

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.08.008

区块链技术在配电网精益化管理中的应用研究

Research on blockchain technology applied in the lean management
of distribution cable network

高爽¹, 王珞珈¹, 杨鑫¹, 张振宇¹, 王国民¹, 刘向军²
GAO Shuang¹, WANG Luojia¹, YANG Xin¹, ZHANG Zhenyu¹,
WANG Guomin¹, LIU Xiangjun²

(1. 国网北京昌平供电公司, 北京 102200; 2. 华北电力大学, 北京 102206)
(1.State Grid Beijing Changping Power Supply Company, Beijing 102200, China; 2.North China
Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要:配电网是智能电网建设的重要组成部分,其规划建设、运行维护不仅局限于电力系统内部,更关乎多能源系统地下资源的统筹安排和地区地下管网的整体规划、发展。研究如何有效提升配电网精益化管理水平是一个重要课题。区块链技术作为一种分布式共享数据库技术,其去中心化、透明性、公平性和公开性的特征与配电网精益化管理的需求不谋而合。首先,分析了配电网从规划建设到运行维护的管理需求;然后,从对象、功能、属性3个维度探究了区块链技术在配电网精益化管理中的应用方向;以地下管网占用认证以及去中心化的多机构协同、多能源系统融合2个场景为例,说明了区块链技术在配电网精益化管理中的应用模式;最后,对区块链技术在配电网精益化管理中的发展机遇和面临的挑战进行了分析和总结。

关键词:区块链技术;精益化管理;配电网;地下管网;多能源系统融合;去中心化;综合能源;能源互联网

中图分类号:TM 7 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2020)08-0054-07

Abstract: Cable network is an important component of intelligent electricity distribution network. Its planning, construction, operation and maintenance are not only confined to power system, but also related to the coordination between underground resources of multi-energy systems, and the overall planning and construction of regional underground pipelines. Therefore, it is very important to study how to effectively improve the lean management level of distribution cable network. As a distributed shared database technology, blockchain has the characteristics of decentralization, transparency, fairness and openness, which coincide with the requirements of the lean management on distribution cable network. The management demand of distribution cable network is analyzed from planning and construction to operation and maintenance. Then, the application direction of the blockchain technology in the lean management of distribution cable network is explored from three dimensions, object, function and attribute. And by analyzing two application scenarios of blockchain which are the occupation certification of underground pipelines and the fusion of decentralized multi-agency and multi-energy systems, the application mode of blockchain technology in the lean management of distribution cable network is illustrated. Finally, the opportunities and challenges of the blockchain technology in developing lean management of distribution cable network are analyzed and summarized.

Keywords: blockchain technology; lean management; distribution cable network; underground pipeline; integration of multiple energy systems; decentralization; integrated energy; energy internet

0 引言

电力行业正随着城市建设、社会经济的进步而

发展,地区电网建设紧跟着地区用电需求的变化而变化。近年来,随着社会经济的不断发展,电力供应需求日益增加,电网改造、架空线入地的步伐也逐渐加快,这对配电网建设与城市建设规划的契合度、地下空间资源的利用率以及电缆精益化管理水平等方面提出了更高的要求。

收稿日期:2020-06-28;修回日期:2020-08-04
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0901200)

1 配电电缆工程建设需求分析

1.1 配电电缆工程建设流程

配电电缆网建设一般要经历方案审核、管网占用、设计审核、工程施工(土建、电缆)、工程竣工验收、并网发电 6 个环节(如图 1 所示)。在方案制定的过程中,合理规划、正确地选择电缆敷设方式及路径是电缆网建设工作的首要环节。方案应以工程条件、地区地貌、环境特点是否满足管网的经济、可靠运行作为依据,以城市管理委员会对地区建设的规划为基本方向,促使市政、园林等政府部门与热力、燃气等能源系统部门共谋发展、共同规划城市地下管线建设。

