

目录

1	第一章：绪论	1
1.1	低温装置中常用的换热设备	1
1.2	回热器材料	1
1.3	制冷设备的研究和发展趋势	1
1.3.1	传热设备	1
1.3.2	传质设备	1
2	第二章：常用换热设备的特点	1
2.1	管壳式换热器	1
2.1.1	定义	1
2.1.2	结构形式	2
2.1.3	固定管板式	2
2.1.4	U 型管换热器	3
2.1.5	浮头式换热器	3
2.1.6	典型结构	3
2.2	绕管式换热器	4
2.2.1	定义	4
2.2.2	特点	4
2.2.3	应用	4
2.2.4	说明	5
2.3	套管式换热器	5
2.3.1	结构	5
2.3.2	特点	5
2.3.3	应用	5
2.4	翅片管式换热器	5
2.4.1	分类	5
2.4.2	特点	5
2.5	板式换热器	6
2.5.1	特点	6
2.6	椭圆管式换热器	7
2.6.1	优点	7
2.6.2	排列方式	7
2.7	扭曲椭圆管换热器	7
2.7.1	优点	7
2.7.2	纵向流	7
2.7.3	自支撑	7

3	第三章：回热器换热器的设计及计算	7
3.1	基本概念	8
3.1.1	定义	8
3.1.2	分类	8
3.1.3	应用	8
3.2	结构形式	8
3.2.1	间壁式回热器	8
3.2.2	蓄热式回热器	8
3.3	参数设计	8
3.3.1	间壁式换热器	8
3.3.2	蓄热式换热器	8
3.3.3	回热器损失	9
4	第四章：冷凝器	10
4.1	换热系数	10
4.2	水冷式冷凝器	10
4.2.1	套管式	10
4.2.2	立式管壳式冷凝器	11
4.2.3	卧式管壳式冷凝器	12
4.2.4	板式换热器	12
4.2.5	螺旋板式换热器	12
4.3	空冷式冷凝器	13
4.3.1	空冷式冷凝器的特点	13
4.3.2	微通道换热器	13
4.3.3	水和空气联合冷却式冷凝器	13
4.4	冷凝器的热工性能	13
4.4.1	制冷剂侧分析	13
4.4.2	冷却介质侧分析	14
4.4.3	冷凝器的热阻	14
4.5	选择原则	14
5	第五章：蒸发器	15
5.1	蒸发器的分类	15
5.2	满液式壳管式蒸发器	15
5.2.1	应用	15
5.2.2	注意	15
5.2.3	优缺点	16
5.2.4	回油装置	16
5.3	干式蒸发器	16
5.3.1	应用	16

5.3.2	优缺点	16
5.4	降膜式蒸发器	17
5.4.1	组成	17
5.4.2	工作原理	17
5.4.3	排气过热度与蒸发温度联动冷媒流量控制技术	17
5.4.4	与满液式区别	17
5.5	冷却空气式蒸发器	17
5.5.1	结构	17
5.5.2	应用场合	17
5.5.3	优缺点	18
5.6	微通道换热器	18
5.6.1	特点	18
5.6.2	问题	18
6	第十一章：冷却塔	18
6.1	水冷机组与风冷机组的比较	18
6.2	冷却塔的分类	18
6.2.1	大分	18
6.2.2	空调用冷却塔	19
6.3	冷却塔的结构特点	19
6.4	逆流式冷却塔	19
6.4.1	两个冷却段	19
6.4.2	优缺点	19
6.5	横流式冷却塔	20
6.5.1	优缺点	20
6.6	喷雾通风无填料冷却塔	20
6.7	封闭式冷却塔	20
6.8	能源塔	21
6.8.1	问题	21
6.9	冷却塔的其他应用	21
6.10	选择	21
6.11	设计布置及调节	22
7	节流装置	22
7.1	节流装置的分类	22
7.2	毛细管	22
7.2.1	适用范围	22
7.2.2	特点	22
7.3	节流短管，孔板	22
7.4	手动节流阀	23

7.5 热力膨胀阀与电子膨胀阀	23
8 喷射器	29
9 高热流散热	53
10 螺杆压缩机简介	92
11 工业冷冻典型系统简介	113
12 历年卷个人解析	139
12.1 2021-2023	139
12.1.1 制冷与低温设备的发展方向	139
12.1.2 散热热流超过 50w/cm2 的散热方式	139
12.1.3 设计板换全逆流	139
12.1.4 扭曲椭圆管换热器特点	139
12.1.5 根据 hd 图, 含湿量能不能表征空气干燥程度	139
12.1.6 选择换热器的结构, 实现高温高腐蚀气体与水的换热, 可画图说明	139
12.1.7 水冷机组与风冷机组的比较	140
12.1.8 螺杆式压缩机干式经济器的 ph 图, 制冷量与 cop 计算	140
12.1.9 换热量计算	141
12.1.10 蒸发制冷压缩机分为高压区和低压区的目的; 节流装置的作用	141
12.1.11 空气冷却冷凝器的制冷剂侧、空气侧、管壁热阻, 哪个是主要热阻; 热阻大的原因是什么?	143

1 第一章：绪论

1.1 低温装置中常用的换热设备

间壁式板翅式换热器：蒸发冷凝器；过冷器；液氧蒸发器；液化器；切换式换热器
直接接触式换热器：回热器；精馏塔；吸附器；储冷器。

1.2 回热器材料

- 1、聚合物：强化措施，使用聚合物基体复合材料。
- 2、金属与金属泡沫：重量轻（由约 90% 的空气组成）；-高比表面积；-高气体渗透性与高导热性相结合（用于开孔体）；-抗热冲击、高温、潮湿和热循环；-高强度和韧性，适用于高压条件；-易于控制材料形态（孔径大小和分布）；-可加工性和可焊接性允许形成复杂部件。-良好的噪音衰减
- 3. 碳，石墨：成本低
- 4. 陶瓷：高温，高压，耐腐蚀

1.3 制冷设备的研究和发展趋势

1.3.1 传热设备

- 1. 传热机理的探讨：液膜形成机理；两相流理论；气泡形成机理；结霜形成机理；场协同理论
- 2. 设备结构、材料的改进与创新：新型制冷剂的新设备；微通道换热器；加强扰动；改变换热表面状况。
- 3. 新型换热材料的研究：

1.3.2 传质设备

有填料塔取代板式塔的趋势。

	Polymers	Metals	Carbonaceous materials	Ceramics
密度 (Density)	Low to moderate	Moderate to high	Low to moderate	Moderate to high
热传导系数 (Thermal conductivity)	Low	Moderate to high	Moderate to very high	Low to high
温度 (Temperature)	Low (< C)	Moderate (500-1000°C)	Very high (< C)	High (< C)
耐化学性 (Chemical resistance)	Moderate to good	Poor to moderate	Good	Excellent
机械性 (Mechanical properties)	Poor	Good	Poor to moderate	Good (for mold)
形状与连接 (Shape and join)	Easy	Moderate	Difficult	Difficult
成本 (Cost)	Relatively Inexpensive	Moderate to High	Moderate to High	Moderate to High
主要不足 (Main weaknesses)	Lack of strength	Low corrosion and fouling resistance	Low compressive strengths and friability	Inherent brittleness

2 第二章：常用换热设备的特点

2.1 管壳式换热器

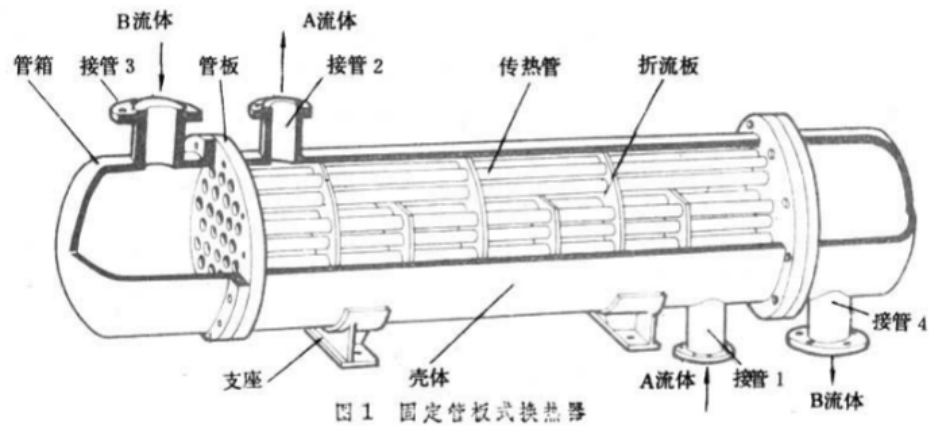
2.1.1 定义

由壳体和管束构成，冷、热流体之间通过管壁进行换热。在化工、炼油、石油化工、动力、核能和其他工业装置中得到普遍采用，特别是在高温高压和大型换热器中的应用占据绝对优势。通常的工作压力可达 4.0MPa，工作温度在 200℃ 以下，在个别情况下还可达到更高的压力和温度。一般壳体直径在 1800 毫米以下，管子长度在 9 米以下，在个别情况下也有更大或更长的

2.1.2 结构形式

- 1. 固定管板式换热器（刚性结构），单管程，双管程
- 2. U 型管换热器；浮头式（考虑冷热补偿）

2.1.3 固定管板式



为减小热应力，壳体设置膨胀节

适用范围 适当温差，壳程压力不高

特点

1. 结构简单，制造容易
2. 清洗困难
3. 温差受限
4. 要求壳程流体不易结垢

2.1.4 U 型管换热器

定义：一束管子被弯制成不同曲率半径的 U 型管，其两端固定在同一块管板上，组成管束。管板夹持在管箱法兰与壳体法兰之间，用螺栓连接。

适用范围：适用于流体温差较大；压力较高

特点：管内清洗困难；管难更换；U 型管排列数量少，换热面积小；造价较低

2.1.5 浮头式换热器

定义：管子一端固定在一块固定管板上，管板夹持在壳体法兰与管箱法兰之间，用螺栓连接；管子另一端固定在浮头管板上，浮头管板与浮头盖用螺栓连接，形成可在壳体内自由移动的浮头

适用范围：温度波动和温差大的场合

特点：管束可从壳体抽出，清洗方便，但较固定管板式结构复杂，造价高

2.1.6 典型结构

在管板上的固定：焊接；胀接

在管板上的排列：等边三角形；正方形；正方形斜转 45°；同心圆型；

三角形可排列较多，增加面积，但清洗困难，流阻大。

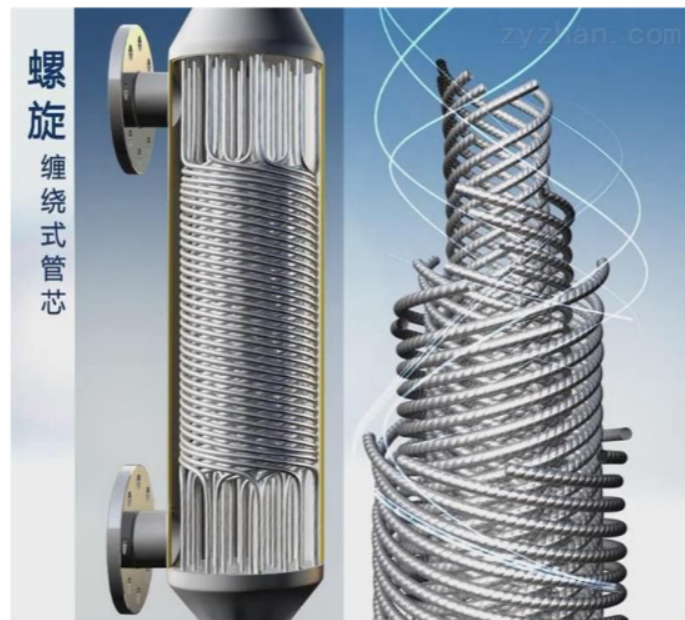
分程隔板：将换热器管程分成若干段。

纵向隔板和折流板：提高壳程流速，强化换热；固定式（圆缺形）；U 型管（圆盘形和环型）

螺旋折流板的优点：减小死区；强化换热

支撑板：防止管子下垂

2.2 绕管式换热器



2.2.1 定义

传热管分层以螺旋状盘绕在中心管上，每层有几根管子同时盘绕。• 缠绕管式换热器由绕管芯体和壳体两部分组成。绕管芯体由中心筒、换热管、垫条及管卡等组成。

所有换热管一种工质：单通道；多种工质：多通道。

传热管材料可根据压力、温度及介质的性质选定，通常采用管径 8~25mm 的钢管、不锈钢管或铜管。

中心筒：支撑作用

2.2.2 特点

1. 换热结构紧凑, 单位容积具有较大的传热面积效率高
2. 多介质传热

3. 操作压力高
4. 热膨胀自补偿
5. 易大型化

2.2.3 应用

化肥；空分；天然气液化

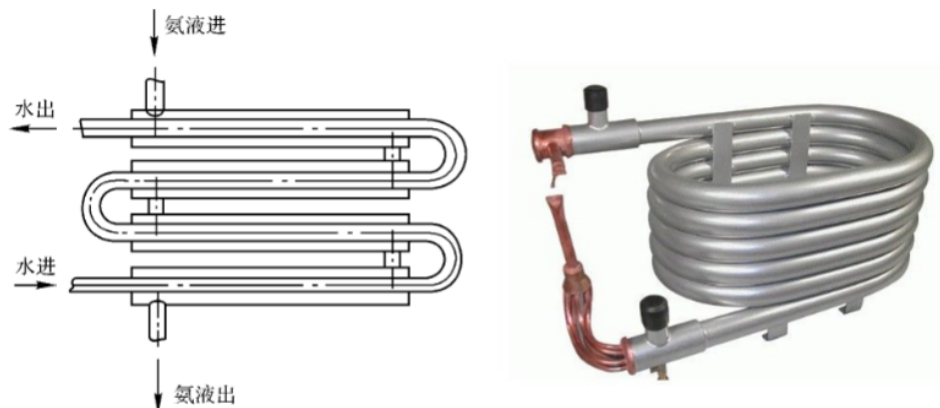
2.2.4 说明

结构复杂，价格昂贵，位置重要，有计划更换；气体液化中，绕管为套管，或滚轧翅片管。

2.3 套管式换热器

2.3.1 结构

基本部件是由直径不同的两根或多根标准管子套在一起形成的套管



2.3.2 特点

结构简单紧凑；可逆流换热
清洗困难，接头多时容易泄露，金属耗量大

2.3.3 应用

流量不大，传热面积小的场合，制冷及气体液化。

2.4 翅片管式换热器

2.4.1 分类

整体翅片管（管与翅片一体化）加工方法整体翅片管由铸造、机械加工或轧制而成优点：翅片与管子一体，无接触热阻，强度高缺点：要求翅片与管子用同一种材料

- 焊接翅片管加工方法：用钎焊或氩弧焊等方法加工
 - 机械连接翅片管接型方式：绕片管、攘片管和双金属轧片管
- 常见翅片管：绕片管；套片管；轧片管（看 PPT 图）

2.4.2 特点

传热能力强，与光管比，传热面积增加 2 10 倍，传热系数 1 2 倍
 结构紧凑，相同负荷下，所需空间小
 可合理利用材料，管道和翅片材料可根据要求选用
 造价高，翅片侧流阻大

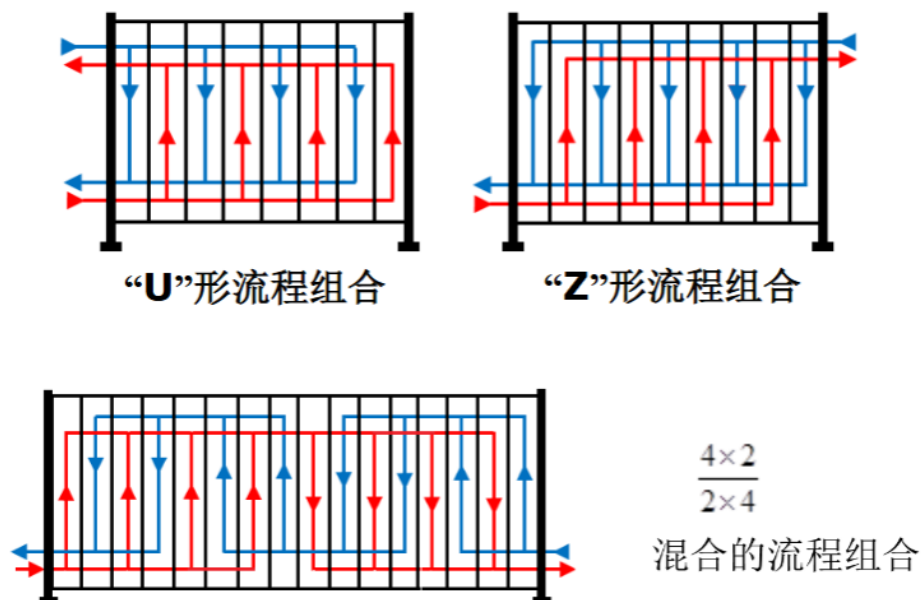
2.5 板式换热器

板式换热器的结构比较简单，它是由板片、密封垫片、固定压紧板、活动压紧板、压紧螺柱和螺母、上下导杆、前支柱等零部件组成。

板片形式：水平波纹；人字形波纹板（最广泛）；圆弧形波纹板

人字形波纹板：倾角大，放热强，但流阻大；倾角小，流阻小，但传热弱。（与竖直倾角）

流程与流道：



表示方法：

热程有相同流道的流程数乘以其流道数之和
 冷程有相同流道的流程数乘以其流道数之和

流向的选取：想要逆流，需要等程；不等程顺逆流交替出现。

2.5.1 特点

传热系数高的原因：流道中布满触点，流道狭窄，流体形成强烈湍流，破坏边界层，减小热阻；固体不易沉积，比表面积大

1. 传热系数高，传热效率高
2. 温差小，13 摄氏度，不可逆损失小
3. 热损失小，由于仅有板片边缘及周边密封垫暴露在大气中，所以热损失极小，一般为 1% 左右。不需采取保温措施。在相同换热面积情况下，板式换热器的换热损失仅为管壳式换热器的 1/5，而重量则不到管壳式的一半。
4. 结构紧凑，换热板片由薄的不锈钢板 (如厚 0.8 mm) 压制而成，板片间距一般为 4mm，板片表面的波纹大大增加了有效换热面积，这样单位容积中可容纳很大的传热面积
5. 适应性强，可根据产量及工艺要求，很方便地增加或减少传热板片，亦可将板片重新排列，改变流程组合。
6. 用途广泛，目前，已广泛应用于化工、石油、机械、冶金、电力、食品、热水供应、集中供暖等多种工程领域，完成加热、冷却、蒸发、冷凝、余热回收等工艺过程中介质间的热交换
7. 操作灵活，维修方便
8. 内容积小，需设储液器；板片间距小，易堵塞；温度过低，板间结冰冻裂。

2.6 椭圆管式换热器

2.6.1 优点

1. 流动阻力小，传热系数大，分离点后移，减小了涡旋区；
2. 前部边界层更薄

2.6.2 排列方式

1. 换热系数：叉排优于顺排；错列由于错排（沿长径为列）
2. 流动阻力：错排优于错列

2.7 扭曲椭圆管换热器

纵向流壳管式，无折流板，点接触支撑，管两端为圆截面

2.7.1 优点

1. 紧密排列，尺寸和质量小
2. 克服折流板换热器横向冲刷的振动
3. 加强了流体的横向混合，增强了流体的扰流程度

2.7.2 纵向流

减小了壳程压降

避免折流板的流动死区和结垢

增加了有效换热面积。

减小横向冲刷震动

2.7.3 自支撑

壳程流道一体化，网格化
强化纵向混合，提高换热效果

3 第三章：回热器换热器的设计及计算

不要了

3.1 基本概述

3.1.1 定义

用于能量回收的换热器。
实际效益：

1. 冷热能回收，降低能耗
2. 保证蒸汽过热，防止液滴对水泵等造成冲击
3. 梯次利用不同位能的能量，提高系统热力学效率
4. 回热式制冷机实现声功转换

3.1.2 分类

1. 间壁式回热器：冷热流体不直接接触，通过壁面传热
2. 蓄热式回热器：填充回热填料，冷热流体交替通过同一流道，与会热填料接触传热。传热系数大，传热效果好；结构简单紧凑，换热效率高
3. 混合式回热器：冷热流体直接接触，问题在于实际中收到冷热流体不能互相混和的限制

3.1.3 应用

制冷系统，空调系统；空气分离系统；斯特林制冷机，余热回收；深冷制冷循环

3.2 结构形式

3.2.1 间壁式回热器

板式；管壳式；

3.2.2 蓄热式回热器

填料材质：石头；铝；铜；不锈钢；磁性材料
填料形状：球状；块状；丝网状，带状；丝球状

3.3 参数设计

3.3.1 间壁式换热器

传热单元数法；LTMD 法（放弃了）

3.3.2 蓄热式换热器

1. 导热率：径向导热大，轴向导热小
2. 比热容：越大越好。德拜比热容理论：温度远低于德拜温度时，比热容与温度立方成正比，选德拜温度低的材料，金属中铅最低。
3. 孔隙率：材料空体积与总体积之比，小了流阻大，大了回热效果差
4. 比表面积：总传热面积与总体积之比，越大越好
5. 水力半径：孔隙率与比表面积之比，大于粘性渗透深度，小于热渗透深度。

选取原则：

3 参数设计>>蓄热式

3.2.2 填料选取原则

应具有大的比表面积和大的容积比热容，使得回热器在相同的传热工况下具有较小的尺寸；

- 要耐磨损、不易破碎、在经受剧烈的温度变化时不易破裂；
- 填料的流动阻力应比较小，价廉易得。

对于回热式低温制冷机：

- 77-300 K时用铜、磷青铜、不锈钢等材料，拉制成直径为0.015-0.04mm的金属丝，制成堆积丝绒状填料或者的丝网叠层填料。
- 20-77 K用200~400目的不锈钢丝网叠层填料或直径为0.08-0.20mm的铅丸堆层填料。有时将两者分段合用：高温段用不锈钢丝网，低温段用铅丸，因为低温时铅的比热容大于不锈钢。
- 20 K以下一般采用铅丸、硫化铕（EuS）、钆铈系合金（GdRh）、活性炭、金属吸附材料以及最新发展的磁性蓄冷材料。

300 K

77 K

20 K

25

3.3.3 回热器损失

1. 有限传热损失：换热面积有限和换热系数有限，造成传热温差，形成换热的不可逆性；增大换热面积，换热器长度
2. 填料温度波动损失：冷热气流之间的平均温差比有效传热温差大，增加传热的不可逆性；措施增大材料比热
3. 流动压降损失：摩擦压降损失
4. 壁效应损失：填料与壁面温差不可逆换热损失，填料蓄冷能力降低；采用导热系数比容小的非金属材料壁面。

5. 偏离理想气体损失：工质非理想气体，氨低温时也偏离理想气体。
6. 轴向导热损失和空容积损失：长轴温度梯度；存在死容积。
7. 气流入口温度变化对损失的影响。尚待研究的课题。

注意事项：无阀回热器，长径小，有限换热损失，流动压降损失，壁效应损失，轴向导热损失占比大；阀切换式流动压降损失大。

温度低于 77K 时，填料温度波动损失不可忽略；20K 以下，偏离理想气体不可忽略。

4 第四章：冷凝器

4.1 换热系数

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}}$$

当最大温差与最小温差之比小于二时，可以用算数平均温差代替对数平均温差。

冷凝器：换热系数

在工程上，为了简化计算，通常把以上复杂的热传递过程用一个总传热系数来表示，用 K 来表示。当传热面为圆管形状时，常常以外传热表面为基准面，总传热系数的计算式为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + R_{so} + \frac{bd_0}{\lambda d_m} + R_{si} + \frac{d_0}{d_i} \frac{1}{\alpha_i}} \quad (8-1)$$

式中 α_i 、 α_0 ——传热面内、外两侧流体的表面传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$];
 d_i 、 d_0 ——管子的内、外径 (m);
 b ——管子壁厚 (m);
 λ ——传热面材料的热导率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$];
 R_{si} 、 R_{so} ——管子内、外壁污垢热阻 [$\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$];
 d_m ——管子中间面直径 (m)。

- 铜、水、空气的热导率 λ 分别是：383.79 W/(m·K)，0.599 W/(m·K)，0.0244 W/(m·K);
- 静止/流动气体和液体的换热系数 α 分别是：4-20/10-500 W/(m²·K)，70-300/200-1000 W/(m²·K)；
- 冷凝面/蒸发面 R12 的换热系数 α 是 1600/1700 W/(m²·K)。

影响冷凝换热的主要影响因素：

1. 制冷剂的凝结方式：蒸汽中不凝性气体的含量；减少制冷剂中的含油率。

4.2 水冷式冷凝器

主要特点 > 冷凝温度低

- > 换热系数大：相同换热面积和传热温差下的排热量大
- > 能效比高
- > 多用于大、中型制冷机组，但要求有相应的冷却水源

冷却水来源 冷却塔；地下水；地表水

4.2.1 套管式

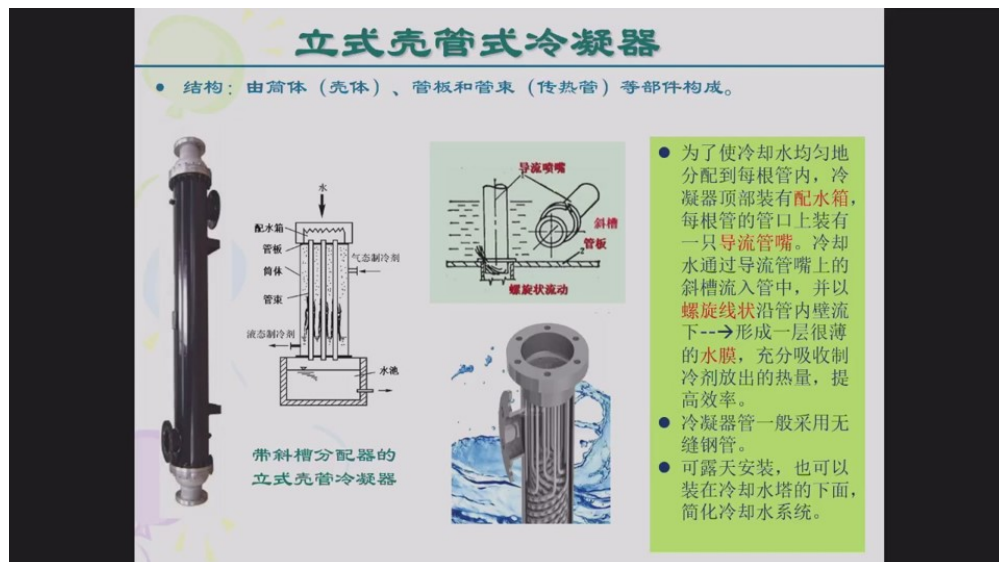
多管束套管式换热器：

1. 内部多管管束，有利于提高流速，增大换热面积
2. 内管走制冷剂，采用分液头使其均匀
3. 采用麻花状内管束，加强扰动，增大传热系数，提高管束强度。

优缺点 优点：传热系数较高（970-1290），结构简单，易制造

缺点：金属耗量大，冷却水流动阻力大。适用于小型氟利昂。

4.2.2 立式管壳式冷凝器



结构：筒体，管板管束

为了使冷却水均匀地分配到每根管内，冷凝器顶部装有配水箱，每根管的管口上装有一只导流管嘴。冷却水通过导流管嘴上的斜槽流入管中，并以螺旋线状沿管内壁流下 - → 形成一层很薄的水膜，充分吸收制冷剂放出的热量，提高效率。冷凝器管一般采用无缝钢管。可露天安装，也可以装在冷却水塔的下面，简化冷却水系统。

优缺点 优点：1. 冷却流量大，流速高，传热系数较高（600-700）

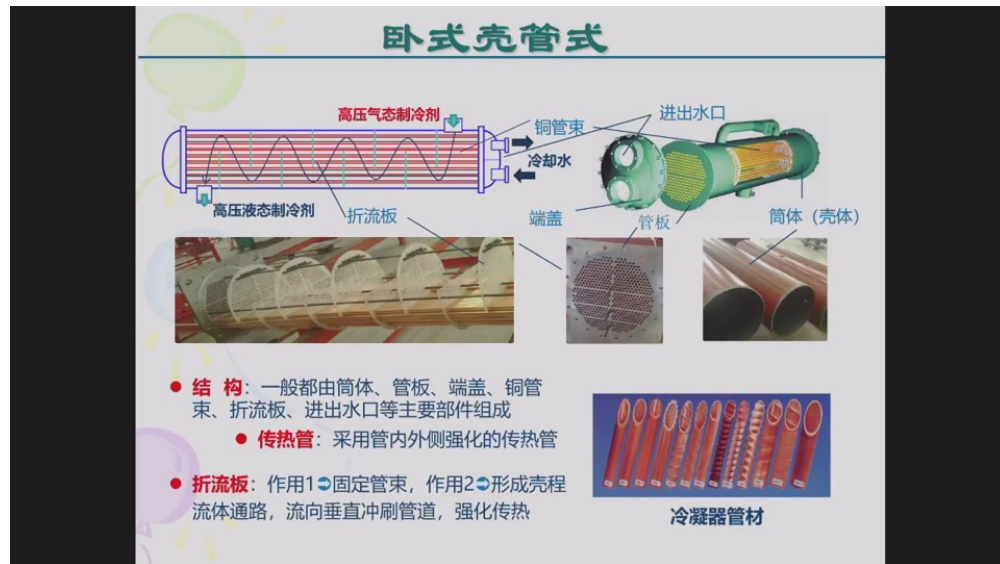
2. 占地面积小，可露天安装
3. 冷却水直通流动，对水质要求低
4. 运行中清洗
5. 置于空气中，泄露易发现。

不足：

1. 传热系数比卧式管壳式低；重力顺流，制冷剂液膜厚。
2. 体积大，易结垢，需要经常清洁。
3. 水温升小，耗水量大
4. 操作不方便，需高台。

适用于大中型氨制冷装置

4.2.3 卧式管壳式冷凝器



制冷剂走壳程，冷却水走管程，冷却水从下向上流动，制冷剂从上向下流动，冷却水与制冷剂交换热量。壳程阻力小

优缺点 优点：

结构紧凑，体积比立式小。

传热系数比立式大

出口温差大，耗水量小

室内布置，操作不方便

缺点：对水质要求高

清洗不方便，需要停止运行

冷却水流动阻力大

制冷剂泄漏不易被发现

适用大中型氨与氟利昂制冷装置

4.2.4 板式换热器

如第二章所述。

4.2.5 螺旋板式换热器

优点：螺旋板式结构紧凑，比表面积大
流速高，滞留层薄，传热系数大
流速大，脏物不易滞留
缺点：焊接质量要求高，检修困难
重量大，刚性差，运输安装需注意

4.3 空冷式冷凝器

4.3.1 空冷式冷凝器的特点

优点：
不需要冷却水，节约
露天布置，节省面积

缺点：
传热系数小
气温高时，冷凝压力高
管外有翅片清洗不便
中小型氟利昂制冷，用于干燥地区或运输式制冷装置

4.3.2 微通道换热器

特点：
全铝结构，节约铜材，换热系数大
翅片结构易积灰
只能做冷凝器，除霜问题难以解决。

4.3.3 水和空气联合冷却式冷凝器

吸风式：形成负压，水蒸气的蒸发温度降低，但带有水滴的湿热空气损害风机；鼓风式则相反。
淋水式：和闭式冷却塔很像。
优点：
耗水量小
室外布置，节省面积
冷凝面积小，经济性好
缺点：造价高、维护困难

4.4 冷凝器的热工性能

传热过程：降低过热、冷凝、再冷
80% 以上的负荷在冷凝段，冷凝段温度略有下降，因为存在流动阻力。

4.4.1 制冷剂侧分析

1. 凝结形式：珠状；膜状
2. 冷凝壁面表面状态：粗糙液膜变厚，传热系数下降
3. 氨冷凝器会沉积润滑油膜
4. 不凝性气体：含有不凝性气体，冷凝温度升高；占据换热空间，换热系数下降。

4.4.2 冷却介质侧分析

1. 流速：流速大，换热强，不易结垢，但流阻大，过大造成冲刷腐蚀；流速小，泵与风机能耗小，换热系数低。
2. 故存在最佳流速：水：**1-1.5m/s**（氟利昂）；空气：**2-4m/s**（再大不起作用，增加能耗及噪音）
3. 传热面结垢：水冷式蒸发式：水垢、锈狗；风冷式：灰尘，锈蚀

4.4.3 冷凝器的热阻

冷凝器：换热系数

在工程上，为了简化计算，通常把以上复杂的热传递过程用一个总传热系数来表示，用 K 来表示。当传热面为圆管形状时，常常以外传热表面为基准面，总传热系数的计算式为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + R_{so} + \frac{bd_0}{\lambda d_m} + R_{si} + \frac{d_0}{d_i} \frac{1}{\alpha_i}} \quad (8-1)$$

式中 α_i 、 α_0 ——传热面内、外两侧流体的表面传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$];
 d_i 、 d_0 ——管子的内、外径 (m);
 b ——管子壁厚 (m);
 λ ——传热面材料的热导率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$];
 R_{si} 、 R_{so} ——管子内、外壁污垢热阻 [$\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$];
 d_m ——管子中间面直径 (m)。

- 铜、水、空气的热导率 λ 分别是：**383.79 W/(m·K)**，**0.599 W/(m·K)**，**0.0244 W/(m·K)**;
- 静止/流动气体和液体的换热系数 α 分别是：**4-20/10-500 W/(m²·K)**，**70-300/200-1000 W/(m²·K)**;
- 冷凝面/蒸发面 R12 的换热系数 α 是 **1600/1700 W/(m²·K)**。

