Busbar Trunk Online Monitoring System Based on Multi-Sensor and LSTM*

LIU Dongfeng, SONG Mingtao, LIU Xing, CHEN Ping*
(*School of Digital Commerce, Nanjing College of Information Technology, Nanjing Jiangsu* 210013, *China*)

Abstract: Excessive temperature rise and current overload are the main causes of busbar fire. By using intelligent sensing technology, alarm information can be sent before abnormal temperature rise of busbar or current overload occurs, which can greatly reduce the accident rate. Through multi-sensor fusion technology of the monitoring system, combined with the temperature rise at the same time, the electric current, and many other data, the cloud monitoring center is built, which can effectively monitor the temperature, humidity, current and voltage of the busbar trunk, and the running state of the busbar trunk in real time. The corresponding data can be collected and transmitted to the intelligent monitoring and control system for further analysis and processing by using LSTM, so as to realize the busbar trunk intelligent management and electricity safety guard.

Key words: busbar trunk; multi-sensor; LSTM; on-line monitoring
EEACC: 7220; 8140 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2022.06.020

基于 LSTM 网络和多传感器的母线槽在线监测系统*

刘东风*, 宋明涛, 刘 星, 陈 平
(南京信息职业技术学院数字商务学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 温升超值和电流过载是母线槽引起火灾的主要原因之一, 通过智能传感技术, 在母线槽温度异常升高或电流过载发生前发出报警信息, 能够大幅度地降低事故率。通过多传感器融合技术的监测系统, 同时结合温升、电流等多项数据搭建云监控中心, 可以有效地掌控母线槽的温升、湿度、电流及电压的实时情况和运行状态, 并将数据采集传输到智能监测管理系统通过 LSTM 网络进行分析及处理, 从而实现母线槽智能化管理和用电安全守护。

关键词: 母线槽; 多传感器; LSTM 网络; 在线监测
中图分类号: TM764; TP183; TP212.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2022)06-1389-05

母线干线系统(简称母线槽)是低压供电系统中负责传输电能、分配电能的一种设备, 相比于传统配电电缆, 具备电流容量大、过载能力强、散热性好的优点, 因此广泛应用在电力输送行业中[1]。然而, 随着母线槽的普及应用, 安全问题有所减低但仍时有发生, 一些新的问题开始出现, 例如母线槽系统运行整体状况无法监测, 及时维护难等问题。当母线槽自身温度上升到一定极限值时就会加速绝缘老化, 甚至破坏绝缘, 母线槽本体温升等关键因素依赖人工监测, 无法评估其状态, 容易造成难以控制的突发灾难。近期多座变电站因为铝母线温度升高而融化导致单相短路故障的发生, 造成了停电事故[2-3]。同时母线槽作为供电导体, 其两端连接配电柜, 在实际中经常出现过载现象, 容易发生安全事故。

如何解决母线槽存在的温升和过载监测难的新问题, 增加母线槽智能化水平, 通过 IOT 和数据技术实现对母线槽的温升和过载进行动态实时监测, 通过运行状态数据监测预防用电安全事故, 是行业较为关注的热点和难点问题。宋诚等[3]设计了一种非接触式密集型母线槽测温系统, 通过非接触式红外测温模块进行母线温度的采集, 再由 4G 数据传输模块将数据上传至服务器, 并在客户端中的可视化界面进行温度监测预警、设备管理等操作。张俊明等[4]试图通过母线的温升模型, 为母线状态监测提供参考方法和依据。王长清等[5]提出采用 ZigBee 传输方式, 无线采集自供电高压母线的温度。但与此同时, 相关研究者

项目来源: 2021 年国家自然科学基金青年项目(12101319); 中国高校产学研创新基金-新一代信息技术创新项目资助课题(2020ITA08006)
收稿日期: 2022-05-07 **修改日期**: 2022-07-05

