文章编号:1001-5078(2014)02-0126-05 ·激光应用技术·

基于分离模块航天器的激光输能技术研究

杨业伟[1],李小将[1,2],张东来[1]
(1. 装备学院研究生院,北京 101416;2. 装备学院激光推进及其应用国家重点实验室,北京 101416)

摘 要:随着航天任务的日趋复杂化,航天器能源需求越来越高,将激光输能技术运用于航天器能源供给越来越受到重视。针对当前地基激光输能技术的发展现状和不足,本文从分离模块航天器的设计理念出发,研究了一种基于模块化航天器的天基激光输能技术。介绍了这种天基激光输能的输能模式和输能过程,分析了其相对于地基激光输能的优势。根据当前激光技术和航天技术的发展现状,分析了实现天基激光输能方式需要解决的五个关键技术,为分离模块航天器的能量供给提供了一种新的解决方案。

关键词:激光输能;分离模块航天器;光电转换;空间布站
中图分类号:V528 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.02.003

Research on laser energy transmission technology based on fractionated spacecraft

YANG Ye-wei[1], LI Xiao-jiang[1,2], ZHANG Dong-lai[1]
(1. Company of Postgraduate Management, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China;
2. State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: As the space task is further complicated, the spacecraft energy demand is higher. Using the laser energy transmission technology to the spacecraft energy supply is more and more attention. In order to supply the gaps of current ground-based laser energy transmission, a kind of space-based laser energy transmission technology is studied on basis of the fractionated spacecraft concept. The process and models of this energy transmission are presented. Compared with the ground-based one, the advantages of space-based laser energy transmission are analyzed. According to the development situation of laser technique and aerospace technology, five key technologies that need to be achieved for realizing laser energy transmission technology are analyzed, which provides a new solution for the fractionated spacecraft energy supply.

Key words: laser transmission; fractionated spacecraft; photovoltaic conversion; space deployment

1 引 言

随着航天器任务的复杂程度越来越高,航天器的能源要求也随之越来越高。目前航天器的供能大多采用太阳能电池阵供电或蓄电池组供电的方式,但这两种方式存在着明显不足[1],一是受到白天黑夜的限制,无法满足航天器长时间持续供能;二是航天器高电量需求使得蓄电池组体积、质量不断增加,很大程度地限制了有效荷载的搭载。

为了更高效地发挥航天器功能,突破上述因素的限制,世界各主要航天国家都在寻求一种全新的为航天器供能的方案,而激光输能便是其中的一种。但目前航天器激光输能的方案设计大多数都局限于地对天的地基激光输能,这种输能方案由于目前技

基金项目:激光推进及其应用国家重点实验基础研究项目资助课题。
作者简介:杨业伟(1990-),男,硕士研究生,研究方向武器系统建模与仿真。E-mail:yangyewei_1990@126.com
收稿日期:2013-07-17;**修订日期**:2013-08-20

术条件的限制,存在诸多技术难点,如激光大气传输过程对激光能量的消减,使得原本出光功率就不大的激光到达航天器的接收端后,其功率更加难以满足实际需要;由于传输距离远,大气湍流等因素对激光传输的干扰,使得激光系统对航天器的跟瞄难度大,且容易损伤航天器上的非接收元件;地基激光输能还对输能站点的布站要求高,且当航天器处于站点输能范围外时,无法进行输能等。

针对这些技术条件的限制,本文在2006年美国国防高级研究计划局(DARPA)提出的"分离模块航天器"设计理念的基础上,研究了一种天基的航天器激光输能方案。

2 分离模块航天器概念及特点

"分离模块航天器"一词最早出现在2006年美国国防高级研究计划局(DARPA)战术技术办公室Owen Brown的一系列论文中。2007年,DARPA正式启动名为"F6"的分离模块航天器项目,该设计理念被广泛讨论和研究。

分离模块航天器就是将传统整型的、集所有功能于一体的巨大航天器变为多个具有单一主功能的子模块,由具有基础功能的支撑模块在轨自由运行,支撑自由飞行的有效载荷模块,各个子模块之间协同合作,形成一个模块化的航天器,完成特定航天任务[2]。这种模块化航天器具有很高的灵活性和响应速度,生存能力强,具有功能再定义能力,有利于产品标准化和通用化,能够分散发射风险、降低发射成本[3]。