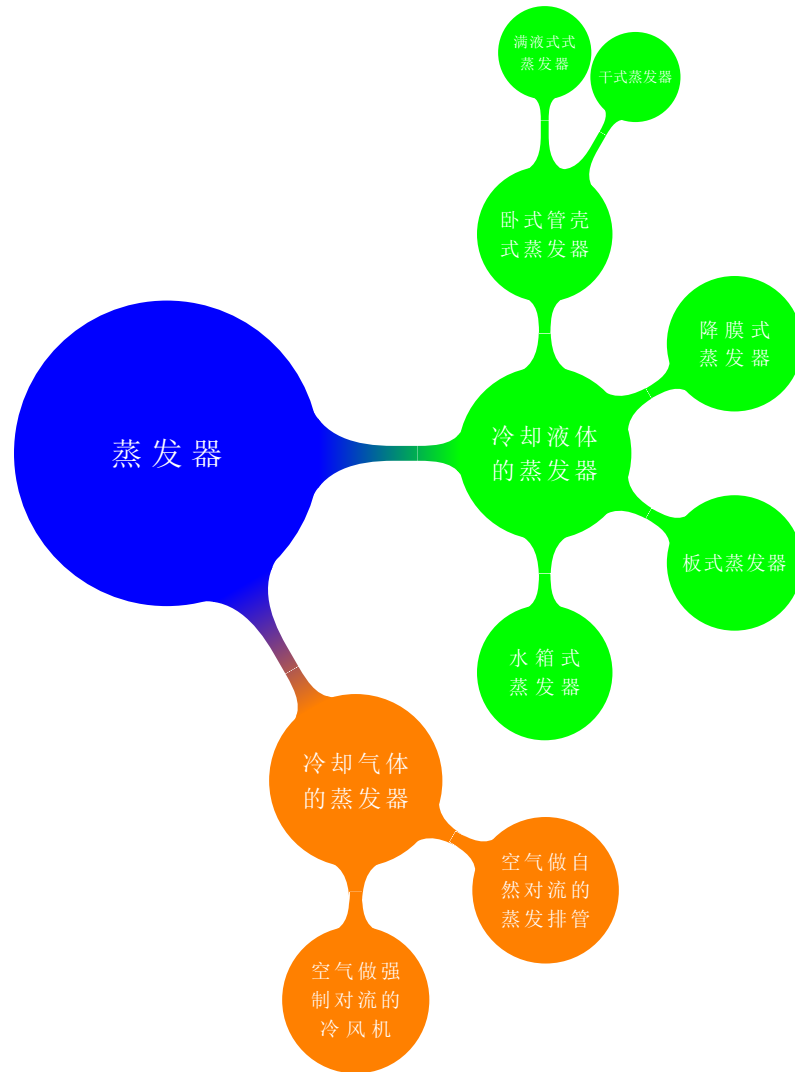
4.5 选择原则

1. 冷凝面积满足最大负荷，并有余粮
2. 台数与压缩机数对应，不宜过多，不用备用
3. 立式冷凝器：水质差，水资源丰富，氨系统
4. 卧式：水质较好，水温较低；氨和氟利昂均适用
5. 蒸发式：水资源短缺干燥地区

6. 风冷式：水资源短缺干燥地区。中小型氟利昂系统
7. 冷却水循环使用时，立式卧式均可
8. 从设备维护角度：蒸发式最高

5 第五章：蒸发器

5.1 蒸发器的分类



5.2 满液式壳管式蒸发器

5.2.1 应用

与卧式冷凝器相似，常用于空调制冷装置，冷却水或盐水，广泛应用于大中型氨氟利昂冷水机组。

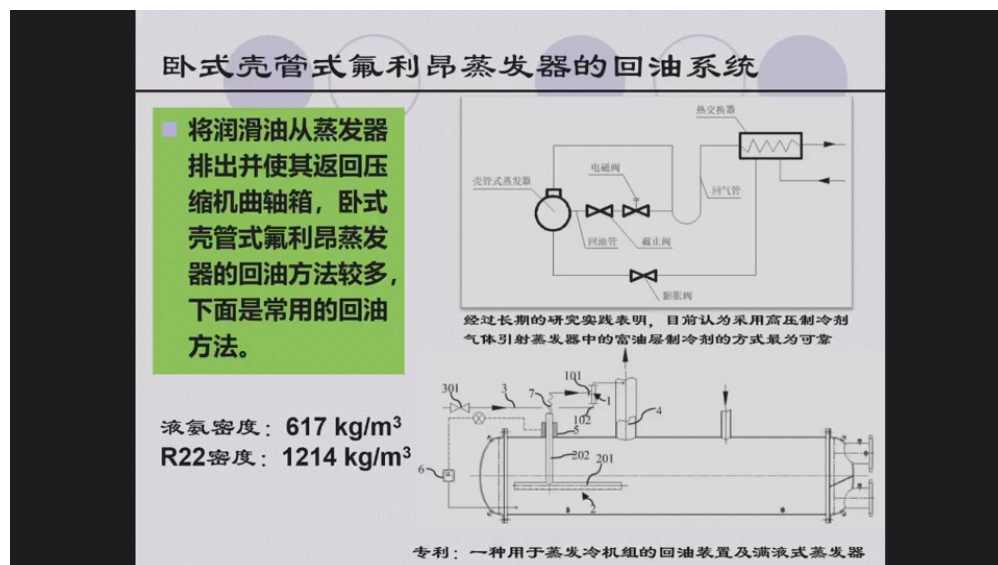
5.2.2 注意

1. 制冷剂汽化使液面升高，在充注制冷剂时应留有空间；
2. 氨70-80%；氟利昂55-65%
3. 采用电子膨胀阀或浮球阀精准控制液位；过热度小，设挡液板防止回液；
4. 管子内走水，严格控制管侧水的出水温度和流量，防止冻结

5.2.3 优缺点

1. 结构紧凑，金属消耗量少；工艺简单，造价低；传热性能好，管理方便；
2. 蒸发压力低时，净液柱使底部温度升高，传热温差减小
3. 与制冷剂相溶的润滑油难以回油
4. 制冷剂充灌量大
5. 液面摇摆易液击冲缸

5.2.4 回油装置



5.3 干式蒸发器

5.3.1 应用

制冷剂在管内一次完全汽化的蒸发器，管内蒸发

用途：常用于冷库，以直接对库房进行冷却，也有用于制冷冰的，此时蒸发器放在盐水箱内，先用制冷剂冷却盐水，再通过盐水制冰。

传热管有两种形式：U 型管和直的光管或内翅片管。

为了提高载冷剂的流速, 在壳体内装有多块折流板。

制冷剂在端盖内转向时会出现气液分层现象, 影响制冷剂在下一流程的均匀分配

5.3.2 优缺点

1. 使用与润滑油相溶的制冷剂时, 回油简单
2. 制冷剂充注量少
3. 液体分配不均, 影响换热效率
4. 部分负荷运行易跑油
5. 水侧清洗不便; 水侧短路

5.4 降膜式蒸发器

5.4.1 组成

液体分布器; 蒸发管束; 回油系统和排气系统

5.4.2 工作原理

工作原理: 流过膨胀阀的含油制冷剂液体通过进液管道进入布液器, 通过布液器布液后在蒸发管束上形成液膜, 同流经管内的冷媒介质如水等进行热交换, 在一定的蒸发温度下大部分制冷剂蒸发变为制冷剂蒸气由排气通道排出, 未蒸发的制冷剂液体和油沉积到蒸发器的底部, 由泵送至压缩机的进油口, 制冷剂蒸气由排气通道回到压缩机的吸气端, 完成一个工作循环。布液器性能直接决定着降膜蒸发器的传热系数, 是关键技术之一

5.4.3 排气过热度与蒸发温度联动冷媒流量控制技术

技术难点:

1. 开度太小冷媒供液不够, 太大造成热气旁通
2. 吸气过热度控制: 换热效率下降, 排气温度过高影响可靠性、性能过热度调节范围过窄, 可操作性差
3. 排气过热度控制易产生低压保护无法正常工作。

5.4.4 与满液式区别

减小净液柱压力影响; 流动沸腾。液膜厚度小, 传热效率高; 属于小温差, 但要防止结垢。

5.5 冷却空气式蒸发器

5.5.1 结构

1. 翅片管式换热器, 进液管多采用分液头
2. 根据场合采用不同风机

5.5.2 应用场合

家用空调器
单元式空气调节机组
多联式空调 (热泵) 机组
直接膨胀式组合式空调机组
冷库制冷系统

5.5.3 优缺点

直接膨胀式蒸发器, 换热环节少, 蒸发温度高
多为湿工况 (水蒸气冷凝), 换热系数比风冷式冷凝器高
在低温工况下运行时, 换热器表面会结霜, 热阻增加、风量减小, 必须进行除霜, 这是目前在空气源热泵中最为重要的问题

5.6 微通道换热器

5.6.1 特点

1. 设计紧凑, 重量轻, 可回收
2. 制冷剂充注量少
3. 传热面积大, 热阻小, 效率高
4. 耐腐蚀

5.6.2 问题

1. 制冷及分配不均, 受多种因素影响
2. 凝结水不易排出
3. 结霜快, 除霜时间长
4. 空气侧气流组织不均匀, 削弱换热器性能

6 第十一章: 冷却塔

6.1 水冷机组与风冷机组的比较

1. 水冷机组冷凝温度更低, 水冷机组 40°C , 风冷机组 $50\text{-}55^{\circ}\text{C}$
2. 水的比热容大, 有更小的换热温差
3. 水侧热阻更小, 传热系数更大, 换热面积小, 成本低

6.2 冷却塔的分类

6.2.1 大分

1. 依据通风方式：自然通风式；机械通风式；混合通风式
2. 依据冷却水与空气接触方式方式：湿式；干式；湿干式
3. 依据冷却水与空气的流动方式：逆流；横流；混合流

6.2.2 空调用冷却塔

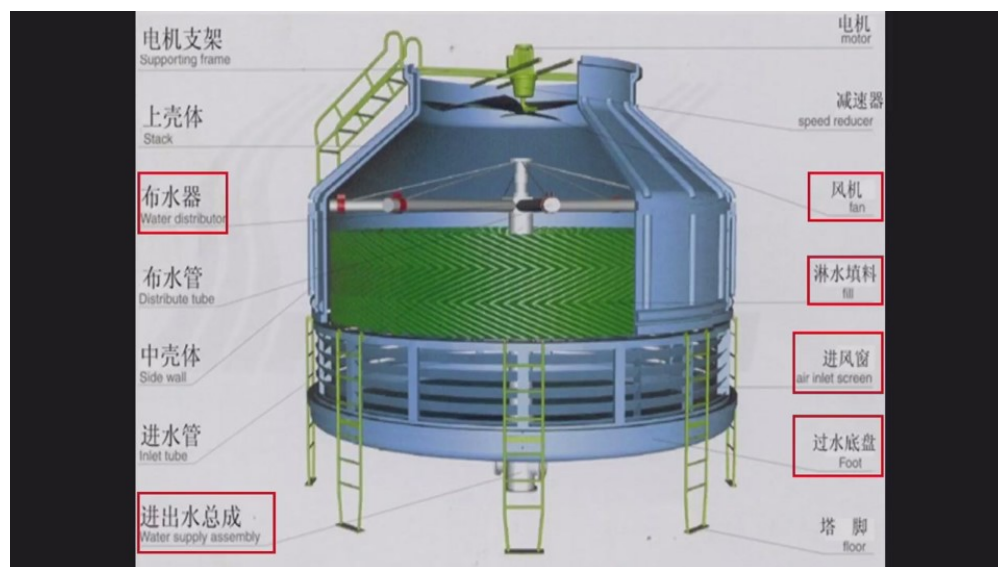
1. 开式冷却塔：冷却水与空气直接接触；逆流塔；横流塔；喷雾通风无填料冷却塔。
2. 封闭式冷却塔：冷却水与空气通过热交换器间接接触
3. 能源塔。

6.3 冷却塔的结构特点

1. 塔体；风机；配水；淋水；收水部分
2. 下塔体可做储水用，储水量不大。

6.4 逆流式冷却塔

水自上而下；空气自下而上。



6.4.1 两个冷却段

填料热交换段：主要换热段

填料至集水池淋水段：尾效

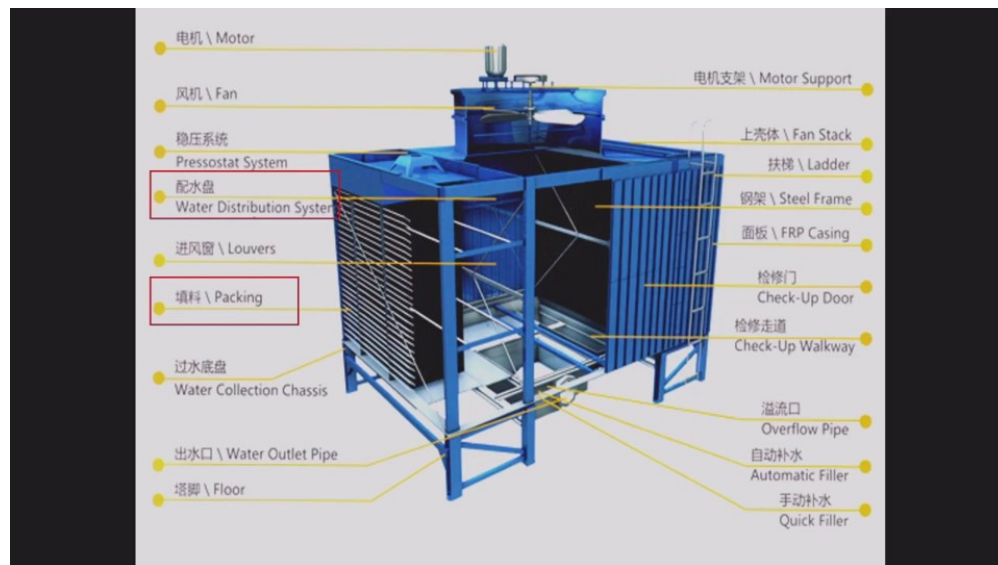
6.4.2 优缺点

1. 冷却效果好，冷却温差大，价格低
2. 施工检修安装容易，费用低
3. 与横流塔相同情况下，填料体积小，换热过程更合理
4. 圆形逆流冷却塔旋转机构复杂，易出现故障，要求水压高
5. 噪声大，主要是淋水声
6. 圆形无法组合，占地面积大

工业空调及工艺冷却循环水

6.5 横流式冷却塔

水在填料内自上而下；空气自侧面进入，两者流向垂直正交。用在噪声要求严格的居民区。喷淋面积小，单位面积喷水量大，喷头压力小。



6.5.1 优缺点

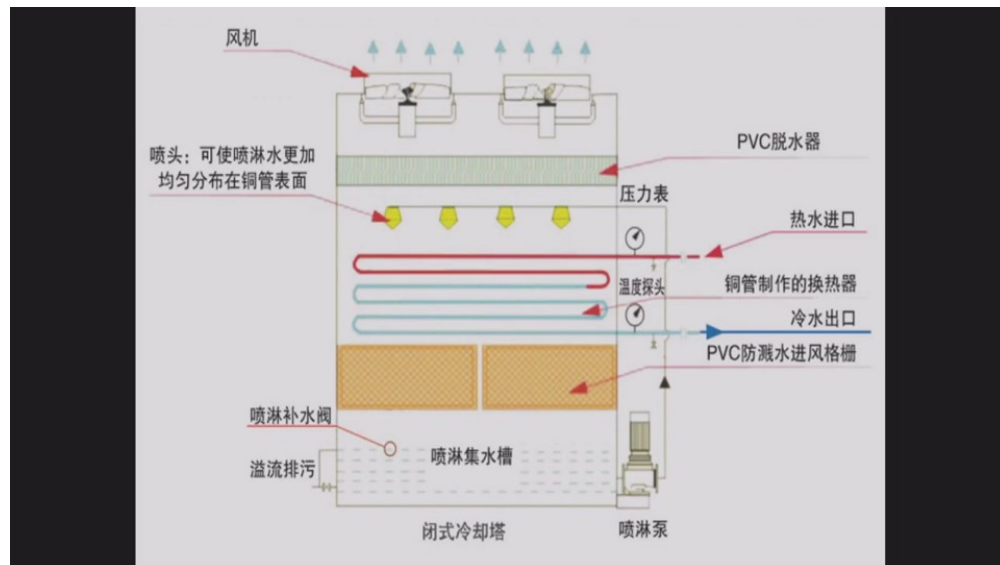
1. 噪声小，无滴水噪声且风噪小
2. 节能，水压要求低，风阻小
3. 检修方便
4. 紧凑放置，占地面积小
5. 造价高

6.6 喷雾通风无填料冷却塔

略

6.7 封闭式冷却塔

工艺流体在管内流，空气在管外流，蓄水池的水经循环水泵抽取均匀喷淋。



适用于对循环水质要求高的场合；适用于过渡季节直接冷却室内侧空调冷水缺点：造假高；硬水结垢。

6.8 能源塔

夏季水冷，冬季汲取低品位热。

冬季运行，来自热泵蒸发器的低温循环溶液从高效换热器上部进入，底部流出，出液温度低于环境温度 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，效率高于空气源热泵。核心技术，溶液浓缩：将稀释的防冻液浓缩，使冰点下降。

6.8.1 问题

1. 载冷剂腐蚀
2. 溶液飘逸对环境的影响
3. 溶液性能不稳定
4. 根据季节更换溶液，麻烦

6.9 冷却塔的其他应用

冷却塔直接供冷：湿球温度低的干旱地区

6.10 选择

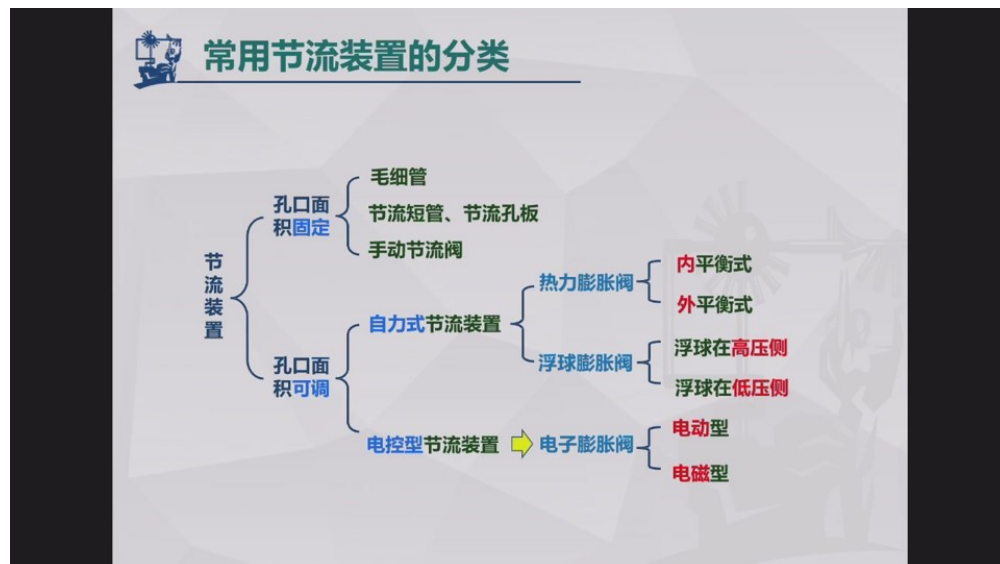
1. 逼近度小于 4°C ，选逆流式
2. 逼近度大于 4°C ，选横流式或逆流式
3. 冷却水流量变化大，选横流式
4. 不考虑备用
5. 冷却塔水流量 = 冷却系统水流量
6. 根据性能表矫正

6.11 设计布置及调节

略

7 节流装置

7.1 节流装置的分类



7.2 毛细管

7.2.1 适用范围

工况稳定或小系统

大容量与其他节流设备并联，降低成本

7.2.2 特点

1. 调节性能差，取决于结构参数和状态参数
2. 出口压力与背压有关。
3. 相变转换点存在延时闪发现象
4. 停机后，压力较快平衡，减轻启停负荷，但造成启停损失。

7.3 节流短管，孔板

防震性能优于毛细管

7.4 手动节流阀

人工调节，无流量反馈；
负载变化不大，流量稳定场合
试验系统的节流机构。

7.5 热力膨胀阀与电子膨胀阀

在接下来的部分，我们将讨论由[\[潘文豪老师\]](#)编写的关于热力膨胀阀与电磁膨胀阀的详细分析。详细内容见下文所示的文档。

热力膨胀阀 / 电磁膨胀阀

文豪 潘文豪 | 昨天创建

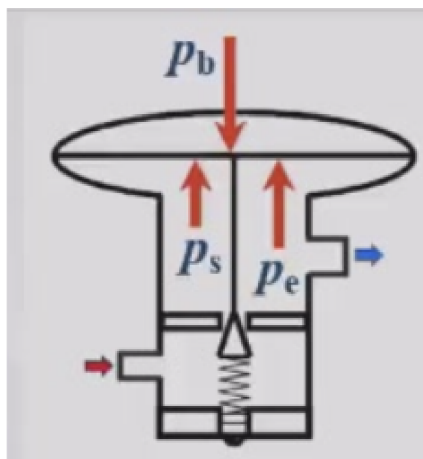
热力膨胀阀

结构与特点

- 结构
 - 热力头：感温包、毛细管、动力头（膜片 / 波纹管）
 - 阀件：节流孔、阀杆、阀芯、阀座
 - 过热度调整机构
 - 阀体
- 特点：以蒸发器出口处制冷剂的过热度为信号，来调节供液量

工作原理

力平衡原理



开阀力 = 关阀力，即

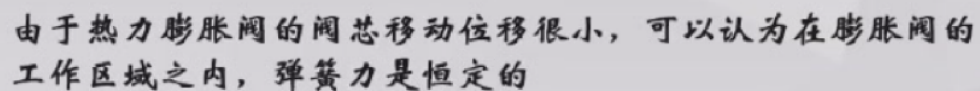
$$p_b = p_s + p_e$$

p_b ：感温包内压力，反应蒸发温度和蒸发器出口过热度

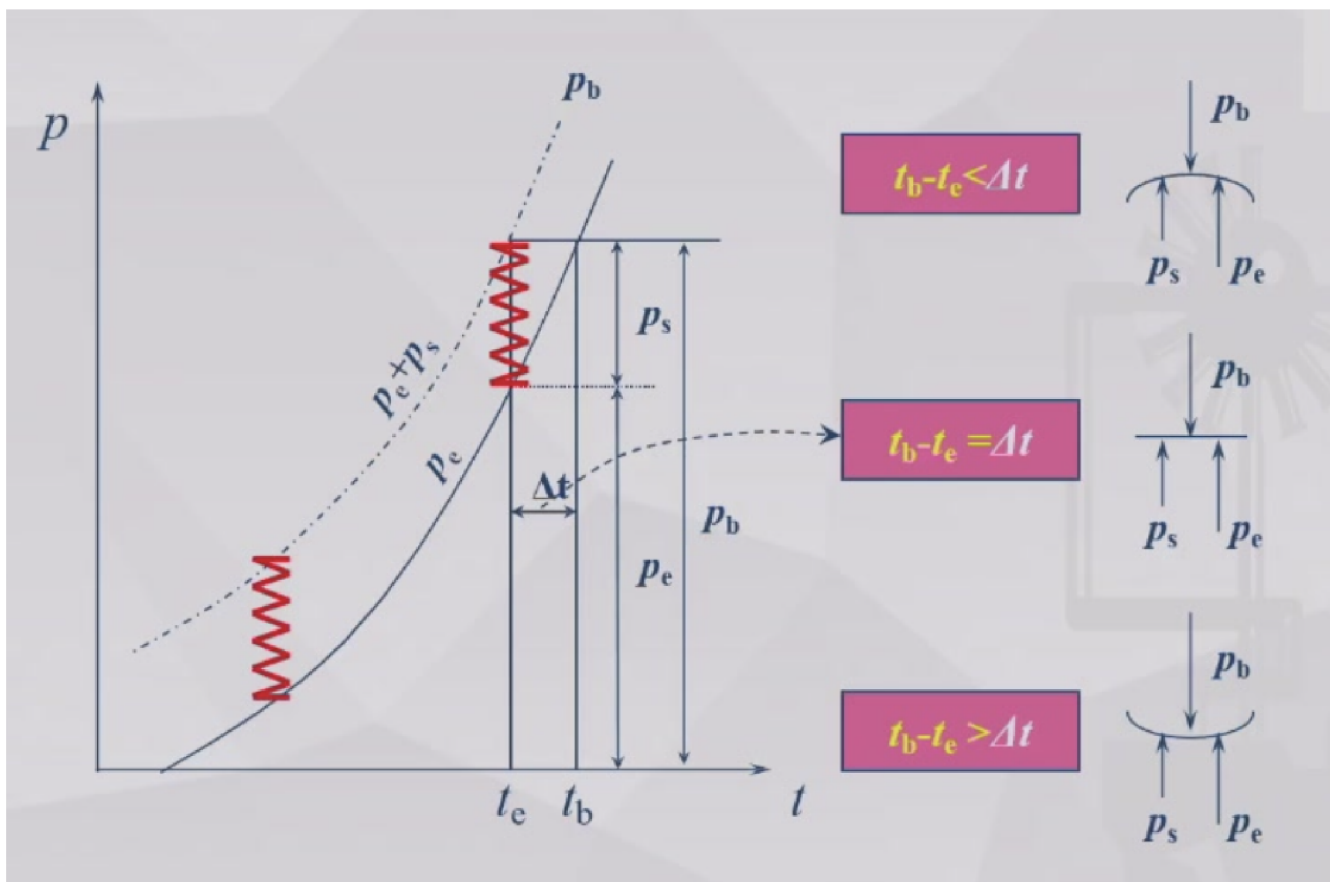
p_s ：弹簧弹力，视为定值

p_e ：节流后制冷剂压力

饱和温度与饱和压力曲线



负反馈原理



若过热度大于设定值，则膜片向下移动，阀开度减小；若过热度小于设定值，则膜片向上移动，阀开度增大。因此可以实现负反馈调节。

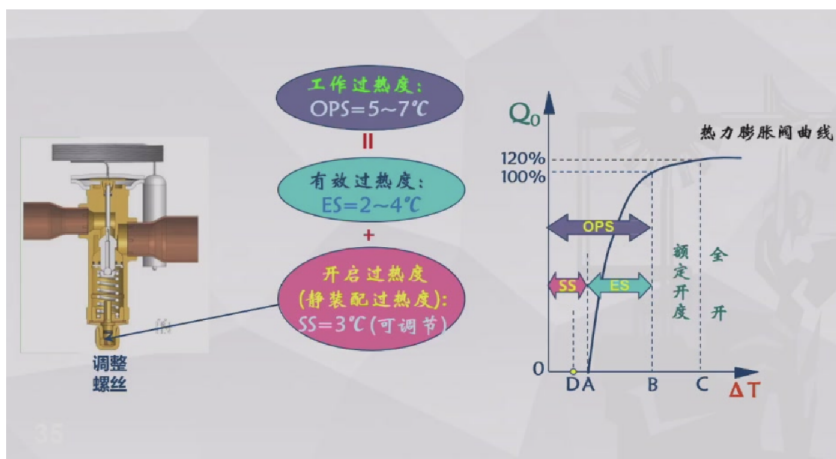
内平衡/外平衡

由于实际蒸发器中存在流动压力损失，蒸发器入口压力与出口压力不相等，若采用内平衡式膨胀阀，会导致表观过热度相比于实际过热度偏小。（上面饱和温度 - 饱和压力图中蒸发器出口压力下降，蓝线向左移动，出口压力对应饱和温度减小）

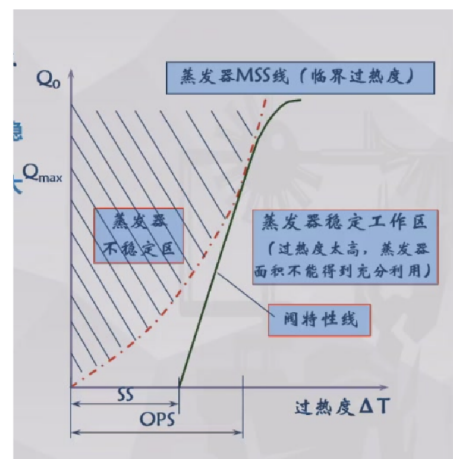
- 内平衡式
 - 成本低
 - 存在调节误差
 - 适用于阻力较小的蒸发器
- 外平衡式
 - 原理：在膜片下方隔出一个平衡压力腔，将节流后的制冷剂与膜片下部的联系断开。用外平衡引管，把蒸发器出口的压力直接引入平衡压力腔，作用于膜片下部。
 - 优缺点：成本高，控制误差小；适用于沿程阻力比较大的蒸发器

性能曲线

- 调节特性：工作过热度 = 有效过热度 + 开启过热度



热力膨胀阀性能曲线



热力膨胀阀性能曲线 / 蒸发器MSS线

选择阀门时，阀门的工作性能曲线应根据蒸发器的临界过热度曲线（MSS线）确定（二者相切，使其工作性能最佳）

安装要点

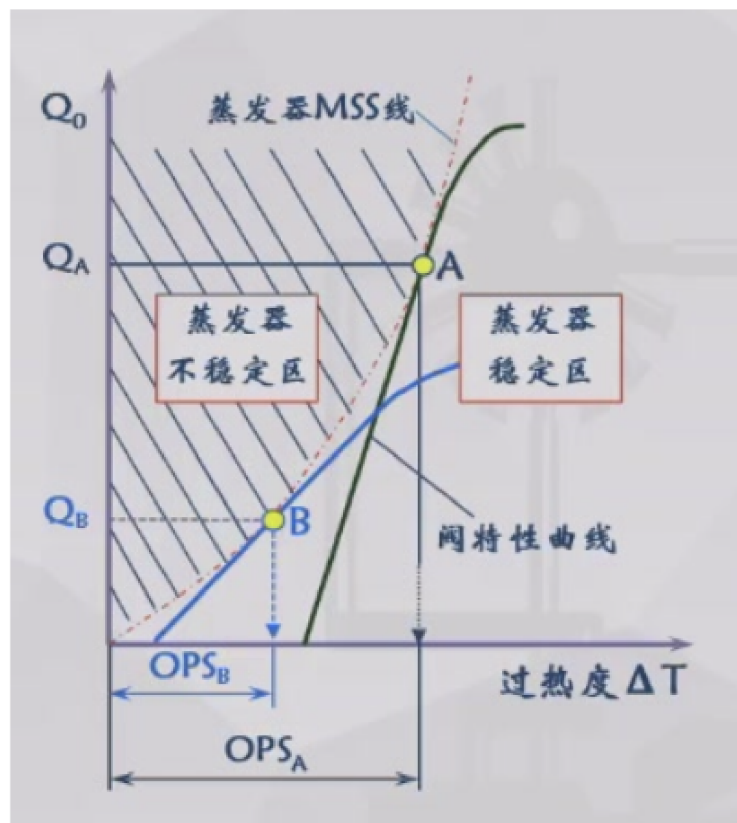
- 阀体：必须竖直安装，不能倾斜，更不能颠倒
- 平衡管：必须设置在感温包后的吸气管顶部，避免被润滑油堵塞
- 感温包：应安装在压缩机出口与蒸发器吸气口之间的水平吸气管壁上，并确保紧密贴合，以减小时间滞后
- 备注
 - 热力膨胀阀应设置在液分离器、回油弯之前，以反应蒸发器真实的过热度
 - 感温包不能受其他热源（空气、风扇电机、液体管）的影响，应做保温措施
 - 当感温包无法安装在水平管段时，不得不选择垂直管段时，必须注意感温包的安装方向，应使毛细管从上方插入感温包中，而不能倾倒

电子膨胀阀

分类

- 电动式：调节速度比较慢，但一旦调节完成，可以断电工作
- 电磁式：调节速度很快，但需要始终通电才能运行

性能



- 相比于热力膨胀阀，电磁膨胀阀的工作性能曲线可调节，可适应的范围更广，能实现针对 MSS 曲线的跟随控制，提高调控性能。
- 热惯性小，可实现实时的前馈与反馈控制，改善和提高系统的性能，但相应的控制难度也较大。

8 喷射器

历史



- 喷射器是一种利用高压流体抽吸低压流体的流体混合设备
- 在制冷系统中，其可**利用低品位热能或余压参与驱动循环，起到节能减排的作用**
- 优点：**不直接消耗机械能、结构简单、没有运动部件、运转费用低廉、操作维修方便**
- 优点：对被抽介质无严格要求，适用有毒性、易燃易爆、腐蚀性强乃至可燃性气体等
- 在国内外得到了广泛应用和研究。

PART
02

原理

气体在喷管的流动过程可视为**可逆的稳定绝热过程**。

连续性方程的微分形式为: $\frac{dA}{A} + \frac{dc}{c} - \frac{dv}{v} = 0$

过程方程式的微分形式为: $\frac{dp}{p} + k \frac{dv}{v} = 0$

能量方程的微分形式为: $dh + \frac{1}{2} dc^2 = 0$

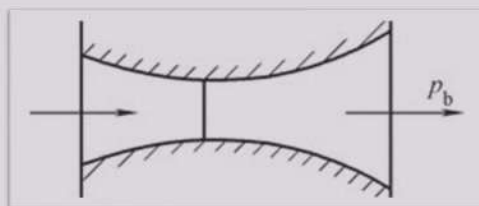
对于稳定流动定熵过程有: $dh = v dp$

将上式联立后可得: $c dc = -v dp$

进一步变形后: $\frac{dc}{c} = -\frac{kpv}{kc^2} \cdot \frac{dp}{p}$

引入声速 $a = \sqrt{kpv}$ 和**马赫数** $Ma = \frac{c}{a}$ 可得: $kMa^2 \frac{dc}{c} = -\frac{dp}{p}$

最终得到喷管截面积和速度之间的变化关系: $\frac{dA}{A} = (Ma^2 - 1) \frac{dc}{c}$

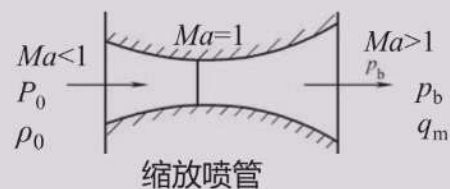
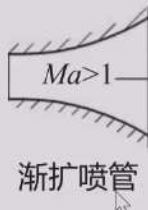


