



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

Lecture 5

主讲：刘俊

电力工程系



电气工程学院

XJTU school of electrical engineering

第三章 光伏发电特性分析

3.1 光伏电池的物理基础

掌握太阳能光伏电池的光生伏特效应原理。

3.2 光伏电池的模型与等值电路

掌握光伏电池数学模型和工程分析等值电路。

3.3 太阳能光伏电池的输出外特性

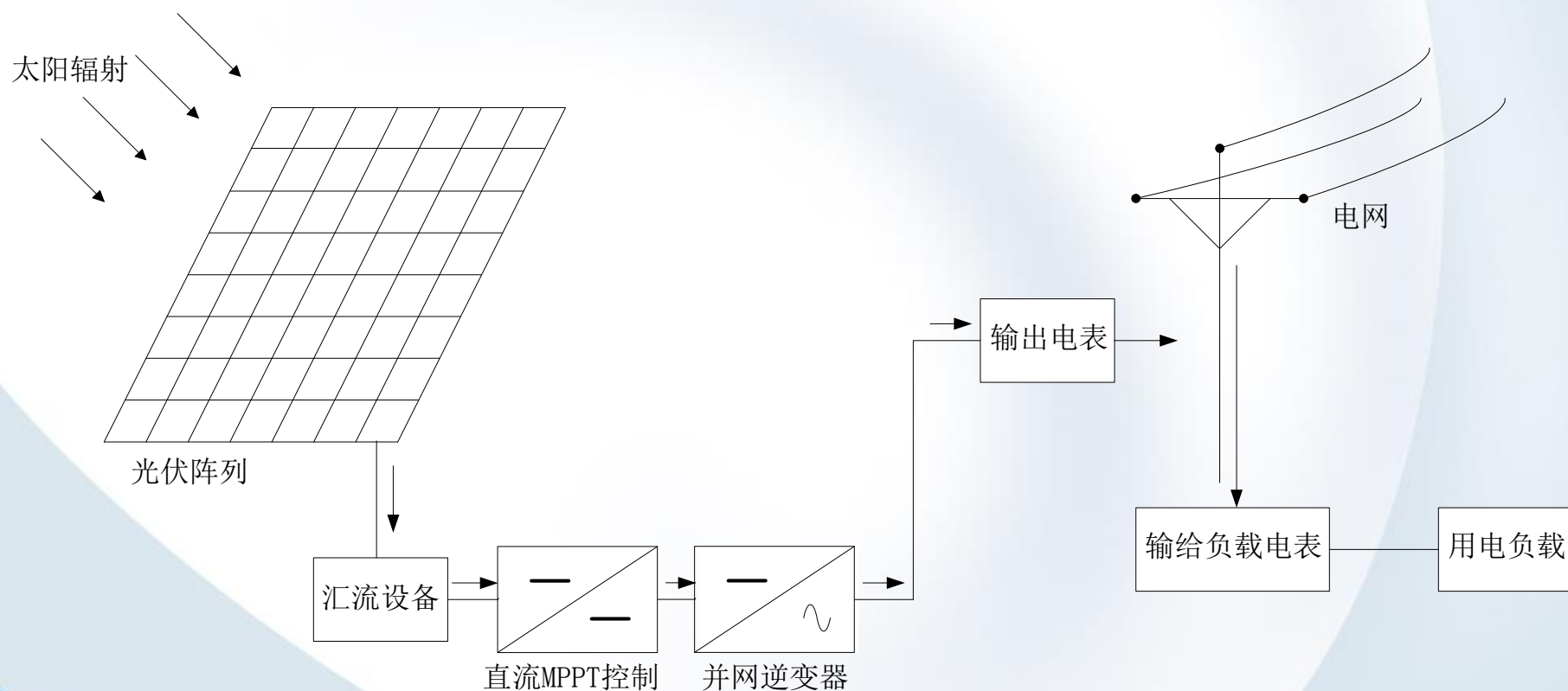
掌握不同参数下光伏电池I-V和P-V特性曲线。

3.4 光伏发电的控制

掌握最大功率点跟踪方法。

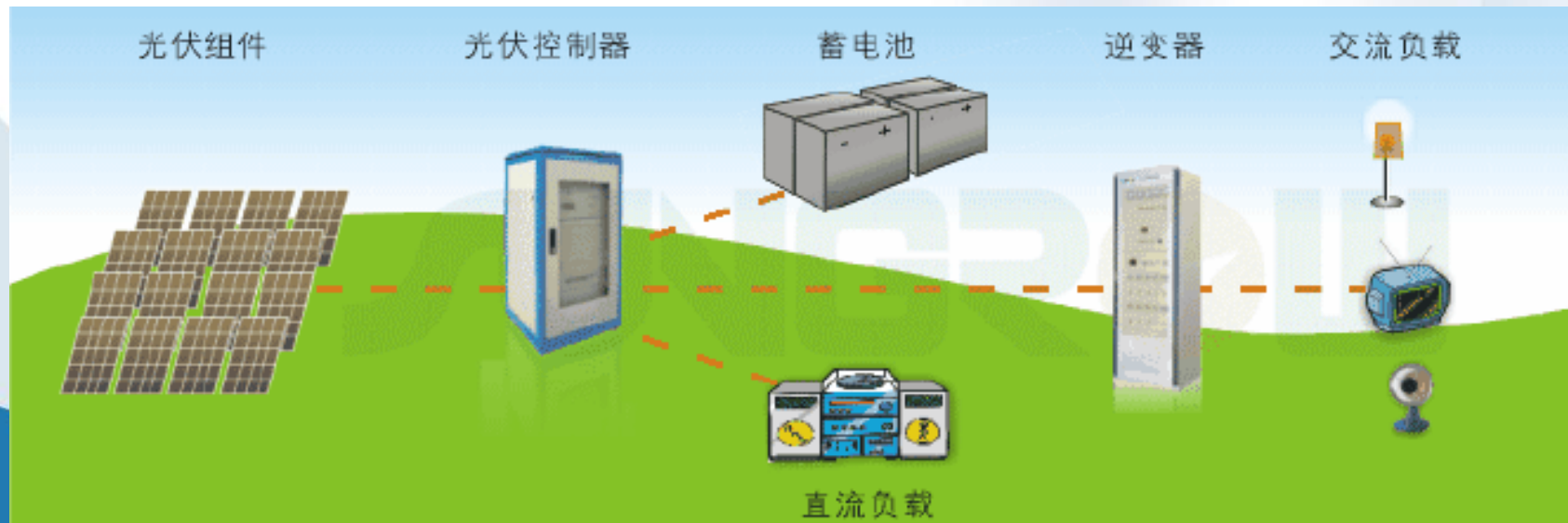
3.1 光伏电池的物理基础

■ 光伏电站整体结构



光伏电站整体结构示意图（并网型）

并网型 V_S 独立型光伏电站



1、并网光伏发电系统一般包括哪些设备？

- ☒ A 光伏阵列
- ☒ B 光伏逆变器
- ☒ C 光伏控制器
- ☐ D 储能系统

2、独立光伏发电系统一般包括哪些设备？

- ☒ A 光伏阵列
- ☒ B 光伏逆变器
- ☒ C 光伏控制器
- ☒ D 储能系统

提交

- 光伏发电（Photovoltaic）系统设备：
 - 太阳能光伏阵列
 - 光伏逆变器
 - 控制器
 - 直流MPPT控制
 - 充放电控制（独立光伏系统使用）
 - 储能设备（独立光伏系统使用）
 - 物理储能主要包括飞轮储能、抽水蓄能、压缩空气蓄能、超导磁存储，相变储能等
 - 化学储能主要分为：各类蓄电池、超级电容器、液流电池，可再生燃料电池等

