

doi: 10.7690/bgzd.2025.06.013

基于 LoRa 技术的电力检修作业挂接地线智能监测系统

黄光斌

(福建水口发电集团有限公司, 福州 350004)

摘要: 针对接触网检修作业中人工监测挂接地线状态弊端, 设计基于长距离(long range, LoRa)技术的接触网检修作业挂接地线智能监测系统。通过监测层、传输层、控制层和应用层设计智能监测系统总体结构, 在该结构下通过接地监测模块、LoRa 无线通信模块和 ARM 控制芯片设计系统硬件结构; 构建三自由度数学模型, 计算不同方向挂接地线的输电线路自由度; 利用线路自由度判断线路舞动幅度, 并依据线路载流量大小判断接地线中电流情况, 根据判断结果查看是否符合挂接线路安全运行条件, 并通过 LoRa 无线通信模块对监测数据进行传输, 发送至系统应用层调度中心与检修人员手持终端。实验结果表明: 该系统可准确监测挂接地线状态, 且具备较好的远距离传输性能。

关键词: LoRa 技术; 接触网检修作业; 挂接地线; 智能监测系统; 无线通信模块; 监测数据传输

中图分类号: TM764 **文献标志码:** A

LoRa Technology-based Intelligent Monitoring System for Hanging Grounding Wire in Electric Power Maintenance

Huang Guangbin

(Fujian Shuikou Power Generation Group Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

Abstract: In view of the disadvantages of manual monitoring the state of grounding wire in catenary maintenance operation, an intelligent monitoring system for grounding wire in catenary maintenance operation based on long range (LoRa) technology is designed. The overall structure of the intelligent monitoring system is designed through the monitoring layer, the transmission layer, the control layer and the application layer, and the hardware structure of the system is designed through the grounding monitoring module, the LoRa wireless communication module and the ARM control chip under the structure; The freedom degree of that line is utilize to judge the galloping amplitude of the line, the current condition in the ground wire is judged according to the current-carrying capacity of the line, whether the current condition meet the safe operation condition of the hooking line is checked according to the judgment result, and the monitoring data is transmitted to a system application layer dispatching center and a handheld terminal of a maintainer through a LoRa wireless communication module. The experimental results show that the system can accurately monitor the state of the ground wire, and has good long-distance transmission performance.

Keywords: LoRa technology; catenary maintenance operation; grounding wire hanging; intelligent monitoring system; wireless communication module; monitoring data transmission

0 引言

电力系统是集电能生产、分配、传输、转换以及消耗于一体的系统。随着用户用电需求逐渐增多, 电力系统亦在逐步完善其内部结构, 形成如今的智能化电力系统^[1]。电力系统的稳定运行是社会经济的基础, 由于电力系统结构复杂, 其在运行时会出现线路、设备故障或受到其他因素影响, 而导致大面积用户断电甚至发生系统崩溃等重大电力事故, 后果不堪设想^[2]。保障电力系统运行稳定的同时, 为用户提供高质量电能是电力行业从业人员的工作目标, 而完成该目标的首要工作是接触网检修

作业^[3]。接触网检修作业挂接地线是保障工作人员安全的重要措施。通过智能监测, 可以实时监测接地线的挂接和解除情况, 防止因操作不当或疏忽导致安全事故的发生, 确保检修作业的顺利进行^[4]。

接触网检修作业存在极高风险, 需做好充足的安全措施才能够开始工作, 接地线是接触网检修作业安全工具之一, 可以通过与地面直连将高压危险转移至地表内。由于接地线便于携带且操作简单, 检修人员通常利用挂接地线的方式防止断电设备与线路突然产生电压, 进而威胁工作人员自身及设备安全^[5]。传统接触网检修作业在进行挂接地线操作时, 检修现场专业技术人员与调度中心通过电话沟

收稿日期: 2024-08-05; 修回日期: 2024-09-10

第一作者: 黄光斌(1970—), 男, 福建人, 硕士。

通确定地线挂接情况，以人工监控方式监测接地线状态，但人工监控易受到外界干扰，并且长时间监控会产生视觉疲劳，从而造成电力安全事故隐患^[6]。人工监测不仅可靠性低，监测数据实时性与工作效率也无法满足智能化电力系统的检修作业要求。

