

# 基于数字人民币的智能电表及实时电力交易新模式

申永鹏<sup>1</sup>, 孙嵩楠<sup>1</sup>, 赫婷<sup>1</sup>, 刘东奇<sup>2</sup>, 唐耀华<sup>3</sup>, 王延峰<sup>1</sup>

(1. 郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 润电能源科学技术有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 综述分析了现有智能电表及电力交易机制无法真正地实现实时交易-实时结算是限制实时电价电力交易模式的关键因素。以实现电能的实时计量-实时交易-实时结算为目标, 依托数字人民币的支付即结算和可编程特性, 构建了硬件上由计量芯、管理芯及交易芯构成, 软件上基于 GlobalPlatform 可信框架, 内置数字人民币硬件钱包的 e-CNY 智能电表结构。构思了基于实时电价、销售和上网电价智能合约实时发布、实时结算的发电侧和售电侧实时电力交易新模式。所提出的 e-CNY 智能电表及实时电力交易新模式可有效激励发电企业及用电方通过跟踪价格信号来响应系统需求, 积极参与电网调峰、节能减碳, 助力“3060 双碳”目标的达成。

**关键词:** 智能电表; 数字人民币; 电力交易; 实时电价

## Real-time power trading mode based on an e-CNY smart electricity meter

SHEN Yongpeng<sup>1</sup>, SUN Songnan<sup>1</sup>, HE Ting<sup>1</sup>, LIU Dongqi<sup>2</sup>, TANG Yaohua<sup>3</sup>, WANG Yanfeng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;  
2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;  
3. Rundian Energy Science Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** This paper summarizes and analyzes the fact that existing smart meters and electricity trading mechanisms cannot truly realize real-time power trading, and real-time settlement is the key factor restricting the real-time electricity price and electricity trading mode. By taking the goal of realizing real-time measurement, real-time trading, and real-time settlement of electricity and also relying on the payment settlement and programmable features of e-CNY, an e-CNY smart electricity meter with an e-CNY wallet built-in is designed. Its hardware is composed of a metering core, management core and transaction core and its software is based on the GlobalPlatform trusted framework. A new mode of real-time power trading on both the power generation and sales sides is conceived. It is based on real-time electricity prices, real-time released smart price contracts of power generation and sale, and real-time settlement. The e-CNY smart meter and the new real-time power trading model proposed can effectively encourage power generation companies and power users to respond to power system commands by tracking price signals, to actively participate in grid peak shaving, energy conservation and carbon reduction, and contribute to achieving the “3060 carbon peak and neutrality goals”.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62273313 and No. 52177068).

**Key words:** smart electricity meter; e-CNY; power trading; real-time price

## 0 引言

电能计量数据是贸易结算的根据以及电力企业

内部经济指标的考核依据, 对于确保贸易结算的公平、公正以及电力企业内部优化资源配置, 提升运行效率非常关键<sup>[1-4]</sup>。

随着能源互联网、综合能源系统以及风力、光伏等清洁能源的发展, 以实现电力系统低碳、经济、可靠运行为主要目标的智能电网和电力物联网成为研究热点<sup>[5-6]</sup>。作为智能电网和电力物联网的重要计量设备, 智能电表具有监测指标多、上传数据量大

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(62273313, 52177068); 河南省科技攻关项目资助(222102240005); 河南省青年骨干教师培养计划项目资助(2021GGJS089); 河南省高校科技创新团队支持计划项目资助(22IRTSTHN017)



标的实时电价决策模型。文献[50]提出了利用智能电表数据的配电市场 P2P 交易偏差惩罚方法,约束了实时用电负荷和发电功率的最大偏差功率、累计偏差里程以及累计偏差能量的变化范围。

上述研究已经认识到智能电表的计量数据是制定实时电价的基础,智能电表的费率控制功能是实现实时电价的载体,实时电价政策的推行必须依赖于智能电表的安装<sup>[46-47]</sup>。但是,在配电侧采用的预存式或远程抄表式智能电表,以及发电企业与电网企业采用的合约市场交易、期货与期权市场交易、日前市场交易等模式,均难以适应未来智能电网高比例新能源、高度智能、开放互动的特征。

造成上述问题的原因在于:现有的智能电表及电力交易机制无法真正地实现实时交易-实时结算,进而无法调动发电企业以及用户主动参与到电网调峰的积极性,无法实现资源的优化配置以及电力系统的高效运行。

解决上述问题的关键在于:在发电侧,根据电力供需情况,结合基准电价、超低排放电价、环保电价等价格水平,实时制定并发布上网电价,通过价格杠杆引导发电企业积极参与调峰,促进节能减碳;在售电侧,售电公司根据发电侧上网电价的报价情况,在保障社会供电稳定的前提下,针对高耗能、高排放用户,采用差别电价、阶梯电价等实时绿色电价政策,促进节能降耗;在电表侧,结合发电或者售电侧的实时电价,采用智能合约形式,以最小计量单位为基础,实现实时计量-实时交易-实时结算。通过上述三方面,可构建时间精度更高的实时电价机制,刺激所有发电企业及用电方通过跟踪价格信号来响应系统需求,达到优化资源配置的目的。

