

## 4. 光伏系统设计

本章主要讲述太阳能光伏系统的组成结构和工作原理，并结合实例讲述光伏系统的常见类型、一般设计原理和方法、光伏系统的测试以及性能分析，并描述了太阳能光伏系统的发展趋势。

### 4. 1. 光伏系统的组成和原理

光伏系统由以下三部分组成：太阳电池组件；充、放电控制器、逆变器、测试仪表和计算机监控等电力电子设备和蓄电池或其它蓄能和辅助发电设备。

光伏系统具有以下的特点：

- 没有转动部件，不产生噪音；
- 没有空气污染、不排放废水；
- 没有燃烧过程，不需要燃料；
- 维修保养简单，维护费用低；
- 运行可靠性、稳定性好；
- 作为关键部件的太阳电池使用寿命长，晶体硅太阳电池寿命可达到 25 年以上；
- 根据需要很容易扩大发电规模。

光伏系统应用非常广泛，光伏系统应用的基本形式可分为两大类：独立发电系统和并网发电系统。应用主要领域主要在太空航空器、通信系统、微波中继站、电视差转台、光伏水泵和无电缺水地区户用供电。随着技术发展和世界经济可持续发展的需要，发达国家已经开始有计划地推广城市光伏并网发电，主要是建设户用屋顶光伏发电系统和 MW 级集中型大型并网发电系统等，同时在交通工具和城市照明等方面大力推广太阳能光伏系统的应用。

光伏系统的规模和应用形式各异，如系统规模跨度很大，小到 0.3~2W 的太阳能庭院灯，大到 MW 级的太阳能光伏电站。其应用形式也多种多样，在家用、交通、通信、空间应用等诸多领域都能得到广泛的应用。尽管光伏系统规模大小不一，但其组成结构和工作原理基本相同。图 4-1 是一个典型的供应直流负载的光伏系统示意图。其中包含了光伏系统中的几个主要部件：

I 光伏组件方阵：由太阳电池组件（也称光伏电池组件）按照系统需求串、并联而

成，在太阳光照射下将太阳能转换成电能输出，它是太阳能光伏系统的核心部件。

- I 蓄电池：将太阳电池组件产生的电能储存起来，当光照不足或晚上、或者负载需求大于太阳电池组件所发的电量时，将储存的电能释放以满足负载的能量需求，它是太阳能光伏系统的储能部件。目前太阳能光伏系统常用的是铅酸蓄电池，对于较高要求的系统，通常采用深放电阀控式密封铅酸蓄电池、深放电吸液式铅酸蓄电池等。
- I 控制器：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，是整个系统的核心控制部分。随着太阳能光伏产业的发展，控制器的功能越来越强大，有将传统的控制部分、逆变器以及监测系统集成的趋势，如 AES 公司的 SPP 和 SMD 系列的控制器就集成了上述三种功能。
- I 逆变器：在太阳能光伏供电系统中，如果含有交流负载，那么就要使用逆变器设备，将太阳电池组件产生的直流电或者蓄电池释放的直流电转化为负载需要的交流电。

太阳能光伏供电系统的基本工作原理就是在太阳光的照射下，将太阳电池组件产生的电能通过控制器的控制给蓄电池充电或者在满足负载需求的情况下直接给负载供电，如果日照不足或者在夜间则由蓄电池在控制器的控制下给直流负载供电，对于含有交流负载的光伏系统而言，还需要增加逆变器将直流电转换成交流电。光伏系统的应用具有多种形式，但是其基本原理大同小异。对于其他类型的光伏系统只是在控制机理和系统部件上根据实际的需要有所不同，下面将对不同类型的光伏系统进行详细地描述。

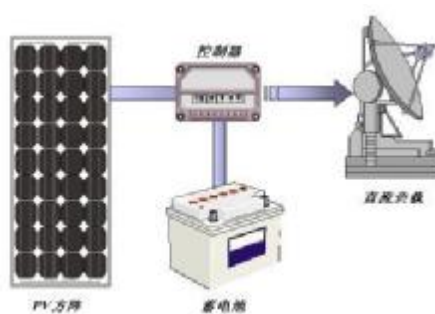


图 4-1 直流负载的太阳能光伏系统

## 4.2. 光伏系统的分类与介绍

一般将光伏系统分为独立系统、并网系统和混合系统。如果根据光伏系统的应用形式、应用规模和负载的类型，对光伏供电系统进行比较细致的划分，可将光伏系统分为如下六种类型：小型太阳能供电系统（Small DC）；简单直流系统（Simple DC）；大型太阳能供电系统（Large DC）；交流、直流供电系统（AC/DC）；并网系统（Utility Grid Connect）；混合供电系统（Hybrid）；并网混合系统。下面就每种系统的工作原理和特点进行说明。

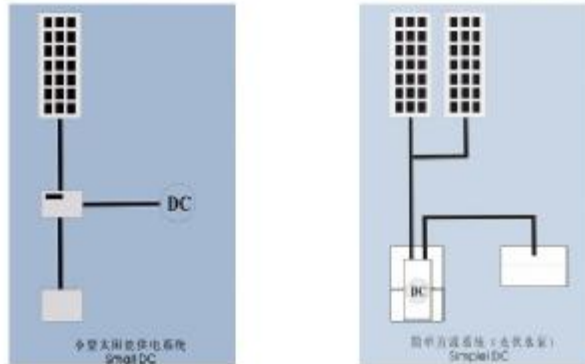


图 4-2 小型太阳能供电系统 (Small DC) 图 4-3 简单直流系统 (Simple DC)

### 4.2.1. 小型太阳能供电系统 (Small DC)

该系统的优点是系统中只有直流负载而且负载功率比较小，整个系统结构简单，操作简便。其主要用途是一般的户用系统，负载为各种民用的直流产品以及相关的娱乐设备。如在我国西北边远地区就大面积推广使用了这种类型的光伏系统，负载为直流节能灯、收录机和电视机等，用来解决无电地区家庭的基本照明问题。

删除的内容: <sp>

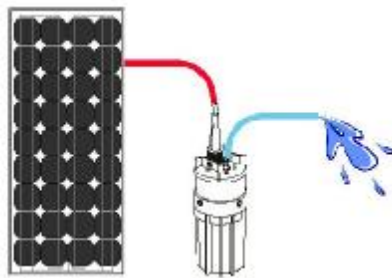


图 4-4 简单直流的光伏水泵系统

#### 4.2.2. 简单直流系统 (Simple DC)

该系统的特点是系统负载为直流负载而且对负载的使用时间没有特别的要求，负载主要是在白天使用，所以系统中没有使用蓄电池，也不需要使用控制器。系统结构简单，直接使用太阳能太阳电池组件给负载供电，省去了能量在蓄电池中的储存和释过程所造成的损失，以及控制器中的能量损失，提高了太阳能的利用效率。其常用于光伏水泵系统、一些白天临时设备用电和旅游设施中。图 4-4 显示的就是一个简单直流的光伏水泵系统。这种系统在发展中国家的无纯净自来水供饮地区得到了广泛的应用，产生了良好的社会效益。

带格式的: 项目符号和编号

#### 4.2.3. 大型太阳能供电系统 (Large DC)

与上述两种光伏系统相比，这种光伏系统仍适用于直流电源系统，但是这种太阳能光伏系统的负载功率较大，为了保证可靠地给负载提供稳定的电力供应，其相应的系统规模也较大，需要配备较大的太阳能太阳电池组件阵列和较大的蓄电池组，常应用于通信、遥测、监测设备电源，农村的集中供电站，航标灯塔、路灯等领域。我国在西部地区实施的“光明工程”中，一些无电地区建设的部分乡村光伏电站就是采用这种形式；中国移动和中国联通公司在偏僻无电网地区建设的通信基站也采用了这种光伏系统供电。

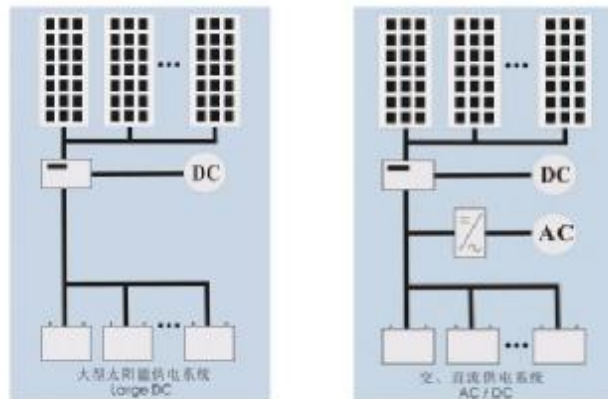


图 4-5 大型太阳能供电系统 (Large DC) 图 4-6 交流、直流供电系统 (AC/DC)

#### 4.2.4. 交流、直流供电系统 (AC/DC)

与上述的三种太阳能光伏系统不同的是，这种光伏系统能够同时为直流和交流负载提供电力，在系统结构上比上述三种系统多了逆变器，用于将直流电转换为交流电以满足交流负载的需求。通常这种系统的负载耗电量也比较大，从而系统的规模也较

大。在一些同时具有交流和直流负载的通信基站和其它一些含有交、直流负载的光伏电站中得到应用。

#### 4.2.5. 并网系统 (Utility Grid Connected)

这种光伏系统最大的特点就是太阳能电池组件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公共电网，并网系统中光伏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。在阴雨天或夜晚，太阳能电池组件没有产生电能或者产生的电能不能满足负载需求时就由电网供电。因为直接将电能输入电网，免除配置蓄电池，省掉了蓄电池储能和释放的过程，可以充分利用光伏方阵所发的电力从而减小了能量的损耗，并降低了系统的成本。但是系统中需要专用的并网逆变器，以保证输出的电力满足电网电力对电压、频率等电性能指标的要求。因为逆变器效率的问题，还是会有部分的能量损失。这种系统通常能够并行使用市电和太阳能太阳能电池组件阵列作为本地交流负载的电源，降低了整个系统的负载缺电率。而且并网光伏系统可以对公用电网起到调峰作用。但并网光伏供电系统作为一种分散式发电系统，对传统的集中供电系统的电网会产生一些不良的影响，如谐波污染，孤岛效应等。

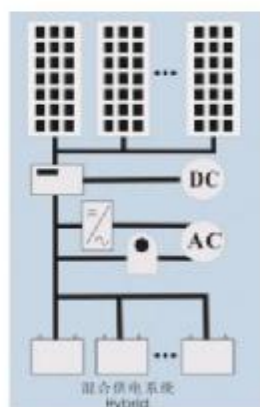
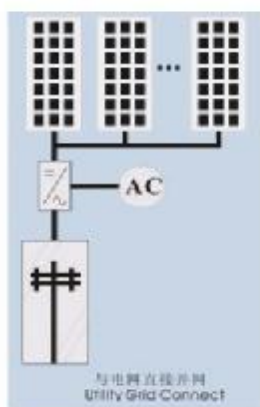


图 4-7 并网系统 (Utility Grid Connect) 图 4-8 混合供电系统 (Hybrid)

#### 4.2.6. 混合供电系统 (Hybrid)

这种太阳能光伏系统中除了使用太阳能太阳能电池组件阵列之外，还使用了燃油发电机作为备用电源。使用混合供电系统的目的就是为综合利用各种发电技术的优点，避免各自的缺点。比方说，上述几种独立光伏系统的优点是维护少，缺点是能量输出

依赖于天气，不稳定。综合使用柴油发电机和太阳能电池组件的混合供电系统与单一能源的独立系统相比所提供的能源对天气的依赖性要小，它的优点是：

- 2 使用混合供电系统可以达到可再生能源的更好利用。因为可再生能源是变化的，不稳定的，所以系统必须按照能量产生最少的时期进行设计。由于系统是按照最差的情况进行设计，所以在其他的时间，系统的容量过大。在太阳辐照最高峰时期产生的多余能量没法使用而白白浪费了。整个独立系统的性能就因此而降低。如果最差月份的情况和其他月份差别很大，有可能导致浪费的能量等于甚至超过设计负载的需求。
- 2 具有较高的系统实用性。在独立系统中因为可再生能源的变化和不稳定会导致系统出现供电不能满足负载需求的情况，也就是存在负载缺电情况，使用混合系统则会大大地降低负载缺电率。
- 2 和单用柴油发电机的系统相比，具有较少的维护和使用较少的燃料。
- 2 较高的燃油效率。在低负荷的情况下，柴油机的燃油利用率很低，会造成燃油的浪费。在混合系统中可以进行综合控制使得柴油机在额定功率附近工作，从而提高燃油效率。
- 2 负载匹配更佳。使用混合系统之后，因为柴油发电机可以即时提供较大的功率，所以混合系统可以适用于范围更加广泛的负载系统，例如可以使用较大的交流负载，冲击载荷等。还可以更好的匹配负载和系统的发电，只要在负载的高峰时期打开备用能源即可简单的办到。有时候，负载的大小决定了需要使用混合系统，大的负载需要很大的电流和很高的电压。如果只是使用太阳能成本就会很高。

