

激光无线能量传输技术应用及其发展趋势

李向阳 吴世臣 李钟晓

(山东航天电子技术研究所, 山东烟台 264670)

摘要 介绍了无线能量传输技术的分类,分析了无线能量传输技术在未来航天方面的应用需求,最后以激光无线能量传输系统为例,对系统组成、关键技术以及未来的发展趋势进行了展望。无线能量传输技术将为我国空间科学研究、天基遥感和环境监测等领域提供技术先进、应用灵活、可满足多类重大应用需求的支持。

关键词 无线能量传输;激光能量传输;发展趋势

中图分类号:V423.44 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1673-8748.2015.01.001

Laser Wireless Power Transmission Technology and Its Development Trend

LI Xiangyang WU Shichen LI Zhongxiao

(Shandong Aerospace Electro-technology Institute, Yantai, Shandong 264670, China)

Abstract: The development of wireless power transmission technology provides a new method for spacecraft energy obtaining, especially in fractionated spacecraft power transferring, satellite rescuing, and spacecraft maintaining in orbit. In this paper, several wireless power transmission technologies such as loose coupled, flexible coupled, laser, microwave and their applications are introduced. Then a laser wireless power transmission system is presented, including its compositions, key technologies, state and development trend. With the progress of the technology, it can support many needs of space missions.

Key words: wireless power transmission; laser power transmission; development trend

1 引言

无线能量传输(Wireless Power Transmission, WPT)系统是指不依赖能源输送线,利用微波、激光等无线手段,向特定环境下工作的目标机器提供能源支持,使其顺利完成指定任务的能源输送系统。目前,尽管无线能量传输的效率低于有线传输,但浩瀚的宇宙空间是无法铺设电力传输线的,而无线能量传输技术成为向远端供电的唯一选择。当前美国

国家航空航天局、日本宇宙航空研究开发机构、欧洲航天局等纷纷开展了无线能量传输技术的研究。2002年,德国开展了激光驱动小车验证试验。2006年日本近畿大学开展了室内电动风筝和直升机激光供能试验。2009年美国开展了激光驱动太空电梯试验,2012年美国洛克希德-马丁公司与美国激光动力公司成功试验了一种新型激光能量传输系统,实现对“潜行者”(Stalker)无人机室外无线充电。2014年中国山东航天电子技术研究所首次实现了两个飞艇之间的激光无线能量传输试验。随着无线

收稿日期:2014-11-20;修回日期:2015-01-05

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA120605)

作者简介:李向阳,男,硕士,研究员,山东航天电子技术研究所所长,从事航天器综合电子系统研究和航天电子设备产业化、先进制造技术研究等工作。Email:513dzb@sina.com。

