

[输电线路]

110 kV输电线路故障智能诊断与预警机制

文/廖奕才
瑞沣集团股份有限公司

针对110 kV输电线路故障频发且诊断困难的问题，提出一种基于深度学习算法的智能诊断与预警机制。该方法通过构建深度学习模型，充分利用输电线路实时监测数据和历史故障信息，对线路运行特征进行深入学习，实现了对故障类型的精准识别与定位。通过融合先进的特征提取技术和深度学习网络的强大数据分析能力，该方法有效解决传统诊断方法中存在的误诊率高、诊断周期长等问题。

随着电力系统规模的不断扩大和复杂度的日益提升，110 kV输电线路作为电网的关键组成部分，其运行安全性和可靠性面临着严峻挑战^[1-2]。传统人工巡检和故障诊断方法已难以满足当前对故障快速响应和高效处理的需求，亟须一种更加智能、高效的故障诊断与预警机制^[3-4]。深度学习算法以其强大的数据处理能力和模式识别能力，在图像识别、语音识别等领域取得显著成果，为解决输电线路故障诊断难题提供新的思路^[5-6]。本文致力于探索基于深度学习算法的110 kV输电线路故障智能诊断与预警机制，旨在通过构建深度学习模型，对输电线路的实时监测数据进行深入分析，实现对故障类型的精准识别、故障位置的准确定位以及未来故障风险的可靠预测^[7]。这一机制的建立，不仅有助于提升故障诊断的准确性和效率，还能为运维人员提供及时的预警信息，为电力系统的安全稳定运行提供有力支撑。

故障自动定位及监测系统

针对我国电力市场的实际需求，一款集成了故障定位与线路监测功能的自动化系统应运而生。该系统专为非接地系统的110 kV配电线路设计，同时

展现出对高电阻接地系统或直接接地系统中任意电压等级的广泛适用性。其核心技术如下。

1) 电缆设备故障预警与精准定位技术，通过先进的监测手段，系统能够敏锐捕捉到电缆局部放电的细微迹象，从而对未来可能爆发的短路故障提前发出预警，为运维人员争取宝贵的处理时间。

2) 针对非接地配电系统，系统提供在线短路及接地故障的迅速定位服务。一旦10 kV配电线路遭遇故障，系统能够即刻启动，快速锁定故障地点并辨识故障类型，有效缩短故障排查与修复周期。

3) 该系统还配备非接地配电网故障预警及定位监测装置，能够与配电调度自动化系统无缝对接，实现数据信息的互联互通与资源共享，不仅提升故障处理的智能化水平，也进一步增强电网运行的可靠性和安全性。这一创新设计，无疑为电力行业的稳定发展注入新的活力。

1. 系统的构成

该综合系统由三大核心组件协同工作，共同构成了高效、智能的电力故障管理体系。组件为故障感知与监测设备，如同电力系统的“哨兵”，能够持续、精准地捕捉电缆及配电线路上任何异常的电气信号，包括局部放电、电流波动等，为后续的故

障预警与定位提供基础数据支持。自动故障定位及监测系统的中枢——服务器平台。这一平台集成了先进的算法与分析工具，能够及时处理来自前端监测设备的数据，迅速识别故障类型、位置，甚至预测故障发展趋势，为运维决策提供科学依据。便携终端设备作为系统的重要延伸，赋予现场人员及时响应的能力。通过无线通信技术，终端可以实时接收服务器推送的故障信息，包括故障位置、类型及建议的处置方案，使运维团队能够迅速行动，有效缩短故障恢复时间，确保电力系统的稳定运行。这三大组件的紧密配合，共同构建了一个高效、智能的电力故障管理体系。

