

基于UHF-RFID/RBF的电力电缆温度监测研究

刘 姝¹, 顾升霖¹, 蒋洪亮², 尤洪宇¹, 王鹤岩¹

(1. 沈阳工程学院研究生部, 辽宁 沈阳 110136; 2. 沈阳法雷奥科技有限公司, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 电缆是城市建设中的重要设备, 据统计电缆事故中大部分源于电缆温度过高而引发损坏, 因此监测电缆温度有很重要的意义。由于实际情况中电缆安装的环境比较复杂, 选择采用无线 UHF-RFID 技术监测温度, 既有效节约成本, 又提高效率, 还可以系统内供电, 同时搭建实验平台收集数据并用于温度预测研究。首先将 UHF-RFID 技术应用于电缆温度监测, 然后根据电缆表皮温度、环境湿度、环境温度、电缆载流量和运行时间五个影响因子用 RBF 神经网络算法对测得的压接接头、插拔接头和电缆本体的缆芯温度进行训练与预测, 最后用 MATLAB 仿真出温度图, 与实际温度对比误差很小, 证明 UHF-RFID/RBF 预测可靠性强。

关键词: 电力电缆; RBF 算法; 无线传输; UHF-RFID 技术; 温度预测

Research on temperature monitoring of power cable based on UHF-RFID/RBF

LIU Shu¹, GU Shenglin¹, JIANG Hongliang², YOU Hongyu¹, WANG Heyan¹

(1. Shenyang Institute of Engineering, Graduate Department, Shenyang 110136, China;

2. Shenyang Valeo Technology Co., Ltd., Shenyang 110004, China)

Abstract: Cable is an important equipment in urban construction. According to statistics, most cable accidents are caused by damage caused by cable temperature. Therefore, monitoring cable temperature is of great significance. Due to the complex environment of cable installation in actual situation, wireless UHF-RFID technology is chosen to monitor temperature, which can not only effectively save cost, but also improve efficiency, but also power supply within the system. At the same time, an experimental platform is built to collect data and used for temperature prediction research. This paper will be the UHF RFID technology is applied to the cable temperature monitoring, and then use RBF neural network algorithm to the measured pressure joint, plug connector and cable core temperature of the ontology, according to the cable skin temperature, environment humidity, environment temperature, cable current carrying capacity, operation time, five impact factor for training and prediction, the MATLAB simulation temperature figure, The comparison error with actual temperature is very small, which proves that UHF-RFID /RBF prediction is reliable.

Key words: power cable; RBF algorithm; wireless transmission; UHF-RFID technology; temperature prediction

0 引言

随着社会的进步与发展, 大部分城市采用电力系统或电缆取代架空线路, 需要改善和提高电

缆运行的可靠性。现场数据表明, 电力电缆发生故障的主要原因之一是电缆与连接处温度升高, 绝缘性能下降, 接合部位发生热破坏, 导致电缆

沈阳市教科系统 2021 年“双服务”重点项目; 辽宁省教育厅项目 (JL-2014)

故障。电力线与架空线路不同，一般在管道上敷设，或埋在地下和水中，巡逻和修理都很难。电力电缆的劣化过程和故障与电力电缆的温度密切相关，因此可通过在线监测电力电缆的温度来判断线路的状态，从而监控电缆的温度提前发现过热现象，在故障发生前可以及时解决潜在的风险^[1-2]。

1 电缆温度研究现状

1.1 电缆测温研究现状

电缆温度监测分为就地监测和远程监测两大类：就地监测的代表性方法有示温蜡片法和红外测温法；远程监测的主要方法为分布式光纤测温法、数字温度传感器测温法等。其优缺点为：

示温蜡片法原理为在电缆的测温点贴上特殊蜡片，根据蜡片的颜色变化或者融化程度大致推测该点的温度范围。文献[3]应用示温蜡片法来监测电缆接头温度，该方法具有成本低廉、原理简单、产品轻巧、便于携带和安装简便的优点，其缺点是需凭个人经验判断，对故障把握的准确性和可靠性不高，温度不能定量测量，需要进行定期巡检，并且对于高压开关触头、电缆接头等易热部位，运行时几乎很难测量。

