

微波输电,现代化建设的生力军

Power Transmission by Microwave——a Propulsion for Modernization Construction

林为干 赵愉深 文舸一 邓扬建

(电子科技大学 成都 610054)

提要 微波于近百年的人类实践活动中在讯号传输领域已取得了长足的进展。然而,微波的主力臂——微波输能却是极为有限。本文综述国际有关微波输能的研究进展,从微波输能的基本原理及其特点出发分析微波输能在国民经济和战略上的重要意义。为倡导我国科技工作者关注国际微波输能的研究动态,重视发展我国的微波输能事业,我们已进行了理论及实验研究。

微波的发展与应用是从产生微波振荡与放大的器件开始的。1920~1940年期间,微波电真空器件的研制取得了巨大成就。磁控管、速调管,以及多腔磁控管、双腔速调管和反射速调管等相继出现,不但能产生或放大微波信号,而且是两类主要的微波功率源。它们的出现为微波能的应用打下了基础。60年代出现的回旋管把微波推向了毫米波大功率领域,为微波能的应用展示了更为广阔的前景。微波自出现以来,主要的应用是在雷达、通信、导航、电视、遥感等信号传输领域,在二次世界大战中以及战后都有了飞速的发展。由于微波的热效应,以美国、日本为首的国家70年代就开始发展家用微波炉。随后,微波的应用又扩大到了干燥、加热、杀菌、种子处理等工农业领域。在医学上也探索出了微波治癌、理疗、针灸等新的医疗手段。可见,微波能不但应用于国民经济的诸多领域,而且还进入了家庭,同我们人体自身有着密切的联系。

然而,作为微波能应用的重要方面——微波能的空间传输,我们还知之不多。其实,微波输能也是人类社会进步、微波技术发展的必然结果。早在1968年,针对人类社会面临的能源危机,彼得·格拉泽(Peter Glaser)提出了卫星太阳能电站(Satellite Solar Power Station,简称SSPS)的设想。该电站用庞大的太阳能电池阵在太空中将太阳能转变为电能,设计容量为1000万千瓦。但是如何将这一强大的电能送到地球表面即成了一个大的

问题。经专家们反复论证,目前提出的最为可行方案就是采用“无线输电”的方式,即通过微波将这一强大的电能带回地球。80年代中后期由加拿大通信研究中心着手研制的SHARP(Stationary High Altitude Relay Platform)高空永久平台,静止高度为21公里,视野覆盖地面直径达1000公里以上的区域,在广播、电视、通讯、气象、地面监测等方面都将起重要作用。但是这一高空平台靠什么能源才能稳定在空中?通过对常规燃料的重量及其可靠性进行分析,他们得出的结论是,微波供能是很好的解决办法。目前我国驻守在岛屿的官兵,工作于山头雷达站、导航站的工作人员,由于不便架设电线,他们的设备和生活用电大都采用柴油机组发电,而且燃油、配件等消耗材料往往靠人工运输。这类应用要求的传输距离不大(一般小于50公里),应用微波送电是切实可行的。

微波输能是社会对微波技术提出的新课题。在我国,微波输能的研究还是一片空白,而以美国为首的发达国家对微波输能的研究工作已开展了30多年了。

一、微波输能的发展史

电磁波输能的历史可追溯到赫芝(Hertz)的早期实验。他不仅用火花间隙来产生高频能量并检测它的存在,而且还最早在发射端和接收端采用抛物

形反射面。最早产生无线输能设想的是尼古拉·特斯拉(Nikola Tesla),他的首次实验完成于1899年。由于没有技术的发展作先导,其无线有效输能的尝试没有取得成功。磁控管、速调管的出现,为大功率微波的产生奠定了基础;二次世界大战的爆发又极大地推动了微波技术、天线以及相关学科的发展。但是人们着手将这些新技术应用于微波无线输能则是50年代后期的事。古博(Goubau)、施瓦因(Schweing)等人首先从理论上推算了自由空间波束导波可达到近100%的传输效率,并随后在反射波束导波系统上得到了验证。紧接着,美国陆军、空军、航天局等开始资助以布朗(William C. Brown)等人为首的雷声公司(Raytheon)以及一些研究中心从事该项研究。长达20来年的研究中,理论和实验上都取得了很大成就,其中有四项实验被称为微波输能史上四个重要的里程碑,它们是:

1. 1964年,美国雷声公司首次演示了仅靠微波供能的简易飞行平台。飞行高度达18米,飞行时间10小时。平台上安装的整流天线将微波能直接转换为直流,电机获得的直流功率为200瓦。实验使用了一只工作在2450兆赫、5千瓦的磁控管,椭圆面反射器的直径为3米。

