

# 中国城乡能源供给系统的低碳途径

江亿, 胡珊\*

清华大学建筑学院建筑节能研究中心, 北京 100084

**摘要** 城乡能源供给系统指为建筑和工业生产提供电力、热力和燃料供应的供给系统, 包括输配系统、中间转换环节、终端用能和调控。讨论了在零碳情境下新型电力系统和热力系统的结构、特点和调控手段, 以及实现零碳能源后燃料系统的走向。在给出未来零碳能源供给系统目标的基础上, 按照3个时间节点讨论了各个时期为实现这一零碳目标所要完成的任务, 并提出了实现零碳能源供给系统的路径规划。

**关键词** 低碳; 能源供给系统; 新型电力系统; 集中供热

党的二十大对实现“双碳”目标做出最新战略部署, “双碳”目标在能源领域就是实现化石能源系统向零碳能源系统转型的能源革命, 是主要依靠风、光、水、核电力和生物质燃料这些零碳能源替代目前的燃煤、燃油和燃气等化石能源的能源转型。中央明确要“先立后破”, 要在保证社会发展和经济增长的前提下实现能源转型。因此, 必须明确未来的零碳能源系统的结构, 给出能源转型的最终目标, 并且在此基础上制定转型路径, 明确路线图、时间表。

能源革命涉及能源生产、能源转换和输送、能源终端消费3个环节的全过程。为最终的能源消费提供可靠的能源供给是能源系统的最终目的。目前一般把能源终端消费按照其性质分为工业、建

筑和交通3大领域。而工业生产又根据其生产过程的用能特点分为流程工业和非流程工业。冶金、有色、建材、化工等属于流程工业, 化石燃料在这些生产过程中不仅作为燃料, 同时也作为生产原料进入部分生产流程, 实现零碳目标意味着对这些生产过程进行彻底的变革。而机电、电子、轻工业等诸多行业属于非流程工业, 其生产过程的能源消费仅是电力、热力和燃料。建筑与交通的用能特点与非流程工业很相似, 支撑建筑运行的能源是电力、热力和燃料, 而交通运行用能则主要是电力和燃料。化石燃料燃烧必然释放二氧化碳, 因此未来能源系统中的零碳燃料只能源自生物质燃料或由零碳电力通过电解水制取的氢燃料。中国生物质能源的资源总量有限, 而氢及氨的合成燃料成本都很高,

收稿日期: 2023-06-27; 修回日期: 2023-07-27

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2023-XBZD-07); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(7221101340); 清华大学自主科研计划(2022THZWY06)

作者简介: 江亿, 中国工程院院士, 教授, 研究方向为城乡能源系统节能低碳, 电子信箱: jiangyi@tsinghua.edu.cn; 胡珊(通信作者), 助理研究员, 研究方向为建筑节能低碳, 电子信箱: hushan@tsinghua.edu.cn

引用格式: 江亿, 胡珊. 中国城乡能源供给系统的低碳途径[J]. 科技导报, 2023, 41(16): 6-22; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.16.001

因此在非流程工业、建筑运行和交通运行中都需要尽可能减少对燃料的需求,用电力或集中供给的热量替代燃料的需求,在这3个领域尽可能地实行全面电气化。这样,为了实现能源的零碳转型,就需要完成如下任务:(1) 电力系统的零碳化,也就是建设新型的零碳电力系统;(2) 热力系统零碳化,为非流程工业、建筑运行提供其所需要的热量;(3) 零碳燃料的来源、制备和转换;(4) 流程工业的流程再造,通过改变流程实现零碳生产;(5) 非流程工业、建筑运行、交通运行用能方式的转变,尽可能减少其对燃料的依赖。

此外,中国农村具有巨大的空间资源和生物质材料资源,在未来的零碳能源系统中将从目前的能源消费者转为能源的供给者,为零碳能源系统起到突出的贡献,因此农村新型能源系统的建设也可作为能源转型中的重要任务之一。本文暂不讨论用能过程的转型任务,作为城乡能源供给系统,主要讨论上述任务中的如下4个任务:(1) 新型电力系统的建立;(2) 新型热力系统的建立;(3) 零碳燃料供给;(4) 农村新型能源系统的建设。

## 1 新型的零碳电力系统

按照中国工程院<sup>[1]</sup>、中国科学院<sup>[2]</sup>分别完成的零碳发展咨询研究成果,不包括为了制备热力所需要的电力,中国到2050年全社会需要的电力总量为13万亿kW·h,表1为需求侧的构成。

表1 中国用电量预测

消费领域	2021年用电量/ 万亿kW·h	2050年用电量/ 万亿kW·h
工业	5.5	6.5
建筑运行	2	4
交通	0.5	2
其他	0.5	0.5
总计	8.5	13

注:2050年数据不包括热力供给需要的电力。

为了满足这一电力总量需求,表2为电源侧结构。其中核电是未来的重要零碳电源,中国目前核电装机约0.5亿kW,年发电总量约0.4万亿kW·h。

表2 中国电源结构和年发电量预测

电源结构	2021年		2050年	
	发电功率 /亿kW	年发电量 /万亿kW·h	发电功率 /亿kW	年发电量 /万亿kW·h
核电	0.5	0.4	2	1.5
水电	4	1.5	5	2
风电、光电	7	1	74	9.5
火电	13	5.6	7	1.5
总计	24.5	8.5	88	14.5

尽可能建设核电满足电力系统的基础负荷需要,是零碳电力系统的重要举措。按照目前只能在沿海建设核电的考虑,把沿海可以建设核电的厂址统一规划,并考虑避免核电排热造成对近海海水的热污染,中国核电未来可发展的上限为2亿kW,全年可提供的电力为1.5万亿kW·h。水电是灵活可调节的零碳电力。除西藏雅鲁藏布江流域外,中国水电资源开发利用已达到90%以上,目前的装机容量已达到4亿kW,年发电量在1.5万亿kW·h左右<sup>[3]</sup>。今后再全面开发雅江流域1亿kW,水电全年可提供的电力不超过2万亿kW·h<sup>[4]</sup>。这样,按照13万亿kW·h的电力需求计算,还有9.5万亿kW·h的电力缺口,需要由风电(包括海上风电)、光电来提供。按照风电、光电平均年发电小时为1300h计算,需要风电、光电总的装机容量74亿kW。中国到2022年风电、光电总的装机容量为7.4亿kW,这就意味着风电光电装机要增加到目前的10倍。风电、光电的装机容量要达到电力总装机量的80%以上,提供的电量将占到中国用电总量的60%以上。这就导致电力系统必须面对和解决3大难题:风光电的安装空间;风光电变化与用电负荷的不一致;由于电源侧缺少足够的可调节电源而出现的系统稳定性。

### 1.1 大规模发展风电光电的空间资源

与火电、核电不同,风电、光电属于低密度电源。由于它依靠自然界的太阳辐射和风力,所以必须有足够的空间才能产生所要求的电力。一般情况下估算,风光、电可提供发电功率为100W/m<sup>2</sup>,74亿kW的风电、光电就需要1.23亿亩国土空间。

在哪里找到这样规模的安装空间成为发展风电、光电的第一个问题。

中国西北地区有大量的戈壁沙漠区域,且有很好的太阳辐射强度和风力条件,可否把发展风电、光电的重点放在这些区域呢?中国的地理资源环境条件导致70%以上的人口聚集在中东部,这就使得主要的社会和生产活动、用电需求也集中在中东部。如果主要的电力供给来自于西北地区,就需要“西电东输”,依靠长距离、大功率输电线路把西北的风电、光电输送到中东部电力负荷密集区。由于风电、光电发电装机的成本不断下降,长距离输电设施的成本已经接近风光电的发电设施成本。把风电、光电布局在西北,再依靠“西电东输”,就显著增加了电力建设成本。同时,如果风电、光电集中布局在中国新疆、甘肃等西部地区,西电东输就必须经过狭窄的河西走廊,输电线路的空间布局也会出现很大困难。此外,风光电力的日夜变化与终端用电负荷的变化有一定的相似性,而长距离输电需要在电源侧通过储能等方式消减这些变化,而到了用电端,又需要再次采用储能措施来实现与用电需求的同步变化。2次调蓄也造成电力建设成本的增加。因此根据西部地区具有的可为风光电配套调节的水力资源、输电的空间资源等因素,综合优化的结果,中国风电、光电在东西部的布局应为7:3到6:4之间,即60%~70%的风光电要在中东部负荷密集区发展,而西部风电、光电的装机容量在20亿~25亿kW,年发电3万亿~3.5万亿kW·h,其中