以实现电能的实时计量-实时交易-实时结算为目标,本文在分析数字人民币架构与特征的基础上,构建了硬件上由计量芯、管理芯及交易芯构成,软件上基于 GlobalPlatform 可信框架,通信端采用 3GPP R16 超可靠低时延通信(ultra-reliable and low latency communications, uRLLC),内置数字人民币硬件钱包,并可通过实时智能合约完成实时电能交易及结算的数字人民币智能电表。进一步地,构思了基于实时电价、可实时结算的发电侧和售电侧实时电力交易新模式。

## 1 数字人民币构架与特征

数字人民币(e-CNY)是人民银行发行的数字形式的法定货币,由指定运营机构参与运营,以广义账户体系为基础,支持银行账户松耦合功能,与实

物人民币等价,具有价值特征和法偿性<sup>[51]</sup>。

1) 支付即结算。数字人民币与银行账户松耦合,不依赖于银行账户,基于数字人民币钱包进行资金转移,等效于纸币的支付过程,可实现支付即结算。

2) 兼具账户和价值特征。数字人民币兼容基于账户(account-based)、基于准账户(quasi-account-based)和基于价值(value-based)等三种方式,采用可变面额设计,以加密货币串形式实现价值转移<sup>[51]</sup>。

3) 低成本且不计付利息。与纸钞和硬币人民币一致,数字人民币在使用过程中,中国人民银行及指定运营机构、收款方均不向下游机构及个人客户收取兑出、兑回及交易费用。数字人民币定位于 M0 货币(流通中现金),因此中国人民银行及各商业银行等指定运营机构不对其计付利息。

4) 可控匿名。遵循“小额匿名、大额依法可溯”的原则,对于小额交易,数字人民币高度重视个人信息与隐私保护,满足公众对小额匿名支付服务需求;对于大额交易,数字人民币仅收集少于传统电子支付模式的部分交易信息,并设有信息“防火墙”,严格落实信息安全及隐私保护管理,禁止任意查询、使用,以防范被用于电信诈骗、网络赌博、洗钱、逃税等违法犯罪行为<sup>[51]</sup>。

5) 高安全性。尽管数字人民币由中国人民银行发行,但其借鉴了区块链的分布式账本机制,采用“一币,两库,三中心”框架,通过央行和商业银行构建分布式确权账本,确保了交易的安全性。同时,数字人民币综合使用数字证书体系、数字签名、安全加密存储等技术,实现不可重复花费、不可非法复制伪造、交易不可篡改及抗抵赖等功能<sup>[51]</sup>。

6) 多载体。有别于实体形式存在的纸钞和硬币,数字人民币必须通过“数字钱包”载体才能进行触达用户并进行交易。

从载体形式上,数字钱包可分为软钱包和硬钱包。软钱包基于移动支付 APP、软件开发工具包(software development kit, SDK)、应用程序接口(application program interface, API)等为用户提供服务。硬钱包基于安全芯片实现数字人民币相关功能,可依托手机终端、智能电表、物联网设备等为用户提供服务。

从权限归属上,数字钱包可分为母钱包和子钱包。钱包持有主体可根据应用需求将母钱包划分为若干子钱包,并设定限额支付、条件支付和个人隐私保护等功能。企业和机构可通过子钱包实现资金归集和分发、财务管理等功能。

7) 可编程性。数字人民币可通过加载智能合约实现可编程性,使数字人民币在确保安全与合规的

前提下, 根据交易双方商定的条件、规则进行自动支付交易, 促进业务模式创新<sup>[51]</sup>。

在运营方面, 数字人民币采用和纸币相同的“双层运营模式”, 即中国人民银行负责数字人民币发行、注销、跨机构互联互通和钱包生态管理; 指定的运营机构(目前为“工农中建交邮储”六大商业银行)负责数字人民币兑换和流通交易。整个数字人民币的发行、投放、兑换和交易系统框架如图 2 所示<sup>[52]</sup>。

