

序

新型电力系统是实现能源转型的重要载体。随着全球能源转型发展进程步入关键期，电力行业数字化、网络化、智能化水平发展迅速，人工智能成为主导新一轮能源产业链变革、加速构建新型电力系统和新型能源体系的重要引擎。

为构建新型电力系统，国家发展改革委、国家能源局、国家数据局联合印发的《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027 年）》指出，切实落实“四个革命、一个合作”能源安全新战略，围绕规划建设新型能源体系、加快构建新型电力系统的总目标，重点开展布局电力系统稳定保障、智慧化调度体系建设等 9 项专项行动。在此背景下，将人工智能贯穿于电力系统发—输—配—用—调等环节建设的紧迫需求日益凸显。国内外大量研究工作也证实，依托人工智能卓越的数据处理能力、自主学习能力与辅助决策能力，可以显著增强电力系统运营过程灵活性、智能性和开放性，实现电能生产、运营与营销过程降本增效、扩圈强链。

当下，以国家能源政策为牵引，以企业供能、用户用能实际诉求为导向，总结提炼人工智能赋能电力系统关键领域的前沿研究进展，供电力作业人员与高校单位交流尤为必要。秉持该使命，我们也一直密切关注，见证了“人工智能与新型电力系统”丛书从策划、启动、交稿到出版的全过程。

本套丛书汇集了国内高校和企业近百位专家构成的高水平编写队伍，从创意萌芽、丛书框架研讨到外部专家反复论证，历经数年攻关，形成了以人工智能赋能电力系统垂直场景为鲜明特色的高质量科学技术论著。本套丛书细致梳理了先进人工智能在电力系统控制、规划、调度、预测、故障诊断与多能融合等关键领域的基本概念、技术原理与应用场景。本套丛书图文并茂、内容翔实、应用场景明确，符合当前国家能源转型核心需求。在此，对编写团队表达由衷的祝贺和诚挚的感谢。

本套丛书既是一套有深度的理论专著，又是一套极具实用价值的参考书，具有极高的阅研和实用价值，凝聚了编写团队的心血。它的出版发行，将有助于推动国内人工智能理论及技术在电力系统领域的跨越式发展。

程时杰 黄琦 胡维昊

2025 年 6 月

前 言

配电网作为直接面向用户的关键环节，其运行状态直接影响用户的用电体验以及社会生产生活的正常秩序。随着“双碳”目标的提出，越来越多的新能源、电力电子设备在配电网中广泛应用，新型配电网的结构和运行特性变得极为复杂，这给故障诊断工作带来了诸多棘手难题。首先，分布式能源的间歇性和不确定性接入，使得配电网的潮流分布更加复杂多变，传统的基于单向稳态潮流分析的故障诊断方法难以适用。其次，大量电力电子设备的使用产生了丰富的谐波、多变的故障特性，干扰了故障特征信号的提取，增加了故障诊断的难度。再者，配电网节点众多、拓扑结构复杂多变，在故障发生时，要快速准确地定位故障位置和类型，对传统诊断方法的计算速度和精度是极大的挑战。

在此背景下，新一代人工智能技术的崛起为新型配电网故障诊断带来了曙光。人工智能技术具有强大的自学习、自适应和模式识别能力，能够处理海量、复杂且具有不确定性的数据。例如，在特征提取方面，深度学习算法可以自动从大量的电力数据中提取有效的故障特征，无须人工进行复杂的特征工程；在模型泛化方面，机器学习算法能够根据不同的运行工况和故障场景，自适应地调整诊断模型，提高诊断的准确性和可靠性等。利用这些技术，可以有效解决新型配电网故障诊断中面临的难题，实现故障的快速、精准诊断，保障配电网的安全稳定运行。

从相关书籍的现状来看，目前市面上关于新型配电网故障诊断的书籍虽然不少，但将新一代人工智能技术深度融合并进行系统阐述的书籍相对匮乏。部分书籍仅简单提及人工智能在配电网故障诊断中的应用，缺乏深入的理论分析和算例验证研究；一些书籍侧重于传统的故障诊断方法，未能充分体现新一代人工智能技术的优势和潜力。本书系统且全面地阐述基于新一代人工智能技术的新型配电网故障诊断的理论、方法与应用，为电力领域的研究人员和技术人员提供参考。

本书的撰写汇聚了众多研究人员的智慧与心血。其中，谭颖捷、杨雪凤、张永杰、刘畅宇等研究人员提供了大量的文字材料。全书由罗国敏、王小君审阅、修改和统稿，尚博阳负责整理。此外，张一帆和茹嘉昕也参与了本书的部分工作，在此一并向他们的辛勤付出表示感谢。

