CARDIFF UNIVERSITY
PRIFYSGOL CAERDYDD

ORCA – Online Research @ Cardiff

This is an Open Access document downloaded from ORCA, Cardiff University's institutional repository:https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/163414/

This is the author's version of a work that was submitted to / accepted for publication.

Citation for final published version:

Zou, Yang, Wang, Jianxiao, Dai, Jing, Zhou, Yue , Zhang, Tiance, Qin, Peixin, Xu, Qingyu, Song, Jie and Wu, Jianzhong 2023. Causes, impacts and mitigation measures of European energy crisis. Automation of Electric Power Systems 47 (17) , pp. 1-13. 10.7500/AEPS20230129006

Publishers page: https://doi.org/10.7500/AEPS20230129006

Please note:
Changes made as a result of publishing processes such as copy-editing, formatting and page numbers may not be reflected in this version. For the definitive version of this publication, please refer to the published source. You are advised to consult the publisher's version if you wish to cite this paper.

This version is being made available in accordance with publisher policies. See http://orca.cf.ac.uk/policies.html for usage policies. Copyright and moral rights for publications made available in ORCA are retained by the copyright holders.

基金项目：国家重点研发计划资助（2022YFB2405600）。
Funding: This work is supported by National Key Research and Development Program（No. 2022YFB2405600）.

欧洲能源危机成因、影响与应对措施

邹洋[1]，王剑晓[2]，戴璟[3]，周越[4]，张天策[5]，秦佩欣[3]，许庆宇[3]，宋洁[1,2]，吴建中[4]

(1. 工业工程与管理系，工学院，北京大学，北京市 海淀区 100871；2. 大数据分析与应用技术国家工程实验室，北京大学，北京市 海淀区 100871；3. 清华大学能源互联网创新研究院能源治理研究中心，北京市 海淀区 100089；4. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff, CF24 3AA；5. 电气与电子工程学院，华北电力大学，北京市 昌平区 102206)

摘要：能源安全是国家安全的重要组成部分，在世界格局动荡、气候风险不断升高的当下，保证国家能源安全具有重要意义。2021 年，欧洲爆发能源危机，为各国的政治经济带来巨大挑战。新冠疫情后的经济复苏、极端天气导致的供暖需求增加、欧洲各国激进的能源转型政策以及俄乌冲突导致的能源格局变化是这次能源危机的主要原因。欧洲能源危机对我国在能源转型过程中政策的制定、节奏的把握、科技的创新等方面带来一定启示。本文首先分析近年来欧洲能源危机的现状、成因及影响因素；进而，研判欧洲各国家采取的能源韧性提升措施；综上，归纳总结应对能源危机的解决策略，对我国能源安全战略发展提出政策建议。

关键词：欧洲能源危机；能源安全战略；能源系统；低碳转型；能源供给；极端气候

0 引言

随着全球气候变暖趋势加剧，气候风险水平提高。为加强气候治理，保护人类生存环境，各国应对气候变化的能源政策不断加码，碳达峰、碳中和、清洁化发展道路已经成为国际社会基本共识[1]。然而，当前世界格局动荡，各类“黑天鹅”事件频发，新冠疫情、极端气候、中美博弈、俄乌冲突等事件为世界各国能源安全带来巨大风险，能源短缺已经成为突出的全球性挑战。

能源安全不仅关乎国家经济社会发展，更是推动社会主义生态文明建设和高质量发展的关键，稳定的能源供应是对国家安全的基础保障[2]。在当今复杂多变的国际环境下，我们必须牢牢把握国家能源安全，确保国家长治久安。然而，我国能源安全面临多种挑战和风险。到 2021 年，中国能源生产规模达四十四亿一千万吨目标煤，但对外部能源的依赖性水平较高，能源自给率为 82%；此外，对石油和天然气资源的依赖程度正在逐年增加，这一状况令人担忧[3]。地缘政治风险、全球低碳行动等对全球能源结构造成的冲击增加了我国获得外部能源供应的不确定性。此外，我国仍存在能源地方壁垒、供需错配等原因导致的结构性能源短缺问题，部分地区的阶段性缺电情况仍较为严重，为人民经济生产和生活带来诸多影响[4]。

当前，全球能源面临转型，我国的能源可持续发展正逐步推进[5]。在我国能源发展战略中，推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系是一项关键举措[6]。在 2020 年 9 月，中国明确提出了实施碳达峰和碳中和的双碳增长方向，为了实现社会经济的绿色低碳发展，我国能源系统正面临具有挑战性的转型进程。随着新能源占比不断提升，传统电力系统面临着具有挑战性的转型过程，这一过程既需要可接受的经济成本，又需要保障能源供应的安全稳定。

在低碳能源转型领域，作为全球碳中和进程的主要推动者，欧洲进行了较多能源转型的探索和部署，然而仍未能避免能源危机的发生。2021 年，能源价格暴涨，全球能源供应紧张，给各国的政治经济带来了极大的挑战。由于新冠疫情后，各国经济复苏，加上极端天气导致的供暖需求增加，使得能源市场需求上升。然而，欧洲各国激进的能源转型政策，对俄罗斯能源的高度依赖以及俄乌冲突发生后来自俄罗斯天然气进口的大幅下降等多种因素共同导致了本次能源危机的发生。

欧洲能源危机的发生警示我们：居安思危，强化能源底线思维是必要的。通过对欧洲能源危机的分析和研究，可以帮助我国吸取教训，完善能源安全战略；借鉴国外经验，加强能源风险应对能力；

优化低碳能源转型布局，提升我国能源系统韧性。因此，本文首先分析近年来欧洲能源危机的现状、成因及影响因素；进而，研判欧洲各国家采取的能源韧性提升措施；综上，归纳总结应对能源危机的解决策略，对我国能源安全战略发展提出政策建议。

1 历史上的能源危机

能源市场中价格波动颇为常见，通过价格波动，市场向消费者、生产者以及投资者传递能源商品的稀缺程度，对其行为产生影响。然而，能源短缺和价格激增将对经济社会带来巨大挑战。从 1973 年至 1990 年，全球能源市场经历了三次剧烈波动并以石油价格的剧烈波动为主要特征。

1973 年 10 月，中东爆发战争，随后以沙特阿拉伯为主的阿拉伯石油输出小组成员国宣布，对支持以色列的国家实施石油禁运[7]，从而引发了第一次能源危机。由于这次石油禁运，全球石油价格上涨近 300%，从三美元/桶上涨至近十二美元/桶[8]。这给西方国家带来了巨大的国际收支逆差，最后导致了 1973 至 1975 年战后资本主义社会最严峻的市场经济挑战[9]。1979 年至 1982 年初，伊朗引爆伊斯兰革命，引爆了第二次能源危机。两伊战争的爆发使得伊朗和伊拉克的原油日产量急剧减少，原油价格也从十五美元/桶飙升至最高三十九美元/桶，这一系列经济变动导致西方工业国遭遇了重大的经济衰退。1990 年，第三次能源危机开始，伊拉克由于海湾战争受到了各国的制裁，导致原油供给停滞，沙特阿拉伯油田产出也遭到严重威胁，从而使原油价格从二十一美元/桶飙升至四十六美元/桶[10]。

2 2021 年欧洲能源危机

与历史上三次能源危机均体现为石油危机不同，由于天然气在能源转型过程中对能源供应起到越来越重要的作用，2021 年欧洲能源危机主要体现为天然气价格急剧上涨、屡创新高。

如图 1 所示，2021 年 4 月起，英国国际石油交易所天然气期货结算价格不断攀升，2021 年 12 月达到 453 便士/色姆，短暂下跌后于 2022 年 3 月升至 501 便士/色姆，2022 年 8 月价格升至 570 便士/色姆。受天然气价格影响，国际原油期货价格也不断上升，如图 2 所示，2022 年 3 月布伦特原油期货结算价格上升至最高点，达 128 美元/桶，年同比上涨 87.5%。

