

热电联产

- 1. 简介 1
- 2. 热电联产系统的类型 2
- 3. 热电联产系统评估 10
- 4. 提高能源效率的可能性 14
- 5. 方案清单..... 16
- 6. 工作表..... 17
- 7. 参考文献..... 19

1. 简介

本章简单介绍热电联产系统，或称为热电联合(CHP)系统的主要特点。

1.1 什么是热电联产？

热电联产系统就是在一个综合性的系统中，连续或同时产生多种形式的有用能(通常是机械能和热能)。热电联产系统由多个独立的部分组成：牵引机(热力发动机)、发电机、废热回收系统、以及电力互连，这些部分经过配置成为一个综合性的整体。热电联产系统的类型由驱动整个系统的设备(即牵引机)的类型决定。热电联产系统牵引机包括活塞式发动机、燃气轮机、蒸汽轮机、微型汽轮机以及燃料电池等。这些牵引机能够使用多种燃料，包括天然气、煤、油以及替代燃料，以产生轴输出功率或机械能。尽管牵引机产生的机械能通常用于驱动发电机发电，它还可以用于驱动压缩机、泵、风机等旋转设备。热电联产系统产生的热能可以直接或间接地用于生产蒸汽、热水、用于干燥的热空气、或者用于过程冷却的冷冻水。

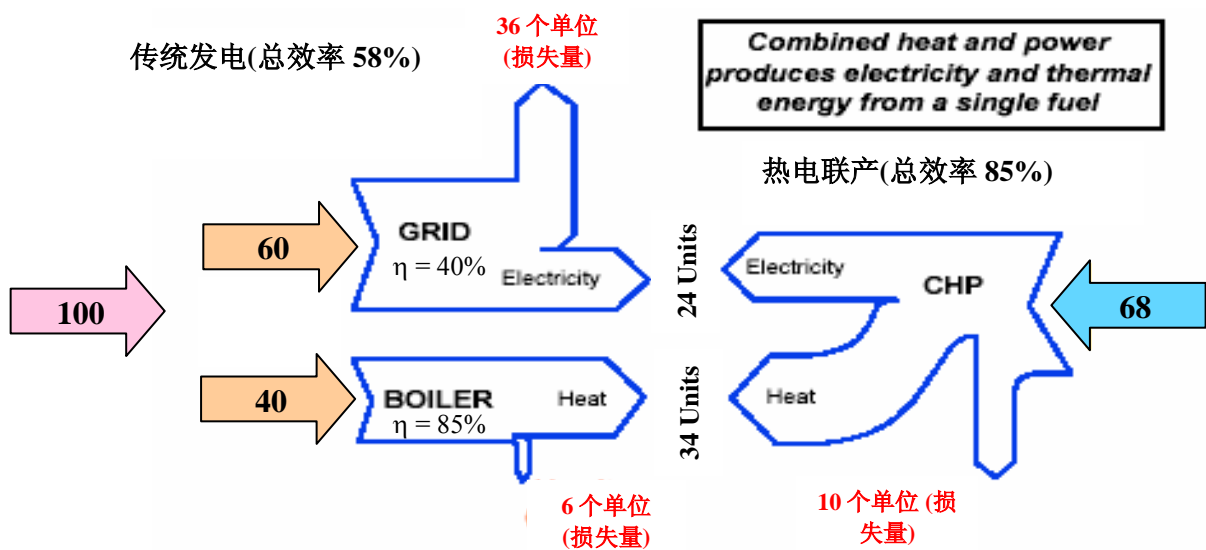


图1.热电联产系统的能效优势 (UNESCAP, 2000)

图1体现了与传统的中心电站发电相比，热电联产系统存在的能源效率方面的优势。如果对热力和电力过程都进行比较，一套热电联产系统需要的原始能量仅为热电分离系统的四分之三。热电联产系统主要的环境效益就是这些减少的原燃料消耗量，因为更加有效地燃烧相同总量的燃料也就意味着相同水平的产出所带来的废气排放量更少。

1.2 热电联产的效益

如果热电联产用上述方法进行了优化(即根据需要的热量确定系统规模)，就能取得以下效益：

- 更高的能量转换和利用效率。
- 降低对环境的排放量，特别是主要的温室气体CO₂。
- 在某些情况下，可以使用生物燃料以及一些废料，如精炼气、工艺废物或农业废物(厌氧分解或气化后)。这些用于热电联产方案的物质能够提高成本效果，并降低废料处理的需求。
- 节约大量的成本，为工业和商业用户提供额外的竞争力，并且为国内用户提供价格合理的热能。
- 让一些设计为满足本地消费者需求的电厂能够使用更多的多样化的发电方式，提高效率，消除输电损失，提高系统应用的灵活性。此方法特别适合于以天然气为能源载体的发电。
- 提高发电厂的多样性，为发电行业创造竞争环境。热电联产是促进能源市场自由化最重要的载体之一。

2. 热电联产系统的类型

本章包含多种热电联产系统类型：蒸汽轮机热电联产系统、燃气轮机热电联产系统、以及活塞式发动机热电联产系统。本章还将根据能源使用的顺序对热电联产系统进行分类。

2.1 蒸汽轮机热电联产系统

蒸汽轮机是仍然用于普通生产的应用最广泛、使用时间最长的牵引机技术。自从因为更高的效率和更低的成本而取代了蒸活塞式蒸汽发动机之后，用蒸汽轮机发电的技术已经应用了约100年。蒸汽轮机的功率小的有50kW，大的可到大型电厂的数百MW。蒸汽轮机广泛用于热电联产(CHP)应用。蒸汽轮机的热动力循环即“兰金循环”。此循环是传统电站的基础，由将水转化为高压蒸汽的热源(锅炉)组成。在蒸汽循环过程中，水首先经过泵加压到中压或高压，然后加热到相应压力下的沸点温度，沸腾(由液态加热到气态)，然后通常还要过热(加热到沸点温度以上的温度)。多级汽轮机使压缩蒸汽膨胀，压力降低，然后排入真空状态下的冷凝器或排入中温蒸汽分配系统，输送到工业或商业用途。来自冷凝器或蒸汽利用系统的冷凝水回到到给水泵，继续进行循环。

