

面向电力设备数字孪生的 RFID 传感器与数据传输协议设计

杨帆¹, 朱力¹, 刁冠勋², 杨子康¹, 倪祺², 吴涛¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 电力设备数字孪生技术的发展推动了各类新型传感技术在电力行业中的应用, 并亟需一条稳定、明确的数据上云渠道, 以供给电力设备孪生体进行更加深入的状态分析及故障预测。为此, 研制了一种带有金属反射板的双天线射频识别(radio frequency identification, RFID)加速度与温度传感器, 并设计了 RFID 传感系统内的数据包格式以及传感数据经由边缘网关通过 4G 网络以消息队列遥测传输(message queuing telemetry transport, MQTT)协议上传至物联网云平台的数据传输通道, 然后以 OFPSZ-150000/220 变压器为例进行了传感器测试和数据传输协议的应用。结果表明: 所设计的数据传输协议丢包率主要存在于 RFID 传感器信道内, 在 2 m 内的丢包率为 11.3%, 在最远通信距离 3 m 处的丢包率为 38.2%, 在数据经由边缘网关上云的信道中几乎不存在数据包的丢失问题。研究表明所设计的 RFID 传感器具有一定的实用性, 且数据通信协议通道是稳定可靠的。

关键词: 数字孪生; RFID 传感器; 物联网; 丢包率; 通信协议

Design of RFID Sensor and Data Transmission Protocol for Digital Twin of Electrical Equipment

YANG Fan¹, ZHU Li¹, DIAO Guanxun², YANG Zikang¹, NI Qi², WU Tao¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: The development of digital twin technology of electrical equipment promotes the application of various new sensing technologies in the power industry, and a stable and clear data cloud channel is urgently needed to provide electrical equipment twins with more in-depth status analysis and fault prediction. For this reason, we developed a dual antenna radio frequency identification(RFID) acceleration and temperature sensor with metal reflector. Then, we designed the data package format in the RFID sensor system and the transmission channel, and uploaded sensor data to the Internet of Things cloud platform via the message queuing telemetry transport (MQTT) protocol over a 4G network by way of an edge gateway. Finally, the OFPSZ-150000/220 transformer was taken as an example for sensor testing and data transfer protocol application. The results show that the designed data transmission protocol mainly exists in the RFID sensor channel, with a packet loss rate of 11.3% within 2 meters and 38.2% at the farthest communication distance of 3 meters. There is hardly any problem of packet loss in the channel where data pass through the cloud on the edge gateway. The research shows that the designed RFID sensor is practical and the data communication protocol channel is stable and reliable.

Key words: digital twin; RFID sensor; Internet of Things; packet loss rate; communication protocol

0 引言

近年来, 在物联网技术快速发展的大背景下, 电力设备数字孪生技术应运而生^[1-3], 国家电网公司

不断提倡利用先进的通信、信息和控制技术构建统一坚强的智能化电网系统^[4-7]。其中最为关键的基础技术即传感技术和通信技术, 当前主流的物联网协议中, 高级消息队列协议(advanced message queuing protocol, AMQP)、表述性状态传递/超文本传输协议(representational state transfer/ hyper text transfer protocol, REST/HTTP)工作在以太网, 受限应用协

基金资助项目: 国网上海市电力公司科技项目 (5500-202017468A-0-0-00); 国家重点研发计划 (2021YFB2401701)。

Project supported by Science and Technology Project of State Grid Shanghai Electric Power Company (5500-202017468A-0-0-00), National Key R&D Program of China (2021YFB2401701).

议(constrained application protocol, COAP)适用于资源受限的设备及无线传感网络, 面向实时系统的数据分布服务(data distribution service for real-time systems, DDS)协议和消息队列遥测传输(message queuing telemetry transport, MQTT)协议的兼容强。将这些主流的物联网(Internet of Things, IoT)协议与 IEC61850-6、ISO/IEC18000 等通信协议结合使用, 能够实现电力设备数字孪生数据的高效传输^[8-9]。

射频识别(radio frequency identification, RFID)技术在物流、医学、制造等行业的应用已经非常成熟^[10]。RFID 技术首先与传感技术相结合, 诸多学者开展了相应的研究, DE 等人采用印刷天线的方案, 设计了一种具有测量温度和加速度功能的加速度 RFID 传感器^[11]。KONSTANTINOS 等人利用天线作为温度传感器, 设计出一款高性能 RFID 温度传感器^[12]。随后, RFID 传感技术凭借其独特的优势逐渐应用在电力行业, 邓芳明等人研制了一种基于 RFID 的加速度传感器, 在 110 kV 变压器箱体上进行了振动测量实验和振动信号分析^[13]。王泉智等人设计了一款 RFID 加速度传感器, 实现了输电线路导线舞动的长期在线监测^[14]。DENG 等人设计了一个 RFID 传感器, 实现了金属氧化物避雷器的在线监测^[15]。ZHAI 等人提出了一种基于射频识别传感器的变电站电气设备状态信息采集系统, 并建立了信息采集系统的信道模型^[16]。

目前数字孪生技术在电力领域的应用结合了云计算、大数据、人工智能等技术, 将电力设备运行状态参数上传至云端汇集成数据库系统^[17-18]。应俊等人通过分析对比电力行业与物联网行业所用的数据通信协议, 给出了在电力领域中的云平台与边缘设备之间应该使用 MQTT 协议进行数据通信协议的设计^[19]。窦仁晖等人基于 IEC61850 协议进行了变电站的站控层服务协议设计, 并通过测试有效提升了同性能效率和效率^[20]。高洋等人基于用户数据报协议(user datagram protocol, UDP)实现了微电网协调优化控制策略的实时感知数据试验^[21]。

由此可见, 虽然 RFID 传感技术在电力领域的应用已经逐渐开始普及, 但电力设备数字孪生技术的发展还需要新型的 RFID 传感器, 也需要一条可靠的数据传输通道完成监测数据的上云^[22-23]。

基于上述分析, 本文设计了一款带有金属反射板的双天线 RFID 加速度与温度传感器, 并基于 IoT 协议设计了一条 RFID 传感数据传输通道, 最后以

OFPSZ-150000/220 变压器为对象, 完成了 RFID 传感器的应用实验以及传感数据传输通道的验证, 为新型传感器接入大电网中的数据传输通道设计起到了借鉴指导意义。

