



亚跨临界循环CO₂制冷系统 技术提升与创新应用

汇报人：周子鹏

2024.4

冰轮环境技术股份有限公司
MOON ENVIRONMENT TECHNOLOGY CO.,LTD.

CONTENTS

目录

01

行业背景

02

技术提升

03

创新应用

04

总结展望

01

行业背景

- 全球温控目标
- 制冷行业现状
- 双碳背景下的政策



——全球温控目标

政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的《全球温控1.5°C特别报告》指出，实现**1.5°C温控目标**有望避免气候变化给人类社会和自然生态系统造成不可逆转的负面影响，而这需要各国共同努力，在2030年实现全球净人为CO₂排放量比2010年减少约45%，在2050左右达到净零。

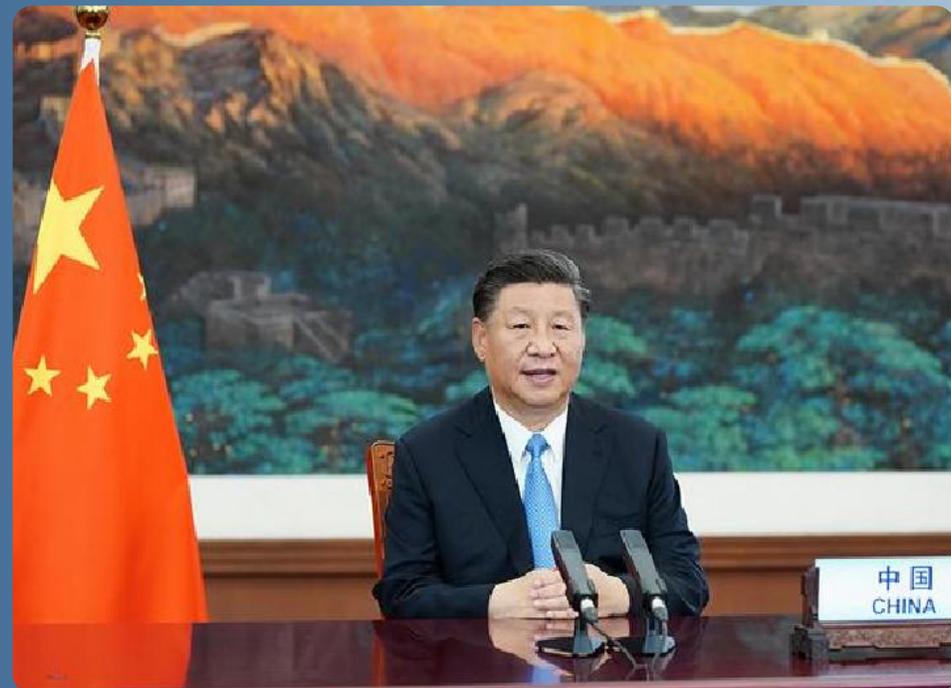
中国态度

2020年9月22日，中国国家主席习近平在第七十五届联合国大会

- 力争2030年前达到峰值。
- 努力争取2060年实现碳中和（比欧盟缩短30年）。

2020年11月22日，习近平在二十国集团领导人利雅得峰会“守护地球”主题边会

- 到2030年，中国单位国内生产总值CO₂排放将比2005年下降65%以上；
- 非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右；
- 森林蓄积量将比2005年增加60亿立方米；
- 风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上。



高耗能

- 我国制冷用电量占全社会用电量**15%**以上;
- 年均增速近**20%**;
- 大中城市空调用电负荷约占夏季高峰负荷的**60%**;
- 主要制冷产品节能空间达**30%~50%**。



高温温室气体排放

- 中国是全球最大的制冷剂消费国，经测算中国的制冷剂消费量超过全球的**50%**。
- 制冷空调设备中各类制冷剂的年消费量超过30万吨，折合CO₂当量超过5亿吨，其中**HFCs**消费量超过20万吨，折合CO₂当量超过**3.5亿吨**。



01 行业背景

——双碳政策（国家）

2021年8月6日，中华人民共和国商务部等9部门印发《**商贸物流高质量发展专项行动计划（2021-2025年）**》。《计划》指出，加快推进冷链物流发展。加强冷链物流规划，布局建设一批国家骨干冷链物流基地，支持大型农产品批发市场、进出口口岸等建设改造冷冻冷藏仓储设施，推广应用移动冷库、恒温冷藏车、冷藏箱等新型冷链设施设备。**改善末端冷链设施装备**，提高城乡冷链设施网络覆盖水平。鼓励有条件的企业发展**冷链物流智能监控与追溯平台**，建立全程冷链配送系统。