认为[6]，现有的有线通信光缆和电力专网存在网络覆盖有限、通信方式单一、造价成本高、使用维护费用高等不足，采用传统电力通信的数据采集方案不具备经济性和可行性。于是，结合行业应用，很多人提出温升监测的方案[7-9]，普遍认为采用物联网监测结合大数据分析平台的方案是未来母线槽安全监测技术的趋势[10-12]。然而，当下，母线状态监测的需求不仅仅局限于温升测量，更是引出了温湿度、电压电流过载以及实时采集预警功能[13]。

在前人研究基础上，本文提出基于多传感器融合技术的智能化在线监测管理系统，实时采集母线槽的温度、湿度、电压电流等数据，通过无线的方式传给数据采集器，数据采集器按照事先设定好的编码规则，上传至云服务器，保存在数据库中，当大数据分析平台判定存在事故可能性时，通过下发控制信号到本地，进行及时干预，从而实现对母线槽的智慧化管理。

1 系统架构

本文母线槽故障在线诊断系统框架如图 1 所示，系统主要由红外测温传感器、湿度传感器、电流采集器、数据采集终端以及云服务器监控中心组成。信号采集器通过 ZigBee 传输到 STM32 主控，采集得到多维度数据，通过 4G 传输到云监控中心，并进行预测。

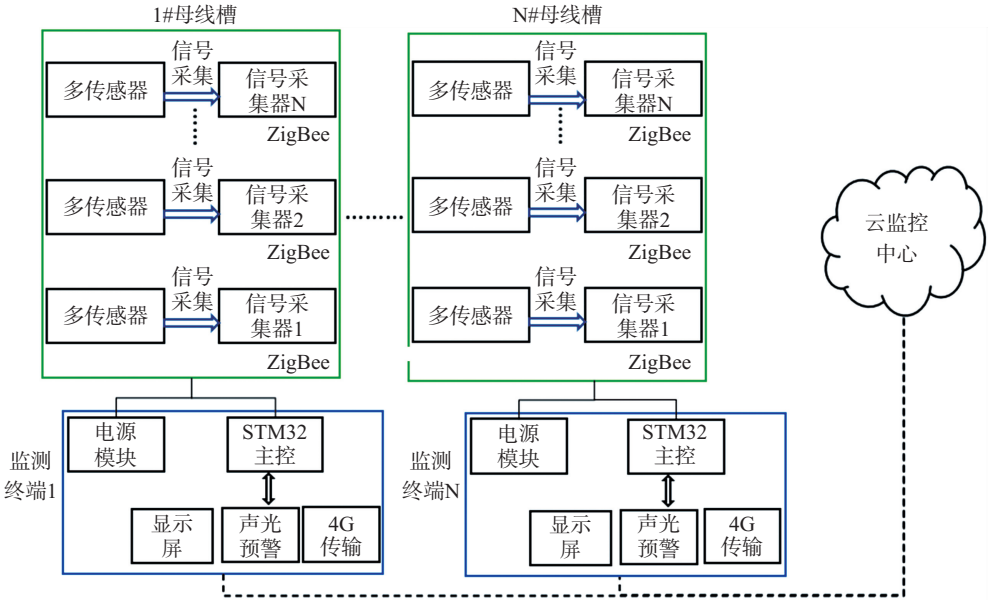


图 1 系统总体框架

2 基于 LSTM 网络的母线槽故障时间序列预测

2.1 LSTM 循环神经网络模型

对于给定序列 $x=(x_1,x_2,x_3,x_4,\cdots,x_n)$，应用标准的 RNN 模型，可以计算出一个隐藏层序列 $h=(h_1,h_2,h_3,h_4,\cdots,h_n)$ 和一个输出序列 $y=(y_1,y_2,y_3,y_4,\cdots,y_n)$。