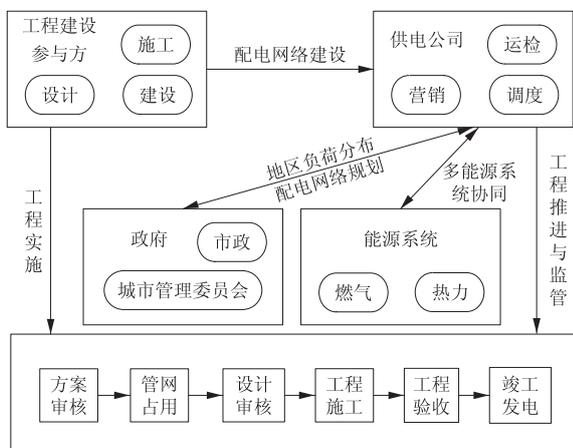


图 1 配电电缆网工程建设流程

Fig. 1 Distribution cable network construction process

1.2 配电电缆网精益化管理需求

随着我国电网运营规模的进一步发展扩大和我国电力体制改革的不断深入,以企业人力资源管理投入为传统的传统电缆网络建设和电力运检管理模式对电网安全、质量和运营效率等多维度的提升形成制约,难以适应地区电网发展要求,迫切需要挖掘管理和技术上的潜力,以加快运检信息化建设,推动运检业务向智能化、精益化转变。

从电缆网工程建设的角度分析,工程前期的路径规划涉及热力、燃气等多能源系统的信息交互和市政、园林等多政府部门的联合响应。如何高效、合理地规划地下管网建设、简化信息交互流程、保障信息互换安全至关重要;在工程启动、施工阶段,如何精准办理断面审批,实现多行业、多部门联动发布施工信息,亦是提升工程建设效率的关键;在工程竣工及电缆网运维阶段,如何提升配电电缆网反外力水平、提高运检效率效益、集约运检管控、实现业务和管理的有机结合,是提升配电网管理水平的主要课题。因此,以有效提升配电电缆网供电可

靠性水平为技术主线,以提高配电电缆线路及通道标准化建设水平、精益化运维水准、智能化管控效果为技术指导,充分发挥区块链特性,施行电缆工程全流程管理、运行风险全维度管控、施工检修全环节监管,是配电电缆网精益化管理的迫切需求。

2 区块链技术在配电电缆网精益化管理中的应用维度

2.1 区块链技术原理与特征探究

区块链作为一项颠覆性技术,正在引领全球新一轮的技术变革和产业变革,有望成为全球技术创新和模式创新的“策源地”,推动“信息互联网”向“价值互联网”变迁。在我国《“十三五”国家信息化规划》中首次提出将区块链作为一项重点前沿技术并强调要深入研究该项技术的创新和应用。

区块链基于分布式账本、密码学、共识管理机制、智能金融合约四大核心技术,可以搭建无需第三方的可信交互环境,为企业关键数据的安全记录和管理提供一种新思路。在链内封闭的系统内可以基于共识机制自定义不同权限的参与方,进行多方记账;所有用户都可以被赋予访问区块内容的权限,实现全员监督;加上区块链基于非对称加密、时间戳等技术,可以确保区块记录内容难篡改、可追溯^[1-3];整个区块链不需要依赖第三方信任中心,可以自身构建用户之间可信度。可见,区块链具有去中心化、公开性、自治性、防篡改性等特性,能够很好地适应分散化的系统结构。

2.2 区块链技术应用维度分析

区块链技术的应用及核心特征体现为数据的去中心化,保障了用户数据的真实可信,打破了数据信任管理壁垒,极大程度地降低了传统业务全流程管理中数据的信任管理成本。该核心特征与电缆精确效益化管理需求高度吻合,可以从对象维度、功能维度和属性维度等 3 个方面研究区块链在配电电缆网精益化管理中的应用,如图 2 所示。

2.2.1 对象维度

随着市辖区、县的发展和绿色能源经济的飞速发展,电力、热力、燃气等主要区域能源传输网络的空间界限逐渐模糊,不同区域能源系统的管网耦合性明显增强,地下能源管网呈现出相互交织的复杂状态,地下管线资源的综合利用率有待提升,这给目前能源行业传统的管网联动管理模式和地下管网断面申请、审批流程都带来了极大挑战。区块链的多能源“对等”控制模式以及去中心化的特质,能够为多能源协同发展提供关键的信息技术支撑。

