



太阳能利用技术



光伏发电系统的应用

张 涛

工程热物理

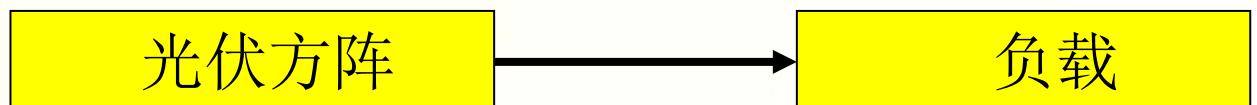


光伏系统的类型

1. 独立光伏系统

完全依靠太阳电池供电的光伏系统，系统中太阳电池方阵是唯一的能量来源。

- 最简单的独立光伏系统是直联系统，太阳电池方阵受光照时发出的直流电力直接供给负载使用，中间没有储能设备，负载只在有光照时才能工作。这种直联系统如太阳能水泵、太阳能风帽等。
- 方框图如下



光伏系统的类型

1. 独立光伏系统

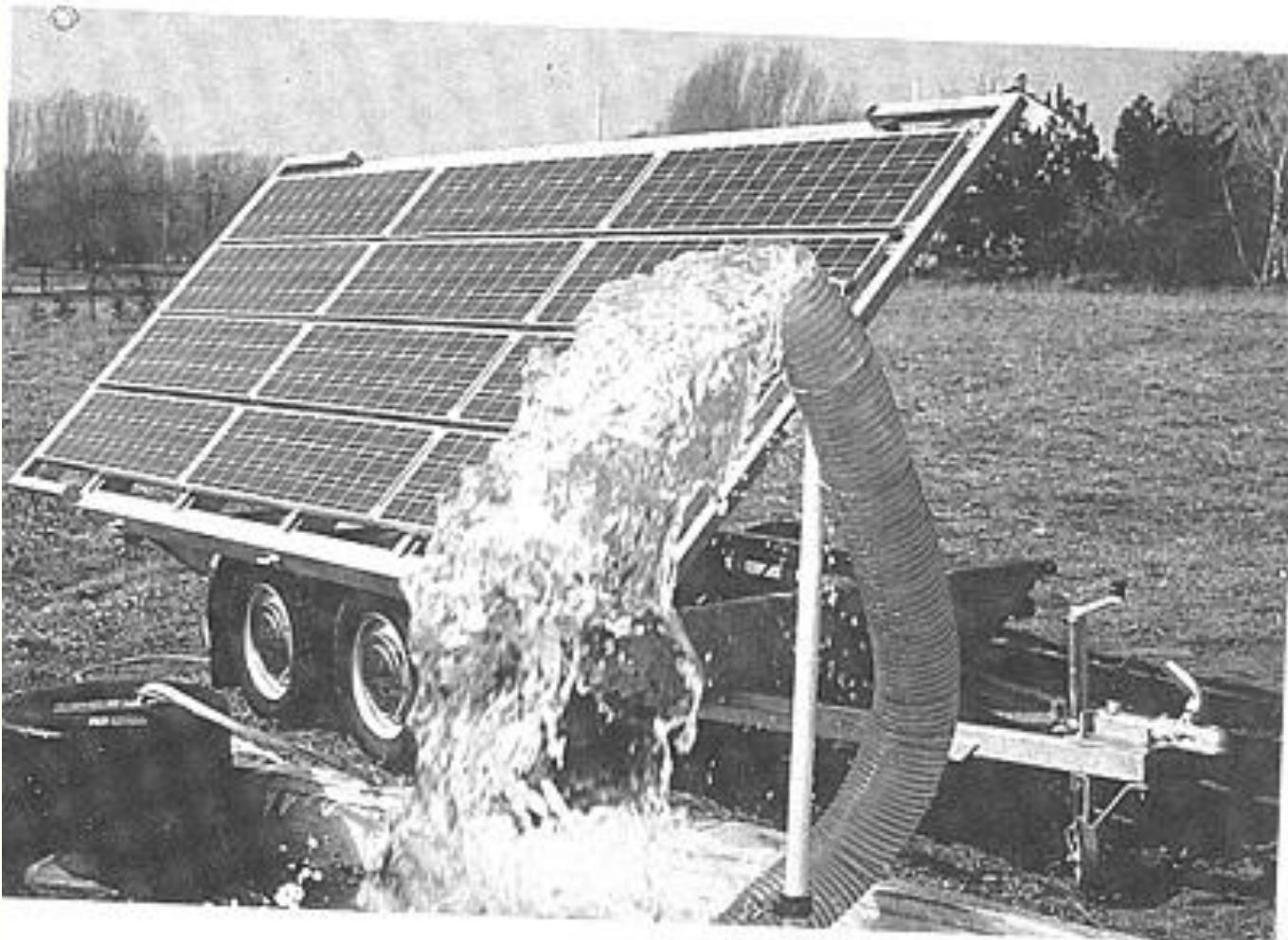
光伏水泵



光伏系统的类型

1. 独立光伏系统

太阳能水泵



光伏系统的类型

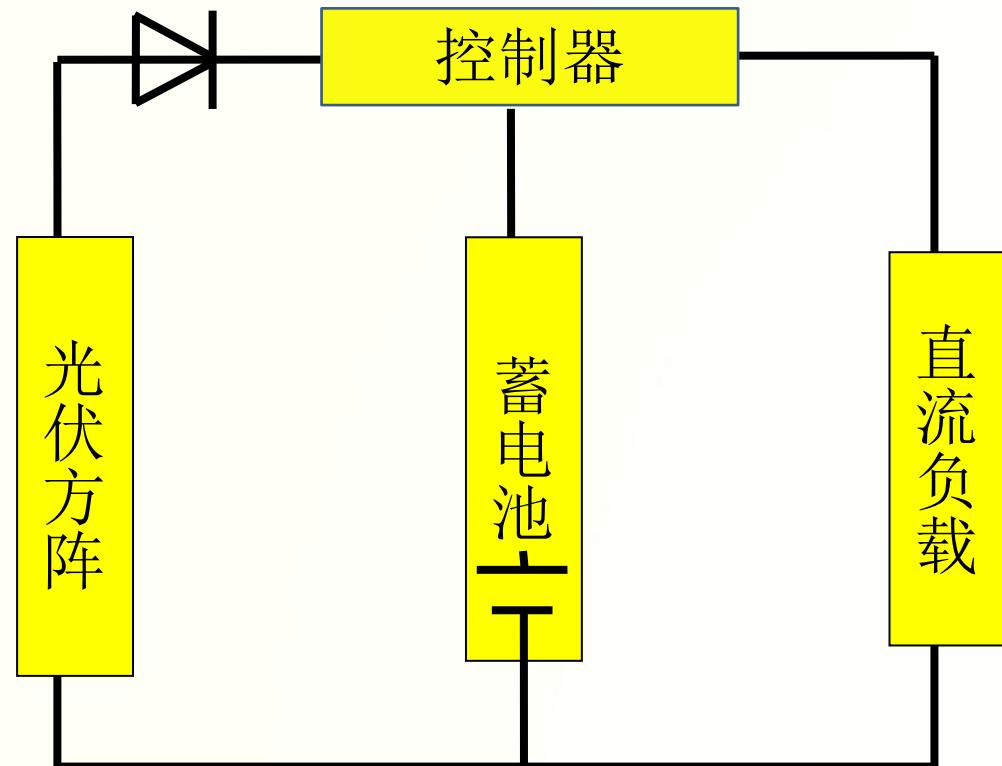
1. 独立光伏系统

太阳能风帽



独立光伏系统

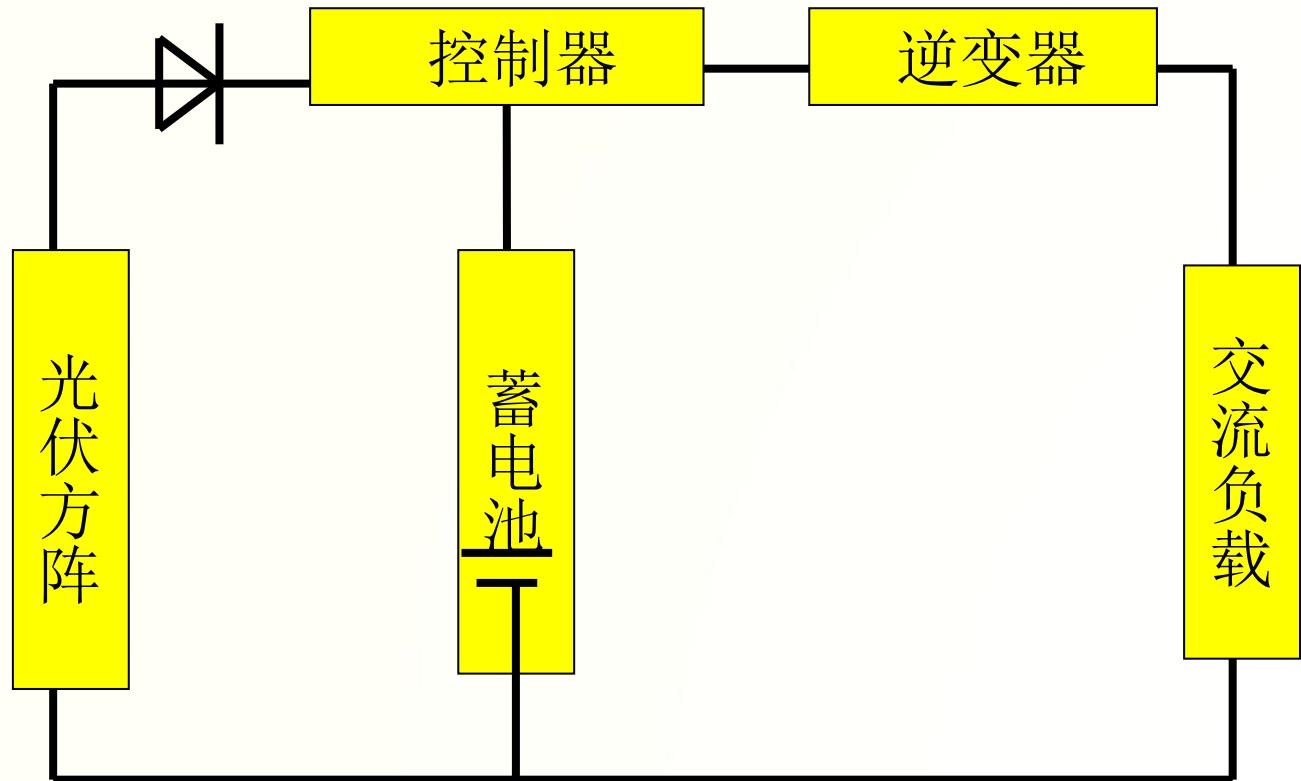
- 一般为直流负载供电的独立光伏系统主要由太阳电池方阵、防反充二极管、蓄电池组、控制器等组成。方框图如下



独立光伏系统

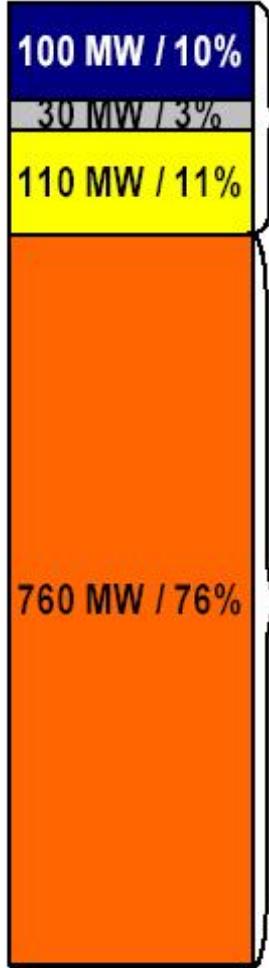
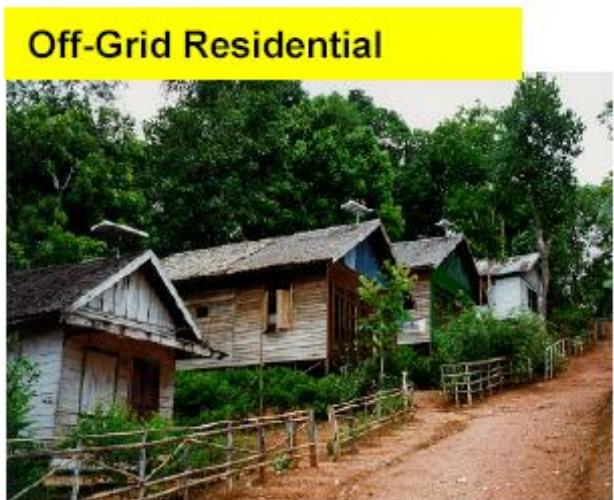
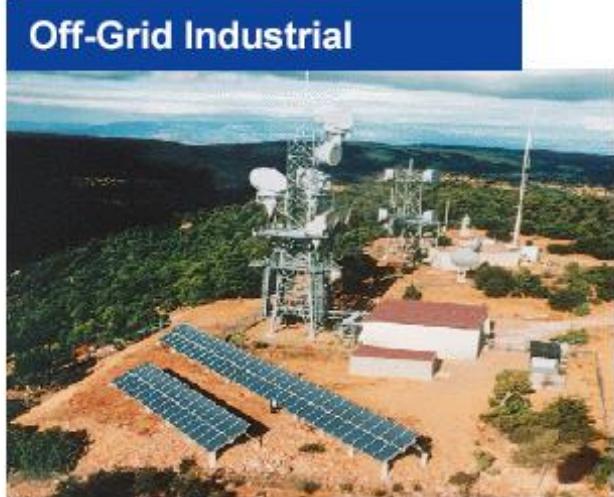


- 为交流负载供电的独立光伏系统,除了以上部件外,还要配备逆变器,方框图如下



