

北京高校第八届青年教师教学基本功比赛教案

教案主题：湿空气的热湿传递特性

比赛类别：理工组

比赛组别：A

选手姓名：刘晓华

北京高校第八届青年教师教学基本功比赛教案

湿空气的热湿传递特性

课程名称：《热质交换原理和应用》

课程类型：专业基础课

授课对象：三年级本科生

2013年4月

一、 课程介绍与教学目标

【课程名称】

中文：热质交换原理和应用

英文：Principles and Applications of Heat and Mass Transfer

【课程类型】

专业基础课

【教学对象】

建筑学院建筑技术科学系 三年级 本科生

【课程简介】

本专业立足于为服务对象（如人类）提供适宜的建筑室内环境（如温度 t 、湿度 ω ），本课程主要介绍建筑环境领域的热质交换原理及其应用。上世纪末，为了适应国家新的学科目录，本着夯实基础、提高能力的原则，建筑环境与设备工程专业增加了三门专业基础与专业理论课，本课程即是其中之一。该课程是建筑环境与设备工程专业最核心的专业基础课，为后续课程提供理论基础。该课程是本专业三年级专业基础课，也可供工程热物理专业、建筑物理专业学生选修。与很多已经成熟的数理课程相比，本课程仍是一门处在不断充实和完善阶段的专业基础课程。这种课程特点得益于飞速扩大的专业实践需求，同时也更加彰显出本课程将科研与教学紧密结合的指导思想。课程内容分为绪论、基础篇和应用篇：绪论主要阐述室内环境热质交换原理和应用的重要性；基础篇根据传质特征分六章系统介绍该过程的基本原理；应用篇分七章介绍室内环境领域传质学原理和应用的情况，并将研究团队近年来最新科研成果融入课程教学之中。

【课程目标】

- (1) 知识层面：使学生掌握建筑环境领域热质交换方面的基本原理、基本知识和常用分析方法，并了解建筑环境领域一些典型传质应用问题的分析和求解。
- (2) 能力层面：培养学生从实际社会需求、工程应用中发现科研问题、并利用所学知识解决问题的能力，培养同学独立思考、积极交流的能力。
- (3) 思维层面：注意培养学生从实际问题中提炼建筑环境传质问题，用数学方法抽象表述并予以解决，使学生掌握科学研究的思维方法。

【教材与参考书】

教材：张寅平,张立志,刘晓华,莫金汉. 建筑环境传质学.中国建筑工业出版社,2006
参考书：

1. 连之伟,陈宝明. 热质交换原理与设备（第三版）.中国建筑工业出版社,2011
2. Incropera, Frank P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer (7th edition), John Wiley & Sons Inc, 2011

【前导课与后续课】

本课程的前导课程包括《传热学》、《工程热力学》等基础课程和建筑环境与设备专业的专业基础课程《建筑环境学》、《空气调节与制冷技术》等，后续课程包括《流体网络原理》、《建筑环境与设备专业课程设计》等，进一步加深学生对营造建筑室内环境过程的认识和实践。

二、 单元教学内容与教学目标

【教学任务】

在 50 分钟内讲授“第五章 热量和质量的同时传递”中的“第一节 湿空气热湿传递特性研究”，主要教学内容如下：

- 1、湿空气热湿传递问题的物理描述；
- 2、热湿传递过程解耦分析与可及处理区域；
- 3、热湿传递可及处理区域的应用；
- 4、热湿传递过程与显热传递的类比。

【教学目标】

1、知识层面

- 了解湿空气热湿传递过程的耦合特性；
- 掌握刘易斯关系式的定义及其物理意义；
- 了解热湿传递驱动力解耦的具体过程；
- 掌握湿空气热湿传递与显热传递的异与同。

2、能力层次

- 会运用三角形可及处理区域判断湿空气与水接触时终状态所在区域；
- 会根据湿空气热湿传递方程的解耦分析进行热湿处理设备的流程优化；
- 会运用湿空气与水传热传质的研究方法解决类似的热湿传递问题。

3、思维层次

- 要善于从实际问题中提炼建筑环境传质问题，用数学方法抽象表述，定量解决实际问题；
- 要善于运用解耦的方法从多元影响因素耦合的复杂问题中理出头绪，认清事物的本质；
- 要善于“站在巨人的肩膀上”，通过与现有知识体系的类比，得到解决新问题的创新思路。

三、 教学重点

1、 湿空气热湿传递过程的科学问题：热湿耦合

建筑环境与设备工程专业(暖通空调专业)的重要目标是实现对湿空气温度、湿度的处理过程，湿空气与水的湿传递过程是本专业最重要、最常用的处理过程，**热湿传递方程的分析是本次课程崭新的知识点**。针对典型的湿空气处理过程，从实验数据的“出圈”现象（出口参数状态并不一定在进口参数界定的区域）提炼出湿空气热湿传递过程中的**科学概念：热湿耦合**，分析传热驱动力、传质驱动力之间的相互耦合影响关系，明确复杂物理现象背后的共通特点。从基本的科学问题出发，在定性分析的基础上对热湿耦合问题进行定量刻画，给出热湿耦合过程的科学描述，为寻求合适的解决方法奠定基础。

2、 湿空气热湿传递过程驱动力的解耦分析

通常对湿空气热湿传递过程的描述是温差驱动传热、湿差驱动传质，这种描述符合同学对传热传质物理过程的理解，但由于温度与湿度在热湿传递过程中并非相互独立，使得虽然可以通过传热传质方程进行求解，但无法给出空气终状态参数的变化规律。因此，**运用解耦的方法找出相互独立的传热、传质驱动力是解决热湿传热问题的关键**。此处的教学突出两部分内容：一是用线性代数方法演示驱动力解耦的过程，让学生能够独立运用该方法解决类似的复杂问题；二是重点讲解解耦思想，展示解耦为分析带来的直观性和便利性，让学生深刻理解解耦方法抓住事物本质的有效性。

3、 湿空气可及处理区域原则的应用

通过上述解耦的方法得到了热湿传递的独立驱动力：相对湿度差与焓差。对于任意的空气与水的初状态，由相对湿度差和焓差界定了对应的三角形区域，任一湿空气处理过程的终状态都在该区域内。**三角形可及处理区域**原则为湿空气处理方式提供了直观的理论基础，在此基础上利用此普适规律分析实际问题，介绍可构建出的湿空气处理系列创新流程，突出所学**科学知识指导工程实践**的重要作用，训练学生开展创新实践的能力。这部分内容讲授以知识本身的理解和灵活应用为重点，辅助以适量的练习题。

四、 教学难点与学生特点分析

经过大学两年的学习，同学们基本完成了数理基础课及专业基础课的学习，具备了建立物理模型与数学求解的能力，掌握了一定的专业知识，对暖通空调这一领域的常见对象及科研方法有一定的了解。学生的特点主要包括：

