

3 建筑行业低碳实施路径

教学目标



知识目标

1. 了解我国新的清洁低碳能源体系的构成；
2. 理解构建“光储直柔”建筑能源系统的必要性；
3. 熟悉建筑全生命周期的低碳路径。



能力目标

1. 能说出各类节能节电措施；
2. 能编制建筑节能运行方案；
3. 会进行建筑碳排放计算。



思政目标

1. 具备大国责任意识，以实现碳中和为己任；
2. 能积极主动进行碳达峰、碳中和宣传；
3. 能身体力行坚持绿色低碳生活方式。

3.1 构建新的清洁低碳能源体系

3.1.1 我国的能源结构及碳排放现状

1. 能源结构不合理及资源不平衡

我国的能源结构特点是“富煤、贫油、少气”，现阶段我国的能源体系是一个“高碳、高煤”的系统。依据 2020 年能源消费数据，化石能源消费占比接近 85%，其中，煤炭占 56.7%，石油占 19.1%，天然气占 8.5%。另外，水电、核电、风电等非化石能源占比 15.7%（图 3-1）。

我国人均资源拥有量较低，煤炭和水力资源人均拥有量为世界平均水平的 50%，石油、天然气资源人均拥有量为世界平均水平的 10%。我国除了煤炭资源相对丰富外，其他化石能源自给能力不强，对外的依存度过高。中国是油气进口大国，2020 年我国的石油进口率为 73%，天然气的进口率为 43%。从我国能源资源分布看，煤炭、石油、天然

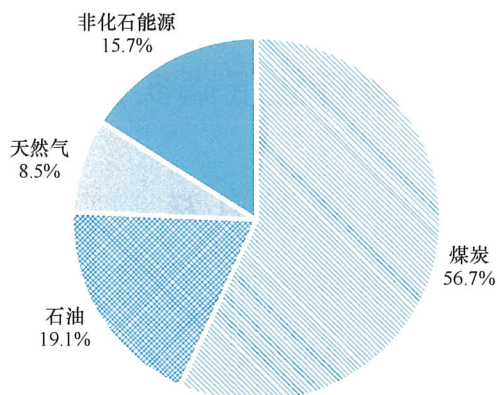


图 3-1 2020 年我国各类能源消费量占比

(数据来源:《中国能源发展报告 2020》)

气、水力资源等主要分布在华北、西北、西南一带，而能源的消费则主要集中在东南地区，能源资源与消费市场的逆向分布制约了能效提升。

2. 碳排放及电力生产情况

根据国际能源署 (IEA) 的数据，2020 年我国二氧化碳排放总量 98.99 亿吨（其中来自煤炭的碳排放量约为 70 亿吨），占全球排碳总量的 1/4 以上，居全球首位。

2020 年我国的二氧化碳排放，从行业看，发电和供热行业占总排放的 51%，远高于其他行业；工业排放占比约 28%，是第二大碳排放行业；交通行业和建筑行业的碳排放占比分别为 10% 和 6%（图 3-2）。

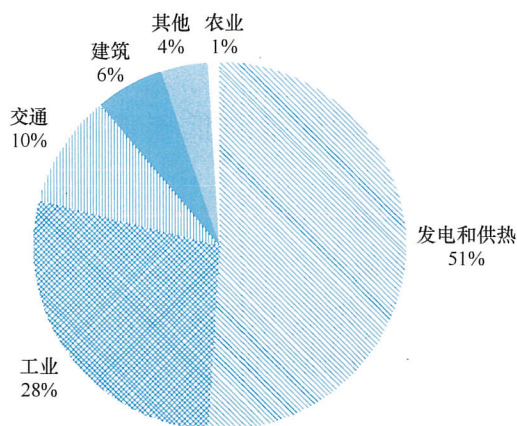


图 3-2 2020 年我国二氧化碳排放按行业细分

(数据来源:国际能源署)

电能供应涉及各行各业，但现阶段我国的电力生产仍然是以燃煤火电为主。根据国家统计局数据，2020 年我国全社会发电量见表 3-1。

2020 年我国各类发电量及占比

表 3-1

		发电量 (亿千瓦时)	占社会总发电量比例
火电	燃煤	46320	60.75%
	燃气	2490	3.27%
	其他火电	1620	2.12%
水电		13550	17.78%
风电		4670	6.12%
核电		3660	4.80%
太阳能发电		2610	3.42%
生物质发电		1330	1.74%
总计		76250	100%

我国以碳基为主的能源结构，是排碳量大的主要原因。要减少二氧化碳排放量，如期实现“碳中和”目标，调整能源结构，大力发展低碳和非碳能源，构建新的清洁低碳、安全高效的能源体系势在必行。



知识链接

火电产生的碳需要多少棵树吸收？

我国目前发电量中，水电、风电、核电和光电约占 30%，属于“零碳电力”，而以燃煤燃气为动力的“碳排放电力”则接近 70%。数据显示，火电的二氧化碳排放量为 838g/kWh，2020 年的 5.04 万亿千瓦时火电排放的二氧化碳约为 42.26t。按照一棵普通树平均每天可吸收 5023g 二氧化碳计算，需要 24 亿棵树花费 1 年才能将这些二氧化碳全部吸收完。

3.1.2 清洁低碳能源体系的目标

1. “双碳”工作对构建新的能源体系的要求

2021 年 9 月，《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，对构建新的能源体系提出的目标见表 3-2。

我国新的能源体系目标

表 3-2

时间	目标
2030 年	(1) 社会发展全面绿色转型取得显著成效； (2) 重点耗能行业能源利用率达到国际先进水平； (3) 非化石能源消费比重达到 25% 左右，风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上； (4) 二氧化碳排放量达到峰值并实现稳中有降
2060 年	(1) 绿色低碳循环发展的经济体系和低碳安全高效的能源体系全面建立； (2) 能源利用效率达到国际先进水平； (3) 非化石能源消费比重达到 80% 以上； (4) 碳中和目标顺利实现

