能源转型中构建我国新一代电力系统

周孝信

2020年8月7日 上海

目　录

- 我国能源革命与转型的主要目标
- 新一代电力系统的主要特征和关键指标
- 新一代电力系统的发展前景
- 新一代电力系统的关键技术
- 结语

我国能源转型的主要目标

国家发展改革委、国家能源局于2016-2017年先后发布：

一 《电力发展“十三五”规划》《能源发展“十三五”规划》

能源发展目标（2020年）

- **能源消费总量：50亿吨标准煤以内**
- **非化石能源占一次能源消费15%以上**
- 天然气消费比重力争达到**10%**，煤炭消费比重降低到**58%**以下
- 全社会用电量预期为**6.8~7.2万亿kWh**

电力发展目标（2020年）

- 全国发电装机达到20亿kW
- **非化石能源装机7.7亿kW**，占39%
- 燃煤发电供电煤耗少于310g/kWh
- 煤电发电装机控制在11亿kW
- 西电东送规模由1.3亿kW增加到2.7亿kW
- **人均用电量5000kWh左右**

二 《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》

2021-2030年

- **能源消费总量控制在60亿吨标准煤以内**
- **非化石能源占比达到20%左右**
- 新增能源需求主要依靠清洁能源满足，**初步构建现代能源体系**
- **非化石能源发电量占全部发电量的比重力争达到50%**

2050年

- **能源消费总量基本稳定，非化石能源占比超过一半，建成现代能源体系**

一次能源消费中非化石能源主要来自“一次电力”

- 非化石能源在一次能源消费中占比是我国能源转型的主要指标
- 一次能源消费中非化石能源主要来自一次电力（可再生能源发电及核电等）
- 大力开发利用可再生能源，形成以非化石能源为主的电源结构，构建新一代电力系统，是实现能源转型的主要途径

年份	一次能源消费总量（亿tce）	非化石能源消费电量（万亿kWh）	火电平均供电煤耗（gce/kWh）	非化石能源电量消费折合标煤（亿tce）	计算非化石能源消费在一次能源消费中占比（%）	实际非化石能源消费在一次能源消费中占比（%）
2015	43.0	1.56	315	4.91	4.91/43.0=11.4%	12.1
2016	43.6	1.76	312	5.49	5.49/43.6=12.6%	13.3
2017	44.9	1.95	309	6.03	6.03/44.9=13.4%	13.8
2018	46.4	2.16	308	6.65	6.65/46.4=14.3%	14.3
2019	48.6	2.39	306.4	7.32	7.32/48.6=15.1%	15.3

目　录

- 我国能源革命与转型的主要目标
- 新一代电力系统的主要特征和关键指标
- 新一代电力系统的发展前景
- 新一代电力系统的关键技术
- 结语

新一代电力系统的主要特征

结构模式特征：

可再生能源优先、因地制宜*的多元能源结构*

集中分布并举、协同可靠的电力*生产和供应模式*

供需互动、*多能互补*、节约高效*的用能用电方式*

*面向全社会的*平台性和*综合能源电力服务*

技术特征：

- 高比例可再生能源
- 高比例电力电子装备
- 多能互补综合能源
- 信息物理深度融合智慧能源

新一代电力系统的关键指标

5项关键指标：

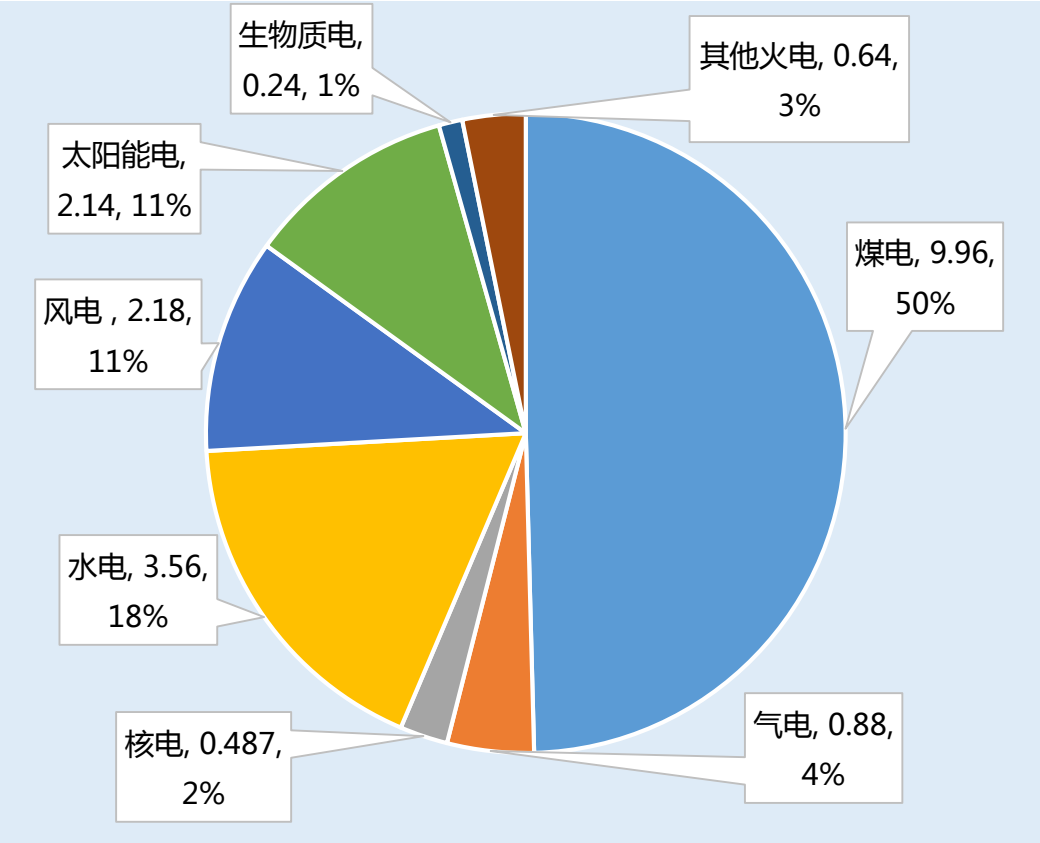
1. 非化石能源在一次能源消费中比重
2. 非化石能源发电量在发电量中比重
3. 电能在终端能源消费中比重
4. 系统总体能源利用效率
5. 能源电力系统CO_2排放总量

