微小颗粒云团,则能大大提高此方法的经济效能和碎片清除效果,因此该方法仍然有待进一步探索研究。

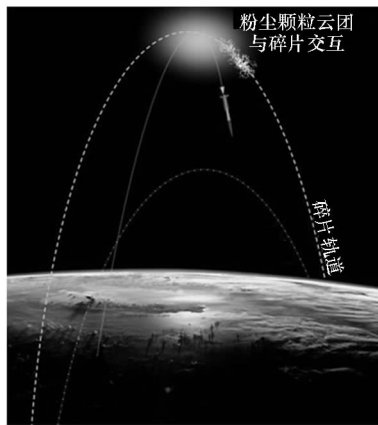


图1 美海军研究实验室提出的亚轨道碎片拦截方案

Fig.1 Schematic illustration of the suborbital debris interception method proposed by NRL

2 应用地面电磁发射空间碎片清除原理

电磁发射是一种利用电磁能将载荷进行超高速发射的新概念技术,与传统发射技术相比,具有发射速度快、循环周期短、发射能量大、发射成本低、易于控制等突出优势。自1901年世界上第一个电火炮专利问世以来,电磁发射技术经过原理验证和关键技术攻克,目前已经进入工程化研制阶段。美国在2010年即实现了利用电磁发射技术在地面将10 kg物体在10 m内加速到2500 m/s的出口速度的目标。此外,英、法、德、俄罗斯、日本及我国等也都在大力进行电磁发射技术研究。电磁发射技术的工程化应用指日可待。

电磁发射利用电磁能发射替代传统化学推进剂,可实现对物体的超高声速发射。传统的基于化学推进剂将空间碎片清除装置运送到太空的方式成本过高,是制约碎片清除技术发展的关键问题之一。电磁发射利用电磁能推进,不需要化学推进剂,是一种高效、低成本的推进技术。为此可将碎片清除装置通过电磁发射的方式运送至太空。同时为了避免清除装置本身在太空产生碎片,可采用微粒云团来清除碎片。这种基于地面电磁发射的空间碎片清除方法,其清除过程可分为下面几个阶段。

2.1 电磁发射

首先,通过电磁发射的原理将清除装置加速到预定速度,发射体出膛后采用近垂直的发射角通过高初速将清除装置运送到太空。该阶段的工作原理如图2所示。

图2是利用电磁发射原理进行清除装置加速的原理示意图。电磁发射装置通常由储能电源、

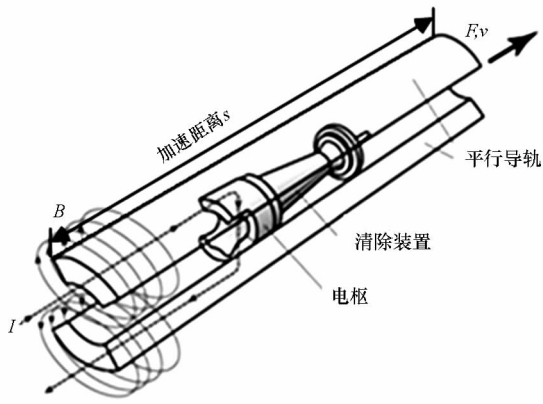


图 2 电磁发射阶段原理示意图

Fig. 2 Schematic of electromagnetic launch phase

发射装置、电枢和控制系统组成,储能电源用于提供能源,控制系统用于系统信息流控制,图中未给出。清除装置和电枢安装在一起,作为发射体,设其总质量为 m ;电枢为良导体,假设在两条平行导轨间通恒定电流 I ,则清除装置和电枢在两条导轨产生的磁场作用下受到指向出口的作用力 $F = k \cdot I^2$ 。其中, k 是由电磁发射装置结构确定的系数。假设加速距离为 s ,则清除装置经电磁发射加速,出口速度可达到:

$$v = \sqrt{\frac{2ks}{m}} \cdot I$$

从上式可以看出,通过加大电流、加长电磁发射距离和优化发射装置结构都可提高发射体出口速度和动能,使得清除装置获得亚轨道拦截空间碎片的地面初速度,典型速度曲线如图 3 所示。

