



太阳能利用技术



光伏发电系统部件

张 涛

工程热物理



教学要求：

了解：光伏发电系统的实际应用场所；

掌握：光伏发电系统的组成及其关键部件；关键部件的作用；

熟悉：离网、并网型光伏发电系统；



教学要点：

- (1) 光伏发电方阵；
- (2) 二极管及其作用；
- (3) 储能设备；
- (4) 控制器分类及功能；
- (5) 逆变器功能

全球知名厂商

2020年全球光伏组件出货量TOP10企业 (GW)				
排序	企业	2019年	2020年	涨幅
1	隆基	8.4	24.53	192%
2	晶科	14.3	18.771	31%
3	天合	10	15.915	59%
4	晶澳	10.26	15+	46%
5	阿特斯	8.6	11.3	31%
6	韩华Qcell	7.7	9	17.00%
7	东方日升	7.3	7.53	3.00%
8	First Solar	5.4	5.5	2%
9	正泰新能源	3.73	5.2	39%
10	无锡尚德	2.9	4	38%

数据来源：上市公司财报，非上市公司由咨询企业获悉

晶硅光伏企业2021年全球出货量榜单

数据来源：索比光伏网&索比咨询

序号	企业	出货量 (单位: GW)
1	隆基股份	37-38
2	天合光能	≈25
3	晶澳科技	24-25
4	晶科能源	22.8-24.3
5	阿特斯	14.4-14.6
6	东方日升	9.5
7	韩华新能源	8.1
8	无锡尚德	7.3
9	正泰新能源	7
10	环晟光伏	4.5