1 电力设备数字孪生架构的建立

1.1 数字孪生技术架构

数字孪生技术涵盖了数字支撑技术、数字线程技术、数字孪生体技术、人机交互技术 4 大类型, 其架构如图 1 所示。

图 1 中, 数字线程技术和数字孪生体技术是核心技术, 数字支撑技术和人机交互是基础技术。本文主要针对基础技术中的数字支撑技术进行相关研究。数字支撑技术具备数据获取、传输、计算、管理一体化能力, 支撑数字孪生高质量开发利用全量数据, 涵盖了采集感知、执行控制、新一代通讯、新一代计算、数据模型管理 5 大类型技术。未来, 集 5 类技术于一身的通用技术平台有望为数字孪生提供“基础底座”服务。

采集感知技术的不断创新是数字孪生蓬勃发展的源动力, 支撑数字孪生更深入获取物理对象数据。一方面, 多传感技术不断融合, 传感器向微型化发展, 能够被集成到智能产品之中, 实现更深层次的数据感知、更丰富的数据获取; 另一方面, 随着物联网技术的不断发展, 在新型传感技术的基础上结合新一代通信、计算技术进行数字孪生基础数据采集与传输协议的设计, 能够为推动电力设备数字孪生实时仿真监测并预测其运行状态。

1.2 IoT 云平台选择

当前国内主流的 IoT 平台主要有阿里云、华为云、腾讯云等, 将 3 家主流 IoT 平台的规格参数进行汇总对比如表 1 所示。

对比分析 3 家云平台的主要参数, 可明显地发现阿里云所支持的协议数量、中级服务质量(quality of service 1, QoS1)消息存储时间、单设备上下行限制、设备端与云端软件开发工具包(software development kit, SDK)数量、物模型参数、云端下行应用程序接口(application programming interface, API)等参数的性能都有较大的优势, 且在评估同样实例的情况下, 阿里云所需的费用成本最低。

1.3 数据传输协议选择

本文以变压器箱体上的振动与温度参量为例, 设计了一款集成加速度与温度的 RFID 传感器对其

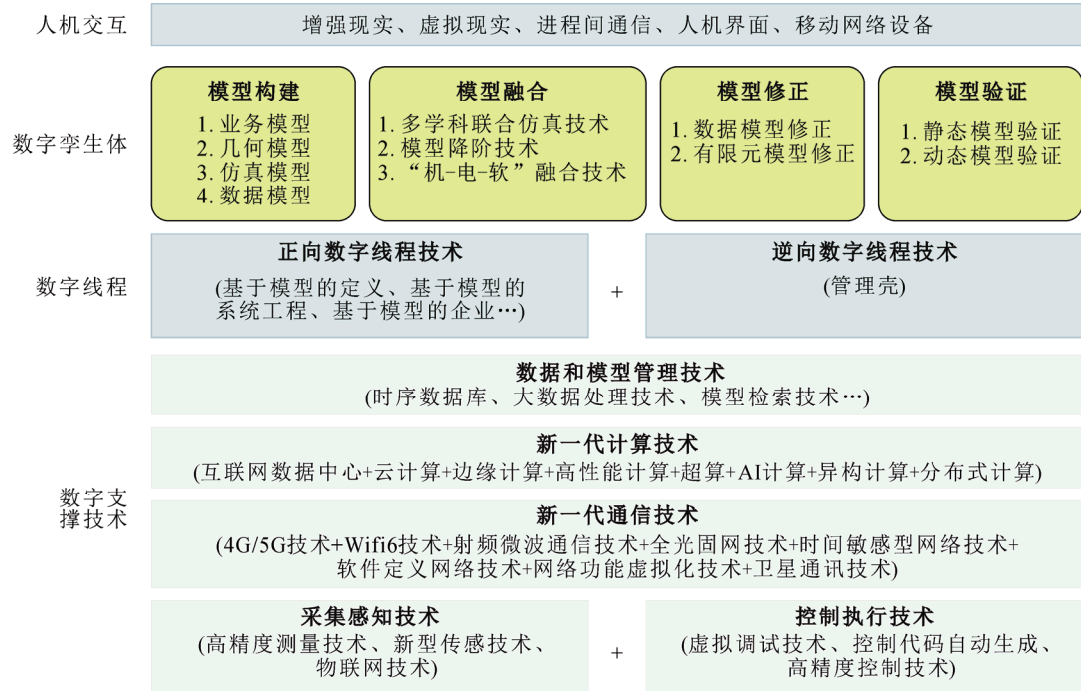


图 1 数字孪生技术体系架构

Fig.1 Digital Twin technology architecture

表 1 国内主流 IoT 平台参数对比

表 2 本文协议与传统协议对比

Table 1 Comparison of domestic mainstream IoT platform parameters

参数	阿里云	华为云	腾讯云
支持协议数量	4	3	3
单设备上行限制 (/条·s ⁻¹)	低级服务质量 QoS0: 30 中级服务质量 QoS1: 10	50	30
单设备下行限制	50		50
设备端 SDK 数量	6	3	3
云端 SDK 数量	6	3	6
QoS1 消息存储时间/d	7		1
规则引擎种类	9	7	8
物模型参数量/个	300		100
云端下行 API/(次·s ⁻¹)	1 600	100	200
费用评估/(元/月) (实例: 5 万个设备; 1 万个同时在线; 上下行消息 100 条/s)	618	15 000	1 950

进行监测，并与传统的光纤测温传感器、压电式加速度传感器进行传感数据采集与传输过程中所用的协议进行对比，结果如表 2 所示。

分析可知，本文所提出的协议与 RFID 传感器搭配使用，直接通过电磁信号在空中进行数据采集与传输，可以减少传统方式下传感数据采集与传输过程中的所需的数据输出线和协议转接线。

