



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

# 工业制冷技术现状及发展趋势

— 报告人：王闯 —

西安交通大学压缩机工程系

2024年04月09日



# 内容提要

## CONTENTS

1、引言

2、制冷剂替代

3、核心装备开发

4、系统集成

5、安全与节能控制

6、总结与展望

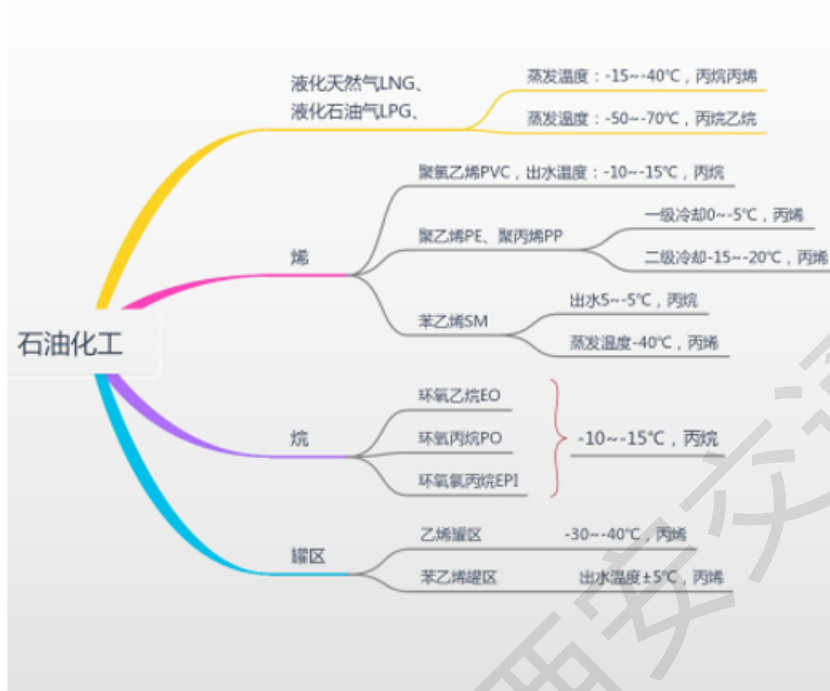
## □ 工业 VS 商业?

名词	百度百科	维基百科
工业	对自然资源开采和对各种原材料加工的社会物质生产部门	在设备、劳动力、机器、工具以及化学或生物加工或配方的基础上进行的商品生产
商业	以买卖方式使商品流通的经济活动	有组织的提供顾客所需的商品与服务的行为

## □ 什么是工业制冷?



## □ 能源化工：-100 ~ 5 °C



行业	细分领域	需求温度
精细化工	氟化工	5/-15/-35/-40 °C
	MDI、TDI	-15~-20°C
	锂电	-10~-20/-30~-40/-50 °C
	甲烷氧化物	-35°C
煤化工	煤制烯烃	-40~-45°C
	煤制甲醇	-40~-43°C
	煤制乙二醇	-10~-15°C
	煤制二甲醚	-40~-45°C
气体液化	煤制天然气	-45~-48°C
	二氧化硫	-15~-20°C
	轻烃回收	-20~-40°C
硅业	二氧化碳	-20~-40°C
	多晶硅	-20~-30/-40~-46/-50~-55/-60~-65 °C
	颗粒硅	-90°C
	有机硅	-15°C
VOCs	硅烷	-30~-35/-65~-70/-85~-100 °C
	汽油PO	-70~-85°C
	丙烯酸丁酯	-40~-50°C
	MTBE、苯、PX、航煤、柴油	-70~-85°C

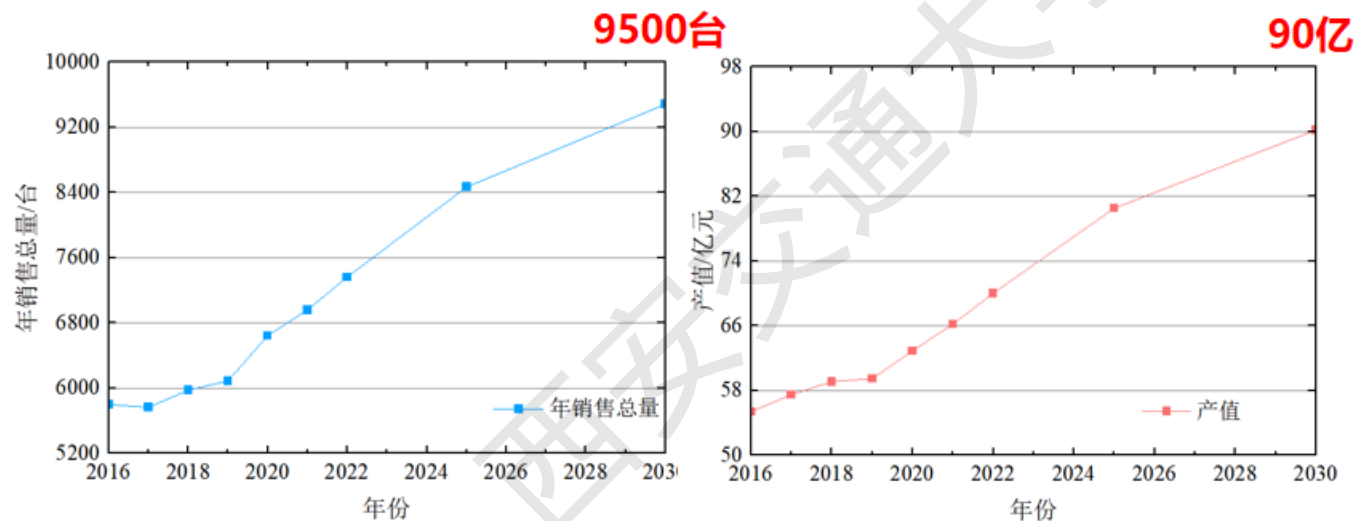
## □ 食品加工：-50 ~ 5 °C (0~5°C、-35~-45°C)