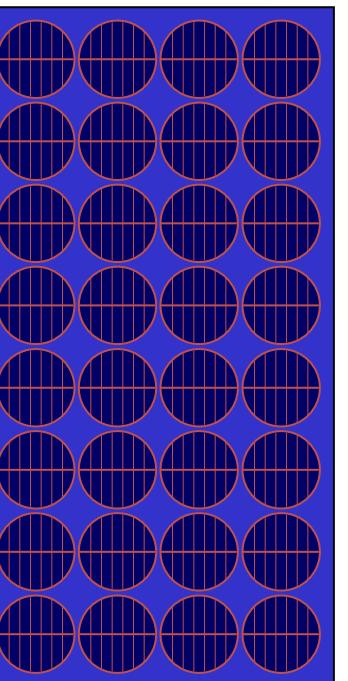
以上数据由索比光伏网&索比咨询根据调研、交流整理得出。

如与各家企业实际出货量不符，以上市公司公告为准。

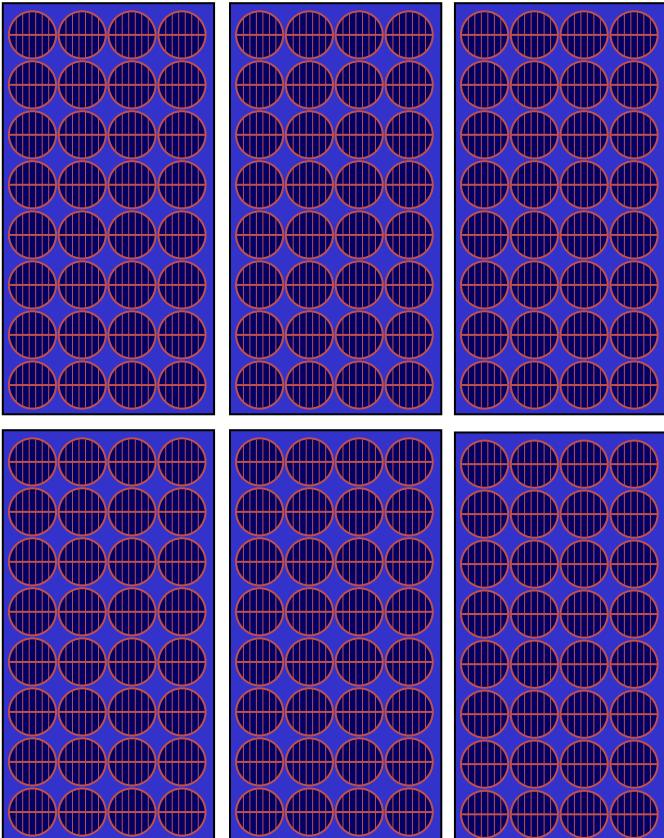
一、光伏发电系统

如果想实现应用，则需要将电池片进行合理的连接，以便实现更高的电流和电压输出

- **电池片的串并联**
- **模块的串并联**



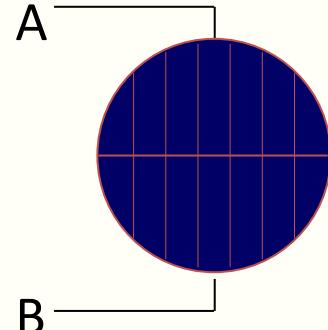
电池片



电池组件

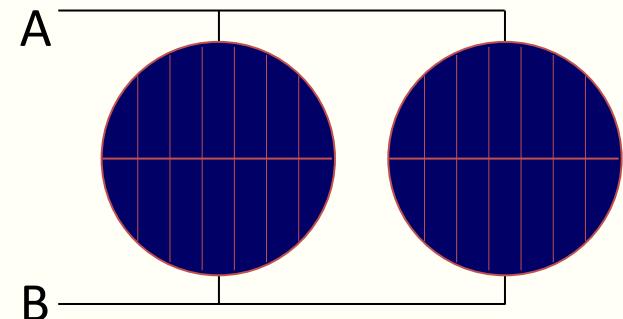
电池方阵

一、光伏发电系统

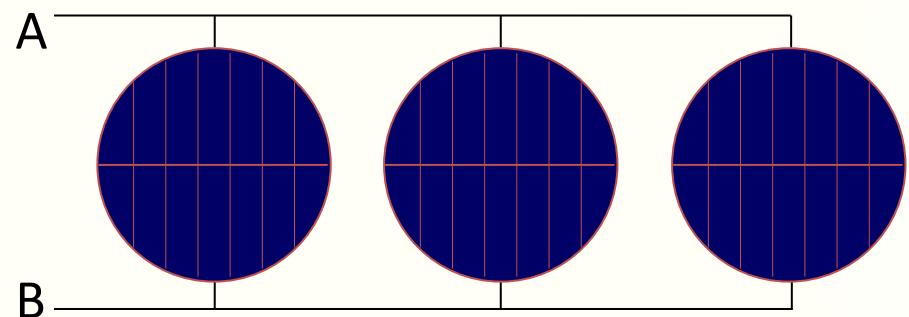


并联

电压从A到B = 0.5V
通过的电流 A = B = 3A



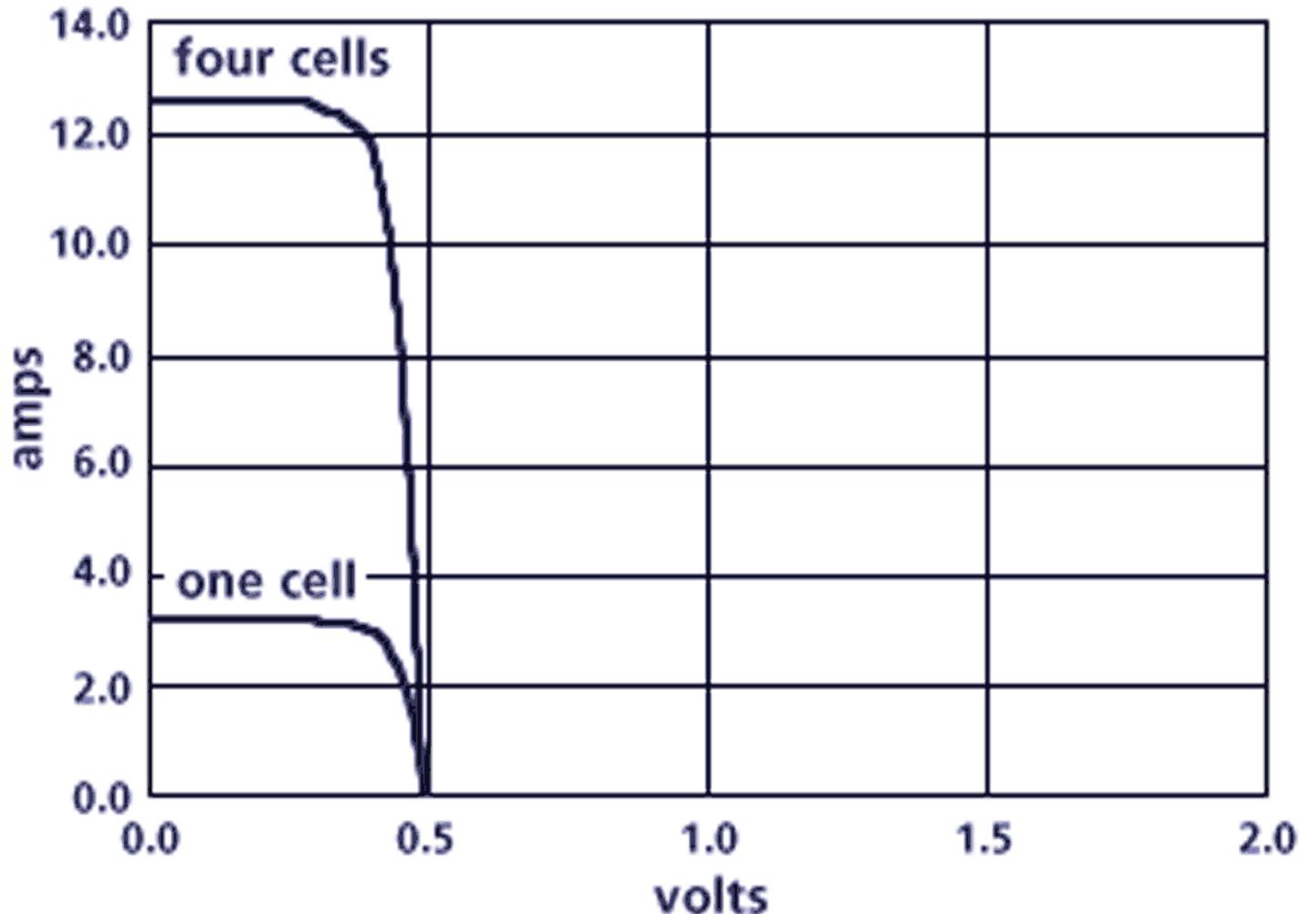
电压从A到B = 0.5V
通过的电流 A = B = 6A



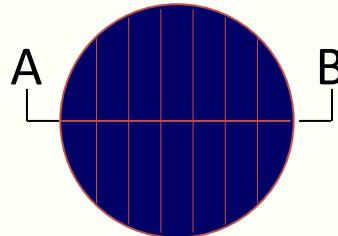
电压从A到B = 0.5V
通过的电流 A = B = 9A

一、光伏发电系统

并联



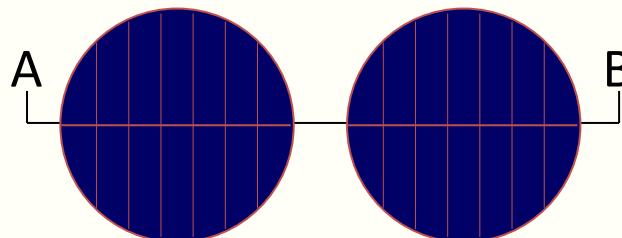
一、光伏发电系统



串联

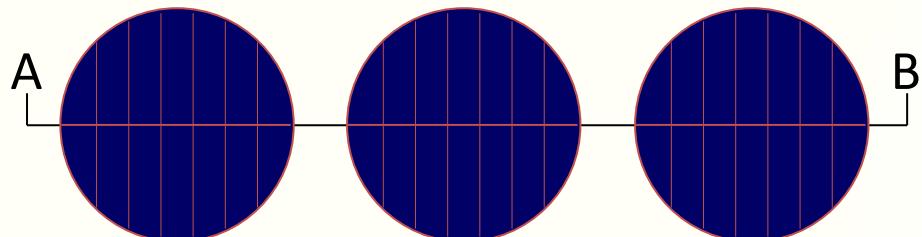
电压从A到B = 0.5V

通过的电流 A = B = 3A



电压从A到B = 1.0V

通过的电流 A = B = 6A

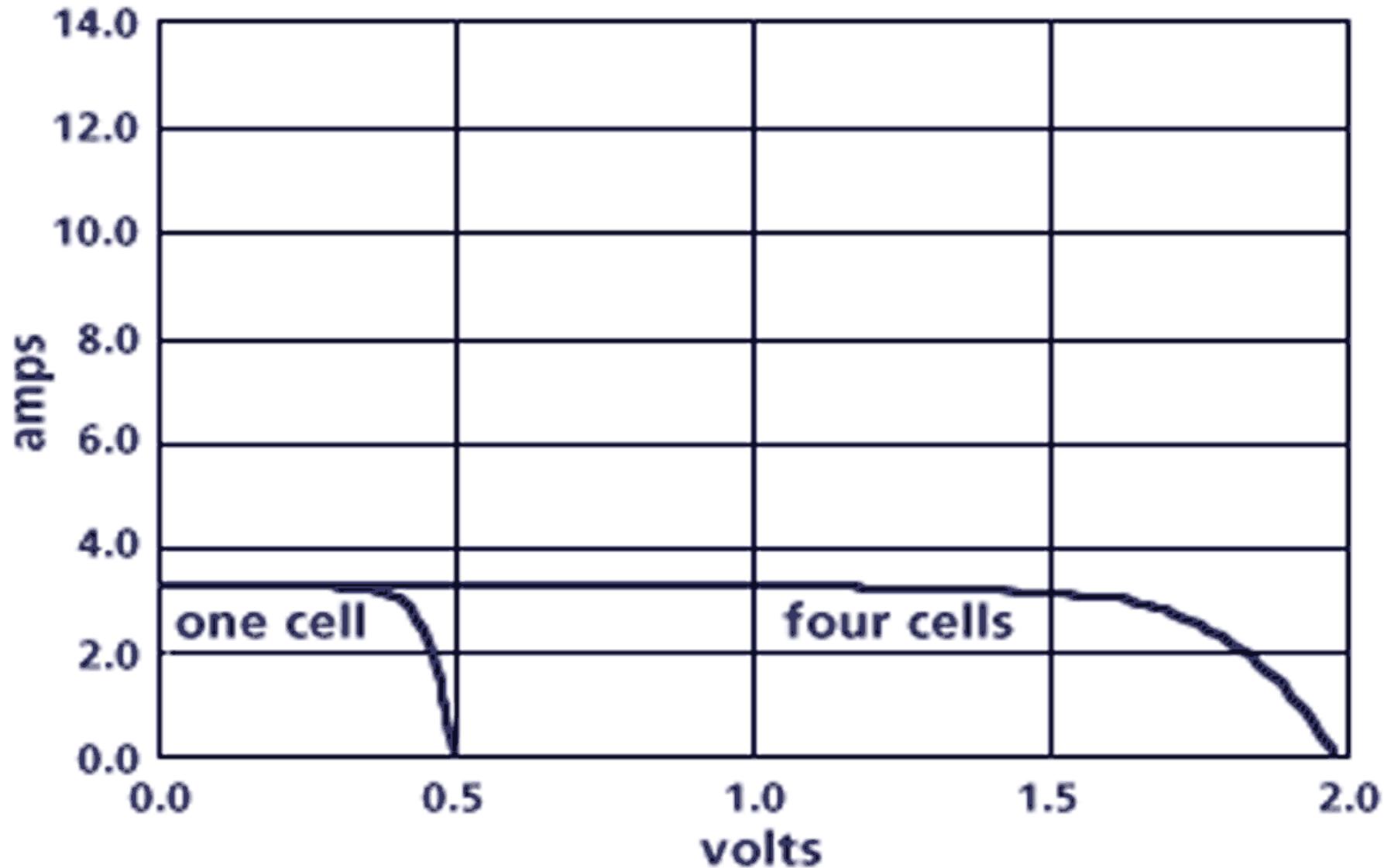


