



适合能源动力类专业的 《太阳能》课程设置与教学体会

报告人：肖刚

浙江大学 热能工程研究所

xiaogangtianmen@zju.edu.cn

15068878066



新能源是能源动力类专业的重要分支

IEA组织成员国的
化石燃料和可再生能源投资情况

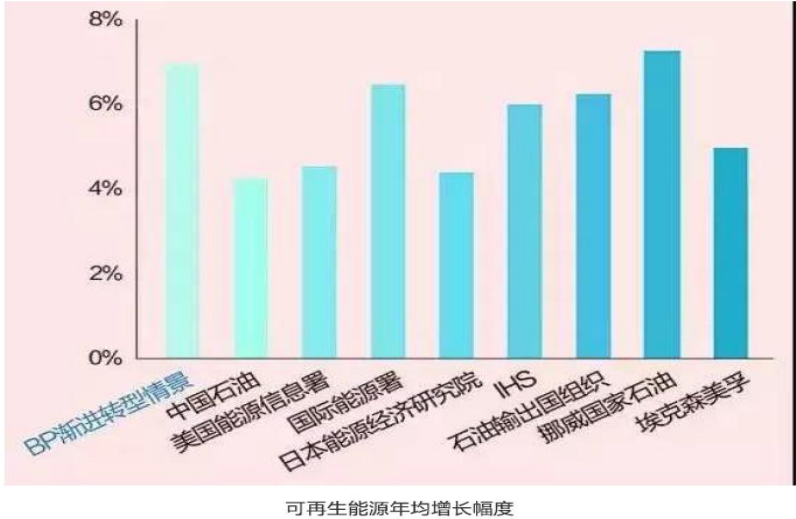


国际能源署（IEA）能源技术研发预算数据库（2019）

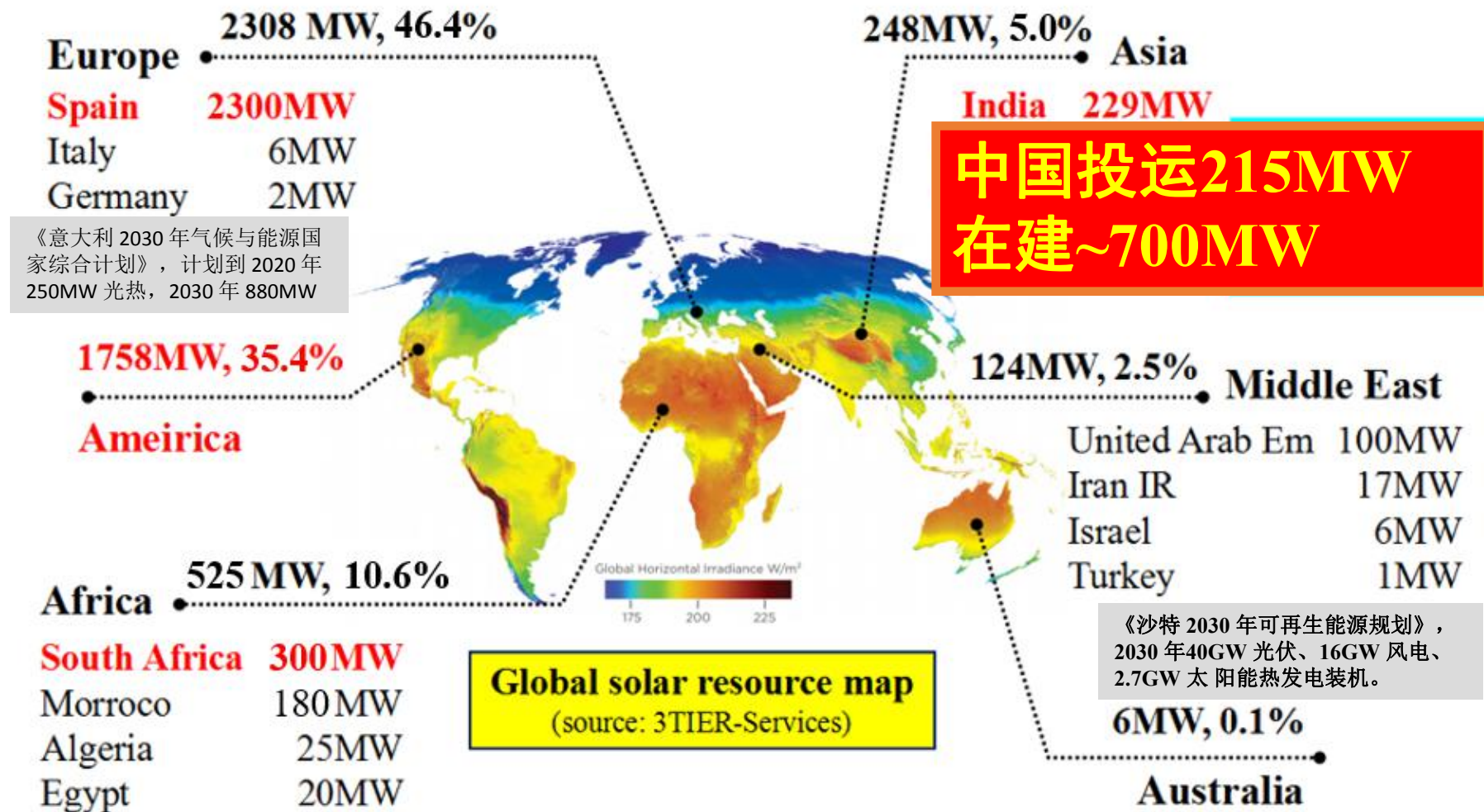
<https://www.iea.org/statistics/rdd/>

	2018年全球加权电力成本（美分/千瓦时）	与2017年相比
生物质能	6.2	-14%
地热能	7.2	-1%
水电	4.7	-11%
光伏	8.5	-13%
光热	18.5	-26%
海上风电	12.7	-1%
陆上风电	5.6	-13%

