



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

“科创中国”先进制冷技术
产学研融合会议，青岛

“双碳目标”背景下制冷核心技术发展路线展望

邢子文

2022-1-8



内容提要

CONTENTS

一、引言

二、制冷剂替代及应用

三、关键部件与制冷系统能效提升

四、冷热耦合及可再生能源利用

五、大数据分析 with 智慧运维

六、总结与展望

■ 双碳目标：2030年前，CO₂排放达到峰值；2060年前，实现碳中和

➤ 电力生产侧：

- ✓ 大力发展可再生能源：光电、风电、水电、生物质发电、**绿色氢能**
- ✓ 安全高效发展核电，控制和减少煤电

➤ 能源消费侧：

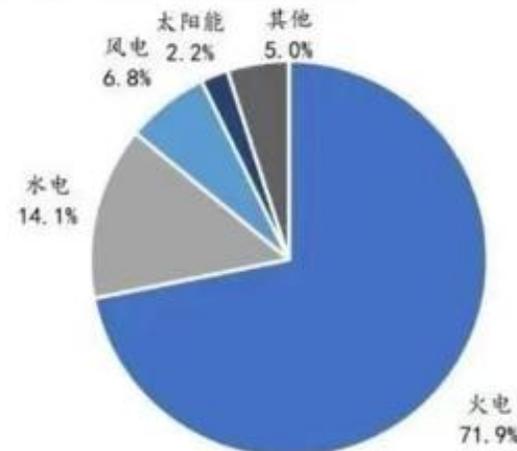
- ✓ 绿色建筑：低碳建筑（超低能耗、**净零能耗**）
- ✓ 低碳交通：新能源车**热管理**（电动、**氢燃料**）
- ✓ **工业节能减排**

➤ 负碳技术、碳汇：

- ✓ 自然碳汇：森林、陆地、海洋
- ✓ CCUS：物理、化学



图 10. 2021 年前 8 个月发电结构



来源：红塔证券

氢能：

- ◆ 制备：**绿氢**、**蓝氢**、灰氢
- ◆ 储运：气态、液态
- ◆ 利用：燃料电池、燃料、原料

储能：

- ◆ 物理储能：抽水蓄能、压缩空气储能、**蓄热**、**蓄冷**
- ◆ 化学储能：动力电池、电动车、**氢储能**

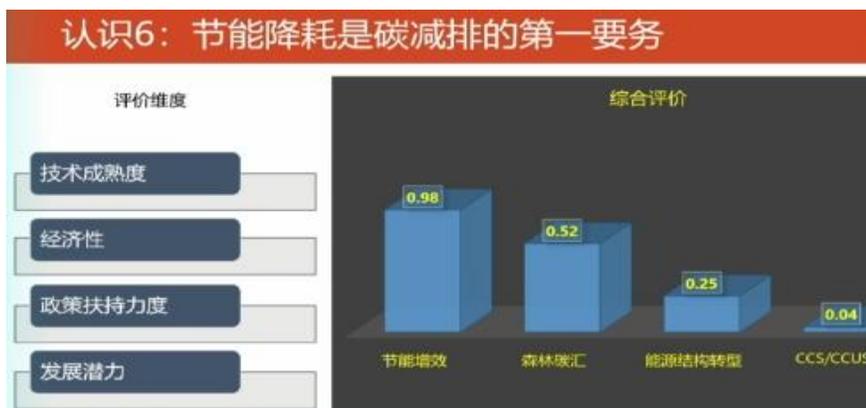
解振华：实现碳中和，大体需136万亿投入；“1+N”政策体系

■ 双碳目标：

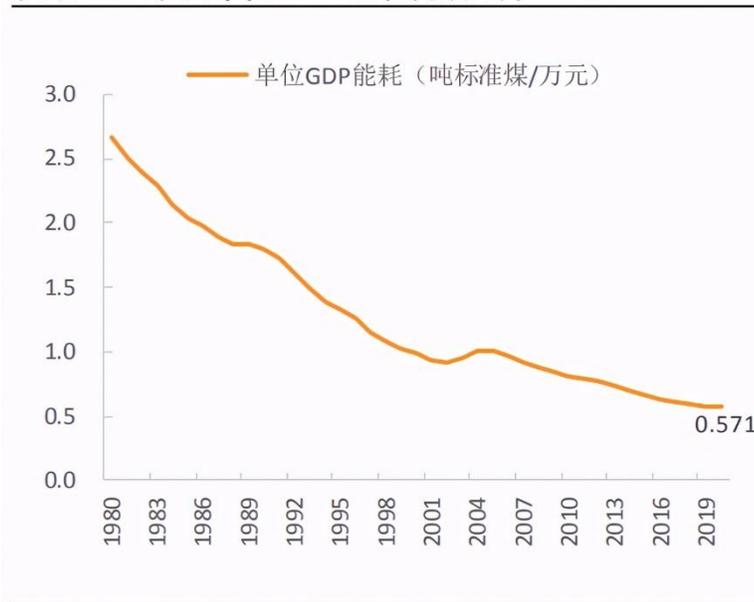
➤ 能源消费侧：

✓ 工业节能减排：

- 产品碳排放：直接排放：材料获取、制造、运输、报废回收)
间接排放：运行维护（能效）
- 节能优先：成本最低的低碳路径，在全过程、各领域强化
- 优化能源结构：化石能源→电力（热泵）、绿氢燃料、绿氨燃料
- 调整原料结构：绿氢原料、绿氨原料
- 调整产业结构：冶金、化工、建材、矿山、食品
- 非二排放：甲烷、HFCs（基加利修正案）



图表11 中国单位 GDP 能耗持续下降



能耗双控（总量、强度）

- ◆ 2019年，国外发达国家每万元GDP能耗是0.26吨标煤，我国是0.6吨标煤，是国外发达国家的2.6倍
- ◆ 我国十四五节能目标：单位GDP能耗下降13.5%、二氧化碳排放下降18%

实现双碳目标，必须坚定不移地把节能放在首位，以较低峰值实现碳达峰，并为最终实现碳中和奠定基础

■ 绿色高效制冷行动方案（发改环资[2019]1054号）：

- 重大意义：年产值达8000亿元，全社会用电量15%以上；年均增速近20%
- 主要目标：到2030年，制冷总体能效提升20%以上
- 主要任务：强化标准引领；提升绿色高效制冷产品供给；促进绿色高效制冷消费；推进节能改造；深化国际合作
- 提升绿色高效制冷产品供给：
 - ✓ 加大对变频控制、高效压缩机、紧凑轻量化高效传热...等关键共性技术研发；
 - ✓ 鼓励生产企业为工商用户提供按需定制、精准适配的绿色高效制冷系统。

■ 基加利修正案：

- 效果：履行HFCs管控要求，可为巴黎协定的2°C目标，贡献0.4°C
制冷空调设备还可通过提升能效，使气候效益加倍
- 受控HFCs：R32、R134a、R143a、R245fa等共18种
- 基线年：2020-2022
- 冻结：自2024年起，将HFCs的生产及使用冻结在基线水平
- 削减：从2029年开始，到2045年累计削减80%以上（我国各类细分场景明确的GWP降低目标值与时间表？）



制冷技术应用广泛，相关产品未来仍将快速增长，对实现双碳目标具有十分重要的作用和贡献

■ “双碳目标”背景下制冷核心技术发展路线

➤ 制冷剂替代及应用

- ✓ 自然制冷剂及低GWP合成制冷剂
- ✓ 基于制冷剂的关键部件与制冷系统开发
- ✓ 超低充注量及安全防御

➤ 关键部件与制冷系统能效提升

- ✓ 关键部件：压缩机、换热器、控制阀
- ✓ 机组及系统：精准匹配、评价标准

➤ 冷热耦合及可再生能源利用

- ✓ 制冷供热集成系统及余热利用
- ✓ 直流驱动与氢能利用

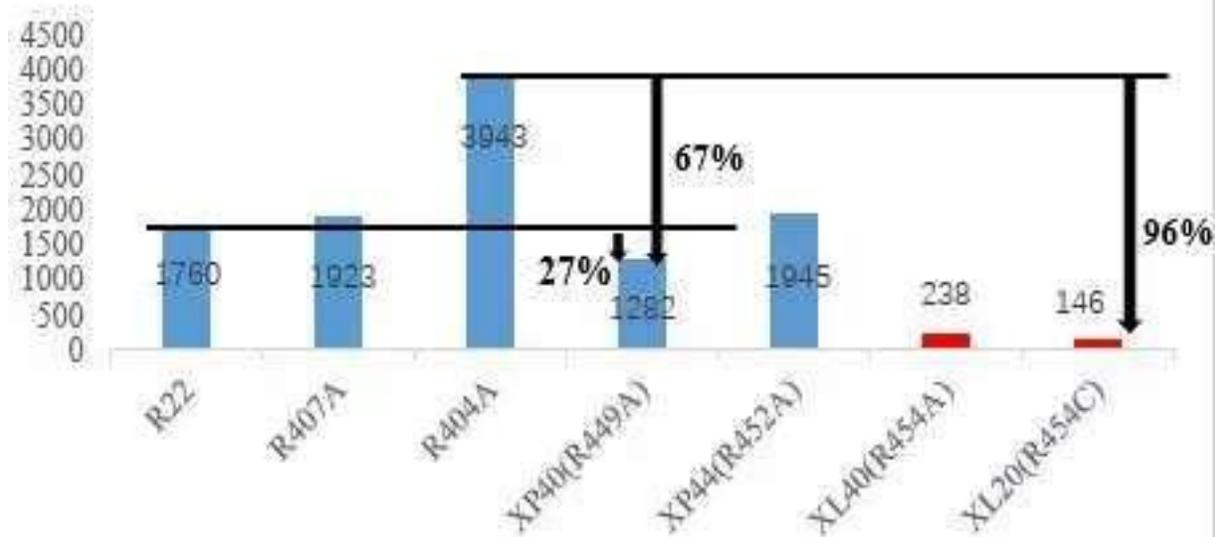
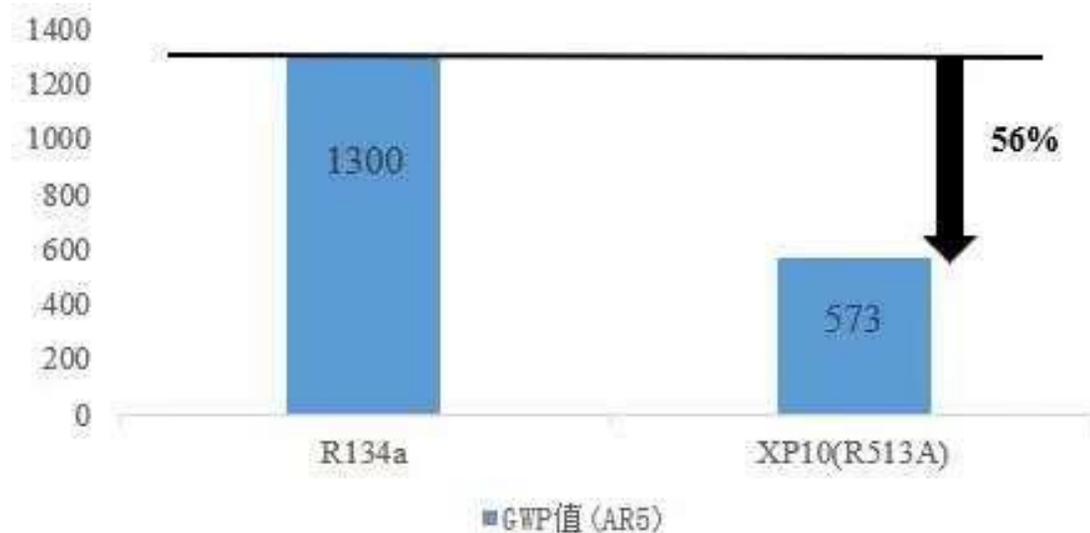
➤ 大数据分析智慧运维

