

中国科学技术大学  
“科学与社会”新生研讨课研究报告

2020年2月14日

报告题目：基于地理因素影响的光伏电池板发电与优化及其在扶贫工作中的应用展望

小组成员：徐鹤峰，徐博

导师姓名：刘文

目录	2
----	---

## 目录

<b>1 摘要</b>	<b>3</b>
<b>2 选题背景及研究目标</b>	<b>4</b>
2.1 选题背景	4
2.1.1 光伏产业现状及太阳能光伏发电利弊	4
2.2 研究目标	6
<b>3 绪论</b>	<b>7</b>
3.1 我国太阳能资源概况	7
3.1.1 我国太阳能资源储量及空间分布特征	7
3.1.2 影响我国太阳能资源利用的因素	15
3.2 光伏发电原理	16
3.2.1 光伏电池与光伏组件	16
3.2.2 光伏电池的发电原理	17
<b>4 复杂地形下光伏发电效率模型分析（理论）</b>	<b>18</b>
4.1 辐照度和太阳辐射	18
4.2 影响太阳辐射的因素	20
4.3 典型太阳辐照度模型比较	20
4.4 热斑效应及山体自身阴影效应	22
4.4.1 热斑效应	22
4.4.2 山体自身阴影	23
4.5 复杂地形下光伏组件太阳辐照度(效率)模型	25
<b>5 光伏系统主要设备选取（部分引用）</b>	<b>26</b>
5.1 太阳能电池组件	26
<b>6 光伏电池方阵分布设计（部分引用）</b>	<b>28</b>
6.1 光伏电池方阵分布设计方案概述	28
6.2 光伏阵列安装方式选择	28
6.3 光伏方阵设计	29

目录	3
<b>7 复杂地形下光伏电站优化设计大体方法</b>	<b>30</b>
7.1 安装角度优化设计	30
7.2 组件间距推算及方案	31
7.2.1 水平场地	31
7.2.2 存在南北、东西向坡度时阵列间距	32
7.2.3 考虑方位角的设计	34
7.2.4 实例设计	36
<b>8 发电量及节能效果计算（气象及地形数据引用）</b>	<b>37</b>
8.1 发电量计算	37
8.2 节能效益分析	38
8.3 环境保护影响分析	38
<b>9 结论，展望与应用思路</b>	<b>39</b>
9.1 结论与展望	39
9.2 相关建议（政策制定角度）	40

## 1 摘要

现阶段中国利用开展光伏发电处于快速发展时期，产业潜力巨大。光伏发电技术除提供能源外，还有许多特殊优势，如降低温室气体和污染物排放、创造就业机会、保障能源安全和促进边远地区发展等，尤其是可在边远地区就地安装，在特殊场合整个光伏系统可直接提供电力输出等综合优势，适合进行大规模安装推广，在欧洲、美国、日本等已运作得比较成熟。结合中国国情及电网特点，在太阳能资源充足的区域大力建设更多的示范性光伏发电项目，提高清洁可再生能源在电源结构中的比例，对中国经济、社会 and 环境保护具有积极意义。

随着光伏电站容量的增加，山地逐渐成为了电站建设重要用地。目前山地光伏电站工程中，非正南向坡面上固定式组件往往采取和正南向坡面组件统一的安装参数，这通常无法实现光伏资源的最佳利用。在复杂地形下，固定式光伏组件表面接收到的太阳辐照度不仅与其倾斜角和方位角有关，还取决于地形条件。

本文主要考虑由组件互相遮挡和山体自身遮挡对固定式光伏组件太阳辐照度造成的阴影影响，先建立复杂地形下光伏组件、坡面和太阳光线之间的空间模型，在考虑这些阴影影响的前提下，建立了复杂地形下固定式光伏组件太阳辐照度的计算模型。提出一种设定角度范围进行循环穷举法寻优的方法，组件倾斜角和方位角都以 1 为步长，通过计算组件时均辐射量，确定组件安装的最佳倾斜角和方位角。本文还分析计算了分别在水平地面上、有南北向坡度、有南北、东西向坡度和山地阴坡上组件之间的间距。

此外，本文还就以上模型设计了并网发电方案并结合相关实例进行了分析。最后通过数值模拟进行了发电量和环保效益的分析。

关键字：太阳能光伏发电，地形，参数，优化方案，扶贫计划

## 2 选题背景及研究目标

进入新世纪以后，工业发展导致能源消费急剧增加，相应的产生的一些环境问题也变得更加明显。人们开始注重节能减排，首先是寻找一些可再生能源去代替传统的化石能源，其次是加大清洁能源在能源结构中的占比。可再生清洁能源的开发利用成为世界能源研究的重点。其中太阳能作为清洁能源的代表正逐渐受到人们的重视。

### 2.1 选题背景

化石能源的使用由来已久，人们在使用它的同时，它也给人们所生存的自然环境造成了严重的污染。伴随着人们环保意识不断的提高，人们逐步认识到它所带来的不利影响。因此，人们开始寻找新型能源进行替代，近年来，太阳能作为一种新型清洁能源，因其在使用过程中基本对环境不会造成污染，且储量巨大，已得到社会普遍认可。我国目前的能源消费结构以化石能源为主，石油、天然气对外依存度高，自年，我国由石油净出口国转为净进口国以来，石油的进口量不断增加，进口依存度也不断升高。综上，我国在能源需求方面面临着很高的风险。与此同时，在化石能源大量可采及使用的过程中，造成了很大的碳排放量和其它有害物质，对环境，气候，土地，水体等都产生恶劣的影响。我国已成为世界上碳排放量最大的国家，而近年全国大部分地区所出现的雾霾、干旱等气候环境状况也警示着治理环境、节能减排刻不容缓。现阶段，我国正处于经济高速增长时期，面对能源和环境问题的双重压力，我国政府也积极推进新能源的开发利用并制定了相关的法规政策及目标，关注全球气候，参与减排任务在新能源中，太阳能作为首屈一指的绿色能源，其独特的优势对于解决能源危机及环境恶化等问题有着重大的意义，相对于欧洲、日本，我国有着更为丰富的太阳能资源。因此，要实现经济持续发展，改善生态环境，必须充分优化能源开发结构，努力发展可再生资源。故，基于此，明晰我国太阳能资源的分布特点及开发潜力，合理利用太阳能资源显得必要且迫切。

#### 2.1.1 光伏产业现状及太阳能光伏发电利弊

某些西方国家的政府也特别重视太阳光伏产业的发展，欧美一些国家率先对光伏发电技术进行了研究，早在80年代美国就实施了PVUSA计划，1990年启动了光伏制造技术产业化计划，随后美国提出了“百

万太阳能屋顶计划 (Million Solar Roofs Initiative)”，是指在100万座建筑物屋顶上安装太阳能电池板，以最佳角度布置集热发电，从而建成光伏发电系统和热利用系统。2008年总统奥巴马上台后又推出了新能源计划，这些政策计划的出台实施极大地促进了美国光伏产业的快速发展，德国在1993年建成了世界上第一座兆瓦级的光伏电站，1997年，德国吸取现有的光伏技术经验实施了“十万屋顶计划”，2004年政府颁布了《可再生能源法案》，对光伏电力上网实施强制补贴政策，这些政策有效的推动了德国光伏产业的进步和光伏技术的研发，随着技术完善和政策支持，德国光伏装机容量从3840 MW上升至4100 MW日本，美国等国家的光伏产业发展也相应得到了当地政府的政策支持，鼓励大力发展光伏、风电等清洁能源，各国光伏发电的装机容量都增加了很多，并且将实行长期发展计划，光伏发电的装机容量将不断增加，逐渐增大发电比重。我国的光伏产业最初起步于20世纪60年代，2007年政府出台《可再生能源中长期发展规划》，2009年发布的《关于金太阳示范工程的通知》中规定政府给予财政补助的光伏示范项目不低于500 MW，批准光伏项目有275个，功率达到642 MW，2012年国家能源局公布了《光伏产业“十二五”发展规划》，将不断增加我国光伏的装机容量，预计到2015年底，我国光伏装机容量将达到160 GW，发电量达到250亿千瓦时。截止到目前，光伏发电依然是世界各国大力发展的重要绿色能源，能源消耗量大的大国普遍看好光伏产业的发展前景，已经计划或完成建设了许多光伏发电站并重点普及推广，根据国际能源署的预测，预计到2050年，太阳能将会取代相当一部分的化石能源，可以为全世界提供20%到25%的电力供应。

光伏电池为太阳能光伏发电系统的技术核心，光伏电池接收太阳辐照，转化为电能，再将电能输出给负载或者并入电网。相对于常规的发电系统，光伏发电具有以下优势：（1）可靠性：太阳能光伏发电系统对环境的适应力很强，即使在恶劣的环境下，光伏系统也能正常运行，只要地区太阳资源丰富，光伏系统的建设就没有制约。光伏系统受外界因素影响较少，所以较少产生故障，要求可靠性较高的场合可选择光伏系统供电。（2）维护费用低：光伏发电系统受外界因素影响较小，所以一旦建设投产，一般只需要定期检查，平时出现故障的几率较小，后期维护工作少且操作简单，所以在偏僻山区供电线路损耗大，建设分布式光伏电站是目前最提倡的一种供电方式。（3）高海拔性能：光伏发电性能取决于地区太阳辐照，高海

拔地区空气稀薄, 太阳辐射会更大, 所以在我国青海新疆等地区都是建设大型光伏电站的优选地址。如玉树地区平均海拔 4 0 0 0 m 以上, 其年辐射量可达到  $7 8 0 \text{ KJ} / \text{cm}^2$  综上所述, 光伏发电具有可靠性强、适应度广、维护简单等优势, 但在实际应用中存在一些问题: (1) 太阳光的分散性: 太阳辐射强度与季节时间有关, 一般夏季正午辐射强度较强, 但冬季的辐射度会减弱很多, 还与太阳升落有关, 一般正午最强, 落山后为零, 这些因素都使太阳能分散, 光伏组件接收到的太阳辐射不均匀。(2) 光伏发电的转换效率低。光伏发电的转化效率一般与选址位置、辐射强度、光伏电池的特性等因素有关, 一般通过增加控制器或者辅助电路来提高光伏电池的光电转换效率。(3) 光伏发电的不稳定性。光伏组件接收到的太阳辐射强度还与晴空指数、空气质量等随机因素有关, 太阳辐射是间断的及不稳定的。想要尽可能消除这类因素的影响, 光伏蓄电池的储能问题相当重要。全世界太阳能辐射强度和日照时间都是不均匀的, 为提高光伏系统的发电量, 一般要提高光伏电池接收到的太阳辐射量, 所以光伏电站选址要选择太阳能资源丰富的地区以提高发电量。我国最佳区域在西北青海新疆等地区。根据中国气象局风能资源中心统计数据得到我国的太阳能分布状况, 按辐射量数量范围等'级分类, 绘制全国辐射总量示图, 我国太阳能资源的分布为西多东少, 因为海拔气候经纬度等因素, 按照太阳能资源量可划分为五个区域: 一类: 太阳能资源最丰富区域, 年辐照总量为  $6 6 8 0 - 8 4 0 0 \text{ (MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{a)}$ ; 二类: 较丰富区域, 年辐照总量为  $5 8 5 2 - 6 6 8 0 \text{ (MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{a)}$ ; 三类: 中等地区, 年辐照总量为  $5 0 1 6 - 5 8 5 2 \text{ (MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{a)}$ ; 四类: 较差地区, 年辐照总量为  $4 1 8 0 - 5 0 1 6 \text{ (MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{a)}$ 。中国近几年光伏装机容量不断增加, 2 0 1 6 年度累计为  $2 1 1 0 0 . 0 0 \text{ MW}$ , 同比增长率为  $2 7 . 1 1 \%$ 。光伏组件的发电量与其接收到的太阳辐射量直接相关, 所以组件安装的倾斜角、方位角等角度设计对光伏系统的发电率影响很大, 为了获取最大的发电量, 尽最大可能提高太阳资源的利用率。合理的利用太阳能资源以及长远的规划太阳能光伏产业对自然生态环境以及促进国民经济可持续发展都有着重要的现实意义和历史意义。

