

能源-交通-信息三网融合发展的需求、形态及关键技术

何正友, 向悦萍, 廖凯, 杨健维
(西南交通大学电气工程学院, 四川省成都市 611756)

摘要: 当前中国正处于经济社会由高速发展向高质量发展转型的关键时期, 先进的信息通信技术赋能能源与交通传统行业。能源网、交通网、信息网三网融合发展, 将有力推动能源转型和交通强国的建设, 实现绿色、智慧、可持续发展。文中对能源网、交通网、信息网融合发展的优势与需求进行了系统梳理与分析, 明确了三网融合发展的必要性; 归纳了三网基础设施建设现状, 以及融合发展的现有技术支撑, 总结了三网融合发展在电动汽车充电服务领域的初步尝试, 论述了三网融合发展的途径及可行性; 分析了三网融合发展形态, 提出了三网融合系统架构, 归纳了三网融合系统的主要特征; 从三网融合系统架构的物理层、感知层、平台层、应用层4个层面, 归纳总结了构建三网融合系统的关键技术; 最后, 探讨了三网融合分析的关键理论。

关键词: 能源网; 交通网; 信息网; 三网融合; 能源转型; 信息通信技术

0 引言

近年来, 中国经济社会快速发展, 城市规模急剧扩张, 能源供应日益紧缺, 交通与通信需求逐年上升。交通系统作为重要能源负荷, 与能源系统在用户、能量、信息等层面产生了频繁的交互与影响^[1]。文献[2]提出了能源网、交通网、信息网三网融合发展的理念, 认为三网融合是可持续发展的大势所趋, 是基础设施发展的高级形态。在“碳达峰、碳中和”目标^[3]下, 能源网、交通网均肩负着绿色低碳转型的重要任务。建设能源互联网, 推进交通电气化、智慧化是能源网与交通网绿色低碳转型的关键途径, 而发展能源互联网和智慧交通需要高度信息化技术的支撑。因此, 能源-交通-信息一体化应运而生。

当前, 中国大力推动新型基础设施建设, 为三网融合发展带来了新的机遇, 注入了新的动力。新型基础设施建设以新发展理念为引领, 以技术创新为驱动, 以信息网络为基础, 面向高质量发展需要^[4], 促进能源网、交通网、信息网的基础建设与融合创新: ①以特高压为供能脉络的能源网, 为三网融合提供更强的能源供应能力, 促进新能源外送与消纳; ②以城际高速铁路及城市轨道交通为主的综合立体交通网, 为三网融合提供更高效率的交通承载能力及运输能力; ③以5G、大数据中心、人工智能、工业互

联网构成的信息网, 为三网融合提供低延迟、高速率的信息通信能力, 为三网深度连接、广泛感知奠定基础; ④以新能源汽车充电桩为代表的能源交通融合基础设施, 推动了交通电气化, 为三网融合提供了融合发展的初步应用场景。显然, 新型基础设施建设将会推动能源与交通数字化转型、智能升级、融合创新, 加速能源网、交通网、信息网融合发展的进程, 是三网融合发展的催化剂。

然而, 三网融合发展势必面临诸多挑战, 除三网相关行业间存在明显壁垒、商业模式与市场机制亟待更新外, 在技术层面, 能源网、交通网、信息网的现有技术应用于三网融合运行时, 将会面临以下理论研究方面的挑战: 融合系统高度复杂, 数据多源、海量、高维、异构, 三网运行时间尺度不一致, 用户行为存在多重不确定性等。因此, 亟须进一步研究助力三网融合发展的新技术, 实现真正意义上的三网深入融合、友好共享、智慧协同。基于此, 本文分析了能源网、交通网、信息网融合发展的需求和意义、形态与架构, 总结了构建三网融合系统的关键技术, 探讨了三网融合分析的关键理论。

1 三网融合发展的必要性与可行性

本章围绕三网融合发展的优势与需求, 分析三网融合发展的必要性, 并论述三网融合发展的途径及可行性。

1.1 三网融合发展的优势及必要性

1.1.1 三网融合发展的优势

能源网、交通网、信息网是人类社会进步、国民

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-06-16。

上网日期: 2021-07-02。

国家自然科学基金资助项目(51977180)。

经济发展的重要基础设施。能源网是交通网、信息网的动力来源;交通网是能源网的重要负荷,是信息网的重要用户;信息网是能源网和交通网高效稳定运行的通信基础。三网紧密相连、相互影响、相互支撑,共同服务于经济社会发展和民生需求。然而,受经济社会发展阶段所限,三网长期处于各自发展的状态。

当前,中国正处于由经济高速增长迈向高质量发展的重要转折期。若能对三网融合发展进行统一规划,将可发挥三网各自最大潜力,显著降低建设及运营成本,提高设施研发与建设的投入产出比,提高能源利用效率;促进土地资源高效集约利用,提升资源配置效率,优化经济结构;刺激能源、交通、信息领域前沿技术融合创新,推动跨学科技术突破与应用;促进能源、交通传统行业新模式、新业态的形成,推动能源转型与交通强国建设,助力“碳达峰、碳中和”的实现,形成深度融合、智慧协同的局面,向社会提供更高效智能、绿色便捷的服务。

1.1.2 三网融合发展的必要性

目前,中国能源结构以化石能源为主,资源匮乏、环境污染等问题日益严峻,石油、天然气占一次能源消费能源比重约27%,煤炭占一次能源消费比重约58%^[5]。加快绿色低碳转型是中国能源发展的必然趋势。在能源供给侧,需加快可再生能源替代,构建以新能源为主体的新型电力系统^[6];在能源消费侧,需提高终端电气化水平,促进终端绿色、低碳、节能运行。在加强电能替代进程中,交通电气化是能源消费终端电气化中的重要环节。在电气化交通大规模普及的未来,如果不统筹考虑电气化交通的运行特性,城市电网将难以解决电气化交通大规模接入带来的一系列安全问题。例如无视电动汽车负荷的时空分布规律,任由其无序充电,将会导致电网中出现大量变压器过载、电能质量下降^[7]等问题,影响电力系统的稳定运行,继而影响电动汽车的可靠供电,使安全隐患在电力、交通网间交互蔓延。基于此,能源网建设,尤其是电网建设,应着重考虑未来大规模电动汽车接入的影响与应对措施,通过能源网与交通网的联合规划与协同运行调度^[8],实现交通、能源的协同可持续发展。另外,能源互联网是助推能源转型的重要途径。然而,中国能源互联网发展仍处于起步阶段,工程应用仍以示范为主,尚未有效落地^[9]。能源互联网的建设依赖于先进信息技术的深度应用。目前,中国智能电网仍然存在终端覆盖不足、通信不畅通、数据不贯通等问题^[10],电力大数据在采集和应用方面均有待进一步提升。因此,推动能源互联网的建设落地,急需突破大数据、物联

网、人工智能、边缘计算、5G通信等先进信息技术在能源(电力)领域的应用创新。

随着城市交通需求激增,中国城市交通系统面临愈渐严峻的环境污染、安全、拥堵等问题。2021年2月,中共中央、国务院印发了《国家综合立体交通网规划纲要》^[11]。《纲要》提出到2035年,打造顺畅高效、绿色集约、智能可靠的国家综合立体交通网,要求交通基础设施绿色化建设比例达95%,数字化率达90%。因此,融合能源新技术推进交通绿色化、电气化进程,结合先进信息技术,科学布局新型智能交通基础设施研发建设,是交通网发展的既定路线。交通网的发展离不开能源网的配套建设与绿色供应,更离不开信息技术的深度应用。

在数字社会发展的历史进程中,能源网、交通网作为保障民生需求的庞大基础设施网络,拥有广泛、海量的数据与信息,有不可估量的数据潜力及挖掘价值,可以为信息技术的更新迭代带来全新且难以预料创新驱动。

综上所述,能源转型需要交通网电气化的支持,交通强国离不开能源供应升级。同时,只有将新一代信息技术深度应用于能源、交通等传统行业,广泛互联,融合创新,才能实现传统产业升级,打造能源互联网、智慧交通等绿色产业。这使得能源网、交通网、信息网融合发展成为必然趋势。

