



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

**基于图像阴影识别技术的光伏发电系统
局部阴影仿真模拟及故障诊断**

姓 名：秦琪伟

学 号：1432467

所在院系：机械与能源工程学院

学科门类：工学

学科专业：供热、供燃气、通风及空调工程

指导教师：许鹏 教授

二〇一七年五月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Engineering

**Fault Diagnosis and Simulation of Partial
Shadows in PV Systems using Image
Processing Technology**

Candidate: Qin Qiwei

Student Number: 1432467

School/Department: School of Mechanical
Engineering

Discipline: Engineering

Major: Heating, Ventilation and Air Conditioning

Supervisor: Prof. Xu Peng

May, 2017

基于图像阴影识别技术的光伏发电系统局部阴影仿真模拟及故障诊断

秦琪伟

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

光伏能源具有取之不尽用之不竭的特点，随着光伏材料成本的下降，光伏系统越来越多的用于人们的生活中。屋顶光伏系统缺乏专业的维护人员，在实际使用中，存在有光伏系统能源效率低寿命短等问题，其中局部阴影引起的功率损失和热斑现象是其中的主要因素。目前针对光伏系统的仿真研究多集中在正向工作状态，主要有单二极管四参数模型，单二极管五参数模型和双二极管模型。其中，四参数模型精度最低但是计算速度最快，五参数模型和双二极管模型在高光照强度下模拟精确度相似但是在低光照强度下，双二极管模型具有更加高的准确性。当电路中的某些电池处于局部阴影时，其工作状态将进入负电压状态。目前商用电池主要材料有单晶硅多晶硅和非晶硅，这三种材料的反向特性不尽相同。当电池处于负向电压状态，阴影区域和受阴影区域影响的电池不仅不会输出功率，反而会成为电路中的负载消耗电能。这部分电能转化为了热量加热电池造成局部升温现象，这就是所谓的热斑问题。当温度升高到一定程度时，会损坏光伏板结构造成光伏系统的寿命缩减。传统的热斑检测多从电路特性入手，有电容测量、电压测量、电流测量等诸多方法，这些方法需要大量的电路计量设施，成本较高。也有从总体数据和能量损失来进行热斑故障诊断的，这些方法有的算法复杂，有的无法准确判断故障位置。

因此，本课题针对光伏系统的局部阴影引起的热斑问题做深入探讨，目的在于利用监控系统和一些测量设备，采用图像技术结合模型计算的方法，建立一套完整的局部遮挡引起的屋顶光伏系统热斑问题的诊断方法，从而延长屋顶光伏系统的使用寿命和提高能源利用效率。

首先，本文从电学仿真开始，建立准确而又快速电学模型，考虑到正向工作模型只是本课题的一小部分，对其精度和运算速度都有较高的要求，因此综合考虑，拟使用单二极管五参数模型作为本课题电学模型的基础。其次，通过实验来测定本课题实验所用的光伏电池的反向特性。在建立反向电压模型之后，需要与之前的正向电压模型相结合，从而建立完整准确地光伏电池全电压模型。在电学模拟的基础之上，结合实验建立合适的光伏电池板热学模型，分析光伏板上最高温度的变化情况，根据一定的规则来判断是否存在严重的热斑情况。在明确需要判断的阴影特征之后，针对光伏板图像特征，采用图像处理来分割阴影。

所有模型均在 Matlab-Simulink 平台上运行以方便模型之间的兼容和操作。

关键词： 热斑，光伏系统，局部阴影，图像识别技术

ABSTRACT

The solar energy is sustainable and with the decreasing cost of photovoltaic material, more and more PV systems have been used in our daily life. However, in practical usage of roof-top PV systems, the short life cycle and low energy efficiency are the two main problems. The power loss and hot-spot caused by partial shadows are the main causes.

This thesis will discuss the hot-spot problem caused by partial shadows. The first step is to create an accurate model to describe the electrical characteristics of PV cells and PV arrays. In the base of electrical models, the thesis will build a thermal model of PV arrays in respect to the reality. The thermal model is aimed at analyzing different results caused by different types of shadows. Finally, this thesis will use image processing to detect the partial shadows in PV arrays. Most of the research on PV systems are in the electrical characteristics in positive voltage. The main three models are four-parameter single diode model, five-parameter single diode model and two-diode model. The four-parameter single diode is the simplest one, it has the fastest calculating speed but lowest accuracy. The five-parameter single diode model and the two-diode model have nearly same accuracy in high solar radiance cases but the former one is faster. When cells are in shadows, they will work in negative voltage. Nowadays, there are three materials for commercial PV materials. They are single crystal silicon, monocrystalline silicon and noncrystalline silicon. They share different characteristics when working in negative voltage. Traditional hot-spot diagnosis study in the electrical characteristics such as the change in current, voltage or power loss of PV arrays, these methods need numbers of electrical audit installations. Some methods use data analyze or energy loss to make the diagnosis, some of them may be complex, some of them cannot locate the location of hot-spot.

This thesis is based on noncrystalline silicon. Considering the speed and accuracy, this thesis will take the five-parameter single diode model as the basic of electrical PV model. With the data from experiments, the article will create a model for negative voltage model and combine it with the positive model. Finally, we get the the whole voltage electrical model of PV array. After having the accurate electrical model, it should build a thermal model to analyze the rising of temperature in PV array. The thesis will make some rules to judge if there exists dangerous hot-spot phenomenon.

Finally, This thesis will analyze the source of partial shadows. By using image processing, it can separate the location of shadows and at last detect the partial shadow.

All the models are in the platform of Matlab-Simulink.

Key words: Hot-spot, PV systems, Partial shadow, image processing

目录

摘要	III
ABSTRACT	IV
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与研究意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究目的及意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 光伏系统及其仿真研究现状	3
1.2.2 光伏板局部阴影以及热斑检测研究现状	5
1.2.3 阴影分割问题研究现状	6
1.2.4 存在问题与思考	9
1.3 主要研究内容	9
第 2 章 光伏板阴影的图像检测	12
2.1 数字图像成像基本原理与光伏图像的数学特征	12
2.1.1 成像原理与三原色、灰度等基本概念	12
2.1.2 均匀光照条件下光伏板图像的数学特征	13
2.1.3 不均匀光照条件下光伏板图像的数学特征	14
2.2 光伏板图像处理和阴影分割	16
2.2.1 灰度阈值分割法与缺陷	17
2.2.2 灰度边缘检测与噪声分析	21
2.2.3 形态学膨胀、腐蚀与重构	23
2.3 本章小结	28
第 3 章 屋顶光伏系统电学分析与模拟	30
3.1 光伏电池正向电压工作状态模型	31
3.1.1 标准实验条件下的参数确定	31
3.1.2 光照与温度修正	34
3.1.3 SIMULINK 光伏电池模块与光伏板模拟	36
3.1.4 模型模拟与厂商数据比较	37
3.2 局部阴影遮挡情况下光伏电池状态	38
3.2.1 电路定性分析	38
3.2.2 反向电压情况下电池伏安特性曲线	40
3.2.3 不同遮挡情况阴影区光伏电池模拟及模型建立	42
3.3 本章小结	44
第 4 章 光伏板热学模型	45

4.1 光伏平板导热问题的简化.....	45
4.2 光伏板热学模型构建与模拟参数的选定	46
4.2.1 二维平板导热的描述方程组及参数设置	47
4.2.2 MATLAB PDETOOLBOX 模拟工具	48
4.3 本章小结	49
第 5 章 光伏板电热学实验与模型验证.....	51
5.1 实验平台与实验设计	51
5.2 实验结果与模型验证	53
5.2.1 均匀光照下光伏板电学实验与模型验证	53
5.2.2 局部遮挡下的光伏板电学实验与模型验证	55
5.2.3 局部遮挡下的光伏板热学实验与模型验证	59
5.3 本章小结	62
第 6 章 不同类型遮挡模拟分析	63
6.1 阴影的分类及其对光伏板温度的影响	64
6.1.1 阴影影响系数定义	64
6.1.2 全电池完全遮挡阴影影响模拟	64
6.1.3 半电池遮挡阴影影响模拟	71
6.2 本章结论	75
第 7 章 研究结论与展望	78
7.1 本文主要成果与结论	78
7.2 本文局限性、创新点和展望	79
致谢	81
参考文献.....	82
附录	85
附录 A 完全遮挡不同列数情况下电池板功率损失与阴影影响系数模拟结果	85
A.1 G400T55FX 功率损失与阴影影响系数模拟结果表	85
A.2 G600T55Fx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表	85
A.3 G800T55Fx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表	86
A.4 G1000T55Fx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表	86
附录 B 完全遮挡不同列数情况下阴影电池总热功率和单位热功率模拟结果	87
B.1 G400T55Fx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表	87
B.2 G600T55FX 功率损失与阴影影响系数模拟结果表	88
B.3 G800T55Fx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表	88
B.4 G1000T55FX 功率损失与阴影影响系数模拟结果表	89
附录 C 半遮挡不同列数情况下阴影电池总热功率和单位热功率模拟结果	89
C.1 G400T55HX 功率损失与阴影影响系数模拟结果表	89

C.2 G600T55HX 功率损失与阴影影响系数模拟结果表	90
C.3 G800T55HX 功率损失与阴影影响系数模拟结果表.....	90
C.4 G1000T55HX 功率损失与阴影影响系数模拟结果表	91
附录 D 半遮挡不同列数情况下阴影电池总热功率和单位热功率模拟结果	92
D.1 G400T55HX 电池总热功率与单位热功率模拟结果表.....	92
D.2 G600T55HX 电池总热功率与单位热功率模拟结果表.....	92
D.3 G800T55FX 总热功率与单位热功率模拟结果表.....	93
D.4 G1000T55FX 总热功率与单位热功率模拟结果表.....	94
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	95

第1章 绪论

1.1 研究背景与研究意义

本课题主要研究局部遮挡带来的建筑用屋顶光伏系统的热斑问题，主要涉及图像识别技术，光伏系统模拟和热学传导问题。

1.1.1 研究背景

中国人口与经济的飞速增长，带来的是能源的供需紧张。2013 年底，中国发电设备的总装机容量达 12.5 亿千瓦，居世界第一^[1]。但是用电高峰期间的电力供需紧张问题一直存在，即使在夏季气候较温和的 2014 年，上海市依然存在较大的电力供应缺口。

解决能源供给矛盾一般有两种方式——开源与节流。需求响应、各种节能建筑材料的开发、能源系统的优化可以解决一部分的能源供给问题。但是如果找到一种取之不尽用之不竭的能源，则似乎可以一劳永逸的解决问题。

传统的化石能源面临环境污染大以及日益枯竭等众多问题，根据国家能源局《2017 年能源工作指导意见的通知》，2017 年非化石能源的消费比重需提高到 14.3%左右。^[2]

太阳能资源由于其取之方便且几乎没有对环境的副作用而备受青睐。我国太阳能资源丰富，年日照数两千小时以上地区几乎占国土面积的百分之六十。每年中国陆地国土所接受的太阳辐射能，如果能够完全利用的话，其能量相当于几万个三峡发电站的发电量。

光热、光伏和光化学利用是目前太阳辐射能的主要利用形式，光伏发电以其零排放、低污染、便携等优点成为太阳辐射能的主要利用形式。根据统计，虽然 2010 年光伏设备的发电量占全世界能源的很少的比例，但是预计 2035 年，光伏设备的发电量将是 2010 年发电量的 26 倍，从 32TWh 到 846TWh，总装机容量将从 2011 年的 67GW 成长到 600GW。^[3]

截止 2017 年，中国仍有 832 个贫困县，其主要特点是交通不便基础设施落后，而中国农村的用能水平一直呈现有人均耗能低，能源利用效率低污染大的特点。为此，国务院开展了光伏扶贫专项作为精准扶贫的重要手段，在 2016 年的光伏扶贫工作中，村级电站占据了 2.18GW，集中式占据了 2.98GW。^[2]

评价任何一个新能源系统是一个比较复杂的事情，其中投入产出比以及成本

回收周期是一个非常重要的指标。而影响投入产出和成本回收周期的两个重要因素，一个是系统的使用寿命，另外一个为系统的能源效率。

光伏系统的安全与效率一直是社会关注的问题，尤其是家用或者小型屋顶光伏系统经常由于操作者的不当操作，设计的不规范造成的局部遮挡等问题一直影响建筑用屋顶光伏系统的使用。

现阶段，光伏板由于技术限制，其理论能源效率不会超过百分之三十，目前光伏板的能源效率在 15%-25%之间。但是光伏组件会由于制造的问题，连接组件之间的问题，发热的问题，老化的问题造成组件的能源效率下降。

一般的，商业光伏组件质保分为两类，一类是产品质保，一般为 10 年，另一类为发电量质保，一般为 25 年。局部阴影造成组件的受热不均会造成表面褐斑，电栅极线老化能源效率下降等，都会影响光伏板的使用寿命从而影响资本回收时间，加大光伏推广难度。

阴影遮挡是造成光伏系统能源效率下降的主要原因，局部阴影造成了串联组件中的组件状态不一致，从而造成了不匹配。处于阴影状态下的电池组件不仅不会输出电能，反而消耗能量。百分之九十的光伏系统效率问题都是由局部阴影引起。与此同时，阴影状态下的电池由于电流热效应将会过热而造成局部温升，局部温升造成光伏板应力不均影响光伏板结构影响寿命。若温升超过一定条件，过高的温度可能损坏电极栅线甚至引发火灾。

此外，局部阴影遮挡会造成光伏系统的工作点偏移和跳跃，从而冲击电网，造成电网的不稳定。因此，在光伏系统的使用过程中，规范安装行为，规范使用行为以及一个即时的阴影检测和热斑预测系统是十分关键的。

太阳光可视为均匀光源，太阳辐射能量又主要集中于可见光，因此可见光的数字图像包含了大量信息。处于均匀光照的光伏板的数字照片应该是一幅较为均匀的图片，如果光伏板上有阴影，则该光伏板的数字图片是有许多特征信息的，通过图像技术可将阴影区域自动检测出来。

因此，利用太阳能光伏板的图像进行太阳能光伏板的局部遮挡和热斑预测似乎是可行的方案

1.1.2 研究目的及意义

论文的研究目的在于，针对建筑用屋顶小型光伏系统的局部遮挡问题，利用监控系统或者成像设备，构建局部阴影的诊断和热斑问题的预测系统，保证光伏系统运行安全与高效率，延长使用寿命。

1.2 国内外研究现状

本课题涉及范围较广，涉及到光电技术、电路仿真模拟、图像识别技术以及热学模拟仿真。跨专业知识较多，在开始本课题研究前，首先要对国内外的研究现状进行初步了解，主要从光伏系统的仿真研究、热斑问题的研究以及阴影分割技术这三个方面着手。

1.2.1 光伏系统及其仿真研究现状

1839 年，法国物理学家 A.E. 贝克勒在贵金属电极研究的试验中意外发现了光伏效应（photovoltaic effect）。1876 年开始了硒及其氧化物的光电效应研究并同时于 1880 年开始了第一批光伏电池的商业应用。而贝尔实验室研制的第一块实用晶体硅光伏电池则开始了现代太阳能商业应用的新时代^[4]。

与国外相比，我国对光伏发电技术的研究起步较晚，实际应用规模相对较小。1958 年我国太阳能光伏电池研究正式开始，并于 1971 年成功的在东方红 2 号卫星上应用光伏电池，1973 年开始光伏电池的地面应用研究。新世纪初，受国外市场巨大需求的影响，国内光伏企业的产能迅速扩展，产量迅速增长，对光伏电池和光伏系统的研究也受到了越来越多的研究人员的关注^[5]。

光电池是光伏系统的基本组成单元，目前商业光伏电池的材料主要有单晶硅、多晶硅、非晶硅^[6]。单晶硅光电转换效率最高可达 24.7%^[7]，制作单晶硅材料成本较高，多晶硅材料具有与单晶硅材料相似的电学与机械性能但是成本确实单晶硅材料的一半，其电池效率已经突破 19.8%^[8]。但是无论单晶硅多晶硅，为了保证太阳能电池板的材料一致性，这两种材料都不能做的太大，因此商业单晶硅和多晶硅材料都不能做的太大，一般规格为 125mm*125mm 和 150mm*150mm 两种。非晶硅材料在可见光的频谱段有较高的吸收利用率，且制作过程的能耗较低，厚度较小便于自动化生产。非晶硅材料的优势在于成本较低，制作环保且电流密度小不易产生热斑，非晶硅电池片可以任意改变大小，因此其形态可不受限制。缺点在于其能源效率利用低^[8]。

从光伏系统的发展和推广的角度来看，光伏系统存在初投资大，成本回报时间久等缺点。其主要问题在于两个方面：一个是成本问题，一个是能源利用效率问题。前一个问题材料的研制问题，本课题不会研究这一方面，另一个是能源利用效率问题，提高能源利用效率既可以从材料性质入手，也可以从实际的使用策略上进行研究。

本课题主要研究的是在实际使用过程中由于操作不当或者设计不规范等引起的热斑问题，其主要包括电学偏差和热学偏差。其中建立准确的电学模型是基

础, 其主要包括处于正向电压的光伏电池的模拟和处于反向电压下的光伏电池的模拟。

光伏电池的模拟电路基本都是基于二极管的方程推导而出, [9]目前的数学模拟主要有两大类模型: 单二极管模型和双二极管模型, 其中单二极管模型又分为四参数模型和五参数模型, 这三种模型的等效电路图如图 1.1 所示。

从模型的精度上来看, 双二极管模型与单二极管五参数模型在高太阳辐射强度下精度较高^[10], 计算速度方面, 四参数模型的计算速度最快, 五参数其次, 双二极管模型由于参数较多, 计算速度较慢^[11]。考虑到本课题的实际情况, 拟采

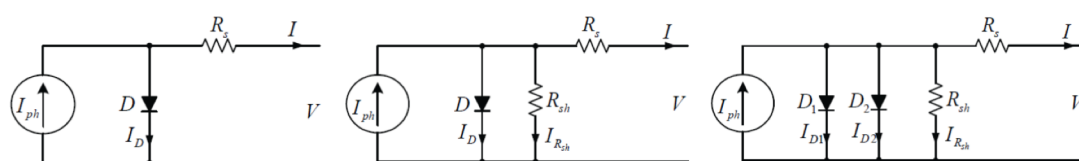


图 1.1 光伏电池的三种等效电路图: 1) 单二极管四参数模型 2) 单二极管五参数模型 3) 双二极管模型

取单二极管五参数的模型。

单个电池的输出电压有限, 一般为 $0.5V-2V$ ^[12], 为了充分利用这些电池, 需要将若干个电池串联或者并联起来形成光伏电池板并进一步形成光伏阵列, 一般的厂商不会给出单个电池的技术参数而是给出整个光伏电池板的电流电压。刘刚等^[13]提出了两类模型, 设计手册模型和工程应用类型并对这两类模型进行了优缺点分析。张建坡, 张红艳等^[14]提出了太阳能电池模型, 并根据太阳能阵列的 I-V 曲线制定了最大功率点的运行策略。

综上所述, 自从光伏板商业化应用以来, 国内外均对光伏系统的运行仿真模拟进行了较为深入的研究, 这些文献或从物理角度去分析光伏板的发电原理^[15], 或者从数学建模结合实验数据进行光伏电池的数学模拟^[16]。

三种常用的光伏电池材料在正向工作时, 电流电压关系曲线都是较为相似的, 而光伏电池在反向工作电压情况下时, 不同材料的电流电压曲线有显著地不同。^[17]光伏电池主要材料为硅, 与二极管的结构类似, 同样具有 P-N 结, 因此也有与二极管类似的反向特性和雪崩击穿现象^[18]。

本课题研究局部遮挡引起的热斑问题, 建立准确的反映任意情况下的光伏电池板运行的电学模型是所有其他模型的基础, 虽然在过往的研究中已经多种针对光伏系统的仿真模拟, 但是需要研究出适合于模拟局部阴影的光伏电学模型。

1.2.2 光伏板局部阴影以及热斑检测研究现状

光伏阵列的主要障碍为：1) 光伏电池片本身的损坏；2) 电池片之间的连接组件如电线、逆变器等损坏；3) 局部遮挡引起的局部阴影。^[19]

当光伏板由于积灰，建筑物间的遮挡或者光伏板之间的遮挡等问题，造成光伏板里有部分电池处于无光照情况，这就导致了这部分电池处于负向工作状态。负向工作状态的电池片由于电流的热效应导致了以下几个后果：其一是消耗了其他正常光伏电池片发出的大量能量，这就导致了总体能源输出的效率偏低；其二，光电输出的电流电压曲线会出现“多峰”现象，导致控制系统的混乱，对于并网系统产生冲击；其三，电热效应产生的局部电池温度的升高。光伏板的理论寿命为 20-30 年，^[20,21]局部阴影造成的局部遮挡严重影响光伏板寿命，主要表现在：这部分引起局部材料的膨胀从而张力不均匀损坏结构，同时温度过高可能导致材料的损坏及其他附带的安全问题^[22]。

德国的 1000-roofs-PV-Programme 汇集了从 1990 年开始的德国屋顶光伏系统的使用情况，指出了局部阴影是光伏系统效率降低的主要原因。A.Woyte, J.Nijss 和 R.Belmansa 等在比较了不同的光伏系统在局部阴影条件下的一些关键电路参数的实验结果之后，发现局部阴影遮挡可能会显著减少光伏电池的能量产出，智能电网中的光伏系统能量损失主要是由于局部遮挡引起^[23]。

局部阴影故障的诊断有很多方法，总体总结来说分为两大类：1) 从遮挡状况来分析；2) 从引起的后果来分析。

首先是从遮挡状况的情况来分析不同阴影引起的不同后果：

Dezso Sera, Pedro 等学者在研究中发现，由于光伏板结构的特殊性，不同阴影遮挡对于相同的光伏电池板有着不同的影响，他们将遮挡的情况分为五类：a、阴影大小为板面积的 0.1%，百分之百全遮挡，位于一个电池组的中央；b、同一面积，同一遮挡率，位于两个电池组的交界处；c、同一面积，同一遮挡率，位于四个电池组交界处；d、完全遮挡两个电池块，但是这两个电池块属于不同电池组；e、遮挡方式同 d，但是属于相同电池组。根据这样的分类可以归纳出不同的电路特性曲线^[24]。

该学者针对的是多晶硅太阳能电池板的局部遮挡问题，该材料与非晶硅材料电池的形态、电路属性不同，但是其研究方法值得借鉴。

其次，也可以从局部遮挡引起的电路变化来分析，主要是电流变化和功率的变化：

从电路的角度来说，局部阴影遮挡造成了串联组件之间的不匹配，针对这一类故障，T. Takashima 采用电容值的方法来对光伏阵列的串联组件进行故障诊断。这种方法在串联的每一个支路都进行电容测量，可以准确的判断出现问题的串联

H. Patel 等人在 Matlab 平台下, 在分析了局部遮挡条件下光伏板电流电压关系和功率电压关系的变化情况, 根据局部阴影遮挡会导致光伏系统最大功率点的变化这一特性, 提出了根据最大功率点进行阴影诊断的方法^[26]。

局部阴影会引起光伏板整体输出的能量损失, A. Chouder 等利用这一特点, 在量化分析的基础上判断局部阴影的发生情况^[27]。

在准确建立正常条件下运行的光伏模型的条件, S. K. Firth 等人基于采集的数据, 利用数学分析方法分析数据。将故障分为四种类型: 1) 长期功率零输出; 2) 短期功率零输出; 3) 局部阴影引起的局部遮挡; 4) 无阴影情况下的低功率输出。他们在分析数据特征的基础上, 将故障分类, 最中发现大部分的住宅光伏系统的能量损失均来自于以上四类^[28]。

周俊冬, 马明均通过对比不同光照条件下局部阴影条件下的光伏系统输出曲线, 发现当阴影面积超过原电池板面积的一半之时, 光伏功率显著下降, 不到原最大功率的 1%^[29,30]。

以上方法均是从电路特性来分析, 主要特点是原理简单, 但是需要大量的数据计量器如电流表等。T. Takashima 等人的方法可以快速判断故障发生的位置, 但是需要大量的电路计量器。其他方法均是利用功率损失方法来判断局部阴影是否存在, 这些方法无需大量的计量器材, 但是无法判断故障发生位置。

局部阴影遮挡引起的后果除了功率损失之外, 另外一个较为严重的是热斑问题, 前文提出过, 热斑问题也是因为电池的热效应引起的电池板局部温升的情况。当单个电池板上的负载超过 20W 时, 会发生热斑情况。^[31]但是这个功率只是针对单晶硅多晶硅等电池, 不同材料的电池形态形状等不一样, 热斑问题归根结底是电池温度过高导致材料损坏, 因此笼统的使用电池功率来判断热斑问题虽然简单, 但是没有说服力, 需要建立热学模型。

在国内外的研究中, 也有学者想到了利用光伏板上的温度分布来判断热斑问题, 例如杨维翰, 王培珍, 周雷等提出了基于红外图像分析的故障诊断方案, 此方法将正常工作条件下的光伏板和在局部阴影条件下的光伏板的温度进行对比, 通过温差分析, 然后根据他们的红外图像来进行分析。此种方法不能区分温度相差不明显的状态, 红外图像的背景噪声大, 干扰大难以实施^[32]。

1.2.3 阴影分割问题研究现状

谈到局部遮挡引起的阴影问题, 首先想到的就是如何把阴影提取出来, M. Karaköse, M. Baygin 提出可以将阴影检测的结果作为光伏系统模拟的输入参数^[33]。

本课题拟采用可见光图像进行阴影检测，主要优点如下：

1) 设备简单，普通的手机拍摄图像即可满足要求；

2) 相较于红外线图像，环境的变化对图片质量影响不大。实际上，环境对可见光图像的影响仅仅是在环境光照强度上，而一般的光伏电站都会带有光照强度的测量装置，这方面的变化可以通过其他的测量方式补足。

3) 阴影发生到热斑发生时会有 10-15 分钟的反应时间，可见光图像诊断可以在阴影一发生就通过计算判断出来，留给维护人员的时间较多。

基于可见光图像技术的阴影分割重点在于阴影的性质。阴影的出现会给目标物的提取带来一定的困难，尤其是动态目标的提取，因此阴影分割是一个非常重要的课题。从国内外研究进展来看，虽然将图像技术应用于光伏板上的案例较少，但是，阴影分割的问题已经有多人研究过。阴影分割技术主要有两大分支：第一类是基于时间序列的视频图像的动态目标识别，第二类则是单幅图像的静态分割。前者是利用帧差进行目标识别，利用这类技术进行图像识别的图像主要特点是图像变化较快，背景差异小，易于分割。第二类相对较难，是静态图像分割，这一类技术对于不同的图像有不同的处理方法，主要有分水岭算法，梯度边缘检测等，同时也要根据图像的特征选取适当的噪声去除方法。

光伏板系统的图像相较于其他图像有以下特点：

1) 图像结构单一，元素重复高易于识别异常区域；

2) 光伏系统处于自然环境下，光源可视为均匀光源，相同条件下，光源对不同位置的像素影响较小，相对于单光源情景，阴影的不确定性降低。

3) 一般情况下，遮挡目标本身不会出现在图片中，这样就不需要对象分割，阴影区域的结构也比较单一。

4) 光伏板的图像变化较缓慢，但是环境光照随时间变化较大。

综上所述，动态阴影识别不适合于本课题。本课题将采用第二类方法。这就涉及到计算机视觉问题。

视觉是人类认识世界的主要途径，70%的信息都是人类通过眼睛的观察而得到的。例如，在驾车时，人类可以通过眼睛接收到信息来避免与他人或者其他汽车相撞；一个视觉正常人可以轻易的分辨台阶或者道路的边缘；一个经过训练的人可以通过分辨字母或文字来获得抽象的信息。

计算机视觉是一个新颖的仿生科技，利用计算机的识别技术可以从大量的图片中分辨一些目标，从而节省大量的人力物力。例如显微图像的区域识别可以进行细胞计数从而诊断癌症，小区监控系统的车牌识别或者某些高级的监控系统的人脸识别和虹膜识别也是计算机视觉的一种运用。计算机图片也可以根据图片源不同分为多个种类，如全息数字图片（相干光源图片），自然光源图片（普通数

码图片) 以及其他例如, 红外光源图片, 超声波图片等等。

检测光伏板的局部温升最简单的方法就是测量光伏板上的每一个点的温度, 采用热电偶的测点分布方法显然不现实。而红外线测温仪似乎可以做到短时间测得板上的温度场分布, 王培珍^[32]利用太阳能电池板的红外线图像特征, 提取光伏板局部温升的位置, 达到热斑定位和诊断的目的。该方法有两个缺陷: 1) 红外线图像的噪声较大, 主要原因是周围环境温度的变化会影响红外图像的质量, 同时由于光伏板制作中有大量的电栅极线和空隙, 这些都会带来局部温差影响图片检测。2) 使用该方法的前提是已经发生了热斑或者局部温升的情况, 然后再用该法进行检测, 这样给维护人员的反应时间已经比较短了。太阳光的主要能量集中在可见光段和红外光段, 而太阳能电池板主要吸收的能量来自于可见光段, 太阳能板反射的光可以视作和入射光成线性关系, 因此太阳能光伏板的图像可以反映光伏板表面的光照分布情况。

阴影包含了大量的信息, 遮挡物的形状以及光源强度等等。自动提取阴影信息就涉及到计算机视觉技术, 利用图像或图像序列获取对目标区域的描述。其中有许多针对阴影分割的算法^[34,35]。

阴影检测根据不同的目的有不同的方法, 例如车辆检测中的动态阴影检测问题^[36]。

图像检测技术是一个庞大的体系, 首先分析光伏板图像的基本特征, 在均匀光照情况下, 光伏板图像表面灰度值分布均匀, 表面纹理呈现一定规律性。带有阴影的光伏板, 阴影边缘处的灰度值变化较大。光伏板所处环境变化较小, 一般为静态图像。因此, 重点研究的是静态阴影成像技术。

静态阴影检测主要根据阴影特性来进行分类^[37], 图像中的阴影颜色的表征与其他太阳光直射区域的颜色特征不一样, R. Cucchiara 等人利用 HSV 色彩空间的变化来分割动态目标的阴影^[38], A. Cavallaro 等利用 nRGB 色彩来进行阈值分割^[39], 其他也有根据 Yuv^[40], 也有根据物理参数等进行阴影检测^[41,42]。

Andrea Prati 等人对现有的阴影检测方法进行了更详细的分类, 大致为基于统计的方法和基于确定性的方法, 而其中基于统计的方法又可以根据参数的特征分成有参数方法和无参数方法^[43]。

Weiss^[44]通过对比不同光照背景下同样反射系数的图像, 分析不同背景光对图像整体的影响, 从而分割出阴影区域, 得到原图像。

Tappen^[45]等利用了灰度、色彩、目标表面的三维构成等多种线索来训练分类器, 而后使用置信度传播的方法对模糊区域进行修正, 最终获得阴影区域。Wu 和 Tang^[48]提出了一种基于贝叶斯统计的方法, 来获取无阴影图像, 获得了较好效果。但这一方法需要人工干预, 在对图像进行处理的过程中, 需要由人工标注出

