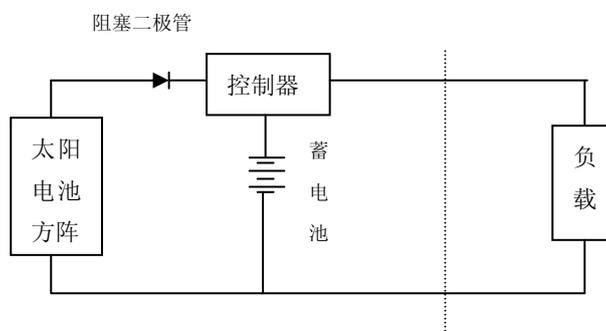


第一部分 地面太阳电池发电系统

太阳电池发电系统（又称光伏发电系统），按其使用场所不同，可分为空间应用和地面应用两大类。在地面可以作为独立的电源使用，也可以与风力发电机或柴油机等组成混合发电系统，还可以与电网联接，向电网输送电力。目前应用比较广泛的光伏发电系统主要是作为地面独立电源使用。

第一节 独立光伏系统系统概述

通常的独立光伏发电系统主要由太阳电池方阵、蓄电池、控制器以及阻塞二极管组成，其方框图如下：



1. 1. 1 太阳电池方阵

方阵的作用是将太阳辐射能直接转换成电能，供给负载使用。一般由若干太阳电池组件按一定方式连接，再配上适当的支架及接线盒组成。

1. 1. 2 蓄电池组

蓄电池组是太阳电池方阵的储能装置，其作用是将方阵在有日照时发出的多余电能贮存起来，在晚间或阴雨天供负载使用。

在光伏发电系统中，蓄电池处于浮充放电状态，夏天日照量大，除了供给负载用电外，还对蓄电池充电；在冬天日照量少，这部分贮存的电能逐步放出，在这种季节性循环的基础上还要加上小得多的日循环，白天方阵给蓄电池充电，（同时方阵还要给负载用电），晚上则负载用电全部由蓄电池供给。因此，要求蓄电池的自放电要小，而且充电效率要高，同时还要考虑价格和使用是否方便等因素。常用的蓄电池有铅酸蓄电池和硅胶蓄电池，要求较高的场合也有价格比较昂贵的镍镉蓄电池。

1. 1. 3 控制器

在不同类型的光伏发电系统中控制器各不相同，其功能多少及复杂程度差别很大，需

根据发电系统的要求及重要程度来确定。控制器主要由电子元器件、仪表、继电器、开关等组成。在简单的太阳电池，蓄电池系统中，控制器的作用是保护蓄电池，避免过充，过放。若光伏电站并网供电，控制器则需要有自动监测、控制、调节、转换等多种功能。如果负载用的是交流电，则在负载和蓄电池间还应配备逆变器，逆变器的作用就是将方阵和蓄电池提供的低压直流电逆变成 220 伏交流电，供给负载使用。

1. 1. 4 阻塞二极管

也称作为反充二极管或隔离二极管，其作用是利用二极管的单向导电性阻止无日照时蓄电池通过太阳电池方阵放电。**对阻塞二极管的要求是工作电流必须大于方阵的最大输出电流，反向耐压要高于蓄电池组的电压。**在方阵工作时，阻塞二极管两端有一定的电压降，对硅二极管通常为 0.6~0.8；肖特基或锗管 0.3V 左右。

第二节 太阳电池组件

太阳电池是将太阳光直接转换为电能的最基本元件。但单体太阳电池是不能直接做为电源使用的。因为单体电池薄而脆，容易碎裂，其电极的耐湿，耐腐蚀性能也还不能满足长期裸露使用的要求，而且单体太阳电池的工作电压太低，远不能满足一般用电设备的电压要求。因而需根据使用要求将若干单体电池进行适当的连接并经过封装后，组成一个可以单独对外供电的最小单元即组件。

1. 2. 1 组件电气性能的设计

在设计中主要是确定组件工作电压和功率这两个参数。同时还要根据目前材料、工艺水平和长寿命的要求，让组件面积比较合适，并让单体电池之间的连接可靠，且组合损失较小。

通过对单体太阳电池进行适当的串、并联，以满足不同的需要。**电池串联时，两端电压为各单体电池中电压之和，电流等于各电池中最小的电流；并联时，总电流为各单体电池电流之和，电压取平均值。**

组件设计举例：用 $\Phi 40\text{mm}$ 的单晶硅太阳电池（效率为 8.5%）设计一工作电压为 1.5 伏，峰值功率为 1.2 瓦的组件。

单晶硅电池的工作电压为： $V=0.41\text{v}$

则串联电池数： $N_s=1.5/0.41=3.66$ 片，取 $N_s=4$ 片

单体电池面积： $s=\pi/4d^2=\pi\times 4^2/4=12.57\text{cm}^2$

单体电池封装后功率： $P_m=100\text{mv}/\text{cm}^2 \times 12.57 \times 8.5\% \times 95\%=100\text{mw}=0.1\text{w}$

式中 95% 是考虑封装时的失配损失

需太阳电池总的片数： $N=1.2/0.1=12$ 片

太阳电池并联数： $N_p=N/N_s=12/4=3$ 组

故用 12 片 $\Phi 40\text{mm}$ 的单晶硅太阳能电池四串三并，即可满足要求。

联接的方法如图 7.1 但这种联接方法有缺点，一旦其中一片电池损坏、开路或被阴影遮住，损失的是一片电池的功率，而是整串电池都将失去作用，这在串联电池数目较多时影响尤为严重。为了避免这种情况，可以用混联（或称网状连接）的对应的电池之间连片连接起来，如图 7.2，这样，即使有少数电池失效（如有阴影线的），也不致于对整个输出造成严重损失。

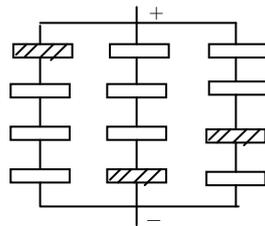


图 串并联

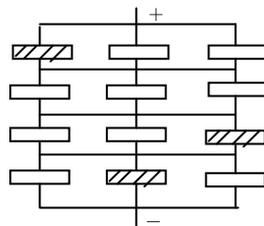


图 混联

1. 2. 2 组件的结构

单体电池联接后，即可进行封装，以前组件的结构多数是：正面用透光率高的玻璃覆盖，太阳能电池的前后面都用透明的硅橡胶粘接，背面用铝板式玻璃作依托，四周用铝质或不锈钢作边框，引出正负极即成组件。这种组件质量不易保证，封装劳动强度大。近些年来，国内外组件大多已采用新型结构；正面采用高透光率的钢化玻璃，背面是一层聚乙烯氟化物膜，电池两边用 EVA 或 PVB 胶热压封装，四周是轻质铝型材边框，有接线盒引出电极。

组件封装后，由于盖板玻璃，密封胶对透光的影响及各单体电池之间性能失配等原因，组件效率一般要比电池效率低 5~10%，但他也有些玻璃胶的厚度及折射率等匹配较好，封装后反而使效率有所提高。

太阳能电池组件经常暴露在阳光下直接经受当地自然环境的的影响，这种影响包括环境、气象和机械因素。为了保证使用的可靠性，工厂生产的太阳组件在正式投产之前一般要经过一系列的性能和环境试验，湿、温度循环、热冲击、高温高湿度老化、盐水喷雾、低湿老化、耐气候性、室外曝晒、冲击、振动等试验，如应用在特殊场合还要进行一些专门试验。

工厂生产的通用组件一般都已考虑了蓄电池所需充电电压，阻塞二极管和线路压降，以及温度变化等因素而进行了专门的设计，如用 36~40 片晶体硅太阳能电池串联而成的组件即可充分满足对 12V 蓄电池的充电需要。各种组件功率大小从数瓦到数十瓦不等，用户选用非常方便。

1. 2. 3 太阳能电池方阵

在实际使用中，往往一块组件并不满足使用现场的要求，可将若干组件按一定方式组装，在固定的机械结构上，形成直流发电的单元，即为太阳能电池方阵。

太阳能电池方阵在安装的时候，应固定牢靠，能够经受当地最大风力。且离地面要有一定的高度，以免冬天积雪掩埋。方阵与地面之间要有一定的倾角。有些方阵的组件两端并联有旁路二极管，有的方阵带有跟踪系统或聚光装置，下面分别加以讨论：

1. 2. 3. 1 方阵的倾角

太阳能电池方阵通常是面向赤道放置，相对地平面有一定倾角。倾角不同，各个月份方阵面接收到的太阳辐射量差别很大。对于全年负载均匀的固定式光伏方阵，如果设计斜面的辐射量小，意味着需要更多的太阳能电池来保证向用户供电；如果倾面各月太阳辐射量起伏很大，意味着需要大量的蓄电池来保证太阳辐射量低的月份的用电供应。这些都会提高整个系统的耗费。因此，确定方阵的最优倾角是光伏发电系统中不可缺少的一个重要环节。

对于方阵倾角的选择应结合以下要求进行综合考虑：

☞**连续性**。一年中太阳辐射总量大体上是连续变化的，多数是单调升降，个别也有少量起伏，但一般不会大起大落。

☐**均匀性**。选择倾角，最好使方阵表面上全年接收到的日平均辐射量比较均匀，以免夏天接收辐射量过大，造成浪费；而冬天接受到的辐射量太小，造成蓄电池过放以至损坏，降低系统寿命，影响系统供电稳定性。

☐**极大性**。选择倾角时，不但要使方阵表面上辐射量最弱的月份获得最大的辐射量，同时还要兼顾全年日平均辐射量不能太小。

同时，对特定的情况要作具体分析。如，有些特殊的负载（灌溉用水泵、制冷机等，）夏天消耗功率多，方阵倾角的取值当然应使得方阵夏日接收辐射量相对冬天要多才合适。

1. 2. 3. 2 旁路二极管

为了保证系统的可靠运行，有些系统还在组件两端并联旁路二极管，其作用是在组件开路或遮荫时，提供电流通路，不致于使整串组件失效（见下图）。使用时要注意极性，旁路二极管的正极与太阳能电池组件的负极相连，负极与组件的正极相连，不可接错。平时旁路二极管处于反向偏置状态，基本不消耗电能。显然，旁路二极管的耐压和允许通过正向电流应大于组件的工作电压及电流。

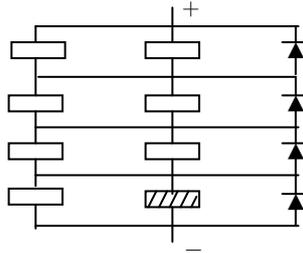


图 旁路二极管的连接

1. 2. 3. 3 跟踪系统

由于太阳的方位角和高度角每日每时都在作周期性的变化。固定方阵接收的太阳辐射能只有在中午时分才最强，如能使方阵面始终与太阳光线保持垂直，显然可以接收更多的辐射能量，因此要利用跟踪装置。

跟踪方式根据要求不同，可以单独跟踪太阳方位角（称一维跟踪），也可以同时跟踪太阳高度角（称二维跟踪），后者效果较好，但结构也相对复杂。

跟踪的方法有机械方法，物理方法，电子方法及计算机控制的高精度跟踪系统等。使用跟踪装置能提高太阳电池方阵的输出功率，但要增加部分投资，同时也带来了方阵结构的复杂性和不可靠因素，转动也要消耗一定的能量，所以采用跟踪系统是否合算，要进行综合考虑。一般小型方阵都不推荐采用跟踪装置。