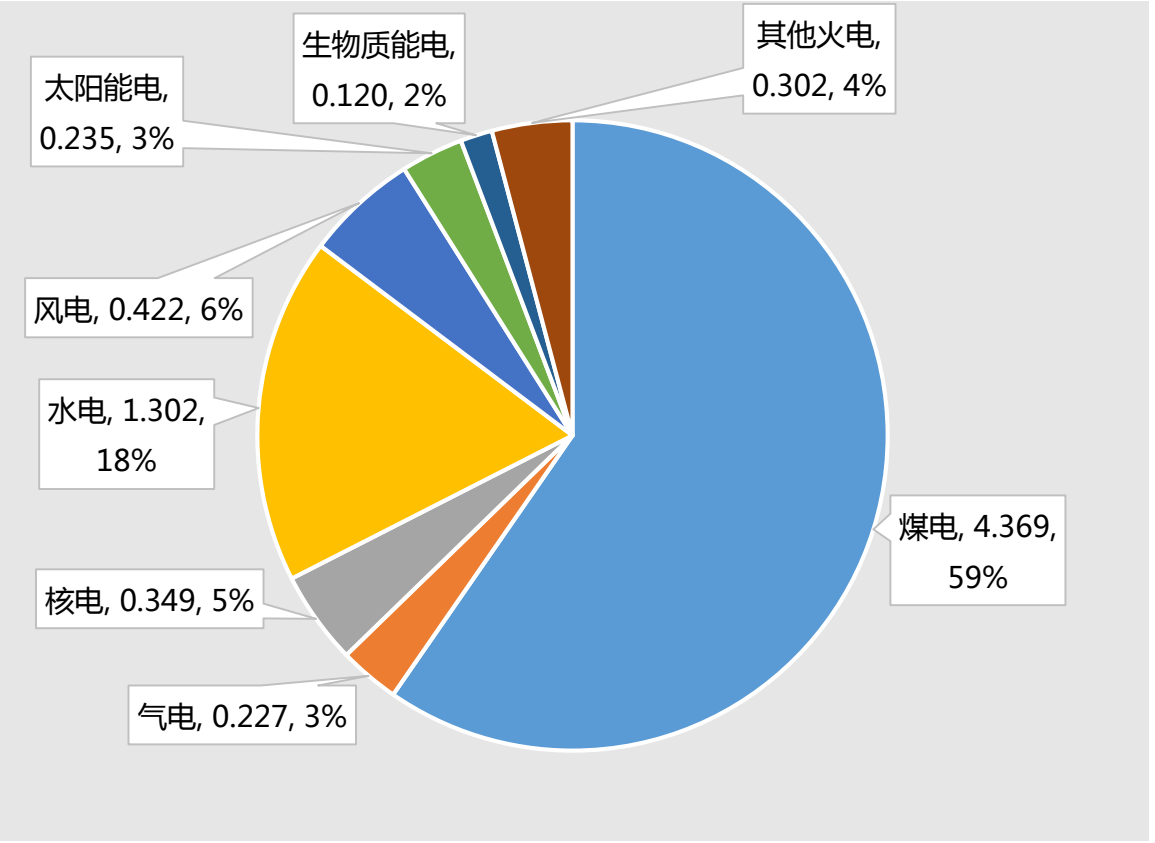
目　录

- 我国能源革命与转型的主要目标
- 新一代电力系统的主要特征和关键指标
- 新一代电力系统的发展前景
- 新一代电力系统的关键技术
- 结语

2019年我国能源电力发展情景

能源消费总量48.6亿tce　非化石能源占比15.3%　全社会用电量7.23万亿kWh　人均年用电量5161 kWh





年底装机容量：20.11亿kW

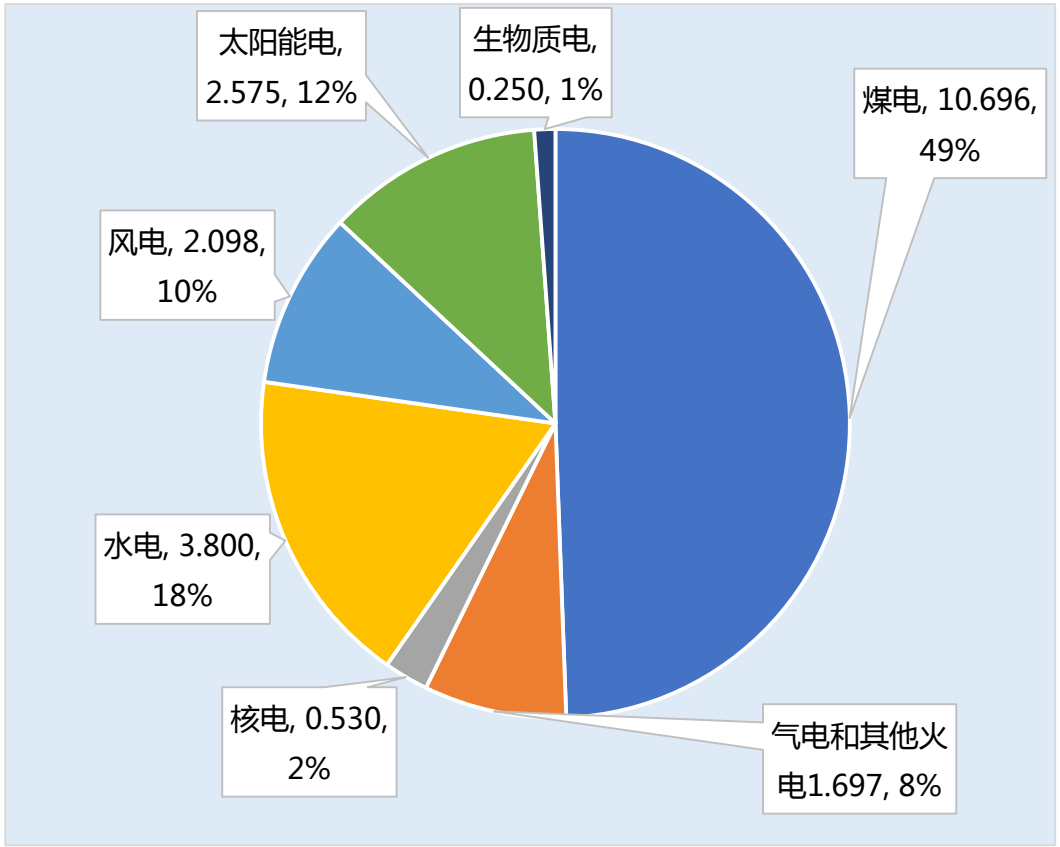
非化石能源发电装机占比：42.9%

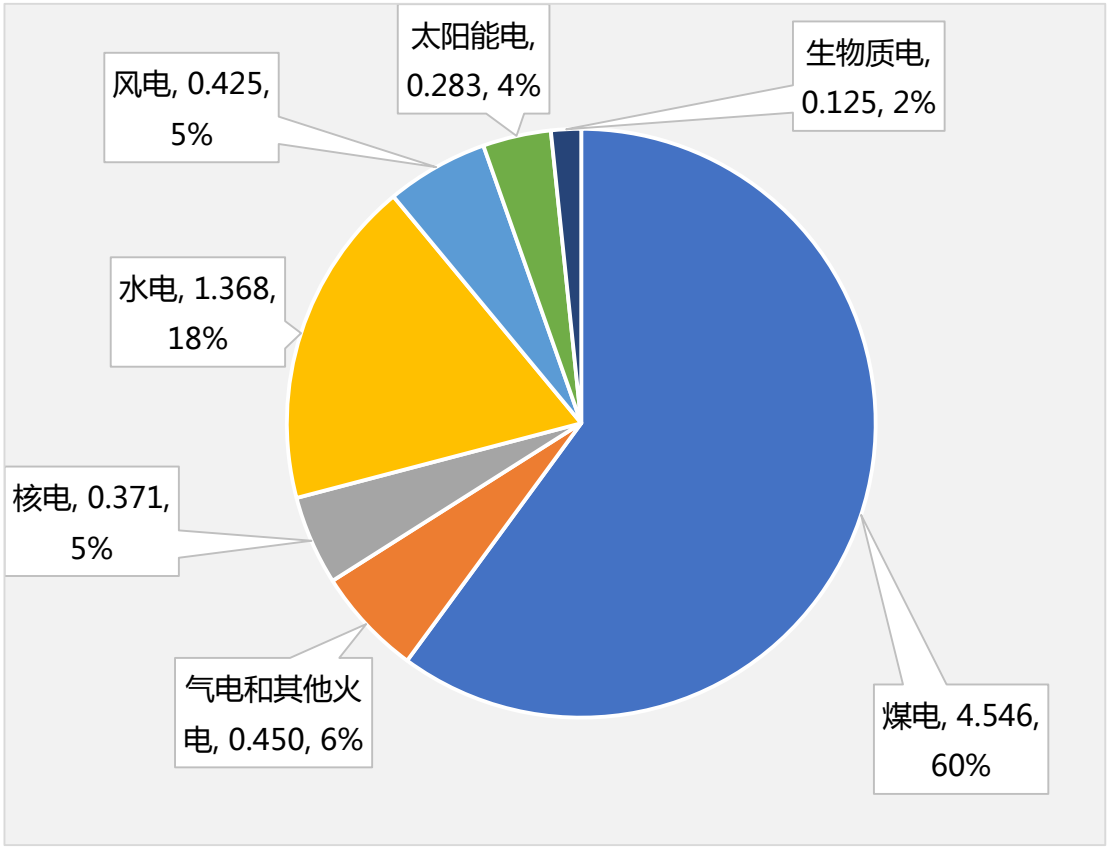
年总发电量：7.33万亿kWh

非化石能源发电量占比：33.1%

2020年我国能源电力发展情景估算-全社会用电量年增长2.5%

能源消费总量49.5亿tce　非化石能源占比15.9%　全社会用电量7.41万亿kWh　人均年用电量5253kWh





年底装机容量：21.65亿kW

非化石能源发电装机占比：42.7%

年总发电量：7.57万亿kWh

非化石能源发电量占比：34.0%

2021-2050年我国能源电力发展情景估算-基础情景

情景设置：满足一次能源消费条件下，设定
2021-2025 年发电量年均增长4%，非化石能源一次能源消费比重年均增长 0.5个百分点
2026-2030 年发电量年均增长3%，非化石能源占一次能源消费比重年均增长1.15个百分点
2031-2035 年发电量年均增长2%，非化石能源占一次能源消费比重年均增长1.15个百分点
2036-2050 年发电量年均增长1%，非化石能源占一次能源消费比重年均增长1.4个百分点

电力生产消费预计

年份	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
发电装机（亿kW）	21.65	28.19	36.26	42.42	45.30	47.71	53.26
总发电量（万亿kWh）	7.568	9.207	10.673	11.784	12.385	13.017	13.681
全社会用电量（万亿kWh）	7.406	9.011	10.446	11.533	12.121	12.739	13.389
人均年用电量（kWh）	5253	6368	7305	8179	8720	9299	9933
非化石发电量占比（%）	33.99	36.96	44.82	50.91	58.72	64.11	70.70

一次能源消费预计

年份	一次能源消费总量（亿tce）	非化石能源占比（%）	煤炭消费占比（%）
2020	49.5	15.9	58
2025	55.0	18.5	54
2030	58.0	24.3	48.5
2035	58.0	30.0	42.5
2040	57.0	37.0	33.5
2045	55.0	44.0	24.5
2050	55.0	51.0	15

2021-2050年我国能源电力发展情景估算-非化石能源消费占比加速增长

情景设置：满足一次能源消费条件下，设定
2021-2025 年发电量年均增长4%，非化石能源一次能源消费比重年均增长 1.15个百分点(基础情景0.5)
2026-2030 年发电量年均增长3%，非化石能源占一次能源消费比重年均增长1.3个百分点(基础情景1.15)
2031-2035 年发电量年均增长2%，非化石能源占一次能源消费比重年均增长1.4个百分点(基础情景1.15)
2036-2050 年发电量年均增长1%，非化石能源占一次能源消费比重年均增长1.4个百分点(基础情景1.4)