- ✓ 基于知识和数据驱动模型的节能控制
- ✓ 制冷系统智慧运维专家系统

二、制冷剂替代及应用

➤ 自然制冷剂及低GWP合成制冷剂

- ✓ 自然制冷剂扩大应用领域：NH₃、CO₂、R290、R600a、R718
- ✓ 合成制冷剂研发、润滑油及材料兼容、回收再利用：R1234yf、R1234ze、R1233zd、...?
- ✓ 空调（需求占比80%以上）：R32、R410A；R1234yf、R1234ze、R1233zd、R515B、R513A
- ✓ 冷冻冷藏
 - ① 中大型：NH₃/CO₂、R290，螺杆压缩机
 - ② 中小型：R134a、R22、R404A、CO₂；R513A、R449A、R452A；R454A，R454C，螺杆、涡旋压缩机
 - ③ 轻商：R134a、R32、R410A、R290、R513A、R454B，涡旋、滚动转子、活塞压缩机
 - ④ 冰箱：R600a，活塞压缩机



➤ 关键部件与制冷系统

✓ 基于制冷剂的关键部件及系统研发

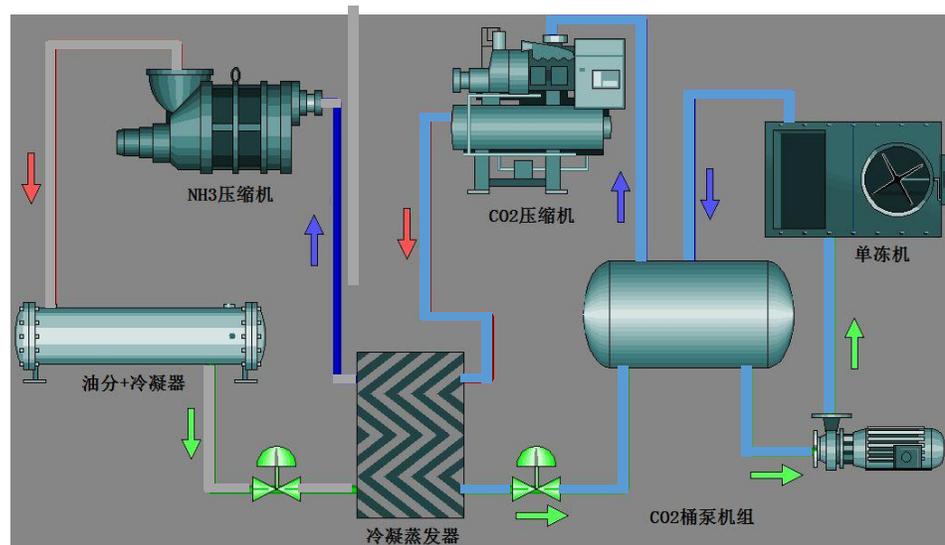
- ① R600a活塞压缩机及冰箱
- ② R290滚动活塞压缩机及轻商系统
- ③ 跨临界CO₂活塞、涡旋压缩机及其系统
- ④ NH₃/CO₂复叠螺杆压缩机及其系统



✓ 替代制冷剂应用技术

- ① 减小充注量：小管径、微通道换热器
- ② 缺陷管理：安全、能效、高转速
- ③ 材料替代：铝代铜（换热器、连接管）、钢代铜、非金属材料、新材料

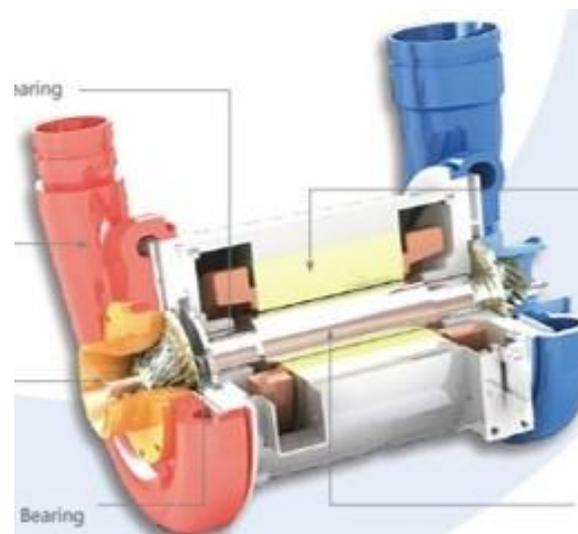
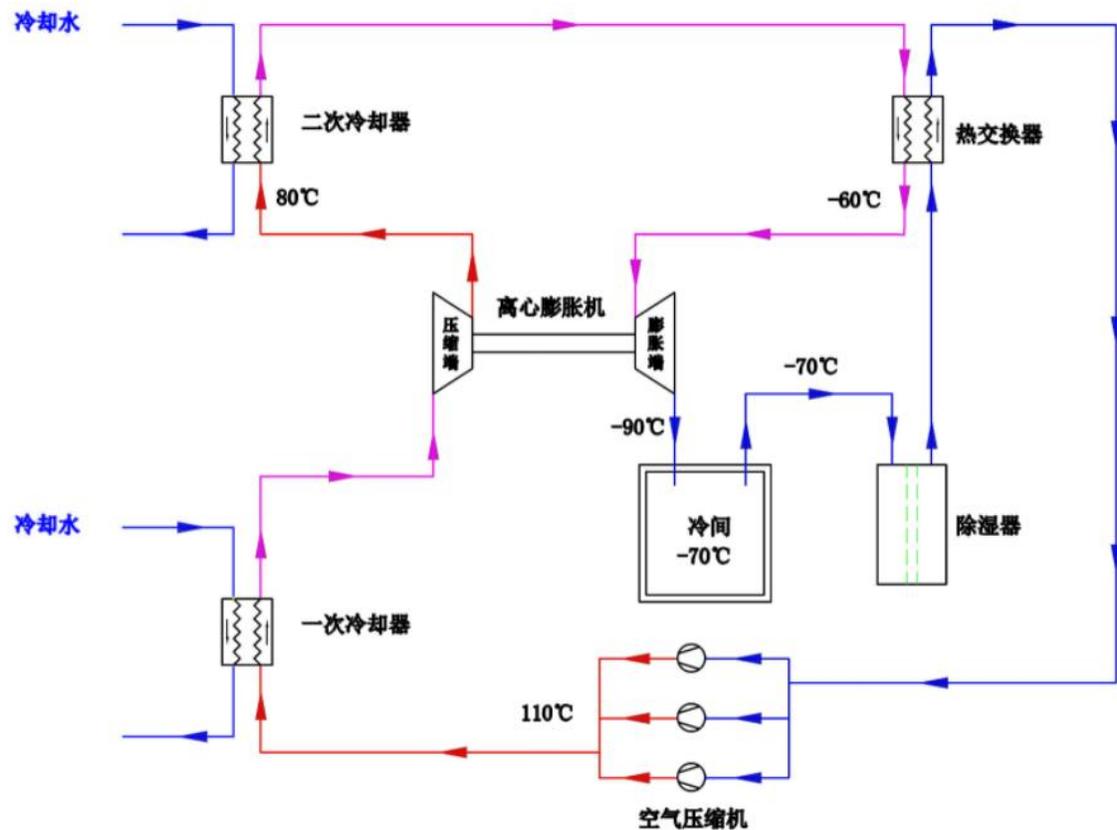
✓ 非蒸气压缩制冷：吸收吸附、固态制冷



➤ 自然制冷剂应用

✓ 空气制冷机

- ① 压缩空气膨胀制冷， -60°C 与传统系统性能相当？
- ② 用于低温储运、生物医药、石油化工、冷冻干燥、血液/器官保存等领域



新一代高速气浮离心压缩-膨胀机

■ 制冷设备节能潜力

- 关键部件：10%
 - ✓ 压缩机（电机）
 - ✓ 换热器、控制阀（节流阀、四通阀）
 - ✓ 控制器、传感器、.....
- 冷热源机组：20%？
- 制冷系统：机组+输配+末端：30%~50%？



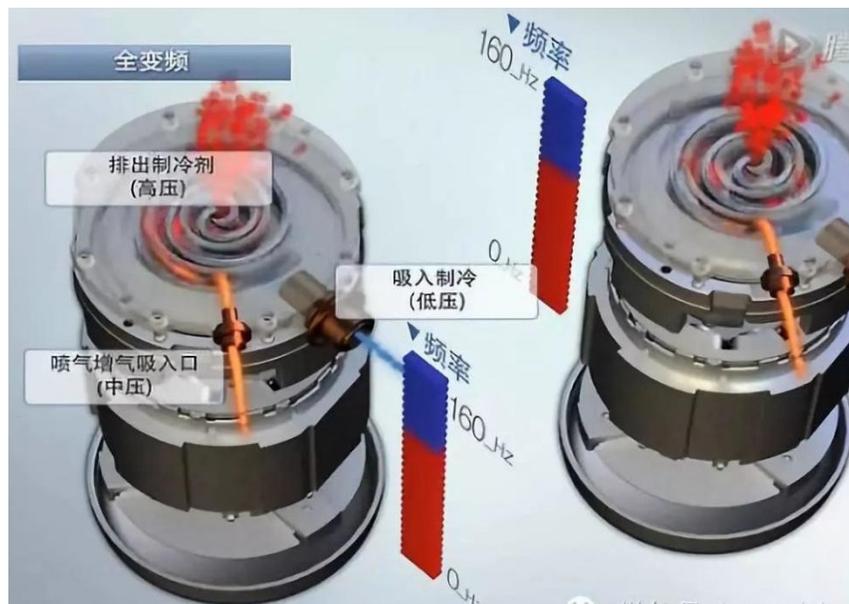
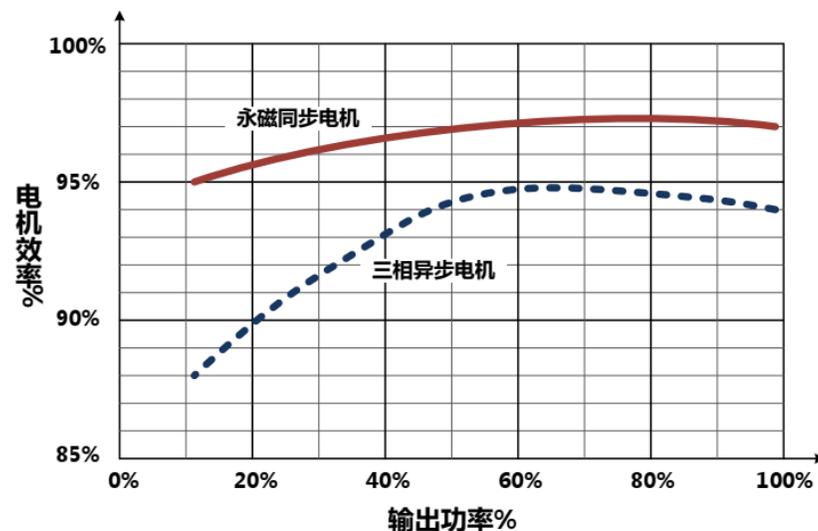
■ 国务院《2030年前碳达峰行动方案》：