1. 2. 3. 4 聚光

太阳电池方阵按接收的光线的方式的不同可以分为聚光式方阵和非聚光（平板式）方阵，前者是将太阳光聚到太阳电池上，以提高输出功率。经过聚光后，照在太阳电池上的光强可增加数倍到几百甚至上千倍，电池效率虽有提高，但并不与光强成正比，主要是由于聚光后电池的工作温度的升高而导致对效率影响的增加，因而要采用适当的冷却方法，如风冷或水冷等。

一般来说，聚光方阵都要采用跟踪方式，否则很可能对发电量产生负面影响。聚光方阵需要一套聚光、跟踪、冷却等装置，增加了系统的成本和复杂程度，但由于效率有所提高，尤其是在同时需供热的大型系统中，聚光方阵具有突出的优越性，因而聚光组件及方阵的研究还是有一定的价值的。

1. 2. 4 太阳电池发电系统的设计

一个完善的太阳电池发电系统需要考虑很多因素，进行各种设计，如电气性能设计、热力设计、静电屏蔽设计、机械结构设计等等，对地面应用的独立电源系统来说，最主要的是根据使用要求，决定太阳电池方阵和蓄电池规模，以满足正常工作的需求。

光伏发电系统总的设计原则是在保证满足负载用电需要的前提下，确定最少的太阳能电池组件和蓄电池容量，以尽量减少投资，即同时考虑可靠性及经济性。

1. 2. 4. 1 决定方阵发电量的因素

光照条件：太阳照在地面太阳能电池方阵上的辐射光的光谱，光强受到大气质量、地理位置、当地气候、气象、地形等多方面因素的影响，其能量在一日、一月和一年间都有很大的变化。

太阳能电池方阵的光电转换效率：由于转换效率受到电池本身的温度和太阳光强、蓄电池电压浮动等因素的影响，因而方阵的输出功率也随着这些因素的改变而出现一些波动。

负载用电情况：由于用途不同，耗电功率、用电时间、对电源可靠性的要求等各不相同。有的用电设备有固定的耗电规律，如中继站、航标灯等；有些负载用电则没有规律，如水泵。

这些因素相当复杂，原则上需要对每个发电系统单独进行计算，对一些无法确定数量的影响因素，只能采用一些系数来进行估量。由于考虑的因素及其复杂程度不同，采取的方法也不一样。在这里介绍一种比较简单而又实用的设计方法，这种方法不仅能说明所涉及的概念，而且对一般使用来说足够精确。

1. 2. 4. 2 太阳能电池发电系统的设计步骤

1、列出基本数据

- A、所有负载的名称、额定工作电压、耗电功率、用电时间、有无特殊要求等。
- B、当地的地理位置：包括地名、经度、纬度、海拔等。
- C、当地的气象资料：主要有逐月平均太阳总辐射量，直接辐射及散射量，年平均气温及极端气温，最长连续阴雨天数、最大风速及冰雹等特殊气候情况。这些气象数据需取积累几年或几十年的平均值。

2、确定负荷大小：算出所有负载工作电流与平均每天工作小时数相乘积之和。

$$Q = \sum I * H$$

3、选择蓄电池容量：

蓄电池储备容量的大小主要取决于负载的耗电情况，此外还要考虑现场的气候条件，环境温度，系统控制的规律性及系统失效的后果等因素，通常储备 10~20 天容量比较适宜。

蓄电池在太阳能电池系统中处于浮充电状态，充电电流远小于蓄电池要求的正常充电电流。尤其在冬天，太阳辐射量小，蓄电池常处于欠充状态，长期深放电会影响蓄电池的寿命，故必须考虑留有一定余量，常以**放电深度**来表示：

$$d = \frac{C - C_R}{C} \quad (7.2)$$

式中：d---放电深度 C---蓄电池标称容量 C_R---蓄电池储备容量

过大的放电深度会缩短蓄电池的寿命；过小的放电深度又会增加太阳能电池方阵的规模，加大总的投资成本，放电深度最大到 80%较为合适。当然，随着太阳能电池组件价格的下降，可以允许设计较浅的放电深度。

这样，确定蓄电池的储备容量 C_R 和放电深度后，即可初步选定蓄电池的标称容量：

$$C = (10 \sim 20) \frac{Q}{d} \quad (7.3)$$

式中：Q——负载每天平均总耗电量

4. 决定方阵倾角：

在这里，我们来用一种较近似的方法来确定方阵倾角。一般地，在我国南方地区，方阵倾角可取比当地纬度增加 $10^\circ \sim 15^\circ$ ；在北方地区倾角可比当地纬度增加 $5^\circ \sim 10^\circ$ ，纬度较大时，增加的角度可小一些。在青藏高原，倾角不宜过大，可大致等于当地纬度。同时，为方阵支架的设计，安装方便，方阵倾角常取成整数。

5. 计算日辐射量

从气象站得到的资料一般只有水平面上的太阳辐射总量 H ，直接辐射量 H_b 及散射辐射量 H_d

且有： $H \sim H_b + H_d$

需换算成倾斜面上的太阳辐射量。

(1). 直接辐射分量 H_{BT}

$$H_{BT} = H_B R_B$$

其中 R_B 为倾斜面上的直接辐射分量与水平面上直接辐射分量的比值。对于朝向赤道的倾斜面来说：

$$R_B = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin(\omega_{ST}) + \frac{\pi}{180} \omega_{ST} \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (7.6)$$

式中： ϕ ——当地纬度

β ——方阵倾角

$$\text{太阳赤纬: } \delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right]$$

$$\text{水平面上日落时角: } \omega_s = \cos^{-1} [-\tan \phi \cdot \tan \delta]$$

$$\text{倾斜面上日落时角: } \omega_{ST} = \min \{ \omega_s, \cos^{-1} [\tan(\phi - \beta) \cdot \tan \delta] \}$$

(2)、天空散射辐射分量 H_{dT}

$$\text{在各向同性时: } H_{dT} = \frac{H_d}{2} (1 + \cos \beta)$$

(3)、地面反射辐射分量 H_{rT} ：

通常可将地面的反射辐射看成是各向同性的，其大小为：

$$H_{rT} = \frac{\rho}{2} H(1 - \cos \beta)$$

其中 ρ 为地面反射率，其数值取决于地面状态，各种地面的反射率如下表所示：

地面状态	反射率	地面状态	反射率	地面状态	反射率
沙漠	0.24~0.28	干湿土	0.14	湿草地	0.14~0.26
干燥裸地	0.1~0.2	湿黑土	0.08	新雪	0.81
湿裸地	0.08~0.09	干草地	0.15~0.25	冰面	0.69

一般计算时，可取 $\rho=0.2$

故斜面上太阳辐射量即为：

$$H_T = H_B R_B + \frac{H_d}{\pi} (1 + \cos \beta) + \frac{\rho}{2} H(1 - \cos \beta)$$

通常计算时用上式即可满足要求。如考虑天空散射的各向不同性，则可用下式计算：

$$H_T = H_B R_B + H_d \left[\frac{H_B}{H_0} R_B + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{H_B}{H_0} \right) (1 + \cos \beta) \right] + \frac{\rho}{2} H(1 - \cos \beta)$$

式中： H_0 为大气层外水平面上辐射量。

6、估算方阵电流：

将历年逐月平均水平面上太阳直接辐射及散射辐射量，代入以上各公式即可算出逐月辐射总量，然后求出全年平均日太阳辐射总量 $\overline{H_T}$ ，单位化成 mwh/cm²，除以标准日光强即求出平均日照时数：

$$T_m = \frac{\overline{H_T} \text{mwh} / \text{cm}^2}{100 \text{mw} / \text{cm}^2}$$

则方阵应输出的最小电流为：

$$I_{\min} = \frac{Q}{T_m \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}$$

式中：Q—负载每天总耗电量

η_1 —蓄电池充电效率

η_2 —方阵表面灰尘遮蔽损失

同时，由于倾斜面上各月中最小的太阳总辐射量可算出各月中最少的峰值日照数 T_{\min} 。方阵应输出的最大电流为：

$$I_{\max} = \frac{Q}{T_{\min} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}$$

7、确定最佳电流：

方阵的最佳额定电流介于 I_{\min} 和 I_{\max} 这两个极限值之间，具体数值可用尝试法确定。先选定一电流值 I ，然后对蓄电池全年荷电状态进行检验，方法是按月求出方阵输出的发电量：

$$Q_{\text{out}} = I \times N \times H_T \times \eta_1 \times \eta_2 / 100 \text{mw} / \text{cm}^2$$

式中： N ——当月天数

而各月负载耗电量为：

$$Q_{\text{load}} = N \cdot Q$$

两者相减， $\Delta Q = Q_{\text{out}} - Q_{\text{load}}$ 为止，表示该月方阵发电量大于耗电量，能给蓄电池充电。若 ΔQ 为负，表示该月方阵发电量小于耗电量，要用蓄电池储存的能量来补足。

如果蓄电池全年荷电状态低于原定的放电深度，就应增加方阵输出电流；如果荷电状态始终大大高于放电深度允许的值，则可减少方阵电流。当然也可相应地增加或减少蓄电池容量。若有必要，还可修改方阵倾角，以求得最佳的方阵输出电流 I_m 。

8、决定方阵电压：

方阵的电压输出要足够大，以保证全年能有效地对蓄电池充电。方阵在任何季节的工作电压应满足：

$$V = V_f + V_d$$

式中： V_f ——蓄电池浮充电压

V_d ——因线路(包括阻塞二极管)损耗引起的电压降

9、最后确定功率：

由于温度升高时，太阳电池的输出功率将下降，因此要求系统即使在最高温度下也能确保正常运行，所以在标准测试温度下(25°C)方阵的输出功率应为：

$$P = \frac{I_m \cdot V}{1 - \alpha(t_{\max} - 25)}$$

式中： α ——太阳电池功率的温度系数。对一般的硅太阳电池，

$\alpha = 0.5\%$

t_{\max} ——太阳最高工作温度。

这样，只要根据算出的蓄电池容量，太阳电池方阵的电压及功率，参照生产厂家提供的蓄电池和太阳电池组件的性能参数，选取合适的型号即可。

第三节 太阳电池发电系统设计实例

为西安地区设计一座全自动无人指导 3 瓦彩色电视差转站所用的太阳能电源，其工作

条件如下：电压为 24V，每天发射时间 15 小时，功耗 20 瓦，其余 9 小时为接收等候时间，功耗为 5 瓦。

1、列出基本数据：

A、负载耗电情况：

工作条件	功耗	电压	每天工作时间
发射期间	5w	24v	15 小时
等候期间	20w	24v	9 小时

B、西安纬度：北纬 34°18'东经 108°56'海拔 396.9 米。

C、有关气象资料见后列表格。

2、确定负载大小：

每天耗电量： $\alpha = \Sigma I \cdot h = 20 \times 15 / 24 + 9 \times 5 / 24 = 14.4 \text{ Ah}$

