

论开发空间太阳能

ON THE EXPLOITATION OF SPACE SOLAR ENERGY

刘导治

一、能源问题的长远出路

世界能源的消耗大约每 15 年增长 1 倍。随着科学技术的发展,对能源的需求越来越大。能源短缺成了人类面临的一大问题。

世界年产石油 30 亿吨,而可采石油仅剩 1 000 亿吨,只够用几十年。煤也只用几百年的时间了。而且,这些矿物燃料会生成大量二氧化碳污染大气,产生温室效应而使气温升高、海平面上升和大陆干旱。水力是可再生资源,但它的潜力是有限的,例如,美国水力资源已开发得相当彻底,却还不到总能源供应的 $1/10$ 。今后将大力开发风能、地热能、波能和潮汐能,但它们的利用也都有一定限度。目前正用核裂变能来填补能源的不足。地球上铀 235 的储量不多,很快就会用完。铀 238 储量多些,毕竟也有限,况且利用铀 238 的增殖反应堆尚处在研究阶段。反应堆的安全问题和核废料处理问题还可能限制它的大规模使用。核聚变释放的能量大。它用海水中的重氢作燃料,取之不尽,又没有放射性污染,但可控核聚变近期内还不易实现。欧洲联合研究的实验反应堆估计在 2000 年才能运行,而商用反应堆也许要半个世纪后才能实现。物质和反物质湮没时释放的能量更大,可是它的利用更是遥远将来的事。太阳能也是一种取之不尽而又没有污染的能源。然而许多人认为未来几十年太阳能可能是一种辅助能源,没有给予足够的重视。从目前半导体技术、激光技术和航天技术的快速发展

看,很有必要重新认识大规模开发空间太阳能的技术可行性。

60 年代开始发展核电站时还看不到别的选择。在当时的技术条件下,太阳能只能用作辅助能源。1987 年切尔诺贝利核污染事件后,苏联停建了一批核电站,同时加速了开发太阳能。在克里米亚,5 000 千瓦的太阳能电站已经运行,正在建设 30 万千瓦的。不过,在地面利用太阳能的效率很低,大气层会反射掉 35%,还会吸收掉 20%,到达地面时只剩一半了。加上夜间无阳光,上下午阳光倾斜以及阴雨天,中纬度地区的地面只能吸收到太空太阳能的 $1/10$ 左右。

随着航天技术的发展,建立空间平台来大规模开发太阳能已不再是科学幻想。苏联正计划在 90 年代用“能源”号火箭建设空间太阳能平台,下世纪初将用激光向地面提供几十万千瓦的电力。航天技术不仅可促进太阳能的开发,还可建立太空企业,生产各种新材料、新合金、超纯物质、高质量单晶体、半导体、光导纤维、超导体、高纯药品以及生物制品,产生巨大的经济效益。美国有人估计,到 2010 年可利用太空增产 8 000 亿美元,并将推动其他经济部门发展。那时,太阳能的开发将得利于对航天技术的大量投资。能源事业一旦得到航天事业的全力支持,将会出现意外的大飞跃,从而还将加速整个科技与经济的大发展。

二、开发空间太阳能的技术可能性

太阳总辐射能为 $3\,750 \times 10^{20}$ 千瓦。按日地距离 1.5 亿公里和地球半径 6 366 公里计算, 其中 22 亿分之一, 即 170×10^{12} 千瓦可到达地面, 每平方公里有 134 万千瓦。目前全世界总发电量是 17 亿千瓦, 为到达地面太阳能的 $1/10^5$, 只相当于 1 300 平方公里面积上的太阳能。全中国的总发电量只相当于一个北京城 60 平方公里所吸收的太阳能, 约 8 000 万千瓦。因此太阳能是取之不尽的。

苏联克里米亚太阳能电站用 40 000 平方米共 1 600 面反射镜聚焦产生 250℃、40 大气压的蒸汽来发电, 能量转换效率为 9%。美国 NASA 空间站用反射镜聚焦日光加热甲苯推动涡轮, 效率有 25%。第一架用光电池的太阳能飞机也已于 1974 年在美国试飞。目前硅二极管光电池阵的能量转换效率约 10%。用砷化镓的二极管光电池阵效率约达 20%, 重量与发电量之比可低到每千瓦 10 公斤。日本还计划在 90 年代初就制成效率 40% 的砷化镓光电池。根据半导体技术的发展, 预计下世纪初光电池阵效率可提高到 30%, 重量可降低到每千瓦 2.5 公斤。将来若研制成光波共振发电, 即用多元偶极子天线吸收光子, 利用光子交变电场引起谐振并整流, 效率还可提高到 75%。一个面积 60 平方公里的太阳能平台吸收太阳能为 8 000 万千瓦, 效率按 30% 估计, 将发电 2 400 万千瓦, 相当于世界上最大的三峡水电站的两倍; 重量按每千瓦 2.5 公斤估计, 将重 6 万吨。平台先发射到几百公里高的低轨道上初步装配, 然后提升到 36 000 公里高的同步轨道上。其视面积只占太阳视面积的 $1/1\,400$ 。