能量传输技术的发展,在向卫星、机器人、空间探测巡视器等类似平台供电方面将得到越来越多的应用,并将有力促进航天技术的发展。

本文主要对无线能量传输技术的分类、应用需求进行了介绍,并以激光无线能量传输系统为例,对系统组成、关键技术以及未来的发展趋势进行了展望。

2 无线能量传输技术分类及应用需求

目前,实现无线能量传输的方式主要有4种:感应耦合、磁场共振、激光、微波等不同形式^[1-2],如图1所示。

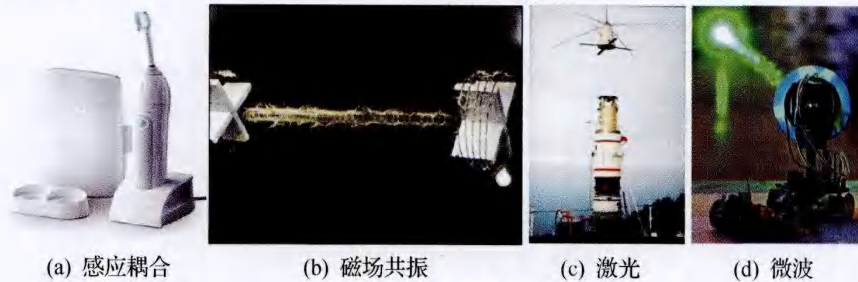


图1 无线能量传输方式

Fig. 1 Wireless power transmission methods

4种能量传输手段各有特点,其中,电磁感应传能和磁场共振耦合传能的方式在近距离情况下可以获得较理想的传输效率,而随着传输距离的增加,其效率迅速下降,在较远距离情况下能量损耗比较严重;微波无线能量传输技术可实现中远距离能量传输,其突出优点是大气穿透能力强,传输功率大,但微波手段的发射和接收天线尺寸都较大,对电子设备有强电磁干扰,同时由于弥散与不期望的吸收与衰减,传输效率相对较低,限制了微波无线能量传输技术的应用;激光无线能量传输技术以大功率激光光束为能量介质,利用光电效应实现能量传输,适于中远距离无线能量传输。由于激光光束发散角度小、能量密度大,传输和接收设备口径较小,非常适合于空间应用。但是激光在穿越大气时,由于波长短,受大气影响严重(激光透过率最高为0.8,微波为0.9),因而对传输效率的影响很大。虽然中红外波段大气窗口(3~5 μm , 8~14 μm)可以减弱大气影响,但目前该波段的大功率激光器的效率较低。而近年来大功率、新型激光发射器技术、高效率光电转换技术的发展,为激光无线能量传输技术的进一步研究应用提供了现实基础。

2.1 适合于空间在轨操控的无线能量传输

当前空间在轨活动日益增多,包括交会对接、航天员出舱活动、在轨维护与服务等。在越来越多的空间非固定活动中,需要解决对灵活轨道设备的能量供给问题。而无线能量传输在实现对空间机械臂、航天员出舱活动工具、在轨更换单元(ORU)等在轨操控设备(图2)能量供给方面,提供了快速、方

便的解决手段,根据感应耦合、磁场共振和激光无线能量传输的特点,可提供近、中、远不同距离上的解决方案。

感应耦合电能传输采用非接触的变压器线圈传能,具有较高的传输效率,可以能源模块的形式方便地进行ORU设备能量交换;磁场共振式无线能量传输系统,具有使能量传输通道绕过金属的突出特点,可采用基站安装能量主发射线圈,而各个接收部分安装谐振线圈的无线能量传输方式,用于机械臂关节、出舱活动工具的无线供能;激光无线能量传输系统以其体积小、质量轻、传输距离远的优点,可用于对伴飞卫星、维护卫星等进行远距离的无线电能供给。



图2 在轨操控示意图

Fig. 2 Space operation on orbit

2.2 航天器传感器网络中的无线能量传输

目前,随着空间任务的扩展,航天器组成和结构越来越复杂,航天器在发射、运行及回收过程中,其系统运行状态可为航天器故障评估处理、重复使用检测、新型航天器设计等提供重要的信息支持。而无线传感器网络将在航天器健康监测中发挥重要作

用,同时在深空探测领域,可以使用无线传感器网络来进行行星环境的探测,借助于航天器布撒的传感器节点实现对星球表面大范围、长时期、近距离的监测和探索。图 3 所示为 NASA 的空间探索计划无线传感网络,系统由数据采集单元、数据处理单元、数据传输单元和电源管理单元等组成。目前电源管理单元一般采用微型纽扣电池供电,其寿命将影响到网络节点的寿命,而无线能量传输技术为这一关键问题提供了很好的解决途径。通过采用磁场共振式无线能量传输方式,可方便地实现对分布于各处的无线传感器网络节点供电。该技术的运用为整星健康状态的感知提供了有效解决手段,可满足在轨应用的需求^[3]。



图 3 NASA 空间探索计划无线传感网络
Fig. 3 NASA wireless sensor net in space exploration project

2.3 卫星之间无线能量传输

分布式可重构卫星是由多个模块化航天器编队飞行构成的新型航天器,具有任务可重构、抗损能力强的突出特点。由于模块化航天器体积、质量、功能和组成受限,集群飞行的能量供给成为制约技术发展的难题。无线能量传输技术可应用于分布式可重构卫星^[4]、多个卫星组成的编队飞行中,一旦某一卫星出现能源采集系统故障,或者因遮挡等因素无法采集太阳光能源时,其他正常工作的卫星就可以采用无线方式为其输送能源,保证每个卫星的能量供给,如图 4 所示。该技术可有效提高卫星系统在轨修复的可行性,延长卫星寿命,降低卫星成本。鉴于航天器间的距离较远,目前可行的方案集中于激光无线能量传输和微波无线能量传输两种方式。

