



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

# 压缩机技术研究进展与发展趋势

邢子文

压缩机研究所

西安交通大学能源与动力工程学院

2018-05-31

# 内容提要

- 引言
- 制冷压缩机进展与趋势
  - ✓ 往复式
  - ✓ 滚动活塞式
  - ✓ 涡旋式
  - ✓ 离心式
- 螺杆压缩机进展与趋势
  - ✓ 概述
  - ✓ 研究进展
  - ✓ 技术趋势
- 总结与展望

# 引言

## ➤ 压缩机技术创新驱动因素

- ✓ 基于自身**产品平台**：高效节能、减振降噪、制造成本
- ✓ 基于政策法规和客户需求：替代工质、工况范围、新应用场合

## ➤ 压缩机结构型式分类

- ✓ **新机型**：均未批量生产，前景**尚不明确**
- ✓ **主流机型**：往复、滚动活塞、涡旋、螺杆、离心
- ✓ **市场**：空调（气候变暖、基建）、冷冻冷藏（食品安全）、热泵（家用、工商）

## ➤ 压缩机技术新进展

- ✓ **替代工质**：部件设计、材料兼容、润滑油选型、电气安全
- ✓ **高效节能**：结构设计优化、容量调节（机械、变频）、工况适应、高效电机
- ✓ **工况拓展**：补气、双级、级间压力可调；热水器、烘干机、热风机、冷冻冷藏
- ✓ **容量拓展**：大滚动活塞~小涡旋，大涡旋~小螺杆，小离心~大螺杆；回转~往复
- ✓ **新应用场合**：电信基站&穿戴设备、新能源汽车、高温水蒸气热泵

# 制冷压缩机分类与应用范围

	家用 冰箱	房间空 调器	汽车 空调	住宅空 调器及 热泵	商用、工业 用制冷和空 调设备	大型工业 制冷及空 调设备
往复压缩机						
滚动活塞压 缩机						
涡旋压缩机						
螺杆压缩机						
离心压缩机						

# 往复制冷压缩机

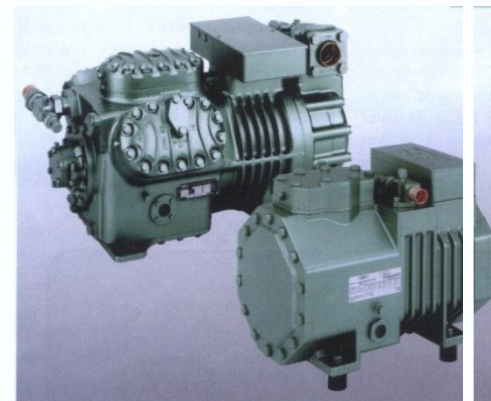
## ➤ 全封闭往复制冷压缩机

- ✓ 应用场合：家用冰箱、冰柜
- ✓ 电机功率：< 500 W
- ✓ 销量（JARN）：2017年中国1.585亿台
- ✓ 工质：R134a、R600a、R290
- ✓ 研究热点：COP（气阀、余隙、吸气过热、变频）、噪声、直线



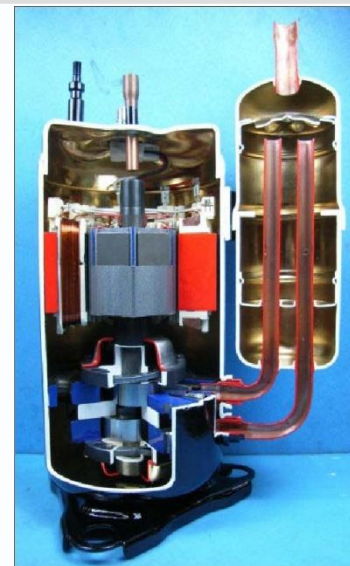
## ➤ 半封闭往复制冷压缩机

- ✓ 应用场合：空调用↓、商用↑、车载、**ATW**
- ✓ 电机功率：冷冻冷藏6~40hp；空调&热泵16~40hp
- ✓ 销量(JARN)：2017年全球48.5万台，中国10.8万台
- ✓ 工质：R22 → R404A、R507A、R32、**CO2（往复机再辉煌？）**
- ✓ 研究热点：COP、双级、吸气喷液，可靠性&故障诊断（p-V，振动）



# 滚动活塞压缩机

- 应用场合：空调、冷冻冷藏、热水器、**热风机**
- 电机功率：1 ~ 16 hp, 20 hp
- 销量（JARN）：2017年全球1.881亿台、中国1.341亿台
- 研究热点：
  - ✓ 工质：R22 → R410A、R32、R290；CO<sub>2</sub>；HFO
  - ✓ COP：间隙、气阀、油路、储液器、高效电机
  - ✓ 变频：轴承负荷、滑片摩擦磨损、气阀寿命；振动、供油、转矩控制
  - ✓ 大容量：双缸（家用中央空调）；升频
  - ✓ 小容量：微型（电信基站、穿戴设备）
  - ✓ 热泵专用：ATW、CO<sub>2</sub>、烘干机、热风机；补气；双级；三缸变容积比
  - ✓ 降成本：轻量化（新材料、新型电机）
  - ✓ CFD：工质&润滑油流场，润滑油特性



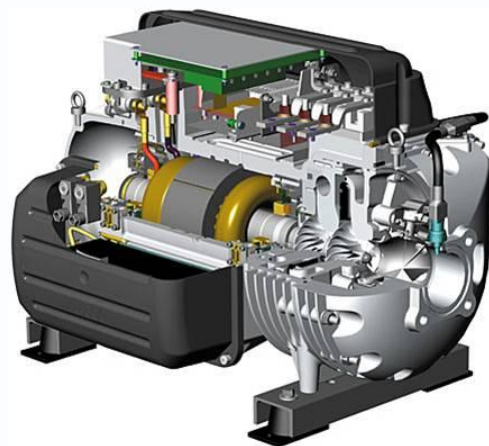
# 涡旋制冷压缩机

- 应用场合：空调、冷冻冷藏、热泵热水器、供暖、**车载**
- 电机功率：3 ~ 30 hp ; 40 hp、60hp
- 销量（JARN）：2017年全球1490万台、中国370万台
- 研究热点：
  - ✓ 工质：R22 → R404A、R407C、R410A、CO<sub>2</sub>；（R32、R290、HFO）
  - ✓ COP：型线优化、齿顶密封、高效电机
  - ✓ 容量调节：数码涡旋，变频驱动
  - ✓ 大容量：30-60hp；并联机组（油平衡）
  - ✓ 变工况：中间排气阀（过压缩、液击）
  - ✓ 车用：卧式；**电动**大巴、轿车；地铁、高铁
  - ✓ 工况拓展：补气、中间级喷液、吸气喷液、双级



# 离心式制冷压缩机

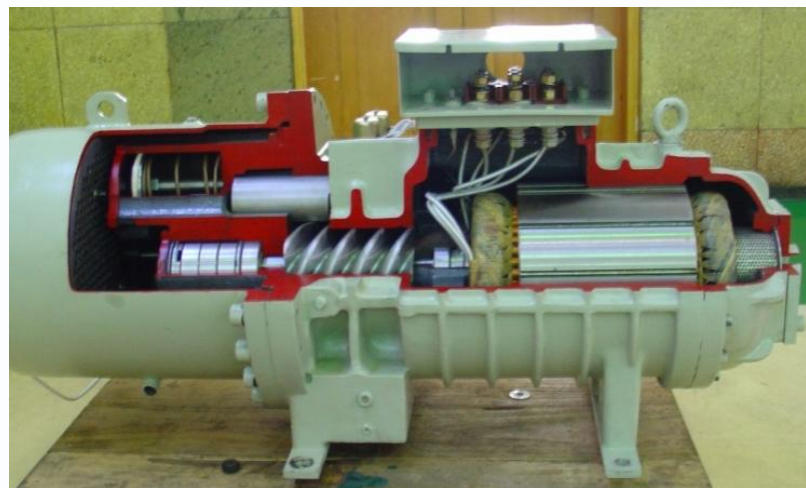
- 应用场合：空调、工艺制冷、蓄冷，**热泵**（区域供暖）
- 电机功率：大于300hp；100 ~ 300 hp
- 销量（JARN）：2017年全球18000台，中国5000台
- 研究热点：
  - ✓ 工质：R134a、R1234ze、R1233zd、H2O
  - ✓ COP：三元叶轮，高效电机，双级、补气，**无油**（新工质）
  - ✓ 轴承：磁悬浮、气悬浮，陶瓷滚动轴承（工质润滑）
  - ✓ 容量调节：进口导叶、可变扩压器、变频
  - ✓ 小、大容量：50~3000RT，多机并联
  - ✓ 防喘振
  - ✓ ORC膨胀机





# 螺杆制冷压缩机

- 螺杆制冷压缩机：**双螺杆**（90%）、单螺杆、三螺杆
- 电机功率：30 ~ 500 hp
- 销量：2017年国内空调螺杆6万台、冷冻螺杆1万台
- 应用场合
  - ✓ 冷水机组↓：20~500RT；变频（**最适合机型**）、Vi调节
  - ✓ 工商冷冻：中高温-20℃ ↑、低温-20℃ ↓、双级-30℃ ↓；船用
  - ✓ 热泵机组↑：小区供暖，余热回收
- 工质
  - ✓ R22→R134a、R407C
  - ✓ R404A、NH<sub>3</sub>、R290、CO<sub>2</sub>
  - ✓ HFO、混合工质



# 螺杆压缩机研究热点

## ➤ 高效节能:

- ✓ 转子型线&加工、油分（压缩机、冷凝器）、高效电机，大数据分析
- ✓ 变容量：滑阀、柱塞、变频（异步&永磁，降频&升频，停机反转）
- ✓ 工况拓展：补气、双级，Vi可调

