



双碳目标下我国能源电力系统 发展前景和氢能利用

周孝信

2021.10.23 太原

 国际能源研究中心

目录



- **我国能源转型的战略目标和实施路径**
- **新型电力系统主要特征核心指标和关键技术**
- **双碳目标下我国能源电力系统发展情景分析**
- **综合能源生产单元 (IEPU) 设想**
- **总结与讨论**

我国能源转型的战略目标和实施路径



关键指标
2030

习近平主席2020年9月22日在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话中提出“**中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和**”的应对气候变化“**双碳目标**”



落实两个
“构建”

2021年3月15日，习近平总书记在中央财经委员会第九次会议上明确了“**十四五**”是碳达峰的关键期、窗口期，需要落实几项重点工作，其中第一项任务就是“**要构建清洁低碳安全高效的能源体系，控制化石能源总量，着力提高利用效能，实施可再生能源替代行动，深化电力体制改革，构建以新能源为主体的新型电力系统**”

国际能源研究中心

我国能源转型的战略目标和实施路径

“双碳目标”和能源转型的战略目标高度一致
“两个构建”是实现能源转型的根本措施，是实现“双碳目标”的基本保证



战略目标
Strategic goal

实现双碳目标

- 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值
- 努力争取2060年前实现碳中和



实施路径
Implementation path

落实两个构建

- ✓ 构建清洁低碳安全高效的能源体系
- ✓ 构建以新能源为主体的新型电力系统

目录



- 我国能源转型的战略目标和实施路径
- **新型电力系统主要特征核心指标和关键技术**
- 双碳目标下我国能源电力系统发展情景分析
- 综合能源生产单元 (IEPU) 设想
- 总结与讨论

新型电力系统主要特征核心指标和关键技术

5个主要特征:

1. 高比例可再生能源电力系统
2. 高比例电力电子装备电力系统
3. 多能互补综合能源电力系统
4. 数字化智能化智慧能源电力系统
5. 清洁高效低碳零碳电力系统

5项核心指标:

1. 非化石能源在一次能源消费中比重
2. 非化石能源发电量在发电量中比重
3. 电能在终端能源消费中比重
4. 系统总体能源利用效率
5. 能源电力系统CO₂排放总量



新型电力系统主要特征核心指标和关键技术

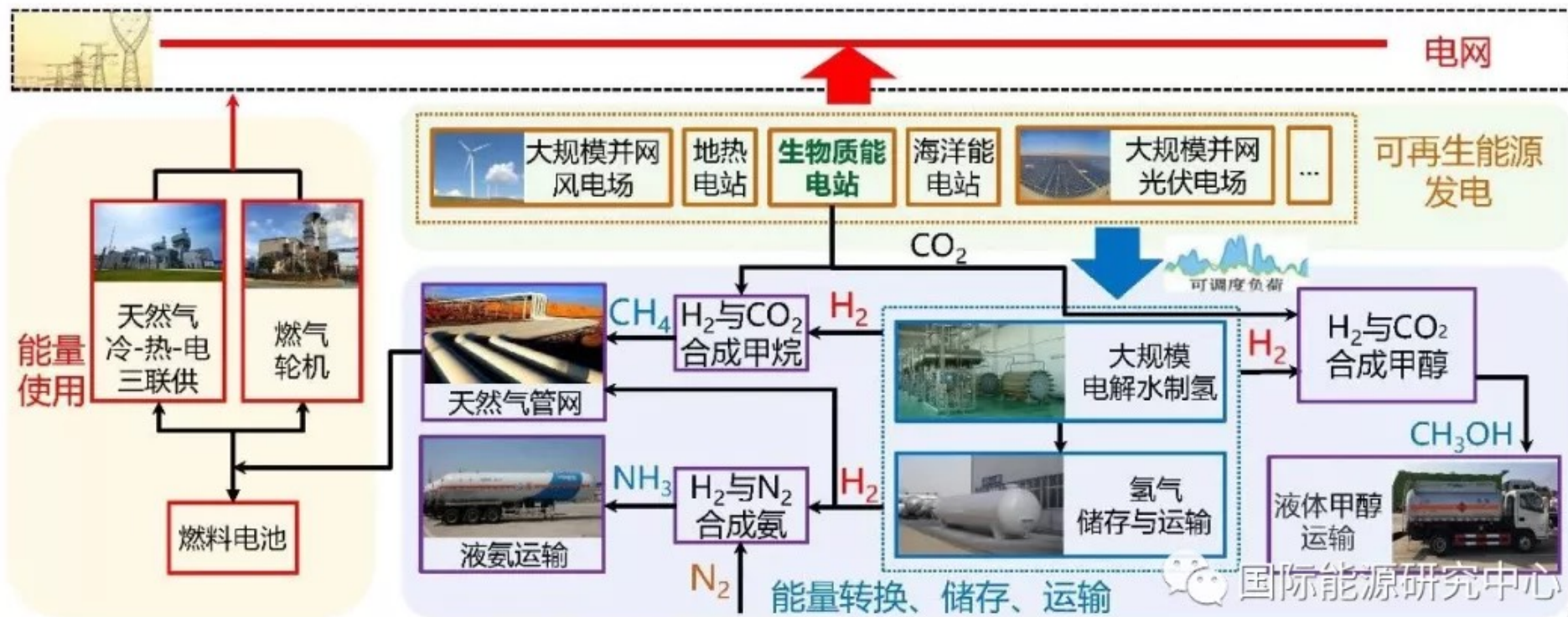
10类关键技术：

1. 高效低成本电网支持型**可再生能源发电**和**综合利用技术**
2. **燃煤发电**提高**灵活性****低碳排放**和**碳资源利用技术**
3. 高可靠性低损耗**新型电力电子元器件装置**和**系统技术**
4. 安全高效低成本长寿命**新型储能技术**
5. **清洁高效低成本氢能生产储运转化**和**应用技术**
6. **超导输电**和**新型综合输能技术**
7. **新型电力系统**规划运行调度和**仿真控制保护技术**
8. 数字化智能化**综合能源电力系统技术**
9. 信息物理融合的**能源互联网/物联网技术**
10. 综合能源**电力市场技术**