我们衷心希望本书能够为电力系统故障诊断领域的科研人员开拓新的研究思路，

为电力工程师在实际工作中攻克配电网故障诊断难题提供有力的技术支撑，激发他们对电力系统智能化发展的探索热情。

尽管本书内容历经多次讨论、修改，但由于作者水平有限，书中难免存在不足，诚望广大读者不吝赐教，以便我们在后续研究和实践中不断完善。

罗国敏

2025 年 3 月

目 录

第 1 章 新型配电网故障诊断概述	1
1.1 引言	1
1.2 配电网故障诊断理论与方法	2
1.2.1 基于物理表征的故障诊断方法	3
1.2.2 基于数学变换的故障诊断方法	5
1.2.3 基于数据驱动的故障诊断方法	6
1.3 问题凝练与解决方案	7
1.3.1 新型配电网故障诊断问题提出	8
1.3.2 新型配电网故障诊断意义凝练	9
1.3.3 基于人工智能的故障处理方法的基本原理	9
第 2 章 基于人工智能的新型配电网故障检测方法	11
2.1 引言	11
2.2 基于多角度特征融合的配电网高阻接地故障检测方法	12
2.2.1 高阻接地故障特征分析	12
2.2.2 故障特征样本库构建	17
2.2.3 检测模型及应用流程	18
2.2.4 算例分析	21
2.3 基于度量元学习的小样本场景下高阻接地故障检测方法	26
2.3.1 小样本度量元学习分类理论	26
2.3.2 多域特征融合的信息表征结构	29
2.3.3 基于度量元学习的故障检测模型	30
2.3.4 算例分析	35
2.4 本章小结	38
第 3 章 基于人工智能的新型配电网故障选线方法	39
3.1 引言	39
3.2 基于空洞卷积神经网络的配电网选线方法	40

3.2.1	单相接地故障特性分析	40
3.2.2	空洞卷积神经网络模型构建	41
3.2.3	故障选线应用流程	42
3.2.4	算例分析	43
3.3	基于领域自适应迁移学习的配电网故障选线方法	46
3.3.1	领域自适应迁移学习简介	46
3.3.2	基于领域自适应的配电网选线模型	48
3.3.3	小样本场景下故障选线应用方案	50
3.3.4	算例分析	52
3.4	本章小结	58
第 4 章	基于人工智能的新型配电网故障区段定位方法	59
4.1	引言	59
4.2	基于图卷积网络的配电网故障区段定位方法	59
4.2.1	图论角度的配电网拓扑信息分析	60
4.2.2	图卷积网络配电网故障特征表达	63
4.2.3	基于图卷积网络的故障区段定位模型	65
4.2.4	算例分析	67
4.3	基于图注意力网络的配电网故障区段定位方法	70
4.3.1	考虑注意力机制的图注意力网络	70
4.3.2	适用于配电网重构的图注意力网络故障定位模型	73
4.3.3	改进的注意力调节机制	76
4.3.4	算例分析	76
4.4	本章小结	82
第 5 章	基于人工智能的新型配电网故障精准测距方法	83
5.1	引言	83
5.2	基于 BP 神经网络和三相注入的配电网故障测距方法	83
5.2.1	基于单端注入法的故障特征分析	83
5.2.2	BP 神经网络设计	90
5.2.3	基于反射脉冲特征提取的故障测距应用	93
5.2.4	算例分析	103
5.3	基于堆叠式自编码器的配电网故障测距方法	106

5.3.1 配电线路故障特性分析	106
5.3.2 基于堆叠式自编码器故障测距模型	109
5.3.3 定位流程及参数分析	112
5.3.4 算例分析	119
5.4 本章小结	122
参考文献	123
后记	132

第1章 新型配电网故障诊断概述

1.1 引言

自我国明确提出“双碳”目标，各行业部门积极推动能源体系向绿色、低碳、可持续方向转变，诸多政策文件相继出台，为能源转型与“双碳”目标实现提供保障与指引，促使能源行业在技术创新、结构调整等方面不断探索^[1,2]。其中，电力作为清洁、高效的二次能源，必将以核心身份之一在现代能源体系的建设中扮演重要角色^[3,4]。保障电力和电网的安全稳定输送与运行，是“双碳”目标启航阶段关键时期电力行业的重大历史使命。为此，国家能源局在2021年底印发了《电力安全生产“十四五”行动计划》，明确指出到2025年底，电力安全治理体系基本完善，治理能力现代化水平明显提升^[5]，在能源消费增长迅猛的窗口期和能源发展的新阶段，消除风险隐患，保障电力安全发展。配电网作为面向用户的电能输送平台，负责从电源侧（输电网、发电设施、分布式电源等）接收电能，通过配电设施就地或逐级分配给各类用户，是推动可再生能源大力发展、提高电能终端消费占比等方面的核心载体^[6,7]。因此，进一步提升配电网保护水平已然成了支撑新型配电网建设的关键任务之一。