## ➤ 稳定可靠:

- ✓ 轴承选配、机体设计转子成型
- ✓ 远程监控、故障诊断

## ➤ 减振降噪:

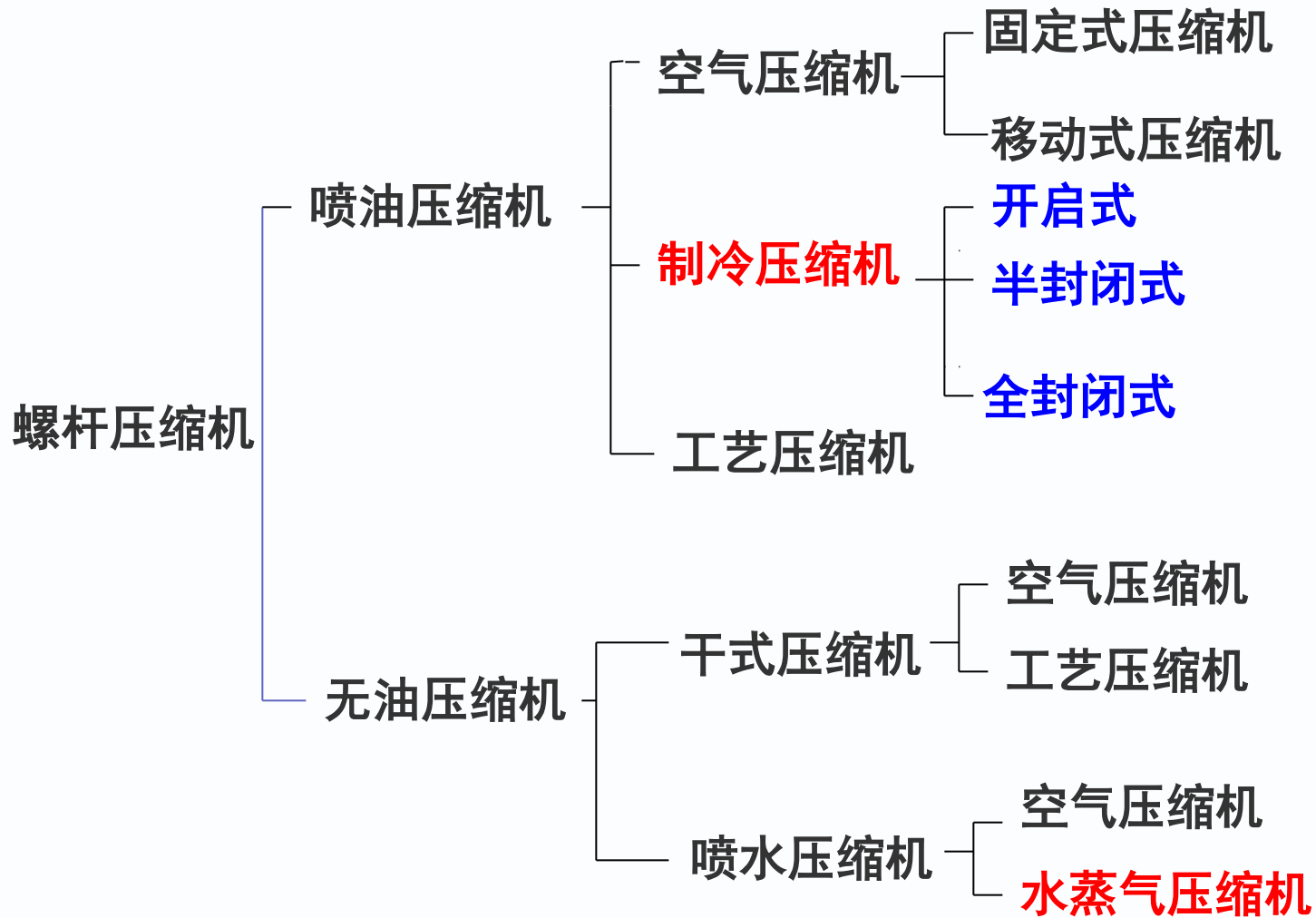
- ✓ 腔体声学优化，流体脉动衰减
- ✓ 噪声隔离

## ➤ 环保工质:

- ✓ HFO、混合物、自然工质
- ✓ 复叠&载冷：NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub>、R290/CO<sub>2</sub>、R134a/CO<sub>2</sub>

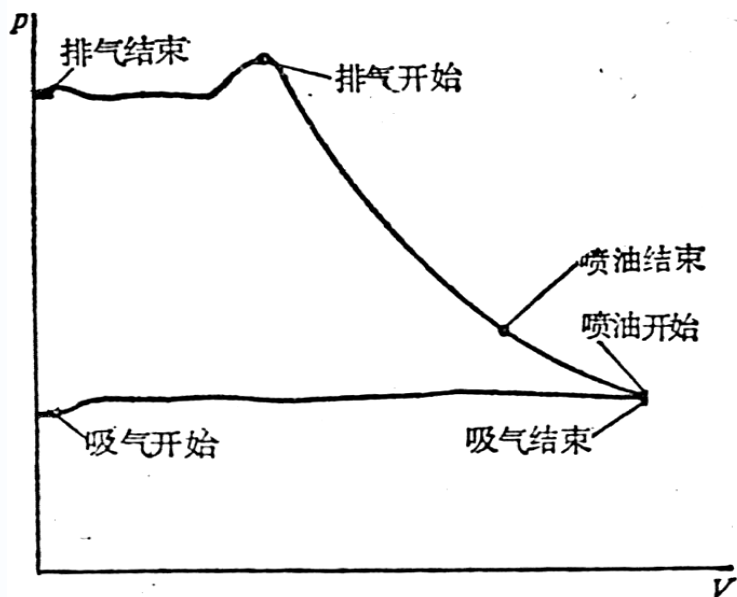


# 螺杆压缩机分类



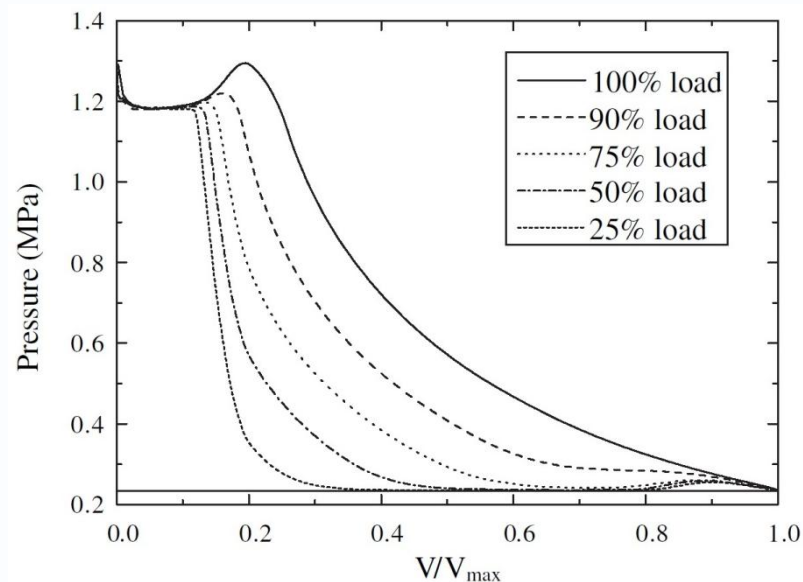
其它螺杆机械：螺杆真空泵、螺杆混熟泵、螺杆ORC&水蒸气膨胀机

# 螺杆压缩机实际工作过程

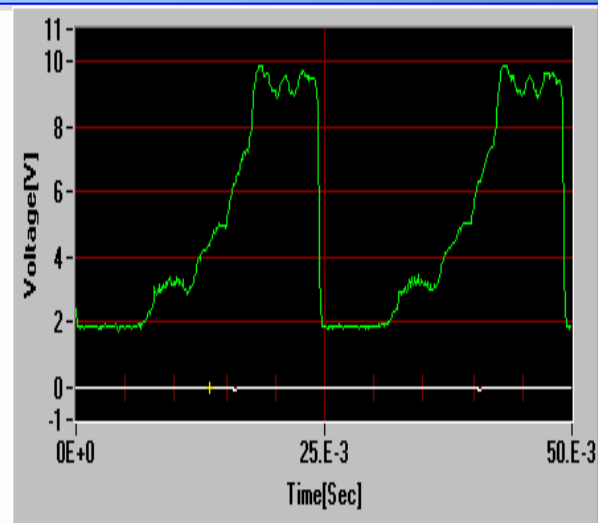
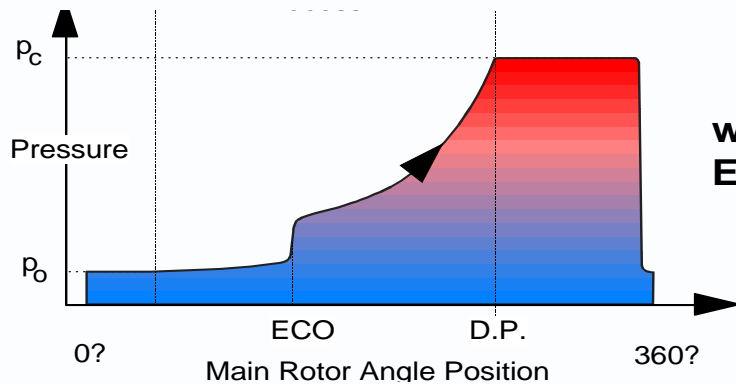


