

# 基于数据加密技术的配网可视化同步验收联调系统

覃拓, 兰小鲜, 潘一琦, 韦昌辰, 刘康豪

(广西电网有限责任公司河池供电局, 广西 河池 547000)

**摘要:** 以提升配网供电质量为目的, 基于数据加密技术设计配网可视化同步验收联调系统。在感知层中, 利用传感装置采集配网设备参数信息, 并传输至网络层; 在网络层中, 采用 AES 算法对参数信息实施加密后, 通过无线网络传输至应用层; 在应用层中, 验收解密后的设备参数信息, 并将信息存储于数据库服务器内, 之后由联调模块读取信息并利用集中控制器生成对应的联调指令; 在显示层中, 通过三维平行散点图等形式向用户展示配网设备状态的各项参数信息。实验结果显示: 该系统所采用的数据加密技术具有较高安全性和随机性, 且联调性能较好。应用该系统后, 电压越下限问题得到了有效改善。

**关键词:** 数据加密技术; 配网可视化; 验收联调系统; 系统设计

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)01-0092-05

## Visual Synchronous Acceptance and Joint Commissioning System for Distribution Network Based on Data Encryption Technology

QIN Tuo, LAN Xiao-xian, PAN Yi-qi, WEI Chang-chen, LIU Kang-hao

(Hechi Power Supply Bureau of GXPG, Guangxi Power Grid Co, Hechi 547000 China)

**Abstract:** In order to improve the power supply quality of distribution network, a visual synchronous acceptance and joint commissioning system for distribution network based on data encryption technology is designed. In the sensing layer, the sensor device is used to collect the parameter information of the distribution network equipment and transmit it to the network layer. In the network layer, AES algorithm is used to encrypt the parameter information, and then it is transmitted to the application layer through the wireless network; In the application layer, the decrypted equipment parameter information is accepted and stored in the database server. After that, the joint debugging module reads the information and uses the centralized controller to generate the corresponding joint debugging instructions; In the display layer, various parameter information of distribution network equipment status is displayed to users in the form of three-dimensional parallel scatter diagram. The experimental results show that the data encryption technology used in the system has high security and randomness, and the joint debugging performance is good. After the system is applied, the problem of voltage exceeding the lower limit is effectively improved.

**Keywords:** data encryption technology; distribution network visualization; acceptance of joint commissioning system; system design

## 0 引言

作为判断配网供电质量的主要指标, 电压质量对于配网运行以及电力设备运行性能均产生直接影响<sup>[1]</sup>。当配网内负荷量提升, 配网初始电压无功控制能力将无法匹配用户需求, 由此造成配网低电压问题显著<sup>[2]</sup>, 这对配网建设与控制中的电压幅值与谐波含量等均提出更高要求。联调技术是一种治理配网的有效技术, 为提升配网用户的电能质量, 改善低电压问题, 对联调技术的应用进行深入研究。

文献[3]在研究配网联调问题中, 针对配网负荷变化导致的频率变化与电压骤降等问题, 提出以静止同步补偿器为基础的配网联调控制方法, 基于配网设备状态实时监测结果、获取联调动态决策结果, 基于决策结果执行

配网联调控制。该方法在实际应用过程中无法保障配网设备状态监测结果的安全性。文献[4]在研究配网联调问题中, 以配网运行成本为基础, 从时间尺度差异化角度出发, 考虑光热与储热性能, 完成配网无功调度。该方法在实际应用过程中, 无法全面解决配网负荷端电压越下限问题。

基于上述分析, 本研究设计了基于数据加密技术的配网可视化同步验收联调系统, 提升配网供电质量与经济效益。

## 1 配网可视化同步验收联调系统设计

### 1.1 系统整体架构

系统整体由4部分组成, 分别是感知层、网络层、应用层与可视化显示层。图1所示为系统结构框架。

感知层利用传感装置采集配网内有限调压变压器、电压补偿装置等设备的电压与功率因数等线路参数, 所采集参数通过网络层加密后, 通过无线专网或无线公网

\*基金项目: 广西电网公司科技项目(GXKJXM20210297)