两种应用最广泛的蒸汽轮机是背压式汽轮机和抽汽凝汽式汽轮机。选择背压式汽轮机还是抽汽式凝汽汽轮机主要取决于电和热的总量、热能的质量以及经济因素。汽轮机的蒸汽抽汽口可能不止一个，这主要取决于工艺要求的温度的温度水平。

2.1.1 背压式蒸汽轮机

背压式蒸汽轮机是最简单的设备配置。根据热负荷的需求，从汽轮机排出的蒸汽压力略高于或至少等于大气压力。这就是使用“背压”一词的原因。也可以从蒸汽轮机的中间阶段，在与热负荷相适应的压力和温度下分离出蒸汽。排出汽轮机后，蒸汽将被载入荷载，以便释放热量后冷凝。如果蒸汽在工艺过程中被消耗掉了或者在管线上有损耗，冷凝水可以以一个比蒸汽流速低的流速回流入系统。补偿给水维持了物料平衡。

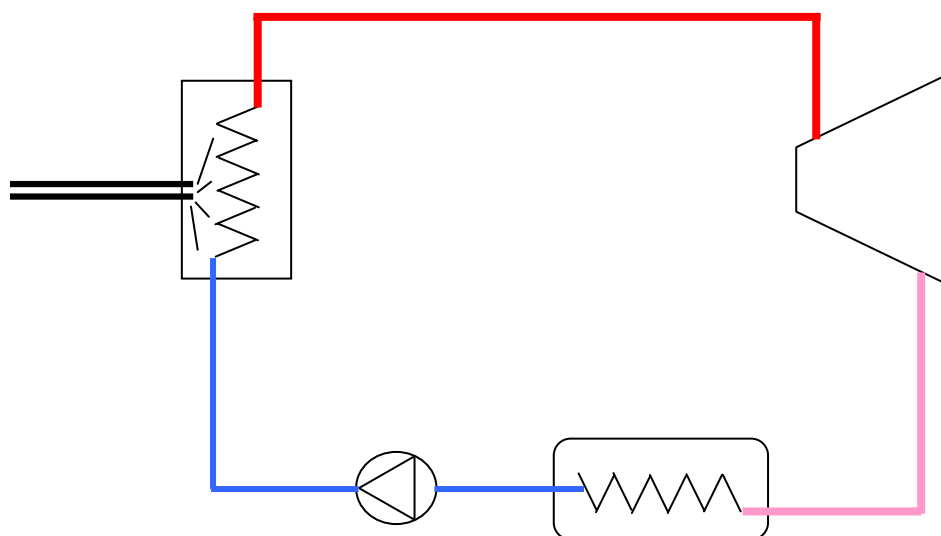


图 2. 背压式蒸汽轮机

背压式系统有以下优点：

- 设备配置简单，构件很少。
- 避免了昂贵的汽轮机低压级的成本。
- 基本投资低。
- 冷凝水需求量较少甚至没有。
- 全效率高，因为没有通过冷凝器排入环境而损失的热量。

背压式系统有以下缺点：

- 在相同的功率输出下，蒸汽轮机的体积更大，因为它工作在较低的蒸汽焓差下。
- 经过汽轮机的蒸汽质量流量取决于热负荷。因此，由蒸汽发的电就由热负荷控制，这就造成直接使电力输出和电力负荷匹配缺乏或没有灵活性。因此，需要和电网建立双向连接，以便购买补充用电或销售多余的电。直接将蒸汽排入大气可能会提高电的产量，但这样的效率是很低的。这个做法会造成经过处理的锅炉水的浪费，并且，最大的可能是，造成经济和能源效能低下。

2.1.2抽汽式凝汽蒸汽轮机

在这样的系统中，热负荷所需要的蒸汽是在适当的压力和温度下，从一个或多个中间级抽取出来的。剩余的蒸汽排入冷凝器中，冷凝器的压力可以低至0.05巴，与之相应的冷凝温度约为33°C。温度这么低的热能几乎没有什么用处，因此，直接排入环境。和背压式系统相比，凝汽式汽轮机的基本投资更高，效率通常也要低一些。不过，在一定程度上，这种系统可以通过适当地调节通过汽轮机的蒸汽流速，独立于热负荷来调节发电功率。

