DOI：10.13334/j.0258-8013.pcsee.162432 文章编号：0258-8013 (2017) 13-3672-10 中图分类号：TM 72

区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式初探

曾鸣，程俊，王雨晴，李源非，杨雍琦，窦金月

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)，北京市 昌平区 102206)

Primarily Research for Multi Module Cooperative Autonomous Mode of Energy Internet Under Blockchain Framework

ZENG Ming, CHENG Jun, WANG Yuqing, LI Yuanfei, YANG Yongqi, DOU Jinyue

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The energy internet is the key platform for the realization of China's energy revolution, block chain is expected to become the key supporting technology to promote the development of energy internet. A mechanism framework was proposed in this paper that using block chain technology to realize distributed decision making and cooperative autonomous operation of energy internet system; the compatibility of block chain and energy internet was analyzed; the basic framework of energy internet which was supported by the energy block chain was proposed; the multi module cooperative autonomous mode and control flow of the energy internet was designed and the operation optimization model of each module was built; finally, the key technology of the development of the energy internet under block chain framework were put forward from the perspective of the block chain and the energy internet.

KEY WORDS: energy internet; block chain; distributed decision making; cooperative autonomy

摘要：能源互联网是实现我国能源革命的关键平台，区块链有望成为推动能源互联网发展的关键支撑技术。该文提出了一种利用区块链技术实现能源互联网系统分布式决策和协同自治运行的机制框架；分析了区块链与能源互联网的兼容性；提出了能源区块链为支撑的能源互联网基本框架；设计了能源互联网多模块协同自治模式、控制流程并构建了各模块运行优化模型；最后从区块链和能源互联网角度分别提出了区块链框架下能源互联网发展的关键技术。

关键词：能源互联网；区块链；分布式决策；协同自治

0 引言

面对我国能源行业当前存在的从生产消费到技术体制层面的问题，能源革命势在必行[1]，而能源互联网以其“开放、互联、对等、分享”的特性，被认为是推动我国实现能源变革的关键技术平台[2]。然而，能源互联网在我国的实现和发展还面临着技术和体制层面的多种障碍。比如复杂系统的运行决策、多元能源的广域平衡、开放网络的主体信誉、共享平台的交易机制等[3]。这些问题的妥善解决除了能源互联网自身的发展之外，还需要吸纳其它技术框架和解决方案予以支撑。

区块链最初是比特币的底层技术[4]，其定义由美国学者梅兰妮·斯万在其著作《区块链：新经济蓝图及导读》中给出[5]：区块链技术是一种公开透明的、去中心化的数据库。同时，它是一种具有普适性的底层技术框架，可以为金融、经济、能源等领域带来深刻变革。国内能源互联网的前沿研究表明，区块链将有望成为解决能源互联网发展瓶颈问题的突破口[6]。

能源互联网和区块链技术是时下研究的热点，两个领域分别都取得了可观的成果。能源互联网方面，文献[7-10]分别从能源互联网的定义与理念、市场结构与商业模式、关键运营模式以及信息物理特性等方面为能源互联网的发展奠定了理论基础；文献[11-13]则针对具体的技术形态，分别对大数据技术、电储能技术、和能量路由技术在能源互联网中的应用展开研究。区块链方面，关于区块链的技术原理[14]、应用价值[15]和风险分析[16]等基本理论已经较为成熟，其在金融交易[17]、数字管理[18]等方面的具体应用也取得了一定成果。然而，在区块链与能源互联网结合应用的领域，目前的成果还较为有限。文献[19]首次提出利用区块链技术解决能源互

基金项目：国家电网公司科技项目(SGNX0000DKJS1600128)，
Project Supported by the Science and Technology Project of SGCC(SGNX0000DKJS1600128).

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

联网系统交易的构想；文献[20]提出了区块链在能源互联网领域的应用前景；文献[21]提出了一种在多能互补系统中利用区块链技术进行结算的思路。可以看出，目前关于区块链在能源互联网中应用的相关研究仍停留在融合构想，作用分析等层面，尚没有运用区块链的技术特点为能源互联网发展的具体问题设计解决方案。因此，现阶段的成果距离能够发挥区块链对能源互联网的支撑作用还有一段距离。

本文就区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式开展研究，首先从思维和技术角度分析区块链与能源互联网的兼容性；提出以区块链技术为支撑的能源互联网系统结构框架；在此基础上，提出基于区块链技术的能源互联网多模块协同自治模式及其控制流程；最后分析区块链支撑能源互联网多模块协同自治的关键技术体系。以期用区块链技术解决能源互联网复杂系统的决策运行问题，实现系统的分散式模块化协同自治。

1　区块链与能源互联网的兼容性分析

区块链是一个去中心化的对等网络，其运行方式是分布式集体运作。这一网络结构形态和运行方式与能源互联网目标形态下的协同自治运营模式有相似之处。但是，在进一步研究区块链框架下能源互联网发展的解决方案之前，需要至少从思维和技术角度，对区块链和能源互联网的兼容性进行深入分析。

1.1　思维兼容性

能源互联网中的“互联网+”思维能够在其“开放、对等、互联、分享”的特征中充分体现。因此，若要将区块链技术用于能源互联网，首先要保证区块链的技术特性与能源互联网的四大特征相互兼容。具体的论证诠释见表 1。