各机构预测的
全球可再生能源的增长速率



太阳能光热装机全球分布情况



新能源方面的教材相对缺乏

风能

- 风能转换原理与技术（田德）
- 风能工程（杰恩）

生物质能

- 生物质能利用原理与技术（袁振宏）
- 生物质化工与生物质材料（黄进）

地热能

- 地热能利用技术（唐志伟）

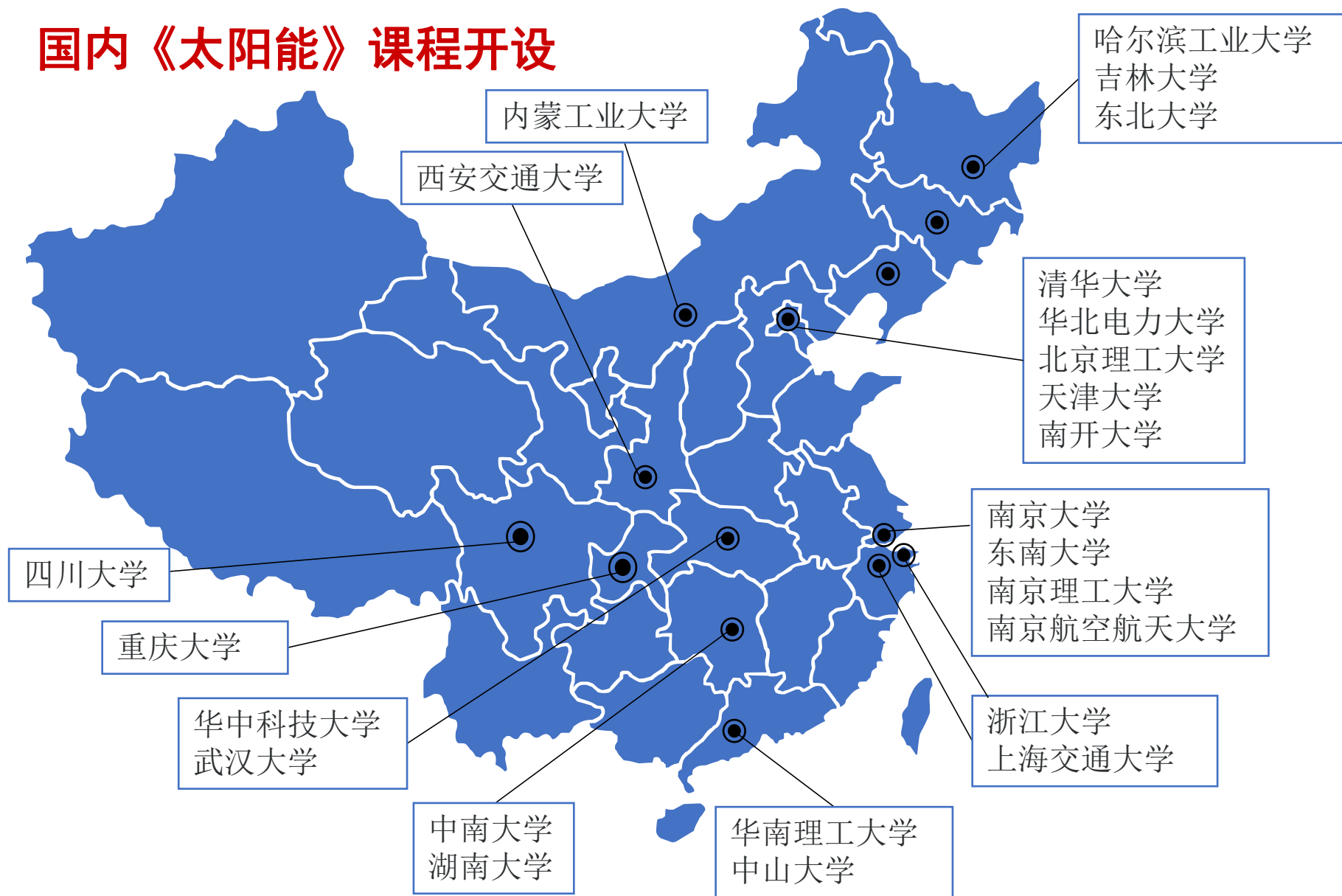
海洋能

- 新能源与分布式发电技术（朱文强）

太阳能

- 光伏：材料专业较多，偏半导体材料学科
- 光热：能源专业，但处于起步阶段、实例不多、知识体系不完善

国内《太阳能》课程开设

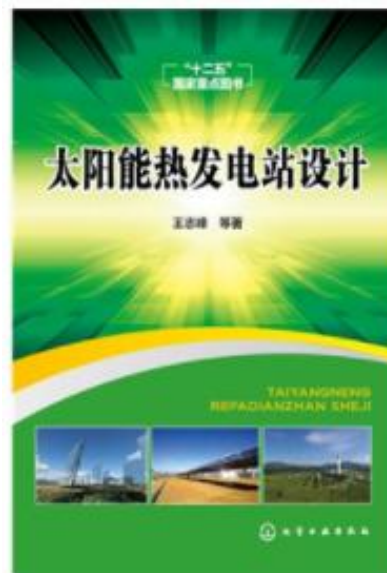


2010年，教育部批准开设新能源专业，目前全国有约**80所高校**开设太阳能课程。



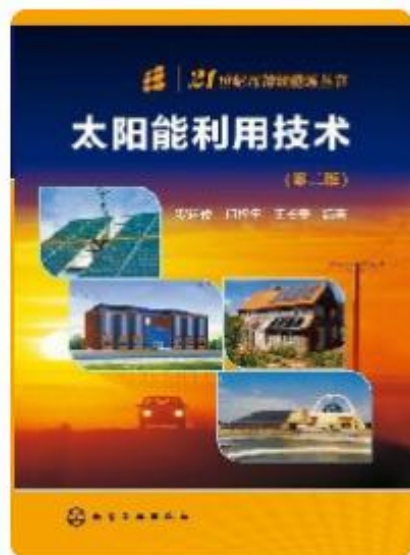
2010

较为全面介绍了太阳能利用技术的基础知识：聚光、光热、光伏的等技术和工程，涵盖范围广，内容深刻。



2014

主要包括太阳能热发电站总体设计、聚光系统设计、吸热器系统设计、储热系统、厂址选择、电力负荷与发电流程等。
工程设计参考



2014

太阳热水器、太阳灶、太阳房、太阳能干燥、太阳能温室
太阳能制冷与空调、
太阳能光伏发
太阳能热发电。



2017

主要介绍了平板型太阳集热器、真空管型太阳能集热器、家用太阳能热水系统等中低温热利用。

《太阳能》开设情况和教材情况

国外开设情况



美国：加州理工学院、麻省理工学院、康奈尔大学等拥有自己的太阳能研究中心，主要研究光电转换、光电材料等。



英国：诺丁汉大学开设可再生能源与建筑专业，如太阳能建筑等。



德国：亚琛工业大学、慕尼黑工业大学开设的太阳能相关课程（光伏和光热）。



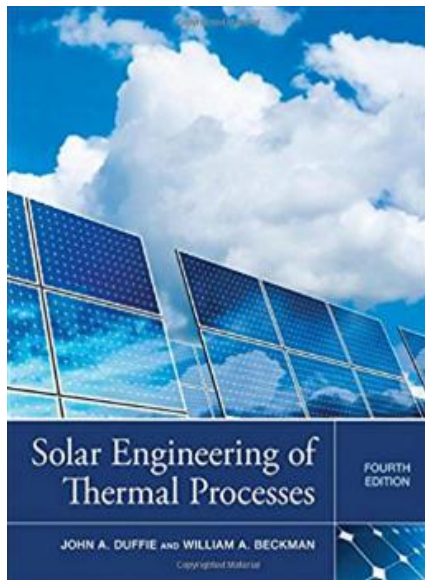
日本：东京大学、东京工业大学、东北大学、京都大学等侧重太阳能电池及光伏发电。



新加坡：南洋理工大学开设太阳能光伏电池和半导体材料等课程，主要研究钙钛矿电池等。



澳大利亚：澳大利亚国立大学开设太阳能光热发电、光伏电池等课程等。



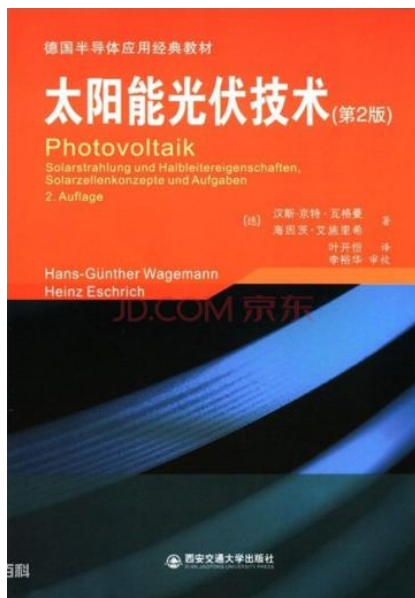
2013

主要介绍了太阳辐射、传热计算、平板型集热器、聚光集热器、热水供暖等。



2012

介绍了聚光太阳能发电系统的基本原理和应用



2011

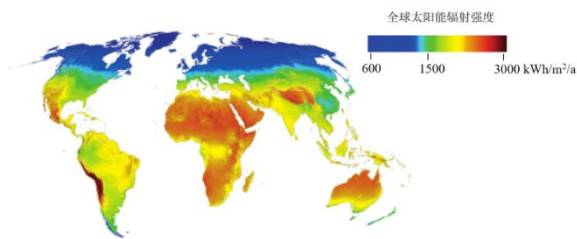
详细地介绍了各类半导体太阳电池和新型太阳电池的原理，太阳能光伏技术的数学推导，以及太阳电池的生产方法与工艺。