1. 数理基础较扎实，运用知识解决专业问题的能力有待提高

学习本课程的同学已具备了较好的数理基础，而且通过建筑环境学、参观实践等环节也具备了一定的空调专业知识基础。但总体来讲，学生解答数理题目能力较强，综合运用数学、物理知识解决本专业问题的实践较少，且往往不易抓住问题的本质，面对具体问题不能抽象出有效的数理模型，缺少综合运用知识能力的锻炼和有效引导。建筑环境传质领域涉及的面较广，需要善于学习相关领域的知识，并灵活运用，解决书本上、文献中尤其是生活和实践中的建筑空气环境传质学问题，加强运用科学理论解决问题能力的培养。

在本节课程的讲授中，教师通过充分调动同学的求知欲，引导其思考湿空气传热传质过程的特点，并鼓励同学与已有的传热学知识进行对照，以此来加深对新知识的掌握。在思维方法引导的基础上，参赛教师将学生对湿空气处理过程的感性认识提升到理性分析的高度：从基本实验现象提炼出热湿耦合的科学问题，学生将学会运用已有的数理知识基础和传热学知识等，将传热驱动力与传质驱动力的耦合影响进行解耦分析，从而得到适用于任意湿空气-水热湿处理过程的普适的处理区域范围（详见“教学创新点”）。

2. 专业认知处在感性阶段，科学思维、方法的训练尚有欠缺

参加本课程学习的同学已经完成了大学两年的学习，对空调专业的冷却塔、表冷器等空气热湿处理设备与系统有了一定程度的感性认识。同学们目前较为重视各门学科本身知识的学习，属于求索知识的重要阶段。在此基础上，需要引导同学们开始训练科学思维、关注科学方法。在讲授本课程中，参赛教师将为学生建立起热质交换过程的知识体系，并注重与已掌握的传热学知识进行联系，通过类比等方法认识到不同知识间的联系，锻炼学生的科学思维。

具体到本节湿空气热湿传递过程分析的教学中，参赛教师将引导学生从实际实验现象中提炼出热湿耦合的科学问题，从基本的物理传递方程出发来探求解决问题的方法，让学生体会到科学研究、科学理论形成的思维全过程。从复杂的热湿耦合传递方程中，启发学生从变化量（ Δt 、 $\Delta \omega$ ）也即驱动力的角度来看待热湿耦合传递过程，由此可以将热湿耦合的传递方程进行改写，进而得到解耦的驱动力，并通过解耦驱动力推知可及处理区域，让热湿耦合的复杂科学问题通过解耦方法迎刃而解。学生通过对问题提出到解决过程的全面认识，可以从新的角度获得认识，从而使得复杂问题“柳暗花明”，问题解决之路也变得“自然而然”。

3. 学习书本知识能力强，亟需培养自行开展科研实践、创新的能力

学生之前的学习多集中于理论知识的积累，但结合本专业所属建筑环境营造行业实践性强的特点，高年级本科生迫切需要培养开展科研实践的能力。本课程的教学突出专业与实践联系紧密的特点，坚持“从实践中来但高于实践，科学理论服务实践”的教学方针，将理论教学与实践创新强有力的结合起来，不仅提供“干粮”，还要让学生收获“猎枪”。

具体到本节内容的学习，在对本专业任务有基本了解的基础上，教师将引导学生转变认识问题的角度：根据已知的进口参数（被处理对象），从传统的由装置、设备计算得到出口参数（目标需求）的正向分析问题角度，转变到从需求的参数出发来寻找适宜流程构建方法的逆向思维角度，加强本节课内容的实际应用意义。在以目标为导向的指引下，通过正向、逆向认识问题角度的切换，学生将能够更清晰地认识本专业的任务特点，学会从复杂的计算中跳脱出来，练就其分析、解决问题的“火眼金睛”。通过从出口目标参数到较优处理流程的构建，使得学生体会到科学理论的研究可以指导创新性实践，让科研不再神秘。学生可以在对实际装置构建过程进行了解的同时，得到分析问题思维的启发，锻炼解决实际工程问题的能力，充分体现本节课研究性教学和启发性教学的特点。

五、 教学创新点与教学理念

1. 通过教学与科研密切结合，将参赛教师提出的“热湿耦合”新概念以及解决热湿传递过程的通用方法引入教学中

本课程主要关注的是建筑室内的环境营造问题（主要指温度 t 、湿度 ω ）。即在已知进口参数的前提下设计合理流程和装置来满足出口参数的需求，以达到室内人员舒适健康和工艺生产要求。具体来说，如图 1 所示，夏季需要对空气降温除湿、冬季需要对空气加热加湿。此外，在满足建筑室内环境需求下，还要降低营造过程的能源消耗，这也是本课程的重要任务。



图 1 建筑室内环境营造过程

湿空气的热湿处理，就是在众多流程（包含多种传热、热湿传递部件）中进行选择并予以优化，以在满足空气出口参数要求下使能效最高。而传统的解决办法（如参赛教师查阅的国内外多本空气调节教材、《实用供热空调设计手册》等权威资料）是在研究者能想到的一些流程中逐一进行复杂计算再来筛选。但是，实际存在的流程却像“满天星”一样的不胜枚举。这样，即使选择出了一种流程，也未必是最优的。此时所有的流程如同一个“黑箱”，研究者只能在其中找出一个部分进行上述处理，研究的盲目性很大，而且每项流程的计算又是非常复杂的。

参赛教师通过教学与科研密切结合，提出了**热湿耦合**新概念以及解决热湿传递过程的**通用方法**。将其引入教学后，使传统教材存在的上述问题得以很好解决。

“热湿耦合”即传热过程和传质过程相互影响与制约。在传统教材上，对这一新概念仅表述为“热量和质量同时传递”的意思，即只强调为同时传递，没有强调传热与传质过程的相互影响与制约，而后者却是更为重要的。

有了热湿耦合（温度 t 、湿度 ω ）新概念后，就启发参赛教师找到新的热湿变量，对使用原变量表达的热湿传递方程进行解耦。实践表明：解耦后的方程计算起来要比传统教材中的耦合方程简单得多。当然更重要的问题是要将热湿耦合新概念以及解耦后的热湿传递方程进行工程实际应用。参赛教师进而找到了湿空气出口在温度-湿度图上表示出来的“三角形可及处理区域”（见图 2），这个三角形的边界线分别为解耦的两个新变量：焓与相对湿度，还有湿空气与水（或吸湿溶液）进口状态的连线。这就为分析复杂热湿传递过程提供了有别于传统方法的简便的通用方法。