2021年12月，国家发展改革委印发《**国家骨干冷链物流基地建设实施方案**》。其中指出，加快数字化发展步伐，推动基地存量冷链物流设施数字化升级，加快传统冷库等设施设备智慧化改造升级；提高绿色低碳发展水平，鼓励基地对在用设施开展节能改造，鼓励使用绿色、安全、节能、环保冷藏车及配套装备设施

2022年01月24日，**国务院印发《“十四五”节能减排综合工作方案》**。其中提出，**实施绿色高效制冷行动**，以建筑中央空调、数据中心、商务产业园区、冷链物流等为重点，更新升级制冷技术、设备，优化负荷供需匹配，大幅提升制冷系统能效水平。

2021年9月29日，生态环境部、发展改革委、工业和信息化部正式发布公告称，共同修订了《**中国受控消耗臭氧层物质清单**》，增加了18种HFC物质。

2021年11月15日，工信部印发《**“十四五”工业绿色发展规划**》（工信部规[2021]178号），提出主要目标：到2025年，工业产业结构、生产方式绿色低碳转型取得显著成效，绿色低碳技术装备广泛应用，能源资源利用效率大幅提高，绿色制造水平全面提升，为2030年工业领域碳达峰奠定坚实基础。

2021年12月13日，国家发改委就日前公布的《**“十四五”冷链物流发展规划**》举行发布会。其中提出，**提高智能化发展水平**，推动冷库“上云用数赋智”，加强冷链智慧仓储管理、运输调度管理等信息系统开发应用；**提高冷链物流设施节能水平**，鼓励企业对在用冷库以及冻结间、速冻装备、冷却设备等低温加工装备设施开展节能改造；**加速绿色化发展进程**，加大绿色冷链装备研发应用，加强低温加工、冷冻冷藏、冷藏销售等环节绿色冷链装备研究应用，**鼓励使用绿色低碳高效制冷剂**；



2022年12月15日国务院办公厅关于印发《**“十四五”现代物流发展规划**》。其中提出，提升冷链物流服务水平，引导商贸流通企业改善末端冷链设施装备条件，提高城乡冷链设施网络覆盖水平。到2025年，基本建成供需适配、内外联通、安全高效、智慧绿色的现代物流体系。

2023年11月6日，生态环境部印发《**2024年度氢氟碳化物配额总量设定与分配方案**》，正式开启氢氟碳化物（HFCs）的管控。

2024年02月03日，生态环境部印发《**关于宣传贯彻新修订的《消耗臭氧层物质管理条例》的通知**》，加强消耗臭氧层物质和氢氟碳化物管理。

2023年06月12日生态环境部和工业和信息化部办公厅印发《**中国消耗臭氧层物质替代品推荐名录**》。其中指出**工业或商业用制冷系统、冷库推荐采用CO₂替代R22；工业用制冷系统、冷库推荐采用氨替代R22；**

01 行业背景

——CO₂技术路线

CO₂制冷技术拥有安全、环保、高效及可持续性等众多优势，CO₂制冷技术被写入《冷库设计标准》、《室内冰雪场馆保温及制冷系统设计标准》、《人工制冷运动冰场制冰技术规程》等行业规范和标准中。



亚临界循环CO₂制冷技术

关键技术

- 基于绿色低碳工质NH₃、CO₂的复合制冷系统
- 整合各类高效节能的创新产品，组建节能产品矩阵，打造独具特色的冷热系统高度集成、多能互补的高效机房。
- 通过型线升级、永磁变频等关键技术突破，实现压缩机升级换代
- 研究各种介质传质传热流动特性，开发工况、介质、需求、换热型式不同的各类换热器
- 通过制冷系统氨小充注量运行控制技术，实现系统运行安全可靠

智慧互联

- 研发基于数字孪生的系统仿真、自主寻优的智能控制系统和大数据云平台，为用户提供全生命周期的节能服务
- 完善算法优化、专家库干预等手段，建立完善的能耗诊断分析体系，实现人工智能与大数据的完美结合
- 实现基于大数据与人工智能结合的智慧运维关键技术