电力生产消费预计

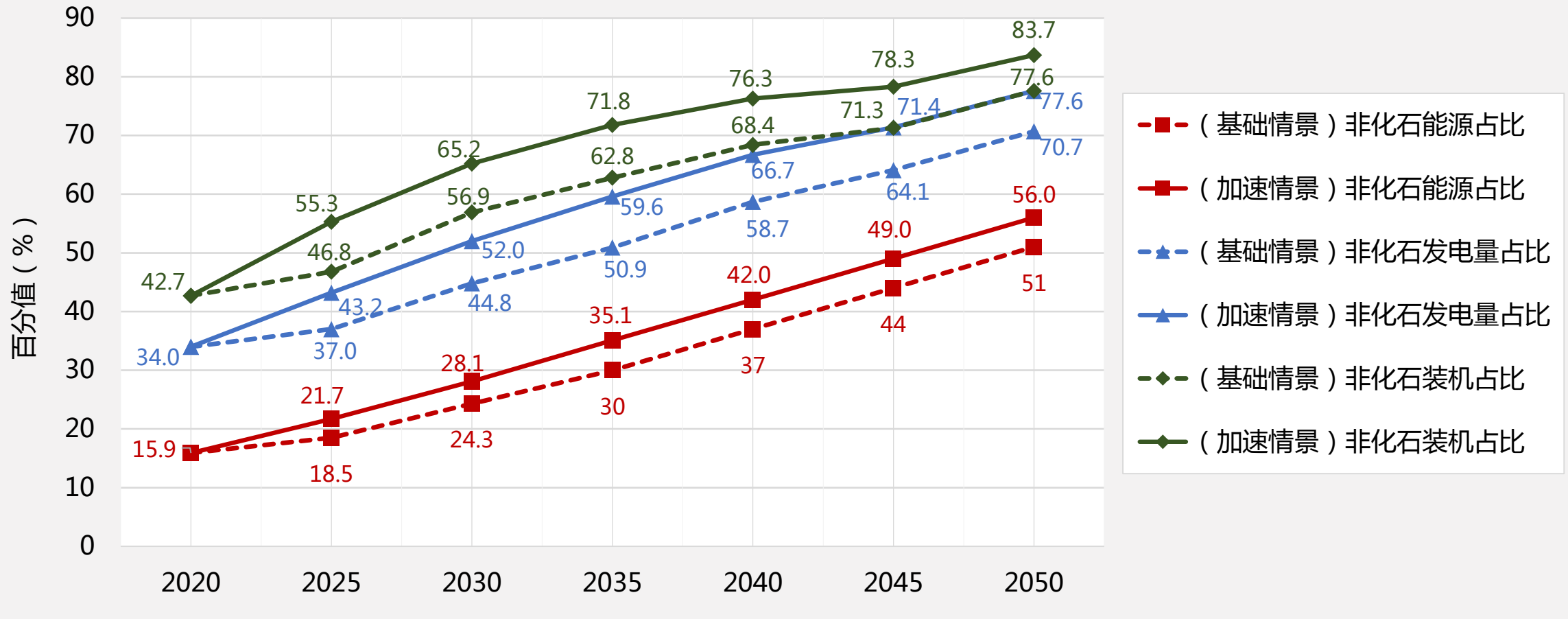
年份	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
发电装机（亿kW）	21.65	30.22	39.11	46.05	48.71	50.15	55.65
总发电量（万亿kWh）	7.568	9.207	10.673	11.784	12.385	13.017	13.681
全社会用电量（万亿kWh）	7.406	9.011	10.446	11.533	12.121	12.739	13.389
人均年用电量（kWh）	5253	6368	7305	8179	8720	9299	9933
非化石发电量占比（%）	33.99	43.21	51.99	59.62	66.65	71.39	77.63

一次能源消费预计

年份	一次能源消费总量（亿tce）	非化石能源占比（%）	煤炭消费占比（%）
2020	49.5	15.9	58
2025	55.0	21.6	54
2030	58.0	28.1	48.5
2035	58.0	35.1	42.5
2040	57.0	42.0	33.5
2045	55.0	49.0	24.5
2050	55.0	56.0	15