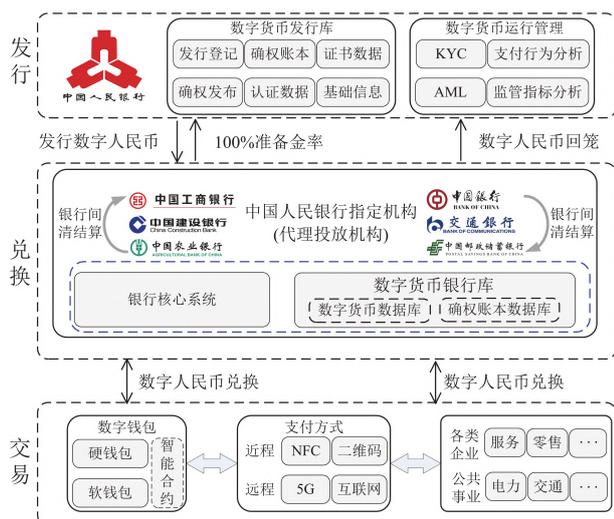


图 2 数字人民币的发行、兑换和交易系统框架

Fig. 2 Framework for the issuance, exchange and trading system of e-CNY

## 2 e-CNY 智能电表

基于数字人民币硬钱包及其支付即结算、多载体和可编程特性, 结合 OIML R46 提出的多芯分离构架, 构建了硬件上由计量芯、管理芯及交易芯构

成, 软件上基于 GlobalPlatform 可信框架的 e-CNY 智能电表结构。

### 2.1 e-CNY 智能电表硬件结构

所提出的 e-CNY 智能电表硬件上由计量芯、管理芯及交易芯三大功能部分, 以及附属电源电路和功能扩展模组构成, 如图 3 所示。

#### 1) 计量芯

计量芯是完成计量功能的核心, 由高精度集成式多相电能和电源质量监控器件 ADE9000 及 24.576 MHz 时钟、I2C 接口 512 kbit 铁电存储器 MB85RC512T、状态指示及计量脉冲接口构成。

电流互感器或罗氏线圈将 A、B、C 三相及中性线 N 的电流信号经抗混叠滤波电路处理后输入至 ADE9000 相应端子; 电阻分压电路将分压后的 A、B、C 三相相电压信号分压至 $\pm 1$  V 后, 经抗混叠滤波电路处理并连接至 ADE9000 相应端子。

上述计量芯电路确保了 e-CNY 智能电表支持三相三线、三相四线测量以及中性线电流测量, 同时具有针对电流互感器的多段相位/增益补偿。能够对均方根(root mean square, RMS)、有功功率、无功功率、视在功率和电能进行总值和基波测量。在计量精度方面, 由于 ADE9000 具有 7 个信噪比达 101 dB、最大温度漂移为 $\pm 25$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$  的高性能 ADC 转换器, e-CNY 智能电表符合有功 0.2S 级(IR46 D 级)、无功 0.5S 级(IR46 C 级)精度。

#### 2) 管理芯

管理芯主要用于实现计量配置、计量数据的加密及存储、数据通信、按键及显示等基础功能, 以及非介入式负荷感知、负荷控制、电动汽车有序充电、扩展通信、多表集抄等扩展功能。

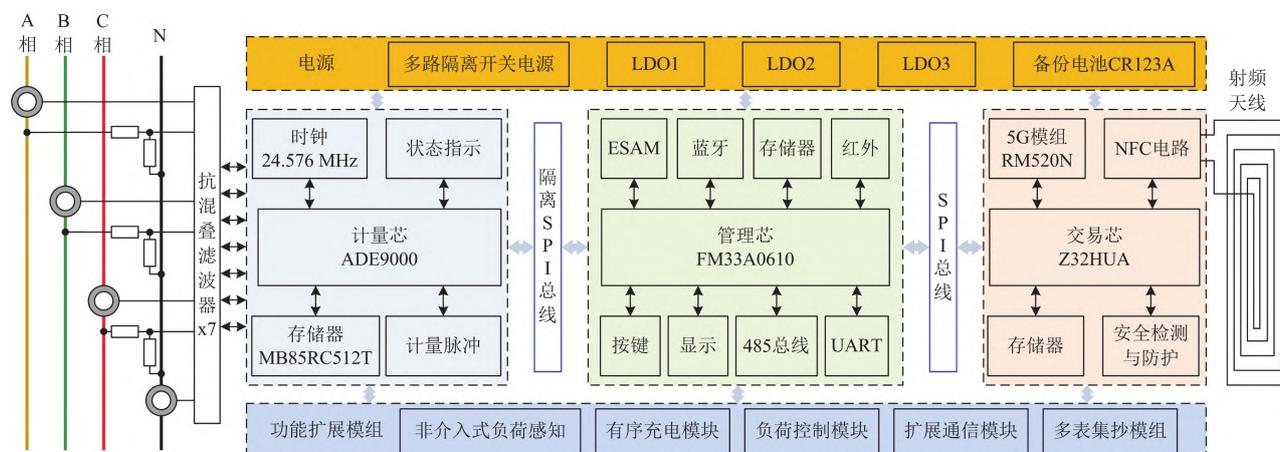


图 3 e-CNY 智能电表硬件结构

Fig. 3 Hardware structure of e-CNY smart electricity meter

管理芯与计量芯之间采用隔离 SPI 总线进行明文数据交互。管理芯由采用 ARM Cortex-M0+内核的低功耗微控制器 FM33A0610 及周边电路构成。嵌入式安全控制模块(embedded secure access module, ESAM)是实现安全存储、数据加/解密、双向身份认证、存取权限控制、线路加密传输等安全控制功能的硬件电路,其内部集成有国密算法 SM1、随机数发生器、电压和频率检测等多种安全保护机制,可有效确保数据传输的机密性和完整性,通过 ISO 7816 接口与 FM33A0610 连接,功能上符合国家电网公司《Q/GWD 1365-2013 智能电能表信息交换安全认证技术规范》。

由于《Q/GWD 1354-2013 智能电能表功能规范》要求电表至少应存储 12 个结算日的单相和双向总电能,以及各费率电能数据。同时,定时冻结量至少保存 60 次,日冻结数据至少保存 62 天的数据量,整点冻结应至少保存 254 个数据。再加上智能电表需要保存各相失压、各相断相、各相失流、潮流反向、需求超限、磁场干扰及各相过载等事件,对存储器容量和可靠性的要求越来越高。此处,采用 GD25S512MD 型 2 x 256M-bit NOR Flash 通过 SPI 总线与 FM33A0610 连接。