阴影区域、非阴影区域、不确定区域和由于光照形成的在目标物体背光面的附属阴影区域，大大限制了应用范围。

在阴影分割的算法中，最常见的是阈值分割方法，二值阈值分割法的关键在于灰度阈值的选取，其中比较常见的三种常用分割方法为 Ostu 法^[46]、最大熵法、最小误差阈值法。这三类方法本质上是基于统计的方法，其实每一个图像都是一个数据库，里面记录了每一个像素的信息，这些信息就构成了一个或者多个统计样本。

1.2.4 存在问题与思考

目前，将可见光图像技术放在光伏板的阴影检测上较少，主要原因在于学者更加关注的是局部遮挡引起的功率损失问题，大部分的局部阴影检测方法都是利用功率损失或者电路变化来进行诊断。这类方法要么需要大量的计量设备，要么计算方法复杂，或者难以迅速判断故障发生的位置。

局部阴影引起的热斑问题虽然发生条件较为苛刻，但是无论什么样的遮挡都会影响到电池板的寿命，利用局部阴影会引起太阳能光伏板的局部温升这一特点，可以考虑使用红外线成像仪来判断温度分布情况。但是，红外成像仪成本较高且图像噪声大，当温差较小时也无法侦测，而温差大时，说明光伏板热斑已经发生。

从目前的研究情况来看，使用可见光图像进行阴影侦测不仅成本小而且检测结果也较为可靠，而将阴影状况作为光伏电学模型的输入参数也是可行方案。而正向光伏电池模型和负向光伏电池模型的研究也是较为成熟。

现有的针对热斑的研究多集中在电学部分，热学部分的研究较少。I.Geisemeyer 等人综合了材料属性等等提出了一些关于光伏电池板的导热模型并结合实验做出了一些预测^[47]。

将这些成果全部结合起来，似乎可以建立一整套的热斑侦测体系，输入参数为光伏系统的检测设备所拍摄的图像，太阳光照强度测量仪等，经过几个模型运算判断热斑发生的情况。

1.3 主要研究内容

本课题主要涉及到屋顶光伏系统的电学分析，光伏板表面的传热学分析和光伏板图像阴影分割技术，基于前人对光伏系统运行情况，故障诊断方法，传热导热模拟和图像阴影识别技术等方面的研究经验、方法和结论，以及已有的实验平台条件，学习和借鉴国内外的研究成果，结合跨专业的知识，克服已有的热斑故障诊断方法的不足，建立一套新的热板故障预测系统，其主要方法是利用已知的

输入参数和厂商数据建立电学模型，热学模型和光伏图像识别模型，然后结合实验数据和实际运行的阴影图像，验证模型的可靠度，最后推广到任意工作情况下，完成完整的热斑故障预测系统，主要研究内容如下：

1) 根据给定的温度、光照强度等环境参数，研究光伏系统的伏安特性数学特征，建立正确的光伏系统运行模型，该模型应能快速准确计算出给定状态下的光伏板整体伏安特性曲线以及每一块电池上所消耗的热功率。

2) 根据传热学知识，适当简化复杂的环境和光伏结构参数，建立正确的光伏板导热模型，该模型需要根据 1) 中所建立模型输出的每块电池的热功率，根据环境参数给出一定时间后的光伏板温度分布情况，并进一步分析诊断热斑。

3) 基于普通照相设备所拍摄的标准化的光伏板表面成像状况，分割光伏板表面阴影情况。主要做到能够根据给定的太阳辐照仪参数和图像，给出太阳能组件每一块电池表面的光照情况，作为模型 1) 的输入参数。

本课题具体工作为：

(1) 首先是通过实验分别获得处于均匀光照下的电池板的伏安特性曲线以及处于不同阴影状态下的电池板伏安特性曲线，并获得处于各种光照情况下的数字图片以及光照区，阴影区的光照强度。

(2) 在实验和厂家信息的条件下，建立合适的光伏电池电学模型，继而发展为全光伏板电学模型。该模型可以做到输入板上的光照信息，输出各个组件的伏安特性状况以及所消耗的热功率。

(3) 电学模型输出了各个电池的热功率，在此基础上，建立一个二维板的传热模型，计算随着时间的推移电池板上的最高温度，从而判断热斑是否会产生。

(4) 利用图像技术，建立阴影检测与分割模型，可判别有无阴影，阴影形状与位置。建立图像阴影分割模型。

主要技术路线图如图 1.2:

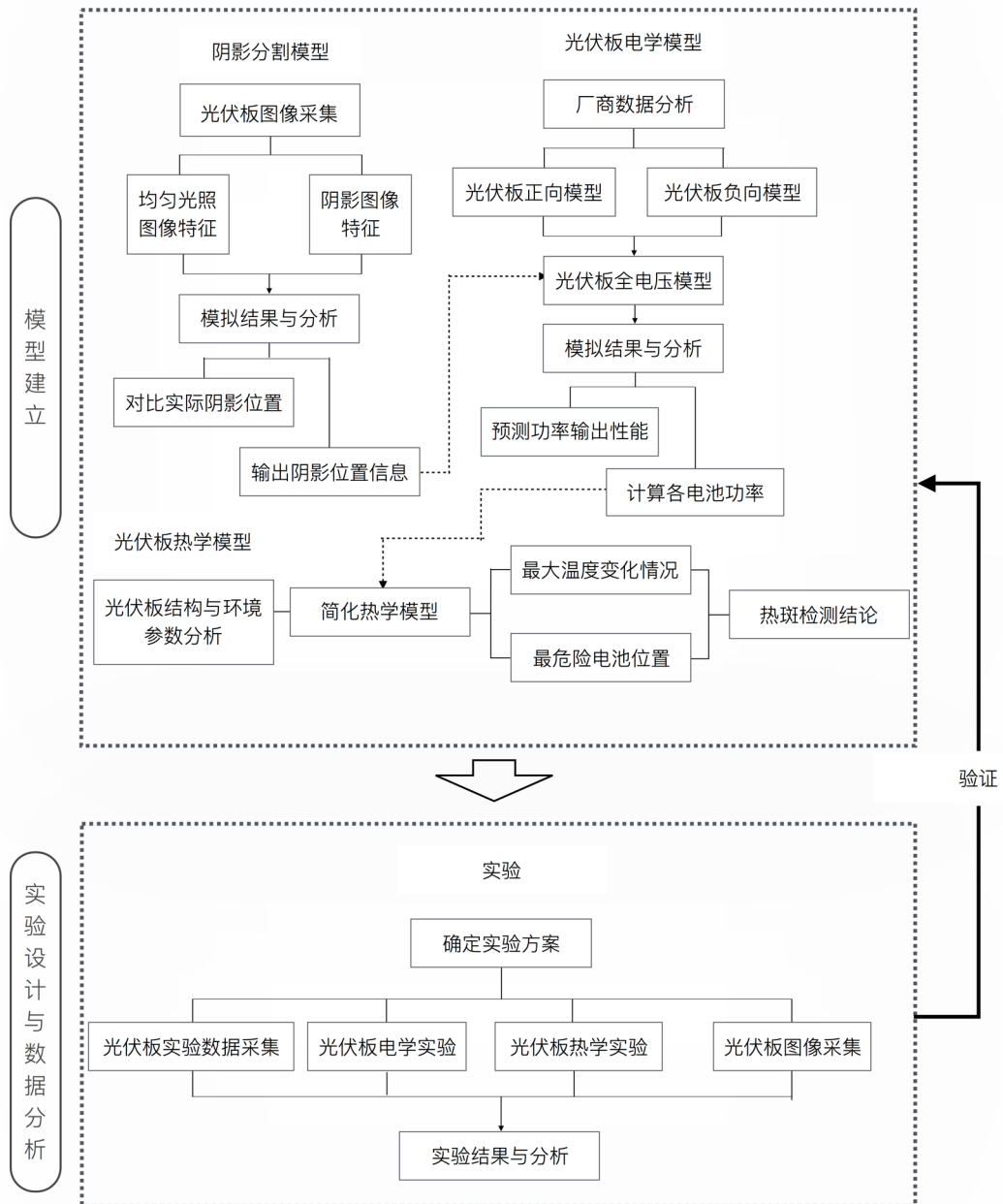


图 1.2 技术路线

第 2 章 光伏板阴影的图像检测

目前光伏板热斑诊断多数是基于能量损耗或者是电路测量的方法,前者是基于整体的功率损失来进行阴影故障的判断,该方法计算较复杂但是错误率较低,缺点是无法判断阴影发生的位置,一旦阴影发生只能采用断短路的控制策略,这样使得即使是小阴影也会造成一组光伏板不再进行工作,同时即使将阴影区与正常工作的电池分割开,处于不均匀光照下的电池板块还是会出现内部小循环,这样的内部小循环会造成热斑。

电路测量的方式就是在光伏系统的每一个支路上加装电流计量装置,这样的方法带来的是费用随着电站规模的变大成几何级增长并且加装的电流计量装置本身也会影响光伏系统整体的能源利用效率。

而利用可见光图像技术,不仅成本较低而且可以通过计算快速预测光伏板的温度升高情况,在热斑未造成严重事故前就进行维护,提高光伏板的寿命。

本课题考虑极端情况暨认为阴影部分的光照强度为 $0\text{W}/\text{m}^2$ 。实际情况是当太阳辐照很强时,环境光强也会变强,但是最大不超过 $150\text{W}/\text{m}^2$ 。由于照相机复杂的成像规则和传感器对不同色光的响应曲线为非线性,利用灰度值倒推阴影处的光强是繁琐和不现实的,因此本课题将考虑极端情况,直接将阴影区域的光强视为 0。

2.1 数字图像成像基本原理与光伏图像的数学特征

数字图像的基本原理是基于仿生学,而图像处理过程又是将图像信号处理为离散函数然后转化为数学问题,基本上采用的是统计方法或者无参数的逻辑计算等。

2.1.1 成像原理与三原色、灰度等基本概念

数字图像成像技术是典型的仿生技术,仿照的是人眼成像的原理。光线发射到反射表面后,通过刺激人类的视锥细胞形成神经信号,再经过大脑的处理后形成图像。

数字照相机则是利用电传感器将光强信号和频谱信号转换出来,形成数字图像。光线是所有成像的基础,也可以说是能量源,没有光线就不可能有图像。光的频率决定了光的颜色。

光线投射到不同表面上，一部分被吸收，一部分透射穿过目标，另一部分则反射回来。光伏板处于均匀光照下，也就是说入射光不随入射点地理位置变化而变化，所以光伏板上的每一个点的入射条件是一致的。光伏板由电池硅材料和电栅极线组成，电栅极线夹杂在电池片之中。本课题假设所有电池片表面性质一样，也就是说对入射光的响应是一致的，那么在同样光照条件下，所反射的光照分布也应该是一致的。但是电栅极线所形成的反射不一致，电栅极线所占面积较小且分布广，在后续的处理中视作噪声。理论上来说，去掉电栅极线的光伏板，在均匀光照条件下所拍摄的图片也应当是均匀的。

人类的视网膜有三种视锥细胞，其对于 380nm-780nm 波段的短、中、长具有不同的响应曲线^[55]，人类感知色彩就是这三种视锥细胞对于这三个波段的响应综合得到的结果。

相应的，彩色摄像机也有三个不同的色彩传感器，对于不同波段有不同的响应曲线，这样感光函数 $f_k(\lambda)$ 就具有了红、绿、蓝三个通道，分别对应三个波段的强度从而组成不同的颜色。

灰度图像是用黑白色来表示图像的一种方法，在黑白图像中，黑色的值为 0，白色的值为 255。在背景均匀的图像中，灰度值的大小一定程度上反映了亮度的大小，但是仅仅凭借灰度值是无法反向去推导光照强度的，其原因主要是每一幅图片拍摄时的照相机参数不一样。但是对于同一幅图像，可认为灰度值与光照存在某种线性的关系，在后文中将详细阐述。

灰度、红、绿、蓝三通道等的幅度都可以看做是关于位置的函数，自然界的反射表面一般都是连续的，因此幅度 f 是一个关于 (x,y) 的连续函数。但是实际上，由于传感器的限制，数字图像是一个离散的函数，是关于像素点的离散函数，表示为 $f(i,j)$ 。一般的，一幅图像包含了大于 100,000 的采样点，采样点数量越多意味着对目标的复原越精确。

2.1.2 均匀光照条件下光伏板图像的数学特征

一幅图像可以视为一个庞大的数据库，这个数据库记录不同位置的信息，这些信息往往庞杂但是会表现出一定的特征。这些特征往往会被一些噪声所覆盖，所谓的噪声就是影响我们提取目标像素的一些“异常值”，噪声可能来自于物体表面的不均匀性，或者照相机本身的问题。噪声去除有多种方法，例如滤波器、图像的重建、图形的转码或者一些形体的识别。噪声的去除也取决于噪声本身的性质，例如假设噪声为高斯白噪声或者一些均匀分布的噪声。

为了完成通过计算机自动识别和处理图像的目标，选择合理的表达图像数学特征的方式是非常重要的。自然界的图像千变万化，每一个图像都有自己的特征，

针对每一类不同的图像都有一定的处理办法,选择错误的处理方法会带来不同的处理结果。图 2.1 左边是三幅不同的图像,右边则反映了这三幅图像的灰度分布直方图,可以明显的看到这三幅图的数学特征是完全不一样的。

图 2.1 第一幅图整体色调偏白,因此像素点多分布于灰度值较大的区域;第二幅为近似渐变图片,频数发布直方图为近似均匀分布;第三幅图整体色调偏黑,因此像素点多分布于灰度值较小区域。

前文已经提到,光伏板处于均匀光照情况下时,由于光伏板表面结构单一,图像数学特征理论上应该是集中分布于某一个像素附近,图 2.2 是几幅处于均匀光照情况下的光伏板图像以及像素值的一维直方图,图中可以看出,图像的像素值主要集中在单个值附近。图 2.3 是灰度值随位置的变化情况,理论上应该是平滑的平面,但是实际状况是表面是在一定平面基础上有周期性的突起,这是因为电栅极线的反射响应与光伏材料不一样,但是相较于非晶硅表面,电栅极线的面积非常小,所以其对于整体的数学特征没有影响,但是对于接下来的边缘分割和阴影分割有巨大的影响,这意味着要首先去除这些“噪声”,当然在本课题中一旦判断光伏板处于均匀光照条件下时,是无需做进一步的图片处理的。因此,要首先判断光伏板的工作状态,那么就需要分析处于不均匀光照下光伏板照片的数学特征。

2.1.3 不均匀光照条件下光伏板图像的数学特征

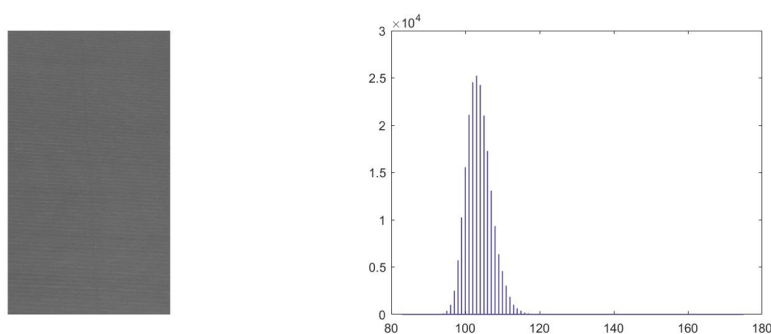


图 2.2 均匀光照状况下光伏板数字图像及其灰度分布直方图

所谓的不均匀光照条件，就是指光伏板上的光照由于遮挡等因素造成的处于同一串联组的电池上光照强度不一致。现实条件中，造成光照条件不均匀的主要因素是周围建筑的遮挡和一些如落叶、鸟粪等自然垃圾。这些自然垃圾与光伏板一般会产生非常明显的色差和差异，相对于遮挡物产生的阴影，这些自然垃圾比较容易检测出来。但是，阴影对于光伏板的影响可能没有自然垃圾来的严重，因为处于阴影状况下的电池通风良好而处于自然垃圾覆盖下的电池通风较差，此外即使处于阴影状况下，依然会因为环境散射光的存在而有一定的光照，这样与其他未遮挡电池的光照强度差将会减少，热功率下降。

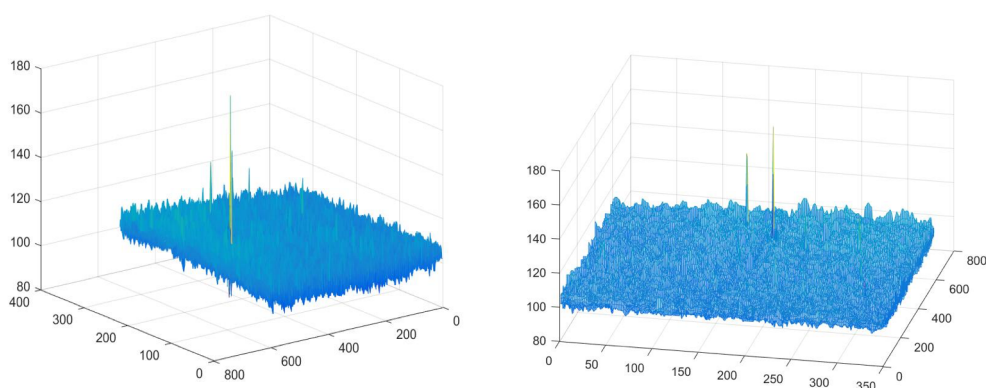


图 2.3 均匀光照条件下灰度值地理分布

介于大多数的不均匀光照由阴影产生而自然垃圾的图像识别相对容易，本课程着重研究阴影引起光照不均匀的图像分析。

如图 2.4 所示，处于不均匀光照条件下的光伏板图像和其灰度分布直方图，相较于均匀光照条件下的灰度分布直方图，带有阴影的图像其直方图有明显的“双峰现象”。这主要是因为阴影区域的灰度值远小于处于正常光照的灰度值，

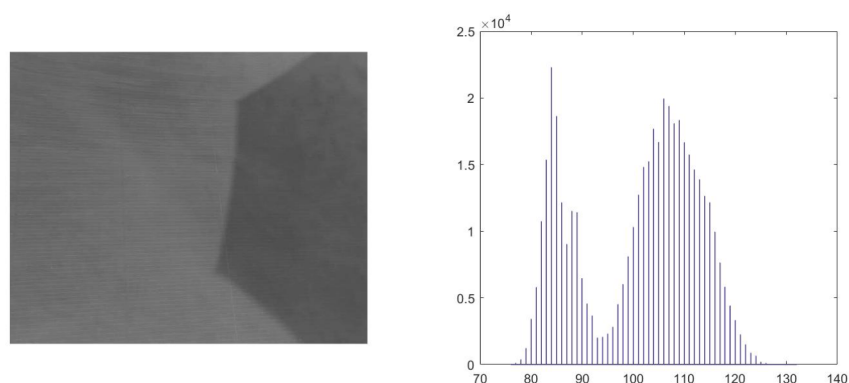


图 2.4 局部阴影条件下光伏板图像及其灰度分布直方图

也就是说阴影对于图像的主要影响在于其改变了灰度值的分布。

同时如图 2.5 所示，阴影部分的灰度值明显小于处于光照情况下的光伏板灰度值，其主要原因在于照射到阴影部分的太阳光被遮挡住了，图 2.6 是阴影形成的一个物理解释，本课题认为太阳照射源为平行光源，因此对于遮挡物存在的阴影，只存在本影，不考虑半影情况。

相较于均匀光照图像的数字特性，阴影图像出现了灰度分布直方图的双峰情况，且处于阴影区图像的纹理和颜色对比没有处于均匀光照下的图像明显。初步可考虑用灰度阈值来分割阴影与处于光照区域。

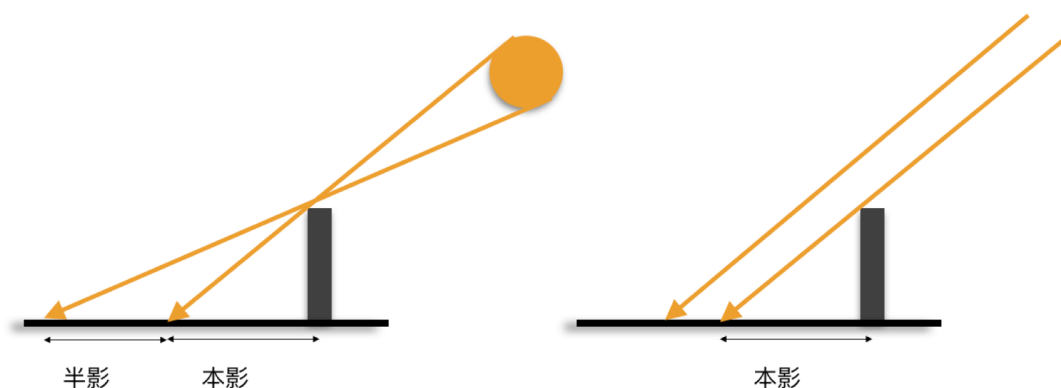


图 2.6 阴影的物理形成 左：点光源 右：平行光源

2.2 光伏板图像处理和阴影分割

阴影的介入使得图像灰度分布直方图上出现了明显的“双峰”现象，这主要是在太阳辐照强度较强的情况下，阴影区域的像素灰度值明显的小于处于光照条件下的灰度且阴影区域占有一定的面积，在数字图像上表现为一定数量的像素灰度值较低。使用二值灰度阈值划分似乎是最简单而且最容易理解的方法。2.3.1 节将着重介绍二值灰度阈值法。

二值灰度阈值划分法无法准确辨别小阴影和无阴影的情况，这就需要其他方法。我们的假设是光伏板表面为各向同性的漫射表面，这样处于均匀光照情况下的光伏板的图像应该是一个灰度值均一的图像。阴影区域与均匀光照区域的有明显的灰度差，从地理位置图上可以看出呈现“悬崖”式的断层，用数学的描述为此处灰度梯度非常大，如果我们对带阴影的光伏板图像的灰度函数进行全局求梯度，理想状况下，灰度梯度非常大的地方就是阴影区域与均匀光照区域的分界线，找到这条分界线就可以将阴影区与正常区域分隔开。2.3.2 节将着重介绍几个灰

度梯度算子和边缘检测方法。

由于电栅极线的存在，光伏板表面不是各向同性表面，在光照较大区域，电栅极线的灰度响应要明显高于其他区域的灰度响应，这样在每一个电栅极线的区域，都有一个非常大的梯度，这就对正常的阴影边缘产生了干扰。因此，为了分割阴影区域与正常光照区域，必须首先对图像进行预处理，主要是根据我们所定义的噪声的特性来去除噪音。这里的噪音与普通的由于仪器等其他因素造成的随机噪声不同，本章定义的噪声是那些可能干扰我们分隔阴影和正常光照区域的信号，主要是电栅极线的灰度响应值。2.3.3 将介绍针对这些噪声进行的图像预处理方法以及这些方法的组合。

2.2.1 灰度阈值分割法与缺陷

图像处理过程中，选择合适的阈值来将背景与目标分割开是非常重要的。前文提到，阴影的出现使得灰度分布直方图出现了双峰情况，理想状况下，灰度直方图在两个尖峰之间有明显的低谷情况，由于阴影部分的灰度值明显小于正常光照的灰度值，如果选择一个合适的灰度阈值进行分割，可将背景（处于光照条件下区域）标记为 1，处于阴影状况下的目标标记为 0。具体标记方法如下：

$$\begin{cases} g(i,j) = 0 & \text{if } g(i,j) < T \\ g(i,j) = 1 & \text{if } g(i,j) \geq T \end{cases}$$

其中 T 为灰度的划分阈值，二值阈值分割法的关键在于灰度阈值的选取，其中比较常见的三种常用分割方法为 Ostu 法^[46]、最大熵法、最小误差阈值法。其中 Ostu 法是较为常见的灰度阈值划分方法，由日本学者大津展之首先提出的，利用两类之间的方差最大或者同类之间方差最小的方法，在大多数情况下有良好的效果。

首先对给定图像的灰度值进行分级，分级数为 L，这样对应每一级的像素数量为 $n_1, n_2, n_3 \dots n_L$ ，像素总数量为 $N = \sum_{i=1}^L n_i$ 。分级之后，我们可以把整个灰度分布直方图视为一个未知的概率分布图，取出任意一个像素，他落在 i 级上的概率为： $p_i = n_i/N$ 。于是有：

$$p_i = \frac{n_i}{N}, \quad p_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^L p_i = 1 \quad (2.1)$$

在灰度分布直方图中，我们将背景和目标设为 CB 和 CO，灰度的阈值为 T，其值位于 k 等级。那么等级为 $[1,2,3,\dots,k]$ 为目标类 CO，等级为 $[k+1,\dots,L]$ 的列为背景类 CB。

我们有如下定义：

1、两类的概率分别为：

目标类概率：

$$\varpi_0 = \sum_{i=1}^k p_i = \varpi(k) \quad (2.2)$$

背景类概率：

$$\varpi_B = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \varpi(k) \quad (2.3)$$

2、图像灰度的整体期望和两类的期望分别为：

整体期望值为：

$$\mu_{Total} = \sum_{i=1}^L ip_i \quad (2.4)$$

目标类期望值为：

$$\mu_0 = \mu(k)/\varpi_0 = \sum_{i=1}^k ip_i / \varpi_0 \quad (2.5)$$

背景类期望值为：

$$\mu_B = \sum_{i=k+1}^L ip_i / \varpi_B = \frac{\mu_{Total} - \mu(k)}{1 - \varpi_0} \quad (2.6)$$

3、整体、目标类与背景类的方差分别为：

目标类方差：

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(i - \mu_0)^2 p_i}{\varpi_0} \quad (2.7)$$

背景类方差

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_B)^2 p_i / \varpi_B \quad (2.8)$$

整体方差为：

$$\sigma_{Total}^2 = \sum_{i=1}^L (i - \mu_{Total})^2 p_i \quad (2.9)$$

对于任意的 k 的选取，必须制定一些规则来评价以 k 级别为阈值级别划分目标和背景的可靠程度，此时需要引入类别辨别分析。

类别分析是根据不同样本的数字特征制定类别判别函数和类别判别规则, 在本例中, 类别判别规则和类别判别函数的形式已经确定, 需要确定的是判别函数的参数。

Ostu 法采用类间方差最大和类内方差最小法则, 引入了如下两个参数和三个判别规则:

1、类内方差:

$$\sigma_w^2 = \varpi_O \sigma_0^2 + \varpi_B \sigma_1^2 \quad (2.10)$$

2、类间方差:

$$\sigma_B^2 = \varpi_O (\mu_O - \mu_{Total})^2 + \varpi_B (\mu_B - \mu_{Total})^2 = \varpi_O \varpi_B (\mu_O - \mu_B)^2 \quad (2.11)$$

3、三个判别法则:

$$\lambda = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_w^2}; \quad \kappa = \frac{\sigma_{Total}^2}{\sigma_w^2}; \quad \eta = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_{Total}^2} \quad (2.12)$$

注意到:

$$\sigma_w^2 + \sigma_B^2 = \sigma_{Total}^2 \quad (2.13)$$

所以我们有:

$$\kappa = \lambda + 1; \quad \eta = 1 - \frac{1}{\lambda + 1} \quad (2.14)$$

这两个数都随着 λ 的增大而增大, 我们的目标是使得三个指标都最大从而使得两类的分类更加显著。注意到 σ_w^2 和 σ_B^2 都是阈值级别 k 的函数, 而 σ_{Total}^2 是整体参数与 k 无关, 因此在优化时, 选取 η 为求解目标是最快速和最简单的。

因此, 我们的目标就是在级别 $1-L$ 中找到使得 σ_B^2 最大的那个 k , 从而作为划分的阈值。

图 2.7 所示就是利用 Ostu 法分割的带有阴影的光伏板图像，图 2.8 给出了 η 随 k 值的变化曲线，可以看出 η 最大值所处的阈值 T 就是分割的阈值。

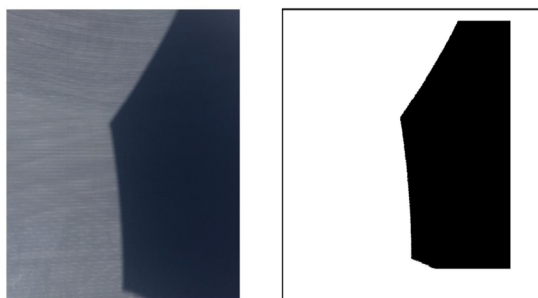


图 2.7 带阴影的光伏板图像和 Ostu 分割法效果

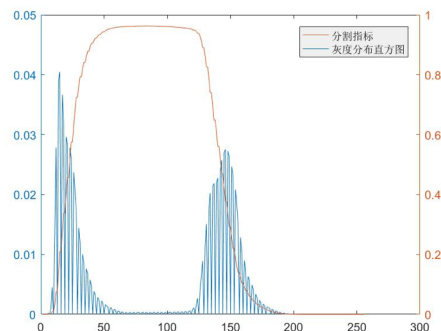


图 2.8 灰度分布直方图与不同 k 值下分割准则变化情况

从图 2.7 可以看出 Ostu 法非常简单的就将一个带有阴影的光伏板图像分割为了两个部分。但是 Ostu 法的缺陷在于其无法分辨有小阴影和无阴影的情况，首先我们来看小阴影的情况。图 2.9 所示是一块带有小阴影的光伏板图像及其 Ostu 法的处理结果，可以发现其处理有较大偏差，而观察图 2.10，发现其判别准则的最大值出现在了均匀光照灰度区域，其主要原因在于阴影部分非常小而由于噪声的原因使得灰度分布的整体重心向右偏移，造成了分割准则的向右偏移，从而使 Ostu 法失效。

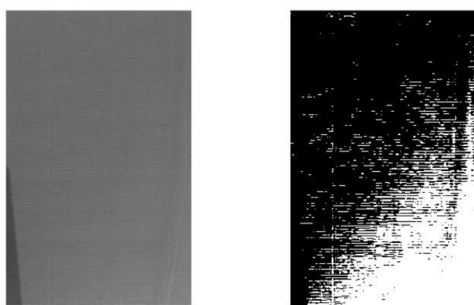


图 2.9 小阴影光伏板图像及其 Ostu 处理结果

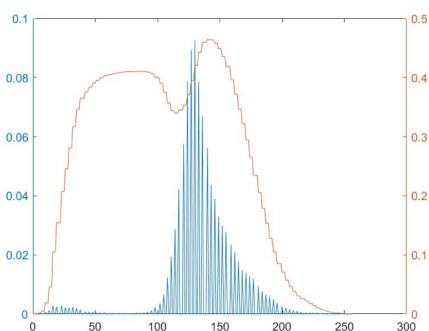


图 2.10 小阴影光伏板图像灰度分布直方图与不同 k 值情况下准则数的变化情况

Ostu 法是针对图像整体的数学特征处理的一种方法，其主要特点是简单易懂，但是缺陷就在于其对于噪声较敏感，当需要分离的目标较小而噪声影响较大时，Ostu 法会造成误分割造成分离错误和判断失准。因此在使用 Ostu 方法之前，

必须针对要处理的一类图像进行图像预处理，主要是降噪处理。但是在降噪处理之前必须搞清楚噪声的特性和分布情况，因此下一节将通过边缘检测的方法来分析噪声的特性。

2.2.2 灰度边缘检测与噪声分析

边缘检测或者是图像的轮廓检测在目标识别中是经常使用的图像处理技术，人类和计算机识别某个物体的边缘是因为他的某一个图像性质如颜色或者明亮程度与周围的物体有显著的区别，这个显著的区别在数学上就表现为某一个图像函数的区别，而这个“显著”的区别表现为函数的突变，理想的边缘其图像函数