2. 1965年,布朗等人演示了模拟的直升飞行。飞机受照于微波束,其高度、俯仰、水平位移等参量全部通过机身的微波传感器随波束自动进行调整。发射天线口径23厘米,工作频率为10吉赫。

3. 1975年,美国雷声公司在实验室完成了交流到直流转换效率达54%的输能系统。系统工作频率2450兆赫,整流天线直流输出功率为600瓦。

4. 同在1975年,加州理工学院JPL(Jet Propulsion Laboratory)实验室在野外完成了迄今最大的微波无线输能系统。工作频率2.388吉赫,传输距离1.6公里,整流天线面积27平方米,84%的入射微波功率被转换成直流电能,获得了30千瓦的直流输出。

进入80年代后,国外微波输能研究的重点转移到了军事应用和未来太空太阳能的利用,其研究进展及成果均不见详细报道。1992年12月加拿大学者伊斯特(Thomas W. R East)报道了SHARP高空永久平台的一些研究进展,其缩比模型早在1987年9月就完成了低空试飞。1993年10月,国际无线电联盟大会期间,日本NEC公司展出了微波供能的无人海岸巡航机的样机,地面发射功率10千瓦,飞机接收到1千瓦;飞机自重15公斤,可负重50公斤。与此同时,大功率微波输能系统的规划以及系统各部分的研究工作也正在积极进行。

二、微波输能的基本原理及其特点

微波输能是指在真空中或大气中不借助其它

任何传输线或波导来达到能量传递目的一种手段。图1示出了微波输能系统的基本结构,它主要由三部分组成:

1. 将包括来自太阳能、风能、海洋能、核能等的电能转换成能在自由空间传播的微波;
2. 微波的定向发射和传输;
3. 将接收到的微波功率直接由整流天线(rectenna)变换为直流电能。



图1 微波无线输能的系统组成

若D代表微波在自由空间传输的距离, A_t 、 A_r 分别代表发射天线和接收天线的面积, λ 表示工作波长,则微波在自由空间的传输效率 η 是参数 $\tau = \sqrt{\frac{A_t}{\lambda^2} \cdot \frac{A_r}{\lambda^2}} \left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-1}$ 的函数,图2示出了它们之间的关系。图中假设发射天线的口径场分布为高斯型。

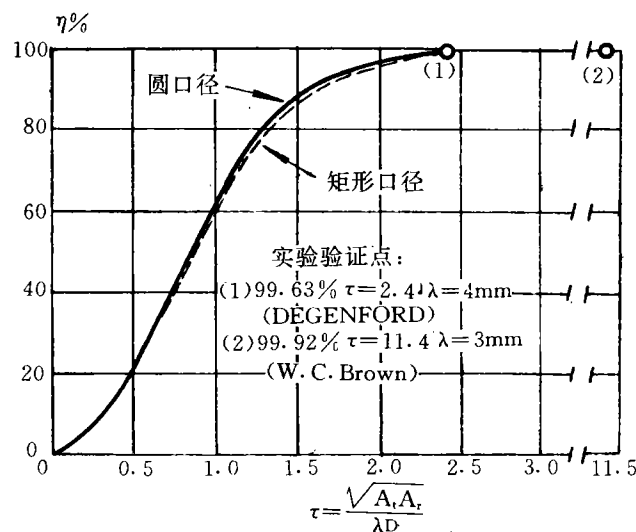


图2 自由空间电磁波传输效率的理论值

从效率曲线得出的一个重要结论是:传输效率不与传输距离直接有关,而是由 $\frac{\sqrt{A_t A_r}}{\lambda D}$ 决定,故距离D增大的效应可由 A_t 、 A_r 的增加或 λ 的减小来补偿。

微波输能的总效率等于直流到微波、微波传输和接收整流三部分效率之积。表1给出了微波输能总效率的分布。

由微波输能的独特机理可知,电磁波无线输能具有下列特点:源到负载之间的能量传递可以不借

助任何导波系统;能量的传递速度为光速;能量的传递方向可以迅速改变;电磁波在真空中传输没有损耗,在大气中的损耗也可做到很小;由于工作在微波频段,收发端的设备比较小;能量在两点之间的传输与两点之间引力势的差别无关。

表1 微波输能总效率与各部分效率的关系(%)

	当前值	改进值	预期值
微波发生器的效率	76.7	85	90
发生器至接收天线 口径之间的传输效率	94	94	95
接收整流的效率	64	75	90
总效率	45	60	77