表 1　区块链与能源互联网的思维兼容性论证

Tab. 1　Thinking compatibility argument of block chain and energy internet

特征	内涵	区块链兼容性诠释
开放	能源互联网的网络结构对各类主体开放，从而为能源行业与其他行业提供了物理信息交流的平台。	区块链提供了广泛的网络接口，各主体都能够自主参与系统的运维并成为分散化数据库的组成单元。
对等	能源互联网将改变以往传统能源网络自上而下的集中决策模式，网络中的各主体能够自主管理自身的能源生产消费和交易，参与系统决策自治。	区块链具有去中心化和集体维护的特征，系统的运行不存在控制中枢，而是由各节点分散式平等决策。节点之间不存在上下级关系，具有对等的权利和义务。
互联	能源互联网的各系统模块之间能够实现能量和信息的充分互联，具有较高的安全性和经济性。	区块链是一个扁平化的分布式网络，节点之间实时互联，以保证各节点能够随时进行区块信息读写和验证。
分享	能源互联网的节点之间共享系统运行和市场交易的信息，能够进一步提升资源优化配置的能力。	区块链的实质是一个分散化数据库，网络中的各节点同时共享所有区块的信息，保证系统运行的安全和透明。

1.2　技术兼容性

技术层面的兼容性论证，应解决两个问题：一是能源互联网技术框架能否搭载区块链的技术模块。二是引入区块链技术能够突破能源互联网的技术瓶颈。

第一个问题的实质是可行性。区块链应用的关键技术载体一是分布式决策技术、二是分布式存储技术。从短期来看，目前多代理技术和分布式数据库技术已经在电力系统中有较为成熟的应用，基本可以满足区块链应用的要求。从长期来看，能量路由器是能源互联网的关键技术之一，负责控制系统节点的实时能量转化传递和信息流动。通过搭载分布式计算和数据存储模块并预设相应的程序或算法，能量路由器能很好地兼容区块链网络节点功能，承担分散化数据存储、计算和交互验证的工作。因此可认为，通过对以能量路由器为代表的能源互联网关键技术进行适应性改进，则将区块链技术用于能源互联网系统是可行的。

第二个问题的实质是必要性。引入区块链技术对能源互联网技术框架的完善和提升至少有以下两方面：一是区块链的分散决策技术能够解决能源互联网复杂系统在集中决策模式下拓展性低下问题：在系统相对简单时，集中决策通常具有比分散决策更高的效率，但随着系统规模的增大，集中决策模式对中心服务器的计算能力要求过高，这将导致系统决策效率显著下降，而提升中心服务器的算力的边际成本将随着服务器自身算力的增长呈指数增加。通过引入区块链分散决策技术，能够以较低、较分散的成本显著提升系统整体算力，同时通过节点间的共识验证模式，能够确保最优方案作为决策结果，从而解决能源互联网复杂系统的拓展问题。二是区块链的网络信任技术能够解决能源互联网系统节点的交易信任和数据开放问题：通过公私钥等加密技术能防止虚假交易和记录篡改，便于形成交易主体自律性和系统信用体系，同时相较于支

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

付宝等集中式交易信用管理平台而言，通过区块链解决交易信任问题，不需要在系统中特别设置第三方主体(或在现有的集中平台基础上增设业务)，因而能够在解决主体公信力问题、降低外部攻击风险的同时，更为符合能源互联网市场化、扁平化、自治化的特征。与此同时，区块链框架下的数据库具有实时透明共享的特征，系统中的用户能够随时访问数据，洞悉系统运行的实施情况，从而能够对自身的运行策略进行动态调整，在提升单个用户经济性的同时，有利于提升整个系统的能效、经济指标。而在集中数据平台下，用户从外部访问中心数据库需要经过复杂的安全验证流程和数据传输流程，其效率与可行性要大打折扣。综上，区块链技术的引入能够从多个角度对突破能源互联网发展的技术瓶颈或为能源互联网的构想提供技术实施路径，具有较大的必要性。

2 以区块链为支撑的能源互联网基本框架

2.1 区块链在能源互联网中的定位与作用

能量流与信息流的相互融合、传导是能源互联网的基本特征之一[22]。能源互联网秉承互联网思维，在传统能源网络的基础上，实现信息资源在多能源互联运营系统能源开发利用各环节的实时共享。而区块链作为一种共享的分布式数据库技术[23]，区块链中的每个节点都可以将其记录的数据更新至网络，每个参与维护的节点都能获得一份完整数据库的拷贝，且该区块中的信息将会被拷贝至网络中的所有区块，实现全网数据同步[24]。由于区块链技术特征与能源互联网理念吻合，未来区块链有潜力成为能源互联网中的重要解决方案之一。

文献[25]指出区块链技术在能源互联网中的应用可以分为功能维度、对象维度和属性维度 3 个方面，功能维度包括计量认证、市场交易、组织协同、能源金融，对象维度可以分为源、网、荷、储等多个能源生产、传输、存储、消费环节，属性维度包括能源互联网中的能量流、信息流和价值流。通过在能源互联网中应用区块链技术，可将能源输送网络、发电设备、用能设备以及储能设备的参数、特性与运行数据都存储在区块链中，区块链中还可记录能源互联网各主体间的交易信息，实现用能数据、设备运行数据、调度数据、交易记录等信息的精准计量、不可篡改与实时共享，保证交易透明可信，区块链的“去中心化”可有效提高交易效率，同时也可为能源互联网分散化决策提供信息与技术基础。

2.2 以区块链为支撑的能源互联网基本框架

未来以区块链为支撑的能源互联网旨在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，以电力系统为纽带，利用互联网思维和技术改造能源产业，从而构建“横向多能互补，纵向源—网—荷—储协调”、能源与信息高度融合的新型能源供用体系。

区块链是由区块有序链接起来形成的一种数据结构[25]，其中区块是构成区块链的基本单元，是相关信息和记录的数据集合。在能源互联网中，每个时段将该时段能源互联网系统内集中式能源供应、分布式能源供应、多元智能输送网络、储能、用户等多个模块[22]的数据信息汇总形成能源区块，具体包括用能数据、设备运行数据、调度数据、交易记录等数据，并为保证区块链的可追溯性与数据的不可篡改性，加盖时间戳，以不可逆的时间维度与前一时段的能源区块相连形成能源区块链，完整记录能源互联网在各个时间段内的系统运行情况。以能源区块链为支撑的能源互联网基本框架如图 1 所示。

