

泛能网——信息与能量耦合的能源互联网

甘中学, 朱晓军, 王成, 陈岳

(新奥集团股份有限公司, 河北廊坊 065001)

摘要: 伴随着世界能源危机及环境保护等问题, 世界各国正在积极探索未来能源发展的新出路。近年来美国著名经济学家杰里米·里夫金的第三次工业革命和能源互联网的提法引起了广泛关注。基于此发展趋势, 各国纷纷提出了自己的互联网驱动工业技术进步发展策略: 美国的第三次工业革命和工业互联网, 德国的工业 4.0, 中国的坚强智能电网, “互联网+”。泛能网以系统能效理论为基础, 形成能源网、物联网和互联网构成的三层立体网络, 利用信息与能量的耦合和协同, 因地制宜, 充分发挥多品位能源的潜力, 解决可再生能源融合带来的稳定性问题、供能用能一体化带来的动态匹配问题, 并实现了基于信息与能量耦合的协同优化控制, 成为一种具有代表性的新型能源互联网。

关键词: 泛能网; 信息和能量耦合; 能源互联网; 系统能效; 有序化

中图分类号: TK01 **文献标识码:** A

Ubiquitous Energy Internet—New Energy Internet Coupling with Information and Energy

Gan Zhongxue, Zhu Xiaojun, Wang Cheng, Chen Yue

(ENN Group, Langfang 065001, Hebei, China)

Abstract: With the world energy crisis and environmental protection issues, countries around the world are actively engaged in exploring the new way of the future energy development. In recent years, Jeremy Rifkin, the famous American economist, proposed the idea of the third industrial revolution and the energy internet which caused widespread concern. Following this trend, countries put forward their own development strategies of industrial technology which are driven by internet respectively, such as: the third industrial revolution and industrial Internet of American, industry 4.0 of Germany, smart grid and “Internet + energy” of China. Based on energy efficiency theory in the system, the ubiquitous energy Internet has a stereoscopic structure which consists of three levels: information network, energy network and physical network. By using the optimization control based on the coupling between information and energy to adjust measures to local conditions and fully exploit the multiple grade energy, the ubiquitous energy Internet can give the solution to the integration stability of the renewable energy and the dynamic matching between demand and supply, and become a representative internet of the new energy.

Key words: ubiquitous energy internet; coupling with information and energy; energy internet; system energy efficiency; ordering

一、前言

随着我国城镇化的进程, 城市对能源的需求总

量及多元化提出了更高的要求, 城市能源和环境的承载能力及传统能源的服务模式已逐渐不能满足急剧增长的城市人口的生活需求。能源是现代社会赖

收稿日期: 2015-11-19; 修回日期: 2015-11-23

作者简介: 甘中学, 新奥集团股份有限公司, 首席技术官, 美国康涅狄格大学机械工程博士, 国家“973”计划首席科学家, 研究方向为能源系统工程、智能控制; E-mail: ganzhongxue@enn.cn

基金项目: 国家 973 项目“可再生能源与天然气融合的分布式能源的网络系统基础研究”(2014CB249200)

本刊网址: www.enginsci.cn

以生存和发展的基础,为了应对能源危机,各国积极研究新能源技术,可再生能源具有取之不竭、清洁环保等特点,受到世界各国的高度重视。日益紧张的能源供需矛盾和环境压力等要求再生清洁能源应在未来能源体系中承担主要能源供给任务,但可再生能源存在地理上分散、生产不连续、随机性、波动性和不可控等特点。

大力发展可再生能源、建立联接能源网络和信息网络的“能源互联网”是世界下一次工业革命的发展趋势,也是建立现代能源体系、解决我国能源安全和环境安全,实现可持续发展的必然选择。当前,国内外都在努力推动分布式能源系统的应用,虽然分布式能源系统的综合能源利用效率很高,但由于分布式能源系统没有充分利用环境可再生能源和实时满足客户的动态需求,系统通常很难长时间维持在最佳工况运行,造成分布式能源系统投资成本高、系统实际运行效率并不高的局面,致使分布式能源系统在国内并没有大规模地推广。