世界光伏应用分类

Market Segments



Economically viable

Dependant on market support programs

Source: Strategies Unlimited Estimation

Market in 2004



独立光伏系统应用领域

- (1) 离网工商业(Off-Grid Industrial)应用
- 光伏系统为无电场所供应电力,可根据需要专门设计.
- 可就地供电,不需延伸电网,节省了投资,也减少了线路损耗.
- 使用方便,安全可靠,维护简单.



微波中继站太阳能电源





光纤通讯太阳能电源





天然气输送管道太阳能阴极保护电源型





太阳能航标灯





太阳能灯塔





太阳能分段断路器电源





独立光伏系统应用领域

- (2) 偏远地区供电(Rural Electrification)
- 全球还有将近20亿人口没有用上电，我国也还有大约3000万人口没有电力供应，其中相当大部分处在经济不发达的偏远地区，很难依靠延伸常规电网来解决用电问题。而这些地区往往太阳能资源十分丰富，应用太阳能发电大有可为。



牧民户用光伏电源





户用光伏系统





西藏改则县20KW光伏电站





独立光伏系统应用领域

- (3) 消费产品 (Consumer)
 - 可以将太阳能电源系统与产品安装在一起，这样就不需要与电网相连,方便使用
 - 如:交通工具
 - 照明电源
 - 日用产品等