跨临界循环CO₂制冷技术

关键技术

- CO₂单一工质双级压缩，规避氨工质不适用的场景
- 研发适应变工况应用的电动可调喷射器技术
- 研发CO₂绝热加湿气体冷却器
- 冷热联供，提供比例可观的热量回收，实现节能运行

智慧互联

- 开展制冷、制热、喷射等多模式下的热力系统匹配仿真和性能优化，形成最优控制算法和控制策略，获得跨临界CO₂制冷系统通用的神经网络智能控制模型和控制系统
- 建立智慧运维云平台，打造可复制推广的冰雪运动场馆运维一站式解决方案

02

技术提升

- NH₃永磁高效开启螺杆压缩机
- CO₂永磁半封一体压缩机
- 智慧运维
- 减量化充注控制
- 机组撬装化
- 跨临界循环技术



02 技术提升

——压缩机能效提升技术

设计

- 介质
- 型线、间隙、孔口
- 轴承定位
- 半封电机冷却（专利）技术

制造

- 型线转化加工
- 端面、轴端加工

运行

- 流量
- 工况
- 系统

- 螺杆压缩机是制冷系统的主要耗能部件
- 影响理论压缩功和实际耗功差异的因素包括：
 1. 介质的压缩特性
 2. 型线、间隙、孔口的合理性
 3. 机械摩擦损失
 4. 电机效率和传动效率
 5. 以及制造的精度和运行的水平

等熵绝热
压缩功率

相同工况受介
质特性的影响

绝热指示
功率

型线、间隙、
孔口等

轴功率

机械摩擦损失

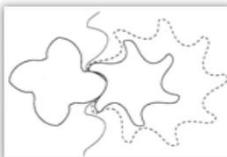
实际
耗功

电机效率、传
动效率

高效螺杆压缩机
设计方向

型线提升

1



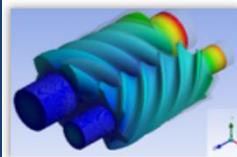
变导程、自平
衡转子结构

2



转子变形、最
小间隙技术

3



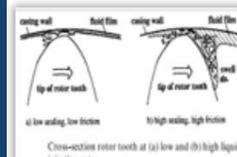
多孔
封严涂层

4



喷油精细管理

5



高速磁/气悬
浮轴承技术

6

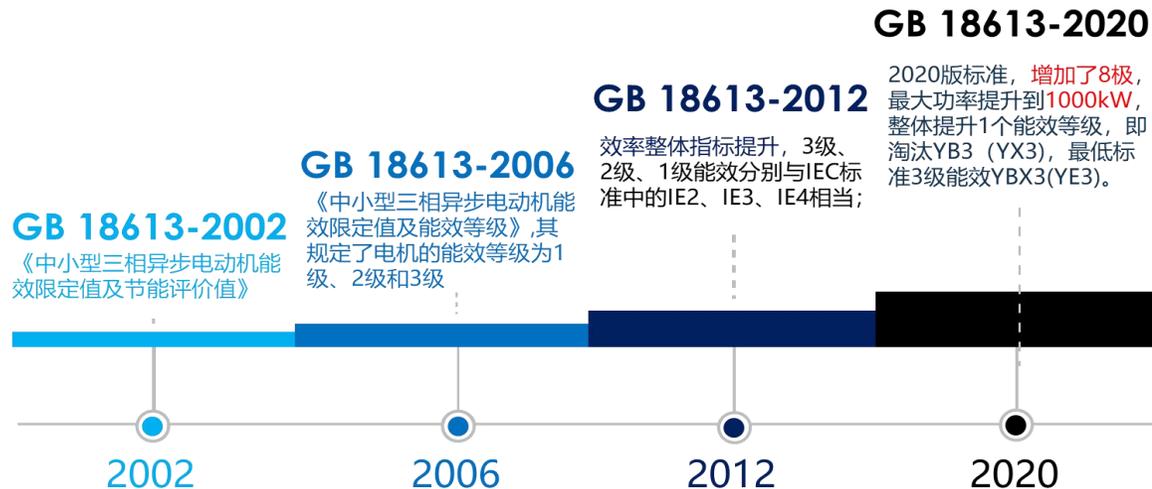


来源：西安交通大学压缩机研究所

02 技术提升

——电机能效提升

- GB/T18613-2020《电动机能效限定值及能效等级》，电机能效等级进一步提高
- 23年3月国家发改委、市场监管总局下达《关于进一步加强节能标准更新升级和应用实施的通知》，24年2月工信部下达《关于组织开展2024年度工业节能监察工作的通知》，其中较23年增加重点用能设备能效专项监察，包含针对工业制冷设备的电机及系统的专项监察，淘汰达不到强制性能效标准限定值的低效设备。