- 以电机、风机、泵、压缩机、变压器、换热器、工业锅炉等设备为重点，全面提升能效标准。建立以能效为导向的激励约束机制，推广先进高效产品设备，加快淘汰落后低效设备。
- 加强重点用能设备节能审查和日常监管，强化生产、经营、销售、使用、报废全链条管理，严厉打击违法违规行，确保能效标准和节能要求全面落实。

三、关键部件与制冷系统能效提升

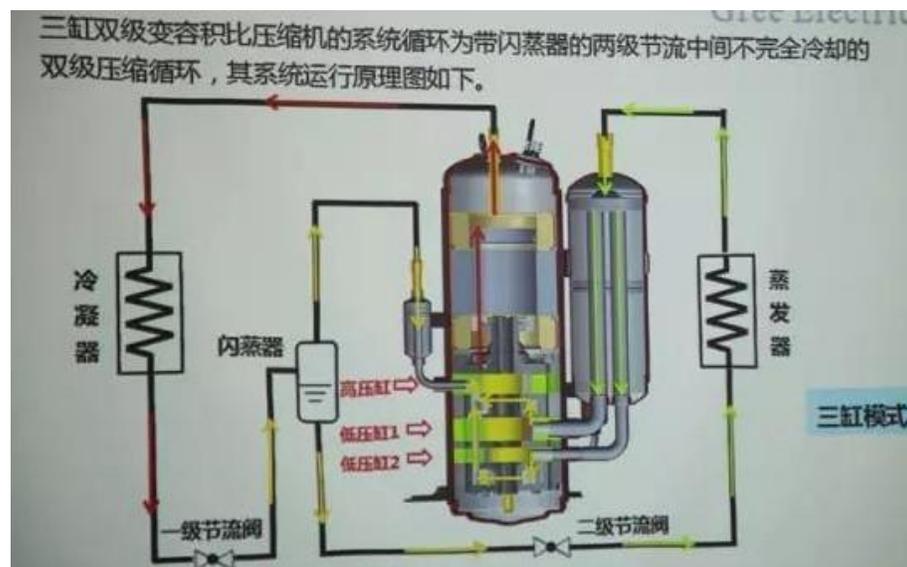
➤ 变频驱动：高速小型化、轻量化，减低直接碳排放

- ✓ 活塞压缩机：高端冰箱
- ✓ 转子压缩机：家用空调、轻商
- ✓ 涡旋压缩机：多联机、轻商
- ✓ 螺杆压缩机：中央空调、热泵、**冷冻冷藏**
- ✓ 离心压缩机：中央空调、热泵



➤ 双级压缩

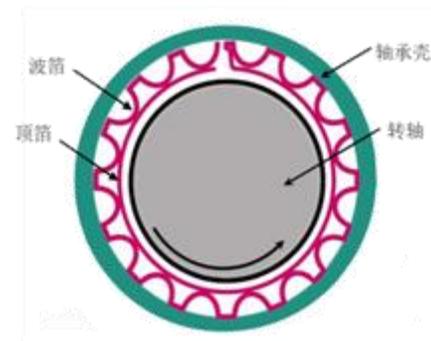
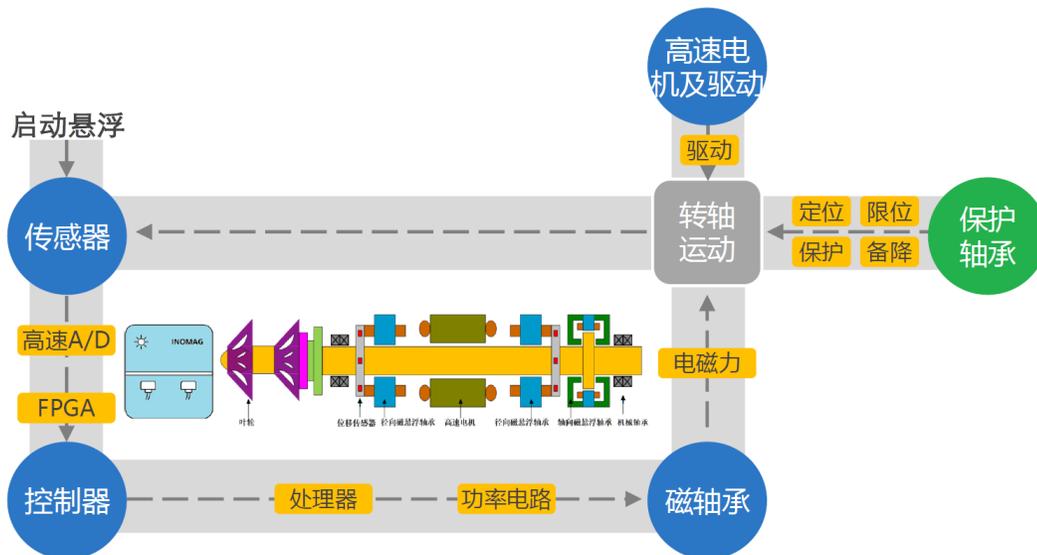
- ✓ 替代大压比单级压缩
- ✓ 替代压缩过程中补气的单级压缩
- ✓ 三缸双级变容积比滚动转子式压缩机
 - ① 双级压缩、级间补气
 - ② 工作缸数选择、双级容积比控制
 - ③ -35°C 超低温制热、 60°C 高出水温度



三、关键部件与制冷系统能效提升

➤ 无油压缩

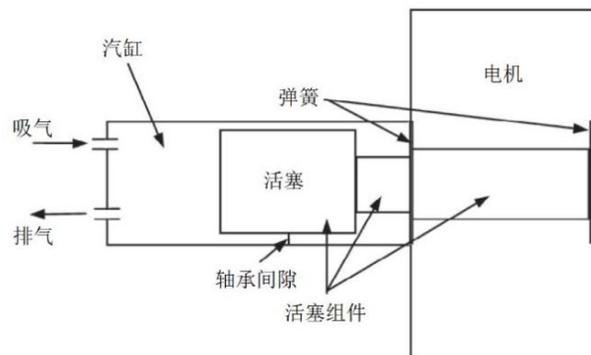
- ✓ 效率高、运维费用低
- ✓ 磁浮离心机
 - ① 高速电机直联驱动
 - ② 磁浮控制器、传感器、保护轴承等核心部件
- ✓ 气浮离心机（动压、静压）
 - ① 箔片材料及工艺
 - ② 箔片受力及变形
- ✓ 线性活塞压缩机
- ✓ LNG等BOG压缩机（接收站、运输船）



径向箔片轴承

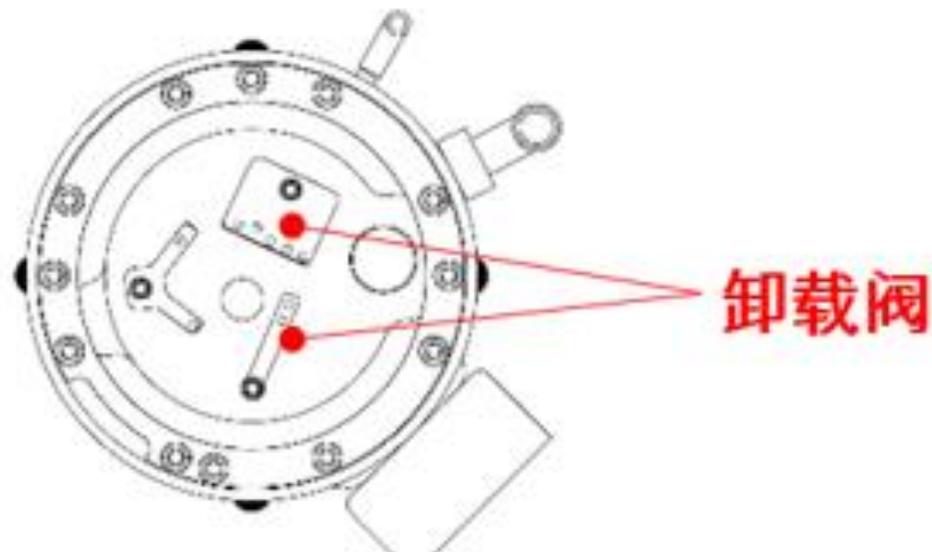
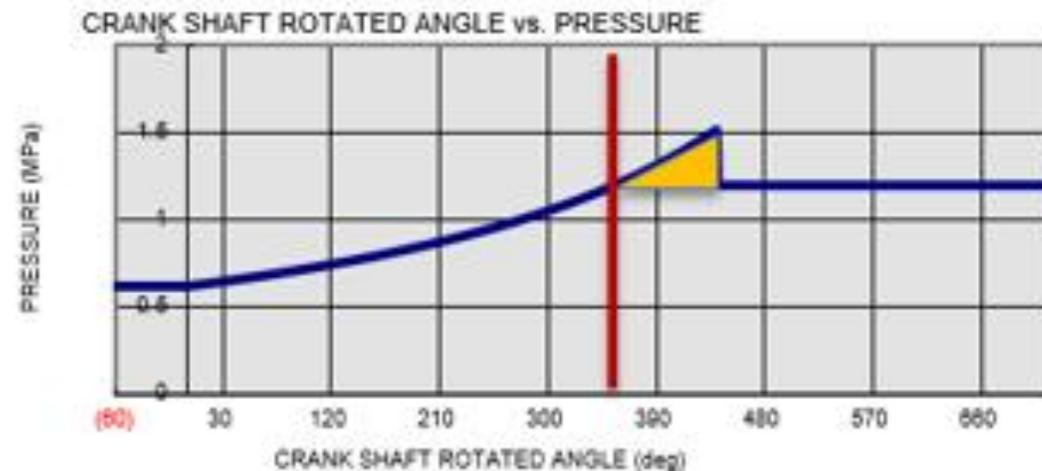