2013

主要介绍了太阳能光伏发电系统的设备构成，太阳能电池组件的电力特性，以及系统设计等

《太阳能》 涉及面范围广



太阳能
资源

聚光
集热
储热

中低温
供热、制冷

范围广
内容多

中高温
发电、燃料

光伏

新发展

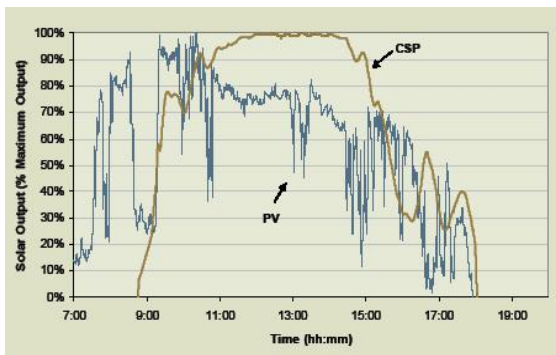
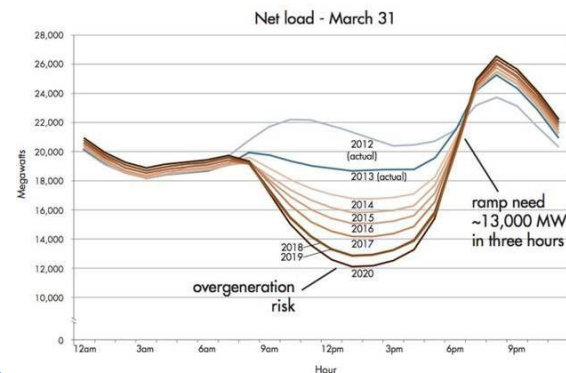
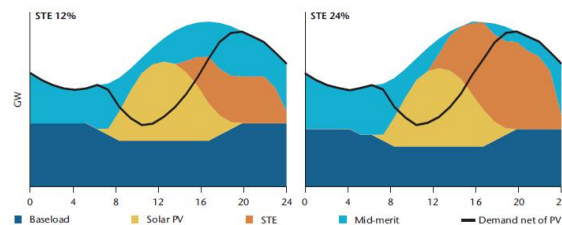


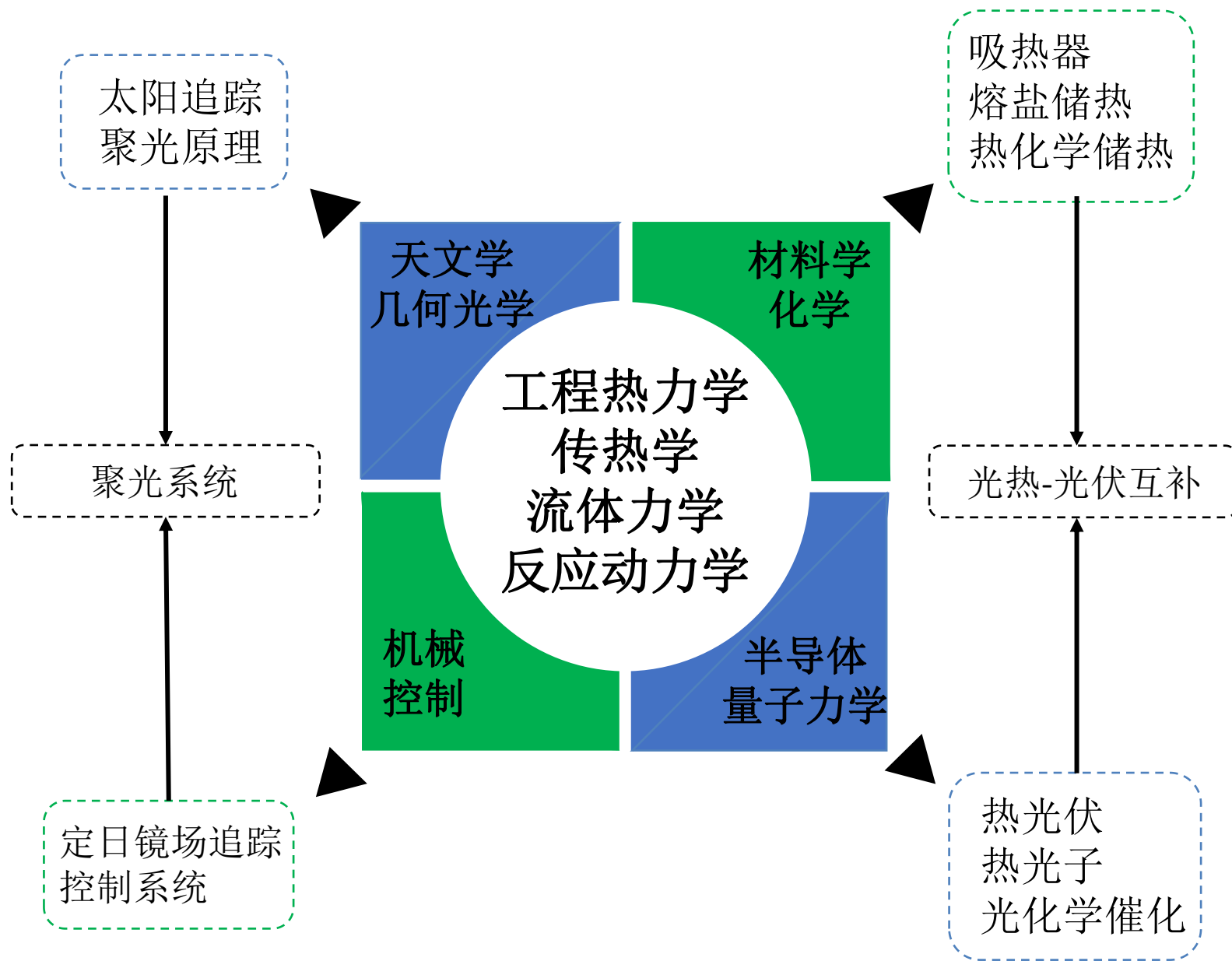
Figure 15: Daily dispatch for a stylised system with annual PV electricity share of 18% and various CSP shares (left: 12%; right: 24%)



KEY POINT: CSP plants would generate electricity for peak and mid-peak demand, after sunset, their capacity complements PV generation from earlier in the day.