永磁电机能效								
3000转速电机功率 (kW)	75	132	160	185	200	220	250	250-1000
GB18613-2020一级能效	96.5	96.9	97		97.2	97.2	97.2	97.2
GB18613-2020二级能效	95.6	96.2	96.3		96.5	96.5	96.5	96.5
行业一般的永磁电机能效	96.6	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8
IE3(YE3)	94.7	95.4	95.6		95.8	95.8	95.8	95.8

02 技术提升

——NH₃永磁高效开启螺杆压缩机

通过对复杂几何空间流体温度场和速度场的准确预测

转子型线设计

- 低压侧：采用贝塞尔曲线优化，对控制点进行调整，提升面积利用系数
- 齿顶：阴阳转子均添加齿顶圆弧段，减少泄漏
- 阴转子齿厚增加，有利于减小泄漏三角形处的泄漏量

内压缩过程研究

- 排气波动小，有利于减小噪音
- 高转速下腔体内压力不均匀性增加，通过增加扭转角进行改善

NLG系列永磁高效开启螺杆压缩机

- 额定转速3000r/min，排量1120m³/h
- 适用转速范围1000~4500r/min，可覆盖LG20S
- -LG20T，排量覆盖806~1672m³/h范围
- **压缩机效率与现有系列相比提升大于等于5%**



02 技术提升

——CO₂永磁半封一体压缩机

ZL201710176998.4
一种基于油冷电机的半封螺杆制冷压缩机



ZL202210655826.6
一种减小螺杆转子啮合间隙的方法

ZL202311145860.X
一种风冷变频式螺杆压缩机

创新点：独有电机油冷却技术结合永磁电机

油冷却技术优势

- 冷却介质和电机直接接触，冷却效率高
- 不损耗系统冷量，将电机发热转化为油冷负荷
- 电机内部无气流冲刷，安全可靠
- 两路油循环分别冷却电机定子与绕组、转子，解决局部过热