太阳能飞机





太阳能快艇





轮船上的光伏电源





太阳能拖车





太阳能高尔夫球车





太阳能广告牌





太阳能汽车站





太阳能交通警示灯





太阳能路灯





太阳能道钉





太阳能投射灯





太阳能草坪灯





太阳能手机充电器





太阳能玩具





一. 光伏系统的类型

2.并网光伏系统

太阳电池方阵发出的直流电力经过逆变器变换成交流电，并且与电网并联。可分为两大类：

(1) 光伏电站

所发的电力全部输入电网。



德国巴伐利亚太阳公园6.3MW太阳能发电站





德国莱比锡地面5MW太阳能电站





德国波茨坦5MW屋顶太阳能电站





美国Tucson地区4.59MW太阳能电站





深圳园博会屋顶太阳能电源





上海5KW光伏发电系统





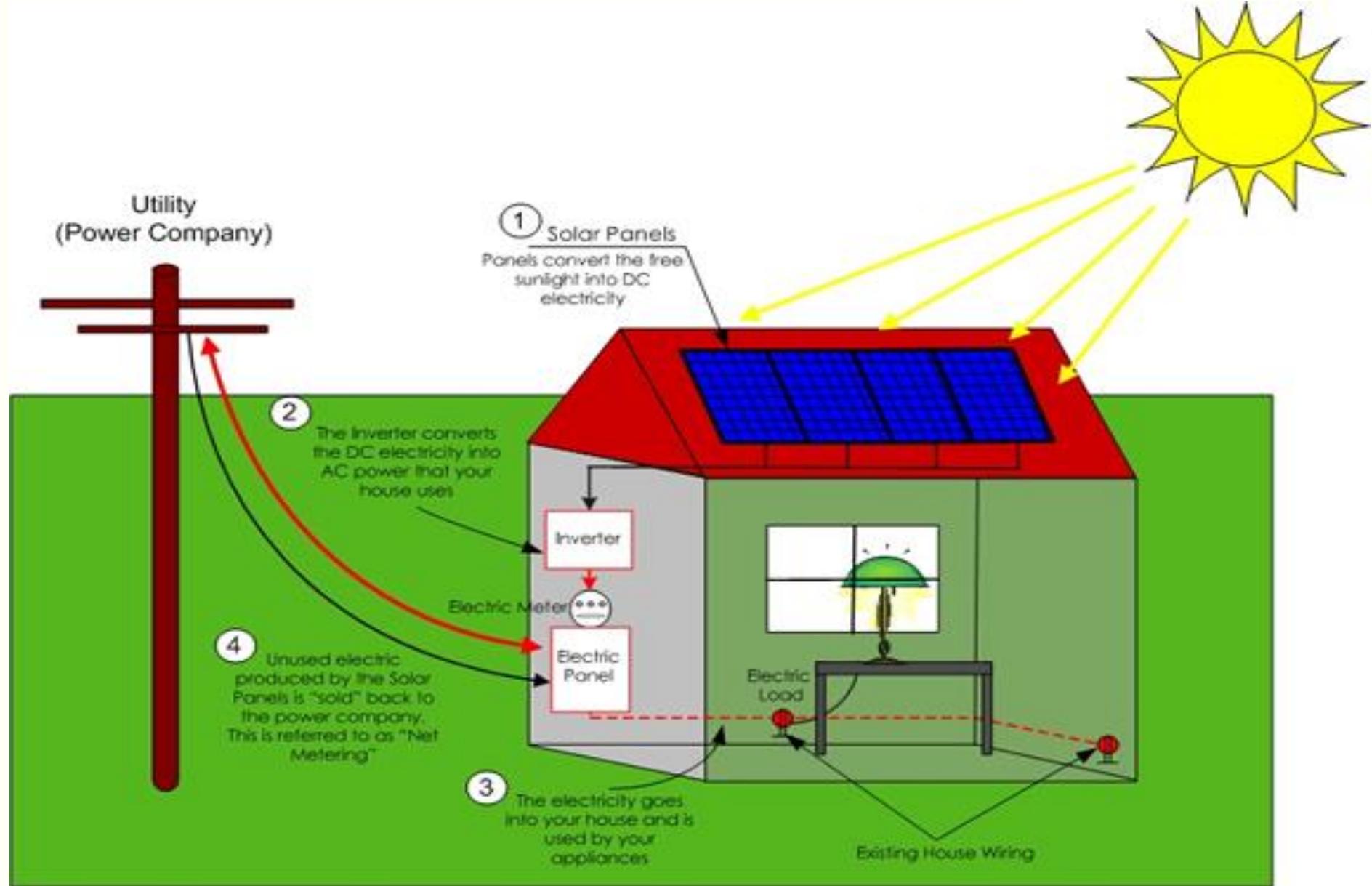
一. 光伏系统的类型

2.并网光伏系统

(2) 户用并网光伏系统

通常安装在屋顶，光伏系统与电网并联，光伏方阵发出的电力除了供应负载使用外如有多余，可以输入电网。在晚上或阴雨天，光伏方阵发出的电力不足，则由电网向负载供应一部分或全部电力。

户用屋顶并且网光伏系统示意图





屋顶户用光伏系统





一. 光伏系统的类型

3.混合光伏系统

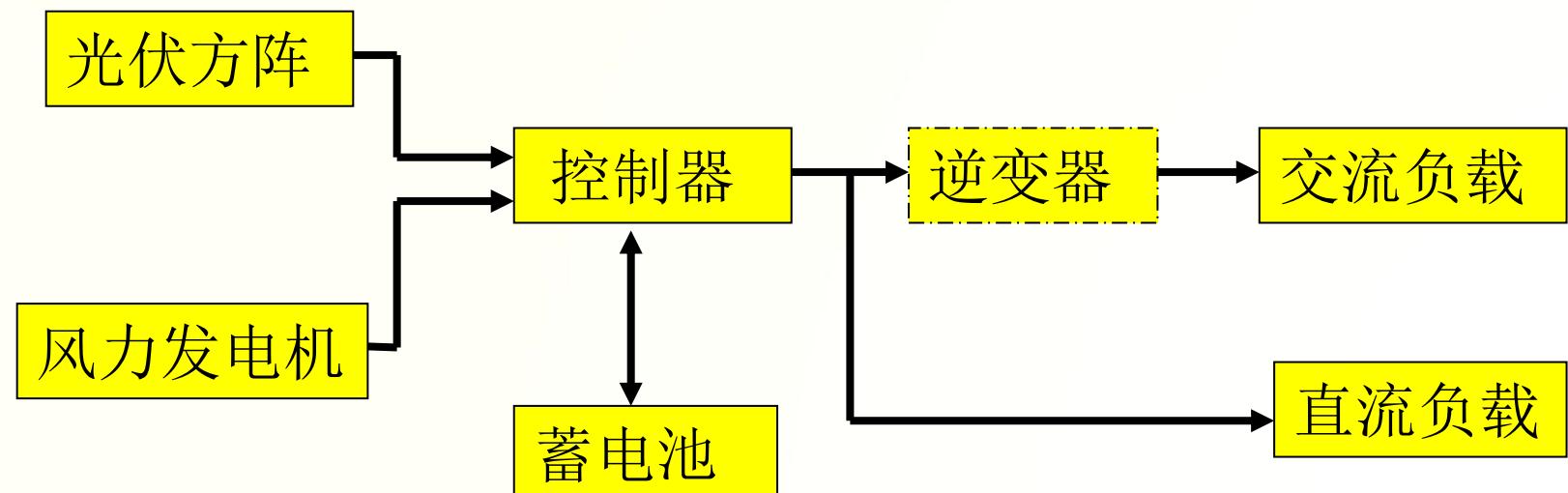
将一种或几种发电方式同时引入光伏系统中，联合向负载供电的系统称为混合光伏发电系统。由于目前光伏系统发电的价格较高，如果完全用光伏系统来满足负载用电的需求，太阳电池方阵和蓄电池必须在最差的天气条件下也能支持负载的运行，这样的系统初始投资很高。如将柴油发电机引入光伏系统，平时由光伏系统供电，冬天太阳辐射量不足时启动柴油发电机供电，这样可以节省投资。



一. 光伏系统的类型

3. 混合光伏系统

➤ 另一种混合发电方式是光伏/风力混合发电系统，有些地区冬天日照差，但风力大，可以由风力发电机补充，这种风/光互补系统在有些地区有很大的实用价值。方框图如下





二. 光伏与建筑相结合(BIPV)

1. 光伏与建筑相结合的形式

(1) 光伏系统与建筑相结合

将一般的光伏方阵安装在建筑物的屋顶或阳台上，通常其逆变控制器输出端与公共电网并联，共同向建筑物供电，这是光伏系统与建筑相结合的初级形式。



光伏系统与建筑相结合





屋顶并网光伏系统





屋顶并网光伏系统





“零能耗”建筑





二. 光伏与建筑相结合(BIPV)

1. 光伏与建筑相结合的形式

(2) 光伏器件与建筑相结合

光伏组件与建筑材料融为一体，采用特殊的材料和工艺手段，将光伏组件做成屋顶、外墙、窗户等形状，可以直接作为建筑材料使用，既能发电，又可作为建材，一举两得，能够进一步降低发电成本。



光伏器件与建筑相结合





光伏器件与建筑相结合





德国慕尼黑国际贸易中心屋顶光伏系统





纽约时代广场太阳能系统





太阳能发电与建筑一体化





太阳能光伏声屏障系统

- 同样兼具两种功能，而又不需占用土地，并且具有重大经济价值的光伏应用领域就是光伏声屏障，将光伏组件安装在高速道路两旁，既能降低噪声，又能发电，兼具两种功能，一举两得，可以进一步降低光伏系统的发电成本，有着巨大的市场潜力。



太阳能公路声屏障





瑞士声光伏屏障系统

Plant Name : DOMAT
Country : Switzerland
Type of plant : Grid-connected
Nominal Power [kWp] : 103.97

