

题目 15 回热循环与再热循环

回热循环与再热循环			
课程名称	《工程热力学》	学时	64 学时
课程性质	专业基础课	本次课时	1
授课学期	第三学期	授课专业	暖通、能动
回热循环与再热循环			
教 学 目 标	一：知识目标： 1.让学生掌握回热循环与再热循环的原理，并将此原理合理地应用到实际生活中。掌握单级回热循环与双级回热循环的温熵图及焓熵图；掌握一级再热循环的温熵图及焓熵图。 2.让学生熟练掌握回热循环、再热循环热效率的计算方法。 3.让学生熟练掌握抽气比的计算方法，了解再热循环中各种参数的设定依据。 二、能力目标 通过所学习的回热循环和再热循环，使学生具备一定的分析、思考和解决热电厂中工程问题的能力，例如抽气比的数量级、回热循环中过热蒸汽的再热压力、再热温度如何确定等；培养学生的逻辑思维能力。 三、情感目标 1.能够让学生对热电循环产生兴趣，熟悉热电循环。 2.通过本次课程学习，让学生了解本次课程与后续专业课程的关系。 3.加深学生对专业的意识。		
	启发式教学	在课堂中，以防学生走神，同时要让学生自己去寻找问题的答案，用以前学过的内容去解决现在遇到的问题。在授课过程中，要让学生的头脑一直在思考，就不会走神。	
	过程化考核	利用雨课堂的形式，很容易能够实时掌握学生学习的状况。学习卡片，能够让学生带着任务去课堂；学生掌握的情况能够如实地反应在学习卡片上，批改学习卡片能够让教师掌握学生学习的情况。这种过程化考核，	

		可以给学生一些平时成绩。
	深层次思考	这些“深层次”的思考，其实是已经解决的问题。但是学生作为专业的门外汉，对专业还是一知半解。这些思考，能够加深学生对专业的认识。对于一些好学生，会主动查阅一些专业资料，在以后学习专业课的过程中，能发现更多的问题，对本科生的成长是极为有利的。
学 情 分 析	《工程热力学》是一门专业基础课，主要研究热功转换的规律。授课对象是建筑环境与能源应用工程专业、能源与动力工程专业的本科生。 《工程热力学》一共 4 个学分，64 个学时，其中 60 个课堂学时，4 个实验学时。 授课时间是本科生的第三学期，即大二上学期。 在此之前，学生已学习完高等数学、概率论、线性代数、大学物理等公共基础课。《工程热力学》、《流体力学》、《传热学》是本专业的三大基础课，而《工程热力学》是本专业的本科生接触到的第一门专业基础课。作为此门课的主讲老师，应起到专业领路人的作用。 建环专业培养的毕业生应具备从事建筑环境与能源应用工程领域所需的基础理论知识、专业技术能力及实践创新能力，能够在设计研究、工程建设、设备制造等相关单位，从事采暖、通风、空调、冷热源系统等方面的规划设计、研发制造、施工安装、工程咨询、运行管理等工作。 能源与动力工程专业主要培养以热能转换与利用系统为主的热能动力工程以及以电能转换为机械功为主的制冷低温工程两个方向的高级工程技术人才。本毕业生主要在电厂热能、制冷空调、新能源和可再生能源等领域，从事各种能源利用系统以及能源转换与利用装置的研究开发、工程设计、施工安装和运行管理等方面的工作。 本次课程所要讲述的回热循环与再热循环，是热电循环里面非常重要的一节。现有的热电厂，无一例外，都采用了回热循环；对于大型电厂的超临界机组，无一例外，都采用了再热循环。对于能源与动力工程专业的学生来讲，重要性不言而喻。	
课	教材： 《工程热力学》，廉乐明等编，第 6 版，中国建筑工业出版社；	