所设计的基于新型 RFID 传感器的电力设备数字孪生数据传输协议通道如图 2 所示。

Table 2 Comparison of the proposed protocol and the traditional protocol

设备	本文协议	传统协议
本文 RFID 传感器/ 传统传感器	ISO/IEC18000	TTL 电平转 485 转 232 转 USB
本文 RFID 阅读器	IEEE802.2/802.3	无
IoT 云平台	MQTT	MQTT
特点	技术成本较高，硬件设备 需求较少，无电气连接	技术成本较低，硬件设备 需求较多，使用复杂

其中，RFID 加速度与温度传感器通过 ISO/IEC18000-6C 空中接口协议将传感数据以自定义数据包的格式发至 RFID 阅读器；RFID 阅读器在接收到数据包后通过 IEEE 802.2/802.3 通信协议以以太网帧的格式发至芯聚智 X2000 边缘网关；边缘网关对以太网数据包进行解析，并将可选数据转换为 json 格式，通过 MQTT 协议将其直接上传至阿里云物联网平台。

2 基于金属反射板的双天线 RFID 传感器设计

2.1 RFID 传感器整体架构

为了能同时测得变压器箱体上的振动与温度信号，设计了如图 3 所示 RFID 传感器架构，RFID 传感器工作在 915 MHz。选择加速度传感器对变压器进行振动信号的监测，对加速度进行一次数值积

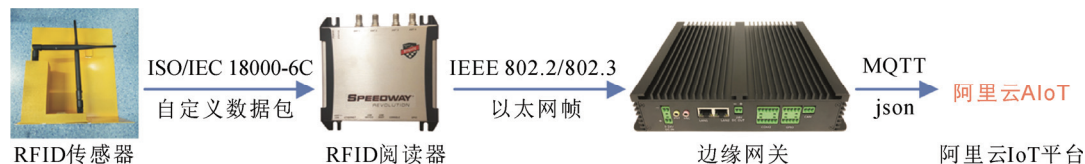


图2 传感数据传输过程的协议及其数据包

Fig.2 Protocols and data packages for sensor data transfer

分和二次数值积分后即可得到速度和位移参数。在 RFID 传感器内部同时嵌入加速度传感器芯片和温度传感器芯片, 双天线与 RFID 阅读器之间通过空中接口协议 ISO 18000-6C 进行数据通信。其中加速度芯片选择 LIS3DH 三轴加速度传感器, 测量精度为 $\pm 2g$ (g 为重力加速度), 量程为 1 Hz~5.3 kHz; 温度传感器芯片选择 EVAL01-FENIX-RM, 测量精度为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度范围为 $-85\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2 个传感器芯片均由 RFID 射频芯片供电, 射频芯片选型为 ROCKY100, 主控芯片(MSP430)的额定工作电压为 3.0 V, 如何保证传感器内部多个芯片取得稳定的工作能量是传感器设计的主要难点, 本文提出了一种采用双天线取能的方案, 天线 1 同时进行取能和通信, 而天线 2 只进行取能, 双天线的结构保证了足够的能量供应^[24]。

2.2 射频电路设计

考虑到传感器使用场景在变压器外壳上存在金属物体, 为避免传感器天线受到干扰, 采用单极子外置天线作为 RFID 传感器天线, 通过实物制作后测得阻抗实部为 $60.133\text{ }\Omega$, 虚部为 $-15.872\text{ }\Omega$ 。天线传输线的特性阻抗为 $50\text{ }\Omega$, 需将天线的实际阻抗匹配到 $50\text{ }\Omega$ 才能使天线辐射的能量最大化、RFID 传感器的通信性能最优化。通过并联 14.0 nH 电感, 串联 6.5 pF 电容可完成天线前端的阻抗匹配。

射频芯片 ROCKY100 的阻抗为 $(52-j479)\text{ }\Omega$, 且芯片的射频信号输入需要为一对幅值相等相位相差 180° 的差分信号, 所以需要在天线与射频芯片之间搭建巴伦电路。结合天线阻抗匹配电路, 设计出图 4 所示的巴伦电路。

在巴伦电路中, 将端口 1 视为阻抗匹配完成后的 $50\text{ }\Omega$ 天线端, 阻抗写为: $Z_s=R_s+jX_s$; 端口 2、3 为 2 个差分信号输入端, 阻抗均为 $(52-j479)\text{ }\Omega$, 记为: $Z_d=R_d-jX_d$; 在源端串联电容后的等效源阻抗写为: $Z'_s=R_s+jX'_s$ 。计算得出: $C_{ms}=C_{m0}=0.378\text{ pF}$, $L=L_{m1}=L_{m2}=116\text{ nH}$, $C=C_{m1}=C_{m2}=0.26\text{ pF}$ 。