## 2.2 研究目标

(1) 针对山地光伏电站设计中非正南向山体坡面上组件辐照度分析方法, 首先分析光伏组件接收太阳辐射的机理和太阳辐射的计算方法, 对

比已有模型；后探索山地光伏电站组件接收到的太阳辐照度的影响因素，考虑复杂地形条件引起的阴影遮挡影响，建立山地倾斜角和方向角、太阳光线和组件倾斜角和方位角之间的几何模型，从而完成复杂地形下考虑山地阴影的光伏组件太阳辐照度计算模型。（2）针对山地光伏电站组件最佳倾斜角和方向角的优化设计，求得山地光伏组件的最佳倾斜角和方向角，提出一种设定角度范围进行循环穷举法寻优的方法，组件倾斜角从 $0^{\circ}$ 到 $90^{\circ}$ ，以 $1^{\circ}$ 间隔，组件方位角从 $-90^{\circ}$ 到 $90^{\circ}$ （从正东到正西），以 $1^{\circ}$ 间隔，求取所对应的太阳辐射量，寻优得到组件布置的最佳倾斜角和方位角。复杂地形使组件之间的阴影遮挡变得复杂化，本文将分析计算分别在水平地面上、有南北向坡度、有南北、东西向坡度和山地阴坡上组件之间的间距。

## 3 绪论

### 3.1 我国太阳能资源概况

#### 3.1.1 我国太阳能资源储量及空间分布特征

现阶段，我国学者主要采用三种方法来计算太阳总，第一种是采用气候学方法计算；第二种是利用卫星遥感数据来推算；最后一种是将技术与数字高程模型（DEM）结合，模拟太阳总。其中气候学计算方法最为成熟，且计算简单，计算精度高，故本文采用此方法对我国太阳能资源进行估算。相关数据来源于中国气象局国家气象信息中心和中国气象科学数据共享网，包括中国地面气候日值数据、日值数据、年均降水资料等。

干旱地区的计算公式： $Q = Q_1(0.29 + 0.557S_1)$

其它地区的计算公式： $Q = Q_1(0.18 + (0.55 + \frac{1.11}{E})S_1)$

式中 $Q$ 为地表受到太阳的总辐射， $Q_1$ 、 $S_1$ 、 $E$ 分别为理想大气（无水汽和各种悬浮微粒的大气）总辐射、日照百分率、实际水汽压（水汽在空气中的分压强）。关于理想大气总、实际水汽压、理想大气压的计算与数值参考王炳忠等关于太阳能资源计算的方法。以上计算公式借鉴于已有研究已考虑到海拔高度等因素的影响）。



代入数据，计算结果为：全国各地区太阳能辐射总量中，

$$Q_{max} = 8364MJ/m^2$$

$$Q_{min} = 3324MJ/m^2$$

$$\bar{Q}_h = 5749MJ/m^2$$

**我国太阳能资源的空间分布** 太阳能资源开发潜力强弱从资源本身判断，主要表现于三个方面特性：丰富性、稳定性、时效性。



图 2.5 我国辐射台站及气象台站空间分布图

**1)丰富性** 要开发利用太阳能，前提条件即是太阳能资源具有一定存在量，存在量的多少体现出了太阳能资源的丰富性，存在量越大，其丰富性越强，故丰富性的强弱是规模性利用太阳能的第一因素，也是资源开发潜力的重要特性。根据物理学定律，太阳光照射产生的电流强度和光强呈正相关比例，太阳能资源丰富性强度体现于于光照产生的电流强度，故，太阳能资源的丰富性取决于光强。而在日常生活中，用于单位时间内的太阳年值描述光强，所以在太阳能丰富性这一方面，本文采用太阳年量为其量化因子。下图为根据站点数据所作出的我国太阳能资源年量的空间分布图（图2.6）

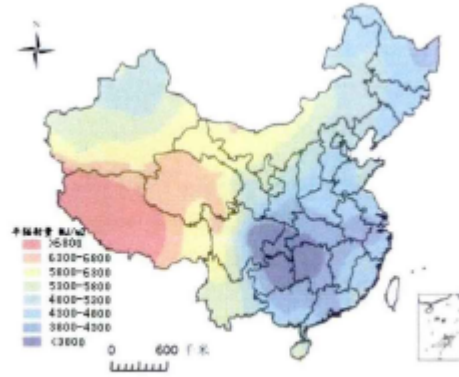


图 2.6 我国太阳能年辐射量空间分布图

表 2.4 我国大陆地区太阳能资源年辐射分布特征

我国大陆地区	地区特点	包含省(市、区)份	省份均值(MJ/m <sup>2</sup> )
华北地区	由北到南总辐射逐渐减少,总辐射范围基本在4800-6400MJ/m <sup>2</sup> 之间,有小部分地区超过6400MJ/m <sup>2</sup> 。均值约为5700MJ/m <sup>2</sup>	北京	5460
		天津	5510
		河北	5620
		山西	5580
		内蒙	6310
东北地区	辐射范围跨度不大,除最东部较	辽宁	5160

	低, 在 3400 MJ/m <sup>2</sup> 左右外, 其余地区在 4600-5400 MJ/m <sup>2</sup> 之间, 均值约为 5100 MJ/m <sup>2</sup> 。	吉林	5050
		黑龙江	4970
华东地区	地区中部处于全区低值中心, 约 3800 MJ/m <sup>2</sup> , 其余地区处于在 4200-5100MJ/m <sup>2</sup> 之间, 均值约 4800 MJ/m <sup>2</sup> 。	上海	4460
		江苏	4510
		浙江	4480
		安徽	4870
		福建	4940
		江西	4330
		山东	5020
华中地区	地区整体年辐射量较低, 在 3700-4900MJ/m <sup>2</sup> 之间, 均值约为 4400MJ/m <sup>2</sup> 。	河南	4760
		湖北	4290
		湖南	4070
华南地区	该地区辐射量由北向南逐渐增多, 年辐射量处于 4100-5000MJ/m <sup>2</sup> 之间, 均值约为 4700MJ/m <sup>2</sup> 。	广东	4820
		广西	4470
		海南	5130
西南地区	地区辐射量的跨度范围最大, 由西向东呈减少趋势, 最大值达 8400MJ/m <sup>2</sup> 左右, 最小值约 3300MJ/m <sup>2</sup> , 为全国辐射量最大值与最小值的所在区, 该地区西南部均值超过 7200MJ/m <sup>2</sup> , 中部大部分地区均值为 6200MJ/m <sup>2</sup> , 最东部均值约 3400MJ/m <sup>2</sup> , 综合平均值可达 6000 MJ/m <sup>2</sup> 。	重庆	3770
		四川	4820
		贵州	4050
		云南	5800
		西藏	7340
西北地区	除去地区最北端 5500MJ/m <sup>2</sup> 左右外, 该地区普遍在 5800MJ/m <sup>2</sup> 以上, 为所有地区中最均衡的高值区, 均值约 6400MJ/m <sup>2</sup> 左右。	陕西	5990
		甘肃	6410
		青海	6720
		宁夏	6390
		新疆	6250

**2)稳定性** 气候、地形、天气等各种因素对太阳能都有着直接的影响, 太阳能有着明显的季节特征, 日夜变化也显而易见。在稳定性上, 其并非时时可用, 要探讨太阳能开发潜力、合理高效利用太阳能, 必须考虑到稳定性问题。日照时数描述的是某一地域日照的时间总和, 且已被较多学者证实用来衡量太阳能资源的稳定性, 因此本文采用日照时数作为太阳能资源稳定性的量化因子。下图为根据站点数据所作出的我国太阳能资源年日照时数分布图(2.7)

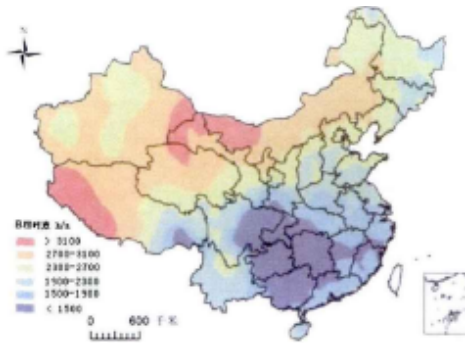


图 2.7 我国太阳能年日照时数空间分布图

表 2.5 我国大陆地区年日照时数分布特征

我国大陆地区	地区特点	包含省(市、区)份	省份均值(h)
华北地区	地区日照时数又西北向东南减少, 最大值超过 3100h, 处于内蒙最西部地区, 最小值为 2300h, 均值约为 2800h。	北京	2640
		天津	2580
		河北	2670
		山西	2870
		内蒙	2930
东北地区	该地区西部比东部日照时数要长, 东部均值为 2500h 左右, 西部均值为 2100h 左右, 整个地区	辽宁	2210
		吉林	2280
		黑龙江	2340

均值约为 2300h。			
华东地区	地区日照时间差距不大，在 1900-2400h 左右，地区平均日照时数约 2100h。	上海	1970
		江苏	2020
		浙江	2040
		安徽	2210
		福建	1990
		江西	2150
华中地区	华中地区日照时数由北向南变化明显，相对其它地区而言，高值不高，最小值较低不到 1000h，均值为 1700h 左右。	河南	1920
		湖北	1790
		湖南	1610
华南地区	该地区日照时数为全国最少，平均约为 1650h，部分地区年日照数不足 1000h。	广东	1690
		广西	1470
		海南	1870
西南地区	由西向东地区日照时数变化趋势明显，地区西部日照时数超过 3200h，最南部不足 1000，平均值约 2600h。	重庆	1460
		四川	1790
		贵州	1630
		云南	2340
		西藏	3050
西北地区	西北地区日照时数普遍较高，绝大部分地域都是在 2600h 以上，地区峰值出现于中北部达 3300h 以上，平均日照时数约为 3000h，为全国均值最高区。	陕西	2910
		甘肃	3000
		青海	3190
		宁夏	2980
		新疆	2920

