

中图分类号: TM46

单位代号: 10280

密 级:

学 号: 13721244

上海大学



硕士学位论文

SHANGHAI UNIVERSITY
MASTER'S DISSERTATION

题 目	光伏系统直流电弧故障分 析与检测
--------	---------------------

作 者 袁同浩

学科专业 电力电子与电力传动

导 师 吴春华

完成日期 2016 年 3 月

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查, 确认符合上海大学硕士学位论文质量要求。

答辩委员会签名:

主任:

委员:

导 师:

答辩日期:

原创性声明

本人声明：所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已发表或撰写过的研究成果。参与同一工作的其他同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名：_____日 期：_____

本论文使用授权说明

本人完全了解上海大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留论文及送交论文复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名：_____导师签名：_____日期：_____

上海大学工学硕士学位论文

光伏系统直流电弧故障分析与检测

姓 名： 袁同浩

导 师： 吴春华

学科专业： 电力电子与电力传动

上海大学机电工程与自动化学院

2016 年 3 月

A Dissertation Submitted to Shanghai University for the
Degree of Master in Engineering

Arc fault analysis and detection in photovoltaic system

MA Candidate: Yuan Tonghao

Supervisor: Wu Chunhua

Academic Discipline: Power Electronics and Drives

Electromechanical Engineering and Automation College

Shanghai University

March, 2016

摘 要

化石燃料日益紧缺，碳排放污染日益严重，使得各国都对可再生能源给予高度重视，光伏发电作为重要的新能源，是国家能源安全战略重要组成部分。光伏发电系统直流电压较高，户外环境导致电缆老化、绝缘破坏进而引起直流电弧故障，不及时处理将引发火灾，造成大量经济损失甚至人员伤亡。本文以光伏系统中串联直流电弧故障为研究对象，主要研究内容如下：光伏发电系统串联直流电弧的建模，直流电弧故障电流的时频域特征提取、电弧故障检测方法，大型光伏系统寄生参数对电弧噪声信号的影响等。

故障检测的前提是对故障特征的清晰认识，通过对电弧波形的观察，确定分别使用两段分段函数对电弧电压、电流波形进行拟合。电弧阻抗可根据欧姆定律获得，利用 PSIM 仿真软件实现该阻抗模型，仿真结果显示该方法拟合效果较好。电弧故障检测方法的难点在于排除干扰，减少误判。为此，本文将故障检测描述成模式识别问题，通过小波分析提取电弧故障频域特征，计算出各频段能量作为频域特征向量，利用统计方法提取电流时域特征，构建时域特征向量，由时频域特征向量距离构建系统特征平面，根据系统状态在系统特征平面的位置实现故障检测。该方法在故障和正常状态之间增加了过渡状态，有效减少了将过渡状态判为故障的概率，同时该方法可实现关键参数自校正功能，有效解决了逆变器的噪声干扰问题。最后仿真和实验数据证明了该方法的有效性。在大型光伏电站中，还涉及到电弧检测设备放置以及电弧故障的定位问题，为此，本文提出了一种小信号下的光伏系统等效网络，研究了电弧信号在光伏系统中的衰减情况，仿真结果表明由于光伏组件和电力电缆寄生参数的存在，当检测装置离电弧故障发生位置较远时，电弧噪声衰减较大，难以准确检测。

关键词：光伏，直流电弧故障，小波分析，故障检测

ABSTRACT

With the crisis of fossil fuels and the demand for carbon emission reduction, much attention has been paid to the clean energy. As an important renewable energy, photovoltaic is a component of the national energy security system. Due to the high voltage and aging of the cable, DC arc fault may happens incidentally and much economic losses will be caused if no proper measures has been taken. Arc fault in photovoltaic system is the main topic in this dissertation including modeling of dc arcs, arc fault detecting with extracting of characteristics in time and frequency domain of the fault current, and the effect of parasitic parameters on the signals generated by arcs in large-scale photovoltaic systems.

Clear understanding of fault characteristics is the precondition of fault detecting. Fault current and voltage was collected and analysed, and two piecewise functions were used to fitting the wave. Equivalent impedance of dc arc was obtained with Ohm's law. The model was implanted in PSIM, results seems good comparing with the experiment data. Difficulty in arc fault detecting is reduce the false triggers. Fault detecting here was described as a pattern recognize problem with Frequency and time domain characteristics extracted by wavelets and statistics which form the frequency and time domain vectors. System characteristic plane was set up with the distance between the vectors. Depending on the sector in the characteristic plane arc fault can be detected. Simulation and experiment data proves its effectiveness. It also shows that this method can solve the disturbances caused by inverters. Another problem in large-scale systems is about detecting device placing and Fault location. For this reason, an equivalent circuit under small signal was established and attenuation of the arc signal in the network was studied. The result shows that due to the parasitic parameters arc signals will be reduced greatly so that the detecting device can not recognize a fault. In the end some work follow-up was

discussed about protecting strategies.

Keywords: photovoltaic, dc arc fault, wavelet, fault detecting

目录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 课题研究的目的和意义	2
1.3 国内外研究现状	4
1.3.1 电弧模型研究现状	5
1.3.2 电弧故障检测研究现状	7
1.3.3 大型光伏系统电弧特性研究现状	9
1.3.4 光伏组件动态模型研究现状	10
1.4 本文主要研究内容	11
第二章 光伏系统直流电弧建模	12
2.1 引言	12
2.2 实验平台设计	12
2.3 直流电弧特性	15
2.4 直流电弧曲线拟合	17
2.5 光伏系统直流电弧模型	20
2.5.1 光伏系统特性及其对电弧的影响	21
2.5.2 光伏系统中电弧模型参数取值	23
2.6 本章小结	26
第三章 大型光伏电站电弧故障分析	28
3.1 引言	28
3.2 大型光伏电站拓扑结构	29
3.3 光伏电池动态模型	32
3.4 大型光伏电站电力线路等效电路	35
3.5 电弧故障信号衰减研究	38
3.6 本章小结	46
第四章 直流电弧检测研究	47
4.1 引言	47

4.2	光伏系统直流电弧故障类型.....	47
4.3	模式识别故障诊断原理.....	48
4.4	电弧故障特征提取.....	51
4.4.1	电弧信号时域特性.....	52
4.4.2	电弧信号的频域特性.....	54
4.4.3	小波分析和频域特征提取.....	56
4.5	故障识别方法.....	57
4.6	仿真研究.....	59
4.7	实验验证.....	62
4.8	本章小结.....	66
第五章	总结和展望.....	67
5.1	结论.....	67
5.2	展望.....	67
参考文献	69
作者在攻读硕士期间公开发表的论文	74
致谢	75

第一章 绪论

1.1 引言

近年来,新兴国家经济正处于高速发展期,城市化进程加快,能源需求不断攀升。世界石油需求重心东移,需求增长大多来自发展中国家,且主要集中在以中国和印度为主的亚太地区。据国际能源署预测,2030 年之前中国和印度的能源需求增长将占全球能源需求增长量的 53%。我国尚处于发展中国家,人均能源消费量很小,与发达国家相差甚远,能源需求增长空间较大,随着我国全面建设小康社会的推进、工业化程度提高及人民生活不断改善,能源需求将持续增长。积极发展新能源,节约和替代部分化石能源,有利于保障我国能源供应,促进能源结构的调整,实现低碳经济和可持续发展。

根据国家能源局发布的 2015 年光伏发电统计信息,截至 2015 年底,光伏发电累计装机容量 2805 万千瓦,同比增长 60%,其中光伏地面电站系统 2338 万千瓦,小型分布式发电系统 467 万千瓦,年发电量约 250 亿千瓦时,同比增长超过 200%。2015 年新增装机容量 1060 万千瓦,约占全球新增装机的五分之一,占我国光伏电池组件产量的三分之一,实现了《国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见》中提出的平均年增 1000 万千瓦目标;其中,光伏地面电站系统 855 万千瓦,小型分布式发电系统 205 万千瓦^[1,2]。

根据国家能源局发布的 2015 年光伏产业发展情况,2015 年,全国光伏发电应用模式不断创新,列入国家发展改革委鼓励社会投资基础设施项目中的 30 个分布式光伏发电示范区项目充分发挥示范引领作用,目前已建成 50 万千瓦,在建规模 60 万千瓦,带动社会投资超过 100 亿元。其中,青海龙羊峡水光互补项目实现累计并网 60 万千瓦,探索了水电和光伏电站协调运行、联合调度的创新模式;与农业相结合的光伏农业大棚、渔光互补电站逐渐成为市场热点;集合荒山荒坡治理、煤矿采空区治理和沙漠化治理的生态恢复与光伏发电建设相结合的项目不断推陈出新。

虽然光伏发电发展迅速，前景被普遍看好，但是光伏发电自身还有许多技术问题有待解决，比如效率问题，并网问题以及安全问题等等。在安全问题中，电弧故障作为一种可能造成极大危害并可能引起二次事故的故障，目前国内研究较少。本文从多方面对此问题进行了较详细的研究工作。

1.2 课题研究的目的是和意义

能源是社会经济发展的基石，过去一百多年来，煤炭和石油是全球能源的主要来源。但是煤炭和石油均为碳化合物，在燃烧过程中，不可避免产生二氧化碳和多种硫化物，对空气和环境造成巨大污染。1952 年英国伦敦雾霾造成巨大人员伤亡，使得环境保护受到各国重视。同时煤炭、石油化石燃料，形成周期长，是地球地壳运动过程中保存的能源物质，几乎不可再生。经过近代社会大量开采，化石能源正在日趋枯竭，我国由于近年来的快速现代化，这一趋势更加明显。根据 2015《BP 世界能源统计年鉴》中提供的数据，世界上传统化石燃料只能供世界继续使用几十到一百年^[3]，其中部分数据如表 1-1 所示。从表中可以看出，按照目前的开采速度，我国有较大的能源危机。

表 1-1 化石能源开采统计

燃料种类	我国可供开采年限（年）	世界可供开采年限（年）
石油	11.9	52.5
天然气	25.7	54.1
煤炭	30	110

近年我国各地也相继出现雾霾现象，也使得市民和政府环保意识日益增强，清洁无污染能源的开发成为现代社会发展的必然要求。出于节能减排的要求以及能源安全的战略考虑，发展新能源已成为国家重要战略之一。光伏发电作为一种清洁且可再生的能源，在安装使用过程中几乎不受地理位置限制，可安装于屋顶建立小型分布式发电系统，也可以在人口稀少的沙漠等地建立大型地面光伏电站，因此在过去几年光伏发电在全球发展迅速。但是光伏发电本身仍有许多问题亟待解决，光伏发电系统通常安装在户外，尤其是大型地面光伏电站，往往建在偏远地区，环境条件恶劣，设备极易老化损坏，虽然已有许多厂商相

继推出特殊产品如光伏专用电缆等，光伏系统依然容易出现许多意外事件导致系统故障。鉴于这种较高的故障率，许多光伏行业标准要求光伏系统具有故障检测等运维系统，但是由于工作环境恶劣，人工维护成本过高，难以实现。因此研发一套在线监控设备，实时监测系统状态，并对故障进行预警和处理有非常重要的现实意义。

相比常见的故障如阴影、热斑、逆变器故障等，国内外对光伏系统中的电弧故障研究较少。光伏系统中导致直流电弧的原因多种多样，其中主要是由于电力电缆和其他连接设备老化出现裂缝，高压将裂缝中的空气电离导致。光伏阵列由 10-20 块光伏组件串联而成，其直流母线电压可高达数百伏，足以将气隙中的空气击穿，产生持续燃烧的电弧。由于电弧持续燃烧，系统并不会出现开路、过流、振荡等明显特征，一般很难察觉。但是电弧在燃烧过程中，会产生极大的热量，并且可加速线路和设备的老化进程，进而扩大事故范围，引起火灾、系统其他设备损害等严重的二次事故。及时有效的检测并消除电弧故障，有助于系统的安全稳定运行，减小故障损失，避免相关工作人员伤亡。

通过实时采集系统电流，利用先进数据处理和信号分析技术，可以准确识别出电弧故障。在对原始数据进行采集时，难免会混入系统噪声，其中最大的干扰源是光伏系统中的并网逆变器。逆变器开关管工作在高频开关状态下，在直流侧引起较大的电流纹波和噪声。这种噪声与电弧故障产生的噪声信号特征类似，对电弧检测算法中的阈值选取有很大的影响。逆变器厂家众多，逆变器采用的开关频率也多不相同，因此，为了适用各种光伏系统，设计一种具有阈值自校正功能的检测算法非常有必要。

对于大型光伏系统，电弧故障更加复杂。光伏电池的本质是 PN 结，光伏阵列由大量光伏电池串并联构成，数量众多的分布电容为高频电弧噪声提供了通路，同时电力电缆的电阻、电感等也会阻碍高频信号的传播。因此大型地面光伏电站中的电弧故障信号很可能难以被检测装置检测到，造成漏判。对电弧高频噪声在阵列中的传输情况进行研究，可以为光伏电站保护提供重要参数。

综上所述，研究光伏系统的电弧故障问题，可以有效提高系统运行和管理效率，有助于我国光伏产业健康发展。

1.3 国内外研究现状

电弧现象伴随着电力工业的发展。早期电弧现象曾用于公共照明^[4-8]，在如今现代工业中也用于加热^[9-11]。电弧作为一种故障，较早出现在交流电力系统中^[12-14]，在配电端，由于电线电缆老化引起的间断或持续的电弧造成了大量财产损失，甚至是人员伤亡，在输电环节，对地电弧对输电效率和电力系统稳定形成不良影响，为此在电力系统领域研发出了故障电弧断路器以检测电弧故障并实施相应保护^[15-17]。二战之后，飞机、船舰以及地面直流系统发展迅速，直流系统随着半导体行业的发展逐渐复兴，直流电弧故障也频繁出现，慢慢受到工业界和学术界关注。光伏系统近年来发展迅速，装机容量不断增加，光伏组件和逆变器之间的直流区域经常出现电弧故障，国外已有许多学者进行了相关研究。但是由于领域较窄，时间较短，相对于交流电弧故障，直流电弧故障的研究还不够深入。交流系统中的电弧会随着电流过零点而自动熄灭，直流系统没有电流过零点，因此直流电弧不容易熄灭，持续时间长，危害更大，同时由于电弧发生后负载电流会稍微减少，这使得传统的基于过流检测的保护设备无法检测到电弧故障。尤其对于光伏系统，光伏组件和并网逆变器的非线性特点使得直流电弧特性更加复杂，使得传统电弧故障检测方法误判较多。所以，相对来说，直流系统产生的持续稳定的电弧具有更大的危害，故障的检测方法也更加复杂。

直流电弧故障可以分为串联故障、并联故障以及对地故障，如图 1-1 所示。对地电弧可以看成特殊的并联电弧，且对地电弧可以利用传统漏电保护设备检测到；并联电弧会导致负载电流急剧增大，传统过流保护设备也可以及时检测到；串联电弧发生后，系统电流只有轻微下降，传统保护设备无法有效检测。因此本文主要研究对象为光伏系统串联直流电弧问题。

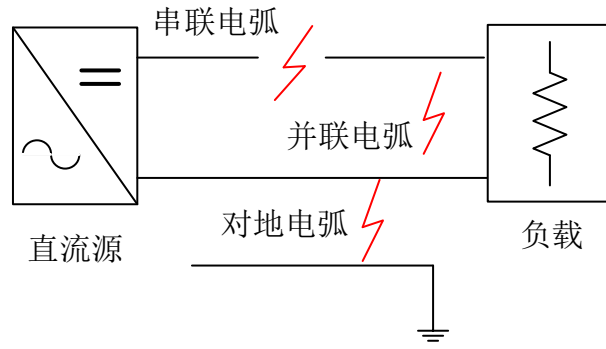


图 1-1 电弧故障类型

1.3.1 电弧模型研究现状

电弧检测算法的设计，需要对大量电弧故障信号进行分析，提取故障特征以及设定阈值。首先研究电弧的特性，建立其仿真模型可以深入了解电弧发生的机理，有助于电弧检测方法的前期设计和验证。根据建模方法的不同，电弧模型可以分为基于物理过程的理论方法和基于电弧电气特性的黑箱模型。电弧物理过程十分复杂，涉及到光、电、热等多门学科，且在燃烧过程中，受到环境温度、湿度、电磁环境以及电极材料等许多时变参数影响^[18, 19]，因此精确的理论推导非常困难。而电弧的黑箱模型，是根据实验中采集到的电弧电压和电流数据，拟合出的电弧等效阻抗特性曲线，许多科学家以及工程师在这一领域进行了深入的研究，获得了较好的研究成果。

H.Ayrton 早在 20 世纪初研究电弧灯时，通过大量实验和数据分析得出电弧的稳态模型^[20]，如式(1-1)所示。

$$V_{\text{arc}} = A + B \cdot d + \frac{C + D \cdot d}{I_{\text{arc}}} \quad (1-1)$$

式中， d 为电弧长度，由于实际电弧长度难以测量，一般使用电弧发生器的两电极之间的距离表示，如图 1-2 所示。A, B, C, D 为经验常数，受到电源电压、负载、电极材料以及环境温度等参数影响，不过大量实验数据可以表明，这些参数在较大范围内可以认为保持不变。

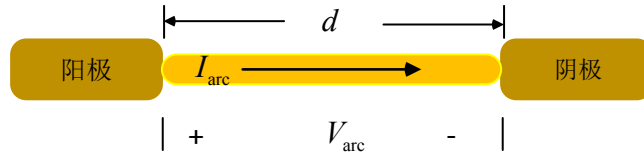


图 1-2 电弧长度

同时期其他模型如 Steinmetz 建立的模型如式(1-2)所示, Nottingham 建立的模型如式(1-3)所示。1973 年文献[21]根据实验数据,使用数字信号处理器拟合了电弧的电压电流稳态特性。

$$V_{\text{arc}} = A + \frac{B \cdot (C + d)}{I_{\text{arc}}^{0.5}} \quad (1-2)$$

$$V_{\text{arc}} = A + \frac{B}{I_{\text{arc}}^n} \quad (1-3)$$

受制于当时的实验条件以及实际需求, H.Ayrton 等人的实验都在较大功率下进行, 实验电流为数百安培, 电压最高达 1000 伏特, 且这一时期的模型更加侧重于电弧的宏观静态统计特性, 对于电弧的瞬时特性和频域特性则关注较少。随着电力的普及, 特别是二战之后, 电力技术有了极大的进步, 电力实验条件也得到了极大的改善, 1990 年 A.D.Stokes 和 W.T.Oppenlander 采用与前人类似的方法重复了大量的实验, 实验中负载电流从 0.1A 到 20kA, 电极之间的距离为 5-200mm, 为电弧特性分析提供了大量实验数据。根据实验数据, 他们得到了与 H.Ayrton 类似的宏观静态特性, 同时 A.D.Stokes 和 W.T.Oppenlander 也对电弧的动态特性进行了详细的描述^[22], 但是限于当时电子技术的发展, 依然无法建立电弧的动态模型。

进入 21 世纪后, 新能源的接入问题以及交流输电的效率问题使得大型直流系统渐渐增多, 直流电网成为了未来电力系统发展趋势。在这种背景下, 许多学者认识到直流电弧故障这一古老问题将会成为直流系统的重大安全隐患。在解决直流电弧问题的迫切需求下, 大型先进实验平台相继建立, 现代计算机软件仿真模拟技术也愈加成熟, 使得高精度的动态模型的建立成为可能^[23, 24]。2012 年, Uriarte 等人利用德州大学奥斯汀分校的兆瓦级微网实验室, 进行了多种电压、电流等级的电弧实验, 并通过实验数据拟合出合适的电弧模型, 该模型动态性能好, 与实验可以较好吻合^[25, 26]。

1.3.2 电弧故障检测研究现状

早期直流系统主要应用于汽车、飞机以及舰船电力系统中。处于安全考虑大量学者对其中直流电弧故障进行了研究。2011 年最新版美国国家电气标准，规定母线电压不小于 80V 的光伏发电系统必须具备电弧故障检测能力。此后，光伏发电系统电弧故障的分析检测和保护成为直流电弧研究热点^[27-30]。

传统直流电弧故障检测技术主要是基于电流时域或频域特征值的阈值法。Malakondaiah Naidu 等利用电流瞬时变化率检测汽车系统中的串联和并联电弧故障，但是在系统启停等过渡状态时极有可能造成误判^[31]；文献[32]通过多组实验数据，分析了直流电弧的功率特点、伏安特性以及直流电弧电流中的高频分量，并考察了电极之间的距离、电极（铜棒）直径、电极移动速度对直流电弧的影响，最后提出了利用电源端电压变化率的方法检测电弧故障，该方法在负载突变等暂态过程会导致误判断，易受干扰，稳定性较差；Faier 等人研究了飞机直流电力系统中的直流电弧故障，通过分析实验数据，发现电弧发生瞬间电流出现了明显的突降，从而导致了较大的电流变化率，并利用电流变化率对电弧故障进行实时检测，同时，为了避免系统启停等暂态过程导致的干扰，该文设计了高通滤波器将类似低频扰动信号滤除，虽然这种方法在一定程度上消除了许多干扰，但是对于负载突变引起的高频干扰仍然无法很好处理^[33]；Mackay 等人分析了电弧发生时负载侧的电压变化，并提出了一种基于负载侧电压变化率的电弧故障检测方法，该方法无法将暂态过程造成的电流、电压突变与电弧故障区分开来，从而容易导致误判^[34]。F. Schimpf 等人提出利用滤波器和统计方法计算信号混乱程度来判别故障，然而光伏发电系统中直流电弧特性相对于传统直流系统中的直流电弧又有其自身特点，比如在实际光伏系统中，变化的光照，逆变器的工作状态都会引起电流波动，所以该方法也不适用于光伏系统^[35]。

为了解决上述问题，许多文献提出了基于频域特征的检测方法。王占等人对傅里叶分析和小波分析的结果进行了对比，并利用小波分析计算某一频段能量进行直流电弧故障检测，然而该方法无法避免高频信号的干扰，也无法很好解决逆变器开关频率引起的干扰噪声问题^[36]。郭云梅等人利用小波包对电弧故

障电流信号进行 4 层分解, 得到 64 个独立频段, 计算出每个频段的能量, 与正常电流对比后, 选取在故障前后变化较大的频段作为电弧故障特征频段, 通过实验数据对比, 设定某一阈值进行电弧故障检测, 该方法有效解决负载波动导致的误判问题, 但是电弧特征频段受到逆变器开关频率影响较大, 且不同逆变器开关频率往往并不相同, 导致这种固定频段的检测方法通用性较差, 同时在大型地面电站光伏系统中系统暂态过程多, 干扰信号复杂, 固定频段的检测方法也容易受到特定频段噪声的干扰^[37]; James.A 使用傅里叶分解得到信号频谱并利用神经网络判断是否发生故障, 但傅里叶分析要求原始数据长度 N 尽可能的大, 若将傅里叶分析得到的 $N/2$ 个数据输入到神经网络显然太过复杂, 同时神经网络需要大量数据训练, 实时性差且实现难度大^[38]。

