

学校代码: 10289
分类号: TM711; TP18
密 级: 公 开
学 号: 159030008



江苏科技大学

专业硕士学位论文

(全日制专业学位)

船舶岸电故障诊断方法研究

研究生姓名 朱祥兵 导师姓名 王建华
申请学位类别 工程硕士 学位授予单位 江苏科技大学
学 科 专 业 电子与通信工程 论文提交日期 2018 年 04 月 25 日
研 究 方 向 信息处理理论与技术
应用 论文答辩日期 2018 年 06 月 08 日
答辩委员会主席 林明 评 阅 人 _____

2018 年 6 月 日

分类号: TM711; TP18

密 级: 公 开

学 号: 159030008

工程硕士学位论文

船舶岸电故障诊断方法研究

学生姓名 朱祥兵

指导教师 王建华 教授

江苏科技大学

二〇一八年六月

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Research on Fault Diagnosis Method of Ship Shore
Power

Submitted by

Zhu Xiang-bing

Supervised by

Professor Wang Jian-hua

Jiangsu University of Science and Technology

June, 2018

江苏科技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，是本人在导师的指导下，独立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，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

江苏科技大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权江苏科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于：

(1)保密□，在____年解密后适用本授权书。

(2)不保密□。

学位论文作者签名：

指导教师签名：

年 月

摘要

针对船舶岸电并网过程中出现的过流、继电保护误动作等问题，提出了一种新的船舶岸电故障诊断方法。本文将陆上电网和船舶电网故障诊断技术相结合，分析船舶岸电系统的继电保护方案，在继电器、断路器拒动/误动条件下研究多种继电保护之间的状态关系及其对岸船电力系统的综合影响。

本文首先介绍了船舶岸电技术的发展历程和故障诊断技术的研究现状；确定采用解析模型和风驱动优化算法相结合的方式对船舶岸电系统进行故障诊断；并对船舶岸电系统对象模型进行数字编码设计。

其次研究风驱动算法的原理和优缺点；针对传统风驱动优化算法易陷入局部最优、早熟收敛的问题，选择在优化过程中有条件的引入莱维（Levy）飞行机制更新质点位置，提高空气质点的搜索范围和种群多样性，增强其跳出局部最优的能力，并做相应的仿真实验。在此基础上，融合现有映射方法得到二进制 Levy 飞行风驱动优化算法，并给出了详细流程。

然后，研究当前数学解析模型的搭建思路和方法，根据船舶岸电目标对象搭建数学解析模型。通过二进制 Levy 飞行风驱动算法对船舶岸电电力系统的故障算例进行迭代求解，并做详细仿真分析。

最后，在 Windows 平台上通过 C#高级程序设计语言编写可视化诊断工具，将 MATLAB 中的诊断方法和算法函数打包并导入工程项目，结合 Matlab Compile Runtime 组件，构建船舶岸电故障诊断可视化工具。

本文将岸电系统包含的元件状态、继电保护装置和断路器动作解析规则结合起来，共同构建一个可以反映它们之间逻辑关系的数学表达式作为船舶岸电电力系统故障诊断数学解析模型。改进现有风驱动算法并做仿真分析，实验证明本文改进策略使测试函数的收敛精度和寻优效率有较大提升，将现有映射方法做融合修正得到二进制 Levy 飞行风驱动算法。利用该算法对故障模型迭代求解，得到最符合告警信息的故障假说，故障算例仿真后得到较好诊断效果验证了该模型的合理性和改进算法的可靠性。

关键词：二进制；风驱动算法；故障诊断；船舶岸电

Abstract

Aiming at the problems of overcurrent and malfunction of relay protection in the process of ship shore power connection, a new method of ship shore power fault diagnosis is proposed. This paper combines the fault diagnosis technology of the land power grid and the ship power grid, the relay protection scheme of ship shore power system is analyzed, and studies the state relationship between the multiple relay protection and the comprehensive influence of the power system on the shore ship under the condition of relay and circuit breaker's rejection / misoperation.

First, the paper introduced the development history of ship shore power technology and the research status of fault diagnosis technology. It is determined that the fault diagnosis of the ship shore power system is carried out by combining the analytical model and the wind driven optimization algorithm, and designs the digital coding of the object model of the ship's shore power system.

Secondly, the principle, advantages and disadvantages of the wind-driven algorithm are studied. For the traditional wind driven optimization algorithm, it is easy to fall into the problem of local optimum and premature convergence. In the optimization process, the Levy flight mechanism is introduced to update the position of particles and improve air quality. The search scope and population diversity of the particle point enhances its ability to jump out of the local optimum and does the corresponding simulation experiment. Based on this, a binary Levy flight-wind-driven optimization algorithm is obtained by integrating the existing mapping methods, and the detailed flow is given.

Then, the construction ideas and methods of the current mathematical analytic model are studied, a mathematical analytical model which based on the ship shore power target is built. A binary Levy flight wind driven algorithm is used to solve the fault calculation example of ship shore power system, and detailed simulation analysis is carried out.

Finally, a visual diagnostic tool is written by C# advanced programming language on the Windows platform. Diagnostic methods and algorithm functions in MATLAB were packaged and imported into engineering project. Combined with Matlab Compile Runtime components, a visual instrument for ship shore power fault diagnosis is constructed.

In this paper, the component state, analysis rules of relay protection device and analysis rules of breaker action are combined to build a mathematical expression that can reflect the logical relationship between them as a mathematical analytical model for the fault diagnosis

of the ship shore electric power system. The existing wind driving algorithm is improved and the simulation analysis is done. The experiment proves that the improved strategy improves the convergence precision and optimization efficiency of the test function. The existing mapping method is modified to get the binary Levy flight wind driving algorithm. Using this algorithm to solve the fault model iteratively, the fault hypothesis which is most consistent with the alarm information is obtained. The fault calculation example is simulated to get a better diagnosis result and verify the rationality of the model and the reliability of the improved algorithm.

Key words: Binary, The wind driven algorithm, Fault diagnosis, Ship shore power

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 故障诊断方法简介	2
1.2.1 专家系统	2
1.2.2 人工神经网络	3
1.2.3 贝叶斯网络	3
1.2.4 解析模型	4
1.3 船舶岸电故障诊断技术研究进展	4
1.3.1 船舶岸电介绍	4
1.3.2 船舶岸电系统故障成因及研究现状	6
1.4 本文的主要研究内容与工作安排	7
1.4.1 文章的研究内容	7
1.4.2 论文的整体结构	8
第 2 章 船舶岸电故障诊断机理研究	11
2.1 引言	11
2.2 陆上电网故障诊断	11
2.2.1 陆上电网保护机制	11
2.2.2 陆上电网故障保护原理	12
2.2.3 陆上电网故障诊断理论	13
2.3 船舶电网故障诊断	14
2.3.1 船舶电网保护机制与原理	14
2.3.2 船舶电网故障诊断理论	15
2.4 船舶岸电故障诊断原理和编码设计	16
2.4.1 船舶岸电故障诊断原理和研究对象	16
2.4.2 船舶岸电电力系统编码设计	18
2.5 本章小结	20
第 3 章 面向船舶岸电模型的风驱动优化算法研究	21
3.1 风驱动算法原理	21
3.1.1 速度和位置更新方程	21
3.1.2 算法流程	23
3.2 融合莱维飞行机制的改进风驱动算法	24
3.2.1 莱维飞行策略	25
3.2.2 算法思想和步骤	26
3.2.3 算法仿真测试	27
3.3 风驱动优化算法的二进制映射	35
3.3.1 传统映射公式	35
3.3.2 改进的混合映射公式	37
3.3.3 二进制 Levy 飞行风驱动算法	38

3.4 本章小结	39
第 4 章 基于改进风驱动算法的船舶岸电故障诊断方法研究	41
4.1 船舶岸电系统故障诊断解析模型	41
4.1.1 保护继电器和断路器动作期望解析	41
4.1.2 电力系统故障诊断的完全解析模型	43
4.1.3 船舶岸电系统故障诊断完全解析模型	45
4.2 基于二进制 LEVY 飞行风驱动算法的船舶岸电并网故障诊断	46
4.2.1 Levy 飞行风驱动算法与常用故障诊断算法比较	46
4.2.2 基于解析模型的二进制 Levy 飞行风驱动算法的故障诊断步骤	47
4.3 算例仿真	48
4.3.1 有误动和漏报的复杂算法例	49
4.3.2 有误动和拒动的复杂算法例	49
4.3.3 算例分析	50
4.4 本章小结	51
第 5 章 船舶岸电故障诊断系统搭建	53
5.1 船舶岸电故障诊断系统组成设计	53
5.2 船舶岸电故障诊断系统软件设计	54
5.2.1 登录界面和主界面设计	55
5.2.2 诊断分析模块	56
5.3 系统演示	59
5.4 本章小结	60
总结与展望	63
参考文献	65
攻读硕士期间发表的论文	69
致 谢	71

Contents

Abstract(Chinese)	I
Abstract(English)	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research background and significance	1
1.2 Introduction to fault diagnosis methods	2
1.2.1 Expert System.....	3
1.2.2 Artificial Neural Networks	3
1.2.3 Bayesian Network	3
1.2.4 Analytical Model	4
1.3 Research progress on fault diagnosis technology of ship shore power	4
1.3.1 Introduction of ship's shore power	4
1.3.2 Fault causes and research status of ship's shore power system	7
1.4 The main research content and work arrangement of this article.....	7
1.4.1 Research content of the paper.....	7
1.4.2 The overall structure of the paper.....	8
Chapter 2 Study on the fault diagnosis mechanism of ship's shore power	11
2.1 Introduction	11
2.2 Fault diagnosis of land power grid	11
2.2.1 Protection mechanism of land power grid.....	11
2.2.2 Fault protection principle of land power grid.....	12
2.2.3 Fault diagnosis theory of land power grid.....	13
2.3 Fault diagnosis of Ship Power Grid	14
2.3.1 Protection mechanism and principle of Ship Power Grid	14
2.3.2 Fault diagnosis theory of Ship Power Grid	15
2.4 Fault diagnosis principle and coding design of ship's shore power	16
2.4.1 The principle and research object of the fault diagnosis of ship's shore power ...	16
2.4.2 Coding design of marine electric power system	18
2.5 Summary of this chapter.....	20
Chapter 3 Research on wind driven optimization algorithm for ship shore power model	21
3.1 The principle of wind driving algorithm	21
3.1.1 Speed and position update equation	21
3.1.2 Algorithm flow	23
3.2 An Improved Wind Driven Algorithm Integrating Levy Flight Mechanism.....	24
3.2.1 Levy flight strategy	25
3.2.2 Algorithm ideas and steps.....	26
3.2.3 Algorithm simulation test	27
3.3 Binary mapping of wind driven optimization algorithms	35
3.3.1 Traditional mapping formula.....	35
3.3.2 Improved mixed mapping formula.....	37
3.3.3 Binary Levy flight wind driving algorithm	38
3.4 Summary of this chapter.....	39
Chapter 4 Research on ship shore power fault diagnosis method based on improved wind driven algorithm	41
4.1 Analytical model for fault diagnosis of ship shore power system.....	41

4.1.1 Protection Relay and Circuit Breaker Action Expectation Analysis	41
4.1.2 Completely Analytical Model of Power System Fault Diagnosis	43
4.1.3 Complete analytical model for fault diagnosis of ship shore power system	45
4.2 Fault diagnosis of ship shore power grid connection based on binary Levy flight air drive algorithm	46
4.2.1 Comparison between Levy flight air drive algorithm and common fault diagnosis algorithms	46
4.2.2 Fault diagnosis step of binary Levy flight air drive algorithm based on analytical model	47
4.3 Example simulation	48
4.3.1 Complex calculations of misoperation and misrepresentation	49
4.3.2 Complex calculations of of misoperation and rejection	49
4.3.3 Analysis of examples	50
4.4 Summary of this chapter	51
Chapter 5 Construction of fault diagnosis system for ship shore power	53
5.1 Design of fault diagnosis system for ship's shore power	53
5.2 Software design of fault diagnosis system for ship's shore power	54
5.2.1 Design of the main interface and login interface	54
5.2.2 Diagnostic analysis module	56
5.3 System demonstration	59
5.4 Summary of this chapter	60
Summary and outlook	63
References	65
Publication papers in the period of studies master degrees	69
Acknowledgement	71

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

对停港船舶施行岸电技术可以减少碳排放、有助于保护大气环境，促进社会绿色发展，对恢复港口地区生态环境，有着深远的意义和价值。2016年1月国内正式施行的《大气污染防治法》中提出“新修建的码头应当规划、设计和建设岸基供电设施，已建码头需要自身改造来提供岸基供电设施，舰船停港后必须优先使用岸基电源。”

船舶在停靠港口这一段时期内，主要通过自身搭载的辅机来满足其用电需求，而辅机在工作过程中会消耗燃油，同时产生包含氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)、挥发性有机化合物(VOC)和可吸入颗粒污染物(PM)等在内的严重有害污染物^[1]，危害了港口地区的生态和生活环境，另外辅机工作过程中会造成大量的噪声污染，给周边人们的工作生活带来了极大影响。船舶使用岸电技术是船舶在靠港期间停用辅机，使用陆上电源供电，为其泵组、通风、照明、通讯和其他设施提供电力^[1]。

2012年7月4日，交通部颁布的《码头船舶岸电设施建设技术规范 JTS155—2012》和《港口船舶岸基供电系统技术条件 JT/T814—2012》，提出“新建设的集装箱码头、干散货码头、邮轮码头和客滚轮码头，其工程项目规划、设计和建设中必须包含码头船舶岸电设施内容”的强制要求^[1]。2013年，国家电网公司提出“以电代油，以电代煤、电从远方来”^[2]新的能源使用模式，获得了全社会的一致好评。而船舶使用岸电就是“以电代油”的重点典型，有效解决了港口船舶的燃油问题。但是国内目前的岸电应用还处于起步阶段，且只能对特定的船舶提供岸电；对于老式船舶还要对其进行基础改造，且改造成本较大。

我国港口特别是沿海港口的电制通常是 6kV/10kV 50Hz，国内船舶电制通常是 400V 或 6.6kV 50Hz 而国外船舶的电制通常是 450V、6.6kV 或 11kV 60Hz，当国外船舶在国内使用岸基电源要用到变频技术，所以，国内港口需要提供 50Hz/60Hz 双频供电方案，即：（1）岸电双变频供电技术。该技术涉及变频稳定性和供电可靠性，而且还需为变频电源负载提供谐波抑制对策，以免影响岸上电网^[3]。（2）岸电综合保障系统。由于船电线制不同、电位不同及负载特性不同，需要专门的岸电综合保障系统控制整个供电过程。这对港口来说也是一项较大的投入。

现代船舶负载容量日益增大、电站结构日趋复杂，同时装载的多种特殊设备（保鲜保活设备、舰载武器等）具有“不断电”需求，因此岸上电源给船舶供电时必须采用岸/船的“无缝并网”的方式。该方式必将取代“先停船舶发电机，在并岸电”的传统供电方式。岸/船并网不同于传统的多台柴油机联网控制。而发电机转子具有惯性，同时

具备的“逆功”承受能力。而岸基变频电源的核心器件是大功率 IGBT, 船舶电站电流、电压、频率的微小扰动, 就会威胁变频电源和船舶发电机的稳定性, 严重时也会造成岸/船电力设备的损毁。虽然现在对无缝并网的研究正在如火如荼的展开, 但要彻底杜绝并网过程中的问题产生, 还有较长的一段路要走。所以在岸/船并网过程中, 对岸上设备和船载设备进行状态监测和故障诊断是必不可少的。

1.2 故障诊断方法简介

一个完整的船舶岸电故障诊断系统通常是融合故障检测、故障定位和故障预测且具备数据采集、分析、反馈功能的智能系统^[4]。船舶岸电故障检测功能是指通过遍布在整个船舶岸电电力系统中的数据采集单元对整个电力系统的电流、电压等电气量进行实时监测, 并根据这些监测状态判断目标单元的状态; 船舶岸电故障定位功能首先是确定故障所在的失电区域, 并能准确找到具体目标故障单元。

当电路中元件故障时, 将导致对应的电气量会剧烈变动, 而故障元件所对应的继电保护装置会根据电气量数据产生动作, 当相关断路器收到保护动作的信号就会跳闸, 将故障元件从电路中隔离出来^[5]。

船舶岸电故障诊断技术主要为: 数据状态识别、故障种类确定、故障定位。其中数据状态识别和故障种类确定都可以通过数据采集单元分析可知, 而故障定位则需要对结合前面两种数据, 结合算法和模型得到故障元件的具体位置和拒动误动信息。

当前主要的故障诊断技术有: 专家系统、人工神经网络、贝叶斯网络、解析模型等。

1.2.1 专家系统

Feighbaum 教授于上世纪 70 年代研发出世界上首个专家系统, 并详细介绍了专家系统是一种相对智能化的计算机程序, 以知识与推理过程来求解的高难度问题。十几年后, 专家系统就被引入了电网故障诊断中且应用较为成功。专家系统工作原理为: 第一步需要建立信息知识故障库, 以自然语言为基础建立产生式规则; 之后根据对这一规则的理解, 知识工程师把知识编译成机器语言储存到知识故障库中^[6]; 当故障产生时, 推理机将获得故障数据, 根据之前的故障数据映射关系, 运用知识故障库中已存在的知识, 以设定好的策略推理诊断出故障元件。

将专家系统应用于电网故障诊断之中, 可以保证电网诊断系统的实效性, 目前专家系统应用于电网故障诊断依旧存在着不足: (1)专家系统中知识通过人为干预植入电脑, 所以不可能建成非常全面的知识故障库; (2)容错能力差, 一旦保护装置或断路器发生错误动作或遇到知识库中没有植入的情况, 几乎不可能给出正确的诊断; (3)整个系统的维护成本大, 知识故障库需要根据现实情况频繁更新^[6]。

1.2.2 人工神经网络

人工神经网络(Artificial Neural Network)是模拟人类神经系统工作原理的一种模型,是根据输入、输出之间关系和众多基础的神经元互连形成的复杂系统。神经网络可以将海量样本训练分析,找到一定的规律,实现对不确定的故障情况进行分析并做出判断。这种前馈式的神经网络已经成功应用在电力系统故障诊断领域,最常见的有BP(Back Propagation)神经网络和径向基神经网络。BP神经网络的具体应用步骤:将保护继电装置的动作数据设定成神经输入部分,训练产生的可能故障假设当成输出部分,以此搭建故障模型;根据众多故障实例生成训练样本集;在训练中,在输入节点添加输入信息,此信息传前一个节点传递,并根据所在节点内的函数、加权系数和相关阈值进行计算,这个过程叫做学习过程;这个过程中,一旦前馈的输出结果与期望结果之间存在误差,则将误差反向传输,调整节点权值和阈值设定,直到满足输出条件。

神经网络具备较为强大的自我学习能力,同时具备容错能力强、鲁棒性好、非线性映射和并行分布处理等特点^[7]。但是,神经网络也存在如下缺陷:(1)训练样本集过于庞大,且得到高价值的样本非常困难;(2)诊断过程中,神经网络无法对自身行为提供解释;(3)神经网络难以解决启发式规则。以后针对神经网络方面的研究主要集中在完备训练样本的获取、提高诊断过程中的解释能力。

1.2.3 贝叶斯网络

贝叶斯网络是一具备概率标识有方向的无环图,是图论和概率理论的结合体,利用网络流程图来表达知识,使用概率理论来描述不同知识成分之间的影响,通过条件概率推理实现电网故障诊断^[8]。

基于贝叶斯网络的诊断模型直观、清晰,可在告警信息不确定和不完备情况下较好地实现诊断决策^[9]。然而,实际应用中贝叶斯网络需获得有效的先验概率才可确保诊断结果的准确性,而在电网复杂故障时先验概率的求取具有一定难度;而且由于贝叶斯理论上的严密性,当电网结构复杂时贝叶斯网络建模难度很大,所构建的模型也较复杂,影响诊断效率;此外,现有模型的诊断结果受保护、断路器动作信息不确定性的影响,在存在多重保护、断路器误动或拒动、信息误报或漏报等事件时,会导致误判率的提升。

近年来,采用时序信息来改进传统贝叶斯网络在故障诊断中的不足。通过引入时序信息,构建时序属性的贝叶斯故障模型,一定程度上提高了故障诊断精度,但如何使贝叶斯网络能够自动建模以适用于在线应用,以及通过与其他数据源进行信息融合构建出鲁棒性更强的诊断模型仍有待深入研究。

1.2.4 解析模型

电网故障诊断中的解析模型思想是将电网元件、保护继电装置和断路器动作规则构建一个可以反映电气元件与保护继电装置、断路器动作规则之间逻辑的数学关系式，将故障数据信息进行整数规划，通过智能优化算法迭代求解，遍历得到最符合告警信息的故障假说^[10]。

解析模型的建立是以严谨的物理和数学知识为基础的，它可以简化推理过程，易于计算机编程，能为复杂故障且包含不确定性告警信息的问题，给出全局最优的故障假说。但是如何建立合理的电网故障诊断解析模型却是当前的首要难题，尤其是当复杂故障发生且伴随较多的不确定信息时，无法确保所得到的故障假说是否合理。也就是说解析模型合理性很大程度上决定了诊断结果的可靠性。

近年来，将表征故障的更多信息引入到解析模型，使得模型结构更完备，最终求得的故障假说亦更为准确、清晰的解释。然而，计入的信息越多所构建的数学模型的维数就越高，故障模型也就越复杂，在求解时亦会存在许多缺陷，其突出表现为：模型权重的分配有较大的主观性；优化求解过程中各级保护、断路器等故障信息在模型中表征部分的优劣进程不可控。因此，未来将考虑充分利用与故障过程相关的电气量信息及非关键故障信息，在前期对现有基于保护、断路器信息构建的解析模型进行信息校验与修正，考虑构建包含多源信息的多目标解析模型来降低故障模型的复杂度及维度。

1.3 船舶岸电故障诊断技术研究进展

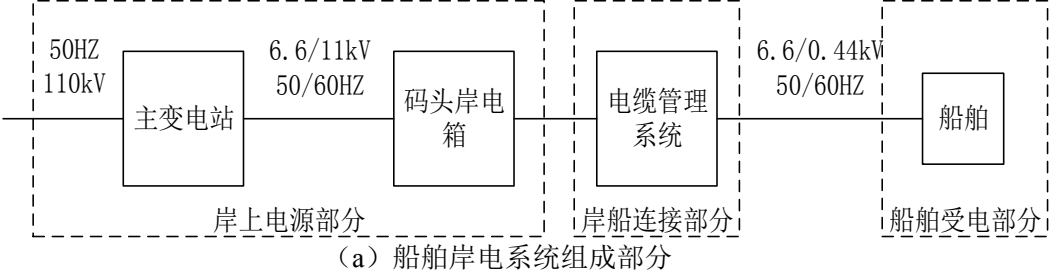
1.3.1 船舶岸电介绍

2000 年，哥德堡港为其渡船码头安装了世界首个高压岸电系统。据统计，该码头全年污染排放降低了 94%-97%，引起了世界范围的广泛关注。随即欧洲其他各国的主要港口，如鹿特丹港、安特卫普港等集装箱码头、泽布勒赫港、哥德堡港等客滚或渡船码头也相继使用了岸电技术^[11]。2001 年中旬，美国朱诺港首次将船舶岸电技术使用在豪华邮轮码头上，3 年后，美国洛杉矶港集装箱码头的 100 号集装箱泊位也安装了岸电系统，并计划在 2014 年之前给所有集装箱码头配备岸电设施；2009 年，长滩港为其油码头安装岸电设备。2012 年后，安特卫普港、泽布吕赫港和吕贝克港也使用了岸基电源设施。

国内岸电的研究与落实目前已进入初步发展阶段。2009 年后，国内众多港口开始部分安装船用岸电项目，2009 年青岛港在全国范围内率先完成了 5000t 级内贸支线集装箱码头船舶岸电工程改造，虽然该项目只针对内货船只提供岸电，但它拉开了国内岸电发展的新篇章；2010 年 3 月，上海港外高桥二期集装箱码头安装移动式岸基船用变频变压供电系统，成为国内首个集装箱码头岸电系统；2010 年 10 月，连云港港

口集团率先将高压船用岸电系统应用于邮轮码头，成功为“中韩之星”供电；2011年11月-2012年1月，招商国际蛇口集装箱码头先后安装了低压岸电系统与高压岸电系统^[8]。江苏淮安新港和句容电厂码头在2013年也成功配备部分岸基电源；2016年，连云港港与上海港合作开发的岸电系统在上海羊山港投入运行，采用高压岸电方式对台湾的“长青号”集装箱船成功受电18小时，最大负荷2500kVA。

船舶岸电系统的主要由以下三部分组成：（1）岸上电源部分，主要由主变电站和码头岸电箱组成；（2）岸船连接部分，以电缆管理系统为主，是岸/船供电的桥梁；（3）船舶受电部分，在原本船舶的基础上安装了电缆装置和船载变压器等。其工作原理为：主变电站根据目标受电船舶的供电标准调整电压、频率和相位等参数，将相对应等级的电能输送到码头接线箱，通过岸船连接部分与船相连，实现为船载设备供电。图1.1为岸电系统的组成框图和连云港港口集团的集装箱码头与岸电出线柜实拍图。