3 能源互联网多模块协同自治模式及其控制流程

能源互联网中包含集中式能源供应、分布式能源供应、多元智能输送网络、储能、用户等多个模块，能量流与信息流交互复杂，集中决策模式效率低下，因此理想的能源互联网是一个分散式决策、自治的系统，可以实现系统的自调度与生态化运行，而区块链的分散决策技术为能源互联网群决策问题提供了解决之道，可以通过多模块协同运行实现能源互联网的系统自治。本文将能源互联网划分为能源利用、传输和供应三个模块，以此为例详细阐述区块链框架下的能源互联网多模块协同自治模式及其控制流程。

3.1 控制运营流程

基于区块链中的 PoW(proof of work)共识机制，在能源互联网中各主体都可成为“矿工”，与比特币中各节点相互竞争共同解决一个求解复杂的 SHA256 数学难题(即“挖矿”)相似[26]，能源互联网各主体可基于区块链中共享的用能数据、设备参数、运行数据等信息，针对能源利用、传输、供应 3 个模块中的某一模块或多个模块提出下一时段的

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

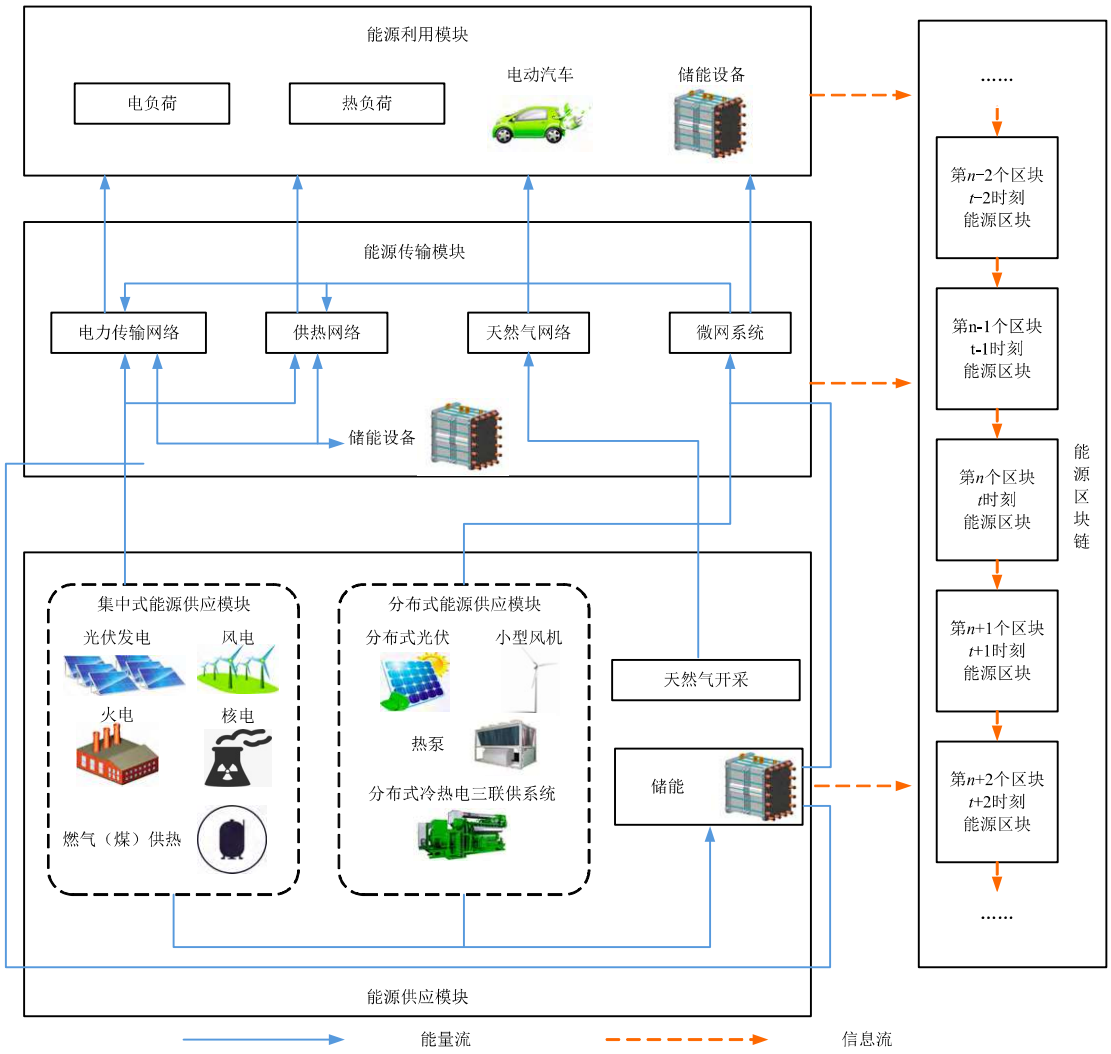

图 1　以能源区块链为支撑的能源互联网基本框架

Fig. 1　Basic framework of energy internet supported by energy block chain

运行策略，各主体提出的运行策略将被发送至能源互联网中参与决策的所有主体，各决策主体以模块运行优化目标函数的优化结果为标准在所有运行策略中选择最优运行策略并为其投票，系统将得票数最高的运行策略暂定为最优运行策略，询问各主体意见，若其得到 51%以上主体的认可则可成为下一时段能源互联网系统的运行策略，同时提出此运行策略的主体也将根据系统实际运行情况获得相应获得奖励，图 2 为能源利用模块最优运行策略确定过程，其他模块的控制运营模式与之一致，图 3 为基于 PoW 共识机制的模块最优运行策略选择的详细流程。在此基于区块链的能源互联网控制运营模式下，各主体将积极贡献算力、提出系统运行策略，通过共识机制确定能源互联网的最优运行策略，保证系统安全、稳定、经济、高效地运行。