目前，针对以上问题已有相关人员进行研究：李稳等^[7]设计电力检修带电作业安全监测与预警系统，利用 ToF 摄像机采集电力检修现场图像，依据所采集图像建立 3 维模型，并设定检修人员与带电物体距离阈值，若超出该阈值则会触发系统预警提醒，该系统虽然可以保障带电状态下检修作业人员的人身安全，但未考虑断电状态下残压对检修人员及设备带来的影响；谭笑等^[8]提出以物联网为基础，设计电缆局部放电分布式监测系统，实时监测电缆局部放电情况，有效提升电缆检修作业安全性，但该系统局限性较强，未考虑电力检修作业中其他检修内容的安全隐患，仍有待改进。

LoRa 是存在于物联网接入层的一种远距离网络无线传输技术。该技术的优点是采用特殊扩频调制方式，通过不同扩频序列区分相同网络中不同终端设备同时发出的相同频率数据，在同等功耗下 LoRa 技术的传输距离远高于其他无线传输方式，无线射频通信距离可扩大至传统通信的 3~5 倍^[9-10]。笔者以 LoRa 技术为基础，设计基于 LoRa 技术的接触网检修作业挂接地线智能监测系统，通过实时监测接地线的挂接以及接地状态，保障电力检修作业安全。

1 接触网检修作业挂接地线智能监测系统

1.1 智能监测系统总体结构

依据接触网检修作业现场的实际情况，在原接地线的基础上设计接地监测模块，并将其安装于接地线绝缘杆上，利用该模块采集挂接地线状态数据，确定挂接地线的连接情况以及状态，避免检修人员与设备受挂接地线影响产生安全隐患。接触网检修作业挂接地线智能监测系统的总体结构如图 1 所示。

接触网检修作业挂接地线智能监测系统各层功能分别为：监测层，作用是实时监测接触网检修现场挂接地线情况，主要包含摄像头与接地监测模块。摄像头的作用是采集接触网检修作业现场图像；接地监测模块的作用是检测接地线状态并将检测数据传输至传输层。传输层，用于支撑系统数据传输，利用 LoRa 技术构建 LoRa 无线通信模块，实现多个

远距离监测点同时传输监测数据。控制层，作用是计算由传输层传输的接地线检测数据，计算并判断挂接地线状态。应用层，主要包含调度中心以及检修人员手持终端 2 个模块，用于接收系统对挂接地线的监测数据及现场图像。

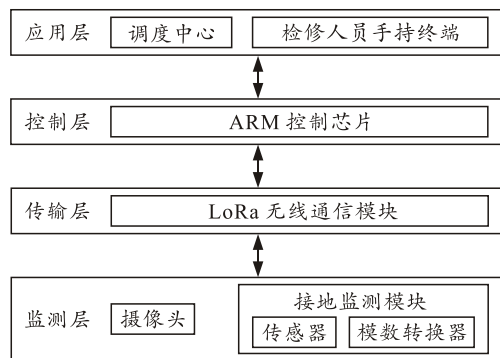


图 1 智能监测系统总体结构

通过图 1 结构，综合分析智能监测系统运行流程为：1) 在接触网检修作业开始前，将接地监测模块置于接地线绝缘杆上，利用模块内压力传感器采集接地线与接地桩连接位置的壓力数据；2) 由于传输线路以外的其余电力线上方均无任何物体，因此系统利用接地监测模块内各传感器测量输电线路与模块间的各类数据，以此作为判断挂接地线状态的依据，同时通过摄像头实时采集接触网检修作业现场图像；3) 由传输层 LoRa 无线通信模块远距离传输现场图像与接地监测模块内监测数据至控制层，控制层 ARM 控制芯片采用自由度方程与线路载流量等智能算法对监测数据进行计算，通过计算获取不同方向挂接地线的输电线路自由度以及线路载流量数据，并设定线路舞动幅度阈值，利用线路自由度以及线路载流量数据确定挂接地线状态，将线路状态以及现场图像传输至应用层；4) 应用层中的调度中心与检修人员手持终端均可查看以上传输内容，并通过该传输内容进一步确认挂接地线状态，双重保障接触网检修作业现场人员、线路及设备安全。