但混合系统也有其自身的缺点：

- 2 控制比较复杂。因为使用了多种能源，所以系统需要监控每种能源的工作情况，处理各个子能源系统之间的相互影响、协调整个系统的运作，这样就导致其控制系统比独立系统复杂，现在多使用微处理芯片进行系统管理。
- 2 初期工程较大。混合系统的设计，安装，施工工程都比独立工程要大。
- 2 比独立系统需要更多的维护。油机的使用需要很多的维护工作，比如更换机油滤清器，燃油滤清器，火花塞等，还需要给油箱添加燃油等。
- 2 污染和噪音。光伏系统是无噪音、无排放的洁净能源利用，但是因为混合系统中使用了柴油机，这样就不可避免地产生噪音和污染。

很多在偏远无电地区的通信电源和民航导航设备电源，因为对电源的要求很高，

都采用混合系统供电，以求达到最好的性价比。我国新疆、云南建设的很多乡村光伏电站就是采用光/柴混合系统。

#### 4.2.7. 并网混合供电系统 (Hybrid)

随着太阳能光伏产业的发展，出现了可以综合利用太阳能光伏阵列、市电和备用油机的并网混合供电系统。这种系统通常是控制器和逆变器集成一体化，使用电脑芯片全面控制整个系统的运行，综合利用各种能源，达到最佳的工作状态，并可以配备使用蓄电池。进一步提高系统的负载供电保障率，例如 AES 的 SMD 逆变器系统。该系统可以为本地负载提供合格的电源，并可以作为一个在线 UPS（不间断电源）工作。它可向电网供电，也可从电网获得电力，是个双向逆变/控制器。系统工作方式是将市电和光伏电源并行工作，对于本地负载而言，如果太阳电池组件产生的电能足够负载使用，它将直接使用太阳电池组件产生的电能供给负载的需求。如果太阳电池组件产生的电能超过即时负载的需求还能将多余的电能返回给电网；如果太阳电池组件产生的电能不够用，则将自动启用市电，使用市电供给本地负载的需求；而且，当本地负载功耗小于 SMD 逆变器额定市电容量的 60% 时，市电就会自动给蓄电池充电，保证蓄电池长期处于浮充状态；如果市电产生故障，即市电停电或者市电的供电品质不合格，系统就会自动断开市电，转成独立工作模式，由蓄电池和逆变器提供负载所需的交流电能。一旦市电恢复正常，即电压和频率都恢复到正常状态以内，系统就会断开蓄电池，改为并网模式工作，由市电供电。有的并网混合供电系统中还可以将系统监控、控制和数据采集功能集成到控制芯片中。

#### 4.3. 太阳能光伏系统的特点

太阳能光伏发电系统自身具有其独特的特点：

- ① 无枯竭危险；
- ② 绝对干净（无污染，除蓄电池外）；
- ③ 不受资源分布地域的限制；
- ④ 可在用电处就近发电；
- ⑤ 能源质量高；
- ⑥ 使用者从感情上容易接受；
- ⑦ 获取能源花费的时间短；

⑧ 供电系统工作可靠。

不足之处是：

① 照射的能量分布密度小；

② 获得的能源与四季、昼夜及阴晴等气象条件有关；

③ 造价比较高。以上的一些特点决定了光伏发电供电系统在教育中有着其独有的优势和相关的制约。

#### 4.4. 光伏系统的容量设计

光伏系统的设计包括两个方面：容量设计和硬件设计。

光伏系统容量设计的主要目的就是要计算出系统在全年内能够可靠工作所需的太阳能电池组件和蓄电池的数量。同时要注意协调系统工作的最大可靠性和系统成本两者之间的关系，在满足系统工作的最大可靠性基础上尽量地减少系统成本。光伏系统硬件设计的主要目的是根据实际情况选择合适的硬件设备包括太阳能电池组件的选型，支架设计，逆变器的选择，电缆的选择，控制测量系统的设计，防雷设计和配电系统设计等。在进行系统设计的时候需要综合考虑系统的软件和硬件两个方面。

针对不同类型的光伏系统，软件设计的内容也不一样。独立系统，并网系统和混合系统的设计方法和考虑重点都会有所不同。

在进行光伏系统的设计之前，需要了解并获取一些进行计算和选择必需的基本数据：光伏系统现场的地理位置，包括地点、纬度、经度和海拔；该地区的气象资料，包括逐月的太阳能总辐射量、直接辐射量以及散射辐射量，年平均气温和最高、最低气温，最长连续阴雨天数，最大风速以及冰雹、降雪等特殊气象情况等。

##### 4.4.1. 独立光伏系统软件设计

光伏系统软件设计的内容包括负载用电量的估算，太阳能电池组件数量和蓄电池容量的计算以及太阳能电池组件安装最佳倾角的计算。因为太阳能电池组件数量和蓄电池容量是光伏系统软件设计的关键部分，所以本节将着重讲述计算与选择太阳能电池组件和蓄电池的方法。

需要说明的一点是，在系统设计中，并不是所有的选择都依赖于计算。有些时候需要设计者自己作出判断和选择。计算的技巧很简单，设计者对负载的使用效率和恰当性作出正确的判断才是得到一个符合成本效益的良好设计的关键。



## 1. 设计的基本原理

太阳电池组件设计的一个主要原则就是要满足平均天气条件下负载的每日用电需求；因为天气条件有低于和高于平均值的情况，所以要保证太阳电池组件和蓄电池在天气条件有别于平均值的情况下协调工作；蓄电池在数天的恶劣气候条件下，其荷电状态（SOC）将会降低很多。在太阳电池组件大小的设计中不要考虑尽可能快地给蓄电池充满电。如果这样，就会导致一个很大的太阳电池组件，使得系统成本过高；而在一年中的绝大部分时间里太阳电池组件的发电量会远远大于负载的使用量，从而造成太阳电池组件不必要的浪费；蓄电池的主要作用是在太阳辐射低于平均值的情况下给负载供电；在随后太阳辐射高于平均值的天气情况下，太阳电池组件就会给蓄电池充电。

设计太阳电池组件要满足光照最差季节的需要。在进行太阳电池组件设计的时候，首先要考虑的问题就是设计的太阳电池组件输出要等于全年负载需求的平均值。在那种情况下，太阳电池组件将提供负载所需的所有能量。但这也意味着每年都有将近一半的时间蓄电池处于亏电状态。蓄电池长时间内处于亏电状态将使得蓄电池的极板硫酸盐化。而在独立光伏系统中没有备用电源在天气较差的情况下给蓄电池进行再充电，这样蓄电池的使用寿命和性能将会受到很大的影响，整个系统的运行费用也将大幅度增加。太阳电池组件设计中较好的办法是使太阳电池组件能满足光照最恶劣季节里的负载需要，也就是要保证在光照情况最差的情况下蓄电池也能够被完全地充满电。这样蓄电池全年都能达到全满状态，可延长蓄电池的使用寿命，减少维护费用。

如果在全年光照最差的季节，光照度大大低于平均值，在这种情况下仍然按照最差情况考虑设计太阳电池组件大小，那么所设计的太阳电池组件在一年中的其它时候就会远远超过实际所需，而且成本高昂。这时就可以考虑使用带有备用电源的混合系统。但是对于很小的系统，安装混合系统的成本会很高；而在偏远地区，使用备用电源的操作和维护费用也相当高，所以设计独立光伏系统的关键就是选择成本效益最好的方案。

## 2. 蓄电池设计方法

蓄电池的设计思想是保证在太阳光照连续低于平均值的情况下负载仍可以正常工作。我们可以设想蓄电池是充满电的，在光照度低于平均值的情况下，太阳电池组件产生的电能不能完全填满由于负载从蓄电池中消耗能量而产生的空缺，这样在第一天

结束的时候，蓄电池就会处于未充满状态。如果第二天光照度仍然低于平均值，蓄电池就仍然要放电以供负载的需要，蓄电池的荷电状态继续下降。也许接下来的第三天第四天会有同样的情况发生。但是为了避免蓄电池的损坏，这样的放电过程只允许持续一定的时间，直到蓄电池的荷电状态到达指定的危险值。为了量化评估这种太阳光照连续低于平均值的情况，在进行蓄电池设计时，我们需要引入一个不可缺少的参数：自给天数，即系统在没有任何外来能源的情况下负载仍能正常工作的天数。这个参数让系统设计者能够选择所需使用的蓄电池容量大小。

一般来讲，自给天数的确定与两个因素有关：负载对电源的要求程度；光伏系统安装地点的气象条件即最大连续阴雨天数。通常可以将光伏系统安装地点的最大连续阴雨天数作为系统设计中使用的自给天数，但还要综合考虑负载对电源的要求。对于负载对电源要求不是很严格的光伏应用，我们在设计中通常取自给天数为 3~5 天。对于负载要求很严格的光伏应用系统，我们在设计中通常取自给天数为 7~14 天。所谓负载要求不严格的系统通常是指用户可以稍微调节一下负载需求从而适应恶劣天气带来的不便，而严格系统指的是用电负载比较重要，例如常用于通信，导航或者重要的健康设施如医院、诊所等。此外还要考虑光伏系统的安装地点，如果在很偏远的地区，必须设计较大的蓄电池容量，因为维护人员要到达现场需要花费很长时间。

光伏系统中使用的蓄电池有镍氢、镍镉电池和铅酸蓄电池，但是在较大的系统中考虑到技术成熟性和成本等因素，通常使用铅酸蓄电池。在下面内容中涉及到的蓄电池没有特别说明指的都是铅酸蓄电池。

蓄电池的设计包括蓄电池容量的设计计算和蓄电池组的串并联设计。首先，给出计算蓄电池容量的基本方法。

#### (1) 基本公式

- I. 第一步，将每天负载需要的用电量乘以根据实际情况确定的自给天数就可以得到初步的蓄电池容量。
- II. 第二步，将第一步得到的蓄电池容量除以蓄电池的允许最大放电深度。因为不能让蓄电池在自给天数中完全放电，所以需要除以最大放电深度，得到所需要的蓄电池容量。最大放电深度的选择需要参考光伏系统中选择使用的蓄电池的性能参数，可以从蓄电池供应商得到详细的有关该蓄电池最大放电深度的资料。通常情况下，如果使用的是深循环型蓄电池，推荐使用 80% 放电深度 (DOD)；如果使用的是浅循环蓄电池，推荐选用使用 50%DOD。设计蓄电池容量的基本公式见下：

$$\text{蓄电池容量} = \frac{\text{自给天数} \times \text{日平均负载}}{\text{最大放电深度}} \quad (4.1)$$

下面我们介绍确定蓄电池串并联的方法。每个蓄电池都有它的标称电压。为了达到负载工作的标称电压，我们将蓄电池串联起来给负载供电，需要串联的蓄电池的个数等于负载的标称电压除以蓄电池的标称电压。

$$\text{串联蓄电池数} = \frac{\text{负载标称电压}}{\text{蓄电池标称电压}} \quad (4.2)$$

为了说明上述基本公式的应用，我们用一个小型的交流光伏应用系统作为范例。假设该光伏系统交流负载的耗电量为 10KWh/天，如果在该光伏系统中，我们选择使用的逆变器的效率为 90%，输入电压为 24V，那么可得所需的直流负载需求为 462.96Ah/天。(10000 Wh ÷ 0.9 ÷ 24 V = 462.96 Ah)。我们假设这是一个负载对电源要求并不是很严格的系统，使用者可以比较灵活的根据天气情况调整用电。我们选择 5 天的自给天数，并使用深循环电池，放电深度为 80%。那么：

$$\text{蓄电池容量} = 5 \text{ 天} \times 462.96\text{Ah} / 0.8 = 2893.51\text{Ah}.$$

如果选用 2V/400Ah 的单体蓄电池，那么需要串连的电池数：

$$\text{串联蓄电池数} = 24\text{V} / 2\text{V} = 12 \text{ (个)}$$

需要并联的蓄电池数：

$$\text{并联蓄电池数} = 2893.51 / 400 = 7.23$$

我们取整数为 8。所以该系统需要使用 2V/400Ah 的蓄电池个数为：12 串联 × 8 并联 = 96 (个)。

下面是一个纯直流系统的例子：乡村小屋的光伏供电系统。该小屋只是在周末使用，可以使用低成本的浅循环蓄电池以降低系统成本。该乡村小屋的负载为 90 Ah/天，系统电压为 24V。我们选择自给天数为 2 天，蓄电池允许的最大放电深度为 50%，那么：

$$\text{蓄电池容量} = 2 \text{ 天} \times 90\text{Ah} / 0.5 = 360\text{Ah}.$$

如果选用 12V/100Ah 的蓄电池，那么需要该蓄电池 2 串联 × 4 并联 = 8 个。

## (2) 设计修正

以上给出的只是蓄电池容量的基本估算方法，在实际情况中还有很多性能参数会对蓄电池容量和使用寿命产生很大的影响。为了得到正确的蓄电池容量设计，上面的基本方程必须加以修正。

