

## 第3章 能源互联网中的网络元件

### 3.1 能源互联网的网络元件

#### 3.1.1 什么是能源互联网的网络元件？

能源互联网的网络元件，是指各个能源网络中用于能源传输、分配等功能的设备，以及耦合不同能源网络的能源形式转换设备。这些网络元件是能源互联网的物理基础，也是能源互联网得以安全、高效运行的实体依托。

在能量传输与分配方面，不同电压等级的输电线路、不同气压水平的输气管道、不同温度水平的供热管网，以及其他配套的网络元件，为各个能源网络提供了能源在物理空间上的转移功能；在能量转换方面，变压器、换流器、压缩机、电制气（Power to Gas, P2G）机组、热泵等网络元件提供了能源网络内部不同层级之间、不同形式之间，以及不同能源网络之间的能源转换、耦合功能，使得能源互联网的运行具有更大的灵活性。

本章主要讨论能源互联网中电力网络、供热网络和天然气网络的相关网络元件。



图 3-1 多样的网络元件构成能源互联网实体

#### 3.1.2 能源互联网的网络元件是如何分类的？

能源互联网的网络元件可从“归属网络”和“元件功能”两个维度进行划分。

从元件归属的网络主体角度来说，能源互联网的网络元件可划分为电网网络元件、热网网络元件和气网网络元件。电网的网络元件覆盖电网运行的输、变、配全过程，既提供能量安全输送的基本功能，也响应新时代对更高电能质量的要求，具体包含架空线、电力电缆、杆塔、变压器、电能路由器等元件；热网的网络元件则负责供热网络中水力调节与热力调节的可靠实现，以及热能在不同等级热网（一次网、二次网等）之间的中继转换，具体包含热水管道、蒸汽管道、阀门、水泵、换热器等元件；气网的网络元件支撑天然气网络从气井到用户终端的安全可靠供气，实现多压力等级供气，具体包含天然气管道、阀门、压缩机、缓冲罐等元件。

从元件提供的主要功能角度来说，能源互联网的网络元件可划分为输配网络元件、变换网络元件和耦合网络元件。输配网络元件是指那些主要提供能源输送与配给的网络元件，如架空线、电力电缆、热水管道、蒸汽管道、天然气管道等均属于该类；变换网络元件中的“变换”并非指代跨能源网络的能源形式变换，而是指同一能源网络内部实现不同层级、不同特征供能的网络元件，如变压器实现了电压等级的变换，换流器完成了不同电能形式的变换，换热器实现了热能在不同供热网络之间的传递，压缩机完成了气压等级的变换；那些完成不同能源形式变换的网络元件则称为耦合网络元件，具体包括热泵（电-热耦合）、燃气锅炉（热-气耦合）、电制气机组（电-气耦合）等元件。

下图提供了一些典型的网络元件在“归属网络”和“元件功能”两个维度构成的坐标系中的定位。

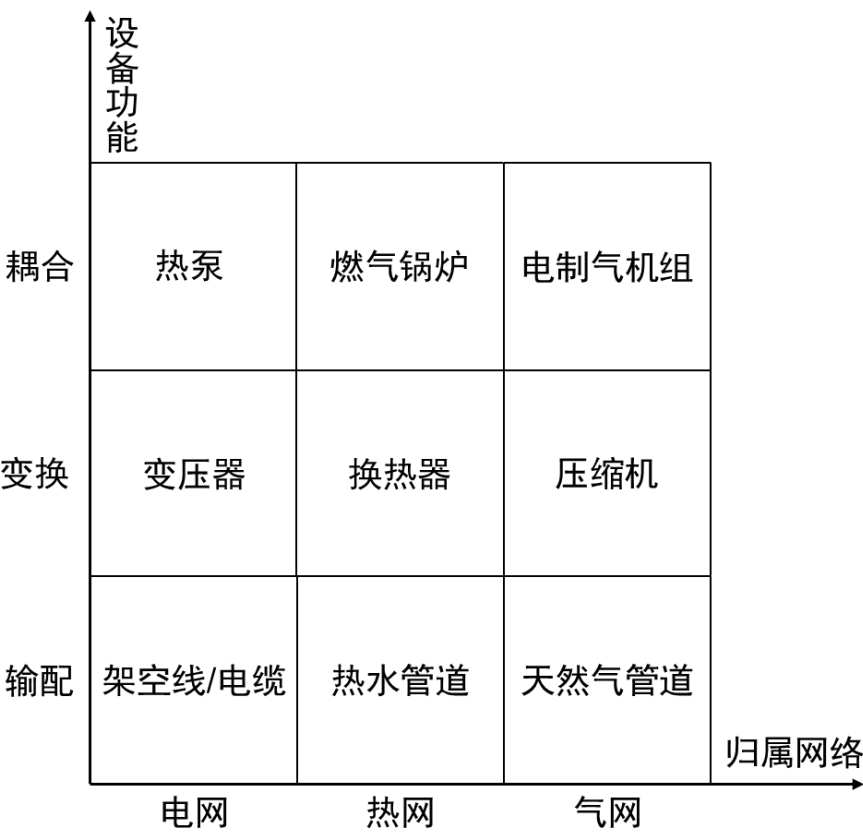


图 3-2 不同类别的网络元件举例

3.2 电力网络的网络元件

3.2.1 电力网络的网络元件有哪些？

电力网络的网络元件支撑其输电、变电、配电功能的安全、高效、优质实现。就电网的电能传输来说，主要有架空线路、电力杆塔、电力电缆、无线电能传输装置等元件发挥作用；就电网在电压等级、电能形式上的变换功能来说，变压器、换流器、电能路由器等元件不可或缺；至于电网在拓扑管理、潮流管理等方面的应用，其依赖于断路器、隔离开关、统一潮流控制器等元件。

