

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.005

开关柜绝缘件嵌入式RFID柔性温度标签天线设计研究

徐世泽¹, 白桦¹, 邱益林¹, 徐凯宏², 李江涛², 郑昕雷², 严泽鑫²

(1. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 杭州 310002; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 无源无线的RFID开关柜温度测量系统较其他传统温度监测技术有易于布置、供电稳定和自组网通讯等优点,有广阔的应用前景。文中首先介绍了RFID温度测量系统的工作机理,讨论该系统在开关柜环境中使用的可行性;其次,文中设计了一种柔性FPC基底的RFID感温标签天线,并仿真研究了所设计天线的相关性能指标;最后,文中详细讨论了开关柜环境和布置方式对感温标签天线性能的影响情况,并根据开关柜内热源环境提出一种嵌入绝缘件(绝缘套管)的RFID柔性温度标签布置方案。研究表明该测量方法可以采集到较为准确的导杆温度信息,易于维护,对提高开关柜智能化水平,推进电力设备温度测量技术发展具有一定的指导意义。

关键词: 开关柜; 温度测量; RFID; 嵌入式传感器; 超高频天线

Research on Design of Embedded RFID Flexible Temperature Tag Antenna for Insulation Part of Switch Cabinet

XU Shize¹, BAI Hua¹, QIU Yilin¹, XU Kaihong², LI Jiangtao², ZHENG Xinlei², YAN Zexin²

(1. Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310002, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The passive wireless RFID switch cabinet temperature measurement system, compared to other traditional temperature monitoring technologies, has such advantages as easy layout, stable energy supply and self-organizing network communication, and has a high application prospect. Firstly, the working mechanism of RFID temperature measurement system is introduced in this paper, and the feasibility of using this system in the environment of switch cabinet is discussed. Then, a kind of RFID temperature-sensitive tag antenna based on flexible FPC substrate is designed, and the related performance indexes of the designed antenna are simulated and studied; Finally, the influence of the environment and layout mode of the switch cabinet on the performance of temperature-sensitive tag antenna is discussed in detail, and a kind of RFID flexible temperature tag layout scheme with embedded insulation (insulation bushing) is proposed in accordance with the heat source environment in the switch cabinet. The research shows that the measurement method can collect more accurate information of guide bar temperature and is easy to maintain, which has certain guiding significance for improving the intelligent level of switch cabinet and promoting the development of temperature measurement technology of power equipment.

Key words: switch cabinet; temperature measurement; RFID; embedded sensor; UHF antenna

0 引言

随着电力系统的发展和对供电质量要求的不断

提高,配电设备运行安全性、可靠性越来越受到重视。然而目前大量状态监测传感器在设计与安装过程中未全面地考虑被测设备的具体结构和传

感器工作环境,常常出现传感器遭受电磁干扰、测量数据可靠性低和服役寿命短等问题,甚至影响配电网设备的正常运行^[1-2]。

配电开关柜为了减小设备体积和占地面积而采取紧凑化设计,由此带来了透气性差,散热能力不足等问题;开关柜中的主要热源为载流导体,母排、触头等载流导体接触不良会产生严重的发热并引发严重的设备事故^[3]。常用的开关柜无线测温手段是在断路器、电缆堵头等易发热部位,通过捆扎或嵌入测温传感器来监测这些部位的温度变化情况^[4-5]。大量工程经验表明,当前的开关柜无线测温技术存在以下问题:①通过表带式捆扎等方式安装的温度传感器与测量位置的接触热阻较大,采集的温度数据准确性和可靠性较差;②温度传感器嵌入开关柜组件后将增加开关柜产生局部放电的风险,加速开关柜绝缘件的劣化;③温度传感器与信号接收器需要配置,更换和维护步骤繁琐;④线圈或电容取能方式不稳定,电池供电方式寿命短,导致温度传感器信号断续。综上所述,开关柜无线测温技术研究的的关键在于传感器布置设计、能量获取技术和无线通讯技术3个方面^[6-9]。

随着中国MEMS技术的发展,在2015年前后开始有学者尝试将基于CMOS半导体温度测量技术和射频识别(radio frequency identification, RFID)技术进行集成,设计小型化、超低功耗的RFID测温芯片^[10]。射频识别是一种无源无线通信技术,可以通过无线电磁波信号识别特定的目标并读写相关数据^[11]。近年来围绕超高频段(UHF, 860~960 MHz)射频识别开展的长距离信号读写技术出现突破,使得开关柜等电力设备内RFID测温技术的应用成为可能^[12]。通过RFID的定向取能技术可以为测温芯片提供稳定的电源,提高测量数据的稳定性;通过研究缩小天线尺寸可以使感温标签与开关柜等电力设备进行深度融合,提高测量数据的准确性;将电力设备运维周期与传感器维护周期相结合,解决开关柜无线测温技术的3个难点。