由于以上几种方法都有较大缺点, 很多学者转而研究将故障的时域特征与频域特征进行有效融合得到多判据的检测方法。Grasseti.R 等人将电流的脉冲模式作为时域特征, 某固定频段信号的能量作为频域特征, 进行电弧故障的检测^[39]; 姚秀等人利用了电流脉冲模式和电流峰峰值作为时域特征, 利用小波分解得到的某节点系数作为频域特征进行直流电弧故障检测^[40-43]; 高原等人通过对直流电弧故障电流信号进行仔细分析, 最后提出 3 个时域特征、3 个频域特征并分别设定阈值的检测方法。上述方法虽然利用了时频域的特征, 提高了检测的精度, 但是同时也增加了阈值设定的难度^[44], 且对于光伏系统中的逆变器开关频率问题始终无法解决。

针对传统电流互感器的缺点, Healy 提出了使用 Rogowski 线圈采集电流的方法, 该线圈可以采集到极高频率的电流, 更加适合电弧检测, 但是同时也会增加设备成本^[45]; Rabla 研发了基于 FPGA 电弧检测平台, FPGA 相对于传统的微处理器, 运算速度更快, 可以实时检测电弧故障, 但是同样也会增加成本^[46]。

综上, 目前国内外关于直流电弧故障检测的基本理论虽然较为成熟, 但是检测方法还需优化, 以便提高检准确率。概括来说还需要对三个方面进行深入研究, (1) 对电弧特性的认识上不够彻底, 缺乏通用的电弧模型; (2) 在信号处理上方法太过单一, 电弧的特征参数识别度不高, 易受干扰; (3) 故障判别

的阈值设定太过复杂，不能够实现自校正，通用性较差。

1.3.3 大型光伏系统电弧特性研究现状

大型地面电站式光伏系统结构十分复杂，与小型分布式光伏系统相比有较多不同。BIPV (Building Integrated Photovoltaic) 等小型分布式光伏系统如图 1-3 所示，其特点是规模不大，功率较小，电缆电线总长一般不超过几十米，发生直流电弧故障后，其高频信号不会在线路中产生衰减，所以一般只在直流母线处安装电弧检测装置。

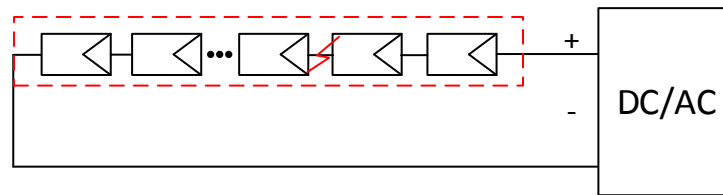


图 1-3 BIPV 系统

大型地面光伏电站则不同。地面电站一般规模较大,如图 1-4 所示，光伏组件通过连接器串联组成光伏组串，光伏组串再通过汇流箱将能量汇集之后连接到并网逆变器。由于光伏组件数量较多，系统寄生参数对电弧故障信号有较大的衰减作用。考虑到大型光伏电站中光伏组件结电容、电缆阻抗等寄生参数，当电弧发生位置与电弧检测装置较远时，电弧产生的高频信号在传输过程中可能会大量衰减，导致不能及时检测到。因此，需要对大型光伏电站的阻抗特性进行分析，以便合理制定直流电弧检测装置的安装位置，以保证电弧故障检测的有效性和经济性。

M. C. Di Piazza 等人分析了光伏发电系统的电磁干扰问题，考察了直流母线的长度对高频信号传输的影响^[47]。R. Araneo 等人在前人的基础上，对大型地面光伏电站的电磁干扰问题进行了系统详细的研究，重点考察了光伏组件对地电容、光伏电池结电容、直流电力电缆寄生参数等对高频信号的影响情况，在其建立的等效模型中还考虑了正负直流母线对地以及正负直流母线之间的寄生电容，该模型十分复杂，而且许多参数难以获得，不适合工程使用^[48]。湖南大学谢宁、罗安等人在研究大型地面光伏电站与电网的交互影响过程中，仔细分析了大型地面光伏电站及其传输线的等效电路，其中在电缆传输线建模中，

考虑了串并联不同模式下的等效电路，有较高的参考作用。总体而言，目前国内外在此领域的研究并不多见，有较大的研究需求。

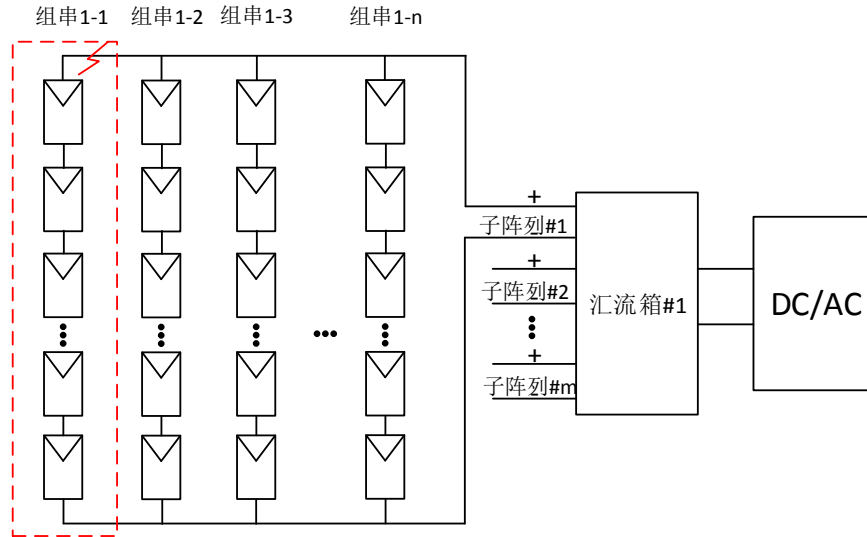


图 1-4 集中式光伏发电系统结构

1.3.4 光伏组件动态模型研究现状

光伏电池 PN 结等效电容对大型地面光伏电站的高频特性有着重要的影响。光伏电池的动态模型和动态特性对研究光伏发电系统的直流电弧故障至关重要。

目前关于光伏电池动态模型已经有部分学者进行了研究。傅望、张圆圆等分析了光伏电池的物理模型，提出了光伏电池的动态等效电路，其中考虑了 PN 结电容，由于没有考虑到高频特性，所以认为该电容对电路影响较小，可以忽略^[49, 50]。Anil Kumar R 等人的研究结果表明，太阳能电池的结电容受输出电压的影响很大，其数值在开路时约为短路时的 25 倍，而且该电容会导致高频工作时后级变换器的输出电压纹波增大^[51]。Manit Sea pan 等人指出 PN 结等效电容的充放电过程会导致光伏电池的 V-I 曲线变化，进而影响最大功率点的位置，使得最大功率点跟踪不准确^[52]。Merhej 等人通过电导增量法推导出光伏电池结电容的近似公式，并通过仿真和实验验证了 Manit Sea pan 等人提出的问题，但是该推导过程较为复杂，计算量大^[53]。Perny M 等人推导了硅底的光伏电池 PN 结电容定量计算公式，并且证明该公式同时适用于单晶硅和多晶硅材料，同时

该公式还表明 PN 结等效电容受输出电压影响较大^[54]。Anssi, Maki 和 J. Johnson 等人通过实验测定了不同光照、不同输出电压下光伏电池的小信号输出阻抗伯德图，实验数据表明光伏电池在中频段呈现容性，在高频段呈现感性^[55]。

1.4 本文主要研究内容

本文以光伏发电系统中的串联直流电弧故障为研究对象，研究了光伏系统的串联直流电弧故障特性并提出了一种新型的电弧故障检测算法，以及大型地面光伏电站中电弧故障信号的衰减问题，为大型地面光伏电站中直流电弧故障保护策略提供理论支持。主要内容如下：

- (1). 从电弧模型出发，研究分析了直流电弧的电气特性以及直流电弧动态的随机特性，利用数据拟合方法建立了电弧数学模型，通过实验提取了电弧模型中的关键参数；
- (2). 研究了故障电弧电流的时频域特性，选择了小波分解提取频域特征，统计分析提取时域特征，提出了基于时频域特征融合进行模式识别的新型检测算法，该方法可以将故障状态和过渡状态区分，降低了误判率，同时该算法可实现参数自校正，解决了逆变器开关频率的干扰问题；
- (3). 考虑到光伏电站系统的复杂性和保护策略的经济型，研究了电弧信号在系统中的衰减问题。主要考察了光伏电池结电容和电力电缆的等效阻抗这两种寄生参数对电弧噪声的影响。

第二章 光伏系统直流电弧建模

2.1 引言

串联直流电弧特性主要受到周围环境和系统电压以及负载电流的影响。周围环境如空气温度、湿度、流动特性等参数主要影响电弧的动态特性，而系统的电压和负载电流决定了电弧的稳态特性。环境参数的变化呈现出较强的随机性，根据统计理论可知，各种环境参数对电弧的综合影响导致了电弧动态变化的随机性。系统开路电压决定了电弧是否能够发生，而负载电流决定了电弧的极限长度。光伏组件的非线性使得其与普通直流源有较大不同。根据光伏组件输出特性可知，电弧发生后，光伏组件输出电压升高，输出电流下降，这使得电弧极限长度减小，更容易熄灭。同时逆变器开关管工作在高速开通和关断状态，这种非线性使得电弧持续燃烧更加困难。本文研究了直流电弧的特性以及电弧和光伏系统之间的相互影响，最后拟合了光伏系统中的直流电弧模型。

2.2 实验平台设计

建立模型的前提是对研究对象的数据分析，为获得电弧故障信号的实验数据，本文设计搭建了如图 2-1 所示的实验平台。该平台由光伏组串、电弧发生器、电弧检测装置以及并网逆变器组成。

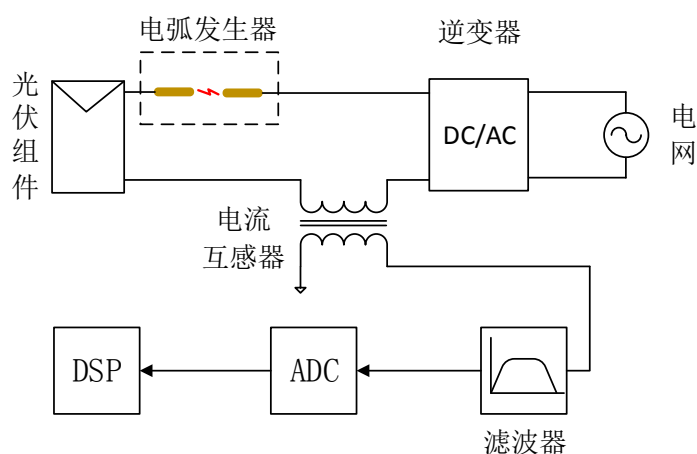


图 2-1 电弧检测实验平台

实验平台中光伏组串由 4 块参数如表 2-1 所示的光伏组件串联而成，根据表中数据可知，标准条件（光照强度为 1000 w/m^2 ，组件表面温度为 25°C ）在最大功率点处，系统直流母线电压为 147V 左右，直流母线电流为 5A 左右，实际数据受到天气因素影响，略有差异。

表 2-1 光伏组件主要参数

名称	缩写	数值
最大功率	P_m	190w
最大功率点电压	V_m	36.67V
最大功率点电流	I_m	5.18A
开路电压	V_{oc}	45.32V
短路电流	I_{sc}	5.53A

电弧发生器如图 2-2 所示。电弧发生器由一对距离可变的铜棒电极以及控制系统构成。右边电极固定，左边电极可随一滑台移动，滑台由步进电机通过丝杆连接，由单片机构成的控制系统可以通过步进电机和丝杆按要求精确控制铜棒之间的距离。电弧实际长度难以测量，可利用电极间距近似。通过改变电极之间的距离即可模拟光伏系统中的电弧故障。

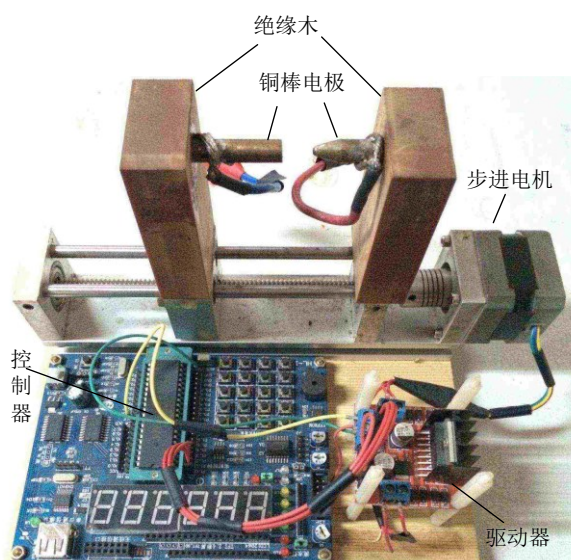


图 2-2 电弧发生器实物图

电弧检测器实物如图 2-3 所示，由电流互感器、带通滤波器、高速 ADC 模块和微处理器构成。电流互感器用于采集直流母线中的交流电流分量；带通滤波器对原始信号带宽进行限制，以提高采样精度；微处理器和 ADC 进行数据采集和电弧检测。

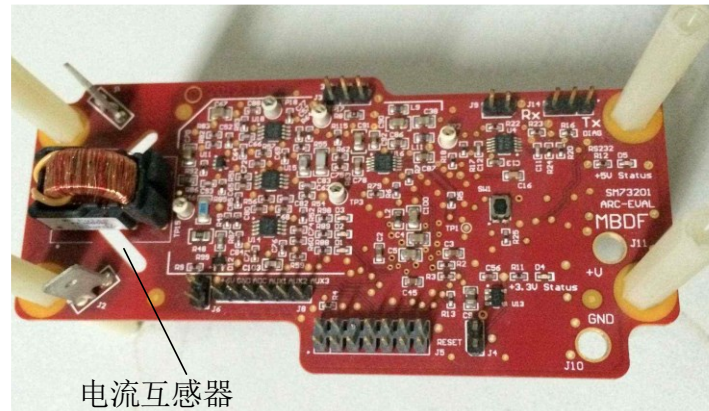


图 2-3 电弧检测装置

硬件滤波电路如图 2-4 所示。图中 5 个运算放大器构成带通滤波电路，对电流互感器变换之后的模拟信号带宽进行限制后，送到 ADC 芯片转换成数字信号。

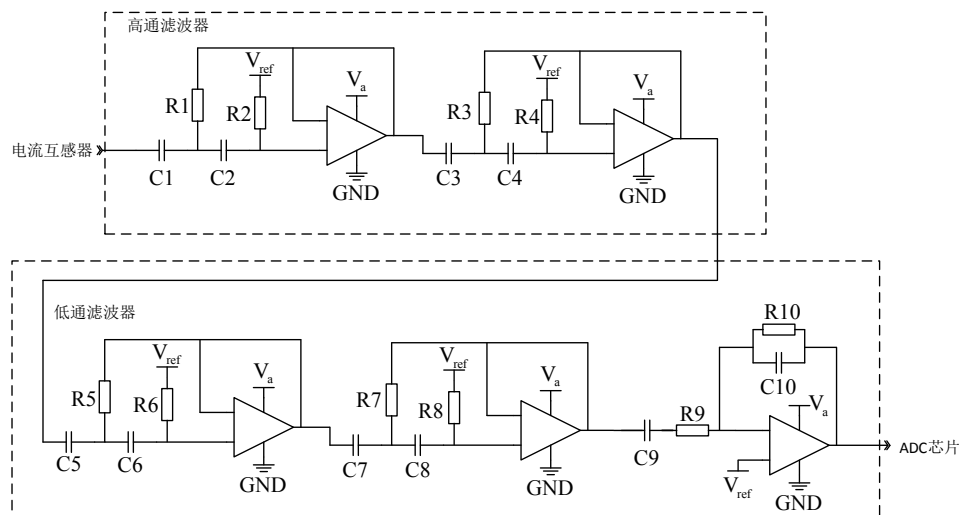


图 2-4 硬件滤波器电路图

逆变器的主电路结构如图 2-5 所示。逆变器采用两级结构，前级 DC/DC 变换器用来进行最大功率点跟踪，后级 DC/AC 变换器实现并网控制，功率器件开关频率为 20kHz。

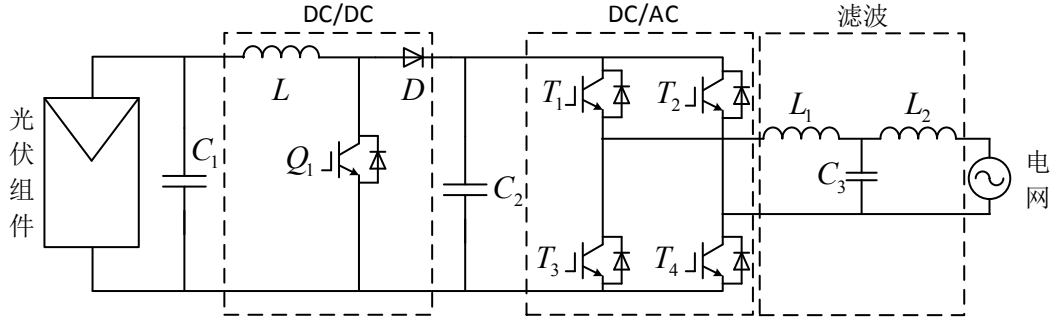


图 2-5 逆变器主电路结构

在模拟电弧故障前，电弧发生器串联在电路中，两铜棒电极良好接触，模拟电弧故障时右边电极在步进电机的驱动下慢慢移动，形成空气间隙。两电极之间的距离记为 x_{gap} ，由于实际电弧形状不稳定，大致呈现出弧形，电弧长度的精确测量十分困难，因此使用 x_{gap} 近似为电弧的长度。本文首先利用直流源对直流电弧特性研究，然后考虑光伏特性对电弧模型进行修正。实验用直流源输出电压范围为 0~180V，负载为 100Ω 可调。实验时，燃烧的电弧产生极高的温度，会使铜棒表面加速氧化并残留黑色物质，因此，每次实验之前需要对电极表面进行打磨处理。

2.3 直流电弧特性

图 2-6 为采用直流源时电弧的电压电流波形图，图中波形 X 为电弧电压随着电极分离时的波形，电弧电压记为 v_{arc} ；波形 Y 为电弧的电流波形，并记为 i_{arc} 。整个电弧的发展过程分为 3 段，各节点含义及各阶段特征如下：

A 点：电弧开始产生的时刻。A 点之前，电弧电压近似为 0V，电弧电流等于正常时的负载电流。A 点之后，电极逐渐分离，直流源将电极之间的气隙电离，并形成电弧；

B 点：此点表明电极之间的气隙被完全电离，电弧形成。此时的电弧电压称为开启电压 a ，A 点到 B 点的过程极短，在此过程中电弧电压可认为从 0 跳变到 a V。实验中，该值为 12V 左右。大量实验证明电弧的开启电压 a 与系统电压 V_{dc} 以及负载电流 I_{load} 无关，只和电极材料及周围环境有关，在电极材料

(铜) 不变时, 周围环境参数变化较小, 因此可认为 a 为一固定常数。

B 点之后电弧电压近似认为随着电极距离以 b V/cm 线性增加, 直到 C 点, 与 a 类似, b 也可以当成固定常数。此过程中电弧电压偶尔有较大波动, 这种现象可以看作是电弧熄灭的尝试。由于电弧受环境变化影响极大, 周围环境如温度、湿度和空气流动速度等均可认为是随机变化的, 这种随机参数导致了电弧在燃烧过程中具有很强的随机性。当环境参数随机变化到某一不利于电弧继续燃烧的时候, 电弧就会趋向于熄灭。然而直到 C 点之前, 由于电弧间距较小, 还没有达到电弧的平均极限距离, 电弧熄灭成功的概率较小, 只会出现较大的波动。观察此过程中的电流波形, 可以发现电弧电流与电弧电压近似同步变化, 这也说明电弧的负载特性为阻性。

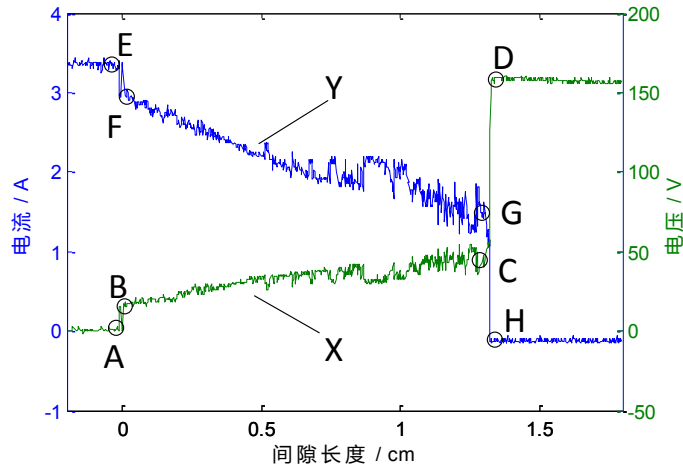


图 2-6 电弧电压电流实际波形

C 点: 此点为电弧的一个极限位置。电弧趋近 C 点时, 电弧波动更加剧烈, 成功熄灭的概率大大增加, C 点之后, 电弧就进入熄灭的过程, 此过程中电弧的长度慢慢趋近极限, 电弧电流难以继续维持燃烧, 环境参数的变化极容易导致电弧熄灭。此时电弧的长度依然由电极的间距表示, 记为电弧的极限长度

x_{crit} 。

D 点: 电弧的长度超过 D 点的位置之后, 即 $x_{\text{gap}} > x_{\text{crit}}$, 电弧将完全熄灭。这一过程表现为, 电弧电压从 C 点的较小值突然跳变到直流电源的开路电压。这一过程与 A 点到 B 点的过程类似, 该过程及其短暂, 电压上升率极高。在此过程中, 电弧电流也出现类似现象, 电流从 1.5A 左右突降到 0A。

与电弧电压波形类似，电弧电流波形有如下特点：

E 点：该点之前，电弧电流等于系统的负载电流 I_{load} 。电弧开始时，电弧电流瞬间下降到故障电流记为 I_{fault} ，从图中可以看出 I_{fault} 略小于 I_{load} ，正是这一特点使得电弧故障难以检测。