1万亿kW·h左右与黄河流域水电“打捆”成为相对稳定的电力,西电东输至东部,其余则满足当地发展的需要,包括为转移到西部的一些高用电产业提供电力。

中东部负荷密集区则要发展50亿kW的风电光电,在哪里找到足够的安装空间?清华大学与国土资源部卫星信息研究所合作,利用卫星提供的高分图片获得了中国城乡屋顶闲置状况的统计数据<sup>[5]</sup>。按照保守的分析和估算,城镇屋顶可安装光伏8.7亿kW,年发电1万亿kW·h,农村屋顶(包括库房、牛棚等非居住设施)可安装光伏19.7亿kW,年发电2.5万亿kW·h。这样,城乡屋顶光伏就可提供未来全国需要的风电、光电装机容量和发电量的1/3。这些屋顶光伏的75%分布在中东部地区,也就是有20亿kW的屋顶光伏安装资源,再发展5亿kW海上风电、在中东部地区发展25亿kW的集中和分布的风电、光电,就可以解决发展风电、光电所需要的空间资源问题。

## 1.2 应对风电、光电的变化所要求的的储能和灵活用电资源

根据清华大学建筑节能中心对于中国能源系统的预测分析<sup>[6]</sup>,图1给出了预测2050年各种零碳电力日平均功率的全年变化的堆积图,还显示了全国除制备热量之外的各类用电负荷日平均功率的全年变化。可以看出,尽管全年的零碳电源发电总量基本满足全年的用电总量,但电源与用电侧之间却存在较大的季节差。冬夏季电力负荷高,但零碳

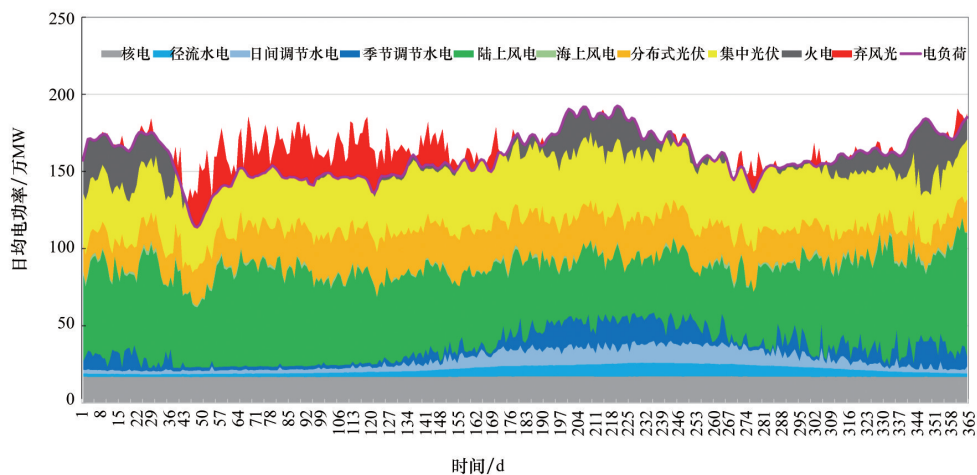


图1 各类电源逐日平均功率堆积图和用电负荷日均功率的全年变化

电力不足,而春季电力负荷低,但电源产量高。如果再进一步增加风电、光电的装机容量,尽管可以满足冬夏的用电要求,但春季“弃风”会更严重,并且需要新增10亿kW以上的风电、光电装机,也存在投资和安装空间的问题。而利用化学储能存储春季弃电用于冬夏季,需要的投资回收期将是几百年。可能的途径一是利用春季的“弃风”“弃光”电制氢,储存氢或储存由氢合成的其他类型燃料,供冬夏电力不足时发电补差。另一个途径则是保留目前火电装机的1/2,约6亿~7亿kW的火电,在冬季和夏季时发电补充电力不足。按照图1对应的分析可得到在冬夏季的调峰火电发电全年发电总量在1万亿kW·h左右,火电机组的满负荷发电小时数在1500h左右。如果是采用生物质燃料、燃煤和燃气作为燃料,全年所排放的二氧化碳可以通过二氧化碳捕获和封存(CCS)技术从烟气中回收,回收排放量的70%约5亿t二氧化碳,可以作为原料用于化工和新型建材生产中。这是表2中列出的电源为什么包括调峰火电的原因。保留一定容量的可调控电源,还可以应对各种缺水、连续静风、连续阴天等意外天气现象导致的缺电问题,保证电力的可靠供给。

除了季节差外,风光电成为主要电源时更需要应对的是风电、光电1d内的随机变化和其变化与负荷侧用电需求的不一致性。图2表示典型的5d内的风电、光电与用电负荷的变化。为了应对这些变化,必须有足够的储电能力,在电力富裕时储电,电力不足时放电;还可以通过一定容量的灵活用电负荷,在电力富裕时尽可能多用电,电力不足时尽可能少用电。抽水蓄能就是为完成这一任务所设置。为了发展和有效消纳风光电,现在全国各地都在竭力开发建设不同规模的抽水蓄能电站。然而抽蓄电站需要特殊的地理条件,初步分析结果,中国可以修建的抽水蓄能电站仅为5亿~10亿kW,在东部地区最多是5亿~7亿kW,远不能满足应对50亿kW风电、光电的调蓄需要。发展空气压缩等物理储能方式、液流电池等化学储能方式,也可以解决部分问题。但由于投资高、占地大,且有一定的地理条件和安全要求的限制,所以这些集中储电设

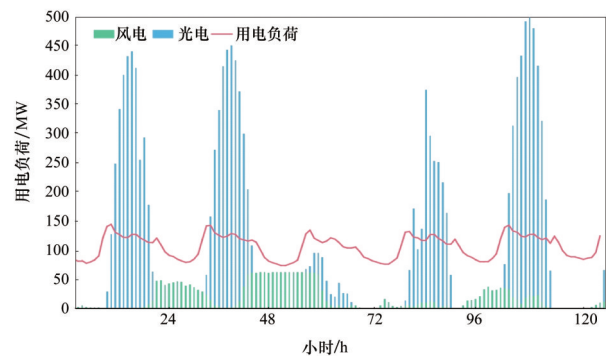


图2 风电、光电发电功率和用电负荷的逐时变化

施的规模也仅能在5亿~10亿kW。这样,考虑到风电、光电变化与用电负荷变化之间一定的相似性,还需要额外的25亿~30亿kW,日储电能力超过150亿kW·h/d的储电资源,才能有效解决中东部地区风光电的消纳问题。

解决问题的希望在用电终端的储电和灵活用电能力。中国电动车飞速发展,2023年预计将新增电动车1000万辆,到2050年私家电动车总量或将达到3亿辆。乘用车目前的电池容量是50~100kW·h,充放电功率都在10kW以上。如果能利用这些车辆的70%作为电力的调蓄手段,全国就是150亿kW·h/d的蓄电容量和30亿kW的充放电能力,几乎可以补足上述蓄电资源的空缺。图3分别给出采用大数据分析得到的私家车在工作日和公休日所处状态和位置<sup>[7]</sup>。

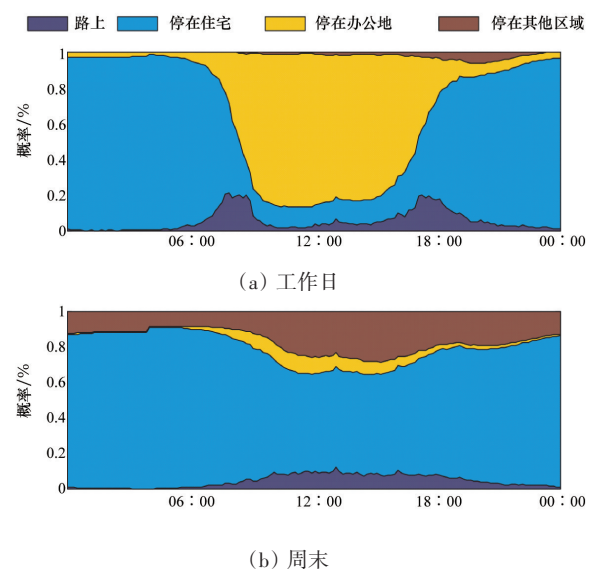


图3 1天内私家车所处位置的大数据统计结果

图3数据表明85%以上的时间这些车辆停靠在住区或工作地的停车场,而不是在路上。这样,只要实行“一位一桩”、使车主养成“即停即接”的习惯,电动桩采用有序“双向充放”模式,并依靠“免费充/放电”来使车主积极参与,就有可能把这些非营业性电动车的电池资源利用起来。充电桩应接入邻近建筑的配电系统,利用建筑屋顶光伏电力和建筑用电低谷期配电系统的富余容量来为车辆充电,从而避免由于充电桩需要的巨大电功率引起城市配电网巨大的增容压力。建筑用电高峰期一般也是电网负荷高峰期,电动车在这一时段通过充电桩向建筑配网放电,可满足建筑用电需要,减缓城市电网供电压力。未来中国城镇建筑运行用电量每天将在100亿~200亿kW·h/d(不同季节差别很大),车辆每日充电150亿kW·h/d,自用10~30kW·h,充放电损失30kW·h,返回建筑约100kW·h,基本可以被建筑有效消纳而不必反向送电上网。只是春季建筑负荷低,也是风电、光电过剩时,车辆中保留较多电力而减少为建筑提供的高峰期电量。

除了电动车电池资源外,建筑本身也具有直接和间接地储电和灵活用电资源。20世纪90年代开始在大型公共建筑中建设的冰蓄冷、水蓄冷装置,采用电动热泵或电锅炉制备热水时配备的蓄热水箱,都可以在电力富余时制冷或制热,避开用电高峰,为电力系统削峰填谷。建筑中的空调、水泵、风机等用电装置也可以在供电紧张时段适当减少用电功率、在电力富足时段适当加大用电功率。由于建筑自身的热惯性,供热、供冷和通风换气上的时间变化不会给使用者带来太大的不适。此外,很多建筑电器都配有不同容量的蓄电池,全球建筑电器所配置的蓄电池总量几乎为全球用于电动车电池容量的1/2。通过某种措施使这些蓄电池能在大比例的短时间内与建筑配电系统保持连接,并发挥其蓄电能力,也可以为建筑提供一定量的储电资源。

汇总建筑的储能和灵活用电资源、建筑所连接的电动车的储电资源,可以得到分步于用电终端的、连接在建筑配电网上的储电资源高达200亿kW·h/d,接收能力超过30亿kW,总量上基本满足有效消纳中东部地区风电、光电的需求。待解决的

问题就是如何调度这些储能和灵活用电资源,使其与电网互动,真正能够起到消纳风电、光电和为电网削峰填谷的作用?