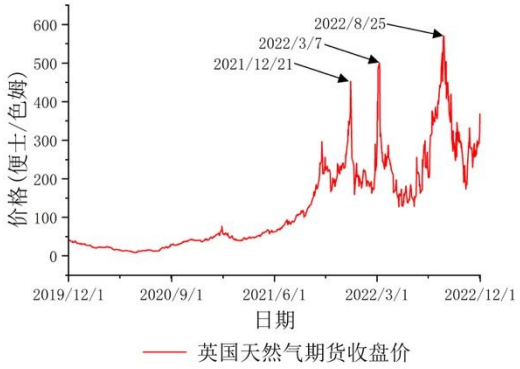

图 1.英国国际石油交易所天然气期货收盘价走势图[11]

Figure 1 Run chart of IPE closing price of natural gas futures

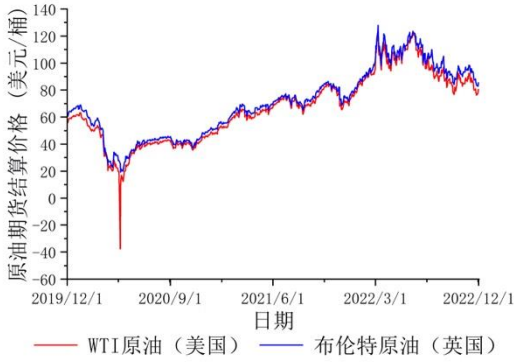

图 2：原油期货结算价格走势图[12-13]

Figure 2 Run chart of crude oil futures settlement price

由于欧洲采用边际定价的电力定价机制，电价与天然气价格直接挂钩，高昂的天然气发电成本使得欧洲电力价格随之飙升，引发电力危机。根据图 3 显示，2022 年 8 月，德国批发电价的月均值达到四百六十六欧元/兆瓦时，年同比增长 459.5%，而法国、意大利和英国的电价分别上涨 70.6%、64.0%和 53.8%。

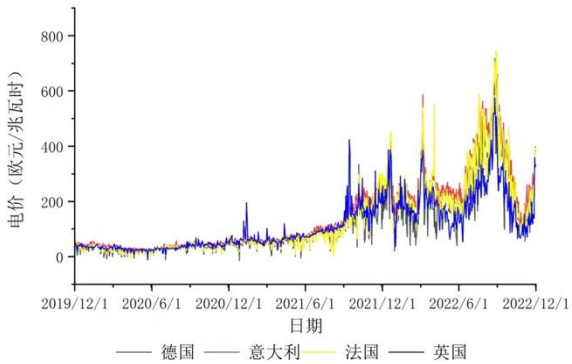

图 3：欧洲多国批发电价走势图[14]

Figure 3 Run chart of European countries wholesale electricity price

3 欧洲能源危机成因

历史上前三次能源危机均有各自的主导诱发因素。然而，本次欧洲能源危机是多种因素共同作用的结果：既受到新冠疫情大规模传播、自然气候变化等因素的影响，也与俄乌冲突、欧洲激进的能源转型策略以及对俄能源过度依赖有关。本文将从需求侧和供给侧分别探究欧洲能源危机的成因。

3.1 新冠疫情后的经济复苏与寒冷的冬季导致欧洲能源需求旺盛

欧洲能源危机主要体现在天然气短缺，天然气需求可分为工业、电力需求，住宅、商业需求两大类。

3.1.1 工业、电力能源需求增加

一般情况下，受经济活动影响，工业、电力能源需求变化与 GDP 增速高度相关。2020 年新冠疫情在全球范围内大规模蔓延，经济停摆、消费萎缩，使得全球大宗商品需求大幅下降，短期内对全球贸易造成巨大冲击[15]，也使得天然气、石油等能源的消费需求相应降低。2020 年全球贸易额减少 3%，天然气需求下降 1.9%[16]。然而，进入 2021 年后，随着疫情限制的放松，世界经济复苏强劲，消费回暖，天然气需求陡然增加。欧盟在 2021 年第二季度 GDP 大幅反弹，同比增长 13.2%。如图 3 所示，从 2021 年第二季度起，欧盟 27 国的电力需求量基本恢复至疫情前水平，电力消耗量达到 2018-2019 同期均值的 99.4%。如图 4 所示，2021 年第二季度欧盟 27 国天然气消耗量达到疫情前 2018-2019 年同时期均值的 114.2%。

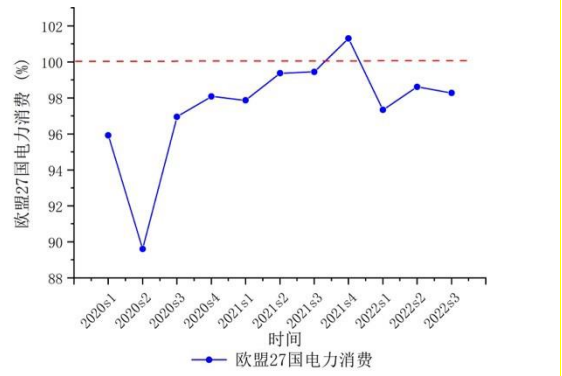

图 4：欧盟 27 国电力消费走势图[17]

Figure 4 Run chart of electricity consumption in EU 27 countries

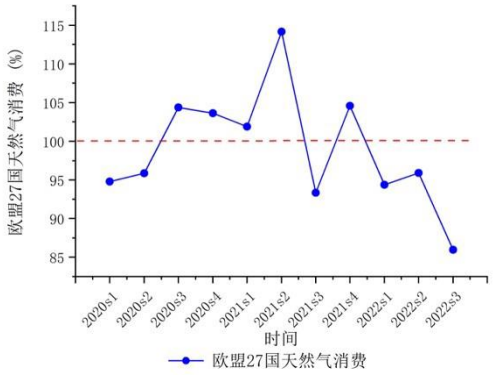

图 5：欧盟 27 国天然气消费走势图[17]

Figure 5 Run chart of natural gas consumption in EU 27 countries

此外，随着液化天然气的贸易增长，天然气市场呈现出日益紧密的区域一体化趋势，亚洲、欧洲对天然气的竞争愈加激烈。为满足经济增长所需要的能源消耗，中国增加了对液化天然气的采购、印度的抗疫封锁政策放宽，也导致天然气的工业需求呈现恢复趋势[18]。亚洲地区消费量的回升使其液化天然气价格不断上涨，在 2021 年 3 月至 2021 年 6 月短短 3 个月内实现价格翻倍。然而，为了消除长期合作中价格固定带来的约束，欧盟减少了长协贸易合同，导致其对冲能源风险的能力大幅降低[19]。

3.1.2 住宅、商业能源需求增加

受季节变化影响，天然气市场具有显著的周期特性，由于北半球国家在每年 11 月到第二年 3 月的冬季取暖需求强烈，该时间段也成为天然气市场的需求旺季。天然气市场在该时间段去库存后，从第二年 4 月开始补充库存并持续到接下来的需求旺季。然而，2020 年至 2021 年之交，欧洲的冬季漫长而寒冷，居民供暖需求格外旺盛。研究发现，欧洲在经历 2020 年疫情导致的天然气库存高位后，于 2020 年至 2021 年冬季取暖季期间快速消耗，并在 2021 年 4 月达到底部，此后未能如期进行库存回补[20]。

3.2 气候变迁、地缘政治等多种因素叠加导致能源供给不足

多种因素叠加导致的天然气等能源供给不足，也是形成本次欧洲能源危机的重要原因。

3.2.1 基础设施投资不足与激进的低碳政策

欧洲能源危机体现了世界能源市场投资长期不足这一深层原因。尽管能源需求呈上升趋势，石油、天然气上游产业 2021 年的投资额仅为 2014 年的一半，对于可再生能源的投资也远远无法满足上述需求[21]。

近年来，尤其在 2020 年新冠疫情期间，石油和天然气价格相对较低，各国政府政策制定者高度重视气候变化、环境保护、低碳能源系统等议题；投资者、生产商担忧未来化石能源需求减少，投资风险增加，降低了对石油、天然气新项目的投资意愿。为适应全球绿色低碳转型的大方向，越来越多的国际油气巨头正加快低碳转型的脚步[22]。由于投资下降，液化天然气市场增长放缓，生产商几乎没有可弥补短期能源短缺的剩余产能[23]。据国际能源署预估，未来对化石能源需求的不确定性较大[24]。除此之外，由于建设能源供应所需基础设施的项目周期较长，当政策制定者、投资者、能源行业本身发生错误判断时，周期性能源短缺和能源价格极端波动的风险大大提升[25]。