(b) 连云港港口码头



(c) 岸电箱出线柜

图1.1 船舶岸电系统的组成部分和部分的配图

Fig. 1.1 Distribution of parts and parts of the ship's shore power system

上述港口的岸电供电方式主要分为以下3种：（1）低压岸电—低压船舶，首先变电站将电网电压降压到6.6kV，将其接到岸电箱，由岸电箱降压（变频）到440V/50HZ（60HZ），用多根电缆与船相接；（2）高压岸电—低压船舶，同样需要将电网电压降至6.6kV，有变频要求的，可通过相应的变频器变频，用一根高压电缆线与船载变压器相接，经过降压处理后供船载设备使用；（3）高压岸电—高压船舶，电网电压降压至

6.6kV后（如需变频，可先在岸上调整频率），用一根高压电缆直接与船舶连接，为船舶负载供电。低压岸电主要用于负荷较小的船只，而高压岸电适合负荷量较大的大型船舶。表1列举以上三种供电方式在国内外港口之间的应用情况。

表1 三种不同供电方式在国内外港口中的应用

Table 1.1 Application of three different power supply methods in domestic and foreign ports

国家	港口	岸电基本情况
瑞典	哥德堡港	高压 6.6/10kV、低压 400V;频率 50Hz
	赫尔辛堡港	低压 400/440V;频率 50Hz
	斯德哥尔摩港	低压 400/690V;频率 50Hz
	皮提阿港	高压 6.6kV ; 频率 50Hz
比利时	安特卫普港	高压 6.6kV;频率 50/60 Hz
	泽布勒赫港	高压 6.6kV;频率 50Hz
芬兰	科密港	高压 6.6kV;频率 50Hz
	奥卢港	高压 6.6kV;频率 50Hz
	科特卡港	高压 6.6kV;频率 50Hz
德国	吕贝克港	高压 6.6 kV;频率 50Hz
美国	洛杉矶港	高压 6.6 kV/11kv;频率 60Hz
	长滩港	高压 6.6 kV、低压 480V;频率 60Hz
	旧金山港	高压 6.6/11kv;频率 60Hz
	西雅图港	高压 6.6/11kv;频率 60Hz
	朱诺港	高压 6.6/11kv;频率 60Hz
	匹兹堡港	低压 440v;频率 60Hz
加拿大	温哥华港	高压 6.6/11kv;频率 60Hz
	鲁伯特王子港	
韩国	三星 LNG 天然气头	高压 6.6/11kv;频率 60Hz
中国	天津港	高压 6.6 kV、低压 380 V;频率 50/60Hz
	青岛港	低压 440 V; 频率 50Hz
	上海港	低压 440 V; 频率 50/60Hz
	连云港港口	高压 6.6 kV、低压 440 V;频率 50/60Hz
	蛇口港	高压 6.6 kV、低压 440 V;频率 50/60Hz

根据当前社会发展趋势来看，船舶的吨位和体量都朝着大型化、多功能化发展，所带来的电站容量需求也随之提高，文献[11]提出高压岸电方式具有供电操作便捷、成本较低和占用码头空间少等优势，将成为今后船舶岸电技术发展的主流。从表一也可以看出，当今世界上主要的大型港口都是采用高压岸电的供电方式。

1.3.2 船舶岸电系统故障成因及研究现状

岸电和船电的并网过程中是整个系统最容易发生故障的一段时间，并网的方式主要分为：（1）先停船舶发电机，在并岸电；（2）先并岸电，再停船舶发电机。第一种方法会造成船舶短时失电，这样不利于船上正常的工作和生活；第二种方法是“无缝

并网”的一种体现，该方法是指：船舶靠港后，直接与岸电相连，通过负载转移的方法停掉船用发电机，当船离港时，船用发动机启动，通过负载转移切除岸电。然而在并网过程中还要考虑谐波抑制、负载迁移过程中的电流冲击、线制不同造成的绝缘击穿等问题。

谢圣昌^[12]分析了传统岸与船并网原理及方法，提出了新的无缝并网技术即运用负载转移技术来关闭船用发电机，使船用设备在不停电的状态下实现与岸上电源并网。侯珏^[13]提出了一种基于改进下垂控制的岸/船并网策略，使码头电源逆变器在具有下垂特性的同时，具有类似于船舶同步柴油发电机转子的惯性。在这种模型下，岸上电源使用并网预同步控制的方法与船舶电力系统并网，将不会引起过大的电流冲击。郇克存等^[14]提出了一种基于虚拟同步发电机模型的岸电电源电力电子逆变器控制策略，初步验证了该控制策略的可行性。

当岸电系统失电区域保护装置发生拒动或误动时，现有的控制策略无法满足系统安全稳定的需求。文献[15]运用自组织特征映射网络 (SOM) 对岸电系统监测数据进行分析，证明了 SOM 网络在系统绝缘故障监测的可行性。文献[16]从岸电供电网络架构、电网接地方式出发，对岸电系统接地故障进行仿真分析，得出在码头安装多个隔离变压器，将隔离变压器副边中性点连接上高电阻接地装置，可以抑制岸电电缆产生的对地拉弧故障。文献[17]为解决港口岸电系统中出现的安全问题，对港口岸电中的安全联锁系统进行研究，得出初步的安全联锁规范。文献[18]提出了一种根据保护和断路器动作规则构建完全解析的电网诊断模型，在提高算法模型的抗干扰能力和鲁棒性的同时，降低了误诊概率。文献[19]提出了一种改进的解析模型即通过告警信息漏报率与误报率，并结合保护与断路器自身的误动率和拒动率，给出相应的权值，提高了故障诊断的可靠性。

1.4 本文的主要研究内容与工作安排

1.4.1 文章的研究内容

查阅国内外与船舶岸电相关的文献和资料，熟悉船舶岸电的工作原理和电力故障诊断方面的技术难点；仿真分析比较常见智能优化算法的优劣，选择风驱动优化算法并对其进行改进；研究当前阶段陆上电网和船舶电网故障诊断的先进方法，并进行可行性分析，最后运用到船舶岸电电力系统上去。文章总体脉络如图 1.2 所示。

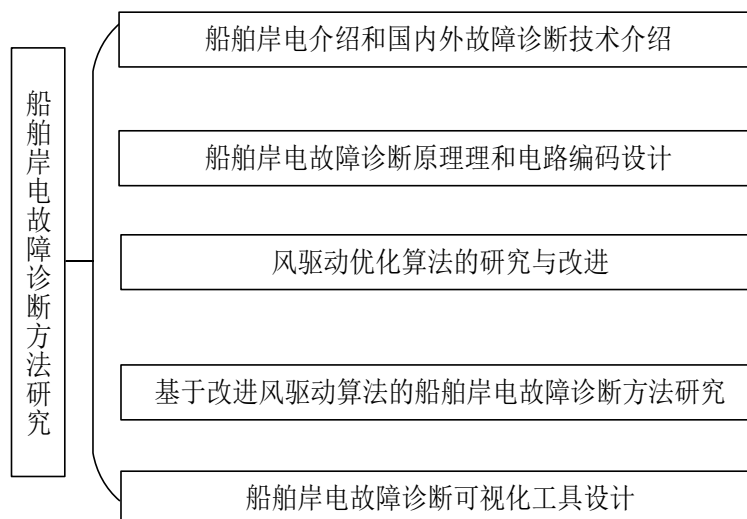


图 1.2 文章总体脉络

Fig. 1.2 Overall context of the article

1.4.2 论文的整体结构

第一章，对船舶岸电和故障诊断技术的一个总体介绍，主要包括船舶岸电系统的研究背景、意义和现阶段故障诊断方法及其优劣性。比较国内外船舶岸电的发展历程，认识到岸电给我们社会和环境发展带来的巨大好处，也包括目前国内岸电发展过程中的问题和不足。最后确定了用解析模型和风驱动优化算法进行故障诊断求解。

第二章，研究当前陆上电网和船舶电网故障诊断的主流方法，确定船舶岸电电力系统故障诊断原理和迭代运算的智能优化算法。设定仿真船舶岸电研究物理对象，根据研究对象的电路结构进行数学编码设计。

第三章，首先阐述风驱动算法的数学原理和物理模型，介绍并重写了风驱动算法的公式推导步骤，明确算法位置更新方程和速度更新方程的意义，画出原始的风驱动算法的流程图。针对传统风驱动优化算法易陷入局部最优、早熟收敛的问题，在优化过程中有条件的引入 Levy 飞行机制更新质点位置，提高空气质点的搜索范围和种群多样性，增强其跳出局部最优的能力。通过仿真实验结果验证了改进策略的正确性，有效的提高算法的收敛精度、速度和全局搜索能力。最后对两种不同的二进制映射公式进行特殊机制混合得到新的混合映射公式，将解决连续空间问题的风驱动算法改进成解决离散空间问题的二进制风驱动算法。

第四章，主要研究当前学解析模型的搭建思路和方法，建立适合本文船舶岸电对象的数学解析模型，通过二进制 Levy 飞行风驱动算法对船舶岸电电力系统的故障算例进行迭代求解，并与标准故障结果进行对比，验证的诊断的正确性，同时与其它优化算法进行对比，发现本文得到的诊断结果更加精准。

第五章，在 Windows 平台上通过微软的 .NET Framework 框架和 C# 高级程序设计语言编写可视化诊断工具，将 MATLAB 中的诊断方法和算法函数打包并导入工程项

目，结合 Matlab Compile Runtime 组件，构建故障诊断可视化工具。

第2章 船舶岸电故障诊断机理研究

2.1 引言

目前国内电力行业发展迅速，陆上电网电压等级已经实现 800kV 直流特高压、1000kV 交流特高压并网运行。主要形成了东北、西北、华北、华东、华中和南方电网这六大电网分区，实现了超远距离跨区域输电的电网架构^[20]，将不同分区之间的电力资源通过特高压工程进行传输，真正做到全方位供电，提高了电力资源的利用效率和配给方式的合理性。然而，电力资源互联互通的同时也给电力故障处理和隔离调度带来了挑战，当自然灾害或电网自身问题导致的电路故障不能都得到及时的处理，可能会造成一系列的连锁反应，扩大事故影响范围。例如：2003 年，美国纽约发电厂遭到强电雷击，由于工作人员未能及时确定故障区域，使得北美东部极大面积区域发生长时间停电，严重影响了五千多万居民的日常生活，给当地社会带来了巨大的经济损失和政治影响；2006 年，国家电网河南分公司一高压线出现故障，没有及时排除故障源，造成郑州等五个市的电力中断，还影响了周边各省市的电网稳定，引起了众多的社会问题。在电网组成日趋复杂、电网规模日益庞大的今天，研究出可以快速定位故障区域和故障源信息的电网故障诊断方法具有极为重要的意义。

2.2 陆上电网故障诊断

2.2.1 陆上电网保护机制

就目前来说，陆上电网主要通过继电保护装置来确保电网安全，通过继电保护装置将故障点隔离在最小范围。继电保护主要由主保护、后备保护（第一后备保护和第二后备保护）组成，当电网有故障产生时，主保护迅速判断是否动作来切除被保护设备并隔离故障线路，当主保护拒绝动作（拒动）时后备保护动作以确保线路安全^[21]。其中后备保护指第一后备保护（也叫近后备保护）和第二后备保护（也叫远后备保护），在电路设计中，通常将主保护和第一后备保护合并形成同一保护装置，通过灵敏度和时间长短结合的方式确保电路安全。文献[21]记录了近年来引发电网事故原因分类，认为有超过四分之一的事故是由于继电装置保护不力造成的，其他因素可以归纳为：人为因素，自然灾害等不可抗因素，继电装置保护差错主要可分为：保护/断路器的拒动、误动等，这些差错会造成电网事故，甚至扩大事故的影响范围，故而准确且及时的电网监测和诊断机制非常关键。

2.2.2 陆上电网故障保护原理

对电网故障的分析研究主要集中于母线、变压器和线路，其主保护用“m”表示，第一后备保护用“p”表示，第二后备保护用“s”表示。陆上电网的故障诊断以图 2.1 所示的电网拓扑图为例。

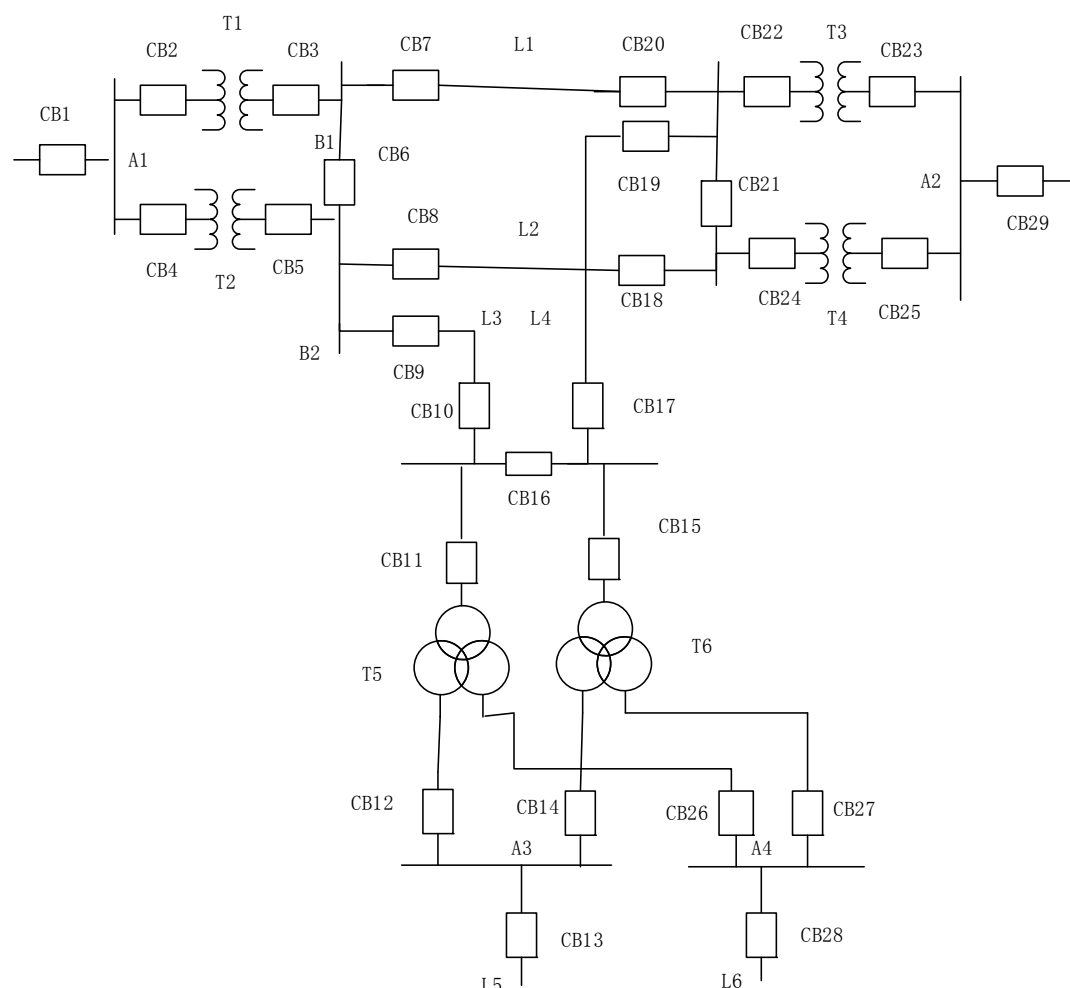


图 2.1 陆上电网拓扑图

Fig.2.1 Topography of the onshore power network

其中 CB 指的是开关，T 为变压器，A 表示母线，L 代表线路和元件。

(1) 当母线 A 产生故障问题时，主保护动作跳开将母线与电网隔离，保证电网的正常运行，例如：当 A1 出现问题时，A1 的主保护 A1_m 动作，与 A1 关联的 CB1, CB2 和 CB3 将会断开；A4 出现问题时，A4 的主保护 A4_m 动作，将与 A4 相关联的 CB26, CB27 和 CB28 断开；

(2) 变压器故障时，其主保护 T_m 将断开所有与该变压器相连的开关断路器，确保电网安全运行，但是一旦主保护拒动其第一后备保护 T_p 将会动作，断开与变压器相关联的所有断路器。例如：当 T5 出现故障时，T5_m 拒动，T5_p 将会动作断开断路器开关：CB11、CB12 和 CB26。变压器的第二后备保护是用来确保相邻级设备故障无法及

时切除时动作，保护变压器安全，例如：当 A3 产生故障，A3 主保护和第一后备保护都没有及时动作，这时 T5 第二后备保护动作断开 CB26。

(3) 线路的两端部都配有主保护和后备保护。当 L1 产生故障时，L1 两端的主保护 L1_{leftm} 和 L1_{rightm} 都将动作断开 CB7 和 CB20。如果 L1_{rightm} 未动作，L1 右侧的第一后备保护 L1_{rightp} 将跳开 CB20。同理 L2 的第二后备保护为了确保 L1 安全而设计，例如：当 B1 故障且 B1 的主保护和第一后备保护未能及时断开 CB7 时，L1 右侧的第二后备保护 L1_{lefts} 就会跳开断路器开关 CB7。

综上所述，主保护是在故障发生后的首要保护，第一后备保护是对主保护的有效备选保护，以确保保护的执行，第二后备保护是为了确保设备不受周围未被及时隔离元件的影响。

2.2.3 陆上电网故障诊断理论

当前陆网故障诊断方法有很多，本文主要详细介绍解析模型方法，该方法根据电网特性建立电网故障诊断模型：通过告警信息反馈过来的数据形成一系列故障假设；然后将这些假设通过优化算法（粒子群算法、遗传算法等）代入故障模型，最终求得最优解，该最优解是最能合理阐述当前故障问题的一种假说，再根据最优解反推出保护与断路器的动作是否准确。

因此故障诊断的主要研究方向就转变成对解析模型设计和模型目标函数的优化上来，合理的故障诊断模型和高效的优化算法将决定诊断结果是否准确迅速。近年很多研究者提出了不同的诊断模型，其基础都是建立在保护和断路器不同状态上，有着一定的共同点。

文献[22]将继电保护装置和断路器动作与电网系统元器件之间逻辑关系相结合。提出如下诊断模型作为目标函数：

$$E(S) = \sum_{i=1}^C \left| C_i - C_i^*(S, R) \right| + \sum_{i=1}^R \left| R_i - R_i^*(S) \right| \quad (2.1)$$

上式将故障诊断求解转换成对目标函数最低适应度值的运算上来，利用遗传算法求得最优解。 S 表示电力系统的设备元件的未知状态， C_i 和 C_i^* 分别表示第 i 个断路器的实际状态和期望状态， R_i 和 R_i^* 分别表示第 i 个保护的实时状态值和期望状态值。 C 和 R 分别代表断路器和各个保护的数量。

文献[23]采用与式（2-1）相同的故障模型，利用粒子群优化算法求得最优解，在取得同样的诊断结果下，提高了诊断速度。文献[24-26]对故障发生前后的系统拓扑结构分析，判断出失电区域范围，确定失电范围内故障元件集合，然后基于区域内故障元件集搭建故障诊断解析模型，减少了故障诊断模型的维度，降低目标函数的寻优范围，提高寻优速率。然而，一旦继电保护装置和断路器产生拒动或误动，该方法无法

确保诊断结果是否可靠,且没有办法根据最优解反推出保护与断路器的动作是否准确,不能判断误动、拒动、误报和漏报的情况。文献[27]以文献[24-26]为基础,将继电保护装置和断路器拒动、误动状态引入数字逻辑关系,并与失电区域内故障元件集合中的故障假说一起组成待优化参数变量,模型较之前丰富,且能实现继电保护和断路器运行情况做出正确判断,由于引入更多的参数变量,目标函数(故障模型)的维度也增加了,函数模型的空间复杂度相对增大,求解速度相对降低;在处理优化参数变量冲突的问题上,采用查表法来避免相互矛盾的逻辑,诊断模型因此缺少了适用性和鲁棒性。最重要的一点,上述故障解析模型都是把保护继电装置动作的期望值表示成实际告警数据与待优化参数变量的目标函数,依靠智能优化技术迭代运算求得目标函数的最优解,根据最优解求得实际告警数据与待优化参数最优值。一旦实际告警数据不正确时(保护或断路器动作的漏报、误报),错误数据会在目标函数期望值的运算中继续扩散,诊断结论的正确性将会降低。

文献[28]将故障发生前后元器件状态、继电保护装置和断路器动作三者关联起来,同时还引进继电保护和断路器动作的不确定性作为权值,建立新的故障诊断完全解析模型,避免上文中告警数据出错将造成诊断错误的缺点,但并没有考虑不同保护动作之间随机事件发生概率的不同,致使当诊断含有较多拒动、误动和告警数据不正确故障情况,可能出现多个解。

2.3 船舶电网故障诊断

2.3.1 船舶电网保护机制与原理

船舶电网由发电机、线路、变压器、母排(配电板)和用电元件设备组成。通过主配电板将电网划分成许多个单独的单侧电源辐射区域,并以主配电板环形连接,每一个配电板上都装有隔离开关,多个电机能够实现独立供电。供电方式以分层供电为主:主要负载与主配电板直接相连,次要负载与区域配电板相连。

船舶电网的保护与陆上电网保护机制略有不同,但同样可以分为三种保护,它是根据电流在特定时间段内突然增大而动作的,是某一时间段内的阶段式保护。某一元件发生故障时,首先是元件自带保护动作,将元件与电网隔离,如果自带的保护未能及时隔离自身,元件靠近电源一侧的关联元件的保护将作为后备保护将对应的断路器断开隔离故障。由此可见,船舶电网上的保护线圈设计有别陆上电网,它将保护线圈与断路器集成在一起,保护的类型也是由瞬时保护和延时(短延时、长延时)保护组成。保护动作与否是由断路器负载端的状态决定的。当元件短路时,原则是上瞬时保护动作,一旦瞬时保护未及时动作,一定时间内短延时保护作为后备动作,如果保护还未成功动作,将由靠近电源端一侧的上一级元件保护动作为长延时保护动作断开相关

断路器，确保电力系统的稳定运行。

保护机制如图 2.2 所示：当 D1 发生故障时，其自身保护动作使断路器 CB5 断开（瞬时保护动作），当 CB5 动作未完成，一定时间内短延迟保护动作断开断路器 CB5，一旦短延迟保护未及时动作，将会由靠近电源 G 一侧母排的保护动作作为长延时保护动作，断开断路器 CB2 和 CB4，将故障隔离于电路之外。

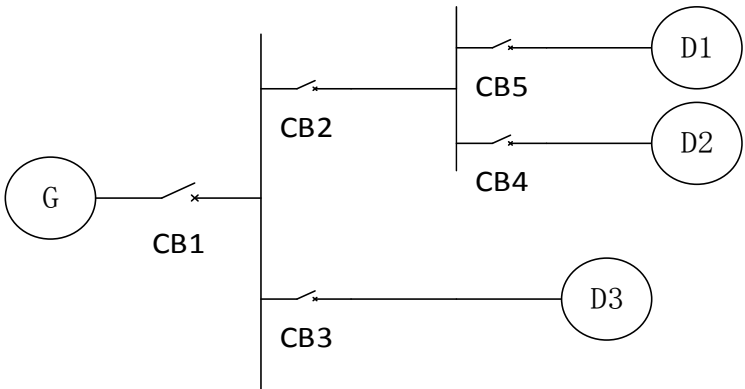


图 2.2 电网保护机制简图

Fig.2.2 Diagram of the grid protection mechanism

其实船舶电网保护原理从根源上看还是类似于陆上电网保护机制，除了各种保护所关联的断路器不同外，船舶电网也会因继电保护装置和断路器的拒动、误动，造成电路故障和故障影响扩大化。

2.3.2 船舶电网故障诊断理论

因为船舶电网与陆上电网的相似性，陆上电网故障诊断的解析模型和优化技术同样适用于船舶电网。首先，将目标系统内的继电保护装置和断路器的期望状态与实际状态以 0-1 表示，并做对比，建立式（2.1）所示的故障诊断模型，将故障诊断的求解转换成对目标函数最低适应度值运算上来，再通过优化算法的迭代运算求得一种使得期望状态与实际状态的对比偏差值最小故障假说，这假说就是与实际故障状态最为接近的状态，这时候将期望状态与实际状态做对比分析，就可以得到造成电网故障的断路器或保护继电器，从而推断出故障元件。其中保护和断路器的期望状态是由电路故障状态计算得到的，而实际状态是通过监测设备对保护和断路器状态实际监测而得。由此可知当监测数据出现故障或部分故障，将会对诊断结果造成重大影响。