由式 $\frac{dA}{A} = (Ma^2 - 1) \frac{dc}{c}$

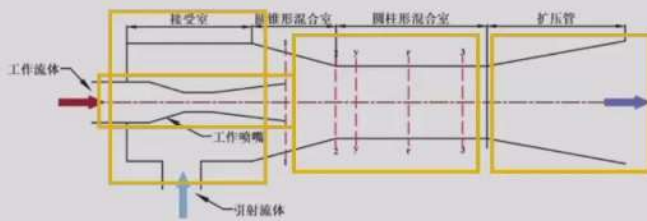
当气流处于亚声速时，加速气流必须采用渐缩喷管。

当气流处于超声速时，加速气流必须采用渐扩喷管。

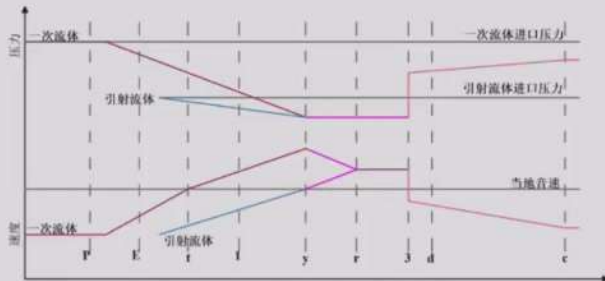
显然如果要使气流从亚声速加速到超声速，则应采用先缩后放的缩放喷管（拉伐尔喷管）。



拉伐尔喷管的质量流量公式为：
$$q_m = A \rho_0 \left(\frac{p_b}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p_b}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$



喷射器结构



内部流体压力、速度变化

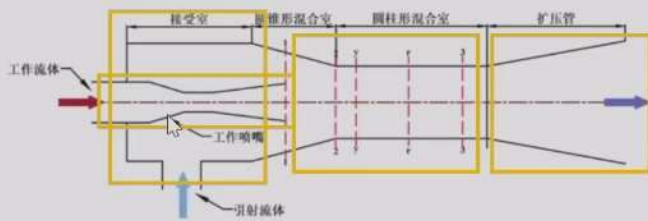
喷射器的工作过程大体可分为四个阶段：

(1) **主喷嘴**：高压的工作流体进入工作流体喷嘴，速度升高，压力降低，在工作流体喷嘴出口处形成低压；

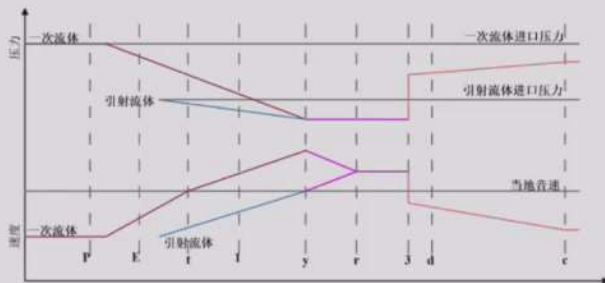
(2) **接受室**：接受室与引射流体之间存在压差，引射流体进入接受室；

(3) **混合室**：高速的工作流体与低速的引射流体在混合室内发生动量和能量的传递，速度逐渐均匀。若混合流体的速度超过音速，在混合室内会发生激波现象，混合流体的速度急剧降低，压力急剧升高；

(4) **扩压管**：混合流体进入扩压管，速度进一步降低，动能转化为压力能，压力进一步升高，在背压压力下排出喷射器。



喷射器结构



内部流体压力、速度变化

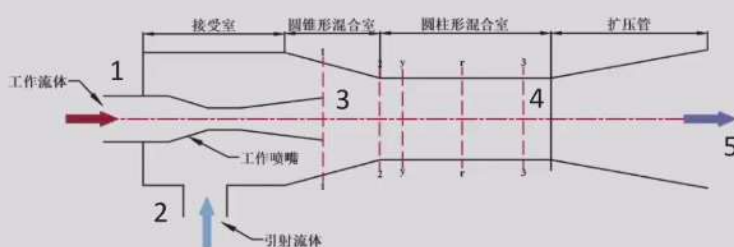
喷射器的工作过程大体可分为四个阶段：

(1) **主喷嘴**：高压的工作流体进入工作流体喷嘴，速度升高，压力降低，在工作流体喷嘴出口处形成低压；

(2) **接受室**：接受室与引射流体之间存在压差，引射流体进入接受室；

(3) **混合室**：高速的工作流体与低速的引射流体在混合室内发生动量和能量的传递，速度逐渐均匀。若混合流体的速度超过音速，在混合室内会发生激波现象，混合流体的速度急剧降低，压力急剧升高；

(4) **扩压管**：混合流体进入扩压管，速度进一步降低，动能转化为压力能，压力进一步升高，在背压压力下排出喷射器。



喷射器结构图

如何对喷射器内部过程进行数学描述？

1. 基于伯努利方程
2. 基于其他守恒方程

假设一次、二次流为音速，给定几何参数、工作流体流速及热力学状态、引射流体热力学状态。求引射流体流量与出口压力。

能量守恒+动量守恒

$$\Delta E / dt = Q - W + m_{in}(h + k + z)_{in} - m_{out}(h + k + z)_{out}$$

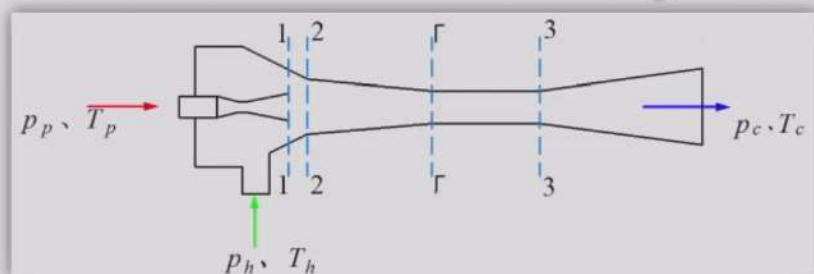
$$(h + k)_{in} \mp (h + k)_{out} \quad h_{out} = h_{in} + k_{in} - k_{out}$$

$$\Delta S / dt = S_g + m_{in}s_{in} - m_{out}s_{out} \quad s_{in} = s_{out}$$

由 h_{out} 和 s_{out} 便可确定出口流体状态

伯努利方程+动量守恒 如何利用伯努利方程？

对于理想，不可压缩流体， dh 的定义可由定熵过程简化为 vdp ，对于一般流体 v 是状态参数，按物性计算，对于不可压缩流体， v 是常数 $= 1/\rho$ ，即 $\Delta h = \Delta p / \rho$ ，因此，伯努利方程是基于能量守恒的一个特例。



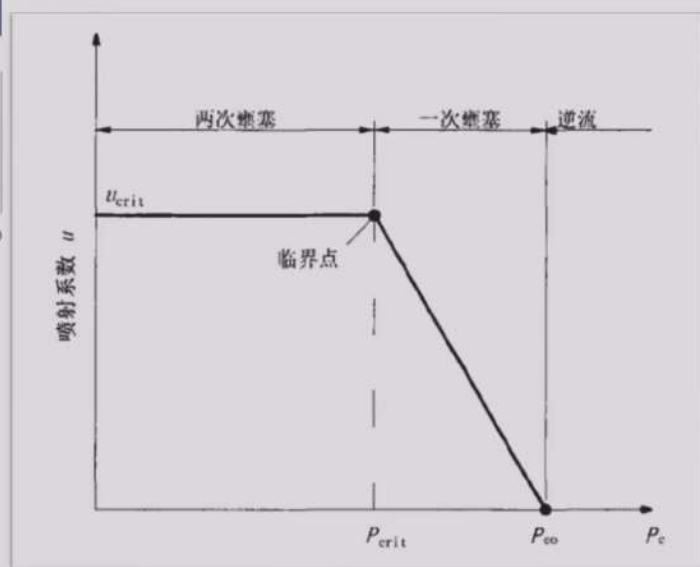
评价喷射器性能的最主要参数是**喷射系数 μ** ，它反应了喷射器的工作性能，在数值上等于引射流体质量流量与工作流体质量流量之比，即： $\mu = m_h / m_p$

对于喷射器的工作过程，可以用以下三个定律来描述：

(1) **能量守恒定律**: $i_p + \mu i_h = (1 + \mu) i_c$

(2) **质量守恒定律**: $m_c = m_p + m_h = (1 + \mu) m_p$

(3) **动量守恒定律**: $\rho_2 (m_p w_{p2} + m_h w_{h2}) + p_{p2} A_{p2} + p_{h2} A_{h2} - \int_{A2}^{A3} p dA = m_c w_c + p_3 A_3$

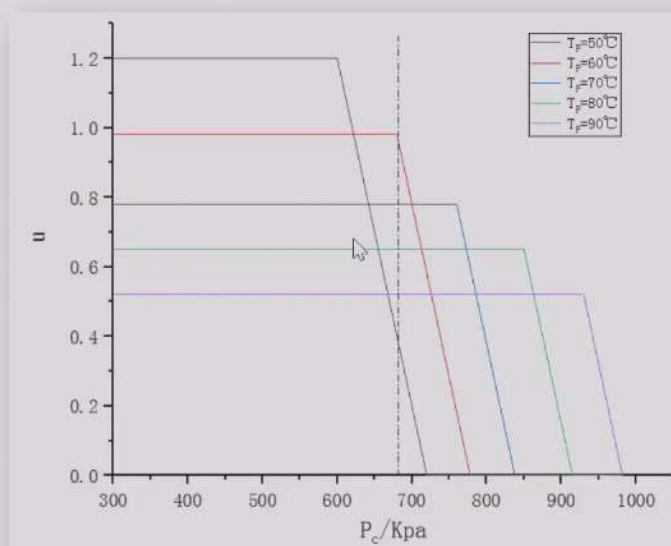


喷射系数随背压的变化

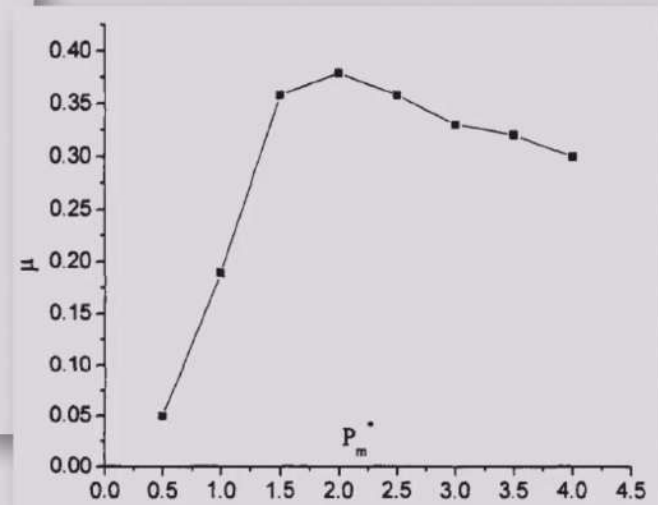
当工质在进出口压差的作用下，通过某一流体通道，并在这一通道内达到音速时，会发生**壅塞现象**。此时工质的流量与通道出口背压无关。

(1) **出口背压** $p_c < \text{临界背压 } p_{crit}$ ，工作流体与引射流体都发生壅塞现象。此时，随着出口背压的变化，工作流体与引射流体的流量不变，引射比保持不变。

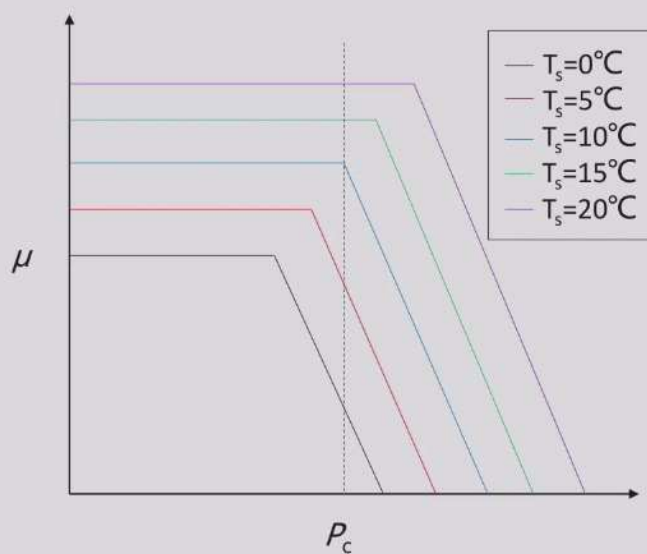
(2) **出口背压** $p_c > \text{临界背压 } p_{crit}$ ，喷射器内只有工作流体发生壅塞现象，随着背压的升高，引射比会急剧下降。若背压进一步上升，引射比会下降为0，甚至逆向流动。



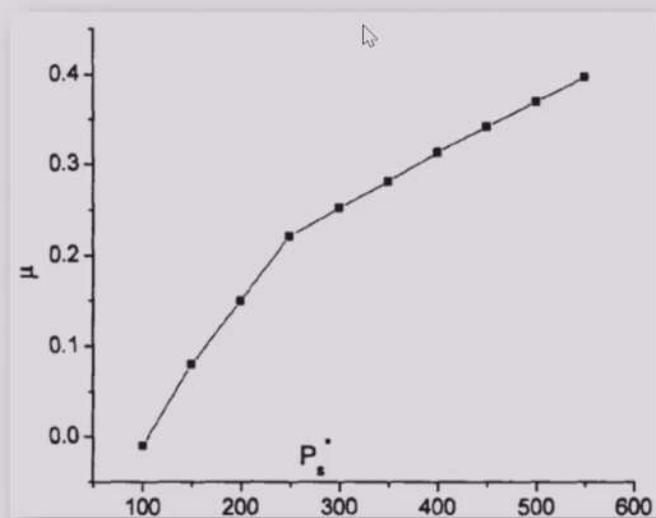
不同发生温度下喷射系数随背压的变化



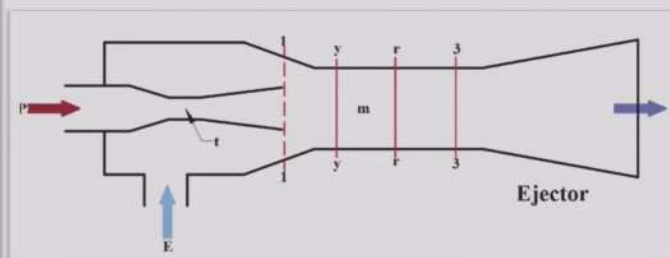
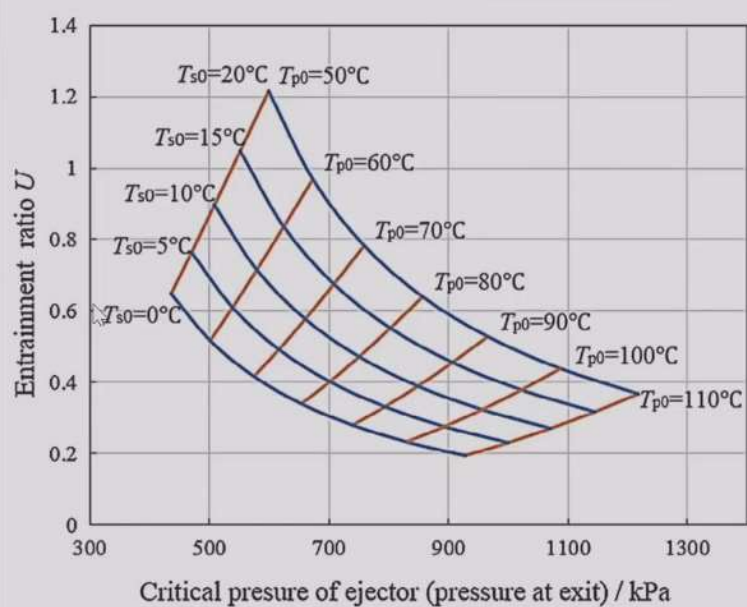
喷射系数随工作流体压力的变化



不同二次流温度时喷射系数随背压的变化



喷射系数随引射流体压力的变化



喷射系数与临界压力

PART
04

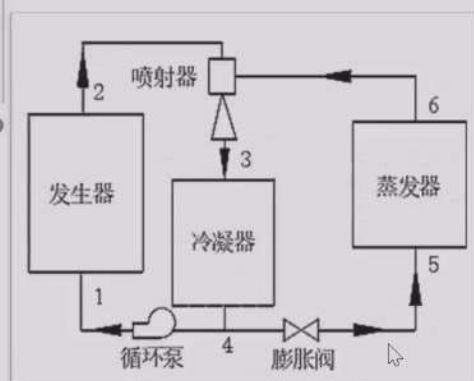
喷射器的应用

23

- ① 在**发电厂**：燃料燃烧设备（气体喷燃器）；蒸汽锅炉的给水系统（抗汽蚀水喷射泵）；汽轮机的调节系统（油引射器）等。
- ② 在**废汽余热供暖装置**方面：作为采暖用户入口的混合器（水喷射混水器）；提高生产设备的废汽压力（蒸汽喷射压缩器）等。
- ③ 在**制冷技术**方面：作为引射制冷装置的主要和辅助设备。
- ④ 在**工业热工技术**方面：工业炉的燃料输送、室气供给和燃烧系统；很多现代化机器的供油系统和试验发动机的试验台装置。
- ⑤ 在**通风装置**方面：用来形成通过风道和房间的一股不间断的空气流。
- ⑥ 在**自来水装置**方面：用来把水从深水井和钻井中提上来。
- ⑦ 在**燃料电池**方面：回收氢燃料电池中未反应的氢气。
- ⑧ 用来**输送**固体的散粒状物料和液体.....

- ① 在**发电厂**：燃料燃烧设备（气体喷燃器）；蒸汽锅炉的给水系统（抗汽蚀水喷射泵）；汽轮机的调节系统（油引射器）等。
- ② 在**废汽余热供暖装置**方面：作为采暖用户入口的混合器（水喷射混水器）；提高生产设备的废汽压力（蒸汽喷射压缩器）等。
- ③ 在**制冷技术**方面：作为引射制冷装置的主要和辅助设备。
- ④ 在**工业热工技术**方面：工业炉的燃料输送、室气供给和燃烧系统；很多现代化机器的供油系统和试验发动机的试验台装置。
- ⑤ 在**通风装置**方面：用来形成通过风道和房间的一股不间断的空气流。
- ⑥ 在**自来水装置**方面：用来把水从深水井和钻井中提上来。
- ⑦ 在**燃料电池**方面：回收氢燃料电池中未反应的氢气。
- ⑧ 用来**输送**固体的散粒状物料和液体.....

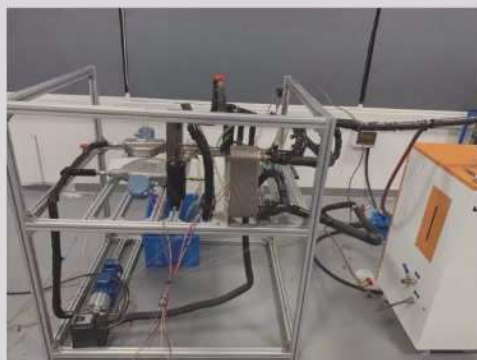
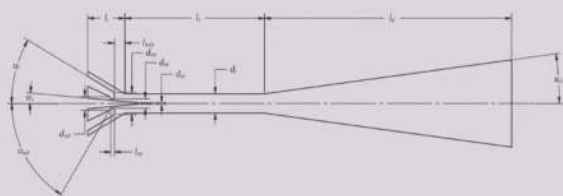
在制冷领域



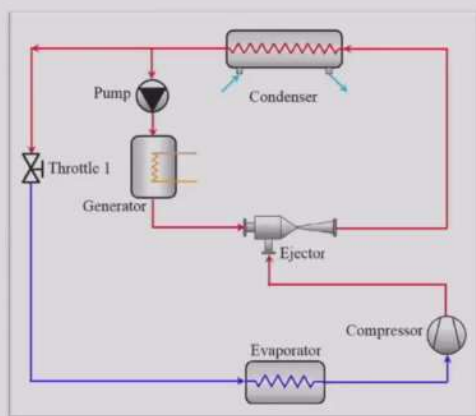
传统的喷射循环

蒸汽喷射式制冷循环最早于1910年由Leblanc提出。随后逐渐被具有较高循环效率的压缩制冷技术所取代。近年来，环境和能源问题日益严峻，喷射制冷循环研究重新被重视。

- Eames等对使用R245fa作为制冷剂的喷射式制冷进行了实验研究，其实验结果COP可达0.5~0.7。 $(COP=Q_c/(Q_g+W))$
- Guo、Shen以R134a为工质进行了太阳能喷射制冷系统的热力学计算，结果表明该系统节电率高达80%。
- Bejan121以R114为制冷剂设计初制冷量为3.5kW的喷射制冷系统，该系统能够在发生温度90-105°C蒸发温度4°C时实现0.12-0.26的COP。
- Huang设计的喷射制冷系统，以R141b为制冷剂，在发生温度95°C蒸发温度8°C时，系统的COP大约为0.22。
- 张博以R123为制冷剂，通过理论和实验研究了太阳能喷射制冷系统的运行性能。

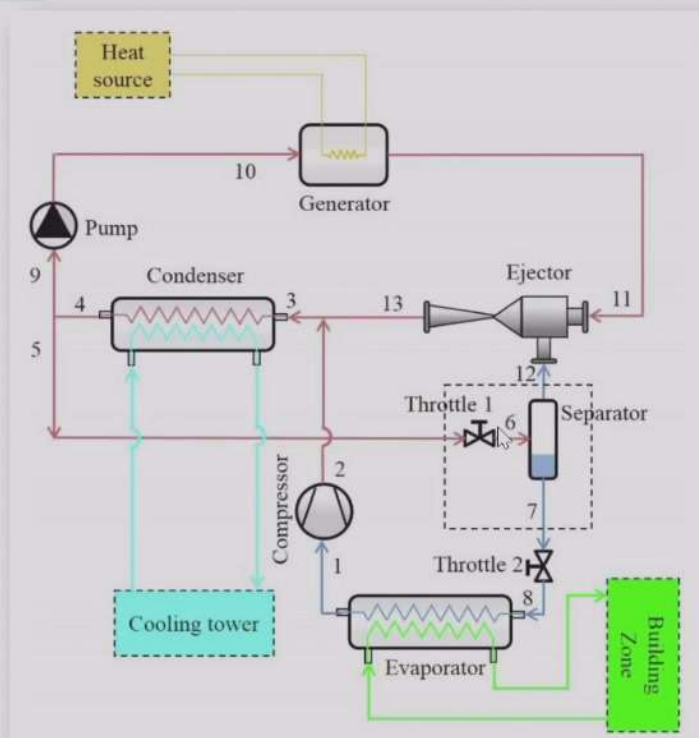


嵊州研究院绿色制冷实验室
喷射制冷实验台

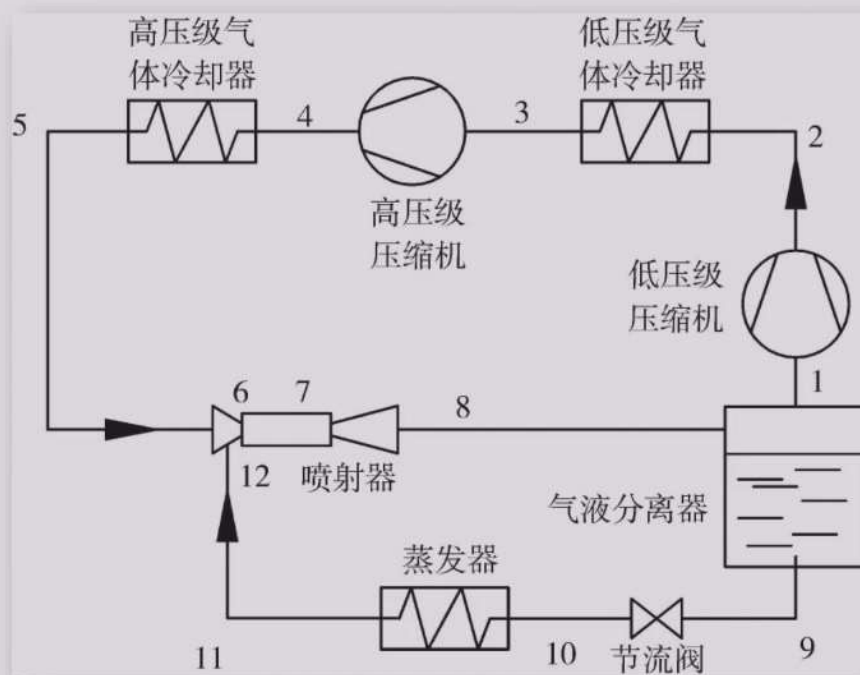


传统的增强喷射循环

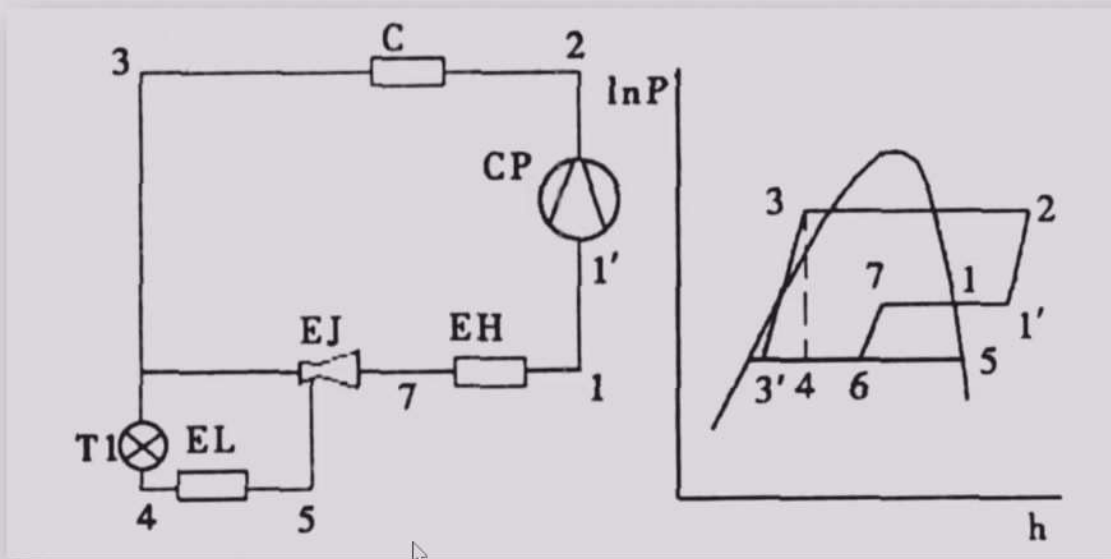
- 1990年Sokolov等提出了增强喷射式制冷系统。该方法的主旨是消耗少量的电能来提高整个喷射制冷系统的性能系数。
- Sokofov等以R113为制冷剂研究了太阳能增强喷射制冷系统的性能，结果表明，增压器的加入提高了系统的蒸发温度，使系统性能得以提高。
- Bejan以R114为制冷剂研究了在蒸发温度4°C冷凝温度50°C时的系统性能。结果表明COP达到0.85。
- Dorantes等在墨西哥城实际日照条件下对以R142b为制冷剂的增强喷射制冷系统进行了研究。结果显示：制冷系统COP等于0.21，太阳能集热效率为0.52，系统综合COP达到0.11。
- 国内的杨贵春以R11作为制冷剂对系统进行理论计算。结果显示：增强系统的COP较常规系统大大提高，达到197.1%。



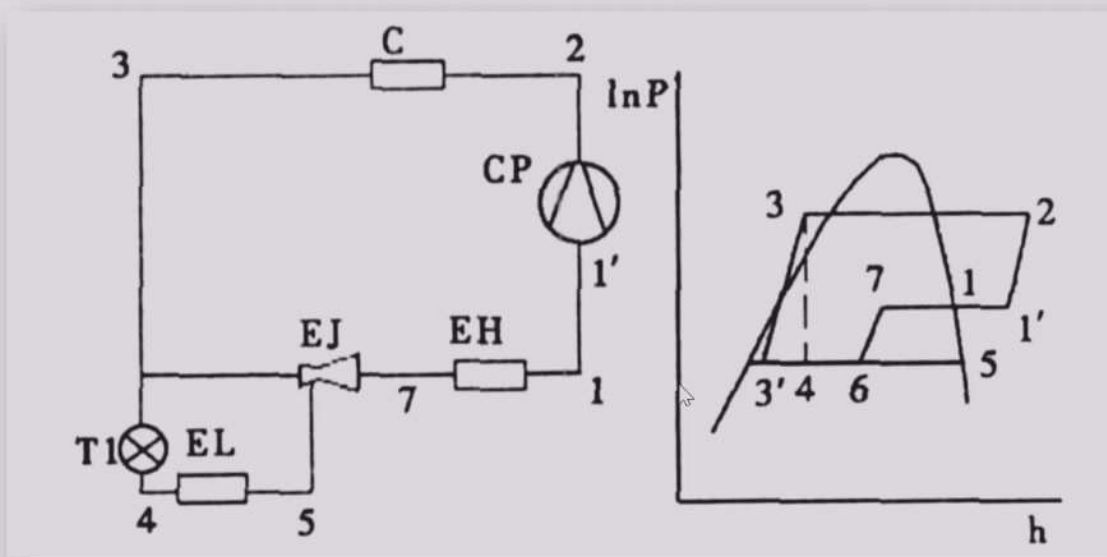
太阳能高效利用的喷射-压缩制冷循环



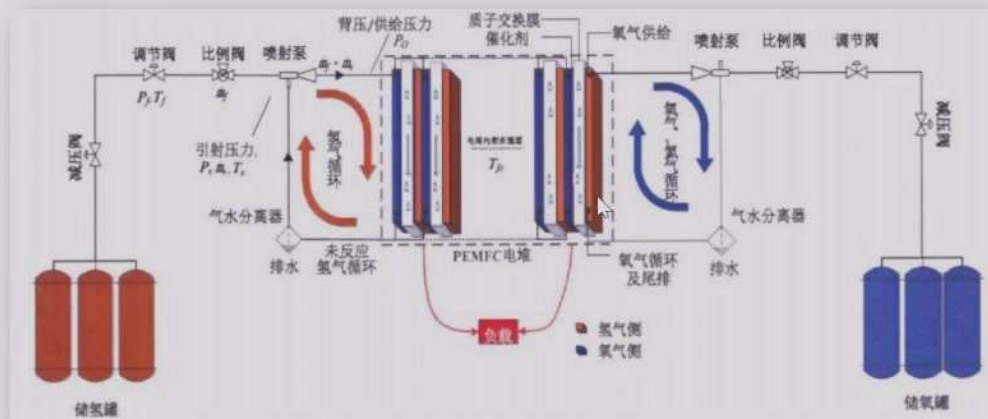
跨临界CO₂双级压缩-喷射制冷循环



新型冰箱压缩/喷射混合制冷循环



新型冰箱压缩/喷射混合制冷循环

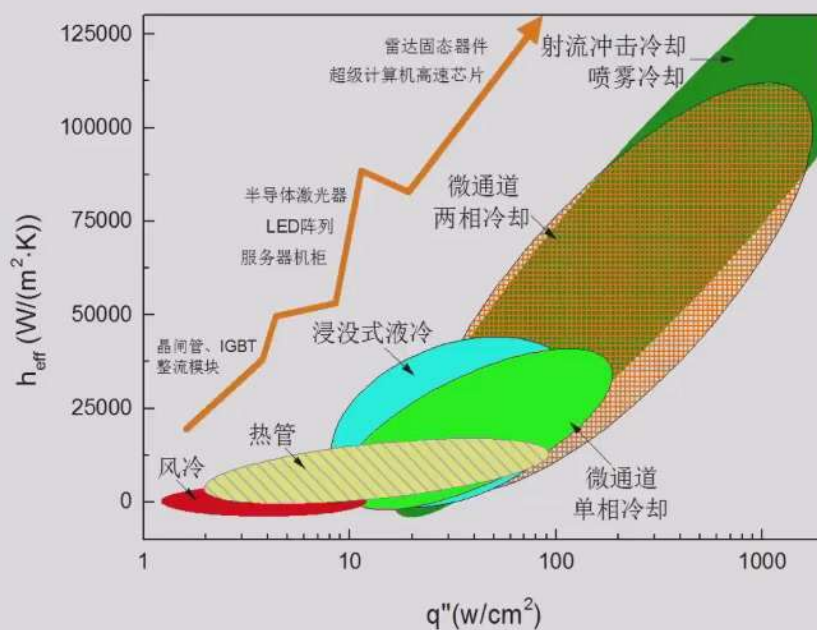
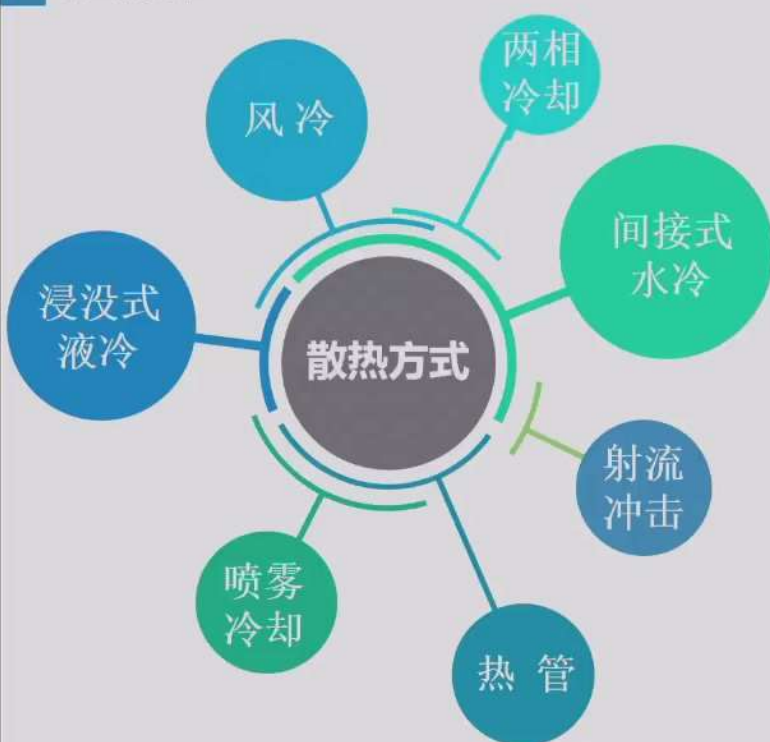