2. 信息流程

在110 kV配电线路遭遇故障时，故障检测与监测装置会立即启动，迅速捕捉并分析故障产生的行波信号。从故障发生到故障检测信息送往测距服务器，耗时不足1 min，体现了系统的高效性。测距服务器作为系统的核心大脑，具备强大的数据处理能力，会在短时间内接收来自多个故障检测与监测装置发送的故障信息。这些信息如同拼图碎片，每一片都承载着故障定位的关键线索。服务器在接收到部分数据后，会立即启动测距计算程序，尝试定位故障点。若初次尝试未能成功探测到故障点，服务器会保持耐心，继续等待其他监测装置传来更全面的故障信息。一旦成功探测到故障点，服务器会暂时将结果存储在测距结果缓冲区中。若在规定时间内，有新的、更可靠的故障信息抵达，服务器会智能地更新测距结果，确保定位的准确性。测距服务器在完成测距计算后，会将精确的测距结果存入测距数据库中，以供后续分析使用。同时，系统还会向已注册的手机号码发送故障短消息，及时通知相关责任人关注线路故障的处理进展。这一步骤如同一道紧急警报，迅速传递至相关人员手中，为故障的快速处理赢得了宝贵时间。系统的信息流程图如图1所示。

输电线路故障智能诊断与预警

在110 kV输电线路故障诊断领域，其核心依据主要聚焦于保护和断路器的动作信息，这些信息构成了诊断过程的基础框架。为了更全面地揭示故障特征，需融合诸如重合闸记忆功能提供的数据、故

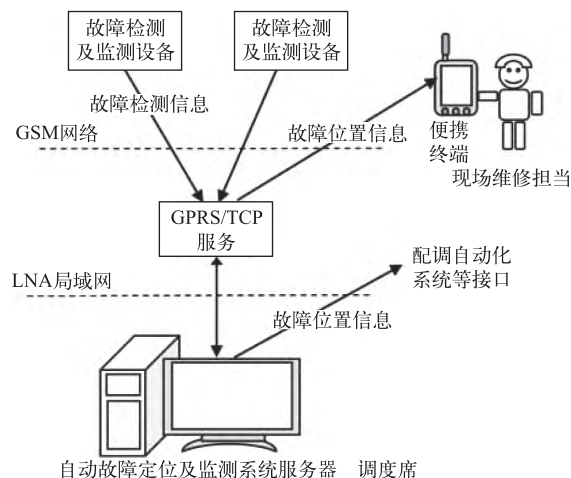


图1 系统信息流程图

障录波器捕获的波形信息以及保护启动信号等多重关键要素。在着手构建针对110 kV输电线路故障诊断的径向基函数（RBF）网络模型时，关键是对输电线路及其配套的一次设备和二次设备进行详尽的配置分析与动作特性研究。该知识树体系不仅能够系统地整合各类故障特征信息，还能为RBF网络模型提供坚实的理论基础与数据支撑，从而确保其在实际应用中能够发挥出最大的诊断效能。依据这一逻辑，所构建的RBF网络模型结构包含12个输入矢量元素和17个输出矢量元素。如图2所示。

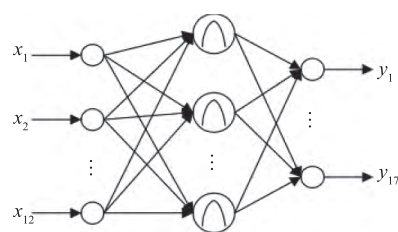


图2 RBF网络模型结构图

RBF网络的模型结构揭示了其前馈式网络的本质。在这一架构中，输入层节点扮演着纯粹信号传递者的角色，负责将输入信号无损地传送到隐含层。隐含层节点的核心在于其采用的辐射状作用函数，这些函数对输入信号在局部范围内产生特定的响应，称为径向基函数。在实际应用中，高斯核函数因其良好的数学性质和实际应用效果，常用作径向基函数的具体形式

$$u_j = \exp\left(-\frac{[X - c_j]^T (X - c_j)}{2\sigma_j^2}\right) \quad j=1,2,\dots,N_h \quad (1)$$

式中， u_j 为第 j 个隐层节点的输出； X 为输入样本矢量， $X=[x_1, x_2, \dots, x_{12}]$ ； c_j 为高斯函数的中心值； σ_j 为标准化常数（也称概率散度）； N_h 为隐层节点数。