F 点：随着电弧完全形成，电弧电流在这一点开始稳定。电弧电流的突降程度与系统电气参数无关，但是与电弧开启电压 a 呈比例关系。F 点之后，随着空气气隙长度增加，电离空气阻抗近似线性增加，系统电流近似线性减小，且其减小梯度与电弧电压上升梯度有关，记为 $f(b) \text{ A/cm}$ 。

G 点：根据实验研究，当电弧产生后，决定电弧能否持续的是电弧电流而不是电弧电压。此时，电弧电流已经下降到一极限程度，环境的随机变化极有可能导致电弧的熄灭，故在此点附近电弧电流剧烈波动，并引起电弧电压的波动。大量实验数据表明，电弧的维持电流 I_{sus} 具有较强独立性，在很大范围内与系统开路电压以及负载电流无关。

H 点：电弧达到极限距离后，电弧电流下降到维持电流以下，电弧彻底熄灭。

综上，随着电极从良好接触到分离到极限距离直至电弧熄灭的过程中，电弧电压和电流均可分为 3 个阶段，电压电流的同步变化说明电弧为阻性负载。大量实验也表明，电弧在变化过程中许多关键参数或在较大范围内不变，或具有内部联系，这使得电弧近似模型的建立成为可能。

2.4 直流电弧曲线拟合

基于以上实验数据分析，可以通过分段曲线拟合近似的电弧动态模型。该方法实现简单，关键参数易于获取，适合电弧故障检测算法设计及验证。对实验中电弧的电压电流波形经过平均处理之后，可得如图 2-7 所示的电弧模型曲线。图中电流和电压数值均已归一化。横坐标为电极之间的距离与电弧极限距离的比，即

$$q = \frac{x_{\text{gap}}}{x_{\text{crit}}} \quad (2-1)$$

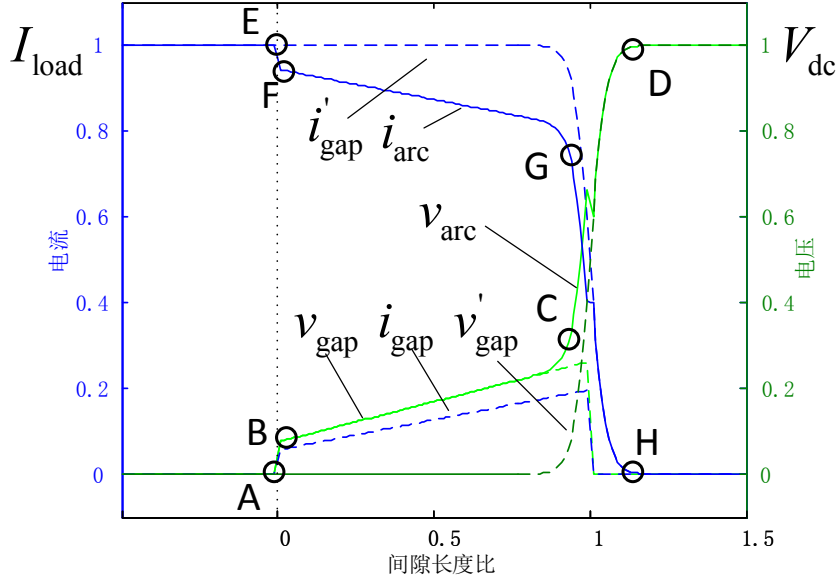


图 2-7 电弧电压和电流拟合图

由图 2-7 可看出，电弧电压可以用下式表达：

$$v_{\text{arc}} = v_{\text{gap}} + v'_{\text{gap}} \quad (2-2)$$

其中， v_{gap} 在 A 点之前为 0，A 点之后的瞬间为电弧开启电压 a ；在 A-C 过程中，随电极之间的距离 x_{gap} 以梯度 b 线性增加；在 C 点之后瞬间下降到 0。根据上节叙述， a 和 b 可认为一固定常数，即

$$v_{\text{gap}} = \frac{1}{2} (a + b \cdot x_{\text{gap}}) (\tanh(\alpha q) - \tanh(\alpha(q-1))) \quad (2-3)$$

v'_{gap} 是用来拟合 C-D 过程中的电弧电压，通过对原始数据的分析，可以发现利用合适参数，双曲正切函数可以描述这种非线性。如下式所示：

$$v'_{\text{gap}} = V_{\text{dc}} \cdot (0.5 + 0.5 \cdot \tanh(\alpha \cdot (q-1))) = V_{\text{dc}} \frac{e^{2q\alpha}}{e^{2\alpha} + e^{2q\alpha}} \quad (2-4)$$

式中， V_{dc} 是系统直流电压， α 是控制 C 点到 D 点过程中变化率的参数，可根据具体实验测定。 v_{gap} 主要在电弧开始的时候占主要成分，而 v'_{gap} 则在电弧将要熄灭的时候占主要作用。

与电压类似，电流也由两部分组成：

$$i_{\text{arc}} = i'_{\text{gap}} - i_{\text{gap}} \quad (2-5)$$

同样， i_{gap} 包含电弧开始时的电流突降和之后一段时间的线性下降，电流的突降程度主要和开启电压以及系统负载大小有关，电流线性下降梯度与电压上升梯度有关，对于确定系统来说，这两参数均可认为不变。所以， i_{gap} 可近似按下式计算。

$$i_{\text{gap}} = \frac{e_{\text{gap}}}{R_{\text{gap}} + R_{\text{load}}} \approx \frac{V_{\text{dc}}}{I_{\text{load}}} e_{\text{gap}} \quad (2-6)$$

其中， R_{gap} 为电弧阻抗， R_{load} 为系统阻抗。对于大部分系统来说 $R_{\text{gap}} \ll$ ，因此可以忽略电弧阻抗。

i'_{gap} 同样由双全正切曲线拟合，以近似电弧将要熄灭过程中电弧电流变化情况。因此可得：

$$i'_{\text{gap}} = I_{\text{load}} \left(0.5 - 0.5 \tanh(\alpha(q-1)) \right) = I_{\text{load}} \left(\frac{1}{1 + e^{2\alpha(q-1)}} \right) \quad (2-7)$$

电弧燃烧过程中，电压电流表现出强烈的波动，尤其是当电弧长度接近极限的时候，这种波动更加激烈。如前文所述，波动可以看成电弧熄灭的尝试，在电弧的模型中，这种波动主要体现在电弧的极限长度 x_{crit} 中。电弧的极限长度 x_{crit} 是指当电弧长度大于此值电弧将会熄灭，实验数据显示此极限长度受周围环境参数和电极材料等影响较大。通常认为电极材料不变，电弧极限长度主要受到环境参数的随机变化的影响。为此可以将电弧的极限距离用随机函数描述。注意到电弧长度越接近电弧的极限长度时，电弧的波动越剧烈，说明电弧的极限距离为在某一固定常数附近波动的参数，如(2-8)所示。

$$x_{\text{crit}} = L + (\text{random}() - 0.5)^3 \quad (2-8)$$

其中， L 为固定常数， L 决定了电弧的极限长度的平均值，该值主要受到系统负载电流和开路电压的影响； $\text{random}()$ 可以在 0-1 之间产生一随机数。

综上，在恒定电压、电流下， x_{crit} 可认为在某一均值附近随机变化；电弧

开启电压 a 表示电弧产生瞬时的基础电压，实验表明在较大直流电压及电流负载范围内， a 均为常数且维持在 10-20V 左右；电压梯度 b 表示电弧间隙较小时，电弧电压随电弧长度线性增加的程度，实验证明该值也在较大范围内保持恒定；电压上升斜率 α 表示在电弧长度接近极限长度时，电弧电压迅速升高的速率；电流梯度与电压梯度呈现固定线性关系；直流电压和负载电流表示系统正常时电源电压以及负载电流。

本文利用 PSIM 仿真软件建立了电弧仿真模型。由于电弧的实质是一种非线性负载，本文选用了可编程非线性电阻元件作为电弧模型的原型。利用该非线性元件的输入控制端口控制其电阻动态变化模拟电弧等效阻抗，元件电气函数为：

$$v = f(x, i) \quad (2-9)$$

其中 v 代表元件所在支路电压， i 代表元件支路所在支路电流， x 为控制参数。本文利用前文所述电弧电压和电流计算方法，得到电弧等效电阻，作为该元件的输入建立电弧模型，如图 2-8 所示。

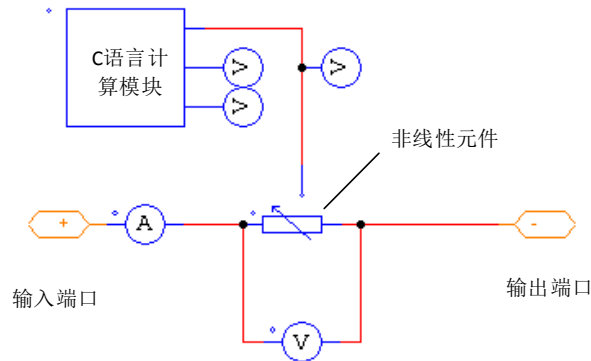


图 2-8 基于 PSIM 的电弧模型

2.5 光伏系统直流电弧模型

光伏组件为非线性电源，其本质可近似认为是电流源与二极管的并联，随着输出电压的增大，二极管上电流迅速增大，直至将输出电路短路。这种非线性使得电弧特性与线性的直流源系统有所不同。一般电源均可认为是电压源，电弧发生后电源输出电压几乎不变，在光伏系统中电弧发生后，光伏系统工作点受到电弧故障的影响，使得情况更加复杂。

2.5.1 光伏系统特性及其对电弧的影响

光伏组件由光伏电池串联而成。光伏电池的稳态等效电路如图 2-9 所示。图中 I_{sc} 为光生电流，当光照恒定时，可将其等效为一电流源； D 为 PN 结等效二极管； R_s 为制造工艺导致的输出串联电阻； R_{sh} 为等效并联电阻； R_{sh} 一般比 R_s 高出两个数量级； I 和 V 分别为光伏电池输出电流和输出电压。根据相关物理过程可得输出电流和输出电压的关系如式(2-10)-式(2-12)所示。

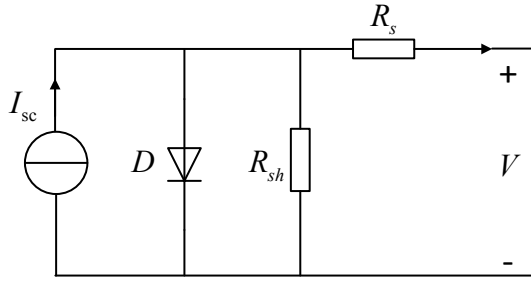


图 2-9 光伏组件工程等效电路

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{V}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} \quad (2-10)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}\right) \quad (2-11)$$

$$C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) \left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \quad (2-12)$$

根据该模型，只需要光伏组件生产厂家提供的开路电压 V_{oc} ，短路电流 I_{sc} ，最大功率点电压 V_m 和最大功率点电流 I_m 即可得到光伏组件的输出特性曲线。典型光伏组件的 V-I 曲线如图 2-10 所示。其中图 2-10 (a) 显示了不同光照强度时的光伏组件输出特性，从图中可以看出，光照变弱时，组件的短路电流明显下降，这是因为光伏组件本身可看成光生电流源，光电效应产生的电流随光照减弱而大幅减少；图 2-10 (b) 为不同温度时的输出特性曲线，当光伏组件表面温度升高时，组件开路电压明显减小，这是因为温度上升导致 PN 结变窄，结电压变低，结电压串联而成的光伏组件开路电压显著减小。

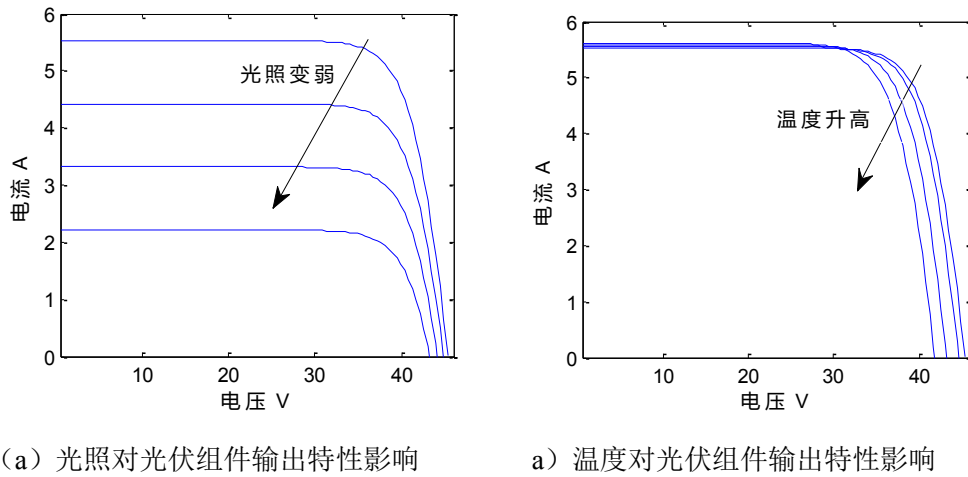


图 2-10 环境参数对光伏组件输出特性的影响

由以上光伏组件的 U-I 特性曲线可知，光伏组件是一种非线性电源，为保证其输出最大功率，必须实时调整光伏组件工作点。图 2-11 中实线为光照为 600 w/m^2 ，光伏组件表面温度 20°C 时输出曲线，虚线为光照值 1000 w/m^2 ，光伏组件表面温度为 50°C 时的输出曲线。对比两条曲线可以看出，为使组件输出最大功率，须对光伏组件的输出电压进行实时调整，使其工作在最大功率点。

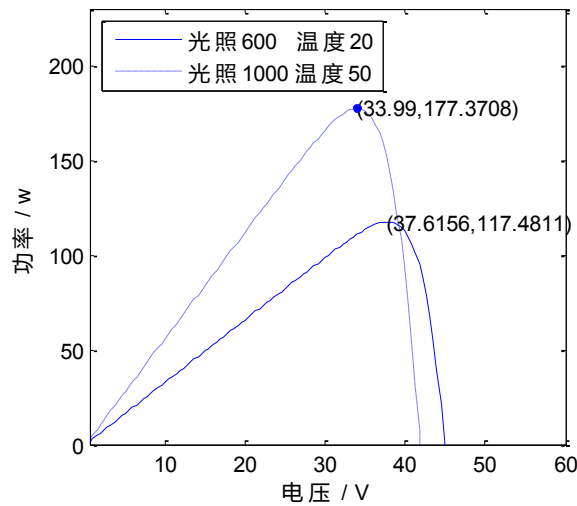


图 2-11 光伏组件功率输出特性

图 2-12 为电弧故障时光伏系统等效电路，图中 R_{arc} 为电弧等效电阻， U_{pv} 是光伏组件输出电压， U_{in} 为逆变器输入电压， I 是负载电流。

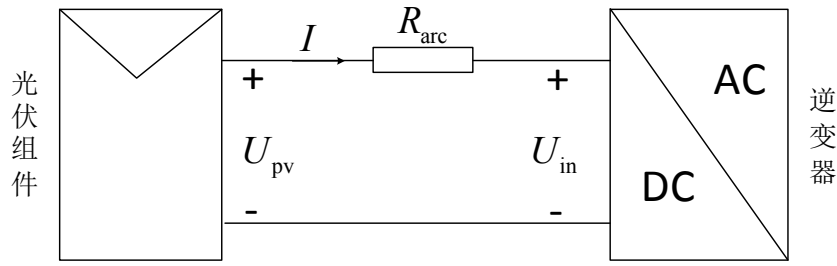


图 2-12 用电阻代替电弧后光伏系统等效电路

为故障发生前后光伏组件输出端的变化。图中可以看出，电弧故障发生后，由于电弧等效阻抗的加入，光伏系统负载增大，电流减小，光伏组件工作点向最大功率点右边移动，导致光伏系统的电压增大；同时光伏组件输出电压增大又导致故障电流增加。最后两种相反趋势达到平衡状态，光伏系统工作点最终位于最大功率点右边，如图 2-13 所示。

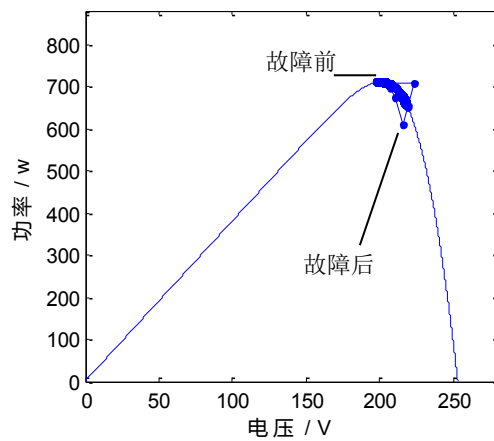


图 2-13 电弧故障前后光伏组件输出变化

2.5.2 光伏系统中电弧模型参数取值

根据获得的直流电弧模型，本文在考虑了实际光伏系统的特点后，利用建立的光伏系统实验平台，通过多组实验得到适用于光伏系统的电弧模型。本实验平台一共采用 4 块光伏组件串联，根据表 2-1 中的光伏组件参数可知，逆变器直流母线工作电压在 100-140V，工作电流根据光照条件在 2-4A。为此本文在不同光照条件下进行了 4 组实验，包含逆变器可能的工作电压和电流，每组实验分别用逆变器和电阻作为负载，以观察逆变器对电弧的影响。各组实验数据如表 2-2 所示，表中电压数据只保留个位，电流保留小数点后一位。

表 2-2 各组实验条件

实验编号	负载类型	开路电压 (V)	负载电流 (A)
1-1	逆变器	90	2.9
1-2	电阻	90	2.9
2-1	逆变器	110	3.1
2-2	电阻	110	3.1
3-1	逆变器	120	3.1
3-2	电阻	120	3.1
4-1	逆变器	140	4
4-2	电阻	140	4

其中, 实验编号 1-1 电弧电压电流波形如图 2-14 所示。利用实验数据, 可以得出上节导出的电弧模型中关键参数, 进而得到完整电弧模型。图 2-15 为拟合出的电弧电流电压各部分波形, 与上节对电弧实际波形的分析对比可发现, 电弧模型对于电弧电流和电压各部分拟合效果均较好。图中虚线代表梯形的 i_{gap} 或 v_{gap} , 实线代表双曲正切的 i'_{gap} 和 v'_{gap} 。两部分波形合成之后得到最终波形如图 2-16 所示, 对比可发现电弧模型整体拟合效果较好, 高频噪声拟合效果较差。由于电弧频谱分布广泛难以拟合且对电弧检测影响不大, 所以在本文中电弧模型的拟合精度已经足够使用。

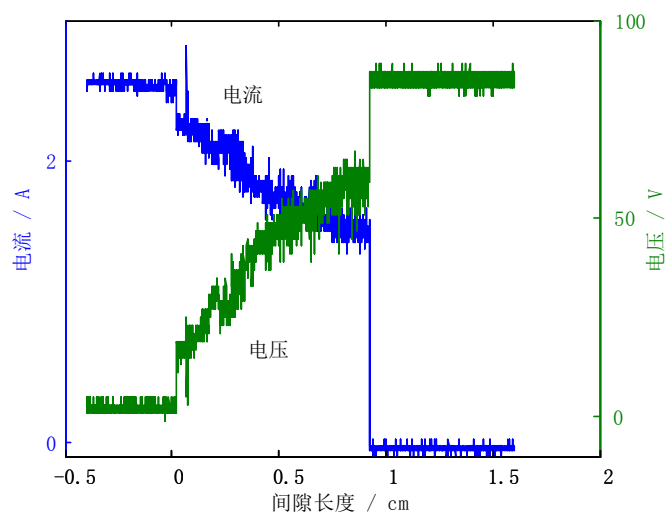


图 2-14 实验 1-1 电弧电压电流波形

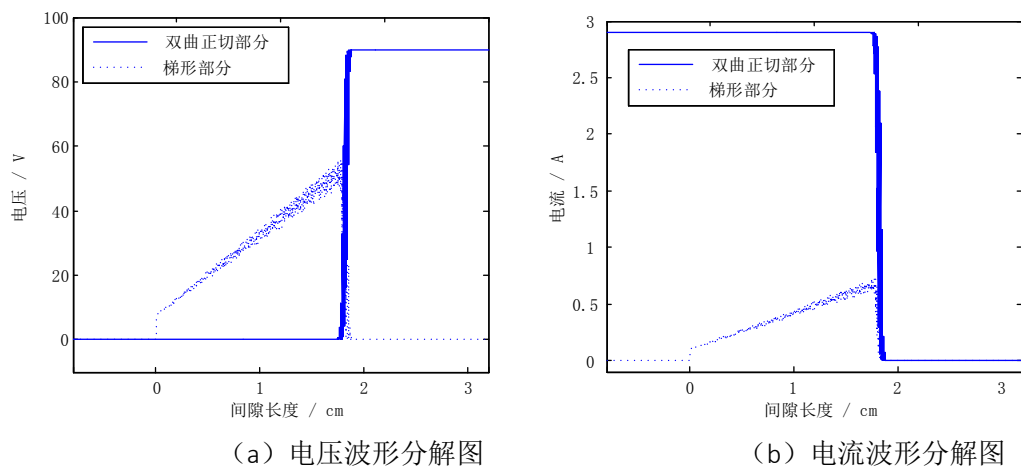


图 2-15 仿真模型分解图

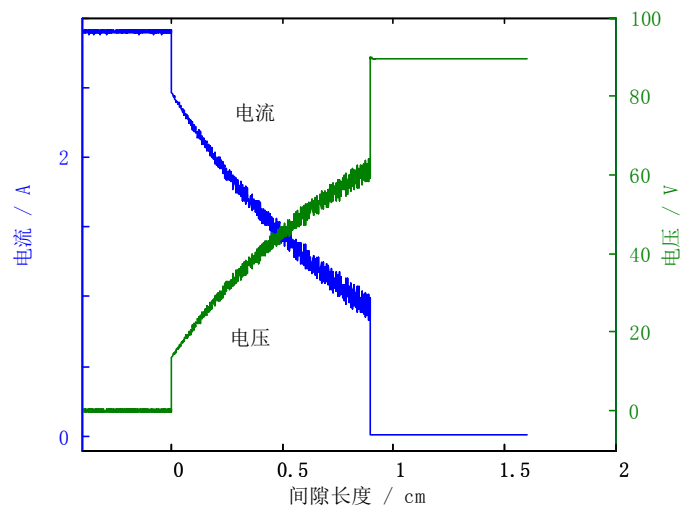


图 2-16 实验 1-1 数据仿真拟合结果

逆变器主电路中含有滤波电感和解耦电容，同时开关管工作在高频开通、关断状态使得逆变器对直流电弧的持续燃烧形成不利影响。1-2 组实验为 1-1 组的对比试验，除负载由电阻变为逆变器之外，其他电气条件均相同。实验证明纯电阻负载下，电弧的极限距离更大。