由于分离模块航天器的子功能模块一般都只具有单一子功能,如通信、测控、控制等,其能源供给主要依靠供能子模块来完成,因此,分离模块航天器需要通过无线输能技术将能量从供能子模块传输到有效载荷模块和其他基础功能模块。

目前的无线输能技术主要有电磁感应方式、磁共振耦合方式、微波方式和激光方式。但是由于电磁感应方式和磁共振耦合方式传输能量时距离受限,不适合远距离的航天模块之间传输。微波和激光方式适合远距离传输,但是微波发散角太大,不便于小模块航天器接收。而激光具有密度高、发散角小等特点,因此在分离模块航天器中选择激光输能技术作为无线输能的方式[4]。

3 国内外激光输能研究现状

激光输能是指在发射端将电能或其他形式的能量转换为激光,经过发射系统发射到接收端,接收端通过激光转换装置将接收的激光转换为直流电的技术。

通过激光实现远距离能量无线传输的想法最早由Backus于1972年提出,并在此之后世界各国做了相关技术的大量研究和实验验证。

1981年美国国家航空航天局(NASA)Langley研究中心发布了一份长达218页的报告[5],集中系统地介绍了空间激光能量传输的特点、关键技术、应用领域和前景,为之后激光输能技术的研究奠定了基础。

2003年9月,由NASA马歇尔航天飞行中心、达莱登(Dryden)飞行研究中心以及阿拉巴马州大学组成的研究小组完成了以激光为动力的飞机试飞。该飞机翼展约1.5 m,重约0.26 kg,飞机上的光电电池可有效地将激光能量转换成电能,为飞机上的小型电动机提供能源。

2005年,德国人用激光器成功驱动了80 m外的电动小车。激光照射并跟踪小车上的光电池,光电池将光能转化为电能带动电动机驱动小车前进。

2012年,洛马公司和LaserMotive公司在一个风洞内成功验证了激光驱动无人机。该无人机是被适当改装后的"阔步者"(Stalker)无人机,在验证中其连续飞行时间被延长到超过48小时。之后,两家公司又在偏远沙漠地带进行了对无人机激光输能的室外验证,并取得了一系列成果。

国内对于激光输能技术的研究起步较晚,目前主要还处于理论研究阶段。但最近几年国内研究人员在激光大气传输、激光跟瞄技术、激光输能系统的设计仿真和激光输能的布站方案设计等领域都得到了大量研究成果[6-8],这为以后的实际应用奠定了基础。

正如前文所述,目前国内外对于激光输能技术的理论研究与实验验证绝大多数都是在地基激光器的基础上进行的,这种基地激光输能方案存在着许多目前很难克服的技术瓶颈,因此我们提出将分离模块航天器概念中的供能方法与激光输能相结合,形成一种新的对航天器供能的输能方案。

4 分离模块航天器的激光输能机理及优势

基于分离模块航天器的激光输能方式,将航天器的供能单元作为一个单独的飞行器模块,通过激光无线输能的方式为航天器的其他功能模块供能。

4.1 不同结构的分离模块航天器激光输能模型

根据航天器空间任务的不同,以及供能模块与任务模块之间不同的相互位置关系,激光输能模型的结构也有所不同,以图1、图2为例。

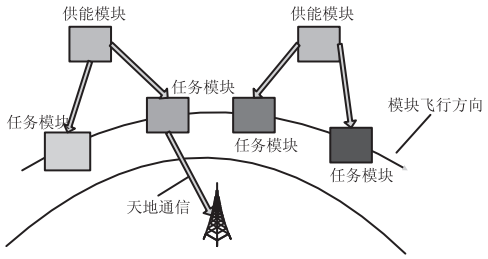

图 1 共轨线性结构下多供能模块协同输能示意图

在图 1 所示的构型中,所有任务模块在同一条轨道上运行,彼此之间保持固定的相位关系。供能模块在另一条升交点赤经 Ω 不同、倾斜角 i 相同的不同平面轨道或者轨道高度不同的同一平面轨道运行。供能模块与任务模块相对于地球的运行速度不同,任务模块顺序进入某一供能模块的输能区域,供能模块对其输能。该构型要求对供能模块进行布站设计,并合理设计任务模块飞入供能模块输能区域的时间,以保证供能模块上有限数量的输能设备能满足对区域内的多个任务模块的同时输能。这种跟飞结构下多供能模块协同输能模式的最大好处在于,通过合理的设计和布站理论上可以实现对任务模块的 24 小时不间断输能。