### 1.3 电网与终端柔性用电负荷的互动机制

以火电、水电为主要电源的电力系统具备巨大的调节能力,通过集中对电源的精准调节适应负荷侧的各种变化,实现电力频率、电压的稳定,这是目前中国电网的主要调节方式。随着风电、光电在电源中占比的增加,在冬季热电联产机组又要保供热而不能大范围调节,北方电网冬季出现由于调节能力不足而导致“弃风”“弃光”现象;而南方电网则是在夏季由于空调加大而出现用电高峰时已有电源不足以满足巨大的用电功率需要的问题。为了避免仅仅为了满足短期的用电高峰需要而再增加电源装机,南方各省就陆续推广需求侧响应的用电模式,从而避峰度夏。

然而当电源侧大比例为只能切断、不可调节的风、光电时,缺少足够的可调控电源或可调度的储能资源就成为电力系统常年(非季节性的)需要面对的主要问题。前文表明未来约1/3的调节和储能资源是可集中调度的电源和储能资源(水电、抽蓄、集中储能),而2/3的储能和灵活用电资源是分散在建筑和与建筑连接的电动车中的分布式资源,也可以称柔性负载。尽管这些柔性负载资源在统计意义上随时可提供巨大的调蓄能力,但对各个个体来说又都是不确定的,变化的。尤其是这些资源的主要服务对象是资源的所有者,有各自的其他工作任务,为电力调蓄仅是其所具有的附带的而非主要任务。这样,就很难对这些海量的彼此独立的用电末端逐一进行精确的指挥、按照集中电源或集中储能设施那样为电网进行调蓄工作,而只能采用一种“号召”的方式,激励各个个体进行“自律式”调节。也就是通过每时每刻发布统一的调节信息“多用电、加大功率”或“少用电、降低功率”来激励各个具有调蓄能力的终端用户按照所号召的方向进行导向性调节,从而实现对整个区域负荷侧用电量调节的目的。这样,一个区域的终端用电用户合起来就像一个执行器,而这个导向性信号则是执行器的控制变量。不断改变这个信号的大小和方向,

就有可能调动起所在区域的柔性负载资源,使总的用电功率接近电网当时所希望的用电功率。电网要求源与荷之间在每个瞬间都保持平衡,这种依靠终端的自律调节自然不能时刻精准地维持这种平衡。但电网还具备 1/3 左右的可集中精准调度的调蓄资源,它们的投入就可以解决最终的平衡和稳定问题。因此,最终还是靠由电网调度和控制的可调电源和集中储能来实现电网的平衡与稳定,只是由于集中的调蓄资源不足,由大量彼此独立的不能精准调控的分布于用电终端的调蓄资源分担部分调节任务而已。

这种对用电终端的“号召信号”既要准确反映出电网此时对终端用电调节的方向,又要激励终端进行调节的积极性。动态电价似乎是可以选择的一种号召信号,也是已经在很多西方国家开始使用的方式。然而中国电价已经承载了太多的职能,再加入涉及瞬态调节的信息很难使凸显出来,从而也就难以使其真正发挥作用。为此,目前设计了一种

“电力动态碳排放责任因子”(简称  $C_R$ ) 的信息,也就是用户侧每使用一度电需要承担的二氧化碳责任,单位为  $\text{kgCO}_2/\text{kW}\cdot\text{h}$ 。每个瞬间由于电力供需关系的变化,电力调度根据这种变化可实时计算出  $C_R$  的数值,实时以广播方式发布。图 4 为某电网一周内计算出的  $C_R$  值的变化曲线。用电终端接收到  $C_R$  值,根据其大小自动调整自身的用电或充/放电功率,从而实现“自律式”调节。根据科学的设计,又可以使这个  $C_R$  在长期累积值上与电源侧真实的碳排放数值一致。用电终端可根据  $C_R$  的大小自行调整其用电功率,尽可能在高  $C_R$  时不用电、少用电;低  $C_R$  时多用电,储存电,由此可在全年用电总量与其他用电户相同时,其对应的碳排放责任量远小于其他用电户。这样就可以调动起全社会减碳的积极性用于柔性用电,开发出用电终端的电力调蓄功能。而所减少的碳排放责任,又可以进入未来的碳交易市场,换取经济收益。

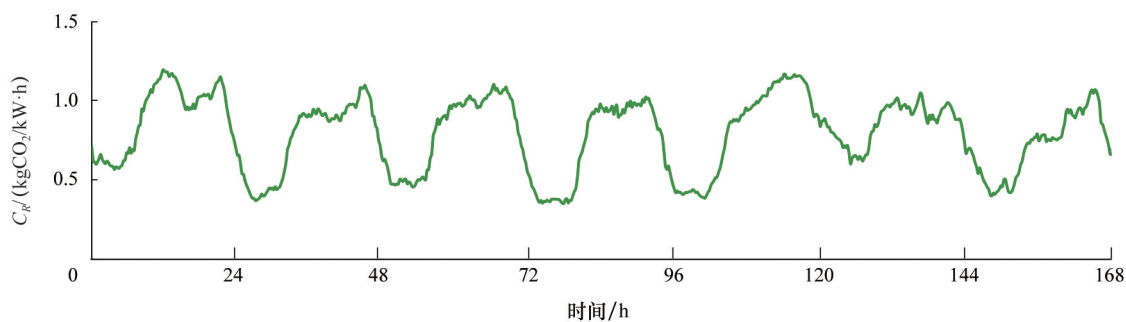


图4 动态碳排放责任因子  $C_R$  在 1 周内的变化(根据京津唐电网夏季运行工况计算得到)

## 2 零碳热力系统

如果取消燃烧燃料制备热量的过程,则 2050 年中国非流程工业和建筑运行约需热量 240 亿  $\text{GJ}^{[7]}$  (表 3)。这些热量如果全部用电热来制取,则每年需要额外的 7 万亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$  电力,约是前面预测电力总量的基础上再增加 50%,这显然是不可能的。另一个方式就是从低温热源提取热量,然后再利用热泵依靠电力驱动,提高热量的温度品位,在所需要的温度下再释放出热量。这时所需要的电力与所

提取的热量成正比,也与热量的提升温差成正比。一般情况下,当从  $20^\circ\text{C}$  的低温热源中提取热量制备

表 3 中国工业生产和建筑运行对热量的需求

用途	低于 $150^\circ\text{C}$ 的热量/亿 $\text{GJ}$	高于 $150^\circ\text{C}$ 的热量/亿 $\text{GJ}$
工业生产	76	60
北方城镇建筑供暖	54	—
北方农村建筑供暖	20	—
南方地区建筑供暖	20	—
建筑生活热水和蒸汽	10	—
共计	180	60

60℃的热量时,1 kW·h的电力可以获得4~5 kW·h的热量,所获得的的热量与所消耗的电力之比称COP,这里的COP为4~5。这样如果采用热泵方式,就可以只消耗1.5万亿~2万亿kW·h的电力满足前述热量供给的需求,也就是前述13万亿kW·h的电力需求总量上再加上1.5万亿~2万亿kW·h电力,得到未来的用电总需求是14.5万亿~15万亿kW·h。

采用热泵方式的关键是找到合适的低温热源。目前中国热泵主要用于提取自然低温热源,也就是以空气中、土壤中、地表水中以及中深层土壤沙石为低温热源。那么,这些低温热源可否提供这样大的热量呢?