3.1 光伏电池的物理基础

■ 并网型光伏发电系统

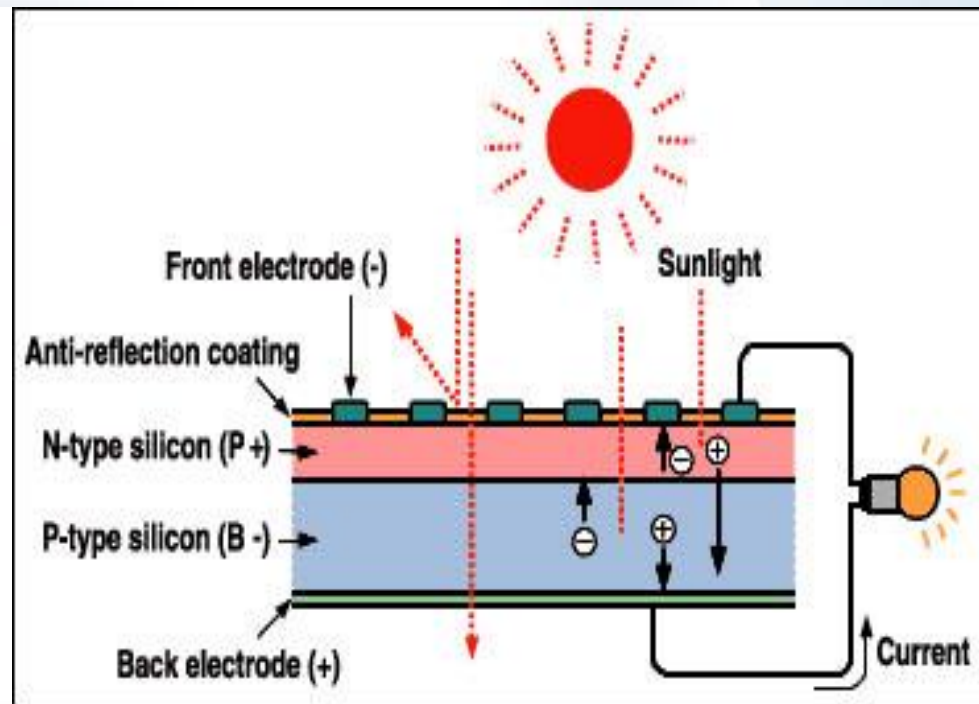
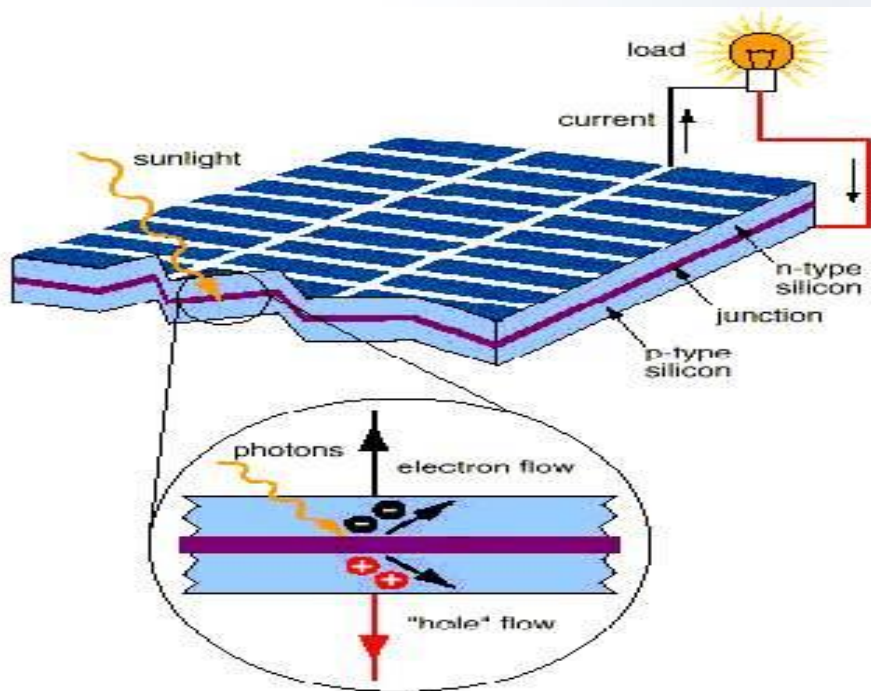
- 并网型光伏的特点是光伏阵列产生的直流电经过并网逆变器转换成符合市电电网要求的交流电之后[直接接入市电网络](#)，并网系统中PV方阵所产生电力除了供给交流负载外，多余的电力反馈给电网。

■ 独立（离网）型光伏发电系统

- 离网型光伏是由光伏组件发电，经控制器对[蓄电池等储能系统](#)进行充放电管理，并给直流负载提供电能或通过逆变器给交流负载提供电能的一种新型电源。广泛应用于环境恶劣的高原、海岛、偏远山区及野外作业，也可作为通讯基站、广告灯箱、路灯等供电电源。

