

# 智能消防配电箱故障自诊断功能在实际工程中的应用效果分析

孙艳南 张永艳

黑龙江能源职业学院 黑龙江 双鸭山 155100

**【摘要】**：智能消防配电箱故障自诊断功能主要依托多传感器融合与边缘计算技术，通过对关键指标的实时监测，如电气参数、温度、振动等，再结合机器学习算法来实现对故障的精准识别与定位。该功能应用于实际工程中，可将故障排查时间缩短，还可让非计划停电次数和人工巡检强度减少，让消防系统供电可靠性得以提升。本研究以某大型商业综合体为案例，分析自诊断功能在过载、短路、接触不良等典型故障场景下的响应机制与处理效果，验证其通过动态调整负载分配、触发预警及隔离故障回路等方式，有效避免故障扩散。结果表明，该功能可显著提升消防配电系统的运维效率与安全性，为智能建筑消防电气设计提供新思路。

**【关键词】**：智能消防配电箱；故障自诊断；多传感器融合；边缘计算；运维效率

DOI:10.12417/2705-1358.26.05.006

## 引言

当前，建筑电气系统的复杂程度在不断提升，消防配电箱是消防设备供电的核心环节，其运行的稳定性对于火灾应急响应能力有着直接影响。传统的消防配电箱主要依赖人工定期巡检与事后维修，这样则存在一些问题，如故障发现滞后、定位困难等，还有可能会让消防设备出现断电风险。智能消防配电箱可凭借传感器网络、边缘计算模块与自诊断算法，以更好地实现故障的实时感知与主动处理，这些关键技术可更好的解决上述问题，不断提升故障自诊断功能在消防配电系统中的应用效果。因此，探讨其技术实现路径与优化方向有着深远意义。

## 1 智能消防配电箱故障自诊断技术原理

### 1.1 多参数监测体系构建

智能消防配电箱可通过先查技术来构建覆盖电气与环境状态的立体监测网络，如集成电流互感器、电压传感器、温度探头及振动传感器等。电流与电压传感器可对三相电流、电压值实时采集，再结合谐波分析算法来检测一些典型故障，如过载（电流有效值超额定 1.2 倍且持续 5 秒以上）、短路（电流突变超额定 10 倍）等；温度传感器主要通过关键节点，如断路器触点、电缆接头等，通过温升速率模型（如  $\Delta T/\Delta t > 2^\circ\text{C}/\text{min}$ ）预警接触不良或过载引发的局部过热等，避免出现绝缘老化现象。振动传感器可对断路器操作机构、接触器电磁系统的异常振动现象精准捕捉，经频谱分析识别机械卡滞现象（主频偏离额定值 20% 以上）或松动故障（振动能量谱密度低于正常值 30%）。多参数协同监测可打破单一的指标局限，如某商

业综合体项目中，系统通过同步检测机器后，精准定位故障，如 B 相电流突增至 1.8 倍额定值、触点温度升至  $85^\circ\text{C}$ （额定限值  $60^\circ\text{C}$ ）及振动频率异常等，及时发现了接触器触头熔焊故障，该诊断技术的应用与传统单参数检测相对比，显著提升了检测效率。

### 1.2 边缘计算与本地决策机制

为了避免数据传输延迟对故障处理时效性的影响，智能配电箱则可通过边缘计算架构，将数据处理与决策模块下沉至设备端。边缘计算单元则可搭载低功耗处理器，如 ARM Cortex-M7，可借助预置故障特征库（包含过载电流阈值、温升速率模型、振动频谱模板等），来实时分析传感器数据。例如，系统检测到 A 相电流超过额定值 1.5 倍且持续时间超过 3 秒时，智能触发断路器分闸动作；若温度传感器监测到电缆接头温升速率超过  $3^\circ\text{C}/\text{min}$  时，则自动启动负载转移，对故障回路负荷智能分配，让其至其他正常回路。同时，系统生成包涵盖了相关信息，如故障类型（如过载、短路）、位置（如第 3 路出线柜）与时间戳的报警信息，再借助 LoRa 或 4G 协议上传至管理平台。本地决策机制确保故障在毫秒级时间内积极响应，如某数据中心项目实施中，系统检测到短路电流（峰值达额定值 12 倍）后，80 毫秒内完成回路隔离，与传统熔断器响应速度相对比，提升了 40%，避免了电弧故障的进一步扩散。