## □ 主要设备类型

冷(盐)水机组、压缩机组、压缩冷凝机组、速冻设备、工业制冰设备

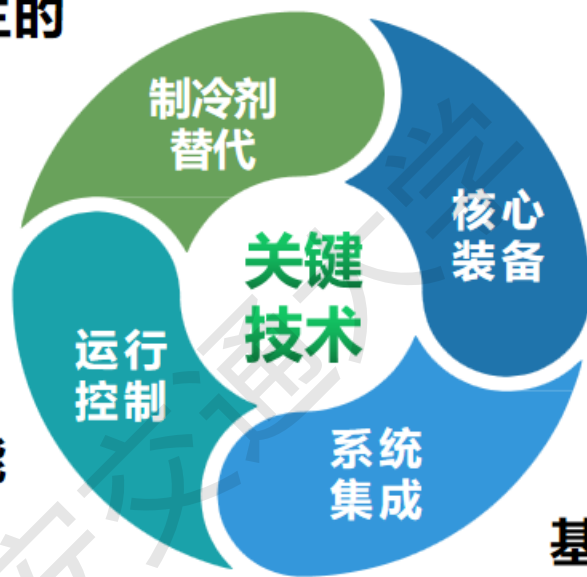
螺杆压缩机机组 VS 活塞压缩机机组 VS 离心压缩机机组 (使用量较少)

## □ 销售产量和产值复合增长率



周期(年)	年销售量	产值
2016~2019	1.6%	2.4%
2019~2022	6.5%	5.6%
2022~2030	~3.2%	~3.2%

以HFO和天然制冷剂为主的  
新一代工质替代



基于CFD+模拟的压缩机、换热器与油分离器等优化设计

基于专家经验和人工智能  
安全与节能控制

基于模型的系统参数最优化匹配  
及系统集成

从设计视角

# 内容提要

## CONTENTS

1、引言

2、制冷剂替代

3、核心装备开发

4、系统集成

5、安全与节能控制

6、总结与展望

□ 制冷剂种类：目前HCFC、HFC、HFO、HC制冷剂均有应用

制冷剂	制冷剂类型	ODP	GWP
R22	HCFC	0.055	1810
R507A	HFC	0	3990
R134a	HFC	0	1430
R404A	HFC	0	3920
R448	HFC/HFO共混物	0	1273
R1270	HC	0	2
R290	HC	0	3
R744	天然制冷剂	0	1
R717	天然制冷剂	0	0

该领域传统制冷剂，在多个细分方向中均有大量的应用

应用较少并未大范围推广

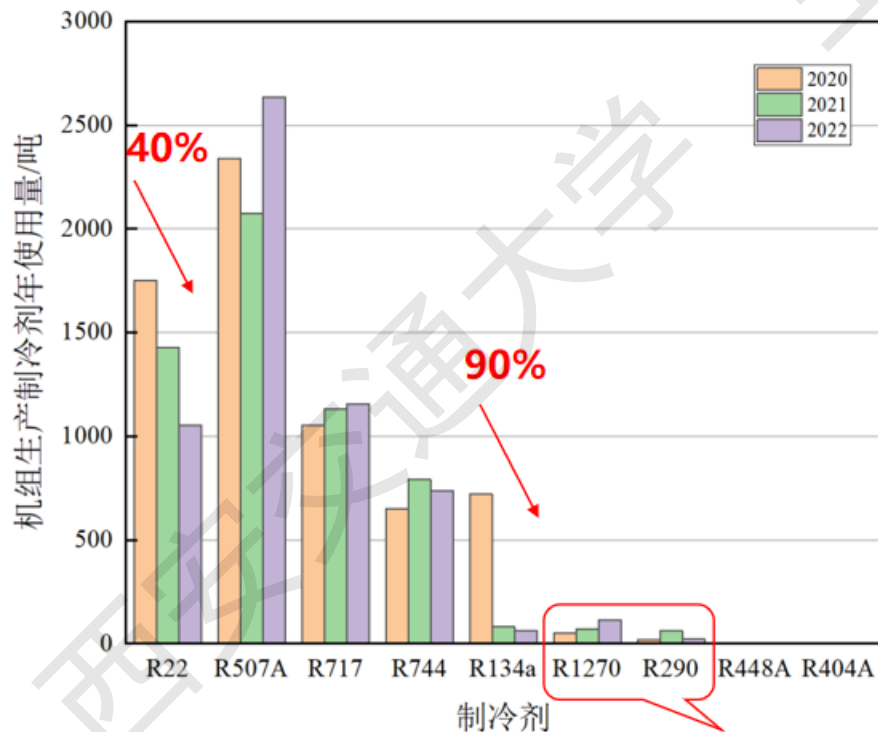
A3类可燃制冷剂，仅可用于化工工艺等具有高阻燃防爆保护措施的环境

因较好的低温制冷性能和低GWP，在食品加工领域具有广泛的应用前景



### □ 制冷剂使用量

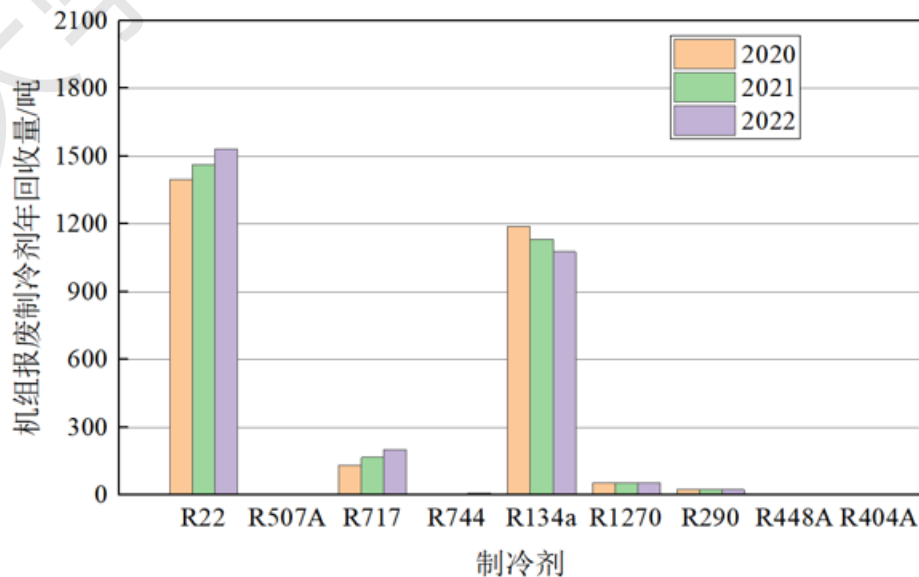
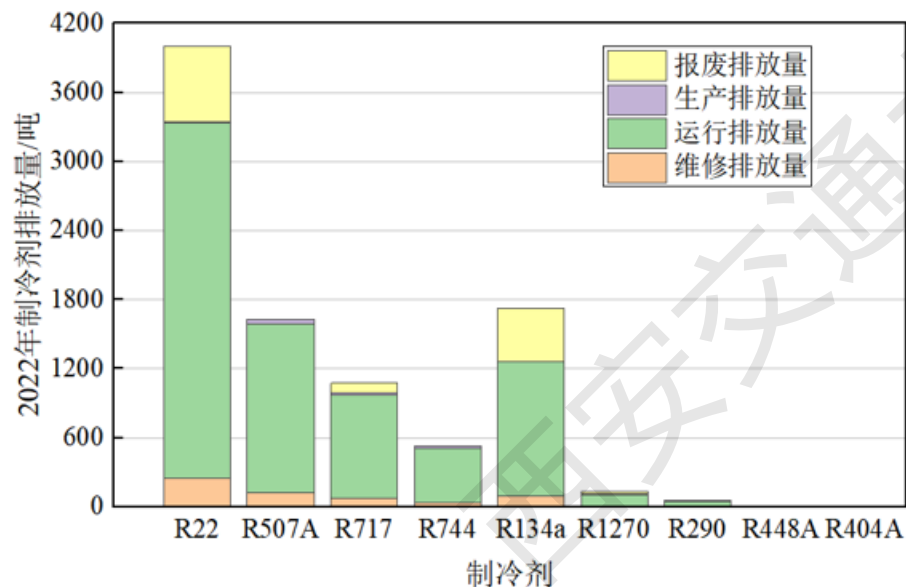
R507A>R22>R717>R744, 和占该领域制冷剂总用量87%以上