图 5 为 RFID 射频芯片主电路, 所设计的射频

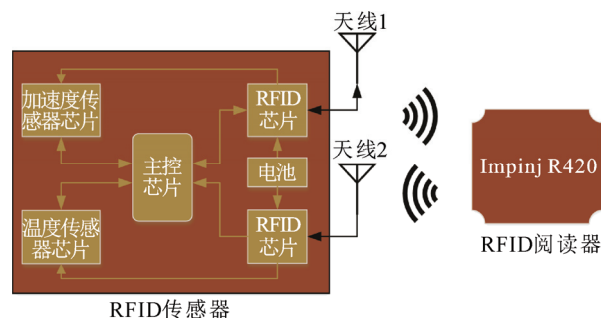


图3 RFID 传感器架构

Fig.3 RFID sensor architecture

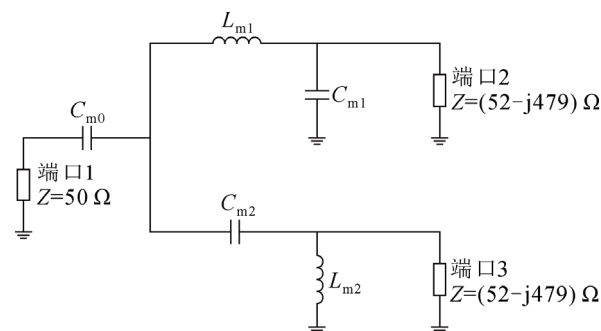


图4 巴伦电路

Fig.4 Barron circuit

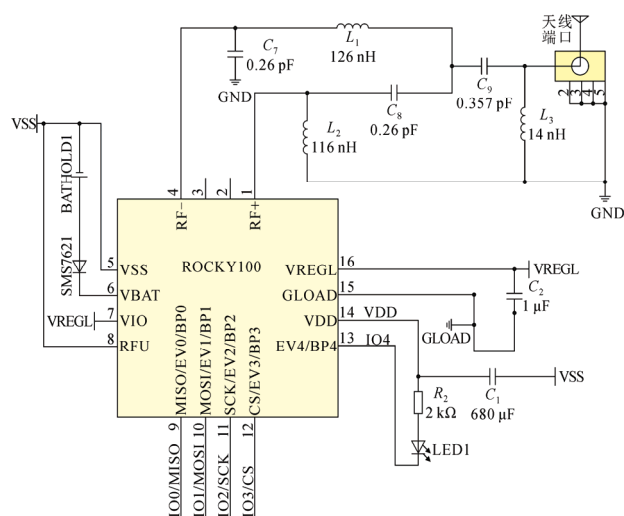


图5 RFID 射频芯片主电路

Fig.5 RFID main circuit

前端巴伦匹配电路将天线接收到的射频信号转换为一对差分信号输入到射频芯片的 RF+ 和 RF- 端, 另一根天线的前端电路设计与该天线相同。将巴伦电路和天线前端的阻抗匹配电容、电感进行整理后可得 L_1 、 L_2 、 L_3 、 C_7 、 C_8 、 C_9 数值, 其中 C_4 是天线前端 6.5 pF 和 0.378 pF 电容串联后得到的电容值。

2.3 带金属反射板的双天线性能测试

考虑到变压器环境下的电磁干扰问题, 设计了传感器外部的电磁屏蔽层, 屏蔽层外层采用金属材料、碳材料和磁性金属及其氧化物等对电磁波具有反射、吸收作用的材料填充进环氧树脂制成机械强度更高的电磁屏蔽材料, 屏蔽层内层由纯环氧树脂构成绝缘层, 以保证电子器件的正常工作^[25]。

为了提高 RFID 传感器的通信距离, 增加一块“L”型金属铝板底座, 使传感器工作时的射频信号辐射方向更具指向性; 该金属铝板还能有效导热, 使温度传感器更加准确地监测到变压器箱体温度。传感器实物如图 6 所示, 2 根单极子天线的架设方式需要十字交叉摆放, 每一根天线的极化方式为线极化, 这样就构成了兼具垂直极化和水平极化的天线, 与金属底座结合之后能够将天线能量以最大的效率朝特定方向反射。

整个传感器工作电压为 5 V, 电流 4 mA, 功耗约为 10 mW。其中加速度传感器工作电压为 1.8 V, 电流随着测量振动频率不同而有所差别, 在 100 Hz 时电流为 20 μ A, 1 344 Hz 时为 185 μ A, 其功耗位于 36~333 μ W 之间。

在微波暗室进行天线性能测试, 以验证在增加反射金属铝板后的天线辐射性能。选择 860~1 000 MHz 进行扫频, 频点间隔设置为 5 MHz, 从图 7 天线增益曲线可以看出, 在整个扫频频段内, 915 MHz 时的天线增益达到了最大值 5.96 dB, 意味着谐振点位于 915 MHz 左右, 5.96 dB 的增益数值对于 915 MHz 频率下的天线来说性能较为优异。图中, 增益的单位为 dB, 即增益的参考基准为全方向性天线。

图 8 和图 9 是增加反射金属铝板条件下的天线 E 面(平行于电场方向的平面)和 H 面(平行于磁场方向的平面)辐射方向图。从 E 面方向图可看出, 辐射主瓣大约位于 0°~60°, 而金属反射板长边位于 90°~180°方向上, 短边位于 180°~270°方向上, 可直观地看出在有金属反射板的方向上辐射功率较小, 反射板能够很好地将射频信号朝着 30°方向集中发射; 从 H 面方向图可以看出, 辐射主瓣同样位于

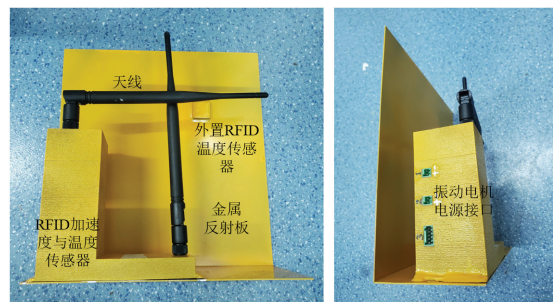


图6 RFID传感器实物图

Fig.6 Physical RFID sensor

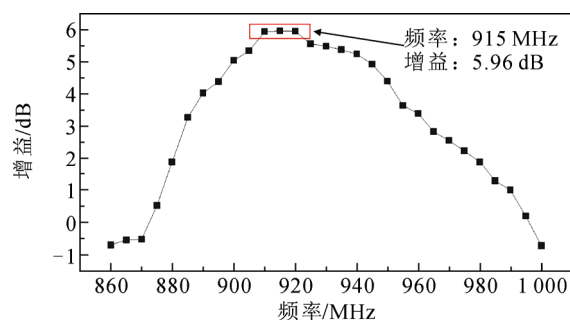


图7 天线增益曲线

Fig.7 Gain curve of antenna

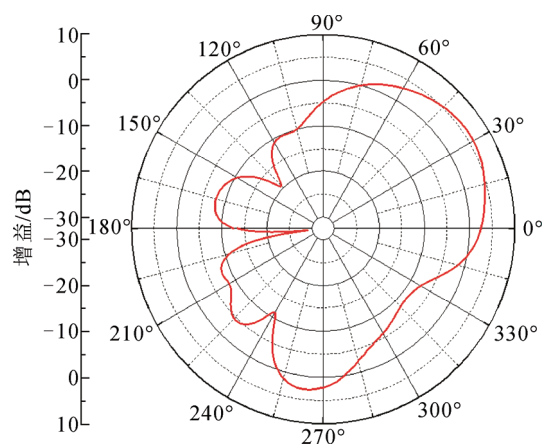


图8 E面的辐射方向图

Fig.8 Radiation direction diagram in E plane

330°至 0°和 0°至 60°之间, 反射板将射频信号集中朝向 15°方向发射, 且在金属反射的 90°~270°方向上, 辐射率受到了抑制。这也证实金属反射板能够将天线功率以更优的性能朝指定方向辐射。