2. 零碳愿景下的能源供给与需求

根据清华大学建筑节能研究中心的数据,对2060年碳中和背景下的各行业用电量预测,以及零碳愿景下能源供给与需求数据见表3-3。

2060 年我国零碳愿景下的能源供给与需求

表 3-3

产出与消费	装机容量/kW	发电量/kWh	需要燃料	排出二氧化碳	输出热量
核电	2 亿	1.5 万亿			70 亿 GJ
水电	5 亿	2 万亿			
风电、光电	65 亿	8 万亿			
调峰火电	6.5 亿	1.5 万亿	4.5 亿 tce (生物质、燃煤、燃气各 1/3)	9 亿吨 CO ₂	70 亿 GJ
流程工业		—3 万亿	7 亿 tce	14 亿吨 CO ₂	50 亿 GJ
非流程工业		—4 万亿	3 亿 tce	6 亿吨 CO ₂	—70 亿 GJ
交通		—2 万亿	3 亿 tce	2 亿吨 CO ₂	
建筑		—4 万亿			—50 亿 GJ
合计	78.5 亿	产出 13 万亿 消费 13 万亿	17.5 亿 tce	31 亿吨 CO ₂	输出 190 亿 GJ 需要 120 亿 GJ

注:生物质商品能源 10 亿 tce,燃气燃煤 6 亿 tce,回收 12 亿吨 CO₂用于化工建材等。

3.1.3 清洁低碳能源体系的实现路径

大力发展低碳和非碳能源,逐步替代煤炭等高碳能源,是我国构建新的绿色清洁能源体系的必由之路,也是解决我国环境和资源问题、走可持续发展的必由之路。

1. 太阳能

(1) 太阳能概述

太阳能是一种清洁的可再生能源。与常规能源相比,太阳能具有资源量大,分布广泛、清洁、经济的优点,也有能量密度低、不稳定和间歇性等缺点。



太阳能应用的优缺点

(2) 我国太阳能资源分布

我国太阳能资源丰富,全国各地年太阳能辐射总量为 3340~8400MJ/m²,平均为 5852MJ/m²。受气候、地形等条件制约,我国的太阳能资源分布具有明显的地域性,根据太阳年辐射量大小,划分为四类地区(表3-4)。

我国(大部分地区)太阳能资源分布及特征

表 3-4

太阳能分布带	主要地区(省、市)	峰值日照时数/h	全年辐照量/[MJ/(m ² ·a)]
一类地区 资源丰富	宁夏北部、甘肃北部、新疆东南部、青海西部和西藏西部	5.08~6.39 均值 5.7	6680~8400
二类地区 资源较丰富	河北西北部、山西北部、内蒙古南部、宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部和新疆南部	4.45~5.08 均值 4.7	5852~6680

续表

太阳能分布带		主要地区（省、市）	峰值日照时数/h	全年辐照量/ [MJ/（m ² ·a）]
三类地区 资源中等		山东东南部、河南东南部、河北东南部、山西南部、新疆北部、吉林、辽宁、云南、山西北部、甘肃东南部、广东南部、福建南部、江苏北部、安徽北部、天津、北京和台湾西南部	3.82~4.45 均值 4.1	5016~5852
四类地区	资源较差	宁夏北部、甘肃北部、新疆东南部、青海西部和西藏西部	3.19~3.82 均值 3.5	4190~5016
	资源最少	四川、贵州、重庆	2.54~3.19 均值 2.8	3344~4190

（3）太阳能光伏发电系统的组成

太阳能光伏发电系统，是利用太阳能电池将太阳能转化为电能的系统（图 3-3）。该系统一般包括：太阳能电池组件（方阵）、储能装置、控制器和逆变器等。



光伏发电的优缺点

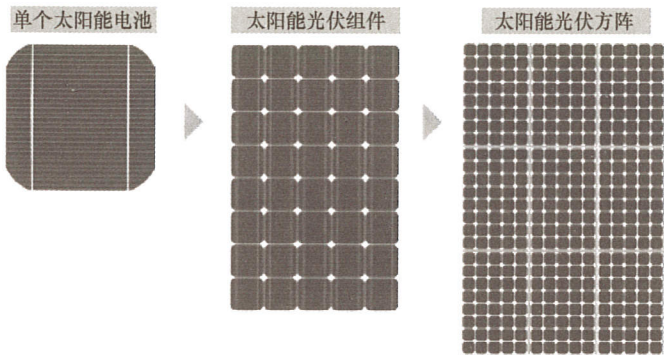


图 3-3 太阳能电池板

（图片来源：公开网络）

（4）光伏发电系统的类型

1）独立光伏发电系统（离网系统）

独立光伏发电系统是指未与公用电网相连的系统，也称离网光伏发电系统。该系统一般为特定用户如野外军营、哨所、边缘村庄等供电。该系统发出的电能不输送到电网，而是直接供给用户使用。系统一般由太阳能电池组件方阵、控制器、蓄电池、逆变器和负载构成。这类系统白天时由电池组件为负载供电同时为蓄电池充电；夜间时由蓄电池为负载供电（图 3-4）。

该系统常与市电、风电结合，构成市电-光电互补、风电-光电互补系统，市电或风电作为夜间、阴雨天气时光电不足时的补充。

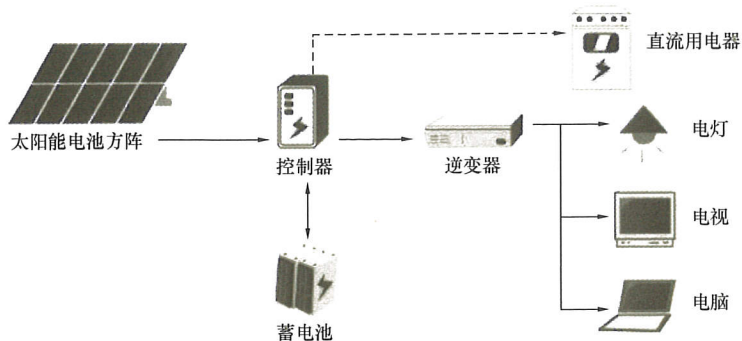


图 3-4 独立光伏发电系统

(图片来源: 公开网络)