轴向箔片轴承



➤ 变容积比

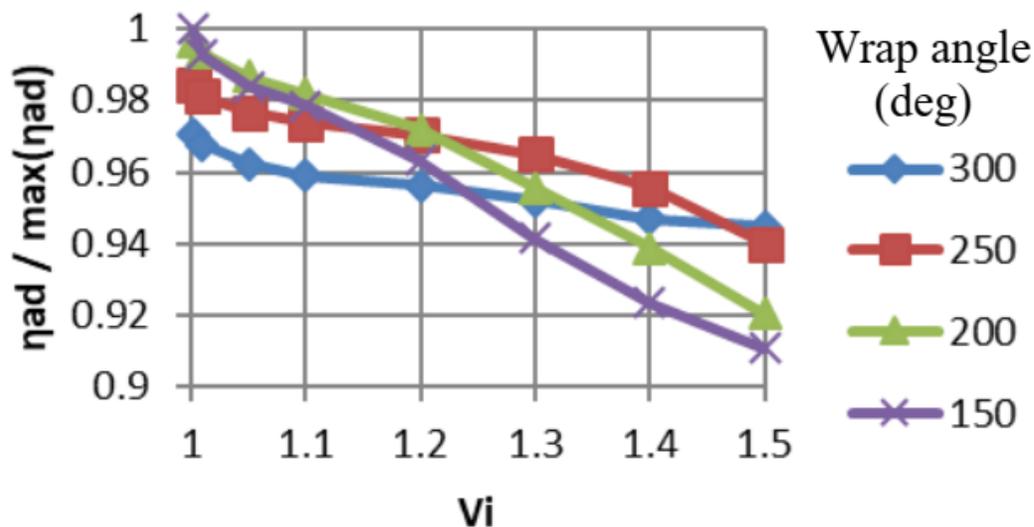
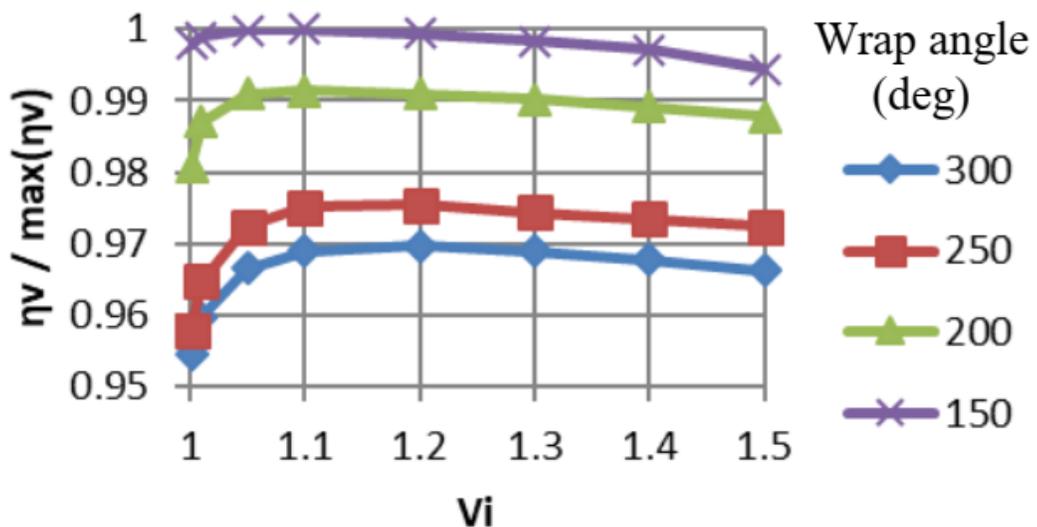
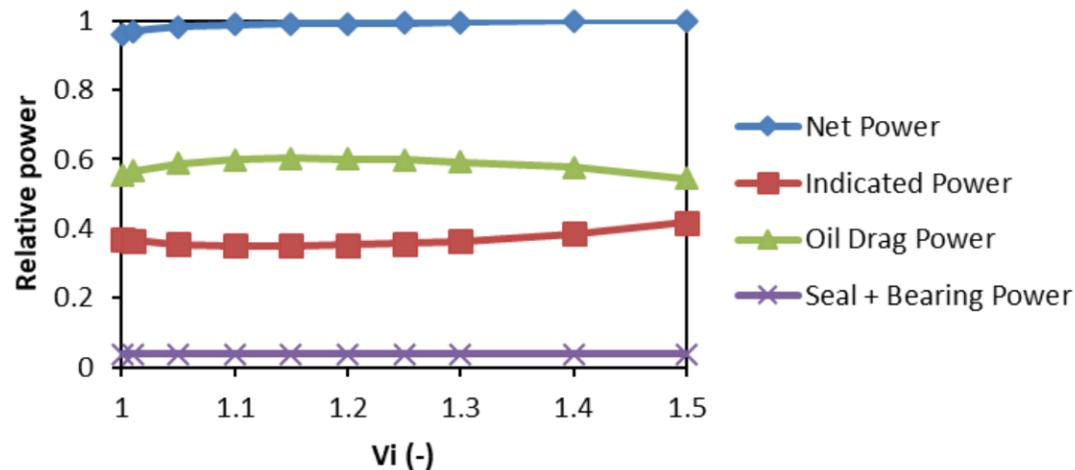
- ✓ 涡旋压缩机：卸载阀（中间压力排气阀）
- ✓ 变频变容积比螺杆压缩机
 - ① 变频调节容量、滑阀调节内压比
 - ② 容量、内压比各自独立调节
 - ③ 运行调节适应性强



➤ 特定工况订制

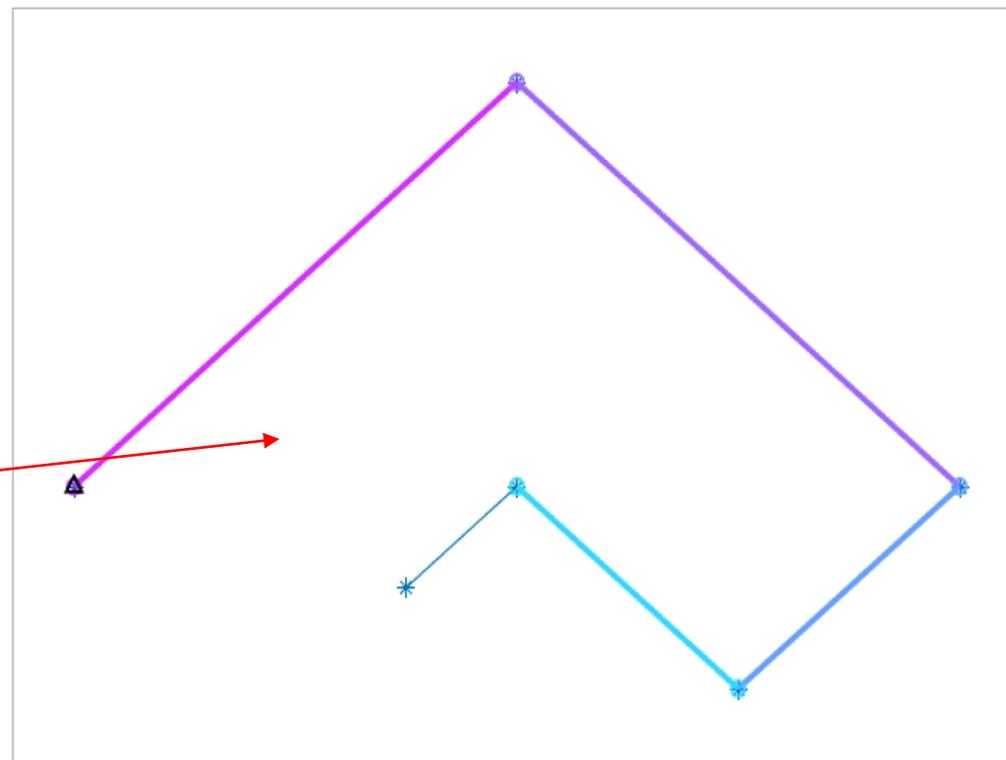
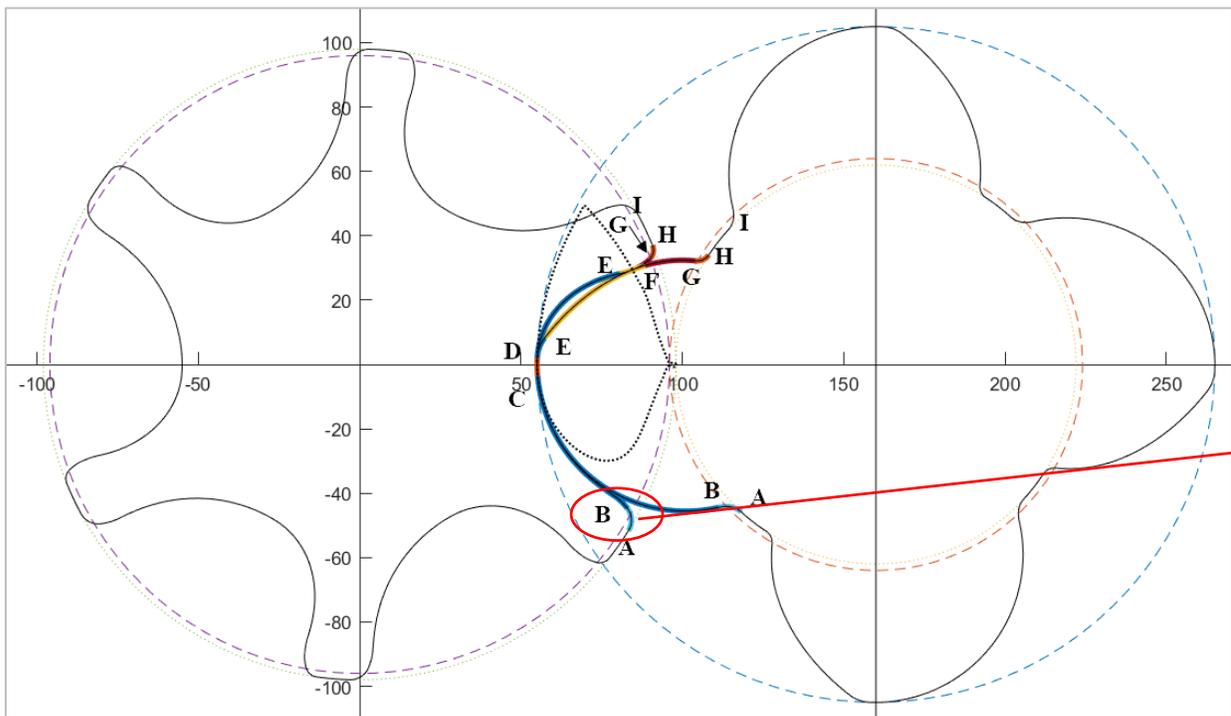
✓ 小压比