程 资 源	参考书目： (1)《工程热力学》，沈维道等编，高教出版社； (2)《工程热力学精要分析及典型题精解》，何雅玲编，西安交大出版社。 课程中心： http://kczx.qut.edu.cn/G2S/site/preview#/home/v?currentoc=226 精品课程： 清华大学（史琳主讲） http://www.openke.net/show-210.html 清华大学（吴晓敏主讲）： http://www.xuetangx.com/courses/course-v1:TsinghuaX+20140064X+sp/about
教 学 方 法	教学方法： 1、雨课堂 采用雨课堂，及时掌握学生的学习情况。课间让学生用微信扫描二维码进入雨课堂。进入教学阶段，使用雨课堂检测学生学习效果。课后，雨课堂会生成课后小结。教师根据课后小结了解学生的学习情况。 本次课给学生准备的雨课堂题目： 单选题 100分 再热循环一定可以提高热效率 ☐ A 错 ☐ B 对 ☐ C 不确定 发送题目 2、学习卡片 采用学习卡片，让学生带着任务上课，边听边记。 在每次讲课之前，为学生准备好学习卡片，人手一份。学习卡片上，是本节课的重点内容。学习卡片内容设置原则：(a)简单可记：最好是填空或者判断题，主要考察对所讲内容的理解；(b)重点内容：卡片上的内容必须是需要学生掌握的内容，理解层面的内容尽量不放置；(c)要有提

示性的语言：如果是比较难理解的问题，考虑到学生第一次接触所学内容，应设置提示性语言；(d)要有书写空间：如果涉及到作图题，应有学生作图、书写、草稿的空间；(e)时间顺序：卡片内容与讲课内容要一致，在顺序上要同步进行，不能具有跳跃性；(f)加入课堂思考和总结：如果有富裕版面，或者是每一章结束的位置，应预留学生自行总结重点、难点的空间。学习卡片使用方法：上课前发给學生，人手一份；下课后收回，批改。

学习卡片的优点：(a)能够起到点名的作用，每次课不用浪费点名时间；(b)能够让学生带着任务上课，让学生主动在课堂上寻找问题的答案，收获更大，也更容易把握课堂上的重点，提高课堂听课效率；(c)教师在批阅学习卡片时，可以看到学生掌握的情况，以便给学生答疑解惑，并提高教学水平，避免以后的教学环节中出现类似问题；(d)学生将所有的学习卡片整理成册以后，在结课后，还可以作为期末考试的复习资料，有助于学生理解课本上的重点内容。

本次课为学生准备的学习卡片内容（答案见小结）：

第二节 回热循环与再热循环

学习卡片小结:

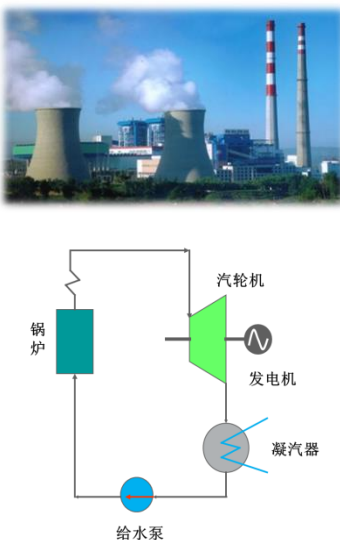
- (1) 采用回热循环的原因: () (2) 采用再热循环的原因: ()
- (3) 一级回热循环T-s图和h-s图 (4) 一级再热循环的T-s图和h-s图
- (5) 一级回热循环的热效率 (6) 一级再热循环的热效率

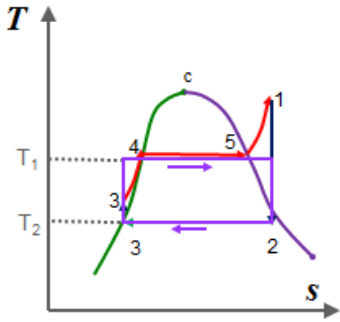
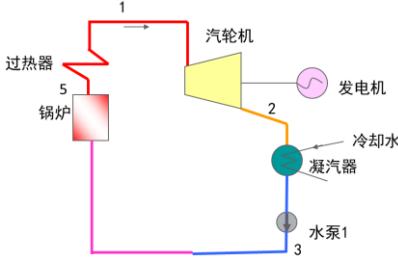
策略