目前国内在该领域的研究主要集中于低功耗RFID测温芯片的开发和RFID感温标签的应用,但尝试将这两种技术与开关柜等电力设备温度测量相结合的研究较少。在RFID测温芯片研究方面,曾岩对比分析了传统CMOS工艺下PNP晶体管和亚阈值区的MOS管的温度特性,改进了测温芯片的激活特性^[13];孔令荣等人提出了一种低工作电压、低功耗、快速A/D转换的数字温度传感模块电路,并将其应用于RFID测温系统,该电路工作电流小于 $4\ \mu\text{A}$ ^[14]。

周俊等人设计了RFID开关柜温度实时监测系统,并在开关柜中进行了测试,试验结果表明该温度监测系统能长时间保持信号稳定^[15];李波涛等人开发了一种UHF频带的RFID数据阅读器并在变电站中进行试验,该数据阅读器可以根据温度标签的EPC编码精准定位被测点的温度^[16];关志远等人的研究结果也表明RFID无源无线测温技术可以解决全封闭开关柜温度状态实时监测的难题^[17]。

1 RFID温度传感机理

1.1 RFID测温系统结构

RFID测温系统主要由感温标签、信号读写器和应用系统组成。其中感温标签中集成了测温元件,可以附着在电力设备表面或者嵌入设备内部进行温度数据采集,标签信息中包含的电子编码作为确定温度测量点的唯一标识;读写器作用是读取感温标签中的温度信息,并转发给应用系统进行处理,一般分为手持式和固定式两种。感温标签和读写器之间的采用无线通信方式,主要通讯频段涉及超高频段和ISM频段两种^[18-19]。

RFID感温标签主要采用PTAT温度电压产生电路(proportional-to-absolute temperature),通过寄生工艺下的BJT或处于亚阈值区工作状态的MOSFET产生与温度成正比的电压或电流信号。当天线收集到足够的能量唤醒感温芯片后,ADC、寄存器和数字控制电路开始工作完成温度信号的采样储存和发送。

RFID测温系统的天线是能量和信号传递的桥梁,包括信号读写器天线(reader antenna, RA)和感温标签天线(tag antenna, TA)两种。RFID测温系统的工作原理见图1。

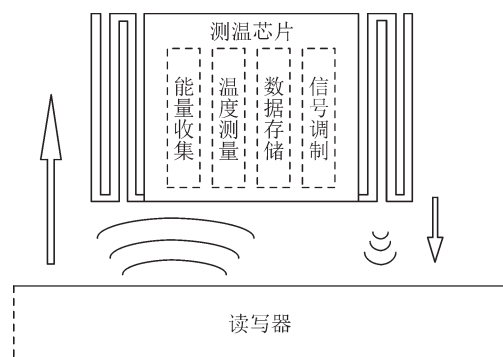


图1 RFID测温系统的工作原理

Fig. 1 Working method of RFID temperature measuring system

读写器天线的功能为定向或非定向空间传播携带有询问指令的功率信号,同时接收感温标签

天线反馈的温度数据信号;感温标签天线除了完成温度数据信号电磁波的收发外,还负责从周围空间中收集电磁波,为芯片中温度采集、处理、存储等模块提供运行所需的能量。通信电磁波信号的调制方式主要包含振幅键控、频移键控和相移键控3种,其中相移键控是RFID测温系统的主流调制方式。

根据电磁波传播机理,电磁辐射源的结构大小一般与其工作波长成正比。高频天线具有尺寸小、方向性好、增益高等优点,因此在小型化方面,高频率的电子标签具有明显优势。但是高频天线的波长范围更窄,通信载波受电力设备内部电磁场环境的干扰更为严重,因此电力设备RFID测温系统的布置方案设计需要从测温系统和测量设备两方面的应用要求进行综合考虑。

RFID感温标签主要由感温标签芯片和天线组成,其中感温标签芯片目前已经可以控制在 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$ 的大小,因此RFID感温标签尺寸主要由天线尺寸决定^[20]。感温标签的小型化实质上就是对RFID感温标签天线面积进行限制的过程^[21]。

1.2 RFID测温系统通信距离影响因素

1.2.1 自由空间中理论通信距离

自由空间中,影响感温标签通信距离的因素包括信号读写器的有效全向辐射功率、无线通信信道和标签灵敏度,理论最大通信距离 R_{\max} 可以通过式(1)的Friis公式进行估算

$$\begin{cases} R_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r (1 - |s|^2)}{P_{\text{th}}}} \\ |s|^2 = \left| \frac{Z_C - Z_A^*}{Z_C + Z_A} \right|^2 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: λ 为自由空间中波长; P_t 为信号读写器的有效全向辐射功率,在实际工程中考虑到降低功耗的需求而受到严格限制; G_t 和 G_r 分别为读写器和感温标签的天线增益; P_{th} 为感温标签的最低激活功率; s 为功率反射系数,主要取决于感温标签芯片的特征阻抗 Z_C 和感温标签天线的特征阻抗 Z_A ,当 $Z_C = Z_A^*$ 时,二者达到最佳匹配,此时RFID测温系统的理论传输距离达到最大。

文[12]给出了RFID测温天线的最佳通信范围,见表1。915 MHz为RFID测温系统的最佳工作频段,在该频段通信距离大于大多数配电设备的实际内部尺寸,具有较为广阔的应用前景。