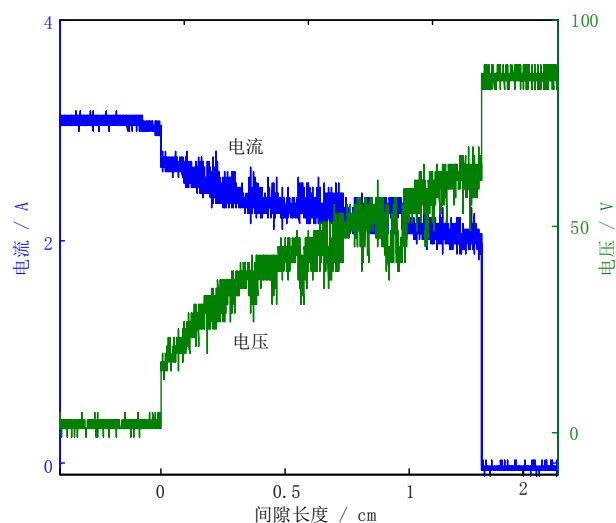


图 2-17 实验 1-2 电弧电流电压波形

与各组实验对应的电弧模型参数如表 2-3 所示。表中数据说明，除 b 之外，其他电弧模型的参数基本保持稳定。使用该参数可以建立近似模型。在逆变器负载下，电弧的极限距离明显小于电阻负载下，但是电弧熄灭的条件基本相同，即电流小于某一值，本文实施的各种条件下，电弧电流下降到 1.5A 左右更容易熄灭，可认为在这种条件下，电弧的维持电流为 1.5A。

表 2-3 光伏系统电弧模型参数

实验序号	a (V)	b (V/mm)	α
1-1	15	6	150
1-2	16	4.8	149
2-1	14	7	156
2-2	15	4.5	154
3-1	18	6.3	151
3-2	16	5	152
4-1	14	6.9	159
4-2	17	4.8	162

2.6 本章小结

本章首先详细研究了直流电弧特性，然后提出了基于数据拟合的电弧阻抗

模型，最后利用实验平台采集了光伏系统电弧电压和电流波形，并根据该数据建立了适合光伏系统电弧故障诊断的电弧模型。本章主要内容如下：

- (1) 为对电弧故障进行仔细分析，本文搭建了实验平台，主要包括光伏组件、光伏并网逆变器以及电弧发生器。该实验平台可方便、重复地进行电弧故障实验，为后续研究提供数据。
- (2) 依靠实验平台，本文利用示波器采集电弧的电压和电流数据，为通过数据拟合方法建立电弧模型，将电弧发展分成 3 个过程，并对各部分电弧电压电流特性进行详细的分析。
- (3) 依据电弧电压电流特性分析结果，寻找合适函数模型对曲线进行拟合。对于其中关键参数进行了讨论，最后解释了电弧随机特性的原因，并提出了电弧极限距离的函数表达式。
- (4) 研究了光伏系统的非线性特点，以及电弧和光伏系统的相互影响，通过实验数据采集不同条件下光伏系统中电弧故障的电压电流数据，利用前文所述的电弧模型，计算出关键参数并获得最终电弧模型。将电弧模型与实验波形对比可知，该模型精度满足本文要求

第三章 大型光伏电站电弧故障分析

3.1 引言

大型地面光伏电站与小型分布式光伏系统相比，规模更大，结构更复杂。从结构上说，小型分布式光伏发电系统大多采用组串结构，光伏组件数目较少，采用直接串联的方式连接；在大型地面光伏电站中，单台逆变器功率可达 500kW，其中一个阵列采用的光伏组件数可多达 2000 块以上，且连接复杂，一个地面光伏电站通常由几个到十几个如此规模的阵列组成，直流电弧故障发生的位置随机性强，没有规律，传统方法难以定位。从信号衰减的角度来说，小型分布式光伏发电系统规模小，系统寄生参数可以忽略，任何位置发生的电弧故障均可被放置于直流母线的电弧检测装置检测到；在大型地面光伏电站中，情况变的更加复杂，长达几百米的输电线缆中的寄生电感和寄生电阻会对电弧故障信号产生较大的衰减，光伏电池的 PN 结电容为故障信号提供了通路，因此，大型地面光伏电站中的寄生参数不能忽略。从保护的角度看，小型系统由于并网功率小，检测到故障之后可以直接将系统关闭，不会对用户造成太大经济损失，也不会对公共电网造成实质性损害；大型光伏电站则不同，若因局部小型故障而将整个系统关闭，用户就会损失其他非故障区域的发电收益，同时未受电网调度中心许可，突然将如此大功率发电系统关闭会引起电网动荡，甚至大规模停电事故，而这绝不会被允许。

综上，大型地面光伏电站系统中的电弧故障处理与小型系统相比，故障信号的检测和判断更加困难。大型系统中的主要难点在于故障的检测和定位以及故障后的容错运行方案。检测和保护设备安装的越密集，故障检测和定位的分辨率越高，系统可以更大的功率容错运行，但是会增加设备成本；反之减少保护设备投入，又会导致故障时不得不损失更多的发电功率。

解决大型电站的电弧故障问题，首先必须能够准确的检测到任意位置的电弧故障。然而，由于大型电站寄生参数的存在，电弧故障导致的噪声信号可能

淹没在光伏阵列之中，造成安装在直流母线处的电弧故障检测设备漏判。为此，本文建立了光伏阵列的等效模型，研究了任意位置电弧噪声信号在系统中的传输情况，以及在逆变器直流母线端的电弧故障信号的衰减情况。

3.2 大型光伏电站拓扑结构

目前光伏电站规模越来越大，除了前期的建设，后期运行和维护也是非常关键的工作。对于光伏电站的运行管理系统，非常重要的一项工作就是对故障的处理。而光伏电站的复杂结构使得故障处理成为一项十分困难的工作。大型光伏电站通常有若干个功率单元组成，每个功率单元又可包含数台逆变器，每台逆变器可接纳若干汇流箱的输出，每个汇流箱又可接纳若干个组串，每串包含若干串联的光伏组件，最终导致整个地面光伏电站包括数千至数万块光伏组件。出于故障的可操作性，本文将以单台逆变器所接纳的光伏阵列作为研究对象。以青海省某光伏电站为例，其全貌如图 3-1 所示。



图 3-1 青海某光伏电站俯瞰图

图中分离的小单元即为光伏组串，由上下两排一共 20 块光伏组件串联而成，直流电压可达 600V 以上。图 3-2 为单台逆变器下光伏组件的连接方法，图中，20 块光伏组件串联构成光伏组串，一般 16 路光伏组串并联到一个汇流箱，若干汇流箱再通过并联接入逆变器直流输入端。图 3-3 为逆变器与交流电网的连接方式，功率为 1MW 的工频三相三绕组变压器将两台 500kW 光伏并网

逆变器的输出电压升压到 35kV 母线，再由变电站将 35kV 交流母线升压至 110kV 交流母线，实现电能的远距离传输。

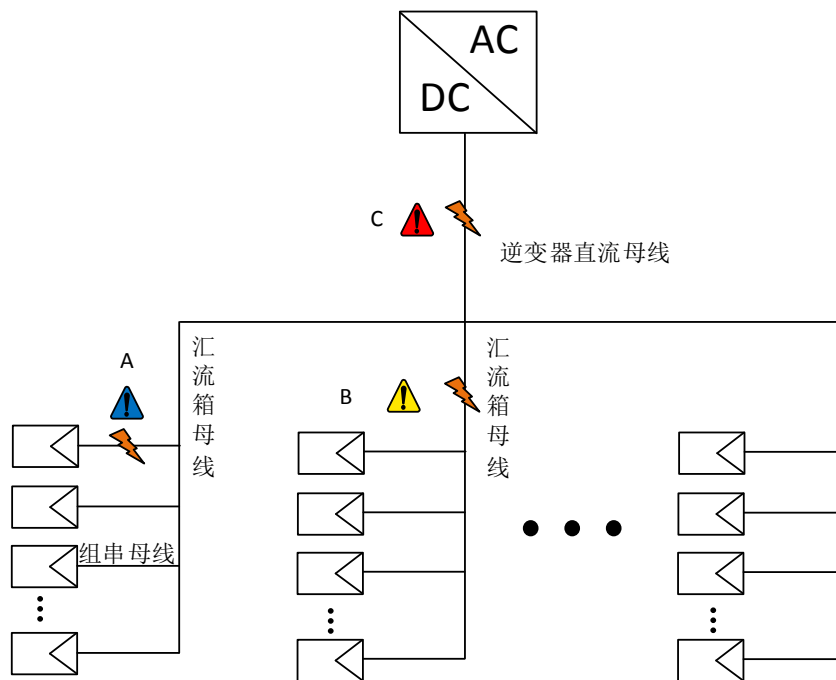


图 3-2 单台逆变器光伏阵列结构图

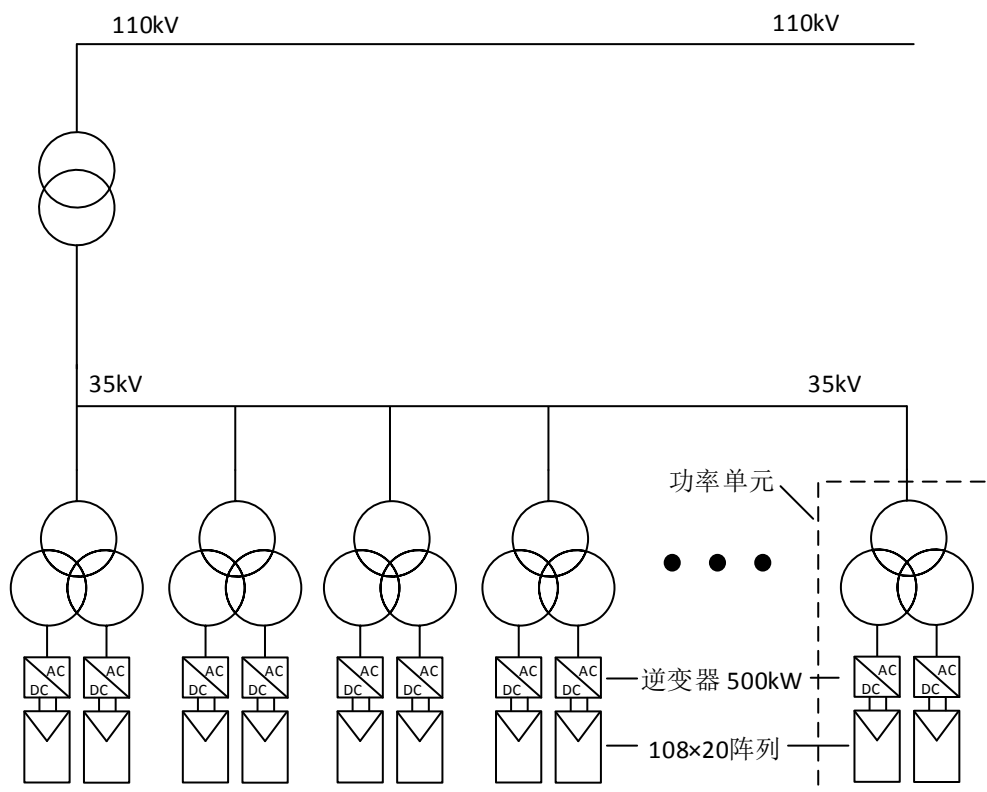


图 3-3 青海某光伏电站原理结构图

表 3-1 列出了该电站中单台逆变器所接纳的光伏阵列参数。该系统中单台逆变器额定功率为 500kW。逆变器接纳的光伏组件总数为 2160 个，包含 108 个组串，每个组串由 20 块光伏组件并联而成。标准条件（光照值为 $1000W/m^2$ ，温度为 $25^{\circ}C$ ）下，光伏组件在最大功率点的电压为 29.5V,最大功率点电流为 7.97A。故标准状态下，组串的直流电压为 600V，电流为 8A 左右；汇流箱一般最大可有 16 路组串，所以汇流箱输出端电流为 126A；逆变器的直流端电流为 860A。因此在组串内和逆变器输入直流母线上均有极大串联电弧的威胁。

表 3-1 单台逆变器光伏系统参数

参数名称	数值
单台逆变器额定功率（kW）	500
单台逆变器光伏组件数量（并联数*串联数）	108*20
组件开路电压（V）	37
组件短路电流（A）	8.54
组件最大功率点电压（V）	29.5
组件最大功率点电流（A）	7.97
逆变器直流侧最大功率点电压（V）	450-800

根据最大功率传输理论可计算出在最恶劣的情况下电弧的危害。通过对线性电源下的电弧危害计算公式进行改进，得到适合光伏系统电弧危害的计算公式：

$$IE_{pv} = \frac{0.239 * (V_{mpp} * I_{mpp} * T_{arc})}{4 * 3.14 * R^2} \quad (3-1)$$

式中， IE_{pv} 为估计出的电弧最大危害，单位是卡路里每平方厘米； V_{mpp} 是最大功率点电压； I_{mpp} 是最大功率点电流； T_{arc} 是电弧持续时间； R 是离电弧的距离。

从该公式可以看出，电弧的辐射能量与最大功率点电压和电流成正比。根据此处估计，可将系统中电弧的危害分成 3 个等级，如图 3-2 所示。图中，A 处电弧故障为组串内串联电弧，电流为 8A 左右；B 处位于汇流箱输出直流母

线处电弧，电流为 126A 左右，C 处为逆变器直流母线处电弧，电流为 860A 左右。表 3-2 为利用公式(3-1)估计的各处电弧故障的危害，根据危害程度和保护成本可确定保护方案的隔离分辨率。

表 3-2 不同类型电弧故障危害估计

电弧类型	故障位置	电压 (V)	电流 (A)	能量 (s·cal·cm ⁻²)
A	组串母线	600	8	91.33
B	汇流箱母线	600	126	1438.6
C	逆变器母线	600	860	9818.8

3.3 光伏电池动态模型

电弧的故障信号属于高频信号，光伏电池的本质是 PN 结，大量的光伏电池连接成光伏组件进而形成光伏阵列之后，这种寄生的电容可能成为高频电弧故障信号的通路，从而使得在远处的故障检测装置无法正确检测到。研究光伏电池的动态模型可以分析光伏电池 PN 结电容的大小以及对电弧故障信号的影响，为建立光伏系统动态等效模型提供基础。下面将从硅太阳能电池的物理模型出发，推导出太阳能光电流的表达式以及端电压对暗电流的影响，进而推导出光伏电池的动态模型。

光伏电池的物理结构如图 3-4 所示。图中，N 区的参杂浓度远大于 P 区，即 N⁺/P 结构。N 区一般做的很薄，且材料的光吸收系数很小，因此可以忽略 N 区和空间电荷的光吸收，近似认为只有 P 区吸收光子并形成过剩载流子。由固态电子学可知，空间电荷区边界处少数载流子的扩散电流之和即为通过 PN 结的电流，且该电流主要以轻杂质侧少数载流子的扩散电流为主。因此可近似认为太阳能电池的输出电流由空间电荷区的 P 区侧边界的少数载流子扩散运动形成。

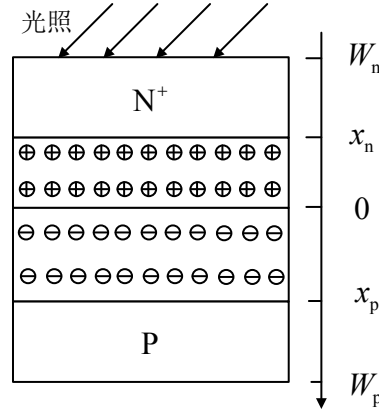


图 3-4 光伏电池物理结构

扩散电流与少数载流子的浓度有关，P 区中过剩少数载流子浓度满足以下动态方程：

$$\frac{\partial \delta n(x,t)}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 \delta n(x,t)}{\partial x^2} + G(x) - U(x,t) \quad (3-2)$$

$$G(x) = k_1 e(t) e^{-\alpha(x-x_p)} \quad (3-3)$$

$$U(x,t) = \frac{\delta n(x,t)}{\tau_n} \quad (3-4)$$

式中， $\delta n(x,t)$ 为 t 时刻、P 区 x 处的过剩少数载流子的浓度； D_n 为电子扩散系数； $G(x)$ 为 P 区 x 处过剩载流子的产生速率， $e(t)$ 为入射光的强度， k_1 为反应光反射系数、光吸收系数等各种因素综合效应的参数； $U(x,t)$ 为 P 区少数载流子的复合率， τ_n 为 P 区少数载流子的寿命。

太阳能电池稳态时可以认为载流子浓度不变，即 $\frac{\partial \delta n(x,t)}{\partial t} = 0$ ，带入(3-2)

-(3-4)可得：

$$\begin{aligned} I &= I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{U_D}{U_r}} - 1 \right) \\ &= I_{sc} - I_D \end{aligned} \quad (3-5)$$

其中， I_{sc} 为光生电流，只与光照强度有关， I_D 为暗电流，只与 PN 结偏置

电压 U_D 有关。

动态特性主要由光照、温度以及偏置电压（电池输出电压）导致，温度变化缓慢可以不予以考虑，光照变化只影响电池的光电流大小，偏置电压的变化会导致太阳能电池模型参数的变化，本文主要研究偏置电压变化时太阳能电池的输出特性。考虑偏置电压变化时，可令光强 $e(t)=0$ ，也即 $G(x)=0$ 。由式(3-2)-(3-4)可得到：

$$\frac{\partial \delta n(x,t)}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 \delta n(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\delta n(x,t)}{\tau_n} \quad (3-6)$$

由式(3-6)求解可得，光照为零，偏置电压变化时暗电流的大小为：

$$i_D(t) = I_D \left\{ \frac{\sqrt{\tau_n}}{\sqrt{\pi}} \cdot t^{-0.5} e^{-\frac{t}{\tau_n}} + \operatorname{erf}\left(\sqrt{-\frac{t}{\tau_n}}\right) - 1 \right\} + I_D \quad (3-7)$$

图 3-5 显示了当暗电流为 10A 时，偏置电压变化引起的暗电流阶跃响应曲线。图中可以看出，当突加电压的一瞬间，有较大的冲击暗电流，之后快速下降，在 $2\tau_n$ 时暗电流稳定在 10A。这表明太阳能电池输出特性存在惯性环节，即呈容性。偏置电压突变时，由于电容的存在，电容充电电流较大，形成了暗电流的冲击电流，随着电容电压升高，电容慢慢充满，电流呈指数减小。进入稳态后，电容电流为零，暗电流等于理想二极管电流。所以，黑暗条件下，太阳电池的物理模型可等效成二极管和电容的并联。

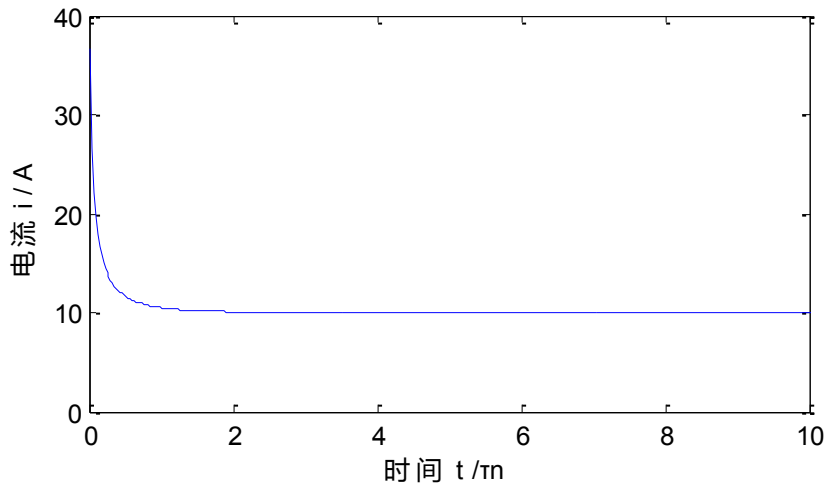


图 3-5 暗电流阶跃响应曲线

由式(3-5)可知，光伏电池输出电流为光电流和暗电流之差。所以完整的光伏电池等效模型应该是光生电流源和理想二极管、寄生电容的并联电路，如图 3-6 所示。

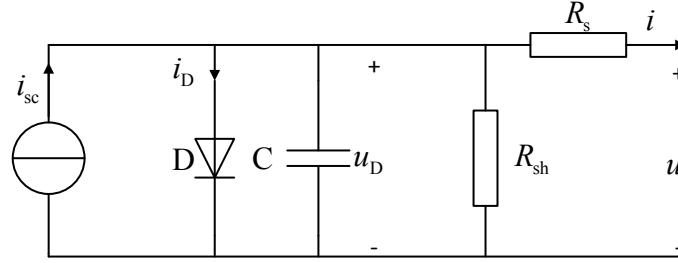


图 3-6 太阳能电池动态等效电路

根据式(3-5)以及(3-7)可知，暗电流的暂态分量实际为寄生电容的电流，即：

$$i_c(t) = I_D \left\{ \frac{\sqrt{\tau_n}}{\sqrt{\pi}} \cdot t^{-0.5} e^{-\frac{t}{\tau_n}} + \operatorname{erf}\left(\sqrt{-\frac{t}{\tau_n}}\right) - 1 \right\} \quad (3-8)$$

$$C(t) = \frac{d}{dU_D} \int i_c dt = \frac{I_D}{U_T} e^{\frac{U_D}{U_T}} [\tau_n \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{t}{\tau_n}}\right) - \int \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{t}{\tau_n}}\right) dt] \quad (3-9)$$

从上式可以看出，电容 \$C\$ 并非常量，即当偏置电压突变后，寄生电容 \$C\$ 的容值随时间变化。稳态后等效电容 \$C\$ 的大小为：

$$C = \lim_{x \rightarrow \infty} C(t) = \frac{I_D \tau_n}{U_T} e^{U_D/U_T} \approx \frac{I_D \tau_n}{U_T} \quad (3-10)$$

可见，寄生电容 \$C\$ 是与温度 \$T\$、少数载流子浓度寿命 \$\tau_n\$、稳态暗电流 \$I_D\$ 有关的非线性电容。

3.4 大型光伏电站电力线路等效电路

如前文所述，光伏电站发电容量较大，直流输电电缆较长，电压较高，电流较大，其寄生参数对于电弧故障信号的影响应予以分析研究。

电力线路的参数可用电阻 \$R\$、电抗 \$X\$、电导 \$G\$ 和电纳 \$B\$ 这四个参数表示。光伏系统电力线路一般使用标准电缆，其参数可直接从制造商提供的数据中获得。电缆的电阻反映了通电导线的热效应，与导线材料、截面积以及长度有关。线路电抗是导线中流过交流信号，在导线周围产生磁场而形成的电感对交流信

