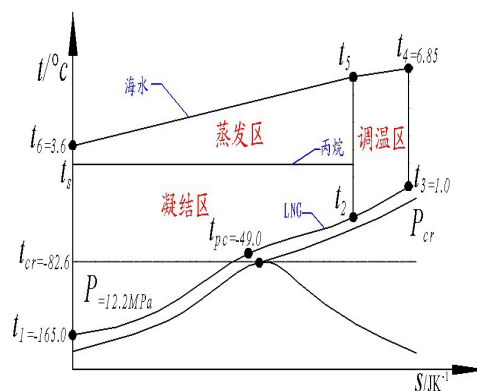


第七章案例一：LNG 中间介质汽化器校核

背景： 液态天然气(LNG)需要汽化才能供给用户使用，中间介质汽化器是以海水为热源以丙烷为中间介质的高效换热器。中间介质丙烷在海水侧的蒸发器发生管外池沸腾换热吸收热量变为丙烷蒸汽，再在 LNG 侧的凝结器发生管外凝结换热将从海水侧吸收的热量传递给 LNG，超临界状态的 LNG 吸收了丙烷凝结放出的热量变为气态天然气，气态天然气温度经过在调温器单相换热吸收海水热量升至用户要求的温度，系统图如下。

问题： 汽化器内热力过程的 t-s 图如下图所示，整个汽化器分为 3 各部分 E1(蒸发器)、E2(凝结器)、E3(调温器)，蒸发器内海水与沸腾丙烷换热，凝结器内凝结丙烷与液态 LNG 换热，调温器内温度较低的气态天然气与海水的单相换热以达到用户要求的天然气温度。



考查知识点： 沸腾、凝结、强制对流等的理解及相应关联式运用，换热器设计和

换热器校核

已知： LNG 侧流量 q_{m2} 、入口温度 t_1 、压力 p_1 ；海水侧入口温度 t_4 、出口温度 t_6 、压力 p_2 ；E1、E2、E3 换热器的换热面积 A_1 、 A_2 、 A_3 。

待求： 凝结器出口 LNG 温度 t_2 、调温器出口海水温度 t_5 、丙烷饱和温度 t_s 、海水流量 q_{m1} 。

分析求解方法：

总述，海水管内强制对流换热关联式采用了 Dittus-Boelter 公式，丙烷管外池沸腾和凝结换热采用了对应的实验关联式，超临界 LNG 流体管内强制对流实验关联式则是 $Nu = 0.0068 Re^{0.94} Pr^{0.4}$ 。根据能量守恒，蒸发器海水侧的焓差、蒸发器丙烷侧沸腾吸热量、凝结器 LNG 侧的焓差、凝结器丙烷侧的凝结放热量四者是相等的，调温器内海水侧的焓差和调温器内 LNG 侧的焓差是相等的。

蒸发器的能量方程和传热方程为：

$$\phi_1 = H_5 - H_6 \quad \phi_1^* = k_1 A_1 \Delta t_1$$

凝结器的能量方程和传热方程为：

$$\phi_2 = H_2 - H_1 \quad \phi_2^* = k_2 A_2 \Delta t_2$$

调温器的能量方程和传热方程为：

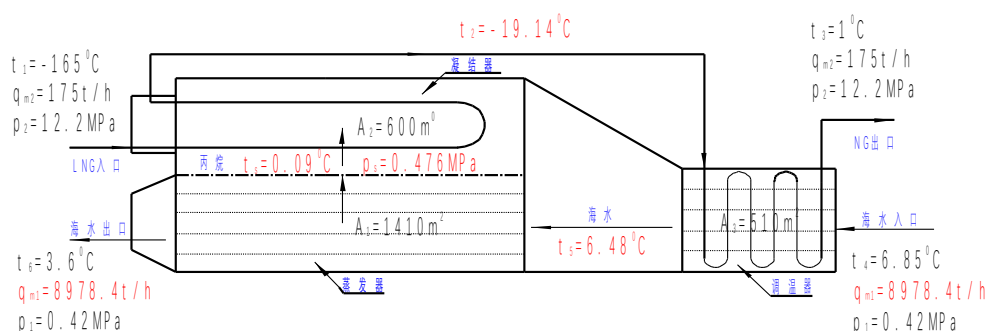
$$\phi_3 = H_4 - H_5 = H_3 - H_2 \quad \phi_3^* = k_3 A_3 \Delta t_3$$