**3)时效性** 太阳每天的日照时数不尽相同，这就造成了太阳能在某些方面利用的无效性。如果一天中，太阳的日照时间少于3小时，那么该天的太阳能资源就没有规模化利用尤其是在光电方面利用的价值。太阳能稳定性所代用的日照时数则包含着这些无效日照时间，为此，从太阳能规模开发的有效性出发，选取大于3小时的日照天数作为有效日照天数，以反映太阳能利用的时效性。下图为根据站点数据所作出的我国太阳能资源年有效天数分布图

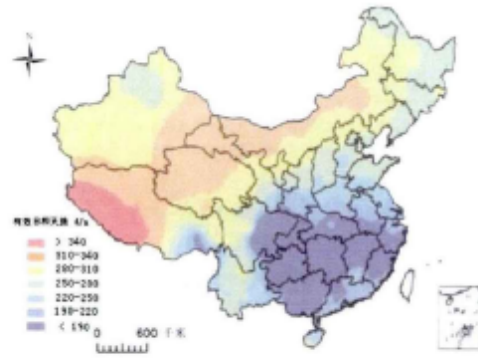


图 2.8 我国太阳能年有效日照天数空间分布图

表 2.6 我国大陆地区年日照有效天数分布特征

我国大陆地区	地区特点	包含省(市、区)份	省份均值(d)
华北地区	地区有效天数由西、中、南依次减少,最高值达 340d 左右,变化范围在 260-340d 之间,均值为 300d。	北京	294
		天津	288
		河北	297
		山西	302
		内蒙	317
东北地区	有效天数在 260-310d 之间,该区东部地区普遍小于西部地区,均值分 270d。	辽宁	264
		吉林	271
		黑龙江	275
华东地区	南部地区数值小于北部地区,南部地区属于全国低值地区,地区有效天数变化范围在 180-270d,均值为 220 左右。	上海	223
		江苏	225
		浙江	203
		安徽	206
		福建	184
	江西	190	

华中地区	华中地区整体年有效日照天数都偏低，为全国最低值区。只有极少部分区域在 220d 以上，其余均低于 220d，最低值不足 160d，地区均值约 180d。	山东	239
		河南	216
		湖北	173
		湖南	186
华南地区	该地区也属于低值区域，仅次于华中地区，东南部地区数值比该地区的其它地方高，范围在 170-230d 之间，均值接近 200d。	广东	213
		广西	175
		海南	221
西南地区	数值分布范围最广，从西向东变化明显最大值为地区最西部，高于 340d，最小值为最东部小部地区，约 170d，全区平均值约为 275d。	重庆	187
		四川	252
		贵州	207
		云南	282
		西藏	327
西北地区	该区全区数值都比较高，地区中部数值明显高于西部和东部，东西部数值相当，数值范围为 290-330d，平均约 310d。	陕西	294
		甘肃	304
		青海	321
		宁夏	316
		新疆	307

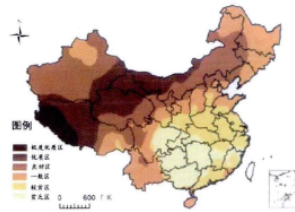


图 2.9 太阳能资源本身综合潜力分区图

表 2.8 太阳能资源潜力总分分级及地域范围表

	极度优质区	优质区	良好区	一般区	较贫区	贫乏区
潜力评价总分	100	90~100	70~90	50~70	30~50	≤30
潜力区占国土面积比例 (%)	3.7	18.2	29.6	23.4	13.4	11.7
包括省(市、区)	西藏西部、青海西部	西藏中部及北部、甘肃北部、青海北部、	新疆西部、内蒙古东部、东北三省西部、河	东三省北部和东部、北京、天津、内蒙	河北南部、山东南部、山西和陕西东南	四川(除西部外)、贵州南部、湖南、广

的 范 围		宁夏大 部、新疆 东部、内 蒙中西 部	北及山 西北部、 宁夏北 部、甘肃 中部、青 海东部 和南部、 陕西、四 川西部、 西藏东 南小部	北部、山 东大部、 云南大 部、海 南、广西 北部、新 疆北部	部、河 南、安 徽、江苏 大部、上 海、浙江 大部、湖 北大部、 江西和 福建以 及广东 大部、贵 州大部	西、重庆
-------------	--	---------------------------------	---	---	--	------

综上所述，从太阳能资源的本身潜力来看，最适合大规模开发利用的地域是在西藏和青海西部及中部，资源非常丰富，其年量最大值超过、日照时数超过及有效天数也高于，而当地的云少气稀气温低等气候环境条件也满足太阳能发电的环境要求。

### 3.1.2 影响我国太阳能资源利用的因素

一直以来，人类生产活动的地域并非完全由主观支配，而是受到多种因素的制约，如土地、原材料、劳动力、资本、科技水平等因素。人类对太阳能资源的利用也如此，影响太阳能资源利用的因素随着其利用方式的不同，也不完全一致，一般主要有太阳能资源本身条件、土地条件、消费水平、政策保障度、技术水平、技术成本等。由于在国家层面上开发利用太阳能的技术水平及技术成本并没有明显区别，故我国各地区太阳能资源开发潜力比较可以不考虑这两方面的因素。下面从各地区太阳能开发利用潜力评价这一目标出发，参照王健等对我国风能资源最优化开发研究，分四个综合因素来说明我国各地区太阳能资源开发潜力情况。

a.太阳能资源本身条件太阳能资源本身受到气候、海拔、温度、沙尘等因素的影响，但综合影响结果体现于太阳能资源本身的三个方面：年量，日照时数和有效日照天数。在其它层面同等的情况下，量、日照时数、年有效日照天数数值越大，表明该地区的太阳能资源本身条件越好，越有利于地区太阳能的开发利用。

b.土地由于太阳能资源的利用需要土地作为其在地理空间上的承载，加上我国太阳能功率密度较低左右)，故土地类型、地形和土地面积等因素影响着太阳能资源的利用。尤其是在规模化利用方面，太阳能发电站的建



设需要较大面积的廉价土地，显然戈壁、沙漠等土地类型比草原、耕地等其它利用价值大的类型更适合，而平坦的地形和宽广的面积更有利于开发利用太阳能。

c.消费水平消费水平对各地区太阳能资源开发的影响可以通过地区电力消费量、电力净输入量、地区经济发展水平来体现，电力消费量越大，需求越高，地区开发利用太阳能的愿望就越迫切。地区电力净输入量则反应各地区电力短缺的程度，地区电力输入量越大，则表明地区开发太阳能资源的内在动力越强。地区经济发展水平是能源消费的根本原因，地区经济越发达，人们生活水平越高，能源消费就越高，在地区范围内或者周边开发利用太阳能就越必要。

d.政策保障太阳能的开发利用离不开国家和地区的政策支持，尤其在规模化开发利用方面。可以通过三个方面来体现，第一，太阳能规模开发的激励政策，各地区有关太阳能各种激励政策越多，政策强度越高，促使该地区的太阳能开发的动力越足。第二，金融扶持力度，太阳能相关项目的建设需要大量的资金来扶持，不同地区对太阳能产业和项目的金融优惠度各异，资扶持越强，金融优惠度越高，越有利于规模性利用太阳能。第三，政府重视度，一般来说，太阳能的推广和规模应用属于国家层面的规划，但各地区政府在制定各地产业发展规划、太阳能项目的申报和审批、配套设施的完善、公民利用太阳能意识导向等方面扮演着相当重要的作用。政府的态度对于投资商的选址也是一个重要判断角度，有利于相关联产业发展，进而与太阳能利用相互促进。总而言之，地区政策保障度越高，地区开发潜力越大。

## 3.2 光伏发电原理

### 3.2.1 光伏电池与光伏组件

太阳能电池是光伏系统的最基本单元。其典型的结构是半导体材料的PN节，及其类似于二极管的结构。制作太阳能电池的材料应用最多的是硅，应用不同的材料，成本会不同，发电效率也会不同。其中应用最多的为以下几种材料：

1. 单晶硅 ( $c-Si$ ): 单晶硅是目前应用比较广泛，其最高效率约为23%。
2. 多晶硅: 多晶硅的物体特性与单晶硅不同，且导电性较弱，电池转换效率略低。

3. 薄膜材料：薄膜电池的价格比晶体硅电池的价格低。

4. 其他新技术：有机太阳电池、多层或叠层电池、含反射镜和透镜装置的聚光电池、金属—绝缘体—半导体反型层电池等。

光伏电池是光伏系统最基本的单元，通过串联或并联一定数量的光伏电池可获得较大的输出功率。由光伏电池顺次排列组成光伏组件。一个或多个光伏组件互相连接构成了光伏电池板。光伏组件发电效率的影响因素有很多，例如：电池板的安装方位、电池板安装的倾斜角度、周围建筑物的遮挡、气象条件等等。

### 3.2.2 光伏电池的发电原理

光伏电池作为光伏发电系统的核心部件在整个系统的运行中极其重要，其发电的原理一般都是依靠P-N结的光伏效应，即P-N在受到光照辐射时在其两端产生光生电动势的现象，其实质为硅晶体构成的二极管。

P-N结两端分别由两种不同的半导体材料制成，在受到太阳光中一定波长的光照辐射时，若入射光子能量相比于P-N结光学带隙大时，一定数量的价带电子在吸收光子能量后，在P-N结两侧形成较多数量的电子空穴对，受内建电场影响电子朝P-N结中的N区运动，剩余的空穴则朝P区运动。在电场的持续作用下P-N结两端的空穴、电子持续积累，积累到一定程度时在这两端就产生了光生电动势，这种现象即光生伏特效应。

利用外部导线将P-N结两端的半导体连接在一起时，N区的电子将通过外部导线移动到P区与该区的空穴复合，从而在导线中产生光生电流，即为光伏电池的短路电流 $I_{sc}$ 。忽略内部电阻及外部温度的影响，P-N结短路电流 $I_{sc}$ 正比于光照强度。在P-N结内部光生电流方向由N区到P区，外部由P区到N区，所以P-N结阳极为P区，阴极为N区。当没有外接导线将P区和N区的二极管连接到一起时，两端的电子及空穴则不会复合只是逐渐积累，此时电压即为光伏电池的开路电压 $V_{oc}$ 。

实际应用中，P-N结材料与负载连接时，由于P-N结和导线电阻的存在，在P-N结的两端仍旧存在着一部分光生电动势，在外接负载电阻越小时，P-N结的光生电动势越小，工作电流越大；相反，在外接负载越大时，P-N结的光生电动势越大，工作电流越小。