清洁高效低成本氢能生产储运转化和应用技术-电制气和液体燃料

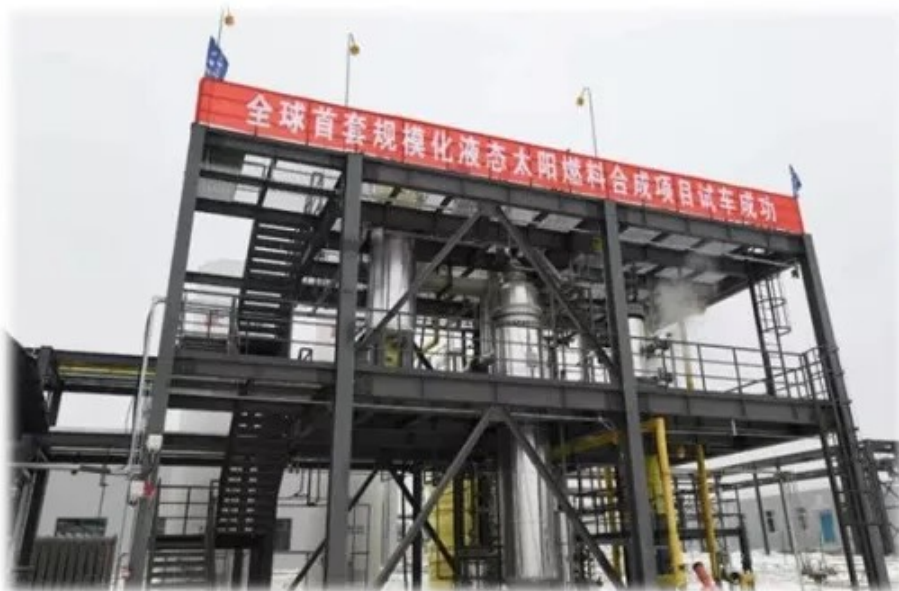
可再生能源电制氢、甲烷 (CH₄)、甲醇 (CH₃OH)、氨 (NH₃)



太阳燃料合成工业化技术

年千吨级规模太阳燃料（甲醇）合成工业示范工程

光伏发电制氢



- 可实现单套装置1000方氢/小时
- 10MW光伏发电可供两套装置
- 每方氢耗电4.3kWh以内
- 若光伏电价0.3元/kWh, 考虑电解成本, 已经与天然气制氢成本持平
- 若用弃电 (成本低于0.1元/kWh), 成本甚至可以低于煤制氢

全球首套直接液态太阳燃料规模化合成于2020年1月在兰州新区试车成功

我国规模化制氢成本比较*

表1 煤制氢成本

煤价 (元/吨)	500	600	700	800	900
制氢成本 (元/Nm ³)	0.88	0.95	1.03	1.10	1.18

表2 甲醇制氢成本

甲醇价格 (元/吨)	1625	2319	3014	3708	5097
制氢成本 (元/Nm ³)	1.5	2	2.5	3	4

表3 天然气制氢成本

天然气价格 (元/Nm ³)	1.82	2.65	3.49	4.32	5.99
制氢成本 (元/Nm ³)	0.9	1.18	1.46	1.74	2.3

表4 光伏发电电解水制氢成本

电价 (元/kWh)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
制氢成本 (元/Nm ³)	1.35	1.95	2.55	3.15	3.75	4.35



以1000Nm³/h电解水制氢为例，总投资约1400万元，按照1Nm³氢气消耗5kWh电能计算，不同电价测算制氢成本分析如表4。考虑石化制氢杂质组分复杂还需进一步提纯，由此分析，电价控制在0.3元/kWh以下时，光伏发电制氢才具有竞争力。

数据参考来源：

2020-07-08 10:11:35 北极星太阳能光伏网；

中国氢能产业基础设施发展蓝皮书（2018）

Cost-Economic Analysis of Hydrogen for China's Fuel Cell Transportation Field. Energies 2020, 13(24), 6522; doi:10.3390/en13246522

目录



- 我国能源转型的战略目标和实施路径
- 新型电力系统主要特征核心指标和关键技术
- **双碳目标下我国能源电力系统发展情景分析**
- 综合能源生产单元 (IEPU) 设想
- 总结与讨论

双碳目标下我国能源电力系统发展（情景六）-情景设置

根据双碳目标的基本要求，考虑经济社会发展对能源电力安全供应需求及能源电力技术进步等因素，在不同发展阶段3个时段下设定3项经济社会和能源发展主要指标及其变化趋势

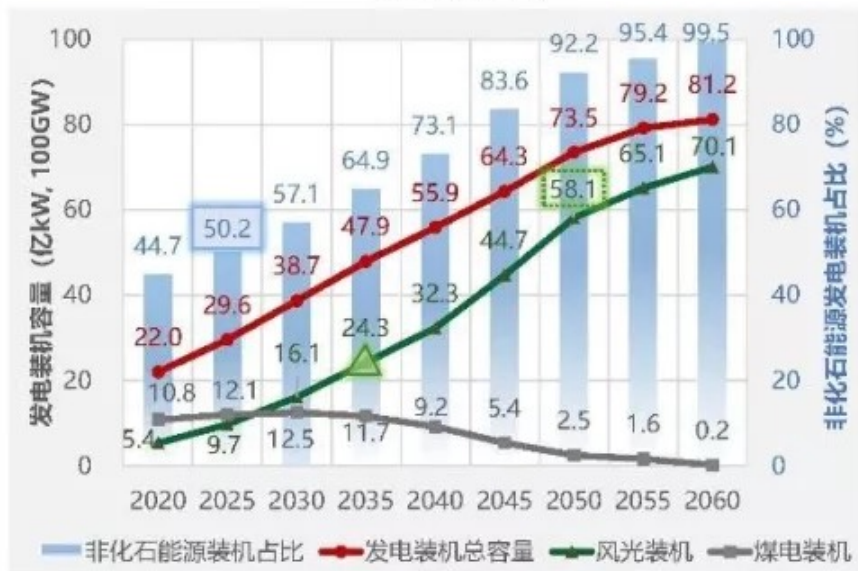
- 1. 一次能源消费总量（亿tce）：**在2020年49.8亿tce的基础上，2030年达到峰值59亿tce，之后缓慢下降，2050年到56亿tce，2060年55亿tce
- 2. 非化石能源消费占比（%）：**在2020年15.8%的基础上，时段1（2021-2025）和时段3（2051-2060）按较低增长率增长；时段2（2031-2050）按较高增长率增长，20年期间增长50个百分点
- 3. 全社会用电量（万亿kWh）：**在2020年7.5万亿kWh的基础上，2030年达到11.1万亿kWh、2050年16.1万亿kWh、2060年16.9万亿kWh