对于蓄电池，蓄电池的容量不是一成不变的，蓄电池的容量与两个重要因素相关：蓄电池的放电率和环境温度。

首先，我们考虑放电率对蓄电池容量的影响。蓄电池的容量随着放电率的改变而改变，随着放电率的降低，蓄电池的容量会相应增加。这样就会对我们的容量设计产生影响。进行光伏系统设计时就要为所设计的系统选择在恰当的放电率下的蓄电池容量。通常，生产厂家提供的是蓄电池额定容量是 10 小时放电率下的蓄电池容量。但是在光伏系统中，因为蓄电池中存储的能量主要是为了自给天数中的负载需要，蓄电池放电率通常较慢，光伏供电系统中蓄电池典型的放电率为 100~200 小时。在设计时我们要用到在蓄电池技术中常用的平均放电率的概念。光伏系统的平均放电率公式如下：

$$\text{平均放电率 (小时)} = \frac{\text{自给天数} \times \text{负载工作时间}}{\text{最大放电深度}} \quad (4.3)$$

上式中的负载工作时间可以用下述方法估计：对于只有单个负载的光伏系统，负载的工作时间就是实际负载平均每天工作的小时数；对于有多个不同负载的光伏系统，负载的工作时间可以使用加权平均负载工作时间，加权平均负载工作时间的计算方法如下：

$$\text{加权平均负载工作时间} = \frac{\sum \text{负载功率} \times \text{负载工作时间}}{\sum \text{负载功率}} \quad (4.4)$$

根据上面两式就可以计算出光伏系统的实际平均放电率，根据蓄电池生产商提供的该型号电池在不同放电速率下的蓄电池容量，就可以对蓄电池的容量进行修正。

下面考虑温度对蓄电池容量的影响。蓄电池的容量会随着蓄电池温度的变化而变化，当蓄电池温度下降时，蓄电池的容量会下降。通常，铅酸蓄电池的容量是在 25℃ 时标定的。随着温度的降低，0℃ 时的容量大约下降到额定容量的 90%，而在 -20℃ 的时候大约下降到额定容量的 80%，所以必须考虑蓄电池的环境温度对其容量的影响。

如果光伏系统安装地点的气温很低，这就意味着按照额定容量设计的蓄电池容量在该地区的实际使用容量会降低，也就是无法满足系统负载的用电需求。在实际工作的情况下就会导致蓄电池的过放电，减少蓄电池的使用寿命，增加维护成本。这样，设计时需要的蓄电池容量就要比根据标准情况（25℃）下蓄电池参数计算出来的容量

要大，只有选择安装相对于 25℃ 时计算容量多的容量，才能够保证蓄电池在温度低于 25℃ 的情况下，还能完全提供所需的能量。

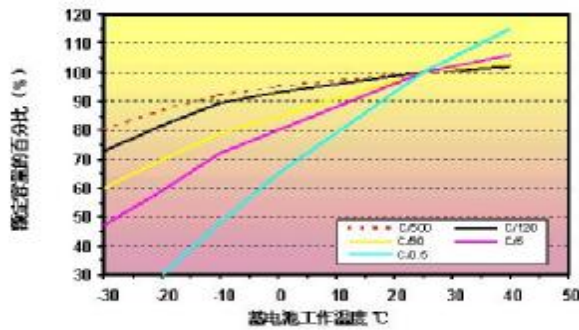


图 4-9 蓄电池温度 - 放电率 - 容量曲线

蓄电池生产商一般会提供相关的蓄电池温度-容量修正曲线。在该曲线上可以查到对应温度的蓄电池容量修正系数，除以蓄电池容量修正系数就能对上述的蓄电池容量初步计算结果加以修正。上面是一个典型的温度 - 放电率 - 容量变化曲线。

因为低温的影响，在蓄电池容量设计上还必须要考虑的一个因素就是修正蓄电池的最大放电深度以防止蓄电池在低温下凝固失效，造成蓄电池的永久损坏。铅酸蓄电池中的电解液在低温下可能会凝固，随着蓄电池的放电，蓄电池中不断生成的水稀释电解液，导致蓄电池电解液的凝固点不断上升，直到纯水的 0℃。在寒冷的气候条件下，如果蓄电池放电过多，随着电解液凝固点的上升，电解液就可能凝结，从而损坏蓄电池。即使系统中使用的是深循环工业用蓄电池，其最大的放电深度也不要超过 80%。下图给出了一般铅酸蓄电池的最大放电深度和蓄电池温度的关系，系统设计时可以参考该图得到所需的调整因子。

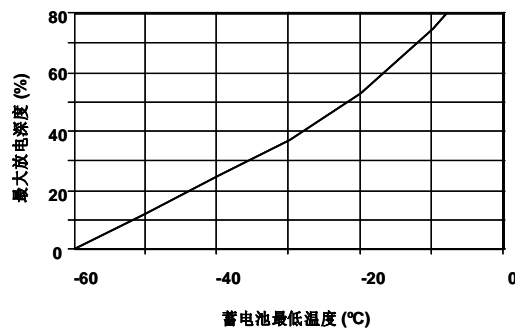


图 4-10 铅酸蓄电池最大放电深度 - 温度曲线

在设计时要使用光伏系统所在地区的最低平均温度，然后从上图或者是由蓄电池

生产商提供的最大放电深度 - 蓄电池温度关系图上找到该地区使用蓄电池的最大允许放电深度。通常，只是在温度低于零下 8 度时才考虑进行校正。

### (3) 完整的蓄电池容量设计计算

考虑到以上所有的计算修正因子，我们可以得到如下蓄电池容量的最终计算公式。

$$\text{蓄电池容量} (@ \text{指定放电率}) = \frac{\text{自给天数} \times \text{日平均负载}}{\text{最大允许放电深度} \times \text{温度修正因子}} \quad (4.5)$$

下面对每个参数进行总结分析：

- 1 **最大允许放电深度**：一般而言，浅循环蓄电池的最大允许放电深度为 50%，而深循环蓄电池的最大允许放电深度为 80%。如果在严寒地区，就要考虑到低温防冻问题对此进行必要的修正。设计时可以适当地减小这个值扩大蓄电池的容量，以延长蓄电池的使用寿命。例如，如果使用深循环蓄电池，进行设计时，将使用的蓄电池容量最大可用百分比定为 60% 而不是 80%，这样既可以提高蓄电池的使用寿命，减少蓄电池系统的维护费用，同时又对系统初始成本不会有太大的冲击。根据实际情况可对此进行灵活地处理。
- 1 **温度修正系数**：当温度降低的时候，蓄电池的容量将会减少。温度修正系数的作用就是保证安装的蓄电池容量要大于按照 25℃ 标准情况算出来的容量值，从而使得设计的蓄电池容量能够满足实际负载的用电需求。
- 1 **指定放电率**：指定放电率是考虑到慢的放电率将会从蓄电池得到更多的容量。使用供应商提供的数据，可以选择适于设计系统的在指定放电率下的合适蓄电池容量。如果在没有详细的有关容量 - 放电速率的资料的情况下，可以粗略的估计认为，在慢放电率（C/100 到 C/300）的情况下，蓄电池的容量要比标准状态多 30%。

下面举例说明上述公式的应用。建立一套光伏供电系统给一个地处偏远的通讯基站供电，该系统的负载有两个：负载一，工作电流为 1 安培，每天工作 24 小时。负载二，工作电流为 5 安培每天工作 12 小时。该系统所处的地点的 24 小时平均最低温度为 -20℃，系统的自给时间为 5 天。使用深循环工业用蓄电池（最大 DOD 为 80%）。

因为该光伏系统所在地区的 24 小时平均最低温度为 -20℃，所以必须修正蓄电池的最大允许放电深度。由最大放电深度 - 蓄电池温度的关系图我们可以确定最大允许放电深度为 50%。所以，

$$\text{加权平均负载工作时间} = \frac{5A \cdot 8\text{hrs} + 10A \cdot 6\text{hrs}}{5A + 10A} = 6.67\text{hrs}$$

$$\text{平均放电率} = \frac{5\text{days} \cdot 6.67\text{hrs}}{0.5} = 66.7 \text{ 小时率}$$

根据上页中的典型温度-放电率-容量变化曲线，与平均放电率计算数值最为接近的放电率为 50 小时率，-20℃时在该放电率下所对应的温度修正系数为 0.7（也可以根据供应商提供的性能表进行查询）。如果计算出来的放电率在两个数据之间，那么选择较快的放电率（短时间）比较保守可靠。因此蓄电池容量为：

$$\text{蓄电池容量} = \frac{5 \cdot (5A \cdot 8\text{hrs} + 10A \cdot 6\text{hrs})}{0.5 \cdot 0.7} = 1428.57\text{Ah@50 小时放电率}$$

根据供应商提供的蓄电池参数表，我们可以选择合适的蓄电池进行串并联，构成所需的蓄电池组。

#### （4）蓄电池组并联设计

当计算出了所需的蓄电池的容量后，下一步就是要决定选择多少个单体蓄电池加以并联得到所需的蓄电池容量。这样可以有多种选择，例如，如果计算出来的蓄电池容量为 500Ah，那么我们可以选择一个 500Ah 的单体蓄电池，也可以选择两个 250Ah 的蓄电池并联，还可以选择 5 个 100Ah 的蓄电池并联。从理论上讲，这些选择都可以满足要求，但是在实际应用当中，要尽量减少并联数目。也就是说最好是选择大容量的蓄电池以减少所需的并联数目。这样做的目的就是为了尽量减少蓄电池之间的不平衡所造成的影响，因为一些并联的蓄电池在充放电的时候可能会与之并联的蓄电池不平衡。并联的组数越多，发生蓄电池不平衡的可能性就越大。一般来讲，建议并联的数目不要超过 4 组。

目前，很多光伏系统采用的是两组并联模式。这样，如果有一组蓄电池出现故障，不能正常工作，就可以将该组蓄电池断开进行维修，而使用另外一组正常的蓄电池，虽然电流有所下降，但系统还能保持在标称电压正常工作。总之，蓄电池组的并联设计需要考虑不同的实际情况，根据不同的需要作出不同的选择。

### 3. 光伏组件方阵设计

#### （1）基本公式

在前面的章节中，我们讲述了光伏供电系统中蓄电池的设计方法。下面我们将讲述如何设计太阳电池组件的大小。太阳电池组件设计的基本思想就是满足年平均日负载的用电需求。计算太阳电池组件的基本方法是用负载平均每天所需要的能量（安时

数)除以一块太阳能电池组件在一天中可以产生的能量(安时数),这样就可以算出系统需要并联的太阳能电池组件数,使用这些组件并联就可以产生系统负载所需要的电流。将系统的标称电压除以太阳能电池组件的标称电压,就可以得到太阳能电池组件需要串联的太阳能电池组件数,使用这些太阳能电池组件串联就可以产生系统负载所需要的电压。基本计算公式如下:

$$\text{并联的组件数量} = \frac{\text{日平均负载 (AH)}}{\text{组件日输出 (AH)}} \quad (4.6)$$

$$\text{串联组件数量} = \frac{\text{系统电压 (V)}}{\text{组件电压 (V)}} \quad (4.7)$$

## (2) 光伏组件方阵设计的修正

太阳能电池组件的输出,会受到一些外在因素的影响而降低,根据上述基本公式计算出的太阳能电池组件,在实际情况下通常不能满足光伏系统的用电需求,为了得到更加正确的结果,有必要对上述基本公式进行修正。

### I. 将太阳能电池组件输出降低 10%

在实际工作情况下,太阳能电池组件的输出会受到外在环境的影响而降低。泥土,灰尘的覆盖和组件性能的慢慢衰变都会降低太阳能电池组件的输出。通常的做法就是在计算的时候减少太阳能电池组件的输出 10% 来解决上述的不可预知和不可量化的因素。我们可以将这看成是光伏系统设计时需要考虑的工程上的安全系数。又因为光伏供电系统的运行还依赖于天气状况,所以有必要对这些因素进行评估和技术估计,因此设计上留有一定的余量将使得系统可以年复一年地长期正常使用。

### II. 将负载增加 10% 以应付蓄电池的库仑效率

在蓄电池的充放电过程中,铅酸蓄电池会电解水,产生气体逸出,这也就是说着太阳能电池组件产生的电流中将有一部分不能转化储存起来而是耗散掉。所以可以认为必须有一小部分电流用来补偿损失,我们用蓄电池的库仑效率来评估这种电流损失。不同的蓄电池其库仑效率不同,通常可以认为有 5~10% 的损失,所以保守设计中有必要将太阳能电池组件的功率增加 10% 以抵消蓄电池的耗散损失。