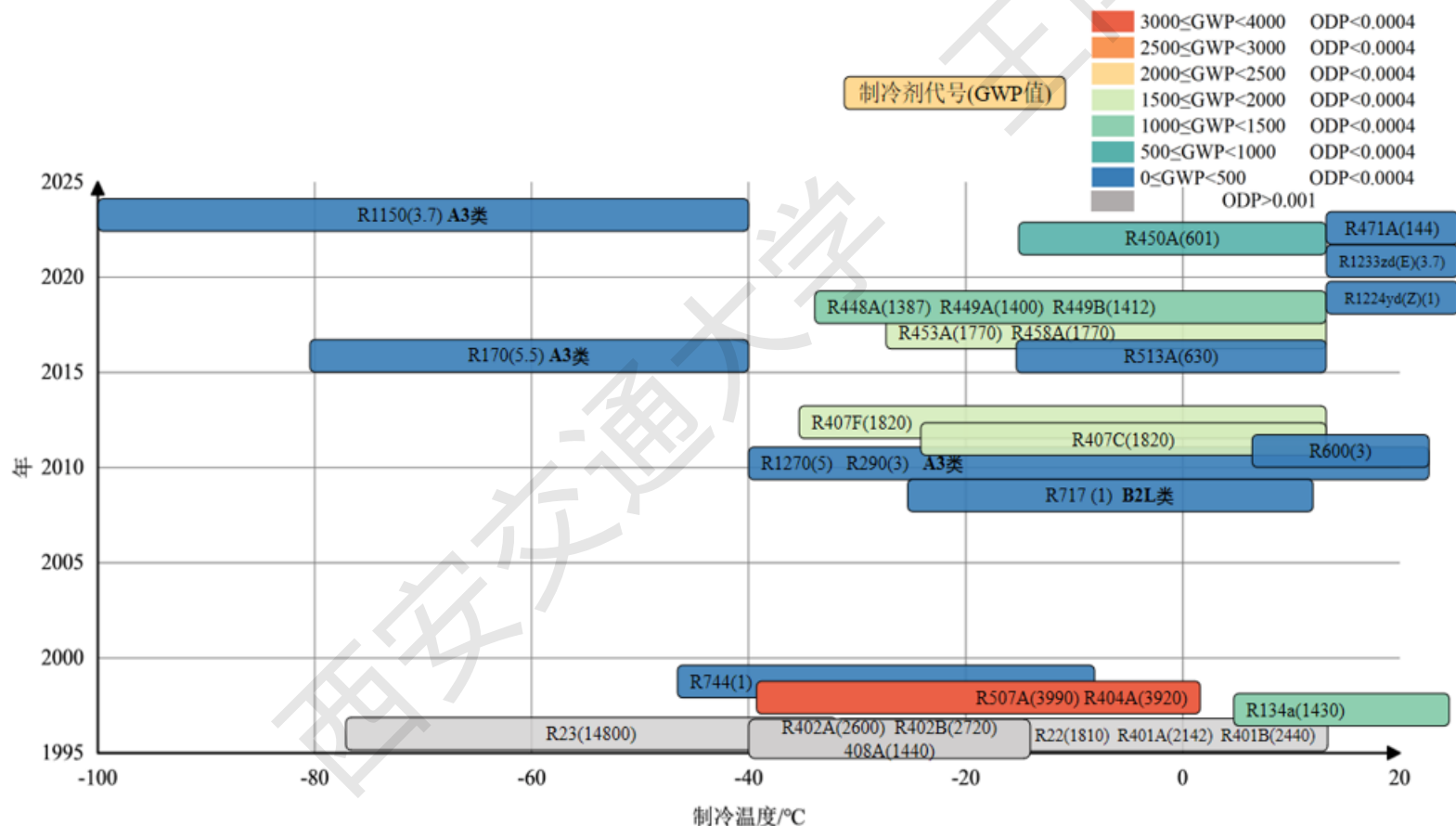
受限于特殊应用场景，年使用量较小

### □ 制冷剂排放量与回收量

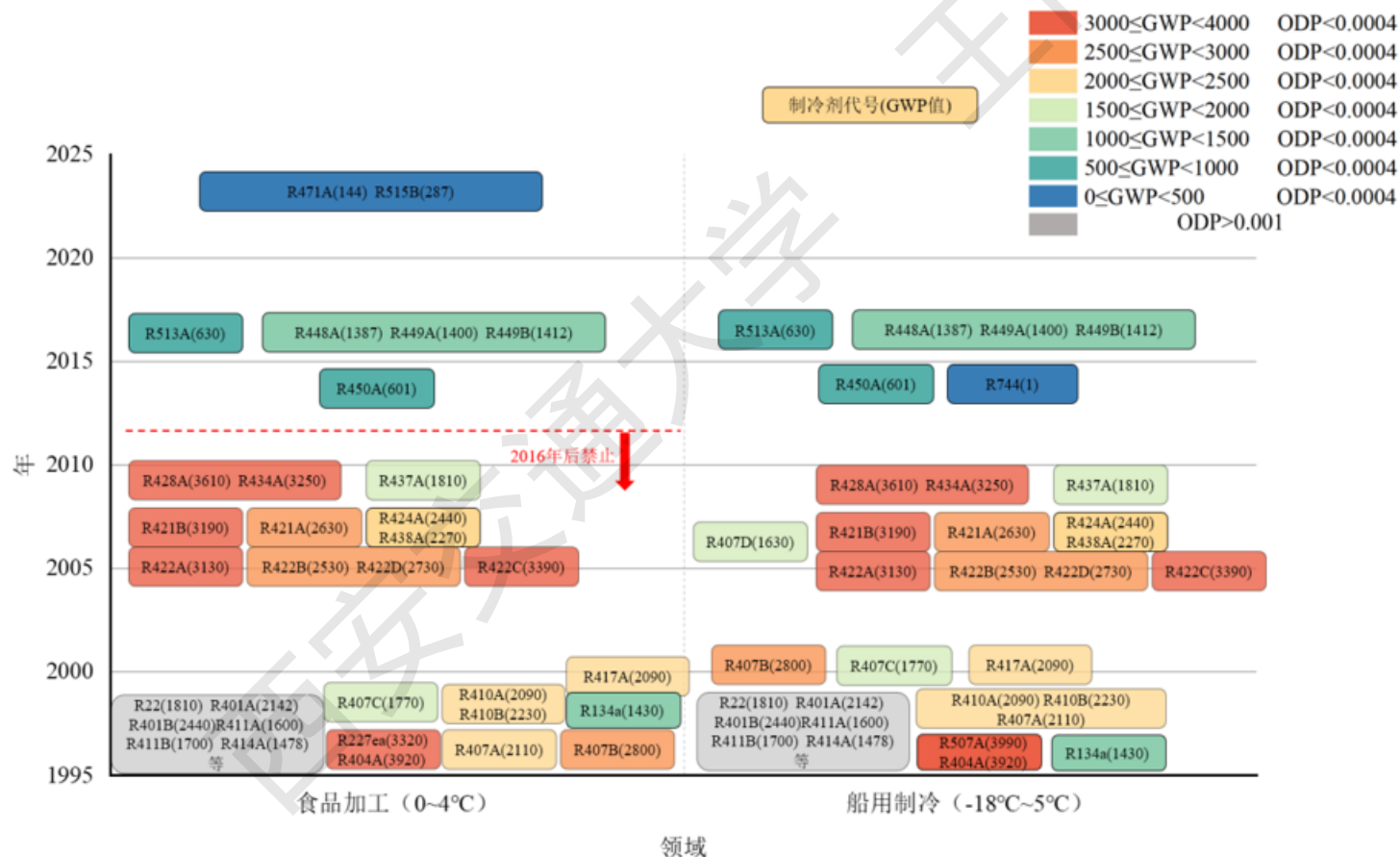
- ✓ 由于较大的保有量和泄漏率，R22和R134a排放量和回收量最大
- ✓ 目前各制冷剂的总排放量中占比最大的均为**机组运行排放量**，其次报废排放量和维修排放量，生产排放量占比很小。



### □ 能源化工



## 食品加工和船用制冷



## 2.2 制冷剂替代趋势-我国?

领域	细分设备/工况	未来替代制冷剂		GWP
能源化工	高温 (-15°C以上)	R290、R600a、R600		3
		R717		0
		防爆要求下可用R1234yf、R1234ze(E)、R515B、R513A、R450A		/
	中温 (-15°C~-40°C)	R290		3
		R1270		5
		R717等/R744复合		/
	低温 (-40°C以下)	复叠高温级	R1270	5
			R290	3
			R717	0
复叠低温级		R744	1	
		R170	5.5	
		R1150	3.7	
食品加工	大型设备	R717亚临界		0
		R744跨临界		1
		R717/R744复合系统		/
	小型设备	R1234yf、R1234ze(E)		1
		R515B、R513A、R450A		287、631、601
船用制冷	/	R744		1
		R513A		631

