



华南理工大学
South China University of Technology

基于氢储能的多级能量综合利用系统设计

组长：郭炯成

组员：赵知易 张凌云

指导老师：郑杰辉

华南理工大学电力学院

第一届高校电气电子工程创新大赛

University Electrical and Electronic Engineering Innovation Competition



目录

- ◇ 研发目标
Research Goal
- ◇ 研发背景
Background
- ◇ 技术方案
Technical Scheme
- ◇ 案例分析
Case Analysis
- ◇ 创新点及展望
Innovations and Outlook



01

研发目标



研发 目标

- 设计以储氢为主体的储能单元，实现能量高效转换、大规模、长时段存储，有效保障新能源的可持续开发利用；
- 构建基于氢储能的多级能量综合利用单元，实现储能单元即插即用，灵活高效参与系统调节，促进新能源消纳，实现节能减排，助力“3060双碳”目标的达成。

02

研发背景



双碳目标

- 双碳目标实现的关键是建设以新能源为主体的新型电力系统，因此需要配置相应的大规模储能技术；
- 氢能具有来源丰富、排放污染小、能量密度高的特点，是理想的二次能源载体，亦是可大规模应用的储能介质。

各国发展现状

- 日本在2014年提出了建设“氢能社会”的战略方向。（上图为日本东京的一家氢能充电站）
- 欧洲重视燃料电池在交通领域的商业推广，氢能和燃料电池产业链已趋于完善。
- 《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》明确氢能是战略性新兴产业的重点方向。



欧洲氢能公司Logo

传统大规模储能与氢储能的对比

传统大规模储能	不足
铅酸电池	比能量低，寿命短， 污染环境
钠硫电池	过高工作温度 ，成本高
全钒液流电池	能量效率低 ，成本高，储能密度低
锂离子电池	耐过充/过放性能较差，组合及保护电路复杂
抽水蓄能	响应慢 ，受地理条件限制
压缩空气储能	响应慢 ，受地理条件限制，天然气燃烧排放污染物