永磁变频电机技术优势

- 转子无鼠笼，变频启动，电气损耗(铜耗)低，效率高；
- IPM内置式结构，磁钢离心力小，结构稳固；
- 第三代稀土永磁体
- 表面特殊防腐处理

02 技术提升

——CO₂永磁半封闭一体压缩机

CO₂技术在与时俱进



开式异步电机



半封闭异步电机



半封闭永磁电机

2006



2017



2022

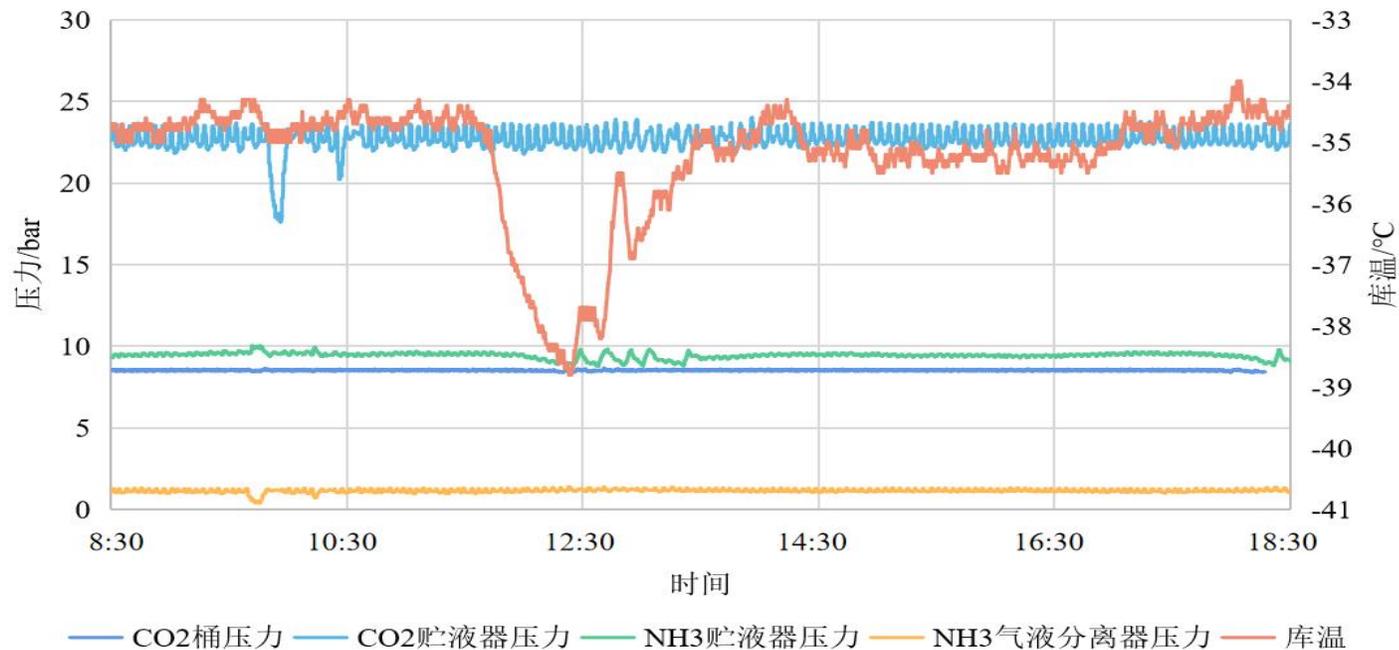


02 技术提升

——速冻模式智慧运维

采用可信区域策略优化 (Trust Region Policy Optimization, TRPO) ”算法。

- 对于复叠系统，低环境温度时自然冷源利用不足，综合考虑蒸发冷风机功耗和压缩机功耗，存在最优冷凝温度。
- 复叠制冷系统中间压力的设定值将直接影响节能效果，不同工况存在最优中间压力。
- 根据大数据运行统计节能评分，优化系统运行模型。