一、太阳能光伏发电的原理

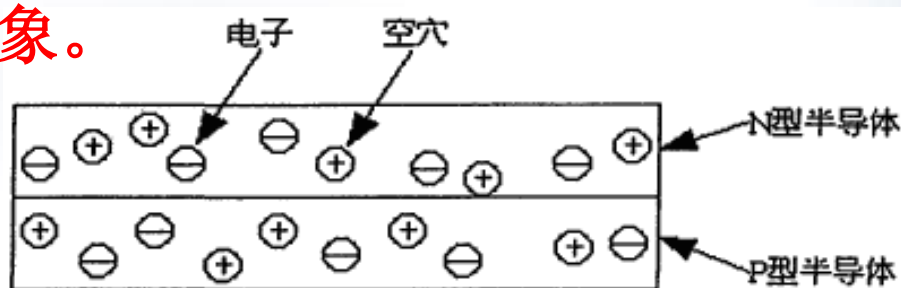
◆ 1. 光生伏特效应



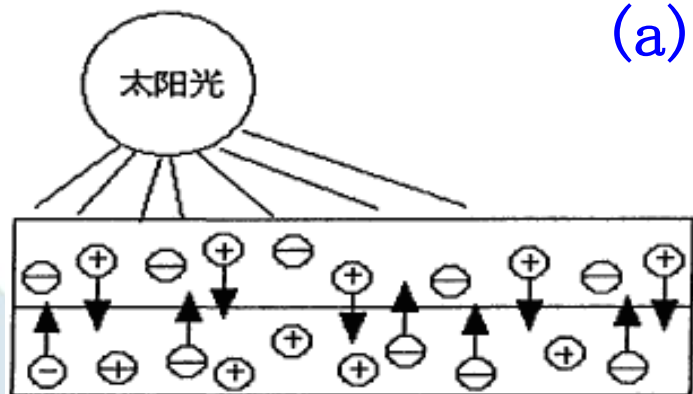
光生伏特效应太阳能电池的工作原理

◆ 光生伏特效应

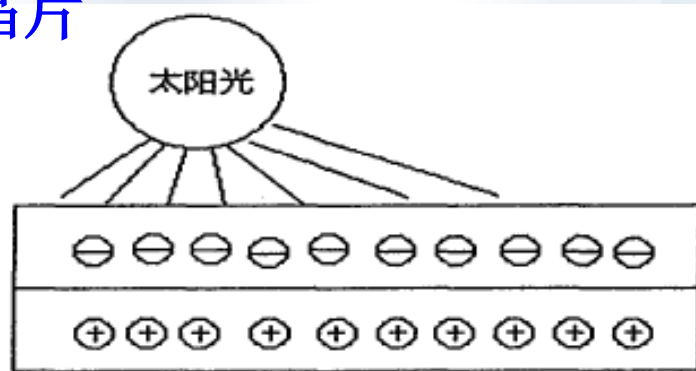
- 概念：光生伏特效应是指半导体在受到光照射时产生电动势的现象。



(a) 半导体晶片



(b) 带正电的空穴向P 型半导体区移动，带负电的电子向N型半导体区移动



(c) 电子从N 区负电极流出，与P 区正电极空穴的正电荷形成电流环路

“光生伏特效应” 原理

- 当光照射到半导体光伏器件时，若光子能量大于半导体材料的禁带宽度，将在器件内产生电子-空穴对，内部P-N结附近生成的载流子没有被复合而能够到达空间电荷区；
- 受内建电场作用（P-N结空间电荷区或称势垒区中的电场，也称势垒电场），使得电子流入N区，空穴流入P区；
- 结果使N区储存了过剩的电子，P区有过剩的空穴，它们在P-N结附近形成与内建电场方向相反的光生电场；
- 光生电场除了部分抵消内建电场的作用外，还使P区带正电，N区带负电，在N区和P区之间的薄层就产生电动势，这就是光生伏特效应。

2. 光伏发电的优点

- 首先光伏发电具有太阳能（包括太阳能热利用）的所有优点：
 - （1）储量丰富
 - （2）维持长久
 - （3）分布广泛
 - （4）维护方便，运行成本低
 - （5）清洁，无污染

2. 光伏发电的优点

- 从光伏发电系统的角度来看：
 - (1) 运输、安装容易
 - (2) 运行、维护简单
 - (3) 安全，可靠，寿命长
 - (4) 清洁，环境污染少（同太阳能利用的优点）
- 但是，也存在明显的不足：
 - (1) 能量分散（能量密度低）
 - (2) 能量不稳定
 - (3) 能量不连续

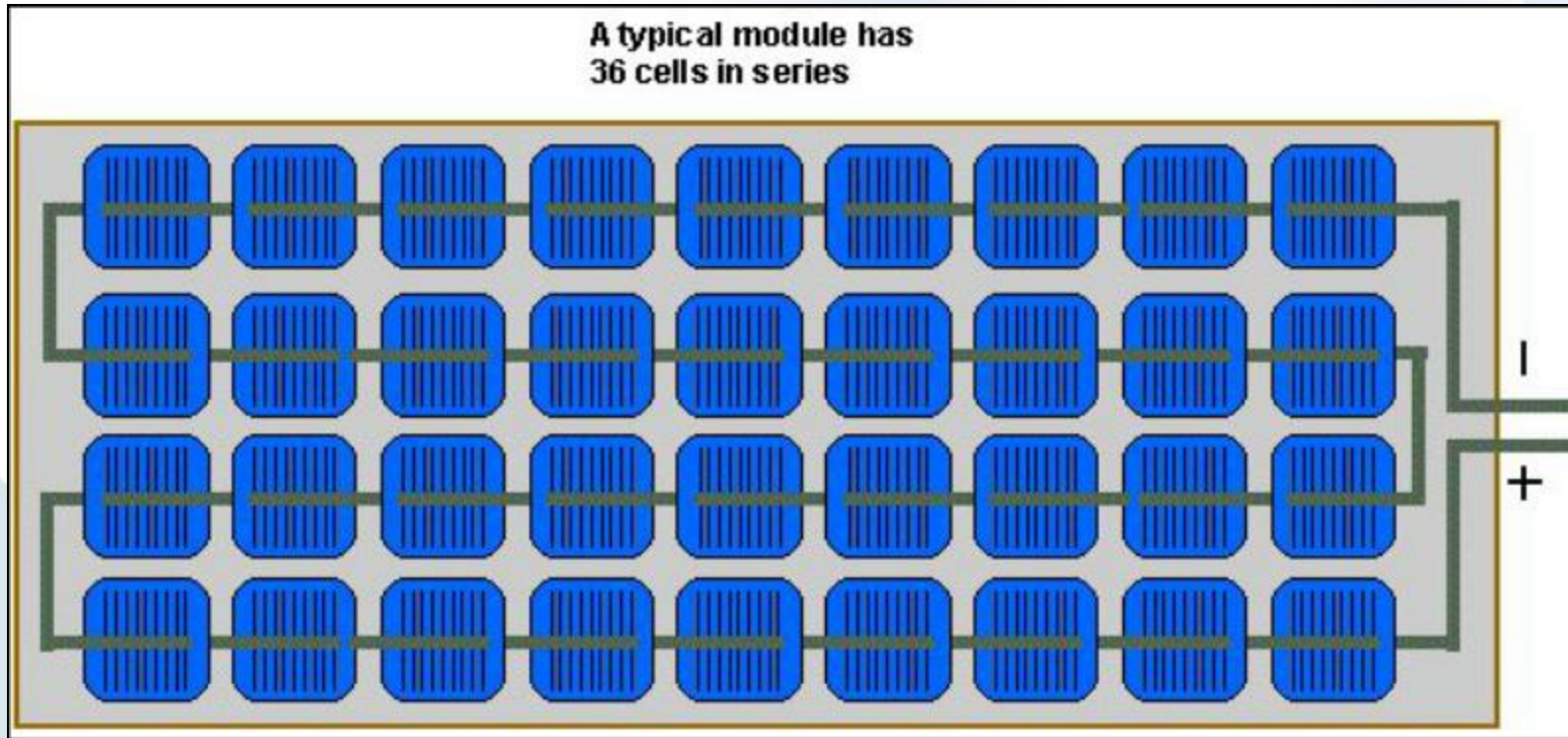
二、光伏电池

- 光伏单体（组件）——
光伏**电池**（**PV Cell**）
- 光伏单体组合——光伏
模块（**PV Module**）
- 光伏模块串并联——光
伏**阵列**（**PV Array**）
- 多个光伏阵列汇流——
光伏**电站**（**PV Station**）





- 典型的36块0.6V光伏电池串联组成输出约21V的光伏模块示意图（互连条连接）：



• 1. 太阳能光伏电池分类:

— 晶硅太阳能电池 (元素半导体)



➤ 单晶硅 (Si)

➤ 多晶硅

➤ 非晶体电池

— 多元化合物薄膜太阳能电池



➤ 硫化镉、碲化镉

➤ 砷化镓 (GaAs)