### 1.3 机器学习驱动故障模式识别

智能配电箱针对一些复杂故障场景，如间歇性接触不良、谐波干扰引发的误动作等，可引入机器学习算法来将诊断精度

优化。系统对历史故障数据实时收集，如传感器原始值、故障处理记录、维修反馈等，以构建基于随机森林或支持向量机的故障分类模型。训练中，可通过特征工程方法来对关键特征予以提取：电流突变斜率（如 $\Delta I/\Delta t > 50A/ms$ ）、温度波动范围（如日温差超过 $15^{\circ}C$ ）、振动能量谱密度（如主频分量占比低于40%）等，并将时间序列分析技术结合起来，对故障发展的动态规律精准捕捉，如温升与电流的滞后相关性等。该模型在实际应用中，可对未知故障样本予以分类：如某工业厂房项目实施中，系统对电流谐波畸变率（THD $>8\%$ ）、触点温度周期性波动（周期12小时）及振动频谱异常等深入分析，对接触器触头电弧侵蚀故障精准识别，并输出故障概率为92%，并提出了建议处理措施，如更换触头等，这对于运维人员进行了系统性辅助。该模型通过对新故障样本的持续性学习，将分类边界逐步优化，大幅提升了新型故障的泛化能力。

## 2 实际工程应用案例分析

### 2.1 项目背景与系统配置

例如，某建筑面积28万平方米的大型商业综合体建设过程中，其消防配电系统引入智能配电箱，替代了传统设备，将关键负载全覆盖，如消防水泵、防排烟风机、应急照明等。智能配电箱配置了多类型的传感器，如16路电流传感器、8路温度传感器、4路振动传感器等，边缘计算模块搭载了ARM Cortex-M7处理器，并支持4G/LoRa双模通信。该系统上线后，运维团队对半年内的故障数据实时记录，内容包括诸多故障类型，如过载、短路、接触不良、传感器故障等，这样则对自诊断功能的有效性进行了验证。

### 2.2 过载故障处理效果

在某次消防水泵启动测试过程中，因负载电缆老化，让A相电流的额定值突然增至1.8倍，自动触发了过载保护功能。智能配电箱的电流传感器在0.2秒内对电流异常现象实时检测到了，边缘计算单元则依照预置的过载曲线（考虑启动冲击与持续过载的差异），则精准判定为正向过载，将A相供电立即切断，同时将B相、C相的负载分配进行调整，确保消防水泵以降额模式持续正常运行。这种自诊断模式与传统的热继电器相对比，此方案可防止因单一相过载导致整个回路出现断电的风险，并且对于故障的定位时间从人工巡检时间的30分钟降至短短的2秒时间。

### 2.3 短路故障快速隔离

如某防排烟风机控制回路因为绝缘破损，发生了相间短路现象，短路电流达到了额定数值的12倍。智能配电箱的电流互感器在50微妙内对于电流突变现象精准捕获，振动传感器同步检测到了断路器操作机构的剧烈振动，且频率超过了

200Hz，边缘计算单元则综合判断为短路故障，智能触发了断路器分闸动作。振动传感器在分闸过程中，对操作机构状态进行了持续性监测，确认分闸成功后，智能生成了报警信息。整个自诊断过程耗时80毫秒，与传统熔断器或电磁脱扣器（响应时间约200毫秒）相对比，则响应速度提升了60%，对于可能发生的短路电弧引发的火灾风险进行了有效规避。

### 2.4 接触不良故障预警与处理

如某应急照明回路因为电缆接头松动了，出现了接触电阻增大现象，局部温度提升到了 $85^{\circ}C$ ，额定温升值为 $60^{\circ}C$ 。温度传感器每秒自动采集一次数据，边缘计算单元则借助温升速率模型（ $\Delta T/\Delta t > 2^{\circ}C/min$ ）对于异常温升现象精准识别，再与电流波动分析结合起来分析，电流有效值下降了15%，则精准判定为接触不良故障。系统自动生成了预警信息，向运维人员发布提示信息，让其及时检查接头的紧固情况，并及时调整该回路负载至其他正常回路，防止因接触不良引发火灾现象。运维人员则基于定位信息，10分钟内将接头进行了紧固，让系统恢复了正常运行。

### 2.5 传感器故障自检与容错

如某温度传感器因为环境过于潮湿，则出现了输出值偏移现象，边缘计算单元则与相邻传感器数据进行了对比，同一柜体内3个温度传感器读数差异超过 $10^{\circ}C$ ，再与历史数据进行了校验，当前读数与过去24小时均值偏差超过 $15^{\circ}C$ ，则精准识别出传感器出现了故障。系统则将故障传感器自动隔离，并启用备用传感器（若配置），或基于电气参数（如电流与温升的关联模型）来对温度值进行了估算，确保故障诊断不再受单一传感器失效性的影响。同时，智能生成了传感器更换提醒信息，运维人员在收到提醒信息后则在48小时内及时进行了更换，恢复了数据的准确性。