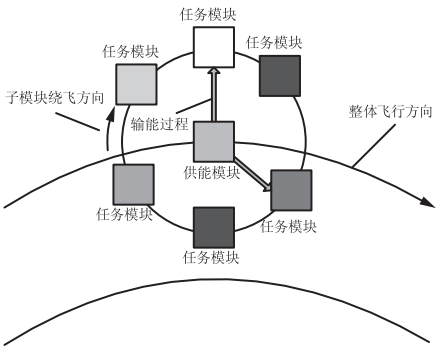

图 2 环形结构下单一供能模块输能示意图

在图 2 所示的构型中,任务模块与供能模块组成一个以供能模块为中心的环形结构,任务模块之间保持一定的相位关系,环绕供能模块飞行的同时,与供能模块作为一个整体在某一轨道上运行,供能模块通过其有限数量的输能设备对有需要的任务模块同时输能。这种环形结构下单一供能模块输能模式的好处在于,构型设计简单,结构稳定,由于类似于卫星编队中的空间圆构型,相关技术已经比较成熟。

4.2 分离模块航天器的激光输能过程

无论是图 1 还是图 2 所示的输能模式,从接收输能指令到完成输能的基本过程都是一致的,如图 3 所示。

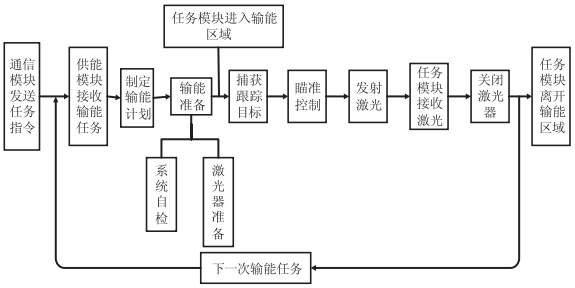

图 3 激光输能过程

数据分析处理模块通过计算任务模块进入供能模块输能区域的时间,将输能指令发送给集中处理分离模块航天器通信信息的通信模块,然后由通信模块将输能指令发给供能模块。供能模块接收到指令后开始做输能准备,包括系统自检、激光器准备等。当任务模块进入输能区域时,通过由光学望远镜、光电传感器、信号处理和控制系统等组成的 ATP 系统捕获、跟踪和瞄准任务模块,然后发射激光,任务模块接收激光,并通过光电转换装置将激光能转化为电能。当任务模块离开输能区域时关闭激光器,准备下一次输能任务。该过程大致经历接收任务指令、发射准备、捕获跟瞄、输能这四个阶段,每个阶段的具体内容和实现方式因输能模式的不同会有所差别。

4.3 分离模块航天器激光输能的优势

分离模块航天器激光输能相比于地基激光输能方式最大的区别就在于:前者的输能方式是天对天的方式,属于天基激光输能,后者的输能方式是地对天的方式,属于地基激光输能。就本文所讨论的对航天器的输能而言,天基的输能方式相比于地基的输能方式拥有着许多优势,详见表 1。

表 1 天基激光输能与地基激光输能的比较

地基激光输能技术难点	天基激光输能技术优势
从地面到航天器运行轨道,传输距离远	从供能模块轨道到临近的任务模块轨道,传输距离更近
大气折射衍射对光束传输路径影响大,增加跟瞄难度和要求	激光传输路径几乎不受大气折射衍射影响
大气分子的吸收、大气湍流、热晕等严重消减激光功率	稀薄大气对激光功率的消减作用很小,激光传输效率几乎不受大气影响
由于受到地面输能站点布站位置的限制,无法实现对航天器 24 小时输能	通过对供能模块合理布站,并设计其他任务模块的运行轨道,理论上可以实现对任务模块的 24 小时输能

5 拟解决的关键技术

5.1 高能激光器的研制

作为激光输能系统的关键装置,高能激光器的输出性能直接决定着激光输能系统的实用性。目前世界上的激光器研究主要围绕着化学激光器和电激励激光器展开,而化学激光器体积庞大,且会向外排出有害物质,加之需要的维护和后勤支援任务繁重,不适合集成于空间小型机动平台上[9]。相比于化学激光器,电激励激光器因具有效率高、体积小、激励源易获得、寿命长、结构紧凑等特点,更加适合于空间激光输能任务。