电压从A到B = 1.5V

通过的电流 A = B = 9A

一、光伏发电系统

串联

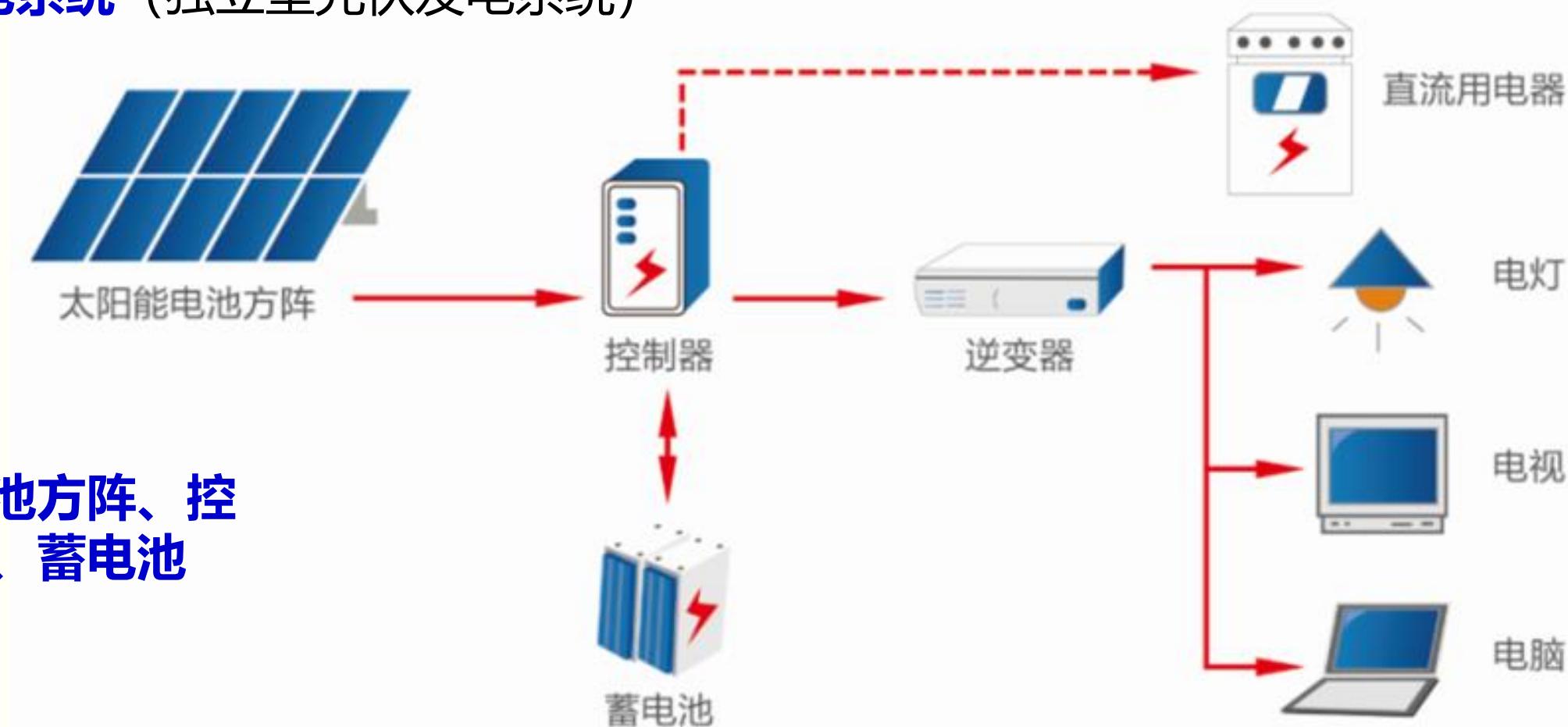




一、光伏发电系统

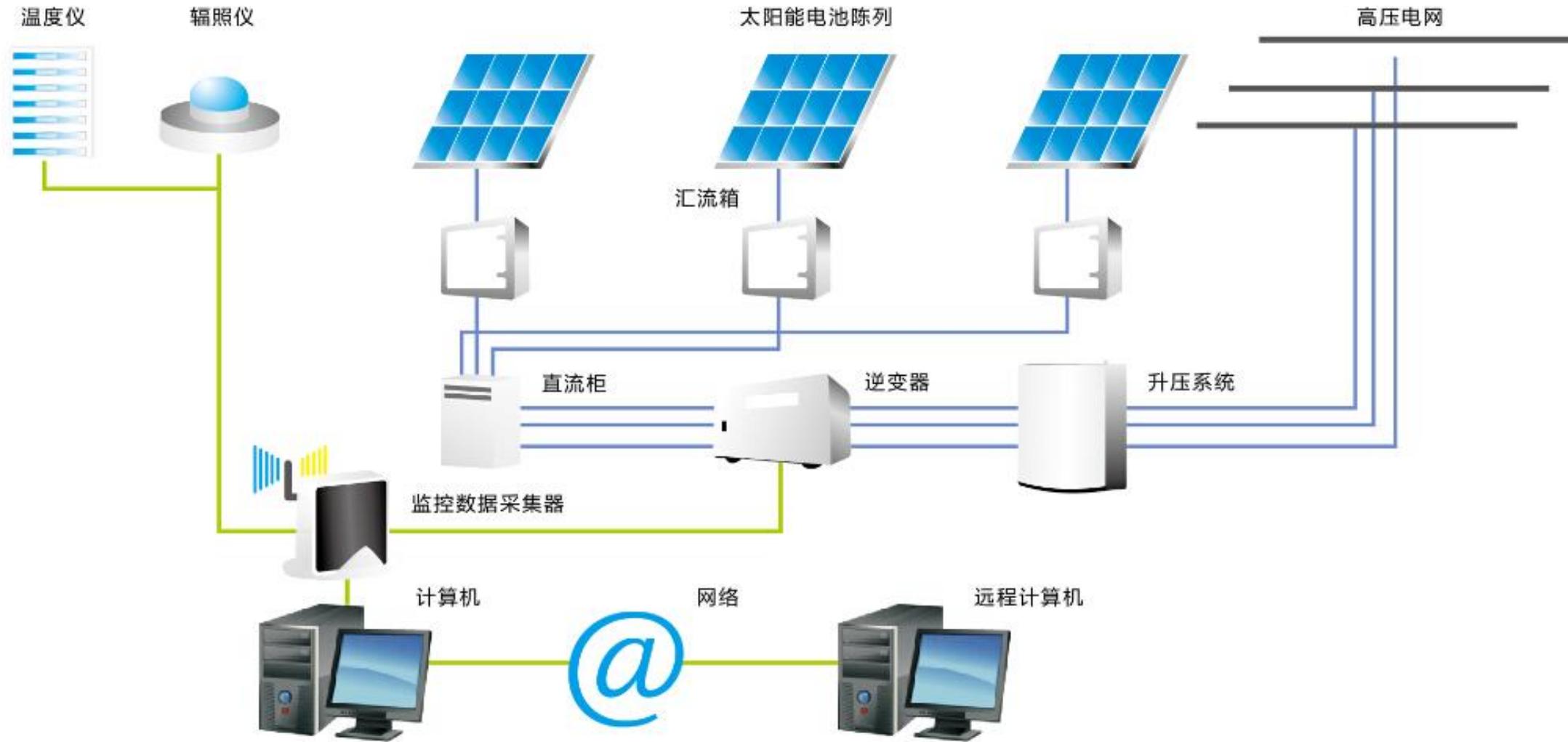
分类：

离网型光伏发电系统（独立型光伏发电系统）



一、光伏发电系统

并网型光伏发电系统（分布式光伏发电系统）



主要部件：
**电池方阵、
汇流箱、
直流柜、
逆变器、
升压并网
系统**

一、光伏发电系统

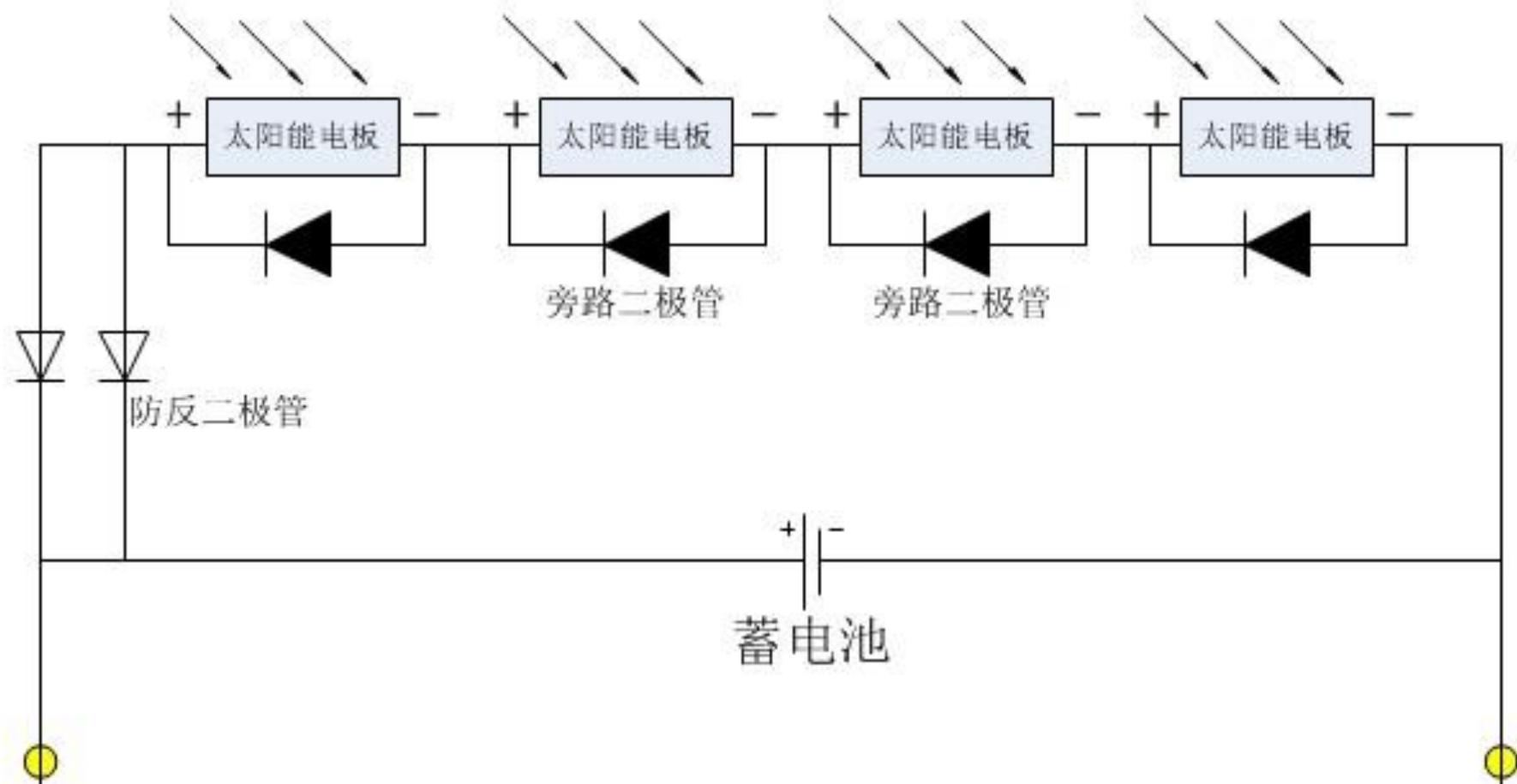
家庭型并网系统



二、二极管

太阳能电池方阵中，二极管很重要

- 防反充二极管
- 旁路二极管

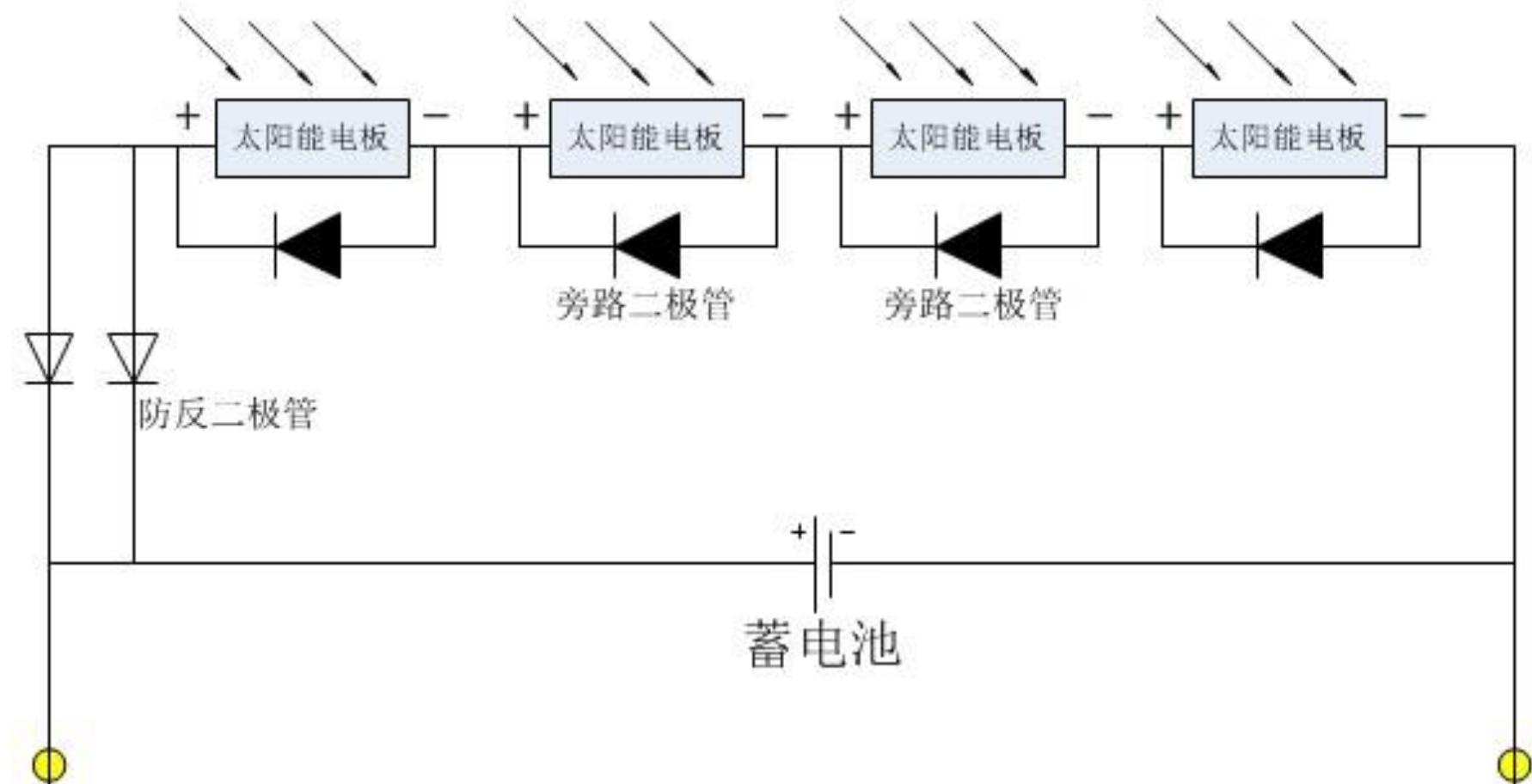


二、二极管

➤ 防反充二极管

在储能蓄电池或逆变器与太阳电池方阵之间，以防止夜间或是阴雨时，**电池方阵电压小于供电的母线电压时**，蓄电池反过来向太阳电池方阵倒送电，导致能量消耗和导致电池发热。

起单向导通的作用。



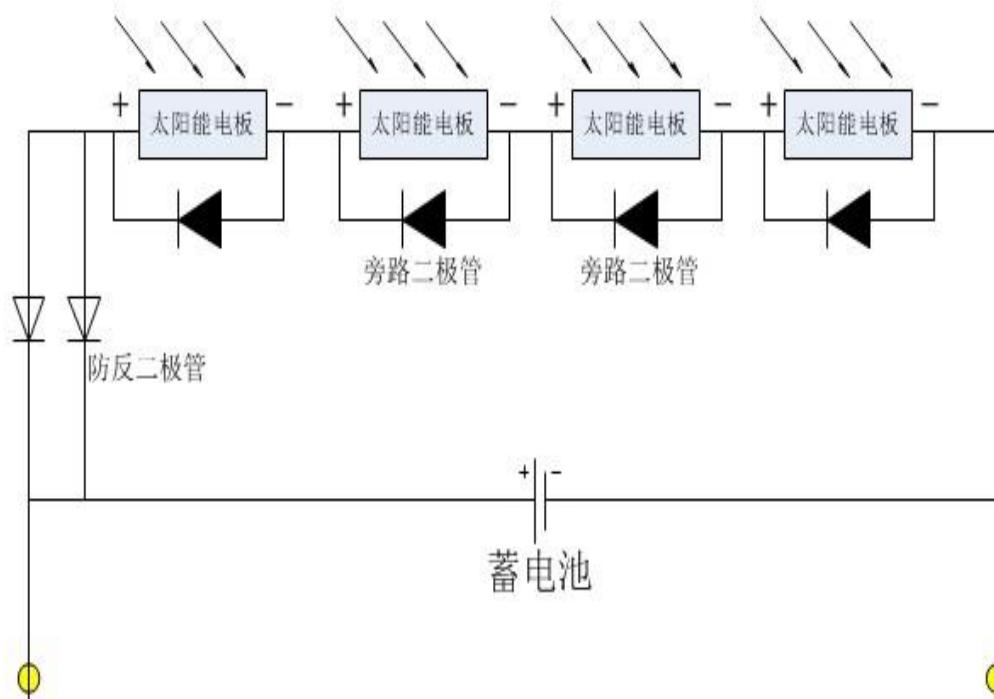
二、二极管

➤ 旁路二极管

在有较多太阳组件串联时，在每个太阳电池组件两端并联一个二极管。

当其中某个组件被阴影遮挡或出现故障时，在二极管两端形成正向偏压，实现电流的旁路，不至于影响其他组件的发电。

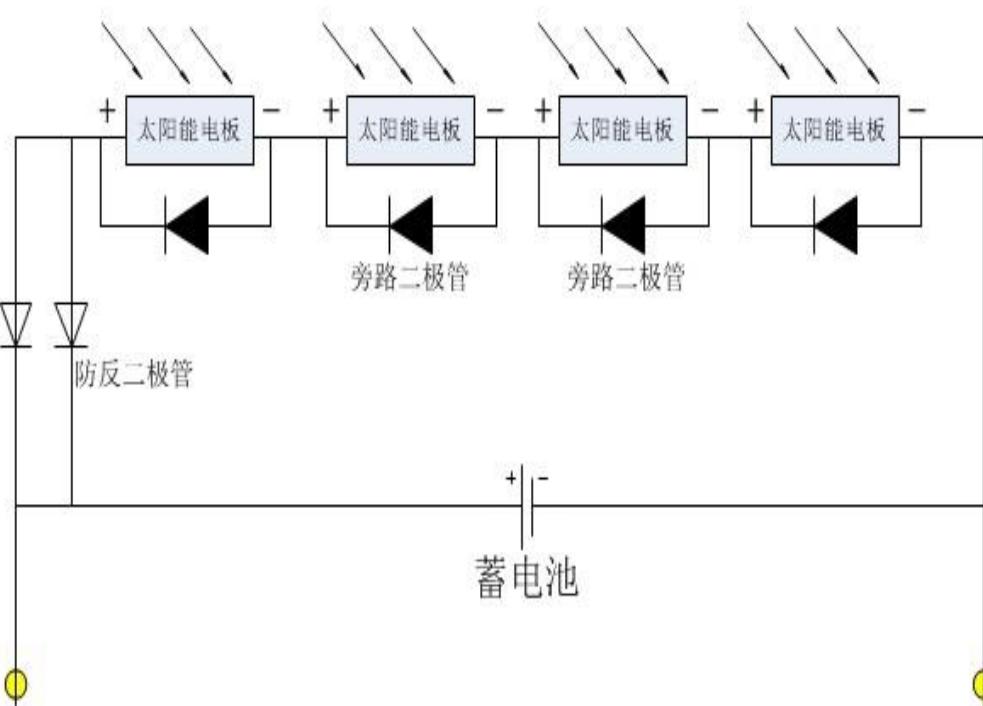
避免受到较高的正向偏压或由于“热斑效应”发热而损坏。通常其耐压容量应能达到最大反向工作电压的两倍，电流容量也要达到最大运行电流的两倍。