选取最优参数
关联式控制

02 技术提升

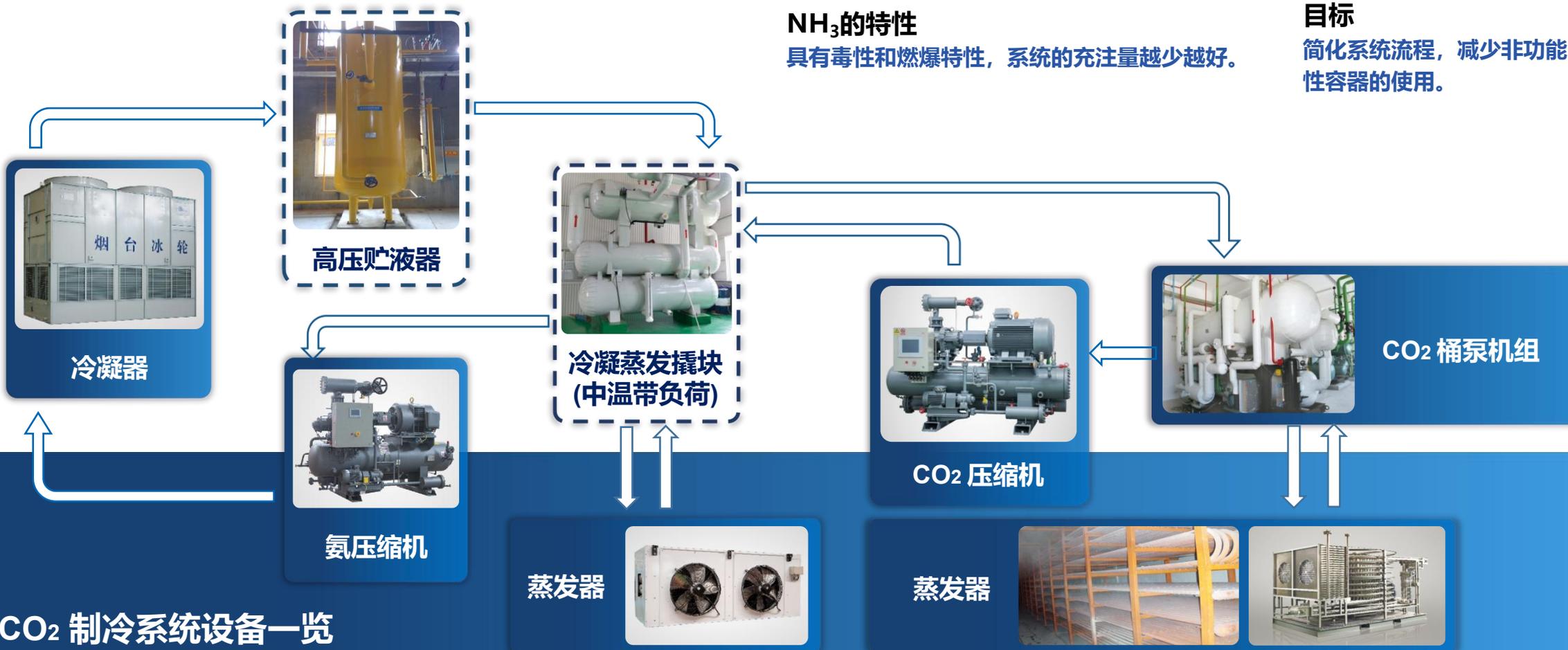
——制冷剂氨的减量化充注要求

NH₃的特性

具有毒性和燃爆特性，系统的充注量越少越好。

目标

简化系统流程，减少非功能性容器的使用。



《危险化学品重大危险源辨识》GB18218-2018中明确规定氨的临界量为10吨，系统氨冲注量超过10吨即被列入“重大危险源”管控范畴

02 技术提升

——机组撬装化



一代 开放式制冷系统

- 专用机房
- 施工量大，施工周期长
- 施工质量难保

二代 撬装式制冷系统

- 模块化设计，标准化程度高，节拍式生产，缩短交货期
- 开启式结构，管路、控制线路及动力回路接线全部在撬块内完成，
- 蒸发冷分体室外安装，简化工程安装量

三代 AIST模块化机组（室外型）

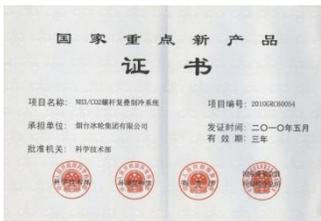
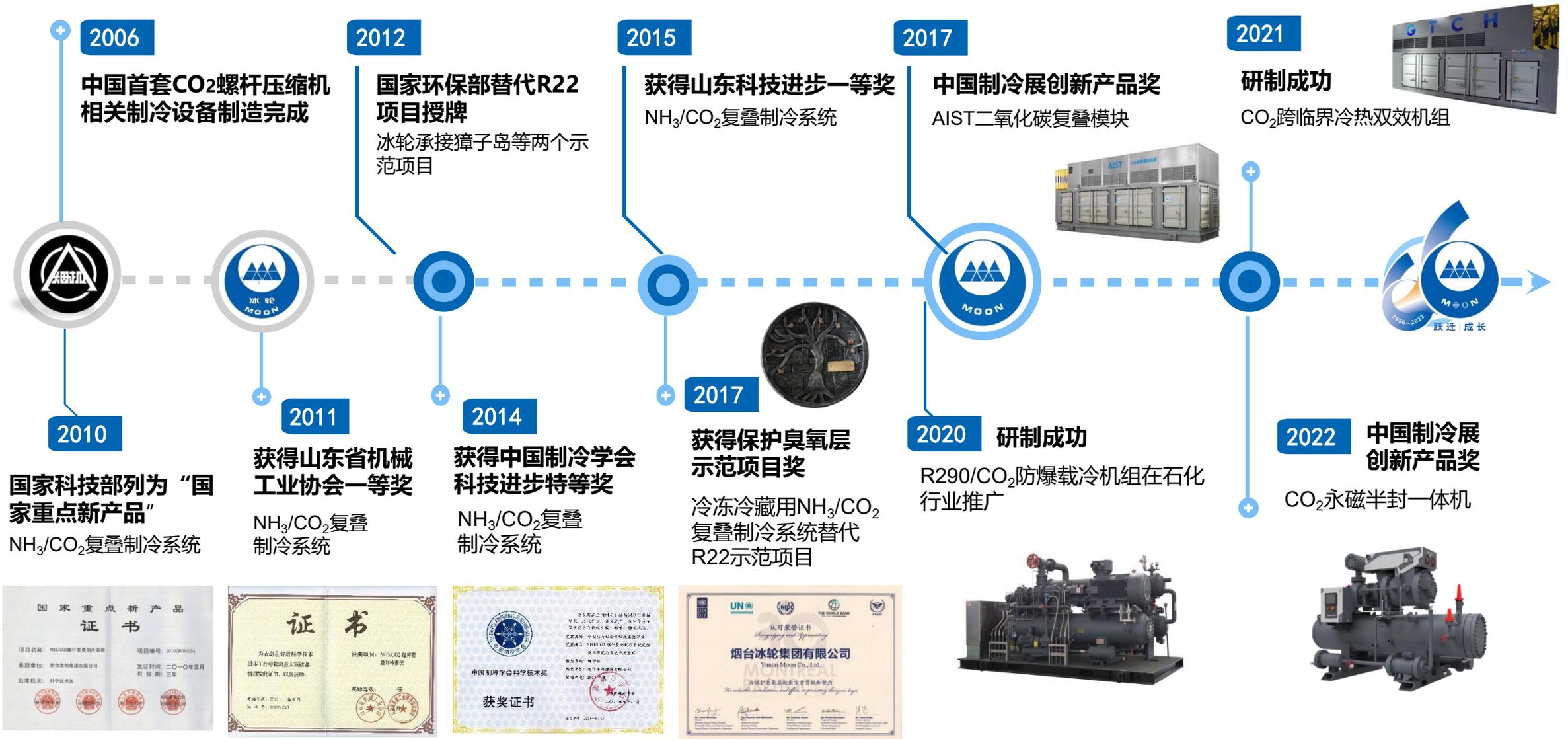
- 无需独立机房
- 系统集成化程度不断提升，充注量逐渐降低
- 高低温级压缩机半封闭设计
- 具备氨主动防御系统
- 进一步简化系统安装，施工质量高