本节对以上网络元件进行简要的介绍。

1) 架空线路与杆塔

架空线路是最常见的电能输送元件，覆盖了从 380V 到 1000kV 的所有电压等级，这主要得益于其架设、维修方便且成本低廉的特点。但是，架空线路通常直接暴露于野外环境，所以一方面易受到环境与气象等因素影响而发生诸如倒塔、断线、短路等故障，另一方面对周边环境也存在电磁干扰、噪声干扰等损害。此外，架空线路的输电走廊一般会占用较多土地面积。综合上述优缺点，架空线路通常用于野外环境的远距离电能输送，而在城市集中供电等场合中的应用日渐式微。

杆塔是用来保护、支撑架空线路的网络元件，按照材料的不同可分为金属杆塔、水泥杆塔和木制杆塔；按照功能的不同可分为直线杆塔、耐张杆塔、转角杆塔、终端杆塔、换位杆塔和跨越杆塔。



图 3-3 不同类型的架空线路与杆塔

## 2) 电力电缆

电力电缆是区别于架空线路的另一种有线电能传输方式。电力电缆与架空线路的最大区别在于，电力电缆的导电线芯外层有绝缘层（防止漏电）和保护层（防止绝缘层受伤、受潮）覆裹，从而使其可安置于地下、海底等更加广泛的场景，进而获得架设隐蔽、整洁美观、故障率小等优点。但是，绝缘层与保护层的造价相对高昂，尤其是高压线路的绝缘成本高居不下，使得电力电缆的应用目前仍局限于城市供电、海底供电等特殊场合。在海底供电应用中，电力电缆的架设、维修极其不便，这对电力电缆的可靠性提出了很高的要求。

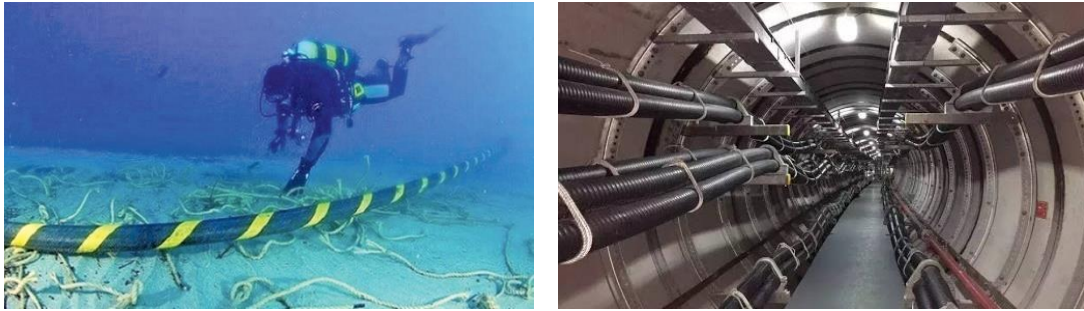


图 3-4 不同类型的电缆：海底电缆与地下电缆

### 3) 无线电能传输装置

以架空线路和电力电缆为代表的有线电能传输技术具有成本低廉和技术成熟的优势，在目前的电网中得到了极其普遍的应用。但随着能源互联网中移动用能的需求日益丰富，有线电能传输在移动供能上稍显力有不逮，更遑论体内、深空等极特殊的应用场景。在此背景下，无线电能传输（Wireless Power Transfer, WPT）技术应运而生，掀起了“能量 WiFi”和“移动能源互联网”的概念热潮。

基于磁感应、微波辐射等原理，无线电能传输实现了电能在空中的定向传输，可用于电动汽车、电子器官等场景的非接触式供电。作为该技术的重要落地场景，电动汽车的无线充电公路已在中国雄安、韩国龟尾等城市已经开展相关的工程试验。受限于技术的发展水平，无线电能传输目前仍面临传输功率较小、传输距离较近的技术限制，大部分项目仍处于概念阶段。



图 3-5 电动汽车的无线充电公路

### 4) 变压器

变压器是一种以线圈间的电磁感应为工作原理的静止电器，实现一种电压等级的交流电能向另一种电压等级的同频率交流电能的转换。变压器的组成主要包括铁心、一次绕组、二次绕组和相应的配套设施（如绝缘套管、油箱等）。其中，铁心提供磁通回路，减少漏磁的发生从而提高转换效率；一次绕组和二次绕组分别为两种电压等级的电能流通提供回路；其他配套设施则主要负责变压器的正常、安全工作，提供散热、绝缘、保护、检测等功能。