与陆上电网故障诊断技术发展不同的是，由于船舶本身的局限性，船舶电力系统故障诊断的发展特别缓慢，张海艳^[29]对船舶电力系统故障诊断的方向进行了叙述，介绍了几种可行的理论方法：用专家系统来对船舶电力系统进行故障诊断^[30]，文献[31]提出采用式（2.1）所示电网故障模型，将故障模型转换为目标函数的数学问题，通过遗传算法对目标函数求解，得到全局最优值，最后得到诊断结果。文献[32]采用量子遗传算法，借鉴了文献[27]的陆上电网故障模型，提出一种合适船舶电力系统的故障诊断模型，将模型代入量子遗传算法求得故障模型的最优解，提高了故障诊断的速度

和精度。

改进的船舶电网故障诊断模型如下所示：

$$E(S) = \sum_{i=1}^n \left| C_i - C_i^*(S, R) \right| + \sum_{i=1}^n \left| R_{i,m} - R_{i,m}^*(S) \right| \left| 1 - R_{i,p} R_{i,p}^*(S) - R_{i,s} R_{i,s}^*(S) \right| + \sum_{i=1}^n \left| R_{i,p} - R_{i,p}^*(S) \right| \left| 1 - R_{i,s} R_{i,s}^*(S) \right| + \sum_{i=1}^n \left| R_{i,s} - R_{i,s}^*(S) \right| \quad (2.2)$$

式中： C_i 和 C_i^* 表示断路器实际状态和期望状态， $R_{i,m}$ 和 $R_{i,m}^*$ 分别表示第 i 个设备元件的主保护实际状态和期望状态， $R_{i,p}$ 和 $R_{i,p}^*$ 分别表示第 i 个设备元件的第一后备保护实际状态和期望状态， $R_{i,s}$ 和 $R_{i,s}^*$ 分别表示第 i 个设备元件的第二后备保护实际状态和期望状态。

与文献[27]的故障模型比较，式（2.2）由于船舶电力系统保护和开关设计的一体化，没有设计断路器失灵保护，而且船舶电网最底层元件直接与负载相连，故最底层元件都不设计第二后备保护。

2.4 船舶岸电故障诊断原理和编码设计

2.4.1 船舶岸电故障诊断原理和研究对象

船舶岸电故障诊断从字面上理解就是对整个岸电系统进行故障监测和诊断。本文中，对岸电系统的诊断主要集中在电缆管理系统和船舶受电系统，而岸上电源模块被简化为一个单独电源，其内部的研究和故障诊断会在今后的工作学习中继续研究。因此船舶岸电电力系统的研究对象与船舶电力系统极为相似，本文设计的船舶岸电系统的研究对象的电路拓扑图如图 2.3 所示

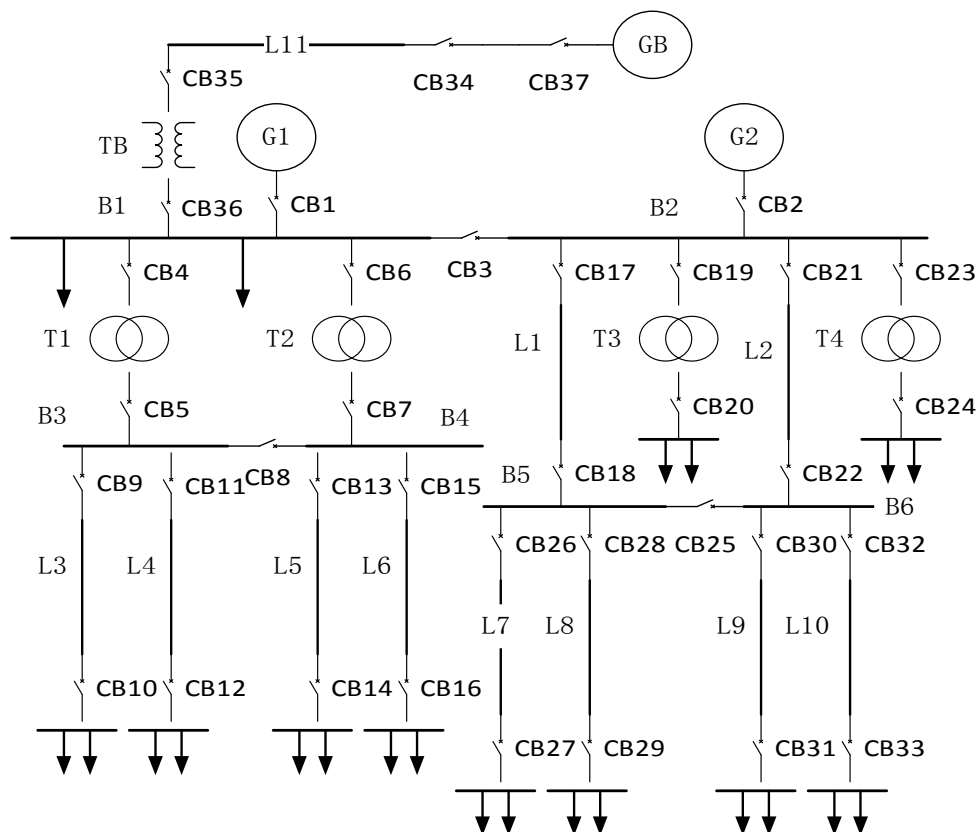


图 2.3 船舶岸电系统电路拓扑图
Fig.2.3 Circuit topology of ship shore power system

由上图可知，该电力系统将船舶电力系统、岸电电源和岸船连接部分整合在一起，其中船舶电力系统采用辐射式半环网兼并的方式，本文为了增加元件复杂度，没有将环网结构明显呈现出来，但这半环网结构和众多的局部配电板使电路结构更加复杂化。其中 G 表示发电机，GB 表示岸电电源，T 表示变压器，TB 表示船载变电站，L 表示母线，CB 表示开关（断路器）。整个系统包括 G1、G2 两台主发电机，一个岸电电源 GB，T1、T2、T3、T4、TB 五个变压器，CB1、CB2、CB37 三个主开关，B1、B2 两个主配电板，B3、B4、B5、B6 四个区域配电板，10 条线路 L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7、L8、L9、L10 和一个输电线路 L11，34 个保护断路器 CB3、CB4、CB5、CB6、CB7、CB8、CB9、CB10、CB11、CB12、CB14、CB14、CB15、CB16、CB17、CB18、CB19、CB20、CB21、CB22、CB23、CB24、CB25、CB26、CB27、CB28、CB29、CB30、CB31、CB32、CB33、CB34、CB35、CB36。船舶电力系统中包含了三种继电保护机制（瞬时继电保护机制（m）、短延时继电保护机制（p）、长延时继电保护机制（s））。

当然所有设备元件并不会都在网运行，不同配电网的不同时段都可能有着不同通路存在，在故障诊断运算过程中，通常只考虑参与电网运行的在网设备元件，排除掉暂时不在电网运行的设备，这样会大大降低故障诊断空间复杂度。但是，通常故障发生都会造成一定失电区域，这样就需要先判断出故障区域和非故障区域，造成重复运

算。现如今确定失电区域方法通常是对故障发生前后各个元件通断状态做对比，如果元件状态前后不一致，元件所处区域为故障区域，对比的数学实现是通过故障发生前后两种状态相互之间做逻辑减法并对结果求绝对值，当值等于 1 就说明元件在故障区域，等于 0 就代表元件无故障。

为了便于和陆上电网比较，本文将这三种保护机制统一用主保护、第一后备保护和第二后备保护来表示，对于发电机来说，应该还配有包含特殊的发电机保护机制(a)。船舶岸电电力系统与陆上电网的差异主要分为以下四点：

(1) 船体空间有限，线路和设备布局紧密，线路短，与陆上电网的线路保护分为输入端保护和输出端保护不同，船舶电网上的线路保护具有单一性。也就是说当发生线路故障时，线路的保护动作同时控制线路两端的断路器跳闸。例如：当 L3 故障时，主保护 L3_m 成功动作后，会同时将线路 L3 上下的 CB9 和 CB10 断开。

(2) 船舶电力系统的开关断路器和继电保护装置设计一体化，所以不会单独给断路器设置失灵保护。而在陆上电网中，每个断路器都有自己的断路器失灵保护。

(3) 前文提到船舶电网的设计是以主配电板为中心，依据各个主配电板可以划分出相对独立的单侧电源辐射区域，当元件产生故障时，通过主保护和第一后备保护动作来隔离故障，若上述保护未能成功隔离故障元件，其上级关联元件的保护将作为第二后备保护动作，使相关断路器断开；而陆上电网则是将所有关联元件作为第二后备保护，这样会将所有关联元件对应的断路器跳开。例如：当图 4.3 中 L1 出现故障时，正常情况主保护或第一后备保护动作将 CB17 和 CB18 断开，一旦主保护和第一后备保护未成功断开断路器（断路器拒动），配电板（母线）B2 的第二后备保护动作切断其相关断路器 CB2、CB3、CB17、CB19、C21 和 CB23；而如果是在陆上电网中，B2 和 B5 都将作为第二后备保护动作，同时切断 CB2、CB3、CB17、CB19、CB21、CB23、CB25、CB26、CB28、CB30 和 CB32。

(4) 船舶岸电电网最底层元件就是船舶电力系统最底层元件，因为直接与负载相连的特性，所以都不设计第二后备保护，一旦负载产生故障由负载自身所带的保护将其与主线路断开。例如：线路 L3、L4、L5、L6、L7、L8、L9 和 L10 都只设有主保护和第一后备保护，并不设有第二后备保护。

2.4.2 船舶岸电电力系统编码设计

在对船舶岸电电力系统建立故障诊断模型之前，要先确定元件、断路器和保护装置的编码形式，这样才能将系统的实际状态转化为可以进行数学运算的形式。

根据上文的船舶岸电电力系统研究对象可知，在编码设计的过程中需要考虑发电机、岸电电源、配电板（母排）、负载、变压器、线路、断路器和继电保护装置的通断状态。电源和发电机的状态分为：正常运行和非正常运行，分别用 0、1 表示；配电板

分为正常和短路两种状态，用 0,1 表示；负载分为正常和故障两种状态，用 0、1 表示；线路分为正常和短路两种状态，用 0,1 表示；断路器分为闭合和断开两种状态，用 0、1 表示；继电保护装置分为动作和未动作两种状态，用 0,1 表示；船舶电力系统的所有元件、断路器和继电保护装置的编码方式如表 2.1 和表 2.2 所示。

表 2.1 船舶岸电电力系统元件与断路器编码表

Table 2.1 Codes for marine power system components and circuit breakers of ships

名称	编码	名称	编码	名称	编码
G1	[0,1]	L8	[0,1]	CB18	[0,1]
G2	[0,1]	L9	[0,1]	CB19	[0,1]
GB	[0,1]	L10	[0,1]	CB20	[0,1]
B1	[0,1]	L11	[0,1]	CB21	[0,1]
B2	[0,1]	CB1	[0,1]	CB22	[0,1]
B3	[0,1]	CB2	[0,1]	CB23	[0,1]
B4	[0,1]	CB3	[0,1]	CB24	[0,1]
B5	[0,1]	CB4	[0,1]	CB25	[0,1]
B6	[0,1]	CB5	[0,1]	CB26	[0,1]
T1	[0,1]	CB6	[0,1]	CB27	[0,1]
T2	[0,1]	CB7	[0,1]	CB28	[0,1]
T3	[0,1]	CB8	[0,1]	CB29	[0,1]
T4	[0,1]	CB9	[0,1]	CB30	[0,1]
TB	[0,1]	CB10	[0,1]	CB31	[0,1]
L1	[0,1]	CB11	[0,1]	CB32	[0,1]
L2	[0,1]	CB12	[0,1]	CB33	[0,1]
L3	[0,1]	CB13	[0,1]	CB34	[0,1]
L4	[0,1]	CB14	[0,1]	CB35	[0,1]
L5	[0,1]	CB15	[0,1]	CB36	[0,1]
L6	[0,1]	CB16	[0,1]	CB37	[0,1]
L7	[0,1]	CB17	[0,1]		

表 2.2 船舶岸电电力系统元件保护名称与编码表
Table 2.2 Names and codes for protection of components of ships' coast power systems

保护名称	编码	保护名称	编码	保护名称	编码
G1 _m	[0,1]	B5 _m	[0,1]	L1 _s	[0,1]
G1 _p	[0,1]	B5 _p	[0,1]	L2 _m	[0,1]
G1 _s	[0,1]	B5 _s	[0,1]	L2 _p	[0,1]
G1 _a	[0,1]	B6 _m	[0,1]	L2 _s	[0,1]
G2 _m	[0,1]	B6 _p	[0,1]	L3 _m	[0,1]
G2 _p	[0,1]	B6 _s	[0,1]	L3 _p	[0,1]
G2 _s	[0,1]	T1 _m	[0,1]	L4 _p	[0,1]
G2 _a	[0,1]	T1 _p	[0,1]	L5 _m	[0,1]
GB _m	[0,1]	T1 _s	[0,1]	L5 _p	[0,1]
GB _p	[0,1]	T2 _m	[0,1]	L6 _m	[0,1]
GB _s	[0,1]	T2 _p	[0,1]	L6 _p	[0,1]
B1 _m	[0,1]	T2 _s	[0,1]	L7 _m	[0,1]
B1 _p	[0,1]	T3 _m	[0,1]	L7 _p	[0,1]
B1 _s	[0,1]	T3 _p	[0,1]	L8 _m	[0,1]
B2 _m	[0,1]	T3 _s	[0,1]	L8 _p	[0,1]
B2 _p	[0,1]	T4 _m	[0,1]	L9 _m	[0,1]
B2 _s	[0,1]	T4 _p	[0,1]	L9 _p	[0,1]
B3 _m	[0,1]	T4 _s	[0,1]	L10 _m	[0,1]
B3 _p	[0,1]	TB _m	[0,1]	L10 _p	[0,1]
B3 _s	[0,1]	TB _p	[0,1]	L11 _m	[0,1]
B4 _m	[0,1]	TB _s	[0,1]	L11 _p	[0,1]
B4 _p	[0,1]	L1 _m	[0,1]	L11 _s	[0,1]
B4 _s	[0,1]	L1 _p	[0,1]		

表格中元器件: B1, B2, ..., B6; T1, T2, ..., TB; L1, L2, ..., L11; G1, G2, GB 的实际状态值可表示为 S₁~S₂₄。断路器: CB1, CB2, ..., CB37 实际状态值简化表为 C₁~C₃₇。保护装置: B1_m, B2_m, ..., B6_m; T1_m, T2_m, ..., T5_m; L1_m, L2_m, ..., L11_m; B1_p, B2_p, ..., B6_p; T1_p, T2_p, ..., T5_p; L1_p, L2_p, ..., L11_p; B1_s, B2_s, ..., B6_s; T1_s, T2_s, ..., T5_s; L1_s, L2_s, L11_s; G1_m, G2_m, GB_m, G1_p, G2_p, GB_p, G1_s, G2_s, GB_s, G1_a, G2_a 实际状态值简化表示为 R₁~R₆₈。各个断路器和保护对应的期望状态值表示为: C₁^{*}~C₃₇^{*}和 R₁^{*}~R₆₈^{*}。

2.5 本章小结

本章研究当前陆上电网和船舶电网故障诊断原理, 确定以解析模型和风驱动算法分别作为船舶岸电电力系统故障诊断方法和迭代运算的智能优化算法。设计船舶岸电研究的物理对象并画出电路拓扑图, 最后对研究对象的电路结构进行分类和数学编码设计。

第 3 章 面向船舶岸电模型的风驱动优化算法研究

3.1 风驱动算法原理

Zikri Bayraktar 博士等人在研究遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等自然启发式算法时,根据大气中风的运动规律并结合物理学知识,于 2010 年提出了一种基于种群多维迭代的自然启发式全局优化算法,该算法被命名为风驱动优化算法^[33]。其核心是一个无限小的空气(质点)群体分布在整个 N 维空间中的问题。

3.1.1 速度和位置更新方程

风驱动优化算法是根据非惯性坐标系中牛顿第二运动定律并结合理想气体状态方程推导出来的,在建立大气运动模型的过程中忽略一些影响特别小的作用力,算法中主要考虑 4 个力的作用:由高压指向低压的气压梯度力 F_{pg} 、与气压梯度力反作用的摩擦力 F_f 、指向地心的重力 F_g 和地球旋转引起的科氏力 F_c ^[34]。同时,假定气体满足理想气体状态方程且质点是一种流体静力的平衡态,在现实中大气运动主要受水平方向运动影响,故算法忽略了风的垂直运动。

简化的牛顿第二运动定律和理想气体状态方程公式分别如下:

$$\rho\alpha = \sum_i F_i \quad (3.1)$$

$$P = \rho RT \quad (3.2)$$

上式中 α 是指空气质点加速度,且 $\alpha = \frac{\Delta u}{\Delta t}$, ρ 为质点的密度, F_i 是多种力在空气质点上的合力, i 是力的数量, P 为空气压强, R 为理想气体常量, T 代表温度。

根据大气力学的知识,上文中运动模型所受的四个力的具体理想方程:

$$F_{pg} = -\nabla P \delta V \quad (3.3)$$

$$F_f = -\rho\alpha u \quad (3.4)$$

$$F_g = \rho\delta V g \quad (3.5)$$

$$F_c = -2\Omega * u \quad (3.6)$$

上式中: $-\nabla P$ 代表气压梯度值,负号是指力的方向与梯度方向相反, δV 为空气质点的理想体积,用 1 来表示; α 为空气摩擦系数, u 是风的速度矢量,负号说明摩擦力与速度方向相反; g 为重力加速度矢量; Ω 代表地球旋转角速度矢量。

将式 (3.3) (3.4) (3.5) (3.6) 代入式 (3.1) 可得:

$$\rho \frac{\Delta u}{\Delta t} = -\nabla P \delta V + \rho \delta V g + (-\rho \alpha u) + (-2\Omega * u) \quad (3.7)$$

将式 (3.2) 代入上式中, $\delta V=1$, 并假设 $\Delta t=1$:

$$\frac{P_c}{RT} \Delta u = -\nabla P + \frac{P_c}{RT} g + (-\frac{P_c}{RT} \alpha u_c) + (-2\Omega * u) \quad (3.8)$$

其中 P_c 表示当前空气质点的压力值, 将上式两边除以 $\frac{P_c}{RT}$, 得到:

$$\Delta u = -\nabla P \frac{RT}{P_c} + g + (-\alpha u_c) + (-2\Omega * u \frac{RT}{P_c}) \quad (3.9)$$

在该算法中, $\Delta u = u_n - u_c$ 表示一次迭代中速度的变化量, u_n 表示下一次迭代质点的速度值, u_c 代表现在质点的速度值。代入上式可得 u_n 的表达式:

$$u_n = -\nabla P \frac{RT}{P_c} + g + (1-\alpha)u_c + (-2\Omega * u \frac{RT}{P_c}) \quad (3.10)$$

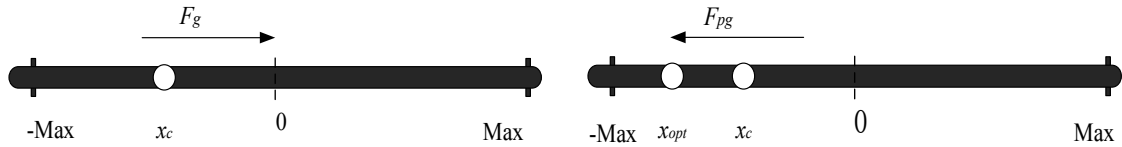


图 3.1 一维坐标内重力和气压梯度力示意图

Figure 3.1 Gravity and pressure gradient force in one-dimensional coordinates

假定在一维坐标系 $[-x, x]$ 内 (图 3.1), 质点所受的重力矢量 F_g , 其方向指向坐标中心, 那么我们推导其重力加速度 g 的表达式: $g=|g|(0-x_c)$ 。同理可知, 气压梯度力 F_{pg} 方向是由高压指向低压, 转到坐标系中就是从当前位置指向当前最优压力点, $-\nabla P$ 可以写成 $-\nabla P = |P_{opt} - P_c|(x_{opt} - x_c)$, P_{opt} 指当前最优压力值, P_c 代表当前压力值, x_{opt} 指当前最优压力值对应的位置 (最优位置), x_c 代表当前压力值对应的位置 (当前位置)。这样 g 和 $-\nabla P$ 都写成了标量和方向的乘积形式, 简化了方程。对于科氏力来讲, 它表示每次迭代中, 质点所在维度的速度受其他任意维度的影响, 可用 $u_c^{otherline}$ 表示。文献 [35] 为了简化方程, 将 $-2|\Omega|RT$ 设置为一个常数, 用 c 来表示。故 u_n 可以表示为:

$$u_n = \frac{RT}{P_c} |P_{opt} - P_c|(x_{opt} - x_c) - gx_c + (1-\alpha)u_c + (\frac{cu_c^{otherline}}{i}) \quad (3.11)$$

但由于引入了实际压力值使迭代后得到的速度变得特别大, 不利于算法的操作。可以利用质点的降序排列 j 来代替真实的压力值, 同时令最优压力值为 1, 代入式 (3.11) 可得:

$$u_n = RT \left| \frac{1}{j} - 1 \right| (x_{opt} - x_c) - gx_c + (1-\alpha)u_c + (\frac{cu_c^{otherline}}{j}) \quad (3.12)$$

故上式 (3.12) 为简化后质点的速度更新方程, 等号右边第一项模拟的气压梯度力使空气质点向全局最优压力点移动, 其常量系数 RT 的取值范围是 $[1.0, 2.0]$ 。等号右边第二项模拟了重力的存在, 使质点从当前位置向坐标中心移动, 有利于质点在搜索边界内运行, 常量系数 g 在 $[0.6, 0.7]$ 范围内。右边第三项模拟了摩擦力, a 代表了摩擦系数, 其取值范围在 $[0.7, 0.9]$ 之间。右边第四项表示其他任一维度的速度信息对当前维度内空气质点速度的影响, 提高了算法的稳定性, 其中系数 c 的取值范围在 0.05 到 3.6 之间。

在每一个维度内, 风驱动算法都给质点速度设置了边界条件, 当速度超出了边界值 u_{\max} , 算法就会认为质点将跳出搜索边界, 这时算法会强制给质点赋一个最大限定值, 这个值通常与边界值相等。其边界条件可做如下设置:

$$u_n = \begin{cases} u_{\max} & \text{if } u_n > u_{\max} \\ -u_{\max} & \text{if } u_n < -u_{\max} \end{cases} \quad (3.13)$$

风驱动算法每次迭代都将更新质点速度和位置信息, 由于式 (3.12) 已经得到了质点的速度方程, 根据速度与位置的关系, 我们可以得到位置关系方程:

$$x_n = x_c + u_n \Delta t \quad (3.14)$$

Δt 指时间间隔, 通常设为 1。空气质点的速度与位置更新方程整理如下:

设 M 个空气质点存在于 N 维中, 那么第 i 个空气质点的位置信息表达式为:

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^k, \dots, x_i^N); i = 1, 2, \dots, M \quad (3.15)$$

式中: x_i^k 代表空气质点 i 在第 k 维度上的位置信息。空气质点的位置更新表达式为:

$$x_i^{k(t+1)} = x_i^{kt} + (u_i^{k(t+1)} \Delta t) \quad (3.16)$$

其中, $x_i^{k(t+1)}$ 表示第 $t+1$ 次更新后的空气质点的位置, $u_i^{k(t+1)}$ 表示 $t+1$ 次更新后的空气质点的速度。在计算的过程中, 可以将时间间隔 (Δt) 取 1。 $u_i^{k(t+1)}$ 代表的速度更新方程表达式为:

$$u_i^{k(t+1)} = (1-a)u_i^{kt} + \left[RT \left| \frac{1}{j} - 1 \right| (x_{opt} - x_i^{kt}) \right] - g x_i^{kt} + \frac{c u_{i \text{ otherline}}^t}{j} \quad (3.17)$$

3.1.2 算法流程

风驱动算法的实现流程:

(1) 初始化空气质点的个数和维度, 定义最大迭代次数和相关的参数常量, 设置搜索边界 (位置和速度), 设置相应的测试函数。

(2) 随机初始化各个质点的初始信息 (位置和速度), 计算初始的压力值并根据压

力值的大小升序排列。

(3) 开始迭代。更新空气质点的速度和位置，代入目标函数计算质点压力值并以升序方式重新排列种群顺序。

(4) 迭代终止。判断是否满足终止条件，如果不满足就返回步骤 3)，否则就终止迭代，最后搜索到的最优位置就是最优解。

通常终止条件为最优压力值达到某个设定好的值或迭代到一定次数。图 3.2 为风驱动算法的流程示意图。

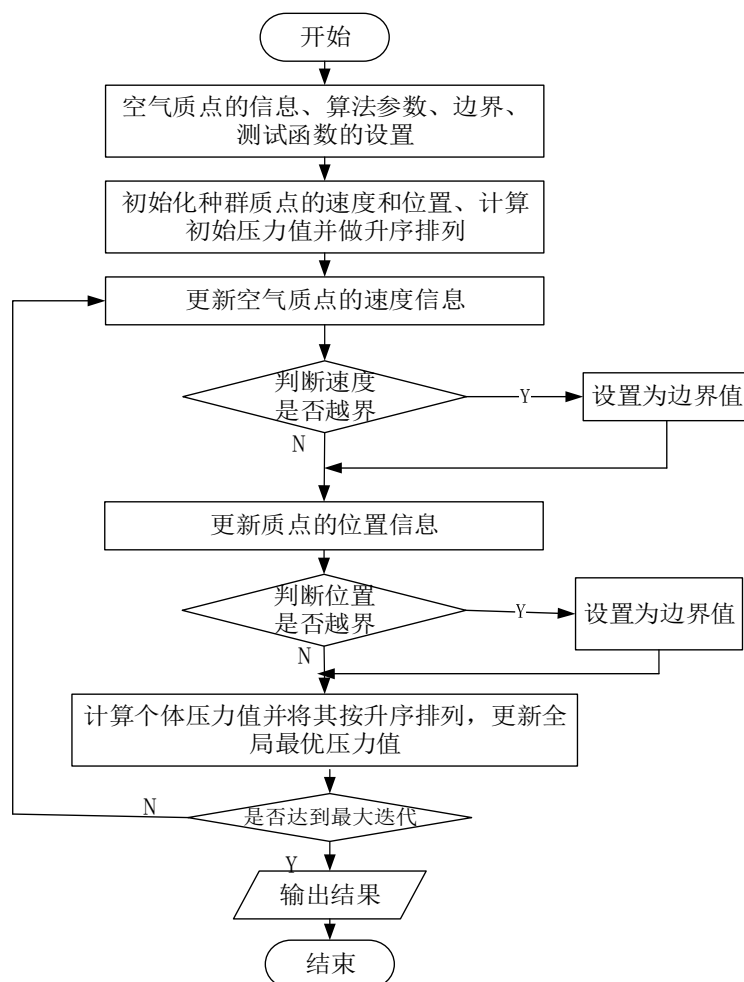


图 3.2 风驱动优化算法流程图

Fig.3.2 Wind Drive Optimization Algorithm Flow Chart

3.2 融合莱维飞行机制的改进风驱动算法

传统的风驱动算法跟其他智能优化算法一样，容易陷入局部最优极值，特别是在多峰函数优化时，无法从局部最优值中跳出，无法获得理想的全局最优效果。与其他智能算法类似，风驱动算法的改进策略集中在种群的多样性、变异性及寻优策略等方面。文献[34]提出了五种不同的变异机制(小波变异策略、混沌变异策略、非均匀变异

策略、高斯变异策略以及柯西变异策略)并与粒子群算法对比分析风驱动优化算法的优化能力,实验结果表明,小波变异风驱动优化(Wind Driven Optimization with Wavelet Mutation,WDOWM)算法具有较强的寻优能力,可有效跳出局部最优,其寻优速率、收敛精度及算法稳定性均优于粒子群算法、传统风驱动算法和其他改进算法,但其算法性能仍存在一定不足。

本文针对上述风驱动优化算法易陷入局部最优、早熟收敛的问题,在优化过程中有条件的引入 Levy 飞行机制^[36-37]更新质点位置,提高空气质点搜索范围和种群多样性,增强其跳出局部最优能力,从而实现算法的全局优化。该算法被称为莱维飞行风驱动算法(Wind Driven Optimization based on Levy flight, LWDO)。

3.2.1 莱维飞行策略

大自然中动物们想要在不确定的环境中觅食,最理想的方式就是采用“Levy 飞行”,在这种搜索模式下,短距离探索性蹦蹦跳跳与偶尔的较长距离行走相互结合^[36]。短距离的行走习惯可以确保动物对自身周边的环境探索的比较仔细,偶尔的长距离行走可以让动物进入其他环境进行探索,进入更广阔的环境范围。目前,Levy 飞行已经被运用于优化领域,比如布谷鸟算法中就用莱维飞行进行位置更新。而且,许多成熟的优化算法也借鉴了 Levy 飞行机制,改进算法的性能,取得了更好的效果。

Levy 飞行最初是在上世纪三十年代由莱维提出的,莱维觉得 Levy 分布是指跳跃路径信息与时间函数存在一定关系,文献[38]详细介绍了这一分布规律,将 Levy 函数推理变换得到其概率密度函数:

$$Levy \propto u^{-\beta} \quad 1 < \beta < 3 \quad (3.18)$$

其中 β 指幂次系数,式(3.18)是概率密度函数,该函数有重尾特征,可以描绘飞行动物的随机飞行路径,但是其编程实现非常复杂,难以实现。

Levy 飞行机制的位置更新方程为^[39]:

$$x_i^{k(t+1)} = x_i^{kt} + \vartheta \oplus Levy(\beta) \quad i=1,2,\dots,M \quad (3.19)$$

其中: ϑ 代表了步长控制量, ϑ_0 本文内取 0.01; \oplus 表示点对点乘法, $Levy(\beta)$ 代表莱维随机搜索路径,同时 ϑ 需要满足下列条件:

$$\vartheta = \vartheta_0 (x_i^{kt} - x_{gbest}) \quad (3.20)$$

上面提到 Levy 飞行的步长满足一个重尾的概率分布,但由于编码的复杂性难以完全实现。所以我们通过 Mantegna 提出的 Mantegna 算法来模拟出 Levy 飞行路径的步长计算公式^[40]:

$$s = \frac{\mu}{|v|^{1/\beta}} \quad (3.21)$$

式中: s 代表了 Levy 随机搜索路径 $Levy(\beta)$; β 的取值范围在 $[0,2]$, 通常取 1.5; μ 、 v 是服从式 (3.22) 的正态分布随机数:

$$\mu \sim N(0, \sigma_\mu^2); \quad v \sim N(0, \sigma_v^2) \quad (3.22)$$

其中, σ_μ , σ_v 代表了符合正态分布的标准差, 它们的取值满足式 (3.23):

$$\begin{cases} \sigma_\mu = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta)\sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2]2^{(\beta-1)/2}\beta} \right\}^{1/\beta} \\ \sigma_v = 1 \end{cases} \quad (3.23)$$

如此的话, 就可以模拟出 Levy 飞行的搜索路径。

3.2.2 算法思想和步骤

从 WDO 算法中, 第 t 次迭代所获得的较好的质点的位置信息可以表示为 x_i^{kt} ($i=1,2,\dots,M$), 而本文提出的算法是通过一个均匀随机数来判断 x_i^{kt} 是否需要 Levy 飞行优化其位置信息。

空气质点在迭代过程中, 其速度和位置信息初步更新完毕后, 通过随机生成的 $[0,1]$ 之间的均匀随机数 $rand$ 来与飞行概率控制变量 (Levy flight probability) $lp[0,1]$ 进行比较, 如果 $rand$ 小于 lp , 则刚刚更新的位置信息通过式以下飞行公式继续优化:

$$x_i^{kt'} = \begin{cases} x_i^{kt} + s * (x_{ibest}^t - x_i^{kt}) & s > 0 \\ x_i^{kt} + s * (x_i^{kt} - x_{ibest}^t) & s \leq 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

其中 $x_i^{kt'}$ 就是 $x_i^{k(t+1)}$, 表示第 t 次迭代后经过 Levy 飞行后的空气质点的位置信息; $x_i^{kt'}$ 表示第 t 次迭代未经过 Levy 飞行的空气质点的位置信息; s 的值参照公式 (3.21) 求得。 lp 的值通常经过实验对比分析得到, 实验发现当 $lp=0.2$ 时算法取得最好的效果。

在风驱动算法中加入 Levy 飞行策略的详细实现步骤为:

1) 初始化空气质点的个数和维度, 定义最大迭代次数和相关的参数常量, 设置搜索边界 (位置和速度), 设置相应的测试函数。

2) 随机初始化各个质点的初始信息 (位置和速度), 计算初始的压力值并根据压力值的大小升序排列。

3) 开始迭代, 更新空气质点的速度和位置信息, 判断速度和位置是否越界, 如越界做相应的修正。

4) 均匀随机数 $rand$ 与飞行概率比较 lp , 如果 $rand > lp$, 执行步骤 6), 否则执行 5)。

5) Levy 飞行。通过式 (3.19) 开始继续对位置信息进行优化, 判断位置是否越界, 如越界做相应的修正。计算质点的个体压力值并根据压力值的大小做升排列, 更新全

局最优值 `global_best`。

6) 迭代终止。判断是否满足终止条件, 如果不满足迭代终止。判断是否满足终止条件, 如果不满足就返回步骤 3), 否则就终止迭代, 最后搜索到的最优位置就是最优解。

LWDO 算法的流程图如图 3.3 所示。

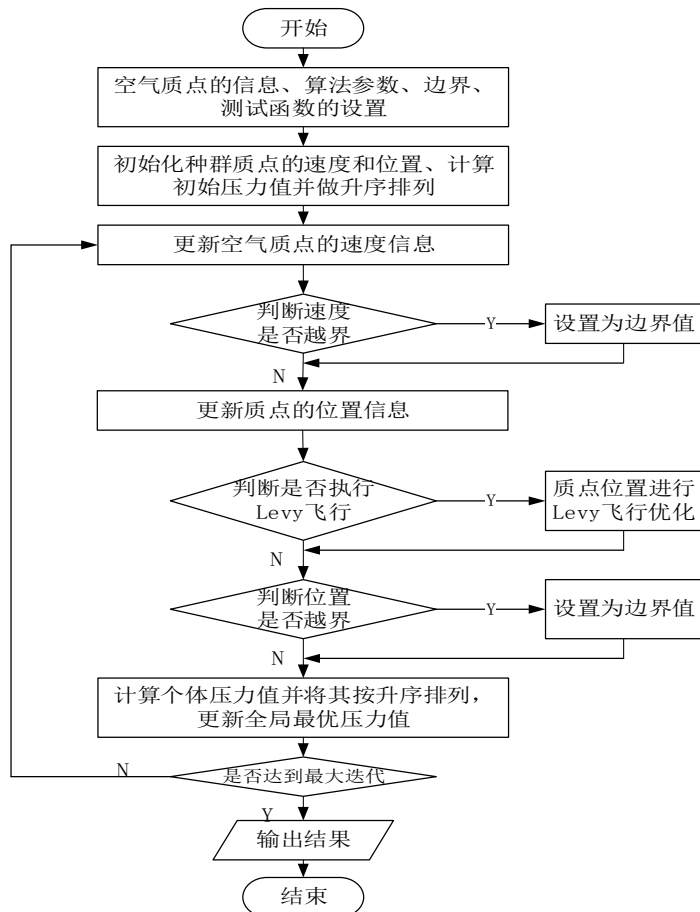


图 3.3 基于莱维飞行机制的风驱动优化算法流程图

Fig.3.3 Flow diagram of a wind-driven optimization algorithm based on Levy flight mechanism

3.2.3 算法仿真测试

为了测试基于莱维飞行风驱动优化算法 (LWDO) 的整体性能, 将通过 Matlab 对原始 WDO 算法、小波变异风驱动优化算法、本文改进算法进行对比分析, 从而验证算法的有效性。实验的测试环境建立在 Intel(R) Core(TM) i5-2450M CPU @ 2.50GHz、内存 4GB、Windows7 操作系统的计算机上, 其仿真测试软件为 Matlab 2010.b。

如表 3.1 所示, 本文采用 7 个比较经典的测试函数。这些测试函数中 f_1 - f_4 代表着单峰函数, 其中 Sphere 函数较为简单, 用来测试算法的寻优效果; Rosenbrock 函数是一个经典且复杂的优化测试函数, 其全局最优值位于一条连续的好似长且窄的抛物形态的山谷内, 正常较难以找到全局最优值, 常用它来测试算法的执行效率; Quadratic

和 Schwefel 函数常被用作检验算法的性能。 f_5 - f_7 代表着多峰函数，Rastrigin 函数与 Griewank 函数类似，都含有较多的极小值，常被用来测试算法的寻优效果；Ackley 函数提供了一个余弦函数来控制指数函数，局部最优值众多。

表 3.1 7 种标准测试函数
Table 3.1 7 Kinds of standard test functions

函数名	表达式	搜索范围	最优压力值
Sphere	$f_1(x) = \sum_{i=1}^N x_i^2$	[-100,100]	0
Rosenbrock	$f_2(x) = \sum_{i=1}^{N-1} \left[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2 \right]$	[-5,5]	0
Quadratic	$f_3(x) = \sum_{i=1}^N ix_i^4 + random[0,1)$	[-1.28,1.28]	0
Schwefel	$f_4(x) = \sum_{i=1}^N x_i + \prod_{i=1}^N x_i $	[-10,10]	0
Griewank	$f_5(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \prod_{i=1}^N \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	[-600,600]	0
Rastrigin	$f_6(x) = \sum_{i=1}^N (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)) + 10$	[-5.12,5.12]	0
Ackley	$f_7(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	[-32,32]	0

3.2.3.1 飞行概率 lp 设置和优化

一个好的算法中，每一个参数值都是通过无数次实验得到的，为了确定飞行概率 lp 参数的准确数值，使算法在收敛性和迭代速度上获得较好效果，本文将不同飞行概率值代入算法，求解其对应的压力值和迭代次数，比较分析得出合适的飞行概率值。

参数测试实验中，我们分别设定飞行概率为 0.1,0.2,0.3,0.4,0.5。以上表中 Schwefel 和 Rastrigin 标准测试函数为目标函数，这两个函数分别为单峰和多峰函数，具有一定的代表性。对 Schwefel 标准测试函数运算 5 次取平均值、最大值和最小值，其他参数保持不变，算法种群和质点维度设为 30 和 20。Schwefel 目标函数的测试结果如图 3.4 所示：

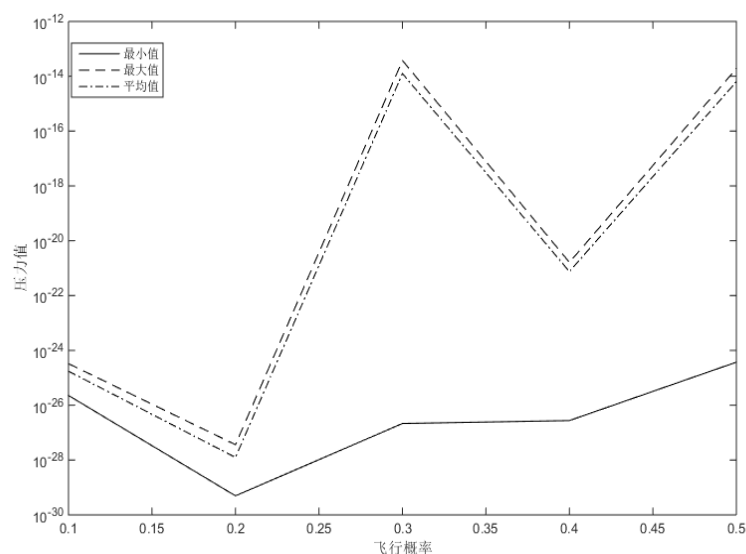


图 3.4 Schwefel 函数中不同飞行概率的压力值

Fig.3.4 Pressure values for different flight probabilities in the Schwefel function

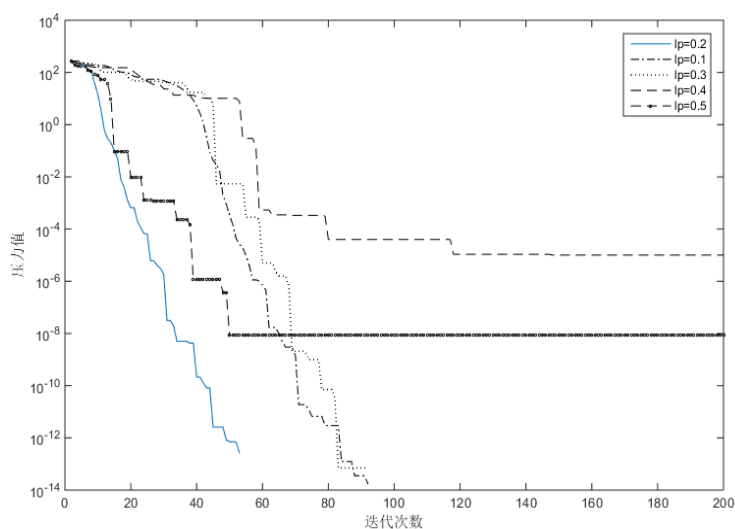


图 3.5 Rastrigrin 函数中不同飞行概率的压力值

Fig.3.5 Pressure values for different flight probabilities in the Rastrigrin function

对 Rastrigrin 标准测试函数运算 5 次，测试不同飞行概率下，函数求得最优解的迭代次数，其他参数保持不变，算法种群和质点维度设为 30 和 20。Rastrigrin 目标函数的测试结果如图 3.5 所示：

由图 3.4 可知，发现当飞行概率 $lp=0.2$ 时，Schwefel 测试函数对应的适应度压力值最低，当飞行概率设为 0.3、0.4 和 0.5 时，压力值的差值变大，由此可以判断当飞行概率为 0.3、0.4 和 0.5 算法出现了局部最优现象，这时候算法全局多样性较低，长时间被困在某一区间，无法及时跳出该范围。而飞行概率为 0.1 时，算法较为稳定，但寻优性能不佳，与飞行概率为 0.2 状态下相差 4.5 个数量级。综上所述，当飞行概率

为 0.2 时，单峰函数 Schwefel 可以获得较好的寻优性能和全局多样性。

由图 3.5 可知，当飞行概率为 0.2 时函数迭代次数最少且能获得最优解，这时候算法的寻优效率最高；而飞行概率为 0.1 和 0.3 时，算法的迭代次数较多，寻优效率较低，但也可以获得最优值 0；可是当飞行概率设为 0.4 和 0.5 时，算法出现了局部最优值，算法的全局多样性较低，无法寻找的全局最优值，算法寻优效果极差。综上所述，当飞行概率为 0.2 时，多峰函数 Rastrigrin 可以获得较好的寻优性能和全局多样性。

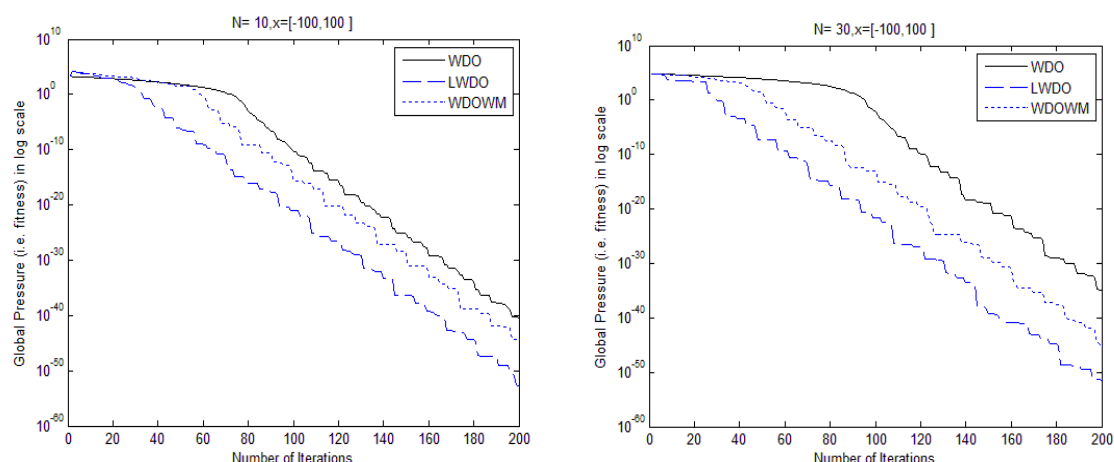
根据图 3.4 和图 3.5 得出的结论可知，当飞行概率为 0.2 时，无论是多峰函数还是单峰函数的可以获得较好的寻优效果。所以本文将后面飞行概率设为 0.2。

3.2.3.2 实验参数设置和仿真结果

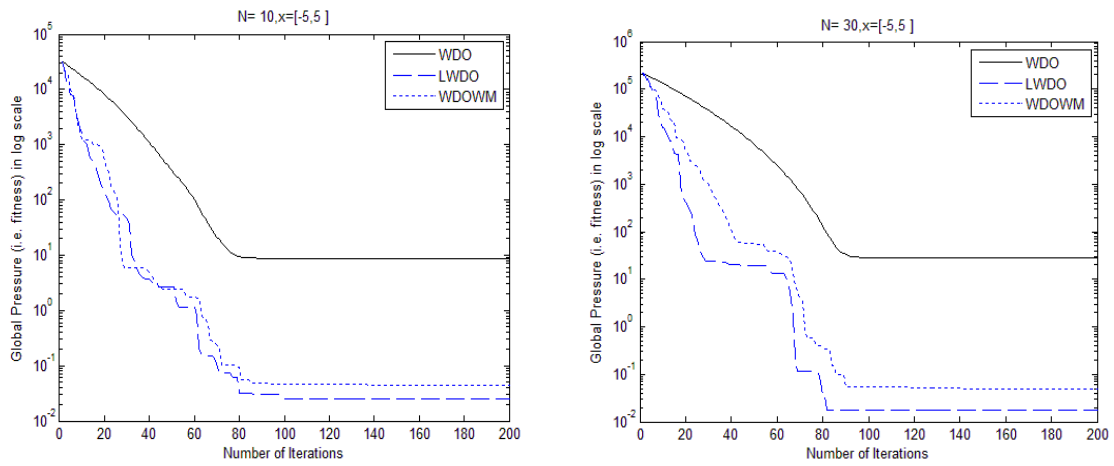
在实验过程中，各个算法的种群个数 M 设置为 30，空气质点的维度分别选取 10、30，最大的迭代次数设置为 200，测试函数的相应搜索范围如表 1 所示，搜索速度的范围对应于位置搜索范围的百分之一。在标准 WDO 算法中，常量参数 $a=0.7$ ， $g=0.4$ ， $RT=2$ ， $\theta=0.2$ ；LWDO 算法中飞行概率主要控制算法前 50 次迭代过程中寻优曲线的振荡程度，其数值越小，曲线越平稳，在这里取 $lp=0.2$ ， $\vartheta_0=1$ ， $\beta=1.5$ ；WDOWM 算法中，变异概率 pm 的值与飞行概率相同，取值为 0.2；其他参数如 $\xi_{wm}=0.5$ ， $g_{wm}=1000$ ^[34]。

实验中，3 种待测算法的初始化过程相同。采用上述 7 个标准函数分别对算法的性能进行测试，其独自运行次数为 30。最后采用最优压力值（Best Pressure, BP）、平均最优压力值（Mean Best Pressure, MBP）、标准差（Standard Deviation, SD）和平均迭代次数来评价算法的性能。其中 BP 和 MBP 体现了算法的寻优精度，SD 代表了算法的稳定性，平均迭代次数数表示算法的寻优效率。

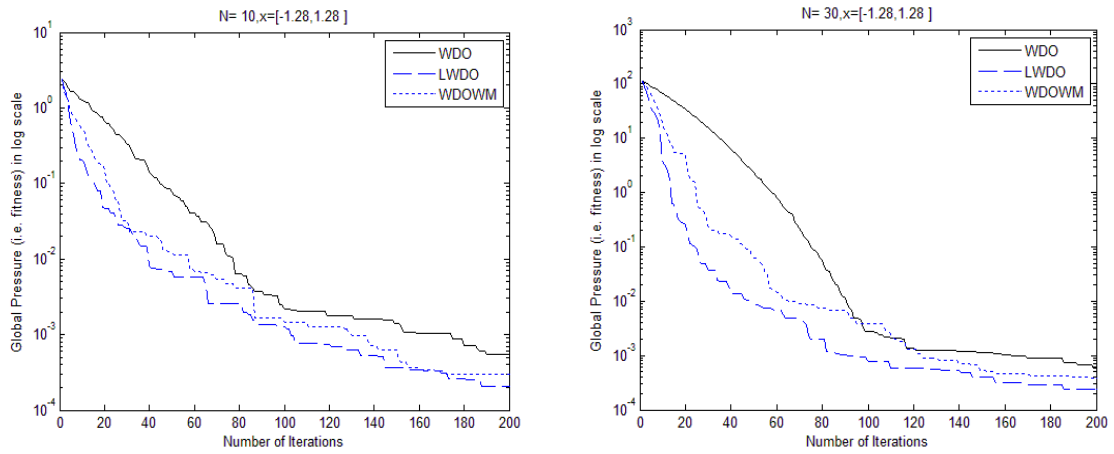
图 3.6 是 WDO、LWDO、WDOWM 对不同测试函数进行优化 30 次的平均最优压力值的曲线，空气质点的维度分别取 10 和 30。表 3.2 是对最优压力值、平均最优压力值、标准差的对比结果。表 3.3 是对各个算法的迭代次数的统计分析。