通过喷射器将燃料电池中未反应的气体循环回收。

喷射器在燃料电池中的应用

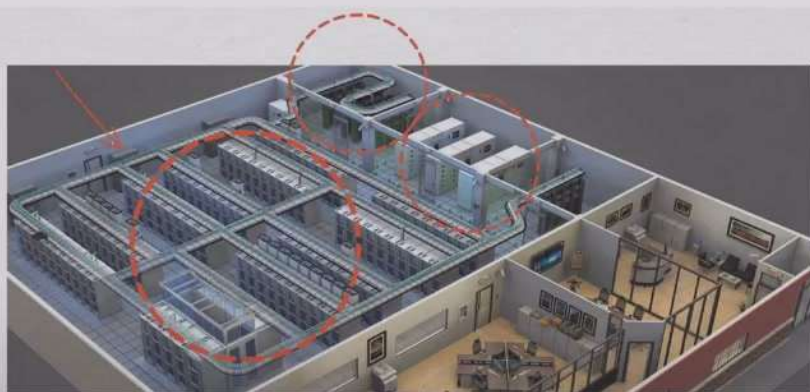
9 高热流散热

高热流散热背景 冷却技术

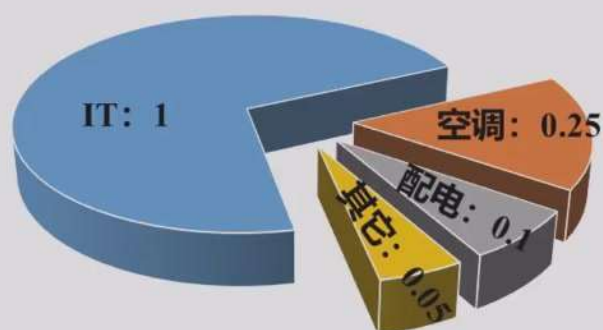


不同散热手段的比较

高热流散热背景 数据机房能耗



某数据中心
PUE=1.4

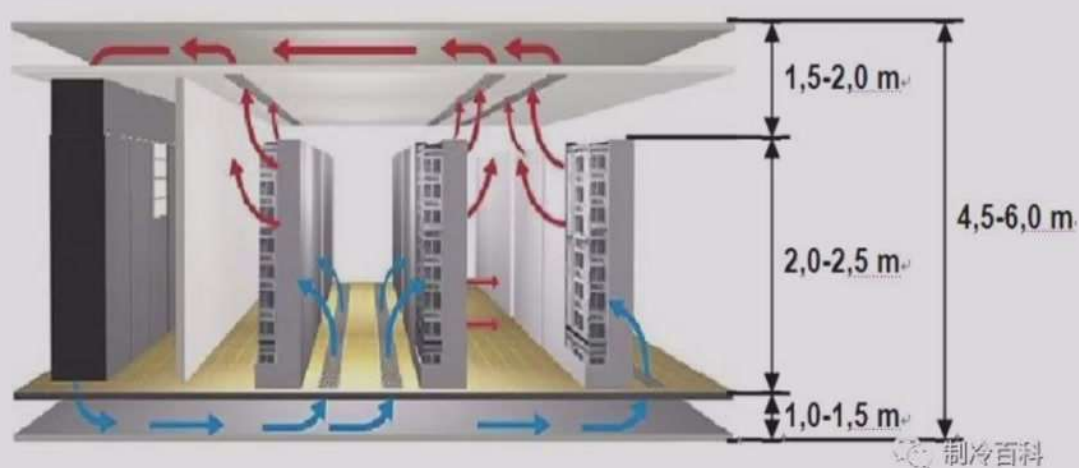


电源利用效率 Power Usage Effectiveness (PUE)

$$\text{PUE} = \frac{\text{IT设备能耗} + \text{基建设备能耗 (空调、照明、电梯、配电损耗等)}}{\text{IT设备能耗}}$$

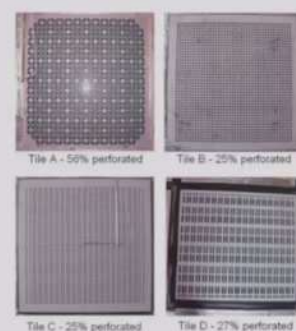
风冷机房

传统下送风空调



精密空调，下连静压箱
单台最大制冷量**150kW**

冷风/热风温度：**20°C / 30°C**左右



开孔地板

风冷机房

传统下送风空调

回风温度指数

$$RTI = \left(\frac{T_{re} - T_{su}}{T_{eq,out} - T_{eq,in}} \right) \times 100\%$$

体积流量加权的空调平均回风/送风温度

体积流量加权的设备平均回风/送风温度

RTI 越接近 **100%**越理想，>**100%**表示空气再循环，<**100%**表示空气短路

能量利用程度指标

$$SHI = \frac{\delta Q}{Q + \delta Q}$$

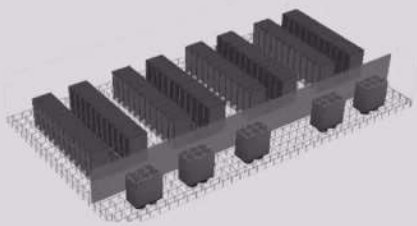
冷气流从地板送风口到服务器机柜进风口所吸收的热量

机柜中用于冷却服务器所损失的冷量

空调送风在进入**IT**设备之前与热空气混合的程度，值越小表示冷量利用效率越高

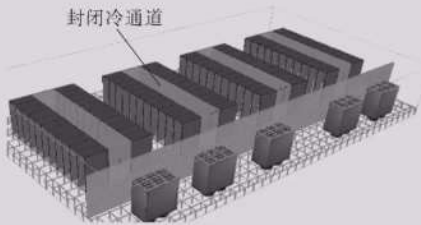
风冷机房

传统下送风空调

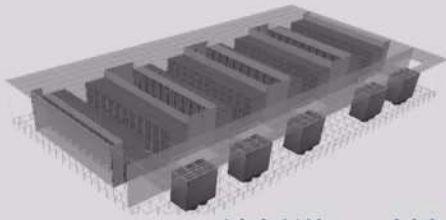


(a) 原机房模型

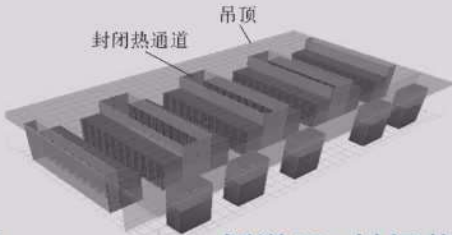
地板送风+封闭冷通道



(b) 方案 A

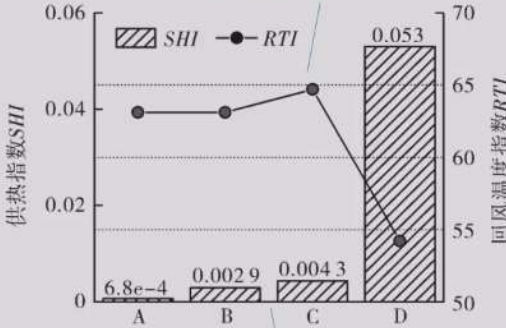


(c) 方案 B



(d) 方案 C

回风温度指数

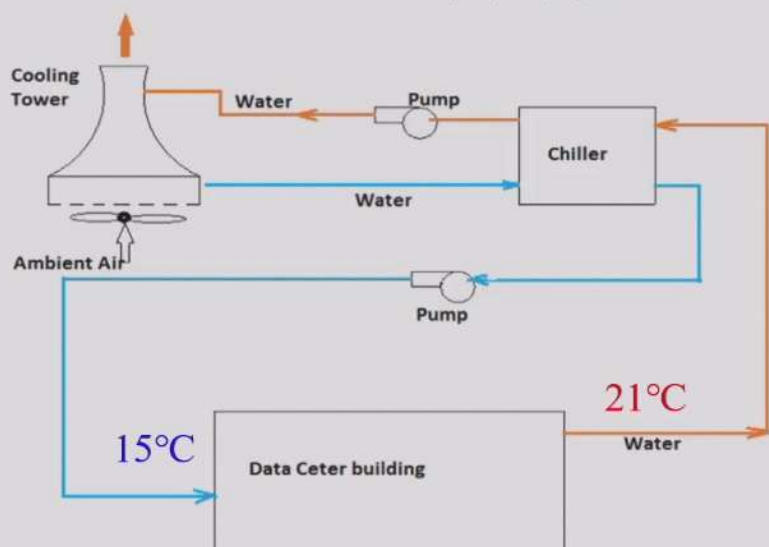


能量利用程度指标

风冷机房

传统下送风空调

冷冻水系统



将机房30°C回风冷却为18°C冷风为机房IT设备降温

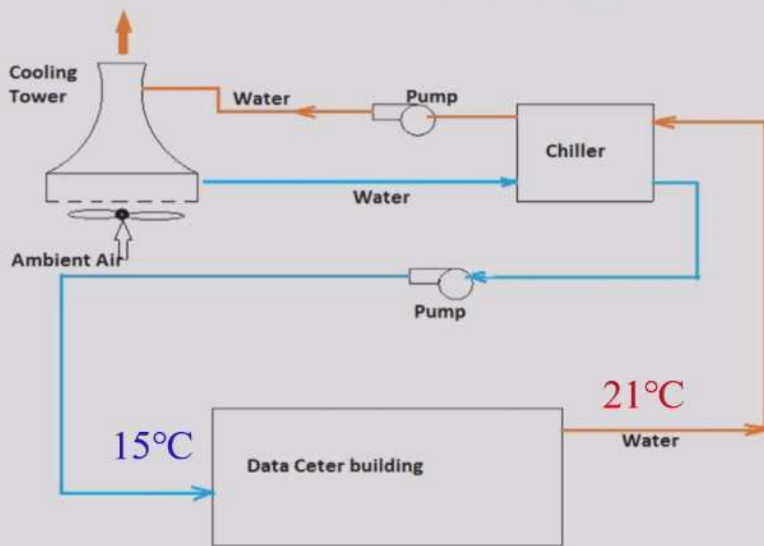
传统风冷的缺点：

- 大风量、高风压，远距离送风，末端能耗高
- 风冷形式能耗高
- 单系统，最大制冷量150KW。大型数据中心，制冷管路复杂，外机数量多，不利维护

风冷机房

传统下送风空调

冷冻水系统



将机房30°C回风冷却为18°C冷风为机房IT设备降温

传统风冷的缺点：

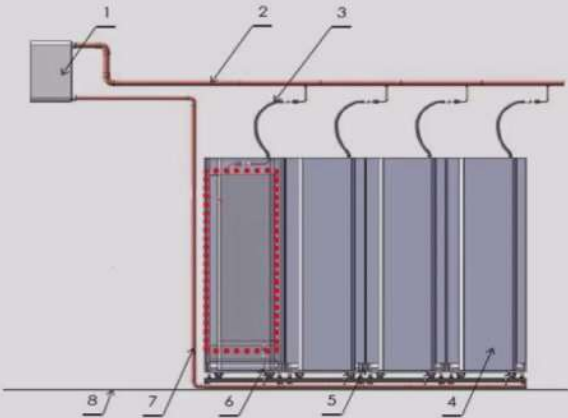
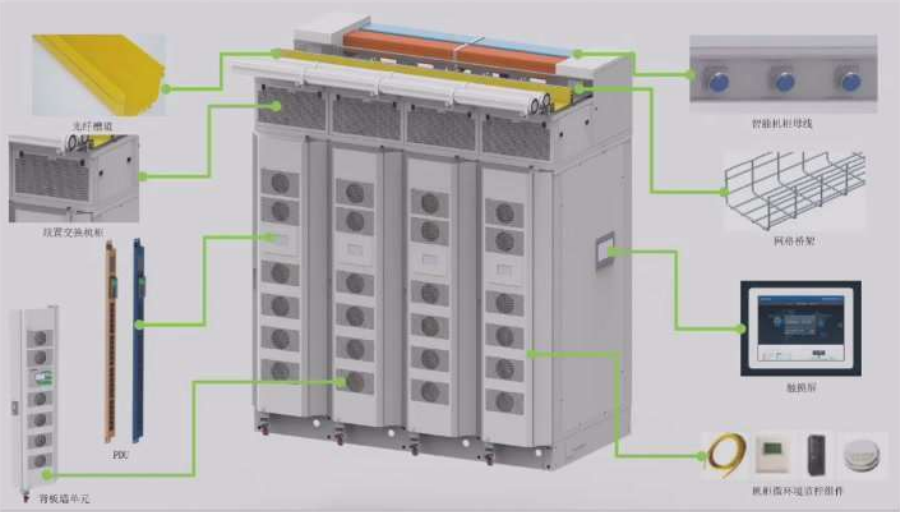
- 大风量、高风压，远距离送风，末端能耗高
- 风冷形式能耗高
- 单系统，最大制冷量150KW。大型数据中心，制冷管路复杂，外机数量多，不利维护

Q1：若想完全依靠冷却塔，环境温度的要求是？

Q2：能否增大风量，提高冷风温度和冷冻水温度？

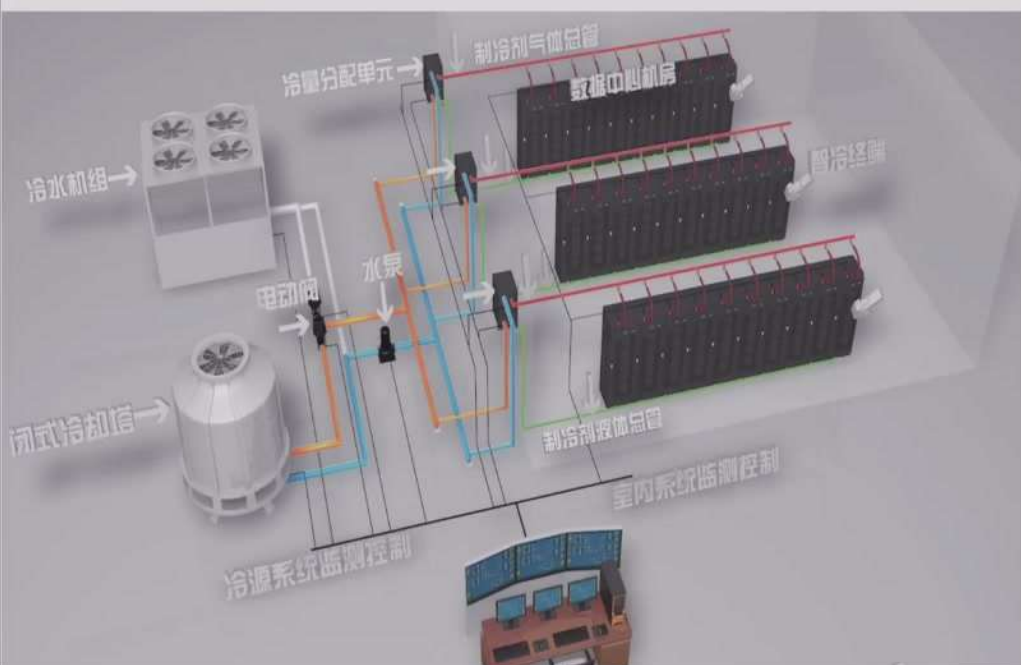
背板空调：重力背板

基于重力热管的背板空调



背板空调：重力背板

水系统构成



行模块背板墙，在冷冻水18-24 °C 工况下仍能完成机柜内<35 °C、机房内<24 °C的制冷控制

水氟换热：

设置水氟换热环节，杜绝水进机房

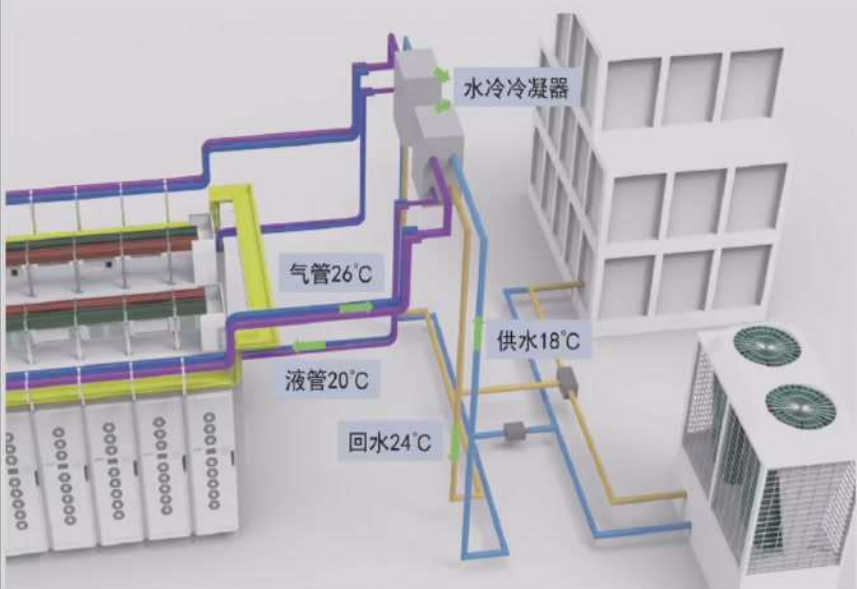
冷水输送：

水泵输送、配备流量、定压措施

冷媒输送：

重力热管，无额外动力

背板空调：重力背板

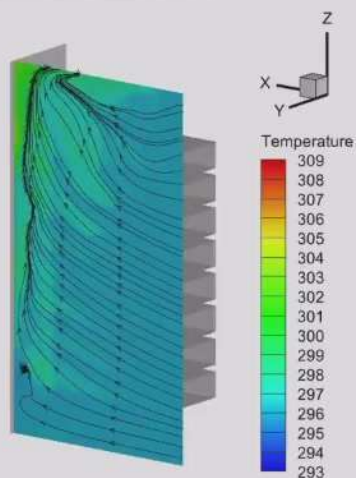


乌兰察布实例

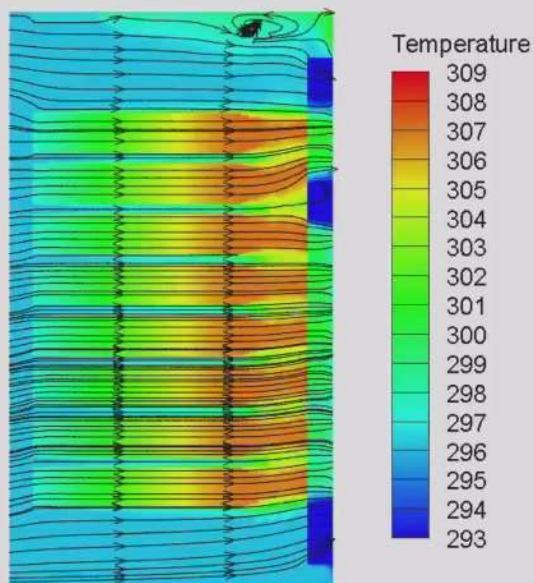
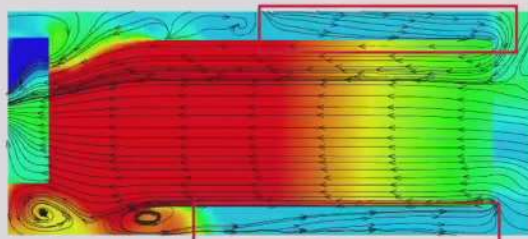
运行模式	切换点	运行 时长h
乙二醇自由冷	干球温度 $\leq 8^{\circ}\text{C}$	4443
直接蒸发冷却	干球温度 $> 8^{\circ}\text{C}$, 湿球温度 $\leq 14^{\circ}\text{C}$	2551
间接复合直接 蒸发冷却	$14^{\circ}\text{C} < \text{湿球温}$ 度 $\leq 18^{\circ}\text{C}$	1326
机械制冷	湿球温度 $> 18^{\circ}\text{C}$	440

- 冷源侧：18°C供水，最大限度实现自然冷
- 输配侧：变流量系统复合重力热管；
- 末端侧：背板墙进一步贴近热源

背板空调：重力背板

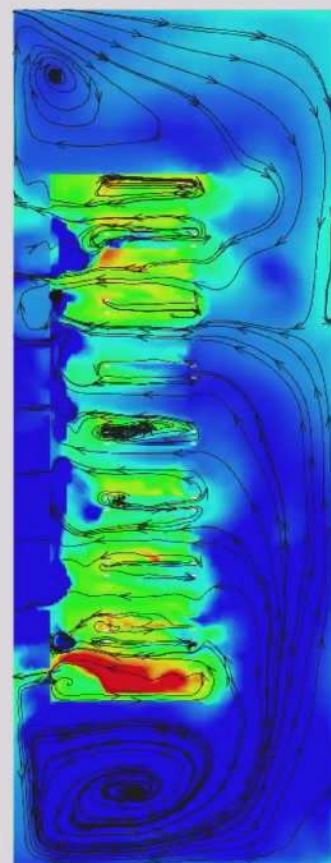


机柜内“上热下冷”，顶部存在明显回流



梯度送风，减少20%风量

机柜底部、顶部开孔，改善机房的气流组织

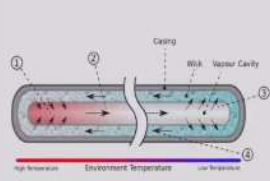


热管散热技术

常见热管类型

传统热管

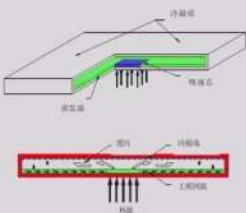
Conventional
heat pipe



毛细芯结构

平板热管

Flat-plate
heat pipe

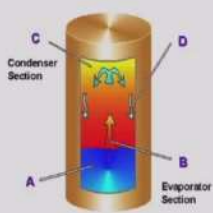


传统管式热管的改进结构

两相闭式热虹吸管

(重力热管)

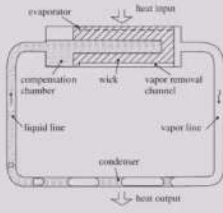
Thermosyphons



单直管，无吸液芯

环路热管

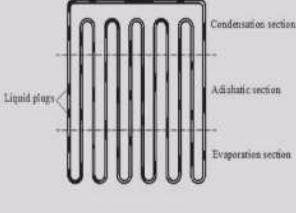
Loop
heat pipe



由蒸发器、冷凝器、蒸汽管道、液体管道、补偿腔等部分组成

脉动热管

Pulsating
heat pipe



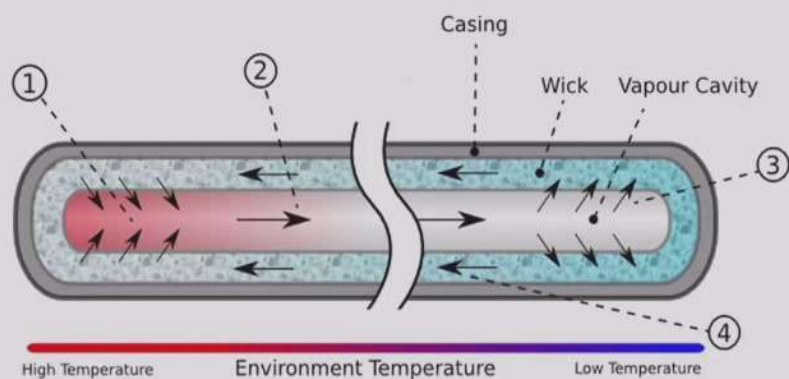
由一根细长的管道经过弯折成多个弯头而成

热管散热技术

传统热管

传统热管

Conventional heat pipe



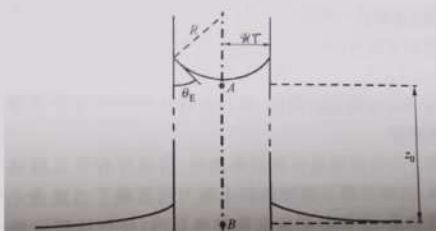
传统热管结构

工作原理：在热负荷的作用下，蒸发段毛细芯界面上的液体发生相变，相变产生的蒸汽从蒸发段流到冷凝段并冷凝为液体，凝结的液体在蒸发端毛细芯内的毛细抽力下，从冷凝段回流到蒸发端，补充毛细芯界面上蒸发的液体。

热管散热技术

传统热管

毛细力 Capillary force



毛细芯 Wick structure



烧结毛细芯



丝网毛细芯



沟槽毛细芯

- 丝网/多重金属网(wrapped screen): 中等毛细力，但渗透性较差，目前使用较少
- 沟槽(groove): 轴向沟槽结构具有渗透性较好的优点，但提供的毛细力较小
- 烧结毛细芯结构 (sintered metal solution/sintered porous wick): 孔径小使得渗透性差，毛细力强
- 复合毛细芯结构: 例如screen-covered grooves, 得到尽可能高的毛细力和尽可能好的渗透性

热管散热技术

传统热管应用

传统热管 Conventional heat pipe



应用于电脑中与风冷相结合散热



应用于手机中与石墨烯等材料相结合散热

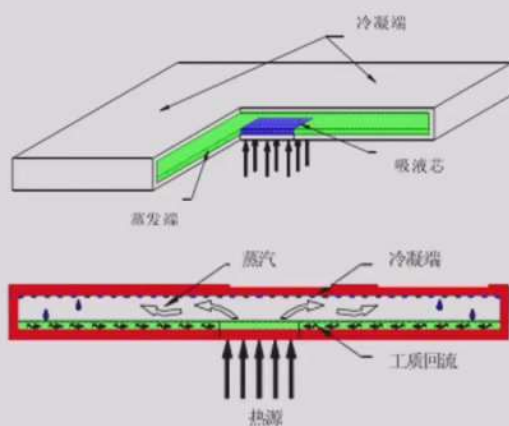
热管散热技术

平板热管

平板热管(均热板)

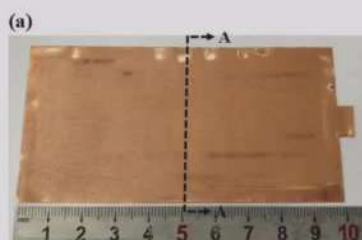
Flat-plate heat pipe

Vapor chamber (VC)



平板热管结构

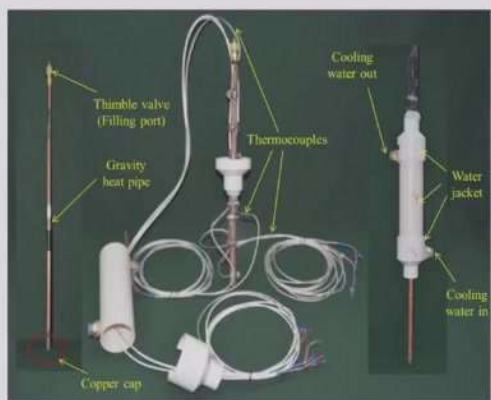
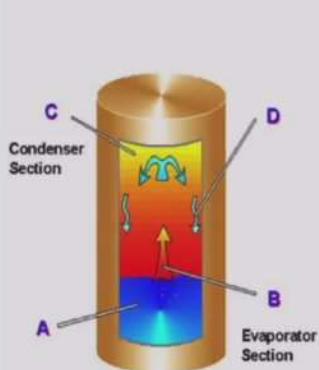
- 工作原理与传统热管相似
- 采用面接触换热，能够提高换热表面的均温性，因此也成为均热板



热管散热技术

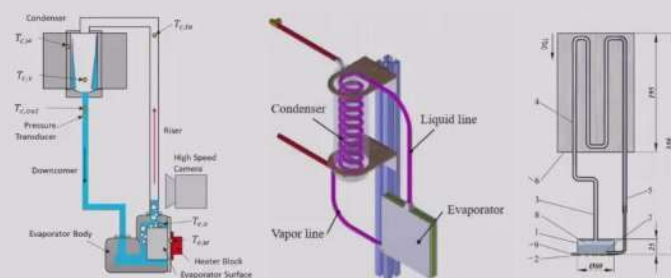
重力热管

两相闭式热虹吸管（重力热管） Thermosyphons



两相闭式热虹吸管（重力热管）结构

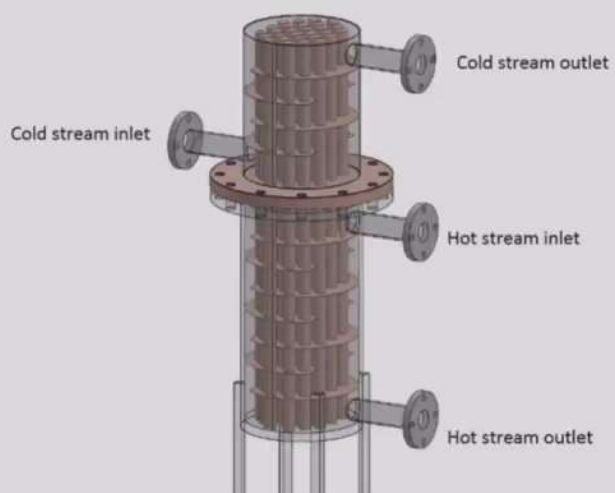
- 主要特点：无毛细芯结构，液体回流主要依靠重力
- 结构：最简单的重力热管由一根金属空管子，内部充注工质构成；也有很多其他改进的结构



热管散热技术

重力热管

两相闭式热虹吸管（重力热管） Thermosyphons



由重力热管组成的换热器



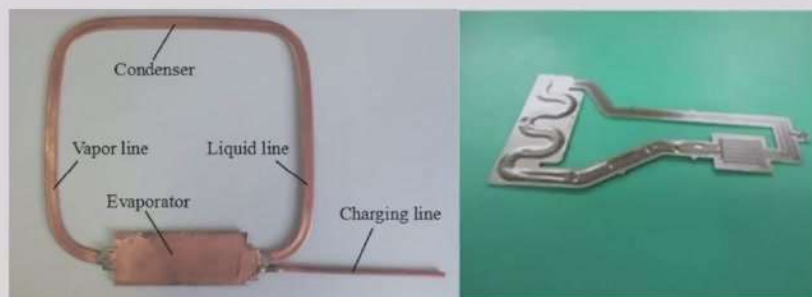
青藏铁路两侧采用重力热管技术解决冻土稳定性问题

热管散热技术

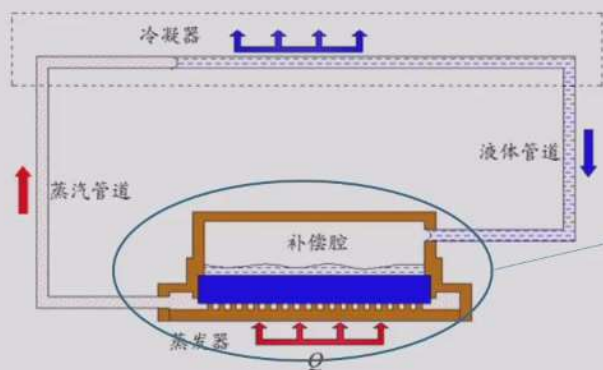
环路热管

环路热管

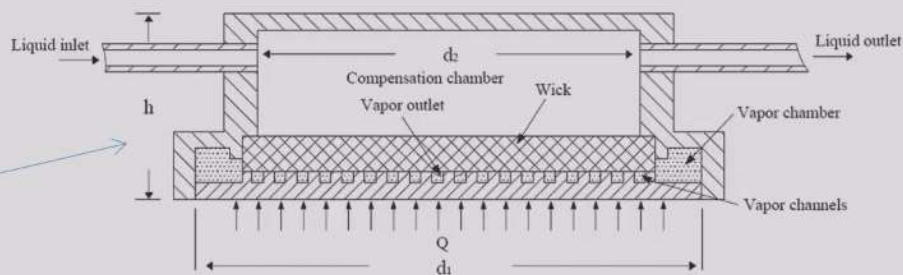
Loop heat pipe



环路热管实物图



环路热管结构



环路热管补偿腔

热管散热技术

环路热管



环路热管的应用

- 1989年，俄罗斯首次在“Granat”飞船上进行了环路热管的空间飞行试验，证明环路热管可以在微重力环境下长期稳定可靠地运行；
- LHP 的首次实际应用是在 1994 年俄罗斯人造卫星 Obzor 上，多个氨循环 LHP 及丙烯循环 LHP 装置用于解决光学元器件及附属调节器的温度控制问题；
- 目前环路热管仍是航天器的主要热控手段：我国“嫦娥五号”采用了异构式环路热管技术；我国“实践二十号卫星”将开展的基于深冷环路热管的35K温区深低温传输在轨演示。
- 环路热管在地面的应用也在发展，例如用于大功率集成LED芯片散热、笔记本散热等

