



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

建筑用小型光伏发电系统仿真模拟及故障诊断

姓名：侯金明

学号：1130998

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

副指导教师：韩延民 研究员

二〇一四年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

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

The Simulation and Fault Diagnosis for the Small-scale Photovoltaic System of Buildings

Candidate: Hou Jinming

Student Number: 1130998

School/Department: School of Mechanical
Engineering

Discipline: Engineering

Major: Heating, Ventilating and Air Conditioning

Supervisor: Prof, Xu Peng

Associated Supervisor: Han Yanmin

March, 2014

建筑用小型光伏发电系统仿真模拟及故障诊断

侯金明

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；学校有权保存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：所呈交的学位论文，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

在有限的传统能源逐渐耗尽与实现可持续发展的双重制约下，如何发展经济已成为全球的热点问题，这就要求传统能源的替代能源必须是可再生的清洁能源，而太阳能就是满足这一要求的理想能源之一。在利用太阳能的各种技术中，由于光伏发电的诸多优点，其研究开发、产业化制造技术已经成为当今世界各国激烈竞争的主要热点，光伏发电在过去的二十年里取得了飞速的发展。虽然光伏系统的装机容量在迅速增加，但目前对控制系统和太阳能板的故障诊断的研究基本还是空白。在实际工程中，太阳能光伏系统运行期间如果系统控制不好，或运行期间产生故障，那么再好的光伏组件实际运行效果也会大打折扣。

对于光伏系统的仿真模拟，本文首先通过对光伏系统的构成以及原理的分析，简要介绍了并网型光伏发电系统的各部分构成、原理及相应的数学模型。然后，根据各部分的数学模型及要进行研究的实际问题，利用 Matlab/Simulink 平台搭建了各部分的仿真模型，包括光伏电池模型、最大功率跟踪模型、并网逆变器模型等。其中，光伏电池模型利用一种新型的带有修正因子的四参数模型进行搭建，该模型不仅克服了传统四参数光伏模型精度低缺点，而且能够实现模型的快速求解。

对于光伏系统的故障诊断，本文首先调研了国内外学者对光伏系统故障诊断所作的研究。其次，在此基础上，根据光伏系统不同故障的特征及实际情况，总结出了相应的光伏系统故障分类方法并进行了分析。然后，根据所建立的光伏系统故障分类，提出了一种基于能量分析的故障诊断算法，此方法所需计算参数较易获得，仅需辐照度、温度等环境参数与系统中相应的交、直流电压电流等电路参数即可进行故障判断。最后，利用 Matlab 平台实现了该故障诊断系统的建立，并实现了整个系统的软硬件系统设计与搭建。

实验结果表明，本文所建立仿真模型，计算结果准确，故障诊断系统能进行准确判断，达到了系统设计的要求。

关键字：光伏系统，仿真模拟，故障诊断

ABSTRACT

Under the dual constraints of the limited traditional energy depleted and the implementation of sustainable development, it has become a hot issue around the world that how to develop the economy. It requires the traditional alternative sources of energy must be renewable and clean, and solar energy is one of the ideal energy to meet this requirement. There is a variety of techniques in the use of solar energy. Due to the many advantages, the research and development of photovoltaic power generation in the industrial manufacturing technology has become a fierce competition in the major hot spots of the world today and photovoltaic power generation has achieved rapid development in the past 20 years. Although the installed capacity of PV systems is increasing rapidly, the fault diagnosis of the control system and solar panels is still blank. In the actual project, if the control is not good or running with failure during operation of the solar photovoltaic system, the actual effect will be greatly reduced no matter how well the PV modules are.

For the simulation of PV systems, through the analysis of the constitution and the principles of the photovoltaic system, a brief introduction of grid-connected photovoltaic power generation system parts, the principle and the corresponding mathematical model is introduced. Then, according to the various parts of the mathematical model and the practical problems, I use Matlab / Simulink platform to build the various parts of the simulation model, including the model of photovoltaic cell, the maximum power tracking model and the grid-connected inverter model. Among them, the photovoltaic cell model uses a new four-parameter model with a correction factor to build the model. It not only overcomes the drawback of the traditional four-parameter PV model of low accuracy, and also achieves fast solution.

For the photovoltaic system fault diagnosis, this paper researches the work of the scholars at home and abroad by the photovoltaic system fault diagnosis. Secondly, on this basis, according to my own awareness and the actual situation of the photovoltaic system failure, I sum up a photovoltaic system failure classification and do some analysis. Then, according to the established PV system fault classification, I propose a fault diagnosis algorithm based on energy analysis. The required parameters of this method are easier to obtain, only the irradiance, temperature and other environmental parameters and the AC/DC voltage and current circuit parameters of the system. Finally, I achieve the establishment of the fault diagnosis system using the

Matlab platform and the entire system of hardware and software system design and build.

Experimental results show that the simulation model established in this paper can achieve accurate results and the fault diagnosis system can accurately determine the fault of the system and the whole system can achieve the design requirements.

Key words: photovoltaic systems, simulation, fault diagnosis

目录

第 1 章 引言	1
1.1 光伏系统故障诊断的背景及意义	1
1.2 本课题的主要研究内容	3
第 2 章 光伏系统故障诊断算法的建立	5
2.1 国内外光伏系统故障诊断的研究现状	5
2.1.1 国外研究现状和发展动态	5
2.1.2 国内研究现状和发展动态	6
2.2 光伏系统故障分类及分析	8
2.3 故障诊断算法的建立	10
第 3 章 光伏系统的原理及仿真模型的建立	15
3.1 光伏系统的构成及原理	15
3.1.1 光伏系统简要介绍	15
3.1.2 光伏电池的原理及数学模型	16
3.1.3 最大功率点跟踪的原理及实现方法	18
3.1.4 光伏逆变器	22
3.2 光伏系统仿真模型的建立	22
3.2.1 光伏阵列模型的建立	22
3.2.2 最大功率跟踪模型的建立	36
3.2.3 并网逆变器模型的建立	38
3.2.4 其他模型的建立	39

第 4 章 光伏系统故障诊断系统的建立	41
4.1 故障诊断系统的实现	41
4.2 实时数据采集系统	42
4.3 故障诊断软件	43
第 5 章 实验验证与结果分析	47
5.1 故障诊断系统的硬件系统设计	47
5.2 实验结果与分析	49
5.2.1 光伏参数的获取	49
5.2.2 故障诊断系统验证实验	50
第 6 章 总结与展望	79
6.1 总结	79
6.2 展望	79
参考文献.....	81
致谢	81
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	86

第 1 章 引言

1.1 光伏系统故障诊断的背景及意义

随着人们对能源和环境问题认识的不断提高,光伏发电越来越受到各国政府的重视,科研投入不断加大,鼓励和支持光伏产业发展的政策也不断出台。以 1997 年美国克林顿的“百万太阳能光伏屋顶计划”为标志,日本还有欧洲的德国、丹麦、意大利、英国、西班牙等国也纷纷开始制定本国的可再生能源法案,刺激了光伏产业的高速发展。

2000 年以来,全球光伏产业连续 6 年以 30%~60% 以上的速度增长,2002 年全球光伏电池产量为 560MW/a,到 2003 年已高达 750MW/a,增长了 34%。2004 年开始,德国对可再生能源法进行了修订,新的补贴法案促成了德国光伏市场随后的爆发,随之而来的是发达国家间新一轮的政策热潮和全球光伏市场的更高速膨胀。2004 年世界光伏电池年产量达到 1256MW,年增长率高达 68%,2005 年产量达 1818MW,增长率仍有 45%。正是由于欧洲、日本和美国强有力的政策推动,在新世纪头几年,全球太阳能光伏发电系统市场呈现出欣欣向荣的景象。1999~2007 年间,光伏电池产量以年均增长率超过 40% 的速度高速发展,太阳电池的年产量从 1999 年的 202MW 增加到 2007 年的 4000MW,增长了 20 倍。

但 2008 年的美国经济危机,以及欧债危机的爆发,都使光伏市场受到了较大的冲击,光伏市场增速放缓,光伏产能过剩。现在形成的光伏市场格局是:欧盟仍是世界上光伏发电量最大的区域,欧盟仍是光伏组件需求最大的区域,约占全球光伏市场 60% 的份额;中国已成为世界光伏生产第一大国,2010 年中国光伏电池产量达 8GW,全球市场占比近 50%,但中国光伏面临着“两头在外”的难题,即技术和市场在外。

短期来看,受美国经济危机及欧债危机的影响,世界光伏市场增速不如预期,同时光伏产能过剩,造成光伏市场供需失衡,中国光伏产生面临着严峻的考验。但从中国光伏产业的长期发展来看,中国光伏产业“两头在外”的问题正在得到解决,本土市场快速发展,同时政策法规正在逐步完善。作为新能源产业代表之一的光伏产业必将在近期短暂的低迷后,迎来新的发展期。

新世纪,在有限的传统能源逐渐耗尽与可持续发展的双重制约下,如何发展经济已成为全球的热点问题,这就要求传统能源的替代能源必须是可再生的清洁能源,而太阳能就是满足这一要求的理想能源之一。据估计,1 年之内到达地球表面的太阳能总量是日前世界已探明储量能源的一万倍以上。我国属于太阳能能

源较为丰富的国家之一，中国国土面积 2/3 以上的地区每年日照时数 2000 小时以上，而且仅陆地面积每年接受的太阳辐射能就约等于几万个三峡工程发电量的总和。太阳能可以说是取之不尽、用之不绝的能源，而且太阳能是现在唯一已知的能满足人类能源需求的可再生能源。因此，从能源供应的诸多因素考虑，太阳能无疑是符合可持续发展战略理想的绿色能源^[1]。

太阳能利用主要有光热利用、光伏利用和光化学利用等三种主要形式。其中光伏利用主要是以光伏发电的形式来实行的。光伏发电具有以下明显的优点：(1) 无污染：绝对零排放——无任何物质及声、光、电、磁、机械噪音等“排放”；(2) 可再生：资源可视为无限的，可直接输出高品位电能，具有理想的可持续发展属性；(3) 资源的普遍性：基本上不受地域的限制，只是地区之间的太阳能资源含量不同；(4) 机动灵活：发电系统可按需要以光伏电池模块方式集成，可大可小、扩容方便；(5) 存储性好：电能可以方便地通过输电线路传输、使用和存储；(6) 安全可靠：将提高整个能源系统的安全性和可靠性，特别是从抗御自然灾害和战备的角度，它更具有明显的意义；(7) 光伏建筑集成 (BIPV-Building Integrated Photovoltaic)：能大量节省发电基地使用的土地面积和费用，是目前国际上研究及发展的前沿，深受各国政府的重视，也是相关领域科技界最热门的话题之一^[2,3]。

由于光伏发电的诸多优点，其研究开发、产业化制造技术已经成为当今世界各国，特别是欧美和日本等发达国家激烈竞争的主要热点，光伏发电在过去的 20 年里取得了飞速的发展。虽然光伏板的装机容量在迅速增加，价格在迅速下降，但是目前整体价格比起传统的能源系统还是偏高。光伏发电的价格偏高的主要原因还是效率比较低。根据传统的 PV 技术，理论上的极限效率也就在 20% 左右。目前，单晶硅产品转换效率已经达到 20% 以上，单晶硅电池的实验室最高效率为 24.7%，多晶硅产品转换效率已达 16.7% 以上，多晶硅电池的实验室最高效率为 19.8%，非晶硅电池的实验室最高效率为 15.2%。大幅地提高光伏板的效率已经极为困难，但是很多研究仍关注在如何提高太阳能板的效率上面。目前对控制系统和太阳能板的故障诊断的研究基本还是空白。在实际工程中，太阳能光伏板运行期间如果系统控制不好，或运行期间产生故障，那么再好的光伏板实际效果也会大打折扣。

同时对于光伏发电是否真的可以做到可靠环保，仍有许多学者持保留意见。一方面在于，光伏组件在制造过程中对环境会造成一定程度的污染，例如，光伏板所用的单晶硅或多晶硅的提炼和加工就会对环境造成污染；另一方面，光伏系统能否真正实现节能还要看它是否能在全生命周期内实现能源回收和产出预期的电能，如果光伏系统在运行期间，某个光伏板发生故障，它不仅不发电而且还

会成为系统的负载,消耗其它正常工作光伏板所发的电能,严重影响光伏系统的能源产出。

安装和运行合理的光伏板系统是提高能效,实现全生命周期能源回收的关键。光伏板的理论寿命是20到30年^[4,5],但是配件寿命往往达不到这个指标,逆变器,和暴露在室外的配件经常在几年之后就出现问题^[6-8]。逆变器的效率可能下降,个别线路可能断线。但是出现问题之后,除非是导致系统无法发电,否则用户是无法知道系统的效能是在下降的。因为天气在变化,单纯的比较上个月和下个月的发电出力是无法判断系统是否有问题的。另外一方面,即使是相当可靠的光伏板也会出现自然衰减。光伏板的表面会变脏或者被周围的建筑物和植物遮挡,这些都会影响光伏板的出力,如果不能实时监控,做到故障自动报告,那么实际运行效果就会比理论值要差^[9-12]。

而实际工程中光伏系统的故障发生还是很普遍的。根据美国西南技术所的研究,在5年内,50%的 pre-block 型光伏板都有这样或者那样的问题,主要原因不是光伏板本身的问题而系统集成的问题,系统采用的配件和连线,加上系统处于室外日晒雨淋的状态,导致了光伏系统产生这样或者那样的故障^[13]。另外根据美国 Sandia 国家实验室的报告,应用于建筑屋顶的小型系统,5年内的故障率是20%左右。这是发达国家管理制度和安装规范比较好的情况。在中国,故障率可能会更高。即使按照这个数据推算,2010年中国的光伏板的总产量是8GW,其中的20%,也就是1.6GW的发电产能在五年之内其效能会受到不同程度的影响。所以光伏系统的故障诊断和监控就显得格外重要,不然在无声无息中,大量的可发出的能源被白白浪费掉^[14]。

实际应用中由于光伏组件封装工艺等原因,当光伏组件运行八至十年后,光伏电池板局部区域因为气孔的渗入或扩散而老化,这使得光伏组件中的部分电池损坏。此外,当光伏组件受到遮挡时,也会使光电转换受到影响。目前,早先几年安装的光伏发电系统已经出现局部的老化现象,使得光伏发电系统的输出受到了影响^[15,16]。随着光伏发电技术的大规模推广和应用,如何对光伏发电系统中光伏电池的工作状态进行分析,及时地发现并诊断出故障的原因,将是一件十分必要及有意义的工作。

1.2 本课题的主要研究内容

本课题的主要工作如下:

- 1) 根据光伏电池的数学模型建立满足一定精度要求的仿真模型,并建立光伏实验台,通过进行一定的实验,以验证此光伏电池仿真模型的准确性。如果光伏电池仿真模型的准确度达不到相应要求,则改进光伏电池仿真模型直至其能满足以后工作的精度需求

- 2) 采用不同类型的光伏电池进行实验，并更改仿真模型相应的参数输入，将实验数据与模拟数据进行对比，以验证仿真模型的通用性。
- 3) 建立光伏系统其他组件的仿真模型，如逆变器效率模型、MPPT 模型，并用实验数据验证所建立模型的准确性。
- 4) 进行光伏系统故障诊断系统的建立，在实验用的光伏板上引入不同的故障，确定故障诊断系统是否能正常运行，能否达到需要的技术要求。
- 5) 在长期实际运行的系统中引入本课题所建立的故障诊断系统，以在实际运行情况下验证其有效性。

第 2 章 光伏系统故障诊断算法的建立

2.1 国内外光伏系统故障诊断的研究现状

2.1.1 国外研究现状和发展动态

光伏电池的仿真模型种类很多，它们都有各自的复杂程度和精度。在这些仿真模型中，有两类是使用最广与研究最多的：一是单二极管模型（通常被叫作单指数模型），二是双二极管模型（通常被叫作双指数模型）。这两种模型都是基于著名的 Shockley 二极管方程建立的^[32]。早期文献通常使用单二极管模型进行建模，这种模型虽然牺牲了一定的精度，但模型简单，方程易于计算，更有文献指出，光伏电池模型在组合成光伏阵列时，其模型精度就不太重要，低精度的单二极管模型就足以用于模拟光伏阵列性能^[33-38]，所以仍有研究者使用此模型进行建模^[39-45]。近年来，多数学者认为双二极管模型要比单二极管模型更精确^[45, 46]，同时在低辐照度情况下有更高的准确性^[47, 48]，所以在近期关于光伏电池模型的文献中，越来越多的学者选用双二极管模型进行建模^[49, 50]。

许多学者采用不同的方法对光伏系统进行建模。T. Takashima 采用地容值的方法来对光伏阵列的串联组件进行错故障诊断。因为这种方法不受太阳辐射强度的影响，所以可以使用在任何时刻来检测串联组件中故障的位置^[7]。K. Chao 基于光伏模块直流物理模型，在 PSIM 仿真环境下，模拟了光伏阵列仿真模型，并将仿真数据与实测数据进行了比较。他们首先用 PSIM 软件建立了一个 3kW 的光伏阵列模型，然后基于可拓理论，用物化模型对光伏阵列进行不同类型的故障诊断。模拟结果显示该方法能够有效且准确对光伏阵列进行故障诊断^[6]。H. Patel 等人采用完全的，实时的模拟方式。他们研究了在部分阴影条件下光伏阵列的特性。在 MATLAB 仿真环境下，建立了模型来研究光伏阵列的电流-电压和功率-电压特性，且分析了光伏阵列在太阳辐射强度不等的条件下，选取最大可能功率作为故障诊断点^[4]。

如果不采用物理模型，还有一个方法就是采用统计模型。统计模型有它的优越性。最大的好处在于统计模型不需要建模过程。一个模型可以用实时的数据进行矫正。Y. Wu 等人就是采用了这样的方法，他们研究了光伏并网系统的不同故障诊断模式以及问题来源。作者基于反向传播神经网络理论提出了一个故障诊断方法。结果显示这种诊断方法具有实用性，且可以有效可靠的对光伏并网系统进行故障诊断^[10]。

模型是一方面，如何把模型结果和实测结果进行比较，从而细分和判断出故

障的位置，也是技术的关键。Y. Yagi 的论文基于数据分析开发了一种光伏诊断技术。作者采用诊断指标数据库对光伏系统实测的数据进行分析，从而对阴影和逆变器故障进行诊断。这种方法可以诊断出光伏系统中可能发生的错误，但不能诊断出故障的具体位置^[9]。

在这方面，S. K. Firth 等人的贡献比较有特色。他们和其他的研究人员一样，基于采集的数据，首先建立了在正常条件下运行的光伏模型。然后采用了新颖的数据分析技术鉴定光伏系统的故障。但是他们将故障分为四个类型：持久零效率故障，短暂零效率故障，阴影，非零效率无阴影故障。然后根据结果的比较，这样把故障细分到每一类中间去。结果显示这四类故障在很大程度上导致了住宅光伏系统的能量损失，而其他的故障不是特别的重要^[5]。

在太阳能板本身的机械故障方面，T. Takashima 研究了针对光伏串联组件的故障诊断方法。第一种是对地电容的测量，这种方法可以估测到组件间断开的位置。第二种是时域反射测量法，这种方法可以通过响应波形的改变来估测出如由组件间电阻增加所引起的衰减故障及其位置^[8]。

故障诊断不仅是运行过程中的故障，有些故障来自于系统设计和制造商。在这样的情况下，就不需要实时诊断。Y. Ueda 等人采用一种先进的确认方法来对住宅光伏系统进行性能及能量损失分析，并对不同的系统结构进行了比较分析。该论文研究了光伏系统性能的影响因素，包括光伏系统的朝向，组件制造商，串联组件电压不均衡等。直流/直流转换器可以将串联组件电压不均衡所引起的能量流失最小化，避免峰值功率损失和最大功率点的不匹配^[11]。

出于同样的目的，T. Yamada 对光伏组件的反射能量损失进行了模拟分析。结果显示修正系数在 0.96 到 0.98 之间。为了得到组件材料的光学性能、组件倾斜角度、朝向和位置，需要用修正系数对年反射损失进行模拟估值^[12]。

这些研究虽然奠定了一些理论基础，比如具体的物理模型和控制方式。但是这些研究都没有解决在运行过程中的长期故障跟踪和诊断。这样研究的物理模型和方法通常被用在系统设置的优化和制造过程中的故障分析和产品检测。

A. Chouder 等基于光伏阵列的能量损失进行故障诊断。他们首先分析了造成光伏阵列能量损失的不同原因，指出其中是由于系统故障而造成的损失，在量化分析的基础上进行诊断。实验结果表明，此种方法能够很好的指明故障的存在^[51]。

但是这些研究对于我们解决运行过程中的故障诊断提供的很好的理论基础。特别是物理模型的开发。使得我们在未来可以采用计算模型的方式，跟踪比较光伏板的运行参数，从而实现实时的故障诊断。

2.1.2 国内研究现状和发展动态

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。20 世纪 70 年代初到 80 年代末，由于成本较高，太阳能电池的地面应用发展十分有限。20 世纪 90 年代以后，由于光伏电池成本的降低和光伏电池作为绿色新能源的优势的逐渐体现，光伏市场稳步扩大，国家和地方政府开始制订光伏计划。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。

“光伏建筑一体化”的概念早在 1991 年就已被正式提出，并很快成为热门课题。此后，许多国家纷纷实施和推广“太阳能屋顶计划”，比如德国的十万屋顶计划、美国的百万屋顶计划以及日本的新阳光计划等^[52]。文献[52]、[53]对光伏建筑一体化的研究进行了一定的探索，其中文献[53]阐述了光伏建筑的技术原理、系统组成及应用方式，文献[53]以实际工程应用阐明了光伏建筑一体化在上海的应用前景，给出了宝贵的实际经验。

在光伏阵列数学模型的研究上，文献[54]给出了两类模型，一类是设计手册模型，这类模型中包含三种模型，文章作者对这三种模型的优缺点进行了分析；一类是工程应用模型，这类模型更适合于在工程技术进行应用。文献[55]参考其他研究人员的成果，建立了一套太阳能电池数学模型，并对其进行了仿真模拟。文献[56-59]分别就太阳能电池模拟器、仿真模型及其输特征等进行了建模与仿真模拟，他们所用的数学模型各有不同，具有一定的参考意义。文献[60-62]均在 MATLAB/Simulink 仿真环境下，基于光伏电池的数学模型，建立了光伏电池的仿真模型并进行了不同的研究。他们的模型均是基于单二极管模型建立的，但模型建立后并没有与实测数据进行比对，所以模型的准确程度无法得到验证。

阴影遮挡问题是光伏故障诊断中研究较多的一个内容，文献[63-66]对此问题进行了相应研究，其中[63, 64]在局部阴影条件下进行了光伏电池输出特性的实验研究，均得到了阴影对光伏电池的电压、电流影响很大且当阴影面积超过光伏组件面积二分之一后，光伏电池输出功率降到原来的 1%。文献[65, 66]进行了光伏电池建模，并在此基础上进行了阴影遮挡问题的研究。

文献[67]介绍了光伏发电智能诊断的几种方法，并且结合这些方法给出了太阳能光伏发电设备的智能诊断方案，具有一定的理论研究意义和工程实用价值。

文献[68]提出了基于红外图像分析的故障诊断方案，此方法将正常工作状态下的电池板与处于故障电池板的温差进行分析和计算，并以每块电池板的平均温度与整个光伏阵列的平均温度的差值作为判断重要依据，结果表明采用此方法进行太阳能光伏阵列进行故障诊断的方案是有效的、可行的。但此种方法不能区分温度相差不明显的状态；实时性差，不具备快速检测和诊断能力；故障检测的精

度和效率取决于检测设备（红外热像仪）的等级，在实际运用中有一定的局限性。

文献[69]对光伏阵列在不同故障状态下的输出特性进行仿真，总结了光伏阵列在故障下输出特性的变化规律，分析了基于支路电流检测与电池板电压检测相结合的故障诊断策略，并且在故障诊断的基础上，提出了阴影影响下光伏阵列多极值点最大功率点跟踪控制策略，最后通过搭建的光伏阵列对所提的最优传感器配置方法和最大功率点跟踪方法进行了验证。

文献[70]介绍了光伏发电系统的故障诊断模式和故障原因，针对太阳能并网光伏发电系统工作过程中可能出现的故障，提出了一种基于 BP 神经网络的故障诊断方法，并用测试结果验证了该方法的有效性，但论文中给出实际可用数据及方法实现过程的说明。

综合国内外光伏发电系统仿真模拟与故障诊断的研究现状，可以发现在仿真模拟方面国内外研究人员均已作了较多的研究工作，但方法众多没有一个统一而系统的模型基础，故障诊断的研究仍处于起步阶段，越来越多的研究人员已进行关注，但并没有建立起真正有效的故障诊断系统。

2.2 光伏系统故障分类及分析

在光伏系统的不同部分会发生不同的故障，其实表现形式也各有不同。对于并网型光伏发电系统，主要有光伏阵列、最大功率跟踪和逆变器这三个大部分来实现整个光伏系统的发电、最大功率跟踪和逆变上网。本文主要针对这三大部分，提出九种故障类型与相应的诊断方法，具体如下表 2-1 和表 2-2 所示：

表 2-1 故障类型及其对就的原因和结果

故障所属组件	故障类型	故障所产生结果	故障产生的原因
光伏阵列系统	1. 短时间开路	短时间支路或系统无输出	系统维修、线路短暂接触不良
	2. 长时间开路	长时间支路或系统无输出	元件损坏、支路或全光伏侧线路开路
	3. 短路	支路输出减少模块或阵列的整数倍	模块级别或阵列级别旁通二极管击穿、线路短路
	4. 周期遮挡	同一时域输出低于理论值、多 MPP	光伏阵列自遮挡、周围环境固定时间形成遮挡
	5. 老化、积灰、污物	长时间输出低于理想值	光伏板自然老化、光伏板板面积灰或有污物沉积

MPPT	6. MPPT 失效	运行点在 T、G 下的输出曲线下，但不在 MPPT 点	逆变器 MPPT 部分出现故障，MPPT 功能失效
逆变器	7. 逆变器能量失衡	逆变器两端能量不平衡	逆变器逆变过程出现故障，能量损耗高于正常范围
	8. 逆变器关闭	DC 有电压，AC 无功率输出	逆变器未在正确时间启动、故障性关闭或并网线路开路
其他	9. 其他故障	其他致使系统输出小于预期的故障	其他致使系统输出小于预期的故障

表 2-2 不同故障的判别方法及判别难易

故障所属组件	故障类型	判别难易	故障判别方法及需求
光伏阵列系统	1. 短时间开路	简单	在光照满足正常发电的情况下 ($G > 200\text{W}/\text{m}^2$)，某一时刻起，光伏板发电失效板数 N_{ma} 等于阵列中串联光伏板的个数 n_s ，从此刻起，发出警报“故障 1”，并进行记录。当功率输出大于前面的界定，则退出此故障并记录故障发生起止时间。当功率输出持续基本为零超过一定时间（1 小时），则故障转为长时间开路。
	2. 长时间开路	简单	短时间开路转换为长时间开路后，发出警报“故障 2”，并进行记录。当功率输出大于前面的界定，则退出此故障并记录故障发生起止时间。
	3. 短路	中等	在光照满足正常发电的情况下 ($G > 200\text{W}/\text{m}^2$)，某一时刻起，功率输出 DP 小于模型计算所得理论值 DP_0 ，计算光伏阵列输出功率实测值 DP 与输出功率理论值 DP_0 的比值 PR_1 ，由 $PR_1 = 1 - (1/N) * N_{ma}$ 计算出 N_{ma} ，若 $N_{ma} > 0.5$ ，且在某整数附近 (N_{ma} 在某整数的加减 0.1) 且不为 n_s ，一段时间内（5 个计算点）所计算的 N_{ma} 稳定为上述整数附近，则发出警报“故障 3”，并进行记录。
	4. 周期遮挡	难	计算全监测时段 PR_1 值，若干天内（3 天），筛选 PR_1 值 < 0.9 的数值点，在基本相同的时域内（正负 5%），同一 PR_1 值数值点基本相等（正负 5%），则发出警报“故障 4”，并进行记录。
	5. 老化、积灰、污物	中等	计算全监测时段 PR_1 值，长时间（1 天） PR_1 值低于正常值的限定范围（小于 0.9），则发出警报“故障 5”，并进行记录。
MPPT	6. MPPT 失效	难	计算 PR_1 值， PR_1 值低于正常值的限定范围（小于 0.9）时，将直流输出电压数值代入光伏模型中，得出的直流输出电压若与实测输出电压较接近（正负 5%），持续时间超过界定范围（5 个测试点），则发出警报“故障 5”，并进行记录。

逆变器	7. 逆变器能量失衡	简单	将光伏阵列输出功率代入逆变器模型得到逆变器输出功率理论值，计算逆变器输出功率实测值 AP 与输出功率理论值 APO 的比值 PR2，PR2 值低于正常值的限定范围（小于 0.9），则发出警报“故障 7”，并进行记录。
	8. 逆变器关闭	简单	光伏阵列侧可测得直流电压，逆变器输出侧功率输出基本为零（逆变器输出功率实测值 $AP \leq 1W$ ），持续时间超过界定范围（5 个测试点），则发出警报“故障 7”，并进行记录
其他	9. 其他故障	简单	无法判断具有以上故障，但系统输出小于预期输出

2.3 故障诊断算法的建立

在获得实测数据后，根据前面所建立的光伏系统各部件的模型，将会根据实测数据来模拟出光伏系统在同样环境参数作用下的模拟输出数据，用以进行故障判断。数据计算过程如图 2-1 所示。

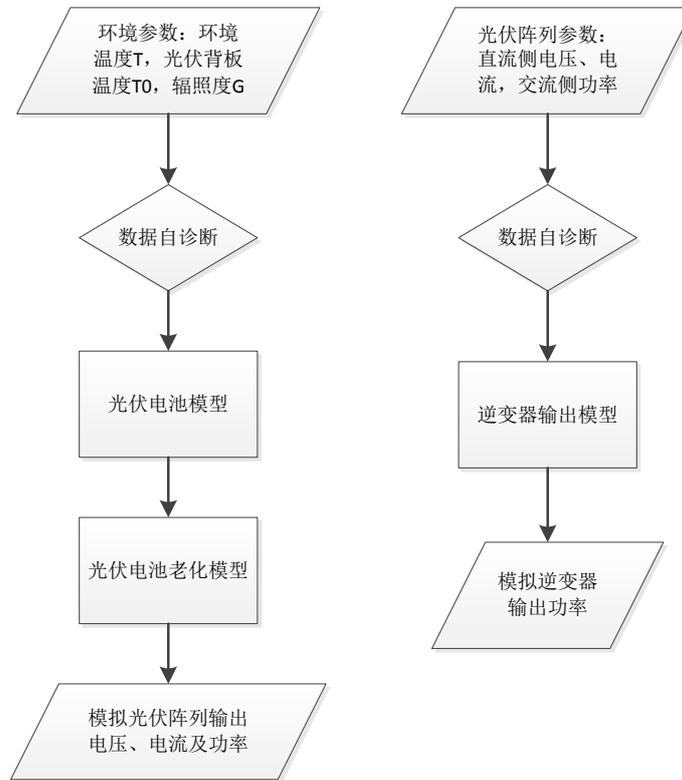


图 2-1 诊断数据计算过程

光伏系统中实时采集到的数据或是历史数据，经数据自诊断判断数据准确后，环境参数（环境温度 T，光伏背板温度 T0，辐照度 G）传递给光伏电池模型进行计算，之后将计算数据传递给光伏电池老化模型，计算在老化作用后，光伏阵列的模拟输出数据（模拟直流电压、电流和功率）；同时光伏阵列参数（直流侧电压、电流，交流侧功率）传递给逆变器模型，计算出模拟逆变器输出功率。

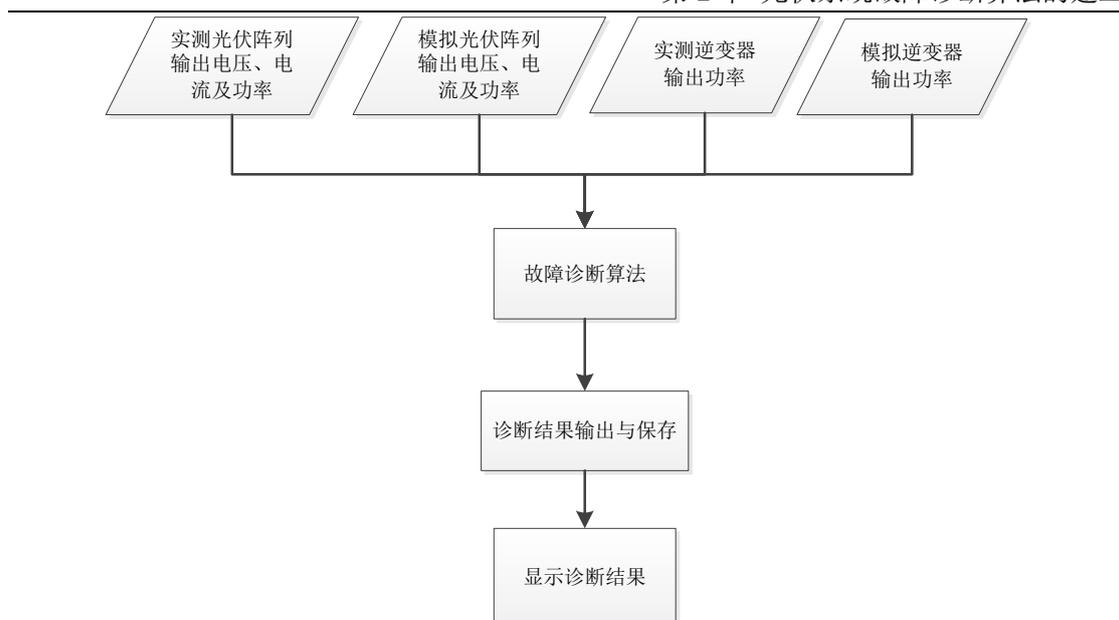


图 2-2 诊断系统的流程图

故障诊断系统的诊断流程如图 2-2 所示。本发明的故障诊断算法根据实测光伏阵列参数、实测逆变器参数、模拟光伏阵列输出参数和模拟逆变器输出参数进行故障诊断，并将诊断数据进行输出与保存，用户可以自行去查看诊断数据，也可通过故障诊断软件进行诊断数据的查看。在故障诊断软件中，会实时的显示所计算数据的故障情况，并在故障状态时发出报警。