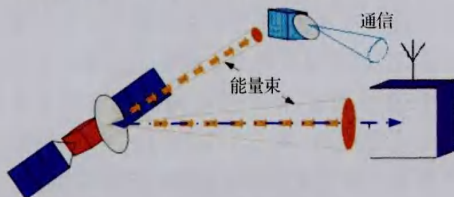


图 4 分布式卫星无线能量传输示意图
Fig. 4 WPT on fractionated satellites

2.4 星地之间无线能量传输

无线能量传输技术还可应用于空间太阳能电站。1968 年, P. E. Glaser 首次提出了在地球同步轨道上建造太阳能发电卫星的概念,以满足天基和地基的电力需求,如图 5 所示。这就需要在地球同步轨道到地面的 36 000 km 距离上建立无线能量传输通道。目前,各国专家将研究重点集中在微波和激光两种无线能量传输方式上^[5-6]。



图 5 太阳能发电卫星示意图
Fig. 5 WPT on space power station

2.5 深空探测无线能量传输

无线能量传输技术可应用于载人登月及其他深空探测任务,如使用着陆器给巡视器等移动设备供给能量、月球基地与电站之间能源供给(图 6)、月球卫星与着陆器之间的能源供给等,为巡视器无线供能能够极大拓展巡视器的活动范围。



图 6 月球基地示意图
Fig. 6 WPT on lunar base

2.6 无人机无线能量传输

无人机具有体积小、质量轻、机动性好、飞行时间长和便于隐蔽等特点,特别适用于执行危险性大的任务。当前,无人机逐渐成为作战、侦察及民用遥感的飞行平台。小型无人机大多使用电力发动机,一般由锂电池来驱动,然而电池的能量密度远低于燃油,严重限制了无人机的续航性能。而无线能量

传输技术的发展为提高无人机的续航能力提供了一种有效的解决方法,其中采用激光方式是目前实现电动无人机无线传能的首选,又称为激光射束驱动无人机技术(图 7)^[7]。



图 7 无人机激光无线能量传输示意图
Fig. 7 WPT on unmanned aerial vehicle

无线能量传输技术在航天领域的应用正在逐步拓展,而随着技术的成熟及应用范围的扩大,在构建无线通信网络的同时,可构建一个无线能量传输网络,将使航天技术的设计理念发生根本性的变化;同时,在我国空间科学探测、空间遥感、在轨维护、新能源利用等重大科技需求中,将进一步加强空间无线能量传输技术的研究,为未来空间飞行器的新型能源供应及有效利用太阳能等奠定良好的技术基础。

3 激光无线能量传输系统组成及关键技术

激光无线能量传输技术(LWPT)是以激光光束为能量传输载体,利用发射端光电转换、接收端光电转换,实现电能的无线传输。系统主要由激光发射模块、激光接收模块、激光传输控制模块、能源管理模块等组成,如图 8 所示。涉及的关键技术包括无线能量传输总体设计技术、高效高光束质量的激光发射器技术、高效激光—电能转换系统设计技术、能源管理技术和激光光束控制技术。

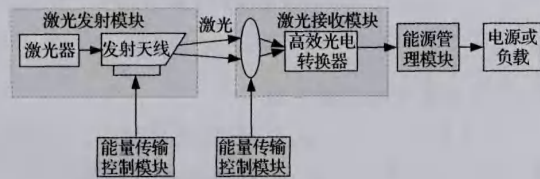


图 8 激光无线能量传输系统示意图
Fig. 8 Fame of LWPT system

3.1 无线能量传输总体设计技术

需要对无线能量传输的功率、效率和距离的相

互耦合关系进行研究,达到发射、接收之间的最佳匹配,使系统具有最高的传输效率,涉及的关键技术包括激光无线能量传输波长、光电材料选择,传输途径设计,卫星平台影响等因素的分析及仿真实证。

3.2 高效、高光束质量的激光发射器技术

激光无线能量传输系统的发射端主要采用大功率激光器,如光纤耦合输出的半导体激光器等。需要根据激光器的特点分析其远场分布特性,研究大功率激光器阵列的光束变换技术和激光器阵列准直的微透镜结构。

此外,由于热功耗引起的半导体激光器有源区的温升会使激光器转换效率下降,阈值电流上升,输出功率减小,激光波长漂移,甚至会彻底毁坏激光器,因此需要对大功率激光器进行温度控制,特别是针对空间应用的特殊环境,研究空间激光器的散热方式。