(1)在配电电缆网搭建方面,工程建设在进行

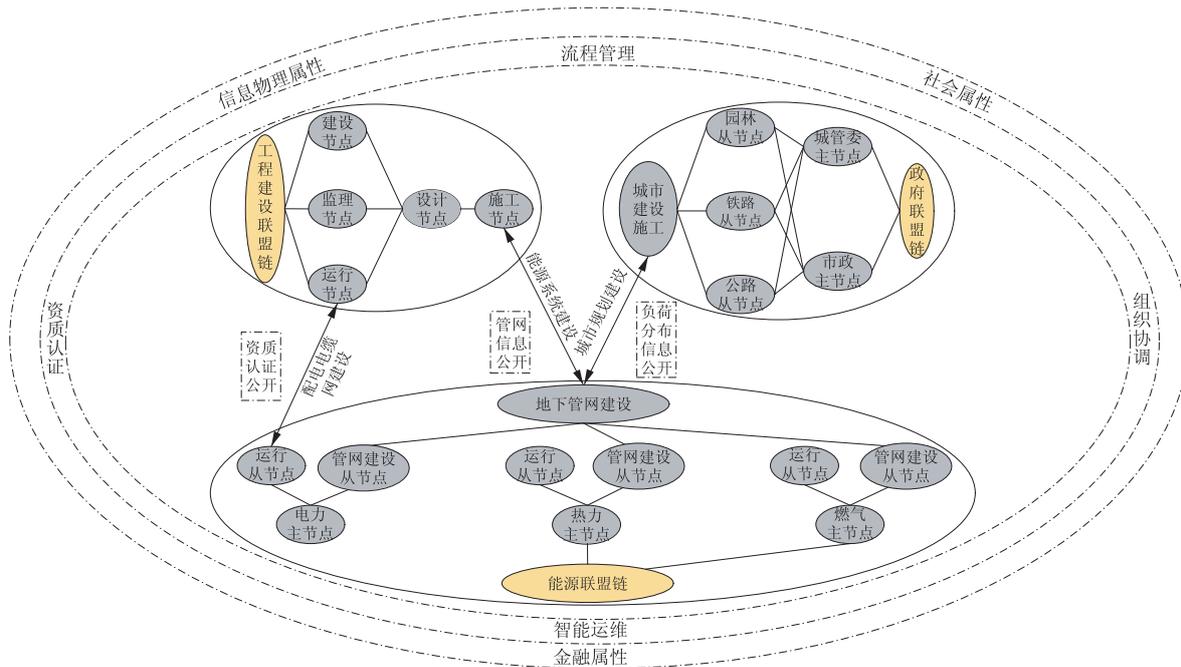


图 2 区块链技术在配电网精益化管理中的应用

Fig. 2 Application of blockchain technology in lean management of distribution cable network

通道路由选择、路径规划时,也面临着管网断面占用、施工方资质认证等信息交互环节,其申请、批复、验收环节的效率和准确性也将影响工程建设的时效性和电缆网运行规划合理性。区块链技术具有去中心化的特点。采用基于区块链的资质认证和断面审批流程,能够实时共享施工方的施工资质状态以及配电网各通道的断面占用情况,各配电网工程的建设方、组织方可采用区块链实时共享占用信息,自主确定配电网工程建设实施方案,有效实现生态化的建设管理模式。

(2)在能源系统建设方面,电力、热力、燃气等多能源系统管网信息的接入将极大程度地辅助工程施工方案的设计。区块链能够为各能源管网提供开放、公平的记账和信息发布平台^[4-5],能够面向多能源管网提供完备的管网占用信息,为能源系统建设者、规划者提供参考,从而实现地下管网空间立体化应用,减少因管线跨越交叉、安全距离不足导致的运维冲突,实现智能化运维,也能为更多参与者(例如地下管线测绘单位)加入能源行业管网建设提供便利。

(3)在城市建设规划方面,涉及大量能量流和信息流的传输和处理:能量流的合理、准确分布和流动,可以保障地区能源系统的安全、稳定运行,还要对实际的地区能源负荷进行准确计量、合理分布,以便于实现地区综合能源发展的长期规划;针对信息流,则需要保证系统状态信息数据、参数的可靠传递,并能够综合各种信息对能源系统全局开