国际能源研究中心

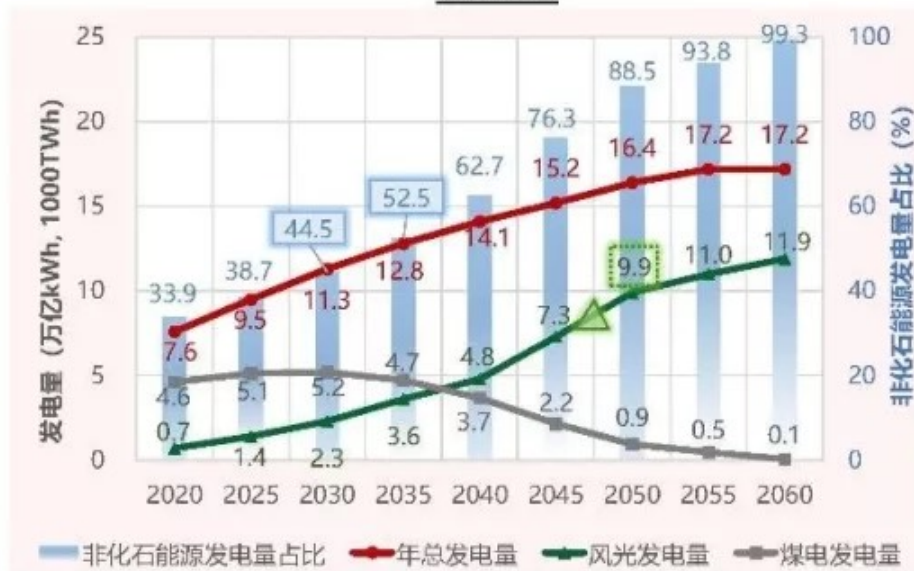
双碳目标下我国能源电力系统发展（情景六）-装机容量和发电量

装机容量



- 2025年非化石能源发电装机占比超过50%
- 2035年风光装机, 超过装机容量50%
- 2050年风光装机58.1亿kW, 占装机总量79%

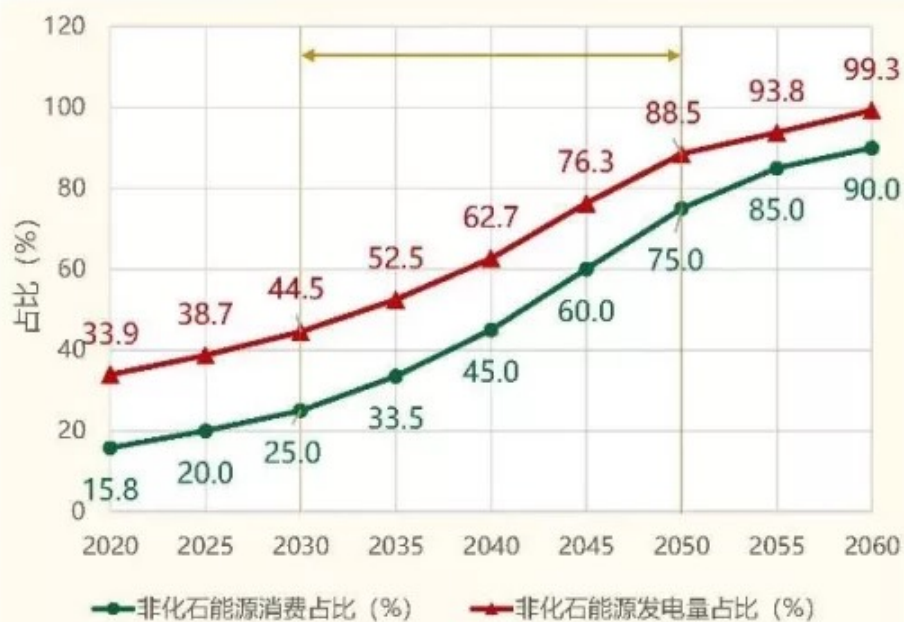
发电量



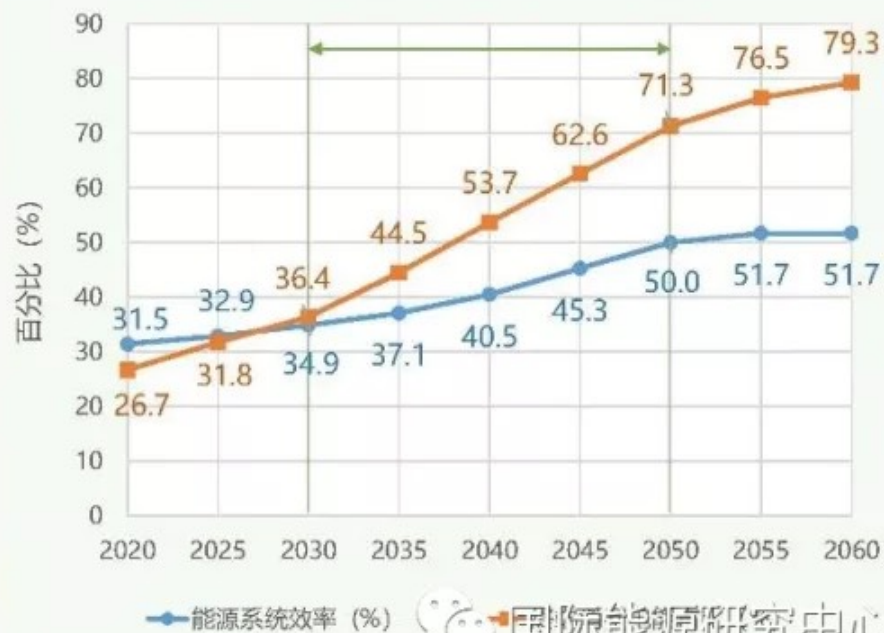
- 2030-2035年间非化石能源年发电量超过50%
- 2045-2050年间风光发电量超过总发电量50%
- 2050年风光发电量9.9万亿kWh, 占总发电量60%