## 实际工作过程:

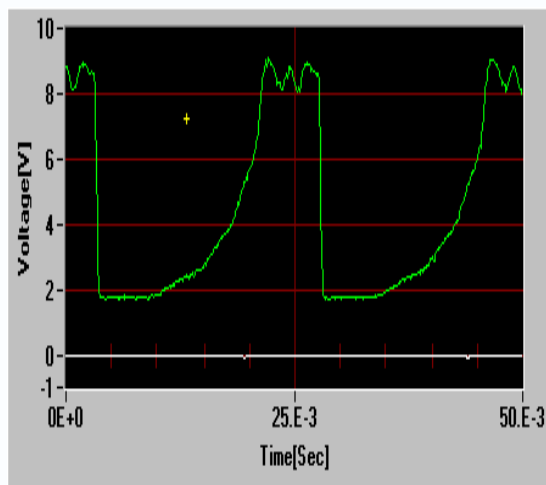
- ✓ 泄漏：内泄漏、外泄漏
- ✓ 传热：喷液冷却
- ✓ 流动&扰动：沿程、局部阻力损失，扰动损失



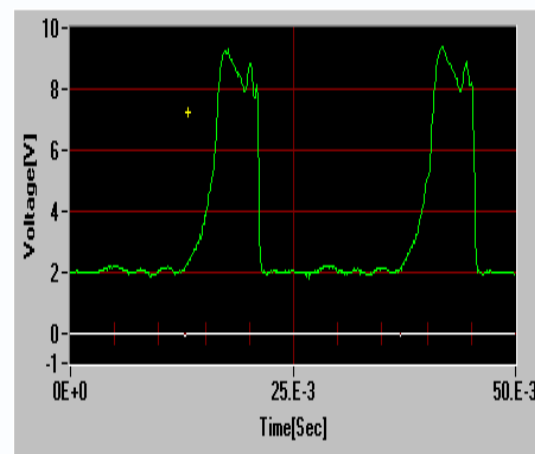
# 螺杆制冷压缩机p-V指示图测录



## 经济器补气对螺杆压缩机工作过程影响



100%负荷



50%负荷

# 螺杆压缩机工作过程模拟与计算

- 压缩机工作过程数学模拟
- 预测压缩机热力性能（排量、功率）
- 计算压缩机动力特性（轴承负荷等）

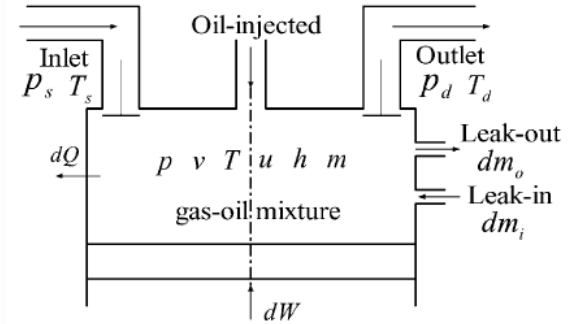


Fig. 1. The control volume.

$$\frac{dp}{d\theta} = \left( \frac{1}{v_g} \left[ \left( \frac{\partial h_g}{\partial v_g} \right)_{T_g} - \frac{(\partial h_g / \partial T_g)_{v_g} g (\partial p / \partial v_g)_{T_g}}{(\partial p / \partial T_g)_{v_g}} \right] \frac{dv_g}{d\theta} - \frac{1}{V_g} \left[ \sum \frac{dm_{g,i}}{d\theta} (h_{g,i} - h_g) - \frac{dQ_g}{d\theta} \right] \right) \left( 1 - \frac{1}{v_g} \frac{(\partial h_g / \partial T_g)_{v_g}}{(\partial p / \partial T_g)_{v_g}} \right)^{-1}$$

$$\frac{dT_g}{d\theta} = \left( \left[ \frac{1}{v_g} \left( \frac{\partial h_g}{\partial v_g} \right)_{T_g} - \left( \frac{\partial p}{\partial v_g} \right)_{T_g} \right] \frac{dv_g}{d\theta} - \frac{1}{V_g} \left[ \sum \frac{dm_{g,i}}{d\theta} (h_{g,i} - h_g) - \frac{dQ_g}{d\theta} \right] \right) \left( \left( \frac{\partial p}{\partial T_g} \right)_{v_g} - \frac{1}{v_g} \left( \frac{\partial h_g}{\partial T_g} \right)_{v_g} \right)^{-1}$$

$$\frac{dT_l}{d\theta} = \frac{1}{M_l} \left( \sum T_{l,i} \frac{dM_{l,i}}{d\theta} - T_l \sum \frac{dM_{l,o}}{d\theta} - T_l \frac{dM_l}{d\theta} - \frac{1}{C_l} \sum \frac{dQ_l}{d\theta} \right)$$

$$\frac{dM_g}{d\theta} = \frac{dM_{g,i}}{d\theta} - \frac{dM_{g,o}}{d\theta}$$

$$\frac{dM_l}{d\theta} = \frac{dM_{l,i}}{d\theta} - \frac{dM_{l,o}}{d\theta}$$

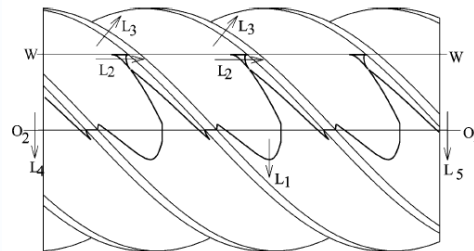


Fig. 2. Leakage paths.

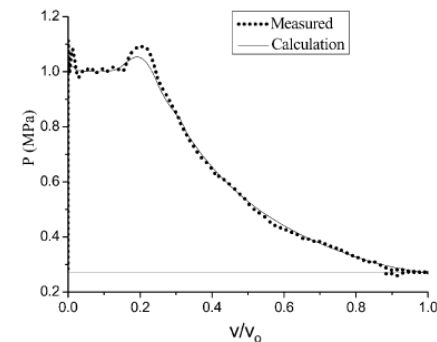
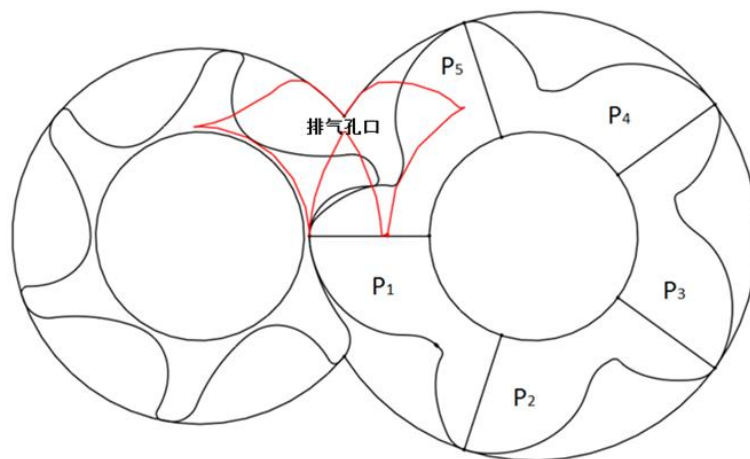
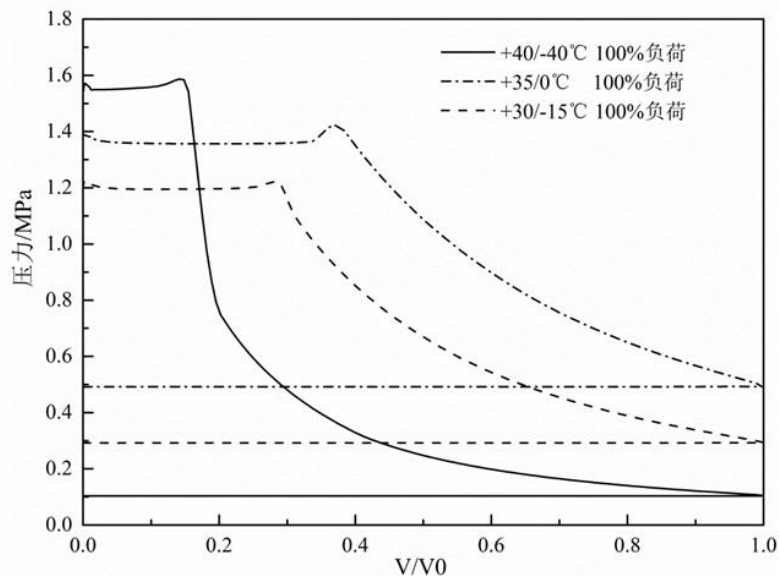
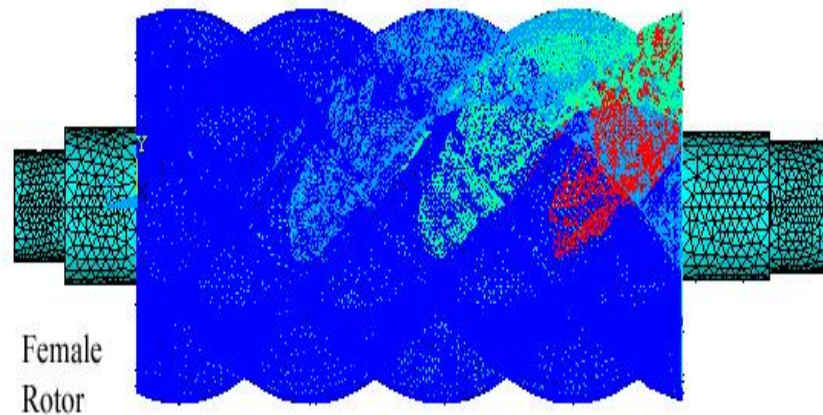
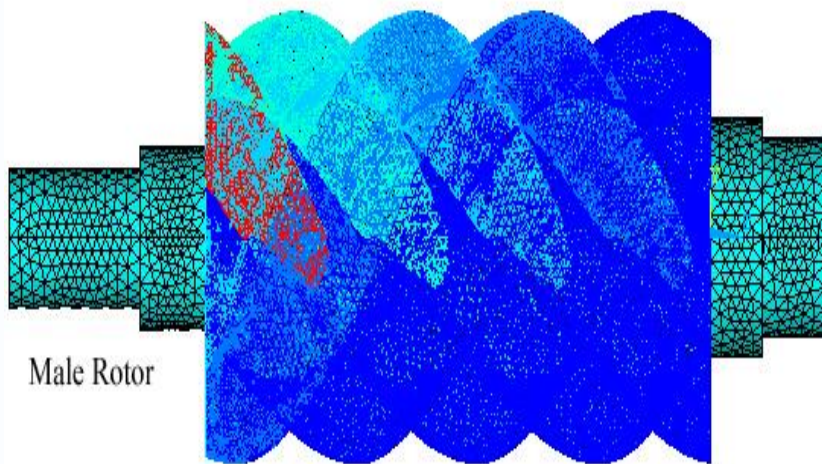
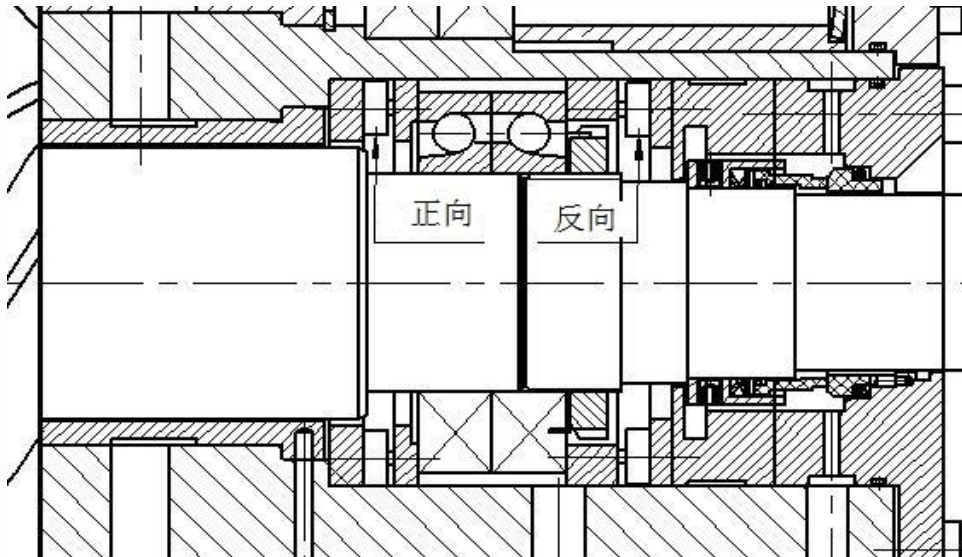