采用红外热像仪进行红外测温，提高了监测电缆温度的准确性，该方法根据被测量电缆温度的不同，其红外辐射量随温度的变化而变化。红外热像仪能准确捕捉到电缆故障部位发生的温度变化，通过信号的形式转换，显示设备缺陷位置的表面热图像和局部温度值，进而发现设备的异常状态及不可见的缺陷。文献[4]应用红外测温法进行测温研究，发现红外测温法抗干扰和可靠性高，缺点是温度数据准确度不高，并且红外光谱的计算机识别技术不能代替人工识别，自动化程度不高，测量范围小，同时红外热像仪的设备结构复杂，体积庞大，成本较高。

光纤测温应用最广的技术按工作原理主要有拉曼散射和光纤光栅两种基本类型。拉曼散射原理在光纤测温系统分为基于光时域和光频域的分布式光纤温度传感技术。文献[5]介绍了分布式

光纤测温法，可以发现拉曼散射的缺点是当光纤某一区域温度发生变化时，其算法会剔除异常温度，得到除了异常点外的平均温度，因此有可能监测不到异常温度，而且光纤若过度弯曲和挤压都会严重影响测量准确度，同时光纤分布式温度监测系统线路长，投资大。

数字温度传感器测温法采用先进的数字化温度传感技术和微处理技术，可有效降低环境的各类干扰，安全、可靠且完整地把数据传递到监测终端，但此法的测温准确度受探头准确度和寿命的影响，需要定期进行维护，一旦发生故障更换比较麻烦^[6]。

UHF-RFID技术可有效规避上述方法的缺点，具有使用成本低、可进行电量自给、后期维护检查难度低、节约能源且环保的优点，可以在极其恶劣的环境下稳定工作，检测数据准确性极高。

1.2 电缆测温研究现状

电缆温度预测可减少因电缆温度过高而造成的事故损失，并降低维修成本。常见的预测电缆芯温度的方法有基于有限元分析的缆芯温度预测方法，采用可直接测量的电缆外护套温度结合环境参数、负荷参数等对缆芯温度进行预测，利用有限元分析方法，结合电力电缆的结构参数、热参数以及边界条件等，建立电缆温度场分析的有限元模型；求解出不同环境参数和负荷参数下的缆芯温度，得到样本数据；利用样本数据训练神经网络，建立缆芯温度预测模型^[7]。这种方法前期收集数据较为麻烦，且需要根据电缆型号更换边界条件和参数。

还有一种单纯利用BP神经网络算法对电缆缆芯温度进行预测，利用BP神经网络对电缆接头导线温度进行预测前，首先设置网络参数值，创建、训练神经网络，通过训练使BP神经网络具有较强的预测推广能力。将环境温度、环境湿度等影响因子作为BP神经网络输入层的神经元，电缆接头导线温度作为输出层的神经元。预测结果显示，该优化算法的导线温度预测准确度与单一人工神经网络相比有显著提高^[8]。

2 UHF-RFID技术

特高频 (Ultra-High Frequency, UHF)通常是指频率为300~3 000 MHz、波长范围在1 m~1 dm的无线电波,这个波段的电波也被称为Demi波。能在环境恶劣的条件下稳定工作,能被动地进行自充电,可以节约资源且环保。数据的保存量也很多,可以反复使用,安全性很高,且使用成本低。UHF-RFID的主要工作原理是高频电磁波从UHF的读取器发送到标签内部,标签从高频电磁波中直接提取其正常工作时所需要的能量,从而通过调制在该标签内部的集成电路芯片中储存的数据,将被反射出来的电磁波中一部分发送到该读取器中,读取器接收到被反向散射的电磁波信号,并被解调为可用于读取该标签的数据资料^[9-10],UHF-RFID关键技术主要是为了对读写器背向散射进行调制,多标签防碰撞^[11-12]。

其系统工作的基本流程可以大致概括为:①读取器将标签唤醒;②清点轮询所需要识别的标签;③标签的响应;④如果标签之间没有响应的冲突,则需要进行标签的冲突信息分解;⑤对标签进行信息访问;⑥再重复进行第②~第⑤步的过程。