现代化的信息技术和能源技术为构建未来能源系统提供了借鉴和技术支持,以能源与信息相耦合的能源互联网成为解决能源危机和环境危机问题的关键之匙。构建一个可再生能源与天然气分布式能源互补、能源网络和信息网络耦合的智能化现代能源体系,符合中国共产党第十八次全国代表大会提出的“实现能源生产和消费革命”的国家重大需求和国家中长期科技发展规划的要求,并促进了能源互联网的发展,同时对相应的技术提出了更高的要求。

二、能源互联网发展的阶段与现状

伴随着世界能源危机及环境保护等问题,世界各国正在积极探索未来能源发展的新出路。近年来美国著名经济学家杰里米·里夫金的第三次工业革命和能源互联网的提法引起了广泛关注^[1]。基于此发展趋势,各国纷纷提出了自己的互联网驱动工业技术进步发展策略:如美国的第三次工业革命和工业互联网,德国的工业 4.0,中国的坚强智能电网,“互联网+”等^[2]。

美国在对需求侧能源供应方面的研究已进入实际应用阶段,通过能源的互联和转换,发电公司根据长期市场需求选择出售天然气和电力的比例。欧

盟也在开展“智能能源的未来网络”项目,研究通过将能源与信息的整合提供创新性的能源解决方案以优化能源传输,改变人们的能源消费方式。日本则在微电网及分布式电源方面进行了大量电能控制基础的相关装备的研究^[3]。

针对我国目前能源互联网的发展,在智能电网方面,国家提出了互通电网的基本发展模式,确定了建设坚强智能电网的总体目标。智能电网的核心技术包括分布式能源系统和储能式混合动力交通工具,是新能源发展的重要技术支点。在可再生能源发电方面,国家启动了多项 863 高技术研究发展计划项目,如:以煤气化为基础的多联产示范工程,兆瓦级并网光伏电站系统,太阳能热发电技术及系统示范等项目。国内多家企业、院校和研究机构也在大力推进新型能源系统及能源服务业务的探索,逐渐明确并形成适合我国国情的具有我国特色的能源解决之道。

国内不同的能源领域对能源互联网有着不同的理解和研究,如清华大学曹军威等研究认为,能源互联网是在信息互联网的理念上构建的新型信息与能源相耦合的“广域网”,其以国家大电网为“主干网”,以微网、分布式能源等能源自治单元为“局域网”,以开放对等的信息与能量一体化真正实现能源双向的按需匹配和动态平衡^[4]。董朝阳等研究认为未来的能源互联网将是天然气网络与电力系统高度耦合的产物^[5]。

能源互联网为我们提供了一个解决能源可持续发展的思路,对国家新能源发展来说,既是挑战,也是一次重大的机遇。但目前国内外在能源互联网领域的研究均偏向于智能电网的研究,从国家主干网出发,将局域网和其他自组织网络连接,形成发电、输电、配电及供电的智能化管理,这样的能源互联网,仅从单一能源出发,主要针对国家电网,没有实现多能源的协同供应及多能源系统间的互联互通,是对能源互联网片面的认识。未来能源互联网的发展,需要以多能源间的互联互通为基础,形成完善的能源基础网络及顶层能源控制网络,实现多能源的交易及协同互补^[6]。

能源互联网是信息流+能量流的多流并行的能源网络,其在未来实现还面临着诸多的技术难题。例如,同时保证信息流和能量流两种载荷的交错运行,并且在多流协同条件下实现高效运行,将其成

本控制在可普及的程度，目前仍面临着技术障碍；在信息流方面，适应与能源互联网所需求的大数据、云计算等先进技术，目前尚未完全达到可以规模化应用的程度；在能量流方面，能量的储存、高效的运输技术，更是远远达不到能源互联网在较大范围普及所要求的程度。能源互联网的发展不是一蹴而就的，必须要基于现有的传统能源网络，尤其是近几年以来的智能电网发展路线。同时能源互联网的发展仍面临着如智能电网、不同能源之间互联、能源网络共享等各种技术难题。根据国内外能源互联网发展的现状及技术需求，本文提出了基于信息与能量耦合的泛能网的发展理念。

