空间太阳能发电卫星的几个理论与关键技术问题

段宝岩*

西安电子科技大学机电科技研究所, 西安 710071

* E-mail: byduan@xidian.edu.cn

收稿日期: 2018-04-25; 接受日期: 2018-07-09; 网络版发表日期: 2018-09-04

国家自然科学基金重大项目(批准号: 51490660, 51490661)和国家自然科学基金重点项目(批准号: U1637207)资助

摘要 本文较为系统地阐述了发展空间太阳能发电卫星(space solar power satellite, SSPS)的几个问题. 首先, 论述了发展SSPS对世界人类从根本上解决能源危机, 尤其是对我国生存与发展的极端重要性. 其次, 对聚光与非聚光两大类空间太阳能发电卫星的几个典型设计方案, 从功质比(即单位质量所产生的电能)指标、工程实现、可靠性等方面, 分析了它们的优缺点. 再者, 对作者团队2014年提出的SSPS-OMEGA方案的近期研究进展作了较为详细的讨论. 最后, 就本领域近期进展与未来需注意的几个理论与技术问题, 提出了相应的观点.

关键词 空间太阳能发电卫星(SSPS), SSPS-OMEGA方案, 协同、耦合及系统综合, 无线微波能量传输与波束收集效率, 光电转换, 在轨组装与振动抑制, 地面演示验证系统

1 引言

能源对于人类生存与社会发展起着至关重要的作用, 主要体现在两个方面: 一是供给问题, 二是环境问题. 就前者而言, 人类至今已经历过三代能源形式的变革. 第一代是植物(木头)类, 第二代是煤炭类, 第三代是石油和天然气等化石类. 据初步统计^[1], 煤炭的可供开采期还有119年, 石油45.7年、天然气62.8年. 就能源需求而言, 因全球人口将在2050年达到100亿^[2], 相应的能源消耗量2005年约为15 TW、2050年将达到30 TW (1 TW=10¹² W). 因此, 强烈呼唤新一代亦称第四代能源的出现, 对新一代能源的要求是, 清洁、安全、经济、取之不尽用之不竭. 另外, 可供选择的能源有原子能、风与水电、地面太阳能. 问题是, 大规模开发利

用原子能存在安全问题, 风与水电受地域条件限制, 地面太阳能因受天气与黑夜影响, 其单位面积可接收到的太阳能仅约为空间的1/10, 已有数据显示^[3], 即使不考虑大型光伏电站的电能存储与分配问题, 位于美国最佳的沙漠位置处的最大的光伏工厂已公布的数据表明年光伏电力功率低于10 W/m²的水平.

因此, 在空间利用太阳能也就是空间太阳能发电卫星(SSPS)将是一个必然的选择. 研究表明, 若在地球同步轨道沿地球赤道铺1 km宽的光电转换带, 则一年可产生212 TW的电力, 而地球剩余的石油储存量折算成电能仅为250 TW^[4].

再看第二个问题, 因工业化而带来的环境污染问题, 大气中的二氧化碳含量在逐年升高, 导致地球环境温度上升, 冰山在慢慢减少, 若长此以往, 后果将不

引用格式: 段宝岩. 空间太阳能发电卫星的几个理论与关键技术问题. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 1207–1218

Duan B Y. The main aspects of the theory and key technologies about Space Solar Power Satellite (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 1207–1218, doi: 10.1360/N092018-00116

堪设想. 为实现《巴黎协定》的长远目标——确保全球平均气温较工业化前水平升高控制在 2°C 之内, 世界需要一种可替代化石燃料的碳平衡、可持续的能源. 大众舆论反对核裂变, 而核聚变仍旧是一个遥远的期待, 因此太阳能光伏正在成为一种重要的可持续能源. 然而, 随着全球人口的不断增长, 地面光伏的大量部署将开始与农业争夺用地量. 无疑, 解决此问题的唯一方式也是空间太阳能发电卫星.

所谓SSPS, 就是在太空将太阳能收集后, 通过光电转换转换为直流电, 再转换为微波射频并通过无线方式传送至地面, 地面接收天线接收后并整流为直流电, 送入普通电网供人类使用. 当然, 也可在太空将直流电转换为激光(若向地面供电, 则不宜用激光, 因其穿过大气层时损失太大, 而微波则损失很小, 如 2.45 GHz 或 5.8 GHz 的微波, 穿过大气层的损失理论上不超过2%), 直接给各种航天器供电.