根据以上故障类型及诊断方法，本文将以上故障根据故障持续时间分为实时性故障及时序性故障。实时性故障包括故障 1、2、3、6、7、8 和 9，用实时数据进行判断。时序故障包括故障 4 和 5，用历史数据进行判断。其相应的故障诊断流程图如图 2-3 和图 2-4 所示。

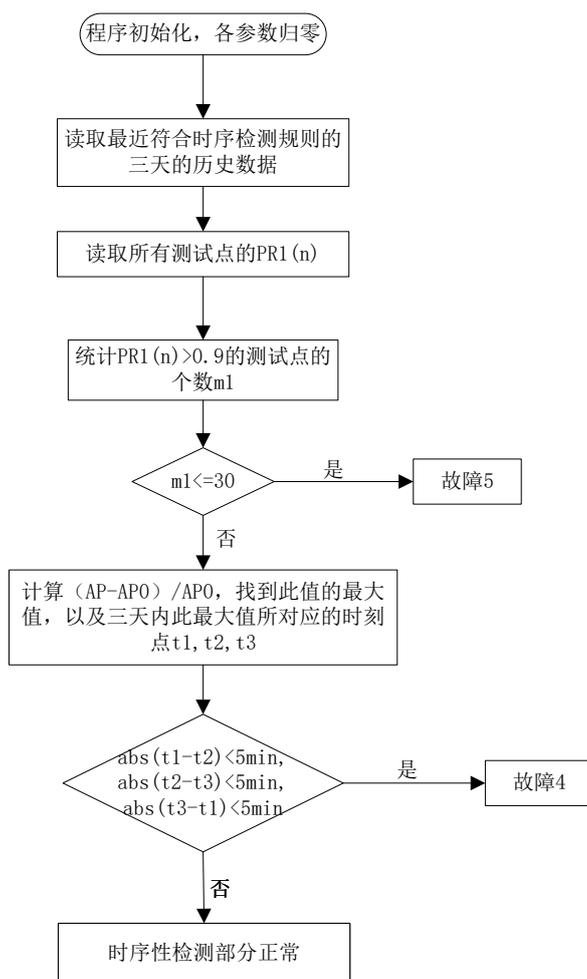


图 2-4 时序性故障诊断流程图

第3章 光伏系统的原理及仿真模型的建立

3.1 光伏系统的构成及原理

3.1.1 光伏系统简要介绍

光伏发电系统一般可分为独立光伏发电系统、并网光伏发电系统和混合型光伏发电系统。

1) 独立太阳能光伏发电是指太阳能光伏发电不与电网连接的发电方式，典型特征为需要用蓄电池来存储夜晚用电的能量。独立太阳能光伏发电在民用范围内主要用于边远的乡村，如家庭系统、村级太阳能光伏电站；在工业范围内主要用于电讯、卫星广播电视、太阳能水泵，在具备风力发电和小水电的地区还可以组成混合发电系统，如风力发电/太阳能发电互补系统等。独立系统结构图如图 3-1 所示。其中，PV 表示由光伏电池组成的光伏组件或光伏组件阵列。

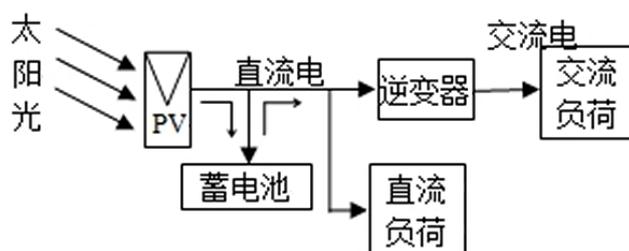


图 3-1 独立太阳能光伏发电系统

2) 并网太阳能光伏发电是指太阳能光伏发电连接到国家电网的发电的方式，成为电网的补充，典型特征为不需要蓄电池。民用太阳能光伏发电多以家庭为单位，商业用途主要为企业、政府大楼、公共设施、安全设施、夜景美化景观照明系统等的供电，工业用途如太阳能农场。目前常用的并网光伏发电系统具有两种结构形式，其不同之处在于是否带有蓄电池作为储能环节。带有蓄电池环节的并网光伏发电系统称为可调度式并网光伏发电系统。并网太阳能光伏发电如图 3-2 所示。其中， u_s 表示电网电压。



图 3-2 并网太阳能光伏发电系统

3) 混合型光伏发电系统区别于以上两个系统之处是其增加了一台备用发电机组, 当光伏阵列发电不足或蓄电池储量不足时, 可以启动备用发电机组, 它既可以直接给交流负载供电, 又可以经整流器后给蓄电池充电。

如果根据光伏系统的应用形式, 应用规模和负载的类型进行更细致的分类, 光伏发电系统还可以分为户用光伏发电系统、小型光伏电站、屋顶光伏发电系统和大型并网光伏发电系统。其中, 屋顶光伏发电系统的显著优点是: a. 不占用土地资源, 在城市中应用的优势相当明显; b. 减少了电力输送的线路损耗; c. 降低了墙面的温升, 减轻了建筑物的空调负荷, 降低了空调的能耗, 符合目前节能减排的政策; d. 舒缓了高峰电力的需求, 配备蓄电池后能满足安全用电设施不能断电的要求。

3.1.2 光伏电池的原理及数学模型

光伏电池是光伏发电的能量转换器件, 其原理是光生伏打效应。当太阳光(或其他光源)照射到光伏电池上时, 光伏电池吸收光能, 产生光电子-空穴对。在电池内建电场的作用下, 光生电子和空穴被分离, 光伏电池两端出现异号电荷的积累, 产生“光生电压”, 这就是“光生伏打效应”。若在内建电场的两侧引出电极并接上负载, 则负载就有“光生电流”流过, 从而获得功率输出。经过光伏电池的“光生伏打效应”, 太阳的光能就被转化成了电能。

光伏电池的仿真模型种类很多, 它们都有各自的复杂程度和精度。在这些仿真模型中, 有两类基于光伏电池等效电路的模型是使用最广与研究最多的: 一是单二极管模型(通常被叫作单指数模型), 二是双二极管模型(通常被叫作双指数模型)。其中单二极管模型又包括四参数模型(单二极管简单模型)和五参数模型(单二极管精细模型)。

四参数光伏模型等效电路如图 3-3 所示:

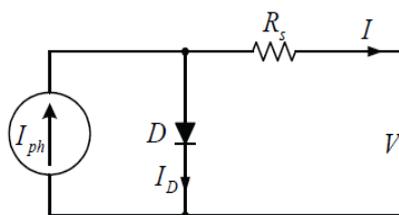


图 3-3 四参数光伏模型等效电路图

其数学表达式为:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_t}\right) - 1 \right) \quad (3-1-1)$$

其中, I_{ph} 为光伏电池的光生电流 (A), I_0 为二极管的反向饱和电流 (A), I_D 为通过二极管的电流 (A), R_s 为光伏电池等效串联电阻 (Ω), n 为二极管的理想因子, $V_t = \frac{kq}{T}$ 为光

伏电池热电压 (V)，其中 $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ，为波尔兹曼常数， $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，为电子电荷量， T 为光伏电池温度 (K)。

五参数光伏模型等效电路如图 3-4 所示：

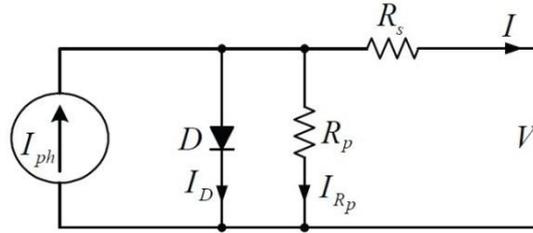


图 3-4 五参数光伏模型等效电路图

其数学表达式为：

$$I = I_{ph} - I_D - I_{R_p} = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3-1-2)$$

其中， R_p 为光伏电池等效并联电阻 (Ω)。

双二极管光伏模型等效电路如图 3-5 所示：

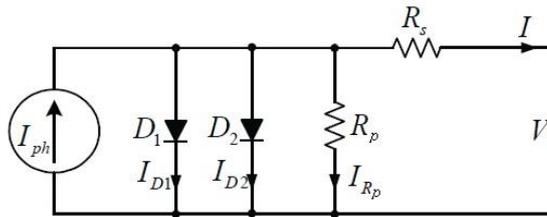


图 3-5 双二极管光伏模型等效电路图

其数学表达式为：

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{R_p} = I_{ph} - I_{o1} \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_1 V_t}\right) - 1 \right) - I_{o2} \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_2 V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3-1-3)$$

其中， I_{D1} 、 I_{D2} 为通过两个二极管的电流 (A)， I_{o1} 、 I_{o2} 为两个二极管的反向饱和电流 (A)， n_1 、 n_2 为两个二极管的理想因子。

这三种模型在模型准确度及计算速度方面各有其优缺点。四参数模型含有串联电阻、二极管反向饱和电流、光生电流和二极管理想因子四个待解参数，该模型结构简单，求解快速，但其准确度较低，在低光照情况下会出现较大误差。五参数模型比四参数模型多加一个并联电阻，该模型是构建光伏电池模型所应用最多的模型，其能较准确的模拟出光伏电池特性曲线，但其方程复杂，求解速度较慢。双二极管模型在五参数模型的基础上增加了一个二极管用以表征载流子在耗散区的复合损失，该模型是最能全面表征光伏电池特性的模型，但其所需求解参数为七个甚至更多，这使其求解极为困难，通常

需进行若干假设减少所需求解参数才能对其求解。

光伏电池在一定光照及温度下的输出特性曲线如图 3-6 所示。其中有三个重要的参数点以及其对应的四个参数值，这三个参数点分别为短路电流点、最大功率点和开路电压点，这四个参数值分别为短路电流值 I_{sc} 、最大功率点电流值 I_{mp} ，最大功率点电压值 V_{mp} ，开路电压值 V_{oc} 。

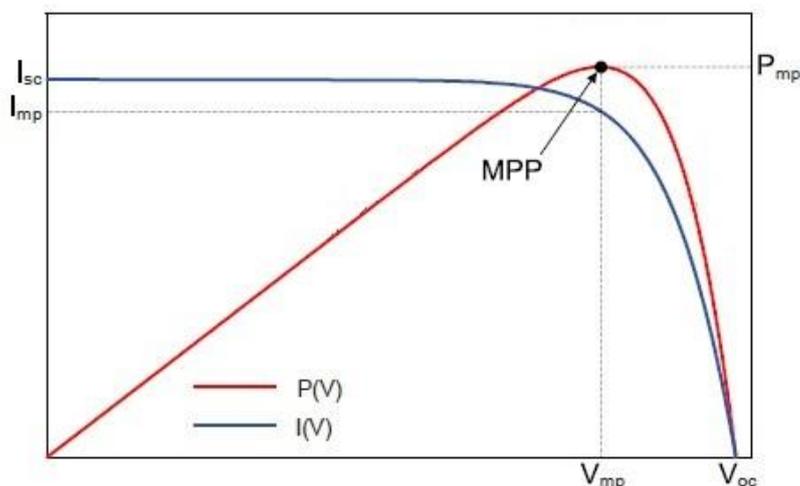


图 3-6 光伏电池输出特性曲线

3.1.3 最大功率点跟踪的原理及实现方法

光伏电池的 I-V 特性曲线是非线性的，一个环境条件下的光伏电池具有最大功率输出值，这个输出状态点就是此状态下光伏电池的最大功率点。为实现光伏电池电能输出最大化，最大功率点跟踪（MPPT）就成为光伏发电系统必备的功能之一。目前有多种 MPPT 算法，其中最常见有恒电压法、扰动观察法和电导增量法等。以下对这三种算法进行简要介绍。

1) 恒电压法

恒电压法（Constant Voltage Tracking, CVT）的理论依据是，当温度不发生改变时，光伏电池在不同光照条件下的最大功率点处的输出电压相差不大，近似为恒定，约为其对应开路电压的 76%^[17]，在同一温度不同光照下，光伏电池的最大功率点几乎落在同一根垂直线的两侧邻近，这就有可能把最大功率点的轨迹线近似地看成电压 $U=\text{const}$ 的一根垂直线，亦即只要保持太阳电池的输出端电压为常数且等于某日照强度下相应于最大功率点的电压，就可以大致保证在该温度下太阳电池输出最大功率，于是通过控制 DC/DC 变换电路来把光伏电池的输出电压保持在 U_{mp} 恒定值，从而把最大功率点跟踪简化为恒电压跟踪 (CVT)。

用恒电压法实现最大功率跟踪的优点是控制简单，硬件上容易实现，可靠性强，达到稳定状态后输出无震荡等优点；缺点 CVT 法虽然在一定情况下能够提高光伏发电系

统的输出功率，但是没有考虑到温度和光照变化带来的对太阳能最大功率点输出电压的影响，尤其是当温度改变时，光伏阵列的最大功率点会产生较大变化，因此说 CVT 法不是真正意义上的最大功率跟踪。由于 CVT 法控制精度差，在环境条件改变时会有较大的功率损失，加上光伏电池本身的转化效率就不是很高，所以恒电压法已经逐渐的被其他控制算法所淘汰^[18]。

2) 扰动观察法

扰动观察法 (Perturbation and Observation, P&O) 又叫爬山法，其实质是一个自寻优的过程，通过检测在一定环境参数下光伏阵列的输出电压与输出电流，得到此状态下的输出功率；然后给系统一个电压扰动，检测出扰动后阵列的输出电压和输出电流进而得到扰动后时刻的输出功率，并与前一时刻的输出功率进行比较。如果功率增加，则继续按照刚才的扰动方式进行；反之，则按照与原来扰动方式相反的方式进行。如此按此方法的进行下去，直到光伏阵列工作在最大功率点附近^[19]。其流程图如图 3-7 所示。

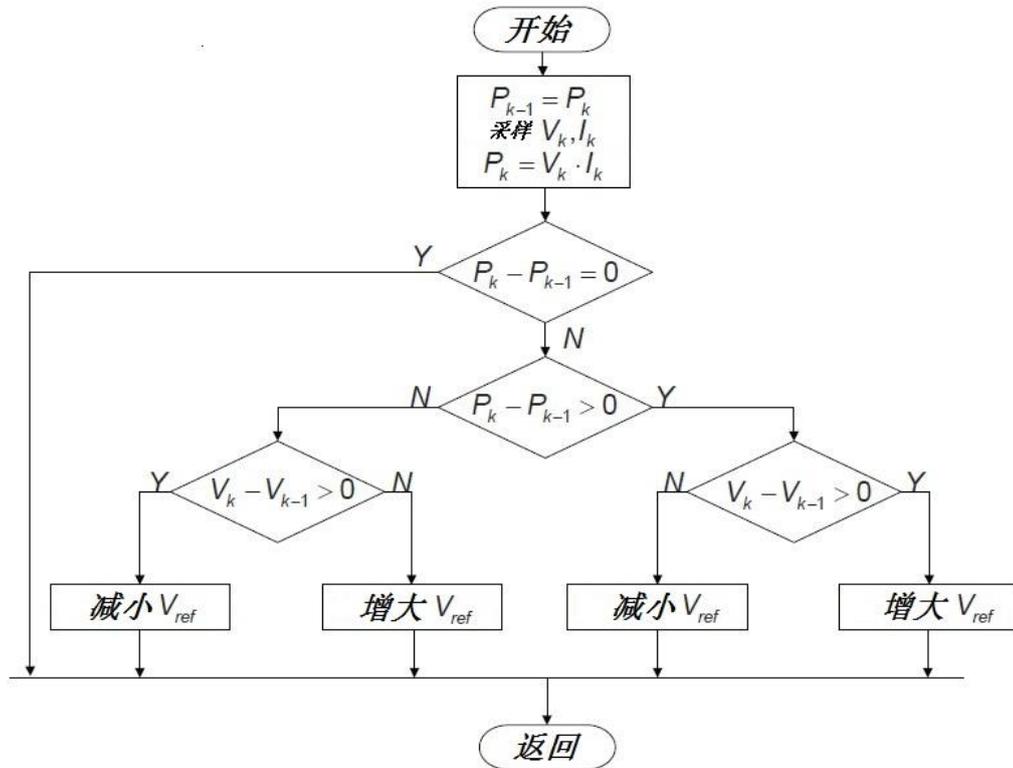


图 3-7 扰动观察法的流程图

其中 V_{ref} 是输出电压变化的步长。

扰动观察法是现如今最常用的一种光伏发电系统 MPPT 控制算法。其优点是：模块化控制回路；跟踪方法简单，易于实现；对传感器精度要求不高。其缺点是：在光伏阵列最大功率点附近振荡运行，会有一定的功率损失；跟踪步长的设置无法兼顾跟踪精度和响应速度；在环境参数变化迅速的情况下，容易出现误判。

3) 电导增量法

电导增量法 (Incremental Conductance Algorithm, INC) 是利用光伏方阵输出端的动态电导值 (dI/dV) 与同时对应的静态电导的负数 ($-I/V$) 相比较, 以判断调节光伏方阵电压方向的一种 MPPT 控制算法^[20]。当系统到达最大功率点时,

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I$$

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{\substack{I=I_{mp} \\ V=V_{mp}}} = 0 \Rightarrow \left. \frac{dI}{dV} \right|_{\substack{I=I_{mp} \\ V=V_{mp}}} = -\frac{I_{mp}}{V_{mp}}$$

其中 V_{mp} 是光伏电池最大功率点处的输出电压, I_{mp} 是光伏电池最大功率点处的输出电流。

电导增量法的控制算法策略是:

- a. 当 $dI/dV = -I/V$ 或者 $dI=0, dV=0$ 时, 光伏电池达到最大功率点, $V=V_{mp}, V=V$;
- b. 当 $dI/dV > -I/V$ 或者 $dI>0, dV=0$ 时, 光伏电池工作在最大功率点左侧, $V < V_{mp}$, $V=V+V_{ref}$;
- c. 当 $dI/dV < -I/V$ 或者 $dI<0, dV=0$ 时, 光伏电池工作在最大功率点右侧, $V > V_{mp}$, $V=V-V_{ref}$;

其中 V 是光伏电池实际输出电压, V_{ref} 是输出电压变化的步长。

电导增量法的优点是稳态时的电压振荡较扰动观察法小; 适于光强变化快速及缓慢的各种场合。其缺点是: 系统始终工作在最大功率点左右来回震荡; 对传感器的精度要求比较高, 不适用于小功率的光伏发电系统。

在一定的光照和温度条件下, 光伏系统控制电路主要通过改变光伏阵列所接负载的大小来改变光伏阵列的输出状态点, 当负载与光伏阵列最大功率输出点特性匹配时, 即可使光伏阵列输出最大功率。光伏系统最大功率跟踪器一般是一个 DC-DC 变换器 (亦称直流斩波器), 可以把光伏阵列等效成直流电源, DC-DC 变换器等效成可变化的外部负载, 光伏阵列所接的等效负载是 DC-DC 变换器的占空比 D 和其所带负载的函数, 调节变换器的占空比就可以改变光伏阵列的等效负载, 即可实现光伏阵列最大功率输出。常见的光伏发电系统 DC-DC 变换电路主要有: 降压式变换器 (Buck Converter)、升压式变换器 (Boost Converter) 和升降压式变换器 (Buck-Boost Converter) 等等。以下对这三种 DC-DC 变换器进行简要介绍。

1) 降压式变换器 (Buck Converter)

图 3-8 为降压式变换电路, 其输出电压平均值 V_o 总是小于输入电压 V_{in} 。在电路处于稳态工作时:

$$V_o = \frac{t_{on}}{T} V_{in} = DV_{in} \quad (3-1-4)$$

其中, D 为占空比。

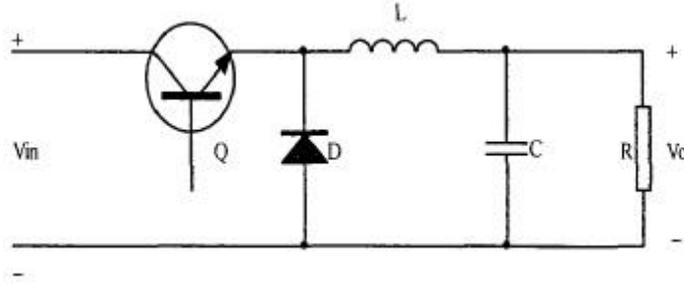


图 3-8 降压式变换器电路图

降压式变换器的优点是电路简单，动态发性能好。其缺点是：输入电流的脉动会引起对输入电源的电磁干扰；稳态电压比永远小于 1，只能降压；开关晶体管发射极不接地，使得其驱动电路很复杂。

2) 升压式变换器 (Boost Converter)

图 3-9 为升压式变换电路，其输出电压平均值 V_o 总是大于输入电压 V_{in} 。在电路处于稳态工作时：

$$V_o = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (3-1-5)$$

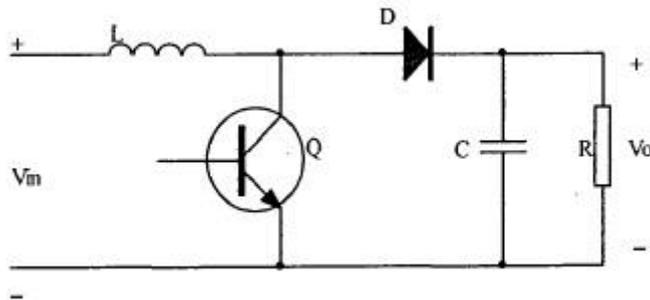


图 3-9 升压式变换器电路图

升压式变换器的优点是：输入电流连续，对电源的电磁干扰相对较小；开关晶体管发射极接地，驱动电路简单。其缺点是：输出侧二极管的电流是脉动的，使输出纹波较大；稳态电压比永远大于 1，只能升压。

3) 升降压式变换器 (Buck-Boost Converter)

图 3-10 为升降压式变换电路。在电路处于稳态工作时：

$$V_o = \frac{DV_{in}}{1-D} \quad (3-1-6)$$

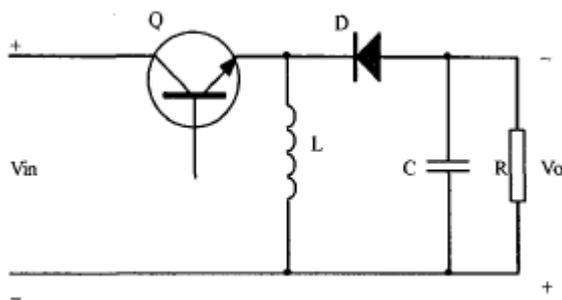


图 3-10 升降压式变换器电路图

升降压式变换器的优点是：输出电压可以在很宽的范围工作，调节功率开关管占空比可得到高于或低于输入电压的输出电压。其缺点是：输入电流的脉动会引起对输入电源的电磁干扰。

3.1.4 光伏逆变器

逆变器（inverter）是把直流电能转变成交流电的电力设备。通常，把将交流电能转换成直流电能的过程称为整流，把完成整流功能的电路称为整流电路，把实现整流过程的装置称为整流设备或整流器。与之相对应，把将直流电能转换成交流电能的过程称为逆变，把完成逆变功能的电路称为逆变电路，把实现逆变过程的装置称为逆变设备或逆变器。

根据逆变器在光伏发电系统中的用途可分为离网用和并网用二种。离网逆变器相当于自己建立起一个独立的小电网，主要是控制自身系统的电压，相当于一个电压源。并网逆变器将能量直接送到电网上，所以要跟踪电网的频率、相位，相当于一个电流源。并网逆变器不需要储能，但能量不可调控，光伏发多少就往电网上送多少。

根据波形调制方式又可分为方波逆变器、阶梯波逆变器、正弦波逆变器和组合式三相逆变器。对于用于并网系统的逆变器，根据有无变压器又可分为变压器型逆变器和无变压器型逆变器。

3.2 光伏系统仿真模型的建立

本文所要研究的系统是建筑用并网型光伏发电系统，主要由光伏阵列、并网逆变器、监控系统和电网组成，这些设备所需实现的功能有光伏发电、最大功率跟踪、逆变、并网和数据采集与监控。本章将根据研究需要建立以上设备或功能的模型，用以模拟理想情况下系统运行状态及理想输出结果。

3.2.1 光伏阵列模型的建立

太阳能光伏发电由于其可再生性、对环境无污染以及近年来光伏组件成本的快速下降，而持续受到各国青睐。世界范围内的光伏电池产量及光伏系统装机容量都在迅速增长。随着光伏系统应用的越来越多，越来越广，光伏电池制造商所提供的特定条件下（如标准测试状态，辐照度 $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ，光伏电池温度 $T=298\text{K}$ ，大气质量 $AM=1.5$ ）的性能

参数已不能满足光伏系统的设计与分析的需求,因此能够在多种环境条件下快速、准确地模拟出光伏阵列运行状态的光伏模型一直受到国内外研究者的关注^[21-24]。

光伏电池模型可以基于光伏电池的物理特性进行等效电路的建立,常用的光伏电池等效电路有四参数光伏电池模型、五参数光伏电池模型及双二极管光伏电池模型。

四参数模型含有串联电阻、二极管反向饱和电流、光生电流和二极管理想因子四个待解参数,该模型结构简单,求解快速,但其准确度较低,在低光照情况下会出现较大误差^{[25], [26]}。

五参数模型比四参数模型多加一个并联电阻,该模型是构建光伏电池模型所应用最多的模型,其能较准确的模拟出光伏电池特性曲线,但其方程复杂,求解速度较慢^{[26], [27]}。

双二极管模型在五参数模型的基础上增加了一个二极管用以表征载流子在耗散区的复合损失,该模型是最能全面表征光伏电池特性的模型,但其所求解参数为七个甚至更多,这使其求解极为困难,通常需进行若干假设减少所求解参数才能对其求解^[28]。

本研究中分别对以上三种光伏电池模型进行了建模,并在以上研究的基础上,提出了一种改进型的四参数光伏模型,这种光伏模型准确度高,同时计算快速。

(1) 四参数光伏模型

四参数光伏模型等效电路如图 3-11 所示:

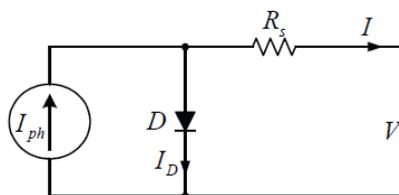


图 3-11: 四参数光伏模型等效电路图

其数学表达式为:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_t}\right) - 1 \right) \quad (3-2-1)$$

其中, I_{ph} 为光伏电池的光生电流 (A), I_0 为二极管的反向饱和电流 (A), I_D 为通过二极管的电流 (A), R_s 为光伏电池等效串联电阻 (Ω), n 为二极管的理想因子, $V_t = \frac{kq}{T}$ 为光伏电池热电压 (V), 其中 $k = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K, 为波尔兹曼常数, $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C, 为电子电荷量, T 为光伏电池温度 (K)。

通常采用光伏电池特性曲线上具有代表性的点来求解方程 (3-2-1), 以获得光伏电池特性曲线, 这些点为某一环境状态下光伏电池的短路电流点 ($I = I_{sc}$, $V = 0$)、开路电压点 ($I = 0$, $V = V_{oc}$) 和最大功率点 ($I = I_{mp}$, $V = V_{mp}$)。

在短路电流点处， $I_{sc} = I_{ph} - I_0(\exp(\frac{I_{sc}R_s}{nV_t}) - 1)$ ， $I_{ph} = I_{sc} + I_0(\exp(\frac{I_{sc}R_s}{nV_t}) - 1)$ ，由此得到

$I_0(\exp(\frac{I_{sc}R_s}{nV_t}) - 1) \ll I_{sc}$ ，所以可得：

$$I_{ph} \approx I_{sc} \quad (3-2-2)$$

在开路电压点处， $0 = I_{ph} - I_0(\exp(\frac{V_{oc}}{nV_t}) - 1)$ ，而 $\exp(\frac{V_{oc}}{nV_t}) \gg 1$ ，所以可得：

$$I_0 = I_{sc} \exp(-\frac{V_{oc}}{nV_t}) \quad (3-2-3)$$

在最大功率点处， $I_{mp} = I_{ph} - I_0(\exp(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{nV_t}) - 1)$ ，而 $\exp(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{nV_t}) \gg 1$ ，所以可得：

$$R_s = \frac{nV_t \ln(\frac{I_{sc} - I_{mp}}{I_0}) - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (3-2-4)$$

在最大功率点处， $\frac{dP}{dV}|_{mp} = \frac{d(IV)}{dV}|_{mp} = (I + V \frac{dI}{dV})|_{mp} = 0$ ，可以得出：

$$N = nV_t = (\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{I_{mp}}) \cdot I_0 \cdot \exp(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{nV_t}) \quad (3-2-5)$$

为方便书写与计算，记 $N = nV_t$ 为修正二极管理想因子。

将 (3-3) 代到 (3-4)，(3-3)、(3-4) 代到 (3-5) 可得：

$$R_s = \frac{N \ln(\frac{I_{sc} - I_{mp}}{I_{sc}}) + V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (3-2-6)$$

$$N = (\frac{V_{mp} - I_{mp}R_s}{I_{mp}})(I_{sc} - I_{mp}) \quad (3-2-7)$$

将方程 (3-2-3)、(3-2-6)、(3-2-7) 联立就可求得所需参数 I_0 、 R_s 、 N 。

a. 不同环境状态下光伏输入参数的确定

当环境状态发生变化时，光伏系统的运行状态会发生变化，其中辐照度与温度是对光伏系统影响最大的两个环境参数。对此，在辐照度与温度变化时，参考文献[29]，[31]，

并做出合理修正，在参考参数基础上用以下四式来计算新环境状态下的输入参数：

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \cdot \frac{G}{G_{ref}} + a(T - T_{ref}) \quad (3-2-8)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + b(T - T_{ref}) + M \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \quad (3-2-9)$$

$$I_{mp} = I_{mp,ref} \cdot \frac{G}{G_{ref}} - a(T - T_{ref}) \quad (3-2-10)$$

$$V_{mp} = V_{mp,ref} + b(T - T_{ref}) + M \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \quad (3-2-11)$$

其中，下标 ref 表示参考状态，一般将参考状态定为标准测试状态，即

$G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ ， $T_{ref} = 298\text{K}$ 。 $M = (V_{oc,200} - V_{oc,ref}) / \ln\left(\frac{G_{200}}{G_{ref}}\right)$ ，表示电压在辐照度变化时所需的

修正系数，其中 $V_{oc,200}$ 为光伏阵列在 $G = 200\text{W/m}^2$ ，光伏电池温度 $T = 298\text{K}$ 时的开路电压。 a 为短路电流温度系数， A/K ； b 为开路电压温度系数， V/K 。

b. 从光伏电池到光伏模块再到光伏阵列的仿真模型扩展

单个光伏电池的电力特性不能满足需求，因此需将若干光伏电池串联在一起组成一个光伏模块，以在一定环境条件下提供适当的电压和电流。若干光伏模块再通过串、并联组合成一个光伏阵列，以达到需要的电压和电流输出^[30]。

光伏模块模型的数学表达式可在光伏电池模型的数学表达式上进行修改获得，为：

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + IR_s N_s}{N_s n V_t}\right) - 1 \right) \quad (3-2-12)$$

其中， N_s 为一个光伏模块所串联的光伏电池数。

光伏阵列模型的数学表达式为：

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left(\exp\left(\frac{V + IR_s \frac{N_s}{N_p}}{N_s n V_t}\right) - 1 \right) \quad (3-2-13)$$

其中， N_s 为光伏阵列中串联光伏电池的个数， N_p 为光伏阵列光伏模块并联数。

容易得知，如将 N_s 、 N_p 隐含在相应的参数中，即 $I'_{ph} = N_p I_{ph}$ ， $I'_0 = N_p I_0$ ，

$R'_s = R_s \frac{N_s}{N_p}$ ， $N' = N_s \cdot N = N_s n V_t$ ，方程 (3-12) (3-13) 就与方程 (3-1) 一致，并且表达简捷，易于理解。

光伏阵列模型的具体计算过程为：a) 由制造商提供的技术文件获得 $I_{sc,ref}$ 、 $V_{oc,ref}$ 、

$I_{mp,ref}$ 、 $V_{mp,ref}$ ， a ， b ， $V_{oc,200}$ ；b) 根据实际辐照度及光伏电池温度，由方程 (3-2-8)、(3-2-9)、(3-2-10)、(3-2-11) 计算出相应的 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_{mp} 、 V_{mp} ；c) 由方程 (3-2-2) (3-2-3) (3-2-6) (3-2-7) 计算出用于求解光伏特性的四个参数；d) 将四个参数代入方程 (3-2-1) 中，求解不同负载电压 V 下所对应的输出电流 I ，同时获得输出功率 P 。

c. 光伏阵列 Matlab/Simulink 仿真模块

基于上述数学模型，本文在 Matlab/Simulink 环境下，建立了光伏阵列的仿真模块，如图 3-12，其内部结构如图 3-13 和图 3-14 所示，其中图 3-13 的模块用于计算在不同太阳辐射及温度下的四个参数，图 3-14 的模块用于计算在负载电压下光伏阵列的输出电流和输出功率。