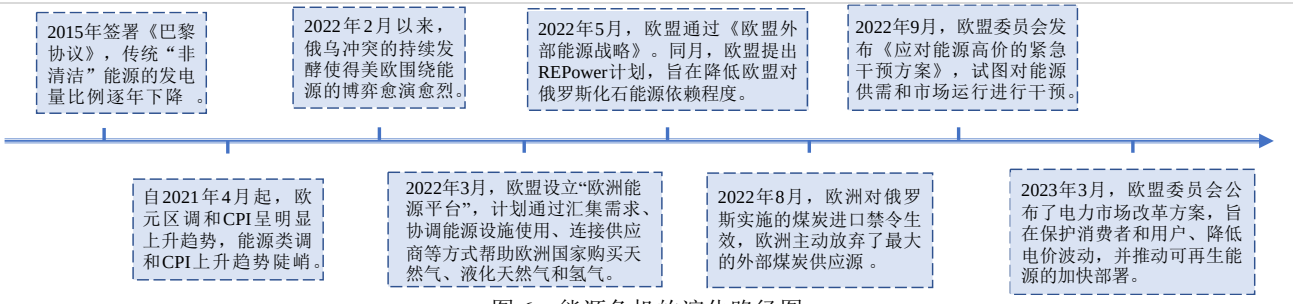

图 6：能源危机的演化路径图

Figure 6 The evolution path of energy crisis

作为全球碳中和进程的主要推动者，欧洲的减碳目标较为激进。由于欧洲能源供给高度依赖外部，为提升自给能力，欧洲国家大力推动传统能源的退出与新能源装机比例的增加。然而，在新能源装机水平能够支撑能源需求之前，过早退出传统化石能源，加剧了能源风险。

3.2.2 气候条件不利于发电

自 2007 年开始，为降低碳排放，欧洲主动对能源发电结构进行改革，鼓励和推广使用风力、水力等绿色能源发电。自 2015 年《巴黎协议》签署以来，欧洲能源结构发生了重大变化，传统“非清洁”能源的发电量比例逐年下降，这一趋势正在加速。2011 年至 2020 年，欧洲煤炭发电比例从 25%降低至 13%。与此同时，随着天然气、风力、水力、太阳能发电占比不断提升，欧洲对清洁能源发电的依赖程度逐年增加[26-28]。西欧大部分地区，特别是德国和荷兰，几乎有 1/5 的电力供应来自风力发电。然而，风力、水力等清洁能源的发电能力稳定性差，不仅具有明显的季节特性，而且极易受气象因素影响，在极端天气下，发电量可能发生剧烈波动[29]。2021 年欧洲风能发电供给同比降低 17%，这是由于欧洲持续的超高压天气，海上风速显著降低，风力条件恶化，导致风力发电大幅减少。此外，风力发电量的下降，间接导致了欧洲国家对天然气和煤炭需求的提升。

欧洲国家夏季气候干燥，水力发电量下降，影响能源供应。高温使得江河、湖泊和水塘的蒸发量增加，水位下降。2022 年 1 月至 7 月，欧盟水力发电量比去年同期降低了约 20%。在法国，核电发电量占总发电量的 70%，而水电则为该国的第二大电力来源。受老旧核反应堆维护、河流水位下降，水温升高等因素的影响，法国的核电发电量显著降低，跌至数十年来最低点[30]。罗纳河谷、阿尔卑斯山区及蓝色海岸地区的水电装机量占法国全国总量约 70%，然而气候的干燥导致水力发电降低 60%。

3.2.3 俄乌战争加剧欧洲能源危机

俄罗斯天然气对外出口积极，境内天然气探明储量约 32 万亿立方米居世界首位，全球十大天然气田中有一半来自俄罗斯。作为世界上天然气产量第一大公司，俄罗斯天然气工业股份有限公司 2020 年天然气产量达四千五百二十七亿立方米[31]。

一直以来，天然气市场是买方市场，价格自由化给欧洲客户带来了巨大的经济利益。然而，高度依赖俄罗斯的能源供应使欧洲国家能源战略存在严重缺陷。2021 年欧洲消耗的天然能源中有高达五分之一来自于俄罗斯[32]。尽管在 2014 年克里米亚事件后，欧洲增加了相关基础设施的建设，以多样化石油、天然气等能源的进口来源，然而，来自俄罗斯的天然气占欧洲天然气总需求的比例从 2005 至 2010 年的年均 30%提升至 2015 至 2020 年的年均 40%，对于部分成员国，该比例接近 100%。因此，在能源危机背景下，俄气占据市场主导位置，欧洲能源安全受到极大威胁。

2022 年 2 月以来，俄乌冲突的持续发酵使得美欧围绕能源的博弈愈演愈烈。美国、欧洲对俄罗斯实施了多轮制裁，俄罗斯也采取相应的反制措施。俄乌冲突爆发前，德国希望通过建设海上天然气管道北溪二号增加从俄罗斯的天然气进口，满足本国及欧洲其他国家的能源需求，然而，俄乌冲突爆发后，德国停止了该项目[33]。这一系列事件的发生使欧洲的政治、经济及未来的能源布局均受到重大影响。欧洲天然气供应受到巨大冲击，电力供应紧张，价格剧烈增长 [34]。

此外，从俄罗斯经乌克兰和波兰管道出口到欧洲的天然气于 2021 年显著降低。2022 年 4 月 1 日，俄罗斯颁布卢布结算令，要求“不友好”国家和地区的客户用卢布购买天然气；4 月 27 日俄方宣布暂停向波兰、保加利亚供气，并关闭亚尔马输气管道，此后欧洲气价一度上涨 20%[35]。自 2022 年 6 月 14 日起，北溪一号输气量降低至正常状态 40%；7 月 26 日起降低至 20%；9 月俄方宣布因检修无限期关闭北溪一号，至此，俄罗斯向欧盟国家出售的天然气总量与此前相比降低 80%。更出人意料的是，9 月 26 日至 28 日，位于丹麦和瑞典附近水域的北溪一号和北溪二号天然气管道先后被发现至少 4 处泄漏，导致其输送能力短期内难以恢复。

俄罗斯对欧洲能源系统的影响不止包括天然气和石油。欧洲的煤炭、铀、化肥，以及对清洁能源转型进程至关重要的矿物和金属也受到严重影响。一直以来，俄罗斯是欧洲最大的煤炭进口来源地，然而，为制裁俄罗斯经济，欧洲对俄罗斯实施了煤炭进口禁令并于 2022 年 8 月生效，欧洲主动放弃了最大的外部煤炭供应源。

4 欧洲能源危机的影响

能源安全不仅关系到经济发展和社会稳定，而且对世界政治、经济格局，乃至军事形势都会产生深远影响[36]。本次能源危机中，居高不下的能源价格对欧洲的社会、经济、环境和国家安全等均形成了深远影响。

4.1 环境污染和可再生能源系统部署

能源短缺和价格上涨对环境和再生能源的部署产生将产生一定影响。天然气的短缺使欧洲不得不用煤炭等非清洁能源代替清洁能源，从而导致了更多的环境污染。这种反向转换的趋势也使全球范围内煤炭的需求量和利润达到创纪录水平。

此外，能源危机导致的连锁反应在一定程度上影响了可再生能源系统的部署，阻碍了低碳转型的进程。全球可再生能源系统的建设和部署需要依赖较为廉价的化石燃料和大规模生产的燃煤工业。然而，能源短缺严重影响了太阳能电池板的制造，导致太阳能和风能等新能源在连续多年成本下降后，迎来首次上涨。

4.2 工业生产受到阻碍

高昂的能源价格对能源密集型公司带来的经济压力是巨大的[37]。一方面，公司经营利润因此而大幅下降；另一方面，由于脱碳进程成本不菲，能源价格的上涨也间接导致工业生产的脱碳进程受到阻碍。