3、选择蓄电池容量：

选蓄电池容量为 10 天，放电深度 $\alpha = 75\%$

$C = 10 \times Q / d = 10 \times 14.4 / 75\% = 205.7 \text{ Ah}$

根据蓄电池的规格。取 $C = 200 \text{ Ah}$

4、决定方倾角：

因当地纬度 $\Phi = 34^\circ 18'$ ，取 $\beta = \Phi + 10^\circ = 45^\circ$

5、计算倾斜面上各月太阳辐射总量

由气象资料查得水平面上 20 年各月平均太阳辐射量 H ， H_b 及 H_α ，计算出倾斜面上各月太阳辐射击总量，结果见下表：

月份	H	H_b	H_α	N	δ	R_b	H_{BT}	H_{dT}	H_{FT}	H_T
1	219.0	91.6	127.4	16	-21.10	2.033	186.2	108.7	6.4	301.3
2	264.2	106.2	158.0	46	-18.29	1.899	201.7	134.9	7.7	344.3
3	327.6	123.7	203.9	75	-2.42	1.261	156.0	174.0	9.6	339.6
4	398.9	156.0	242.9	105	9.41	0.956	149.1	207.3	11.7	368.1
5	465.4	215.1	250.3	136	19.03	0.766	164.8	213.7	13.6	392.1
6	537.9	279.1	258.8	167	23.35	0.690	192.6	220.9	15.8	429.3
7	506.5	268.3	238.2	197	21.35	0.726	194.8	203.3	14.8	412.9
8	505.9	294.2	211.7	228	13.45	0.871	256.2	180.7	14.7	451.7
9	328.2	157.9	170.3	258	2.22	1.129	178.3	145.4	9.6	333.3
10	272.8	129.0	143.8	289	-9.97	1.514	195.3	122.7	8.0	326.0
11	224.3	98.6	125.7	319	-19.15	1.922	189.5	107.3	6.6	303.4
12	200.4	83.9	116.5	350	-23.37	2.173	182.3	99.4	5.9	287.6

其中：n 为从一年开头算起的天数。H 为水平面上的辐射量， H_T 为倾斜 45 度平面上的辐射量，单位为 mwh/cm^2 。

6. 估算方阵电流:

由上表可知, 倾斜面上全年平均日辐射量为 $357.5\text{mwh}/\text{cm}^2\cdot\text{d}$, 故全年平均峰值日照时数为:

$$T_m = \frac{357.5\text{mwh}/\text{cm}^2 \cdot d}{100\text{mw}/\text{cm}^2} = 3.58\text{h}/d$$

取蓄电池充电效率为: $\eta_1=0.9$; 方阵表面的灰法尘遮损失为 $\eta_2=0.9$, 算出方阵应输出的最小电流为:

$$I_{\min} = \frac{Q}{T_m \eta_1 \eta_2} = \frac{14.4}{3.58 \times 0.9 \times 0.9} = 4.97\text{A}$$

由上表查出在 12 月份倾斜面上的平均日辐射量最小, 为 $287.6\text{mwh}/\text{cm}^2\cdot\text{d}$ 相应的峰值日照数最少, 只有 $2.88\text{h}/\text{d}$ 。

则方阵输出的最大电流为:

$$I_{\max} = \frac{Q}{T_{\min} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} = \frac{14.4}{2.88 \times 0.9 \times 0.9} = 6.17\text{A}$$

7. 确定最佳电流:

根据 $I_{\min}=4.97\text{A}$ 和 $I_{\max}=6.17\text{A}$ 选取 $I=5.4\text{A}$, 将方阵各月输出电量及负载耗电量以及蓄电池的荷电状态计算列表 7.3。

由表 7.3 可见, 即使从 10 月份开始, 连续 7 个月蓄电池未充满, 但最少时容量仍有 37.1%, 即放电深度最大只有 62.9%, 未超过 75%, 所以取 $I=5.4\text{A}$ 是合适的。

如果计算结果放电深度远小于规定的 75%, 则可减少方阵输出电流或蓄电池容量, 重新进行计算。

8. 决定方阵电压:

单只铅酸蓄电池工作电压为 2V, 故需 12 只单体电池串联才可满足系统的工作电压 24V。每只单体铅酸电池的工作电压为: 2.0~2.35V, 取线路压降: $V_\alpha=0.8\text{V}$, 则方阵工作电压为:

$$V=V_f+V_\alpha=12 \times 2.35+0.8=29\text{V}$$

月	月安时数	蓄电池状态
---	------	-------

份	方阵输出	负载消耗	差值	开始	終了	%全充
1	408.6	446.4	-37.8	200	162.2	81.1
2	421.7	403.2	18.5	162.2	187.7	90.4
3	460.5	446.4	14.1	180.7	194.8	97.4
4	482.9	432.0	50.9	194.8	200	100
5	531.7	446.4	85.3	200	200	100
6	563.2	432.0	131.2	200	200	100
7	559.9	446.4	113.5	200	200	100
8	612.5	446.4	166.1	200	200	100
9	437.3	432.0	5.3	200	200	100
10	442.1	446.4	-4.3	200	195.7	97.9
11	398.1	432.0	-33.9	195.7	161.8	80.9
12	390.0	446.4	-49.2	161.8	112.6	56.3
1	408.6	446.4	-37.8	112.6	74.2	37.1
2	421.7	403.2	18.5	74.2	92.7	46.4
3	460.5	446.4	14.1	92.7	106.8	53.4
4	482.9	432.0	50.9	106.8	157.7	78.9
5	531.7	446.4	85.3	157.7	200	100

9、确定最后功率：

设太阳能电池的最高温度为 60℃, 则由(7.1--20)式中可算出需的方阵的输出功率为

$$P=I_m*V/[1-\alpha(t_{max}-25)]=5.4*29/[1-0.5\%(60-25)]=189.8W$$

取 P=192W

所以,最后取太阳能电池方阵的输出功率为 192W,可用 6 块 32 瓦的组件(每块电压约为 16 伏)2 串 3 并而成。蓄电池容量为 24V, 200AH, 只要用 4 只 6Q—100 铅酸电池以 2 串 2 并的方式连接起来的,即可满足需要。

第四节 光伏系统的安装及维护

光伏发电系统在设计制造完成后,要运到现场进行安装.使用现场往往是在偏远的地区,道路崎岖,交通不便,在运输中,所有部件都要妥善包装.如组件等易碎物品要用木箱装运,以免损坏,蓄电池不能倾倒,防止电解液溢出。

1. 4. 1 安装注意事项

在建造光伏发电系统过程中,安装是个很重要的环节。

- 1、安装时最好用指南针确定方位,并应注意在方阵前全天不能有高大建筑物或树木等遮阳光。
- 2、仔细检查地脚螺钉及方阵支架等是否结实可靠,所有螺钉接线柱等均应拧紧,不能有松动。
- 3、方阵安装在房顶上的要采取防火措施。

- 4、在高处安装的方阵应设避雷针。必要时还需设置驱鸟装置。
- 5、阳光下安装时注意不要同时接触组件（尤其是方阵）的正、负两极，以免电击。必要时可用不透明材料覆盖后再接线或安装。
- 6、安装组件时要轻拿轻放，严禁碰撞、敲击，以免损坏。
- 7、注意组件，二极管、蓄电池、控制器等极性不要接反。
- 8、蓄电池室应保持通风干燥、清洁。在北方冬天寒冷，蓄电池应采取保暖措施。

1. 4. 2 光伏系统的维护

太阳能电池发电系统没有活动部件，不容易损坏，其维护也非常简便。不过也需作定期维护，否则可能影响正常使用，甚至缩短使用寿命。

(1) 一般来说，方阵倾角超过 30° 时，所以灰尘可由雨水冲刷而自行清洁，不过在风沙较大地区，应当经常清除灰尘，保持方阵表面的干净，以免影响发电量。这对于小型有用电源系统是不难做到的。

清洁时可揩去尘土，有条件可用清水清洗，再用干净抹布擦干。切勿用腐蚀性溶剂或硬物冲洗擦拭。

- (2) 定期检查所有安装部件的紧固程度。
- (3) 遇到冰雹、狂风、暴雨等异常天气，应及时采用保护措施。
- (4) 经常检查蓄电池的充电放电情况，定期测量电解液的比重，及时添加新的电解液。随时观察电极或接线是否有腐蚀或接触不良之处。
- (5) 在一些简单的系统中应根据储能情况，控制用电量，防止蓄电池因过放而损坏。
- (6) 发现有异常情况应当立刻检查、维修。

第二部分 风光互补系统

第二部分 风光互补系统

风能、太阳能都是无污染的、取之不尽用之不竭的可再生能源，“六五”、“七五”期间，小型风电和太阳光电系统在我国已得到初步应用。这两种发电方式各有其优点，但风能、太阳能都是不稳定的、不连续的能源，用于无电网地区，需要配备相当大的储能设备，或者采取多能互补的办法，以保证基本稳定的供电。我国属季风气候区，一般冬季风大，太阳辐射强度小；夏季风小，太阳辐射强度大，正好可以相互补充利用。

风—光互补联合发电系统有很多优点：（1）利用太阳能、风能的互补特性，可以获得比较稳定的总输出，提高系统供电的稳定性和可靠性；（2）在保证同样供电的情况下，可大大减少储能蓄电池的容量；（3）对混合发电系统进行合理的设计和匹配，可以基本上由风/光系统供电，很少启动备用电源如柴油发电机等，并可获得较好的社会效益。所以综合开发利用风能、太阳能，发展风/光互补联合发电有着广阔的前景受到了很多国家的重视。

2. 1 风力资源

2. 1. 1 风的形成及其特性

风是一种自然现象，它是由太阳辐射热引起的。从太阳传到地球的能量中，大约有 2% 的能量转变成风能。地球上全部风能估计约为 2×10^{17} 千瓦，其中，可利用的约为 2×10^{10} 千瓦，这个能量是相当大的。

风的变化

众所周知，风随时间、离地高度、地形和环境而变化。

A: 风随时间的变化

在一天之内，风的强弱可能不同。在地面上，白天风大，而夜间风小；相反，在高空却是夜间风大，白天风小。在沿海地区，由于陆地和海洋热容量不同，白天产生海风（从海洋吹向陆地）；夜间产生陆风（从陆地吹向海洋）。在不同的季节，太阳和地球的相对位置也发生变化，使地球上存在季节性温差，因此，风向和风的强度也会发生季节性变化。在我国，大部分地区的风的季节性变化情况是：春季最强，冬季次强，秋季第三，夏季最弱。

B: 风随高度的变化

由于空气的粘性和地面摩擦的影响，风速随高度而变化，可用下面的公式表示：

$$V=V_1(h_1/h_2)^n$$

其中 V_1 ——高度为 h_1 处的风速；
 h_1 ——高度（一般为 10 米）
 V ——待测高度 h 处的速度；

h ——待测点离地高度；

n ——指数，由大气稳定性和地表的粗糙程度来决定，其值约为 $1/2 \sim 1/8$ 。稳定性居中的开阔平地取 $1/7$ ，粗糙度大的大城市常取 $1/3$ ，一般上下风速差较小， n 较小，反之 n 值取大。

风速随高度变化及其大小情况，因地面的平坦度，地表粗糙度以及风通道上的气温变化不同而异。特别是受地表粗糙度的影响程度最大。

C、风的随机性变化：

自然风是一种平均风速与激烈变动的瞬间紊乱气流相重合的风。气流紊乱主要与地面的摩擦，除此之外，当风速与稳定层是垂直分布时会产生重力波，在山风下测也会产生山岳波等。这种紊乱气流不仅影响风速，也明显影响风向。