具体来说，该通用方法排除了一大批传统方法难以排除的传质方向与全热换热方向不一致的流程，使得流程选择要从传统的“黑箱”中进行“满天星”似的找寻，而变为有方向性、有针对性的类似“白箱”的流程构建过程，同时减少了大量复杂计算。

参赛教师及研究团队的此项研究工作，获得了行业内的认可，参赛教师的博士学位论文入选 2009 年全国优秀博士学位论文，先后获得了 2007 年国家技术发明二等奖、2010 年教育部自然科学一等奖等奖励。

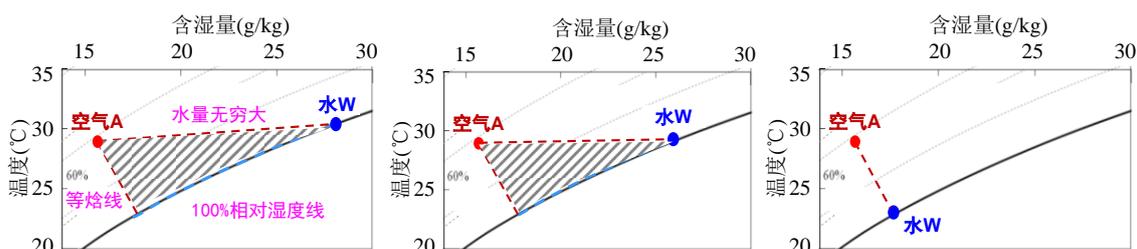


图 2 湿空气出口状态的可及处理区域

教学理念 在以课堂讲授为主的教学环节中，怎么实施和体现创新教育？通过讲授已经知道的东西，启发学生独立思考、创新思维是一个方面。另一个值得倡导的是，教师通过教学与科研的密切结合，讲授自己提出的新概念、新见解和新方法，这是一种研究式讲课。教师在课堂上讲授自己的创新成果是对学生未来创新的很好启发，对于研究型大学，应该给予积极倡导。

2. 以参赛教师提出新概念和通用方法的过程为讲授线索，使学生不仅学到知识，而且学会思维方法

前述参赛教师的研究工作，有两项关键点：第一是提出热湿耦合新概念；第二是找到了使热湿方程解耦的新变量。

对于第一点，开始时参赛教师做了大量湿空气与溶液的热湿传递实验，其中一组实验结果引起了参赛教师的关注：热空气与溶液进口在没有传湿驱动力时，仍发生了对空气的加湿效果（进口无湿差却产生传湿效果）。参赛教师又回过头

来看同样进口温度的空气与溶液的那组实验结果，发现空气出口的温度也发生了变化（进口无温差却产生传热效果）。参赛教师继续查找了文献中湿空气与水的湿传递实验数据，发现与上述溶液实验存在着同样的现象。这些实验结果，使得参赛教师深切感到，这与传统的单一传递过程存在显著差异，例如同样温度的两股流体进行单纯传热过程，其结果必然是二者的出口温度都不变。但是在传统教材中，对于湿空气的湿传递过程却强调说“热量和质量同时传递”，其重点在于“同时传递”，而不是相互影响。于是，参赛教师进一步思考并敏感地认识到，传热与传质过程既是同时传递，也是相互影响的，正是由于这种作用，才会出现“进口无湿差却产生传湿效果”、“进口无温差却产生传热效果”。此时，“热湿耦合”新概念应运而生。

对于第二点，有了热湿耦合的新概念后，自然会想到如何使热湿传递方程解耦的问题。参赛教师重新翻阅《传热学》教材，找寻思路。当看到傅里叶研究传热过程并将方程写为驱动力温差 Δt （温度梯度）的形式时受到很大启发：是否可以将温度、湿度变量也写为驱动力形式，移植于热湿传递特性的研究中？尝试的结果发现，这一移植为解决热湿耦合问题带来了极大便利。具体如图 3 所示，应用线性代数知识将驱动力的系数矩阵对角化，即可得到解耦的两个驱动力表达式，原来的复杂过程变得一目了然。这样，再以相互独立的驱动力为依据，创造性给出了湿空气出口的三角形可及处理区域（图 2），由此得到了适用于任意状态的湿空气处理过程的普适规律。

$$\frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \Delta\omega \\ \Delta t \end{pmatrix} = \frac{NTU}{H} \begin{pmatrix} -1 - \frac{\hat{m}fr}{c_{p,m}} & \frac{-\hat{m}f}{c_{p,m}} \\ \frac{-\hat{m}r}{c_{p,m}} & -(1 + \hat{m}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\omega \\ \Delta t \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{矩阵对角化}} \frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \Delta\Gamma_1 \\ \Delta\Gamma_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\Gamma_1 \\ \Delta\Gamma_2 \end{pmatrix}$$

图 3 变耦合驱动力为解耦驱动力

在参赛教师授课的线索中，突出了两个创新关键点的讲授，使学生具体学到了“在实验中认真观察思考、并努力进行理论提升”以及“要从其他学科中启发灵感、移植知识”的思维方法。

教学理念 美国著名教育家约翰·加德纳说过，“很多教师只给学生看知识园地里采摘下来的缤纷花朵，而不给学生看那束呈现在眼前芬芳美丽的花朵的种植、除草、施肥和修剪的整个过程”。在课堂上再现教师自己研究提出并引入教学的新概念、新见解和新成果的过程，而不仅仅是把知识的结果单纯奉送给学生，这将使学生对知识创新产生一种亲切感，学到鲜活的创新思维方法。

3. 引入溶液除湿技术“兴起-沉寂-再兴起”的发展史，让学生看到“一项有效的科学技术不在于永不沉寂，而在于沉寂后的再度兴起”

“热湿解耦”和“可及处理区域”的通用分析方法，也适用于湿空气与溶液热湿处理过程的分析（称为溶液除湿方法）。参赛教师将溶液除湿技术作为课堂应用的举例。

该技术是太阳能应用领域的先驱（pioneer）、美国科罗拉多州立大学教授 Lof GOG（1913-2009）于 1955 年首次提出的。他应用这一技术为推广太阳能应用起到了重要支撑作用。上世纪 70 年代，美国能源危机的影响给了 Lof 推广其太阳能技术的有利契机，利用太阳能再生的溶液除湿技术也得到了一定应用；同时期，我国三线建设中也应用溶液除湿技术解决地下厂房的湿度控制问题，利用燃料燃烧等方式满足了其高温再生的需求。

蒸汽压缩制冷除湿方法自 1902 年被美国 Carrier 博士用于建筑室内环境营造过程后，其性能得以不断完善、提高。而在上世纪 80 年代后，溶液除湿方式却受到再生温度高（100℃左右）、能量利用效率低等因素限制，而逐渐被不断发展的蒸汽压缩制冷除湿方式所取代，溶液除湿技术发展也几乎陷入停滞，如图 4。

