

量子计算在输配电线路状态评估与故障诊断中的应用探索

李雅瑞

(国网山西送变电工程有限公司)

【摘要】文章聚焦量子计算在输配电线路状态评估与故障诊断中的应用。首先介绍量子计算的基本概念、算法及其与经典计算的差异,同时阐述输配电线路的运行原理、常见故障类型、状态评估指标体系和故障诊断方法,进而构建基于量子计算的输配电线路状态评估与故障诊断模型,包括数据采集处理、模型选择设计、训练优化,以及故障特征提取、量子编码和模型性能评估对比。研究表明,量子计算能提升输配电线路状态评估和故障诊断的效率与准确性,为电力系统智能化运维提供新路径,对保障电力供应稳定性意义重大。

【关键词】量子计算;输配电线路;状态评估;故障诊断

中图分类号:TM726

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.154

Exploration of the Application of Quantum Computing in State Evaluation and Fault Diagnosis of Transmission and Distribution Lines

LI Ya-rui

(State Grid Shanxi Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd.)

【Abstract】The article focuses on the application of quantum computing in the state evaluation and fault diagnosis of power transmission and distribution lines. Firstly, it introduces the basic concepts, algorithms, and differences between quantum computing and classical computing. At the same time, it elaborates on the operating principles, common fault types, state evaluation index system, and fault diagnosis methods of power transmission and distribution lines. Furthermore, a quantum computing based model for state evaluation and fault diagnosis of power transmission and distribution lines is constructed, including data acquisition and processing, model selection and design, training optimization, as well as fault feature extraction, quantum coding, and model performance evaluation and comparison. Research has shown that quantum computing can improve the efficiency and accuracy of state assessment and fault diagnosis of power transmission and distribution lines, providing a new path for intelligent operation and maintenance of power systems, and is of great significance for ensuring the stability of power supply.

【Keywords】quantum computing; power transmission and distribution lines; state assessment; fault diagnosis

1 引言

输配电线路作为电力系统的核心组成部分,其安全稳定运行是保障电力可靠供应的关键。量子计算作为前沿新兴技术,凭借独特计算原理与超强并行计算能力,为输配电线路领域研究开辟了全新路径。本文聚焦量子计算在输配电线路状态评估与故障诊断中的应用探索,通过深度融合量子计算理论算法与输配电线路专业知识,构建高效精准的评估诊断模型,为电力系统智能化升级提供坚实理论支撑与技术借鉴。

2 量子计算基础理论与算法

2.1 量子计算基本概念

量子计算是依托量子力学原理的全新计算范

式,利用量子比特的量子叠加特性,使其可同时处于0、1及任意叠加态,让量子计算机能在单次操作中并行处理多个任务,大幅提升计算效率。此外,量子纠缠是另一核心特性,处于纠缠态的量子比特存在强关联性,任一状态改变都会引发其他量子比特瞬间同步响应。通过量子门操作调控量子比特状态,可实现复杂逻辑运算。量子计算的独特性质,为解决复杂问题、处理大规模数据开辟了全新路径。

2.2 量子算法介绍

量子算法是释放量子计算优势的核心支撑。Shor 算法作为经典代表性算法,能在多项式时间内完成大整数分解,这是经典算法难以实现的突破,既对传统加密系统构成挑战,也为密码学创新发展带来新契机。Grover 算法适用于非结构化数据库搜

索,可将搜索速度提升至经典算法的平方根级别,显著缩短海量数据搜索耗时。量子模拟算法能高效模拟量子系统行为,在化学、材料科学等领域具有重要应用价值。这些算法充分彰显了量子计算在特定问题上的巨大潜力,为各领域研究提供强劲技术支撑。

2.3 量子计算与经典计算的对比

量子计算与经典计算存在显著差异。经典计算基于二进制逻辑,通过晶体管开关状态表征0和1;量子计算则依托量子叠加与纠缠特性,量子比特可处于多状态并行处理信息。计算能力上,量子计算在处理大整数分解等复杂问题时具备指数级加速优势;经典计算则具有技术成熟、运行稳定、应用场景广泛的特点。