提出发展空间太阳能发电卫星的先驱者, 是美国的Glaser博士^[5], 他在1968年首次提出了这一大胆设想. 随后, 各国科学家积极探索, 提出了多种方案, 这些方案不外乎两大类, 即聚光类和非聚光类. 非聚光类即指将未加强的自然太阳光(一个太阳常数)直接照射到光伏电池表面上, 其优点是系统构型简单, 容易扩展, 缺点是需要庞大的光伏电池阵列(PV cell)以实现大的电能产出, 效率低、系统功质比低, 此外, 需对大惯量系统进行实时姿态控制以保证PV cell始终对日定向, 发射天线同时对地面接收天线定向, 难度较大. 这类设计有代表性的设计方案, 一是1979年美国NASA提出的所谓基准式的SSPS^[6](图1), 其功质比约为 51 W/kg , 同时巨大的平面光伏电池板需实时定向太阳, 而另一端的微波发射天线则须始终对准地面上的接收天线, 显然控制压力很大. 非聚光类的另一代表为图2所示的太阳帆式^[7], 该设计中, 太阳光直接照射到布有光伏电池的一组矩形表面上, 这些光伏电池产生的直流电通过两排矩形面之间的竖杆中的电缆送到底部的发射天线处, 转化为微波后, 再以无线方式将能量传送至地面接收天线. 该系统靠重力梯度使天线始终指向地面, 而位于竖杆两侧的矩形光伏电池则须实施分布控制使它们始终保持指向太阳. 可见, 其缺点是不聚光导致功质比低, 约 58 W/kg , 再就是超大规模的分布控制, 不仅难度大且可靠性也是须认真对待的一个问题.

图1 (网络版彩图)基准式非聚光SSPS示意图

图2 (网络版彩图)太阳帆式非聚光SSPS示意图

非聚光类的第三个代表是日本JAXA提出的分布绳系方案^[8], 如图3所示. 在这个方案中, 整体由1个发输电平板组成, 这个平板悬挂于位于其上的总线系统所伸出来的4根绳线上. 分布绳系的每一个发电单元为太阳能电池、微波转换装置和发射天线组成的“三明治”夹层结构. 该方案的优点是简单易扩展, 缺点是系统功质比低, 约 37.5 W/kg , 太阳能收集效率波动大、平均收集功率低.

图3 (网络版彩图)分布绳系非聚光SSPS示意图

至于聚光类, 即通过聚光器将数倍太阳常数的光能照射到光伏电池表面, 再进行类似的直流到射频的转换, 进而以无线方式将能量发送到地面接收天线. 聚光类的优点是可显著提高光能收集效率, 提高系统的功质比. 至于缺点, 一是热控的压力大, 二是结构系统要来的复杂. 当然, 同样具有聚光器对日、发射天线对地定向控制的问题. 该类SSPS的一个典型代表是对称聚光式^[9](图4), 其功质比为63 W/kg. 由图4可知, 太阳光经主副反射面两次反射聚光后, 被聚集到布有光伏电池的三明治结构的上表面, 之后通过振荡器、放大器、移相器以及功分器等微波部件, 直流被转换为射频, 通过布置在三明治下表面的发射单元将能量发射至地面接收天线. 这儿除需对聚光镜实时姿态控制外, 最大的问题是三明治结构的散热压力巨大. 为缓解三明治结构的散热压力, 文献[10]提出了如图5所示的创新方案, 即将三明治的圆盘结构拉长为漏斗形结构, 这可明显增加向空间辐射散热的有效面积. 当然也带来了向地面发射微波波束合成上的难度问题.

聚光类的第二个代表是图6所示的ALPHA方案^[11], 很漂亮, 功质比约为79 W/kg, 优于之前的方案. 这一设计的底部是与图4相同的三明治结构, 所不同的是聚光方式, 由成千上万个六边形的反射镜组成, 在地球同步轨道运行时, 酒杯底始终对地定向, 为了使众多的小六边形的平面反射镜始终指向太阳, 须对它们进行实时控制, 这是其缺点之一. 小六边形反射镜之间存在的漏光会降低其功质比, 这是第二个不足. 三明治结构的热问题仍然存在, 但可利用图5所示的漏斗方法加以解决.