通过这一技术特性,将UHF-RFID的标签固定于电缆测温点上,在有效距离布置接收器收集温度数据进行监测。UHF-RFID系统结构如图1所示。

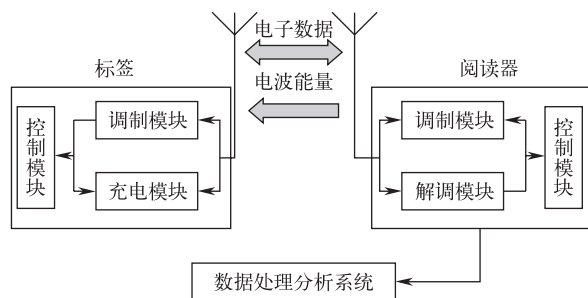


图1 UHF-RFID系统结构

Fig. 1 UHF-RFID system architecture

3 UHF标签设计

基于表面声波测温技术的无线无源SAW温度传感器,通过测量射频信号的频率变化获得温

度值,但是基于无线无源SAW温度传感器的温度监视系统有以下几点缺陷:首先传感器通过频率识别ID,而本身并没有电子ID;其安装距离必须在20 cm以上;不适用于温度测量点密集的环境;电子隔离效果较差;通常需要用螺丝固定安装,检查维护不便^[13]。

在UHF-RFID技术中,通过将温度感测芯片和RFID芯片进行集成设计,使电子标签具有温度感测能力,超高频读取器通过电子标签获取温度感测信息,实现温度监测的无线无源,节能高效且安装方便,即将UHF-RFID温度标签应用于电力电缆温度测量,有效解决当前问题^[14]。

3.1 基础版面设计

本次标签采用耐高温的柔性绝缘材料制成电子标签底板,同时增加了传统电子标签天线与被测金属材料的距离,脱离金属表面的保护罩,实现标签的抗金属功能。将金属导热材料装于基础板面上,使测得的温度数据直接反映测量点的实际温度变化趋势,保证测量数据可靠。芯片焊接技术采用反向焊接工艺,不使用各种异性导电粘合剂影响热传导。框架增加了不锈钢涂层,有效保护系统内部,利用具有高级导热性能的粘合剂将标签固定在电缆接头上^[15]。

3.2 媒体层设计

添加媒体层:具有相反的第一表面和第二表面,第一表面包括辐射振荡器和连接到辐射振荡器的芯片,增强连接稳定性,辐射振荡器的一部分位于点孔中,另一部分位于第一表面。在第二个电缆表面加入金属反射层,将一个电子标签作为输入的标签直接嵌入到电缆内部,从而无须使用周边的电路和供应器等电源,就可以对电缆全生命周期进行管理,实时监测电缆温度变化情况可以及时发出报警信号,大大提高了管理效率和技术水平,降低了维护费用,节约了成本。

4 电缆温度监测模拟实验

为了验证此方法的准确性,搭建实验平台进

行电缆接头测温,如图2所示。

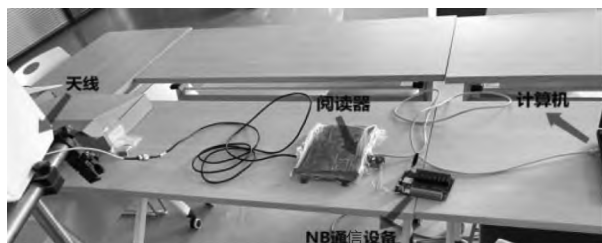


图2 系统实验平台
Fig. 2 System test platform

图2中的实验平台包含计算机数据收集、阅读器、天线、连接线和NB通信设备。将UHF-RFID标签固定于电缆测温点上,通过阅读器接收温度数据,并进行信号转化传给天线,再通过NB通信设备传给后台计算机进行数据处理。选择一根20 m长XLPE三芯电缆进行一次电缆温度在线监控和实验,并采用频率发生器和数字电源方式对电缆进行供电和加热的测试,最后把RFID标签固定在三芯电缆表面的测温点上进行测试,如图3所示。测温实验流程及示意图设计如图4所示。



图3 三芯电缆与RFID标签
Fig. 3 Three core cable with RFID tag

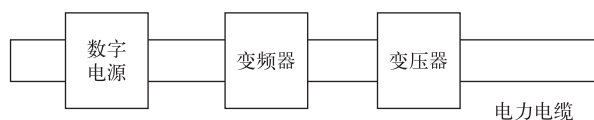


图4 测温实验示意图
Fig. 4 Schematic diagram of temperature measurement experiment

在电缆上选取A、B、C共三个测温点,其中测温点A为压接接头缆芯,B为插拔接头缆芯,C为电缆本体缆芯,将UHF-RFID温度电子标签置于三个测温点上,并在两测温点处各放置一个热电偶温度传感器进行温度测量,以提供温度参考