二、二极管

如果**控制器具有防反接功能**，可以**不接防反二极管**。

如果所有的组件都是**并联的**，也可以**不接旁路二极管**。实际应用时，由于设置旁路二极管要增加成本和损耗，对于串联数目不多时，可以不用旁路二极管。



三、蓄电池

太阳能发电受气候影响。

蓄电池是通过充电将电能转换为化学能储存起来，使用时再将化学能转换为电能释放出来的化学电源装置。

放电-当外电路接通时，电极上的活性物质分别被氧化和还原，释放电能

充电-放电后，若有反方向的电流流入，就可将两极的活性物质恢复到原来的状态。



三、蓄电池

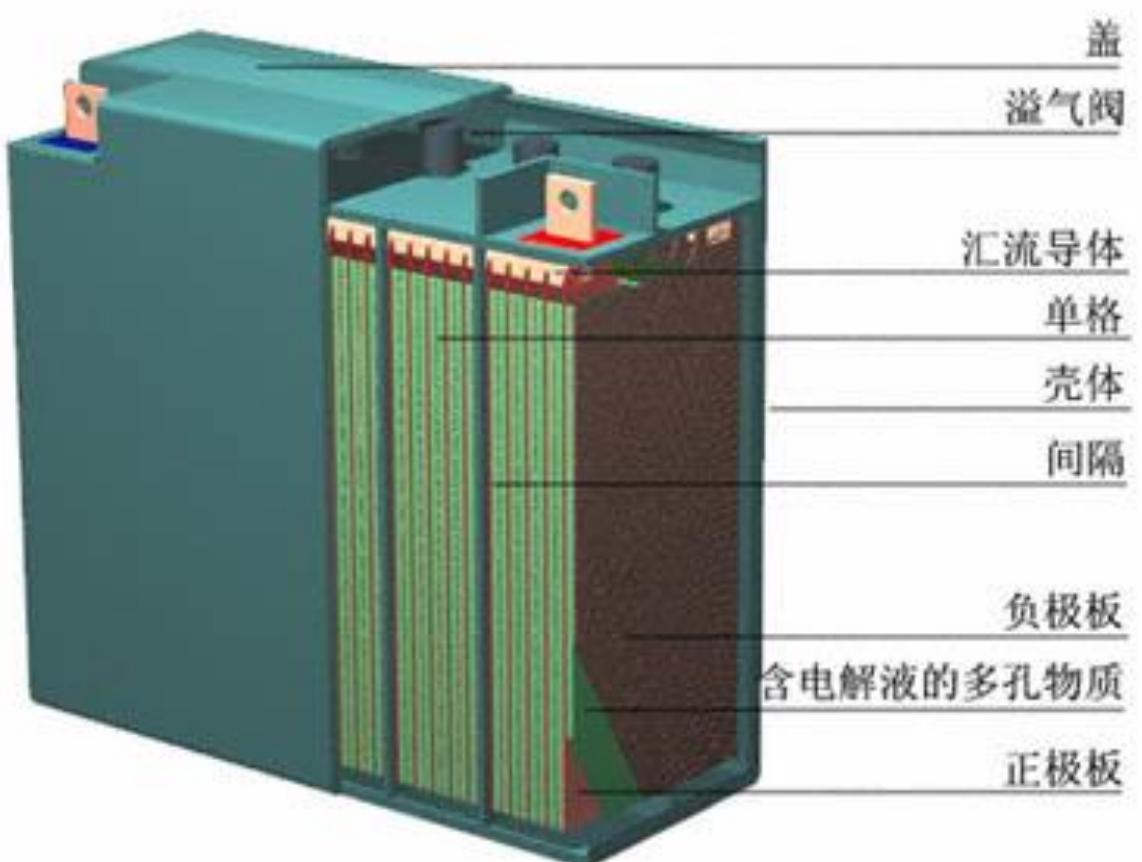
铅酸蓄电池

由正、负极板，隔板，壳体，电解液和接线桩头等组成

正极的活性物质是二氧化铅

负极板的活性物质是海绵状铅

电解液是稀硫酸

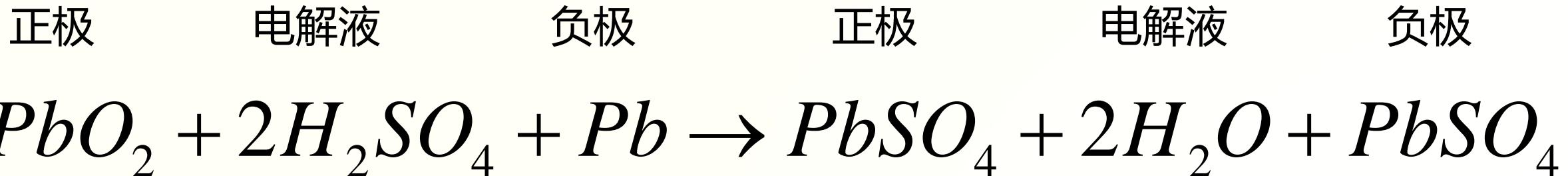




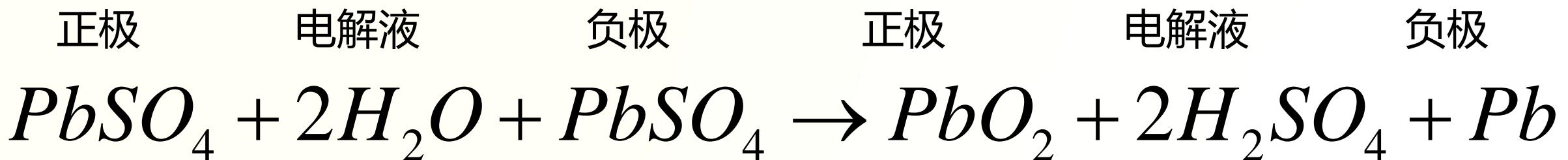
三、蓄电池

铅酸蓄电池-原理

放电的电化学反应



充电的化学反应





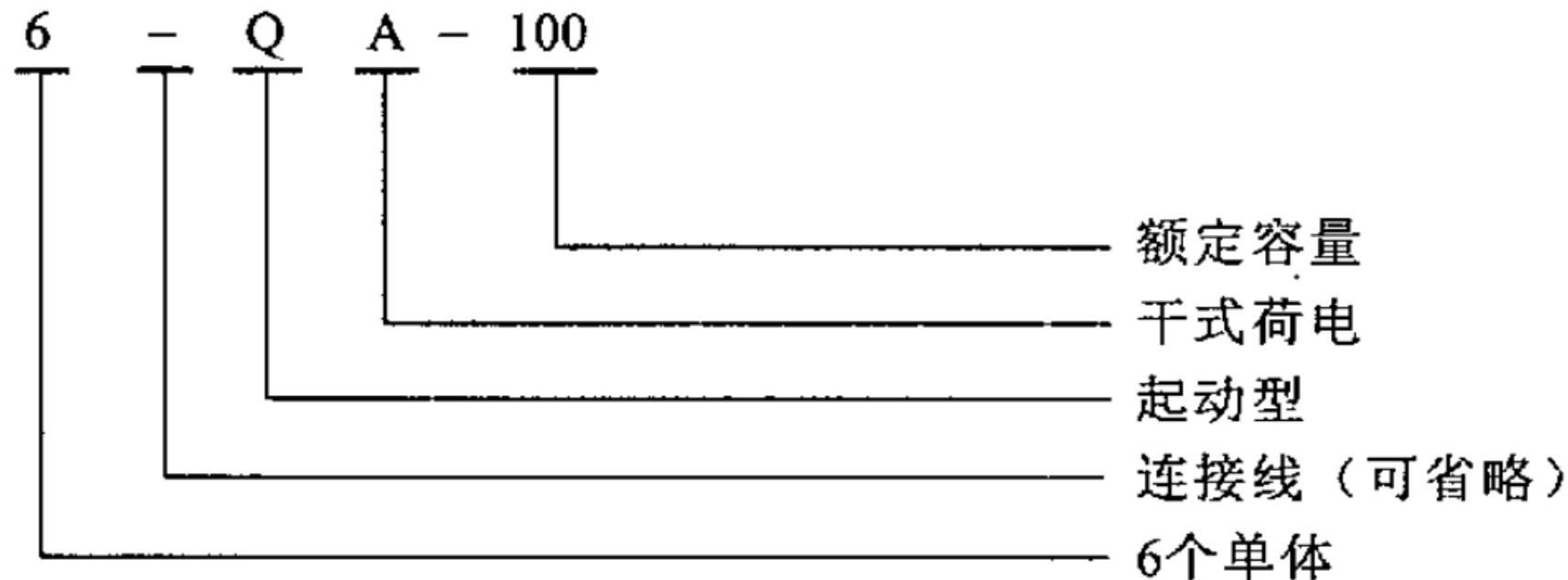
三、蓄电池

铅酸蓄电池-命名规则

根据最新国标JB/T 2599-2012

蓄电池型号由三部分组成（见图1）：

- 第一部分为串联的单体蓄电池数；
- 第二部分为蓄电池用途、结构特征代号；
- 第三部分为标准规定的额定容量。





三、蓄电池

铅酸蓄电池-命名规则

表 A.1

序号	蓄电池类型 (主要用途)	型 号	汉字及拼音或英语字头		
			汉字	拼音	英语
1	起动型	Q	起	qi	
2	固定型	G	固	gu	
3	牵引(电力机车)用	D	电	dian	
4	内燃机车用	N	内	nei	
5	铁路客车用	T	铁	tie	
6	摩托车用	M	摩	mo	
7	船舶用	C	船	chuan	
8	储能用	CN	储能	chu neng	
9	电动道路车用	EV	电动车辆		electric vehicles
10	电动助力车用	DZ	电助	dian zhu	
11	煤矿特殊	MT	煤特	mei te	



三、蓄电池

铅酸蓄电池-命名规则

序号	蓄电池特征	型号	汉字及拼音或英语字头	
1	密封式	M	密	mi
2	免维护	W	维	wei
3	干式荷电	A	干	gan
4	湿式荷电	H	湿	shi
5	微型阀控式	WF	微阀	wei fa
6	排气式	P	排	pai
7	胶体式	J	胶	jiao
8	卷绕式	JR	卷绕	juan rao
9	阀控式	F	阀	fa



三、蓄电池

铅酸蓄电池-命名规则

FM在最新的标准中相当于F

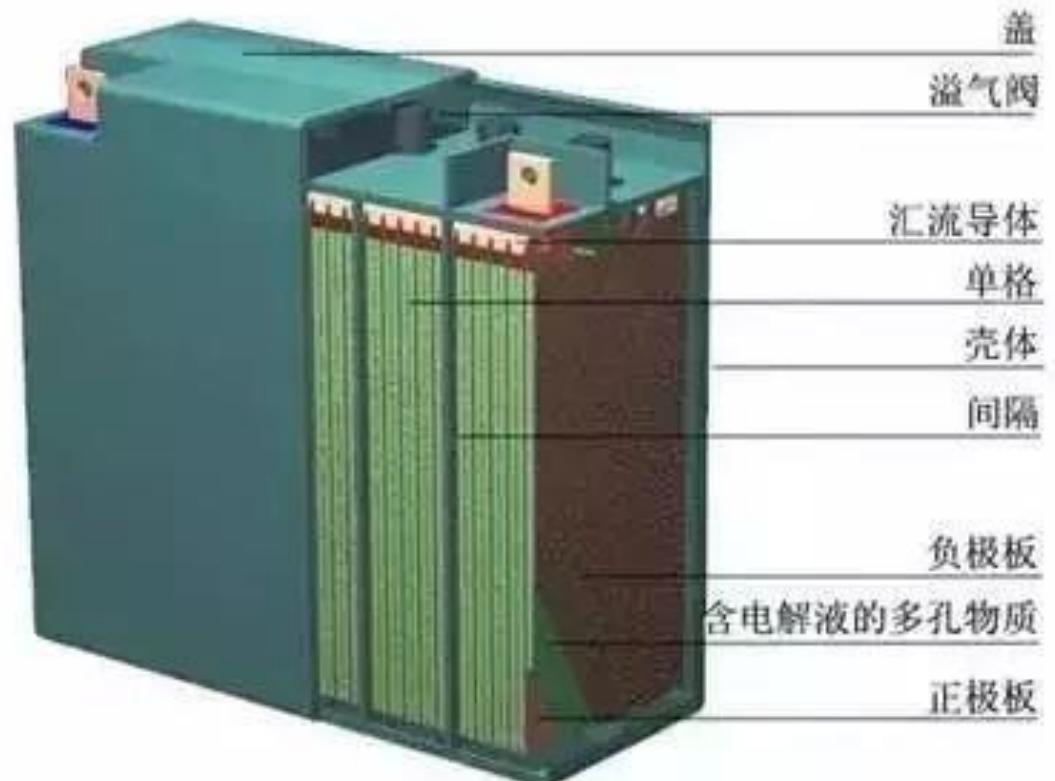


三、蓄电池

免维护铅酸蓄电池

传统的铅酸蓄电池在使用过程中会发生减液的现象，需要定期补充电解液，增加了维护工作量。

- 采用铝钙合金栅架，充电时产生的水分解量少，液体汽化速度减小，水分蒸发量低；
- 外壳采用密封结构；
- 特殊设计的氟塑料橡胶多孔透气阀；
- 富液设计，多加20%的酸液；
- 采用多孔低阻PE隔板；





三、蓄电池

胶体蓄电池

胶体蓄电池是对液态电解质的改进，即将铅酸蓄电池中的**硫酸电解液换成硅胶电解质**，工作原理仍与铅酸蓄电池相同。

硅胶电解质是用 SiO_2 凝胶和一定浓度的 H_2SO_4 ，按照适当的比例混合在一起，形成一个多孔、多通道的高分子聚合物，将 H_2O 和 H_2SO_4 都吸附其中，形成固体电解质。一般采用富液设计。