1.2 三网融合发展的途径及可行性

随着新型基础设施建设部署的落实,以及信息技术在能源互联网、智慧交通中的应用深化,三网融合发展具有广阔的发展途径及良好的发展基础。

1.2.1 三网融合发展的途径

近期,三网融合发展应重点推进数据共享、联合规划及协同运行。首先,须打破行业壁垒,共享规划方案、运行数据等关键信息,使得能源、交通、信息部门间形成良好的协同。考虑三网间供需关系,有预见性地进行能源网、交通网、信息网基础设施及通道枢纽的联合共建,促进资源集约利用;通过小微智能传感器、融合智能终端、应用程序(APP)等的开发应用,实现能源网、交通网、信息网终端共享。考虑交通网实时负荷分布和需求,结合能源网实时负载情况及运行工况,经信息网的数据上行与指令下达,实现协同优化调度及智能运行控制。

远期,三网融合发展的目标在于:系统可感知、可预测、可调控;用户零碳绿色用能、通畅高效出行;社会智能高效、可持续发展。在信息技术、通信技术、传感技术及控制技术的高速迭代下,推动系统运行数据的实时采集、上传、识别、监控与可视化展示,能源网与交通网的所有节点均可经由信息网被全面

感知,三网广泛互联,数据全面采集、集中存储与处理。未来,可再生能源成为能源供应主力,趋于零边际成本供应电力;用户随时随地获取能源、自由交易;交通网、信息网用能清洁、服务绿色;三网零碳融合助力经济社会可持续发展。

1.2.2 三网融合发展的可行性

能源网、交通网、信息网均是惠及民生的重要基础设施网络,三网融合发展需要融合基础设施建设,以及跨学科交叉的技术创新。

在基础设施建设方面,目前中国能源、交通、信息的基础设施网络已基本建成,服务效率明显提升,结合新型基础设施建设部署,三网融合的基础建设进展可观。

1)以特高压为供能脉络的能源网。截至2021年1月,中国共有30条正在运行的特高压线路,9条正在建设的特高压线路。

2)以城际高速铁路与城市轨道交通为主干的综合立体交通网。截至2020年底,中国铁路运营里程为146.3 Mm,其中高铁38 Mm,占比26%,电气化率达72.8%^[12]。内地共有44个城市开通了城市运营轨道交通线路233条,运营里程高达7 545.5 km,车站4 660座,上海、北京、成都、广州运营里程均已超过500 km^[13]。

3)以新能源汽车充电桩为代表的能源融合基础设施。2020年全年,电动汽车充电基础设施增量为46.2万台。截至2020年底,中国充电基础设施累计达168.1万台^[14]。

4)以5G与大数据中心为基础的信息网。截至2020年底,中国移动通信基站总数已达931万个,其中4G基站总数575万个,城镇地区实现深度覆盖,5G基站逾71.8万个,基本覆盖中国所有地级以上城市及重点县市,5G终端连接数超过2亿^[15]。随着5G技术的应用推广,数据资源将急速增长,预计2030年中国数据总量将高达4 YB^[16]。作为经济社会发展的新一代生产要素,海量数据资源的管理需要大规模数据中心的支撑。截至2019年底,中国数据中心总量达到7.4万个,约占全球23%,数据中心机架规模达到227万架,超大型、大型数据中心占比12.7%。

在技术创新方面,“能源+交通”的电动汽车及电气化轨道交通日渐普及,氢动力汽车^[17]、氢燃料电池混合动力机车^[18]等绿色运输工具的研发不断创新。同时,随着5G技术的成熟^[19],以及物联网^[20]、大数据^[21-23]、云计算^[24]等信息技术的广泛应用,“能源+信息”融合的智能电网技术^[25]、“交通+信息”融合的车联网^[26]与自动驾驶技术^[27]、“能源+

交通+信息”融合的“车-桩-路-网”协同优化运行技术^[28-29]等融合创新技术日渐成熟,为三网融合发展提供了技术支撑。

与此同时,三网融合也已在电动汽车充电服务领域进行了初步尝试。电动汽车充电服务网络的“能源+交通”融合可实现电动汽车充电站的优化规划^[30-32];“能源+信息”融合可实现电网负载状态监测,动态调整实时充电电价以引导电动汽车有序充电^[33-34];“交通+信息”融合可实现交通实时路况监测,动态规划出行路径和充电方案^[35-36];“能源+交通+信息”融合^[37]可兼顾能源网负荷分布、交通网路况及用户需求,实现更多用户在车载终端、手机APP等移动设备的综合充电服务,包括路况查询、充电站空余查询与预约、出行路径规划^[38]、充电引导方案、计费与结算等。电动汽车充电服务网络建设是三网融合发展的初步探索、先导领域,未来与无线充电^[39-42]、无人驾驶^[43]等技术相结合,将进一步提升用户出行及充电体验。

综上,三网融合发展具有良好的基础设施建设基础与创新技术支撑,并且在电动汽车充电服务领域已开展了初步的探索与应用。可见,在如今新型基础设施建设大规模部署、技术快速更迭的时代发展背景下,能源网、交通网、信息网的融合发展具有良好的发展基础及广阔的发展前景。

2 三网融合的形态与架构

本章从发展形态、融合系统架构、主要特征3个方面,对三网融合发展的形态与架构进行阐述。

2.1 三网融合形态

三网融合将独立发展的3个网络融合集成为协同服务社会的高级基础设施网络。在新型基础设施建设的推动下,三网融合发展将建成5G基站、变电站、储能站多站融合的城市三网融合基础设施;建设光储电站、电动汽车充换电站、高速服务区融合的城际三网融合服务区;集成海上风光机组、港口、通信基站等,形成沿海三网融合枢纽等,实现三网联合共建、设备高度集成。同时,通过小微智能传感器、融合智能终端、APP等的开发应用,以5G、数据中心、人工智能、云计算等前沿信息技术为支撑,对三网运行数据进行全面采集、集中存储与处理,实现三网终端互联互通,推动能源、交通各类数据跨平台共享,充分挖掘数据价值,为三网高效协同、供需灵活互动提供数据支持。能源、交通、信息跨学科交叉、跨领域融合,加速前沿技术突破创新与应用,推动形成三网融合的创新发展技术体系,打破能源、交通、信息间的行业壁垒。基于上述设施、数据与技术的融合,

三网融合系统可全面分析掌握用户信息、习惯和意愿,精准描绘用户用能、出行、通信的需求画像,为用户提供更便捷、高效的服务,形成能源供应、交通出行、信息反馈高效集成的服务新模式、产业新生态。

总结上述发展形态可知,三网融合发展将形成基础设施集成、数据信息共享、技术创新、服务模式创新和产业转型升级的格局,如图1所示。设施融合是“骨骼”,为三网融合发展提供基础支撑;数据融合是“神经”,是三网融合系统的信息传递通道;

技术融合是“大脑”,为三网融合发展提供分析引导方法;服务融合在技术融合(“大脑”)的分析指导下,经数据融合(“神经”)的信息传递,依靠设施融合(“骨骼”)的支撑,完成一系列动作。因此,服务融合是三网融合发展的“肌肉”。能源网是三网融合发展的“血液”,为三网融合运行提供动力。“骨骼”、“神经”、“大脑”、“肌肉”和“血液”的配合,共同支撑融合系统带动产业转型升级,刺激发展,服务社会。

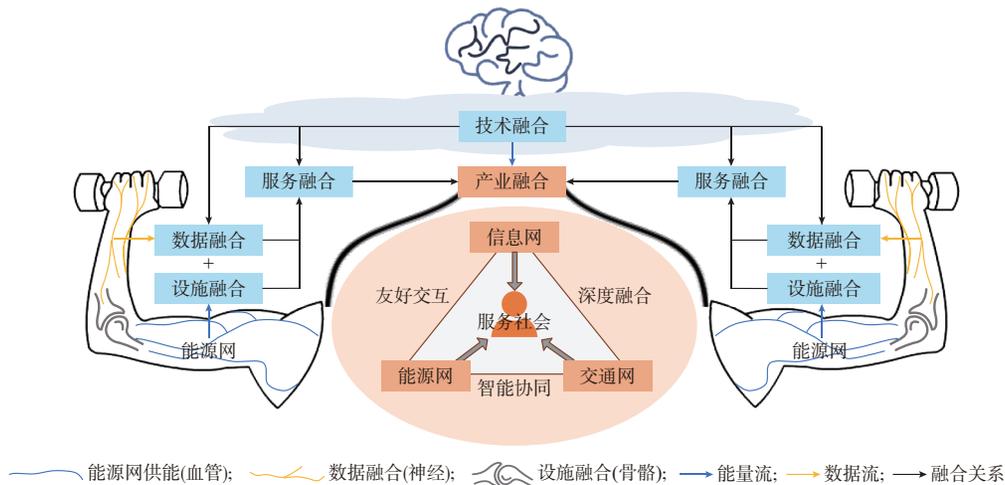


图1 三网融合发展形态
Fig. 1 Integrated development form of three networks

电动汽车充电服务网络由电网供电,同时电动汽车作为移动储能单元,可基于充电服务网络实现与电网的双向互动,具有能源网属性。同时,充电服务网络向电动汽车提供充电引导、停泊等功能,是现代交通网的重要网络之一,具有交通网属性。此外,

