



四川轻化工大学课程实施大纲

课程名称：化工原理 C

授课班级：质量 20231-4

任课教师：卫晓利

工作部门：化学工程学院

联系方式：13547417487

四川轻化工大学

2025 年 9 月

《化工原理》C 课程实施大纲

基本信息

课程代码：16341032

课程名称：化工原理

学 分：5

总 学 时：48 学时

学 期：2025--2026-1

上课时间：1-12 周

上课地点：临港 LA5-438、LA5-443、LA5-446、LA5-328

答疑时间和方式：课前、课间或平时；课前、课间答疑，电话答疑，邮件答疑或QQ 答疑

答疑地点：上课教室

授课班级： 质量 20231-4

任课教师：卫晓利

学 院：化学工程学院

邮 箱：1900809131@QQ.com

联系电话：13547417487

1 教学理念

众所周知，化工原理课程有着逻辑性强、公式推导多、理论知识深的特点。它和物理化学并列为化工学院最难学的专业基础课，但是专科专业学时较少，理论基础比较薄弱，针对以上特点，在备课过程中，如何把最难的问题简单化，是我一直思考的问题。

我将以传递过程和研究方法论为主线来组织教学内容，建立“化工原理”课程教学内容新体系；适当融入本领域中一些最新的技术、方法和发展动向，拓宽教学内容。建立以学生为本，启发—讨论—总结式的教学方法，实现在教师指导下以学生为中心的学与教的互动过程，并不断归纳、思考以寻找出适合我校各专业学生特点的更能有效发挥学生学习过程的主动性、积极性、创造性为目标的教学方法。

此外，化工原理课程体系应兼有“技术”与“科学”的双重特点，它不仅要担负工程技术教育任务，还应担负工程科学教育任务；课程中不仅要强调工程观点、定量运算、实验技能及设计能力，更要强调理论联系实际，强调解决工程问题的方法论，使学生能“知其然”，更能“知其所以然”；课程内容中不仅要介绍经典化工单元操作，更应跟踪当今化工乃至相关学科最新发展动态，介绍化工最新单元操作及科技前沿知识；在教学活动中不仅传授知识与技能，更应“树人、育才”。

2 课程介绍

2.1 课程的性质

化工原理是化工工艺类及其相近专业的一门主干课，是一门很重要的技术基础课，它在基础课和专业课之间起着承前启后、由理及工的桥梁作用。

化工原理的研究内容是化工生产过程中的物理操作过程及其设备。研究方法主要是理论解析和在理论指导下的实验研究。化工原理的主要任务是：培养学生

运用辩证唯物主义观点和科学方法考察、分析和处理工程实际问题；培养学生的工程观点以及实验技能和设计能力。

2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用

《化工原理》课是化工类所有专业都开设的一门工程性极强的技术基础课，也是我校轻化工专业重要的大类平台课。它在基础课和专业课之间起到承上启下的桥梁作用，它首次把学生带入化工生产领域真实、复杂的问题中。通过对化工单元操作的基本规律的学习，将帮助学生树立牢固的工程观点，培养解决工程实际问题的综合能力，为即将进行的专业课学习打下坚实的基础。

2.3 课程的前沿及发展趋势

自化工原理课程问世至今已有一百多年的历史，而化学工程学科成立也已有五十多年的历史了。化工原理作为化工类及相关专业高等教育的技术基础课，一直以来起着为自然科学和应用科学的塔桥作用，其地位极为重要。这门课程的目的是使学生掌握化工单元操作过程的基本理论，培养学生分析和解决工程技术问题的能力，同时在科学研究和生产实践中对设备具有操作管理、设计、强化与过程开发的本领，因此，历来受到化工类专业师生的广泛重视。进入21世纪，随着全球能源短缺而导致的能源格局的不断变化，以及生态环境的不断恶化，传统的化学和化工工业将面临严峻的挑战。在这种大形势下，传统的化工原理课程也将面临许多新的挑战。随着化学和化工工业与高新技术的不断紧密结合，化工原理的应用覆盖面也从炼油、化工、冶金、医药等传统工业扩大到了近年来发展起来的核、生化、材料与空间技术等高新技术行业。那么化工原理课程的内容设置也应做适当的调整，教师的教学手段和方法以及教师自身的业务水平也亟需提高。

很多年来，化工原理教材的内容基本没有太大的变化，对学生要求的重点内容仍然放在流体输送、传热、精馏、吸收等几大章节。尽管这两年许多化工原理教材已经新增了膜分离内容，在教材改革方面可以说前进了一步，但整体上依然没有跟上现代科学技术的发展，比如化工原理在生化技术、新材料技术的应用都没有体现。尤其是在给学生讲授的内容中，“传统”单元操作的基本理论和各种

公式的推导占用了大部分时间，有的计算事例也还停留在二十世纪七、八十年代的水平上。很多教师在授课时是希望添加一些新内容，但苦于授课学时是有限的，新内容的增加必然与有限的课时产生矛盾。解决这一问题可以采用如下方法：(1) 精简课程内容。(2) 教师要注重教学方法，提高教学效率。在教学过程中要注意“四重一轻”，即重概念，重分析，重结论，重应用，轻推导。我们知道，研究单元操作时公式特别多，因此推导公式占用的课时就很多，而公式推导达到的目的往往是使学生明白了这个公式是怎么得来的，但如何去灵活的运用这个公式去解决实际问题，却因为课堂时间太少，分析的不透彻，而成为一大难题。因此，可以适当精简推导公式的时间，把时间用在分析过程原理和实际应用上。

随着计算机应用的普及，大量的化工工程软件已经广泛地应用在设计院、企业及各种研究机构。目前，国内主要的化工流程模拟软件有美国PRO/II，Aspen Plus，Hysys，Design II，加拿大的VMGSim。其中Aspen Plus 是大型通用流程模拟系统，全球各大化工、石化、炼油等过程工业制造企业及著名的工程公司都是Aspen Plus 的用户，PRO/II 更多地应用在炼油工业。这些软件中几乎涉及了化工原理中的各个单元操作，可以设计流程和设备，也可以对操作过程进行分析。目前，已有不少高校的化工系已经将化工模拟软件应用在化工原理课程设计这一教学环节，如清华大学、天津大学、浙江工业大学等，如果在化工原理的课堂教学中也引入化工软件作为辅助教学工具，无疑会对培养学生的工程观念、提高学生分析和解决实际问题的能力有很大的帮助。

教学过程中，学生和老师之间的交流至关重要。但一直以来基本是大班授课，学生人数少则五六十多则一百多，而且目前学生修的课程很多，所以课下与老师交流和答疑的时间就很少。如果能建立网上交流平台，就可以不受时间和地点的限制，学生可以在这个平台上留言，提出问题，老师给出答案，及时解决每节课的重点难点及疑惑，而且老师也可以设计题目发起讨论，这样既达到了教学目的，还能满足不同程度学生的不同需要。

2.4 学习本课程的必要性

化工原理是化工类及相近专业的一门重要的技术基础课程，它是综合运用数学、物理、化学等基础知识分析和解决化工过程中各种单元操作问题的工程学

科, 自化学工程学科形成以来, 它在培养化工类高级人才中起着由理论到工程、由基础到专业的桥梁作用。

3 教师简介

3.1 教师的职称、学历

卫晓利

四川轻化工大学, 化学工程学院, 副教授, 博士研究生

3.2 教育背景

受教育经历 (从大学本科开始, 按时间倒排序)

2006/09 – 2010/12, 中北大学, 化学与环境工程学院, 博士

2003/09 – 2006/06, 中北大学, 化学与环境工程学院, 硕士

1999/09 – 2003/06, 华北工学院, 化学工程系, 学士

4 先修课程

本课程在高等数学、普通物理和物理化学三门先修课的基础上进行教学。对先修课程的要求如下:

1. 高等数学:熟悉微积分及微分方程等内容。
2. 普通物理:对力学、热学、电学、物态和光学等概念清楚, 内容熟悉。
3. 物理化学:对热力学、相平衡、溶液理论、分子运动理论等章节的概念清楚, 内容熟悉

5 课程目标

- 1.掌握流体流动及传热等化工过程的基本原理和典型设备的构造及性能;

2.通过本课程知识的系统学习，培养学生的工程观点和解决工程实际问题的能力，包括对化工单元操作进行工程计算的能力、正确运用工程图表的能力以及运用技术经济观点分析、解决工程实际问题的能力；

3.通过学习一些处理工程问题的基本方法，如因次分析法、数学模型法、过程分解法、试差计算法和图解计算法等，使学生具备在不同场合选用不同方法处理工程问题的能力；

4.通过对基本原理、工程计算和典型设备的讲授，培养学生从过程的基本原理出发，观察、分析、综合、归纳众多影响因素，从中找出问题的主要方面，运用所学知识解决工程问题的科学思维能力和创新思维能力；

5.通过本课程学习，培养学生的自学能力和独立工作能力，能根据所处理问题的需要，寻找、阅读有关手册、参考书、文献资料并理解其内容。

6 课程内容

6.1 课程的内容概要

各部分教学内容及教学要求如表1所示。

表1 各章节教学内容及教学要求

章节	教学内容	教学要求
第1章流体流动	1.1 流体的物理性质 1.2 流体静力学 静止流体的压力 静止流体学基本方程式及应用 1.3 流体流动的基本方程 流量与流速 稳态流动与非稳态流动 连续性方程 伯努力方程及应用 1.4 流体流动现象 流体类型与雷诺数	掌握内容： 1、流体的密度和粘度的定义、单位、影响因素及数据获取； 2、压强的定义、表达方法、单位换算； 3、流体静力学方程、连续性方程、柏努利方程及其应用； 4、流体的流动类型及其判断、雷诺准数的物理意义、计算； 5、流体阻力产生的原因、流体在管内流动的机械能损失

	<p>流体在圆管内流动时的速度分布</p> <p>边界层的概念</p> <p>1.5 流体在管内的流动阻力</p> <p>流体在直管中的流动阻力</p> <p>管路上的局部阻力</p> <p>管路系统中的总能量损失</p> <p>1.6 管路计算</p> <p>1.7 流量测量</p>	<p>计算；</p> <p>6、管路的分类、简单管路计算及输送能力核算；</p> <p>7、液柱式压差计、测速管、孔板流量计和转子流量计的工作原理、基本结构、安装要求和计算；</p> <p>8、因次分析的目的、意义、原理、方法、步骤；</p> <p>熟悉的内容：</p> <p>1、流体的连续性和压缩性，定常态流动与非定常态流动；</p> <p>2、层流与湍流的特征；</p> <p>3、圆管内流速分布公式及应用；</p> <p>4、Hagon-Poiseuille 方程推导和应用；</p> <p>5、复杂管路计算的要点；</p> <p>6、正确使用各种数据图表；</p> <p>了解的内容：</p> <p>1、牛顿粘性定律，牛顿流体与非牛顿流体；</p> <p>2、边界层的概念、边界层的发展、层流底层、边界层分离。</p>
第2章 流体输送机械	<p>2.1 离心泵</p> <p>离心泵的工作原理和主要部件</p> <p>离心泵的基本方程</p> <p>离心泵的主要性能参数与特性曲线</p> <p>离心泵的气蚀现象和允许安装高度</p>	<p>掌握的内容：</p> <p>1、离心泵的结构、工作原理、性能参数、特性曲线及应用；</p> <p>2、影响离心泵性能的主要因素，离心泵特性曲线测定；</p>

	<p>离心泵的工作点 选择与使用 离心泵的类型 选择与使用</p> <p>2.2 其他类型液体输送机械</p> <p>2.3 气体输送和压缩机械</p>	<p>3、管路特性曲线，离心泵的工作点及流量调节；</p> <p>4、允许吸上真空高度、允许气蚀余量，确定泵的安装高度；</p> <p>5、离心泵的设计型计算与操作型计算、离心泵的操作要点；</p> <p>熟悉的内容： 离心泵的组合操作及选组形式的原则； 往复泵的结构、工作原理、性能参数、特性曲线、操作要点与应用。</p> <p>了解的内容： 1、离心力场中的流体静压强分布； 2、了解其它泵的工作原理。</p>
第4章 传热	<p>4.1 概述</p> <p>传热的基本方程 传热过程中热、冷流体（接触）热交换的方式 典型的间壁式换热器 传热速率和热通量 稳态传热和非稳态传热 载热体及其选择</p> <p>4.2 热传导</p> <p>基本概念和傅立叶定律 热传导系数</p>	<p>掌握的内容： 1、热传导基本原理，一维定常态傅立叶定律及应用，平壁及圆筒壁一维定常态热传导计算与分析； 2、对流传热基本原理，牛顿冷却定律，影响对流传热的主要因素； 3、无相变管内强制对流的 α 关联式及应用；Nu、Re、Pr、Gr 等的物理意义及计算。正</p>

	<p>通过平壁的稳态热传导</p> <p>通过圆筒壁的稳态热传导</p> <p>4.3 对流传热概述</p> <p>对流传热速率方程和对流传热系数</p> <p>对流传热机理</p> <p>保温层的临界半径</p> <p>4.4 传热过程计算</p> <p>热量衡算</p> <p>总传热速率微分方程和总传热系数</p> <p>总传热速率方程的应用</p> <p>传热单元数法</p> <p>4.5 对流传热系数关联式</p> <p>影响对流传热系数的因素</p> <p>对流传热过程的量纲分析</p> <p>流体无相变时的对流传热系数</p> <p>流体有相变时的对流传热系数</p> <p>壁温的估算</p> <p>4.6 辐射传热</p>	<p>确选用 α 的计算式, 注意其用法和使用条件;</p> <p>4、传热计算: 传热速率方程与热负荷的计算、平均温差推动力、总传热系数、污垢热阻、壁温计算、传热面积、加热程度和冷却程度计算、强化传热的途径;</p> <p>熟悉的内容:</p> <p>1、对流传热系数经验式建立的一般方法;</p> <p>2、蒸汽冷凝、液体沸腾对流传热系数计算;</p> <p>3、传热效率、传热单元数及其在传热操作型计算中的应用;</p> <p>4、热辐射的基本概念、两灰体间辐射传热计算;</p> <p>5、列管换热器的结构及选型计算。</p> <p>了解的内容:</p> <p>1、加热剂、冷却剂的种类和选用;</p> <p>2、各种常用换热器的结构特点及应用;</p> <p>3、高温设备热损失计算。</p>
第6章 蒸馏	<p>1、双组分理想体系的汽液平衡: 拉乌尔定律、泡点方程、露点方程、汽液平衡图、挥发度与相对挥发度定义及应用、相平衡方程</p>	<p>1、掌握两组分理想物系的气液平衡关系;</p>

	及应用； 2、精馏原理与流程； 3、精馏塔的物料衡算、操作线方程和 q 线方程及物理意义、图示及应用； 4、双组分连续精馏塔计算及操作调节、分析：恒摩尔流假设、理论板、等板高度、汽液两相的摩尔流率、回流比选用与最小回流比、加料热状况影响及选择、全塔效率、单板效率、理论板数的确定。	2、掌握精馏的原理与流程； 两组分连续精馏的基本计算方法。 3、了解间歇精馏与特殊精馏过程。
--	---	--

6.2 教学重点、难点

化工原理课程教学重点、难点及参考学时如表 2 所示。

表 2 化工原理课程教学重点、难点及参考学时

章节	参考学时	教学重点、难点
绪论	2	
第一章 流体流动	16	重点：连续性方程、伯努力方程及应用 难点：边界层的概念
第二章 流体输送机械	6	重点：离心泵的主要性能参数与特征曲线、允许吸上真空高度、允许气蚀余量，确定泵的安装高度； 难点：往复泵的结构、工作原理、性能参数、特性曲线、操作要点与应用
第四章 传热	12	重点：傅立叶定律及应用、传热计算； 难点：对流传热基本原理及影

		响因素，牛顿冷却定律。
第六章 蒸馏	12	<p>重点：两组分的相平衡关系；两组分联系精馏的计算；影响精馏过程的主要因素。</p> <p>难点：单板效率，确定回流比，间歇精馏。</p>

7 课程教学实施

7.1 教学单元一

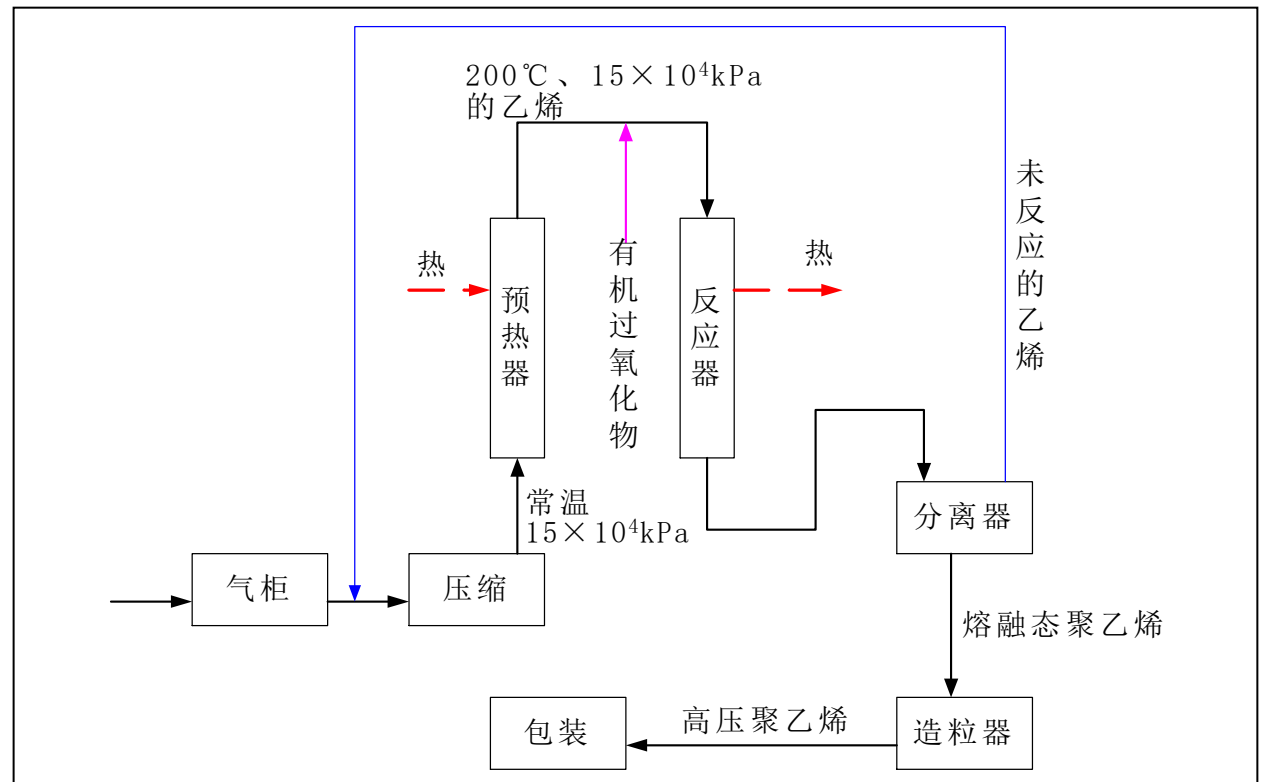
本讲教学目标
<ol style="list-style-type: none"> 1、熟练掌握单位制及单位换算；物料衡算和能量衡算等基本概念 2、理解单元操作的基本概念、单元操作计算的一般内容及其依据的基本规律 3、了解化工原理的目的和任务、主要内容、性质和地位及研究方法
本讲教学内容
<p>知识点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1、课程的性质及研究内容 2、单元操作的概念 3、单位制和单位换算 4、化工过程计算的基本关系 5、物料衡算和能量衡算的基本概念 <p>重点：单位制和单位换算、物料衡算</p> <p>难点：化工原理的工程性，化工单元操作</p>
本讲教学过程及教学方法
<p>本章主要采用图例讲授方法</p> <p>教师通过多媒体课件向学生展示聚乙烯和二甲基二氯硅烷的合成工艺路线，进而引出《化工原理》这门课的所要研究内容、性质。使学生对《化工原理》这门课有个初步、大致了</p>

解。

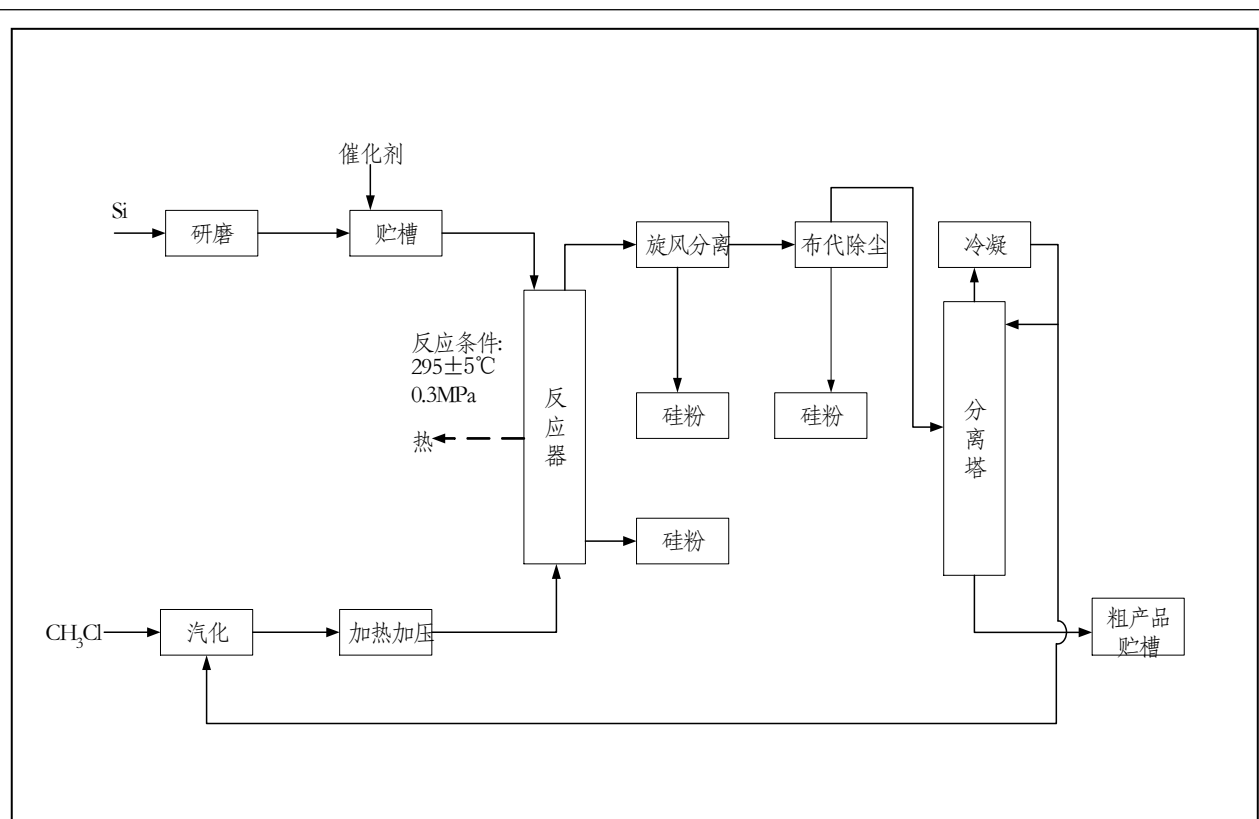
1、化工原理课程介绍

(1)课程的研究对象（图例讲授）

示例 1：高压聚乙烯



示例 2：二甲基二氯硅烷



(2)化工单元操作（讲授结合图例）

教师将会为同学们展示出一些真实的大型化工设备的图片，如精馏塔，反应釜、换热器，以此来加深同学对单元操作的印象。

(3)课程的内容(讲授法)

三传一反

三传：

1. 流体流动过程（动量传递）1-3 章
2. 传热过程（热量传递）4 章
3. 传质过程（质量传递）5-6 章

一反：反应器原理

(4)课程的性质与任务(讲授)

(5)研究方法与学习目的(讲授)

(6)化学工程发展简介(讲授)

2、单位制与单位换算（提问+讲授）

(1)单位制

表 3 单位制及基本物理量

单位制	基本物理量及单位			别称
<u>cgs</u> 制	长度(L) cm	质量(M) g	时间(θ) s	绝对单位制
<u>Kms</u> 制	长度(L) m	质量(M) kg	时间(θ) s	

(2) 单位换算

物理量的单位换算

经验公式的单位换算

3、几个基本概念 （举例讲授）

(1) 物料衡算和能量衡算

(2) 速率的概念

本讲师生互动

课堂提问：1、什么叫国际单位制？国际单位制的基本单位有哪些？

本讲作业：本章课后习题 1、3、4.