Mounting : Sound barrier
Array area [m²] : 967.82



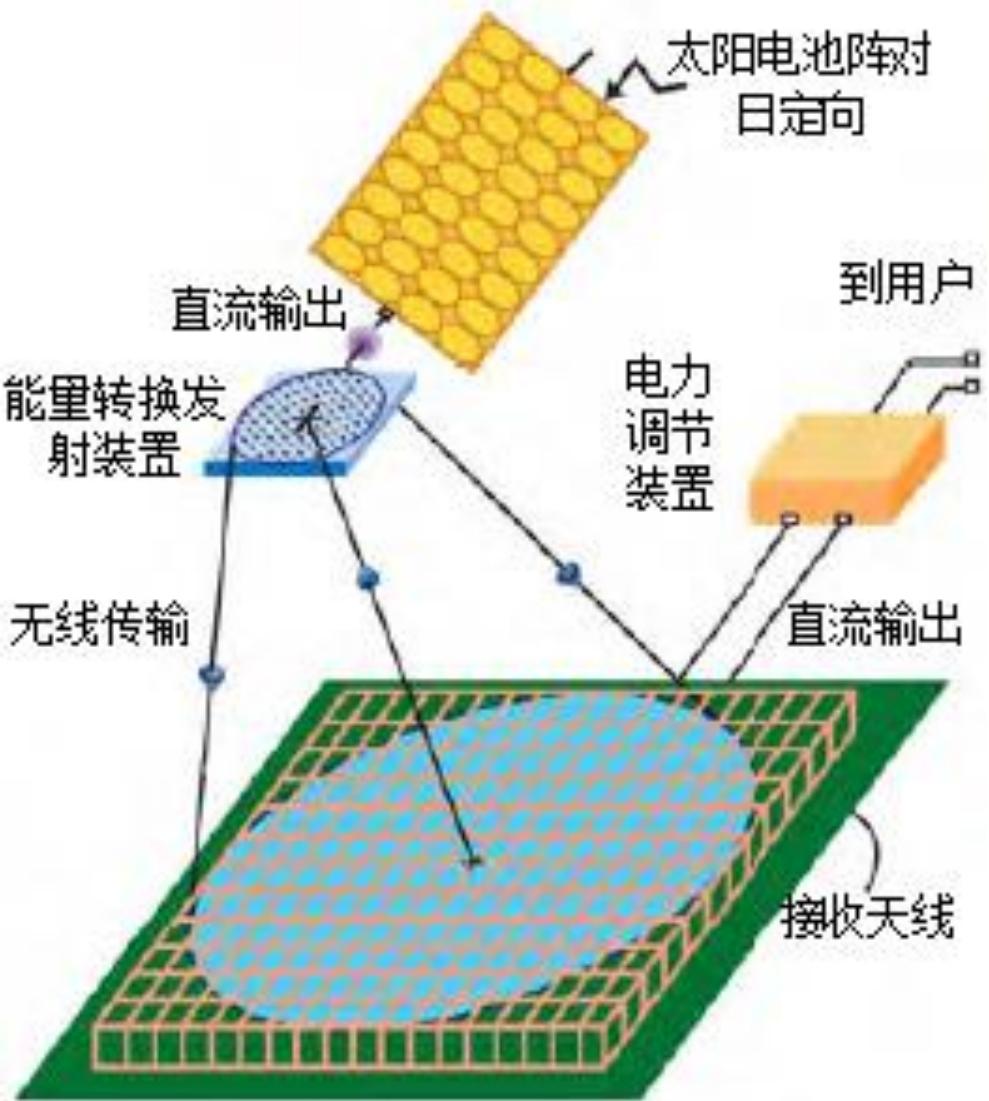
空间太阳能电站



空间太阳能电站（SSPS），也称太阳能发电卫星或太空发电站，是指在空间将太阳能转化为电能，再通过无线能量传输方式传输到地面的电力系统。空间太阳能电站主要由三大部分组成（图1）：

太阳能发电装置，能量转换和发射装置，地面接收和转换装置。

整个过程经历了太阳能—电能—微波（激光）—电能，或太阳能—激光—电能的能量转变过程。

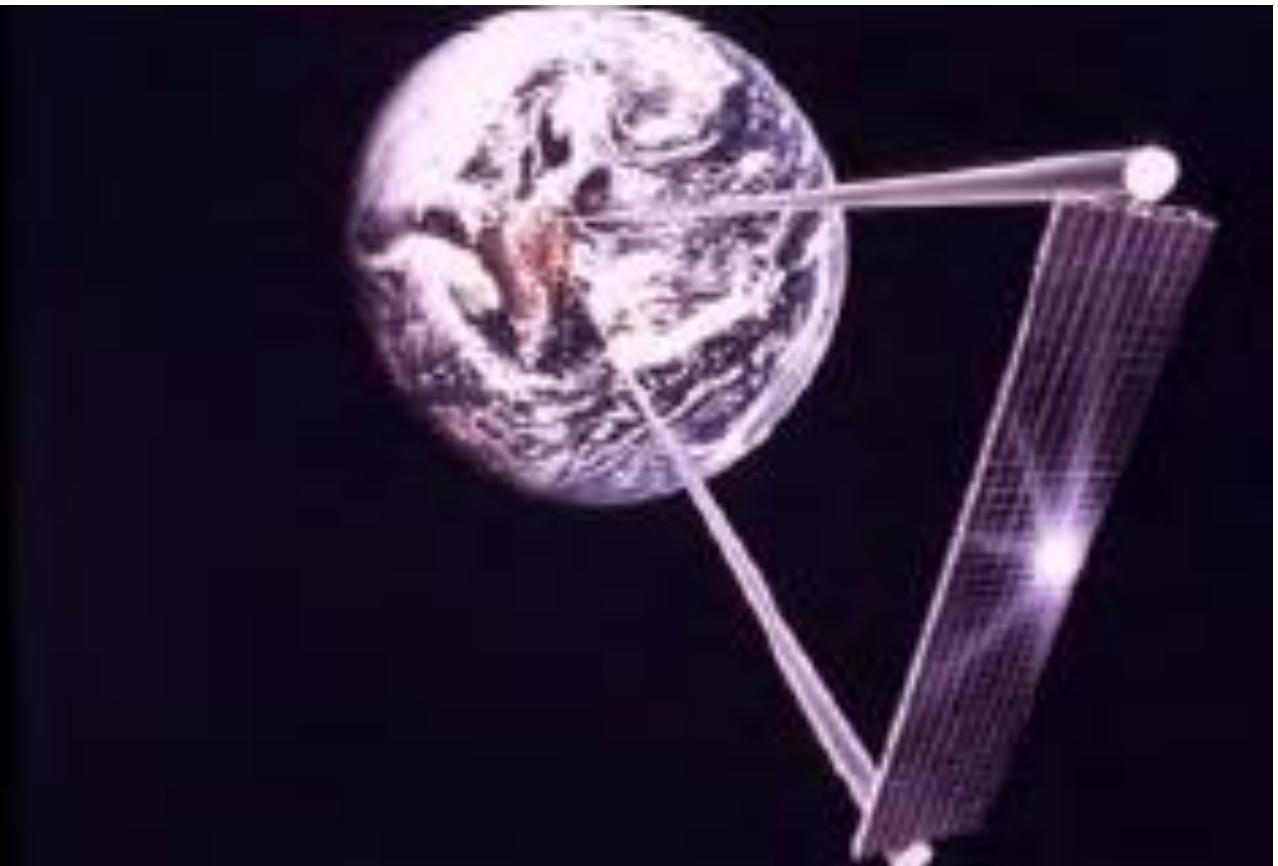




空间太阳能电站

1979 SPS 基准系统

该系统由巨型太阳电池阵和大型发射天线组成。巨型太阳电池阵保持对日定向，位于电池阵边缘的巨大的发射天线保持对地球定向，两者之间的相对位置变化利用大功率导电旋转关节实现。该系统可以连续向地面接收站供电。单个卫星系统的发电功率为5GW。





空间太阳能电站

太阳帆塔空间太阳能电站

欧洲提出了太阳帆塔太阳能电站（Sail Tower SPS）方案。该系统采用重力梯度稳定方式，使中央缆绳自动保持垂直于地面，以保证末端的发射天线对准地面。太阳电池阵由数百个尺寸为 $150\text{ m} \times 150\text{ m}$ 的太阳发电阵模块组成，根据总发电量的要求配置发电阵的数目。发电阵沿中央缆绳两侧排列成2行或4行，发出的电流通过由超导材料制成的中央缆绳输送到缆绳末端的发射天线。每一个子阵发射入轨后自动展开，在低地球轨道进行系统组装，再通过电推力器运往地球同步轨道。由于太阳电池阵无法保持对日定向姿态，该系统无法实现向地面接收站的连续供电。



空间太阳能电站





空间太阳能电站

1997 太阳盘系统

美国于1997年提出了太阳盘方案，该方案包含了可扩展的轴对称和模块化的太阳能收集器。太阳能收集系统是一个对日定向的大型地球同步轨道自旋稳定薄膜太阳能电池阵(直径约3~6km)。太阳能收集系统中心有一个集电器，将通过光电转换所获得的电力集中在一起。