三、微波输能与电力传输无线化

在电力工业中,输变电设备是重要组成部分。

表2 电力工业中输电电压、容量、距离及造价

输电电压(千伏)	10	35	110	220	330	750
输送距离(公里)	6~20	20~50	100~150	200~300	250~500	600~1000
输送容量(兆瓦)	0.2~2	2~10	30~70	120~250	300~600	1000~2000
线路造价(万元/公里)	0.3~0.6	1~1.8	3~4	8~10		

空对地:以美国为首的发达国家正在研究到外层空间索取太阳能的途径。计划在距地球 35 800 公里的同步轨道上放置面积约为 100 平方公里的太阳能电池阵列,加上自动控制,自动接收最大的日照量,可以不受气候影响地昼夜取得电能,然后将电能转换为微波,通过口径 1 公里的发射天线将微波发送回地球表面,地表接收天线面积为 43 平方公里。该系统设计容量为 10 000 兆瓦,费用可高达数百至数千亿美元,但可工作 100 年。若进一步改进技术,其发电成本可望达到目前轻水反应堆核电站的几分之一,而且没有放射污染,不需要厂房、道路等一系列投资。有人估计,如果在地球同步轨道上每隔 10 公里放一颗 10 000 兆瓦的太阳能卫星,组成一个太阳能电站链,则取得的太阳能电功率相当于 1980 年全球用电量的 200 倍,若设计 100 座这种电站,总发电量将占全球发电量的 40%。到那时,单位电能的价格将大大降低。

地对空:在地面将电能以电磁波的形式送至太空中的卫星、高空的无人侦察机或永久性平台。

空对空:美国国家航空和航天局已经研究了在太空中用一颗母卫星向数公里外的多颗子卫星用微波供电的可能性。在真空中电磁波可无衰减地传

播,因此工作频率可以很高,天线等设施则很小。由于品种繁多,用量极大,因此电力工业中用于输变电设备的投资一般都大大超过了发电设备的投资。据英、美、德等国统计,前者比后者多 17~74%。一条长 500 公里,输送容量 400 兆瓦的线路,仅架空裸线就需优质金属 4 000 多吨,悬式瓷绝缘子串 14 万个,还有数百个高压铁塔。据统计,每 10 兆瓦输电需 90~110 台高压断路器,250~300 台隔离开关,320~400 组高压熔断器,120~180 吨高压电瓷产品。表 2 给出了输送电压、容量、距离及造价的大致关系。随着原材料价格的上升,实际造价会更高。如果采用微波无线输电,工业用电或发电厂出来的电能稍加变换后可用来产生微波;电力在空气中的传输几乎不需要任何投资;接收端整流后即为低压直流,不需要复杂的变电设备。仅此来看,传统的高压输电与微波输电在设备的投资上差距相当惊人。

美国雷声公司 1964 年演示的微波供能飞行平台,就已经证明了利用电磁波在空间传输能量的可能性。空对地、地对空、空对空、地对地四种电磁波输能方式则要求大功率高效率不污染环境的输电。

播,因此工作频率可以很高,天线等设施则很小。

地对地:由于受到地球曲率的限制,地面微波输电当前可应用于海岛、山顶等一些不便架设线路的场合。若在空中用微波供能的静止平台投入使用,则微波地面传输的距离可达数千公里。最近还有人构思了用数颗低轨卫星实现电能大转运的蓝图。

人类对电能的应用从 19 世纪开始,至今已有 100 多年的历史。经过数代人大规模的苦心建设,当今的电力传输系统已具备了相当的规模。虽然在经济性、适用性上,地面大功率微波输电还不能马上同业已成熟的高压输电媲美,但至少已成为当前电力传输方式的一种有益的补充。而且,微波输电不局限于地面传输方式,它是一个广义的概念。其全方位的输电方式是对传统输电方式的有力挑战。

四、微波输能与高能波束武器

一片聚光镜可以将太阳光聚成一个点,多个聚光镜(burning glasses)将太阳光聚成一个点即可引起物体的燃烧。根据光的电磁学理论,将这一太阳灶的原理应用在微波领域,就是当今微波能武器

的基本原理。与激光武器比较,高能微波束受气候影响小,技术上易于实现。这种武器能在金属表面感应起强大的电流、电荷,烧毁导弹、卫星、飞机等内部的电子设备。强大的电磁场辐射还可使人员致盲、皮肤烧伤和致死。图3示出了在波束方向不同距离处微波能聚焦后功率密度的变化情况。