传统配电网中故障的诊断与清除大量依赖逐级跳闸与人工拉路选线的方式，导致故障引起的停电范围广、时间长。由于我国长期以来对电力系统“重发输、轻配用”的发展模式，配电侧可视化与自动化水平有着明显短板。自国家能源局发布和实施《配电网建设改造行动计划（2015—2020年）》以来，配电网运行监测、控制能力明显提高，自动化建设显著加快，同时，配电通信网也进行了同步的规划与建设，预计配电自动化覆盖率和配电通信网覆盖率分别从2014年的20%和40%提升到90%和95%^[8]。目前，随着改造建设各级配电网的稳步推进，其故障诊断、定位和隔离时间不断缩短，供电可靠性得到了显著改善，但在智能化、数字化水平日益提升的大背景下，如何利用海量数据信息实现配电网快速、可靠的故障诊断与定位成了未来配电网发展的一个重要课题^[9]。

在目前的配电网故障保护中，以三相故障、两相故障和中性点有效接地方式下的单相接地故障为主的大电流接地故障因故障电流变化显著，可在现有保护中有效识别并动作，故障诊断的准确性和可靠性只与配电自动化建设水平有关。但是，中性点不接地与经消弧线圈接地方式下的小电流单相接地故障（统称为小电流故障）以及经弱导电性复

杂介质接地的高阻故障，因其故障电流小、故障特征微弱，往往难以达到保护动作阈值，但在带电运行过程中，弱特征故障会影响设备寿命，引起火灾甚至人身伤害等风险，并逐步发展为两相故障和多相故障，成为重大事件或事故隐患，造成严重损失^[9-13]。因此，2017 年国家电网有限公司发布的《配电网技术导则》（Q/GDW 10370—2016）中将小电流接地故障从传统的“持续运行两小时”改为躲过瞬时接地故障后快速就近隔离故障原则^[14]；在《电力安全生产“十四五”行动计划》中，电力安全事故与电力安全事件也成了关键指标，要求分别达到五年总起数 ≤ 3 起和五年平均起数 ≤ 4 起。可以看出，我国对配电网保护的要求正不断提升，快速有效的弱特征故障诊断成了进一步提升保护水平的关键。

与此同时，配电网发展建设呈现出了明显的数字化与智能化趋势，国家能源局发布的《配电网规划设计技术导则》（DL/T 5729—2023）中，对配电网的智能化建设提出了基本要求，包括智能终端、配电通信网、配电网业务系统、信息安全防护等多个方面，并对边缘智能终端装置、故障下自动化系统智能处理等方面进行了补充说明^[15]，逐步对未来新型配电网的软硬件环境进行布局完善。结合近年来云计算、边缘智能、工业物联网的高速发展，国家电网提出的泛在电力物联网雏形正不断形成，南方电网规划的“数字南网”也在持续建设并成立了南方电网数字电网研究院股份有限公司。我国电网处于数字化升级转型过程中，如何合理建设电力系统大数据、多信息的交互管理平台，形成有效的数字应用方式，是新时代电网面临的一大挑战^[16-21]。

综上可知，在“双碳”目标启航、强抓电力安全、配电网升级转型的重要阶段，结合配网自动化的快速发展机遇，研究基于数据驱动、结合云计算和边缘智能协同的配电网弱特征故障诊断方法，能进一步提升配电网的安全可靠运行水平，保障新型电力系统的现代化建设，同时以配电网故障诊断为切入点对电力领域的数字化、智能化建设进行探索，具有很强的现实意义。

1.2 配电网故障诊断理论与方法

在配电网中，故障诊断是一个相对宽泛的概念，广义上讲，包括从故障发生时的故障检测到故障的选线以及区段定位等，整个过程均可看作故障诊断的范畴，差异在于故障诊断的针对对象和精度范围。对于配电网弱特征故障诊断问题，虽然小电流接地故障和高阻接地故障（high impedance fault, HIF）有着不同的故障特征形态，但按照原理不同，可将配电网弱特征故障诊断方法分为基于物理表征、基于数学变换和基于数据驱动三种类型。其中，基于物理表征的故障诊断方法主要通过对相关物理量特征的建模分析和差异性描述实现故障诊断；基于数学变换的故障诊断方法通过各类非线性变换提取和

增强故障特征进而实现故障诊断；基于数据驱动的故障诊断方法则是利用历史数据学习生成某种特定的分类或回归模型达到诊断的目的。下面将对这三类弱特征故障诊断方法的研究现状进行分析。

1.2.1 基于物理表征的故障诊断方法

对配电网弱特征故障通过物理模型还原、电气关系推导、波形行为刻画等方式进行表征区分进而实现诊断的方法称为基于物理表征的故障诊断方法，其具有机理清晰、特异性强的特点。