课前准备情况及其他相关特殊要求：

(1) 备课时结合生活中的实例和教师自身的企业实践锻炼，给同学们介绍化工原理与生活的密切相关性和重要性，激发学生学习化工原理课程的兴趣。

(2) 准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料：

本课程使用教材；P1—8，“绪论”部分

7.2 教学单元二

本讲教学目标

掌握的内容：

- 1、流体的定义及分类
- 2、流体的物理性质
- 3、连续介质模型
- 4、流体的静压强

本讲教学内容

知识点：

- 1、流体的定义，可压缩流体、不可压缩流体
- 2、流体的密度、重度、比重
- 3、流体的静压强的定义及特征

重点：流体的静压强

难点：连续介质模型

本讲教学过程及教学方法

用 10 左右的时间回顾上节课所学主要内容，由“三传”引出本次课流体流动的学习目的。

1、流体的定义、分类及性质（讲授）

具有流动性的液体和气体统称为流体。

流体的主要特征：具有流动性；无固定形状，随容器形状而变化；受外力作用时内部发生相对运动。

流体的种类：不可压缩流体——液体

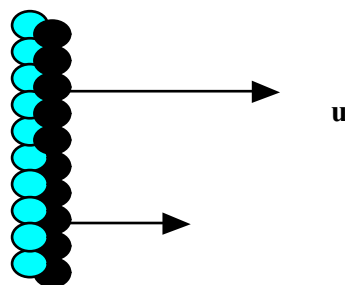
可压缩流体——气体

2、流体的密度（讲授+举例）

主要讲授：流体密度的定义，单位及物理意义；混物流体密度的计算；影响密度的因素，压力和温度对密度的影响；密度数据的来源；以及和密度相关的一些参数（比容、比重、重度）

示例：已知干空气的组成为： $O_2 21\%$ 、 $N_2 78\%$ 和 $Ar 1\%$ (均为体积%)。试求干空气在压力为 $9.81 \times 10^4 Pa$ 、温度为 $100^\circ C$ 时的密度

3、连续介质模型（图例讲授）



流体质点（微团）的特点（示例说明）

相对于分子尺度很大，相对设备尺度很小。

例如：

1mol 水 18g~ 6.023×10^{23} 分子, 1012 个质点, 每个质点含 1011 个分子, 1 个质点 18×10^{-12} g.

4、流体的静压强（讲授提问）

压强的定义、压强的单位、表示方法。

压力单位的换算关系：

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 760 \text{ mmHg} \\ &= 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1.0133 \text{ bar} = 1.0133 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= 1 \text{ kgf/cm}^2 = 735.6 \text{ mmHg} \\ &= 10 \text{ mH}_2\text{O} = 0.9807 \text{ bar} = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa} \end{aligned}$$

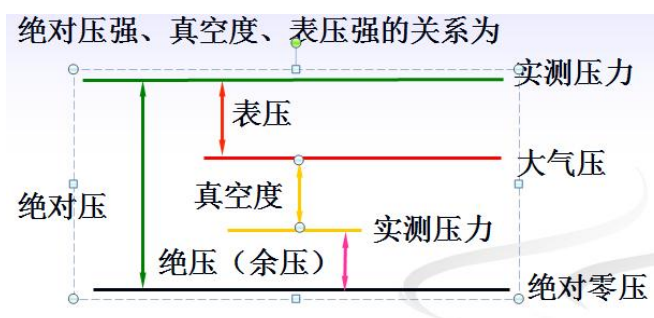
5、流体压力的特征（讲授）

6、压强的表示方法（图解讲授+举例）

1) 绝对压强（绝压）：流体体系的真实压强称为绝对压强。

2) 表压强（表压）：压力上读取的压强值称为表压。

3) 真空度：真空表的读数



表压=绝对压-大气压

真空度=大气压 - 绝对压

[例]：在兰州操作的苯乙烯真空蒸馏塔塔顶真空表读数为 80kPa，在天津操作时，真空表读数应为多少？已知兰州地区的平均大气压 85.3kPa，天津地区为 101.33kPa。

本讲师生互动

课堂提问：1、压力的单位有哪些？如何换算？

本讲作业：本章课后习题 1.

课前准备情况及其他相关特殊要求：

提前熟悉所讲的内容，准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料：

本课程所使用的教材：P11-12，P17-18

7.3 教学单元三

本讲教学目标

掌握的内容：

- 1、流体静力学基本方程
- 2、流体静力学基本方程的应用

本讲教学内容

知识点：

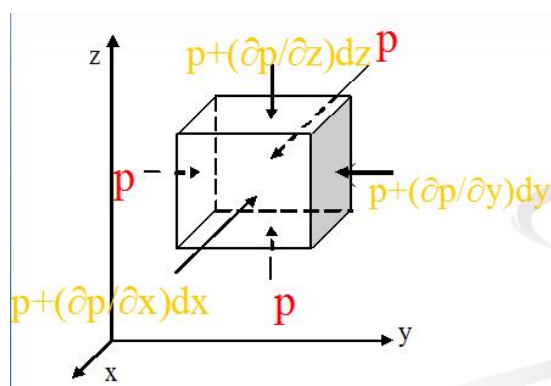
- 1、流体静力学方程表达式、
- 2、U 型管压差计和等压面
- 3、压力与压力差的侧量
- 4、液位的测量
- 5、液封高度的计算

重点：压力与压力差的侧量

难点：液封高度的计算

本讲教学过程及教学方法

- 1、复习上次课流体的静压力的定义、单位及表示（提问）
- 2、流体静力学方程的推导（图例讲授）



对连续、均质且不可压缩流有体，静力学的基本方程的多种表示形式如下：

$$\rho g z + p = \text{常数}$$

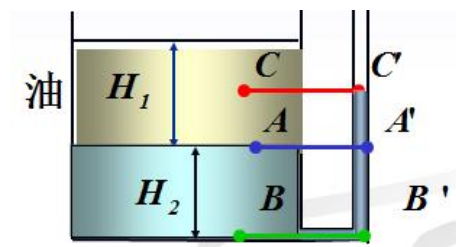
$$\rho g z_1 + p_1 = \rho g z_2 + p_2$$

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2)$$

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_1}{\rho g} + (z_2 - z_1)$$

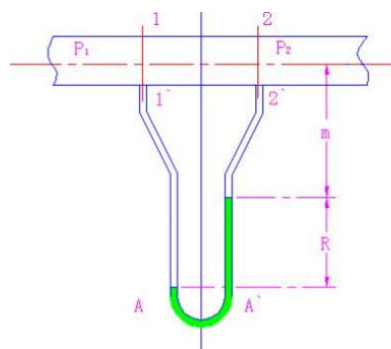
3、.流体静力学方程的意义（讲授）

4、等压面的概念（图例讲授）

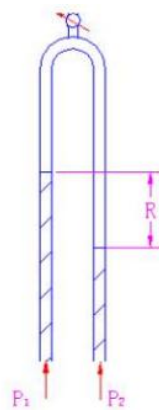


5、流体静力学的基本方程的应用（图例讲授）

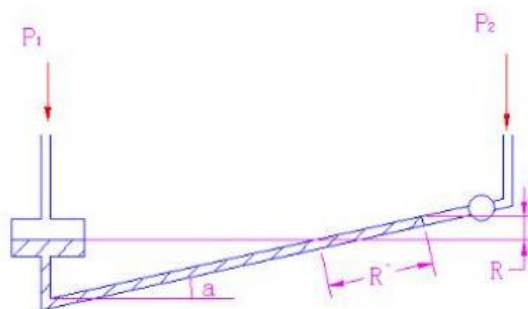
(1)压力或压强差的测定，U 型压差计的原理和使用、倒置 U 型压差计和倾斜压差计的原理与使用（图解讲授）



U 型压差计



倒置 U 型压差计



倾斜压差计

本讲师生互动

课堂提问：压力的表示方法有哪些？它们之间的关系？

本讲作业：本章课后习题 3、5

课前准备情况及其他相关特殊要求：

提前熟悉所讲的内容，认真备课，从作业中发现问题，总结学生知识的掌握程度。

准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料：

本课程所使用的教材：P18-23

7.4 教学单元四

本讲教学目标

掌握的内容：

- 1、 进一步熟悉流体静力学方程的应用
- 2、 流量与流速的定义
- 3、 稳态流动和非稳态流动
- 4、 连续性方程

本讲教学内容

知识点：

- 1、流体静力学基本方程的应用：液位的测定和液封高度的计算
- 2、流量和流速的定义和相互之间的关系
- 3、稳态流动和非稳态流动的区别

4、连续性方程的推和应用

重点：连续性方程

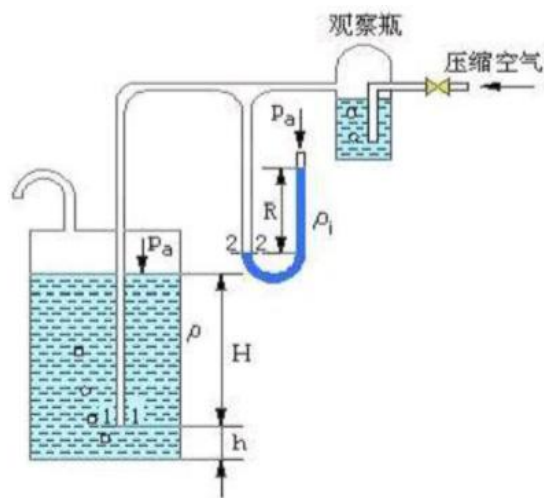
难点：非稳态流动

本讲教学过程及教学方法

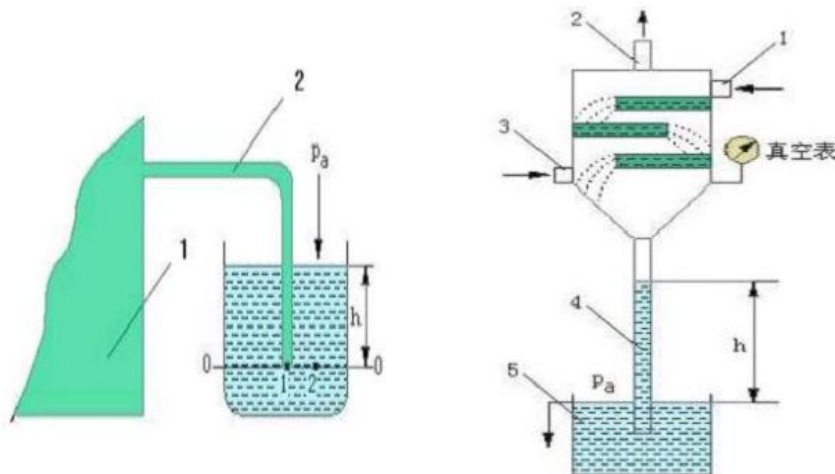
1、复习上次课流体静力学基本方程，并进行提问。

2、流体静力学方程的应用（举例讲授）

(1)液位的测定



(2)液封高度的计算



以教材上的例题为例讲解液位和液封高度的计算

3、流量和流速（讲授）

(1)流量，：单位时间内流过管道任一截面的流体量称为流量。

体积流量： v_s ， m^3/s

质量流量: w_s , kg/s

体积流量与质量流量之间的关系: $w_s = \rho v_s$

(2)流速: 单位时间内流体微团在流动方向上所流经的距离成为流速。其单位 m/s

平均流速: $u = \frac{v_s}{A}$

质量流速: $G = \frac{w_s}{A} = \frac{\rho v_s}{A} = \rho u$ kg/m².s

4、管路直径的估算和选择

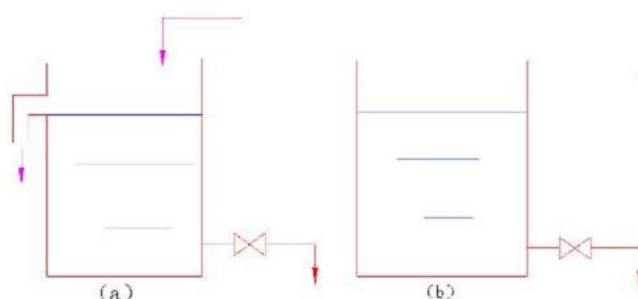
估算公式:

$$d = \sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}}$$

5、稳定流动与非稳定流动（图解讲授）

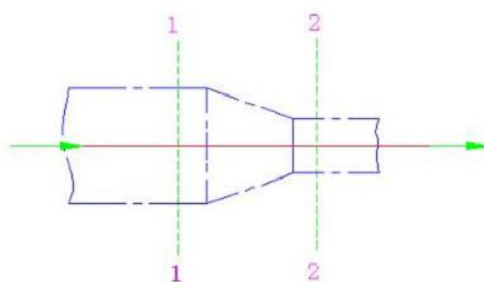
流体流动系统中，若各截面上的温度、压力、流速等物理量仅随位置变化，而不随时间变化称之为稳定流动（定常流动）如图 a。

若各截面上的温度、压力、流速等物理量随位置变化，也随时间变化称之为非稳定流动（定常流动）如图 b。



5、连续性方程（图解讲授）

从质量守恒定律导出连续性方程



质量守恒: $W_s = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \dots \rho u A = \text{常数}$

对于不可压缩流体:则 $V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = uA = \text{常数}$ ——连续性方程

连续性方程的应用（举例讲授）

对于圆形管道：

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

本讲师生互动

课堂提问：1、就上次课所学知识进行提问

本讲作业：本章课后习题 7

课前准备情况及其他相关特殊要求：

提前熟悉所讲的内容，认真备课，从作业中发现问题，总结学生知识的掌握程度。

准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料：

本课程所使用的教材：P23-28

7.5 教学单元五

本讲教学目标

掌握的内容：

- 1、伯努力方程推导和形式
- 2、伯努力方程的应用

本讲教学内容

知识点：

- 1、伯努力方程的形式、物理意义
- 2、伯努力方程的讨论

重点：伯努力方程的讨论

难点：伯努力方程的推导

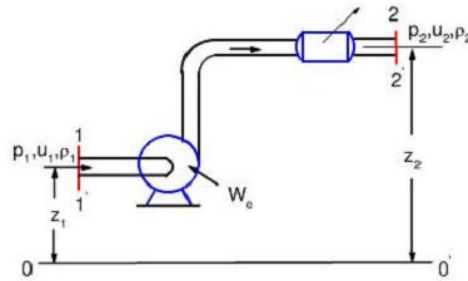
本讲教学过程及教学方法

1、复习上次课主要知识点，并进行课堂提问。

2、伯努力方程式（图解讲授）

伯努力方程式是管内流体流动机械能衡算式。

(1)伯努力方程式的推导



当流体为理想流体时，两界面上的上述三种能量之和相等。即：

$$gZ_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2}$$

截面上的三种能量之和为常数

(2)伯努力方程的讨论（讲授）

单位质量流体，位能，静压能，动能，内能之和叫做总机械能，其值为一常数，单位 **J/kg**

$$gz + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} = \text{常数}$$

上式为单位质量 流体能量守恒方程式

表明：

- 三种形式的能量可以相互转换；
- 总能量不会有所增减，即三项之和为一常数；

单位重量流体，压头，静压头，动压头之和叫做总压头，其值为一常数，单位为高度单位 **m**。

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = \text{常数}$$

静力学基本方程式与 伯努力方程关系

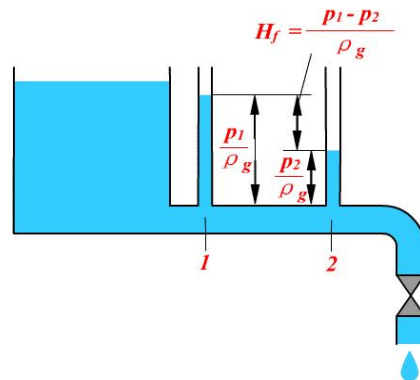
当流体处于静止状态时，速度为零，则动能为零，此时伯努力方程即为静力学基本方程。

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g}$$

$$z + \frac{p}{\rho g} = \text{常数}$$

位压头+静压头=常数

(3) 实际流体的机械能衡算式（图解讲授）



$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum H_f$$

(4) 流体机械能衡算式在实际生产中的应用

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum H_f$$

$$\text{或 } z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum h_f$$

——实际流体柏努利方程

We=0 时即为理想流体的伯努力方程

$\sum h_f$ 为能量损失

本讲师生互动

课堂提问：1、就流速、流量以及连续性方式的相关知识进行提问

本讲作业：本章课后习题 8、9

课前准备情况及其他相关特殊要求：

提前熟悉所讲的内容，认真备课，从作业中发现问题，总结学生知识的掌握程度。
准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料：

本课程所使用的教材：P29-33

7.6 教学单元六

本讲教学目标

掌握的内容：

1、伯努力方程的应用

本讲教学内容

知识点：

1、应用柏努利方程的步骤

2、应用柏努利方程的注意事项

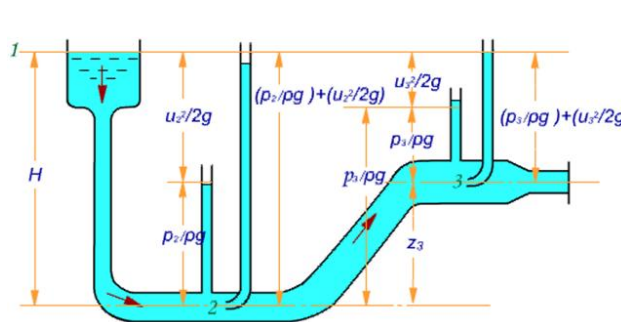
重点：伯努力方程的讨论

难点：伯努力方程的推导

本讲教学过程及教学方法

1、复习伯努力方程的知识点，并进行提问。

2、伯努力方程的几何意义（图解讲授）



3、应用伯努力方程的步骤（图例讲解）

进一步讲解伯努力方程的应用，加强学生对伯努力方程相关知识点的掌握。

$$gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f$$

应用方程的步骤：

1)作图并确定衡算范围

2)截面的截取

3)基准水平面的选取

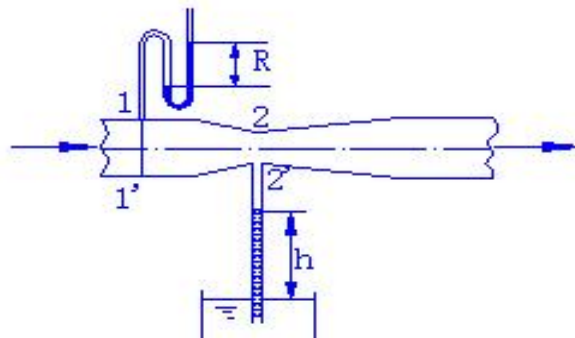
4)单位必须一致

4、伯努力方程的应用（举例讲授）

1)确定流体的流量

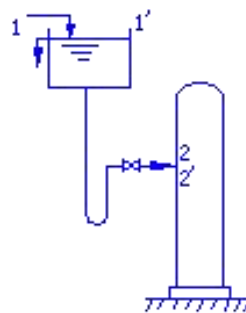
例：20℃的空气在直径为 80 mm 的水平管流过，现于管路中接一文丘里管，如本题附图所示，文丘里管的上游接一水银 U 管压差计，在直径为 20 mm 的喉径处接一细管，其

下部插入水槽中。空气流入文丘里管的能量损失可忽略不计,当U管压差计读数 $R=25\text{mm}$, $h=0.5\text{m}$ 时, 试求此时空气的流量为多少 m^3/h ?当地大气压强为 $101.33 \times 10^3\text{Pa}$ 。



2)确定容器间的相对位置

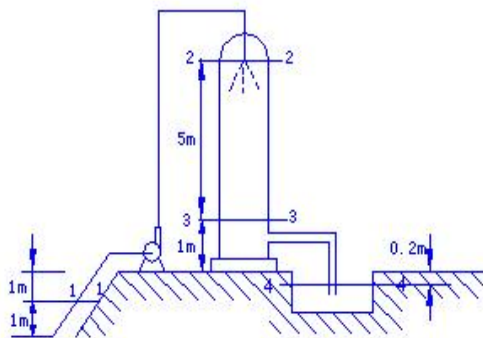
例: 如本题附图所示, 密度为 $850\text{kg}/\text{m}^3$ 的料液从高位槽送入塔中, 高位槽中的液面维持恒定, 塔内表压强为 $9.81 \times 10^3\text{Pa}$, 进料量为 $5\text{m}^3/\text{h}$, 连接管直径为 $\phi 38 \times 2.5\text{mm}$, 料液在连接管内流动时的能量损失为 $30\text{J}/\text{kg}$ 求高位槽内液面应为比塔内的进料口高出多少?