变压器的分类规则颇为复杂，按照相数的不同可分为三相变压器（通常大容



量)和单相变压器(通常小容量);按照绕组的不同可分为双绕组变压器、三绕组变压器和自耦变压器;按照冷却介质的不同可分为干式变压器、油浸式变压器和充气式变压器;按照铁芯种类的不同可分为芯式变压器、壳式变压器、非晶合金变压器等。除此之外,还有用途、冷却方式、调压方式等分类维度,读者可自行查阅资料。



图 3-6 不同类型的电力变压器

### 5) 换流器

换流器是实现电能与交流与直流之间形式转换的一类网络元件,其以晶闸管、绝缘栅型双极晶体管等电力电子开关器件为最小单元,组成换流桥模块,再将若干换流桥模块按照一定的拓扑关系相连接得到。换流器元件在特定的控制逻辑下,可实现直流向交流或交流向直流的变换。特别地,将实现直流向交流的换流器称为逆变器,将交流向直流的换流器称为整流器。根据直流侧电源类型的不同,换流器还可分为电流源型换流器和电压源型换流器。

换流器元件是直流输电技术不可或缺的核心网络元件。



图 3-7 换流器阀厅

### 6) 电能路由器

在能源互联网中,风电、光伏等新能源发电大比例接入,其间歇性与波动性给电网安全运行造成了威胁。此时,电能路由器,一种实现电力能源接入功能和电力能流路由功能的网络元件应运而生。

电能路由器是一种由全控型电力电子开关器件和高频变压器构成的电磁能量变换装置,集成了电力电子变换技术与信息技术,在传统变压器的电压等级变

换和电气连接隔离的基础功能之外，进一步扩展了新能源可靠接入、电能最优路由、谐波污染治理、电能形式变换、无功电压调控等功能，实现了不同类型网络元件的即插即用，助力能源互联网从安全运行迈向经济运行与高质量运行。



图 3-8 电能路由器产品

#### 7) 断路器与隔离开关

断路器和隔离开关都是电力网络中的开关元件，用于控制相连线路或机组等元件的接入状态。两者的区别在于，断路器具有灭弧装置，可实现正常电流、短路电流的安全切断，按照灭弧方式的不同主要有真空断路器和气体断路器两类；隔离开关不具有灭弧装置，只适用于诸如检修倒闸等不带电作业，且通常为手动操作。这两种电力网络元件对于电网拓扑管理具有重要意义。

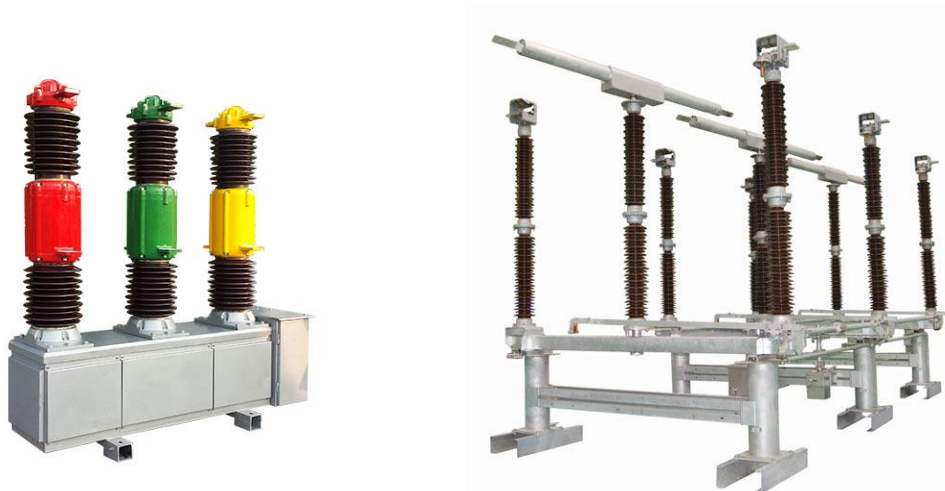


图 3-9 断路器与隔离开关

#### 8) 统一潮流控制器

统一潮流控制器（Unified Power Flow Controller, UPFC）是一种基于电力电子技术的柔性交流输电装置，其最大特点是可同时对电网的有功潮流、无功潮流和母线电压进行独立控制，通过对系统潮流的灵活控制，实现改善系统稳定性与提高网络传输容量的功能。在组成上，UPFC 是一系列网络元件的集成，包括变压器、换流器等，通过中央控制器的特定逻辑，实现不同子模块的协调配合，达到需要的潮流控制效果。

### 3.2.2 为什么要把高压架空线路一分为多？

若有留心观察野外的架空线路，就会发现输电线并非“一根一根”地挂在杆塔上，而是“一捆一捆”地悬挂于杆塔上，尤其是那些高大的杆塔，悬挂的“一捆”电线中导线数量越多。这种特殊设计的输电线称为分裂导线，其目的是通过改善线路周围的电磁场分布来实现线路等效截面积的增大。更大的等效截面积，意味着线路在相同材料、相同用量下具有更大的电纳（或者说，更小的电抗），从而减少线路上的电晕损耗，带来更大的线路传输容量。

分裂导线的分裂数与线路的输电电压等级呈正相关关系。通常，220kV 的线路为二分裂导线，500kV 的线路为四分裂导线，750kV 的线路为六分裂导线，1000kV 的特高压线路（目前我国最高的电压等级）甚至达到了八分裂导线。