Fig. 5.  $p-v$  indicator diagram comparison for R134a under full load condition.

# 螺杆转子受力计算

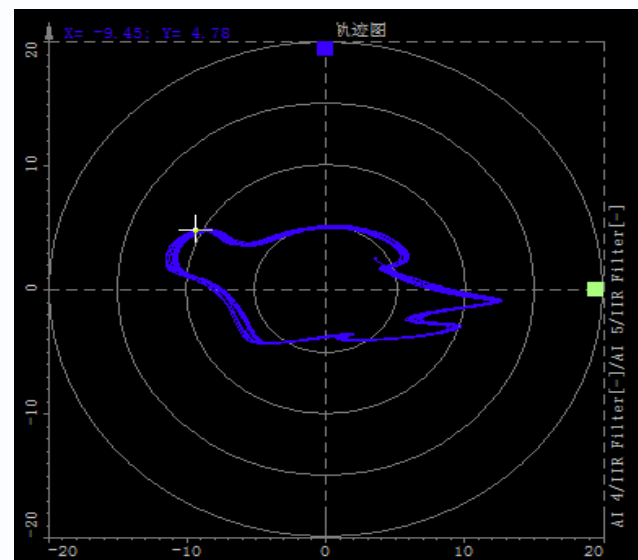
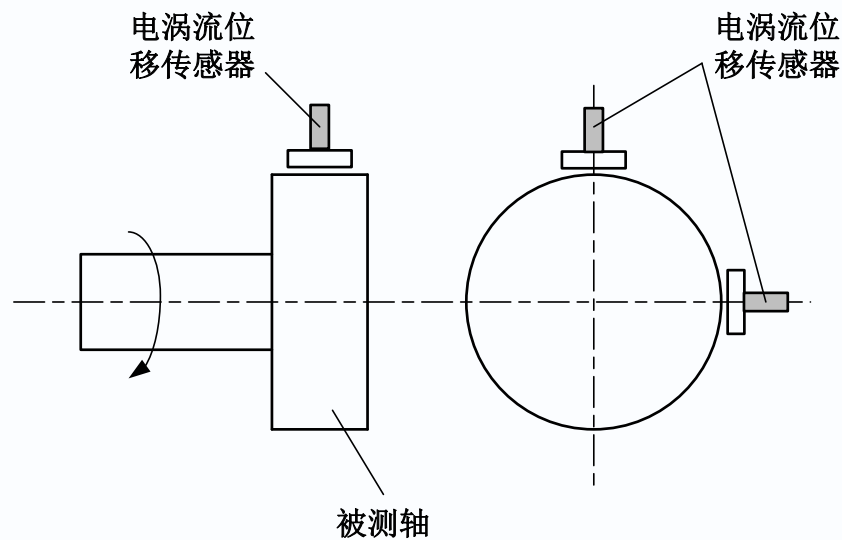
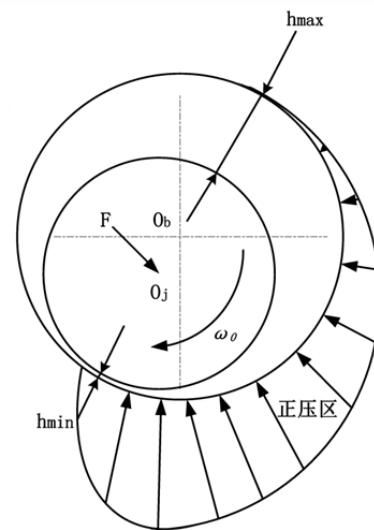
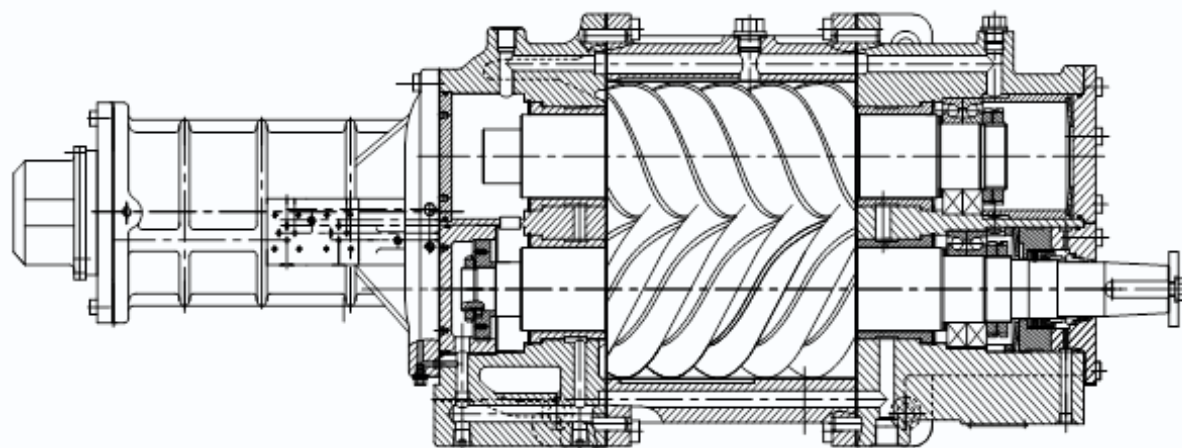