利用风力驱动风力机时，因此收集关于风向变化的资料也是很重要的。

如果按时间区分，可将风向的变化区分为： \square 一年或一个月内风向的趋势； \square 短时间内变动的紊乱气流； \square 介于两者之间的平均风向。对于第一种风向的变化状况，如制成风向玫瑰图（风向频度），便可清楚地看出风向的大致趋势，如图 7.4。对风速，一般采用年平均风速时间曲线（表示一地方一年中各种风速小时数）来进行记录。如图 7.5。

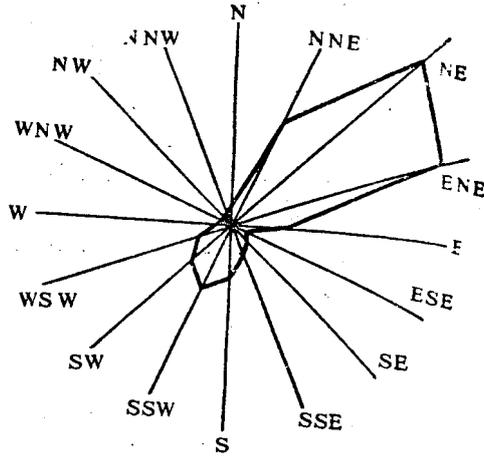


图 风玫瑰图

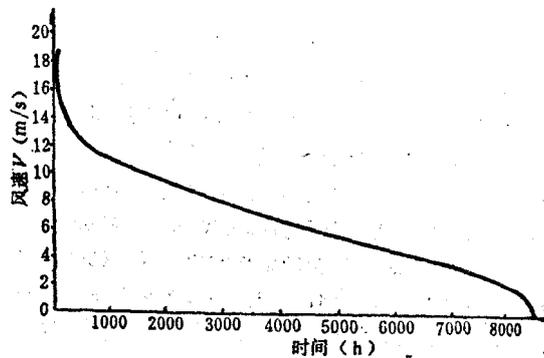


图 年平均速度时间曲线

风能资源

空气运动具有动能，如果风力机风轮的断面积为 A ，则当一般体积为 AV 的空气在单位时间内流经风轮时，该空气传递给风轮的风能功率（一般称为风能）为

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot Av = \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad (7.2.1-2)$$

式中 ρ ——空气密度 (Kg/m^3)；

A ——风力机叶片旋转一圈所扫过的面积 (m^2)；

V ——风速 (m/s)；

P ——每秒钟空气流过风力机风轮断面积的风能，即风能功率 (W)

如果风力机的风轮直径为 D ，则

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (7.2.1-3)$$

这时
$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3 \quad (7.2.1-4)$$

若有效风速时间为 t ，则在时间 t 内的风能为

$$E = P \cdot t = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3 t \quad (7.2.1-5)$$

由上式可知，风能与空气密度 ρ 、风轮直径的平方 D^2 、风速的立方 V^3 和风持续时间 t 成正比。一般说来，一定高度范围内的空气密度可以认为是一个常数。因此，当风力机的风轮越大，有效风速时间越长，特别是风速越大，则风力机所能获得的风能就越大。

表征一个地点的风能资源潜力，要视该地区常年平均风能密度的大小。风能密度是单位面积上的风能，对于风力机来说，风能密度是指风轮扫过单位面积的风能，即

$$W = \rho / A = \rho 1/2 V^3 \quad (\text{W/m}^2) \quad (7.2.1-6)$$

式中 W ——风能密度 (W/m^2);

ρ ——空气密度 (Kg/m^3);

V ——风速 (m/s)。

常年平均风能密度为

$$\bar{W} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho v^3 dt \quad (7.2.1-7)$$

式中， \bar{W} —平均风能密度 (W/m^2)

T —总的时间 (h)

在实际应用时，常用下式来计算某地年（月）风能密度，即

$$W_{\text{年(月)}} = \frac{W_1 t_1 + W_2 t_2 + \cdots + W_n t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n} \quad (7.2.1-8)$$

式中： $W_{\text{年(月)}}$ —一年（月）风能密度 (W/m^2);

W_i ($1 \leq i \leq n$)—各等级风速下的风速密度 (W/m^2)

T_i ($1 \leq i \leq n$)—各等级风速在每年（月）出现的时间 (h)。

在我国，风力资源比较丰富。据估计，我国风能储量为 2.2×10^3 千瓦时以上。

2.2 风力机

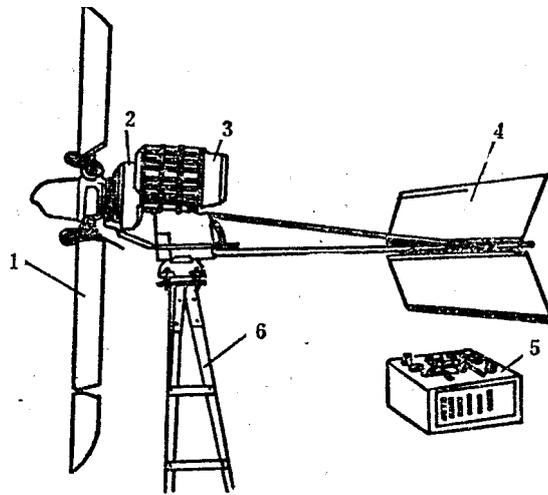
1、分类

风力机是风能利用中一种最重要的风能转换装置。风力机可用于发电、提水、搅拌池水充氧和致热等。它主要有下列三种分类方法：

☞按风力机功率：分为大中小型风力机。功率在 10 千瓦以下的风力机叫小型风力机，10 至 100 千瓦叫中型风力机，100 千瓦以上叫大型风力机。

☐按风力机风轮轴位置：分为水平轴风力机和垂直轴风力机。水平轴风力机的风轮轴与风向平行（图 7.6），而垂直轴风力机的风轮轴与风向垂直（图 7.7）

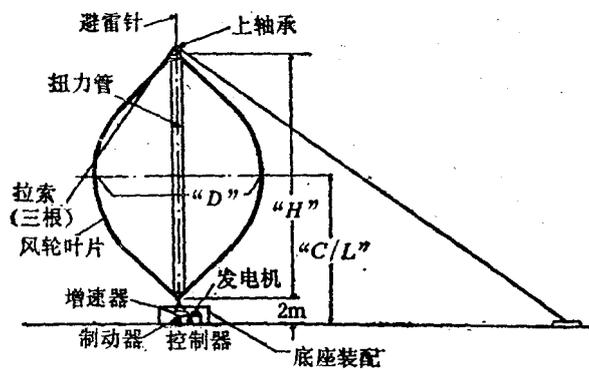
☐按风轮转速：分为高速风力机和低速风力机。



图水平轴风力发电机

1—风轮；2—调速控制系统；3—发电机（做功装置）；4—尾轮（方向控制）；
5—蓄电池（储能装置）；6—塔架；7—轮壳。

图 垂直轴风力机



2、风力机的性能和特点

(1) 功率吸收

风轮从风中吸收的功率等于风轮效率 η 乘以通过风轮扫掠面的体积流量 $V_T A_T$ ，再乘上压力加动能变化 $\Delta \rho + \Delta \theta$ 之和：

$$P = \eta V_T A_T (\Delta \rho + \Delta \theta)$$

对于常规的水平轴风力机，设风的初始速度为 V_0 ，当空气接近风轮时，空气速度逐渐减小，直到通过风轮，并离开一段距离，速度却是下降的。当空气的速度增加，直到速度达到初始速度。

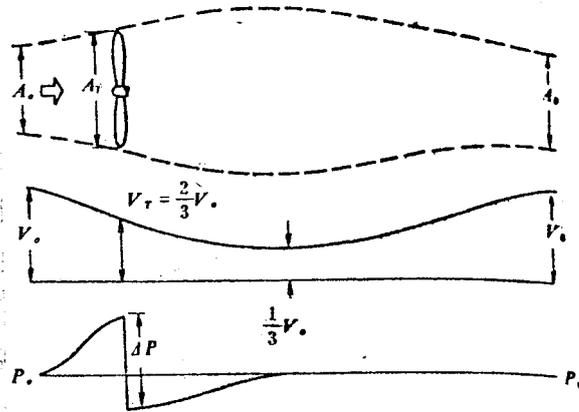


图 水平轴风力机的最佳性能

当空气吹过风轮时，单位体积的压力的压力能和动能之和是常数。压力能增加，动能减小。在风轮面上，压力能达到最大。当空气通过风轮时，空气将动能传给风轮，压力能大大下降，低于大气压。当空气离开风轮向后运动时，空气压力增加，直到达到大气压。空气通过风轮后，它的动能进一步下降，直到它的压力恢复到大气压。

流经风轮的气流流管的横截面积与空气的速度成反比，当空气流向风轮，通过风轮，直到离开它一段距离，空气的流管是膨胀的。当扰动的空气从周围的风中吸取动能之后，由于气流中的扰动弥散，风轮的影响消失。

风轮的效率（功率）系数定义为风轮提供的功率除以风轮扫掠面内气流的总有用功率：

$$\text{功率系数: } C_p = \text{风轮提供功率} / \frac{1}{2} \rho A_T V_0^3 \quad (7.2.1-10)$$

从动量理论得知：风轮从空气中吸收的最大能量是通过风轮空气的动能的九分之八。这时，风速的最大损失是空气初始速度 V_0 的三分之二。

风轮的最大功率系数为：

$$\frac{\rho_{\max}}{A_T} = \frac{2}{3} V_0 \left[\frac{8}{9} \frac{(\rho V_0^2)}{2} \right] = 0.593 \frac{\rho V_0^2}{2} \quad (7.2.1-11)$$

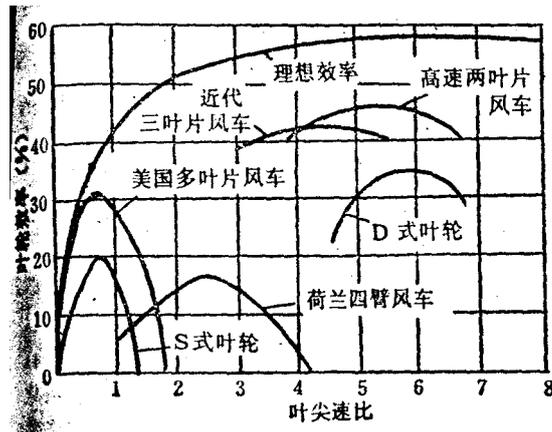
其中， $\rho V_0^3/2$ 是空气单位体积的功率密度。系数 0.593 称为贝兹系数，这是风轮的最大功率系数。

(2) 典型功率系数

理想风轮的功率系数随叶片尖端速度与风速之比（尖速比 λ ）而变化。当尖速比 λ 达到 5 或 6 时，功率系数达到最大 0.59。

试验表明，具有较好气动外形的二叶片风轮，当其转动速度较大；尖速比为 5 或 6 时，功率可达 0.47。

同样，对于垂直轴风力机，达里厄风轮在圆周速度和空气速度之比为 6 时，最大功率系数可达 0.35。还有其他形式的风轮，最大功率系数较低，对应的尖速比都小于高速水平轴风轮和垂直轴达里厄风轮（图 7.9）。



图典型功率系数

(3) 输出特性:

具有固定桨距的水平轴风轮产生的扭矩随风速和转速变化。如果叶片的旋转速度太低，叶片将失速，风轮输出的扭矩下降，因此为了从气流中取得最大功率输出（当气流速度变化时）必须改变叶片的桨距角或叶片的转速。现在很多风力机风轮都设计成变桨距叶片，使风轮以常转速运行。

当风速额定风速，风轮转速必须随风速改变，以便从空气中取得最大功率。但对于由风轮驱动的同步或异步交流发电机来说，这并不是最佳的。这种不匹配问题对于风轮及其输出关系来说是很重要的。解决的方法之一是准许风轮转速随风速变化，同时使用变速恒频发电系统，以得到电网所需的常频电流。为此，可使用差动装置。

美国 MOD—0 风力机，在风速大于额定风速时，为简化设计，减小功率，风轮的功率系数 $C_p=0.35$ 。该机的最大理论输出如下图的虚线所示。在风速为 27 米/秒时，输出功率应为 4935 千瓦。然而，带有固定增速比齿轮传动装置的同步系统发电机只能是常转速，所以风轮转速要一定。除去摩擦损失之后，在切入速度 3.8 米/秒和额定风速 8 米/秒之间，可以保持理想的最大输出。通过改变系统输出载荷，可以保持风轮转速为 40 周/分。当风速大于 8 米/秒时，通过改变风轮叶片的桨距角保持风轮转速为 40 周/分。用这样的方法，在额定风速 8 米/秒和切出风速 27 米/秒之间，保持恒定的功率输出，在 27 米/秒时，风轮叶片顺桨，保护风力机。这种风力机不会导致有效风能很大的损失。

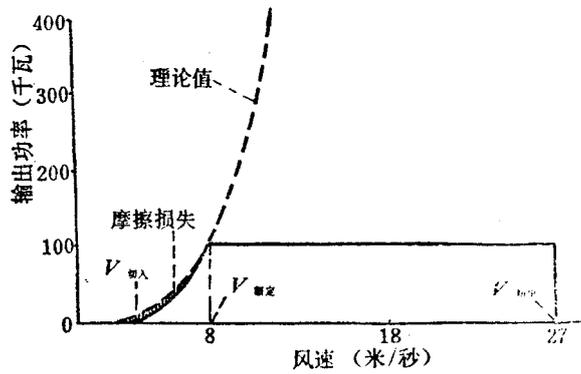


图 MOD-0 风力机（风轮直径 38 米，额定功率 100 千瓦）的功率输出。

理论功率密度时间曲线表示在风场上具有特定功率系数的风力机，在一年内，能提供某一功率密度的小时数。在这样一条功率密度曲线下的面积表示安装在该风场上风力机的风轮单位面积上每年产生的总的有效能量。例如：一台功率系数为 0.35 的风力机，安装在具有下图功率密度时间曲线的风场上，风轮扫掠面每平方米面积上能产生 1000 瓦以上的功率小时数，每年为 876 小时。

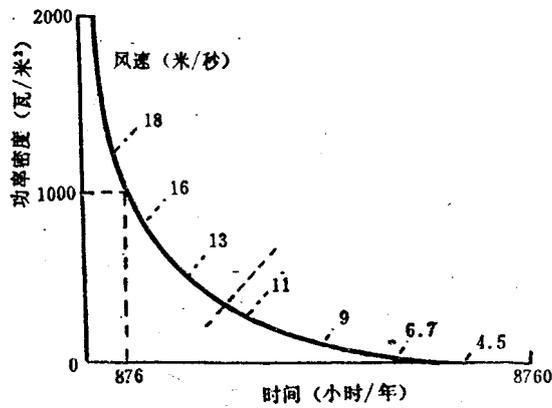


图 $C_p=0.35$ 风力机的理论功率密度时间曲线

这样的风力机，带有固定传动比的增速装置驱动的固频交流发电机，其实际功率密度小于上述理论值。例如，这种风力机的切入风速为 6.7 米每秒，额定风速为 13.4 米/秒。切出风速为 27 米/秒，而实际输出功率密度按图 7.12 虚线变化。每年的实际能量密度输出用虚线下的暗影面积表示。

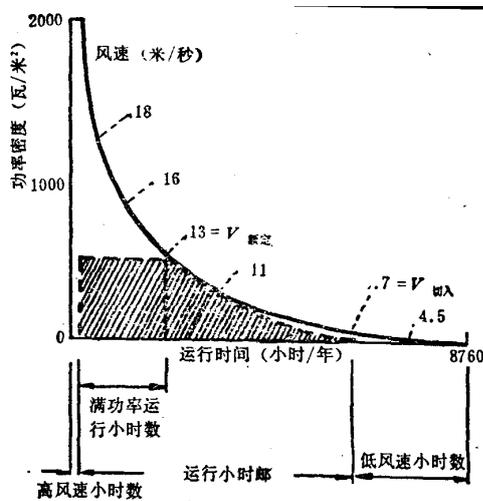


图 每年实际功率密度输出（一台风力机）

因为气流的功率随空气速度和风轮扫掠面变化，所以当风场的风速增加和风轮直径平增大，都能使风力机的功率输出增加。

然而，为了降低风能利用成本，风力机的大小和安装地点必须认真选择。

（4）附加载荷

当风力机运行时，还会产生几种附加载荷，对叶片的运动产生很大的影响。它包括陀螺力、叶片不平衡力、风剪切、风的不均匀性、阵风、重力和塔尾流的影响。这些载荷可能引起叶片、塔架、轴承和其它部件周期运动和振动，并且会对风力机系统的可靠性、寿命和性能产生严重的影响。当设计风力机时，这些载荷都需要仔细进行分析。

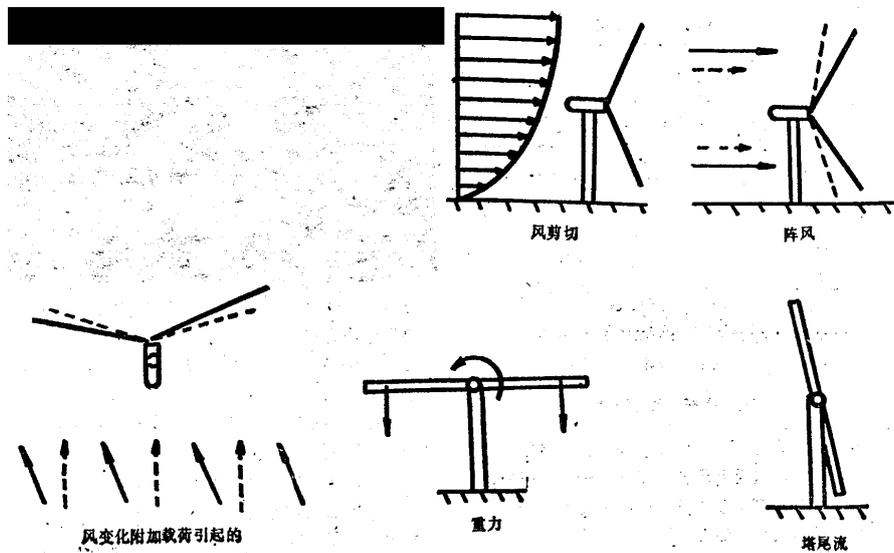


图 风力机的附加载荷

(5) 生产能量的成本

虽然风力机的成本随着尺寸的增大而增加，但是风力机每千瓦的成本随着尺寸增大而下降，运输成本也随尺寸增大而下降。从经济上讲，最好使用大型风力机，越大越好。然而，由于目前制造和运行可靠性的限制，风力机的尺寸还不能太大。另外，风力机成本随额定风速的增加而下降。根据这个估算，批量生产的大型风力发电机（兆瓦级）的成本为批量生产的中型风力机（百千瓦级）成本的一半。

(6) 蓄能方式

风力机提供的能量完全取决于风况。由于风的不连续性，风力机提供能量是间断的。因此需要合适的蓄能设备与之配合。风力机蓄能系统可分为以下几类：

- a、电化蓄能系统——蓄电池和电解蓄氢；
- b、热能蓄能系统——能通过机械运动，将产生的热蓄存起来；
- c、动能系统——飞轮或超导电磁系统；
- d、势能系统——泵水系统或压缩空气系统。

(7) 风力机评估标准

在风力机的应用中，要求风力机设计性能好，提供能源的成本低。这就要求，风力机（包括蓄能设备在内）投资低，各部件（叶片、发电机、轴承、齿轮箱、塔架和蓄能设备等）在风力机的使用年限内，运行和维修费用最低。

其他标准包括：

a、能源偿还时间—风力机利用风产生的能量正好等于制造风力机所消耗的能量加上在偿还期运行和维修消耗的能量所需要的时间—应短。

B、系统的能量收益—在风力机使用寿命内风力机所产生的能量除以风力机制造、运行和维修所需的能量—应大。

2.3 风场选择

由于风力机的能量输出与风速三次方成正比，所以选择风力机的安装地点时，特别要小心。因为当风吹过地表时，水气的空气流会产生剪切和加速。剪切的作用会使地面上风速比高空的风速低得多。而不受剪切影响的高度比气象站测量高度（10米）要大得多。

风的剪切要受地形影响，因此有效风能也受地形影响。也就是说，建筑物、树及其他障碍物对剪切和有效风能有影响。

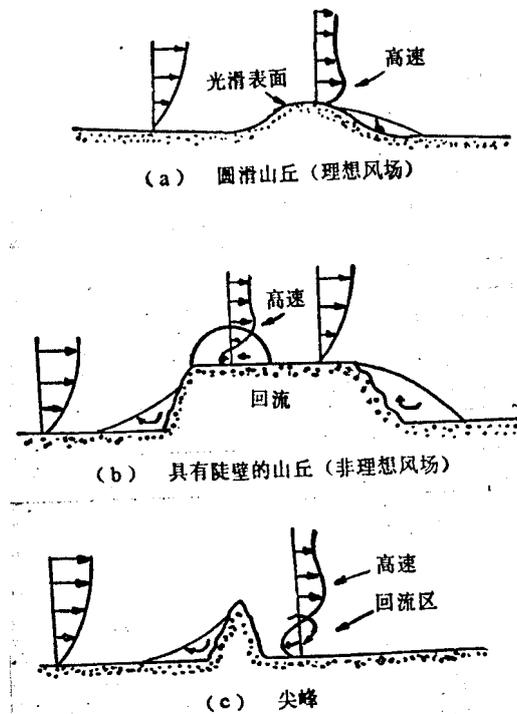


图 地形对风的影响

当气流通过山丘或窄谷时，气流产生加速作用，利用这一特点，可以将风力机安装在这样的有利地形上以增加功率输出，有关地形影响见上图和下表所示：

风特性	对风力机影响
不稳定	功率不稳定，有时为零，要求蓄能或备用设备
风向稳定	输出最大功率，螺旋桨风轮总对准风
由于地表面的粗糙不平 and 地形变化引起的风空间分布不均匀 (风剪切)	必须增加塔架高度，增加强度，以防阵风和大风产生的大载荷。

风洞试验表明：一个风场上风力机之间的距离应有一定的要求，以免风轮之间产生干扰。试验证明，风力机之间的距离不应小于六个风轮直径。

合适的风场特性综合如下：

- a、具有较高的平均风速；
- b、在风力机来风的方向上没有高大建筑物（其距离与高度有关）；
- c、在平地的光滑山顶或湖、海中的岛上；
- d、开阔的平坦地，开阔的海岸线；
- e、能产生烟筒效应的山谷。