### 2.1 利用自然低温热源的热泵

采用周边空气作为热泵热源,提取其热量就要降低空气温度并且要处理足够量的空气,以实现源源不断的热量供给。当高强度地提取热量时,以高楼林立的北方城市为例,为密集的高层建筑获取冬季采暖所需热量,需要从大量的空气中取热。分析表明,即使把作为热源的空气温度降低10 K,每小时所需要的空气量为建筑周边街区空间体积所对应的空气的几倍到几十倍,会严重影响周边的热环境,并且会人为地造成外界空气无序地流动。而为满足工业生产用热,就更需要高密度取热。因此完全依靠以周边空气为低温热源的空气源热泵很难满足这类高强度用热需要。反之,由于空气随处可以获取,空气源热泵是最适宜提供低强度用热的热源方式。例如制取生活热水、制备医院等部门消毒用蒸汽、农村和中国南方地区建筑采暖等,空气源热泵是为这些应用提供热量的最佳方式。

采用土壤换热器的方式从土壤中提取热量,是把作为土壤换热器的U型管垂直埋入120 m深地下,通过管内流动的水与周边土壤换热获取热量。一般情况每延米可得热30 W,当横向管间距为4 m时,水平投影单位面积可采集热量225 W/m<sup>2</sup>。对于中国城市高密度建筑来说,包括周边道路、绿化地,综合容积率(建筑面积与水平投影面积之比)在3以上,单位建筑面积采暖需要从低温热源提取的热量为20~40 W/m<sup>2</sup>,采用土壤源热泵时,30%~50%

的投影面积对应的地下都要在120 m以内埋放U型管,占用了大部分地下空间资源,埋放U型管的地下很难再开发利用。而地下空间的深度开发利用将是中国未来城市发展的重点。因此,在容积率为3以上的城区,土壤源热泵不适宜作为建筑采暖的热源,同样也不适宜作为高强度用热的工业生产热源。

近年来,北方地区采用中深层地热方式作为建筑采暖热源也获得较好效果。这种方式是垂直钻井2000~3000 m,置入钢套管作为土壤换热器,使循环水被土壤加热到20~40℃,再进一步通过热泵提升温度,成为建筑供暖热源。这种方式的本质并不是如一些研究所述“利用深层地幔释放出的热量”。除具有特殊地质条件的场合,一般情况地下深层提供的热量不到所提取的总热量的1%。而主要的热量来源是套管周边土壤岩石的显热,从大尺度范围看,持续提取热量导致土壤岩石温度的下降不可能在以年为尺度的时间内恢复。周边土壤岩石的温度会随热量的提取而逐年下降,根据取热强度和钻孔间距不同,温度下降速率在0.3~1.5 K/a。这样连续10年运行会导致地下环境温度下降3~15 K,且难以恢复。因此,在个别场合可以利用这种方式提供低密度低强度的热量,但对于工业用热、北方城市高建筑密度区域供暖等用热场合,不应将此方式作为主要的热源方式大规模应用。

从表3的各类热量需求看,生活热水供给、医院等特殊建筑的蒸汽制备、南方建筑采暖等单位地表面积需要的热量功率不到100 W/m<sup>2</sup>,都属于低密度热量需求,可用空气源、土壤源或中深层地热的方式提供热量,未来全国在这些领域需要的热量为50亿GJ/a,通过热泵提取自然界低温热量制取所需要的热量,消耗电力约0.5万亿kW·h/a。

### 2.2 以工业余热为低温热源的热泵

现代社会的生产、生活和社会活动消耗了大量的能源,而这些能源极少量保留在其产生的产品中,大多数能源最终以低温余热的形式排出。如果这些余热的排放相对集中,就有可能被回收,从而作为热泵的低温热源被再利用。例如,冶金、有色、化工、建材等生产过程排放出的大量余热就是可利

用的余热资源。温度较高的热量目前大多被回收利用、发电,但还有大量100℃以下的热量,尤其是30~50℃的余热被排放到大气中。为了方便排热还消耗了大量的工业冷却水用于蒸发散热。此外,数据中心消耗的电力也都转换为热量排放、大型电力变电站冷却、包括垃圾焚烧等,都产生和排放大量低品位余热。此外,未来的核电和调峰火电,在生产电力的同时也排放相当于其电力产出1.5倍左右的低温余热。表4为初步预测和统计出的中国到

2050年全社会排放的可回收余热热量,总量高达205亿GJ/a<sup>[4]</sup>。只要回收利用其60%,就可以完全满足北方建筑冬季采暖和工业生产所需要的低于150℃的热量这2项用热需求。而且这些余热所处温度都高于上述自然界可提供的低温余热,从而在一些场合可被直接利用,或者较容易利用热泵将其提升到所需要的温度品位。图5为回收利用各类余热资源用于建筑和工业生产用热的余热共享系统原理。

表4 预测2050年中国各类余热资源排放的余热量

余热来源	排放余热功率/亿kW	全年排放余热热量/亿GJ	排放热量的主要季节
核电余热	3	70	全年均衡排热
调峰火电	10	50	集中于冬、夏两季
冶金、有色、化工等	—	60	根据生产需求不定
数据中心	0.5	10	全年基本恒定
垃圾焚烧发电余热	0.4	10	全年基本恒定
大型变电站余热	0.2	5	全年基本恒定
总计	—	205	—

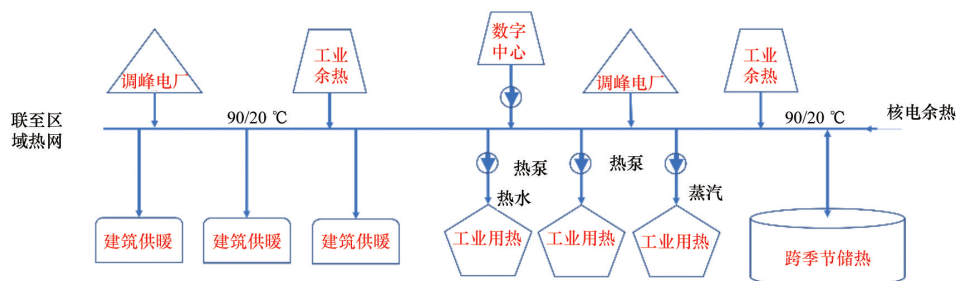


图5 余热共享系统原理

然而,回收利用这些余热资源又必须破解下面3个问题。

1) 余热产生的时间与热需求的时间不一致。例如,核电余热均匀出现在全年四季,而如果作为建筑采暖热源,则仅在冬季采暖季才需要这些热量;工业生产余热由生产组织和市场需求决定,很难与余热利用侧在时间上匹配。为此,就需由大型跨季节储热设施,平衡供与需在时间上的不一致。

2) 余热产生的位置与热需求位置地理上不一致。初步分析,在100 km半径内,中国大多数北方城市和非流程工业都可以找到配套的余热资源;在200 km半径内,北京等超大城市也可以找到与其

需求匹配的余热资源。问题是:如何实现低品位余热的低成本长距离输送?

3) 用统一的循环水管网系统采集各类余热,并为各个用热终端提供热量,就要求循环水管网采用统一的热水和冷水温度。各个热源就需要用自己产生的余热把从冷水管获取的循环水加热到统一要求的热水温度;而各个用热终端又需要从热水管获取的循环水中提取所需要的热量,并将循环水冷却至统一的冷水温度。而各个余热热源温度的温度品位不同,各个用热终端需要的热量品位也不同。于是,就需要有热量变换装置,实现不同温度范围间热量的变换。这就如同变压器在电力输送

系统中的作用一样,必须有可以实现不同温度范围之间的热量变换器,才能支撑这种热量共享的管网系统。

### 2.3 大型跨季节储热设施

近10年来,跨季节储热已成为国内外的研究热点。通过深入的机理研究和示范性工程实验,目前普遍认为比较合适的储热方式是具有保温顶的大型蓄热水池。储热时把热水从顶部缓慢输入,同时从底部取出冷水;放热时则从顶部取出热水,同时从底部注入冷水。对于体积为百万立方米以上的蓄热水池,当水池深度大于20 m,顶部有较好的保温和气密性时,夏季储存的热量到冬季取出,热量散失量不超过10%。目前在丹麦、瑞典等国已建成若干个库容达50万的储热水池,在中国西藏、张北等也已建成万 $\text{m}^3$ 以上的储热池。当采用一些技术措施有效消除储热池内冷热掺混现象时,这种跨季节储热方式可以获得较好的储热效果。

大规模建设跨季节储热设施,可以有效回收各种余热,满足北方城市建筑采暖和工业生产用热对低品位热量的需求。例如北方地区的一座核电站,如果仅利用其冬季排放的热量为建筑供暖,则必须在严寒期提供全部余热满足建筑的最大热负荷需求,从而整个供暖季余热利用率约为50%,全年的余热利用率就只有17%。而如果建有跨季节储热设施,则可以回收利用全部核电余热,余热利用率提高到6倍。某2X30MW垃圾焚烧电厂全年运行8000 h,冬季余热仅能满足200万 $\text{m}^2$ 建筑供暖,而配合跨季节储热设施,其热量可满足1200万 $\text{m}^2$ 以上的建筑供暖。当储热设施接近用热负荷区域时,还可以有效提高供热保障率,只要储热池中有足够的热量,就不会由于热源的故障影响供热。