受能源危机影响，部分欧洲公司已被迫停产并考虑迁址。“欧洲天然气需求缩减计划”要求各成员国将天然气使用量降低 15%，由于目前工业用气量占欧盟总天然气使用量的 38%，为达到该目的，欧洲国家需将工业用气降低 40%。截至 2022 年 10 月，德国钢铁产业已减产约 5%，化工产业减产约 8%，化肥行业关闭产能约 70%。有专家认为，受能源危机影响，欧洲经济复苏阻碍重重。

4.3 国家经济通胀

几乎所有产品均可通过供应链、价值链追溯到上游的化石燃料，因此，能源价格的飙升导致了通货膨胀的加剧。

图 7:欧元区调和 CPI 走势图[38]

Figure 7 Run chart of the Eurozone harmonic CPI

2022 年 1 月以来，海运、钢铁、油气等全球多数中上游行业价格纷纷达到历史高位。能源危机迫使欧美能源密集型企业减产甚至停产，降低了相关行业的产能弹性，中上游行业产能受到限制使得全球通货膨胀难以降温。2022 年 10 月欧元区通胀率按年率计算达 10.7%，再创历史新高，能源和食品价格持续飙升，通胀压力居高不下。居民消费价格指数（consumer price index, CPI）是反映居民家庭购买消费商品及服务的价格水平变动情况的宏观经济指标。如图 7 所示，自 2021 年 4 月起欧元区调和 CPI 呈明显上升趋势，能源类调和 CPI 上升趋势陡峭。电费、燃气费及食品开销增加严重削弱了民众消费能力，受能源危机和高通胀影响，欧元区经济增长开始放缓[39]。

4.4 国家安全风险

国家安全与社会稳定同样与能源安全密不可分，这一点在本次欧洲能源危机中得到充分体现。持续飙升的天然气价格可能引发粮食危机。食品生产离不开化肥，生产化肥需要用到由天然气制成的氨。因此，天然气价格飞涨引起了食品价格快速上涨。由于难以承受高昂的天然气价格，一些化肥生产厂家已经停产，粮食和农业组织对可能发生的粮食短缺危机作出警告[40]。能源短缺带来的负面影响不止于此，当粮食安全无法保证时，社会稳定失序和政治动荡的风险极大增加。例如，2011 年初以北非突尼斯小贩自焚为开端的“阿拉伯之春”，与粮食危机所造成的高通胀和高失业关系密切。

由于国际能源市场紧密连接，欧洲能源危机不仅会对其自身产生影响，也将影响欧洲以外的其他国家。高昂的能源价格使全球范围内粮食价格不断上涨，进一步推高了本已不容乐观的通货膨胀。从而可能促进政府治理不善、生活水平下降所引起的民众不满，导致大规模移民、重大动乱甚至暴力冲突事件的发生。

5 欧洲国家采取的应对措施

为了应对能源危机，欧盟以及欧洲各国均提出了多项政策和措施，旨在缓解能源供给短缺。

5.1 短期行政手段干预能源价格

由于能源价格不断上涨，捷克、德国、法国、意大利等多个国家爆发大规模游行抗议活动，要求政府解决能源通胀问题。欧盟各国急需减轻能源价格上行对居民生活带来的负面影响，避免出现政治动荡。通过行政手段直接干预能源价格在短期内抑制价格上涨是有效的。2022 年 9 月 14 日，欧盟委员会发布《应对能源高价的紧急干预方案》，试图对能源供需和市场运行进行干预，9 月 30 日欧洲理事会宣布正式批准有关控制能源价格的紧急措施。然而，欧盟国家对是否直接限制天然气价格看法不一，11 月 25 日欧盟能源部长举行的特别会议中，未能就此前欧盟委员会提议的天然气限价机制达成一致。

已经通过的《应对能源高价的紧急干预方案》具体包括限电、限价和征收暴利税三方面干预措施。限电措施要求欧盟成员国从 2022 年 12 月 1 日至 2023 年 3 月 31 日主动减少 10%用电量，在用电高峰时段减少 5%；限价措施将对欧盟内使用可再生能源、核能、褐煤的发电企业设定每兆瓦 180 欧元的收入上限，这些企业在能源危机期间受益于电价定价机制，获得了超额收益；暴利税政策旨在对石油、天然气、煤炭和炼油部门产生的超额利润征税，用来补贴因电价上涨而受损的家庭和企业。此外，由于欧盟各成员国对于该方案内容分歧较大，各国各自采取行政手段对能源价格进行干预。然而，补税、减税等行政手段导致欧洲国家财政压力巨大，难以长期坚持。

5.2 长期重新赋能欧盟（REPower）计划

针对俄乌冲突导致的能源供应短缺以及全球能源市场价格飞涨问题，欧盟提出 REPower 计划，旨在降低欧盟对俄罗斯化石能源依赖程度，推动新能源转型，帮助欧洲获得安全、廉价和可持续的能源供应。REPower 计划提出的措施包括节能、能源供应多样化、加快推动新能源转型进程、以及为产业能源转型提供资金支持的智慧投资四个方面[41]。

节能是解决当前能源危机、降低电费最快且最有效的方法之一。计划鼓励在短期内通过改变用能行为实现节能，并倡导欧盟成员国采取促进节能行为的财政措施。此外，针对长期节能需要，计划提出，将以 2030 年欧盟温室气体净排放量较 1990 年至少减少 55%为减排目标的“减碳 55 ”一揽子计划中提出的能效目标由 9%提升至 13%。

能源危机发生以来，欧盟努力促进与其他国家的合作，提升能源供应的多元化水平，液化天然气进口量创历史新高，管道天然气输送量也不断提升。2022 年 3 月，欧盟设立“欧洲能源平台”，计划通过汇集需求、协调能源设施使用、连接供应商等方式帮助欧洲国家购买天然气、液化天然气和氢气。2022 年 5 月，欧盟通过《欧盟外部能源战略》，与供应商建立长期伙伴关系，加强能源外交，促进能源多样化供应。未来，欧盟将考虑发展“联合采购机制”，代表成员国进行天然气采购的谈判以及合同签订，并考虑通过立法，要求成员国实现天然气的多元化供应。

长期来看，欧洲将坚持加快推动新能源转型进程，尽早实现能源独立的能源政策。REPower 计划提出，将欧盟 2030 年可再生能源在能源结构中占比的目标由“减碳 55”一揽子计划中提出的 40%提升至 45%，可再生能源装机容量从 1067GW 提升至 1236GW。此外，计划提出多项在工业和交通领域的电气化、清洁化转型措施，为提升清洁能源占比，降低化石能源依赖提供支持。

在产业能源转型投资方面，作为 REPower 计划的核心，欧洲复苏基金将为跨国以及国家能源基础设施的协调规划和融资提供支持。为支持产业转型，提升能源自给能力，REPower 计划到 2027 年增加 2100 亿欧元投资，到 2030 年需达到 3000 亿欧元投资。

5.2.1 节约用能，降低能源需求

在 REPower 计划中，为节约用能，降低能源需求，部分欧洲国家已经部署减少能耗的多项措施，具体包括限制空调、暖气温度，非营业时间关闭照明，缩短供暖时间等。目前，瑞士明确规定，冬季室内暖气温度不得超过 19 摄氏度，热水不超过 60 摄氏度，多次故意违规最高可处罚 3 年有期徒刑；法国要求所有居民降低电器使用频率，否则将推出国家层面的“强制法案”，强制要求居民节约 10%能源；西班牙限制公共场所恒温器，并要求建筑大门保持关闭，晚上十点后关闭商店橱窗照明等。

5.2.2 多元化天然气供给，提升天然气库存

由于自身天然气供给能力较弱，进口比例高达 83%，为获得充足天然气供给，欧洲正努力扩大全球天然气合作伙伴。欧盟通过“欧盟能源平台”帮助成员国以及乌克兰、摩尔多瓦、格鲁吉亚、西巴尔干地区购买天然气、液化天然气和氢气，拓展国际合作伙伴，建立长期合作关系，促进天然气供给多元化。