20 世纪末以来，新的能源危机促使本领域开始探寻新的高效除湿方法，以满足建筑湿度调节需求。此时，作为市场主流的蒸汽压缩制冷除湿方式已暴露出缺陷：其露点送风特性无法将空气直接处理到目标需求的状态，需要“曲线救国”、路径曲折，致使除湿后空气温度偏低，很多情况下需要进行再加热，由此造成了巨大的能量浪费。这样，节能的巨大需求推动了本团队开启除湿方面的新研究。有意思的是，溶液除湿技术此时已经沉寂，本领域的众多学者大多不再看好它。但是，参赛教师研究团队的带头人江亿院士却认为，暂时的沉寂并不表示它的永久沉寂，能否使它再度兴起却是需要认真思考的问题。通过多种可能的除湿方式的对比分析，团队认识到溶液除湿方法可从根本上避免蒸汽压缩制冷除湿方式的本质缺陷。若能降低其再生温度并改善处理能效，该项技术仍然具有应用的前景。

于是，在江亿院士的带领下，参赛教师所在团队将已经沉寂的溶液除湿技术视为研究的突破口，并持续开展了十余年的不懈工作。并根据已得到的热湿耦合新概念和可及处理区域通用方法的分析，得出以下重要结论：在再生过程对溶液进行加热可大幅降低需求的热源温度，即得到溶液除湿流程的基本构建原则。由此可构建出溶液除湿与热泵循环结合的新流程，实现“低温再生”，将空气直接处理到需求的目标参数。这就走出了进口参数与目标参数之间的“最短路径”。其处理能效优于常规蒸汽压缩制冷除湿方式，促使了溶液除湿技术的再兴起。



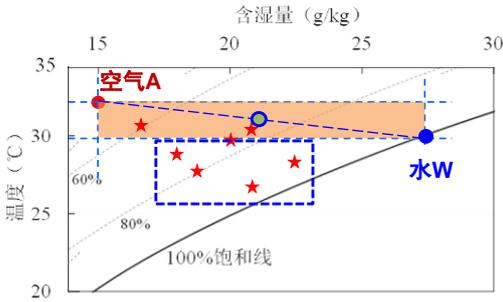
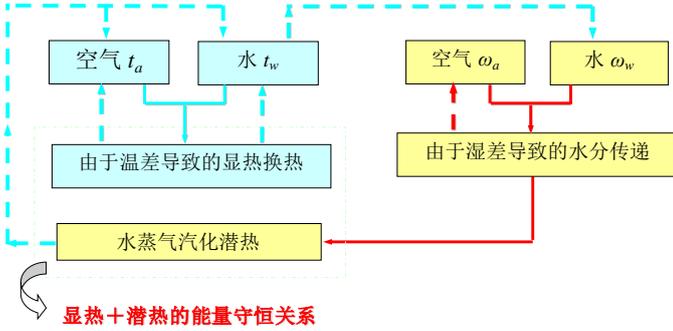
图 4 溶液除湿空气湿度处理装置发展史

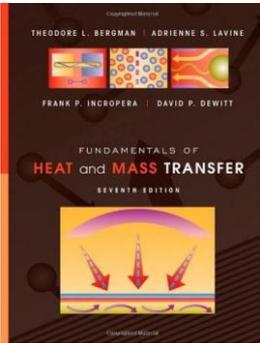
新型溶液除湿装置已在深圳招商地产办公楼、西安咸阳机场3号航站楼等超过400万平方米的建筑中得到了实际应用，基于溶液除湿装置构建的新型温度、湿度独立控制空调系统可实现比常规空调系统运行能耗降低30%以上的节能效果，有力促进了行业发展。

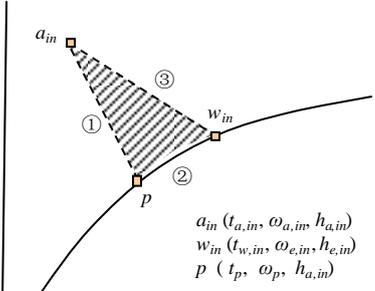
教学理念 讲授知识不能只讲授它的现在，还要讲授它的过去，并且构想它的未来。已经沉寂的技术，别人会认为它已经没有希望和再应用价值，而能够再寄希望于它、分析它再度兴起的条件并最终予以实现，这是很可贵的一种研究理念，将其引入教学后，也是很重要的一种教学理念。

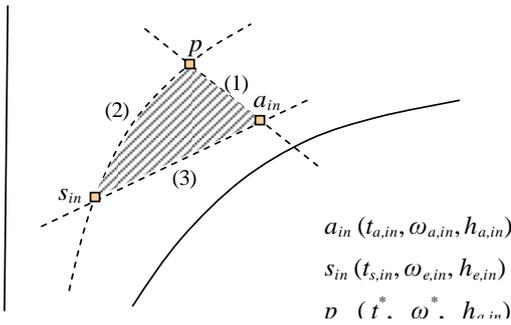
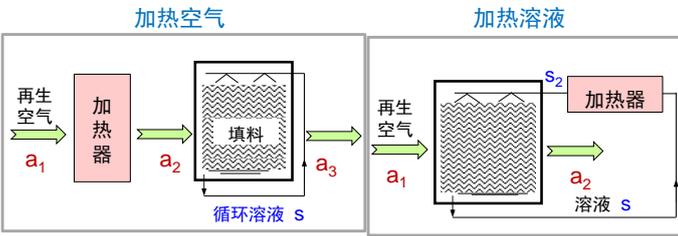
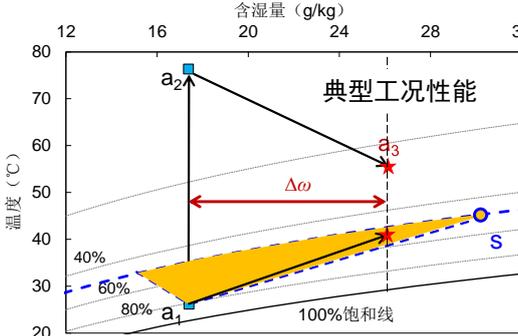
六、 教学过程设计