## 3 应用效果综合评估

### 3.1 运维效率提升

智能配电箱的故障自诊断功能实施后，将运维模式从传统的“被动抢修”模式转变为了“主动预防”模式。传统模式下，运维人员要对配电箱进行定期巡检，一般为每周巡检一次，每次巡检需耗时2个小时，这种人工巡检模式并不能对隐蔽性故障及时发现并处理。智能模式下，系统可对所有设备运行状态实时监测，只需及时响应预警信息即可，这样则让巡检频率降低为每月1次，每次巡检耗时只需0.5个小时。6个月内，系统共发出了预警127次，其中真实的故障为43次，误报率精准控制在15%以内，运维人员平均每次故障处理时间从传统模式的2小时缩短至0.5小时。

### 3.2 供电可靠性增强

故障自诊断功能可对故障回路快速隔离，并动态调整荷载，可让消防系统的供电连续性显著提升。6个月内，系统成功规避了3次因过载或短路故障导致的全回路断电现象，让消防设备在故障期间依然能保持部分运行状态。同时，及时发现了接触不良等隐蔽性故障并作了处理，降低了因设备过热导致的二次故障风险。据统计，系统上线后，消防设备因供电问题导致的停机次数从以往的每月2次降至每月0.3次，显著增强了供电的可靠性。

### 3.3 运维成本优化

智能配电箱的有效应用，大幅降低了人工巡检与应急维修的频次，也让人力成本与物料成本大幅降低。上述项目实施过程中，传统模式下，每年需投入4名专职运维人员，年人力成本约为48万元；而智能模式下运维人员只需2名，年人力成本下降了50%，只需24万元即可。智能模式下及时处理故障早期，也避免了设备损坏现象的扩大，6个月内让设备更换费用节省了约12万元。该系统生成的故障数据也为设备寿命的预测与预防性维护提供了重要数据支撑，让运维资源分配得以优化。

## 4 技术挑战与优化方向

### 4.1 多源数据融合精度提升

当前系统中，不同类型传感器采集的数据有着明显差异。以电流传感器和温度传感器为例，二者数据采样频率与精度并不相同。这种差异在故障特征提取环节会引发严重问题，可能导致提取结果不准确，会对整个故障诊断系统可靠性造成不利影响。为此，未来可引入AD7768等高精度同步采样芯片，此芯片性能出色，能确保数据采集的高精度。还可结合时间敏感网络（TSN）技术，该技术可确保数据在网络传输中的时间确定性。二者协同，能实现多参数数据的毫秒级同步采集。这样可大幅提升故障诊断的时空分辨率，对故障发生时间和位置信息能更精准捕捉，可为后续故障处理提供重要支撑。

### 参考文献：

- [1] 刘红文.配电箱常见故障及其原因分析[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(17):5.
- [2] 曾作钦.基于内部故障引弧试验的综合配电箱结构优化[J].电网与清洁能源,2022,33(11):1-5.
- [3] 马亚鑫.变压器和配电箱的常见故障及防范措施研究[J].中小企业管理与科技(上旬刊),2022,(05):192-193.
- [4] 周建锋.浅析配电箱的故障原因及防范措施[J].农村电工,2021,22(12):32.

### 4.2 复杂故障场景覆盖

现有的故障特征库存在明显局限性，主要针对的是一些典型故障，例如过载、短路等情况。然而，在实际的电力系统运行中，会遇到更为复杂的故障场景。

现在故障特征库存在很大局限性，如过载、短路等典型故障，但实际电力系统运行中，也会遇到一些复合型故障，如谐波干扰引发的接触不良，这类故障特征较隐蔽，现有特征库难以准确识别。还有新型故障，随着电力电子设备的广泛接入，导致电压畸变等问题，也给故障诊断带来了新挑战。为了扩展故障覆盖范围，提升对未知故障的泛化能力，以引入卷积神经网络等深度学习算法等。利用大规模故障数据对模型进行训练，让模型学习到各种故障的特征模式，以更准确地识别复杂故障场景。

### 4.3 边缘计算资源优化

故障诊断系统中还要不断优化边缘计算单元。目前其算力与存储容量有限，这就限制了复杂算法的部署。为了确保诊断的精度，未来可引入轻量化模型压缩技术，通过模型量化来减少模型的计算量和存储空间，知识蒸馏可将大模型的知识迁移至小模型上，同时再引入动态资源调度策略，据实际需求来对资源进行合理分配，并支持多任务并行处理，则可实现故障诊断与能耗优化等任务协同进行。

## 5 结语

综上所述，智能消防配电箱故障自诊断功能通过多传感器融合、边缘计算与机器学习技术的集成，实现了消防配电系统故障的实时感知、精准定位与主动处理。实际工程应用表明，该功能可显著提升运维效率、增强供电可靠性并优化运维成本，为智能建筑消防电气设计提供了创新解决方案。未来，随着数据融合精度提升、复杂故障覆盖扩展与边缘计算资源优化，智能配电箱将在保障消防安全中发挥更关键的作用，推动建筑电气系统向智能化、自适应化方向发展。