号的抵抗作用。线路的电纳是有导线之间、导线与大地之间的电容决定的。线路的电导主要是由于绝缘泄露导致的。根据《电力工程电缆设计规范》以及《光伏电站设计规范》中的有关规定，光伏系统中，汇流箱至逆变器处通常使用 YJV22-0.6/1kV 型电缆并采用直埋敷设方式安装。这种情况下，电缆电导和电纳均较小，电缆阻抗主要以电阻和电感为主。

根据前文分析，在光伏系统中汇流箱出线额定电流为 126A 之间，电缆截面积可选 20-30mm²，逆变器进线额定电流为 860A，电缆截面积可选 180mm²。光伏系统中的电缆一般使用国家标准 GB/T 3956-2008 中规定的第 5 种软导体制成的电缆。在 20℃时的其电阻不得超过某一数值，表 3-3 为其中部分线径电缆参数。从数据可知，随着电缆截面积的增大，电缆单位长度电阻急剧减小。这是因为导体电阻与导体截面积成反比。由于实际电缆导体往往有数跟单线绞合而成，可按并联考虑，因此导体实际电阻应为表中数据几分之一。

表 3-3 单芯和多芯电缆用第 5 种软铜导体最大电阻

标称截面积/mm ²	20℃时导体单线最大电阻/（Ω/km）
1.5	13.3
2.5	7.41
4	4.95
25	0.78
150	0.129
185	0.016

电缆的电感参数计算较为复杂。电缆的电感是电缆导体所交链的磁通链与导体电流的比值。为便于计算导线中的电感分成内感和外感两部分，内感是导体本身的电流所形成的磁通与导体自身交链形成的电感，外感则是邻近导体的电流形成的磁通与电缆导体交链形成的电感。图 3-7 为两根单芯电缆组成的回路，图中 r_c 为导体半径（cm）， S 为两导体之间距离（cm）。

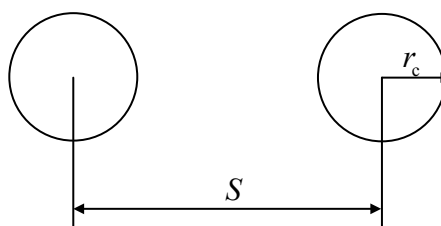


图 3-7 两根单芯电缆回路

电缆内感与导体的制作方式有关，通常有单根实心圆导体和多根单线组绞两种方式，内感 L_i 的大小如表 3-4 所示。

表 3-4 不同电缆内感大小

单线根数	$L_i (10^{-9} \text{ H/cm})$
1	0.500
3	0.780
7	0.640
19	0.555

电缆自感 L 为：

$$L = L_i + 2 \cdot \ln \frac{1}{r_e} \quad (3-11)$$

电缆互感 M 为：

$$M = 2 \cdot \ln \frac{1}{S} \quad (3-12)$$

对于光伏系统来说，电缆长度一般为数百米，电缆间距以 5cm 计，根据式 (3-11)-(3-12) 可知，电缆自感一般远大于互感。综上线路的等效电路可以用电阻和电抗的串联回路表示，如图 3-8 所示。

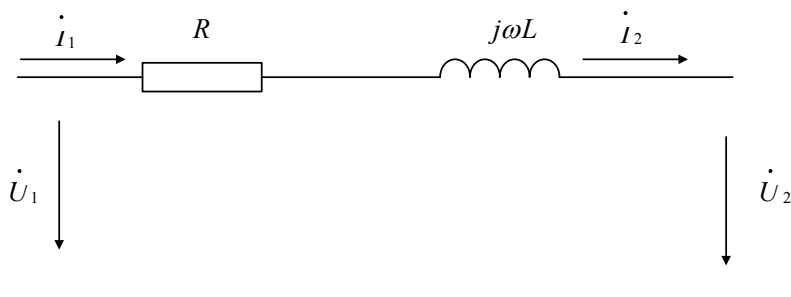


图 3-8 光伏电站电力线路等效电路

则电力电缆阻抗为：

$$Z_{\text{cable}} = R + j\omega L \quad (3-13)$$

3.5 电弧故障信号衰减研究

以上各节分别分析了光伏系统中主要元件光伏组件和电力电缆的寄生参数或动态模型。本节将对光伏系统进行建模分析，研究电弧高频信号在光伏系统中的传输衰减问题。

由图 2-6 可知，电弧发生之后电流波动幅值并不太大，因此光伏组件输出电压变化不大，由式(3-7)-(3-9)以及图 3-6 可知，太阳能动态等效电路中理想二极管电流变化不大；同时光生电流值完全由光照强度决定与输出电压无关。所以，若只考察电弧高频信号在系统中的传输问题，光伏组件可等效成如图 3-9 所示负载网络。

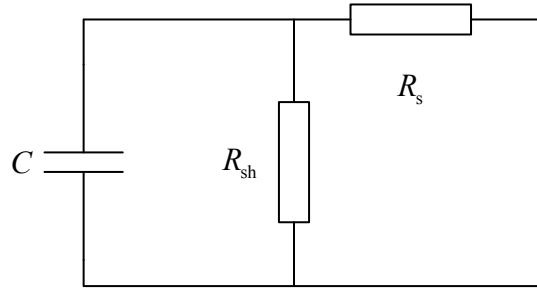


图 3-9 等效负载网络

光伏组串有 20 块光伏组件串联而成，可得光伏组串等效网络的阻抗为：

$$Z_{\text{PVS}} = \frac{20R_{\text{sh}}}{\omega R_{\text{sh}} C + 1} + 20R_s \quad (3-14)$$

光伏组串经汇流箱汇集后与逆变器并联，所以单台 500kW 光伏并网逆变器下光伏阵列系统等效阻抗网络如图 3-10 所示。图中光伏组串由 20 块光伏组件串联而成，所有光伏组串并联之后与电力电缆串联。光伏组件参数以及电力电缆参数均可由产品数据表中查询或计算得出。根据该网络结构，可计算出任意位置发生电弧故障时，电弧故障产生的噪声信号在电弧故障检测装置处的衰减情况。

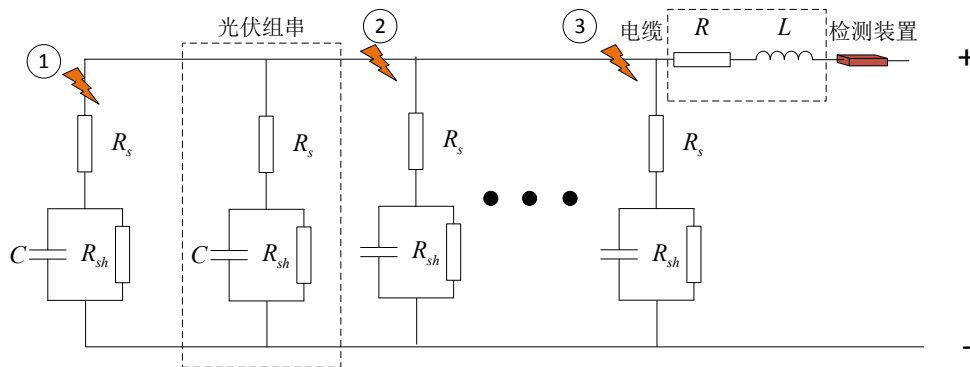


图 3-10 光伏系统等效阻抗网络

当串联直流电弧故障发生在光伏组串内时，如图 3-10 中第 1 种类型电弧，由于所有光伏组串与逆变器并联，所以任意光伏组串内发生串联直流电弧故障，故障信号在电弧检测装置出的衰减情况都一样。以最左边光伏组串内发生电弧为例，可得系统频域特性如图 3-11 所示。PN 结电容、串联寄生电阻、并联寄生电阻大小由制造材料、制造工艺以及 PN 结面积等因素决定，结电容大小往往在 10-100pF 之间，串联电阻不到 1 欧姆，并联电阻可达几百欧姆。结电容大小对频域特性有较大影响，图 3-11 中 3 条曲线分别为结电容为 20pF、50pF 和 80pF 时的特性曲线。图中可见，电容增大后频域特性往下移动，表明故障信号衰减更加严重。对于 40kHz 及以上的信号甚至已经衰减致原始信号的十分之一，这使得本来就不十分明显的电弧故障信号难以被正确检测识别。如果考虑到制造工艺，采用 PN 结电容较大的光伏组件构成的光伏系统，这种衰减效应更加明显。

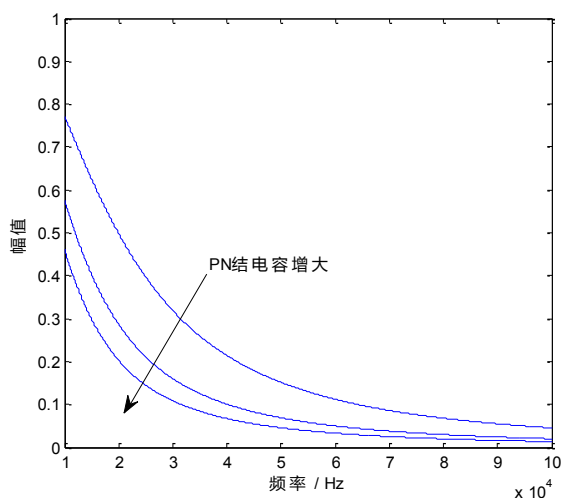


图 3-11 PN 结电容变化时光伏系统频域特性

为更直观显示这种衰减效应，文章利用随机信号进行测试。图 3-12 为各处信号时域波形，第一幅图为测试随机信号，第 2 至 4 幅图为分别为 PN 结电容为 20pF、50pF 和 80pF 时电弧故障检测装置处的信号。图中可以看出，随着 PN 结电容的增大，信号幅值衰减越来越严重，PN 结电容为 50pF 和 80pF 时已经几乎看不到时域故障特征。测试信号中的快速随机变化在衰减之后的信号中难以见到。

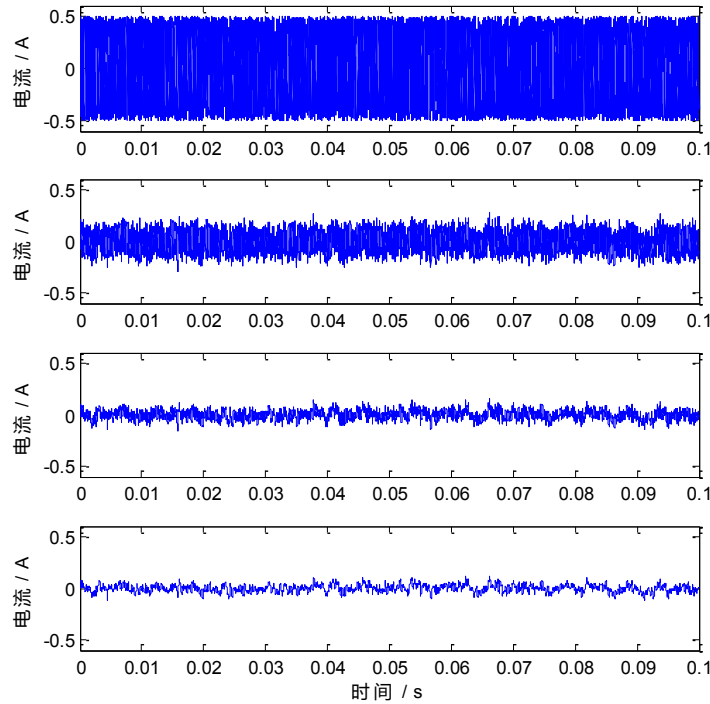


图 3-12 PN 结电容对电弧故障信号衰减影响

对这组时域信号进行傅里叶分析，可以得到各信号的频谱如图 3-13 所示。图中第 1 幅图依然是测试信号的频谱，可以看出随机信号的频谱很宽，在全频域均有相等的幅值。第 2 至 4 幅图为衰减之后信号的频谱图，可以看到衰减之后的信号在高频段的频谱分量几乎为零，这说明大型地面电站式光伏系统对高频信号有较大的衰减作用。对于第 2 至 4 幅图可以发现，随着 PN 结电容的增大，高频衰减效应显著增强，结电容为 80pF 时，信号中 10kHz 以上频率成分几乎为零，电弧故障特征信息已经全部被系统过滤掉，对检测装置带来极大挑战。

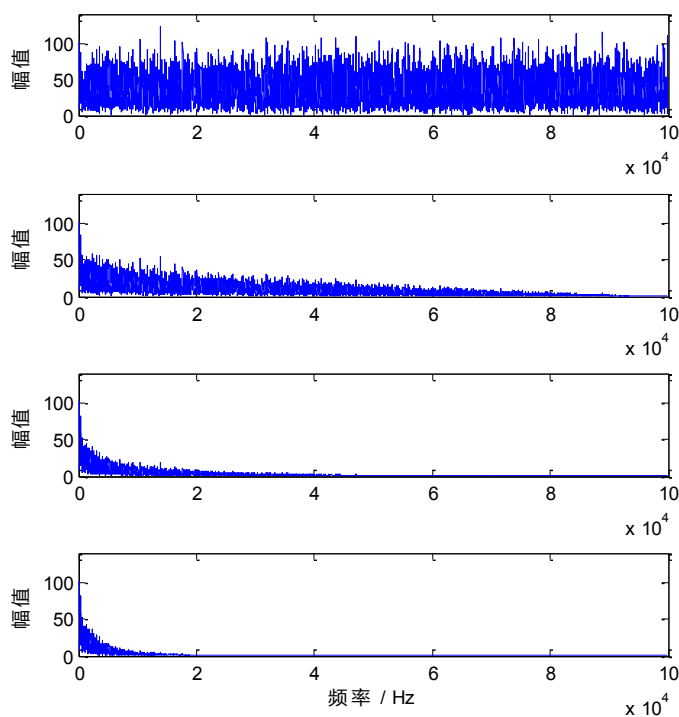


图 3-13 不同 PN 结电容电弧故障信号频谱图

同时，电力电缆由于布线方案不同，其长度变化也较大，本文分别对 100m、200m 和 300m 电缆进行了计算。此时 PN 结电容为 20pF 不变。结果如图 3-14 所示。图中可看出，当电缆长度越长，其阻抗越大，电弧造成的高频噪声信号也越容易被衰减，导致在检测装置处的信号十分微弱。

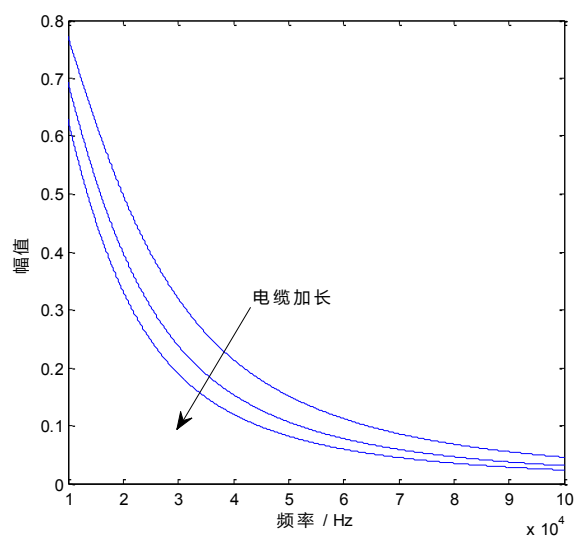


图 3-14 电缆变化时光伏系统频域特性

随机信号的测试结果如图 3-15 所示。图中 3 条曲线为不同电缆长度时，电弧故障检测装置处的故障信号，图中第 1 幅图依然是随机信号，往下依次是电缆长度为 100m、200m 和 300m 时的电弧故障信号。图中时域信号幅值大幅减小，主要是由于故障信号中高频信号大量衰减导致。对比不同长度电缆时电弧故障信号的衰减情况，可以发现随着电缆长度增加，故障信号的衰减更加严重，这与前文的分析吻合。

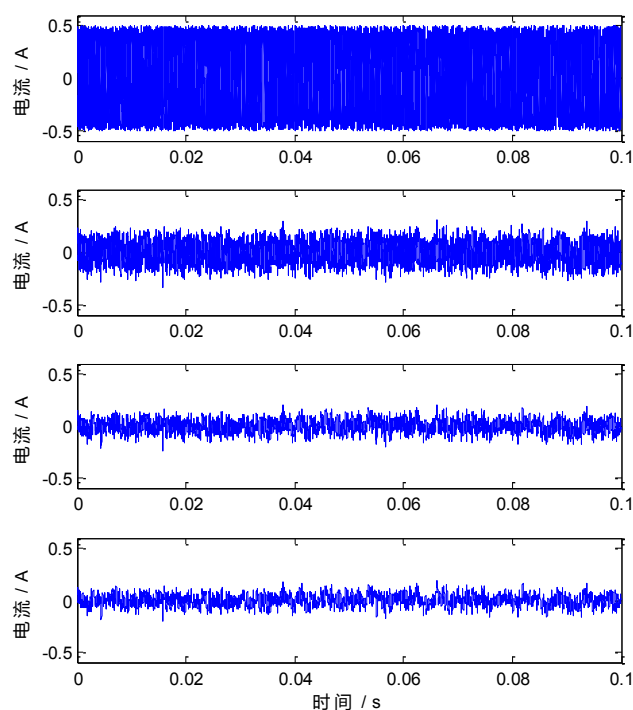


图 3-15 电缆长度对电弧故障信号的影响

对上述信号进行傅里叶分析，得到其频谱图如图 3-16 所示。随机信号在全频域的幅值相同，适合作为测试信号。将衰减信号与测试信号对比可以发现，衰减后的信号中高频成分幅值几乎为零。对比不同长度电缆时的衰减信号可以发现，随着电缆长度增加，高频成分衰减愈加严重。

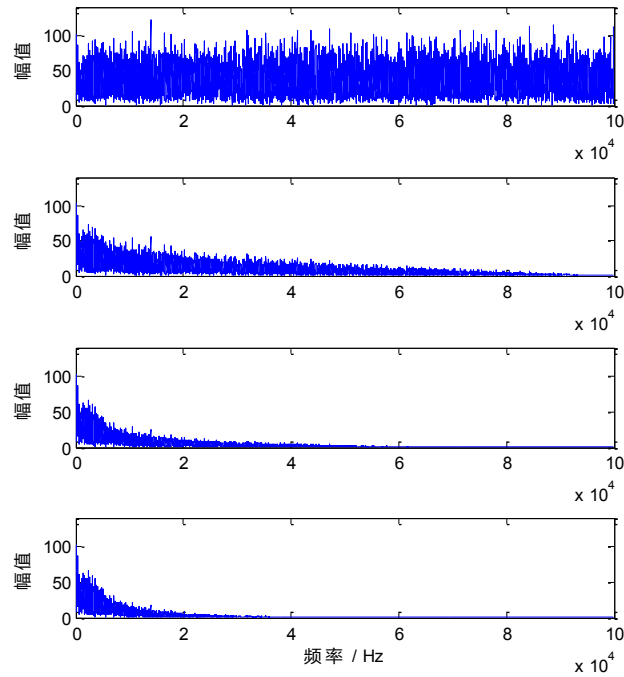


图 3-16 不同电缆长度电弧故障信号频谱图

从以上分析可见，当电弧发生在光伏组串内时，无论电弧发生位置在何处，位于逆变器直流母线处的电弧故障信号十分微弱，频域特征变化较大，给电弧故障检测带来极大挑战。但是当电弧发生在光伏组串之外，如图 3-10 中第 2 类和第 3 类电弧所示，电弧发生的位置就必须予以考虑。在本例中，一共有 108 个光伏组串与逆变器并联，令 k 为电弧发生位置与逆变器之间的光伏组串数， k 取 1 时表示电弧发生位置与逆变器最近， k 取 108 时表示电弧发生位置与逆变器最远，如图 3-17 所示。 k 取不同值即可表示电弧发生位置与检测设备的远近，以 k 为变量考察电弧造成的噪声信号在逆变器直流母线处的衰减情况，对系统电弧故障保护有极重要的参考意义。 k 取不同值时，等效电路的频域特性如图 3-18 所示。在研究不同位置处的电弧故障信号在检测装置处的衰减情况时，保持 PN 结电容不变为 20pF，电缆长度为 200m。

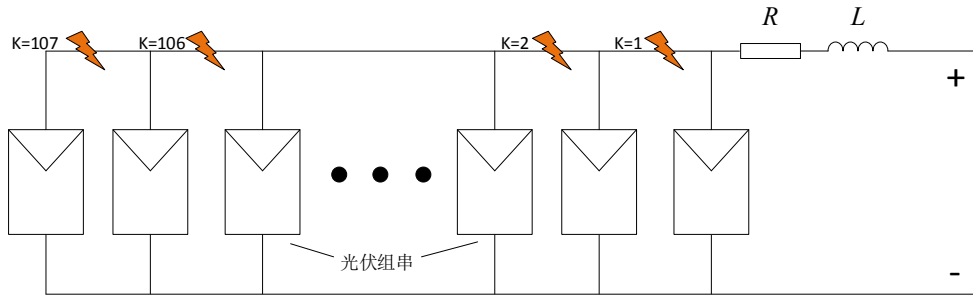


图 3-17 不同位置电弧示意图

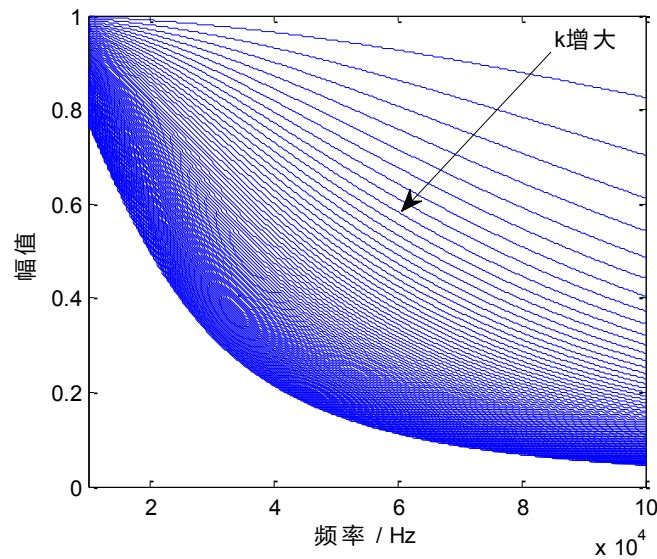


图 3-18 不同位置电弧噪声信号衰减情况

从上图可以看出，当 k 增大，即电弧发生位置距离逆变器越远，电弧噪声衰减越严重，这也与常识符合。图中 k 均匀增大，但网络的频域特性开始下降较快，之后下降速度越来越慢，且电弧发生位置与逆变器较近时（如 $k=1,2$ ），电弧造成的噪声衰减并不十分严重，当电弧发生位置与逆变器的距离超过某一数值之后（如 $k=10$ 时，大部分频段信号衰减比例都没超过 50%），频域特性较低，信号衰减较为严重。这一临界光伏组串数可以作为系统保护策略的重要参考依据。

