

# 基于文献计量的能源互联网发展研究<sup>①</sup>

周肖贝<sup>②</sup> 赵蕴华 孟浩

(中国科学技术信息研究所 北京 100038)

**摘要** 对 Web of Science 数据库和德温特创新索引(DII)专利数据库中收录的与能源互联网相关的论文和专利数据进行文献计量分析,从基础研究和应用研究等方面系统地探讨了全球能源互联网的发展情况,并提出了多源数据融合和新兴技术不断融入所产生的问题。研究发现,全球能源互联网基础研究成果和应用研究成果数量持续快速增长,中美两国处于全球前列,中国近 10 年来的赶超速度很快,但其基础研究和应用研究成果的含金量还有很大的上升空间,国际市场布局有待拓展;全球能源互联网领域的基础研究方向以电力电子为主,并不断与计算机、通信、清洁能源等进行交叉,而应用研究主要侧重于能源互联网的信息传输、数据处理系统和相关软件。

**关键词** 能源互联网;智能电网;科学引文索引(SCI);德温特;文献计量

## 0 引言

在新一轮科技革命和产业变革的迅猛发展中,大数据、人工智能、5G、云计算、区块链、物联网等数字技术快速发展,推动经济进入数字时代。数字化转型对各类要素重新配置,已成为变革的主旋律。能源互联网以智能电网为核心,是多种能源网交互并存的复杂网络<sup>[1-3]</sup>,它也是互联网思维在能源领域的体现<sup>[4-6]</sup>。在配电网层面,能源互联网融合大量分布式可再生能源和储能装置,具有能量和信息流动的电网结构<sup>[7]</sup>。能源互联网有望颠覆传统单一能源行业的运行结构、市场环境、商业模式、技术体系与管理体制,对于全球工业界而言都是重大挑战。

为了实现我国社会的可持续发展,推动我国经济发展模式的转变,2014 年,习近平总书记强调要积极推动我国能源生产和消费革命,加快实施能源领域重点任务重大举措,2015 年在联合国发展

峰会上倡议构建全球能源互联网,2020 年在联合国大会上宣布我国力争在 2060 年之前实现碳中和。“十四五”是我国全面落实高质量发展要求、加快能源变革转型的关键期,加快我国能源互联网建设,对保障国家能源安全、实现碳中和目标、推动经济高质量发展意义重大。

文献计量是揭示未来趋势的一种重要方法。约在 5~10 年前,国内外学者主要围绕智能电网进行文献计量分析<sup>[8-11]</sup>,近几年国内学者围绕能源互联网也进行了探索<sup>[12-13]</sup>,但数据的时间范围多受到局限,考虑到我国近几年在能源互联网领域发展很快,成果较多,本研究将系统化利用文献计量这一重要手段展开对全球能源互联网发展的研究。

## 1 数据来源和检索结果

学术期刊文献一般记载了学科领域的基本研究成果,为重要的信息源之一。Web of Science 核心合集数据库是获取全球学术信息的重要数据库,收录

① 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(ZD2021-01)资助项目。

② 女,1989 年生,博士,助理研究员;研究方向:重点科技领域监测与分析;联系人,E-mail:zhouxb@istic.ac.cn (收稿日期:2021-02-10)

了12 000多种学术期刊。对该数据库收录的与能源互联网相关的论文数据进行统计,主要从学术论文的逐年分布、国家分布、机构分布、出版物来源和学科类别等方面探讨,以有效分析能源互联网技术领域的科研人员和机构的研发能力和水平。构建期刊文献检索式为:TS = (“smart energy” OR “energy smart” OR “energy internet” OR “internet of energy” OR “smart power grid \*” OR “energy interconnection” OR “smart grid \*” OR “distributed \* energy” OR “energy router \*” OR “active distribut \* network” OR “integrat \* energy system \*” OR “smart power network” OR “intelligent \* energy” OR “smart meter \*” OR “smart electric meter \*” OR “intelligent meter \*” OR “intelligent electric meter \*” OR “ultra high voltage” or “phasor measurement unit \*” or (TS = “digital grid \*” and TS = electric),限定文献类型为 Article,检索日期为2020年9月27日,共检索到科学引文索引(science citation index, SCI)论文16 394篇。

