

基于熵值度量数据混淆加密度的智能电力计量 系统设计与开发

谢辉, 杜卫华, 唐胜飞, 周菁菁, 陈津, 孟智刚
(国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200051)

摘要: 满足数据加密传输要求的智能电力计量系统的设计与开发是能量互联网优化运行以及大规模可再生能源消纳的关键。分析现有电力计量系统特征及能量互联网运行需求,提出能源互联网环境下智能电力计量系统的基本架构;建立熵值度量数据混淆加密度模型,确立智能电力计量系统中数据混淆加密方法;分析 STM32 与 BC28 等主要元器件以及典型云服务经济技术指标,给出智能电力计量系统中各部分子系统实现方法;以新疆南部某城市区域部分用户为算例,实验验证了所提出的智能电力计量系统设计与开发方法的可行性。

关键词: 电力计量; 熵值度量; 数据混淆; 加密

Design and Development of Intelligent Power Metering System Based on Cross Entropy to Measure Data Confusion Encryption Degree

XIE Hui, DU Weihua, TANG Shengfei, ZHOU Jingjing, CHEN Jin, MENG Zhigang
(State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200051, China)

Abstract: The design and development of intelligent power metering system meeting the requirements of data encryption transmission is the key to the optimal operation of energy internet and consumption of large-scale renewable energy. The characteristics of the existing power metering system and the operation requirements of the energy internet are analyzed, and the basic architecture of the intelligent power metering system in the energy internet environment is proposed; The entropy measurement data confusion encryption degree model is set up, and the the data confusion encryption method in the intelligent power metering system is defined; Such main elements as STM32 and BC28 and the economic and technical data of typical cloud services are analyzed, and the implementation method of each subsystem in the intelligent power metering system is given; Some users in a area of certain city in south of Xinjiang are taken as an example, the feasibility of the design and development method of the proposed intelligent power metering system is verified by experiments.

Keywords: power metering; entropy measurement; data confusion; data encryption

0 引言

能源互联网是一种综合运用先进的电力电子技术、信息技术和智能管理技术,将大量由分布式能量采集装置、分布式能量储存装置和各种类型负载构成的新型电力网络、石油网络、天然气网络等能源节点互联起来,实现能量双向流动的能量对等交换与共享的网络^[1],是现实电网优化控制、可再生

能源并网消纳以及我国“双碳战略”顺利实施的关键^[2]。其中,具备数据安全传输的智能电力计量系统是能源互联网中多异质能源节点能量流动与转化、对等交换与共享的关键。因此,深入研究基于数据安全传输要求的能源互联网环境下智能电力计量系统设计与开发已显得尤为必要与紧迫。

现阶段,电网公司普遍使用的电力计量系统仅能实现无线定时抄表功能,电网的能量调度中心与

营销中心仅能实现电力用户整体用电行为数据的记录与查看,而对于电力用户端各类型负荷的用电行为难以直接准确地记录与查看,对于电力用户端部分可参与电网优化调度的柔性负荷也难以进行状态调节与控制,不仅不利于电网调度中心利用柔性负荷优化电网能量调度,而且还不利于可再生能源并网消纳。而且,国内外专家与学者虽然明确提出了柔性负荷可参与电网优化调度、提升可再生能源并网消纳的思路^[3-5],但围绕支撑能源互联网优化运行的智能电力计量系统的设计与开发方面取得的成果多集中于电力计量系统运维故障分析与评估^[6-9]、应用效果分析^[10]、系统设计初始开发等方面^[11-14],均未针对性地考虑能源互联网环境下基于数据安全传输要求的智能电力计量系统设计与开发,也未明确智能电力计量系统应具有的可准确及时反映电力用户端各类型负荷的用电行为、依据电网调度要求改变电力用户端部分柔性负荷的运行状态、满足电网调度要求的特定功能模块开发。在电力计量系统运维故障分析与评估、应用效果分析方面,文献[6]针对电力计量设备运行存在的降噪效果差与故障诊断精度低等问题,提出了一种基于 Gabor 变换的电力计量设备运行降噪方法,实验结果表明了该方法可使电力计量设备信噪比评价指标得到有效提高;文献[7]针对电流互感器难以满足采暖期与非采暖期季节性用电负荷宽范围采集问题,提出一种复合电流互感器变比自动切换防开路计量装置设计方法,给出了基于微控制器单元(microcontroller unit, MCU)的该装置设计方法;文献[8]针对不同类型媒体低层特征之间难以直接关联问题,在综合考虑语义分析与特征提取、语义关联挖掘、跨媒体本体构建等过程的基础上,提出了一种基于语义关联的电力计量跨媒体知识图谱构建方法,有效支撑了电力计量领域的跨媒体检索应用;文献[9]提出一种基于联邦学习(federated learning, FL)的分布式训练框架,在保证各个本地电力数据信息安全前提下实现多孤岛信息源数据的整合与利用;文献[10]以电力营销计量为背景,介绍了电力计量设备在自动抄表、线损四分统计、用电检查工作等方面的应用,但并未涉及数据加密技术使用以及智能计量设备设计方法。在智能电力计量系统设计方面,文献[11]提出一种基于 Zigbee 无线技术的智能计量系统设计方法,包括使用 Zigbee 无线技术向服务器传递多点电力用电数据模块设计、用户通过服务器远程打开或关闭系统中任何设备点设计以及基于 XBee 用电数据查看模型设计;文献[12]基于 Orvibo WiFi 智