4 个方程 4 个未知数，方程封闭可解。

$$\phi_1 = \phi_1^* \quad \phi_2 = \phi_2^* \quad \phi_1 = \phi_2 \quad \phi_3 = \phi_3^*$$

由于上述 4 个方程是相互耦合的，因此 t_2 、 t_5 、 t_s 、 q_{m1} 的值不能直接得到，可以通过先假定其数值，然后通过二分法逐渐迭代逼近得到。

结果：（红色代表待求量，黑色代表已知量）



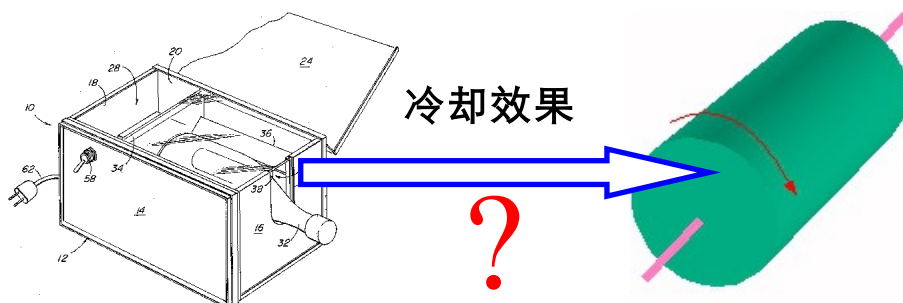
总结：通过本案例，学生可以熟悉换热器的设计与校核过程，学会提炼工程问题，并将所学的传热学知识加以综合运用。

第七章案例二：场协同原理的运用

背景：夏天，冷饮料的冷却问题。人人都知道冰的可乐才好喝，可是你知道怎样才能快速地把一瓶常温的可乐迅速的冷却吗？



问题：如果将饮料瓶旋转放在冷水里能加速饮料冷却吗？下图为一个冷饮料冷却专利，瓶子内装满冷饮料，瓶子处于冷流体之中，该装置是通过不停旋转瓶子对饮料进行冷却的，请分析该专利的冷却效果。



考查知识点：传热与流动问题的数学描述，对流换热机理，场协同原理的物理

本质。

待分析：将瓶子在冷水中旋转能否加快冷却？如何才能加快冷却？

分析求解方法：

两维边界层换热的能量方程为：

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

对上述方程两边沿着热边界层积分，可以得到对流项的下列矢量形式：

$$\rho c_p \int_0^{\delta_t} (\vec{U} \cdot \text{grad} T) dy = \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=\delta_t} - \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = - \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = q_w$$

由于 $\vec{U} \cdot \text{grad} T = |\vec{U}| |\text{grad} T| \cos \theta$ ，故对于固定的流速和温差，速度方向和温度梯度方向的夹角越小则对流换热越好，此时速度场和温度场协同性较差；该夹角越接近 90 度，则对流换热越差，此时速度场和温度场协同性较好，因此该角度应避开 90 度。

结果：将盛有冷饮料的瓶子放在冷流体中冷却时，如果沿轴线方向不停地旋转瓶子，由于旋转角速度方向沿着瓶子的切线方向，与温度梯度方向垂直，此时并不能增强对流换热效果。为增强换热效果可以将瓶子螺旋地旋转，此时速度方向和温度梯度方向小于 90 度，具有强化对流换热效果。

总结：通过本案例学习，学生可以了解强化对流换热的机制，学会用传热学原理解释或解决实际生活中碰到的传热问题，甚至可以通过场协同等传热学原理的灵活运用获得某些实用性强的发明专利。