德温特创新索引(Derwent innovation index, DII)提供了全球收录专利引文信息且经过了二次加工,数据可回溯到1963年。对该数据库中收录的与能源互联网相关的专利数据进行统计,从专利申请量及年度变化、专利权人、专利的德温特手工代码等方面分析了全球能源互联网专利的整体产出情况、主要申请机构的专利战略布局情况和重点技术领域。构建专利文献检索式为:TS = (“smart energy” OR “energy smart” OR “energy internet” OR “internet of energy” OR “smart power grid \*” OR “energy interconnection” OR “smart grid \*” OR “digital grid \*” OR “distributed \* energy” OR “energy router \*” OR “active distribut \* network” OR “integrat \* energy system \*” OR “smart power network” OR “intelligent \* energy” OR “smart meter \*” OR “smart electric meter \*” OR “intelligent meter \*” OR “intelligent electric meter \*”) OR (TS = “ultra high voltage” AND IP = H02 \*) OR TS = “phasor measurement unit \*”,专利检索时间2020年9月16日,共检索到14 904件专利。

鉴于2003年“美加814大停电”后,《The Economist》发表的《Building the Energy Internet》一文提出了能源互联网的概念,本文着重分析2004年以来的16 176篇SCI论文数据和14 802件专利。由于专利申请到公开有18个月的滞后期,且德温特数据库录入数据信息也有一定延误,2019-2020年数据仅供参考。

## 2 全球能源互联网期刊文献计量分析

### 2.1 全球能源互联网论文的逐年分布

全球能源互联网SCI逐年论文数量在2009年突破百篇,在此之前缓慢增长,而在此之后则呈快速增长趋势,2014年的论文数量突破千篇,至2019年达到峰值2881篇(图1),目前已处于能源互联网研究的快速成长期。这主要与各国加大对能源互联网的重视、持续深入研究有直接关系。2008年,美国国家科学基金会资助,成立了未来可再生电能输送和管理(future renewable electric energy delivery and management, FREEDM)系统工程研究中心,致力于构建能源互联网;同年,德国在6个城市推出E-Energy能源互联网示范项目,以新型ICT通讯设备和系统为基础,利用先进的调控手段,来应付日益增多的分布式电源与各种复杂的用户终端负荷。2009年,中国正式启动智能电网计划;2016年,国务院、国家发改委以及国家能源局发布《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》《能源技术革命创新行动计划(2016-2030)》《能源互联网行动计划大纲》等多个文件,明确提出要积极推进能源互联网的推广与建设。

### 2.2 全球能源互联网论文的国家分布

全球能源互联网SCI论文主要分布在中国和美国等国家(图1),其论文数量分别为4113篇和3699篇,远高于之后的加拿大等国家,充分证明了中美两国目前在该领域科学研究中的领军地位。2004年至2016年,美国能源互联网的论文数量持续领先于中国,而自2017年以来,该领域中国论文数量开始赶超美国,并保持快速增长。

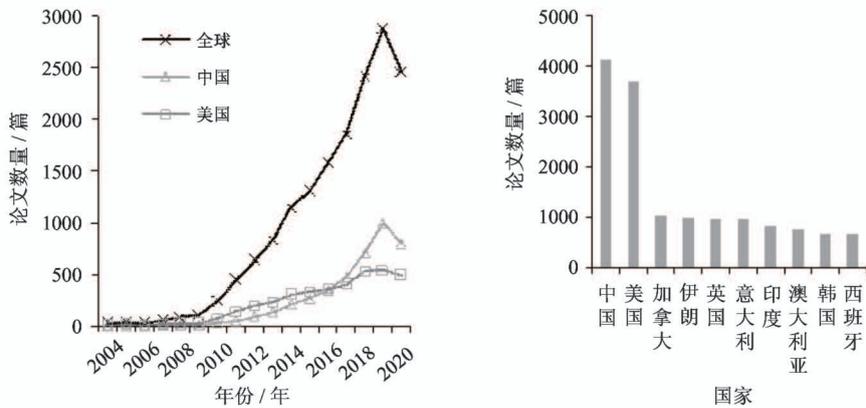


图1 SCI收录的能源互联网论文的年度数量变化(左)和主要国家分布(右)

### 2.3 全球能源互联网论文的机构分布

全球能源互联网SCI论文所属的前10家机构主要为大学和科研院所(图2),它们是能源互联网基础科学研究的主要力量,如美国能源部下属研究机构、华北电力大学、中国科学院、清华大学和印度理工学院系统等。按国别来分,美国机构和中国机

构分别为3个和5个,反映了中美两国在能源互联网技术领域基础研究中的领先地位和研究力量。另外,丹麦奥尔堡大学排名第6,目前丹麦政府已加大了全球分布式能源系统的推广,构建了多元化的新能源与热电联产相结合、节流与开源并举的现代化区域能源体系。