➤ 铜铟硒 (CIS)

➤ 染料敏化TiO₂纳米薄膜太阳能电池

— 新型太阳能电池



➤ 聚合物多层修饰电极型

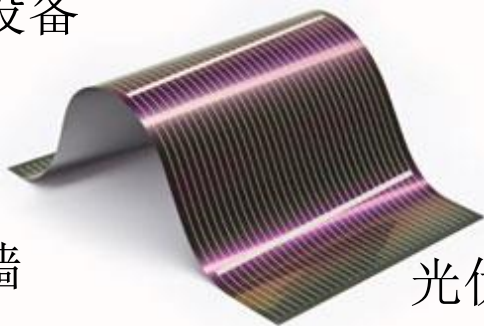
➤ 高太阳能转化率电池

➤ 柔性太阳能电池

薄膜光伏电池



← 可穿戴设备



光伏幕墙



光伏车棚



光伏电站

薄膜光伏电池的特点

- 优势：

在柔性衬底上制备

可卷曲折叠

不怕摔碰

重量轻

弱光性能好

薄膜光伏电池的应用

- 应用前景：
 - 薄膜太阳电池可以做成柔性的，铺贴在汽车表面、家庭内、外墙面等任意形状的物体上；
 - 因为可以做成透明的，则能够用于需要照明的任何建筑物上，比如候车室、火车站站台等；
 - 由于弱光效应好，可以应用于室内光照强度低的地方，比如应急照明灯、微型电子办公用品等。

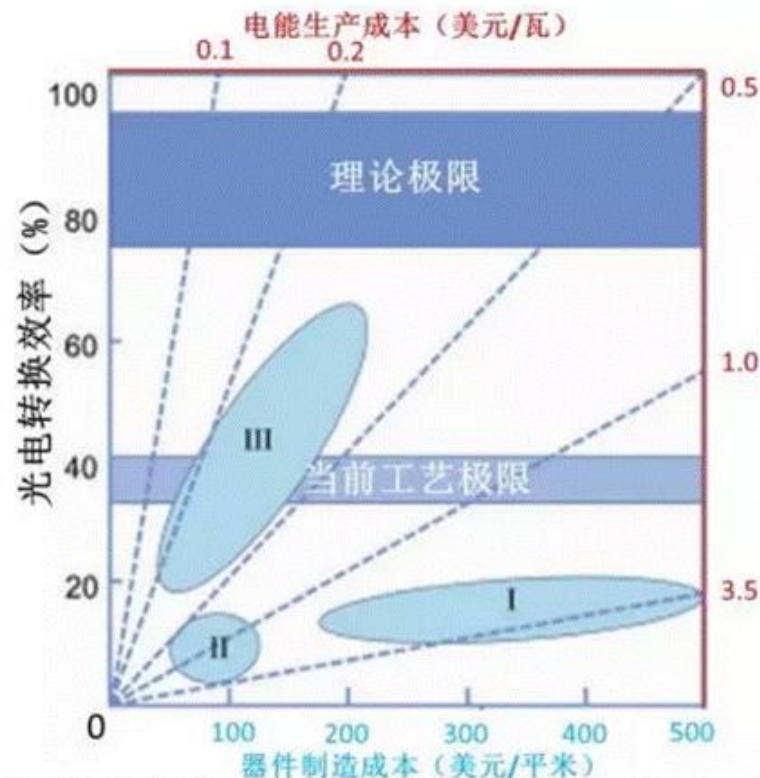
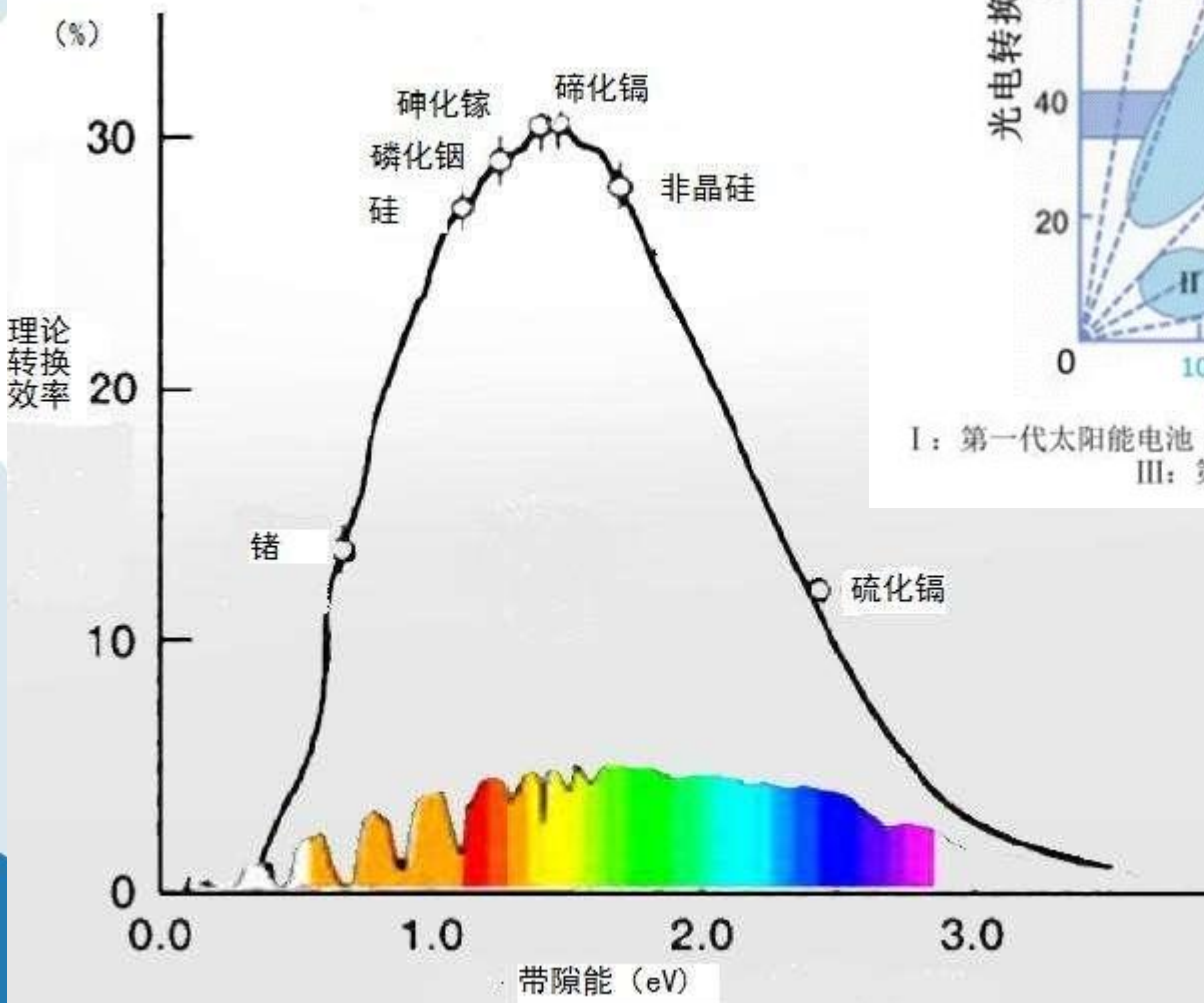
2. 光伏材料