1.2.2 开关柜环境对通信距离的影响

文中对RFID测温系统进行的初步测试结果表明,测温系统的工作环境对实际通信距离有较大影响,往往难以达到理论最大通信距离。开关柜内部

表1 RFID系统最佳通信范围参考值

Table 1 Optimal communication range value of RFID system

通信频率/kHz	最佳通信范围/m
125.00	0.8
13.56×10^3	0.5
866.00×10^3	4.5
915.00×10^3	7.3
2.45×10^6	1.0
5.80×10^6	0.6

环境影响RFID测温系统通信的因素主要包含以下两点:①临近金属、天线弯曲导致的感温标签天线增益下降和性能偏移;②开关柜局放对传输信号产生的干扰作用。

由于开关柜内部主要热源为母排、电缆等金属件,为取得准确的测量结果,感温标签在布置时往往邻近金属表面。临近金属影响RFID感温标签的通信距离和信号稳定性,主要表现在两个方面。

1)电磁波干涉相消。金属表面对电磁波的反射作用较强,电磁波在金属表面反射后相位与入射波相反,叠加削弱了电磁波能量,这将直接导致感温标签天线无法被激活。

2)标签天线性能参数偏移。当感温标签位于金属表面时,标签天线的阻抗会受金属表面的影响而发生变化,影响感温标签的阻抗特性和传输系数,间接影响RFID测温系统的无线传输距离。

当感温标签直接部署在开关柜金属母排上时,感温标签与信号读写器之间的有效通信距离大大降低,严重影响测量信号的稳定性。

同时,开关柜内部局放产生的超高频信号将会干扰感温标签在UHF频段的实际通信效果。因此感温标签的信道往往较窄,以尽可能减小电磁干扰的影响;但开关柜内的感温标签实际布置情况可能影响标签天线的杂散电容参数,从而改变其谐振频率,降低通信距离。因此在标签天线设计时应尽可能全面地考虑标签的附着介质和弯曲情况。

2 感温标签天线设计与性能仿真研究

2.1 基于柔性FPC的感温标签天线设计

在开关柜等电力设备中加装温度传感器,传感器往往采用硬质外壳封装,与设备测点处的贴合性较差,可能因接触热阻过大而导致严重的测量偏差。FPC感温标签是以聚酰亚胺或聚酯薄膜为基材制成的一种具有高度可挠性的柔性标签。采用柔性FPC作为天线基底的感温标签,嵌入开关柜温度

测点的绝缘件中,可以获得更为准确的温度测量数据;此外柔性FPC的高可挠性、高介电常数也可以降低开关柜绝缘件在感温标签嵌入后产生的局部放电水平。

文中所使用的RFID感温芯片的具体参数见表2。该无源超高频RFID感温芯片相较同类产品具有优良的性能,温度测量范围最高可达150℃,工作信号带宽120 MHz,灵敏度适配2 dBi的标签天线,芯片尺寸仅为2 mm×2 mm×0.75 mm。

表2 RFID感温芯片参数

Table 2 Parameters of RFID temperature sensing chip

性能参数	范围(典型值)
信号频率/MHz	840~960
灵敏度/dBm	-18
输入阻抗/ Ω	25-j220
温度传感范围/℃	-40~150
温度传感精度/℃	± 1
温度传感分辨率/℃	0.01
静电放电(ESD)/kV	± 2

文中根据RFID测温芯片的通信要求设计了一种基于柔性FPC基板的弯折偶极子天线,见图2。该天线设计适配频率范围为902~928 MHz的信号阅读器天线,为了减小开关柜环境中可能产生的局部放电干扰,天线的带宽不应过大,并尽可能匹配阅读器天线的频率范围。为提高天线的匹配性能,减小天线的整体尺寸,本设计中采用末端加载的设计方式。

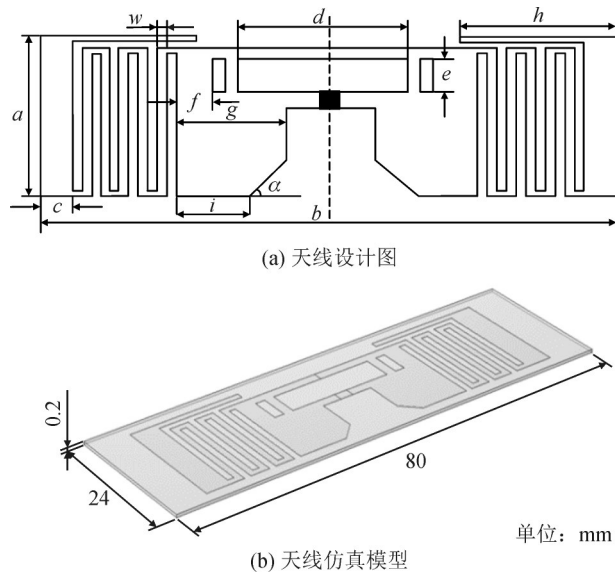


图2 感温标签弯折偶极子天线设计图

Fig. 2 Diagram of bent dipole antenna for RFID temperature sensing label

图2(a)中天线结构的具体尺寸见表3。该天线采用聚酰亚胺薄膜作为绝缘层,抗拉性能较好,材

料极限张力174 N/mm²,极限延伸率76%。

表3 感温标签天线尺寸

Table 3 Size of temperature-sensitive tag antenna

参数	尺寸
a/mm	18.0
b/mm	68.0
c/mm	4.0
d/mm	16.0
e/mm	4.5
f/mm	3.0
g/mm	10.0
h/mm	17.5
i/mm	7.5
w/mm	1.0
α (°)	45.0