教学方法	教学内容	教学意图
<p>从本专业任务出发，以室内热湿环境调节的需求引发学生思考</p> <p>典型的夏季与冬季室外参数</p> <p>教具：展示湿空气热湿处理装置工作原理</p> <p>讲授传统方法的解决思路</p> <p>空气-空气混合，单纯的传热、传质问题，遵循已有知识体系</p> <p>提问：空气与水的热湿传递过程呢？</p>	<p>一、知识回顾与热湿耦合问题的引出（3min）</p> <p>✧ <u>湿空气热湿传递的基本任务</u></p> <p>简要介绍本节授课内容，指出课程学习重点为湿空气热湿传递过程的解耦分析</p> <p>本专业的根本任务——营造室内适宜的热湿环境</p> <p>✧ <u>回顾湿空气物理特性</u></p> <p>本门课是研究热湿环境调控中的传热传质规律，湿空气是重要的研究载体</p> <p>湿空气是干空气和水蒸气组成的混合气体，水蒸气含量直接影响空气状态，温度-湿度图的分析方法</p> <p>湿空气的热湿处理过程是进行空气调节的基础</p> <p>✧ <u>湿空气热湿传递问题的引出</u></p> <p>建筑热湿环境调控中关注湿空气出口参数，本专业需要通过构建处理流程来满足出口参数需求</p> <p>可以有多种设备、流程来实现对湿空气的热湿处理</p> <p>传统方法：通过复杂计算进行流程设计来满足处理需求，是一种“黑箱”式、“满天星”式的找寻思路。</p> <p>是否存在流程构建的指导原则？</p> <p>实验数据引出热湿传递问题的不同：“出圈”现象</p> <p>热湿传递过程不同于单纯的传热、传质问题：</p> <p>单纯传热：$t \in (t_{a,in}, t_{w,in})$ 热湿过程 $t \notin (t_{a,in}, t_{w,in})$</p> <p>单纯传质：$\omega \in (\omega_{a,in}, \omega_{w,in})$ $\omega \notin (\omega_{a,in}, \omega_{w,in})$</p>	<p>引出空气调节对象：湿空气</p> <p>回顾已学知识，吸引学生探索新知识</p> <p>加强学生直观感受，引起对热湿传递知识的兴趣</p> <p>提出本节课任务，启发同学从流程构建角度思考本专业的任务</p> <p>从学生已有知识体系出发，给出实验结果，与已有知识产生对照</p>

教学方法	教学内容	教学意图
<p>PPT 演示: 给出实验结果, 说明不同, 提出问题</p> <p>突出 热湿传递与单纯显热传递现象不同</p> <p>提问: 如何分析热湿传递现象? 引发同学思考</p> <p>PPT 演示: 分析湿空气热湿传递过程, 突出传热传质相互影响</p> <p>教师提炼出重要内容: 热湿耦合新概念</p>	 <p>◇ 热湿传递过程的耦合影响</p> <p>定性分析湿空气热湿传递过程的复杂特点, 从实验现象、分析中引出本节课重要的科学概念: “热湿耦合” 新概念比 “热量、质量同时传递” 更强调传热、传质的相互影响和作用, 更体现复杂过程的本质</p>  <p>如何定量刻画热湿耦合问题? 如何有效指导热湿传递流程的构建呢?</p>	<p>“颠覆” 学生现有知识体系, 引发思考</p> <p>总体认识热湿传递过程的耦合影响, 引导学生从复杂现象中提炼科学问题</p> <p>引出本节课的重点内容: 解答热湿耦合问题</p>
<p>以最简单的一维顺流流型为例, 给出热湿传递过程的物理描述</p> <p>板书: 热湿传递过程的基本方程</p> <p>给出方程描述</p> <p>介绍刘易斯的贡献; 给出影响热湿传递过程的关键因素</p>	<p>二、热湿传递过程传热传质方程 (6min)</p> <p>◇ 热湿传递过程的基本物理模型</p> <p>给出湿空气-水热湿传递过程的 守恒方程 (能量守恒和质量守恒) 和 传递方程 (热量传递和质量传递)</p> <p>依据基本方程, 分析热湿传递过程的关键因素为 流量比 R 和 传递单元数 NTU</p> $\left\{ \begin{array}{l} \text{能量守恒} \quad dt_w = -R \frac{c_{p,a}}{c_{p,w}} \cdot dt_a - R \frac{r}{c_{p,w}} \cdot d\omega_a \\ \text{传质方程} \quad \frac{d\omega_a}{dx} = -\frac{NTU}{H} \Delta\omega \\ \text{传热方程} \quad \frac{dt_a}{dx} = -\frac{NTU}{H} \Delta t \end{array} \right.$ <p>传热过程驱动力为温差 Δt, 传质过程驱动力为湿差 $\Delta\omega$ (水蒸气分压力差),</p>	<p>从数学模型出发, 指导学生构建起分析热湿传递问题的体系</p> <p>认识实际热湿传递过程的数理模型</p> <p>介绍求解过程</p>