$$h_t=f_a(W_{xh}+W_{hh}h_{t-1}+b_h) \tag{1}$$

$$y_t=W_{hy}h_t+b_y \tag{2}$$

式中，W 为权重系数矩阵，b 为偏置向量；f_a 为激活函数(激活函数可以用 tanh 函数，sigmod 函数等)；下标 t 表示时刻。

虽然 RNN 能对非线性时间序列的数据进行预测，但是仍然存在梯度消失、爆炸的问题以及需要预先确定延迟窗口的长度，因此，LSTM 模型应运而生[14]。如图 2 所示，x 为输入模块，则隐藏层计算可以表示为：

$$i_t=\sigma(W_{xi}x_t+W_{hi}h_{t-1}+W_{ci}c_{t-1}+b_i) \tag{3}$$

$$f_t=\sigma(W_{xf}x_t+W_{hf}h_{t-1}+W_{cf}c_{t-1}+b_f) \tag{4}$$

$$c_t=f_tc_{t-1}+i_{t-1}\tanh(W_{xc}x_t+W_{hc}h_{t-1}+b_c) \tag{5}$$

$$o_t=\sigma(W_{xo}x_t+W_{ho}h_{t-1}+W_{co}c_t+b_o) \tag{6}$$

$$h_t=o_t\tanh(c_t) \tag{7}$$

式中：i,f,c,o 分别为输入门，遗忘门，细胞状态和输

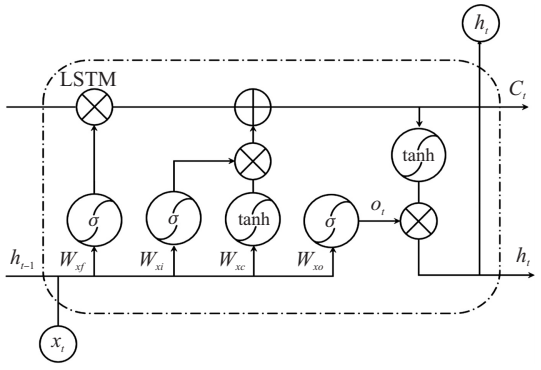


图 2 LSTM 隐藏层细胞结构

出门。σ 和 tanh 分别为 sigmoid 函数和双曲正切激活函数。

2.2　基于 LSTM 网络的故障时间序列预测

本文搭建了云数据监控中心,接收主控终端通过 4G/5G 网络发送的编码数据,采用 LSTM 循环神经网络对数据进行预测,可对母线槽运行状态进行实时监测。考虑到多变量故障时间序列有限样本点的数据特征,以及循环神经网络从简的设计原则,本文构建的 LSTM 预测模型的整体框架如图 3 所示,包括输入层、隐藏层、输出层以及网络预测等功能模块。输入层输入温度、湿度、电流的时间序列数据,隐藏层对输入数据进行分析和预测,最终输出层经过迭代预测和反标准化,输出母线槽故障时间序列。

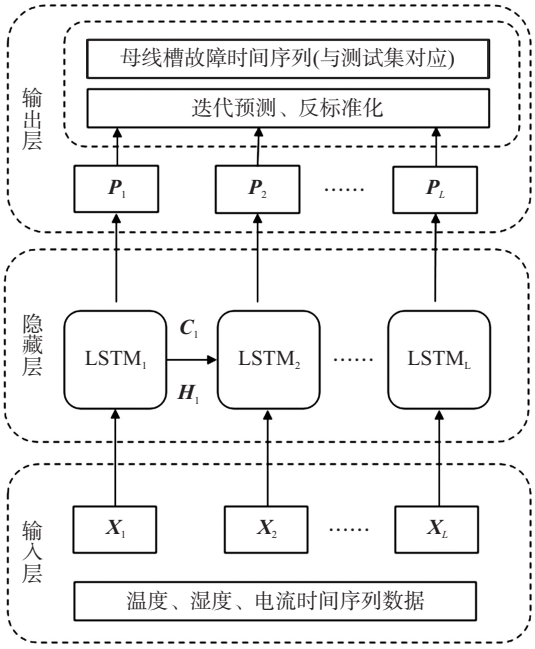


图 3　基于 LSTM 的故障时间序列预测框架

记母线槽的输入温度数据为 T_i,湿度数据为 h_i,电流数据为 I_i,通过提取一段时间内的数据,对经过预处理后的数据 T_i,h_i,I_i,按行编列为 3 维度向量作为输入向量,记为:

$$X_m=[T_m\ h_m\ I_m] \tag{8}$$

经过 *LSTM* 网络的预测,输出预测序列为:

$$P_o=\{P_{m+1},P_{m+2},P_{m+3},\cdots,P_n\} \tag{9}$$

3　系统硬件设计

3.1　STM32 主控

基于 STM32 芯片开发的主控主要包括电源模块、主控单元、4G 传输模块、声光预警模块和显示模块,如图 4 所示。当接收到传感器发回的温湿度、电流数据后,对数据进行采集和编码处理,显示在 LCD 显示屏上,并通过 4G 模块传输到云监控中心。当云监控中心检测到存在事故风险时,下发控制信号到主控,主控发出预警信号到声光预警设备。本文提出一种 LCD 液晶显示屏与 STM32 主控通过 RS-485 串口进行连接,主要是方便电工们能够直接通过显示屏看出其内部的情况,防范安全事故于未然,保证安全运行。

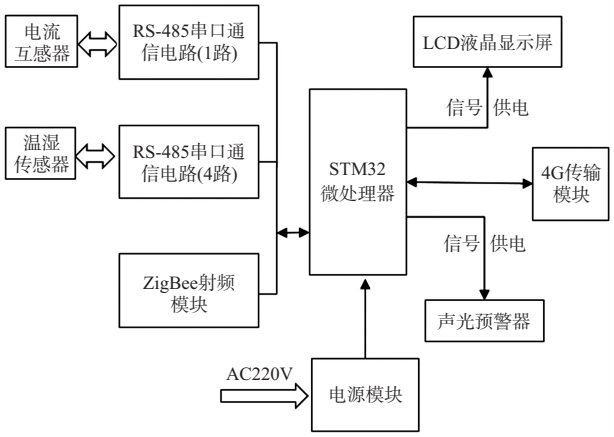


图 4　STM32 主控

3.2　多传感器数据采集

温湿度采集程序流程图如图 5 所示。红外测温传感器由红外热传感探头和信号调理电路组成。由于用其测量温度数值,且考虑母线槽所处的高压强电场工作环境,本文采用 OTP-538U 红外热电堆传感探头,其测温范围为-20 ℃~120 ℃,测量精度为 1 ℃,测量距离为 3 cm。对电流的感知采用电流互感器 ALH-066。各个监测单元的互感器以穿孔的方式直接插入母线接头部位,以探测母线槽的电流值。

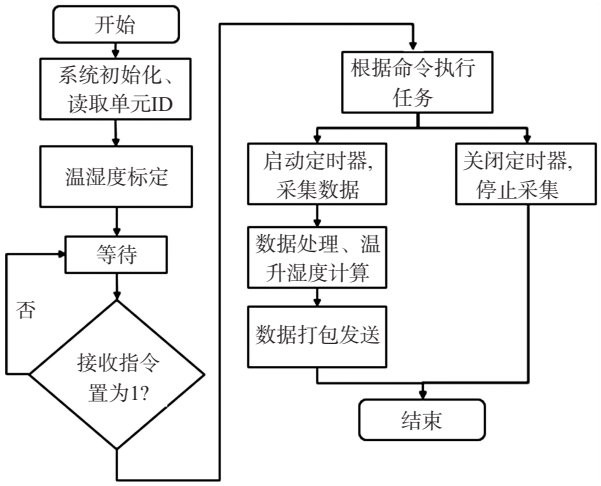


图 5　温湿度采集程序流程图

4　实验结果分析

4.1　实验平台

通过搭建的实验平台,对系统性能进行了调试。

系统参数配置为 1 台主控、4 个温湿度采集器和 16 个电流互感器实现对 4 处母线排连接单元的发热、过载等故障监测，并结合后台大数据监控中心对监测信息进行分析，当超过阈值时，即判定为发生过热和过载故障。