- ① 利用自然冷源的空调系统、数据中心冷却、设施农业、立体养殖
- ② 低成本、低碳：无滑阀等冗余功能、国产轴承
- ③ 小压比NH3螺杆压缩机参数优化：
 - $P_{\text{suc}} = 3.55 \text{ bar}$, $T_{\text{suc}} = -5^\circ\text{C}$
 - $P_{\text{dis}} = 4.62 \text{ bar}$
 - Pressure ratio = 1.3



➤ 压缩机结构参数优化

- ✓ 转子型线设计新方法：用贝塞尔曲线、NURBS等替代常规曲线作为组成齿曲线，型线优化更灵活



➤ 压缩机结构参数优化

✓ 变导程

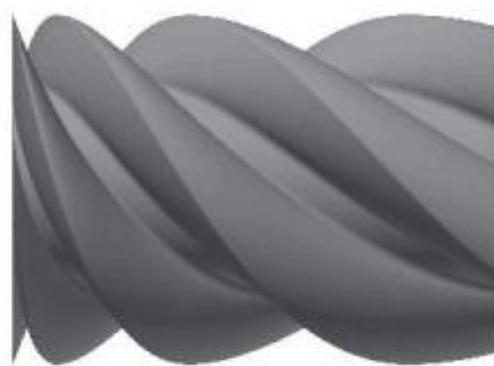
- ① 更大的排气孔口面积、更小的流动损失
- ② 更低的压缩多方指数、更高的效率



恒导程



多段导程



渐变导程



➤ 轻商压缩机及其机组

- ✓ 制冷陈列柜、厨房冰箱、饮料柜、葡萄酒储藏柜、自动售货机、制冰机、冰激凌机、医用冷柜等
- ✓ 生鲜电商、新零售、无人零售市场
- ✓ 压缩机：小型轻量化、高效能、变频化
- ✓ 轻商设备类型多、生产厂家，技术水平存在明显差异
- ✓ 压缩机及制冷机组匹配、运转率优化等综合解决方案：压缩机用电占60~70%、其它部件30~40%
- ✓ 制冷剂：R134a、R404A、R22；R1234yf、R513A、R452A；CO₂、R290



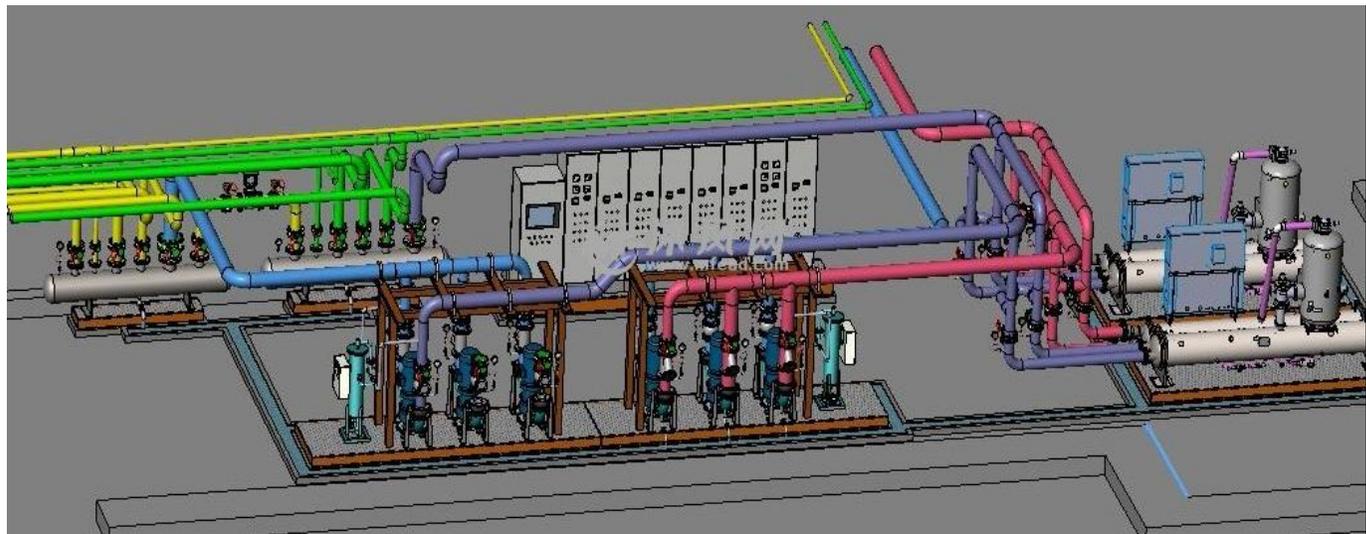
➤ 机组及系统

✓ 个性定制、精准匹配

- ① 用户**负荷准确核算**
- ② 基于解决方案的产品
- ③ 分布式机组：工业制冷、大型冷库

✓ 标准驱动

- ① 能效标准：家用、轻商、**冷冻冷藏**；部件、机组、系统
- ② 产品分区标准、中国特色IPLV标准
- ③ 现场检测标准



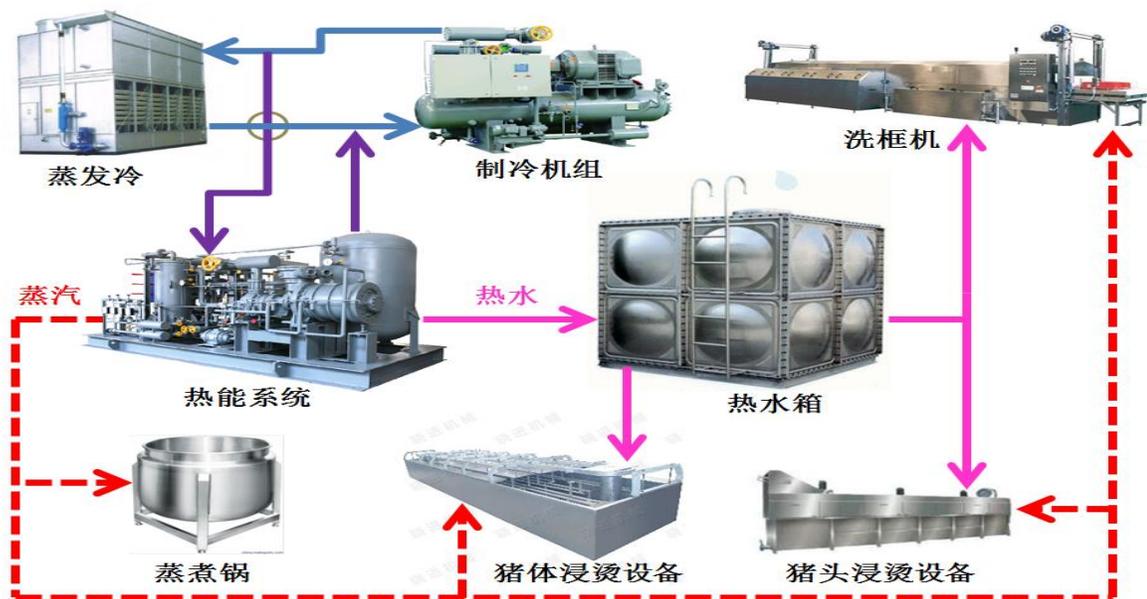
➤ 制冷供热集成系统

✓ 宽温区高效制冷供热耦合集成系统

- ① 制冷、制热、蓄热
- ② 冷热负荷匹配、模块化系统集成

✓ 冬奥会国家速滑馆大型跨临界CO₂制冷供热系统

- ① 冰面：跨临界CO₂直接蒸发制冷，较传统技术能效提升20%以上
- ② 全部余热可实现回收利用，多个模块化跨临界CO₂机组并联运行



生猪屠宰用冷热联供系统



➤ 高效热泵机组：

- ✓ 电力高效转化为热量的最佳途径
- ✓ 余热高效提升温度的最佳装备
- ✓ COP>2.5 ? COP>1 ?



➤ 高温工业热泵

- ✓ 合成工质：R245fa、R1233zd、R1336mzz、... ?

➤ 水蒸气压缩机

- ✓ 水蒸气温度：100~400°C
- ✓ 水蒸气压力：0.1~3.5MPa

➤ 自然冷/热能利用、多能互补

- ✓ 蒸发冷
- ✓ 深水库
- ✓ 深层地热
- ✓ 数据中心
- ✓ 制冷系统冷凝热



➤ ORC系统及其膨胀机

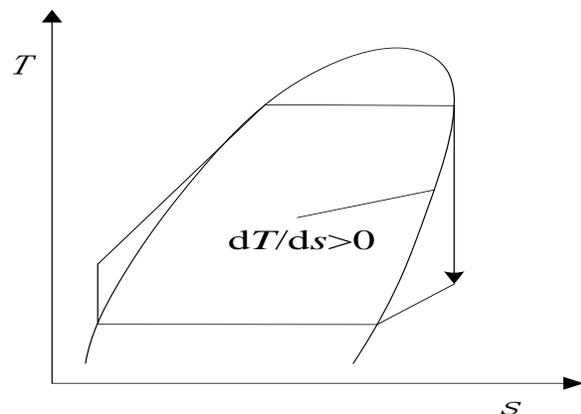
- ✓ 涡旋、滑片、螺杆、透平
- ✓ 开启式、半封闭式
- ✓ 喷油、无油、带液膨胀

➤ 水蒸气膨胀机

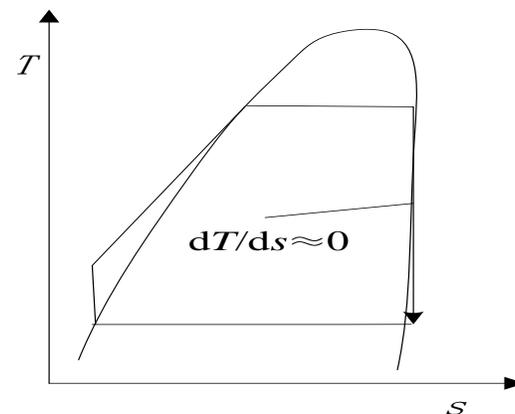
- ✓ 水蒸气温度：100~400°C
- ✓ 水蒸气压力：0.1~3.5MPa