展评估。区块链技术通过保证信息的可靠性和透明性,能够实现对能量流和信息流的可靠计量,例如开发基于区块链的政府-能源企业状态估计平台并对其进行检测和估计。区块链技术通过采用统一的能源计量、核算手段,打破能源网络间、政府与企业之间的隔阂,从而消除网络阻塞。

2.2.2 功能维度

区块链去中心化的数据采集、存储模式与技术使其天然地能够实现数据的多源备份,在机制上能够实现数据来源可信任与“交易流程”自组织,因此不再需要第三方机构,这对“互联网思维”下的综合能源网络体系建设具有重要指导意义。具体而言,区块链将在电缆网建设工程资质认证、断面申请及审批流程管理、多能源和多机构参与的组织协同、能源网络智能化运维管理等方面发挥巨大作用。

资质认证是配电网实现开放与公平的重要基础。配电网工程建设涉及施工单位、设计单位、建设单位等多类合作方,也包含多种交易,比如施工交易、代维服务交易等。因此要想确保配电网工程全方位的稳定、高效运行,亟须建立具有高可信度的计量机制和高权威的认证机制。区块链分布式账本技术以其公开、透明的特性,为每位参与者赋予拥有、查询账本等权限,实现账本难篡改,保证了记录数据真实性和完整性,保障了公共认证的合法性、权威性^[6-7],这在配电网工程建设资质认证方面发挥重要作用。此外,区块链还能够为配电网地下管网占用的资源搭建数据记

录管理平台,采用公共数据验证机制减少坏数据出现的概率,有效保证数据的真实、可信。

流程管理是配电网建设信息化的主要应用方向。在多行业和多能源领域的建设模式下,流程管理的信息化将促进各行业主体的公平竞争以及行业主体与能源网络的信息交互,而区块链在交易和信息透明公开的应用方面具有独特优势:首先,区块链的共识机制促使链上所有节点为交易的清算提供算力,极大地减少了交易成本;其次,链上的区块信息具有公开透明性,确保信息的对称性和市场的有效性;再次,区块链的每个节点都拥有一份相同并完整的账本,增加了数据被篡改的难度,保证交易系统中数据的真实可靠;最后,区块链可提供智能合约,双方在满足合约条款时将自动执行,提高了交易的执行力和可靠性,保障交易市场的公平性和可靠性。

组织协同是配电网提升建设水平和管网利用率的重要保障。地下管网建设不仅仅局限于电力电缆管线,而是包含热力、燃气等多种能源系统,建设参与者也不仅仅局限于施工单位,而囊括了设计单位、建设单位、运维单位等众多参与者。在合理的区块链机制下,促进多类型的能源系统、多组织参与主体的共同发展和高效协同需要2个基本条件:一是各方共同利益和私有利益的合理分配,以保障工程建设的切实可行;二是各方交换的信息一定是真实、有效的,以便提高协同工作的效率。而区块链可以很好地满足以上需求,并且去中心化的运行管理模式赋予每个节点一定的自治权限,能够根据参与者自身实际利益需求做出最优的决策,从而在更大的空间内优化系统运行,实现能源的高效综合利用。

智能运维是配电网精益化管理的阶段性的目标。智能运维立足于服务基层一线班组,服务各级运检管理人员,以信息技术为支撑,以保障配电网设备安全运行、提升运维效率为目标,以“突出设备、强化基层、精益管理”为重点,从而形成信息化、智能化配电网工程建设和运维管控的有机体。区块链将每一次的数据更新从更新者的信息到传递路径完整地记录下来,实现了记录数据的可追溯;同时通过密码学增加了数据被摧毁或篡改的难度,有利于实现地下管网的高效监管。

2.2.3 属性维度

区块链技术映射于配电网建设及精益化管理的不同环节中,会体现出具有差异化的属性特点。根据不同的服务与管理对象以及预期目标,区块链技术于配电网中的应用可体现出3种属

性,见表1。

表1 区块链技术在配电网精益化管理中的应用

Tab. 1 Application of blockchain technology in the lean management of distribution cable network