在小电流接地故障方面，从稳态量利用角度出发，中性点不接地系统的小电流接地故障利用对称分量法转化为序网络，非故障线路零序电流为线路本身的对地电容电流，方向由母线流向线路，故障线路零序电流数值为其他非故障线路的对地电容电流之和，方向由线路流向母线，与非故障线路相反；中性点经消弧线圈接地的小电流接地故障受补偿方式影响，故障线路的零序电流与补偿的电感电流有关。基于该原理，开发出了零序电流比幅法、比相法和比幅比相法几种典型方法。单纯比幅法无法区分母线故障；比相法虽灵敏度相对较高，但在经消弧线圈接地的配电网中常用的过补偿方式下无法适用；比幅比相法结合两种方法准确度有所提升，但在采用消弧线圈完全补偿时无法判别，且在电流互感器不平衡电流的影响下无法进行有效选线^[22, 23]。此外，利用功率进行小电流故障诊断也是一类基于稳态量的常见方法，包括零序有功功率法^[24]、零序无功功率方向法^[25]等。零序有功功率法分量比例小，在实际中存在提取困难的问题，而零序无功功率方向法与电压电流比相法同样受消弧线圈补偿的影响，难以适用于过补偿方式下的小电流故障诊断。除利用零序电流和零序功率以外，还有基于五次谐波分量^[26]的小电流故障诊断方法，但由于五次谐波分量幅值小且不稳定，在实际应用中已被逐步放弃；也有学者专门针对配电网三相不对称问题，提出了基于三相电压幅值信息的故障相识别方法^[27, 28]。

由于小电流故障发生引起的稳态量变化小，一类通过外加设备配合或特定信号注入并利用带来的附加信号进行诊断的主动式稳态量法被提出。其中，中电阻法^[29]、残留增量法^[30]等通过在永久接地故障情况下在配电网中性点投入适中阻值的接地中电阻、改为自动随调控制消弧线圈等方式，产生额外的附加电流实现故障诊断，随着电力电子技术的发展，该方法逐步演变为将高可控性变换器应用于接地线路中的柔性接地技术来提升配电网稳定运行水平^[31]；特定信号注入法包括间谐波注入法、S 信号注入法等，利用注入信号引起的故障特征量或其他特异耦合量变化进行诊断^[32, 33]。但主动式稳态量方法只适用于永久性故障，对于间歇性故障或含有不稳定电弧的故障无法适用，且易对运行安全性造成影响，实际应用仍有待进一步研发。

在小电流故障情况下,故障暂态量相较于稳态量而言特征差异更为明显且受消弧线圈影响小,因此,基于暂态量利用的诊断方法往往更具灵敏性和可靠性的优势。其中,首半波法、暂态零模电流极性法、暂态无功功率方向法、暂态零序电流群体比幅比相法等是几种典型的诊断方法^[22]。首半波法^[34]是利用第一个暂态半波内暂态零模电压与非故障线路零模电流极性相同,但与故障线路零模电流极性相反的原理进行故障判别,但受电网参数对暂态频率的影响,该极性关系成立的时间较短,往往只有不到 1 ms 的时间区段,实际中诊断实现较为困难。暂态零模电流极性法的原理是检测线路上暂态零模电流与零模电压导数的极性关系,利用故障线路上始终反极性而非故障线路上为同极性的差异进行诊断,能有效弥补首半波法适用时段的缺陷。暂态无功功率方向法与暂态零模电流极性法原理类似,利用的是暂态无功功率在线路上的流向进行诊断。而暂态零序电流群体比幅比相法比较各出线暂态零模电流幅值或极性关系从而进行判别,通过故障线路与其余非故障线路上的差异进行诊断,适用于两条出线以上的配电网结构^[35, 36]。为提升适用性,综合多种暂态量也是应用中一种有效的方式^[37, 38]。在对典型故障暂态量分析的基础上,多种基于其他暂态量关系的方法也不断被提出,如基于暂态能量提出了零序电流首容性分量能量法,通过辨识暂态零序电流的首容性频段区分故障^[39, 40];通过多时态下的矢量关系提出了三相增量电流法,利用暂态下增量电流特征关系确定故障^[41];利用小电流接地系统暂态电流频率特性,提出了暂态高频分量法,利用相对熵系数矩阵辨识故障线路^[42];利用故障点上下游同侧暂态波形相似度高的特点,提出了暂态零模电流相关性法^[43]、暂态零序电流幅值分布相似性法^[44]、暂态功率-余弦相似性法^[45]和互近似熵法^[46]等,通过相似性差异确定故障区段。在暂稳态量结合的基础上,提出了电流-电压导数线性度关系法^[47]、暂态分界法^[48]等,通过暂稳态分量结合分析实现故障选线。此外,还有一类基于行波的故障诊断方法,利用故障初始电流行波的折反射形成的暂态信号进行判别,其原理与暂态电流法类似,可以构造基于行波的比幅、比相等诊断方法^[49-51],但由于配电网出线线路长度较短,电气关系成立的持续时间往往在微秒级,同时需要专门配置额外的行波板卡,在实用性和经济性方面略逊于其他暂态量方法。