值,最后将测得的180组数据传送至后台计算机处理器进行实时监测管理,测温结果如图5~图7所示。

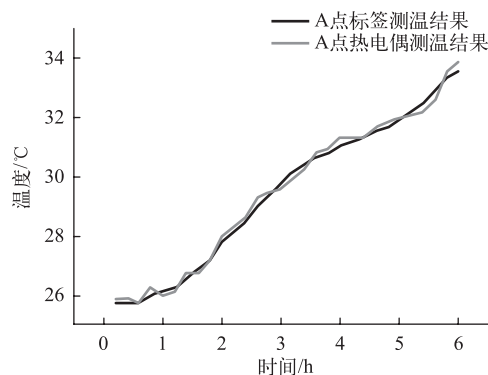


图5 A点测温结果对比
Fig. 5 Comparison of temperature measurement results at point A

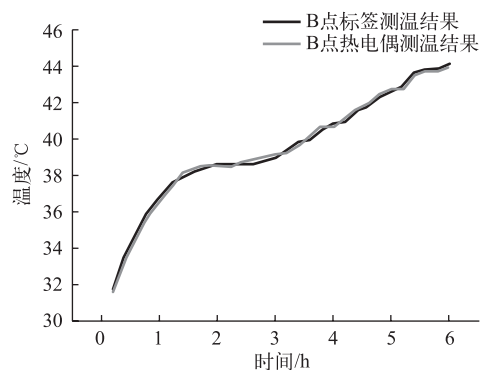


图6 B点测温结果对比
Fig. 6 Comparison of temperature measurement results at point B

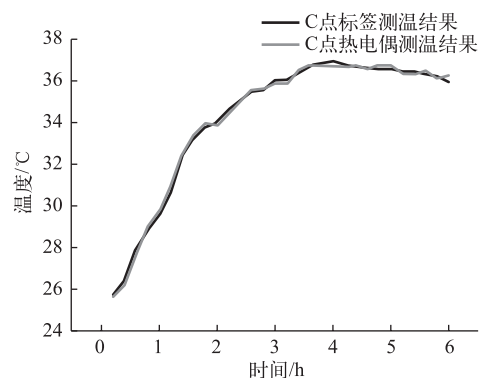


图7 C点测温结果对比
Fig. 7 Comparison of temperature measurement results at point C

由图5~图7可知,UHF-RFID温度标签测温结果与热电偶差别并不大,误差在0.3℃以内,说明此方法用于电缆测温完全可行。还可看出插

接接头缆芯处的温度要高于其他两处，在实际应用中应密切关注此问题并加以预防。

本次研究不仅验证了UHF-RFID技术可检测电缆温度的可行性与准确性，还研究了预测温度，避免电缆温度过高造成损失，最后将监测与预测相结合研究出一套可行的理论方案。

5 RBF算法预测对比

5.1 RBF算法原理

径向函数的神经网络（RBF）的近似能力、分类能力、学习率及速度等诸多方面都优于BP神经网络，其特点是结构简单、训练简易、学习的收敛率及速度快，可拟合任何非线性函数，克服出现极小值问题。参数的初始化并不是随机的，而是有自身独特的训练机制。

RBF是具有单隐层的三层前馈网络。第一层是输入层，由信号源节点组合构成；第二层是进入隐含响应层，对于隐含响应层的每个节点和函数，所有的表达方式描述解决问题的具体要求，其中的一个输入神经元局部变换响应函数来自于一个局部的响应函数，以此方式来描述如何解决层的问题；第三层是进入输出响应层，主要指对于一个输入输出模型的局部响应。RBF是一种含有单隐层的前馈网络，属于局部逼近网络，可以任意准确度逼近任一连续函数^[16]。

本文研究的电缆温度模型有多种不同影响因素，因而采用多输入单输出的神经网络。此网络分别是输入层、隐含层和输出层。输入层为影响预测电缆温度的主要参数，例如环境温度、电流载流量、电缆表皮温度和运行时间等。由于这些数据大小和单位各不相同，全部数据进行归一化处理。公式为

$$y = \frac{1}{2} \times \frac{x_i - \bar{x}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中， x_i 为测量值； $\bar{x}$ 为其算术平均值； $x_{\max}$ 为最大值； $x_{\min}$ 为最小值；得到的 y 取值范围在 $[-0.5, +0.5]$ 之间。