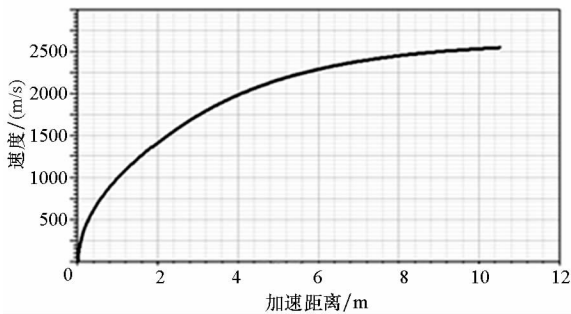


图 3 发射体电磁速度曲线

Fig. 3 Schematic of the projectile velocity during electromagnetic launch

在电磁发射过程中,电源提供能源,能量转化为电枢及清除装置的机械功和感应磁能,能量转换效率理论最高是 50%。实际装置目前能够达到的效率为 30% 左右。这样发射一个 20 kg 的物体到 2500 m/s 所需能量仅为 58 kW · h。图 2 所示的发射系统可重复利用,且能量可灵活调节,基

于电磁发射将清除装置运送至太空提供了一种低成本灵活可控的方法。

出膛后,电枢和清除装置分离,清除装置以高射角发射到太空,如图 4 所示。

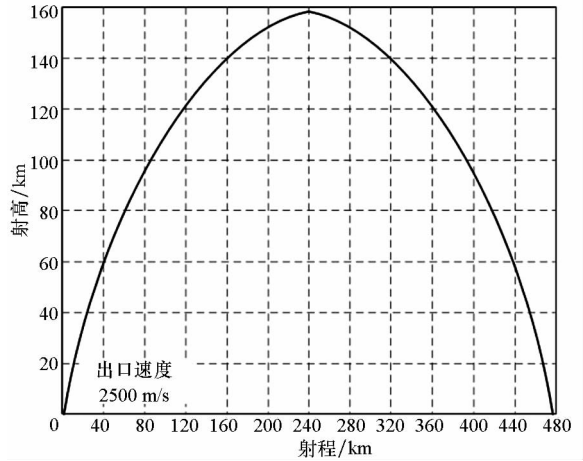


图 4 清除装置出膛后轨迹示意图

Fig. 4 Schematic of the trajectory of the removal device

2.2 释放燃气射流和装置飞离

清除装置采用图 5 所示的结构,由隔热层、导航制导与控制装置、发动机和燃气舵组成。隔热层用于防护高速运行的气动热烧蚀,导航制导与控制装置用于运行控制,发动机用于提供能量,燃气舵用于控制装置飞行姿态。

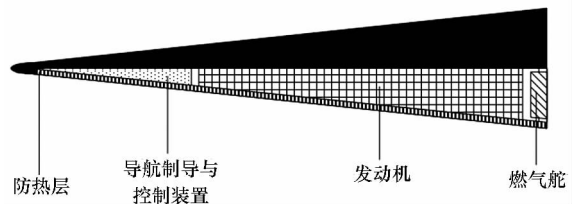


图 5 空间碎片清除装置示意图

Fig. 5 Schematic of space debris removal device

清除装置到达碎片运行区域后,在高抛弹道的顶点调姿 90°并点火,使燃气射流覆盖住空间碎片即将飞经的一小段轨道。

释放燃气射流后,清除装置调姿并离轨,防止与碎片相撞。

2.3 微粒云团碰撞并减速碎片

空间碎片(速度约为 7700 m/s)与燃气射流中的稀薄微粒云团(速度约为 3000 m/s)相向撞击,动能下降。通过使用电磁发射装置多次以此原理拦截并减速碎片,最终使碎片近地点不断降低而坠入大气层。