共同不足：**长周期储存容量受到限制**

氢储能特点

- 秒级响应，调频能力强
- 衰减极小，服役寿命长
- 能量密度高，清洁无污染
- 长时储存，调峰尺度大
- 规模效应，成本非线性
- 具有丰富的应用场景

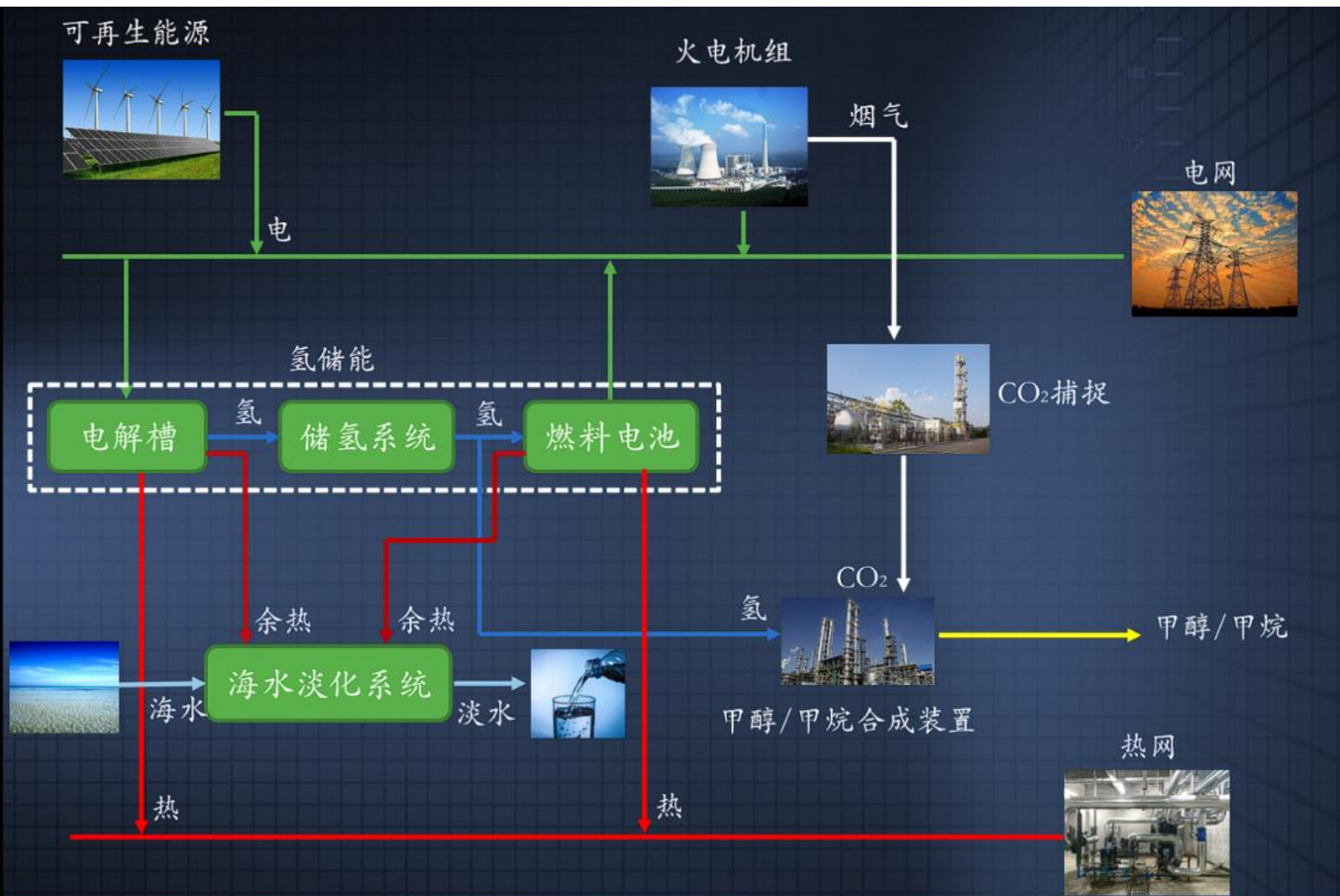


03

技术方案

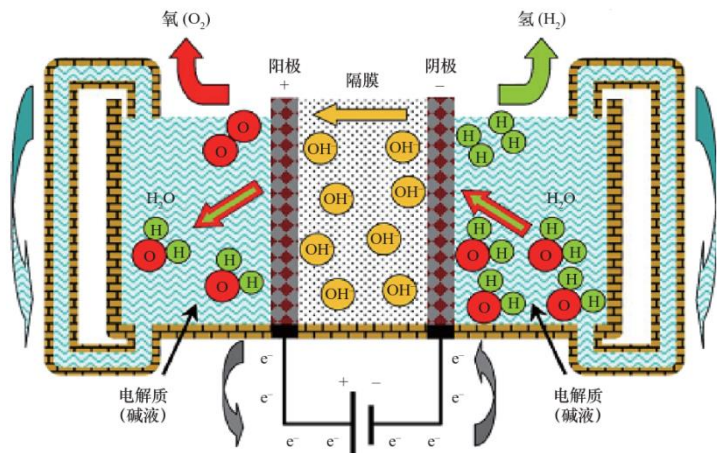


系统设计方案



- ◆ 本作品旨在打造基于氢储能的能量多级综合利用系统；
- ◆ 将由风能、太阳能等可再生能源转换的电能并入电网或用于电解产生氢气加以储存，同时通过燃料电池发电、氢储能余热利用、工业原料合成等实现综合能源的多级能量利用。

电-热-氢耦合



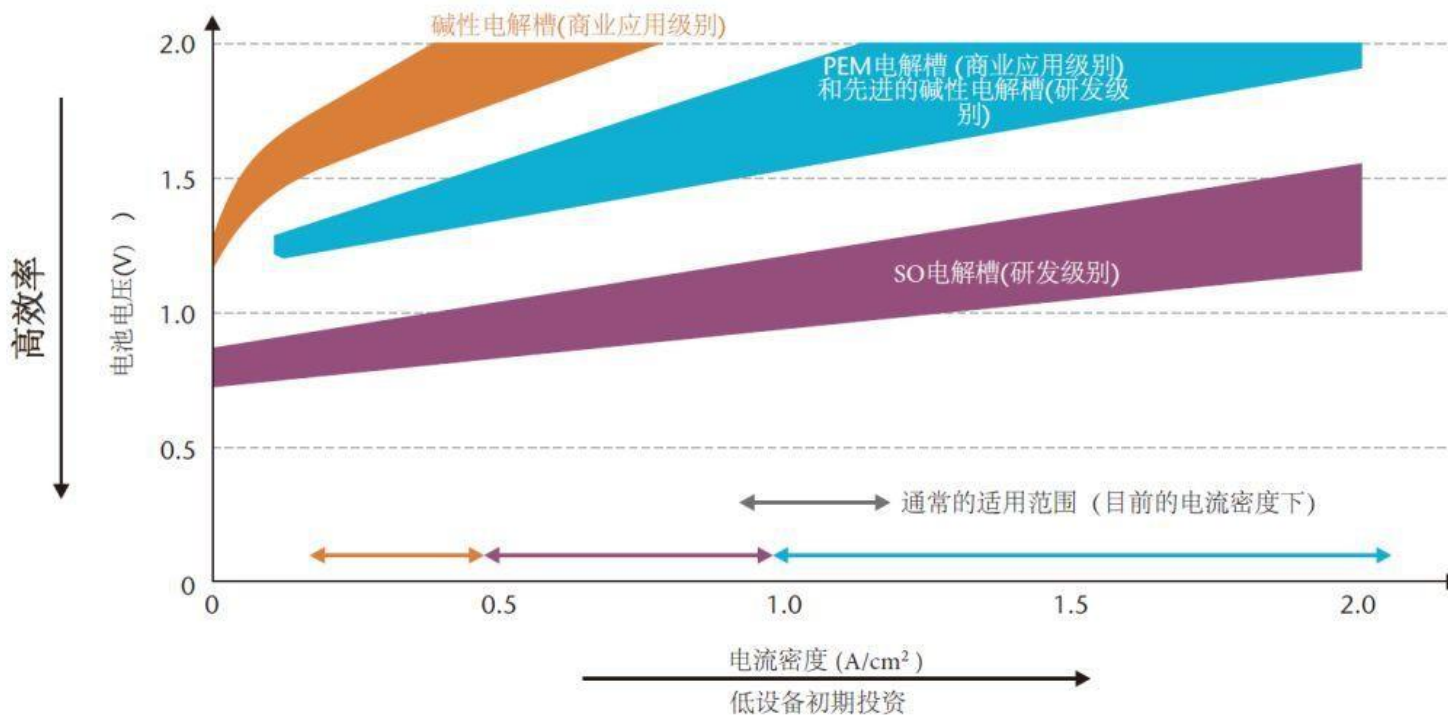
数学建模:

$$U_{\text{cell}} = U_{\text{rev}} + \frac{r_1 + r_2 T_{\text{el}}}{A_{\text{cell}}} I_{\text{el}} + (s_1 + s_2 T_{\text{el}} + s_3 T_{\text{el}}^2) \log \left(\frac{t_1 + t_2 / T_{\text{el}} + t_3 / T_{\text{el}}^2}{A_{\text{cell}}} I_{\text{el}} + 1 \right)$$

$$C_{\text{elt}} \frac{dT_{\text{el}}}{dt} = Q'_{\text{gen}} - Q'_{\text{loss}} - Q'_{\text{cool}}$$

$$\dot{n}_{\text{aeH}_2} = \eta_F \frac{N_{\text{el}} I_{\text{el}}}{zF}$$

$$\eta_F = a_1 \exp \left[\left(\frac{a_2 + a_3 T_{\text{el}}}{I_{\text{el}} / A_{\text{cell}}} + \frac{a_4 + a_5 T_{\text{el}}}{(I_{\text{el}} / A_{\text{cell}})^2} \right) \right]$$