1.2 智能监测系统硬件设计

1.2.1 接地监测模块

接地线不仅需要挂接于检修线路上，而且要确保可靠接地，为此系统设计接地监测模块。接地监测模块位于智能监测系统监测层内，模块内包含传感器、模数转换器以及多个接地线监测点，接地监测模块结构如图 2 所示。由于压力传感器的输出值为电信号，需将其转换为数字信号才能够利用系统

LoRa 无线通信模块进行传输；因此，系统选取 TLC1543 的芯片作为转换电信号的模数转换器，接口为串行通信接口，具有多通道输入、低噪声、高精度以及高性价比优势，被广泛应用于电力数据采集与监测系统中^[11]。接地监测模块支持多个检修人员同时进行接触网检修作业，利用模块内各传感器在不同监测点处采集挂接地线监测信号，并采用 TLC1543 模数转换器转换各传感器所采集的监测信号为数字信号，转换后的监测数据由 LoRa 无线通信模块传输至系统控制层。

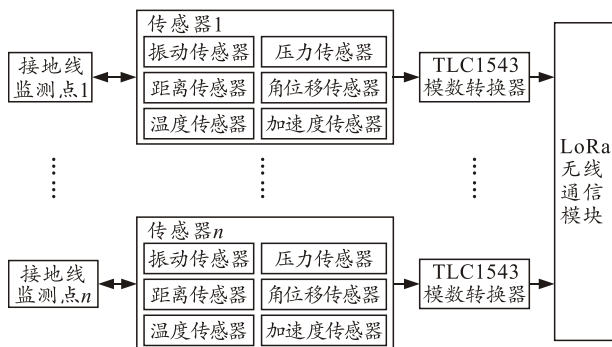


图 2 接地监测模块结构

1.2.2 LoRa 无线通信模块

LoRa 无线通信模块位于智能监测系统传输层。系统选取 SX1268 芯片作为 LoRa 无线通信模块的射频芯片，该芯片具备 LoRa 技术的特殊扩频调制方式。LoRa 无线通信模块结构如图 3 所示。

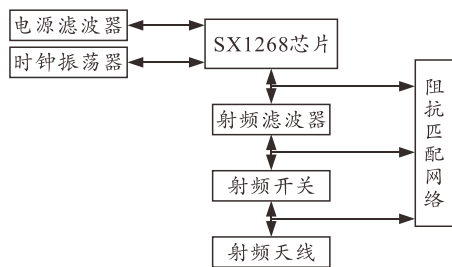


图 3 LoRa 无线通信模块结构

观察图 3，LoRa 无线通信模块以 SX1268 芯片为主，芯片封装引脚为 24 脚，在更换频段时不需要更换引脚，仅需调整射频参数即可，芯片支持 SPI 通信协议，带宽为 7.81~500 kHz。

智能监测系统传输层 LoRa 无线通信模块的优势为：

1) 远距离传输。LoRa 无线通信模块中射频滤波器可以滤除噪声干扰以及带外干扰，且内置 SX1268 芯片的扩频因子为 5~12，具备较强的抗干扰能力以及穿透性能，适用于远距离传输接触网检修作业数据^[12]。

2) 高效率数据传输。SX1268 芯片的空中速率为 0.018~62.5 kbps，为减少信号传输时的路径损耗，系统为 LoRa 无线通信模块中射频滤波器、射频开关以及射频天线设置阻抗匹配网络，以此提升系统传输效率。

3) 低功耗。模块中 SX1268 芯片可以采用 TCXO 晶振，且无需额外添加匹配电容，通过内部软件调节即可为 TCXO 晶振供电，同时芯片具备 2 种配电模式，分别为低压差线性稳压器与高效率 DC-DC 转换器，当芯片处于 DC-DC 电源模式下工作时，最大接收电流仅为 5 mA。

1.2.3 ARM 控制芯片

ARM 控制芯片位于智能监测系统控制层。系统选取的 STM32F103VEH6 微控制器作为控制层控制芯片。该芯片核心为 ARM Cortex M3，数据总线宽度为 32 位，具备体积小、功耗低以及指令执行速度快等特点^[13]。ARM 控制芯片结构如图 4 所示。