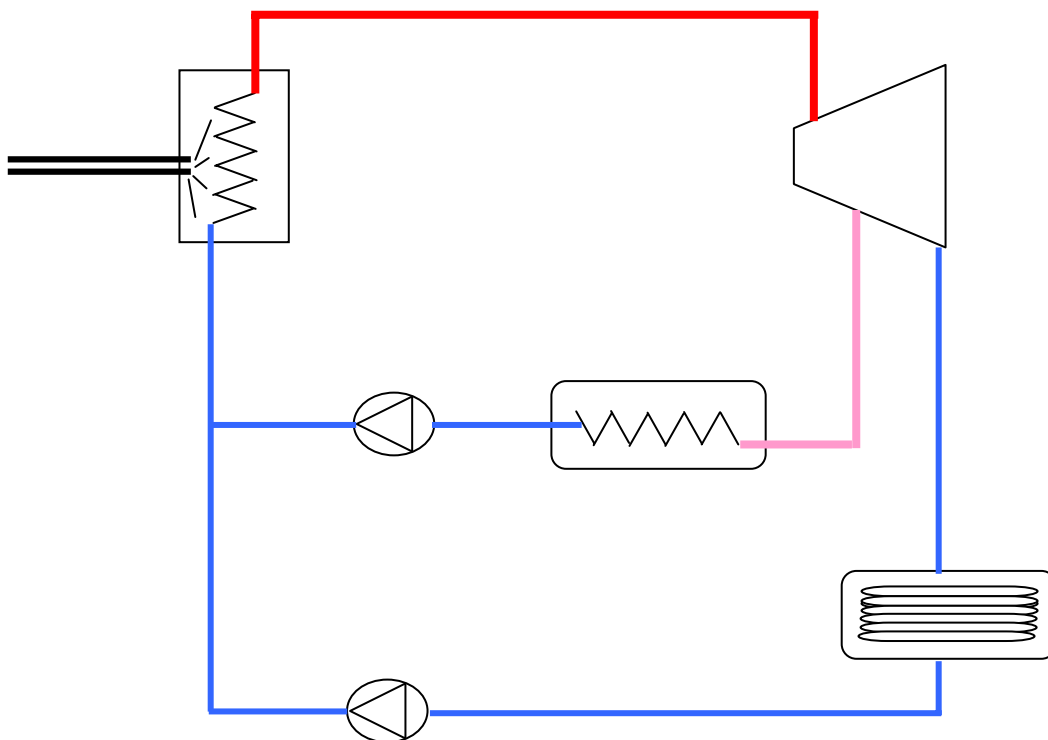


图 3. 抽汽式凝汽蒸汽轮机

2.2 燃气轮机热电联产系统

燃气轮机系统运行的热动力循环叫做布雷顿循环。在一个布雷顿循环中，空气被压缩，加热，然后膨胀。汽轮机或膨胀器产生的动力除供压缩机发电使用外还有富余。燃气轮机热电联产系统可满足电站全部或部分的能量需求，而且从烟囱排放的高温热能可以回收用于各种加热和冷却过程(见图4)。虽然天然气是最常用的燃料，其他的燃料如轻燃料油或柴油也可以使用。燃气轮机典型的功率范围从几分之一MW到100MW不等。

最近几年或许是燃气轮机热电联产发展最快的时期，因为天然气开采能力提高，技术迅速进步，安装成本大大降低，而且此技术的环境效能更好。此外，开发一个项目的酝酿期比以前更短了，设备可以模块化地供货。燃气轮机的启动时间更短，并且可以间歇运行，灵活性更高。尽管燃气轮机的热功转换效率较低，但在更高的温度下却能回收更多的热量。如果热量输出达不到最终用户的需求，可以向富氧废气中混合更多的燃料，进行补充天然气燃烧，以更加有效地提高热功率。

2.2.1 开式循环燃气轮机热电联产系统

目前各中应用类型中使用的燃气轮机系统大部分都是开式布雷顿循环(当不考虑不可逆性时也可称为焦耳循环)系统，压缩机从大气中吸入空气，然后将升压后的空气导出到燃烧器中。由于压缩，空气的温度也会升高。老式的和小型的机组的增压比为 15:1，而新式的大型机组运行的增压比则接近 30:1。

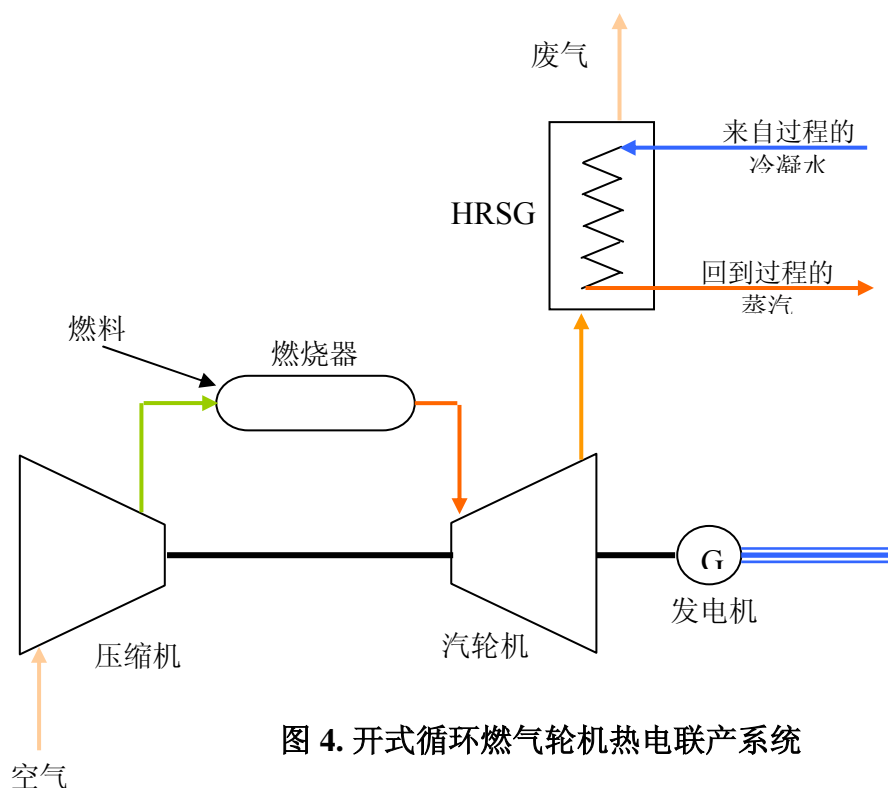


图 4. 开式循环燃气轮机热电联产系统

空气通过一个扩散器进入定压燃烧室，与喷入燃烧室的燃料进行燃烧。扩散器将空气的速度降低到燃烧器许可的数值。通过燃烧器的空气存在一个压力差，范围在 1.2%以

内。在与过量空气混合后，燃料发生燃烧。由燃烧器排出的废气温度很高，氧气浓度达 15-16%。开式布雷顿循环的最高温度就出现在这个点上；温度越高，循环效率就越高。温度的上限是由燃气轮机的材料所能承受的温度和冷却叶片的效率确定的。在当前的技术水平下，温度上限是 1300°C。

高温高压的废气进入燃气轮机，产生机械功，驱动压缩机和荷载(如发电机)。废气会使汽轮机的温度变得相当高(450-600°C)，很容易从这里进行高温热回收。热回收由单压或者双压热回收锅炉进行，后者回收热能的效率更高。

锅炉产生的蒸汽压力和温度都能很高，不仅可用于热力过程，还可以驱动蒸汽轮机，从而生产额外的电能。

2.2.2 闭式循环燃气轮机热电联产系统

在闭式循环系统中，工作流体(通常是氦气或空气)在一个闭合回路中循环。在进入汽轮机前，工作流体先被加热，在排出汽轮机后则被冷却，释放出有用的热能。因此，工作流体能够保持清洁，不会造成设备侵蚀或腐蚀。