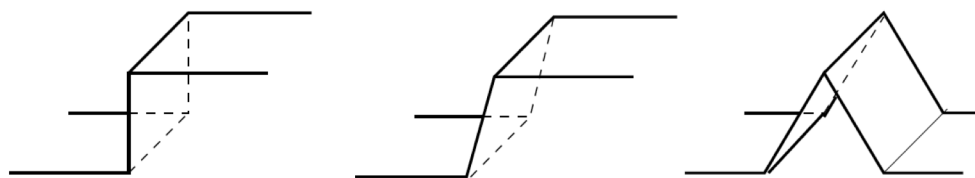


图 2.11 理想状况下边缘的函数形式

可分为三种情况：1) 悬崖式 2) 斜坡式 3) 三角式，如图 2.11 所示：

其中，最常见的是悬崖式的突变，这一突变我们在图 2.5 中可以明显观察到。



图 2.12 带阴影图像的灰度梯度图

图像轮廓的定义是非常模糊的，这就给边缘或者轮廓检测带来了问题，一般的采用梯度方法或者卷积算法来辨别轮廓。图像函数的突变在数学上表现为该点梯度的无限大，我们先假设某幅图像的某一图像函数（例如灰度）为 $f(x, y)$ ，那么他的梯度为：

$$\vec{g} = \vec{\nabla}_f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

所以它的模为：

$$G = \|\vec{\nabla}_f\| = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

其方向向量可定义为：

$$\vec{g} = \frac{\vec{\nabla}_f}{\|\vec{\nabla}_f\|} \quad (2.17)$$

于是我们定义一个物体的轮廓在图像上的表达方式为：那些使得在方向 \vec{g} 上的梯度最大的点，需要满足下列方程：

$$\frac{\partial G}{\partial \vec{g}} = 0 \text{ and } \frac{\partial^2 G}{\partial \vec{g}^2} \leq 0 \quad (2.18)$$

因此可以得到如下等式：

$$\frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2} = 0 \quad (2.19)$$

式(2.19)复杂且非线性，直接求解分析解费时费力而且几乎难以实现，可采用试算法，我们采用下列两步骤：1) 求出全部梯度；2) 寻找全局极值。

前文中已经提到了，数字图像由于传感器的限制，表达图像的函数为离散化的离散函数 $f(i, j)$ ，对于离散函数的偏导数，有几个常见的不同边缘检测器来近似。主要有 Sobel 算子、Prewitt 算子、Roberts 算子和 gradient 算子，根据常用度来排序，Sobel>Roberts>Gradient>Prewitt。

举 Sobel 算子为例，现在要计算点 (i, j) 处的梯度，已知该点灰度以及该点为中心的周围八个点的灰度值，则近似 G_x 和 G_y 的算法如下：

$$G_x = f(i+1, j-1) + 2f(i+1, j) + f(i+1, j+1) - f(i-1, j-1) - 2f(i-1, j) - f(i-1, j+1) \quad (2.20)$$

$$G_y = f(i-1, j+1) + 2f(i, j+1) + f(i+1, j+1) - f(i-1, j-1) - 2f(i, j-1) - f(i+1, j-1) \quad (2.21)$$

矩阵表示为:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * Matrix(image\ 3 * 3) \quad (2.22)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * Matrix(image\ 3 * 3) \quad (2.23)$$

同时为了简便计算, 式(2.16)可近似为:

$$\hat{G} = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \quad (2.24)$$

该方法可以将图像中的所有边缘都检测出来。如果将一个未经处理的光伏板图像直接进行边缘检测, 其效果如图 2.12 所示(原图分别为图 2.7 和图 2.9 所示图), 从图中可以看出: 1) 由于电栅极线的存在, 使得灰度梯度图像中出现了大量的长细条形图形, 这些边缘是实际图像中的边缘, 但是对我们提取阴影边缘产生极大的障碍, 在本课题中视为“噪声”; 2) 在阴影区域内, 电栅极线的边缘和电池相比不再明显, 这是因为在低照度情况下, 边缘的差异更加小而消失; 3) 阴影的边缘较为明显, 可被检测但是混杂在噪声中。

实际上, 无论是基于整体数学特征的阈值分割法还是基于局部变化的梯度检测法, 如果不进行图像的降噪处理, 都很难取得良好的效果。根据图 2.12 所示的结果, 如果有这样的一个“刷子”, 可以自动的刷掉电栅极线带来的噪声, 那么采用上述两种方法会更加高效。下一节, 我们将从形态学的角度, 根据本例的特殊情况进行一些图像的预处理。

2.2.3 形态学膨胀、腐蚀与重构

数学形态学是一种基于非线性的理论, 其目的是根据图像的形态、大小、其与相邻单元的关系、背景、灰度、颜色等一系列的特征进行图像的分析。主要是利用一些集合论、封闭图形的拓扑学和概率论的一些理论, 利用一些结构元素(mask)对图像局部进行一一分析, 根据不同图形结构的数字特征过滤一些不需要的结构, 强化一些需要的结构。其主要操作有形态学膨胀、形态学腐蚀以及图像开闭操作、图像重构等等。

图像的腐蚀操作可以说是一个“细化”和去掉一些微小结构的过程, 根据 a'dad 处理图像的噪声, 首先定义一个结构元素 S, 用结构 S 去腐蚀图像 A 的定义为:

$$E(A, S) = A \ominus S = \{x | (S)_x \cap A^c \neq \phi\} \quad (2.24)$$

其中 x 是向量, $(S)_x$ 表示的是 S 的原点对称集沿着向量 x 位移之后得到的集合。 A^c 表示 A 的求反。 所求的结果 D 是一组向量集, 然后可以生成一幅新的图像, 该图像的每一个像素对应一个向量, 如果该向量属于集合 D , 那么像素值为 0, 否则为 1。

式(2.24)较为抽象, 用下图来表示一个二值图像的处理过程, 图 2.13 所示可视为一个 9×9 的图像像素分布, 共 81 个分布点, 其图像为二值图像, 其中红色标记为需要分离的目标, 而绿色标记可以视为噪声, 因为他的像素为 1 但是却不是我们要分离的目标。 图 2.14 为 2.13 的求反图。 图 2.15 是根据噪声选取的一个圆盘型“刷子”, 及结构元素 S 。 图中标记为橙色的是结构元素的中心。

当 $x=(0,0)$ 时, 结构元素 S 位置处于图 2.16 中底色为灰色的位置, 这样结构元素与原图进行式 (2.24) 的操作, 其结果为非空, 那么 $x=(0,0)$ 为所求的解之一, 那么新图中的 $(0,0)$ 位置为 0。 图 2.17 为处理之后的图像

0	0	1	0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	1	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0

图 2.13 9×9 像素的二值地理分布图

1	1	0	1	1	0	0	1	1
1	0	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	0	0	0	1	1	1
1	1	0	0	0	0	1	0	1
1	1	0	0	0	0	1	1	1
1	1	0	0	0	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1	1	1

图 2.14 9×9 像素的求反二值地理分布图

0	1	0
1	1	1
0	1	0

图 2.15 3×3 结构元素

1	1	0	1	1	0	0	1	1
1	0	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	0	0	0	1	1	1
1	1	0	0	0	0	1	0	1
1	1	0	0	0	0	1	1	1
1	1	0	0	0	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1	1	1

图 2.16 $x=(0,0)$ 时结构元素处理示意图

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 2.17 2.13 图经过腐蚀操作后的二值地理分布图

从图 2.17 可以看出，所有的噪声暨原图 2.13 的绿色部分都已经去除，目标暨原图中的红色部分保留但是其边缘削弱。所以可以看出，图像的腐蚀操作可以将图像中的一些小的“噪声”或者是微小结构去除掉，但是由于其削弱效应，原来的目标也会相应的削弱。

从图 2.17 可以看出，虽然图像的腐蚀成功的去除了一些细小的结构，但是对于要提取的目标也有相应的“损坏”或者“削弱”，但是如果其中的“噪声”已经完全去除干净，我们可以另外一种操作来讲已经削弱或者“剪断”的结构“连接”起来，我们称之为形态学膨胀。

形态学膨胀操作其实质是形态学腐蚀的反操作，定义为

$$D(A,S) = A \oplus S = \{x|(S)_x \cap A \neq \phi\} \tag{2.24}$$

将腐蚀后的图 2.17 用图 2.18 所示的结构元素进行膨胀操作，得到如图 2.19 的最终处理模型，可以发现经过腐蚀后再膨胀的图像去掉了噪声同时恢复了原来的目标。

	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1

图 2.18 3*3 结构元素

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 2.19 2.13 图经过腐蚀再膨胀操作后的二值地理分布图

实际的图像一般为灰度图像，针对灰度图像可以先用 2.3.1 节介绍的阈值分割法将图像转化为二值图像，然后再进行腐蚀膨胀操作，但是由于噪声的存在，会导致分割出现错误或者丢失细节，因此作为拓展，引入灰度图像的膨胀与腐蚀。

灰度图像的膨胀很简单，也是构造一个结构元素指定计算区域，在计算区域内的所有像素点的最大值为新图像中的像素值，灰度图像的腐蚀为计算区域内的最小值为新图像中的像素值。

图 2.20 所示的是一幅“TONGJI”的字样写在了有条纹的笔记纸上，我们的目标是要提取字样而删除条纹，这个和我们课题中所作的光伏板图像类似，噪声都是细长的条纹。图 2.20 第二幅是使用腐蚀这一处理之后的结果，可以发现字样“瘦身”之后，条纹全部去除，这就说明这一方法是可以用于处理细长的条纹噪声的。但是，腐蚀之后的图像字样缩减，因此再进行膨胀操作再与原图比较后发现，该算法很好的分割出了所需要的字样。



图 2.20 自左到右依次为 1) “TONGJI”原图 2) 腐蚀操作后图像 3) 最终处理图像

腐蚀去掉噪声的效果取决于结构元素 S 是否与噪声形状相近，结构元素若偏小，则“噪声”剔除不干净后在之后的膨胀操作中又被放大，结构元素过大，有可能影响到目标物的提取。结合本课题的实际情况，我们可以很好地掌握噪声的形状为细长的条纹，噪声的大小较整体目标物偏小，为了较好的掌握腐蚀和膨胀处理的程度，需要引入新的操作暨图像的重构。

为了完全去除噪声，往往选择的是较大的“刷子”暨结构元素，这样在处理图像的同时可能导致原目标的丢失，图形重构首先是两个同样大小的图像之间的计算，定义标记图像 J 和面具图像 I ，标记图像 J 一定是面具图像 I 的一个子集。 I 中所有的连通结构为 I_1, I_2, \dots, I_n 。重构的定义就是找出面具图像 I 与标记图像 J 中所有的联通结构中交集不为空的结构。数学定义为：

$$\text{Reconstruction}(J) = \bigcup_{J \cap I_k \neq \emptyset} I_k \quad (2.24)$$

腐蚀之后的图像去掉了所有的噪声但是也弱化了目标物的边缘，如果将腐蚀

后的图形作为标记，原图作为面具，那么得到的图像将恢复原目标物的全貌。

综上，我们利用腐蚀去掉噪声，重构恢复原有轮廓再通过膨胀将离散的区域连接起来，再经过重构就基本可以分离出原有的阴影。图 2.21 为小阴影处理效果图，图 2.22 为大阴影处理效果图，图 2.23 为无阴影处理效果图。

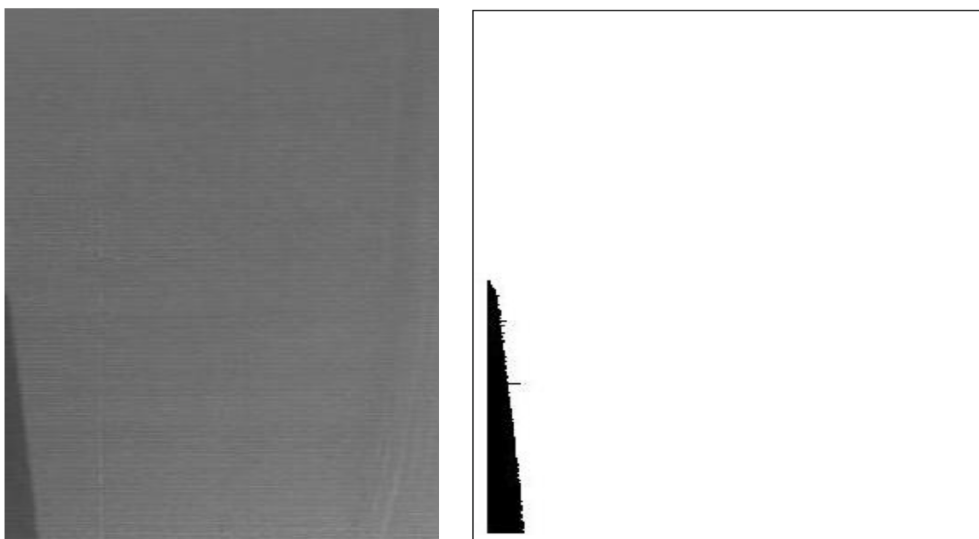


图 2.21 a) 小阴影光伏图像原图 b) 最终处理图像



图 2.22 a) 无阴影光伏图像原图 b) 最终处理图像

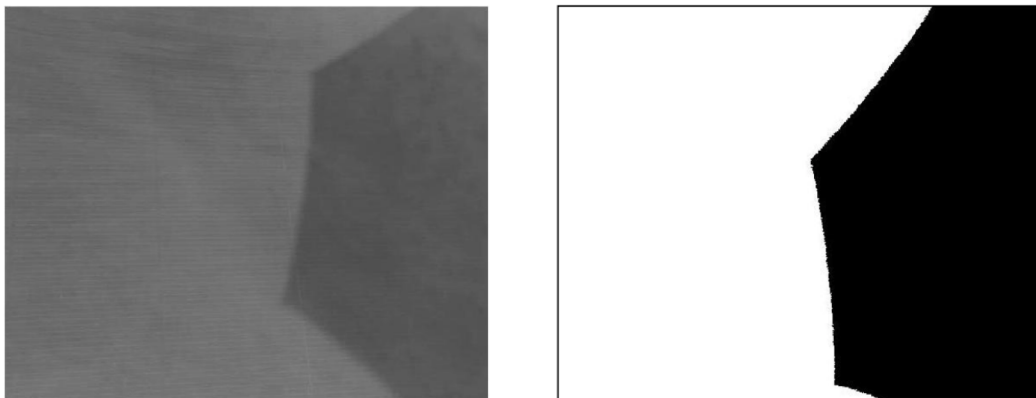


图 2.23 a) 大阴影光伏图像原图 b) 最终处理图像

2.3 本章小结

本章主要是处理光伏板图像问题,主要目的为利用图像技术自动分离光伏板上的阴影,主要成果如下:

1) 均匀光照图像与带有阴影的图像灰度值的数学特征有显著的不同,主要体现在均匀光照图像的灰度分布直方图为“单峰”的情况而带有阴影的图像会出现灰度分布的“双峰”情况,利用阈值划分法可以划分大多数的情况。

2) 电栅极线的存在以及其他随机噪声的引入,造成小阴影和无阴影状况下的误判,给边缘检测和形态分割造成困难,需要根据噪声的形状和数学特性进行图像的去噪声处理,图像腐蚀就是利用平滑结构元素进行小结构的去除,

3) 在去除噪声之后,原有的目标结构会有一定程度的信息丢失,为了恢复原有的结构,利用图像重构可以把目标的大部分边缘修复,之后再利用图像的膨胀操作和重构操作,使得原有结构中的空隙和不连续部分连接起来,边缘更加清晰。

4) 由于技术限制,直接通过光伏板图像推测光伏板上太阳辐射强度暂时无法实现,但是由于即使在盛夏太阳光强达到 $800\text{W}/\text{m}^2$ 的情况下,阴影部分的光强也不会超过 $150\text{-}200\text{W}/\text{m}^2$,因此,出于安全考虑,本课题统一认为阴影部分光强为 $0\text{W}/\text{m}^2$ 。

本章建立了图像阴影分割模型,将阴影的位置用 0-1 逻辑值表示出来,作为光伏电学模型的照度输入参数,完成了阴影检测的任务。

第 3 章 屋顶光伏系统电学分析与模拟

光伏板的热斑问题，功率损失问题以及实际运行的策略等等都是由于电路性质的改变所引起的。本章主要从光伏电池实际运行时的电学特征开始着手。

首先，研究处于均匀光照条件下的光伏电池板电路特性。关于均匀光照条件下的研究已经非常丰富，主要模型都是基于伏安特性曲线来模拟^[10]，有如下两种：单二极管模型和双二极管模型。这些模型都是基于以下前提：电池处于正向电压状态。

一个合适的光伏电池的模拟模型需要满足以下两个条件：1) 可以准确而又快速的模拟光伏电池的伏安特性曲线；2) 模型根据实际情况的不同可以进一步的开发和改造。^[48]

从模型的复杂性上来看，单二极管四参数模型最为简单，但是没有考虑到反向电压时的能源消耗问题，同时单二极管四参数模型也是准确度最低的。双二极管模型最为复杂，准确度最高尤其在光伏电池处于低光照强度的时候。在高光照强度时，其计算精度比单二极管五参数模型略好。本课题考虑的是不均匀光照情况下的热斑问题，在低光照区的电池处于反向状态，双二极管模型不适用。因此，从计算速度上来考虑，本课题选择单二极管五参数模型来进行模拟。

光伏板一般由若干个电池串联而成，串联电池必须始终保持同样的状态，否则会造成电路的不匹配从而影响电流输出。

然而，在实际使用过程中，建筑用屋顶光伏系统往往会受到来自邻近建筑物、树木或者电线杆的遮挡，天空中飞鸟的鸟粪或者积灰等也往往是局部阴影或者遮挡的主要来源。当局部阴影发生时，阴影遮挡部分的电池相较于太阳光照区的电池，其电流输出显著减小，造成该部分电池与其他部分的电池不匹配，为了平衡这样的不匹配，处于正常工作区的电池只能“牺牲”一定的电流输出从而减小自己的输出功率，处于阴影区域的电池则需要消耗一定的电功率来平衡电路，这就造成了部分电池的过热情况形成热斑现象。

当然，在光伏电池在实际运行中，由于制造工艺、组件连接间的电阻不同等造成电池之间的状态不一致，这样的不匹配的情况在每一块光伏板出厂前都已经做过了基本测试，本课题主要考虑实际操作中的不规范行为导致的局部阴影遮挡引起的电路不匹配情况，因此在模拟和实验过程中都假设电池的制作工艺，组件互相之间的连接没有问题。

本章首先通过厂商给出的基本参数，利用五参数模型建立准确快速的光伏电池正向电路模型，然后根据材料特性和实验数据，借鉴前人的研究成果，建立光

伏电池反向电学模型，最后将两个模型进行整合形成完整的光伏电池模型。

3.1 光伏电池正向电压工作状态模型

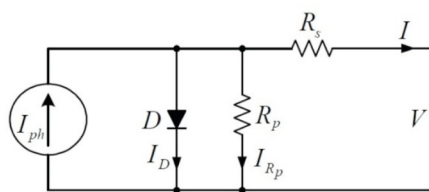


图 3.1 单二极管五参数模型

所有的光伏电池模拟电路都基于以下假设：光伏电池的电流由光生电流和二极管的偏置电流所组成。单、双二极管模型的区别就在于模拟偏置电流时，双二极管用两个二极管来模拟。单二极管四参数和五参数的区别在于，五参数模型考虑了并联电阻的问题。图 3.1 所示的是单二极管的

五参数模型。其中 I_s 为模拟二极管的饱和偏置电流， I_{ph} 为光生电流， R_p 为等效并联电阻以及 R_s 为等效串联电阻。在给定温度和光照的情况下，光伏电池的伏安关系可以用下式来表示：

$$I = I_{ph} - I_s * \left(e^{\left(\frac{V + I * R_s}{nV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (3.1)$$

V_t 是热电压，可以用下式表示 $V_t = kT/q$ ，其中 k 是玻尔兹曼常量， $k = 1.3806503e-23 \text{ J/K}$ ， T 为光伏电池的温度。字母 q 表示电子的电量 ($q = 1.60217646e-19 \text{ C}$)。 n 为二极管的理想因子。

五参数模型有五个待定参数，理论上需要至少五个方程来确定五个参数的量，但是注意到公式 (3.1) 是一个非线性方程，因此方程组为非线性方程组，所以在解的过程会比较复杂。

光生电流 I_{ph} 、二极管饱和电流 I_s 和二极管理想因子都会随着温度和光照强度而变化，因此需要引入温度和光强修正。

一般的，对于一个光伏板，厂商会给出标准实验条件下的开路电压、短路电流和最大功率点。所谓的标准实验条件就是指光照强度为 1000 W/m^2 ，电池温度为 298 K 。此外，厂商还会给出一个在其他光照强度和温度的开路电压、短路电压和最大功率点以确定温度修正，一般的光照强度为 800 W/m^2 ，温度为 328 K 的情况。

3.1.1 标准实验条件下的参数确定

根据厂商数据，在标准实验状况下暨 25 摄氏度，光照强度为 1000 W/m^2 时，全光伏板的短路电流为 1.42 A ，全光伏板的断路电压为 141 V 。最大功率点为 1.14 A

和 105V。本次实验模拟的是非晶硅的光伏板，非晶硅材料的光伏板与其他两种材料相比，具有电流密度小，可自由裁剪而不会影响各向同性的特点。非晶硅电池片一般为细长的条形，形状越长，短路电流和二极管饱和电流越大，形状越宽，断路电压越大。本太阳板由 108 块电池片组成，本课题主要讨论局部遮挡造成的光伏板运行问题，因此我们认为所有的电池片材料均一，伏安特性属性相同且无连接损失。因此可认为对于单块电池，其短路电流为 1.42A 且断路电压为 1.3V。

五参数的光伏电池公式由 (3.1) 给出：

$$I = I_{ph} - I_s * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{n*V_t}} - 1 \right) - \frac{V+I*R_s}{R_p} \quad (3.1)$$

其中的光生电流，二极管饱和电流，二极管理想因子，串联电阻和并联电阻为五个待定的参数需要逐一解出。

首先，在短路状态下，测得 $V=0$ ， $I=I_{sc}$ ，代入公式 (3.1)，得到式 (3.2)。

$$I_{sc} = I_{ph} - I_s * \left(e^{\frac{I*R_s}{n*V_t}} - 1 \right) - \frac{I * R_s}{R_p} \quad (3.2)$$

由于二极管饱和电流 I_s 远远小于太阳能电池的光生电流 I_{ph} ，因此式 (3.2) 的第二项可忽略不计。又由于串联电阻 R_s 远远小于并联电阻 R_p ，因此式 (3.2) 的第三项也可忽略不计，综上所述，光生电流 I_{ph} 可以直接用短路电流 I_{sc} 来表示，得到式 (3.3)：

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (3.3)$$

至此，第一个参数已经求得。要求得剩余的四个参数，仍然需要四个方程式来确定。

在开路状态时，测得 $I=0$ ， $V=V_{oc}$ ，代入公式 (3.1)，可以得到式 (3.4)：

$$I_s = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\left(\frac{V_{oc}}{n*V_t}\right)} - 1} \quad (3.4)$$

根据厂商给出的数据，可以知道最大功率工作点， $V=V_{mp}$ ， $I=I_{mp}$ ，将数据代入式 (3.1)，可以得出式 (3.5)：

$$R_p = \frac{I_{mp} * R_s + V_{mp}}{I_{ph} - I_s * \left[e^{\frac{I_{mp}*R_s+V_{mp}}{n*V_t}} - 1 \right] - I_{mp}} \quad (3.5)$$

同时在最大功率点处，我们有：

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{mp} = \left. \frac{d(I * V)}{dV} \right|_{mp} = \left(I + V \frac{dI}{dV} \right) \Big|_{mp} = 0 \quad (3.6)$$

将式 (3.1) 求导后代入 (3.6)，可以得出式 (3.7)：

$$R_s = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} - \frac{1}{\frac{I_s}{nV_t} e^{\frac{V+I_{mp}}{nV_t}} + \frac{1}{R_p}} \quad (3.7)$$

四个未知参数需要四个方程，因此仍然需要一个方程来解四个未知参数，在短路工作点（ $V=0, I=I_{sc}$ ）处，电流关于电压的导数为并联电阻的负倒数：

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{sc} = -\frac{1}{R_p} \quad (3.8)$$

将（1）式求导代入后可得：

$$R_p = R_s + \frac{1}{\frac{I_s}{nV_t} e^{\frac{I_{sc} * R_s}{nV_t}} + \frac{1}{R_p}} \quad (3.9)$$

式（3.4）（3.5）（3.7）（3.9）为四个方程解决四个未知参数，但是这四个方程为非线性的方程组，通过联立方程的方式难以得到四个参数的解。因此采用试算法。

观察方程（3.4）和（3.5）假设我们已知二极管理想因子 n 和串联电阻 R_s ，那么联立（3.4）和（3.5）就可以解出 I_s 和 R_p 。将 R_p 和 I_s 代入到（3.7）中就可以计算出 R'_s ，然后再将该值与初始设置的 R_s 比较，若误差超过一定范围，则需要重新设置二极管理想因子和串联电阻的初始值。若误差未达到规定范围，则需要继续验证四个参数代入（3.9）计算得 R'_p ，若不满足，需要修改二极管理想因子 n 和串联电阻 R_s 的试算值。

由方程（3.7）可以得出串联电阻 R_s 的范围为 $[0, \frac{V_{mp}}{I_{mp}}]$ ，二极管影响因子一般为 1，本次模拟的允许误差为 1%，计算的流程如图 3.2 所示。

图中 Er1 的表达式如下：

$$Er1 = \frac{R'_s - R_s}{R_s} \quad (3.10)$$

Er2 的表达式如（3.11）：

$$Er2 = \frac{R'_p - R_p}{R_p} \quad (3.11)$$

以上两个参数的容错率为 1%，串联电阻的试算步长为 0.01 欧姆，二极管理想因子的试算步长为 0.001。将实验参数输入后发现串联电阻的误差率为 0.8%，并联电阻的误差率为 0.9%。

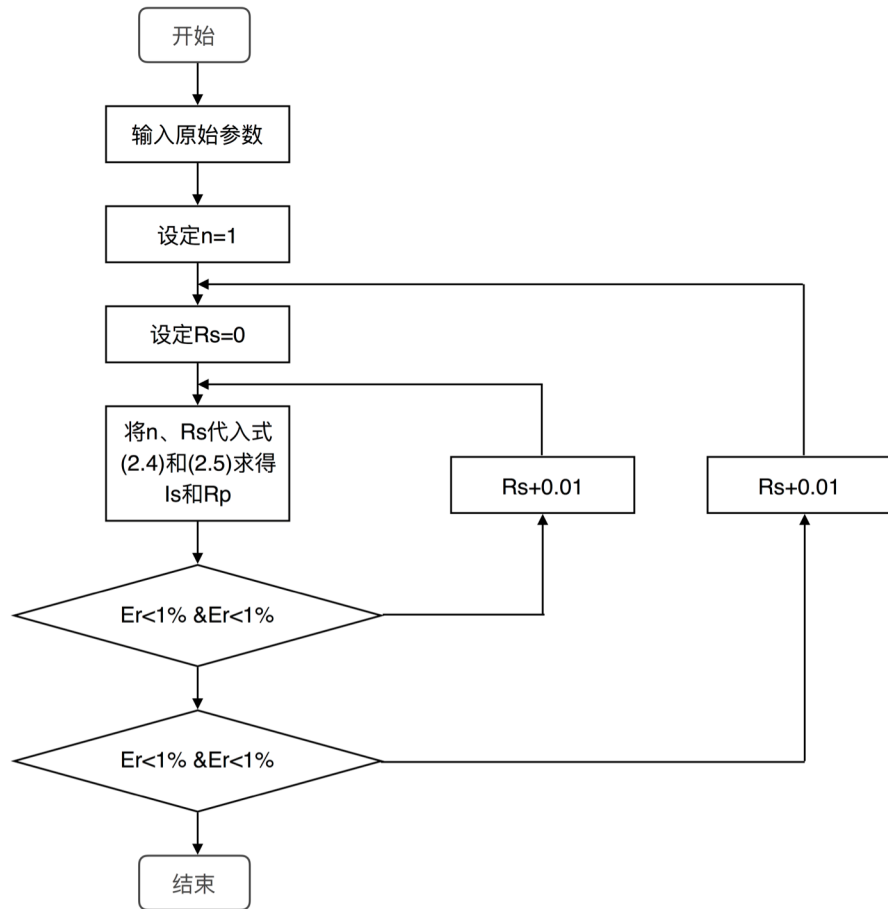


图 3.2 标准实验状态下光伏电池五参数模型参数确定流程图

3.1.2 光照与温度修正

影响光伏电池的环境因素主要是光伏薄膜所处的温度以及照射在电池表面的太阳辐射强度。主要表现在短路电流和开路电压会随着光照强度和光伏电池的绝对温度而变化。光照强度主要影响光伏电池的短路电流，对光伏电池的断路电压几乎没有影响。上一节已经提到过光伏电池的短路电流几乎等于光生电流，实验和文献均表明，光伏电池的短路电流与光照强度存在线性关系，具体可表现为式 (3.12)

$$I_{ph} = I_{ph0} * \frac{G}{G_0} \quad (3.12)$$

其中 I_{ph0} 为标准实验状况下的短路电流， G_0 为标准实验状况下光照强度，一般为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 。 G 为要模拟的光照强度， I_{ph} 为该状态下的短路电流。

电池的绝对温度对于短路电流的影响也可以近似认为线性影响，厂商一般会给出短路电流的温度系数，式(3.13)表达了这样的关系：

$$I_{ph} = I_{ph0} * (1 + \alpha * (T - T_0)) \quad (3.13)$$

式中的 α 为短路电流的温度系数， T 为电池板的绝对温度， T_0 为标准实验状况下的温度，一般为 298K 。

综合(3.12)和(3.13)，对于任意状态下的光伏电池模块，其五参数模型的第一个参数光生电流 I_{ph} 就可以用标准实验状况下的光生电流 I_{ph0} 来表述：

$$I_{ph} = \frac{G}{G_0} * I_{ph0} * (1 + \alpha * (T - T_0)) \quad (3.14)$$

厂商直接给出了光伏电池的短路电流的温度系数，因此对于任何个工作状态，可直接确定该状态下的光伏电池光生电流。

光照强度对于二极管的偏置电流几乎没有影响，温度对于饱和电流的影响较大，根据文献^[49]，温度对于的二极管饱和电流的影响可表示为：

$$I_s = I_{s0} * \left(\frac{T}{T_0}\right)^3 * e^{\frac{E}{nV_t} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)} \quad (3.15)$$