2021-2050年我国能源电力发展情景估算-情景计算参数变化比较

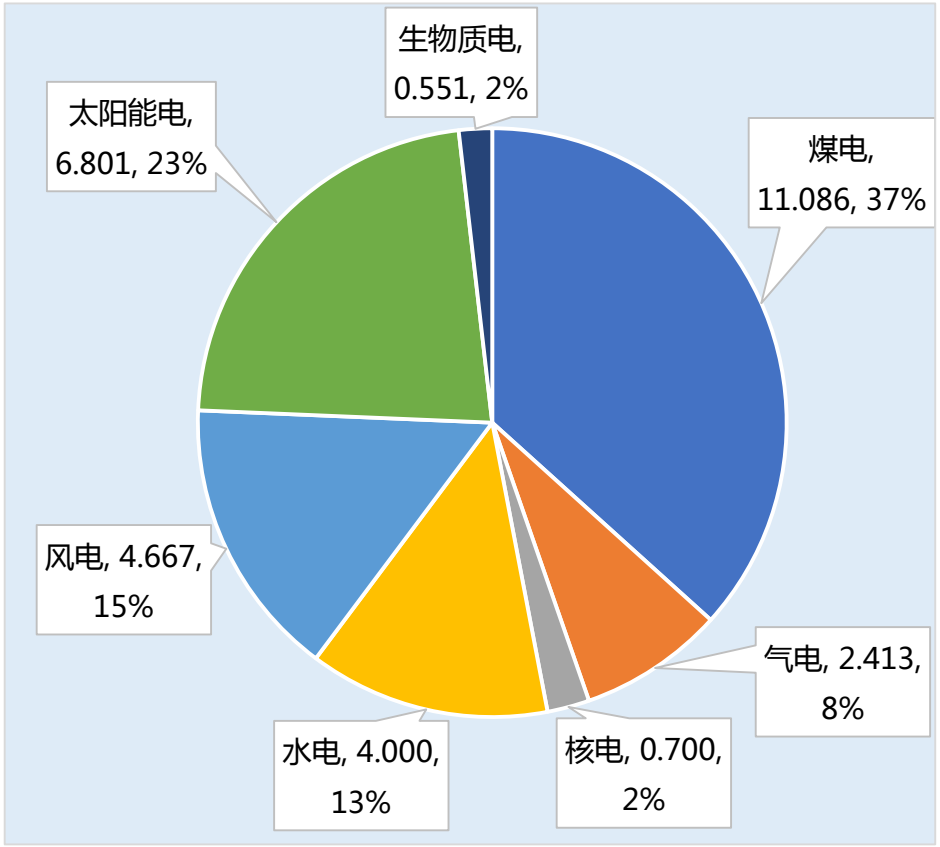
基础情景与加速情景计算参数比较



2021-2050年我国能源电力发展预估-非化石能源消费占比加速增长

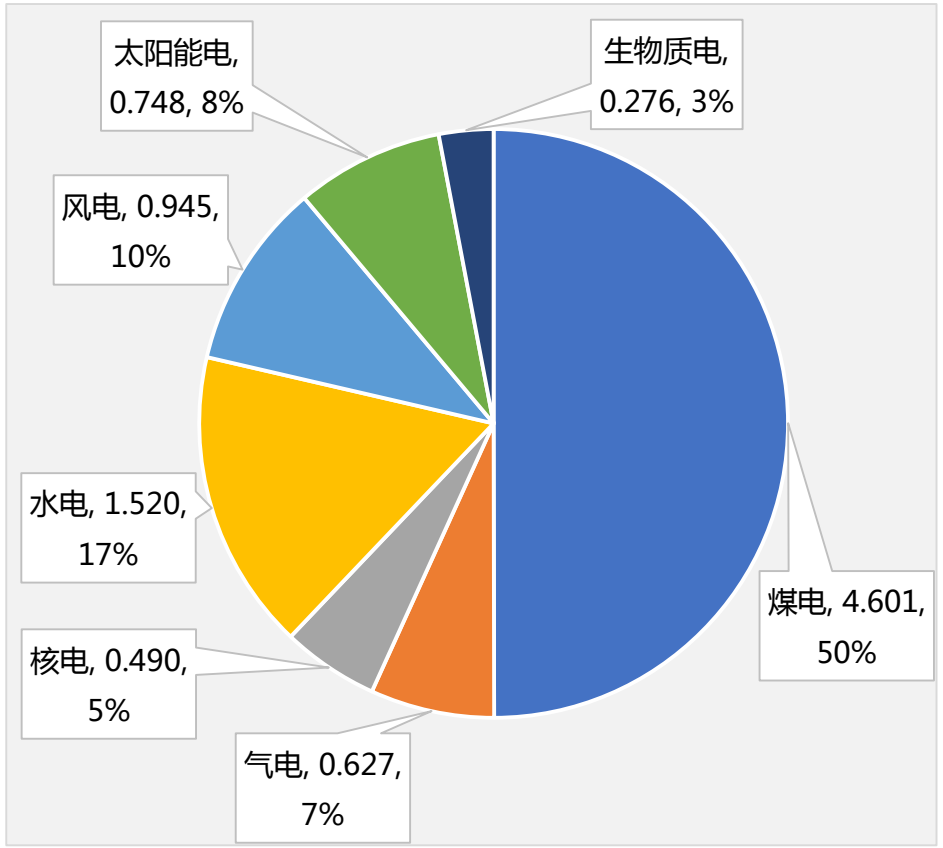
2025年

能源消费总量55亿tce	非化石能源占比21.6%	人均年用电6368kWh



年底装机容量：30.22亿kW

非化石能源发电装机占比：55.3%



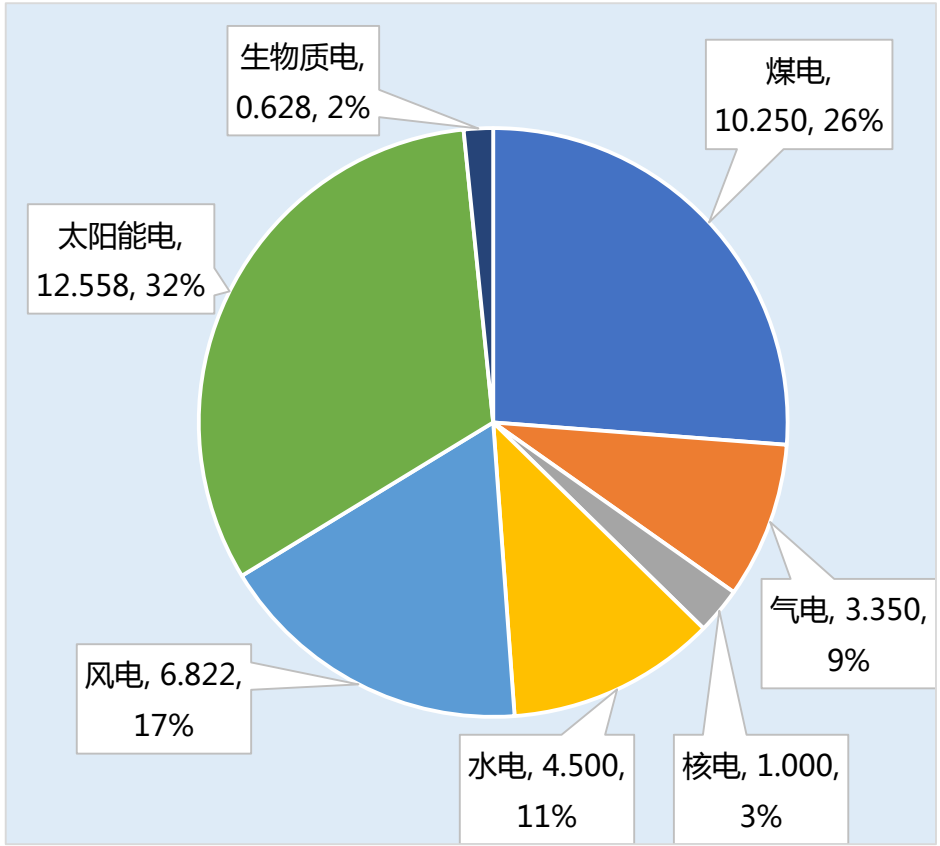
年总发电量：9.21万亿kWh

非化石能源发电量占比：43.2%

2021-2050年我国能源电力发展情景估算-非化石能源消费占比加速增长

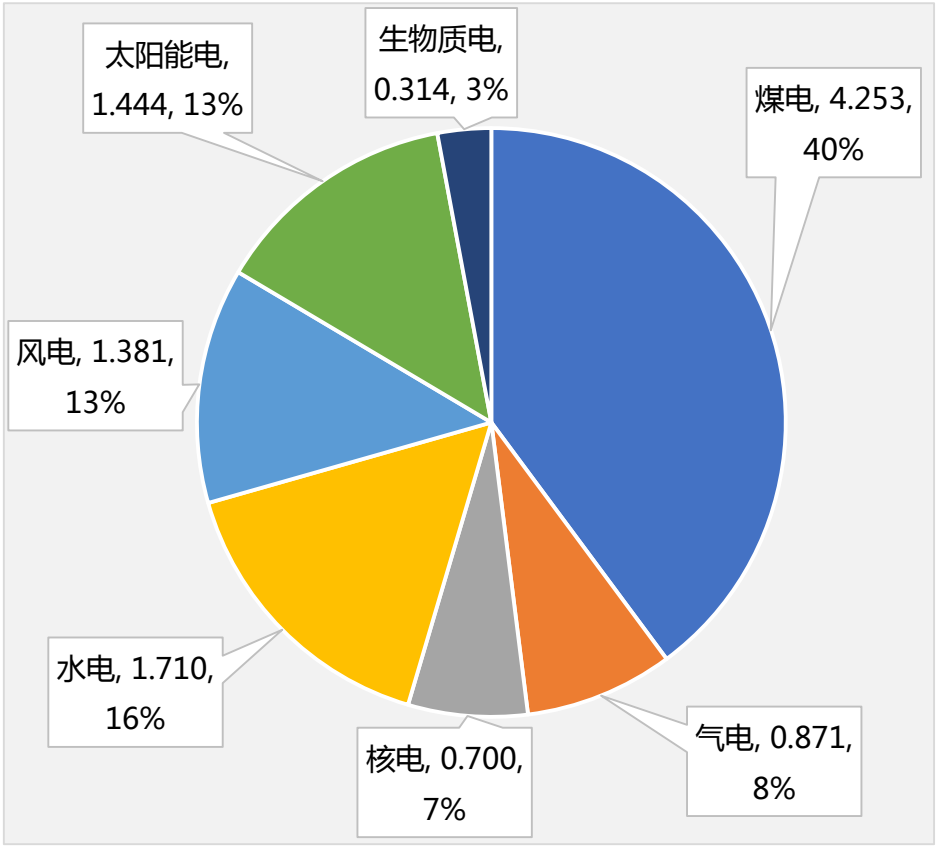
2030年

能源消费总量58亿tce	非化石能源占比28.1%	人均年用电7305kWh



年底装机容量：39.11亿kW

非化石能源发电装机占比：65.2%



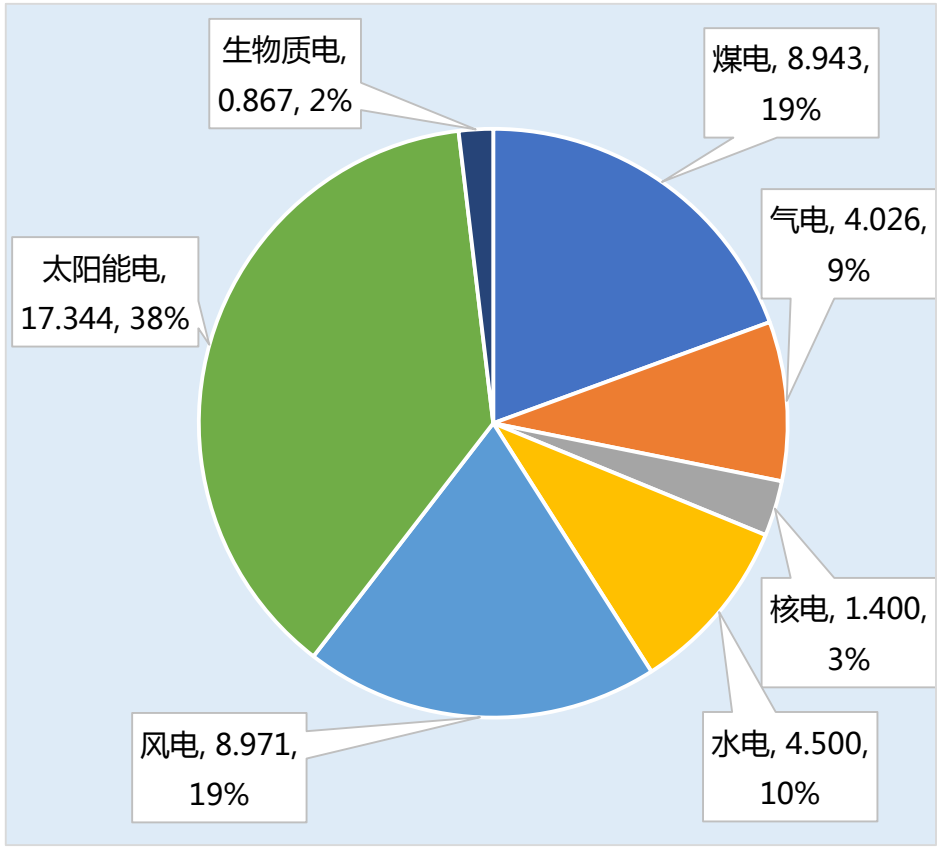
年总发电量：10.67万亿kWh

非化石能源发电量占比：52.0%

2021-2035年我国能源电力发展情景估算-非化石能源消费占比加速增长

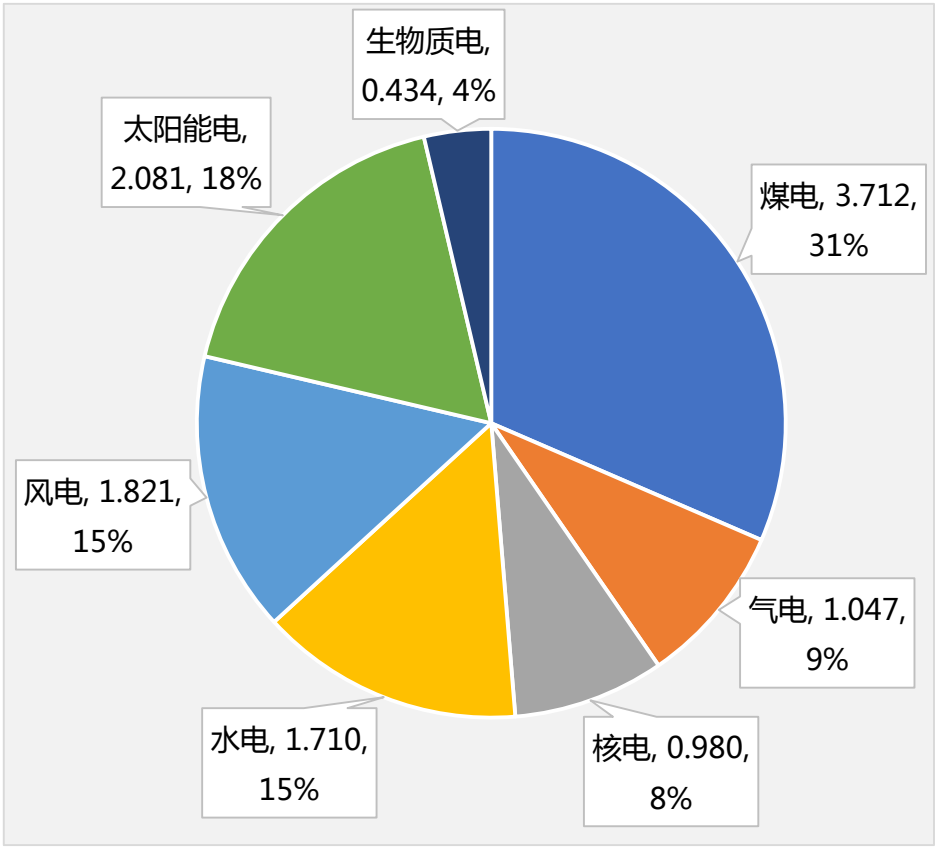
2035年

能源消费总量58亿tce	非化石能源占比35.1%	人均年用电8179kWh