为验证上述方法的正确性，利用随机信号进行仿真验证。图 3-19 为距离电弧故障检测装置距离不同的故障信号，其中第 1 幅图为测试信号，第 2 至第 4 幅分别为 $k=1, 50, 107$ 时故障信号，图中可以看出，随着 k 增大故障信号幅值大幅减小；图 3-20 为故障信号的频谱图，可以看出，当 k 增大时故障信号中

的高频成分几乎衰减为零。这与前文的理论分析一致。

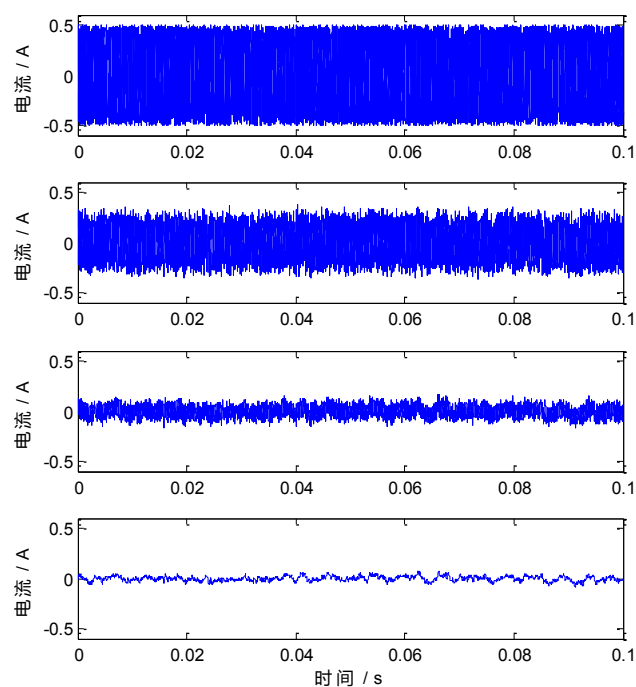


图 3-19 不同距离处电弧故障信号

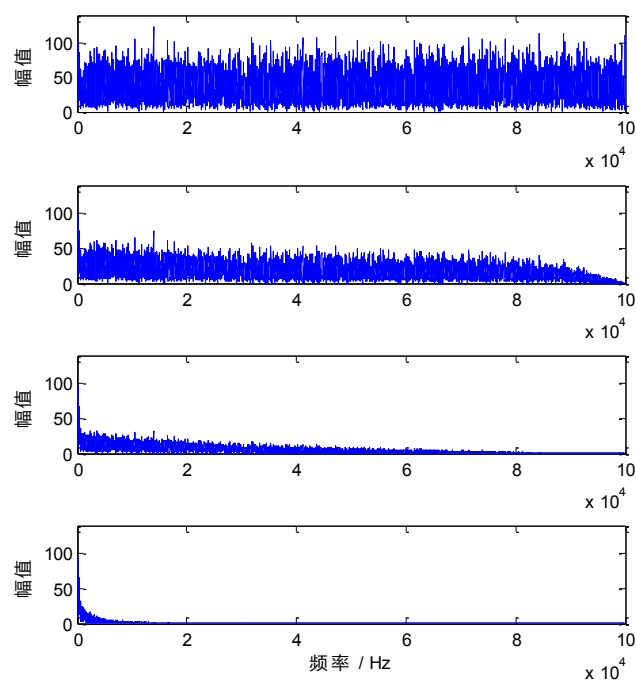


图 3-20 不同距离处电弧故障信号的频谱

3.6 本章小结

本章主要研究了大型地面光伏电站中直流电弧故障信号的衰减问题。结果表明光伏组件寄生电容和电力电缆寄生阻抗使得电弧故障信号快速衰减，检测装置难以准确检测到故障。具体内容如下：

- (1) 以青海省某光伏电站为例，研究了大型地面光伏电站的系统结构、连接方式以及系统主要技术参数。根据系统参数利用最大功率方法计算了三种典型位置处电弧故障的危害，确定了研究对象；
- (2) 研究光伏组件的动态模型和直流侧电缆线路的等效模型，重点考虑了PN结电容和电缆阻抗对高频信号的影响，建立了交流信号下的光伏系统等效电路；
- (3) 研究了不同位置处光伏系统中直流串联电弧故障信号在逆变器直流侧的衰减情况。结果表明，光伏组串内的直流电弧故障无论发生在什么位置，其故障信号在逆变器直流侧的衰减程度都很大，给检测算法设计带来极大挑战；发生在汇流箱直流母线处的直流电弧故障，故障信号在逆变器直流的衰减情况与故障点与检测装置之间的位置有关，距离越远，衰减越严重。

第四章 直流电弧检测研究

4.1 引言

随着可再生能源快速发展，新能源接入问题引起了广泛关注。直流系统是一种对新能源友好的电力系统，因此近年来研究较多。然而，如前文所述，直流系统中的直流电弧严重威胁到系统的安全稳定运行。

传统串联直流电弧故障检测方法大多为特征值阈值法，即通过实验采集数据，并进行分析，找出故障前后变化明显的特征量，根据实验数据设定该特征值的阈值，当故障特征值大于阈值即可认为发生故障。然而对于复杂、非线性系统来说，单一的故障特征值难以识别故障状态，导致误判或漏判。

本文提出了一种新型的检测算法，通过时-频域特征向量提取电弧故障特征，同时通过自校正阈值适应不同系统，仿真和实验数据均证明该方法有效可行。

4.2 光伏系统直流电弧故障类型

小型分布式光伏系统和大型地面光伏电站中的光伏组串通常由十数块光伏组件串联而成，如图 4-1 所示。为便于安装，光伏组件之间通过易于插拔的连接器连接。按照电气安全标准，一般要求逆变器以及光伏组件外壳可靠接地。光伏组件和电缆一般安装在室外，恶劣环境使系统极易老化损坏，同时系统一般安装在屋顶或偏远地区等不易到达的场地，人工维护检修困难，为电弧故障的发生埋下隐患。光伏系统工作时，系统直流母线电压可高达几百伏，极易产生串联电弧，若正负母线距离较近，可能由于绝缘损坏导致并联电弧，系统正负母线对地也有较高电压，对地电弧也是较常发生的故障之一。图 4-1 中标识了 3 种可能发生的电弧故障类型，其各自特性如表 4-1 所示。

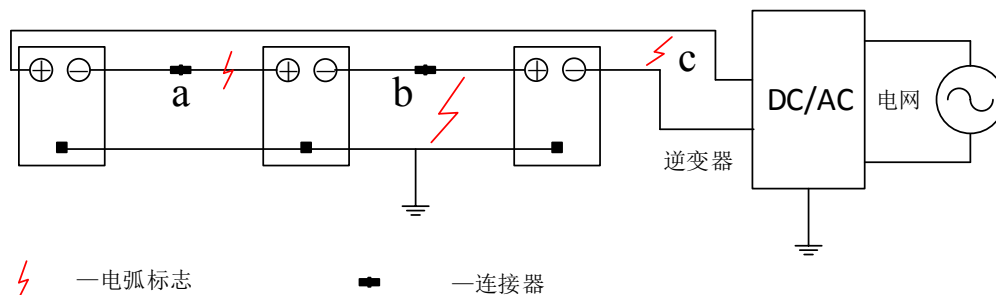


图 4-1 单相光伏系统结构图

输电线缆老化损坏，连接器松动均会导致串联电弧，这是最常见也是危害较大的电弧故障；由于系统能量较小，对地电弧不易发生，同时传统的漏电保护设备也可以检测到对点电弧的发生，因此对地电弧危害较小；并联电弧的危害最大，逆变器可能因为输入电压过低而停机，导致系统能量全部用于支持电弧燃烧，这将造成大量热量，引发二次事故，但也正因为这种明显的故障特征，许多传统保护设备都可以实时检测。综上，在光伏系统中，串联电弧是最值得关注的故障，也是本文的工作重点。

表 4-1 单相光伏系统中电弧故障类型及特点

类型	名称	危害	发生概率	处理难度
a	串联电弧	中	大	大
b	对地电弧	小	小	小
c	并联电弧	大	中	小

4.3 模式识别故障诊断原理

模式识别是 20 世纪 60 年代迅速发展起来的一门学科，在很多科学和技术领域中得到了广泛的应用，推动了人工智能系统的发展，特别在于机器视觉、故障检测、医学图像分析、文字识别和语音识别等领域有许多成功应用。模式识别理论涉及到自动控制理论、计算机科学人工智能等多个技术和科学领域。

识别是指利用计算机对某些物理对象进行分类，在错误概率最小的条件下，使识别的结果尽量与客观事物相符。也就是说，用计算机来实现人对各种事物或现象的分析、描述、判断和识别。模式是计算机对识别对象处理之后得到的属性集合。模式具有如下两个重要特征：

- (1) 根据模式可以确定一集合，且只要熟悉集合中有限数量的样本之后，就可以认识该集合中的全体样本；
- (2) 根据模式可以确定一集合，且集合中的任意样本在发生较大变化后仍属于该集合。

基于以上两特征，通过有限的样本训练，使分类器对无穷的样本进行分类成为可能。一般来说，对于某一问题，可选择模式是非常多的，即模式的维数是很高的。所有模式构成的集合称为模式空间，每一个模式都是该空间的一维。在模式空间里每个样本对应一个点，点的位置由该样本在每一种模式（维、坐标）上的数值确定。模式空间的维数虽然多，但是许多模式之间并非相互独立，对模式空间里各坐标上的元素进行综合分析，获取最能揭示样本属性的互相独立的参数，称为特征提取，所有特征构成特征空间，一般来说特征空间的维数要远小于模式空间的维数。类型空间是分类的结果构成的集合，如{正常，故障，暂态}。最后通过学习和训练获得知识和经验，进而确定判别准则即分类器，模式识别的过程就是通过分类器函数，将样本从特征空间映射到类型空间的过程，如图 4-2 所示。

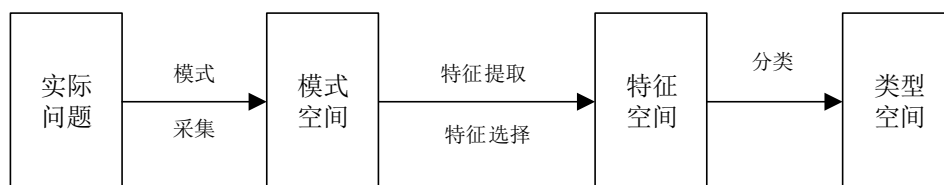


图 4-2 模式空间、特征空间和类型空间的转换

完整的系统包含识别和训练两个过程，如图 4-3 所示。模式识别系统包括数据采集和预处理，模式生成，特征提取和选择、识别分类和分类器设计 5 个步骤。

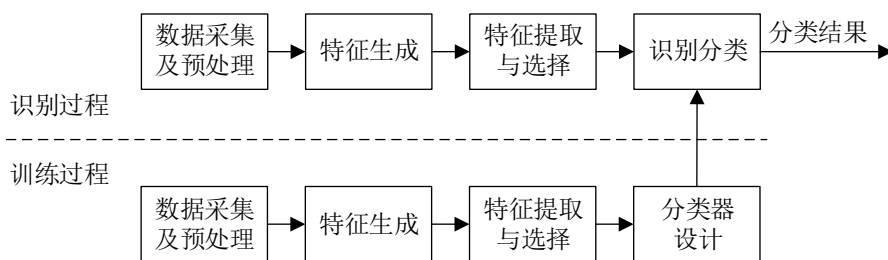


图 4-3 模式识别系统框图

数据采集和预处理

数据采集是将需要识别的对象转化为波形、图像等数字信号，如电弧的电流，以供计算机处理。在数据采集过程中，难免会有噪声干扰，因此在预处理的过程中，需要运用数字信号处理方法，将识别对象从背景噪声中分离出来。

模式生成

经过数据采集得到的数据量一般比较大，很难直接由分类器进行识别，需要对原始信息进行处理，找出描述不同类别对象之间差异的“特征”，如幅值大小，频谱能量分布等，分类器再根据这些特征来判别被识别对象的类别属性。

特征提取和选择

采样什么样的特征对对象进行识别是模式识别系统设计的一个关键问题，但是特征往往是与实际应用相关的，不同的分类问题需要不同的特征。对于识别系统的设计者来说，一般很难预先确切地知道所面对的问题到底需要哪些特征，那些特征能够很好的区分所要识别的对象。通常的做法是尽量多的从原始数据中生成与问题相关的特征。然后选择出最有效的特征，或对这些特征进行组合得到一组更有效的特征，这个过程称为特征的提取与选择。

识别分类

经过特征生成和特征提取与选择之后，每个被识别的对象都被描述为一组特征，这组特征一般被称为“特征矢量”、“特征向量”等。每个对象所对应的特征向量可以看成是“特征空间”中的一个点，识别分类环节根据特征向量判别对象所属的类别，这个过程可以看作是采用一定数学方法实现了从“特征空间”到“类别空间”的映射。

分类器设计

对于一些简单问题，可以采用人工的方式设计分类器，决定什么样的特征向量应该映射为哪一个类别。然而，对于一个复杂的实际问题来说，人工方式设计分类器往往是低效的，特别是当特征向量很多、特征空间的维数很高时，很难通过人的只管感觉设计出一个合适的分类器。人对周围不同物体和对象的分辨能力也不是与生俱来的，而是通过后天不断地学习和训练，以及对经验的总结逐渐形成的，识别系统中的分类器一般也需要一个训练和学习的过程。在

训练过程中设计者需要提供大量不同识别对象的实例，即“训练样本”，而识别系统则采用一定的训练和学习算法在这些训练样本的基础之上自动完成分类器的设计。

分类器的设计根据训练样本的不同可以分为有监督学习方法和无监督学习方法。有监督学习又被称为有教师学习，需要知道训练样本集合中的每个样本具体属于哪一个类别；无监督学习又被称为无教师学习，只知道训练样本集合中的每个训练样本，而不知道每个训练样本所属的类别。

有监督学习的模式识别问题，可以表示为如下形式：已知由 n 个 d 维特征向量组成的训练样本集合：

$$D = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\} \quad (4-1)$$

其中， $x_i \in \mathbf{R}^d, i = 1, 2, 3 \dots n$ 。

n 个训练样本分别属于 m 个不同的类别：

$$C = \{w_1, w_2, w_3 \dots w_m\} \quad (4-2)$$

样本训练学习的目的就是要构造一个分类器使得：

$$f(x): D \rightarrow C \quad (4-3)$$

对于样本中的每一个待识别的模式 x_i ，通过分类器函数映射到某一唯一的类别。

在电气系统的故障诊断中，大部分可利用的数据都是电流和电压，经过特征生成、提取与选择之后得到的特征向量一般维数不会太高，因此可以通过人工分析出不同类别识别对象的分布区域。

4.4 电弧故障特征提取

直流母线电流时频域特征在电弧故障发生前后均有许多变化，利用合适的参数将故障特征提取是故障检测的重要一步。故障特征在时域中主要包括电弧开始时的电流突降和电弧稳定后电流波动程度变大；在频域中主要表现在电弧信号在特殊频段能量较大。

4.4.1 电弧信号时域特性

直流电弧故障发生前后直流母线电流仿真波形如图 4-4 所示。电弧发生于 0.75s，电弧发生前由于逆变器的影响，电流有较小波动。电弧发生瞬间，由于负载突然增大，导致工作点右移，即直流电压增大，电流减小，经 MPPT 调整后，系统稳定在新的工作点继续运行。电弧发生之后，系统电流并入了大量电弧噪声信号。

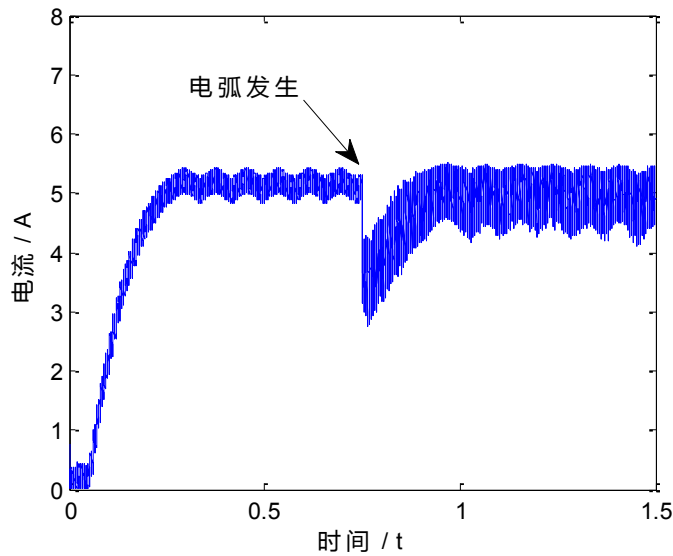


图 4-4 电弧发生前后电流波形

如前文所述，正常电流幅值的波动是因为逆变器主电路工作于开关状态，导致了电流的畸变，产生了大量的谐波，具体特性受到 PWM 调制算法和逆变器并网电流控制策略影响；电弧发生后电流的波动主要受到电弧的影响。

电弧的燃烧过程对环境参数及其敏感。温度、湿度、空气流动速度，光照条件以及周围电磁环境的轻微改变，都会对电弧的燃烧产生影响，进而影响电流幅值的分布。这些参数的变化呈现出极强的随机性，最终导致电弧电流的幅值近似符合正态分布。而正常状态下，逆变器 PWM 调制造成的噪声信号与开关频率有关，电流幅值不服从正态分布。

图 4-5 和图 4-6 分别为电弧发生前后电流及其幅值分布图。电流为滤除直流部分后的交流信号。两幅图对比可以发现，电弧发生后电流的幅值分布可认为符合正态分布，而正常情况下，电流的幅值分布没有这一规律，这一结论与

之前的分析吻合。

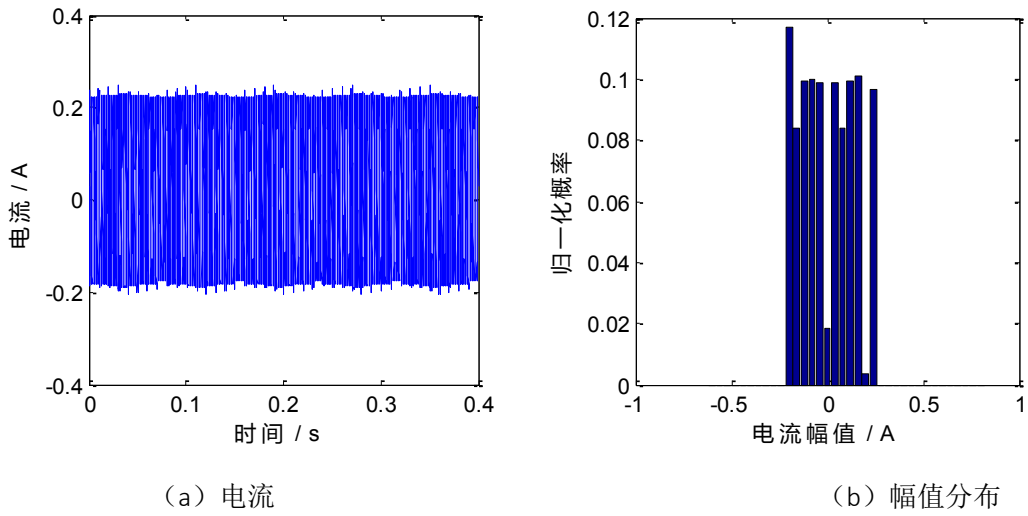


图 4-5 无电弧故障电流及其幅值分布

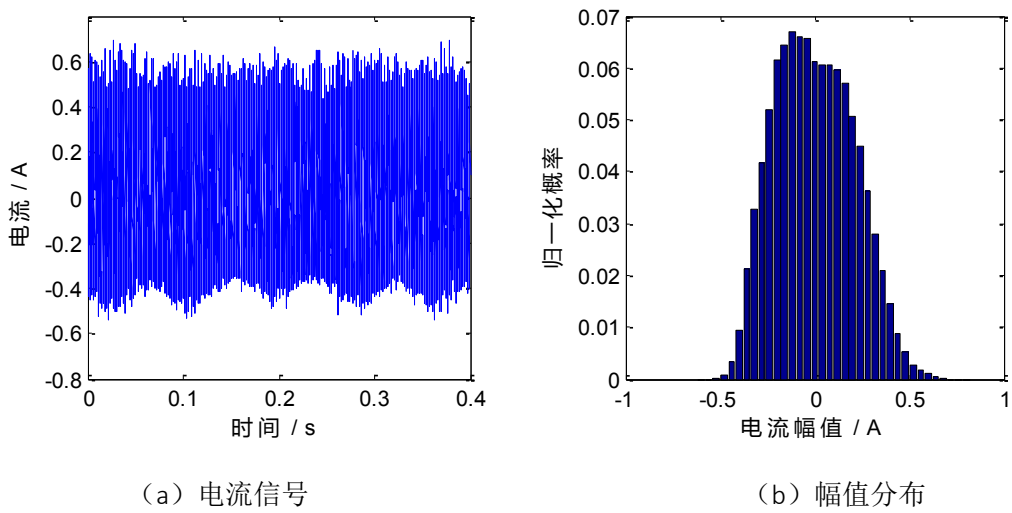


图 4-6 电弧发生后电流及其幅值分布

将这一时域特征通过合适的方法提取可以有效提高故障检测的稳定性。方差表征了信号偏离中心的程度，故可将电流看成随机变量，用方差提取故障时域特征。对长度为 N 的电流 $i(n)$ ，则时域特征向量为：

$$\mathbf{V} = [v] \quad (4-4)$$

其中

$$\begin{cases} v = \frac{1}{N} \left(\sum_{n=0}^{N-1} (i(n) - \mu)^2 \right) \\ \mu = \frac{1}{N} \left(\sum_{n=0}^{N-1} i(n) \right) \end{cases} \quad (4-5)$$