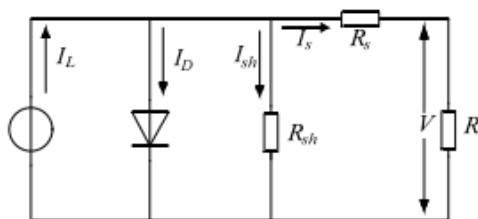


图 2-3 太阳能电池等效模型

## 4 复杂地形下光伏发电效率模型分析（理论）

### 4.1 辐照度和太阳辐射

在光伏电站建设中，光伏组件一般朝南向布置，但随着光伏装机容量的增大，山地逐渐成为电站建设的重要用地，非正南向组件布置成为本文的研究重点，需要定量评估不同朝向的光伏组件得到的太阳能辐射量，以取得最大太阳辐射量所对应的光伏组件的最佳倾斜角和朝向角。

气象部门可提供水平地面表面接收到的辐射数据，而以一定倾角安装的光伏组件表面接收到的太阳辐射量得通过相关公式计算得到。其中倾斜面上接收到的太阳辐射总量由三部分组成：太阳直射辐射量、天空散射辐射量以及地面反射辐射量。光伏组件接收到的太阳辐射分布示意图如图 2-1 所示。

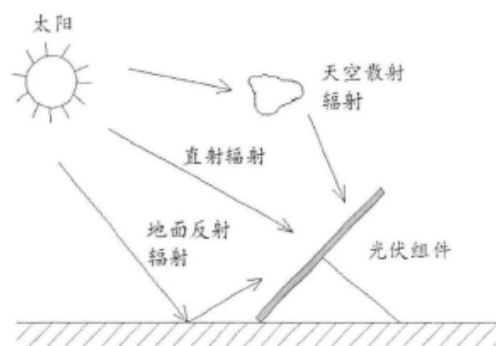


图 2-1 光伏组件接收太阳辐射示意图

**辐射照度：**单位面积上瞬时接收到的太阳辐射入射通量的物理量。单位通常用 $KW/m_2$ 表示。注：外大气层的太阳辐射照度为 $1.373 KW/m_2$ 接收到的辐照度最大时仅为 $1 KW/m_2$ 。**太阳辐射：**辐射照

度在一定时间内的加积分就是太阳辐射。辐射照度也可以用日照时间表示，当日照时间以小时计算，参考标准照度为 $1KW/m_2$

**太阳辐射：** 光伏组件表面接收到的瞬时太阳辐射量与太阳在天空中位置直接相关，其分析坐标系如图 2 - 2 所示。其中，以X轴正方向为正西，Y轴正方向为正南，构成水平平面；Z轴正方向为竖直向上，表示高度。在此空间坐标系下，定义太阳高度角 $\alpha$ 为太阳光线XY水平面的夹角；太阳方向角 $\theta$ 为太阳光线在X-Y平面上投影与Y轴正方向的夹角。

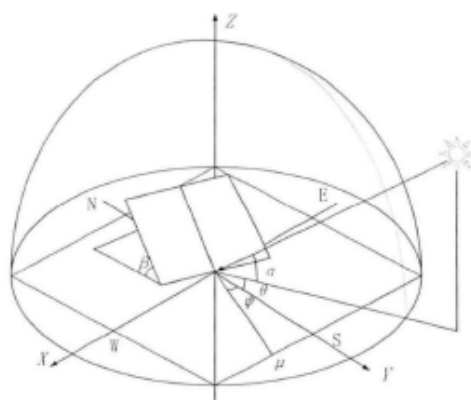


图 2-2 太阳角度和光伏组件角度的示意图

在此空间坐标系中，定义水平面上某倾斜平面（如固定式光伏组件平面、平坦坡面等）的倾角为 $\beta$ ，即该倾斜平面与X-Y水平面的夹角（ $0^\circ$ - $90^\circ$ ）；定义倾斜平面的方向角为 $\psi$ ，即该倾斜平面法向量在水平面的投影直线 $\mu$ 与Y轴正方向的夹角。本文所涉及到的太阳方向角、光伏组件方向角以及山体坡面方向角都是由正南向顺时针为正，由正南向逆时针为负，即正西向为 $90^\circ$ ，正东向为 $-90^\circ$ 。

太阳高度角 $\alpha$ :

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (2-1)$$

太阳方位角 $\theta$ :

$$\sin \theta = -\cos \delta \sin \omega / \cos \alpha \quad (2-2)$$

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ \frac{360(d_n + 284)}{365} \right] \quad (2-3)$$

## 4.2 影响太阳辐射的因素

地表表面接收太阳的三种辐射，直接辐射、天空散射辐射、附近地形的反射辐射。倾斜表面接收到的太阳辐射还可以归纳为：天文因子、大气因子和地表因子。天文因子影响主要体现在电站选址方面，包括所在地区的经纬度、太阳高度角、太阳方位角等因素。大气因子对太阳辐射的影响主要体现在光传播收到物质颗粒使其削弱或者谱带重叠等粒子内部变化。地表因子的影响主要体现在地面反射辐射中，包括地形、海拔、地表材料等因素，不同的地表，其反射率不同，也会影响组件接收太阳辐射量，一般地面反射率为 0.2，当然如果在草地或蓬松的地表面，反射率会减小，这样反射辐射就会被削弱。倾斜表面的倾斜角和方向角是影响光伏组件接收到的太阳辐射量的最重要的一个因素，表面角度与太阳光线的角度直接影响了表面接收太阳辐照的强度和ación，所以一般以能够接收最多太阳辐射的角度为最佳倾角和方向角，比如在阳坡和阴坡，阴坡明显接收到的太阳辐射遮挡较多，强度低而时间较短，阳坡获得的太阳辐射量明显的大于阴坡。

## 4.3 典型太阳辐照度模型比较

太阳辐照度计算模型随着时代的发展不断改进，其中针对太阳散射辐射模型方面的研究可分为三个阶段，太阳散射辐射与地区晴空指数、空气质量、漂浮粒子等都有关系，所以其研究比较复杂。第一阶段模型是以各向同性散射辐射模型为主，计算简单，参考量少，但没有考虑天气状况因素，以 Liu 和 Jordan 模型为代表；第二阶段模型是在各向同性散射辐射模型的基础上进行了修正，一般是在各向同性模型的基础上增加了天气因素，其中较为典型的有 Temp s 和 Cou l s o n 模型、Hay 模型，这一阶段模型形式相对简单，计算量增加但计算准确率提升了很多；第三阶段模型是采用构建散射辐射微元后积分求解的方法，这样计算结果的准确性会更高，P e r e z 模型则是将太阳散射辐射分解分为三个区域，分别为环日散射辐射、天边散射辐射、天顶散射辐射，然后对每个区域分别进行分解积分计算，计算使用的模型为各向同性模型。

本文将列举典型的三种斜面辐射模型，分别为天空各向同性模型、散射各向异性模型和K l e i n和T h e i l a c k e r模型，本文将对这三种模型进行分析

天空各向同性模型：

$$\overline{H_T} = \overline{H_b} R_b + \overline{H_d} R_d + \rho \overline{H} \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2-4)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta_T}{\cos \theta_z} \quad (2-5)$$

对于L i u等的天空各向同性模型和H a y天空各向异性模型%辐射包含的三部分中唯一差别是斜面散射辐射计算方法。L i u天空各向同性的散射辐射计算公式为：

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2-6)$$

天空各向同性模型计算简单认为天空散射是均匀分布，所以和实际天空散射分布情况不同。计算结果无法正确表征区域散射辐射特性，有一定的误差体现，在此基础上H a y散射各向异性模型则认为倾斜面上天空散射辐射量是由环日辐射和其余天空穹顶均匀分布的散射辐射量组成，即有：

$$R_d = \frac{\overline{H_b}}{\overline{H_0}} R_b + \left( 1 - \frac{\overline{H_b}}{\overline{H_0}} \right) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (2-7)$$

对公式进行分析，如果满足（7），则H a y模型的计算值会大于天空各向同性模型计算值；反之则小于各向同性模型。

$$R_d > \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2-8)$$

对于北半球，正南朝向，K l e i n和T h e i l a c k e r模型：

$$\begin{aligned} \bar{R} = & \frac{\cos(\varphi - \beta)}{d_1 \cos \varphi} \left( a_1 - \frac{H_d}{H} \right) \left( \sin \omega s' - \frac{\pi}{180^\circ} \omega s' \cos \omega s'' \right) + \\ & \frac{b_1 \cos(\varphi - \beta)}{2d_1 \cos \varphi} \left[ \frac{\pi}{180^\circ} \omega s' + \sin \omega s' (\cos \omega s' - 2 \cos \omega s'') \right] + \\ & \frac{H_d}{H} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \end{aligned} \quad (2-9)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} a_1 = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60^\circ) \\ b_1 = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60^\circ) \\ d_1 = \sin \omega_s - \frac{\pi}{180^\circ} \omega_s \cos \omega_s \end{cases} \quad (2-10)$$

表 2-1 公式变量释义表

变量	释义
$\bar{H}_r$	倾斜表面月均太阳总辐射量, kWh/m <sup>2</sup>
$\bar{H}_b$	水平表面月均直接辐射总量, kWh/m <sup>2</sup>
$\bar{H}_d$	水平面月均散射辐射总量, kWh/m <sup>2</sup>
$\bar{H}$	水平面月均太阳总辐射量, kWh/m <sup>2</sup>
$H_0$	各月代表日的日地外辐射量, kWh/m <sup>2</sup>
$R_b$	斜面月平均直接辐射量与水平面月平均直接辐射量之比
$R_d$	斜面月平均散射辐射量与水平面月平均散射辐射量之比
$\bar{R}$	斜面月平均总辐射量与水平面月平均总辐射量之比
$\rho$	地面反射率, 无量纲
$\theta_r$	太阳入射角, 太阳入射光线与倾斜面法线之间的夹角, (°)
$\theta_z$	天顶角, 太阳入射光线与水平面法线之间的夹角
$\beta$	光伏阵列斜面倾角 (与水平面的夹角), 取值范围 0°-90°
$\varphi$	光伏系统所在地的纬度, (°)
$\omega_s$	水平面上各月代表日的日落时角, (°)
$\omega_s'$	倾斜面上各月代表日的日落时角, (°)。

## 4.4 热斑效应及山体自身阴影效应

### 4.4.1 热斑效应

在光伏组件的实际运行时, 太阳能电池板容易受到各种阴影的影响。在建筑、山地上建设的光伏组件, 常受到其他建筑、树木、电线杆的阴影影响, 就算在荒漠等开阔平坦地区铺设的光伏组件, 也会受到云层阴影的影响, 使得光伏组件的表面所接受到的光照强度不均匀, 对整个光伏阵列

的正常工作产生影响，还有可能产生热斑效应损害组件。热斑效应一般来是指光伏组件中的一或几块电池被遮挡造成失光或者损坏时，所能产生的光生电流降低，导致这些电池的电流小于整个串联电路的工作电流。这就会使这部分电池处于反向偏置的状态，不作为电源产生电能而是作为负载消耗电池板发出的电能，并且作为负载，该部分电池的温度会高于周围其他组件的温度，产生局部热斑 [ 4 8 ]。