电动汽车含车载全球定位系统(GPS)等移动信息终端,电动汽车充电服务终端与设备含通信、计算等功能,具有信息网属性。

电动汽车充电服务网络及产业是典型的三网融合案例,其发展形态如图2所示。

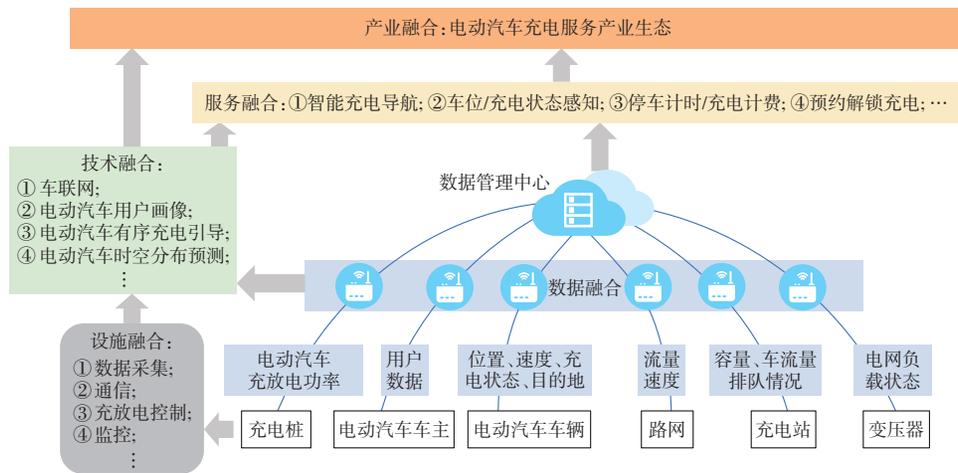


图2 电动汽车充电服务网络及产业的发展形态
Fig. 2 Charging service network of electric vehicles and industrial development form

停车位一对一建设充电终端,集成数据采集、通信、充放电控制及监控终端,实现能源、交通、信息的

设施融合。结合智慧能源、车联网等创新融合技术,集中处理和分析充电终端数据,分析预测充电服务

网络在能源、交通层面的运行态势,优化电动汽车充电调度,实现能源、交通、信息的数据融合与技术融合。同时,集成车位状态感知、充电状态感知、停车计时/充电计费、预约解锁充电等功能,形成充电服务平台,打通充电与出行需求的实现路径,实现服务融合。当前,相关电动汽车充电服务企业正推动充电服务平台研发,致力于构建电动汽车充电服务产业生态。

2.2 系统架构

三网融合系统的基本架构由物理层、感知层、平台层与应用层组成,如图3所示。

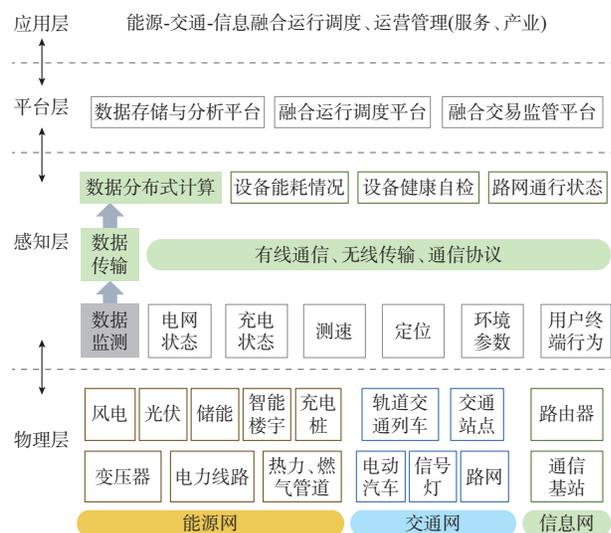


图3 三网融合系统架构

Fig. 3 Integrated system architecture of three networks

物理层由能源、交通、信息系统的一系列物理实体设施、用户终端及融合设施组成,包括发电机组、电力线缆、气/热管道、储能、交通设施、运载工具,通信基站、数据中心、用户用能、出行、通信终端等。

感知层由能源与交通网的数据采集终端、传感设备,以及信息网的通信网络、分布式计算资源组成,用以采集及传输物理层运行数据,监测并感知物理层运行状态,实现数据融合。

平台层基于感知层的数据采集,以数据处理与优化算法为核心,通过技术融合,形成分工不同的各类管理运营平台,例如:基于云计算的数据存储与分析平台、融合运行调度平台、融合交易监管平台等。平台与平台间制定可靠边界与友好互动协议,保障用户隐私及信息安全。平台层面向上层应用提供安全可靠、高效便捷的软硬件基础,以及有效决策或调控方案。

应用层是三网融合的价值集中体现。结合物理层的运行状态,汇集感知层的有效信息,基于平台层的技术支持,面向用户社群提供用能管理、出行引

导、信息获取等服务,实现三网融合系统的运营管理。

2.3 主要特征

总结三网融合发展形态可知,三网融合发展将呈现以下特征。

1)开放互联。能源、交通、信息设备与系统广泛互联,灵活接纳多元用户,支持各主体平等参与^[44],产业生态体系开放包容。

2)全面感知。广泛分布在终端的小微智能传感器实时采集海量运行数据,经由5G基站等先进通信网络传输,将海量数据上传、识别与可视化展示,控制中心可全面感知能源网、交通网所有节点、线路及用户终端,实时监测融合系统运行工况及设备状态^[45]。

3)供需互动。在物联网框架下,能源网、交通网、信息网的大量用户移动设备将组成庞大的群智感知网络;融合系统通过对用户行为进行分析动态调整系统运行状态,通过集中调度控制、各子单元分布自治、远程协作,实现人机双向交互^[46],供需互动。

4)绿色低碳。三网融合发展促进资源集约利用,提高能源利用效率^[47],能源供应将以可再生能源为主力,交通基础设施绿色化,信息网用能清洁、服务绿色,三网零碳融合,经济社会可持续发展。

3 构建三网融合系统的关键技术

三网融合作为交叉学科、跨界融合的创新发展体系,其实质是能源系统与交通系统作为供需双方的协同规划运行体系,以及信息技术在能源与交通融合领域的创新应用突破。为支撑三网融合系统向社会提供更优质、高效的服务,需面向工程应用需求,顺应三网融合产业发展趋势,逐步完善物理层、感知层、平台层与应用层的架构及建设,进而实现三网广泛连接、深度融合、全面感知、智能交互及协同运行。基于此,本章考虑三网融合发展的工程应用需求和产业融合态势,从物理层、感知层、平台层与应用层4个层面,分析归纳构建三网融合系统的关键技术。

3.1 物理层的关键技术

构建三网融合系统物理层的工程建设需求主要在于能源网、交通网、信息网的联合优化规划,其工程应用需求主要在于维持三网设备终端健康运转、通道网络可靠传输。基于此,本节归纳总结构建三网融合系统物理层的关键技术如下。

1)计及已建网络的三网联合优化规划

现有能源网的规划研究往往只考虑运行约束和

投资回报,并主要集中在综合能源系统规划^[48-49]、输电网、配电网、微电网规划^[50-52]等领域,对象众多、范围广泛。交通网的规划主要集中在交通网络的空间布局与配置^[53-54]。信息网的规划主要集中在无线网的网络规划与路由设计^[55]。针对电力-交通耦合网络的规划研究大多集中于电动汽车充电站规划^[56]、考虑电动汽车的配电网及道路扩建规划^[57-58]等方面。然而,现有规划研究鲜有考虑不同发展阶段的社会需求。

目前,中国能源网、交通网、信息网的基础设施及传输通道已基本建成。已建网络体量庞大,节点繁多,结构复杂。三网融合的网络扩建与新建均须基于已建网络的结构和已建设施的分布展开。