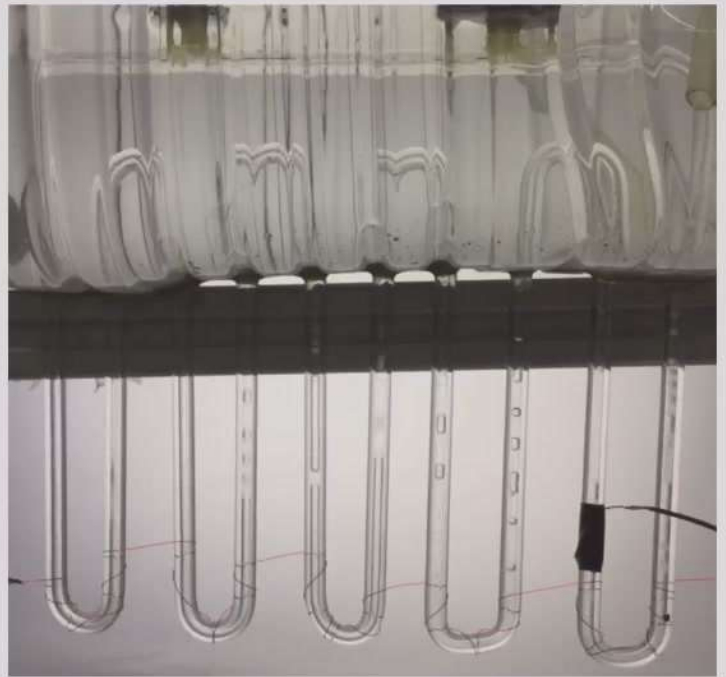
热管散热技术

脉动热管

脉动热管工作原理

脉动热管的优势

- 结构简单
- 易于弯折
- 受重力影响较小
- 适用多种应用场合
- 热响应速度较快



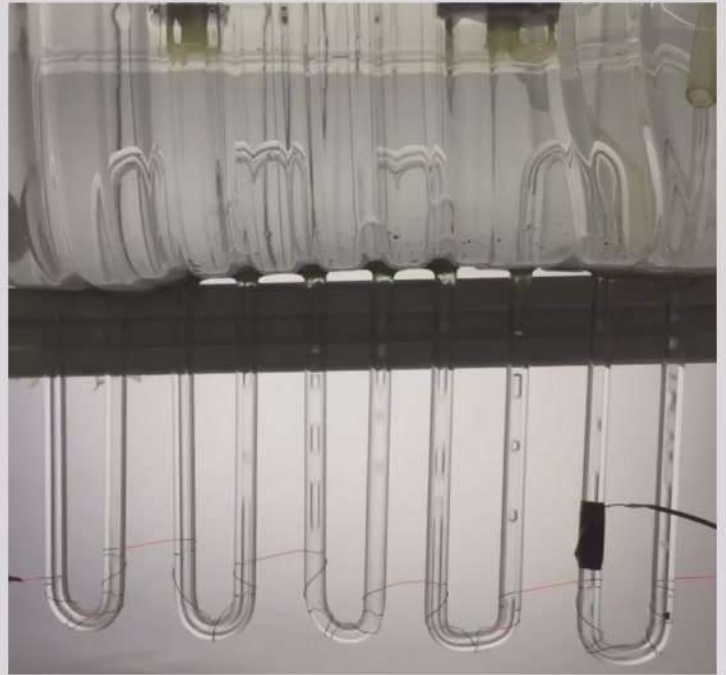
热管散热技术

脉动热管

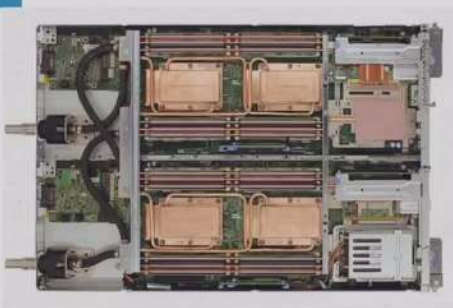
脉动热管工作原理

脉动热管的优势

- 结构简单
- 易于弯折
- 受重力影响较小
- 适用多种应用场合
- 热响应速度较快



冷板液冷



间接式液冷：谷歌 TPU3.0

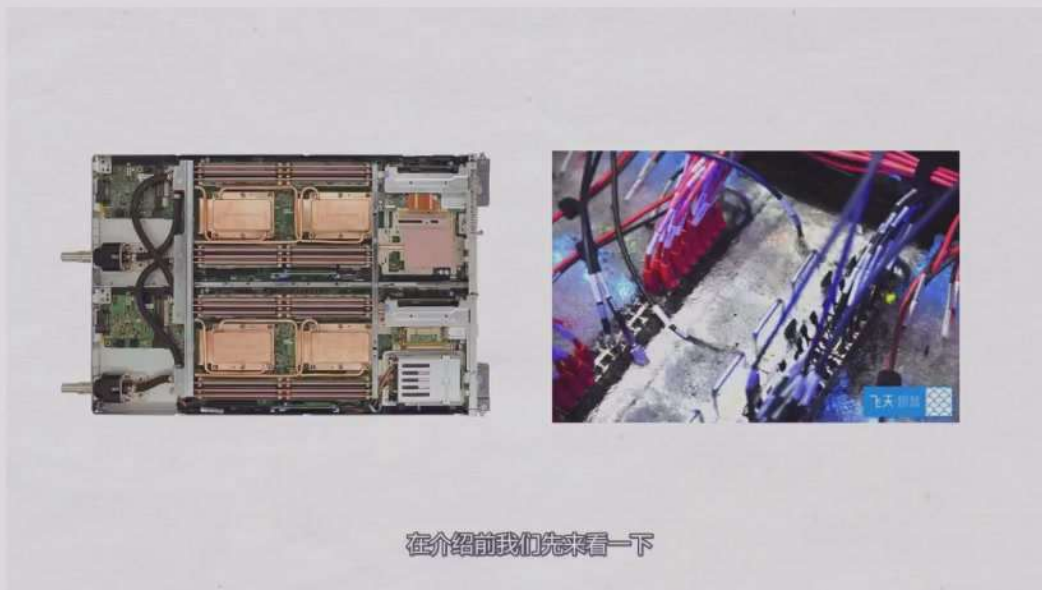
优点：

更高的散热效率和节能率

缺点：

安全性和稳定性：水管、快拆头的漏液

设计、制造和维护的成本高



在介绍前我们先来看一下

高热流散热背景

传统冷却技术

■设备热流密度加大

现主流性能的刀片式服务器单片CPU的峰值热流密度高达80~200 W/cm²，属于高热密度散热的范畴。

高热流：100~1000 W/cm²

超高热流：1000~10000 W/cm²

极高热流：> 10000 W/cm²

■散热能力较低、效率低

空气的最大散热能力为37 W/cm²；风冷机房的PUE较高。

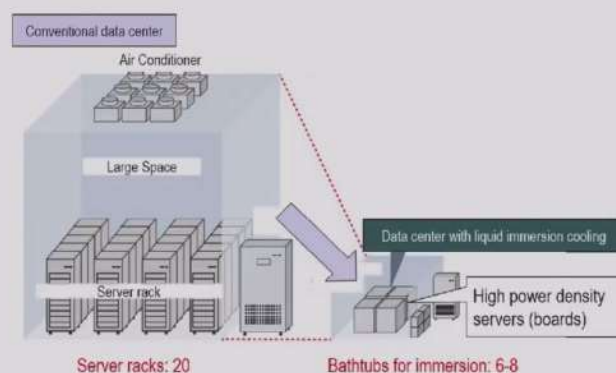
双碳需求：

数据中心更加节能

散热能力能适应科技的发展

液体冷却技术是高热流散热更节能有效的手段之一

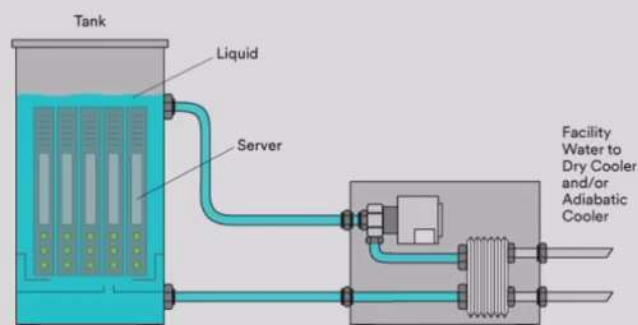
最早由CRAY在1985年提出



传统气体对流换热冷却技术和浸没式液冷占空间对比

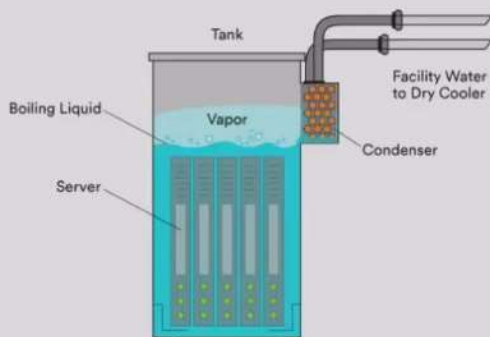
浸没式冷却技术

单相 vs 双相



Single-phase immersion cooling

In single-phase immersion cooling, fluid remains in its liquid phase. Electronic components are directly immersed in dielectric liquid in a sealed but readily-accessible enclosure where heat from electronic components is transferred to the fluid. Pumps are often used to flow the heated fluid to a heat exchanger, where it is cooled and cycled back into the enclosure.



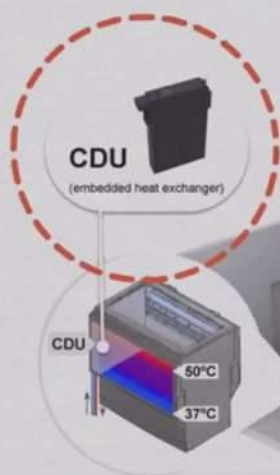
Two-phase immersion cooling

In two-phase immersion cooling, fluid is boiled and condensed, exponentially increasing heat transfer efficiency. Electronic components are directly immersed in dielectric liquid in a sealed but readily-accessible enclosure where heat from electronic components causes the fluid to boil, producing vapor that rises from the liquid. The vapor condenses on a heat exchanger (condenser) within the tank, transferring heat to facility water that flows outside of the data center.

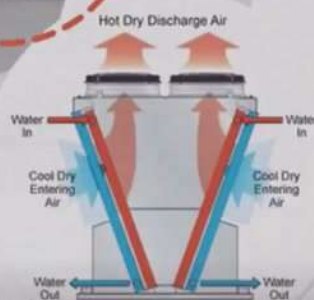
浸没式冷却技术

PUE

嵌入式换热器



冷却塔



冷液分配装置(CDU): 如何设计, 考虑哪些因素?

仁和数据中心的液冷机房年均PUE为1.07

浸没式冷却技术

冷却液选择

电学性质

- 介电常数
- 电阻率

热物性参数

- 汽化潜热
- 比热容
- 饱和蒸汽压值
- 表面张力
- 热导率
- 粘度
- 密度
- **GWP**

安全性相关参数

- 毒性
- 可燃性
- 腐蚀性
- 与材料相容性
- **(GWP值)**

迁移特性相关参数

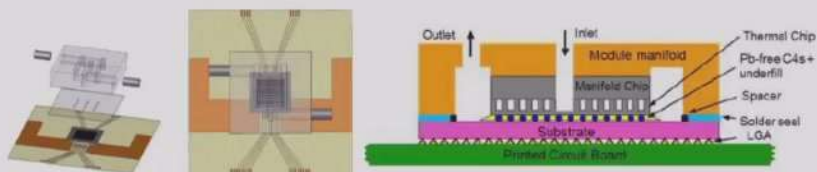
- 表面张力
- 粘度
- 密度

浸没式冷却技术

冷却液选择

➤ 制冷剂

常见的制冷剂其常压沸点一般低于常温甚至低于 0°C ，在常温常压下不能维持液态的形式，难以将电子器件放在其中进行浸泡，制冷剂常用于间接液体冷却或者喷雾冷却、射流冲击冷却等形式的直接液体冷却，而不用于浸没式冷却。



微通道+射流 ($255\text{W}/\text{cm}^2$) 射流+三维堆叠芯片 ($275\text{W}/\text{cm}^2$)

单相直接冷却

矿物油

制冷剂

电子氟化液

间接液体冷却或者
喷雾冷却

单相、两相直接冷却

浸没式冷却技术 冷却液选择

➤ 矿物油：

优点：良好的绝缘性能、冷却液泄漏的危险性大幅降低

缺点：热力学性质并不如水，因此冷却液侧的热阻较大；

矿物油的黏度较大，循环泵功随之增大；

取出设备进行检修时，矿物油容易在上面附着；

矿物油的渗透性较强，需要定时清洁机房；

长时间的冲刷会对连接或粘合位置造成破坏



Levin等采用改良后的矿物油MD-4.5设计的液冷系统



Green Revolution Cooling 设计系统中采用 Electrosafe的矿物油

单相直接冷却

矿物油

制冷剂

电子氟化液

间接液体冷却或者
喷雾冷却

单相、两相直接冷却

浸没式冷却技术 冷却液选择

➤ 电子氟化液

电子氟化液一般情况下为高度氟化物，与制冷剂同属于卤代物，与常见制冷剂最大的差别是，电子氟化液的正常沸点高于常温，在常压下为液态。

优点：电子氟化液绝缘性强；部分电子氟化液沸点较低，可以充分利用相变换热的优势；使用相变换热时与制冷剂不同的一点是无需通过高压来维持液态，排除了高压对电子器件的不利影响；比热较低，对冷却液进行预冷时，所需的冷量也更少；易挥发，在维护过程中取出服务器时，粘附的冷却液会迅速汽化，有利于设备的维护和检修。

缺点：价格都比较昂贵；热力学性质并不如水，因此冷却液侧的热阻较大，为了减少这一环节对传热的阻碍，使用强化换热的手段显得必不可少。

九氟丁基甲醚
(HFE-7100)

氢氟醚
(HFE) 类

含氟酮
(FK) 类

全氟碳
(PFC) 类

全氟己酮
(Novec 649)

全氟己烷
(FC-72)

浸没式冷却技术 冷却液选择

➤ 电子氟化液

电子氟化液一般情况下为高度氟化物，与制冷剂同属于卤代物，与常见制冷剂最大的差别是，电子氟化液的正常沸点高于常温，在常压下为液态。

优点：电子氟化液绝缘性强；部分电子氟化液沸点较低，可以充分利用相变换热的优势；使用相变换热时与制冷剂不同的一点是无需通过高压来维持液态，排除了高压对电子器件的不利影响；比热较低，对冷却液进行预冷时，所需的冷量也更少；易挥发，在维护过程中取出服务器时，粘附的冷却液会迅速汽化，有利于设备的维护和检修。

缺点：价格都比较昂贵；热力学性质并不如水，因此冷却液侧的热阻较大，为了减少这一环节对传热的阻碍，使用强化换热的手段显得必不可少。

九氟丁基甲醚
(HFE-7100)

氢氟醚
(HFE) 类

含氟酮
(FK) 类

全氟碳
(PFC) 类

全氟己酮
(Novec 649)

全氟己烷
(FC-72)

浸没式冷却技术 实际应用



基于FC-40的单相液冷展示系统

采用浸没式单相液冷，工质为沸点高达165℃的FC-40



液冷机房内景（来源：阿里巴巴）

阿里巴巴在张北的液冷数据中心机房

<https://v.qq.com/x/page/j0398po2r2p.html>

浸没式冷却技术 实际应用



基于FC-40的单相液冷展示系统

采用浸没式单相液冷，工质为沸点高达165℃的FC-40



液冷机房内景（来源：阿里巴巴）

阿里巴巴在张北的液冷数据中心机房

<https://v.qq.com/x/page/j0398po2r2p.html>

浸没式冷却技术 实际应用



基于FC-40的单相液冷展示系统

采用浸没式单相液冷，工质为沸点高达 165°C 的FC-40



液冷机房内景（来源：阿里巴巴）

阿里巴巴在张北的液冷数据中心机房

<https://v.qq.com/x/page/j0398po2r2p.html>

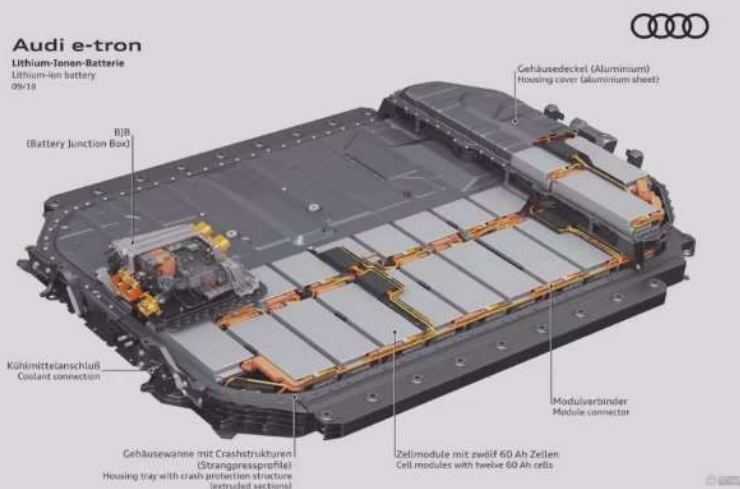
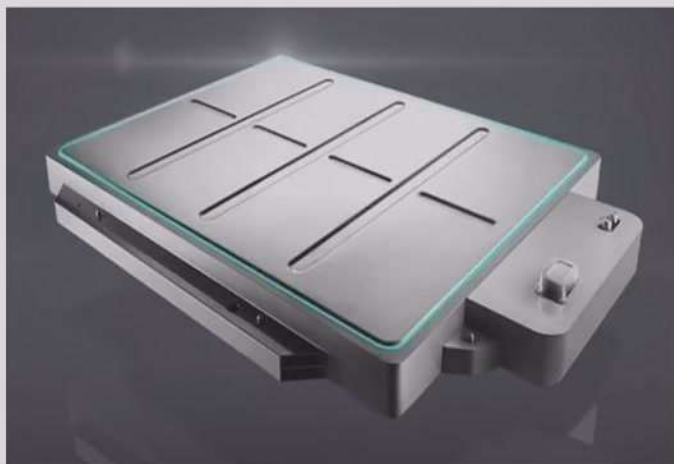
浸没式液冷还未大规模推广，原因有哪些？

- 机房部署成本高；
- 冷却液价格昂贵，3M的FC-40氟化液，高达1000元/公斤；
- 环保问题，3M将于2025年停产氟化液；
- 冷却液与部件不兼容；
- 运维成本高，维修时需专用设备，还需经历沥液、烘干等流程；
- 相变液冷，还涉及气密性要求、气泡压力对封装的影响等问题。

浸没式冷却技术

其它应用

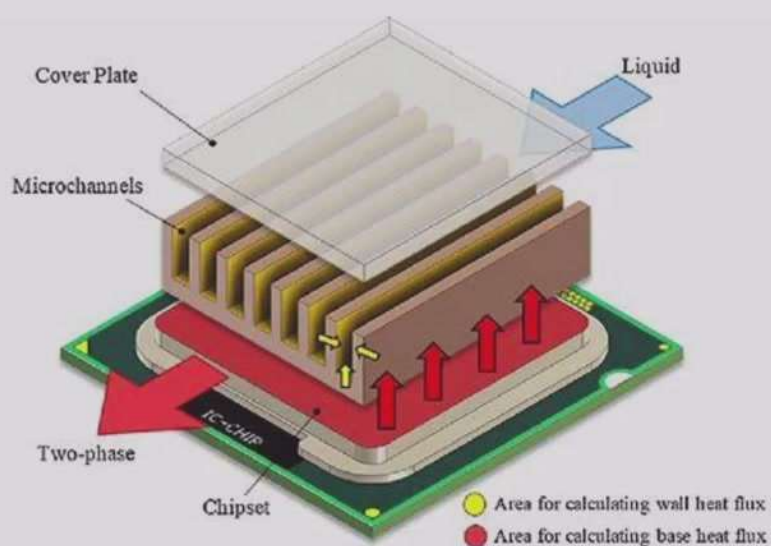
- 新型电动汽车电池冷却技术：英国M&I Materials公司、华威大学制造工程学院（WMG）和Ricardo咨询机构，联手推出i-CoBat项目，i-CoBat浸没式冷却项目旨在减少冷却系统的尺寸和成本，使汽车制造商能够在不增加热量积累的情况下制造更密集的电池组。



<http://www.nengyuanjie.net/article/29616.html>

微通道液冷

Microchannel cooling

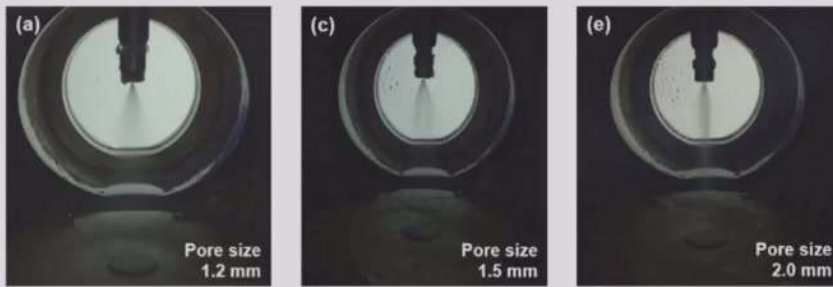


- 1981年由Tuckerman和Pease首次提出
- 水利直径: 20-200 μm
- 液体: 单相或双相
- 散热能力高达1000 W/cm^2

影响因素和研究热点

- 板材
- 流道布局、形状, 内表面粗糙度
- 制冷剂物性, 例如liquid metal
- 制冷剂相变

喷雾冷却

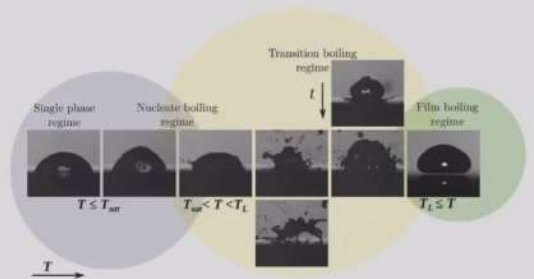
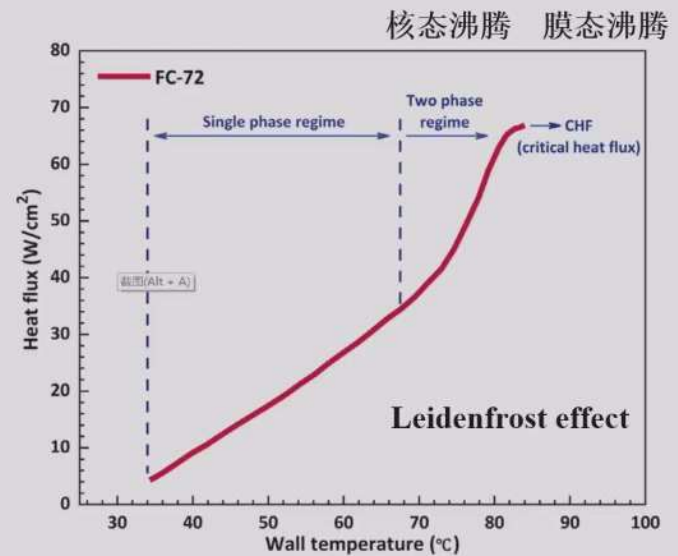


Spray cooling

Phased Array Radar: 5-10 MW/m²
激光武器、铣加工等

如何改善冷却效果？

- 喷嘴参数：孔径、压力、距离等
- 冷却液物性：疏水、低沸点、**nanofluid**等
- 表面：朝向、粗糙度、微观结构等



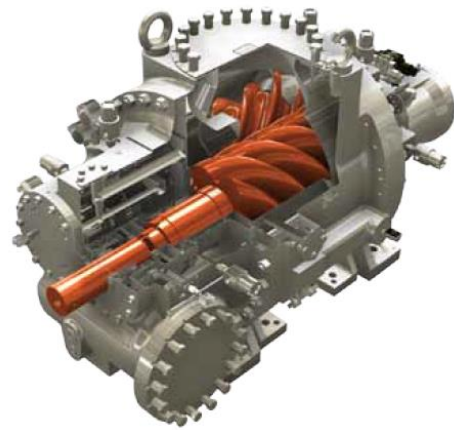
10 螺杆压缩机简介

螺杆压缩机简介



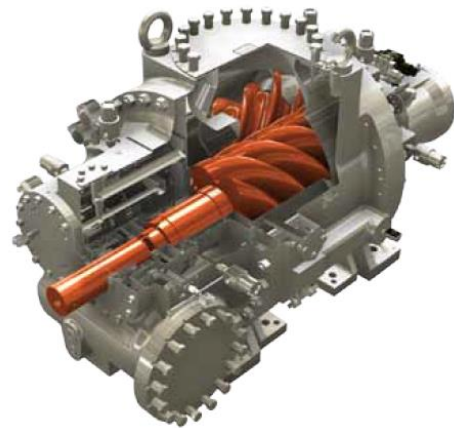
1.螺杆压缩机特点

- 内压缩，强制排气
- 连续输气，压力稳定，无喘振
- 排气量不随排气压力变化，适用不同工质
- 滑阀调节，变内容积比，变压比
- 转速高，排温低，效率高
- 几乎没有易损件，寿命长；动力平衡好，工作平稳
- 型线几何形状复杂



2.螺杆压缩机应用范围

- 容积式压缩机
- 压缩过程更类似于往复式压缩机
- 应用范围限制
- 压比: **1.4:1 - 20:1**
- 吸气温度最低到**-60°C**
- 排气压力
- **2.4Mpa(350 psig)** 灰铸铁/球墨铸铁
- **4.1Mpa(600 psig)** 铸钢



3.螺杆压缩机的几个重要参数

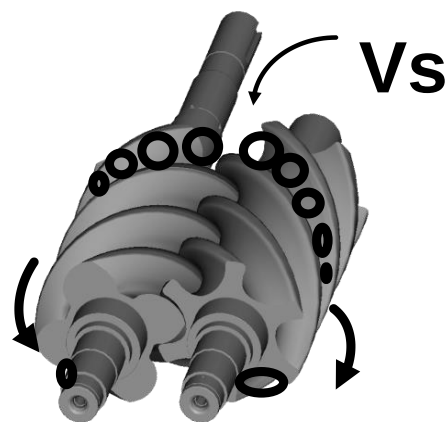
➤ 内容积比 V_i

$$V_i = V_s / V_d$$

V_s : 吸气结束压缩开始时的齿间容积

V_d : 压缩过程结束时的齿间容积

喷油螺杆 $V_{ia} = V_s / (V_d + V_{oil})$

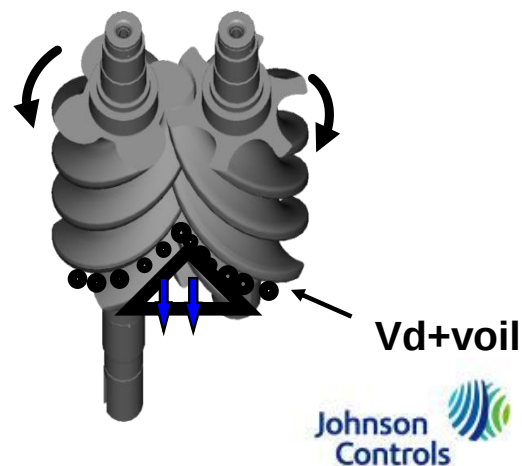


➤ 内压力比 P_i

$$P_i = P_d / P_s$$

P_s : 齿间容积与吸气孔口断开瞬间，该容积内的气体压力，即吸气终了压力。

P_d : 齿间容积与排气孔口连通时，该容积内的气体压力，即排气终了压力。



3.螺杆压缩机的几个重要参数

➤外压比CR

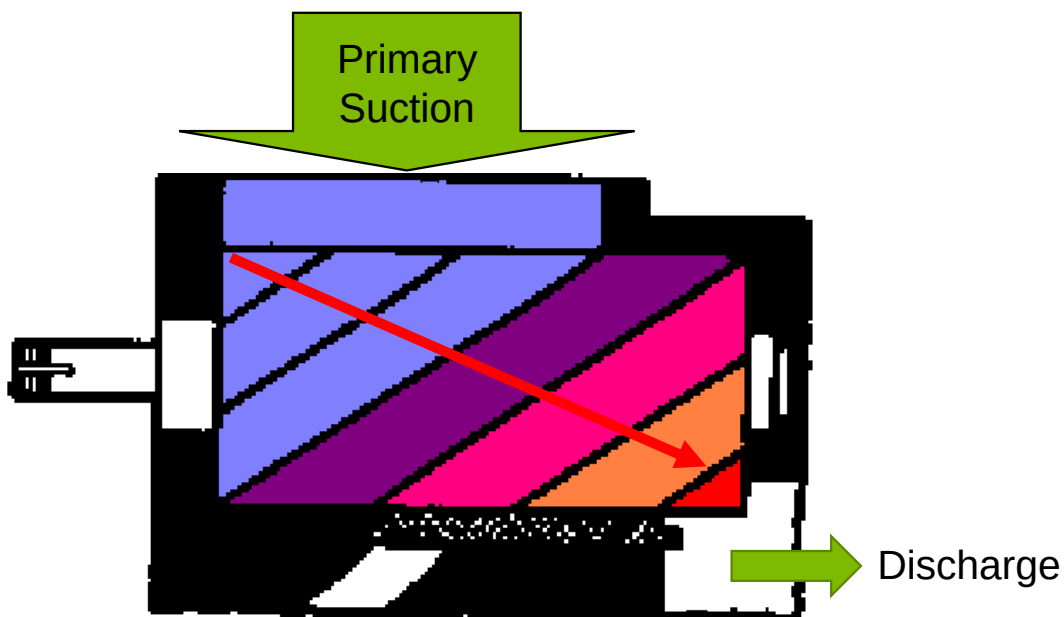
CR是吸排气背压之比，是由系统的工况决定的，
CR=冷凝饱和压力/蒸发饱和压力（绝对压力）

➤Pi与Vi的关系

$P_i = V_i^n$ （n为气体的多方过程指数），
 $P_i = V_i^k$ （K为气体的绝热指数）。
R22, $k=1.30$
R134a, $k=1.18$,
R717, $K=1.29$.