- 光伏发电对光伏材料的要求是：
 - 要有较高的光电转换效率；
 - 材料本身对环境不造成污染；
 - 材料便于工业化生产；
 - 材料的性能要稳定等。
- 制造光伏电池的半导体材料，已知的有十几种。第一代光伏电池主要基于硅晶片，采用单晶硅和多晶硅材料制成，目前仍是光伏产品市场的主流。

光电转换效率

- 晶硅电池：
 - 单晶硅太阳能电池目前的光电转换效率为**19%**左右，最高的达到**24%**。
 - 多晶硅太阳能电池约**17%**左右。
 - 非晶体太阳能电池国际先进水平为**10%**左右（硅材料消耗很少，电耗更低，成本低重量轻，便于大规模生产，主要优点还有在弱光条件也能发电）。
- 化合物薄膜：
 - 有机薄膜太阳能电池**11.0%**。
 - 砷化镓（**GaAs**）III-V化合物电池达**28%**。
 - 美国再生能源实验室(NREL) CIGS电池的实验室转换效率达到**19.9%**。

光电转换效率



I: 第一代太阳能电池 (硅片技术); II: 第二代太阳能电池 (薄膜技术); III: 第三代太阳能电池 (高效薄膜技术)

光电转换效率

- 新型太阳能电池

- 美国太阳能电池单元设计开发企业Solar3D宣布试制出了采用立体构造的硅太阳能电池单元，转换效率达到了25%以上。
- 夏普对化合物三接合型太阳能电池单元上作306倍聚光，实现了43.5%的转换效率。
- 东京大学将与美公司共同开发同时使用太阳光和热的发电模块，能量转换效率可提高至45%左右。

- 3.光伏系统辅助设备

- 太阳能光伏阵列
 - 固定式光伏阵列
 - 跟踪式光伏阵列
 - 聚光光伏阵列



- ✓ 单轴跟踪系统
 - 水平单轴
 - 垂直单轴
 - 斜单轴
- ✓ 双轴跟踪系统

光伏太阳跟踪系统（仿向日葵原理）



双轴



斜单轴



单体式平单轴



联动式平单轴

光伏太阳跟踪系统



三、 不同类型光伏发电系统

- 1.独立光伏发电系统

- 五种运行方式：

- (1) 有负载需求，有足够的光照强度，光伏阵列发出的电能小于负载需求。

- (2) 有负载需求，有足够的光照强度，光伏阵列发出的电能大于负载需求，且多余的电能可以被储能装置完全吸收。

- 2.并网光伏发电系统

三、不同类型光伏发电系统

• 1.独立光伏发电系统

— 五种运行方式：

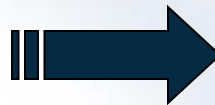
(3) 有负载需求，有足够的光照强度，光伏阵列发出的电能大于负载需求，但多余的电能不能被储能装置完全吸收。

(4) 有负载需求，无足够的光照强度，光伏阵列不能发出电能，系统仅仅由储能装置独立向负载供电。

(5) 无负载需求，有足够的光照强度，此时系统没有负荷，可以简化为一套充电系统。

• 2.并网光伏发电系统

– 1)分布式并网光伏系统



典型应用：

住宅用并网
光伏系统

– 2)集中式并网

- 有逆流型并网系统
- 无逆流型并网系统
- 切换型并网系统
- 直、交流型并网系统
- 混合用系统

- 1)集中式并网光伏系统分类

典型应用:

光伏电站

➤按接入方式分类

- 可逆接入电站
- 不可逆接入电站

➤按装机容量分类

- 小型光伏电站 ($<1\text{MWp}$)
- 中型光伏电站 ($1\sim30\text{MWp}$)
- 大型光伏电站 ($>30\text{MWp}$)

➤按与交流电网的耦合类型分类

- 直接耦合系统
- 工频隔离系统
- 高频隔离系统
- 高频不隔离系统

➤按逆变器控制方法分类

- 基于电压定向的矢量控制
- 基于虚拟磁链定向的矢量控制
- 基于电压定向的直接功率控制
- 基于虚拟磁链定向的直接功率控制

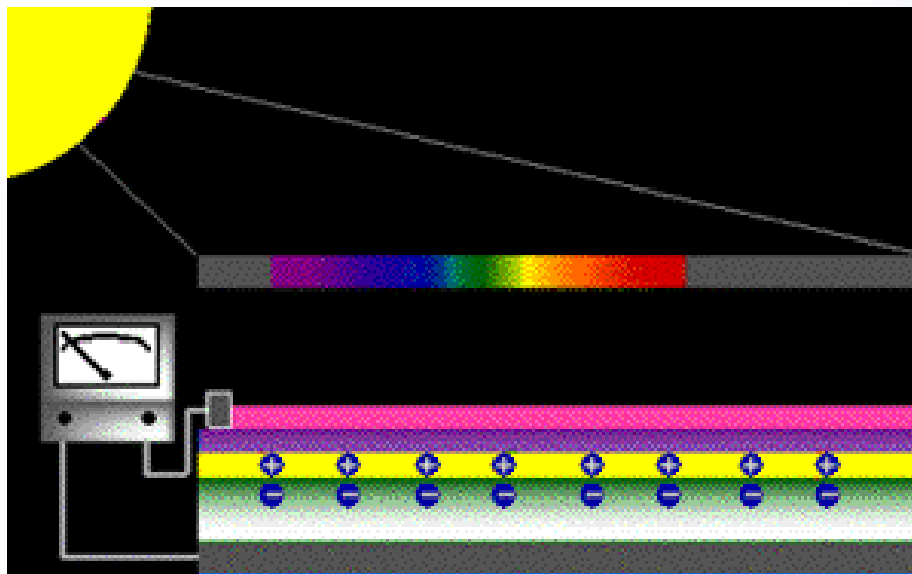


3.2 光伏电池的模型与等值电路

■ 光伏电池模型概述

- 光伏组件是将**太阳能**转换成**电能**的核心装置，直接决定了太阳能装置的效率。其中最主要的是光伏组件的电压电流特性。
- 根据电压电流特性可计算得到光伏组件的输出功率。
- 光伏电池的电压电流特性受其它因素的影响较大，如**辐照度**、**温度**等。太阳辐照度是指单位时间内、单位面积上的太阳辐射能量，又与太阳赤纬角、太阳高度角、日地距离等相关。

◆建立光伏电池模型的意义



- 巩固 “光生伏特效应” 原理
- 重点：推导光伏电池数学模型
 - 引出 光伏电池输出外特性： $I-U$ 曲线、 $P-U$ 曲线
 - 作为 光伏电池的直流最大功率跟踪控制、光伏逆变器并网控制模型的基础
 - 作为 潮流计算模型、概率模型的基础