数据通信方面,管理芯集成了调制型红外通信接口、隔离型 RS485 接口、蓝牙 3 种接口,用于抄读 e-CNY 智能电表内部记录的数据和信息,数据通信接口还可以用于相关参数的设置。此外,预留 UART 总线接口,用作多功能测试接口。

为提升功能扩展能力,根据多芯模组化设计思路,e-CNY 智能电表预留 2 个扩展模块接口,用来实现非介入式负荷感知、有序充电、负荷控制、扩展载波/无线通信、多表集抄等功能。各功能扩展模组以 UART 串行通信方式与管理芯 FM33A0610 通信,供电方式、通信接口定义均保持统一<sup>[53]</sup>。

### 3) 交易芯

交易芯是实现 e-CNY 智能电表可编程实时交易-实时支付-实时结算的关键。硬件上,交易芯由 32 位高性能 ARM 安全核 Z32HUA 及通信、存储、安全检测与防护等周边电路组成。交易芯与管理芯通过 SPI 总线进行数据通信,并采用 AES-256 对数据进行高强度加密。

Z32HUA 片上集成 4 kB 的高速 Cache、48 kB 的 SRAM 以及 512 kB 的 Flash,同时提供 SM1/SM2/SM3/SM4、AES、RSA 等安全算法以及真随机数发生器,可确保数据的可靠加密。此外,具有电压、温度、频率、光照等异常检测功能,确保了 e-CNY

智能电表的物理安全。

交易芯存储器是数字人民币的物理载体,同时还承担着交易记录、智能合约加载记录等数据的存储,其安全性、可靠性至关重要。这里采用铁电存储器(ferroelectric random access memory, FRAM),可提供 10<sup>13</sup> 高耐久性擦写;在 35°C 时,可确保数据 200 年以上可靠存储;在 85°C 时,可确保数据 10 年以上可靠存储;具有 150 ns 的高字节读写速度。以上特性,确保了数字人民币硬件钱包的高频次、长时间、高可靠性交易需求。

e-CNY 智能电表智能合约的更新、加载以及在线交易需要高实时性、高可靠性的远程通信方式。这里采用支持 3GPP R16 标准的 5G 通信模组 RM520N。相比于 R15 仅侧重于增强移动宽带应用场景(enhanced mobile broadband, eMBB),3GPP R16 重点加强了 uRLLC 应用场景。R16 版本通过 PDCCH 监视、多个 HARQ-ACK、无序 PUSCH 调度、UE 优先级和多路复用,进一步增强了 uRLLC 性能,实现了低至 1 ms 的空口时延、5 ms 以内的端到端时延。同时,R16 对分组数据汇聚协议(packet data convergence protocol, PDCP)复制机制进行了增强,最高可支持 4 路复制数据传输,增强了通信可靠性。

为便于现场对 e-CNY 智能电表交易芯的相关参数进行配置,设计了近场通信(near-field communication, NFC)接口电路,以便于在生产及现场调试等环节实现钱包设置、交易限额和智能合约加载等功能。

## 2.2 e-CNY 智能电表交易芯软件结构

由于 e-CNY 智能电表采用计量芯、管理芯和交易芯分离结构,实现了 3 个主要功能单元的物理隔离,极大地简化了软件构架设计。e-CNY 智能电表交易芯软件结构如图 4 所示。

交易芯软件功能上,包括 5G 数据通信、NFC 数据通信、通信日志管理、数字人民币钱包、电力交易智能合约、交易日志管理、数据加密/解密以及电压、温度、频率、光照等异常检测与防护。

交易芯软件结构上,基于 GlobalPlatform,由包含运行于富执行环境(rich execution environment, REE)的 RTOS 及驱动、REE 应用程序,以及运行于可信执行环境(trusted execution environment, TEE)的可信 OS 及可信 APP 构成。其中,数字人民币钱包、电力交易智能合约以及交易日志管理等关键功能运行于 TEE 中;5G 数据通信、NFC 数据通信及通信日志管理等功能,运行于 REE 环境中,如图 4 所示。GlobalPlatform 可信框架示意图如图 5 所示<sup>[54]</sup>。