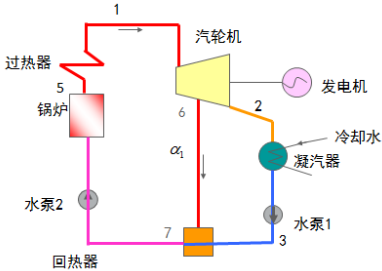
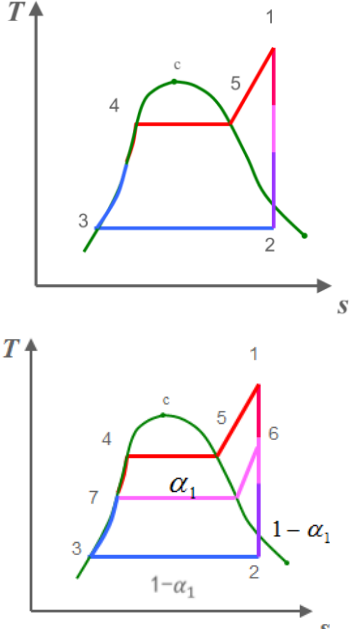
内容回顾；启发式教学，由浅入深，潜移默化；深层次思考；课堂小结

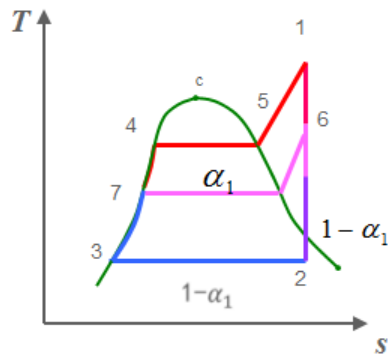
教学内容 及 时间规划		
教学阶段	内容	时长 (min)
内容回顾	借助学习卡片回顾朗肯循环热力过程； (用雨课堂的方式完成三个选择题，考察学生学习状况)	2
课程的导入	提出问题：如何提高朗肯循环的热效率	3
启发式教学，由浅入深，潜移默化	如何提高平均吸热温度？	2
	单级抽气回热循环及各状态点参数	3
	抽气比如何确定？	3
	回热循环热效率如何求？	2
	热效率计算需要用焓值，如何把温熵图改成焓熵图？	3
	两级抽气回热循环抽气比、热效率和焓熵图？	3
	抽气回热循环是否一定能提高热效率？	2
	提出问题：如何提高汽轮机出口的乏汽干度？	3
	再热循环的温熵图？再热参数如何确定？	3
	再热循环的热效率？	2
	再热循环是否一定能提高热效率？	3
深层次思考	再热循环和回热循环同时使用的温熵图？焓熵图？热效率？	2
课堂小结	重点、难点的总结及收齐学习卡片	2

教学重难点 及 解决方案	
教学重难点	解决方案
教学重点： （1）回热循环的原理图，即温熵图和焓熵图；（2）再热循环的原理图，即温熵图和焓熵图；（3）回热循环和再热循环热效率的计算	（1）从简入难，先讲简单的单级抽气回热循环，再讲两级抽气回热循环。先讲学生熟悉的温熵图入手，再讲焓熵图。 （2）充分利用多媒体课件的优势，加入动画效果，强化学生印象； （3）采用启发式教学，让学生自己去思考，并找到问题的解决方案。
教学难点： 两级回热循环的原理图，即温熵图和焓熵图；虽然这部分比较难，但是学生只需要达到了解的程度就可以。	（1）采用雨课堂和启发式教学，在教学过程中不断地提出问题，让学生利用以前学过的知识点解决问题； （2）使用学习卡片，让学生带着任务去学习。课本中并没有再热循环和回热循环的焓熵图，但是为了方便学生理解原理和做题，将焓熵图一并讲述。