# 螺杆转子受力测量

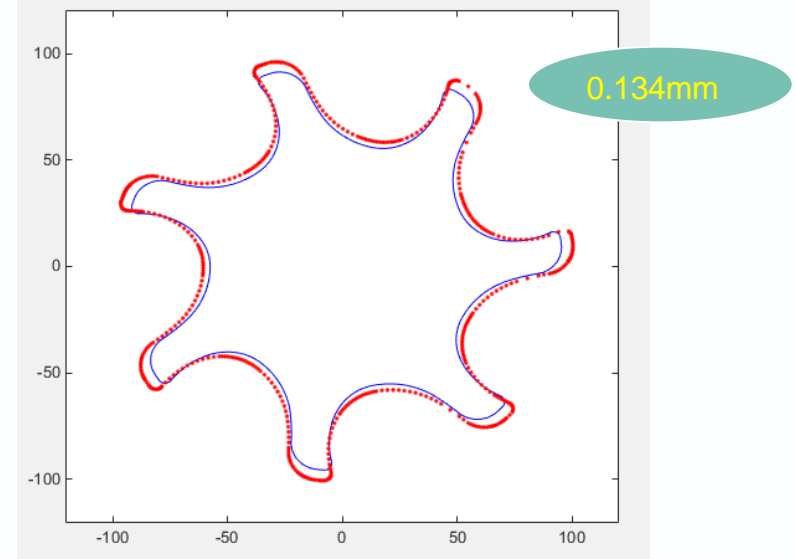
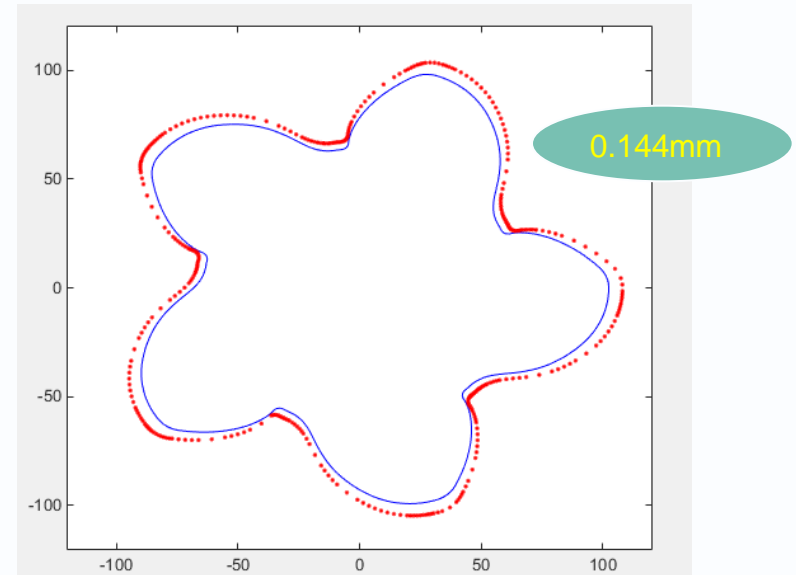
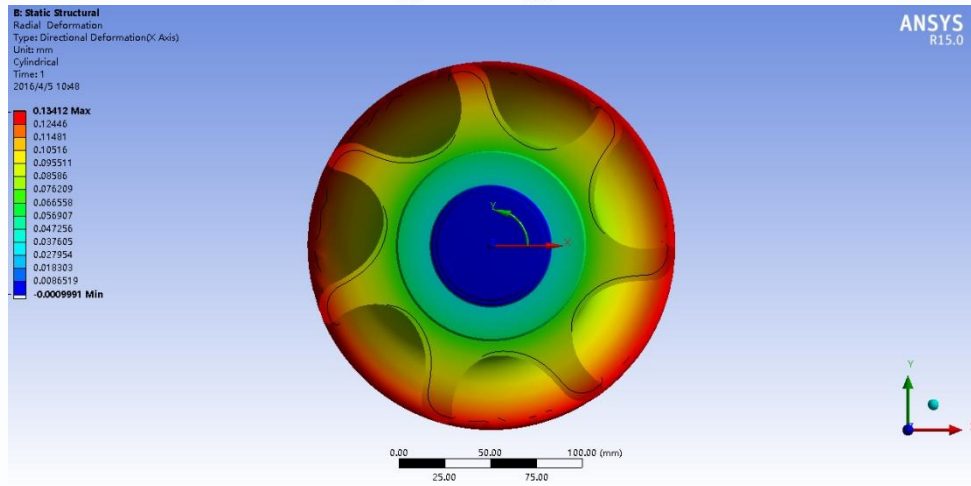
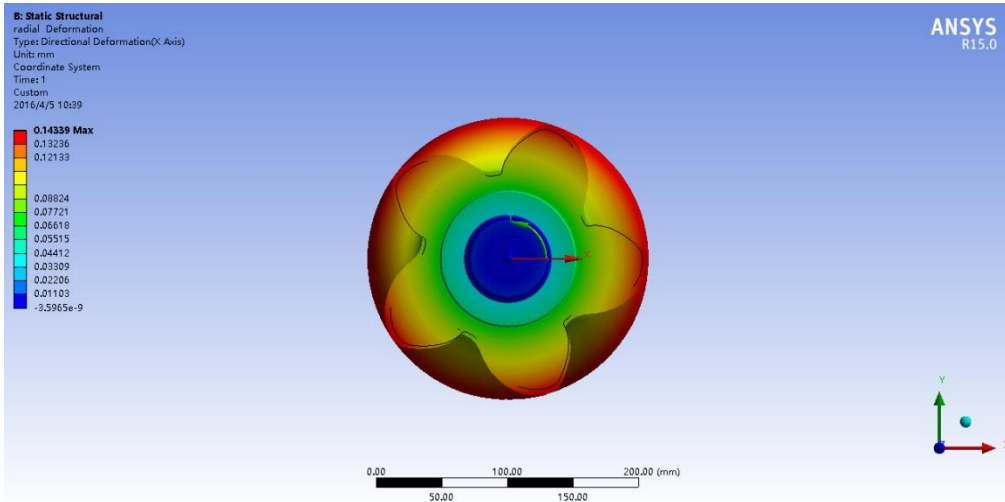




# 螺杆转子轴心轨迹计算与测量



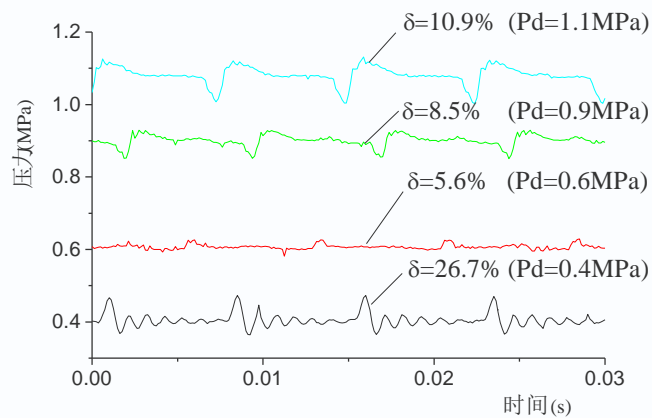
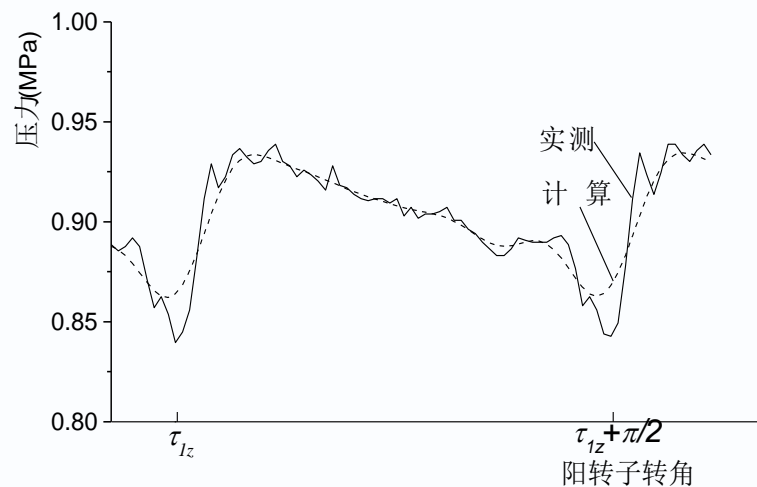
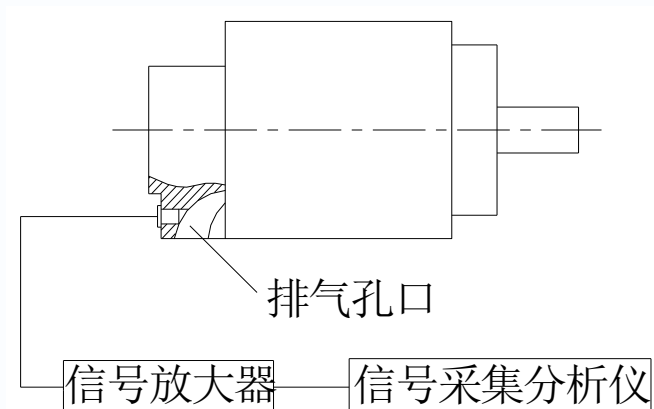
# 受力变形、受热膨胀计算结果



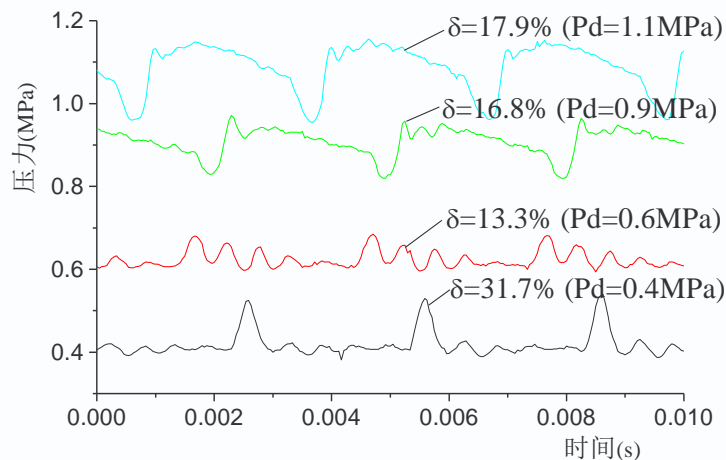
转子排气端径向热力变形放大50倍后示意图



# 排气压力脉动测试与计算

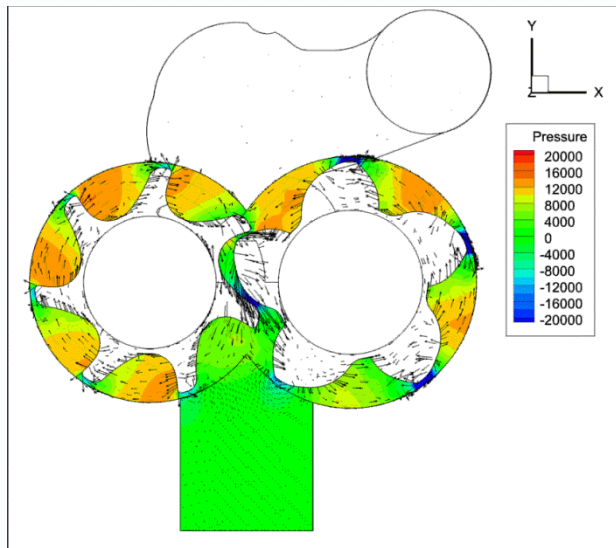
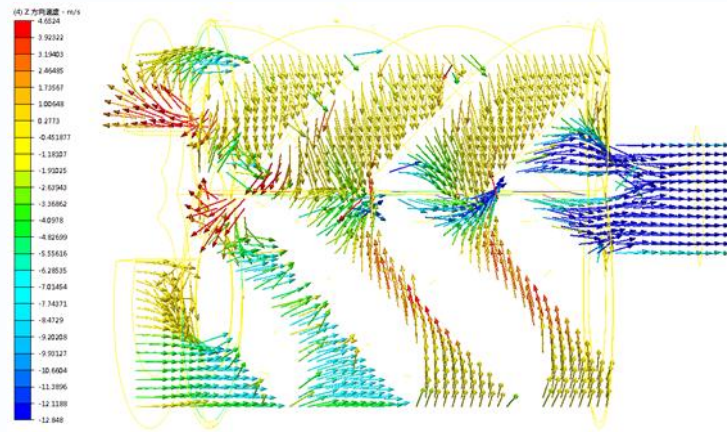
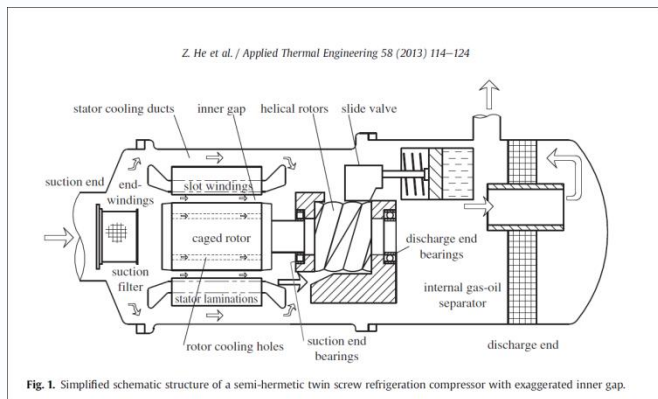