# 内容提要

## CONTENTS

1、引言

2、制冷剂替代

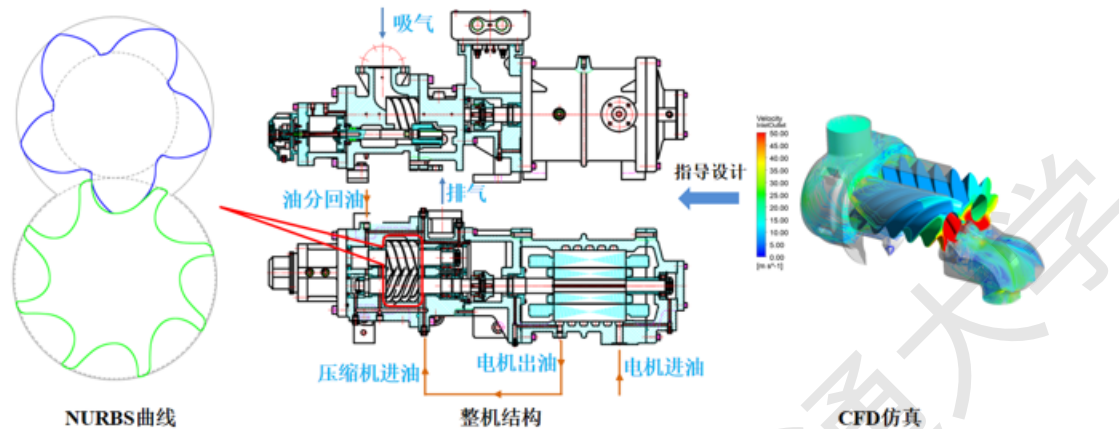
3、核心装备开发

4、系统集成

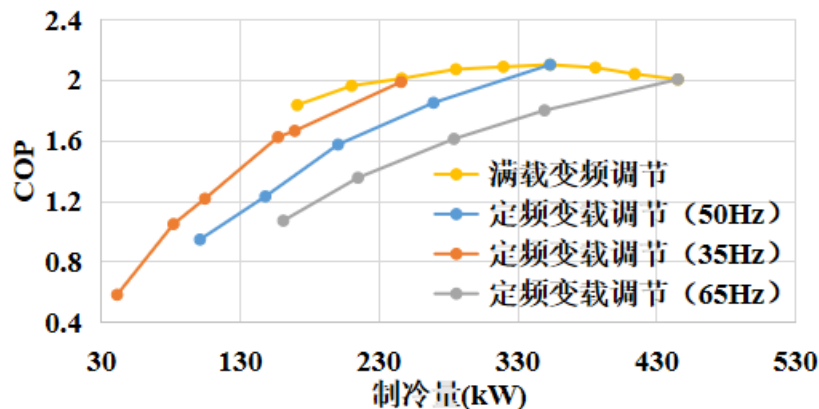
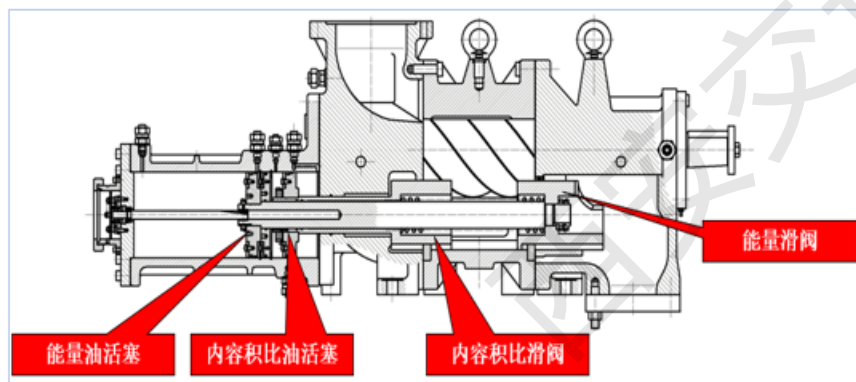
5、安全与节能控制

6、总结与展望

## 螺杆压缩机：转子型线、流道优化 (CFD)、喷液、冷却、容量调节 (变频+滑阀)

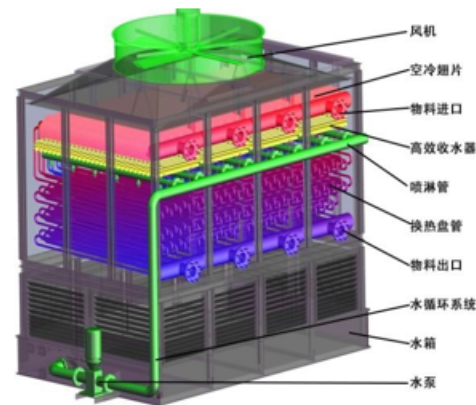
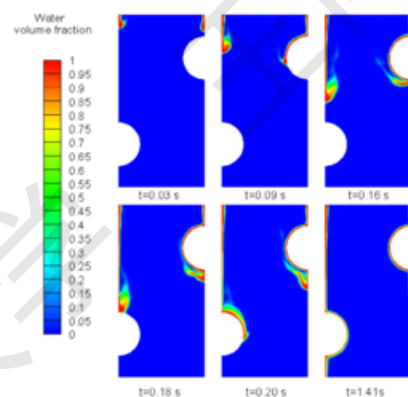
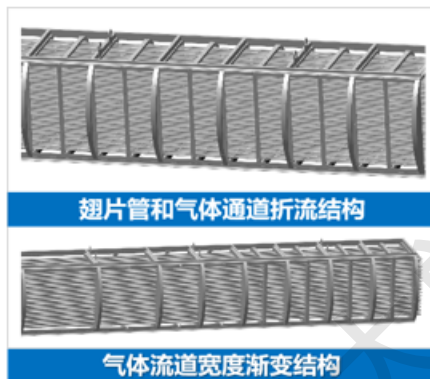
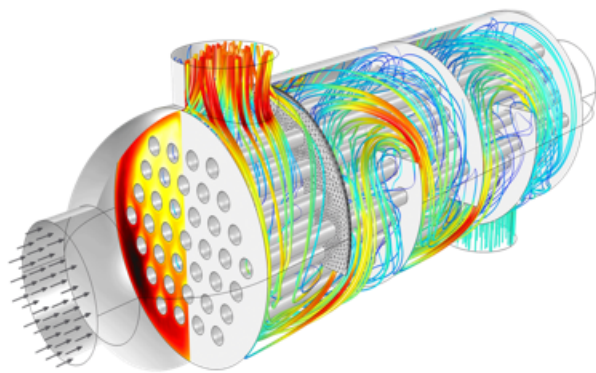