双碳目标下我国能源电力系统发展（情景六）-核心指标

- 1. 非化石能源在一次能源消费中比重
- 2. 非化石能源发电量在总发电量中比重

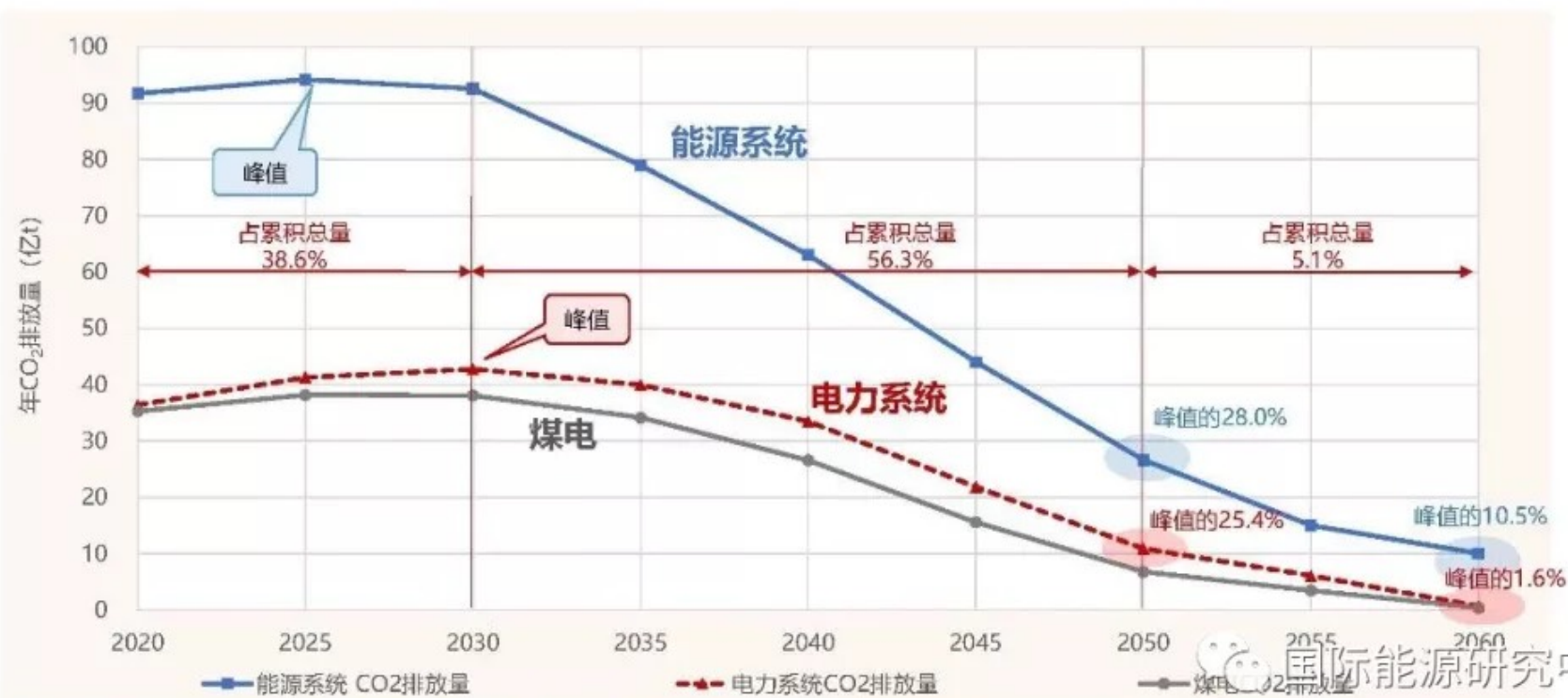


- 3. 电能在终端能源消费中比重
- 4. 系统总体能源利用效率



双碳目标下我国能源电力系统发展（情景六）-核心指标

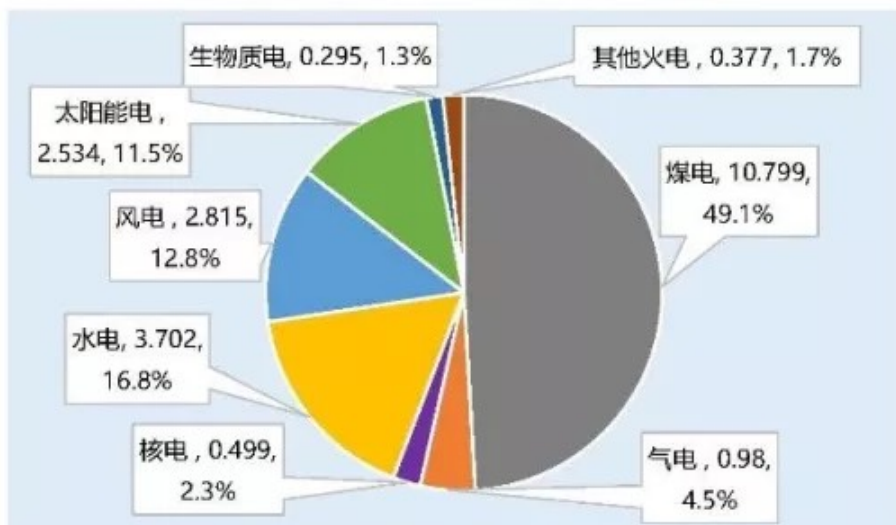
5. 能源电力系统CO₂排放



2020年我国能源电力发展情景

一次能源消费总量**49.8亿tce**

非化石能源消费比重**15.8%**

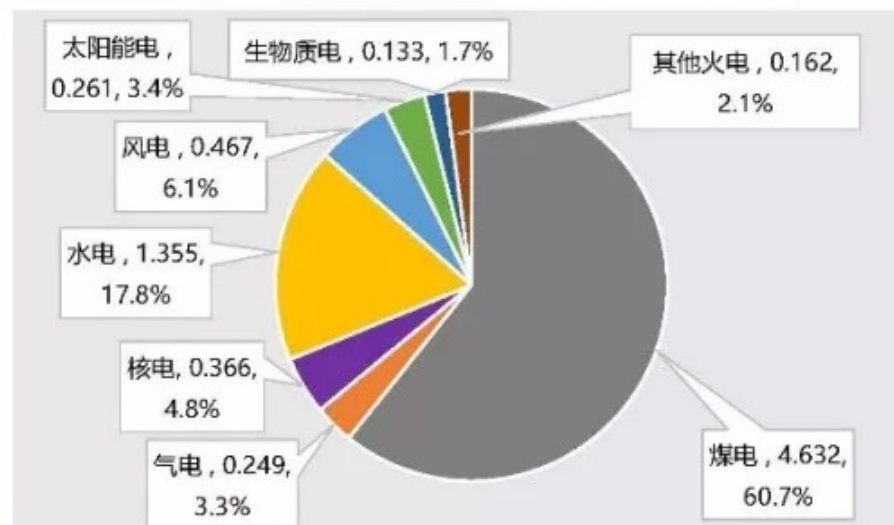


装机总容量：**22.01亿kW**

非化石能源装机占比 **44.7%**
风光装机占比 **24.3%**

全社会用电量**7.51万亿kWh**

人均年用电量**5327kWh**



总发电量：**7.62万亿kWh**

非化石能源发电量占比 **33.9%**
风光发电量占比 **9.5%**

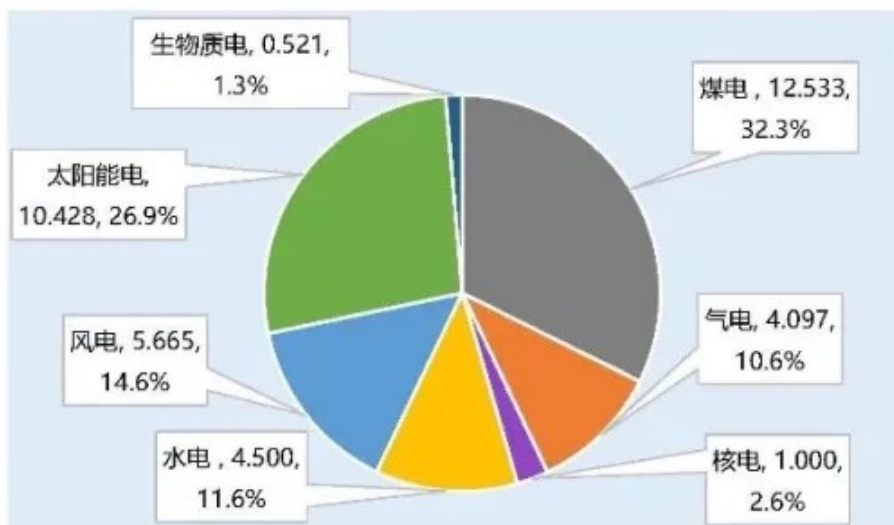
2030年我国能源电力发展估算（情景六）

一次能源消费总量**59亿tce**

非化石能源消费比重**25%**

全社会用电量**11.12万亿kWh**

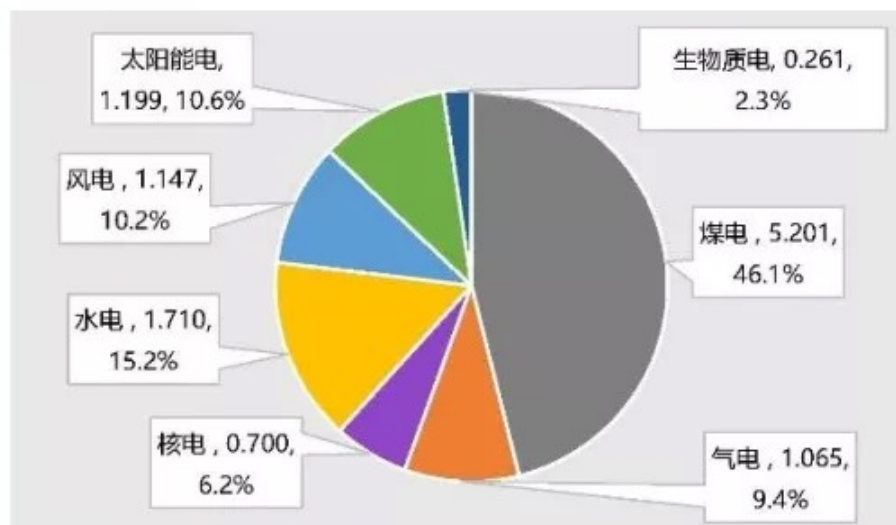
人均年用电量**7774kWh**



装机总容量：**38.75亿kW**

非化石能源装机占比 **57.1%**

风光装机占比 **41.5%**



总发电量：**11.28万亿kWh**