隐含层采用高斯核函数作为基函数，即

$$\varphi(x) = \exp\left(-\frac{(x-c_i)^T(x-c_i)}{2\sigma_i^2}\right) \quad (2)$$

输出层可通过隐节点加权得到，是简单的线性组合。可表示为

$$y(x) = w_0 + \sum_{i=1}^{n_i} w_i \exp\left(-\frac{(x-c_i)^T(x-c_i)}{2\sigma_i^2}\right) \quad (3)$$

式中， x 为输入向量； w_0 为调整输出的偏移量； n_i 为隐节点的个数； w_i 为第 i 个隐节点的基函数与输出节点的连接权值； c_i 为第 i 个隐节点的场中心； σ_i 为第 i 个隐节点的场域宽度。

其三层结构原理图如图8所示。

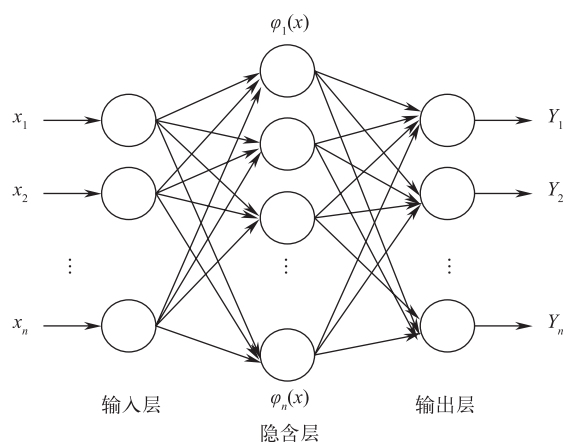


图8 RBF原理图

Fig. 8 The principle diagram of the RBF

5.2 电缆温度预测对比

在实际电缆连接器的温度监控中，温度传感器检测电缆连接器中的导体和电缆连接器导体之间的温度，电缆连接器构造被破坏，严重影响绝缘，因此不能直接检测导体温度。一般方法是使用实际测量的电缆连接器的外表面温度和电缆外表面温度来反转计算相应的导体温度。传统的计算方法是热路方法，并且使用电缆的等效热路模型计算，但是这种方法受到许多因素的影响：一是负荷电流的大小影响了导体的热量；二是负荷电流变化后，短时间内不会变为稳定状态，也会影响测量温度；同时电缆敷设时空气中有传播热，环境温度直接影响测量点的温度；此外，热路径方法的计算量非常复杂，因此受到限制^[17]。

对不同电流下的电缆及其接合部位进行了温度上升实验, 获得大量数据, 因此用RBF算法计算和预测电缆及其接合部位的导体温度, 从得到的数据中提取180组温度数据, 用算法预测压连接器、插拔连接器、电缆主体的表皮温度和电缆芯温度, 并将电缆表皮温度、环境湿度、环境温度、电缆载流量和运行时间作为五个影响因子, 使用MATLAB得到的预测温度与实际温度进行比较, 算法流程图如图9所示。

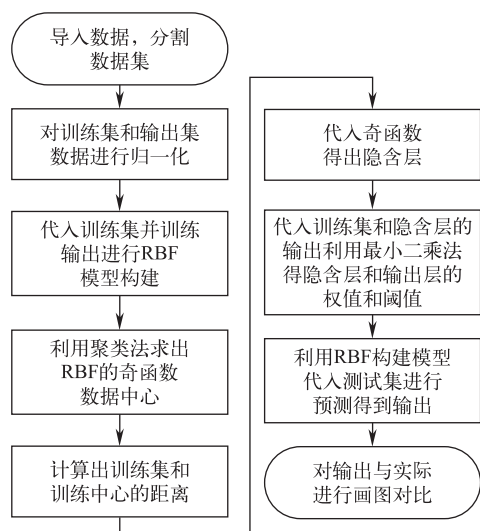


图9 RBF 算法流程图

Fig. 9 Flow chart of RBF algorithm

根据图形验证算法可行性, 从压接接头、插拔接头和电缆本体的缆芯温度测试样本抽取12组数据与实际数据进行对比, 如图10~图12所示, 输出均为温度, 样本为抽调个体。