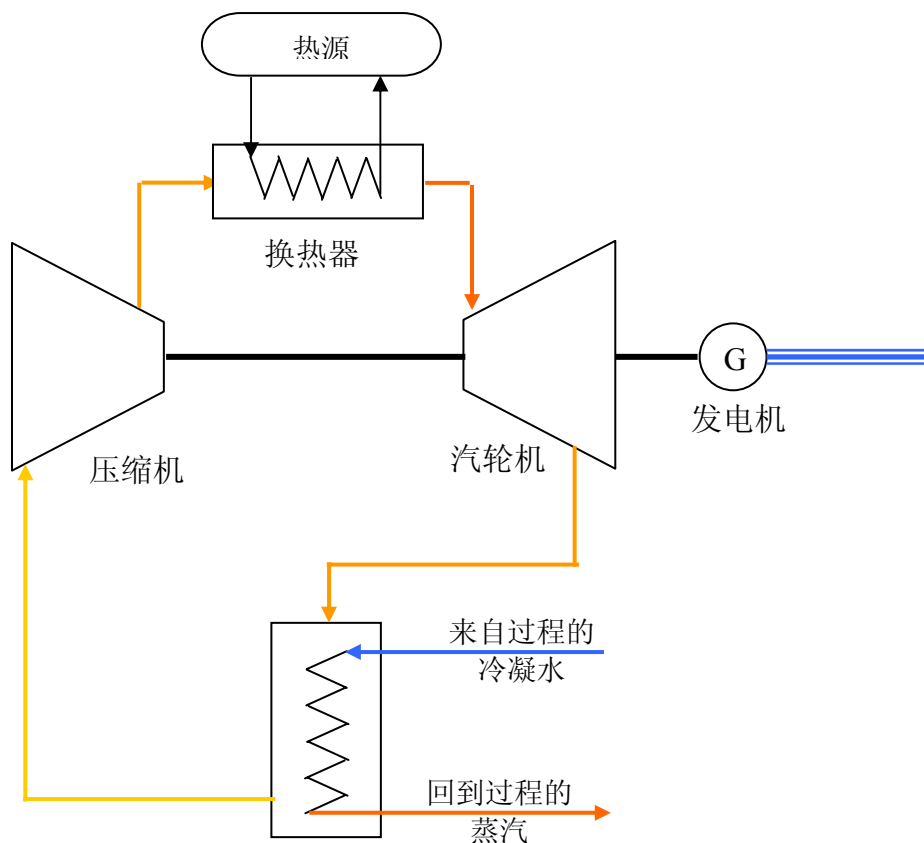


图 5: 闭式循环燃气轮机热电联产系统

热源可以来自任何燃料的外部燃烧，也可以来自核能或太阳能。

2.3 活塞式发动机热电联产系统

热能设备：热电联产技术

活塞式发动机很适合各种分布式发电应用，以及从事发电和热电联产的工业、商业和事业性设施。活塞式发动机启动迅速，跟踪负荷准确，有很好的部分负荷效率，而且通常可靠性都很高。在很多案例中，复合式活塞式发动机组能够进一步提高工厂总装机容量和系统有效性。活塞式发动机的电机效率比大小相当的燃气轮机要高，因此燃料方面的运行成本就比燃气轮机低。此外，活塞式发动机发电机组的初投资成本通常要比燃气轮机发电机组低相当于 3-5MW 装机容量的成本。活塞式发动机的维护成本通常要比大小相当的燃气轮机高，但其维护通常可以由电站内部员工承担或由当地服务机构提供。

活塞式发动机在分布式发电中还可以应用于备用机组，高峰调节，电网支护以及热电联产。热电联产需要热水、低压蒸汽或以废热为能源的吸热式冷却器。活塞式发动机还作为直接机械动力广泛应用于抽水、空气和气体压缩以及制冷/冷冻。

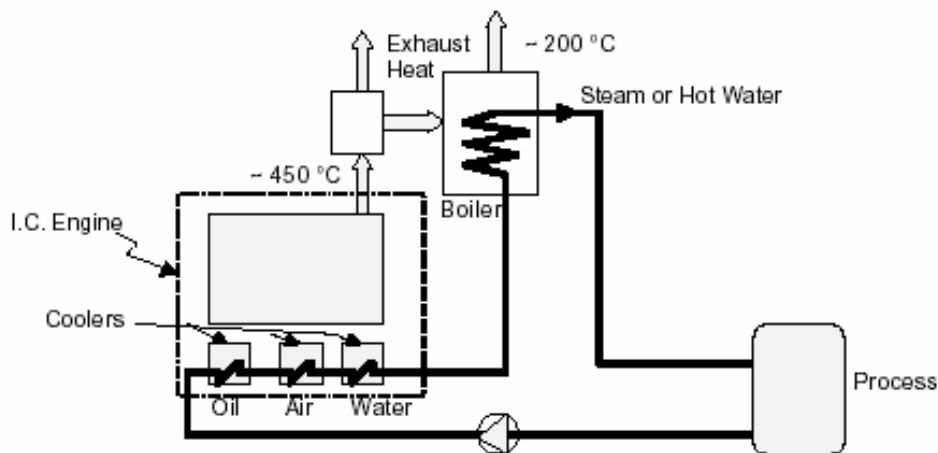


图 6: 活塞式发动机热电联产系统 (UNESCAP, 2000)

尽管活塞式发动机有望在各种分布式发电中更广泛地应用，但一直以来天然气 SI 发动机用于发电应用得最广泛的还是热电联产，而且此趋势应该还会继续。蕴涵在废气和冷却系统中的热能的有效利用提高了天然气发动机在现场发电应用中的经济性，这些能量通常相当于输入的燃料能量的 60%到 70%。

活塞式发动机有四个可用废热源：废气、气缸套冷却水、润滑油冷却水以及涡轮增压器冷却。废热通常以若说或低压蒸汽(<30 psig)的形式回收。高温废气可以产生中压水蒸气(压力 150psig 左右)，但是热废气所含的热能量仅占活塞式发动机排放的热能的一半左右。一些工业化的热电联产应用直接用发动机废气进行工艺烘干。通常，活塞式发动机热电联产系统产生的热水和低压蒸汽适用于低温工艺需要，场地加热，饮用水加热，以及驱动吸热式冷却器从而提供冷水、空调或制冷。