能插座和安卓应用程序,设计了一种允许用户查看和管理用电量电力计量系统,但多个通信信道造成了系统额外功耗;文献[13]通过微控制器采集每个家庭的用电数据,并将数据传输至云端,但传输数据过程中并未考虑数据加密技术处理,也未设计测量数据的本地存储模块,可能造成系统在与云端失去连接时用电数据的丢失;文献[14]设计了一种能够在 SD 卡上保存用户用电详情的智能电表,但未涉及直接将数据传递至电力企业功能模块的设计;文献[15]针对电网业务日益递增与智能电表功能落后之间的矛盾,开展了一种含多处理器的智能电表开发研究,但未考虑电力数据加密传输的迫切设计要求;文献[16]以 HLW-8112 和 STM8S208MB 单片机为基础,开发一种小型化的终端设备电力测量与用电管理系统,但未涉及终端电力数据上传与控制指令下发以及终端电力数据显示、分析与处理功能。

凡此种种,围绕智能电力计量系统设计与开发国内外专家与学者的研究成果与结论中均未明确涉及能源互联网背景下考虑数据混合加密度要求的智能电力计量系统设计方法,也未明确智能电力计量系统应具有的可准确及时地反映电力用户端各类型负荷的用电行为、依据电网调度要求改变电力用户端部分柔性负荷的运行状态、满足电网调度要求的特定功能模块开发。为此,论文在综合分析现有的智能电力计量系统设计特征的基础上,提出智能电力计量系统的基本架构;建立熵值度量数据混淆加密度模型,确立智能电力计量系统中数据混淆加密方法;分析能源互联网运行的要求,给出智能电力计量系统中各部分子系统实现方法。以新疆南部某城市区域用户为例,实验验证了所提出的智能电力计量系统设计与开发方法的可行性。

1 智能电力计量系统的基本架构

图 1 为提出的智能电力计量系统的基本架构,包括终端电力负荷数据采集系统、电力负荷数据上传与控制指令下发系统、电力负荷数据集中显示与控制系统 3 个方面。

终端电力负荷数据采集系统主要实现终端电力负荷运行状态、大小及运行时间数据采集,以及按要求执行(电力负荷数据集中显示与控制系统)下发指令;电力负荷数据上传与控制指令下发系统由物联网模块以及阿里云服务器构成,主要负责终端电力负荷数据采集系统的数据上传与电力负荷