收稿日期: 2023-12-01

传输至应用层内,为集中控制器制定验收标准与联调策略提供主要判断依据。在条件许可的状态下,需考虑不同装置与GPS时钟对准,并对传输信息附加时标。

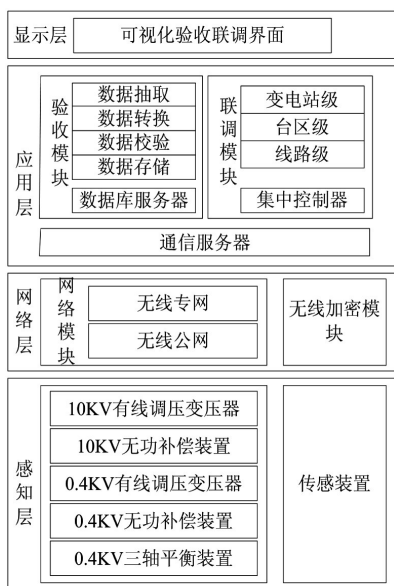


图1 基于数据加密技术的配网可视化同步验收联调系统结构框架

感知层内所感知到的配网电压、电流与功率等状态信息经由网络层内的智能通信模块的标准通信协议,在利用加密模块进行加密后通过无线网络传输至应用层内。

应用层内获取网络层传输的配网设备状态信息并通过解密,将解密后的配网设备状态信息传输至验收模块内,进行数据抽取、转换与校验等验收环节后,将数据存储于数据库服务器内。联调模块读取数据库服务器内的配网设备状态信息,并以此为基础,利用集中控制器针对变电站级、台区级与线路级配网生成对应的联调指令,进行联调控制。联调指令在加密后通过通信服务器传输至对应电压无功调节装置,电压无功调节装置在获取联调指令后进行解密,并执行对应的指令操作。

显示层内的可视化验收联调界面通过三维平行散点图等形式向用户提供配网设备状态的各项参数信息,实现系统与用户之间的友好交互。

## 1.2 无线加密模块设计

感知层在利用传感装置采集配网内有限调压变压器、电压补偿装置等设备的电压与功率因数等线路参数后,利用网络层中的无线加密模块进行信息加密处理后再传输至应用层内,通过无线加密模块确保配网设备参数信息(密文)在传输过程中无法被窃取或破译,而合法接收端通过对应的解密过程即可获取准确的配网设备参数信息(明文)。为保障配网设备状态参数信息加解密的效率,满足配网可视化同步验收联调的实时性要求<sup>[5]</sup>,无线加密模块采用基于DSP芯片的设计方式,其结构如图2所示。

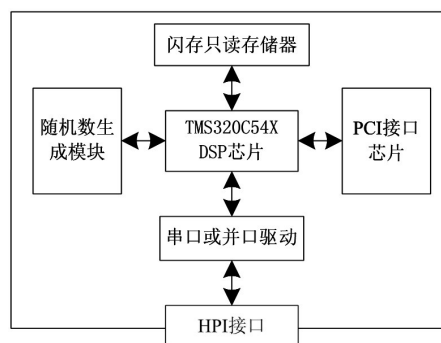


图2 基于DSP芯片的无线加密模块

无线加密模块中主要包含DSP芯片、闪存只读存储器、PCI总线接口芯片以及外部设备接口等。无线加密模块以TMS320C54X DSP芯片为核心完成加解密算法的运算,提升配网设备状态信息加解密的效率。无线加密模块利用PCI接口芯片实现TMS320C54X DSP芯片与系统主机间的数据交互。将闪存只读存储器用于存储加密算法、主控程序与密钥管理程序等。实际运行过程中,DSP芯片由闪存只读存储器内调取相应的加密算法,在主控程序控制下对配网设备参数信息实施加解密处理,处理后的配网设备参数信息通过HPI(HOST PORT INTERFACE)接口传输。

加解密算法是无线加密模块的核心,其主要采用AES算法,该算法为一种以Square算法为基础,数据块长度为128 bit,而密钥块长度不固定的迭代分组加密算法<sup>[6]</sup>。实际加解密过程中,各轮迭代过程均包含四个不同层次,分别是:(1)字节代换层,其由具有非线性特征的S盒所组成,具有混淆功能;(2)行/列变换层,这两个层在具有线性混合特征,其主要功能为保障多轮后数据信息的扩散性达到实际标准;(3)密钥加层,通过加循环密钥将子密钥异或至中间状态上。