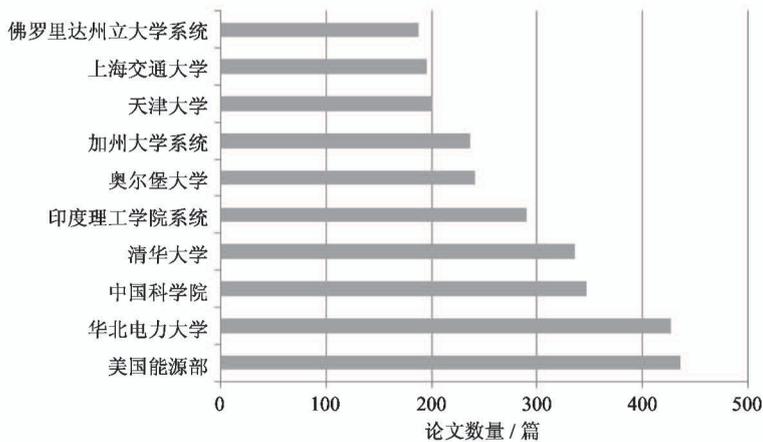


图2 SCI收录的能源互联网相关论文的前10个主要机构

### 2.4 全球能源互联网论文的出版物来源

全球能源互联网SCI论文主要发表在《IEEE Transactions on Smart Grid》《Energies》《IEEE Access》《Applied Energy》《IEEE Transactions On Power Systems》等杂志上(表1)。其中,在《IEEE Transactions on Smart Grid》发表的论文最多,高达1515篇,而且该期刊影响因子也比较高,为8.267。这些主要出版物全部来自于欧美等国家,美国 and 英国各4个,瑞士2个。其中,美国出版物多为IEEE旗下期刊,涉及智能电网和电力系统等;英国出版物多为Elsevier旗下期刊;瑞士Energies期刊为多学科数字

出版机构(Multidisciplinary Digital Publishing Institute, MDPI)旗下的多个开源期刊之一,MDPI总部位于瑞士巴塞尔,已在北京海淀、北京通州、武汉以及西班牙巴塞罗那、塞尔维亚贝尔格莱德等设有分部。

对比中国和美国能源互联网论文所属主要期刊(表2),一定程度上反映出了美国的优秀论文数量较中国多。美国前5名期刊中有3个期刊的影响因子大于6,对应的论文数量高于千篇;中国前5名期刊中有2个期刊的影响因子大于6,但对应的论文数量约为500篇。

表1 SCI收录的全球能源互联网相关论文的前10个出版物来源

序号	来源出版物	2019年度 影响因子	所在国家	论文数量/篇
1	IEEE Transactions on Smart Grid	8.267	美国	1515
2	Energies	2.702	瑞士	1013
3	IEEE Access	3.745	美国	681
4	IEEE Transactions on Power Systems	6.074	美国	672
5	Applied Energy	8.848	英国	629
6	Energy	6.082	英国	553
7	International Journal of Electrical Power and Energy Systems	3.588	英国	524
8	IET Generation Transmission and Distribution	2.862	英国	455
9	Electric Power Systems Research	3.211	瑞士	381
10	IEEE Transactions on Industrial Informatics	9.112	美国	357

注:2019年度影响因子数据来自于Clarivate Analytics官方公布的《期刊引证报告》(Journal Citation Reports, JCR),下同。

表2 SCI收录的中国和美国能源互联网论文的前5个出版物来源

序号	中国的主要来源 出版物	2019年度 影响因子	论文数量 /篇	美国的主要来源 出版物	2019年度 影响因子	论文数量 /篇
1	IEEE Access	3.745	319	IEEE Transactions on Smart Grid	8.267	702
2	IEEE Transactions on Smart Grid	8.267	295	IEEE Transactions on Power Systems	6.074	349
3	Energies	2.702	294	IEEE Access	3.745	130
4	Applied Energy	8.848	207	Applied Energy	8.848	127
5	IET Generation Transmission and Distribution	2.862	145	IEEE Transactions on Industry Applications	3.488	87

## 2.5 全球能源互联网论文的学科类别

从Web of Science学科类别的分类来看(表3),全球能源互联网SCI论文集中在电气电子工程、能

表3 SCI收录的全球能源互联网论文的前10个学科类别情况

序号	学科类别	论文数量/篇
1	电气电子工程	8653
2	能源燃料	4250
3	电信	2165
4	计算机科学信息系统	1947
5	绿色可持续科学技术	984
6	热力学	879
7	自动化控制系统	853
8	工程化学	772
9	环境科学	724
10	仪器仪表	669