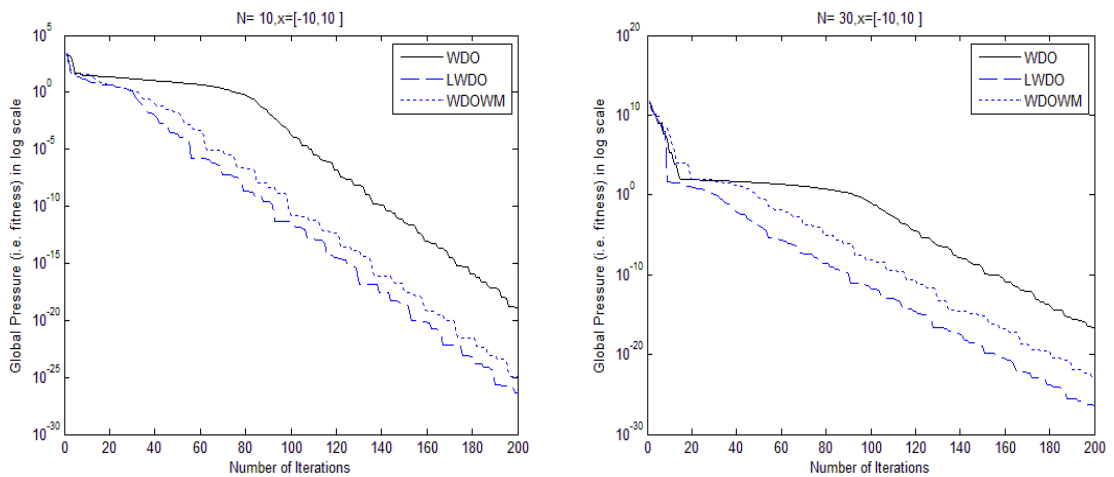
(a) Sphere 函数



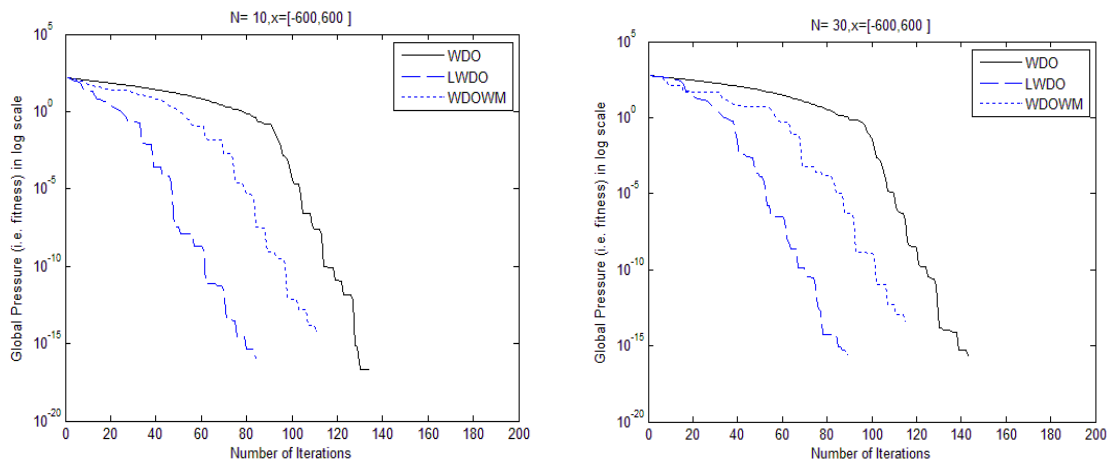
(b) Rosenbrock 函数



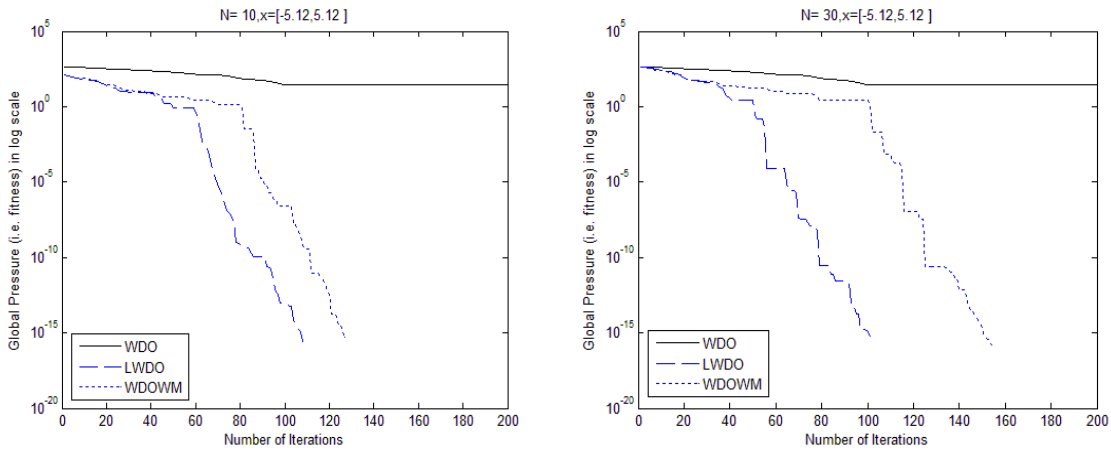
(c) Quadratic 函数



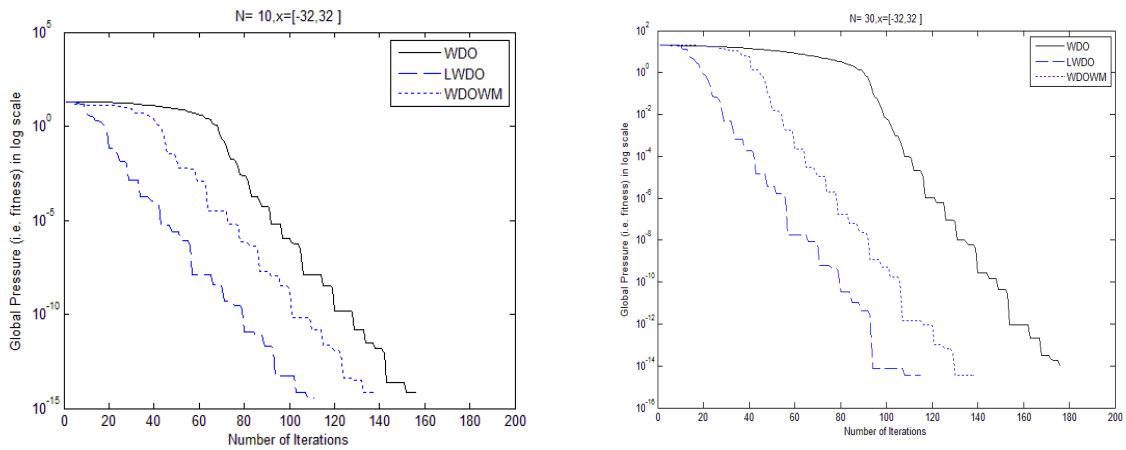
(d) Schwefel 函数



(e) Griewank 函数



(f) Rastrigrim 函数



(g) Ackley 函数

图 3.6 3 种不同 WDO 算法优化测试函数的平均最优压力值曲线

Fig.3.6 Curve of average optimal pressure value for three different WDO algorithm optimization test functions

表 3.2 仿真数据比较
Table 3.2 Comparison of Simulation Data

函数	维度	测试指标	WDO	LWDO	WDOWM
f_1	10	BP	2.440E-49	2.760E-60	7.856E-61
		MBP	3.756E-41	2.022E-53	3.065E-45
		SD	1.036E-40	1.898E-53	6.635E-45
	30	BP	6.458E-40	3.689E-64	4.598E-62
		MBP	1.325E-35	3.327E-52	6.529E-45
		SD	4.654E-36	3.873E-51	3.881E-45
f_2	10	BP	8.630	1.280E-04	4.910E-04
		MBP	8.725	2.521E-02	4.482E-02
		SD	7.978E-02	5.140E-02	1.012E-02
	30	BP	28.784	2.790E-03	5.19E-05
		MBP	28.866	1.772E-02	4.866E-02
		SD	3.957E-02	1.525E-02	7.978E-02
f_3	10	BP	1.000E-04	6.980E-05	4.75E-05
		MBP	5.410E-04	2.049E-04	2.960E-04
		SD	3.080E-04	8.911E-05	1.790E-04
	30	BP	9.030E-05	7.751E-06	2.240E-05
		MBP	5.410E-04	2.367E-04	3.860E-04
		SD	4.170E-04	1.732E-04	4.290E-04
f_4	10	BP	9.584E-26	3.287E-33	6.214E-30
		MBP	9.883E-20	4.583E-27	1.247E-25
		SD	2.586E-20	9.843E-28	1.536E-25
	30	BP	2.468E-20	6.547E-31	3.256E-30
		MBP	3.492E-18	2.254E-26	9.425E-22
		SD	4.578E-19	6.538E-27	2.547E-22
f_5	10	BP	0	0	0
		MBP	0	0	0
		SD	0	0	0
	30	BP	0	0	0
		MBP	0	0	0
		SD	0	0	0
f_6	10	BP	0	0	0
		MBP	3.160	0	0
		SD	8.324	0	0
	30	BP	0	0	0
		MBP	27.946	0	0
		SD	54.765	0	0
f_7	10	BP	0	0	0
		MBP	0	0	0
		SD	0	0	0
	30	BP	0	0	0
		MBP	0	0	0
		SD	0	0	0

表 3.3 迭代次数比较
Table 3.3 Comparison of iteration times

函数	算法	最大迭代	最小迭代	平均迭代
f_1	WDO	200	200	200
	LWDO	200	200	200
	WDOWM	200	200	200
f_2	WDO	200	200	200
	LWDO	200	200	200
	WDOWM	200	200	200
f_3	WDO	200	200	200
	LWDO	200	200	200
	WDOWM	200	200	200
f_4	WDO	200	200	200
	LWDO	200	200	200
	WDOWM	200	200	200
f_5	WDO	147	125	134
	LWDO	90	62	75
	WDOWM	119	69	94
f_6	WDO	200	120	146
	LWDO	108	58	80
	WDOWM	158	72	107
f_7	WDO	178	159	167
	LWDO	117	85	96
	WDOWM	140	96	114

根据上述的仿真结果图和表格数据可以总结出以下观点：

(1) 由表 3.2 的最优压力值和平均最优压力值和表 3.3 的迭代次数可以看出，对于单峰函数来说，LWDO 算法和 WDOWM 算法比较优秀，在寻优精度上领先 WDO 算法 5 个数据集，总的来说 LWDO 的寻优精度比 WDOWM 略好。但是在多峰函数上，LWDO 算法的寻优效率远远大于 WDOWM 和 WDO 算法，总是领先其他算法 20 次迭代以上。

(2) 根据表 3.2 中标准差数据可以判断出算法的稳定性能，标准差越小代表稳定性越高，根据表中粗体数据可知：LWDO 的算法稳定性最好，WDO 算法的稳定性最差。

(3) 图 3.6 中，LWDO 比其他 WDO 算法具有更加快速的寻优速率，得到较为满意的结果。在相同迭代次数情况下 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 、 f_6 、 f_7 不同维度的仿真结果中，实现 Levy 飞行机制的 LWDO 算法在任一迭代中都取得较好的结果。

(4) 由图 3.6 可知，在对 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 的计算中，LWDO 和 WDOWM 算法的运算量相近似，比 WDO 算法的运算量略大，但得到较大寻优精度的提升；而对 f_5 、 f_6 、 f_7 的优化过程中，LWDO 和 WDOWM 在运算前期比 WDO 的运算量略大，但其获得理论

最优解的速度远超 WDO，特别是 LWDO 只需要将近一半的迭代次数，大大提高了运算速度。

(5) 结合图 3.6、表 3.2 和表 3.3 的信息，可以对下面 3 中算法的寻优性能作出如下判断：LWDO>WDOWM>WDO，根据文献 [34] 得出的寻优性能关系：WDOWM>WDO>PSO。可以得知，无论是从算法的寻优精度、寻优效率和稳定性来看，LWDO 算法均有良好的表现，极具应用价值。

上述基于 Levy 飞行机制的风驱动优化算法 (LWDO) 在空气质点初步位置更新完成后通过飞行概率选择性的对质点进行 Levy 飞行，提高风驱动算法的种群多样性和全局搜索能力。从对标准测试函数的仿真实验可以看出，本文提出的 LWDO 算法有着较优的收敛精度和收敛速度，不仅提高了算法跳出局部最优的能力，还增强了算法的稳定性。

3.3 风驱动优化算法的二进制映射

上述改进风驱动算法适用于连续空间对象，而船舶岸电故障原理和电路模型编码主要是以更为方便的二进制为基础建立的，在离散空间中，空气质点的位置信息等价于可疑元件状态，质点维度就是元件数量，这样可以根据不同可疑元件的不同状态，定位到故障元件的位置。

3.3.1 传统映射公式

1、Kennedy 映射公式

Kennedy 博士等人在 1995 年提出了一种启发式的标准粒子群优化算法，该算法最初是为了解决连续空间优化问题^[41]。然而在实际过程中，许多问题在二进制条件下求解更加方便，比如在电网故障诊断、多维背包问题、信号波束形成等方面二进制运算有着不可替代的作用。所以，Kennedy 博士在标准粒子群算法的基础上提出了一适用于离散空间的二进制粒子群算法^[42]。以二进制的编码方式，将粒子的位置编码用 0 或 1 这两种形态表示，粒子的速度信息用位置的改变几率表示，速度信息由 $Sig()$ 方法映射在 $[0,1]$ 之间。

同理，我们也可以将其应用到风驱动优化算法中来，张贞凯^[43]将二进制风驱动优化算法应用在阵列波束形成技术，并取得较好成果。借鉴二进制粒子群优化算法的思想，将空气质点的位置信息的值通过对速度信息的映射进行归一化处理并与是随机变量 $rand \in [0,1]$ 比较，位置和速度的信息通过式 (3.25) 和 (3.26) 来更新。

$$x = \begin{cases} 0 & rand \geq sig(u) \\ 1 & rand < sig(u) \end{cases} \quad (3.25)$$

$$u_i^{k(t+1)} = (1-a)u_i^{kt} + \left[RT \left| \frac{1}{j} - 1 \right| (x_{gbest} - x_i^{kt}) \right] - gx_i^{kt} + \frac{cu_{iotherline}^t}{j} \quad (3.26)$$

其中 u_i^{kt} 代表了在第 t 次迭代中 k 维度上第 i 个空气质点的速度信息, g 是重力加速度的常量系数, a 指的是相对摩擦系数, x_{gbest} 表示整个种群 M 在目前迭代次数内搜索到的全局最优位置, RT 、 c 代表的是常量系数, $u_{iotherline}^t$ 为第 t 次迭代中去除了第 k 维度之后第 i 个质点另外 $N-1$ 维的速度信息, j 表示全部质点根据压力值大小的一个升序排列。Sig()函数的对应公式为:

$$sig(u_i^{k(t+1)}) = 1 / (1 + \exp(-u_i^{k(t+1)})) \quad (3.27)$$

Kennedy 公式的 Sig()函数图像如图 3.7 所示:

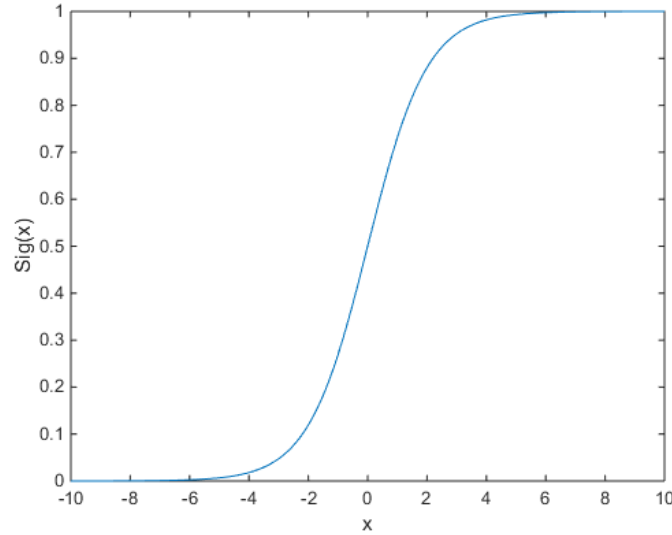


图 3.7 Kennedy 公式的 Sig()函数曲线

Fig.3.7 Sig() Function curve of kennedy formula

由上图可知, Sig()函数是将函数的速度信息映射到 0 和 1 之间, 这个映射的值将代表位置取 0 还是 1 的概率。

2、刘建华映射公式

2009 年, 刘建华在他的毕业论文中提出一种新的函数映射公式^[44]。Kennedy 映射公式是在牺牲了函数收敛性而获得的全局多样性, 为了提高函数的收敛效果, 他改进了 Kennedy 公式, 新的映射公式思想为: 当速度信息的绝对值趋向于无穷大时, 映射到的概率值无限接近于 1, 速度信息靠近 0 时, 映射的概率值接近 0; 映射函数关于 $x=0$ 对称。同样可以将新的映射公式运用到风驱动算法中来, 引入到算法中后, 映射函数表示为:

$$Sig(u_i^{k(t+1)}) = \begin{cases} 1 - 2 / (1 + \exp(-u_i^{k(t+1)})) & u_i^{k(t+1)} \leq 0 \\ 2 / (1 + \exp(-u_i^{k(t+1)})) - 1 & u_i^{k(t+1)} > 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

其函数图像如图 3.8 所示

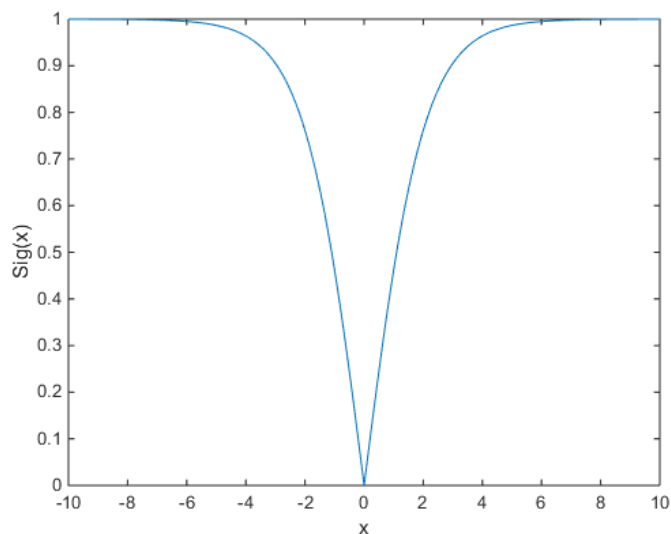


图 3.8 刘建华公式的 $Sig()$ 函数曲线

Fig.3.8 $Sig()$ function curve of Liu Jianhua's formula

当 $u_i^{k(t+1)} > 0$ 时:

$$x_i^{k(t+1)} = \begin{cases} 1 & rand \leq sig(u_i^{k(t+1)}) \\ x_i^{kt} & otherwise \end{cases} \quad (3.29)$$

当 $u_i^{k(t+1)} \leq 0$ 时:

$$x_i^{k(t+1)} = \begin{cases} 0 & rand \leq sig(u_i^{k(t+1)}) \\ x_i^{kt} & otherwise \end{cases} \quad (3.30)$$

3.3.2 改进的混合映射公式

然而刘建华映射公式虽然解决了算法收敛性差的问题,但也带来了全局搜索能力的减弱,容易产生局部最优值。为了将两者兼而得之,本文将这两者映射方法结合在一起同时使用,并比较这两种方法在算法中每一次迭代的效果,取效果好的一方进行下一次迭代,产生一种新的位置更新公式。位置更新公式的伪代码如表 3.4 所示:

表 3.4 位置更新方程的二进制修正伪代码
Table 3.4 Binary modified pseudocode for position update equation

for iterNum=1:MaxIter
更新空气质点的速度信息，并通过式 (3.25)、(3.29)、(3.30) 分别计算位置信息， x_{ken} 和 x_{liu} ；
代入标准测试函数得到对应的压力值： P_{ken} 和 P_{liu}
if $P_{ken} < P_{liu}$
$x_{new} = x_{ken}$
else
$x_{new} = x_{liu}$
end
end

其中 iterNum 为当前迭代次数，MaxIter 代表设置的最大迭代数， x_{ken} 和 x_{liu} 分别表示 Kennedy 映射公式和刘建华公式求得的位置信息， P_{ken} 和 P_{liu} 分别表示通过 x_{ken} 和 x_{liu} 求得标准测试函数的压力值。

这种混合映射方法可以确保二进制算法的全局搜索能力，提高算法收敛性和寻优性能，但是由于在运算的过程中进行了两次运算并做比较取值操作，浪费了一些资源，算法的运算效率会略有降低，在硬件资源紧张的操作环境下需要谨慎使用。

3.3.3 二进制 Levy 飞行风驱动算法

上文的混合映射方法，将连续空间上的风驱动优化算法映射到离散空间上并做归一化处理，改进了原始的二进制风驱动算法。改进后的算法在收敛性和全局多样性方面都有着较好的表现。因此本文将这种混合映射方法借鉴到 LWDO 算法中来。

算法思想是对二进制风驱动算法选择性的加入 Levy 飞行策略，进行混合迭代得到二进制 Levy 飞行风驱动优化算法。首先对算法进行初始化，根据式 (3.25)、(3.29) 和 (3.30) 计算并比较，得到较好的位置信息；通过飞行概率判定，选择性的使用莱维飞行策略式 (3.21)；如果进行莱维飞行后，还需继续将飞行路径 s 代入式 (3.25)、(3.29) 和 (3.30) 中，继续与同代未飞行质点比较，选择适应度压力值较小的位置信息作为质点新的位置信息。

根据前文说描述的方法，二进制 Levy 飞行风驱动算法的实现步骤如下所示：

步骤 1：给定设置好的各函数参数，设定好参与运算的质点种群数 m 和每个质点的维度 n ，选择将要进行运算的目标测试函数。

步骤 2：初始化各个质点的初始位置信息和速度信息，计算初始的测试函数的压力值并根据压力值的大小进行升序排列。

步骤 3: 开始迭代, 符合条件 $t < \text{Max}t$ (最大迭代次数) 时, 由式 (3.17) 计算更新空气质点的速度信息, 并通过式 (3.25)、(3.29) 和 (3.30) 分别计算不同映射公式下位置信息, 然后代入目标测试函数得到各适应度压力值, 比较压力值大小, 取较小值为全局最优值 (global_best), 全局最优值对应的位置信息作为质点新的位置信息。

步骤 4: 均匀伪随机数 rand 与飞行概率 lp 比较, 如果 $\text{rand} > \text{lp}$, 需要执行莱维飞行策略, 执行步骤 5, 否则执行步骤 6。

步骤 5: Levy 飞行。通过式 (3.21) 计算出飞行路径的步长信息 s , 将 s 分别带入式 (3.25)、(3.29) 和 (3.30) 中计算质点位置信息, 然后代入目标测试函数得到各自适应度压力值, 比较压力值大小, 取较小值为全局最优值 (global_best), 全局最优值对应的位置信息作为质点新的位置信息。

步骤 6: 迭代终止。判断是否满足终止条件, 如果不满足就返回步骤 3), 否则就终止迭代。输出全局最优值和对应的质点信息。

3.4 本章小结

本章首先阐述风驱动算法的数学原理和物理模型, 介绍并重写了风驱动算法的公式推导步骤, 明确算法位置更新方程和速度更新方程的意义, 画出原始的风驱动算法的流程图。针对传统风驱动优化算法易陷入局部最优、早熟收敛的问题, 在优化过程中有条件的引入 Levy 飞行机制更新质点位置, 提高空气质点的搜索范围和种群多样性, 增强其跳出局部最优的能力。通过仿真实验结果验证了改进策略的正确性, 有效的提高算法的收敛精度、速度和全局搜索能力。最后对两种不同的二进制映射公式进行特殊机制混合得到新的混合映射公式, 将解决连续空间问题的风驱动算法改进成解决离散空间问题的二进制风驱动算法。

第4章 基于改进风驱动算法的船舶岸电故障诊断方法研究

4.1 船舶岸电系统故障诊断解析模型

当代船舶电气电网结构日趋复杂多样，其规模和互联性都有了极大提高，同时也增加了船舶电力系统故障及时诊断的难度。故障解析模型的定义是当电力系统故障产生时，根据保护原理和保护配置规则，继电保护装置检测到故障信息动作，控制断路器跳闸。过程中如果主保护拒动，则由第一后备保护动作；一旦断路器拒动，该元件的上级关联元件保护作为第二后备保护动作并控制其他相关断路器动作，直到将故障元件隔离出电力系统，同时上报保护动作和断路器动作的告警信息。简单来说就是通过逻辑运算方程组将上述动作原理表示出来，为后面的优化运算做准备，可抽象表示为^[45]：

$$\begin{cases} R = P(S, R, C, M, D) \\ C = Q(S, R, C, M, D) \\ H(S, R, C, M, D) = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

式中： S 是待定故障元件集，可表示为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, $S_i = 0$ 或 1 代表元件集 S 中第 i 个元件是正常或故障状态， N 是待可疑故障元件集中元件数量； R 是跟集合 S 相关联的所有保护集合，可表示为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_Z\}$, $R_i = 0$ 或 1 代表保护 R 中第 i 个保护未动作或动作， Z 是 R 中保护的个数； C 是与集合 S 相关联的所有断路器集合，可表示为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$, $C_i = 0$ 或 1 代表断路器 C 中第 i 个断路器未动作或动作， K 是 C 中断路器个数； M 是所有保护和断路器误动集合，可表示为 $M = \{M_{R1}, \dots, M_{RZ}, M_{C1}, \dots, M_{CK}\}$, $M_{Ri} = 0$ 或 1 ($M_{Ci} = 0$ 或 1) 代表保护 R_i (断路器 C_i) 正常动作或误动； D 是所有保护和断路器拒动集合，可表示为 $D = \{D_{R1}, \dots, D_{RZ}, D_{C1}, \dots, D_{CK}\}$, $D_{Ri} = 0$ 或 1 ($D_{Ci} = 0$ 或 1) 代表保护 R_i (断路器 C_i) 正常动作或拒动。 P 方程组是保护动作解析， Q 方程组是断路器动作解析， H 方程组是矛盾逻辑约束情况，方程组的解与故障情况一一对应。