一、光伏术语

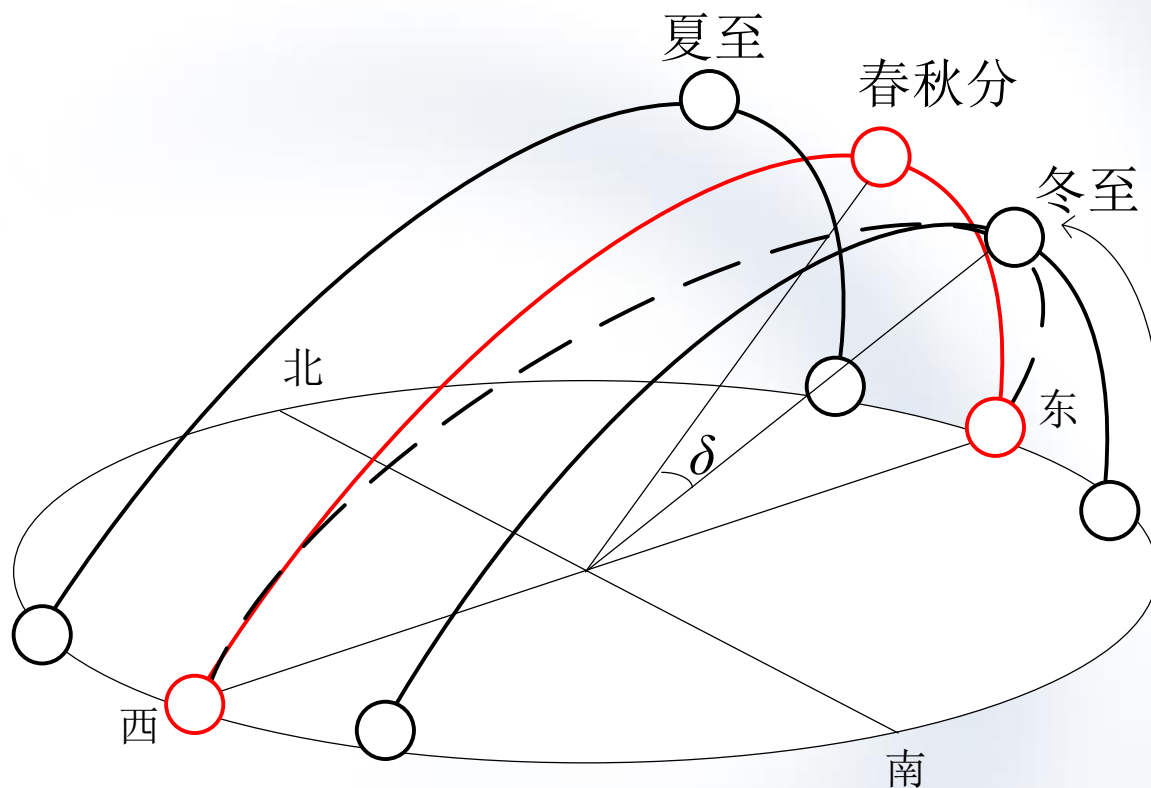
- 太阳赤纬角

- 即黄赤交角：是地球公转轨道面（黄道面）与赤道面（天赤道面）的交角。目前地球的黄赤交角最大值约为 $23^{\circ} 26'$ ，黄赤交角并非不变的，它一直有微小的变化，但由于变化较小，所以短时间可以忽略不计。

- 太阳高度角

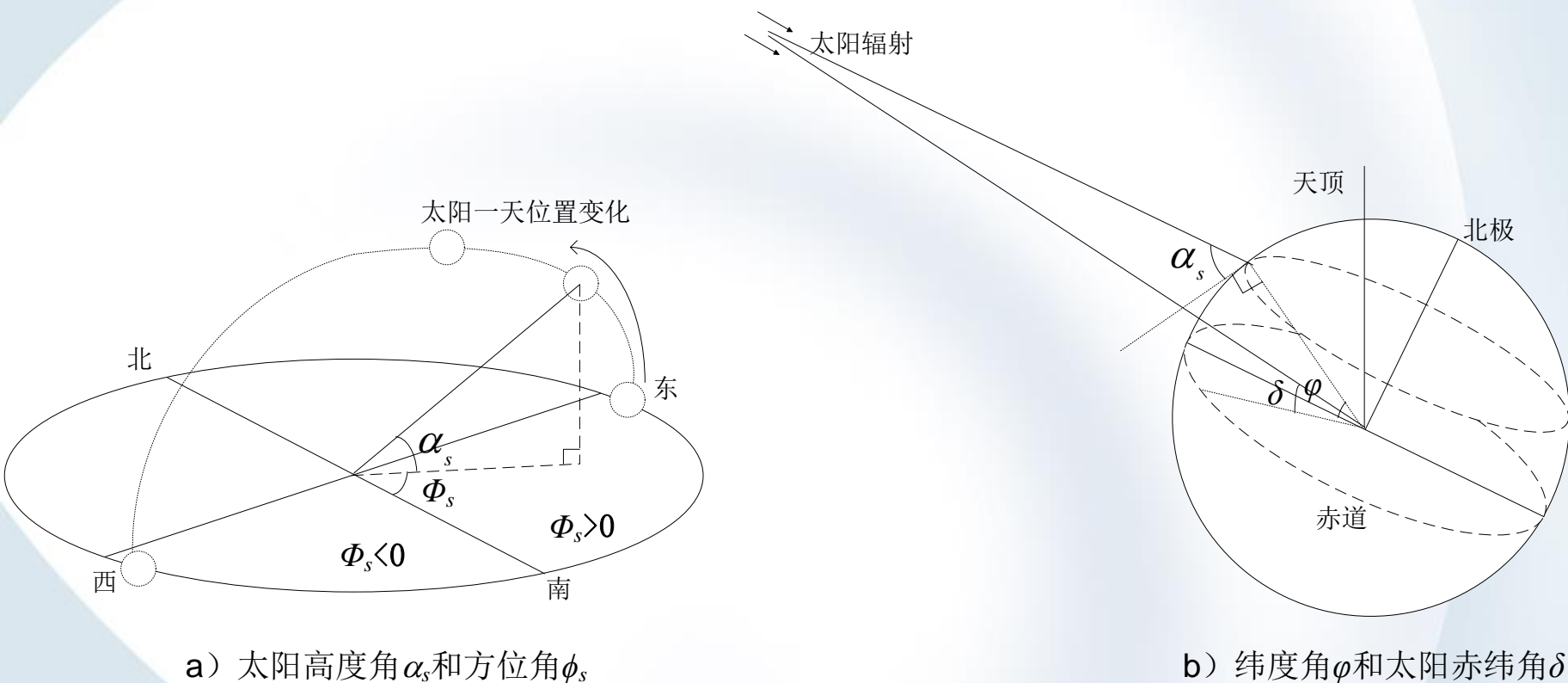
- 对于地球上的某个地点，太阳高度角是指太阳光的入射方向和地平面之间的夹角，专业上讲太阳高度角是指某地太阳光线与该地作垂直于地心的地表切线的夹角。太阳高度角简称高度角。

不同季节的赤纬角示意图



北半球春秋分、夏至、冬至太阳赤纬角示意图

太阳高度角及太阳赤纬角



太阳高度角 α_s 、方位角 ϕ_s 和赤纬角 δ 示意图

二、 太阳辐射强度数学模型（了解）

◆ 太阳高度角及太阳赤纬角

由太阳赤纬角、纬度角、方位角可推出太阳高度角：

$$\alpha_s = \arcsin[\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega]$$