3 基于 IoT 协议的传感数据格式控制

3.1 RFID 传感数据包格式控制

RFID 通信机制中阅读器与 RFID 传感器之间进行数据传输的方式如图 10, 整个通信过程如下:

1) 阅读器通过天线向 RFID 天线发射 915 MHz

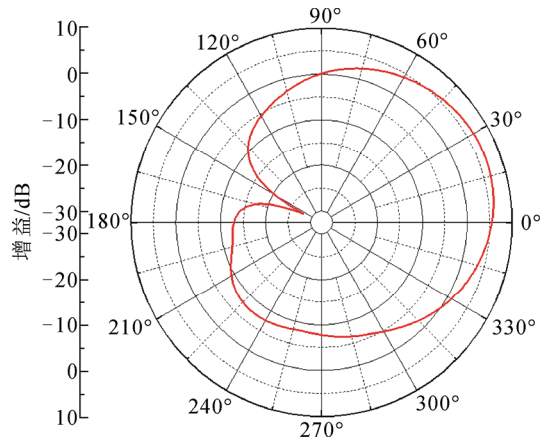


图 9 H 面的辐射方向图

Fig.9 Radiation direction diagram in H plane

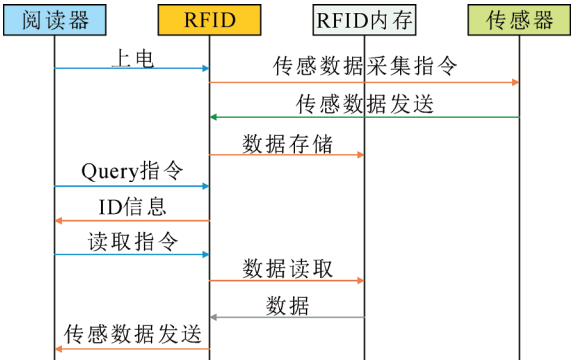


图 10 RFID 传感数据传输方式

Fig.10 Process of sensor data transmission by RFID

的射频信号, RFID 接收射频能量并蓄能直至达到开启内部电路工作的阈值。

2) RFID 开始工作后, 向加速度和温度传感器发送传感数据采集指令。

3) 加速度和温度传感器开始连续采集数据, 采集完毕后返回给 RFID。

4) RFID 在接收到传感数据后, 将其存储在 RFID 内存中。

5) 阅读器基于 ISO/IEC18000-6C 协议向 RFID 发送 Query 轮询指令, 查询射频范围内是否有 RFID 响应。

6) RFID 接收到 Query 指令后立即向阅读器返回自身 ID 信息。

7) 阅读器接收到 ID 信息后表示握手成功, 于是开始下发数据读取指令。

8) RFID 在接收到读取指令后, 向自身内存访问读取传感数据。

9) RFID 将加速度和温度数据返回给阅读器。

本文基于 ISO/IEC18000-6C 空中接口协议自行设计了 RFID 传感器数据包, 以存储温度的数据包的格式为例, 所设计的协议数据包的格式表示为图 11 所示。

RFID 阅读器与传感器在通信中的帧头、帧尾、数据包类型、循环冗余校验位、命令格式等都遵循 ISO/IEC18000-6C 协议, 并修改了部分数据位的格式, 天线对应端口的射频信号大小用 RSSI 位表示, 单位为 dBm(以 1 mW 为基准值); 915 Hz 射频通信频率所用的射频信道用 CHANN 位表示; 返回数据的天线编号用 ANT 位表示; 自行定义读取温度时所读取的次数用 Average 位表示; Checksum 位为校验位, 为从帧类型(Type)到最后一个指令参数(Checksum 前一位)的 16 进制累加和, 并只取累加和的最低一个字节。将传感器采集的温度数据以 16 进制的格式存储在 2 个 Temp 位中, 直接抓取 2 个 Temp 位的数据即可识别温度数值。

由于芯片内存有限, 在读取加速度数据时, RFID 阅读器的盘存指令、传感器的 EPC 返回指令都与温度传感器一致。不同之处在于 RFID 阅读器对加速度传感器的读取指令需要访问并读取 RFID 传感器的 User 存储区, 从存储区的 0x0100 地址开始读取一共 241 个字节的数据包, 每个数据包中包含 60 组 AACD 为帧头的开始字节和 1 个以 EE 为帧尾的结束字节。每组数据中的 AACD 为帧头, 后面依次为加速度数据, 每组加速度数据的采样间隔为 0.5 ms, 从而实现变压器振动信号在 30 ms 周期内连续不间断的加速度数据采集。

3.2 边缘网关数据包转换

RFID 阅读器将传感器上传得数据包进行封装后, 以以太网帧的格式通过 IEEE 802.2/802.3 协议发至边缘网关, 数据包在边缘网关内进一步封装, 以 json 格式通过 MQTT 协议将接收到的传感数据直接上传至物联网平台, 如图 12 所示。

本文所选用的边缘网关型号为芯聚智 X2000, 网关将以太网帧格式的数据包初步转换为 json 格式, 根据需要选择性保留需要的数据位, 以温度传感器为例, 该 json 数据包中的温度数值为 16 进制, 在边缘网关中将其转换为 10 进制, 再缩小 10 倍即可得到实际的温度数据。