4.1.1 保护继电器和断路器动作期望解析

通过解析模型和智能优化技术进行电力系统故障诊断都需要计算保护、断路器动作的期望状态值，该期望值是将保护和断路器动作进行规则解析，最终转化为逻辑表达式（通常包括与运算、或运算和非运算）求得。

(1) 保护动作解析规则

1) 主保护规则

设 R_i 是元件 S_n 的主保护，当元件 S_n 发生故障 ($S_n=1$)，其对应的主保护 R_i 理应动作，该主保护的期望动作实际期望 R_i^* 逻辑表达式为：

$$R_i^* = S_n \quad (4.2)$$

2) 第一后备保护规则

设 R_i 是元件 S_n 的主保护， R_j 是元件 S_n 的第一后备保护，当元件 S_n 发生故障 ($S_n=1$) 且主保护 R_i 并未产生动作，则第一后备保护 R_j 应动作隔离元件 S_n 。该第一后备保护的期望动作实际期望 R_j^* 逻辑表达式为：

$$R_j^* = S_n \overline{R_i} \quad (4.3)$$

3) 第二后备保护规则

设 R_i 是元件 $S_n \in Z(R_k, S_n)$ 的主保护， R_j 是元件 S_n 的第一后备保护，设 R_k 是元件 S_n 的第二后备保护，该保护为 S_n 的邻近元件 S_x 提供远后备保护，陆上电网有两种情况会导致 R_k 动作：第一种，元件 S_n 发生故障 ($S_n=1$) 且主保护 R_i 和第一后备保护 R_j 都未产生动作；邻近元件 $S_x \in Z(R_k, S_n)$ 发生故障，且 R_k 到 S_n 的关联路径上的所有断路器都是闭合状态。第二后备保护的期望动作实际期望 R_k^* 逻辑表达式为：

$$R_k^* = S_n \overline{R_i} \overline{R_j} \oplus \sum_{S_x \in Z(R_k, S_n)} (S_x \prod_{C_l \in P(R_k, S_x)} \overline{C_l}) \quad (4.4)$$

由于上文提到船舶对象的特殊性，第二后备保护动作只存在第二种情况。

$$R_k^* = \sum_{S_x \in Z(R_k, S_n)} (S_x \prod_{C_l \in P(R_k, S_x)} \overline{C_l}) \quad (4.5)$$

式中 $Z(R_k, S_n)$ 表示 R_k 保护区域内 S_n 所有邻近关联设备集， $P(R_k, S_n)$ 指代以保护 R_k 为起点到 S_x 路径上的所有断路器开关集合。

(2) 断路器动作解析规则

任意保护 R (C_k) 动作可以驱动断路器开关 C_k 跳闸，该断路器动作期望值 C_k^* 的逻辑表达式为：

$$C_k^* = \sum_{R_x \in R(C_k)} R_x R_x^* \quad (4.6)$$

其中 $R(C_k)$ 指代为能让断路器开关 C_k 跳闸的所以保护集合。 \sum 表示逻辑连或运算。

根据上文对各个保护、断路器期望值的规则解析，同时考虑误动和拒动因素的影响，文献[45]总结得出矛盾逻辑约束情况：1、有拒动又误动；2、未动又误动；3、动作又拒动、未动又误动；4、有动作期望激励又误动；5、无动作期望激励又拒动。同时给出了任意保护 R 和断路器 C 的跳闸状态解析：

$$\begin{cases} R = R^*(1-d_r) \oplus m_r \\ d_r m_r \oplus r d_r \oplus (1-R)m_r \oplus R^* m_r \oplus (1-R^*)d_r = 0 \\ C = C^*(1-d_c) \oplus m_c \\ d_c m_c \oplus c d_c \oplus (1-c)m_c \oplus C^* m_c \oplus (1-C^*)d_c = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

其中 d_r 、 m_r 、 d_c 和 m_c 分别表示保护和断路器的拒动信息、误动信息。根据上式可知，该模型包含了保护规则和动作状态，对故障诊断规则有着较为完整描述。保护动作状态和其拒动误动情况、断路器动作状态和其拒动误动情况在期望状态解析规则下充分耦合，提高了模型的容错力和鲁棒性。

4.1.2 电力系统故障诊断的完全解析模型

文献[45]认为上述公式（4.1）在应用中会面临下列问题：

(1) 当目标失电区域的故障元件增多，模型的维度为 $(N+3Z+3K)$ ， N 表示目标区域内的可疑故障元件， Z 指目标区域内的保护数量， K 表示区域内断路器的个数。这样会给解析运算带来巨大困难。

(2) 解析模型会存在一定的多解现象。如：区域内可疑故障元件中的正常元件，可能会被模型解析成为其保护和断路器都拒动的故障元件；相反的故障元件也可能因误动被解析成一个正常元件。

针对上述问题，文献[46]通过优化技术将故障诊断转化成最能解释故障告警信息的规划问题，将 $G=\{S, R, C, M, D\}$ 统一作为参变量，以下式代替式（4.7）。

$$F(S, R, C, M, D) = 0 \quad (4.8)$$

F 的维度为 $2Z+2K$ ，同时借鉴式（4.1）得到规划后的函数模型：

$$E(G) = \sum_{i=1}^K |C_i - C_i^*(S, R)| + \sum_{i=1}^Z |R_i - R_i^*(S)| + w_1 \sum_{i=1}^{Z+K} |D_i| + w_2 \sum_{i=1}^{Z+K} |M_i| + w_3 \sum_{i=1}^{2Z+2K} |F_i(S, R, C, M, D)| \quad (4.9)$$

等式右侧第一、二项分别表示所有保护、断路器的动作值与期望值之间的差异，可以检测告警信息是否出现漏报和误报；第三、四项是保护与断路器的误动、拒动情况；第五项是模型矛盾逻辑约束。 w_1 、 w_2 分别表示保护与断路器告警信息误报、漏报的权值， w_3 远大于 1 且远大于 w_1 和 w_2 。

从理论上出发，式（4.9）可以得到完整的故障诊断结果集，但是还是会造成多解或误诊情况，以图 4.1 所示电网为例：

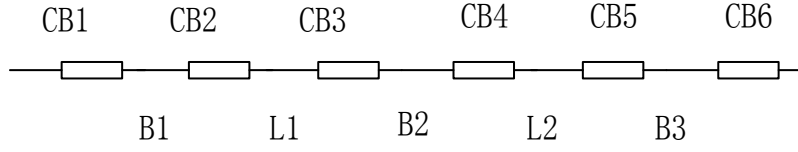


图 4.1 局部电网示例

Fig.4.1 Local Grid Example

故障具体信息详情：母线 B1 故障，其主保护动作，控制断路器 CB1 和 CB2 动作；线路 L1 故障，其靠近 B1 侧的主保护漏报，靠近 B2 侧的主保护和第一后备保护拒动，由 L2 右侧的保护充当第二后备保护动作断开 CB5；收到的告警信息为：A 主保护动作，L2 右侧远后备保护动作，CB1、CB2、CB5 动作。

根据上述告警信息，由于存在漏报信息，得到的故障集合可能错误判断为：母线 A 故障，主保护动作并驱动断路器 CB1 和 CB2 跳闸；母线 B2 故障，自身保护拒动，其远后备保护 L2_{rs} 动作，断开 CB5。

将正确的故障情形和错误故障情形代入式（4.9）中迭代求解，得到的目标函数最优解结果分别为：

$$\begin{cases} \min E(B1, L1) = 2\omega'_2 + 1 \\ \min E(B1, B2) = \omega'_2 \end{cases} \quad (4.10)$$

由上式（4.10）可知， $\min E(B1, L1) > \min E(B1, B2)$ ，选择较小适应度值对应的故障结果，即：母线 B1 和 B2 故障。显而易见，该诊断结果为误诊。

文献[47]认为式（4.9）对不同元件保护采用相同的权值，对目标函数的贡献度一致，都为 w_1 或 w_2 ，并未关注不同元件之间保护和断路器不确定事件发生的概率差异性，导致构造目标函数时判定故障信息的因素会相互抵消从而产生误诊或多解情况。因此，提出了一种充分考虑不确定事件发生的概率差异性并将这种差异概率应用到不同元件保护的权值上来。式（4.7）中第一和第三个方程进行等价逻辑变换：

$$\begin{cases} m_r = R(1 - R^*) & \text{保护误动} \\ d_r = (1 - R)R^* & \text{保护拒动} \\ m_c = C(1 - C^*) & \text{断路器误动} \\ d_c = (1 - C)C^* & \text{断路器拒动} \end{cases} \quad (4.11)$$

将式（4.9）中等式右侧第三、第四和第五项分解成不同种类保护与断路器的误动、拒动集，并结合式（4.11）可改进得到如下的目标函数：

$$\begin{aligned} E(G) = & \sum_{i=1}^K |C_i - C_i^*(S, R)| + \sum_{i=1}^Z |R_i - R_i^*(S)| + w_{11} \sum_{i=1}^{z1} |m_{r_i}| + w_{12} \sum_{i=1}^{z2} |m_{r_i}| + w_{13} \sum_{i=1}^{z3} |m_{r_i}| + w_{21} \sum_{i=1}^{z1} |d_{r_i}| + \\ & w_{22} \sum_{i=1}^{z2} |d_{r_i}| + w_{23} \sum_{i=1}^{z3} |d_{r_i}| + w_3 \sum_{i=1}^K (|m_{c_i}| + |d_{c_i}|) \end{aligned} \quad (4.12)$$

式中： $G=\{S, R, C\}$ 是自变量集合 $Z=z_1+z_2+z_3$ ， z_1 、 z_2 、 z_3 分别代表了母线、变压器

和线路各自保护的数量， K 表示断路器的数量；等式右边第一、二项表示保护与断路器告警信息的漏报、误报信息；第三项到第八项为母线、变压器和线路的误动、拒动信息，第九项代表了断路器的误动和拒动信息； ω_{11} , ω_{12} , ω_{13} , ω_{21} , ω_{22} , ω_{23} , ω_3 分别表示母线、变压器和线路保护的误动、拒动权值。 ω_{11} , ω_{12} , ω_{13} 分别取 12.59, 5.32, 1.16; ω_{21} , ω_{22} , ω_{23} 取 3.46, 0.46, 0.09; ω_3 取 0.5。保护应该动作时 R_i^* 为 1, 反之为 0, 断路器应该跳闸时 C_i^* 为 1, 反之为 0。

与式 (4.9) 相比，该模型中维度数量下降到 $N+Z+K$ 个，大大降低了模型逻辑运算复杂度，提高了运算速度。采用式 (4.12) 目标函数模型对图 4.1 所示故障构造目标函数，最后的诊断结果为：

$$\begin{cases} \min E(B1, L1) = 2\omega_{23} + 1 \\ \min E(B1, B2) = \omega_{21} \end{cases} \quad (4.13)$$

显而易见 $\min E(B1, L1) < \min E(B1, B2)$ ，即得到母线 B1 和线路 L1 故障的诊断结果，该诊断结果符合故障描述，是正确的。

4.1.3 船舶岸电系统故障诊断完全解析模型

由于船舶岸电系统与船舶电力系统在诊断对象方面绝大部分是一致的，本文在深入分析岸/船电力系统之间的保护配置差异，参考式 (4.12) 提出的模型目标函数，结合保护与断路器不确定事件发生概率的差异性和舰船特自身特性，建立如式 (4.14) 包含继电保护或断路器误动、拒动的情况下主保护与后备保护之间关系的船舶岸电故障诊断的数学解析模型，当岸/船并网发生故障时，对整个电力系统进行拓扑分析来划分发生故障的区块^[48]，确定需要纳入故障诊断的元器件数量，并统一编码形成故障诊断目标函数，利用二进制 Levy 飞行风驱动算法迭代求值。故障算例的正确诊断，证明了本文的船舶岸电故障诊断模型和智能算法的合理性和可靠性。

$$\begin{aligned} E(G) = & \sum_{i=1}^K \left| C_i - C_i^*(S, R) \right| + \sum_{i=1}^Z \left| R_i - R_i^*(S) \right| + w_{11} \sum_{i=1}^{z1} \left| m_{r_i} \right| + w_{12} \sum_{i=1}^{z2} \left| m_{r_i} \right| + w_{13} \sum_{i=1}^{z3} \left| m_{r_i} \right| + \\ & w_{21} \sum_{i=1}^{z1} \left| d_{r_i} \right| + w_{22} \sum_{i=1}^{z2} \left| d_{r_i} \right| + w_{23} \sum_{i=1}^{z3} \left| d_{r_i} \right| \end{aligned} \quad (4.14)$$

对各个保护 R 和断路器 C 做动作解析所得到的对应期望状态可简单描述为：当元件 S 故障，其主保护 r_i 的期望的响应=元件 s 状态值；如果 r_i 拒动，则第一后备保护 r_j 期望 r_j^* 的响应=元件 s 状态*(1-主保护 r_i 状态)；当 r_i 和 r_j 都拒动时，则第二后备保护 r_k 期望 r_k^* 的响应(1-关联路径断路器 1 的状态)*(1-关联路径断路器 2 的状态)；断路器的期望响应= $\max\{R^* \cdot R\}$, R 表示所有与待断路器相关的保护状态。

权值 ω_{11} , ω_{12} , ω_{13} , ω_{21} , ω_{22} , ω_{23} 参照 2013 年全国继电保护设备运行情况对误动和拒动的权值进行更新^[49]。陆基电网拥有最先进的智能电网体系，其智能化程度高、

故障率极低。而船舶电网与陆基电网在电制、电网拓扑结构及用电设备功率等方面具有显著不同，船舶系统自动化、信息化程度偏低，多以手动/半自动化保护装置为主。同时船舶环境恶劣、电网谐波严重使得岸电系统继电保护设备的误动与拒动远超陆上电网。根据连云港港口集团提供的 2011 年至 2017 年的岸电故障数据显示，继电保护装置的各种保护不正确率远大于陆基电网的平均值，其比例大约在 50~100 倍左右。因此，重新计算各个权值得到参照表 4.1。

表 4.1 船舶电力系统继电保护不正确情况
Tab. 4.1 Incorrect protection of ship power system

保护类型	拒动%	误动%
变压器保护	0.76	3.32
母线保护	0.5	2.59
线路保护	0.96	3.26

4.2 基于二进制 Levy 飞行风驱动算法的船舶岸电并网故障诊断

4.2.1 Levy 飞行风驱动算法与常用故障诊断算法比较

现阶段，对电力故障解析模型进行优化的智能算法主要有遗传算法、粒子群算法和风驱动算法等。本文在前面两个章节对原始风驱动算法做了详细介绍并加入 Levy 飞行策略和小波变异优化策略进行对比分析，结果表明改进后的风驱动算法比原始风驱动算法和小波变异风驱动算法拥有更好种群多样性和全局搜索能力，为了验证在风驱动算法中加入 Levy 策略的可靠性，采用数据集标准测试函数 Schwefel 和 Rastrigrin 来验证，其中 Schwefel 是单峰函数，它的最优值状态为 0，常用来测试算法的运算和寻优性能；Rastrigrin 是多峰函数，最优值状态为 0，主要用来判断算法是否能够快速的跳出局部最优值。

分别用粒子群算法、遗传算法、风驱动算法、加入 Levy 飞行策略的风驱动算法这 4 种故障诊断优化算法来优化上述两个测试函数，各个算法的初始的速度速度和位置信息相同，取独立运行 20 次后的最优适应度值，并对其取平均值，画出相应的平均最优适应度图。

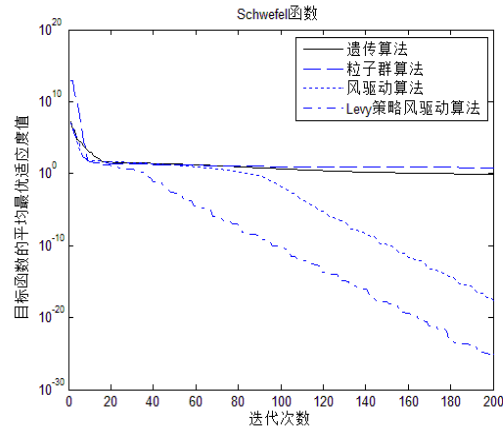


图 4.2 Schwefel 函数的平均最优适应度值变化曲线

Fig.4.2 The average optimal fitness value change curve of Schwefel function

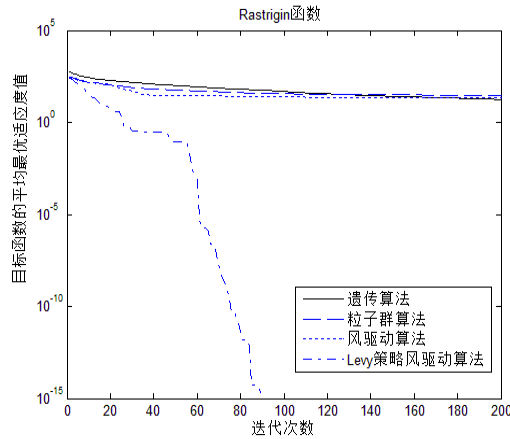


图 4.3 Rastrigrin 函数的平均最优适应度值变化曲线

Fig.4.3 The average optimal fitness value change curve of Rastrigrin function

根据函数测试结果可知：对比图 4.2 发现，加入 Levy 策略风驱动算法比其他算法有着更好的寻优性能和精度，高于其他算法至少 5 个精度级。由图 4.3 可以看出，对于 Rastrigrin 多峰函数来说，遗传算法、粒子群算法和风驱动算法都易陷入局部最优值，而加入 Levy 策略的风驱动算法可以更好的跳出局部极值。故而证明在风驱动算法中加入 Levy 策略是可行的。

4.2.2 基于解析模型的二进制 Levy 飞行风驱动算法的故障诊断步骤

在船舶岸电电网的故障诊断中，空气质点的位置等价于元件的状态，质点的维度就是元件的数量。将二进制风驱动算法与 Levy 飞行实现混合轮番迭代，得到基于二进制的 Levy 风驱动算法。该算法的故障诊断步骤：

- 1) 输入获得的岸电系统传来的报警信号，主要有开关断路器跳闸信息，保护动作信息、设备线路信息，根据分析的结果确定电网停电区域，将停电区域内的每个元件视为可疑故障元件。

2) 采用矩正法表示各个可疑故障元件关联的保护及对应的断路器. 并形成式 (5.14) 模型的目标评价函数。

3) 随机初始化各个质点矩阵的初始信息（位置和速度），计算初始的保护和断路器期望值。将各个参数带入目标评价函数中获得初始压力值并根据压力值的大小升序排列。

4) 开始迭代，符合条件 $t < \text{Maxt}$ （最大迭代次数）时，由式（3.17）计算更新空气质点的速度信息，并通过式（3.25）、（3.29）和（3.30）分别计算不同映射公式下位置信息（元件状态），将 R 、 R^* 、 C 和 C^* 代入式（4.13）得到保护和断路器的拒动误动信息（ M 和 D ），然后将所有参数代入式（4.14）计算目标函数得到各自适应度压力值，比较压力值大小，取较小值为全局最优值（ global_best ），全局最优值对应的位置信息作为质点新的位置信息。

5) 均匀伪随机数 rand 与飞行概率 lp 比较，如果 $\text{rand} > \text{lp}$ ，需要执行莱维飞行策略，执行步骤 6，否则执行步骤 7。

6) Levy 飞行。通过式（3.21）计算出莱维飞行路径的步长信息 s ，将 s 分别带入式（3.25）、（3.29）和（3.30）中计算质点位置信息，将 R 、 R^* 、 C 和 C^* 代入式（4.13）得到保护和断路器的拒动误动信息，将所有参数代入式（4.14）计算目标函数得到各自适应度压力值，比较压力值大小，取较小值为全局最优值（ global_best ），全局最优值对应的位置信息作为质点新的位置信息。

7) 迭代终止。判断是否满足终止条件，如果不满足就返回步骤 4)，否则就终止迭代。输出全局最优值和对应的质点信息（可疑故障元件状态和拒动误动信息）。

4.3 算例仿真

为了验证本文提出的诊断方法是否可行，在 Matlab 平台上设计岸电故障诊断与船舶电网运行的仿真模型，采用本文提出的二进制 Levy 风驱动算法（Binary Levy Wind Drive Optimization Algorithm, BLWDO）与二进制风驱动方法（Binary Wind Drive Optimization Algorithm, BWDO）、遗传算法（Genetic Algorithm, GA）做对比分析^[50]。

利用图 2 所示系统的算例来进行测试。该系统由 6 个母线，5 个变压器，10 条线路，36 个断路器开关和 53 个保护组成。分别表示为元器件 $S_1 \sim S_{21}$ ： B_1, B_2, \dots, B_6 ； T_1, T_2, \dots, T_5 ； L_1, L_2, \dots, L_{20} 。断路器 $C_1 \sim C_{36}$ ： $CB_1, CB_2, \dots, CB_{36}$ 。保护 $R_1 \sim R_{53}$ ： $B_{1m}, B_{2m}, \dots, B_{6m}$ ； $T_{1m}, T_{2m}, \dots, T_{5m}$ ； $L_{1m}, L_{2m}, \dots, L_{20m}$ ； $B_{1p}, B_{2p}, \dots, B_{6p}$ ； $T_{1p}, T_{2p}, \dots, T_{5p}$ ； $L_{1p}, L_{2p}, \dots, L_{20p}$ ； $B_{1s}, B_{2s}, \dots, B_{6s}$ ； $T_{1s}, T_{2s}, \dots, T_{5s}$ ； L_{1s}, L_{2s} 。其中 m, p, s 分别表示主保护，第一后备保护和第二后备保护。

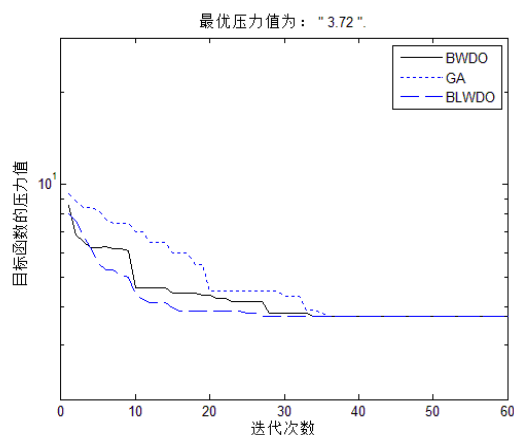


图 4.4 算例 1 的最小压力值变化曲线

Fig.4.4 The minimum pressure change curve of example1

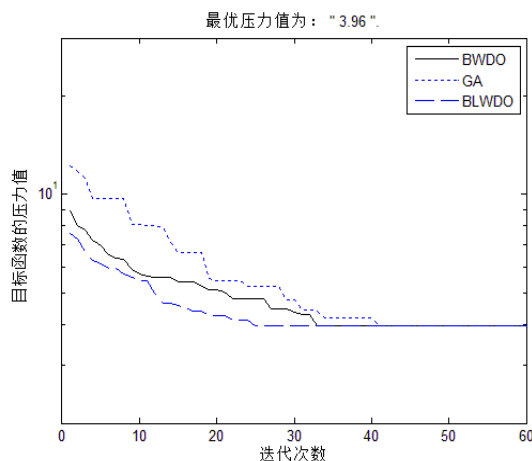


图 4.5 算例 2 的最小压力值变化曲线

Fig.4.5 The minimum pressure change curve of example2

从上文图表中可知：1、在收敛速度方面 BLWDO 和 BWDO 都要优于 GA,其中 BLWDO 和 BWDO 平均要领先 GA1 十次迭代就能取得最优解；2、在诊断正确率方面 BLWDO 优于 BWDO 和 GA，由表 4.2 可知，BLWDO 诊断正确率比 GA 算法高 5 个百分点。由此可见 BLWDO 算法在船舶岸电网故障诊断中更加具有准确性和实时性，有着较好的应用前景。

4.4 本章小结

本章首先介绍了故障诊断抽象解析模型和保护（断路）动作解析规则的表达式，主要包括主保护动作规则、第一第二后备保护动作规则、断路器动作规则等内容，再通过保护继电装置（断路器）动作的期望状态值进行逻辑运算并结合船舶岸电系统的自身特性，转化为适合船舶岸电电力系统的故障诊断解析模型逻辑表达式。将 Levy 飞行风驱动算法与常用的故障诊断算法（粒子群算法、遗传算法、普通风驱动算法）