图 3-10 四分裂导线

### 3.2.3 架空线路和电力电缆是如何分析的？

尽管架空线路和电力电缆在形态、特性上各不相同，但是它们在电力网络分析中均可用 T 型或  $\pi$  型等值电路模型进行分析。因为  $\pi$  型等值电路模型相比 T 型等值电路模型可少引入一个节点，从而减小电力网络计算规模，所以  $\pi$  型等值模型在实际分析中更为常用。

建立线路的  $\pi$  型等值模型过程如下：首先根据导线的材料、尺寸等参数或者进行外特性参数实验测算出导线的分布参数；然后依据分布参数建立网络的二端口方程；再依据二端口方程建立图 3-11 所示的二端口等效网络，并得到线路阻抗和对地导纳的集中参数。具体的推导过程可参考电力系统分析方面的书籍，限于篇幅这里不再展开。

在  $\pi$  型等值电路模型中，沿线路传输方向的阻抗反映了电能传输由于电流的热效应引起的有功损耗和载流导线周围的磁场效应；首末端的对地导纳反映了沿绝缘方向的泄漏电流、线路周围空气电离导致的电晕效应引起的有功损耗和线路中相与相之间、相与地之间的分布电容。

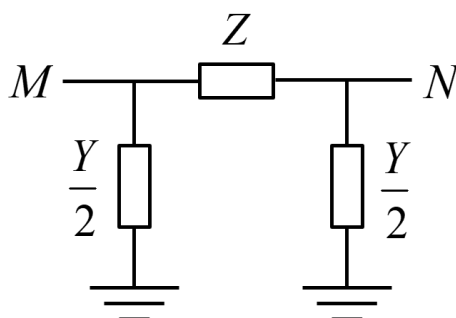




图 3-11 架空线路、电力电缆的  $\pi$  型等值电路

### 3.2.4 电能如何“隔空”传送？

为了实现无线电能传输，可采取的办法包括磁感应耦合方式、磁耦合谐振方式、电场耦合方式、微波辐射方式、超声波方式和激光方式。在上述这些不同的无线电能传输技术中，又数磁感应耦合方式、磁耦合谐振方式、微波辐射方式和激光方式的研究最为广泛。

就磁感应耦合式无线电能传输来说，它首先将来自电网的工频交流经整流、逆变转换为高频交流，并通入可分离变压器的原边线圈，再经过电磁感应作用将能量输送到远处的副边线圈，最后使用电流调理电路得到负载所需的电能形式，如图 3-12 (a) 所示。

磁耦合谐振式无线电能传输的工作原理和磁感应耦合式较为相似，不同之处在于它得到的高频交流电是通过输入到发射线圈，并在磁耦合谐振作用下使发射线圈和接收线圈发生耦合谐振，从而实现电能的隔空传送，如图 3-12 (b) 所示。

微波辐射式无线电能传输则是通过将交流电源整流后送入微波发生器，以微波能量的形式在发射天线聚焦并发射，进而在远距离的自由空间中定向传播，最终为接收天线接收后经整流滤波电路得到直流电源，如图 3-12 (c) 所示。

激光方式无线电能传输是以特定波长的激光为载体的。具体来说，它首先将电能经激光发射模块转换为激光束，再经由光学发射天线集中与整形后发射，在远距离的自由空间中传播后为光学接收天线接收并聚焦，并通过光-电转换器回到电能形式，最后由整流稳压器输出所需的直流电，如图 3-12 (d) 所示。

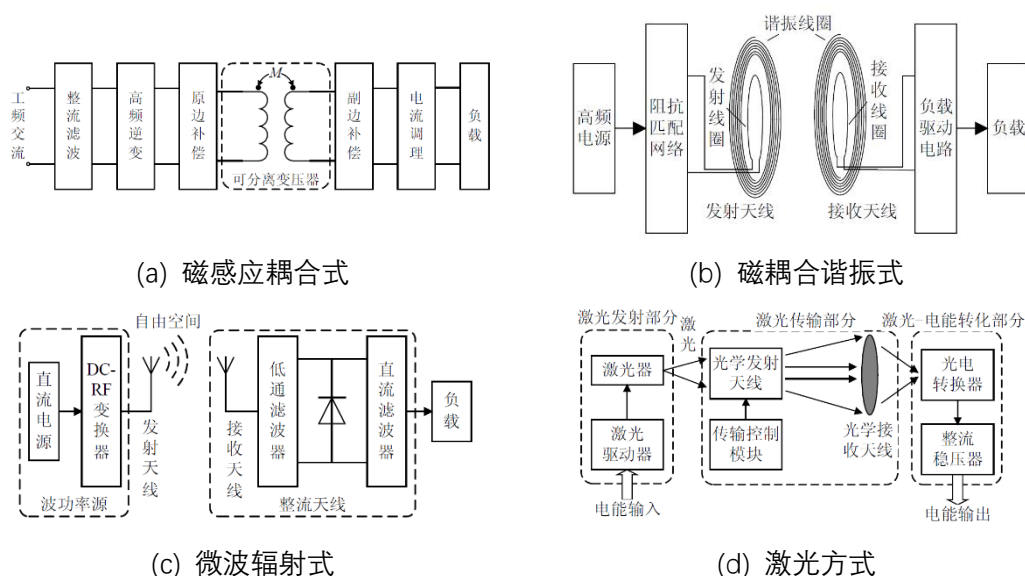


图 3-12 无线电能传输的原理示意图

### 3.2.5 换流器在能源互联网中扮演了什么角色？

能源互联网实现了可再生能源的广泛接入，在这个过程中换流器承担了诸多角色。

首先，以光伏为代表的可再生能源输出的电能形式为直流，为确保这些电能顺利输入传统的交流电网，换流器（逆变器）扮演了交直流接口的角色：将经过稳压处理的光伏直流电逆变成工频交流电并上网。