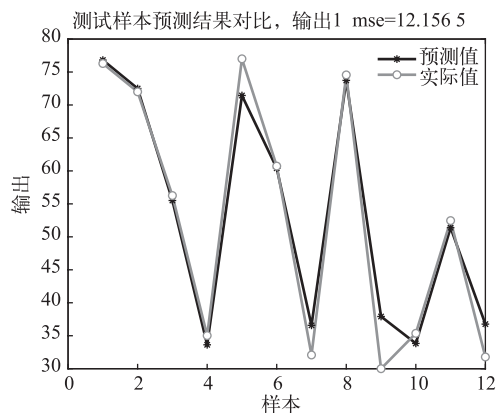


图10 压接接头缆芯温度测试样本

Fig. 10 Crimping joint cable core temperature test sample

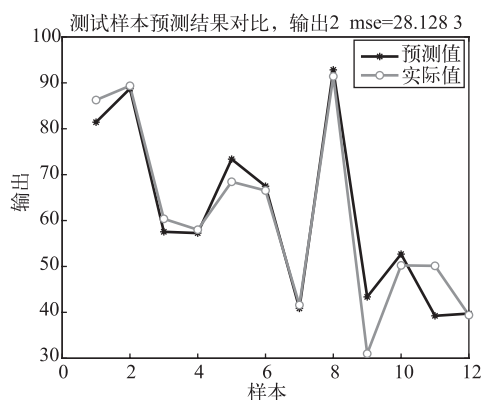


图11 插拔接头缆芯温度测试样本

Fig. 11 Plug and unplug cable core temperature test sample

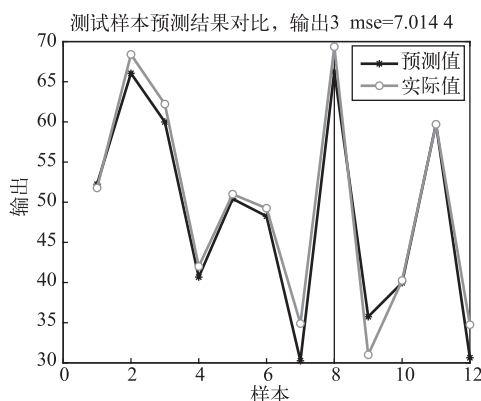


图12 电缆本体缆芯温度测试样本

Fig. 12 Cable core temperature test sample

从图10~图12可以看出算法可行性很好, 测试样本与实际数据曲线高度重合, 因此可进行训练样本与实际数据的对比预测。各抽取压接接头、插拔接头和电缆本体的缆芯温度50组数据进行预测分析, 如图13~图15所示。