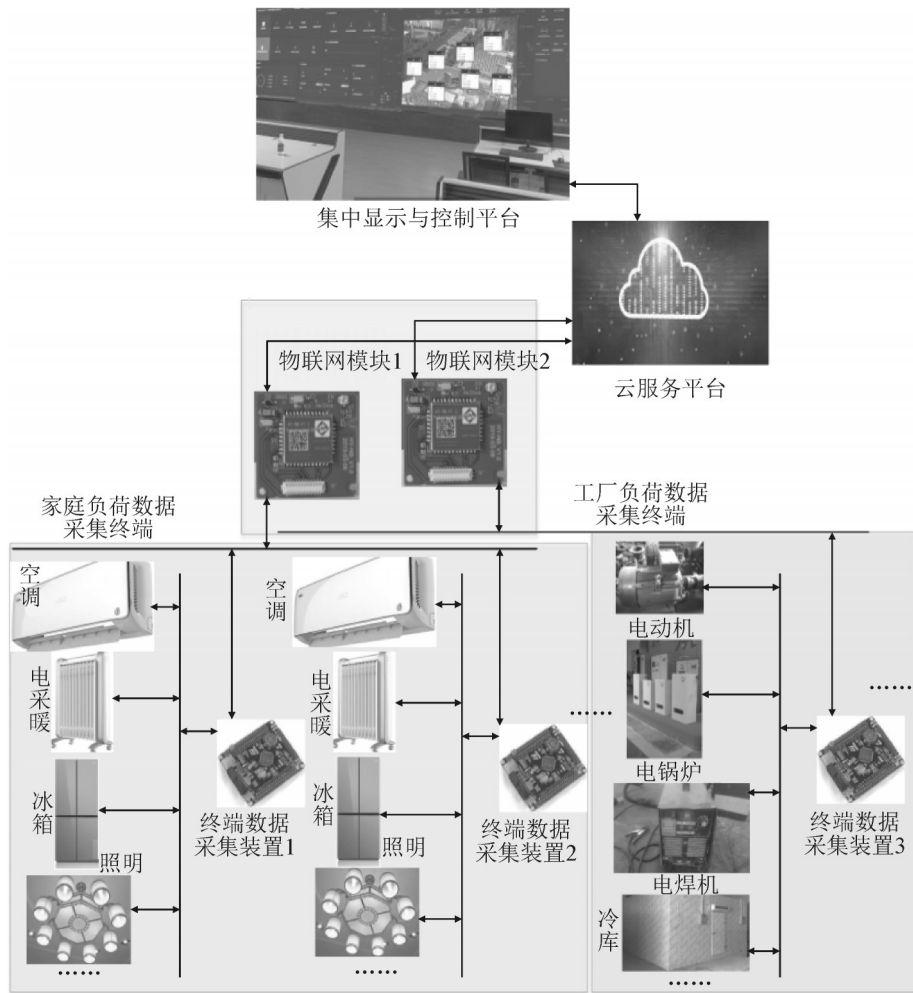


图1 智能电力计量系统的基本架构
Fig. 1 Basic architecture of intelligent power metering system

数据集中显示与控制系统指令的下发;电力负荷数据集中显示与控制系统主要完成电力负荷数据集中显示、分析、处理以及按控制规则或者电网调度要求下发电力负荷控制指令,包括负荷的种类、位置、持续时间、运行状态控制等。

2 熵值度量数据混淆加密度模型

2.1 基于TLS的数据混淆加密方法

电力系统的安全防护不仅取决于传统的保护与监测技术,还取决于电力系统中复杂的信息数据正确和有效传送^[17],尤其是分布式新能源发电多点接入与大量可参与电网优化调度的柔性或可控负荷接入。在传统的使用 TCP、UDP 等方式传输数据时,电力系统运行的关键数据不仅面临数据包被截获与信息被解析的可能(TCP 实现数据传输时报文提交的数据放在报体里看不到的,但是还是可以通过抓包工具窃取到,即有被窃取与修改的风险;UDP 具有不提供数据包分组、组装和不能对数据包进行排序的明显缺点,当报文发送之后,无法得知其是

否安全完整到达的,即有被窃取与修改的风险)^[18],还将面临关键数据被篡改,影响电力系统安全稳定运行的可能^[19]。

为此,本文在完成电力负荷数据上传与控制指令下发数据传输过程中,在传输层中增设 TLS 加密技术(TLS 由 TLS 记录协议(TLS record)和 TLS 握手协议(TLS handshake)构成,其中,TLS 记录协议具有对称加密、使用密钥的 MAC 进行信息完整性检查功能,TLS 握手协议具有使用非对称的或公共密钥的密码术来认证对等方的身份、共享解密密钥的协商、协商是可靠的)^[20]。图 2 为阿里云支撑下传输层增设 TLS 加密技术的部分通讯程序代码。

本文采用的 TLS 加密技术包括 3 个部分:1)数据混淆加密机制,即论文参考文献[21]采用先基于非固定位置置换的数据混淆一次简易混淆与再基于随机正交矩阵进行二次数据混淆的增强数据混淆加密机制;2)验证身份标识有效性机制,即 SSL 证书有效期为 1 年,需及时更新证书有效期并重新下载配置 CA 证书,否则使用加密连接的客户端程

序将无法连接,不能实现数据传输^[22];3)完整性检测机制,即依据数据混淆加密机制,将数据解析,并验证数据传输是否正确,确定是否需要数据重新传输。

```
ATI           //查看模块信息
Quectel
BC26
.....
OK
AT+CGSN=1    //获取卡号
+CGSN:860411049918459
OK
AT+CGATT?    //注册设备
+CGATT:1
OK
AT+CGPADDR   //获取当前IP
+CGPADDR:0,100.108.76.202
OK
```

图2 传输层增设 TLS 加密技术的部分通讯程序代码
Fig. 2 Some communication program codes of TLS encryption technology added to the transport layer

2.2 熵值度量数据混淆加密模型

依据数据混淆加密传输原理与过程,智能电力计量系统实现数据加密传输可理解为先将数据加密处理,接收数据之后再将其解密处理,加密之前的数据与解密之后的数据能否相等可作为度量数据是否正确传输的依据,而破解加密与解密的复杂程度与技术成本则可视作数据混淆加密程度,如图3所示。

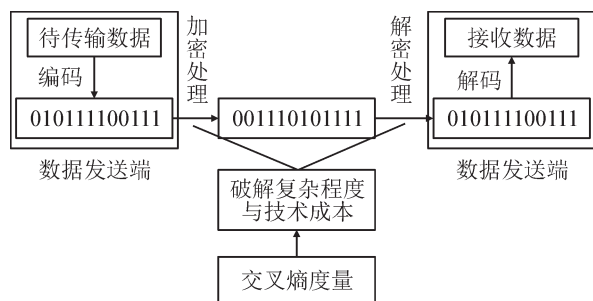


图3 数据混淆加密传输
Fig. 3 Data confusion encryption transmission

数据混淆加密传输过程中,对于 n 序列待混淆加密传输的数据,混淆加密传输方法不同则待混淆加密传输的数据加密处理结果就不同,公式为

$$\begin{Bmatrix} d_1^1, d_2^1, d_3^1 \cdots d_n^1 \\ d_1^2, d_2^2, d_3^2 \cdots d_n^2 \\ \vdots \\ d_1^m, d_2^m, d_3^m \cdots d_n^m \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中, $d_1^m, d_2^m, d_3^m, \dots, d_n^m$ 为第 m 种混淆加密方法得到的数据加密处理结果,其中, d_n^m 为由该方法得到的第 n 序列数据加密处理结果。