为了满足北方城市建筑冬季供暖和这些地区非流程工业的生产用热,中国在北方地区需要建设库容在1000万 $\text{m}^3$ 以上的储热设施400~500座,储热能力12亿GJ。这也需要巨大的空间资源和建设投资。如何利用各种国土资源建设这种大规模储热设施,如何低成本建设、并使空间资源能够得到综合利用,都需要进一步研究探索,并在示范工程中尝试和实践。

如前文所述,零碳电力也面临季节之间供需不

平衡问题。跨季节储能是实现零碳能源的共性问题。与抽水蓄能、储氢、空气压缩储能相比,大规模储热池储存每吉焦能量的设施投入仅为这些方式的0.1%~1%。即使认为这些方式的本质是储电,其能量品位远高于热量,取1份电力等效于10份同样能量的热量的话,储热设施的投资成本也不到这些储电设施投资成本的10%。因此如果最终的用能目的是热量,应该先用富裕的电力制备热量,然后跨季节储热,而不是跨季节储电并在使用时再由电力制热。图1揭示,在大比例风电、光电时,由于与用电负荷季节变化的不匹配,春季将出现大比例的“弃风”“弃光”现象。把这些电力转换为热量,再通过跨季节储热设施储存,供工业生产和建筑采暖使用,也是消纳“弃风”“弃光”电力的有效方法。

### 2.4 热量的长距离低成本输送

由于余热的产出地点与用热的需求地点很难一致,所以还需要解决热量的低成本长距离输送问题。分析表明除北京等特大城市和内蒙一些旗县外,北方地区旗县以上城市都可以在100 km的半径内找到充足的余热资源,而北京也可以找到曹妃甸等200 km范围内的余热。这样问题就成为可否在这样的距离下实现热量的低成本输送?

通过循环水管道输送热量的经济性取决于循环水温差和热量输送规模。中国提出“大温差”热量输送技术,使循环水温差从120/60 $^{\circ}\text{C}$ 的60 K提高到120/20 $^{\circ}\text{C}$ 的100 K,同样循环水量输送的热量提高近70%。分析还表明,经济输送距离与管径成正比。近年来开发应用的直径为1.6 m管道,与0.8 m直径管道相比,经济输送距离提高了1倍。而管道由于散热导致的相对热损失与管内流速成反比,为把热损失控制在5%以内,流速不能低于2m/s,这样1.6 m直径的管道流量在4  $\text{m}^3/\text{s}$ 以上,当供回水温差为100 K时,热量输送量为1500 MW以上。因此只要大功率输送热量,输送单位热量的投资、管网运行阻力、管道散热相对损失都可控制在可接受的范围内。根据实际运行的工程案例,在采用1.4 m管径、2m/s流速、50 km输送距离、80 K供回水温差的情况下,相对热损失低于5%,包括初投资和运行费的综合成本不超过15元/GJ。这样,当输送距离达到100 km时,包括初投资的综合成本也可以

控制在 30 元/GJ。相比目前煤改气,采用燃气锅炉制备热量成本在 80 元/GJ 以上(当燃气价格为 3 元/Nm<sup>3</sup>时),长距离大容量输送余热有很大的竞争潜力。

以上分析都是按照没有跨季节储热,输送管网每年仅运行 4 个月计算。如果在用热侧有跨季节储热设施,管网全年连续运行,利用率提高到 3 倍,输送的综合成本还可进一步降低到前述的 1/2 以下,就具有更大的竞争力。

对于沿海地区的余热资源如核电、调峰火电和钢铁厂等,还可以利用余热采用热法进行海水淡化,制备 90℃ 左右的热淡水。再利用单管输送热淡水,实现“水热同送”。在临近城市侧通过“水热分离”装置可分离出常温淡水和热量,为城市同时供水和供热。热法的海水淡化可以获得高质量淡水,驱动海水淡化的热量 85% 都保留在热淡水中,所以可实现低能耗的热法海水淡化。而单管输送热淡水,可替代输送淡水和输送热量的循环水共 3 条管道,从而可使输送热量的综合成本进一步降低。

长距离大容量输热技术,目前已在山西(古交到太原)50 km、银川(河东到河西)70 km 等工程实施并连续 5 年运行,显示出良好的经济性和节能减碳效果。“水热联产”“水热同送”和“水热分离”的示范性项目也在山东海阳核电建成并运行,取得良好效果。

### 2.5 基于多种热泵的热量变换技术

采用统一的循环管网回收各类热源的余热,就

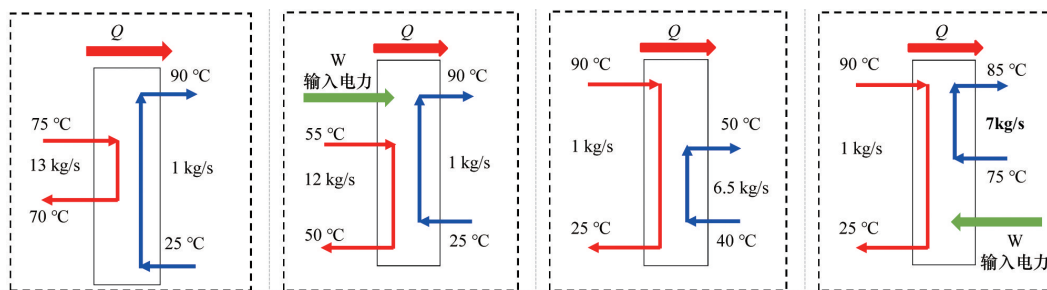
要求各余热热源都要把循环水管提供的冷水加热到统一的热热水温度(如 90℃);而各类用热终端从循环管获得热水,又要提取其热量,满足自身用热需求,并把循环水冷却到统一的冷水温度(如 20℃),返回循环管道。这就需要热量的变送装置,实现热量在不同温度之间的传递,满足热量输送、使用过程中对温度的各种要求,从而实现用统一的热量输送管网满足温度不同的热量传递需要。这就如同电网的变压器要满足电力输送过程电压变换要求一样,实现热量输送过程的各种温度变换要求。

中国研究者首先提出热量变换器的概念,并研究开发出各类实现在不同温度之间的热量要求的热量变换器,主要包括以下几类。

1) 由热源侧小温差向输送管网大温差的热量变换。当热源侧循环水平均温度高于输送管网侧平均温度时,可通过无动力的第二类吸收式换热实现小温差向大温差的传热(图 6(a));当热源侧平均温度不高于输送管网平均温度时,则需要由热泵提供额外的提升动力的热量变换器(图 6(b))。

2) 由输热管网的大温差向用热终端小温差的热量变换。当输热管网循环水平均温度高于用热终端要求的平均温度时,可通过无动力的第一类吸收式换热实现大温差向小温差的传热(图 6(c));当输热管网循环水平均温度低于用热终端要求的平均温度时,就需要由热泵提供额外的提升动力的热量变换器(图 6(d))。

3) 对于需要不同压力蒸汽的工业用热终端,



(a) 小温差向大温差侧传热, 无动力 (b) 小温差向大温差侧传热, 热泵补充动力 (c) 大温差向小温差侧传热, 无动力 (d) 大温差向小温差侧传热, 热泵补充动力

图 6 各类热量变换器示意图

也可以在图6(d)利用热泵提升温度的基础上通过闪蒸产生低压蒸汽,再利用水蒸气压缩机制备工业生产要求的不同压力的蒸汽。当用热终端获得的热量成本在40元/GJ时,包括终端装置的初投资和热泵升温与水蒸气压缩用电,所获得蒸汽的综合成本在160元/t左右,低于目前热电联产电厂提供的蒸汽价格,更远低于燃气锅炉制备蒸汽的成本。

上述几类热量变换和蒸汽制备装置目前国内都已经有了成熟的市场化产品,并且已具备年产20亿~30亿元的市场规模。零碳热力系统的全面推广将形成对这类产品的巨大的市场需求,也必将

促进其性能的进一步提高和成本的继续下降。

表5汇总了在零碳要求下建筑和工业生产所要求的各类热量的来源和制备方式。对于温度要求高于150℃的工业生产用热,采用热泵的COP很难高于1.5,且有很多技术困难,因此考虑仍然依靠燃料通过燃烧制备,当然也可以采用高温气冷堆由核能提供。此外则全部依靠电力和各种余热资源提供。全年所需要的电量不超过1.5万亿kW·h。将此加在第一节讨论的全国用电总量上,未来需要的电力总量为14.5万亿~15万亿kW·h。

表5 未来150℃以下的热量需求的供给方式和所消耗的电力

用途	热量需求/亿GJ	热量的制备方式	需要的电力消耗/万亿kW·h
工业生产用热(<150℃)	76	利用余热共享系统提供低品位热量,电动热泵提升	0.7
北方城镇建筑供暖	54	利用余热共享系统,少量由电动热泵提升	0.3
农村和南方建筑供暖	40	空气源、土壤源热泵	0.4
生活热水和建筑用蒸汽	10	空气源热泵	0.1
共计	180	—	1.5