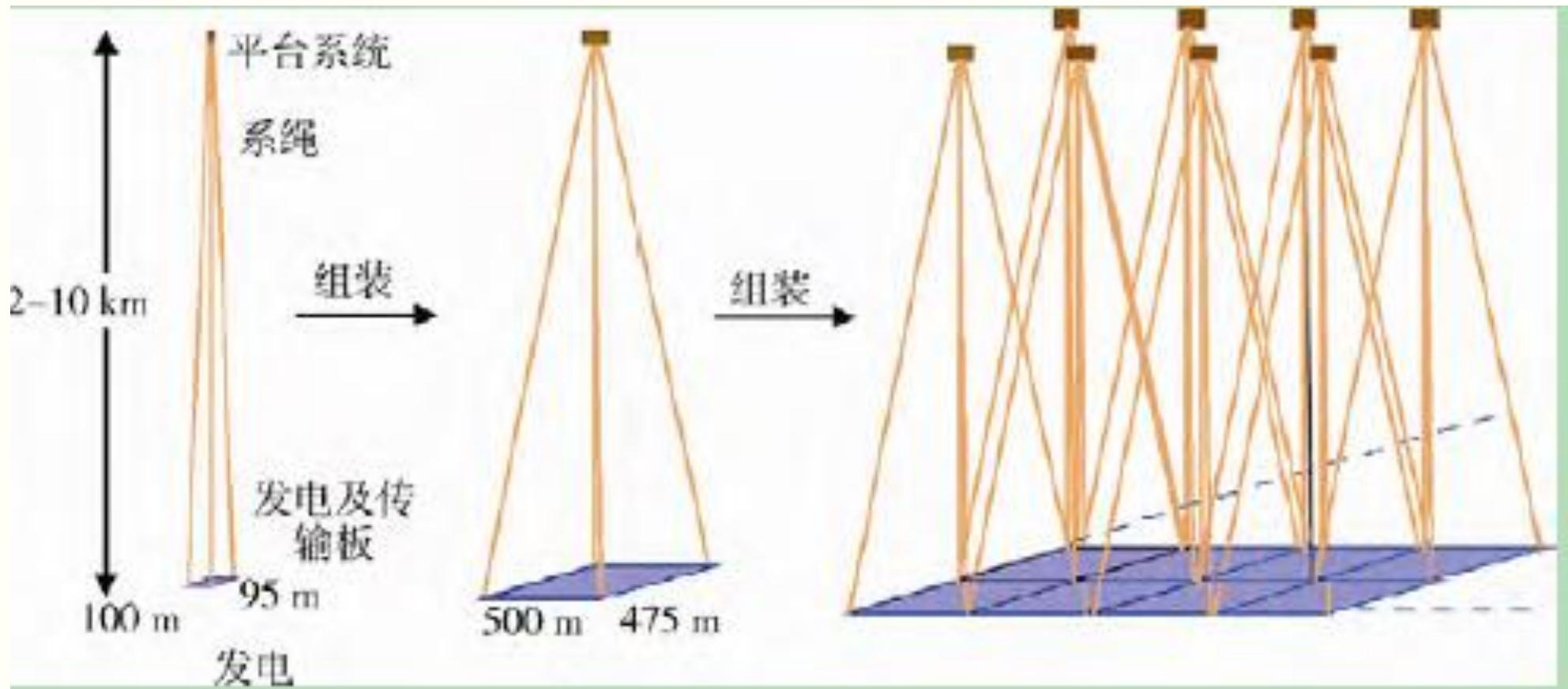


空间太阳能电站

分布式绳系太阳能电站

日本提出了分布式绳系太阳能电站（Tether SPS）概念。其基本组成单元由尺寸为 $100\text{ m} \times 95\text{ m}$ 的单元板和卫星平台组成，单元板和卫星平台间采用4根 $2\sim 10\text{ km}$ 的绳系悬挂在一起。单元板为太阳电池、微波发射机和发射天线组成的夹层结构板，共包含3800个模块。每个单元板的总质量约为42.5 t，微波能量传输功率为2.1 MW。由25块单元板组成子板，25块子板组成整个系统。该方案的模块化设计思想非常清晰，有利于系统的小规模验证、扩展、组装和维护。但由于太阳电池无法持续指向太阳，所以整个系统的发电会出现巨大的波动，总体效率较低。

空间太阳能电站





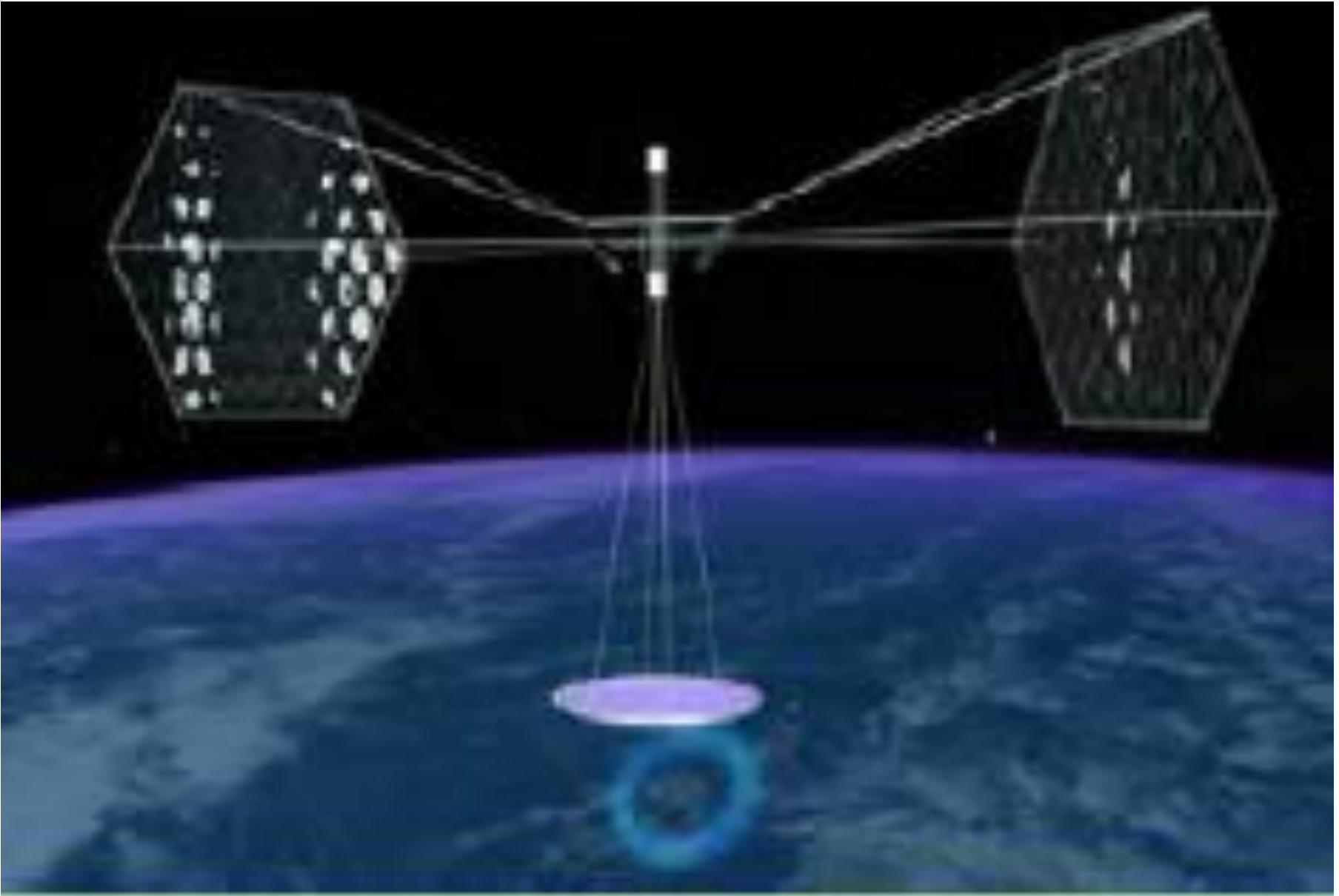
空间太阳能电站

集成对称聚光系统

NASA 在20世纪90年代末的SERT 研究计划中提出“集成对称聚光系统”(ISC) 的设计方案，经过改进后的聚光型SPS 结构。该方案的最大特点是采用了聚光系统设计，将关键的太阳电池、微波发射机和发射天线集成为“三明治”夹层结构板，即外层板为太阳电池，中间夹层为微波发射机，底层为微波发射天线。利用位于桅杆两边的大型薄膜聚光器通过机构控制指向太阳，将太阳光反射聚集到三明治结构板上，电池发出的电能传递到微波发射机，取消了对于大功率导电滑环和长距离电力传输的需求。三明治结构板的发射天线阵面指向地球，聚光器与桅杆间相互旋转以适应轨道变化。