一直以来欧洲天然气的主要进口来源是管道气，然而跨国供气管道主要建设于俄罗斯和高加索

地区，短期内难以建设其他管道进行输气。俄乌冲突后，为解决天然气短缺的燃眉之急，欧洲增加了最主要来源于美国和北非的液化天然气进口。2022年3月，欧盟委员会和美国发布联合声明，宣布成立了联合能源安全工作组，帮助欧洲摆脱对俄罗斯的能源依赖。此外，意大利分别与阿尔及利亚、埃及、安哥拉和刚果签署了增加天然气供应的协议。2022年6月，欧盟从美国进口的液化天然气首次超过了从俄罗斯进口的管道天然气。然而，液化天然气的运输依赖于船运，并且需要建设相应的接收终端，液化天然气船的运力以及接收终端数量也是对液化天然气的进口重要的限制因素。2022年，液化天然气的船一年期租金均值同比上涨约50%，而德国、波兰等也加快了液化天然气接收站的建设。

为保证欧洲天然气供应，应对寒冬可能带来的能源需求激增，欧盟设定了天然气最低储气率义务法案并于2022年6月投票通过。欧盟要求确保2022年11月前，天然气储气率达80%。截止2022年10月，通过不断加大液化天然气进口等方式，欧洲天然气储气率已达92%。

5.2.3 短期增加化石能源，长期加速能源转型

由于当前欧洲能源危机所带来的巨大压力，多个欧洲国家宣布计划暂缓化石能源的退出，并采取多项措施增加能源供应。例如重新启动已经关闭的燃煤电厂，增加油气运输能力，推进核电建设等。德国Uniper重启了煤发电厂至2023年4月供暖季结束，且允许封存的煤电产能重新入网；英国撤回页岩气开采禁令且计划加大北海油气开发；法国重新发展核电，计划建成6座新一代EPR核反应堆，且将现有核电站使用年限延长至50年以上。

出加大对新能源转型相关领域的投资，而欧洲各国也在俄乌冲突后加速新能源建设的部署。以德国为例，2022年4月，德国发布《复活节一揽子计划》，将 100%电力来源于可再生能源产生的时间点从2050年提前至2035年。

5.3 欧盟新版电力改革方案

欧洲能源危机揭示了欧盟的电力市场机制设计存在缺陷。由于欧盟的电价受到以化石燃料为基础发电成本的高度影响，因而能源价格的飙升使得家庭和企业承担了过高的用电成本。为解决这些问题，欧盟委员会提议对欧盟的电力市场设计进行改革，修订欧盟相关立法，以保证欧洲的能源主权和碳中和目标的实现。

2023年3月，欧盟委员会公布了备受关注的电力市场改革方案，该电力市场改革方案以保护消费者和用户、降低电价波动，并推动可再生能源的加快部署为主要目的。为了在短期市场和消费者支付的电费之间建立缓冲区，减少电费对化石能源价格的依赖，使欧盟电力市场更能抵御未来价格的冲击，增强工业竞争力，提案涵盖一系列措施。具体包括提出电力购买协议，差价合约和远期市场等方案。其中，购电协议是电力客户和发电商之间的商业合同，发电机组同意以一定的价格向客户出售电力。差价合约可以保证发电商从其生产的电力中获得稳定的收入，在双向差价合约中，如果市场价格低于执行价格，则发电商接收差额；如果市场价格高于执行价格，则发电商将偿还差额。远期合约是客户和发电商之间的合同，用于约定未来以一定的价格购买或出售一定数量的电力，从而对冲价格风险，减少对短期价格的依赖。

表1：能源安全指数排名

Table 1 Energy Security Index Ranking

排名	国家	综合指数	评分	能源安全排名	能源公平排名
1	瑞典	AAA	84.3	4	19
4	英国	AAA	82.4	10	12
7	德国	AAA	80.6	6	20
10	美国	AAC	78.5	2	9
29	俄罗斯	ABC	69.6	16	40
40	中国	ABC	65.3	25	55

数据来源：World energy trilemma index 2021 [44]

尽管为了缓解当下能源短缺的燃煤之急，欧洲国家纷纷重启化石能源[42]，一定程度上减缓了碳中和进程，但长期来看，本次能源危机更加坚定了欧洲国家通过加速能源转型，实现能源自给自足，降低对进口化石能源依赖的发展方向。欧盟提出的可再生能源占比目标不断提升，REPower计划重点提

此外，该提案还旨在通过进一步促进可再生能源在电力系统中的整合，改善灵活性解决方案的使用条件来加速可再生能源的部署，逐步减少天然气发电。拟议措施还将提高短期市场的效率，使可再生能源市场参与者有更多的交易机会，提高非化石燃料技术提供的电力系统的灵活性，如储存和需求

响应，最终将促进更便宜的可再生能源的整合，从而为家庭和工业带来更稳定的能源价格。

6 对我国能源安全的启示

应对欧洲能源危机的策略应基于能源安全三个层次，即在保证能源供应安全、能源经济安全和能源环境安全三者之间的协调平衡的前提下，进行能源转型和能源革命。过度关注任何一个方面都会由于连锁反应导致最初设定的目标难以实现。未来亚洲、欧洲对天然气、液化天然气的竞争仍会一直存在。此外，在对未来能源市场和能源供应进行预测和模拟时应当充分考虑各方面因素，对于全球能源市场的紧缩性以及地缘政治带来的能源风险做出更充分的准备，制定出更加完善的应急计划。同时，还要警惕多个极端情况共同存在，例如极端气候和个别能源供应国家发生断供同时发生。短期内对欧洲国家来说，增加液化天然气进口终端和储气设施的建设尤为重要。长期来看，提升可再生能源占比，减少对天然气的依赖也是避免受到难以预估的全球能源市场影响的最有力的手段。

中国作为一个新兴市场国家，对能源需求不断上升，2022 年在全球能源危机的背景下，我国多地因煤炭供应短缺，电力需求暴涨，限电潮发生。如何以合理的价格获得稳定的能源供应，应对环境污染和全球气候变化问题是我国社会经济可持续发展过程中面临的重要课题[43]。因此，本文基于能源系统建设中的关键要素，总结和探讨了欧洲能源危机对我国能源安全问题的启示。

6.1 保障合理能源储备，鼓励倡导节约用能

合理的能源储备是应对能源危机的关键。欧洲能源危机暴露了过度依赖进口能源和缺乏足够的储备措施所带来的风险。因此，我们应该建立健全的能源储备体系，包括战略性储备和应急储备，以应对可能出现的能源供应紧张局面。这样的储备可以为我们提供必要的保障，确保能源的稳定供应，并在紧急情况下提供支持。

在当前全球能源短缺的背景下，我国应立足民生，保障能源供应，避免对居民生活和企业经营带来过多影响。如表 1 所示，我国能源安全指数排名仍有上升空间，其中环境可持续性排名最低。其中，能源安全指数包含安全、平衡和可持续性三个主要维度和国家环境维度，其中，前三个维度覆盖 90%总成绩。国家安全指数通过对上述维度进行评分并给出等级，前 25%的国家等级为 A，25%-50%的国家等级为 B，50%-75%的国家等级为 C，75%-100%的国家等级为 D。

在当前国际能源价格高企的情况下，合理的能源储备是应对能源危机的重要方法。能源储备体系的建设和完善具有缓解用能高峰能源短缺的作用。通过加强政府和企业的能源储备共建，统筹布局，提升跨区域供应保障能力，对煤炭、石油、天然气等多种能源进行战略储备建设将有利于提升能源系统的调峰和应急能力。

此外，欧洲能源危机的经验充分说明，鼓励节约用能既是快速有效降低能耗的措施，也是能源转型过程中不可或缺的重要部分。一方面，可加强对用户侧主观用电行为的改变，另一方面也可通过客观条件实现节能增效，例如对房屋绝缘等级的提升和设备家电和生产过程的节能增效。

6.2 发展多轮驱动、供应安全的新型能源体系

欧洲能源危机与其本身新能源转型过程、极端的气候条件、俄乌冲突地缘政治等因素高度相关。一直以来，欧洲都充当能源转型“领跑者”的角色，然而仍未能避免能源安全问题的发生。与美国、欧洲国家相比，我国能源结构中煤炭和油气占比较高，如图 8 所示，2022 年我国煤炭消费量占能源消费总量的 55.8%，石油占比 19.5%，远高于图中发达国家，我国绿色低碳转型进程任重而道远。