2.2 感温标签无线性能仿真

文中利用有限元仿真软件的射频仿真模块对文中所设计的FPC弯折偶极子天线的性能参数进行仿真计算,得到天线在中心工作频率915 MHz下的天线辐射方向及其增益大小仿真结果。仿真结果见图3。

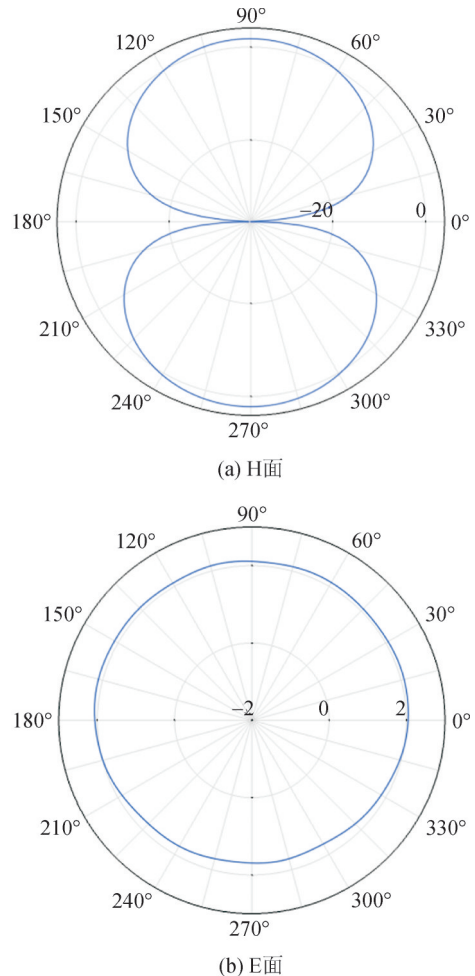


图3 天线辐射方向图

Fig. 3 Antenna radiation pattern

天线最大方向增益随信号频率变化情况的仿真结果见图4,在900~935 MHz区间内,天线最大方向增益可达2.32 dB,最大增益频率为912.7 MHz。

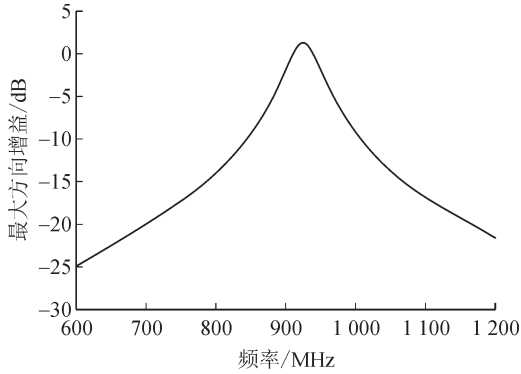
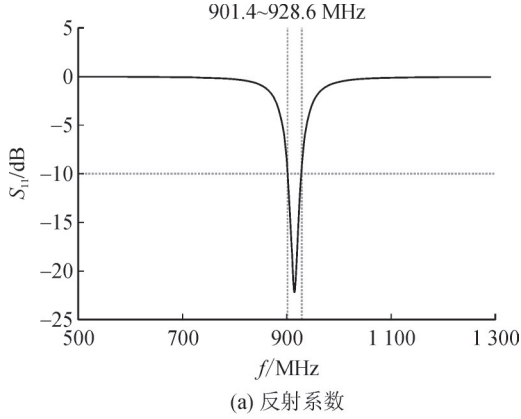


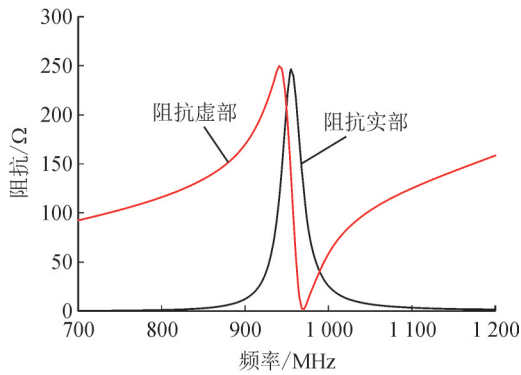
图4 天线增益随频率变化情况

Fig. 4 Variation of antenna gain with frequency

文中所设计的FPC弯折偶极子天线的反射系数和输入阻抗仿真结果见图5。仿真结果表明,该天线谐振频率为912.7 MHz,对应的反射系数可以达到-22.19 dB,其-10 dB阻抗带宽为27.2 MHz,覆盖频率范围为901.4~928.6 MHz;915 MHz下天线的阻抗实部为23.2 Ω,虚部为198.6 Ω。文中所设计的偶极子天线能与感温标签芯片(25-j220 Ω)达成良好的共轭匹配。