- 碱性电解槽：以 KOH、NaOH 水溶液为电解质，如采用石棉布等作为隔膜，在直流电的作用下，将水电解，生成氢气和氧气。产出的气体需要进行脱碱雾处理。

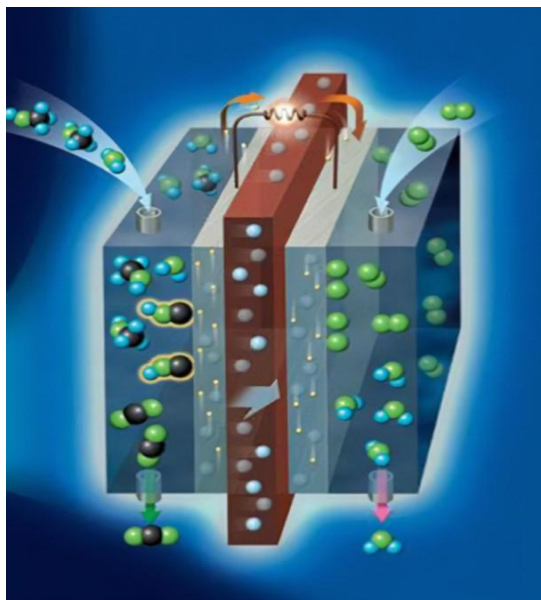
电-热-氢耦合

- 当前高压气态储氢是主流，但是因为安全性其发展一直受到限制，且储氢密度较低，不适合大规模长距离运输。
- 低温液态储氢由于高成本、储运难度大，在国内的发展面临重重困难。
- 液态有机储氢技术（LOHC）在安全性、储氢密度、储运效率上极具优势，在我国70MPa高压储氢和低温液态储氢均发展滞后的前提下，有望成为未来我国氢气储运的主要方式之一，也是我们系统设计中选择的方案。

（右图为一个1000升的LOHC罐取代了57个H₂压力气瓶）



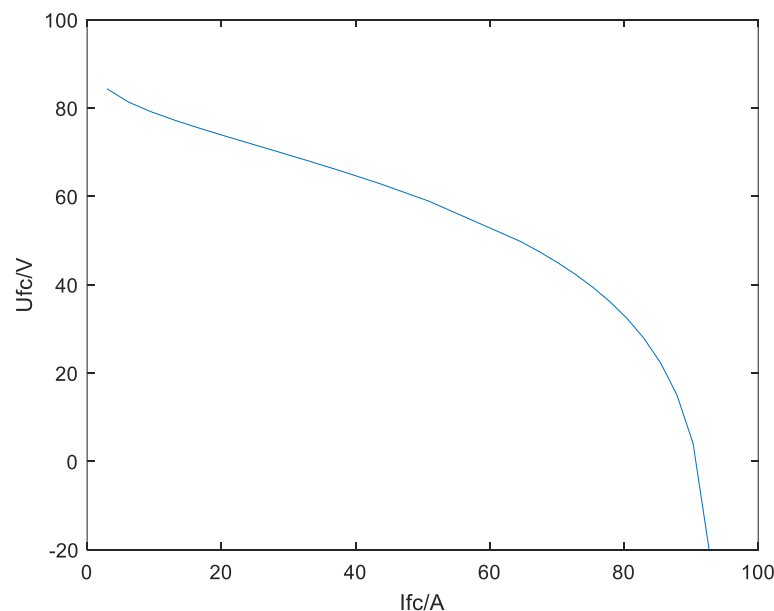
电-热-氢耦合



燃料电池：通过催化剂促使燃料发生氧化还原反应，持续产生电流，进而起到发电的作用。氢燃料电池具有燃料能量转化率高、噪音低以及零排放等优点，能够实现电能和化学能两种能量载体间连续，直接，高效的转换，可与电网，气网，热网互联互通与协调控制，广泛应用于交通工具以及固定电站。

数学建模：

$$\begin{cases} U_{fc} = U_{nst} - U_{act} - U_{ohm} - U_{con} \\ U_{nst} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S(T - T_{ref})}{2F} + \frac{R_a T \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{1/2})}{2F} \\ U_{act} = k_1 + k_2 T + k_3 T \ln C_{O_2} + k_4 T \ln i \\ U_{ohm} = i \left(\frac{r_M l}{S} + R_c \right) \\ U_{con} = m e^{ni} \end{cases}$$



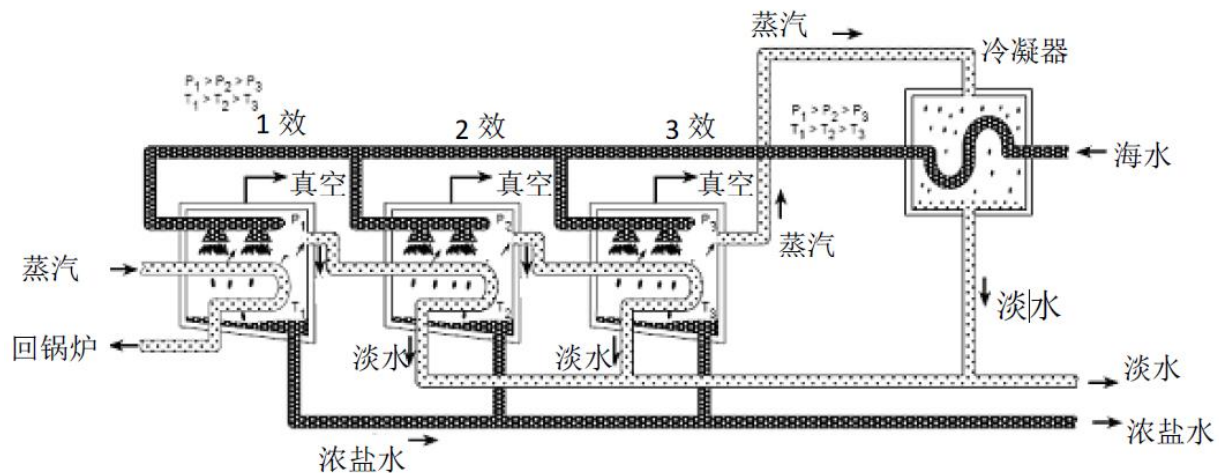
系统余热利用

➤ 海水淡化

系统中各过程所产生的余热可用于海水淡化系统。将系统各过程产生的余热运用于脱盐过程，可有效缓解能源问题，降低海水淡化成本，使水资源来源更丰富。（右图为低温多效蒸馏海水淡化系统）