3)确定输送设备的有效功率

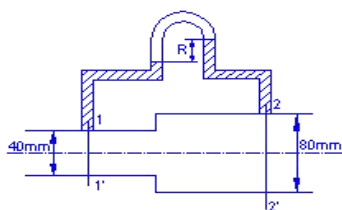
公式:
$$N_e = W_e W_s$$

例: 如图所示, 用泵将河水打入洗涤塔中, 喷淋下来后流入下水道, 已知道管道内径均为 0.1m , 流量为 $84.82\text{m}^3/\text{h}$, 水在塔前管路中流动的总摩擦损失(从管子口至喷头进入管子的阻力忽略不计)为 $10\text{J}/\text{kg}$, 喷头处的压强较塔内压强高 0.02MPa , 水从塔中流到下水道的阻力损失可忽略不计, 泵的效率为 65% , 求泵所需的功率。



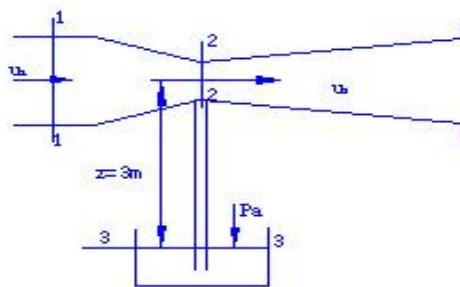
4) 管道内流体的内压强

例：如图，一管路由两部分组成，一部分管内径为 40mm，另一部分管内径为 80mm，流体为水。在管路中的流量为 $13.57\text{m}^3/\text{h}$ ，两部分管上均有一测压点，测压管之间连一个倒 U 型管压差计，其间充以一定量的空气。若两测压点所在截面间的摩擦损失为 260mm 水柱。求倒 U 型管压差计中液柱的高度 R 为多少 mm？



5) 流向的判断

例：在 $\phi 45 \times 3\text{mm}$ 的管路上装一文丘里管，文丘里管上游接一压强表，其读数为 137.5kPa ，管内水的流速 $u_1=1.3\text{m/s}$ ，文丘里管的喉径为 10mm，文丘里管喉部一内径为 15mm 的玻璃管，玻璃管下端插入水池中，池内水面到管中心线的垂直距离为 3m，若将水视为理想流体，试判断池中水能否被吸入管中？若能吸入，再求每小时吸入的水量为多少 m^3/h ？



本讲师生互动

课堂提问：1、就伯努力方程的相关知识提问

本讲作业：本章课后习题 9、14、15

课前准备情况及其他相关特殊要求：

提前熟悉所讲的内容，认真备课，从作业中发现问题，总结学生知识的掌握程度。

准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料：

本课程所使用的教材：P33-38

7.7 教学单元七

本讲教学目标

掌握的内容：

- 1、掌握流体的流动类型及其判断、雷诺准数的物理意义、计算
- 2、熟悉层流与湍流的特征
- 3、了解牛顿粘性定律，牛顿流体与非牛顿流体
- 4、边界层的概念、边界层的发展、层流底层、边界层分离

本讲教学内容

知识点：

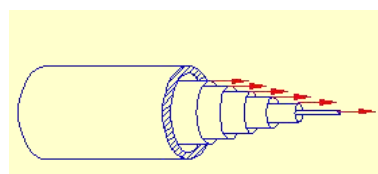
- 1、牛顿粘性定律
- 2、流体的粘度的物理意义
- 3、流动类型与雷诺准数

重点：流体的流动类型及判断，层流与湍流的区。

难点：边界层的形成与分离

本讲教学过程及教学方法

- 1、复习总结上次内容，并进行提问。
- 2、牛顿粘性定律及粘度（图例讲授）



牛顿粘性定律

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} \text{ —— 牛顿粘性定律}$$

粘度：

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}}$$

粘度的物理意义、单位、影响因素

3、流动类型与雷诺准数

(1) 雷诺实验（图例讲授）

雷诺实验

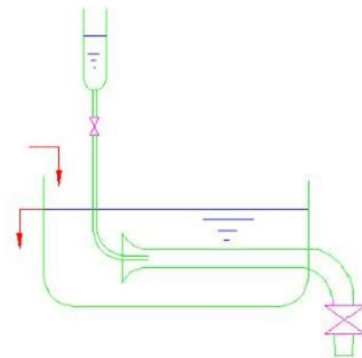


图 1-22 雷诺实验装置

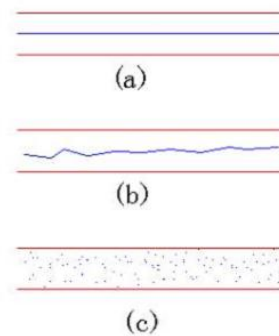


图 1-23 流体流动型态示意图

(2) 雷诺数 Re

$$Re = \frac{du\rho}{\mu}$$

(3) 雷诺数与流动类型

当 $Re \leq 2000$ 时，流体的流动类型属于滞流；

$Re \leq 4000$ 时，流体的流动类型属于湍流；

$2000 < Re < 4000$ 时，可能是滞流，也可能是湍流，与外界条件有关。——过渡区。

雷诺数的物理意义：

反映了流体流动中惯性力与粘性力的对比关系，标志流体流动上湍动程度。

1、流体在圆管内的速度分布

(1) 层流时的速度分布

实验和理论证明：层流时的速度分布为抛物线形状。

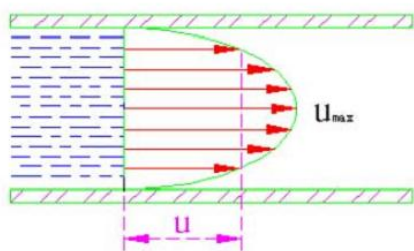


图 1-24 层流时的速度分布

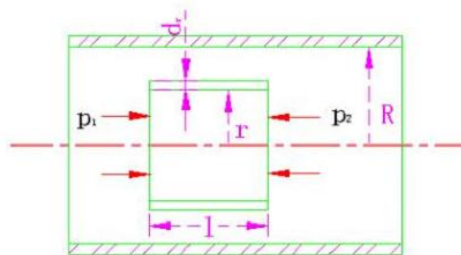


图 1-24a 层流时管内速度分布的推导

管中心流速为最大，即 $r=0$ 时， $u = u_{\max}$

$$u = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

根据流量相等的原则，确定出管截面上的平均速度为：

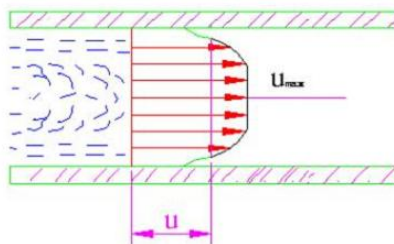
$$u = \frac{V_s}{\pi R^2} \frac{1}{2} u_{\max}$$

(2) 湍流时的速度分布

分布方程通常表示为：

$$u = u_{\max} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^n$$

式中 n 与 Re 有关



5、滞流与湍流的比较

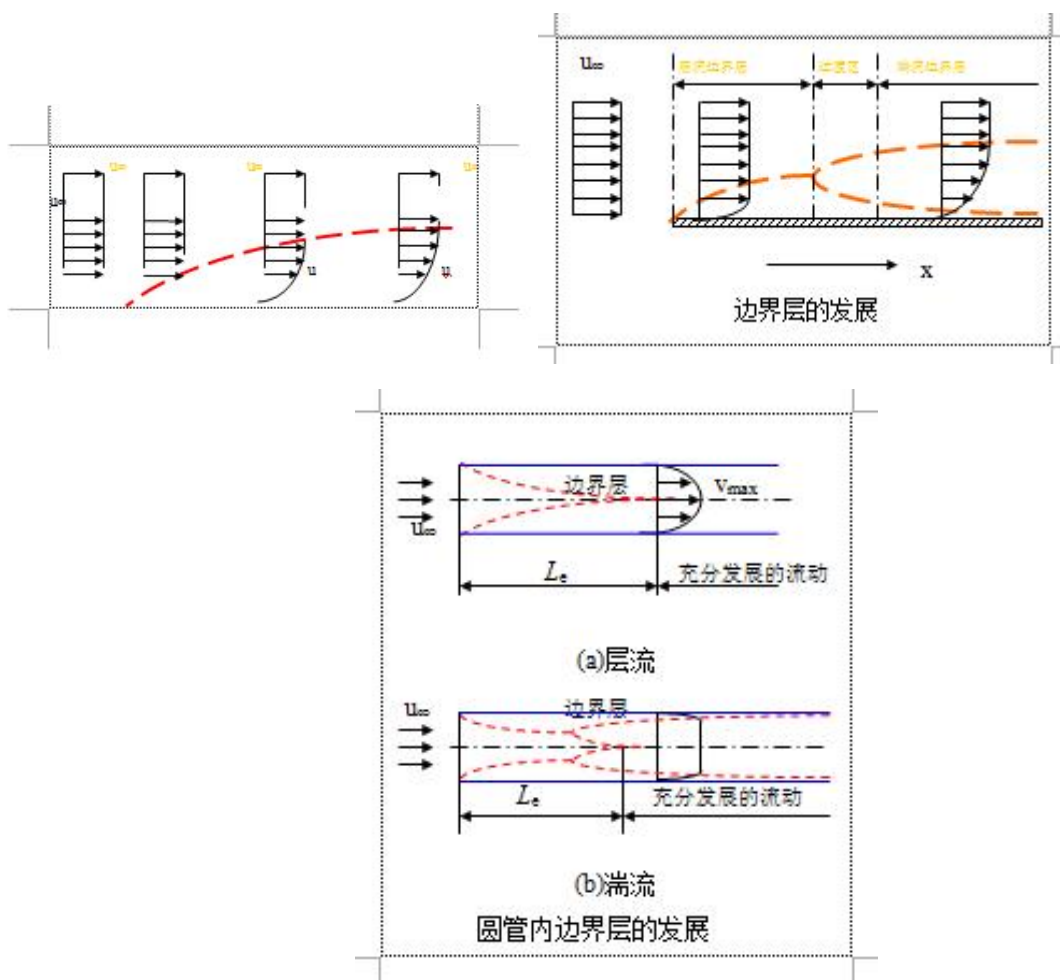
圆管内滞流与湍流的比较

	滞流	湍流
本质区别	分层流动	质点的脉动
速度分布	$u = u_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$	$u = u_{\max} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} (n = 7)$
平均速度	$u_m = \frac{1}{2} u_{\max}$	$u_m = 0.82 u_{\max} (n = 7)$
剪应力	$\tau = \mu \frac{du}{dy}$	$\tau = (\mu + \varepsilon) \cdot \frac{du}{dy}$

6、边界层（图解讲授）

主要讲授定义、发展和分离。

流体在平板上流动时的边界层图如下图所示，由于边界层的形成，把沿壁面的流动分为：边界层区和主流区。

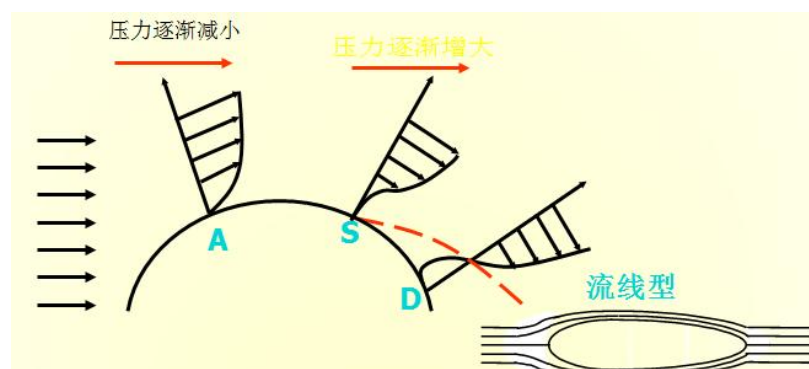


边界层的分离的必要条件：

流体具有粘性；流动过程中存在逆压梯度

边界层的分离的后果：

产生大量漩涡；造成较大的能量损失



边界层的分离示意图

本讲师生互动

课堂提问：1、针对流量的测定提问。

本讲作业：无

课前准备情况及其他相关特殊要求

授课准备：熟悉所讲的内容、思考具体的教学方法和手段；准备好课件及其他教学设备。

参考文献：

本课程所使用的教材：P39-48

7.8 教学单元八

本讲教学目标

- 1、掌握流体阻力产生的原因、分类、在管内动机械能损失计算
- 2、熟悉圆管内流速分布公式及应用。

本讲教学内容

知识点：

- 1、阻力产生的原因
- 2、阻力的分类和影响因素
- 3、直管阻力和局部阻力的计算公式
- 4、滞流时的摩擦系数的求取
- 5、层流流体管内流速分布

重点：

- 1、流动阻力计算式——范宁公式
- 2、圆管内层流流速分布关系
- 3、层流流动摩擦系数求取难点：牛顿粘性定律的意义

难点：

- 1、范宁公式；2、圆管内层流流速分布关系

本讲教学过程及教学方法

1、回顾上次课内容（复习总结、提问）

2、管路中的阻力（讲授）

流动阻力产生的根源：流体具有粘性，流动时存在内部摩擦力

流动阻力产生的条件：固定的管壁或其他形状的固体壁面

直管阻力：流体流经一定管径的直管时由于流体的内摩擦而产生的阻力

局部阻力：流体流经管路中的管件、阀门及管截面的突然扩大及缩小等局部地方所引起的阻力。

直管阻力产生原因：流体粘性及对管壁凸出部分的碰撞

局部阻力产生原因：粘性引起的内摩擦；边界层分离导致的形体阻力

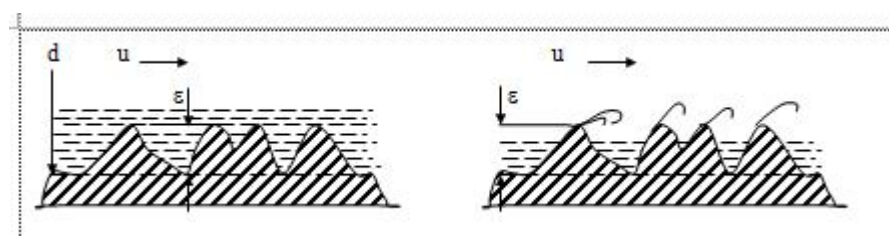
3、流体在圆形直管内的流动阻力公式（讲授、推导）

直管阻力计算通式（范宁公式）：

$$h_f = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2}$$

3、管壁粗糙度对摩擦系数的影响（图解讲授）

绝对粗糙度与相对粗糙度



4、滞流时的摩擦系数 λ 计算公式（讲授推导）

流体在圆管内做层流时的流速分布： $u_r = \frac{\Delta P_f}{4L\mu}(R^2 - r^2)$

流体在圆管内做层流流动时阻力计算公式：

$\Delta P_f = \frac{32\mu u L}{d^2} \quad \text{——哈根-泊谟叶公式}$ <p>层流时摩擦系数λ计算公式（滞流流动时λ与 Re 的关系）：</p> $\lambda = \frac{64}{Re}$ <p>讨论：层流时的关系：</p> $u_{\max} = 2u ; \quad h_f \propto u ; \quad h_f \propto \frac{1}{d^2}$
本讲师生互动
课堂提问：1、 提问雷诺数与流动类型的关系；2、提问边界层的内容
本讲作业：本章课后习题 17、18.
<p>课前准备情况及其他相关特殊要求</p> <p>授课准备：熟悉所讲的内容、思考具体的教学方法和手段；准备好课件及其他教学设备。</p>
<p>参考文献：</p> <p>本课程所使用的教材：P49-51</p>

7.9 教学单元九

本讲教学目标
<p>掌握的内容：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1、掌握湍流流动时摩擦系数的求取方法 2、掌握局部阻力的计算
本讲教学内容
<p>知识点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1、量纲分析法 2、摩擦系数与Re及管壁粗糙度的关系 3、局部阻力 <p>重点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1、量纲分析法 2、摩擦系数与Re及管壁粗糙度的关系 3、局部阻力计算方法 <p>难点：量纲分析法</p>

本讲教学过程及教学方法
<p>1、回顾上次课的内容（复习提问）</p> <p>2、湍流时的摩擦系数与因次分析法（讲授）</p> <p> 因次分析法：因次一致性原则和π定理</p> <p> 湍流摩擦系数的求取</p> <p>3、直管内湍流流动的阻力损失（图解讲授）</p> <p> 摩擦因素图</p> $\lambda = \phi\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{d}\right)$ <p> 柏拉修斯(Blasius)光滑管公式</p> $\lambda = 0.316 / \text{Re}^{0.25}$ <p> 非圆形管内的摩擦损失</p> <p> 令r_H（水利半径）= 流道截面积/润湿周边长度 $\therefore de = 4r_H$</p> <p>4、局部阻力计算（举例讲授）</p> <p> 当量长度法：</p> $\text{阻力系数法： } h_f = \lambda \frac{\sum L_e}{d} \frac{u^2}{2}, \quad h'_f = \zeta \frac{u^2}{2}$
本讲师生互动
课堂提问： 1、 提问直管阻力有哪些及产生的原因
本讲作业： 课后习题 21、22
课前准备情况及其他相关特殊要求： 提前熟悉所讲的内容，准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。
参考资料： 本课程所使用的教材：P52-58

7.10 教学单元十

本讲教学目标

<p>掌握的内容：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1、掌握管路的分类、简单管路计算及输送能力核算； 2、熟悉复杂管路计算的要点。
本讲教学内容
<p>知识点：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1、管路计算的分类及特点：简单管路、复杂管路 2、管路计算分类及计算方法 <p>重点：</p> <p>简单管路的计算</p> <p>难点：</p> <p>复杂管路的计算及其特点。</p>
本讲教学过程及教学方法
<ol style="list-style-type: none"> 1、回顾上次课的内容（复习提问） 2、管路分类及特点（讲授） <p>简单管路：流体从入口到出口是在一条管路中流动的，没有出现流体的分支或汇合的情况</p> <p>串联管路：不同管径管道连接成的管路</p> <p>复杂管路：存在流体的分流或合流的管路</p> <p>分支管路、并联管路</p> 3、计算工具： $u_1 A_1 = u_2 A_2$ $gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + w_s = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + w_f$ $w_f = \lambda \frac{l + l_e}{d} \frac{u^2}{2} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2}$ 4、常用的三种计算（讲授） <p>直接计算：已知流量和管器尺寸，管件，计算管路系统的阻力损失</p> <p>试差法或迭代法：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1)给定流量、管长、所需管件和允许压降，计算管路直径 2)已知管道尺寸，管件和允许压强降，求管道中流体的流速或流量 5、简单管路和复杂管路的特点（图例讲授）

1)简单管路的特点

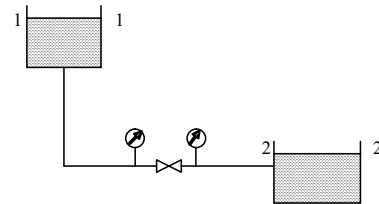
质量衡算：

$$W_s = W_{s1} + W_{s2} + W_{s3}$$

能量衡算：

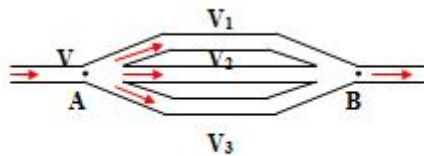
$$\sum h_{f1} = \sum h_{f2} = \sum h_{f3}$$

举例：现将阀门开度减小，试定性分析以下各流动参数：管内流量、阀门前后压力表读数 p_A 、 p_B 、摩擦损失 w_f （包括出口）如何变化？

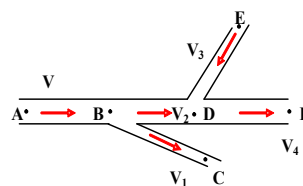


2)复杂管路的特点

并联管路



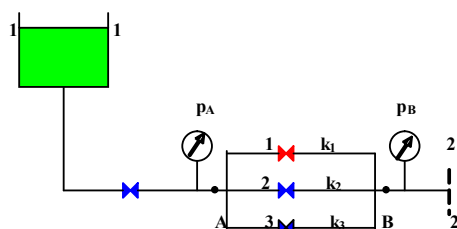
分支或者汇合管路



举例：现将支路 1 上的阀门 k_1 关小，则下列流动参数将如何变化？

(1)总管流量 V 、支管 1、2、3 的流量 V_1 、 V_2 、 V_3 ；

(2)压力表读数 p_A 、 p_B 。



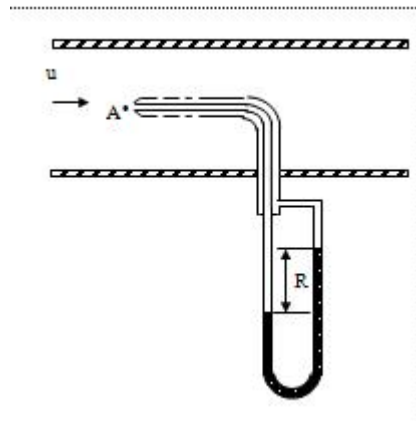
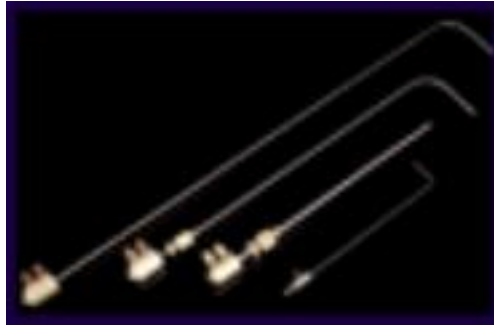
本讲师生互动
课堂提问： 提问局部阻力的计算方法
本讲作业： 本章课后习题 23
课前准备情况及其他相关特殊要求： 提前熟悉所讲的内容，准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。
参考资料： 本课程所使用的教材：P59-68

7.11 教学单元十一

本讲教学目标
<p>掌握的内容：</p> <p>1、掌握液柱式压差计、测速管、孔板流量计和转子流量计的工作原理、基本结构、安装要求和计算。</p>
本讲教学内容
<p>知识点：</p> <p>1、测速管的结构、安装要求及计算</p> <p>2、孔板流量计的结构、安装及计算原理</p> <p>3、文丘里流量计的结构、计算原理</p> <p>4、转子流量计的结构、安装及计算重点：</p> <p>重点：</p> <p>1、孔板流量计的结构、安装及计算原理</p> <p>2、转子流量计的结构、安装及计算</p> <p>难点：</p> <p>孔板、转子流量计的计算原理</p>
本讲教学过程及教学方法
1、回顾上次课的内容（复习提问）

2、测速管的结构、安装要求及计算（图例讲授）

测速管结构：



测量原理：

$$\therefore u = \sqrt{\frac{2gR(\rho' - \rho)}{\rho}}$$

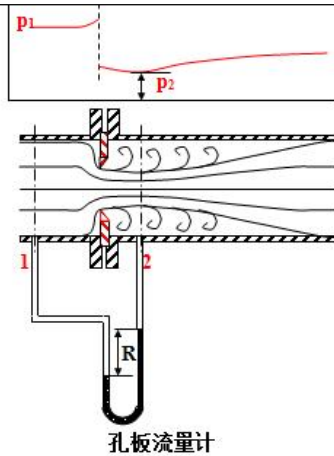
使用注意事项

优点：结构简单、阻力小、使用方便，尤其适用于测量气体管道内的流速。

缺点：不能直接测出平均速度，且压差计读数小，常须放大才能读得准确。

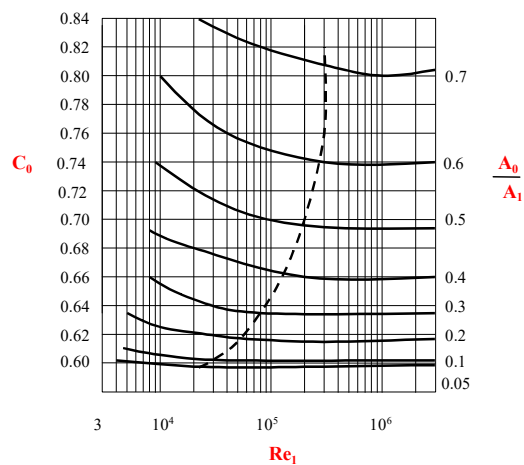
3、孔板流量计的结构、安装要求及计算（图例讲授）

孔板流量结构：



测量原理:

$$V = u_0 A_0 = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_0 - \rho)}{\rho}}$$



$$C_0 = f\left(\text{Re}_1, \frac{A_0}{A_1}\right)$$

使用注意事项:

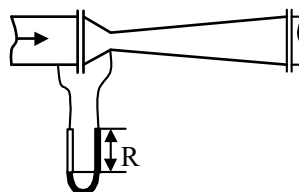
孔流系数 C_0 与 Re_1 及 A_0/A_1 的关系

优点: 构造简单, 制造和安装都很方便

缺点: 机械能损失 (称之为永久损失) 大。

4、文丘里的结构、安装要求及计算 (图例讲授)

结构:



测速原理:

$$V = u_0 A_0 = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_0 - \rho)}{\rho}}$$

缺点: 加工比孔板复杂, 因而造价高, 且安装时需占去一定管长位置。

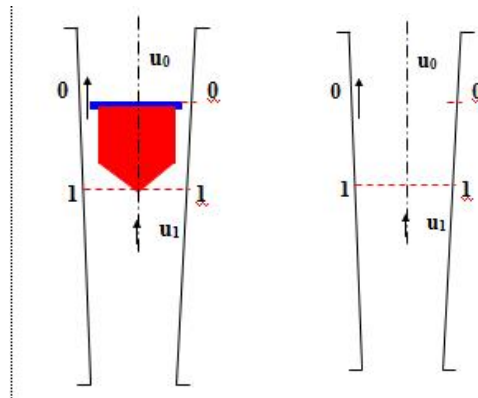
优点: 其永久损失小, 故尤其适用于低压气体的输送。

变压头流量计的特点是:

恒截面, 变压头。

5、转子流量计的结构、安装要求及计算 (图例讲授)

转子流量计的结构



测速原理:

$$V = C_R A_0 \sqrt{\frac{2V_f(\rho_f - \rho)g}{\rho A_f}}$$

转子流量计安装、使用中注意事项

优点: 读取流量方便, 流体阻力小, 测量精确度较高, 能用于腐蚀性流体的测量; 流量计前后无须保留稳定段。

缺点: 玻璃管易碎, 且不耐高温、高压。

本讲师生互动

课堂提问: 1、 复习提问流体流量的表示方法

本讲作业: 无

课前准备情况及其他相关特殊要求:

提前熟悉所讲的内容, 准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料:

本课程所使用的教材：P69-77

7.12 教学单元十二

本讲教学目标

- 1、掌握离心泵的结构、工作原理
- 2、掌握离心泵的性能参数
- 3、熟悉离心泵的基本方程求和计算。

本讲教学内容

知识点：

- 1、离心泵的结构、工作原理、
- 2、离心泵的性能参数
- 3、离心泵的基本方程式

重点：

- 1、离心泵的工作原理、结构和主要部件
- 2、离心泵的性能参数及基本方程

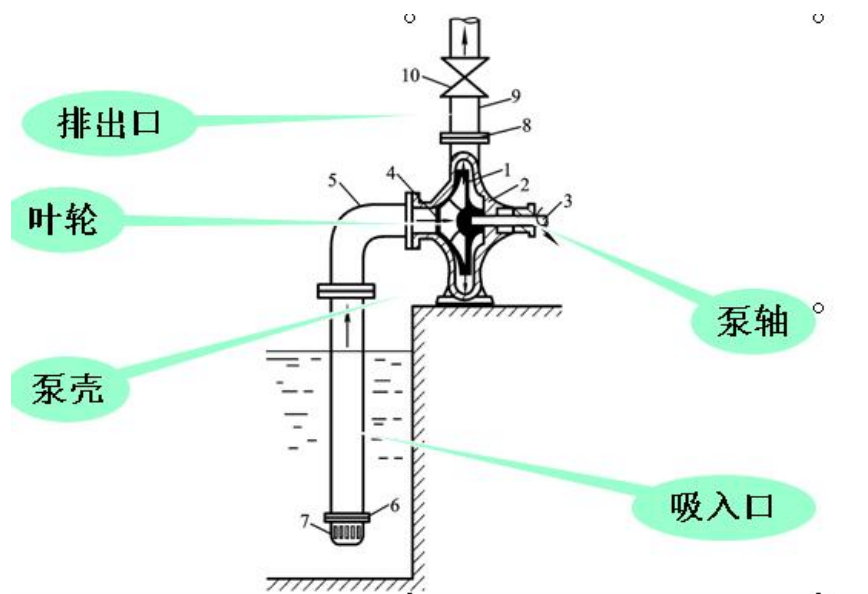
难点：

- 1、离心泵的工作原理
- 2、离心泵的基本方程

本讲教学过程及教学方法

1、离心泵工作原理和构造（图例讲授）

离心泵的装置图



2、工作原理：气缚现象的产生原因和预防（讲授）

若泵启动前不灌满液体，则泵内有一部分空气，当泵启动时，不能产生足够大的离心力，故叶轮中心不能形成足够大的真空，流体不能被吸入泵内，从而不能实现流体输送。此现象称为**气缚现象**。

故泵启动前一定要灌满液体。

3、离心泵的主要构造（图解讲授）

① 叶轮

a.作用：将原动机的机械能传给液体，使液体静压能和动能 \uparrow 。

b.结构：一般由 4~12 片后弯叶片组成（后弯指叶片弯曲方向与叶轮旋转方向相反）。

{ 闭式
半闭式
开式



(a) 闭式



(b) 半闭式

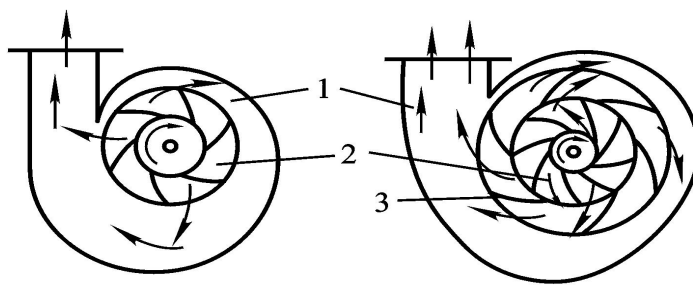


(c) 开式

② 泵壳

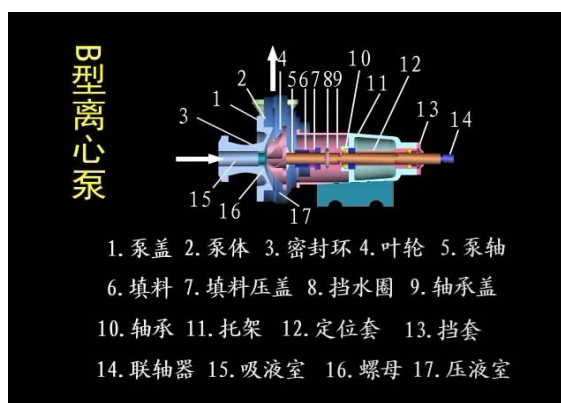
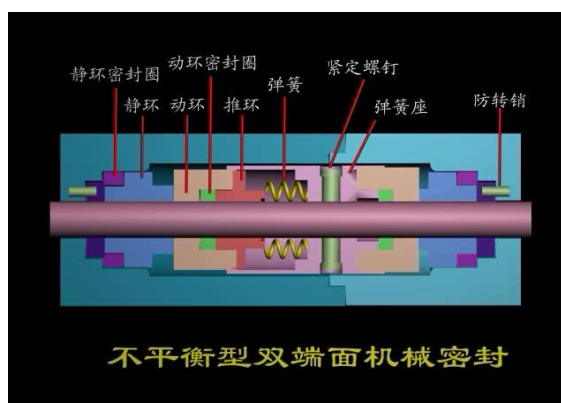
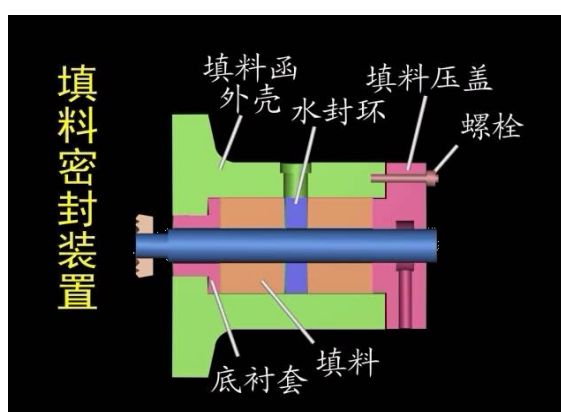
a.结构：成蜗牛形，越接近泵出口，流道 \uparrow ， $u\downarrow$ ，故静压能 \uparrow 。

b.作用：汇集液体，并导出液体；能量转换装置，将部分动能转化成静压能。



③轴封装置

作用：减少泵内高压液体外流，防止空气进入泵内。



4、离心泵的性能参数（讲授）

A.流量 $Q(\text{m}^3/\text{h}, \text{L}/\text{s})$: 单位时间内, 流体输送设备提供给管路系统的流体体积量, 是泵供液能力的一个参数。 $Q=f(\text{结构、尺寸、转速})$

B.压头 $H(\text{J}/\text{N}, \text{m})$: 又称扬程, 单位重量流体从流体输送设备上获得的机械能, 是泵供能能力的一个参数。 $H=f(\text{结构、尺寸、流量、转速})$ 。

C.轴功率 $N(\text{W}, \text{kW})$: 泵单位时间得到的能量。即电机传给泵轴的功率。

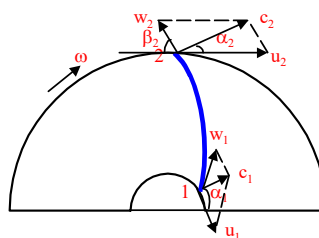
D.效率 η : 泵输送液体时, 必然存在一部分能量损失, 故泵得到的能量不能全传给流体, 用效率来衡量。

$$\eta = \frac{N_e}{N} = \frac{Q\rho Hg}{N} \quad N_e - \text{流体单位时间得到的能量。} W$$

5、离心泵的基本方程（图例讲授）

离心泵基本方程式的导出

$$H_{T\infty} = \frac{1}{g} \left(u_2^2 - \frac{Q_T u_2 \cot \beta_2}{\pi D_2 b_2} \right)$$



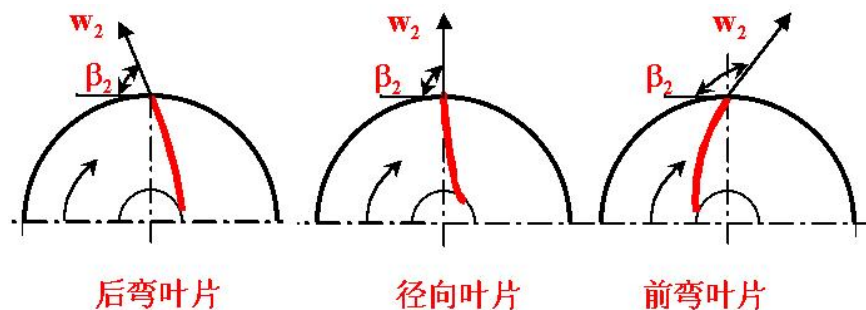
6、离心泵理论压头影响因素分析（图例讲授）

1) 叶轮的直径 D 与转速 n : 从基本方程可知, 在其它条件不变时, 随着转速或叶轮直径 \uparrow , 则离心泵的理论扬程 $HT \uparrow$ 。

2) 叶片形状, 即流动角 β_2 的影响:

当结构一定时 (即 D_2 、 b_2 、 β_2 一定) 和 n 一定时, 离心泵基本方程写成如下的直线形式

$$H_{T\infty} = A - BQ_T \quad A = \frac{u_2^2}{g}, B = \frac{u_2 \cot \beta_2}{g \pi D_2 b_2}$$



后弯叶片: $\beta_2 < 90^\circ, \cot \beta_2 > 0, B > 0, H_{T\infty} < A$, 即随 $Q_T \uparrow, H_{T\infty} \downarrow$ 。

径向叶片: $\beta_2 = 90^\circ, \cot \beta_2 = 0, B = 0, H_{T\infty} = A$

前弯叶片: $\beta_2 > 90^\circ, \cot \beta_2 < 0, B < 0, H_{T\infty} > A$, 即随 $Q_T \uparrow, H_{T\infty} \uparrow$ 。

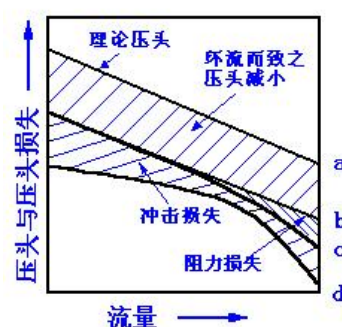
3) 液体密度

离心泵的理论压头与液体密度无关。

7、实际压头（图解讲授）

离心泵的实际压头与理论压头有较大的差异，原因在于流体在通过泵的过程中存在着压头损失，它主要包括：

- 1) 叶片间的环流
- 2) 流体的阻力损失
- 3) 冲击损失



本讲师生互动

课堂提问：1、 提问伯努力方程中的有效功率的概念和计算公式，引出离心泵做功

本讲作业：课后习题 1.

课前准备情况及其他相关特殊要求：

提前熟悉所讲的内容，准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料：

本课程所使用的教材：P86-94

7.13 教学单元十三

本讲教学目标

- 1、掌握离心泵的特性曲线及应用
- 2、熟悉特性曲的影响因素
- 3、掌握离心泵的安装高度
- 4、熟悉影响扬程、流量的主要因素

本讲教学内容

知识点:

- 1、离心泵的特性曲线
- 2、气蚀现象
- 3、气蚀余量及安装高度

重点:

- 1、离心泵的特性曲线
- 2、离心泵的安装高度

难点: 离心泵特性曲的影响因素

本讲教学过程及教学方法

1、复习归纳上次课关于离心泵基本方程的内容并进行提问

2、离心泵的特性曲线（图例讲授）

离心泵的 H 、 η 、 N 都与离心泵的 Q 有关，它们之间的关系由确定离心泵压头的实验来测定，实验测出的一组关系曲线：

$$H \sim Q, \eta \sim Q, N \sim Q$$

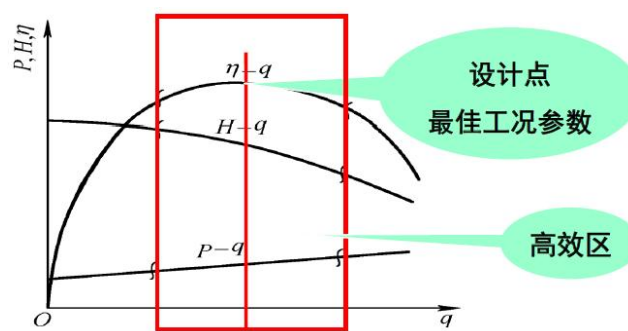
——离心泵的特性曲线

1) $H \sim Q$ 曲线：表示泵的压头与流量的关系，离心泵的压头普遍是随流量的增大而下降（流量很小时可能有例外）

2) $N \sim Q$ 曲线：表示泵的轴功率与流量的关系，离心泵的轴功率随流量的增加而上升，流量为零时轴功率最小。

离心泵启动时，应关闭出口阀，使启动电流最小，以保护电机。

3) $\eta \sim Q$ 曲线：表示泵的效率与流量的关系，随着流量的增大，泵的效率将上升并达到一个最大值，以后流量再增大，效率便下降。



3、影响离心泵特性曲线的因素（讲授）

①密度 ρ 的影响：由基本方程知，离心泵的理论流量和理论压头与 ρ 无关，说明 $H-Q$ 曲线不随 ρ 而变，由此 $\eta-Q$ 曲线也不随 ρ 而变。

②粘度的影响：

液体粘度的改变将直接改变其在离心泵内的能量损失 Σh_f ，一般 $\mu \uparrow$ ， $\Sigma h_f \uparrow$ 。 $\therefore H \downarrow, Q \downarrow, \eta \downarrow, N \uparrow$ 。 $H-Q$ 、 $N-Q$ 、 $\eta-Q$ 曲线都将随之而变。

③转速 n 的影响（比例定律）

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{Cr_2'}{Cr_2} = \frac{C_2'}{C_2} \left(\because Q = \pi D_2 b_2 C r_2 \right) = \frac{u_2'}{u_2} = \frac{r_2 \omega'}{r_2 \omega} = \frac{\frac{2\pi n'}{60} \cdot r_2}{\frac{2\pi n}{60} \cdot r_2} = \frac{n'}{n}$$

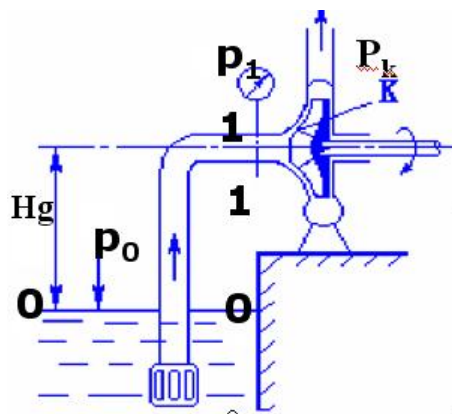
$$\text{又} \because H = \frac{1}{g} u_2 C_2 \cos \alpha \quad \therefore \frac{H'}{H} = \frac{u_2' C_2'}{u_2 C_2} = \left(\frac{n'}{n} \right)^2$$

$$\frac{N'}{N} = \frac{N_e'}{N_e} (\because \eta \text{ 不变}) = \frac{H' g Q' \rho}{H g Q \rho} = \frac{H' Q'}{H Q} = \left(\frac{n'}{n} \right)^3$$

②离心泵叶轮直径 D_2 的影响（切割定律）

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{D_2'}{D_2}, \quad \frac{H'}{H} = \left(\frac{D_2'}{D_2} \right)^2, \quad \frac{N'}{N} = \left(\frac{D_2'}{D_2} \right)^3$$

4、离心泵的气蚀现象（图解讲授）



气蚀产生的条件：

叶片入口附近 K 处的压强 P_k 等于或小于输送温度下液体的饱和蒸气压

气蚀产生的后果：

- ✓ 叶片表面产生蜂窝状腐蚀；
- ✓ 泵体震动，并发出噪音；

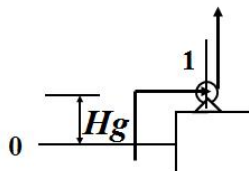
- ✓ 流量、压头、效率都明显下降；
- ✓ 严重时甚至吸不上液体。

为了防止气蚀现象的发生，必须要求叶片入口附近的最低压强大于输送温度下液体的饱和蒸汽压，即泵的安装高度不宜太高。

5、离心泵的允许吸上高度（图解讲授）

为避免汽蚀现象，安装高度必须加以限制，即存在最大安装高度又称为允许吸上高度，指泵的吸入口与吸入贮槽液面间可允许达到的最大垂直距离，以 H_g 表示。

$$H_g = \frac{P_0 - P_1}{\rho g} - \frac{u_1^2}{2g} - H_{f0-1} \quad H_g = \frac{P_a - P_1}{\rho g} - \frac{u_1^2}{2g} - H_{f0-1}$$



离心泵的允许吸上真空度

$$H_s' = P_a - p_1 / \rho g$$

$$H_g = H_s' - \frac{u_1^2}{2g} - H_{f0-1}$$

——允许吸上高度的计算式

H_s' 值越大，表示该泵在一定操作条件下抗气蚀性能好，安装高度 H_g 越高。

H_s' 与泵的结构、流量、被输送液体的物理性质及当地大气压等因素有关。 H_s' 随 Q 增大而减小。

6、气蚀余量（讲授）

$$\text{令 } \Delta h_{\min} = \frac{P_{e,\min}}{\rho g} + \frac{u_e^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g}$$

-----最小汽蚀余量

一般规定，允许汽蚀余量

$$[\Delta h] = \Delta h_{\min} + 0.3$$

本讲师生互动

课堂提问：1、离心泵的结构主要有哪些？

本讲作业： 本章课后习题 2、3
课前准备情况及其他相关特殊要求： 提前熟悉所讲的内容，准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。
参考资料： 本课程所使用的教材：P95-106
本讲师生互动
课堂提问： 1、提问恒压过滤
本讲作业： 无
课前准备情况及其他相关特殊要求 授课准备：熟悉所讲的内容、思考具体的教学方法和手段；准备好课件及其他教学设备。
参考文献： 本课程所使用的教材：P181-188

7.15 教学单元十五

本讲教学目标
<ol style="list-style-type: none"> 1、掌握三种传热基本方式（热传导、热对流、热辐射）的特点和机理 2、了解工业常用的三种换热方式及典型间壁式换热器 3、了解加热剂、冷却剂的种类和选用 4、掌握传热速率和热通量的概念 5、掌握热传导基本原理，一维定常态傅立叶定律及应用，平壁一维定常态热传导计算与分析
本讲教学内容
知识点： <ol style="list-style-type: none"> 1、传热速率和热通量的概念 2、热传导基本概念：温度场，导热系数 3、傅立叶定律 4、平壁一维稳态的热传导 重点： <ol style="list-style-type: none"> 1、傅立叶定律

2、平壁一维稳态的热传导

难点：

1、温度场温度梯度的概念

本讲教学过程

1、 传热概述（讲授）

化工生产中的传热过程

传热的目的

传热的分类

2、 传热的基本方式（讲授）

(1)导热：不依靠物体内部各部分质点的宏观混合运动而借助于物体分子、原子、离子、自由电子等微观粒子的热运动产生的热量传递称为热传导，简称导热。

特点：没有物质的宏观位移；发生在相互接触的物质之间和物体内部。典型是发生在固体中；静止和层流流动流体。

(2)热对流：流体各部分之间发生相对位移所引起的热传递过程称为热对流。 热对流仅发生在流体中。

{自然对流：由流体各部分温度不同引起密度差异，从而
导致流体流动。
强制对流：在外力作用下使流体流动。（如泵，搅拌等）

特点：有质点的宏观运动，发生于流体中。

(3)热辐射：因热的原因而产生电磁波在空间的传递。

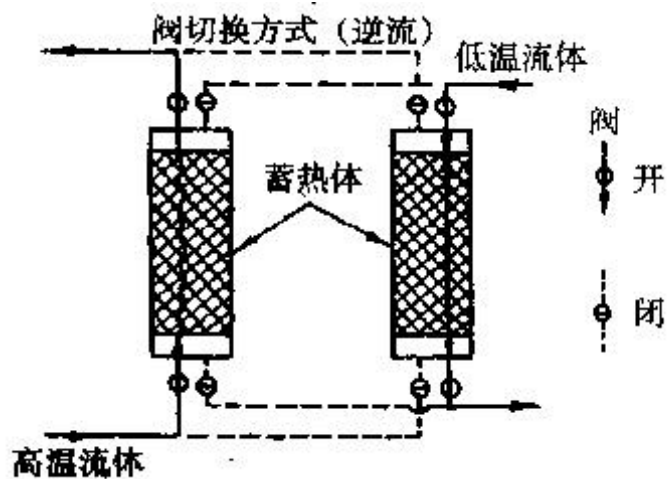
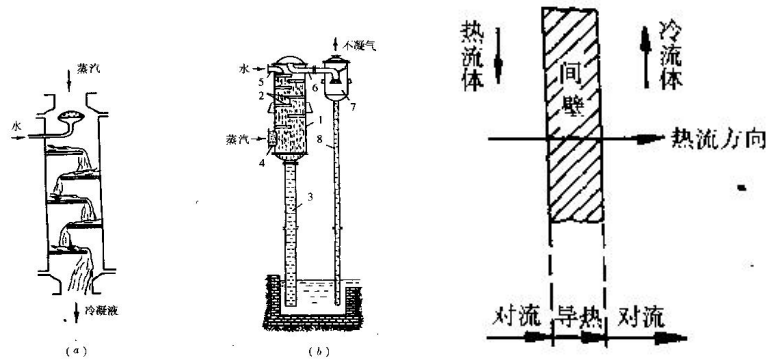
特点：

A、所有物体都能将热能以电磁波的形式发射出去，故热辐射不需要任何介质，真空中可传递。

B、不仅有能量的传递，而且还有能量形式的转换；

C、热辐射不需要温差。 $E \propto T^4$

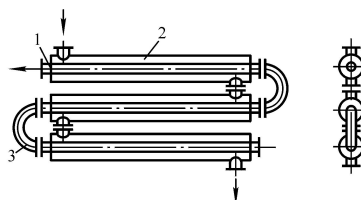
3、工业换热方式及典型的换热设备（图解讲授）



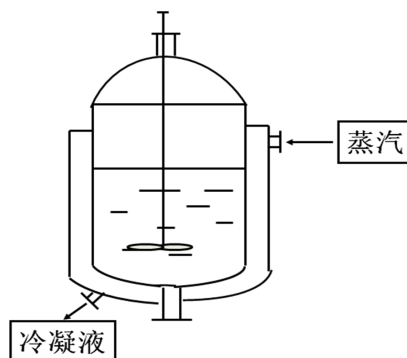
方式：直接混合式、蓄热式换热、间壁式换热

典型设备（针对间壁式换热）

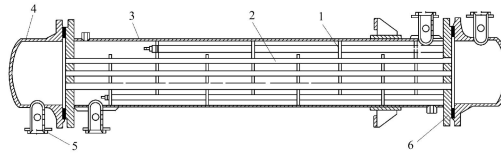
A、套管式



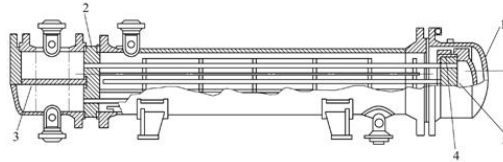
B、夹套式



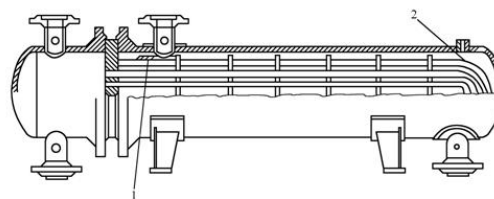
C、列管式（管壳式）



固定管板式



浮头式



U型管式

4、选择载热体原则（讲授）

- ①载热体的温度易调节控制；
- ②载热体的饱和蒸气压较低，加热时不易分解；
- ③载热体的毒性小，不易燃、易爆，不易腐蚀设备；
- ④价格便宜，来源容易。

5、基本概念和傅立叶定律（讲授）

1)温度场和温度梯度

2)傅立叶定律

傅立叶 (Fourier) 定律——热传导基本定律

$$dQ = -\lambda \cdot ds \cdot \frac{dt}{dx} \text{——唯定态温度场}$$

导热系数：导热系数在数值上等于单位温度梯度下的热通量，它表征物质导热能力的大小。与物质的种类、组成、结构、密度、温度、压强有关。

$$\lambda = -\frac{dQ}{ds \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial \vec{n}}\right)} = -\frac{dQ/ds}{\frac{\partial t}{\partial \vec{n}}}$$