三、泛能网——信息与能量耦合的能源互联网

随着信息技术的高速发展，人们发现对信息的控制和使用可以促使能量的传递和转化高效地进行，通过信息与能量的相互作用，能明显提高系统的运行效率，如何进一步深入探索理解信息与能量的关系意义重大。

对于单纯的没有信息调控的热力学的系统，其内部的有序化是由单一的热力学负熵流而引起的，而信息流对系统内部有序化程度的影响，在传统的热力学理论中并没有给出答案。最新研究表明，信息反馈控制对于系统的熵变有重要的影响，在这些相关研究中，首先通过测量装置建立的控制系统与控制系统之间的关联，此过程中得到的被控系统的状态信息量可以用两者之间的互信息来描述，在接下来的反馈控制过程中，控制系统利用得到的测量信息进行相应的反馈控制，整个过程可以降低系统的熵增。具体到现在的宏观能源系统分析，我们可以将系统分为四个环节，它们是能源生产、能源储运、能源回收和能源应用，因为各个环节都是相互关联的，因此我们可以利用互信息来度量各环节的关联程度，得到的系统之间的关联情况进行相应的反馈控制，借此来使系统更加的有序化，从而提高能源系统的能效。

对于一个耗散系统，无论是稳定的生物体还是复杂的能源系统，进出的能量是平衡的。对于这样的系统，可以认为消耗的不是能量而是系统的有序程序，即系统熵变^[7]。需要的熵变多则代表需要更多的高品位能量，熵变少则可以降低对高品位能量

的需求。在热力学中，系统熵变可以分成熵流和熵产生两部分：熵流贡献部分，是外界和研究系统之间的物质和能量交换引起的系统熵的变化；熵产贡献部分是内部的非平衡过程引起的，比如系统内部的化学反应、传热等非可逆过程。在反馈体系中，具有控制系统作用的内部信息可以引起熵产的减少，这其实是因为内部反馈信息使得过程更接近可逆、更为有序，一般认为这是一种负熵。如果将不加反馈的系统当做参考态，在反馈体系下，熵产又拆成了两部分：参考熵产和信息反馈系统引起的熵减。如果信息毫无作用，则熵减少为0，系统退回到参考状态。当信息为干扰信息作用非常混乱，则导致熵增加，反馈后的系统势必会产生更多的熵，效果还不如参考系统。只有当信息为有用信息，使得体系更为有序，才可以认为是负熵产，最终导致降低系统的熵增^[8]。

对于耗散系统中反馈信息的作用机理，在微观上，无论是通过麦克斯韦妖还是希拉德热机，微观的信息与能量作用已经研究的非常深入，而宏观论证没有直接证明。统计力学原理构建了微观与宏观的桥梁^[9]，而对于一个平衡态系统，其熵可以认为是系统态数的函数。信息的作用是消除系统的不确定性，当系统加入信息反馈后，删除了一些可能的态。当其态数发生了改变，势必会导致系统熵的变化。在这个过程中，内能并没改变，然而由于熵的减少，导致系统自由能的增加，这就意味着系统的做功能量提高。

信息是物质与能量有序的量度，对于一个热力学系统而言，信息的交互或者流动意味着系统的物质与能量的交互，同时对系统的有序程度产生影响^[10]，即信息调控对于能源系统的能效最终会产生重要影响。从热力学角度来看，信息作用对处于动态能流环境下的开放系统的影响，可以用信息熵减来表示开放系统物质与能量交互产生的有序化作用。信息与能量的这种关系，指导着泛能网的基础网络动力学和热力学特性研究，以及多输入、多输出系统的稳定性控制研究；同时提出网络化的系统能效提升机理所涉及的新分析方法，促进复杂性系统科学理论、系统理论的发展，特别是促进信息和能量关系的科学研究。在此基础上，进一步指导泛能网技术体系的建设，同时在一些能源互联网项目实践中产生了巨大的价值。