2.4 风力机发展现状

2.4.1 小型风力发电机（10 千瓦以下）

小型风力发电机结构简单，安装和维修方便，适合于无电地区居民使用。目前，其产品已经成熟，整机效率可达 25%~30%，运行寿命可达 20 年。

小型风力发电机多采用水平轴风力机，风轮的叶片数目 2~3 片，多用玻璃钢制造。这种材料寿命长，加工复杂的气动外形容易。为了简化结构，小型风力发电机很多采用定桨距风轮。在大风时保护风力机，只能依靠机械气动力刹车或使整个风轮自动偏离风向。我国小型风力发电机（50~200 瓦）发展很快，现已推广应用 10 多万台，主要分布在内蒙、新疆、青海、甘肃等地。

2.4.2 中型风力发电机（10~100 千瓦）

中型风力机大多是 70—80 年代完成研制并商品化的，技术上已比较成熟，是目前风电场主要机种之一，多用于并网运行。

中型风力发电机多是二叶片或三叶片式风轮，风轮的功率系数 C_p 一般在 0.4 左右。叶片多数采用玻璃钢制成。风轮布置多采用下风向，无尾舵，有的甚至省掉自调向专用的对风装置，依靠风轮和舱体合理布置实现自调向。

我国的 10 千瓦和 18 千瓦风力机已先后作过并网运行。

2.4.3 大型风力机（100 千瓦以上）

大型风力机的研究，美国、丹麦、德国等技术比较先进。我国在这方面的研究有待进一步拓展。

2.5 风光互补发电系统

2.5.1 系统的构成与原理

风光互补发电系统的结构框图如下：

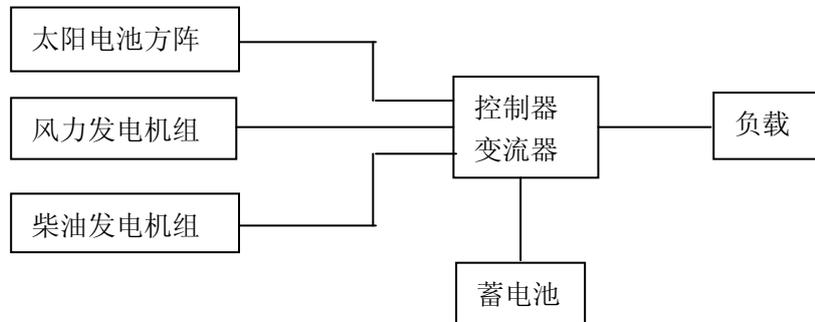


图 风光互补发电系统结构框图

发电部分由太阳电池方阵、风力发电机组、柴油发电机组、控制器及蓄电池组组成。

2.5.1.1 太阳电池方阵

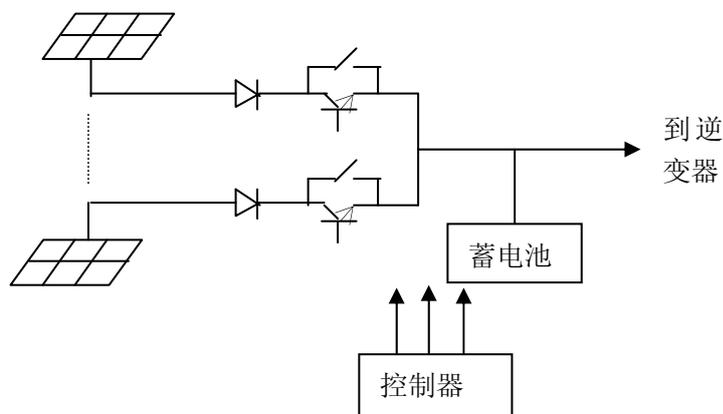


图 太阳电池发电部分原理框图

上图为太阳电池发电部分的原理框图。太阳电池方阵的支路通过二极管、充电控制器并联向蓄电池充电。

充电控制器采用增量控制太阳电池方阵对蓄电池的充电过程。当蓄电池组的充电电压达到设定的最高充电电压时，自动依次切断一个或数个方阵供电支路，以限制蓄电池的充电电压继续增长，确保蓄电池的寿命，并最大限度的利用和储存太阳电池发出的电能。

2.5.1.2 风力发电机组

风力发电机组一般由多台风力机和发电机组成。下图即为风力机输出功率曲线。其中 V_c 为起动风速， V_R 为额定风速，此时风机输出额定功率， V_F 为截止风速。

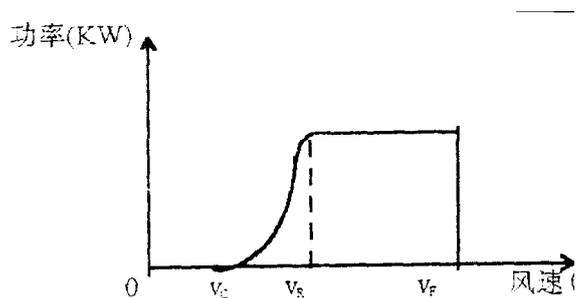


图 风力发电机输出特性

当风速小于起动风速时，风机不能转动。风速达到起动风速后，风机开始转动，带动发电机发电。输出电能供给负载以及给蓄电池充电。当蓄电池组端电压达到设定的最高值时，由电压检测得到信号电压通过控制电路进行开关切换，使系统进入稳压闭环控制，既得保持对蓄电池充电，又不致使蓄电池过充。在风速超过截止风速时，风机通过机械限速机构使风力机在一定转速下限速运行或停止运行，以保证风力机不致损坏。

2.5.1.3 蓄电池组

如同独立光伏系统中的蓄电池组，发挥同样的作用，储能供无风、无日照的时间使用。

2.5.1.4 控制器

在风光互补发电系统中，控制器主要包括风电控制系统，光电控制系统和蓄电池充放电控制器三部分。它们主要是根据蓄电池的充电状况来控制风力发电机组，太阳电池发电方阵的运行方式和开断情况，从而保证负载的正常供电以及系统各个部分的安全运行。

2.5.1.5 逆变器

逆变器在系统框图中未标出，它将风力发电机组输出变换后得到的直流电，以及太阳电池方阵输出和蓄电池放电转换成负载所需要的交流电。逆变器主电路由大功率晶体管构成，采用正弦脉宽调制，抗干扰能力强，三相负载不平衡度可达 0—100%，还有很强的过载及限流保护功能。

2.5.1.6 阻塞二极管

作用也是防止无日照时蓄电池通过太阳电池方阵放电。

2.5.1.7 备用柴油发电机

当连续很多天无风，无太阳时可启动备用柴油发电机对蓄电池补充充电，以防止蓄电

池长时间处于缺电状态。一般柴油发电机只提供保护性的充电电流，其直流充电电流值不宜过高。对于小型的风光互补发电系统，有时可以不配柴油发电机。

2.5.2 系统的设计

对于风光互补发电系统设计，其中涉及的问题很多。在这里主要通过一个例子，简单说明风力发电机与太阳电池的功率分配这一核心问题。

例中，风力发电机选用太原汾西机器厂 50W—200W 系列产品，太阳电池选用哈尔滨克罗拉公司 3W—120W 非晶硅系列，其电池转换效率取 6%，寿命 20 年。蓄电池选用铅蓄电池，寿命 3—5 年，放电率 30%。不配备柴油发电机。

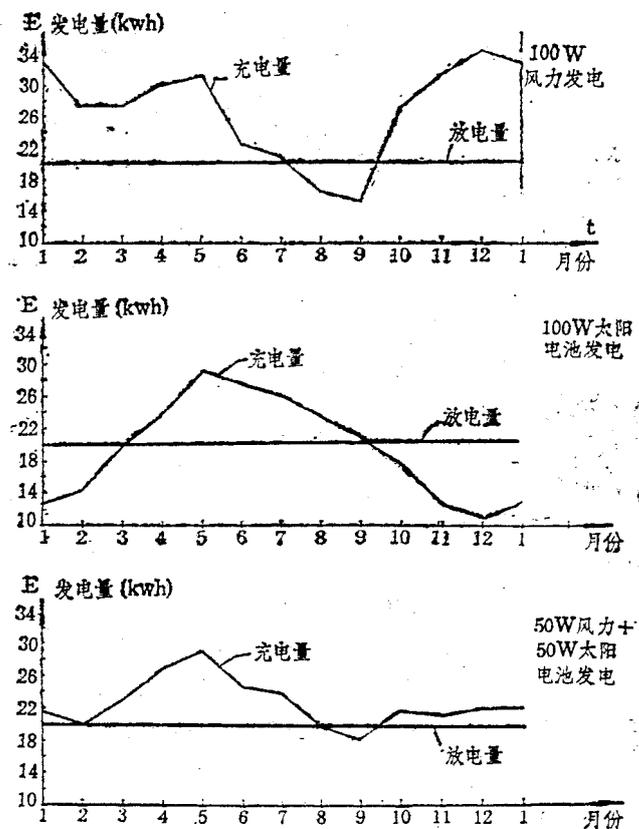
1、根据资料对当地风力机与太阳电池的年发电量及二者互补的发电量进行测算，如下表所示：

各发电量数据（单位 KWh/年）

太阳 0		HC3-5W	HC6-8W	HC10-15W	HC20-30W	HC40-60W	HC70-120W
		305×305	305×610	305×915	610×915	915×1220	1220×1829
风机	0	9.98	19.95	29.90	69.90	139.80	239.40
50Wyc	151.05	161.03	171.0	180.95	220.95	290.85	390.45
100Wyc	316.18	326.16	336.13	346.80	386.08	455.98	555.58
150Wyc	329.86	339.84	349.82	359.80	399.76	469.66	569.20
200Wyc	630.18	640.26	650.24	660.22	700.18	770.08	869.68

2. 根据负载要求, 选择可能的发电方式, 设负载功率 130 瓦, 每天工作 5 小时, 年需要 240KWh。根据上表可以选择 100Wyc 风力 发电机单独发电, 或者两组 HC915×1220 电池板并 联 100W 太阳电池单独发电, 或者 50Wyc 风力发电机加一组 HC915×1220 50W 太阳电池互补 发电。

3. 蓄电池容量的确定, 在不需要连续供电的场合, 如生活用电, 为了降低成本, 可以只根据 负载每日所需的能量与场合, 如差转台、航标灯用电, 则必须考虑天气变化(如连雨天, 连续无风)的因素加修订。设蓄电池电压 24V, 计算结果



发电方式	年充电 时数	不需连续供电场合			保证连续供电场合		
		计算值	选取值	连接	计算值Ah	选取值Ah	连接
100W风力机	4787	91.32Ah	120Ah	2×60Ah 串联	911.94	950	5×2×95 Ah组串
100W太阳电池	3210	91.32Ah	120Ah	2×60Ah 串联	2539.25	2470	28×95 Ah组串
50W+50W互补	5603	91.32Ah	120Ah	2×60Ah 串联	374.33	330	2×2×95 Ah组串