同时为在能量接收端获得高功率密度、高质量激光光束,需要对大功率激光整形、准直技术进行研究,引入自适应光学技术,对大气闪烁、波前畸变等进行补偿。

3.3 高效率激光—电能转换技术研究

激光—电能转换模块的工作参数,主要包括转换效率、工作频率、输出功率、工作温度、面板结构及形状设计、空间环境影响等。普通太阳能电池是针对太阳光宽光谱结构设计的,且其在实际应用中有较高的激光反射,不能直接应用于激光—电能转换模块。因此,开发与激光波长相匹配,具有特定表面限光结构的激光—电能转换器件是实现激光无线能量传输的关键技术之一,其中包括激光—电能转换器件的表面限光结构的研究,半导体激光—电能转化器件的基质材料研究,高功率传输情况下升温对激光—电能转换器件性能的影响等。

在进行激光—电能转换过程中,光束能量分布、电池片工作温度、串/并联特性、输出电压/电流、面板结构及形状等都会影响接收装置效率,需要根据光电池特性,结合激光光束特性,对高效的激光光电池结构进行设计和优化。例如,光电池最大功率点跟踪技术就是通过一种算法,使光伏电池始终工作在最大功率点状态,当温度或者光照影响最大功率点位置的时候能进行自动调整,使光伏电池的输出功率达到最大。通过研究激光—电能转换模块的光伏特性,建立适用于激光无线能量传输系统的功率跟踪算法。

3.4 能源管理技术研究

通过激光无线传输的能量需要快速存储,以达

到高效传输的目的。需要研究能源检测技术、能源平衡及能源控制技术,以提高无线能量传输的有效利用率,涉及的关键技术包括能源管理系统组成、能量存储、能量管理、能量稳定输出等技术。

3.5 激光光束控制技术研究

激光光束的波束很窄,对发射端和接收端的对准提出了更高要求。需要研究激光发射传输控制技术和编程方案,控制激光束发射方向,使光束与激光电池板正入射,达到最高的光电转换效率。需要研究瞄准、捕获与跟踪(APT)系统的动态、静态、随机振动等性能对能量传输链路的稳定性、能量传输效率等的影响,为激光无线能量传输 APT 系统的优化设计提供技术基础。

4 激光无线能量传输技术发展趋势

4.1 国内外激光无线能量传输技术发展

国外开展激光无线能量传输技术研究的主要有美国、日本和德国等。目前激光无线能量传输技术仍处于试验阶段,多数为数十瓦的传输功率和数百米内的传输距离,受器件、传输效率等因素影响很大,至今尚未有实际装备应用^[8-12]。

1997年,日本进行了激光无线能量传输的地面试验。激光器为连续 CO₂ 激光器,传输距离为 500 m。试验结果显示激光空间传输效率约为 60%~65%。另外,日本专家使用 2 cm×2 cm 的太阳能电池板接收激光,在 808 nm 半导体激光器照射下砷化镓(GaAs)转换效率最高为 51%。

2002年德国进行了地面激光能量传输试验,用激光驱动装备有光伏电池的小车,采用钕钇铝石榴石(Nd:YAG)全固态激光器倍频输出 532 nm 的绿光,激光光束扩束后,光束直径为 30~50 mm,输出功率为 5 W,光伏电池的转换效率为 25%。

2004年,美国设计了一种激光无线能量传输接收系统,其中透镜的口径为 3.7 cm,将激光汇聚在一个直径为 4.0 mm 的 GaAs 太阳能电池上。测试性能显示,在 835 nm、功率 0.522 W 激光照射下,激光-电能转换效率大于 56%。

2006年,日本近畿大学利用激光能量进行了机器人、电动风筝、直升机激光供能试验,激光系统由两个光纤耦合半导体激光器组成,输出功率为 200 W,波长为 808 nm,太阳能电池板为直径 30 cm 的圆形,由 30 个 4 cm×7 cm 的 GaAs 电池片构成。当用 200 W 激光照射时,太阳能电池板的最大输出功率

为 42 W。整个试验过程中,激光器转化效率为 34.2%,GaAs 光伏电池的转化效率为 21%,整体电-光转化效率为 7.2%。

2008年,NASA 开展了激光驱动太空电梯的试验。此试验采用半导体激光器,波长为 0.84 μm,电-光转换效率为 70%,光伏电池粘附在电梯上,以 3.7 m/s 的均速最终将电梯送到了 900 m 的高空。2012年,美国激光动力公司和洛马公司在风洞内验证了一种激光充电系统,成功地将“潜行者”(Stalker)无人机系统的连续飞行时间延长到了超过 48 h,相当于“潜行者”自身能力的 24 倍,超出了最初设定的耐久目标。