2) 并网光伏发电系统

并网光伏发电系统是指与公共电网相连, 与公共电网共同承担供电任务的系统。太阳能电池组件方阵将光能转变为电能, 经直流配电线箱进入并网逆变器, 经逆变器输出的交流电供负载使用, 多余的电能通过电力变压器等设备馈入公共电网(卖电); 当并网光伏系统因天气原因或自身用电量偏大时, 可由公共电网向交流负载供电(买电)(图 3-5)。

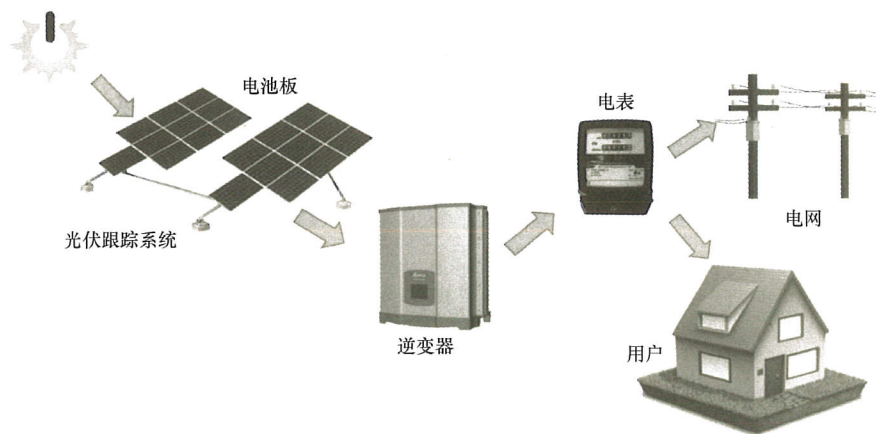


图 3-5 并网光伏发电系统

(图片来源: 公开网络)



知识链接

我国光伏发电行业现状及前景

2021 年我国光伏发电新增并网容量 5488 万千瓦, 其中集中式光伏电站 2560.07 万千瓦, 分布式光伏 2927.9 万千瓦。

截至 2021 年底, 我国光伏发电累计并网容量 30598.7 万千瓦, 其中集中式光伏电站 19847.9 万千瓦, 分布式光伏 10750.8 万千瓦。

光伏发电成本大幅降低, 平均上网电价已降至 0.35 元/kWh, “十四五”期间将降到 0.25 元/kWh 以下。

2. 风能

(1) 风能概述

风是一种自然现象，风能是一种天然能源。与常规能源相比，风能具有如下优点：

- 1) 蕴藏量丰富。据估算，全世界可利用的风能总量约 2000 万兆瓦。
- 2) 可再生，用之不尽。风能是太阳能的变异，只要太阳和地球存在，就有风能。
- 3) 清洁无污染。风能开发不存在开采和运输问题，可以就地开发利用。

(2) 我国的风能资源

我国是世界上风力资源占有率最高的国家之一。风能资源的勘测以距地面 10m 高度层的全年风速和累计小时为依据。根据年有效风能密度值、风速大于等于 3m/s 和 6m/s 的全年累积小时数，我国风能资源划分为风能丰富区、风能较丰富区、风能可利用区和风能贫乏区四个区域（表 3-5）。

我国（大部分地区）风能资源分布及特征

表 3-5

风能分布区	主要地区（省、市）	年有效风能密度/ (W/m ²)	年风速≥3m/s 累计小时/ h	年风速≥6m/s 累计小时/ h	占全国面积的 百分比/%
风能丰富区	东南沿海、山东半岛、辽东半岛及海上岛屿，内蒙古、甘肃北部，黑龙江南部、吉林东部、河北北部	>200	>5000	>2200	8
风能较丰富区	西藏高原中北部，东南沿海，东北、西北、华北的南部地区，华东沿海地区	150~200	4000~5000	1500~2200	18
风能可利用区	广东、广西沿海，福建沿海，大、小兴安岭山区，中部地区等	<50~150	<2000~4000	<350~1500	50
风能贫乏区	云、贵、川、甘南、陕西、湘西、鄂西和福建、两广的山区等；塔里木盆地、雅鲁藏布江各地	<50	<2000	<350	24

(3) 风力发电系统的组成

风力发电是利用风的动能来驱动风力机，风力机再带动发电机进行发电的技术。风力发电机组一般由风力机、发电机、支撑部件、基础及电气控制系统等几部分组成。

风力发电机组的种类和式样有很多种，通常有以下分类方式：

- 1) 根据风力发电机的输出容量，我国分为四种：

① 微型，1kW 以下；② 小型，1~10kW；③ 中型，10~100kW；④ 大型，100kW 以上。1000kW 以上的风力发电机也称为兆瓦级风力发电机。

- 2) 按风轮结构和其在气流中的位置，分为两种：

① 水平轴。水平轴风轮的旋转轴水平，与风向平行。因技术成熟、单位发电量成本较低，是目前应用最广的形式（图 3-6）。

② 垂直轴。垂直轴风轮的旋转轴垂直于地面或气流方向，其主要优点是可以接受来自任何方向的风，发电机位于风轮下方，便于安装维护和保养，但因叶片形状特殊，设计、加工和运输难度较大，单位发电量造价高于水平轴风机，应用尚少（图 3-6）。