➤ 余热制冷

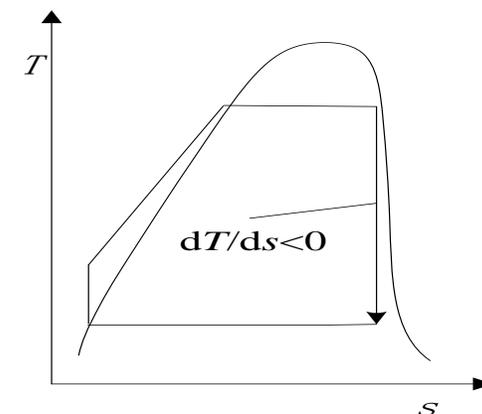
- ✓ 溴化锂



a) 干性工质



b) 等熵工质



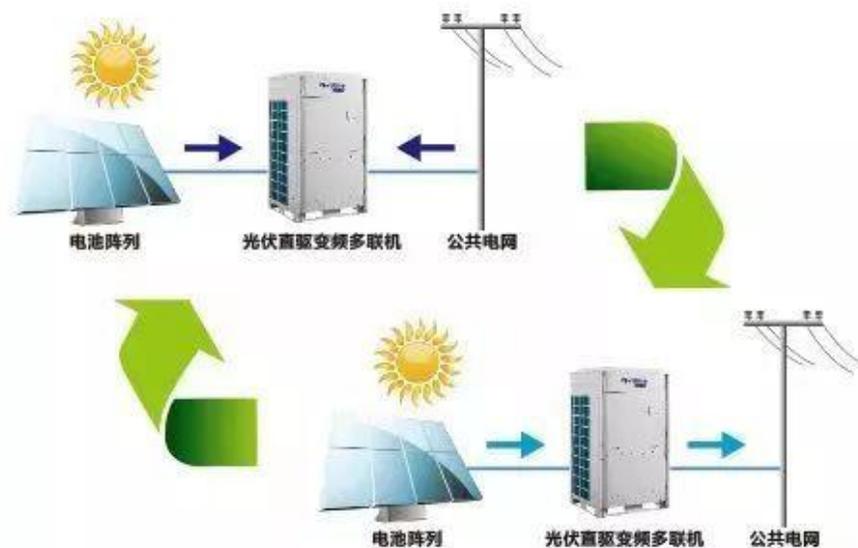
c) 湿性工质



西藏羊八井地热蒸汽和汽水两相螺杆膨胀发电机组

➤ 直流驱动制冷系统

- ✓ 2021年6月，国家能源局发布《关于报送整县（市、区）屋顶分布式光伏开发试点方案的通知》
- ✓ 中央空调、多联机、家用空调、冰箱、冰柜、冷库、冷藏车、....
- ✓ 调峰特性：消减电网波动、动态响应，储能（储能电池，蓄冷蓄热）



➤ 碳捕集、利用与封存 (CCUS) 装置制冷系统

- ✓ 燃煤电厂烟气中CO₂大规模捕集，15万吨/年
- ✓ CO₂ 增压机组：0.12MPa增至2.6MPa
- ✓ CO₂液化制冷机组：蒸发温度-21℃；制冷量1113kW



➤ 氢制备

- ✓ 化石燃料制氢、工业副产物制氢、电解水制氢、生物质制氢及其他
- ✓ 绿氢、蓝氢、灰氢
- ✓ 电解水制氢

① 碱性电解水制氢

② 质子交换膜电解水(PEM)制氢

③ 和固态氧化物电解水(SOEC)制氢

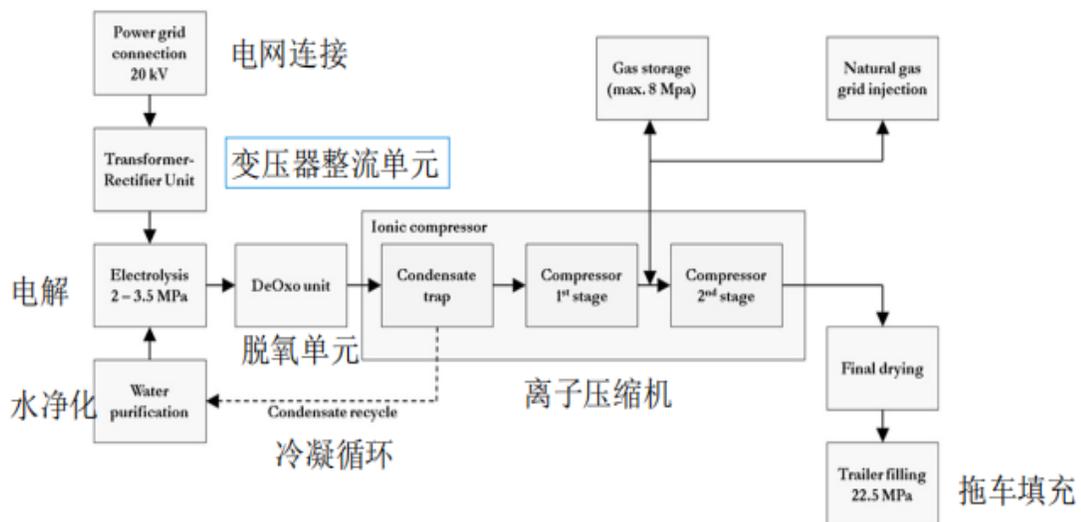


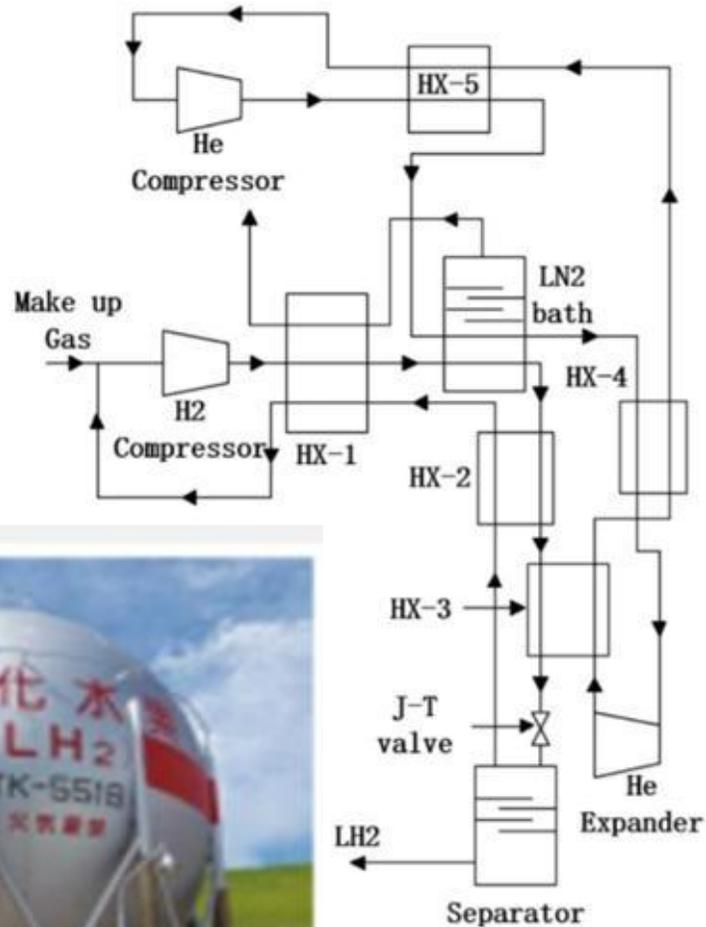
Fig. 1 – Block diagram of the PtG plant.

制氢方式		优点	缺点	能源效率	氢气价格 (美元/kg)	氢气成本 (元/NM ₃)
化石燃料制氢	天然气制氢	产量高, 成本低	排放温室气体	83	0.75	0.6-1.2
	煤制氢	产量高, 成本低, 商业化技术成熟	排放温室气体	63	0.92	1-1.2
工业副产物制氢	焦炉气制氢	利用副产物, 成本低	焦炉气具有污染性, 建设地点受制于原料供应	-	-	1.2
	氯碱制氢	产品纯度高, 原料丰富	建设地点受制于原料供应	-	-	1.3-1.5
电解水制氢		环保, 产品纯度高	耗电量大, 成本高	45-55	1.95	3-5
光解水制氢		无污染, 零排放	技术不成熟, 转化率低	10-14	4.98	-
生物质制氢		环保, 产量高	技术不成熟, 产品纯度过低	40-50	1.21-2.42	-