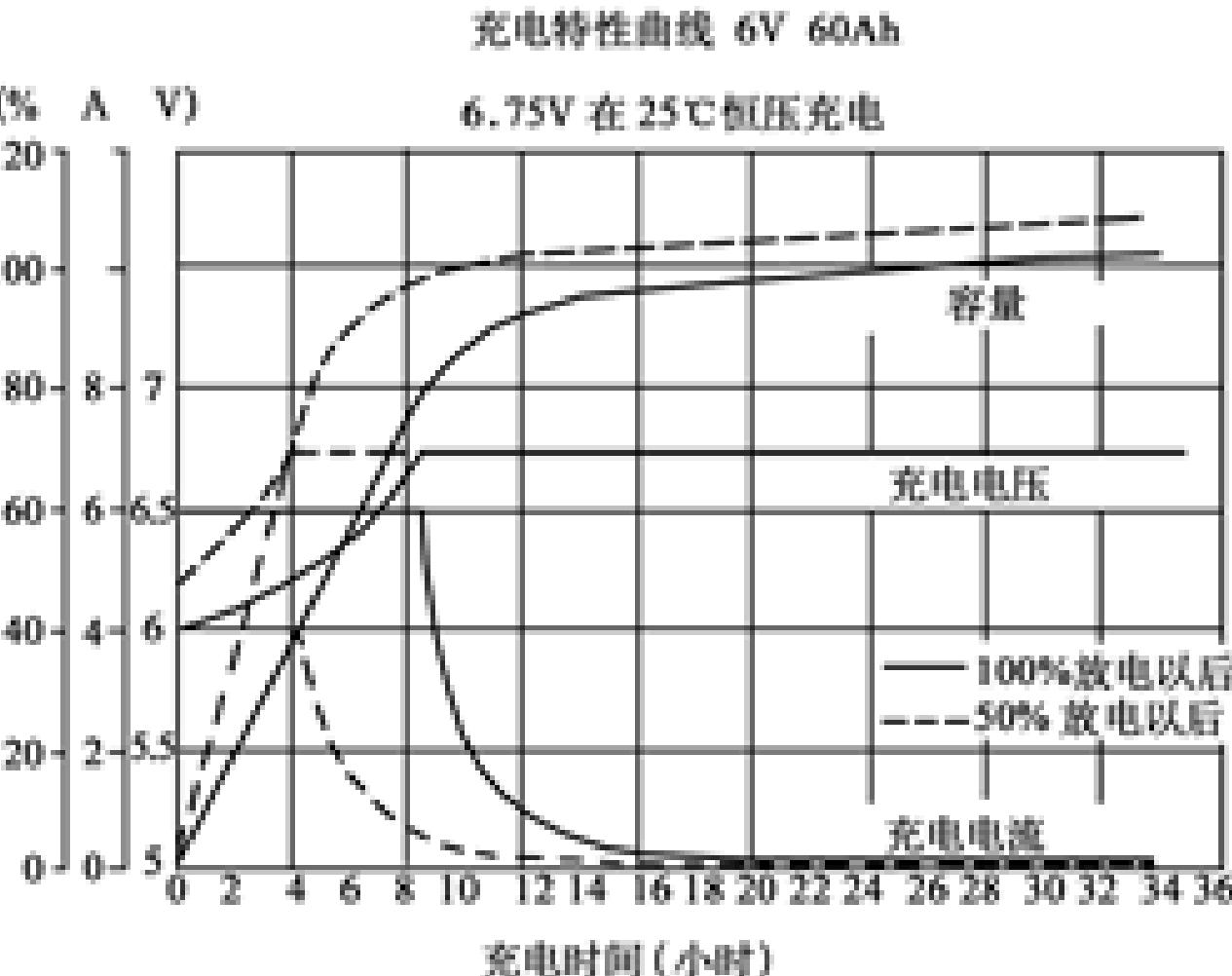
优点：存放时间长；寿命增长；不存在电解质分层；少维护；

缺点：胶体电解质加注比较困难；胶体配置工艺要求高。

三、蓄电池

性能参数-电压

铅酸蓄电池每格的标称电压是2V，实际电压随充放电情况有变化，充电时电压可达2.5-2.7V，之后稳定到2.05V的稳定状态；放电时，低于1.7V时，需停止放电，否则会损坏极板。





三、蓄电池

性能参数-容量

蓄电池的容量是出厂时规定的该蓄电池在**一定的放电电流和一定的电解液温度**下，单格电池的**电压下降到规定值**时，所能提供的电量，一般用**安时 (A·h)**或**瓦时 (W·h)** 表示。