## (3) 完整的太阳能电池组件设计计算

考虑到上述因素,必须修正简单的太阳能电池组件设计公式,将每天的负载除以蓄电池的库仑效率,这样就增加了每天的负载,实际上给出了太阳能电池组件需要负担的真



正负载；将衰减因子乘以太阳能电池组件的日输出，这样就考虑了环境因素和组件自身衰减造成的太阳能电池组件日输出的减少，给出了一个在实际情况下太阳能电池组件输出的保守估计值。综合考虑以上因素，可以得到下面的计算公式。

$$\text{并联的组件数量} = \frac{\text{日平均负载 (AH)}}{\text{库仑效率} \times [\text{组件日输出 (AH)} \times \text{衰减因子}]} \quad (4.8)$$

$$\text{串联组件数量} = \frac{\text{系统电压 (V)}}{\text{组件电压 (V)}} \quad (4.9)$$

利用上述公式进行太阳能电池组件的设计计算时，还要注意以下一些问题：

#### I. 考虑季节变化对光伏系统输出的影响，逐月进行设计计算

对于全年负载不变的情况，太阳能电池组件的设计计算是基于辐照最低的月份。如果负载的工作情况是变化的，即每个月份的负载对电力的需求是不一样的，那么在设计时采取的最好方法就是按照不同的季节或者每个月份分别来进行计算，计算出的最大太阳能电池组件数目就为所求。通常在夏季、春季和秋季，太阳能电池组件的电能输出相对较多，而冬季相对较少，但是负载的需求也可能在夏季比较大，所以在这种情况下只是用年平均或者某一个月份进行设计计算是不准确的，因为为了满足每个月份负载需求而需要的太阳能电池组件数是不同的，那么就必须按照每个月所需要的负载算出该月所必须的太阳能电池组件。其中的最大值就是一年中所需要的太阳能电池组件数目。例如，可能你计算出你在冬季需要的太阳能电池组件数是 10 块，但是在夏季可能只需要 5 块，但是为了保证系统全年的正常运行，就不得不安装较大数量的太阳能电池组件即 10 块组件来满足全年的负载的需要。

#### II. 根据太阳能电池组件电池片的串联数量选择合适的太阳能电池组件

太阳能电池组件的日输出与太阳能电池组件中电池片的串联数量有关。太阳能电池在光照下的电压会随着温度的升高而降低，从而导致太阳能电池组件的电压会随着温度的升高而降低。根据这一物理现象，太阳能电池组件生产商根据太阳能电池组件工作的不同气候条件，设计了不同的组件：36 片串联组件与 33 片串联组件。

36 片太阳能电池组件主要适用于高温环境应用，36 片太阳能电池组件的串联设计使得太阳能电池组件即使在高温环境下也可以在  $I_{mp}$  附近工作。通常，使用的蓄电池系统电压为 12V，36 片串联就意味着在标准条件（25℃）下太阳能电池组件的  $V_{mp}$  为 17V，大大高于充电所需的 12V 电压。当这些太阳能电池组件在高温下工作时，由于高温太阳电

池组件的损失电压约为 2V，这样  $V_{mp}$  为 15V，即使在最热的气候条件下也足够可以给各种类型的蓄电池充电。采用 36 片串联的太阳电池组件最好是应用在炎热地区，也可以使用在安装了峰值功率跟踪设备的系统中，这样可以最大限度的发挥太阳电池组件的潜力。

33 片串联的太阳电池组件适宜于在温和气候环境下使用 33 片串联就意味着在标准条件（25℃）下太阳电池组件的  $V_{mp}$  为 16V，稍高于充电所需的 12V 电压。当这些太阳电池组件在 40-45℃ 下工作时，由于高温导致太阳电池组件损失电压约为 1V，这样  $V_{mp}$  为 15V，也足够可以给各种类型的蓄电池充电。但如果在非常热的气候条件下工作，太阳电池组件电压就会降低更多。如果到 50℃ 或者更高，电压会降低到 14V 或者以下，就会发生电流输出降低。这样对太阳电池组件没有害处，但是产生的电流就不够理想，所以 33 片串联的太阳电池组件最好用在温和气候条件下。

### III. 使用峰值小时数的方法估算太阳电池组件的输出

因为太阳电池组件的输出是在标准状态下标定的，但在实际使用中，日照条件以及太阳电池组件的环境条件是不可能与标准状态完全相同，因此有必要找出一种可以利用太阳电池组件额定输出和气象数据来估算实际情况下太阳电池组件输出的方法，我们可以使用峰值小时数的方法估算太阳电池组件的日输出。该方法是将实际的倾斜面上的太阳辐射转换成等同的利用标准太阳辐射  $1000 \text{ W/m}^2$  照射的小时数。将该小时数乘以太阳电池组件的峰值输出就可以估算出太阳电池组件每天输出的安时数。太阳电池组件的输出为峰值小时数  $\times$  峰值功率。例如：如果一个月的平均辐射为  $5.0 \text{ kWh/m}^2$ ，可以将其写成  $5.0 \text{ hours} \times 1000 \text{ W/m}^2$ ，而  $1000 \text{ W/m}^2$  正好也就是用来标定太阳电池组件功率的标准辐射量，那么平均辐射为  $5.0 \text{ kWh/m}^2$  就基本等同于太阳电池组件在标准辐射下照射 5.0 小时。这当然不是实际情况，但是可以用来简化计算。因为  $1000 \text{ W/m}^2$  是生产商用来标定太阳电池组件功率的辐射量，所以在该辐射情况下的组件输出数值可以很容易从生产商处得到。为了计算太阳电池组件每天产生的安时数，可以使用峰值小时  $\times$  太阳电池组件的  $I_{mp}$ 。例如，假设在某个地区倾角为 30 度的斜面上按月平均每天的辐射量为  $5.0 \text{ kWh/m}^2$ ，可以将其写成  $5.0 \text{ hours} \times 1000 \text{ W/m}^2$ 。对于一个典型的 75W 太阳电池组件， $I_{mp}$  为 4.4Amps，就可得出每天发电的安时数为  $5.0 \times 4.4 \text{ Amps} = 22.0 \text{ Ah/天}$ 。

使用峰值小时方法存在一些缺点，因为在峰值小时方法中做了一些简化，导致估

算结果和实际情况有一定的偏差。

首先，太阳能电池组件输出的温度效应在该方法中被忽略。在计算中对太阳能电池组件的  $I_{mp}$  要进行补偿。因为在工作的時候，蓄電池兩端的電壓通常是稍微低於  $V_{mp}$ ，這樣太陽電池組件輸出電流就會稍微高於  $I_{mp}$ ，使用  $I_{mp}$  作為太陽電池組件的輸出就會比較保守。這樣，溫度效應對於由較少的電池片串聯的太陽電池組件輸出的影響就比對由較多的電池片串聯的太陽電池組件的輸出影響要大。所以峰值小時方法對於 36 片串聯的太陽電池組件比較準確，對於 33 片串聯的太陽電池組件則較差，特別是在高溫環境下。對於所有的太陽電池組件，在寒冷氣候的預計會更加準確。

其次，在峰值小時方法中，利用了氣象數據中測量的總的太陽輻射，將其轉換為峰值小時。實際上，在每天的清晨和黃昏，有一段時間因為輻射很低，太陽電池組件產生的電壓太小而無法供給負載使用或者給蓄電池充電，這就將會導致估算偏大。通常，這一點造成的誤差不是很大，但對於由較少電池片串聯的太陽電池組件的影響比較大。所以對 36 片串聯的太陽電池組件每天輸出的估算就比較準確，而對於 33 片串聯的太陽電池組件的估算則較差。

再次，在利用峰值小時方法進行太陽電池組件輸出估算時默認了一個假設，即假設太陽電池組件的輸出和光照完全成線性關係，並假設所有的太陽電池組件都會同樣地把太陽輻射轉化為電能。但實際上不是這樣的，這種使用峰值小時數乘以電流峰值的方法有時候會過高地估算某些太陽電池組件的輸出。

不過，總的來說，在已知本地傾斜斜面上太陽能輻射數據的情況下，峰值小時估計方法是一種對太陽電池組件輸出進行快速估算很有效的辦法。

下面舉例說明如何使用上述方法計算光伏供電系統需要的太陽電池組件數。

一個偏遠地區建設的光伏供電系統，該系統使用直流負載，負載為 24V，400Ah/天。該地區最低的光照輻射是一月份，如果採用 30 度的傾角，斜面上的平均日太陽輻射為 3.0 kWh/m<sup>2</sup>，也就是相當於 3 個標準峰值小時。對於一個典型的 75W 太陽電池組件，每天的輸出為：

$$\text{組件日輸出} = 3.0 \text{ 峰值小時} \times 4.4 \text{ 安培} = 13.2 \text{ Ah/天}$$

假設蓄電池的庫倫效率為 90%，太陽電池組件的輸出衰減為 10%。根據上述公式，

$$\text{並聯組件數量} = \frac{\text{日平均負載 (AH)}}{\text{庫倫效率} \times [\text{組件日輸出 (AH)} \times \text{衰減因子}]}$$

$$= \frac{400(\text{AH})}{0.9 \lceil 13.2(\text{AH}) \rceil 0.9} = 37.4$$

$$\text{串联组件数量} = \frac{\text{系统电压 (V)}}{\text{组件电压 (V)}} = \frac{24(\text{V})}{12(\text{V})} = 2$$

根据以上计算数据，可以选择并联组件数量为 38，串联组件数量为 2，所需的太阳能电池组件数为：

$$\text{总的太阳能电池组件数} = 2 \text{ 串} \times 38 \text{ 并} = 76 \text{ 块}$$

#### 4. 蓄电池和光伏组件方阵设计的校核

我们有必要对光伏组件方阵和蓄电池的设计计算进行校核，以进一步了解系统运行中可能出现的情况，保证光伏组件方阵的设计和蓄电池的设计可以协调工作。

##### I. 校核蓄电池平均每天的放电深度，保证蓄电池不会过放电。

计算公式如下，但是如果自给天数很大，那么实际的每天 DOD 可能相当小，不需要进行校核计算。

$$\begin{aligned} \text{蓄电池日放电深度} &= \frac{\text{日负载 (V)}}{\text{设计蓄电池的总容量 (V)}} \\ &= \frac{\text{日负载 (V)}}{\text{设计并联蓄电池数} \times \text{蓄电池容量 (V)}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

如果一个光伏系统使用了 4000 Ah 的深循环蓄电池，每天的负载为 500 Ah，那么平均每天的 DOD 校核计算如下：500Ah/4000Ah = 0.125 < 0.8。所以该系统中蓄电池不会过放电。

##### II. 校核光伏组件方阵对蓄电池组的最大充电率

另外一个校核计算就是校核设计光伏组件方阵给蓄电池的充电率。在太阳辐射处于峰值时，光伏组件方阵对于蓄电池的充电率不能太大，否则会损害蓄电池。蓄电池生产商将提供指定型号蓄电池的最大充电率，计算值必须小于该最大充电率。下面给出了最大的充电率的校核公式，用总的蓄电池容量除以总的峰值电流即可。

$$\begin{aligned} \text{最大充电率} &= \frac{\text{设计蓄电池总容量 (Ah)}}{\text{设计光伏阵列的峰值电流 (Amps)}} \\ &= \frac{\text{并联蓄电池数} \times \text{蓄电池容量 (Ah)}}{\text{并联光伏组件数} \times \text{组件峰值电流 (A)}} \end{aligned} \quad (4.11)$$

下面举例说明，光伏供电系统使用了 75W 太阳电池组件 50 块（25 并联 × 2 串联），工作电压 24V，配备 4000 Ah 的蓄电池。最大充电率为：

$$\text{最大充电率} = 4000\text{Ah} / 25 \times 4.4 (75\text{W 组件峰值电流}) = 24 \text{ hours}$$

将计算值和蓄电池生产商提供的该设计选用型号蓄电池的最大充电率进行比较，如果计算值较小，则设计安全，光伏组件方阵对蓄电池的充电不会损坏蓄电池；如果计算值较大，则设计不合格，需要重新进行设计。

#### 4.4.2. 计算斜面上的太阳辐射并选择最佳倾角

在光伏供电系统的设计中，光伏组件方阵的放置形式和放置角度对光伏系统接收到的太阳辐射有很大的影响，从而影响到光伏供电系统的发电能力。光伏组件方阵的放置形式有固定安装式和自动跟踪式两种形式，其中自动跟踪装置包括单轴跟踪装置和双轴跟踪装置。

与光伏组件方阵放置相关的有下列两个角度参量：太阳电池组件倾角；太阳电池组件方位角。

太阳电池组件的倾角是太阳电池组件平面与水平地面的夹角。光伏组件方阵的方位角是方阵的垂直面与正南方向的夹角（向东偏设定为负角度，向西偏设定为正角度）。一般在北半球，太阳电池组件朝向正南（即方阵垂直面与正南的夹角为 0°）时，太阳电池组件的发电量是最大的。

对于固定式光伏系统，一旦安装完成，太阳电池组件倾角和太阳电池组件方位角就无法改变。而安装了跟踪装置的光伏供电系统，光伏组件方阵可以随着太阳的运行而跟踪移动，使太阳电池组件一直朝向太阳，增加了光伏组件方阵接受的太阳辐射量。但是目前太阳能光伏供电系统中使用跟踪装置的相对较少，因为跟踪装置比较复杂，初始成本和维护成本较高，安装跟踪装置获得额外的太阳能辐射产生的效益无法抵消安装该系统所需要的成本。所以下面主要讲述采用固定安装的光伏系统。