依据信息论基本原理,熵是系统无序程度的度量,即熵值可用来反映某个指标的离散程度,信息熵值越小则指标的离散程度就越大^[23]。因此,对于相同的 n 序列数据,当采用 m 种混淆加密方法处理之后,处理后的 n 序列数据之间的熵值即可反映 m 种混淆加密方法造成(原本相同、经混淆加密不同处理)相同数据之间的离散程度,也即是熵值越小混淆加密方法可靠性越高。第 k 种混淆加密方法处理 n 序列数据后得到的信息熵值为

$$\begin{cases} p_j = \frac{d_j^i}{\sum_{j=1}^n d_j^i} \\ e_k = -\ln(n)^{-1} \sum_{j=1}^n p_j \ln(p_j) \end{cases} \quad (2)$$

式中, e_k 为第 k 种混淆加密方法处理得到的信息熵值,其他变量含义同上。进而,可依据不同加密处理方法得到的信息熵值大小即可判断数据混淆加密混乱程度,判断数据加密与解密复杂程度与技术成本,即熵值越低数据加密与解密复杂程度与技术成本越高,也即论文选取熵值越低的数据混淆加密方法,保证电力数据传输的安全性。

3 智能电力计量系统设计与开发

如前所述,智能电力计量系统主要包括终端电力负荷数据采集子系统、电力负荷数据上传与控制指令下发子系统、电力负荷数据集中显示与控制子系统3个部分。为此,智能电力计量系统设计与开发主要针对上述3个子系统开展。

3.1 基于STM32F103的终端电力负荷数据采集系统开发

终端电力负荷数据采集子系统不仅需要实现终端电力设备(例如家庭供暖、制冷以及工业厂房中异步电机、加热炉等)运行状态、负荷大小及其运行时间等数据采集,同时需要将上述采集数据传输至电力负荷数据上传与控制指令下发子系统。此外,考虑到终端电力负荷数据采集子系统可能工作于全疆区域,面临较为严峻的风沙侵蚀与大温差环境条件,在综合对比典型处理芯片性能、工作条件、批量采购价格的基础上,论文以 STM32F103 芯片为基础开发终端电力负荷数据采集子系统。

图4为 STM32F103 芯片引脚分布示意图。其中,终端电力负荷数据由分压电路、整流模块,经输入阻抗增大电路处理之后得到 0~3.3 V 采样电压,由具有 ADC 功能的 PA~PC 管脚接入(终端电力设

备运行状态的采集仅需普通 PA~PC 管脚接入即可),实现终端电力负荷数据采样,再依据要求实现采样数据上传(由实现异步通讯 PA0-WKUP 引脚输出至电力负荷数据上传与控制指令下发系统)或者本地存储;由电力负荷数据上传与控制指令下发系统下发的指令由 PA0-WKUP 引脚接入,再由 PA~PC 管脚输出,采用 0/1 状态控制或者 PWM 方式控制终端电力设备运行状态。

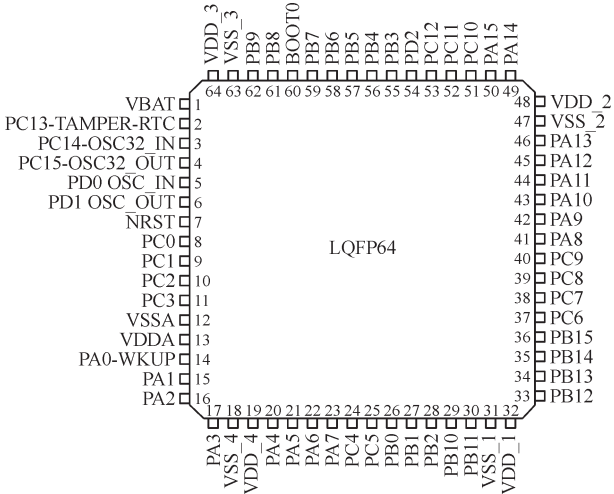


图4 STM32F103芯片引脚分布
Fig. 4 STM32F103 chip pin distribution

3.2 基于BC26芯片的电力负荷数据上传与控制指令下发系统开发

如 3.1 节所述,论文所开发的智能电力计量系统可能应用于全疆区域,即系统可能应用于地理位置较为偏僻、WIFI 信号无法到达区域。因此,论文选用购置成本较低、支持 TLS 加密协议使用、支持 2G/3G/4G/WIFI 信号通讯的 BC26 芯片(该种物联网芯片的选择可保证客户端按实际流量或通讯次数缴纳通讯费用,或者使用 WIFI 信号实现远程通讯)开发电力负荷数据上传与控制指令下发系统,即 BC26 芯片将终端电力负荷数据上传至云平台以及将云平台指令下载至终端电力负荷数据采集系统,控制终端电力负荷运行状态。

图 5 为 BC26 芯片引脚分布示意图。其中,左起第 4 引脚 DTX 为 DBG 串口输出,左起第 5 引脚 DRX 为 DBG 串口输入,分别实现与云平台交互信息的上传与下载;左起第 1 引脚 RXD 与左起第 2 引脚 TXD 分别实现与 TTL(STM32F103 芯片引脚)串口输入与输出,即将终端电力负荷数据采集系统所采集的信息输入至 BC26 芯片,以及将从云平台下载的信息或命令输入至终端电力负荷数据采集系统。



