

智能化变电设备状态实时感知微型化监测系统 系统设计

刘 昊 丁 岩 张泽银
(国网宁夏电力有限公司吴忠供电公司)

摘要：由于变电设备包含多种类型的设备和元件，且每个设备都有独特的特性和状态参数，同时，变电设备之间存在复杂的相互影响和耦合关系，使得对其状态监测存在一定难度。因此，为提高设备可靠性和降低故障风险，设计智能化变电设备状态实时感知微型化监测系统。

关键词：智能化变电设备；状态实时感知；微型化监测；系统设计

2024.09.DQGY
27

0 引言

变电设备是电力系统中的核心组成部分，用于电能的传输、配送和转换。如果变电设备出现故障或失效，会导致电网的异常运行、停电事故甚至引发火灾等危险^[1-2]。因此，实时感知和监测变电设备状态的重要性日益凸显。而传统的定期巡检和维护方式存在一定的局限性，例如依赖人工巡检、周期性维护等^[3]。针对变电设备的微型化监测可以实现对设备状态的持续监测和实时故障检测，提供更准确和及时的设备维护需求。因此设计一种变电设备状态监测系统具有重要意义。

1 微型化系统硬件设计

在设计智能化变电设备状态实时感知微型化监测系统时，以三级系统构架为系统设计的基础，将系统硬件分为不同的层次，可以对系统各个部分进行独立设计和优化，提高系统的效率和可靠性，实现系统的

微型化。

变电设备在空间中分布广泛，涉及到地理位置的特征和关联。通过结合三维 GIS 技术，可以将设备状态信息与其地理位置相关联，更加直观地展示设备状态、故障分布和处理情况。同时，三维 GIS 还能支持对设备状态进行空间分析和可视化展示，提供全面的变电设备状态监测和管理^[4]。因此，结合三维 GIS 设计智能化变电设备状态实时感知微型化监测系统，将系统硬件分为用户界面层、逻辑层以及功能层。

(1) 用户界面层

1) 人机界面：包括图形化界面和命令行界面，提供用户与系统交互的途径。通过图形化界面，用户能够直观地查看变电设备的状态、报警信息、趋势分析结果等。命令行界面则提供更灵活的操作选项并允许用户输入指定的命令。

2) 显示设备：使用液晶显示器展示实时状态数据、报警信息和设备图形化图像。

3) 报警器：当监测系统检测到设备异常状态时，发出声音或者光亮的警报信号。

(2) 逻辑层

1) 数据采集模块：数据采集模块通过有线或无线方式连接到变电设备，并实时获取各种关键参数的数据。

2) 决策模块：根据经过处理的数据展开决策。常见的决策包括确认设备是否处于正常运行状态、判断设备的寿命状况、评估设备的性能等。决策模块根据设定的规则和策略，自动执行相应的操作或向用户发出建议和警告。

(3) 功能层

1) 实时监测模块：利用该模块跟踪不同设备的变化情况，及时更新变电站设备状态信息。

2) 控制模块：该模块负责控制变电设备操作，以保证其正常运行。通过控制模块可实现远程开关控制、电流调节、断路器操作等，确保了操作的准确性和安全性，并与设备保持良好的通讯连接，使得用户能够灵活地控制设备状态^[5]。

系统的硬件组成如图 1 所示。

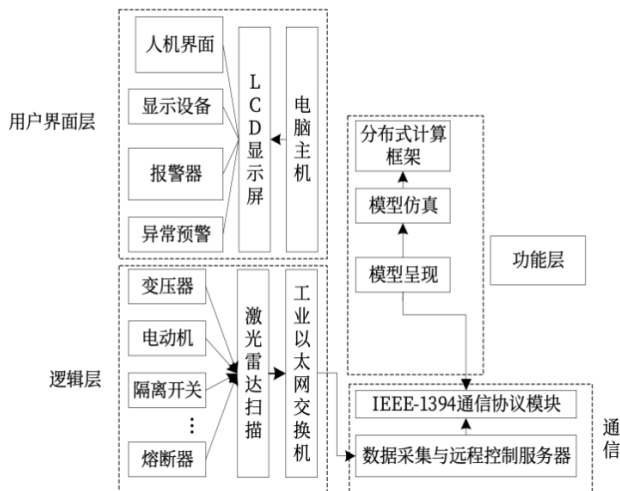


图 1 系统的硬件组成

在系统的硬件组成中，数据采集模块和总线通信

模块是最为关键的硬件模块。数据采集模块负责从各个变电设备中获取传感器数据，其是整个系统的数据源，提供准确、可靠的数据。总线通信模块负责与数据采集模块之间的数据传输。总线通信模块具备高效、可靠的数据传输能力，确保传感器数据的完整性和实时性^[6]。因此，主要对以上两个模块完成详细设计。