式中的 I_{s0} 为标准实验状况下的二极管饱和电流， T_0 为标准实验状态下的电池温度，一般为 298K 。 E 为二极管的能带系数。

式(3.15)引入了新的未知参数为二极管的能带系数，这个系数厂商并没有直接给出，需要根据其他工作点进行推导。厂商给出了在光照强度为 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，温度为 313K 情况下的各个参数，根据式(3.1)，在开路工作点处，暨 $I=0$ ， $V=V_{oc1}$ 时，有：

$$I_{s1} = \frac{I_{sc1} - \frac{V_{oc1}}{R_p}}{e^{n*V_t} - 1} \quad (3.16)$$

所以可以推导出：

$$E = \frac{nV_t}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \ln \left[\frac{I_{s1}}{I_{s0}} * \left(\frac{T_0}{T}\right)^3 \right] \quad (3.17)$$

(3.16)和(3.17)式中下标为0的表示标准实验状况下，下标为1表示 $800\text{W}/\text{m}^2$ 光照强度和 313K 温度的工作状态下。

至此，任意的一个工作状态都可以模拟，总结如下：

1) 首先，根据图3.2的流程和厂商给出的标准实验状况下的短路工作点，断

路工作点和最大功率点，计算标准状况下的五个参数。

2) 根据厂商给出的另外一个工作状态下的短路工作点，断路工作点和最大功率点，计算二极管的能带系数。

3) 在任意给定的工作状态下，根据式 (3.14) 和 (3.15) 来调整光生电流和二极管偏置电流，二极管理想因子、串联电阻和等效并联电阻可视为不随工作状态变化而变化。

4) 在给定的状态下，将修正过的光生电流参数 I_{ph} ，二极管偏置电流 I_s ，计算得到的二极管理想因子和等效串联电阻，等效并联电阻导入 (3.1) 可得出该状态下的光伏电池的伏安特性曲线。

3.1.3 Simulink 光伏电池模块与光伏板模拟

Simulink 是一个基于动态系统模拟的多领域模拟平台。他提供了一个用户友好且可以模拟多物理耦合系统的模拟环境。Simulink 可以由 MatLab 直接调用，结合了多个不同算法的开发工具，可视化的操作平台和可与多种程序语言进行对接。

Simulink 中可用于光伏电池模拟的模块大致可以分为纯数学模拟和电学模拟，其中纯数学模拟方法一般用于分析不同模拟模型的数学准确性。本课题重点不在分析模型的数学准确性，而是选择一个计算速度快，相对准确以及便于扩展的模型来进行模拟。Simulink 的智能电力模块有光生电池模型，搭配其他电阻模

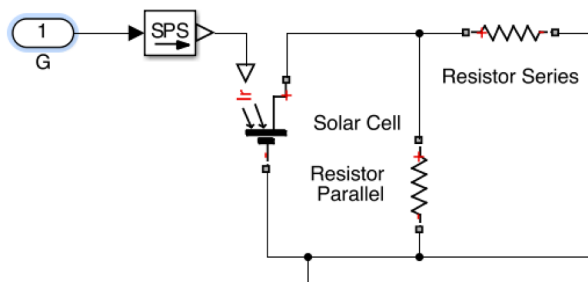


图 3.3 光伏电池的 Simulink 模型

块，构成如图 3.3 所示的光伏电池模型。

图中的门 1 表示的是输入光伏电池的光照强度，其余各个模块的参数也可以在模块中设置，主要设置为标准实验情况下光伏电池的二极管饱和电流，光生电流，二极管理想因子，并联电阻和串联电阻的电阻值以及模拟温度等。

实际情况中由于单块光伏电池输出电压小，需要若干块电池串联后组成一块

光伏电池板才能发电，因此在 Simulink 模块中有两种方式，第一是复制图 3.3 的模块组成光伏电池板，第二是在光伏电池模块中设置串联个数，修改串联电池的电池数目。第二种方法计算速度快，但是缺陷是所有的光伏电池都处于同样的工作状态下，这对我们的计算模拟不利，第一种方法构建的模型复杂，但是可以模拟多种情况。考虑到本课题主要目的是研究处于不同工作状态下的电池工作情况，因此拟主要采用第一种方法，第二种方法为辅助的形式。

3.1.4 模型模拟与厂商数据比较

首先对厂商给出的标准状况下实验参数进行模拟验证， $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，背板温度为 25 摄氏度情况下，厂商给出的参数为短路电流 1.42A，断路电压 141V，最大功率点为 1.19A、105V。试验模拟曲线如图 3.9 所示，模拟的短路电流为 1.42A 断路电压为 141V，最大功率点为 1.193A、105V，标准试验状况下模型准确反映

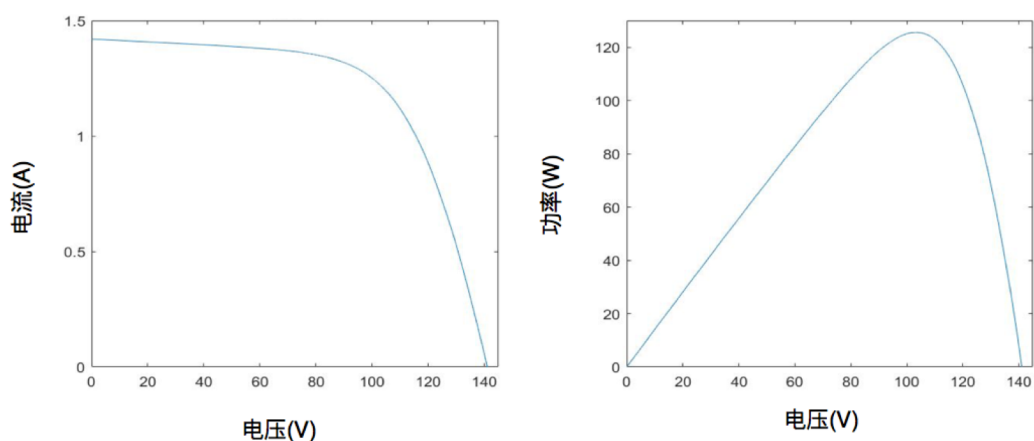


图 3.4 标准实验状况下模拟曲线 左：I-V 曲线 右：P-V 曲线

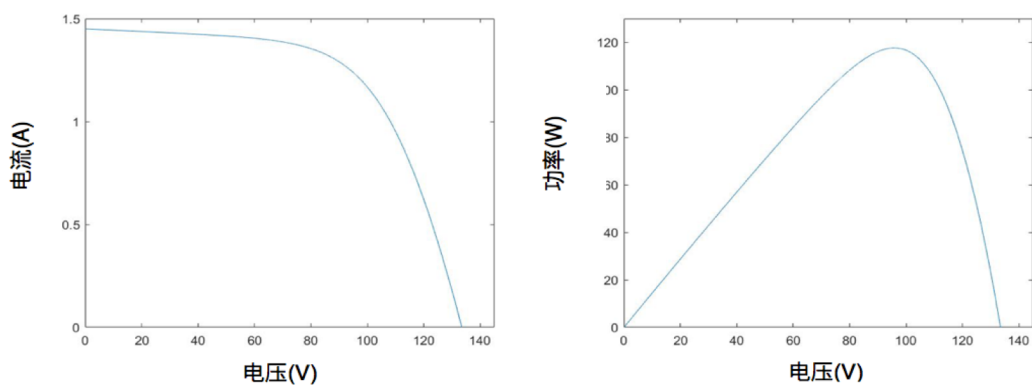


图 3.5 $G=800\text{W}/\text{m}^2$ 、 $T=40$ 摄氏度实验状况下模拟曲线 左：I-V 曲线 右：P-V 曲线

了所模拟的光伏板。

其次验证厂商给出的第二组实验状况下的数据， $800\text{W}/\text{m}^2$ ， 40 摄氏度实验条件下的短路电流为 1.16A ，断路电压为 132V ，最大功率点为 0.93A 、 101V 。试验模拟曲线如图 3.10 所示，试验的短路电流为 1.16A ，断路电压为 131V ，最大功率点为 0.94A 、 100V ，模型较准确的符合该实验状况。

3.2 局部阴影遮挡情况下光伏电池状态

局部阴影处的电池在电路中将会处于负向电压状态，而负向电压状态电池的伏安特性根据电池材料的不同而显著不同，这些性质的不同造成不同材料光伏板局部阴影状态时伏安特性曲线的不一样，本节将首先定性分析局部阴影条件下电路的情况，然后根据电池反向特性曲线选择合适的电池反向模型，然后与正向电池模型结合，从而形成完整的全电压光伏电池模型。

3.2.1 电路定性分析

多个电流源串联在电路中，根据基尔霍夫定律，流经这些电流源的电流应该一致。当局部阴影发生时，阴影部分的电池处于弱电流或零电流状态，而正常组的电源电流处于强电流状态，为了平衡这就导致大部分的电流都会经过与弱电源并联的等效电阻。

在分析遮挡前，需要对一些概念进行定义。首先是遮挡率的定义，遮挡率反映的是遮挡物的透光程度，其表达式可如公式 (3.18) 表达：

$$\alpha = 1 - \frac{G_{shadow}}{G_{normal}} \quad (3.18)$$

其中， G_{shadow} 表示阴影区域的光强， G_{normal} 表示处于太阳直射区域的光照强度。

对单块电池而言有如下几种遮挡形式：1) 该电池全部面积都被遮挡，且遮挡片不透光，如图 3.6 所示的遮挡方式，本文简称为单块电池的全电池完全遮挡；2) 该电池全部面积被遮挡，如图 3.6 的遮挡方式，但是遮挡片有一定透光，本文简称为单块电池的全电池非完全遮挡；3) 电池部分被遮挡，由于非晶硅电池片为细长条形，因此本课题只考虑非晶硅电池纵向半遮挡情况，暨横向要么不遮挡要么完全覆盖，如图 3.7 左侧的遮挡，而 3.7 右侧的遮挡不考虑，遮挡片不透光，本文简称为半电池完全遮挡；4) 遮挡方式同图 3.7 左图，但是遮挡片有一定透光，本文简称为半电池的非完全遮挡。

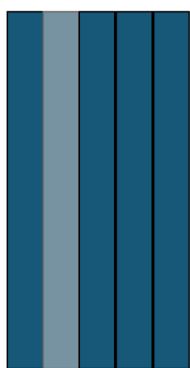


图 3.6 全电池遮挡方式（如左 2 电池片）

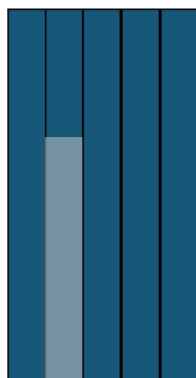


图 3.7 几种半电池遮挡方式（图中阴影部分）

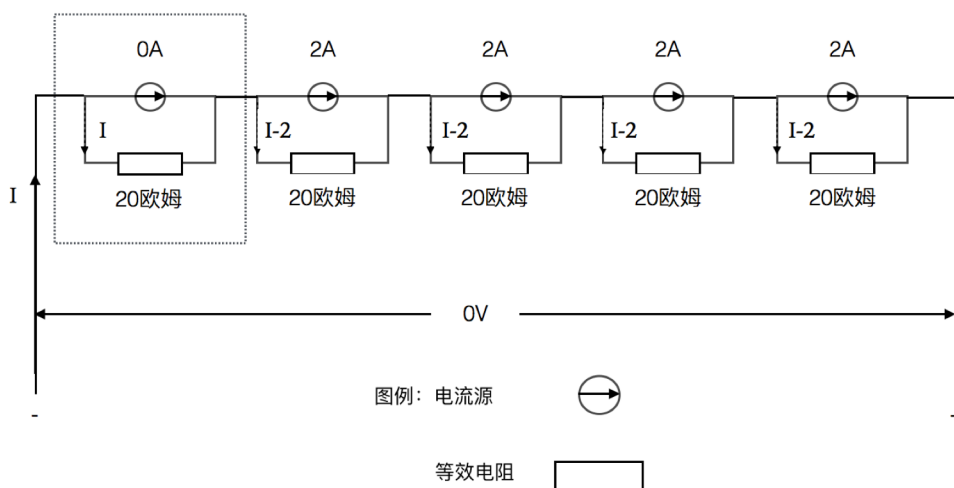
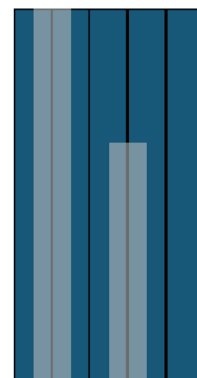


图 3.8 定性分析电路图

实际情况大多数的遮挡为第四种情况，但是无论哪一种遮挡，都会使得光伏电池板分成两个部分，一部分为正常工作的电源另一部分为非正常工作的电源。要搞清楚阴影区域电池的工作状态，首先就要弄清楚其处于正向电压还是负向电压，这就需要定性分析。

前文已经分析过了任意情况下光伏电池的伏安特性曲线，本节做定性分析，假设每一个光伏电池可以等效为一个电流源加上一个并联电阻，现在假设某光伏电池板有五块电池串联而成，其中一块处于全电池完全遮挡情况，因此该电源电流为零，其余电池处于正常工作状态。考虑到光伏电池板的防反二极管作用，当光伏电池板处于非正常工作状态时，防反二极管导通使得电池板隔离于系统之外，

而该光伏电池板形成自己的“小循环”，暨直接短路，负载为零。分析电路如图 3.8，图中虚线框为遮挡电池的等效电路，假设流过这五块电池的总电流为 I ，根据电路分析图可以得到：

$$4 * 20 * (I - 2) + 20 * I = 0V \quad (3.19)$$

可以得到 $I=1.6A$ ，这样阴影电池的两端电压为 $-32V$ 处于负向电压工作状态，其余正常电池的两端电压为 $8V$ 处于正向工作状态。

通过定性分析，可以知道一旦阴影出现，电源之间的不匹配造成阴影区域的电池处于负向工作状态，这样前文所阐述的光伏电池的模型就不适用于处于阴影状态下的光伏电池，这就需要在前文的基础上进行模型的修改。

3.2.2 反向电压情况下电池伏安特性曲线

光伏电池的主要材料为硅，其结构中也含有类似于二极管的 P-N 结，其反向特性与二极管较为类似，也存在有二极管的反向特性和反向导通情况。不同材料的电池处于正向电压状况时，其曲线类似。但是当电池处于反向工作状态时，不同材料的曲线性质不一样，主要体现在偏置饱和电压和等效电阻上。

总体上，电池根据反向特性的不同分为了 A 类电池和 B 类电池，如图 3.9 所示，A 类电池的等效并联电阻较大且偏置电压较高，而 B 类电池的等效并联电阻较小且偏置电压较小。一般的，单晶硅多晶硅具有等效并联电阻大，反向偏置电压大的特点而非晶硅材料具有等效并联电阻小反向偏置电压小的特点。

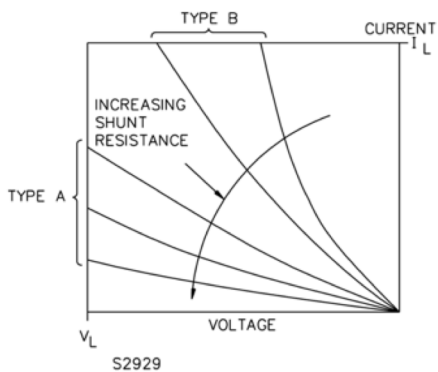


图 3.9 A 类与 B 类电池反向工作特性

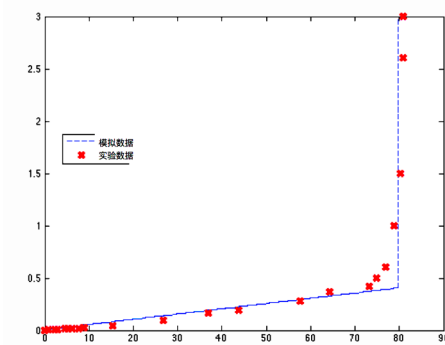


图 3.10 非晶硅的电池反向电流电压实验曲线

为了判断实验所用的电池类型，首先需要测定电池的反向电流电压关系曲线，图 3.10 所示的是十块电池串联所得的反向电流曲线，结合正常电池曲线得到初步结论为 B 类电池。

光伏电池的反向工作模型没有一个统一的形式，针对不同的材料有不同的模

型，例如 Hartman 模型，Iopez 模型等。但是总体来说有如下特征：光伏电池处于反向工作状态时，若其电压高于偏置电压，其电流电压曲线表现为类电阻性质暨线性关系，而一旦电压低于偏置电压时，电池的电流电压变化表现为电压变化不大而电流显著增高。

因此在原有的光伏电池正向模型的基础上，加装一个反向电压模块来完成对光伏电池的全电压的模拟，图 3.11 为光伏电池的全电压模型图。图中的定压电压为光伏电池的反向偏置电压。

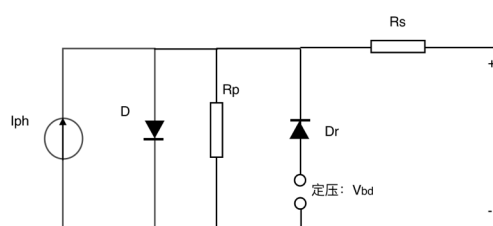


图 3.11 光伏电池全电压模型图

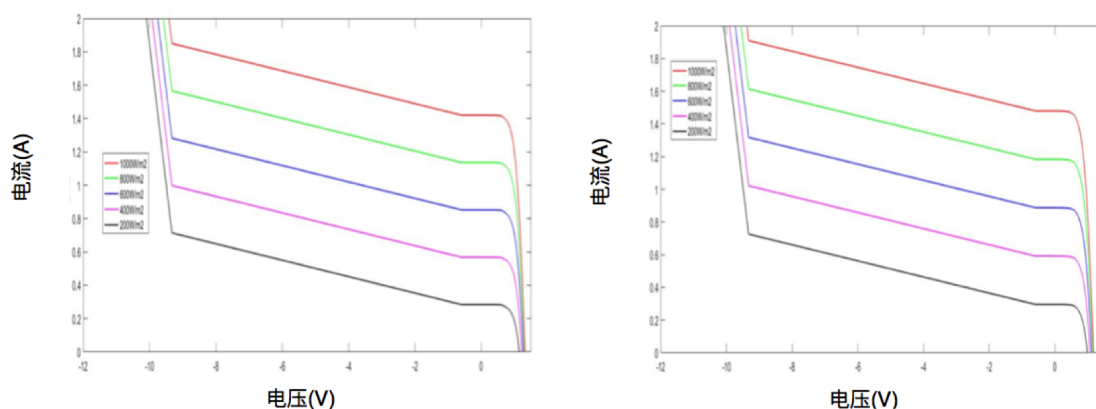


图 3.12 不同光强下电池全电压电流模拟曲线 左：25 摄氏度 右：55 摄氏度

至此可以得到光伏电池的全电压模型，他的数学函数表达式为：

$$\begin{cases} I = I_{ph} - I_s * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_p} & V > V_{bd} \\ V \approx V_{bd} & V < V_{bd} \end{cases} \quad (3.20)$$

当光伏电池的电压大于反向偏置电压时，光伏电池的电流电压关系为前文所得到的正向电压模型所求到的函数关系，当电压小于偏置电压时，其表现类似二极管反向导通的电流电压关系，在函数表达中可认为当电压小于偏置电压时，光伏电池的电压不再下降而电流可能为任意值。图 3.10 为模型得到的某几组光强温度下的全电压电流曲线。

3.2.3 不同遮挡情况阴影区光伏电池模拟及模型建立

前文提到了四种情况的遮挡，可分为两类，第一类为全电池的遮挡，暨阴影完全覆盖了电池；第二类为半电池遮挡，阴影覆盖了部分电池。前文提到了由于非晶硅电池片的细长的形状特性，因此只需考虑纵向的遮挡。

对于全电池遮挡的模拟较为简单，在模拟的时候根据实际情况调整其输入的光强参数即可。那么主要问题就集中于半电池遮挡的模型如何处理，对于块状的电池的半遮挡问题，部分文献^[50]给出了等效电池的方法，该方法提出整块电池出现半遮挡时，假设遮挡的部分面积为 A_s ，未遮挡的部分面积为 A_{normal} ，那么对于整块电池来说，其光生电流可表达为：

$$I_{ph} = \frac{A_s * I_{ph,T,G'} + A_{normal} * I_{ph,T,G}}{A_s + A_{normal}} \quad (3.21)$$

其二极管饱和电流可表达为：

$$I_s = \frac{A_s * I_{s,T,G'} + A_{normal} * I_{s,T,G}}{A_s + A_{normal}} \quad (3.22)$$

式中 G' 表示阴影区域的光强， G 表示式太阳直射区域的光照强度， T 为电池温度。 $I_{ph,T,G'}$ 表示的是假设整块电池在温度为 T 光照强度为 G' 的情况下的光生电流，同样的可推及其他参数。

那么整块电池在遮挡的部分面积为 A_s ，遮挡处光强为 G' ，未遮挡的部分面积为 A_{normal} ，未遮挡部分光强为 G ，温度为 T 的情况下，其电压电流关系为：

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_s * \left(e^{\left(\frac{V+I*R_s*fra}{nV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_p} \\ &= \frac{A_s * I_{ph,T,G'} + A_{normal} * I_{ph,T,G}}{A_s + A_{normal}} - \frac{A_s * I_{s,T,G'} + A_{normal} * I_{s,T,G}}{A_s + A_{normal}} \\ &\quad * \left(e^{\left(\frac{V+I*R_s*fra}{nV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_p} \end{aligned} \quad (3.23)$$

式 (3.23) 为电池电压高于反向偏置电压时的情况，当电压低于反向偏置电压时，可认为整块电池处于反向导通状态。

该方法可以快速的将处于半遮挡状态的电池的伏安特性曲线拟合出来，其缺点是由于其将整块电池放在一起考虑，没有逐一分析同一块电池不同光照部分的情况，适合于那些块状的电池。但是由于非晶硅电池的细长特性，不同光照的地理位置相对较远，在热学分析上应该分开考虑，因此此模型不适合本课题。因此考虑采用新的方法——电路分析法。

在考虑半电池遮挡之前，首先要搞清楚光伏板中电池片之间的连接方式，非

晶硅电池片为细长的条状，电池之间串联方向为沿窄边串联，其电流流向如图 3.11 所示。非晶硅电池片越长其短路电流越大，也就是说同一块电池如果横向切割为两块，这两块在电路中相当于并联关系。假设某电池按一定比例 (fra) 横向切割，那么切割出来的电池在电路中的伏安关系为：

$$\begin{cases} I = \text{fra} * I_{ph} - \text{fra} * I_s * \left(e^{\left(\frac{V + I * R_s * \text{fra}}{nV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s * \text{fra}}{R_p / \text{fra}} & V > V_{bd} \\ V \approx V_{bd} & V < V_{bd} \end{cases} \quad (3.4)$$

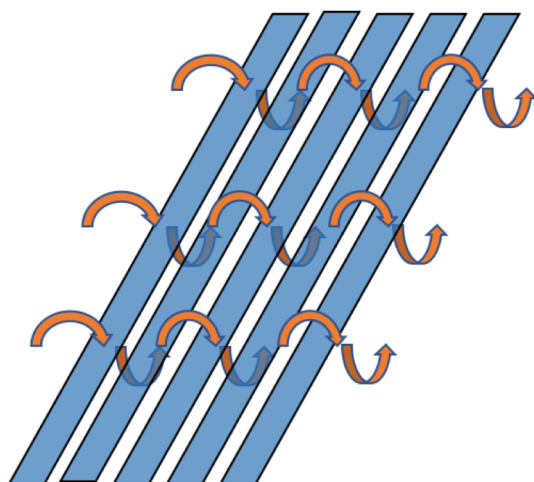


图 3.13 非晶硅电池板中的电流流向

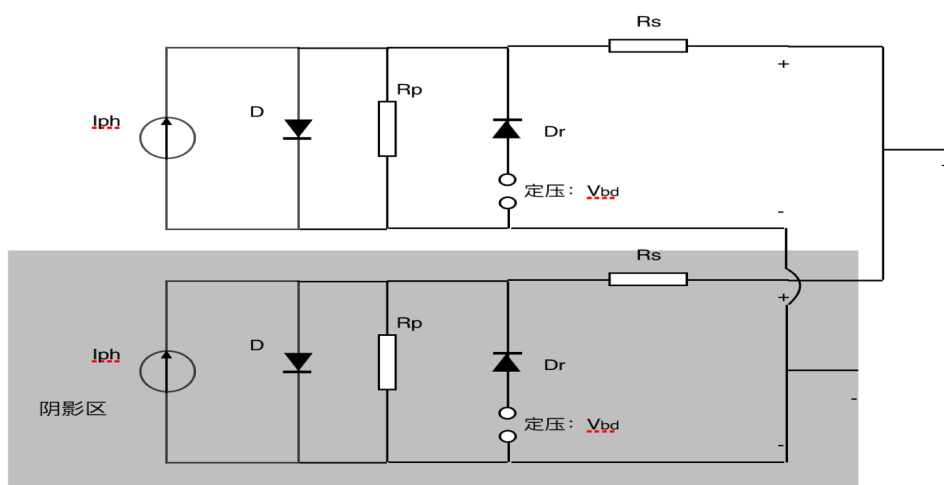


图 3.14 半遮挡电池电路等效图

其电路等效图如图 3.9 所示，其实质就是讲同一块电池拆分为并联的两块电池，这两块电池的参数根据拆分比例改变，这么做的目的就是当电池出现半遮挡时，将遮挡部分视为一块电池，未遮挡的部分视为另外一块电池，两个部分分别

模拟。由于电池面积较小，可以认为同一块电池上至多只有两种光照强度。

结合上文的理论，首先修改正向光伏电池模块，加入反向电池模拟模块，然后将每一块电池拆分为两块并联电池，设置全局变量 $\text{fra}(i)$ 来表示第 i 块电池上的阴影遮挡比例。这样这个模型的输入参数为：1) 温度；2) 太阳直射照度和阴影区域太阳辐射照度；3) 每一块电池上的阴影遮挡比例。

对于照度输入，需要满足这样的要求，每一块电池上有两个照度，一个遮挡区照度，另一个为太阳直射照度。太阳直射照度为仪器直接测得，而遮挡区域的照度根据实际情况而定，为了模拟最差情况，一般设置为 0。遮挡比例反应每一块电池上的遮挡面积大小，如果该块电池没有遮挡则将 fra 设为 0.5（在 `simulink` 中 fra 不可为 0），将两块电池照度都设为直射照度。这些输入参数的确定将通过图像技术来获得，在第六章将详细介绍。

3.3 本章小结

本章主要模拟均匀光照电池板的电流电压输出曲线，主要目的是建立正确的处于正向工作状态的光伏电池模型。考虑到该模型是后续电学模型的基础，而同时又是整个光伏热斑诊断系统的一小部分，因此需要一个快速有效、准确度相对较高的正向电池模拟模型，因此选用单二极管的五参数模型进行模拟。

本章首先要根据厂商给出的数据进行模拟参数的确定，由于描述方程复杂且非线性，考虑到模拟精度和实际使用情况，采用了试算法进行试算，最终得出五个参数。

其次，讨论局部遮挡发生的情况下，带有阴影的单个电池板的伏安特性情况。建立合适的电池反向模型并在原有的正向电池模型基础上加以修改。然后分析部分遮挡电池的处理方法，将光伏电池的全电压模型扩展到全板的模型，并通过实验验证模型的准确性。

影响光伏电池板的环境因素为光照情况和温度，其中光照强度包括两个方面因素，一个是光照的强度，另一个是光照的分布情况。本章首先考虑均匀光照情况，然后考虑到不均匀分布暨局部阴影的情况，建立准确的模拟模型，为之后的阴影影响分析和热斑分析打好基础。

第 4 章 光伏板热学模型

光伏电池板中的光伏电池由于负向带电原因,不光不会成为电路中的能量输出者,反而成为电路中的能量消耗负载。这些损失的能量全部成为热量作用在被遮挡的电池上,这就造成了电池板的局部过热情况,一般的商业电池消耗热功率 $25\text{W}^{[31]}$ 即可视为热斑情况,但是这没有考虑到遮挡处的对流散热、导热等其他情况,也没有考虑到不同材料不同结构的光伏电池板的实际情况,因此需要建立合适的光伏板导热模型。

光伏板的结构一般为钢化玻璃、EVA 粘合层、光伏电池材料非晶硅薄膜、EVA 粘合层、背板材料和支架构成,相对与光伏板尺寸,其厚度非常小,因此可认为光伏板在厚度方向上的温度是一致的。在生产过程中,非晶硅板会被切割成各个小块,相互之间有一定距离,可视为绝热,那么在光伏板的长宽方向上主要是玻璃板上的二维导热。因此其导热模型简化为含有不同内热源的二维玻璃板的导热问题。

当光伏板处于局部阴影状态,其电流输出将远小于其他光伏板,在防反二极管的作用下,该光伏板将短路,但是其自身内部存在小循环的情况。因此,本课题考虑热斑情况时,均考虑的是光伏板处于短路工况下各个电池的情况。

本章主要讨论光伏板的热学模型,利用简化了的热学模型分析局部阴影遮挡后光伏板的温度分布情况,主要关注的是光伏板上最大温度随时间的变化情况。其目的在于,基于第三章电学模拟输出的每一块电池功率,结合光伏电池板的物性参数建立快速而准确地光伏电池板温度分布热学模型,已达到判断是否有热斑存在的目的。

4.1 光伏平板导热问题的简化

光伏板的结构为钢化玻璃层约 3.2mm , EVA 材料约 0.4mm , 非晶硅薄膜约 $0.2\text{-}0.4\text{mm}$, EVA 材料约 0.4mm 以及衬底背板玻璃为 3.2mm , 其导热系数如表 4.1 所示。

表 4.1 光伏电池板构造数据

	厚度 δ mm	导热系数 λ W/(m*K)
玻璃	3.2	1.00
EVA	0.4	0.25
非晶硅薄膜	0.3	148[51]
EVA	0.4	0.25
衬底背板玻璃	3.2	1.00

整块板在厚度方向上的热阻由下式计算：

$$R = \sum_i^5 \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (4.1)$$

由（4.1）式可求得光伏板厚度方向的热阻为 $9.62\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ，那么整个光伏板在厚度方向的等效导热系数由下式求得：

$$\lambda = \frac{\delta}{R} \quad (4.2)$$

计算后得到光伏板在厚度方向的等效导热系数为 $0.833\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，我们假设光伏板处于空气对流之中，空气对流情况为自然通风条件。

上海地区平均风速为 $2\text{-}4\text{m}/\text{s}$ ，问题简化为室温下（设为 20 摄氏度）空气在常压下以 $2\text{-}4\text{m}/\text{s}$ 的速度外掠长 $1000\text{-}1300\text{mm}$ 的平板，假定平板温度为 $50\text{-}60$ 摄氏度，空气的流动始终为层流，那么全板的换热系数为^[52]：

$$h = 0.664 * \frac{\lambda_{air}}{x} * Re_x^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.3)$$

式中的因此空气与板的换热系数在 $5\text{-}15\text{W}/\text{m}^2$ 之间。那么板与空气对流换热的毕渥准则数为：

$$Bi = \frac{h\delta}{\lambda} \quad (4.4)$$

计算得毕渥数小于 0.1 ，可以使用集总参数法，因此可以认为光伏板在厚度方向上的温度不变，问题可以简化为二维板的导热问题。

4.2 光伏板热学模型构建与模拟参数的选定

在构建模型之前有以下几个基本假设：

- 1) 三维问题简化为二维问题，不考虑厚度方向上的温度变化；
- 2) 由于结构为“夹心饼干”结构，而非晶硅电池之间可视为绝热，因此可认为导热均在玻璃层中进行，模型简化为厚度为 7mm 的玻璃板的二维导热问题；
- 3) 光伏板处于两面空气对流中，光伏板的四边认为绝热；
- 4) 在实际过程中，由于光伏板温度变化会引起电池属性变化从而影响电功