源燃料、电信、计算机科学信息系统和绿色可持续科学技术等学科,反映出了全球能源互联网基础研究涉及的学科范围较广,具有偏信息化、智能化、清洁化等趋势,但主体仍是电网自身相关的电气电子工程,相关论文高达8653篇。

## 3 全球能源互联网专利文献计量分析

### 3.1 全球能源互联网专利的逐年分布

全球能源互联网相关专利数量自2004年以来总体呈上升趋势(图3)。2004年至2008年,其专利年申请量整体呈缓慢上升趋势;2009年以来,全球能源互联网专利数量增长速度在加快,2018年达到峰值2386件,这主要得益于美国、欧盟、中国等国家不断重视能源互联网、纷纷制定战略及具体措施、支

持各国能源互联网的建设。

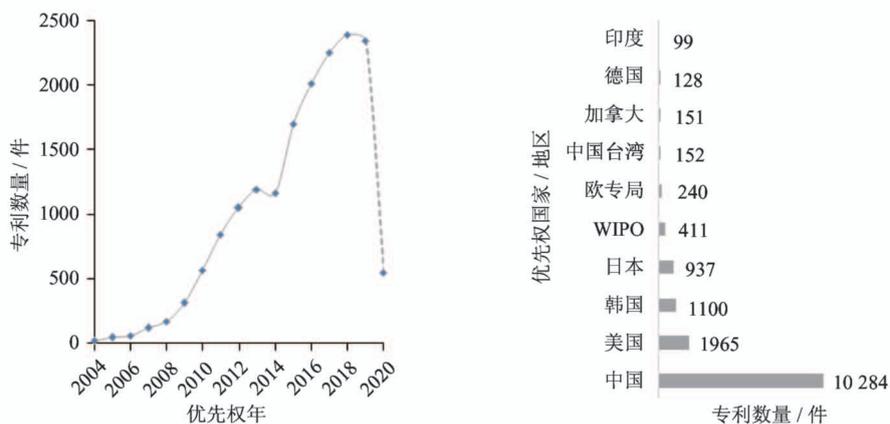


图3 全球能源互联网相关专利的逐年申请量(左)和前10个技术来源国/地区(右)

### 3.2 全球能源互联网专利的区域分布

优先权国为专利申请首次提交的国家,可以粗略地表示专利所属国以及技术创新的来源国。全球能源互联网相关专利主要分布在中国、美国、韩国、日本和世界知识产权组织(World Intellectual Property Organization, WIPO)等(图3),它们是能源互联网研发机构持有专利的重点技术布局之地,有较大的市场潜力和市场价值。WIPO 专利的技术经济价值较高,相关研发机构非常重视对自己知识产权的国际市场保护,通过 WIPO 申请 PCT 国际专利来抢占全球能源互联网的技术市场。

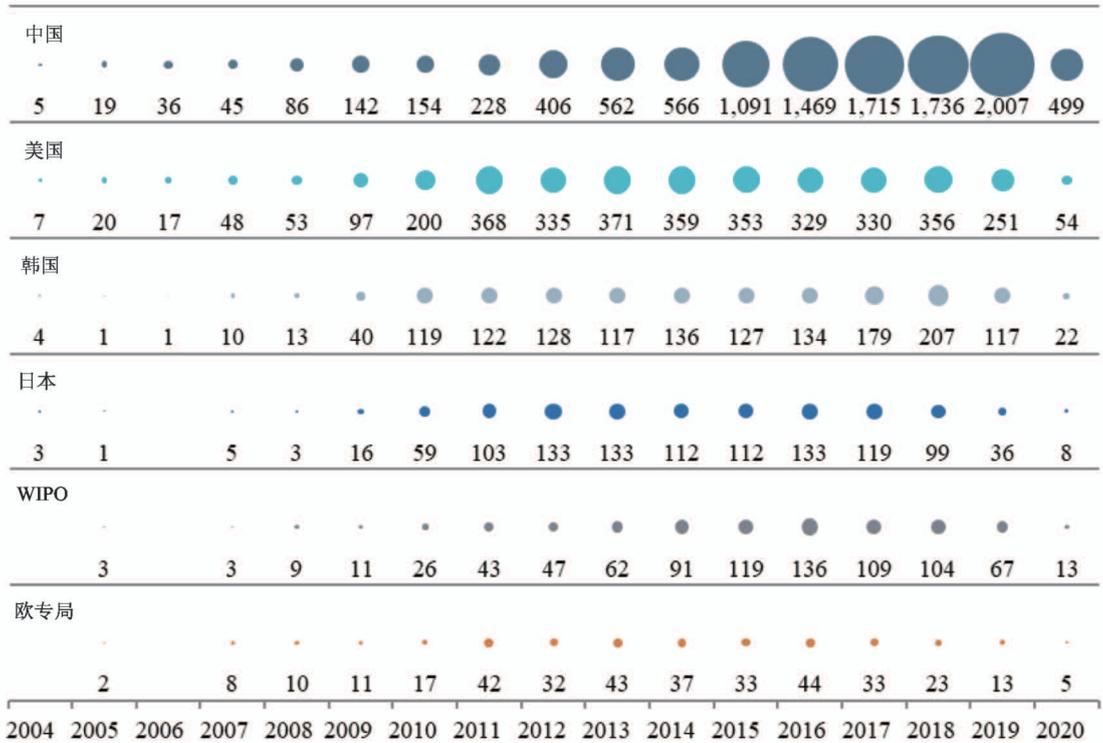
在中国申请的能源互联网相关专利最多,为10284件,但 PCT 国际专利仅为 412 件。在美国申请的能源互联网相关专利为 1965 件,远低于中国,但 PCT 国际专利高达 831 件,在主要国家或组织中排名第一,表明专利的市场价值相对较高。虽然美国专利总申请量并不高,但如此较高数量的 PCT 国际专利说明美国能源互联网专利技术的含金量远高于中国,更注意通过国际专利的申请来保护其在全球范围内的市场和利益。中国能源互联网技术相关专利申请数量之高离不开政府对能源互联网的大力扶持,尤其是近些年来大力发展特高压,重视清洁能源,不断推动能源互联网的发展,然而,中国能源互联网 PCT 国际专利较少,这可能是由于对国际市场的关注度不高,但是更重要的可能在于专利价值含