影响因素：

物质本身的影响

纯净程度： $\lambda_{\text{纯}} > \lambda_{\text{混}}$ ，

紧密程度： $\lambda_{\text{紧}} > \lambda_{\text{松}}$ ，

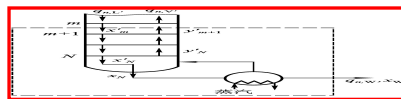
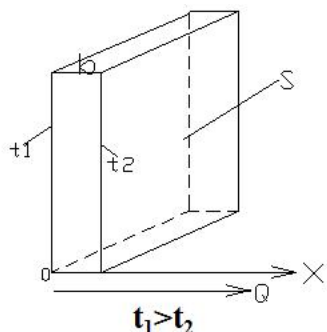
聚集状态： $\lambda_{\text{固}} > \lambda_{\text{液}} > \lambda_{\text{气}}$ ； $\lambda_{\text{导电固体}} > \lambda_{\text{非导电固体}}$

外部条件的影响：压强、温度

导热系数的求取：查手册、计算

6、平壁一维稳态的热传导（图例讲授）

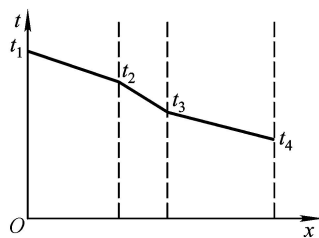
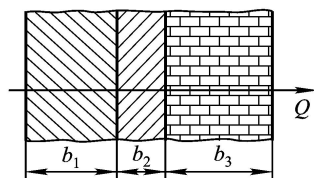
单层



$$q = \frac{Q}{S} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b}{\lambda}} = \frac{\Delta t}{R'}$$

$$\therefore Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

多层平壁的热传导



$$\begin{aligned} \text{即 } Q &= \frac{t_1 - t_2}{\frac{b_1}{\lambda_1 S}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{b_2}{\lambda_2 S}} = \frac{t_3 - t_4}{\frac{b_3}{\lambda_3 S}} \\ &= \frac{t_1 - t_4}{\frac{b_1}{\lambda_1 S} + \frac{b_2}{\lambda_2 S} + \frac{b_3}{\lambda_3 S}} \\ &= \frac{t_1 - t_4}{\sum_{i=1}^3 \frac{b_i}{\lambda_i S}} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总热阻}} \end{aligned}$$

结论：

①对各层平壁，其 Δt 越大，则对应其热阻 R 也越高。

②各层平壁导热通量 $q = \text{const}$ 。

本讲师生互动

课堂提问：无

本讲作业：本章课后习题 1

课前准备情况及其他相关特殊要求：

提前熟悉所讲的内容，准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料：

本课程所使用的教材：P209-221

7.16 教学单元十六

本讲教学目标

- 1、掌握圆筒壁一维稳定的热传导规律
- 2、理解对流传热基本原理，牛顿冷却定律
- 3、理解影响对流传热的主要因素

本讲教学内容

知识点：

- 1、圆筒壁一维稳定的热传导规律
- 2、对流传热分析、热边界层
- 3、牛顿冷却定律、对流传热系数

重点：

- 1、圆筒壁一维稳定的热传导规律
- 2、牛顿冷却定律

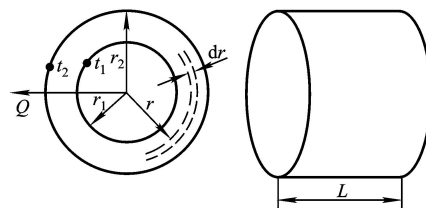
难点：

- 1、圆筒壁一维稳定的热传导规律
- 2、对流传热过程分析

本讲教学过程

- 1、复习上次课所学内容，并能进行提问。
- 2、圆筒壁的热传导（图例讲授）
 - 1)单层圆筒壁的热传导

$$Q = -\frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi L \lambda} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \text{ 或 } Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi L \lambda} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \frac{r_2 - r_1}{r_2 - r_1}}$$



$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b}{\lambda \cdot S_m}} = \frac{\text{导热推动力}}{\text{圆筒壁导热热阻}}$$

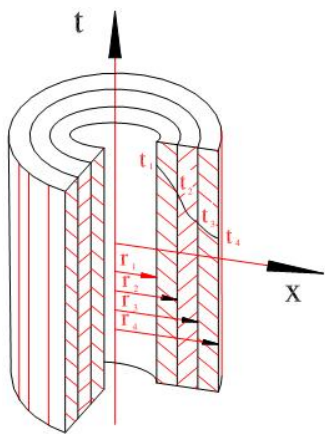
2) 多层圆筒壁的热传导

定态传热, $\therefore Q = \text{const}$

即 $Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$

$$Q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{1}{2\pi L \lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi L \lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{2\pi L \lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3}} = \frac{t_1 - t_4}{\frac{r_2 - r_1}{\lambda_1 S_{m1}} + \frac{r_3 - r_2}{\lambda_2 S_{m2}} + \frac{r_4 - r_3}{\lambda_3 S_{m3}}}$$

$$= \frac{t_1 - t_4}{\frac{b_1}{\lambda_1 S_{m1}} + \frac{b_2}{\lambda_2 S_{m2}} + \frac{b_3}{\lambda_3 S_{m3}}}$$



对 n 层圆筒壁, 其热传导速率方程可表示为

$$Q = \frac{(t_1 - t_{n+1})}{\frac{1}{2\pi L \lambda_i} \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{1}{2\pi L} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i S_{mi}}}$$

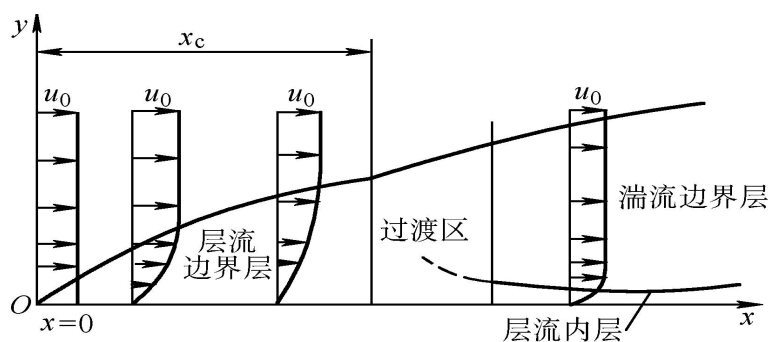
平壁与圆筒壁的比较

项目	传热速率	传热面积	热通量
平壁	常量	常量	常量
圆筒壁	常量	随半径变	随半径变

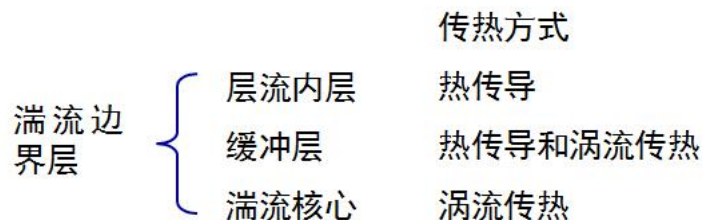
特点：圆筒壁的传热面积不是常量，随半径而变；故热通量也随半径而变。

3、对流传热分析（图解讲授）

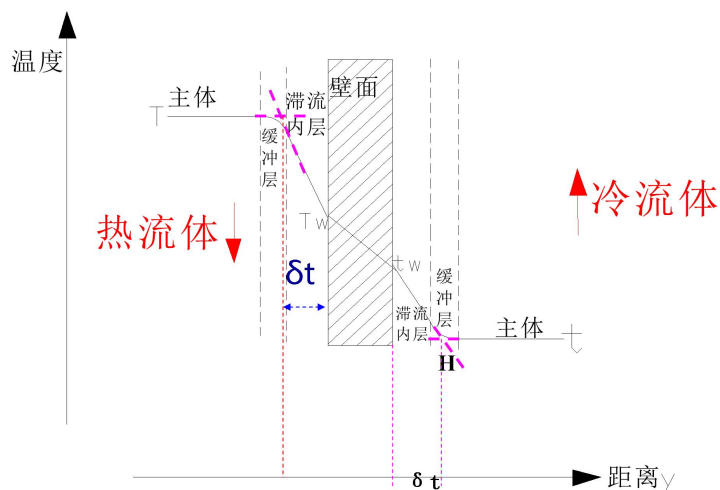
流过固体壁面的流体与固体壁面之间的传热过程称为对流传热。



当湍流的流体流经固体壁面时，将形成湍流边界层，若流体温度与壁面不同，则二者之间将进行热交换。



流体流过固体壁面在垂直于流动方向、某一截面上的温度分布情况如图所示。



		温度梯度	热阻
湍流边界层	层流内层	较大	较大
	缓冲层	居中	居中
	湍流核心	较小	较小（可以忽略）

结论：对流传热是集热对流和热传导于一体的综合现象。对流传热的热阻主要集中在层流内层，因此，减薄层流内层的厚度是强化对流传热的主要途径。

4、流体与壁面间的 对流传热速率——牛顿冷却定律（讲授）

$$dQ = \alpha(T - T_w)ds \text{ — 牛顿冷却定律}$$

在换热器中，换热面积有不同的表示方法，可以是管内侧或管外侧表面积。但对流传热系数必须和传热面积以及温度差相对应。如热流体在管外流动，冷流体在管内流动。则对流传热速率方程式可分别表示为：

$$dQ = \alpha_o (T - T_w) dS_o = \alpha_i (t_w - t) dS_i$$

对于整个换热器，则有：

$$Q = \alpha_o (T - T_w)_m S_o = \alpha_i (t_w - t)_m S_i$$

α_o 、 α_i —管外、管内的平均对流传热系数。

5、对流传（给）热系数（讲授）

$$\alpha = \frac{Q}{S \Delta t}$$

在数值上等于单位温度差下、单位传热面积的对流传热速率。它反映了对流传热的快慢，它不是流体的物理性质，而是受诸多因素（如流体物性、流动状况、设备、有无相变等）影响的一个系数。

α 值(W/(m². °C)) 的经验范围

空气自然对流	气体强制对流	水自然对流	水强制对流	水蒸汽冷凝	有机蒸汽冷凝	水沸腾
5~25	20~100	20~	1000~	5000~	500~	2500~
		1000	15000	15000	2000	25000

结论：强制对流>自然对流；有相变>液体>气体

本讲师生互动

课堂提问：提问傅立叶定律相关内容

本讲作业：本章习题3、4

课前准备情况及其他相关特殊要求：

提前熟悉所讲的内容，准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料：

本课程所使用的教材：P222 -230

7.17 教学单元十七

本讲教学目标

- 1、掌握传热速率方程
- 2、掌握传热热阻，传热系数、热负荷的概念
- 3、掌握热负荷、传热面积、总传热系数、平均温差推动力的计算

本讲教学内容

知识点：

- 1、传热速率基本方程
- 2、热量衡算；
- 3、换热器的传热面积和总传热系数
- 4、简单流向的对数平均温度差

重点：

- 1、 传热速率基本方程
- 2、 热量衡算；换热器的传热面积和总传热系数
- 3、 简单流向的对数平均温度差

难点：

- 1、传热速率基本方程
- 2、总传热系数。

本讲教学过程

1、复习上次课所学内容，并能进行提问。

2、传热速率基本方程（图例讲授）

假定：（1）传热过程为稳定传热；（2）壁面两侧流体为恒温；

（3）取 T_w 、 t_w 和相应的 α_o 、 α_i 为平均值

$$\text{外侧对流: } Q = \alpha_o S_o (T - T_w) = \frac{T - T_w}{\frac{1}{\alpha_o S_o}}$$

$$\text{内侧对流: } Q = \alpha_i S_i (t_w - t) = \frac{t_w - t}{\frac{1}{\alpha_i S_i}}$$

$$\text{壁面导热: } Q = \frac{T_w - t_w}{\frac{b}{\lambda S_m}}$$

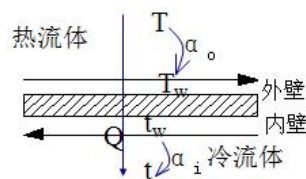
由等比定律:

$$Q = \frac{(T - T_w) + (T_w - t_w) + (t_w - t)}{\frac{1}{\alpha_o S_o} + \frac{b}{\lambda S_m} + \frac{1}{\alpha_i S_i}}$$

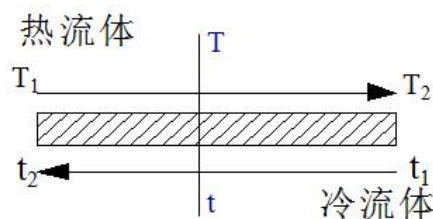
$$= \frac{T - t}{\frac{1}{\alpha_o S_o} + \frac{b}{\lambda S_m} + \frac{1}{\alpha_i S_i}} = \frac{S(T - t)}{\frac{S}{\alpha_o S_o} + \frac{bS}{\lambda S_m} + \frac{S}{\alpha_i S_i}}$$

$$\text{令 } \frac{1}{K} = \frac{S}{\alpha_o S_o} + \frac{bS}{\lambda S_m} + \frac{S}{\alpha_i S_i} \text{ —— 总传热热阻}$$

K —— 总传热系数, $W / m^2 \cdot ^\circ C$



实际情况, T , t , T_w , t_w 往往沿管长变化



总传热速率方程: $Q = KS\Delta t_m$

3、热衡算 (讲授)

1) 热平衡方程

假设换热器绝热良好, 热损失可以忽略不计, 对于整个换热器, 其热量衡算式为:

$$Q = W_h(I_{h1} - I_{h2}) = W_c(I_{c2} - I_{c1})$$

2) 流体无相变化

$$Q = W_h c_{ph} (T_1 - T_2) = W_c c_{pc} (t_2 - t_1)$$

↑ **热流体释放的热**
↑ **冷流体吸收的热**

C_{pc} , C_{ph} ——冷、热流体的比热, $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

3) 若换热器中流体有相变, 例如饱和蒸气冷凝

$$Q = W_h r = W_c c_{pc} (t_2 - t_1) \quad \text{有相变无温降}$$

$$Q = W_h [r + c_{ph} (T_s - T_2)] = W_c c_{pc} (t_2 - t_1)$$

r ——饱和蒸气的冷凝潜热, kJ/kg 。 **有相变有温降**

4、 传热面积 (讲授)

传热面积有三种:

$$S_o = n\pi d_o l, \quad S_i = n\pi d_i l, \quad S_m = n\pi d_m l。$$

d_o 、 d_i 、 d_m ——管外径、内径、平均直径。

工业上若无具体说明, 大多以 S_o 为计算基准。

5、 总传热系数K (讲授)

传热面积有: S_o , S_i , S_m 。而K与S的取法密切相关。

基于内表面 S_i 的总传热系数 K_i :

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{bd_i}{\lambda d_m} + \frac{d_i}{\alpha_o d_o}$$

基于外表面 S_o 的总传热系数 K_o :

$$\frac{1}{K_o} = \frac{d_o}{\alpha_i d_i} + \frac{bd_o}{\lambda d_m} + \frac{1}{\alpha_o}$$

K是评价换热器性能的一个重要参数, 也是对换热器进行传热计算的依据。 K的数值取决于流体的物性、传热过程的操作条件及换热器的类型等, 可通过计算、实验测定或查阅相关手册得到。

污垢热阻:

$$\frac{1}{K_o} = \frac{d_o}{\alpha_i d_i} + R_{s_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{bd_o}{\lambda d_m} + R_{s_o} + \frac{1}{\alpha_o}$$

控制热阻:

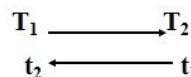
结论: $K \rightarrow \alpha_{\text{小}}$, 即K由对流传热系数小的一侧流体控制。

故要有效的提高K, 则应提高 $\alpha_{\text{小}}$ 。

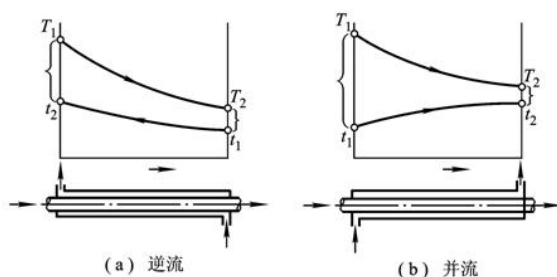
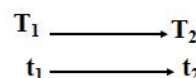
6、平均温度差（图解讲授）

1)流体的流向

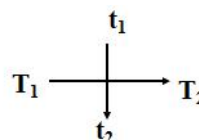
A、逆流：指两流体以相反的方向流动。



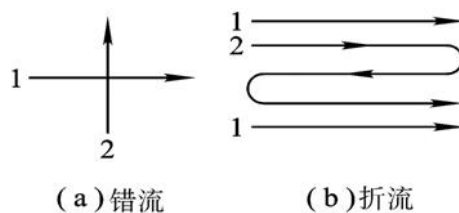
B、并流：指两流体以相同的方向流动。



C、错流：两流体的流向相互垂直。



D、折流：一流体沿一个方向流动，另一流体反复折流。
如：



2) Δt_m 的求取

恒温差传热 $\therefore \Delta t_m = \Delta t = T - t$

简单的并、逆流 Δt_m 的求取
$$\Delta t_m = \frac{Q}{KS} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}$$

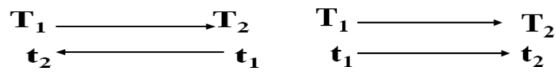
并、逆流 Δt_m 的计算式，称为对数平均温度差。

平均温度差公式的讨论

a. 当 $\Delta t_2/\Delta t_1 < 2$ 时, $\Delta t_m = (\Delta t_2 + \Delta t_1) / 2$

b. 对于逆流: $\Delta t_1 = T_1 - t_2$; $\Delta t_2 = T_2 - t_1$

对于并流: $\Delta t_1 = T_1 - t_1$; $\Delta t_2 = T_2 - t_2$



遵循: 同侧相减, 大减小。

c. 当两侧流体进出口温度相同时, 并流、逆流 Δt_m 不相等。

例: 当 $T_1 = 90^\circ\text{C}$, $T_2 = 70^\circ\text{C}$; $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = 60^\circ\text{C}$ 时

逆流 $T_1 = 90^\circ\text{C}$ \longrightarrow $T_2 = 70^\circ\text{C}$ $\Delta t_{m\text{逆}} = \frac{50 - 30}{\ln \frac{50}{30}} = 39.2^\circ\text{C}$
 $t_2 = 60^\circ\text{C}$ \longleftarrow $t_1 = 20^\circ\text{C}$
 $\Delta t_1 = 30^\circ\text{C}$ $\Delta t_2 = 50^\circ\text{C}$

并流 $T_1 = 90^\circ\text{C}$ \longrightarrow $T_2 = 70^\circ\text{C}$ $\Delta t_{m\text{并}} = \frac{70 - 10}{\ln \frac{70}{10}} = 30.8^\circ\text{C}$
 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ \longrightarrow $t_2 = 60^\circ\text{C}$
 $\Delta t_1 = 70^\circ\text{C}$ $\Delta t_2 = 10^\circ\text{C}$

$$\Delta t_{m\text{逆}} > \Delta t_{m\text{并}}$$

3) 流向的比较 (并流和逆流)

已知: 当两侧流体进出口温度相同时 $\Delta t_{m\text{逆}} > \Delta t_{m\text{并}}$

$$\text{而 } Q = K \cdot S \cdot \Delta t_m$$

(1) 从传热面积 S 来看:

假设并、逆流的 Q 、 K 相同, 则有: $S_{\text{逆}} < S_{\text{并}}$

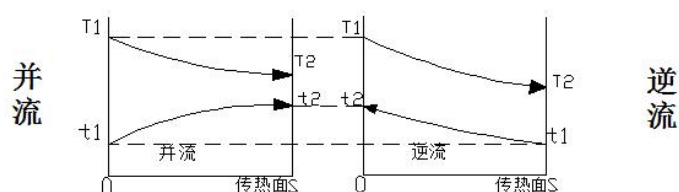
即采用逆流操作, 可节省传热面积。逆流优于并流。

(2) 生产能力看:

假设并、逆流的 S 、 K 相同, 则有: $Q_{\text{逆}} > Q_{\text{并}}$

即采用逆流生产能力大。

(3)从加热介质用量 W_h 、冷却介质用量 W_c 来看



T_2 极限 $\rightarrow t_2$

T_2 极限 $\rightarrow t_1$

即 $T_{2逆} < T_{2并}$

$t_{2逆} > t_{2并}$

(a)若传热的目的是为了加热,

$T_{2逆} < T_{2并}$, $\therefore W_{h逆} < W_{h并}$

即逆流时加热介质用量可以比并流少, 逆流优于并流。

(b)同理若目的是为了冷却, 则

$Q = W_h C_{ph} (T_1 - T_2)$ 固定, 若冷流体 t_1 , C_{pc} 一定。

由 $Q = W_c C_{pc} (t_2 - t_1) = W_h C_{ph} (T_1 - T_2)$

$\therefore t_{2逆} > t_{2并}$, 故 $W_{c逆} < W_{c并}$ 。

(c)宜采用并流的操作

①、流体温度的限制

$\left\{ \begin{array}{l} \text{当 } t_2 \text{ 不大于某一温度时 (如不超过 } T_2) \\ \text{当 } T_2 \text{ 不低于某一温度时 (如不低于 } t_2) \end{array} \right.$ (从上图可知)

②、高粘度的冷流体

由图分析

4) 复杂流向 Δt_m 的求取

思路: 先按逆流处理, 计算 $\Delta t_{m逆}$, 再乘以考虑流动方向的校正因素 $\phi_{\Delta t}$

即 $\Delta t_m = \phi_{\Delta t} \Delta t_{m逆}$

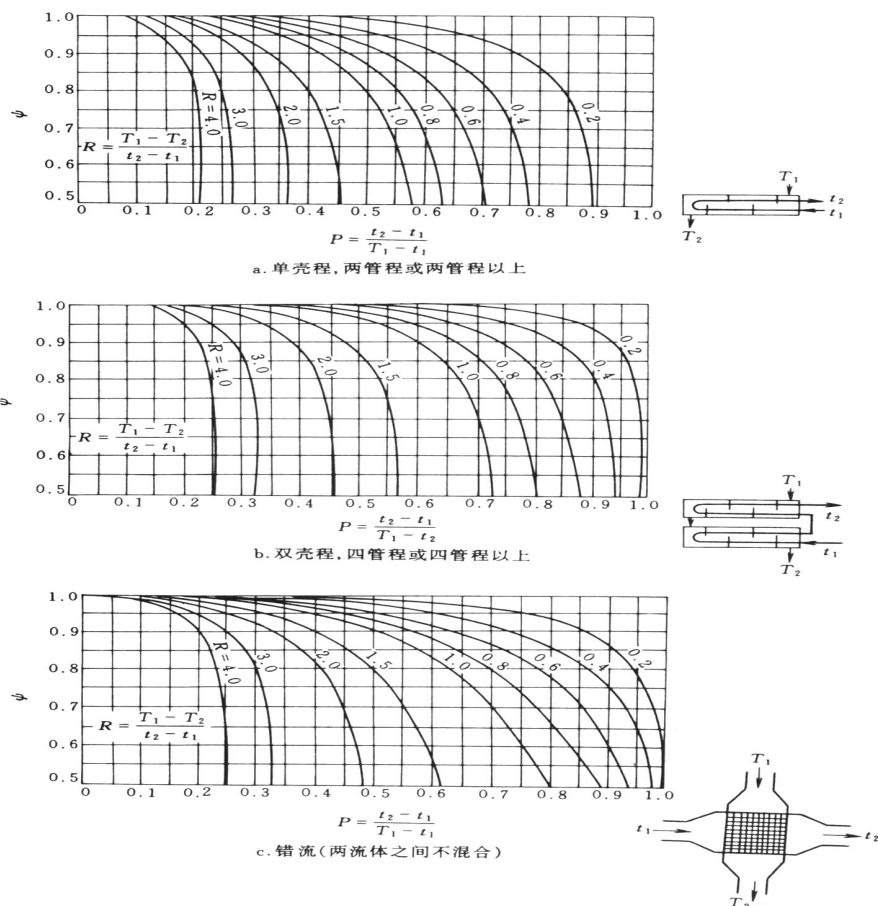
其中: $\phi_{\Delta t} = f(P, R)$ $R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$ $P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$

$\phi_{\Delta t}$ 可根据 P 、 R 查图得到

注意: (1) 由图可知, $\phi_{\Delta t} < 1$ 为什么?