针对以上聚光类设计方案存在的问题, 作者团组曾提出了OMEGA方案^[12~14], 功质比可到98 W/kg, 其

图4 (网络版彩图)对称聚光式SSPS示意图

图5 (网络版彩图)阶梯形模型组成的太阳能光电板与发射天线

图6 (网络版彩图)ALPHA聚光式SSPA示意图

结构系统如图7所示. 因投射到球反射面的平行光线将聚焦到一条线 $([0.5, 1]R, R$ 为球半径)上, 故这里将PV cell 铺在线馈源的表面, 而发射天线则由6根索支撑. 优点是缓解了散热压力、没有漏光问题、姿态控制大为简化, 因只有线馈源沿圆弧的一维匀速运动. 但也存在两个缺点: 一是需研制一种光的单向性薄膜材料, 当光线照射到凸面时可全部透过, 而从凹面照射时则全反射; 二是由线馈源向发射天线的电能传输存在较大问题, 因靠电刷进行超大功率传输难度巨大^[15,16].

聚光类的另一设计如图8所示^[3], 其接收光的面积和发射天线的面积相等, 整个面呈DNA双螺旋的样子. 该方案采用分布式聚光(图8), 即来自太阳的平行光通过图9右下图中的菲涅尔透镜聚光后, 经斜置的反射镜打下面红色的光伏电池上, 而光伏电池被置于图9上图所示的一个平板上, 该板上围绕光伏电池布有3个偶极子构成的全向发射天线单元. 该系统被置于北极附近的太阳同步轨道上, 阵面可始终对日定向, 接收天线布置于北半球纬度较高的区域, 该方案的优点, 是

图 7 (网络版彩图)OMEGA 聚光式SSPS方案

图 8 (网络版彩图)DNA透镜聚光式SSPS方案

结构简单易扩展, 且不需进行对日和对地的姿态控制, 再就是不存在像三明治结构那样严重的散热问题。但同时存在如下缺点: 一是不适于在地球同步轨道工作, 因不能提供供整个系统在沿地球同步轨道运行时需始终对日定向的动力, 单单依靠光压难以保持其DNA螺旋面的对日定向; 二是发射天线口径会很大(否则收集不了所需的太阳能), 导致造价高, 因为发射与接收天线的口径需符合Finis方程, 在追求相同发电功率和波

图 9 (网络版彩图)聚光型光伏电池与RF单元集成示意图

束收集效率的情况下, 为降低造价, 应尽可能减小发射天线的口径, 增大地面接收天线的口径。遗憾的是, 该方案做不到。

综上所述, 聚光类更有发展的生命力, 究竟哪一个方案最适合付诸实施, 需要进一步的深入研究。

2 几个理论与关键技术问题

SSPS是一个超大型的卫星系统, 涉及许多前所未有的理论与技术挑战, 如多物理系统耦合、综合、协同与优化, 大功率连续微波能量传输, 超大型结构高精度自动展开, 热控, 在轨组装与振动控制, 发射火箭以及运营安全及维护等问题。考虑到篇幅所限, 下面仅就前5个问题加以讨论。为讨论方便起见, 下面的论述以OMEGA为例, 但所涉及的理论与方法, 对其他方案同样适用。

2.1 多物理系统耦合、综合、协同与优化

被送上天的空间太阳能卫星, 包括聚光镜、光电转换与电能管理、发射天线等3大分系统, 每个分系

统本身也很复杂, 欲使整个系统实现3个目标, 即有序运行、功能协调以及造价低廉, 则分系统本身以及分系统之间的协调至关重要, 这儿的协调包括两层含义: 一是分系统本身的问题, 二是分系统之间的问题。

设3个分系统的质量、惯量、体积以及特征尺寸分别为 $[M^1, M^2, M^3]$, $[J^1, J^2, J^3]$, $[V^1, V^2, V^3]$ 以及 $[L^1, L^2, L^3]$, 且系统的总体坐标系与各分系统的坐标系分别为 $OXYZ$, $O^{(1)}X^{(1)}Y^{(1)}Z^{(1)}$, $O^{(2)}X^{(2)}Y^{(2)}Z^{(2)}$ 及 $O^{(3)}X^{(3)}Y^{(3)}Z^{(3)}$, 则可将它们之间的协调方程写为

$$f(M^i, V^i, J^i, L^i, x, y, z | i = 1, 2, 3) = 0, \quad (1)$$

式中, x, y, z 为各部分特征点在总体坐标系 $OXYZ$ 中的坐标。

其次是耦合问题, 表现为多场、多域及多尺度问题。多场指电磁场、结构位移场、温度场, 多域指电磁、结构、信息以及控制等, 多尺度则指系统级的大尺度、子系统级的中尺度、子系统内部关键部件的小尺度以及制造与装配误差的微尺度。因此这里的耦合问题理论上是一个多场、多域、多尺度耦合的高度非线性问题。