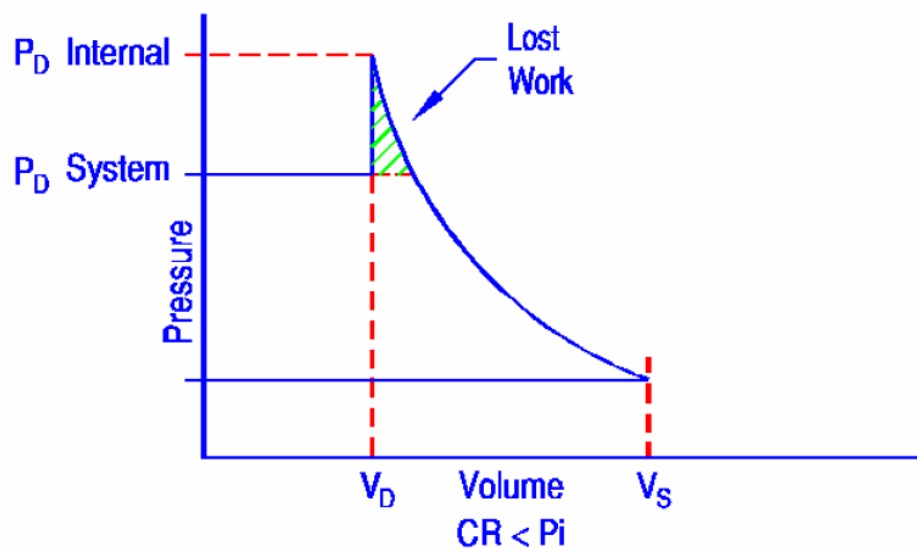
4.内容积比

- 内压缩终了压力取决于排气口的位置
- 螺杆压缩机排气口位置决定排气何时开始
- 螺杆压缩机排气口位置决定 V_i 大小



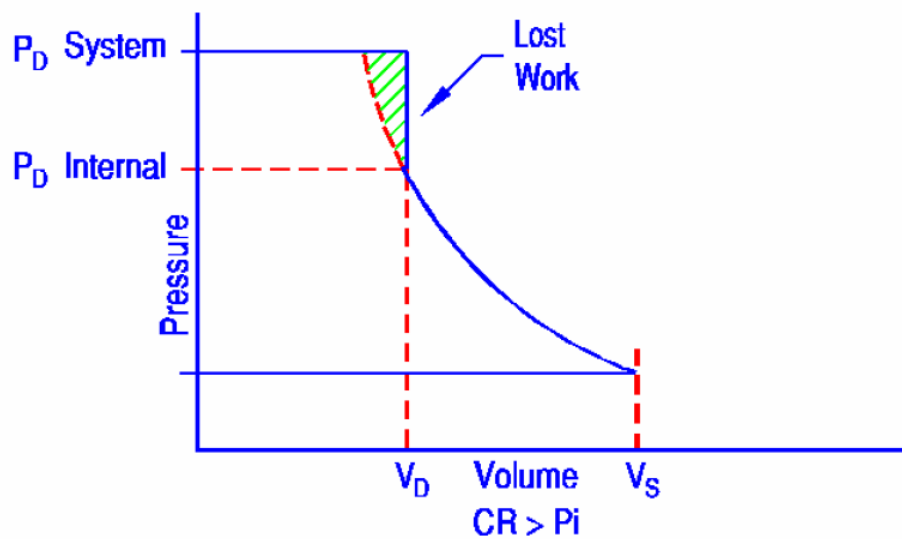
4.内容积比

Over Compression P-V Diagram

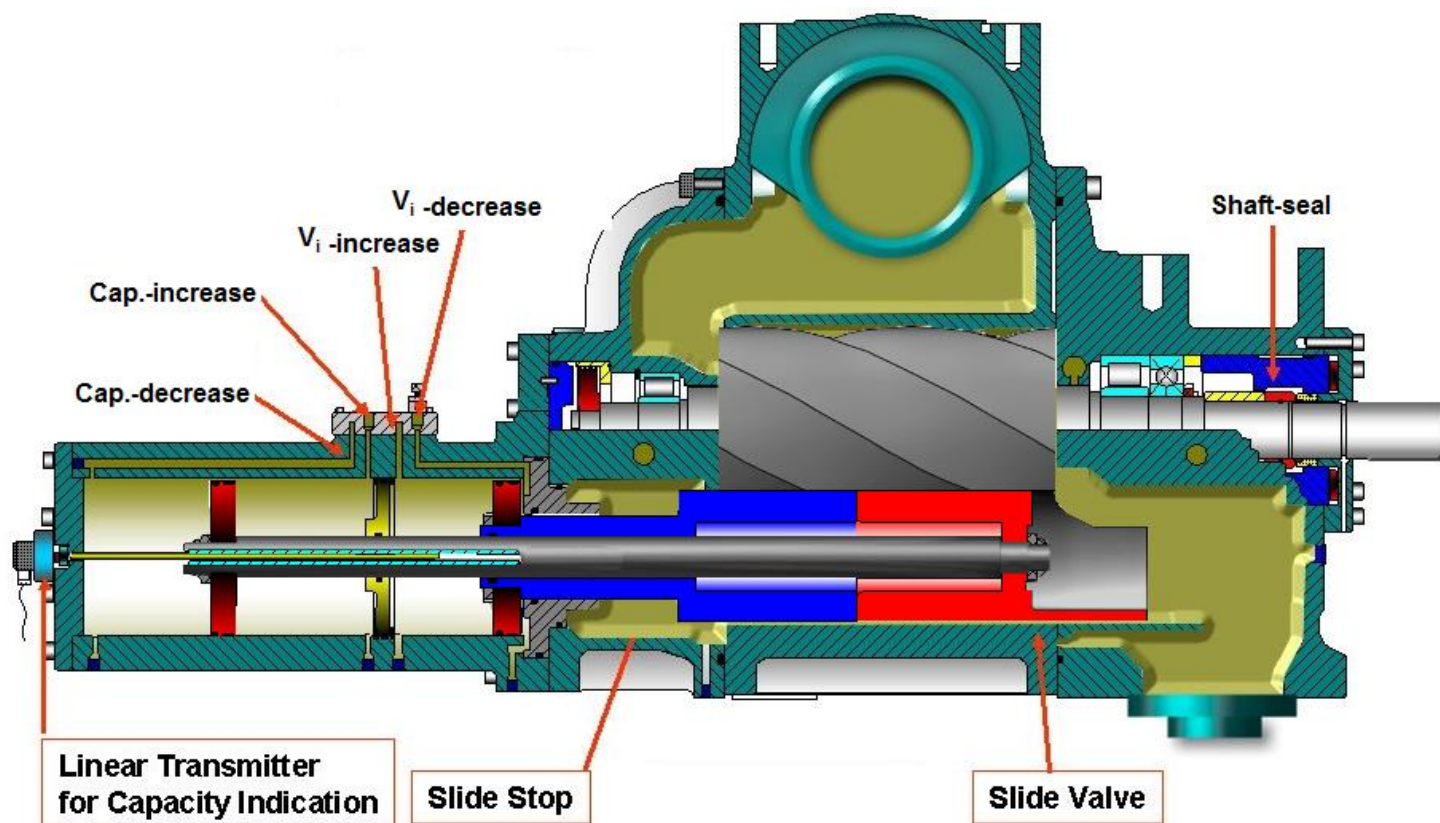


4.内容积比

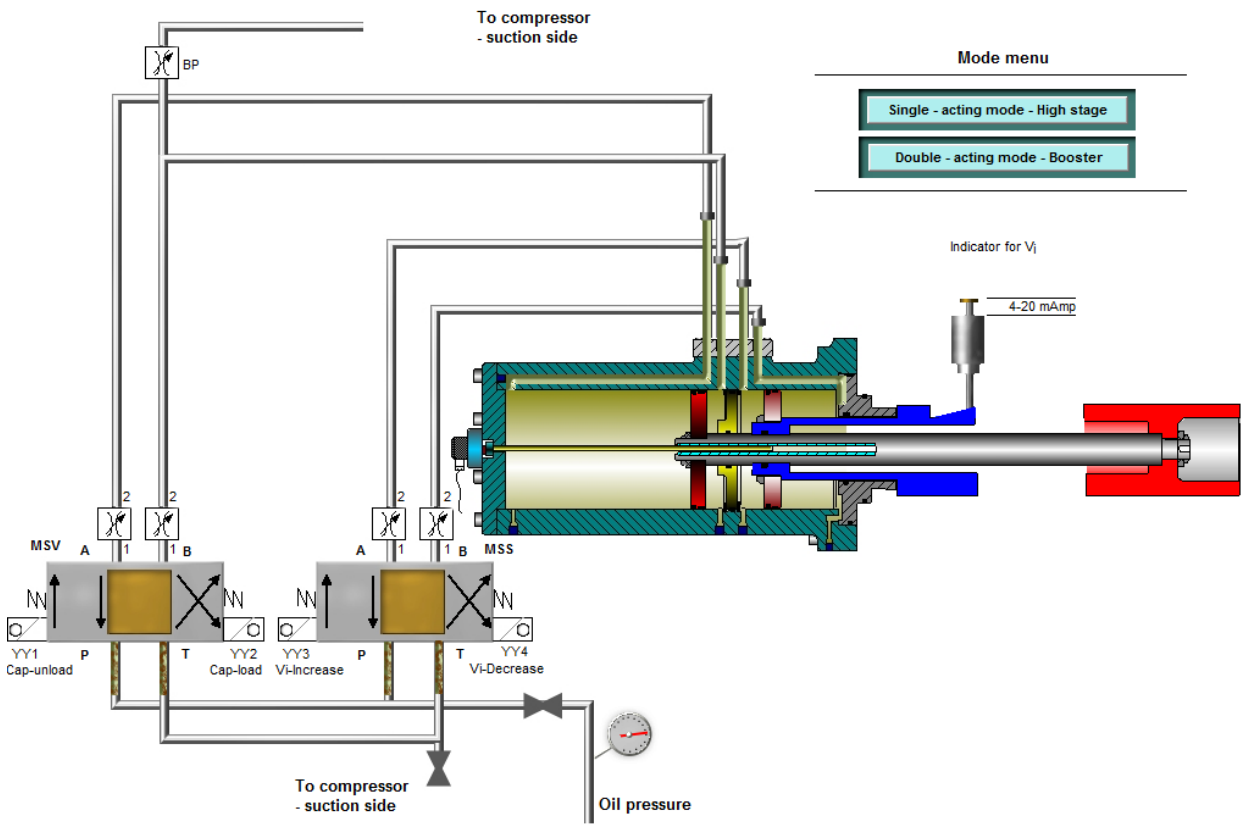
Under Compression P-V Diagram



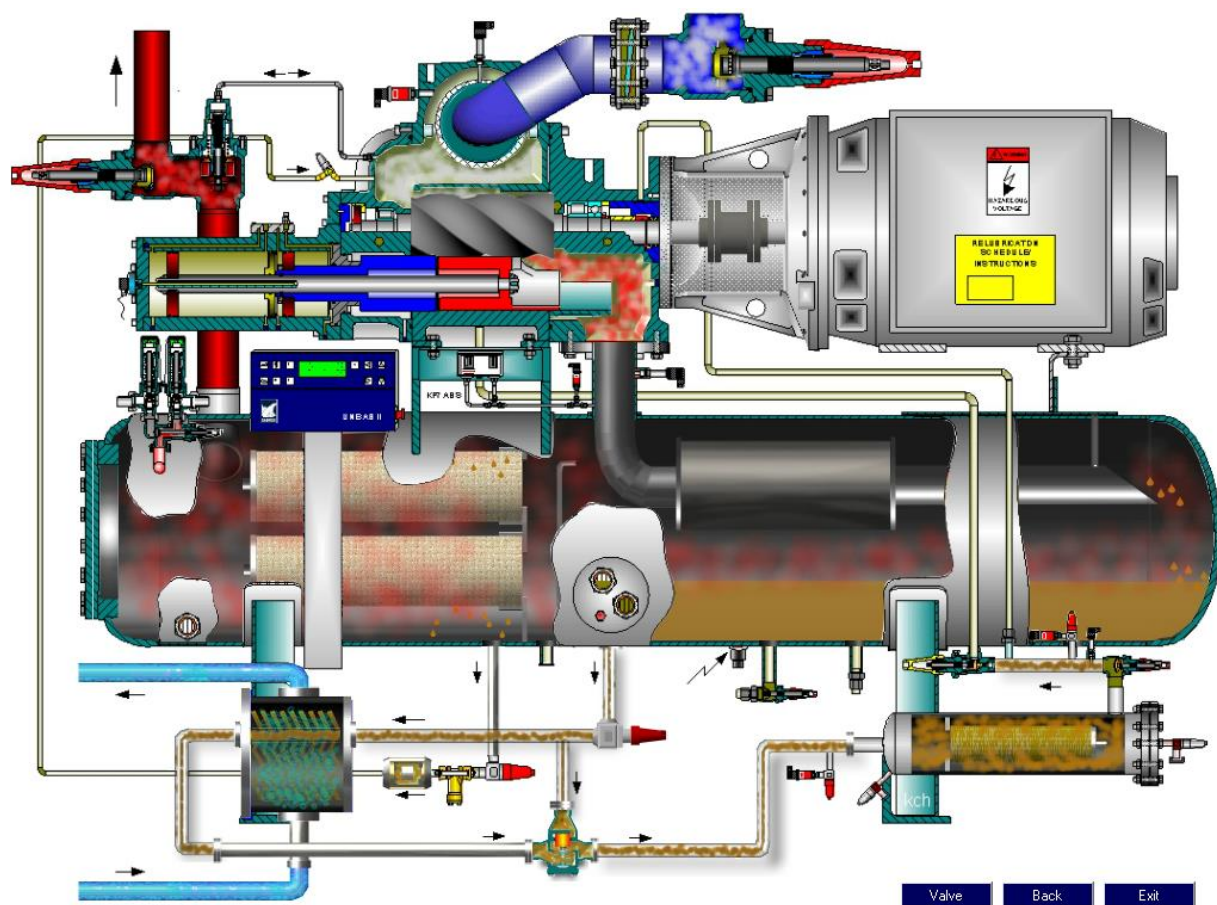
5.内容积比调节



5.内容积比调节



5.压缩机组



6.变频螺杆压缩机应用

➤ 什么是VSD？：

VSD是英文（Variable Speed Drive）的首字母缩写，中文称为变频器。在有的公司，也成为ASD（Adjustable Speed Drive），或者VFD（Variable Frequency Drive）。

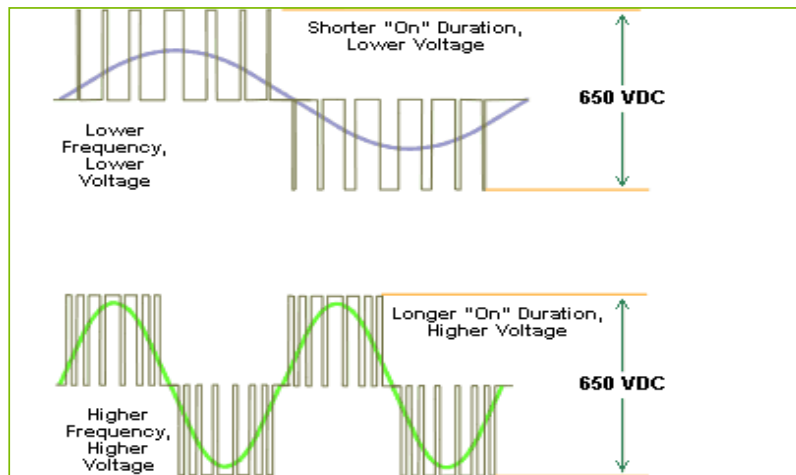
➤ VSD的作用

从中文名变频器可以看出，VSD可以理解为在输入电压频率固定的情况下，通过改变自身输出频率大小，从而控制电机转速变化的一种设备。

➤ 变频器的输入输出：

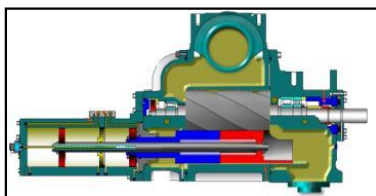
输入：一般来说，变频器的输入是标准的工频三相交流电。当然由于客户端电压质量的原因，实际输入电压各有不同。

输出：变频器的输出电压不是正弦波，是一系列宽度不等的矩形波。根据数学分析，这个波形滤除其中的高次谐波后，可以近似等效于正弦波。通过VSD 的程序控制，这个等效波的频率是可控的，从而实现了变频。

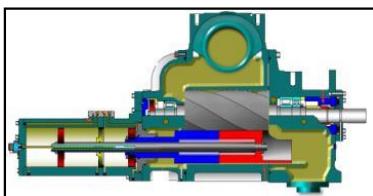


6.变频螺杆压缩机应用

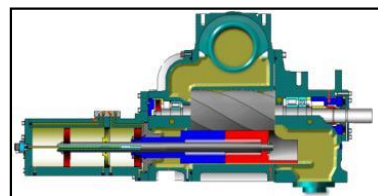
Optimum



Constant Speed
@ 100% Cap.

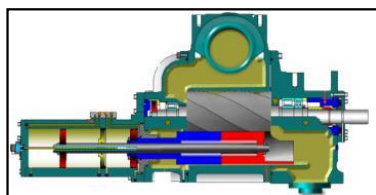


Constant Speed
@ 100% Cap.

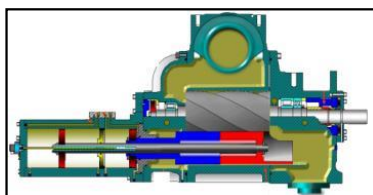


VFD @ 30% Cap.
S.V. Loaded

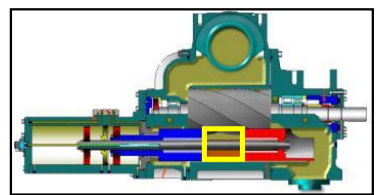
Better



Constant Speed
@ 100% Cap.

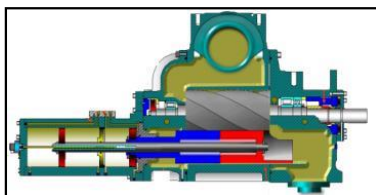


Constant Speed
@ 100% Cap.

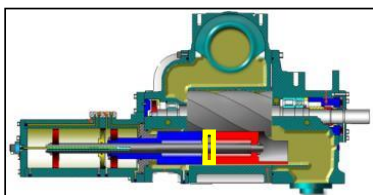


Constant Speed
@ 30% Cap.

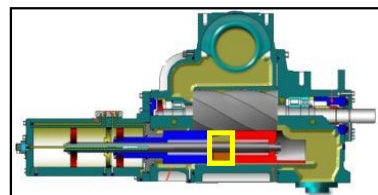
Inefficient



Constant Speed
@ 100% Cap.

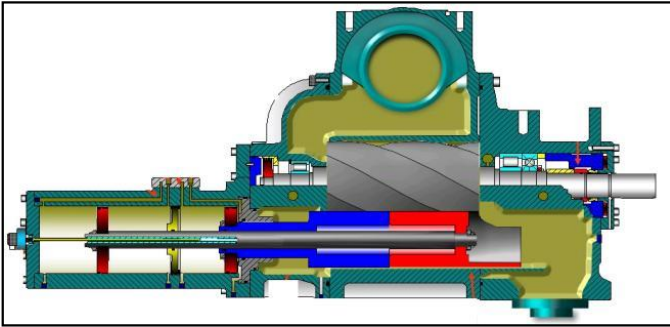


Constant Speed
@ 70% Cap.

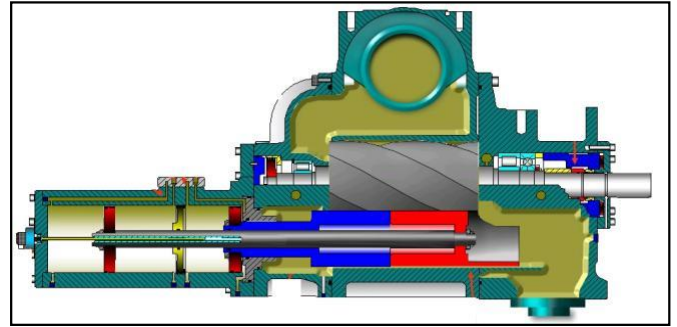


Constant Speed
@ 60% Cap.

6.变频螺杆压缩机的应用



***Capacity 20% -100%
(720 RPM 3600 RPM)
100% Slide Valve***



***Base Loaded, Capacity 100%
3600 RPM
100% Slide Valve***

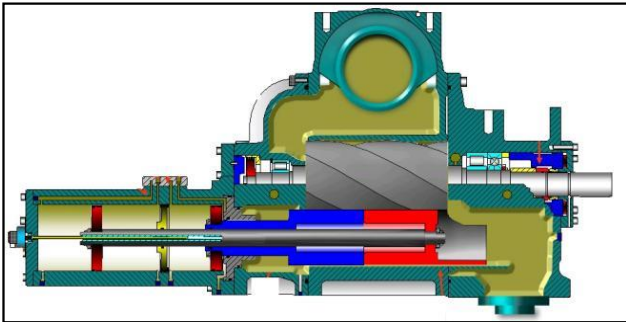
The improvement in part load efficiency will vary based on...

Compression Ratio

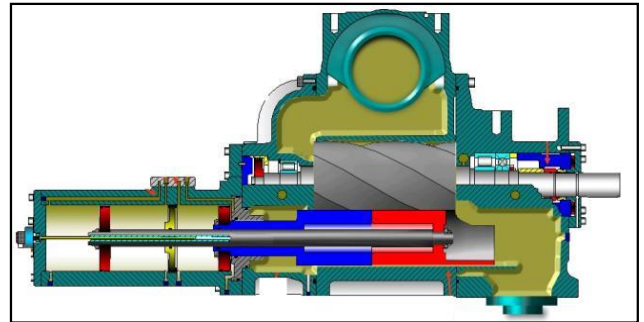
Minimum Speed

Volume Control

6.变频螺杆压缩机应用



194.8psiaD / 48.7psiaS
4:1 CR



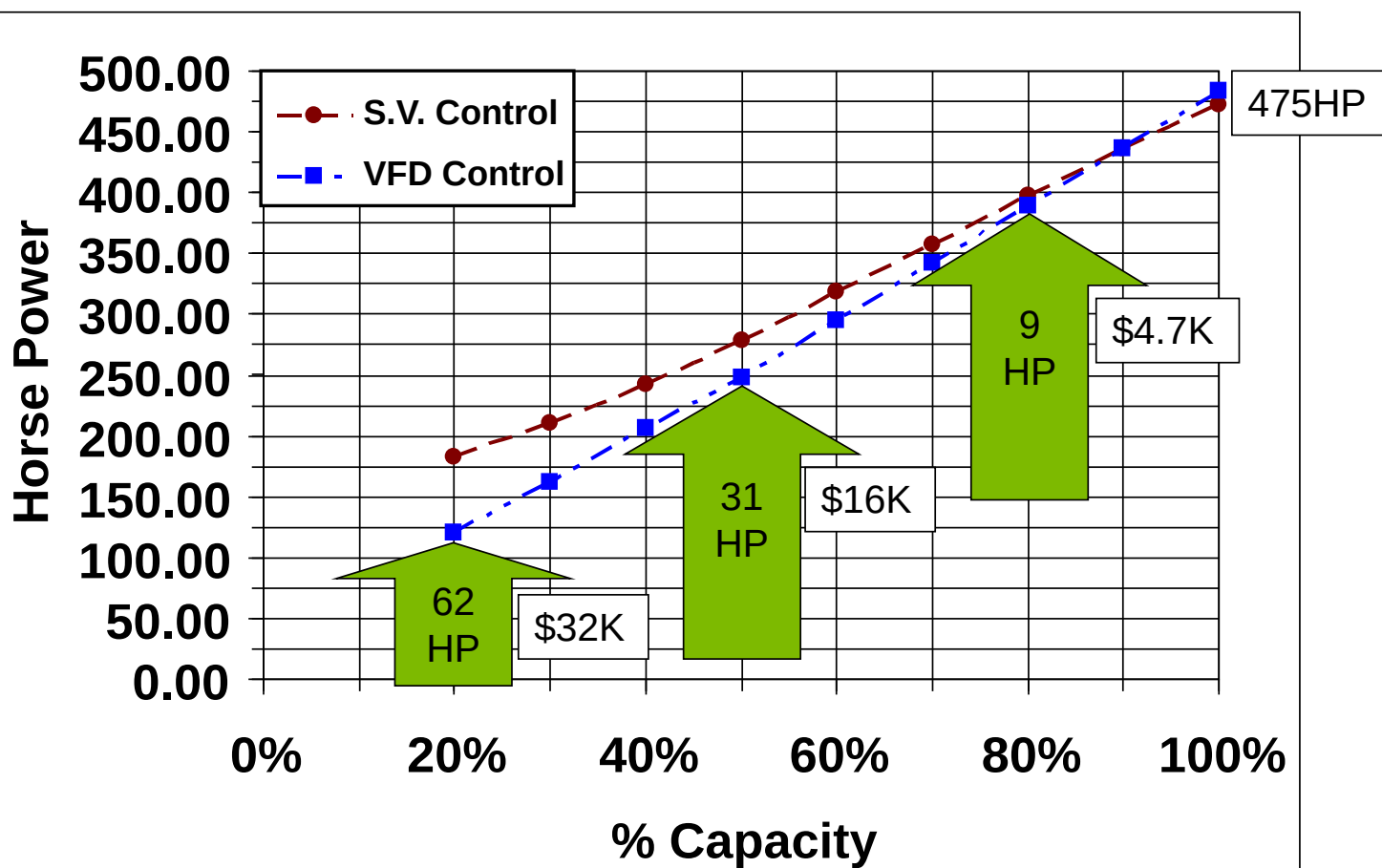
194.8psiaD / 19.48psiaS
10:1 CR

Example: Improvement at 40% capacity by speed
over 40% capacity by slide valve

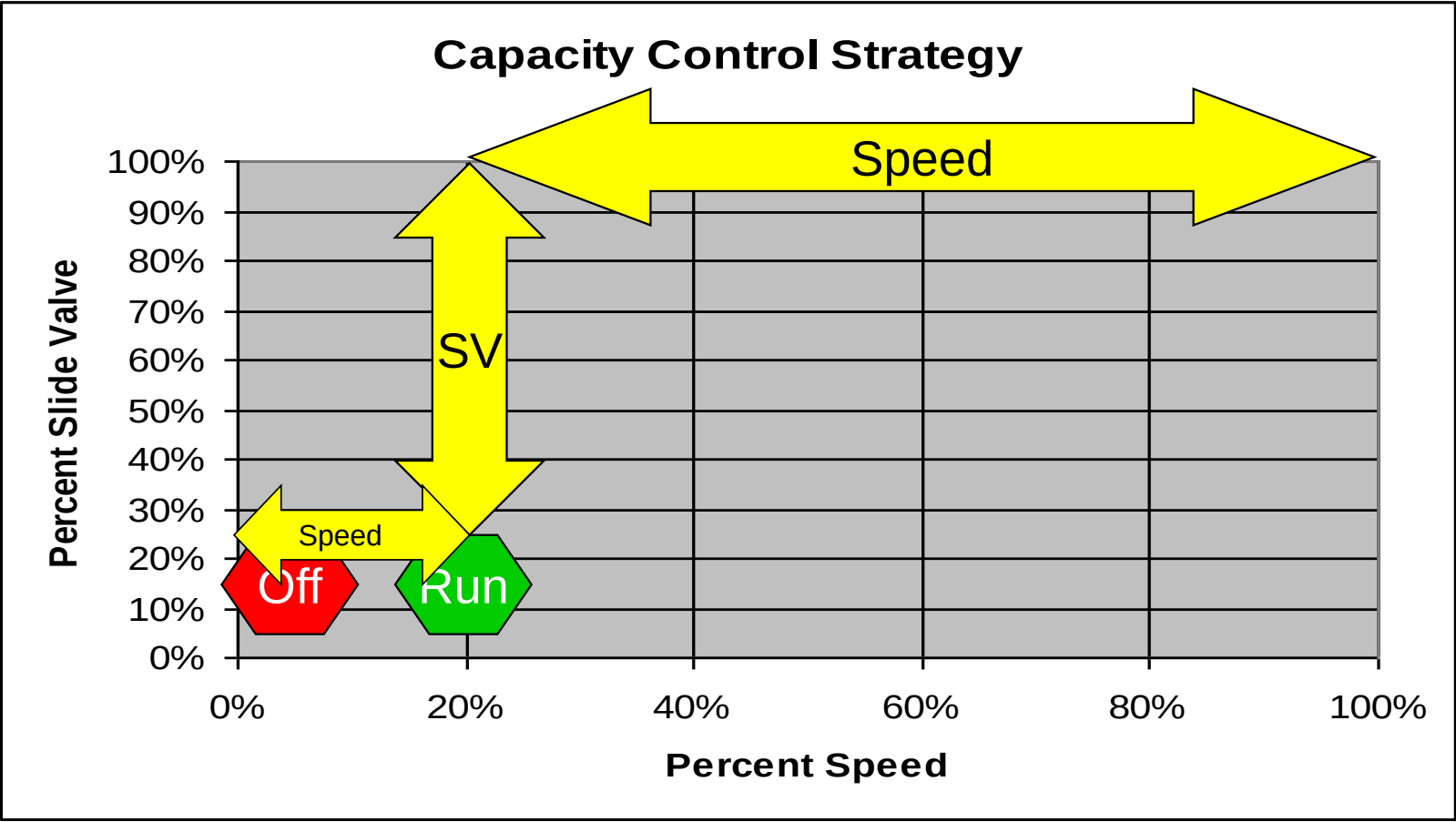
4:1 CR = 19% Improvement

10:1 CR = 33% Improvement

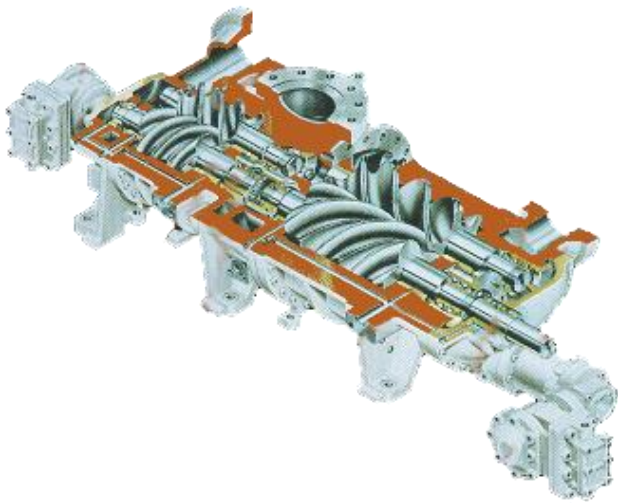
RWFII-270 @ 20°F (-6.7°C) SST / 75°F (24°C) SDT / 2.9:1 CR on Ammonia
Slide Valve, VFD and Ideal Part Load Efficiencies



6.变频螺杆压缩机应用



7.单机双级压缩机



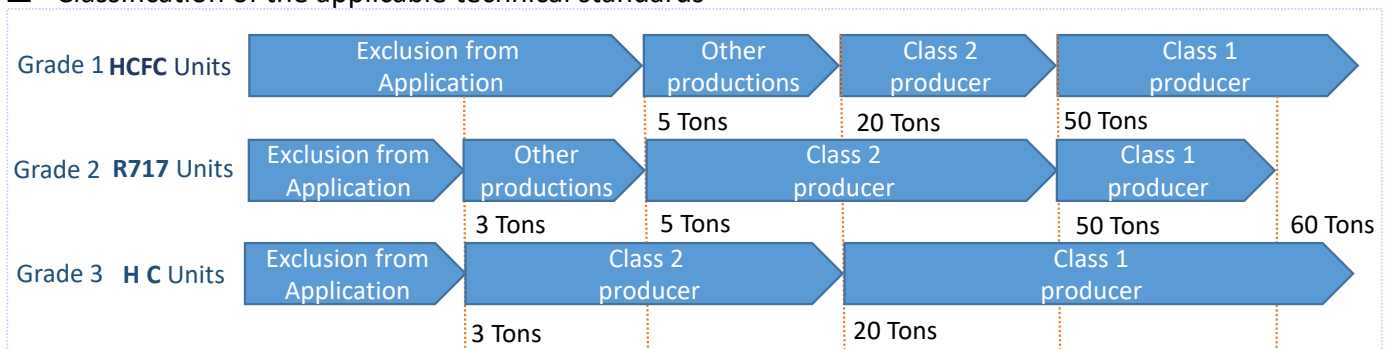
单机双级（MYCOM）



VS 双机双级

7.单机双级压缩机

Classification of the applicable technical standards



Class1 requires:

- End users to sit an exam every 3 years for safety and employ a full time licensed refrigeration safety person for traditional turnkey installations;
- Packaged units do not need a full time person;
- New installations require government approvals;
- Modifications require government approvals

Class2 requires:

- Does not require the 3 year exam, full time person;
- Modifications are permitted.

Example:

Below is an example of comparison between TCMO-28 (2-stage recip.) and CMO (single stage recip.).

Daily refrigerating capacity calculation

$$R = \frac{V}{C}$$

R- Daily refrigerating capacity (Legal Ton)
C- Refrigerant parameters
V-Compressor swept volume

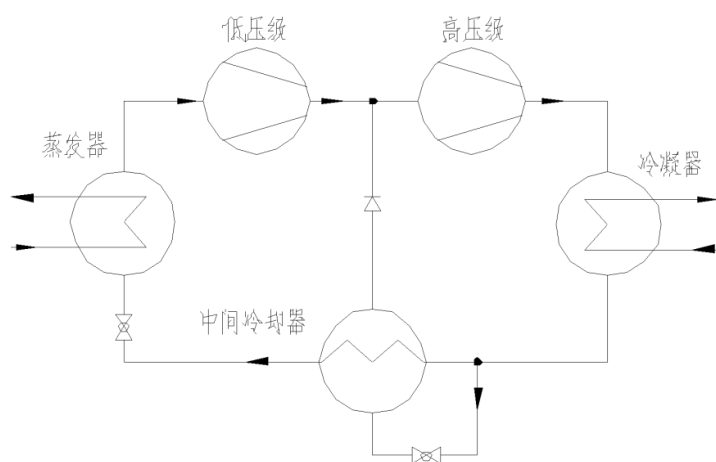
For 2 stage compressor system $V = V_h + 0.08V_l$

V_h -high stage Compressor swept volume

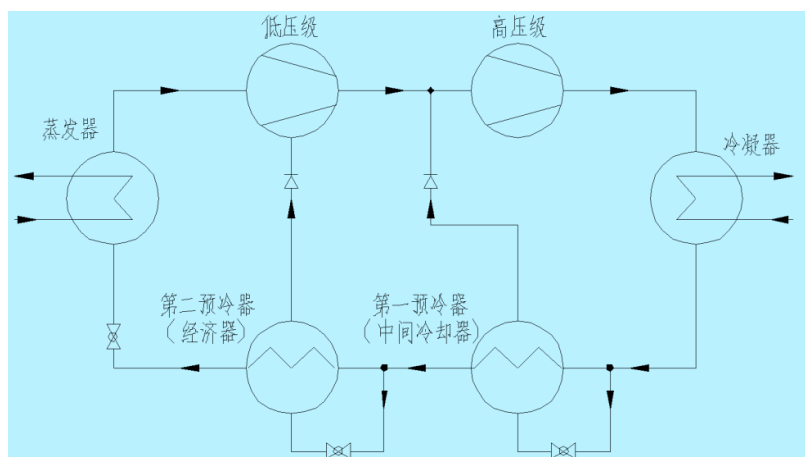
V_l -booster swept volume

CMO-26(NH3) @1800rpm single		TCMO-28(NH3)@ 1800rpm 2-stage system	
V	175 m ³ /h	V_h	58.3 m ³ /h
		V_l	175 m ³ /h
		V	$58.3+0.08*175=72.3$ m ³ /h
C	8.4	C	8.4
<u>R</u>	$V/C = 175/8.4$	<u>R</u>	$V/C = 72.3/8.4$
	20.83 Ton		8.61 Ton

7.单机双级压缩机



单机双级



双机双级

单机双级优势：结构紧凑，较双级散系统减少了50%的占地空间，降低了成本。

单机双级缺点：内容积比固定，很难与工况匹配；COP较低；采用大电机，启动电流大；开机时，两台压缩机同时开启，效率低；

11 工业冷冻典型系统简介

工业冷冻典型系统简介

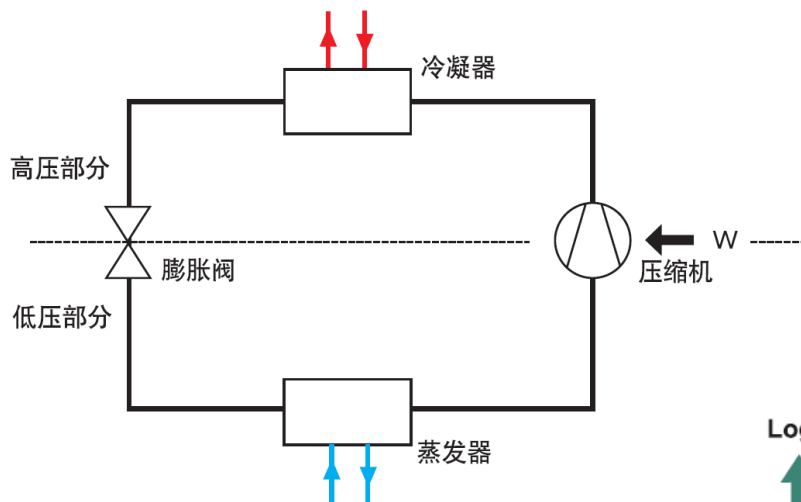
崔立祺



目录

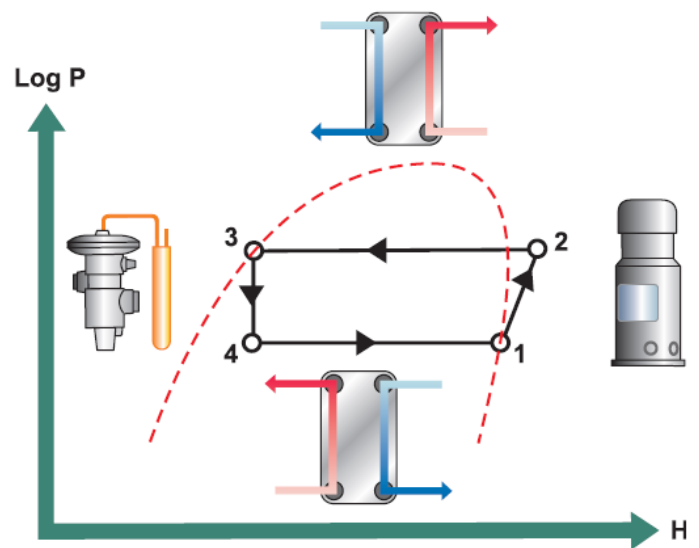
- 1.基本制冷压缩循环
- 2.工业冷冻典型系统P&ID
- 3.工业冷冻系统基本部件
- 4.工业冷冻系统辅助部件