$\phi_{\Delta t(并流)} < \phi_{\Delta t(错、折流)} < \phi_{\Delta t(逆流)}$

(2) 当 $\phi_{\Delta t} < 0.8$, P 对 $\phi_{\Delta t}$ 的影响很大



例：已知一换热器 $S_o=3\text{m}^2$ ，用表压为 2kgf/cm^2 的饱和蒸汽在管外加热管内的水，水流量 $W_c=4000\text{kg/h}$ ，从 $t_1=20^\circ\text{C}$ 被加热到 $t_2=80^\circ\text{C}$ ，比热为 $C_{pc}=4.17\text{KJ/Kg}^\circ\text{C}$ ，列管为 $\Phi 25 \times 2.5\text{mm}$ 。求：(1) 蒸汽消耗量 $W_h=?$

(2) 总传热系数 $K_o=?$

(3) 如果水侧对流传热系数为 $\alpha_i=2\text{KW/m}^2^\circ\text{C}$ ，管壁导热系数 $\lambda=4.5\text{W/m}^\circ\text{C}$ ，忽略污垢热阻，求蒸汽侧的对流传热系数 $\alpha_o=?$

(4) 若换热器列管长 $L=3\text{m}$ ，求管子数 $n=?$

例：单程换热器 $S=100\text{m}^2$ ，冷流体用量 $W_c=550\text{kg/min}$ ，比热 $C_{pc}=4.18\text{KJ/Kg}^\circ\text{C}$ ，进口温度 $t_1=35^\circ\text{C}$ ，出口温度 $t_2=75^\circ\text{C}$ ；热流体比热 $C_{ph}=2.18\text{KJ/Kg}^\circ\text{C}$ ，进口温度 $T_1=150^\circ\text{C}$ ，出口温度 $T_2=60^\circ\text{C}$ 。求：(1) 热流体用量 $W_h=?$ (2) 设总传热系数 $K=400\text{W/m}^2^\circ\text{C}$ ，此换热器能否完成换热任务？

本讲师生互动

课堂提问：就上次课所学内容提问总结

本讲作业：本章课后习题 6、7

课前准备情况及其他相关特殊要求：

提前熟悉所讲的内容，准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料：

本课程所使用的教材：P230-244

7.18 教学单元十八

本讲教学目标

- 1、掌握传热单元数法
- 2、传热效率 ε 和传质单元数的关系

本讲教学内容

知识点：

- 1、传热效率 ε 、最小值流体
- 2、传热单元数法
- 3、传热效率 ε 和传质单元数的关系
- 4、理解对流传热系数准数关联式
- 5、熟悉热辐射的基本概念和两灰体间辐射传热计算
- 6、理解常用的换热器的结构

重点：传热单元数法

难点：传热效率 ε 和传质单元数的关系

本讲教学过程

1、复习上次课所学内容，并能进行提问。

2、传热效率 ε （讲授）

$$\varepsilon = \frac{\text{实际传热速率 } Q}{\text{最大可能传热速率 } Q_{\max}}$$

最小值流体：换热器中两流体中热容量流率较小者

a.若冷流体为最小值流体，则有：

$$\varepsilon_h = \frac{W_h C_{ph}(T_1 - T_2)}{W_h C_{ph}(T_1 - t_1)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1}$$

b.若热流体为最小值流体,则有：

$$\varepsilon_c = \frac{W_c C_{pc}(t_2 - t_1)}{W_c C_{pc}(T_1 - t_1)} = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

计算传热效率时，应选用最小值流体。

3、传热单元数NTU（讲授）

基于冷流体的传热单元数(NTU)_c

$$(NTU)_c = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{T-t} = \frac{KS}{W_c c_{pc}}$$

基于热流体的传热单元数 (NTU)_h

$$(NTU)_h = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{T-t} = \frac{KS}{W_h c_{ph}}$$

(NTU)_c的物理意义：

它反映传热推动力和传热所要求的温度变化，传热推动力愈大，所要求的温度变化愈小，则所需要的传热单元数愈少。

4、传热效率与传质单元数（讲授）

对于单程并流换热器

若冷流体为最小值流体，且令：

$$C_{\min} = W_c C_{pc}, \quad C_{\max} = W_h C_{ph}, \quad \text{则} \quad (NTU)_{\min} = \frac{KS}{C_{\min}}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp \left[-(NTU)_{\min} \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \right]}{1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}}$$

对于单程逆流换热器

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp \left[-(NTU)_{\min} \left(1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \right]}{1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \exp \left[-(NTU)_{\min} \left(1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \right]}$$

当两流体中任一流体发生相变时： $\varepsilon = 1 - \exp[-(NTU)_{\min}]$

当两流体的热容流率相等：

$$\text{单程并流换热器} \quad \varepsilon = \frac{1 - \exp[-2(NTU)]}{2}$$

$$\text{单程逆流换热器} \quad \varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$$

5、 传热单元数法 ($\varepsilon-NTU$) —讲授+举例

采用 $\varepsilon-NTU$ 法进行换热器校核计算的步骤如下:

(1)根据换热器的工艺及操作条件, 计算(或选取)总传热系数;

(2)计算 $W_h c_{ph}$ 及 $W_c c_{pc}$, 确定 $(Wc_p)_{\max}$ 及 $(Wc_p)_{\min}$;

(3)计算: $NTU = \frac{KS}{(Wc_p)_{\min}}$ 及 $C_R = \frac{(Wc_p)_{\min}}{(Wc_p)_{\max}}$

(4)根据换热器中流体流动的类型, 由 NTU 和 C_R 查得相应的 ;

(5)根据冷、热流体进口温度及 ε , 可求出传热量 Q 及冷、热流体的出口温度。

例: 重油和原油在单程套管换热器中呈并流流动, 两种油的初始温度分别为 $T_1=243^\circ\text{C}$ 和 $t_1=128^\circ\text{C}$; 终温分别为 $T_2=167^\circ\text{C}$ 和 $t_2=157^\circ\text{C}$ 。若维持两种油的流量和初温不变, 而将两流体改为逆流, 试求此时流体的平均温度差 $\Delta t_m'$ 及它们的终温 T_2' 和 t_2' 。假设在两种流动情况下, 流体的物性和总传热系数均不变化, 换热器的热损失可以忽略。

6、准数关联式 (讲授)

$Re = \frac{l\rho u}{\mu}$ ——雷诺准数, 反映流体流动状态的影响。

$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ ——努塞尔特准数, 表对流传热系数的准数。

$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda}$ ——普兰特准数, 表物性影响的准数。

$Gr = \frac{l^3 \rho^2 g \beta \Delta t}{\mu^2}$ ——格拉斯霍夫准数, 表自然对流影响的准数,
在湍流时可忽略。

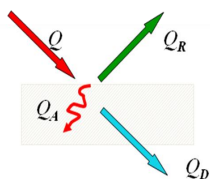
7、辐射传热基本概念(图解讲授)

辐射: 物体以电磁波的形式传递能量的过程称为辐射;

辐射能: 物体辐射传递的能量称为辐射能;

热辐射: 物体因热的原因引起的电磁波辐射, 即热辐射;

辐射传热: 不同物体之间相互辐射和吸收能量, 从而使热量从高温物体向低温物体传递的过程。



根据能量守恒： $Q = Q_A + Q_R + Q_D$

$$A = \frac{Q_A}{Q} \text{ --- 吸收率} \quad R = \frac{Q_R}{Q} \text{ ---- 反射率}$$

$$D = \frac{Q_D}{Q} \text{ ---- 透过率} \quad A + R + D = 1$$

黑体（绝对黑体， $A=1$ ）

镜体（绝对白体， $R=1$ ）

透过体， $D=1$

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} = f(T, \lambda)$$

下标 b 表示黑体。

本讲师生互动

课堂提问：无

本讲作业：本章课后习题 9、10 题

课前准备情况及其他相关特殊要求：

提前熟悉所讲的内容，准备好课件、教案以及其他相应的教学设备。

参考资料：

本课程所使用的教材：P244—250

7.19 教学单元十九

本讲教学目标

掌握的内容：

- 1、蒸馏过程的原理
- 2、蒸馏过程的分类

本讲教学内容

- 1、蒸馏原理、特点、应用、分类
- 2、温度-组成图

3、气—液相组成图

重点：t-x-y 图的构成

难点：压力对温度组成图的影响

本讲教学过程及教学方法

1、概述

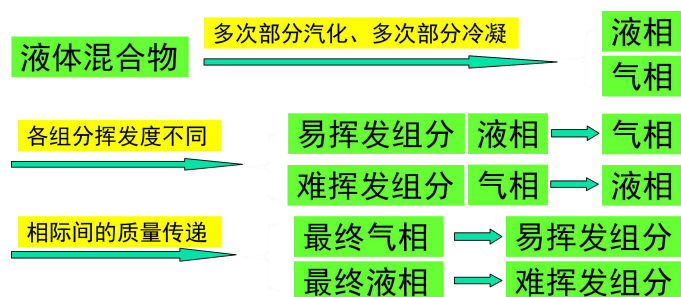
(1)蒸馏过程的原理（提问法+图例法+讲授法）

以采用蒸馏实验分离丙酮-水为例，提问学生此实验可以进行的原理是什么？再以分离水-乙醇、苯-甲苯为例进行讲解从而总结蒸馏的分离的原理。



蒸馏分离的对象为均相的液体混合物（对比过滤、沉降、萃取分离方法）

原理图下图所示：



(2)蒸馏过程的应用(案例法)

①液体混合物分离

❖ 混合芳烃蒸馏可得到苯、甲苯及二甲苯等。

②气体混合物分离

❖ 空气液化蒸馏可得到纯态的液氧和液氮等。

③固体混合物分离

❖ 固体脂肪酸加热融化后用蒸馏方法分离。

蒸馏操作实例：石油炼制中使用的 250 万吨常减压装置



(3)蒸馏分离的特点(讲授法)

- ❖ 通过蒸馏分离可以直接获得所需要的产品
- ❖ 通过蒸馏分离可以直接获得所需要的产品
- ❖ 蒸馏过程适用于各种浓度混合物的分离
- ❖ 蒸馏操作耗能较大，节能是个值得重视的问题

(4)蒸馏过程的分类

按蒸馏操作方式分类：

按操作压力分类

蒸馏

简单蒸馏

平衡蒸馏

精 馏

特殊精馏

蒸馏

常压蒸馏

加压蒸馏

减压蒸馏

按蒸馏操作流程分类

按物系中组分数目分类

蒸馏

间歇蒸馏

连续蒸馏

蒸馏

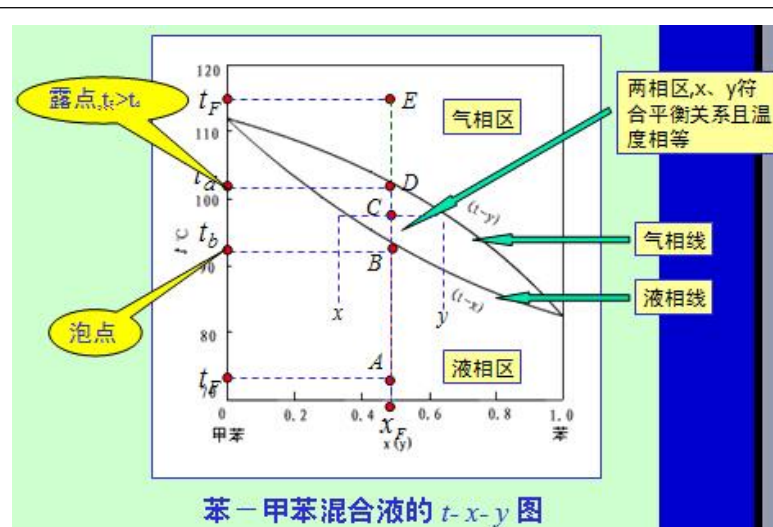
两组分蒸馏

多组分蒸馏

2、两组分理想物系的气液平衡(图例法+讲授法)

(1)t - x -y 图

在恒定的总压下，溶液的平衡温度随组成而变，将平衡温度与液（气）相的组成关系标绘成曲线图，该曲线图即为温度—组成图。



t - x - y 图的构成:

该图常用以分析蒸馏的原理——两线三区。

①.图中有上、下两条曲线:

上曲线: 平衡时汽相组成与温度的关系, 称为汽相线 (露点曲线);

下曲线: 平衡时液相组成与温度的关系, 称为液相线 (泡点曲线);

②.两曲线将图分成三个区域:

液相线以下代表尚未沸腾的液体, 称为冷液区;

汽相线以上代表过热蒸汽区;

被两曲线包围部分表示汽液共存, 称为汽液共存区。

注意:

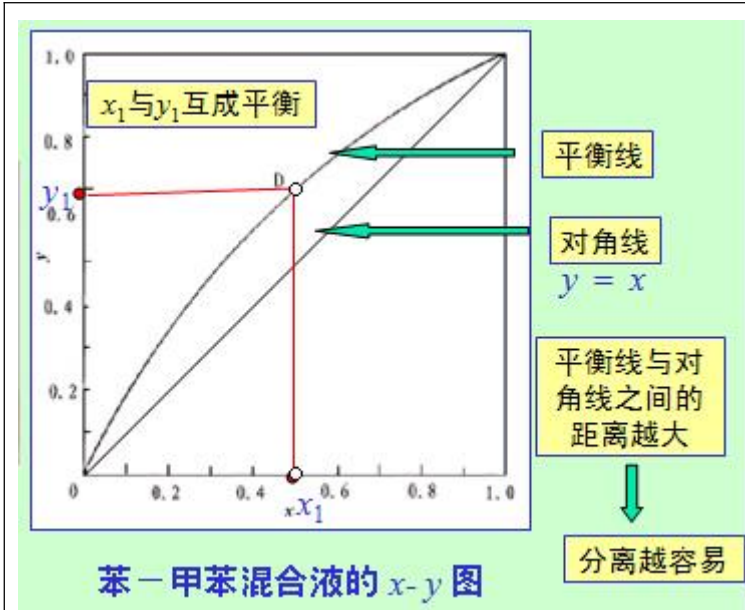
①气、液两相成平衡状态时, 气、液两相的温度相同, 但气相 y 组成大于液相组成 x 。

②若气、液两相组成相同, 则气相露点温度总是大于液相的泡点温度。

③与总压有关。

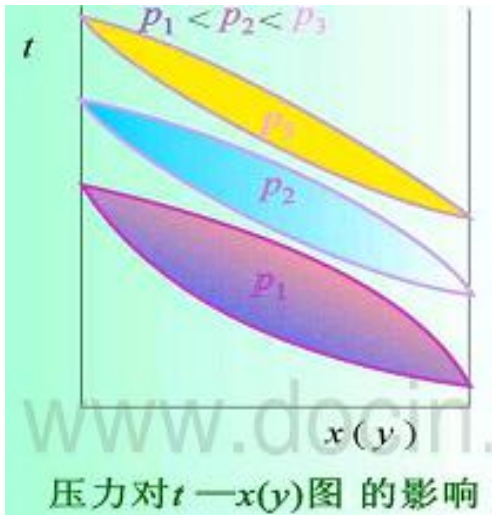
(2) x - y 图

x - y 图代表在总压一定下, 液相组成和与之成平衡的汽相组成的关系



平衡线与对角线之间的距离越大分离越容易

压力对温度组成图的影响：P 越大， t 越大， a 越小，对分离不利



课堂提问：如何绘制 x - y 图？有哪些方法？

x - y 图和 t - x - y 图有何关系？

本讲作业：反思压力对温度组成图的影响

7.20 教学单元二十

本讲教学目标

掌握的内容：

1、泡点方程

2、露点方程

3、气液平衡方程及其的应用

4、平衡蒸馏的物料衡算

本讲教学内容

1、泡点方程和露点方程

2、气液平衡方程及其应用

3、平衡蒸馏的物料衡算

4、简单蒸馏的物料衡算

重点：气液平衡方程

难点：气液平衡方程的应用

本讲教学过程及教学方法

1、复习上次课所学内容(提问法和导入法)

复习上次课所学的相图，提问学生相图中气液相组成 x 、 y 的如何获得？从而引出泡点方程和露点方程。

2、气液平衡关系式(讲授法)

(1)、泡点方程

拉乌尔定律

当理想溶液气液两相呈平衡时，溶液上方组分的分压与溶液中该组分的摩尔分数成正比。

$$p_A = p_A^* x_A$$

注意：

- 某组分液体的饱和蒸汽压只是温度的函数，随温度升高而增大，纯组分液体的 P 与 t 的关系通常用安托因方程表示。
- 液体的饱和蒸汽压是表示液体挥发能力的一个属性。液体的挥发能力越大，其蒸汽压越大，液体混合物中各组分在汽相中的蒸气分压比其在纯态下的饱和蒸汽压要小。

泡点方程：反映气液平衡时液相组成与平衡温度间的关系

有拉乌尔定律推导出
$$x_A = \frac{p_{\text{总}} - p_B^*}{p_A^* - p_B^*}$$

$$p_A^*(p_B^*) = f(t)$$

安托因方程：可用来求不同温度下的饱和蒸汽压

$$\lg p^0 = A - \frac{B}{t + C}$$

气液平衡时液相组成与平衡温度间的关系

(2)以平衡常数表示的气液平衡方程

平衡的气相遵循道尔顿分压定律

$$y_A = \frac{p_A}{p_{\text{总}}} \quad y_A = \frac{p_A^*}{p_{\text{总}}} x_A$$

$$\text{令 } k_A = \frac{p_A^*}{p_{\text{总}}} \quad (\text{平衡常数})$$

$$y_A = k_A x_A \quad (\text{平衡常数随温度变化而变化})$$

露点方程：气液平衡时气相组成与平衡温度间的关系

将 $y_A = k_A x_A$ 带入泡点方程即可得到

$$y_A = \frac{p_A^*}{p_{\text{总}}} \frac{p_{\text{总}} - p_B^*}{p_A^* - p_B^*}$$

(3)以相对挥发度表示的气液平衡方程

挥发度、相对挥发度

$$\alpha = \frac{v_A}{v_B} = \frac{p_A / x_A}{p_B / x_B}$$

对于理想物系，有

$$\alpha = \frac{p_A^*}{p_B^*}$$

以相对挥发度表示的气液平衡方程

$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}$$

讨论：

蒸馏操作 $\alpha > 1$ ， α 值愈大，分离愈容易

若 $\alpha = 1$ ，不能用普通蒸馏方法分离。

(4)气液平衡方程的应用(讲授法)

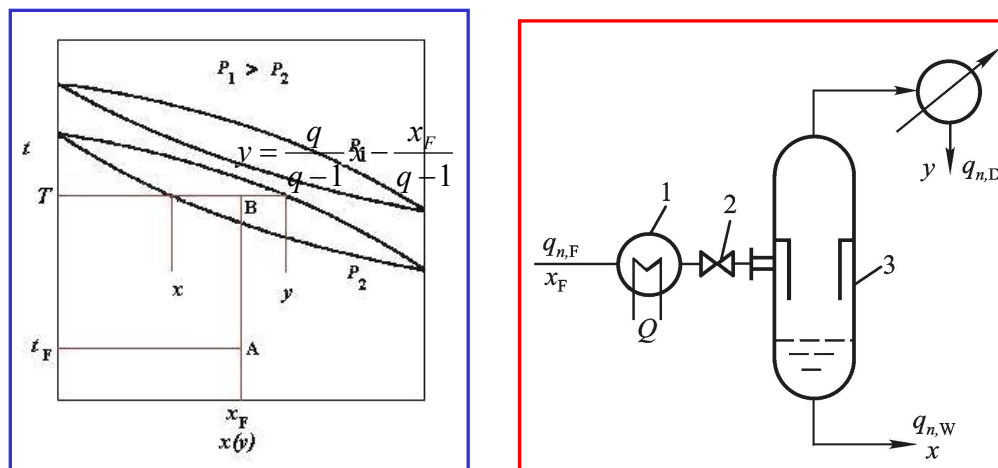
计算泡点温度

计算露点温度

计算气液平衡组成

3、平衡蒸馏装置(图例讲授法)

平衡蒸馏为单级蒸馏操作，即闪蒸。 右图为平衡蒸馏装置简图

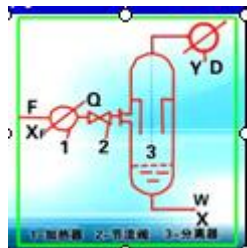


特点：① 连续操作；② 组成和温度恒定不变；③分离程度不高。

4、平衡蒸馏过程的计算(图例讲授法)

蒸馏过程的方程式：物料衡算、热量衡算、平衡关系方程式

(1)物料衡算：对连续定态过程做物料衡算可得



总物料衡算： $F = D + W$

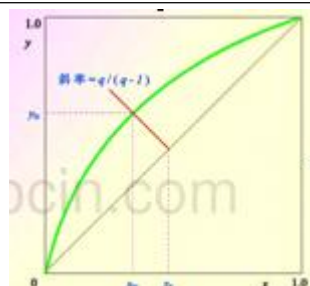
易挥发组分物料衡算： $Fx_F = Dy + Wx$

设液相产物占总加料量的分率为 $q = W / F$ (液化率)

整理得： $y = \frac{q}{q-1}x - \frac{x_F}{q-1}$ (直线方程)

平衡蒸馏中气液相组成的关系式

注意：在平衡蒸馏中，气液组成关系同时满足平衡方程与物料衡算方程



图解法解平衡蒸馏问题图上图所示

(2)热量衡算(讲授法)

加热炉的热流量为 Q , 对加热器作热量衡算, 忽略热损失, 得

$$Q = Fc_p(t - t_F) \quad \text{显热}$$

对减压阀和分离器作热量衡算, 忽略热损失, 得

$$Fc_p(t - t_e) = (1 - q)rF \quad \text{显热转化成汽化潜热}$$

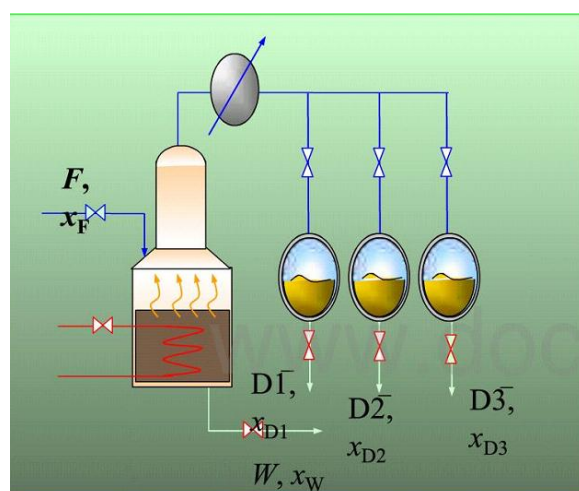
可求料液加热温度

$$t = t_e + (1 - q) \frac{r}{c_p}$$

5、简单蒸馏装置(图例讲授法)

简单蒸馏为间歇、单级蒸馏操作——微分蒸馏

原料液在蒸馏釜中通过间接加热使之部分汽化, 产生的蒸汽进入冷凝器中冷凝, 冷凝液作为馏出液产品排入接受器中。在一批操作中, 馏出液可分段收集, 以得到不同组成的馏出液。简单蒸馏装置简图如下图所示:



简单蒸馏的特点

❖ 间歇操作过程

- ❖ 非稳态过程
- ❖ 单级过程，无塔段

简单蒸馏的应用场合(举例讲授法)

- ❖ 液体混合物的初步分离
- ❖ 测油品的沸程 — 恩式蒸馏
- ❖ 某些料液的脱色

6、简单蒸馏过程的计算(讲授法)

简单蒸馏为非稳态过程。因此，简单蒸馏的计算应该进行微分衡算，必须选取一个时间微元

总物料衡算

$$-dL = dD$$

易挥发组分衡算

$$Lx = (L - dL)(x - dx) + ydD$$

简单蒸馏过程物料衡算关系 $\ln \frac{F}{W} = \int_{x_W}^{x_F} \frac{dx}{y - x}$

馏出液的平均组成 $\bar{y} = \frac{Fx_F - Wx_W}{F - W}$

课堂提问：

- 1.挥发度与相对挥发度有何不同？
- 2.何为泡点和露点，如何进行计算？

本讲作业：P73，1、3

课外资料：气液平衡数据获取途径

- 1.由安托尼方程求取

$$\lg p_i^* = A_i - \frac{B_i}{t + C_i}$$

- 2.由手册查得

权威的气液平衡数据手册

Gmehling J, et al.

《Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection

3.由实验测定

7.21 教学单元二十一

本讲教学目标

掌握的内容：

- 1、精馏原理
- 2、理论板假设
- 3、恒摩尔流的假定
- 4、全塔物料衡算
- 5、精馏塔操作线方程

本讲教学内容

- 1、精馏原理
- 2、精馏操作流程
- 3、理论板的假定
- 5、恒摩尔流的假定
- 6、全塔物料衡算
- 7、操作线方程

重点：1、连续精馏操作流程

- 2、理论板的假定
- 3、恒摩尔流的假定
- 4、精馏段操作线方程
- 5、提馏段操作线方程

难点：精馏原理、恒摩尔流的假定

本讲教学过程及教学方法

- 1、复习上次课内容（导入法+提问法）

从普通蒸馏的优缺点引出研究学习精馏操作的必要性。

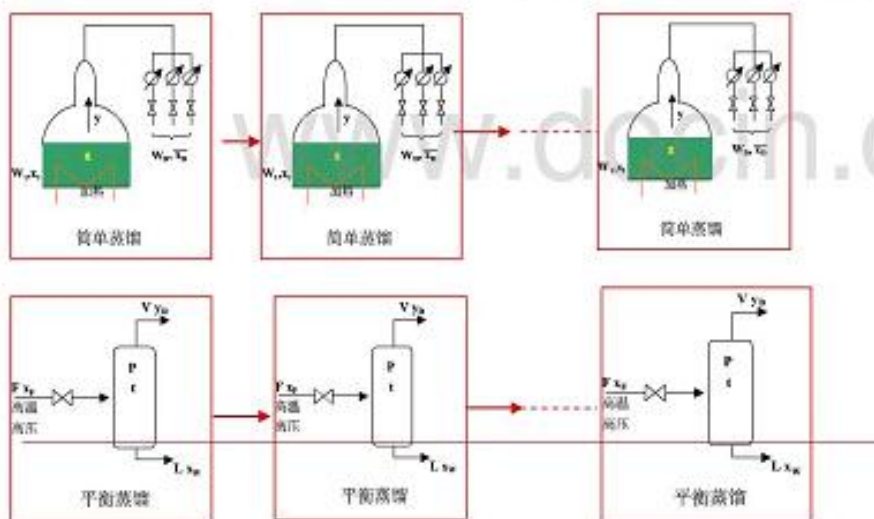
简单蒸馏及平衡蒸馏只能使液体混合物得到有限的分离，远远不能满足工业的需求。

如何利用两组分挥发度的差异实现连续的高纯度的分离？

(1) 多次重复蒸馏

反复进行多次部分汽化部分冷凝可以实现高纯度的分离，从理论上说，可以用多次重复蒸馏的方法来达到所需求的分离纯度。但是，完成同样的分离任务，普通蒸馏能耗大、设备投资大、产能小！如下图所示，

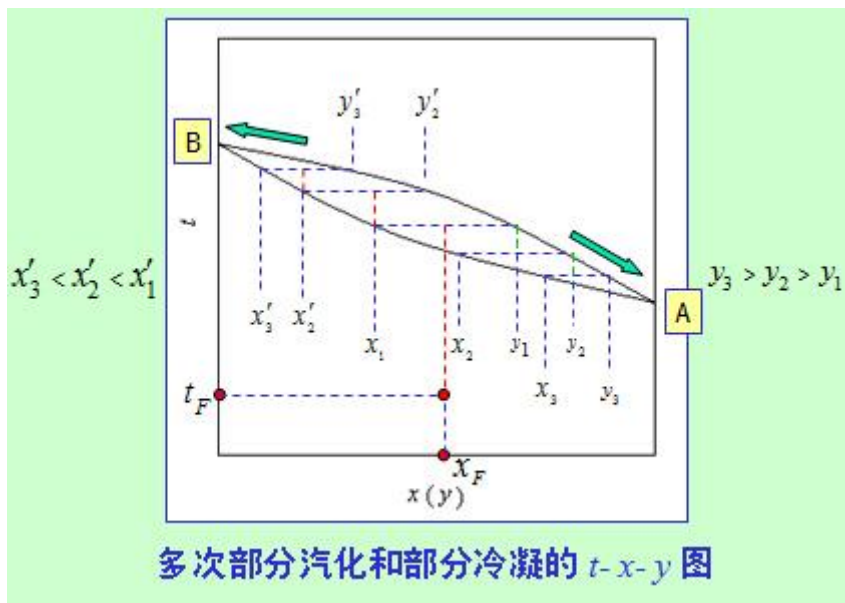
(2)精馏。利用回流手段，经过多次平衡级过程，是物系实现高纯度的分离的操作。



比较：

平衡蒸馏、简单蒸馏——单级过程，进行一次部分汽化——液体混合物的初步分离
精馏——多级过程，进行多次部分汽化和部分冷凝——实现液体混合物的完全分离

2、精馏原理（图例讲授法）



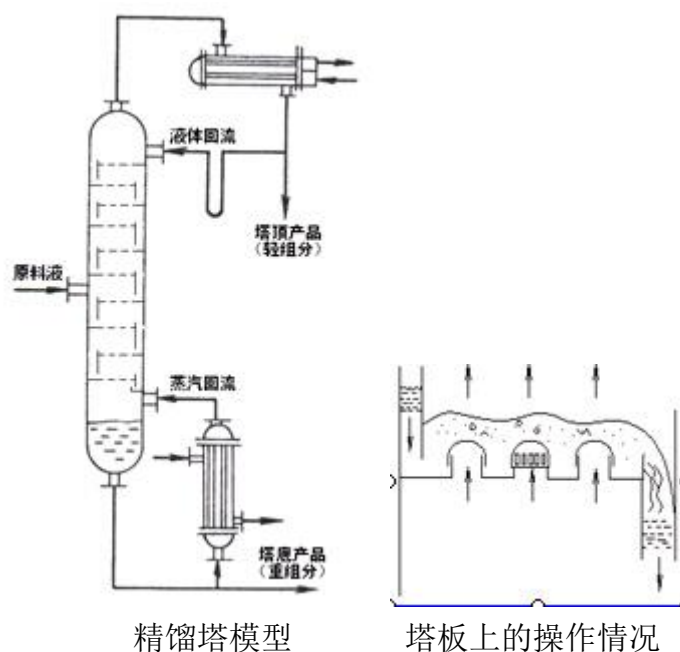
(1)板式塔内进行的精馏过程

上述的多次部分汽化和部分凝过程是在精馏塔内进行的。

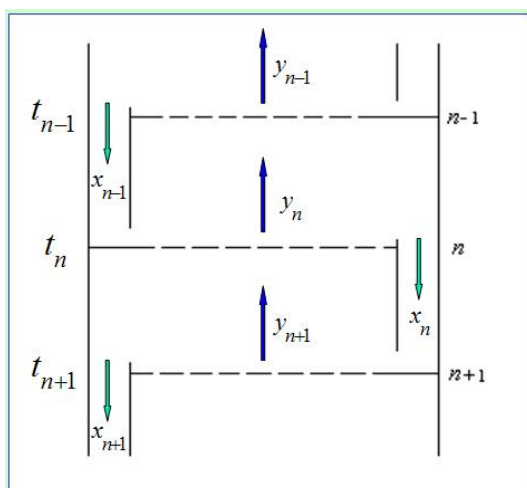
精馏塔 板式塔——塔内装有若干层塔板

填料塔——塔内装有一定高度的填料层

本章主要学习板式塔的计算



(2)塔板操作分析如下图所示：



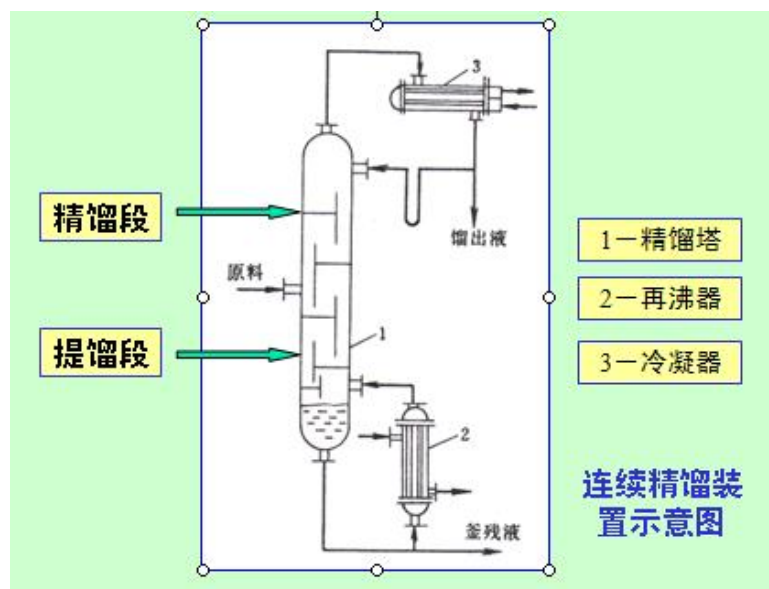
注意： $t_{n-1} < t_n < t_{n+1}$ 、 $y_{n-1} > y_n > y_{n+1}$ 、 $x_{n+1} < x_n < x_{n-1}$

3、精馏操作流程

(1)连续精馏操作流程（图例讲授法）

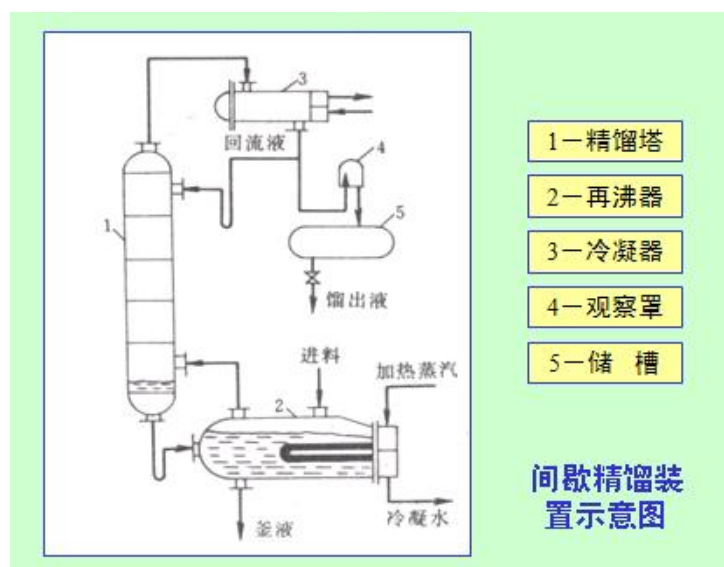
化工生产以连续精馏为主。操作时，原料液连续地加入精馏塔内，连续地从再沸器取

出部分液体作为塔底产品（称为釜残液）；部分液体被汽化，产生上升蒸汽，依次通过各层塔板。塔顶蒸气进入冷凝器被全部冷凝，将部分冷凝液用泵（或借重力作用）送回塔顶作为回流液体，其余部分作为塔顶产品（称为馏出液）采出。



(2)、间歇精馏操作流程（图例讲授法）

与连续精馏不同之处是：原料液一次加入精馏釜中，因而间歇精馏塔只有精馏段而无提馏段。在精馏过程中，精馏釜的釜液组成不断变化，在塔底上升蒸气量和塔顶回流液量恒定的条件下，馏出液的组成也逐渐降低。当釜液达到规定组成后，精馏操作即被停止。



4、两组分连续精馏的计算（讲授法）

精馏过程的计算包括：

计算类型：

操作型计算、设计型计算。

计算依据：

- ▲ 物料衡算；
- ▲ 热量衡算；
- ▲ 相平衡关系；
- ▲ 归一方程。

计算项目：

塔顶（或塔底）产量和浓度

塔内物流量

确定操作条件：

回流比、进料热状况等

塔板数或填料层高度

进料位置

塔径

再沸器、冷凝器的热负荷

(1) 计算的基本假定

① 理论板的假定

理论板的概念

- ❖ 离开该板的气液两相互成平衡；
- ❖ 塔板上各处的液相组成均匀一致。

理论板提出的意义

用作衡量实际板分离效率的依据和标准。通常，在工塔板上各处的液相组成均匀一致。程设计中，先求得理论板层数，再用塔板效率予以校正，即可求得实际塔板层数。

② 恒摩尔流的假定

恒摩尔气流

精馏段

$V_1 = V_2 = \dots = V_n = V = \text{常数}$ —— 精馏段中上升气体摩尔流量

提馏段

$V'_1 = V'_2 = \dots = V'_m = V' = \text{常数}$ —— 提馏段中上升气体摩尔流量

注意：两段上升的气相摩尔流量不一定相等。

恒摩尔液流

精馏段 $L_1 = L_2 = \dots = L_n = L = \text{常数}$ —— 精馏段中下降液体摩尔流量

提馏段 $L'_1 = L'_2 = \dots = L'_m = L' = \text{常数}$ —— 提馏段中下降液体摩尔流量

恒摩尔流动的假定成立的条件

- ❖ 混合物中各组分的摩尔汽化潜热相等；

❖ 塔设备保温良好，热损失可以忽略。

恒摩尔流动虽是一项简化假设，但某些物系能基本上符合上述条件，因此，可将这些系统在精馏塔内的气液两相视为恒摩尔流动。后面介绍的精馏计算均是以恒摩尔流为前提的。

5、两组分连续精馏的计算

精馏塔各股物料(包括进料、塔顶产品和塔底产品)的流量、组成之间的关系可通过全塔物料衡算来确定。

(1)全塔物料衡算

总物料衡算： $F = D + W$

易挥发组分衡算： $Fx_F = Dx_D + Wx_W$

馏出液采出率： $\frac{D}{F} = \frac{x_F - x_W}{x_D - x_W}$

易挥发组分回收率 $\eta_A = \frac{Dx_D}{Fx_F} \times 100\%$

难挥发组分回收率（提问法）

$\eta_B = \frac{W(1-x_W)}{F(1-x_F)} \times 100\%$

(2)精馏段操作线方程（图例讲授法）

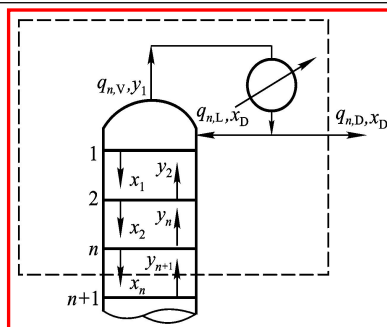
在精馏段中，任意塔板（ n 板）下降的液相组成 x_n 与由其下一层塔板（ $n+1$ 板）上升的气相组成 y_{n+1} 之间的关系称之为操作关系，描述该关系的方程称为精馏段操作线方程。

总物料衡算： $V = L + D$

易挥发组分衡算： $Vy_{n+1} = Lx_n + Dx_D$

令回流比： $R = \frac{L}{D}$

化解后得精馏段操作线方程： $y_{n+1} = \frac{R}{R+1}x_n + \frac{1}{R+1}$



精馏段的物料衡算示意图

根据恒摩尔流假定， L 为定值，且在稳态操作时， D 及 x_D 为定值，故 R 也是常量。精馏段操作线方程为一直线方程。

斜率： $\frac{R}{R+1}$ 截距： $\frac{x_D}{R+1}$

(3) 提馏段操作线方程（图例讲授法）

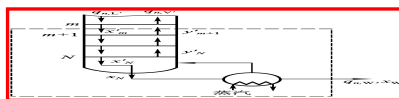
在提馏段中，任意塔板（ m 板）下降的液相组成 x'_m 与由其下一层塔板（ $m+1$ 板）上升的气相组成之间 y'_{m+1} 的关系称之为操作关系，描述它们之间关系的方程称为提馏段操作线方程。

总物料衡算： $L' = V' + W$

易挥发组分衡算： $L'x'_m = V'y'_{m+1} + Wx_W$

整理得提馏段操作线方程：

$$y'_{m+1} = \frac{L'}{L' - W} x'_m - \frac{W}{L' - W} x_W$$



提馏段的物料衡算示意图

根据恒摩尔流假定， L' 为定值，且在稳态操作时， W 及 x_W 为定值。提馏段操作线方程为一直线方程。

斜率： $\frac{L'}{L' - W}$

截距： $-\frac{Wx_W}{L' - W}$

课堂提问：精馏原理是什么，精馏与简单蒸馏有何不同？

本讲作业：

- 反思** 1. 精馏原理是什么，精馏与简单蒸馏有何不同？
2. 塔顶液体回流和塔底上升蒸汽流的作用如何？
3. 为什么说理论板是一种假定，理论板的引入 在精馏计算中有何重要意义？
4. 恒摩尔流假定的内容如何？
5. 塔顶液体回流和塔底上升蒸汽流的作用如何？
6. 塔顶液体回流和塔底上升蒸汽流的作用如何？

7.22 教学单元二十二

本讲教学目标

掌握的内容：

- 1、五种进料热状况
- 2、进料热状况参数 q 值的取值及意义
- 3、进料热状况参数对提馏段操作线方程的影响

本讲教学内容

- 1、复习上次课内容
- 2、精馏塔的进料状况
- 3、进料热状况参数定义
- 4、进料热状况参数的计算
- 5、进料热状况参数对提馏段操作线方程的影响

重点：1、五种进料热状况

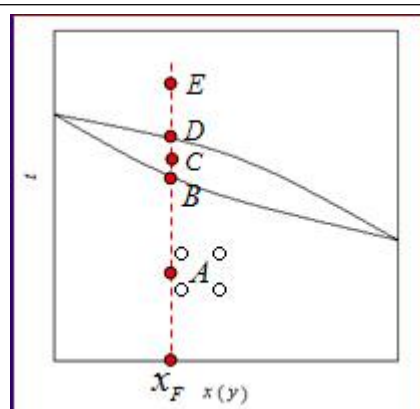
2、进料热状况参数对提馏段操作线方程的影响

难点：进料热状况参数的计算

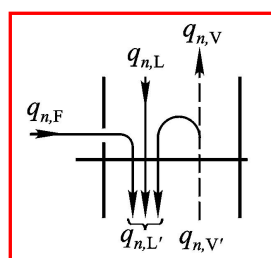
本讲教学过程及教学方法

1、精馏塔的进料状况(图例讲授法)

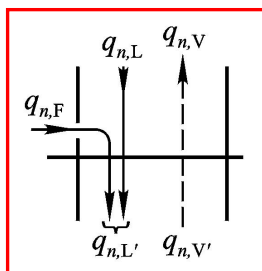
◆ 精馏塔五种进料热状况



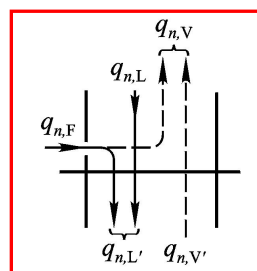
- 冷液进料: $t_F < t_b$ 、 $L' > L + F$ 、 $V' > V$
- 饱和液体（泡点）进料: $t_F = t_b$ 、 $L' = L + F$ 、 $V' = V$
- 气液混合物进料: $t_b < t_F < t_d$ 、 $L < L' < L + F$ 、 $V' < V$
- 饱和蒸气（露点）进料: $t_F = t_d$ 、 $L' = L$ 、 $V' = V - F$
- 过热蒸气进料: $t_F > t_d$ 、 $L' < L$ 、 $V > V' + F$



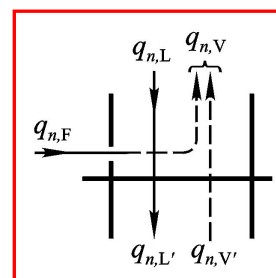
冷液进料



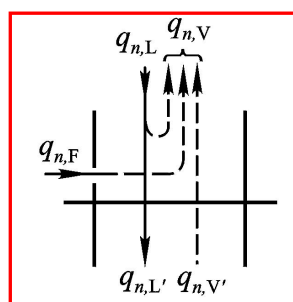
泡点进料



气液混合物进料



露点进料



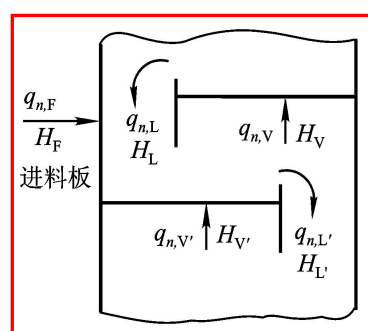
过热蒸气进料

2. 进料热状况参数

(1) 进料热状况参数定义

为了定量地分析进料量及其热状况对于精馏操作的影响，现引入进料热状况参数的概念。

对进料板的物料衡算和热量衡算



$$q = \frac{H_V - H_F}{H_V - H_L} = \frac{\text{将1kmol进料变为饱和蒸气所需热量}}{\text{原料液的kmol汽化潜热}}$$

$$L' = L + qF$$

$$V' = V + (q - 1)F$$

(2) 进料热状况参数对提馏段操作线方程的影响

$$y'_{m+1} = \frac{L + qF}{L + qF - W} x'_m - \frac{W}{L + qF - W} x_w$$

(3) 进料热状况参数的计算

对于冷液进料，设进料温度为 t_F 、泡点温度为 t_b

$$q = \frac{H_V - H_F}{H_V - H_L} = \frac{\bar{c}_p(t_b - t_F) + \bar{r}}{\bar{r}}$$

讨论：五种进料热状况 q 的取值，（提问学生）

冷液进料 $q > 1$

泡点进料 $q = 1$

气液混合物进料 $0 < q < 1$

气液混合物进料 $q = 0$

过热蒸气进料 $q < 0$

课堂提问：1. 进料热状况参数有何物理意义？

2. q 线方程或进料方程是如何获得的？

本讲作业：教材 P74，6、7

7.23 教学单元二十三

本讲教学目标

掌握的内容：

- 1、逐板计算法
- 2、梯级图解法
- 3、进料热状况对理论板层数的影响

本讲教学内容

- 1、复习上次课内容
- 2、逐板计算法
- 3、操作线的作法及 q 线方程
- 4、梯级图解法求理论板层数
- 5、适宜的进料位置
- 6、进料热状况对理论板层数的影响