03 创新应用案例



03 创新应用案例

——冰轮CO₂制冷技术发展历程



03 渐入佳境

——冰轮CO₂制冷技术发展历程

典型业绩

河南某肉食加工
福建某肉鸡加工
怀远某肉鸭屠宰
诸城某肉鸡屠宰



冷链物流行业



肉类加工行业



调味品、果蔬深加工

典型业绩

威海某水产加工
山东烟台某海洋食品加工
福建某水产食品加工
浙江舟山某水产加工



水产加工行业



冰淇淋冷饮

典型业绩

北京某冰场改造
突泉县某滑雪场
西安某滑雪馆
石家庄某奥体中心



人工智能环境

典型业绩

广州某物流库
武汉某物流库
河南某水产冻品物流

典型业绩

鹤壁某食品加工
如皋市某农产品加工
山东聊城某熟食加工

典型业绩

兰溪某冷食
合肥某乳业
江西某食品

- ✓ 冰轮公司承担示范的“NH₃/CO₂复叠和载冷技术”已成为当前中国冷冻冷藏领域的主流技术并获得了广泛的市场化应用。领域涉及食品、石油、化工、医药、酿酒、建筑、肉类、水产、低温物流、冷饮加工、冰雪环境等。
- ✓ 迄今已经承建了超500个CO₂项目，遍布全国27个省市、4个自治区以及台湾地区，同时也遍及世界各地。
- ✓ 每一天都有1800台套冰轮的CO₂制冷设备在运转。



项目概况

- 广州港 库容：近30万吨；
- 含3座8层冷库，1个冷藏箱堆场和1栋配套展示楼
- 库间：-23℃低温冷藏间（采用CO₂制冷系统）、0℃高温冷藏间和0℃穿堂
- -23℃冷藏间选用CO₂冷风机384台