3.3 IoT 平台数据协议控制

边缘网关通过 MQTT 协议将 json 格式的数据包以 4G 网络方式直接上传至云平台, 在阿里云平

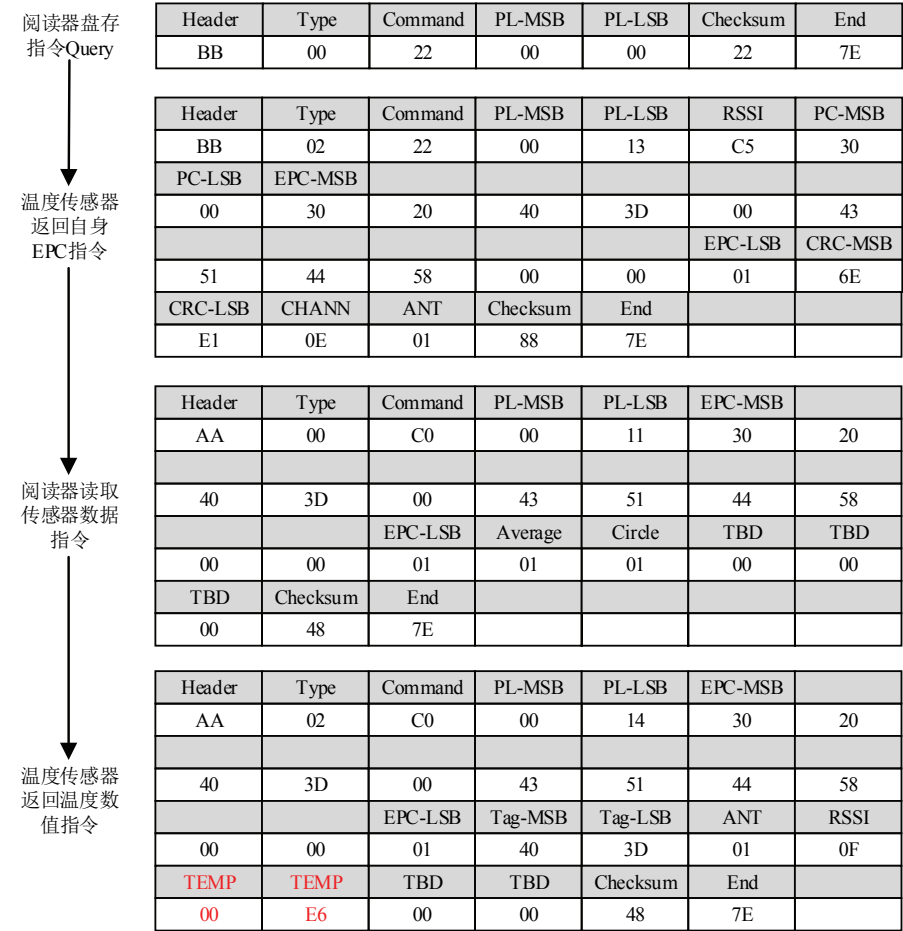
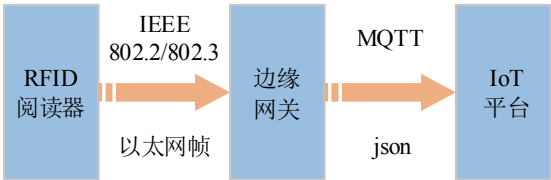


图 11 存储温度的数据包格式

Fig.11 Data format for temperature storage



Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Bit1	MQTT报文类型				DUP	QoS等级		保留
Bit2	剩余长度							

图 13 MQTT 固定报头

Fig.13 MQTT fixed header

图 12 边缘网关通信协议与数据包格式

Fig. 12 Edge gateway communication protocol and packet format

台上对 json 格式的数据包进行数据包的抓取, 读出 epc 和 usermemory 两个数据。

MQTT 协议分为 3 个部分, 固定报头、可变报头、有效载荷。每个 MQTT 报文都必须携带一个固定报头, 格式如图 13 所示, 其中 MQTT 报文类型位, DUP 标志位, QoS 服务质量位和保留位均可查表得到^[26]。

从第 2 个字节开始的数据就包括了可变报头和有效载荷, 在本文的阿里云物联网平台上所使用的

MQTT 协议通信中, 有效载荷为边缘网关发送而来的 json 格式的数据。以温度数值为例, IoT 平台服务器读取到的 json 数据包为:

{“epc”: “3020403D0043514458000001”, “antennaPort”: “1”, “userMemory”: “23.0”, “peakRssi”: “-55.0”, “type”: “0”}

在 json 格式的数据包中, “:” 表示映射关系, 其左边的变量与右边的值相对应; “,” 用以分隔多个并列数据; “{}” 表示所有映射的集合。该数据包中的信息包含了传感器的编码 epc, 通信所占用的天线端口编号 antennaPort, 芯片存储区的温度值 userMemory, 输入端的信号强度 peakRssi 和数据包

类型 type。

4 RFID 传感器测试与应用

4.1 通信距离测试

通信距离是 RFID 传感器性能指标中最为关键的一项参数, 通信距离的远近决定了实际应用时 RFID 阅读器及天线与电力设备之间安全距离。

针对本文所设计的 RFID 传感系统, 首先在实验室进行了通信距离的初步测试, 测试场景如图 14 所示, 阅读器部分由图 14(a)中所示的英频杰阅读器和阅读器天线构成, 通过空中接口协议 ISO/IEC18000-6C 与图 14(a)中所示的 RFID 传感器进行传感数据的读取, 传感数据经由网线上传至图 14(b)所示的上位机。

测试时控制阅读器发射功率为 0.64~1.78 W, 将阅读器发射功率与阅读器能读取到传感数据的最远距离汇总整理如表 3 所示。

当阅读器天线增益固定为 9 dB(放大 4 倍)时, 控制阅读器发射功率从 0.64 W 以 1.25 mW 逐次增加到最大发射功率 1.78 W。RFID 的数据读取距离从 2.46 m 增加到了 3.12 m; 在每个发射功率下进行多次测试, 对第一次读取到传感数据时的时间取平均值, 其时间也从 20.5 s 逐渐减少到 10.6 s。固定发射功率为 1.78 W, 当 RFID 传感器的首次读取时间(充电时间)增加到约 70 s 时, 达到最远通信距离 6.5 m。分析可知, 虽然发射功率从 0.64 W 到 1.78 W 增加了接近 2 倍, 读取距离只增加了 0.5 m 左右, 但传感数据的首次读取时间从 20.5 s 下降至 10.6 s, 也就是 RFID 传感器通过射频取能达到正常工作能量阈值的时间缩小了 1 倍, 在所有情况下, 第 2 次及以后的传感数据读取时间稳定在 1~3 s 之间。