4.4.2 电弧信号的频域特性

在研究电弧噪声信号的频率特性之前，需要先分析光伏系统并网逆变器直流侧的噪声情况。无论是单相光伏并网逆变器还是三相光伏并网逆变器，由于开关管工作在高频开关状态，直流侧电流中含有大量谐波。其中开关频率及其谐波噪声幅值较大。电弧检测装置一般安装在光伏系统的直流母线上，与逆变器的输入端临近。并网逆变器的开关频率及其谐波形成的系统噪声往往与电弧信号频域部分重叠，这使得故障检测更加困难，尤其考虑到不同逆变器拓扑结构和开关频率可能不同时，情况更加复杂。以开关频率为 20kHz 的单相并网逆变器为例，逆变器输入端典型电流波形如图 4-7 所示。对其做傅里叶分析得到的频谱如图 4-8 所示。

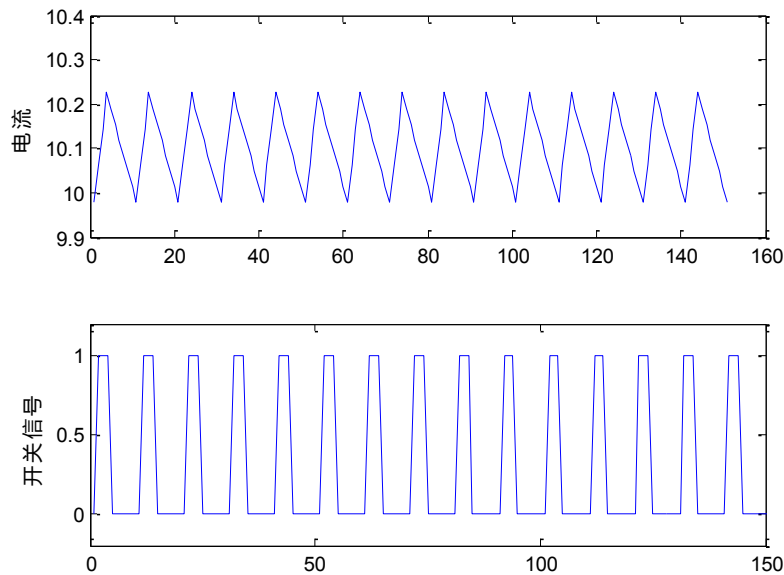


图 4-7 逆变器直流侧典型电流波形

从图 4-8 可以看出，直流侧电流频谱在开关频率及其谐波处幅值较大，由于电弧所在频段很宽，且包含了逆变器开关频率及其谐波所在频段。不同逆变

器所采用的开关频率往往并不一致，这将对电弧检测算法造成干扰。若利用常规办法，提取固定频段的信息，由于逆变器噪声的影响，容易导致误判。

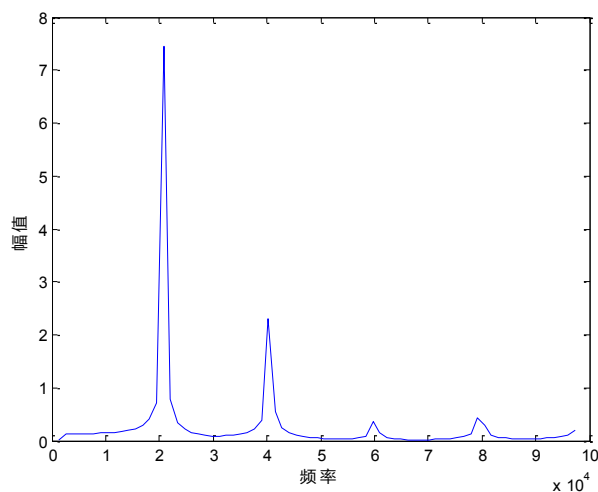


图 4-8 直流电流交流分量频谱图

考察电弧故障信号的频域特征，对电弧发生前后的电流做傅里叶分析，观察其频谱可以得到电弧信号的频域特征。图 4-9 为利用仿真得到的电流信号的频谱图。其中，分析的电流为交流成分，直流量通过滤波器滤除，逆变器开关频率为 20kHz。

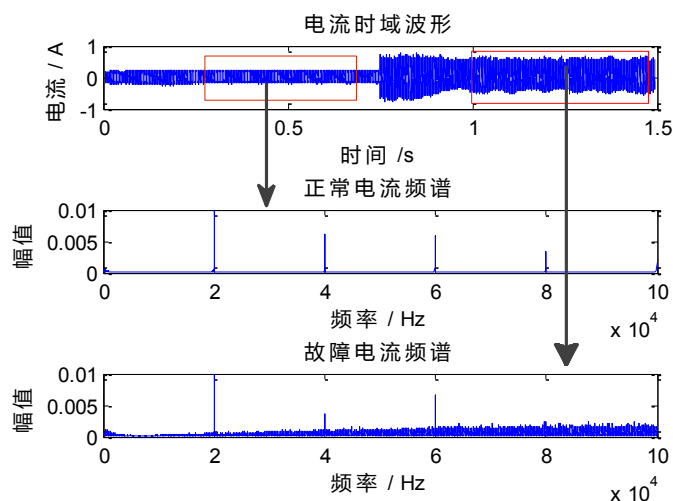


图 4-9 电弧发生前后电流频谱

从上图可以看出，频谱中因包含逆变器开关频率而存在的开关频率及其整数倍的频率成分，且幅值相对较高。对比正常电流频谱和故障电流频谱可以发

现，正常时电流高频成分很少，但是电弧故障电流中高频成分，尤其在 20kHz 到 100kHz 内显著增多。

4.4.3 小波分析和频域特征提取

频域特征的提取方法主要有 2 种，一种是傅里叶分析方法，另一种是小波分析方法。傅里叶分析的基波为无限长正弦函数，小波分析的基波为重新设计的冲击波形，实践证明小波分析更加适合对故障中的非平稳信号进行分析。由于故障信号大多为非平稳信号，小波分析相对于传统的傅里叶分析更加适用于故障检测^[56, 57]。离散正交小波变换可以通过图 4-10 所示的树状滤波器组实现^[58, 59]。图中 a_0 代表原始数据； h_0 和 h_1 分别代表高通和低通滤波器系数； a_j 和 d_j 分别代表小波分解第 j 层的近似系数和细节系数。

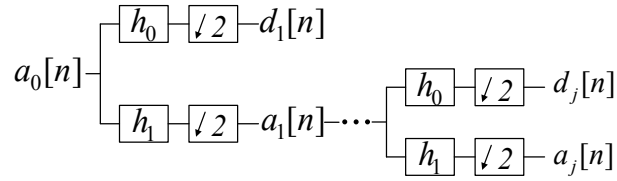


图 4-10 离散正交小波分解示意图

设信号长度为 N ，滤波器长度为 K ，则第 j 层小波变换的近似系数和细节系数分别如式(4-6)、(4-7)所示。由于 2 倍抽取，第 j 层系数的长度为 $\frac{N}{2^j}$ 。

$$a_j[n] = \sum_{k=0}^{K-1} a_{j-1}[2n-k] \cdot h_1[k] \quad (4-6)$$

$$d_j[n] = \sum_{k=0}^{K-1} d_{j-1}[2n-k] \cdot h_0[k] \quad (4-7)$$

通过上式，小波变换可以将原始信号分解到任意层，对于每一层小波变换都可以得到近似系数和细节系数，近似系数表示信号的相对低频成分，细节系数表示信号的相对高频成分。为了得到各个子频带的能量，使用小波包变换，即对每层近似信号和细节信号都进行分解。经过 j 层分解可得到 2^j 组频带系数，设某频带系数为 c_m ，定义该频带能量为：

$$e_m = c_m * c_m^T \quad (4-8)$$

式中, c_m^T 是 c_m 的转置。

根据 parseval 恒等式(4-9), 可知时域信号能量等于各频带小波变换系数内积之和。

$$\sum_{n=0}^N s(n) \cdot s(n) = \sum_{m=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{N_l} c_m(k) \cdot c_m(k) \quad (4-9)$$

式中, N_l 是 c_m 的长度。

单独考虑某一频带能量特征容易受到外界干扰, 逆变器开关频率及其谐波所占频段能量极大, 不同逆变器可能采用不同开关频率, 由此导致的频带能量漂移也会使得固定频段能量的频域特征提取方式不稳定^[60, 61]。本文将各频带能量归一化后一起作为频域特征向量, 该特征向量不仅在故障前后变化明显, 同时, 可以抑制不同开关频率造成的频带能量漂移问题, 非常适合用来提取故障的频域特征。所以频域特征向量:

$$\mathbf{F}=[E_0, E_1, E_2, \dots, E_{2^j-1}] \quad (4-10)$$

其中,

$$E_m = \log 10 \left(\frac{e_m}{\sum_{m=0}^{2^j-1} e_m} \right) \quad (4-11)$$

4.5 故障识别方法

故障诊断中重要的一步是将提取的特征通过合适的分类方法将故障状态与正常状态区分开来。计算频域特征向量与频域原点之间的距离, 得到频域特征距离; 同理可得时域特征距离。利用时域和频域特征距离构建系统特征平面, 如图 4-11 所示, 根据特征平面中的位置可以确定故障是否发生。

未发生电弧故障时, 频域特征距离和时域特征距离均很小, 且在一很小范围内波动。电弧发生之后, 频域特征距离和时域特征距离均增大数倍。图中, r_f 、 r_t 是正常区域的边界; m_f 、 Δ_f 和 m_t 、 Δ_t 分别用于确定电弧故障区域的时域和频域边界。 Δ_f 和 Δ_t 决定了电弧故障区域频域和时域的宽度。

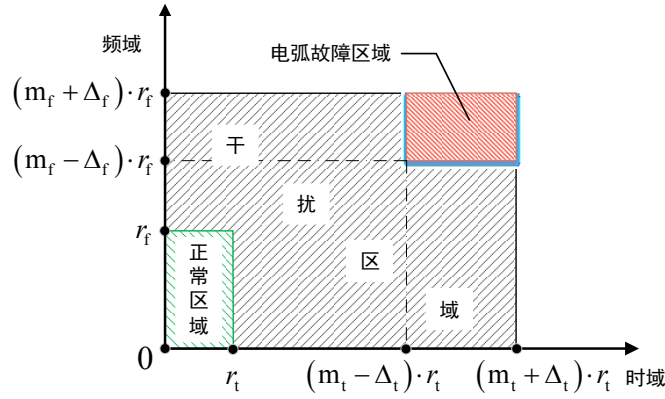


图 4-11 系统特征平面

在正常区域和故障区域之间，为干扰区域。系统暂态过程，如启停、局部阴影时的系统优化等都会造成瞬时的较大电流波动，但是在频域并不会造成频带能量的大幅偏移，这时判别结果位于图 4-11 的右下方；而在光伏电站中不同逆变器之间的干扰会导致直流母线上的电流信号频带能量发生较大变化，电流幅值却基本不变，这对应于特征平面的左上方位置。实际系统工作电磁环境复杂，工况变化多，许多非正常工作状态不能判定为故障。传统检测方法采用二元论，即非故障即正常的检测分类法，这会导致大量的误判。本文通过建立系统特征平面，并将其分成正常、故障和干扰（特殊工作状态）3 大区域，根据电流信号的分析结果，实时确定系统状态，有效降低了故障的误判率，同时为故障定位提供了思路。

正常状态边界 r_f 、 r_t 和系统原点 O_f 、 O_t 可通过多次取均值的方法得到，其流程图如图 4-12 所示。图中可以看到，多次取均值即为循环取原点和特征向量的中点为下次循环的原点，取边界和特征距离的平均值为下次循环的边界。在线计算出初始原点后，频域特征距离和时域特征距离分别按式(4-12)和式(4-13)计算得到。

$$d_f = \sqrt{[\mathbf{F} - \mathbf{O}_f]^2} \quad (4-12)$$

$$d_t = \sqrt{[\mathbf{V} - \mathbf{O}_t]^2} \quad (4-13)$$

电弧故障区域的边界中 m_t 、 m_f 根据实际经验可以分别取 16 和 5， Δ_t 和 Δ_f 可取 0.02 和 0.3。根据上述边界和时、频域特征距离即可准确检测电弧。

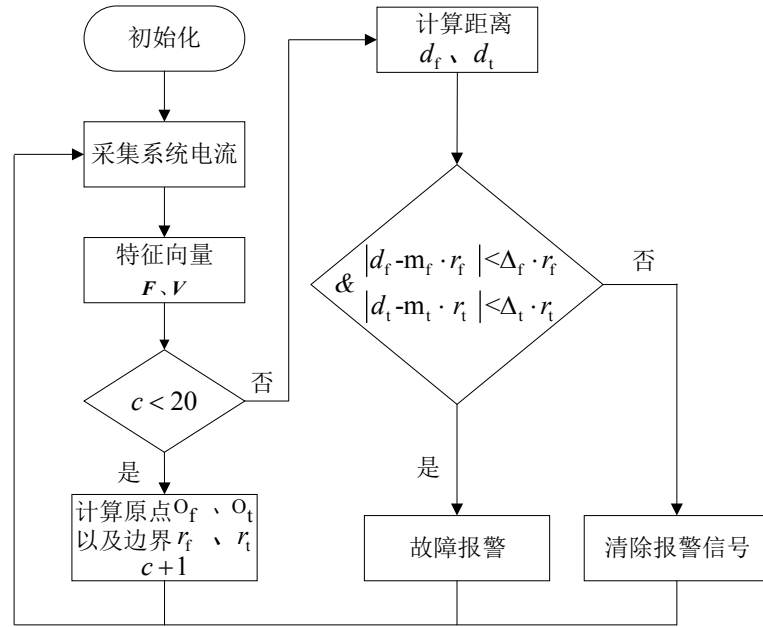


图 4-12 故障判别流程图

4.6 仿真研究

基于上述理论分析，建立了 PSIM 仿真模型。采用 4 块相同参数的光伏组件与电弧模块串联后与逆变器相连。光伏组件参数如表 2-1 所示。为验证上述方法对不同开逆变器关频率都有很好的适应能力，逆变器开关频率分别采用 12kHz、14kHz、16kHz、18kHz 和 20kHz，电流经低通滤波器滤除直流分量后以 200kHz 的采用速率对电流进行采样。得到典型故障前后电流波形如图 4-13 所示

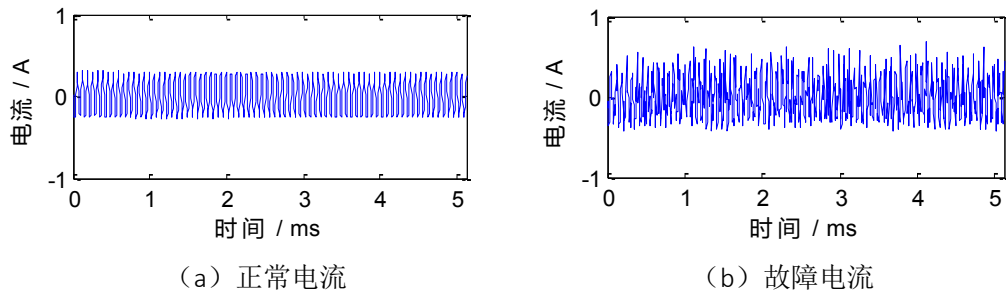


图 4-13 仿真故障前后电流

按照前文所述电弧故障特征提取方法分别提取电弧故障时频域特征。表 4-2 为利用上述公式计算得出的电流方差。逆变器开关频率及其谐波对电流信号的干扰不可忽略，表中仿真数据包含了不同开关频率下的正常电流和故障电流方

差。从表中数据可以看出，无论在何种开关频率下，电流的方差大小在故障前后都有 2 倍大小的差距。

表 4-2 不同开关频率正常电流与故障电流的方差

开关频率 (kHz)	方差	类型
12	0.0338	正常
	0.0601	故障
14	0.0293	正常
	0.0564	故障
16	0.0290	正常
	0.0521	故障
18	0.0258	正常
	0.0475	故障
20	0.0229	正常
	0.0449	故障

提取正常电流和故障电流频域特征向量 F 如图 4-14 所示。前 3 分量为逆变器开关频率及其谐波所在频段的能量，这些值均较大且在故障后变化较小。 F 后 13 个分量是系统背景噪声和电弧频率所在频段，在故障发生后，电弧所在频段能量显著增大。

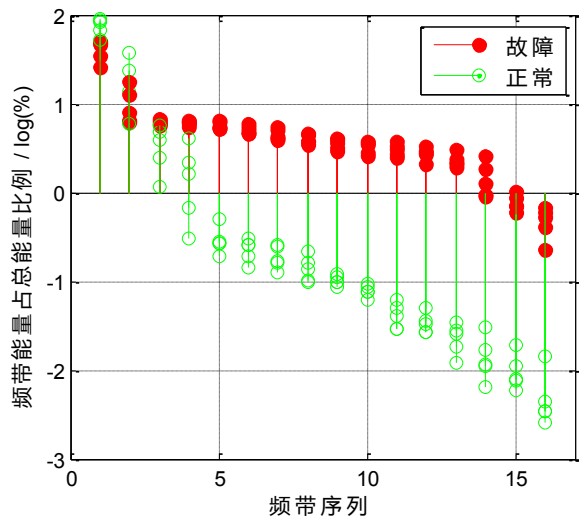


图 4-14 各频带能量占比

图中分别采用 5 种不同开关频率，其结果均显示出相同趋势，即在不同逆变器开关频率下，该频域特征向量均能可以正确反映故障前后频域的变化，证明了上述特征提取方法的可行性。这表明，在故障发生之后开关频率及其谐波所在的频段能量往高频区域流动，图 4-14 表明本文构造的频域特征向量可以有效反映故障的频域特征，并且不受逆变器开关频率的干扰。

对于故障识别方法，本文在每种开关频率下采集 16 组正常和故障数据，一共 80 组正常数据和 80 组故障数据对该方法进行测试，识别结果如图 4-15 所示。图中区域 I 为正常状态；区域 II 是电弧故障区域；剩下的为干扰区域。区域 III 为模拟逆变器暂态过程如负载变化时，逆变器的动态调节过程以及环境变化时如光照变化时的状态，此时由于电流变化较大，导致较大的方差，然而由于逆变器调节过程和光照变化不会太快，电流中高频部分仍没有太多变化，通过在正常电流中注入低频大幅值的扰动信号模拟；区域 IV 模拟电站系统中其他子阵列逆变器工作对当前阵列的影响，此时直流母线电流加入许多高频成分，频域能量变化较多，而电流方差却基本不变，通过在正常电流中注入高频小幅值的扰动信号模拟。从该图中可以清楚看出，电弧区域与正常区域相距较远，很容易区分，同时使用合适参数还可以将电弧故障与其他非正常工作状态导致的干扰区分开来。

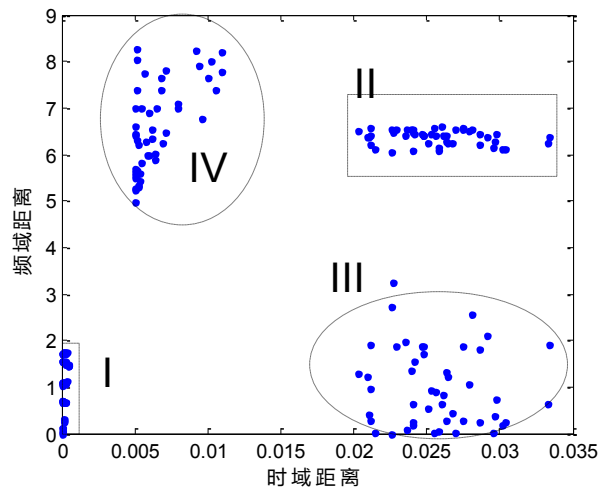


图 4-15 仿真识别结果

4.7 实验验证

考虑到仿真结果与实际情况的差别,本文使用基于 DSP 的检测系统进行验证。利用前文所述的实验平台,如图 2-1 所示。电弧发生器采用步进电机精确控制电极分离的速度和距离。系统用逆变器开关频率为 20KHz。检测板采用高速数-模转换器,并在采样之前对原始信号进行了硬件滤波处理。实际故障处理要求时间非常短,电弧长度可以认为没有变化。实验时,首先采集正常状态电流,然后利用步进电机将电极分离至合适距离并固定,采集故障电流。正常和故障电流信号如图 4-16 所示。图中横坐标为时间,单位为 ms,纵坐标为电流幅值,单位为 A。从图中可以看出,电弧发生后,电流波动显著增大。

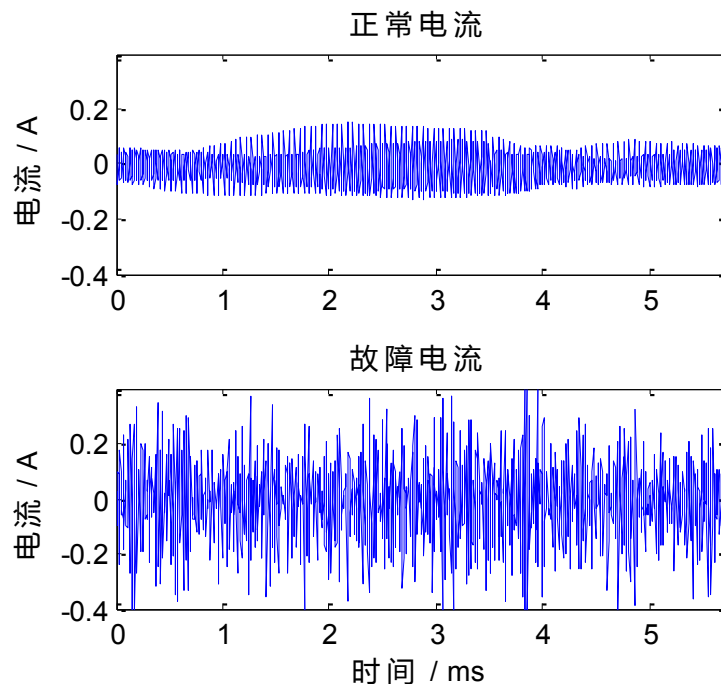


图 4-16 实验电弧电流

计算正常电流和故障电流频谱如图 4-17 所示。实际检测装置采样频率为 180KHz,频谱幅值采用 10 的对数显示。图中可以清楚看到电弧发生后,开关频率附近能量占比降低,开关频率以外频率成分显著增加。图中可以看出,电弧电流频谱非常宽,使用某一固定频段提取频域特征不合理且极易受到干扰。