## 2.6 化石燃料的替代和零碳燃料的供给

除了建筑供暖、生活热水、某些特殊需要的蒸汽之外,建筑用燃料还有炊事,目前主要采用天然气。而非流程工业生产中,还有温度高于150℃的热量的制备需要燃料。天然气属于化石能源,其燃烧同样释放二氧化碳。天然气本身还是非二氧化碳类温室气体,没经过燃烧直接泄露将会造成相当于20余倍二氧化碳的温室效应影响。从能源安全的角度考虑,尽可能减少对天然气的依赖对中国的能源自给也有重要意义。而炊事用气完全可以用电替代。目前各类电炊具进入千家万户,也进入餐饮业,都显示出高效、清洁、安全、可控和低成本的优势。目前除了炒锅,其他类型的电炊具已获得全面认可。而实际上电磁炉等也可以满足高温烧制中餐炒菜的需要,近来一些企业又推出等离子电炒锅,可提供明火炒菜,完全满足中餐色、香、味的需要。如此,建筑就应该彻底告别天然气,全面实现电气化。这既不会增加用能成本,也不会降低用能的服务水平,最多也只是替换燃气的电气化设备的购置费和部分建筑的电力增容工程。取消建筑的

天然气供给可以极大地提高建筑安全,避免天然气可能引发的各种事故。

一种观点认为应该保留建筑的天然气供给,通过在燃气中部分地加入氢气,逐渐提高氢气的比例,最终实现全氢燃料。利用天然气和未来的氢能进而发展分布式能源,以燃气和氢为动力,实行热电冷三联供,全面解决建筑用电、用热和夏季空调用冷需求。这种方式没有理清目前的天然气和未来的氢的来源和转换效率。利用氢实现建筑的热电冷三联供,当热电、冷电需求比例合适时,把所产生的热和冷按照前面所提到的热泵方式折合为电力的话(用热量或冷量除以COP得到电量),综合的氢-电转换效率也只能达到70%左右。而绿氢又只能来自电解水,其转换效率也很难超过70%。这样,从电到氢再回到电,综合的转换效率很难达到50%。为什么不直接用电,非要进行这样复杂且低效的转换呢?实际上建筑用热、冷随时间的变化与建筑用电的变化不是同步的,春秋季节建筑仍然用电,而却没有冷、热负荷,此时综合的转换效率就很低。长期以来工程界就一直在讨论以天然气为动

力的分布式热电联产、冷电联产是应该“以热定电”还是“以电定热”? 20年也没有结论。其本质就是因为热与冷的变化与电力需求的变化不匹配所致,这也是为什么这么多年来热电冷三联供的分布式能源系统很少能真正产生节能效益。采用作为燃料的燃气尚且如此,当采用由电力制备的氢作为燃料,就更不可能比直接用电的效率高了。因此对于建筑来说,逐渐减少天然气用量,逐步推进全面电气化,是实现零碳的必由之路。

对于非流程工业需要的高温热量,电动热泵的COP也很难超过1.5,所以当有条件储热时,可以在风电光电富裕时制备、储存高温热量,从而有效消纳风电光电。而缺乏储热条件时,还需要通过燃料燃烧制备。此时可以使用生物质能源或者是天然气,通过CCS分离和回收燃烧过程释放出的二氧化碳,从而实现天然气燃烧的零碳排放,或者是生物质燃料燃烧的负碳排放。当然也可以采用氢或氢的合成燃料,氢由风电、光电的零碳电力电解水获得,再通过储氢或储存氢合成燃料来解决风电、光电与用热在时间上的不匹配。这时要比较储存高温热与电解水制氢+储氢的综合成本。

总的来说,由于一次能源由目前的化石燃料转为大比例的风电、光电,原来最直接的燃烧获取热量的方式成为转换环节最多的昂贵方式,反之直接用电力制备的方式在很多情况下反而成为简单和低成本方式。在电力和燃料之间,优先选择电力而不是燃料,是能源结构变化带来的重要变化。

### 3 农村能源系统可能出现的巨大变化

零碳能源需要的资源是空间,而农村具有足够的空间资源。目前农村屋顶(包括库房、牛棚等)可安装光伏19.7亿kW,每年发电2.5万亿kW·h。而目前农村总用电量不到0.5万亿kW·h<sup>[9]</sup>。因此,全面开发利用农村屋顶资源做光伏发电,可以满足农村生活、生产和交通的全部用能,实现农村的全面电气化。还将剩余1万亿~1.5万亿kW·h的电力输出到大电网,支持大能源系统。这样,目前农村的

燃煤、柴油、燃气和柴火就可以全部被替置,做饭和取暖不再烧火、农机不再烧柴油,农村可以重返蓝天白云、绿水青山。

#### 3.1 依靠屋顶光伏的全面电气化

在山西某县的实践表明,北方农村一户院落的屋顶可安装光伏20~40kW,年发电2.5万~5万kW·h。户内改为直流配电,光伏直接接入,可以完全满足炊事、采暖、照明和家电用能。通过充电桩又可为电动车和电动农机具充电,满足生产和交通的用能需求。当采用换电模式的电池组为车辆和农机供电,或者采用双向充放电模式时,户均具有60kW·h以上的储电能力,在连续3天阴天时也能保证正常的生活用能,从而可以实现“只发不收”,只是单向地向电网送电,而不再依靠电网提供电力保障。图7是一个村的配电系统原理<sup>[10]</sup>。

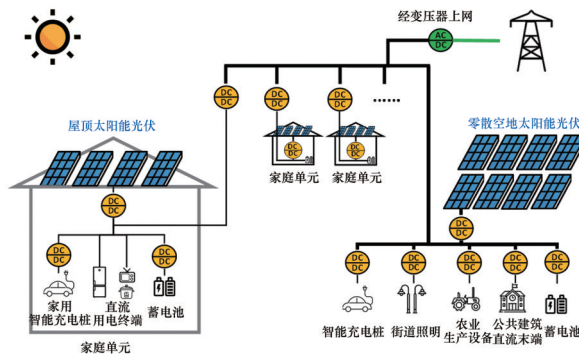


图7 农村基于屋顶光伏的直流微网系统

由图7中可见各户多余的电力进入村级直流微网,为公共照明、生产等用电设施供电,多余电力逆变升压上网。目前农网配电容量多为每户5~6kW,不能满足每户超过20kW的光伏上网功率。这时可利用各户和公共的储电能力,储存多余电力,在更长的时间内均匀上网送电。由于晴天每天光伏高峰期也仅为3~4h,通过蓄电池调节就可以使通过变压器向往上送电的时间延长到每天12~15h,尤其是在17:00到20:00的晚高峰可以满功率送电,协助电网解决晚高峰电力紧张问题。每个台区变压器所连接的DC/AC逆变器可根据输出功率调节直流母线电压,需要加大上网功率时降低母线电压,各户的户内直流系统与外网连接的DC/DC

就会加大进入村级微网的送电功率,从而提高台区的上网功率。DC/AC逆变器检测到上网功率变大时,又可以提高母线电压,由此就会降低各户输出的电功率,通过这种基于直流母线电压的分布式协调控制,可以实现村内电力系统的安全运行,并充分利用村网的配电容量,送电上网。由于经过储电使上网送电的时间与太阳辐射变化解耦,上网送电就由光伏的“垃圾电”转身为可为电网调峰的可调电力。这时就有可能与电网协商获得更高的上网电价。

### 3.2 形成基于生物质材料的零碳商品燃料基地

农村实现了全面电气化,置换下来产自农村的农业秸秆、林业枝条、畜牧业粪便等生物质材料,就可以将其加工成固体、液体或气体形式的商品燃料,进入燃料市场。目前玉米桔、果木枝都可以加工为颗粒燃料,在很多灶具内实现清洁燃烧,市场价格每吨超过千元还供不应求。麦秸、稻草则可以压缩为比重达1.2的大压块,可在一般燃煤锅炉中燃烧,替代燃煤。这些生物质材料加工成型的固体燃料其燃烧效率都可以从未成型加工时的不足20%提高到40%以上,从而不仅降低了燃烧过程排放的污染物,也有效提高了能源利用效率。加工为成型燃料最大的加工成本是电力,每吨成型燃料加工需要大约200 kW·h电力。而光伏正好可以提供充足的电力。压缩成型的生产过程可以“看天吃饭”,日出而做,日落而休,成为可中断型生产用电,缓解对蓄电的压力。畜牧业粪便等湿材料可通过大型沼气池生成沼气,然后再通过压缩分离出沼气中二氧化碳等成分,成为优质燃气,进入燃气市场。初步分析表明,粮食作物的秸秆加工成商品燃料后在市场出售的收入约为出售粮食收入的1/3,这样,生物质燃料商品化可以使产粮户的收入增加三成。农村不仅输出粮食,同时也输出宝贵的零碳燃料。

电力和燃料都对外输出,为什么生物质燃料不优先自用,而是通过加工为商品燃料全部输出呢?因为一种产品如果作为商品进入市场,它应具备可储存、易运输的性质。而电力很难储存、不易输送,因此应尽可能优先使用、就地消纳;而固体和气体的生物质燃料却类似于燃煤,具备各种商品属性,