固定安装的光伏系统涉及到两个重要的方面，即如何选择最佳倾角以及如何计算斜面上的太阳辐射。

地面应用的独立光伏发电系统，光伏组件方阵平面要朝向赤道，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。因此，确定方阵的最佳倾角是光伏发电系统设计中不可缺少的重要环节。目前有的观点认为方阵倾角等于当地纬度为最佳。这样做的结果，夏天太阳电池组件发电量往往过盈而造成浪费，

冬天时发电量又往往不足而使蓄电池处于欠充电状态，所以这不一定是最好的选择。也有的观点认为所取方阵倾角应使全年辐射量最弱的月份能得到最大的太阳辐射量为好，推荐方阵倾角在当地纬度的基础上再增加 15 度到 20 度。国外有的设计手册也提出，设计月份应以辐射量最小的 12 月(在北半球)或 6 月(在南半球)作为依据。其实，这种观点也不一定妥当，这样往往会使夏季获得的辐射量过少，从而导致方阵全年得到的太阳辐射量偏小。同时，最佳倾角的概念，在不同的应用中是不一样的，在独立光伏发电系统中，由于受到蓄电池荷电状态等因素的限制，要综合考虑光伏组件方阵平面上太阳辐射量的连续性、均匀性和极大性，而对于并网光伏发电系统等通常总是要求在全年中得到最大的太阳辐射量。下面将介绍对于独立光伏系统，如何选择最佳倾角。

在讨论最佳倾角的选择方法之前，先介绍利用水平面上太阳辐射计算斜面上太阳辐射的方法。因为我们需要使用的太阳辐射数据是倾斜面上的太阳辐射数据，而通常我们能够得到的原始气象数据是水平面上的太阳辐射数据。当太阳电池组件倾斜放置时，原始气象数据就不能代表斜面上的实际辐射，所以必须要测量斜面上的辐射数据或者采用数学方法对原始的水平面上的气象数据进行修正以得到斜面上所需的辐射数据。

#### 1. 将水平面上的太阳辐射数据转化成斜面上太阳辐射数据

确定朝向赤道倾斜面上的太阳辐射量，通常采用 Klein 提出的计算方法：倾斜面上的太阳辐射总量  $H_t$  由直接太阳辐射量  $H_{bt}$ 、天空散射辐射量  $H_{dt}$  和地面反射辐射量  $H_{rt}$  三部分所组成：

$$H_t = H_{bt} + H_{dt} + H_{rt} \quad (4.12)$$

对于确定的地点，知道全年各月水平面上的平均太阳辐射资料(总辐射量、直接辐射量或散射辐射量)后，便可以算出不同倾角的斜面上全年各月的平均太阳辐射量。下面介绍相关公式和计算模型。

计算直接太阳辐射量  $H_{bt}$  引入参数  $R_b$ ， $R_b$  为倾斜面上直接辐射量  $H_{bt}$  与水平面上  $H_b$  直接辐射量之比，

$$R_b = \frac{H_{bt}}{H_b} \quad (4.13)$$

上述公式中倾斜面与水平面上直接辐射量之比  $R_b$  的表达式如下：

$$R_b = \frac{\cos(L-s)\cos d \sin h_s + \frac{\rho}{80} \sin(L-s)\sin d}{\cos L \cos d \sin h_s + \frac{\rho}{80} \sin L \sin d} \quad (4.14)$$

上式中,  $s$  为太阳能电池组件倾角,  $\delta$  为太阳赤纬,  $h_s$  为水平面上日落时角,  $h_s'$  为倾斜面上日落时角,  $L$  是光伏供电系统的当地纬度。太阳赤纬  $\delta$  的计算可参见公式 (1.1)。

水平面上日落时角  $h_s$  的表达式如下:

$$h_s = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta) \quad (4.15)$$

倾斜面上日落时角  $h_s'$  的表达式如下:

$$h_s' = \min\{h_s, \cos^{-1}[-\tan(L-s)\tan \delta]\} \quad (4.16)$$

对于天空散射采用 Hay 模型。Hay 模型认为倾斜面上天空散射辐射量是由太阳光盘的辐射量和其余天空穹顶均匀分布的散射辐射量两部分组成, 可表达为:

$$H_{dt} = H_d \left[ \frac{H_b}{H_0} R_b + 0.5 \left(1 - \frac{H_b}{H_0}\right) (1 + \cos(s)) \right] \quad (4.17)$$

式中  $H_b$  和  $H_d$  分别为水平面上直接和散射辐射量。  $H_0$  为大气层外水平面上太阳辐射量, 其计算公式如下:

$$\overline{H_0} = \frac{24}{p} I_{sc} \left[ \cos \delta \cos L \cos d \sin h_s + \frac{\rho}{360} \sin L \sin d \right] \quad (4.18)$$

式中  $I_{sc}$  为太阳常数, 可以取  $I_{sc} = 1367$  瓦/米<sup>2</sup>。

对于地面反射辐射量  $H_{rt}$ , 其公式如下:

$$H_{rt} = 0.5 \rho H (1 - \cos(s)) \quad (4.19)$$

上式中  $H$  为水平面上总辐射量,  $\rho$  为地物表面反射率。一般情况下, 地面反射辐射量很小, 只占  $H_t$  的百分之几。

这样, 求倾斜面上太阳辐射量的公式可改为:

$$H_t = H_b R_b + H_d \left[ \frac{H_b}{H_0} R_b + 0.5 \left(1 - \frac{H_b}{H_0}\right) (1 + \cos(s)) \right] + 0.5 \rho H (1 - \cos(s)) \quad (4.20)$$

根据上面的计算公式就可以将水平面上的太阳辐射数据转化成斜面上太阳辐射数据, 基本的计算步骤如下:

(1). 确定所需的倾角  $s$  和系统所在地的纬度  $L$ 。

- (2). 找到按月平均的水平面上的太阳能辐射资料  $H$ 。
- (3). 确定每个月中有代表性的一天的水平面上日落时间角  $h_s$  和倾斜面上的日落时间角  $h_s'$ ，这两个几何参量只和纬度和日期有关。
- (4). 确定地球外的水平面上的太阳辐射，也就是大气层外的太阳辐射  $H_0$ ，该参量取决于地球绕太阳运行的轨道。
- (5). 计算倾斜面与水平面上直接辐射量之比  $R_b$ 。
- (6). 计算直接太阳辐射量  $H_{bt}$ 。
- (7). 计算天空散射辐射量  $H_{dt}$ 。
- (8). 确定地物表面反射率  $\rho$ ，计算地面反射辐射量  $H_{rt}$ 。
- (9). 将直接太阳辐射量  $H_{bt}$ 、天空散射辐射量  $H_{dt}$  和地面反射辐射量  $H_{rt}$  相加得到太阳辐射总量  $H_t$ 。

## 2. 独立光伏系统最佳倾角的确定

对于负载负荷均匀或近似均衡的独立光伏系统，太阳辐射均匀性对光伏发电系统的影响很大，对其进行量化处理是很有必要的。为此，可以引入一个量化参数，即辐射累积偏差  $\delta$ ，其数学表达式为：

$$\delta = \sum_{i=1}^{12} |H_{t\beta} - \overline{H_{t\beta}}| M(i) \quad (4.21)$$

式中  $H_{t\beta}$  是倾角为  $\beta$  的斜面上各月平均太阳辐射量， $\overline{H_{t\beta}}$  是该斜面上年平均太阳辐射量， $M(i)$  是第  $i$  月的天数。可见， $\delta$  的大小直接反映了全年辐射的均匀性， $\delta$  愈小辐射均匀性愈好。按照负载负荷均匀或近似均衡的独立光伏系统的要求，理想情况当然是选择某个倾角使得  $\overline{H_{t\beta}}$  为最大值、 $\delta$  为最小值。但实际情况是，二者所对应的倾角有一定的间隔，因此选择太阳电池组件的倾角时，只考虑  $\overline{H_{t\beta}}$  最大值或  $\delta$  取最小值必然会有片面性，应当在二者所对应的倾角之间进行优选。为此，需要定义一个新的量来描述倾斜面上太阳辐射的综合特性，称其为斜面辐射系数，以  $K$  表示，其数学表示式为：

$$K = \frac{365\overline{H_{t\beta}} - d}{365\overline{H}} \quad (4.22)$$

$\overline{H}$  为水平面上的年平均太阳辐射量。由于  $\overline{H_{t\beta}}$  和  $\delta$  都与太阳电池组件的倾角有关，



所以当 K 取极大值时，应当有

$$\frac{dK}{db} = 0 \quad (4.23)$$

求解上式，即可求得最佳倾角。下表为利用上述方法，采用计算机进行计算，取步长为 1 度，计算出来我国部分城市对于负载负荷均匀或近似均衡的独立光伏系统的最佳倾角。

表 4-1 我国部分主要城市的斜面最佳辐射倾角

城市	纬度 (φ)	最佳倾角
哈尔滨	45.68	φ + 3
长春	43.90	φ + 1
沈阳	41.77	φ + 1
北京	39.80	φ + 4
天津	39.10	φ + 5
呼和浩特	40.78	φ + 3
太原	37.78	φ + 5
乌鲁木齐	43.78	φ + 12
西宁	36.75	φ + 1
兰州	36.05	φ + 8
银川	38.48	φ + 2
西安	34.30	φ + 14
上海	31.17	φ + 3
南京	32.00	φ + 5
合肥	31.85	φ + 9
杭州	30.23	φ + 3
南昌	28.67	φ + 2
福州	26.08	φ + 4
济南	36.68	φ + 6
郑州	34.72	φ + 7

武 汉	30.63	$\phi + 7$
长 沙	28.20	$\phi + 6$
广 州	23.13	$\phi - 7$
海 口	20.03	$\phi + 12$
南 宁	22.82	$\phi + 5$
成 都	30.67	$\phi + 2$
贵 阳	26.58	$\phi + 8$
昆 明	25.02	$\phi - 8$
拉 萨	29.70	$\phi - 8$

#### 4.4.3. 混合光伏系统设计

混合光伏系统中除了使用太阳能外还有多种能量来源，常见的能源方式有：风力，柴油发电机，生物质能等。混合光伏系统在使用光伏发电的基础上还要综合利用这些能源给负载供电。常见的两种混合光伏系统是风光互补供电系统和光伏油机混合系统。

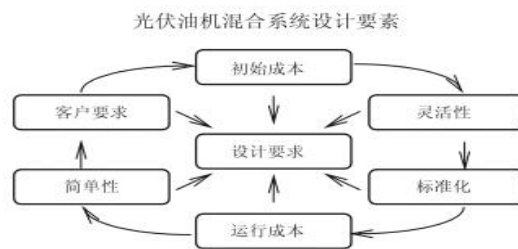


图 4-11 光伏油机混合系统设计要素

我们首先讨论风光互补供电系统。在很多地区太阳能和风能具有一定的互补性，例如青藏高原每年的4-9月太阳能辐射值最高，而风力资源最丰富的月份在当年的10月到次年的4月，为太阳能风能互补发电系统的应用提供了良好的基础。而且由于风光互补的特性使得对于独立光伏系统中必须考虑连续阴雨天或者独立的风力发电系统中必须考虑连续的无风天数而造成的蓄电池组余量偏大的问题得到缓解。但是，在进行风光互补系统设计的时候首先需要考虑风力发电的特点：

- 1 风力发电对风的速度十分敏感，远远大于光伏系统对太阳辐射的敏感程度。从理论上讲，风力发电机的输出和风速的3次方成正比。这样就给风力发电的设计带来一定的影响，如果估计的风速大于实际的风速，那么系统的输出就会远远小于

负载的实际需求，使得系统的设计参数必须十分准确。另一方面，如果该地区的风速很高，那么使用风力发电的成本就很低了，一般而言，如果平均风速大于 4m/s，那么风力发电的成本就会低于在光照条件很好地区的光伏系统了。但是因为风速变化很大，年度，季度以及在一天中的变化都很大，所以最好还是使用风/光互补系统，减小风能对速度的敏感从而对系统供电的影响。

- I 风力发电对风机的安装位置很敏感。即使是在同一个地区，有着相同的气象条件，风力发电机坐落的位置不同，也会造成风力发电的很大区别，例如山丘和树林都会对风力发电机坐落地点的风速产生很大影响，从而影响风力发电机的输出。
- I 风力发电对风机叶片的安装高度很敏感。因为风速随着高度的变化会变化，在同一个安装地点，叶片 5 米高的风机的发电量和 20 米高的风机的发电量是不同的。

考虑到上述因素的影响，建议在安装风力发电站的地点进行一年时间的实地测量，以获得较为准确的数据，便于系统的设计。风光互补供电系统设计的首要问题就是寻求太阳能光电和风力混合系统在各自规模上的最佳匹配，求得既能满足功能需求成本又最低的最佳风机容量、最佳太阳能电池组件大小和蓄电池容量。其基本的设计思路为：