四、泛能网的主要架构与特征

泛能网是从能源互联网出发，将能源网、物联网和互联网形成同一的智能协同网，通过能源、控制及云计算等先进技术，构成能源的生产、储运、应用、再生四个环节的闭路循环，在能源全生命周期中，实现信息和能量的耦合协同，从而达到多能源的梯级按需匹配，能源资源的全价高效利用和经济价值最大化。

如图 1 所示，泛能网是由能源网、物联网和互联网三层网络耦合而成。

(1) 能源网是泛能网的基础网络系统，是以可再生和化石能源为输入，以分布式和集中式能源生产为节点，以电、热、气、冷能源网络为纽带，连接能源生产、储运、应用和再生四环节而形成的综合能源网络系统。

在生产环节上，通过对能源的多元化开发和循环生产，将需求与资源、环境相结合，将能源分布式与集中式相结合，将可再生能源、气体能源与传统能源相结合，匹配协同，优势互补，进而实现能源供应的高效性、可靠性和系统的配置有序性。在储运环节上，通过对能源系统管网、输配系统及储能系统的分析与设计，将能量的输配与储存相结合，将稳态设计与运行态设计相结合，实现能源输配系统的最优化运行和储能系统的合理化调度与优化调峰。在应用环节上，通过对终端用能的节能优化及按能源品位匹配用能，实现能源高效利用和用能总量的节约。在再生环节上，通过对余能、废能及环境势能的梯级回收利用，保障了能源资源价值和环

保价值的最大化。

(2) 物联网是泛能网的中间层，是以能源基础数据采集和能源生产、储运、应用及回收四环节优化控制为目的，对能源网络及设备上配置的智能化计量及控制终端整合而形成的信息网络系统。

物联网也是能源网和互联网信息交互的纽带，在物联网中，通过对能源网四环节中各个系统、设备的运行数据、计量数据及指令等信息的采集、分析和处理，结合系统运行特点和能源产用的特性，合理化控制能源网络，从而保证系统的运行稳定；此外，通过互联网大数据及不同时空、空域的能源供需差异和系统集成组合方式分析，形成系统优化策略，对能源网运行进行控制优化，确定系统运行状态的最优化协同模式，尽可能提高系统的最佳运行效率。从而实现能源系统的智能化、最优化运行。

(3) 互联网是泛能网的顶层信息网络，是以“云平台”为核心，通过云计算及大数据技术，将能源终端客户、供应商、运营商汇聚在一个双向交互的平台上，实现能源双向选择、智慧沟通凝聚、价值增值交换的信息网络系统。

在互联网中，构建能源网、物联网及设施的虚拟化基础平台，通过大数据和云计算分析，并结合能源规划、设计、诊断、调度、监管与交易等能源服务业务，形成自主平等、自由竞争、信息对称的网络化能源服务平台，为能源生产商、运营商、服务商、供应商及终端客户提供多边、双向、平等的能源信息服务，从而实现能源经济价值的最大化。