AES算法加解密过程中,配网设备参数信息均以字或字节的形式存在,因此在进行加解密前,需将配网设备参数信息块转换成字的形式,不同配网设备参数信息字内均具有四个字节,各配网设备参数信息字节内存在8比特信息,由此可知配网设备参数信息块转内字的数量 $M_b=4$ ,密钥内字的数量 $M_k=4,6,8$ ,相对应的加解密算法轮数 $M_r=10,12,14$ 。

以分组长度与密钥长度均为128 bit为例,描述AES算法对配网设备参数信息加密的具体实现过程。由于 $M_b$ 和 $M_k$ 均为4,因此设定对应的 $M_r$ 值为10,在各轮循环加密过程中均包含一个初始循环密钥,各轮加密过程中的输入位同输出位一致,均为128位。各轮配网设备参数信息加密过程中均包含字节转换、行位移变换、列混合变换与循环密钥四个环节。

(1) 字节转换环节中,对配网设备参数信息字节进

行可逆的非线性变换,该环节中包含有限域内求乘法逆运算与DF(2<sup>8</sup>)下的放射变换运算两部分。

利用式(1)描述有限域DF(2<sup>8</sup>)内求乘法逆运算过程:

$$X = (X')^{-1} = \begin{cases} (X')^{254}, & X \neq 0 \text{的条件下} \\ 0, & X' = 0 \text{的条件下} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)内, X和 X' 分别表示配网设备参数信息字节和其逆运算结果。

在 X' ∈ DF(2<sup>8</sup>)的条件下,计算 X=(X')<sup>-1</sup>。

用多项式描述为:

$$\partial_7 X^7 + \partial_6 X^6 + \partial_5 X^5 + \partial_4 X^4 + \partial_3 X^3 + \partial_2 X^2 + \partial_1 X^1 + \partial_0 = \sum \partial_i X^i \quad (2)$$

式(2)内, ∂<sub>i</sub>表示多项式系数。

放射变换是在有限域DF(2<sup>8</sup>)上乘法逆元对配网设备参数信息字节实施字节变换处理。以(x<sub>0</sub>, x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub>, x<sub>4</sub>, x<sub>5</sub>, x<sub>6</sub>, x<sub>7</sub>)表示DF(2<sup>8</sup>)上的元素分量,利用式(3)描述放射变换过程:

$$Z = G * x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式(3)内, Z和 G分别表示配网设备参数信息放射变换结果与放射变换系数。

(2) 行位移变换过程中,令配网设备参数信息块在第0行处于固定状态的条件下,第一行循环向左移动一个字节,以此类推,移动量取决于 M<sub>0</sub>。

(3) 列混合变换过程中可理解为DF(2<sup>8</sup>) $\frac{[x]}{x^4+1}$ 同固定

多项式的相乘。

(4) 加循环密钥过程中需对循环密钥上层加密结果实施异或处理。轮密钥可由密钥表获取,其长度为4。

### 1.3 联调模块设计

网络层将感知层所感知到的配网设备参数信息传输至应用层内,通过解码与校验等验收过程后,通过联调模块实现配网联调目的。联调模块分别以配网内的变电站、馈线线路和不同台区为核心构建中枢司令级CC、组织协调级OC和单元控制机UC,将以此为基础构建配网三联联调模块中的配网联调机制。图3所示为联调模块的接线图,针对不同级别划分配网状态空间,设计特征模型、控制模态与规则库,由此达到三级联调目的。

图3所示的联调模块具有显著的灵活性与可扩展性。

联调模块最底层的单元控制级UC也具备二阶产生式单元结构,能够自主地针对实际被控制对象,即配网设备进行实时控制任务。联调模块作为一个高阶产生式模块<sup>[7]</sup>,其中的各级:运行控制级(MC)、参数自校正级(ST)与任务自适应级(TA)均存在不同的规则库RB、特征辨识器CI与推理机IE,完成不同级别间的配网设备参数信息交互。联调模块中的这种并行机制有利于单元控制器高效率自适应过程的实现。针对配网中任意单一被控设备来说,一个单元控制器可求解自主控制问题,同时不同级别产生式单元还能够经由特征记忆完成学习过程,持续提升联调模块的控制性能。