- I 了解实际情况，计算出系统负载的逐月日平均需求，作出日平均用电量曲线。
- I 计算出各种规格的风力发电机、太阳能电池组件在全年各月的日均发电量，作出他们全年各月的日均发电量曲线。
- I 将风力和光电两种发电方式不同规格发电装置的发电量曲线进行多种拟合。
- I 看哪些互补组合的拟合曲线和日平均用电量曲线接近。
- I 对接近的拟合曲线进行成本估算，选择成本最低的那条曲线作为设计结果。

下面考虑光伏油机混合系统。对于没有足够风力资源的地方且负荷较大的光伏供电系统，如果考虑到要在暴风雨天气或者较长的坏天气后蓄电池不至于过放电，或者能够很快地恢复蓄电池的 SOC，我们可以采用两种方法，一种方法是采用很大的光伏系统，即很大的太阳能电池组件和很大的蓄电池容量；另外一种方法就是考虑使用混合系统，给该系统添加一个备用能源（通常是柴油机，或者汽油机），在冬天或者在较长的坏天气里每隔几天就将蓄电池充满，在夏天备用电源可能根本就不会使用。到底是采用较大的光伏系统还是采用光伏油机混合系统，其关键的决定因素就是系统成本。

光伏油机混合系统有更大的弹性，适合不同的系统需求，有很多种不同的方法设计混合系统。对系统进行设计时，必须在初始设计阶段作出正确的选择。在整个设计

过程中必须时刻牢记整个系统的运行过程。混合系统不同部分之间的交互作用很多，设计者必须保证满足所有的重叠要求。不管按照什么方法进行设计，首先必须使光伏油机混合系统的功能恰好满足负载需求，然后综合考虑各种因素，平衡好各方面因素对系统的影响。

下面介绍光伏油机混合系统的设计：

- I 负载工作情况。与独立光伏系统设计一样，混合系统中总载荷的确定也同样重要。对于交流负载，还需要知道频率、相数和功率因子。需要了解的不仅仅是负载的功率大小，负载每小时的工作情况都是很重要的。系统必须满足任何可能出现的峰值情况，采用确定的控制策略满足负载工作的需求。
- I 系统的总线结构。选择交流还是直流的总线取决于负载和整个系统工作的需要。如果，所有的负载都是直流负载，那么就使用直流总线。如果负载大部分都是交流负载，那么就最好使用交流总线结构。如果发电机要供给一部分的交流负载需求，那么选择交流总线结构就比较有利。总的来说，采用交流总线需要更加复杂的控制，系统的操作也较为复杂。但是更加的有效率，因为发电机产生的交流电直接供给负载的需要，不像在直流总线结构下，发电机输出的电流需要经过整流器将交流转化为直流，然后又经过逆变器将直流转换为交流满足交流负载的需要而产生很大的能量损失。进行设计的时候必须仔细的进行这些比较，确定最佳的系统总线结构。
- I 蓄电池总线电压。在混合系统中，蓄电池的总线电压会对系统的成本和效率产生很大的影响。通常，蓄电池的总线电压应该在设备允许电压和当地的安全法规规定的电压下尽量取高的值。因为较高的电压就会降低工作电流，从而降低损失，提高系统效率（因为功率的损失与电流的平方成正比）。而且因为电缆、保险、断路器和一些设备的成本都和电流的大小有关，所以较高的电压能够降低这些设备的成本。对于直流总线系统，通常负载的直流工作电压决定了总线的电压。如果有多种负载，最大的负载电压为总线电压，这样可以减少 DC/DC 滤波器的容量。对于有交流负载的系统，蓄电池电压由逆变器的输入电压决定。通常，除了最小的系统以外，其他的应该使用最小为 48V 的电压。较大的系统应该使用 120V 或者 240V。目前商用的最大的光伏/柴油机混合系统为 480V 系统。
- I 蓄电池容量。独立光伏系统经常提供 5-7 天或更多的自给天数。对于混合系统，

因为有备用能源，蓄电池通常会比较小，自给天数为 2-3 天。当蓄电池的电量下降时，系统可以启动备用能源如柴油发电机给蓄电池充电。在独立系统中，蓄电池是作为能量的储备，该能量储备必须充分以随时满足天气情况不好时的能量需求。在混合系统中，蓄电池的作用稍稍有所不同。它的作用是使得系统可以协调控制每种能源的利用。通过蓄电池的储能，系统在充分利用太阳能的同时，还可以控制发电机在最适宜的情况下工作。好的混合系统设计必须在经济性和可靠性方面把握好平衡。

- I 发电机和蓄电池充电设计。发电机和蓄电池的充电控制应该进行匹配设计，因为在混合系统中这两个部分联系紧密。首先，蓄电池的容量决定了蓄电池的充电器大小。充电器不能用过大的电流给蓄电池充电，通常最大充电率为  $C/5$ 。发电机的功率必须能够满足蓄电池充电的需要。较小的蓄电池会降低系统的初始成本，但会导致更为频繁的柴油机工作和启动，从而增加燃油消耗和柴油机维护成本。在计算发电机大小的时候还要考虑负载的能量需求和功率因数。如果系统使用的是交流总线，那么还要考虑直接接到发电机的交流负载。使用较大的发电机，会减少发电机工作的时间，但是并不一定会降低太阳电池组件发电量占系统总发电量的百分比。减少发电机的工作时间就可以降低系统的维护成本，并且提高系统的燃油经济性。所以使用较大功率的发电机会有很多优点。理论上，可以选择发电机的功率为系统负载的 75 - 90%。这样就可以有比较低的系统维护成本和较高的系统燃油经济性。

在选择发电机的时候还需注意到发电机的额定功率是在特定的温度、海拔和湿度条件下测定的。如果发电机在不同的条件下工作，那么发电机的输出就会降低。相关资料可以从柴油机制造商处获取。一般情况下，发电机的输出功率随着海拔的升高而降低，通常每升高三百米降低 3.5%。温度（相对额定温度，一般为 30℃）每升高一度，则输出降低 0.36%；而湿度可能导致的功率下降最高为 6%。

- I 燃油发电机发电与太阳电池组件能量贡献的分配。在光伏-燃油发电机混合系统设计中，燃油发电机发电与太阳电池组件能量贡献的分配非常关键，它决定了太阳电池组件的大小和燃油发电机年度的能量贡献，直接影响到系统成本和系统工作情况。发电机提供的能量越大则所需的太阳电池组件就越小，这样可以降低系统的初始成本，但燃油发电机的工作时间会增加从而导致系统的维护成本和燃油消

耗提高，它是整个系统各项容量设计的基础。决定该分配需要综合考虑系统所在地气象因素、系统成本、系统维护等各项因素。可以根据经验进行简单的估计，如果想得到精确的估计，就需要使用计算机进行过程模拟。通常认为太阳能电池组件的能量贡献应该在总负载需求的 25%到 75%之间，系统的初始成本和维护成本就会比较低。但是对于不同的实际情况，就需要对整个系统的效率和能量损失做仔细的考虑，对贡献比例加以修正。

在确定了燃油发电机发电与太阳能电池组件能量贡献的分配之后，就可以根据负载每年的耗电量，计算出太阳能电池组件的年度供电量和燃油发电机的年度供电量，由太阳能电池组件的年度供电量就可以计算出需要的太阳能电池组件容量，由发电机的年度供电量可以计算出每年的工作时间，从而估算燃油发电机的维护成本和燃油消耗。

I 光伏系统倾角的设计。对于独立光伏系统，为了降低蓄电池用量和系统成本，需要在冬季获得最大的太阳能辐照。这样就需要将太阳能电池组件的倾角设置成比当地纬度大 10-20 度。但是在混合系统中，因为备用油机可以给蓄电池充电，所以可以不再考虑季节因素对太阳能电池组件的影响。太阳能电池组件的设计只需要考虑使得太阳能电池组件在全年中输出最大即可，可以更为有效的利用太阳能。可以将太阳能电池组件的倾角设置为当地的纬度以得到最大的太阳辐射。但是在设计的时候需要注意一点，因为在混合系统中使用的蓄电池的容量比较小，在太阳辐射较强的夏季对于那些光伏能量贡献占比较大比例的光伏系统就有可能无法完全储存太阳能电池组件产生的能量，会造成一定的能量浪费，从而导致系统的能源利用效率降低，影响系统的经济性。所以实际上，可以在太阳辐射最好的月份应该将太阳能的贡献比例控制在 90%左右。在某些情况下，可能在特定的季节对能量贡献有指定的要求，这就需要对太阳能电池组件进行调节。

下面通过一个简单实例说明混合系统的设计方法：

偏远地区的一个通信基站，用户对柴油发电机的使用没有经验。负载为直流 30A 的连续负载，电压为 48V。还有一个 600W/220V 的交流负载，不定时使用。安装地点的海拔为 1500m，夏季的平均温度为 30 摄氏度。气候很干燥，所以不必考虑湿度对发电机的影响，平均太阳能辐射为 5.5kWh/m<sup>2</sup>/day。

I 负载情况，负载的年度耗电量为，

$$30 \text{ A} \times 48 \text{ V} = 1440 \text{ W}$$

$$1440W \times 24h = 34.56 \text{ kWh/day} = 12,614 \text{ kWh /year}$$

- I 总线结构。因为交流负载的工作时间很短，所以可以单独使用一套控制系统直接将交流负载接在柴油发电机上，也就是可以将交流负载和直流分开供电；又因为直流负载是连续负载，所以系统采用直流总线结构较好。
- I 总线电压。因为直流负载的电压为 48V，所以选择直流总线电压为 48V。
- I 蓄电池。因为是混合系统，所以选择自给天数为 3 天，选择深循环蓄电池，DOD 为 0.8。

$$34.6KWh \times 3 / 0.8 = 129.75 \text{ kWh}$$

$$129.75 \text{ kWh} / 48V = 2,703 \text{ Ah}$$

可以选择 3000Ah 的蓄电池，作为自给 3 天的蓄电池容量。蓄电池的最大的充电率为 C/5，所以最大充电电流为：

$$3000 / 5 = 600 \text{ Amps.}$$

- I 蓄电池充电器和发电机

可以选择 400A 的三相整流器，输入功率为 24KW。虽然电流比最大允许充电率要低一点，但是实际上仍然可以满足适当的蓄电池充电率需要。

下面来确定发电机的功率。首先，我们计算满足 75-90%负载需要的发电机功率。

$$24 / 0.75 = 32 \text{ kW} \quad 24 / 0.90 = 26.7 \text{ kW}$$

所以发电机功率范围：26.7KW~32KW

考虑海拔和温度的影响：

$$\text{温度} \quad -0.36\% / ^\circ \text{C} \times (30 - 25) = -1.8\%$$

$$\text{海拔} \quad -3.5\% / 300 \times (1500 - 900) = -7.0\%$$

$$\text{总计} \quad 1.8 + 7.0 = 8.8\%$$

额定功率的下降导致发电机功率：

$$26.7 / (1 - 0.088) = 26.7 / 0.912 = 29.3 \text{ kW}$$

所以选择 30KW 的三相柴油发电机。

- I 发电机能量贡献。用户已经表明不希望发电机的工作时间过长，我们可以选择 200 小时作为发电机一年中工作的最长时间（通常一年维修一次）。

整流器的输出为  $400A \times 48 \text{ V} = 19.2 \text{ kW}$ 。

假设系统的额外损失为百分之十，蓄电池的总效率为百分之八十。我们就可以计算出整流器发电机组的能量输出：

$$200 \times 19.2 \times 0.90 \times 0.80 = 2,764 \text{ kWh/year}$$

#### I 太阳电池组件

太阳电池组件将提供余下的能量 = 12,629 - 2,764 = 9,865 kWh /year。年平均辐射为 5.5 个峰值小时，并假设如下的系数：

高温降低因子=0.85；灰尘降低因子=0.9；蓄电池效率 = 0.8

太阳电池组件的计算：

$$\begin{aligned} \text{太阳电池组件(kW)} &= \frac{\text{太阳电池组件年度发电量 (kWh/year)}}{\text{峰值小时数} \times 365 \text{ 天} \times 0.85 \times 0.9 \times 0.8} \\ &= \frac{9,865}{5.5 \times 365 \times 0.85 \times 0.9 \times 0.8} \\ &= 8.03 \text{ kWp} = 8030 \text{ Wp} \end{aligned}$$

如果使用 SM50 (50Wp) 太阳电池组件，那么需要的总组件数为：

$$8,030 / 50 = 160.6$$

由于太阳电池组件的系统电压为 48V，SM50 的标称系统工作电压为 12V，所以太阳电池组件的串联数为 48V/12V=4，而并联数为 160.6/4=40.15 ≈ 41，总共 164 块。