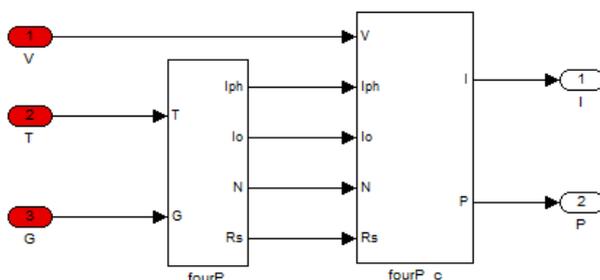


图 3-12: 光伏阵列的 Matlab/Simulink 仿真模块

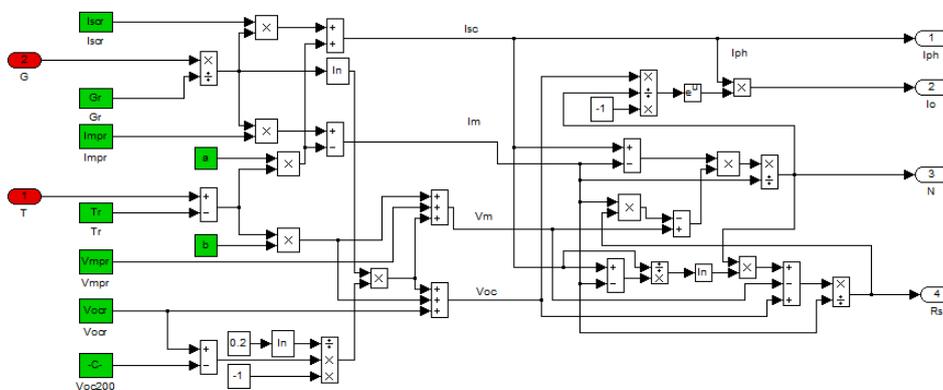


图 3-13: 计算四个参数的仿真模块的内部结构

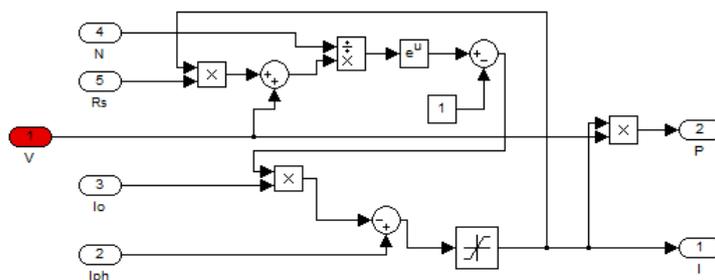


图 3-14: 计算输出电流和输出功率的仿真模块的内部结构

该模块的输入参数有： $I_{sc,ref}$ 、 $V_{oc,ref}$ 、 $I_{mp,ref}$ 、 $V_{mp,ref}$ 、 G_{ref} 、 T_{ref} 、 a 、 b 和 $V_{oc,200}$ 。以上参数均可轻易地从制造商提供的技术文件中获得。

(2) 五参数光伏模型

五参数光伏模型等效电路如图 3-15 所示：

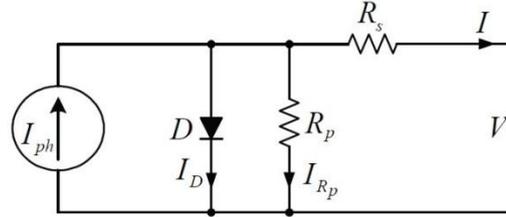


图 3-15: 五参数光伏模型等效电路图

其数学表达式为：

$$I = I_{ph} - I_D - I_{R_p} = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3-2-14)$$

其中， I_{R_p} 为通过并联电阻的电流 (A)， R_p 为光伏电池等效并联电阻 (Ω)。这里为方便书写与计算，记 $N = nV_t$ 为修正二极管理想因子。

本文采用光伏电池特性曲线上具有代表性的点来求解方程 (3-2-14)，以获得光伏电池特性曲线，这些点为某一环境状态下光伏电池的短路电流点 ($I = I_{sc}$ ， $V = 0$)、开路电压点 ($I = 0$ ， $V = V_{oc}$) 和最大功率点 ($I = I_{mp}$ ， $V = V_{mp}$)。

在短路电流点处， $I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{N}\right) - 1 \right) - \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_p}$ ，由此得到 $I_{ph} \approx I_{sc} + I_0 \left(\exp\left(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{N}\right) - 1 \right) + \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_p}$ ，而 $I_0 \left(\exp\left(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{N}\right) - 1 \right) + \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_p} \ll I_{sc}$ ，所以可得：

$$I_{ph} \approx I_{sc} \quad (3-2-15)$$

在开路电压点处， $0 = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V_{oc}}{N}\right) - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_p}$ ，而 $\exp\left(\frac{V_{oc}}{N}\right) \gg 1$ ，所以可得：

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p} \right) \cdot \exp\left(-\frac{V_{oc}}{N}\right) \quad (3-2-16)$$

在最大功率点处， $I_{mp} = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{N}\right) - 1 \right) - \frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{R_p}$ ，而 $\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{N}\right) \gg 1$ ，

所以可得：

$$N = \frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{\ln\left(\frac{I_{sc} - I_{mp} - (V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s) / R_p}{I_0}\right)} \quad (3-2-17)$$

在最大功率点处，功率对电压的导数为零，即 $\left.\frac{dP}{dV}\right|_{mp} = \left.\frac{d(IV)}{dV}\right|_{mp} = \left.(I + V \frac{dI}{dV})\right|_{mp} = 0$ ，可以得出：

$$\left.\frac{dP}{dV}\right|_{mp} = I_{mp} - V_{mp} \frac{X_{mp}}{1 + X_{mp} \cdot R_s} = 0$$

$$R_s = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} - \frac{1}{X_{mp}} \quad (3-2-18)$$

其中， $X_{mp} = \frac{I_0}{N} \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{N}\right) + \frac{1}{R_p}$ 。

在短路电流点，电流对电压的导数等于并联电阻的负倒数，即 $\left.\frac{dI}{dV}\right|_{sc} = -\frac{1}{R_p}$ ，可以得出：

$$R_p = R_s + \frac{1}{X_{sc}} \quad (3-2-19)$$

其中， $X_{sc} = \frac{I_0}{N} \exp\left(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{N}\right) + \frac{1}{R_p}$ 。

将 (3-16) 代到 X_{mp} ， X_{sc} 可得：

$$X_{mp} = \frac{I_{sc} - V_{oc} / R_p}{N} \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s - V_{oc}}{N}\right) + \frac{1}{R_p}$$

$$X_{sc} = \frac{I_{sc} - V_{oc} / R_p}{N} \exp\left(\frac{I_{sc} \cdot R_s - V_{oc}}{N}\right) + \frac{1}{R_p}$$

将 (3-16) 代到 (3-17) 可得：

$$N = \frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s - V_{oc}}{\ln\left(\frac{I_{sc} - I_{mp} - \frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{R_p}}{I_{sc} - V_{oc} / R_p}\right)} \quad (3-2-20)$$

将方程 (3-18)、(3-19)、(3-20) 联立就可求得参数 R_s 、 R_p 、 N ，再将其代入到 (3-16)，即可求得 I_0 ，至此五个待解参数均已获得。

a. 从光伏电池到光伏阵列的仿真模型扩展

若干光伏电池串联在一起组成一个光伏模块，光伏模块模型的数学表达式可在光伏

电池模型的数学表达式上进行修改获得^[30]，为：

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + IR_s N_s}{N_s n V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s N_s}{R_p N_s} \quad (3-2-21)$$

其中， N_s 为一个光伏模块所串联的光伏电池数。

若干光伏模块再通过串、并联组合成一个光伏阵列，以达到需要的电压和电流输出^[30]。光伏阵列模型的数学表达式为：

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left(\exp\left(\frac{V + IR_s \frac{N_s}{N_p}}{N_s n V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s \frac{N_s}{N_p}}{R_p \frac{N_s}{N_p}} \quad (3-2-22)$$

其中， N_s 为光伏阵列中串联光伏电池的个数， N_p 为光伏阵列光伏模块并联数。

容易得知，如将 N_s 、 N_p 隐含在相应的参数中，即 $I'_{ph} = N_p I_{ph}$ ， $I'_0 = N_p I_0$ ，

$R'_s = R_s \frac{N_s}{N_p}$ ， $R'_p = R_p \frac{N_s}{N_p}$ ， $N' = N_s \cdot N_p = N_s n V_t$ ，方程(3-2-21)(3-2-22)就与方程(3-2-14)

一致，并且表达简捷，易于理解。

b. 全工况条件下五个参数的确定

当光伏阵列所处工况发生变化时，所求解的五个参数也会相应发生变，参考文献[31]，并做出合理修正，得到在相应工况下，这五个参数的确定方法如下：

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{sc,ref} + a(T - T_{ref})) \quad (3-2-23)$$

$$N = N_{ref} \cdot \frac{T}{T_{ref}} \quad (3-2-24)$$

$$R_s = R_{s,ref} \cdot \frac{G_{ref}}{G} \quad (3-2-25)$$

$$R_p = R_{p,ref} \cdot \frac{G_{ref}}{G} \quad (3-2-26)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + b(T - T_{ref}) + M \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \quad (3-2-27)$$

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p} \right) \cdot \exp\left(-\frac{V_{oc}}{N}\right) \quad (3-2-16)$$

其中，下标 ref 表示参考状态，一般将标准测试状态定为参考状态，即

$G_{ref} = 1000 \text{W/m}^2$ ， $T_{ref} = 298 \text{K}$ 。 $M = (V_{oc,200} - V_{oc,ref}) / \ln\left(\frac{G_{200}}{G_{ref}}\right)$ ，表示电压在辐照度变化时所需的

修正系数，其中 $V_{oc,200}$ 为光伏阵列在 $G = 200 \text{W/m}^2$ 时的开路电压。 a 为短路电流温度系数，

A/K ； b 为开路电压温度系数， V/K 。

光伏阵列模型的具体计算过程为：a) 由制造商提供的技术文件获得 $I_{sc.ref}$ 、 $V_{oc.ref}$ 、 $I_{mp.ref}$ 、 $V_{mp.ref}$ ；b) 由方程 (3-2-15)、(3-2-16)、(3-2-18)、(3-2-19)、(3-2-20) 联立迭代计算出参考状态下的 $I_{ph.ref}$ 、 N_{ref} 、 $R_{s.ref}$ 、 $R_{p.ref}$ 和 $I_{o.ref}$ ；c) 根据实际辐照度及光伏电池温度，由方程 (3-2-23)、(3-2-24)、(3-2-25)、(3-2-26)、(3-2-27)、(3-2-16) 计算出全工况下用于求解光伏特性的五个参数 I_{ph} 、 N 、 R_s 、 R_p 和 I_o ；d) 将五个参数代入方程 (3-14) 中，求解不同负载电压 V 下所对应的输出电流 I 。

c. 光伏阵列 Matlab/Simulink 仿真模块

基于上述数学模型，本文在 Matlab/Simulink 环境下，建立了光伏阵列的仿真模块，如图 3-16，其内部结构如图 3-17 和图 3-18 所示，其中图 3-17 的模块用于计算在不同太阳辐射及温度下的五个参数，图 3-18 的模块用于计算在负载电压下光伏阵列的输出电流和输出功率。

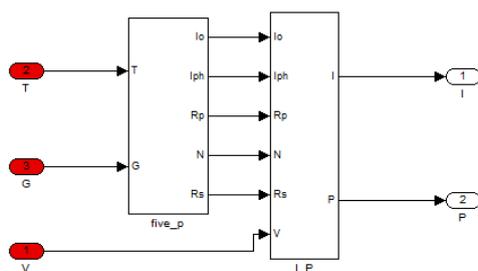


图 3-16: 光伏阵列的 Matlab/Simulink 仿真模块

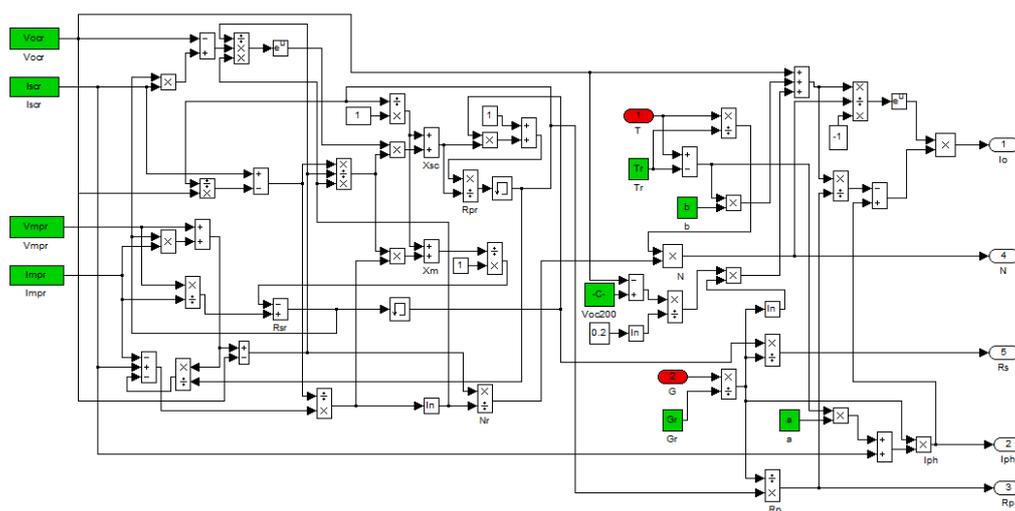


图 3-17: 计算五个参数的仿真模块的内部结构

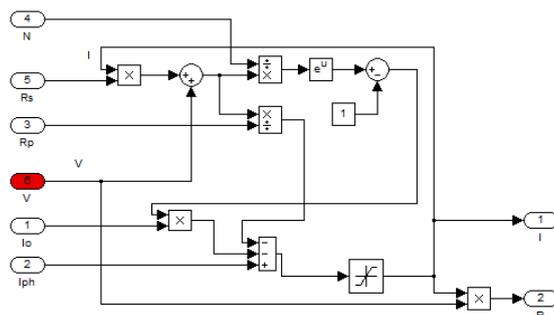


图 3-18: 计算输出电流和输出功率的仿真模块的内部结构

该模块的输入参数有： $I_{sc.ref}$ 、 $V_{oc.ref}$ 、 $I_{mp.ref}$ 、 $V_{mp.ref}$ 、 G_{ref} 、 T_{ref} 、 a 、 b 和 $V_{oc,200}$ 。以上参数均可轻易地从制造商提供的技术文件中获得。

(3) 双二极管光伏模型

双二极管光伏模型等效电路如图 3-19 所示：

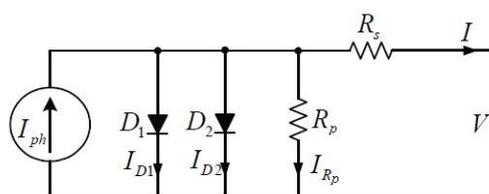


图 3-19: 双二极管光伏模型等效电路图

其数学表达式为：

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{R_p} = I_{ph} - I_{o1}(\exp(\frac{V + I \cdot R_s}{n_1 V_t}) - 1) - I_{o2}(\exp(\frac{V + I \cdot R_s}{n_2 V_t}) - 1) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3-2-28)$$

其中， I_{D1} 、 I_{D2} 为通过两个二极管的电流 (A)， I_{R_p} 为通过并联电阻的电流 (A)， I_{o1} 、 I_{o2} 为两个二极管的反向饱和电流 (A)， n_1 、 n_2 为两个二极管的理想因子，。这里为方便书写与计算，记 $N_1 = n_1 V_t$ 、 $N_2 = n_2 V_t$ 为两个修正二极管理想因子。

为了求解方程 (3-28)，需要确定七个参数： I_{ph} 、 I_{o1} 、 I_{o2} 、 n_1 、 n_2 、 R_s 和 R_p 。根据文献[28]可知，在使用双二极管模型时，可认为： $n_1 = 1$ ， $n_2 = 2$ 。这样方程 (3-2-28) 就变为：

$$I = I_{ph} - I_{o1}(\exp(\frac{V + I \cdot R_s}{N_1}) - 1) + I_{o2}(\exp(\frac{V + I \cdot R_s}{N_2}) - 1) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3-2-29)$$

通常采用光伏电池特性曲线上具有代表性的点来求解上述方程，以获得光伏电池特性曲线，这些点为参考状态(用下标 ref 来表示)下光伏电池的短路电流点 ($I = I_{sc.ref}$ ， $V = 0$)、开路电压点 ($I = 0$ ， $V = V_{oc.ref}$) 和最大功率点 ($I = I_{mp.ref}$ ， $V = V_{mp.ref}$)。

根据文献[28]可知, 可作假设: $I_o = I_{o1} = I_{o2} = I_{sc} / (\exp(V_{oc} / V_i) - 1)$, 所以可得:

$$I_{o,ref} = I_{sc,ref} / (\exp(V_{oc,ref} / V_{i,ref}) - 1) \quad (3-2-30)$$

在短路电流点处, $I_{sc} = I_{ph} - I_o (\exp(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{N_1}) + \exp(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{N_2}) - 2) - \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_p}$, 由此得到

$$I_{ph} = I_{sc} + I_o (\exp(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{N_1}) + \exp(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{N_2}) - 2) + \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_p}, \quad \text{而} \quad I_o (\exp(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{N_1}) + \exp(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{N_2}) - 2) + \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_p} \ll I_{sc}, \text{ 所以可得:}$$

$$I_{ph,ref} \approx I_{sc,ref} \quad (3-2-31)$$

在短路电流点处, $-\frac{dV}{dI} \Big|_{sc} = R_{sho} = R_p$, 所以可得:

$$R_{p,ref} = R_{sho,ref} \quad (3-2-32)$$

其中, $R_{sho,ref}$ 为参考状态下光伏特性曲线在短路电流点处斜率的负倒数。

在开路电压点处, $-\frac{dV}{dI} \Big|_{oc} = R_s + 1 / (I_o (\frac{1}{N_1} \exp(\frac{V_{oc}}{N_1}) + \frac{1}{N_2} \exp(\frac{V_{oc}}{N_2})) + \frac{1}{R_p}) = R_{so}$, 所以可得:

$$R_{s,ref} = R_{so,ref} - 1 / (I_{o,ref} (\frac{1}{N_{1,ref}} \exp(\frac{V_{oc,ref}}{N_{1,ref}}) + \frac{1}{N_{2,ref}} \exp(\frac{V_{oc,ref}}{N_{2,ref}})) + \frac{1}{R_{p,ref}}) \quad (3-2-33)$$

其中, $R_{so,ref}$ 为参考状态下光伏特性曲线在开路电压点处斜率的负倒数。

至此七个待解参数均已获得。

a. 从光伏电池到光伏阵列的仿真模型扩展

若干光伏电池串联在一起组成一个光伏模块, 光伏模块模型的数学表达式可在光伏电池模型的数学表达式上进行修改获得^[30], 为:

$$I = I_{ph} - I_o (\exp(\frac{V + I \cdot R_s \cdot N_s}{N_1 \cdot N_s}) + \exp(\frac{V + I \cdot R_s \cdot N_s}{N_2 \cdot N_s}) - 2) - \frac{V + I \cdot R_s \cdot N_s}{R_p \cdot N_s} \quad (3-2-34)$$

其中, N_s 为一个光伏模块所串联的光伏电池数。

若干光伏模块再通过串、并联组合成一个光伏阵列, 以达到需要的电压和电流输出^[30]。光伏阵列模型的数学表达式为:

$$I = I_{ph} \cdot N_p - I_o \cdot N_p (\exp(\frac{V + I \cdot R_s \cdot \frac{N_s}{N_p}}{N_1 \cdot N_s}) + \exp(\frac{V + I \cdot R_s \cdot \frac{N_s}{N_p}}{N_2 \cdot N_s}) - 2) - \frac{V + I \cdot R_s \cdot \frac{N_s}{N_p}}{R_p \cdot \frac{N_s}{N_p}} \quad (3-2-35)$$

其中, N_s 为光伏阵列中串联光伏电池的个数, N_p 为光伏阵列光伏模块并联数。

容易得知, 如将 N_s 、 N_p 隐含在相应的参数中, 即 $I'_{ph} = N_p I_{ph}$, $I'_o = N_p I_o$, $R'_s = R_s \frac{N_s}{N_p}$,

$R'_p = R_p \frac{N_s}{N'_p}$, $N'_1 = N_1 \cdot N_s = n_1 V_t \cdot N_s$, $N'_2 = N_2 \cdot N_s = n_2 V_t \cdot N_s$, 方程 (3-2-34) (3-2-35) 就与方程 (3-2-29) 一致, 并且表达简捷, 易于理解。

b. 全工况条件下七个参数的确定

当光伏阵列所处工况发生变化时, 所求解的七个参数也会相应发生变化, 参考文献 [31], 并做出合理修正, 得到在相应工况下, 这七个参数的确定方法如下:

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{sc,ref} + a(T - T_{ref})) \quad (3-2-36)$$

$$N_1 = N_{1,ref} \cdot \frac{T}{T_{ref}} \quad (3-2-37)$$

$$N_2 = N_{2,ref} \cdot \frac{T}{T_{ref}} \quad (3-2-38)$$

$$R_s = R_{s,ref} / \left(\frac{G}{G_{ref}}\right)^{0.85} \quad (3-2-39)$$

$$R_p = R_{p,ref} / \left(\frac{G}{G_{ref}}\right)^{0.85} \quad (3-2-40)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + b(T - T_{ref}) + M \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \quad (3-2-41)$$

$$I_o = I_{o1} = I_{o2} = I_{sc} / (\exp(V_{oc} / V_t) - 1) \quad (3-2-42)$$

其中, $M = (V_{oc,200} - V_{oc,ref}) / \ln\left(\frac{G_{200}}{G_{ref}}\right)$, 表示电压在辐照度变化时所需的修正系数, $V_{oc,200}$

为光伏阵列在 $G = 200\text{W/m}^2$ 时的开路电压。 a 为短路电流温度系数, A/K ; b 为开路电压温度系数, V/K 。一般将标准测试状态定为参考状态, 即 $G_{ref} = 1000\text{W/m}^2$, $T_{ref} = 298\text{K}$ 。在运行温度不同于标准状态时, 需对方程 (3-2-29) 进行温度修正, 方程变为:

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp\left(\frac{V + K \cdot I + I \cdot R_s}{N_1}\right) + \exp\left(\frac{V + K \cdot I + I \cdot R_s}{N_2}\right) - 2 \right) - \frac{V + K \cdot I + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3-2-43)$$

其中, $K = \frac{V_{mp,348} - V'_{mp,348}}{I_{mp,348} \cdot (348 - 298)} \cdot (T - T_{ref}) \cdot \frac{G}{G_{ref}} = \frac{V_{mp,ref} + 50 \cdot b - V'_{mp,348}}{50 \cdot (I_{mp,ref} - 50 \cdot a)} \cdot (T - T_{ref}) \cdot \frac{G}{G_{ref}}$

为最大功率点电压修正系数, $V'_{mp,348}$ 为实验获得的光伏组件在温度为 348K 时的最大功率点电压。本文选取 348K 作为计算 K 的基准, 是因为通常光伏制造商所提供的最大温度测试为 348K, 此公式也可以根据具体情况进行修改。

c. 光伏阵列 Matlab/Simulink 仿真模块

基于上述数学模型, 本文在 Matlab/Simulink 环境下, 建立了光伏阵列的仿真模块,

如图 3-20，其内部结构如图 3-21 和图 3-22 所示，其中图 3-21 的模块用于计算在不同太阳辐射及温度下的七个参数，图 3-22 的模块用于计算在负载电压下光伏阵列的输出电流和输出功率。

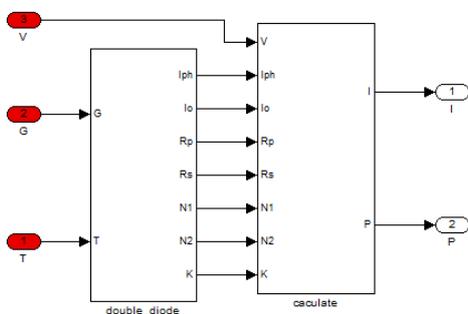


图 3-20：光伏阵列的 Matlab/Simulink 仿真模块

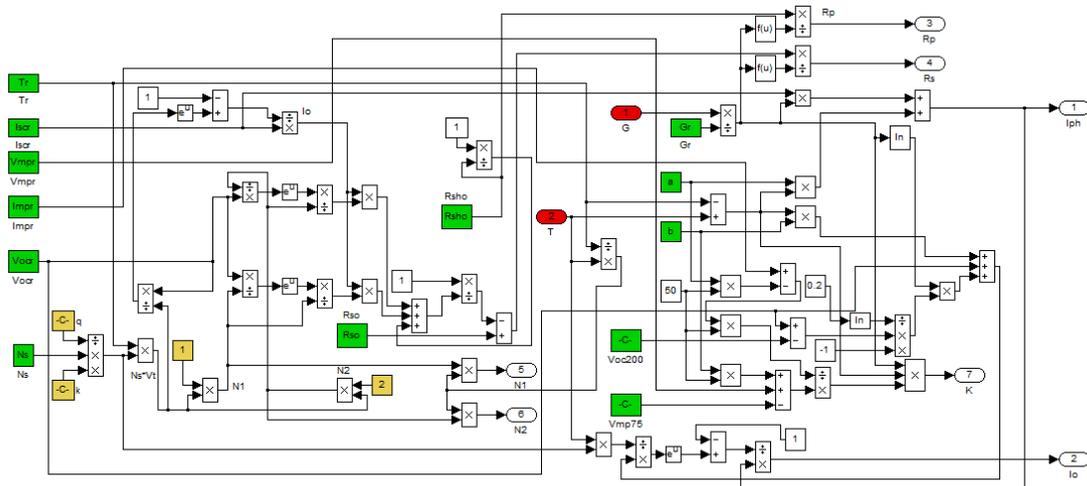


图 3-21：计算待解参数的仿真模块的内部结构

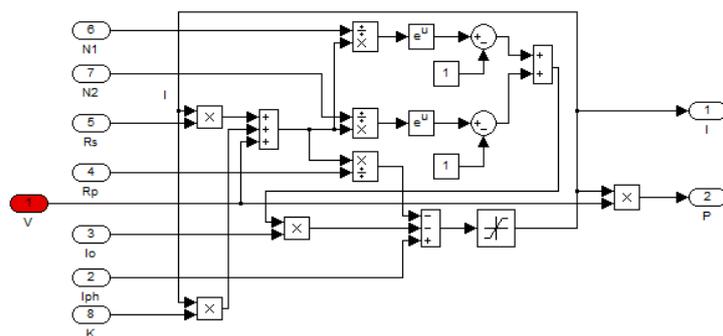


图 3-22：计算输出电流和输出功率的仿真模块的内部结构

(4) 改进型四参数光伏模型

本文在传统四参数模型光伏电池的基础上加入两个修正系数，可以准确快速的获得光伏电池在特定条件下的输出曲线。模型输出与实验输出偏差可控制在 1%以内。带修正

参数的四参模型数学表达式为

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp\left(\frac{V + K \cdot I + I \cdot R_s}{N}\right) - 1 \right) \quad (3-2-44)$$

其中, $K = \frac{V_{mp,348} - V'_{mp,348}}{I_{mp,348} \cdot (348 - 298)} \cdot (T - T_{ref}) \cdot \frac{G}{G_{ref}} = \frac{V_{mp,ref} + 50 \cdot b - V'_{mp,348}}{50 \cdot (I_{mp,ref} - 50 \cdot a)} \cdot (T - T_{ref}) \cdot \frac{G}{G_{ref}}$ 为最大功率点电

压修正系数, $V'_{mp,348}$ 为光伏组件在温度为 348K 时的实测最大功率点电压, 下标 ref 表示参考状态下的参数, 下标 mp 表示最大功率点时的参数, a 为短路电流温度系数, A/K; b 为开路电压温度系数, V/K。

在参考状态下, 可根据光伏组件制造商提供的技术文件中的数据 (如标准测试状态下的开路电压 V_{oc} , 短路电流 I_{sc} , 最大功率点处电压 V_{mp} 和电流 I_{mp}) 进行模型参数的计算求解。

当光伏电池运行在非参考状态下时, 可用以下公式对模型参数进行扩展:

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \cdot \frac{G}{G_{ref}} + a(T - T_{ref}) \quad (3-2-45)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + b(T - T_{ref}) + M \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \quad (3-2-46)$$

$$I_{mp} = I_{mp,ref} \cdot \frac{G}{G_{ref}} - a(T - T_{ref}) \quad (3-2-47)$$

$$V_{mp} = V_{mp,ref} + b(T - T_{ref}) + M \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \quad (3-2-48)$$

其中, $M = (V_{oc,200} - V_{oc,ref}) / \ln\left(\frac{G_{200}}{G_{ref}}\right)$, 表示电压在辐照度变化时所需的修正系数, $V_{oc,200}$

为光伏阵列在 $G = 200\text{W/m}^2$ 时的开路电压。

再进行光伏电池到光伏模块到光伏阵列扩展, 就可进行光伏阵列在全工况下的模型模拟, 而且其公式形式仍保持不变。

模拟与实测的输出结果对比如下:

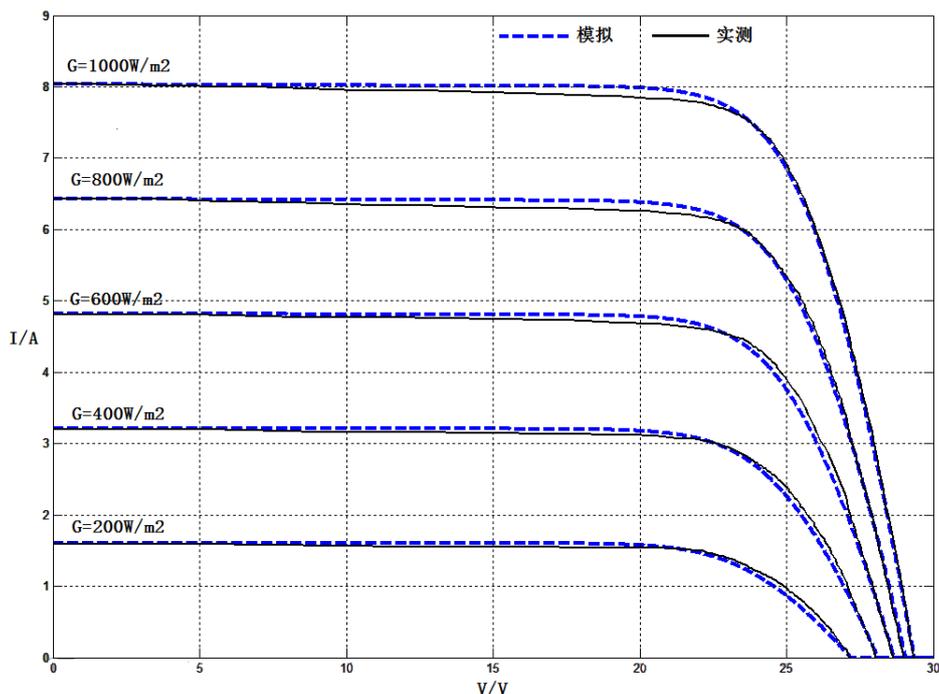


图 3-23 在不同辐照度情况下，光伏阵列模拟输出与实测输出对比

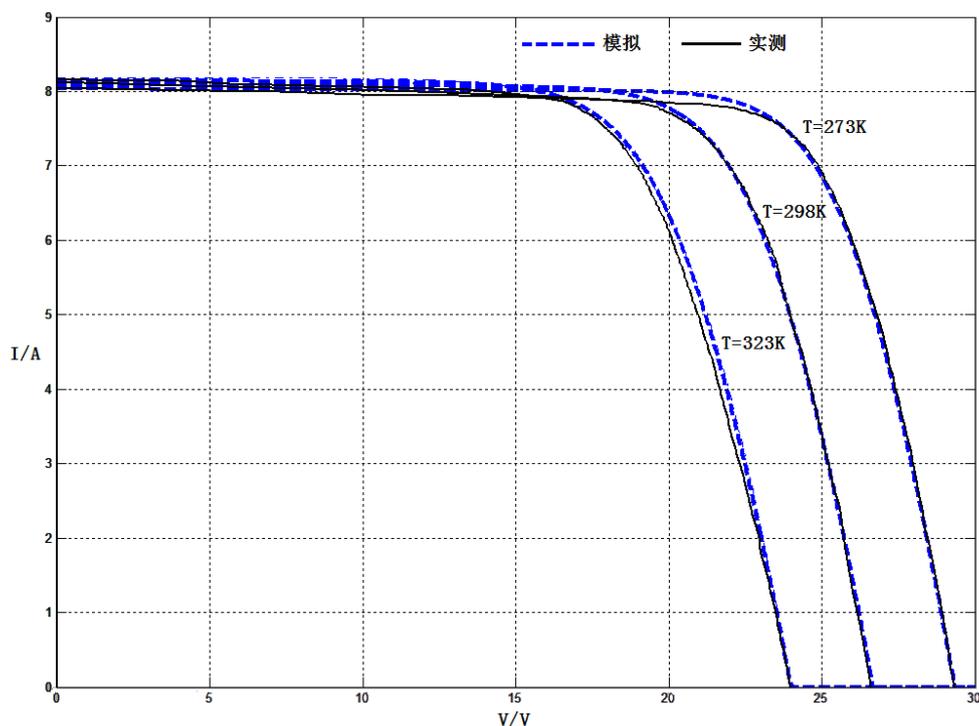


图 3-24 在不同温度情况下，光伏阵列模拟输出与实测输出对比

3.2.2 最大功率跟踪模型的建立

根据光伏输出特性曲线可知，光伏电池在一定的环境参数下，其输出曲线如图所示，具有一个最大输出点，即为最大功率点 MPP。最常用的寻找最大功率点的算法为扰动观察法和电导增量法。本文采用扰动观察法用以寻找光伏电池在一定环境参数下的最大功