- 如何串起来？形成相互关联的知识体系
- 适合能源动力类专业？

内容分解与学科交叉



《太阳能》 目录

主要分为太阳能光学、高温热发电、中低温利用、光伏发电四大核心章节，并将各种技术的发展趋势融入其中。

第一章 概论

- 太阳能资源概况
- 各类技术简介

第二章 太阳能利用技术中的光学原理和热工基础

- 太阳时间
- 太阳辐射和聚光原理
- 吸热介质和热力循环

第三章 太阳能光热发电系统与工程

- 槽式、线性菲涅耳式、塔式、碟式光热发电系统与工程
- 储热技术
- 其他光热发电技术

《太阳能》 目录

第四章 太阳能中低温利用基本原理及工程

- 太阳能热水器
- 太阳能制冷
- 太阳能海水淡化
- 太阳能建筑一体化

第五章 太阳能光伏发电原理与系统

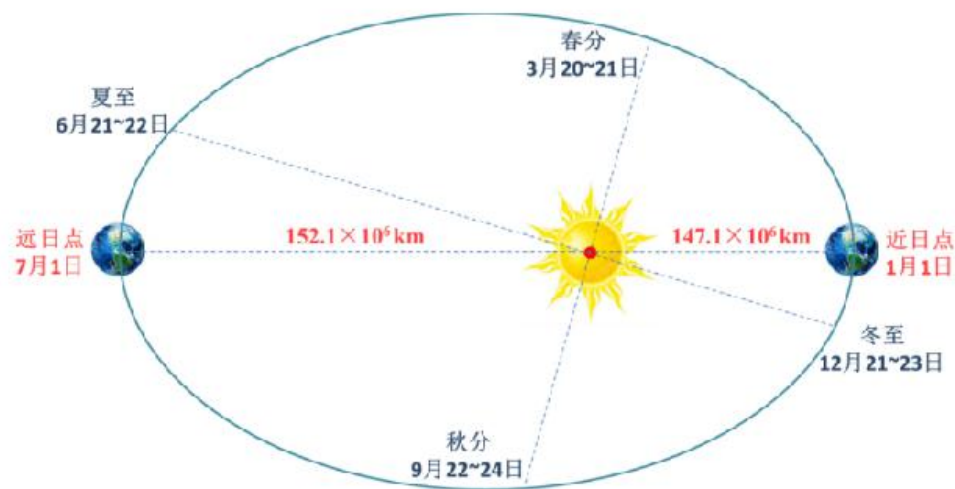
- 光伏发电原理及系统
- 太阳能光伏/光热综合利用

第六章 新型太阳能发电与利用技术

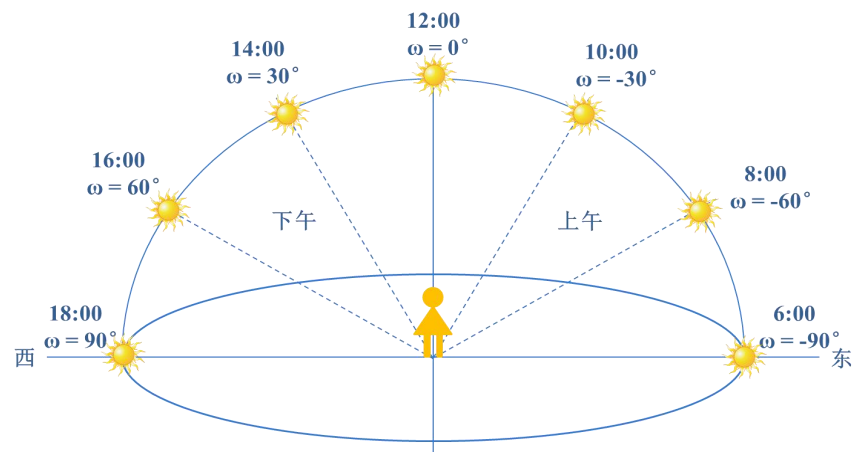
- 热光伏、热电子发电技术
- 温差发电技术
- 太阳能化学转化技术等

涉及面广，各章都设置主要知识点，注重启发和引导学生。

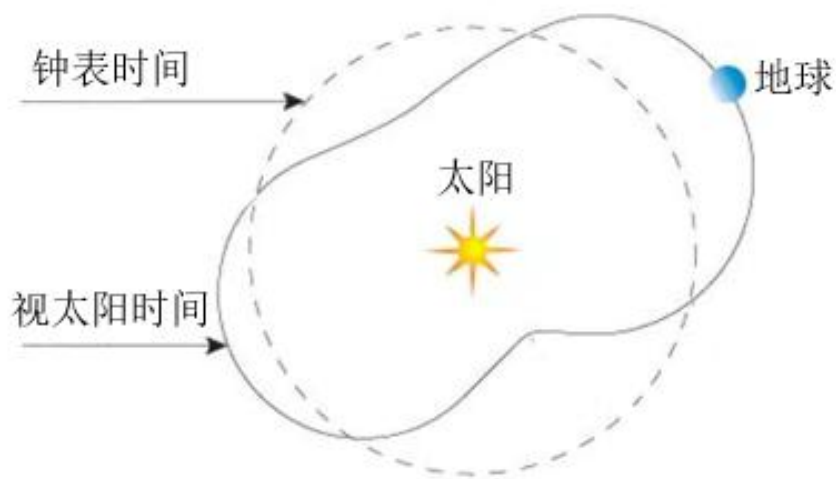
差异化的知识点：太阳时间



日地距离

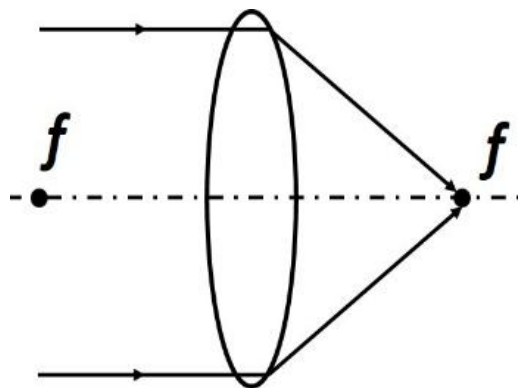


时角示意

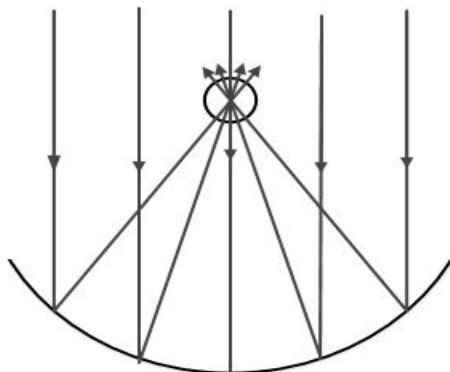


根据某地经度推算出来的当地时间称为**钟表时间**，并不是真正的太阳时，因为地球绕日运行的轨道是椭圆形的，所以地球相对于太阳的自转周期并不是十分均匀的，一年之内，有时快一些，有时慢一些。