量还不足以获得国际专利授权,并在相应的国际市场获利。

从全球能源互联网主要技术来源国的专利申请趋势来看(图4),只有中国保持了能源互联网专利的持续性快速增长趋势,且专利数量远高于其他主要技术来源国/地区。2009年至2013年,美国专利数量也实现了快速增长,《美国经济恢复和再投资法案》(2009)要求能源部资助45亿美元用于智能电网投资补助项目(SGIG)和智能电网示范项目(SGDP),对电网进行现代化改造,促使能源互联网相关专利数量不断增长;2013年之后,美国能源互联网专利数量趋于稳定,每年约350件。韩国、日本、WIPO和欧专局的专利数量变化趋势与美国先快速增长后稳定的变化趋势类似,只是专利快速增长的起步年限要晚于美国。

### 3.3 全球能源互联网专利的机构分布

从全球能源互联网专利的主要机构性质来看(图5),全球能源互联网专利的前10个机构包括7个企业和3所高校,以企业为主,如国家电网、南方电网、高通、三星等企业。而从国别来看,中国机构最多,为6家,包括3家企业和3所高校;韩国拥有2家机构,美国和日本各1家机构,全部为企业。可以看出,全球能源互联网专利的研发活动主要在企业中进行,以技术开发和应用为主,产业和市场竞争比较激烈。



注:圆圈下面的数字表示相对应的专利数量(下同)

图4 全球能源互联网专利主要技术来源国发展趋势

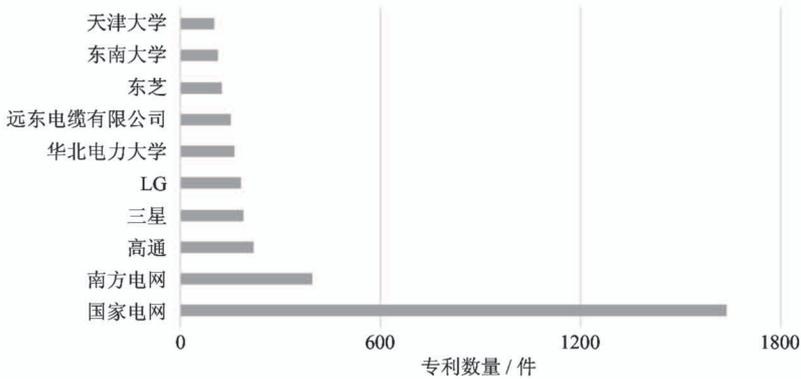


图5 全球能源互联网专利的前10机构分布

对全球能源互联网主要机构的专利申请区域(图6)进行分析,中国的国家电网和南方电网主要在中国申请专利,海外拓展有待加强;而高通、三星和LG等企业在多个国家申请专利,涉及中国、美国、韩国、世界知识产权组织等,国际市场占有度高,具有较强的市场竞争关系,但在中国申请的专利数量相对较少,其中三星和高通在世界知识产权组织申请的PCT国际专利数量很多,专利技术和经济价值较高,更注重对知识产权的国际市场进行保护。