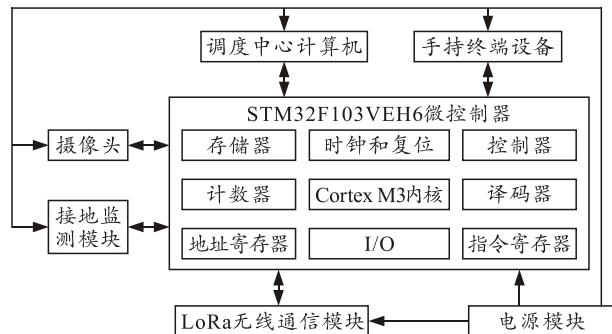


图 4 ARM 控制芯片结构

观察图 4，ARM 控制芯片主要用于控制智能监测系统中各硬件所产生的数据，与各层硬件模块之间采用双向传输方式传输数据。ARM 控制芯片存储器大小为 512 kB，内置 8 位计数器，最大时钟频率可达 72 MHz，芯片运行内存为 64 kB，支持 CAN、I2C、SPI、USART 以及 USB 等多种类型接口。

1.3 智能监测系统软件设计

1.3.1 挂接地线智能监测

笔者通过系统接地监测模块，利用三自由度数学模型与线路载流量等智能算法对接触网检修作业挂接地线以及待检修输电线路状态进行监测^[14-15]。

将挂接地线的输电线路定义为一个三自由度模型，该模型由垂直、水平以及扭转 3 个方向自由度组成，通过三自由度数学模型计算不同方向挂接地线的输电线路自由度，并分别定义 3 个方向自由度表达式为：

1) 垂直方向自由度表达式为：

$$(m\partial^2 y / m\partial t^2) + (k_y y) + (dy / dt) \left[\frac{1}{2} \rho v^2 D \left(\frac{\partial H_L}{\partial \theta} + H_z \right) + m\zeta_y F \right] = \left(\frac{1}{2} \rho v^2 D \frac{\partial y}{\partial \theta} \theta \right) - \left(mr \cos \theta_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \right) - \left(\frac{1}{2} \rho v^2 D v \frac{dy}{dt} \right). \quad (1)$$

式中：\$y\$ 为模型线性垂直坐标；\$\theta\$ 为模型角度坐标；\$m\$ 为输电线路质量；\$\theta_0\$ 为接地线与输电线路的初始夹角；\$r\$ 与 \$D\$ 分别为输电线路半径与直径；\$v\$ 与 \$\rho\$ 分别为风速与空气密度；\$H_L\$ 与 \$H_z\$ 分别为升力与阻力系数；\$F\$ 与 \$k_y\$ 分别为固有频率以及垂直方向的支撑刚度；\$\zeta_y\$ 为垂直方向的阻尼系数。

2) 水平方向自由度表达式为：

$$(m\partial^2 x / m\partial t^2) + (k_x x) + (dx / dt) \left[\rho v^2 D H_z / 2 + m\zeta_x F \right] = \left(\frac{1}{2} \rho v^2 D \frac{\partial A_z}{\partial \theta} \theta \right) - (mr \sin \theta_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}). \quad (2)$$

式中：\$x\$ 为模型线性水平坐标；\$\zeta_x\$ 为水平方向的阻尼系数；\$k_x\$ 为水平方向的支撑刚度。

3) 扭转方向自由度表达式为：

$$A = \sqrt{[9.92\varphi(vD+1)^{0.485} + \pi Dk_i(273+t_0)^4 - \pi Dk_i(273+t_c)^4 - Dr] / \beta R}. \quad (4)$$

式中：\$A\$ 为接地线安全载流量；\$\varphi\$ 与 \$t_c\$ 分别为接地线的温升与稳态温度；\$t_0\$ 为接触网检修作业现场的初始温度；\$\beta\$ 为增容系数。

通过式(4)获取接触网检修作业过程中接地线的载流量，依据线路载流量大小判断接地线中电流情况，接地线载流量越大则线路产生残压的概率越大，对接触网检修作业现场线路、设备以及检修人员的危险性越高；反之，对接触网检修作业现场线路、设备以及检修人员的危险性越低。