联系热力学的知识点：聚光极限



折射式聚光



反射式聚光

对于理想聚光器，是否可以一直提高聚光比？

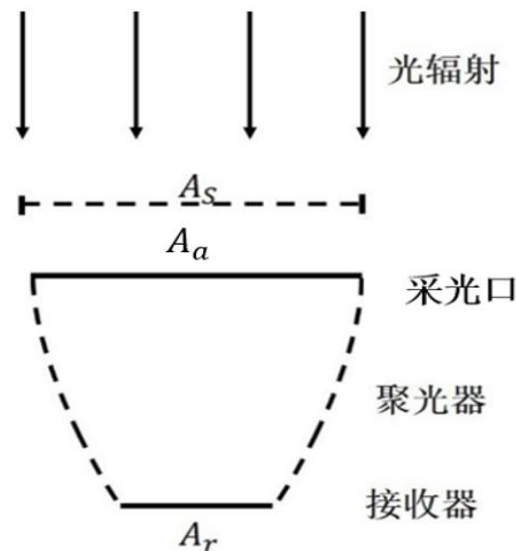
太阳和聚光器的接收器之间的能量传递遵守**热力学第二定律**，意味着接收器不能获得比太阳更高的温度，因此即使是理想聚光器也存在**聚光极限**。

前提：设想一种理想的太阳能聚光器，能够完全吸收从太阳辐射到某一点的辐射能

思路一：**光线的可逆性原则**，黑体的对外辐射都只能从同一路径返回到太阳

思路二：辐射换热原理和**热力学第二定律**，能量守恒原理

可以请推导聚光极限，光学和热力学统一起来



联系实际的知识：抛物面/CPC/菲涅尔

抛物线是唯一可能将平行光聚焦于一点的型线，
太阳能工程中经常采用抛物线制作各种形式的聚光器



槽式抛物面聚光属于**线性抛物面聚光器**，槽式太阳能发电技术是目前应用最广的太阳能热发电技术。



碟式抛物面聚光属于**旋转抛物面聚光器**，特点在于不同镜面深度的聚光效果不同。

传热学的知识点：聚光辐射测量

为什么？

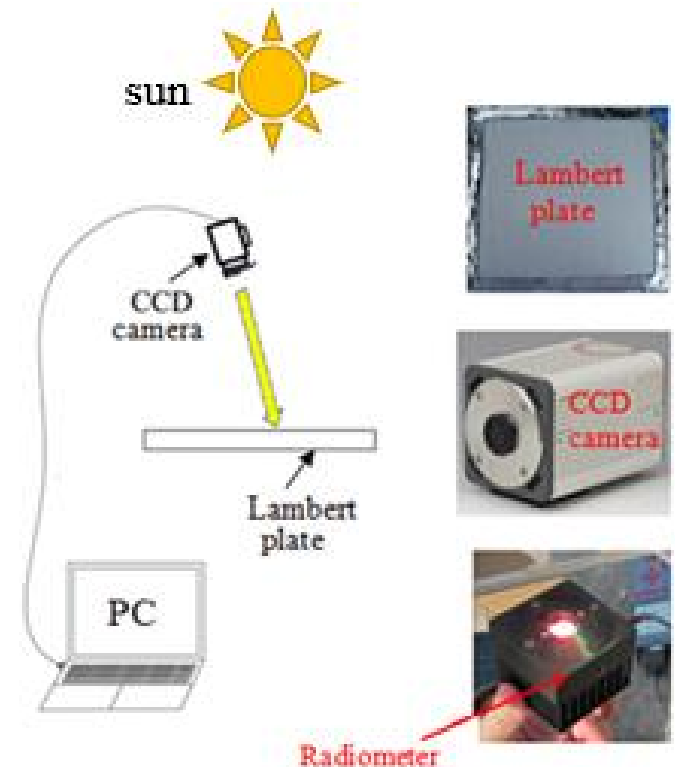
- 重要性：聚光辐射测量常用于运行中的太阳能聚光系统，通过测量聚光器焦平面及不同离焦面的能流密度分布，进而求出聚光系统的光学效率、几何聚光比、能量聚光比等，因此聚光测量对于太阳能热发电系统十分重要。

如何测？

- 基本原理：兰贝特定律
- CCD相机灰度信号与热流密度之间存在线性关系

如何实现？

- 系统组成：光源、CCD相机、朗伯板、光强计、电脑处理器等五部分



综合热力循环的知识点： 各类循环

循环类型	运行最高温度 /℃	光电效率/%	装机容量/MW	聚光形式	技术成熟度
有机朗肯循环	<300	5-8%	0.2-10	平板式或线聚光	示范阶段
卡琳娜循环	<300	5-10%	0.2-10	平板式或线聚光	示范阶段
蒸汽朗肯循环	390-600	10-20%	50-600	线聚光或场聚光	商业化运行
斯特林机循环	600-800	20-30%	0.001-0.100	点聚光	示范阶段
布雷顿循环	800-1200	20-25%	10-600	场聚光或点聚光组合	试验阶段
布雷顿-朗肯联合循环	800-1400	30-35%	100-600	场聚光或点聚光组合	设计阶段

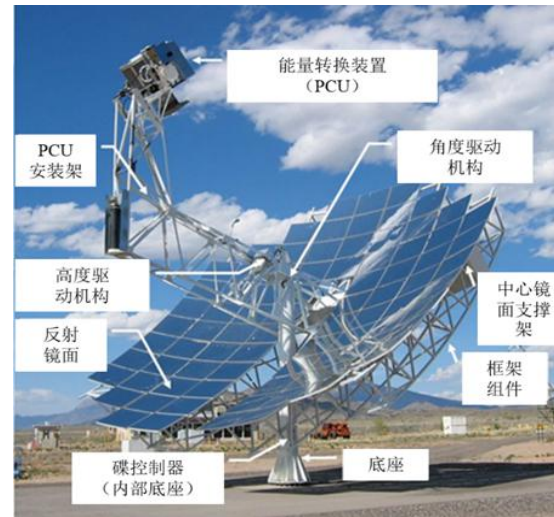
在太阳能热利用领域涉及的动力循环，应该是所有课程中最多的

在讲解各类循环时，重点讲解太阳能发电站中的新颖循环，根据不同太阳能发电系统的温度和聚光比，选择合适高效的循环。

中低温 ($<300^{\circ}\text{C}$) 槽式系统：有机朗肯循环



中高温 ($600\text{--}800^{\circ}\text{C}$)
碟式系统：斯特林循环



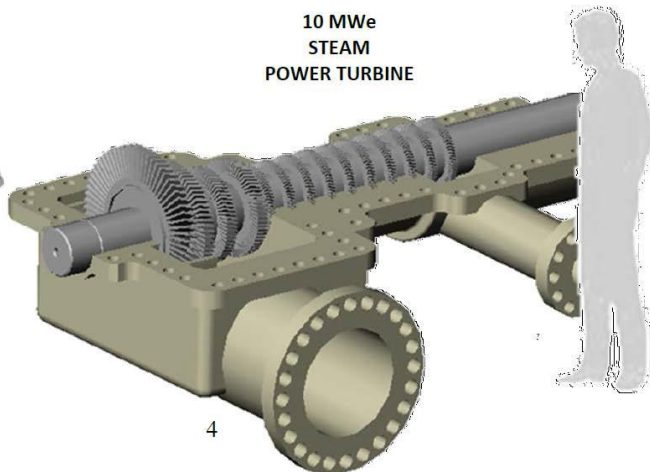
高温 ($800\text{--}1200^{\circ}\text{C}$) 系统：
超临界二氧化碳布雷顿循环