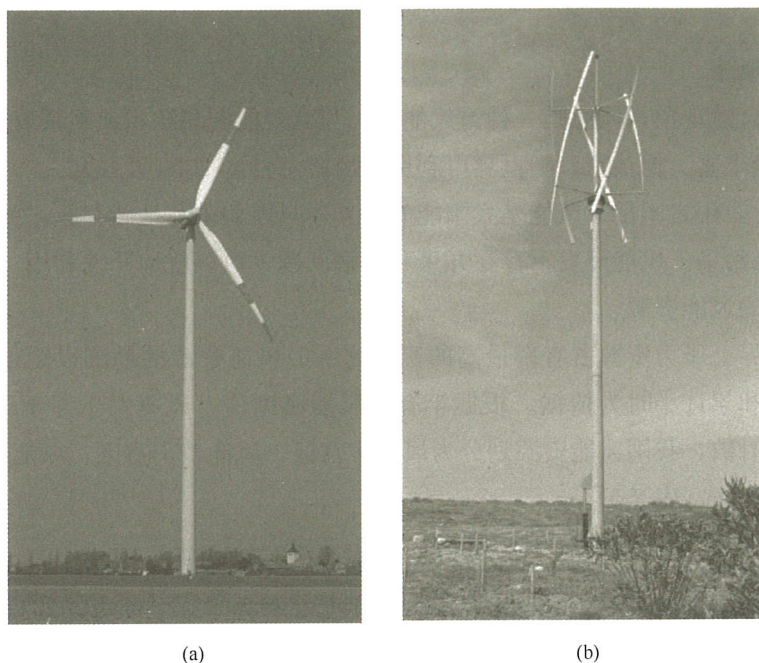


图 3-6 风力发电机组

(a) 水平轴风轮；(b) 垂直轴风轮

(图片来源：公开网络)

(4) 风力发电系统的类型

1) 小型风力发电系统

小型风力发电机组多用于偏远农村、山区、草原、岛屿等偏远地区，多为离网型发电系统，常与光伏发电系统形成互补，实现供电可靠性。

小型风力发电系统由小型风力发电机、控制器、蓄电池和逆变器等构成（图 3-7）。

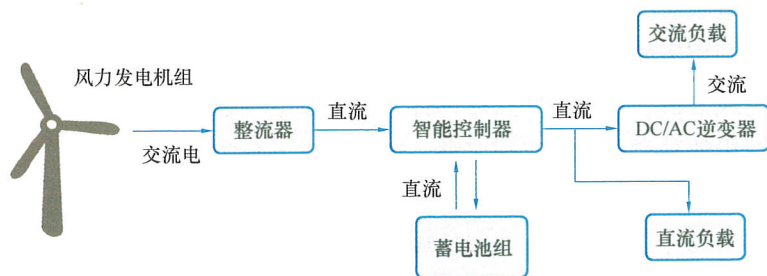


图 3-7 小型风力发电系统

(图片来源：作者自绘)

2) 并网型风力发电系统

发电功率大于 1000kW 的风力发电系统，即兆瓦级风力发电系统，通常采用并网运行的方式。风力发电机产生的电能，不直接供当地的负荷使用，而是输送到其他区域或大电网中（图 3-8）。

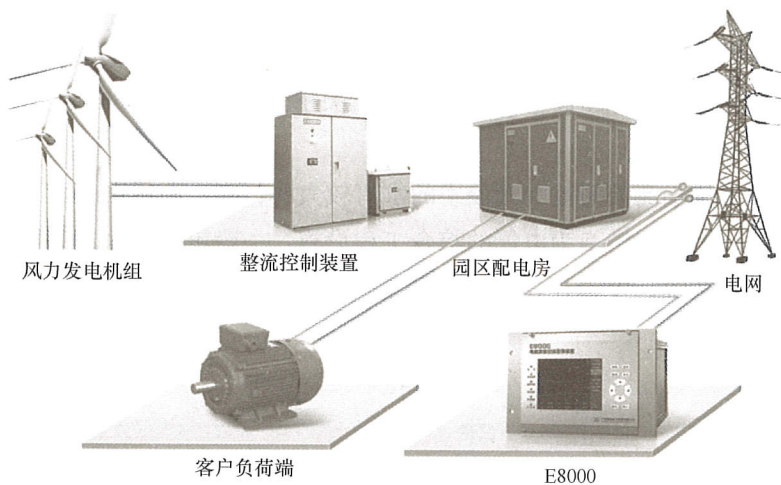


图 3-8 并网型风力发电系统

(图片来源: 公开网络)

并网型风力发电机组可分为风轮、机舱、塔架和基础等部分。

知识链接

我国的风力发电

新疆达坂城风电一场是我国第一个风能发电场, 于 1989 年建成。

广东省南澳岛风电场是我国第一个海岛风电场, 到 2005 年底, 装机容量达到 5.6 万千瓦, 是当时亚洲最大的海岛风电场。

2007 年 6 月, 我国建成最大的风电场, 内蒙古的辉腾锡勒风电场, 总装机容量 189 兆瓦。

2021 年全国风电发电量为 5667 亿千瓦时, 占发电总量的 6.6%。

3. 水能

(1) 水能概述

水能通常是指水具有的势能、压能和动能三种机械能。自然界中的水能实际是太阳能的一种转化形式, 低位的水被太阳光加热, 蒸发变成水蒸气, 水蒸气在高空聚集成云飘散到地球各处, 在冷空气的作用下形成雨降落到地面, 汇集成河流并具有了机械能。

人类很早就开始利用水能, 中国古代利用湍急的河流、跌水、瀑布等水能资源, 建造水车、水磨和水碓等机械用于提水灌溉、粮食加工、舂稻去壳。

(2) 我国的水能资源

我国河流众多, 径流丰沛、落差巨大, 蕴藏着非常丰富水能资源。我国的水力资源居世界第一。水资源理论蕴藏量 7 亿千瓦, 技术可开发量 5.4 亿千瓦, 经济可开发量 4 亿千瓦。截至 2020 年底, 全国水电装机 3.70 亿千瓦, 占全国电力总装机规模的 16.82%。

我国可利用的水能资源主要包括长江流域、黄河流域、东北边境流域、西南边境流域、东南沿河流域及其他流域。其中，长江是中国水力最丰富的河流，可开发的水能资源占全国总量的 53.4%；黄河是中国第二大河，黄河流域水能资源的理论蕴藏量达 43311 兆瓦。

(3) 水力发电系统

水力发电是指位于高处河流和湖泊中的水有较大的势能，利用水的落差形成的势能用于发电。水电站是将水能转换为电能的综合工程设施，一般包括挡水建筑物、泄水建筑物形成的水库、引水系统、发电厂房和机电设备等设施。上述设施共同构成水力发电系统（图 3-9）。