对于配电网高阻故障,由于不同的中性点接地方式、接地介质材料、含水量等因素的影响,其故障特征复杂,往往呈现电弧特性并伴随大量随机性波动和特征畸变^[10, 52, 53],需要对故障本身进行建模并结合电网进行特定分析,根据侧重点不同,可将基于物理表征的配电网高阻故障诊断方法分为中性点接地方式敏感型、高阻接地介质敏感型和电弧畸变特征敏感型。中性点接地方式敏感型主要通过某种特定中性点接地方式下分析高阻接地故障引起的电气量特征变化进行故障诊断,主要针对中性点经小电阻接地^[54-61]、中性点不接地^[62-66]和中性点经消弧线圈接地^[67-78]等接地方式下的配电网,从暂态角度分析,在中性点经小电阻接地系统和中性点不接地系统中,零序电压与零序电流由随着接

地阻抗变化的稳态正弦分量和衰减的直流分量组成,经小电阻接地系统相较于不接地系统具有更大的衰减系数,暂态过程更短,且暂态过程的出现与故障初相角有关。在中性点经消弧线圈接地系统中,由于补偿方式的不同,过补偿情况下暂态电压和电流为衰减的直流分量,而在欠补偿情况下为衰减的交流分量,衰减过程同样受过渡电阻的影响^[12]。对于稳态量特征,由于配电网中的高阻接地故障阻值可达几百欧到数十千欧,故障电流往往只有数安培,直接利用零序电压、零序电流等特征值电气关系的诊断方法可靠接地阻抗范围有限(通常在 $1000\ \Omega$ 以内),且易受三相不平衡和其他扰动的影响^[62, 79, 80]。因此在不同接地方式下经其他特异性特征量判别是该类型诊断方法的研究重点,典型的有如小电阻接地系统下的零序电压幅值修正零序电流差动法^[54]、零序电流中性线投影法^[55, 59]、综合内积值法^[57],不接地系统下的高频谐波法^[63]、功率因数突变法^[62],以及谐振接地系统下的谐波群体比相法^[71]、五次谐波法^[72]、暂态电流投影法^[70, 77]、相电压极化量方向法^[68]、零序阻抗突变特征法^[69]等。此外,还有基于信号注入法^[81, 82]和行波法^[50, 83]等相关研究。高阻接地介质敏感型主要针对某种特定接地介质进行故障建模与分析以达到故障诊断的目的,典型的有经树木接地^[84, 85]、经水下电缆接地^[86]、经生物体接地^[87]等,通过对不同接地介质特性进行具体的阻抗特征和电弧特性模型分析,能有效地提升针对特定类型高阻接地故障情况的诊断效率。电弧畸变特征敏感型主要根据电弧特性刻画和由电弧引起的特异性畸变描述来对高阻接地故障进行判别,主要包括在时频域上电弧过零畸变、不对称畸变、间歇性燃熄弧等特性的特定表征,是针对弧光高阻接地故障的一类专门判别方法。根据弧光高阻接地故障时伏安特性曲线在故障线路呈阻性畸变、非故障线路呈容性畸变的特征,提出基于高阻接地故障伏安特性畸变的高阻接地故障诊断方法^[88-93]。基于混沌思想的相空间重构能构建反映故障电流非线性变化过程的相平面重构轨迹,可依据电弧引起的形态坍塌差异实现高阻接地故障的判别^[94];依据对故障电流波形畸变形态、位置、程度等特征的描述分析,形成了一类基于波形畸变的高阻接地故障诊断方法,具有更高的检测灵敏性^[11, 95-99]。但由于电弧过程的复杂性和随机性影响,根据单一特征量的高阻接地故障诊断在实际应用中的泛化能力有待验证。

1.2.2 基于数学变换的故障诊断方法

为进一步增强故障特征的差异性,提升故障诊断方法的泛化能力,形成了一类基于数学变换的弱特征故障诊断方法。该方法通过应用和结合不同的数学变换方式对故障非线性特征进行表达,进而通过差异描述达到故障诊断的目的。应用于配电网故障诊断中的典型数学变换方法为各类域变换,其中,以傅里叶变换^[100]、小波变换^[101-106]、S变换^[107]等为主的基于基函数进行分解的时频域变换方法通过挖掘信号中的时频特性信息进行故障诊断,而小波变换因其对突变信息表达灵活的特点,又衍生出其他基于经验小

波变换^[108]、小波能量矩^[109]等算法的故障诊断方法。以经验模态分解^[110, 111]、变分模态分解^[112-114]等为主的模态分解法通过自适应分解得到故障信号的本征模态分量, 通过该时频特征的描述差异或进一步通过希尔伯特-黄变换^[115-118]、Teager 能量算子^[119, 120]等来求解瞬时频率特征表达变化, 以实现弱特征故障判别的目的。此外, 还有一类基于数学形态学的数学变换方法, 通过预定义结构对信号进行腐蚀和膨胀、开运算和闭运算的组合处理以提取关键细节信息, 通过变换后的特征差异进行弱特征的故障诊断^[121, 122]。除根据某类变换后单一特征值诊断的方法以外, 也有学者利用特征选择联合多特征值来提升故障诊断算法的可靠性^[123, 124]。