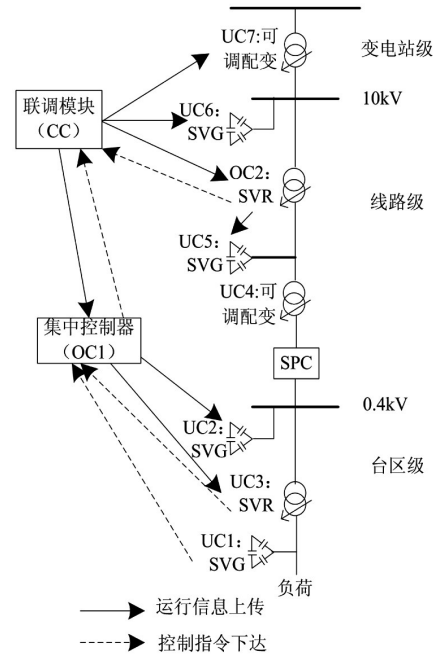


图3 联调模块结构框图

### 1.4 验收联调结果的可视化设计

系统通过应用层实现配网验收与联调功能后,利用显示层内的可视化验收联调界面向用户提供配网设备参数信息验收结果与联调结果的可视化。

可视化验收联调界面中采用三维平行散点图呈现配网设备参数信息<sup>[8]</sup>。三维平行散点将高维、时序的配网设备参数信息集 X<sub>w</sub> 内的配网设备参数信息元素 X<sub>j</sub> 映射为一组三维点 d<sub>j</sub>, X<sub>j</sub> 的时间属性 t、属性编号 k 与属性值 x<sub>jk</sub> 直接影响 d<sub>j</sub> 的位置,其中的映射关系 F 可通过式(4)描述:

$$F(X_j \rightarrow d_j) = \begin{cases} x_j(t_j, x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jk}, \dots, x_{js}) \\ d_j \{d_{j1}, d_{j2}, \dots, d_{jk}, \dots, d_{js}\} \\ d_{jk} = (t_j, k, x_{jk}) k=1, 2, \dots, s \\ c_i \rightarrow (r_i, g_i, b_i) \end{cases} \quad (4)$$

为展示 t 时刻条件下的配网设备参数信息,对平行坐标系实施着色加强处理。为配网设备参数信息点着色是关键的颜色空间

内,各组配网设备参数信息点 $d_j$ 对应的配网设备参数信息分类 $c_i$ 均包含一个对应的 $(r_i, g_i, b_i)$ 三原色值。经由利用有所差异的色彩空间,令配网设备参数信息集 $X_w$ 内各 $X_j$ 呈现的配网设备参数类别区分显著,由此令用户更准确地获取配网设备运行状态的波动情况。

综上所述,完成了对基于数据加密技术的配网可视化同步验收联调系统的设计,其运行流程如图4所示。

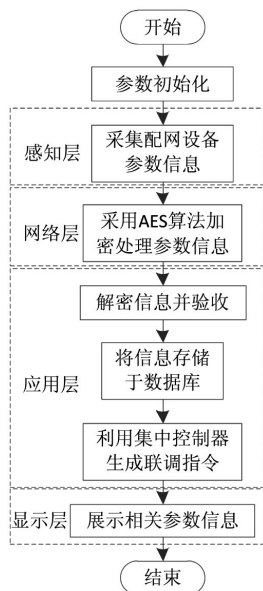


图4 系统流程图

## 2 实验与结果分析

为验证基于数据加密技术的配网可视化同步验收联调系统在实际应用中的性能,选取某农村区域配电网为研究对象,其中包含50 kV变电站、22 kV线路及若干台区。利用Simulink功能仿真研究对象,并通过图形化构建研究对象模型。该模型可用于对研究对象内部的母线、线路、配电、无功发生器、调压器等进行仿真。以研究对象2021年2月份(用电高峰期)为研究时间节点,该时间节点下,研究对象线路末端与用户侧的电压和无功功率均产生越限的问题,针对这一问题,采用本文系统对研究对象进行设备参数信息的验收与联调。