热斑效应会使光伏组件的一部分发电量被内部消耗导致效益降低，同时如果产生热斑效应的电池块温度过大，会使电池组件损坏，影响整个太阳能电池板。对此，可以在串联的光伏电池组件两端并联旁路二极管，这样可以使某一块电池产生热斑效应时，二极管两端会产生正向的偏置压力，使其他电池能够正常发电。

#### 4.4.2 山体自身阴影

在水平面上，组件接收到的太阳辐射量受当地经纬度、太阳辐射的影响，在复杂地形下，除了组件互相遮挡，还有山地自身会对组件有一定的遮挡影响，从而影响组件接收太阳辐射的时间段，影响到组件接收到的总辐射量。在上午时段山地接收太阳辐射的自身阴影变化趋势如图 2 — 3 所示：



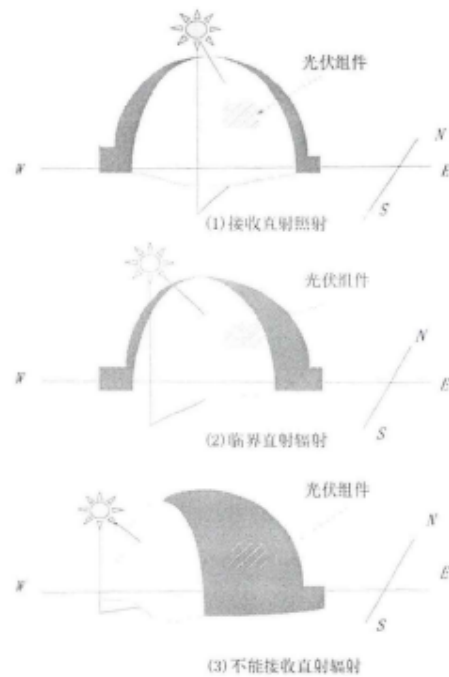


图 2-3 山体自身阴影变化图

例如在图 2-3 所示的山地坡面上，山体自身阴影随着时间太阳光的改变而变化，如光伏组件安装在山地的偏东坡面，图 2-3 (1) 为正午时段，组件可接收到太阳直射辐射；而在下午时段，东坡的阴影区域逐渐增大，图 2-3 (2) 是组件可接收直射辐射的临界状态，表现为太阳光线向量达到与组件所在坡面的法向量垂直，本文将此定义为“临界直射辐射条件”，图 2-3 (3) 中组件已经处于山体的阴影中，不能接收到太阳直射辐射。可见，由于山地自身阴影对组件造成遮挡，需要对组件接收到的太阳辐射的时间段和总辐射量进行修正，这在目前的山地光伏电站实际开发工作中还尚未形成统一的设计规范。

因此，分析山体的临界直射辐射条件对于山地光伏电站的组件安装区域微观选址尤为重要，本文提出了下述方法：在图 2-2 所建立的坐标系下，定义坡面的法向量为  $\vec{\mu}_s$ ：

$$\vec{\mu}_s = (\sin \phi_s \sin \rho_s, \cos \phi_s \sin \rho_s, \cos \rho_s) \quad (2-11)$$

在该坐标系下太阳光线的向量 $\bar{R}$ 可表示为：

$$\bar{R}=(\cos \alpha \sin \theta, \cos \alpha \cos \theta, \sin \alpha) \quad (2-12)$$

该向量方向是由辐射表面发出指向太阳。当 $\bar{R}^* \bar{\mu}_s=0$ 时，即为太阳光线与坡面法向量垂直，是安装在该坡面组件接收太阳直射辐射的临界条件；当 $\bar{R}^* \bar{\mu}_s>0$ 时，组件可收到太阳的直接辐射；当 $\bar{R}^* \bar{\mu}_s<0$ 时，组件不能接收到太阳的直接辐射，此时山体坡面只有天空散射辐射，这就是山体自身阴影对组件辐照度造成的影响，从而限制了组件受太阳辐照的时间，影响了光伏组件的总辐照度。通过空间向量关系说明了在复杂地形下，山体自身对布置在其坡面上的组件的阴影遮挡影响，影响组件接收太阳辐射的时间段和总太阳辐射量，为了接收到最大的太阳辐射量，考虑组件非正南布置是非常必要的。分析出了遮挡临界点，这为后面的复杂地形下组件光伏辐射量计算的数学模型的研究奠定了基础。

#### 4.5 复杂地形下光伏组件太阳辐照度(效率)模型

通常来讲，组件接受到的太阳辐射由三部分组成：直接辐射、天空散射辐射和地面反射辐射。安装在特定地点的光伏组件可视为倾斜平面，其倾角和方向角一旦确定，可根据该地点实测气象站太阳辐射数据，间接计算组件表面的辐照度情况。文献给出了确定倾斜平面在全年任意时间段的时均太阳辐照度 $T$ 的计算公式。

$$T=CI+\frac{D(1+\cos \beta)}{2}+\frac{\rho H(1-\cos \beta)}{2} \quad (2-13)$$

$$C=\cos \alpha \sin \beta \cos (\psi-\theta)+\sin \alpha \cos \beta \quad (2-14)$$

式中， $C$ ——倾斜平面和水平面上直接辐照量的比值，当 $S<0$ 太阳光线不能到达组件表面，此时组件表面接收不到直射辐射，只有天空散射辐射和地面反射辐射； $I$ ——直接辐照度， $W/m_2$ ； $D$ ——散射辐照度， $W/m_2$ ；

$H$ ——水平面上的太阳总辐照度， $W/m_2$ ； $\rho$ ——地面反射率。

针对考虑山体阴影遮挡的光伏组件，本文将公式（2-13）修正为公式（2-15）。公式（2-15）考虑了山体自身遮挡对坡面的受辐射情况的影响，与传统分析方法<sup>^</sup>相比，对于山地非正南向坡面光伏资源的

评估分析具有针对性。

$$T = \begin{cases} Cf + \frac{D(1+\cos\beta)}{2} + \frac{\rho H(1-\cos\beta)}{2} & \bar{R} * \bar{\mu}_i > 0 \\ & C > 0 \\ \frac{D(1+\cos\beta)}{2} + \frac{\rho H(1-\cos\beta)}{2} & \bar{R} * \bar{\mu}_i > 0 \\ & C \leq 0 \\ \frac{D(1+\cos\beta)}{2} & \bar{R} * \bar{\mu}_i \leq 0 \end{cases} \quad (2-15)$$

基于该地区气象站全年实测太阳辐射历史数据及山体测绘数据，根据公式（2-15）求出各小时的辐照度，再将全年各时均太阳辐照度如公式（2-16）进行求和，即得到在某一特征坡面以某种倾斜角度和方向角安装的光伏组件接收到的年总辐射量 $S$ ， $kWh/m_2$ 。

$$S = \sum_{i=1}^{8760} T_i \quad (2-16)$$

## 5 光伏系统主要设备选取（部分引用）

### 5.1 太阳能电池组件

#### 1) 常用的太阳能电池分类

##### 1) 晶硅电池

自太阳能电池问世以来，晶体硅作为光伏电池的一种原材料一直占据主要地位，晶体硅电池单前主要分为单晶硅电池和多晶硅电池两种。国内目前商用的主要为这两种为主。当前，市场上的单晶硅电池一般能实现16% 20%的太阳能转换，多晶硅则只能实现12% 18%的太阳能转换，转换效率一直处于一个较低水平，且晶体硅太阳能电池成本也一直较高。

##### 2) 非晶硅电池

由于晶体硅成本高、转换效率低，一种低成本的非晶硅电池开始得到人们重视并逐步发展起来。由于非晶硅材料制成的光伏电池光学带隙为1.7eV，这就造成太阳辐射的可发电波长范围减少，从而降低此种方式光伏转换效率。目前，转换效率约为5% 9%。除了转换效率低，这种光伏电池在使用后它的光电效率会随着光照射时间的增加而降低，并且它的性能不像传统晶硅电池稳定，衰减却比晶硅电池快。

虽然这种非晶硅电池转换效率低，但其拥有晶硅电池所不具有的成本低、重量轻高温性能好等优点，在未来拥有更大的发展空间。

表 3-2 不同太阳能电池性能比较表

比较项目	单晶硅	多晶硅	非晶硅	比较结果
技术成熟性	技术最成熟，性能稳定	技术成熟，性能稳定，使用量最大	性能不稳定，易衰减	晶硅电池技术成熟，性能稳定
转换效率	16%~20%	12%~18%	5%~9%	单晶硅>多晶硅>非晶硅
价格	工艺复杂，成本价格相对较高	制造简便，生产成本略低	工艺简单，成本较低	非晶硅成本最低，多晶硅稍贵，单晶硅最贵
光照、温度等外部环境的影响	输出功率正比于光强，高温影响效率发挥	输出功率正比于光强，高温影响效率发挥	弱光响应好，充电效率高。受温度的影响较小	晶硅电池输出功率正比于光强
运维情况	故障率极低，自身免维护	故障率极低，自身免维护	组件易积灰，维护难度大	晶硅电池组件故障率低，运行维护简单
使用寿命	25年以上	25年以上	衰减快，约15-20年	晶硅电池组件使用寿命最长

对比三种不同类型光伏组件，可以看出：

①晶体硅电池由于使用最早，相比于非晶硅电池制作工艺及技术均较为成熟，因此制成的产品质量更加有保障，拥有较长的寿命。

②当前市场上的光伏电池，太阳能转换效率按从高到小顺序分别为单晶硅、多晶硅、非晶硅，若安装场地限制将影响安装组件总容量。

③晶硅电池组件故障率极低，运行维护简单，而非晶硅电池后期维护难度较大。

④晶硅电池受光照影响较大高温性能较差，非晶硅电池具有良好的弱光效应，受高温影响小。

对比上述三种太阳能电池几项重要指标结合实际情况本工程拟选用性价比较高的多晶体硅电池组件。

此外，结合当前市场情况，从组件效率、价格及技术成熟性等方面考虑，此次设计采用单片功率为260W的多晶硅组件，具体技术参数如表3-3所示：

表 3-3 光伏组件技术参数表（标准测试条件：STC）

参数名称	数值	单位	参数名称	数值	单位
最大输出功率 $P_{max}$	260	W	开路电压 ( $V_{oc}$ ) 温度系数	-0.32	%/°C
功率误差 $\Delta P_{max}$	0.5	W	短路电流 ( $I_{sc}$ ) 温度系数	0.06	%/°C
开路电压 $V_{oc}$	37.6	V	最大输出功率 ( $P_{max}$ ) 温度系数	-0.42	%/°C
短路电流 $I_{sc}$	9.22	A	工作温度	-40~80	°C
最佳工作电压 ( $V_{mpp}$ )	30.5	V	组建转换效率	15.98	%
最佳工作电流 ( $I_{mpp}$ )	8.52	A	25 年功率衰减	<20	%
最大额定串联电流	13	A	重量	17.5kg	kg
最大系统电压 (DC)	1000	V	尺寸 (长×宽×高)	1640×992×35 mm	