空间太阳能电站





空间太阳能电站

任意相控阵空间太阳能电站

在NASA创新概念项目支持下，由美国、日本和英国科学家共同提出了一种新的空间太阳能电站概念方案——任意相控阵空间太阳能电站（**SPS-ALPHA**）。该方案仍基于聚光式空间太阳能电站的思想，创新性地提出了无须控制的聚光系统概念（其有效性还有待进一步分析），对控制系统的的要求大大降低，采用了模块化的设计，降低技术难度和研制成本。整个系统的质量约为1.0~1.2万t。



空间太阳能电站

任意相控阵空间太阳能电站

该方案采用高度模块化设计思路，太阳能收集系统由多组正六边形薄膜反射镜、桁架式支撑和连接结构组成。每个镜面类似定日镜实现单独调整，通过一次或多次反射将太阳光汇聚到底部“三明治”结构的光伏电池表面。Mankins等人设计了多个ALPHA 系统方案，于2013 年公开的最新方案中，太阳能收集系统采用了类似双反射面天线的设计，其中，主反射体为 Sigmoid 曲线作为母线的旋转曲面。



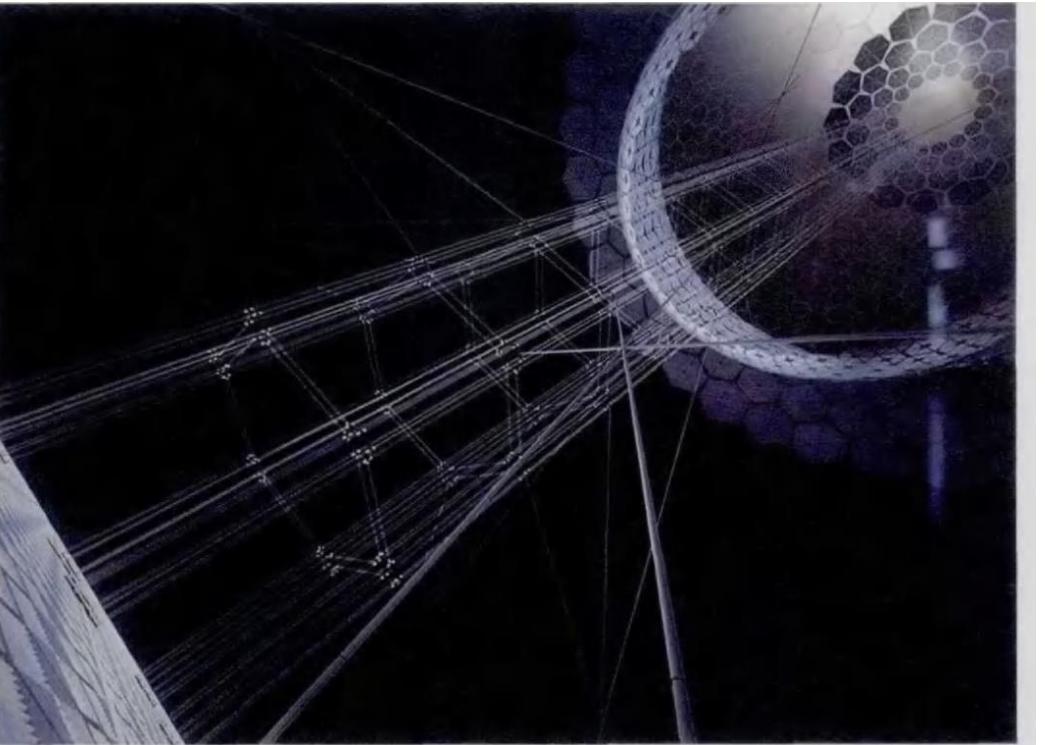
空间太阳能电站



空间太阳能电站

曼金斯的SPS-ALPHA

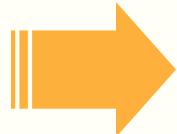
SPS-Alpha是以大规模方式生产的接收器，然后连接形成独特的高脚杯形状的接收器阵列。接收阵列将太阳光聚焦后转化为微波束，然后发射到地面的大型接收天线。





空间太阳能电站

激光太阳能电站



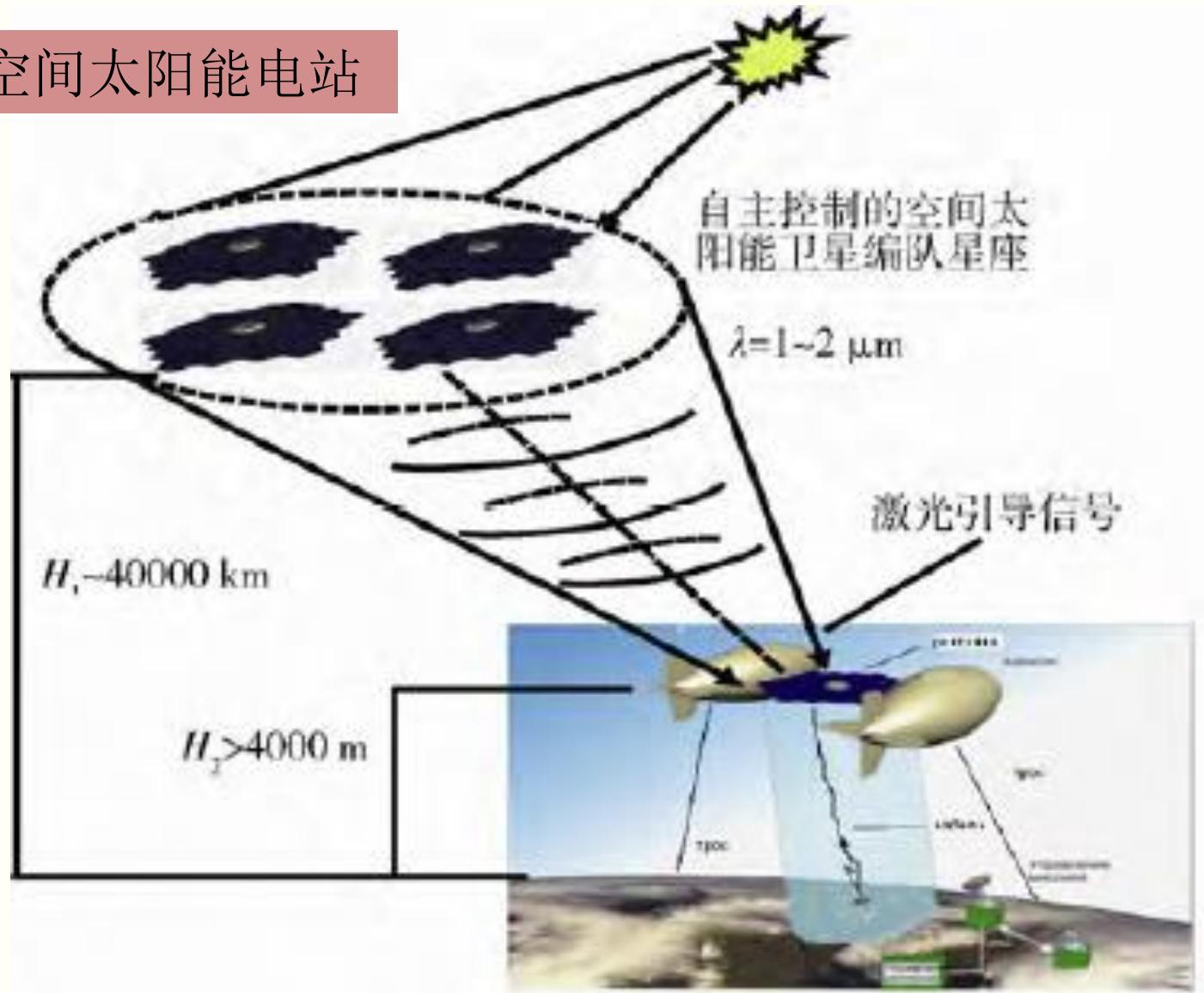
俄罗斯的空间太阳能电站

俄罗斯于 2012 年提出了一种基于激光无线能量传输的空间太阳能电站（R-SPS）方案。其主要的思路是采用多个分离的太阳能发电卫星编队飞行，建立太阳电池和半导体激光器组成的三明治结构，并利用激光无线能量传输（LPT）的方式向由浮空器支撑的接收平台进行能量传输，再通过电缆直接将电能传输到地面。该方案包含多种可能的变化，如将激光直接传输到地面接收站（天气良好的情况下），或采用微波无线能量传输的方式将电能从浮空器传输到地面。