率点。

最大功率跟踪的 Matlab/Simulink 仿真模块及其内部结构如图 3-25 和图 3-26 所示。

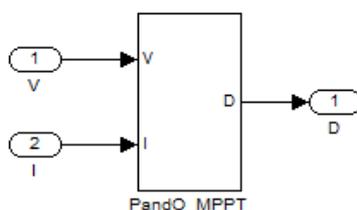


图 3-25 最大功率跟踪的 Matlab/Simulink 仿真模块

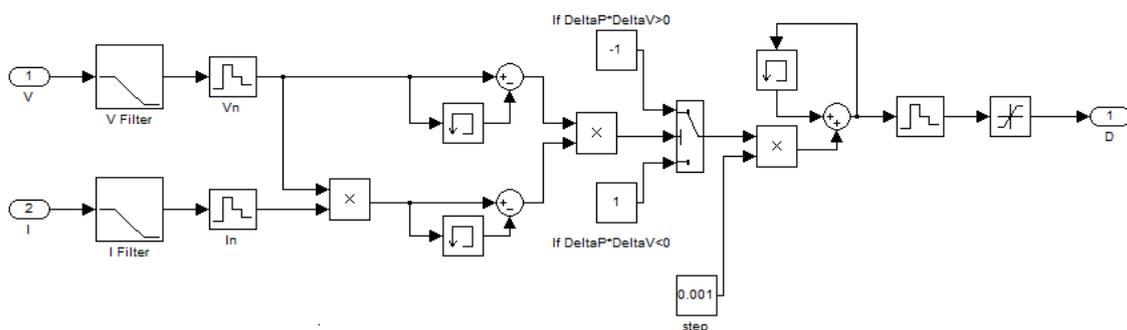


图 3-26 最大功率跟踪的 Matlab/Simulink 仿真模块内部结构

通过调节点空比 D ，来调节负载侧等效电阻，从而改变光伏阵列输出状态点所在位置，实现最大功率跟踪。

整个系统的 Matlab/Simulink 仿真结构如图 3-27 所示。

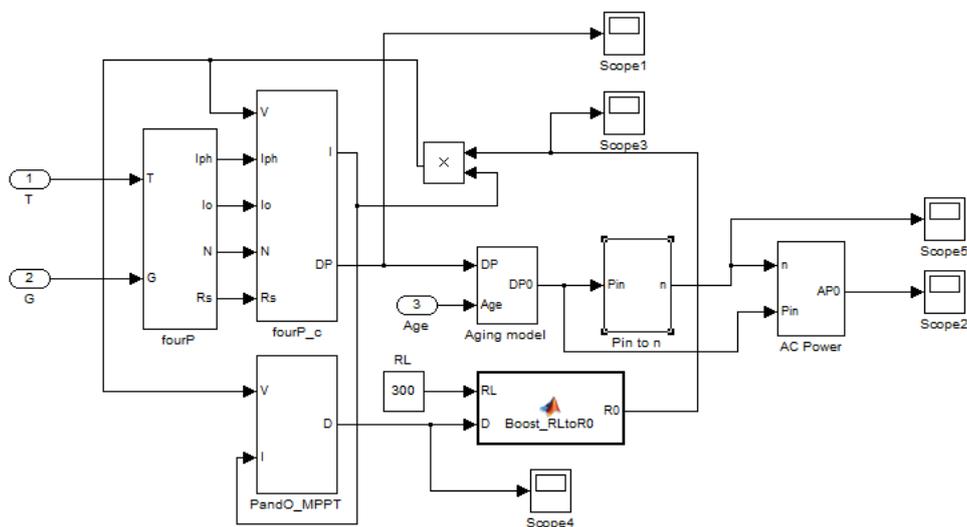


图 3-27 整个系统的 Matlab/Simulink 仿真结构

对上述模型系统进行仿真研究，以 HIT-180 型最大功率为 180W 的光伏板进行仿真模拟，其进行最大功率跟踪时的占空比变化及光板输出功率曲线如图 3-28 和图 3-29 所示。

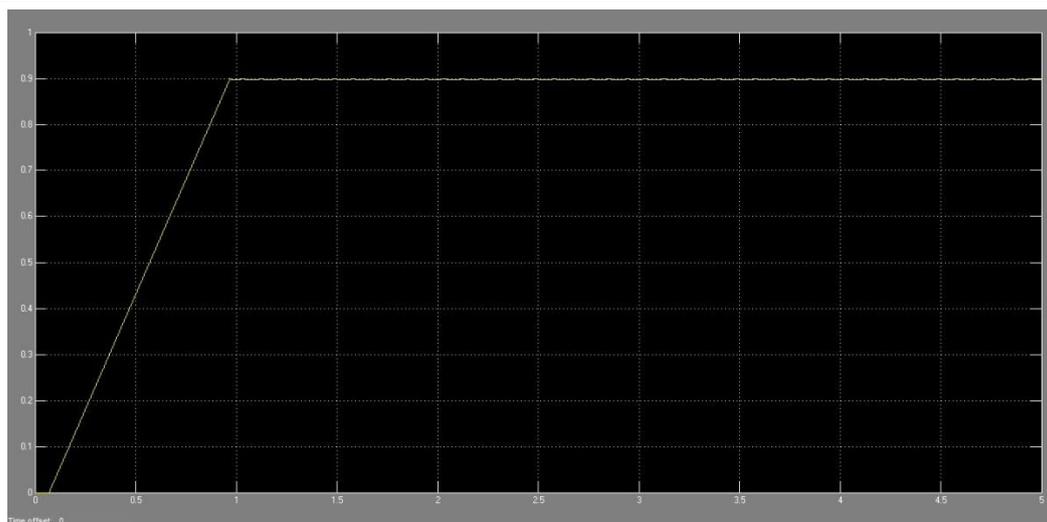


图 3-28 最大功率跟踪时的占空比变化

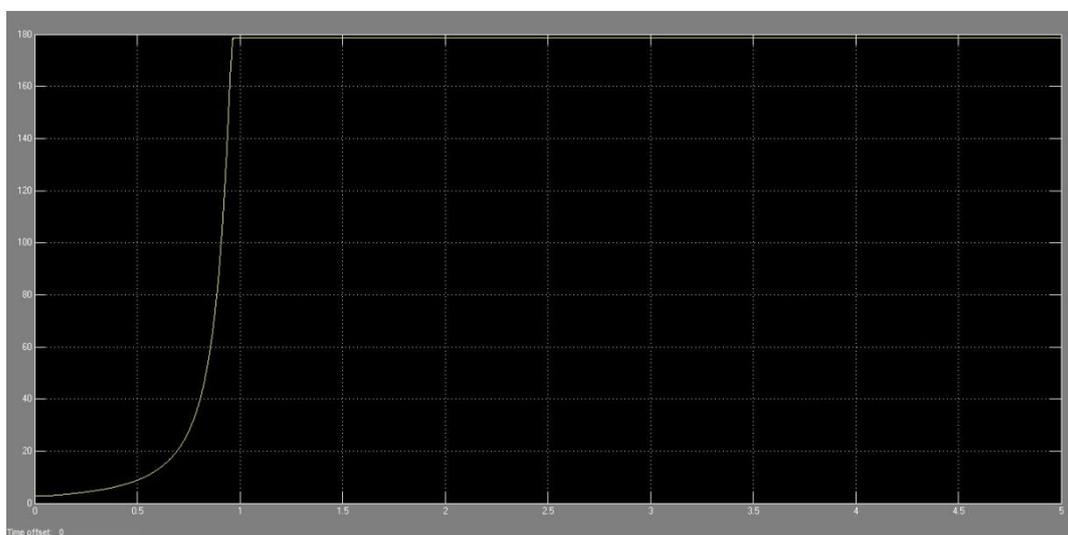


图 3-29 最大功率跟踪时的光板输出功率曲线

可以看出经最大功率跟踪后，光伏阵列输出功率稳定在最大功率 180W 左右，最大功率跟踪仿真模型能够很好的实现其实目标。

3.2.3 并网逆变器模型的建立

逆变器在工作时会消耗一定电力，并且对于不同的输入功率逆变器具有不同的输出效率，本文根据逆变器制造商提供的效率曲线，拟合出逆变器的输出功率与输入功率之间的关系，用以模拟逆变器的理论输出功率。

以 Sunny Boy 1200 为例，其输出特性如图 3-30 所示。

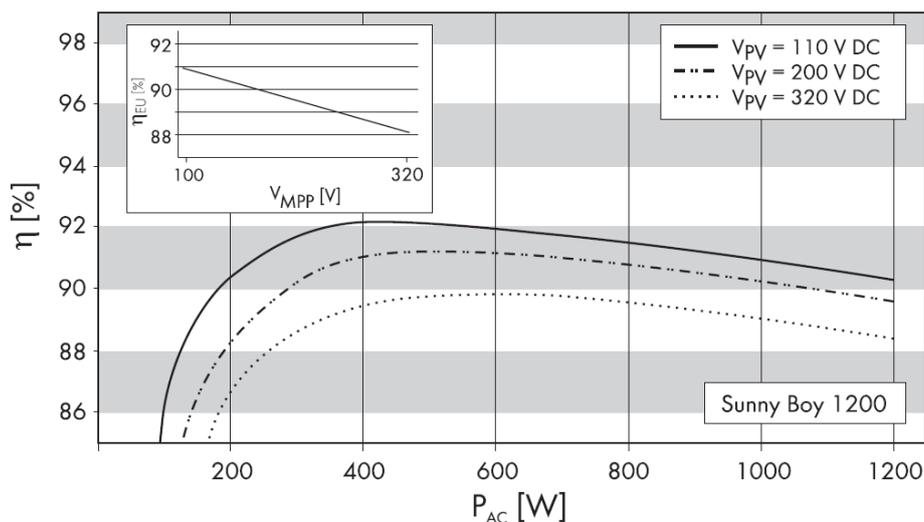


图 3-30 Sunny Boy 1200 的输出特性

基于逆变器的输出特性曲线，建立逆变器输入功率与输出功率的仿真模块，如图 3-31 所示。

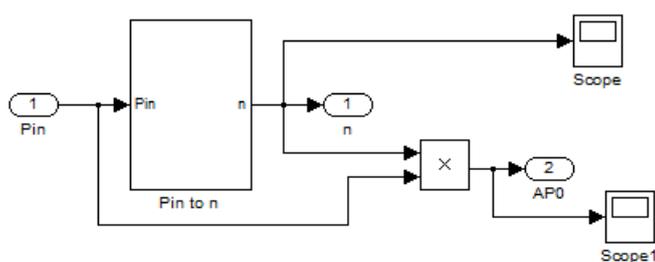


图 3-31 逆变器输入功率与输出功率的仿真模块

其中，逆变器输入与输出效率的内部仿真结构如图 3-32 所示。

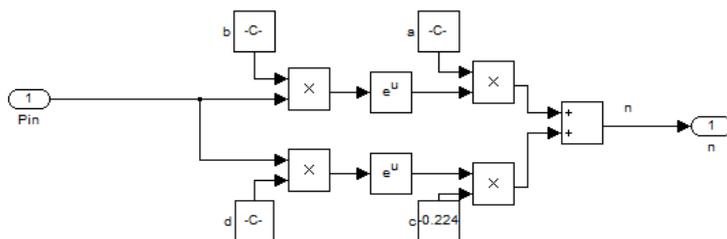


图 3-32 逆变器输入与输出效率的内部仿真结构

3.2.4 其他模型的建立

其它模型是根据光伏系统组件所受的其它限制及物理规律加入系统以更准确的模拟光伏系统，其中包括光伏电池老化模型（用以表征老化对光伏电池输出性能的影响）及光伏电池温度模型（用传热学方法获得更准确的光伏电池温度）等。

第4章 光伏系统故障诊断系统的建立

4.1 故障诊断系统的实现

整个光伏故障诊断系统包括四个执行线路：光伏并网线路，环境参数采集线路，光伏系统参数采集线路和故障诊断线路。

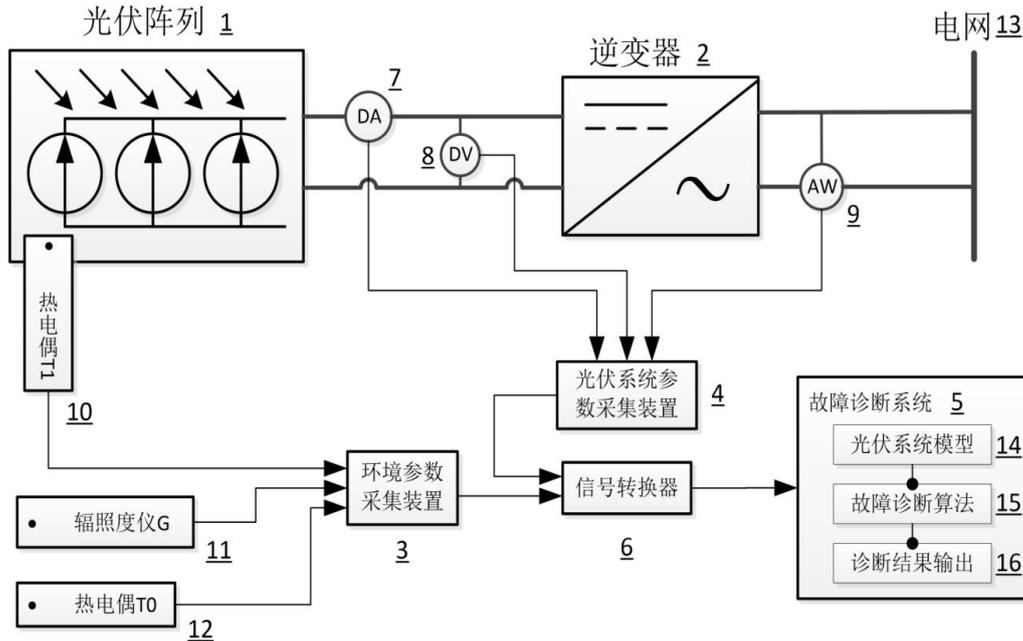


图 4-1 光伏故障诊断系统示意图

图 4-1 中标号：1 为光伏阵列；2 为逆变器；3 为环境参数采集装置；4 为光伏系统参数采集装置；5 为信号转换器；6 为信号转换器；7 为直流电流表；8 为直流电压表；9 为交流功率表；10 为测试光伏背板温度热电偶；11 为辐照度仪；12 为测试环境温度热电偶；13 为电网；14 为光伏系统模型；15 为故障诊断算法；16 为诊断结果输出。

光伏并网线路是此系统的发电并网线路，主要包括光伏阵列 1、逆变器 2 和电网 13。在一定的环境参数下，光伏阵列 1 输出直流电能给逆变器 2，逆变器 2 经其内部的控制电路对直流电进行相应处理（包括最大功率跟踪及直流转交流等）后输出符合电网 13 要求的交流电并入电网 13。

环境参数采集线路用来采集相应的环境参数，如辐照度、不同位置的温度等，这一线路主要包括辐照度仪 11、测试环境温度热电偶 12、测试光伏背板温度热电偶 10、环境参数采集装置 3 和信号转换器 6。环境参数采集装置 3 每隔一定时间间隔从辐照度仪 11、测试环境温度热电偶 12 和测试光伏背板温度热电偶 10 处采集辐照度、环境温度及光伏背板温度，经信号转换器 6 将这三个环境参数传

递给故障诊断系统 5。

光伏系统参数采集线路用来采集直流电压电流信号与交流功率信号,这一线路主要包括直流电流表 7、直流电压表 8、交流功率表 9、光伏系统参数采集装置 4 和信号转换器 6。在进行环境参数采集的同时,光伏系统参数采集装置 4 以同样的时间间隔从直流电流表 7、直流电压表 8 和交流功率表 9 处采集直流输出电流、直流输出电压及交流输出功率,经信号转换器 6 将这三个环境参数传递给故障诊断系统 5。

故障诊断线路是故障诊断系统在计算机内执行时的虚拟线路,其作用在于使用接收到的参数信号经过内部计算与处理对光伏系统运行状态进行判断并输出故障诊断结果,这一线路主要包括故障诊断系统 5、光伏系统模型 1、故障诊断算法 15 和诊断结果输出 16。在故障诊断系统 5 中,光伏系统模型 14 根据采集到的环境参数计算出光伏系统理论直流输出及理论交流输出,并将计算结果传递给故障诊断算法 15,故障诊断算法 15 根据得到的理论输出值与实测的光伏系统实际输出值及其他参数判断出当前光伏系统所处的运行状态,并将计算结果及相应指标传递给诊断结果输出 16,最后,通过诊断结果输出 16 显示系统运行状态及可能出现的故障情况的相应信息,以便方便相关人员进行光伏系统故障排除。

系统中有一套实时数据采集系统和故障诊断软件,用于参数的获取和故障诊断的判断与输出,实现故障诊断过程。

4.2 实时数据采集系统

实时采集的数据主要有,环境参数中的辐照度、环境温度和光伏背板温度,光伏系统中的直流侧电压、电流和交流侧功率。图 4-2 为实时数据采集系统的主要界面。其中包括为环境温度、光伏背板温度和辐照度采集界面;两串光伏板的直流电压、电流采集界面;两串光伏板的输出功率采集界面;逆变器后交流电压、电流及有功功率的采集界面。

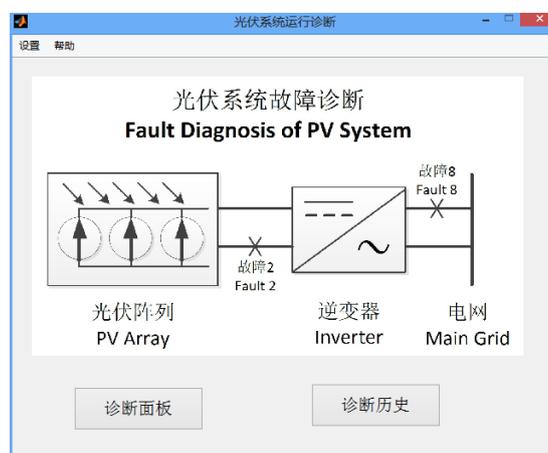


图 4-2 实时数据采集系统的主要界面

实时数据采集系统采集到的数据会自动显示在本软件上，并保存到数据库中。采集到的参数再传递给故障诊断软件，进行故障判断。

4.3 故障诊断软件

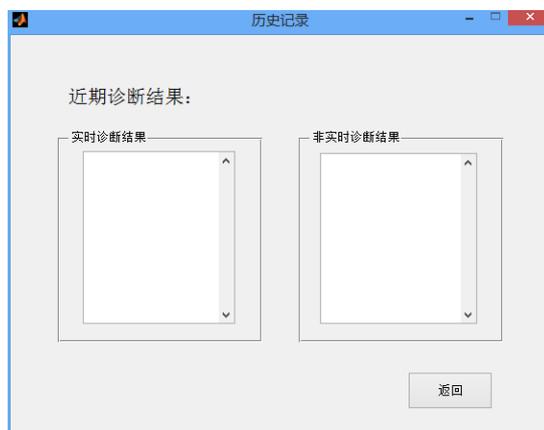
在得到相应的参数后，故障诊断软件会进行故障判断。故障诊断软件的主要界面如图 4-3 所示。



a



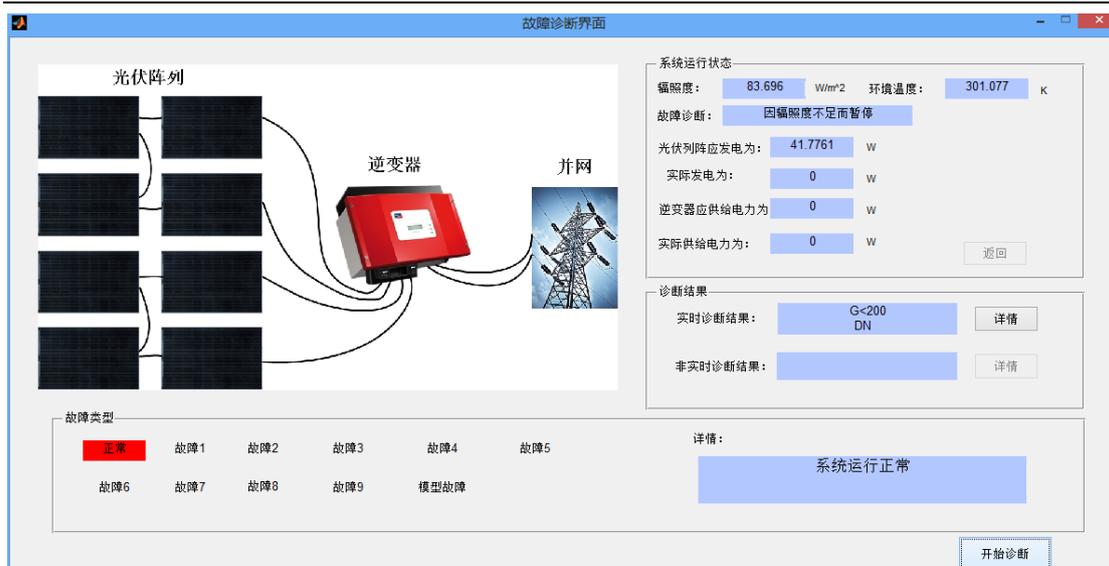
b



c



d



e

图 4-3 故障诊断软件的主要界面

其中，a 是故障诊断软件的主界面，用户可在此界面进行功能选择；b 是故障诊断软件的软件设置界面，用于设置数据文件的位置、诊断数据的保存位置以及故障所进行的模式；c 为查看历史诊断结果的界面；d 为光伏系统参数设置界面，用于输入故障诊断软件计算时所需的相关参数；e 为故障诊断界面，在此界面中可以查看光伏系统运行状态及故障诊断运行状态。

第5章 实验验证与结果分析

5.1 故障诊断系统的硬件系统设计

为验证本文所提出的故障诊断算法,本文搭建了能够实现第4章所述功能的光伏实验平台。光伏实验平台的示意图如图5-1所示。

光伏阵列由八块新奥公司生产的ETS-120型薄膜太阳能光伏板,其单块光伏板在标准测试状态下的最大功率输出为120W,开路电压为141V,短路电流为1.42A。此光伏阵列的标准测试状态的最大功率输出为960W。

逆变器为SMA公司生产的型号为Sunny Boy 1200并网型光伏逆变器,其额定输入功率为1200W。

光伏阵列在一定环境参数下会产生直流输出,经逆变器的逆变作用产生符合一定特性的交流输出,并入电网,实现光伏系统并网输出。

为了模拟光伏阵列输出,需要向模型输入光伏阵列所在环境的环境参数,热电偶1用于测量光伏背板温度,热电偶2用于测量环境温度,辐射仪用于测量太阳辐射强度,这三个测量信号为电压信号,经相应的数据采集器将信号传递给485-232转换器,最后由计算机转换及记录下采集的数据。

为了进行故障诊断,需要向故障诊断算法提供光伏系统的实际发电参数,直流电压表用于测量直流侧输出电压,直流电流表用于测量直流侧输出电流,交流功率表用于测量交流侧输出功率,这三个电表均自带485通讯功能,采集到的参数信号传递给485-232转换器,最后由计算机转换及记录下采集的数据。

数据采集系统每分钟(采集周期也可自行设置)进行一次数据采集与记录,采集与记录的数据包括:采集时间,辐照度,环境温度,光伏背板温度,直流电压,直流电流,交流电压,交流电流,交流有功功率。

本实验台为两串联,四并联的光伏阵列连接方式,其中两个串联线路并联在一条线路中作为一条主支路连接到逆变器输入端,共有两条主支路将八块光伏板所发电量输入逆变器。

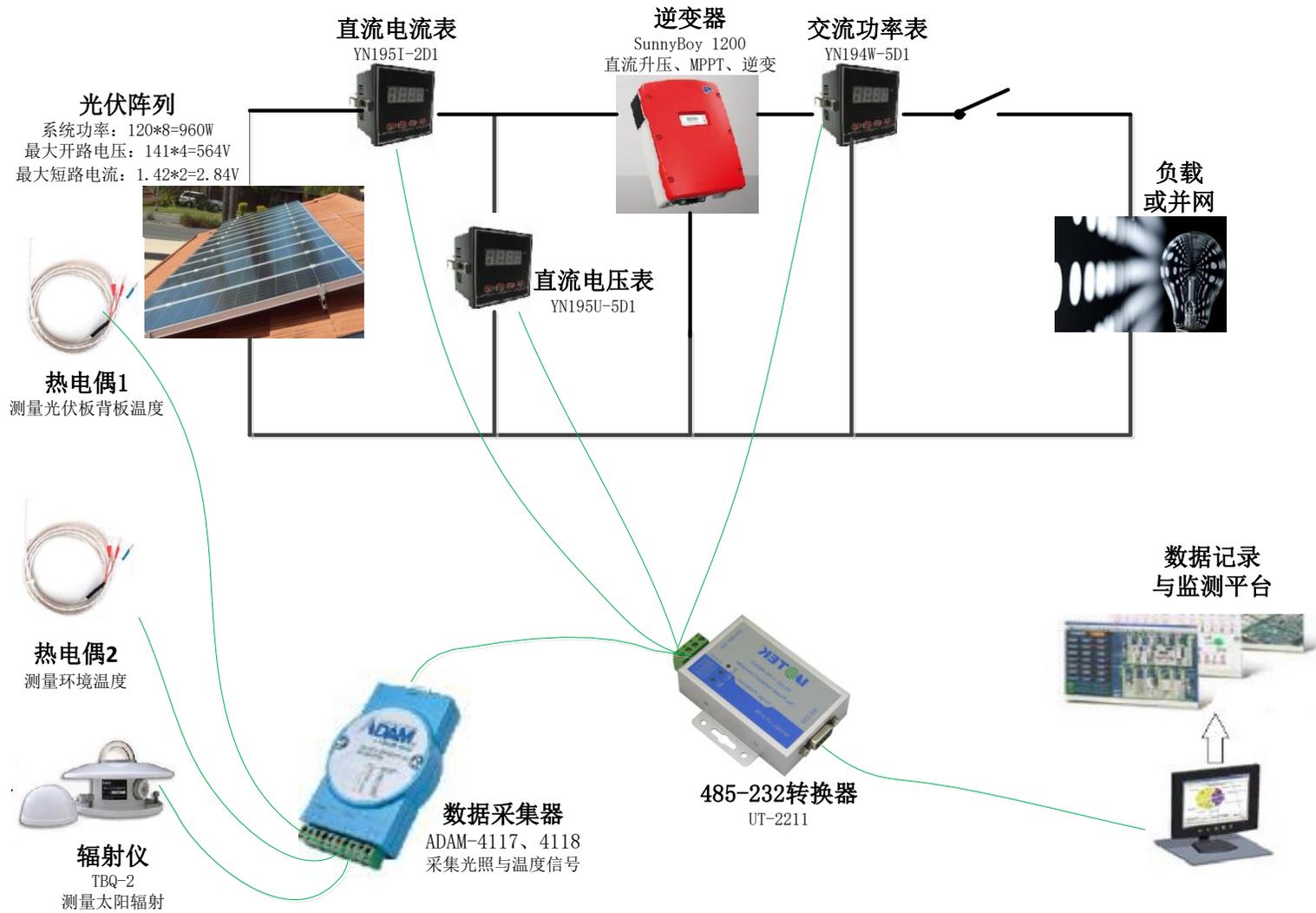


图 5-1 光伏实验平台的示意图

5.2 实验结果与分析

5.2.1 光伏参数的获取

本故障诊断系统需要获取一定的光伏板参数以对模型进行参数设定。从光伏制造商提供的技术文件中一般会比较容易获得参考状态下的开路电压、短路电流、最大功率点电压、最大功率点电流、开路电压温度系数和短路电流温度系数等等。有些光伏制造商会提供比较全面的光伏板测试参数和图表，从这些图表中就可以提取出本系统所需要的另外一些参数，如 $T=298\text{K}$ 、 $G=200\text{W}/\text{m}^2$ 时的光伏板开路电压， $T=348$ 、 $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ 时光伏板的最大功率点电压等等。但有些光伏制造商提供的参数和图表就会比较有限，本实验台所使用的新奥光伏板以上两个参数就无法从制造商提供的技术文件中进行提取，因此进行了不同环境参数下光伏板输出曲线的绘制，以对以上两个参数进行计算提取。此实验的数据曲线如图 5-2 所示

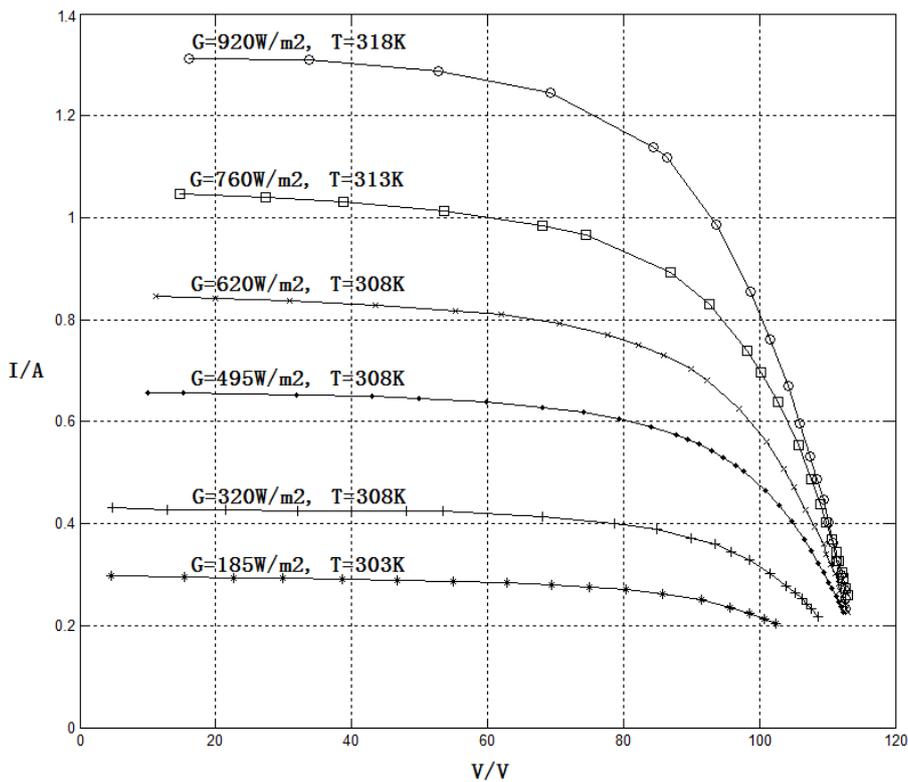


图 5-2 新奥 EST-120 型光伏板在不同环境参数下的输出曲线

根据以上测试数据，带入以下公式中，以便计算出模型系统的两个修正系数。

$$M = (V_{oc,200} - V_{oc,ref}) / \ln\left(\frac{G_{200}}{G_{ref}}\right)$$

$$K = \frac{V_{mp,348} - V'_{mp,348}}{I_{mp,348} \cdot (348 - 298)} \cdot (T - T_{ref}) \cdot \frac{G}{G_{ref}} = \frac{V_{mp,ref} + 50 \cdot b - V'_{mp,348}}{50 \cdot (I_{mp,ref} - 50 \cdot a)} \cdot (T - T_{ref}) \cdot \frac{G}{G_{ref}}$$

经拟合计算，选取 $V_{oc,200} = 121.6V$ ， $V'_{mp,348} = 80.5V$ 。

5.2.2 故障诊断系统验证实验

(1) 光伏阵列光伏板线路开路

光伏板线路开路时，表现为整个支路无直流电压、电流输出，光伏阵列整个输出减少开路的光伏支路功率。

本实验台为两串联，四并联的光伏阵列连接方式，针对这种接线方式，进行了两组光伏阵列光伏板线路开路实验。

a. 一条支路两个光伏板开路

本次实验的故障方式如图 5-3 所示。一条支路线路被断开，造成开路故障。



图 5-3 一条支路开路实验的故障方式

本次实验条件下的环境参数如图 5-4 和图 5-5 所示，光伏输出参数如图 5-6、图 5-7、图 5-8 所示，实际发电情况与理论发电情况对比如图 5-9 所示。