由于微波技术和激光技术的发展, 太阳能已可转换成微波束能量或激光束能量进行远距离输送。自 1960 年第一台激光器问世以来, 激光技术发展迅速, 发射大功率激光已经可能。1985 年美国在白沙导弹试验场击毁导弹的氟化氙激光器连续输出功率为 2 000 千瓦, 现在正研究 20 000 千瓦量级的激光器。90 年代将有 1 000 千瓦的激光束供航天器的轨道提升之用。预计 2000 年有可能发射 10 万千瓦的激光束。太阳能可自同步轨道以激光束的形式射到 500 公里高的低轨道激光站上。再在低轨道上建立环球的十来个激光中继站, 将能量转送到世界各地。激光穿透大气层的效率不如微波, 故可用微波束射向地面天线阵。微波输能已有试验。美国 NASA 自地面发射微波束到太空薄膜天线上, 吸收效率已达 85%, 正计划试验 10 万千瓦的。这样, 可用多束微波向地面电站提供太阳能。

三峡工程按投资 100 亿美元计, 建 2 400 万千

瓦水电站需 200 亿美元。广东大亚湾 2×90 万千瓦核电厂基建资金按 37 亿美元计, 建 2 400 万千瓦核电需 500 亿美元。核电厂造价按比煤电厂高 30% 计, 建 2 400 万千瓦煤电厂需 400 亿美元。太阳能平台主要由光电池阵铺成。太阳能电池每千瓦约 1 000 美元, 2 400 万千瓦的成本为 240 亿美元。将来大规模生产后成本会降低很多。不过, 建立太阳能平台耗资更多的是向低轨道的发射费用。建立一个 2 400 万千瓦的平台, 需发射 60 000 吨器材入轨。美国航天飞机的有效载荷约 30 吨, 需发射 2 000 次。目前发射一次约需 1 亿美元。大规模重复发射后成本将会降低。在太空用机器人进行的大规模安装工程, 自低轨道向同步轨道的提升以及激光与微波输能也需大量投资。总投资将达 2 000 或 3 000 亿美元的量级。因此, 在当前技术水平下, 大规模开发太阳能还不现实。美国能源部 1981 年的论证也认为, 在 80 年代兴建太阳能平台的时机还不成熟。

实际上, 航天飞机的有效载荷只占燃料重量的 $1/60$ 。能量主要不是用于发射有效载荷入轨, 却用来发射燃料本身上天了。可以设想, 若不携带燃料而改为远距离输能, 起飞重量将减小一个量级, 发射功率也会减小一个量级。火箭将极为轻巧, 费用将大为节省。设想由太阳能平台向航天飞机远距离输能, 而航天飞机又用来建设太阳能平台, 使二者相辅相成, 成本将大幅度降低。

三、用航天新技术支持太阳能的开发

近年来光电池、航天推进、机器人、激光和微波输能等新技术进展迅速。如果技术水平出现新的突破, 将有利于大规模开发太阳能。目前已开始探索向航天飞机远距离输能的可能性。

微波输能可用于地面电站或飞行器的轨道提升。微波束的直径与其波长成正比, 需较大的天线面积; 而飞行器起飞入轨需减小接收面积, 故应采用激光输能。由地面站向飞行器窗口内发射激光比较方便。但激光穿透大气的效率不够高, 故最好在高空建立激光站, 向下射入飞行器窗口。窗口材料可用晶体宝石, 透明度有 99.9%, 且耐高温高压。由于可见光会反射聚焦于视网膜而伤害人眼, 可采用近红外频段, 例如 $1.5 \sim 2.8$ 微米波长的激光。

激光束的能量密集强度极高, 可达每平方厘米 10^9 亿千瓦。机械加工中只用每平方厘米 1 至 100 万千瓦。而阳光为每平方厘米 0.134 瓦。激光输能

时为避免激发沿途空气电离，强度不能太高，例如激光束中心平均强度可取每平方厘米 100 千瓦。这时第一圈衍射光强度约每平方厘米 1.8 千瓦。若把第一圈衍射光也接收进来，1 米直径的窗户可接收几十万千瓦的能量。第二、三和四各圈衍射光只剩每平方厘米 0.4、0.1 和 0.05 千瓦的强度，将散射于窗外，损失已很小。这样，500 公里远照射 1 米直径窗户，其散射范围只允许 2×10^{-6} 弧度。可利用目前天文台恒星跟踪系统的技术，其定向精度已达 10^{-6} 弧度，还将提高到 10^{-7} 弧度。