将本文所设计的 RFID 传感器与文献[11](RFID 温度与加速度传感器)、文献[13](RFID 加速度传感器)之间的主要参数进行对比, 结果如表 4。可以发现, 本文的 RFID 传感器在无源方面、工作带宽和测量精度方面都占优, 但在通信距离上的优势与文献[13]还有差距, 主要是由于测量参数的增加导致传感器内部功耗提高, 从而影响了射频通信的距离。

4.2 通信丢包率测试

本文所设计的传感数据传输信道可分为 2 个部分: 一是 RFID 传感器与阅读器之间的初始传感数据读取; 二是经过边缘网关的数据上云通道。基于此, 本文进行了通信信道丢包测试, RFID 传感器

固定每 2 s 进行一次数据读取指令的下发, 一共进行 6 次测试, 每次持续进行 10 min 的数据采集与传输上云, 将测试结果整理为表 5 所示。

从表 5 测试结果可知, RFID 传感数据传输通道中的数据丢包只存在于 RFID 传感器与阅读器

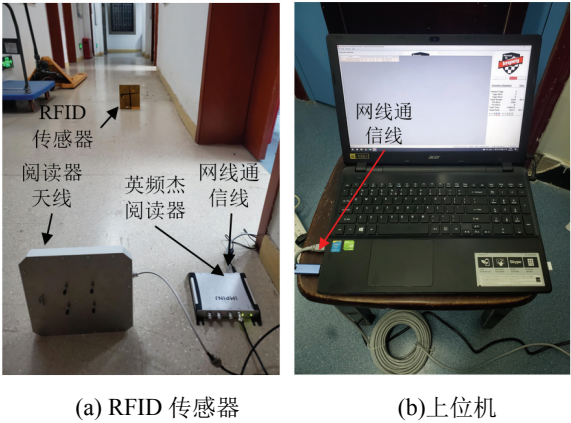


图 14 RFID 传感系统通信距离测试

Fig.14 RFID sensing system communication distance test

表 3 RFID 传感系统通信距离测试结果

Table 3 RFID sensing system communication distance test

results		
发射功率/W	读取距离/m	首次读取平均时间/s
0.64	2.46	20.5
0.80	2.66	18.7
1.00	2.71	16.9
1.25	2.81	13.8
1.60	2.87	11.1
1.78	3.1	10.6

表 4 RFID 传感器参数对比

Table 4 Comparison of RFID sensor parameters

参数	本文	文献[11]	文献[13]
是否有源	无源	有源	无源
工作带宽/MHz	29	<25	<10
最大通信距离/m	6.5	6	10
加速度精度/(mg·LSB ⁻¹)	1	4	4
温度精度/℃	0.5	0.5	

表 5 RFID 传感系统通信丢包率测试

Table 5 Communication loss rate test for RFID sensing

system		
读取距离/m	RFID 信道丢包率/%	网关信道丢包率/%
1.0	1.2	0
1.5	5.2	0
2.0	11.3	0
2.5	26.6	0.7
3.0	38.2	0.9

之间的通信信道内,在传感数据传到网关并通过 4G 网络上传至 IoT 平台中几乎不存在数据包的丢失情况。由于射频功率有限,本文所设计的 RFID 传感器在 2 m 以内的丢包率较低,当通信距离增大到 3 m 时,RFID 传感器传输过程中大概会丢失 38.2%的数据包。

RFID 传感器采集的一个数据包内包含 60 组数据,每组数据间隔为 0.5 ms,当通信稳定后,每一个数据包的采集与传输时间在 1~3 s 之间。如果出现传感数据丢包,并不会影响下一个被完整读取数据包内的所有加速度与温度数据。

4.3 现场应用

以 OFPSZ-150000/220 变压器为实验对象,进行 RFID 传感器应用,现场实验时 RFID 传感器的布置位置如图 15 所示,RFID 通信距离为 3 m,挑选该变压器外壳上的 4 个监测点位进行温度与加速度数值的监测采集与上云。

本文选择阿里云物联网平台对现场应用监测数据进行实时显示,如图 16 所示,IoT 平台上实时显示 1—4 号共 4 个监测点的加速度与温度数值。



图 15 RFID 传感器现场应用

Fig.15 Field application of RFID sensor

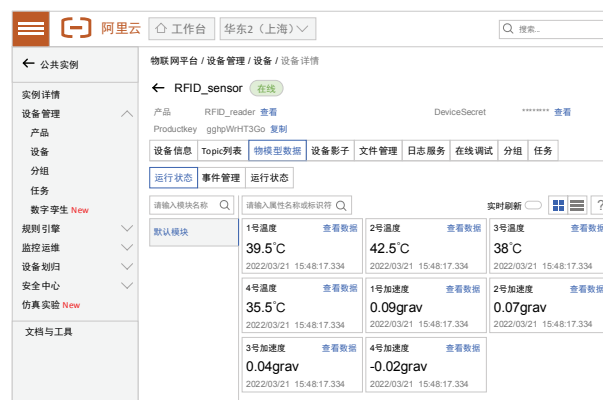


图 16 阿里云 IoT 数据监控平台

Fig.16 Ali Cloud IoT data monitoring platform

5 结论

本文设计了 1 款带有金属反射板的双天线取能 RFID 传感器,能够同时监测加速度和温度 2 个参数;并基于 IoT 协议设计了 1 条 RFID 传感数据传输与上云通道。得到以下结论:

1) 提出了采用线极化方式下交叉摆放的 2 个单极子天线与金属铝板底座搭配,不仅解决了多参量 RFID 传感器的工作能耗问题,同时也有效优化了传感器的射频信号辐射指向性,并在测试中验证了该方案的先进性。

2) 基于 ISO/IEC18000-6C、IEEE802.2/802.3、MQTT 协议设计了 1 条加速度与温度数据经由 RFID 传感器、边缘网关到阿里云 IoT 平台的数据传输通道。通过测试所设计的协议通道丢包率主要存在于 RFID 传感器信道内,在 2 m 内的丢包率为 11.3%,在最远通信距离 3 m 处的丢包率为 38.2%;后续的传感数据上云信道中几乎不存在数据包的丢失问题。

3) 以 OFPSZ-150000/220 变压器为实验对象,进行了现场实验,在阿里云 IoT 平台上完成了监测数据的实时显示,表明所设计的传感器及其数据传输协议通道较为可靠。