三网联合规划应首先分析区域已建网络与区域用能、出行、通信需求间的供需关系,分析区域发展规划对融合系统扩建和新建的需求。划分能源网、交通网、信息网建设阶段,结合政策指向,预测各建设阶段能源网负荷、交通网交通量、信息网通信需求的时空分布,有预见性地进行三网基础设施及网架结构的多阶段、多尺度发展规划。

针对复杂的已建网络,可利用复杂网络理论,按社团结构、层次结构、节点分类结构等复杂网络结构对已建网络结构展开分析,识别已建网络脆弱分支^[59]与关键节点;基于已建网络与区域的供需关系以及区域发展需求,考虑建设周期投资、运行和维护费用成本,兼顾投资效益与用户效用,针对社区级、城市级、广域级等不同范围的融合系统,分析其不同发展阶段的演变规律,研究能源网-交通网-信息网多阶段联合优化规划方法。

另外,针对三网融合枢纽,在传统变电站的基础上,研究多站融合规划配置方法:站内屋顶光伏面板,以及站内闲置空间数据中心、5G基站、储能的联合规划配置^[60]。

2) 三网连锁故障分析与诊断

为保障三网融合系统物理层的安全稳定运转,须关注三网设备终端的健康状态,以及网络故障的传播。传统电网连锁故障常采用解析法、蒙特卡洛搜索法等对连锁故障进行仿真模拟,或引用事故链模型预测连锁故障风险。对于电网-信息网耦合网络,其连锁故障传播机理研究主要从网络结构特征、网络负荷动态分配特性展开。对于电网-交通耦合网络,文献^[61]建立了多层网络级联失效模型,以刻画充电站故障扰动在电网与交通网间的传播过程。但两网耦合的连锁故障研究仅为初步探索,尚未形成可靠的研究方法体系。

由于实际能源网、交通网、信息网的复杂性,三

网融合系统中的扰动渗透和故障连锁传播的成因及发展过程复杂又多变。针对涵盖能源、交通、信息多网特性的融合系统,传统的连锁故障分析方法应用难度极大。近年来也有较多研究基于复杂网络理论^[62-63]提出单一网络或两网耦合的连锁故障模型。但针对能源-交通-信息融合系统的连锁故障研究仍有待深入。

为此,须进一步深入分析能源、交通、信息网络的关联与交互,建立更符合能源网-交通网-信息网融合实际情况的级联故障模型。在传统连锁故障分析方法的基础上,研究融合系统关键节点和主参数控制方法,分析控制方法的稳定性和有效性,量化分析安全域、故障后安全时间,对关键设备进行故障等效建模,提取其故障特征^[64],进而提出故障诊断技术与故障特性分析方法。

另外,可基于复杂网络理论,研究融合系统的同步性、鲁棒性、稳定性与网络结构的关系,根据复杂网络演化动力学、混沌动力学及信息传播学,分析不同能源子网络、能源与交通网络间随机扰动的渗透发展机理,揭示能源子网络间、能源与交通网之间的连锁故障传播演化规律^[65]。面对极端天气、恶性灾害事件,研究灾害蔓延动力学模型,以预测灾害影响及新的事故状态,增强三网融合系统面对极端天气、恶性灾害事件的分析预测能力。

3.2 感知层的关键技术

构建三网融合系统感知层的工程建设需求主要集中在数据的广泛采集与高速传输,其产业融合需求主要集中在数据的高效交互与有效分析。因此,三网融合系统感知层构建的关键技术主要包括:先进传感及量测技术、新型通信传输架构、统一数据交互标准、大数据分析与应用。

1) 先进传感及量测技术

能源网、交通网、信息网的终端分布点多面广,稳定可靠的数据采集是三网融合系统全面感知、高效运行的必备前提。然而,现有传感器普遍成本较高、功耗较大,且抗干扰能力较弱^[66],难以满足海量终端稳定可靠的数据采集要求。

为保障数据采集的及时性、完整性、准确性,需要突破现有传感器技术,全面挖掘能源网、交通网中光、声、热、电、磁等多类型特征量,研究新型传感机理,开发新型敏感材料^[66]。须测试传感器在多种复杂工况下的抗干扰能力,完善传感器封装工艺,提高其量测可靠性及使用寿命。并且集成量测、通信、边缘计算等功能,研发小体积、低功耗、低延迟、高精度、微取能、运行维护简单的小微智能传感器,实现传感器的云边协同,以满足三网融合系统全面覆盖

的数据采集需求。

2) 新型通信传输架构

三网融合系统服务用户众多,运行数据多源、海量、异构。为保障融合系统及时感知设备状态、顺利实现数据交互,需要高速率、低延迟、隐私安全、兼容性强的通信架构。

为此,须研究海量智能终端接入的通信网络架构,5G及更先进的蜂窝移动通信与电力通信网的融合应用技术,研发高速无线本地通信芯片,充分发挥5G等先进通信技术在应用中的效益,实现三网融合系统的广泛深入连接。

3) 数据统一交互标准

当前三网数据通信传输标准尚未统一,行业间数据共享壁垒难以打破。能源网、交通网,甚至电、热、气等不同能源网均有各自使用的数据模型与通信标准,且不同网络平台的建设规范不同,数据标准杂乱不统一,无法有效共享、集中管理。另外,交通运营、能源供应和信息管理部门、社会相关企业等沟通协作的达成周期长、难度大,行业间数据共享壁垒难以打破。

因此,亟须制定行业权威的三网融合统一数据编码标准,明确数据类型、数据格式、数据质量等要求^[67],建立融合系统各环节信息的信息管理与信息交互标准体系。对于现已投运的系统平台设备,研制高效、便捷的通信协议转换技术。

4) 大数据分析与应用

能源网、交通网、信息网均为巨型动态复杂系统,其规划运行将产生海量数据资源。同时,三网均有上亿用户,用户出行、用能与通信等行为数据体量庞大。而海量数据资源是信息技术时代的新型生产要素,对海量数据资源进行有效挖掘与分析,在融合系统的运行状态评估、预测及优化调度控制中深入应用大数据技术,是三网高效协同、深度融合、智慧交互的重要基础。

为此,须基于人工智能、大数据、物联网、增强现实、云计算等前沿信息通信技术,研制基于能源系统运行及消费大数据^[68]、交通运行大数据^[69]的知识图谱和智能大数据集,为提高能源生产及消费效率、提升交通出行便捷度及通畅度提供数据分析基础。研究图像、文本、声音等不同模式数据的多模动态融合分析技术^[70]。在融合系统规划、运行、安全等各个领域深入应用能源、交通大数据分析技术,以充分挖掘能源网、交通网、信息网及社群用户的数据潜力,有效利用数据价值。

3.3 平台层的关键技术

三网融合系统平台层是应用层的实现基础,面

向产业融合需求,为融合系统的运行与服务提供算法支持、方案参考和软件基础,其核心是能源、交通、信息学科交叉的新技术融合,主要包括三网联合仿真、三网协同运行等。基于此,本节归纳总结构建三网融合系统平台层的关键技术如下。

1) 多时间尺度联合仿真技术

能源网、交通网、信息网均为大规模的复杂非线性网络,热、气等能源网络以及交通网具有慢变特征,电网及信息网络整体呈现快变特征,三网融合系统的时间尺度跨域较大,暂态、中长期动态、稳态等不同时间尺度过程相互穿插、交织,对三网融合的仿真分析提出了极为严苛的要求,传统的分析方法与仿真技术难以适用。

基于广义的网络流建模与分析的方法,对三网融合系统进行多时空尺度耦合的状态估计、稳态计算、动态分析理论,形成三网融合系统多时间/空间尺度耦合的理论建模与分析计算体系。考虑能源网、交通网、信息网不同响应时间,结合云计算等先进信息技术,建立从局部暂态、中长期动态到全局稳态的全过程多时间尺度仿真,从而实现三网融合系统的多时空尺度交互分析与仿真,为研究多时空尺度下能源、交通、信息协同运行控制方法提供可靠的理论支撑及仿真技术基础。

2) 多时空协同优化运行控制技术

目前,能源网优化运行控制主要通过调度可控设备,在保障出力与负荷的实时平衡基础上,通过优化设备出力或用能策略,实现更经济、稳定的运行。交通网优化运行控制主要通过红绿灯控制、列车时刻表优化或路径引导等方式,实现更通畅的运行。能源-交通耦合网络的优化运行控制研究通常以电动汽车作为耦合关键,基于充电价格及道路通行、拥堵费用策略优化,实现耦合网络的优化运行。