## 6 光伏电池方阵分布设计（部分引用）

### 6.1 光伏电池方阵分布设计方案概述

在进行大型光伏电站设计时，一般是将整个电站均分成若干个单元，再针对每一个单元进行设计，这样可减少设计工程量。具体设计思路是首先将一定数量的光伏组件依次串联，构成一个最小的太阳能电池组串单元，若干个这样的组串并联连接后形成一个光伏阵列，根据要求选择不同的并联组串数组合即构成了不同规模的光伏发电单元，各发电单元的电能汇集之后再选择合适的并网点并网。

本工程设计装机容量40MW，计划利用光伏组件组成最小发电单元分块进行发电，通过集电线路将所发电能集中于一处并入电网。具体实施方案是分成32个1.25MW的光伏发电单元进行设计，并且每个1.25MW单元均选用2台630kW并网逆变器将所发直流电逆变成合适的交流电压。其中的光伏组件先串后并组成多个光伏阵列，之后各组串在防雷汇流箱汇集后，经并网逆变器接入升压变压器转换成合适的电压等级之后并网。

### 6.2 光伏阵列安装方式选择

当前建设光伏电站中组建安装方式对接收太阳能辐射量有很大影响，对于组件安装方式主要有固定支架式和自动跟踪式，顾名思义固定支架式则是将所有光伏组件安装于一固定倾斜角度的支架上，而自动跟踪式则是根据太阳移动转动支架，时刻保持太阳光线与光伏阵列的尽可能垂直，使

所发电量最大。自动跟踪式由于转轴数量及跟踪方式不同细分为“单轴跟踪式”和“双轴跟踪式”。

单轴跟踪式：传动系统带动光伏支架以某一轴旋转跟踪太阳移动以获得最大太阳辐射，该方式可跟踪太阳方位角或高度角。

双轴跟踪式：光伏支架根据太阳移动全方位旋转跟踪使组件太阳辐射时刻保持最大。

自动跟踪式由于能够接收的太阳辐射量相对较大，所以对其发电量有所提高。但成本也在相应提高，相同发电量下双轴跟踪式比固定式成本提高约20%，单轴跟踪式系统成本提高约5%，同时跟踪系统耗电量也比较大且跟踪系统是分散安装于各组件支架上，统一管理有一定难度。此外，由于项目地特殊的环境气候条件，在沙尘天气时，跟踪系统传动部件容易被沙尘颗粒侵入导致故障，增加了系统维护成本。跟踪系统虽能够提升整个系统发电量但无法补偿相应提高的安装成本，因此组件安装方式选用固定式的支架较为合适。

### 6.3 光伏方阵设计



图 3-10 组件前后布置间隔图

为验证计算间距是否满足条件，采用 PV syst 建立光伏方阵模型观察阴影损失如图 3-11。



图 3-12 光伏阵列单元组件排布图

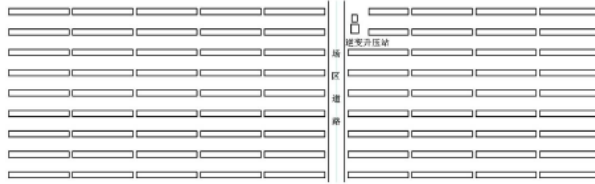


图 3-13 1.25MW 发电单元方阵排布图

## 7 复杂地形下光伏电站优化设计大体方法

### 7.1 安装角度优化设计

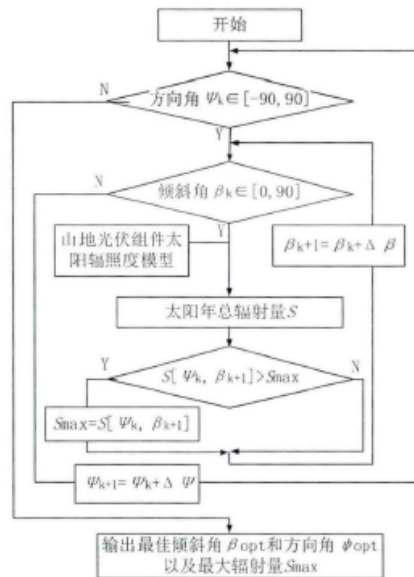


图 3-1 计算最佳倾角和方向角的流程图

太阳能电池板接收到的太阳辐射量会受其方位角和倾斜角度很大影响，所以要调整组件倾斜角度和方向角以最大限度地增加接收到的太阳辐射量，首先对于给定的地形坡面的倾斜角度和朝向方位角，由公式（2-1-1）求出坡面法向量，得到太阳直射辐射的临界条件；然后利用山地坡面光伏组件年辐射量修正计算公式（2-1-5）；将组件倾斜角度从 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ （水平到垂直），组件方向角从 $-90^\circ$ 到 $90^\circ$ （从东到西）分别代入计算，在工程实践中可以选择以 $1^\circ$ 为计算间隔，既能满足工程实施精度需要，又能合理控制

运算量。这样就得到了空间内光伏组件倾斜角度 $\beta$ 和方位角 $\gamma$ 的所有可能的组合，共有 $181 \times 91$ 种安装方式，任一方式下受到太阳全年8760个小时的辐射作用，由此得到光伏组件倾斜角度和方向角的所有可行组合下的太阳总辐射量 $S$ ，其中最大值所对应的倾斜角和方向角即为该坡面位置上考虑山体阴影条件下的光伏组件最佳安装角度参数。

## 7.2 组件间距推算及方案

### 7.2.1 水平场地

光伏阵列在排布时需要考虑前后排组件产生的阴影遮挡问题，这需要通过相应的计算来解决。目前光伏阵列通用的间距标准是在当地冬至日的真太阳时9—15时，光伏组件前后排阵列不产生阴影遮挡。间距 $D$ 可以通过以下公式进行计算：

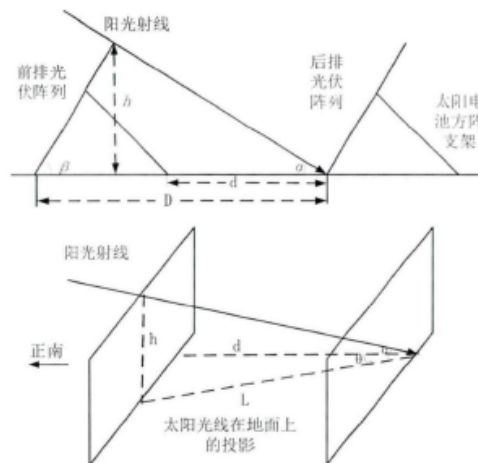


图 3-2 水平地面上光伏阵列间距计算



$$\omega = (\tau_c - 12) \times 15 \times \frac{\pi}{180} = (\tau_c - 12) \times \frac{\pi}{12} \quad (3-1)$$

$$\alpha = \arcsin(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (3-2)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha}\right) \quad (3-3)$$

$$L = \frac{h}{\tan \alpha} \quad (3-4)$$

$$h = l \times \sin \beta \quad (3-5)$$

$$D = L \times \cos \theta \quad (3-6)$$

式中： $\omega$ 为当地的时角； $\tau_c$ 为当地的真太阳时； $\phi$ 为当地纬度； $\delta$ 为太阳赤纬角； $\alpha$ 为当地的太阳高度角； $\theta$ 为当地的太阳方位角； $h$ 为前后排阵列之间的高度差； $\beta$ 是组件的倾斜角度； $L$ 为阵列投影到地面的阴影长度； $l$ 为光伏电池板斜面长度； $D$ 为前后阵列之间的距离。通过该公式，只需要知道某地的纬度 $\phi$ ，光伏组件的安装倾角 $\beta$ ，光伏组件斜面长度 $l$ 即可得出组件后排阵列前端与前排阵列后端之间的水平距离 $D$ 。

### 7.2.2 存在南北、东西向坡度时阵列间距

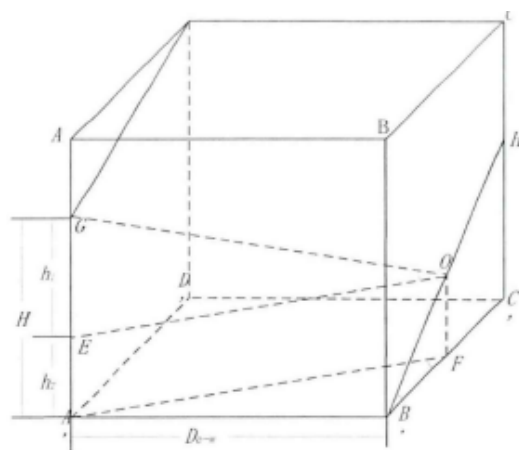


图 3-4 方阵东西向间距计算的立体几何模型

一般来说，光伏阵列的标高都相同。当东西向没有坡度时，如果相邻两电池板间没有铺设道路、电缆等特殊情况，则东西相邻的两电池板之间的间距一般只有10cm-20cm，排布较为密集。

当东西向存在较小的角度时,为了使接收到的太阳辐射量最大,发电效率最优,按照正南朝向,东西水平布置光伏阵列仍然是一般采用的方法。但因为东西向坡度的影响,光伏组件间会产生阴影遮挡,影响发电效率,但平整场地的费用一般较高,所以需要光伏组件纵向相邻的标高计算出一定的差值。在这种情况下,东西、南北向的间距就要做出调整。化简后得到上图的长方体几何图形,长方体 $ABCD - A'B'C'D'$ 中,相邻两光伏方阵的左右边框为 $B'H$ 与 $GD$ ,  $GI$ 为太阳光的入射方向, $CB$ 则为正南方向,在间距为 $D_{e-w}$ 时,东西相邻的两个阵列间恰好不被相互的阴影遮挡。

推导如下:

作以 $F$ 为垂足垂线 $IF \perp C'B'$ ,过点 $I$ 作 $IE$ 平行于 $AF$ 交于边 $AA'$ 。图中的 $\angle IB'F$ 为光伏阵列的固定倾角 $\beta$ , $\angle GIE$ 为太阳高度角 $\alpha$ , $\angle B'FA'$ 为太阳方位角 $\theta$ 。

可证:

$$IE = h_1 \times \cot \alpha \quad (3-9)$$

$$IE = \frac{h_2 \times \cot \beta}{\cos \theta} \quad (3-10)$$

联立可得:

$$h_1 \times \cot(\alpha) = \frac{h_2 \times \cot(\beta)}{\cos \theta} \quad (3-11)$$

又因为 $H = h_1 + h_2$ ,所以:

$$h_2 = H \times \left( \frac{\cot(\alpha)}{\cot(\alpha) + \cot(\beta) / \cos(\theta)} \right) \quad (3-12)$$