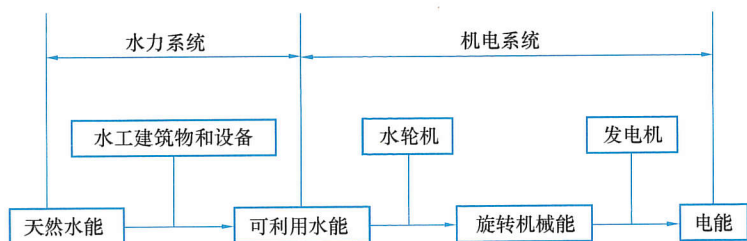


图 3-9 水力发电系统

水库的高水位水，经引水系统流入厂房水轮机，通过水轮机向下游流动时，水能转变为机械能，驱动发电机转变为电能，电能再经升压变压器、开关站和输电线路输入电网。

(4) 水力发电的开发形式

水电站是将水能转变为电能的工厂，又称水力发电厂或水力发电站。

按利用能源的方式，水电站分为：常规水电站、抽水蓄能水电站、潮汐电站和波浪能电站；按集中水头方式，水电站分为：坝式、引水式和混合式；按运行方式，水电站分为：无调节水电站、有调节水电站和抽水蓄能水电站等。



我国的水力发电情况简介



知识链接

我国的水力发电

2021 年我国水力发电装机容量累计约达 3.91 亿千瓦。

2021 年我国水电发电量 11840.2 亿千瓦时，占当年全社会用电量的 14.24%。

2022 年 12 月 20 日，世界技术难度最高、单机容量最大、装机规模第二大水电站——白鹤滩水电站正式投产发电。

截至 2022 年底，三峡集团在长江干流建设运营的乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝、三峡及葛洲坝 6 座巨型梯级水电站，共安装 110 台水电机组，总装机容量达 7169.5 万千瓦，形成世界最大“清洁能源走廊”。6 座水电站联合调度、协同运行，年均发电量可达 3000 亿千瓦时，每年可节约标煤约 9045 万吨。

4. 核能

(1) 核能概述

核能是一次能源的重要组成部分,核电在能源价格上优势明显,而且更稳定,是除化石燃料之外能够提供大规模电力的清洁能源,是今后一段时期内解决能源稀缺问题的希望。



核能的应用与安全

(2) 我国核电发展情况

近年来,我国的核电工业经历起步、初步发展、腾飞和持续发展几个阶段,目前已经是全球核能利用大国。

截至2021年年底,中国大陆运行核电机组共53台,额定装机容量为54646.95MWe。2021年全国核电机组累计发电量为407亿千瓦时,排世界第二位,占全国累计发电量的5.02%。

(3) 核能发电技术

现阶段的核电站大多是利用核裂变进行发电的。核能发电利用铀燃料进行核分裂连锁反应产生热量,将水加热成高温高压蒸汽,水蒸气推动蒸汽轮机并带动发电机发电。核反应所放出的热量较化石燃料燃烧所放出的能量高约百万倍。

(4) 核废料处理与核安全

1) 核废料的分类与处理

核废料是指在核燃料生产、加工和核反应堆用过后不再需要的并具有放射性的废料。按物理状态,核废料可分为固体、液体和气体三种;按比活度(也称比放射性,指放射源单位时间被放射性元素衰变的次数与其质量之比)可分为高水平(高放)、中水平(中放)和低水平(低放)三种。高放废料是指从核电站反应堆芯中换下来燃烧后的核燃料;中放和低放废料主要是指核电站在发电过程中产生的具有放射性的废液、废料,占有核废料的99%。

核废料的处理有两个必需条件:①安全、永久地将核废料封闭在一个容器里,并保证数万年内不泄漏出放射性物质;②寻找一处安全、永久存放核废料的地点。

目前,国际上通常通过海洋和陆地两种途径处理核废料:①将核废料先经过冷却、干式贮存,然后再将装有核废料的金属罐投入选定海域4000m以下的海底;②深埋于建在地下厚岩石层里的核废料处理库中。

2) 核安全

核安全有广义和狭义之分。

广义核安全是指涉及核材料及放射性核素相关的安全问题,包括放射性物质的管理、前端核资源开采利用的设施安全、核电站的安全运行、乏燃料后处理设施的安全及全过程的防核扩散等。

狭义核安全是指在核设施的设计、建造、运行和退役期间,为保护人员、社会和环境免受可能的放射性危害所采取的技术和组织措施的综合。具体包括:确保核设施的正常运

行、预防事故的发生、限制可能的事故后果。



知识链接

我国的核能发电

秦山核电基地是我国目前核电机组数量最多、装机容量最大的核电基地，年发电量约 500 亿千瓦时。1985 年 3 月开工建设，1991 年 12 月并网发电。

2021 年我国核电发电量为 4071.41 亿千瓦时，约占全国总发电量的 4.8%。

截至 2022 年 8 月底，我国拥有商运核电机组 53 台，总装机容量 5559 万千瓦，在建核电机组 23 台，总装机容量 2419 万千瓦，在建核电机组规模全球第一。

“十四五”期间，我国核电装机规模将进一步加快扩大，每年增加 6~8 台。预计到 2035 年，核能发电量在我国电力结构中的占比将达到 10%。

3.1.4 “光储直柔”建筑新型能源系统

1. 清洁低碳能源体系的难题与破解

1) 发展各类电力的局限

从能源供给的角度，构建清洁低碳电力体系是关键。但受各方面因素的制约，各类能源发展都会有最大限度。

① 水电：根据最新统计，中国水能资源可开发装机容量约 6.6 亿千瓦，年发电量约 3 万亿千瓦时。截至 2020 年，我国水电年发电量已突破 1.2 万亿千瓦时，预计到 2060 年，我国水电开发程度将稳步提升，年发电量达到 2 万亿千瓦时。虽然水电具有绿色、廉价的优势，但我国水电资源的开发，年发电量 2 万亿千瓦时已是上限，剩余可开发水电资源经济性较差，增量有限。此外水电除了用于供电外，更重要的作用是用于风电和光电的调蓄。