参考文献 References

- [1] 赵 鹏,蒲天骄,王新迎,等.面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望[J].中国电机工程学报,2022,42(2):447-458.
ZHAO Peng, PU Tianjiao, WANG Xinying, et al. Key technologies and perspectives of power Internet of things facing with digital twins of the energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 447-458.
- [2] 相晨萌,曾四鸣,闫 鹏,等.数字孪生技术在电网运行中的典型应用与展望[J].高电压技术,2021,47(5):1564-1575.
XIANG Chenmeng, ZENG Siming, YAN Peng, et al. Typical application and prospect of digital twin technology in power grid operation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1564-1575.
- [3] 刘亚东,陈 思,丛子涵,等.电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J].高电压技术,2021,47(5):1539-1554.
LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1539-1554.
- [4] 齐 波,张 鹏,张书琦,等.数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J].高电压技术,2021,47(5):1522-1538.
QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1522-1538.
- [5] 李 鹏,毕建刚,于 浩,等.变电设备智能传感与状态感知技术及应用[J].高电压技术,2020,46(9):3097-3113.
LI Peng, BI Jiangang, YU Hao, et al. Technology and application of

- intelligent sensing and state sensing for transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3097-3113.
- [6] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
- XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4.
- [7] PAN H M, DOU Z L, CAI Y X, et al. Digital twin and its application in power system[C]//2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Shanghai, China: IEEE, 2020: 21-26.
- [8] 张文杰, 王国新, 阎艳, 等. 基于数字孪生和多智能体的航天器智能试验[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 16-33.
- ZHANG Wenjie, WANG Guoxin, YAN Yan, et al. Intelligent test of spacecraft based on digital twin and multi-agent systems[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 16-33.
- [9] 杨帆, 吴涛, 廖瑞金, 等. 数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1505-1521.
- YANG Fan, WU Tao, LIAO Ruijin, et al. Application and implementation method of digital twin in electric equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1505-1521.
- [10] COSTA F, GENOVESI S, BORGES M, et al. A review of RFID sensors, the new frontier of internet of things[J]. Sensors, 2021, 21(9): 3138.
- [11] DE DONNO D, CATARINUCCI L, DI SERIO A, et al. A long-range computational RFID tag for temperature and acceleration sensing applications[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2013, 45: 223-235.
- [12] ZANNAS K, EL MATBOULY H, TEDJINI S. Self-tuning RFID tag: a new approach for temperature sensing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(12): 5885-5893.
- [13] 邓芳明, 温开云, 何怡刚, 等. 基于 RFID 传感标签及 QPSO-RVM 的变压器绕组故障在线诊断技术[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7183-7193.
- DENG Fangming, WEN Kaiyun, HE Yigang, et al. On-line fault diagnosis for transformer windings based on RFID sensor tags and QPSO-RVM[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7183-7193.
- [14] 王泉智, 何怡刚, 邓芳明, 等. 基于 RFID 加速度传感器标签的导线舞动在线监测[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(8): 99-102.
- WANG Quanzhi, HE Yigang, DENG Fangming, et al. Online monitoring technology of transmission line galloping based on RFID acceleration sensor tags[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(8): 99-102.
- [15] DENG F M, WEN K Y, ZENG Z, et al. Novel metal-oxide arrester monitoring technology based on RFID sensor and mind evolutionary computation[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 192: 106859.
- [16] ZHAI H M, YANG M B, GUO D S, et al. Acquisition of state information of electrical equipment in substation based on RFID[J]. International Journal of RF Technologies, 2020, 11(1): 31-44.
- [17] 孔垂跃, 陈羽, 赵乾名. 基于 MQTT 协议的配电物联网云边通信映射研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 168-176.
- KONG Chuiyue, CHEN Yu, ZHAO Qianming. Research on cloud-side communication mapping of the distribution Internet of things based on MQTT protocol[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 168-176.
- [18] 吕军, 栾文鹏, 刘日亮, 等. 基于全面感知和软件定义的配电网物联网体系架构[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3108-3115.
- LÜ Jun, LUAN Wenpeng, LIU Riliang, et al. Architecture of distribution Internet of things based on widespread sensing & software defined technology[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3108-3115.
- [19] 应俊, 蔡月明, 刘明祥, 等. 适用于配电物联网的低压智能终端自适应接入方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 22-27.
- YING Jun, CAI Yueming, LIU Mingxiang, et al. Adaptive access method of low voltage intelligent terminal for distribution Internet of Things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 22-27.
- [20] 窦仁晖, 任辉, 姚志强, 等. 变电站国产化站控层服务协议设计[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3268-3275.
- DOU Renhui, REN Hui, YAO Zhiqiang, et al. Design of domestic service protocol for substation control level[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3268-3275.
- [21] 高扬, 贺兴, 艾芊. 基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2483-2491.
- GAO Yang, HE Xing, AI Qian. Multi agent coordinated optimal control strategy for smart microgrid based on digital twin drive[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2483-2491.
- [22] 萧展辉. 面向智能电网的物联网应用体系建设[J]. 广东电力, 2012, 25(8): 1-5, 11.
- XIAO Zhanhui. Construction of smart grid oriented application system of IoT[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(8): 1-5, 11.
- [23] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.
- HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qinhao, et al. Application and development of Internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [24] MILLIGAN T A. Modern antenna design[M]. 2nd ed. Hoboken, USA: IEEE Press, 2005: 217-231.
- [25] 余道轲, 方奕文. 环氧树脂基电磁屏蔽材料研究进展[J]. 塑料科技, 2018, 46(4): 126-130.
- YU Daoke, FANG Yiwen. Research status of epoxy-based electromagnetic shielding materials[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(4): 126-130.
- [26] KUMAR V, SAKYA G, SHANKAR C. WSN and IoT based smart city model using the MQTT protocol[J]. Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography, 2019, 22(8): 1423-1434.



YANG Fan
Ph.D., Professor
Corresponding author

杨帆(通信作者)

1980—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事输变电设备多物理场计算、电力装备数字孪生方面的研究工作

E-mail: yangfancqu@gmail.com

收稿日期 2022-04-06 修回日期 2022-04-30 编辑 卫李静