而由于能源、交通、信息网络响应时间的差异,三网融合系统的协同优化运行控制需考虑不同时间断面。因此,可结合多时间尺度下的三网交互关系,分析融合系统不同时间尺度下能源负荷、交通流量的空间分布,对融合系统进行多时空的供需预测,预测能源网实时负荷和新能源机组出力、交通网实时负荷分布和需求;基于能源、交通运行大数据的实时采集与分析,评估终端设备健康状态,结合多时间尺度耦合的三网融合系统状态估计、稳态计算、动态分析理论体系,分析能源网实时负载情况及运行工况,评估融合系统运行态势;在全面感知分析与供需预测的基础上,计算评估各类灵活性资源的调度潜力,研究融合系统需求侧管理技术;考虑多元、多端用户的多重不确定性,以提高经济性、可靠性、环保性等

为目标展开协同优化调控,研究融合系统鲁棒随机优化调度方法^[71];基于用户心理分析及行为预测,研究能源-交通协同的多时空优化运行调度策略,经信息网的数据上行与指令下达、控制中心计算调度、分布式管理中心分发指令、终端响应,实现集中调度控制、分布自治的多层级智能运行控制^[72]。

3.4 应用层的关键技术

考虑三网融合系统的产业发展态势,其应用层应以用户为中心,考虑三网不同用户社群需求,基于数据驱动,对用户行为进行科学分析与有效引导,实现用户和系统的双向友好交互。

当前,已有研究多针对单一网络和耦合网络的用户展开行为分析与引导研究,并基于马尔可夫决策过程、概率统计学与蒙特卡洛模拟等方法,刻画用户决策行为,反映用户群体特征,模拟用户用能、出行、通信等需求分布,常采用价格激励手段引导用户行为^[73-74]。也有部分研究运用后悔理论等心理学模型^[75-76],刻画用户选择过程。尽管现有研究对用户行为分析和引导技术进行了探索,但仍难以反映现实中多元、海量用户不确定性对系统运行的影响,其实际应用效果有待进一步验证。

在信息技术发达、数据资源海量的当下,应用大数据、云计算等先进信息技术,将更能贴近实际地对多元社会化行为进行分析。因此,可借鉴社会能源互联网的思想^[77],从行为经济学、社会学、心理学等角度,建立行为特征数据库;基于用户行为数据深度挖掘用户社群的交通出行、用能行为及决策特征,合理分析与预测社群普遍行为规律,以及用能、出行行为的时空分布特性^[78];结合供需双向交互信息,基于数据驱动,预测用户行为并决策;结合融合系统运行过程中所采集的海量用户数据,刻画用户受天气、环境、价格、社会动态等信息影响所产生的行为不确定性,描绘用户受到信息和价格激励的行为响应特征,从而揭示多元社会化行为不确定性对系统运行调度的影响机理。

基于用户行为不确定性的特征描绘与分析,建立用户对信息激励/价格引导的响应行为模型^[79],充分利用目标社群的关键特征,设计科学有效的信息激励措施,将融合系统中的灵活调度资源与用户行为进行良好协同,研究三网融合系统的用户激励引导优化方案,以便及时调整优化运行调度策略,统筹能源网的实时供需平衡以及交通网的最优分布。

4 三网融合分析的关键理论

能源网、交通网、信息网所涉时空范围极广,所

含用户节点众多,三网联合运行后的系统结构和机制更加错综复杂,单一网络的高效稳定运行尚且有诸多待解决的问题,融合系统则面临更显著的复杂性及更多重的不确定性。本章将从三网融合系统架构的物理层、感知层、平台层、应用层,对三网融合分析所面临的学术挑战和关键理论进行阐述。

1)在物理层,联合规划需考虑已建网络的复杂结构,且融合系统作为超大规模的复杂网络,其局部扰动将可能在整个网络中蔓延、传播,导致严重后果。联合规划与故障分析的挑战均在于融合系统的复杂网络建模。

2)在感知层,三网融合系统所采集的数据海量、广泛、高维、异构。三网融合系统的大数据分析与应用是跨学科的、高度复杂的创新融合技术,其关键难点在于海量、高维、异构数据的有效处理与挖掘。

3)在平台层,三网融合将能源、交通、信息从独立分割运行模式转变为共享互动协同模式,这种转变需要兼顾三网的不同运行特性,尤其是不一致的时间尺度,而三网运行时间尺度差异较大。同时,能源网、交通网、信息网的辐射范围极广,均具有不同的空间分布特征。三网的多时空特性显著增加了融合系统联合仿真与协同运行的难度。

4)在应用层,能源网、交通网、信息网均面向用户需求,提供相应服务,对用户决策给予相应反馈。而三网用户特性不一,且每个用户均具有用能、出行及通信的需求,用户面对能源、交通及信息网的决策存在相互影响,显著加剧了用户行为特性分析、用户行为引导的难度。

基于上述分析,本章结合构建三网融合系统的关键技术,分析归纳了三网融合分析的关键理论,其与关键技术间的对应关系如图4所示。

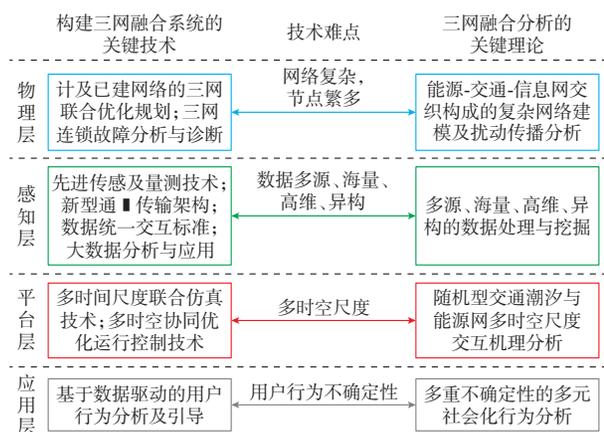


图4 三网融合发展的关键技术及关键理论

Fig. 4 Key technologies and theories for integrated development of three networks

4.1 能源-交通-信息网交织构成的复杂网络建模及扰动传播分析

能源网、交通网、信息网均可以网络流的形式表征运行态势,且均具有自组织、自相似、吸引子、小世界等典型复杂网络特征。三网融合系统的扩建和新建须基于现有网络的结构。而三网已建网络体量庞大,时空分布广泛,社团结构繁多,节点及节点间连接多样,具有多重复杂性。要实现三网联合优化规划,须对现有能源-交通-信息网交织构成的复杂网络进行建模分析。因此,建立统一的复杂网络拓扑模型,以有效表征已建网络的结构类型,建立三网交织的复杂网络拓扑演化模型,为融合系统联合规划提供模型参考。

同时,受环境、政策及各利益主体行为决策等多方面影响,三网通常面临诸多不确定性。这些不确定性所带来的局部扰动可经由复杂网络传播演变至全网性安全事故,例如能源网中的连锁故障、交通网中的相继阻塞、信息网中的病毒传播等。而三网融合后,任一系统中的异常、扰动、故障,均可经由能量流、交通流、信息流及其他系统,甚至可能引发整个融合系统的失稳、失效乃至瘫痪。例如:某一能源网的扰动传递至其他能源网,导致能源网大范围的停电或崩溃;能源网故障向交通网传导,加剧能源网故障造成的社会影响;同时,交通负荷接入能源网所带来的扰动会影响能源网的运行状态。大规模无序充电负荷接入电网,将会引发诸如负荷峰谷差加大、电能质量下降、网损增大等多方面问题^[80]。另外,能源或交通网的物理设施受到信息网络攻击,也会导致大面积停电及交通瘫痪。

通常,复杂网络的扰动传播受网络拓扑影响显著,并且,复杂网络的拓扑结构与系统运行功能及性能紧密相关。因此,建立统一的网络拓扑模型以有效表征融合复杂网络运行性能,分析三网融合系统扰动传播机理,研究能源-交通-信息融合系统传播动力学及演化机制,从而发现传播过程的薄弱环节,预测扰动可能引起的事故,实现及时规避和控制,对融合系统的安全稳定运行具有重要意义。

4.2 多源、海量、高维、异构的数据处理与挖掘

能源网包括电网、热网、气网等多种形式能源网络;交通网包括公路、铁路、水路、航空等多种交通形式;信息网包括光纤、ZigBee、蓝牙等多类通信方式。融合系统庞大且复杂,能源网、交通网运行数据类型参数各异、时间尺度不同、时空不统一。融合系统的数据多源、海量、高维且异构,对其进行识别、处理与挖掘的难度极大。