教学内容与过程			
教学环节	教师活动 与教学内容	学生思维活动	设计意图 及表达方式
导入		国家正在倡导节能减排的政策。每天我们生活的这个城市都要消耗大量的电能，数以万计。如果我们能够从热电厂做到节能减排的话，即便是热效率提高1%，节能量都是巨大的。	节能减排的重要性
回顾	 (1)让学生结合学习卡片，回顾上节课学习的朗肯循环；	学习卡片上有几个问题： (1) 朗肯循环的四大件？ (2) 用温熵图表示朗肯循环的四个热力过程； (3) 朗肯循环的热效率 (4) 提高朗肯循环热效率的方法	让学生回顾上节课的内容。本次课的内容与上次课有个良好的衔接。
过程化考核	朗肯循环中的四大热力过程分别是 A 定温吸热 B 水蒸气定压发生过程 C 定熵膨胀 D 定压放热 E 多变压缩 F 定熵压缩	学生看到两个题目，会非常快速地回忆起上次课的内容。 这两个题非常简单，也都是最基本的知识点，	考察学生的掌握情况，如果达不到预期的效果，则

	提高朗肯循环热效率的途径有哪些？ A 提高初压 B 提高初温 C 降低背压 借助雨课堂，让学生做两个题目，以考察学生的掌握情况	要求正答率达到 95% 以上。	个别知识点需要再简单讲解一下。
提出问题	 $\eta_{t,c} = 1 - \frac{T_2 \Delta s}{T_1 \Delta s} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 结合温熵图及卡诺循环热效率的公式，提出：朗肯循环热效率不高原因：锅炉内水的预热阶段温度较低，平均吸热温度低，传热温差大，不可逆损失大。 问题（1）如何才能提高锅炉内热力过程的平均吸热温度？	学生很自然会想到：进入汽轮机的过热蒸汽温度很高，可以将凝汽器中的饱和水与汽轮机中的部分蒸汽混合，以达到提升锅炉进口温度的目的。	让学生思考，如何提高锅炉进口温度。让学生自己想到：可以采用抽气回热的方式。
单级抽气回热循环		学生首先看到左侧上图，是非常熟悉的朗肯循环的图。 学生接着看到的是有抽气回热的循环图，这样逐渐深入，学生容易	让学生从朗肯循环逐渐过渡到回热循环。理解回热循环的

	 结合学生的思考,先把最常见的朗肯循环给学生展示出来,再把有抽气回热的部分给加上。在原基础上改进,学生容易理解。	理解。 反应到：原来抽气回热循环就是在汽轮机这部分抽气，然后与凝汽器出口的水进行混合。这样就提升了锅炉的入口温度，也就提高了平均吸热温度	原理图。
	 对应朗肯循环的原理图,先给学生朗肯循环的温熵图。结合单级抽气回热循环的原理图,再把朗肯循环温熵图改成抽气回热循环的温熵图。给学生抽气比的概念。	学生先是看到朗肯循环温熵图,这是学生所熟悉的,容易理解。接着看到的是抽气回热循环的温熵图,是在原朗肯循环的温熵图基础上修改的。这样容易让学生理解。	让学生从朗肯循环温熵图逐渐过渡到抽气回热循环的温熵图。此温熵图是第一个核心知识点。