4.2 温度采集器与人工测量对比

本文实验对比了红外测温仪测试温度和人工测量温度，单位为摄氏度 ℃。共采集 11 组母线槽的 24 h 工作温度，取平均值记录下来。如图 6 所示，人工测量和红外测量温度差值最大为 2.6 ℃，平均差值为 1.16 ℃，误差在 2%范围以内。由于人工测量也可能存在误差，因此认为误差在 2%以内是满足要求的。如表 1 中所示，对 1#、2#、3#、4#母线槽的温度测量，差值均值在 0.71 ℃，该精度达到工业用电安全要求。

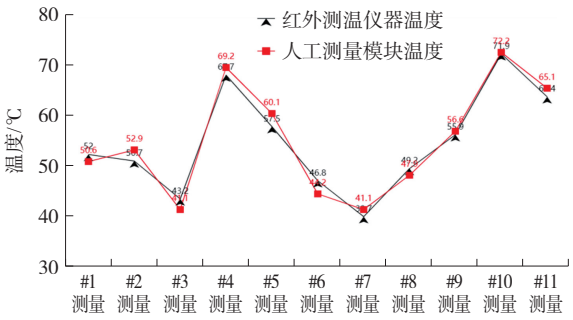


图 6 温度采集器与人工测量温度对比

表 1 母线槽温升状态识别结果

母线槽主控编号	监测位置	温升阈值/℃	环境温度/℃	人工测量温度/℃	传感器测量温度/℃	温升计算值/℃	温度测量误差/℃	湿度/%	电流 A	故障预测序列
1#	零线	20	30	51.1	50.4	20.4	0.7	40	630	1
1#	A 相	20	30	49.3	49.1	18.6	0.2	37		0
1#	B 相	20	30	47.9	49.3	19.3	1.4	35		0
1#	C 相	20	30	48.1	49.3	19.3	1.2	41		0
2#	零线	20	40	57.4	56.9	16.9	0.5	52	621	0
2#	A 相	20	40	56.6	55.9	15.9	0.7	55		0
2#	B 相	20	40	57.1	58.3	18.3	1.2	49		0
2#	C 相	20	40	56.2	55.8	15.8	0.4	51		0
3#	零线	20	50	70.9	69.7	19.7	1.2	34	650	0
3#	A 相	20	50	71.8	72.3	22.3	0.5	33		1
3#	B 相	20	50	69.3	68.5	18.5	0.8	33		0
3#	C 相	20	50	68.3	67.7	17.7	0.6	33		0
4#	零线	20	30	48.1	47.0	17.0	1.1	50	610	0
4#	A 相	20	30	49.9	50.2	20.2	0.3	50		1
4#	B 相	20	30	47.0	46.4	16.4	0.6	51		0
4#	C 相	20	30	47.4	47.4	17.4	0	52		0

由表 1 可以看出：1#母线槽连接单元中，零线位置的温升数值高于设定阈值，因此系统启动报警。而 2#母线槽的各监测位置的温升数值低于阈值，系统不启动预警；3#母线槽同样进行热故障的诊断，准确定位故障点并完成故障的预警。温升数据的测量误差绝对值均在 1.4 ℃之内。本文根据母线槽实际运行中的工作电流、发热温度、湿度等条件，对监测系统进行了等效实验，通过施加不同载荷模拟实际环境下振动对发热的影响，实验表明该系统能够完成故障诊断和预警，满足现场应用需求。