3 输配电线路状态评估与故障诊断

3.1 输配电线路运行原理与常见故障类型

输配电线路是电力系统中电能输送与分配的核心载体,承担着将发电厂电能输送至各用电区域的核心功能^[1]。输电环节通过高电压降低线路电流,有效减少电能损耗;配电环节则将输电电压降压后精准分配给各类用户。线路常见故障类型包括短路故障、绝缘子故障等,此类故障不仅破坏电力供应稳定性,还可能引发设备损毁及安全事故。

3.2 状态评估指标体系

为精准评估输配电线路运行状态,需构建全面完善的指标体系,该体系需涵盖电气参数、物理状态及环境因素^[2]。电气参数(如电压、电流、功率)直接反映线路电能传输状态;物理状态指标(如导线温度、弧垂)决定线路机械稳定性;环境因素(如温度、湿度、风速)则影响线路运行安全性,具体指标体系如表1所示。

表1 指标体系表

指标类别	具体指标	正常范围示例
电气参数	电压	35kV线路:33kV~37kV
电气参数	电流	依线路设计和负载而定
物理状态	导线温度	不超过70℃
物理状态	弧垂	不同档距有对应标准
环境因素	环境温度	-40℃~40℃
环境因素	风速	不超过设计风速(如30m/s)

3.3 故障诊断方法概述

输配电线路故障诊断方法呈多元化发展。传统

方法中,基于电气量分析的阻抗法通过测量线路阻抗定位故障,但易受过渡电阻等因素干扰;行波法利用故障行波定位,精度较高但对设备要求严苛。机器学习方法通过学习海量故障数据实现故障类型与位置的精准诊断,然而这些方法在处理海量高维数据时,计算复杂度呈指数级增长。因此,探索新方法或多方法融合,成为提升故障诊断准确性与效率的关键^[3]。

4 基于量子计算的输配电线路状态评估模型构建

4.1 数据采集与处理

为构建基于量子计算的输配电线路状态评估模型,全面且准确的数据采集与处理是基础。利用电流互感器和电压互感器获取实时电流、电压数据,借助温度传感器监测导线温度,采用气象站采集环境温度、湿度、风速等环境参数^[4]。同时,从历史数据库中提取线路的历史运行数据和故障记录。采集到的原始数据往往存在噪声、异常值和缺失值等问题,需进行处理:运用滤波算法去除噪声,采用统计方法识别并修正异常值;对于缺失值,根据数据特点选择插值法或基于机器学习的方法填充。此外,需对数据进行归一化处理,将不同量纲的数据映射到统一区间,如公式(1)所示。

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{1}$$

式(1)中: x 为原始数据, x_{min} 和 x_{max} 分别为该数据特征的最小值和最大值, x_{norm} 为归一化后的数据,以提升数据质量,为后续模型训练提供可靠依据。

4.2 量子计算模型选择与设计

考虑到输配电线路状态评估的复杂性和量子计算的优势,选择量子神经网络(QNN)构建评估模型。量子神经网络结合了量子计算的并行性和神经网络强大的学习能力。在QNN中,量子比特作为基本单元,通过量子门操作实现状态变换。假设一个简单的QNN包含输入层、量子层和输出层。输入层将经典数据编码为量子态,设输入数据为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,通过编码操作 U_{enc} 将其转换为量子态 $|\psi\rangle = U_{enc}|x\rangle$ 。在量子层,量子比特经过一系列量子门 $U_1, U_2, \dots, U_m$ 的作用,实现对量子态的变换,即

$|\psi'\rangle = U_m \cdots U_2 U_1 |\psi\rangle$ 。最后,通过测量量子态得到输出结果,将其解码为经典数据用于状态评估。通过调整量子门的参数和网络结构,使模型能够学习到输配电线路状态与评估指标之间的复杂关系,实现精准的状态评估。