属性	功能	优势
信息物理属性	信息安全	可靠传输,易防难攻
金融属性	交易平台	公开透明,精简流程
社会属性	行为管理	回溯历史,精益管理

(1)信息物理属性是指区块链技术可实现对配电网建设、运维等环节中物理过程和物理对象的可靠传送和精准记录,及其物理特性和内在联系的高效整合,是配电网智能挖掘和综合分析的前提。信息安全功能的完善是信息物理属性的主要表现方式,其应用主要针对如下问题:现有配电网建设过程中重要信息数据的发送和接收途径包含内网和外网,其数据传输过程易受侵入;由于采用中心化处理方式,入侵者仅需要侵入少数节点或中心节点即可对重要数据进行篡改,难以保证数据有效性。

针对此类问题,可采用区块链技术中密码学技术,即非对称加密与哈希运算保证信息的准确性和数据传输的可靠性^[8];采用共识机制实现去中心化认证机制,从原理上降低了“以少控多”的可能性。

(2)金融属性指区块链技术可为配电网建设中资质认证、管网占用提供一个公开、透明、可信的平台,提升市场参与意愿,同时降低合约执行风险和监管成本^[9-10]。将交易平台应用于管网规划、建设、运维全流程管控是金融属性的主要体现,其应用主要针对如下问题:地下管网自规划阶段至建设、运维阶段参与主体类型众多、数量庞大,全流程管控难度大;现有管网建设参与方需要对不同类型的能源以及不同来源的信息进行融合,即要对数据交换进行多次验证和核对,导致用户获取信息不及时,因而产生交易成本。

针对此类问题,可将管网占用规则写入区块链智能合约,使管网占用透明化,以实现管网的自动申报,降低人力成本。采用集体维护的共识机制实现管网占用审批,每个参与方皆可直接或间接地参与管网占用审批的确认过程,实现审批过程和结果的透明化与公开化。采用点对点通信将最新管网建设、占用信息广播同步至各节点,使各参与方获得实时信息并进行工程方案调整,实现社会效益最大化。

(3)社会属性是指区块链技术可在配电网精益化运维中辅助人的思考与决策,提升对人员和

人员行为的管理水平。行为管理功能在配电网精益化运维中的应用主要针对如下问题:电缆地下管网数字化普及度不高,历史信息储备少;对管网隐患记录、治理记录等过程记录信息化程度较低,对管网运维造成一定困难;人工巡检记录分散,信息化程度低且易被篡改,不利于管控人员行为及事故追责。

针对此类问题,可利用链上信息具有可追溯性的特点,对巡检计划和行为进行记录,实现人员行为管控和责任回溯;采用分布式账本结构存储人员行为记录,实现身份认证、链上审核与数据记录,将历史行为归档留存,便于查询和调用。

3 区块链技术的典型应用示例

3.1 地下管网占用认证

以某地下管网建设场景为例,对信息安全功能的应用进行说明。传统模式下管网数据以单向信息流的方式自单个能源行业至多个管网建设参与方方向流动,各工程管网建设存在时间轴上的重叠,如图 3a 所示。单向的数据传输和更新将造成信息滞后、数据量不完整,管网数据的实时性、有效性难以得到保证。

引入区块链技术的管网建设,可将区块链视为数据防护屏障。数据的录入、广播、存储等过程都建立在区块链体系之上,各能源行业和管网建设参与方都成为具有通信与验证功能的分布式账本,从而防范数据侵入,提升数据更新的实时性和准确性,如图 3b 所示。采用区块链模式的地下管网系统具有如下特点。

(1)具有抗攻击性。由于区块链技术下的系统具有去中心化的技术特点,全网中所有的数据节点都必须拥有数据库的完整数据备份,若攻击者试图完全篡改数据库中的部分数据,则至少需要控制系统中过半数的数据节点才能实现数据篡改^[11-12],这使得数据篡改的成本大大增加,数据被篡改的可能性大大降低。

(2)数据的保密性。由于区块链采用了非对称的密钥加密技术,破解条件繁琐复杂,极大增加了攻击者破解密钥的难度和可行性。

(3)自我备份修复韧性。由于系统中每一个节点都对区块链内所有数据进行了完整备份,即使系统中部分节点或部分通路受到攻击而瘫痪,也能保证系统中的特定节点可以通过其他通路和节点存储的数据重构所需信息。