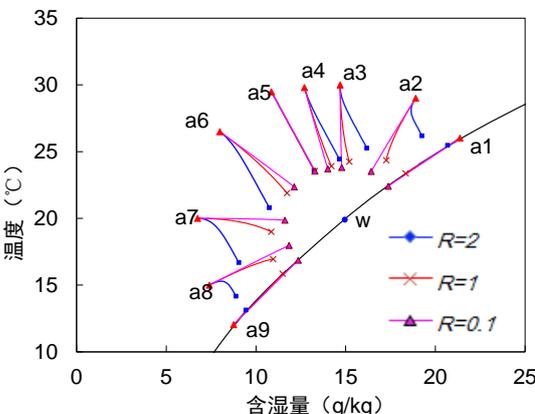
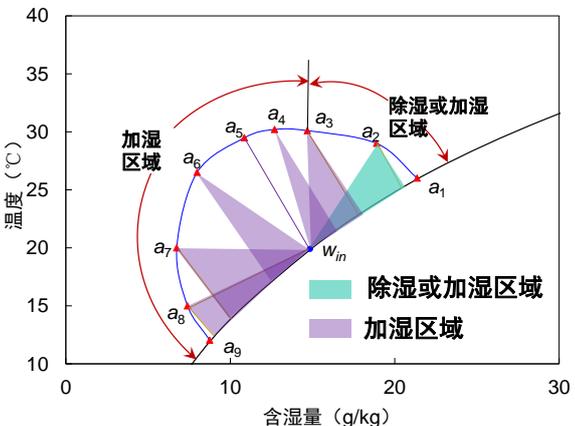
教学方法	教学内容	教学意图
<p>强调热湿传递过程驱动力的相互影响和转化</p> <p>以解的复杂形式引发同学思考： 如此复杂的问题，就只能用如此复杂的解来描述吗？</p> <p>科学方法引导：能否从解耦的视角研究该问题，由此引出教师研究成果——<u>热湿解耦分析</u></p>	<p>传热传质驱动力相互耦合、相互影响</p> <p>◇ <u>热湿传递方程的求解分析</u></p> <p>给出一维顺流过程的解，解的形式非常复杂</p> $\begin{cases} t_{a,out} = \frac{m^* + e^{-NTU(m^*+1)}}{m^*+1} t_{a,in} + \frac{1 - e^{-NTU(m^*+1)}}{m^*+1} t_{w,in} + \frac{r}{c_{p,m}} \frac{m^* - m^* e^{-NTU} - e^{-NTU} + e^{-NTU(m^*+1)}}{m^*+1} (\omega_{a,in} - \omega_{a,m}) \\ \omega_{a,out} = \omega_{a,in} \cdot e^{-NTU} + \omega_{a,m} \cdot (1 - e^{-NTU}) + \frac{\omega_{a,in} - \omega_{a,m}}{m^*+1} [1 - e^{-NTU(1+m^*)}] \end{cases}$ <p>逆流、叉流流型时的解析解更加复杂</p> <p>国内外经典教材中，对热湿传递过程的分析也只停留在上述方程组求解阶段，<u>由此引出热湿解耦分析的方法</u></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>	<p>热湿传递求解过程的复杂</p> <p>点明求解结果复杂的原因：<u>热湿耦合</u></p> <p>从经典教材的内容进一步渲染热湿耦合，从“<u>热湿耦合</u>”向“<u>热湿解耦</u>”切换</p>
<p>巧妙推演，将描述物理过程的方程组改写</p> <p>分析方程组特点：<u>对角元素不为0，故热湿传递驱动力相互耦合</u></p> <p><u>提问</u>：大家是否会利用已掌握的数学知识对方程组进一步处理？</p> <p>以数学方法为分析工具，得出解耦驱动力</p>	<p>三、<u>热湿传递过程解耦分析</u> (9min)</p> <p>◇ <u>热湿传递驱动力解耦分析</u></p> <p>描述热湿传递过程的基本方程：以 t, ω 进行表述</p> <p>受传热过程分析中将传递方程写为传热驱动力温差 Δt 形式的启发，将方程组改写为传热驱动力温差 Δt 和传质驱动力湿差 $\Delta \omega$ 的组合形式，并可进一步写为矩阵形式</p> $\frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \Delta \omega \\ \Delta t \end{pmatrix} = \frac{NTU}{H} \begin{pmatrix} -1 - \tilde{m}fr / c_{p,m} & -\tilde{m}f \\ -\tilde{m}r / c_{p,m} & -(1 + \tilde{m}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \omega \\ \Delta t \end{pmatrix}$ <p>依照线性代数知识，将<u>系数矩阵对角化</u>，即可得到<u>两个相互独立的变量 $\Delta \Gamma_1$ 与 $\Delta \Gamma_2$</u>，均为热湿传递驱动力 Δt、$\Delta \omega$ 的组合关系式，<u>两个独立变量的表达式</u>：</p> $\Delta \Gamma_1 = \frac{1}{f} \Delta \omega - \Delta t = \Delta \varphi = \varphi_a - \varphi_e$ $\Delta \Gamma_2 = \frac{r}{c_{p,m}} \Delta \omega + \Delta t = \frac{\Delta h}{c_{p,m}} = \frac{h_a - h_e}{c_{p,m}}$ <p>湿空气-水热湿传递过程中的耦合驱动力 Δt、$\Delta \omega$ 得到解耦，得到了<u>独立的驱动力相对湿度差 $\Delta \varphi$ 与焓差 Δh</u></p>	<p>从复杂的耦合方程抽离</p> <p>让学生了解热湿解耦的思维过程</p> <p>由传热过程的分析触类旁通，启发新问题的解决</p> <p>启发同学利用已有方法认识新问题，<u>使新知识不再神秘</u></p> <p>利用数学知识得到解耦的驱动力</p>

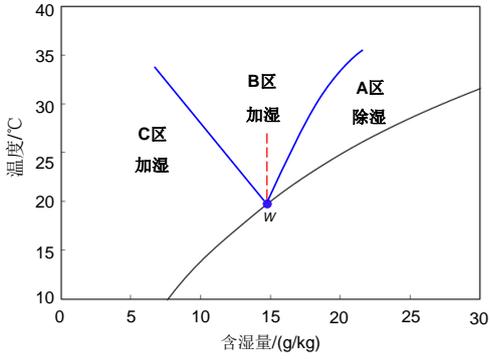
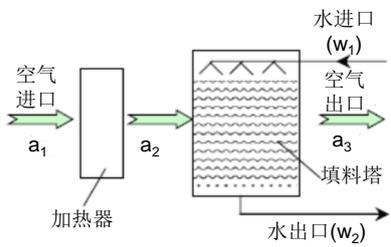
教学方法	教学内容	教学意图
<p>解释独立驱动力的含义：$\Delta\varphi$ 与 Δh</p> <p>回到实验数据</p> <p>PPT 演示：实验结果与解耦驱动力分析相符</p>	<p>➢ <u>焓差驱动力 Δh</u>：表征全热换热能力，是全热换热的衡量指标；</p> <p>➢ <u>相对湿度差驱动力 $\Delta\varphi$</u>：反映水蒸气扩散接近于平衡的程度</p> <p>◇ <u>热湿处理过程的可达处理区域分析</u></p> <p>从独立驱动力角度重新认识热湿传递过程：<u>实验数据点</u>不满足单纯传热、传质过程的规律，但却<u>满足独立的驱动力 $\Delta\varphi$ 与 Δh 所界定的范围</u></p> <p>热湿过程</p> $t \in (t_{a,in}, t_{w,in}) \quad h \in (h_{a,in}, h_{w,in})$ $\omega \in (\omega_{a,in}, \omega_{w,in}) \quad \varphi \in (\varphi_{a,in}, \varphi_{w,in})$	<p>解释清楚<u>独立驱动力的物理意义</u></p> <p>解答前述实验结果，<u>前后呼应</u>，加深认识</p>
<p>根据<u>热湿解耦</u>分析，明确空气出口参数的变化规律，依据进口状态可划分湿空气的可达处理区域</p>	<p>以相互独立的驱动力 $\Delta\varphi$ 与 Δh 为基础，引出热湿传递过程中的“<u>三角形处理区域</u>”</p>  <p>与进口空气 a_{in} 焓值相等的等焓线①、进口水 w_{in} 的等相对湿度线②（即饱和线）、水与空气进口状态的连线③</p> <p>$a_{in} (t_{a,in}, \omega_{a,in}, h_{a,in})$ $w_{in} (t_{w,in}, \omega_{e,in}, h_{e,in})$ $p (t_p, \omega_p, h_{a,in})$</p> <p>此三角形区域就是热湿传递过程的可达处理区域</p> <p><u>分界线的物理含义：</u></p> <p>线①：“焓” 表征全热换热能力，热湿传递过程中空气焓值与水等效焓值，均在二者进口焓值所界定范围内变化；</p> <p>线②：“相对湿度” 表征水与空气间扩散过程接近饱和的程度，空气相对湿度在进口相对湿度所界定范围内变化；</p> <p>线③：当水流量非常大 ($R \rightarrow 0$) 时，空气终状态点就位于两流体进口状态的连线上。</p>	<p>将学生从复杂计算中解脱，<u>简化复杂问题</u>，给出普适规律</p>
<p>强调分界线的重要意义</p> <p>PPT 演示：动画给出空气、水参数变化时三角形处理区域的变化规律</p>	<p>将解耦驱动力的分析用于分析湿空气与吸湿溶液间的热湿传递过程</p> <p>湿空气-溶液热湿传递过程的三角形可达区域：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 界线(1)是与进口空气焓值相等的等焓线 ➢ 界线(2)是进口溶液等浓度线或称为溶液等相对湿度线 ➢ 界线(3)是空气进口状态点与溶液进口状态的连线 	<p>详解界线含义，基本理念贯穿始终</p> <p>使学生对复杂的热湿传递问题有直观、形象的分析方法</p>
<p>简述<u>溶液与湿空气过程与空气-水过程的相似性</u></p> <p>利用同样方法，</p>		<p>加深对可达处理区域的认识，推广解耦分析方法的应用范围</p>