图5 BC26芯片引脚分布
Fig. 5 BC26 chip pin distribution

3.3 电力负荷数据集中显示与控制系统开发

电力负荷数据集中显示与控制系统不仅要实现终端电力负荷数据的集中显示、分析、处理,还要依据电网调度部门或者控制规则要求下发终端电力负荷控制指令。因此,论文将从终端电力负荷数据的显示、分析、处理方面论述所涉及的电力负荷数据集中显示与控制系统开发。

在综合对比了国内主流云服务商(主要有腾讯云、阿里云与华为云 3 类)的收费标准、支持的通讯点数、可延拓开发软件与页面功能等多方面经济技术指标,论文选择了支持功能模块的添加与配套开发、批量收费标准较低(目前平台的标准售价为 10 万点/(3.6 万元·年))、通讯稳定性与可靠性较好的阿里云服务,并基于该平台完成电力负荷数据上传与控制指令下发系统的开发与设计。

综合分析影响含新能源电网优化调度策略制定与实施的主要因素^[3,5,24-25],基于阿里云服务平台,论文开发了电力负荷数据集中显示与控制系统功能模块,所涵盖的功能见图 6。

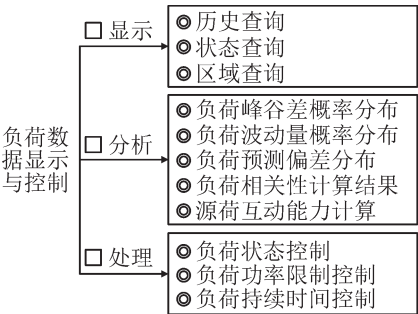


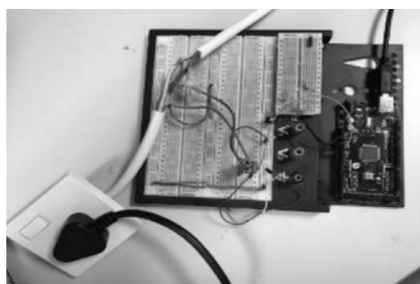
图6 电力负荷数据集中显示界面
Fig. 6 Centralized display interface of power load data

其中,显示功能模块主要包括实现负荷历史运行数据查询功能、各终端负荷实时运行状态查询功能、各区域负荷实时分布查询功能;分析功能模块主要实现负荷峰谷差概率分布计算、负荷波动量概率分布计算、负荷预测偏差概率分布计算、各区域

负荷间相关性计算、源荷互动能力计算,以利于负荷主动参与电网优化调度;处理功能模块主要用于实现负荷状态实时控制、负荷功率限制控制与负荷持续时间控制,以此实现负荷主动参与电网优化调度。上述各功能模块的开发使用的是 python 编程语言。

4 实验结果与分析

论文以 2020 年 6 月份某城市区域电网 13 户居家电力用户的用电设备与 2 户企业电力用户的用电设备为依据,实验验证本文提出的基于熵值度量数据混淆加密度的智能电力计量系统设计与开发思路的可行性。其中,居家电力用户的用电设备包括空调制冷、照明、电饭煲等;企业电力用户的用电设备包括异步电机、电加热炉、电焊机等。图 7 为开发的基于 TLS 的能源互联网环境下智能电力计量系统的测试版本。



(a) 终端电力负荷数据采集与传输



(b) 电力负荷数据集中显示与控制系统

图 7 智能电力计量系统的测试版本

Fig. 7 Test version of intelligent power metering system

图 7(a)包括 2.1 节与 2.2 节分别所述的终端电力负荷数据采集系统与电力负荷数据上传与控制指令下发系统,其中 BC26 芯片外围未采用电磁屏蔽封装处理;图 7(b)为电力负荷数据集中显示与控制系统。

4.1 熵值度量数据混淆加密度测试

依据 2.1 节研究内容,论文采用先基于非固定位置置换的数据混淆一次简易混淆与再基于随机

正交矩阵进行二次数据混淆的增强数据混淆加密机制,增加电力计量数据传输的安全性。其中,方法 1~3(分别简称为 $M_1 \sim M_3$)在一次简易混淆中分别采用 1 位非固定位置置换、1 位非固定位置取反、2 位非固定位置置换,增强数据混淆加密均采用随机正交矩阵处理方法。另外,电力计量数据传输安全性校验由皖西北某获得过国际信息安全荣誉的技术团队测试完成。表 1 熵值度量数据混淆加密度测试结果。

分析可知,由于加密方式不同 3 种数据混淆加密方法造成加密后数据熵值度量结果不同,其中方法 1~3 的熵值度量结果分别为 0.541、0.862 与 0.312,方法 1~3 对应的测试团队破解时间分别为 1.3 h、0.5 h 与 2 h,由此可知在简易混淆加密过程中采用 2 位非固定位置置换可显著增加电力计量数据传输破解的技术难度。