能源互联网中能源利用、供应、传输 3 个模块运行策略协同优化，在优化用能行为的基础上合理

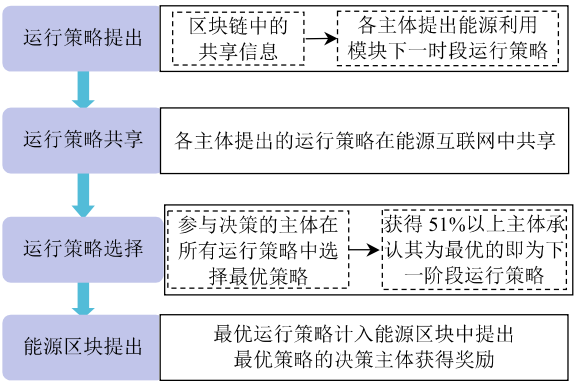

图 2　能源利用模块最优运行策略确定过程

Fig. 2　Determine process of optimal operation strategy of energy utilization module

安排能源供应，进而确定能源传输网络的多能流最优潮流分布，基于区块链的能源互联网控制运营将呈现“链式优化”的特点，具体控制运营流程如下：

1）能源利用模块用能行为优化。

能源互联网中参与决策的各主体以区块链中共享的用能数据、各类能源价格、用户拥有的分布

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

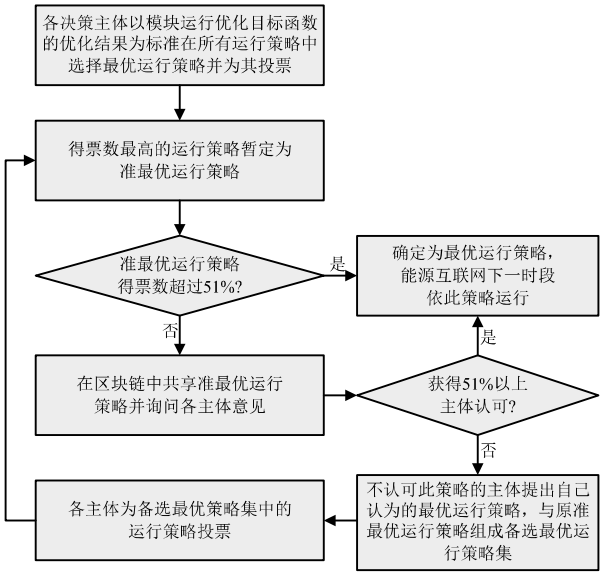

图 3 基于 PoW 共识机制的模块最优运行策略选择流程

Fig. 3 Optimal operation strategy selection process of module based on PoW consensus mechanism

式能源与储能设备的运行数据等历史信息为依据，预测下一时段用户的电能需求、热能需求、分布式能源出力情况、储能设备可用容量以及电、热、气各类能源的交易价格，为实现用户用能成本最低，制定下一时段每个用户的用能策略，确定用户所需电能与热能的来源与数量。热能来源包括供热网络供应、用户拥有的分布式能源供应、电能转换、天然气转换及蓄热装置放热，而电能来源则包括电力网络供应、用户拥有的分布式能源供应及储能设备放电。从各主体提出的诸多用能行为优化策略中选取公认的最优策略，作为下一时段能源互联网中能源利用模块的运行策略，同时在该运行策略下各用户需要能源供应网络与分布式能源分别提供的电能、热能及天然气的数量也将成为能源传输模块与能源供应模块运行优化的约束条件。

2）能源供应模块多能源调度优化。

基于能源利用模块用能优化结果，能源互联网中参与决策的各主体以区块链中共享的电、热、气多种能源供应设备的主要参数、运行成本、能耗水平、污染物排放、运行情况及其配备的储能装置等信息为基础，预测下一时段各能源供应设备可实现的出力范围，在满足用户电能、热能及天然气需求的基础上，以供能成本最小、最大限度利用可再生能源、保证供能可靠性为目标，考虑能源输送网路容量限制等约束条件，提出下一时段的集中式与分布式能源供应模块中多种能源供应设备及其配备的储能装置的运行策略。从各主体提出的诸多多能源调度优化策略中选取公认的最优策略，作为下一时段能源互联网中能源供应模块的运行策略，该运行策略下各能源供应设备的电能、热能及天然气生产情况也将成为能源传输模块运行优化的约束条件。

3）能源传输模块多能流潮流优化。

在确定供需双侧能源供应模块与能源利用模块最优运行策略的基础上，能源互联网中参与决策的各主体以区块链中共享的输配电网、供热网络、天然气输送网络等多种能源传输网络的网络结构、线路设置、线路容量等信息为依据，为满足用能需求与多能源生产调度安排，以多能源输送成本最小、损耗最低、网络安全稳定运行为目标，提出能源供应与利用之间电、热、气多种能源的输送策略，对于当前运行策略下不满足能源传输网络安全运行条件的部分可以采用能源传输网络配备的储能设备进行调节。从各主体提出的诸多能源传输网络潮流优化策略中选取公认的最优策略，作为下一时段能源互联网中能源传输模块的运行策略，确定能源传输网络中的电、热、气多能流的最优潮流分布。

4）系统运行与奖励分配。

能源互联网按照能源利用、传输、供应模块的公认最优运行策略运行，并将该时段内的系统运行与交易数据汇总计入区块链内，根据区块链中记录的实际能源使用量、能源传输量与能源供应量，向用户、能源传输网络运营商与能源供应商收取一定的系统运营费用，分别用于奖励为该时段能源利用、传输与供应模块提供最优运行策略的主体，激励各主体为能源互联网优化运行积极贡献算力、提出可行的系统运行策略。需要注意的是，系统运营费用价格应设置合理，一方面避免价格过高给用户、能源供应商等主体带来负担，另一方面也要防止价格过低导致系统运营费用较少不能给参与决策的主体带来预期的激励效果。