智能监测系统控制层通过线路舞动幅度以及接地线载流量的计算结果，判断检修人员挂接地线操作是否成功，2 种计算结果需要同时符合条件时，系统才会判断挂接地线被成功挂接且保持正常运行状态，若其中任意 1 个或 2 个计算结果不符合条件，系统会判断挂接地线为异常状态，并发送异常提醒至监测终端内。

1.3.2 监测数据传输

完成接触网检修作业挂接地线智能监测后，系统通过 LoRa 无线通信模块对监测数据进行传输，利用 LoRa 技术的特殊扩频调制方式，采用不同扩频序列同时发送监测数据至监测终端内的不同终端设备中。智能监测系统数据传输流程如图 5 所示。

$$(I\partial^2 \theta / I\partial t^2) + (d\theta / dt) \left[\frac{1}{2} \rho v^2 D^2 \left(\frac{\partial H_M}{\partial \theta} \frac{R}{v} \right) + I\zeta_\theta F \right] + (k_i - \frac{1}{2} \rho v^2 D^2 \frac{\partial C_M}{\partial \theta} - mr \sin \theta_0) = \cos \theta_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - (mrg \sin \theta_0 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}) + (\frac{1}{2} \rho v^2 D v H_M \frac{dx}{dt}). \quad (3)$$

式中：\$I\$ 与 \$H_M\$ 分别为转动惯量以及扭转力系数；\$R\$ 与 \$\zeta_\theta\$ 分别为接地线特征半径以及扭转方向的阻尼系数；\$k_i\$ 为单位长度的扭转刚度。

系统通过以上公式计算获取不同方向挂接地线的输电线路自由度，并设置线路舞动幅度阈值，利用线路自由度判断线路舞动幅度，若线路舞动幅度超出设定阈值则判断挂接地线存在安全隐患；反之，挂接地线与待检修输电线路处于安全状态。

系统利用计算载流量的方式判断接触网检修作业现场挂接地线情况。依据接地监测模块所监测数据，获取接触网检修作业现场环境条件与线路自身特性，并利用增容技术计算接地线载流量，通过载流量计算判断接地线产生残压的可能性。为便于系统计算，将线路摩尔根载流量公式简化为：

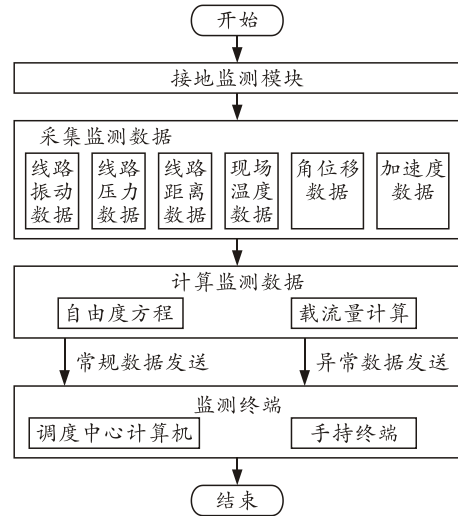


图 5 监测系统数据传输流程

观察图 5，系统利用接地监测模块实时采集接触网检修作业现场，并将所采集到的数据传输至监测层；监测层接收到采集数据后，对接触网检修作业挂接地线智能监测，采用自由度方程以及载流量算法同时进行计算，获取不同方向挂接地线的输电线路自由度以及线路载流量数据，并判断 2 种挂接地线监测数据是否均符合安全运行条件，若二者均符合条件则定义该监测数据为常规数据，实时发送至监测终端，方便调度中心以及现场检修人员随时

查看：若二者中出现不符合条件的监测数据，则定义该监测数据为异常数据，系统计算出异常数据后立刻发送异常数据至监测终端，提醒现场检修人员注意防范。

2 实例分析

2.1 实例环境

为验证基于 LoRa 技术的接触网检修作业挂接地线智能监测系统的整体性能，将本文中系统应用于某检修公司中。该电力公司主营业务为电力工程施工、电力设备及线路安装、运行维护以及检修等，现有在职专业检修人员 1 132 人，依据工作内容不同设置 6 个专业检修部门，可以同时承揽 8 个检修项目。实验环境如图 6 所示。