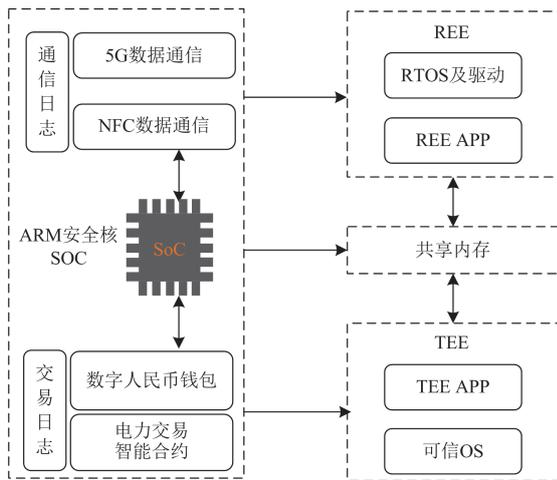


图 4 e-CNY 智能电表交易芯软件结构

Fig. 4 Trading core software structure of e-CNY smart electricity meter

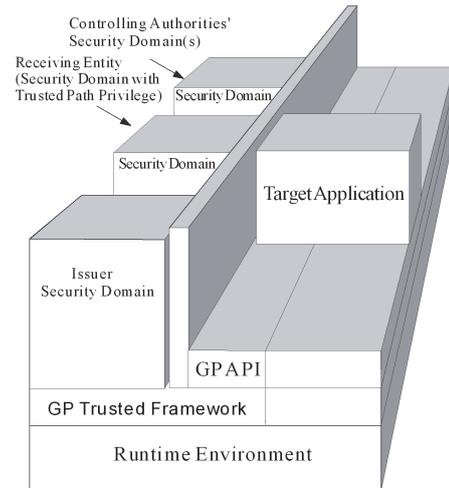


图 5 GlobalPlatform 可信框架

Fig. 5 GlobalPlatform trusted framework

### 3 实时电力交易模式

e-CNY 智能电表在实现电能计量、数据管理与通信基本功能的同时，通过内置数字人民币钱包，实现了电能的实时交易-实时结算；通过内置 5G uRLLC 通信模组，实现了电力交易智能合约的远程实时加载和自动交易，为电力现货交易市场以及实时电价机制提供了终端保障。基于 e-CNY 智能电表，所提出的实时电力交易模式如图 6 所示。

在发电侧，火力、水力等传统发电，风力、光

伏、核能等清洁能源发电，电池蓄能、抽水蓄能等调峰发电，以及电动汽车等分布式电源通过 e-CNY 智能关口电表将电能输送至电网。各 e-CNY 智能关口电表的硬件钱包分别绑定至电网企业购电支出钱包的子钱包 1,2,...,N。

在售电侧，居民生活用电、农业生产用电、工商业及其他用电以及区域电网输电等各种场景通过 e-CNY 用户电表从电网获取电能。各 e-CNY 用户电表的硬件钱包分别绑定至各用户的电费支出钱包 1,2,...,M。

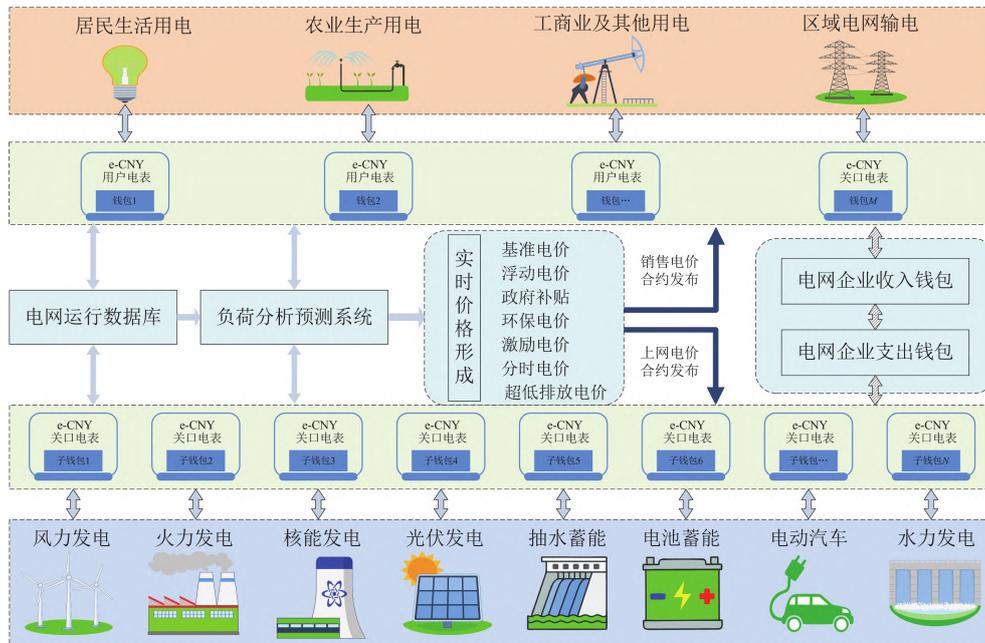


图 6 基于 e-CNY 智能电表的实时电力交易模式

Fig. 6 Real-time power trading mode based on e-CNY smart electricity meter

电网企业结合电网运行数据和负荷分析预测系统得出的相关数据，实时发布激励电价，并综合基准电价、浮动电价、政府补贴、环保电价、分时电价、超低排放电价等因素，分别确定实时上网电价智能合约及销售电价智能合约，并通过 5G uRLLC 将智能合约实时发送至 e-CNY 关口电表和用户电表。

当各发电企业电能入网后，e-CNY 智能关口电表依据上网电力交易实时智能合约，将各自子钱包中的数字人民币实时通过 5G 网络支付至发电企业收入钱包；在用户侧，e-CNY 智能用户电表依据销售电力实时智能合约，将各自钱包中的数字人民币实时支付至电网企业收入钱包，完成实时电力交易。