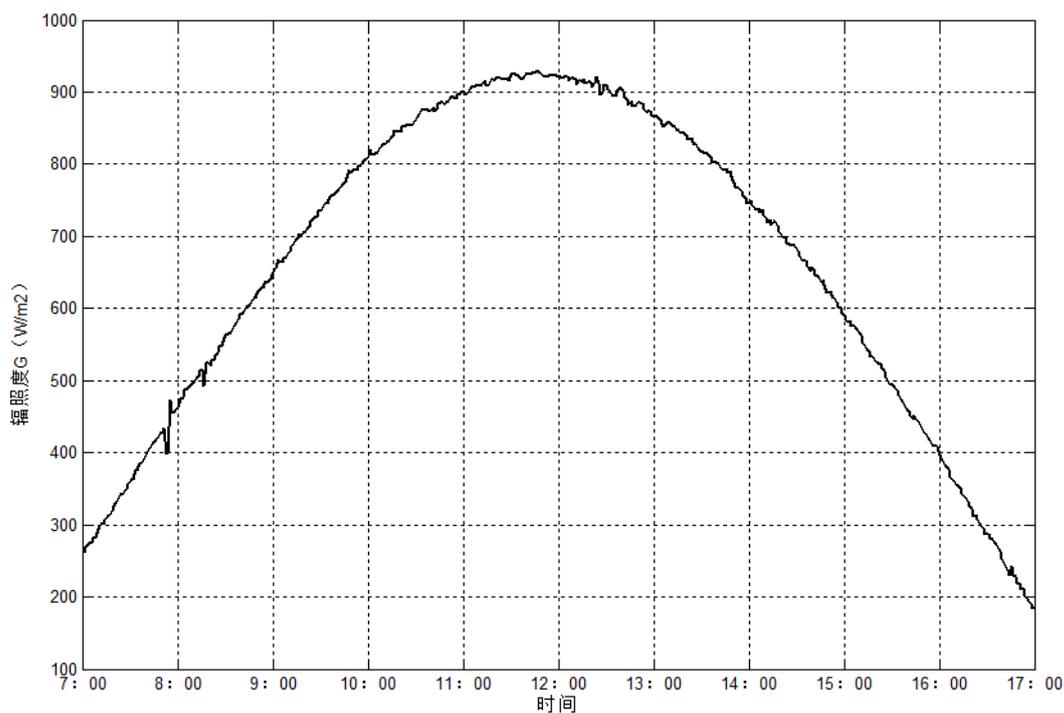


图 5-4 一条支路开路实验的辐照度参数

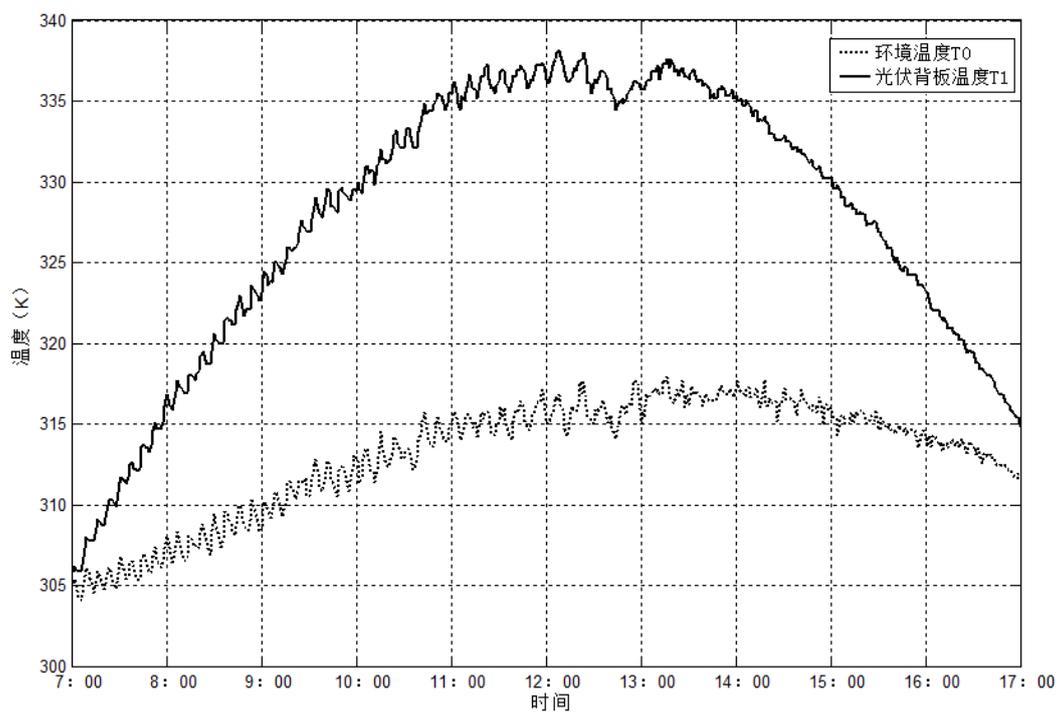


图 5-5 一条支路开路实验的温度参数

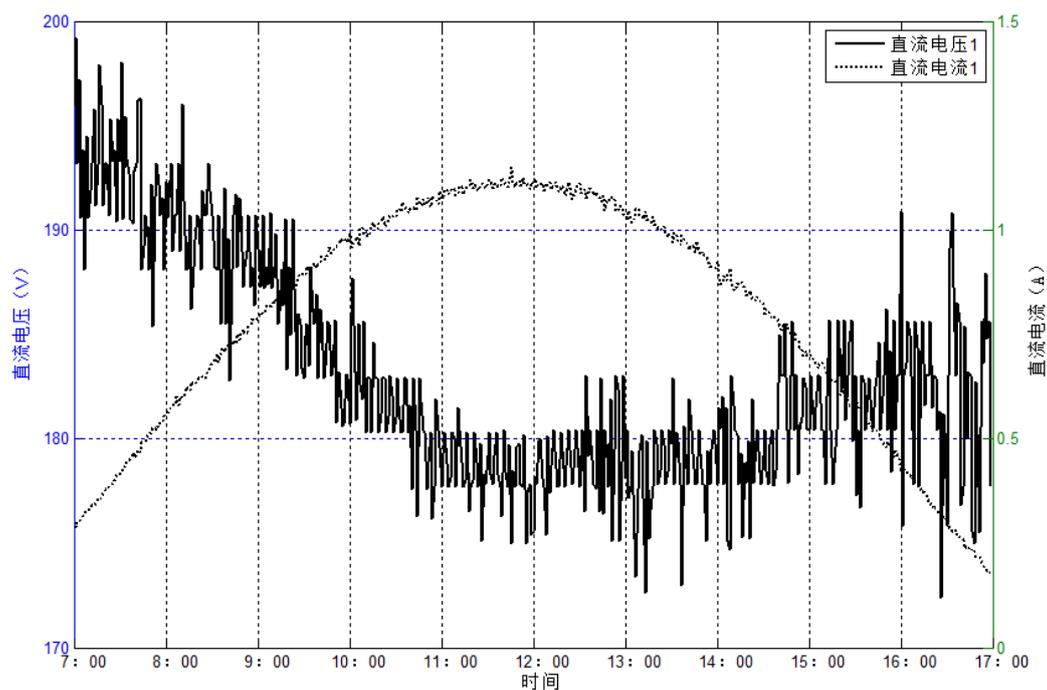


图 5-6 一条支路开路实验的第一主支路输出电压和电流

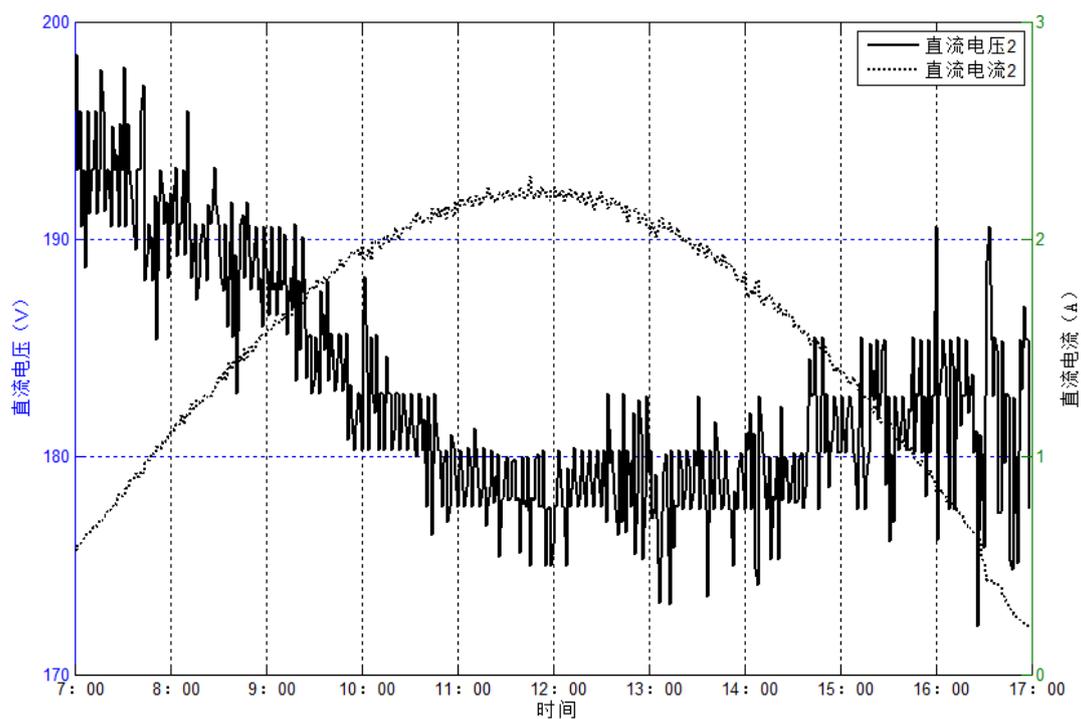


图 5-7 一条支路开路实验的第二主支路输出电压和电流

由图 5-6 和图 5-7 可以得知, 两条主支路中, 第一条由于有两块光伏板开路, 其输出电流减少, 基本为第二条主支路的一半。

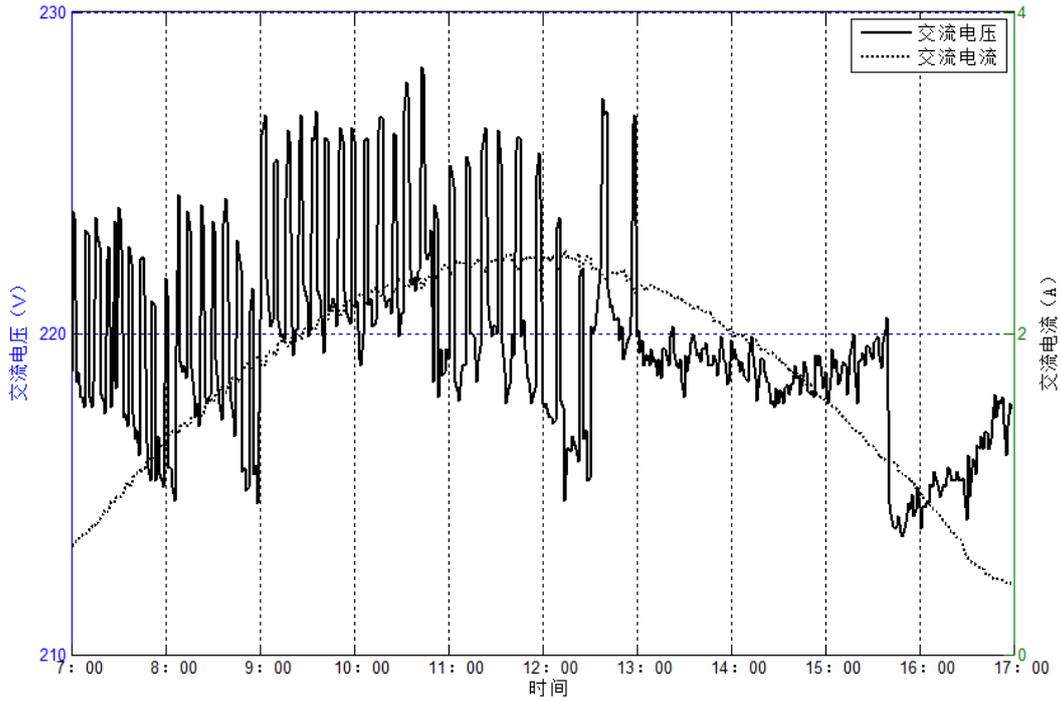


图 5-8 一条支路开路实验的逆变器输出电压和电流

由图 5-8 可以得知，逆变器的输出电压在 220V 左右，输出电流随着辐照度的变化而变化，输出情况正常。

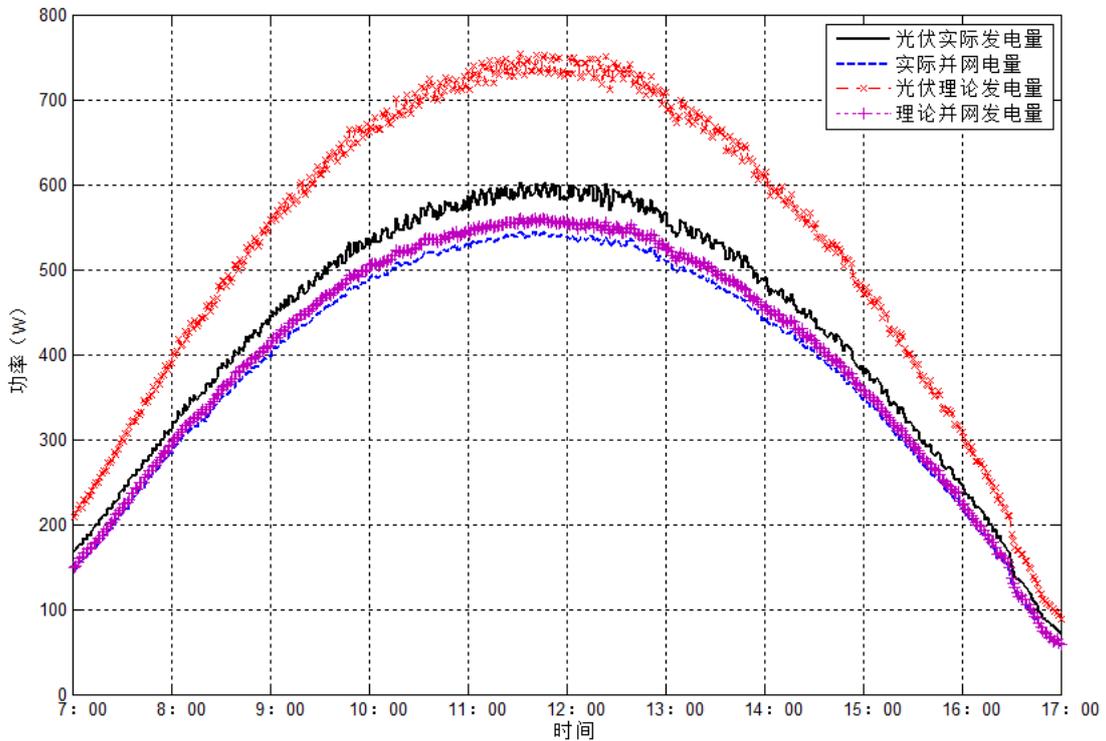


图 5-9 一条支路开路实验的实际发电量与理论发电量

由图 5-9 可以得知，逆变器并网输出的实际电量与理论电量基本一致，而光伏实际发电量比理论发电量要低四分之一左右，符合开路两块光伏板能量损失减

少四分之一的实际情况。

b. 两条支路四个光伏板开路

本次实验的故障方式如图 5-10 所示。两条支路线路被断开，造成一主支路断开故障。

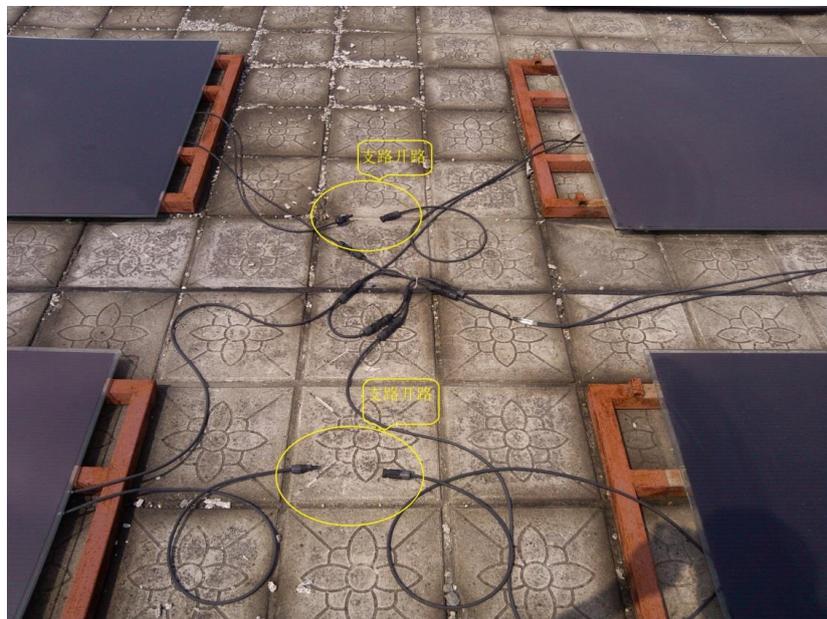


图 5-10 两条支路开路实验的故障方式

本次实验条件下的环境参数如图 5-11 和图 5-12 所示，光伏输出参数如图 5-13、图 5-14、图 5-15 所示，实际发电情况与理论发电情况对比如图 5-16 所示。

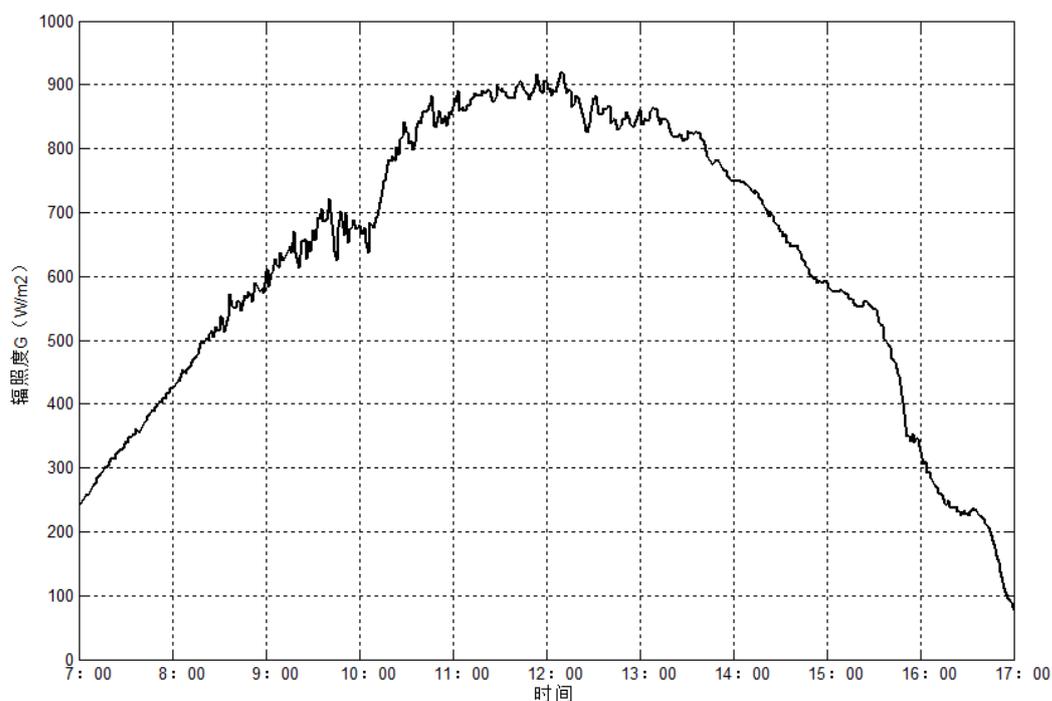


图 5-11 两条支路开路实验的辐照度参数

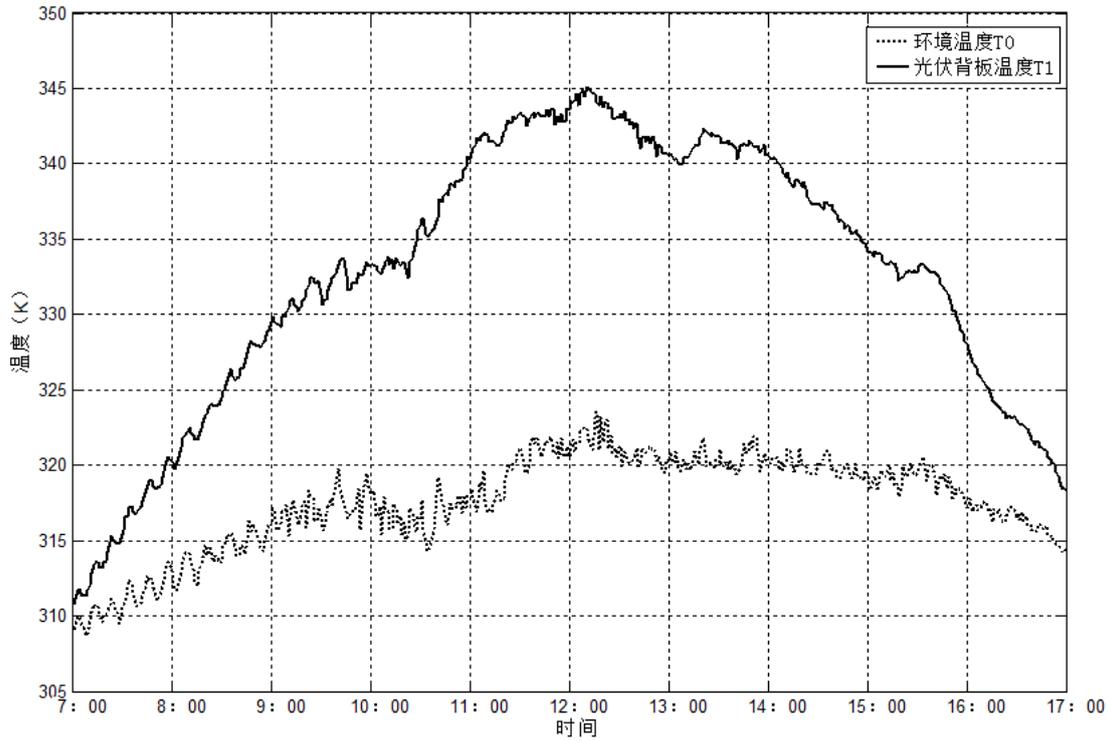


图 5-12 两条支路开路实验的温度参数

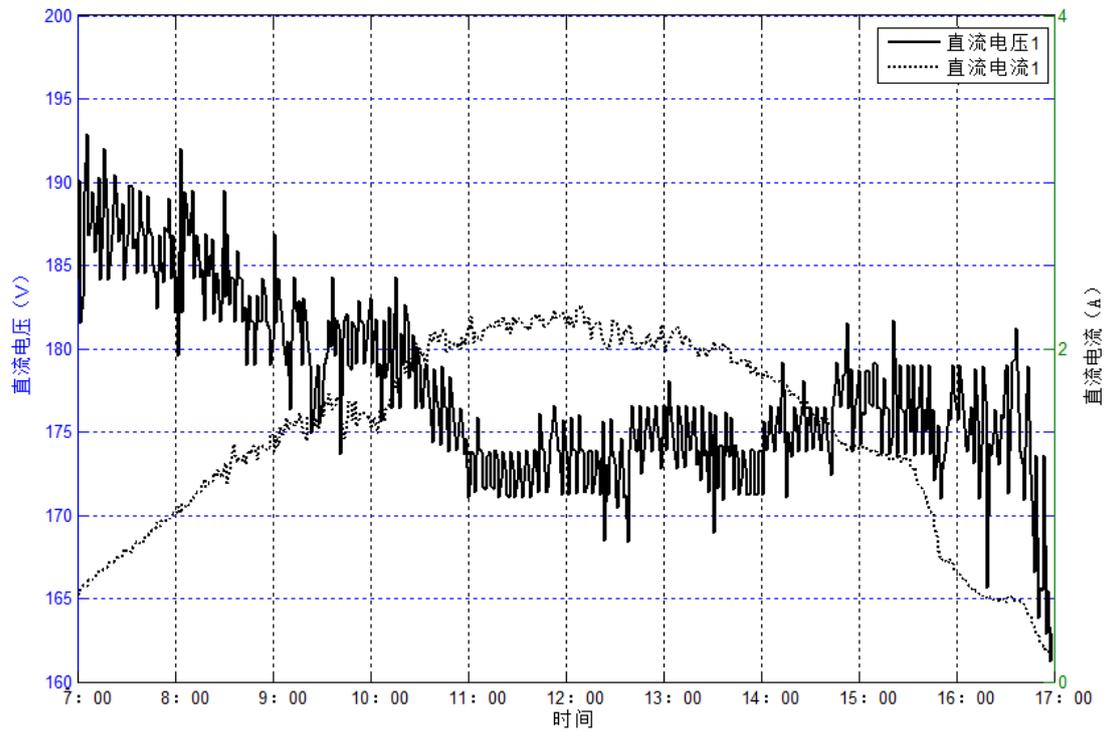


图 5-13 两条支路开路实验的第一主支路输出电压和电流

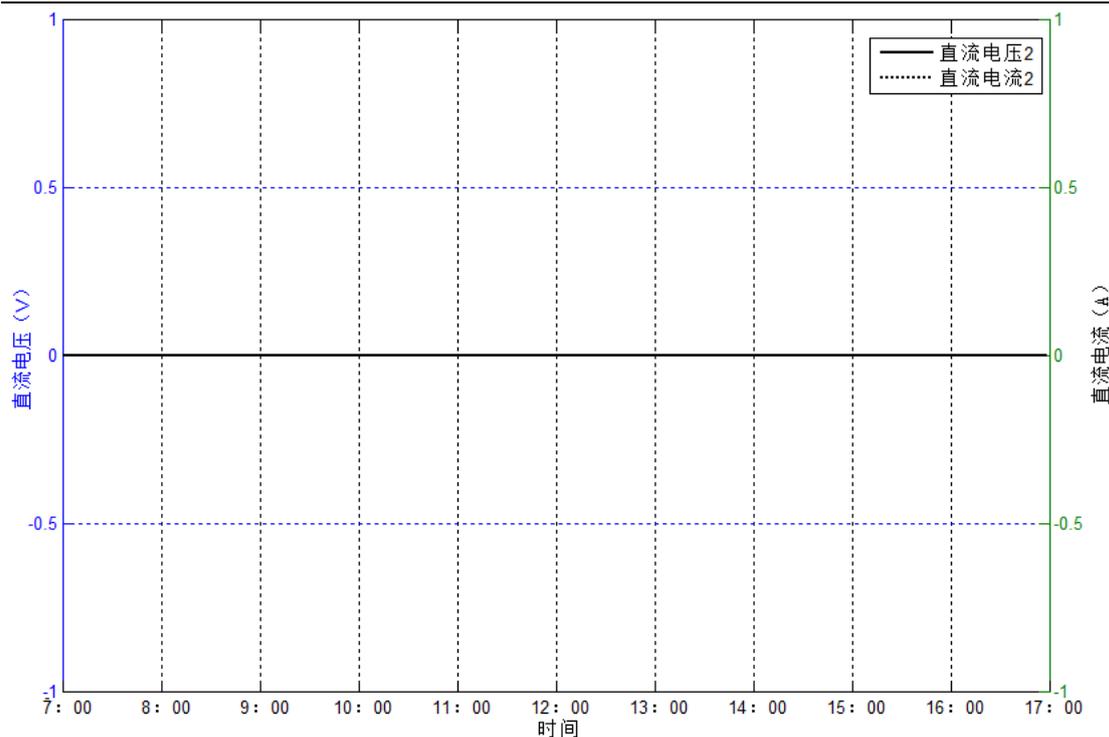


图 5-14 两条支路开路实验的第二主支路输出电压和电流

由图 5-13 和图 5-14 可以得知，第二条主支路四块光伏板全部开路后，其输出电压、电流均为零，而第一条主支路没做任何处理，其输出情况正常。

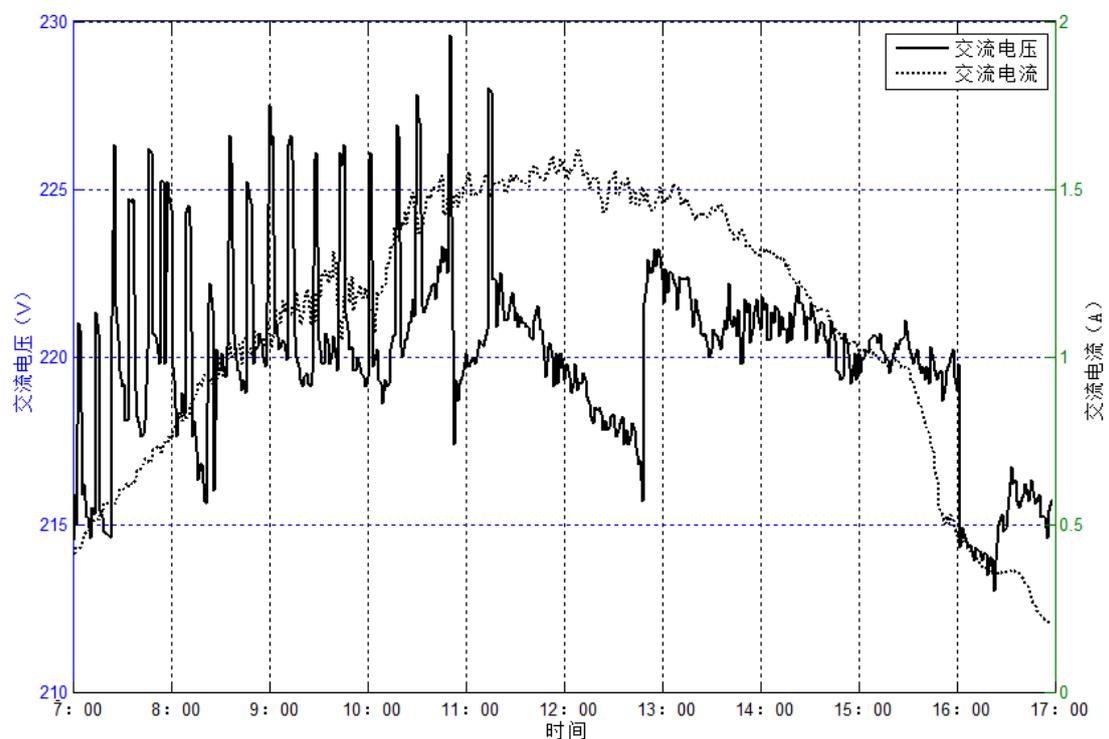


图 5-15 两条支路开路实验的逆变器输出电压和电流

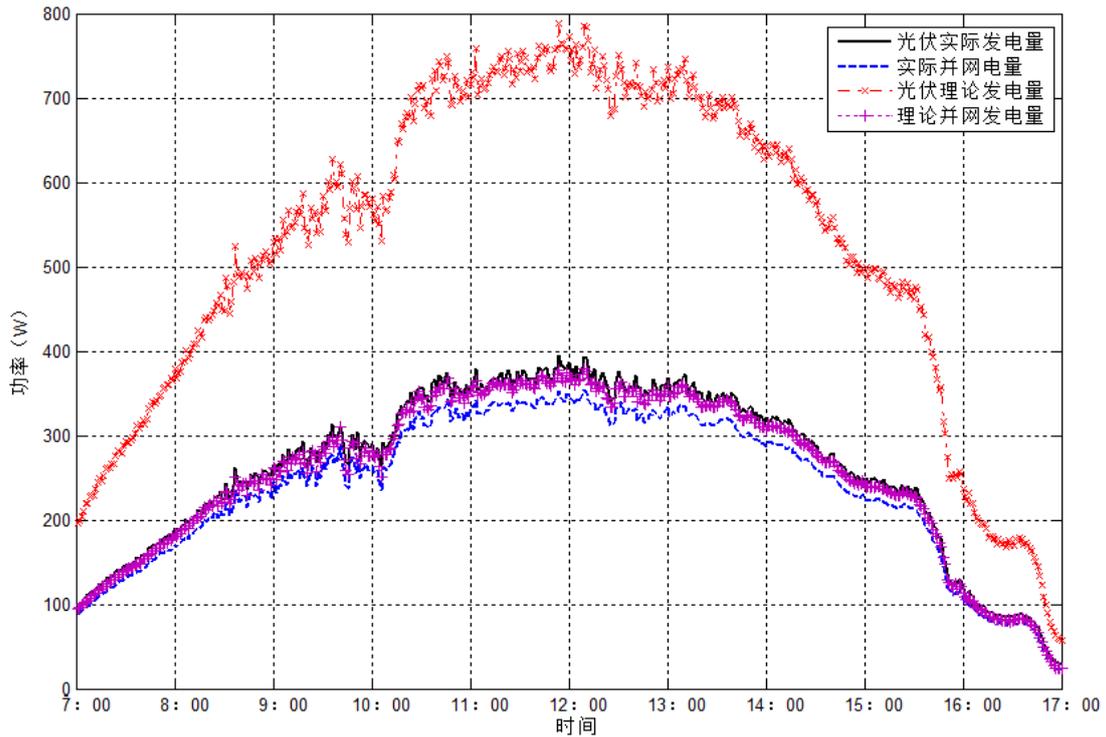


图 5-16 两条支路开路实验的实际发电量与理论发电量

由图 5-16 可以得知，逆变器并网输出的实际电量与理论电量基本一致，而光伏实际发电量比理论发电量要低二分之一左右，符合开路四块光伏板能量损失减少二分之一的实际情况。

这两个实验的故障检测情况在故障诊断软件中的输出结果如图 5-17 所示。在检测开路时间小于一小时（约 60 个检测点）时，其故障判断为短时间开路；当检测开路时间大于一小时（约 60 个以上的检测点）时，其故障判断由短时间开路转换为长时间开路。



图 5-17 支路开路实验的故障诊断软件输出结果

(2) 光伏阵列光伏板短路

a. 一个光伏板被短路

本次实验的故障方式如图 5-18 所示。一支路中一个光伏板被短接，造成一个光伏板被短路故障。



图 5-18 一个光伏板被短路实验的故障方式

本次实验条件下的环境参数如图 5-19 和图 5-20 所示，光伏输出参数如图 5-21、图 5-22、图 5-23 所示，实际发电情况与理论发电情况对比如图 5-24 所示。