率，而由于模拟时间较短，因此在模拟时将其简化为电路属性不会随温度变化暨各个部分的热功率不随时间变化；

5) 模拟过程认为太阳辐射和表面的空气对流换热系数保持不变。

4.2.1 二维平板导热的描述方程组及参数设置

根据以上基本假设，可以列出光伏板模型的基本描述方程：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_v(x, y) \quad (4.5)$$

其边界条件是在四条边处绝热，因此有：

$$-\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) = 0 \quad (4.6)$$

其中， ρ 为玻璃的密度，取值为 2500kg/m^3 ， c 为玻璃的比热容，取值为 750J/kgK ， λ 取值 1W/mK 。

(4.5) 中比较复杂的是 $q_v(x, y)$ 的取值， $q_v(x, y)$ 是一个随地理位置而变化的函数，表示单位体积的内热源，对于单位面积的热量 $Q_v(x, y)$ 包括了三个部分：

1、因电流的热效应而产生的热量 $Q_{elec}(x, y)$

这部分热量是我们研究的重点，也是热斑产生的重要原因。在电池正常工作时，这部分的内热源是非常小的几乎可以忽略不计。但是当电池处于阴影状态中时，根据第三章的模型可以计算出该电池上的热功率较大，进而造成该部分电池温度的上升，因此当局部阴影发生时，此项是一个关于地理位置的函数。

2、与空气的换热 Q_{air}

在三维问题简化为二维问题时，将平板与空气的换热视为一个对于板作用的内热源，在模拟中，认为空气与平板的换热系数不会改变，统一取值 10W/m^2 。与空气的换热可以写为：

$$Q_{air} = h(x, y) * (T_{air} - T) * A \quad (4.7)$$

注意到局部阴影产生时，有可能是绝热遮挡片或者其他遮挡情况会影响到被遮挡电池表面的空气与板的对流换热系数，因此在模拟中，空气与板的对流换热系数也是一个和地理位置有关的函数，如果是遮挡引起的自然光阴影，可以认为换热系数与太阳直射区域的换热系数一样，若是人为的遮挡等，则需要视具体情况而定。

3、太阳直射产生的热效应

太阳直射产生的热量一部分被光伏板吸收转化为了电能经光伏板输出，一部分转化为了热量，根据文献^[53]估算约为 30%-50%。这其中能量包括了转化为电能的能量和转化为热量的能量，而光伏板的光电转化效率为 15-20%左右因此热吸收率约为 15-35%之间。由太阳辐射而吸收的热量为：

$$Q_{solar} = \beta * G * A \quad (4.8)$$

吸收系数 β 预计在 15-35%之间,这就需要用试验数据来估算。首先我们分析没有阴影情况下的光伏板情况。

无阴影情况下光伏板可以认为内热源处处一致,而在工作一定时间后其温度到达了稳定状态,在这样的情况下式(4.5)直接简化为:

$$q_v = \frac{A}{V} [h(x, y) * (T_{air} - T) + q_{elec} + \beta * G] = 0 \quad (4.9)$$

在均匀光照正常输出电流的情况之下, q_{elec} 近似为 0。这样可以得到:

$$G = \frac{h}{\beta} * (T - T_{air}) \quad (4.10)$$

根据简化的模型可以发现,太阳辐照强度与太阳能光伏板和环境之间的温差为近似的线性关系。图 4.1 所示是多组在不同的光照条件下,无阴影太阳能板的

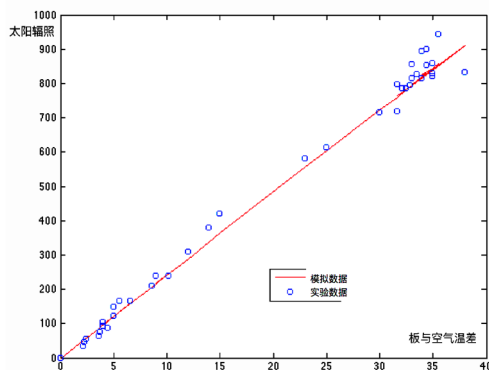


图 4.1 均匀光照光伏板表面光照强度与背板温度关系

实验数据。

当对流换热系数取值为 $10\text{W}/\text{m}^2$ 时,利用线性拟合可以得到吸收率约为 30%。

至此,热学模型所需的所有参数均设置完毕,下面的工作是要求解二维光伏板上的温度场。

4.2.2 Matlab PdeToolBox 模拟工具

式(4.5)是一个非常复杂的椭圆形偏微分方程,由于内热源随地理位置的变化而变化又是一个非线性的问题。解决这样的导热问题有很多计算软件如 fluent 等。考虑到本模型方程虽然复杂但是模型相较于其他的热学或者流体力学模型,相对较为简单,本课题的其他模型都建立在 Matlab 平台上,因此本模型将建立在 Matlab 平台上。

Matlab PDE ToolBox 是专门用于解决偏微分方程的工具箱,有两种方式建模,

一种是简易模型但是图像友好界面 (GUI), 可设置各种偏微分方程应用问题; 另外一种针对复杂地理位置或者复杂模型进行求解。本例由于内热源随地理位置改变因此无法简单的使用前一种方法, 需要代码求解。

Matlab PDE Tool Box 采用的是有限元方法解偏微分方程, 其基本思想是将复杂的连续域离散为一个一个小的连着的子域, 将复杂的微分方程定解问题, 利用泰勒展开等方法变成线性方程组问题的一个过程。首先针对需要求解的对象网格化, 划分为边长 1mm 的正三角形。然后利用 Matlab 的计算能力进行计算, 时间步长设置为 1s。

对于边界条件的设定, 由于四个边为绝热情况, 在 PDE 模型里面设置为纽曼条件, PDE 中纽曼条件 (Neumann Boundary Condition) 为:

$$\vec{n} * c * \overrightarrow{grad}(T) + qT = g \quad (4.11)$$

四个边绝热, 所以 q 和 g 全部设为 0 即可。

初始状态下, 二维板各处温度相等, 温度值视实际情况而定, 一般设为 55 摄氏度。

本例没有流动, 为纯传导问题, 因此采用中心差分方法, 对于时间项采用也是差分法。由于本例中内热源为地理位置的函数, 设置较为复杂, 采用 GUI 界面设置费时费力, 因此考虑采用编码的形式调用。

4.3 本章小结

本章讨论热学模型, 首先根据实际情况进行对模型进行了简化, 将复杂的三维问题转换为二维平板的导热问题, 提高了计算速度, 并在一定理论基础上推导模型所需要的各个参数, 建立了光伏电池板的二维非稳态导热模型。

任何局部遮挡都会引起热斑问题, 只是热斑的严重程度大小不一而已, 对于电池温度的极限, 不同文献针对不同材料有不同的解答。有些文献提出电池所消耗的热功率超过 25W, 则视为热斑发生。本文认为, 单纯的用功率去囊括所有材料的光伏板是不严谨的, 原因在于不同的光伏板的结构不一样, 电池形状不一样会导致散热情况不一样。

由于光伏板结构中 EVA 涂层材料的熔点为 85 摄氏度, 稳定的太阳强度一般在 20 分钟左右, 本文有如下规定:

1) 如果光伏板最高温度在 20 分钟内可以达到 85 摄氏度, 那么则认为热斑现象发生;

2) 若光伏板最高温度在 10 分钟内达到 85 摄氏度, 则认为其温度升高速度非常快, 视为严重热斑;

3) 若光伏板最高温度在 15 分钟内到达 85 摄氏度, 则视为危险热斑。

第 5 章 光伏板电热学实验与模型验证

本章主要目的在于通过实验数据验证第 3、4 章所建立的电热学模型的准确性和可靠性，实验主要分为三个部分：1) 验证所建立的处于均匀光照条件下的电学模型准确度；2) 验证处于局部遮挡条件下的电学模型准确度；3) 验证处于局部遮挡条件下的热学模型准确度。

5.1 实验平台与实验设计

本课题主要针对单块电池板的不均匀光照的情况，因此所有的实验均针对单块太阳能电池板，主要设备为新奥公司生产的 ETS-120 型薄膜太阳能光伏板，厂商给出的参数如下：最大功率 120W，开路电压 141V，短路电流为 1.42A，单块电池板共有 108 块电池片串联。直流电流计、直流电压计以及 TEQ-2 太阳辐射仪。为了测量环境温度和太阳能板的背板温度，本实验使用 K 型 WRNT-01 热电偶。为了测量光伏电池板的伏安特性曲线，使用了 0-1000 欧姆，最大可承受电流为 1.5A 的可变电阻进行试验。本课题不考虑并网，所有试验均在直流情况下进行。

实验于 2015 年 5-7 月的晴朗天气下进行，一共分为了三大类别实验，主要实验平台如图 5.1 所示。前两大类实验为电学实验，实验原理如图 5.2 所示。

第一大类实验是均匀光照条件下对光伏电池板电流电压曲线的测定，保证整个光伏板完全处于太阳直射之下，将其短接测定短路电流，然后将其开路测定开路电压。然后均匀的调整滑动变阻器阻值从零开始至最大值，记录下所有的电压电流点，读取太阳辐射强度和电池板的背板温度。

第二大类实验是对局部遮挡情况下，对光伏板的电流电压曲线的测定。实验共分为两组。第一组实验针对的是全电池的遮挡，用黑色胶布完全依次遮挡 1-5 和 8 列电池；第二组实验针对的是半电池的遮挡，用黑色胶布依次遮挡 1、2、4、5、6 列电池的一半面积。

第三大类实验是针对局部遮挡情况下，对光伏板阴影电池和与阴影电池并联的电池的温度随时间变化进行测量。热电偶测量出来的数据每隔一分钟自动记录。本大类实验同样分为两组，第一组为全遮挡实验，第二组为半遮挡实验，遮挡方式与第二大类一样。该实验将热电偶置于处于局部遮挡电池或者与局部遮挡电池并联的电池的中间，数据采集器每一分钟采样一次，实验共进行 15 分钟，

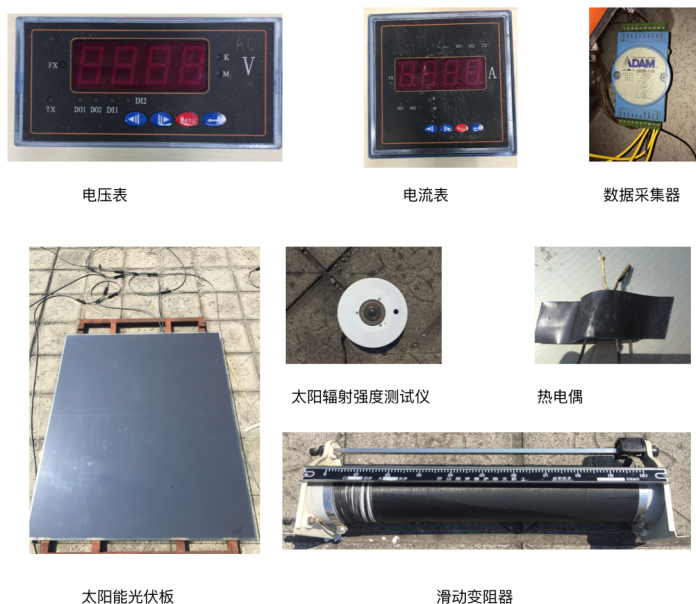


图 5.1 实验仪器图

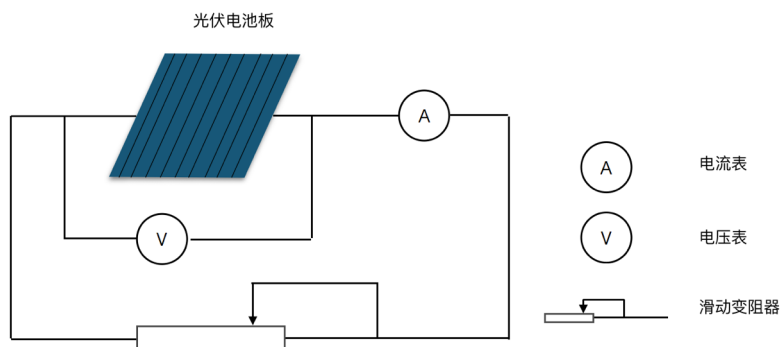


图 5.2 实验原理示意图

第一大类实验是验证第 3 章中处于正向电压下的光伏电池电路特性，五参数模型的准确性是本课题所有模型的基础，

第二大类实验是验证各种遮挡情况下光伏电池电学模型的准确性，电学模型的准确度关系到热学模型的准确性。

第三大类实验是验证不同遮挡条件下光伏电池板热学模型的准确性。

验证标准选取平均绝对误差 MAE 和均方根误差 RMSE 来验证实验与模拟结果的偏差程度，根据下列公式计算：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - \hat{I}_i) \quad (5.1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_i - \hat{I}_i}{\hat{I}_i} \right)^2} \quad (5.2)$$

式中的 I_i 为实验数据， \hat{I}_i 为该电压下的模拟计算得出的电流值。

5.2 实验结果与模型验证

对于电路实验暨第一和第二大类实验，需要采集的数据有处于太阳直射区域的电池板温度，光伏板表面的太阳直射辐射强度，光伏板的电压电流值以及光伏板表面的遮挡情况。

对于第三类实验，需要采集的数据有光伏板表面最大温度的随时间变化情况，环境温度以及光伏板表面太阳直射区域的辐射强度，表面的遮挡情况。

由于实验组数较多，变量参数较多，因此将采用简写形式来描述实验状况，简写规则如图 5.3 所示

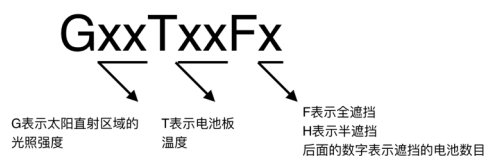


图 5.3 实验参数简写规则示意

例如 G650T50F1 表示非阴影区域光照强度为 $650\text{W}/\text{m}^2$ ，电池板温度为 50 摄氏度，一块电池板完全遮挡的实验条件或者模拟条件；G820T65H6 表示的非阴影区域光照强度为 $820\text{W}/\text{m}^2$ ，电池板温度为 65 摄氏度，将六块电池板遮挡，每块电池上只遮挡一半的实验条件。

5.2.1 均匀光照下光伏板电学实验与模型验证

首先在无遮挡的情况下，进行多组实验。根据热电偶的温度测量发现，太阳光伏板的背板温度均维持在 45 摄氏度至 55 摄氏度之间，图 5.4-5.7 为部分实验数据与模拟结果的对比图，其实验状况分别为

- 1) 太阳辐射强度 $600\text{W}/\text{m}^2$ ，背板温度 45 摄氏度；
- 2) 太阳辐射强度 $650\text{W}/\text{m}^2$ ，背板温度约 48 摄氏度；
- 3) 太阳辐射强度 $730\text{W}/\text{m}^2$ ，背板温度约为 52 摄氏度；

4) 太阳辐射强度 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，背板温度为 55 摄氏度；

表 5.1 列出了四次试验的对比结果。RAE 和 RMSE 均在可接受范围内，可认为模拟成功。

表 5.1 均匀光照光伏板实验数据与模拟结果对照表

编号	实验条件	RAE	RMSE
1	$600\text{W}/\text{m}^2$ ，45 摄氏度	0.23	0.005
2	$650\text{W}/\text{m}^2$ ，48 摄氏度	0.32	0.012
3	$730\text{W}/\text{m}^2$ ，52 摄氏度	0.35	0.02
4	$800\text{W}/\text{m}^2$ ，55 摄氏度	0.19	0.009

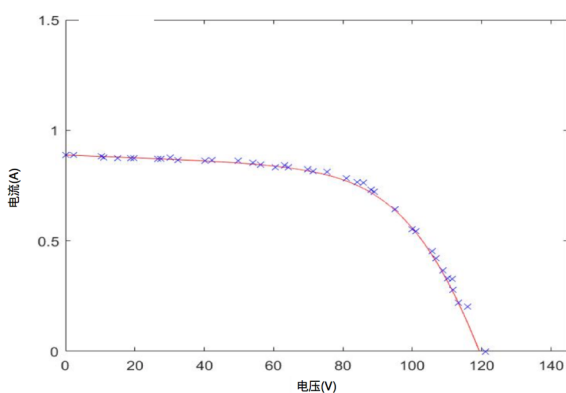


图 5.4 太阳辐射强度 $600\text{W}/\text{m}^2$ ，背板温度 45 摄氏度实验数据与模拟曲线

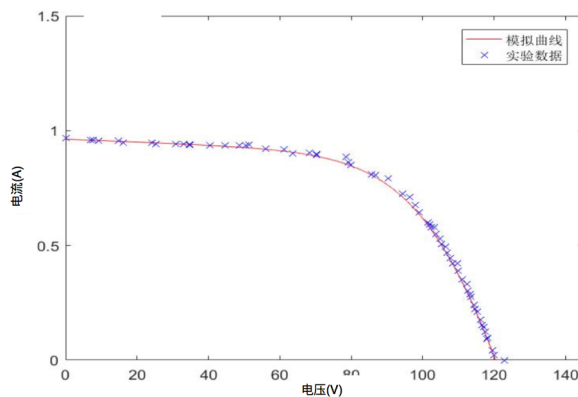


图 5.5 太阳辐射强度 $650\text{W}/\text{m}^2$ ，背板温度约 48 摄氏度实验数据与模拟曲线

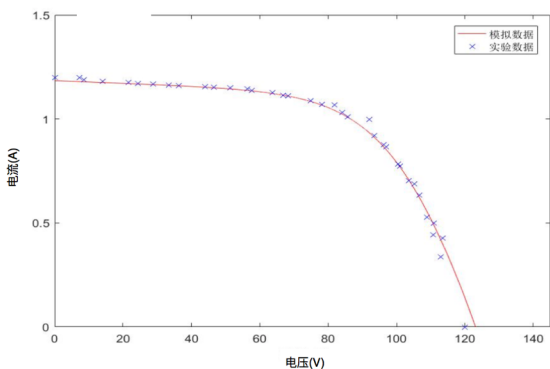


图 5.6 太阳辐射强度 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，背板温度为 55 摄氏度实验数据与模拟曲线

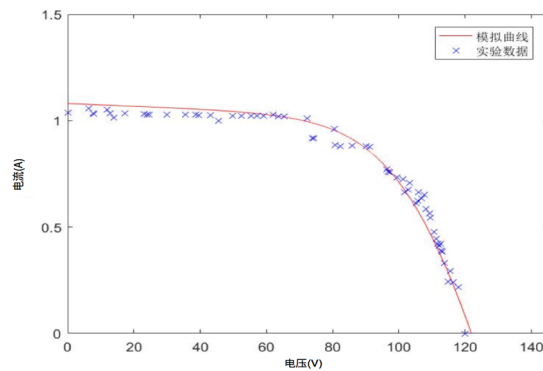


图 5.7 太阳辐射强度 $730\text{W}/\text{m}^2$ ，背板温度约为 52 摄氏度实验数据与模拟曲线

从均方根检验的结果来看，模型基本反映了实验数据，可以认为五参数模型可以准确描述实验状况，因此可以在此基础上发展光伏系统的全电压模型。

5.2.2 局部遮挡下的光伏板电学实验与模型验证

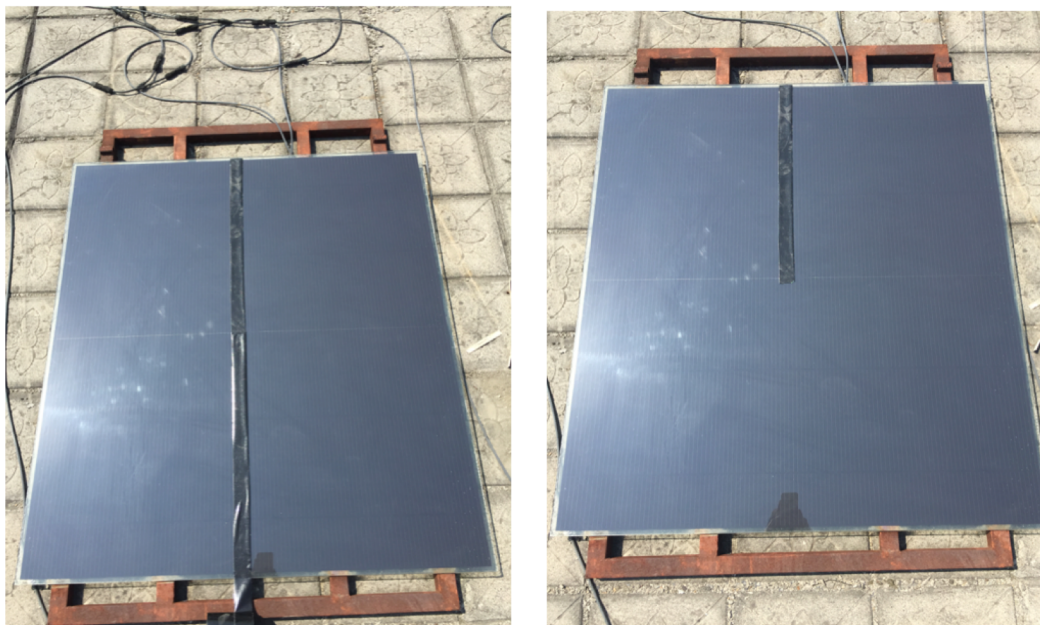


图 5.8 左：全电池遮挡实验图（以遮挡四列为例） 右：半电池遮挡实验图（以遮挡四列为例）

非均匀光照实验采用黑色胶布进行不透光遮挡，实验共分为两组，首先是分别完全遮挡 1、2、3、5、8 列电池，如图 5.8 所示（以遮挡五列为例）；第二组实验为 1、2、4、5、6 列的半遮挡实验，如图 5.8 所示（以半遮挡五列为例）。

将全遮挡的十次试验的结果与模拟结果做对比，使用平均绝对误差和均方根误差进行校验，得到表 5.2。

表 5.2 全遮挡电池板电学模拟结果

编号	实验条件	MAE	RMSE
1	G650T50F1	0.12	0.009
2	G770T50F1	0.43	0.122
3	G810T55F2	0.34	0.109
4	G710T55F2	0.48	0.132
5	G720T55F3	0.16	0.004
6	G800T55F3	0.09	0.001
7	G620T55F5	0.23	0.009
8	G730T55F5	0.08	0.001
9	G520T55F8	0.26	0.012
10	G590T55F8	0.32	0.107

将半遮挡的五次实验的结果与模拟结果进行对比，得到表 5.3。

表 5.3 半遮挡电池板电学模拟结果

编号	实验条件	MAE	RMSE
1	G820T65H1	0.12	0.009
2	G820T65H2	0.34	0.012
3	G880T65H4	0.16	0.013
4	G750T65H5	0.15	0.011
5	G780T60H6	0.23	0.021

实验与模拟对比图如图 5.9-5.23 所示：

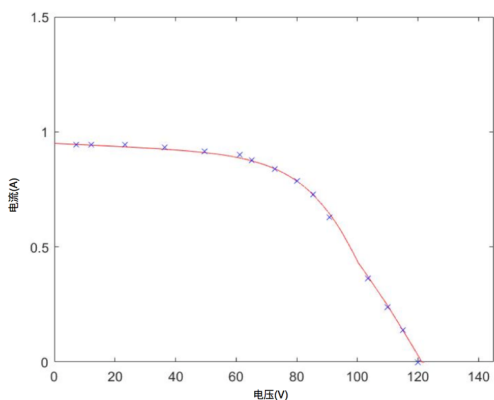


图 5.9 G650T50F1 实验数据与模拟曲线对比

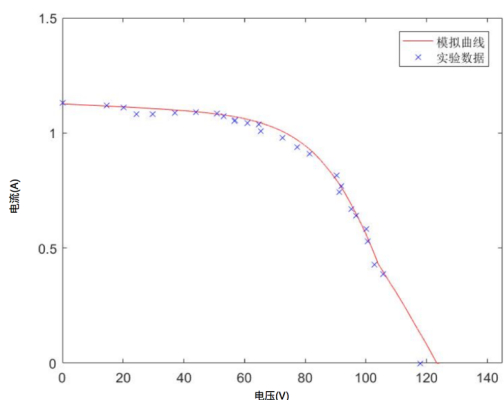


图 5.10 G770T50F1 实验数据与模拟曲线对比

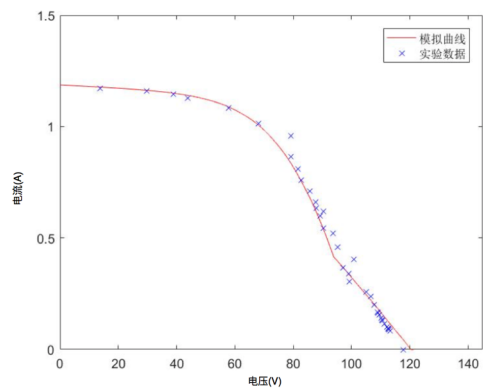


图 5.11 G810T55F2 实验数据与模拟曲线对比

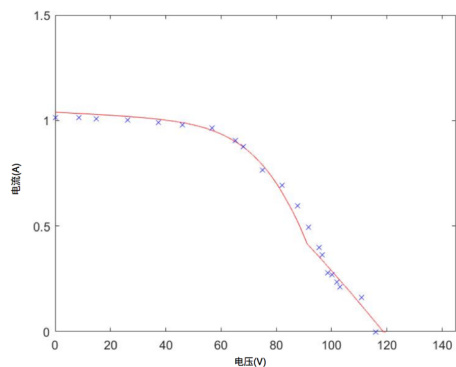


图 5.12 G710T55F2 实验数据与模拟曲线对比

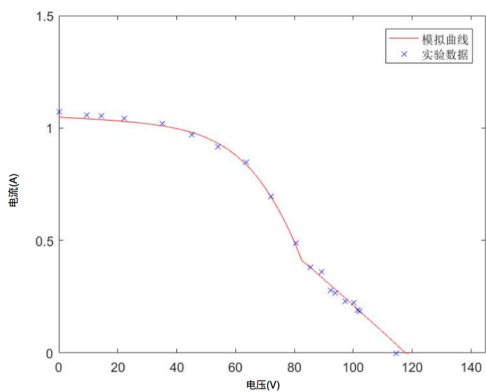


图 5.13 G720T55F3 实验数据与模拟曲线对比

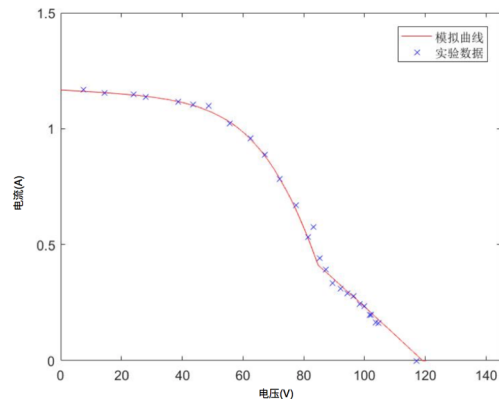


图 5.14 G800T55F3 实验数据与模拟曲线对比

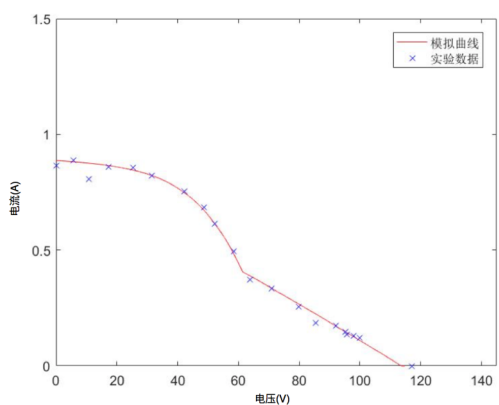


图 5.15 G620T55F5 实验数据与模拟曲线对比

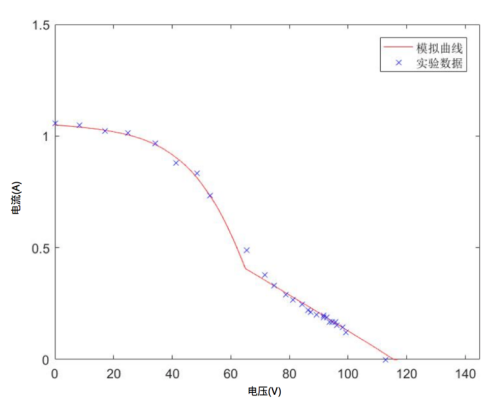


图 5.16 G730T55F5 实验数据与模拟曲线对比

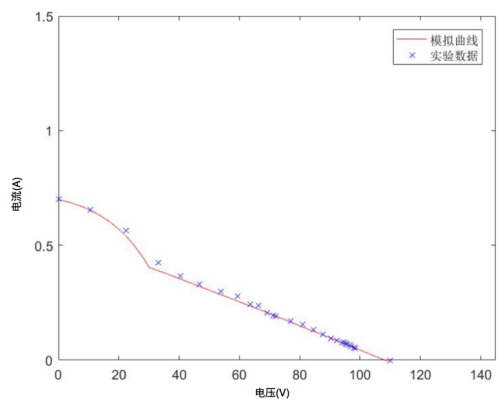


图 5.17 G520T55F8 实验数据与模拟曲线对比

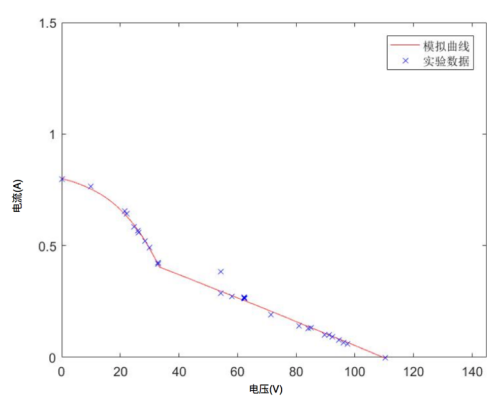


图 5.18 G590T55F8 实验数据与模拟曲线对比

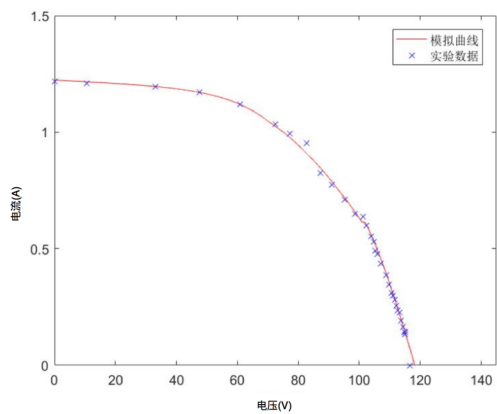


图 5.19 G820T65H1 实验数据与模拟曲线对比

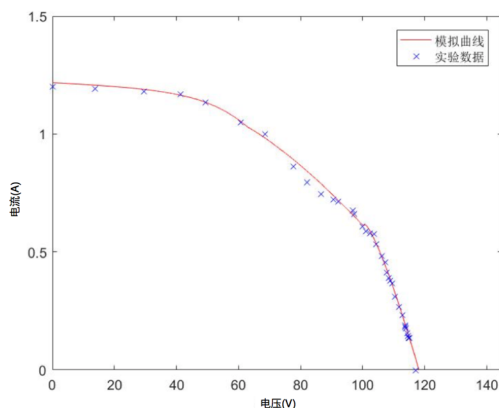


图 5.20 G820T65H2 实验数据与模拟曲线对比

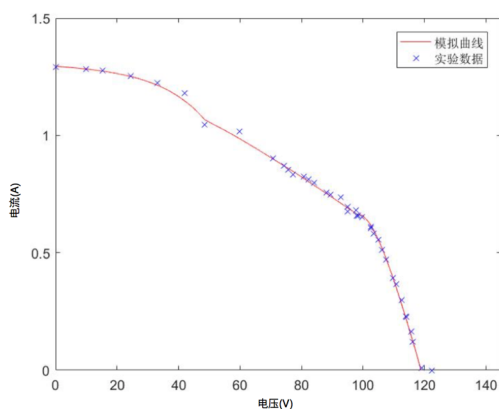


图 5.21 G880T65H4 实验数据与模拟曲线对比

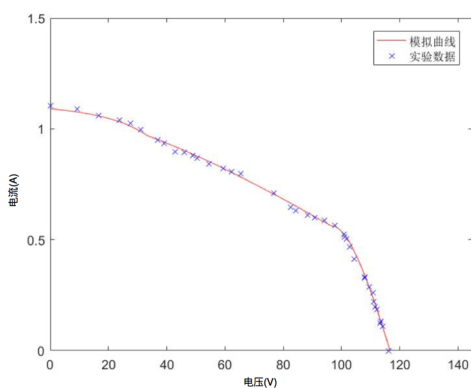


图 5.22 G750T65H5 实验数据与模拟曲线对比

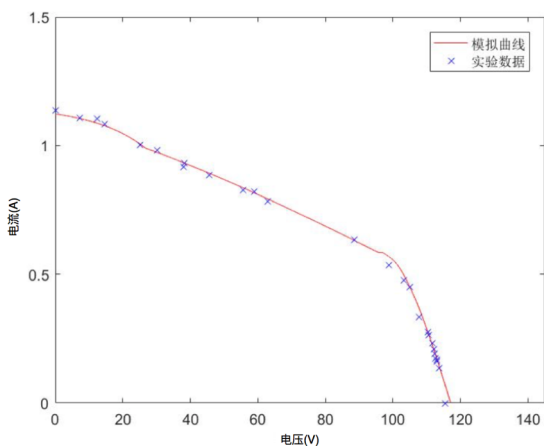


图 5.23 G780T60H6 实验数据与模拟曲线对比

从实验和模拟的结果来看，影响光伏电池板的环境因素为光照情况和温度，其中光照强度包括两个方面因素，一个是光照的强度，另一个是光照的分布情况。阴影遮挡对光伏板的功率输出影响很大，同时不同类别的阴影遮挡对光伏板的影响不一，具体的分析将在第五章阐述。