(a) 反射系数



(b) 天线输入阻抗

图5 天线反射系数及输入阻抗仿真结果

Fig. 5 Simulation results of antenna reflection coefficient and input impedance

3 开关柜嵌入式感温标签布置研究

3.1 开关柜金属环境对标签天线性能影响研究

感温标签天线在识别时会受到周围金属物体的影响。电磁波信号在金属表面发生反射时,入射波和反射波的相位相反,电磁波发生干涉抵消,减小了射频电磁场中包含的总能量,使得感温标签天线和信号读写器天线能够获取的信号功率降低,从而表现出增益抑制效应(gain suppression effects, GSE)。

文中研究忽略不同的金属高频磁化特性差异和涡流损耗对天线增益的影响,仿真了感温标签在贴附于无限大金属良导体表面时导体对标签天线增益的影响情况。当测温标签贴附于金属表面(距离1 mm)时,辐射方向发生畸变,金属侧几乎无法传导电磁波,同时非金属侧的天线增益也受到较大的抑制,见图6。

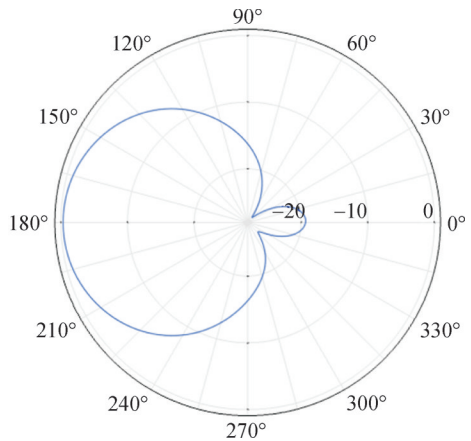


图6 临近金属表面对天线辐射方向(E面)的抑制结果

Fig. 6 Suppression result of antenna radiation direction(E plane) near metal surface

金属表面距离对感温标签输入阻抗和反射系数的影响情况见图7。

在UHF频段,当感温标签距离金属表面距离较大时(≥ 40 mm),天线的输入阻抗变化较小,感温芯片和天线仍然能达成较好的阻抗匹配,谐振频率略微变化,反射系数最低值随距离缩小呈现上升趋势,但仍小于-10 dB,说明天线的通讯频带发生了偏移和收缩;当感温标签距离金属表面距离极小时(≈ 1 mm),天线的性能急剧恶化。

由于天线和金属之间的杂散电容占主导地位,呈现阻容性负载特性,感温芯片和天线的匹配关系无法通过介质薄层进行修正。因此开关柜中RFID感温标签应避免直接布置于隔板、母排、触头等金属表面。

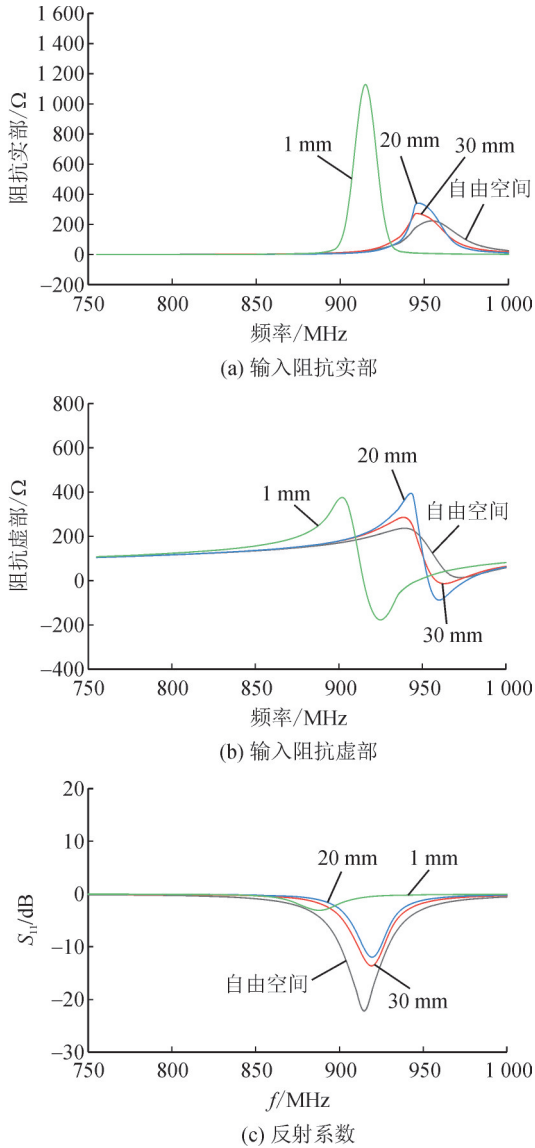


图7 临近金属表面对天线输入阻抗和反射系数的影响
Fig. 7 Influence of adjacent metal surface on antenna input impedance and reflection coefficient