### 3.4 全球能源互联网专利的主要技术方向

德温特专利数据库的特色之一是对每条专利由德温特的标引人员标定德温特手工代码,用于表示具体发明的技术创新点及其应用的技术领域。相比国际专利分类(international patent classification, IPC)代码,德温特手工代码能更为具体和准确地表述专利的技术特征。本研究主要基于德温特手工代码进行全球能源互联网相关专利的主要技术方向分析。

全球能源互联网相关专利的主要技术方向分布在能源互联网信息传输相关的应用程序、多网连接、通信和控制以及电网供电或配电的电路装置、数据

处理系统等(表4),另外,能源互联网相关软件以及测量也是关注点。

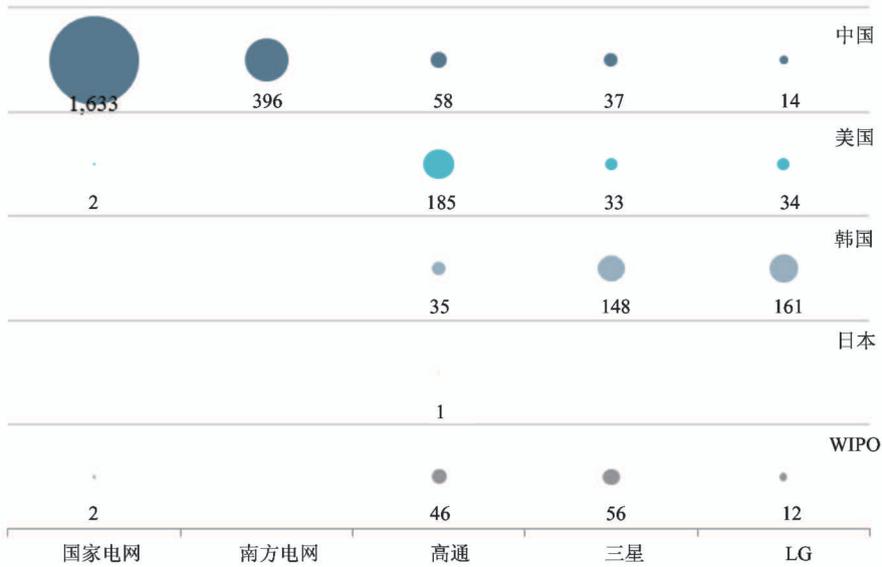


图6 全球能源互联网主要机构专利申请区域分析

表4 全球能源互联网德温特手工代码前10位注释

序号	德温特手工代码	专利数量/件	手工代码注释
1	T01-N01	3025	数字计算机互联网和信息传输相关的应用程序
2	W01-A06	2204	数字信息传输中的交换及交换机之间的连接(包括LAN)
3	T01-N02	2121	数字计算机互联网和信息传输相关的通信和控制
4	X12-H01	2016	供电或配电的电路配置
5	T01-J05	1603	数字计算机中用于管理、商业或信息检索的数据处理系统
6	T01-S03	952	数字计算机软件内容的软件产品
7	T01-J07	882	数字计算机用于工业过程控制的数据处理系统
8	W05-D07	851	报警、信号、遥测和远程控制中对特定系统的控制或测量信号传输
9	W05-D06	821	报警、信号、遥测和远程控制中用于测量或控制信号传输系统的传输介质
10	T01-C03	782	数字计算机输入/输出安排中的与远程站点的数据交换

这些主要技术方向的专利数量(图7)在2008年之前都很少,2009年至2017年,能源互联网信息传输应用程序、多网信息传输的连接以及通信和控制中的信息传输等相关专利数量均呈快速增长趋势,2017年之后数量相对稳定。需要注意的是,能源互联网数据处理系统以及供电、配电的电路装置等的专利数量在2015年之前相对增长较慢,但之后则快速增长,相关专利侧重于能源互联网数据处理系统。近些年随着新兴技术的发展,机器学习、大数

据分析等<sup>[14,8]</sup>新兴技术引入到了能源互联网中,如机器学习可用于预测消费、价格、发电量、未来最优调度、故障检测、自适应控制、规模调整以及在数据泄露期间监测网络入侵者等方面<sup>[15-17]</sup>,大数据分析已成为能源互联网管理系统、控制算法和构建未来能源市场模型的关键功能<sup>[18]</sup>,促使能源互联网多元数据融合逐渐发展,能源互联网的信息传输和数据处理系统的重要性愈发突出。