其中，太阳赤纬角，可由Cooper方程近似计算：
(n 为一年中的日期序号)

$$\delta = 23.45 \sin[360(284 + n) / 365]$$

◆ 日照时间

日出、日落时刻可由下式得出：

$$T_{up} = \arccos(\tan \varphi \tan \delta) / 15$$

$$T_{down} = 24 - \arccos(\tan \varphi \tan \delta) / 15$$

◆ 太阳入射角与天顶角

假设电池板安装方向为正南方，倾角（电池板与水平面的夹角）为 β ，太阳入射角 θ 与方位角 ω_s 、纬度角 φ 、太阳赤纬角 δ 之间的关系为：

$$\cos \theta = \cos \delta \cos \omega_s \cos(\varphi - \beta) + \sin \delta \sin(\varphi - \beta)$$

◆ 日地距离对太阳辐射的影响

一年之中，随着时间日地距离在不断变化，使得到达地球上方大气层单位平面太阳辐射强度（Solar Radiation） R_0 也有 $\pm 3\%$ 的变化， R_0 计算公式如下：

$$R_0 = R_{sc} [1 + 0.033 \cos(360n / 365)]$$

◆ 云层和气候的影响

云层对太阳辐射强度的影响，可以通过澄清度指数 k_t 和散射指数 k 来表示：

$$k_t = R_t / R_0$$

$$k = R_d / (R_n + R_d) = R_d / R_t$$

◆ 电池板的安装倾角

倾斜面上的辐射强度可表示为：

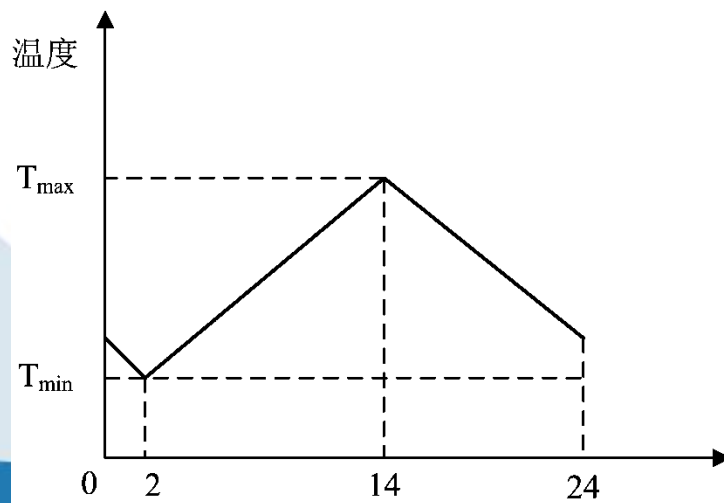
$$R_\beta = [r_b + (\frac{1 + \cos \beta}{2} - r_b)k + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}]R_t$$

1. 一天中太阳的总辐射量 (Solar Radiation, Irradiation)

太阳辐射总量可按式计算:

$$R_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} R_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \times \left(\cos \delta \sin \omega_s \cos \varphi + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \delta \sin \varphi \right)$$

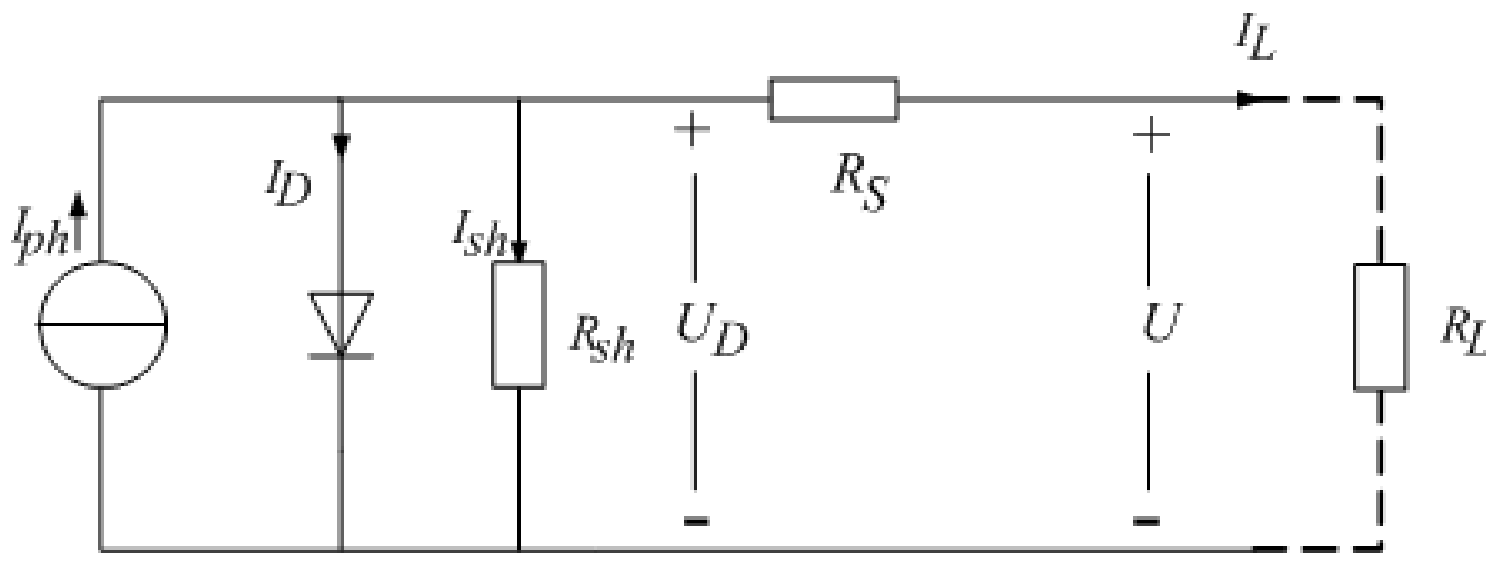
2. 温度模型(需对太阳辐射强度进行修正)



$$T(t) = \begin{cases} T_{\min} - (T_{\max} - T_{\min}) \cdot (t-2)/12, & 0 < t \leq 2 \\ T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \cdot (t-2)/12, & 2 < t \leq 14 \\ T_{\min} - (T_{\max} - T_{\min}) \cdot (t-26)/12, & 14 < t \leq 24 \end{cases}$$

三、 光伏电池的数学模型

- 1. 光伏电池等效电路



光伏电池的实际等效电路图

■ 光伏电池实际等效电路分析

$$I_{sh} = U_D / R_{sh}$$

I_{sh} ——光伏电池旁路电流/A;

R_{sh} ——光伏电池等效旁路电阻/ Ω 。

$$U_D = U + I_L R_s$$

U_D ——等效二极管的端电压/V;

U ——负载两端的电压/V;

I_L ——光伏电池输出的负载电流/A;

R_s ——光伏电阻等效串联电阻/ Ω 。

■ 光伏电池实际等效电路分析

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU_D}{AkT}\right) - 1 \right] \longrightarrow \text{P-N结电流方程}$$

I_D ——流经二极管的电流/A;

I_0 ——等效二极管P-N结中反向饱和电流/A;

q ——电子电荷, $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$;

A ——P-N结的曲线常数, 一般在1-2之间;

k ——波尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23}\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$;