5.2.3 局部遮挡下的光伏板热学实验与模型验证

由于实验条件限制，无法直接测量阴影区域电池的电路特性，因此在电学模型的基础上，将实验条件输入到电学模型中进行模拟，再将模拟参数作为热学模型的输入参数。

第一组实验为全遮挡，受实验条件限制，尽量选取了在同样光照强度下进行的实验数据，选择的实验编号记录为：G770T50F1、G710T55F2、G720T55F3、G730T55F5、G700T55F8。表 5.4 给出了电学模型的计算结果，主要是阴影区域电池的消耗功率。

表 5.4 全遮挡热学模拟的输入参数

实验编号	电池热功率 W	单位面积热功率 W/m ²
G770T50F1	10.67	820
G710T55F2	18	697
G720T55F3	26.67	684
G730T55F5	43.5	670
G1000T55F8	90.85	873.57

将模拟数据输入到热学模型中去，然后和实验数据进行比较，可以得到如图 5.24-5.28 的对比图。

第二组实验为半遮挡，选取了 G820T55H1、G790T55H2、G820T65H4、G790T55H5、G780T60H6。得到表 5.5 的数据，注意到半遮挡状态下，光伏板分为三个区域，一个是阴影电池区，简称为 SS 区，一个是与阴影电池并联的处于太阳直射的电池区 SN 区以及其他正常太阳能电池区域 N 区。其中 SN 区的电池热功率会高于 SS 区，主要是这两个区域电池处于并联状态，处于同样的负压之下，而 SN 区由于处于太阳直射下有光生电流因此电流较大而功率较大。模拟结果如表 5.3 所示。

表 5.5 半遮挡热学模拟输入参数

实验编号	SN 电池热功率 W	SN 单位面积热功率 W/m ²	SS 电池热功率 W	SS 单位面积热功率 W/m ²
G820T55H1	8.56	1317	2.8	436
G790T55H2	15.87	1221	5.2245	401
G820T65H4	29.8	1126	10.4	407
G790T55H5	34.14	1050	10.919	336
G780T60H6	42	1080	13.26	340

将模拟数据输入到热学模型中去，然后和实验数据进行比较，可以得到如图 5.29-5.33 的对比图。

表 5.6 给出了这十组实验的模拟和实验数据对比分析结果，依然采用 MAE

和 RMSE 两种方法进行比对分析。

表 5.6 热学模型实验模拟对比表

实验编号	MAE	RMSE
G770T50F1	0.54	0.26
G710T55F2	0.42	0.23
G720T55F3	0.25	0.19
G730T55F5	-0.25	0.34
G700T55F8	0.12	0.08
G820T55H1	0.51	0.31
G790T55H2	0.14	0.15
G820T65H4	0.12	0.04
G790T55H5	0.15	0.12
G780T60H6	0.17	0.09

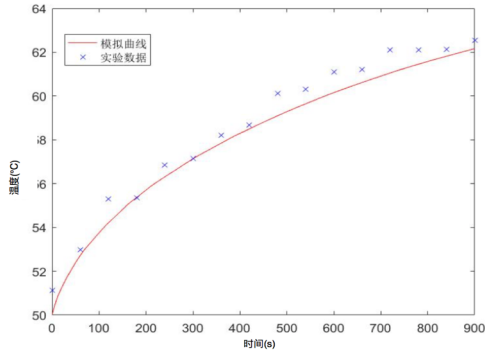


图 5.24 G770T50F1 温度实验数据与模拟曲线对比

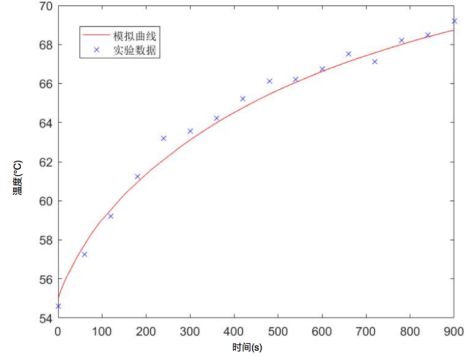


图 5.25 G710T55F2 温度实验数据与模拟曲线对比

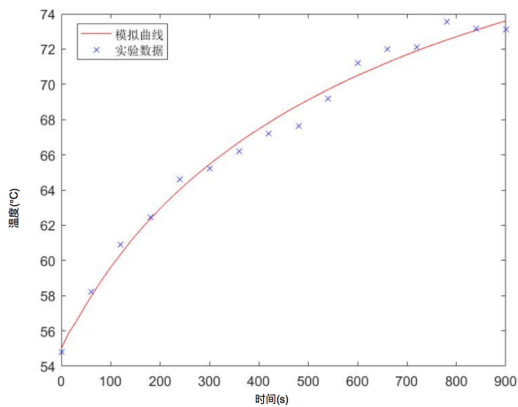


图 5.26 G720T55F3 温度实验数据与模拟曲线对比

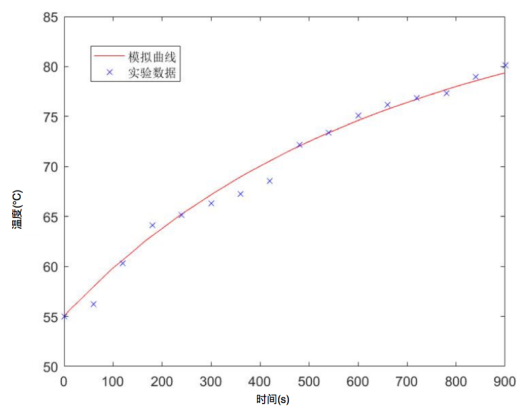


图 5.27 G730T55F5 温度实验数据与模拟曲线对比

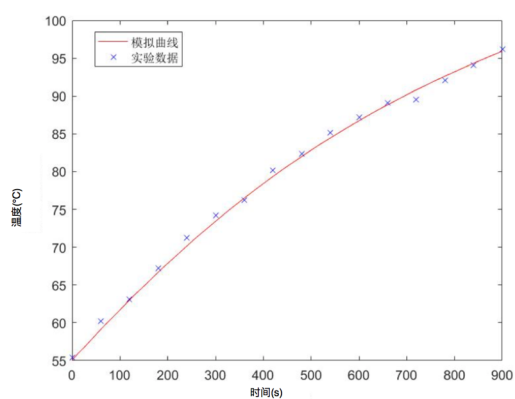


图 5.28 G700T55F8 温度实验数据与模拟曲线对比

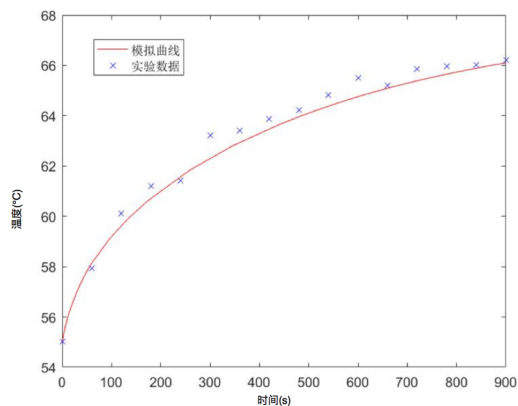


图 5.29 G820T55H1 温度实验数据与模拟曲线对比

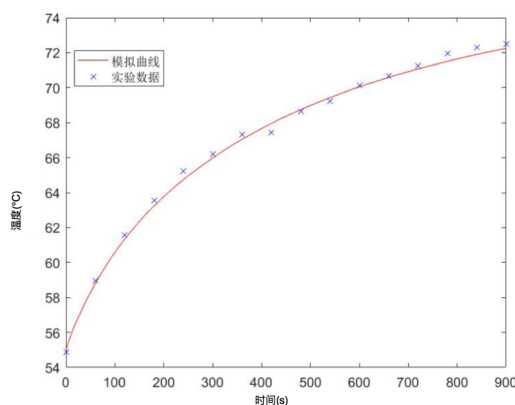


图 5.30 G790T55H2 温度实验数据与模拟曲线对比

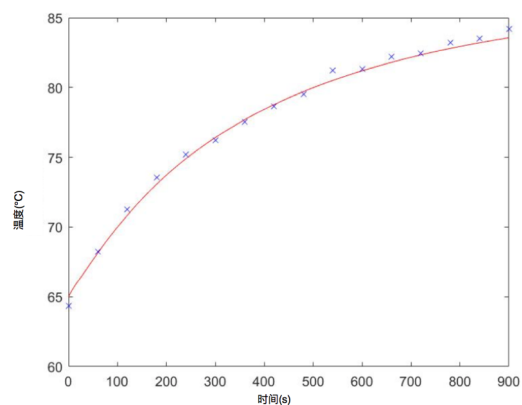


图 5.31 G820T65H4 温度实验数据与模拟曲线对比

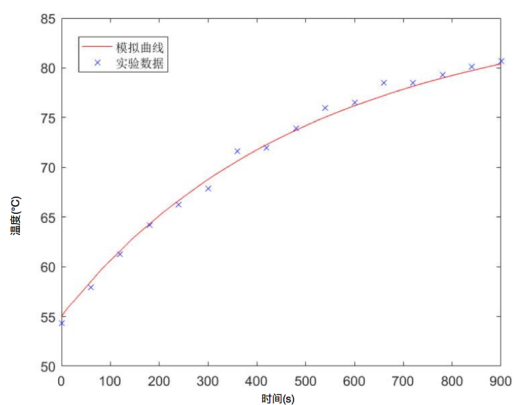


图 5.32 G790T55H5 温度实验数据与模拟曲线对比

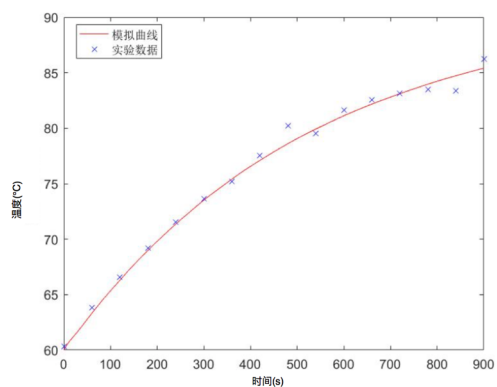


图 5.33 G780T60H6 温度实验数据与模拟曲线对比



图 5.34 光伏板表面的褐斑

从误差校验来说，热学模型的精准度不如电学模型，主要原因是实验时温度处于非稳态的情况，因此很难有较为准确地读数，但是误差还是在可接受范围内，因此可以认为模型可以反映温度场的变化情况。

此外，所有试验中在 G700T55F8 这一组实验中发现，光伏板表面出现了褐色斑点，如图 5.34 所示。且密切观察一天之后仍然没有消失，因此可以认为这一组实验出现了热斑情况。

5.3 本章小结

本章主要介绍了实验方法，模型校验的准则以及实验数据与模型的匹配程度，主要有如下成果：

1) 实验数据证实了第二章所建立的光伏板电学模型的准确性，其较准确且快速的反映任意温度任意光照强度以及遮挡下光伏板的电路输出以及每块电池的热功率的情况。

2) 将电学模型的模拟结果作为输入参数输入到热学模型中去，结合其他实验测量数据等计算出来的光伏板最大温度变化情况与模型较为一致，可以认为热学模型较为准确反映光伏板表面最大温度的变化情况。

实验证明电热学模型可以反映真实情况，同时注意到了不同阴影对光伏板的功率输出和温度场的影响，因此需要进行不同类型遮挡的模拟分析来分析不同阴影对光伏板的影响情况，从而可以为阴影检测提供检测方向。

第 6 章 不同类型遮挡模拟分析

目前影响太阳能光伏组件发展的主要因素是光伏板的寿命较低导致回收成本的周期较长。尽管所有的光伏板在出厂之前都经历了严格的外在环境使用工况测试。但是在实际使用过程中，依然会出现诸如设计不规范，操作不规范或者新建建筑、电线杆遮挡等各种问题。

从前几章已经可以看出，局部遮挡对光伏电池的影响主要有两个：1) 严重影响光伏电池板的功率输出；2) 造成的局部升温现象会影响光伏板使用寿命，严重时可能损坏光伏设备。

在实际过程中，由于光伏电池板的伏安特性曲线为非线性的函数关系，为了更好的保证光伏板的输出，采用最大功率点方法进行控制 (MPPT)，局部阴影带来的问题是光伏板的功率电压曲线出现了多峰的情况，造成了系统的不稳定。

本课题重点不在控制方面，因此主要研究的是局部阴影带来的最大功率损失以及局部升温引发的热斑问题。

热斑问题，归根结底是电池的温度问题，电池的温度到达一定的极限，会损坏电池板结构，严重时可能会烧穿电池。根据厂商给的技术参数，光伏电池板工作温度的极限为 85 摄氏度，这是因为 EVA 涂层材料的熔点为 85 摄氏度，但是在一些文献的研究过程中发现，有的光伏板即使短暂的到达 120 多度也不会发生非常明显的变化。[54]但是，总的来说局部过热都会影响电池板的寿命，考虑到局部遮挡多数来自于自然阴影，而自然阴影遮挡同一区域一般不会超过 10-15 分钟，因此对于热斑在本课题中有如下几个判定准则：

1) 在遮挡发生的十分钟内，如果光伏电池板的最高温度超过 85 摄氏度，视为严重热斑现象

2) 如果光伏板最高温度在十分钟内未到达 85 摄氏度，而在十五分钟内达到 85 摄氏度，视为存在热斑危险。

自然界的阴影千变万化，遮挡物的形状、地理位置、遮挡方式、透光率等都会对光伏板产生不同的影响。基于前四章构建的电热学模型，本章将对如下组合分别进行模拟：

1) 太阳辐射强度为 400、600、800 和 1000W/m² 时，采用完全遮挡的形式，遮挡片为不透光绝热遮挡，分别遮挡 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 列，根据电学模拟结果，判断可能出现热斑的情况，进行热学模拟；

2) 太阳辐射强度为 400、600、800 和 1000W/m² 时，采用每块电池遮挡一半的形式，遮挡片为不透光绝热遮挡，分别遮挡 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 列，根据电学模拟结果，判断可能出现热斑的情况，进行热学模拟；

6.1 阴影的分类及其对光伏板温度的影响

不同遮挡方式首先引起光伏板电流电压的输出变化从而改变光伏电池表面的热功率，由于光伏电池板内热源的分布情况的改变而引起温度的改变。阴影对于光伏板的影响主要是最大功率输出的显著减小和局部温度的升高问题。

6.1.1 阴影影响系数定义

为了更好的比较不同面积大小的光伏板，我们引入阴影影响系数。其定义如下：

$$\text{Factor}_{G_{xx}T_{xx}Shadow} = \frac{P_{normal,max} - P_{shadow,max}}{S_{shadow}} \quad (6.1)$$

式中 Factor 的下标表示光伏板的工作状态，其命名规则与前一章中所介绍的实验简称类似，Shadow 描述阴影的情况。 $P_{normal,max}$ 表示的是在该温度和光照条件下，光伏板没有阴影时可以输出的最大功率，而 $P_{shadow,max}$ 表示在该种阴影下，同样的温度以及同样的太阳直射辐照强度时光伏板所能输出的最大功率， S_{shadow} 表示阴影的面积，阴影影响因子的单位为 W/m^2 。

引入了阴影影响系数之后，对于不同阴影引起的功率损失就有一个相对合理的比较标准。

6.1.2 全电池完全遮挡阴影影响模拟

如第三章的定义所述，为了更好地比较完全遮挡不同电池数对电池板的影响，在前几章的模型基础上，进行如下模拟：在电池板温度为 55 摄氏度情况下，环境温度为 25 摄氏度，光照强度分别为 400、600、800、1000 W/m^2 下，完全遮挡 1-15 列电池。为了简化称呼，采用与前文一致的模拟命名方式。例如：G1000T55F4 表示无阴影区域光照强度为 1000 W/m^2 ，电池板温度为 55 摄氏度，完全遮挡 4 块电池的实验情况；G600T55H8 表示无阴影区域光照强度为 600 W/m^2 ，电池板温度为 55 摄氏度，遮挡 8 块电池，每块电池只遮挡一半的实验情况，所有遮挡区域的光强视为 0 W/m^2 。

第一组模拟对比为非阴影区域的太阳辐射强度为 400 W/m^2 ，电池温度为 55

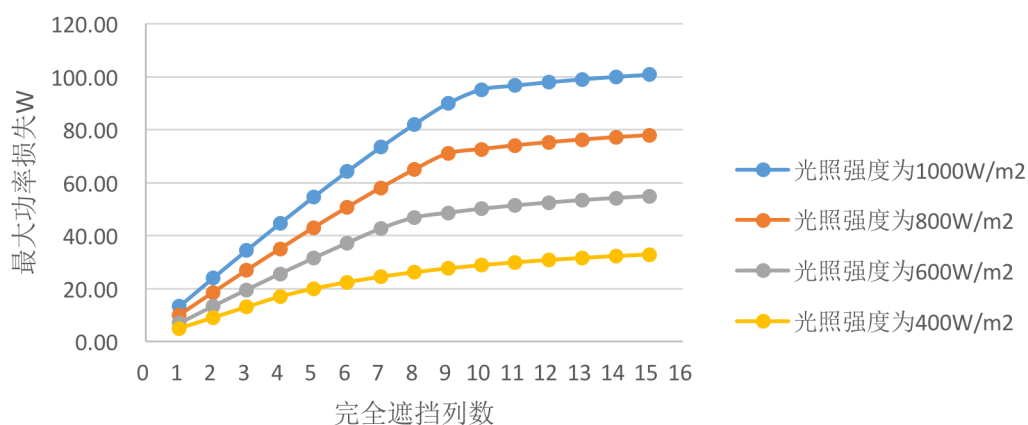


图 6.1 不同全遮挡情况下的最大功率损失情况

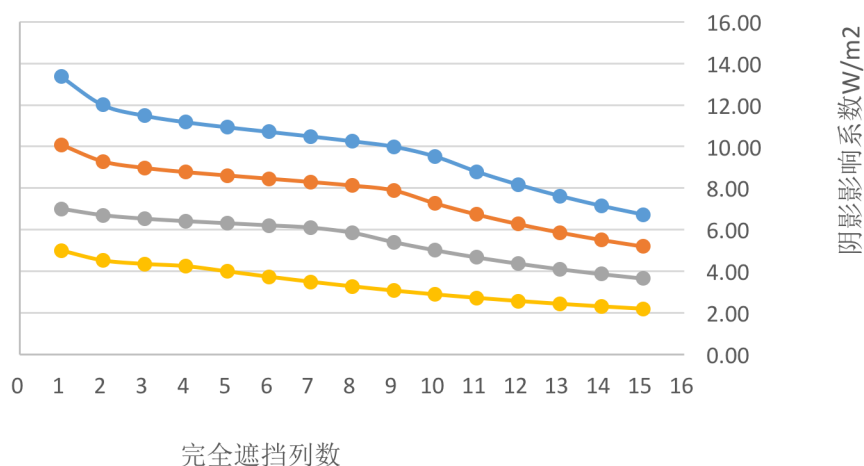


图 6.2 不同全遮挡情况下阴影影响系数

摄氏度时，附录 A 中表 A.1 为该实验情况下，遮挡 1-15 列的最大功率值、功率损失以及阴影影响系数。实验编号为 G400T55F1-G400T55F15，该实验组在没有遮挡的情况下最大功率为 40W。

第二组模拟对比为非阴影区域的太阳辐射强度为 $600\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度时，附录 A 中表 A.2 为该实验情况下，遮挡 1-15 列的最大功率值、功率损失以及阴影影响系数。实验编号为 G600T55F1-G600T55F15，该实验组在没有遮挡的情况下最大功率为 63W。

第三组模拟对比为非阴影区域的太阳辐射强度为 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度时，附录 A 中表 A.3 为该实验情况下，遮挡 1-15 列的最大功率值、功率

损失以及阴影影响系数。实验编号为 G800T55F1-G800T55F15，该实验组在没有遮挡的情况下最大功率为 86.62W。

第四组模拟对比为非阴影区域的太阳辐射强度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度时，附录 A 中表 A.4 为该实验情况下，遮挡 1-15 列的最大功率值、功率损失以及阴影影响系数。实验编号为 G1000T55F1-G1000T55F15，该实验组在没有遮挡的情况下最大功率为 110W。

将表 A.1-A.4 的情况汇总，结果如图 6.1 和 6.2 所示，从图 6.1 可以看出，遮挡列数增加，光伏板的功率损失会增加，但是增加幅度逐渐减缓，图 6.2 可以看出，随着光伏板被遮挡电池数目的增加，阴影影响系数也逐渐减少。遮挡区域与太阳直射区域的太阳光辐照强度的差越大，总的功率损失越大且阴影影响系数也越大。

从电路特性角度来分析，我们举 G1000T55Fx 这一实验组的伏安特性曲线和功率电压曲线来分析，如图 6.3 所示。

图 6.3 中可以看出，电池的最大功率点随着遮挡列数的不一样而发生了显著的变化，这就对光伏系统的控制造成了不利影响，同时某些工况出现了功率电压曲线的“双峰”现象，当采用 MPPT（最大功率点追踪方法）时，容易出现控制逻辑的偏差和系统的不稳定。

一般的，当光伏板出现局部阴影导致该电池板无法正常输出电流时，光伏板上的电流保护机构如防反二极管就回导通而使得该电池板处于短路状态而不会影响其他正常光伏板，同时也保护自身。但是，即使存在防反二极管或者旁路二极管使得电池板阻隔于其他的电池板，该板内部也存在一个“小循环”，暨处于太阳直射的电池“加热”处于阴影处的电池。在模拟中，我们假设光伏板已经被成功的隔离于系统之外成为“孤岛”，在这样的情况下，我们可以得到阴影区电池的工作点。

附录 B 中表 B.1-B.4 显示了不同工况下完全遮挡 1-15 列电池的模拟结果，其汇总图如图 6.4 和 6.5 所示。总体来说，太阳直射区域与阴影区域的光强差越大，热斑效应越明显。

从图 6.4 和图 6.5 可以看出，当分别遮挡 1-8 列时，阴影区电池消耗的总热功率是不断上升的，而单位电池（单位面积）上的热功率是不断下降的；当遮挡在 9 列之后，阴影区电池消耗的总热下降，单位电池的热功率也下降。

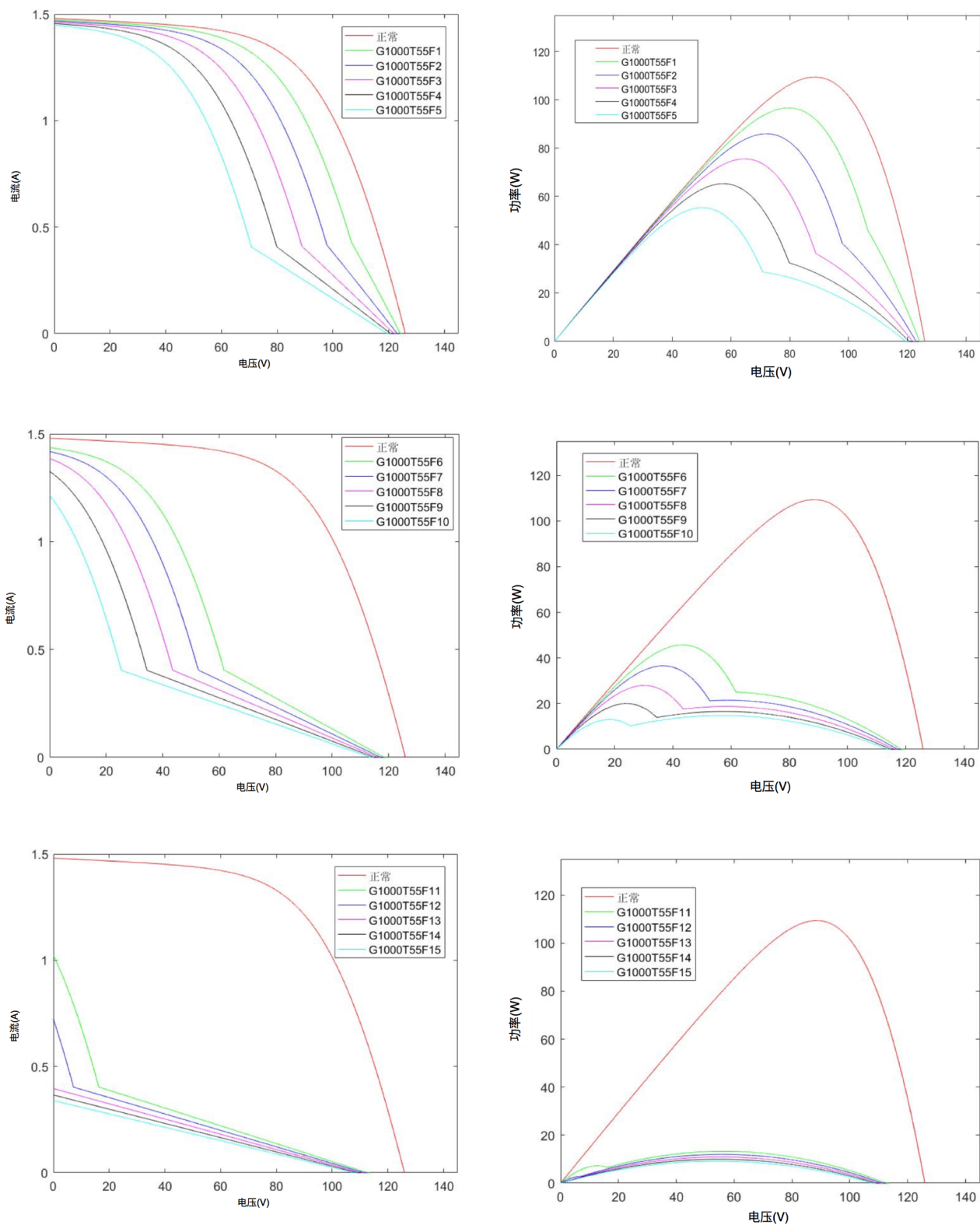


图 6.3 太阳辐射强度为 1000W/m², 温度为 55 摄氏度情况下, 光伏板完全遮挡不同列数电池的 I-V 曲线 (左) 和 P-V 曲线 (右)

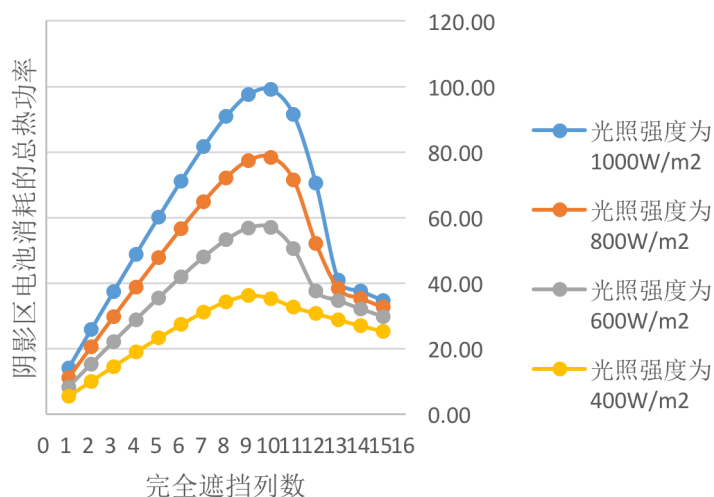


图 6.4 不同全遮挡情况下的阴影电池总热功率

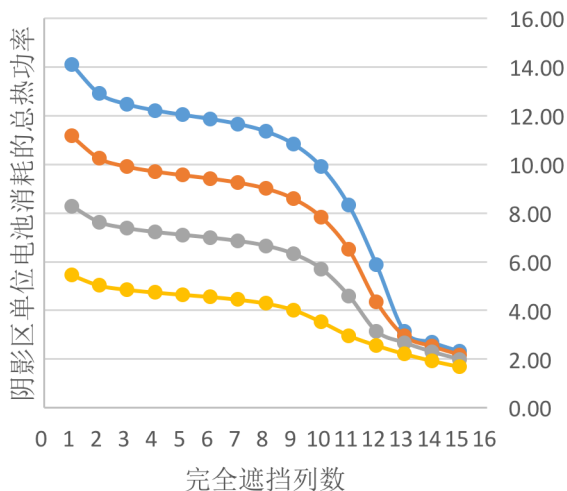


图 6.5 不同全遮挡情况下单位电池热功率

造成这种情况的原因在于阴影区电池工作点的变化，我们将阴影区电池的伏安特性曲线和正常区电池的伏安特性曲线画在一张图上。由于两者串联，因此电流相等，由于总电压为 0，因此上下移动等电流线当两者电压和为 0 时既可以得出阴影区域电池的工作点。如图 6.6 所示，遮挡一列时电池的工作点位置。图中的矩形半透明区域为阴影电池消耗的热功率。