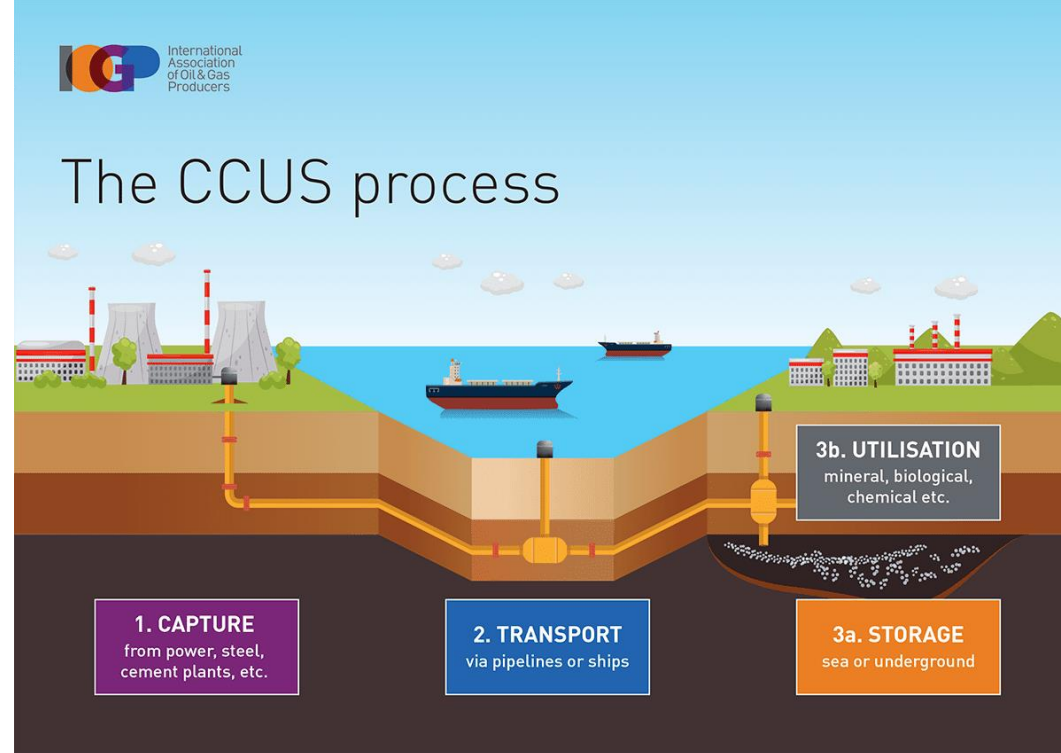
➤ 并入热网

还可以将余热并入热网。热网是集中供热系统的主要组成部分，担负热能输送任务。氢气产生的余热具有安全性，相比于传统热源煤炭等化石燃料更具环保性。



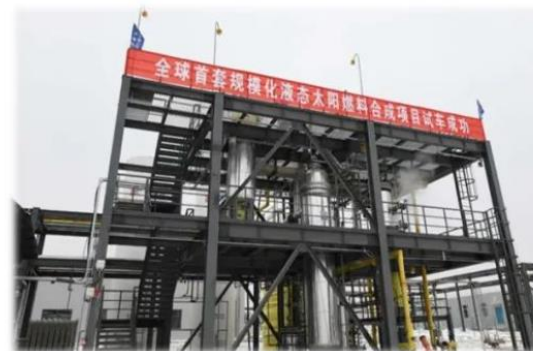
利用储氢系统中的氢合成 甲醇/甲烷等工业原料

- 通过在煤电机组加装CCUS（碳捕获、利用与封存），为系统保留转动惯量的同时可捕捉二氧化碳，与氢气结合大规模制取甲烷或甲醇等多种化工原料或高品质燃料。
- CO₂加氢反应过程简单，工艺日趋成熟。该过程的本质是将可再生能源的能量存储在燃料甲醇中，使能量便于储存与运输，提升化学能的利用率。
- 通过绿色化学反应产生的甲醇可在一些领域替代传统化石能源，壮大我国清洁能源产业，提升能源多元化保障能力，有助于双碳目标实现。