2000r/min

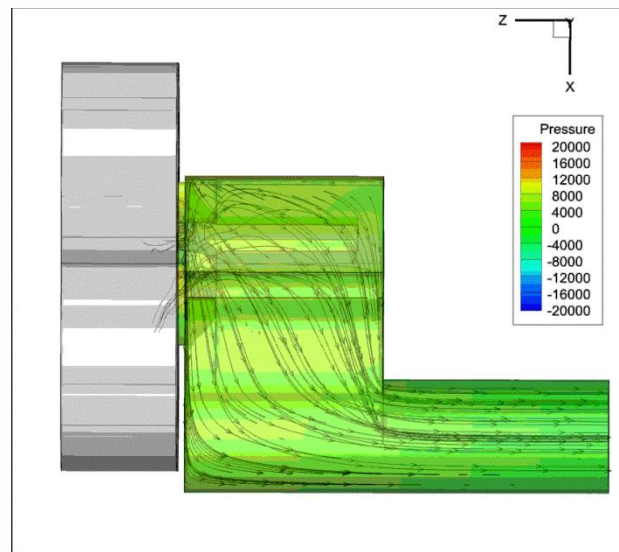


5000r/min

# 螺杆制冷压缩机CFD分析

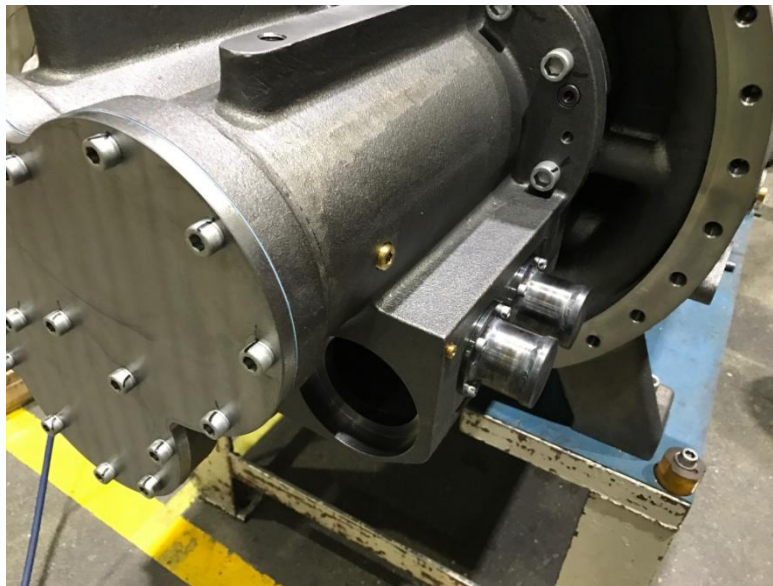
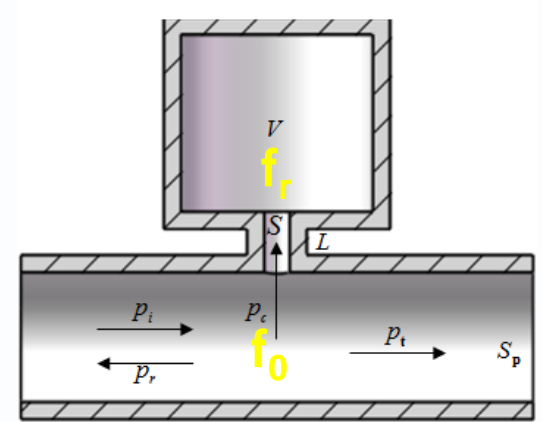
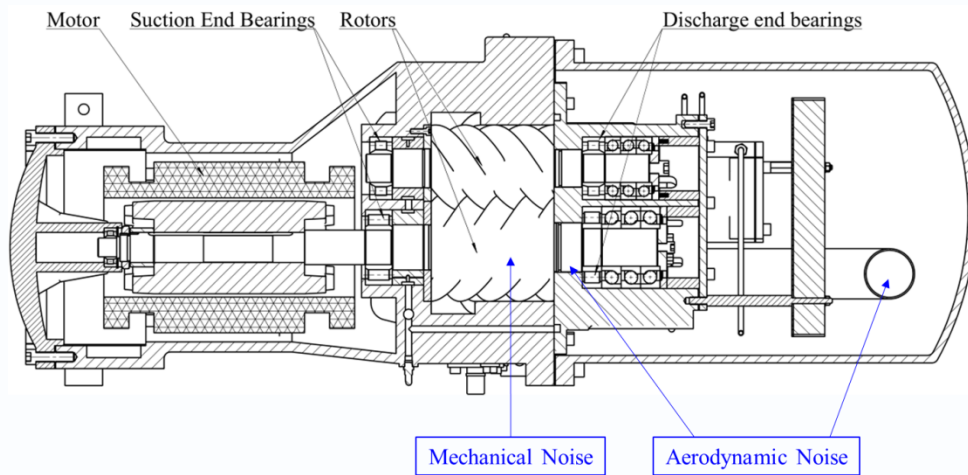


转子剖面压力分布

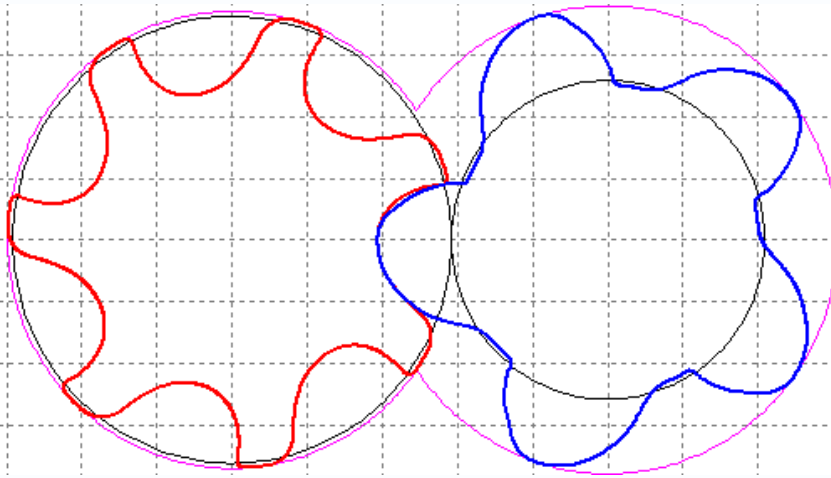
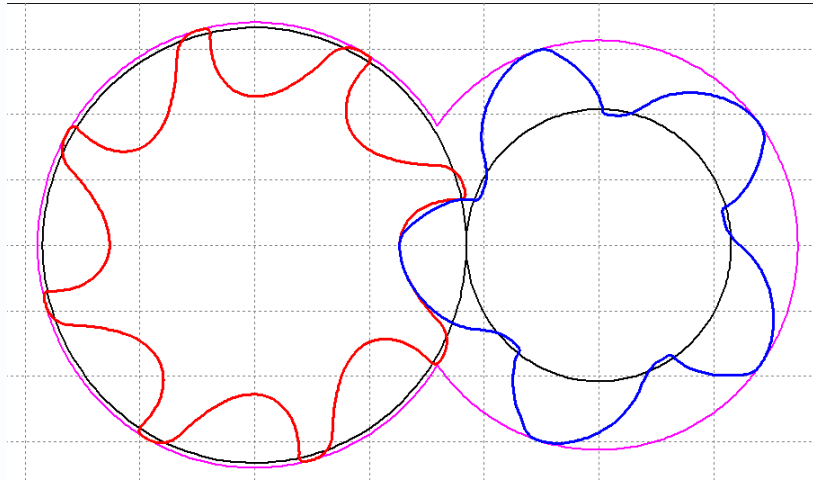