未来发展趋势

10 MWe
SUPERCRITICAL CO_2
POWER TURBINE



10 MWe
STEAM
POWER TURBINE

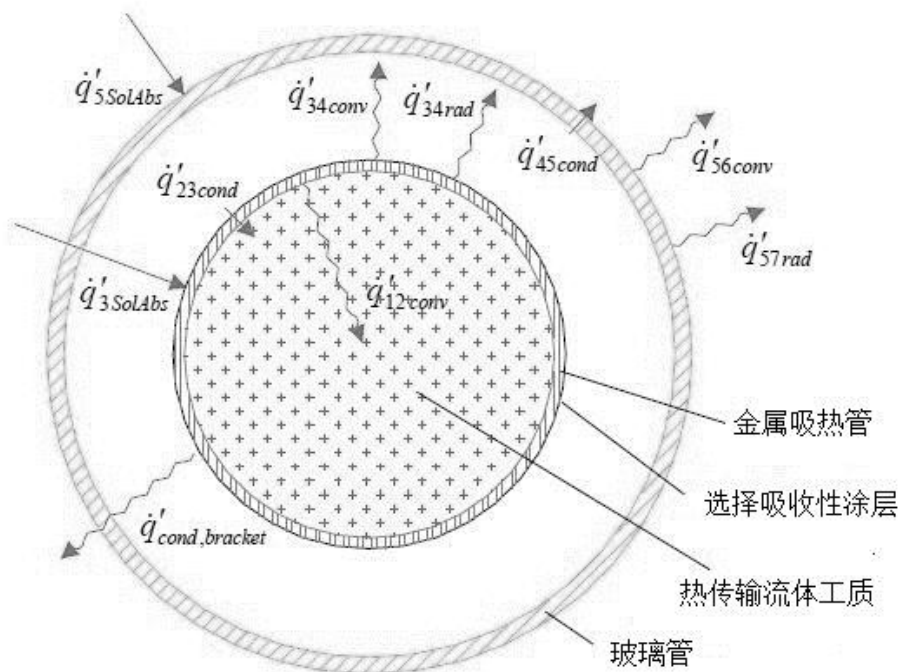


数学建模的知识点：槽式吸热管

真空集热管是槽式太阳能热发电的核心元件，其光热转换与传热是一个复杂传热过程，因此需要建立简化模型。

槽式真空集热管简化模型的假设：

- ① 玻璃管和金属管沿圆周方向的温度是相等的；
- ② 可以忽略支架的导热；
- ③ 流体的速度是恒定的。



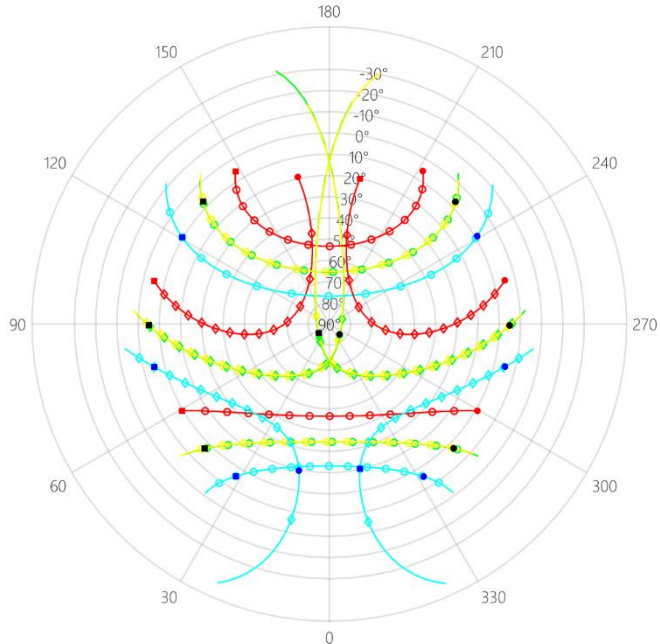
真空集热管一维能量守恒示意图

建模对象清晰，模拟结果较为精确，容易引导学生在合理假设条件下，将复杂的工程实际问题简化为数学模型。

实际应用的知识点：塔式聚光场



四个安装方位的定日镜在二分二至的方位角和高度角运动轨迹



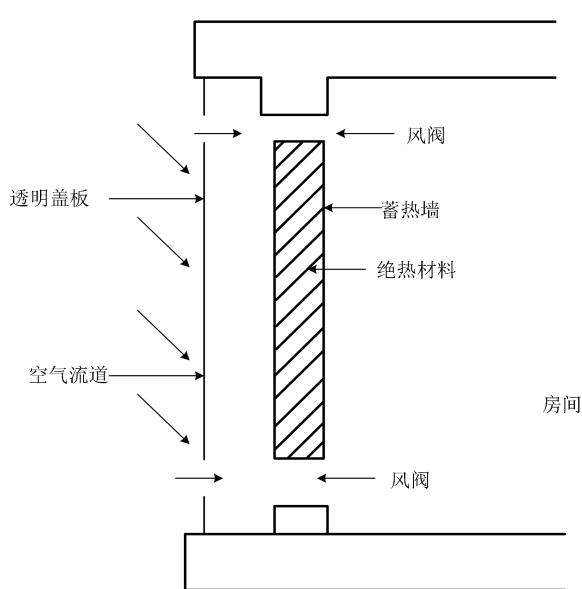
发展中的知识点：储热

太阳能热发电系统中通常配备3-15小时的储热能力，通过储热削峰填谷，保障稳定发电。

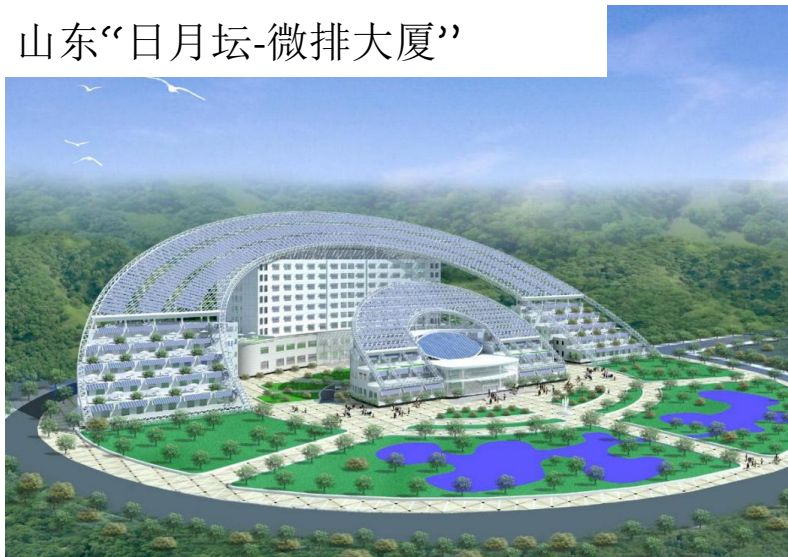
	显热储热	潜热储热	热化学储热
储能密度	0.02-0.03kWh/kg	0.05-0.1kWh/kg	0.5-1kWh/kg
储能温度	吸热阶段温度	放热阶段温度	温度范围较宽
储能周期	有限	有限	理论上无限长
运输	短距离	短距离	理论上无限长
现状	工业应用阶段	试验阶段	试验阶段
技术复杂程度	简单	中等	复杂
常用介质	导热油、熔融盐、 混凝土等	金属、相变胶囊、 功能流体等	金属氧化物、氢氧化 物等