之后又有:

$$D_{e-w} = h_2 \cot(\beta) \tan(\theta) = H \times \frac{\cot(\alpha) \cot(\beta) \tan(\theta)}{\cot(\alpha) + \cot(\beta) / \cos(\theta)} \quad (3-13)$$

对相邻方阵间的高度差 $H$ :

$$H = (L + D_{e-w}) \times \tan(\beta_{e-w}) \quad (3-14)$$

图 1:

联立两式，有：

$$D_{e-w} = \frac{L}{\frac{\cot(\alpha) + \cot(\beta) / \cos(\theta)}{\cot(\alpha)\cot(\beta)\tan(\theta)\tan(\beta_{e-w})} - 1} \quad (3-15)$$

式中： $L$ 为方阵宽度； $D_{e-w}$ 为方阵东西向净间距， $\beta_{e-w}$ 为坡面东西向倾角，一律为正；

东西向间距计算完成后，还需要计算南北向间距。如图 3-5 所示，东西、南北向都存在坡度时，方阵  $B$  与方阵  $C$  之间的间距会受到两种坡度各自的影响。

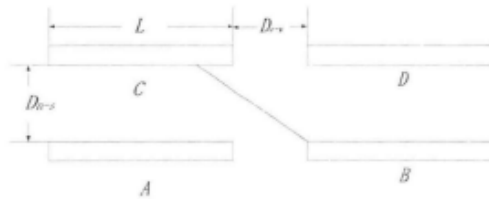


图 3-5 东西、南北相邻光伏方阵示意图

此时  $H$  为：

$$H = l \sin \beta + (L + D_{e-w}) \tan(\beta_{e-w}) - D_{n-s} \tan(\beta_{n-s}) \quad (3-16)$$

$$D_{n-s} = H \times R \quad (3-17)$$

$$D_{n-s} = \frac{l \sin \beta - l \cos \beta \tan(\beta_{n-s}) + (L + D_{e-w}) \tan(\beta_{e-w}) + l \cos \beta}{\frac{1}{R} + \tan(\beta_{n-s})} \quad (3-18)$$

### 7.2.3 考虑方位角的设计

上述公式介绍了光伏组件在正南朝向、带有东西、南北向坡度的地形上安装时阵列前后间距的计算方法，但在建筑上铺设光伏阵列时，由于建筑在设计时大多数不会朝向正南，而是带有一定的夹角，因而需要对计算公式进行一定的优化。

此类光伏阵列间距的计算应该考虑建筑方位角的影响：

$$\theta' = \theta - \theta_1 \quad (3-19)$$

其中， $\theta_1$ 为建筑方位角， $\theta'$ 为组件实际方位角。  
日照间距系数修正如下：

$$R = \frac{\cos(\theta - \theta_1)}{\tan \alpha} \quad (3-20)$$

与公式 (3-15) 结合，得到：

$$D_{n-s} = \frac{L \sin \beta - L \cos \beta \tan(\beta_{n-s}) + (L + D_{e-w}) \tan(\beta_{e-w})}{\frac{1}{\cos(\theta - \theta_1) / \tan \alpha} + \tan(\beta_{n-s})} \quad (3-21)$$

其中太阳方位角  $\theta$  的选取，一般采用阴影最长的冬至日时 9 时或 15 时的角度。建筑方位南偏东时，采用 9 时的太阳方位角，建筑方位为南偏西时，采用 15 时的太阳方位角。以北京延庆地区为例，该地区的纬度为  $40.47^\circ$ ，经度为  $115.97^\circ$ ，假设光伏组件斜面长为 3 m。利用 M A T L A B 设置不同的坡度和坡向，输出计算结果，实际计算中坡度一般采用百分比制。

表 3-1 实际计算 (纬度  $\phi=40.47^\circ$  安装倾角  $\theta=38^\circ$ )

南北向坡 度(%)	东西向坡 度(%)	东西向高 差(m)	组件安装 间距(m)	南北向坡 度(%)	东西向坡 度(%)	东西向高 差(m)	组件安装 间距(m)
0	0	0	8.02	0	4	0.31	9.22
2	0	0	7.27	2	4	0.31	8.68
4	0	0	6.61	4	4	0.31	8.21
0	2	0.16	8.60	0	6	0.47	9.79
2	2	0.16	8.13	2	6	0.47	9.22
4	2	0.16	7.69	4	6	0.47	8.71

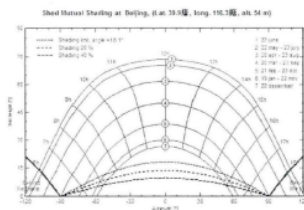


图 3-6 太阳轨迹图

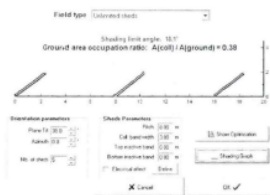


图 3-7 PVSYS 所求的最佳间距

#### 7.2.4 实例设计

以我国某地某光伏电站的设计为例，对于这一类大型光伏电站来说，对于铺设的场地要求越平坦越好，朝向正南方最好。但是对于自然地形来说，铺设所需越大，越难找到十分平坦的地面，地势会存在着一定的起伏。这类起伏不大，一般在5%内，但没有规律，使得实际布置光伏组件的时候会使组件之间产生一定的阴影遮挡，对发电效率有一定的影响，并且处于阴影遮挡下的光伏组件容易导致局部过热，组件老化等现象的发生。对于这类场地，铺设方案需要根据当地实际情况因地制宜进行调整。

该电站所铺设光伏组件的地方地形为东高西低，南高北低。东西向存在0.7%—1.8%的坡度，南北向存在1.4%—2.5%的阴坡，整块场地有较大的起伏。经过计算，这一工程一期建设如果采用分区场平的方式来平整场地使其达到理想的安装要求的话，土方平整成本很高，并且平整过后不同分区之间有可能高度差值超过2m。因此，在实际建设的过程中，施工时将场地采用了阶梯建设的方式。每个分区内的光伏阵列排布为：该分区内的所有阵列有一个基准标高，总体的标高依据地形，阶梯式的以弧形的形式从高处向低处降低，在每行、每列上再根据东西、南北方向逐渐降低高度。不同分区之间的高度差采用人工做边坡来补充。

该光伏电站一期的光伏阵列排布方式如图所示，图3-11(a)中东西、南北方向的地面高度差均超过了2.5m，图3-11(b)为土地平整后光伏阵列支架的基础标高。场地的南北向坡度为阴坡，坡度为2%，光伏组件斜面的长度为3.310m，安装倾角为35°。查阅当地的气象数据后，通过计算得到日照间距系数 $R=2.59$ ，阵列的前后间距为5.335m，前后阵列的中心距离为8.046m。考虑到现场的情况，8.046m的间距在实际布置时很难使所有组件达到相应标准，为了使施工更加方便，以及留出一定的富裕空间，最后设计时将光伏阵列的前后中心距离定为8.150m，前后阵列之间的高度差则定为0.20m。在实际工程的计算中，因为光伏阵列是从西南方向开始向东北方向布置，侧后方阵列受到的阴影遮挡很小，因此没有在计算中加入东西向坡度。但是从图3-11(b)中可以看到，在每年阴影最长的冬至日时，阵列前后之间不会产生相互遮挡，但会对侧后方的阵列形成较小的阴影。

## 8 发电量及节能效果计算（气象及地形数据引用）

### 8.1 发电量计算

依据Metonorm 提供的项目地相邻气象站太阳辐照量数据如表3-1 所示，将该数据导入至光伏仿真软件PVsyst 中进行系统发电量仿真计算。首先在PVsyst 中建立一个1.25MW 发电子系统，以此模拟计算32 个相类似系统构成的40MW 光伏电站总发电量。利用软件计算出该光伏电站第一年可发电量如表5-2 所示，十二个月共计发电63488.6MWh。

表 5-2 第一年各月发电量计算结果

月份	一月	二月	三月	四月	五月	六月
月发电量 (kW·h)	5131776	4972096	5603744	5709344	5935200	5052608
月份	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
月发电量 (kW·h)	5093056	5404704	5599712	5342976	5010016	4633376

光伏组件在自然使用条件下存在衰减，根据所选组件衰减特性，25 年衰减不超过20%，则剩下24 年按照每年0.8%递减计算，25 年总发电量为1443790.13MWh，年平均发电量为57751.61MWh，25 年具体各年发电量如表5-3。

表 5-3 25 年分年发电量统计

年份	年发电量 (MWh)	年份	年发电量 (MWh)
1	63488.60	14	57193.61
2	62980.69	15	56736.06
3	62476.85	16	56282.17
4	61977.03	17	55831.91
5	61481.21	18	55385.26
6	60989.36	19	54942.18
7	60501.45	20	54502.64
8	60017.44	21	54066.62
9	59537.30	22	53634.08
10	59061.00	23	53205.01
11	58588.51	24	52779.37
12	58119.80	25	52357.14
13	57654.85	合计	1443790.13
平均		57751.61	

该40MW 光伏电站并网第一年预计发电量约为6348.86 万度电，25 年平均发电量预计约为5775.16 万度电，累计发电量144379.1 万度电。实际光伏电站运行中还受到其他一些人为或气候等不可预见因素的影响，将导致计算所得电站理论年发电量可能会有一定偏差。

## 8.2 节能效益分析

### （1）电气节能

本项目主要设备的选取按照安全、可靠、低能耗原则进行，在保证系统安全稳定运行前提下，优先选取耗能低的设备，以降低系统损耗提高发电效率。

组件选取技术成熟先进，转换效率高的光伏组件，在汇流系统采用两级汇流，节约电缆和损耗；集电线路电压等级采用35k V，相较于10k V能节约电缆降低损耗；采用大功率逆变器，单位逆变效率高，损耗低，就地升压变采用双分裂变压器，能够减少谐波污染，提高输出电能质量。

此外升压站的用电设备节能设计：选用高效节能的电动机，尽可能采用变频控制；照明设计充分利用自然光，优先采用LED灯具，在满足照度及视觉要求的条件下，合理选择和布置灯具。

（2）建筑节能在进行电站内建筑设计时，应综合考虑当地自然条件，合理的选定建筑朝向及空间布局，还需考虑设备间距及一些设备的特殊条件来确定建筑间距及层高，建筑施工所用的材料在满足要求的前提下优先考虑使用节能环保材料，同时兼顾建筑材料的保温性能，以获得理想的节能效果。

对建筑周围环境进行绿化设计，最大限度减少周围环境对建筑物能耗的影响。同时合理设计空调系统，选用高能效比的空调，降低能耗。

## 8.3 环境保护影响分析

太阳能发电作为一种清洁的发电方式，发电运行时不会像其他发电方式一样大量消耗资源，也不会产生废水、废气、噪声和固体废物，但在施工建设电站及电站后期运行会对周边环境产生一定影响，因此需采取相应措施减少给社会环境所带来的不利影响。