泛能网构建了一个实现系统全生命周期的最优化和能量增效的新能源体系，使能源的生产和应用摆脱了过去孤立、封闭和线性的简单利用，转变为

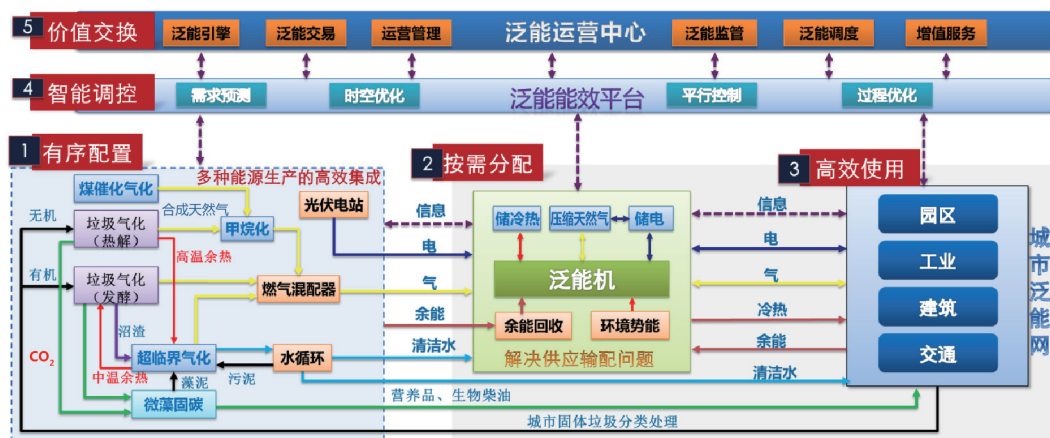


图 1 泛能网架构图

基于系统能效最优的多品类能源协同、互补、循环的智能应用，从形制上打破“行业壁垒”和“企业围墙”，从而从整体上提高能源利用效率，把人类近300年来用“制造自动化”来提高生产效率转变为用“能源的智能化”去创造资源的价值最大化，使生产力由一个单纯的自动化生产水平提高到“资源、能源和环境”全方位融合的生产水平。

五、泛能网的主要技术优势

区别与传统的能源互联网，泛能网技术以系统能效理论作为理论支撑，系统能效理论是针对能量系统的结构（拓扑）、流（包括系统内部的和系统外与系统交互的能量流、物质流、信息流）和运行方式进行协同优化原理的研究，目的是使系统的能量效率达到最高或综合运行经济性达到最优。

在结构上，系统能效理论从能源演进的全生命周期出发，提出能源生产、储运、回收和用户的四环节结构，并最大限度的利用环境能源资源，从而实现系统能源效率的最大化；在流的协同上，通过信息流与能量流和物质流的协同，实现多品类能源协同、互补、循环的智能应用，实现能源和资源的全价开发和梯级利用；在运行方式上，通过智能化的网络控制和协同优化，利用分布式网络节点能量“涨落”造成局部网络系统远离平衡态，产生局部网络能效增益效应，实现整体大于部分之和的能效增益，高效率地输出高品质的智能能源（见图2）。

系统能效理论重视系统过程能量与信息的多层次耦合，实现宏观层面能源利用效率的最大化。系统能效理论将泛能网分为智能控制层、智能优化层

和智能放大层，分别对应着物理四环节、控制四环节、信息四环节，形成了由能源网、物联网和互联网构成的三层立体网络。

(1) 能源网（互感层）实现了能量生命周期四个环节中信息的多向沟通，实现信息和能量过程实时的协同；

(2) 物联网（互动层）通过非线性、变结构和自寻优等特点采用任务分块和控制分散的方式，对环境或过程进行组织、决策和规划，实现信息处理分析能力的智能优化；

(3) 互联网（互智层）实现能量系统信息分析的智能升级，形成智能决策机制。

三个层次的逻辑耦合实现智能能源网络——泛能网，其在横向上包括能源网、物联网和互联网，在纵向上包括智能控制层、智能优化层和智能进化层。智能能源网络的建设是一个系统工程，是将能源网和信息网的耦合，分别实现系统在单元层面、结构层面、系统层面的整体优化。以信息与能量耦合为主要特征的泛能网，将能源的物理网络、传感控制网络和信息网络耦合，形成能源和信息耦合的复杂能源网络系统，将改变能源的消费方式，引发能源生产和消费的一场革命。