3.2 多机构协同、多能源系统融合

配电网建设过程中,促使多机构的协同配

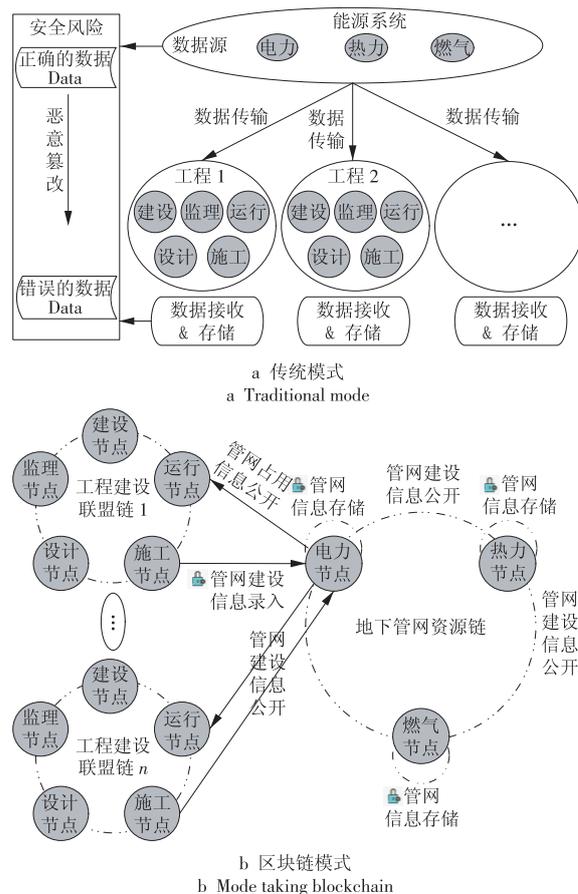


图 3 2 种模式下管网建设拓扑对比

Fig. 3 Topology of pipeline under two construction modes

合、多能源系统的资源融合是适应地区发展的重要前提。传统能源系统网络的建设处于各自独立建设、运维的状态。而在未来能源网络构建中,尤其是地下管网建设,政府部门与能源企业、能源企业与施工方等工程建设参与方,在整体规划、方案制定、路由选择、施工风险等环节的紧密融合、协同优化,可使单一能源系统网络建设与地区建设规划有机融合,从而实现地区能源建设最优化。

在多机构协同、多能源系统融合的愿景中,存在一系列制约其实际落地应用的挑战与技术需求。

(1)传统运行模式下的各能源系统处于分立自治的状态,分属于不同管理部门,其运行机制和管理模式存在一定差异,难以由一个中心机构进行统一运行管理,因此需要建立去中心化的新体制。

(2)不同能源系统管网的物理结构、特性迥异,所构成的能源网络建设模式存在差异,导致管网的发展方向、建设机制无法统一。因此,需要通过标准化平台进行系统间“对话”,以实现平台数据在多个能源系统及其管网系统间的同步,其中亟须实现的功能是数据的可靠传输和安全存储。