1.1 数据采集模块

根据变电设备的监测需求，利用激光雷达采集数据，包括目标物体的三维坐标数据以及目标物体的运动数据等。这些数据提供关于设备状态的重要信息，可以用于检测设备的位置、形态、反射特性、材质质地以及运动信息，从而实现设备状态监测。以西门子 s7-1200 紧凑型可编程逻辑控制器作为主控制器，其具备强大的可编程性和灵活性，支持多种编程语言和开发环境，可以满足不同应用场景的要求。数据采集方式为数字信号采集，该方式具有抗干扰能力强、传输稳定、易于处理和高精度等优势，可以实现对信号的快速采集和准确转换，减少信号失真和干扰对数据采集的影响，提高系统的可靠性和效率，从而实现状态的微型化监测。

除此之外，数据采集模块的内部结构还包括处理器、存储器、接口电路等。Intel x86 系列处理器用于控制和管理数据采集模块的各项功能，DRAM 存储器用于存储采集的数据和处理逻辑，数字模块接口（UART、SPI、I2C）电路用于与传感器和通信模块连接，如图 2 所示。

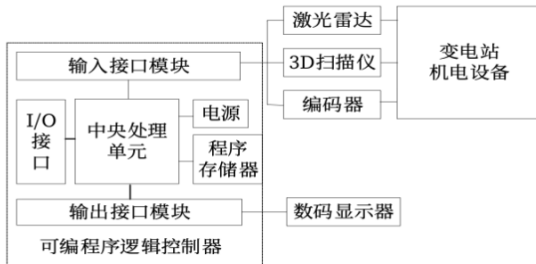


图 2 数据采集硬件结构

通过在程序库中调用变电站的点云数据获取软件，该软件通过一个输入界面模块将数据获取指令发送到编码器、3D 扫描仪和激光雷达，并且向该中心处理器返回收集的结果，该模块通过一个输出界面模块将该数据获取的结果传送到一个数字显示屏上，并向使用者展示。

1.2 总线通信模块

变电设备状态监测系统的总线通信模块是系统的重要组成部分，该模块可以连接不同的设备，使它们之间能够进行信息交换和协同工作。通过总线通信，各个设备可以共享数据、状态和指令，实现互联互通，为系统提供实时的设备状态信息。具备以下功能：

1) 通过各种通信接口（如以太网、RS485 等）连接数据采集模块，实现数据的快速、稳定的传输，支持常见的通信协议和通信机制，确保数据的可靠性和安全性。

2) 提供适应系统扩展的硬件接口和软件工具，方便添加新的数据采集模块或其他辅助设备。

3) 通过安全机制（如数据加密、身份认证）、错误检测和纠正等手段，保证通信的可靠性和系统的安全性。

总线通信模块在变电设备的状态监测系统中扮演着桥梁的角色，实现数据的高效流动和系统的灵活性，从而为设备状态的监测和分析提供了基础支持。

2 监测系统的软件算法与报警流程设计

2.1 状态实时感知信息提取

在变电设备状态的监测中，实时性非常重要。通过实时感知信息的提取，可以及时获得设备的当前状态和参数，及时发现异常情况或变化，以便及时采取措施进行处理和调整，快速检测设备的故障和异常情况，并提前发出预警信号，有助于提早发现潜在问题并及时采取维修措施，避免设备故障导致生产中断

或供电中断。使用卷积操作对激光雷达采集的数据进行特征提取，以获得设备状态的感知结果。其中，卷积操作是一种稀疏、参数共享、等变操作，在卷积操作中，使用滤波器对二维信息整体扫描。卷积操作的输入（4×4）、（3×3）滤波、顺序操作和卷积运算的示意图如图 3 所示。