应该优先出售。农村各项用能需求都可以由电力提供,而某些特殊的工业生产过程却需要燃料。未来可储存的零碳燃料的价格会高于未储存的电力,因此农村应优先用电满足自身需求。此外,成型加工后的生物质燃料燃烧效率是原生态秸秆直接燃烧的2倍以上,但村民很难接受付出高额的加工成本后再简单地烧掉这一过程,而直接的原生态燃烧既低效又不清洁,所以最好的方式是全面电气化,全面置换出生物质材料,进入商品燃料市场。

### 3.3 解决融资问题,振兴乡村经济

建设这样全新的农村能源系统的关键是融资问题。上述新型农村能源系统需要的投资包括如下4部分。

1) 户内光伏系统和户内的直流配电:按照目前的工程实践,安装20 kW光伏和相应的户内直流配电需要6~8万元,如果靠无首付低息贷款,农户免费用电,每年可外送电近2万 kW·h。如果是按照电网协议的时间段送电上网,就可以得到较高的上网电价,年收入近万元。把上网售电费用全部用来还本付息,在10年内可还清贷款。这样,农户得到的好处是完全免费用电、且10年后至第20年的光伏寿命期中每年还可收入近万元。农户需要付出的是清洁、维护其光伏系统的正常运行。

2) 户级的储电能力:每户需要拥有60 kW·h以上的蓄电能力。如果每户一辆电动车,再通过双向充放电,这个问题就可以解决。目前中国农业机械化水平已很高,未来进一步实现农机电气化,也可以充分调动电动农机的储电资源。前几年国家通过“家电下乡”的方式推动农村的家电普及,如果采用同样的政策,对电动车和农用电动机械中的电池给予定向补贴,就能极大促进农户拥有的储电能力。这将是一举三得的好事:扩大蓄电池市场、推动农机电气化、促成农村新型能源系统的建设。

3) 村级的直流微网和公共储电设施:连接100户的台区配电系统需要投资约300万来建设村级直流微网。目前农村的集体经济力量不强,缺乏足够的资金进行建设。但实际上每年通过多个渠道进入农村的财政补贴却很多,如农村电网扩容、北方清洁取暖、农电补贴等,如果把这项工作作为农

村30年的基础设施建设,分期投入,那么只要汇集这样几项进入农村与能源相关的财政补贴,每年投资1000亿集中支持3万个百户村庄的电网改造,30年共投资3万亿元即可以完成中国全部农村的新型能源系统的建设。建设好的村级直流微网,通过收购户网电力与上网电力的差每年可获利30~50万元,从而可以支撑3名维护管理人员对全村包括户内系统的维护管理。

4) 村级的生物质加工装备:每1000~2000亩产粮地的规模设置一个加工点,以“来料加工”方式把秸秆枝条加工为成型生物质燃料,再由农民自行组织出售。每个加工点需要投资30~50万元,全国共需要投资100万个加工点,共需要资金0.5万亿元。这笔投入可以并入村级直流微网建设中,通过从村民收取100元/t左右(不包括电费)加工费,每年收入5万~10万元,可以支撑1名技术工人半时投入维护和管理。把秸秆加工为商品燃料,每亩可收入300~500元,付出10%的加工费。

上述农村新能源建设的投入,可以使农民免除每年用于购买电力、燃煤、燃气和柴油的费用,目前每年约1000亿元以上,每年通过出售电力和零碳生物质燃料增收接近1万亿元,约为目前产粮收入的50%。这对于改善农村经济状况、振兴乡村,都具有重要意义。

### 3.4 农村新型能源系统建设需要的政策机制

农村新能源系统所需要的技术与设备大多成熟,部分则处在商品化和进一步降低成本提高质量的过程中。而全面推广的障碍不仅是融资问题,更是相关的配套政策机制建设和新型能源的文化建设问题。

以村为基础的新型电力系统的建设将使农网从自上而下的供电配电网转为仅输出、不输入的分布式发电网。这种分布式发电网如何与地方电网连接,其管理经营权限、上网售电规则、售电价格等目前完全是政策机制的空白区。只有通过几个典型示范性村网进行实验和深入研究,才能建立起既满足电网安全要求又支持售电上网,且满足农村正常用电要求的新机制和新的经营模式。而这种新模式的建立,对进一步发展城市的分布式电力系

统和有源配电网也有重要参考意义。新型电力系统需要新的配套政策机制,而这些政策机制必须在实践中反复试错、迭代,才能逐渐形成。结合农村新型电力系统建设的政策机制探讨,又可以看做是尝试新型电力系统政策机制的绝佳实验场所,对进一步实现全国范围内集中与分布相结合的新型电力系统的建设,可起到现行先试作用。

而基于生物质材料的零碳商品燃料生产基地的建设,就必须打通整个加工、收购、流通和销售环节,建立系统的服务平台。实际上,近20年来国内持续有一批企业置身于生物质能源商品化领域,但由于缺少合适的平台和相应的政策机制,大多由于在原材料收购价格、产品的销售价格、国家的补贴机制认定等方面出现各种问题而失败,所以必须系统地全产业链的健康发展出发,从解决未来零碳燃料需求出发,全面规划,平衡各方面利益,建立起可高效运行的平台,才可以支撑起生物质材料商品燃料化开发利用这一全新事业。在实现碳中和的未来,中国还需要每年约15亿t标煤的燃料,来自于农、林、牧区的生物质零碳燃料将提供这一需求的50%,因此这项工作对碳中和情景下中国的能源系统也至关重要。

用能的全面电气化和视每一根秸秆为宝来全面收集,都需要相应的文化建设。这包括基本的光伏概念、用电常识、安全知识、以及珍惜生物质材料的文化。这都需要“从娃娃抓起”,在小学、中学普及教育中设置相关课程,普及相关文化,并开始人才培养。文化建设可能是农村新型能源系统最终是否能够全面建成的决定因素,而且是需要长期深入开展的大工程。

## 4 新型城乡能源供给系统的实施路径

新型城乡能源供给系统的四大任务:零碳电力系统的建设、零碳热力系统的建设、燃料的逐步退出、以及农村由能源消费者向能源生产者的转身,都不能一蹴而就,而是需要持续30年的宏大工程,且对社会发展、经济运行和人民生活都有重要影

响。中央提出“先立后破”的基本原则,就是要确保这一以能源转型为目的的能源革命要在保证全社会的能源安全和能源供给,不影响全社会各类用能需求的前提下完成。同时通过新型能源供给系统的建设形成新的市场需求,从而还能大幅度拉动经济增长。

为落实这一目标,首先需要超前地做出新型城乡能源供给系统的全面规划,只有“一张蓝图干到底”,而不是“摸着石头过河”,才能避免重复建设,少走弯路。对于燃气和氢能源的发展方向,风电、光电的主要发展区域,北方沿海地区淡水需求的解决方案,是否要建设跨区域的余热资源共享管网以及其主干系统的走向,是否要建设大规模跨季节储热设施以及其位置规划等,都需做出清晰的决策,不同的方案和反复都会造成千亿以上的投资失误。

为了在30年建设期的同时充分保证全社会对能源的需求,并与中国经济和社会发展同步,各项任务需要规划出合理的顺序和步骤,不可错位。为此,可把建设期分为3个阶段分期实施。

#### 4.1 技术和政策准备期(截至2030年)

在这一时期,燃煤电厂尚未消减,风电、光电的装机将从目前的7.5亿kW增长到13亿~15亿kW,接近电源容量的45%;风光电的日内和日间的变化导致的调节和蓄能问题开始显现;燃煤热电联产逐渐成为供热系统的主要热源,建立新型零碳热源系统的需求并不迫切;燃气也尚未进入大规模削减时期。到2030年达到碳达峰之前,新型城乡能源供给系统建设还是在技术和政策的准备阶段,这主要包括以下几点。

1) 对新型城乡能源供给系统的全面规划,确定未来各类电源和集中储能设施的地理位置分布,根据规划建设的核电,保留的调峰火电以及保留的冶金、有色等流程工业的位置确定余热共享系统的管网走向,初步确定跨季节储热设施地理位置和各自规模,明确新型城乡能源供给系统的建设蓝图。

2) 通过示范工程项目进一步完善相关技术和实现所需要产品的产品化,包括低成本双向有序充电桩产品、用于建筑光储直柔配电方式的系列产品、支撑村级直流微网的技术和系列产品、核电冷

端余热的高效回收技术与装置、各类工业余热有效回收技术与装置、大规模跨季节储热设施的相关技术、多种新型热量变换器产品等,为全面建设新型城乡能源供给系统打下雄厚的技术基础。

3) 初步建立动态碳排放责任因子系统以激励终端柔性负载的灵活调节和储能,初步建立新型分布式发电网的成套政策和机制以支撑新型农网的建设,建立低品位余热资源的计量与定价核算方式以支撑余热共享系统的建设和运行,初步建成生物质成型燃料的流通平台。