汽轮机入口（1点）：10MPa+, 350~550℃

汽轮机出口（2点）：3000-4200Pa, 25~30℃

混合状态点（7点）：0.8MPa, 170℃

0.2MPa, 120℃

抽气比 α_1 ：8%-15%左右，如何精确计算呢？

结合抽气回热循环的温熵图，给学生们讲一讲每个状态点的参数，比如说压力多少，温度多少。这样学生对抽气回热循环能有一个比较深刻的了解。

仅仅定性地去讲解，学生半信半疑，如果能定量地去讲解，学生理解的效果可能更好。

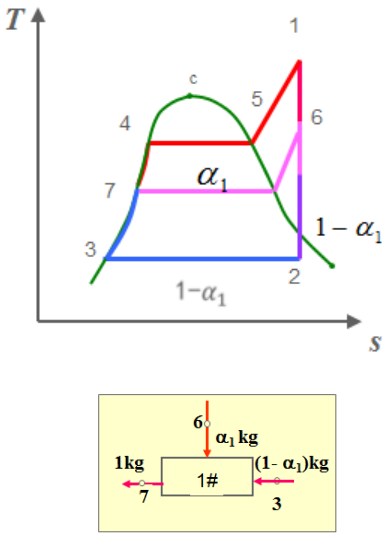
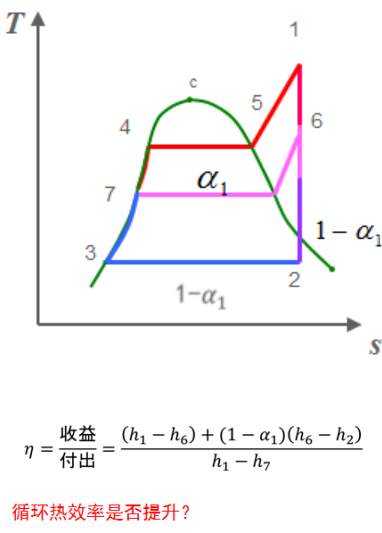
借助抽气比的范围，提出一个问题，抽气比如何精确计算呢？

学生在看到抽气回热原理图和温熵图后，对每个状态点水蒸气的参数还是很懵，为了让学生了解每个状态点大体的参数，给学生举个例子。

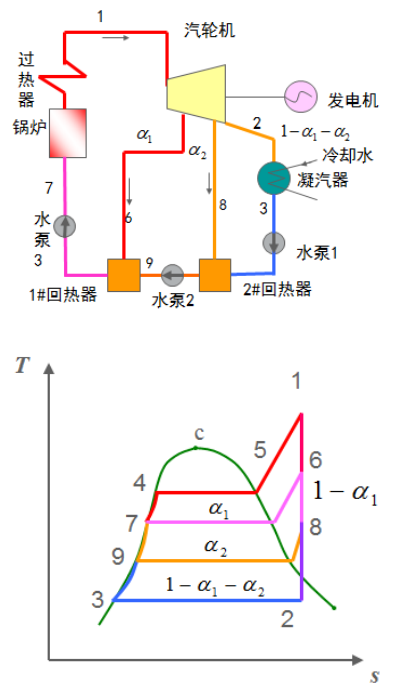
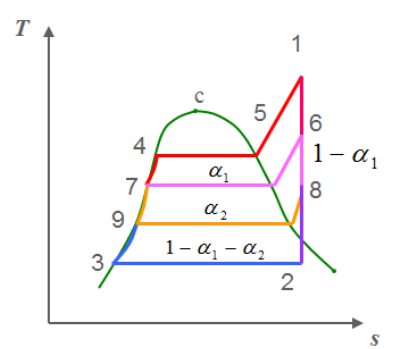
另外给出混合状态点8的参数，能让学生很直观地看到，进度锅炉的水温从30℃上升到了120-170℃，确实提高了平均吸热温度。

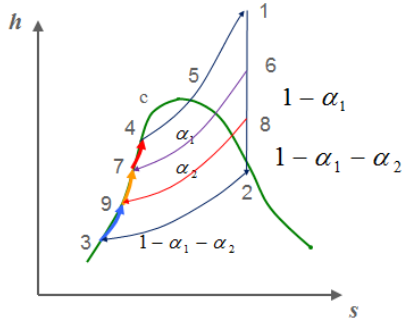
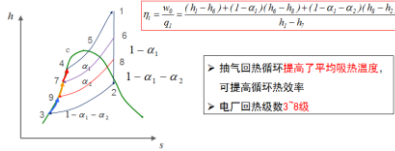
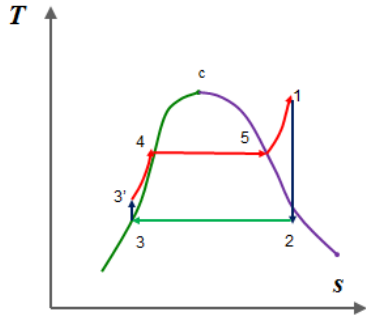
而且对抽气比的数量级有个大概的了解。