注：蓄电池选用铅蓄电池，寿命3-5年，放电率50%

4、三种发电方式的经济效益对比列入下表，另外，当负载需要量大时，风电—光电互补可以有多种组配方式。此时，可以按照上述原则分别计算，然后比较优劣，求得最佳匹配。

从下表可以看出，利用风能和太阳能互补发电；性能价格比要高得多，发电品质也好。

发电方式	实际年 发电(kwh)	年充电时 间占有率	整 寿 机 命	蓄 电 池 使 用 寿 命(年)	不连续供电	连续供电
					成本(元/ 年)	成本(元/ 年)
100W风力机	329.86	54.6%	10年	3	232	949
100W太阳电池	279.6	36.6%	20年	3	270	1252
50W风+50W太	290.35	64%	20年(2台 风机)	4-5	250	365

第三部分

光电水泵系统原理及测试

第三部分 光电水泵系统原理及测试

3.1 引言

水无论是对人们的日常生活还是对农业生产都是必不可少的，在当今世界，大约有十几亿人连清洁卫生的饮水都没有保证。在许多干旱地区，由于缺乏水灌溉，土地逐渐形成盐碱地，甚至被沙漠侵蚀。使得生态自然环境渐渐恶化，在我们这个人口多耕地少的国家里，仍有许多大片大片的荒地，仅是因为无水而未被开垦利用。在诸多的水违纪地方，并不是没有水源，而是缺乏合适的抽水工具及动力。世界上诸多的偏僻、边远、部落地区，至今未被电网覆盖并在今后若干年内也不可能铺设常规电网。那么，使用常规的抽水工具也就遇到了很大的障碍，利用取之不尽，用之不竭的太阳光能作动力，以光电水泵为抽水工具是一种行之有效的并为人们越来越关注的好方法。

光电水泵具有寿命长、安全可靠、使用方便、维护简单、无噪声、不污染环境等优点，从七十年代后期，国外许多生产厂家纷纷研制光电水泵。目前世界上约有四十多家厂商提供该类产品的，其系统效率、可靠性能也在不断提高；功率范围从几十瓦到15千瓦，品种也在不断增加，西方一些发达国家的光电水泵已经系列化；并大量销往到非洲、南美、中东和东南亚等地。迄今已有数十万台光电水泵在世界各地可靠地运行。随着太阳电池技术的迅速发展，光电水泵系统也将得到更广泛的应用。

3.2 光电水泵系统简介

从光伏水泵的结构形式分，可大致分成三类：

1、直耦式：

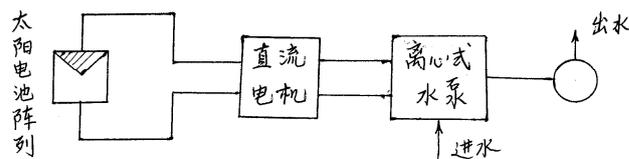


图 直耦式水泵系统

- 特点是：
- ①排除了电压调节器和蓄电池，结构最简
 - ②系统可靠性和效率都很高
 - ③操作简单，晨起暮闭自动实现，很适合发展中国家的偏远地区
 - ④但适用范围窄

2、带有贮能装置的光伏水泵：

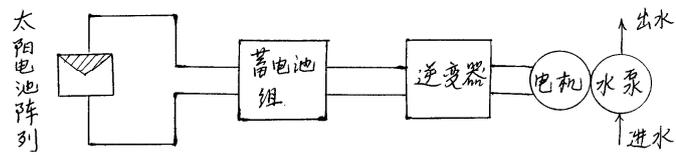


图 带有储能的光伏水泵

- 主要特点是：①可随时工作
②适用性广
③机泵产品标准化、产量大、价格低廉

3、不带储能装置的光伏水泵系统

这是在第一种类的基础上，增加逆变器和最大功率点跟踪器而得到，驱动常规的交流电机水泵工作。

- 特点是：①适用性广
②机泵产品系列化，价格低廉
③但因增加了电子控制和 D/A 转换，效率有所降低

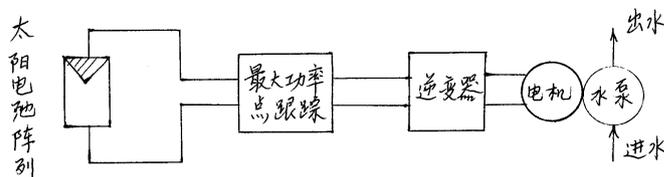


图 带有功率点跟踪的光伏水泵

第二种分类方法是根据水泵的安装位置分类：

- 1、 浅水式：电机和水泵都安装在地面上。便于维护修理，效率也较高。缺点是吸程有限（离心式为 7 米），限制了它的使用。
- 2、 飘浮式：电机和水泵固定在飘浮物上，扬程不超过 10 米，但流量却可达 200 米³/天。
- 3、 潜水式：电机和水泵构成一体，沉于井、河等水下，可达较远扬程（10 米~100 米），流量也可达 250 米/天。

三种形式如图所示：

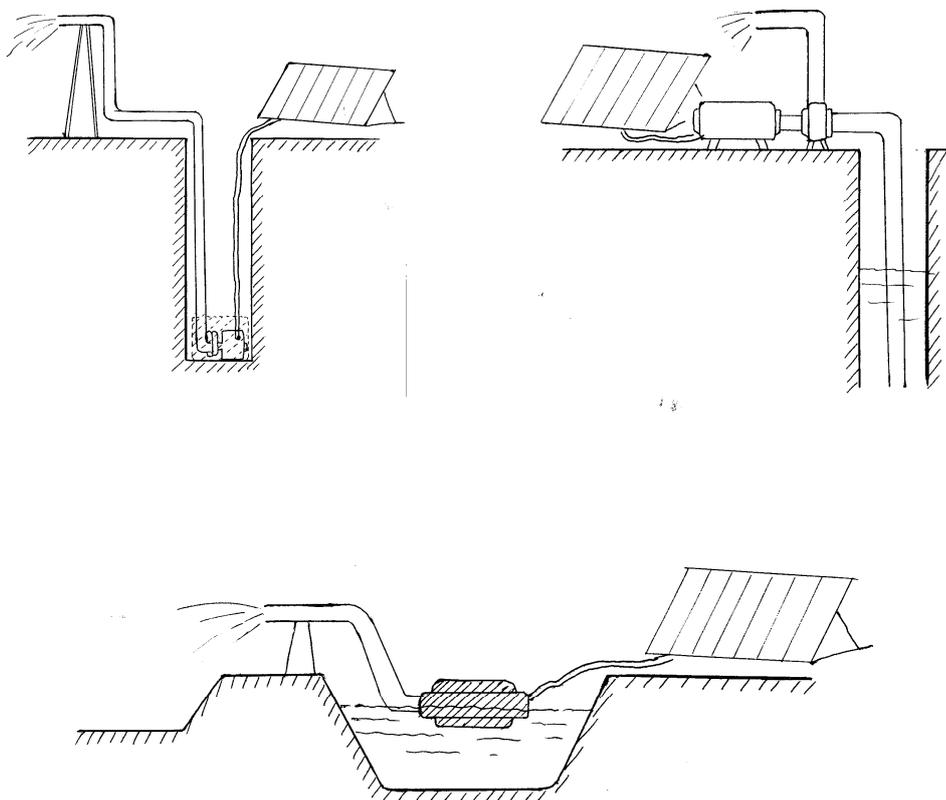


图 浅水式实物图

图 潜水式实物图

图 飘浮式实物图

3.3 光伏水泵系统各部分介绍

主要介绍动力部件：太阳电池方阵、电机和水泵种类和性能

3.3.1 太阳电池阵列

前面章节已经介绍过太阳电池及其组件，及由这些组件构成的方阵。在此仅强调一点，就是方阵的 I-V 负载特性曲线，如图示。方阵工作在 A 点，则输出功率为 $P_a = I_a * V_a$ 。工作在 M 点输出功率最大： $P_m = I_m * V_m$ 。M 点为太阳电池阵列的最佳工作点。应尽可能地使光伏水泵系统工作在最大功率点或其附近。

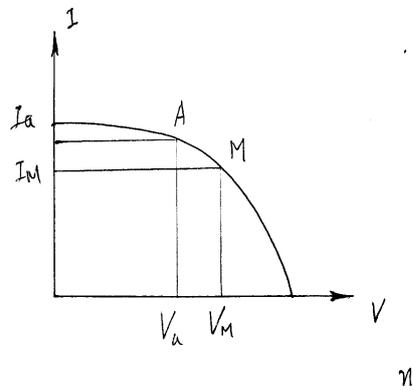


图 太阳能电池阵列 I-V 工作特性

1. 电机：

电机的种类繁多，可大致分成：

- a. 交流电机：异步电动机和同步电动机
- b. 直流电机：他励式电机、并励式电机和复励式电机
- c. 永磁无刷直流电动机

每种类电机都有各自的原理和工作特性，如对直流并励电动机其工作特性如图所示。

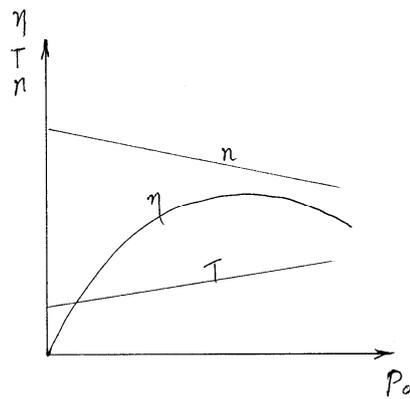


图 直流并励电动机工作特性

A. 速度特性：

由电压平衡方程可得：

$$E_a = C_e \Phi n$$

$$u = E_a + I_a R_a$$

则：

$$n = \frac{u - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

B. 转矩特性：

$$T = C_T \Phi I_a$$

$$T = T_2 + T_0 = \frac{P_2}{\Omega} + T_0$$

3. 水泵：水泵的种类也很多，根据作用原理可将水泵分成三大类：

A. 叶片式泵：离心泵、轴流泵、混流泵和漩涡泵

B. 容积泵：往复泵和回转泵

C. 其他类型泵：喷射泵和电磁泵

下面典型选离心泵，介绍其工作原理及特性。

离心泵是靠叶轮的旋转使水受离心力的作用而得到压力和速度。它的主要特点是结构简单、性能平稳、转速高、体积小、重量轻、效率高、流量大、易操作和维修，使用极广。效率一般在 60~90% 范围。离心泵的性能曲线如下图：

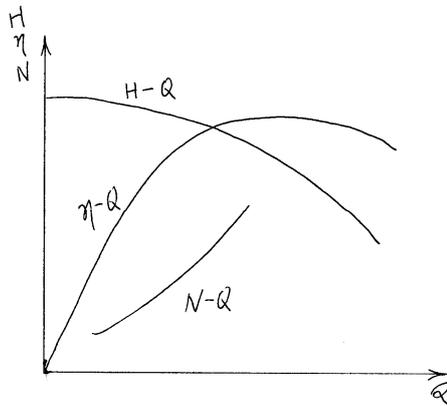


图 离心式水泵的工作特性曲线

离心泵的性能曲线是液体在泵内运动规律的外部表现形式。

3.4 光伏水泵各部件建模及理想匹配

将光伏水泵各部件：太阳能电池阵列、水泵、电机进行理论分析可分别获得各部分的数学模型及相应的性能关系表达式。根据这些性能分析进行各部件之间的最佳匹配，以期得到学的最高工作效率。