图 8 为采用数据混淆加密机制处理后传输的数据敏感属性(特定功能数据的辨识能力,例如电压数据、运行时间长短等数据信息)比例与传输数据安全率(指数据的不丢失、不被篡改及准确传输)的关系。分析可知,在数据敏感属性比例在 10%~55% 范围时,随着数据敏感属性比例增大,传输数据安全率逐渐增大;当数据敏感属性比例超过 55% 以后,传输数据安全率稳定在 80% 左右,启示加密数据传输过程中数据敏感属性比例尽可能维持在 50% 范围,以此保证传输数据安全率与数据敏感属性比例之间的关系。

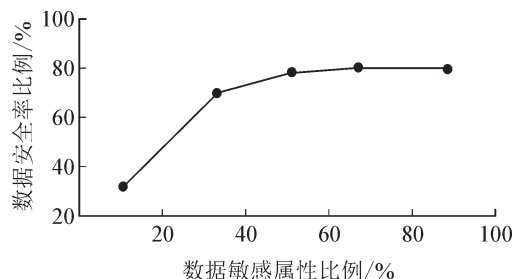


图 8 数据敏感属性比例与传输数据安全率关系

Fig. 8 Relationship between data sensitive attribute proportion and transmission data security rate

4.2 电力负荷数据集中显示与控制系统测试

图 9 为依据电力负荷数据集中显示与控制系统得到的 6 月份某家庭用电峰谷差累计概率分布计算结果。其中,该家庭 30 天内的用电峰谷差范围为 2.43 kW~2.96 kW,集中分布于 2.63 kW~2.96 kW 范围,家庭用电峰谷差累计概率分布结果的准确掌握有利于区域电网调峰机组的启停顺序的制定。

表1 熵值度量数据混淆加密测试结果
Table 1 Test result of confusion encryption test results using entropy

数据	342.08	248.11	115.63	220.10
二进制	101010110.000101000111 10101110	11111000.0001110000101 0001111	1110011.10100001010001 111010	11011100.0001100110011 0011001
简易混淆	M ₁ 001010111.000101000111 10101110	01111001.0001110000101 0001111	1110011.10100001010001 111010	01011101.0001100110011 0011001
	M ₂ 101010100.000101000111 10101110	11111010.0001110000101 0001111	1110001.10100001010001 111010	11011110.0001100110011 0011001
	M ₃ 101011001.000101000111 10101110	11110010.0001110000101 0001111	1111100.10100001010001 111010	11010011.0001100110011 0011001
	M ₁ 001010111.000101000111 10101110	01111001.0001110000101 0001111	1110011.10100001010001 111010	01011101.0001100110011 0011001
	M ₂ 101010100.000101000111 10101110	11111010.0001110000101 0001111	1110001.10100001010001 111010	11011110.0001100110011 0011001
	M ₃ 101011001.000101000111 10101110	11110010.0001110000101 0001111	1111100.10100001010001 111010	11010011.0001100110011 0011001
熵值度量	M ₁		0.541	
	M ₂		0.862	
	M ₃		0.312	
破解时间/h	M ₁		1.3	
	M ₂		0.5	
	M ₃		2	

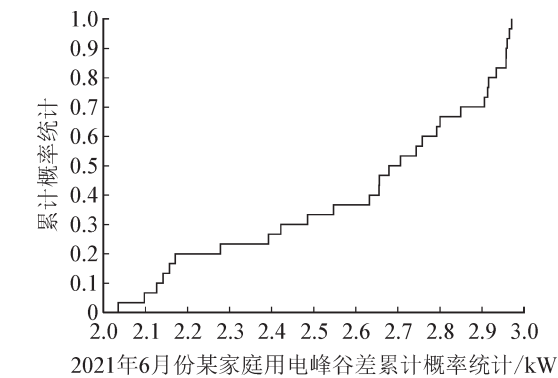


图9 某家庭用电峰谷差累计概率
Fig. 9 Cumulative probability of peak -valley difference of a household

表2为依据电力负荷数据集中显示与控制系统得到的6月份2户企业电力用户用电相关性概率分布结果。2户企业电力用户用的用电序列差值的概率分布主要集中于-0.75 MW~0.65 MW 范围,其中以87.88% 概率分布于-0.15 MW~0.15 MW 范围,说明该2户企业电力用户用的用电相关性较强。

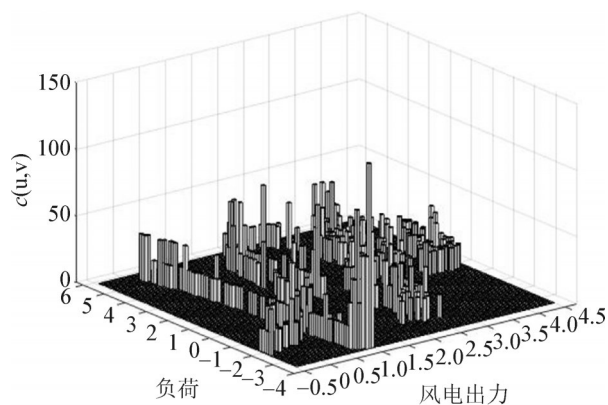
图10为由电力负荷数据集中显示与控制系统给出的6月10日份区域电网源荷互动能力计算结果。其中,负荷由算例中的13户居家电力用户与2户企业电力用户构成,风电出力数据由电网调度中心获取;源荷互动能力计算方法采用的由Copula 函