4) 初步完成农业机械化向农机电气化转型的关键技术和关键产品。

与此同时,为了与此阶段国家能源建设与发展相适应,需集中力量完成如下系统的建设。

1) 根据电力动态碳排放责任因子的方法建成覆盖全电网、全部用电终端的碳排责任核算计量体系。

2) 完成覆盖大多数城市的1亿个有序慢充充电桩系统的建设,以适应电动车的飞速发展,并开始培育新的充电文化。

3) 完成北方城市建筑集中供热系统的低回水温度改造,通过降低回水温度更充分回收热源余热,解决城市建设对供热热源不断增长的需求,同时也解决了余热共享系统要求的用热终端低回水温度这一关键问题。

4) 建成1~2个大规模跨季节储热设施,建成1000个以上的新型能源村,在新建社区实现全面电气化,停止燃气进社区。

#### 4.2 全面建设期(2030—2040年)

2030年中国实现碳达峰之后,面临的任务就是要在满足全社会对能源需求量的基础上通过由零碳能源对化石能源的替代逐年降低碳排放总量。这10年间中国的风电光电装机每年平均增加2亿~3亿kW,装机总量将从2030年的15亿kW增长到40亿~50亿kW,而火电机组将与此同步地每年平均退出0.5亿~1亿kW。至2040年中国的火电机组装机容量将从目前的13亿kW减少到9亿~10亿kW。零碳电力在中国总发电量中的占比将达到70%以上。而天然气将基本退出建筑领域,各类用

于为建筑和工业提供热量的燃煤燃气锅炉基本退出。与此同时,中国乘用车型电动车拥有量将超过2.5亿辆。为了适应电源结构的巨大变化,抽水蓄能装机容量将突破5亿kW,其他类型的集中储能设施装机也将达到3亿~5亿kW。

围绕上述目标,新型城乡能源供给系统进入大规模建设和飞速发展时期,其主要任务如下。

1) 完成全覆盖的有序慢充充电桩的建设,在2030年1亿个桩的基础上,到2040年发展到3亿个有序慢充桩,实现居住区和工作点停车位的“一位一桩”。满足飞速发展的电动车的需要,同时承担起有效消纳风电、光电的任务。通过已全面实施的动力动态碳排放责任因子方式推动起建筑的柔性用电模式,建筑与慢充有序充电桩共同完成50%以上风电、光电的消纳任务。

2) 由于火电厂的逐渐退出和燃煤燃气锅炉的退役,余热共享系统逐渐建设完成,并开始发挥作用。跨季节储热设施进入大规模兴建时期,每一个燃煤火电厂退役减少的热源供给量可以通过新建一个跨季节储热设施来补偿。随着核电建设的深入开展,新增核电应直接考虑余热的综合利用,并建设配套的输送管网和跨季节储热设施。非流程工业的热需求也陆续从燃煤燃气锅炉与热电厂逐渐转至通过热泵从余热共享管网中获取。

3) 农村开始大规模的新型能源系统建设的高潮,10年内完成2万个以上100户为单位的农村新型能源系统的建设,到2040年每年可为大电网提供0.5万亿kW·h以上的电力,为工业和电力生产提供4亿t标煤以上的零碳燃料;与此同时,农业机械电气化应初步完成,各类车辆和农机的机载电池成为农村电力微网系统的主要储能资源。

上述新型能源供给系统的建设同时将带动巨大的新兴制造业和新型基础设施建设。这包括:光伏和风电产业;电力电子技术从器件到产品,成为类似于目前信息业和芯片产品的巨大产业;电动车、电池和充电桩产业;各类热量变换器和蒸汽发生器装备;以及跨季节储能和余热共享系统的管网建设等。新型能源供给系统形成的对这些新型产品的市场需求以及这些新型基础设施建设的规模将达到每年20万亿元以上,超过21世纪前20年房

地产和基础设施建设对经济的拉动。

### 4.3 建成收官期(2040—2050年)

到2050年中国已经初步建成新型的零碳城乡能源供给系统,在这一时期零碳转型的重点任务将从新型能源供给系统的建设转至冶金、有色、建材和化工四大产业的流程再造和产业升级。通过流程再造使这些产业生产过程作为原料和燃料的化石燃料从目前的化石能源转为氢、电力和生物质燃料。部分必须要使用的化石能源也要装配CCS以分离和回收其产生的二氧化碳。在流程产业流程再造的过程中,同步地建设相应的余热回收装置,有效回收和利用其排放的各种余热,从而实现余热共享系统余热资源的充分供给,是这一时期热量供给系统不可错过的时机。同时,跨季节储热装置也应全面建成。这样,零碳热量供给系统将可以满足建筑和非流程工业生产的热量需求。

而零碳能源供给系统的建成将极大地降低能源的边际成本,这就可为中国制造业提供低成本、高可靠的能源供给。制造业由此可摆脱长期以来能源高成本、不能充分供给的束缚,从而得到飞速发展。经过30多年的技术积累,中国制造业也到了全面升级换代时期。再加上低成本的零碳电力、零碳热力的供给,中国制造业将获得前所未有的发展,真正成为制造强国。

## 5 结论

提出了城乡能源供给系统的概念,包括电力系统、热力系统和燃料供给系统。根据中国碳中和发展目标,具体给出能源供给系统在保证社会发展与经济增长对能源安全和能源可靠供给的前提下,全面实现零碳的发展路径。分析表明,能源供给系统的全面零碳转型过程会形成新型零碳产品的巨大市场需求和新的能源基础设施的建设需求,从而抵消国际形势变化导致的出口变缓,以及中国房地产业和传统基础设施建设软着陆对经济的影响;而全新的零碳能源供给系统全面建成后,能源的成本会下降,能源的安全性会提高。届时,中国制造业在可靠、充足和低成本能源的支持下,将得到飞速发展。

新型城乡能源供给系统的建设是涉及大量国土空间利用、巨大投资的大型系统工程,需要从全局出发,在统一的科学规划下进行,为了避免重复建设和资源浪费,必须做好按照整个国土范围综合优化的前期规划,在规划的指导下调动市场力量,分期有序实施。

新型城乡能源供给系统属于新的生产力范畴,它在各方面都与目前的能源供给系统不同,从而也与作为生产关系的能源相关政策机制不相容。我们不可能在现有的政策机制框架下实现新型城乡能源供给系统的建设,而必须按照新型能源供给系统的特点和规律设计新的政策机制,以适应其发展。这就是能源的“四个革命”中的政策机制革命。而这样的新的政策机制需要在实践中检验、试错,需要通过工程实践反复迭代。农村可以是先行开展这种先行实验的场所。中国的土地革命、改革开放都是在农村先行实践,通过“农村包围城市”而获得成功。这是由于中国发展特点所决定。新型能源供给系统的革命,也需要在农村先行先试,使农村成为政策机制的探路者。

#### 参考文献(References)

[1] 中国碳达峰碳中和战略及路径[R]. 北京: 中国工程院,

2022.

- [2] 中国科学院. 碳中和: 逻辑体系与技术需求[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [3] 国家能源局. 国家能源局发布 1—5 月份全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2023-06-20) [2023-06-28]. [http://www.nea.gov.cn/2023-06/20/c\\_1310728898.htm](http://www.nea.gov.cn/2023-06/20/c_1310728898.htm).
- [4] 全国水力资源复查工作领导小组. 中华人民共和国水力资源复查成果(2003年)总报告[R]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [5] 王光辉, 唐新明, 张涛, 等. 全国建筑物遥感监测与分布式光伏建设潜力分析[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 92-100.
- [6] 江亿. 光储直柔——助力实现零碳电力的新型建筑配电系统[J]. 暖通空调, 2021, 51(10): 1-12.
- [7] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
- [8] Wang Y, Infield D. Markov Chain Monte Carlo simulation of electric vehicle use for network integration studies[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 99: 85-94.
- [9] 孙涛. 农村屋顶光伏和生物质资源分布及碳中和发展路径研究[D]. 北京: 清华大学, 2023.
- [10] 江亿, 胡珊. 屋顶光伏为基础的农村新型能源系统战略研究[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(3): 11.
- [11] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.

## The low carbon transition approach for China's urban and rural energy supply systems

JIANG Yi, HU Shan\*

Building Energy Research Center, School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** The urban and rural energy supply system refers to the supply system that provides electricity supply, heat supply and fuel supply for buildings and industrial production. Urban and rural energy supply system includes the transmission and distribution system, intermediate transition system, and consumption and regulation of end-users. Carbon neutrality targets will revolutionize this system. This paper systematically discusses the structure, characteristics and regulation of the new electricity system and heating supply systems towards China's zero-carbon target, as well as the direction of the fuel system. This paper discusses the tasks that need to be accomplished in each period to achieve zero carbon goal in three timeframes, and gives a pathway to a zero carbon energy supply system.

**Keywords** low carbon; energy supply systems; new power systems; district heating ●



(责任编辑 徐丽娇)