NASA 还计划采用 800~830 nm 的激光在航天器之间进行无线能量传输试验。计划利用大功率激光二极管作为发射源,在“国际空间站”上向空间站外的航天器(如货运飞船等)传输电能,试验将分步进行,从开始的小功率、短时间能量传输最终扩展至大功率、长时间的无线激光能量传输。

国内,北京理工大学主要进行了小功率激光能量传输的仿真研究,通过对国外相关文献的研究,给出了激光无线能量传输系统效率的初步模型;清华大学则对用于激光无线能量传输接收端反射镜的反馈弥补效果进行了研究。

以下重点介绍山东航天电子技术研究所的情况。山东航天电子技术研究所对激光能量传输领域高度重视,制定了发展规划,自主投入、大力开展了相关技术的研究。“十一五”期间自筹资金开展了民用系统的开发,研制出无线激光供能系统,给远端工作的电子设备供电,激光工作波长 800~830 nm,激光器输出光功率 5 W,光电转换效率最大可达 40%~50%。“十二五”期间,依托国家 863 项目,联合优势单位,对激光无线能量传输机理进行了深入研究,并针对模块航天器应用背景,设计研制了一套激光无线能量传输系统^[13],系统工作波长 810 nm,工作距离 100~200 m,激光输出光功率 28 W,电-电转换效率最大约 15%,2014年 10 月首次进行了两飞艇之间的激光无线能量传输试验(如图 9 所示),成为国际上首次实现该技术的研究机构。同时开展了分布式航天器无线能量传输、无人驾驶飞机无线能量传输、空间太阳能电站、地外驻留平台无线传能及能源管理的研究工作,掌握了大量关键技术。未来,山东航天电子技术研究所将针对新型激光传能技术发展及其在航天领域扩展应用方面继续深入研究,广开思路,大力促进该技术的发展。



图9 飞艇之间激光无线能量传输试验

Fig. 9 LWPT experiment onboard between airships

4.2 激光无线能量传输技术发展趋势

提高能量传输效率、传输距离和传输功率一直是无线能量传输技术发展的方向,为了实现更高的效率、更远的距离和更大的功率,未来激光无线能量传输技术也将围绕以下几个方向开展研究。

1) 白光激光能量传输

利用白光激光或多波长激光模拟日光,对太阳能电池进行激光充电,实现太阳光和激光能量的复合利用,使得接收端在获得激光能量的同时,可以在平时或者工作时间利用太阳光获得额外的能量,提高能量传输系统的工作效率。目前大功率白光激光器技术还不成熟,最大功率仅为百瓦量级,且一般光束质量较差;而采用多波长传输来模拟日光技术中的波长组成、光强比例,其传输效率优化方面尚需要大量的试验研究。

2) 激光热能转换技术研究

目前在进行激光能量接收时,一部分能量被光能转换为电能,大部分剩余能量则以热的形式被浪费掉。对此可以利用光—热—电、光—热—动能—电等手段实现更高效率的电能获取,以达到激光能量复合利用的目的。主要利用光电池易于回收热能的特点,对循环散热系统和温差发电技术进行研究,将损失的能量以热能和电能的形式回收,可显著提高系统能量传输效率^[14-15]。

3) 多光束激光能量传输

大功率激光器技术、空间散热技术的不足,限制了单路激光发射的能量,未来空间大功率激光能量传输,将采用多光束体制,同时激光无线能量传输分布式应用也需要采用多光束体制,来实现传能的高效及灵活运用,如图10所示。

4) 强激光脉冲传能

利用强激光短时间击穿空气,使得激光通道上的空气成为导体,再利用高压放电原理形成能量发射端与接收端之间的电弧,接收该电能,实现中、远

段距离上的高效电能传输。该方法不再进行电能—激光—电能转换,而是直接电能—电能转换,本质上不是激光能量传输,研究重点是如何控制电弧以及电弧能量如何收集^[15]。

5) 太阳光泵浦激光器传能

与传统激光器相比,太阳光泵浦激光器结构简单,能量转化环节少,省略了光—电—光的环节,较为可靠(见图11)。随着技术进步和转换效率的提高,可以直接用于无线能量传输系统中,提高传输效率^[16]。