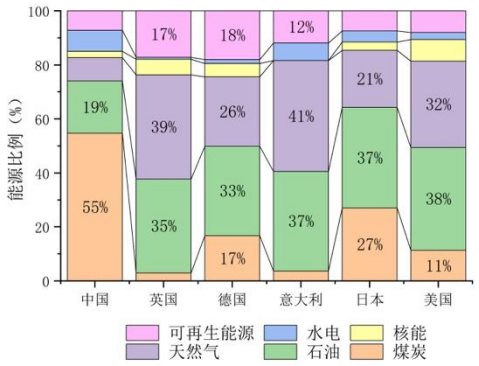

图 8: 2021 年世界多国能源消费结构[45]

Figure 8 Energy consumption structure of countries in the world in 2021

我国亟需发展绿色低碳的新型能源体系，然而在转型的过程中，也应遵循保障能源安全的原则，平稳过渡。近年来，我国电力系统装机结构发生重大改变[46]，新能源装机比例从 2010 年的 3%，增长到 2020 年的 25.3%[47]。大力发展新能源的同时，应对传统能源进行有序退出，提升能源系统韧性，通过多元化的能源供给平稳完成能源转型目标。

除传统化石能源的供应安全外，还应加强保障新能源体系整个产业链的安全，例如保证所需关键矿物质等材料，关键元器件、设备、软件平台等产业链的战略储备安全。此外，发展能源互联网，将能源与信息深度融合，利用先进的电力电子、信息、智能管理等技术采集分布式能量并与能源存储、能

源网络相互连通，从而实现能量的生产者、消费者的连通也是提升能源利用效率的重要方法。

加快多元分布式储能的应用是建设新型能源体系的重要措施。电、氢、气、热等多元分布式储能设施可大幅提升新型能源系统的灵活性，对于调节系统功率，以及突发灾害下的应急调度均具有积极意义。目前，我国分布式储能市场仍存空白，亟须通过市场化运行等措施促进多元分布式储能行业的发展。此外，随着分布式能源的增加，能源互联网的发展也将有利于解决工业能源面临的严峻形势[48, 49]。

6.3 全面推进新型电力系统技术革命

近年来，欧洲能源危机的爆发引起了全球范围内对能源系统的重新思考。面对能源供应紧张和环境压力的双重挑战，欧洲国家积极采取相应措施，推动能源转型和电力系统改革。在这一背景下，我国也认识到了电力系统改革在能源改革中的重要地位。

电力系统改革是我国能源系统改革的重点之一，建设以新能源为主体的新型电力系统，提升整体输配电体系的韧性是能源改革所面临的重要挑战[50]。我国目前仍处于并将长期处于社会主义初级阶段，经济增长潜力巨大，电力需求在很长时间内仍将保持较高速增长[51]。

全面推进以新能源为主体的新型电力系统需要更多的灵活资源和先进控制技术,保障电力系统的安全稳定和经济运行[52-54]。需要注意的是，技术的发展和应用要考虑市场需求和经济性，发展具备充分市场竞争力的技术和装备[55]。此外，在能源转型过程中，应战略性布局和能源技术创新体系，对科学研究和技术创新提供更多支持和包容，为我国在未来能源市场竞争中的技术储备提供有力保证。

在电力系统改革过程中，需要多个方面互相协同。由于新能源随机性和间歇性较大，在大规模接入新能源时，应充分调动能源各环节的灵活性资源，通过利用多源互补、灵活性网络资源、综合需求响应以及多元储能等[56, 57]，以此平抑新能源带来的波动，促进新能源消纳[58, 59]。一方面要在发电侧提升发电效能[60]，提升能源利用效率，加强新能源供应的稳定性，建立适应市场化改革需要的中长期容量保障机制[61, 62]。另一方面，建立适应大规模新能源系统的能源消耗体系，完善需求侧响应机制[63]、建立虚拟电厂、提升区域储能能力等措施，加强电力系统的平衡能力[64]。

随着气象环境变化，极端天气不断增加，城市电网面临着日益严峻的外部安全威胁，建设新型电力系统过程中，应提高电网韧性和抵御外来冲击的能力。通过云技术、5G 升级等建设数字化、智能化的电网，更好地实现电力系统中源网荷储的深度融合和动态平衡。当电网遭受重大灾害或人为攻击时，具有良好韧性的电网能够改变自身状态，降低故障损失，尽快恢复电力供应，提高电网保供能力。高效协调输配网运营商的能源服务[65]，提升整个输配电系统的稳定性[66]，发展可以有效应对极端事件的具有高弹性的电力系统，保障我国能源生产和消费革命的稳步推进[67]。

6.4 构建全国统一的能源市场体系

近年来，欧洲面临的能源供应紧张和价格暴涨问题引发了深刻的思考，而这一危机的成因复杂多样。其中，单一能源供应的过度依赖和缺乏多样化的能源来源是一个关键问题。欧洲国家对俄罗斯天然气的高度依赖以及俄乌冲突的影响导致天然气供应的大幅下降，使得能源市场供应紧张，价格飙升。此外，能源转型政策的激进推进也带来了过渡期间的供需矛盾和能源价格的波动。正因为如此，我们可以借鉴欧洲能源危机的经验，加强我国的能源风险应对能力。

构建合理、高效的能源市场体系是加快能源转型进程、保障能源供应的重要措施。在能源体制革命中，应充分发挥市场本身的资源配置作用，提升企业经营和消费者选择的自主性，保证能源商品和要素自由流动，从而形成有效竞争的能源市场体系[68]。

在对能源市场的管理和运营中，建立安全高效、低碳、清洁的综合能源系统市场服务机制和能源运营模式也是能源体制革命的重要目标[69]。一方面应在考虑能源系统改革和发展的基础上，建立健全的能源法律体系，为能源体制改革和市场机制的建立提供法律保障；另一方面，应加强对能源市场的战略规划引领和运营服务能力，通过合理的战略规划和配套政策以及科学的管理方式引领能源市场高效运行和健康发展。

电力市场机制建设是能源市场体系建设的重要环节，通过加快电力市场改革和建设，推进新能源与储能、碳交易等的结合[70]，有利于促进新能源的发展和利用。在政府的监管下，基于市场竞争建立合理高效的电力价格机制和调度策略，考虑供需关系、碳排放等环境成本，是应对电力系统新能源渗透率不断提升的有效方法[71]。此外，应高度重视机制设计中用户参与市场的积极性提升，充分发挥终端用户参与电力市场的作用。通过促使用户参与需求响应，促进对风能、太阳能等不确定性较强的可再生能源发电的消纳是能够加快建设多能互补的新型电力系统的重要市场机制。

6.5 加强能源国际合作，参与应对气候变化全球治理

借鉴国外经验，特别是欧洲各国采取的能源韧性提升措施，可以帮助我国加强能源风险应对能力。此外，优化低碳能源转型布局，提升我国能源系统的韧性，也是应对能源危机的重要策略之一。综合各方面的经验和教训，完善我国的能源安全战略，确保能源供应的稳定和可持续发展。

在能源领域国际合作方面，我国应积极开展能源外交，拓宽石油、天然气等进口渠道，实现能源供应的多元化，降低单一化能源依赖的风险。此外，还要保障能源运输通道安全，在复杂的国际政治经济形势下，通过开展外交工作，积极与能源资源国建立战略合作关系，稳定能源供应来源。以和平手段解决领土争端，开展国际战略交流合作，避免潜在冲突影响能源运输通道安全。

我国与欧美国家优势互补，应加大与欧美国家在新能源领域的合作力度[72]。一方面，欧美国家新能源战略的实施离不开中国制造，我们应积极参与国际合作，参与境外能源基础设施建设和能源工程技术服务合作[73]；另一方面，在科技装备和能源政策等领域，我们也可以结合自身需求，有选择地对欧美国家的做法进行学习和借鉴[74]；此外，还应积极与国际能源署等机构进行科研合作，开展新能源转型所需关键矿物质产业链的研究。

7 结语

2021 欧洲能源危机是多种因素共同作用的结果。新冠疫情后的经济复苏、冷冬导致的供暖需求增加，过于激进的低碳转型政策以及俄乌冲突导致的能源供给不足使欧洲面临能源短缺。能源价格的飞涨也使得物价飙升，进一步加剧了通货膨胀。居民用电、食品成本上涨，生活水平下降，工厂生产成本急剧增加，甚至不得不停产迁址。这一系列严重的影响再次证实了能源安全的重要性。

本文通过对欧洲能源危机的成因、影响和应对措施进行分析，提出了基于能源供应安全、能源经济安全和能源环境安全三者之间协调平衡的解决策略。在此基础上对我国能源安全战略提出建议，强调发展新能源过程中应保障民生需求，倡导节约用能；注重能源供应安全，建设有强韧性的新型电力系统；并且应积极开展能源领域国际外交与合作。通过能源消费、供给、技术和体制的革命以及积极的能源外交政策，确保我国能源安全的基础上加速能源转型进程。

参 考 文 献

[1] 徐潇源, 王晗, 严正, 等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 2–13.
XU Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 2–13.