综上所述,基于地面电磁发射的空间碎片清除总的工作原理如图 6 所示,由电磁发射、点火施

放燃气射流并形成微粒云团、飞离和微粒云团碰撞并减速碎片四个阶段组成。

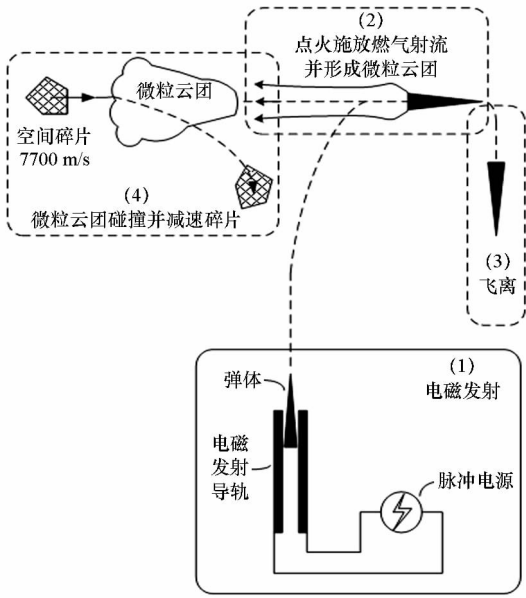


图 6 空间碎片清除原理

Fig. 6 Schematic of the proposed space debris removal strategy

3 关键技术分析

基于地基电磁发射的空间碎片清除技术具有发射成本低、安全度高、适应性强、能量释放易于控制、可重复利用等优点,为快速、低成本空间碎片清除提供了新的途径。其中,火箭发射与电磁发射应用效能的简单对比见表 1。

表 1 电磁发射与火箭发射技术应用效能对比

Tab. 1 Traits comparison of electromagnetic launch and rocket launch

发射技术	费用	灵活性	发射时间	载荷比	可重复性
电磁发射	低	灵活	短	高	可
火箭发射	高	不灵活	长	低	不可

尽管电磁发射技术的发展已较为成熟,但其在地基电磁发射空间碎片清除上的应用以及在过载环境、电磁环境和热环境上与传统的化学发射有本质区别。

3.1 过载分析

电磁发射可以将克至千克级的物体在毫秒级时间、十米级距离内加速至 7.5 马赫,被加速物体承受过载高达数十万个重力加速度^[12]。传统火箭发射由两或三级发射组成,其一级发射推力和过

载最大,加速时间在百秒级,过载为十个重力加速度级。两种发射方式的过载环境对比见表 2。可见,电磁发射的加速度是火箭发射的数千倍,其过载环境相对传统发射要严酷得多。图 5 基于地基电磁发射的空间碎片清除装置中,导航制导与控制装置、发动机属于过载敏感器件,抗过载能力是影响可行性的的重要因素。目前,电磁发射技术研究的国家都在积极进行抗过载器件的研究。美国在 2016 年初,已经研制出抗过载 3.5 万个重力加速度的制导器件,达到电磁发射抗过载技术要求,在不久的将来可投入实用。

表 2 电磁发射与火箭发射技术过载环境对比

Tab. 2 Overload comparison of electromagnetic launch and rocket launch

发射技术	加速时间	加速距离	加速度
电磁发射	毫秒级	十米级	数十万个重力加速度级
火箭发射	百秒级	万千米级	十个重力加速度级

3.2 电磁环境分析

基于地基电磁发射空间碎片清除技术利用脉冲大电流产生的强磁场实现对清除装置的推进。用于驱动清除装置的电流达到数百万安培,由此产生的磁场高达数十特斯拉^[13-15]。与传统火箭发射采用化学能驱动相比,地基发射给驱动装置带来极其严酷的电磁环境。但是,电磁发射持续时间短,仅为毫秒级,其高达数十特斯拉的最强磁场位于图 2 电枢尾部附近区域,随时间和位置变化,磁场会急剧衰减。通过合理优化布局清除装置,可将磁场强度降低至百毫特甚至更低,再加上根据电磁发射频率特性特殊设计的电磁屏蔽措施,可以达到避免强磁场对清除装置中磁敏感器件的干扰的目的。因而,从电磁环境分析,基于地基电磁发射的空间碎片清除技术不存在难以跨越的技术风险。

3.3 气动热环境分析

基于地基电磁发射的空间碎片清除,在地面十米级距离内即可将清除装置加速至 7.5 马赫,地面空气最稠密且具有黏性,装置表面与空气摩擦产生热量,头部驻点温度达到 2000 °C 以上,造成头部烧蚀^[16-17]。与传统的火箭发射相比,电磁发射的空间碎片清除装置体积小、质量轻、气动载荷大、气动热更为严酷、热防护更为困难。空间碎片清除可采用熔点高达 3500 °C 的钨合金进行热

防护,同时还可借鉴现有超高声速飞行器的气动热防护方法,再加上特有的飞行体外形和弹道设计,具备气动热防护的基础。

4 结论

本文提出了一种基于地基电磁发射的空间碎片清除技术,它以电磁能推进代替传统化学推进,具有显著的成本优势,有望发展成为解决空间碎片问题的关键技术之一。提出了该方法的概念、工作原理和主要结构,并基于电磁发射原理分析了其过载、电磁环境和热环境等关键技术与传统火箭发射的区别。后续还需针对空间环境,重点研究稀薄微粒云团的动力学演化及其与空间碎片的作用机理等关键问题。