与中低温利用结合的知识点：太阳能建筑

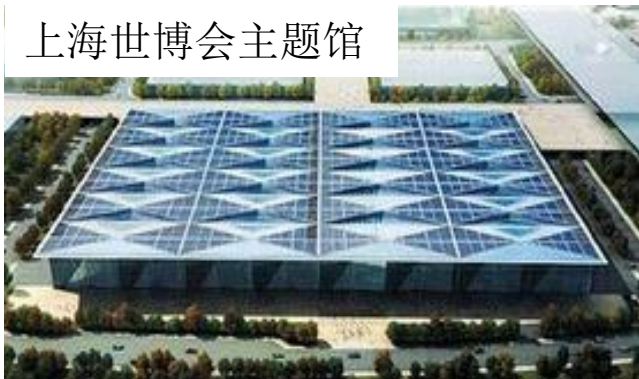
太阳能建筑是将太阳能利用与建筑有机结合，是绿色能源和新建筑理念两大革命的交汇点，前景广阔且贴近生活。



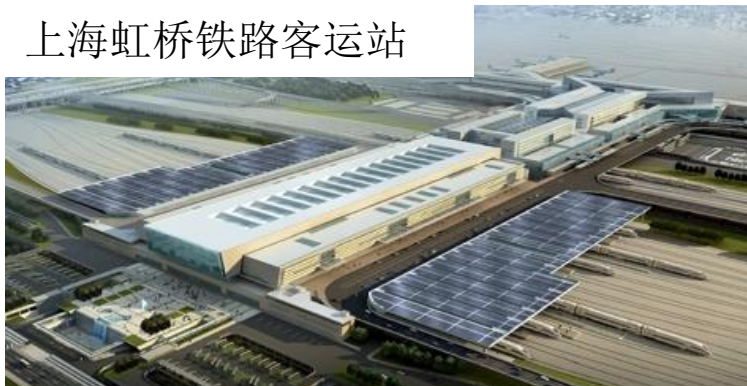
山东“日月坛-微排大厦”



上海世博会主题馆



上海虹桥铁路客运站



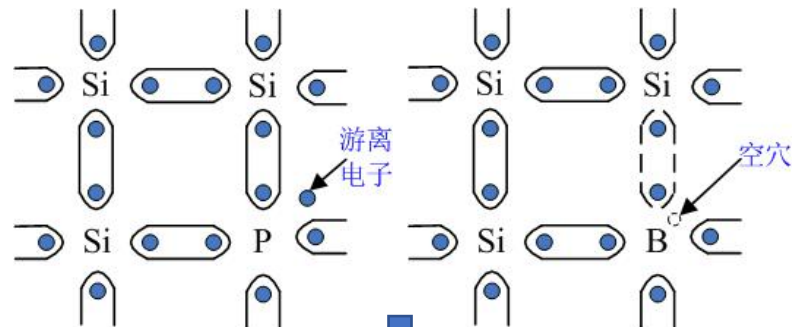
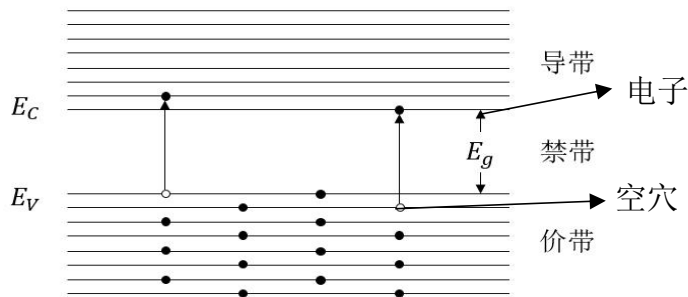
我国已经建设多处太阳能建筑，可组织学生参观，或鼓励学生自己设计小型太阳房

与电工电子区别：光伏电池发电

半导体材料：光伏电池的基础



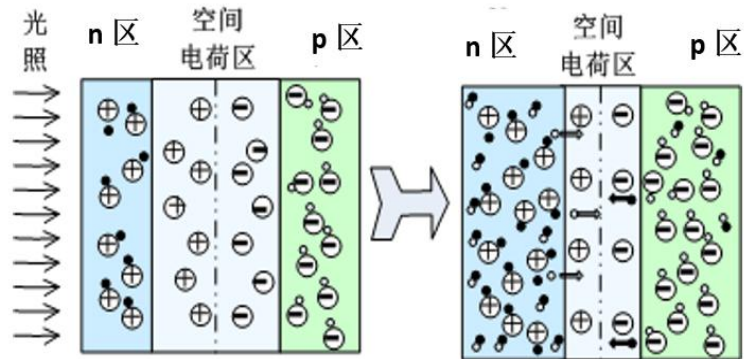
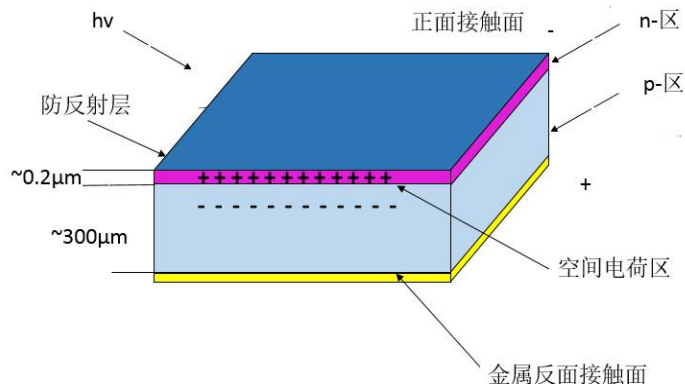
掺杂形成p型、n型半导体



太阳能电池的结构与工作原理



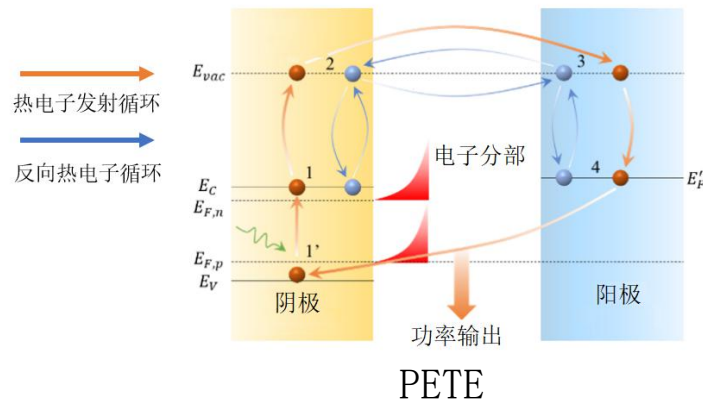
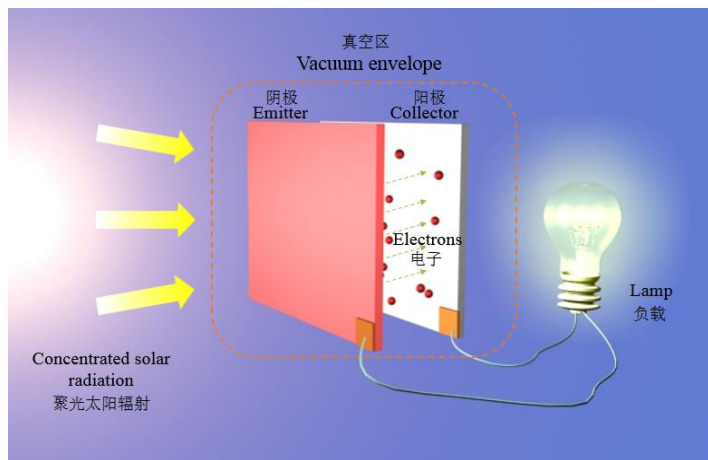
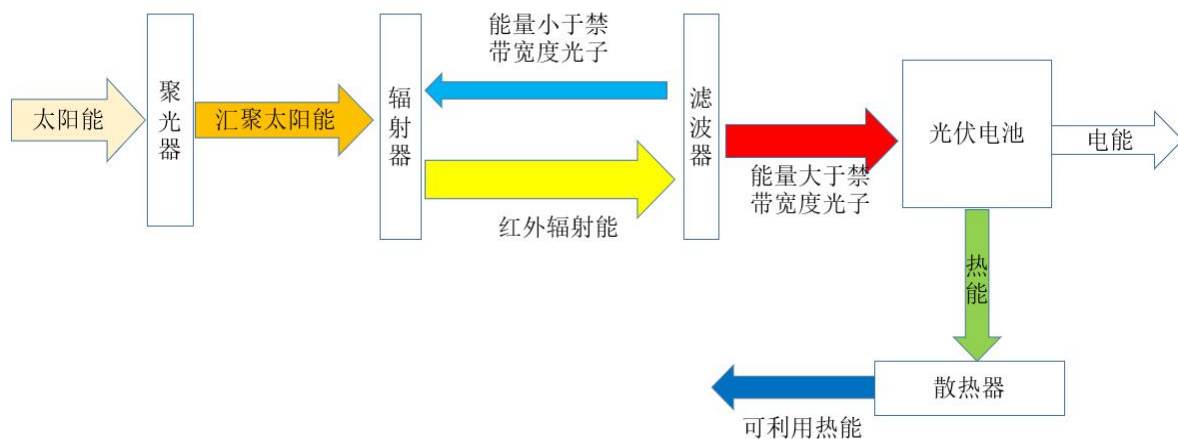
p-n结：光伏电池的基本结构