具体的能源互联网多模块控制运营流程如图 4 所示。

区块链框架下的能源互联网多模块控制与目前已经在西北太平洋智能电网示范项目中应用的多模块分布式交互控制方法(transactive control)均以能量流与信息流的高度融合、实现信息的互联互通为实施基础，以多能互补、可再生能源消纳最大化为目标，实现系统内各模块的协同自治，但二者在信息共享技术、共享信息类型、主体决策范围与决策运行流程等方面存在很大的差异。具体差异描述见表 2。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

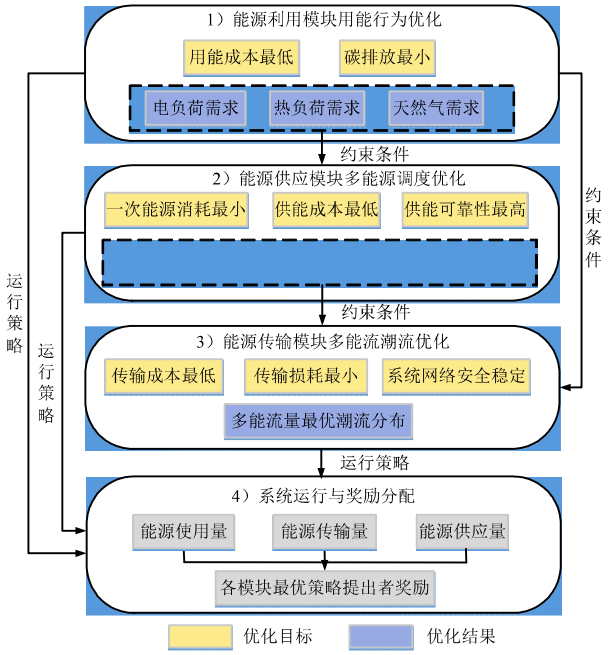

图 4　能源互联网多模块控制运营流程

Fig. 4　Operation process of energy internet multi module control

表 2　能源互联网多模块协同控制与智能电网分布式交互控制对比

Tab. 2　Contrast of energy internet multi module cooperative control and smart grid transactive control

	分布式交互控制	能源互联网多模块协同控制
信息共享技术	分布式交换控制协同网络	区块链
决策信息基础	以实时电力价值表示的激励信号和负载信号	区块链中共享的所有模块的用能数据、设备运行数据、调度数据、交易记录
主体决策范围	各主体根据激励信号制定自己的用能策略(或根据负载信号制定的自己的发电策略)	各主体可针对能源利用、传输、供应三个模块中的某一模块或多个模块提出下一时段的运行策略
决策运行流程	激励信号和负载信号根据各主体的用电策略和发电策略发生变化，各主体也将随着信号变化调整决策，如此反复，激励信号和负载信号最终收敛，计划供电匹配计划用电	能源利用、供应、传输模块之间呈现“链式优化”的特点，依次进行运行策略优化，各模块内部通过 PoW 共识机制从各主体提出的所有运行策略中选取最优策略

3.2　多模块自治模式

能源互联网多模块协同自治是指利用区块链技术协同优化能源利用、供应、传输多个模块的运行策略，实现能源互联网的模块自治与系统自治，本部分在明确能源互联网控制运营流程的基础上，将进一步研究多模块自治模式、构建各模块运行优化模型。

1）能源利用模块用能行为优化模型。

用能行为优化是指用户合理安排能量来源(分布式可再生能源、网供电能、网供热能、天然气、储能等)，通过多种能源之间的分配转化，满足自身用能需求，达到用能成本最低、碳排放量最小[27]等目标，其多目标优化的基本模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} f=\min[f_C(E),f_D(E)] \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} S=RE \\ \underline{E}\le E\le \overline{E} \end{cases} \end{cases} \tag{1}$$

式中：模型的决策变量 E 包括各能量来源的能源输入量、能源在不同设备之间的分配情况、设备的启停状况等[28]；$f_C(E)$表示用户的综合用能成本，$f_D(E)$反映多种能源在转化、利用中的 CO2 排放量；$S=RE$ 为用户能源需求约束，S 表示用户用能需求，R 反映多种能源输入输出的耦合关系；$\underline{E}\le E\le \overline{E}$ 表示能源输入量约束，来自于能源系统网络约束、储能设备运行约束、分布式能源出力约束等。

2）能源供应模块多能源调度优化模型。

多能源调度优化是指合理安排电、热、气等多种能源供应设备出力及其配备的储能装置充放电计划，安全可靠地满足用户用能需求，达到最大限度利用可再生能源、一次能源消耗量最小、供能成本最低、供能可靠性最高等目标[29]，其多目标优化的基本模型如式(2)所示。

$$\begin{cases} f=\min[f_Q(P),f_C(P),f_U(P)] \\ \text{s.t.} \begin{cases} E=NP \\ \underline{P}\le P\le \overline{P} \end{cases} \end{cases} \tag{2}$$

式中：模型的决策变量 P 包括天然气、煤炭等一次能源的开采量、燃煤锅炉、燃气轮机、风机、光伏等多种能源供应设备的能源产量、设备启停状况、储能装置充放电状态等；$f_Q(P)$表示能源供应中的一次能源消耗量，$f_C(P)$表示能源供应成本，包括一次能源的开采成本与电、热等二次能源的生产成本，$f_U(P)$表示能源供应设备工作状态异常引起的社会效益损失，作为供能可靠性的优化目标；$E=NP$ 为能源供需平衡约束，N 反映能源在传输、转化过程中的损耗；$\underline{P}\le P\le \overline{P}$ 表示能源供应量约束，来自于能源供应设备与储能装置的运行约束、能源系统备用约束、能源传输网络容量约束等。