数构建相关性未知与概率分布模型未知的负荷波动与风电出力波动联合概率分布模型(构建方法参考文献[3]),借助二重积分方式确定负荷波动与风电出力波动相关性,即确定电网源荷互动能力计算结果。

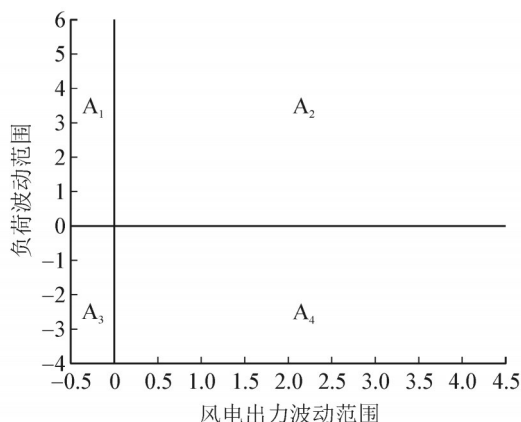
分析可知,风电出力波动变化率与负荷波动变化率的乘积为正的概率为 $P(A_1)+P(A_3)=66.04\%$,同时风电出力波动变化率与负荷波动变化率的乘积为负的概率为 $P(A_2)+P(A_4)=33.96\%$,说明该研究时段内风电出力跟踪负荷波动性能较好。

表2 2户企业电力用户用电相关性概率分布
Table 2 Probability distribution of electricity consumption correlation among enterprises

-1.15~-1.05	-1.1	0	0.05~0.15	0.1	28.880%
-1.05~-0.95	-1.0	0	0.15~0.25	0.2	5.100%
-0.95~-0.85	-0.9	0	0.25~0.35	0.3	1.030%
-0.95~-0.75	-0.8	0	0.35~0.45	0.4	0.200%
-0.75~-0.65	-0.7	0.002%	0.45~0.55	0.5	0.030%
-0.65~-0.55	-0.6	0.030%	0.55~0.65	0.6	0.002%
-0.55~-0.45	-0.5	0.090%	0.65~0.75	0.7	0
-0.45~-0.35	-0.4	0.230%	0.75~0.85	0.8	0
-0.35~-0.25	-0.3	0.940%	0.85~0.95	0.9	0
-0.25~-0.15	-0.2	4.300%	0.95~1.05	1.0	0
-0.15~-0.05	-0.1	19.500%	1.05~1.15	1.1	0
-0.05~0.05	0	39.500%	—	—	—



(a) 负荷波动与风电出力波动概率分布



(b) 负荷波动与风电出力波动概率分布

图10 源荷跟踪能力计算结果

Fig. 10 Calculation results of power supply tracking load capacity

5 结语

针对现有的研究成果均未明确涉及能源互联网背景下考虑数据加密要求的智能电力计量系统设计问题,提出一种基于熵值度量数据混淆加密密度的电力计量系统设计方法,包括:

1)智能电力计量系统设计方法主要由终端电力负荷数据采集系统、电力负荷数据上传与控制指令下发系统与电力负荷数据集中显示与控制系统3部分构成,可以完成终端电力负荷数据的采集、上传与分析,以及将分析与控制结果下发至终端电力负荷;

2)电力负荷数据集中显示与控制系统的主要功能包括终端电力负荷数据的显示、处理以及依据调度或控制要求将控制指令下发至终端电力负荷;

3)建立的熵值度量数据混淆加密模型可反映数据加密方式造成的数据破解的技术难度与时间成本;使用的数据混淆加密机制可以保证传输数据的安全率要求,保证智能电力计量系统数据传输的安全与有效要求;

4)论文后续将着重开展电力负荷数据集中显示与控制系统的功能深化研究,例如基于 Copula 函数与容量可信度的新能源跟踪负荷波动度量方法等。

参考文献

- [1] 窦鹏冲,张鹏,段洪旺. 能源互联网中微网系统设计及其运行控制方法研究[J]. 东北电力技术, 2022, 43(3): 40-42.
DOU Pengchong, ZHANG Peng, DUAN Hongwang. Research on microgrid system design and its operational control method in energy internet[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(3): 40-42.
- [2] 吴晓刚,唐家俊,吴新华,等. “双碳”目标下虚拟电厂关键技术与建设现状[J]. 浙江电力, 2022, 41(10): 64-71.
WU Xiaogang, TANG Jiajun, WU Xinhua, et al. Key technologies and present situation of virtual power plant under “dual-carbon” goals[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(10): 64-71.
- [3] 陶仁峰,李凤婷,李燕青,等. 基于系统频率响应特征的电网广义旋转备用优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 82-91.
TAO Renfeng, LI Fengting, LI Yanqing, et al. Optimal configuration of generalized spinning reserve for power grid based on characteristics of system frequency response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 82-91.
- [4] 王云会,郑强仁,郭森,等. 分布式电源接入配电网的控制策略及消纳能力评估研究[J]. 电器与能效管理技术, 2022(4): 83-87.
WANG Yunhui, ZHENG Qiangren, GUO Miao, et al. Research on control strategy and consumption capacity evaluation of distributed generation access to distribution network[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(4): 83-87.
- [5] 陶仁峰,李凤婷,李燕青,等. 基于辅助服务费用分摊的新能源电厂并网价格动态计算方法[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 962-972.
TAO Renfeng, LI Fengting, LI Yanqing, et al. A dynamic tariff calculation method of renewable power plants based on ancillary service cost allocation[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 962-972.
- [6] 袁瑞铭,李文文,庞富宽,等. 基于 Simulink 和 Ansys Icepak 的单相智能物联网电表计量单元电热耦合仿真方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2022(7): 73-79.
YUAN Ruiming, LI Wenwen, PANG Fukuan, et al. Research on electrothermal coupling simulation method of single-phase iot smart meter metering unit based on Simulink and Ansys Icepak[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(7): 73-79.
- [7] 姜华,郝郁颖,闫廷俊. 季节性负荷变比同步转换系统的