描述整个系统, 除协同方程式(1)外, 尚需建立各分系统本身内部的耦合理论模型。先看聚光镜分系统结构, 其涉及太阳光、结构、热及控制等4个学科, 每个学科有自己的控制方程, 如图10所示。综合考虑4个学科, 可假设它们之间的耦合模型为

$$I_1(S_N, \delta(\beta), \gamma, T, F) = 0, \quad (2)$$

其中, S_N 为光压, $\delta(\beta)$ 为结构位移场, β 为设计参量, 对结构而言包括尺寸、形状、拓扑及类型等4类变量, γ 是制造与装配误差, T 和 F 分别为温度场和控制力。

其次是光电转换分系统结构, 其涉及光电转换、结构、热及控制等4个学科, 每个学科有自己的如图11所示的控制方程。综合考虑4个方面, 可数学推导出它们之间的耦合模型为

$$I_2(E_{op}, \delta(\beta), \gamma, T, F) = 0, \quad (3)$$

其中, E_{op} 为作用于线馈源母线上的光能密度分布, 其他与式(2)中的相同。

至于发射天线分系统, 其涉及电磁、结构、热及控制等4个学科, 每个学科同样有自己的控制方程, 如图12所示, 综合考虑这4个方面, 同样可推导出描述它们之间耦合关系的场耦合理论模型为

$$I_3(E, \delta(\beta), \gamma, T, F) = 0. \quad (4)$$

基于上述协调方程与耦合模型, 若将结构、热、电磁等设计变量统一表示为 $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_{\text{nud}}]^T$, 以系统的功质比 $Z(X)$ 为目标, 同时满足结构、热、控制及电磁等非线性约束:

$$g_j^S(X) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUS}, \quad (5)$$

$$g_j^T(X) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUT}, \quad (6)$$

$$g_j^C(X) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUE}, \quad (7)$$

$$g_j^E(X) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUE}, \quad (8)$$

图10 (网络版彩图)聚光分系统学科间耦合模型示意图

图 11 (网络版彩图)光电转换分系统学科间耦合模型示意图

式中, NUS, NUT, NUC, NUE分别为系统中结构、温度、控制及电磁的非线性约束函数的总数。

还需满足分系统的耦合约束式(2)~(4)、协调方程式(1)以及变量的上下限约束。至此, 可将确定SSPS三部分各自参量的问题归结为如下的非线性规划PA。

$$\begin{aligned} & \text{Find } \mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_{\text{nud}}]^T, \\ & \text{Min } -Z(\mathbf{X}), \\ & \text{s.t. } g_j^S(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUS}, \\ & \quad g_j^T(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUT}, \\ & \quad g_j^C(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUC}, \\ & \quad g_j^E(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, \text{NUE}, \\ & \quad \Gamma_1(S_N, \delta(\beta), \gamma, T, F) = 0, \\ & \quad \Gamma_2(E_{op}, T, \delta(\beta), \gamma, F) = 0, \\ & \quad \Gamma_3(E, T, \delta(\beta), \gamma, F) = 0, \\ & \quad f(M^i, V^i, J^i, L^i, x, y, z | i = 1, 2, 3) = 0, \\ & \quad X \leq X \leq \bar{X}. \end{aligned} \quad (9)$$

求解该非线性规划问题, 便可得出满足各方面约束、功质比最大意义下的各部分设计变量, 供实际工程设计时参考。

2.2 远距离大功率连续无线微波能量传输

该部分需解决如下4个问题。

(1) 发射与接收天线口径的确定

空间太阳能系统是一个单频点的高功率连续无线能量传输系统, 希望发射天线发出的能量可被接收天

线全部接收, 至少是接收到的能量越多越好。为此, 特用波束收集效率 η 来定量描述之。为讨论方便, 不妨研究如图13所示的收发天线系统, 设发射与接收天线的口径分别为 D_T 与 D_R , 工作频率为 f , 相应波长为 λ 。