非化石能源发电量占比 **44.5%**

风光发电量占比

国际能源研究中心

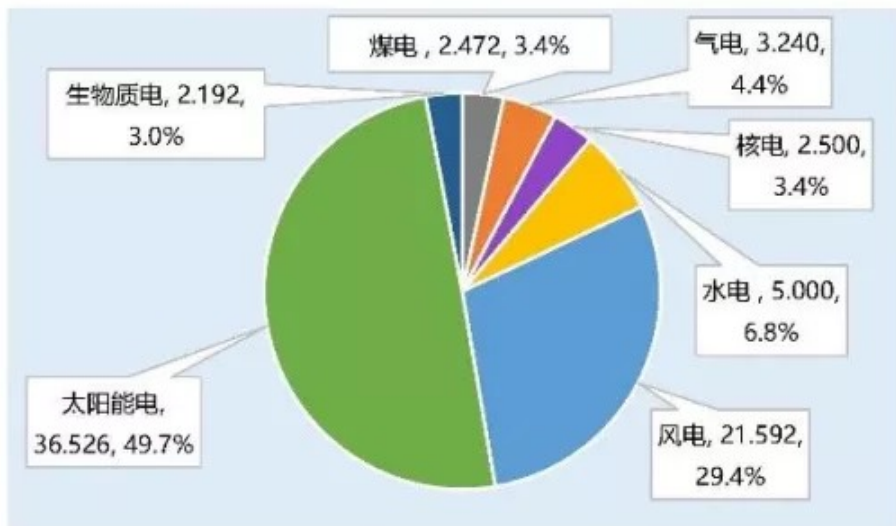
2050年我国能源电力发展估算（情景六）

一次能源消费总量**56亿tce**

非化石能源消费比重**75%**

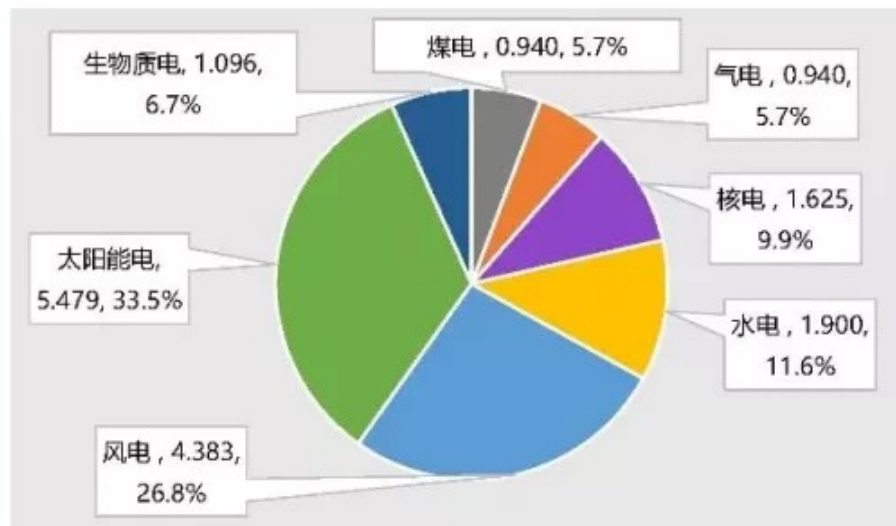
全社会用电量**16.12万亿kWh**

人均年用电量**11958 kWh**



装机总容量：**73.52亿kW**

非化石能源装机占比 **92.2%**
风光装机占比 **79.0%**



总发电量：**16.36万亿kWh**

非化石能源发电量占比 **88.5%**
风光发电量占比 **60.3%**

2020-2060年我国能源电力发展（情景七）-氢能利用情景设置

一次能源消费总量（亿tce）及其组成结构%：非化石能源划分为电利用、地热利用和绿氢利用三类



年份	一次能源消费总量 (亿tce)	非化石能源电利用占比 (%)	非化石能源地热利用占比 (%)	非化石能源绿氢利用占比 (%)	煤炭占比 (%)	天然气占比 (%)	石油占比 (%)
2020	49.8	15.8	0	0	56.8	8.5	18.9
2025	55	20	0	0	49.5	11	19.5
2030	59	25	0	0	42	13	20
2035	58	30.5	2	1	34.5	15	17
2040	57	40	3	2	27	15	13
2045	56	53	3	4	19.5	15	5.5
2050	56	65	3	7	12	13	0
2055	55	73	3	9	6	9	0
2060	55	77	3	15	5	5	0