比较，整理出基于解析模型的船舶岸电故障诊断步骤。针对不同的复杂故障算例对故障解析模型进行验证，对比二进制 Levy 风驱动算法、二进制风驱动算法和遗传算法仿真结果，证明了本文故障解析模型在船舶岸电上的合理性以及本文算法诊断效果的优越性。

第 5 章 船舶岸电故障诊断系统搭建

船舶岸电故障诊断原理和故障解析模型的搭建方法已经在前文做了较为详细的说明,各理论方法与实际算例的成功运行也代表了该岸电故障诊断方法的可行性。本章以上文理论方法和仿真算例为基础建立船舶岸电故障诊断系统,本章主要论述船舶岸电故障诊断模块的研发过程,由于条件所限,本文没有设计数据采集接口,而是在系统内部自定义了模拟数据,方便应用系统的运行演示。

5.1 船舶岸电故障诊断系统组成设计

本文所述的船舶岸电故障诊断系统集成在船舶岸电健康管理系统之中,该系统主要由电源控制系统、系统监控系统、数据记录查询系统、信息帮助系统、注册登录系统和故障诊断系统组成。船舶岸电健康管理系统主界面如图 5.1 所示。

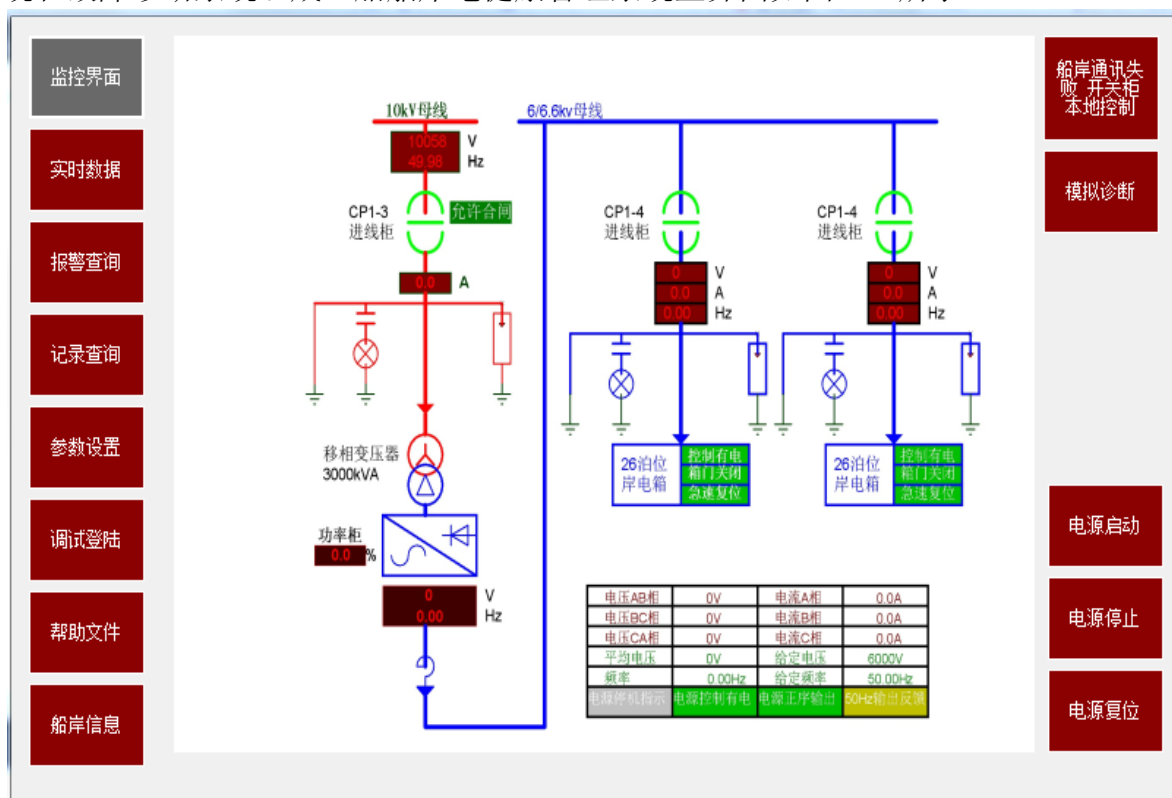


图 5.1 船舶岸电健康管理系统主界面

Fig.5.1 Main interface of the ship shore power health management system

其中,船舶岸电故障诊断模块主要由数据获取模块、诊断分析模块、页面交互模块三部分组成。如下图 5.2 所示。

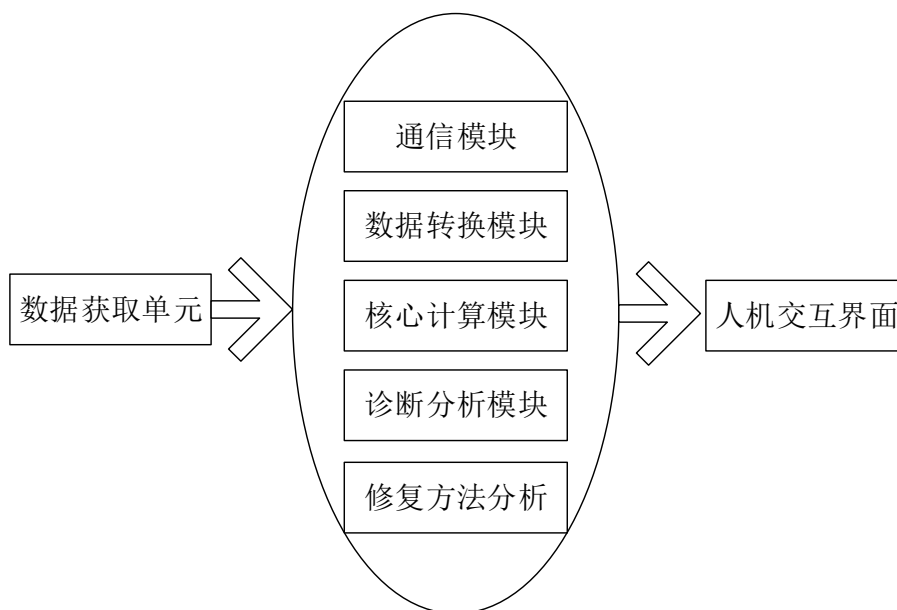


图 5.2 船舶岸电故障诊断系统组成
Fig.5.2 Fault diagnosis system for ship shore power

数据获取模块：在满足硬件条件的基础上可以对各个元件的状态和各保护断路器状态进行实时跟踪获取，并与前一时间段的数据进行全面对比，当产生故障信号可以及时划分可疑故障区域，将相应的数据信息传送到诊断分析模块并激活该模块。

诊断分析模块：以 PC 端为硬件载体，在 Windows 平台上通过微软.NET Framework 框架和 C#高级程序设计语言编写软件代码，结合 matlab compile runtime 组件,以便将第四章编写的 MATLAB 风驱动算法和故障诊断程序翻译并导入.NET 工程之中。诊断分析模块的主程序对数据类型进行转换，并调用 MATLAB 代码，对返回的故障结果进行解析，并与匹配的数据库进行匹配，获得与编码相对应的设备和元器件状态。最后将诊断结果信息全部发送给页面交互模块。

页面交互模块：以各种各样的容器和组件构成一幅可视化界面，可以进行配置信息选择和诊断结果展示，使操作更加便捷简单。

5.2 船舶岸电故障诊断系统软件设计

该软件是基于 Windows 平台和.NET Framework 框架的设计的，所以开发工具选择 Visual Studio 2015 和 SQLServer 2014 数据库。

VisualStudio2015 是微软新一代的较为完善的开发工具，可用来开发 Web 应用程序、桌面应用程序和移动端程序。Visual Studio 2015 全面贴合 windows 操作系统，高度集成的开发环境为开发者提供了十分便捷的工作组件，其支持可视化界面拖拽布局，大大提高了开发效率。

5.2.1 登录界面和主界面设计

当点击模拟诊断按钮时，如果没有检测到用户信息，将会启动登录界面，用户需要在登录界面输入用户名和密码，其窗体如图 5.3 所示。

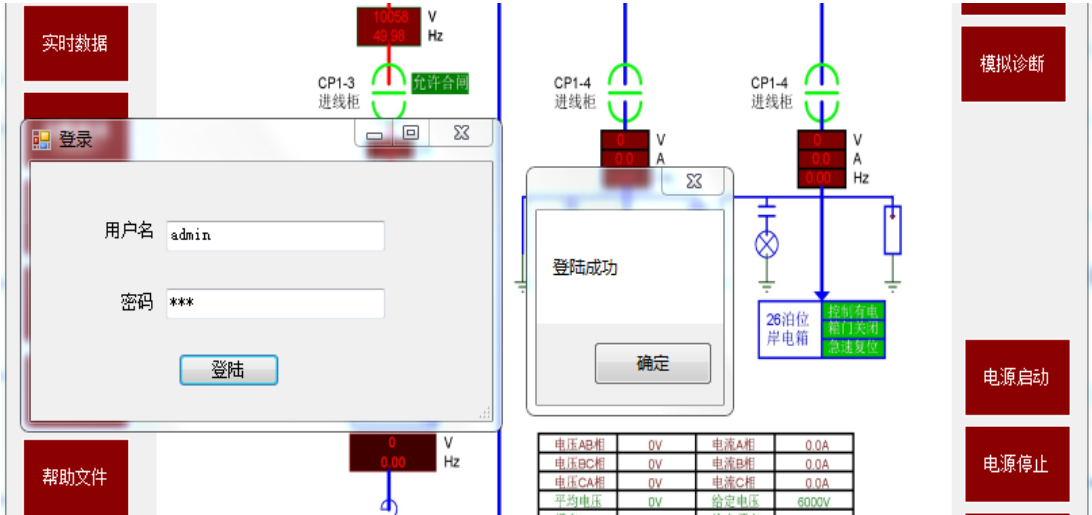


图 5.3 船舶岸电故障诊断系统登录界面

Fig.5.3 Logon interface of ship shore power fault diagnosis system

当账号与密码匹配正确时，模拟诊断主界面将会显示，主界面主要由三个部分组成，分别为船舶岸电电力系统电路拓扑区域、算例选择区域，诊断结果区域。如图 5.4 所示。

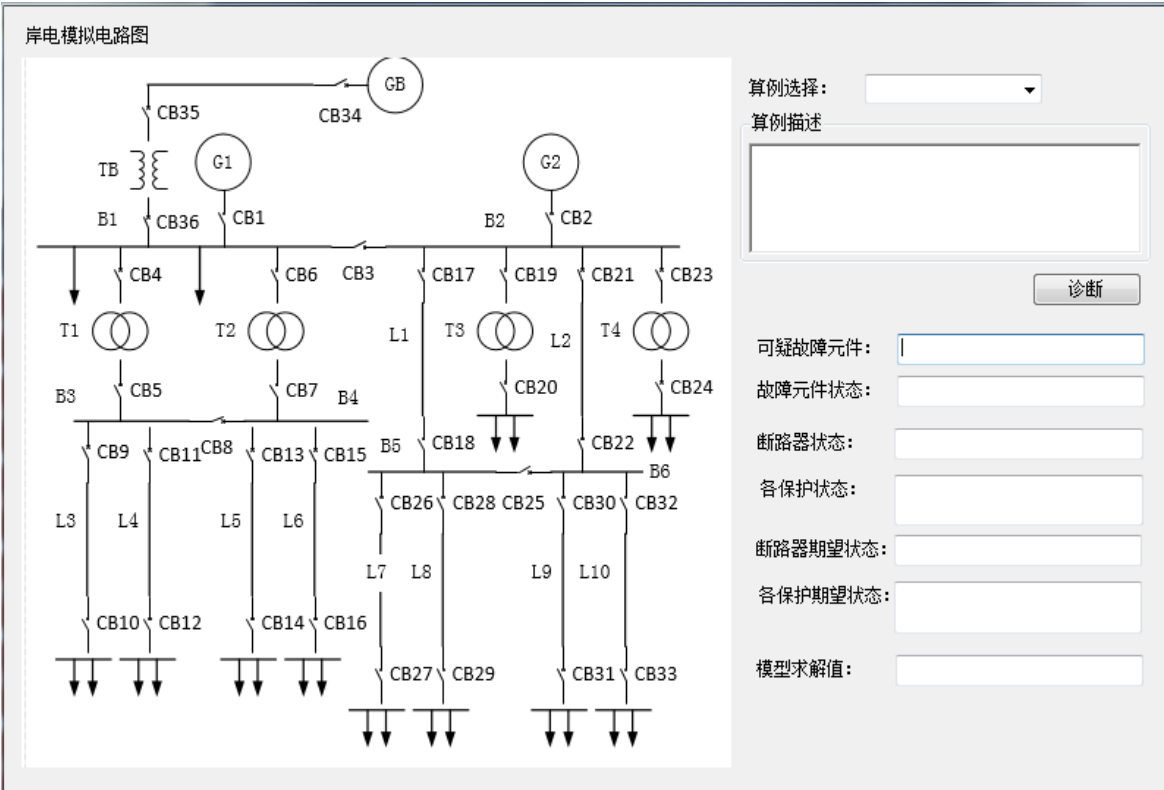


图 5.4 船舶岸电故障诊断系统主界面

Fig.5.4 Main interface of ship shore power fault diagnosis system

界面左边是岸电系统运行时的电路结构拓扑图，存储于 PictureBox 组件中，用于

显示岸电对象的电路结构，并为诊断结果提供参考对象。包含了发电机和岸电电源控件，开关断路器控件，变压器控件，线路控件。界面右上部分是算例选择区域，可以在组合框（ComboBox）控件的下拉菜单里选择想要的算例，该算例描述将自动显示在组合框内的文本域中。系统内部对各个电路元件的编码与本文第二章和第四章一致，在这就不多赘述。而界面右下部分是诊断数据显示区域，当点击诊断按钮后，系统根据故障算例，定位到可疑故障元件，显示各保护与断路器实际状态值，并计算各保护与断路器期望状态值，最后诊断分析出可疑故障元件的状态值。最后跳转到具体的诊断结果分析页面。

5.2.2 诊断分析模块

诊断分析模块的主要任务已在第四章完成，主要包括二进制传统风驱动计算方法、二进制莱维飞行风驱动计算方法、遗传算法计算方法；可疑故障元件定位方法，目标模型确定方法，保护与断路器期望值计算方法和故障元件诊断方法。将上述方法在 Matlab 内编译成适用于 .Net 框架的动态链接包，具体操作方法方法如下：

第一步：进入 Matlab 2014 主界面的命令行窗口，输入 `deploytool` 命令，显示如图 5.5 所示：

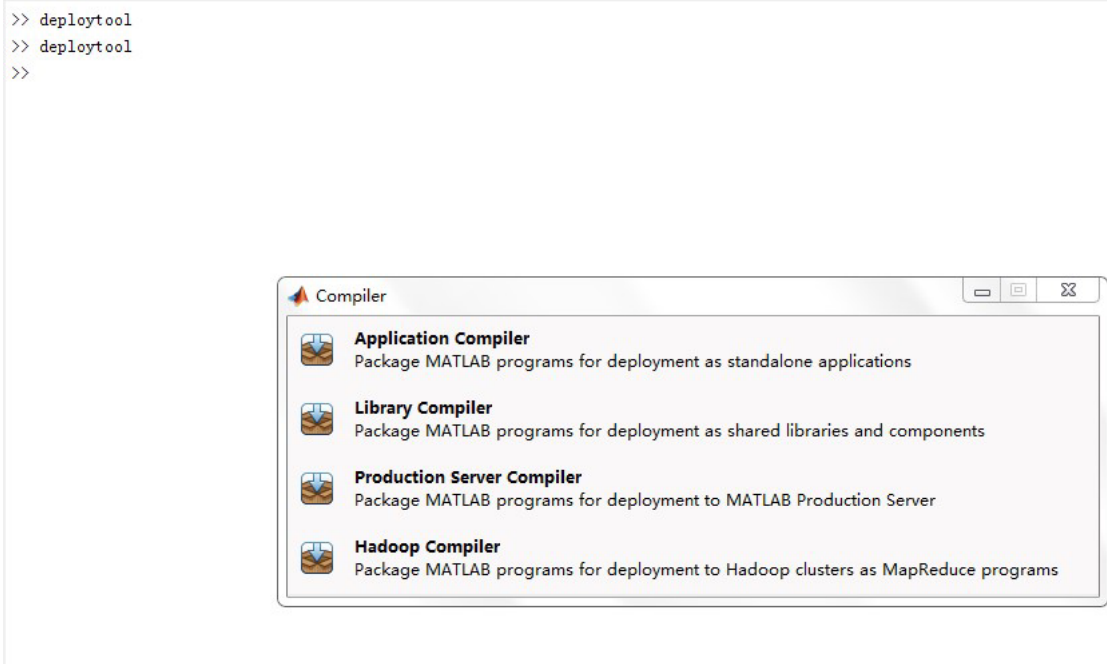


图 5.5 部署工具选择
Fig.5.5 DeploymentToolSelection

第二步：在 Compiler 窗口选择 Library Compiler 行进行具体的框架配置，会弹出如图 5.6 所示界面，选择支持 C#语言的 .Net Assembly 选项。

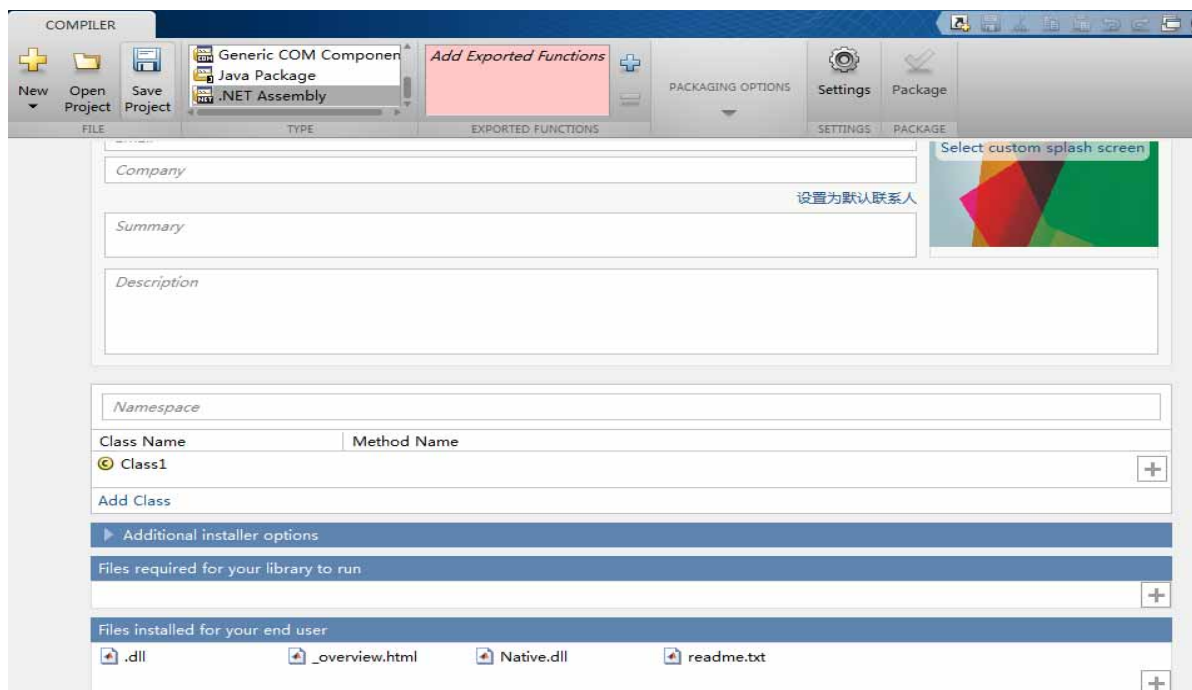


图 5.6 选择项目类型
Fig.5.6 Select project type

第三步：添加需要的进行打包的 matlab 文件，文件类型以.m 结尾，并设置包名和类名，如图 5.7 所示。

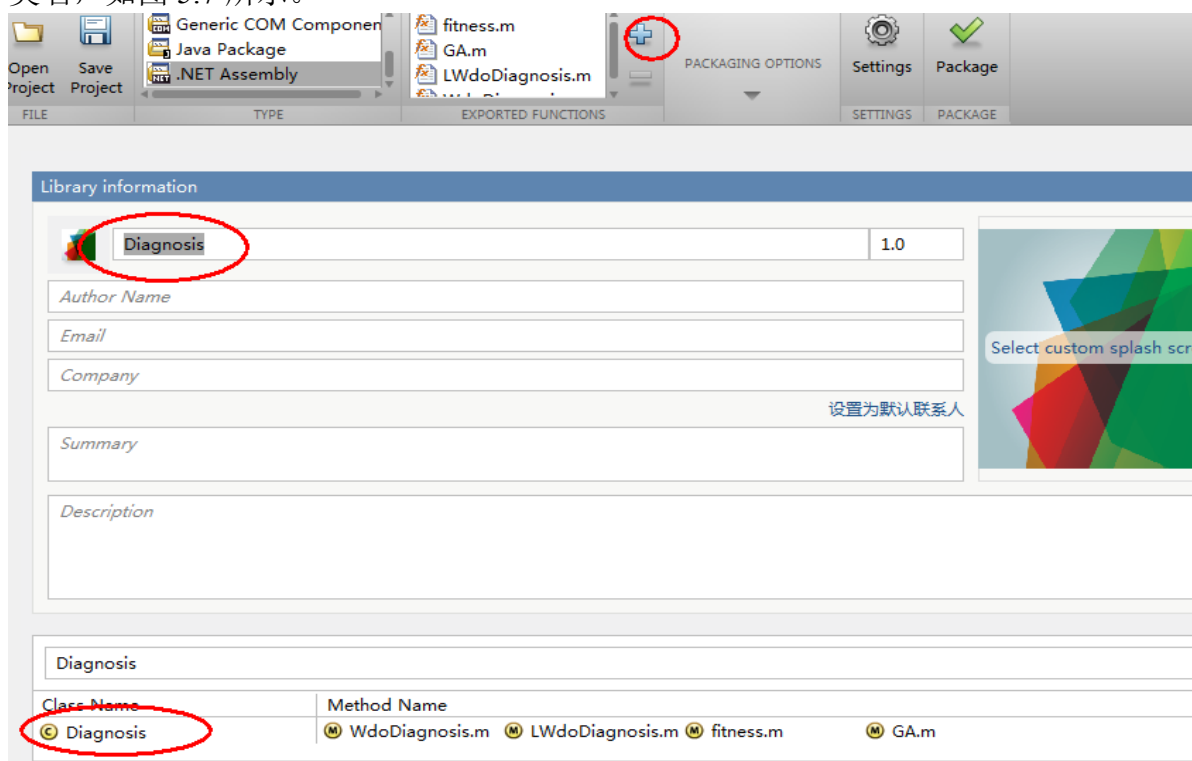


图 5.7 打包文件选取
Fig.5.7 Packaged file selection

第四步：点击图的上方区域 Package 勾型按钮将会生成相应的库文件包：Diagnosis.dll 文件。如下图 5.8 所示。

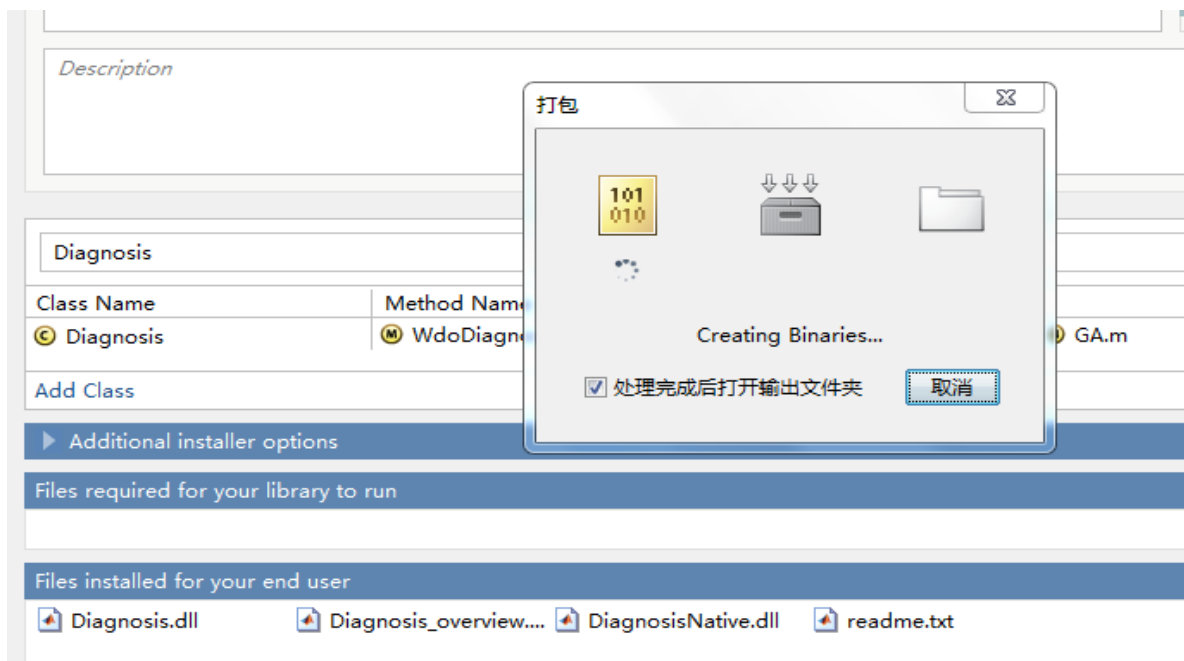


图 5.8 打包结果图
Fig.5.8 Packing result

第五步：在打包项目路径下将 Diagnosis.dll 和 Matlab 安装目录下 MWArray.dll 文件，本机路径为:E:\matlab\toolbox\dotnetbuilder\bin\win64\v2.0\MWArray.dll 拷贝出来。