其次，以风电/水电为代表的可再生能源在地理分布上表现出极为显著的不平衡性，主要集中于我国的西北/西南地区，远离我国的负荷中心即东部地区。为了将这些体量巨大的可再生能源从西部输送到东部，目前主要的手段还是特高压交流输电，但是理论分析表明，在电能的远距离输送中，高压直流输电比高压交流输电更具经济性，所以未来在能源互联网中会



出现更多的直流输电线路。在这个过程中，线路始端的换流器（整流器）和线路末端的换流器（逆变器）通过电能形式的变换提升了电能输送的经济性。

最后，实现了大规模可再生能源接入的电网稳定性稍差，若采用传统的交流大电网模式易引起连锁故障。此时，背靠背的换流站（整流器、逆变器）可承担解耦两侧电网的功能，提升电网的稳定性。

### 3.2.6 电能路由器是如何发展至今的？

电能路由器是基于电力电子技术发展起来的，其电路实现随着电力电子技术的演变呈现出明显的阶段特征。

上个世纪 60 年代，在传统变压器基础上，通过在原边和副边增加电子开关来提高交流电频率，从而减小变压器体积，称为“电子变压器”。这样的高频变压器是电能路由器的雏形。上个世纪 80 年代，基于 Buck 电路的拓扑结构，出现了全部基于电子开关（即“全电子化”）而不依赖电磁感应的交流变压器，进一步减小了变压器体积。上个世纪末，全控型开关器件的广泛应用助推了双向 H 桥型结构控制变压器的原边和副边，进一步提高了变压器的变换能力和控制能力，实现了变压器“智能化”的趋势。到了本世纪初，又出现了“输入级采用二极管整流桥加 Boost 升压电路的级联结构，隔离级采用多绕组变压器结构，输出级采用模块并联结构”的三级式电力电子变压器，其拓扑与现在的电能路由器基本一致。时至今日，电能路由器又经十余年的发展，形成了“模块化”、“多端口”的特点，以更好地适应能源互联网对电能传输灵活性、多样性的更高要求。

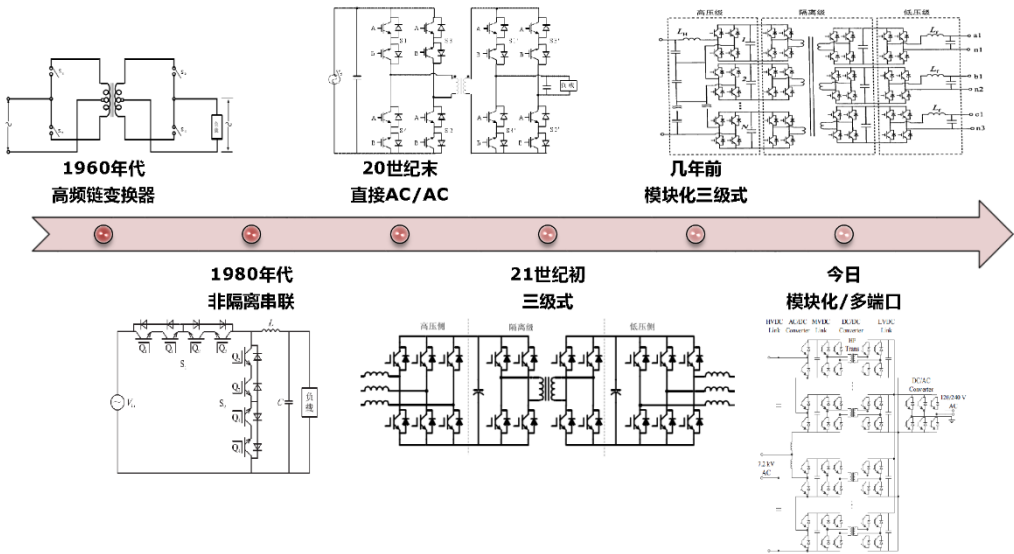


图 3-13 电能路由器的发展史

## 3.3 供热网络的网络元件

### 3.3.1 供热网络的网络元件有哪些？

供热网络的网络元件包含支撑热网的水力运行和热力运行两方面。在水力运行方面，需要热水管道、蒸汽管道、阀门、增压泵等网络元件发挥作用；在热力运行方面，热水管道、蒸汽管道、各类锅炉、热泵、热交换器等网络元件则不可或缺。