3.2 弯曲情况对感温标签天线性能影响研究

在开关柜中的柱形绝缘件中嵌入感温标签时, 应尽可能使标签天线沿着磁场方向弧向弯曲, 减小由于金属导杆产生的工频或高频交变磁场在天线中感应出电流, 防止对标签芯片的正常工作产生干扰。

感温标签在嵌入开关柜绝缘子内部时根据安装方向不同, 在垂直于电流方向的平面内存在两种弯曲形式, 见图8。弯曲方式一中, 感温标签偶极子两臂平行于开关柜绝缘子中心导杆方向(轴向); 弯曲方式二中, 感温标签偶极子两臂沿着导杆电流产生的磁感线方向的圆柱曲面贴合(角向)。

感温标签的弧长不变, 定义感温标签曲率半径为 r , 标签弯曲角为 θ , 两者之间存在反比关系。为了模拟标签天线贴附于圆柱形物体表面的情形, 分别

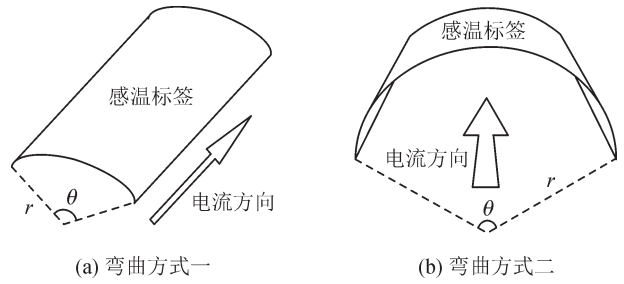


图8 感温标签的两种弯曲方式示意图
Fig. 8 Schematic diagram of two bending modes of temperature sensing label

研究两种弯曲情况下曲率半径为20、25、30 mm的标签天线的性能参数。

弯曲方式一和弯曲方式二下FPC偶极子天线在915 MHz频段下弯曲角对天线性能的影响的仿真结果见表4、5。

表4 弯曲方式一中弯曲角对天线性能的影响

Table 4 Influence of bending angle on antenna performance in bending mode one

r/mm	$\theta/(\text{°})$	f/MHz	S_{11}/dB	Z_{915}/Ω
20	51.6	917.3	-21.6	24.1+j210.5
25	41.2	917.0	-22.0	24.0+j208.0
30	34.2	915.5	-22.6	23.7+j205.5
无弯曲		914.7	-22.2	23.2+j198.6

表5 弯曲方式二中弯曲角对天线性能的影响

Table 5 Influence of bending angle on antenna performance in bending mode two

r/mm	$\theta/(\text{°})$	f/MHz	S_{11}/dB	Z_{915}/Ω
20	194.9	906.6	-11.4	31.5+j186.3
25	156.0	910.2	-17.8	26.6+j226.8
30	130.0	913.9	-22.3	25.8+j224.3
无弯曲		914.7	-22.2	23.2+j198.6

仿真结果表明, 感温标签天线弯曲对其阻抗特性和反射系数存在影响, 但在小范围内弯曲(θ 较小时), 对天线的性能影响较小; 感温标签天线以弯曲方式一布置时性能变化范围很小, 布置方案的通用性好, 但是对嵌入工艺的要求较高。对于文中设计的RFID柔性感温标签天线, 以弯曲方式二布置, 曲率半径取30 mm时, 能与芯片达到很好的匹配效果; 当天线弯曲程度过大时天线反射系数指标劣化较为明显。

3.3 开关柜嵌入式感温标签测量数据准确性研究

根据文中的研究结果, 可以设计一种嵌入RFID感温标签的开关柜绝缘套管, 见图9。套管绝缘介质采用硅橡胶材料, 安装于开关柜母线室内, 起到支撑和连接母排的作用。