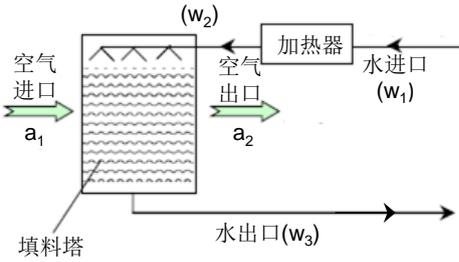
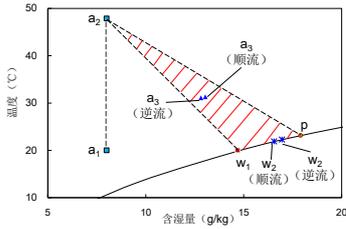
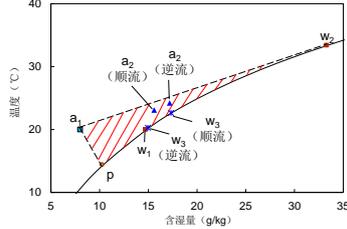
教学方法	教学内容	教学意图
<p>得到<u>湿空气与吸湿溶液热湿传递过程</u>的可及处理区域</p> <p>给出典型溶液与湿空气热湿传递流程，以可及处理区域<u>通用方法</u>为指导原则</p> <p>PPT 演示：认清两种处理流程，得到重要结论：<u>再生过程应加热溶液而非空气</u></p> <p>突出科学理论指导实践</p> <p>PPT 演示：溶液除湿技术的发展历程 <u>“兴起-沉寂-再兴起”</u></p>	 <p>$a_{in} (t_{a,in}, \omega_{a,in}, h_{a,in})$ $s_{in} (t_{s,in}, \omega_{e,in}, h_{e,in})$ $v (t^*, \omega^*, h_{a,in})$</p> <p>◇ <u>热湿处理过程可及处理区域的应用分析</u> 对比两种<u>溶液再生处理流程</u>，利用可及处理区域的分析方法，分析两种流程对再生温度的需求。</p>   <p>再生温度需求 加热空气：78.4°C 加热溶液：47.2°C 大幅降低再生温度需求</p> <p>再生温度的降低使得利用<u>冷凝器排热进行再生</u>成为可能可构建<u>溶液除湿与热泵循环结合</u>的新型空气热湿处理装置，实现“低温再生”</p> <p>新装置推广应用：大幅提高能效，促进了热湿处理装置变革，推动了行业进步</p>	<p>可及处理区域的通用方法</p> <p>向学生介绍两种基本流程</p> <p>对实际流程构建的指导</p> <p>启发学生对创新的认识，体现研究式教学的重要思想</p> <p>讲授知识的过去-现在历程，引发思考：<u>一项有效技术的再度兴起</u></p>
<p>总结本课内容：知识层面</p>	<p>四、小结 (2min)</p> <p>◇ <u>空气与水热湿传递过程的特性：耦合→解耦</u> 复杂问题解决的<u>思维全过程</u>： 由实验现象、分析提炼<u>热湿耦合</u>新概念，解耦分析并得到可及处理区域<u>通用方法</u></p>	<p>引导学生训练科学思维方法</p> <p>解耦的思想</p>

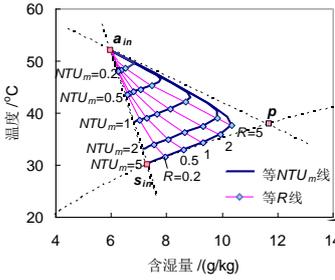
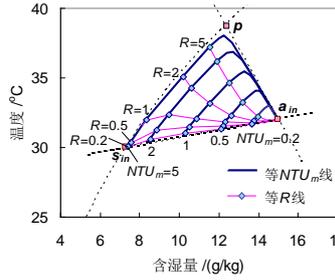
教学方法	教学内容	教学意图
实践意义	◇ 科学知识的实践意义： <u>构建创新流程</u> 科学理论指导实践 普适规律（可及处理区域）指导一系列创新流程的构建 促使溶液除湿技术的再度兴起	

以上为 20min 教学内容。在 50min 教学安排中，将扩充热湿传递特性解耦分析应用的内容，扩充后的部分教案如下：

教学方法	教学内容	教学意图
<p>指出空气与水热湿传递过程中的 <u>影响因素：进口状态相对位置、流量比、投入的换热能力等。</u></p> <p><u>PPT 演示：典型热湿传递过程的计算结果</u></p> <p>分析出口参数的变化规律，由此规律出发探寻热湿传递过程的统一特性</p> <p><u>PPT 演示：给出 9 个不同的空气进口状态点</u> <u>展开课堂讨论，</u> 让学生自主探究不同状态点出口状态所在区域</p>	<p>五、热湿传递特性应用（30min）</p> <p>◇ <u>热湿处理过程计算示例</u>（3min）</p>  <p>空气-水进口状态相对位置不同时，不同流量比 R 时热湿传递过程的空气出口状态分布（顺流流型） 无论流型、流量比、进口状态如何变化，<u>处理终参数均在一划定区域内</u></p> <p>◇ <u>热湿传递过程的分区特性</u>（6min）</p> <p>对于空气与水热湿传递过程，根据进口状态相对位置选取典型空气进口状态 $a_1 \sim a_9$</p>  <p>典型进口状态时空气与水热湿传递的可及处理区域</p>	<p>由基本物理模型出发，以 <u>数值模拟</u> 方法为分析方法，得出典型过程的处理结果</p> <p>锻炼学生独立运用可及区域理论解决问题，加深其理解</p> <p>强化学生运用可及区域理论分析问题的能力</p>