- 设计[J]. 电子技术, 2021, 50(1): 124-125.
- [8] 肖勇, 钱斌, 周密. 基于语义关联的电力计量跨媒体知识图谱构建方法[J]. 计算机科学, 2020, 47(z2): 126-131.
XIAO Yong, QIAN Bin, ZHOU Mi. Cross-media knowledge graph construction for electric power metering based on semantic correlation[J]. Computer Science, 2020, 47(z2): 126-131.
- [9] 郑楷洪, 肖勇, 王鑫, 等. 一个面向电力计量系统的联邦学习框架[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(z1): 122-133.
ZHENG Kaihong, XIAO Yong, WANG Xin, et al. A federated learning framework for power grid metering system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(z1): 122-133.
- [10] 张秀艳, 王贵宝, 魏江, 等. 计量自动化系统在电力营销计量中的应用研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4(10): 82-83.
- [11] BURUNKAYA M, PARS T. A smart meter design and implementation using ZigBee based wireless sensor network in smart grid[C]//2017 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE). [S. l.]: IEEE, 2017: 158-162.
- [12] KHANJI S I R, KHATTAK A M, ALFANDI O. Smart meter: Toward client centric energy efficient smartphone based solution[C]//2016 7th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA). [S. l.]: IEEE, 2016: 1-6.
- [13] 吕英杰, 徐文静, 刘鹰, 等. 基于密码技术的智能电能表软件备案与比对系统设计[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3604-3608.
LYU Yingjie, XU Wenjing, LIU Ying, et al. System design in software storage and comparison of smart meters based on cryptograph [J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3604-3608.
- [14] 付煜辉. 智能IC电能表研究与设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [15] SUN Yi, WANG Yongsheng, LI Shijie, et al. Research on design and key technology of new generation multi-MCUs smart meter[C]//2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). [S. l.]: IEEE, 2019: 468-473.
- [16] BAO J, JI F, LI J, et al. New generation single-phase charge-control intelligent electric energy meter based on remote interaction[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1650(2): 022098.
- [17] 丁斌, 袁博, 郑焕坤, 等. 基于大数据分析的电力信息系
统安全状态监测技术研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 59-66.
DING Bin, YUAN Bo, ZHENG Huankun, et al. Research on security state monitoring technology of power information system based on big data analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 59-66.
- [18] CSND. TCP和UDP的区别[EB/OL]. <http://t.csdn.cn/vl-Ar9>.
- [19] 搜狐. TLS(安全传输层协议)简介[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/158349629_468741.
- [20] CSND. HTTPS、SSL、TLS三者之间的联系和区别[EB/OL]. <http://t.csdn.cn/N0e1n>.
- [21] 邵必林, 蔡婷, 边根庆, 等. 增强隐私保护度的数据混淆机制研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2016, 48(1): 36-40.
SHAO Bilin, CAI Ting, BIAN Genqing, et al. Research of enhancing privacy protection on confused data[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2016, 48(1): 36-40.
- [22] 阿里云. 设置SSL加密[EB/OL]. https://help.aliyun.com/document_detail/95715.html?spm=5176.22414175.sslink.4.5729283dS0jmlA.
- [23] 陈宁, 沙倩, 汤奕, 等. 基于交叉熵理论的风电功率组合预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 29-34.
CHEN Ning, SHAO Qian, TANG Yi, et al. A combination method for wind power predication based on cross entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 29-34.
- [24] SHIN H, LEE D, BALDICK R. An offer strategy for wind power producers that considers the correlation between wind power and real-time electricity prices[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 695-706.
- [25] 宋晓川, 郑宽昀, 李俊臣, 等. 基于计量自动化系统的电能计量异常诊断技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 110-116.
SONG Xiaochuan, ZHENG Kuanyun, LI Junchen, et al. Research on abnormal diagnosis technology of electric energy metering based on metering automation system[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 110-116.

作者简介:

谢辉(1972—), 男, 助理工程师, 主要从事电力营销工作。E-mail: wtinchinas@163.com。

杜卫华(1977—), 男, 工程师, 主要从事电力营销工作。

唐胜飞(1995—), 女, 助理工程师, 主要从事电力营销工作。