重点：1、五种进料热状况

2、进料热状况参数对提馏段操作线方程的影响

难点：1、适宜的进料位置

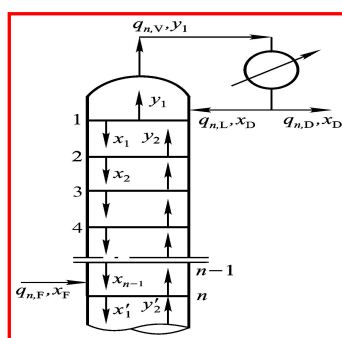
2、进料热状况对理论板层数的影响

本讲教学过程及教学方法

理论板层数的计算

1、逐板计算法（图例讲授法）

逐板计算法通常从塔顶开始，计算过程中依次使用平衡方程和操作线方程，逐板进行计算，直至满足分离要求为止。



逐板计算法示意图

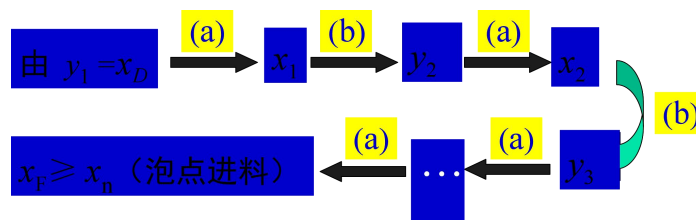
a、
$$y = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}$$

b、
$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{1}{R+1} x_D$$

$$c、y'_{m+1} = \frac{L'}{L' - W} x'_m - \frac{W}{L' - W} x_W$$

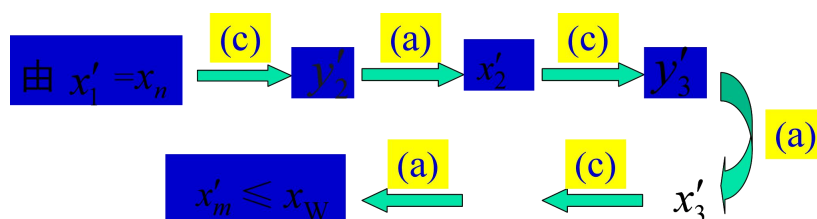
➤ 逐板计算法步骤:

塔顶采用全凝器 $y_1 = x_D$



可得: 进料板 N_F : 第 n 层

精馏段理论板层数: $n-1$ (进料板算在提馏段)



可得: 提馏段理论板层数: $m-1$ (不包括再沸器)

总理论板层数 NT : $n + m - 2$ (不包括再沸器)

2、梯级图解法 (动画演示+讲授法)

(1)操作线的作法

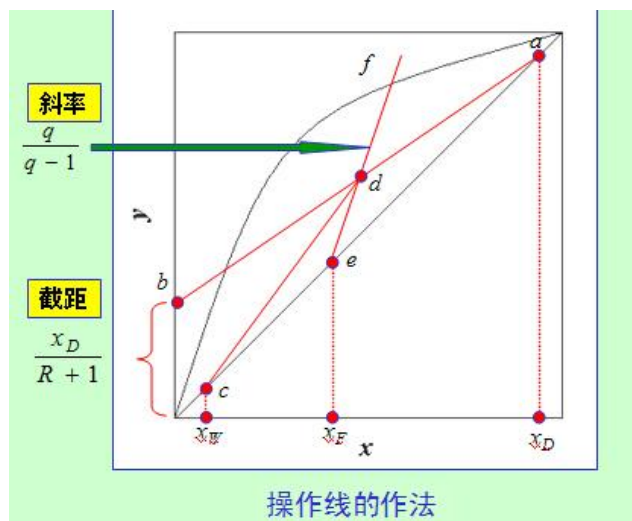
用图解法求理论板层数时, 需先在 $x-y$ 图上作出精馏段和提馏段的操作线。作图时, 先找出操作线与对角线的交点, 然后根据已知条件求出操作线的斜率 (或截距), 即可作出操作线。

提馏段操作线的截距数值很小, 因此提馏段操作线不易准确作出, 且这种作图法不能直接反映进料热状况的影响。故提馏段操作线通常按以下方法作出: 先确定提馏段操作线与对角线的交点 c , 再找出提馏段操作线与精馏段操作线的交点 d , 直线 cd 即为提馏段操作线。

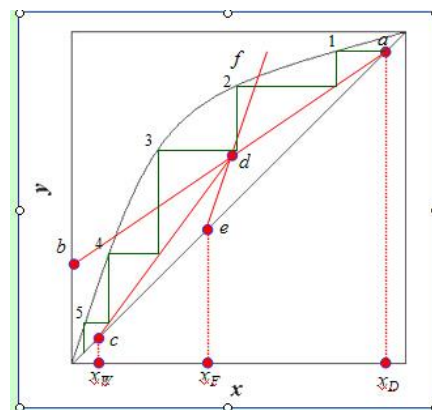
将 q 线方程与对角线联立解得交点 e 。过点 e 作斜率为 $q/(q-1)$ 的直线与精馏段操作线交于点 d , 联接 cd 即得提馏段操作线。

$$q \text{ 线方程或进料方程: } y = \frac{q}{q-1} x - \frac{x_F}{q-1}$$

操作线的作法示意图：



(2) 梯级图解法求理论板层数（动画演示+讲授法）

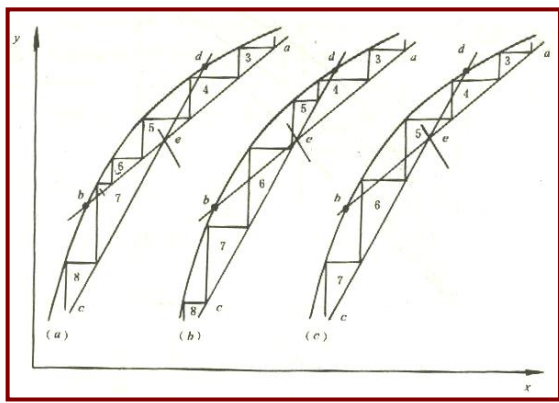


得 $NT=4$ （不包括再沸器）； $NT=5$ （包括再沸器）； $NF=3$

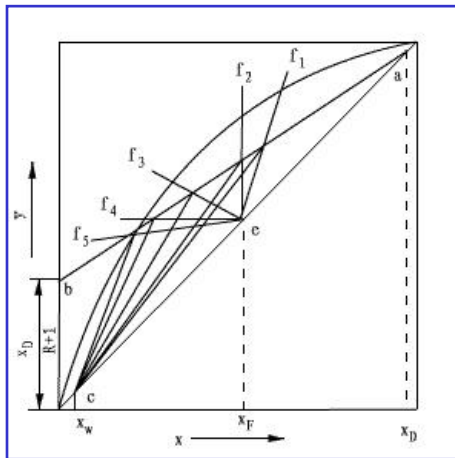
过程描述：自对角线上的点 a 开始，在精馏段操作线与平衡线之间作由水平线和铅垂线构成的阶梯，当阶梯跨过两操作线的交点 d 时，改在提馏段操作线与平衡线之间绘阶梯，直至阶梯的垂线达到或跨过点 c 为止。

(3) 适宜的进料位置（图例讲授法）

进料位置对应于两操作线交点 d 所在的梯级，这一位置即为适宜的进料位置。



(4)进料热状况对 q 线的影响



讨论： q 值越大，进料温度越低，平衡线与操作线距离越远，所需的理论板层数越少

课堂提问：1.进料热状况参数有何物理意义？

2. q 线方程或进料方程是如何获得的？

3.进料量对理论板层数有无影响，为什么？

4.在分离任务一定时，进料热状况对所需的理论板层数有何影响？

本讲作业：教材 P74，8.

7.24 教学单元二十四

本讲教学目标

掌握的内容：

- 1、全回流及最小理论板
- 2、最小回流比的概念及求法
- 3、适宜回流比的选择
- 4、回流比与理论板层数的关系

本讲教学内容

- 1、复习上次课内容
- 2、全回流的概念及最少理论板层数
- 4、回流比与理论板层数的关系
- 5、最小回流比的概念及求法
- 6、适宜回流比的选择
- 7、吉利兰(Gilliland)关联图
- 8、塔板效率
- 9、塔有效高度的计算

重点：1、回流比与理论板层数的关系

2、最小回流比的概念及求法

难点：1、芬斯克方程式

2、进料热状况对理论板层数的影响

本讲教学过程及教学方法

回流比的影响及其选择

1、全回流和最少理论板层数（动画演示+讲授法）

(1)全回流的概念

若上升至塔顶的蒸气经全凝器冷凝后，冷凝液全部回流到塔内，该回流方式称为全回流。

$$R = \frac{L}{D} = \frac{L}{0} = \infty$$

注意：全回流操作时不向塔内进料，也不从塔内取出产品，全塔无精馏段和提馏段之区分，两段的操作线合二为一，操作线与对角线重合，操作线方程为：

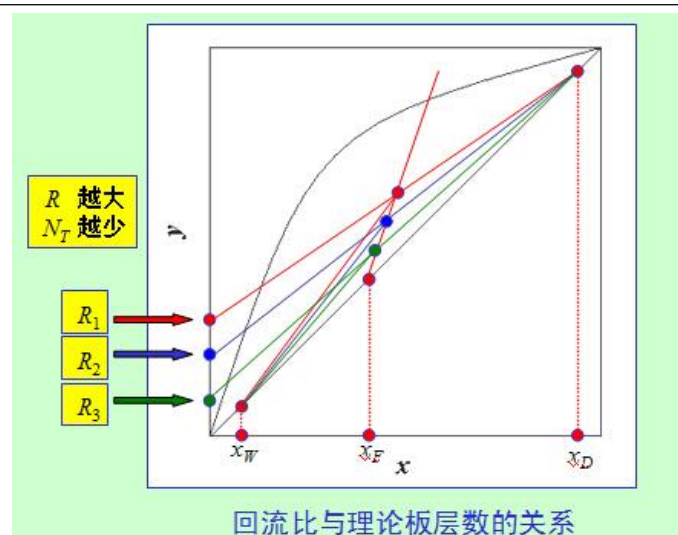
$$y_{n+1} = x_n$$

全回流的应用

❖ 精馏的开工阶段

(2)最少理论板层数

回流比愈大，完成一定的分离任务所需的理论板层数愈少。当回流比为无限大，两操作线与对角线重合，此时，操作线距平衡线最远，气液两相间的传质推动力最大，因此所需理论板层数最少，以 N_{\min} 表示。



芬斯克方程式:
$$N_{\min} = \frac{\lg\left[\left(\frac{x_D}{1-x_D}\right)\left(\frac{1-x_W}{x_W}\right)\right]}{\lg \alpha_m} - 1$$

注意：

- ❖ 求得的最小理论板层数不含再沸器
- ❖ 为全塔平均相对挥发度

$$\alpha_m = \sqrt{\alpha_D \alpha_W}$$

2. 最小回流比（动画演示+讲授法）

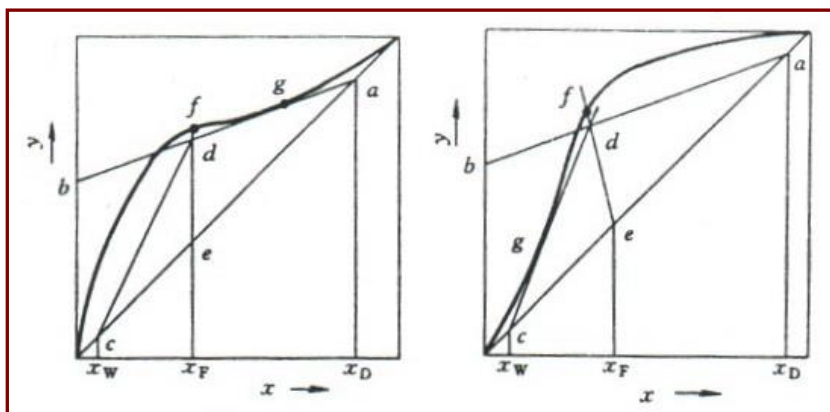
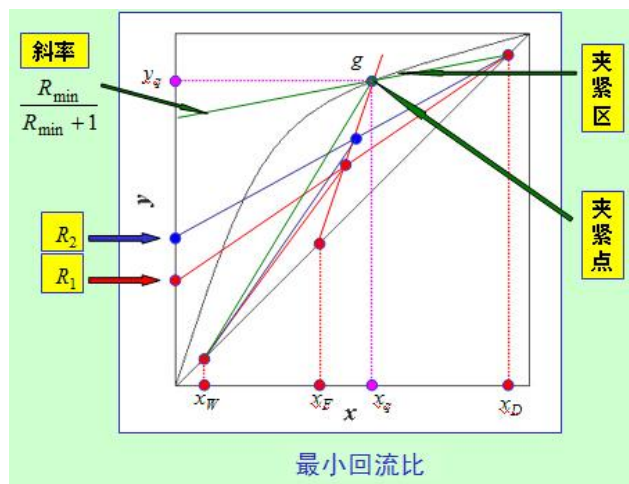
(1)最小回流比的概念

对于一定分离任务，减小操作回流比，两操作线向平衡线靠近，所需理论板层数增多。当回流比减小到某一数值，两操作线的交点 d 落到平衡线上，此时，若在平衡线与操作线之间绘阶梯，将需要无穷多阶梯才能到达点 d ，相应的回流比即为最小回流比，以 R_{\min} 表示。

(2)最小回流比的求法

① 作图法

$$\frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1} = \frac{x_D - y_q}{x_D - x_q} \quad R_{\min} = \frac{x_D - y_q}{y_q - x_q}$$



非正常平衡曲线最小回流比的求法

② 解析法

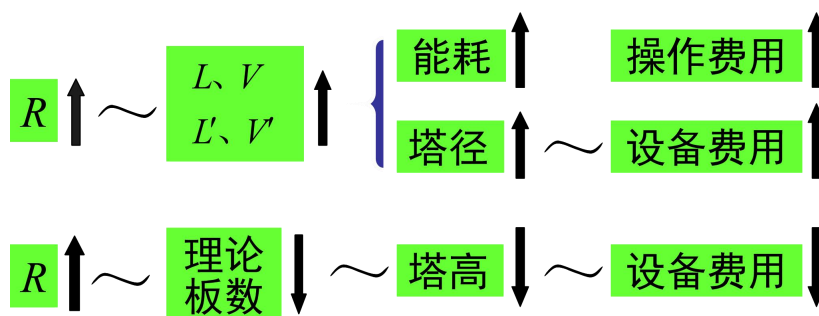
泡点进料

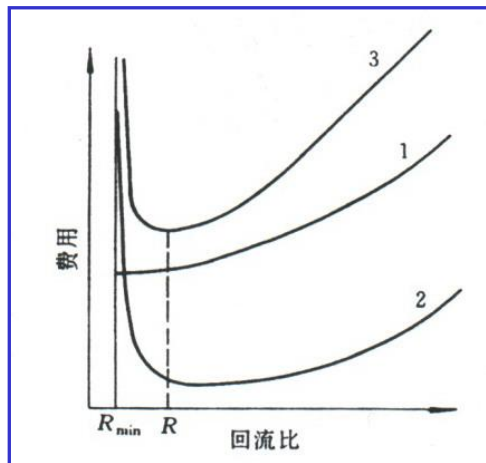
$$x_q = x_F$$

$$R_{\min} = \frac{1}{\alpha - 1} \left[\frac{x_D}{x_F} - \frac{\alpha(1 - x_D)}{1 - x_F} \right]$$

3、适宜回流比的选择（分析讨论、提问、引导法）

分离任务一定





适宜回流比的选择示意图

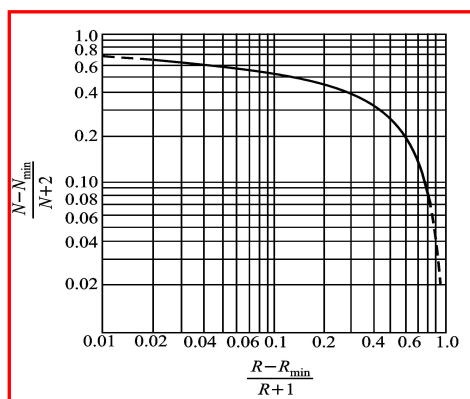
其中：1—操作费用、2—设备费用、3—总费用

因此，选择适宜的回流比需进行经济权衡，根据生产实践经验，取

$$R = (1.1 \sim 2.0)R_{\min}$$

4、吉利兰(Gilliland)关联（图例讲授法）

精馏塔理论板层数除了可用前述的逐板计算法和图解法求算外，还可用简捷法计算。通常采用的简捷法为吉利兰关联图。



吉利兰关联图

简捷法求理论板层数的步骤

- ❖ 先按设计条件求出最小回流比 R_{\min} ，并选择操作回流比 R 。
- ❖ 计算全回流下的最少理论板层数 N_{\min} 。
- ❖ 利用吉利兰关联图，计算全塔理论板层数 N 。
- ❖ 用精馏段的最小理论板层数 $N_{\min 1}$ 代替全塔的 N_{\min} ，确定适宜的进料板位置。

由芬斯克方程式

$$N_{\min} = \frac{\lg[(\frac{x_D}{1-x_D})(\frac{1-x_W}{x_W})]}{\lg \alpha_m} - 1$$

$$N_{\min 1} = \frac{\lg[(\frac{x_D}{1-x_D})(\frac{1-x_F}{x_F})]}{\lg \alpha_{m1}} - 1$$

α_{m1} 为精馏段平均相对挥发度: $\alpha_{m1} = \sqrt{\alpha_D \alpha_F}$

5、塔有效高度的计算

(1)基本计算公式

板式塔有效高度是指安装塔板部分的高度，其计算方法是，先通过板效率将理论板层数换算为实际板层数，再选择合适的板间距计算板式塔的有效高度。

$$Z = (N_p - 1)H_T$$

(2)塔板效率

塔板效率反映了实际塔板的汽液两相传质的完善程度。

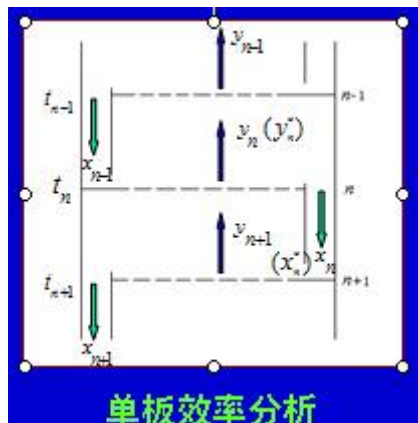
①全塔效率 $E_T = \frac{N_T}{N_p} \times 100\%$

②单板效率

单板效率又称默弗里（Murphree）效率，它是以混合物经过实际板的组成变化与经过理论板的组成变化之比来表示的，单板效率即可用汽相组成表示，也可用液相组成表示，分别称为汽相单板效率和液相单板效率。

气相单板效率 $E_{MV} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$

液相单板效率 $E_{ML} = \frac{x_{n-1} - x_n}{x_{n-1} - x_n^*}$



课堂提问： 吉利兰(Gilliland)关联图求理论板的步骤是什么？
本讲作业： 教材 P74，10、11

8 学生课程学习要求

我将根据自己多年来的学习经验总结与同学们交流分享如何学好《化工原理》这门专业核心课，希望能给同学们的学习提供一些启发。

(1) 预习

预习可以是自己能快速有效的跟上老师的教学思路，事先完成对教科书及其他相关资料的阅读，才能更好的理解老师所讲所做，才能在课堂中提出问题并有效解决问题。

(2) 课堂学习

上课时做好笔记，以备后续复习查阅们注意重点记下教科书中未出现而老师却一再强调的内容及知识点，积极参与课堂提问及课堂讨论，这是对所学知识加深理解的重要途径。

(3) 课后复习

课后及时复习是很有必要的，这不仅可以巩固所学知识，还可以加深对所学知识的理解以及很好的锻炼自己对知识的概括和总结能力

9 课程考核方式及评分规程

本门功课采取平时成绩+考试卷面成绩综合评分的形式，课程实行闭卷考试的形式，依据四川理工学院相关规定进行，具体成绩计算方式如下：

1、平时成绩（40%）：出勤（迟到，早退，缺席等）、作业、课堂讨论及回答问题表现等。

3、出勤：学生应遵守《四川理工学院学生管理条例》中关于出勤的相关政策规定。

对无故缺席的同学（包括课后补假的同学），每缺席 1 次，平时成绩扣 5 分，

如确因有事需要请假，请在授课前提交请假条。

迟到与早退：迟到或早退一次，平时成绩扣 3 分。

课后作业，每缺一次，平时成绩扣 5 分。

课堂回答问题表现突出的同学，平时成绩加 5 分。

4、卷面成绩（60%）：以试卷分数的 60%记入总成绩（补考成绩另算）

5、作业评分标准

作业按 九级制，即 A⁺、A、A⁻，B⁺、B、B⁻，C⁺、C、C⁻、D⁺、D、D⁻，E 计算。

平时作业成绩取应交作业的平均值，不交作业，补（迟）交作业降低一个等级。

表 1 等级分数与百分制分数换算

等级	A ⁺	A	A ⁻	B ⁺	B	B ⁻	C ⁺	C	C ⁻	D ⁺	D	D ⁻	E
分数	98	95	92	88	85	82	78	75	72	68	65	62	50

半期考试：卷面成绩折合为两次作业，计入平时成绩。

10 学术诚信

考试作弊、协助他人作弊、杜撰数据信息、抄袭（包括抄袭他人作业、抄袭教辅资料答案）、学术剽窃等皆视为违反学术诚信，学术诚信问题零容忍，学生抄袭或其他欺诈行为一经证实，将按四川理工学院相关的管理规范要求执行。

11 课堂规范

1、准时上下课，不得迟到和早退。

2、上课期间禁止使用手机

3、上课时学生要衣着整齐，专心听讲，认真记笔记

4、教师提问学生时，学生必须起立回答，学生遇问题需问教师时，应举手示意，经教师同意后起立发问。

5、上课期间，无关人员一律不得进出教室，或在课堂内逗留。

- 6、教室内必须保持整齐洁净
- 7、在教学楼内应保持安静，不得在走廊和教室内高声喧哗以及做有碍上课和自习的活动。
- 8、同学之间要互相谦让，互相照顾，不得抢占座位。
- 9、自觉爱护教室内的物品。

12 课程资源

12.1 教材与参考书

本课程主要参考书：

1.夏清，贾绍义主编，《化工原理》（上册）（第2版），天津大学出版社，天津，2011

其他参考书：

2.姚玉英主编，《化工原理》（上册）（新版），天津大学出版社，天津，1998

3.赵汝溥，管国锋，《化工原理》，化学工业出版社. 北京，1995

4.大连理工大学化工原理教研室编，《化工原理》（上册），大连理工大学出版社，大连，1992

5.陈敏恒，丛德滋，方图南等编，《化工原理》（上册）（第二版），化学工业出版社，北京，1999

6.朱家骅，叶世超编，《化工原理》（上册），科学技术出版社，北京，2002

7.姚玉英，《化工原理例题与习题》（第三版），化学工业出版社，北京，2003

8.柴成敬，王军，陈常贵等编，《化工原理课程学习指导》，天津大学出版社，天津，2003

9.谭天恩，麦本熙，丁惠华编，《化工原理》（上册），化学工业出版社，北京，2010

12.2 网络课程资源

- 1、大连理工大学化工原理及实验精品课程：<http://hgyl.dlut.edu.cn/>
- 2、南京工业大学化工原理精品课程：<http://jpkc-jy.njtech.edu.cn/huagong/index.asp>
- 3、<http://bbs.hg707.com/> （化工 707）
- 4、<http://emuch.net/bbs/> （小木虫）
- 5、<http://www.icourses.cn/jpk/searchCoursesbyMulti.action> （资源共享课程——华东理工、天大、南工大、北化、华南理工）

13 教学合约

13.1 教师作出师德师风承诺

- 1、以学生为中心，公平对待每一位学生。在教学过程中，本人将对不同出身、性别、智力、相貌、年龄、个性以及关系密切程度不同的学生做到一视同仁，同等对待，对每一位学生都关心、爱护、无偏袒、不以个人的私利和好恶作标准；
- 2、在教学过程中，尽量多举与实际生活息息相关的例子，用最浅显易懂、幽默的语言表达课程中比较复杂抽象的概念；
- 3、积极引导学生的自主学习。通过案例分析、知识点对比、归纳等多种讲授方式引导学生积极主动的学习，使学生深刻体会所学知识、研究方法和思维方式对工程实际、科研道路或职场工作的价值。

13.2 阅读课程实施大纲，理解其内容

学生应仔细阅读本大纲，了解本课程的重要性及实用性，熟悉各章节的重点、难点，以便在学习过程中实施。

13.3 同意遵守课程实施大纲中阐述的标准和期望

每个学生应认真阅读本大纲，并遵守本大纲。

14 其他说明

本大纲自上课之日起开始实施，如学生有不了解或不清楚的地方，可随时