排气腔压力分布与流线

# 螺杆制冷压缩机减振降噪



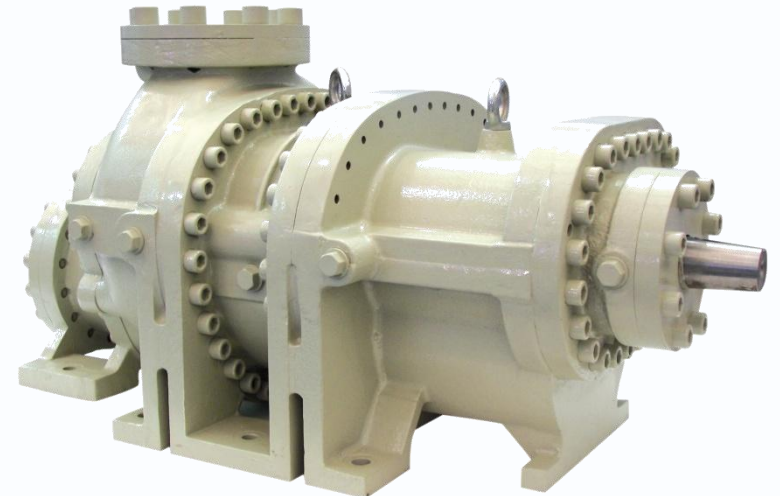
# CO<sub>2</sub>螺杆制冷压缩机



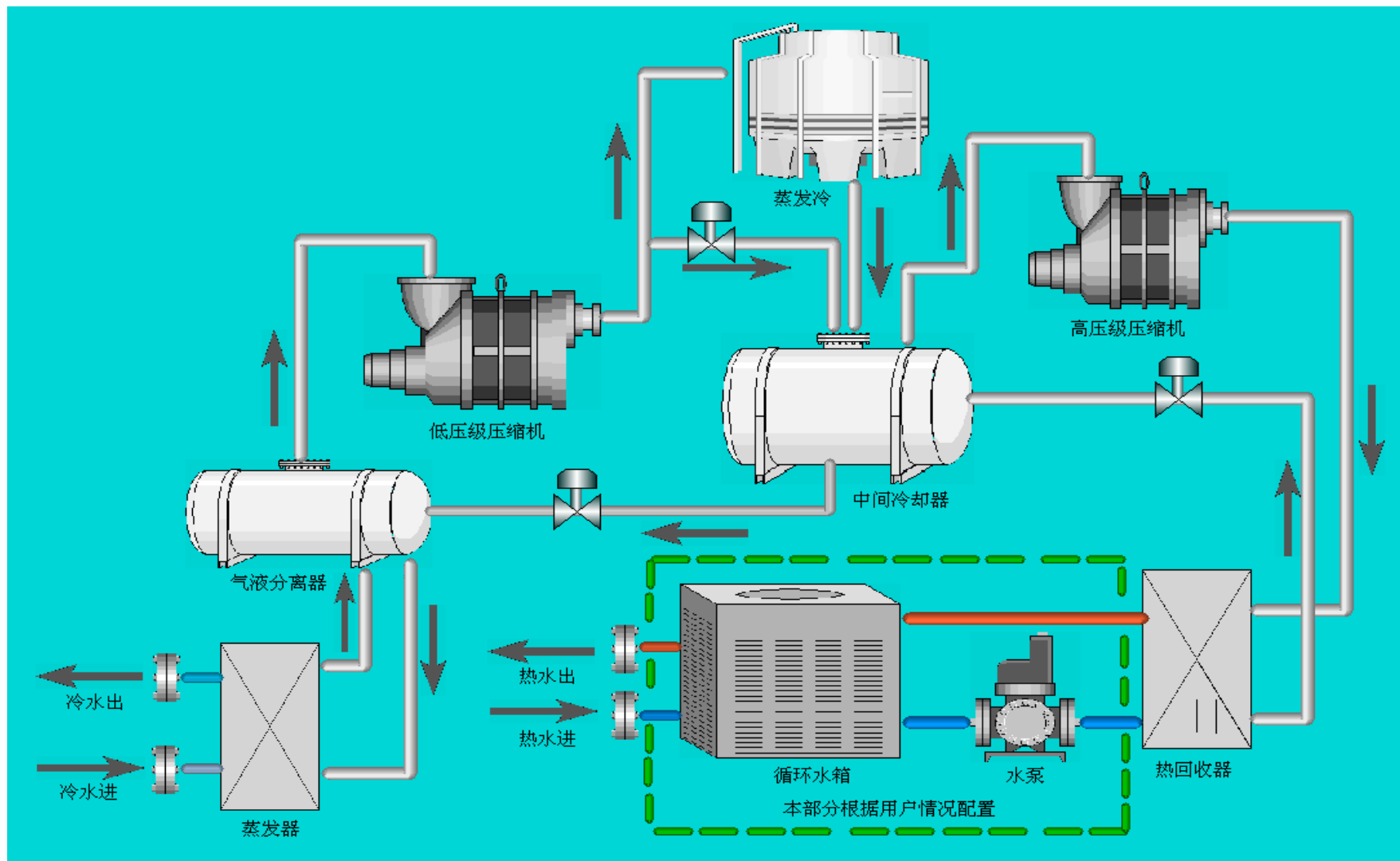
- 设计压力5.2MPa，大压差、小压比
- 转子齿数为5+8、5+7，刚性好
- 球墨铸铁壳体，强度高
- 滑动轴承，承载能力大
- 5个型号，系列产品
- 扩展应用：

✓ **NH<sub>3</sub>高温热泵**

✓ **天然气、煤层气增压**



# NH<sub>3</sub>高温热泵

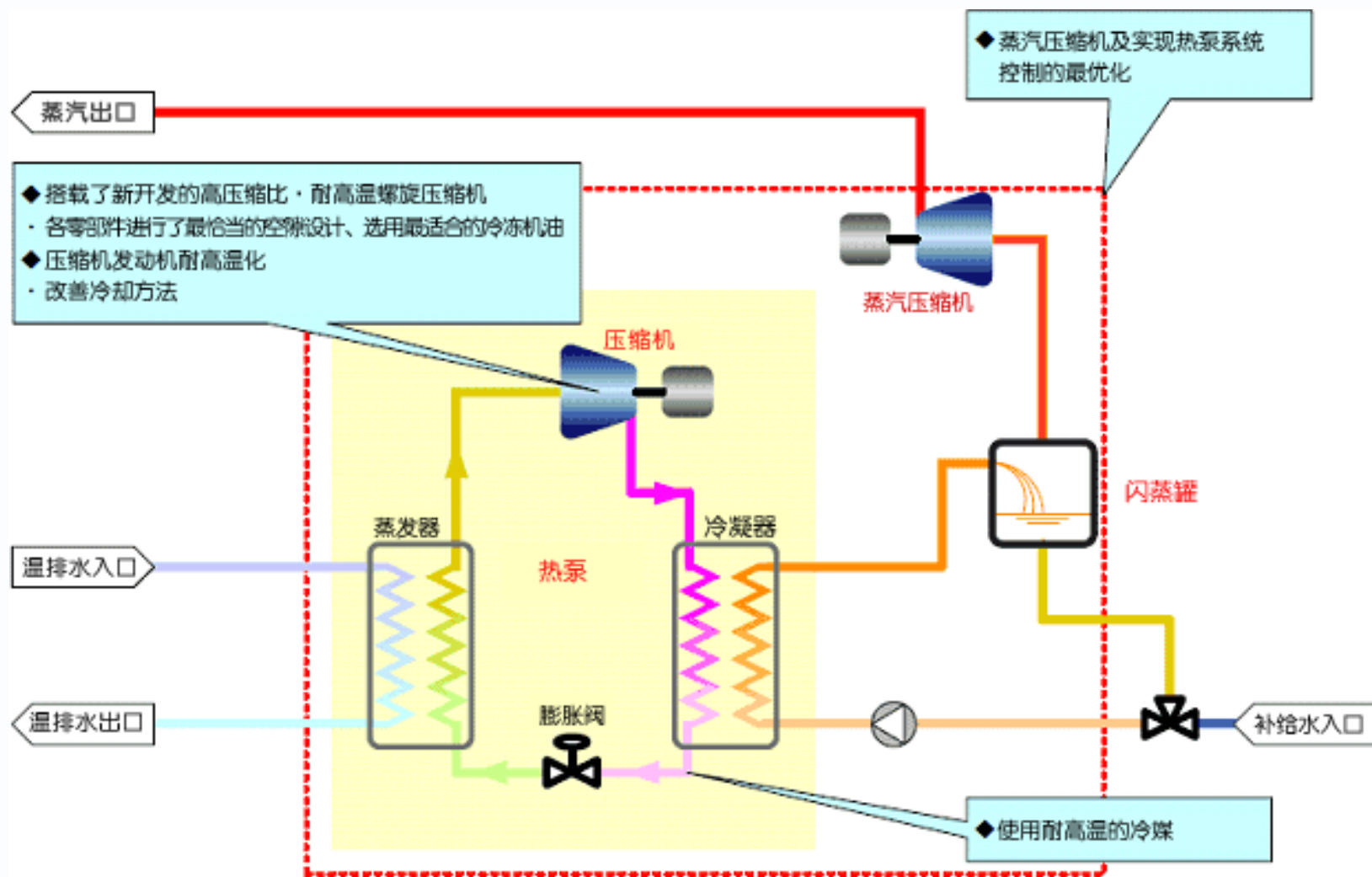


# NH<sub>3</sub>高温热泵



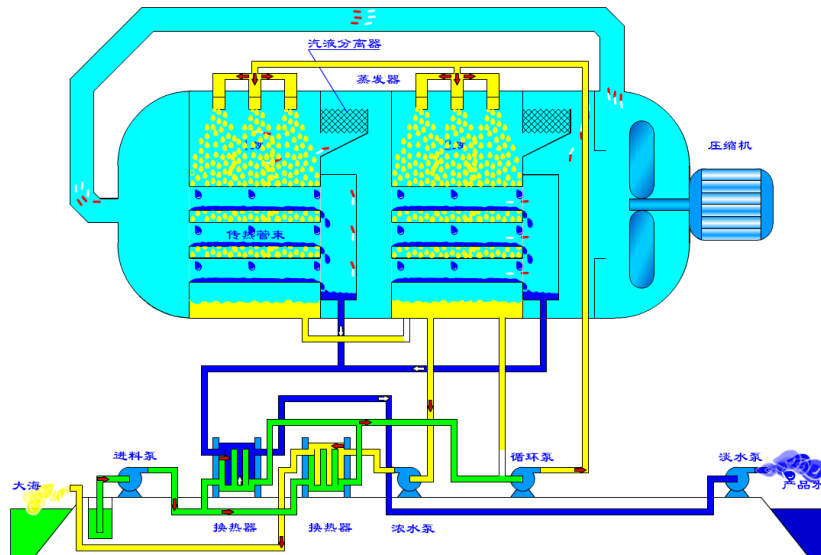


# 螺杆水蒸气热泵及螺杆水蒸气压缩机



# 水蒸气压缩机及MVR多效蒸发系统

- **MVR** ( Mechanical Vapour recompression)
- 广泛用于纺织、印染、造纸及油田等行业污水处理（碱液浓缩）
- 也可用于海水淡化、制盐等多种工艺流程
- 其它介质：NH<sub>3</sub>、甲醇等