从主要技术来源国的主要技术方向分布来看

(图8),中国在各主要技术方向的相关专利数量均高于其他主要技术来源国;美国和韩国主要侧重于能源互联网信息传输相关应用程序、多网连接以及

通信和控制等;WIPO 在能源互联网多网信息传输的连接以及信息传输相关应用程序方面的专利数量更多。

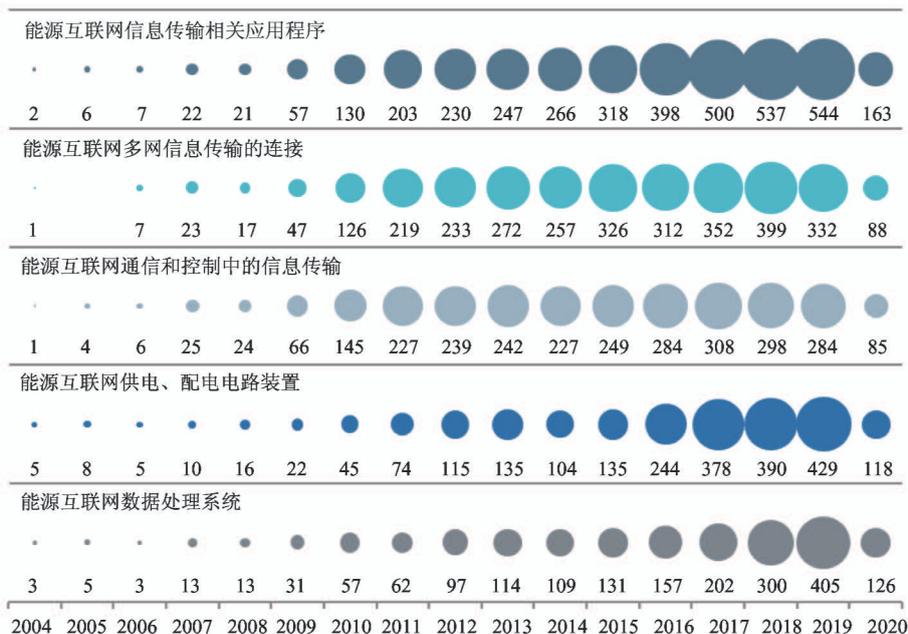


图7 全球能源互联网主要技术方向相关专利的逐年申请量

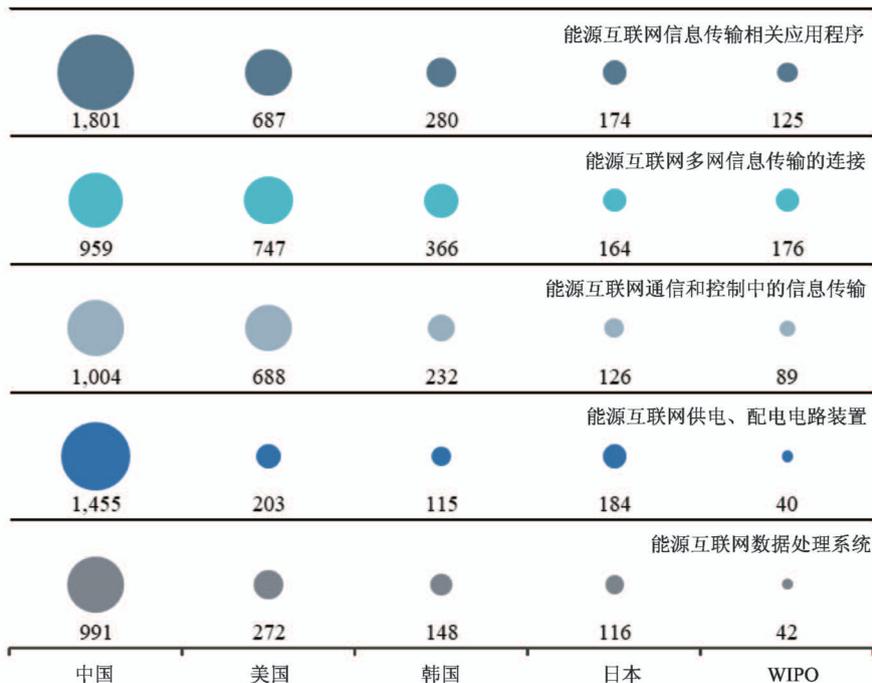


图8 全球能源互联网专利主要技术来源国的主要技术方向

## 4 结论

通过对全球能源互联网进行文献计量分析,得

到如下结论。

(1)从技术发展趋势来看,全球能源互联网的论文数量和专利数量在2009年以来均呈现快速上

升趋势,中国和美国无论是论文数量还是专利数量都在全球处于前列,而且中国近10年来的赶超速度很快,目前论文数量已与美国接近,专利数量远高于美国。然而,美国研究成果多发表于高影响因子的期刊,且PCT国际专利多,专利价值的含金量高。