（1）生态环境影响站址区域气候寒冷、干旱，周围无地表水，地下水埋深较深，植被稀少，

站址区域未发现受保护的国家一、二级野生动物。太阳能电站的建设不会对当地的生态环境带来不利的影晌，相反电站建成后站区进行绿化，这对保护和恢复当地的生态环境有着积极的作用。

### （2）光污染控制

本工程光伏电池组件表面由于部分太阳光被光伏电池镜面反射，而形成光污染。为防治光污染，晶硅芯片表面镀有吸光材料，组件表面采用专

用的超白玻璃, 此种玻璃的透光率可达91.5%, 反射率低于4%, 对阳光的反射以散射为主, 减少光污染的发生。

站址附近的光污染敏感目标主要为附近高速公路上行驶经过的汽车驾驶员。为防止光污染对驾驶员的骚扰, 可在国道靠站界侧种植树木, 屏蔽太阳能光伏电站所产生的光污染。采取上述光污染控制措施后, 能够解决光伏电站所带来的光污染问题。

## 9 结论, 展望与应用思路

### 9.1 结论与展望

在当代资源环境问题的突出、社会经济可持续发展的要求背景下, 发展可再生能源是一种必然选择。太阳能资源属于可再生能源的一种, 也是可再生能源中最具开发利用潜力的能源。太阳能的开发利用不论是对于因为传统能源日益枯竭造成的能源供给问题, 还是对近年来不断恶化的气候环境问题, 都有着较好的“疗效”。能源供应安全推动着全球光伏产业的发展, 世界各国的光伏发电装机容量都在不同程度地增加。

目前, 我国的能源结构仍以传统化石能源为主, 这与我国的节能减排目标和可持续发展战略要求相背离。因此, 当前能源消费结构必须得到改变, 发展可再生能源刻不容缓。我国有着相当丰富的太阳能资源, 有着开发利用太阳能的前提条件。

随着光伏电站容量的持续增加, 山地成为了光伏电站建设的重要用地。对于复杂地形的光伏电站来说, 影响其太阳辐射量的因素很多, 尤其阴影遮挡。阴影遮挡主要包括电站设计光伏组件之间的相互遮挡和山地自身对组件的遮挡影响。一般光伏电站组件都是以正南方向为最佳方向角布置组件, 但是在山地光伏电站的开发中, 存在着大量的非正南向坡面资源, 本文通过空间向量关系建立纬度、山体坡面倾角、方位角与光伏阵列间距和山体自身对光伏阵列阴影遮挡的几何模型, 定量计算组件相互遮挡和山体自身阴影遮挡影响, 从而建立在复杂地形下光伏组件太阳能辐照度的数学模型, 提出一种遍历寻优的方法得到该地形上组件安装的最佳倾斜角和方向角以及最大辐射量,



## 9.2 相关建议（政策制定角度）

4. 1 完善居民家庭光伏支持政策和补助政策投资收益偏低、成本回收期过长是影响居民投资家庭光伏的主要因素。在我国的居民生活电价远远低于工商业电价的情况下，必须推行合理的上网优惠电价和自用电补贴。经测算，如将居民家庭光伏发电电价定在 $1.3C/kwh$ （不考虑自用或上网），投资者可在7~8年收回投资成本，因此可以极大地激发居民的投资热情。此外，财政、税务主管部门应尽快研究出台免收居民家庭光伏发电税费政策和解决居民家庭电费结算过程中如何开具发票的问题，以规范电网企业与用户间的电能交易。

4. 2 简化居民家庭光伏项目的备案管理流程居民家庭光伏发电项目普遍较小，政府相关部门可考虑在项目申报备案时开辟绿色通道，简化相关流程，取消环评、能评等项目，为居民家庭光伏发电项目提供便利，加快居民家庭光伏发电项目的建设进度。

4. 3 加大宣传，形成合力针对居民目前对光伏发电认知度和关注度尚且不高的现状，应加大可再生能源和光伏发电的宣传，普及光伏发电知识，使广大居民充分了解家庭光伏发电的优越性和投资回报，提高其投资的积极性和主动性。光伏制造、经营企业应大力开拓居民用户市场，不断提高服务水平，构建销售—安装—运行维护一体的产销一条龙服务体系。供电企业应做好光伏项目并网及咨询服务工作，各方合力，共同推进全国居民家庭光伏发电项目应用。

总结：马克思曾经提出科学技术具有生产力的属性；邓小平也曾说科学技术是第一生产力。太阳能光伏发电符合中国全面建成小康社会的核心利益，符合全面脱贫的战略部署，符合中国可持续发展过程中对清洁能源充分利用的趋势要求。与此同时，大力推进太阳能资源的利用及加速光伏发电产业发展，对缓解现今能源紧缺的局势及调整能源结构具有一定作用，其社会、政治、经济、环保等综合效益显著。

## 参考文献

- [1] Soulayman SS. On the optimum tilt of solar absorber plates

- [J]. Renewable Energy, 1991, 1 (3): 551-554.
- [2] Soulayman S, Sabbagh W. Comment on 'Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria' by Skeiker, K [J]. Energy Conversion & Management, 2014, 89 (3): 1001-1002.
- [3] Calabro E. An Algorithm to Determine the Optimum Tilt Angle of a Solar Panel from Global Horizontal Solar Radiation [J], Journal of Renewable Energy, 2013, (2013-4-9), 2013, 2013.
- [4] Hussein H M S, Ahmad G E, El-Ghetany H H. Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations [J]. Energy Conversion & Management, 2004, 45 (15-16): 2441-2452.
- [5] Benghanem M. Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia [J]. Applied Energy, 2011, 88 (4): 1427-1433. P
- [6] Jafarkazemi F, Saadabadi S A. Optimum Tilt Angle and Orientation of Solar Surfaces in Abu Dhabi [J]. Renewable Energy, 2013, 56 (4): 44-49.

- [7] Tang R, Wu T. Optimal tilt-angles for solar collectors used in China [J]. Applied Energy, 2004, 79 (3): 239-248.
- [8] 王炳忠, 申彦波. 从资源角度对太阳能装置最佳倾角的讨论 [J]. 太阳能, 2010, (07): 17-20.
- [9] 潘进军, 申彦波, 边泽强, 王香云. 气象要素对太阳能电池板温度的影响 [J]. 应用气象学报, 2014, 25 (02): 150-157.
- [10] 冯志诚. 太阳能光伏发电性能影响因素的研究 [D]. 内蒙古工业大学. 2013. 04.
- [11] 黄文政. 全方位太阳辐照度测量和分析系统 [D]. 武汉纺织大学. 2012. 06
- [12] 郭泉. 光伏组件发电效率影响因子的优化研究 [D]. 内蒙古. 内蒙古工业大学. 2014. 04.
- [13] 柴亚盼. 光伏发电系统发电效率研究 [D]. 北京. 北京交通大学. 2014. 03.
- [14] 杨金焕, 毛家俊, 陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算 [J]. 上海交通大学学报, 2002, (07): 1032-1036.
- [15] 杨金焕. 固定式光伏方阵最佳倾角的分析 [J]. 太阳能学报, 1992, (01): 86-92.
- [16] 魏子东, 霍小平, 贺生云, 尹宁. 固定式光伏最佳水平倾角及朝向的模拟分析 ——以宁夏银川地区为例 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2012, 44 (05): 700-706,
- [17] Grady W M, Gravagne I, Warren A, et al. Predicting the energy harvests of PV installati

- ons using rotating shadow band radiometer data [M]. 2014.
- [18] Jamil M, Ehtesham M. Optimizing PV system performance considering the impacts of non-uniform irradiance and partial shading [C]. International Conference on Energy Economics and Environment. IEEE, 2015: 1-6.
- [19] Alexandra Danu, Vladimir Tanasiev, Constantin Ionescu, Adrian Badea Influence of tilt and orientation angle of the PV panels on high-energy production in Romanian climate conditions during cold season [J]. Faculty of Energetics. 2015. 18(1): 1599-1604.
- [20] Roux W G L. Optimum tilt and azimuth angles for fixed solar collectors in South Africa using measured data [J]. Renewable Energy, 2016, 96: 603-612.
- [21] Asowata 0, Swart J, Pienaar C. Optimum Tilt and Orientation Angles for Photovoltaic Panels in the Vaal Triangle [C]. Power and Energy Engineering Conference. IEEE, 2011 : 1-5.
- [22] 谢阳生. 基于GIS的太阳辐射模型及其实现 [D]. 中国林业科学研究院, 2001.

- [23] Tiwari G N, Ahmad M J. Optimization of Tilt Angle for Solar Collector to Receive Maximum Radiation [J]. Open Renewable Energy Journal, 2009, 2 (1): 19—24.
- [24] Benjamin Y. H. Liu, Assistant Professor. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: With design data for the U. S. its outlying possessions and Canada [J]. Solar Energy, 1963, 7 (2): 53—74.
- [25] Temps R C, Coulson K L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations [J]. Solar Energy, 1977, 19 (2): 179—184.
- [26] Hay J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces [J]. Solar Energy, 1979, 23 (4): 301—307.
- [27] Perez R, Stewart R, Arbogast C, et al. An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: Description, performance validation, site dependency evaluation [J]. Solar Energy, 1986, 36 (6): 481—497.

- [28] Klein S A, Theilacker J C. An Algorithm for Calculating Monthly-Average Radiation on Inclined Surfaces [J], Journal of Solar Energy Engineering, 1981, 103 (1): 29-33.
- [29] 吴贵辉. 中国能源形势及发展对策[J]. 能源与节能, 2011 (01): 10-11.
- [30] 张伯泉, 杨宜民. 风力和太阳能光伏发电现状及发展趋势[J]. 中国电力, 2006 (06): 65-69.
- [31] 孔娟. 太阳能光伏发电系统的研究[D]. 青岛大学, 2006.
- [32] 朱群志, 司磊磊, 蒋挺燕. 不同安装方式建筑光伏系统的经济性及环境效益[J]. 太阳能学报, 2012, 33 (01): 24-29
- [33] 沈义. 我国太阳能的空间分布及地区开发利用综合潜力评价[D]. 兰州大学, 2014.
- [34] 马高祥. 关于光伏电站系统优化设计的研究[D]. 西安建筑科技大学, 2015..
- [35] 雷延霞. 甘肃嘉酒地区光伏电站接入电网方案研究[D]. 华北电力大学(北京), 2016.
- [36] 朱飙, 李春华, 方锋. 甘肃省太阳能资源评估[J]. 干旱气象, 2010, 28 (02): 217-221.
- [37] 薛国斌. 甘肃某100MW 光伏电站接入系统方案研究[D]. 华北电力大学, 2015.
- [38] 朱宏静. 单晶硅电池转换效率及光伏组件PID 效应的分析[D]. 内蒙古大学, 2017.
- [39] 林伟. 多晶硅与单晶硅组件选型分析[J]. 电工技术, 2017 (06): 57-58+74.
- [40] 赵林, 韩晓亮, 侯俊强, 等. 光伏电站组件选型分析[J]. 太阳能, 2015 (12): 19-20.