三、蓄电池

性能参数-容量

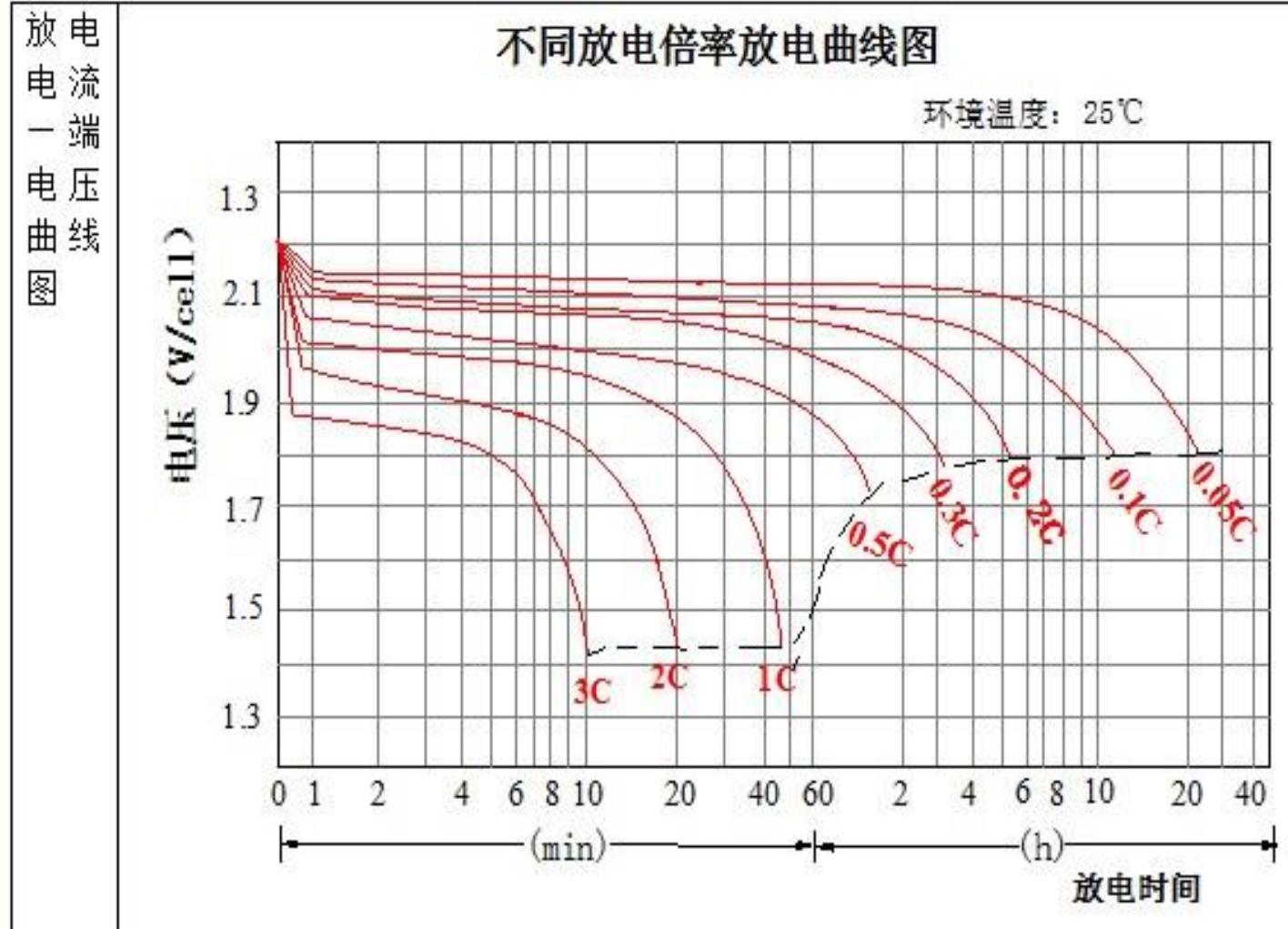
➤ 蓄电池容量与放电率的关系

放电率有**小时率（时间率）**和**电流率（倍率）**两种不同的表示方法

小时率：是以一定的电流放完额定容量所需的时间

电流率：指放电电流相当于电池额定容量的倍数，如 $100\text{A}\cdot\text{h}$ ，以10A放电，则电流率为 $0.1C_{10}$

放电电流—端电压曲线图



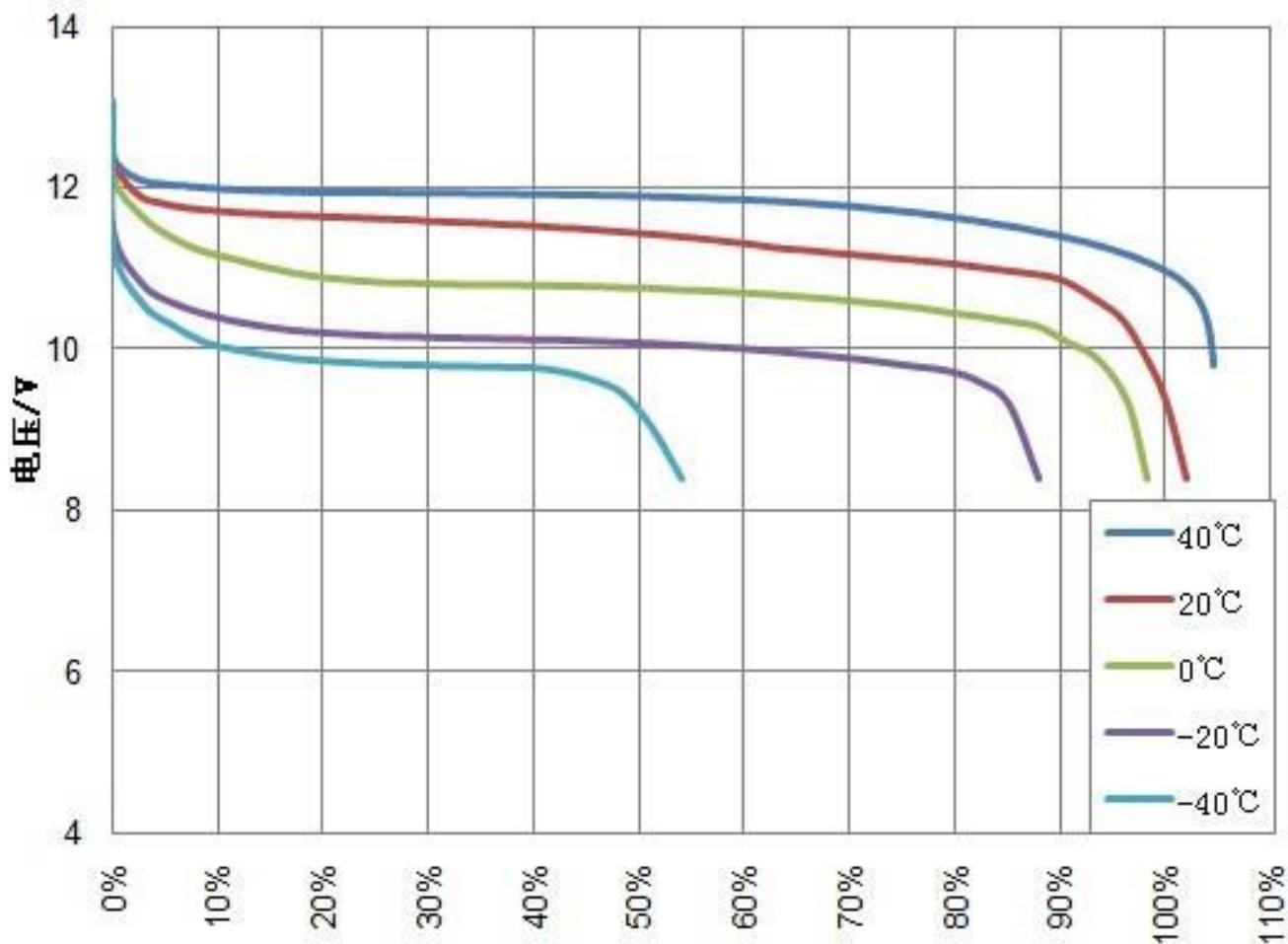
三、蓄电池

性能参数-容量

➤ 蓄电池容量与温度的关系

电解液的温度对蓄电池容量有一定
的影响

蓄电池在**低温下容量会迅速下降**，
并且低温时充电反应非常缓慢，放
电后难以恢复。



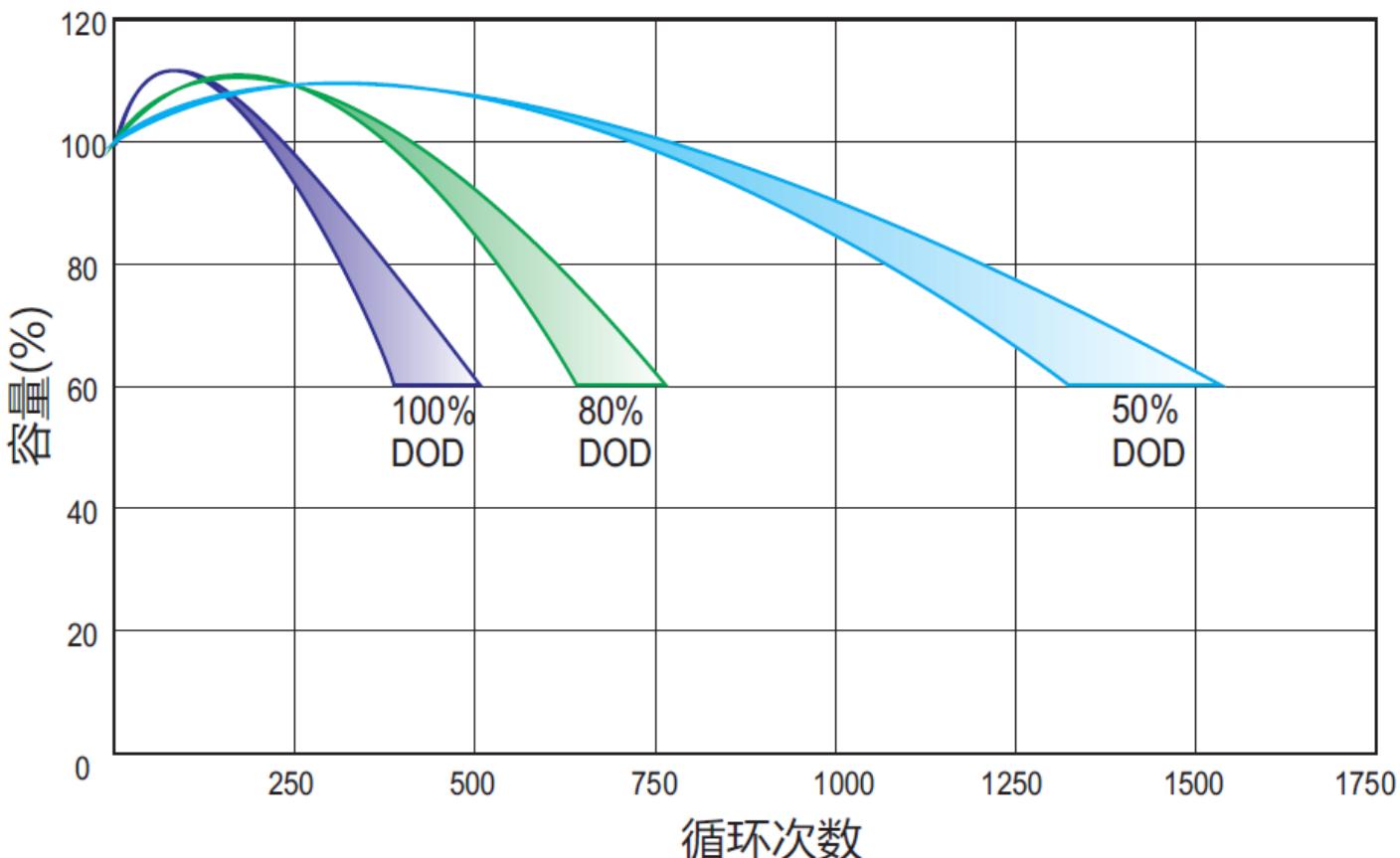
三、蓄电池

性能参数-寿命

蓄电池的寿命有充放电循环寿命，使用寿命和恒流过充电寿命。通常关心前面两种。

**充放电循环寿命是以充、放电循环次数来衡量；
使用寿命以工作年限来衡量。**

放电深度与循环次数的关系曲线





三、蓄电池

性能参数-效率

- **能量效率：**放电时输出的能量与充电时输入的能量之比，影响因素为蓄电池的内阻；
- **充电效率：**在规定条件下，蓄电池放电期间给出的电量与通过充电恢复到初始的完全充电状态所需电量的比值
充电效率一般在85%左右，所以直接供负载使用，要比进入蓄电池效率高。



三、蓄电池

性能参数-自放电

蓄电池不使用时，储电量会自动减少。

- 电解液中含有杂质，或添加的不是纯净水；形成局部微小电池及自放回路；
- 极间污垢较多，形成放电回路；
- 蓄电池负极板的自溶和正极板的自动还原；
- 长期不用造成硫酸下沉，造成上下的密度差，从而形成电位差及温度的变化，从而引起自放电



三、蓄电池

性能参数-放电深度 (DOD, Depth of Discharge)

蓄电池使用过程中，蓄电池放出的安时数占其标称容量的百分比。

深度放电会严重影响电池的寿命。一般情况下，蓄电池的放电深度为30%-80%

性能参数-荷电态 (SOC, State of Charge)

一定温度下，蓄电池充电到不能再吸收能量的状态定义为荷电态，即 $SOC=100\%$ ，
不能再放出能量的状态定义为荷电态 $SOC=0\%$.

$$SOC = 1 - DOD$$



三、蓄电池

性能参数-充电方法

➤ 定电压充电法

刚开始充电时，电流较大；随时间的增加，电流逐渐减小。但充电电流太大会减少电池寿命，并造成温度上升；

➤ 定电流充电法

可以避免电流太大引起的问题，但会造成充电电压过高而影响寿命。同时，定电流充电不能使电池保持在浮充状态，无法完全充足电



三、蓄电池

性能参数-充电方法

➤ 二阶充电法

结合定电流和定电压的优点，先以定电流充电，等达到蓄电池电压后，再以定电压充电。但由于定电压阶段，电流很小，导致充电时间很长。

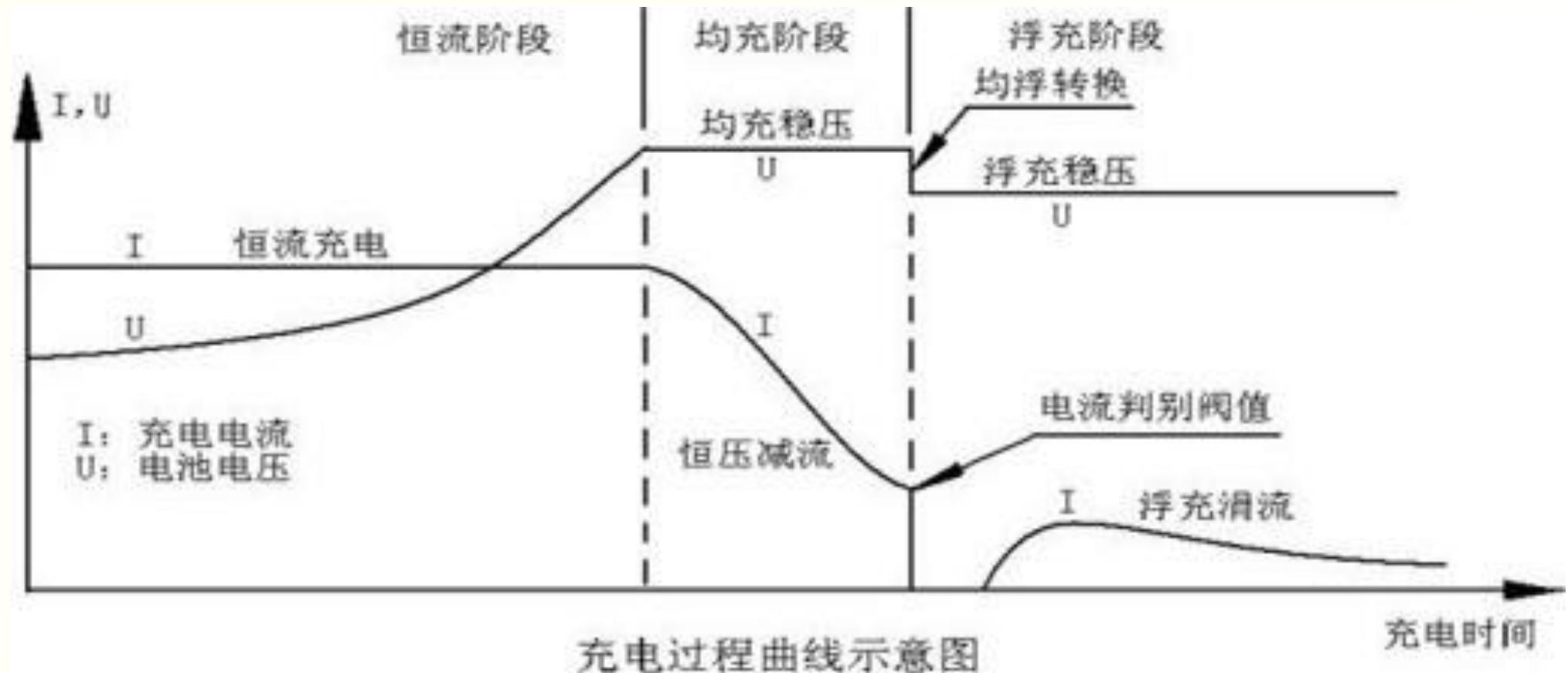
➤ 三阶充电法

对二阶的补充，在中间加入“充电吸收”的第二阶段。在第二阶段中，充电电压维持在气化电压以下，但充电电流缓慢下降，这样可以大幅度缩短定电压充电时间。

三、蓄电池

性能参数-充电方法

三阶充电法是目前最常用的方法



四、控制器

光伏系统中的控制器是对光伏系统进行管理和控制的设备。

- 为蓄电池提供**最佳的充电电流和电压**；
- **减少充电损耗**；
- 保护蓄电池，输入充满和容量不足时具有断开和恢复连接功能，以**避免过充和过放**现象；
- **稳压**，可为直流负载提供稳定的直流电



四、控制器

光伏系统中的控制器是对光伏系统进行管理和控制的设备。

控制器一般有3对接线柱，分别与太阳电池方阵、蓄电池及直流负载或逆变器连接。





四、控制器

光伏系统中的控制器是对光伏系统进行管理和控制的设备。

光伏控制器的主要技术指标可根据 GB/T 19064-2003

- 控制器最大自身损耗不应超过其**额定充电电流的1%**；
- 控制器充放电电压压降不应超过系统**额定电压的5%**；
- 控制器应具有**温度补偿功能**，以设置更为合理的充电电压，防止过充或过放，温度系数为 $-3\sim7\text{mV/}^{\circ}\text{C}$
- 控制器应具有**充满断开及恢复连接**功能；当蓄电池电压到过放点 ($(1.80\pm0.05)\text{ V/只}$) 应能自动切断负载；当蓄电池回升到充电恢复点 ($(2.2\sim2.25)\text{ V/只}$)，应自动或手动恢复供电