空间太阳能电站



俄罗斯的空间太阳能电站





空间太阳能电站

激光太阳能电站



太阳光直接泵浦激光太阳能电站

太阳光直接泵浦激光太阳能电站（**L-SSPS**）是空间太阳能电站概念发展的另外一个重要方向。采用抛物面太阳聚光镜或菲涅耳透镜进行太阳光高聚光比聚焦，聚集的太阳光发送到激光发生器，利用直接泵浦激光方式产生激光，激光扩束后传输到地面；地面采用特定的光伏电池接收转化为电能，

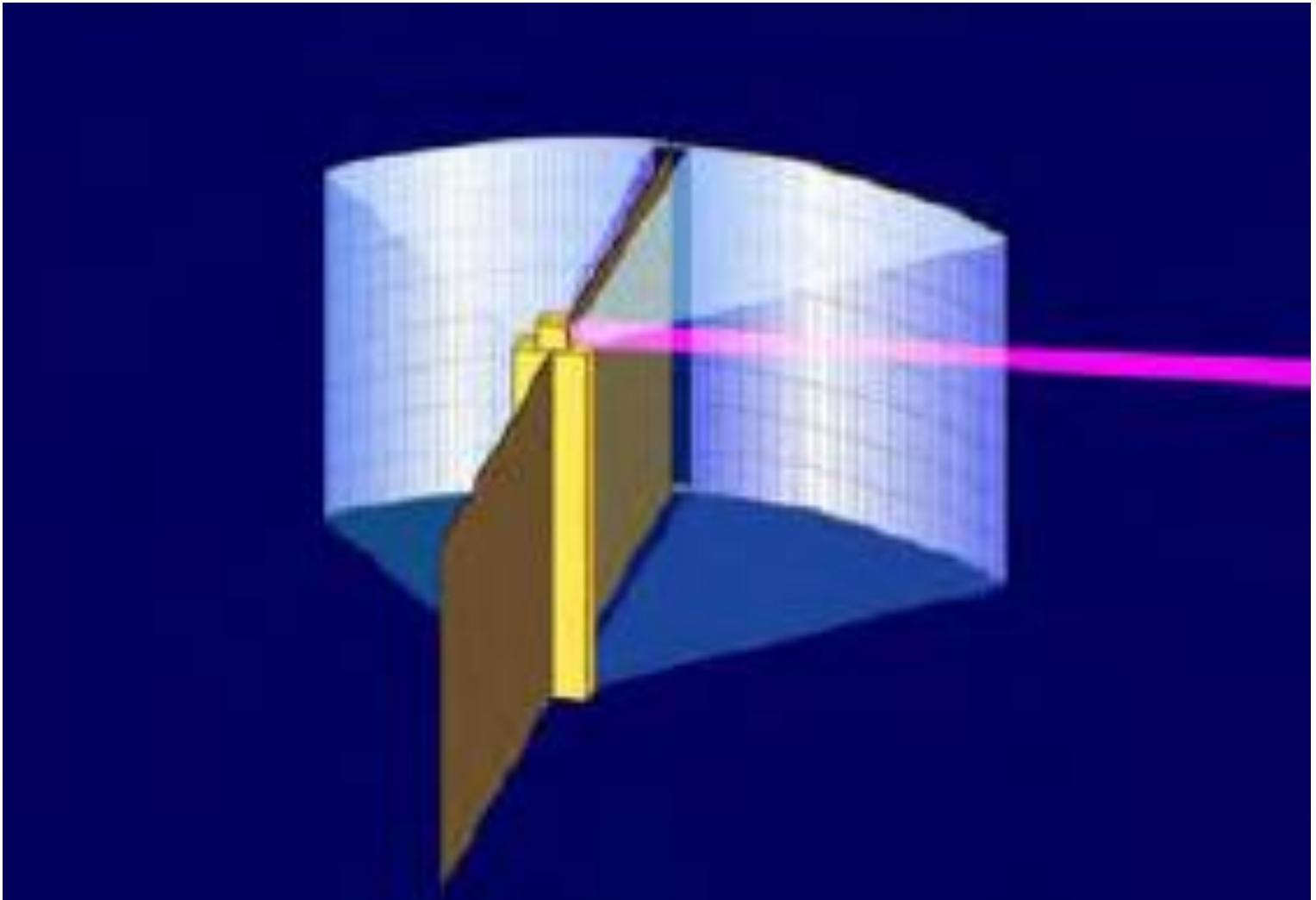
或者直接用于制氢。**L-SSPS** 概念基本组成包括太阳聚光镜、散热器、太阳光泵浦激光器、激光发射器和其他支持系统。



空间太阳能电站



太阳光直接泵浦激光太阳能电站





空间太阳能电站

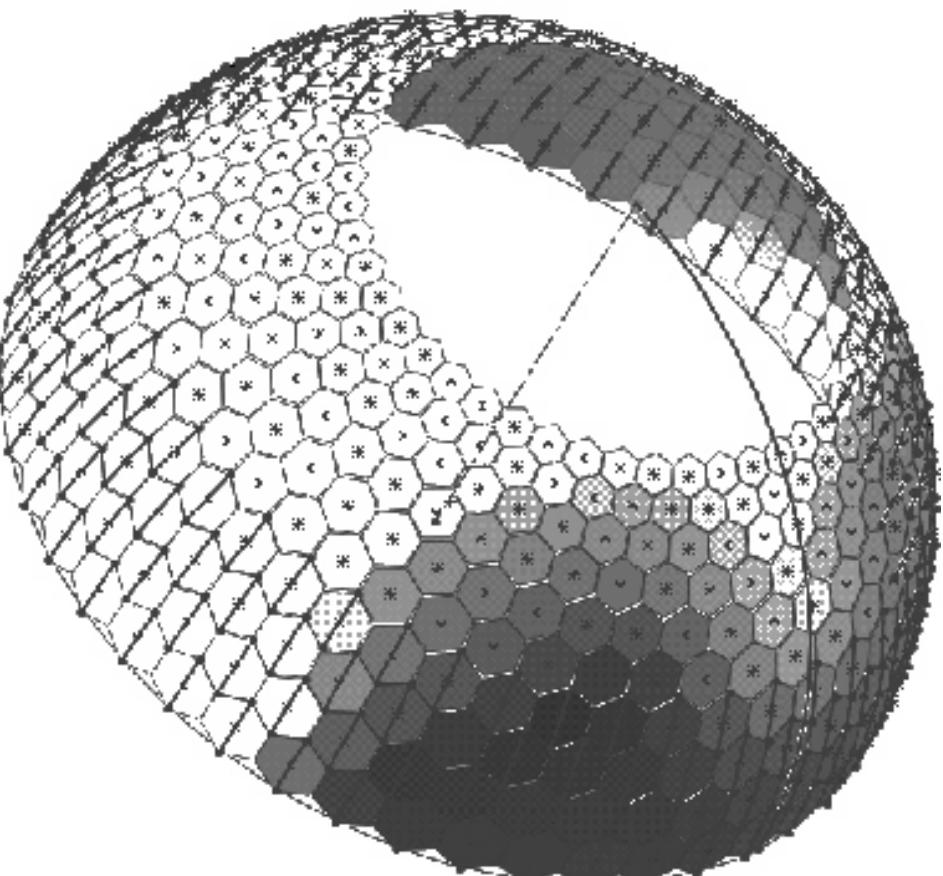
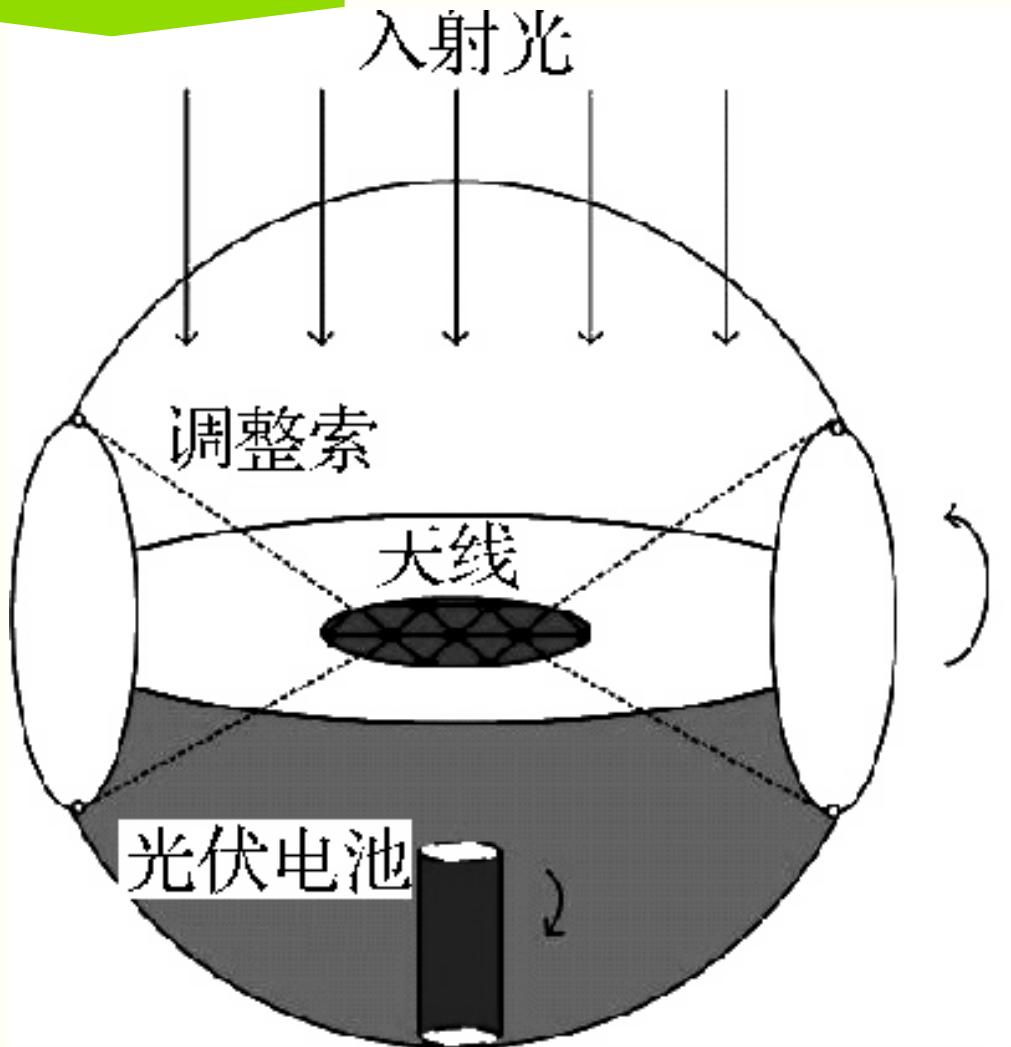
OMEGA 方案