由无线能量传输知识可知, 波束收集效率^[17,18]满足Friis方程:

$$\eta = 1 - e^{-\tau}, \quad (10)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{A_T A_R}}{\lambda L}, \quad (11)$$

其中, A_T 与 A_R 分别为发射与接收天线的口径面积, L 为两天线之间的距离。

若要求波束收集效率(BCE)优于95%, 则 $\tau \geq 2$ 。若取 $f=5.8$ GHz, $L=36000$ km, 且天线为圆形有源相控阵, 则有

$$D_T D_R \geq 3.7 \times 10^6 \text{ m}^2. \quad (12)$$

经计算可知, 若取接收天线口径为10 km, 则位于地球同步轨道的发射天线口径应为400 m; 若将接收天线口径增大至20 km, 则发射天线口径可缩小一半, 200 m即可。显然, 发射与接收天线是一个整体, 应从获取最大波束收集效率、功率密度、天上与地面天线造价以及运行维护等多个方面综合研究来确定。

(2) DC-RF转换与发射天线

平行太阳光经球面反射后, 打在表面铺满光伏电池的线馈源上, 通过光电效应转换为直流电后, 被送到发射天线的微波器件箱, 经过振荡器、放大器、移

图12 (网络版彩图)发射天线分系统学科间耦合模型示意图

相器, 功分网络, 最后经发射单元, 将能量发送到接收天线。

就发射天线而言, 设计时需考虑三点: 一是发射的能量密度与散热密切相关; 二是天线发射处于什么模式, 即需要根据两天线之间的距离 L 与发射口径、波长之间的关系, 明晰究竟是近场 ($L < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$)、远场 ($L > 2(D^2/\lambda)$) 还是介于两者之间的Fresnel场; 三是如何布阵, 具体讲就是根据发射功率所需的总单元

数, 研究最佳的布阵方式, 比如多少个单元构成一个模块, 多少个模块构成一个子阵, 多少个子阵构成最终的大阵。注意, 这一分模块、子阵的过程中, 需始终与结构设计统一来考虑, 因天线性能不仅与电磁本身有关, 也与结构带来的各种误差有关。

(3) 波束形状和指向精度测量与控制

利用无线传输能量, 其实就是一个如图14所示的足印(footprint)对准问题, 关键技术有两点: 一是波束形状; 二是波束指向。就波束形状而言, 理想是一个柱状, 因为这对接收天线的类型个数要求少, 造价低, 用同一种整流单元即可。工程实际是做不到的, 这时可退而求其次, 即希望是多个台阶环的形状, 因这时的接收天线处于同一环的密度相同, 用一种整流单元模块即可。

为使足印始终对准, 就需依据偏移量的大小, 通过电调(移相)和(或)机械调整来完成调整。而调整的前提是准确测量。为此, 在接收天线边沿处安装微波能量密度检测仪, 当处于过中心的接收天线两边沿端的微波能量密度值不同时, 说明指向偏了。解决方式是将计算出的偏移量通过导引信号发射器发送给发射天线, 然后将波束指向调回到电性能所容许的误差范围之内。

(4) RF-DC转换与接收天线

当射频发射到接收天线后, 整流器将RF转换成直流后, 即可送入常规电网中。这需从理论与工程上解决两点: 一是整流器不但应整流效率高且造价低; 二是众

图13 发射与接收天线的波束收集效率

图 14 (网络版彩图)收发天线足印对准与控制

多整流器的连接方式与电能蓄水池的设计。

2.3 超大型空间结构系统的高精度展开与保持

整个SSPS是一个超大型卫星系统，与地面相比，天上系统则更为困难。所包含的聚光镜、光电转换及发射天线每一个都是一个大型卫星系统，是目前卫星可展开天线结构所无法比拟的。这里存在两大问题待深入研究：一是结构上如何进行子阵划分，比如球面聚光镜，其口径可能要高达公里级，做成一个完整的发射上天不现实，因而必须分为多个子阵，即使这样，子阵的规模也远大于当前已有的展开天线。就OMEGA而言，球面的划分，可借助于富乐定理进行，即任一球面都可划分为12个边长为 $0.0446R$ 的正五边形、20个边长为 $0.0410R$ 的正六边形以及其他若干边长在 $[0.0446, 0.0410]R$ 之间的非正六边形。此外，发射天线和线馈源阵也都需要进行相应的子阵划分，这里不再一一赘述。二是子阵的设计与制作。以图15所示的球面聚光镜为例，子阵有若干六边形的模块构成，每个模块由碳纤维桁架与薄膜组成。