从式（1）可以解读出，径向基函数神经元的作用机制颇似一个高度敏感的探测器。当输入的信号与核函数的中心位置相接近时，隐含层的节点会迅速产生强烈的输出反应，从而实现对输入信号的敏感捕捉与响应。这里的标准化常数 σ_j 界定了径向基函数神经元在输入空间内能够有效响应的区域范围，基于此特性，RBF网络亦常被形象地称为局部感知场网络。至于输出层的节点，其主要承担的任务是执行简单的线性运算，该运算实质上是隐含层节点输出的线性加权组合

$$y_i = \sum_{j=1}^{N_h} w_{ij} u_j - \theta_i = W_i^T \quad i=1, 2, \dots, 17 \quad (2)$$

式中， $W_i=[w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iN_h}, -\theta_i]$ ； $U=[u_1, u_2, \dots, u_{N_h}, 1]^T$ ； W_i 为从隐层节点到输出节点 i 的权值矩阵； θ_i 为相应的阈值。

RBF网络的学习过程分为两个关键阶段。在第一阶段，利用聚类算法，基于样本的输入矢量来确定网络隐含层的节点数量、各节点高斯函数的中心值 c_j 以及标准化常数 σ_j 。进入模型构建的第二阶段，基于隐含层参数已稳固确立的前提，接下来的任务是进一步求解隐含层至输出层之间的连接权值以及相应的阈值。鉴于径向基函数（RBF）网络的作用函数展现出的局部响应特性，即输入样本与基函数中心越接近，其输出响应便越强烈，因此，精确选择基函数的中心对于优化RBF网络的性能起着决定性作用。

为更有效地确定RBF网络的径向基函数中心，一种对常规LBG算法的改进版本应运而生。这种改进算法实质上是一种具备动态调整能力的自适应聚类学习算法，其独特优势在于无需事先预设聚类数目，从而巧妙地规避传统LBG算法中因需反复迭代计算不同聚类模式所带来的额外计算负担。此外，该改进算法还摒弃通过逐步增加聚类模式数量以探寻最优聚类数的繁琐流程，极大地提升样本聚类的效率。在运用这一经过精心优化的LBG算法对样本模式进行聚类处理后，输入样本能够借助高斯函数的映射作用，在隐含层节点上精确地获取到对应的输出值，计算公式为

$$u_j = \exp \left(\frac{[X - z_j]^T (X - z_j)}{2\sigma^2} \right) \quad (3)$$

式中， σ 为各聚类重心之间的最大欧氏距离，是衡量聚类分布疏密程度的一个重要参数。

为了确定从隐含层到输出层之间的连接权矩阵 W 和阈值矩阵 θ ，本文选用了LMS（最小均方误差）算法，其修正公式用于迭代调整权重和阈值，以最小化输出误差

$$W(t_k) = W(t_{k+1}) + \Delta W(t_k) \quad (4)$$

$$\theta(t_k) = \theta(t_{k+1}) + \Delta \theta(t_k) \quad (5)$$

式中， $\Delta w_{ij} = \eta \delta_i u_j$ ， $\Delta w_{ij} = \eta \delta_i u_j$ ， $\delta_i = y_i^b - y_i$ ， y_i^b ； y_i 为第 i 个节点的样本实际输出和计算输出； η 为学习率。

可见，本文学习算法调整隐含层节点至输出层之间权值连接的变化量，与网络输出误差及输入矢量成正比，无须进行导数计算，因此计算过程简洁明了，且收敛速度较快，有助于提升网络的学习效率。

实例与结果分析

在利用径向基函数（RBF）网络对110 kV输电线路进行故障诊断的过程中，首先深入剖析110 kV输电线路保护与自动控制装置的工作原理，紧密结合故障综合诊断知识树体系，全面考虑输电线路及其附属设备可能遭遇的各种基本故障情形。在此基础上，构建一个包含65组基本故障模式对的标准样本集，该样本被用作RBF网络的训练数据，旨在提升其故障诊断的精准度与泛化能力。