学科交叉知识点：热光伏、热发射

太阳能+半导体+量子力学 $\longrightarrow$ 热电子发电+PETE

太阳能光子增强热电子发射技术结合了半导体光子吸收和热电子发射效应，可全光谱地利用了太阳辐射能。



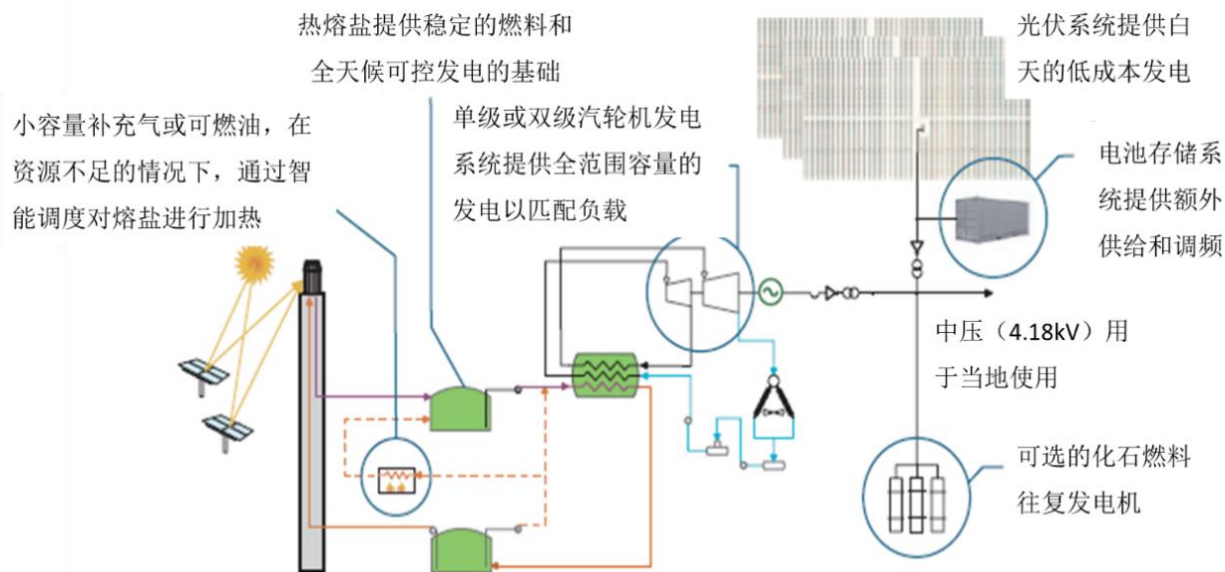
未来的发展趋势

光热
定位

需要配备储热容量更大的储热系统，用于稳定调峰

互补
系统

与光伏或生物质能、风能等可再生能源互补



来源: Gould,W.(2014), Solarreserve, Brief Status and R&D Directions, presentation at the IEA workshop on solar electricity roadmaps, Paris, 3 February.

光伏-光热互补系统

尚需进一步提高的几个方面

改进一：习题

作业题目侧重概念性，缺少引导性和开拓性，定量计算较少。

例1：如何解决或避免塔式熔盐发电站的弃光问题。

例2：如以镇江（119.45E，32.20N）为例，描述太阳赤纬角、太阳高度角、太阳方位角和时角的日变化特点和年变化特点。

改进二：实习与课程设计

增加相关实验和课后实习，如带领学生参观实验室和青山湖试验基地，可利用太阳能模拟灯进行聚光测试等实验，鼓励学生学习ANSYS，MATLAB和ASAP等软件。

改进三、网络资源

太阳能产业发展很快，很多数据需要及时更新，可以将更新较快的内容编辑成数字资源，上传到网盘或公众号，方便更新和课后浏览。

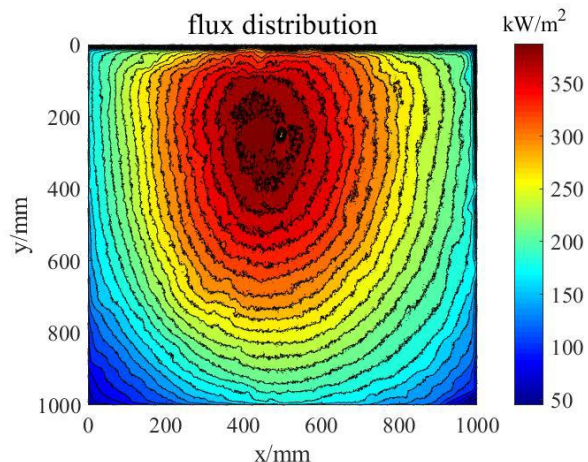
浙江大学青山湖（杭州）塔式研究平台

太阳能高温集热 900°C

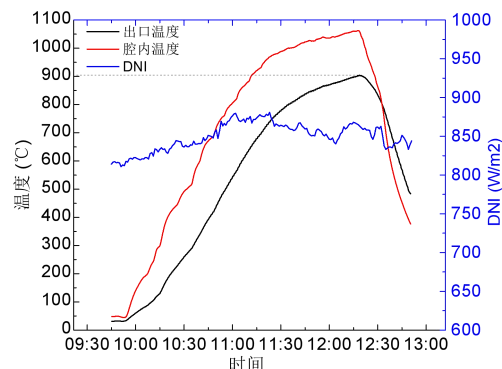
- 聚光塔高40m
- 2000m^2 聚光镜场
- 最大能量1MW



- DNI稳定在约 $850\text{W}/\text{m}^2$



聚光后的能流分布图



- 腔内平均温度 1060°C
- 吸热器出口温度 900°C

感谢前辈的指导与鼓励！ 感谢中国电力出版社！