#### 4.4.4. 并网光伏系统设计

并网系统是目前发展最为迅速的太阳能光伏应用方式。随着光伏建筑一体化的飞速发展，各种各样的光伏并网发电技术都得到了广泛的应用。光伏并网发电包括如下几种形式：

- I 纯并网光伏系统
- I 具有 UPS 功能的并网光伏系统
- I 并网光伏混合系统

首先我们介绍确定并网光伏系统的最佳倾角。

并网光伏供电系统有着与独立光伏系统不同的特点，在有太阳光照射时，光伏供电系统向电网发电，而在阴雨天或夜晚光伏供电系统不能满足负载需要时又从电网买电。这样就不存在因倾角的选择不当而造成夏季发电量浪费、冬季对负载供电不足的



问题。在并网光伏系统中唯一需要关心的问题就是如何选择最佳的倾角使太阳电池组件全年的发电量最大。通常该倾角值为当地的纬度值。

对于上述并网光伏系统的任何一种形式，最佳倾角的选择都是需要根据实际情况进行考虑，需要考虑太阳电池组件安装地点的限制，尤其对于是现在发展迅速的光伏建筑一体化（BIPV）工程，组件倾角的选择还要考虑建筑的美观度，需要根据实际需要对象进行小范围的调整，而且这种调整不会导致太阳辐射吸收的大幅降低。对于纯并网光伏系统，系统中没有使用蓄电池，太阳电池组件产生的电能直接并入电网，系统的直接给电网提供电力。系统采用的并网逆变器是单向逆变器。因此系统不存在太阳电池组件和蓄电池容量的设计问题。光伏系统的规模取决于投资大小。

目前很多的并网系统采用具有 UPS 功能的并网光伏系统，这种系统使用了蓄电池，所以在停电的时候，可以利用蓄电池给负载供电，还可以减少停电造成的对电网的冲击。系统蓄电池的容量可以选择比较少，因为蓄电池只是在电网故障的时候供电，考虑到实际电网的供电可靠性，蓄电池的自给天数可以选择 1-2 天；该系统通常使用双向逆变器处于并行工作模式：

- I 将市电和太阳能电源并行工作。对于本地负载，如果太阳电池组件产生的电足够负载使用，太阳电池组件在给负载供电的同时将多余的电能返馈给电网；
- I 如果太阳电池组件产生的电能不够用，则将自动启用市电给本地负载供电，市电还可以自动给蓄电池充电，保证蓄电池长期处于浮充状态，延长蓄电池的使用寿命；
- I 如果市电发生故障，即市电停电或者是市电供电品质不合格，电压超出负载可接受的范围，系统就会自动从市电断开，转成独立工作模式，由蓄电池和逆变器给负载供电。一旦市电恢复正常，即电压和频率都恢复到允许的正常状态以内，系统就会断开蓄电池，转成并网模式工作。

除了上述系统外，还有并网光伏混合系统。它不仅使用太阳能光伏发电，还使用其他能源形式，比如风力发电机、柴油机等。这样可以进一步的提高负载保障率。系统是否使用蓄电池，要据实际情况而定。太阳电池组件的容量同样取决于客户的投资规模。

#### 4.5. 光伏系统的硬件设计

光伏系统设计中除了蓄电池容量和太阳电池组件大小设计之外，还要考虑如何选择合适的系统设备，即如何选择合乎系统需要的太阳电池组件、蓄电池、逆变器（带有交流负载的系统）、控制器、电缆、汇线盒、组件支架、柴油机/汽油机（光伏油机混合系统）、风力发电机（风光互补系统），对于大型太阳能光伏供电站，还包括输配电工程部件如变压器、避雷器、负荷开关、空气断路器、交直流配电柜，以及系统的基础建设、控制机房的建设、和输配电建设等问题。

上述各种设备的选取需要综合考虑系统所在地的实际情况、系统的规模、客户的要求等因素。太阳电池组件、组件支架、蓄电池、逆变器、控制器在本书的其他章节中有详细描述，在此不作介绍。

##### 4.5.1. 电缆的选取

系统中电缆的选择主要考虑如下因素：

- ü 电缆的绝缘性能；
- ü 电缆的耐热阻燃性能；
- ü 电缆的防潮，防光；
- ü 电缆的敷设方式；
- ü 电缆芯的类型（铜芯，铝芯）；
- ü 电缆的大小规格。

光伏系统中不同的部件之间的连接，因为环境和要求的不同，选择的电缆也不相同。以下分别列出不同连接部分的技术要求：

##### 1) 组件与组件之间的连接

必须进行 UL 测试，耐热 90℃，防酸，防化学物质，防潮，防曝晒。

##### 2) 方阵内部和方阵之间的连接

可以露天或者埋在地下，要求防潮、防曝晒。建议穿管安装，导管必须耐热 90℃。

##### 3) 蓄电池和逆变器之间的接线

可以使用通过 UL 测试的多股软线，或者使用通过 UL 测试的电焊机电缆。

##### 4) 室内接线（环境干燥）

可以使用较短的直流连线。

电缆大小规格设计，必须遵循以下原则：

- 1) 蓄电池到室内设备的短距离直流连接, 选取电缆的额定电流为计算电缆连续电流的 1.25 倍。
- 2) 交流负载的连接, 选取的电缆额定电流为计算所得电缆中最大连续电流的 1.25 倍。
- 3) 逆变器的连接, 选取的电缆额定电流为计算所得电缆中最大连续电流的 1.25 倍。
- 4) 方阵内部和方阵之间的连接, 选取的电缆额定电流为计算所得电缆中最大连续电流的 1.56 倍。
- 5) 考虑温度对电缆的性能的影响。
- 6) 考虑电压降不要超过 2%。
- 7) 适当的电缆尺径选取基于两个因素, 电流强度与电路电压损失。完整的计算公式为:

$$\text{线损} = \text{电流} \times \text{电路总线长} \times \text{线缆电压因子}$$

式中线缆电压因子可由电缆制造商处获得。

#### 4.5.2. 供电系统的基础建设

基础建设包括太阳能电池组件地基和控制机房的建设。太阳能电池组件可以安装在地面上, 也可以安装在屋顶上。如果光伏方阵安装在地面上, 在设计施工的时候需要考虑建筑抗震设计(参考国家标准《建筑抗震设计规范》GBJ 11-89)

太阳能电池组件地基属于丙类建筑, 要符合以下要求:

- 2 选择建筑场地时, 应尽量选择坚硬土或者开阔平坦密实均匀的中硬土。
- 2 同一结构单元不宜设置在截然不同的地基土上。
- 2 地基由软弱粘性土、液化土、新近填土或者严重不均匀土层时, 宜采取措施加强基础的整体性和刚性。
- 2 混凝土砌块的强度等级, 中砌块不宜低于 MU10, 小砌块不低于 MU5, 砌块的砂浆强度等级不宜于 M5。
- 2 混凝土的强度等级不宜低于 C20。
- 2 地基基础抗震验算:

$$F_s E = \zeta s f_s \quad (4.24)$$

$f_{sE}$  为调整后的地基土抗震承载设计值

$\zeta_s$  为地基土抗震承载力调整系数，参考《建筑抗震设计规范》GBJ 11-89

$f_s$  为地基土静承载力设计值，采用《建筑地基基础设计规范》GBJ7-89

2 对于存在液化土层的地基应根据地基的液化等级采取一定的措施：

1 采用深基础时，基础地面埋入液化深度以下稳定土层中的深度不应小于 500mm；

1 采用加密法（如振冲、振动加密、强夯等）加固时，应处理至液化深度下界，且处理后土层的标准贯入锤击数的实测值，应大于相应的临界值；

1 挖出全部液化土层。

2 冻土地区建筑地基基础建设。

在西藏，青海和新疆，都存在大量的冻土地区。太阳能电池组件地基的设计应针对季节性冻土地基和多年冻土地基分别进行设计计算，可参考《冻土地区建筑地基基础设计规范》JGJ 118-98。

2 对于组件基础，安装支架的混凝土基础技术规范。

1) 基础混凝土的混合比例为 1:2:4（水泥、胶石、水），采用 42 号水泥或更细，胶石每块尺寸为 20mm 或更小；

2) 基础尺寸建议为 500mm 长 x 500mm 宽 x 400mm 高。如果发现现场土壤疏松，要相应地增加基础深度。

3) 基础的上表面要在同一水平面上，平整光滑。

4) 支架四个支撑腿所用的四个基础应保持在同一水平上。

5) 基础上的预埋螺杆应该要求正确地位于基础中央，同样要注意保持螺杆垂直，不要倾斜。

6) 基础上的预埋螺杆应该高出混凝土基础表面 50mm。确保已经将基础螺杆的凸出螺纹上的混凝土擦干净。

7) 要注意每付组件支架两个基础之间的朝向和尺寸。建议安装一付支架（不安装太阳能电池组件），将四条支架安装到适当的位置，为基础建造作标记。

2 如果太阳能电池组件安装在屋顶就不需要考虑冻土的情况，但是要考虑抗震对房屋和支架的技术需要。

### 4.5.3 接地和防雷设计

太阳能光伏电站为三级防雷建筑物，防雷和接地涉及到以下的方面：（可参考 GB50057 -94 《建筑防雷设计规范》）

- Ø 电站站址的选择；
  - Ø 尽量避免将光伏电站建筑在雷电易发生的和易遭受雷击的位置；
  - Ø 尽量避免避雷针的投影落在太阳电池组件上；
  - Ø 防止雷电感应：控制机房内的全部金属物包括设备、机架、金属管道、电缆的金属外皮都要可靠接地，每件金属物品都要单独接到接地干线，不允许串联后再接到接地干线上。
  - Ø 防止雷电波侵入：在出线杆上安装阀型避雷器，对于低压的 220/380V 可以采用低压阀型避雷器。要在每条回路的出线和零线上装设。架空引入室内的金属管道和电缆的金属外皮在入口处可靠接地，冲击电阻不宜大于 30 欧姆。接地的方式可以采用电焊，如果没有办法采用电焊，也可以采用螺栓连接。
  - Ø 接地系统的要求  
所有接地都要连接在一个接地体上，接地电阻满足其中的最小值，不允许设备串联后再接到接地干线上。  
光伏电站对接地电阻值的要求较严格，因此要实测数据，建议采用复合接地体，接地机的根数以满足实测接地电阻为准。
  - Ø 光伏电站接地接零的要求  
电气设备的接地电阻  $R < 4$  欧姆，满足屏蔽接地和工作接地的要求。  
在中性点直接接地的系统中，要重复接地， $R < 10$  欧姆  
防雷接地应该独立设置，要求  $R < 30$  欧姆，且和主接地装置在地下的距离保持在 3M 以上。
- 总的来讲，光伏系统的接地包括以下方面。
- Ø 防雷接地：包括避雷针、避雷带以及低压避雷器、外线出线杆上的瓷瓶铁脚还有连接架空线路的电缆金属外皮。
  - Ø 工作接地：逆变器、蓄电池的中性点、电压互感器和电流互感器的二次线圈。
  - Ø 保护接地：光伏电池组件机架、控制器、逆变器、以配电屏外壳、蓄电池支架、电缆外皮、穿线金属管道的外皮。

- Ø 屏蔽接地: 电子设备的金属屏蔽。
- Ø 重复接地: 低压架空线路上, 每隔 1 公里处接地。
- Ø 接闪器可以采用 12mm 圆钢, 如果采用避雷带, 则使用圆钢或者扁钢, 圆钢直径  $\geq 48\text{mm}$ , 厚度不应该小于等于  $4\text{mm}^2$ 。
- Ø 引下线采用圆钢或者扁钢, 宜优先采用圆钢直径  $\geq 8\text{mm}$ , 扁钢的截面不应该小于  $4\text{mm}$ 。
- Ø 接地装置: 人工垂直接地体宜采用角钢、钢管或者圆钢。水平接地体宜采用扁钢或者圆钢。圆钢的直径不应该小于  $10\text{mm}$ , 扁钢截面不应小于  $100\text{mm}^2$ , 角钢厚度不宜小于  $4\text{mm}$ , 钢管厚度不小于  $3\text{-}5\text{mm}$ 。人工接地体在土壤中的埋设深度不应小于  $0.5\text{m}$ , 需要热镀锌防腐处理, 在焊接的地方也要进行防腐防锈处理。
- Ø 根据实际情况安装电涌保护器。参考 GB50057-94。

#### 4.6. 太阳能光伏系统性能分析

对于已经建成的光伏系统, 有必要对光伏系统进行性能分析。性能分析的主要目的就是了解已建成的光伏系统的工作状况, 看系统是否能够正常工作; 通过各种参量的分析找出对该系统性能产生影响的主要因素, 为将来的光伏系统建设积累经验数据。因此需要对已建光伏系统进行长期的累计观测, 以了解系统的工作过程, 了解各种因素对系统性能的影响以及考核系统的部件和整体的工作性能。

为了得到比较全面的分析结果, 至少需要对一个完整的工作年度进行数据观测和分析。性能分析中的重要部分是了解太阳电池组件的输出情况, 即太阳电池组件的发电情况随温度、辐射变化而改变的关系。可以将记录数据整理成表格或者曲线的形式直观地描述系统的工作状况。通常使用下面的几种曲线描述太阳电池组件的输出情况, 参见图 4-12 至图 4-15。