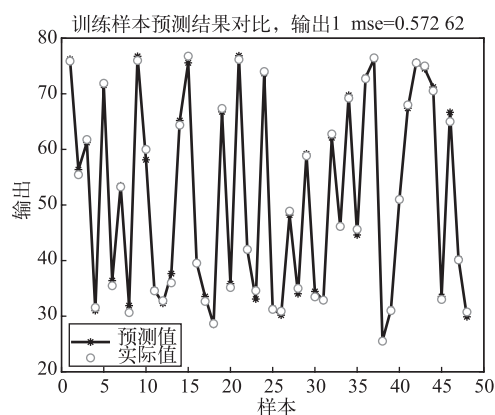


图13 压接接头缆芯温度训练样本

Fig. 13 Crimping joint cable core temperature training sample

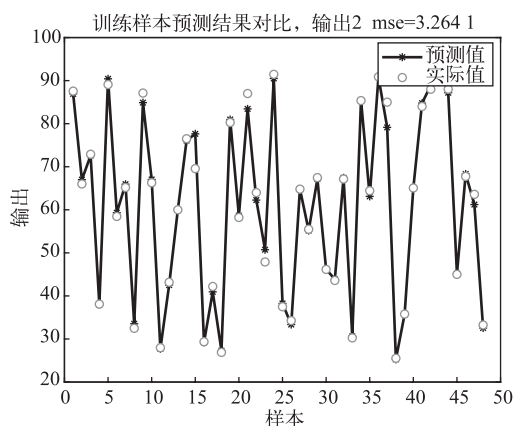


图 14 插拔接头缆芯温度训练样本

Fig. 14 Insert and remove joint cable core temperature training sample

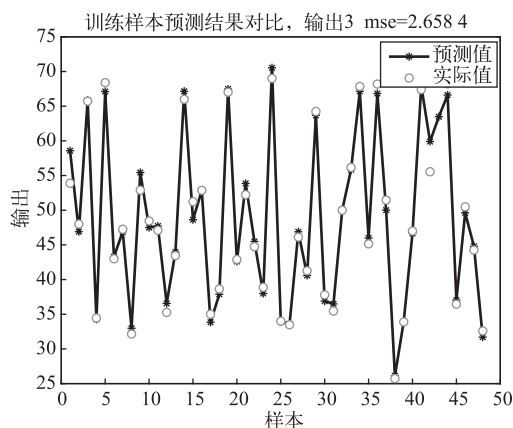


图 15 电缆本体缆芯温度训练样本

Fig. 15 Cable body core temperature training sample

从图13~图15可以得出压接接头、插拔接头和电缆本体的缆芯温度预测结果准确性很高,证明RBF算法预测电缆温度可行。

6 结束语

通过电缆温度监测模拟实验可以验证系统的准确性, UHF-RFID无线技术内嵌温度传感器监测电缆温度,可以在线监测并可自供电,不影响电缆的正常工作,并且易检修和拆装,节约能源,提高系统监测的准确性。数据传输到终端采用RBF预测优化进一步保障温度监测的准确性,可以提前预知温度过高的情况并采取有效措施,因此将无线测温与算法预测结合可以极大地改善测温质量和提高准确性。

参考文献

- [1] 陈立新. 电力电缆温度在线监测系统研究[J]. 电工技术, 2020(16): 60-61, 64.
- [2] 孙冬. 电力电缆中间接头故障分析与检测研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020.
- [3] 高云鹏, 谭甜源, 刘开培. 电力电缆温度监测方法的探讨[J]. 绝缘材料, 2014, 47(6): 13-17, 22.
- [4] 金峰, 宁利, 马德志. 探究基于红外测温法的故障绝缘子在线检测技术[J]. 数字通信世界, 2019(12): 56.
- [5] 陈黎斌. 基于分布式光纤测温的电缆故障监测系统设计与实现[J]. 产业科技创新, 2020, 2(2): 59-60.
- [6] 金懿, 刘彭义, 张葡青. 基于单总线数字温度传感器的分布式测温系统[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2004(1): 51-56.
- [7] 郭文强, 张梦梦, 李清华, 等. 基于有限元的电力电缆缆芯温度预测方法研究[J]. 电子器件, 2020, 43(1): 46-51.
- [8] 周辉, 王军华, 陈效俊, 等. 基于遗传算法优化BP神经网络的电缆接头导线温度预测[J]. 电气应用, 2013, 32(增刊2): 581-585.
- [9] 宋里瑾, 余治民, 王冬冬. UHF RFID射频收发技术研究仿真[A]. 中国航空工业技术装备工程协会、重庆市兵工学会. 2018年军工装备技术专刊论文集[C]. 中国航空工业技术装备工程协会、重庆市兵工学会: 中国航空工业技术装备工程协会, 2018: 6.
- [10] 万小磊. 无源UHF RFID标签芯片射频模拟前端关键技术研究[D]. 长沙: 中国人民解放军国防科技大学, 2016.
- [11] 雷隆毓, 蒋荣斌, 陈子妍, 等. 基于标签分组的动态帧时隙ALOHA算法[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(4): 908-913.
- [12] 竺炜. 基于固定帧长度的时隙ALOHA的RFID信息收集算法研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(3): 17-18.
- [13] 吴翔, 何怡刚, 邓芳明, 等. 基于SAW-RFID的电

- 力电缆温度在线监测技术研究[J]. 仪表技术与传感器, 2018(6): 113-117.
- [14] BAUMBAUER C L, ANDERSON M G, TING J, et al. Printed, flexible, compact UHF-RFID sensor tags enabled by hybrid electronics[J]. Scientific Reports.
- [15] 伏仕波, 肖宛昂, 毛文字, 等. 一种面向植入式RFID标签的温度传感器[J]. 微电子学, 2019, 49(6): 772-776, 782.
- [16] 文怡婷. RBF神经网络算法研究及其在高维数据预处理中的应用[D]. 岳阳: 湖南理工学院, 2020.
- [17] 赵阿琴. 电力电缆接头温度分布规律及其在线监

测系统的研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019.

作者简介

刘姝(1973—), 女, 博士, 副教授/高级工程师, 主要研究方向为电气测量技术及其仪器仪表、分布式发电与微电网技术、主动配电网技术、多能源系统研究。

顾升霖(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气测量技术及其仪器仪表。

(收稿日期: 2021-10-22)