5 结论

本文分析了智能槽监测管理系统的应用背景，从用户现场问题着手，系统地提出了解决方案，并对方案逐层解析，最终组态。从硬件层和软件层角度，对方案进行可行性分析，最终确定了母线槽的温湿度和电压电流数据实时在线监测系统。实验表明，母线槽故障在线监测系统能够对母线槽连接处的工作状态进行实时监测并完成故障位置的准确定位和预警，以专用红外测温传感器并结合电流互感器的数据采集，有效地提高了检测精度和及时性；监测中心的基于 LSTM 网络的数据分析与故障诊断方法，能够快速排查故障点，误报率低、灵敏度高；带有专用数据库的大数据监控中心为后台工作人员的实时监测提供便捷，提高了监测效率；LCD 液晶显示屏能够为现场工作人员提供可视化的界面，提高了操作效率和透明度。

参考文献：

[1] 张煜. 母线槽与电缆的对比及其在配电设计中的应用[J]. 水泥技术，2022(1)：87-91.

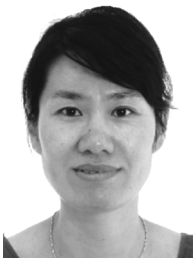
[2] 徐乔笙，谢维成，江山，等. 一种监测母线槽温升信号的无线传感器动态采样策略[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(8)：106-112.

[3] 宋诚,李文志,鲁杨,等. 非接触式密集型母线槽测温系统研究[J]. 电工电气,2022(3):42-45,49.
[4] 张俊民,侯振华,张春朋,等. 27.5kV GIS 母线室三维温度场的数值计算[J]. 电工技术学报,2011,26(12):62-67.
[5] 王长清,王昊. 基于 Zigbee 的自供电高压母线无线温度监测系统设计[J]. 电测与仪表,2015,52(7):101-105.
[6] Prabha R,Ramesh M V,Rangan V P,et al. Energy Efficient Data Acquisition Techniques using Context Aware Sensing for Landslide Monitoring Systems[J]. IEEE Sensors Journal,2017,17(18):6006-6018.
[7] Kim J K,Hahn S C,Park K Y,et al. Temperature Rise Prediction of EHV GIS Bus Bar by Coupled Magnetothermal Finite Element Method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1636-1639.
[8] Li Y M,Li Y B,Bai Z M,et al. 3D Multi-Field Coupling Analysis of Three-Phase GIS Bus Bar[J]. IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2018,423(1):012136.
[9] 刘轩东,程章颖,马乐晨,等. 基于光纤消逝场的电场测量技术研究综述[J]. 高电压技术,2021,47(6):1984-1997.
[10] 王佳培. 基于有限元法的封闭母线槽接头热特性分析及散热影响因素研究[D]. 济南:山东大学,2020.
[11] Puigdellivol O,Meresse D,Menach Y L,et al. Thermal Topology Optimization of a Three-Layer Laminated Busbar for Power Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(6): 4691-4699.
[12] Zou G,Gao H. A Traveling-Wave-Based Amplitude Integral Busbar Protection Technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012,27(2):602-609.
[13] 武安波,王建华,耿英三. 密集型母线槽磁场-温度场综合有限元分析[J]. 高压电器,2003,39(4):7-10.
[14] Greff K,Srivastava R K,Koutník J,et al. LSTM:A Search Space Odyssey[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems,2016,28(10):2222-2232.

刘东风(1980—),男,汉族,副教授,南京信息职业技术学院数字商务学院院长。研究方向:电子商务、管理科学与工程等;

宋明涛(2002—),男,汉族,南京信息职业技术学院商务数据分析专业学生;

刘　星(1988—),男,汉族,南京信息职业技术学院商务数据分析教师。研究方向:大数据分析、人工智能等;



陈　平(1978—),女,汉族,南京信息职业技术学院商务数据分析教师。研究方向:电子商务、管理科学与工程等。