用激光作能源的推进器可有不同的方案。例如，70 年代在实验室中已研究出一种脉冲式激光等离子体火箭。脉冲激光可由燃室上方的窗口射入，用反射镜聚焦于燃室的喷口处，使焦点的气体高温电离产生电子。在一定波长激光束下，电子将吸收激光光子而达到高温高压，形成由激光提供能量的爆燃波。爆燃波高速传进燃室，点燃正脉冲地注入燃室的工质，例如液氢。高温高压工质将形成强烈的反射冲击波推向出口，产生高速等离子体喷流和脉冲反推力。因气体直接吸收激光能量，故温度可高于壁温限制，燃室内可达 5000K 和 100 大气压，得到比常规火箭高得多的喷射速度，例如每秒 5 公里。理论上可达更高的温度和压力，喷射速度可达每秒几十公里。

	“哥伦比亚”号 航天飞机	激光等离子体 航天飞机
有效载荷(吨)	29.5	29.5
起飞重量(吨)	2 043	112
燃料重量(吨)	1 713	45

若发射与“哥伦比亚”号航天飞机相同的有效载荷，可采用每脉冲 5 兆焦的激光等离子体火箭 48

台，每台每秒 5 次，共 120 万千瓦。分析表明，它的起飞重量只及“哥伦比亚”号的 1/20，燃料只需 1/40，见表。

这样，若用起飞重量 2 043 吨的激光动力航天飞机来发射 60 000 吨器材入轨，将只需发射 100 次，发射成本将减低一个量级。

太阳能平台的建设有如搭积木，建成一部分使用一部分。由平台发射激光束提供航天飞行能源，由激光动力航天飞机支持平台建设，二者互相促进，将使成本越来越低。有了轻巧经济的发射手段，又将加快空间研究站、太空工业和月球基地的建设，以后还可由月球取材来建设太空工业和太阳能平台。

目前全世界电的销售量已达每年 4 000 亿美元。下个世纪能源的需求还将翻几番。有可能那时增殖反应堆的安全问题和核废料处理问题尚难解决，而可控核聚变又迟迟未能实现。如果那时光电池，激光输能和航天技术已有根本性突破，成本已大为降低，就应优先开发空间太阳能。到那时，能源大国将通过空间激光站向他国大规模输出太阳能，而能源贫国将不得不用巨额外汇去购买太阳能。目前，在前景还不明朗的情况下，能源问题的长远出路应作多方案的评比论证。只要我们有远见地加强各项新技术的预研，并及时作出正确的技术决策，下个世纪我们将有可能在能源事业上走在世界的前列。

本文主要数据取自《核科学与工程》杂志 1987 年第 3~4 期汪志馨写的《核电发展的利弊》，以及《航空学报》1989 年第 4 期刘导治写的《激光等离子体航天推进》。

本文作者刘导治 (Liu Daozhi) 系北京航空航天大学教授。

欢迎订阅《中国烧伤创疡杂志》

《中国烧伤创疡杂志》系国家科委批准创办的全国性医学专业学术期刊，1989 年 12 月创刊，国内外公开发行。

本刊宗旨坚持以中国医学为主，发挥各家医学所长，在研究、交流和报道烧伤创疡医学方面的理论、学术和经验的同时，重点介绍徐荣祥教授发明的“烧伤湿性医疗理论和技术方法”，并运用中医的哲学思想和辩证原则，以组织学、病理学、病理生理学以及微生物学等基础医学为理论基础，建立“理、法、方、药”四位一体的新医疗体系——中国烧伤创疡医学，为人类健康服务。

本刊内容新颖，涉及面广，实用性强，是理想的烧伤创疡理论研究的园地、医疗技术指导的工具和实践经验交流的桥梁，可供从事烧伤创疡工作的高、中和初级医务工作者和科研教学人员工作、

学习参考。

本刊为大 16 开本，从 1990 年第一期（总第二期）开始征订每期订价 3.5 元，全年定价为 15 元（含寄费）。凡需订购的单位、个人，请与我社发行部联系。

邮政编码：100050

地址：北京市宣武区永安路 106 号

《中国烧伤创疡杂志》社发行部

亦可将订款由银行汇至：

户名：《中国烧伤创疡杂志社》

开户银行：工商银行北京市珠市口分理处

帐号：144914-24

联系电话：338561-306、267（北京）