表1. 典型的热电联产性能参数 (数据取自：加利福尼亚能源委员会，1982)

热电联产机组的牵引机	标称范围 (电力)	发电热消费率 (kcal / kWh)	效率, %		
			电转化效率	热还原效率	热电联产总效率
小型活塞式发动机	10 – 500 kW	2650 - 6300	20-32	50	74-82
大型活塞式发动机	500 – 3000 kW	2400 - 3275	26-36	50	76-86
柴油发动机	10-3000 kW	2770 - 3775	23-38	50	73-88
小型燃气轮机	800-10000 kW	2770-3525	24-31	50	74-81
大型燃气轮机	10-20 MW	2770-3275	26-31	50	78-81
蒸汽轮机	10-100 MW	2520-5040	17-34	-	-

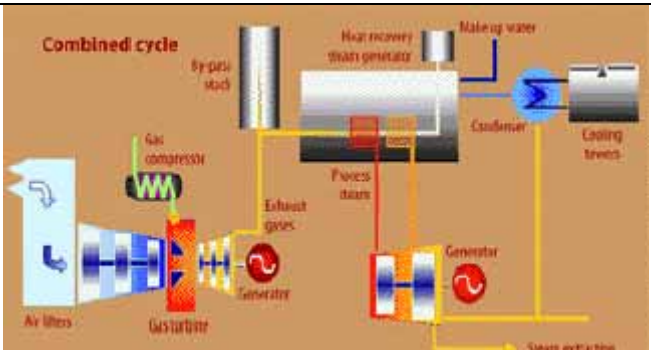
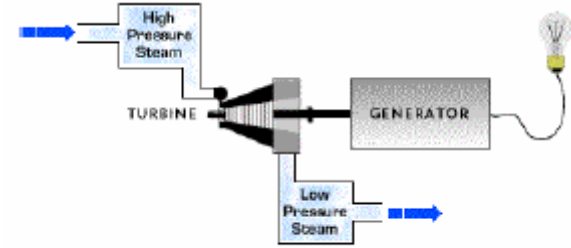
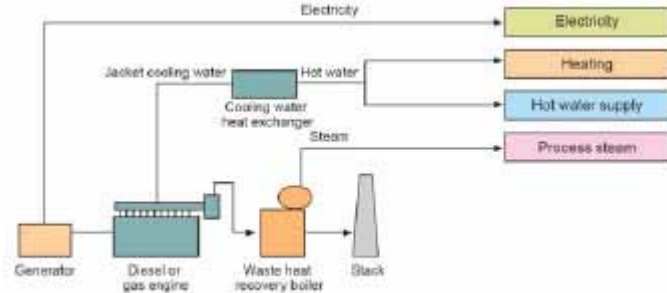
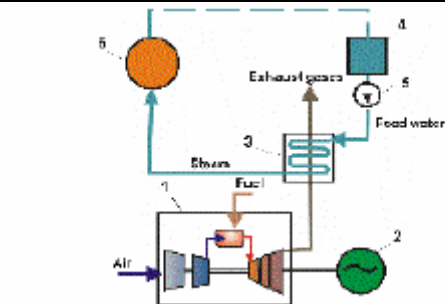
2.4 热电联产系统的其他分类方法

热电联产系统通常按能源利用的顺序和采用的运行流程图来分类。基于这个分类方法，热电联产系统可以分为前置循环和后置循环。

2.4.1 前置循环

在前置循环中，所供燃料首先用于发电，然后才产出热能，热能是该循环的副产品，用于满足工艺用热或其他热能需求。上限循环热电联产应用广泛，是最常见的热电联产方法。

表 2. 四种前置循环热电联产系统 (图片来自澳大利亚能源部)

<p>联合前置循环系统 首先由一台燃气轮机或柴油发动机产生电能或机械能，然后由一台废热回收锅炉产生蒸汽来驱动一台二级蒸汽轮机。</p>	
<p>蒸汽轮机前置循环系统 第二种类型的系统燃烧燃料(任何类型)产生高压蒸汽。高压蒸汽通过一台蒸汽轮机产生电能，排放的废蒸汽可以提供低压工艺用蒸汽。</p>	
<p>废热回收前置循环系统 这种类型的循环系统从发动机废气和/或套管冷却系统中回收废热，流入废热回收锅炉，在那里转换为工艺用蒸汽或热水，供进一步利用。</p>	
<p>燃气轮机前置循环系统 天然气燃气轮机驱动发电机，其废气进入废热回收锅炉，产生工艺用蒸汽和热量。</p>	

2.4.2 后置循环

在一个后置循环中，原燃料产生的高温热能和从工艺过程中释放的热能通过一台废热回收锅炉和一台汽轮发电机进行发电。后置循环适合制造性的工艺过程，这样的工艺过程需要窑炉提供高温热能，也会以相当高的温度释放热能。后置循环典型的应用领域有水泥、钢铁、陶瓷、石油和天然气化工工业。后置循环的工厂远没有前置循环的工厂普遍。图7是一个在窑炉中燃烧燃料来生产合成金红石的后置循环。从窑炉中排出的废气在被利用在一个锅炉中产生蒸汽，驱动汽轮机进行发电。