当前电激励激光器的研发主要以提高功率输出、提高电光转化效率、降低工艺复杂度为目标,同时克服非线性效应和热效应等共性难题,特别是高能激光器在工作过程中产生的废热而导致的晶体热聚焦、热致双折射及退偏振等热效应,已经成为制约国内高重复频率、大功率激光器研制的至关重要的因素[10]。

5.2 光电转换技术

利用模块化航天器中的供能模块输能时,提高任务模块上光伏电池的光电转换效率,对于整个激光束能过程效率的提高至关重要。主要有三种途径,一是在一定的光照强度下,通过改进光电池材料提高光电转换效率;二是通过一定方式提高照射到光电池表面的光照强度;三是根据照射光波长的不同选择与之相匹配的光电池表面材料。

光电池的光电转换效率既受到光照强度的影响,又受到光电池表面材料的影响。表 2 是在 25℃情况下测得的不同太阳光聚光倍数下单晶硅、砷化镓、三结电池太阳转化效率[11]。

表 2 单晶硅、砷化镓、三结电池太阳转化效率

Sun	Si	GaAs	GaInP/GaInAs/Ge
1 ×	15%	15%	30%
50 ×	15%	24%	32%
150 ×	16%	27%	34%

对于同一种材料的光电池,当太阳光聚光倍数增加时,其转化效率也随之提高,但是提高的幅度不够理想。在同一种聚光倍数下,GaInP/GaInAs/Ge 三结电池的转化效率是最高的。

此外,不同的光电池材料的最佳吸收波长也会不同。例如,单晶硅的转化率在激光波长为 900 nm 左右处达到峰值,而用 900 nm 的激光照射 GaAs 电池和 GaInP/GaInAs/Ge 电池其响应并不明显[12]。因此,对于不同波长的照射激光,选择与之相匹配的光电池对于提高光电转换率也很重要。

5.3 空间布站优化技术

在空间中合理的布置供能模块的数量、相对位置和各自运行的轨道,对于最大程度地节省并利用资源,发挥最大效能至关重要。文献[8]对基于地面的输能布站方案做了一定研究,但是基于地面的输能布站方案最大的缺陷在于,由于经济、地理和政治因素的限制,地面输能站点只能选在本国领土范围内,这很大程度上限制了站点之间有效的协同输能范围。而空间布站就不存在这样的限制,但其难点就在于如何尽可能用最少的供能模块通过协同合作实现对任务模块的不间断输能,这需要对任务模块进入输能范围的时间、任务模块与供能模块之间的相对位置,以及不同任务模块之间的相对位置进行精确计算,从而为各个供能模块合理分配输能任务,实现对多个任务模块有序高效的输能。

5.4 核电池技术

供能模块作为其他任务模块的能量来源,其输出的能量需要满足多个任务模块大量、持续的能量需求,这就要求供能模块自身的能源具有高能、可靠、持续等特点。光伏电池由于目前光电转换效率、光伏材料以及太阳光源昼夜因素的限制,很难满足这些要求。核电池寿命长、不受外界干扰、输出能量高并且供能不受昼夜影响,已经被应用于航天、航空导航、医学、机械工程等领域[13],通过不断提高核电池的使用寿命,改善其安全性和可靠性,将其作为供能模块的能量来源具有很现实的意义。

5.5 空间跟踪瞄准技术

捕获、跟踪和瞄准是激光输能整个任务过程中重要的环节,直接决定着激光能否顺利照射到靶目标并对其持续输能。地面激光跟瞄技术的难点在于传输距离远,大气的干扰增加了跟瞄难度。尽管传输距离和大气的干扰对空间跟瞄技术的影响较小,但是由于太空中航天器运动速度较快,接收端激光强度变化快,输出端和接收端相对位置变化快,都大大增加了空间跟瞄的难度,同时对激光输出设备的灵活性和可控性也提出了更高的要求。

6 结 论

本文从分离模块航天器的概念出发,介绍了一种用于模块化航天器之间的激光输能方式。同时对这种输能方式的实现模式、过程和相比于地基输能方式的优势做了深入分析,并提出当前要实现这种

天基的激光输能,需要解决四个关键技术:高能激光器的研制、光电转换技术、空间布站优化技术、核电池技术和空间跟踪瞄准技术。

激光输能技术的概念尽管提出较早,但由于受到技术条件的限制,一直发展较慢,而分离模块航天器的研究还处于初级阶段,基于分离模块航天器的激光输能技术研究更是刚刚起步,还存在诸多难题需要解决。但随着地球能源资源的日益短缺,航天器功能的日趋复杂,将航天器模块化并对其提供持续可靠的高功率能源已成为一种必然的趋势,因此研究发展基于分离模块航天器的激光输能技术拥有着诱人前景。

参考文献:

[1] Richard Mason. Feasibility of Laser Power Transmission to a High-Altitude Unmanned Aerial Vehicle[R]. Rand Corporation,2011.