[2] 梁壮, 叶旭东, 赵冠一, 等. 我国能源安全形势及推动煤炭保障能源供应的措施[J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(11): 9–13.
LIANG Zhuang, YE Xudong, ZHAO Guanyi, et al. China’ s energy security situation and measures to promote coal to ensure energy supply [J]. Coal Economic Research, 2021, 41(11): 9–13.

[3] 姬强, 张大永. 双碳目标下我国能源安全体系构建思路探析[J]. 国家治理, 2022, 2022(18): 22–26.
JI Qiang, ZHANG Dayong. Exploring the approaches to constructing China’s energy security system under the carbon peak and neutrality goals [J]. Governance, 2022, 2022(18): 22–26.

[4] WU Zhaoyuan, WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, et al. Sharing economy in local energy markets [J/OL]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, early access.

[5] WANG J, ZHONG H, YANG Z, et al. Exploring the Trade-offs between electric heating policy and carbon mitigation in China [J]. Nature Communications, 2020, 11:1-11.

[6] 赵云龙, 孔庚, 李卓然, 等. 全球能源转型及我国能源革命战略系统分析[J]. 中国工程科学, 2021, 23(01): 15–23.
ZHAO Yunlong, KONG Geng, LI Zhuoran, et al. Strategic analysis of global energy transition and China’s energy revolution [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(01): 15–23.

[7] SMITH C. Palestine and the Arab-Israeli conflict [M]. New York: Bedford, 1996.

[8] CBC News Online. The price of oil [EB/OL]. （2006-04-18）[2022-12-14]. https://web.archive.org/web/20070609145246/http://www.cbc.ca/news/background/oil/

[9] 应琛, 刘绮黎. 历史上的三次能源危机[J]. 新民周刊, 2021(45): 44–45.
YING Chen, LIU Qili. Three energy crises in history [J], Xinmin Weekly, 2021(45): 44–45.

[10] TAYLOR J. Discretion versus policy rules in practice [C]. Carnegie-Rochester conference series on public policy, 1993, 39: 195–214.

[11] https://www.theice.com/products/910/UK-NBP-Natural-Gas-Futures/data?marketId=5508884&span=1

[12] https://cn.investing.com/commodities/brent-oil

[13] https://cn.investing.com/commodities/crude-oil

[14] https://tradingeconomics.com/united-kingdom/electricity-price

[15] 邹子昂, 王淳. 欧洲天然气危机的成因、影响及应对[R]. 北京: 中国银行, 2021.
ZOU Ziang, WANG Chun. The Causes, Effects and Countermeasures of European Natural Gas Crisis [R]. Beijing: Bank of China, 2021.

[16] 何枭吟, 王晗, 焦成焕. 新冠肺炎疫情对全球经济的影响及中国对策[J]. 重庆三峡学院学报, 2020, 36(06): 65–72.
HE Xiaoyin, WANG Han, JIAO Chenghuan. The Impact of COVID-19 on global economy and Chinese countermeasures [J], Journal of Chongqing Three Gorges University, 2020, 36(06): 65–72.

[17] https://www.iea.org/data-and-statistics

[18] 路透社. 亚洲需求全面增长，液化天然气市场有望蓬勃复苏 [EB/OL].（2021-06-11）[2022-12-14].
https://www.reuters.com/article/%E3%80%8A%E5%9B%BE%E8%A1%A8%E6%96%B0%E9%97%BB%E3%80%8B%E4%BA%9A%E6%B4%B2%E9%9C%80%E6%B1%82%E5%5%A8%E9%9D%A2%E5%A2%9E%E9%95%BF%EF%BC%8C%E6%B6%B2%E5%8C%96%E5%A4%A9%E7%84%B6%E6%B0%94%E5%B8%82%E5%9C%BA%E6%9C%89%E6%9C%9B%E8%93%AC%E5%8B%83%E5%A4%8D%E8%8B%8F-idCNL3S2NT1YG
Reuters. The LNG market is expected to recover vigorously due to the overall growth of Asian demand [EB/OL].（2021-06-11）[2022-12-14].

[19] 中国石油新闻中心. 欧盟能源改革加速去碳化进程[EB/OL].（2022-01-11）[2022-12-14]. http://news.cnpc.com.cn/system/2022/01/11/030055617.shtml
PetroChina News Center. EU energy reform accelerates decarbonization process [EB/OL].（2022-01-11）[2022-12-14].

[20] 郭朝晖. 欧洲天然气：LNG 弹性不足，补库挑战仍存[EB/OL].（2022-05-23）[2022-12-14].
https://finance.sina.com.cn/stock/stockzmt/2022-05-23/doc-imizmscu2847789.shtml
GUO Zhaohui. European natural gas: LNG elasticity is insufficient, and the challenge of replenishment still exists [EB/OL].（2022-05-23）[2022-12-14].

[21] IEA. World energy investment 2020 [R]. Paris: IEA, 2020.

[22] IEA. The oil and gas industry in energy transitions [R]. Paris: IEA, 2020.

[23] S&P Global Commodity Insights. Risk of major underinvesting in oil and gas is real: Analysts [R]. S&P Global Commodity Insights, 2021.

[24] IEA. World energy outlook 2021[R]. Paris: IEA, 2021.

[25] PARK L, JANG Y, CHO S, et al. Residential demand response for renewable energy resources in smart grid systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 3165–3173.

[26] DHUNGANA D, KARKI R. Data Constrained adequacy assessment for wind resource planning [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 219–227.

[27] SUN Y, LI S, LIN B, et al. Artificial neural network for control and grid integration of residential solar photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1484–1495.

[28] AKRAM M N, LOTFIFARD S. Modeling and health monitoring of DC side of photovoltaic array [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1245–1253.

[29] DELIKARAOGLOU S, MORALES J M, PINSON P. Impact of inter- and intra-regional coordination in markets with a large renewable

component [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5061–5070.

[30] 满凯, 唐颢苏. 遭遇 500 年来最严重干旱，欧洲供电系统如何应对？[EB/OL]. （2022-08-28）[2022-12-14]. http://www.escn.com.cn/news/show-1459564.html
MAN Kai, TANG Haosu. How does the European power supply system cope with the worst drought in 500 years? [EB/OL]. （2022-08-28）[2022-12-14].

[31] 潘寅茹, 葛唯尔. 能源危机席卷欧洲，俄罗斯或因此受益 1250 亿美元[EB]. 第一财经, 2021(2021).

[32] IEA. World energy outlook 2022[R]. Paris: IEA, 2022.

[33] 吴晓慧, 刘政宁. 欧洲能源困境下的滞胀[EB/OL]. （2022-11-16）[2022-12-14]. http://www.takungpao.com/finance/236134/2022/1116/787308.html
WU Xiaohui, LIU Zhengning. Stagflation in the European energy dilemma [EB/OL]. （2022-11-16）[2022-12-14].

[34] 陈弈凯. “北溪 1 号”停供 3 天，欧洲冬储气买家措手不及[N]. 新京报, 2022-09-01.
CHEN Yikai. The supply of "Beixi No. 1" was suspended for 3 days, and European winter gas storage buyers were caught unprepared [N]. The Beijing News, 2022-09-01.