从理论上分析，我们假设阴影电池组的电压电流关系为：

$$V = V_{shadow}(I) \tag{6.2}$$

处于太阳直射区域暨正常组的电池电压电流关系为：

$$V = V_{\text{normal}}(I) \quad (6.3)$$

那么对于整块太阳能电池板的电流电压关系为：

$$V = V_{\text{normal}}(I) + V_{\text{shadow}}(I) \quad (6.4)$$

当全板电压为 0 的时候，阴影区电池组电压曲线关于 y 轴的对称曲线与正常组电压曲线的交点就是阴影区电池组电压的反向工作点。图 6.7 所示为 G1000T55Fx 实验条件下的几组阴影区电池的工作点。当遮挡列数增加时，光伏板的总体输出电流就会减小。

从交点的位置来看，在遮挡 1-10 列时，交点处于正常电池组曲线的上半区域，在这个区域，随着电流的减小，电池的热功率是逐渐变大的，而当交点进入曲线的下半区域时，随着电流减小，电池的热功率会逐渐减小。

分析电池工作点的目的就是找出电池热功率随遮挡列数变化的情况从而可以给热学模拟提供方向。当整个电池发生遮挡时，电池板分为高热源区和低热源区域，当遮挡为 1-10 列时，随着遮挡列数的增加，电池的总热功率增加，但是热源密度下降，所以难以定性的分析温度的变化情况。但是在遮挡 11 列之后，电池的总热功率下降，热源密度也下降，所以热斑效应一定是减缓的。

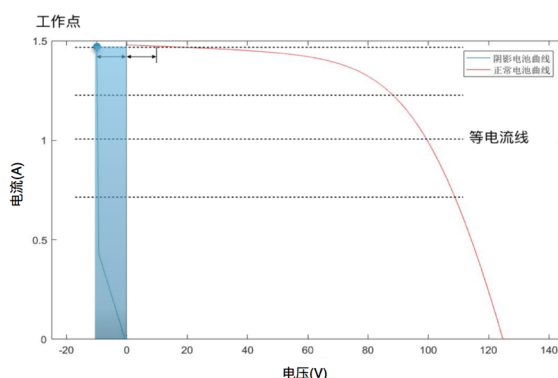


图 6.6 G1000T55F1 情况下阴影区电池组工作点示意图

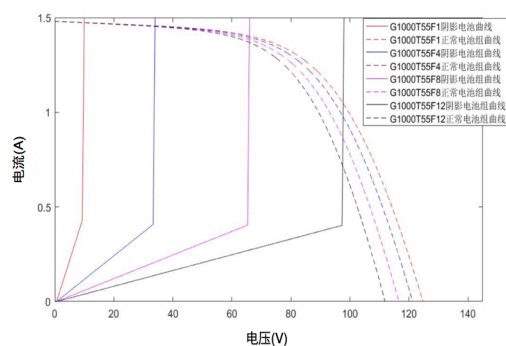


图 6.7 G1000T55Fx 情况下阴影区电池组工作点

在此基础上，将上述结果输入到热斑模型之中进行温度分析。考虑到直射光强为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 时，热斑现象最为严重，因此将从 G1000T55Fx 的情况来分析，其结果如图 6.8。考虑到大部分遮挡都不与光伏板直接接触，因此认为遮挡处换

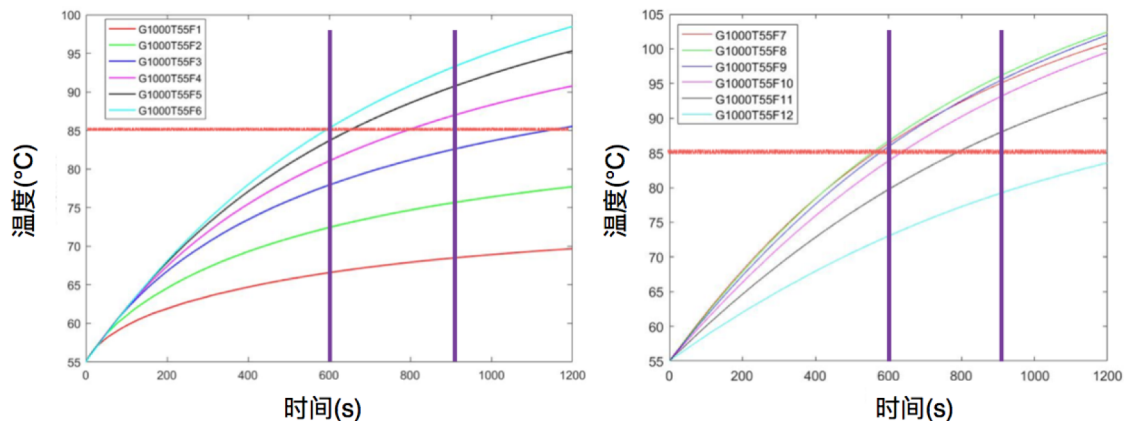


图 6.8 G1000T55Fx 情况下电池板最大温度随时间变化

热系数与直射处一致，同时遮挡部分不透光。

根据前文中热斑发生的分级，在十分钟内就达到 85 摄氏度的为 G1000T55F7-9，这是比较严重的热斑情况。在十五分钟内，达到 85 摄氏度 G1000T55F4-11，属于热斑可能产生情况。综上所述，当光强差为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 时，比较容易产生热斑现象，其中最为严重的是完全遮挡 8 列电池，而遮挡列数在 4-11 之间都是较为危险的。

G800T55Fx 和 G600T55Fx 两组的温度模拟如图 6.9 和图 6.10 所示， $600\text{W}/\text{m}^2$ 情况下已经不会出现热斑情况，因此无需继续模拟 $400\text{W}/\text{m}^2$ 。

光强差为 $800\text{W}/\text{m}^2$ 时，没有严重热斑出现，但是遮挡 6-10 列还是会有热斑现象发生。

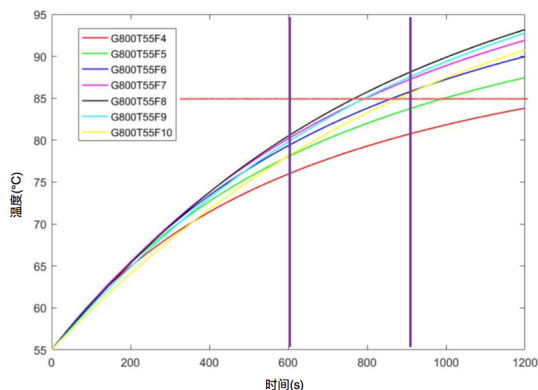


图 6.9 G800T55Fx 情况下电池板最大温度随时间变化

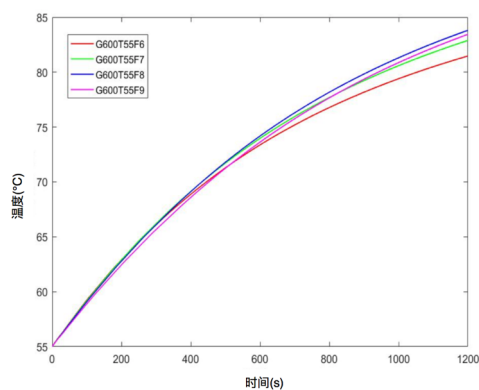


图 6.10 G600T55Fx 情况下电池板最大温度随时间变化

综上所述，当发生全电池遮挡情况时，若考虑非绝热遮挡片，当光强差低于 $600\text{W}/\text{m}^2$ 时，不会发生热斑情况。热斑最严重的情况发生在遮挡列数为 8 列的情况，当遮挡超过 11 列时，已经没有热斑危险。

6.1.3 半电池遮挡阴影影响模拟

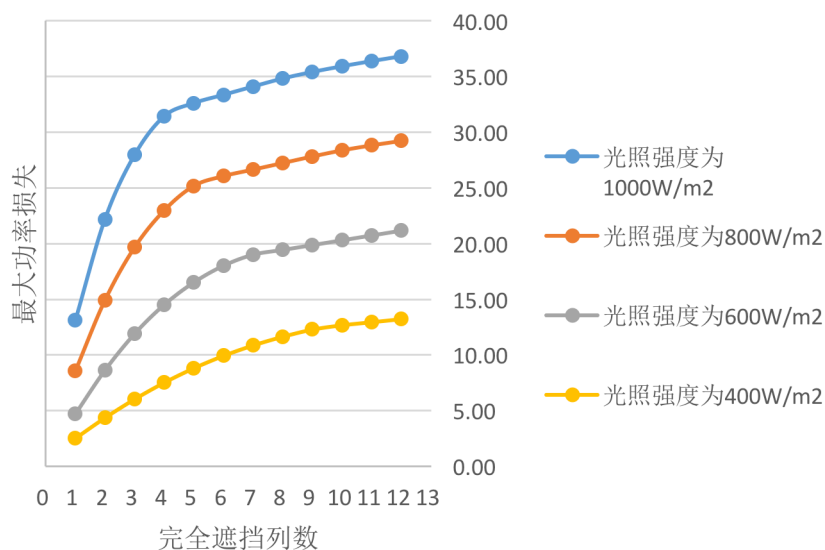


图 6.11 不同半遮挡情况下的最大功率损失情况

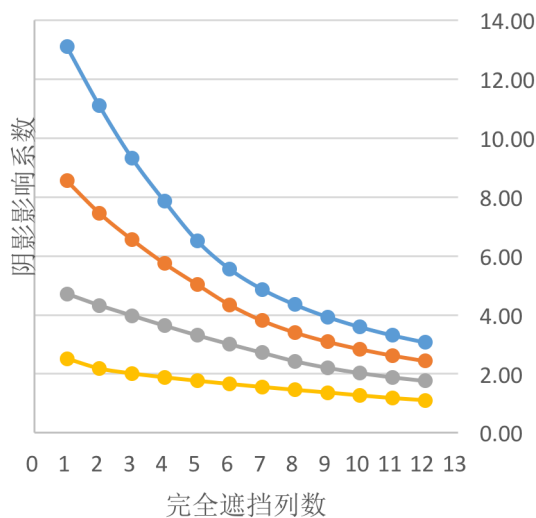


图 6.12 不同半遮挡情况下阴影影响系数

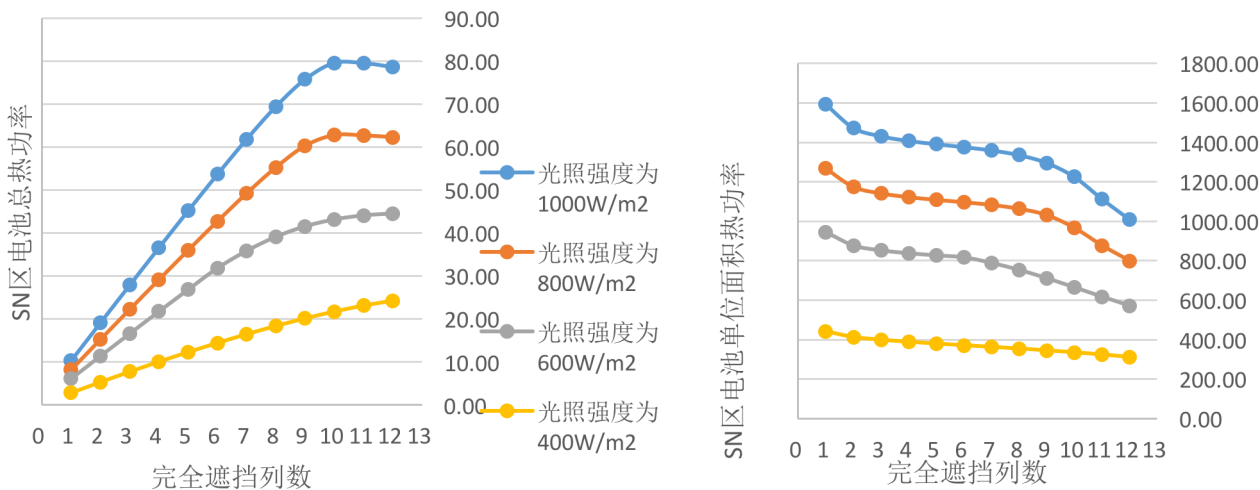


图 6.13 不同半遮挡情况下的 SN 区总热功率 (左) 和单位热功率 (右)

本组模拟主要针对半电池遮挡的情况进行模拟,遮挡1至15列电池的一半,半电池遮挡情况下,被遮挡电池的未遮挡部分消耗的热功率较高,其主要原因是未遮挡部分和遮挡部分处于同样的负电压下,但是未遮挡部分由于存在光生电流,因此分配到的电流值较高,消耗的热功率较大。模拟依然是四组,温度为 55 摄

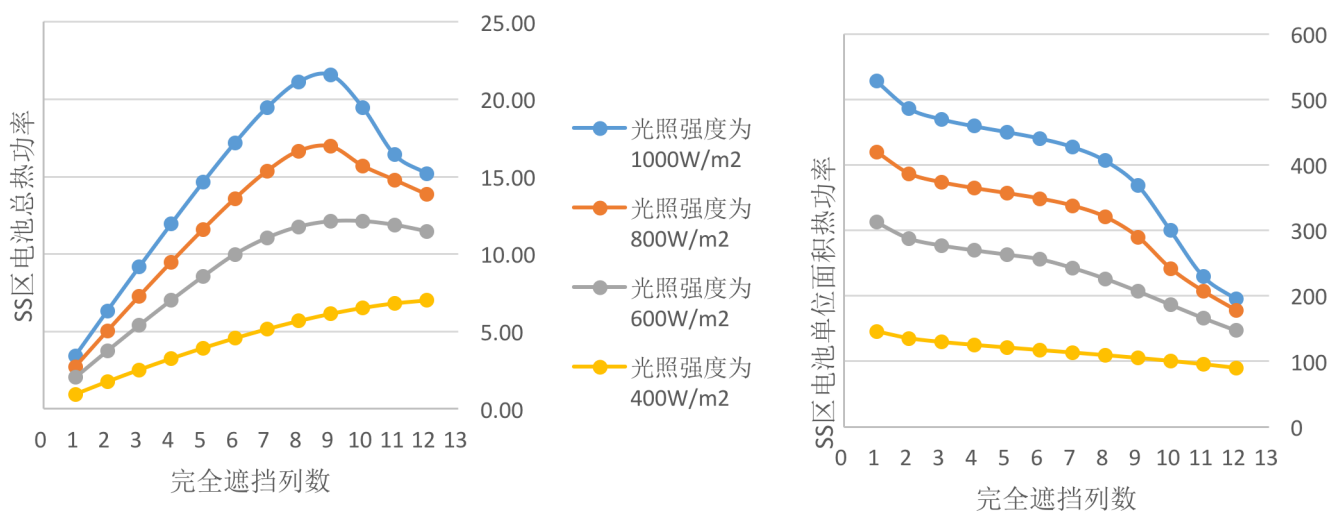


图 6.14 不同半遮挡情况下的 SS 区总热功率（左）和单位热功率（右）

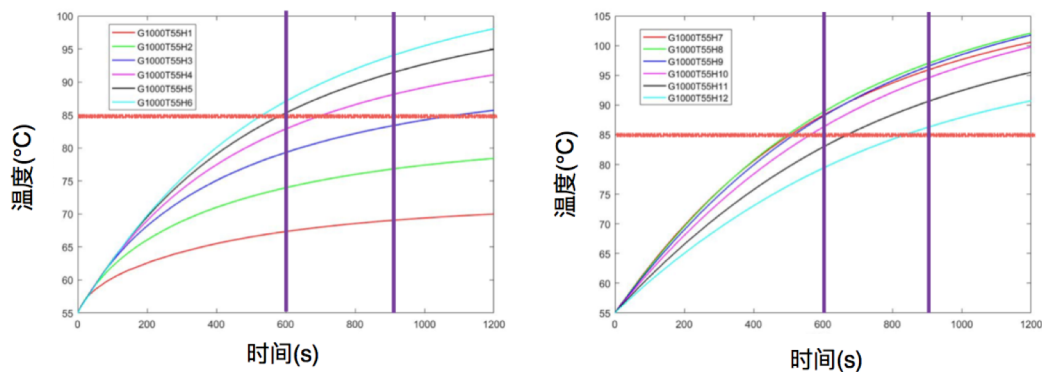


图 6.15 G1000T55Hx 情况下光伏板最大温度随时间变化模拟

氏度,直射区光照强度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$, $800\text{W}/\text{m}^2$, $600\text{W}/\text{m}^2$, $400\text{W}/\text{m}^2$ 。在模拟中发现,当遮挡列数超过 12 时,总热功率已经下降且单位热功率都下降,因此本章只列出了遮挡列数为 1-12 这十二种情况,各工况下的最大功率损失和阴影影响系数见附录 C 的表 C.1-C.4。

同样的,将表 C.1-C.4 的情况汇总,结果如图 6.11 和 6.12 所示,其结论与全电池遮挡结论类似,随着遮挡列数的增加,最大功率损失逐渐上升但是上升速度变慢,阴影影响系数减小并趋向于常数。

半遮挡与全遮挡光伏板的 I-V 曲线类似,都存在“多峰”现象和功率损失,因此这里不作分析。

半遮挡与全遮挡最大的不同在于,由于非晶硅电池板电路的特殊性质,当发

生半遮挡时，与阴影区域并联的未被遮挡的电池所消耗的热功率反而大于被阴影遮挡的电池所消耗的热功率。为了简化称呼，本文将处于太阳直射区但是与阴影区域电池并联的电池区域称为 SN 区，将被遮挡的电池区域称为 SS 区域，将全电池处于太阳直射区的电池区域称为 N 区。这样，当发生半遮挡时，光伏电池板上分为三个区域：低内热源区、次高内热源区和高内热源区域，分别对应 N 区，SN 区和 SS 区。

附录 D 的表 D.1-D.4 为各工况下不同区域电池的总热和单位热模拟数据，图 6.13 和图 6.14 为汇总。同样的，随着遮挡列数的增加，单位面积消耗的热功率下降，而总热量在遮挡 9 列时达到最高峰值，其原因与全遮挡时类似，都是反向电池的工作点的交点移动问题。

将电学模型的输出参数放到热学模型中去进行模拟，首先模拟 G1000T55Hx 的情况，结果如图 6.15 所示。

从模拟结果可以看出，十分钟内到达 85 摄氏度的为 5-10 列的半遮挡，十五分钟内到达 85 摄氏度的是 4、11、12 列半遮挡。热斑发生的地点不在遮挡电池处，而在与遮挡电池并联的太阳直射区域的电池（SN）处。

在分析了光照强度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 的工作情况的基础上，当光照强度为 $800\text{W}/\text{m}^2$ 时，模拟 4-10 列电池的半遮挡情况，模拟结果汇总如图 6.16 所示。

从图 6.16 可以看出，当光照差下降到 $800\text{W}/\text{m}^2$ 时，十分钟内就快速到达 85 摄氏度的情况已经几乎不存在了，十五分钟内到达 85 摄氏度也只有 7、8、9 列半遮挡这三种情况。

而当光照强度差下降到 $600\text{W}/\text{m}^2$ 时，如图 6.17 所示，已经不存在本课题所定义的热斑情况。

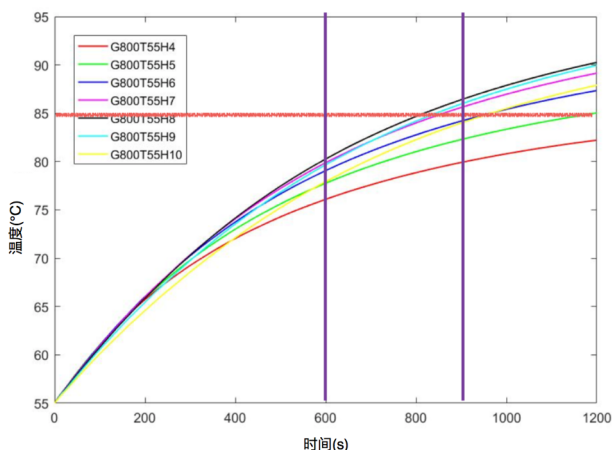


图 6.16 G800T55Hx 情况下光伏板最大温度随时间变化模拟图

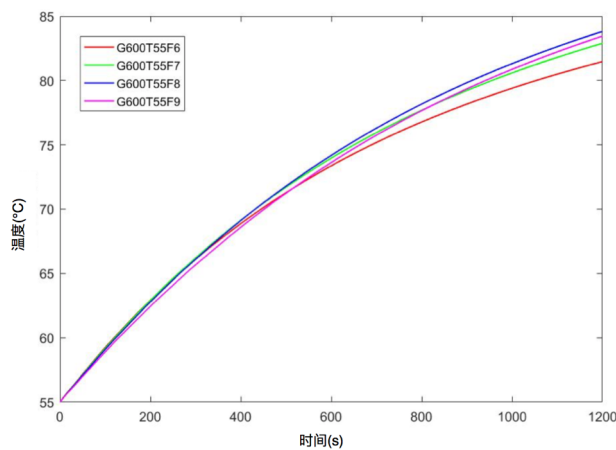


图 6.17 G600T55Hx 情况下光伏板最大温度随时间变化模拟图

6.2 本章结论

本章主要为模拟结果分析,通过控制变量法主要研究的是不同类型遮挡对于光伏板的电热学影响,主要结论分为两个部分:1)对功率输出的影响;2)对局部温升速度的影响。

首先分析不同遮挡对功率输出的影响:

1) 同样形式的遮挡,如电池全遮挡或者电池半遮挡,从发电能力来说,阴影遮挡面积越大,发电能力越弱,当遮挡超过光伏板的百分之十时(暨十块电池),光伏板输出功率几乎低于原最大功率的百分之十。

2) 阴影影响系数随着遮挡面积的变大而减小,也就意味着小遮挡时,单位面积阴影带来的损失更加大。

3) 当遮挡面积较小时,同样面积下,半遮挡带来的功率损失比全遮挡带来的功率损失要大,当遮挡面积超过3块电池时,全遮挡带来的功率损失比半遮挡要大。

4) 均匀光照的太阳能电池板的功率电压曲线具有单峰单极值的特点,实际工作中为了充分利用光伏板的输出功率,多采用最大功率点追踪的控制方法。然而,当光伏电池板存在遮挡时,功率曲线出现了多峰的现象,这样就容易导致控制点的偏移或者跳跃。

然后是对局部温度升高速度的分析:

1) 对于全遮挡而言,电池板中温度升高最快的是遮挡区域的电池。当遮挡发生时,光伏板分为两个区域——高内热源区和低内热源区域,随着遮挡列数的升高,电池消耗的总热量会不断升高但是平均每块电池的热量下降。当遮挡列数超过10列时,总消耗热量也会下降,直观原因是电路中的电源少了负载多了,本质原因是阴影区域电池的工作点移动到了最大功率点附近。

2) 光强差小于 $600\text{W}/\text{m}^2$,不会发生热斑情况,主要是电路中的电源强度不够。

3) 光强差为 $800\text{W}/\text{m}^2$,完全遮挡6-10列会有热斑危险,但是没有严重热斑情况,考虑到上海地区最大光强为 $1000\text{W}/\text{m}^2$,在太阳强烈的情况下,阴影区的光强还是有 $150\text{-}200\text{W}/\text{m}^2$,因此 $800\text{W}/\text{m}^2$ 是比较常见的光强差,这部分的模拟结果需要格外重视。

4) 极端情况下,光强差达到 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 时,完全遮挡4-11列都存在热斑现象,其中7-9列是比较危险的情况。半遮挡5-10列较危险,4、11、12存在热斑现象

5) 同样面积的遮挡,遮挡方式不一样,产生的效果也不同。例如模拟中的半遮挡8列的情况与同样面积的全遮挡4列的情况就不一样,虽然从功率损失的

角度上看，全遮挡 4 列影响更加严重，但是从热学角度来说，半遮挡 8 列温升速度更加快，主要原因是热量更加集中。

本文在模拟和实验的基础上，建立了完整的光伏系统热斑诊断模型，其运算时间在 1 分钟以内，可以快速判断阴影位置以及预测该阴影是否会造成严重热斑以及带来热斑现象。该模型的输入参数为太阳能辐照仪测得的直射区太阳辐射强度，光伏板背板的平均温度以及监控系统拍摄的光伏板可见光图像。

该模型的判断顺序如下图 6.18:

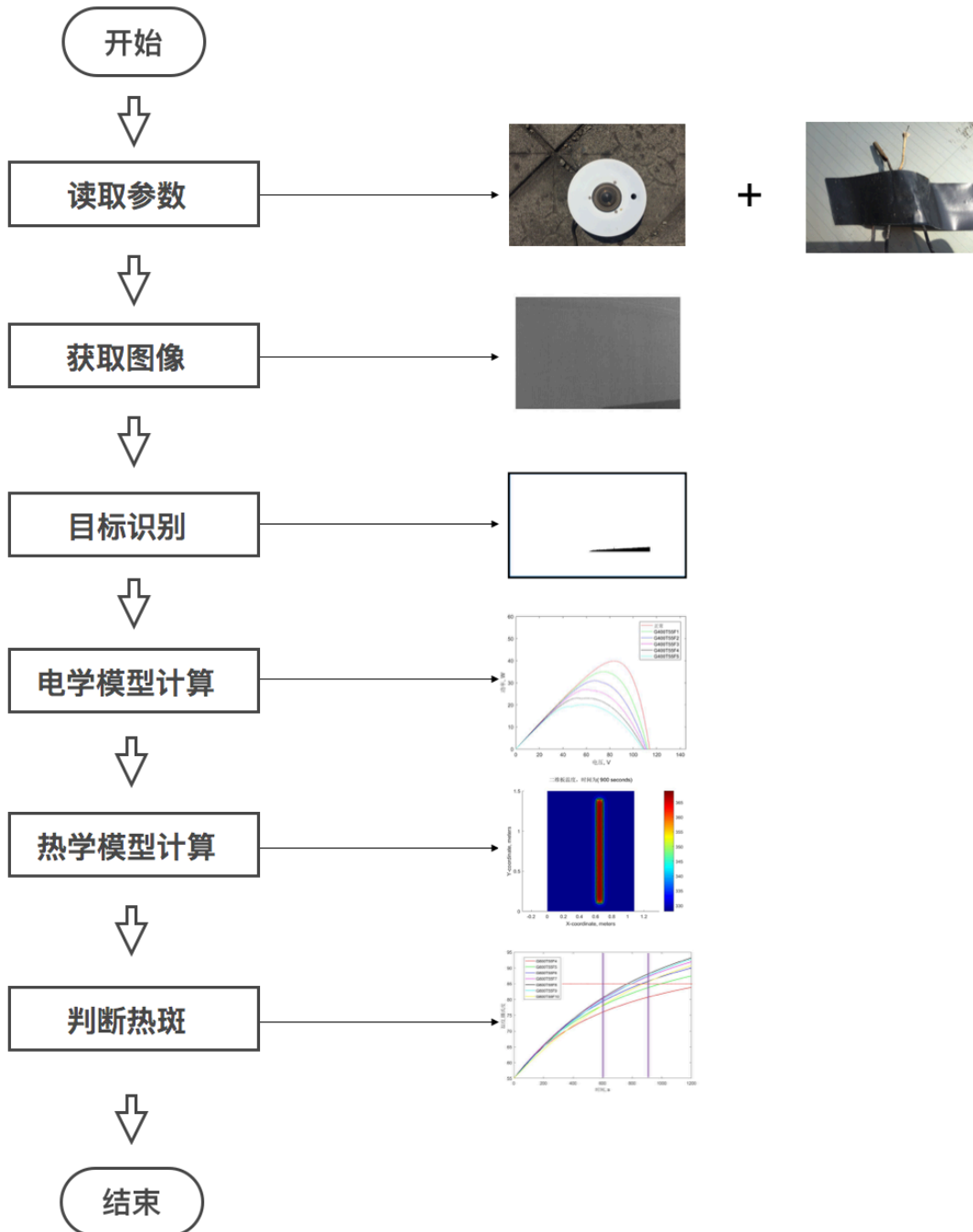


图 6.18 模型流程图

诊断过程中，三个模型为串联形式，首先输入仪器测得的太阳辐射强度，结合图像监控采集得到的图像，进行图像阴影分割处理，将阴影所在的像素标记为0，通过运算转换为反映每一块电池上阴影遮挡的比例。

本例考虑半遮挡情况，因此将一块电池的模型拆分为两块并联的电池，其参数设置成和图像识别模型输出的每一块电池上的阴影遮挡比例有关，电学模型中每一块小电池的光照强度如果处于非阴影区域则为仪器测量的光照强度，如果不是则标记为0。电学模型将输出的是每一个电池的消耗热功率，结合仪器测得的电池板温度，太阳辐射强度输入到热学模型中进行计算。

本例没有考虑到动态阴影问题，但是在实际操作中，可以考虑隔一段时间进行采样的方法，将热学模型计算的温度场作为下一个热学模型的初始条件进行计算。

本例考虑的都是最严重情况，实际上阴影区域也存在光照强度，一般不超过 $200\text{W}/\text{m}^2$ ，由于图像技术限制，均考虑为完全遮挡暨阴影处光照强度为 $0\text{W}/\text{m}^2$ 。

第 7 章 研究结论与展望

7.1 本文主要成果与结论

局部遮挡引起的阴影是造成光伏板功率输出减小和缩短光伏板寿命的主要因素。建立快速有效的热斑故障诊断方法是本文的主要目标。本文主要有如下成果：

1) 根据光伏板图像特点，分析了光伏板图像的主要数据特性和噪声特性，选取适当的噪声处理方法和图像提取方法，结合 Ostu 阈值分割，图像腐蚀与图像膨胀运算，图像开运算和重构运算等，建立了快速有效的阴影分割方法，将阴影位置属性用逻辑运算值表示出来，结合光照辐射仪测出的光强参数和环境温度测试仪，作为电学模型的输入参数。

2) 结合实验数据和已有研究的基础上，建立了全电压光伏电池的数学模型，并且通过 Matlab-Simulink 平台进行模拟，该模型可以模拟任意遮挡、光照和温度下的任意电池的电路特性和消耗的热功率，一方面作为热学模型的输入参数，另一方面可以用来判断总体热功损失的原因。

3) 结合理论分析和实验数据，建立了快速准确的热学模型，根据光伏板材料的特性，提出了热斑判断的基本准则，通过模拟来判断该种情况会引起什么样类型的热斑情况。

本文通过实验验证和模拟分析，得出了如下几个结论：

1) 即使存在有防反二极管或者旁路二极管，由于被屏蔽的电池板内部小循环的产生，也不能完全避免热斑现象的发生。同时，局部阴影产生影响正常的功率输出和电池板寿命，因此需要热斑诊断系统。