[2] Gou Liang, Wei Yingjun, Shen Zhen, et al. Research on Fractionated Spacecraft[J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology,2012,31(2):7 - 12. (in Chinese)
苟亮,魏迎军,申振,等. 分离模块航天器研究综述[J]. 飞行器测控学报,2012,31(2):7 - 12.

[3] Brown O, Eremenko P. Fractionated Space Architecture: A Vision for Responsive Space[C]. 4th Responsive Space Conference. Los Angeles, CA: American Institute of Aeronautics and Astronautics,2006:1102.

[4] Huang Hu, You Zheng, Liu Youjun, et al. Design and Simulation of an Efficient and Safe Laser Power Transmission System[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,2012,54(4):421 - 424,435. (in Chinese)
黄虎,尤政,刘有军,等. 一种高效安全的激光能量传输系统的设计仿真[J]. 清华大学学报:自然科学版,2012,52(4):421 - 424,435.

[5] M D Williams, E J Conway. Space Laser Power Trans-mission System Studies[R]. NASA: Langley Research Center,1981.

[6] Qiao Chunhong, Fan Chengyu, Huang Yinbo, et al. Scaling Laws of High Energy Laser Propagation through Atmosphere[J]. Chinese Journal of Lasers,2010,37(2):433 - 437. (in Chinese)
乔春红,范承玉,黄印博,等. 高能激光大气传输的定标规律[J]. 中国激光,2010,37(2):433 - 437.

[7] Yue Yufang, Zhang Yushuang. Laser Tracking and Pointing Simulation System and Two Tracking and Pointing Methods[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(11):2575 - 2580. (in Chinese)
岳玉芳,张玉双. 激光跟瞄仿真系统及两种跟瞄方法[J]. 强激光与粒子束,2010,22(11):2575 - 2580.

[8] Li Xinnian, Li Xiaojiang, Chen Dong. Research on Disposition Optimization of Laser Energy Transportat-ion of Satellites Based on DPSO Algorithm[J]. Computer Simulation,2010,27(11):9 - 13. (in Chinese)
李新念,李小将,陈冬. 基于DPSO算法的卫星激光输能布站优化研究[J]. 计算机仿真,2010,27(11):9 - 13.

[9] Wu Wuming, Leng Jinyong, et al. Research Program of High Average Power Electric-Energy Laser[J]. Infrared and Laser Engineering,2011,40(2):203 - 209. (in Chinese)
吴武明,冷进勇,等. 高平均功率电能激光器研究进展[J]. 红外与激光工程,2011,40(2):203 - 209.

[10] Liu Dan, Xie Kedi, Ma Xiuhua, et al. Study of High-Efficiency Conduction Cooling Technique for High Power Space-Based All-Solid-State Lasers[J]. Chinese Journal of Lasers,2011,38(7):93 - 97. (in Chinese)
刘丹,谢可迪,马秀华,等. 大功率空间全固态激光器高效传导冷却技术研究[J]. 中国激光,2011,38(7):93 - 97.

[11] He Tao, Yang Suhui, Zhang Haiyang, et al. Experiment of Space Laser Energy Transmission and Conversion with High Efficiency[J]. Chinese Journal of Lasers,2013,40(3):0317001 - 1 ~ 0317001 - 6. (in Chinese)
何滔,杨苏辉,张海洋,等. 高效激光无线能量传输及转换实验[J]. 中国激光,2013,40(3):0317001 - 1 ~ 0317001 - 6.

[12] W F Krupke, R J Beach, S A Payne. DPAL: a new class of lasers for CW power beaming at ideal photovoltaic cell wavelengths[C]. Melville: 2nd International Symposium on Beamed Energy Propulsion,2003.

[13] Hao Shaochang, Lu Zhenming, Fu Xiaoming, et al. Nuclear Battery Materials and application of Nuclear Batteries [J]. Nuclear Physics Review,2006,23(3):359 - 364. (in Chinese)
郝少昌,卢振民,符晓铭,等. 核电池材料及核电池应用[J]. 原子核物理评论,2006,23(3):359 - 364.