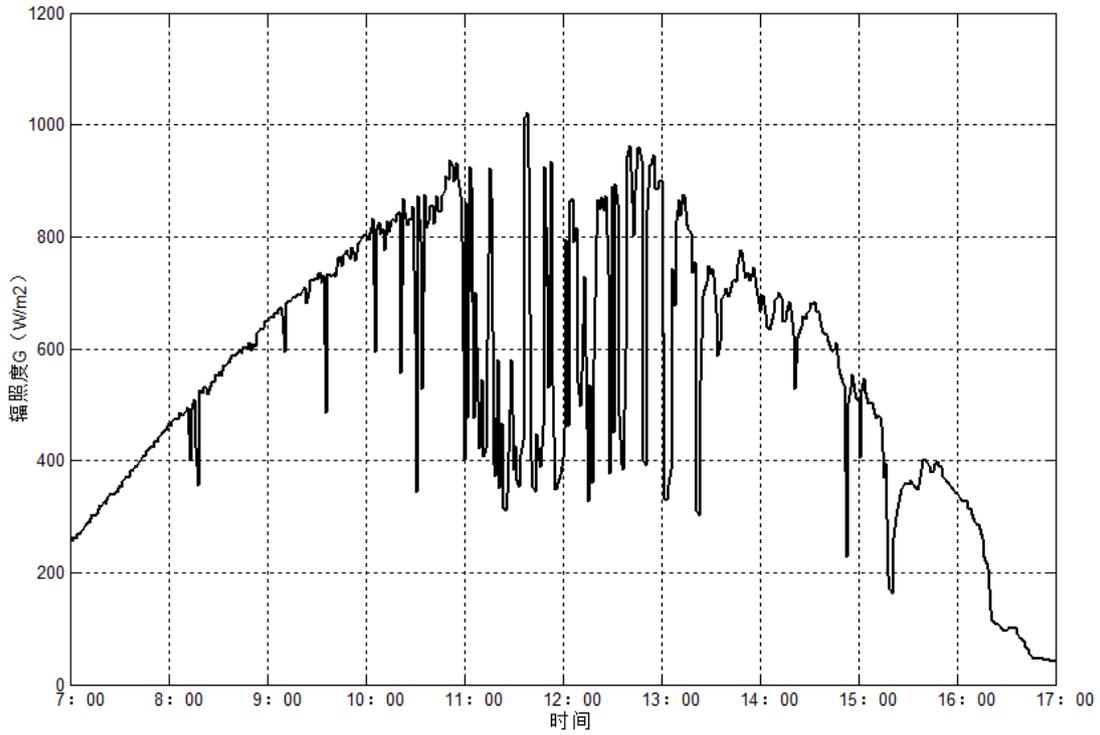


图 5-19 一个光伏板被短路实验的辐照度参数

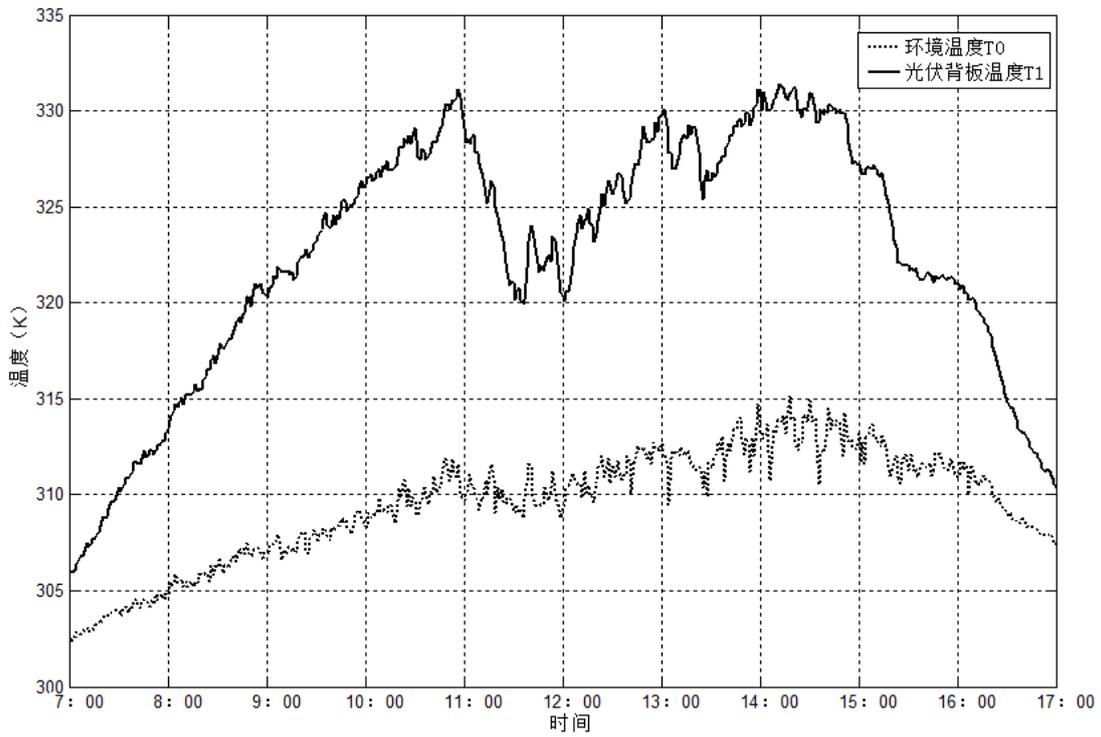


图 5-20 一个光伏板被短路实验的温度参数

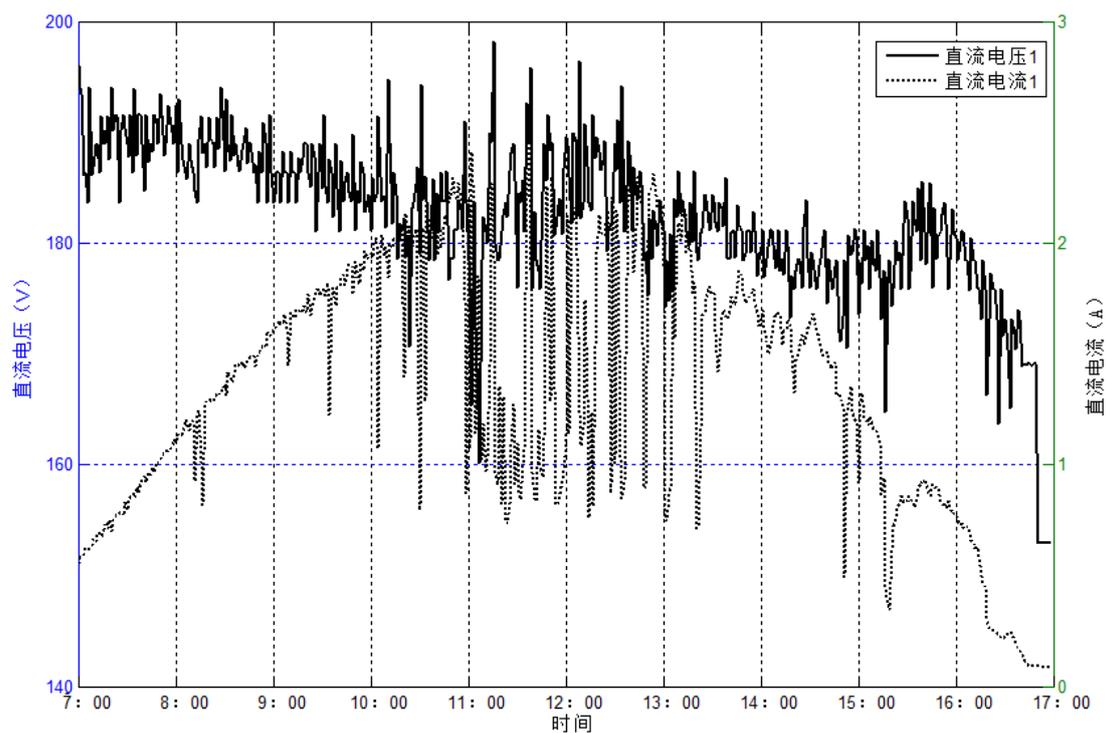


图 5-21 一个光伏板被短路实验的第一主支路输出电压和电流

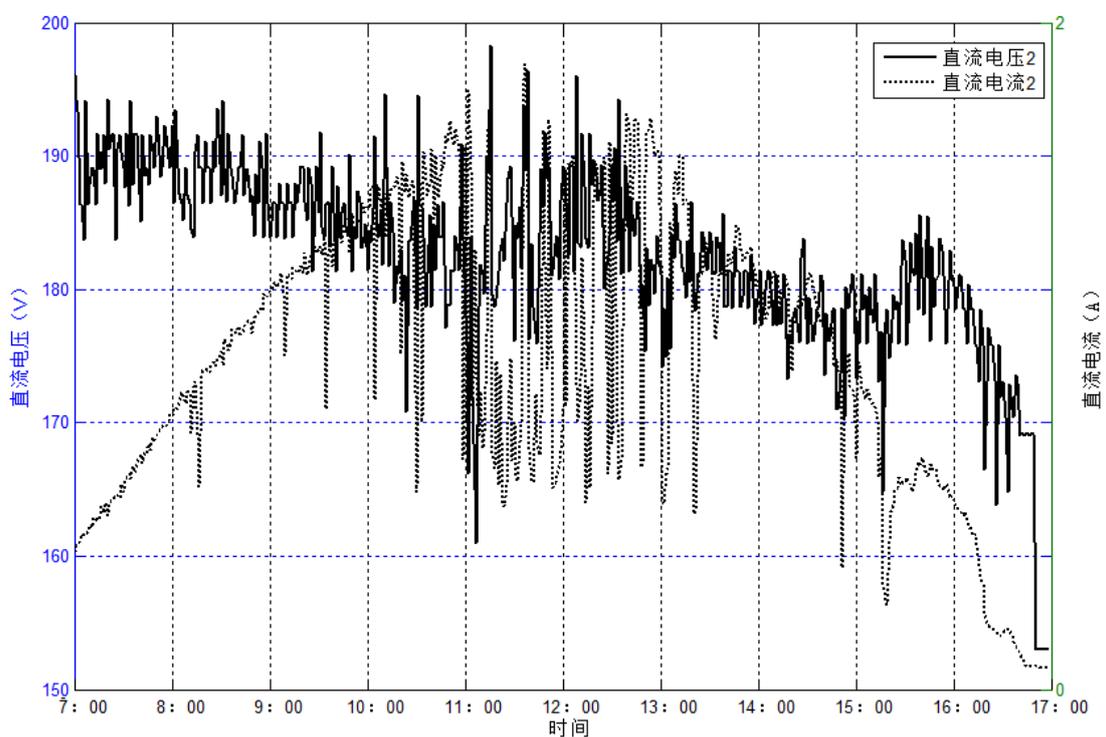


图 5-22 一个光伏板被短路实验的第二主支路输出电压和电流

在图 5-21 和图 5-22 中可以得知，在第二条主支路中，一个光伏板被短接，这一支路的输出下降，低于第一支路。

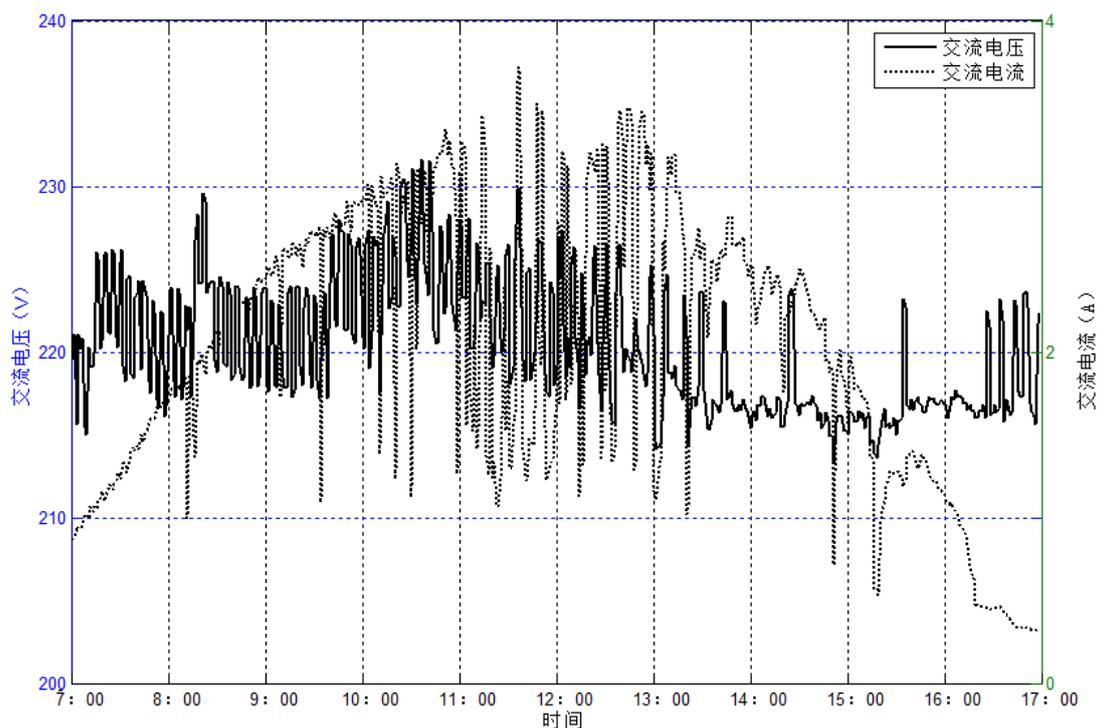


图 5-23 一个光伏板被短路实验的逆变器输出电压和电流

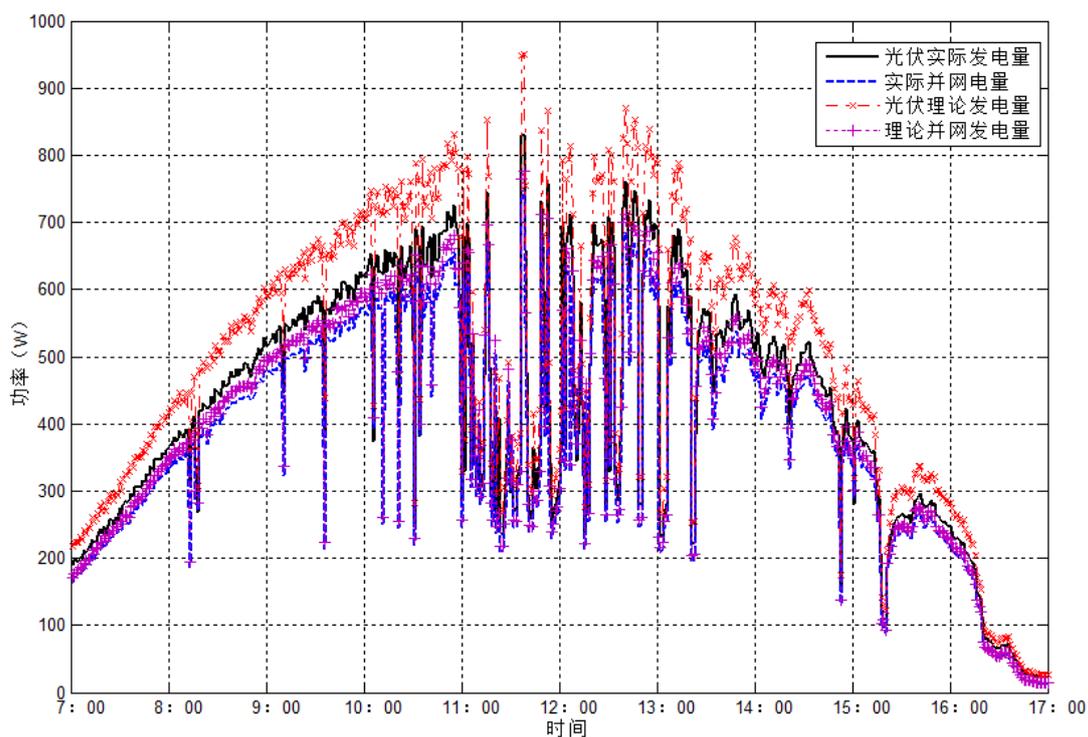


图 5-24 一个光伏板被短路实验的实际发电量与理论发电量

由图 5-24 可以得知，一块光伏板被短接后，其实际光伏发电量低于理论发电量，在达到故障诊断流程的判断条件时，实时性故障流程诊断为故障发生。

b. 三光伏板被短路

本次实验的故障方式如图 5-25 所示。三条支路的三个光伏板被短接，造成

三光伏板被短路故障。

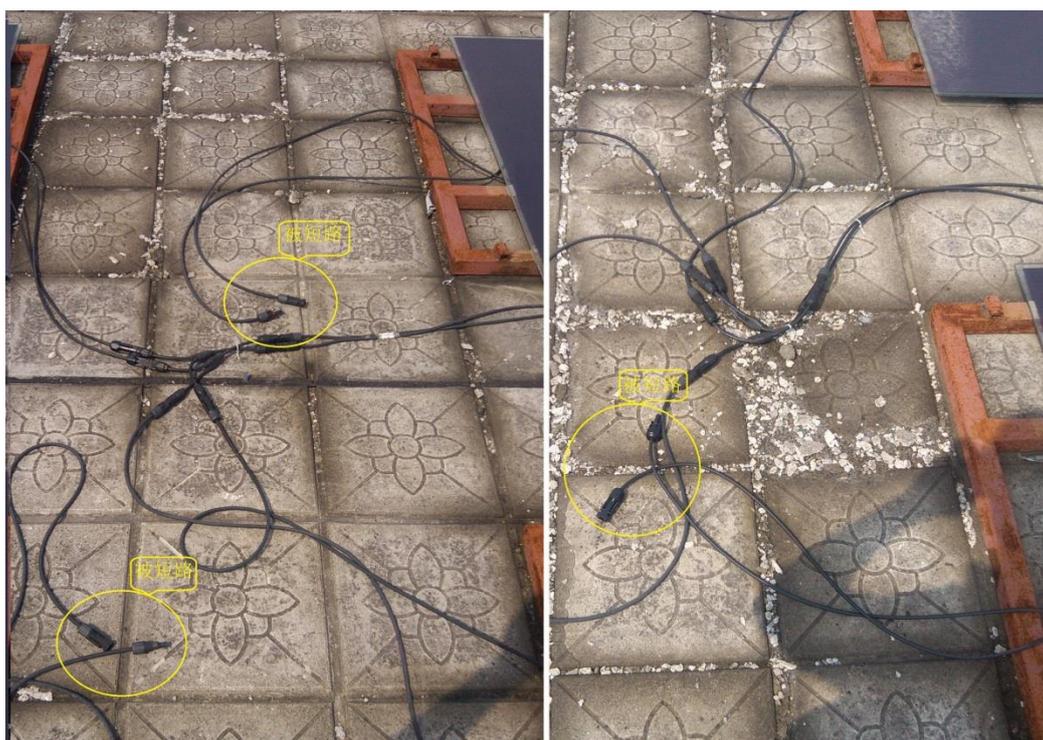


图 5-25 三个光伏板被短路实验的故障方式

本次实验条件下的环境参数如图 5-26 和图 5-27 所示，光伏输出参数如图 5-28、图 5-29、图 5-30 所示，实际发电情况与理论发电情况对比如图 5-31 所示。

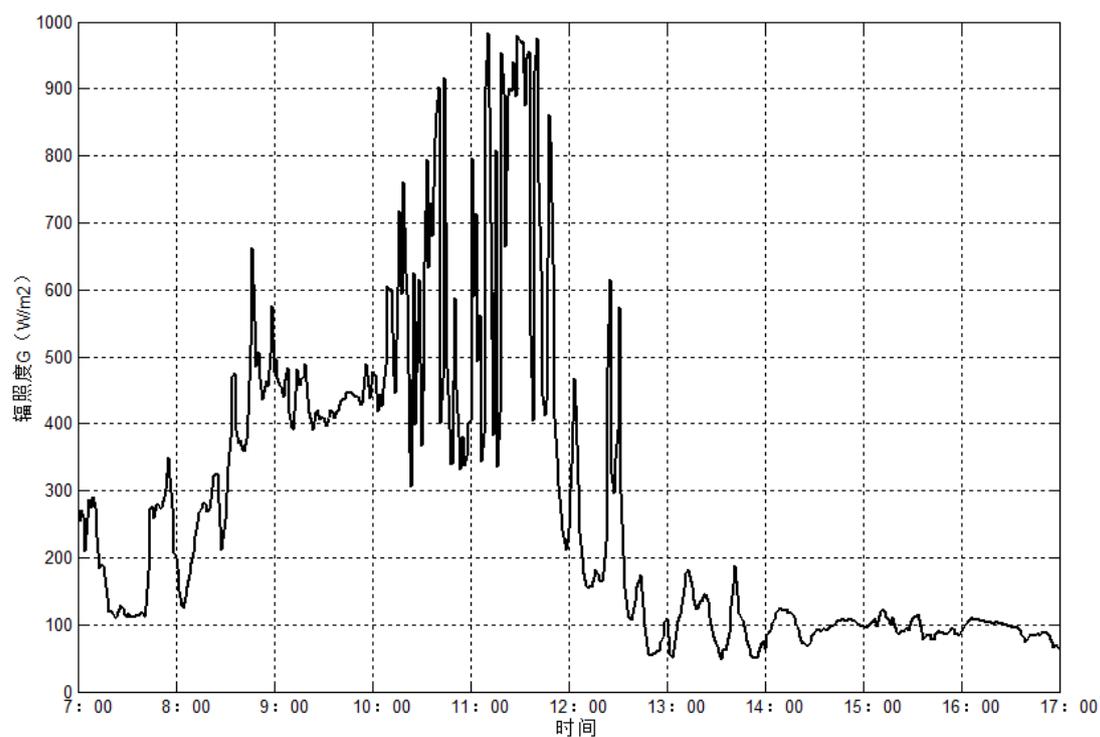


图 5-26 三个光伏板被短路实验的辐照度参数

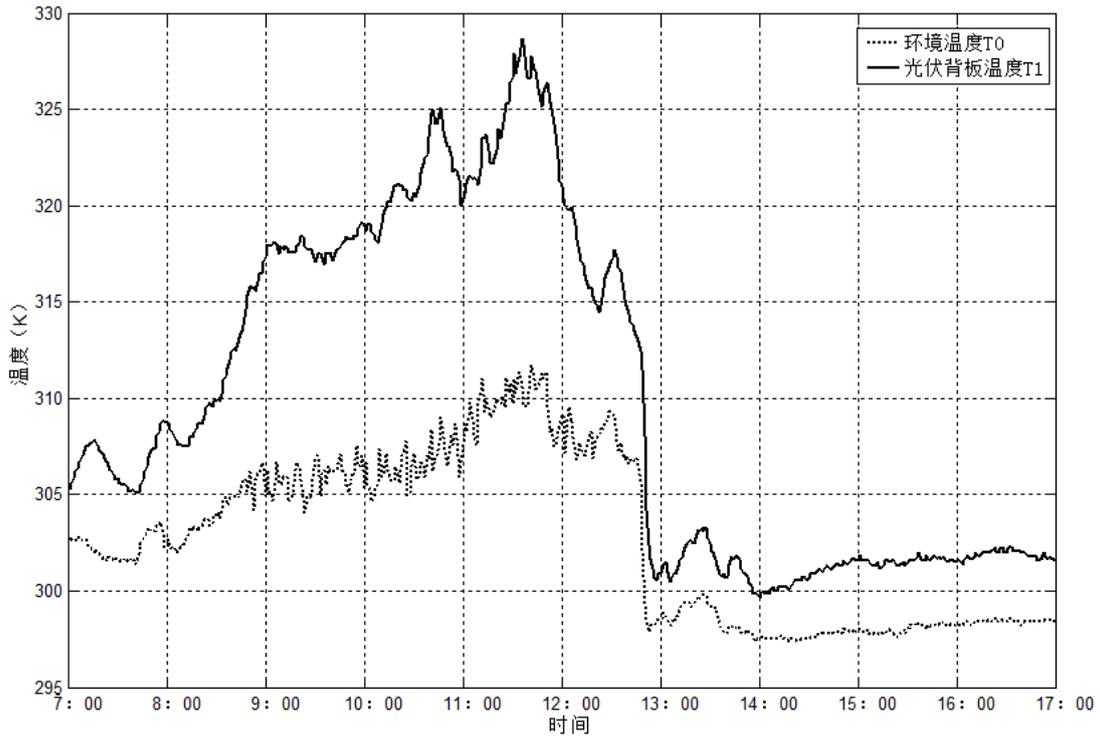


图 5-27 三个光伏板被短路实验的温度参数

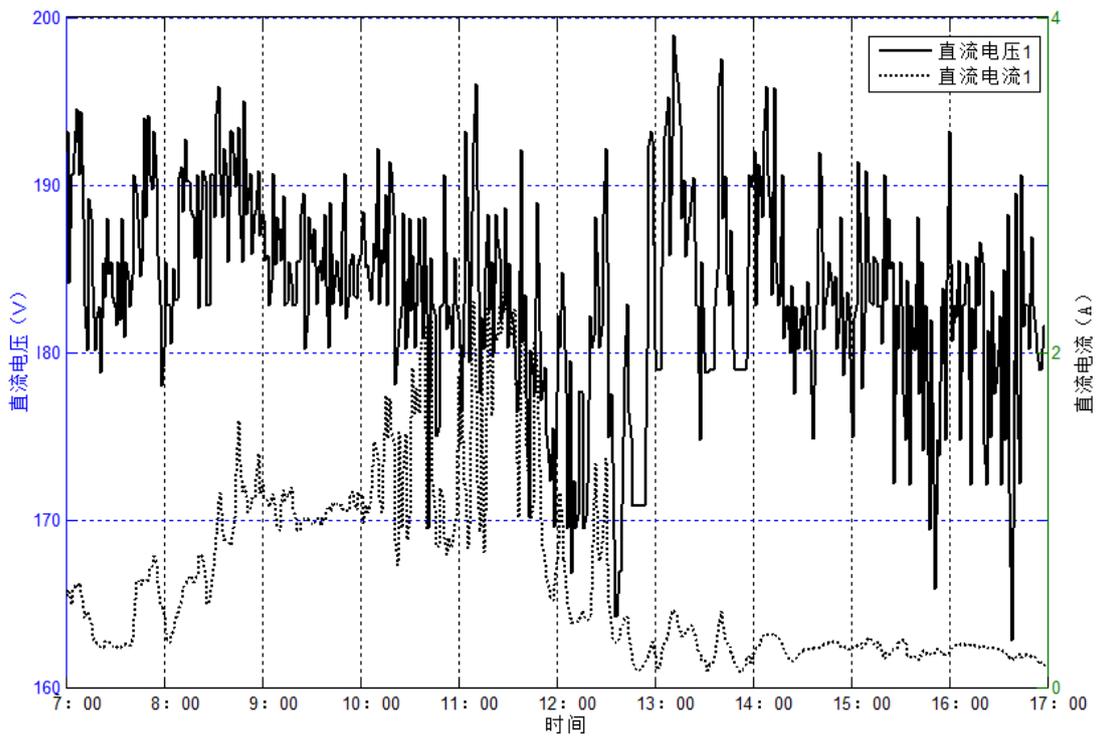


图 5-28 三个光伏板被短路实验的第一主支路输出电压和电流

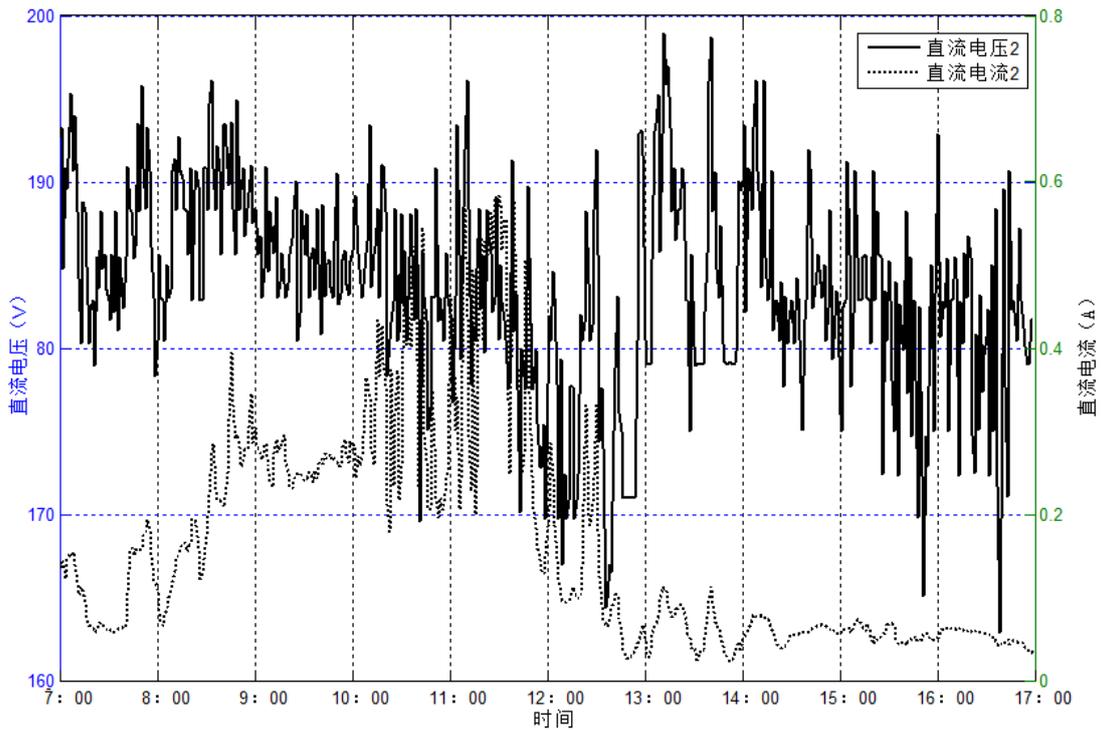


图 5-29 三个光伏板被短路实验的第二主支路输出电压和电流

在图 5-28 和图 5-29 中可以得知，在第二条主支路中，三个光伏板被短接，这一支路的输出下降，远远低于第一支路。

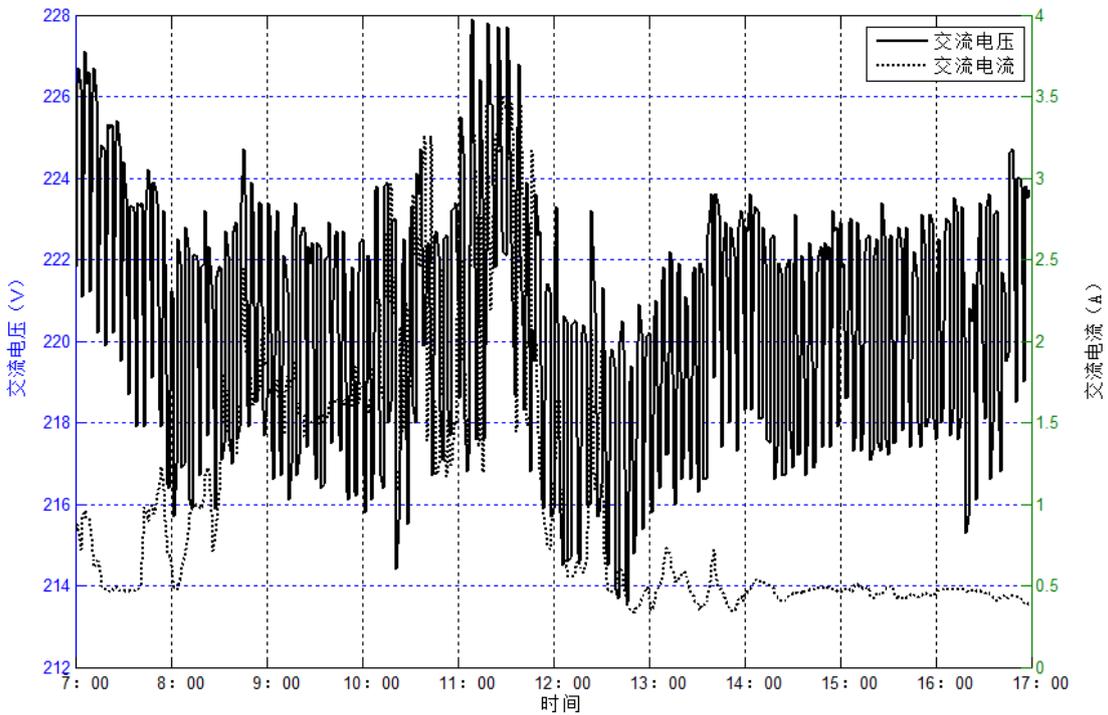


图 5-30 三个光伏板被短路实验的逆变器输出电压和电流

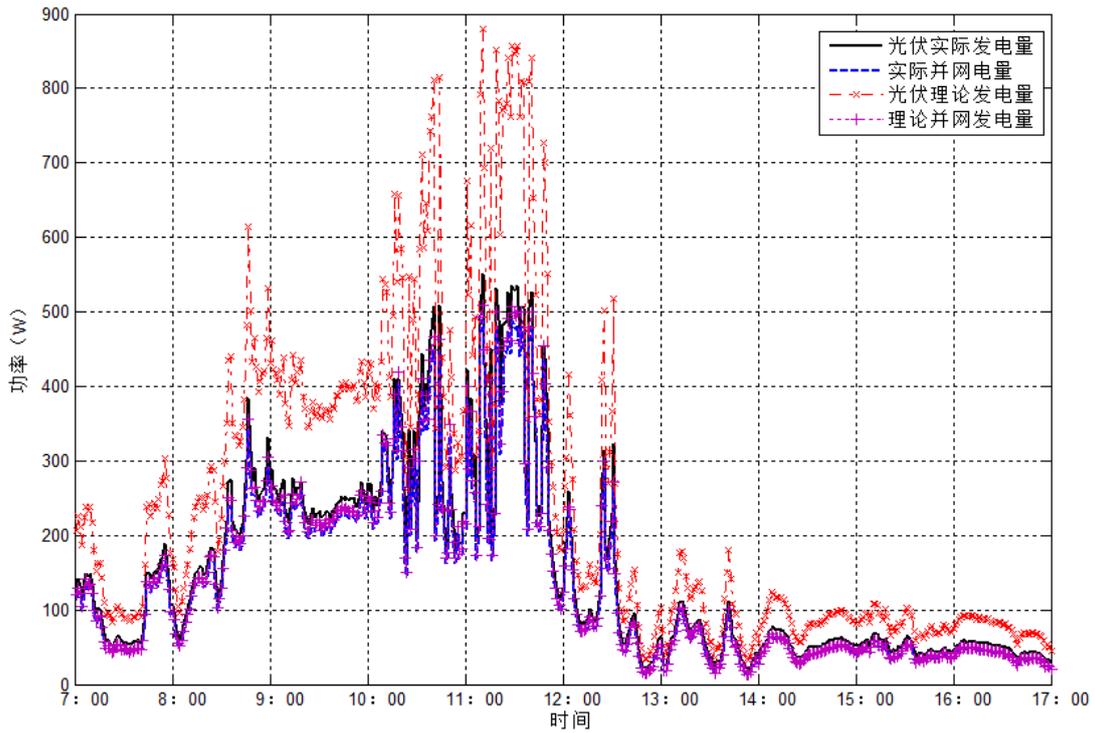


图 5-31 三个光伏板被短路实验的实际发电量与理论发电量

由图 5-31 可以得知，三块光伏板被短接后，其实际光伏发电量低于理论发电量，在达到故障诊断流程的判断条件时，实时性故障流程诊断为故障发生。

这两个实验的故障检测情况在故障诊断软件中的输出结果如图 5-32 所示。



图 5-32 光伏板被短路实验的故障诊断软件输出结果

(3) 逆变器关闭

本次实验的故障方式如图 5-33 所示。逆变器并网插头拔出，造成逆变器并网开路，逆变器关闭故障。



图 5-33 逆变器关闭实验的故障方式

本次实验条件下的环境参数如图 5-34 和图 5-35 所示，光伏输出参数如图 5-36、图 5-37、图 5-38 所示，实际发电情况与理论发电情况对比如图 5-39 所示。