4.3 模型训练与优化

在完成量子计算模型设计后,需要对模型进行训练与优化。训练数据采用经过采集和处理的输配电线路相关数据,将其划分为训练集和验证集。训练过程中,定义合适的损失函数来衡量模型预测结果与真实状态之间的差异,例如均方误差损失函数。

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

式(2)中: N 为样本数量, y_i 为真实状态值, $\hat{y}_i$ 为模型预测值。采用量子梯度下降算法来更新模型参数,量子梯度通过对量子态的测量和计算得到。在训练过程中,不断调整量子门的参数,使损失函数逐渐减小;同时,利用验证集对模型进行评估,避免过拟合现象。通过多次迭代训练,优化模型的性能,使模型在输配电线路状态评估中能够更准确地反映线路的实际状态,为线路的运维和管理提供可靠的决策支持。

5 基于量子计算的输配电线路故障诊断模型构建

5.1 故障特征提取与量子编码

故障特征的精准提取与高效量子编码,是构建输配电线路量子故障诊断模型的核心环节。需深入分析故障相关各类数据,通过挖掘海量历史故障数据,提炼可区分不同故障类型的核心特征量,特征提取完成后,需对经典特征数据进行量子编码,将其转化为量子态。量子编码是实现量子计算处理特征数据的关键,可采用多种编码方式,使量子态精准表征特征信息,为后续模型运算提供适配输入。

5.2 量子故障诊断模型构建

基于量子计算原理与故障特征量子编码构建的量子故障诊断模型,依托量子计算并行处理能力与量子态独特特性,可大幅提升故障诊断的效率与精准度。模型由量子特征处理层、量子决策层及输出层构成:量子特征处理层对编码后的量子态进行针

对性处理,通过量子门操作实现量子态的变换与演化,提取高阶特征;量子决策层依据处理后的量子态完成故障类型与位置判断;输出层将量子决策结果转化为经典域诊断结论。模型构建过程中,需科学设计量子门连接结构与参数配置,确保模型能够充分学习故障特征与类型间的复杂映射关系;同时兼顾量子比特数量与纠缠程度调控,最大化发挥量子计算的核心优势。

5.3 模型性能评估与对比

为验证量子故障诊断模型的有效性与优越性,需对其性能评估并与传统模型对比。性能评估关键在于选合适指标,常用的有准确率、召回率、F1值。准确率体现模型正确诊断故障比例,召回率反映找出所有故障的能力,F1值综合考量二者。通过在实际和模拟故障数据上测试,计算指标值衡量模型性能。将量子模型与基于神经网络、支持向量机等传统模型对比,涵盖诊断准确率、时间及对复杂故障处理能力等方面。对比显示,面对大规模、复杂故障数据,量子故障诊断模型优势显著,能更快速、精准地诊断故障,为输配电线路安全运行提供有力保障。

6 结语

综上所述,本研究成功将量子计算应用于输配电线路状态评估与故障诊断领域,构建的模型展现出良好的性能,为电力系统运维提供了新的思路和方法。然而,目前量子计算技术仍处于发展阶段,在实际应用中存在一些挑战,如量子比特的稳定性、算法的优化等。未来,需要进一步加强量子计算与电力系统的融合研究,持续优化算法,提升模型性能。

参考文献

- [1] 李佳营, 李义, 赵立严, 等. 电力系统中配电线路运行故障检测技术研究[J]. 灯与照明, 2025, 49 (1): 203-205.
- [2] 张冬. 信息化时代人工智能技术在配电网智能感知与故障诊断修复中的应用[J]. 今日自动化, 2023 (6): 66-68.
- [3] 黄新宝, 韩超. 电力系统中配电线路运行故障检测技术研究[J]. 通信电源技术, 2024, 41 (8): 237-239.
- [4] 焦连曜. 电力系统配电线路运行故障检测技术分析[J]. 消费电子, 2024 (10): 149-151.