图 15 (网络版彩图)子阵的设计与制造要求

对子阵的要求不外乎4点(图16)，希望同时具有大尺度、高精度、轻质量及高收纳比等优点，而这4个方面之间是矛盾的，相互之间互为约束，这也正是子阵设计的难点之所在。

为实现以上目标，就需深入研究收拢与展开的两态动力优化、多柔体动力学分析与控制、薄膜-索-桁架组合结构的非线性力学分析与设计以及子阵与子阵间的连接方式等4个方面的研究。尤其是第4点，在现有的星载可展开天线中是不存在的，因只有几十米量级，而到SSPS中，则至少要到百米甚至数百米量级。

2.4 在轨组装与振动抑制

如此庞大系统，在轨组装是必由之路，因组装过程必然伴随振动，因而对振动的抑制和控制就是应有之意。

组装包括两个层面：一是3个子系统之间的组装；

图 16 (网络版彩图)子阵设计要求的4个特征及关系图

二是子系统内部子阵之间的组装. 具体来说, 就需进行图17所示的两个方面的研究工作: 一是图17(a)所示的在轨组装顺序规划, 需进行的研究包括建立在轨组装数学模型、约束前提下的组装模型的优化设计、关于效率、能量等性能的性能估计等; 二是图17(b)所示的在轨组装过程中的振动抑制问题. 具体包括简单而方便的组装结构的创新设计、特别是基于材料-结构一体化设计的减/隔振设计、子阵结构的振动分析、组装过程中的冲击分析等.

在以上图17(a)与(b)两部分工作的基础上, 进行子阵到子系统、子系统到整个系统的在轨自适应组装技术研究.

2.5 空间电力管理

SSPS的另一问题是空间电能管理, 图1与2所示的设计方案, 巨大的直流电被送到发射天线时, 存在巨大电流通过旋转环节的问题. 为此, 文献[19]提出了一种变集中为分布式的输电方式(图18), 可降低输电压力. 遗憾的是, 该方案似乎不适用于聚光类SSPS.

值得指出的另一大问题就是热控, 须在上述所有设计过程中始终认真对待并加以考虑. 因为这是制约系统功质比提高的一个很关键的因素.

3 地面演示验证模型研制

为说明上述方案的可行性, 研制地面演示验证的

图17 (网络版彩图)在轨组装与振动控制. (a) 在轨组装; (b) 振动控制

图18 (网络版彩图)缓解大规模电流环非聚光SSPS设计示意图

缩尺模型十分必要, 通过此, 不仅可实际说明方案是否可行, 同时可验证多项关键技术的可行性. 目前想到的造价低、工程上可行的方法, 是利用位于西安电子科技大学新校区的FAST 50 m口径试验天线场地进行, 如图19所示. 利用长度可变的计算机控制的6根柔索, 将聚光镜、线馈源阵及发射天线支撑起并模拟地球同步轨道的运动, 位于地面的接收天线接收无线微波, 测量系统与控制实现发射与接收天线的足印对准.

为克服六塔高度有限的问题, 可在塔的顶端链接上计算机控制长度的柔索, 索的另一段链接气球框架, 气球框架链接聚光镜、线馈源阵以及发射天线, 这样可实现发射天线与接收天线的任意高度, 进而验证无线微波能量传输的各项关键技术.

值得指出的是, 目前世界范围内, 关于空间太阳能卫星的研究仍处于理论与关键技术攻关研究阶段, 这其中伴有简单小型的实物验证. 遗憾的是, 日本、美国以及我国, 已进行的地面试验, 均未实现从太阳光能-DC-RF-DC的完整系统的试验, 仅限于DC-DC的试验, 如日本2015年完成的DC-DC的无线(距离50 m、频率5.8 GHz)传输效率为14.7%, 美国在夏威夷群岛的两岛间进行的试验效率则更低. 近年, 我国四川大学进行的距离为1.6 km时的无线传输效率仅8%, 西安电子科技大学天线研究所与航天科技集团五院西安分院共同进行的试验效率达到了16%, 但距离仅为11 m且在微波暗室内. 另外, 所有这些试验都是水平传输, 这与实际情况不相符合.