在技术上，泛能网经过长期的发展和实践，已经形成一套完整的技术体系和标准，并解决了几大技术难题如下所示。

1. 分布式能源的网络系统融合可再生能源且并网后带来的稳定性问题

近年来，分布式能源网络系统的稳定性正成为国际分布式能源网络系统研究领域的热点。无论是传统能源企业，还是新能源企业在为客户规划、建

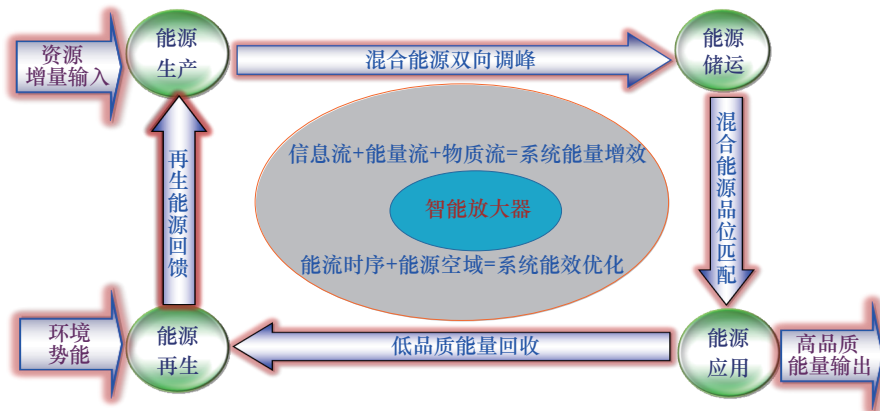


图2 系统能效原理图

设和管理分布式能源网络系统,提供系统化解决方案时普遍缺乏系统理论的支持和指导,往往从各自掌握的优势技术入手,按照传统能源的构建方式自成体系的构建新能源系统,这种系统与传统能源的结合又出现“不稳定”和“代价高”两个特点,致使相当多的分布式能源项目出现了困难。

2. 供能用能一体化带来的供需动态匹配问题

泛能网处在多能量输入、多用户需求的动态环境下,为了提高对能量质的利用,就要从热力学的第二定律出发,研究如何实时地进行各种类型能源的转换,并按照能源的“质”和“量”实施品位对口的梯级利用和循环利用,在供需高效匹配、整体能效提升和能源网络动力性能相结合的前提下,将用能端设计成能够随外部环境变化的自适应调节系统,降低用能端的负荷。同时,将供能端设计成物理能和化学能分级释放、梯级利用的系统,使供能端能够随用能端能量需求的品位和数量变化而自动调节,形成供能端和用能端互动的能量梯级利用机制,使系统可在较宽的操作域内,在偏离设计平衡态的工作点运行,并能在信息协同干预下自动达到若干高效的稳定状态点,形成若干稳定状态点下系统能效最大化的运行机制,这为我国今后大规模发展分布式能源的网络系统提供相关的理论支持,具有重要的现实意义。

3. 能源网络的信息控制对系统能效的影响问题

泛能网作为一种新型的能源互联网,其复杂能源网络系统的控制必须要保证系统的稳定性、安全性和高效性。由于网络系统具有非线性、不稳定性、不确定性等特点,传统的预测控制方式都失去了优势。因此,网络系统控制方式也必须发生突破性的改变。主要包括以下三点:第一,要充分地把外界的可再生能源输入到系统中来,并按质按量分配到能源网络系统中;第二,控制网络系统内部系统运行的状态,使内部能源消耗最低;第三,充分获取和调动用户的智慧,改变用户的用能行为,实现用户和网络的互动,逐渐包含用户端的智慧控制和用能行为,使用户的智能通过合理的互动机制转化为网络的智慧,最终控制方式由传统的集散控制模式转化为分布式并行控制模式。

六、泛能网的实施与工程化

泛能网技术目前正在青岛中德生态园、长沙

黄花机场、廊坊等多个地方得到了实施和应用,具有一定的经济效益和社会效益。以中德生态园为例,中德生态园位于山东青岛经济技术开发区国际生态智慧城内,规划面积约 10 km²。中德生态园旨在为中德两国在经济、高端产业、生态、可持续性城市规划方面提供合作平台,兼顾生态环保、经济发展与社会和谐三大目标,围绕生态环境健康、社会和谐进步、经济蓬勃高效三个方面,打造一个示范性项目,将其建设成为具有国际化示范意义的高端生态示范区、技术创新先导区、高端产业集聚区、和谐宜居新城区。

中德生态园依据《青岛城市规划(2011—2020)》等相关规划标准,进行规划范围及用地功能的划分,应用泛能网技术及生态城市规划方法,对园区规划与泛能规划、园区能源供应与能源消费、园区分布式能源供应与集中式能源供应、可再生能源与化石能源分配、城市能源供应系统等方面进行多边协同,形成针对中德生态园区的生态社区规划方案。在园区应用从小到大的生态城市规划方法,将生态园区分为九个区块,分别进行能源系统设计,并在区块内部通过管路相连接。以区块为单位,依据用地分类,对各区块进行能源的供需平衡分析,对用能测负荷进行多能源系统的匹配优化设计,确定泛能站规模。依据生态园整体负荷分布情况,确定泛能站的数量和位置、能源管网、泛能站之间的互补调峰等,形成中德生态园的基础能源网络,实现对生态园能源四环节的控制。