1.基本制冷压缩循环

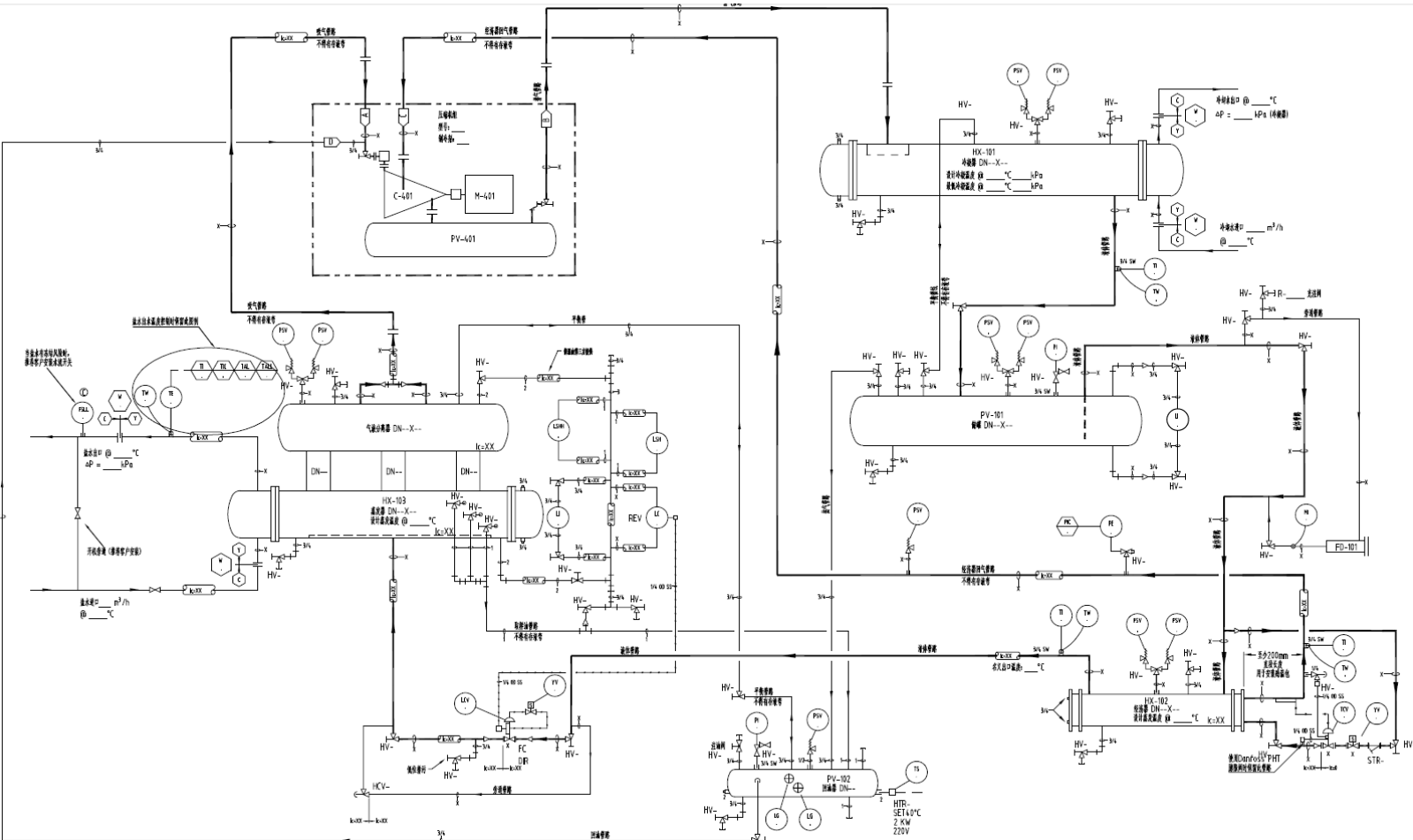


制冷系统基本构成：压缩机（含驱动装置）、冷凝器、蒸发器和节流装置。

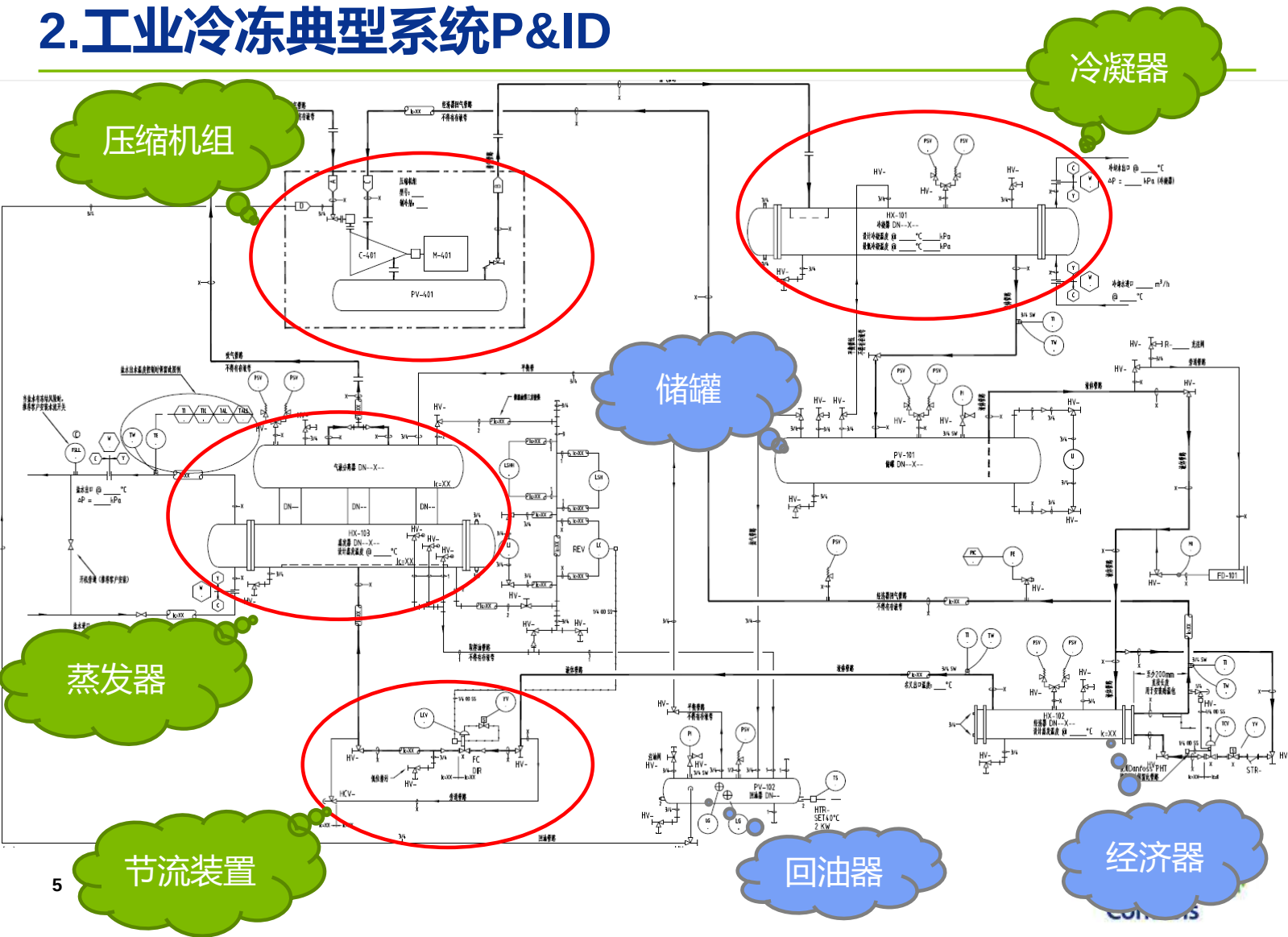
- 1-2: 等熵压缩过程
- 2-3: 恒压冷凝
- 3-4: 等焓节流
- 4-1: 恒压蒸发



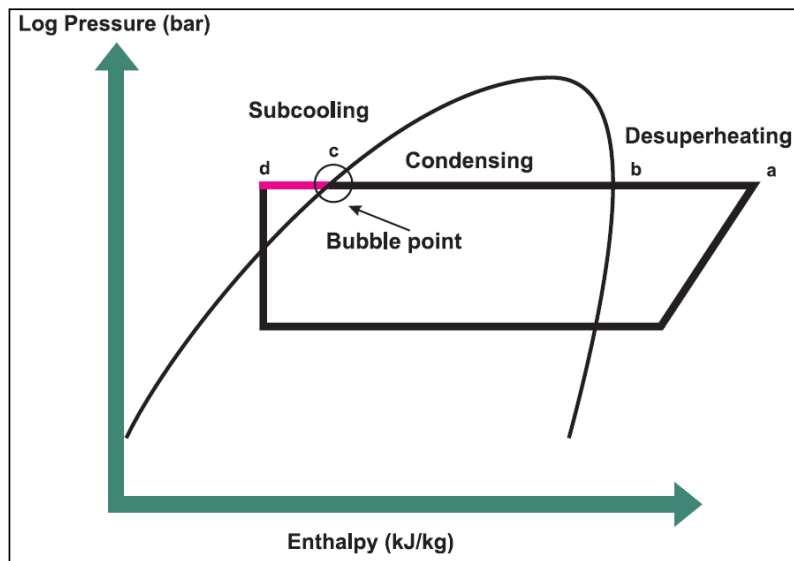
2.工业冷冻典型系统P&ID



2.工业冷冻典型系统P&ID



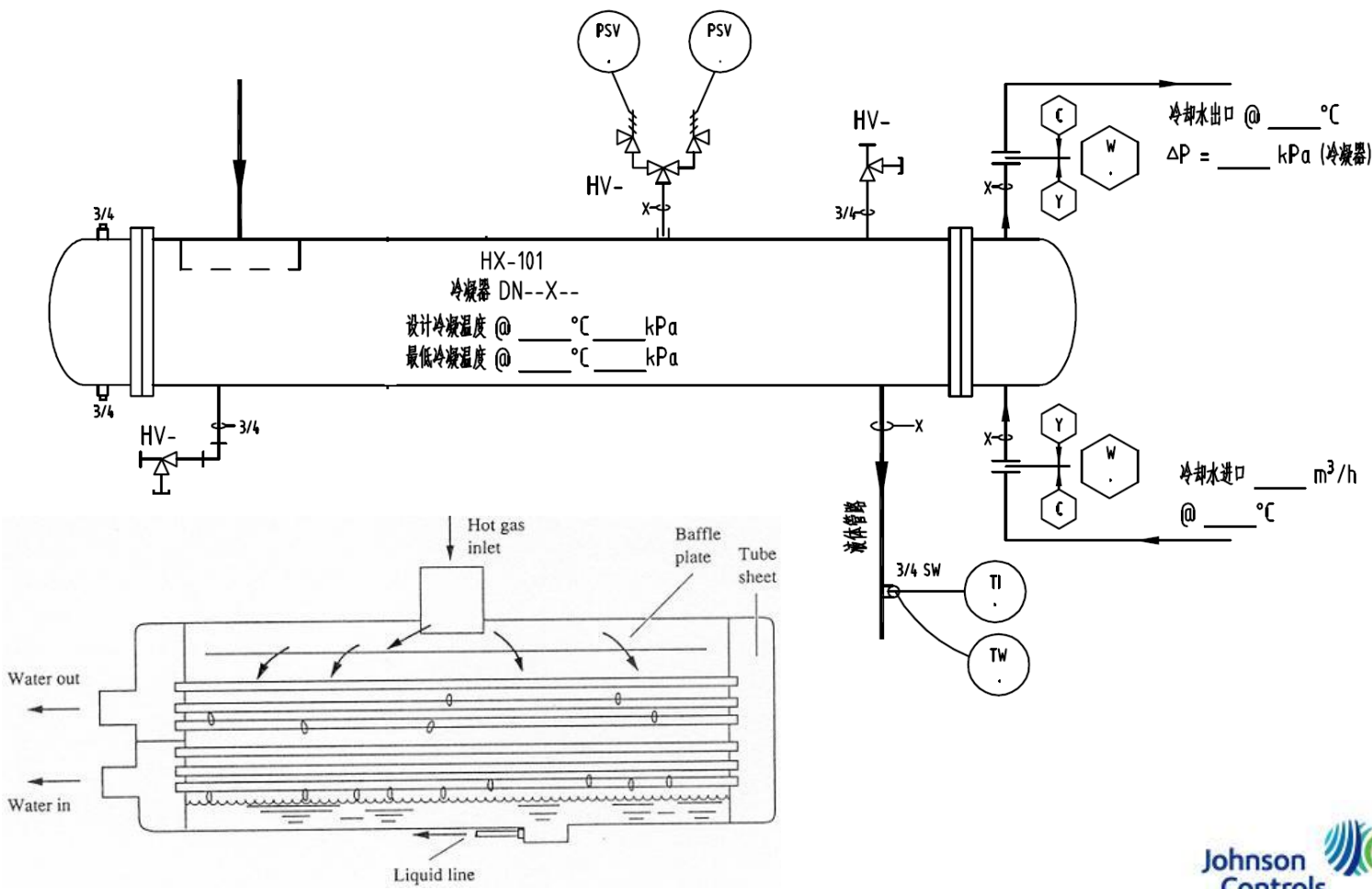
3.工业冷冻系统基本部件-冷凝器



- a-b: 过热蒸气冷却至饱和温度，放热15~25%
- b-c: 由气相变为液相，释放潜热，放热70~80%
- c-d: 液体过冷，放热2~5%

3.工业冷冻系统基本部件-冷凝器

水冷壳管式冷凝器



3.工业冷冻系统基本部件-冷凝器

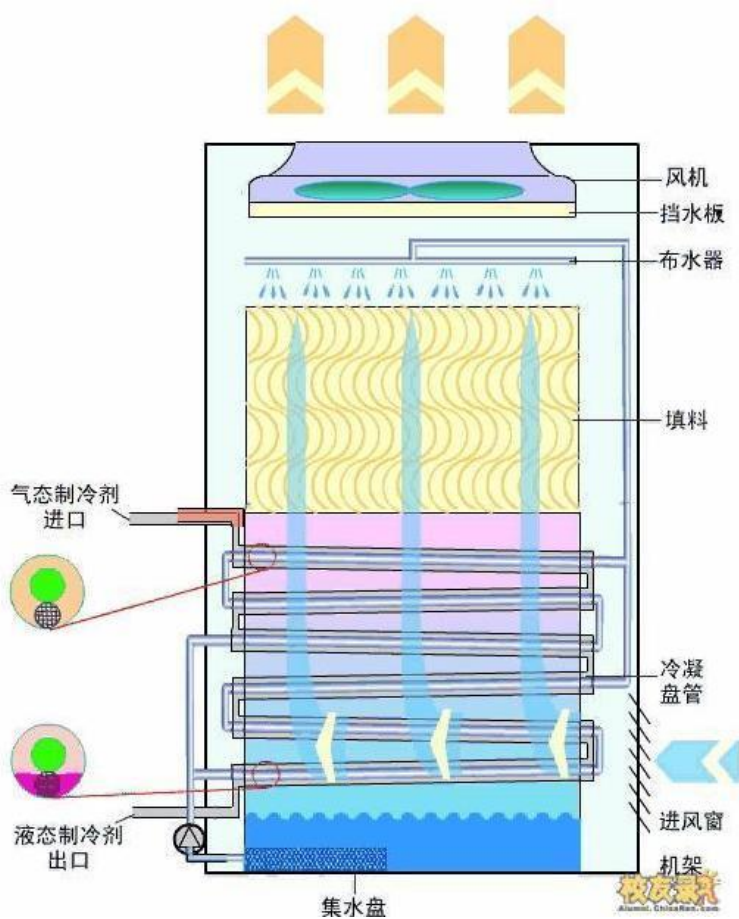
风冷式冷凝器



风冷式冷凝器运行成本低，无需水源，但冷凝温度取决于环境温度，投入成本较高。

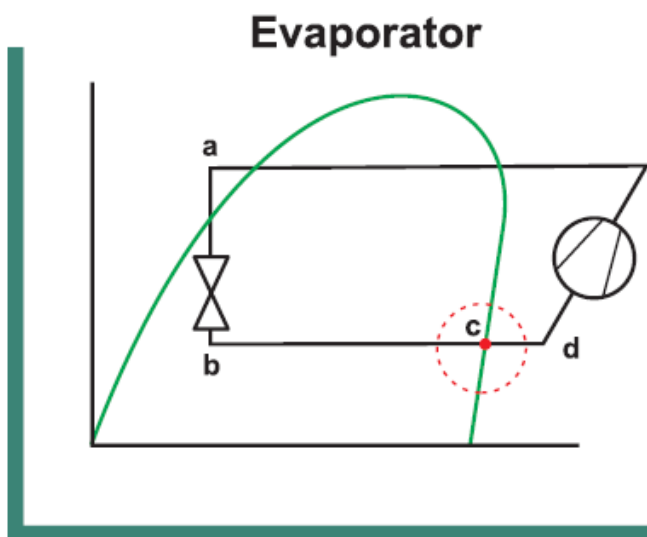
3.工业冷冻系统基本部件-冷凝器

蒸发式冷凝器



蒸发式冷凝器利用水的气化潜热将制冷剂的热量带走，具有节能节水的优点，但初投入较高。

3.工业冷冻系统基本部件-节流装置及蒸发器

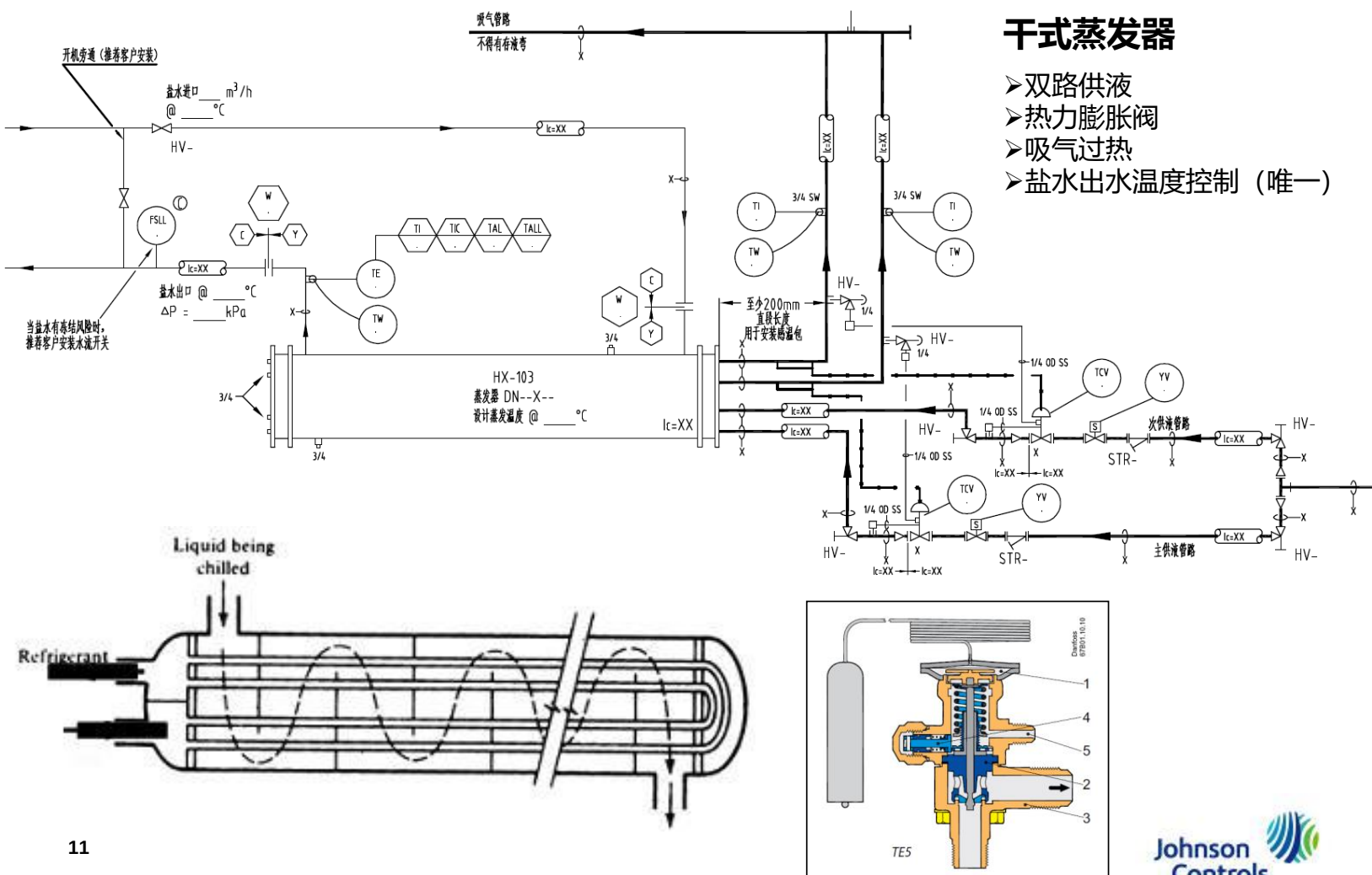


- a-b: 等焓节流膨胀
- b-c: 节流后气液两相制冷剂完全气化
- c-d: 饱和制冷剂蒸汽过热

制冷剂的总吸收热包括蒸发潜热和过热显热。对于干式系统，控制一定的吸气过热有利于防止压缩机吸气带液。

注：以DX蒸发器为例

3.工业冷冻系统基本部件-节流装置及蒸发器



3.工业冷冻系统基本部件-节流装置及蒸发器

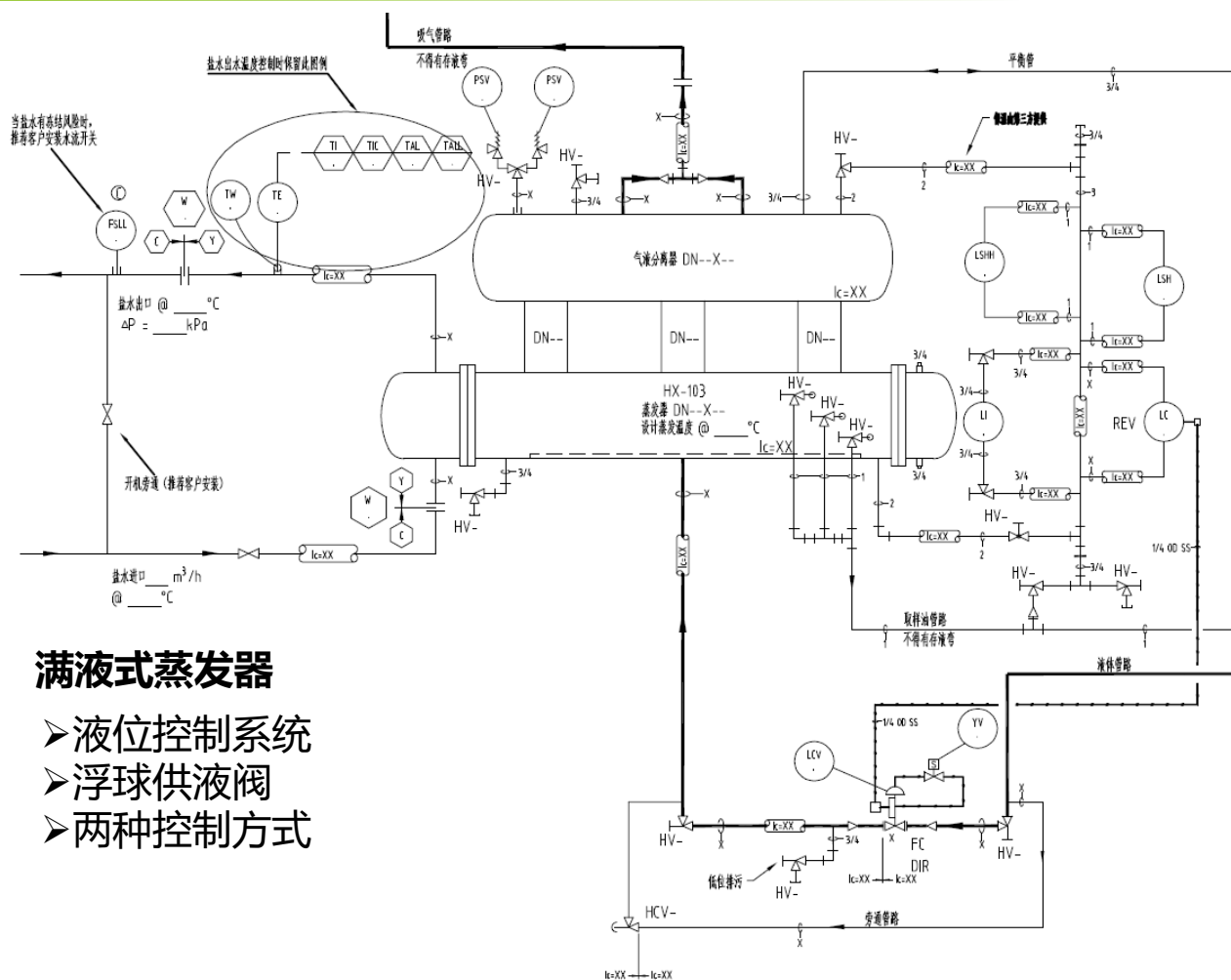
优点:

- 干式蒸发器结构简单，易于加工；
- 制冷剂走蒸发器管程，流速高，可直接将冷冻油带回至压缩机；
- 制冷剂充注量小，只有满液式蒸发器的1/3；

缺点:

- 蒸发器回气要求过热，换热效率低
- 热力膨胀阀供液能力有限，提供冷量范围小
- 管程制冷剂压降大。

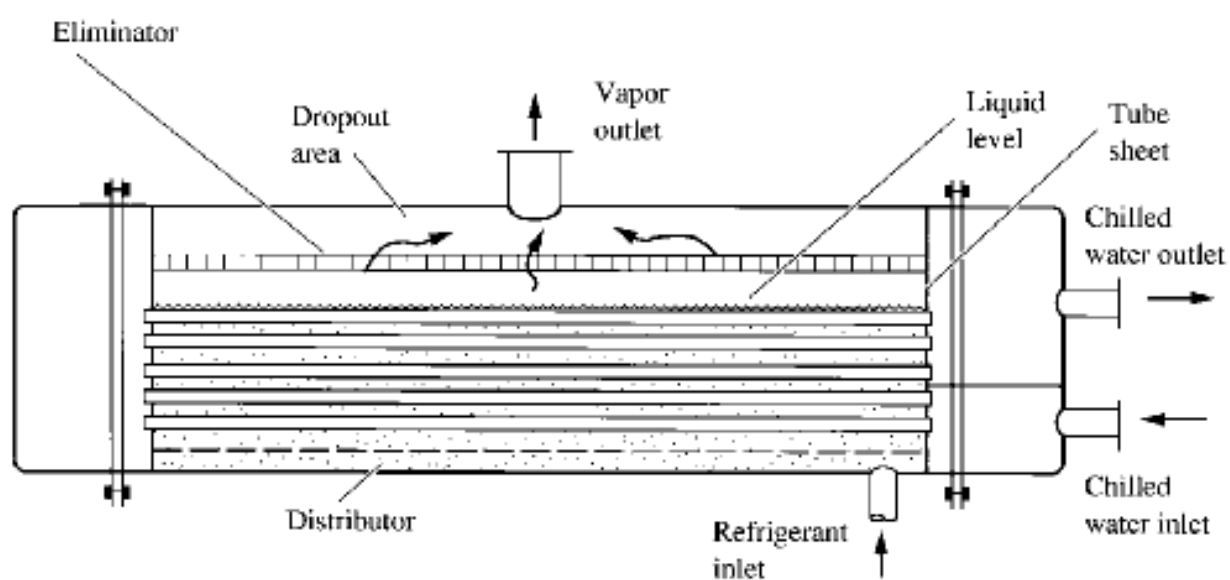
3.工业冷冻系统基本部件-节流装置及蒸发器



满液式蒸发器

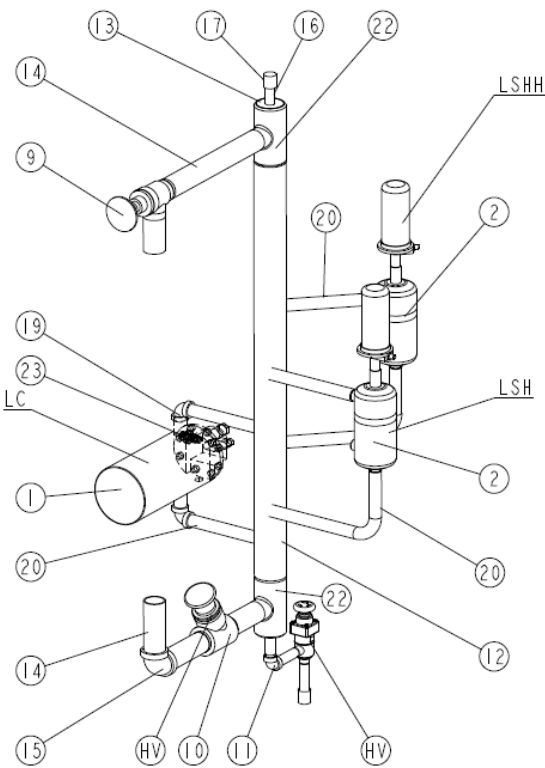
- 液位控制系统
- 浮球供液阀
- 两种控制方式

3.工业冷冻系统基本部件-节流装置及蒸发器

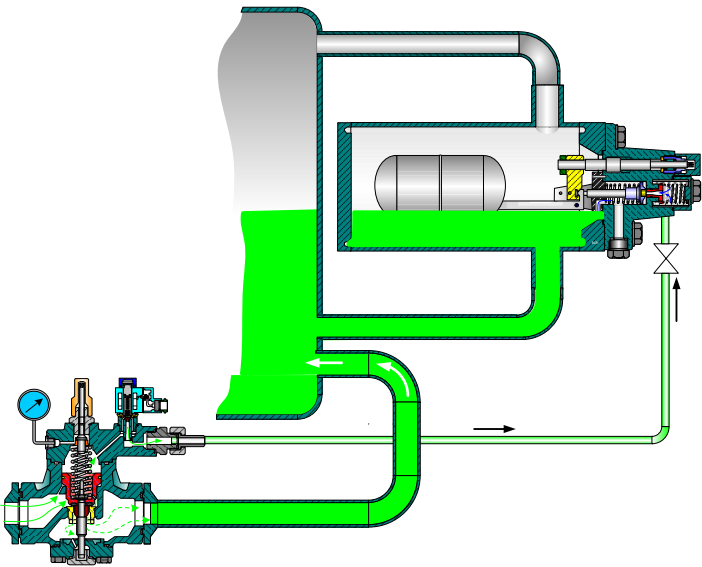


3.工业冷冻系统基本部件-节流装置及蒸发器

液位控制系统



浮球供液阀



3.工业冷冻系统基本部件-节流装置及蒸发器

优点:

- 换热管完全沉浸在制冷剂液体中，换热效率高；
- 制冷剂走蒸发器壳程，压力损失小；
- 回气以接近饱和的气态进入压缩机，故可增加压缩机的压缩效率与质量流率；
- 冷量范围大。

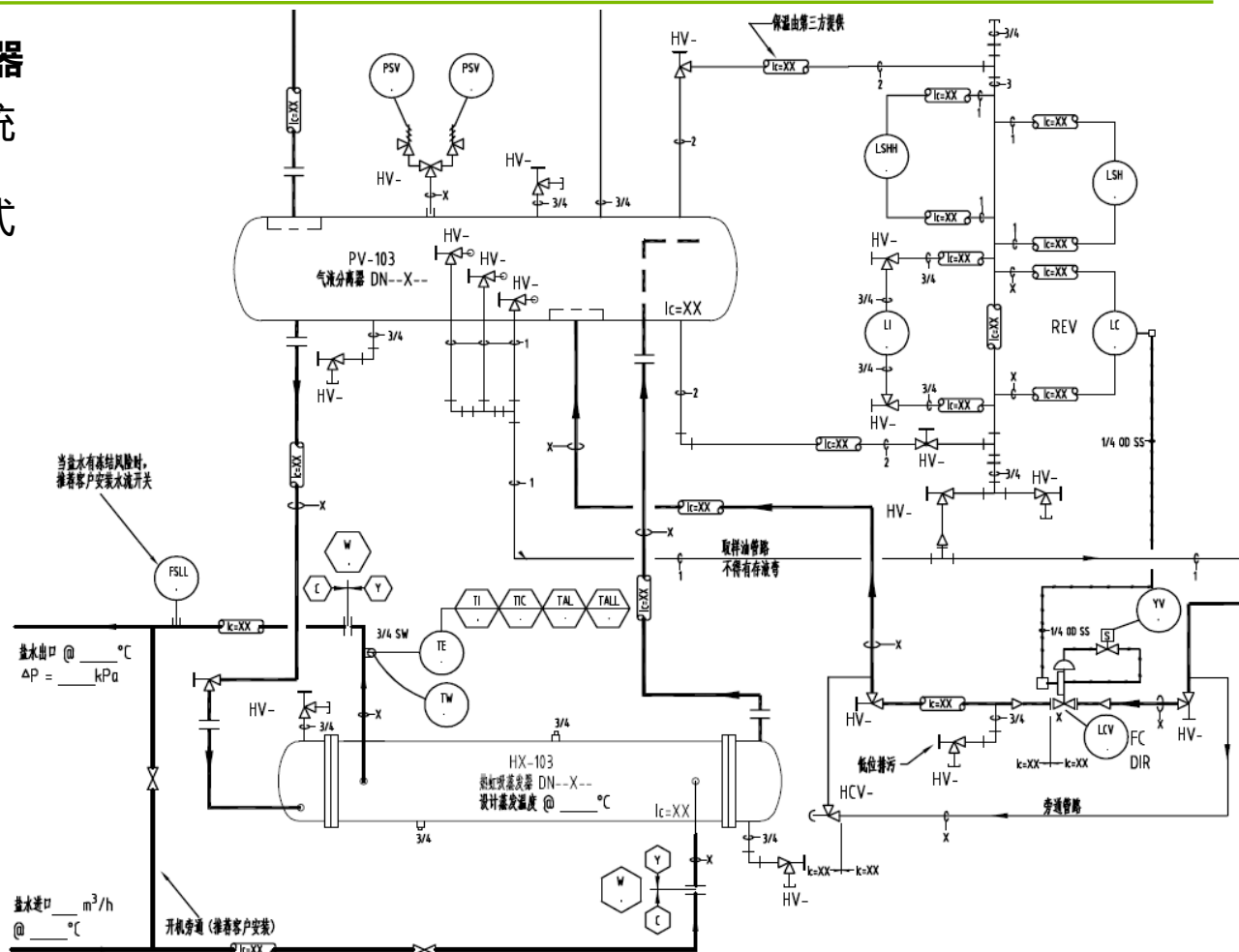
缺点:

- 结构复杂，制造难度大
- 为防止吸气带液，需安装液位控制系统
- 制冷剂充注量大，成本高
- 需增加辅助回油设备

3.工业冷冻系统基本部件-节流装置及蒸发器

热虹吸式蒸发器

- 液位控制系统
- 浮球供液阀
- 两种控制方式

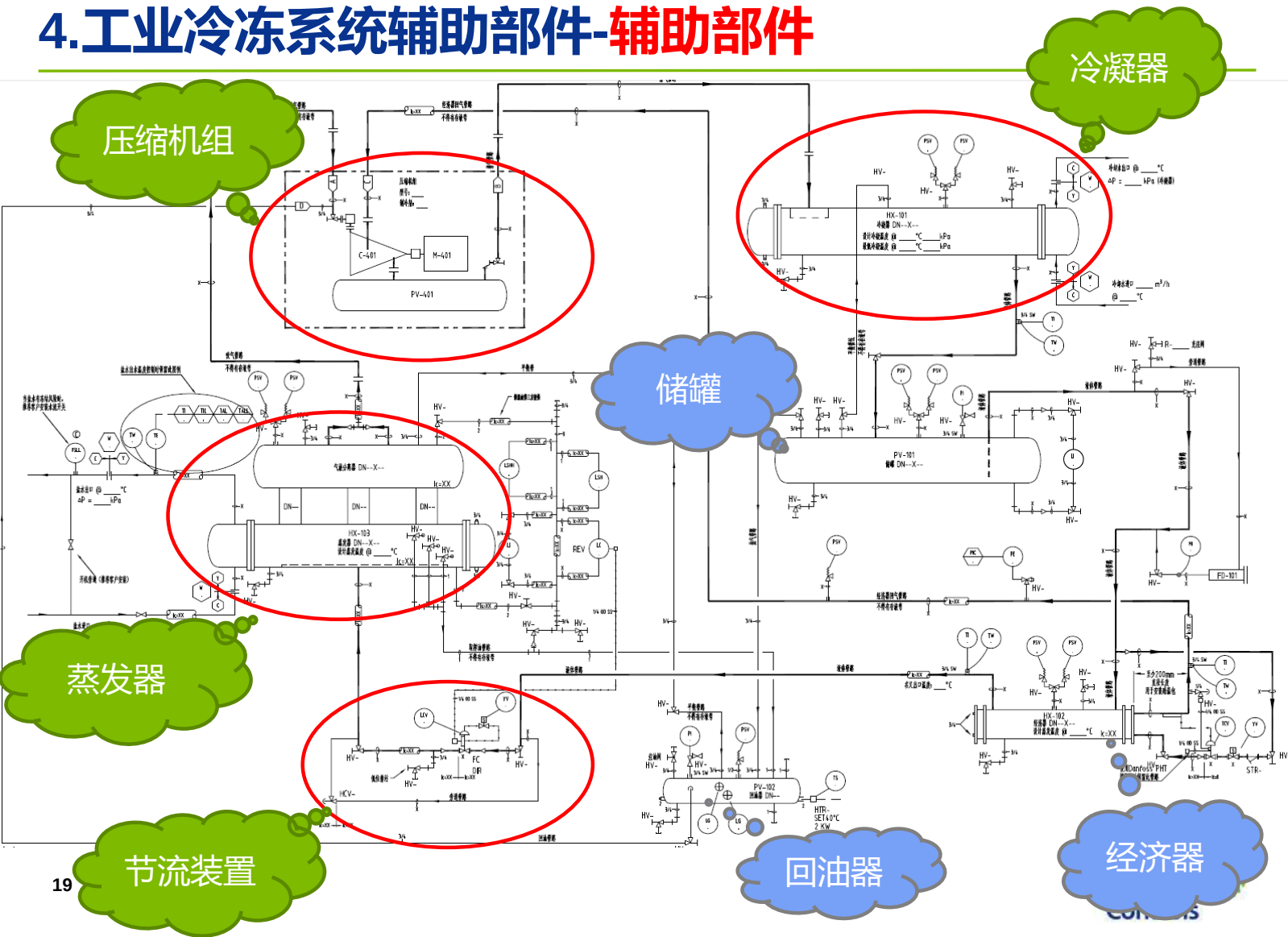


3.工业冷冻系统基本部件-节流装置及蒸发器

满液式和热虹吸式蒸发器的比较：

- 蒸发温度较低时优先选用热虹吸式；

4.工业冷冻系统辅助部件-辅助部件

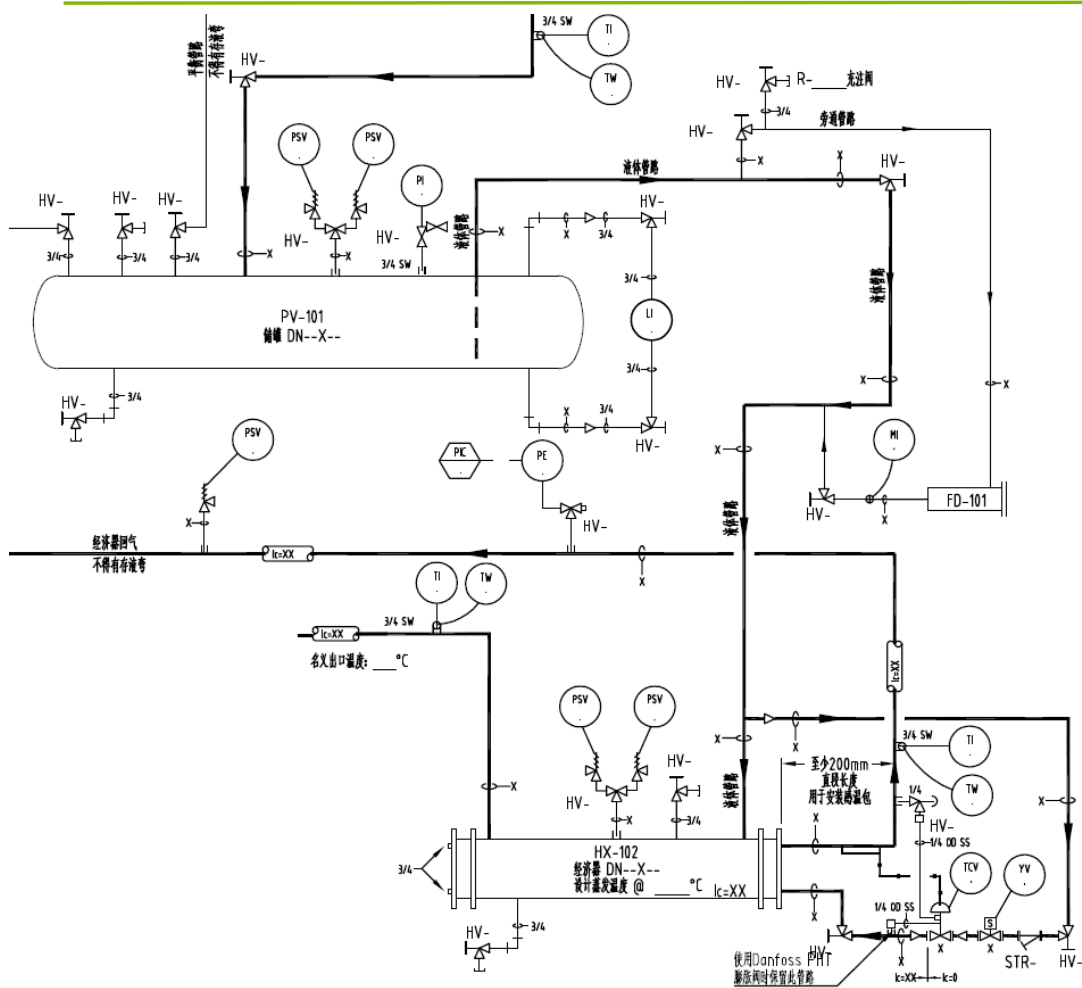


4.工业冷冻系统辅助部件-经济器

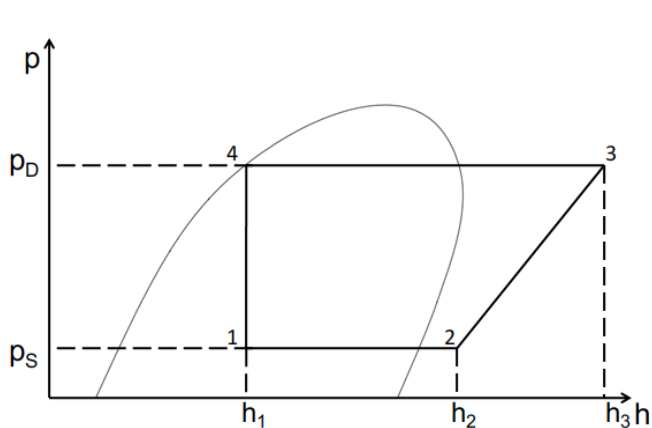
经济器

来自储罐的制冷剂分为两路，一路节流膨胀后冷却另一路，节流后的制冷剂气体由压缩机中间补气口进入压缩机，被冷却的过冷液体供向住供液阀。

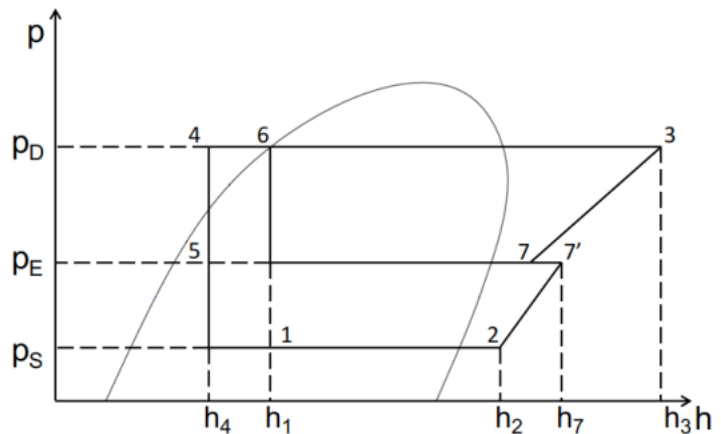
- 经济器的作用：
- 1.提供过冷度；
 - 2.增大机组冷量；
 - 3.提高机组经济性。



4.工业冷冻系统辅助部件-经济器



不带经济器的一次节流制冷循环系统图



带干式经济器的一次节流制冷循环系统图

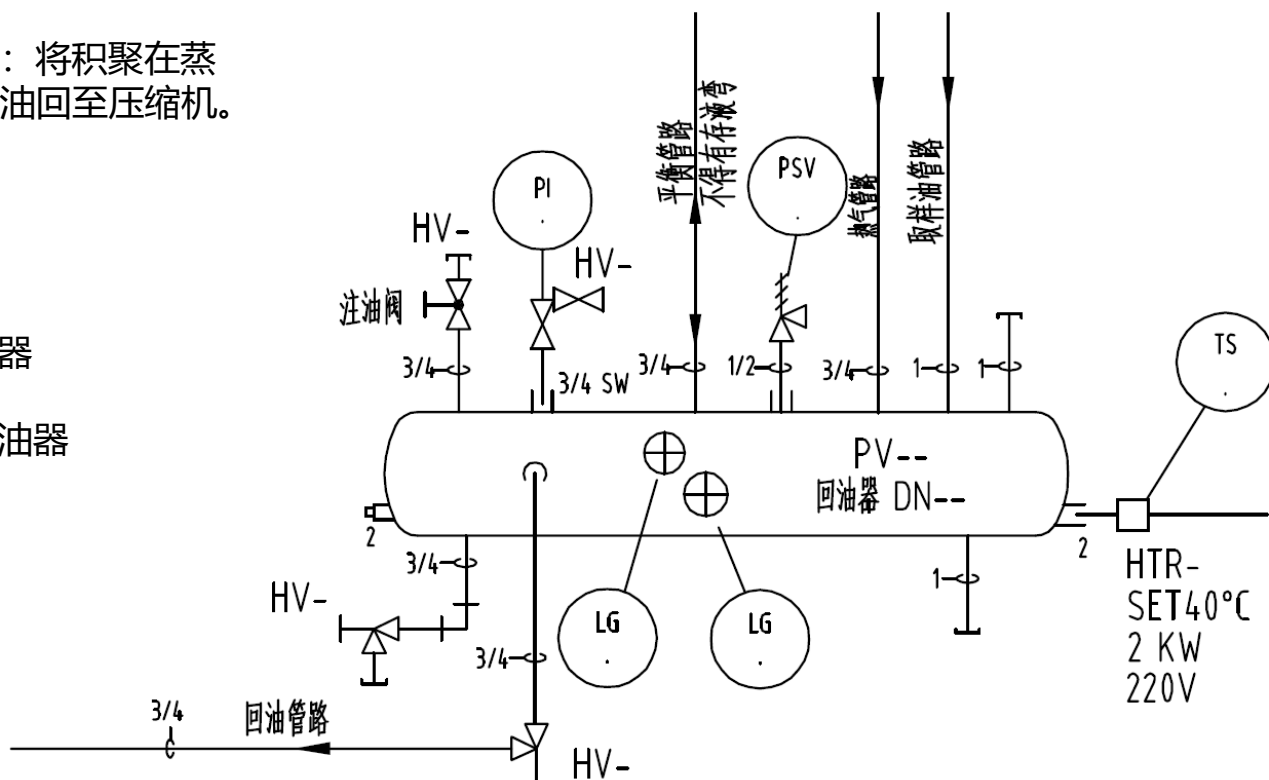
采用经济器后，整个系统制冷量增加的同时，压缩机的功耗也在增大，不过其增长率要小于制冷量的增长率，因此系统的制冷效率得以提高，达到了节能的效果。

4.工业冷冻系统辅助部件-回油器

回油器的作用：将积聚在蒸发器中的冷冻油回至压缩机。

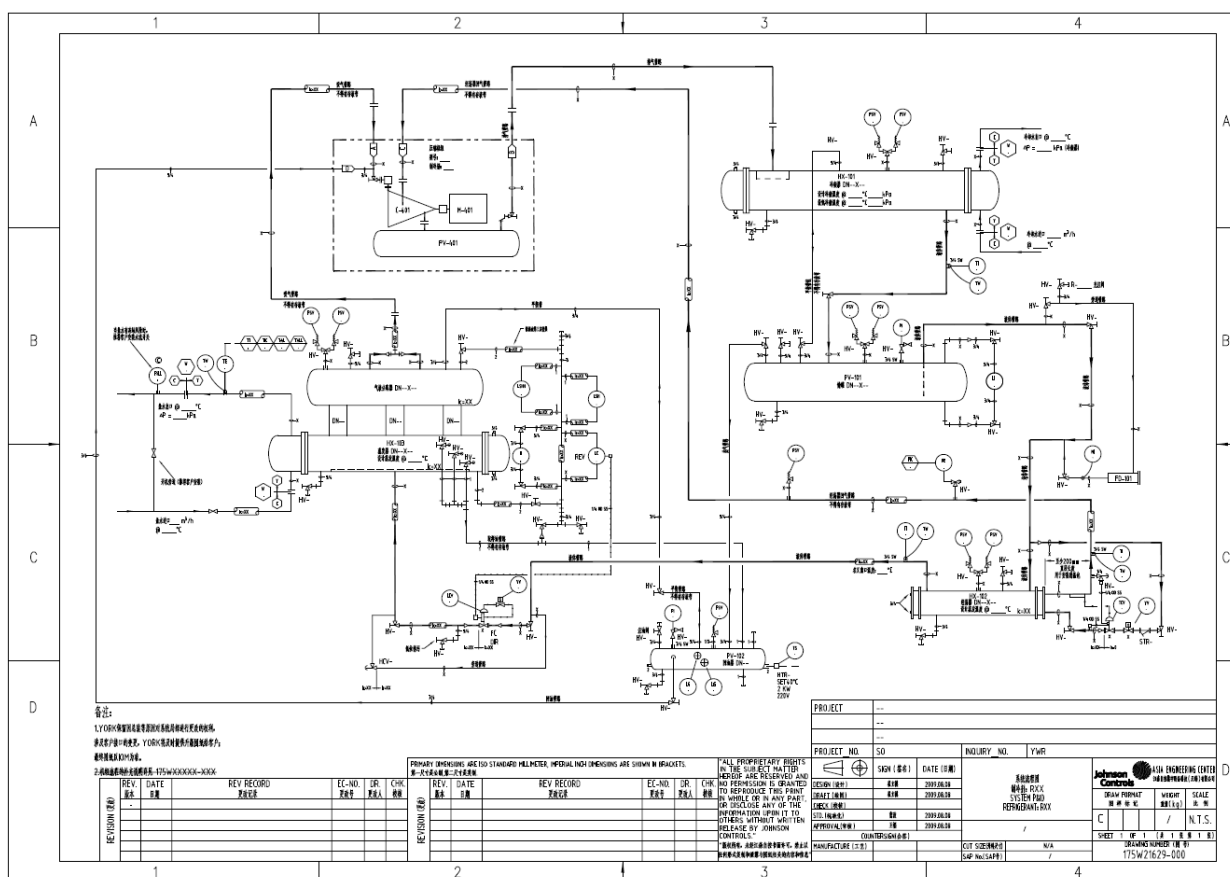
常见回油器：

- 手动回油器
- 半自动回油器
- 自动回油器
- 带泵自动回油器



4.工业冷冻系统辅助部件-回油器

回油器的工作原理:





12 历年卷个人解析

12.1 2021-2023

12.1.1 制冷与低温设备的发展方向

制冷与低温设备的发展方向:1.3

12.1.2 散热热流超过 $50\text{W}/\text{cm}^2$ 的散热方式

散热热流超过 $50\text{W}/\text{cm}^2$ 的散热方式: 浸没式液冷; 微通道单相; 微通道双相; 喷雾冷却; 射流冲击冷却。

12.1.3 设计板换全逆流

设计板换全逆流: 同程

12.1.4 扭曲椭圆管换热器特点

扭曲椭圆管换热器特点:2.7

12.1.5 根据 h_d 图, 含湿量能不能表征空气干燥程度

根据 h_d 图, 含湿量能不能表征空气干燥程度: 不能含湿量 (绝对湿度) 可以在一定程度上反映空气的干燥程度, 但并不能全面准确地表征空气的干燥程度。含湿量是指单位体积空气中所含水汽的质量, 通常用克每立方米 (g/m^3) 表示。虽然含湿量可以告诉我们空气中水汽的实际含量, 但它并不考虑温度的影响, 而温度是影响空气干燥程度的重要因素。

要更准确地表征空气的干燥程度, 我们通常使用相对湿度或露点温度:

1. 相对湿度: 相对湿度是指空气中实际的水汽含量与同温度下饱和水汽含量的比值, 通常以百分比表示。相对湿度能够更好地反映空气的干燥程度, 因为它考虑了温度的影响。例如, 40
2. 露点温度: 露点温度是指空气中的水汽在冷却过程中开始凝结成水滴的温度。露点温度可以直接表明空气中的水汽含量, 且不受温度变化的影响, 是一个更绝对的指标。

因此, 虽然含湿量可以提供一定的信息, 但要全面、准确地表征空气的干燥程度, 相对湿度和露点温度是更常用和更有效的指标。

12.1.6 选择换热器的结构, 实现高温高腐蚀气体与水的换热, 可画图说明

选择换热器的结构, 实现高温高腐蚀气体与水的换热:

1. 耐高温材料: 换热器需要使用能够在高温环境下保持强度和稳定性的材料。
 - 不锈钢 (如 316L 不锈钢): 具有良好的耐高温性能和抗氧化性能。
 - 镍基合金 (如 Inconel 625): 在极高温下具有优异的抗腐蚀和抗氧化性能。
 - 钛合金: 对酸性和高温环境具有优异的耐腐蚀性能, 但成本较高。
2. 耐腐蚀材料: 换热器需要使用能够在高腐蚀环境中保持稳定的材料。

- 不锈钢（如 **316L 不锈钢**）：在酸性和氯化物环境中具有良好的耐腐蚀性能。
- 钛合金：对大多数腐蚀性介质都具有良好的耐腐蚀性。
- 哈氏合金（如 **Hastelloy C276**）：对各种腐蚀性化学品具有极高的耐受性。

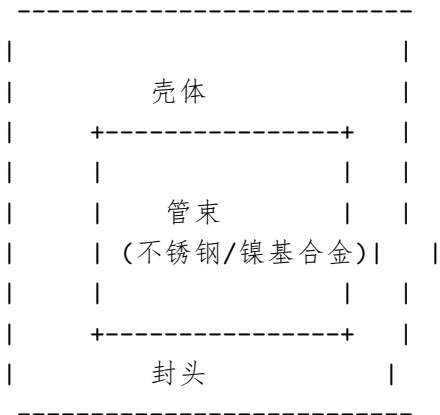
1. 管壳式换热器：适用于高温高压环境，结构坚固，易于维护和清洗。

- 结构说明：
 - 管束：用上述耐高温、耐腐蚀材料制作，如不锈钢或镍基合金。
 - 壳体：通常也采用不锈钢或镍基合金。
 - 封头和管板：采用相同的耐高温、耐腐蚀材料，保证整体密封性和耐用性。

2. 板式换热器：传热效率高，占地面积小，但耐高压性能较差。适用于相对较低的压力下高温高腐蚀环境。

- 结构说明：
 - 板片：采用耐高温、耐腐蚀材料，如钛合金或不锈钢。
 - 密封垫片：选择耐高温、耐腐蚀的材料，如氟橡胶。

为了更直观地展示，我们可以绘制一个管壳式换热器的示意图。



1. 壳体：主要由不锈钢或镍基合金构成，以提供强度和耐腐蚀性。
2. 管束：内部传热管束由不锈钢或镍基合金制成，负责高温气体和水之间的传热。
3. 封头：使用相同的材料，确保高温和高压条件下的密封性和稳定性。

这样的设计能够在高温高腐蚀环境下提供有效的换热，同时保证设备的使用寿命和安全性。

12.1.7 水冷机组与风冷机组的比较

水冷机组与风冷机组的比较:6.1

12.1.8 螺杆式压缩机干式经济器的 ph 图, 制冷量与 cop 计算

螺杆式压缩机干式经济器的 ph 图, 制冷量与 cop 计算: 见企业工业冷冻典型系统

12.1.9 换热量计算

换热量计算：略

12.1.10 蒸发制冷压缩机分为高压区和低压区的目的；节流装置的作用

在蒸发制冷系统中，压缩机分为高压区和低压区是为了实现制冷剂的循环和压缩，从而达到制冷的目的。具体如下：

高压区和低压区的定义：

- **低压区：**制冷剂在蒸发器中吸热后变为低温低压的气态，进入压缩机的吸入口。
- **高压区：**压缩机将低压区的低温低压气体压缩为高温高压气体，进入冷凝器。

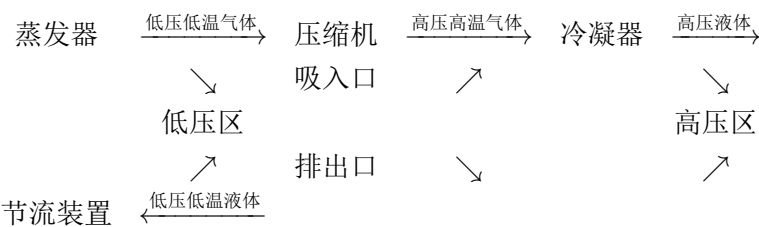
目的：

- **压力提升：**压缩机的主要作用是将制冷剂从低压区压缩到高压区。通过压缩，制冷剂的温度和压力都升高，使其能够在冷凝器中将热量释放给环境。
- **循环驱动：**高压和低压的分区有助于制冷剂在系统内循环。制冷剂在蒸发器中吸热后，需要通过压缩机提升压力，再在冷凝器中放热后通过节流装置降低压力，回到蒸发器继续循环。
- **控制温度：**通过高压区和低压区的转换，可以有效控制制冷剂的温度，使其在蒸发器中吸收热量降温，在冷凝器中放热升温，从而实现制冷效果。

在蒸发制冷系统中，节流装置（如膨胀阀或毛细管）有以下主要作用：

- **降低压力：**节流装置将高压液态制冷剂节流至低压，降低了制冷剂的压力。这个过程通常伴随着制冷剂温度的下降。
- **控制流量：**节流装置通过控制制冷剂的流量，调节进入蒸发器的制冷剂量，以确保蒸发器内有适当的液体和气体比例，保证制冷效果。
- **相变准备：**高压液态制冷剂经过节流装置后，由于压力的降低，会部分蒸发，形成低压低温的湿蒸汽。这种湿蒸汽进入蒸发器后，能够吸收大量的热量进行完全蒸发，从而实现制冷效果。
- **防止液击：**节流装置可以防止过量的液态制冷剂直接进入压缩机，避免压缩机发生液击现象，保护压缩机的正常运行。

为了更直观地理解高压区、低压区和节流装置的作用，以下是一个简单的蒸发制冷系统示意图：



在蒸发制冷系统中，将压缩机分为高压区和低压区的目的是为了提升制冷剂的压力，驱动制冷剂循环，控制温度并实现制冷效果。节流装置的作用则是降低制冷剂压力，控制流量，准备相变，并防止液击。通过这两个关键部分的协同工作，蒸发制冷系统能够高效地进行热量交换，达到制冷的目的。

防止提问的是吸收式制冷系统：

吸收式制冷系统中高压区和低压区的目的

在吸收式制冷系统中，将系统分为高压区和低压区是为了利用热力学循环，实现制冷剂的循环流动和吸热制冷。与压缩式制冷系统不同，吸收式制冷系统通过热源提供能量来推动制冷剂的循环。具体目的如下：

1. **压力提升和降压**：**高压区**：在高压区，通过生成器加热溶液，低压的制冷剂蒸汽从吸收剂中脱离，进入冷凝器，在冷凝器中放热液化为高压液态制冷剂。**低压区**：在低压区，通过吸收器将制冷剂蒸汽重新吸收到吸收剂中，这一过程需要保持低压状态以维持蒸发器的低温制冷效果。
2. **相变驱动**：- 在高压区，制冷剂在冷凝器中放热液化。- 在低压区，制冷剂在蒸发器中吸热汽化。
3. **能量转移和工作介质的循环**：- 通过高压区和低压区的转换，制冷剂和吸收剂可以循环利用，系统可以持续工作。

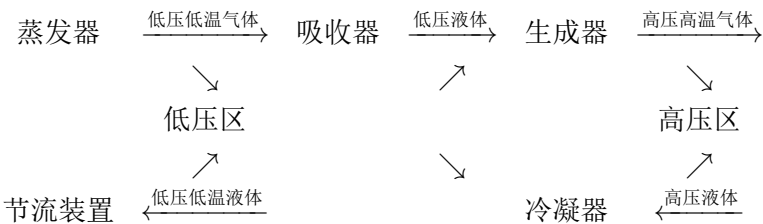
节流装置的作用

在吸收式制冷系统中，节流装置的作用与压缩式制冷系统中的作用类似，但也有其特殊的功能：

1. **压力降低**：- 节流装置将高压液态制冷剂节流至低压，使其变为低温低压的湿蒸汽，进入蒸发器进行吸热制冷。
2. **控制流量**：- 节流装置通过调制冷剂流量，确保蒸发器内制冷剂液体和气体的适当比例，以保证蒸发器的换热效果。
3. **相变准备**：- 高压液态制冷剂经过节流装置后部分蒸发，形成低压低温的湿蒸汽，这样进入蒸发器后能够高效吸收热量完成蒸发过程。

吸收式制冷系统示意图

为了更直观地理解高压区、低压区和节流装置的作用，以下是一个简单的吸收式制冷系统示意图（用 LaTeX 表示）：



总结

在吸收式制冷系统中，将系统分为高压区和低压区的目的是通过压力变化实现制冷剂的循环流动和热力学相变过程，进而实现吸热制冷。节流装置在其中的作用是降低制冷剂压力，控制流量，准备相变，并保持系统的连续稳定运行。通过高压区和低压区的转换，以及节流装置的作用，吸收式制冷系统能够高效地进行热量交换，达到制冷的目的。

12.1.11 空气冷却冷凝器的制冷剂侧、空气侧、管壁热阻，哪个是主要热阻；热阻大的原因是什么？

V1:

在空气冷却冷凝器中，制冷剂侧、空气侧和管壁的热阻各有不同的影响，通常来说，空气侧的热阻是主要的热阻。这是由于以下几个原因：

- **制冷剂侧热阻：**
 - 制冷剂在管内流动时，通常具有较高的对流换热系数。
 - 制冷剂的流动速度较快，且通常处于液相或两相流状态，这些因素使得制冷剂侧的对流换热较强，因此制冷剂侧的热阻通常较小。
- **空气侧热阻：**
 - 空气的热导率较低，相对于制冷剂来说，空气的传热效率较差。
 - 空气侧的对流换热系数较低，因为空气的密度和比热容较低，导致传热效果不如制冷剂。
 - 由于空气在自然或强制对流下流动，流动状态和速度会影响对流换热系数，通常这些因素导致空气侧热阻较大。
- **管壁热阻：**
 - 管壁的厚度较小，并且通常由金属材料（如铜或铝）制成，这些材料的导热系数很高。
 - 由于管壁的导热性好且厚度薄，管壁热阻相对较小，不是主要的热阻来源。

热阻大的原因：

- **空气的热导率低：**空气的热导率远低于大多数制冷剂和金属材料，导致传热效率低。
- **对流换热系数低：**空气侧的对流换热系数较低，特别是在自然对流的情况下，这显著增加了热阻。
- **流动特性：**空气的流动状态（层流或湍流）、速度、以及流动方向（平行或垂直）都会影响传热效率。在实际应用中，空气的流动往往难以完全优化，进一步增加了热阻。

公式说明：换热过程中的总热阻可以表示为各部分热阻的总和：

$$R_{\text{总}} = R_{\text{制冷剂}} + R_{\text{管壁}} + R_{\text{空气}}$$

其中：

$$R_{\text{制冷剂}} = \frac{1}{h_{\text{制冷剂}} \cdot A_{\text{内}}}$$

$$R_{\text{管壁}} = \frac{\delta}{k_{\text{管壁}} \cdot A_{\text{管壁}}}$$

$$R_{\text{空气}} = \frac{1}{h_{\text{空气}} \cdot A_{\text{外}}}$$

- $h_{\text{制冷剂}}$ 和 $h_{\text{空气}}$ 分别是制冷剂侧和空气侧的对流换热系数。- $A_{\text{内}}$ 和 $A_{\text{外}}$ 分别是制冷剂侧和空气侧的换热面积。- δ 是管壁厚度, $k_{\text{管壁}}$ 是管壁材料的导热系数, $A_{\text{管壁}}$ 是管壁的面积。

由于空气侧的对流换热系数 $h_{\text{空气}}$ 通常远小于制冷剂侧的对流换热系数 $h_{\text{制冷剂}}$, 因此 $R_{\text{空气}}$ 通常是总热阻的主要部分。

总结: 在空气冷却冷凝器中, 空气侧的热阻是主要热阻。这主要是由于空气的低热导率和低对流换热系数造成的。制冷剂侧和管壁的热阻相对较小, 因为制冷剂具有较高的对流换热系数, 管壁材料具有较高的导热性和较薄的厚度。

V2:

下面是对空气冷却冷凝器中的制冷剂侧、空气侧、管壁和污垢热阻的详细比较及其原因的分析

在空气冷却冷凝器中, 各部分热阻的大小及其原因如下:

1. 制冷剂侧热阻:

$$R_{\text{制冷剂}} = \frac{1}{h_{\text{制冷剂}} \cdot A_{\text{内}}}$$

- **热阻小:** 制冷剂侧热阻通常较小。- **原因:** 制冷剂具有较高的流动速度和对流换热系数, 且流动状态良好, 有助于减少热阻。

2. 空气侧热阻:

$$R_{\text{空气}} = \frac{1}{h_{\text{空气}} \cdot A_{\text{外}}}$$

- **热阻大:** 空气侧热阻通常是主要的热阻来源。- **原因:** 空气的热导率低、对流换热系数低, 且空气流动特性 (特别是自然对流) 导致传热效率较低。

3. 管壁热阻:

$$R_{\text{管壁}} = \frac{\delta}{k_{\text{管壁}} \cdot A_{\text{管壁}}}$$

- **热阻最小:** 管壁热阻相对较小。- **原因:** 管壁材料 (如铜或铝) 具有高导热性且厚度较薄, 传热阻力很小。

4. 污垢热阻:

$$R_{\text{污垢}} = \frac{1}{h_{\text{污垢}} \cdot A}$$

- 制冷剂侧污垢热阻:

$$R_{\text{制冷剂污垢}} = \frac{1}{h_{\text{制冷剂污垢}} \cdot A_{\text{内}}}$$

- **热阻较小:** 制冷剂侧污垢热阻较小。- **原因:** 制冷剂通常较干净, 且流速高不易形成污垢。

- 空气侧污垢热阻:

$$R_{\text{空气污垢}} = \frac{1}{h_{\text{空气污垢}} \cdot A_{\text{外}}}$$

- **热阻大:** 空气侧污垢热阻通常较大。- **原因:** 空气中的灰尘和颗粒物容易附着在换热器表面, 形成污垢层, 增加热阻。

在空气冷却冷凝器中，**空气侧热阻**和**空气侧污垢热阻**是主要的热阻。原因包括：

- 空气的热导率低、对流换热系数低，传热效率较低。
- 空气中的灰尘和颗粒物容易附着在换热器表面，形成污垢层，显著增加热阻。

制冷剂侧和管壁的热阻相对较小，但为了保持高效的换热性能，仍需定期维护制冷剂侧的清洁。维护空气侧的清洁和优化空气流动条件是提高换热器效率的关键措施。