T ——光伏电池温度/K。

■ 光伏电池实际等效电路分析，由KCL定律：

$$I_L = I_{ph} - I_D - I_{sh}$$


I_{ph} ——光生电流/A；

前式代入， $I_L = I_{ph} - I_D - I_{sh}$ 可得负载电流表达式如下：

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + I_L R_s)}{AkT} - 1 \right] \right\} - \frac{U + I_L R_s}{R_{sh}}$$

部分参数如 I_{ph} 、 I_0 、 R_s 、 R_{sh} 和 A 等光伏电池原始参数，均基于数学推导，实际中很难得到它们的确切值，因此光伏电池模型需要做进一步的处理，通过实验易测得的参数来表征。

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(U + I_L R_s)}{AkT}\right] - 1 \right\}$$



近似后：

■ 2. 工程用数学模型

$$I_L = I_{sc} \left[1 - C_1 \exp\left(\frac{U}{C_2 U_{oc}} - 1\right) \right]$$

- 忽略式中最后一项，这是由于在通常情况下等效并联电阻较大，约几千欧，使得该项值远小于光生电流；
- 设定光生电流 I_{ph} 等于短路电流 I_{sc} ，因为通常情况下等效串联电阻 R_s 远小于二极管正向导通电阻。

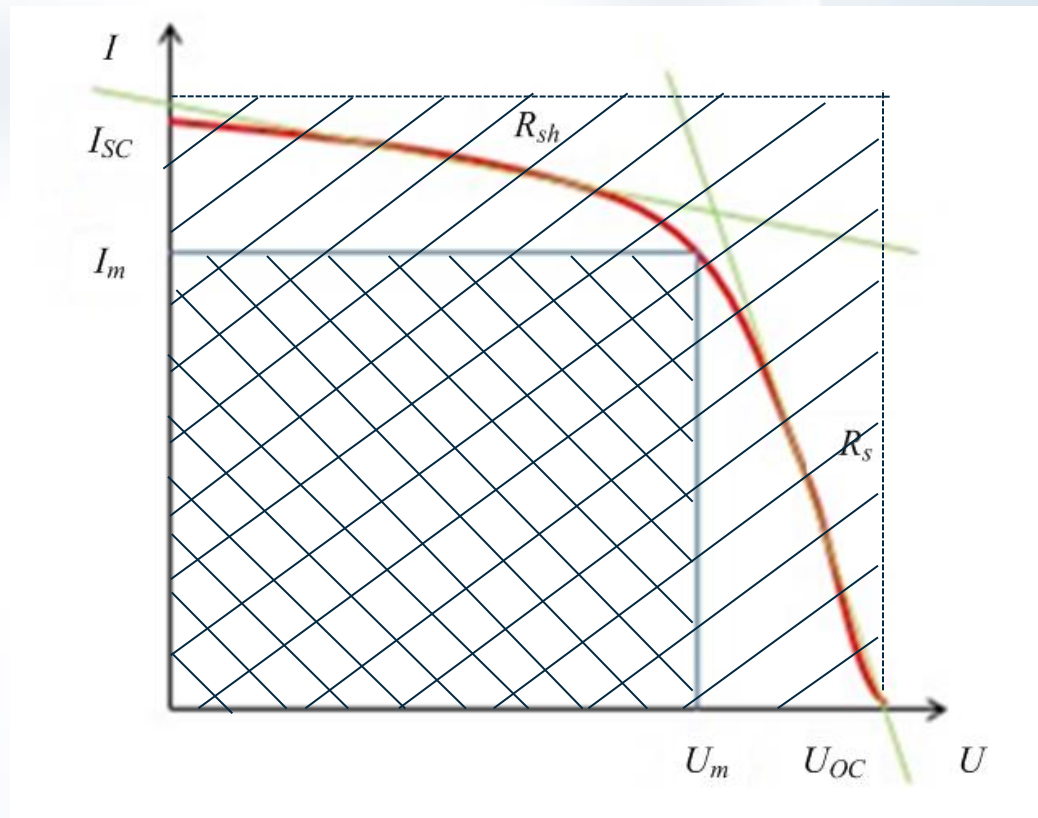
思考题：怎么获取工程用光伏电池发电外特性数学模型即I-U特性公式中的两个常数 C_1 ， C_2 ？并自行推导工程用光伏电池的功率模型 P - U 特性。

■ 3. 几个重要技术参数（能观测的）

注：厂家参数为标准电池温度 $T_{ref}(25^{\circ}\text{C})$ 和标准光照强度 $S_{ref}(1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ 下的测试结果

- 1) 开路电压 U_{oc}
- 2) 短路电流 I_{sc}
- 3) 最大功率点电压 U_m
- 4) 最大功率点电流 I_m
- 5) 峰值功率 P_m
- 6) 填充因子 FF

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{oc} I_{sc}}$$



太阳能光伏电池的 I - U 特性曲线

初始条件，设定光生电流 I_{ph} 等于短路电流 I_{sc} ，在开路工作状态下： $I_L=0$ ， $U=U_{oc}$ ；在最大功率点处： $I_L=I_m$ ， $U=U_m$ ；

$$\begin{cases} C_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \exp(1 - \frac{U_m}{C_2 U_{oc}}) \\ C_2 = (\frac{U_m}{U_{oc}} - 1) / \ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \end{cases} \begin{matrix} \xrightarrow{\quad} C_1 = \exp[1 - \ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) / (\frac{U_m}{U_{oc}} - 1)] \\ \xleftarrow{\quad} C_1 = \exp(1 - \frac{1}{C_2}) \end{matrix}$$

■ 光照强度增大，太阳辐射能大，光生电流大，光伏电池的出力增大。

■ 电池温度升高，太阳能电池禁带宽度变窄，所以开路电压 U_{oc} 下降；因为禁带宽度变窄的同时会有更多电子可以从价带跃迁到导带，所以短路电流 I_{sc} 升高；温度对 U_{oc} 影响较明显，对 I_{sc} 影响较小，所以总体上温度升高，电池功率下降。

■ 4. 考虑 S 和 T 变化后的光伏电池模型

$$T = T_{air} + K_s S$$

T ——电池的实际温度/ $^{\circ}\text{C}$;

T_{air} ——环境温度/ $^{\circ}\text{C}$;

K ——常数，取为 $0.03^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$;

S ——实际的光照强度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

影响电池温度的因素：

- 太阳能热辐射
- 光伏电池内阻发热
- 空气的流通

在**实际环境温度和实际太阳辐射强度**下，光伏电池模型的
温度和光照强度应加以修正：

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_{ref} \\ \Delta S = S / S_{ref} - 1 \end{cases}$$

因此，四个光伏电池技术参数将会发生相应改变：

$$U'_{oc} = U_{oc} (1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta S)$$

$$I'_{sc} = I_{sc} S(1 + a\Delta T) / S_{ref}$$

$$U'_m = I_{sc} (1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta S)$$

$$I'_m = I_m S(1 + a\Delta T) / S_{ref}$$

a ——常数，取 0.0025°C ；

b ——无量纲常数，取 0.05 ；

c ——常数，取 0.0028°C ；

结合式：

$$I_L = I_{sc} [1 - C_1 \exp(\frac{U}{C_2 U_{oc}} - 1)] ,$$

即可得到修正后的光伏电池的 I - U 特性曲线，

作为后面分析光伏电站模型的基础。