② 火电：火电作为当前我国基荷能源的主力，由于碳排放高与“双碳”目标严重相悖，发展将受到限制，未来趋势是逐年递减状态，预计到 2060 年，火电年发电量 1.5 万亿千瓦时，将主要起到调峰作用，以弥补水电、光电因冬季短缺造成的缺口。

③ 核电：鉴于核电站的特殊性，核电站的建设具有一定局限性，核废料处理以及核事故不可预估的后果也都是短时间内无法突破的瓶颈，因此未来核电的容量也有峰值限制。根据预测，到 2060 年，我国核电站的年发电量将达到 1.5 万亿千瓦时。

④ 风电、光电：未来电力体系中，风电、光电将成为电力系统的主力，预计占到总装机容量的 80%，年发电量的 60%。风电和光电都会受气候条件影响，发电量具有较大的波动，除了要考虑因季节原因导致的水电、光电冬季电力短缺问题和供电与用电负荷间不匹配问题外，目前面临的最大问题是风电、光电的安装位置。

2) 我国风电、光电资源现状

由于风电、光电都属于低密度电源，按装机容量 $100\text{W}/\text{m}^2$ 计算，60 亿千瓦装机容量

所需要的水平面积为 6 万平方公里。

如果直接在中东部电力负荷密集区利用屋顶等资源发展分布式光电，不仅安装费用低于戈壁光伏，且减少长途输电投资，还可以降低输送损耗和两侧的储电损耗，并且集发电、储电、用电于一体，电力优先在低压层级进行消纳，可以缓解电网压力。

因此，未来清洁低碳能源体系中，来自风电、光电的约 8 万亿千瓦时的电，其中 6 万亿千瓦时在中东部负荷密集区产生，采用分布式或集中式；另外 2 万亿千瓦时来自西北地区，并且需要依靠水电进行调峰协同。由于光伏发电需要非常大的面积，建筑屋顶就变成了非常好的可再生能源利用场景。所以，在满足建筑美观的前提下，利用建筑的屋面与外立面，尽可能地发展光伏资源，使建筑成为能源的产消者，将是一场新的能源革命。



为何不能全部依赖
我国西部地区
发展光伏

2. “光储直柔”建筑新型能源系统

(1) “光储直柔”建筑必要性

《中国建筑节能年度发展研究报告 2022》的数据显示，我国建筑运行的年碳排放量达到 21.8 亿吨，民用建筑建造相关碳排放量 15 亿吨，二者相加，已经接近全社会碳排放的 40%。未来，我国建筑面积还将进一步增加，服务质量也将进一步提升，建筑领域面临巨大减碳压力。

传统的建筑能源系统，以满足建筑运行的能源需求（冷、热、电等）为基本任务，建筑仅承担能源消费者的角色。在“双碳”目标指引下，建筑能源系统面临更高的发展要求，需重新认识建筑在整个能源系统中的角色和定位，增强建筑能源系统的柔性成为重要任务。

未来的电力系统将转型成为以风电、光电等可再生能源为主体的零碳电力系统，风电、光电的发展需要解决安装位置、消纳和调蓄等问题。建筑作为重要的能源需求用户，同时又具有安装分布式光伏的面积资源，可以有效承担起自身可再生能源充分利用、协助低碳电力系统实现有效调蓄等任务。因而，在能源系统低碳发展需求下，建筑在其中的定位发生了变化：在建筑仍作为能源用户的基础上，既需要建筑作为光伏的生产者，也需要建筑能够响应外部能源供给侧变化，有效承担起从用户侧调节出发、适应供给侧变化特点的任务。

根据卫星图片和现场抽样调查，得到全国建筑屋顶资源利用方面的数据（表 3-6）。

我国的建筑屋顶资源

表 3-6

建筑屋顶	可利用面积/ 亿平方米	光伏安装量/ 亿 kW	年发电量/ 亿 kW	可满足
城镇	75	8.7	10000	城镇建筑和私家车 用电量的 25%
农村	185	19.7	25000	农村生活、生产、 交通用电量的 2 倍

通过全面开发利用城乡建筑的屋顶进行光伏发电,可完成全国 60% 的光伏发电任务。

因此,充分利用建筑屋面发展光伏资源,使建筑从原来的单纯能源消耗变成集能源的生产、消费和调蓄三位一体的产消者,将成为我国构建清洁低碳能源体系的发展方向。

(2) “光储直柔”系统原理

“光储直柔”,英文简称 PEDF,是光伏发电(Photovoltaic)、储能(Energy Storage)、直流配电(Direct Current)和柔性用能(Flexibility)四项技术的合称,是适应碳中和目标需求而构建的新型建筑配电系统,也称建筑能源系统。

光(Photovoltaic):是指建筑中的分布式太阳能光伏发电设施。随着技术的进步,将光伏板、太阳能薄膜、太阳能玻璃等固定在建筑屋顶及外表面或直接成为建筑的构件,将建筑建造与分布式光伏发电进行有机结合,发展低碳建筑,使建筑成为能源的“生产者”。

储(Energy Storage):是指建筑中的储能设施。因为光伏发电与建筑用电的不同步,所以需要大量能够储存电能的设备,蓄电池、可充电的扫地机器人、笔记本电脑等智能家电,都是很好的储能设备。由于汽车 90% 的时间是停在建筑旁边,使用双向充电桩,未来电动车将可能成为“移动电站”。

直(Direct Current):是指建筑内的低压直流配电系统。现有供电系统提供的是交流电,大部分电器也都是交流电器,而事实上,电视、电脑、音响等设备的电子元器件必须用直流电才能工作,需要先整流;电动车的蓄电池需要直流充电,光伏发电输出的也是直流电。供需两侧的“直流本质”,将给相关领域带来机遇和挑战,例如高效直流空调等设备。