图10 多光束激光无线能量传输示意图

Fig. 10 Sketch of multi-beam LWPT

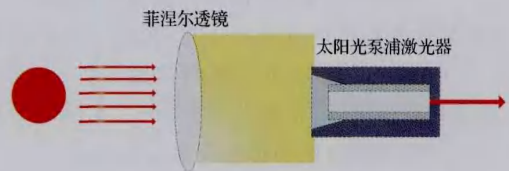


图11 太阳光泵浦激光无线能量传输示意图

Fig. 11 Solar pumped solid-state laser

5 结束语

无线能量传输技术在航天领域的应用前景非常广泛,可为空间科学研究、天基遥感和环境监测等提供技术先进、应用灵活的能量获取手段,可满足多类重大应用需求,使得遥感和空间科学研究更加方便、快捷。通过航天应用引领该技术的发展,不但可以

用于空间太阳能电站等空间应用领域,还可以应用于空一地、空一空、地面等多种无线能量传输应用场合,拓展无人机、无线传感、快速充电等多种用电设备、设施的应用范围和应用模式,具有广泛的应用前景和巨大的经济效益。

参考文献 (References)

- [1] 雷进辉,杜留峰. 无线能量传输技术的理论研究[J]. 福建电脑, 2009(10): 46
Lei Jinhui, Du Liufeng. Theoretical study of wireless power transmission[J]. Fujian Computer, 2009(10): 46 (in Chinese)
- [2] Sheik S, Mohammed K. Wireless power transmission—a next generation power transmission system[J]. International Journal of Computer Applications, 2010, 13(1): 100-103
- [3] Rama K Yedavalli. Application of wireless sensor networks to aircraft control and health management systems[J]. J Control Theory Appl, 2011, 9(1): 28-33
- [4] Mathieu C, Wei gel. Assessing the fractionated spacecraft concept, AIAA 2006-7212 [R]. Washington D. C. : AIAA, 2006
- [5] Hoang H, Fu S J. International Space Station power system requirements models and simulation[C]// Aerospace Conference. New York: IEEE, 2012: 1-9
- [6] Shinohara N, Kawasaki S. Recent wireless power transmission technologies in Japan for space solar power station/satellite[C]// Radio and Wireless Symposium. New York: IEEE, 2009: 13-15
- [7] 盖伊·诺里斯. 利用无人机验证激光动力技术[J]. 国际航空, 2013(1): 50
Guy Norris. UAV Demonstrates utility of laser power [J]. International Aviation, 2013(1):50 (in Chinese)
- [8] H Yugami, Y Kanamori, H Arashi. Field experiment of laser energy transmission and laser to electric conversion[C]// Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. New York: IEEE, 1997: 625-630
- [9] Nobuki Kawashima, Kazuya Takeda. Laser energy transmission for a wireless energy supply to robots[J]. Robotics and Automation in Construction, 2008: 184-198
- [10] N Kawashima. The importance of the development of a rover for the direct confirmation of the existence of ice on the moon[J]. Trans. Japan. Soc. Aeronaut. Space Sci, 2000,43(1):34-35
- [11] Hyde R A, Dixit S N, Weisberg A H, et al. Eye-glass: large aperture diffractive space telescope[C]// Proceedings of the International Society for Optical Engineering. Bellingham: SPIE, 2002: 28-39
- [12] Howell J T, O'Neill M J, Fork R L. Advanced receiver/converter experiments for laser wireless power transmission[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Solar Power from Space. Bellingham: SPIE, 2004: 187-194
- [13] 石德乐,李振宇,吴世臣,等,模块航天器间激光无线能量传输系统方案设想[J]. 航天器工程,2013, 22(5): 67-73
Shi Dele, Li Zhenyu, Wu Shichen, et al. Concept of laser power transmission system for modular spacecraft [J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(5): 67-73 (in Chinese)
- [14] S B RiffaL, Xiaoli Ma. Thermoelectrics: a review of present and potential applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(8): 913-935
- [15] 马洪奎,高庆. 一种温差发电模块的研制及其性能测试[J]. 电源技术, 2013, 37(4): 589-592
Ma Hongkui, Gao Qin, Development and performance test of a thermoelectric modular, development and performance test of a thermoelectric modular[J]. Power Sources, 2013, 37(4): 589-592 (in Chinese)
- [16] 赵长明,赵彬,何建伟. 太阳光泵浦固体激光器及其空间应用[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(z3): 95-99
Zhao Changming, Zhao Bin, He Jianwei. Solar pumped solid state lasers and its space applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(z3): 95-99 (in Chinese)

(编辑:张小琳)