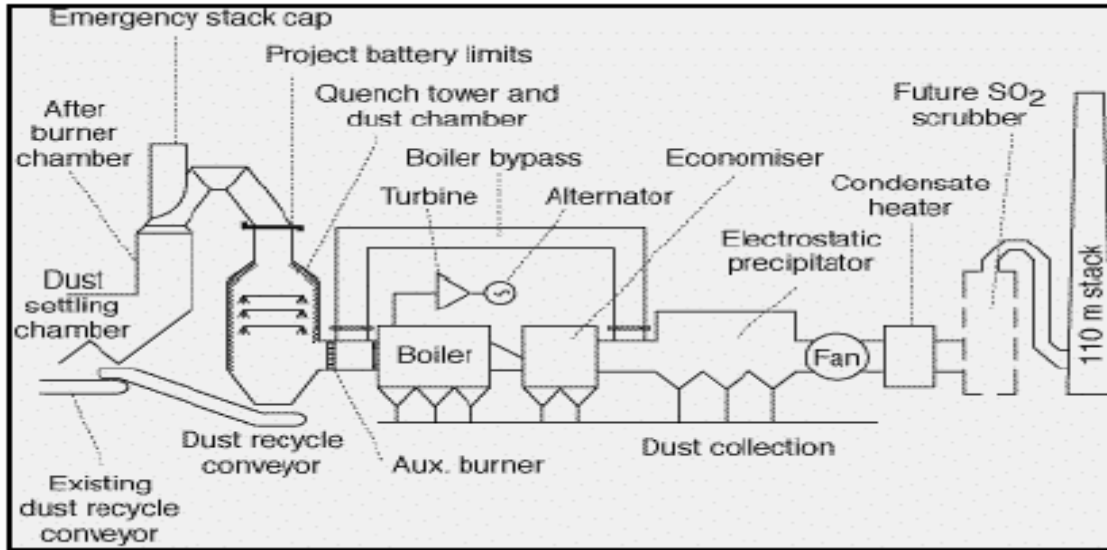


图 7.后置循环热电联产系统 (能源效率局, 2004)

3. 热电联产系统评估

3.1 性能术语和定义

电站总效率

- 电站总热消费率 (kCal/kWh)

$$\frac{Ms \times (hs - hw)}{\text{功率输出 (kW)}}$$

其中,

- Ms = 质量流量 (kg/hr)
- hs = 蒸汽的焓 (kCal/kg)
- hw = 给水的焓 (kCal/kg)

- 电站总燃料消耗率 (kg/kWh)

$$\frac{\text{燃料消耗* (kg/hr)}}{\text{功率输出 (kW)}}$$
- 汽轮机和蒸汽总的燃料消耗

蒸汽轮机性能

- 蒸汽轮机效率 (%):

$$\frac{\text{经过汽轮机的实际焓降 (kCal/kg)}}{\text{经过汽轮机的等熵焓降 (kCal/kg)}} \times 100$$

燃气轮机性能

热能设备：热电联产技术

- 燃气轮机总效率 (%) (燃气轮机和压缩机):

$$\frac{\text{功率输出 (kW)} \times 860}{\text{汽轮机燃料消耗(kg/hr)} \times \text{燃料总热值(kCal/kg)}} \times 100$$

废热回收蒸汽发生器(hrsg)性能

- 废热回收蒸汽发生器效率 (%):

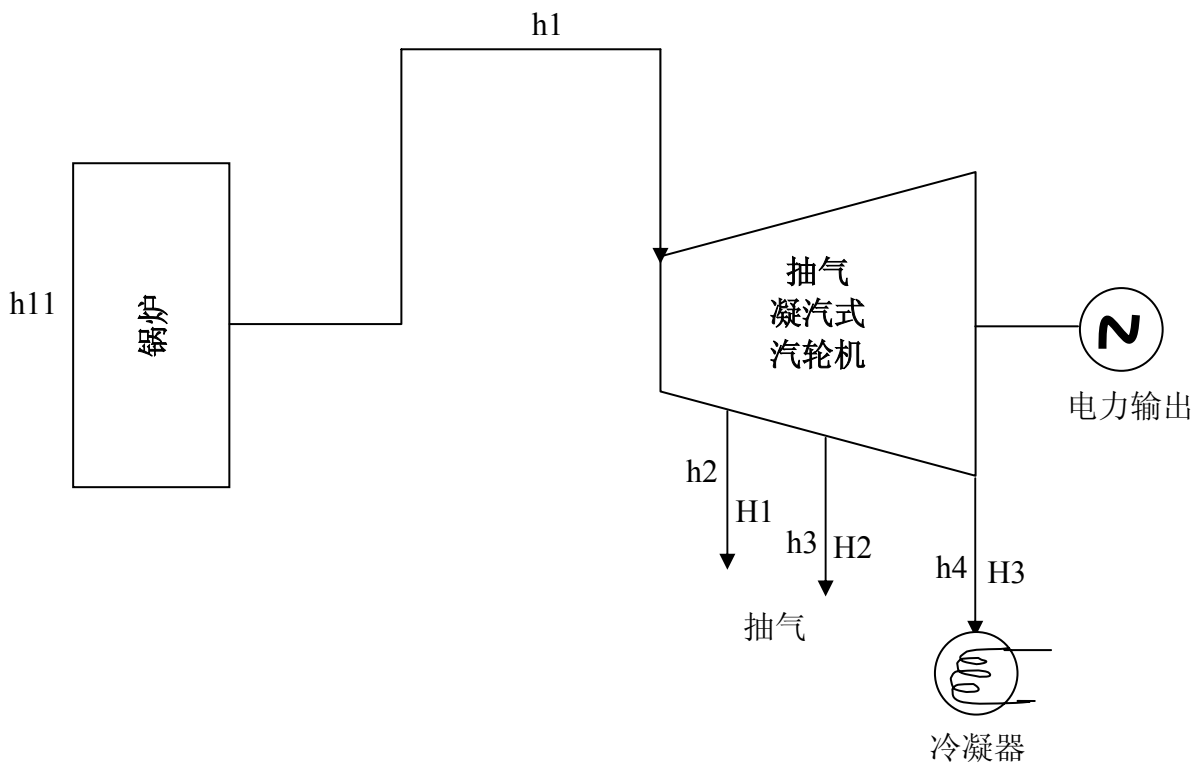
$$\frac{M_s \times (h_s - h_w)}{[M_f \times Cp (t_{in} - t_{out})] + [M_{aux} \times \text{燃料总热值 (kCal/kg)}]} \times 100$$

其中,

- M_s = 产生蒸汽量 (kg/hr)
- h_s = 蒸汽的焓 (kCal/kg)
- h_w = 给水的焓 (kCal/kg)
- M_f = 烟气的质量流量(kg/hr)
- t_{in} = 烟气的入口温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- t_{out} = 烟气的出口温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- M_{aux} = 辅助燃料消耗量 (kg/hr)