为充分验证采用改进版LBG算法的RBF网络在输电线路故障诊断任务中的卓越性能，研究进行详尽的对比分析。不仅对比基于传统LBG算法与改进后LBG算法的RBF网络的仿真表现，还将其与反向传播神经网络（BPNN）进行对比。在传统LBG算法的应用中，通过细致的测试与验证，表1详细记录最佳聚类数的选择历程，并最终确定聚类数为7。而对于改进后的LBG算法，根据式（6）的设定，取 $r=2$ ，网络能够自适应地确定出聚类数为8，这一过程体现了算法的动态优化能力。至于BPNN，则精心设置了学习率为0.3、动量因子为0.9的训练参数，以确保其网络性能达到最优。

$$K = \max \left\{ \frac{z_d}{k/(k-1)} \mid k=2, 3, \dots, N \right\} \quad (6)$$

表1 最佳聚类数的确定

k	2	3	4	5	6	7
K	40.75	50.04	54.35	55.90	56.27	56.47
k	8	9	10	11	12	13
K	54.52	52.93	51.60	50.81	50.26	49.55

在网络训练速度、对复杂故障模式的识别准确度以及对变异故障模式的容错能力等多个维度上，研究进行了深入的测试与对比分析，并将具体结果详尽地呈现在表2中。这些测试结果不仅直观地展示了采用改进LBG算法的RBF网络在输电线路故障诊断中的显著优势，也为后续的研究与应用提供了有力的数据支撑与理论依据。

表2 仿真及容错性测试结果

网络类型	BPNN	RBF (LBG算法)	RBF (改进LBG算法)
隐层节点数	25	7	8
所用时间/s	137.31	16.2	0.83
正确识别的异故障模式	118	266	266
正确识别的测试样本	118+65	266+65	266+65
容错率1 (%)	41.55	93.66	93.66
容错率2 (%)	52.44	94.84	94.84

仿真结果可以看出基于改进LBG算法的RBF网络在多个方面的优势。在网络的学习速度和训练时间方面，该网络相较于基于常规LBG算法的RBF网络以及BPNN，表现出更为出色的性能。在容错性能方面，采用RBF网络的高压输电线路故障诊断系统展现出了强大的容错能力。具体而言，该系统对第一类变异故障模式的正确识别率高达93.66%，对所有测试样本的正确识别率也达到了94.84%。相比之下，基于BPNN的诊断系统对第一类变异故障模式的正确识别率仅为41.55%，对所有测试样本的正确识别率也仅为52.44%。这一显著差异进一步证明RBF网络在故障诊断等实时信息处理系统中的适用性，特别是当采用改进LBG算法进行优化时，其性能优势更为显著。

结束语

通过对基于深度学习算法的110 kV输电线路故障智能诊断与预警机制的研究与实践，可以得出以下结论：该机制展现出强大的故障识别与预警能力，显著提升输电线路运维的智能化水平。深度学习模型通过有效学习输电线路的实时监测数据和历史故障信息，实现对故障类型的精确分类与定位，显著提高故障诊断的准确性和效率。同时，该机制还具备出色的故障预警功能，能够基于实时数据对未来可能出现的故障风险进行可靠预测，为运维人员提供宝贵的决策支持。实验验证和实际运行结果表明，该智能诊断与预警机制在降低故障率、缩短故障处理时间以及提升电网运行安全性方面均取得显著成效。EA

(收稿日期：2025-05-07)

参考文献

[1] 王子康. 输电线路故障预测与智能诊断方法[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2024(2): 36-38.

[2] 吴海涛. 基于智能感知技术输电线路故障诊断与预测[J]. 电力设备管理, 2023(22): 59-61.

[3] 张潇. 基于大数据的输电线路智能化故障诊断分析[J]. 电子技术, 2023(8): 386-387.

[4] 孙灏, 吴宗展. 输电线路巡检中的智能机器人应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(1): 280-281.

[5] 常森森, 张翔, 胡乃文. 高压输电线路故障检测与智能诊断技术研究[J]. 中国地名, 2024(10): 103-105.

[6] 杜怀德. 基于智能算法的高压输电线路故障诊断与维护技术分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(3): 390-391.

[7] 杨勇, 唐磊, 何亮. 输电线路故障预测与诊断实践研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2024, 12(31): 91-93.