年底装机容量：46.05亿kW

非化石能源发电装机占比：71.8%



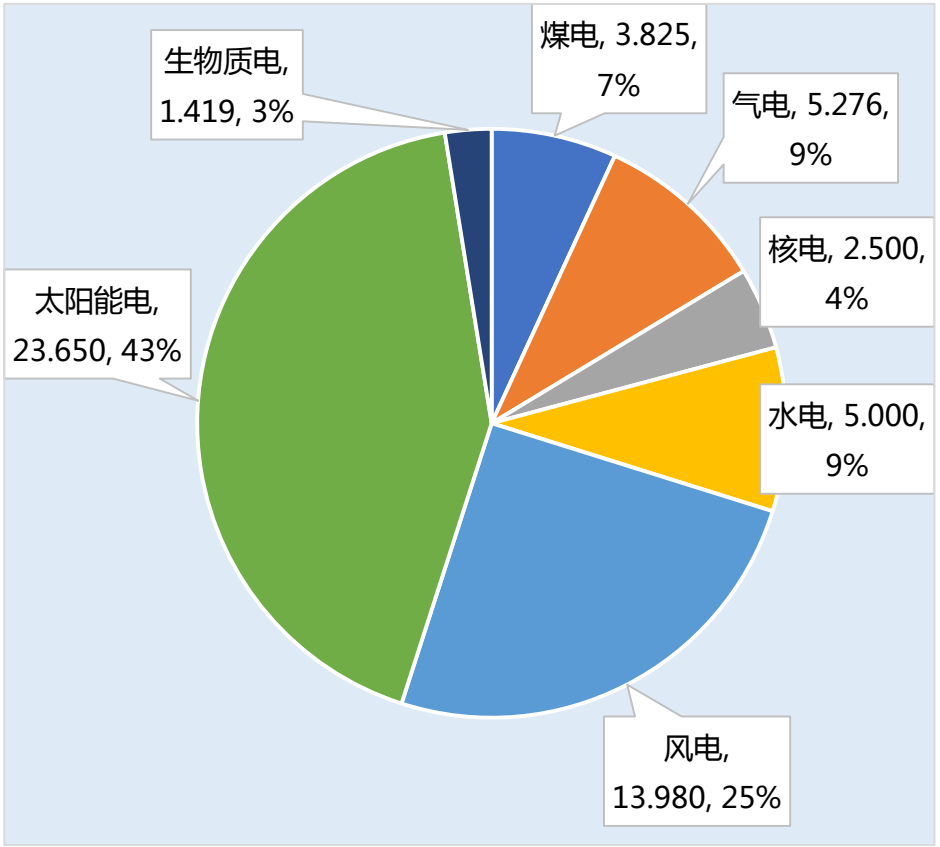
年总发电量：11.78万亿kWh

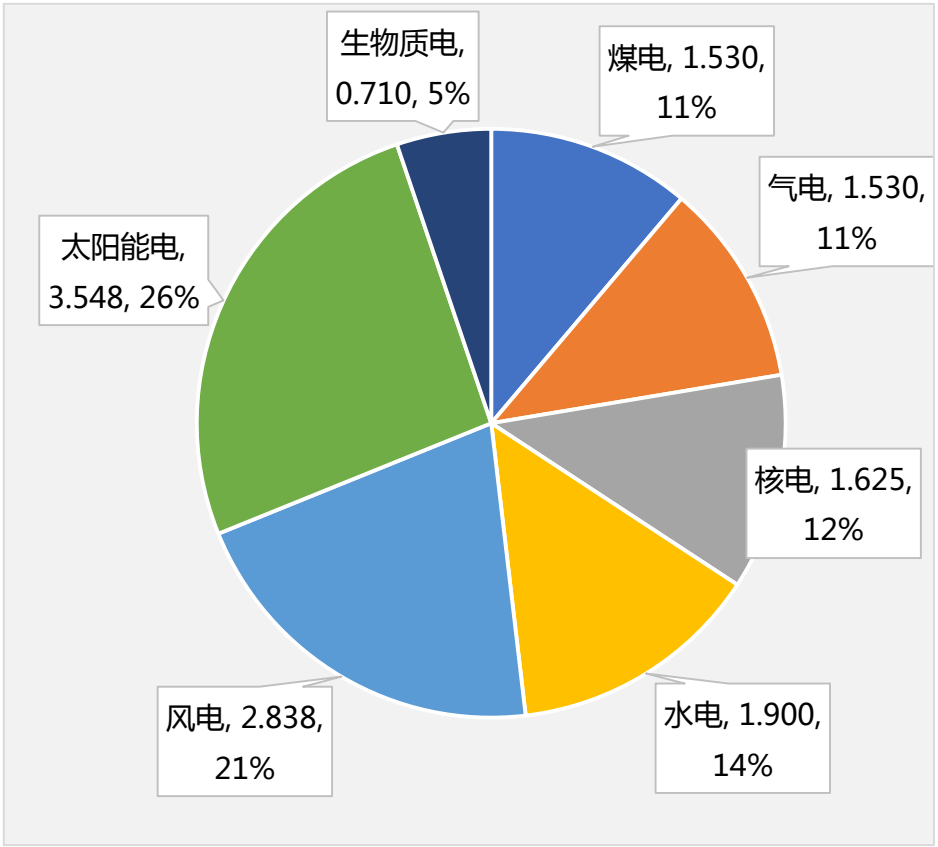
非化石能源发电量占比：59.6%

2021-2050年我国能源电力发展情景估算-非化石能源消费占比加速增长

2050年

能源消费总量55亿tce	非化石能源占比56.0%	人均年用电9933kWh





年底装机容量：55.65亿kW

非化石能源发电装机占比：83.6%

年总发电量：13.68万亿kWh

非化石能源发电量占比：77.6%

关于电源未来发展的建议

1、坚持能源消费总量控制和非化石能源占比的目标不动摇。保证国家战略规划2020年50亿吨标煤、非化石能源占15%；2030年60亿吨标煤、非化石能源占20%目标的实现，对此电力发展的责任重大。

2、坚持电源结构绿色转型的方向不动摇。非化石能源电力提供90%以上一次能源中非化石能源份额，是我国实现能源转型的主要支撑。除继续大力发展可再生能源电力外，核电也应有适当较快的发展，以保证国家战略规划中2030年非化石能源发电量占总发电量50%目标的实现。

3、坚持满足人民日益增长电能需求的目标不动摇。人民对高品质生活日益增长的追求、网络信息产业的加速发展、化石能源电替代进程的加快等因素对电能需求的更快增长，未来全社会人均用电量和电能在终端能源消费中比重等指标可能超出之前的预期。