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

04

现有研究成果 分析

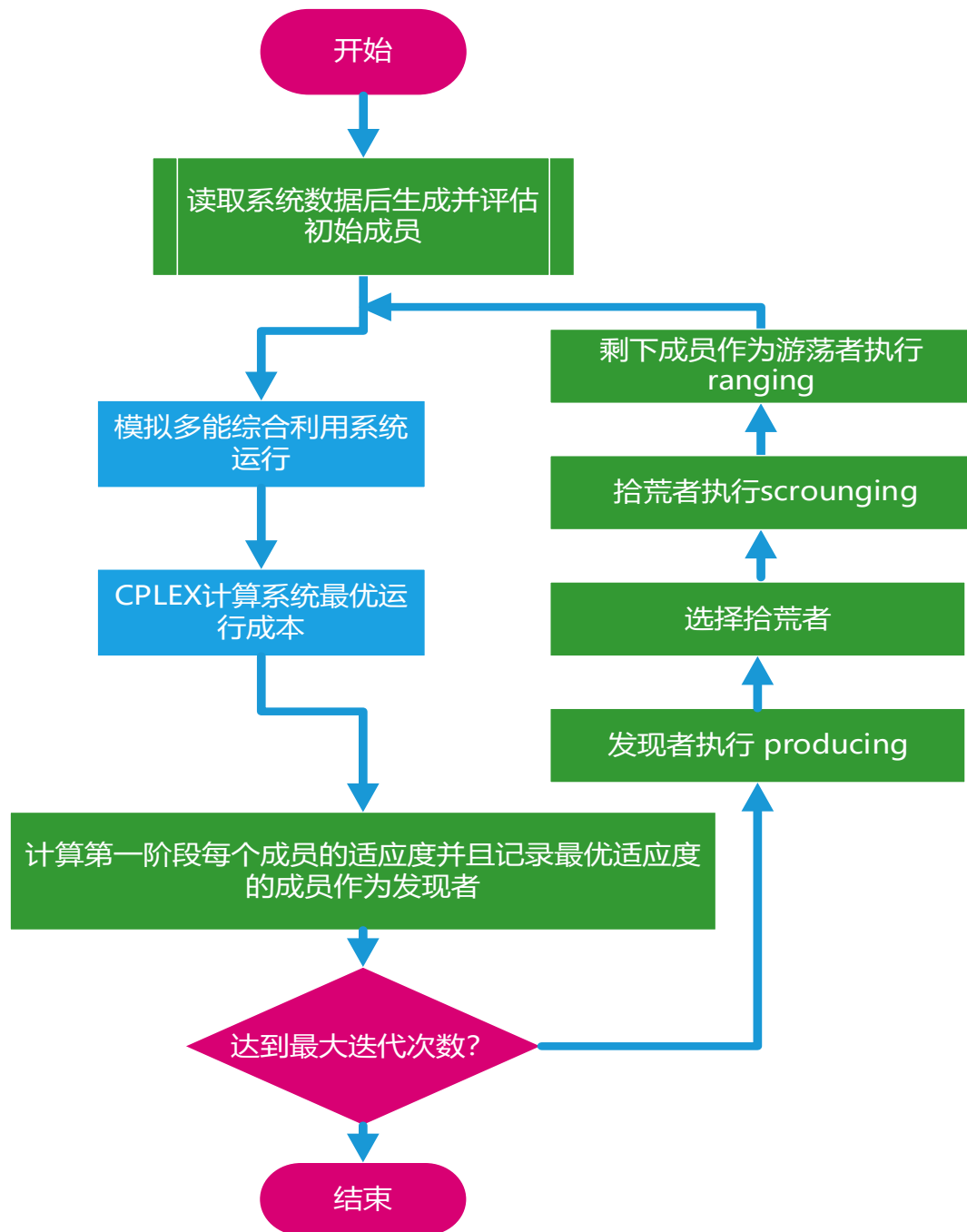




容量配置优化研究

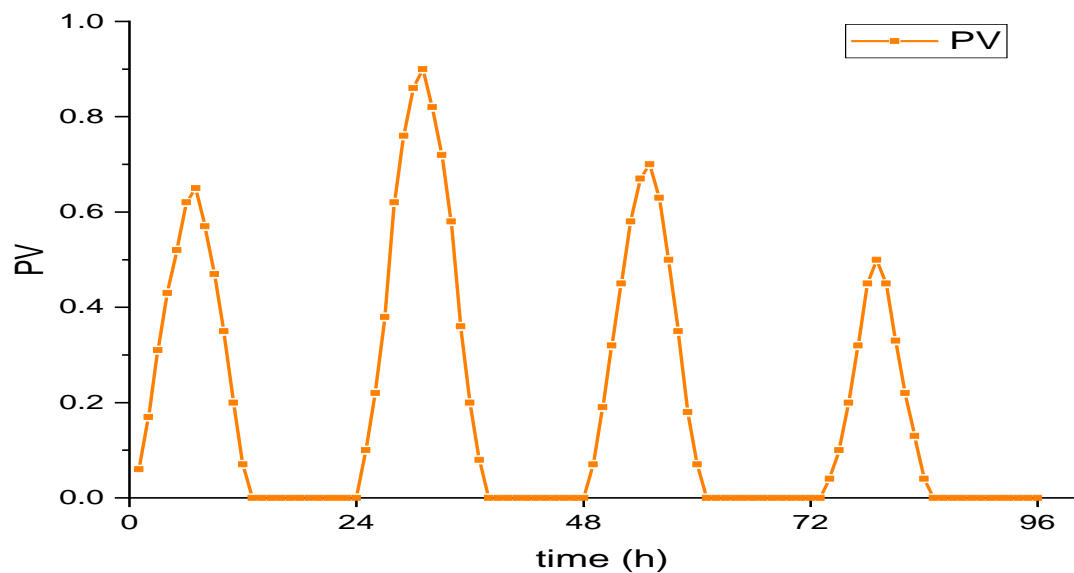


氢储能部分仿真



- 本案例对上述基于氢储能的多级能量综合利用系统设计方案进行简要建模，并在Matlab/Simulink平台上对各模块容量进行容量配置优化，以达到系统建设总成本（包含运营成本）达到最优。
- 案例使用两阶段优化方法：第一个阶段使用群智能搜索算法（GSO）优化系统的设备类型及容量，优化目标包括系统年总成本。第二阶段，采用CPLEX求解器优化设备的小时出力从而实现运行成本最小。第二阶段中优化后得到的总运行成本，能源使用量等信息会传递到第一阶段，来计算相应的年总成本。