2050年我国能源电力发展估算（情景七）-计入氢能地热利用

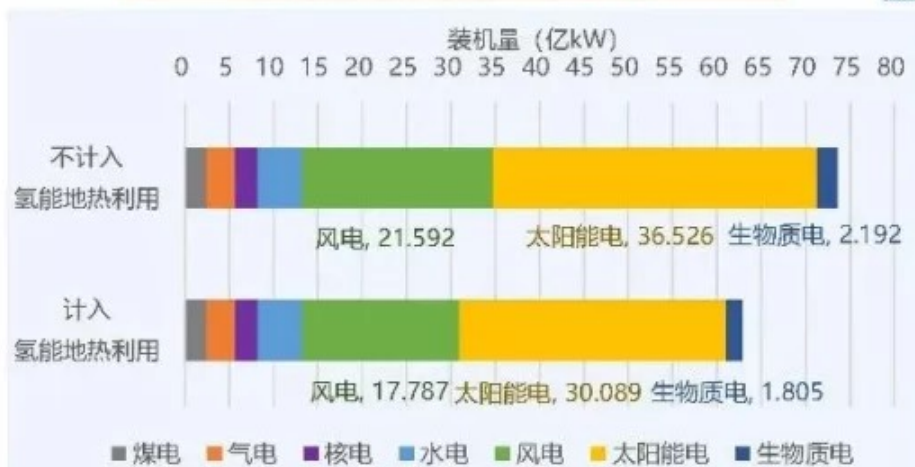
一次能源消费总量**56亿tce**

非化石能源消费比重**75%**

电利用**65%**
绿氢利用**7%**
地热利用**3%**

全社会用电量**14.22万亿kWh**

人均年用电量**10547kWh**



电利用装机总容量：**62.89亿kW**
减少**10.6亿kW**，约**14%**

非化石能源装机占比**90.9%** (减少**1.3个百分点**)
风光装机占比**76.1%** (减少**2.9个百分点**)



电利用发电量：**14.43万亿kWh**
减少**1.93万亿kWh**，约**12%**

非化石能源发电量占比**87.0%** (减少**1.5个百分点**)
风光发电量占比**56.3%**

2050年我国能源电力发展（情景七）

一次能源消费10%（氢7%，地热3%）为非化石能源非电利用

一次能源消费电利用计算结果

指标	一次能源75% 转化为电利用 (非化石能源全部 转化为电利用)	一次能源65% 转化为电利用 (10%为非化石能 源非电利用)
一次能源消费总量 (亿tce)	56	
非化石能源消费占比 (%)	75	
非化石绿氢能利用一次能源 消费量 (亿tce)	0	3.92
全社会年用电量 (万亿kWh)	16.12	14.22
发电装机总容量 (亿kW)	73.52	62.89
年总发电量 (万亿kWh)	16.36	14.43
风光装机容量 (亿kW)	58.12	47.88
风光发电量 (万亿kWh)	9.86	8.12
电力系统年CO ₂ 排放量 (亿t)	10.89	