转速rpm	容积效率	实际等熵效率
3000	76.13%	65.95%
4000	83.01%	72.41%
5000	87.27%	76.15%
6000	90.58%	78.29%
7000	91.55%	78.77%
8000	92.96%	78.84%

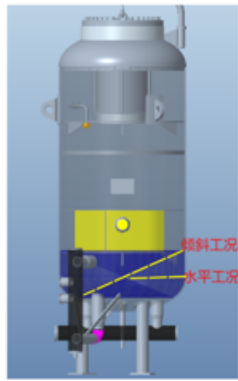
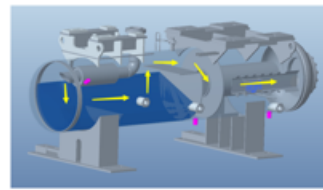
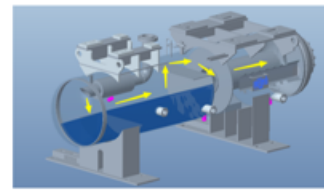
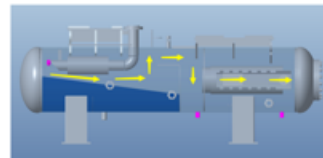
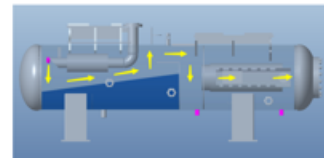
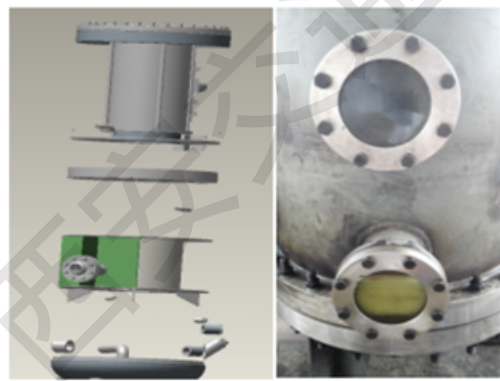
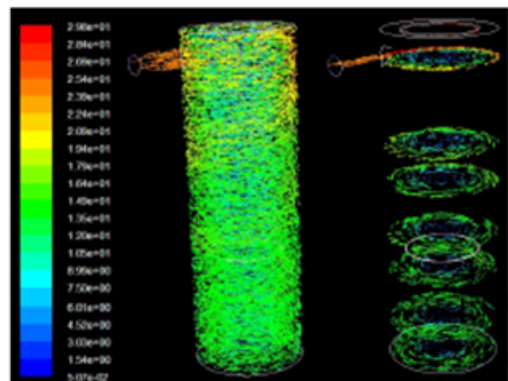