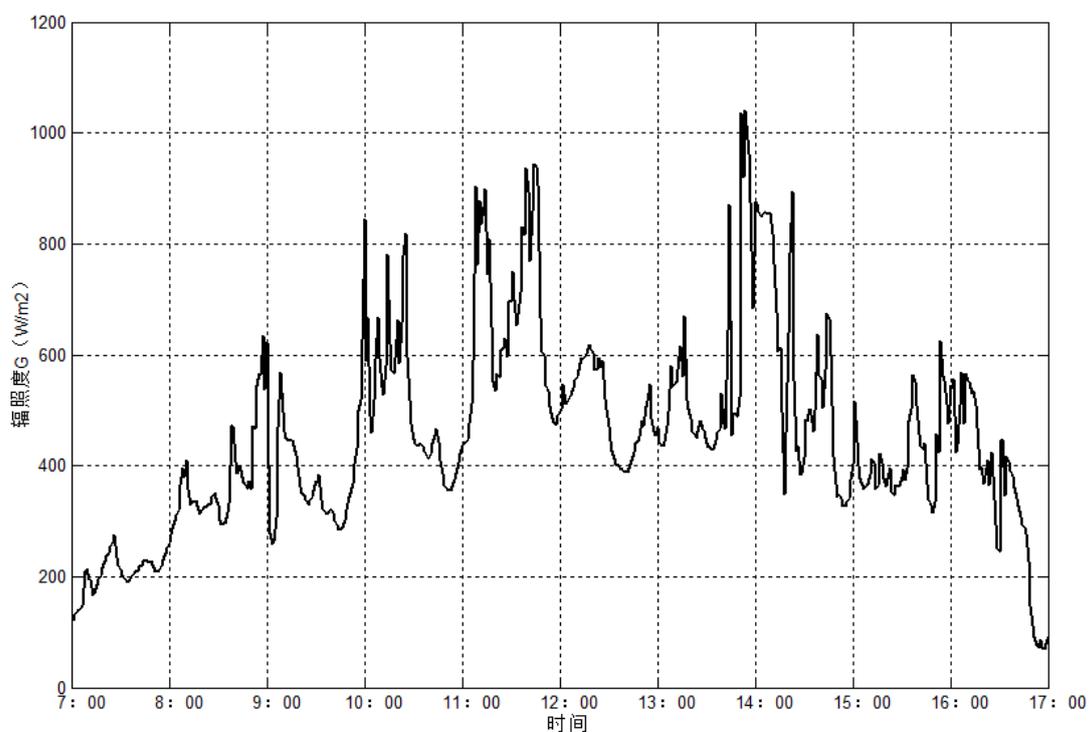


图 5-34 逆变器关闭实验的辐照度参数

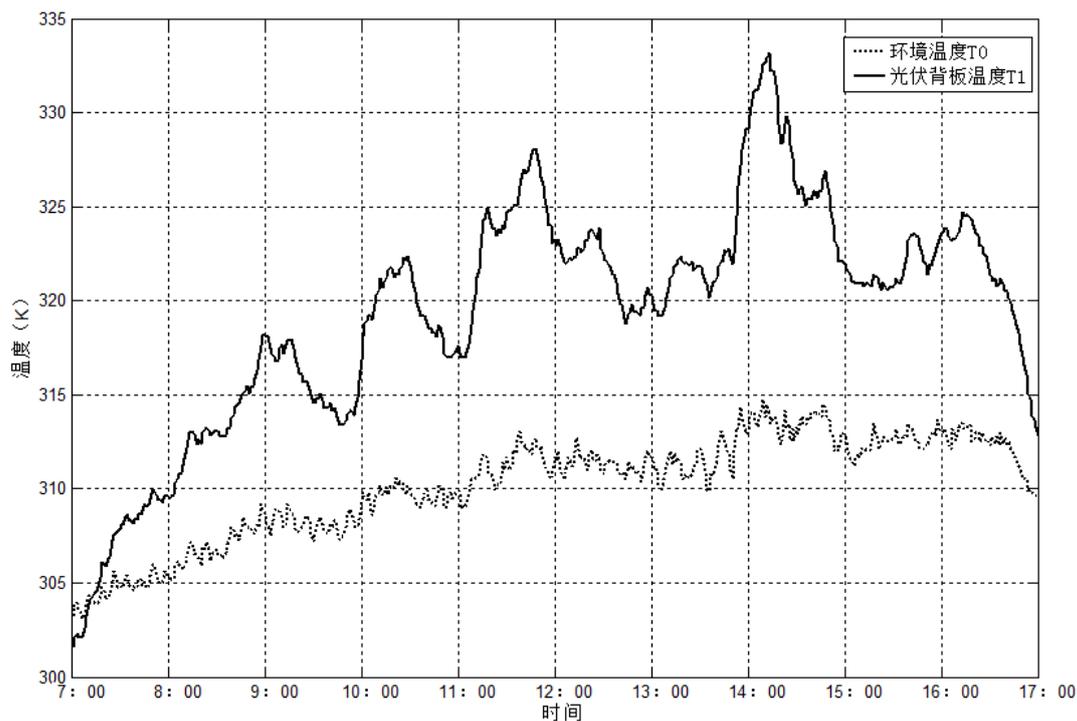


图 5-35 逆变器关闭实验的温度参数

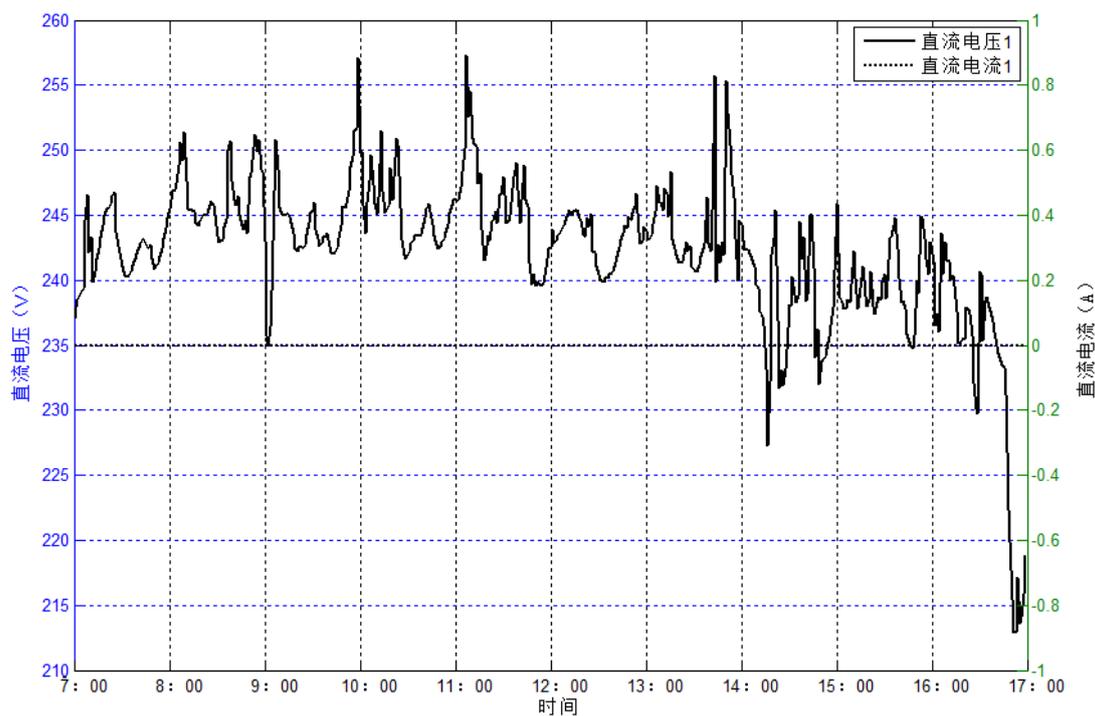


图 5-36 逆变器关闭实验的第一主支路输出电压和电流

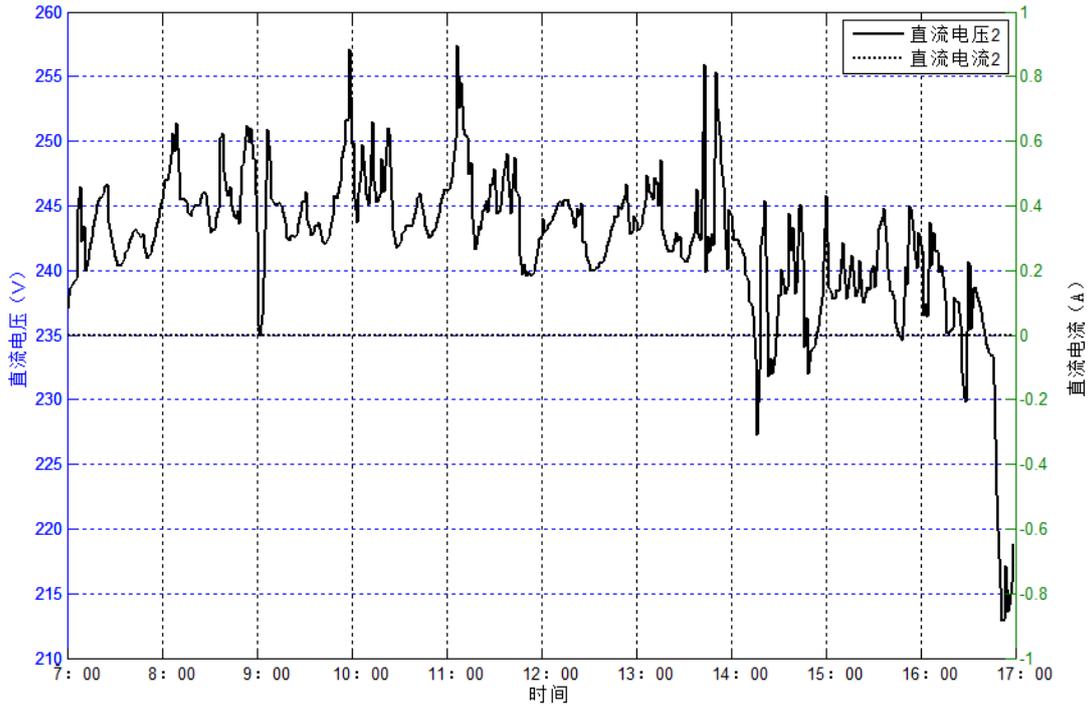


图 5-37 逆变器关闭实验的第二主支路输出电压和电流

由图 5-36 和图 5-37 可以得知，在逆变器关闭或并网线路开路的情况下，光伏阵列有开路电压，但其输出电流为零。

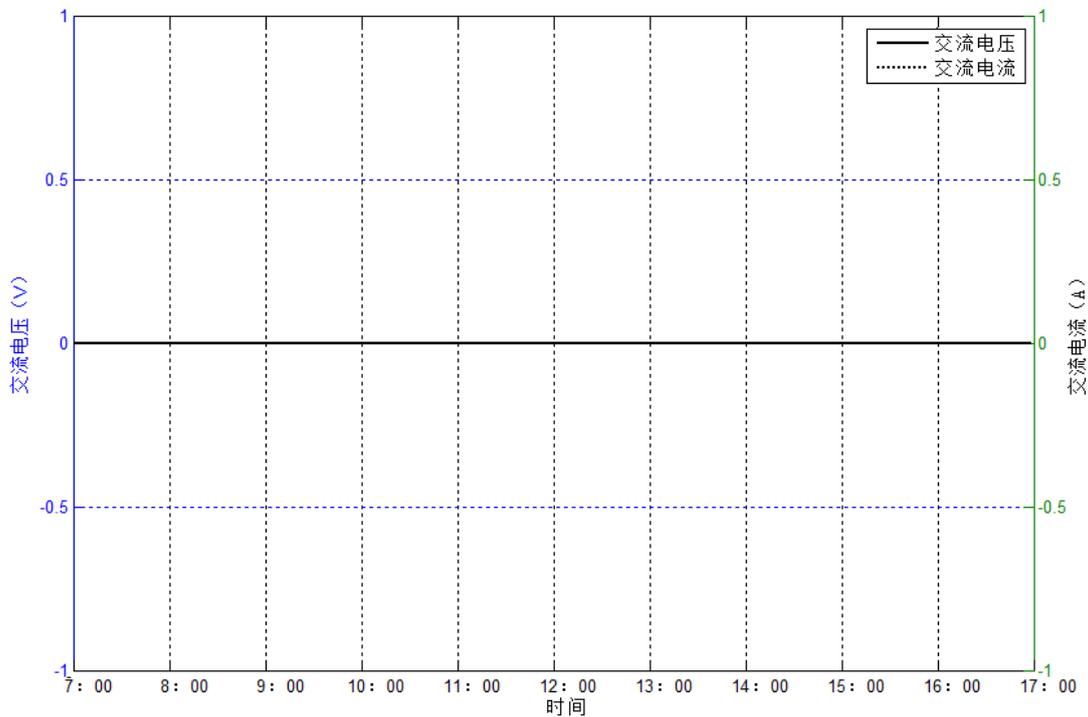


图 5-38 逆变器关闭实验的逆变器输出电压和电流

由图 5-38 可以得知，逆变器关闭或并网线路开路，逆变器输出电压、电流均为零。

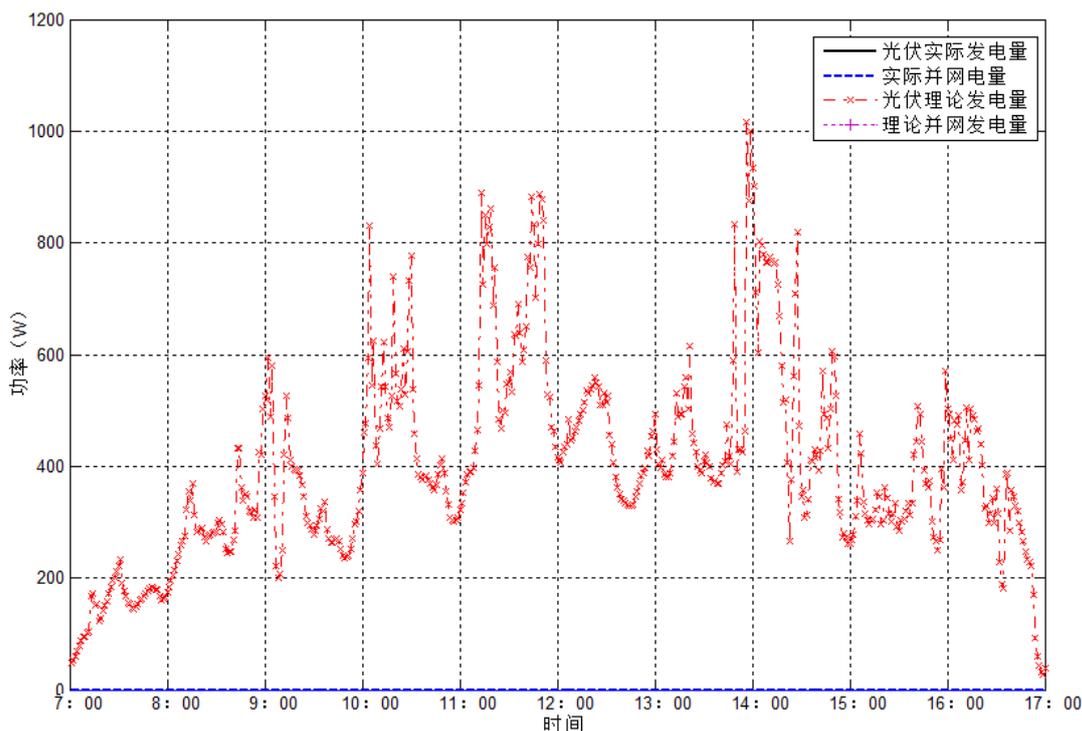


图 5-39 逆变器关闭实验的实际发电量与理论发电量

由图 5-39 可以得知，逆变器关闭或并网线路开路时，光伏实际发电量、理论并网发电量和实际并网发电量均为零左右，实时性故障流程诊断为故障逆变器开路。

这个实验的故障检测情况在故障诊断软件中的输出结果如图 5-40 所示。

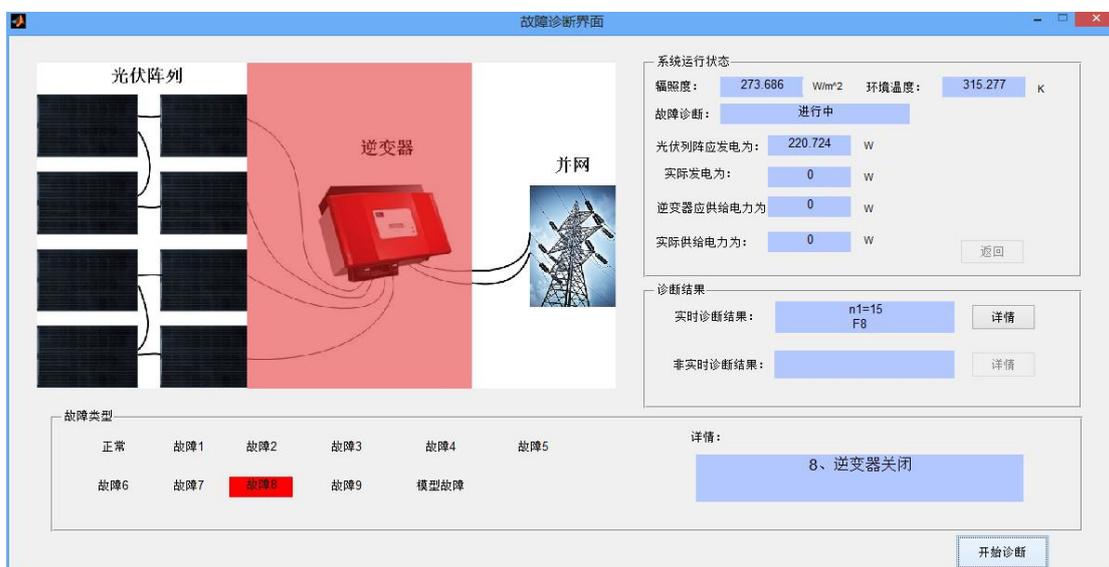


图 5-40 逆变器关闭实验的故障诊断软件输出结果

(4) 周期遮挡

本次实验的故障方式如图 5-41 所示。在正午左右，用白纸覆盖光伏板，覆盖时间长为半小时左右，连续三天在同一时间段进行此项操作，造成周期遮挡故障。



图 5-41 周期遮挡实验的故障方式

本次实验条件下的环境参数如图 5-42 和图 5-43 所示，光伏输出参数如图 5-44、图 5-45、图 5-46 所示，实际发电情况与理论发电情况对比如图 5-47 所示。

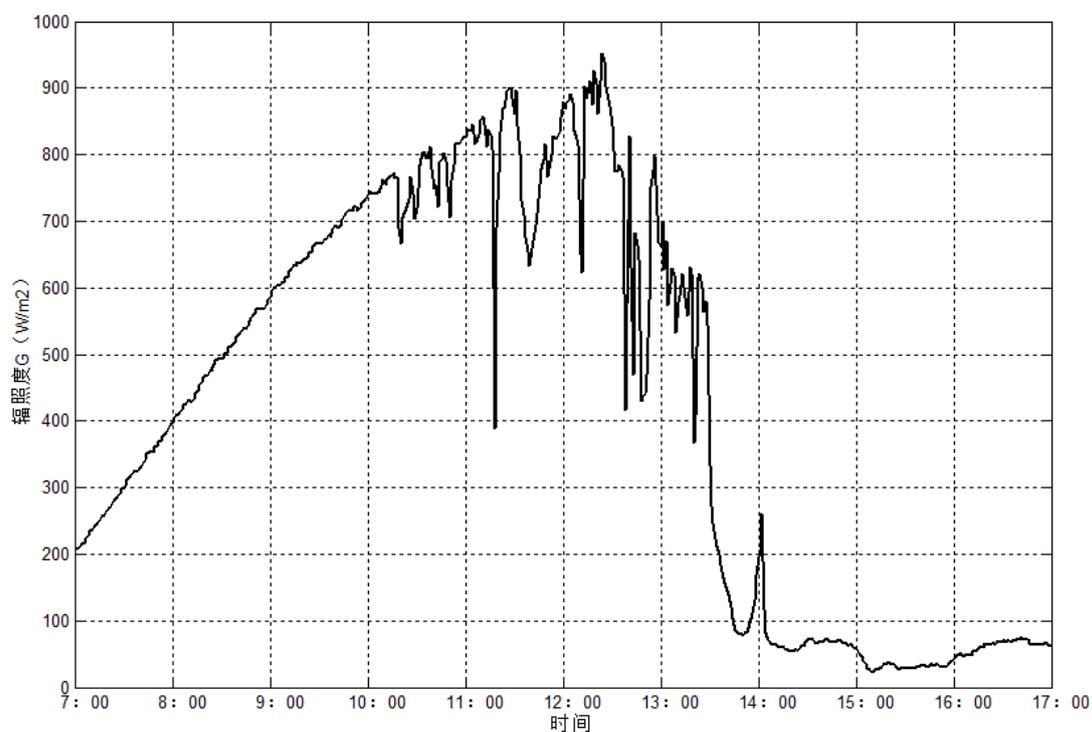


图 5-42 周期遮挡实验的辐照度参数

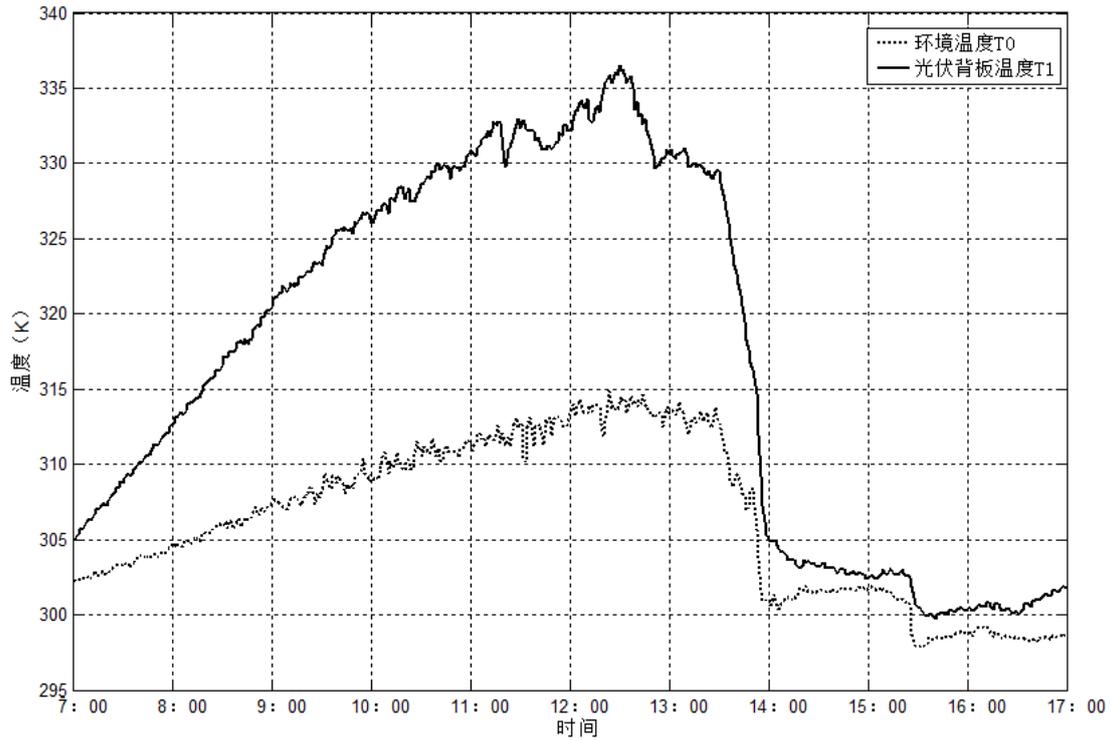


图 5-43 周期遮挡实验的温度参数

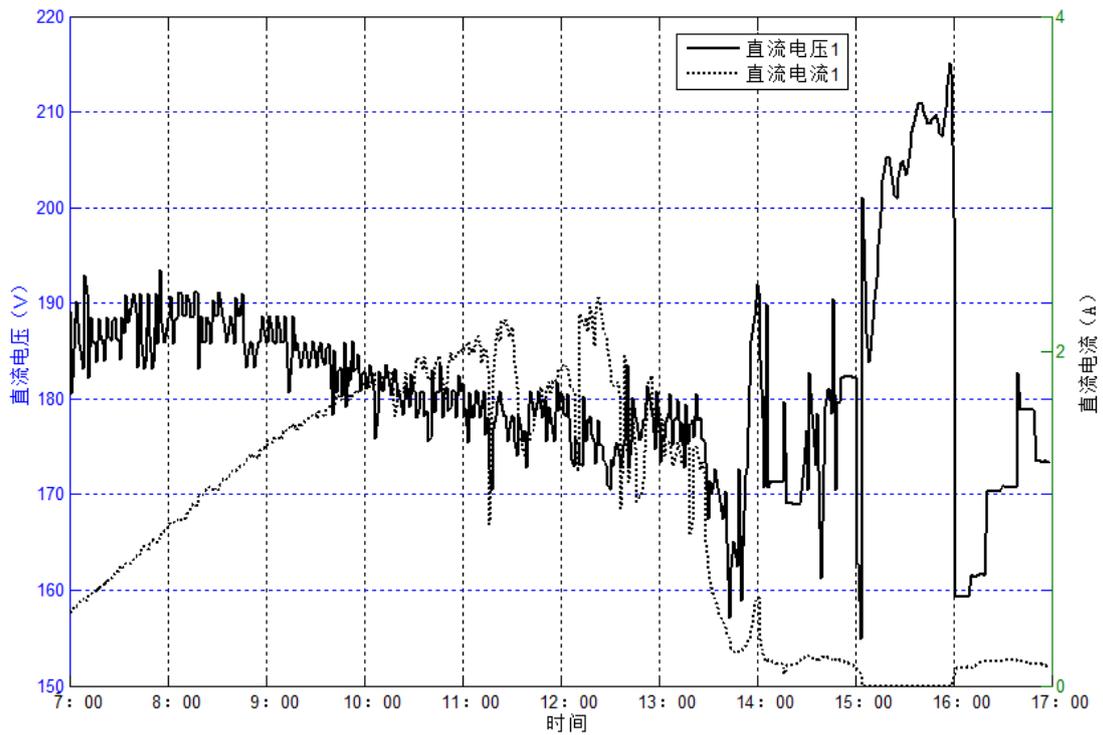


图 5-44 周期遮挡实验的第一主支路输出电压和电流

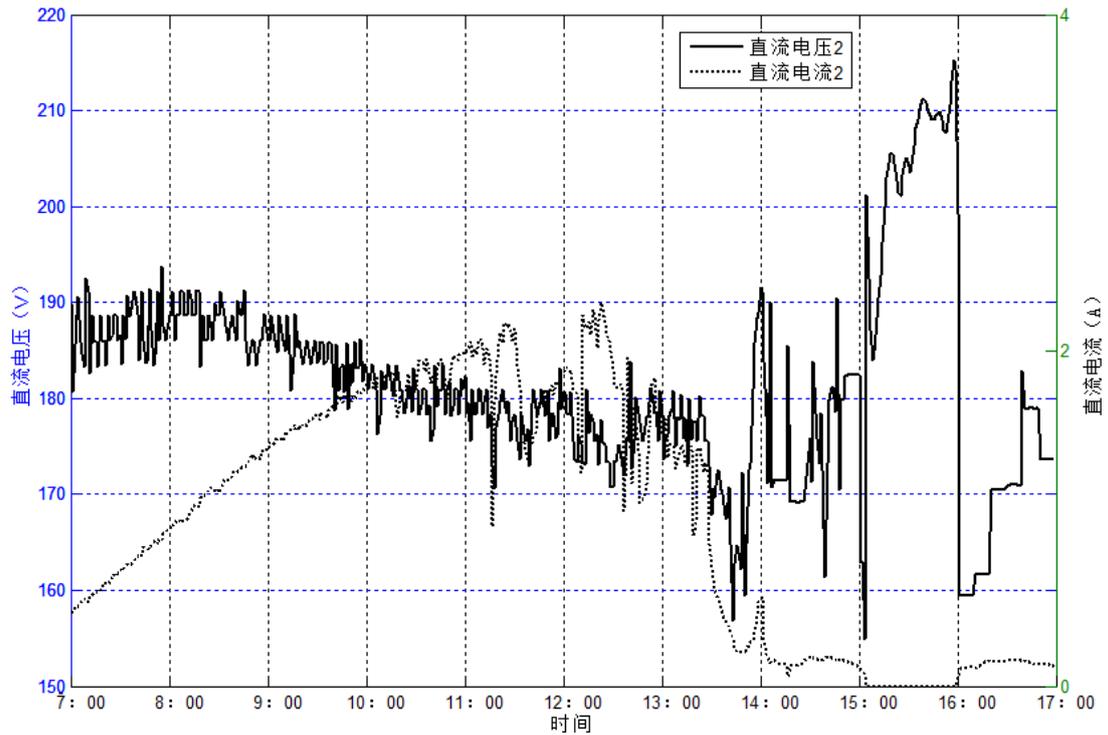


图 5-45 周期遮挡实验的第二主支路输出电压和电流

由图 5-44 和图 5-45 可以得知，在发生周期遮挡时（约为 12 点前后），光伏输出突然降低。同时可以得知，光伏系统在下午 15 点至 16 点期间也发生了一段时间的逆变器关闭的故障

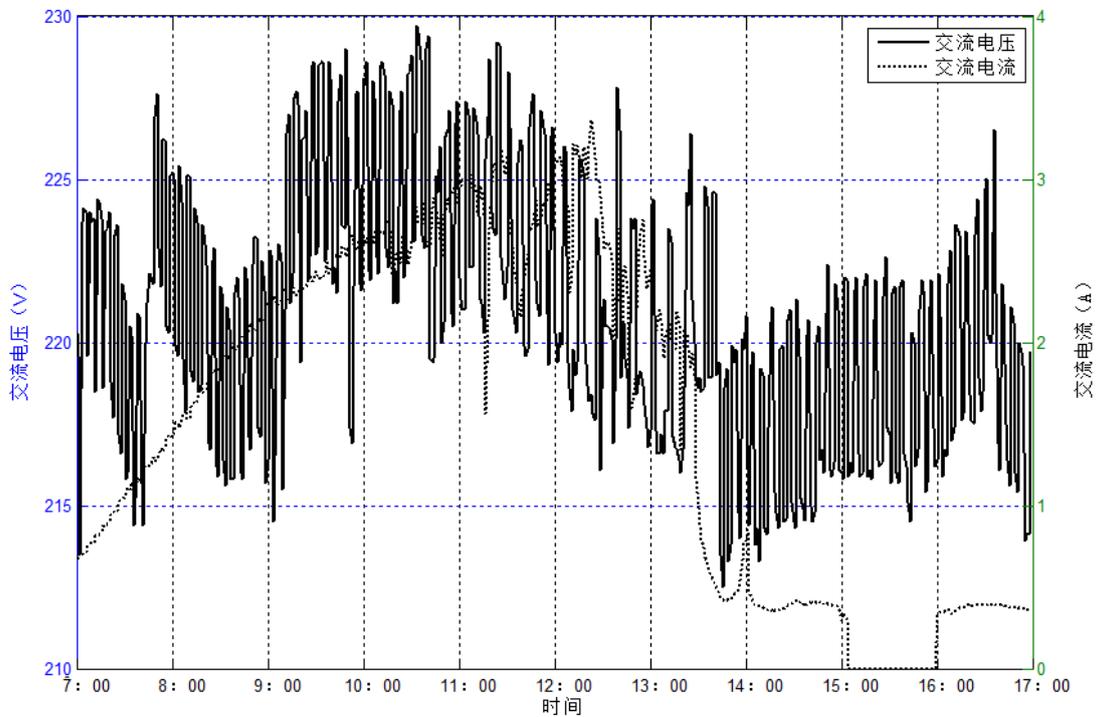


图 5-46 周期遮挡实验的逆变器输出电压和电流

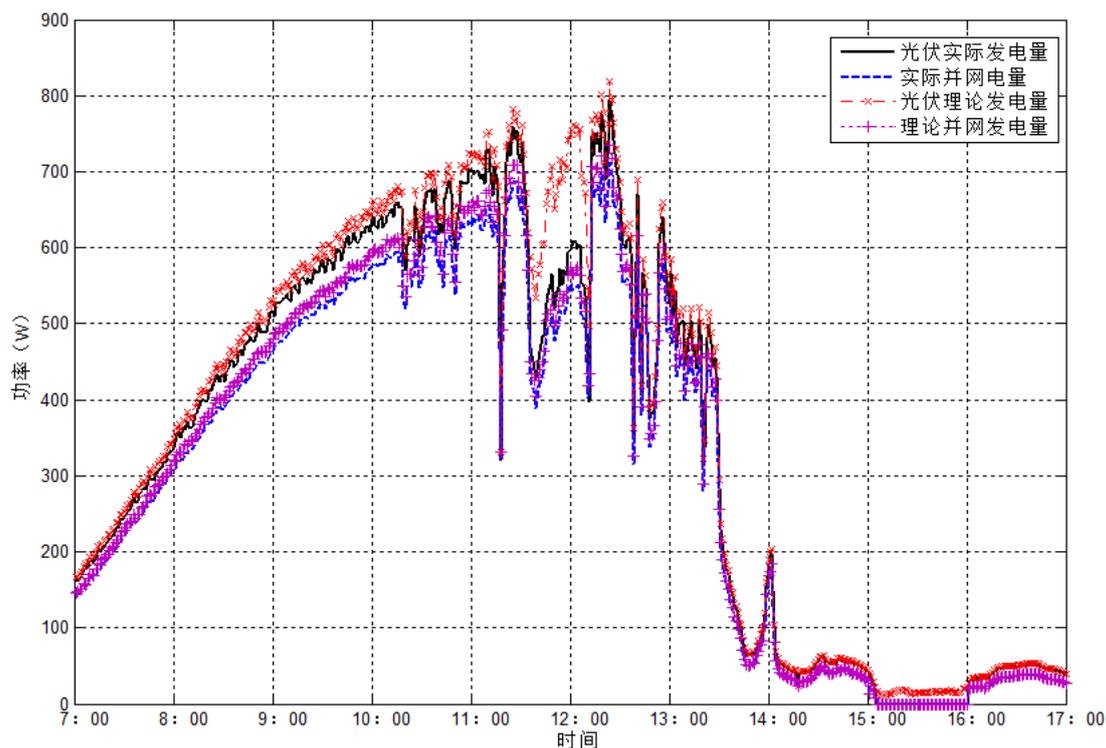


图 5-47 周期遮挡实验的实际发电量与理论发电量

由图 5-47 可以得知，在未发生周期遮挡时，实际输出与理论输出应在正常范围内，在 12 点左右发生遮挡时，光伏理论发电量明显高于实际发电量，如果连续几天在同一时间段内发生这种情况，则在时序性诊断中，诊断为周期遮挡。同时可以得知，在本次实验的 15 点到 16 点期间，发生了约一个小时的逆变器关闭故障，这可能是由于当时辐照度值过低，逆变器停止工作造成的。