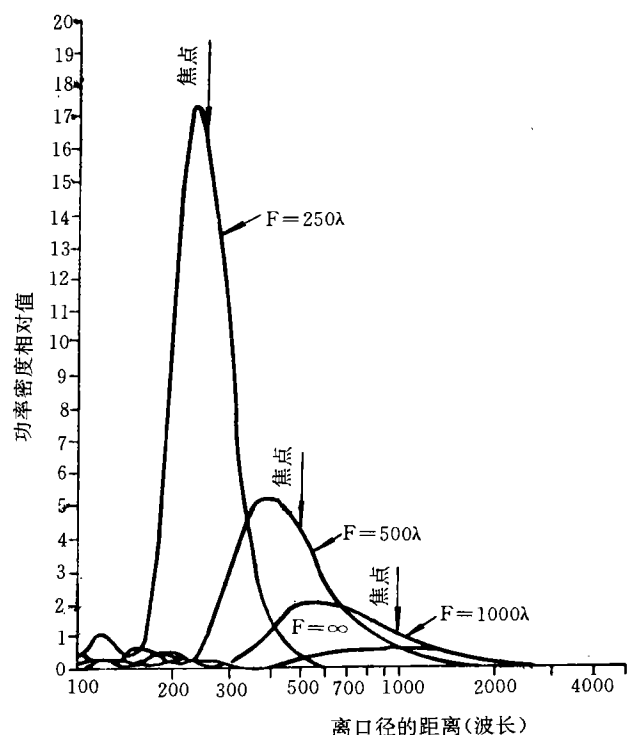


图3 $50\lambda \times 50\lambda$ 的口径分别将电磁波聚焦在 ∞ 、 1000λ 、 500λ 和 250λ 时的电磁能量

目前正在规划的卫星太阳能电站(SSPS),其和平时期的主要目的是发电。一旦战争爆发,通过相控天线阵,改变波束方向,就可以将大量的电磁能量辐射到敌方阵地,从而干扰敌方的军事活动;如将这一巨大的能量聚焦发射,即可在一定的空间倾刻摧毁敌方目标。我国已建设起强大的电能资源,并仍在大力发展中。许多重要的工程已开始建设,其中以三峡建设为主线。人所共知,三峡大坝是一个举世瞩目的巨型水电工程,非平时时期也将是一个巨大的军事目标。能不能将三峡的强大电能战争时期用作武器?答案是肯定的。可以在三峡工程生产的电能中,拿出一部分兴建一座微波输电站,平时即通过无线传输的方式向用电中心供电,战争时期即将电能集中起来做成微波防空防线,并

用所获得的微波组成微波定向能武器,消灭敌人。有迹象表明,美国正在加紧能束武器(包括微波和激光)的研制,并很有可能已经有定型产品。因此,微波输能既有利于国民经济建设,又能在国防建设中发挥重要作用。为此,希望有关部门及科技界对微波输能的研究予以高度重视,制定一个有关微波输能的长远研究与发展规划,力争在不长的时间内赶上并超过发达国家的技术水平。

五、结束语

微波输能是一个综合性的课题。它不仅包括与此直接有关的高功率微波产生、发射和接收等问题,而且还包括生态、环境、电磁兼容等许多相关学科。1968年彼得·格拉泽提出的SSPS计划对微波输能技术的发展产生了深远的影响,并立即启动了有关课题的研究。经过30多年的努力,微波输能在技术上已趋成熟。当前人们还在对高功率微波的产生、高效率传输、聚焦发射等核心课题进行研究。在国内,国家自然科学基金资助研究项目中已包含该项研究,已进行了S波段、C波段、8毫米和3毫米的输能实验,并拟进一步开展中等规模的系统实验。为此我们还希望申请更多的经费,投入更多的技术力量,从事微波输能的理论与实验研究。

一代产业技术的崛起将极大地推动相关学科的发展。以磁控管的生产为例,截至1983年底,我国就已经能生产出2450兆赫,10千瓦;915兆赫,30千瓦的磁控管。截至1993年,10年过去了,但大功率磁控管的生产能力还没有提高。从客观上讲,目前的应用范围似乎对更大功率的微波源没有更多的要求,缺乏推动这一高技术向前发展的客观动力。若将微波输能作为一项产业技术来发展,势必会使我国的微波技术及相关领域研究获得飞速的发展。

从目前的发展水平与趋势来看,微波输能必将是下个世纪的主要输能方式。国外成立了国际空间大学,其主要科学活动是研究如何利用空间太阳能。我国1990年发电量达138000兆瓦,2000年计划达到182000兆瓦(核能占3%)。国外1991年曾提议从月球上的电站向地球送20000000兆瓦的电能。可见,微波输能在下个世纪将扮演重要角色。我国是一个人口大国,人均资源占有量很少,人均电量居世界第80位,如果不发展自己的产业,会在能源危机中步入困境。这里,我们再次呼吁我国科技工作者,特别是有关部门从根本上、更深层次上思考微波输能的重要意义。(责任编辑 冷远猷)