图 6 实验环境

2.2 分析结果

为验证本文中系统对接触网检修作业挂接地线状态监测性能，通过本文中系统界面查看接触网检修公司中多个接触网检修作业现场的挂接地线状态，智能监测系统线路状态界面如图 7 所示。

电力检修作业挂接地线智能监测系统				
实时图像	接地线1	接地线2	接地线3	接地线4
实时数据	线路状态:	线路状态:	线路状态:	线路状态:
异常提醒	正常	正常	正常	正常
历史图像				
历史数据				
线路状态	接地线5	接地线6	接地线7	接地线8
检修记录	线路状态:	线路状态:	线路状态:	线路状态:
统计报表	正常	异常	正常	正常
系统管理				
设置				

(a) 挂接地线异常状态界面

电力检修作业挂接地线智能监测系统				
实时图像	接地线1	接地线2	接地线3	接地线4
实时数据	线路状态:	线路状态:	线路状态:	线路状态:
异常提醒	正常	正常	正常	正常
历史图像				
历史数据				
线路状态	接地线5	接地线6	接地线7	接地线8
检修记录	线路状态:	线路状态:	线路状态:	线路状态:
统计报表	正常	正常	正常	正常
系统管理				
设置				

(b) 挂接地线检修后线路状态界面

图 7 智能监测系统线路状态界面

观察图 7，调度中心人员与检修人员均可以利用智能监测系统查看挂接地线线路状态。系统界面包含接触网检修作业现场所采集的实时监测图像、各传感器所传输的实时线路数据以及当前线路状态等内容。通过图 7(a)可知：当前接触网检修公司同时有 8 个检修作业正在进行中，除 6 号接地线以外，其余接地线路均为正常运行状态。经过调度中心调取并查看系统实时图像内容以及接触网检修作业人员现场检测线路状态，发现 6 号挂接地线异常状态为接地线脱落所致，检修人员在确保自身安全的情况下重新进行挂接地线操作，操作完成后重新查看系统线路状态界面如图 7(b)显示结果恢复正常，验证本文中系统具备对接触网检修作业挂接地线的智能监测功能，且监测结果准确无误。

LoRa 无线通信模块的传输性能是保障智能监测系统监测结果准确性的重要条件。为验证本文中系统 LoRa 无线通信模块的传输性能，采用 ATKPING 丢包测试软件测试本文中系统数据传输丢包率，本次共测试 5 个数据包，数据包节点数量分别为 200、400、600、800、1 000 个，每个数据包长度为 32 B，统计不同距离下本文中系统 LoRa 无线通信模块数据传输丢包率结果，如图 8 所示。

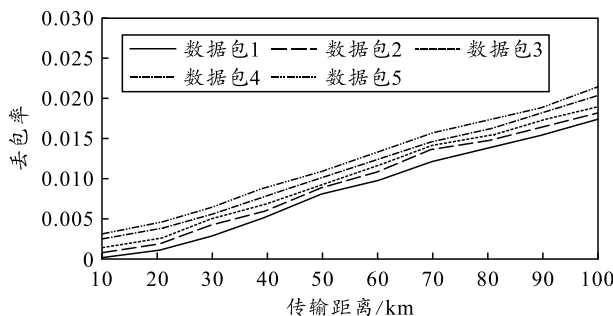


图 8 不同距离下本文中系统丢包率测试结果

观察图 8，丢包率大小与数据包数量以及传输

距离有关。当距离相同数据包数量不同时,丢包率变化相对较小;随着传输距离的不断增加,数据包丢包率随之加大。5 个数据包在传输距离为 10 km 时的丢包率最大,最大丢包率为 0.021,符合远距离数据标准,验证本文中系统具备较好的远距离传输性能。

为进一步验证本文中系统传输性能,随机选取 3 个传输距离分别为 40、60 与 80 km 的监测点,同时向 LoRa 无线通信模块传输一个长度为 128 B 且包含发送时间戳的数据包,LoRa 无线通信模块在接收到数据包后,立刻更新时间戳并将数据包返回至各监测点中,重复测试 800 次后统计本文中系统数据传输时延测试结果如图 9 所示。