## □ 换热器：定制化+标准化



## □ 油分离器





# 内容提要

## CONTENTS

1、引言

2、制冷剂替代

3、核心装备开发

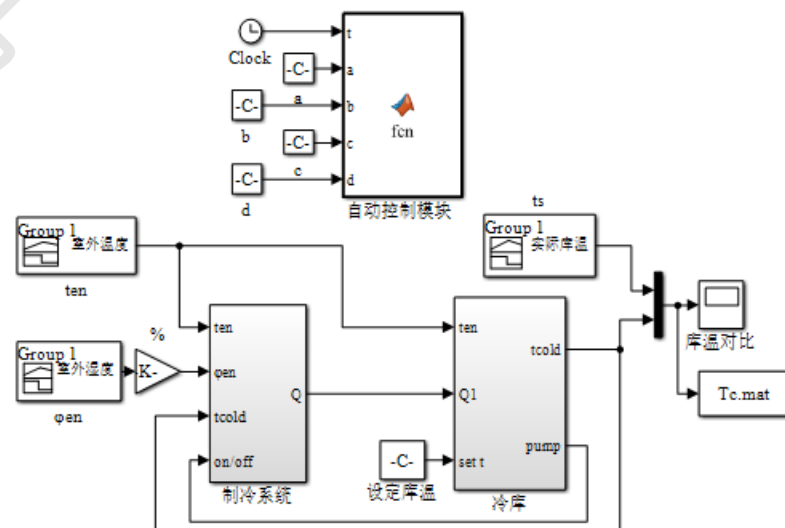
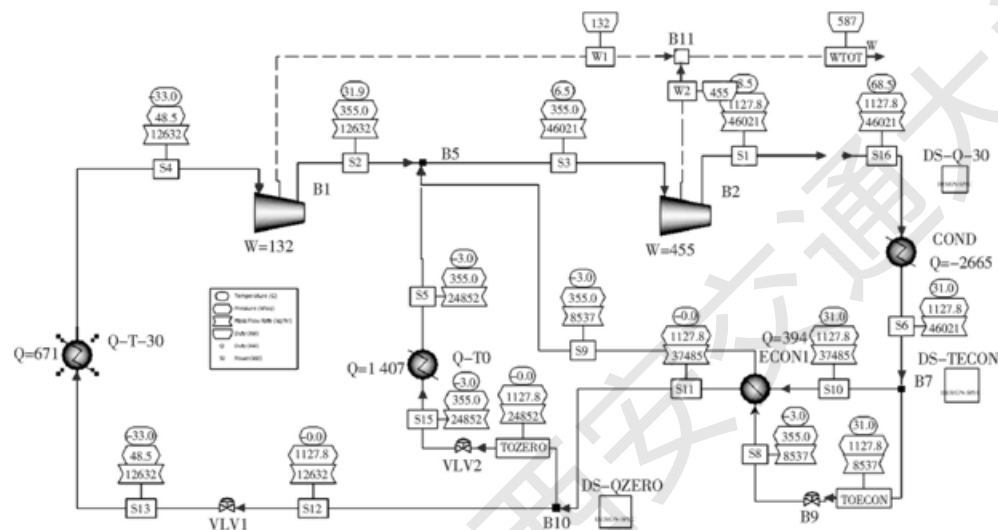
4、系统集成

5、安全与节能控制

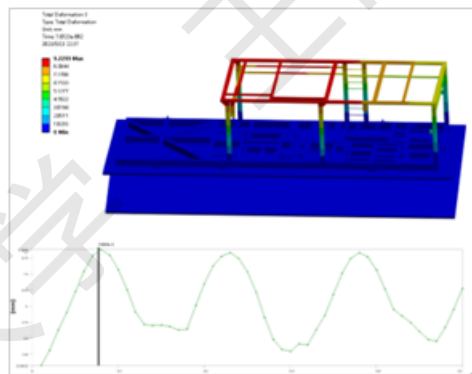
6、总结与展望

□ 流程模拟商业软件: Aspen、Dymola、GT-Suite、Simulink/Simscape .....

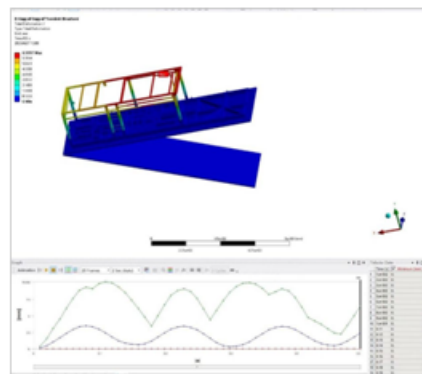
- 二次开发: 设计参数与性能的映射关系
- 全工况+优化算法



### □ 防爆+撬装集成+工程设计+可靠性理论



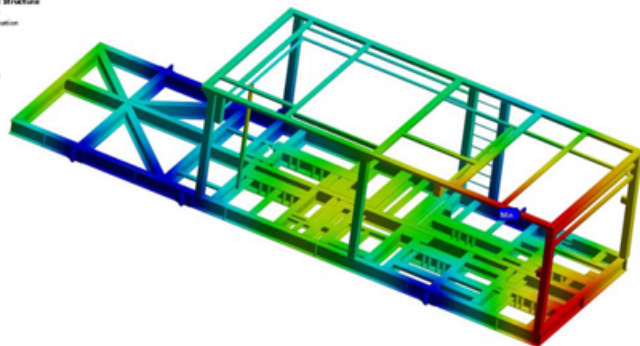
横摇模拟



纵摇模拟



Hi Copy of Shell Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1 s  
2023/09/05