上述过程中，除具有典型电力交易的优势之外，基于交易芯的实时电力交易模式还具有如下优势：

- (1) 为电力生产商和用户提供了端到端的便捷资金转移方式，避免了第三方支付平台和银行的介入，实现了支付即结算，提高了资金周转效率；
- (2) 可实现用户的可靠匿名，有利于保护电力用户的经营信息安全；
- (3) 智能合约的远程更新和加载、e-CNY 钱包参数和交易限额的设置均可通过远程实时加载，可进一步刺激发电企业及用电方通过跟踪价格信号来响应系统需求，达到优化资源配置的目的；
- (4) 为可再生能源电价补贴等财政补助的定向、实时发放提供了载体，为财政补助资金的监管提供了技术支撑；
- (5) 为分布式发电市场化交易提供了便捷的支付渠道，有助于分布式发电的就近入网、就近消纳，提高了运行效率。

## 4 总结与展望

### 4.1 本文的主要工作

1) 在分析电表的智能化及网联化趋势的基础上，指出了现有的智能电表及电力交易机制无法真正的实现实时交易-实时结算是限制实时电价电力交易模式的关键因素。

2) 在分析数字人民币架构与特征的基础上，以实现电能的实时计量-实时交易-实时结算为目标，构建了硬件上由计量芯、管理芯及交易芯构成，软件上基于 GlobalPlatform 可信框架，并且内置数字人民币硬件钱包的 e-CNY 智能电表结构。

3) 基于数字人民币的支付即结算和可编程特性，初步构思了基于实时电价、销售电价智能合约和上网电价实时发布、实时结算的发电侧和售电侧实时电力交易新模式。

### 4.2 e-CNY 智能电表的意义

1) 为实时电价电力交易模式提供了实时计量-实时交易-实时结算的可信终端硬件和软件解决

方案。

2) 依托于实时智能合约的上网电价和销售电价实时发布模式，可有效激励发电企业及用电方通过跟踪价格信号来响应系统需求，积极参与电网调峰、节能减碳。

3) 实时电价机制以及数字人民币的价值特征、支付即结算特征可充分激发发电企业参与需求响应的积极性，同时加快了企业资金周转速度，降低了企业运营资金压力。

4) 售电及上网智能合约实时发布机制为电动汽车等分布式电源参与电网调峰、节能减碳提供了灵活、自主交易手段。

5) 数字人民币可实现定向支付，有助于可再生能源发电等财政补贴高效、定点向纳入补贴范围的发电企业发放。

6) 简化了发电企业与电网企业、电网企业与用电方的电力交易、支付、结算流程，高度匹配新型电力系统的分布式发电特征。

本文的研究为我国电力现货交易市场以及实时电价机制的发展提供关键计量、结算设备及整体系统构架，进而激发发电企业和用电方参与削峰填谷，提升电力系统新能源消纳能力及综合资源配置能力，促进节能减碳，为 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和目标的如期实现提供了支撑。

### 4.3 存在的不足及下一步工作展望

1) 由于中国人民银行尚未发布数字人民币智能合约的具体加载方式及相关接口，因此本文仅构思了依托智能合约的实时电力交易模式的总体框架，未能提供具体的实施方式。如何根据数字人民币的相关规定，构建具体的智能合约加载方式，促进与电力交易应用场景的深度融合是本文的下一步研究方向之一。

2) 论文仅提供了实时发布激励电价，并综合基准电价、浮动电价、政府补贴、环保电价、分时电价、超低排放电价等因素，确定实时上网电价智能合约和销售电价智能合约的总体框架。如何充分发挥 e-CNY 智能电表的实时计量-实时交易-实时结算优势，开发具体的实时电价决策模型，是本文的下一步研究方向之二。

### 参考文献

[1] 孙一浩, 肖先勇, 张文海, 等. 基于伪异常点辨识的关口电能表计量数据异常研究[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4568-4577.  
SUN Yihao, XIAO Xianyong, ZHANG Wenhai, et al. Abnormal measurement data of gateway energy meter