3.2 蒸汽轮机热电联产系统的计算

下图说明了计算业内最常见的热电联产系统，蒸汽轮机热电联产系统性能的四个步骤。注意：尽管此方法适用于所有的热电联产系统，但以下公式仅适用于蒸汽轮机热电联产系统。



步骤1：计算从汽轮机的各级抽气点实际抽出的热量

汽轮机入口处蒸汽的焓	:	h_1 , kCal/kg
1级抽气点蒸汽的焓	:	h_2 , kCal/kg
2级抽气点蒸汽的焓	:	h_3 , kCal/kg
冷凝器内蒸汽的焓	:	h_4^* , kCal/kg

* 在冷凝阶段，由于蒸汽湿度较大，其焓值不能认为和饱和蒸汽的焓相等。蒸汽的干燥度通常在0.88 – 0.92。这个干燥度值可以作为第一近似值，估算最后一个级的热降。不过，我们建议根据汽轮机总效率和其他级的效率来计算最后一级的效率。

从入口到1级抽气点抽出的热量(h_5):

$$h_5 = (h_1 - h_2) \text{ kCal/kg}$$

从1级抽气点到2级抽气点抽出的热量(h_6):

$$h_6 = (h_2 - h_3) \text{ kCal/kg}$$

从2级抽气点到冷凝器抽出的热量(h_7):

$$h_7 = (h_3 - h_4) \text{ kCal/kg}$$

步骤2：估算抽出热量的理论值

通过莫里尔图(H-φ图)估算步骤1中提到的状态下抽出热量的理论值。具体步骤如下：

- 根据蒸汽压力和温度，在莫里尔图上标绘出汽轮机入口状态。
- 由于汽轮机内的膨胀是一个绝热过程，熵是恒定的，因此，从入口点到冷凝状态绘制一条垂线(平行于 y 轴)。
- 读出抽气和冷凝压力曲线与绘出的垂线的交点处的焓。
- 计算出各级抽气点的理论热降。

1级抽气点后的理论焓	:	H1
2级抽气点后的理论焓	:	H2
冷凝器的理论焓	:	H3

从入口到1级抽气点抽出热量的理论值(h8)： $h_8 = h_1 - H_1$

从1级抽气点到2级抽气点抽出热量的理论值(h9)： $h_9 = H_1 - H_2$

从2级抽气点到冷凝器抽出热量的理论值(h10)： $h_{10} = H_2 - H_3$

步骤3：计算汽轮机效率

$$\text{第1阶段的效率} \left(\frac{h_5}{h_8} \right) = \left(\frac{\text{实际抽出热量}}{\text{理论抽出热量}} \right) = \left(\frac{h_1 - h_2}{h_1 - H_1} \right)$$

$$\text{第2阶段的效率} \left(\frac{h_6}{h_9} \right) = \left(\frac{\text{实际抽出热量}}{\text{理论抽出热量}} \right) = \left(\frac{h_2 - h_3}{H_1 - H_2} \right)$$

$$\text{冷凝阶段的效率} \left(\frac{h_7}{h_{10}} \right) = \left(\frac{\text{实际抽出热量}}{\text{理论抽出热量}} \right) = \left(\frac{h_3 - h_4}{H_2 - H_3} \right)$$

步骤4：计算电站热消费率

$$\text{热消费率(kcal/kWh)} = \frac{M \times (h_1 - h_{11})}{P}$$

其中，

M = 蒸汽质量流量 (kg/hr)

h_1 = 入口蒸汽焓 (kCal/kg)

h_{11} = 给水焓 (kCal/kg)

P = 发电量平均值 (kW)

4.提高能源效率的可能性

4.1 蒸汽轮机热电联产系统提高能源效率的可能性

下面从几个方面说明与热电联产有关的能源效率提高：

1. **锅炉：**请参考“锅炉和热流加热器”部分

2. **蒸汽轮机：**

a. 冷凝器真空度：

冷凝器真空度和回压是最重要的参数，因为偏离最佳值的一个微小的偏差也可能造成效率的很大变化。冷凝器真空度偏离最佳值的原因有很多，例如：

- 冷却水入口温度与设计值不符——这是冷凝器真空度变化最常见的原因，因为冷却水的温度受温度、湿度等天气状况影响很大。湿热的天气会造成冷却水温度升高，冷凝器真空度和汽轮机功率降低(结果造成热效率降低)。另一方面，凉爽干燥的天气状况则会带来相反的效果：
- 冷却水流速不是正确值；
- 冷凝管淤塞或堵塞；
- 空气漏进冷凝器。

b. 蒸汽温度和压力：

假如从入口到蒸汽轮机的蒸汽温度和压力状态与设计的最佳状态不同，汽轮机就可能不能以最高效率运行。

蒸汽状态的偏差可能是由于工厂设计(包括尺寸定位)的失误、操作不当或锅炉结垢造成的。

c. 部分负荷运行和起停：

发电机组在部分负荷下运行的效率可以通过对上述项目予以足够的注意而维持在靠近设计值的水平。但是，市场对发电机组运行负荷和周期的决定才是决定机组平均热效率的主要因素。同样，市场对电站开机和停机的决定对平均热效率也有影响，因为起动和停止系统都会造成能量损失。

3. **蒸汽分配和利用：**请参考“蒸汽分配和利用”部分

4.2 燃气轮机提高能源效率的可能性

燃气轮机热电联产系统的以下部分可以提高能源效率：

1. **空气压缩机：**请参考“压缩机和压缩空气系统”部分

2. **燃气轮机：**

热能设备：热电联产技术

- 燃气温度和压力：如果入口到燃气轮机的燃气温度和压力状态偏离设计的最佳状态，汽轮机则可能不能运行在最高效率下。燃气状态的偏差可能是由于电站设计(包括尺寸定位)的错误或不正确的电站操作造成的。
- 部分负荷运行和起停：发电机组在部分负荷下运行的效率可以通过对上述项目予以足够的注意而维持在靠近设计值的水平。但是，市场对发电机组运行负荷和周期的决定才是决定机组平均热效率的主要因素。同样，市场对电站开机和停机的决定对平均热效率也有影响，因为起动和停止系统都会造成能量损失。
- 燃烧器排出的热气温度。热气温度升高通常会使功率输出提高。
- 废气的温度。废气的温度降低通常会使功率输出提高。
- 通过燃气轮机的质量流量。通常，质量流量提高会使功率输出提高。
- 通过废气消音器、管道和烟囱的压力下降。压力损失的下降会提高功率输出。
- 提高空压机入口或出口的空气压力。空气压力的提高会提高功率输出。