在基于数学变换的弱特征故障诊断方法中, 仍要先从故障引起的电气量或物理量表征入手, 且往往是针对故障电压或电流波形信号进行分析。主要原因为故障波形中包含丰富的突变和暂态信息, 数学变换方式的主要作用就是提取并增强其中能表征故障的对应特征, 而由故障引起的突变电气量常在特定集中频带中有较为明显的变化差异, 因此, 合适的时频变换特征能有效地对故障的微弱特征进行提取放大, 进而进行针对性的判别。但由于数学变换方法的特性, 此类方法无法直接给出故障诊断的最终结果, 需要根据变换后的特征进行进一步的判据分析与设定以建立完整的弱特征故障诊断方法。

1.2.3 基于数据驱动的故障诊断方法

对于基于物理表征和数据驱动的故障诊断方法, 往往需要根据经验或仿真分析设定阈值, 但对于弱特征故障诊断问题, 特征值的阈值设定往往是灵敏性与可靠性之间的博弈, 因此固定阈值对其实际应用会有一定局限性, 且在部分方法中会限制其在不同配电网中的泛化能力。而基于人工智能的弱特征故障诊断方法因无须设定阈值、泛化能力强的特点, 已成为一类研究焦点并进行了部分应用探索^[125]。

该类方法以监督式学习为主, 其核心思路为通过利用带标签的历史特征数据训练一个用来进行弱特征故障诊断的分类或回归模型。监督式学习中最为常见的是基于各类神经网络的弱特征故障诊断方法, 神经网络是根据模拟人工神经元联结、仿照生物神经网络搭建的计算模型, 具有针对非线性映射的自学习能力。其中, 最经典的为基于反向传播神经网络的弱特征故障诊断方法^[35, 126]。针对不同输入特征的形态与模型应用的差异, 神经网络发展出了大量变种, 如为提升收敛速度, 提出的基于概率神经网络的高阻接地故障选线方法^[116]等。在浅层人工神经网络的基础上, 近年来提出的各种深度学习算法通过多层结构堆叠组合模拟多层次神经元结构, 可以更好地学习样本数据的内在规律和表示, 在计算机视觉、自然语言处理等领域取得了大量成就, 而在弱特征故障诊断中的应用也在不断探索。在监督式学习分类中, 为增强对二维结构矩阵数据的特征提取能力,

提出了基于卷积神经网络的弱特征故障诊断方法等^[127-129]；也有学者提出了基于深度置信网络的小电流故障诊断方法，通过以受限玻耳兹曼机为元件组成的概率生成式神经网络来识别特征差异^[130]。这些以监督式深度学习网络为基础的故障诊断算法能提取到更深层次的数据特征，有着广泛的应用发展前景。在神经网络结构之外，支持向量机作为一种典型的二分类器，因其相对简单快速的训练速度和明确的数学意义，也是常见的基于监督式学习的故障诊断算法之一^[131-134]；长短时记忆网络具有独特的结构设计，在对于以序列形式表征的故障特征处理问题上，基于长短时记忆网络的故障诊断方法也有着良好的效果^[135]。

然而，典型的监督式学习算法往往需要大量带标签的历史数据进行模型训练来学习特征与标签之间的非线性映射关系，但在实际配电网中，可供训练学习的历史弱特征故障数量较少，且得到的模型往往针对的是某一具体配电网场景，在不同配电网拓扑和结构下的泛化能力存在不足，甚至需要进行重新训练。为解决这些问题，部分学者也进行了一定的探索。其中，基于图结构的图神经网络可在保留数据样本图关联关系的基础上提取深层信息，能有效地提升对配电网这类以拓扑为载体的特征信息的处理能力，如基于图卷积神经网络的故障定位方法^[136, 137]；有学者在此基础上提出了基于图注意力网络的故障定位方法，能有效提升在不同拓扑上模型的泛化能力^[138]。针对可用历史故障数据不足的小样本问题，文献[139]提出了一种基于半监督式学习的高阻接地故障诊断方法，通过结合对无标签数据的利用来减少对故障数据样本的依赖程度；迁移学习是一类通过已有模型迁移到目标领域进行应用的方法，借助已有模型对数据一定的处理能力来减少目标域中的训练样本需求，是解决小样本问题的一个重要可行方向^[140]；还有一类基于非监督式学习来提取深层非线性特征进而实现故障诊断的方法，在应用过程中无需带标签数据或仅需少量监督数据进行微调，如文献[141]提出了一种基于非监督式深度学习中堆叠去噪自编码器的小电流故障选线方法等。