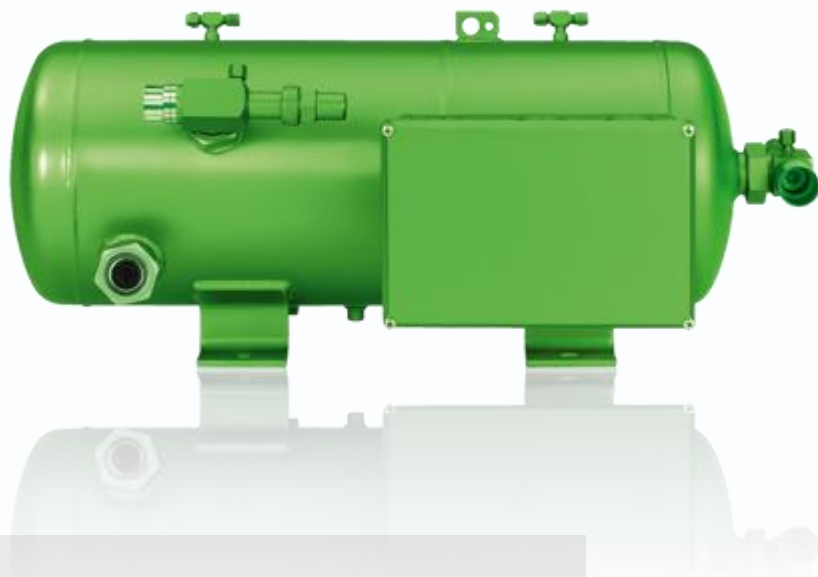
# 螺杆膨胀机

- 水蒸气膨胀机
- ORC膨胀机

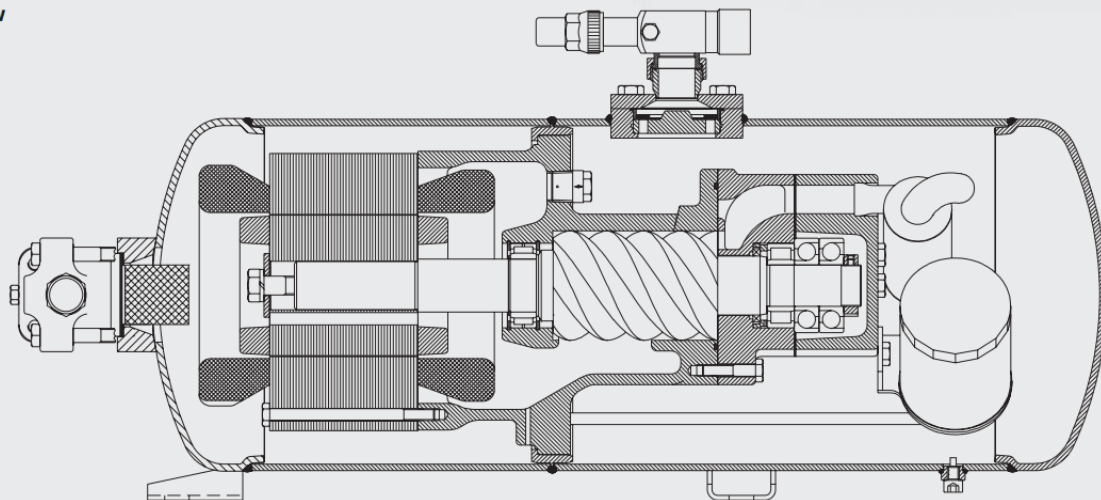


## VSK系列全封闭整体式螺杆压缩机

- ✓ 排气量范围：46 ~ 80m<sup>3</sup>/h（50HZ）
- ✓ 制冷剂：R134a、R407C等
- ✓ 轴承：大尺寸滚动轴承
- ✓ 使用范围：铁路车辆空调
- ✓ 案例：重庆地铁6号线，



Seitenansicht  
Side view  
侧视图



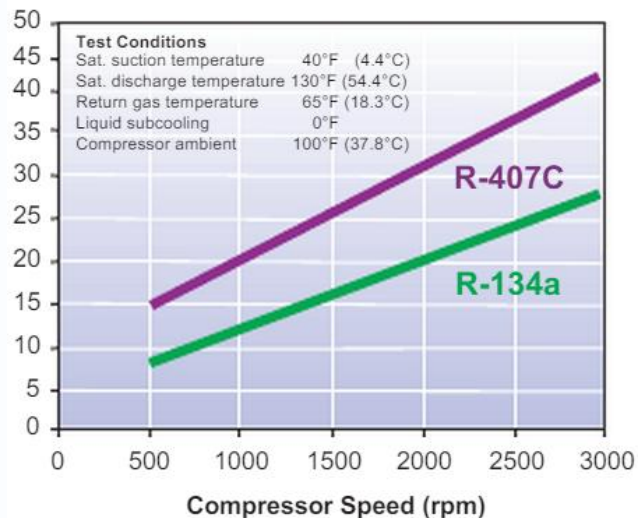
# Thermo King

## S616、S391系列螺杆压缩机

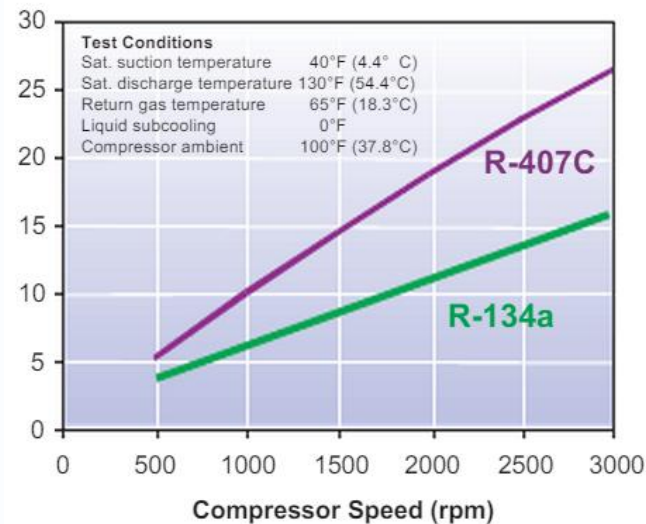
- ✓ 排气量：616cc，391cc
- ✓ 制冷剂：R407C、R134a
- ✓ 最高转速：3000 rpm
- ✓ 最高排气温度：148.9℃



Compressor Input Power vs rpm



Compressor Input Power vs rpm



# Fairchild Controls

## 54mm螺杆压缩机

- ✓ 应用场合：阿帕奇直升机等
- ✓ 振动小、可靠性好、允许吸气带液
- ✓ 工况范围宽，最高/最低转速=4.8
- ✓ 工质：R134a、R236fa、R245
- ✓ 重量：12kg、19kg



### Heli-Rotor Compressor

54mm Twin Screw

The Heli-Rotor compressor is specifically designed for military and commercial airborne applications where ruggedness is required for vibration resistance and high reliability is essential for long life. The 54mm Heli-Rotor compressor is service proven in the Apache Longbow helicopter, as well as several other rotary and fixed wing applications. Performance and efficiency remains high even when the compressor is operated at flows and pressures outside its specified design points.



# Fairchild Controls

## 30mm螺杆压缩机

- ✓ 应用场合：航空航天、国防等
- ✓ 电源：3相、400Hz、115 VAC
- ✓ 工质：R236fa
- ✓ 润滑油：POE
- ✓ 重量：7.7kg



## Heli-Rotor Compressor

30mm Twin Screw



The twin screw 30mm Heli-Rotor Compressor provides superior performance and efficient operation under extreme conditions typical for aerospace and defense environmental control system (ECS) applications.

The compressor is insensitive to refrigerant slugging and installation attitude. Precision machined rotors and moving parts enable high volumetric efficiency.



# 总结与展望

1. 新结构型式的压缩机前景尚不明确，**主流机型**仍是往复、滚动活塞、涡旋、螺杆和离心，产销量均在持续增加。各机型适用于不同的应用场合，但也不断**拓展容量和工况**范围，领地出现交错重叠。滚动活塞、涡旋容量有较大提升，离心机向小流量延伸。
2. 各类压缩机都针对**替代工质**进行了专门开发，能满足工质更替的要求。压缩机**变频驱动**的趋势非常明显，具有高效、连续等优点，机械调节容量的方式逐渐被取代。
3. 在**基础研究**方面，p-V测录和计算、CFD、FEA分析等技术广泛用于压缩机特性研究和优化设计，工作过程数学模拟可准确预测压缩机性能，三维流场、温度场、零件变形计算在设计中的作用越来越明显。
4. 在**技术开发**方面，继续追求提高机组COP等热力性能的同时，转向提高可靠性、降低生产成本等方面，**减振降噪**已成为热点之一。
5. 在**产品设计**方面，绝大多数是针对具体的应用场合与工况范围，对压缩机进行专门设计，在**细分市场**形成有竞争力的特色产品，经济器补气、多级压缩等广泛应用于热泵和冷冻冷藏领域。



---

***Thanks for Your Attention***

**欢迎批评指正！**