- 一次能源消费中10%非电利用减少风电光伏装机10.24亿kW。其中氢能利用为7%，减少风电光伏装机7.17亿kW装机
- 初步测算为了给占一次能源7%共3.92亿tce（相当于约0.8亿t氢）的电解绿氢能提供绿色电力，约需平均年运行2500小时的风光发电装机18亿kW，与电利用48亿kW相加，当年风光装机总容量达到66亿kW
- 与100%转化为电利用风光装机58亿kW比较，需要额外增加约8亿kW的风光装机容量



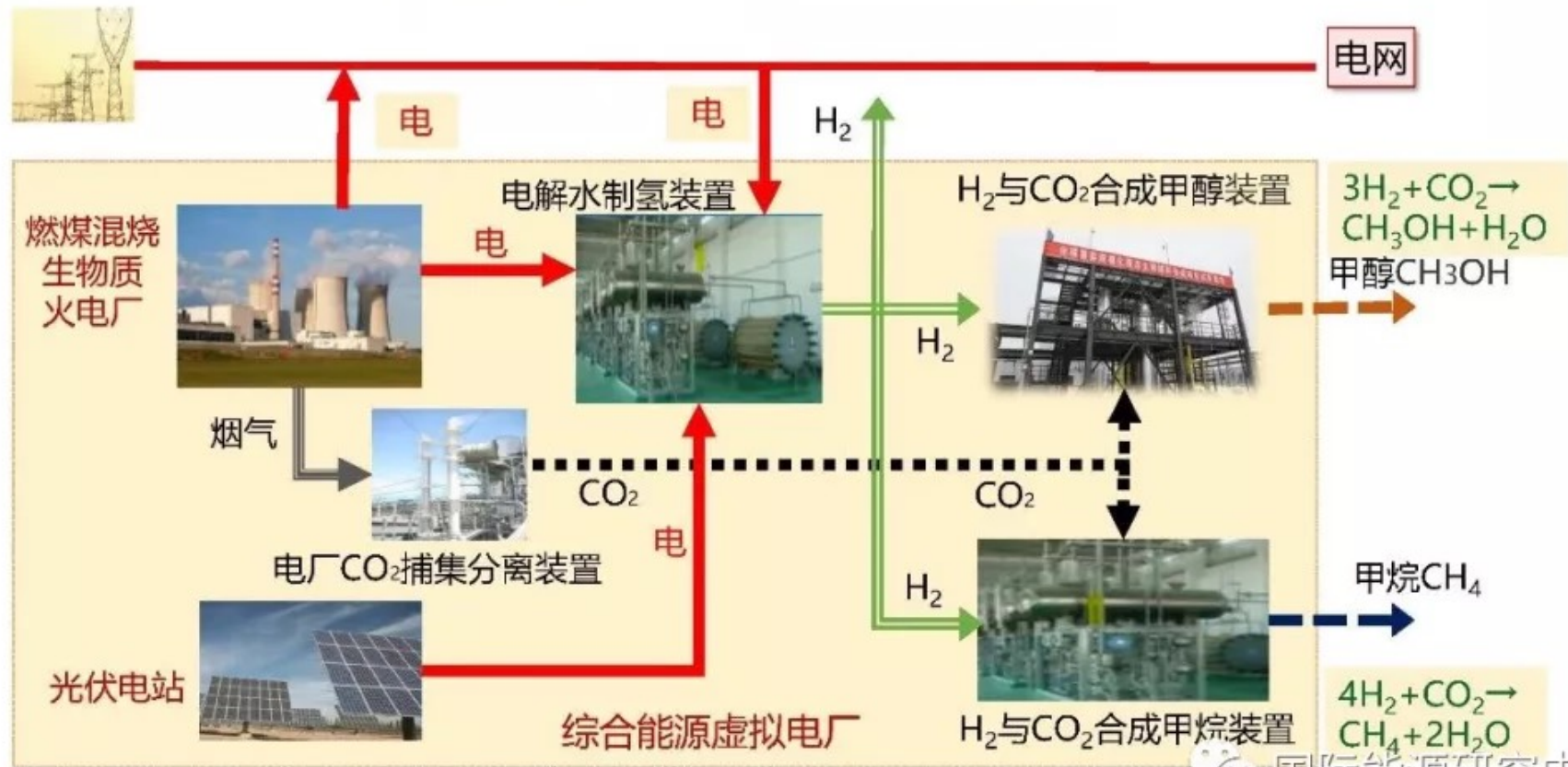
国际能源研究中心

目 录



- 我国能源转型的战略目标和实施路径
- 新型电力系统主要特征核心指标和关键技术
- 双碳目标下我国能源电力系统发展情景分析
- **综合能源生产单元 (IEPU) 设想**
- 总结与讨论

综合能源生产单元 (Integrated Energy Production Unit, IEPU) - 设想方案



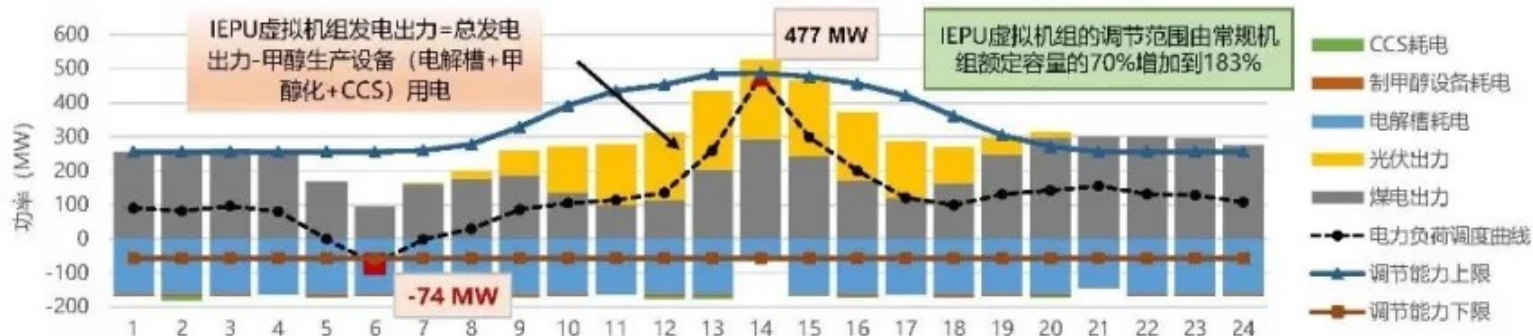
[1] 人民网. 千吨级“液态太阳燃料合成示范项目”通过科技成果鉴定[EB/OL]. [2020-10-16]. <http://gs.people.com.cn/n2/2020/1016/c16718-333587.html>
 [2] 李仁贵, 李灿. 人工光合成太阳燃料制备途径及规模化[J]. 科技导报, 2020, 38(23): 105-112.
 [3] Shih C F, Tao Z, Li J, et al. Powering the Future with Liquid Sunshine[J]. Joule, 2018, 2(10).