柔(Flexibility):是指柔性用电技术。主要是解决市电供应、分布式光伏、储能及建筑用电四者的协同关系,具体来说就是解决一天内电力供需不匹配问题的技术。柔性技术是解决当下电力负荷峰值突出问题以及未来与高比例可再生能源发电形态相匹配问题的关键。

“光储直柔”建筑的最终目标是实现建筑整体柔性用能,使得建筑从传统能源系统中仅是负载转变为未来能源系统中的“产消蓄调”复合体(图 3-10)。

(3) 如何构建“光储直柔”建筑

构建“光储直柔”建筑能源系统,并非简单应用光伏或某项单一技术,也不是“光、储、直、柔”的简单组合。构建“光储直柔”系统需要多方面的协同,才能实现将建筑打造成为能源系统中集生产、消费、调蓄功能“三位一体”复合体的目标。

1) 光:产消明确,应装尽装

光伏发电需要敷设面积,建筑表面成为重要的安装资源,建筑将从单纯的用电负载转变为能源生产者。

未来城市建筑的功能:①充分挖掘利用建筑外表面,发展光伏,满足建筑和私家车用电量的 25%;②利用建筑热惯性、私家车的电池资源、分布蓄电池,完成 60% 的日内调节电量。除特殊场合外,城市建筑完全自发自用,不上网送电。

未来农村建筑功能:依靠屋顶光伏建成新型的农村能源系统,不仅满足农户生活、生产用能,还可以发电上网。由于农村建筑屋顶的光伏发电量是自身用电量的 1.5~3 倍,



建筑屋顶光伏
的潜在价值

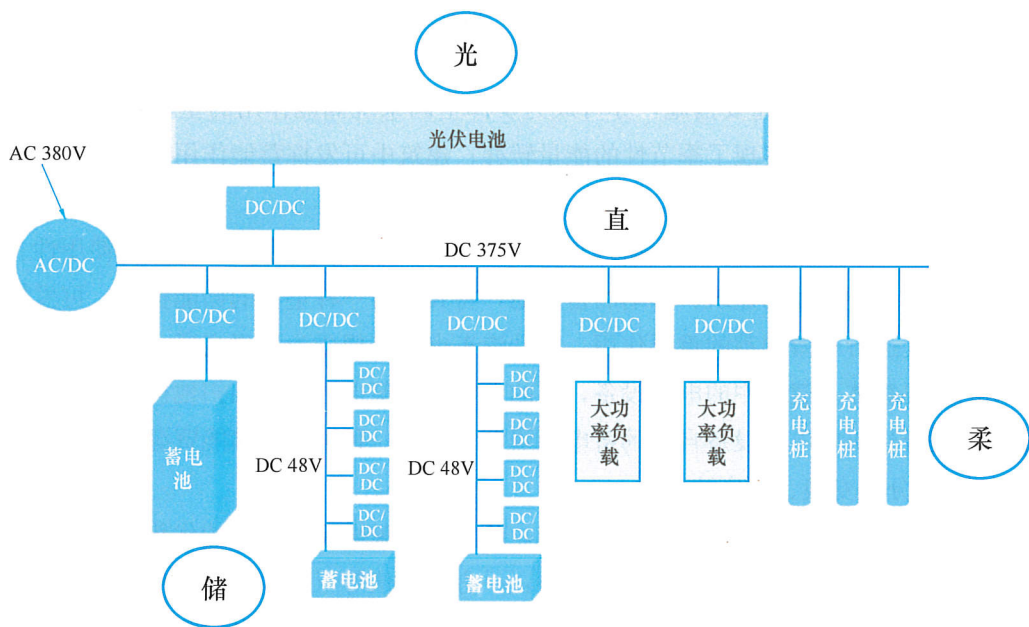


图 3-10 “光储直柔”建筑配电系统

通过车辆和农机具蓄电，可以实现单向送电。农村建筑具有显著光伏利用潜力，有望成为未来零碳电力系统中重要的分布式电力来源。

2) 储：挖掘潜力、合理配置

未来以风电、光电为主的新型电力系统要解决风电、光电电力波动性难题，需要配置大量调蓄和储能资源。当前电力系统中考虑的主要储能方式包括化学电池、蓄冷/蓄热、抽水蓄能、压缩空气、飞轮、氢等，这些储能手段目前成本很高，是构建未来以风电、光电为主的低碳电力系统面临的重要难题，还需要进一步探索。因此，使建筑侧成为调蓄资源具有重要意义。

从建筑侧来看，建筑内可利用的各类具有储能/蓄能能力的设备、设施都可以作为“光储直柔”系统中的储能资源（图 3-11）。

建筑本体围护结构可发挥一定的冷热量蓄存作用,与暖通空调系统特征相关联后可作

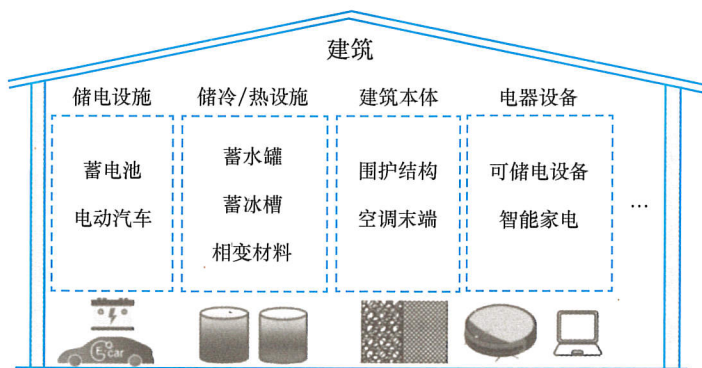


图 3-11 建筑中可供蓄能的资源

为重要的建筑储能/蓄能资源；水蓄冷、冰蓄冷等是建筑空调系统中常见的可实现电力移峰填谷的技术手段；各类用能设备可作为储能系统的重要设备，例如空调系统中的热泵等是满足热量/冷量需求的重要措施，亦可成为发挥空调系统储能作用的重要手段，地源热泵等空调方式实质上是实现了季节性的能量转移；建筑中可发挥蓄能作用的至少还包括电动车和各类设备电器。