3）能源传输模块多能流潮流优化模型。

多能流潮流优化是指在能源供需确定的基础上，合理安排能源传输网络中电、热、气多种能源的潮流分布，特殊情况下还可使用能源传输网络配

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

备的储能设备进行及时调节潮流分布，达到能源传输费用最低、损耗最小、系统网络安全稳定运行的目标，其多目标优化的基本模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} f=\min[f_C(T,A),f_L(T,A)] \\ \text{s.t.}\begin{cases} g(E,P,T,A)=0 \\ \underline{T}\le T\le \overline{T} \\ \underline{A}\le A\le \overline{A} \end{cases} \end{cases} \tag{3}$$

式中：模型的决策变量 T 为能源传输网络中电、热、气多能流的潮流分布；A 为能源网络储能设备的充放电计划；$f_U(T, A)$, $f_L(T, A)$分别表示多能源传输费用与损耗；$t(E,P,T,A)=0$ 为能源传输网络中能量流等式约束[28]；$\underline{T}\le T\le \overline{T}$ 、$\underline{A}\le A\le \overline{A}$ 分别为能源传输网络的潮流约束与储能设备运行约束。

4 区块链框架下能源互联网发展关键技术

为进一步强化区块链技术在能源互联网技术框架中的支撑作用，推动二者实现技术与平台的融合发展，区块链技术和能源互联网技术都需要进行相应的适应性调整和完善。

4.1 区块链关键技术

目前区块链技术最典型的应用场景是比特币[30]，然而能源互联网相较于比特币这一虚拟货币系统而言在复杂性方面存在极大飞跃。为了贴合能源互联网发展的需求，区块链需要在若干关键技术环节取得突破。重点需解决以下问题：1）安全问题。一方面要避免分布式节点被入侵导致系统数据外泄；另一方面要避免外部挟持导致区块信息被篡改(即“51%问题”)[31]。这有赖于新一代加密技术的突破与应用。2）效率问题。区块链中每一节点的求解结果均要传输至系统中的其它节点进行验算才能找到最优结果，这使得每次验算都伴随着庞大的数据传输，对现有的网络通信技术带来巨大挑战[32]。目前新一代以太网标准已经获批，其普及推广将有望解决数据传输效率问题[33]。3）资源问题。区块链要求每一节点保留完整数据备份，这将占据大量存储资源。以比特币为例，完全同步自创世区块至今的区块数据需要约 60GB 存储空间[34]，而能源互联网系统数据若以区块形式存储，其体量相较于比特币预计有数量级的提升。虽然目前轻量级数据节点和大空间存储设备能够应对存储资源问题，但适用于更大规模的工业级解决方案仍有待开发[35]。

4.2 能源互联网关键技术

能源互联网方面，关键是改善现有的技术框架，便于区块链技术模块的嵌套。为此，应重点从硬件平台和软件平台方面展开攻关。

1）多能流智能能量路由器技术。

能量路由器是支撑能源互联网节点运行的核心硬件，具有 3 个方面的核心功能[36]：一是通过标准化接口支持各类供用能设备接入能源互联网系统；二是对各端口能量流动进行实时调控管理；三是全面采集节点能量数据，为广域能源互联网运行提供大数据资源。能量路由器在能源互联网中的分布和功能特性使其成为区块链与能源互联网融合的关键衔接节点。

能量路由器的原型是配电网中的电力电子变压器[37]，目前已经形成了对能量路由器的拓扑和控制策略的初步研究[38]，能够支撑含多类型电源和负荷的智能化配电网稳定高效运行。为实现区块链框架下的能源互联网多模块协同自治，未来能量路由器应向多能流和智能化方向发展，研究重点有以下方面：①剖析多种能源系统的生产传输消费平衡链条，研究多种能量流的全面监测、动态解析和自主调控技术；②集成智能代理模块和数据存储模块，形成支持群计算、群验证和群决策的分布式智能信息交互网络。从而使能量路由器发展成为区块链框架下能源互联网的智能网络终端，在系统组网和运营方面发挥底层支撑作用。

2）高阶多维复杂系统建模求解技术。

能源互联网的系统建模和求解是贯穿能源互联网发展各主要环节的关键软件技术，对于能源互联网的仿真模拟、规划运营具有显著意义。而本文所构建的多模块协同自治模式的核心，是通过区块链体系引导系统各主体求解技术、交易约束下能源互联网系统的最优运行状态，也需要以精益化的系统模型和高效的求解算法为前提。

能源互联网是一个典型的高阶多维复杂系统，国内外对其定量建模技术的研究仍然处于起步阶段。目前对电力系统[39]、热力系统[40]、煤炭系统[41]、交通网络[42]等相对独立的能源发输配用网络已经分别形成了较为完善的模型。反映多能源系统耦合关系的区域综合能源系统建模是目前研究的热点[43]，但发展至应用层面的具体模型还较少。区块链框架下，未来能源互联网系统建模应向精益化、模块化、结构化方向发展：应用大系统分层解析技术，构建能源互联网主体—局部—系统多层级模型；围绕能源互联网的物理信息结构和市场机制，研究能源互联网 CAS 物理—信息—经济多维度建模

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

理论和技术。在模型求解方面，受到数学工具限制，具有适应性学习能力的启发式算法在未来仍然是求解复杂优化模型的主要技术手段[44]。将上述技术模块化嵌入能源互联网系统，依托庞大的节点计算力实现系统高效优化，促进多模块协同自治的实现。

5　结论与展望

本文将区块链技术引入能源互联网，提出一种区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式：从思维和技术角度论证了区块链与能源互联网的兼容性；改进现有的能源互联网结构理念，构建了以区块链为支撑的能源互联网框架；基于区块链系统的分布式运行决策机制，提出了能源互联网多模块协同自治模式及其控制流程；分别从区块链和能源互联网角度探讨了促进区块链与能源互联网融合的关键技术。本文所提模式有望为能源互联网分散决策、协同自治的实现提供一种可行的技术选择。

需要指出，本文利用区块链技术解决的是能源互联网的系统调度效率问题。然而区块链技术对能源互联网交易机制的构建与完善等方面仍然有很大的开发潜力，这还有待于进一步深入研究。

参考文献

[1] 杜祥琬. 能源革命——为了可持续发展的未来[J]. 北京理工大学学报：社会科学版，2014，16(5)：1-8.
Du Xiangwan. Energy revolution for sustainable future [J]. Journal of Beijing Institute of Technology：Social Sciences Edition，2014，16(5)：1-8(in Chinese).