因此,在多源海量大数据中建立相关分析^[81],

发现并提取关键数据节点信息,挖掘高维异构数据内部隐藏的聚簇结构,通过高阶异构数据联合聚类,实现自动降维,以解决多源、海量、高维、异构数据分析处理的难题,进而实现能源、交通大数据的充分挖掘与有效利用。这是三网在数据融合方面须攻克的关键理论问题。

4.3 随机型交通潮汐与能源网多时空尺度交互机理分析

由于人们的日常生活工作具有明显的时空分布规律,因此,交通流量的时空分布具有明显的周期性,交通流量的早高峰、晚高峰与潮汐现象有着相似特性。另外,交通流量时空分布与城市文化、天气、时节、社会活动等因素紧密相关,易受到人、社群决策与行为的直接影响,具有一定的随机性。随机且可移动的交通用能负荷在时空分布上叠加到供能网络基础负荷,将会引起能量流时空分布的明显改变。同时,供能网络的分布与配置将直接影响交通流的时空分布,其运行状态也会对交通流的时空分布产生直接影响。综上,交通网与能源网间的交互具有复杂的时空叠加特性。

然而,能源网、交通网、信息网运行时间尺度不一致。信息网数据传输极快,时间尺度极短;能源网中,电网供用两端实时平衡,调度控制响应常以毫秒、秒级计算,时间尺度短;交通网拥堵、通畅状态的变化过程一般以分钟、小时级计算,时间尺度长。信息网作为能源网与交通网数据交互的通信基础,数据传输速率越快越好,相比于能源网与交通网,其时间尺度短到可以忽略不计。而能源网与交通网时间尺度的差异显著增加了两网交互关系分析,以及协同运行调度的难度。

因此,借助感知层的态势估计与预测,针对能源网、交通网、信息网多时空交互的现象展开具体分析,研究接入城市电网的电气化交通网的电力电子特性对城市电网的影响机理,研究能源网潮流的时空分布对交通网运行状态的影响机理,揭示能源、交通多时空耦合的交互关系,是攻克三网协同优化运行控制技术的重要前提。

4.4 多重不确定性的多元社会化行为分析

能源网向社会供应电、气、热等不同形式能源,交通网满足社会用户海、陆、空等多种形式的出行,信息网向社会提供有线、无线等多类通信服务,融合系统涉及不同形式的需求与服务,存在海量、多元的社会主体。其中,社会主体包括个体和企业用户等消费者、能源供应商、交通运输运营商、信息服务运营商、制造型和服务型社会企业,以及监管、调度等行政机构。人、企业、机构进行互动形成社会网络。

海量、多元的社会主体,以及不同形式的需求与服务背后是复杂的社会化行为。

用能、出行、通信是人类生产生活的核心需求,社会主体具有能源、交通、信息等多重属性,其多元社会化行为易受到环境、价格、社会动态等影响,具有较强的不确定性,直接影响能源消耗、交通分布及信息交互情况,对融合系统的运行状态影响显著。同时,由于社会主体普遍具有有限理性与利益追求的特征,因此可充分利用目标社群的关键特征,设计科学有效的信息激励措施,实现融合系统与社群的友好交互,将融合系统中的灵活调度资源与用户行为进行良好协同。

因此,如何分析社会主体多元社会化行为的多重不确定性对系统规划运行的影响,同时协调上述利益主体,实现“以人为本”的三网融合系统优化运行,是三网服务融合及产业融合的关键。

5 结语

能源网、交通网、信息网是经济社会的重要基础设施网络,三网长期以来的独立建设与运营管理,存在投入产出比低、资源浪费的短板。随着经济社会的快速发展,这一短板还将更加突出。三网融合发展可显著降低建设及运营成本,促进土地资源高效集约利用;推动能源、交通等传统行业形成新业态、新模式;形成深度融合、智慧协同的局面,与能源转型、交通强国协同增效,向社会提供更友好便捷的能源供应服务、交通出行服务和信息服务。

在当前“碳达峰、碳中和”的战略目标下,三网融合发展可加快推进清洁能源替代,有效推动交通网电能替代,促进先进信息技术赋能能源与交通,提升三网融合运行决策效率,优化决策流程,实现资源共享、复用。可见,三网融合不仅可实现有效的资源统筹,提高资源利用效率,还能在能源生产层面加速脱碳,在能源消费层面加速减排,促进跨部门协调、跨领域合作,促进学科交叉、技术融合创新,共同推动“碳达峰、碳中和”目标下的技术融合创新与成果推广应用。

参考文献

- [1] 杨天宇,郭庆来,盛裕杰,等.系统互联视角下的城域电力-交通融合网络协同[J].电力系统自动化,2020,44(11):1-9.
YANG Tianyu, GUO Qinglai, SHENG Yujie, et al. Urban integrated electric-traffic network collaboration from perspective of system coordination [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 1-9.
- [2] 刘振亚.能源网 交通网 信息网扎实推进“三网”融合发展[N].学习时报,2020-12-09(8).
LIU Zhenya. Energy network, transportation network, and information network promote the integration development of the “three networks” solidly[N]. Study Times, 2020-12-09(8).
- [3] 郭敏晓,杨宏伟.“十三五”能源与环境形势及“十四五”展望[J].中国能源,2021(3):19-23.
GUO Minxiao, YANG Hongwei. “13th Five-Year” energy and environment situation and “14th Five-Year” outlook [J]. Energy of China, 2021(3): 19-23.
- [4] 国家发改委首次明确“新基建”范围[EB/OL].[2020-04-21].
<http://www.mofcom.gov.cn/article/i/jyj/e/202004/20200402957398.shtml>.
The National Development and Reform Commission defines the scope of “new infrastructure” for the first time [EB/OL]. [2020-04-21]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/i/jyj/e/202004/20200402957398.shtml>.
- [5] 刘振亚.建设我国能源互联网 推进绿色低碳转型(上)[N].中国能源报,2020-07-27(1).
LIU Zhenya. Constructing the energy internet of our country, promoting green and low-carbon transition (Part 1) [N]. China Energy News, 2020-07-27(1).
- [6] 马钊.“双碳”目标倒逼新型电力系统建设提速[N].中国能源报,2021-03-22(4).
MA Zhao. “Dual-carbon” targets force the construction of new power systems to speed up [N]. China Energy News, 2021-03-22(4).
- [7] 何正友,向悦萍,杨健维,等.电力与交通系统协同运行控制的研究综述及展望[J].全球能源互联网,2020,3(6):569-581.
HE Zhengyou, XIANG Yueping, YANG Jianwei, et al. Review on cooperative operation and control of transportation and power systems [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 569-581.
- [8] 杨天宇,郭庆来,盛裕杰,等.系统互联视角下的城域电力-交通融合网络协同[J].电力系统自动化,2020,44(11):1-9.
YANG Tianyu, GUO Qinglai, SHENG Yujie, et al. Coordination of urban integrated electric power and traffic network from perspective of system interconnection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 1-9.
- [9] 蒲天骄,陈盛,赵琦,等.能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J/OL].中国电机工程学报[2021-03-11].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201757>.
PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet [J/OL]. Proceedings of the CSEE [2021-03-11]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201757>.
- [10] 李钦豪,张勇军,陈佳琦,等.泛在电力物联网发展形态与挑战[J].电力系统自动化,2020,44(1):13-22.
LI Qin hao, ZHANG Yongjun, CHEN Jiaqi, et al. Development patterns and challenges of ubiquitous power Internet of Things [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 13-22.
- [11] 中共中央国务院印发国家综合立体交通网规划纲要[EB/OL].[2021-02-24].http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm.
The State Council of the Central Committee of the Communist Party of China issued the outline of the national comprehensive three-dimensional transportation network planning [EB/OL].