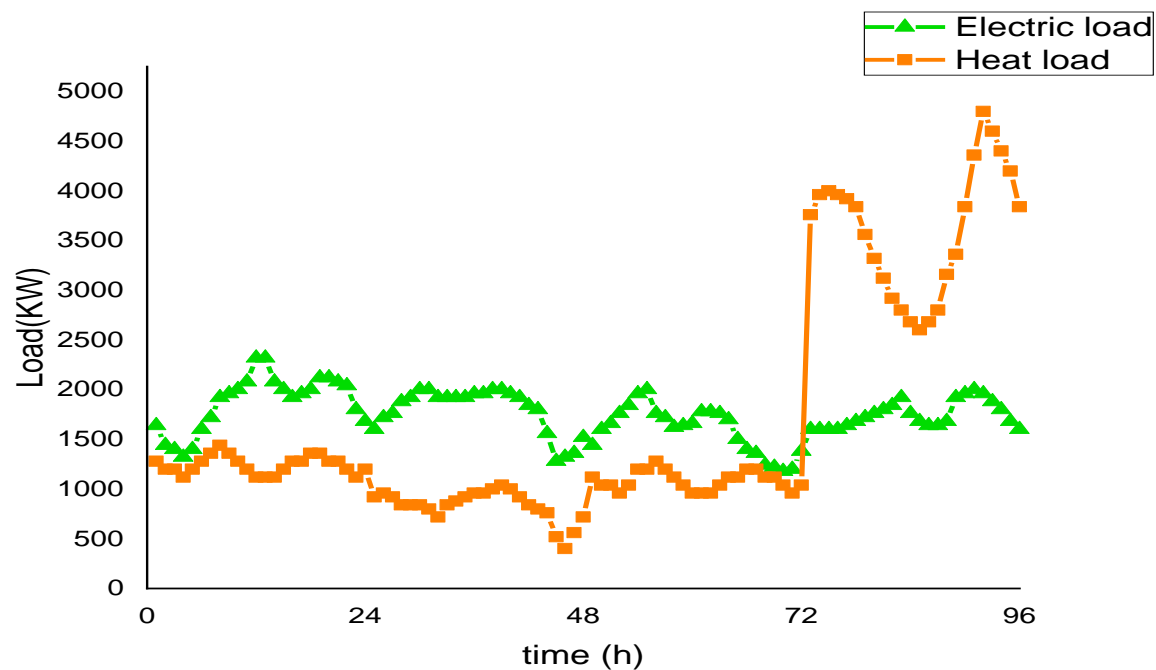
太阳能辐射



如图所示，系统运行于太阳能资源充足的地区条件下，其四个典型日中夏天的太阳能辐射最高，冬天的最低，春秋适中。

电热负荷特征

该园区的电热负荷曲线如图所示，春秋热电负荷比例适中，分别为66.43%，夏天最低，为46.38%，冬天最高，为206.10%。为了与常规储能对比，本案例加入电池蓄能代替氢储能作为对照组并进行分析。



各类装置的建设成本，运维成本占建设成本比例和效率常数如表所示

设备	建设成本	运行成本	效率
光伏	4500\$/kW	3.9%	15%
碱性电解槽	2210\$/kW	5.2%	65%
燃料电池	4550\$/kW	2.6%	65%
电热锅炉	1047\$/kW	4%	95%
储氢罐	1.95\$/kW	4%	98%
储热罐	2.88\$/kW	2.7%	98%
海水淡化装置	2900\$/(m3/s)	6%	70%
蓄电池	640\$/kW	4%	95%

将本案例提出的基于氢储能的多级能量综合利用系统与基于常规储能的系统在相同的场景下进行对比，其中各类成本细节如表所示：

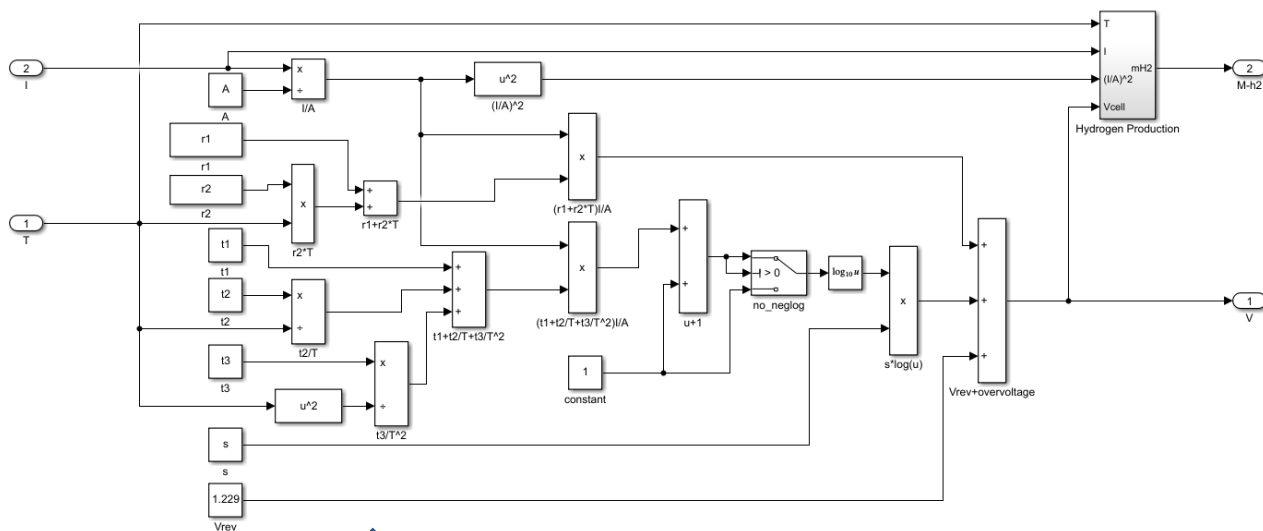
- 配置氢储能系统的总成本比常规储能的总成本要更低，其中前者的光伏装机容量更大，可以得出氢储能在园区的可再生能源消纳能力更强；
- 氢储能的热电联产能力，可以大幅减少电热锅炉和储热罐的配置容量，同时利用氢储能的余热，海水淡化装置比常规储能的装置容量更大，总成本更低。

设备	氢储能	常规储能
光伏	9924kW	8873kW
碱性电解槽	2900kW	-
燃料电池	1667kW	-
电热锅炉	3310kW	4883kW
储氢罐	16119kW·h	-
储热罐	17261kW·h	26282kW·h
蓄电池	-	7501kW·h
海水淡化装置	2535 m3/d	1625 m3/d
总成本	19168115.01	19785538.23