本节对以上网络元件进行简要的介绍。

### 1) 热水管道与蒸汽管道

管道之于供热网络，就如同输电线路之于电力网络，是热能进行输送的主要网络元件。根据供热工质的不同，管道可细分为热水管道（通常用于居民供热）和蒸汽管道（通常用于工业供热）。两者在组成上大同小异，主要构成均为管道主体、保温层和保护层：管道主体为工质流动提供通路，且耐受工质流动所必需的高工作压力；保温层采用热的不良导体，隔绝高温工质和低温环境，增强管道整体的绝热性能，减小输送损耗；保护层用于防护外界对管道可能的损伤，确保管道的安全运行。由于蒸汽在输送过程中存在冷凝现象，即一部分蒸汽会由于自然散热而冷凝成水滴。这些水滴夹杂在蒸汽流中高速流动，在管道转角处或阀门处由于流速突变而形成水击（又称水锤）现象，以致对管道或阀门造成破坏。为了避免这一伤害，蒸汽管道通常还会多增加一个疏水阀装置，用于及时把冷凝水排出管道外。

通常，供热网络中的管道会在地面上呈现出“门”字型的凸起，这是为了避免热胀冷缩造成的应力破坏管道而设计的。



图 3-14 热水管道与蒸汽管道

### 2) 阀门

供热网络中存在大量阀门用于不同的功能：1) 节流阀：调节供热网络中各个支路管道的流量与流速，为热力运行提供良好的水力运行条件，并避免流量过大、流速过快引起管道爆裂的事故；2) 截止阀：开启或关闭某条管道内的工质流动，常用于安全检修、紧急事故等场景；3) 止回阀：单向开启，仅允许工质按照设计方向流动，防止管道内的工质出现倒流的情况；4) 安全阀：监控其他网络元件中的工质压力，当其超过设定阈值时，自动泄压确保工质压力回到正常范围；5) 减压阀：通过阀瓣间隙的阻力达到减小工质压力的目的，常用于用户终端将高压工质恢复到正常压力；6) 疏水阀：专门用于排除蒸汽管道中的蒸汽冷凝水，避免水锤现象的出现。

在分析供热网络的水力工况时，需重点对节流阀进行建模分析。该类阀门在实际运行中存在不同的控制逻辑，比如定开度运行和定流量运行：前者阀门开度固定，流经流量越大，则阀门两侧的压力降越大；后者根据当前流量自动调节阀门开度，维持流经流量不变。

### 3) 增压泵

在供热管网中，工质的流动会由于管道阻力的作用出现压力的减小，而热源端的工作压力受限于管道安全约束存在一定上限，进而造成稍远离热源的用户端供热压力不足，导致供热质量的下降。为了解决这一问题，通常在压力不足处加设增压泵来增加工质流动的压力。增压泵和阀门共同构成供热网络水力调节的两大手段。

增压泵在实际运行中也存在不同的控制逻辑，比如定转速运行和定压差运行：前者电机转速固定，流经流量越大，增压泵能提供的压差增量越小；后者根据当前增压泵两侧的压差自动调节电机转速，维持两侧压差不变。

### 4) 锅炉

锅炉是一类将燃料化学能或电能转换为热能的热网网络元件，按照能量来源类型的不同可分为燃煤锅炉、燃气锅炉、电锅炉等。其中，燃煤锅炉凭借燃料易获得且成本低廉的特点获得了极为广泛的使用，但也面临效率不高、污染较大、响应较慢的局限；因为天然气相较燃煤更易充分燃烧，且无污染物排放的问题，所以燃气锅炉更加高效、更加清洁，但代价是

燃料成本较高；电锅炉利用导体通电产生的热效应进行制热，具有效率高、响应快、灵活性强等优点，但是其使用成本比燃气锅炉更高，给推广利用带来了巨大的挑战。

在能源互联网语境下，燃气锅炉、电锅炉分别将供热网络与天然气网络、电力网络耦合，额外带来了多能互补的灵活性优势。比如，极寒天气下又遇到用电高峰，燃气锅炉可以起到电网调峰的作用；深夜用电低谷又遇到风电大发，电锅炉可以起到电网填谷的作用。

需要指出的是，锅炉元件本质上是将高品位的能量（电能、化学能）转换为了低品位的能量（热能），这决定了锅炉元件只能在小规模范围内起到灵活性调节的供能，无法用于大规模的供热场景。

#### 5) 热泵

热泵是一种利用逆循环方式迫使热量从低温物体流向高温物体的热网网络元件，可以实现仅消耗少量的逆循环净功而产生较大的供热量。按照低温热源的不同，热泵元件可分为空气源热泵、水源热泵、地源热泵等类型。

热泵本质上是 will 低品位的热能收集用以供热，所以相较锅炉元件具有更高的能量输出输入比，或称能效比（COP，coefficient of performance）。理论上，锅炉元件的能效比一定小于 1，这是由能量守恒定律决定的；而热泵元件凭借第三方的低品位热能来源，可以达到远超过 1 的能效比。因此，热泵是一种兼具高效率优势与灵活性优势的理想供热元件，但是其高昂的造价与维护成本阻碍了大范围的推广普及。

除了供热目的，热泵元件还可逆向工作用于制冷。

#### 6) 热交换器

热交换器是一类实现热能在两种流体工质间转移的热网网络元件，其基本原理是热量从高温物体向低温物体的自发传递。

按照换热工质流向的不同，热交换器可分为顺流式热交换器、对流式热交换器（又称逆流式热交换器）、横流式热交换器以及混合式热交换器。其中，对流式热交换器凭借相对较高的效率得到了较为广泛的应用。