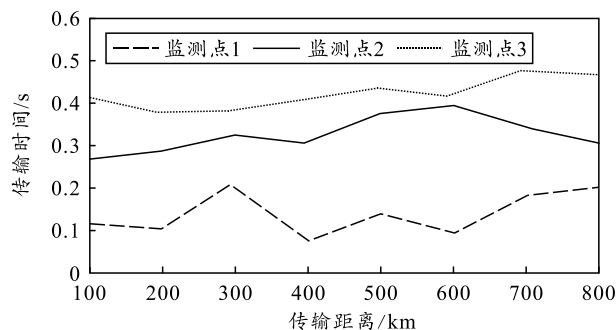


图9 本文中系统数据传输时延测试结果

观察图 9,受监测点传输距离影响,数据传输时延测试结果各不相同。3 号监测点的传输距离最远,传输延迟时间最长,800 次测试数据传输时间为 0.38~0.49 s;2 号监测点的数据传输时间为 0.27~0.40 s;1 号监测点的传输距离最近,数据传输时间为 0.08~0.20 s。由图 8 测试结果可知:本文中系统在 800 km 内的数据传输时间为 0.5 s 以内,验证本文中系统具备实时传输数据性能。

3 结论

笔者设计基于 LoRa 技术的接触网检修作业挂接地线智能监测系统,实现接触网检修作业过程中同时对多个监测点挂接地线状态的智能监测。系统利用 LoRa 技术远距离多点传输接触网检修作业现场监测数据,通过系统控制层对监测数据进行计算,获取挂接地线状态信息,并将结果显示于调度中心及现场检修人员手持终端设备内,提醒工作人员挂接地线状态出现异常需要及时检修,避免因挂接地线异常产生电力安全事故,保障检修人员、线路以及设备安全。

参考文献:

- [1] 许易经,韩学山,杨明,等.基于设备在线监测的电网状态检修决策模型[J].电力系统自动化,2020,44(23):72-81.
- [2] 王培仑,王新刚,姜良刚,等.基于北斗同步技术的变压器套管在线监测系统[J].变压器,2021,58(11):40-43.
- [3] 马伟哲,陈洪云.基于深度学习的配电网故障风险及状态检修[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(1):87-94.
- [4] 蒲天骄,乔骥,韩笑,等.人工智能技术在电力设备运维检修中的研究及应用[J].高电压技术,2020,46(2):369-383.
- [5] 黄伟达,李天友,刘松喜,等.中压有源配电网工作接地线安全校核方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):114-124.
- [6] 李志,余绍峰,张蔡涓,等.基于改进人工蜂群的电力检修设备优化调度[J].计算机仿真,2022,39(6):86-91,150.
- [7] 李稳,顾苏,汪志刚,等.基于 ToF 技术的带电作业安全监测与预警系统[J].中国电力,2020,53(2):63-68.
- [8] 谭笑,陈杰,刘洋,等.基于物联网的电缆局部放电分布式监测系统设计与实现[J].电测与仪表,2020,57(15):80-87.
- [9] 汪晓华,唐明,宋玮琮,等.满足国家电网公司标准体系的 LoRa 用能采集专网技术研究及应用[J].电测与仪表,2020,57(8):8-12.
- [10] 张建亮,巫健,薛泓林,等.5G 高能效 LoRa 融合架构的智能电网覆盖增强策略[J].太原理工大学学报,2022,53(1):162-168.
- [11] 刘军,杨治田,李旭,等.基于稳态特征的输电设备全维度状态监测系统[J].电网与清洁能源,2020,36(7):24-29.
- [12] 尹小俊,陈崇成,李瑞兴,等.基于 LoRa 集成北斗通信技术的应急响应设计与实现[J].福州大学学报(自然科学版),2020,48(2):167-173.
- [13] 张天宇,赵宇超,王重阳.基于 LoRa 技术的同步相量采集系统设计与研究[J].南方电网技术,2020,14(8):41-44.
- [14] 刘翌,季剑,施建华,等.高安全性电网在线运行数据自动监测系统[J].电网与清洁能源,2020,36(11):106-110,117.
- [15] 刘伟,张雁丽,刘洁,等.无线 LoRa 在全业务泛在电力物联网终端层的应用[J].电信科学,2020,36(9):94-101.