教学方法	教学内容	教学意图
<p>通过三角形可及处理区域，将<u>传热传质特性相同的处理过程</u>划分成同一区域，研究各过程区域的异同</p> <p>从具体算例抽象出焓湿图上空气处理区域的划分</p> <p>PPT 演示： 以建筑环境领域常见加湿器为例</p> <p>处理过程及焓湿图上表示</p>	<p>利用湿空气饱和线、空气进口状态等焓线及空气与水进口状态连线可得到各典型状态点的<u>可及处理区域</u> <u>依据传质效果进行划分，分除湿和加湿两种区域</u></p> <p>以水进口状态为中心、根据空气与水进口状态的相对位置也可以在焓湿图上对空气与水的<u>热湿传递过程进行分区</u>：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● A 区：除湿区，全热换热方向与传质方向相同； ● B 区：加湿区，全热换热方向与传质方向相反； ● C 区：加湿区，全热换热方向与传质方向相同。  <p><u>分区结果可用来指导热湿处理过程流型选取</u>：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 在 A、C 区相同条件下<u>逆流装置</u>传质效果优于顺流装置； ➢ 在 B 区，相同条件下<u>顺流装置</u>传质效果优于逆流装置 <p>B 区与 C 区的分界线为进口水状态焓值对应的等焓线 A 区与 B 区的分界线位于湿空气饱和线与水进口状态等效含湿量对应的等含湿量线之间</p> <p>◇ <u>不同加湿处理方法的比较</u>（7min） 讲解常见的空调系统加湿方式：<u>加热空气式和加热水式</u></p>  <p>(a) 加热空气方式</p>	<p>该划分方法<u>涵盖所有的湿空气与水热湿处理过程</u>，加深同学们对统一规律性的把握</p> <p>将各种处理过程按其规律划分成不同区域，培养同学综合分析能力</p> <p>可及处理区域理论的应用</p>

教学方法	教学内容	教学意图
<p>从基本处理过程出发，分析两种方法的差异性</p> <p>应用研究结果，指导实际工程应用中，空气处理流程的选择</p> <p>PPT 演示： 具体算例，对比给出量化结果 强调不同处理方式带来的传湿效果差异</p> <p>由浅入深，启发式教学：鼓励学生运用已有知识解决溶液与湿空气传热传质问题</p>	<div style="text-align: center;">  <p>(b) 加热水方式</p> </div> <p>以热湿传递过程的可达处理区域及分区为手段</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>根据空气与水热湿传递过程分区结果，空气加湿过程中：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>加热空气的热湿处理过程位于 B 区</u>，选取顺流流型可以获得较好的加湿效果 ➤ <u>加热水的过程则位于 C 区</u>，逆流流型的加湿效果较优 <p>根据可达处理区域分析，<u>加热水时空气出口所能达到的含湿量范围要大于加热空气的方法</u></p> <p>计算结果实例： NTU_m=1 和 R=2 时，加热空气最大加湿量为 5.0 g/kg，而加热水最大加湿量为 9.9 g/kg，后者加湿量远大于前者。</p> <p><u>实际工程中的流程设计指导原则：</u> 加湿处理 当加热器热量一定时，应选取加热水而非加热空气的方式来获得更好的加湿效果</p> <p>◇ <u>空气-溶液热湿传递过程的特性分析</u> (7min) <u>典型的湿空气-溶液的热湿传递过程</u> 给出顺流、逆流情况下空气处理终状态点随着 NTU_m 和流量比 R 变化时在焓湿图上的变化情况 典型处理过程 1、2 的空气进口状态 a_{in} 的参数分别为温度 32℃、含湿量为 15g/kg 和温度 52℃、含湿量为 6g/kg，两典型状态的溶液进口 s_{in} 均为温度 30℃、浓度 28%</p>	<p>比较不同的加湿方式，再次明确可及处理区域在解决实际问题时的直观性与有效性</p> <p>研究结果指导工程应用，培养同学解决实际问题的能力</p> <p>由湿空气与水热湿传递过程的分析，拓展到湿空气与吸湿溶液热湿传递过程的分析，启发同学思考，并扩展知识面</p>

教学方法	教学内容	教学意图
<p>湿空气-水热湿传递过程与湿空气-吸湿溶液热湿传递过程的对照分析与研究结果的拓展、应用</p> <p>与已学习过的显热传热过程类比，认识知识间的联系与区别</p> <p><u>课程小结</u></p> <p>总结知识体系、<u>知识要点+科学方法</u></p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>(a) 顺流典型过程 1 (b) 逆流典型过程 2</p> <p><u>空气处理终状态分析</u>（以典型过程 1 为例）</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 当 $NTU_m=5$、$R=1$ 时，空气的出口状态为 34.6°C、10.0g/kg ➤ R 相同时，空气出口状态随 NTU_m 增加越发远离空气进口状态 ➤ NTU_m 固定时，空气出口状态随 R 减小越接近溶液进口状态点 <p>空气-溶液热湿传递过程与空气-水热湿传递过程：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 相似特性：溶液与水的异同 <u>类比方法的运用</u> <p>◇ <u>显热传递与热湿传递过程的类比分析</u>（5min）</p> <p><u>显热传热过程分析回顾</u>：显热换热过程的处理求解</p> <p>“类比”科学方法：相似科学问题类比，有助于启发思路</p> <p><u>刘易斯对传热与传质过程的类比</u>：最早建立起对流换热与对流传质过程的重要联系，<u>刘易斯数关系式</u></p> <p>传热传质过程的类比，引导学生思考： <u>热湿传递过程与显热传热过程的相似性</u></p> <p>◇ <u>空气热湿传递过程应用小结</u>（2min）</p> <p><u>湿空气热湿传递过程的分析方法</u>：<u>热湿解耦+可及处理区域</u></p> <p>应用分析结果指导流程构建，应对复杂问题</p> <p><u>热湿传递过程与显热换热过程的类比分析</u>：描述物理过程的基本方程相似，<u>类比方法</u>推知求解结果的相似</p> <p>启示：从实际出发的研究问题角度、不同处理过程的触类旁通；类比的科学思想方法</p> <p>思考题：</p> <ul style="list-style-type: none"> • 湿空气与水逆流流型中，推导解耦的传热传质驱动力，并与课上所介绍的顺流结果进行比较； • 分析湿空气-水热湿传递过程与传热学两股流体单纯显热换热过程的异同。 	<p>了解溶液与湿空气热湿处理过程中，<u>湿空气终状态的可及处理范围</u></p> <p>深化课程内容，类比思想，启发学生注重科学分析方法</p> <p>根据已有显热分析方法理解热湿传递过程</p> <p>分析基本问题，培养科学研究方法</p>