2) 不同材料的电池板有不同的电路属性，需要针对不同产品做不同分析建立适当准确的电学模拟模型。

3) 阴影遮挡对于光伏系统的影响主要在于功率损失和热斑现象。在实际生活中，可以造成严重热斑的阴影是较为罕见的，但是遮挡给光伏系统带来的损失却是比较大，一块很小的遮挡如 $0.6 \times 0.01\text{m}$ 的遮挡片可以造成近 10% 的功率损失，而超过 10% 的遮挡片就可以让光伏板完全 0 功率输出。

4) 不同阴影遮挡会引起不同的后果，阴影根据遮挡形式主要分为全电池遮挡和半电池遮挡，半电池遮挡中着重分析了遮挡比例为 0.5 的情况；根据遮挡透光率主要分为不透光遮挡和透光遮挡，本文着重分析最严重的不透光遮挡。根据温升速度情况，发现光强差在 $600\text{W}/\text{m}^2$ 以下不会发生热斑情况。在完全遮挡中，

遮挡 8 列为最危险情况，其面积约为 $1.3\text{m} \times 0.08\text{m}$ ，该阴影形状为细长条形，在实际使用中很少出现这样的情况，除非该类型光伏板安装时横向摆放，这一操作是规范中明令禁止的。在半遮挡中，最为严重的遮挡也是 8 列的半遮挡，但是其严重程度不如 8 列的完全遮挡。

7.2 本文局限性、创新点和展望

本文的主要局限性在：

1) 本文重点研究热斑现象，为了模型的运算速度，在光伏正向电池模型中采用了精度和速度兼具的五参数模型，但是该模型在低光照条件下准确度较低，但是考虑到热斑问题都是发生在大光强差的条件下，因此该模型对于热斑问题的分析已经足够。

2) 本文基于规则防反二极管导通情况下进行的模拟和实验，在实际运行中不能排除防反二极管损坏的情况，在这样的情况下，“小循环”的范围会扩大，电路中电源情况会变大，因此热斑效应会加剧。但是考虑到每一个光伏板在出厂前都做过严格的测试，这样的情况实属罕见，为简化分析，本文只针对了一块板运行情况。在未来操作中，可以将整个光伏系统都进行模拟分析并考虑二极管不工作情况，但是这样做计算量较大且该情况发生概率小，本文不作考虑。

3) 本文研究的是并网之前的光伏板运行情况，未考虑带有逆变器等其他设备的运行，也没有深入研究控制策略等，在未来的研究中，可以考虑并网之后对电学模型的修改以及其他方面因素对温度的影响。

4) 可见光图像由于技术本身的限制，对于色差较大的遮挡片如树叶、鸟粪阴影等可以很快辨别出来，但是在实际情况中，也有可能出现与光伏板色差不明显的遮挡片，在这样的情况下图像识别技术是难以分别遮挡物的，因此在这方面需要使用者注意。

本文的主要创新点在：

1) 将图像技术应用到了光伏系统的热斑检测中去，以往的方法大多在电路检测、功率损失或者温度场分布上进行分析，这些方法或需要大量计量设备，或需要复杂的数学逻辑，或者可以判断故障发生但是不能找到故障位置，或者在故障发生积累到一定程度后才能判断热斑。而图像技术可以在阴影发生的初始阶段就读取到阴影信息，再经过电热学模型之后判断出热斑的影响范围和程度，从而给维护人员时间进行维护。

2) 根据实际课题需要，适当简化和修改了光伏板电学模型

综上，本文在电学模型、热学模型和图像侦测模型中均有可以提高的空间和

进一步细化研究的意义。

致谢

时间如海滩上的细沙，不经意间从指间滑落，七年的点点滴滴有如这沙粒一般，渐渐淌过我心。初见同济，没有广厦千万的豪华，没有灯红酒绿的奢靡，但有琳琅满目的书籍，青春洋溢的人群。

四年本科，我曾彷徨也曾失落，但是同济自强不息的校训一直伴我砥砺前行。三年硕士，我有收货也有困惑，但是同济同舟共济的精神伴我同行。今天，当我要离开之时，衷心的说声：谢谢你！

谢谢你，同济！让我遇见了许鹏教授，一个真的科学家，一个令人敬佩的师长。许老师活跃的思路，让我在迷路时峰回路转；大胆创新的风格，让我在彷徨时勇于攀登；和蔼可亲的作风，让我在失落时温暖如春。许老师，衷心的感谢您！

谢谢你，同济！让我在最灿烂的年华遇到了一群美丽的人们，姬颖、李为林、陈永保、叶昀暘、扶洋洋、焦飞飞、李梦西、鲁星、王慧龙、吴云涛、侯瑾、顾洁帆、罗为、杨志伟、陈喆、陈智博，一串串熟悉的名字，一双双欢乐的笑脸，在那我飞扬的岁月里，留下了深深的回忆。吴云涛和杨志伟师弟，在我离开的时间里，帮我做了很多事情，解决了很多困难。师弟师妹师兄师姐们，衷心的感谢你们！

谢谢你，同济！让我有机会参加法国的双学位项目，在那个蔚蓝与翠绿交织的国度里，体会了别样的异域风情。月是故乡圆，在那些思念的夜晚，总有这样一个热情洋溢的组织陪伴着我——同济大学法国校友会，在异乡体会到了家的温暖。亲爱的校友们，衷心的祝福你们！

今天，我就要离开同济。聚似一团火，祝愿许鹏老师的课题组在科研的战场上攻城略地，祝愿我的师弟师妹们在工作学习生活中旗开得胜；散若满天星，祝愿我们毕业的同门，无论走到天涯海角，都有着一颗滚烫的赤子之心，都可以闯出一番新天地。

再见了，同济！扬帆远航之时，我不会忘记，“同心同德同舟楫，济人济事济天下”，这是同济在我身上留下的深深烙印。

本课题的研究得到了国家科技支撑计划 2015BAL04B00 的资金支持，特此感谢

2017年5月

参考文献

- [1] 徐敏.《中国建筑能耗研究报告(2016)》发布. 建筑时报,2016-12-08(008).
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴——2016 年. 北京: 中国统计出版社, 2016.10.21
- [3] 中华人民共和国国家能源局. 2017 年能源工作指导意见. 国能规划[2017] 46 号
- [4] 李申生. 世界范围的常规能源危机. 太阳能, 2003, (2): 15-19.
- [5] 赵争鸣, 陈剑, 孙晓瑛. 太阳能光伏发电最大功率点跟踪技术[M]. 电子工业出版社, 2012.4.
- [6] 赵朝会. 光伏发电技术的研究现状和应用前景[J]. 上海电机学院学报, 2008, 11(2): 104-109.
- [7] 王晓晶, 班群, 沈辉. 硅太阳能电池材料的研究进展[J]. 新能源及工艺, 1004-3950(2002)04-0028-04.
- [8] M.A.Green, J.Zhao, et al. Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells [J]. Solar Energy material solar Cells, 2001, 65: 9-16
- [9] 邓志杰, si 基太阳能电池发展现状[J]世界有色金属 2000, (3).
- [10] W. Shockley. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors[J]. Bell System Technical Journal, 1949(28): 435-489.
- [11] Tian, H. et al. A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels. Sol. Energy (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.004>.
- [12] T. Shatter, M. Elhagry. Sensitivity analysis of the photovoltaic model parameters[J]. Circuits and Systems, 1999(2): 914-917
- [13] 张建坡, 张红艳, 王涛等. 光伏系统中最大功率跟踪算法仿真研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(1): 266-270.
- [14] 刘刚. 太阳能光伏阵列数学模型的综述[J]. 科技信息, 2010, (4): 131-133.
- [15] 张建坡, 张红艳, 王涛等. 光伏系统中最大功率跟踪算法仿真研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(1): 266-270.
- [16] 崔岩, 蔡炳煌, 李大勇等. 太阳能光伏模板仿真模型的研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 829-831, 834.
- [17] G. Araujo, E. Sanchez. A new method for experimental determination of the series resistance of a solar cell[J]. Electron Devices, 1982(29): 1511-1513.
- [18] Katherine A. Kim and Philip T. Krein. Photovoltaic Hot Spot Analysis for Cells with Various Reverse-Bias Characteristics Through Electrical and Thermal Simulation
- [19] 田琦, 赵争鸣, 邓夷, 袁立强, 贺凡波. 光伏电池反向模型仿真分析及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, Vol.31 No.23
- [20] 杨维翰, 王培珍, 周雷等. 太阳能光伏阵列故障诊断的研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2003, 20(4): 345-348.
- [21] S. K. Firth, K. J. Lomas, S. J. Rees. A simple model of PV system performance and its use in fault detection[J]. Solar Energy, 2010(84): 624-635
- [22] K. h. Chao, S. Ho, M. Wang. Modeling and fault diagnosis of a photovoltaic system[J]. Electric Power Systems Research, 2008(78): 97-105.
- [23] H. Rauschenbach, "Electrical output of shadowed solar arrays, "Electron Devices, IEEE Transactions on, vol. 18, no. 8, pp. 483-490, 1971.

- [24] A.Woyte, J. Nijss and R.Belmansa, "Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations-literature review and field test results," *Solar energy*, vol. 74, pp. 217–, 2003.
- [25] Dezso Sera, Remus Teodorescu, Pedro Rodriguez . Partial shadowing detection based on equivalent thermal voltage monitoring for PV module diagnostics. 978-1-4244-4649-0/09/2009 IEEE
- [26] T. Takashima, J. Yamaguchi, M. Ishida. Disconnection detection using earth capacitance measurement in photovoltaic module string[J]. *Photovoltaic: Research and Applications*, 2008 (16):669-677.
- [27] H. Patel, V. Agarwal. MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23 (1):302-310
- [28] A. Chouder, S. Silvestre. Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis [J]. *Energy Conversion and Management* 2010(51):1929-1937.
- [29] S. K. Firth, K. J. Lomas, S. J. Rees. A simple model of PV system performance and its use in fault detection[J]. *Solar Energy*, 2010(84):624–635
- [30]周俊冬,马明.局部阴影条件下光伏电池输出特性实验研究[J].*科技信息*,2010,(31):51-52.
- [31]张利,钟云,张建成等.考虑阴影影响的光伏电池组件实验研究[J].*太阳能*,2008,(5):27-28.
- [32] Luis Castañer,Santiago Silvestre. Modelling PhotoVoltaic Systems using Pspice[M]. Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona,Spain,8 MAR 2006.23-53;
- [33]杨维翰,王培珍,周雷. 太阳能光伏阵列故障诊断的研究[J]. *安徽工业大学学报*. Vol.20 No.4. 2003年10月,第20卷第4期.
- [34] M. Karaköse, M. Baygin, "Image Processing Based Analysis of Moving Shadow Effects for Reconfiguration in PV Arrays," *ENERGYCON*, Dubrovnik, Croatia, May 2014.
- [35] C.Jiang and M.O.Ward. Shadow Identification. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer vision and Pattern Recognition*. 1992,606-612
- [36] Wei Zhang, Xiang Zhong Fang, Xiaokang K and Q.M.Jonathan Wu. Moving Cast Shadows Detection Using Ratio Edge. *IEEE Trans Multimedia*. 2007.9(6). 1202-1214
- [37]宋晓琳, 邬紫阳, 张伟伟. 基于阴影和类 Haar 特征的动态车辆检测.*电子测量与仪器学报*, 2015, 29(9):1340-1347
- [38] A. Sanin, C. Sanderson, B.C., Lovell, "Shadow detection: A survey and comparative evaluation of recent methods," *Pattern Recognition* 45 1684-1695, 2012.
- [39] R. Cucchiara, C. Grana, M. Piccardi, A. Prati, "Detecting moving objects, ghosts, and shadows in video streams," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 25 (10) (2003) 1337– 1342.
- [40] A. Cavallaro, E. Salvador, T. Ebrahimi, "Shadow-aware object- based video processing," *IEEE Proceedings on Vision, Image and Signal Processing* 152 (4) (2005) 398–406.
- [41] K. Jiang, A. H. Li, Z. G. Cui, T. Wang and Y. Z. Su, "Adaptive shadow detection using global texture and sampling deduction," *The Institution of Engineering and Technology*, vol. 7, pp. 115-122, Feb. 2013.
- [42] D.Koller, K.Daniilidis, and H.H.Nagel. Model-based Object Tracking in Monocular Image Sequences of Road Traffic Scenes. *International Journal of Computer Vision*. 1993.10(3). 257-281
- [43]M.Bejanin, A.Huertas, G.Medioni, and R.Nevatia. Model Validation for Change Detection *International IEEE Workshop on applications of Computer Vision*.1994.160-167
- [44] Andrea Prati, Ivana Mikie, Mohan M.Trivedi, and Cuechiara. Detecting Moving Shadows:

- Formulation, Algorithms and Evaluation. IEEE Trans PRMI.2003.vol25.918 — 923
- [45] Y.Weiss. Deriving intrinsic images from image sequences. In: Proceedings of International Conference on Computer Vision,2001.68~75
- [46] M.E Tappen, W.T.Freeman, and E.H.Adelson. Recovering Intrinsic Images from a Single Image, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2005.27(9): 1459~1472
- [47] Otsu, N. "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 9, No. 1, 1979, pp. 62-66.
- [48] I. Geisemeyeretal. Prediction of silicon PV module temperature for hot spots and worst case partial shading situations using spatially resolved lock-in thermography. SolarEnergyMaterials&SolarCells120(2014)259–269
- [49] Chan, D.S.H., Phang, J.C.H., 1987. Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I–V characteristics. IEEE Transactions on Electron Devices 34, 286–293
- [50] Villalva, M.G., Gazoli, J.R., et al., 2009. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. Power Electronics, IEEE Transactions on 24 (5), 1198–1208.
- [51] 周笛青, 吴春华. 光伏组件局部阴影下热斑诊断及优化控制. 上海大学硕士学位论文
- [52] P.L.Komarov,M.G.Burzo,G.Kaytaz,P.E.Raad,Transientthermo-reflectance measurements of the thermal conductivity and interface resistance of metalized natural and isotopically-pure silicon, Microelectronics Journal34(2003) 1115–1118.
- [53] 章熙民等, 中国建筑工业出版社.《传热学(第五版)》
- [54] W. DEN BOER and M. ONDRIS. Solar Cells, 3 (1981) 209 – 213
- [55] Hideki Yoshioka et al. Non-hot-spot PV Module Using Solar Cells With Bypass Diode Function. 0-7803-3 166-4/96 1996 EEE
- [56] DavidA. Forsythand JeanPonce.林学阎王宏.计算机视觉一种现代方法.第一版.北京.电子工业出版社.2004.83—112。

附录

附录 A 完全遮挡不同列数情况下电池板功率损失与阴影影响系数模拟结果

A.1 G400T55Fx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 A.1 太阳辐照强度为 $400\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度全遮挡功率损失与影响系数

实验编号	F1	F2	F3	F4	F5
最大功率 W	35.00	30.96	26.95	23.03	20.06
总损失 W	5.00	9.04	13.05	16.97	19.94
影响系数 W/m^2	5.00	4.52	4.35	4.24	3.99
实验编号	F6	F7	F8	F9	F10
最大功率 W	17.60	15.55	13.85	12.41	11.19
总损失 W	22.40	24.45	26.15	27.59	28.81
影响系数 W/m^2	3.73	3.49	3.27	3.07	2.88
实验编号	F11	F12	F13	F14	F15
最大功率 W	10.14	9.24	8.46	7.77	7.16
总损失 W	29.86	30.76	31.54	32.23	32.84
影响系数 W/m^2	2.71	2.56	2.43	2.30	2.19

A.2 G600T55Fx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 A.2 太阳辐照强度为 $600\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度全遮挡功率损失与影响系数

实验编号	F1	F2	F3	F4	F5
最大功率 W	56.00	49.61	43.42	37.37	31.46
总损失 W	7.00	13.39	19.58	25.63	31.54
影响系数 W/m^2	7.00	6.70	6.53	6.41	6.31
实验编号	F6	F7	F8	F9	F10
最大功率 W	25.76	20.31	16.17	14.36	12.86
总损失 W	37.24	42.69	46.83	48.64	50.14
影响系数 W/m^2	6.21	6.10	5.85	5.40	5.01

续表 A. 2

实验编号	F11	F12	F13	F14	F15
最大功率 W	11.59	10.51	9.59	8.78	8.07
总损失 W	51.41	52.49	53.41	54.22	54.93
影响系数 W/m ²	4.67	4.37	4.11	3.87	3.66

A. 3 G800T55F_x 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 A. 3 太阳辐照强度为 800W/m²，电池温度为 55 摄氏度全遮挡功率损失与影响系数

实验编号	F1	F2	F3	F4	F5
最大功率 W	76.54	68.05	59.71	51.55	43.60
总损失 W	10.08	18.57	50.29	58.45	66.40
影响系数 W/m ²	10.08	9.28	16.76	14.61	13.28
实验编号	F6	F7	F8	F9	F10
最大功率 W	35.91	28.56	21.65	15.63	13.96
总损失 W	50.71	58.06	64.97	70.99	72.66
影响系数 W/m ²	8.45	8.29	8.12	7.89	7.27
实验编号	F11	F12	F13	F14	F15
最大功率 W	12.56	11.37	10.35	9.46	8.69
总损失 W	74.06	75.25	76.27	77.16	77.93
影响系数 W/m ²	6.73	6.27	5.87	5.51	5.20

A. 4 G1000T55F_x 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 A. 4 太阳辐照强度为 1000W/m²，电池温度为 55 摄氏度全遮挡功率损失与影响系数

实验编号	F1	F2	F3	F4	F5
最大功率 W	96.63	85.98	75.53	65.30	55.35
总损失 W	13.37	24.02	34.47	44.70	54.65
影响系数 W/m ²	13.37	12.01	11.49	11.17	10.93
实验编号	F6	F7	F8	F9	F10
最大功率 W	45.74	36.57	27.95	20.04	14.78
总损失 W	64.26	73.43	82.05	89.96	95.22
影响系数 W/m ²	10.71	10.49	10.26	10.00	9.52

续表 A. 4

实验编号	F11	F12	F13	F14	F15
最大功率 W	13.28	12.01	10.93	9.98	9.16
总损失 W	96.72	97.99	99.07	100.02	100.84
影响系数 W/m ²	8.79	8.17	7.62	7.14	6.72

附录 B 完全遮挡不同列数情况下阴影电池总热功率和单位热功率模拟结果

B. 1 G400T55F_x 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 B. 1 太阳辐照强度为 400W/m²，电池温度为 55 摄氏度全遮挡阴影电池总热功率和单位热功率

实验编号	F1	F2	F3	F4	F5
总热功率 W	5.46	10.06	14.57	18.98	23.26
每块电池热功率 W/个	5.46	5.03	4.86	4.74	4.65
单位面积热功率 W/m ²	419.95	386.91	373.57	364.94	357.82
实验编号	F6	F7	F8	F9	F10
总热功率 W	27.36	31.15	34.33	36.22	35.32
每块电池热功率 W/个	4.56	4.45	4.29	4.02	3.53
单位面积热功率 W/m ²	350.75	342.29	330.10	309.54	271.69
实验编号	F11	F12	F13	F14	F15
总热功率 W	32.65	30.72	28.81	26.98	25.26
每块电池热功率 W/个	2.97	2.56	2.22	1.93	1.68
单位面积热功率 W/m ²	228.34	196.91	170.46	148.24	129.54

B. 2 G600T55Fx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 B. 2 太阳辐照强度为 $600\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度全遮挡阴影电池总热功率和单位热功率

实验编号	F1	F2	F3	F4	F5
总热功率 W	8.29	15.26	22.13	28.90	35.52
每块电池热功率 W/个	8.29	7.63	7.38	7.22	7.10
单位面积热功率 W/m^2	637.83	586.84	567.45	555.69	546.52
实验编号	F6	F7	F8	F9	F10
总热功率 W	41.94	47.98	53.27	56.92	57.12
每块电池热功率 W/个	6.99	6.85	6.66	6.32	5.71
单位面积热功率 W/m^2	537.72	527.31	512.18	486.46	439.36
实验编号	F11	F12	F13	F14	F15
总热功率 W	50.59	37.63	34.74	32.15	29.81
每块电池热功率 W/个	4.60	3.14	2.67	2.30	1.99
单位面积热功率 W/m^2	353.81	241.23	205.58	176.63	152.87

B. 3 G800T55Fx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 B. 3 太阳辐照强度为 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度全遮挡阴影电池总热功率和单位热功率

实验编号	F1	F2	F3	F4	F5
总热功率 W	11.18	20.51	29.74	38.86	47.83
每块电池热功率 W/个	11.18	10.25	9.91	9.72	9.57
单位面积热功率 W/m^2	859.73	788.76	762.63	747.38	735.87
实验编号	F6	F7	F8	F9	F10
总热功率 W	56.55	64.81	72.12	77.38	78.40
每块电池热功率 W/个	9.43	9.26	9.01	8.60	7.84
单位面积热功率 W/m^2	725.05	712.25	693.45	661.33	603.07
实验编号	F11	F12	F13	F14	F15
总热功率 W	71.53	52.18	38.36	35.35	32.66
每块电池热功率 W/个	6.50	4.35	2.95	2.52	2.18
单位面积热功率 W/m^2	500.24	334.47	226.98	194.21	167.51

B. 4 G1000T55Fx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 B. 4 太阳辐照强度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度全遮挡阴影电池总热功率和单位热功率

实验编号	F1	F2	F3	F4	F5
总热功率 W	14.11	25.81	37.41	48.88	60.18
每块电池热功率 W/个	14.11	12.90	12.47	12.22	12.04
单位面积热功率 W/m^2	1085.63	992.68	959.10	939.97	925.82
实验编号	F6	F7	F8	F9	F10
总热功率 W	71.19	81.62	90.85	97.53	99.07
每块电池热功率 W/个	11.86	11.66	11.36	10.84	9.91
单位面积热功率 W/m^2	912.63	896.92	873.57	833.56	762.10
实验编号	F11	F12	F13	F14	F15
总热功率 W	91.53	70.45	40.97	37.67	34.75
每块电池热功率 W/个	8.32	5.87	3.15	2.69	2.32
单位面积热功率 W/m^2	640.10	451.62	242.41	206.98	178.23

附录 C 半遮挡不同列数情况下阴影电池总热功率和单位热功率模拟结果

C. 1 G400T55Hx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 C. 1 太阳辐照强度为 $400\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度半遮挡功率损失与影响系数

实验编号	H1	H2	H3	H4
最大功率 W	37.48	35.64	33.96	32.47
总损失 W	2.52	4.36	6.04	7.53
影响系数 W/m^2	2.52	2.18	2.01	1.88
实验编号	H5	H6	H7	H8
最大功率 W	31.17	30.06	29.12	28.34
总损失 W	8.83	9.94	10.88	11.66
影响系数 W/m^2	1.77	1.66	1.55	1.46

续表 C. 1

实验编号	H9	H10	H11	H12
最大功率 W	27.70	27.31	27.03	26.76
总损失 W	12.30	12.69	12.97	13.24
影响系数 W/m ²	1.37	1.27	1.18	1.10

C. 2 G600T55Hx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 C. 2 太阳辐照强度为 600W/m²，电池温度为 55 摄氏度半遮挡功率损失与影响系数

实验编号	H1	H2	H3	H4	H5
最大功率 W	58.29	54.36	51.08	48.47	58.29
总损失 W	4.71	8.64	11.92	14.53	4.71
影响系数 W/m ²	4.71	4.32	3.97	3.63	4.71
实验编号	H6	H7	H8	H9	H10
最大功率 W	46.46	44.97	43.98	43.55	46.46
总损失 W	16.54	18.03	19.02	19.45	16.54
影响系数 W/m ²	3.31	3.01	2.72	2.43	3.31
实验编号	H11	H12	H13	H14	H15
最大功率 W	43.11	42.68	42.25	41.82	43.11
总损失 W	19.89	20.32	20.75	21.18	19.89
影响系数 W/m ²	2.21	2.03	1.89	1.77	2.21

C. 3 G800T55Hx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 C. 3 太阳辐照强度为 800W/m²，电池温度为 55 摄氏度半遮挡功率损失与影响系数

实验编号	H1	H2	H3	H4
最大功率 W	78.04	71.68	66.92	63.61
总损失 W	8.56	14.92	19.68	22.99
影响系数 W/m ²	8.56	7.46	6.56	5.75
实验编号	H5	H6	H7	H8
最大功率 W	61.41	60.53	59.95	59.36
总损失 W	25.19	26.07	26.65	27.24
影响系数 W/m ²	5.04	4.34	3.81	3.41

续表 C.3

实验编号	H9	H10	H11	H12
最大功率 W	58.77	58.22	57.77	57.37
总损失 W	27.83	28.38	28.83	29.23
影响系数 W/m ²	3.09	2.84	2.62	2.44

C.4 G1000T55Hx 功率损失与阴影影响系数模拟结果表

表 C.4 太阳辐照强度为 1000W/m²，电池温度为 55 摄氏度半遮挡功率损失与影响系数

实验编号	H1	H2	H3	H4	H5
最大功率 W	96.90	87.80	82.03	78.57	96.90
总损失 W	13.10	22.20	27.97	31.43	13.10
影响系数 W/m ²	13.10	11.10	9.32	7.86	13.10
实验编号	H6	H7	H8	H9	H10
最大功率 W	77.39	76.65	75.90	75.18	77.39
总损失 W	32.61	33.35	34.10	34.82	32.61
影响系数 W/m ²	6.52	5.56	4.87	4.35	6.52
实验编号	H11	H12	H13	H14	H15
最大功率 W	74.60	74.09	73.62	73.19	74.60
总损失 W	35.40	35.91	36.38	36.81	35.40
影响系数 W/m ²	3.93	3.59	3.31	3.07	3.93

附录 D 半遮挡不同列数情况下阴影电池总热功率和单位热功率模拟结果

D.1 G400T55Hx 电池总热功率与单位热功率模拟结果表

表 D.1 太阳辐照强度为 $400\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度全遮挡阴影电池总热功率和单位热功率

实验编号	H1	H2	H3	H4
SN*总功率 W	2.87	5.36	7.77	10.09
SN 单位功率 W/m^2	441.11	412.45	398.46	388.10
SS*总功率 W	0.95	1.76	2.52	3.25
SS 单位功率 W/m^2	145.79	135.16	129.44	124.95
实验编号	H5	H6	H7	H8
SN*总功率 W	12.32	14.46	16.48	18.39
SN 单位功率 W/m^2	379.11	370.66	362.30	353.69
SS*总功率 W	3.93	4.57	5.15	5.68
SS 单位功率 W/m^2	120.92	117.06	113.22	109.25
实验编号	H9	H10	H11	H12
SN*总功率 W	20.15	21.74	23.12	24.27
SN 单位功率 W/m^2	344.53	334.51	323.41	311.15
SS*总功率 W	6.14	6.53	6.82	7.01
SS 单位功率 W/m^2	105.02	100.43	95.38	89.88

*SN 表示与被遮挡电池并联的处于太阳直射区域的电池，SS 表示遮挡电池

D.2 G600T55Hx 电池总热功率与单位热功率模拟结果表

表 D.2 太阳辐照强度为 $600\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度全遮挡阴影电池总热功率和单位热功率

实验编号	H1	H2	H3	H4
SN*总功率 W	6.14	11.40	16.62	21.78
SN 单位功率 W/m^2	945.32	877.22	852.12	837.51
SS*总功率 W	2.03	3.74	5.40	7.01
SS 单位功率 W/m^2	312.46	287.61	276.95	269.58

续表 D. 2

实验编号	H5	H6	H7	H8
SN*总功率 W	26.87	31.85	35.87	39.15
SN 单位功率 W/m ²	826.63	816.72	788.42	752.82
SS*总功率 W	8.55	9.99	11.04	11.77
SS 单位功率 W/m ²	263.05	256.04	242.72	226.26
实验编号	H9	H10	H11	H12
SN*总功率 W	41.57	43.18	44.12	44.56
SN 单位功率 W/m ²	710.66	664.33	617.04	571.32
SS*总功率 W	12.11	12.12	11.88	11.48
SS 单位功率 W/m ²	207.09	186.54	166.17	147.13

*SN 表示与被遮挡电池并联的处于太阳直射区域的电池，SS 表示遮挡电池

D. 3 G800T55Fx 总热功率与单位热功率模拟结果表

表 D. 3 太阳辐照强度为 800W/m²，电池温度为 55 摄氏度全遮挡阴影电池总热功率和单位热功率

实验编号	H1	H2	H3	H4
SN*总功率 W	8.24	15.27	22.26	29.19
SN 单位功率 W/m ²	1267.70	1174.94	1141.52	1122.64
SS*总功率 W	2.73	5.03	7.28	9.47
SS 单位功率 W/m ²	419.87	386.77	373.29	364.39
实验编号	H5	H6	H7	H8
SN*总功率 W	36.04	42.77	49.28	55.31
SN 单位功率 W/m ²	1108.96	1096.73	1082.98	1063.59
SS*总功率 W	11.59	13.59	15.36	16.66
SS 单位功率 W/m ²	356.72	348.49	337.63	320.44
实验编号	H9	H10	H11	H12
SN*总功率 W	60.33	62.82	62.73	62.35
SN 单位功率 W/m ²	1031.25	966.43	877.40	799.31
SS*总功率 W	16.96	15.71	14.79	13.87
SS 单位功率 W/m ²	289.88	241.68	206.90	177.79

*SN 表示与被遮挡电池并联的处于太阳直射区域的电池，SS 表示遮挡电池

D.4 G1000T55Fx 总热功率与单位热功率模拟结果表

表 D.4 太阳辐照强度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，电池温度为 55 摄氏度全遮挡阴影电池总热功率和单位热功率

实验编号	H1	H2	H3	H4
SN*总功率 W	10.36	19.16	27.92	36.62
SN 单位功率 W/m^2	1593.08	1474.13	1431.88	1408.42
SS*总功率 W	3.43	6.32	9.16	11.94
SS 单位功率 W/m^2	528.27	486.41	469.92	459.36
实验编号	H5	H6	H7	H8
SN*总功率 W	45.23	53.70	61.88	69.48
SN 单位功率 W/m^2	1391.70	1376.84	1360.04	1336.07
SS*总功率 W	14.64	17.19	19.46	21.14
SS 单位功率 W/m^2	450.39	440.72	427.66	406.55
实验编号	H9	H10	H11	H12
SN*总功率 W	75.81	79.62	79.57	78.67
SN 单位功率 W/m^2	1295.92	1224.89	1112.88	1008.57
SS*总功率 W	21.57	19.48	16.43	15.21
SS 单位功率 W/m^2	368.73	299.74	229.78	195.03

*SN 表示与被遮挡电池并联的处于太阳直射区域的电池，SS 表示遮挡电池

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历：

秦琪伟，男，1991年9月生。

2014年7月毕业于同济大学 建筑环境与设备工程（暖通空调）专业 获学士学位。

2014年9月入同济大学供热、供燃气、通风及空调工程专业，参加同济大学与法国国立应用科学研究院卢瓦尔河谷分校硕士双文凭项目。

已发表论文：

秦琪伟，许鹏. 建筑用屋顶光伏电池板热斑电热学模拟. 建筑节能.

专利：

许鹏，陈永保，吴云涛，李为林，褚祎祎，王慧龙，姬颖，侯瑾，**秦琪伟**

一种组合式相变蓄冷装置及采用该蓄冷装置的空调系统. 申请公布号：CN 106197114 A