四、控制器

光伏系统中的控制器是对光伏系统进行管理和控制的设备。

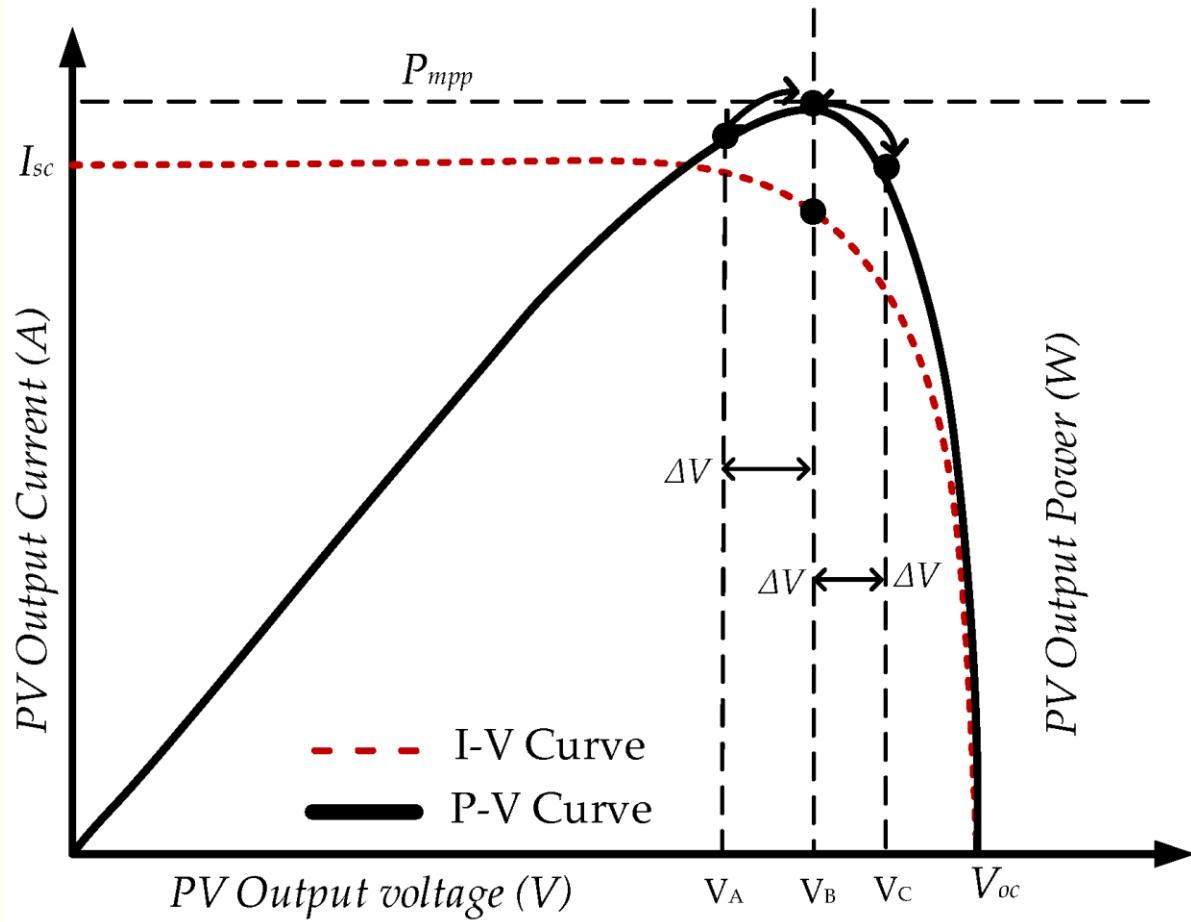
光伏控制器最重要的功能是**光伏最佳功率点追踪**及**系统保护功能**

其中系统保护主要包含以下：

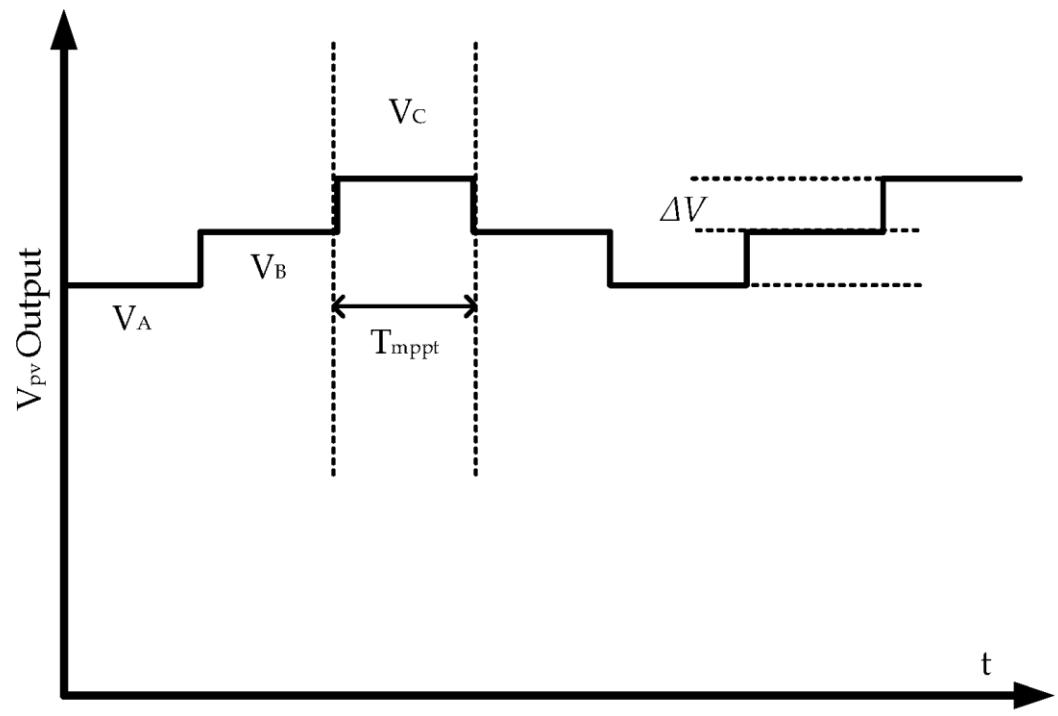
- 防接反
- 防内部短路
- 防雷击
- 故障报警
- 工作状态显示等

四、控制器

光伏最佳功率点追踪(MPPT, Maximum power point tracking),使光伏系统工作在对应时刻的最佳功率点



(a) I-V and P-V characteristics curve



(b) Perturbation step ΔV



四、控制器

MPPT的追踪与算法有关，常用算法如下：

- 1.定电压跟踪法
- 2.扰动观察法
- 3.功率回授法
- 4.增量电导法
- 5.模糊逻辑控制
- 6.滞环比较法
- 7.神经元网络控制法
- 8.最优梯度法

五、逆变器

光伏系统中的逆变器是将直流电转成交流电供给负载使用的装置

逆变器分类比较多，

按照**交流电相数分**，有单相逆变器、三相逆变器

和多相逆变器；

按**功率流动方向**，分单向逆变器及双向逆变器；

按**负载是否有源**，有无源逆变器和有源逆变器；

按**运行方式**，有独立运行逆变器和并网逆变器。



五、逆变器

技术性能

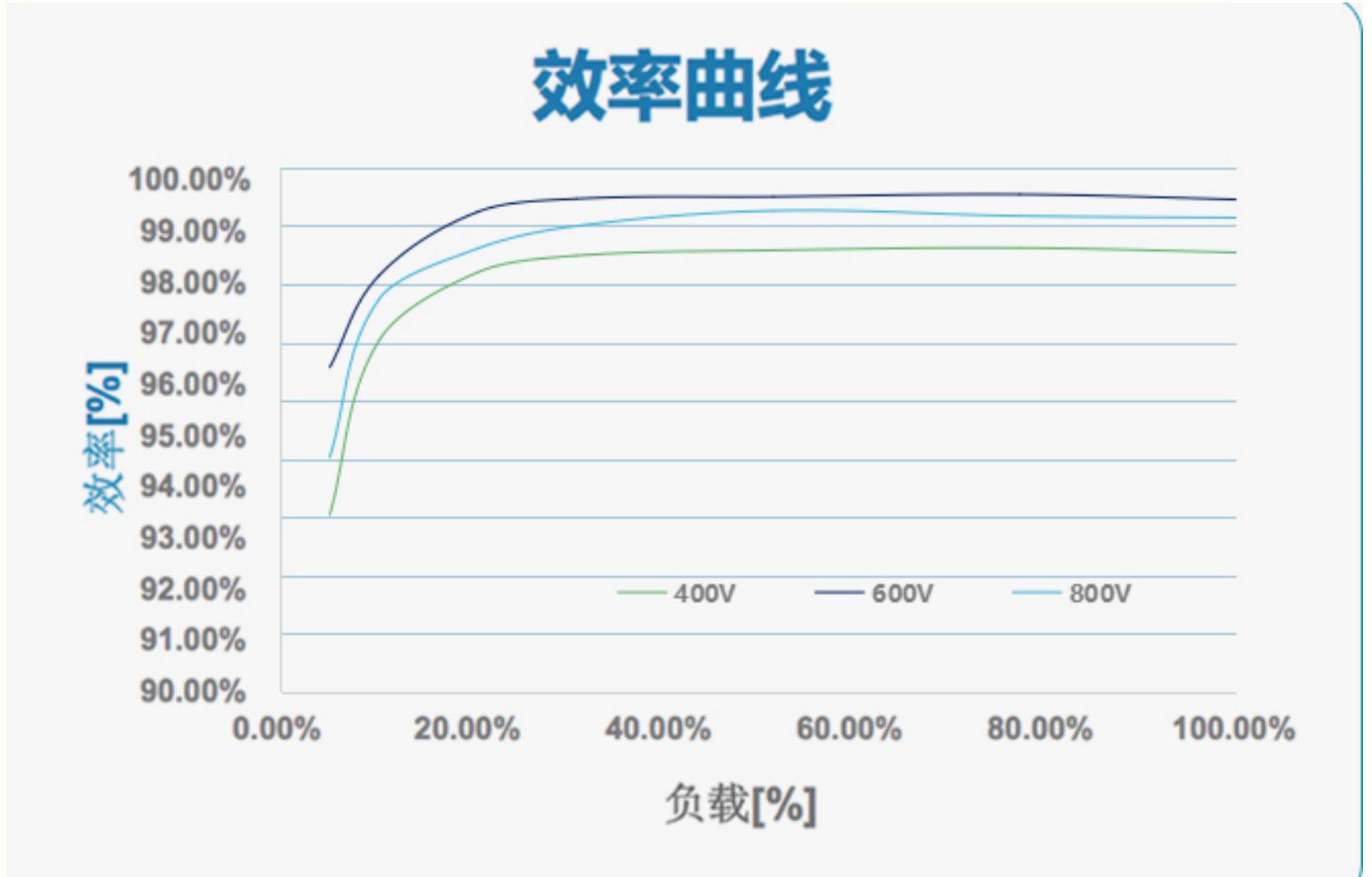
- 稳定运行时，电压波动偏差不超过额定值的3%~5%；
- 负载突变时，电压偏差不应超过额定值的8%~10%；
- 三项电压不平衡度不应超过5%~8%；
- 输出为正弦波时，波形失真度不超过5%；
- 频率偏差应不超过1%；
- 输出功率大于75%时，效率应大于80%；
- 自身耗电应不超过额定输入电流的3%；
- 具有欠压、过电流、短路、反接、雷击等保护功能





五、逆变器

华为 (HUAWEI) SUN2000-15/17/20KTL光伏逆变器





五、逆变器

华为 (HUAWEI) SUN2000-15/17/20KTL光伏逆变器

效率			
最高效率	98.60%	98.60%	98.60%
欧洲效率	98.30%	98.30%	98.30%

最大总谐波失真	< 3%	< 3%	< 3%
---------	------	------	------

保护

输入直流开关	支持
防孤岛保护	支持
输出过流保护	支持
输入反接保护	支持
组串故障检测	支持
直流浪涌保护	类型 II
交流浪涌保护	类型 II
绝缘阻抗检测	支持
RCD检测	支持

六、光伏并网逆变器

光伏并网时对并网电流与国网电流的品质的一致性要求较高。光伏系统发出的直流电需要通过一系列的**逆变、控制、检测和保护**等手段，才能入网。实施时，通常将控制器、逆变器结合在一起，组成控制逆变器。



六、光伏并网逆变器

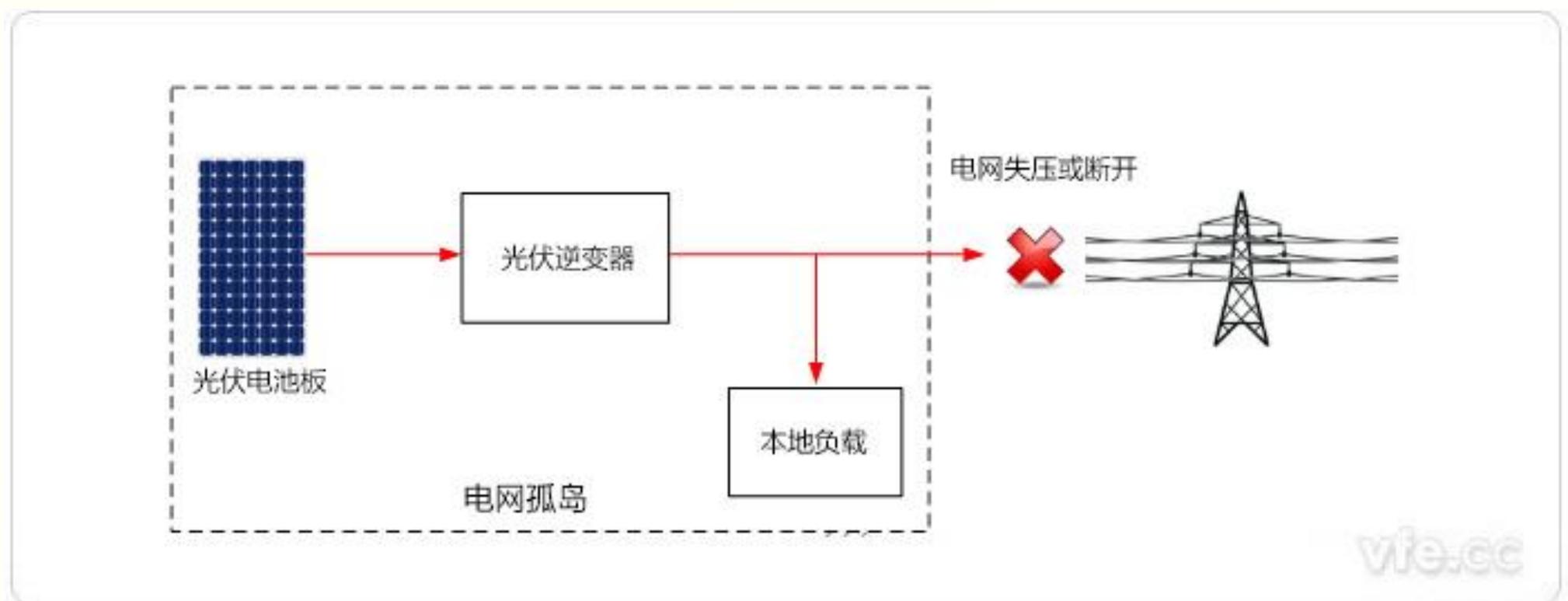
技术性能

- 输出为正弦波，并网时需满足电网规定的指标，不能对电网造成谐波污染；
- 负载和日照变化时均能高效运行；
- 具有最大功率点追踪功能；
- 可靠性高，寿命应与光伏系统配套；
- 具备单独供电功能；
- 大型的并网发电，一般还会配套升压变压器。