目　录

- 我国能源革命与转型的主要目标
- 新一代电力系统的主要特征和关键指标
- 新一代电力系统的发展前景
- 新一代电力系统的关键技术
- 结语

新一代电力系统的关键技术

具有全局性影响的几类关键技术

高效低成本
太阳能风能
发电技术

高效低成本
长寿命
储能技术

高可靠性
低损耗电力电子
和新型输配电
技术

新一代电力系统
稳定分析与
控制技术

安全高效低成本
氢能生产储运和
应用技术

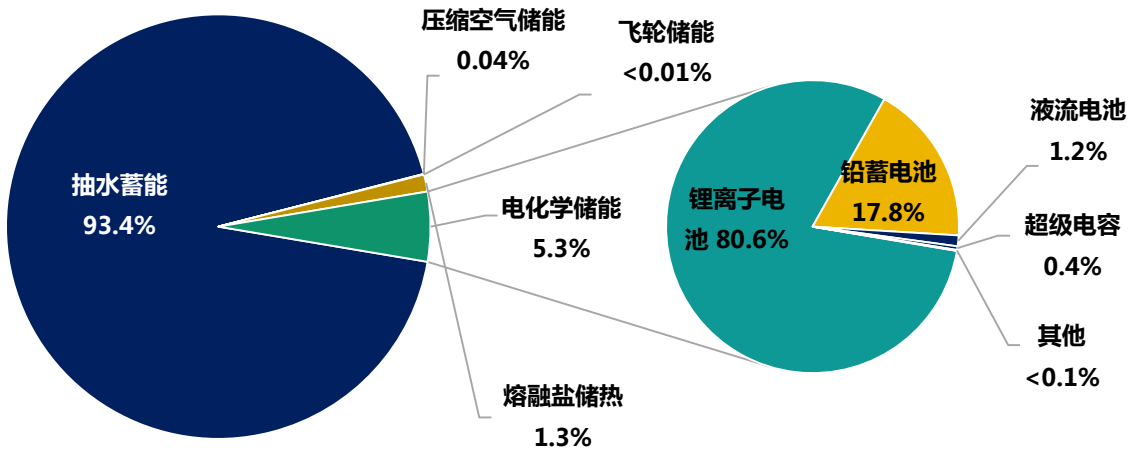
能源互联网和
新一代人工
智能技术

高效低成本长寿命储能技术-应用现状

截至2019年底，全球已投运储能累计装机184.6GW，其中电化学储能累计装机9520.5MW，同比增长43.7%；中国已投运储能累计装机32.4GW，其中电化学储能累计装机达到1709.6MW，同比增长59.4%

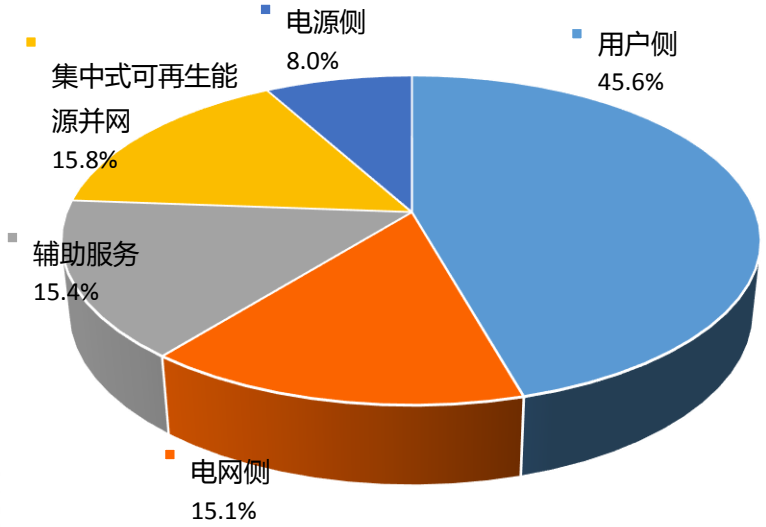
抽水蓄能：截至2019年底，全球累计装机**171.0GW**，同比增长**0.2%**，装机占比大（**92.6%**）。技术成熟，适于大规模储能，但受地理条件限制，长远发展受限

中国储能累计装机规模（截至2019年底）



电化学储能：截至2019年底，全球累计装机**9520.5MW**，占比**5.2%**，同比增长**43.7%**；2019年新增投运规模**2895.1MW**，同比增长**-21.7%**

全球2019年新增电化学储能应用领域分布



从全球范围看，2019年新增电化学储能应用中，用户侧储能装机占比最高（**45.6%**），其次为集中式可再生能源并网领域（**15.8%**）

数据来源：储能产业研究白皮书 2020. 中国能源研究会储能专委会/中关村储能产业技术联盟全球储能项目库.