与世界已有演示验证相比, 此次西安电子科技大学机电科技研究所, 将进行的SSPS-OMEGA方案的演示验证有三大优点: 一是完成从模拟GEO太阳能收集到直流电的全链条的无线能量传输与转换, 在世界尚属首次; 二是通过提高波束收集效率, 使DC-DC的无

图 19 (网络版彩图)SSPS-OMEGA方案地面演示验证系统示意图. (a) FAST 50 m缩尺试验天线实物图; (b) SSPS-OMEGA方案地面演示示意图

线能量传输效率达到16%; 三是利用现有的FAST 50 m 试验天线场地, 可同时实现距离在百米量级的垂直传输.

4 结束语

本文讨论了世界各国发展空间太阳能卫星的基本情况, 特别针对两大类的几个典型设计方案进行了较为深入的分析, 从功质比这一定量指标上, 具体比较了它们的各自优缺点. 论述了需着重研究的几个理论和关键技术问题, 如协同方程与耦合模型以及基于此的系统最佳设计, 无线微波能量传输的足印对准与波束指向控制, 在轨组装与振动抑制, 超大型展开结构的创新设计及多态动力优化与展开过程控制等问题.

需特别指出的是, 除SSPS本身外, 研究进程中将带动一批航天先进技术的突破, 从而带动相关技术与产业的发展, 这一点不容小觑.

除上述问题外, 尚有如下问题亟待解决.

(1) 创新方案

高功质比的SSPS创新系统方案的提出, 能从根本

上克服现有方案存在的缺点和不足. 对于发射天线, 希望能有全新理念的方案出现, 比如选用反射面天线阵作为发射天线, 为有效提高直流到射频(DC-RF)的转换效率, 让直流功率的10%给馈源转换为射频后投射到反射面上, 而其余90%的直流直接送到反射面, 进而与馈源发射的10%的射频一起以射频形式将全部能量以无线形式发射出去. 这一想法是否可行, 值得深入研究.

(2) 高效率的薄膜PV cell

光电转换效率是SSPS系统能否成为现实的关键因素之一, 因此, 强力突破制约光电转换效率的关键技术尤为重要. 目前广泛应用的硅基光伏电池, 虽说价格低廉, 但转换率太低, 只有百分之十几, 而且上天应用太重了. 薄膜砷化镓是一种有前途的材料, 不仅质量轻而且转换率高, 据报道实验室可做到近50%.

(3) 高效散热

因为SSPS是一个大功率连续能量转换与无线传输系统, 各个环节有相当的能量变成废热了, 如光电转换有近60%的能量变成废热, DC-RF的转换也有近半变成废热, 这些废热不仅大大降低效率, 还会带来新

的问题, 导致系统工作失效. 另一方面, 因太空只有辐射一种散热方式, 这又将明显降低散热效率. 因此, 需从两个方面加强研究, 一是减少废热的产生率, 二是创新结构设计以明显提高散热效率.

(4) 高效率的微波器/部件

制约DC-RF转换效率和发射天线质量的关键微波器部件有振荡器、放大器、移相器、功分网络与发射单元. 对它们的要求应是既轻又效率高, 再就是模块化. 因此, 建议研究发射天线单元的片上系统(system-on-chip), 至少是高密度组装系统(system-in-package). 需要指出的是, SSPS对发射天线的要求是单频点连续高功率, 没有大频带要求, 因而对移相器要求较低. 但当天线处于地球同步轨道时, 若指向误差要求优于

0.0005°时, 对应地面误差为314 m, 此时, 恐怕对移相的要求就很高了, 如何办? 需要深入研究. 另外, 也可考虑是否通过2~3级调整来满足指向精度要求的可行性.

(5) 新材料与新工艺

适合SSPS的各种新材料的研究十分必要, 如超轻、高强刚度的复合材料, 超轻、高光电转换效率材料, 聚合物减(隔)振材料等.

高密度组装微系统研究, 尤其是发射天线中的DC-RF转换模块, 希望成为片上系统或微组装系统. 因是连续高功率微波传输, 微系统又带来密度极高, 故散热的压力就可想而知. 显然, 需要研究微系统的新工艺问题, 这其中需均衡考虑电磁、结构、散热的问题.