参考文献 (References)

- [1] 曹喜滨,李峰,张锦绣,等. 空间碎片天基主动清除技术发展现状及趋势[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(4): 117-120.
CAO Xibin, LI Feng, ZHANG Jinxiu, et al. Development status and tendency of active debris removal[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(4): 117-120. (in Chinese)
- [2] Klinkrad H. 空间碎片: 模型与风险分析[M]. 钱卫平, 译. 北京: 清华大学出版社, 2012.
Klinkrad H. Space debris: models and risk analysis[M]. Translated by QIAN Weiping. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)
- [3] 李怡勇,王卫杰,李智,等. 空间碎片清除[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
LI Yiyong, WANG Weijie, LI Zhi, et al. Space debris removal[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2014. (in Chinese)
- [4] 王海福,冯顺山,刘有英. 空间碎片导论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
WANG Haifu, FENG Shunshan, LIU Youying. Introduction to space debris[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [5] 徐浩东,李小将,李怡勇,等. 地基激光空间碎片清除技术研究[J]. 装备学院学报, 2011, 22(3): 71-75.
XU Haodong, LI Xiaojiang, LI Yiyong, et al. Research on technology of space debris removal using ground-based laser[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2011, 22(3): 71-75. (in Chinese)
- [6] Kaplan M. Survey of space debris reduction methods[C]// Proceedings of AIAA SPACE Conference and Exposition, AIAA 2009-6619, 2009: 1-11.
- [7] 李怡勇,陈勇,李智,等. 对一种利用人造粉尘清除空间碎片新方法的理论分析[J]. 空间科学学报, 2015, 35(1): 77-84.
LI Yiyong, CHEN Yong, LI Zhi, et al. Theoretic analysis on a new technique of dust-based active debris removal[J]. Chinese Journal of Space Science, 2015, 35(1): 77-84. (in Chinese)
- [8] 刘林,杨健,王建华. 近地轨道空间碎片清除策略分析[J]. 装备学院学报, 2013, 24(2): 70-73.
LIU Lin, YANG Jian, WANG Jianhua. Research on space debris mitigation strategy in LEO[J]. Journal of Academy of Equipment, 2013, 24(2): 70-73. (in Chinese)
- [9] 常浩,金星,洪延姬,等. 地基激光清除空间碎片过程建模与仿真[J]. 航空学报, 2012, 33(6): 994-1001.
CHANG Hao, JIN Xing, HONG Yanji, et al. Modeling and simulation on ground-based lasers cleaning space debris[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 33(6): 994-1001. (in Chinese)
- [10] Liou J C. Engineering and technology challenges for active debris removal [C]//Proceedings of the 4th European Conference for Aerospace Sciences, 2011: 1-8.
- [11] 张玉军,冯书兴. 空间碎片清理飞行器捕获系统设计与仿真[J]. 装备指挥技术学院学报, 2012, 23(1): 84-88.
ZHANG Yujun, FENG Shuxing. Design capture system of space debris removal spacecraft and simulation[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2012, 23(1): 84-88. (in Chinese)
- [12] 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 Nan, GUI Xianzhou. Foreign space debris removal program[J]. Space International, 2013(2): 64-69. (in Chinese)
- [13] Marshall R A, 王莹. 电磁轨道炮的科学与技术[M]. 曹延杰, 译. 北京: 兵器工业出版社, 2006: 1-5.
Marshall R A, WANG Ying. Railguns: their science and technology[M]. Translated by CAO Yanjie. Beijing: China Machine Press, 2006: 1-5. (in Chinese)
- [14] 殷强,张合,李豪杰,等. 静止条件下轨道炮膛内磁场分布特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(2): 174-179.
YIN Qiang, ZHANG He, LI Haojie, et al. Analysis of railgun in-bore magnetic field distribution at zero speed[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(2): 174-179. (in Chinese)
- [15] Watt T J, Bryant M D. Cracking and dominant stresses in the throat region of c-shaped solid armatures [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 418-421.
- [16] Watt T J, Bryant M D. Modeling assumptions for railguns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 380-383.
- [17] 史金光,王中原. 超高声速穿甲弹气动烧蚀的研究[J]. 弹道学报, 2002, 14(2): 89-92.
SHI Jinguang, WANG Zhongyuan. The study on aerodynamic ablation of hypersonic armour-piercing projectile[J]. Journal of Ballistics, 2002, 14(2): 89-92. (in Chinese)