依照我国《标准电压》中的相关规定,研究对象内部22 kV线路母线电压下限不得低于21.3 kV;而台区母线节点电压下限不得低于0.35 kV。

本文系统的应用性测试结果如下。

### 2.1 数据加密技术的随机性测试

本文系统使用的数据加密技术主要用于保障配网设备参数信息安全性,而加密技术中的密钥随机性是分析加密技术应用性能的重要指标。采用国际普遍使用的NIST随机性测试套件分析本文系统中数据加密技术应用过程中密钥的随机性。该套件中通过不同的项目分别获取一

个项目测试值,各项目测试值的取值范围为0-1,测试值达到0.1以上说明该项目通过测试,且测试值越高说明该项目性能越好。本文系统中所使用的数据加密技术部分套件项目测试结果如表1所示。

表1 密钥随机性测试结果

随机测试套件中部分项目	项目测试值
序列	0.467 4
快速傅里叶变换	0.593 5
非覆盖模板匹配	0.443 6
线性复杂度	0.762 1
随机游动	0.739 4
通用统计	0.534 3

分析表1得到,数据加密技术中所生成的密钥各项性能均通过了随机性测试,且各项测试所得评测结果均高于0.4,其中线性复杂度与随机游动两个项目的结果达到0.7以上,而快速傅里叶变换与通用统计的结果也达到0.5以上,这表明本文系统中所使用的数据加密技术能够生成具有较高的随机性的密钥,对于保障研究对象设备参数信息产生积极影响。

### 2.2 设备参数信息安全性分析

在系统运行过程中,用户接收端通过对应的解密过程即可获取准确的配网设备参数信息。以研究对象内部10 kV无功补偿装置电压参数信息为例,分析用户端采用对应解密过程所获取的电压幅值,并与实际电压幅值进行对比,由此验证本文系统的安全性能,所得结果如图5所示。

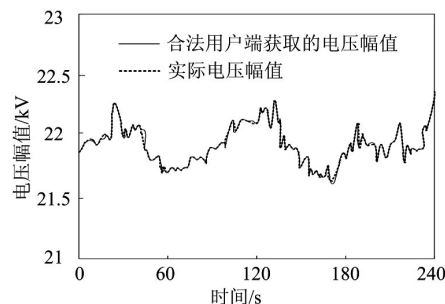


图5 电压幅值接收情况

分析图5得到,用户端在不同时间节点下所获取的电压幅值,同10 kV无功补偿装置实际电压幅值结果基本一致,由此能够表明本文系统中所采用的数据加密技术具有较高的安全性。

### 2.3 联调性能分析

针对研究对象电压越限问题,本文系统对其进行联调处理,具体联调过程为:针对用户电压越下限问题,通过调节配变动作进行联调控制;针对配变二次侧电压越下限问题,通过调节配变变压器变比进行联调控制;针对22 kV线路末端电压越下限问题,通过调节馈线自动调压器进行联调控制。

设定电源出口电压相角为0,分析本文系统联调前后,测试对象中22 kV线路及任意一台区不同母线电压幅值与相角计算结果,所得结果如表2和表3所示。

表2 22 kV线路不同母线电压幅值与相角计算结果

母线 编号	本文系统联调前		本文系统联调后	
	电压幅值/kV	电压相角/°	电压幅值/kV	电压相角/°
C002	21.746	-0.169	22.402	-0.157
C008	21.687	-0.169	22.402	-0.157
C011	21.852	-0.169	22.402	-0.157
C013	21.699	-0.169	22.402	-0.157
C017	21.871	-1.184	22.499	-0.164
C020	21.782	-1.212	22.386	-0.221
C021	21.284	-1.206	22.400	-0.158
C024	21.550	-1.492	22.393	-0.160
C027	21.941	-1.206	22.398	-0.166
C028	21.744	-1.447	22.249	-1.447
C030	21.206	-1.369	22.304	-1.236
C032	21.413	-1.510	22.245	-1.308