- based on pseudo outlier identification[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(11): 4568-4577.
- [2] 王延峰, 申永鹏, 唐耀华, 等. 双碳目标下 NB-IoT 能源物联网安全构架及关键技术[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(8):179-187.  
WANG Yanfeng, SHEN Yongpeng, TANG Yaohua, et al. Framework and key technologies for NB-IoT energy internet of things to achieve carbon peak and neutrality goals[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(8): 179-187.
- [3] 杨娴, 黄珏, 徐佳隆, 等. 关口电能表多回路自动控制与检测装置的研究[J]. *电气应用*, 2021, 40(3): 35-39.  
YANG Xian, HUANG Jue, XU Jialong, et al. Research on multi-loop automatic control and detection device of gateway electric energy meter[J]. *Electrotechnical Application*, 2021, 40(3): 35-39.
- [4] 龚振龙, 唐亮, 马一峰, 等. 关口电能表测量误差的非线性建模[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(17): 74-79.  
GONG Zhenlong, TANG Liang, MA Yifeng, et al. Non-linear modeling of measurement errors of gateway energy meter[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(17): 74-79.
- [5] 朱彦名, 徐潇源, 严正, 等. 面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(2): 176-187.  
ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power internet of things[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(2): 176-187.
- [6] 彭茜, 王爱娟, 李峻阳, 等. 基于高效遗传算法的电网需求侧调度优化研究及其收敛性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(6): 33-42.  
PENG Qian, WANG Aijuan, LI Junyang, et al. Optimization of the demand side dispatching of a power grid based on an efficient genetic algorithm and its convergence analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6): 33-42.
- [7] 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 Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(3): 58-69.
- [8] 刘林, 祁兵, 李彬, 等. 面向电力物联网新业务的电力通信网需求及发展趋势[J]. *电网技术*, 2020, 44(8): 3114-3130.  
LIU Lin, QI Bing, LI Bin, et al. Requirements and developing trends of electric power communication network for new services in electric internet of things[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 3114-3130.
- [9] 陈皓勇, 蔡伟钧, 陈健润. 能量与信息融合的电力物联网技术[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(22): 8-17.  
CHEN Haoyong, CAI Weijun, CHEN Jianrun. Power internet of things technology with energy and information fusion[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22): 8-17.
- [10] 侯兴哲, 刘型志, 郑可, 等. 泛在电力物联网环境下新一代智能电能表技术展望[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(9): 128-131.  
HOU Xingzhe, LIU Xingzhi, ZHENG Ke, et al. Technical prospect of a new generation smart meter in the ubiquitous power internet of things environment[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(9): 128-131.
- [11] 彭楚宁, 罗冉冉, 王晓东. 新一代智能电能表支撑泛在电力物联网技术研究[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(15): 137-142.  
PENG Chuning, LUO Ranran, WANG Xiaodong. Research on a new generation of smart meter-technology supports ubiquitous power internet of things[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(15): 137-142.
- [12] 姚力. 基于 OIML R46 国际建议的智能电能表设计[J]. *电测与仪表*, 2017, 54(16): 95-99.  
YAO Li. A design of smart meter based on OIML R46 international recommendation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(16): 95-99.
- [13] SUN G, CONG Y, HOU D, et al. Joint household characteristic prediction via smart meter data[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 1834-1844.
- [14] SONG H, LIU C, JALILI M, et al. Ensemble classification model for EV identification from smart meter recordings[J/OL]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*: 1-9[2022-08-05]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9779073>.
- [15] KONG W, DONG Z Y, MA J, et al. An extensible approach for non-intrusive load disaggregation with smart meter data[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(4): 3362-3372.
- [16] MAZZA A, CHICCO G. High-quality load pattern reconstruction from smart meter data to enhance the assessment of peak power and network losses[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(3):

- 3261-3274.
- [17] DUAN N, HUANG C, SUN C C, et al. Smart meters enabling voltage monitoring and control: the last-mile voltage stability issue[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(1): 677-687.
- [18] PARVEZ I, AGHILI M, SARWAT A I, et al. Online power quality disturbance detection by support vector machine in smart meter[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 1328-1339.
- [19] DE ORO ARENAS L, DE AZEVEDO E MELO G, CANESIN C A. A methodology for power quantities calculation applied to an FPGA-based smart-energy meter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [20] 陈龙瑾, 邢菁, 吴达雷, 等. 基于支持向量机的多回路关口电能表在线监测方法研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-7[2021-09-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210730.0947.002.html>.
- CHEN Longjin, XING Jing, WU Dalei, et al. Research on on-line monitoring method of multi-loop gateway electricity meter based on SVM[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-7[2021-09-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210730.0947.002.html>.
- [21] 徐焕增, 孔政敏, 王帅, 等. 基于动态线损及 FMRLS 算法的智能电表误差在线评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8349-8358.
- XU Huanzeng, KONG Zhengmin, WANG Shuai, et al. Online error evaluation model of smart meter based on dynamic line loss and FMRLS algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8349-8358.
- [22] KONG X, ZHANG X, LU N, et al. Online smart meter measurement error estimation based on EKF and LMRLS method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4269-4279.
- [23] TUO J, TANG D, WEN C, et al. An error state forecasting method for smart meters based on state parameters[J]. Instrument Technology, 2019, 19(3): 1-5.
- [24] YUAN R, LI W, YE X, et al. Analysis and optimization design of intelligent meter measurement error consistency[J]. Electric Energy Management Technology, 2017, 17(5): 26-30.
- [25] NI J, ZHANG K, ALHERBI K, et al. Differentially private smart metering with fault tolerance and range-based filtering[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2483-2493.
- [26] PENG X, WANG L, JIA Z, et al. Evaluation of measurement error of digital electric energy meter based on Monte Carlo method[J]. Electric Measurement Instrument, 2017, 54(16): 100-105.
- [27] KONG X, ZHANG X, BAI L. A remote estimation method of smart meter errors based on neural network filter and generalized damping recursive least square[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(1): 219-230.
- [28] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 1-8.
- CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.
- [29] BEN-SHIMOL Y, GREENBERG S, DANILCHENKO K. Application-layer approach for efficient smart meter reading in low-voltage PLC networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(9): 4249-4258.
- [30] GONZALEZ-SOTRES L, MATEO C, FRIAS P, et al. Replicability analysis of PLC PRIME networks for smart metering applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 827-835.
- [31] STIRI S, CHAOUB A, GRILO A, et al. Hybrid PLC and LoRaWAN smart metering networks: modeling and optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(3): 1572-1582.
- [32] KUMARI P, MISHRA R, GUPTA H P, et al. An energy efficient smart metering system using edge computing in LoRa network[J/OL]. IEEE Transactions on Sustainable Computing: 1-12[2022-08-05]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9316214>.
- [33] LI Y, CHENG X, CAO Y, et al. Smart choice for the smart grid: narrowband internet of things (NB-IoT)[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 5(3): 1505-1515.
- [34] SHEN Y, HE T, WANG Q, et al. Secure transmission and intelligent analysis of demand-side data in smart grids-a 5G NB-IoT framework[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 585.
- [35] KHAN B, PIRAK C. Experimental performance analysis of MQTT and CoAP protocol usage for NB-IoT smart meter[C] // 2021 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON), March 10-12, 2021, Pattaya, Thailand: 65-68.
- [36] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.

- WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric internet of things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [37] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.
- ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous internet of things in electricity: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025.
- [38] CHIU W Y, SUN H, THOMPSON J, et al. IoT and information processing in smart energy applications[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(10): 44-44.
- [39] ZEINALI M, THOMPSON J, KHIRALLAH C, et al. Evolution of home energy management and smart metering communications towards 5G[C] // 2017 8th International Conference on the Network of the Future (NOF), November 22-24, 2017, London, UK: 85-90.
- [40] MORSTYN T, TEYTELBOYM A, MCCULLOCH M D. Bilateral contract networks for peer-to-peer energy trading[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2026-2035.
- [41] DEVINE M T, CUFFE P. Blockchain electricity trading under demurrage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2323-2325.
- [42] KANG J, YU R, HUANG X, et al. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 3154-3164.
- [43] LONG C, WU J, ZHANG C, et al. Peer-to-peer energy trading in a community microgrid[C] // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, IL, USA: 1-5.
- [44] MORSTYN T, MCCULLOCH M D. Multiclass energy management for peer-to-peer energy trading driven by prosumer preferences[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 4005-4014.
- [45] ZHOU Y, WU J, LONG C, et al. State-of-the-art analysis and perspectives for peer-to-peer energy trading[J]. Engineering, 2020, 6(7): 739-753.
- [46] 殷树刚, 张宇, 拜克明. 基于实时电价的智能用电系统[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 11-16.
- YIN Shugang, ZHANG Yu, BAI Keming. A smart power utilization system based on real-time electricity prices[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 11-16.
- [47] 何永秀, 李欣民. 基于市场供需均衡的实时电价机制研究[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2016(5): 48-54.
- HE Yongxiu, LI Xinmin. The study of real-time pricing mechanism based on the balance of market supply and demand[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2016(5): 48-54.
- [48] 赵峰, 罗鑫, 高锋阳. 考虑网内实时电价的微电网经济优化运行研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9): 53-60.
- ZHAO Feng, LUO Xin, GAO Fengyang. Research on optimal operation for micro-grid considering real-time price[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(9): 53-60.
- [49] 张婕, 孙伟卿, 刘唯. 考虑需求响应收益的售电商实时电价决策模型[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 492-504.
- ZHANG Jie, SUN Weiqing, LIU Wei. Real time pricing considering demand response revenue of electricity seller[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 492-504.
- [50] 杨甲甲, 王宇轩, 陈启鑫, 等. 利用智能电表数据的配电网市场端对端交易偏差惩罚方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 64-73.
- YANG Jiajia, WANG Yuxuan, CHEN Qixin, et al. Smart meter data based penalty mechanism for peer-to-peer transaction deviation in electricity distribution market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 64-73.
- [51] 中国人民银行数字人民币研发工作组. 中国数字人民币的研发进展白皮书[R/OL]. [2021-07]. <http://www.pbc.gov.cn/goutongjiaoliu/113456/113469/4293590/2021071614200022055.pdf>.
- [52] 零壹智库. 数字人民币概论(二): 特征、应用与产业图景[R/OL]. [2021-02]. <https://www.01caijing.com/article/275088.htm>.
- [53] 刘彬德, 蔡高琰, 梁炳基, 等. 多芯模组化智能物联电能表的设计[J]. 物联网技术, 2021, 11(7): 81-85.
- [54] GlobalPlatform, Inc. GlobalPlatform technology card specification version 2.3.1[EB/OL]. [2018-03]. [https://globalplatform.org/wp-content/uploads/2018/05/GPC\\_CardSpecification\\_v2.3.1\\_PublicRelease\\_CC.pdf](https://globalplatform.org/wp-content/uploads/2018/05/GPC_CardSpecification_v2.3.1_PublicRelease_CC.pdf).

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-08-31

作者简介:

申永鹏(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为智慧能源与物联网系统、电动汽车储能与电机控制。  
E-mail: shenyongpeng@zzuli.edu.cn

(编辑 魏小丽)