高效低成本长寿命储能技术-电储能适用场景

应用场景
实现功能

- 发展**用户侧储能**，依托用电高峰低谷电价差和容量电价政策，实现用电移峰填谷

- 建设**电网侧储能**，满足区域电网调峰、调频、调压、应急响应、黑启动等应用需求；配合特高压直流运行，提高受端电网安全稳定水平

- 运用**电源侧储能**，实现风光储电源协调互补，提高风光发电效益，有助电网消纳；实现常规火电与储能协调运行，提高快速调节辅助服务能力

高效低成本长寿命储能技术-电力系统储能需求

可再生能源应用储能主要需求*

- 大规模（集中式）风电厂应用
- 大规模（集中式）光伏电站应用
- 分布式光伏应用
- 分散式风电应用（需求量小，暂不计）
- ……

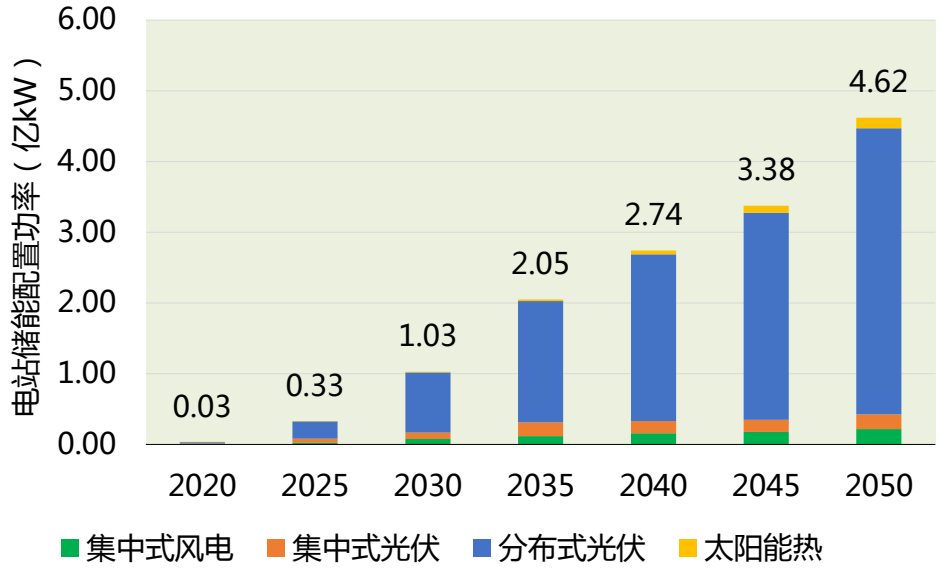
储能总功率=ΣPs_i → *i*类电站储能配置功率

储能总容量=$\Sigma Ps_i \times H_i$ → *i*类电站储能持续放电时间

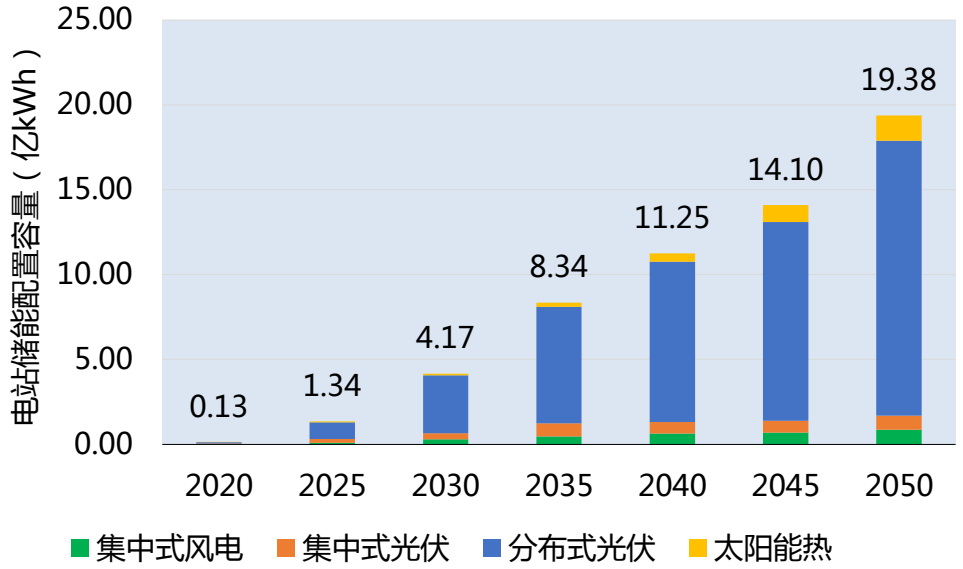
*i*类电站装机容量　　*i*类电站中安装储能的电站占比

$$Ps_i = P_i \times \eta_{1i} \times \eta_{2i}$$ → *i*类电站储能配比

2020-2050年可再生能源应用储能需求功率预测*



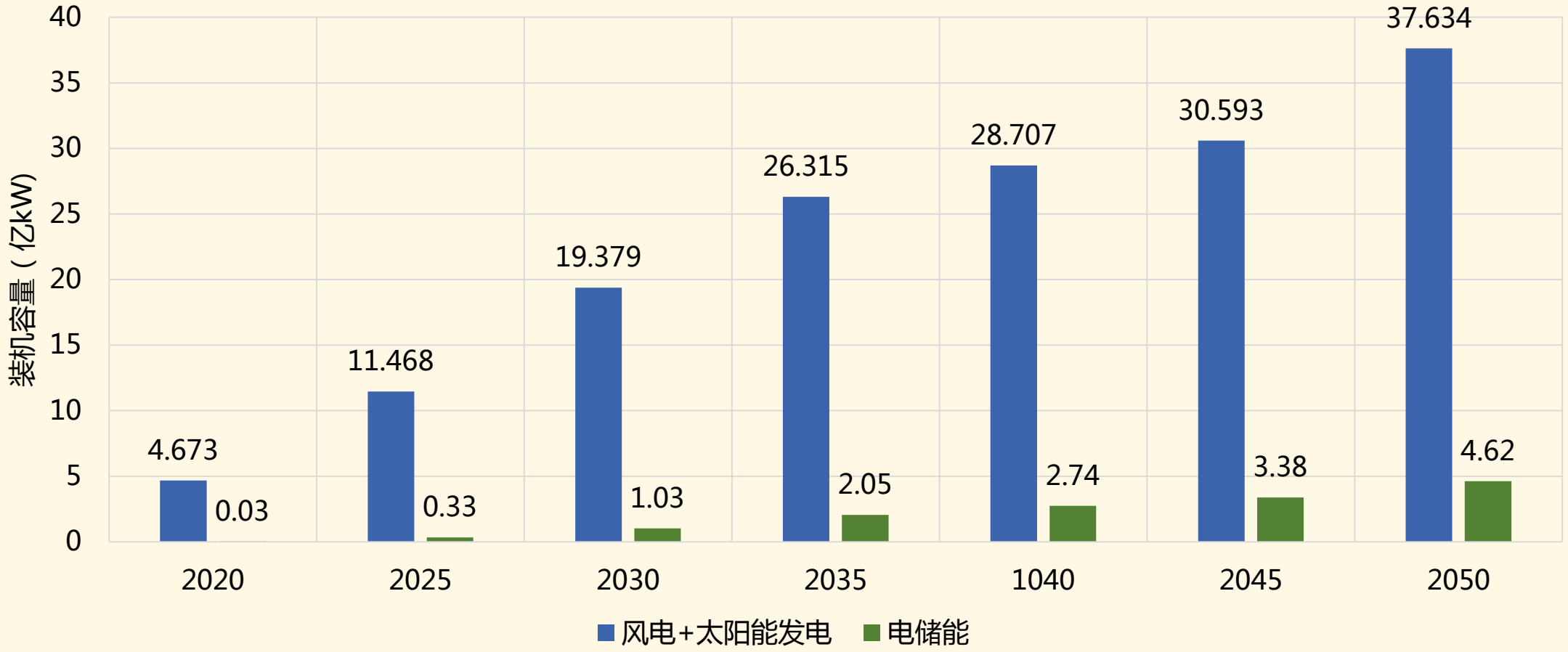
2020-2050年可再生能源应用储能需求容量预测*



*依据“基于国家能源电力发展战略目标的电源结构预估模型-非化石能源消费占比加速增长情景”的装机容量预测数据，采用分项预测法进行估算

高效低成本长寿命储能技术-电力系统储能需求

2020-2050年（风电+太阳能发电）与储能装机容量



高效低成本长寿命储能技术-成本展望

各类储能技术平准化成本（Levelized cost of storage，LCOS）发展趋势展望*

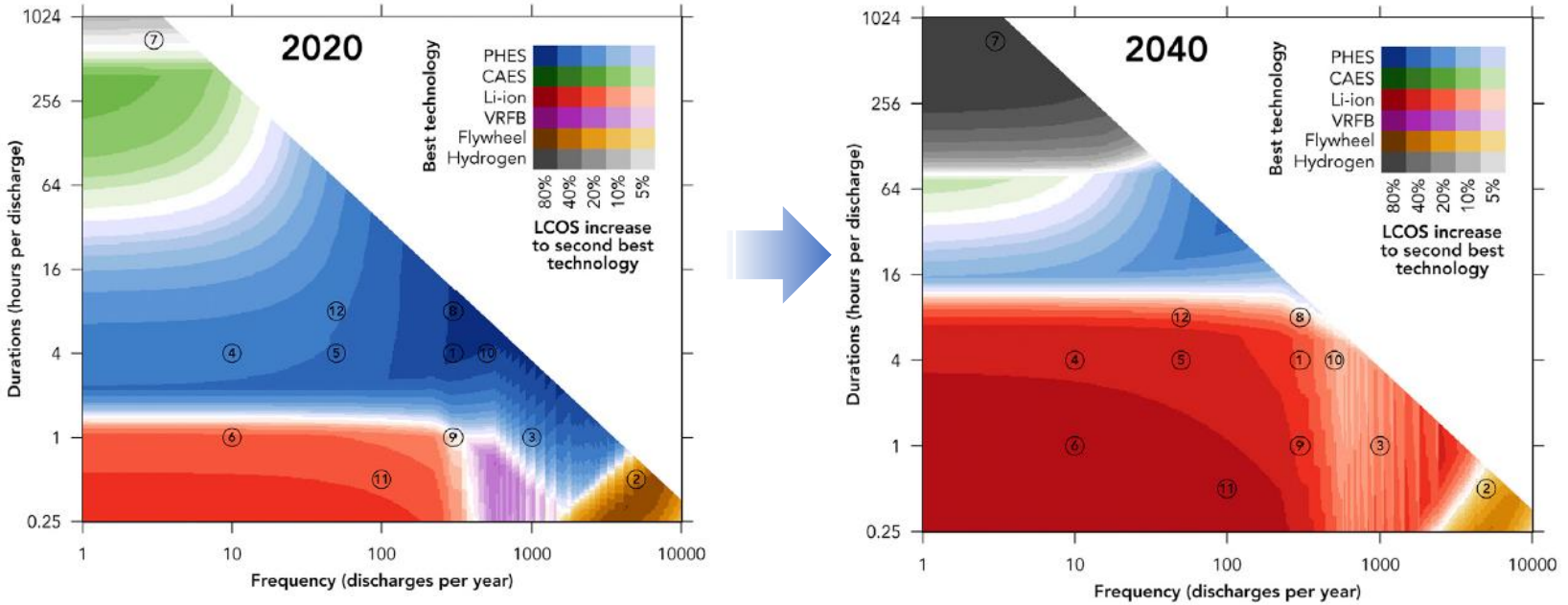
12种应用场景下，抽蓄、压缩空气储能、锂离子电池、钒氧化还原液流电池、飞轮、氢储能等技术的LCOS竞争力发展趋势

（考虑成本预测参数不确定性，基于Monte-Carlo随机实验）

场景序号说明

1.能量套利	5.移峰	9.阻塞管理
2.一级响应	6.黑启动	10.账单管理
3.二级响应	7.季节储能	11.电能质量
4.三级响应	8.延缓输配电投资	12.电力可靠性

技术类型采用不同颜色区分，其颜色深浅表示成本第二低的技术LCOS高于成本最低技术LCOS的程度，颜色越深表示成本优势越明显

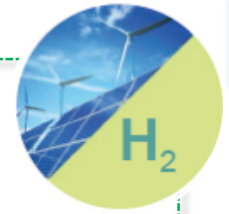


- **中短放电持续时间场景下，锂离子电池成本竞争力逐步提高，在大多数应用领域成为成本优势最显著的储能技术**
- **长放电持续时间应用场景下，氢储能的成本竞争力逐步提高，成为经济性最优的储能技术**

*来源：Schmidt O, Melchior S, Hawkes A, et al. Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies[J]. Joule, 2019, 3(1): 81-100.

安全高效低成本氢能生产储运和应用技术-可再生能源电解水制氢

- ✓ 低碳、环保
- ✓ 促进可再生能源利用
- ✓ 作为季节性储能媒介，参与调峰调频



经济、社会、环境整体效益

效率提升

+

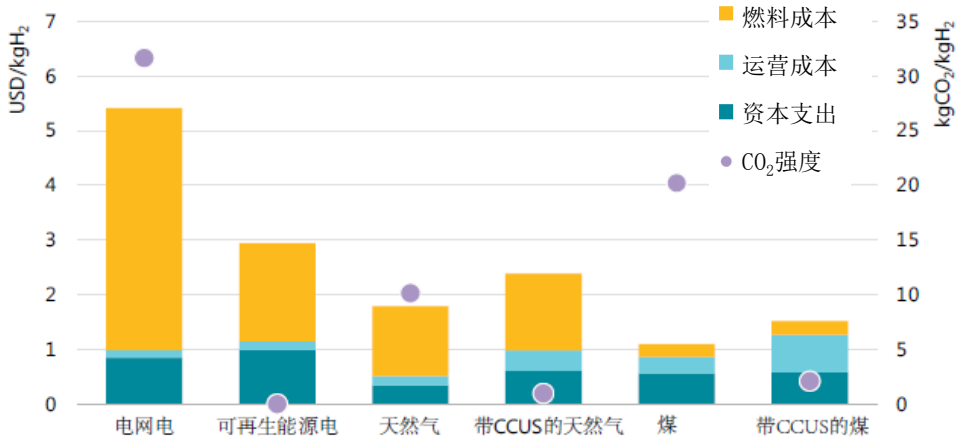
成本降低

- 目前化石能源制氢仍是氢能生产的主要方式（约占96%），但未来**电解水制氢**若具有**经济性优势**，则有望成为制氢主流方式
- 氢作为煤化工副产品，无额外环境负担，也有助提高整体产业链整体效益