综合能源生产单元 (IEPU) 设想-设备技术规范 and 参数 (制氢及合成甲醇)

设备类型	关键参数	参数值	备注
煤电机组	容量 (MW)	300	利用设备折旧完后的机组, 减少生产成本
	年运行时间 (h)	4500	年发电量13.5亿kWh
	CO ₂ 捕集量 (万t)	15	按CO ₂ 总排放量约18%、捕集效率80%计算取整; 年用电量0.15亿kWh
电解槽	氢气产量 (亿Nm ³ /a)	2.29	按15万t CO ₂ 全部用于制甲醇, 约需氢气2.045万t (合2.29亿Nm ³)
	年工作时间 (h)	7000	尽量提高利用小时数, 以提高经济性
	电耗 (kWh/Nm ³)	4.2	总年耗电量约9.6亿kWh
	容量 (MW)	140	按小时产气量、氢气热值和电解效率计算取整
光伏发电机组	容量 (MW)	180	光伏发电容量与电解槽容量比1.25计算
	年运行时间 (h)	1300	年发电量2.34亿kWh, 只占电解槽耗电的24.2%
甲醇化设备*	容量 (t/a)	109000	15万tCO ₂ 全部利用可制成甲醇约10万t
	电耗 (kWh/t)	169	总年耗电量约0.184亿kWh

综合能源生产单元 (IEPU) - 灵活调节能力

灵活调节能力示意图*
—日内电能调度曲线



设备容量配置

设备类型	关键参数	参数值	备注
火电机组	发电容量 (MW)	300	最小技术出力90MW 年运行4500小时
	CO ₂ 捕集量 (万t/a)	15	约为排放总量的18%
光伏机组	发电容量 (MW)	180	
电解槽	用电容量 (MW)	140	最小出力按额定容量的30%考虑
	耗水量 (万t/a)	18.4	
	H ₂ 产量 (万t/a)	2.045	
制甲醇设备	用电容量 (MW)	4.6	年运行4000小时
	甲醇年产量 (万t/a)	10.9	

IEPU虚拟电厂日内24小时调节能力

- 出力上限=煤电机组额定功率+光伏发电功率-电解水制氢制甲醇装置出力下限
- 出力下限=煤电机组最小出力限制 (约30%) - 电解水制氢制甲醇装置出力上限

与电网并网的优化运行结果表明, IEPU比传统火电厂具有范围更大的灵活调节能力

*案例设备配置 (优化值): 电解槽164MW、光伏发电机组226MW

目 录



- 我国能源转型的战略目标和实施路径
- 新型电力系统主要特征核心指标和关键技术
- 双碳目标下我国能源电力系统发展情景分析
- 综合能源生产单元 (IEPU) 设想
- **总结与讨论**

总结与讨论-1

1、关于情景分析的总结：

- ✓ 双碳目标下的情景分析表明：2035年风电光伏装机容量超过装机总容量50%，2045-2050年间风电光伏发电量超过总发电量50%；2060年风光装机容量占总量86%，发电量占总量69.2%，为构建以新能源为主体的新型电力系统创造必要条件
- ✓ 能源系统和电力系统CO₂排放均可实现2030年前达峰。能源系统CO₂排放2050年、2060年分别降低为峰值的28.0%、10.5%；电力系统CO₂排放2050年、2060年分别降低为峰值的25.4%、1.6%，为实现2060年前碳中和目标奠定基础
- ✓ 2050年一次能源消费中绿氢利用占7%时，初步测算为了给占一次能源7%共3.92亿tce的电解绿氢能提供绿色电力，在当年风光装机48亿kW的基础上，约需增加风光发电装机**8亿kW**

总结与讨论-2

2、关于IEPU的讨论

- ✓ 综合能源生产单元IEPU既可生产电和各种近绿色燃料，又能以其高灵活调节能力支撑高比例可再生能源电力系统稳定运行，期望能作为火电低碳/无碳转型路径方案的一种选择
- ✓ IEPU可有不同类型的方案：IEPU所需的CO₂可由火电厂碳捕集，未来也可从空气中捕集；IEPU可由风光发电与电解水制氢装置或水电厂与电解水制氢装置组成，绿氢与空气中氮气耦合制氨；IEPU可由燃气电厂与风光发电及电解水制氢、储氢耦合组成，未来燃气电厂的燃料将由绿氢提供；IEPU本身可以是实体的也可以是虚拟的
- ✓ 各类IEPU规模化生产便于运输储存的甲烷、甲醇、氨等气体/液体燃料，替代石油、天然气等化石能源，既是能源系统低碳化转型的关键举措，也可能成为未来新型电力系统应对中长周期能源电力供需不平衡的储能介质

总结与讨论-3

3、关于IEPU的讨论（续）

- ✓ IEPU与数字化智能化技术结合，可形成能源供应侧各类智慧型基本单元，与能源消费侧智慧型基本单元（Integrated Energy Consumption Unit, IECU）如虚拟电厂、各类园区综合能源微网等一起，组成未来新型电力系统能源生产消费的基本结构，以便充分挖掘利用供应和消费双侧自主管理和灵活性调节潜力，有可能对未来电网结构和系统动态特性、灵活性和储能需求以及电网调度控制模式产生重要影响
- ✓ 可再生能源制氢和各类IEPU的经济性是制约其发展的关键因素，对此期待相关技术的进步带来成本的进一步降低，并结合实际工程的各种因素进行详细的经济性分析；IEPU设想的实现将会促进能源领域不同行业之间的融合，对此需要体制机制的突破和创新