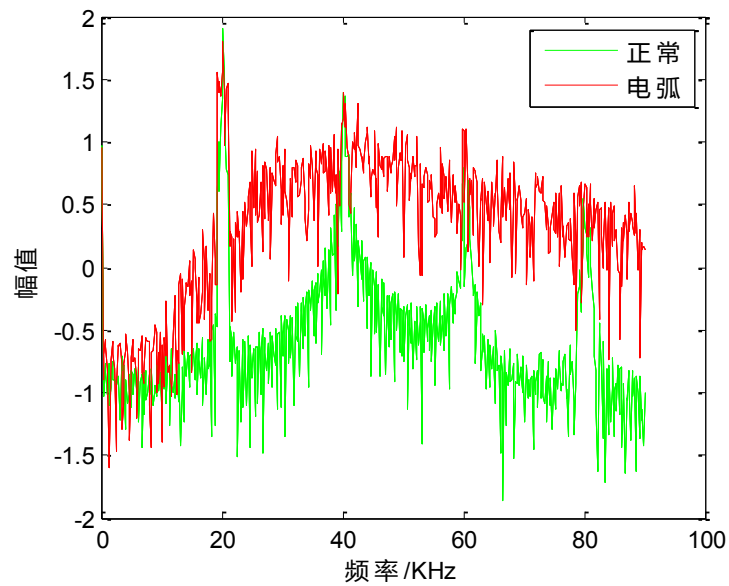


图 4-17 故障电流和正常电流频谱图

利用前文所述的方法提取频域特征,即频域特征向量,结果如图 4-18 所示,对比可发现实际情况与理论分析基本一致。频域特征向量后半部分在故障发生前后有显著变化。实验中电磁环境比仿真时复杂许多,导致能量分布相比仿真更加均衡。以正常状态下为例,仿真结果表明信号能量基本分布在开关频率所在频段,其他频段尤其是高频段能量非常小;而在实验中,系统除去逆变器开关频率还存在其他干扰信号,这导致信号能量较平均的分布在各频段内,使得高频段能量相对较大。尽管如此,图 4-18 依然明确表明本文提出的频域特征向量准确的表征了频域特征信息。

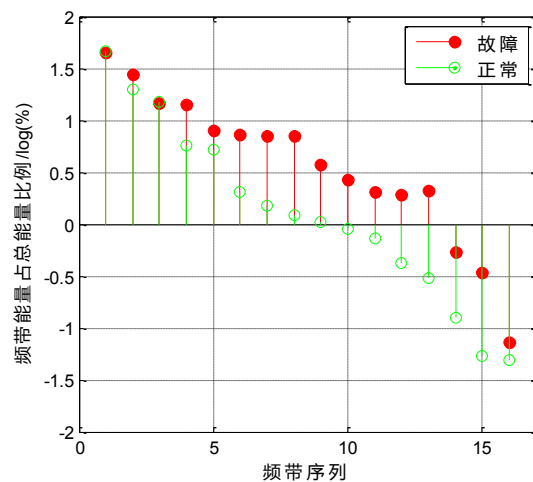


图 4-18 实验电流频带能量分布

时域特征，即电流幅值的方差如

所示，其中正常数据和故障数据各 3 组。可以看出，故障前后电流方差相差一个数量级，比仿真数据更明显。这是因为故障电流的方差主要受环境因素的影响，环境的细微改变也会造成电弧较大波动，进而导致较大的方差。

表 4-3 故障前后电流方差

序号	方差	类型
1	0.0048	正常
2	0.0057	正常
3	0.0050	正常
4	0.0445	故障
5	0.0462	故障
6	0.0463	故障

最后，对该系统进行 20 次实验，其中 10 次故障和 10 次正常状态随机交叉进行，结果全部可以正确识别，没有发现误判和漏判现象。图 4-19 为系统时频域原点。图中频域、时域向量表示初始化数据，空心圆圈表示最终初始化结果。该方法可以实现在线实时更新，当判定为正常时可以将其数据用于更新时频域原点。

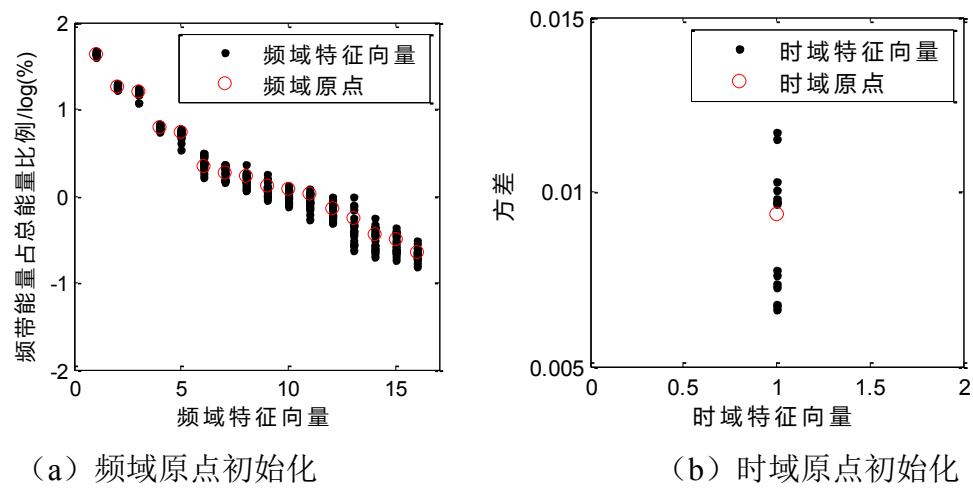


图 4-19 原点初始化

边界初始化如图 4-20 所示。图中虚线为边界初始化的轨迹，实线为最终初始化结果。根据初始化结果可以确定故障和正常区域。

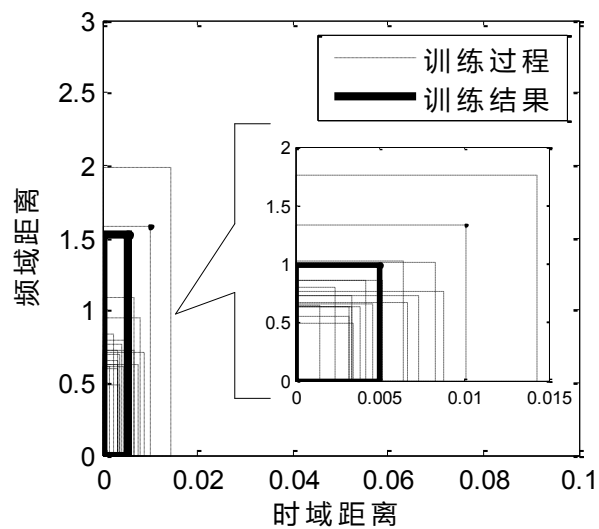


图 4-20 边界训练结果

全部 20 次检测结果如图 4-21 所示。从图中可以看出，10 组故障实验的数据全被判别到特征平面的左下角的正常区域，10 组故障实验数据则判别到右上角故障区域，与此前分析一致。上述实验结果表明，时、频域特征向量可以有效提取故障特征，基于系统特征平面的故障判别方法可以有效区分故障与正常状态。

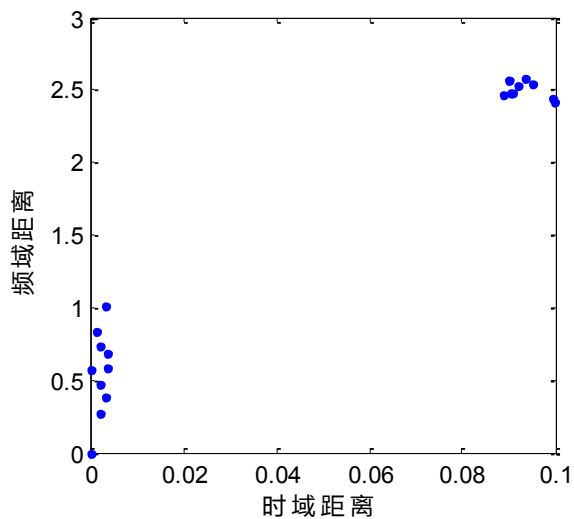


图 4-21 实验数据识别结果

4.8 本章小结

传统直流电弧检测方法利用简单的特征值阈值法，容易受到干扰；光伏系统运行状态受光照影响较大，需要实时进行最大功率点跟踪，过渡状态较多，传统方法的二元判别方法无法区分光伏系统的过渡状态。本文将直流电弧故障检测描述为模式识别问题，提出了一种融合电弧故障时频域特征的多元检测法。仿真和实验证明了该方法的有效性。主要包括以下内容：

- (1) 研究了电弧故障电流的时频域特征，提出了利用统计方法提取时域特征，小波分析提取频域特征的故障特征向量提取方法。利用该方法提取的频域特征向量不受逆变器开关频率的干扰，有较强的适应性。
- (2) 研究了故障前后时频域特征的变化情况，提出了利用时频域特征向量距离构建系统特征平面，并根据系统状态在平面中的位置判别故障的检测方法。仿真和实验证明该方法准确率高，对系统过渡状态和故障状态有较强区分能力。

第五章 总结和展望

5.1 结论

本文以光伏系统直流电弧故障为研究对象，主要研究了光伏系统中的串联直流电弧故障电流的时频域特性，提取了故障的时频域特征，利用向量之间的距离判断故障是否发生，仿真和实验数据证明该方法区分度大、不易误判、准确率高。最后对大型光伏电站中的电弧故障信号在系统中的传输问题做了初步研究，仿真数据表明检测装置与电弧距离较远时难以准确检测到故障。

主要取得了如下成果：

1. 对直流电弧电压、电流波形进行了分析和拟合，据此得到了直流电弧的等效阻抗模型。利用 PSIM 仿真软件实现了该阻抗模型，结果显示拟合效果较好；
2. 提出了一种新型的电弧故障检测方法，该方法综合了故障的时频域特征，较全面的融合了故障信息。仿真和实验数据表明，该方法对故障和正常状态的区分度大，不容易产生误判。同时该方法可以自动校正参数，可以避免不同逆变器开关频率的干扰。
3. 推导了太阳能电池的动态模型，分析了电缆的等效电路得到光伏电站的等效阻抗网络模型。根据该模型仿真获得，在任意光伏组串内发生的电弧故障信号衰减较为严重；在汇流箱输出直流母线出发生的电弧，故障信号的衰减程度随着电弧发生位置和检测点之间的距离增大而严重。

5.2 展望

本文主要研究了光伏系统中的串联直流电弧故障，通过本文研究内容的归纳总结，作者认为在光伏系统直流电弧故障检测问题上完成了一部分理论分析和实践研究工作，但是考虑到本文研究工作时间有限，还有许多工作需要进一

步研究:

1. 本文提出的直流电弧的数学模型, 虽然能够满足大部分时域信号分析的要求, 但是由于该模型中没有考虑电弧的频域特征, 该仿真模型得到的结果不适合在在频域分析中使用。因此, 作者认为还需要对该模型进行优化, 建立一种能够在时频域都能较好与实际数据吻合较好的模型。
2. 直流电弧故障检测方法中的干扰问题。本文提出的检测方法中, 构建了系统特征平面, 将系统状态分成正常、故障和过渡状态。但是由于时间有限未能对系统的过渡状态进行深入研究, 这可能导致该检测方法的检测盲区, 作者认为有必要对系统过渡状态数据进行分析, 进一步完善检测方法, 提高检测准确率。
3. 电弧故障信号在系统中的衰减问题。本文通过对系统在小信号下的网络进行简化得到了系统等效阻抗网络, 进而计算了任意位置电弧故障信号在检测装置处的衰减情况。但是该方法忽略了光伏组件对地电容、电缆对地电容等寄生参数, 相关文献提到这些参数对系统阻抗网络高频特性有较大影响, 作者认为应该将上述因素重新考虑, 建立一种新的等效阻抗网络, 进一步分析电弧故障信号的衰减情况。

参考文献

- [1] 国务院办公厅. 能源发展战略行动计划（2014-2020年）. 2014.
- [2] 刘琦. 中国新能源发展研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26 (1): 1-2.
- [3] BP 中国. BP 世界能源统计年鉴. 2015
- [4] 黄兴. 电气照明技术在中国的传播、应用和发展(1879-1936)[D].内蒙古师范大学,2009.
- [5] 杨琰. 工部局与近代上海电力照明产业研究, 1882-1929 年[D].复旦大学,2013.
- [6] 黄晞. 旧中国电力发展史略[J]. 中国科技史料, 1985, 6 (03): 20-27.
- [7] 黄兴. 晚清电气照明业发展及其工业遗存概述[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2009, 38 (03): 329-336.
- [8] 熊月之. 照明与文化:从油灯、蜡烛到电灯[J]. 社会科学, 2003, 1 (03): 94-103.
- [9] 刘小河,杨秀媛. 电弧炉电气系统谐波分析的频域方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (02): 30-35.
- [10] 王丰华. 电弧炉建模研究及其应用[D].上海交通大学,2006.
- [11] 许树楷,宋强,刘文华等. 配电系统大功率交流电弧炉电能质量问题及方案治理研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (19): 93-98.
- [12] 李文军. 多小波和小波神经网络构造及其在电弧故障诊断中的应用研究[D].吉林大学,2008.
- [13] 刘晓明,赵洋,曹云东等. 基于多特征融合的交流系统串联电弧故障诊断[J]. 电网技术, 2014, 38 (03): 795-801.
- [14] 雍静,桂小智,牛亮亮等. 基于自回归参数模型的低压系统串联电弧故障识别[J]. 电工技术学报, 2011, 26 (08): 213-219.
- [15] 林章. 故障电弧检测的关键技术研究及断路器开发[D].中国计量学院,2013.
- [16] 刘湘澎. 电弧故障断路器的故障电弧电流特性研究[D].北京交通大学,2012.
- [17] 赵淑敏. AFCI（故障电弧断路器）的研制[D].浙江大学,2007.
- [18] E. H. Y,S. J. W,D. A. G. DC Current Limitation Principle Using a Helical Arc Arrangement[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2015, 30 (1): 122-128.

- [19] Gammon.T,Wei-Jen.Lee,Zhenyuan.Zhang, etc. A review of commonly used DC arc models[C].Pulp and Paper Industry Technical Conference, Conference Record of 2014 Annual,2014:34-43.
- [20] A. R.F,Gammon.T,Sen.P.K, etc. DC-Arc Models and Incident-Energy Calculations[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2010, 46 (5): 1810-1819.
- [21] Miller.D.B,H. J. L. DC Arc Model Including Circuit Constraints[J]. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1973, PAS-92 (6): 1926-1934.
- [22] Stokes.A.D,Oppenlander. Electric arcs in open air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1991, 24 (3): 16-35.
- [23] Andrea.J,Schweitzer.P,Tisserand.E. A New DC and AC Arc Fault Electrical Model[C].Electrical Contacts (HOLM), 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on,2010:1-6.
- [24] Jing.Li,Thomas.D.W.P,Sumner.M, etc. Series Arc fault studies and modeling for a DC distribution system[C].Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2013 IEEE PES Asia-Pacific,2013:1-6.
- [25] Uriarte.F.M,Estes.H.B,Hotz.T.J, etc. Development of a series fault model for DC microgrids[C].Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES,2012:1-8.
- [26] Uriarte.F.M,Gattozzi.A.L,Herbst.J.D, etc. A DC Arc Model for Series Faults in Low Voltage Microgrids[J]. Smart Grid, IEEE Transactions on, 2012, 3 (4): 2063-2070.
- [27] Dini.D.A,Brazis.P.W,Kai-Hsiang.Yen. Development of Arc-Fault Circuit-Interrupter requirements for Photovoltaic systems[C].Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE,2011:001790-001794.
- [28] Erhard.F,Berger.F. Measurements of DC arc faults in real photovoltaic systems[C].Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities,2013:1-6.
- [29] Luebke.C,Pier.T,Pahl.B, etc. Field test results of DC arc fault detection on residential and utility scale PV arrays[C].Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE,2011:001832-001836.
- [30] Strobl.C,Meckler.P. Arc Faults in Photovoltaic Systems[C].Electrical Contacts (HOLM),

- 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on,2010:1-7.
- [31] M.Naidu,T. J. Schoepf,S.Gopalakrishnan. Arc fault detection scheme for 42-V automotive DC networks using current shunt[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21 (3): 633-639.
- [32] 刘源,汲胜昌,祝令瑜等. 直流电源系统中直流电弧特性及其检测方法研究[J]. 高压电器, 2015, 51 (02): 24-29.
- [33] Faifer.M,Ottoboni.R,Rossi.M, etc. A method for the detection of series arc faults in DC aircraft power networks[C].Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International,2013:778-783.
- [34] Mackay.L,Shekhar.A,Roodenburg.B, etc. Series arc extinction in DC microgrids using load side voltage drop detection[C].DC Microgrids (ICDCM), 2015 IEEE First International Conference on,2015:239-244.
- [35] F.Schimpf,L.E.Norum. Recognition of electric arcing in the DC-wiring of photovoltaic systems[C].Telecommunications Energy Conference, 2009. INTELEC 2009. 31st International,2009:1-6.
- [36] Z. Wang,B. R. S. Arc Fault and Flash Signal Analysis in DC Distribution Systems Using Wavelet Transformation[J]. Smart Grid, IEEE Transactions on, 2015, 6 (4): 1955-1963.
- [37] G. Yunmei,W. Li,W. Zhuoqi, etc. Wavelet packet analysis applied in detection of low-voltage DC arc fault[C].Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on,2009:4013-4016.
- [38] J. A. Momoh,R.Button. Design and analysis of aerospace DC arcing faults using fast fourier transformation and artificial neural network. In Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE[C], 2003; 788-793.
- [39] Grasseti.R,Ottoboni.R,Rossi.M. A novel algorithm for the parallel arc fault identification in DC aircraft power plants[C].Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International,2012:148-153.
- [40] X. Yao,H. L,S. Ji, etc. Characteristic Study and Time-Domain Discrete- Wavelet-Transform Based Hybrid Detection of Series DC Arc Faults[J]. Power Electronics, IEEE Transactions

- on, 2014, 29 (6): 3103-3115.
- [41] X. Yao,H. L,Y. Huang, etc. The detection of DC arc fault: Experimental study and fault recognition[C].Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE,2012:1720-1727.
- [42] X. Yao,S. Ji,H. L, etc. DC arc fault: Characteristic study and fault recognition[C].Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), 2011 1st International Conference on,2011:387-390.
- [43] Y. Xiu,H. Luis,W. Jin. A series DC arc fault detection method and hardware implementation[C].Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE,2013:2444-2449.
- [44] Y.Gao,J.Zhang,Y.Lin, etc. An innovative photovoltaic DC arc fault detection method through multiple criteria algorithm based on a new arc initiation method[C].Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014 IEEE 40th,2014:3188-3192.
- [45] Healy.Gerard,Roemer.Glenn. Arc Fault Detection Using Rogowski Coils[C].PCIM Europe 2014; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of,2014:1-5.
- [46] Rabla.M,Schweitzer.P,Tisserand.E. Method to Design Arc Fault Detection Algorithm Using FPGA[C].Electrical Contacts (Holm), 2011 IEEE 57th Holm Conference on,2011:1-5.
- [47] M. C. D. Piazza,C.Serporta,G.Tine, etc. Electromagnetic compatibility characterisation of the DC side in a low power photovoltaic plant[C].Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04. 2004 IEEE International Conference on,2004:672-677.
- [48] R.Araneo,S.Lammens,M.Grossi, etc. EMC Issues in High-Power Grid-Connected Photovoltaic Plants[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51 (3): 639-648.
- [49] 傅望,周林,郭珂等. 光伏电池工程用数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26 (10): 211-216.
- [50] 孙园园,肖华锋,谢少军. 太阳能电池工程简化模型的参数求取和验证[J]. 电力电子技术, 2009, 43 (06): 44-46.

- [51] R. A. Kumar, M. S. Suresh, J. Nagaraju. Effect of solar array capacitance on the performance of switching shunt voltage regulator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21 (2): 543-548.
- [52] M. Seapan, C. Limsakul, T. Chayavanich, etc. Effects of dynamic parameters on measurements of IV curve[C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE, 2008:1-3.
- [53] P. Merhej, E. Dallago, D. Finarelli. Effect of capacitance on the output characteristics of solar cells[C]. Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 2010 Conference on, 2010:1-4.
- [54] M. Perny, M. Kusko, J. Packa. PV concentrator cells complex impedance under the bias in the dark[C]. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, 2010:001461-001464.
- [55] J. Johnson, D. Schoenwald, S. Kuszmaul, etc. Creating dynamic equivalent PV circuit models with impedance spectroscopy for arc fault modeling[C]. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE, 2011:002328-002333.
- [56] 于凤芹. 实用小波十讲[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.
- [57] 周小勇, 叶银忠. 小波分析在故障诊断中的应用[J]. 控制工程, 2006, 13 (01): 70-73.
- [58] G. Mallats. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1989, 11 (7): 674-693.
- [59] 卢山, 杨浩. 两通道滤波器组和离散序列的小波变换[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004, 27 (2): 87-91.
- [60] 李晨焱. GIS 局部放电小波去噪与模式识别的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [61] 李书磊. 基于小波神经网络的齿轮故障模式识别[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2007.

作者在攻读硕士期间公开发表的论文

- [1] 吴春华, 袁同浩, 陈雪娟, 冯夏云, 李智华. 光伏电站积灰检测及优化控制[J]. 太阳能学报. (已录用)

致谢

首先，深深感谢我的父母。我多年在外读书，未曾在身边尽孝，心中已十分不忍，早过适婚之年，尚不能赚取分文以补贴家用，又令我感到愧疚难当。然而父母却始终给予我最大的理解与支持，在此衷心祝愿天下父母都能幸福安康！

其次，我要感谢我的研究生导师，吴春华副教授。本课题是在吴老师的指导下完成的。在整个课题的研究过程中，虽然吴老师工作繁忙，但依然给了我最大的自由和信任，关心课题进展，并定期讨论课题中的大小问题，最终使得这一新颖课题顺利开展，许多方面走在国内研究前沿。除此之外，吴老师在论文的写作过程中，给我提出了许多建议，从题目到纲领，从内容到结构，从排版到文字的润色，吴老师付出了辛勤的劳动，身体力行的交给我许多技巧和做人的态度。在此，谨向吴老师表示深深的敬意和感谢，并祝愿吴老师合家幸福。

同时，我也要感谢李智华副教授。作为这一课题的共同负责人，李老师虽然不是我的研究生导师，却无微不至的关怀着我的学习和生活。在课题上，李老师在许多问题上为我打开了新的思路；在生活中，当我情绪低落时，李老师以其丰富的人生经验和前瞻的视角给我安慰和鼓励，这些将对我整个人生有着非常重要的作用。所以，在此感谢李老师对我的关怀和启迪，也祝愿李老师家庭美满幸福。

除此之外，我还想感谢曾经的同学，你们的付出塑造了我的现在；感谢实验室中的师兄姐妹，这几年来的陪伴和帮助使我度过了无数难忘的时光；感谢室友以及同学、伙伴，人生的多彩多姿是由于你们才存在。愿大家都前程似锦！

最后感谢各位评审论文的专家、教授在百忙之中抽出宝贵时间，为本文提出了许多宝贵意见！

袁同浩

2016年3月