(5) 老化、积灰和污物

本次实验的故障方式如图 5-48 所示。经若干天自然积灰后，光伏板表面布满灰尘，在此状况下进行老化、积灰和污物的故障实验。



图 5-48 老化、积灰和污物实验的故障方式

本次实验条件下的环境参数如图 5-49 和图 5-50 所示，光伏输出参数如图 5-51、图 5-52、图 5-53 所示，实际发电情况与理论发电情况对比如图 5-54 所示。

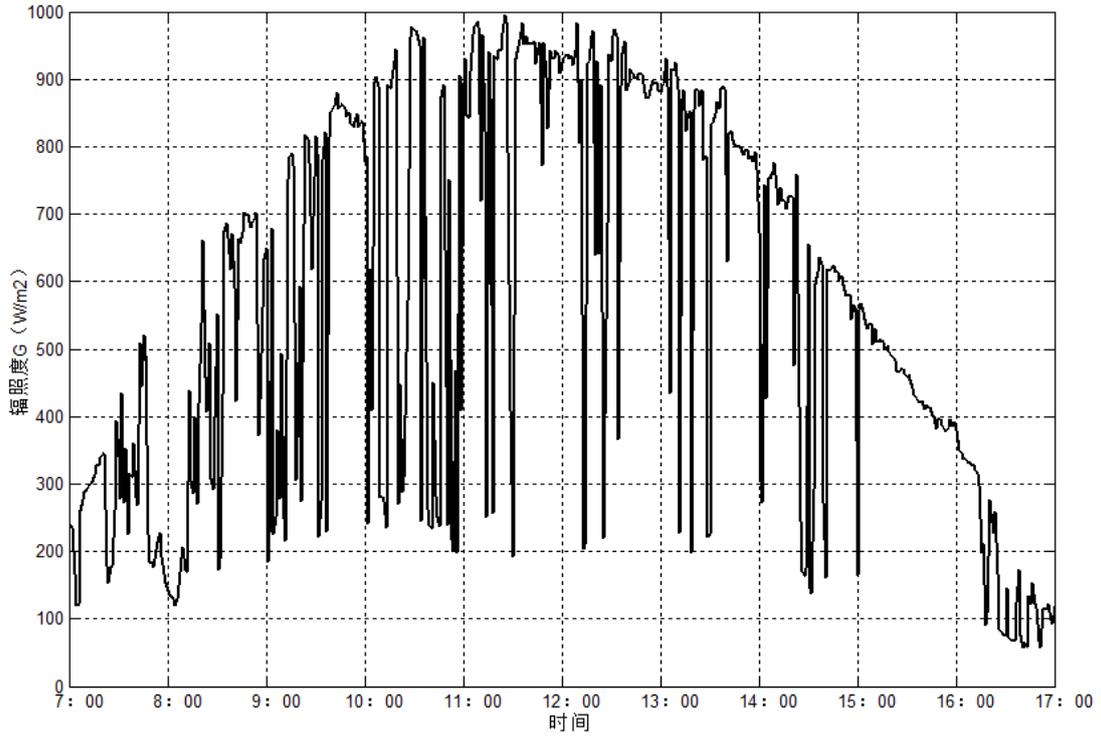


图 5-49 老化、积灰和污物实验的辐照度参数

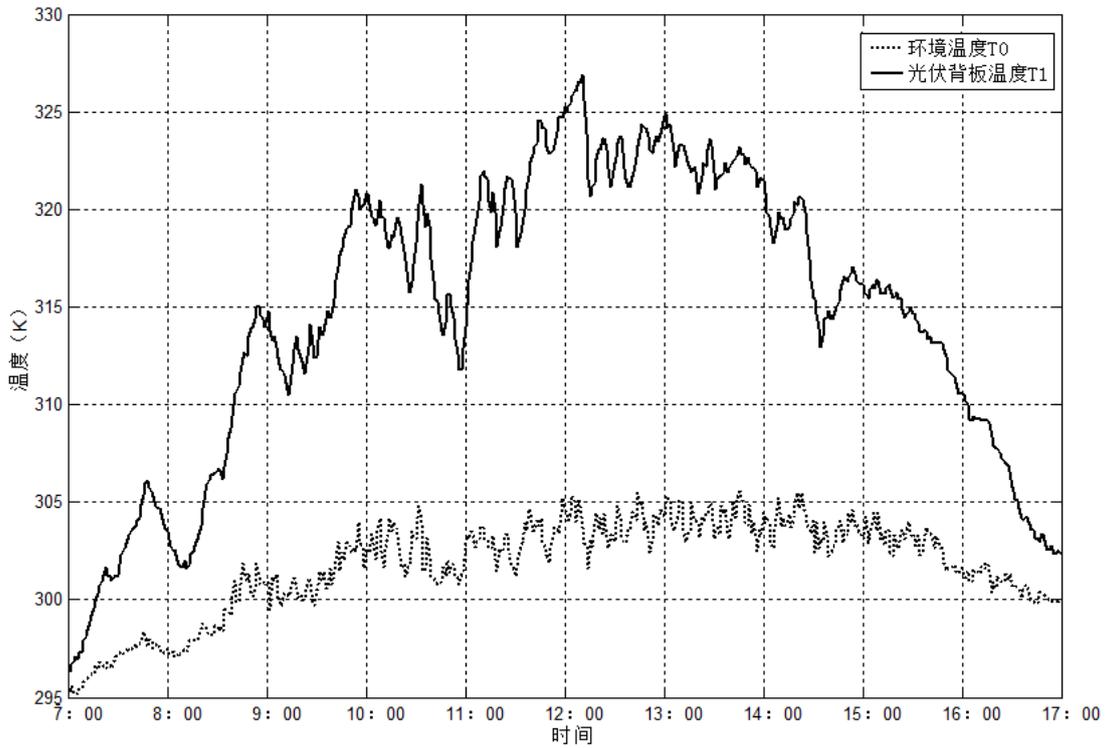


图 5-50 老化、积灰和污物实验的温度参数

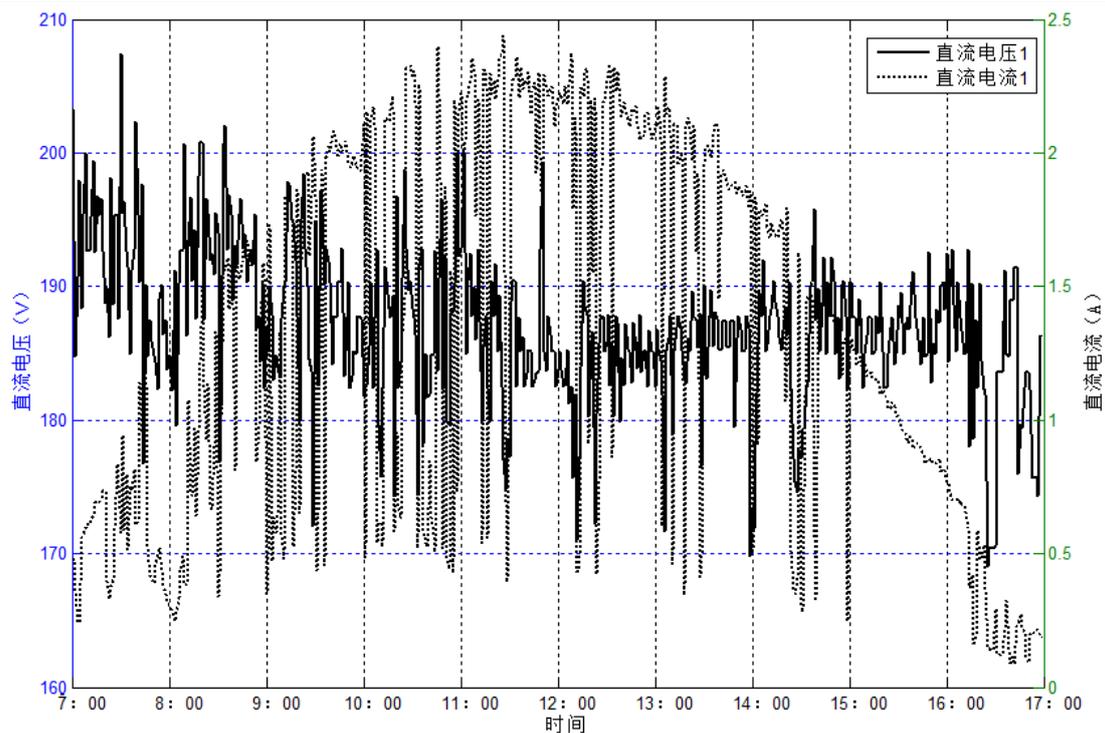


图 5-51 老化、积灰和污物实验的第一主支路输出电压和电流

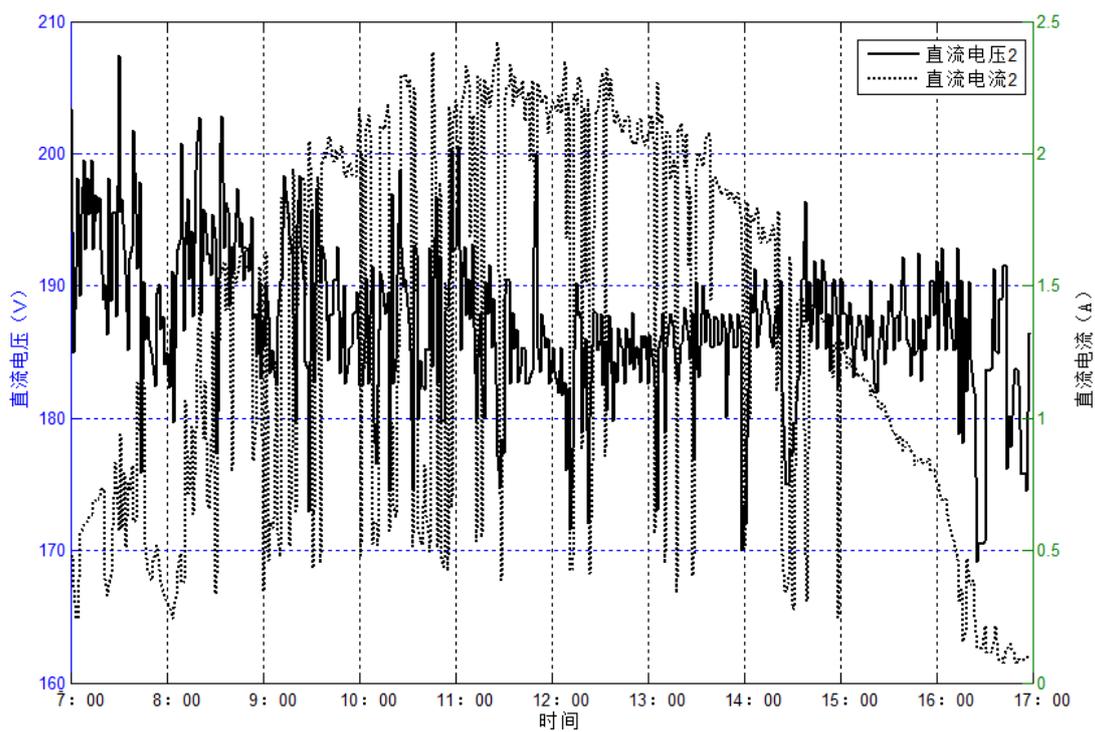


图 5-52 老化、积灰和污物实验的第二主支路输出电压和电流

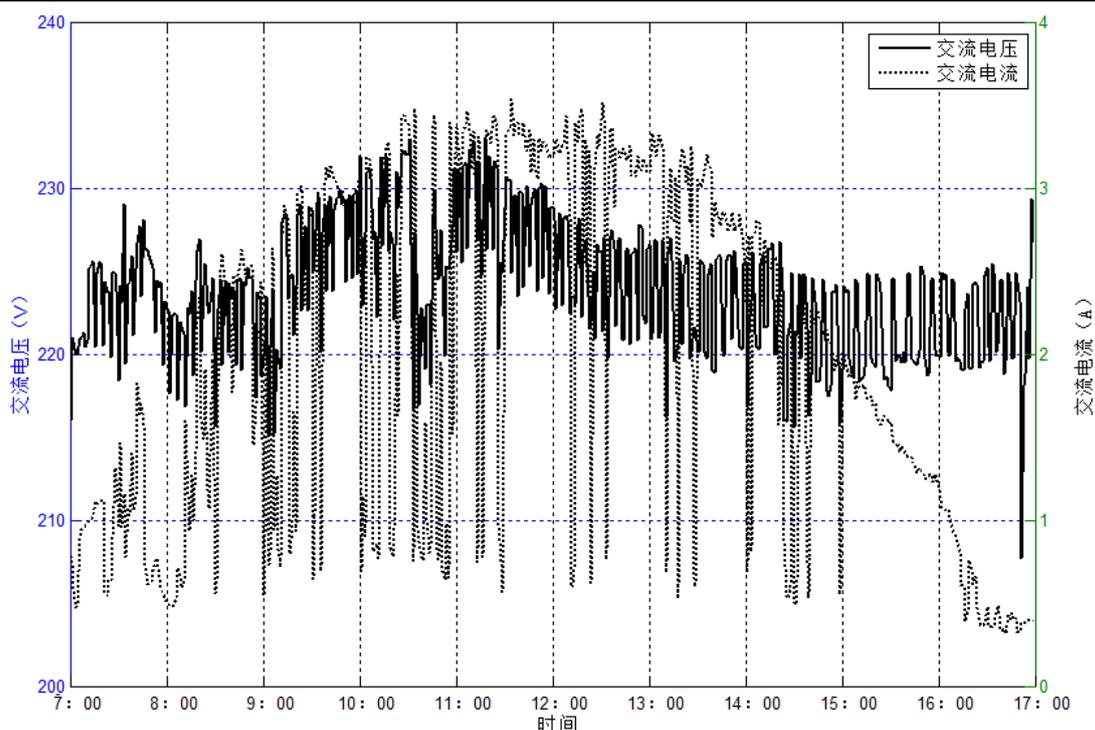


图 5-53 老化、积灰和污物实验的逆变器输出电压和电流

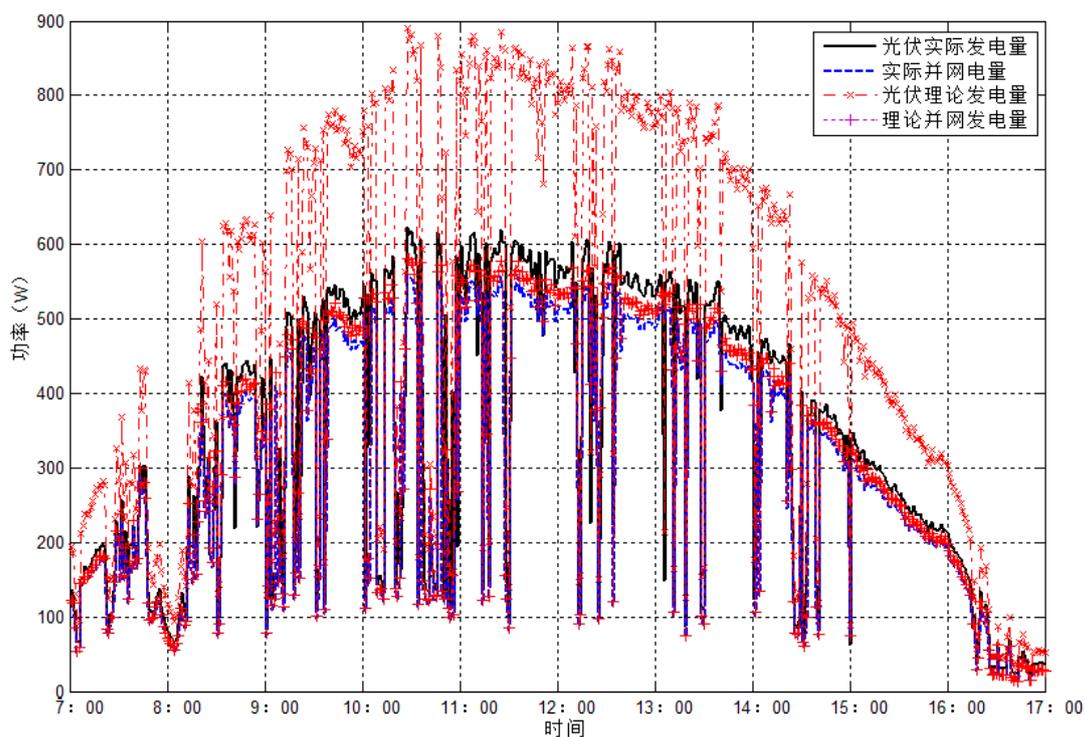


图 5-54 老化、积灰和污物实验的实际发电量与理论发电量

由图 5-54 可以得知，光伏系统的实际输出长时间低于理论输出值，若连续表现为实际输出低于理论输出，则在时序性诊断中，诊断为老化、积灰和污物。

故障 MPPT 失效和逆变器能量失衡由于是逆变器内部电路故障所导致的，无法在不破坏逆变器电路的情况下进行这两个故障的实验，所以本文未对这两个故障进行实测实验。

以上实验及结果证实,本文所建立的光伏数据采集与监控系统能够有效的采集与记录光伏发电系统实时数据,光伏系统模型能够有效的模拟出光伏系统在一定环境参数下的理论发电量,光伏故障诊断系统能够在发生不同故障时有效的进行故障诊断及分类报警。

第6章 总结与展望

6.1 总结

本文针对建筑用小型光伏发电故障诊断系统进行了以下的研究与工作。

(1)、建立了一套完整的并网型光伏发电系统模型，其中主要包括一种新型的带有两个修正参数的四参数型光伏电池模型、最大功率跟踪模型、逆变器功率输入输出模型，还包括光伏电池老化模型、温度参数模型等。这套模型系统能够准确的模拟出在一定环境参数下，光伏阵列的直流输出和逆变器并网的交流输出，为故障诊断系统建立比对基础。

(2)、对光伏系统可能出现的故障进行了系统的分类，将光伏系统的故障以三大部分为基础分为了九种故障。依据这种故障分类方法及每种故障各自的特征，建立了一套光伏系统故障诊断算法。根据故障的不同特性，将故障分为了实时性故障和时序性故障，对这两类故障，分别建立了相应的故障诊断流程。

(3)、建立了两套软件系统。一套是光伏系统实时数据采集与监控软件，用于实时记录光伏系统运行时的环境参数与系统参数；另一套是依据故障诊断算法及故障诊断流程建立的光伏故障诊断软件，用于实现实时状态或离线状态下，光伏系统运行状态的检测与诊断。

(4)、建立了一套并网型光伏发电系统实验平台，其包括用于光伏系统运行数据采集的电表，及环境参数采集仪表及模块。基于以上建立的光伏发电系统实验平台，进行了光伏参数提取实验及故障诊断系统验证实验。光伏模型系统中需要的参数有些无法从光伏制造商的技术文件中提取，所以本文用实验方法提取了相关参数。对可进行实验验证的故障类型，进行了相应的人为故障检验，结果反映本文所建立的光伏故障诊断系统能够有效的实现系统运行监测及故障诊断与警报。

6.2 展望

本文所进行的研究与工作，仍有许多不足和可以补充之处。

(1)、本文所建立的光伏模型系统是基于并网型光伏发电系统进行开发与建立的，光伏系统还有其他类型，如离网型光伏发电系统，而且现建立的光伏系统中未有蓄电池模块，这些都是现在光伏模型系统可以进行的扩展与开发之处。

(2)、本文所建立的光伏模型系统有些分块模型还是比较粗略，例如温度参数模型，这一模型就可依据传热学理论进行细化，得到更精确的光伏电池温度，使整个光伏系统更加精确。

(3)、本文建立了两套软件系统分别用于实现数据采集和光伏系统故障诊断，这两套软件可以开发为一套软件，这样既能防止两套软件同时读取数据时造成软件关闭的问题，又可以简单明了的实现整个系统的功能要求。

(4)、本文所提出的故障分类方法仍可以行细化，故障诊断方法可进行优化，可以引入新的参数，用于诊断出故障系统的更多信息，好比说系统开路时，诊断出哪一条线路开路，甚至于开路位置在何处，这对于大型光伏系统是一个非常有益于故障排除的诊断信息。

致谢

今天硕士研究生的学习即将结束，两年多的研究生学习生活使我受益匪浅。这两年中，我得到了许多的关怀和帮助，现在要向他们表达我最诚挚的谢意。

首先，我要深深感谢我的导师许鹏老师。许老师为人谦和，平易近人。在论文的选题、搜集资料和写作阶段，许老师都倾注了极大的关怀和鼓励。在我初稿完成之后，许老师又在百忙之中抽出空来对我的论文认真的批改，字字句句把关，提出许多中肯的指导意见，使我在研究和写作过程中不致迷失方向。他的治学之风和对事业的孜孜追求将影响和激励我的一生，他对我的关心和教诲我更将永远铭记。借此机会，我谨向许老师致以深深地谢意。

其次，我还要感谢韩延民博士，正是因为有了他高质量的教导，我才能在这几年的学习过程中汲取专业知识和迅速提升能力；我还要感谢我的班主任明岗老师这几年来对我们的关心、帮助与支持；同时也感谢这两年来与我互勉互励的A434办公室的诸位师弟师妹们，在我们的共同努力之下，我们始终拥有一个良好的生活环境和一个积极向上的学习氛围，能在这样一个团队中度过，是我极大的荣幸。

我还要感谢我的家人，他们默默的给予我最大的支持，此份恩情，我了然于心，此生必实现他们的愿景及我心中所给予的承诺。

最后，我要感谢我的母校同济大学，在这所学校里，我渡过了我人生中最宝贵的七年，在这里我获得了知识、得到了成长，在这里我相识了新的朋友，在这里有我的收获也有我的遗憾。现在即将真正的离开我的母校了，想到此处，感伤之情总会不绝的涌上心头。以后的我会更加努力，用自己的成绩来为母校增光，回报社会和国家的培养，报答父母的恩情。

2013年12月于同济大学

参考文献

- [1] 李申生.世界范围的常规能源危机.太阳能,2003,(2):15-19.
- [2] 张耀明.中国太阳能光伏发电产业的现状与前景.能源研究与利用,2007,(1):1-6.
- [3] 王长贵,王斯成.太阳能光伏发电实用技术,北京:化学工业出版社,2005.
- [4] H. Patel, V. Agarwal. MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23 (1):302-310
- [5] S. K. Firth, K. J. Lomas, S. J. Rees. A simple model of PV system performance and its use in fault detection. Solar Energy, 2010(84):624-635
- [6] K. H. Chao, S. Ho, M. Wang. Modeling and fault diagnosis of a photovoltaic system. Electric Power Systems Research, 2008(78): 97-105.
- [7] T. Takashima, J. Yamaguchi, M. Ishida. Disconnection detection using earth capacitance measurement in photovoltaic module string. Photovoltaic: Research and Applications, 2008 (16):669-677.
- [8] T. Takashima, J. Yamaguchi, et al. Experimental studies of fault location in PV module strings. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2009 (93): 1079-1082.
- [9] Y. Yagi, H. Kishi, R. Hagihara, et al. Diagnostic technology and an expert system for photovoltaic systems using the learning method. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2003(75):655-663.
- [10] Y. Wu, Q. Lan, Y. Sun. Application of BP Neural Network Fault Diagnosis in Solar Photovoltaic System. in Proceeding of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, August 9-12, 2009.
- [11] Y. Ueda, K. Kurokawa, et al. Performance analysis of various system configurations on grid-connected residential PV systems. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2009(93): 945-949.
- [12] T. Yamada, H. Nakamura, et al. Reflection loss analysis by optical modeling of PV module. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2001(67):405-413.
- [13] M. Park and Y. Keun. A technical novel real-time simulation of photovoltaic generation system using RTDS. Energy Converts, 2004,19(1):164-169
- [14] E. Dyk, A. R. Gxasheka, E. L. Meyer. Monitoring current-voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules. Renewable Energy, 2005(30):399-411
- [15] 黄宝圣.太阳能电池的新进展:化学教育,2002,(1):7-9
- [16] 黄亚平.太阳能光伏发电研究现状与发展前景探讨.广东白云学院学报, 2007(14):13-118
- [17] N. Toshihiko, T. Shigenori, Short-Current Pulse Based Adaptive Maximum-Power-Point Tracking for Photovoltaic Power Generation System, Nagaoka University of Technology Department of Electrical, Electronics and Information Engineering, IEEE 2000.Vol.1,pp:157-162
- [18] 崔岩,黄宏生,李大勇等,太阳能光伏系统最大功率跟踪器的研究,哈尔滨理工大学学报, Vol.10,No.6,2005,pp:8-11
- [19] 李炜,朱新坚,光伏系统最大功率点跟踪控制仿真模型,计算机仿真, Vol.23,No.6,2006, pp:239-243

- [20] 刘辉, 吴麟章, 江小涛等, 太阳能电池最大功率跟踪技术研究, 武汉科技学院学报, Vol.18 No.8,2005,pp:12-15
- [21] M. A. de Blas, J. L. Torres, E. Prieto, et al. Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices. *Renewable Energy*, 2002, 25(3): 371-380.
- [22] J. H. Jung, S. Ahmed. Real-time simulation model development of single crystalline photovoltaic panels using fast computation methods. *Solar Energy*, 2012, 86(6): 1826-1837.
- [23] 苏建徽, 余世杰, 赵为等. 硅太阳能电池工程用数学模型. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.
- [24] 翟载腾, 程晓航, 杨臧健等. 太阳能电池一般电流模型参数的解析解. 太阳能学报, 2009, 30(8): 1078-1082.
- [25] R. P. Vengatesh, S. E. Rajan. Investigation of cloudless solar radiation with PV module employing Matlab-Simulink. *Solar Energy*, 2011, 85(9): 1727-1734.
- [26] A. N. Celik, N. Acikgoz. Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. *Applied Energy*, 2007, 84(1): 1-15.
- [27] V. L. Brano, A. Orioli, G. Ciulla, et al. An improved five-parameter model for photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94(8): 1358-1370.
- [28] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri. Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(2): 586-594.
- [29] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽等. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [30] H. Tian, F. Mancilla-David, K. Ellis, et al. A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels, *Solar Energy*, 2012, 86(9): 2695-2706.
- [31] A. Chouder, S. Silvestre, N. Sadaoui, et al. Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, 20(1): 46-58.
- [32] W. Shockley. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors. *Bell System Technical Journal*, 1949(28):435-489.
- [33] J. Bishop. Computer simulation of the effect of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits. *Solar Cells*, 1988(25):73-89.
- [34] G. Araujo, E. Sanchez. A new method for experimental determination of the series resistance of a solar cell. *Electron Devices*, 1982(29):1511-1513.
- [35] M. Chegaar, Z. Ouennoughi, A. Hoffmann. A new method for evaluating illuminated solar cell parameters. *Solid-state Electronics*, 2001(45):293-304.
- [36] G. Walker. Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model. *Electrical and Electronics Engineering*, 2001(21):49-55.
- [37] W. Xiao, W. Dunford, A. Capel. A novel modeling method for photovoltaic cells. *Power Electronics*, 2004(3):1950-1956.
- [38] T. Shatter, M. Elhagry. Sensitivity analysis of the photovoltaic model parameters. *Circuits and Systems*, 1999(2):914-917
- [39] J. Jung, S. Ahmed. Real-time simulation model development of single crystalline photovoltaic panels using fast computation methods. *Solar Energy*, 2012(86):1826-1837
- [40] H. Tian, K. Ellis, et al. A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels.

- Solar Energy, 2012(86):2695-2706
- [41] R. Kadri, H. Andrei, et al. Modeling of the photovoltaic cell circuit parameters for optimum connection model and real-time emulator with partial shadow conditions. Energy, 2012(42):57-67
- [42] V. Brano, A. Orioli, et al. An improved five-parameter model for photovoltaic modules. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010(94):1358-1370
- [43] A. Celik, N. Acikgoz. Modeling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. Applied Energy, 2007(84):1-15
- [44] C. Qi, Z. Ming. Photovoltaic Module Simulink Model for a Stand-alone PV System. Physics Procedia, 2012(24):94-100
- [45] M. Wolf, G. Noel, R. Stirn. Investigation of the double exponential in the current voltage characteristics of silicon solar cells. Electron Devices, 1977(24):419-428.
- [46] V. Quaschnig, R. Hanitsch. Numerical simulation of photovoltaic generators with shaded cells. in Universities Power Engineering Conference, 1995(30):583-586.
- [47] D. Chan, J. Phang. Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics. Electron Devices, 1987(34):286-293.
- [48] J. A. d. Cueto. Method for analyzing series resistance and diode quality factors from field data Part II: Applications to crystalline silicon. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1999(59) 393-405.
- [49] K. Ishaque, Z. Salam, et al. Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011(19):1613-1626.
- [50] K. Ishaque, Z. Salam, et al. A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model. Solar Energy, 2011(85):2217-2227.
- [51] A. Chouder, S. Silvestre. Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis. Energy Conversion and Management 2010(51):1929-1937.
- [52] 李蔚. 太阳能光伏技术与建筑应用. 建筑电气, 2007, 26(9):16-20.
- [53] 赵春江, 朱元昊, 包大年等. 200kW 太阳能光伏发电系统设计实践. 节能技术, 2007, 25(4):326-329.
- [54] 刘刚. 太阳能光伏阵列数学模型的综述. 科技信息, 2010, (4):131-133.
- [55] 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. 计算机仿真, 2010, 27(1):266-270.
- [56] 饶建业, 李永东, 李谦等. 太阳能电池阵模拟器的设计和研究. 电力电子技术, 2007, 41(9):12-14, 23.
- [57] 朱小强, 杜燕, 苏建徽等. 太阳能电池阵列光伏特性测试的研究和应用. //中国高等学校电力系统及其自动化专业第20届学术年会论文集(上册). 2004:485-487.
- [58] 崔岩, 蔡炳煌, 李大勇等. 太阳能光伏模板仿真模型的研究. 系统仿真学报, 2006, 18(4):829-831, 834.
- [59] 任航, 叶林. 太阳能电池的仿真模型设计和输出特性研究. 电力自动化设备, 2009, 29(10):112-115.
- [60] 吴海涛, 孔娟, 夏东伟等. 基于 MATLAB/Simulink 的光伏电池建模与仿真. 青岛大学学报(工

- 程技术版),2006,21(4):74-77.
- [61]周昶,叶方铭,马磊等.基于 Matlab 的光伏电池半物理仿真系统的研究.//中国电源学会第 18 届全国电源技术年会论文集.2009:351-352,336.
- [62]刘翼,荆龙,童亦斌等.基于 Simulink 的光伏电池组件建模和 MPPT 仿真研究.科技导报,2010,28(18):94-97.
- [63]周俊冬,马明.局部阴影条件下光伏电池输出特性实验研究.科技信息,2010,(31):51-52.
- [64]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.太阳能,2008,(5):27-28.
- [65]张臻,沈辉,朱家劲等.太阳电池组件阴影遮挡问题实验研究.//第十届中国太阳能光伏会议论文集.2008:964-971.
- [66]刘邦银,段善旭,康勇等.局部阴影条件下光伏模组特性的建模与分析.太阳能学报,2008,29(2):188-192.
- [67]兰琴丽,吴雨川.太阳能光伏发电智能诊断系统研究综述.武汉科技学院学报,2008,21(4):23-26.
- [68]杨维翰,王培珍,周雷等.太阳能光伏阵列故障诊断的研究.安徽工业大学学报(自然科学版),2003,20(4):345-348.
- [69]胡义华,陈昊,徐瑞东等.基于最优传感器配置的光伏阵列故障诊断.中国电机工程学报,2011,31(33):19-30.
- [70]兰琴丽,章乐多.BP 神经网络在光伏发电系统故障诊断中的应用.通信电源技术,2011,28(4):38-40.

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

侯金明, 男, 1988 年 5 月生。

2011 年 7 月毕业于同济大学 建筑环境与设备工程专业 获学士学位。

2011 年 9 月入同济大学读硕士研究生, 就读于供热、供燃气、通风及空调工程专业。

已发表论文:

- [1] 侯金明, 许鹏. 正常光照条件下全工况光伏阵列通用 Matlab/Simulink 仿真模型. 太阳能, 2013, Vol. 223(11):31-36
- [2] 侯金明, 许鹏. 基于四参数模型的光伏阵列 Matlab/Simulink 仿真模型. 可再生能源, 2013, Vol. 31(6):10-14
- [3] Xu Peng, Hou Jinming, Yuan Dengkuo. Fault Diagnosis for Building Grid-Connected Photovoltaic System Based on Analysis of Energy Loss. Advanced Materials Research, 2013, Vol.805-806:93-98.