- [2021-02-24]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm.
- [12] 中国铁路集团有限公司 2020 年统计公报 [EB/OL]. [2021-03-05]. http://www.china-railway.com.cn/wnfw/sjfw/202103/t20210305_113499.html.
Statistical bulletin of China Railway Corporation in 2020 [EB/OL]. [2021-03-05]. http://www.china-railway.com.cn/wnfw/sjfw/202103/t20210305_113499.html.
- [13] 全国城市轨道交通运营里程达 7 545.5 km 去年完成客运量 175.9 亿人次 [EB/OL]. [2021-01-07]. http://www.mot.gov.cn/guowuyuanxinxi/202101/t20210107_3512856.htm.
The operating mileage of urban rail transit in China reached 7 545.5 km, and the passenger volume reached 17.59 billion last year [EB/OL]. [2021-01-07]. http://www.mot.gov.cn/guowuyuanxinxi/202101/t20210107_3512856.htm.
- [14] 2020 年 12 月全国电动汽车充换电基础设施运行情况 [EB/OL]. [2021-01-13]. <https://mp.weixin.qq.com/s/PNs7GvsUNWWwUaGc9fdOCA>.
Operation status of charging and swapping infrastructure for electric vehicles in China in December 2020 [EB/OL]. [2021-01-13]. <https://mp.weixin.qq.com/s/PNs7GvsUNWWwUaGc9fdOCA>.
- [15] 工业和信息化发展情况新闻发布会 [EB/OL]. [2021-03-01]. https://www.miit.gov.cn/gzcy/zbft/art/2021/art_c843d54c61f148878d80ca00fc01f2ab.html.
Press conference on the development status of industry and information technology [EB/OL]. [2021-03-01]. https://www.miit.gov.cn/gzcy/zbft/art/2021/art_c843d54c61f148878d80ca00fc01f2ab.html.
- [16] 王珏.“新基建”时代数据中心的发展 [J]. 中国信息界, 2020 (3): 78-79.
WANG Jue. Data center development in the era of “new infrastructure construction” [J]. Information China, 2020 (3): 78-79.
- [17] FARAHANI S S, VAN DER VEEN R, OLDENBROEK V, et al. A hydrogen-based integrated energy and transport system: the design and analysis of the car as power plant concept [J]. IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine, 2019, 5(1): 37-50.
- [18] MILLER A R, HESS K S, ERICKSON T L, et al. Fuelcell-hybrid shunt locomotive: largest fuelcell land vehicle [C]// IET Conference on Railway Traction Systems (RTS 2010), April 13-15, 2010, Birmingham, UK: 40.
- [19] 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.
- [20] BEDI G, VENAYAGAMOORTHY G K, SINGH R, et al. Review of Internet of Things (IoT) in electric power and energy systems [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 847-870.
- [21] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合: (一) 大数据与电力大数据 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 1-8.
XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking: Part one big data and power big data [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 1-8.
- [22] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合: (二) 应用及探索 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 1-13.
XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking: Part two applications and explorations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 1-13.
- [23] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 503-511.
PENG Xiaosheng, DENG Diyan, CHENG Shijie, et al. Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 503-511.
- [24] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 云计算: 构建未来电力系统的核心计算平台 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 1-8.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cloud computing: implementing an essential computing platform for future power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 1-8.
- [25] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1-9.
LI Licheng, ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, et al. Merger between smart grid and energy-net: mode and development prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9.
- [26] WANG L L, GUI J S, DENG X H, et al. Routing algorithm based on vehicle position analysis for internet of vehicles [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(12): 11701-11712.
- [27] CHEN S T, CHEN Y, ZHANG S Y, et al. A novel integrated simulation and testing platform for self-driving cars with hardware in the loop [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2019, 4(3): 425-436.
- [28] 王珂, 李媛, 杨文涛, 等. 计及路-网-车交互作用的电动汽车充电实时优化调度 [J]. 电力建设, 2018, 39(12): 63-72.
WANG Ke, LI Yuan, YANG Wentao, et al. Real-time optimal charging scheduling for electric vehicles considering interactions among traffic network, distribution system and electric vehicles [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 63-72.
- [29] 邵开池, 穆云飞, 余晓丹, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充电负荷时空预测及其对配电网潮流的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5207-5219.
SHAO Yinchu, MU Yunfei, YU Xiaodan, et al. A spatial-temporal charging load forecast and impact analysis method for distribution network using EVs-traffic-distribution model [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5207-5219.
- [30] 刘洪, 李荣, 葛少云, 等. 基于动态车流模拟的高速公路充电站多目标优化规划 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 56-62.
LIU Hong, LI Rong, GE Shaoyun, et al. Multi-objective planning of electric vehicle charging stations on expressway based on dynamic traffic flow simulation [J]. Automation of

- Electric Power Systems, 2015, 39(24): 56-62.
- [31] 王辉, 王贵斌, 赵俊华, 等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 63-69.
WANG Hui, WANG Guibin, ZHAO Junhua, et al. Optimal planning for electric vehicle charging stations considering traffic network flows [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 63-69.
- [32] WANG X, SHAHIDEHPOUR M, JIANG C W, et al. Coordinated planning strategy for electric vehicle charging stations and coupled traffic-electric networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 268-279.
- [33] 李东东, 段维伊, 林顺富, 等. 实时电价条件下基于用户引导的电动汽车-充电桩匹配策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 74-82.
LI Dongdong, DUAN Weiyi, LIN Shunfu, et al. User guidance based matching strategy for electric vehicle-charging pile in condition of real-time electricity price [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 74-82.
- [34] 孙晓明, 王玮, 苏粟, 等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 191-195.
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [35] 邢强, 陈中, 冷钊莹, 等. 基于实时交通信息的电动汽车路径规划和充电导航策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 534-550.
XING Qiang, CHEN Zhong, LENG Zhaoying, et al. Route planning and charging navigation strategy for electric vehicles based on real-time traffic information [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 534-550.
- [36] 严弈遥, 罗禹贡, 朱陶, 等. 融合电网和交通网信息的电动车辆最优充电路径推荐策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 310-318.
YAN Yiyao, LUO Yugong, ZHU Tao, et al. Optimal charging route recommendation method based on transportation and distribution information [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 310-318.
- [37] LI X C, XIANG Y, LYU L, et al. Price incentive-based charging navigation strategy for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5762-5774.
- [38] MORADIPARI A, ALIZADEH M. Pricing and routing mechanisms for differentiated services in an electric vehicle public charging station network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1489-1499.
- [39] 朱春波, 姜金海, 宋凯, 等. 电动汽车动态无线充电关键技术研究进展[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 60-65.
ZHU Chunbo, JIANG Jinhai, SONG Kai, et al. Research progress of key technologies for dynamic wireless charging of electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 60-65.
- [40] 张献, 金耀, 苑朝阳, 等. 电动汽车动态无线充电强-强耦合模式分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 79-83.
ZHANG Xian, JIN Yao, YUAN Zhaoyang, et al. Analysis of tight-strong coupling mode for dynamic wireless charging of electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 79-83.
- [41] AZAD A N, ECHOLS A, KULYUKIN V A, et al. Analysis, optimization, and demonstration of a vehicular detection system intended for dynamic wireless charging applications [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(1): 147-161.
- [42] AHMAD A, ALAM M S, CHABAAN R. A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 38-63.
- [43] LV C, HU X S, SANGIOVANNI-VINCENTELLI A, et al. Driving-style-based codesign optimization of an automated electric vehicle: a cyber-physical system approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2965-2975.
- [44] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [45] MILLS N, DE SILVA D, ALAHAKOON D. Generating situational awareness of pedestrian and vehicular movement in urban areas using IoT data streams [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(5): 4395-4402.
- [46] 高仕斌, 高风华, 刘一谷, 等. 自感知能源互联网研究展望 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 1-17.
GAO Shibin, GAO Fenghua, LIU Yigu, et al. Prospect of research on self-aware energy internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 1-17.
- [47] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [48] XIAO H, PEI W, DONG Z M, et al. Bi-level planning for integrated energy systems incorporating demand response and energy storage under uncertain environments using novel metamodel [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 155-167.
- [49] HONG B W, CHEN J, ZHANG W T, et al. Integrated energy system planning at modular regional-user level based on a two-layer bus structure [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 188-196.
- [50] LI J, LI Z Y, LIU F, et al. Robust coordinated transmission and generation expansion planning considering ramping requirements and construction periods [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 268-280.
- [51] ZHOU L M, SHENG W X, LIU W, et al. An optimal expansion planning of electric distribution network incorporating health index and non-network solutions [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 6(3): 681-692.
- [52] CHE L, ZHANG X P, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal interconnection planning of community microgrids with