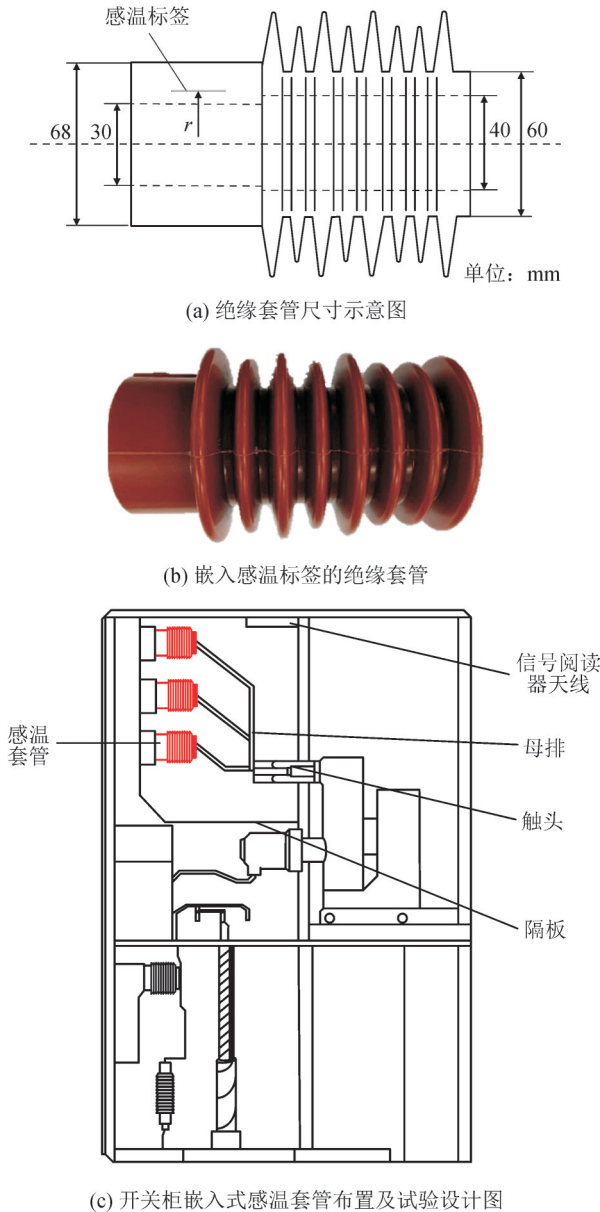


图9 开关柜绝缘套管 RFID 感温标签嵌入设计

Fig. 9 Embedded design of RFID temperature-sensitive tag for insulation sleeve of switch cabinet

文中对于不同嵌入深度($r=20$ 、 25 、 30 mm)的感温标签进行试验,研究感温标签测量结果对中心导杆温度的跟随情况。试验控制环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用可控加热棒对导杆进行加热;为了降低测量误差,文中对感温标签信号的连续100次采样结果进行均值化处理,得到研究结果见表6。

试验过程中,信号阅读器与感温套管之间距离约为 $0.4\sim 0.6$ m,RFID测温系统工作正常,信号阅读器天线和感温标签天线之间数据传输稳定。

研究数据说明,稳态下开关柜绝缘套管硅橡胶在内部导杆热源作用下产生一定的温度梯度,感温标签埋设深度对采集到的温度数据有一定影响。由于嵌入式的感温元件与绝缘介质充分接触,接触

表6 绝缘套管感温标签嵌入位置对测量数据的影响

Table 6 Influence of embedded position of temperature sensitive label for insulation bushing on measurement data

导杆温度/ $^{\circ}\text{C}$	标签传感温度/ $^{\circ}\text{C}$		
	$r=20$ mm	$r=25$ mm	$r=30$ mm
30.0	30.0	30.0	29.8
40.0	40.0	39.8	39.8
50.0	49.7	49.5	49.5
60.0	59.6	59.3	59.2
70.0	69.5	69.3	69.0
80.0	79.4	79.2	78.9

热阻远小于传统捆扎式的布置方式,测量得到的温度数据偏差在开关柜热故障监测和诊断方面可以忽略。此外,将感温标签嵌入开关柜绝缘件的表层,可以同步感温标签和绝缘器件的更换周期,降低开关柜温度测量系统的维护难度,对完成测量系统和开关柜生命周期匹配具有重要价值。

4 结论

文中研究了开关柜 RFID 温度测量技术,采用有限元仿真软件设计了一种 915 MHz 频段的柔性温度标签天线并研究其性能参数,分析开关柜布置环境对感温标签性能的影响情况,并以此为基础设计了一种包含嵌入式 RFID 感温标签的开关柜绝缘套管,试验分析该测量方法得到的数据准确性。文中研究得到以下主要结论:

1)开关柜的金属隔板、外壳、母排等金属部件将影响天线与芯片的阻抗匹配,对 RFID 感温标签信号表现出增益抑制效应。当二者距离较大时,天线的通讯频带随距离的减小而发生偏移和收缩;当二者紧贴时,天线的性能发生急剧劣化。

2)RFID 感温标签弯曲对天线增益、阻抗特性会产生一定的影响,文中所设计的天线可共形于柱状物体表面,在一定的弯曲范围内对天线的性能影响不大。

3)将柔性 RFID 感温标签嵌入开关柜绝缘件内,测量数据可以较好地跟随导杆热源变化,温度梯度和接触所带来的测量偏差较小,可以较为准确地反映开关柜内部导体的实际温度,具有较高的准确性,同时具备易维护等优点,在开关柜智能化道路上有重要的推广价值。

参考文献:

[1] 刘玉娟,谢大为. 基于实时测量系统的电网运行可靠性评估系统[J]. 电力系统保护与控制,2007,35(15):28-31.