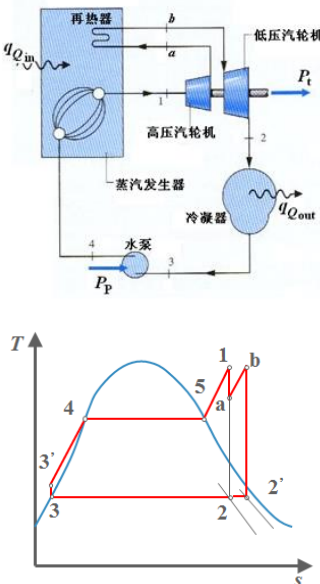
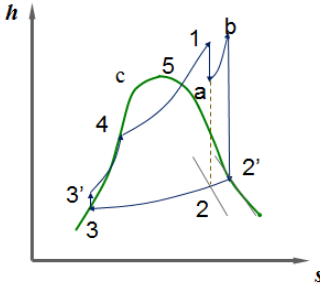
让学生了解每个状态点的大体参数，加深对抽气回热循环的了解。同时认识到，回热循环确实提高了平均吸热温度。对抽气比的数量级有个了解。

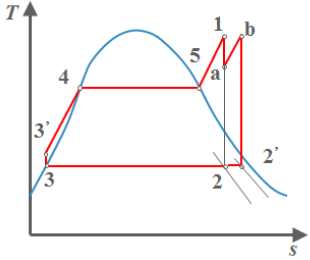
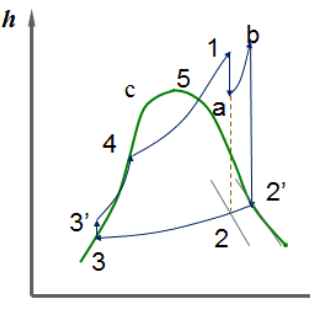
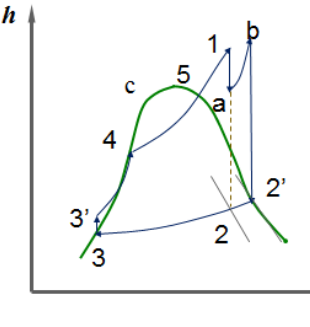
	 能量守恒: $\alpha_1 h_6 + (1 - \alpha_1) h_3 = h_7$ $\alpha_1 = \frac{h_7 - h_3}{h_6 - h_3}$ 结合温熵图和热力学第一定律,把抽气混合这个热力过程抽象成上图,这样学生很容易用第一定律写出能量平衡方程,也就很容易去计算抽气比	学生看到抽象出来的混合热力过程,就会思考能量守恒方程。混合前的焓值等于混合后的焓值,很容易就讲解了抽气比的计算。	让学生掌握抽气比如何计算。这是第二个核心知识点。
	 $\eta = \frac{\text{收益}}{\text{付出}} = \frac{(h_1 - h_6) + (1 - \alpha_1)(h_6 - h_2)}{h_1 - h_7}$ 循环热效率是否提升? 参考例题10-1 朗肯循环热效率42.4% 抽汽回热循环热效率46.3% 结合温熵图,提出问题,抽气回热循环的热效率该如何计	学生很自然会想到,热效率等于收益除以付出。 收益是汽轮机对外输出的功量,学生很自然会想到这个功量分为两段。应该分别用每一段的质量乘以焓变。 付出是锅炉里面水蒸气的焓变。学生也会寻找锅炉入口状态点的焓值和锅炉出口状态点的焓值。	让学生掌握热效率的计算方法,不能死记硬背,理解记忆非常简单。这是第三个核心知识点。