1.3 问题凝练与解决方案

配电网具有网络结构复杂、分支线路繁多、运行环境恶劣、运行方式多样等特点，因此在实际运行中线路故障频发、故障点隐蔽，导致故障排查困难，故障处理周期较长，影响供电可靠性。因此，如何在第一时间检测和定位故障点是迅速恢复系统供电和保障配电网可靠性的核心需求。从故障定位的发展历程可以看出，无论感知技术、通信技术还是数据处理技术如何应用和提升，都是围绕快速、准确查找故障点这一核心需求来开展的。如1.2节所述，考虑新型配电网故障诊断定位问题的关键挑战在于高不确定性故障机理现状与高准确性故障定位需求之间的对立。其中蕴含的核心科学问题即运行不确定性的配电线路故障诊断确定性问题的求解。

1.3.1 新型配电网故障诊断问题提出

针对上述科学问题,本书尝试采用新一代人工智能技术弥补和缩小不确定性的影响,配电网故障诊断必然面临以下三方面的难点。

(1) 如何明晰配电网多重运行不确定性对故障特性的影响。传统电力系统以交流骨干电源、局部电网为主。当分布式能源广泛接入时,电网运行特性的随机性极大增强。直流环节的加入,使得网络的拓扑和电源结构发生变化,故障分析方法和电气量不同于传统电网,且容易发生连锁性故障,故障特征在时间空间域中由线性分布转为非线性分布。不同特性电网的互联使不同区域间的耦合特性增加,故障电气量的变化特性和传播过程不同于传统电网,出现多时序、多参数和多节点耦合的复杂非线性故障演化机理。传统基于线性规则、阈值以及浅层机器学习的分类和回归方法,在故障分析及定位性能上存在一定的不足。如何利用新一代数据驱动技术学习和构建知识表示的表征策略,避免人为设计环节误差的累积,提高对系统中故障特征不确定性的刻画能力是需要解决的第一个难点。

(2) 如何兼顾物理机理特征与数据知识表征对模型设计的需求。电力系统故障诊断定位依赖于故障特征的有效提取和故障信息的准确预测,也就是物理模型和数据模型的精准配合。由于系统结构越来越复杂,物理模型的建模和分析缺乏对故障全响应过程和机理的深度解耦,模型准确度略显不足。另外,缺乏准确的物理模型,分析和诊断的数据模型中相应的特征选取和算法设计难度增加,数据模型对分析及定位的快速性、可靠性、准确性等多样化的需求难以兼顾,判别结果易受影响。同时,传统故障诊断定位方法依赖数据预处理、特征提取、浅层机器学习模型等多个环节,每个环节的误差容易累积,使得最终的诊断判别结果准确率不高。如何利用新一代数据驱动技术根据电气物理信息定制化设计数据模型,增强机理与数据知识的融合共济,提高故障诊断定位模型的准确性和鲁棒性是需要解决的第二个难点。

(3) 如何提升模型在不同样本数据与现场应用条件下的泛化性能。随着配电物联网的建设,配电网采集的数据来源越来越多样化、规模也越来越庞大,但是所采集的大部分数据都是正常运行数据,故障数据少。即使数字配电网的发展使得可依赖的数据集增多,但对于真实数据的有效维度依然处于劣势。同时,人工智能的故障诊断高度依赖历史数据训练,而配电网故障特征与拓扑结构和网络参数之间强相关。从仿真模拟测试到真实现场测试阶段面临着数据集分布的改变,这使得高度依赖历史数据训练的人工智能模型需要被重新训练,甚至直接失效。依靠单一配电网年故障历史数据难以达到支撑机器学习模型大数据训练的量级,配电网故障诊断定位问题是一个典型的小样本问题。如何利用新一代数据驱动技术挖掘故障诊断定位的共性知识,通过迁移共性知识和增强本地个性知识,提高模型在不同样本条件下和运行环境中的适应性是需要解决的第三个难点。

1.3.2 新型配电网故障诊断意义凝练

针对上述一个科学问题和三个技术难点,本书重点围绕配电线路故障诊断定位任务中“故障检测—故障选线—区段定位—精准测距”四大环节开展相关机理分析和理论技术探讨,为后续研究以及智能化故障诊断定位辅助决策工具研发提供理论和技术支撑。

从需求来看,在新型配电网建设的支持下,运行系统方式不确定性、运行拓扑场景不确定性和运行分支线路不确定性使得故障交互耦合机理难以被精确解析,故障诊断精度有待进一步提升。此外,虽然目前我国各地区省级电网、重点城市均建有智能诊断平台,但多数核心的高级应用功能尚未开发完全,缺乏为调度员或运行维护人员提供科学的诊断或定位的辅助决策工具。