[2] 曾鸣，白学祥，李源非，等. 基于复杂适应系统理论的能源互联网演化发展模型、机制及关键技术[J]. 电网技术，2016，40(11)：3383-3390.
Zeng Ming，Bai Xuexiang，Li Yuanfei，et al. Development model，mechanism and key technology of energy internet based on complex adaptive system theory[J]. Power System Technology，2016，40(11)：3383-3390(in Chinese).

[3] 曹寅. 能源区块链与能源互联网[J]. 风能，2016(5)：14-15.
Cao Yin. Energy block chain and energy internet[J]. Wind Energy，2016(5)：14-15(in Chinese).

[4] 凌清. 比特币的技术原理与经济学分析[D]. 上海：复旦大学，2014.
Ling Qing. Technical principle and economic analysis of bitcoin[D]. Shanghai：Fudan University，2014(in Chinese).

[5] Swan M. Blockchain：Blueprint for a new economy [M]. Sebastopol，CA：O'Reilly Media，2015：2-3.

[6] 栾昊，赵简. 区块链在能源互联网应用的前景展望[J]. 能源，2016(8)：70-72.
Luan Hao，Zhao Jian. The prospect of block chain application in the energy internet[J]. Energy，2016(8)：70-72(in Chinese).

[7] 姚建国，高志远，杨胜春. 能源互联网的认识和展望[J]. 电力系统自动化，2015，39(23)：9-14.
Yao Jianguo，Gao Zhiyuan，Yang Shengchun. Understanding and prospects of energy internet[J]. Automation of Electric Power Systems，2015，39(23)：9-14(in Chinese).

[8] 刘敦楠，曾鸣，黄仁乐，等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术，2015，39(11)：3057-3063.
Liu Dunnan，Zeng Ming，Huang Renle，et al. Business models and market mechanisms of E-net(2)[J] Power System Technology，2015，39(11)：3057-3063(in Chinese).

[9] 曾鸣，杨雍琦，刘敦楠，等. 能源互联网 " 源-网-荷-储 " 协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术，2016，40(1)：114-124.
Zeng Ming，Yang Yongqi，Liu Dunnan，et al. "Generation-grid-load-storage" coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J]. Power System Technology，2016，40(1)：114-124(in Chinese).

[10] 曹军威，王继业，明阳阳，等. 软件定义的能源互联网信息通信技术研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(14)：3649-3655.
Cao Junwei，Wang Jiye，Ming Yangyang，et al. Software-defined information and communication technology for energy internet[J]. Proceedings of the CSEE，2015，35(14)：3649-3655(in Chinese).

[11] 刘世成，张东霞，朱朝阳，等. 能源互联网中大数据技术思考[J]. 电力系统自动化，2016，40(8)：14-21，56.
Liu Shicheng，Zhang Dongxia，Zhu Chaoyang，et al. A view on big data in energy internet[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(8)：14-21，56(in Chinese).

[12] 李建林，田立亭，来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化，2015，39(23)：15-25.
Li Jianlin，Tian Liting，Lai Xiaokang. Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet background[J]. Automation of Electric Power Systems，2015，39(23)：15-25(in Chinese).

[13] 陈静鹏，余志文，艾芊. 面向能源互联网的能量路由器研究[J]. 电器与能效管理技术，2015(24)：10-15，23.
Chen Jingpeng，Yu Zhiwen，Ai Qian. Study on power router oriented to energy internet sysem[J]. Electrical & Energy Management Technology，2015(24)：10-15，23(in Chinese).

[14] Dennis R，Owen G. Rep on the block：a next generation reputation system based on the blockchain[C]//

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Proceedings of the 10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST). London，Brintain：IEEE，2015：131-138.

[15] Zyskind G，Nathan O，Pentland A S. Decentralizing privacy：using blockchain to protect personal data[C]// Proceedings of the 2015 IEEE Security and Privacy Workshops(SPW). San Jose，CA，USA：IEEE，2015：180-184.

[16] Frey R M，Vučkovac D，Ilic A. A secure shopping experience based on blockchain and beacon technology [C]//Proceedings of the 10th ACM Conference on Recommender Systems. Boston，USA：RECSYS，2016.

[17] 林晓轩. 区块链技术在金融业的应用[J]. 中国金融，2016(8)：17-18.
Lin Xiaoxuan. Application of block chain technology in financial industry[J]. China Finance，2016(8)：17-18(in Chinese).

[18] 赵赫，李小凤，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：自然科学版，2015，43(S1)：216-219.
Zhao He，Li Xiaofeng，Zhan Likui，et al. Data integrity protection method for microorganism sampling robots based on blockchain technology[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology：Natural Science Edition，2015，43(S1)：216-219(in Chinese).

[19] 郜雪，孙宏斌，郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]. 电网技术，2016，40(12)：3630-3638.
Tai Xue，Sun Hongbin，Guo Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy internet[J]. Power System Technology，2016，40(12)：3630-3638(in Chinese).

[20] 王安平，范金刚，郭艳来. 区块链在能源互联网中的应用[J]. 电力信息与通信技术，2016，14(9)：1-6.
Wang Anping，Fan Jin'gang，Guo Yanlai. Application of blockchain in energy interconnection[J]. Electric Power Information and Communication Technology，2016，14(9)：1-6(in Chinese).