七、孤岛效应

孤岛现象：光伏系统在与电网并联为负载供电时，当电网发生故障或中断的情况下，**光伏系统足以继续独立供电给负载的现象**。此时由于光伏系统的供电与负载达到平衡；电网断开时，光伏系统输出端的电压与频率不会快速随之改变，使得**系统无法正确判断电网是否有故障或中断**。





七、孤岛效应

孤岛现象的危害：

- 电网发生故障和中断后，由于光伏持续供电，维修人员维修时，易发生**设备或人身安全事故**；
- 光伏系统失去市电作为参考信号，造成光伏系统**输出电流、电压及频率漂移而偏离市电**，发生不稳定的情况；
- 市电恢复瞬间，由于电压相位不同，会造成**较大的突波电流**，损坏设备；
- 若光伏系统与电网为三相连接，当孤岛现象发生时，将形成欠相供电，影响用户端三相负载的正常使用；



七、孤岛效应

孤岛现象的防治：

➤ 被动式检测法

通过**检测公共电网的电压大小与频率的高低**，来判断公共电网是否发生故障或中断，如：电压与频率保护继电器检测法、相位跳动检测法、电压谐波检测法、频率变化检测法等

➤ 主动式检测法

在**逆变器的输出端主动对系统的电压或频率加以周期性扰动**，并观察电网是否受到影响，作为判断公共电网是否发生故障或是中断的依据。常用有：输出电力变动方式、加入电感和电容器、频率偏移法。



七、孤岛效应

成熟的并网逆变器，一般都具有完整的逆变、控制、并网、监测、数据采集和报警、防孤岛等功能。

光伏产业链全景图



逆变器



光伏逆变器（PV inverter或solar inverter）

可以将太阳能板产生的可变直流电(DC)转换为市电频率交流电(AC)的逆变器；可以反馈回商用输电系统，或是供离网的电网使用。光伏逆变器是光伏阵列系统中重要的系统平衡(BOS)之一，可以配合一般交流供电的设备使用。太阳能逆变器有配合光伏阵列的特殊功能，例如最大功率点追踪及孤岛效应保护的机能。



逆变器主要生产厂家



2017年以来，逆变器全球市场占有率为分布呈现出逐渐分散的趋势。前五名的逆变器巨头市占率略有下降。2017年，前五名市占率达59%，2018年下降了2个百分点，为57%。2019年再微降到56%。前十名的逆变器厂商市占率则达到76%。排名11~20的企业，市占率有所提升，从2018年的17%上升至2019年的19%。

前十大公司依次是：华为、阳光电源、SMA、Power Electronics、Fimer、上能电气、SolarEdge、古瑞瓦特、TMEIC、锦浪科技。这些厂商中，一半为中国公司。

全球 2019 年前 10 大逆变器厂商出货量 (2012-2019 年, 以兆瓦为单位)									
公司	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	合计
华为			4023	9083	18424	26047	23859	28121	109557
阳光电源	1393	3802	4234	8907	11101	16500	16700	17100	79737
SMA	7938	5361	5051	7260	8231	8538	8449	10564	61329
Power Electronics	455	672	963	1451	2846	2899	6327	7984	23596
Fimer	2960	3406	4382	5230	5968	6764	6651	6713	42074
上能电气	150	1000	1500	2533	3850	4514	5441	6378	25367
SolarEdge	233	277	601	1303	1723	2459	3919	5618	16134
古瑞瓦特	270	320	360	480	620	2500	1416	5402	11368
TMEIC	187	1347	2244	3817	4530	2713	2828	4320	21986
锦浪	63	49	302	541	860	2422	2898	4181	11316

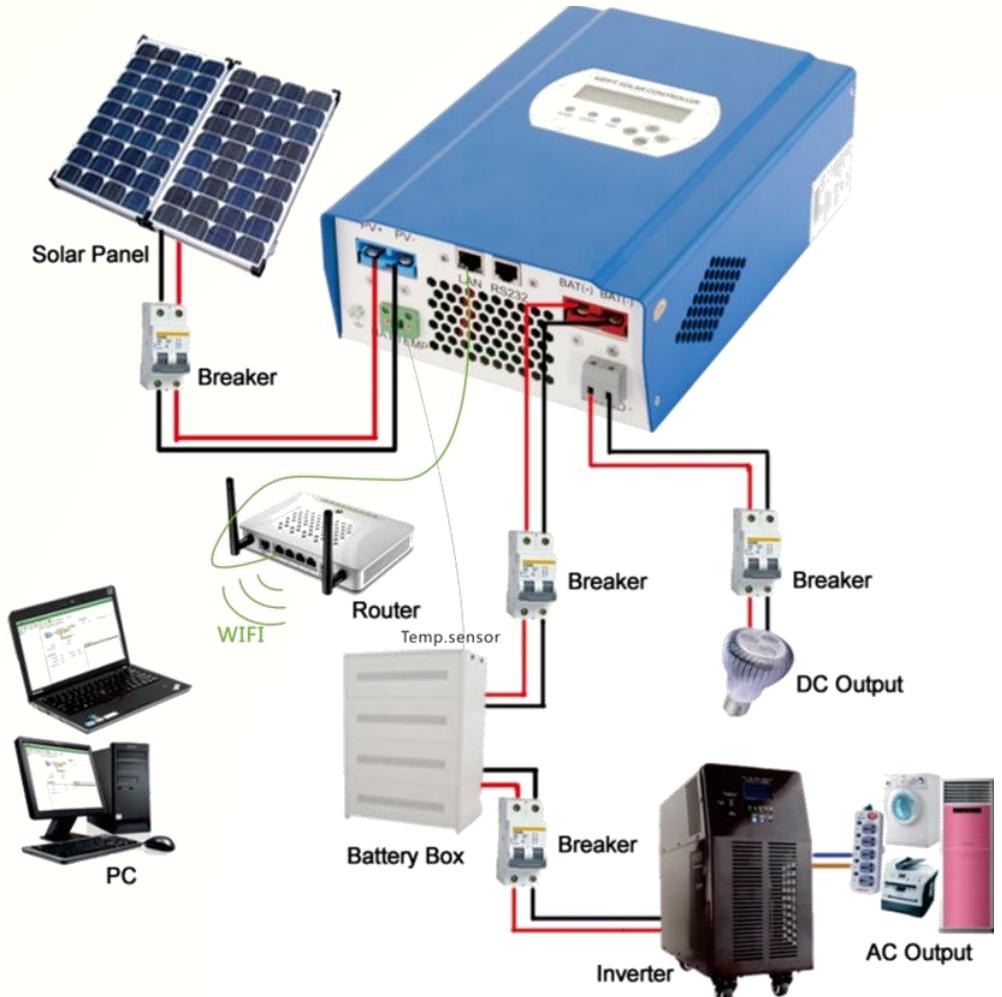
注：上图标红数字为估算的结果。

控制器



光伏控制器 (Controller of Photovoltaic Power Systems)

太阳能控制器全称为太阳能充放电控制器，是用于太阳能发电系统中，控制多路太阳能电池方阵对蓄电池充电以及蓄电池给太阳能逆变器负载供电的自动控制设备。它对蓄电池的充、放电条件加以规定和控制，并按照负载的电源需求控制太阳电池组件和蓄电池对负载的电能输出，是整个光伏供电系统的核心控制部分。



控制器



按照不同产品类型，包括以下两个类别：最大功率点追踪(MPPT)光伏太阳能充电控制器、脉冲宽度调制(PWM)光伏太阳能充电控制器



由于太阳能电池收到光强以及环境等外界因素的影响，其输出功率是变化的。带MPPT最大功率跟踪的逆变器就是为了充分的利用太阳能电池，使之运行在最大功率点。也就是说在太阳辐射不变的情况下，有MPPT后的输出功率会比有MPPT前的要高。



PWM就是脉冲宽度调制，比如，在电源5V的情况下，一个脉冲周期内，如果一半时间高电平，一半时间低电平，那么测量电压即为2.5V，此时要改变输出电压，只需要调整脉冲的占空比就可以，它与输出电压之间成正比例关系，以此就可以达到改变电压的目的。

控制器主要生产厂家



在光伏太阳能充电控制器市场的主要生产商中，Phocos保持了第一名，占全球利润市场份额的19%。

2020年，全球光伏太阳能充电控制器市场规模达到了21亿元，预计2026年将达到27亿元，年复合增长率(CAGR)为3.4%。主要生产商包括：

厂家	技术类型
Phocos (德国)	MPPT、PWM
Morningstar (美国)	MPPT、PWM
汇能精电 (中国)	MPPT、PWM
OutBack Power (美国)	MPPT
Victron Energy (荷兰)	MPPT、PWM
Studer Innotec (瑞士)	MPPT
Steca (德国)	MPPT、PWM
硕日新能源 (中国)	MPPT、PWM
远方动力 (中国)	PWM
武汉万鹏 (中国)	MPPT、PWM

并网柜



光伏并网柜，作为光伏电站的总出口存在于光伏系统中，是连接光伏电站和电网的配电装置，其主要作用是作为光伏发电系统与电网的分界点。对于低压并网的光伏电站，光伏并网柜中还可以加装计量、保护等功能器件。



主要生产厂家

e代家园（中国）

ABB（瑞士）

西门子（SIEMENS）（德国）

施耐德（Schneider）（法国）

德力西电气（DELIXI ELECTRIC）（中国）

鸿雁（HONYAR）（中国）

伊莱科（ELECALL）（中国）

WANQIAN（中国）

西蒙（SIMON）（西班牙）等

并网柜

大型光伏电站

在大型光伏电站中，可能存在多个并网点，这些并网点是电站发电的最后一站，是电站与电网系统的分界点，对于这些并网点的监测、保护十分重要，并网柜对于电站安全、运维、经济效益都有举足轻重的影响



分布式光伏发电

分布式电站中有数个并网点，与大型电站样这些并网点是电站发电的最后一站，是电站与电网系统的分界点，对于这些并网点的监测、保护十分重要，并网柜对于电站安全、运维、经济效益都有举足轻重的影响



家庭光伏

家庭光伏容量较小，通常只有一个并网点，此时的并网柜可以作为发电量统计、配电保护来使用。



光伏支架



光伏支架（ Photovoltaic bracket ）是太阳能光伏发电系统中为了支撑、固定、转动光伏组件而设计安装的特殊结构件。不同的支撑方式，最根本的区别就在于它们的**发电量**差异。当然，**初始投资和运行维护成本**也会有差别。

最佳倾角固定式（目前应用最广泛）



平单轴跟踪式



双轴跟踪式



支架主要生产厂家



中国光伏支架企业二十强排名

排名	企业名称	全球出货量(兆瓦)
1	江苏中信博新能源科技股份有限公司	2910
2	江苏国强镀锌实业有限公司	2730
3	天津仁汇新能源科技有限公司	2100
4	清源科技(厦门)股份有限公司	1775
5	苏州爱康金属科技有限公司	1723
6	深圳市安泰科建筑技术有限公司	1650
7	江苏威尔五金有限公司	1473
8	天津鑫润恒信新能源科技发展有限公司	1390
9	河南天丰集团	1281
10	索沃(厦门)新能源有限公司	923
11	天津市共益钢铁有限公司	785
12	迈贝特(厦门)新能源有限公司	726
13	江苏华康电力钢结构有限公司	672
14	江阴市泰坦光伏材料有限公司	650
15	江阴永嘉新能源科技有限公司	633
16	诺斯曼能源科技(北京)股份有限公司	589
17	中航百慕新材料技术工程股份有限公司	551
18	同景新能源科技(上海)有限公司	539
19	江西晶科光伏材料有限公司	500
20	江苏东升新能源技术有限公司	470



太阳能利用技术



工程热物理