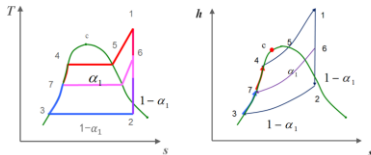
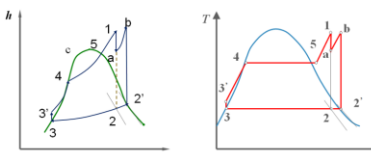
	算呢？ 结合课本例题的计算结果，告诉学生，如果仅仅是朗肯循环，效率是 42.4%，但是如果采用回热循环，热效率提升到了 46.3% 带学生推导出热效率计算方法后，发现计算热效率需要用到焓值，但是温熵图不能读取，引出抽气回热循环的焓熵图。		
	朗肯循环的焓熵图是讲过的，学生很熟悉，所以从朗肯循环的焓熵图入手，在其基础上改变，得到抽气回热循环的焓熵图。	学生看到朗肯循环的焓熵图，很自然很想起抽气的热力过程，混合后的状态点落在什么位置。这样抽气回热循环的焓熵图也就明白了。 让学生理解：焓熵图中各点的焓如何得到。落在干饱和蒸汽线以上的点要查图，落在饱和和水线上的点要查表。	为方便计算热效率，给学生讲解抽气回热循环的焓熵图，这是第四个核心知识点。 不是所有点的参数都通过查图得到。

两级抽气回热循环	 讲完单级抽气回热循环，相信再讲两级抽气回热循环就简单多了。而热电厂一般会采用3-8级抽气回热循环，相信讲完两级抽气回热循环，三级以上的回热循环，基本就不用讲解了。	学生看到两级抽气回热循环的原理图和温熵图，很主动取对应图中各点的对应位置。自己会分析到抽气比从一个增加到了两个。 学生会意识到，抽气比的计算要分两个进行。热效率的计算要分三段进行考虑。	让学生理解两级抽气回热循环的原理图和温熵图
		两级抽气回热循环的焓熵图也仅仅是在一级回热循环焓熵图的基础上多加了一条回热线。 而进入锅炉的状态点温度可以得到进一步提升，就提高了平均吸热温度。	掌握两级回热循环的焓熵图，第五个核心知识点。

	 提出问题： 两级抽气回热循环的焓熵图又该如何画呢？		
	 结合一级回热循环求解热效率的方法，让学生自己去写两级抽气回热循环的热效率。学生就都能理解了。	学生会想到：热效率等于收益除以付出。 收益是汽轮机输出的功率，分为三段，每段的质量是不一样的。 付出是锅炉内水蒸气的吸热量，关键是寻找进入锅炉的水蒸气状态点。	让学生掌握两级抽气回热循环热效率的计算方法。还是不能死记硬背。要理解。第六个核心知识点。
再热循环	 结合朗肯循环的温熵图，提出问题，2 是点汽轮机出口的状态点，而且 2 点落在了湿蒸汽	学生很自然会想到，可以提升 1 点的温度，但是要给学生讲明白，1 点温度升高，意味着锅炉的生产成本就增加了 引导学生去思考，本次课讲再热，如何实现再热呢？	提出问题，让学生理解为什么要再热，而且去思考，如何实现再热循环。

	区,也就是说 2 点既存在饱和水又存在饱和蒸汽,那么液滴和汽轮机的叶片会激烈碰撞,影响汽轮机的正常工作,不可取,怎么办呢?		
	 结合原理图和温熵图,给学生讲再热循环,学生是很容易理解的。为方便学生理解,把再热过程的起点和终点用 a 和 b 来表示。	学生看到原理图和温熵图,很容易就理解再热循环的原理了。而且观察汽轮机出口的状态点,出口的干度确实增加了。对汽轮机的影响就减少了。	让学生理解再热循环的原理图和温熵图。这是第七个核心知识点。
		学生会结合朗肯循环的焓熵图去理解再热循环的焓熵图。这个图是很容易理解的。带着学生去思考问题:再热压力即 a 点的压力和 1 点的压力有何关系?再热温度即 a 点的温度	让学生掌握再热循环的焓熵图。这是第八个核心知识点。