- renewable energy sources [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(3): 1054-1063.
- [53] 姚晓霞, 荣朝和. 我国综合立体交通网规划性质及作用分析 [J]. *城市规划*, 2020, 44(5): 104-110.
YAO Xiaoxia, RONG Chaohe. Analysis on the character and function of integrated three-dimensional transportation network planning in China [J]. *City Planning Review*, 2020, 44(5): 104-110.
- [54] 熊巧. 区域综合交通网络布局优化与决策研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
XIONG Qiao. Research on layout optimization and decision-making of regional comprehensive transportation network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [55] CHEN Q, ZHANG X J, LIM W L, et al. High reliability, low latency and cost effective network planning for industrial wireless mesh networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2019, 27(6): 2354-2362.
- [56] 谭洋洋, 杨洪耕, 徐方维, 等. 基于投资收益与用户效用耦合决策的电动汽车充电站优化配置 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(20): 5951-5960.
TAN Yangyang, YANG Honggeng, XU Fangwei, et al. Optimal allocation of charging station for electric vehicle based on coupled decision of investment benefit and user utility [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(20): 5951-5960.
- [57] XIE S W, HU Z J, WANG J Y. Scenario-based comprehensive expansion planning model for a coupled transportation and active distribution system [J/OL]. *Applied Energy*, 2019, 255 [2021-02-02]. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113782>.
- [58] WEI W, WU L, WANG J H, et al. Expansion planning of urban electrified transportation networks: a mixed-integer convex programming approach [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, 3(1): 210-224.
- [59] WEI X G, GAO S B, HUANG T, et al. Complex network-based cascading faults graph for the analysis of transmission network vulnerability [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(3): 1265-1276.
- [60] 董美玲, 钱学成, 尹燕霖, 等. “多站融合”助力数字新基建的应用场景 [J]. *农村电气化*, 2020(11): 5-7.
DONG Meiling, QIAN Xuecheng, YIN Yanlin, et al. “Multi-station fusion” facilitates the application scenarios of new digital infrastructure [J]. *Rural Electrification*, 2020(11): 5-7.
- [61] 张宇威, 杨军, 吴赋章, 等. 基于电网-交通网耦合的充电站故障传播分析框架 [J]. *电力建设*, 2020, 41(1): 13-22.
ZHANG Yuwei, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Analysis on disturbance propagation of charging station fault considering grid-traffic network coupling [J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(1): 13-22.
- [62] PASQUALETTI F, ZAMPIERI S, BULLO F. Controllability metrics, limitations and algorithms for complex networks [J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2014, 1(1): 40-52.
- [63] MILANOVIĆ J V, ZHU W T. Modeling of interconnected critical infrastructure systems using complex network theory [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5): 4637-4648.
- [64] 何正友, 李波, 廖凯, 等. 新形态城市电网保护与控制关键技术 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(19): 6193-6207.
HE Zhengyou, LI Bo, LIAO Kai, et al. Key technologies for protection and control of novel urban power grids [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(19): 6193-6207.
- [65] HUANG Y X, WU J J, REN W D, et al. Sequential restorations of complex networks after cascading failures [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(1): 400-411.
- [66] 张宁, 马国明, 关永刚, 等. 全景信息感知及智慧电网 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4): 1274-1283.
ZHANG Ning, MA Guoming, GUAN Yonggang, et al. Panoramic information perception and intelligent grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(4): 1274-1283.
- [67] 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.
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.
- [68] 赵俊华, 董朝阳, 文福拴, 等. 面向能源系统的数据科学: 理论与展望 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(4): 1-11.
ZHAO Junhua, DONG Zhaoyang, WEN Fushuan, et al. Data science for energy systems: theory, techniques and prospect [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(4): 1-11.
- [69] 余承其, 张照生, 刘鹏, 等. 大数据分析技术在新能源汽车行业的应用综述——基于新能源汽车运行大数据 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(20): 3-16.
SHE Chengqi, ZHANG Zhaosheng, LIU Peng, et al. Overview of the application of big data analysis technology in new energy vehicle industry: based on operating big data of new energy vehicle [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(20): 3-16.
- [70] 孙影影, 贾振堂, 朱昊宇. 多模态深度学习综述 [J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(21): 1-10.
SUN Yingying, JIA Zhentang, ZHU Haoyu. Survey of multimodal deep learning [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(21): 1-10.
- [71] 许刚, 张丙旭, 张广超. 电动汽车集群并网的分布式鲁棒优化调度模型 [J]. *电工技术学报*, 2021, 36(3): 565-578.
XU Gang, ZHANG Bingxu, ZHANG Guangchao. Distributed and robust optimal scheduling model for large-scale electric vehicles connected to grid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(3): 565-578.
- [72] 何西, 涂春鸣, 王丽丽, 等. 考虑用户行车习惯的电动汽车充电双层控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(3): 64-69.
HE Xi, TU Chunming, WANG Lili, et al. Double-layer charging strategy for electric vehicles considering users' driving patterns [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(3): 64-69.
- [73] JHALA K, NATARAJAN B, PAHWA A. Prospect theory-based active consumer behavior under variable electricity pricing [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3): 2809-2819.
- [74] WANG F, DUAN L J, NIU J W. Optimal pricing of user-initiated data-plan sharing in a roaming market [J]. *IEEE*

- Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(9): 5929-5944.
- [75] 戢晓峰, 连晨希. 基于后悔理论的社交网络分享型交通信息的用户价值研究[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(1): 81-87.
JI Xiaofeng, LIAN Chenxi. A study of user value of traffic information distributed through social network based on regret theory[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36(1): 81-87.
- [76] 李梦, 黄海军. 后悔视角下的多用户多准则随机用户均衡模型[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(5): 1322-1330.
LI Meng, HUANG Haijun. A multi-class, multi-criteria stochastic user equilibrium model under regret theory view[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2017, 37(5): 1322-1330.
- [77] 韦晓广, 高仕斌, 臧天磊, 等. 社会能源互联网: 概念、架构和展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4969-4986.
WEI Xiaoguang, GAO Shibin, ZANG Tianlei, et al. Social energy internet: concept, architecture and outlook [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4969-4986.
- [78] 龙雪梅, 杨军, 吴赋章, 等. 考虑路网-电网交互和用户心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 86-93.
LONG Xuemei, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Prediction of electric vehicle charging load considering interaction between road network and power grid and user's psychology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 86-93.
- [79] 李明洋, 邹斌. 电动汽车充放电决策模型及电价的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 75-81.
LI Mingyang, ZOU Bin. Charging and discharging decision-making model of electric vehicles and influence analysis of electricity price [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 75-81.
- [80] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9.
GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9.
- [81] 梁吉业, 冯晨娇, 宋鹏. 大数据相关分析综述[J]. 计算机学报, 2016, 39(1): 1-18.
LIANG Jiye, FENG Chenjiao, SONG Peng. A survey on correlation analysis of big data [J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(1): 1-18.

何正友(1970—), 男, 通信作者, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要研究方向: 交通能源融合、信息理论在电力系统中的应用。E-mail: hezy@swjtu.edu.cn

向悦萍(1996—), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 电力交通协同交互。E-mail: x_yueping@163.com

廖凯(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力系统稳定分析与控制、新能源电力系统保护与控制。E-mail: liaokai_lk@hotmail.com

(编辑 顾晓荣)

Demand, Form and Key Technologies of Integrated Development of Energy-Transport-Information Networks

HE Zhengyou, XIANG Yueping, LIAO Kai, YANG Jianwei

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Nowadays, China is in a critical period of economic and social transition from rapid development to high-quality development. Advanced information and communication technologies empower traditional industries in energy and transportation. The integrated development of the three networks, i.e., energy network, transportation network, and information network will effectively promote the energy transition and build the powerful transportation country, realizing the green, smart and sustainable development. In this paper, the advantages and demand of the integrated development of the energy network, transportation network and information network are sorted out and analyzed systematically, and the necessity of the integrated development is clarified. The status of the infrastructure construction and the existing technical support for the integrated development of the three networks, and the preliminary attempts in the field of electric vehicle charging services are summarized to discuss the path and the feasibility of the integrated development. The form of the integrated development is analyzed, and the architecture of the integrated system of the three networks is proposed. Moreover, the main characteristics of the integrated system of the three networks are summarized. From the four perspectives of the physical layer, perception layer, platform layer, and application layer of the architecture of the integrated system of the three networks, the key technologies for the development of integrated system are investigated. Finally, the key theories for the integrated analysis of the three networks are discussed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51977180).

Key words: energy network; transportation network; information network; integration of the three networks; energy transition; information and communication technology