变形量模拟

# 内容提要

## CONTENTS

1、引言

2、制冷剂替代

3、核心装备开发

4、系统集成

**5、安全与节能控制**

6、总结与展望

## □ 兜底逻辑+故障诊断





### □ 节能控制技术更迭



#### 节能控制1.0

专家经验群控节能：依赖人为经验，难以量化



#### 节能控制2.0

纯AI被动节能：初始投入较大，严重依赖数据质量

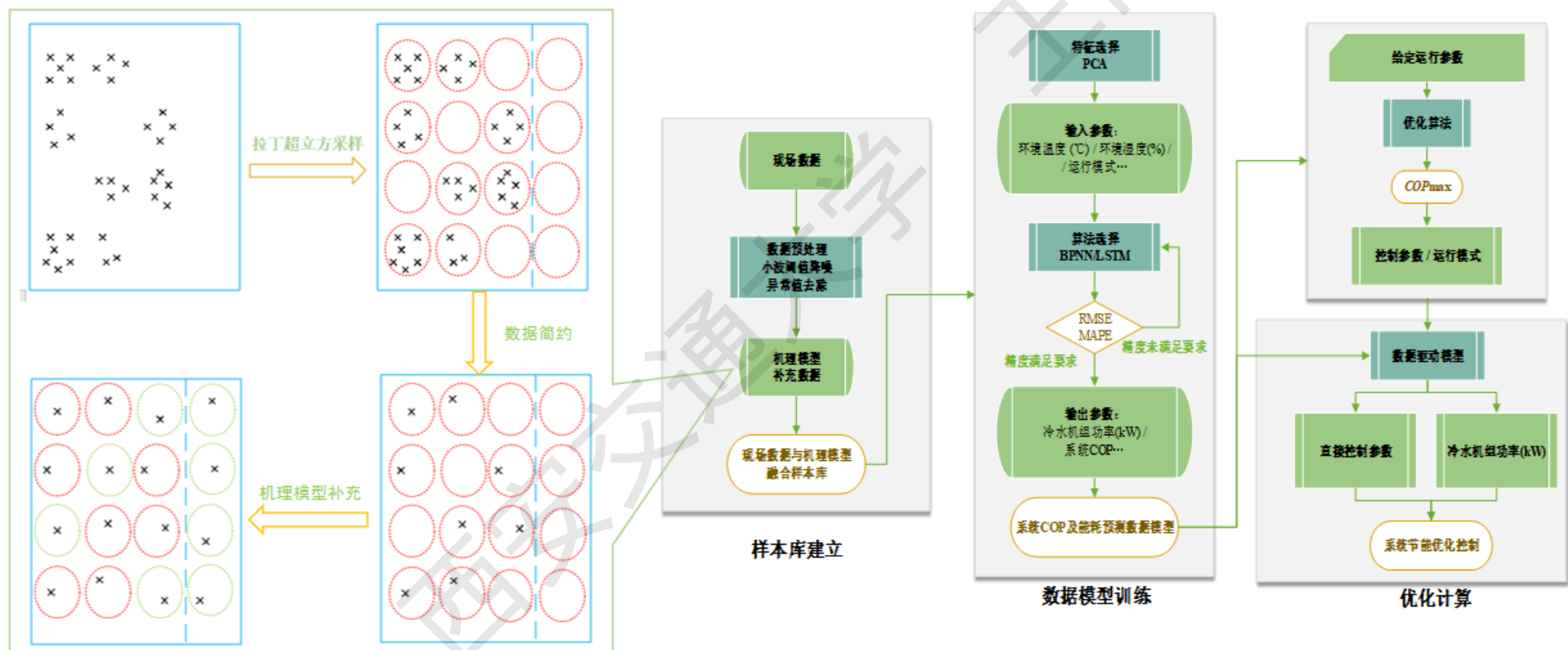


#### 节能控制3.0

**“机理+数据”双驱动全工况高精度建模与寻优技术**

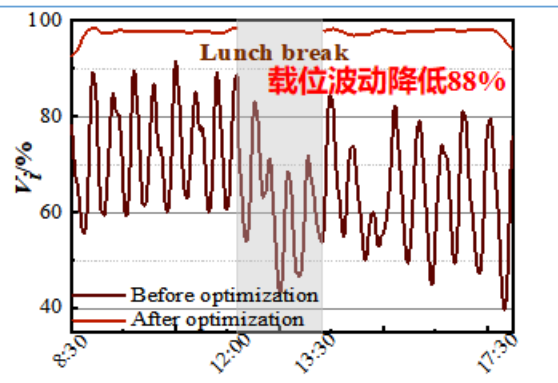
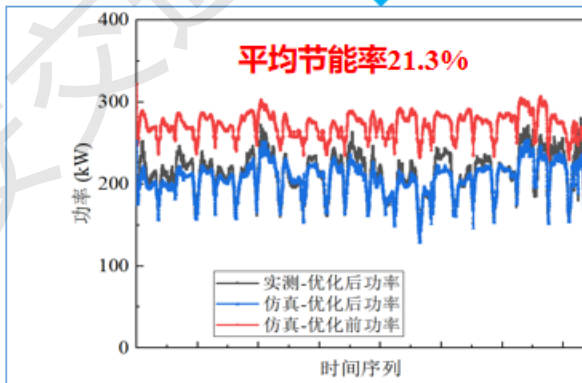
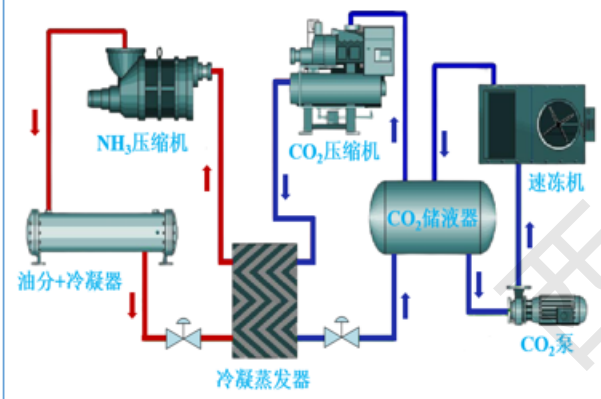
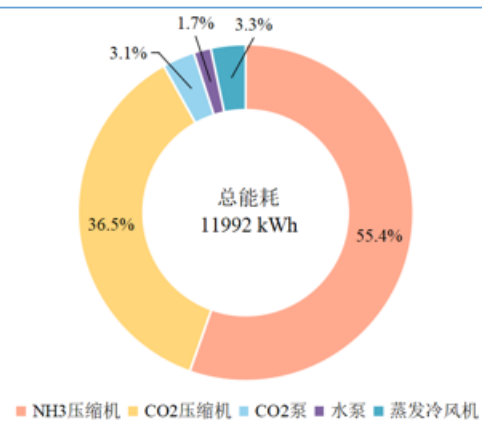
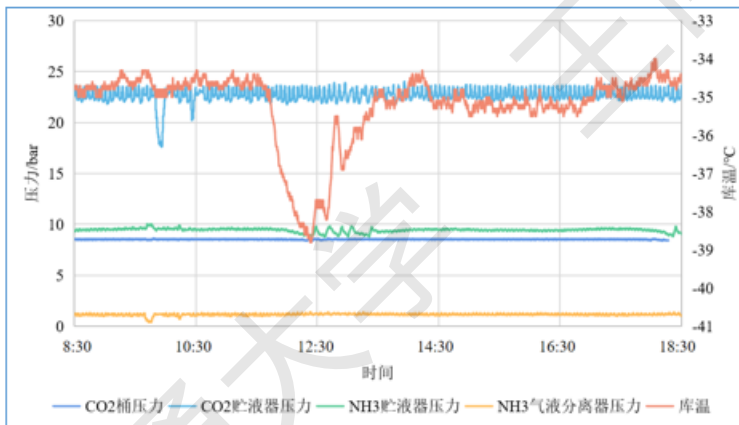