	 结合温熵图，讲再热循环的焓熵图。当然，要把最原始的朗肯循环的图表达出来，学生理解起来方便。	和 1 点的温度有何关系？	
	再热参数：再热压力$P_2 \approx (0.2 \sim 0.3) P_1$之间，再热温度$T_b = T_1$。 使用情况：初压$P_1$小于10MPa,不用； 大于13MPa，一次再热； 大于24MPa，两次再热。 再热效率：再热平均吸热温度大于原来的平均吸热温度就会提高；2%~4%  结合焓熵图，给学生讲再热参数、再热循环的使用情况、再热效率。	学生了解再热参数后，提出一个问题：什么情况下使用再热循环，是不是每个热电厂都有再热循环呢？	了解再热循环的参数级使用条件。
	$\eta = \frac{\text{收益}}{\text{付出}} = \frac{(h_1 - h_a) + (h_b - h_{2'})}{(h_1 - h_3) + (h_b - h_a)}$ 	这是第三次让学生去求热效率。 学生很自然会想到，热效率等于收益除以付出。会主动去解决这个问题。	让学生掌握再热循环热效率的计算方法。这是第九个核心知识点。

	提出问题：再热循环热效率如何计算？ 是不是采用了再热循环一定能提升热效率？		
利用学习卡片小结：	(1) 采用回热、再热循环的原因；(2) 回热、再热循环的T-s图和h-s图；(3) 回热、再热循环的热效率；(4) 回热比、再热压力等参数的确定	学生会结合学习卡片，对本节课内容有个大致了解。 学生会把握本节课的重点和难点。	让学生了解重点和难点。
	第二节 回热循环与再热循环 学习卡片小结： (1) 采用回热循环的原因：(提高平均吸热温度) (3) 一级回热循环T-s图和h-s图  (5) 一级回热循环的热效率 $\eta = \frac{\text{收益}}{\text{付出}} = \frac{(h_1 - h_6) + (1 - \alpha_1)(h_6 - h_2)}{h_1 - h_7}$ (2) 采用再热循环的原因：(提高乏汽干度) (4) 一级再热循环的T-s图和h-s图  (6) 一级再热循环的热效率 $\eta = \frac{\text{收益}}{\text{付出}} = \frac{(h_1 - h_a) + (h_b - h_{2'})}{(h_1 - h_3) + (h_b - h_a)}$		
深层次思考：思考和作业	同时采用回热循环和再热循环，T-s图和h-s图？热效率？ 参考资料： http://kczx.qut.edu.cn/G2S/site/preview#/rich/v/131921?ref=&currentoc=226	对学生来讲，这个问题有些难度。如果能够对本次课很好的消化吸收，还是能够解决这个问题的。	让学生利用本节课的知识，解决问题，同时预习下节课内容。

热力循环中的人生道理	第二节 回热循环与再热循环 朗肯循环中的人生道理 藏 能 于 胸， 御 能 为 功； 少 炆 多 烟， 不 惧 熵 增。
板书设计	
教学评价	一、学生对教师的评价方法 利用课间和课下时间或者课程建设网站 http://kczx.qut.edu.cn/G2S/site/preview#/rich/v/131921?ref=&currentoc=226)、或者组织学生座谈会跟学生交流，了解学生对本次课程的掌握情况，听取学生对教师授课方法和教学手段的反馈意见。 二、教师对学生的评价方法 1.通过雨课堂实时了解学生们的学习情况。 2.通过课堂学习卡片了解学生对核心内容掌握的情况。
预习任务	同时采用回热循环和再热循环，T-s 图和 h-s 图？热效率？
课后作业	习题：9-4、9-5 通过上述作业题，让学生巩固对再热循环和回热循环的理解，掌握两种循环热效率的计算方法。