各类型制氢技术成本对比*

制氢方式	适合规模（Nm^3/h）	设备投资（元/Nm^3·h）	成本（元/Nm^3）
天然气重整（含炼厂气）	200~200000	6620（小型约9800）	0.8~1.5
煤气化（含焦炭）	1000~200000	13780	0.6~1.2
热化学循环	未来大型清洁能源制氢	11500~31000	2.9~4.8
电解水	10~1000	7150	2.5~3.5（0.4~0.6元/kWh）
甲醇转化	50~1000	6400	1.8~2.5
氨气裂解	10~500	6400	2.0~2.5
生物质气化	1000~10000	18500~26400	3.4~4.4

目前我国氢气生产成本**



- 带CCUS的煤资本支出为1475美元/kW
- 可再生能源电力成本为30美元/MWh（4000小时满负荷运行）

*来源：清华四川能源互联网研究院

**来源：IEA，《The Future of Hydrogen》，2019

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）	0.7	0.84	0.98	1.12	1.26

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）	1.5	2	2.5	3	4

表4 光伏发电制氢成本

电价（元/kWh）	0.24	0.34	0.44	0.54	0.64	0.74
制氢成本（元/Nm^3）	1.5	2	2.5	3	3.5	4

表5 光伏发电直流系统造价

设备设施	光伏组件	光伏支架	汇流箱	线缆	基础	合计
造价（万元）	17000	3000	500	500	2000	23000

表6 不同造价反算电价

造价（亿元）	1.6	1.8	2	2.3
电价（元/kWh)	0.1895	0.211	0.233	0.266

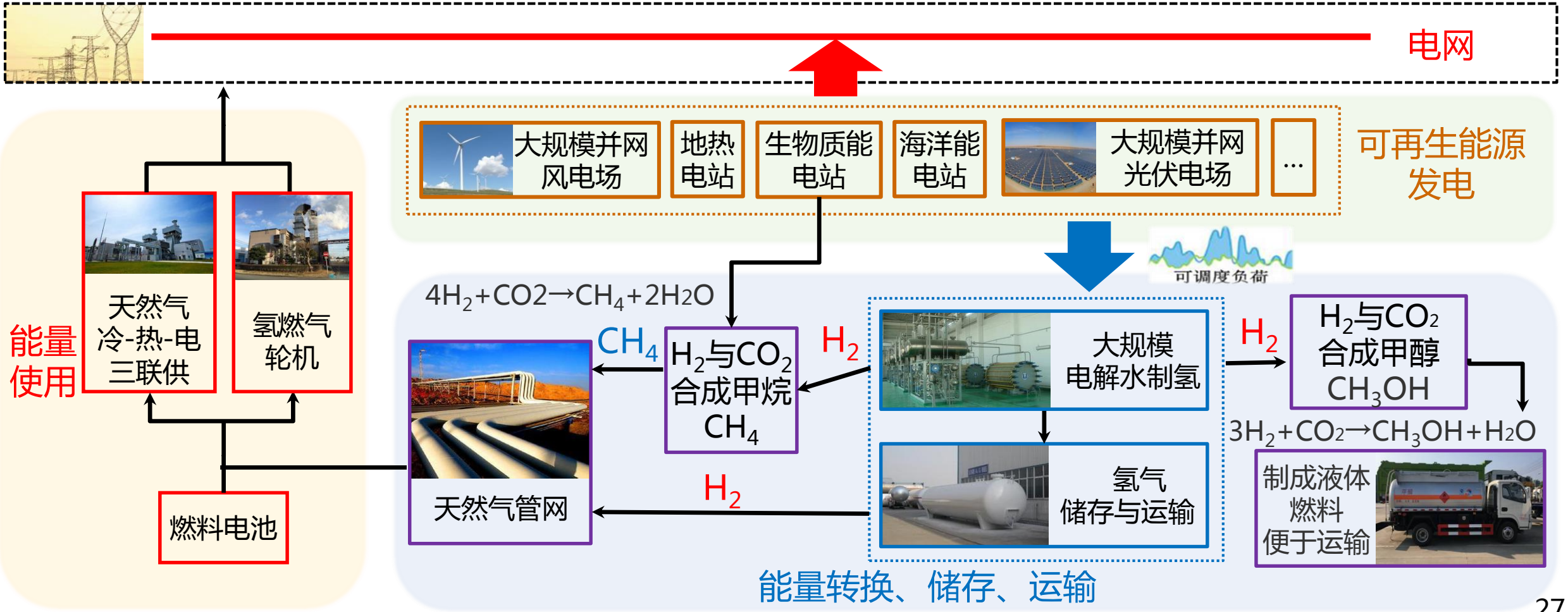
以1000Nm^3/h电解水制氢为例，总投资约1400万元，按照1Nm^3氢气消耗5kWh电能计算，不同电价测算制氢成本分析如表4。由此分析，光伏发电制氢，电价控制在0.3元/kWh以下时，制氢成本才具有竞争力。

* 2020-07-08 10:11:35 北极星太阳能光伏网

引用者注：按0.44元/kWh电价光伏电解制氢成本2.5元/Nm^3计，每kg氢气11.2Nm^3，则每kg氢气制备成本2.5x11.2=28元，制氢成本约30元/kg。

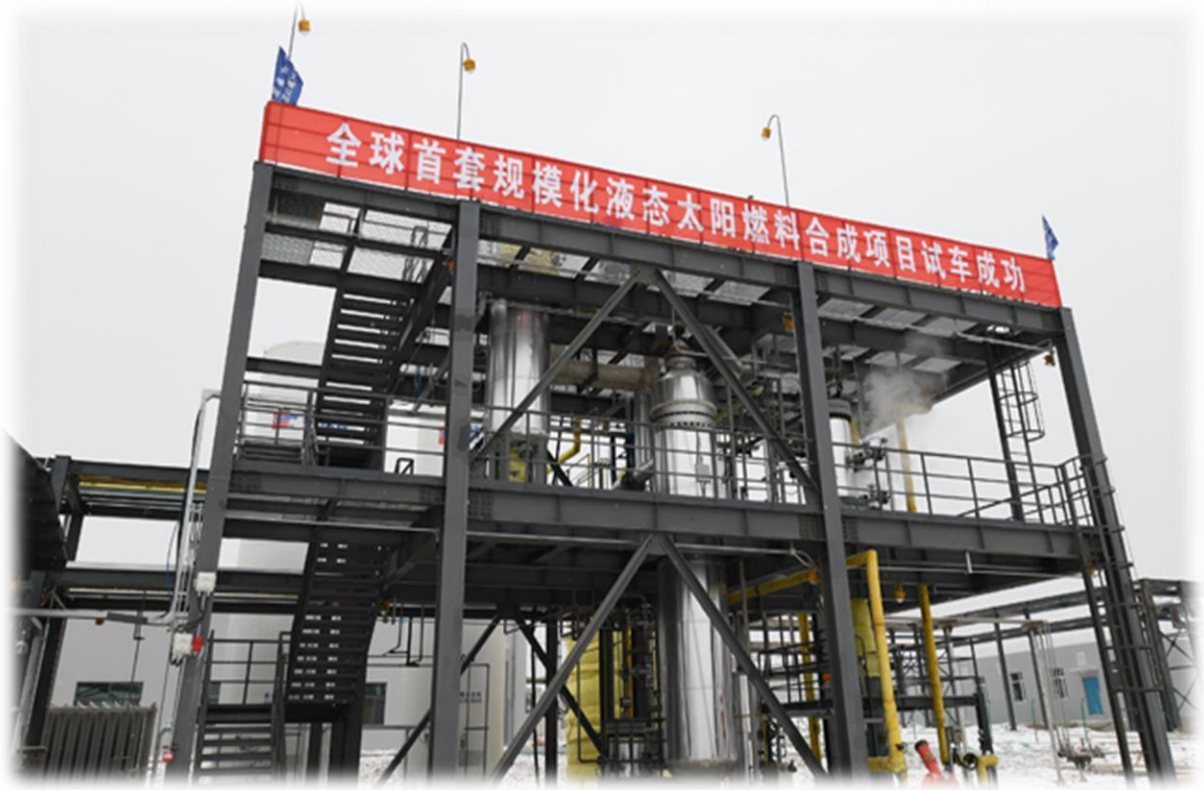
安全高效低成本氢能生产储运和应用技术-电制气和液体燃料

P2G技术（Power to Gas）可再生能源电制氢、甲烷（CH_4），制甲醇（CH_3OH）



太阳燃料合成工业化技术

年千吨级规模太阳燃料合成工业示范工程



- 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4.2kWh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

目　录

- 我国能源革命与转型的主要目标
- 新一代电力系统的主要特征和关键指标
- 新一代电力系统的发展前景
- 新一代电力系统的关键技术
- 结语

结语

1、在当前形势下，要继续坚持能源消费总量控制和非化石能源占比的目标不动摇，坚持电源结构绿色转型的方向不动摇，坚持满足人民日益增长电能需求的目标不动摇。

2、非化石能源消费占比基础情景和加速增长情景的计算分析显示，在2020-2030年期间进一步加快发展可再生能源电力，提高非化石能源发电量占比，对于实现国家能源转型的战略目标具有重要意义。

3、随着可再生能源的快速发展，电力系统中对高效低成本长寿命储能技术的需求持续增加。电化学储能技术和可再生能源电制氢的技术进步和成本降低日趋明显，技术经济竞争力不断提高。

谢谢！

周孝信
xxzhou@epri.sgcc.com.cn