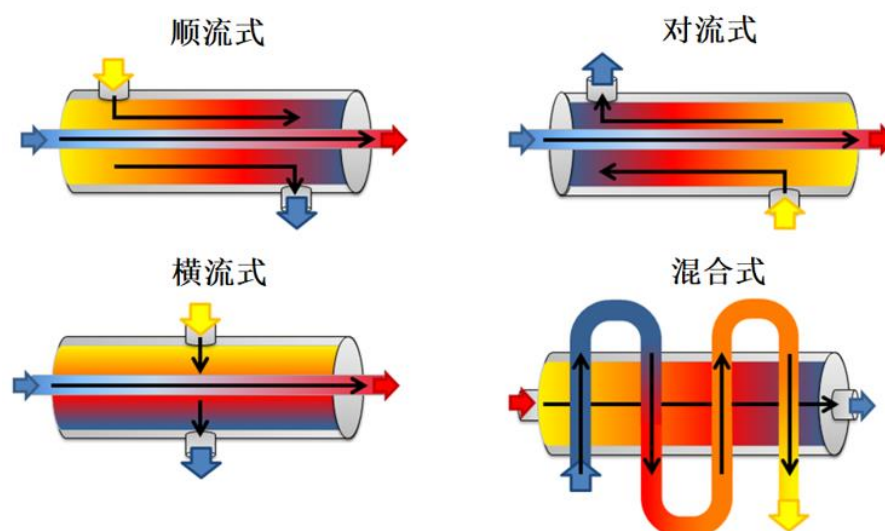


图 3-15 不同工质流向的换热器

值得注意的是，热交换器是一种基于功能的统称。在供热网络的实际应用中，热交换器又可以按照使用场合的不同具体划分为：1) 冷却器：在无相变的情况下冷却目标工质；2) 冷凝器：在有相变的情况下冷却目标工质；3) 加热器：在无相变的情况下加热目标工质；4) 再沸器：在有相变的情况下加热目标工质；5) 余热锅炉：回收烟气余热并加热冷凝水产生蒸汽。



### 3.3.2 热泵如何使热量“倒流”？

热泵能够使能量“倒流”的奥秘在于热量的逆循环过程。以热泵的制热过程为例，其工作原理如下图所示。

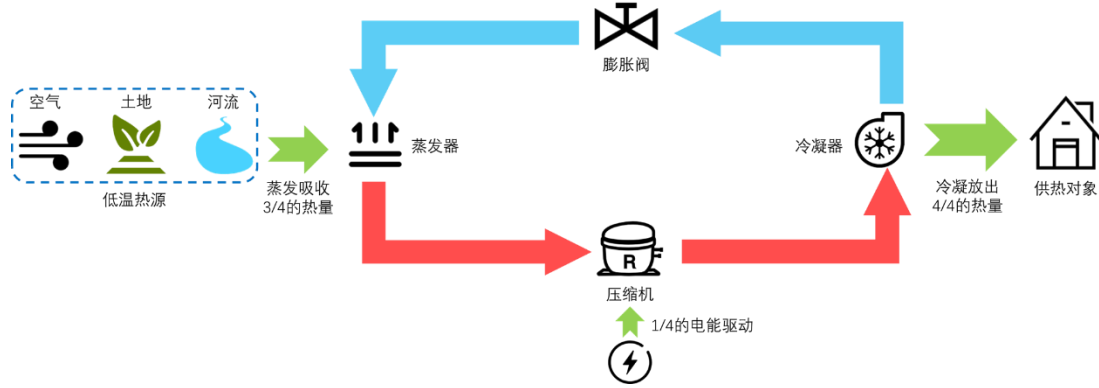


图 3-16 热泵工作原理示意图

首先，参与逆循环的液态载热工质在膨胀阀中完成液态到气态的相变，从而蒸汽吸热，吸收环境中低温热源的低品位热量；然后，气态载热工质在电驱动的压缩机中完成气态到液态的相变，从而冷凝放热，向供热对象放出大量高品位热量。

在这一过程中，冷凝器释放的热量既有来自于压缩机做功的部分，也有来自环境低温热源的部分，从而实现热量产生大于电能输入的效果，达到超过 1 的能效比。

### 3.3.3 热水管道和蒸汽管道是怎么分析的？

在对供热网络的管道元件进行分析时，通常将其中的工质流动简化为一维、单相流动。考虑到蒸汽是一种可压缩流体，而热水则是一种不可压缩流体，所以热水管道的分析可视为蒸汽管道分析的一种特例。

无论是蒸汽还是热水，其管道中的一维、单相流动过程均包含相互耦合的水力过程和热力过程，其中水力过程可以由质量守恒方程(3-1)和动量守恒方程(3-2)描述，热力过程可以由能量守恒方程(3-3)描述。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0 \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda \rho v^2}{2D} + \rho g \sin \theta = 0 \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho v^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho v h}{\partial x} + \frac{4K(T - T_0)}{D} + \rho g v \sin \theta = 0 \quad (3-3)$$