项目特点

中国最大的冷链母港

华南综合性冷链物流分拨基地

综合规模大、建设标准高、配套健全、功能完善的临港枢纽型冷链物流综合体

CO₂制冷系统的标杆性工程

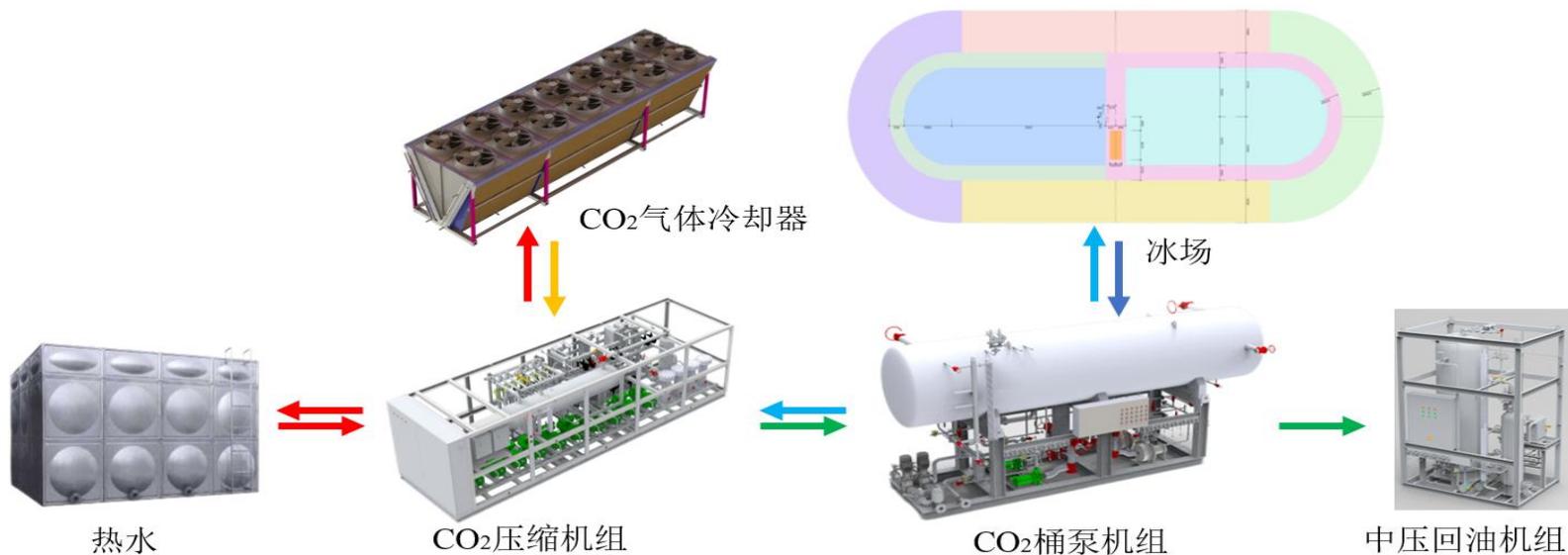
03 创新应用案例

——CO₂跨临界系统应用在冰场方向

项目概况

北京某体育中心

- 主压缩机6台，平行压缩机2台，带喷射器+电动三通阀及三级热回收，制冷量600kw
- 室内制冰盘管+桶泵供液
- 风冷气冷器+绝热加湿喷淋湿帘；三级热回收；





04 总结展望

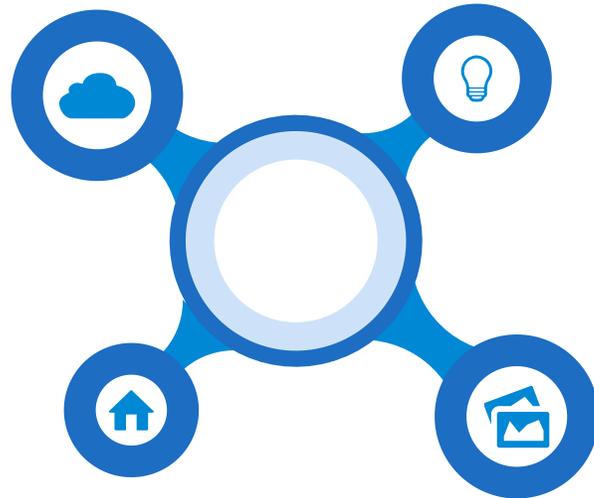
冰轮的CO₂制冷系统技术经过多年的发展，不断探索验证、持续创新、与时俱进，综合先进的设计理论、仿真技术和系统实际运行验证，从以下四方面进行了技术优化提升，加速绿色、高效制冷系统及设备的发展和应用，助力双碳目标的早日实现。

高效

随着螺杆压缩机设计理论不断深化，结合压缩流体温度场和速度场的仿真模拟，综合转子型线优化、高效永磁电机、部分负荷变频调速提升NH₃和CO₂压缩机核心能效。

冷热联供

对于屠宰、啤酒、乳业等冷热需求的行业，通过能源的综合利用和冷凝废热的回收，提升整体制冷系统的能效。



充注量控制

对于采用NH₃这种绿色低碳的制冷剂，通过采用微重力供液方式、高效换热器、减小非功能性容器如贮液器、气液分离器等存液容积等措施，推进绿色制冷向前发展。

智慧运维

通过更精准的数据分析和算法优化，制冷系统能效将得到进一步提升，智能调度和负荷管理将使系统运行更加高效，减少能源浪费。



让温度更有温度
BEYOND JUST TEMPERATURE

致力于人类生活
质量的提高

Making A Better Life

欢迎批评指正