对汽车使用行为研究表明，电动汽车与建筑之间具有密切联系和高度同步使用性。电动汽车可视为一种移动的建筑、移动的蓄电池，将其作为一种重要的储能资源，可发挥对建筑能源系统进行有效调蓄的重要作用，电动汽车也将有望成为实现交通、建筑、电力协同互动的重要载体。建筑中的电气设备，有的自身带有蓄电池，例如扫地机器人、笔记本电脑等，集合建筑中电气设备自身的蓄电池资源，也是一种可观的储能资源。

3) 直：分层变换、适应波动

未来建筑将推广使用低压直流配电系统，除了直流配电系统自身的优势外，供给侧与需求侧的发展变化为其应用提供了有利条件：一方面光伏等可再生能源输出为直流电，直流配电系统可以更好地发挥建筑光伏利用的优势；另一方面建筑机电设备中越来越多的高效设备正在直流化或利用直流驱动，例如直流电器 LED 照明、直流驱动的 EC 风机、直流调速离心冷水机组等高效产品。传统交流配电网络中需将交流电转换为直流电来满足高效机电设备的需求，而直流配电系统可以省去交直变换环节，系统更简单、与用电设备的高效发展需求更匹配。

目前，《民用建筑直流配电设计标准》T/CABEE 030—2022 已正式颁布实施，为建筑低压直流系统的设计、运行等提供了重要基础。该标准建议电压等级不多于 3 级，并推荐采用 DC750V、DC375V、DC48V，可根据设备接入功率需求选取适宜的电压等级。在明确电压等级、系统中各类负荷负载组成的基础上，“光储直柔”系统中的各类负载、光伏、储能等通过有效的 DC/DC 变换器接入建筑直流配电系统，并最终通过直流母线与外部交流电网之间的 AC/DC 变换器连接，根据各类负载电器、用能/供能/蓄能设备所需的电压等级来实现分层分类变换，满足各自需求（图 3-12）。

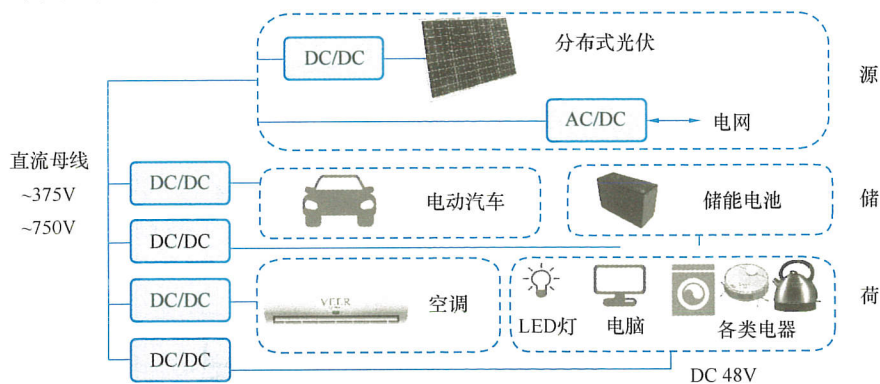


图 3-12 建筑低压直流配电系统示意图

4) 柔：充分调动、积极响应

建筑柔性是指在满足正常使用的条件下，通过各类技术使建筑对外界能源的需求量具有弹性，以应对大量可再生能源供给带来的不确定性。柔性用能是“光储直柔”系统的最终目标，期望将建筑从原来电力系统内的刚性用电负载变为灵活的柔性负载。

要实现建筑柔性用能，一方面需要将建筑融入整个电网或电力系统中，进一步理解电网侧需要建筑用能实现什么样的效果；另一方面则是在建筑内部能够对电网要求的柔性用能进行有效响应，通过调度建筑内部的系统、设备等满足电网侧的调节需求（图 3-13）。

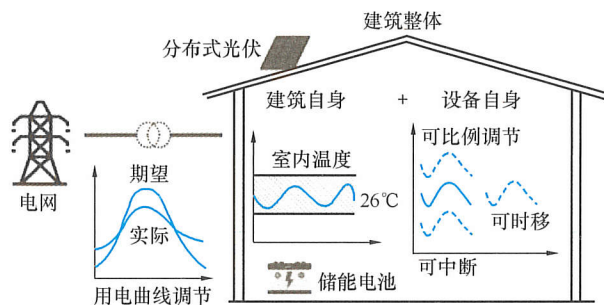


图 3-13 建筑柔性用电及与电网友好互动

从电力系统发展趋势来看，我国未来将建成以风电、光电为主体，其他能源为有效补充或调节手段的低碳电力系统，这一目标的实现需要“源、储、网、荷”多方位的协调配合。风电、光电的发电特点是波动大，电网供给侧的特征变化使得其需要可供调节、应对波动的有效手段。若负载侧能够适应未来电力供给变化的特点，则可有效降低对电网侧储能、调蓄能力等的要求，这也是建筑可主动作为、争取成为未来低碳电力系统中柔性负载的重要意义。

3.2 建筑领域的低碳与节能

3.2.1 低碳目标下建筑节能的必要性

如果从电力、供热、工业生产等领域的工作为建筑服务的角度考虑，我国建筑领域的碳排放量约为我国总碳排放量的 40%，是全社会二氧化碳排放占比最大的部门，建筑行业的减碳工作任重道远。要实现低碳目标，节约能源是关键。

1. 建筑低碳与建筑节能的关系

(1) 低碳与节能目标的一致性

建筑领域的低碳目标是寻求在建筑全生命周期中采取有效措施降低碳排放，关键环节包括减少“建造过程碳排放”“建筑材料相应碳排放”和“建筑运行过程碳排放”。建造过程碳排放，在总碳排放中占比较低（约 3%）；发展各类低碳排放的建筑材料是实现建材减排的重要措施；运行过程中能源消耗对应的碳排放是建筑全生命周期中碳排放占比最大