- LIU Yujuan, XIE Dawei. Power grid operation reliability evaluation system based on real-time measurement system[J]. *Power System Protection and Control*, 2007, 35(15): 28-31.
- [2] 刘宇明, 崔晨, 孙严智, 等. 基于改进EEUC算法的智能变电站无线传感器网络路由策略研究[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(7): 99-105.
- LIU Yuming, CUI Chen, SUN Yanzhi, et al. Research on routing strategy of wireless sensor network in intelligent substation based on improved EEUC algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(7): 99-105.
- [3] 方江华, 谢堪恒, 贺平, 等. 基于多传感器融合与机器学习的开关柜潜伏性故障检测方法[J]. *电子设计工程*, 2025, 33(18): 26-30.
- FANG Jianghua, XIE Kanheng, HE Ping, et al. Latent fault detection method for switchgear based on multi-sensor fusion and machine learning[J]. *Electronic Design Engineering*, 2025, 33(18): 26-30.
- [4] 徐东晟, 许一声. 高压开关柜触头温度在线监测的研究[J]. *高压电器*, 2001, 37(1): 54-55.
- XU Dongsheng, XU Yisheng. On-line monitoring of contact temperature inside HV switchgear cabinet[J]. *High Voltage Apparatus*, 2001, 37(1): 54-55.
- [5] 杜润宏. 开关柜触点温度监测报警系统[D]. 西安: 西安工程大学, 2011.
- DU Runhong. Monitoring and alarm system of switch cabinet contact temperature[D]. Xi'an: Xi'an Engineering University, 2011.
- [6] 黄绪勇, 唐标, 秦雄鹏, 等. 光伏组件异常温度热斑的红外检测方法[J]. *电网与清洁能源*, 2025, 41(10): 128-134.
- HUANG Xuyong, TANG Biao, QIN Xiongpeng, et al. An infrared detection method for abnormal temperature hot spots of photovoltaic modules[J]. *Power System and Clean Energy*, 2025, 41(10): 128-134.
- [7] 朱文海. 基于nRF905的小型无线温度传感器设计[J]. *仪表技术*, 2013(6): 52-54.
- ZHU Wenhai. Design of a small wireless temperature sensor based on nRF905[J]. *Instrumentation Technology*, 2013(6): 52-54.
- [8] 苏波, 李艳秋, 于红云, 等. 从环境中获取能量的无线传感器节点[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(9): 1586-1589.
- SU Bo, LI Yanqiu, YU Hongyun, et al. The wireless sensor node harvesting energy from environment[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(9): 1586-1589.
- [9] 洪丹龙. 适应环境能量补给的无线传感器网络节点低功耗技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- HONG Danlong. Research on low power consumption technology of wireless sensor network nodes adapted to environmental energy supply[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [10] 曾燕. 无源超高频电子标签天线设计及其封装特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- ZENG Yan. Design of passive UHF electronic tag antenna and analysis of its packaging characteristics[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [11] 孔纯成. 无源超高频RFID标签天线研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- KONG Chuncheng. Research on passive UHF RFID tag antenna [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [12] 田川, 尹祖伟. 无源超高频标签天线工程设计案例教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- TIAN Chuan, YIN Zuwei. Case study of passive UHF tag antenna engineering design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.
- [13] 曾岩. 基于无源RFID标签的低功耗温度传感器设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- ZENG Yan. Design of low power temperature sensor based on passive RFID tag[D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
- [14] 孔令荣. 一种适用于无源RFID测温标签的温度传感器[J]. *电子技术应用*, 2013, 39(4): 48-51.
- KONG Lingrong. A temperature sensor circuit for passive UHF RFID transponder of temperature detecting[J]. *Application of Electronic Technique*, 2013, 39(4): 48-51.
- [15] 周俊, 汪之昊, 冯国强, 等. 基于RFID的开关柜温度实时监测技术研究[J]. *科学技术创新*, 2020(5): 61-63.
- ZHOU Jun, WANG Zhihao, FENG Guoqiang, et al. Research on real-time temperature monitoring technology of switchgear based on RFID[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2020(5): 61-63.
- [16] 李波涛, 张宝英, 赵世坡, 等. UHF RFID温度标签的研究及其在开关柜温度监测系统中的应用[J]. *电测与仪表*, 2017, 54(4): 117-122.
- LI Botao, ZHANG Baoying, ZHAO Shipo, et al. Research on UHF RFID temperature tags and its application in switch cabinet temperature monitoring system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(4): 117-122.
- [17] 关志远, 张周胜. 基于RFID传感器的配网设备温度监测系统研究[J]. *电子技术应用*, 2017, 43(3): 88-91.
- GUAN Zhiyuan, ZHANG Zhousheng. Research on temperature monitoring system for distribution network equipment based on RFID sensor[J]. *Application of Electronic Technique*, 2017, 43(3): 88-91.
- [18] 黄玉兰. 物联网射频识别(RFID)技术与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- HUANG Yulan. RFID in Internet of things[M]. Beijing: People's Posts & Telecommunications Publishing House, 2013.
- [19] 杨素素. 无芯片RFID标签的研究与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- YANG Susu. Research and design of chipless RFID tag[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [20] BASAT S, LIM K, KIM I, et al. Design and development of a miniaturized embedded UHF RFID tag for automotive tire applications[C]//Proceedings Electronic Components and Technology, 2005. ECTC'05. USA: IEEE, 2005: 867-870.
- [21] BABAR A A, MANZARI S, SYDANHEIMO L, et al. Passive UHF RFID tag for heat sensing applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(9): 4056-4064.
- 徐世泽(1973—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为输配电技术。
- 徐凯宏(1998—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力系统过电压仿真计算和电力设备状态监测研究(通信作者)(E-mail: 5202181038@qq.com)。