[21] Mihaylov M，Jurado S，Avellana N，et al. NRGcoin：virtual currency for trading of renewable energy in smart grids[C]//Proceedings of the 11th International Conference on the European Energy Market(EEM). Krakow：IEEE，2014：1-6.

[22] 曾鸣，杨雍琦，李源非，等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J].中国电机工程学报，2016，36(3)：681-691.
Zeng Ming，Yang Yongqi，Li Yuanfei，et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet[J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(3)：681-691(in Chinese).

[23] James Schneider，Alexander Blostein，Brian Lee，et al. Blockchain：putting theory into practice[R]. The Goldman Sachs Group，2016.

[24] 关莉莉. 基于区块链技术的信用应用设想[J]. 信息与电脑，2016(6)：168-169.
Guan Lili. The idea of credit application based on block chain technology[J]. China Computer & Communication，2016(6)：168-169(in Chinese).

[25] 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 technique in the energy internet：preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(15)：4011-4022(in Chinese).

[26] 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(in Chinese).

[27] Bozchalui M C，Hashmi S A，Hassen H，et al. Optimal operation of residential energy hubs in smart grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2012，3(4)：1755-1766.

[28] 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(in Chinese).

[29] 孙秋野，滕菲，张化光，等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[J]. 中国电机工程学报，2015，35(14)：3667-3677.
Sun Qiuye，Teng Fei，Zhang Huaguang，et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet[J]. Proceedings of the CSEE，2015，35(14)：3667-3677(in Chinese).

[30] Blockchain Luxembourg S.A.. Blockchain monitoring website[EB/OL]. [2016-01-08]. https://blockchain.info/.

[31] Ethereum White Paper. A next-generation smart contract and decentralized application platform[EB/OL]. [2015-11-12]. https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper.

[32] Kraft D. Difficulty control for blockchain-based consensus systems[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications，2016，9(2)：397-413.

[33] LAN/MAN Standards Committee. IEEE Std 802.3bz™-2016 IEEE Standard for Ethernet：Amendment 7：Media access control parameters，physical layers，and

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

management parameters for 2.5 Gb/s and 5 Gb/s operation，types 2.5GBASE-T and 5GBASE-T[S]．New York：IEEE，2016．

[34] Primecoin．Primecoin Website[EB/OL]．[2016-02-09]．http://prime coin.io/．

[35] Eyal I，Efe Gencer A，Sirer E G，et al．Bitcoin-NG：a scalable blockchain protocol[C]//Cryptography and Security，arXiv：1510.02037．

[36] 郭慧，汪飞，张笠君，等．基于能量路由器的智能型分布式能源网络技术[J]．中国电机工程学报，2016，36(12)：3314-3324．
Guo Hui，Wang Fei，Zhang Lijun，et al．Technologies of energy router-based smart distributed energy network [J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(12)：3314-3324(in Chinese).

[37] 曹阳，袁立强，朱少敏，等．面向能源互联网的配网能量路由器关键参数设计[J]．电网技术，2015，39(11)：3094-3101．
Cao Yang，Yuan Liqiang，Zhu Shaomin，et al．Parameter design of energy router orienting energy internet[J]. Power System Technology，2015，39(11)：3094-3101(in Chinese).

[38] 盛万兴，刘海涛，曾正，等．一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J]．中国电机工程学报，2015，35(14)：3541-3550．
Sheng Wanxing，Liu Haitao，Zeng Zheng，et al. An energy hub based on virtual-machine control[J]．Proceedings of the CSEE，2015，35(14)：3541-3550(in Chinese).

[39] 鞠平，沈斌，陈谦. 新背景下电力系统的建模思路[J]. 南方电网技术，2016，10(3)：32-34．
Ju Ping，Shen Bin，Chen Qian．Trends of power system modeling under new background[J]．Southern Power System Technology，2016，10(3)：32-34(in Chinese).

[40] 钟芬，吴竺，朱彤，等．低温余热驱动的热电复合系统优化设计[J]．中国电机工程学报，2016，36(12)：3176-3183．
Zhong Fen，Wu Zhu，Zhu Tong，et al. Optimization design of a combined organic rankine cycle-heat pump system driven by low-grade waste heat[J]．Proceedings of the CSEE，2016，36(12)：3176-3183(in Chinese).

[41] 余华杰．煤矿逆向物流网络建模与优化研究[D]．郑州：郑州大学，2013．
Yu Huajie．Research on modeling and optimization of coal mine reverse logistics networks[D]．Zhengzhou：Zhengzhou University，2013(in Chinese).

[42] 杨柳青. 道路交通流仿真模型构建及其应用研究[D]. 北京：北京工业大学，2014．
Yang Liuqing．Research on road traffic flow simulation model construction and its application[D]. Beijing：Beijing University of Technology，2014(in Chinese).

[43] 贾宏杰，王丹，徐宪东，等．区域综合能源系统若干问题研究[J]．电力系统自动化，2015，39(7)：198-207．
Jia Hongjie，Wang Dan，Xu Xiandong，et al．Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems，2015，39(7)：198-207(in Chinese).

[44] Umbarkar A J，Joshi M S，Sheth P D．Diversity-based dual-population genetic algorithm(DPGA)：A review[M]// Das K N，Deep K，Pant M，et al．Proceedings of 4th International Conference on Soft Computing for Problem Solving，2015：219-229．

曾鸣

收稿日期：2016-12-08。

作者简介：

曾鸣(1957)，男，教授，博士生导师，主要从事能源互联网运营机制与规划、电力技术经济、需求侧管理方面的研究工作，zengmingbj@vip.sina.com；

程俊(1971)，男，博士研究生，主要从事电力市场理论及应用、电力技术经济方面的研究工作，yxwh_6726078@sina.com。

(**编辑**　乔宝榆)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net