3. 废热回收蒸汽发电机：请参考“废热回收”部分

5.方案清单

本部分包括热电联产最重要的能源效率方案。

- 用废气加热来自压缩机的空气(主要在天气较冷的时候使用);
- 将压缩机分为两部分，并在两个部分之间对空气进行冷却;
- 将汽轮机分为两部分，并通过使气体通过两部分之间的另一台燃烧器对气体进行重新加热;
- 冷却入口空气。此方法通常在天气炎热的时候使用。
- 降低入口空气的湿度;
- 提高空压机出口的空气压力;
- 向燃烧器或汽轮机中注入蒸汽或水;
- 定期冲洗或清洁空压机和汽轮机叶片上的污垢;
- 以上方法的综合应用。

6. 工作表

本部分包括以下工作表：

- 蒸汽轮机热电联产系统性能；
- 燃气轮机热电联产系统性能。

工作表 1：蒸汽轮机热电联产系统性能

编号	参 数	单 位	数 值
1.	电力生产 (P)	kW	
2.	蒸汽生产 (M)	TPH	
3.	蒸汽压力	kg/cm ² (g)	
4.	蒸汽温度	°C	
5.	蒸汽焓 (hs)	kCal/kg	
6.	给水温度	°C	
7.	给水焓 (h4)	kCal/kg	
8.	抽气点数量	Nos	
9.	1 号抽气点状态		
	压力	kg/cm ² (g)	
	温度	°C	
	实际焓 (h1)	kCal/kg	
	理论焓 (H1)	kCal/kg	
10.	2 号抽气点状态		
	压力	kg/cm ² (g)	
	温度	°C	
	实际焓 (h2)	kCal/kg	
	理论焓 (H2)	kCal/kg	
11.	冷凝状态		
	压力	kg/cm ² (g)	
	温度	°C	
	实际焓 (h3)	kCal/kg	
	理论焓 (H3)	kCal/kg	
12.	第 1 阶段效率 $\{(h1 - h2) / (h1 - H1)\}$	%	
13.	第 2 阶段效率 $\{(h2 - h3) / (H1 - H2)\}$	%	
14.	冷凝阶段效率 $\{(h3 - h4) / (H2 - H3)\}$	%	
15.	电站热消费率 $[M \times (hs - h4)] / (P \times 1000)$	KCal/kWh	

工作表 2：燃气轮机热电联产性能

序号	参 数	单 位	数 值
1.	电力生产 (P)	kW	
2.	燃气轮机燃料投入 (F)	kg/hr	
3.	燃料总热值(GCV)	kCal/kg	
4.	HRSG (废热回收蒸汽发电机)		
	蒸汽产量 (Ms)	kg/hr	
	蒸汽焓 (hs)	kCal/kg	
	给水焓 (hw)	kCal/kg	
	烟气质量 (Mf)	kg/hr	
	烟气入口温度 (tin)	⁰ C	
	烟气出口温度 (tout)	⁰ C	
	辅助燃料消耗量 (Maux)	kg/hr	
	燃料 GCV	kCal/kg	
5.	燃气轮机效率 [P x 860 x 100] / [F x 燃料 GCV]	%	
6.	HRSG 效率 [Ms x (hs - hw) x 100] / {[Mf x Cp x (tin - tout)] + [Maux x 燃料 GCV]}	%	

热能设备：热电联产技术

7.参考文献

印度电力部，能源效率局：《热电工程中的能源效率问题》。2004

加利福尼亚能源委员会：《热电联产手册》。1982

澳大利亚昆士兰州政府能源部：

www.energy.qld.gov.au/infosite/steam_turbines.html,
www.energy.qld.gov.au/infosite/condensers_cooling_sys.html
www.energy.qld.gov.au/infosite/facts_influence_thermal.html

印度国家生产力委员会：《印度工业应用热电联产可行性评估》。2002

Polimeros, George. 《热电联产手册》，工业出版公司。

欧洲热电联产促进协会：www.cogen.org/

联合国亚太经济及社会理事会(UNESCAP)，环境与可持续发展分会。

第 1 部分：热电联产总览及其在亚洲的状况。摘自：《亚洲地区应用热电联产作为污染控制和能源效率方案指南》。2000。

<http://www.unescap.org/esd/energy/publications/detail.asp?id=759>

Copyright:

Copyright © United Nations Environment Programme (year 2006)

This publication may be reproduced in whole or in part and in any form for educational or non-profit purposes without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. UNEP would appreciate receiving a copy of any publication that uses this publication as a source. No use of this publication may be made for resale or any other commercial purpose whatsoever without prior permission from the United Nations Environment Programme.

版权声明:

本出版物可供任何形式的培训或非盈利活动全部或部分复制使用，无需经过版权所有者的特别许可，而只需在副本中注明出处即可。如需在其他出版物中引用本出版物中的内容，请向 UNEP 发送一份该出版物的副本。

未经联合国环境规划署的书面许可，禁止将此出版物用于转售或任何其他商业用途。

Disclaimer:

This energy equipment module was prepared as part of the project "Greenhouse Gas Emission Reduction from Industry in Asia and the Pacific" (GERIAP) by the National Productivity Council, India. While reasonable efforts have been made to ensure that the contents of this publication are factually correct and properly referenced, UNEP does not accept responsibility for the accuracy or completeness of the contents, and shall not be liable for any loss or damage that may be occasioned directly or indirectly through the use of, or reliance on, the contents of this publication, including its translation into other languages than English. This is the translated version from the chapter in English, and does not constitute an official United Nations publication.

免责声明:

该能源设备简介是“亚太地区工业温室气体排放削减计划”(GERIAP)的一部分，由印度国家生产力委员会编写。尽管 UNEP 为保证此出版物的内容的正确性做出了不懈的努力，但是 UNEP 不承担其内容的准确性和完整性的责任，对任何通过直接或间接使用或者依赖该出版物内容，包括其非英语译本，而遭受的损失或者伤害，UNEP 概不负责。本材料是英文原版的中文译本，不属于联合国的官方出版物。