[35] 管娜. 卢布结算令生效满月，欧洲国家要“断气”了[EB/OL]. （2022-05-01）[2022-12-14]. https://finance.sina.com.cn/stock/usstock/c/2022-05-01/doc-imcwipii7419931.shtml
GUAN Na. The full moon of the rouble settlement order comes into effect, and European countries will be out of gas [EB/OL]. （2022-05-01）[2022-12-14].

[36] 林伯强, 黄光晓. 能源金融[M]. 清华大学出版社, 2014.
LIN Boqiang, HUANG Guangxiao. Energy Finance. Tsinghua University Press, 2014.

[37] KWON S, NTAIMO L, GAUTAM N. Optimal day-ahead power procurement with renewable energy and demand response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3924–3933.

[38] https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data

[39] 秦天弘. 能源危机高通胀加剧 欧洲经济前景持续走弱[EB/OL]. （2022-11-10）[2022-12-14]. http://www.jjckb.cn/2022-11/10/c_1310675003.htm
QIN Tianhong. The energy crisis and high inflation aggravate the European economic prospects continue to weaken [EB/OL]. （2022-11-10）[2022-12-14].

[40] GRINSCHGL J. A perfect storm: the causes and consequences of the European energy crisis[R]. Hainburg Donau: AIES, 2022.

[41] European Commission. REPowerEU: a plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green Transition [EB/OL]. （2022-05-18）[2022-12-14]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131.

[42] ANTENUCCI A, SANSAVINI G. Gas-constrained secure reserve allocation with large renewable penetration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 685–694.

[43] LIU W, LUND H, MATHIESEN B V, et al. Potential of renewable energy systems in China [J]. Applied Energy, 2011, 88(2): 518–525.

[44] World Energy Council. World energy trilemma index 2021[R]. London: 2021.

[45] BP. BP statistical review of world energy[R]. London: 2022.

[46] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J/OL]. 中国电机工程学报, 2022: 1–9.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022: 1-9.

[47] 孟繁林, 钟海旺, 夏清. 基于非凸报价的高比例新能源现货市场机制[J/OL]. 电网技术, 2022: 1–9.
MENG Fanlin, ZHONG Haiwang, XIA Qing. A non-convex bidding-based spot market mechanism of high penetration renewable energy [J/OL]. Power System Technology, 2022:

1-9.

[48] CAO Y, REN X, QIU C, et al. Hierarchical reinforcement learning for blockchain-assisted software defined industrial energy market [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(9): 6100–6108.

[49] 舒印彪, 薛禹胜, 蔡斌, 等. 关于能源转型分析的评述 (二)不确定性及其应对[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 1–12.
SHU Yinbiao, XUE Yusheng, CAI Bin, et al. A Review of energy transition analysis part two uncertainties and approaches [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 1–12.

[50] WU Z, WANG J, ZHOU M, et al. Incentivizing frequency provision of power-to-hydrogen toward grid Resiliency enhancement [J/OL]. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2022, early access.

[51] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(02): 369–379.
CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(02): 369–379.

[52] KONG W, DONG Z Y, JIA Y, et al. Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 841–851.

[53] LI P, SHENG W, DUAN Q, et al. A Lyapunov optimization-based energy management strategy for energy hub with energy router [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4860–4870.

[54] 孙宏斌, 潘昭光, 孙勇, 等. 跨界思维在能源互联网中应用的思考与认识[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 63–72.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, SUN Yong, et al. Reflection and understanding of application of transboundary thinking in energy Internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 63–72.

[55] YIN C, WANG J, TANG W, et al. Health-aware energy management strategy toward Internet of Storage [J/OL]. IEEE Internet of Things Journal. 2022, early access.

[56] MUELLER J A, WUNSCH D C, KIMBALL J W. Forecast-informed energy storage utilization in local area power systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1740–1751.

[57] ZHANG T, WANG J, LI G, et al. Characterizing Temporal-coupled Feasible Region of Active Distribution Networks [J]. IEEE Transactions on Industry Applications. 2022, 58(5), 5687 - 5696

[58] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(08): 189–207.
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key Technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(08): 189–207.

[59] YU M, WANG J, YAN J, et al. Pricing information in smart grids: A quality-based data valuation paradigm [J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5):3735 - 3747.

[60] MORSTYN T, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3652–3666.

[61] 陈政, 尚楠, 张翔. 兼容多目标调控需要的新型容量市场机制设计[J]. 电网技术, 2021, 45(01): 198–207.
CHEN Zheng, SHANG Nan, ZHANG Xiang. Design of capacity market mechanism with multi-objective regulation [J]. Power System Technology, 2021, 45(01): 198–207.

[62] ZHANG T, WANG J, XIA Q, et al. Extracting umbrella constraint-based representation of local electricity narkets [J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, early access.

[63] TAO Y, QIU J, LAI S, et al. A human-machine reinforcement learning method for cooperative energy management [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(5): 2974–2985.

[64] DU E, ZHANG N, HODGE B-M, et al. The role of concentrating solar power toward high renewable energy penetrated power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6630–6641.

[65] ZHANG T, WANG J, WANG H, et al. On the coordination of transmission-distribution grids: a dynamic feasible region method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022: 1–11.

[66] AGGARWAL R. 人工智能及其在含可再生能源电源的电网安全中的应用(英文)[J]. 电网技术, 2007(20): 46–54.
AGGARWAL R. Artificial intelligence and its application in network security for power networks with penetration of renewable energy-based generation [J]. Power System Technology, 2007(20): 46–54.

[67] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(09): 2735–2745.
BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(09): 2735–2745.

[68] WANG P, WANG J, JIN R, et al. Integrating biogas in regional energy systems to achieve near-zero carbon emissions [J]. Applied Energy, 2022, 322: 1-15.

[69] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(07): 1893-1904+2205.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(07): 1893-1904+2205.

[70] JIANG K, WANG P, WANG J, et al. Reserve cost allocation mechanism in renewable portfolio standard-constrained spot market [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(1): 56-66.

[71] ZHU Z, HU Z, CHAN K W, et al. Reinforcement learning in deregulated energy market: a comprehensive review[J]. Applied Energy, 2023, 329: 120212.

[72] HAN B, BOMPARD E, PROFUMO F, et al. Paths toward smart energy: a framework for comparison of the EU and China energy policy[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 423–433.

[73] ZHANG T, WANG J, ZHONG H, et al. Soft open point planning in renewable-dominated distribution grids with building thermal storage [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, early access.

[74] CHEN L, WANG J, WU Z, et al. Communication reliability-restricted energy sharing strategy in active distribution networks [J]. Applied Energy, 2021, 282: 1-14.

Analysis and Enlightenment of European Energy Crisis

ZOU Yang[1], WANG Jianxiao[2], DAI Jing[3], ZHOU Yue[4], QIN Peixin[3], XU Qingyu[3], SONG Jie[1,2], WU Jianzhong[4]

(1. Department of Industrial Engineering and Management, School of Engineering, Peking University, Haidian District, Beijing 100871, China; 2. National Engineering Laboratory for Big Data Analysis and Application Technology, Peking University, Haidian District, Beijing 100871, China; 3. Energy Governance Research Center, Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100089, China; 4. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff, CF24 3AA)

Abstract: As an emerging zero-carbon secondary energy, hydrogen is gradually becoming a consensus solution for the global energy transition and development driven by low carbon. Hydrogen is of great significance to promote the transition of energy system and support energy security of China. In order to further promote the in-depth integration of hydrogen system and electricity system, and support the development of a high proportion of renewable energy in China, forms and key technologies of integrated electricity-hydrogen system are studied

in this paper. Firstly, the technical framework of integrated electricity-hydrogen system is constructed. Then, starting from integration technologies of production-storage-transmission-utilization of the hydrogen supply chain and key supporting technologies of hydrogen for typical scenarios of electricity system, the forms of integrated electricity-hydrogen system supporting energy security of China are analyzed. Finally, problems in the development of the current integrated electricity-hydrogen system are expounded and relevant policy suggestions are given.