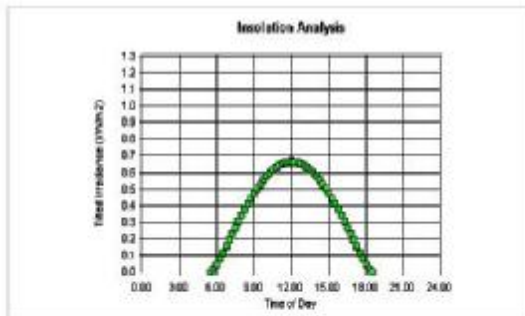


图 4-12 逐月平均太阳能方阵的太阳辐射-时间曲线

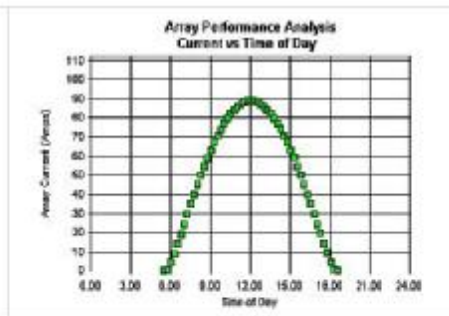


图 4-13 逐月平均太阳能方阵电流-时间曲线

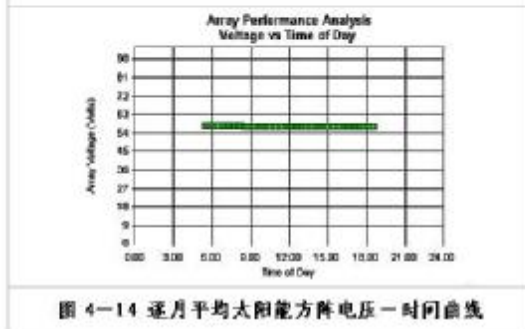


图 4-14 逐月平均太阳能方阵电压-时间曲线

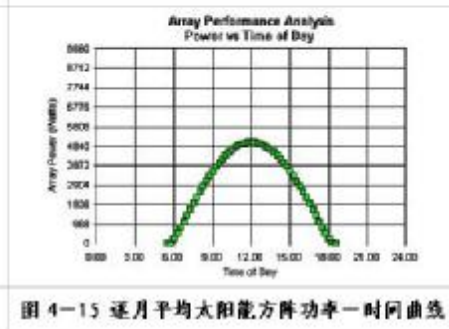


图 4-15 逐月平均太阳能方阵功率-时间曲线

从理论上讲，对太阳能电池组件输出有很大影响的因素就是太阳能电池组件的电池片温度和太阳能电池组件所接收的太阳辐射。所以为了分析的需要，还有必要整理出太阳能电池组件温度和环境温度的关系，以及太阳能电池组件的输出随天气状况变化而改变的关系。通过对各种曲线的分析，就可以找出对该光伏系统输出产生影响的主要因素。

图 4-16 至图 4-19 为某个光伏系统五月份的平均太阳能电池温度、环境温度-时间的变化曲线，以及在晴天、多云以及阴雨天太阳能电池组件输出的对比图。从图中可以看出，电池片的温度随着太阳辐射的增加而大大超过环境温度，从而会导致太阳能电池组件的输出降低。从图中可以看出，天气的变化对太阳能电池组件的输出产生很大的影响。从这些实际积累的数据绘制的图形中可以给我们一个实际而直观的各种因素对太阳能电池组件的输出的影响，了解了这些实际情况，反过来就可以指导我们的系统设计。使得我们的理论设计更加的贴近实际工作情况。

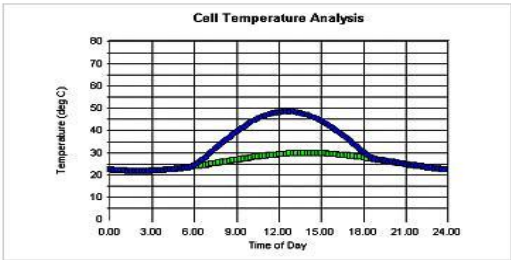


图 4-16 太阳能电池温度、环境温度-时间曲线

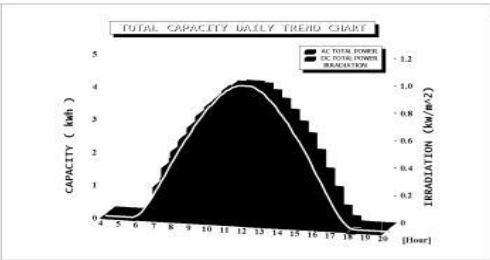


图 4-17 晴天太阳能方阵日输出图

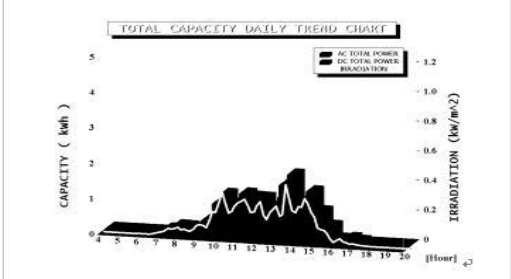


图 4-18 阴天太阳能方阵日输出图

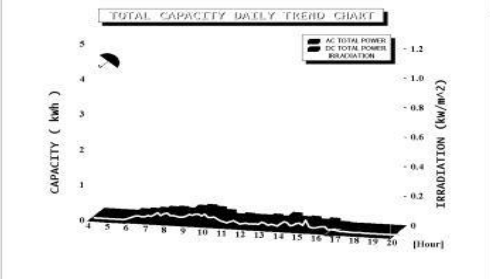


图 4-19 雨天太阳能方阵日输出图

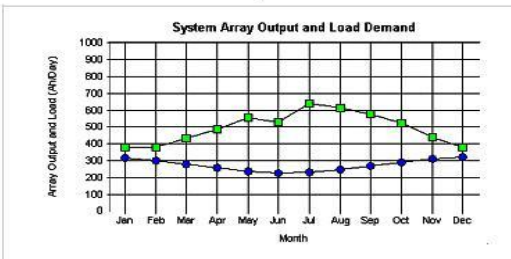


图 4-20 太阳能方阵输出与负载需求-时间曲线

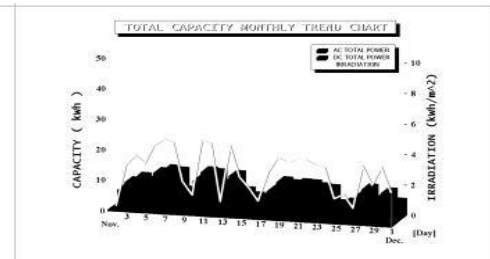


图 4-21 雨天太阳能方阵月输出图

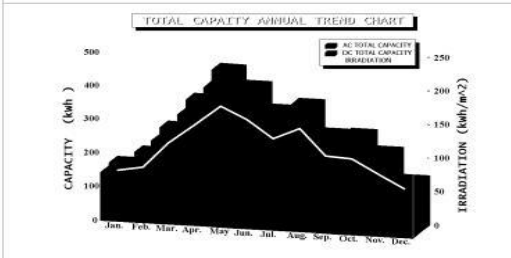


图 4-22 雨天太阳能方阵年输出图

在已知太阳能电池组件的输出情况以后，对于独立和混合系统，考虑到负载的需要还可以作出系统太阳能电池组件输出、负载需求-时间的曲线，根据该曲线就可以了解



在一年中的每一个月份，太阳能电池组件的输出是否能够满足负载的实际需求。

很显然太阳能电池组件的输出曲线必须位于负载需求曲线的上方，如果实际的数据导致太阳能电池组件的输出曲线有部分小于负载的需求曲线，那就说明系统会出现断电现象，并且有可能由于过放电而损坏蓄电池。如果是独立系统，这就说明在系统的设计上出了问题，选择的太阳能电池组件容量小于实际的需要；如果采用的是混合系统，那么就可以从差值计算出每个月份柴油机的能量贡献，了解油机的实际工作情况，看对设计的油机维护情况作出的理论预计是否合理，如果和理论设计有出入，则要进行适当的调整。

将太阳能电池组件的输出、直流负载和交流负载的消耗进行综合比较分析，从而可得出系统的逐月和年度工作情况。进一步了解直流控制部分以及交流控制和逆变部分的工作效率。太阳能电池组件的输出和直流负载消耗的实际电能之差反映了直流控制部分（包括蓄电池系统）的效率情况。差值越大，说明系统的直流损耗越大。

#### 4.7. 光伏系统设计软件介绍

在进行光伏系统设计时，可以通过专业软件来辅助设计。如果使用得当，能大大减少计算量、节约时间、提高效率 and 准确度。例如，我们获得的气象数据中的太阳辐照度一般情况下都是气象站记录的水平面上的数值，而进行光伏系统设计还需要特定倾角的数值，这样的转化一般计算相对复杂。借助软件只需要输入方位角或者倾角就能马上看到变化的系统结构，十分方便有效。

现在国际上比较常用的系统设计软件大约有十多种，如壳牌太阳能的 PV Designer、德国 Gerhard Valentin 博士开发的 PV\*SOL、加拿大的 RETSCREEN 等等，主要集中在美国、德国、日本几个光伏产业比较先进发达的国家，其他国家很少开发。日本的软件普遍可视化程度很高、界面友好、操作方便，可以说是将相对复杂的光伏系统设计做得简单、有趣、生动。德国的软件则功能齐全，比较注重实用性。美国的设计软件其特点是气象数据库比较丰富（如 NASA 的数据库非常全面）。光伏系统设计人员可以结合实际的需要进行选择。

下面简单介绍一下德国 PV\*SOL 设计软件。图 4-23 是该软件的操作界面。PV\*SOL 是用来模拟和设计光伏系统的软件。丰富的相关数据是进行光伏系统设计的基础。PV\*SOL 在数据库的建立方面做得比较出色。它提供了欧美许多国家和地区详尽的气象

数据，而且是以 1 小时为间隔的。这些数据包括太阳辐照强度、指定地点 10 米高的风速和环境温度。所有数据均能够按日/周/月的时间间隔以表格或者曲线的形式显示出来。除此之外，还包含丰富的负载数据、150 种太阳电池组件、70 种蓄电池的特性数据，150 种独立系统和并网系统的逆变器特性数据。所有的数据都可以通过用户自己定义而得到扩展，增加了设计的灵活性。



图 4-23 PV\*SOL 设计软件界面

在进行实际的设计时，首先选择光伏系统的安装地点。如果数据库里面没有确切的地点数据，可以选择相近的地点数据或者通过其他途径获得相关数据并输入软件。此后就要选择系统的类型，PV\*SOL 软件将系统分成三种：独立系统、并网系统以及混合系统，每种系统的设计方法都有所不同。

删除的内容: -

接下来就是负载的选择和输入。负载类型的丰富以及参数的详尽是 PV\*SOL 软件的最大特点之一。很多软件只能确定负载全年总的工作时间以及所消耗的电量，其实这对光伏系统设计来说是不准确的，我们还需要知道某一小时内同时工作负载的数量和功率，负载每天工作的特定小时数，全年在哪些天工作、哪些天工作时间长、哪些天工作时间短等类似的详细信息。这些都影响着太阳电池组件和蓄电池的匹配、逆变器的选择。举个简单的例子，假设一盏 11W 的节能灯一年工作 365 小时，它可以每天工作 1 小时，也可以上半年不工作而下半年每天工作两个小时。这两种情况下太阳电

池组件和蓄电池的选择显然不一样。所以负载信息的详尽是很有必要的。

在确定了负载以后软件就能够计算出系统需要的太阳能电池组件输出和蓄电池容量。此时我们选择好组件、蓄电池和其他设备的型号，软件就会给出组件和蓄电池的数量、串并联情况等等。

上面介绍的是 PV\*SOL 软件的计算功能，其一大功能是模拟。进行模拟后，会显示出详细的模拟报告，内容参数包括：PV 组件的年发电量、负载的年耗电量、PV 阵列的太阳辐射、PV 组件效率、系统效率、系统效率损失的可能性、蓄电池状态等等。此外还可以进行光伏系统经济效益和环保效益的分析。经济效益的分析涉及利率、净现值、通货膨胀率、生命周期等简单的经济学知识，只需要输入这些参数，就可以得到系统生命周期内成本，以 ¥/KWH 表示。环保效益是指温室气体的减排的量化。

#### 本章参考文献

- 1 正田英介. 电力电子学. 北京: 科学出版社, 2002
- 2 王念旭等. DSP 基础与应用系统设计. 北京: 北京航空航天大学出版社. 2001
- 3 TMS320C3X user 's guide TEXAS instrument 1990.
- 4 光伏水泵系统中 CVT 及 MPPT 的控制比较 余世杰 何慧若 曹仁贤。
- 5 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究: [ 博士论文 ]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- 6 M90/91 微型 OPLC 使用说明书. 深圳市亚科仪自动化有限公司