(3)工程建设参与方、能源系统和政府部门之

间缺乏激励机制。一方为其他参与方的建设或运维做出贡献时应获得相应收益,以形成良性循环。

区块链能够为多机构协同、多能源系统融合提供一个去中心化的系统平台,如图4所示。

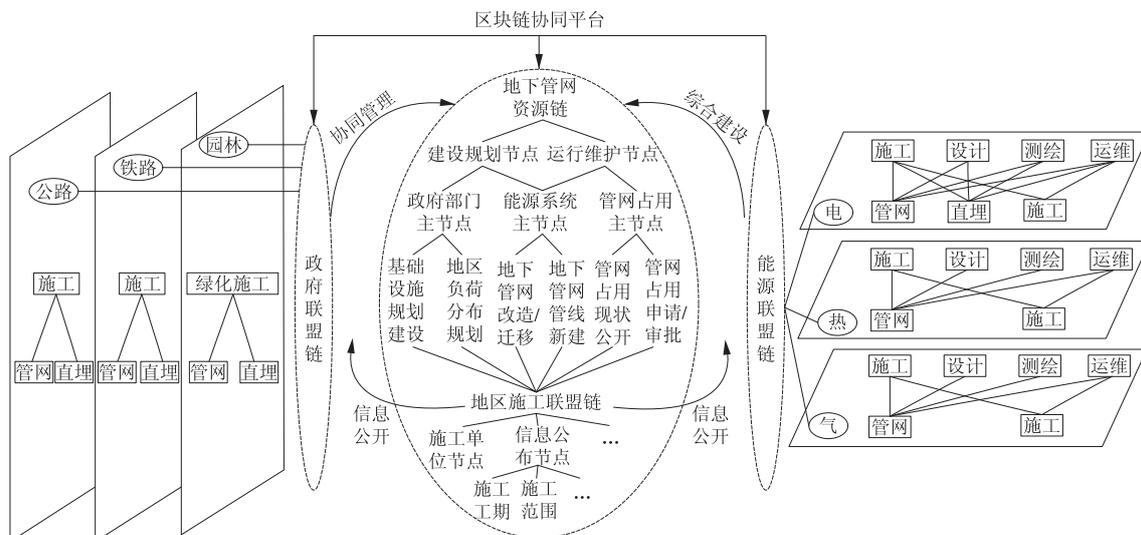


图4 去中心化的多机构协同、多能源系统融合

Fig. 4 Decentralized multi-agency collaboration and multi-energy system integration

就服务与管控对象而言,采用区块链技术记录政府部门、各能源系统以及工程建设参与方的实时管网建设、占用信息,工程建设过程中,涉及跨能源系统的地下管网时,可记录该工程与多个能源系统管网之间的建设及占用信息,在此基础上实时生成该地块各类能源管网的实时信息(如管网建设现状、占用现状、申请占用情况);不同能源系统可以通过区块链中的各类管网建设信息对自身管网系统进行优化,政府部门亦可通过区块链中的综合管网建设现状优化地区发展规划。

该系统具有如下特点。

(1)地区多能源管网建设、多机构协调调度的去中心化。区块链使多个能源系统间无需统一调度,将不同能源系统以及不同工程中的管网建设、占用信息在多能源系统、多机构中共享,处于区块链中的每个个体都能够进行自调度决策,优化自身收益,促进多机构协同、多能源系统融合。

(2)跨能源系统、跨机构的通用性。区块链通过管网信息为各区域能源系统、各参与机构之间的协同和信息融合搭建了桥梁。通过区块链为不同能源系统、不同参与机构之间的信息交互提供了统一化、标准化的“对话平台”^[13],在不改变其自身原有调度运行方式的基础前提下实现多能源系统的融合以及多机构的协同^[14]。

(3)数据具有保密性与可靠性。工程建设中的管网建设流程进度、建设费用等属私有信息,此类信息以公钥形式经过加密后上传拷贝的方式可以确保管网建设交易节点信息的保密性;而管网建设

现状、管网占用信息属共有信息可以被公开和查询,区块链分布式交易账本的数据存储和计算方式能够有效保证节点价格信息的真实、可靠、不易被篡改进而具有公正性。

4 区块链在工程管理应用中的机遇与前景

区块链技术为配电电缆网精益化管理带来了新的契机,其分布式一致性的共享思维打破了电缆网建设、运维只局限于电力系统内部的传统模式。区块链技术是数据安全共享的技术集成,其应用是一种生产模式的突破与变革。

传统工程管理模式中,各工程参与方均享有独立的业务流程和业务数据,相应流程和数据均保存在各方持有的数据库中,因此数据的存储节点单一,安全性低、联动能力和抗抵赖性差,易出现“信息孤岛”和“信息不对称”等问题。此类问题将大幅增加各工程建设参与方的沟通成本、建立信任的时间成本,甚至延缓工程建设进度。区块链技术为配电电缆网精益化管理提供了发展方向。

5 结束语

区块链技术下的配电电缆网精益化管理系统搭建虽然较集中式管理成本更低,但将消耗大量的资源于分布式信息存储和处理,因此,如何权衡系统的综合效能、分析不同场景的应用效果、最大限度地发挥区块链的使用价值仍需深入研究。