C#调用 Matlab 打包好的库文件，需要进行数据类型转换，以便输入输出的数据可以被双方传输调用。在 C#项目内调用 Matlab 库还需要在工程项目里导入相应的引用文件。具体方法如下

(1) 将 Diagnosis.dll 和 MWArray.dll 文件拷贝到 C#对应项目中的 bin\Debug 目录下。

(2) 在解决方案管理器中的引用位置添加引用。将上述目录的两个.dll 文件勾选，点击确定，引用文件就在下图右边，如图 5.9 所示：

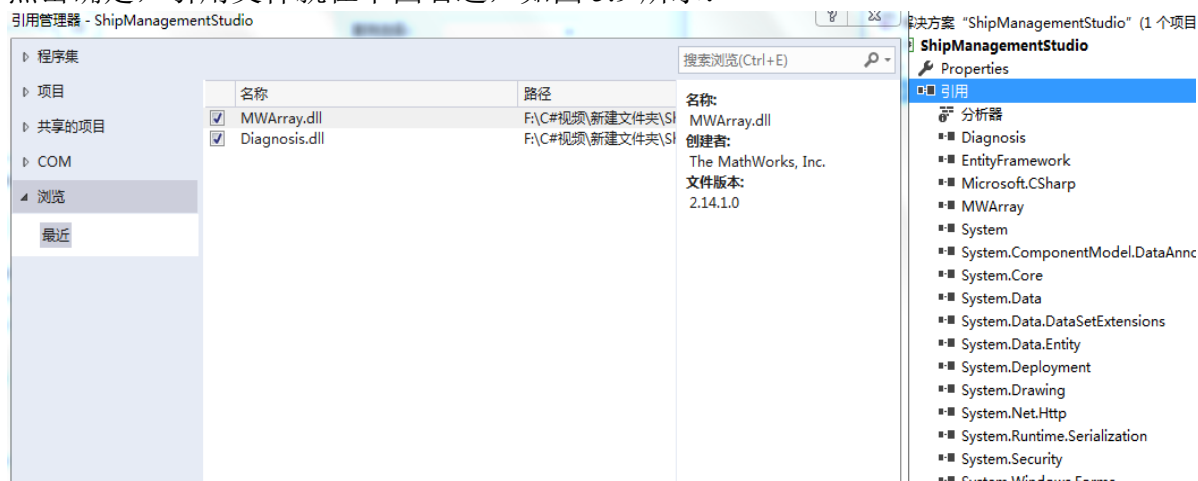


图 5.9 往项目中添加引用文件
Fig.5.9 Adding reference filesto the project

在 C#后台代码调用 Matlab 里的方法是需要文件开头添加如下引用方法：

```
using MathWorks.MATLAB.NET.Arrays;
using MathWorks.MATLAB.NET.Utility;

using Diagnosis;
```

这样引用文件配置就全部完成了，为了保证 Matlab 与 C#保持良好的兼容性，建议最好选择版本相近的开发工具。

5.3 系统演示

进行系统演示之前，需要确保本地 PC 具有 .NET Framework 4.5 和 matlab compile runtime 组件，本机由于安装了 Visual Studio 2015 和 Matlab 2014 都自带了这些基本运行组件。

首先启动软件，打开船舶岸电健康管理系统，点击模拟测试进入船舶岸电故障诊断页面并选择算例 1，如图 5.10 所示：

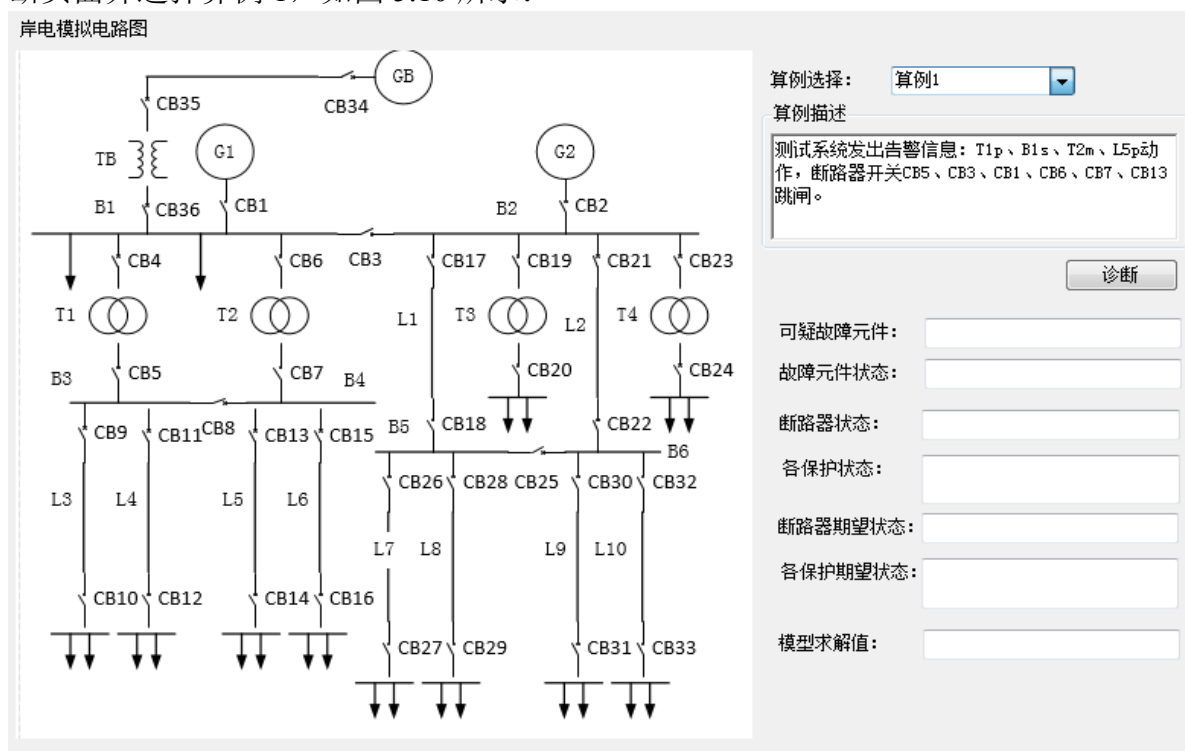


图 5.10 算例选择

Fig.5.10 Selection of studies

点击右侧“诊断”按钮，进行故障诊断分析，得到对应的诊断参数，还会显示出隐藏的“详细故障结果”按钮。

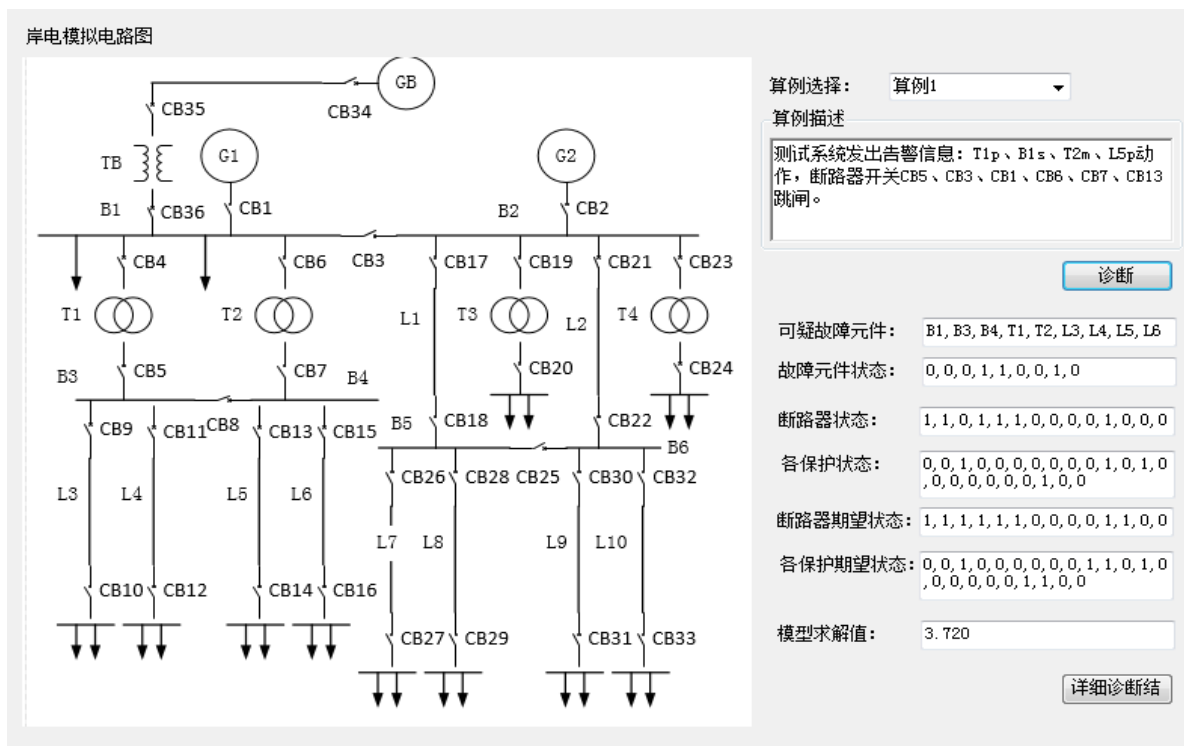


图 5.11 诊断参数
Fig.5.11 Diagnostic parameters

点击详细诊断按钮，将对上述诊断参数进行翻译，进入 SQLServer2014 数据库进行参数比对，分析出故障发生情况并做文字展示，如图 5.12 所示。

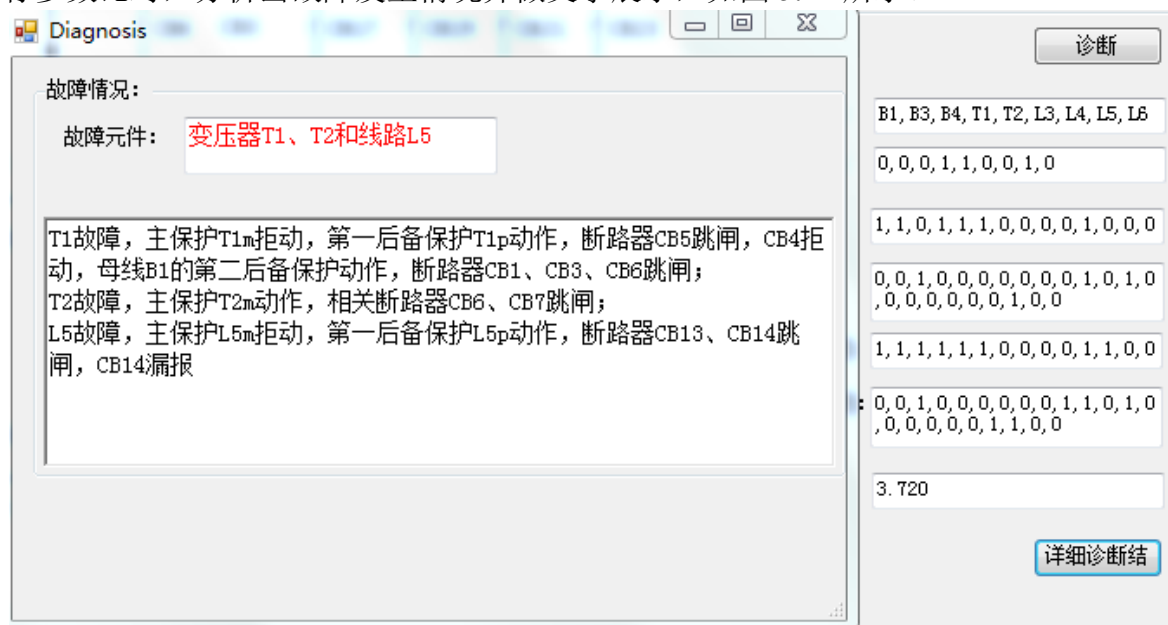


图 5.12 具体诊断结果显示
Fig.5.12 Shows the specific diagnosis results

5.4 本章小结

本章叙述了在 Windows 平台上通过 Visual Studio 2015 的 .NET Framework 4.5 框架

和 C#高级程序设计语言编写故障诊断可视化工具的方法步骤，将 MATLAB 中的诊断方法和算法函数打包并导入 C#工程项目，结合 Matlab Compile Runtime 组件，构建出简洁明了的故障诊断可视化界面。

总结与展望

总结

本文查阅众多国内外相关文献资料，针对船舶岸电和电力故障诊断原理，研究当前阶段陆上电网和船舶电网故障诊断的先进方法，并进行可行性分析，建立合适的船舶岸电故障诊断模型；利用改进的二进制 Levy 风驱动算法对其迭代求解。主要可以分为四个部分：

(1) 本文首先介绍了船舶岸电技术的发展历程和故障诊断技术的研究现状；确定采用解析模型和风驱动优化算法相结合的方式对船舶岸电系统进行故障诊断；并对船舶岸电系统对象模型进行数字编码设计。

(2) 其次介绍了风驱动优化算法，研究风驱动算法的原理和优缺点；针对传统风驱动优化算法易陷入局部最优、早熟收敛的问题，提出在优化过程中有条件的引入 Levy 飞行机制更新质点位置，提高空气质点的搜索范围和种群多样性，增强其跳出局部最优的能力，并对部分算法参数选取做了实验分析；通过算法仿真验证了改进策略的正确性。在此基础上，基于现有映射方法得到二进制 Levy 飞行风驱动优化算法，并给出了详细步骤。

(3) 之后根据船舶岸电目标对象搭建数学解析模型，通过二进制 Levy 飞行风驱动算法对船舶岸电电力系统的故障算例进行迭代求解，并与标准故障结果进行对比，验证的诊断的正确性，同时与其它优化算法进行对比，本文得到的诊断结果更加精准。

(4) 最后在 Windows 平台上通过微软的 .NET Framework 框架和 C# 高级程序设计语言编写可视化诊断工具，将 MATLAB 中的诊断方法和算法函数打包并导入工程项目，结合 Matlab Compile Runtime 组件，构建故障诊断可视化工具。

展望

本文的基于解析模型的船舶岸电故障诊断方法的研究目前只是理论方面，以模拟岸电系统对象和设定好的故障算例进行仿真验证，还有许多不完善的地方需要改进，另外，因为接触课题时间较短和对船舶岸电知识了解不够深入，希望各位专家老师批评指正。以便能及时的认识到自己的不足，在日后的学习生活中能少走弯路。目前本课题的不足和计划：

(1) 本文使用二进制 Levy 飞行风驱动算法对岸电故障模型迭代求解，是否可以在大型复杂岸电系统中也能取得目前所得到的效果还未可知。需要在未来进行更深如的研究。

(2) 本文针对岸电系统的诊断分析结果没有提供相应的故障解决指导措施，计划在之后的课题研究中展开。

(3) 目前该故障诊断方法只支持在线实时诊断,不支持故障实时预测,无法避免故障产生的危险,计划在今后的研究中引入深度学习、人工智能技术,及时预测故障位置和类型,做出合理应对,避免不必要的损失。

(4) 在获得故障诊断结果后,能及时对当前岸电系统进行电路重构,将当前故障区域隔离,恢复非故障区域的供电,确保岸电系统及时恢复正常运转。

参考文献

- [1] 田鑫, 杨柳, 才志远, 等. 船用岸电技术国内外发展综述[J]. 智能电网, 2014(11):9-14.
- [2] Qifan. Research and application of on-shore power supply system for vessel in port of Shanghai[J]. Engineering Sciences, 2012, 10(4):23-28.
- [3] 袁甜. “以电代煤”供热项目综合效益评价及激励对策研究[D]. 华北电力大学, 2016.
- [4] Khersonsky Y, Islam M, Peterson K. Challenges of Connecting Shipboard Marine Systems to Medium Voltage Shoreside Electrical Power[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3):838-844.
- [5] Jayabalan R, Fahimi B. Naval shipboard power system[C]//. Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference. IEEE Xplore, 2005:5 pp.
- [6] 王守鹏, 赵冬梅. 电网故障诊断的研究综述与前景展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19):164-175.
- [7] Binh P T T, Tuyen N D. Fault diagnosis of power system using neural Petri net and fuzzy neural Petri net[C]//. Power India Conference. IEEE, 2006:5 pp.
- [8] 边莉, 边晨源. 电网故障诊断的智能方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014(3):146-153.
- [9] Chen W H. Online Fault Diagnosis for Power Transmission Networks Using Fuzzy Digraph Models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2):688-698.
- [10] 王广夫. 船舶电力故障诊断系统的研究与应用[D]. 大连海事大学, 2015.
- [11] 吴星星, 徐烁娴. 港口发展岸电技术的效益研究[J]. 航海, 2015(6):51-55.
- [12] 谢圣昌, 肖乐明. 一种港口岸电与船电自动并网的控制系统[J], 港口科技, 2016 (6):26-28.
- [13] 侯珏. 船舶与岸电并网控制策略研究[J]. 船舶工程. 2017, 39 (1): 86-88.
- [14] 郜克存, 戴瑜兴, 李加升. 一种新型电子静止式岸电电源[J]. 电力电子技术, 2011, 45(2): 86-88.
- [15] 石朝泓, 徐晔, 吕强, 等. 基于聚类网络的 IT 系统绝缘故障检测研究[J]. 电工电气, 2014(3):48-51.
- [16] Paul D, Haddadian V. Transient Overvoltage Protection of Shore-to-Ship Power Supply System[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3):1193-1200.
- [17] 李晓光, 卜佩征, 王冀星, 等. 港口岸电安全联锁系统研究[J]. 港口科技, 2015(4):17-19.
- [18] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 采用量子遗传算法的船舶电网故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3):35-39.
- [19] 刘道兵, 顾雪平, 梁海平, 等. 电网故障诊断完全解析模型的解集评价与最优解求取[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31):5668-5676.

- [20] 王赛豪, 占小猛, 李良权. 特高压交直流输电技术特点及应用场合浅析[J]. 中国设备工程, 2017(17):166-167.
- [21] 涂敏. 膜计算在电力系统故障诊断和经济负荷分配中的应用研究[D]. 西华大学, 2014.
- [22] 文福拴, 韩祯祥. 基于遗传算法和模拟退火算法的电力系统的故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 1994(3):29-35.
- [23] 李晓. 基于粒子群算法和量子粒子群算法的电力系统故障诊断[D]. 湖南大学, 2010.
- [24] Zhang J, Wang X G, Zhi-Lei L I. Application of Neural Network Based on Wavelet Packet-Energy Entropy in Power System Fault Diagnosis[J]. Power System Technology, 2006, 30(5):72-76.
- [25] 文福拴, 韩祯祥, 田磊, 等. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法——第一部分: 模型与方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998(3):8-14.
- [26] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复[M]. 中国电力出版社, 2007.
- [27] 郭文鑫. 电力系统警报处理和故障诊断的解析模型、方法与应用[D]. 华南理工大学, 2010.
- [28] 刘道兵, 顾雪平, 梁海平, 等. 电网故障诊断完全解析模型的解集评价与最优解求取[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31):5668-5676.
- [29] 张海艳, 夏飞. 舰船电力系统故障诊断综述[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(4):134-137.
- [30] Lee H J, Ahn B S, Park Y M. A fault diagnosis expert system for distribution substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1):92-97.
- [31] 朱小会, 齐仁龙. 基于遗传算法的船舶电网故障诊断优化方法[J]. 舰船科学技术, 2016(12):88-90.
- [32] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 采用量子遗传算法的船舶电网故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3):35-39.
- [33] Bayraktar Z, Komurcu M, Werner D H. Wind Driven Optimization (WDO): A novel nature-inspired optimization algorithm and its application to electromagnetics[C]. Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE, 2010:1-4.
- [34] 任作琳, 田雨波, 孙菲艳, 等. 具有强开发能力的风驱动优化算法[J]. 计算机科学, 2016, 43(1):275-281.
- [35] Bayraktar, Z, Komurcu, M, Bossard, J.A, et al. The Wind Driven Optimization Technique and its Application in Electromagnetics[J]. Antennas & Propagation IEEE Transactions on, 2013, 61(5):2745-2757.
- [36] 张前图, 房立清, 赵玉龙. 具有 Levy 飞行特征的双子群果蝇优化算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(5):1348-1352.
- [37] 王庆喜, 郭晓波. 基于莱维飞行的粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(9):136-141.
- [38] 张琳. 无线传感器网络中信道分配方法的研究[D]. 吉林大学, 2016.
- [39] 宋玉坚, 叶春明, 黄佐铎. 多资源均衡优化的布谷鸟算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(1):189-193

- [40] Mantegna R N. Fast, accurate algorithm for numerical simulation of Lévy stable stochastic processes.[J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 1994, 49(5):4677-4683.
- [41] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[J]. Proc. of 1995 IEEE Int. Conf. Neural Networks, (Perth, Australia), Nov. 27-Dec. 2011, 4(8):1942-1948 vol.4.
- [42] Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation. IEEE, 2002:4104-4108 vol.5.
- [43] Zhang Z, Salous S, Li H, et al. An Opportunistic Array Beamforming Technique Based on Binary Multiobjective Wind Driven Optimization Method[J]. International Journal of Antennas & Propagation, 2015, 2015(3).
- [44] 刘建华. 粒子群算法的基本理论及其改进研究[M]. 中南大学, 2009.
- [45] 刘道兵, 顾雪平, 李海鹏. 电网故障诊断的一种完全解析模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34):85-92.
- [46] Guo W, Wen F, Ledwich G, et al. An Analytic Model for Fault Diagnosis in Power Systems Considering Malfunctions of Protective Relays and Circuit Breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3):1393-1401.
- [47] 王立志, 江雪晨, 宁一, 等. 一种改进的电网故障诊断解析模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(8):1065-1069.
- [48] 刘科学, 宣文华, 魏少鹏, 等. 一种基于高级 Petri 网的微电网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, V44(15):106-111.
- [49] 张烈, 吕鹏飞, 申华, 等. 2013 年国家电网公司 220kV 及以上电压等级交流系统继电保护设备及其运行情况分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4):1153-1159.
- [50] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, V44(2):36-41.

攻读硕士期间发表的论文

- [1] 朱祥兵, 李垣江, 王建华. 基于 Levy 飞行机制的风驱动优化算法[J]. 计算机与数字工程. (统计源, 已录用)
- [2] 朱祥兵, 李垣江, 王建华. 基于二进制莱维风驱动算法的船舶岸电系统并网故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制. (中文核心, 已录用).
- [3] 吴游, 武汉卿, 朱祥兵. 基于相位旋转与密钥矩阵的物理层算法[J]. 通信技术. 已录用. (统计源, 已录用)

致 谢

时光如剑，岁月如梭！转眼间，在江苏科技大学的硕士研究生学习生活即将结束，通过这三年时间的学习，我无论是在思想上还是在学术研究上都获益匪浅。我能够取得今天的成绩，离不开诸多良师益友的指导和帮助，在此特表示衷心的感谢。

在即将毕业之际，首先我要感谢我的导师王建华教授，王老师虽然不在学校任教，但一直挂念着我们的学业，经常督促我要踏实钻研，不懂就问。王老师严谨的治学态度、精益求精的工作作风、诲人不倦的敬业精神使我受益终身。

感谢李垣江副教授对我学习和生活上的帮助，在整个研究过程中，李老师给我提供了很多宝贵的意见和建议。当遇到研究瓶颈时，李老师为我指点方向，帮助我开拓研究思路；在我浮躁，想放弃的时候，李老师告诉我要沉着耐心。从论文的选题、开题、分析到论文的最终完成，都倾注了李老师的无数心血。在此，谨向李老师致以深深的谢意。

感谢师兄、师姐的鼓励和指导，在我迷茫，没有思路的时候给予鼓励，并提出宝贵的建议。感谢 15 级电通班的所有同学，感谢他们在平时的学习以及生活中给予我帮助和鼓励。感谢实验室小伙伴共同创造的和谐的学习环境，感谢他们在平时研学的讨论中帮我找到突破点和新思路。

在此要感谢我生活学习了七年的母校——江苏科技大学，母校给了我一个宽阔的学习平台，让我不断吸取新知，充实自己。

需要特别感谢的是我的父母。父母的养育之恩无以为报，他们是我十多年求学路上的坚强后盾，在我面临人生选择的迷茫之际，为我排忧解难，他们对我无私的爱与照顾是我不断前进的动力。

再次衷心的感谢所有关心过和帮助过我的老师、同学和家人。

对百忙之中对我的论文进行审阅以及答辩的专家老师表示衷心的感谢！