从效果来看,基于本书的研究成果可以开发配电网诊断辅助决策工具,为配电网的可靠运行及快速定位故障点提供科学支持。整合和有效利用配电网内现有数据资源,逐步开展故障机理分析、故障检测分类以及故障点定位研究,对减小停电损失、提升电网可靠性、维护社会稳定、保障电网安全意义重大,具有显著的经济和社会效益。

1.3.3 基于人工智能的故障处理方法的基本原理

基于数据驱动的配电网故障诊断定位方法可以在不依赖系统模型和知识的条件下对复杂非线性问题进行有效分类,无须设定阈值,为解决不确定性故障环境下的高精度诊断定位提供一种新的思路。人工智能技术堪称数据驱动领域的集大成者,其采用海量数据监督学习模式,构建故障特征与诊断定位结果之间存在的非线性关系,以代替精确的数学模型判定,得到了广泛关注。

国务院印发的《新一代人工智能发展规划》指出人工智能的发展是重大的战略机遇,将新一代人工智能引入配电网的故障分析与诊断定位已成为一种趋势。已有多数研究人员相继提出贝叶斯网络、随机森林、支持向量机等故障诊断定位方法,且准确率不断提升。但传统的人工智能方法大多为浅层算法,数据分析能力弱,解决复杂高维度的分类回归问题存在困难。以深度学习为典型代表的新一代人工智能技术具备强大的非线性拟合与特征表达能力,可以从多源异构或非结构化的数据中提取出配电网故障的判别信息,实现更加精准的故障诊断和故障定位,逐步成为一个重要的研究方向。目前应用较多的主要有基于自编码器、卷积神经网络、长短时记忆网络等深度学习算法的配电网故障诊断方法。数据样本扩充、迁移学习和元学习等技术的发展,使得新一代人工智能技术可以更好地契合新态势下的配电网故障诊断和定位。

电力系统故障分析及定位问题本质上是分类和回归问题。传统故障分析及定位在物理模型建模和故障特性分析的基础上,选取和设计具有代表性的特征来表征故障特点,

再利用算法区分和计算判别结果。基于人工智能的方法是将人工智能模型作为“黑箱”来拟合输入（故障特征）与输出（判别结果）之间的映射关系。与传统识别方法不同的是诊断定位依据由包含大量数据知识的人工智能模型确定。具体地，给定电气信息 x_e （其对应类别标签为 y ），通过人工智能模型预测得到预测标签 $\tilde{y}$ ：

$$\tilde{y} = f(x_e, \theta) \tag{1-1}$$

式中， f 为具有分类回归知识的人工智能模型； θ 为大量数据样本训练得到的模型参数。

因此，基于人工智能的故障诊断定位主要分为两个阶段：训练阶段和应用阶段。如图 1-1 所示，训练阶段通过在数字空间训练大量的故障样本以生成包含分类知识的人工智能模型；应用阶段将上述人工智能模型移植应用到真实的物理空间预测电气信息对应的标签。无论训练阶段还是应用阶段，在人工智能模型得出预测标签的过程中都要经历电气信息表达和预测模型泛化两个步骤。电气信息表达是将数据电气量通过某些特征表示手段进行提取表达。常见的特征表示手段是将电气信号通过信号处理方法（如小波变换、傅里叶变换和希尔伯特-黄变换等）进行特征凸显，从而使用一定的规则进行数据特征库的构建。预测模型泛化主要体现在应用阶段。一些学者训练分类知识足够丰富的识别模型，通过非迁移手段直接应用到目标空间中；也有学者通过半监督学习、迁移学习和元学习等策略在目标空间通过微调和更新，构建一种具有足够精度和鲁棒性的故障诊断定位模型。

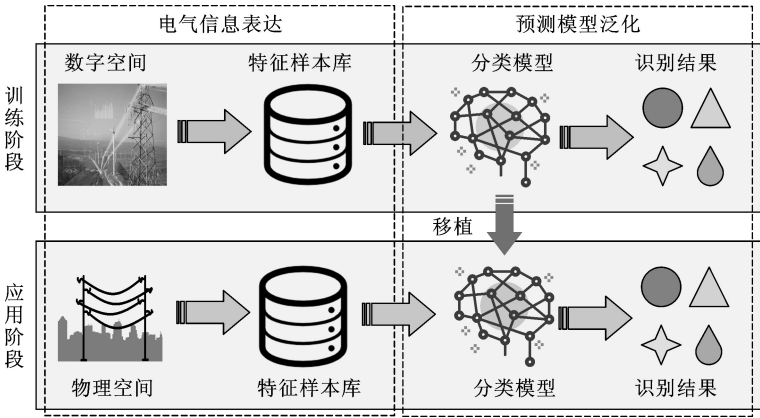


图 1-1 基于人工智能的配电网故障诊断定位范式示意图

综上所述，本书在挖掘故障电气机理的基础上，将数据扩充算法、深度学习模型和现代信号处理等数据驱动技术引入配电网故障诊断之中，从多源异构或非结构化的数据中预测判定故障信息，实现更加精准的诊断。