致谢 在论文所涉及的研究工作与论文整理过程中, 得到了张逸群、李勋、樊冠恒、王东旭、李萌、王鹏飞、刘宇飞等同志的帮助, 在此表示诚挚的谢意.

参考文献

- 1 British Petroleum. Statistical Review of World Energy. London: British Petroleum, 2015
- 2 Department of Economic and Social Affairs, UN. World Population Prospects: The 2015 Revision. New York: Population Division of the Dept. of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, 2015
- 3 Ian Cash. CASSIOPEIA Solar Power Satellite, WISEE-2017, Montreal, October 9, 2017
- 4 The 2005 Annual Report of Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), United Nation, Round Table on Sustainable Development, January 30, 2006
- 5 Glaser P E. Power from the sun: Its future. Science, 1968, 162: 857-861
- 6 Mankins J C. New directions for space solar power. Acta Astronaut, 2009, 65: 146-156
- 7 Seboldt W, Klimke M, Leipold M, et al. European sail tower SPS concept. Acta Astronaut, 2001, 48: 785-792
- 8 Sasaki S, Tanaka K, Higuchi K, et al. A new concept of solar power satellite: Tethered-SPS. Acta Astronaut, 2007, 60: 153-165
- 9 Carrington C, Fikes J, Gerry M, et al. The abacus/reflector and integrated symmetrical concentrator: Concepts for space solar power collection and transmission. In: 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). Las Vegas, 2000
- 10 Jaffe P, Pasour J, Gonzalez M, et al. Sandwich module development for space solar power. In: Proceedings of the 28th International Symposium on Space Technology and Science. 2011
- 11 Mankins J. SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array. NIAC Phase I Final Report, September, 2012
- 12 段宝岩. 一种改进的太阳能收集器与发射天线方案. 见: 中国工程院第二届“空间信息技术与应用展望”院士论坛特邀报告, 西安, 2014年9月21~23日
- 13 杨阳, 段宝岩, 黄进, 等. OMEGA型空间太阳能电站聚光系统设计. 中国空间科学技术, 2014, 34: 18-23
- 14 Yang Y, Zhang Y, Duan B, et al. A novel design project for space solar power station (SSPS-OMEGA). Acta Astronaut, 2016, 121: 51-58
- 15 Duan B Y. Challenges and opportunities on mechatronics in Space Solar Power Station (SSPS). In: The 5th Asia International Symposium on Mechatronics (AISM'15), Invited Report, PPT report, Guilin, China, October 7-10, 2015

- 16 Duan B Y. On new developments of Space Solar Power Station (SSPS) of China. In: The 36th International Space Development Conference. St. Louis, USA, May 25–26, 2017
- 17 Li X, Duan B, Song L, et al. Study of stepped amplitude distribution taper for microwave power transmission for SSPS. [IEEE Trans Antennas Propag](#), 2017, 65: 5396–5405
- 18 Li X, Duan B, Zhou J, et al. Planar array synthesis for optimal microwave power transmission with multiple constraints. [Antennas Wirel Propag Lett](#), 2017, 16: 70–73
- 19 侯欣宾, 王立, 张兴华, 等. 多旋转关节空间太阳能电站概念方案设计. 宇航学报, 2015, 36: 1332–1338

The main aspects of the theory and key technologies about Space Solar Power Satellite

DUAN BaoYan

Research Institute on Mechatronics, Xidian University, Xi'an 710071, China

This paper presents several problems about development of Space Solar Power Satellite (SSPS) systematically. Firstly, the importance of developing SSPS to solve the energy crisis of the world is discussed. Secondly, two main categories of SSPS, non-focusing and focusing concepts, are described with the advantages and disadvantages, such as the specific power to mass ratio (energy produced by unit mass), engineering implementation, reliability and so on. Thirdly, recent achievement of SSPS-OMEGA concept proposed by author's team in 2014 is provided. Finally, future development on SSPS is discussed.

Space Solar Power Satellite (SSPS), SSPS-OMEGA concept, cooperative, coupling and system synthesis, wireless microwave power transmission and the beam collection efficiency, photoelectric conversion, on-orbit assembly and vibration control, ground demonstration system

doi: [10.1360/N092018-00116](https://doi.org/10.1360/N092018-00116)