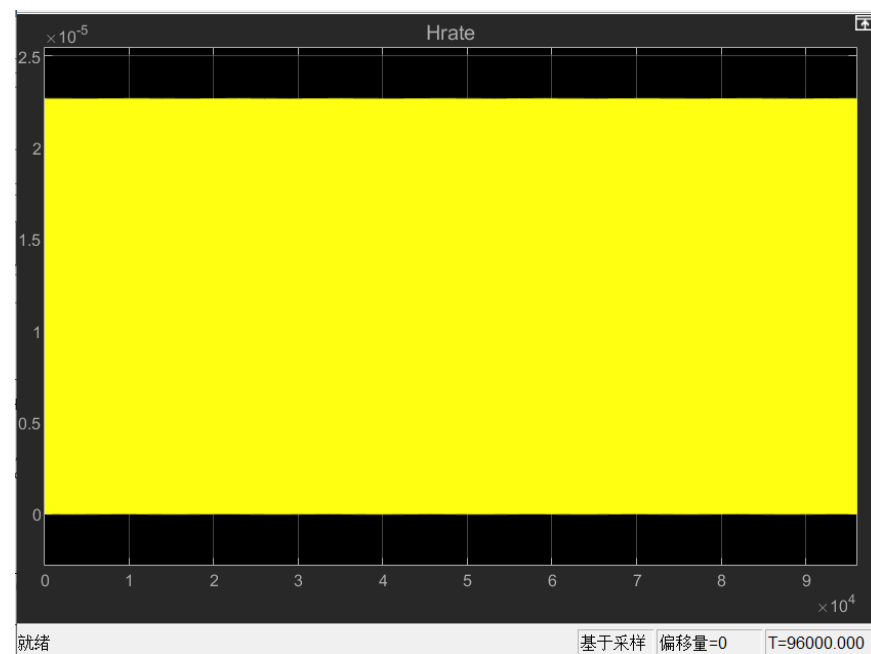
从下表分析可以得出，配置氢储能的**总成本比常规储能低 3.12%**，投资成本提高 7%，但是**购能成本方面降低 9.12%**，**碳排放成本降低 7.36%**，可以得出对比常规储能，氢储能可以有效提高综合能源系统的综合效益，降低能源消耗以及减少碳排放。

	C^{cstr}	C^{ope}	C^{buy}	C^{carbon}
氢储能	4.860	3.598	10.561	0.14956
常规储能	5.073	2.799	11.672	0.16144

碱性电解槽



Simulink平台建模



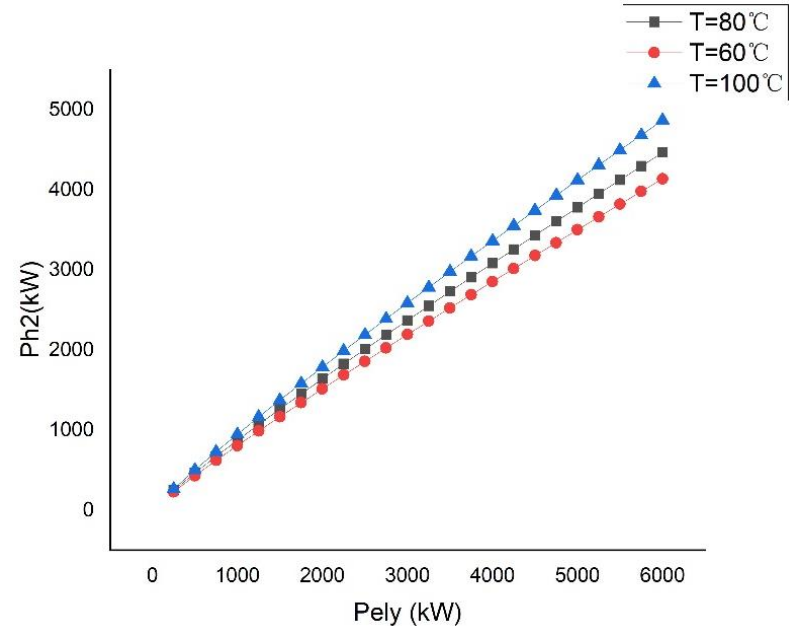
$$U_{\text{cell}} = U_{\text{rev}} + \frac{r_1 + r_2 T_{\text{el}}}{A_{\text{cell}}} I_{\text{el}} + (s_1 + s_2 T_{\text{el}} + s_3 T_{\text{el}}^2) \log \left(\frac{t_1 + t_2 / T_{\text{el}} + t_3 / T_{\text{el}}^2}{A_{\text{cell}}} I_{\text{el}} + 1 \right)$$

$$C_{\text{elt}} \frac{dT_{\text{el}}}{dt} = Q'_{\text{gen}} - Q'_{\text{loss}} - Q'_{\text{cool}}$$

$$\dot{n}_{\text{aeH}_2} = \eta_F \frac{N_{\text{el}} I_{\text{el}}}{zF}$$

$$\eta_F = a_1 \exp \left(\frac{a_2 + a_3 T_{\text{el}}}{I_{\text{el}} / A_{\text{cell}}} + \frac{a_4 + a_5 T_{\text{el}}}{(I_{\text{el}} / A_{\text{cell}})^2} \right)$$