2014 年，杨阳等提出了SSPS-OMEGA 方案，OMEGA 是“球形薄膜能量收阵”(Orbshape Membrane Energy Gathering Array) 的缩写。采用线聚焦的方式，优点高效、稳定、控制简单，缺点天线和电池须相对转动。

OMEGA 方案的太阳能收集系统采用单向光学薄膜材料(利用光学涂层，材料微结构设计等手段实现薄膜材料在相对的上下表面分别具备反射和透射太阳光的功能)，球形主反射体无需调整，系统质量低，可靠性高。微波发射天线通过大跨度悬索连接于主反射体“南北极”区域，连接结构的质量可大幅度降低。主反射体是一个关于中心轴对称的回转体，理论上，除阴影区外的时刻，光伏电池接收的太阳能功率波动小，可稳定、高效地接收太阳光。

空间太阳能电站

OMEGA 方案





空间太阳能电站

典型空间太阳能电站概念的比较

非聚光空间太阳能电站代表为 1979 SPS。系统配置相对简单，易于功率扩展。但也存在一些难题，需要采用高功率旋转关节，维持太阳电池阵列指向太阳和发射天线指向地球；需要大量的输电电缆进行远距离、大功率的电力传输，并会产生更多的功率损耗。

聚光空间太阳能电站是空间太阳能电站发展的新方向，可大幅减少太阳电池的面积，显著降低电力管理和分配技术难度，但系统控制和热控制难度大。增加了聚光系统，使得构型和控制变得复杂，系统难以扩展；高聚光比下系统的散热成为一个重要的问题，需要采用耐高温部件。



空间太阳能电站

典型空间太阳能电站概念的比较

概念	构型	太阳能发电方式	对日定向	无线能量传输方式	电力传输与管理	发电波动性
1979 SPS	非聚光式	光伏	是	微波	集中式	小
Sail Tower SPS	非聚光式	光伏(薄膜)	否	微波	集中式	大
Tether SPS	非聚光式	光伏	否	微波	分布式	大
ISC	聚光式	光伏(聚光)	是(聚光镜)	微波	分布式	小
SPS-ALPHA	聚光式	光伏(聚光)	否	微波	分布式	小
R-SPS	非聚光式	光伏	否	激光	分布式	大
L-SSPS	聚光式	—	是	激光	—	小



空间太阳能电站

无线能量传输技术的比较

微波无线能量传输技术是空间太阳能电站研究较多的传输方式，具有较高的转化和传输效率，在特定频段上的大气、云层穿透性非常好，技术相对成熟，波束功率密度低，且可以通过波束进行高精度指向控制，具有较高的安全性。但由于波束宽，发射和接收天线的规模都非常大，工程实现具有较大的难度，比较适合于超大功率的空间太阳能电站系统。

激光无线能量传输技术主要特点是传输波束窄、发射和接收装置尺寸小，应用更为灵活。通过合理选择频率，可以减小大气损耗，比较适合于中小功率的空间太阳能电站系统。难点在于大功率激光器技术成熟性较差，高指向精度实现难度大，存在较大的安全隐患。主要缺点是大气透过性差，传输效率受天气影响大。



空间太阳能电站

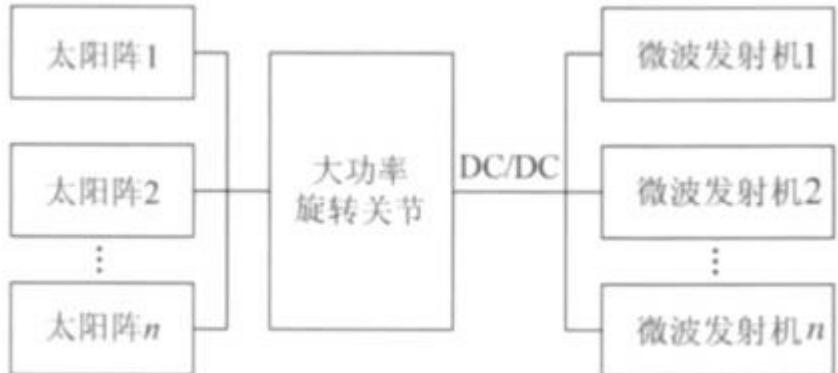
无线能量传输技术的比较

特性项目	微波无线能量传输	激光无线能量传输
装置尺寸	大	较小
云层穿透性	好	差
功率密度	低	低一高
接收天线	仅用于 微波接收	可用于激光和 太阳光接收
转化效率	较高	提高中
成熟度	较高	较低
应用场景	空间到地面	空间到空间

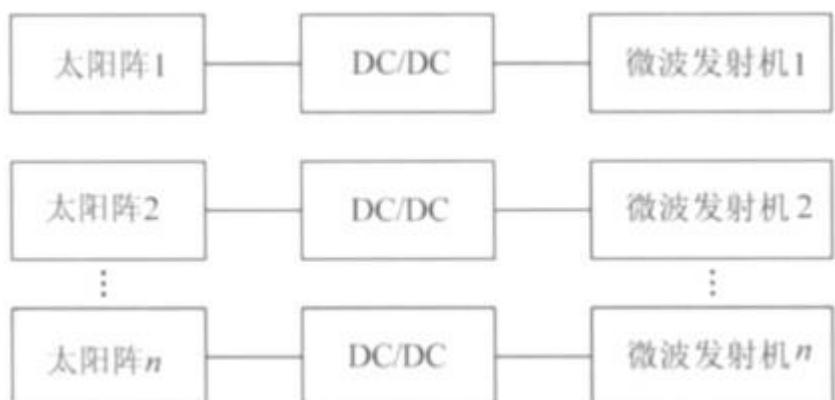


空间太阳能电站

电源管理与分配技术



集中式电源管理
与分配方（PMAD）



分布式电源管理
与分配方式（PMAD）



空间太阳能电站

核心问题分析

- 降低系统面积
- 降低系统质量
- 减小系统的收拢体积
- 旋转机构问题 -聚光方案 -微波反射方式
-无旋转机构的方式
- 提高运输发射能力
- 在轨组装与维护的可实现性
- 环境可靠性与安全问题



空间太阳能电站

关键技术发展建议

- ➡ 空间超大型可展开结构及控制技术
- ➡ 空间高效太阳能转化及超大发电阵技术
- ➡ 空间超大功率电力传输与管理技术
- ➡ 无线能量传输技术
- ➡ 轨道间转移技术及大功率电推进技术
- ➡ 空间复杂系统在轨组装及维护技术
- ➡ 大型运载器及高密度发射技术
- ➡ 电站系统运行控制及地面接收管理技术
- ➡ 电站发展的基础材料和器件研究



太阳能利用技术



工程热物理