首先，我们看光伏阵列，输出功率 $P=IV$ 。为获得最大功率，微商 dp 应为零，从而：

$$dp=IdV+VdI=0$$

又对 M 个电池并联， N 个电池串联的组件有

$$I/M = I_1 - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q}{NkT} \left(\frac{V}{N} + \frac{IRS}{M} \right) \right] - 1 \right\}$$

也可写成：

$$C_1(MV + NIR_s) = \ln \left[\frac{M(I_0 + I_L) - I}{MI_0} \right]$$

$$C_1 = \frac{q}{NMVKT}$$

微分该方程用到 $IdV = -VdI$ ，得：

$$C_1(MV - NIR_s) = \frac{I}{M(I_0 + I_L) - I}$$

联立解得：

$$\ln \left[\frac{M(I_0 + I_L) - I}{MI_0} \right] - \frac{I}{M(I_0 + I_L) - I} = 2C_1NIR_s$$

或

$$x \ln x = (G_1x + 1)(G_2 - x)$$

这里

$$x = \frac{M(I_0 + I_L) - I}{MI_0}$$

$$G_1 = 2C_1NMR_sI_0$$

$$G_2 = \frac{I_0 + I_L}{I_0}$$

为找到其解，可解两条曲线 $y=x \ln x$ 和 $y=(G_1x+1)(G_2-x)$ 的交点，即为其解。设初值为：

$$x_{initial} = G_2$$

当解得 x ，即可得到最大功率点的 I 、 V ：

$$I_m = M \left[(I_0 + I_L) - xI_0 \right]$$

$$V_m = \frac{NI_mR_s}{M} + \frac{I_m}{M(I_0 + I_L) - I_m} C_1 M$$

即

$$P_m = I_m \cdot V_m$$

再看直流电机的模型，其基本方程：

$$\begin{aligned}
 E &= K_e \Phi \omega \\
 V_a &= E + I_a R_a \\
 \tau &= K_\tau \Phi I_a
 \end{aligned}$$

这儿 K 是给定电机的常数，以他励永磁电机为例，磁通是常量，解得电流和电压为：

$$\begin{aligned}
 I_a &= \frac{\tau}{K_\tau \Phi} \\
 V_a &= K_e \Phi C_0 S + \frac{\tau R_a}{K_\tau \Phi}, \quad C_0 = 2\pi/60
 \end{aligned}$$

其次，分析离心水泵的模型：机械负载特性一般可描述成

$$\tau_1 = \tau_0 + (\tau_{n1} - \tau_0) \left(\frac{s}{s_0} \right)^x$$

式中， $x=0$ ，恒定转矩； $x=1$ ，粘滞摩擦； $x=2$ ，恒定水头离心泵。从而，离心泵的

$$\tau_1 = \tau_0 + (\tau_{n1} - \tau_0) \left(\frac{s}{s_0} \right)^2$$

简化又可写成：

$$\tau_1 = A + BS^2$$

式中

$$A = \tau_0, \quad B = \frac{(\tau_{n1} - \tau_0)}{S_0^2}$$

一般情况， $H = A_1 Q^2 + 2B_1 S Q + C_1 S^2$ ， A_1 、 B_1 、 C_1 从泵的制造数据中可得到。

在给定水头 H 下，对每一旋转速度的值，可以确定电机的电流和电压：

$$\begin{aligned}
 I_a &= \frac{A + BS^2}{K_\tau \Phi} \\
 V_a &= K_e \Phi C_0 S + R_a \frac{A + BS^2}{K_\tau \Phi}
 \end{aligned}$$

根据电机—泵分系统的电流 I_a 、电压 V_a 对应于恒定水头下的各个速度值的工作曲线和太阳能电池阵列的 $I-V$ 负载曲线，即可得到一个交点，此交点也即为工作点，为了使全系统工作在最佳匹配状态，可根据电机—泵分系统的 I_a 、 V_a 曲线，获得对应的太阳能电池阵列结构及设计，则就得到直耦式光伏水泵，也可采用最大功率点跟踪器调节两分系统的匹配，跟踪在最佳状态。

下面再谈一下理论效率的计算：

一旦知道工作速度，就可以计算给定水头的流速，然后可以得到两种配置系统的效率。输出和输入功率是：

$$P_{out} = \rho g Q H, \quad P_{in} = RANM \times 10^4$$

其中， R: 太阳辐射强度； A: 太阳电池表面积 (cm²)；
 N: 电池串联数； M: 电池并联数。
 总效率是：

$$\eta_0 = \frac{\rho g QH \times 10^4}{RANM}$$

当从电机方程知道转矩时， 可以得各部件的效率
 泵：

$$\eta_p = \frac{\rho g QH}{\tau C_0 S}$$

电机：

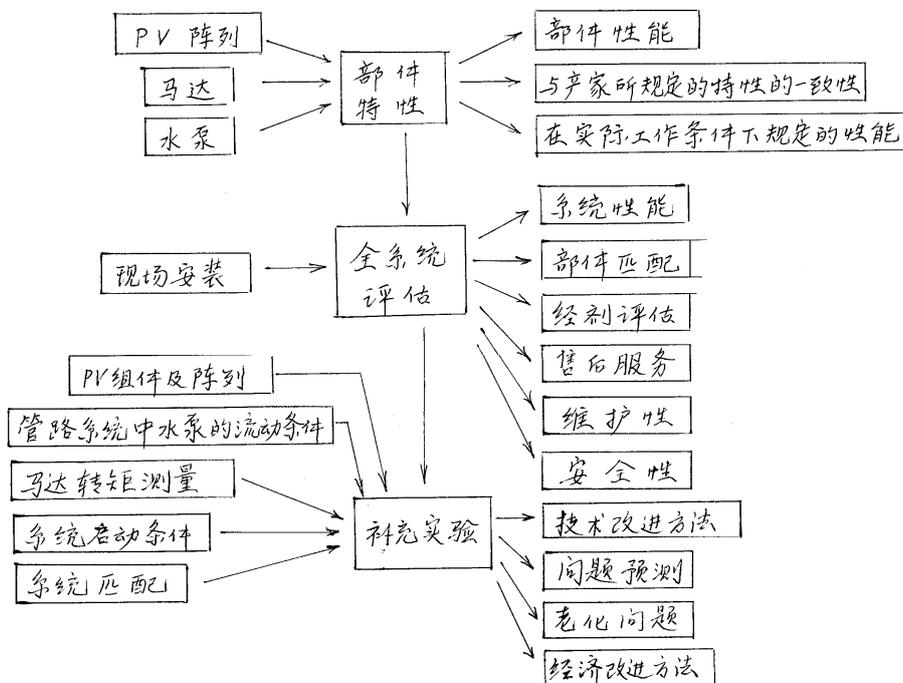
$$\eta_m = \frac{C_0 \tau S}{V_a I_a}$$

3.5 光伏水泵的性能测试

本节将简要介绍光伏水泵的性能测试内容及有关测试系统。研制和生产一种光伏水泵过程中，其性能测试是很重要的环节，实验及测试通常是在模拟或现场工作状态下进行，包括三个实验研究部分：

- 一、部件特性。
- 二、全泵系统特性。
- 三、补充实验。

如下列方框图所示：



如下图，给出室内和室外测试系统图：

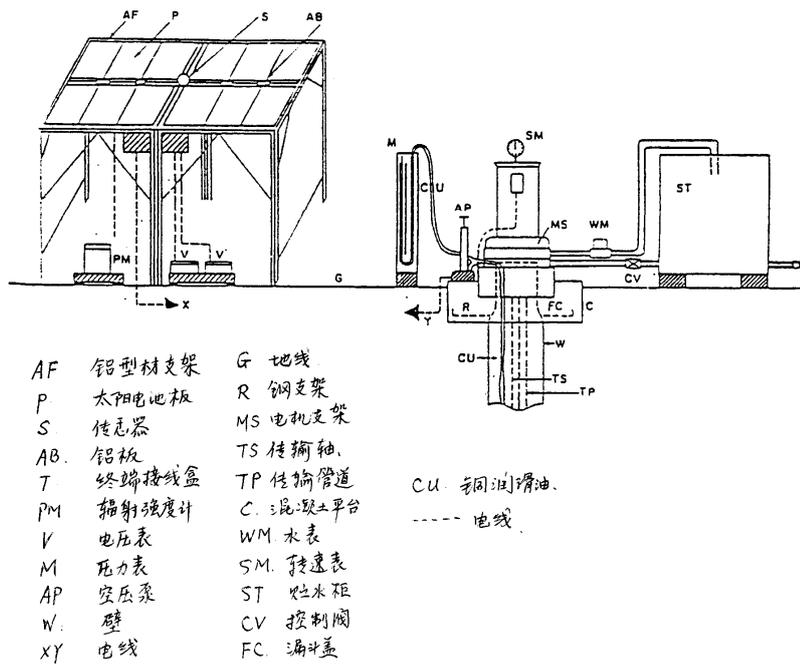
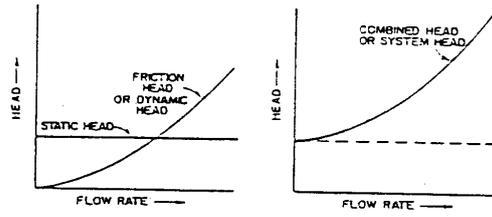
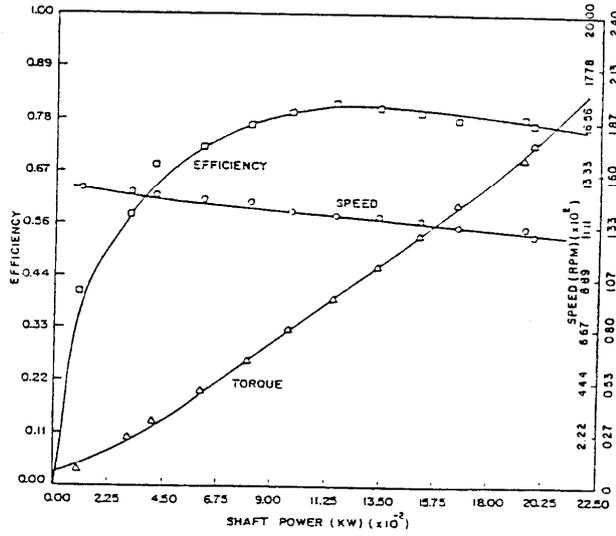


图 室内和室外测试系统图

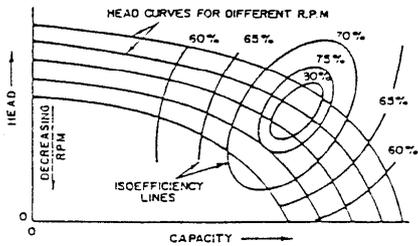
下图给出若干测试结果图表及曲线:



Hydraulic characteristic of delivery pipe-work.

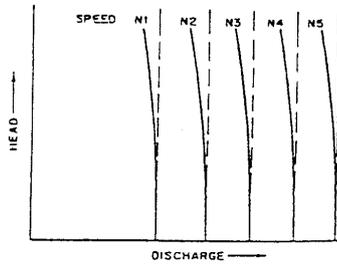


MOTOR CHARACTERISTICS (EXPERIMENTAL DATA AT CONSTANT VOLTAGE 20V)



Speed and isoefficiency curves (Diagrammatic)

Centrifugal pump



Volumetric pump