➤ 氢储存、运输

✓ 大规模氢液化制冷系统

- ① 氢气制冷压缩机
- ② 氢气增压压缩机：活塞式压缩机、螺杆压缩机
- ③ 透平膨胀机：氢气透平、氦气透平



➤ 氢储存、运输

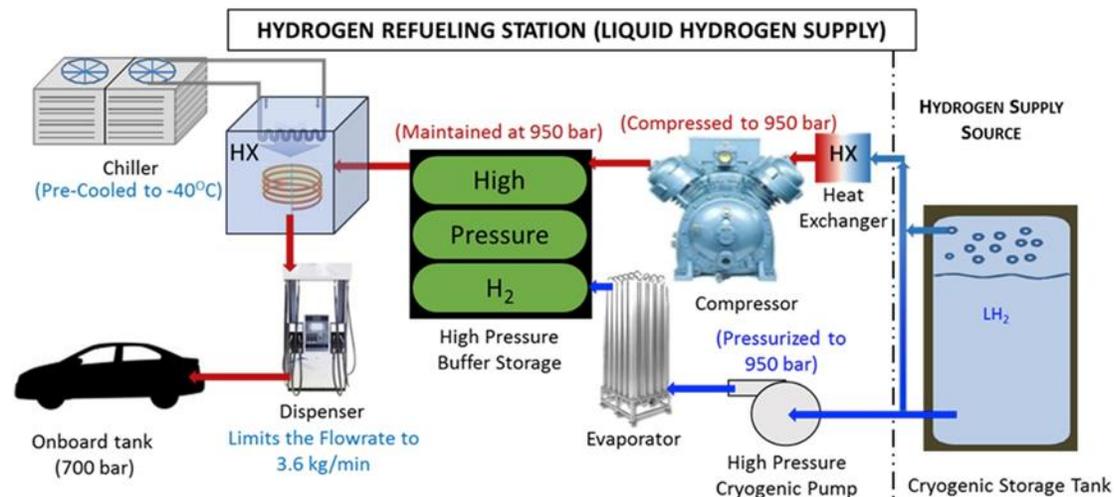
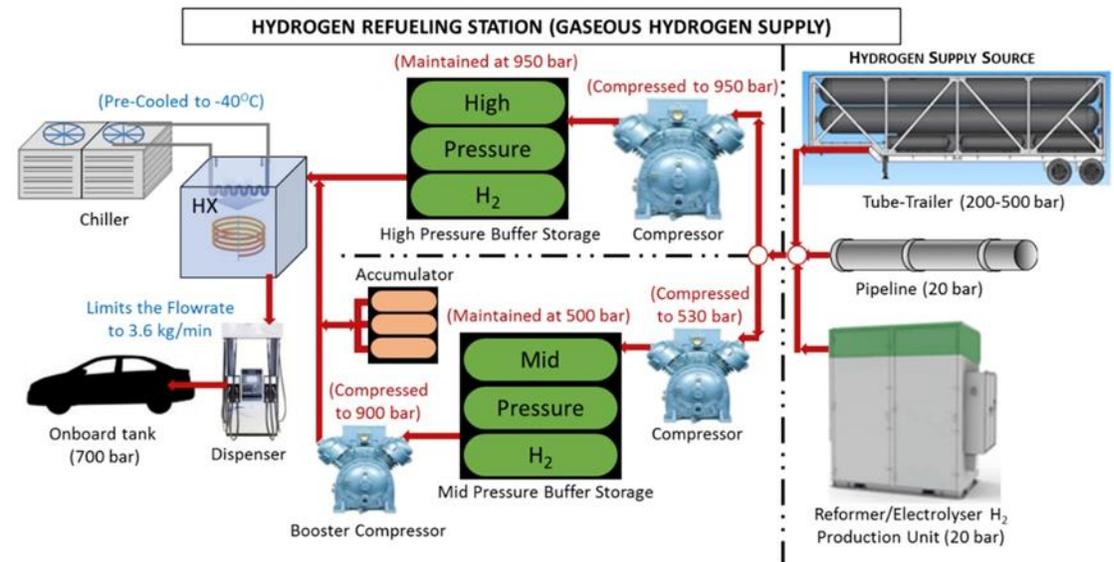
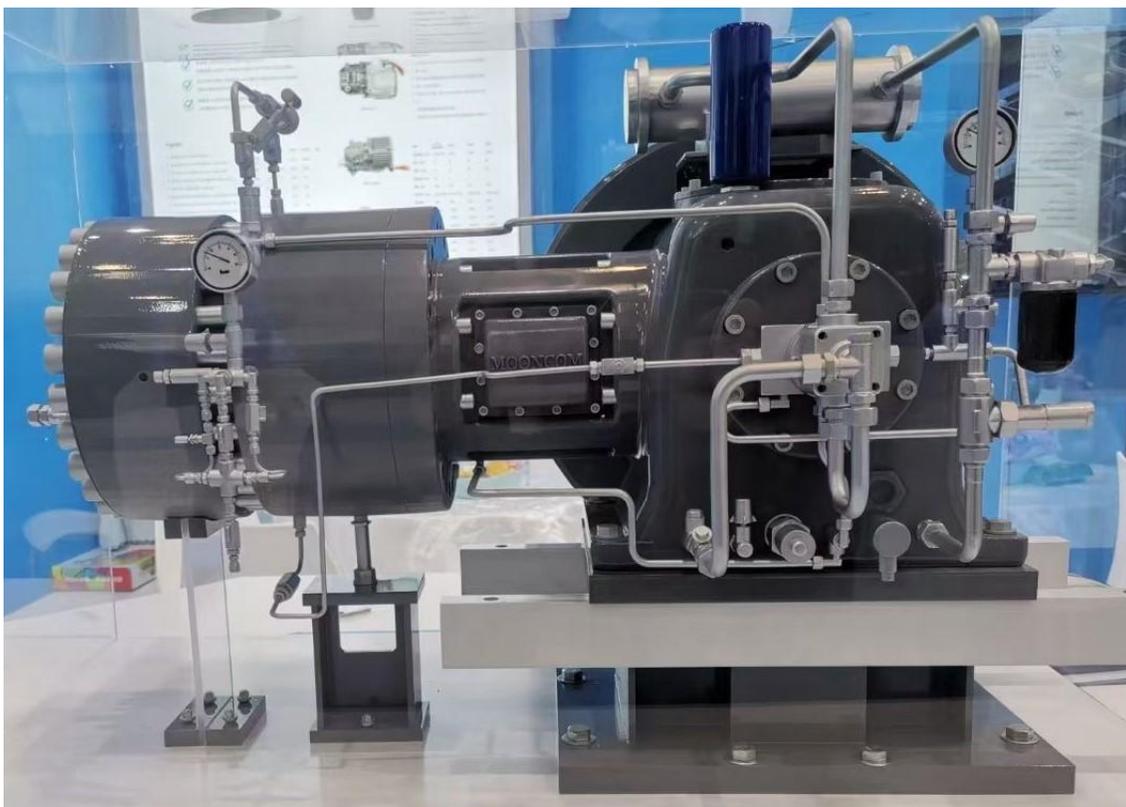
- ✓ 气态储存、运输
- ✓ 液态储存、运输



四、冷热耦合及可再生能源利用

➤ 加氢站

- ✓ 高压氢气压缩机：45MPa；90MPa
- ✓ 高压液氢泵：100MPa
- ✓ 制冷机组

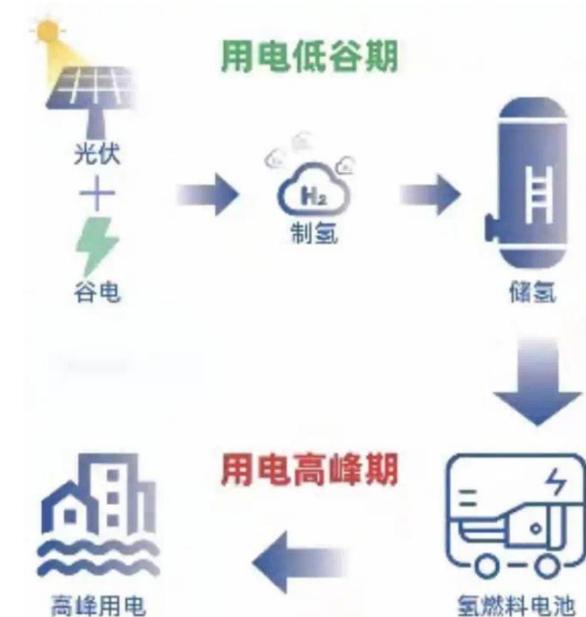
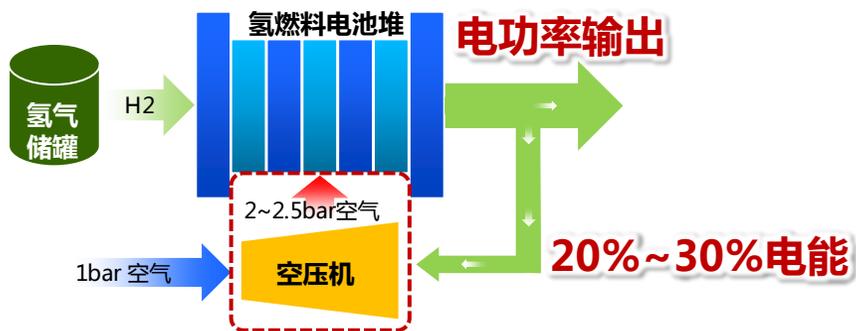


四、冷热耦合及可再生能源利用

氢利用

✓ PEM燃料电池

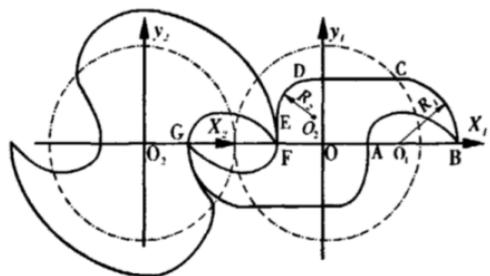
- ① 车用：乘用车、重卡
- ② 分布能源：储能



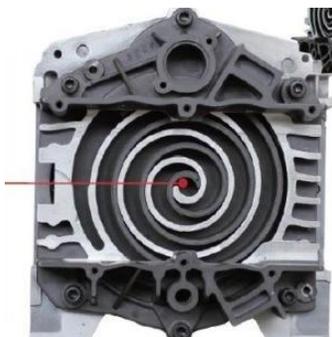
氢利用

✓ PEM燃料电池：氢循环泵

- ① 额定转速8000 rpm，流量 $30 \text{ m}^3/\text{h} \sim 60 \text{ m}^3/\text{h}$ ，压升50 kPa
- ② 适用30 kW~150 kW电堆



爪式



涡旋式



旋涡式



直叶罗茨式

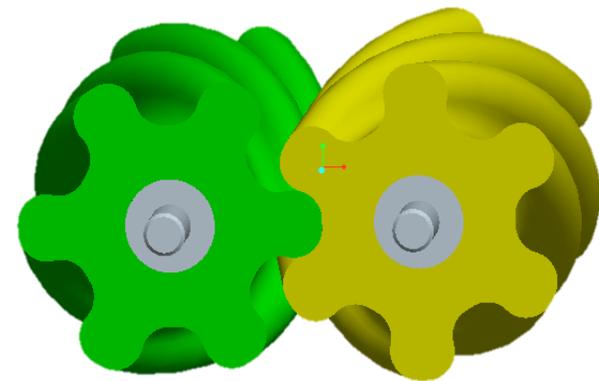
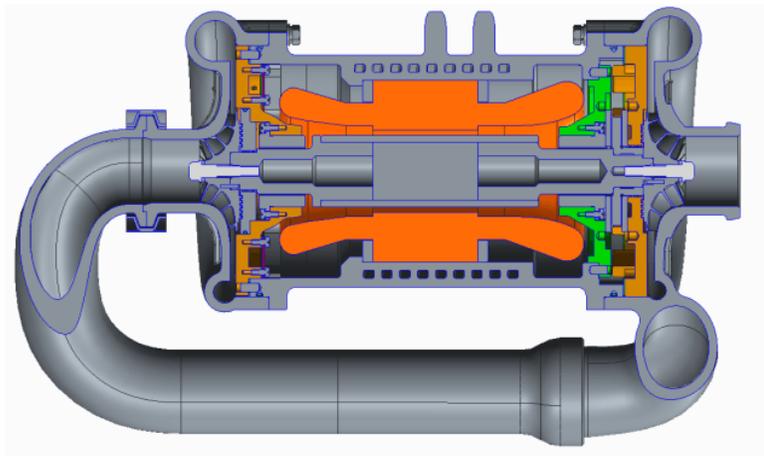


扭叶罗茨式

➤ 氢利用

✓ PEM燃料电池：空压机

- ① 罗茨式、螺杆式：最高转速18000 rpm，压缩比2.5
- ② 离心式：齿轮增速，气浮轴承：额定转速8万 rpm，压缩比2.5
- ③ 适用100 kW~150 kW电堆