此外,电力系统等各能源系统专业人员对区块链技术的基本概念、实现方法、应用价值认识深度

不足,区块链技术专业人员对能源系统中的基本概念、理论技术亦不熟悉,交叉学科人才的缺乏将阻碍技术的融合应用和发展,系统搭建过程中知识体系的建设、层次结构的划分、应用场景的差异化设计均面临挑战。

参考文献:

- [1]张宁,王毅,康重庆,等. 能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报,2016,36(15):4011-4022.
ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technology in energy internet: A preliminary study on research framework and typical applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (15): 4011-4022.
- [2]王毅,张宁,康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报,2015,35(22):5669-5681.
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (22): 5669-5681.
- [3]李彬,曹望璋,张洁,等. 基于异构区块链的多能系统交易体系及关键技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):183-193.
LI Bin, CAO Wangzhang, ZHANG Jie, et al. Multi-functional system trading system and key technologies based on heterogeneous blockchain [J] Automation of Electric Power Systems, 2008, 42 (4): 183-193.
- [4]袁勇,王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报,2016,42(4):481-494.
YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: The state of the art and future trends [J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42 (4): 481-494.
- [5]杨德昌,赵肖余,徐梓潇,等. 区块链在能源互联网中应用现状分析和前景展望[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3664-3671.
YANG Dechang, ZHAO Xiaoyu, XU Zixiao, et al. Application status analysis and prospect of block chain in energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (13): 3664-3671.
- [6]KANG J, YU R, HUANG X, et al. Blockchain for secure and efficient data sharing in vehicular edge computing and networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4660-4670.
- [7]何蒲,于戈,张岩峰,等. 区块链技术与应用前瞻综述[J]. 计算机科学,2017(4):1-7.
HE Pu, YU Ge, ZHANG Yanfeng, et al. Prospective review of blockchain technology and application [J]. Computer Science, 2017(4): 1-7.
- [8]王蓓蓓,李雅超,赵盛楠,等. 基于区块链的分布式能源交易关键技术[J]. 电力系统自动化,2019,43(14):53-64.
WANG Beibei, LI Yachao, ZHAO Shengnan, et al. Key technology of distributed energy trading based on blockchain [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (14): 53-64.
- [9]ZYSKIND G, ZEKRIFA D M S, ALEX P, et al. Decentralizing privacy: Using blockchain to protect personal data [C]// 2015 IEEE Security and Privacy Workshops (SPW). IEEE, 2015: 180-184.
- [10]孙毅,范灵俊,洪学海. 区块链技术发展及应用:现状与挑战[J]. 中国工程科学,2018,20(2):27-32.
SUN Yi, FAN Lingjun, HONG Xuehai. Development and application of blockchain technology: Current situation and challenges [J]. Strategic Study of CAE, 2012, 20 (2): 27-32.
- [11]平健,陈思捷,张宁,等. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3682-3690.
PING Jian, CHEN Sijie, ZHANG Ning, et al. Decentralized trading mechanism of distribution network based on intelligent contract [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (13): 3682-3690.
- [12]顾为东. 能源 4.0: 重塑经济结构——互联网技术与智慧能源[J]. 中国工程科学,2015,17(3):4-9.
GU Weidong. Energy 4.0: Reshaping the economic structure—Internet technology and smart energy [J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17 (3): 4-9.
- [13]赵赫,李晓风,占礼葵,等. 基于区块链技术的采样机器人数据保护方法[J]. 华中科技大学学报,2015,43(10):216-219.
ZHAO He, LI Xiaofeng, ZHAN Likui, et al. Data protection method of sampling robot based on blockchain technology [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2015, 43(10): 216-219.
- [14]杨晨,王浩森,才思远,等. 面向电力营销精益化的综合能源服务研究[J]. 华电技术,2019,41(11):5-8,21.
YANG Sheng, WANG Haomiao, CAI Siyuan, et al. Research on integrated energy service in lean marketing of power [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 5-8, 21.

(本文责编:陆华)

作者简介:

高爽(1993—),女,北京人,助理工程师,工学硕士,从事智能配电网建设、能源电力信息安全维护和可信计算方面的工作(E-mail:gaoshuang19930514@163.com)。

刘向军(1970—),女,河北唐山人,副教授,工学硕士,主要从事电子信息的教学、科研工作(E-mail:lxjun@ncepu.edu.cn)。