(2)从机构分布来看,全球能源互联网的基础研究成果主要分布在美国和中国的大学和科研院所,所发表的主要期刊均位于欧美等国家,而专利反映的应用研究成果则主要分布在企业中,不过中国的主要机构多在国内布局专利,这与美日韩的主要机构差异较大。

(3)从主要技术方向来看,全球能源互联网领域的基础研究以电力电子为主,不断发展了与计算机、通信、清洁能源等领域的交叉,而应用研究主要侧重于能源互联网的信息传输(应用程序、多网信息传输连接以及在通信和控制中的信息传输)、数据处理系统和相关软件。

值得注意的是,未来能源互联网系统中将融入如风能、太阳能等新能源以及电力等,可有助于提高整个能源系统的效率,然而,如何有效整合多源数据并进行高性能计算将是一个值得深入探讨的问题。另一方面,新兴技术的引入使得能源互联网受到的网络攻击也在不断增加,如何有效保证能源互联网的数据隐私和网络安全,从而避免引发重大的经济甚至国家安全问题也是一个需要深入研究的方向。

参考文献

[ 1 ] 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

[ 2 ] 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

[ 3 ] 沈沉, 贾孟硕, 陈颖, 等. 能源互联网数字孪生及其应用[J]. 全球能源互联网, 2020,3(1):1-13

[ 4 ] 杨方, 白翠粉, 张义斌. 能源互联网的价值与实现架构研究[J]. 中国电机工程学报, 2015,35(14):3495-3502

[ 5 ] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网:驱动力、评述与展望[J]. 电网技术, 2015,39(11):3005-3013

[ 6 ] 王永真, 张宁, 关永刚, 等. 当前能源互联网与智能

电网研究选题的继承与拓展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4):1-8

[ 7 ] 蒲天骄, 刘克文, 陈乃仕, 等. 基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015,35(14):3511-3521

[ 8 ] 杨青, 王哲, 王科. 智能电网概念类上市公司中国专利统计与分析[J]. 中国发明与专利, 2011(3):20-23

[ 9 ] Chen S, Huang M, Chen D, et al. Detecting the temporal gaps of technology fronts: a case study of smart grid field [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2012, 79(9):1705-19

[10] Chen S, Huang M, Chen D, et al. Identifying and visualizing technology evolution: a case study of smart grid technology [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2012, 79(6):1099-1110

[11] Tuballa M L, Abundo M L. A review of the development of Smart Grid technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59: 710-725

[12] 刘春年, 陈通. 基于共词聚类的能源互联网研究热点及发展脉络分析[J]. 现代情报, 2015, 35(11):127-133, 137

[13] 张希华, 卢姗姗, 苏建军. 全球能源互联网关键技术专利发展现状与对策[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(6):32-36

[14] Hossain E, Khan I, Un-Noor F, et al. Application of big data and machine learning in smart grid, and associated security concerns: a review[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 13960-13988

[15] Sayghe A, Hu Y, Zografopoulos I, et al. Survey of machine learning methods for detecting false data injection attacks in power systems[J]. *IET Smart Grid*, 2020, 3(5):581-595

[16] Esmalifalak M, Liu L, Nguyen N, et al. Detecting stealthy false data injection using machine learning in smart grid[J]. *IEEE Systems Journal*, 2017, 11(3):1644-1652

[17] Liu W, Tang B, Han J, et al. The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 466-472

[18] Zhang Y, Huang T, Bompard E F. Big data analytics in smart grids: a review[J]. *Energy Informatics*, 2018, 1: 1-24

# Research on the development of energy Internet based on bibliometrics

Zhou Xiaobei, Zhao Yunhua, Meng Hao

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

## Abstract

Using the energy Internet data from the Web of Science database and Derwent innovation index (DII) patent database, bibliometric analysis has been done systematically to explore the global energy Internet development with basic and applied research, and raises questions about the integration of multi-sources of energy data and emerging technology. It is found that the number of global energy Internet papers and patents continues to grow rapidly, with China and the United States in the global forefront and China catching up rapidly in the past 10 years, but the value of basic and applied research results in China still needs to be improved, and its layout of the international market needs to be expanded. The basic research direction of global energy Internet is mainly power electronics, which constantly intersects with computers, communications and clean energy, while applied research mainly focuses on information transmission, data processing systems and software.

**Key words:** energy Internet, smart grid, science citation index (SCI), Derwent, bibliometrics