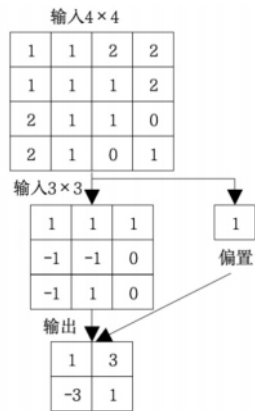


图 3 卷积计算示意图

具体步骤如下：

1) 输入数据：将采集到的激光雷达数据作为输入数据，可以是二维数据，如激光雷达扫描图像。

2) 卷积核定义：根据具体的监测任务和特征需求，设计合适的卷积核。卷积核的尺寸和通道数量通常与输入数据的特征维度相匹配。

3) 扫描输入数据：确定扫描步长。

4) 逐元素相乘与求和：在每个滑动窗口位置上，将卷积核与窗口内的数据逐元素相乘，并对所有乘积结果进行求和，得到卷积输出的一个值。

5) 输出结果：将所有滑动窗口位置的求和结果组成一个新的输出结果，可表示为特征图。

6) 特征分析与状态感知：通过进一步分析特征图，提取和解读其中的特征信息。涉及应用领域和具体任务的专业知识，例如通过检测特定模式、辨别异常区域或比较与基准值的差异等方式进行状态感知和监测。

2.2 报警流程设计

根据以上对检测系统的设计，结合时间序列的自回归模型、自组织神经网络和密度聚类三种算法共同实现实时智能化变电设备状态异常监测与报警。其中，利用时间序列的自回归模型可以对历史数据进行建模和分析，捕捉到数据的趋势、周期性和季节性等规律。而自组织神经网络则可以通过无监督学习方法自动学习数据的特征和模式。结合密度聚类算法，可以将设备状态数据按照相似性进行划分和聚集，从而实现全面性和多维度的分析，以便更准确地检测和预测异常状态。每种算法都有其特定的优势和局限性，综合应用多种算法可以弥补彼此的不足，提高整体监测性能。其流程图如图 4 所示。

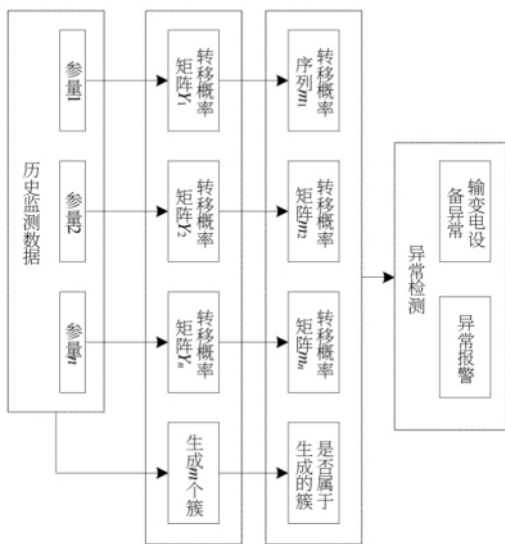


图 4 智能化变电设备数据微型化监测与报警流程图

3 实验与结果

为验证所设计的智能化变电设备状态监测系统的有效性，选取 Hadoop 作为实验的分布式计算框架，以提供高可靠性、高可扩展性和高性能的数据处理能力，使用 Hadoop 来进行数据存储、管理和计算任务的调度和执行，搭建一个由 10 个服务器构成的

Hadoop 集群进行实验。其中，1 个服务器作为主控服务器用于管理和调度任务，1 个服务器作为客户端接收和展示监测结果，另外 8 个服务器用于存储和计算。在集群搭建完成后，使用激光雷达采集到的变电设备数据作为输入。

以文献 [3] 基于边云协同（对比系统 1）和文献 [4] 智能识别系统（对比系统 2）作为所设计的智能化变电设备状态实时感知微型化监测系统的对照。利用数据采集模块采集监测数据，并将其组成数据集，共包含数据 180 万条，数据类型分为 6 种，每种数据为 300 万条，每种数据介绍如下：

- 1) 温度：监测变电设备内部或外部的温度，及时发现温度异常情况，以预防设备过热或过冷造成的故障。
- 2) 湿度：监测湿度防止绝缘性能下降，增加设备故障的风险。
- 3) 电压和电流：监测变电设备中的电压和电流参数，掌握电网运行状态，及时检测电压波动、电流过载等问题，以保证正常运行。
- 4) 气体：监测变电设备内部的气体含量，如硫化氢、二氧化硫等，及时发现潜在的发火、爆炸等危险情况。
- 5) 油质：监测变压器油中的气体、溶解气体和颗粒物等指标，评估变压器内部状态，提前发现可能的故障迹象。
- 6) 部件状态：监测变电设备中各个关键部件（如绝缘子、开关等）的状态，及时发现损坏、老化或松动等问题，避免设备故障。