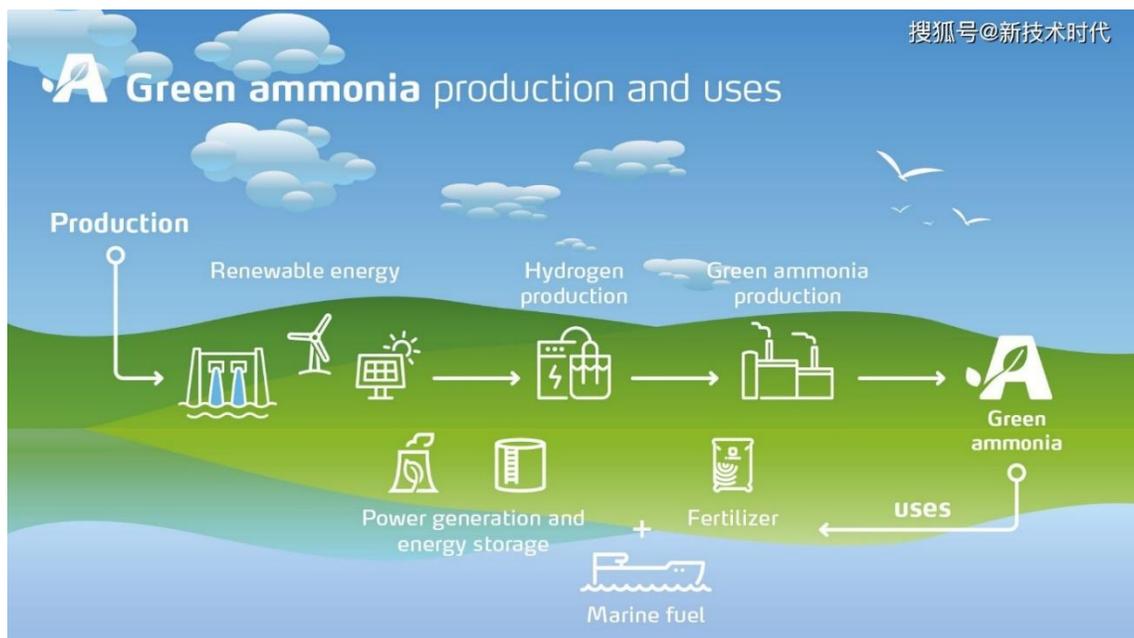
车用燃料电池空压机研发：

- ◆ 国家重点研发计划“可再生能源与氢能技术”重点专项：2019YFB1504600
- ◆ 西安交通大学、珠海格力电器股份有限公司、浙江大学、上海重塑能源科技有限公司、合肥通用机械研究院有限公司、湖南大学、株洲中车时代电气股份有限公司、中车株洲电机有限公司、哈尔滨工程大学、同济大学

➤ 氢利用

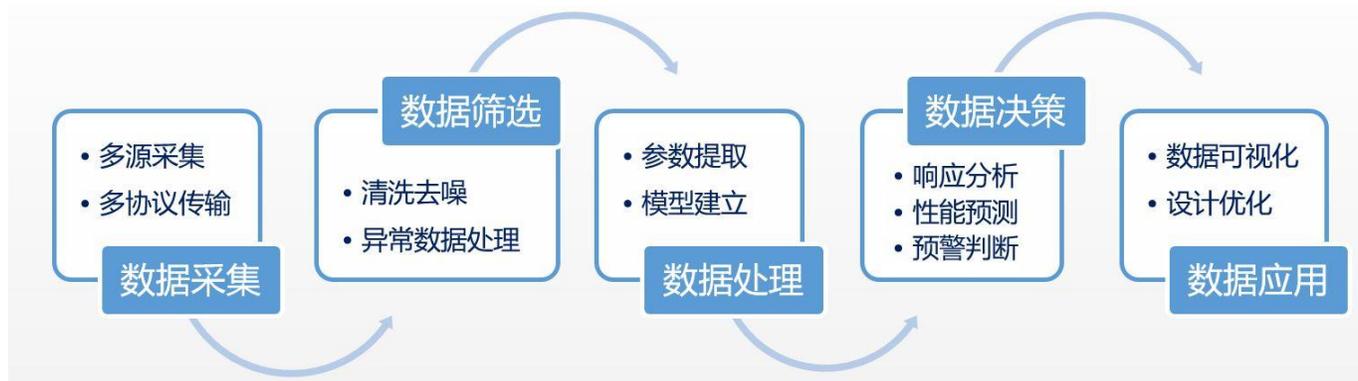
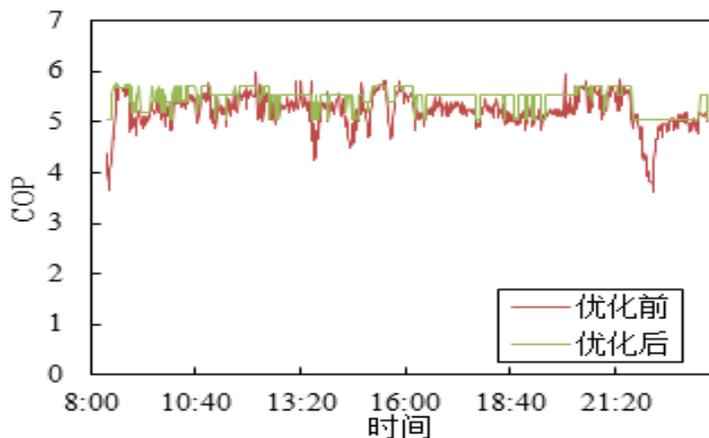
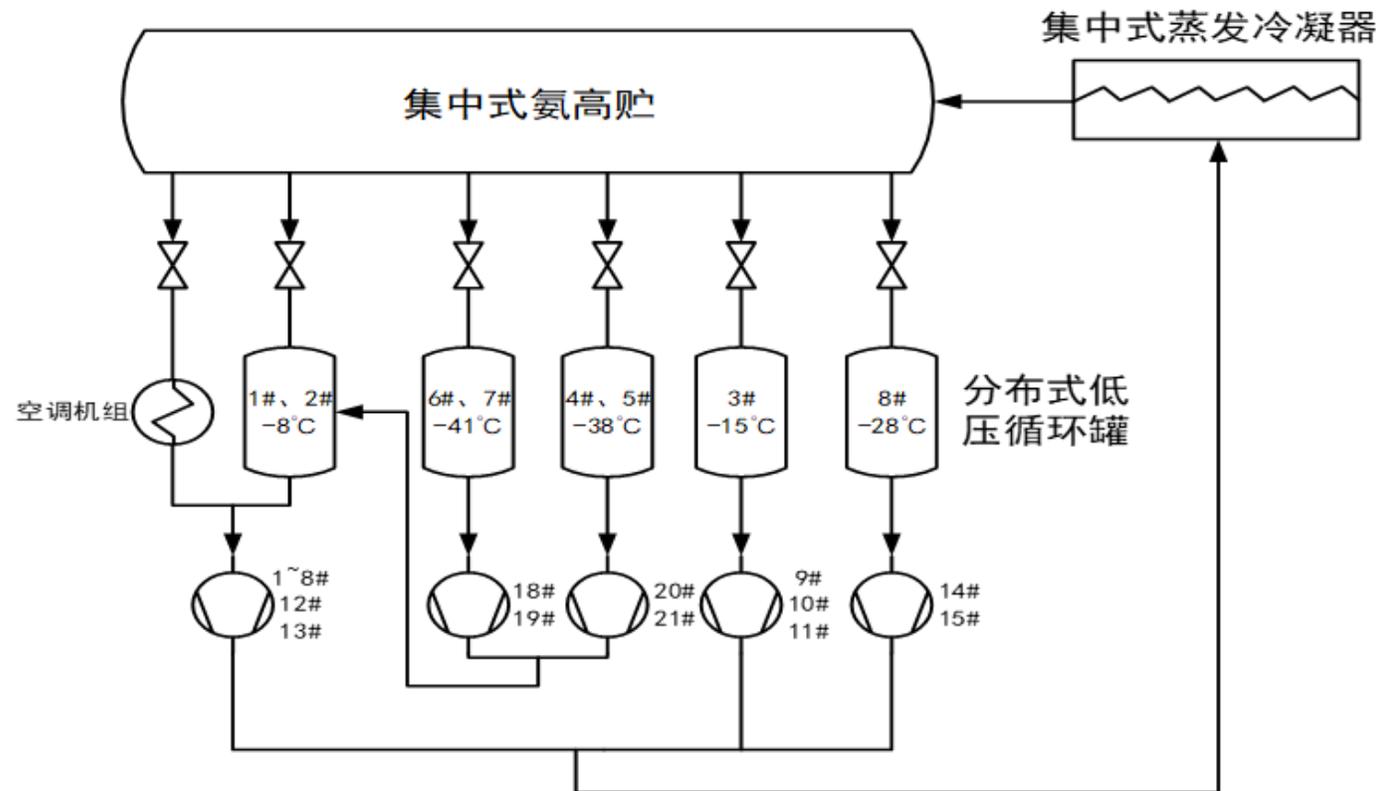
✓ 燃料、原料（绿氢、绿甲醇、绿氨）

- ① 氢进万家：天然气掺氢10%、Ene-farm
- ② 氢能飞机、绿氢炼钢、甲醇&绿氨船用发动机
- ③ 绿甲醇（液态阳光）：光伏+电解水+二氧化碳加氢
- ④ 绿氨：光伏风电+电解水+分离空气的氮气与氢合成氨
- ⑤ 绿色甲醇+CO₂=淀粉、糖
- ⑥ 绿氨+CO=蛋白质，饲料蛋白、减少进口大豆



智慧运维专家系统

- ✓ 基于物联网的实时监测
- ✓ 基于知识与数据驱动的实时调控
- ✓ 控制模型：机理模型+大数据模型
- ✓ 统筹变量：机组特性、用户行为、气候条件、实时电价
- ✓ 实现目标：节能运行、故障预警、改进设计



- 我国**制冷能耗**占社会总能耗**15%以上**，制冷剂排放是**非二氧化碳温室气体排放**的重要来源，行业还将**快速扩张**，**制冷节能降碳**和**制冷剂替代技术**，对双碳目标的实现，具有重要的作用与贡献；
- 制冷剂替代和应用技术包括**新型制冷剂研发**、**部件与系统效提升**、**回收再利用**、**非蒸气压缩制冷**等众多方向，**自然制冷剂**和**低GWP制冷剂**的应用将进一步扩大，基于特定制冷剂和具体运行工况，研发新一代压缩机、换热器等**关键部件与制冷系统**将成为必然趋势；
- **节能**是成本最低的**低碳路径**，伴随设计理论深化、零件加工工艺改进、以及现代材料和人工智能等其它学科技术进步，有必要、也有可能**持续提升**各类制冷产品的**能效水平**，主要措施包括：变频驱动、双级压缩、无油压缩、特定工况定制等；

- **冷热耦合**能大幅提升**能源综合利用**水平，在双碳目标背景下，高温工业热泵、水蒸气压缩机、ORC系统及余热制冷等的应用将不断增加；
- 实现双碳目标涉及电力生产转型、能源消费调整、储能、碳汇等多个方面，在**氢的制备、储存、运输、加注、利用**等环节及**CCUS**装置中，都需要研发和改进多项新型的关键部件和制冷系统；随着光伏、风电等可再生能源的推广，**直流驱动**的各类制冷系统前景广阔；
- 基于**知识和数据驱动**的制冷系统**智慧运维**专家系统，可结合**机理模型**和**大数据模型**，对**机组特性、用户行为、气候条件、实时电价**等要素进行统筹和调控，实现**节能运行、故障预警**和**设计改进**。



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

谢谢!