## 独创：基于样本库管理的机理与数据融合驱动节能智控技术



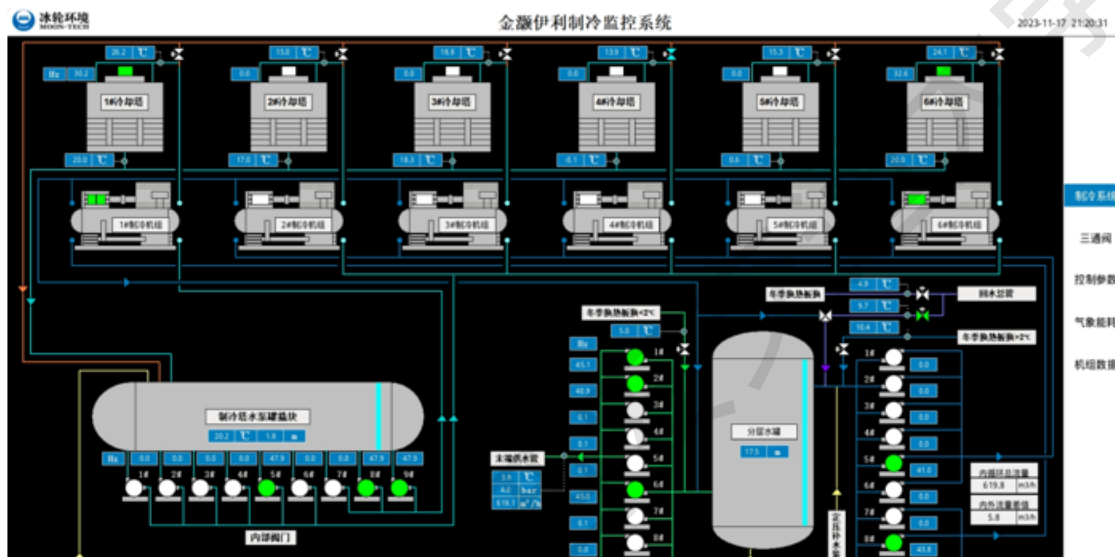


## 案例1: NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub>复叠制冷系统+桶泵供液→双螺旋速冻机供冷



### 案例2：金灞伊利液态奶加工用冷水机组+蓄冷

- 一期：优化蓄冷与制冷系统协同群控逻辑，在相同的环境温湿度和产量下，所需的单吨能耗下降16%~30%；制冷系统负荷峰值降低20%以上，能耗峰值降低15%以上。
- 二期：部署基于样本库管理的机理与数据融合驱动节能智控技术，进行中。



# 内容提要

## CONTENTS

1、引言

2、制冷剂替代

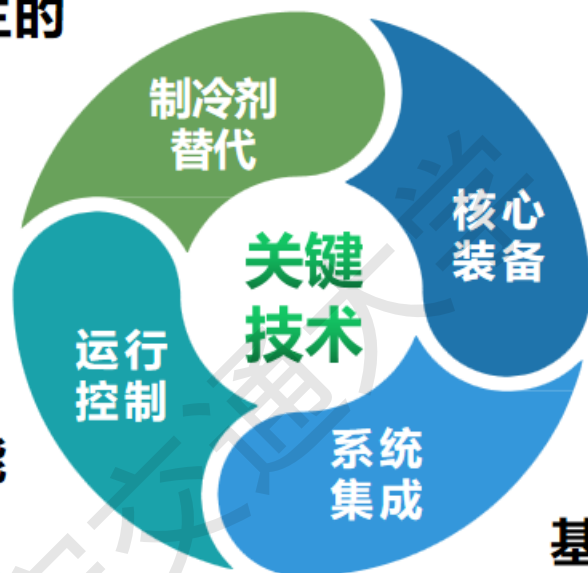
3、核心装备开发

4、系统集成

5、安全与节能控制

6、总结与展望

以HFO和天然制冷剂为主的  
新一代工质替代  
(CO<sub>2</sub>、R507A、复叠)



基于专家经验和人工智能  
安全与节能控制  
(预测性维护、节能智控)

基于CFD+的压缩机、换热器  
与油分离器等优化设计  
(变频、模拟)

基于模型的系统参数最优化匹配  
及系统集成  
(流程模拟、撬装、可靠性)



王闯 助理教授

西安交通大学 能动学院压缩机工程系

邮箱: [chuangwang@xjtu.edu.cn](mailto:chuangwang@xjtu.edu.cn)

敬请批评指正!