针对设备的六种不同状态数据类型，对其状态展开异常微型化监测，将精确率、召回率、F1 值、误报率和 ROC 曲线为指标，评估所设计系统、对比系统 1 和对比系统 2 的微型化监测报警性能。

在状态监测系统中，精确率可以用来评估系统检

测出的异常状态的准确性。高精确率意味着系统检测出的异常状态很少是错误的，更加可靠。而 F1 值可以评估系统在检测出真实异常状态的同时，尽可能减少将正常状态误判为异常状态的情况。综合考虑了召回率和精确率，更全面地评估系统的性能。精确率、F1 值检测结果如表 1 所示。

表 1 精确率、F1 值检测结果

智能化变电设备状态数据类型	方法	精确率	F1 值
温度	所设计系统	0.985	0.972
	对比系统 1	0.818	0.828
	对比系统 2	0.807	0.827
湿度	所设计系统	0.969	0.928
	对比系统 1	0.827	0.837
	对比系统 2	0.752	0.728
电压和电流	所设计系统	0.955	0.927
	对比系统 1	0.737	0.768
	对比系统 2	0.819	0.875
气体	所设计系统	0.992	0.937
	对比系统 1	0.774	0.762
	对比系统 2	0.707	0.872
油质	所设计系统	0.917	0.995
	对比系统 1	0.627	0.723
	对比系统 2	0.822	0.801
部件状态	所设计系统	0.915	0.927
	对比系统 1	0.686	0.658
	对比系统 2	0.873	0.822

根据表 1 实验结果可知，相比于其他两种系统，所设计系统的精确率、F1 值最高，均在 0.9 以上，说明所设计的智能化变电设备状态监测系统表现最佳。意味着系统检测出的异常状态很少是错误的，且系统在检测真实异常状态的同时尽可能减少将正常状态误判为异常。这证明所设计系统在识别和报警异常状态方面取得了较好的结果。

为了进一步验证系统的应用有效性，以 ROC 曲线作为评价指标。在变电设备状态监测中，异常状态往往占据整个数据集的一小部分，导致数据集的不平衡性。ROC 曲线对不平衡数据集具有天然的优势，

能够更好地反映系统在不同类别样本中的表现。通过计算 ROC 曲线下的面积，可以全面评估系统的整体监测性能。曲线与横纵坐标围成的面积越大，则说明系统的检测结果越可靠，所设计系统、对比系统 1 和对比系统 2 的检测结果如图 5 所示。

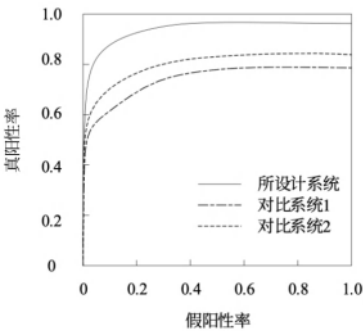


图 5 ROC 曲线检测结果

由图 5 可以看出，所设计系统的 ROC 曲线与横轴之间的面积最大，因此可以说明该系统所获取的检测结果是更准确的，说明所设计的系统在各个阈值下的敏感性和特异性都优于其他系统，进一步支持了所设计系统的有效性和准确性。

4 结束语

本研究采用三级系统构架，并结合三维 GIS 设计新的智能化变电设备状态实时感知微型化监测系统。基于卷积操作提取状态实时感知信息，并设计了相应的报警流程。本研究在智能化变电设备状态实时感知微型化监测系统方面做出了重要的创新，有望为电力系统的运行和维护提供更高效、可靠的解决方案。

参考文献

[1] 王清波，董伟，代正元，等. 一起基于全生命周期管理的 500 千伏 MOA 局部发热缺陷状态检修案例分析与研究 [J]. 电瓷避雷器，2022（4）：169-176.

（下转第 46 页）

(上接第 31 页)

- [2] 周松霖, 段佳奇, 齐伟强. 基于模糊评判的变电设备评估 [J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36 (3): 174-179.
- [3] 江翼, 刘正阳, 王文瑞, 等. 基于边云协同的变电设备多状态量监测系统研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (6): 138-144.
- [4] 李新海, 徐宝军, 范德和, 等. 变电站设备状态智能识别系统技术研究 [J]. 电气传动, 2021, 51 (24): 33-39.
- (收稿日期: 2024-03-22)**