表3 台区不同母线电压幅值与相角计算结果

母线 编号	本文系统联调前		本文系统联调后	
	电压幅值/kV	电压相角/°	电压幅值/kV	电压相角/°
Csa1	0.462	-2.008	0.400	-1.325
Csa3	0.462	-2.008	0.400	-1.325
Csa4	0.462	-2.008	0.400	-1.325
Csa5	0.462	-2.008	0.400	-1.325
Csa7	0.355	-2.740	0.383	-1.346
Csa8	0.351	-2.964	0.381	-1.419
Csa10	0.348	-3.405	0.378	-1.540
Csa14	0.343	-3.728	0.374	-1.762
Csa15	0.338	-4.391	0.371	-1.703
Csa18	0.454	-2.745	0.382	-1.341
Csa19	0.346	-3.472	0.380	-1.484
Csa20	0.333	-4.513	0.372	-1.697

分析表2和表3能够得到,本文系统联调前,研究对象内部22 kV线路母线电压最低的母线电压量为21.206 kV,低于22 kV线路电压下限标准值21.3 kV。同时台区线路低电压问题也较为显著,母线节点电压下限达到0.333 kV,低于台区母线节点电压下限标准值0.35 kV,产生越下限问题。采用本文系统进行联调后,研究对象内部22 kV线路末端电压由联调前的最低母线电压从21.206 kV提升至22.245 kV,而台区线路母线节点电压下限则由0.333 kV提升至0.371 kV。实验结果显示研究对象的越下限问题被有效改善,供电质量显著提升。

## 2.4 不同系统间的对比

为进一步确定本文系统的有效性,将文献[3]、文献[4]系统作为对比,分析应用不同系统联调后,电压越下限的次数,结果如表4所示。

分析表4中的数据可知,应用本文系统后,台区不同母线均未出现电压越下限的情况;应用文献[3]系统后,

母线C011、C020各出现一次电压越下限的情况;应用文献[4]系统后,母线C002、C013、C027出现了电压越下限的情况。

表4 电压越下限的次数测试结果/次

母线编号	本文系统	文献[3]系统	文献[4]系统
C002	0	0	1
C008	0	0	0
C011	0	1	0
C013	0	0	1
C017	0	0	0
C020	0	1	0
C021	0	0	0
C024	0	0	0
C027	0	0	2
C028	0	0	0
C030	0	0	0
C032	0	0	0

## 3 结束语

用电量的提升令配网负荷持续提升,造成配网供电质量下降,而配网供电质量的高标准是确保用户生活用电安全与生产稳定的基础。针对这一问题,本文设计基于数据加密技术的配网可视化同步验收联调系统。实验结果显示本文系统能够有效改善配网电压越下限问题,提升配网供电质量。由于时间所限,本文系统在研究过程中具有一定局限性,例如针对配网三相不平衡与潮流计算问题,本文系统均未深入研究,这也是本文系统在后续优化过程中的主要研究方向。

## 参考文献:

- [1] 余高旺,方陈,樊占峰,等.基于汉宁窗的配电网同步相量测量装置算法及应用[J].中国电力,2022,55(6):18-24.
- [2] 王官涛,高峰,吴晓东.配电网中台区抗负荷波动能力提高的方法研究[J].能源与环保,2021,43(7):237-242.
- [3] 刘青,徐宏璐.提高STATCOM/BESS风电系统频率与电压支撑的智能联调优化控制方法[J].电力自动化设备,2020,40(7):62-71.
- [4] 唐杰,吕林,许立雄,等.多时间尺度下计及光热—储热的主动配电网主辅联合优化调度[J].水电能源科学,2021,39(3):190-194,189.
- [5] 夏伟,蔡文婷,刘阳.基于隐私同态的城市配电网多级网格数据聚合算法[J].电测与仪表,2022,59(9):111-118.
- [6] 吴文丰,张文芳,王小敏,等.一种安全增强的LTE-R车-地无线通信认证密钥协商方案[J].铁道学报,2019,41(12):66-74.
- [7] 李瑞芬,葛倩.基于大数据调度的OMS配网一体化调控算法研究[J].计算机仿真,2021,38(2):253-257.
- [8] 陈盛慧,叶良,徐光年,等.智能化视觉系统在配电网带电接火上的应用[J].机械制造与自动化,2021,50(3):228-231.

作者简介:覃拓(1983-),男,本科,工程师,研究方向:调度自动化运行管理。