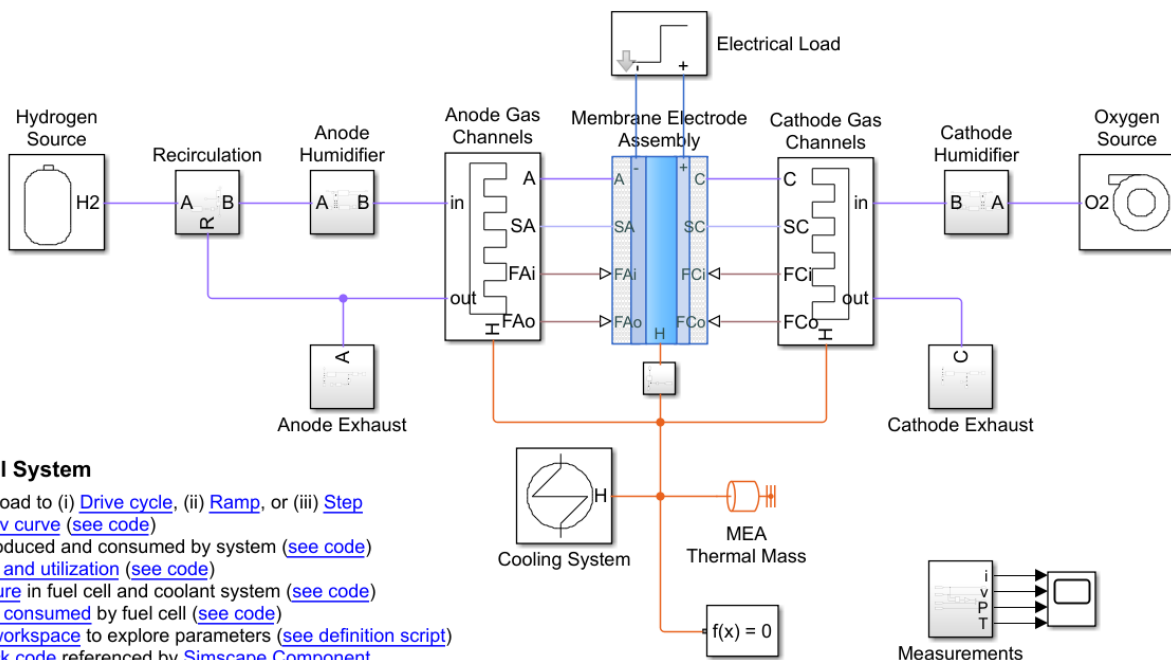
M文件建模



氢储能仿真分析

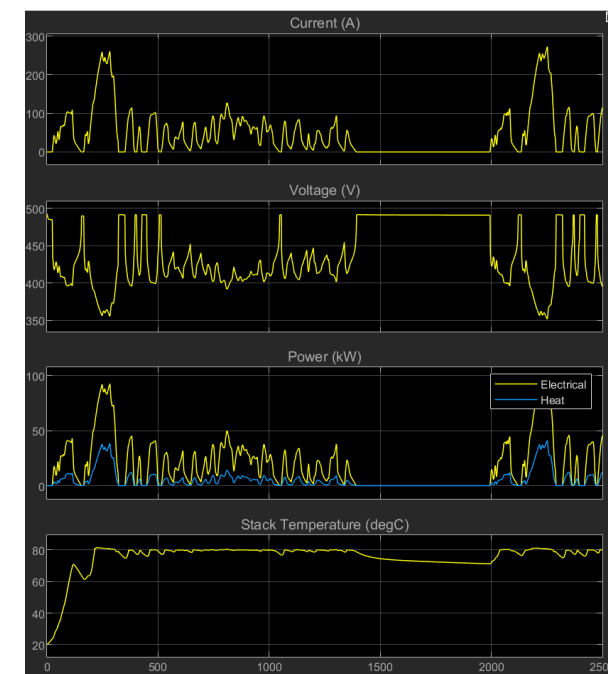
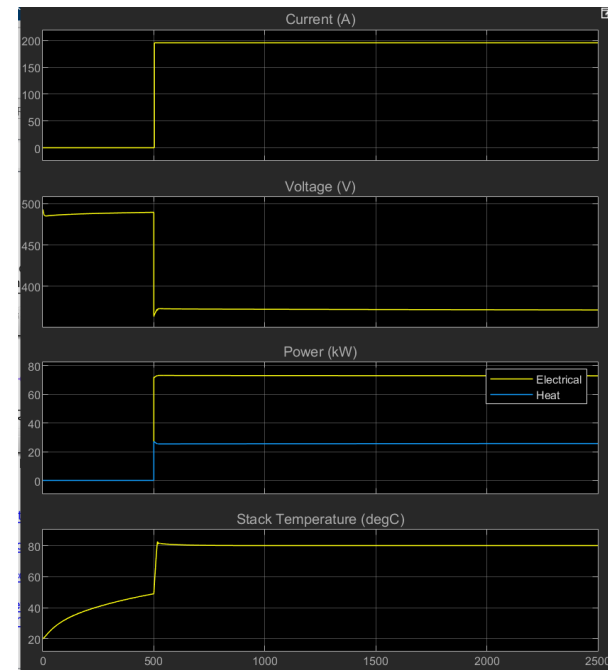
燃料电池

Mathworks 上比较完善的燃料电池模型



PEM Fuel Cell System

1. Set electrical load to (i) [Drive cycle](#), (ii) [Ramp](#), or (iii) [Step](#)
2. [Plot fuel cell i-v curve](#) ([see code](#))
3. [Plot power](#) produced and consumed by system ([see code](#))
4. [Plot efficiency and utilization](#) ([see code](#))
5. [Plot temperature](#) in fuel cell and coolant system ([see code](#))
6. [Plot hydrogen consumed](#) by fuel cell ([see code](#))
7. [Open model workspace](#) to explore parameters ([see definition script](#))
8. [See MEA block code](#) referenced by [Simscape Component](#)
9. [Explore simulation results](#) using [sscexplore](#)
10. [Learn more](#) about this example



氢储能仿真分析

05

创新点及展望



创新与展望



- 氢能作为未来高比例可再生能源新型电力系统应对中长周期能源电力供需不平衡的一种储能介质，可以实现化石能源过渡到可再生能源的可持续循环，有效减小电力系统中的碳排放及能源消耗；
- 从能量转换上看，储存起来的氢能不仅可以转化为电能，还可以转化为热能、化学能多种形式的能源，兼具了安全、灵活的特质；
- 系统中的各模块模型有待丰富，在未来对基于氢储能的多级能量综合利用系统进行实际物理模型设计与搭建。



Thank you