中德生态园的泛能网工程项目,是以泛能网技术体系为基础,以信息与能量的耦合为指导,从网络层级上分为能源网、物联网和互联网,是一个智能化、高度协同的科学能源网络。该项目通过建立一个泛能运营中心来实现中德生态园泛能网的智能化、生态化运营,从而实现经济、安全、高效的运营管理目标,在分布式泛能云计算网络的基础平台上,通过能效控制、系统优化、总体调度、全网监控支撑整个园区能源系统的高效运行,为园区内工商企业、居民以及多种能源供能企业提供余能上网、能源交易、节能服务等一体化能源综合服务。截至目前,中德生态园项目已经完成了整体规划和设计,泛能站和泛能运营中心正在积极的建设中。通过泛能网规划,初期实现了园区内泛能网系统节能量 15×10⁴ tce (tce 为吨标准煤),节能率达到 50.7%,CO₂ 减排率为 64.6%,系统的清洁能源利用率达到

80.4%，可再生能源利用率达到20.6%。中德生态园泛能网的实施，大力推进了能源、资源、信息的融合利用，对推动全社会节能减排和能源高效利用具有积极的示范和引领作用。

七、结语

传统的能源网络难以适应可再生能源大规模利用的要求，只有实现可再生能源的信息共享，以信息流控制能量流，实现可再生能源的高效传输与共享，才能克服可再生能源不稳定的问题，实现可再生能源的真正有效地利用。信息技术与可再生能源相结合的产物——能源互联网为解决可再生能源的有效利用问题，提供了可行的技术方案。泛能网技术是信息和能量耦合的新型能源互联网，先进的电力电子技术、信息技术和智能管理技术、分布式能量采集装置、分布式能量储存装置以及高效的能量转换装置，将支撑着泛能网技术的快速发展。统一能量的度量，实现各种能量的统一调度和交易，将是未来大面积推广泛能网技术的关键技术环节。

以可再生能源和天然气融合、信息网与能源网融合为特征的泛能网将会有效地支撑国家提出的“能源互联网行动方案”，符合党中央在中国共产党第十八次全国代表大会提出的“实现能源生产和消费革命”的国家重大需求和国家中长期科技发展规划的要求，将作为我国能源革命的重要战略里程碑。当前，以“互联网+”和“智能化”为主要特征的

全球新一轮产业革命正在孕育兴起，先进信息技术及互联网理念与传统能源产业的不断融合，推动着能源新业态的产生与发展，为未来新能源产业带来了前所未有的发展机遇。

本文部分研究内容引用了由中国工程院主导的“能源生产消费革命”战略研究题目和科技部主导的973项目“可再生能源与天然气融合的分布式能源的网络系统基础研究”的研究成果，在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Rifkin J. The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World [M]. New York: Palgrave MacMillan, 2011.
- [2] 王继业, 郭经红, 曹军威, 等. 能源互联网信息通信关键技术综述[J]. 智能电网, 2015, 3(6): 473-485.
- [3] 沈洲, 周建华, 袁晓冬, 等. 能源互联网的发展现状[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1): 81-84.
- [4] 曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 1-10.
- [5] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
- [6] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 714-727, doi: 10.1360/N112014-00001.
- [7] 赫尔曼·哈肯. 协同学[M]. 徐锡申, 陈式刚, 陈雅深等, 译. 北京: 原子能出版社, 1984.
- [8] Jarzynski C. None equilibrium equality for free energy differences [J]. Phys. Rev. Lett, 78, 2690 (1997).
- [9] Chandler D. Introduction to Modern Statistical Mechanics[M]. New York: Oxford University Press, 1987.
- [10] 阎植林, 邱苑华, 陈志强. 管理系统有序度评价的熵模型[J]. 系统工程理论与实践, 1997(6): 45-48.