式中： $\rho$  是流体工质的密度， $v$  是流体工质的流速， $p$  是流体工质的压强， $u$  是流体工质的内能， $h$  是流体工质的焓值， $T$  是流体工质的温度， $\lambda$  是管道的摩擦系数， $D$  是管道的内径， $K$  是管道的散热系数， $\theta$  是管道的倾角， $T_0$  是环境温度， $g$  是重力加速度， $x$  和  $t$  分别表示空间与时间。

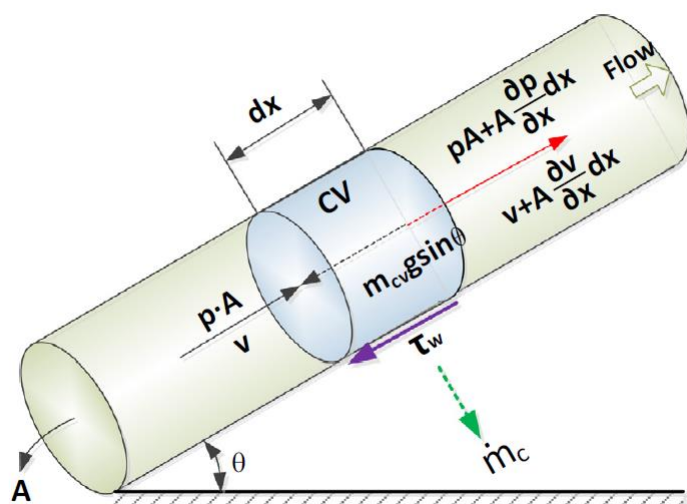


图 3-17 热网管道中的一维、单相流动  
考虑到热水是一种不可压缩流体，所以刻画其水力过程的方程还包括

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (3-4)$$

由上述管道动态模型消去关于时间的偏导项，即可退化出供热网络管道元件的稳态模型。

### 3.3.4 热交换器是如何分析的？

以对流式热交换器为例，在稳态工况下其换热量与两种工质的出入口温度满足换热方程 (3-5)。

$$Q = UA \frac{(T_{a1} - T_{b2}) - (T_{a2} - T_{b1})}{\ln\left(\frac{T_{a1} - T_{b2}}{T_{a2} - T_{b1}}\right)} \quad (3-5)$$

式中： $Q$ 是热交换器内部从供热工质向受热工质传递的热量， $U$ 是热交换器的总换热系数，取决于热交换器媒质的材料、尺寸等因素， $A$ 是热交换器的换热面积， $T_{a1}$ 和 $T_{a2}$ 是供热工质的入口温度和出口温度， $T_{b1}$ 和 $T_{b2}$ 是受热工质的入口温度和出口温度。

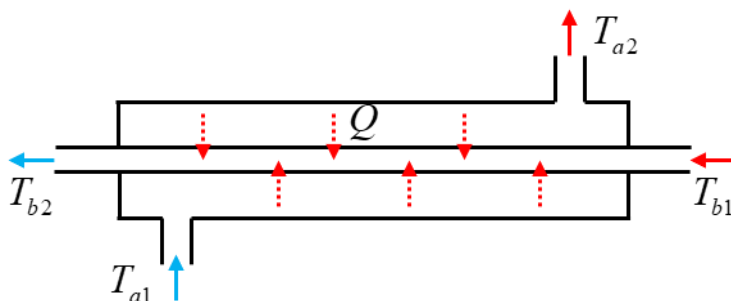


图 3-18 对流式热交换器的示意图  
另一方面，由供热工质和受热工质的能量守恒方程，又可以得到

$$Q = c_a m_a (T_{a2} - T_{a1}) \quad (3-6)$$

$$Q = c_b m_b (T_{b1} - T_{b2}) \quad (3-7)$$

式中：  $c_a$  和  $c_b$  是供热工质和受热工质的比热，  $m_a$  和  $m_b$  是供热工质和受热工质的质量流量。

(3-5)到(3-7)三个方程中，共有 5 个变量（ $Q$ 、 $T_{a1}$ 、 $T_{a2}$ 、 $T_{b1}$ 、 $T_{b2}$ ）。从而，在给定供热工质和受热工质的入口温度情况下，即可推算出两者的出口温度以及热交换器内部的换热量。

## 3.4 天然气网络的网络元件

### 3.4.1 天然气网络的网络元件有哪些？

天然气网络的运行和供热网络的水力运行较为相似，所以二者在网络元件的构成上也比较接近。具体的，天然气网络的网络元件主要包括天然气管道、阀门、压缩机。

本节对以上网络元件进行简要的介绍。

#### 1) 天然气管道

天然气管道是为天然气从气源向负荷流动提供通路的网络元件。相较供热网络的管道元件，天然气管道为适应更远距离的工质输送，需要采用具有更高强度的材料来保证必要的耐压性能；另一方面，天然气的能量供应体现为其化学能，故天然气输送不存在散热损耗的问题，所以天然气管道无需加设保温层。



图 3-19 不同类型的天然气管道

#### 2) 阀门

在天然气网络中，阀门同样是为天然气网络提供流量调节、支路关断、防止倒流、压力监控等功能的重要网络元件。具体介绍可参见供热网络元件中对阀门的介绍。

#### 3) 压缩机

类似电力资源，天然气资源在地理分布上也具有较显著的不均衡性，这决定了天然气需要被远距离输送（如西气东输工程）。在相同的管道直径与流速条件下，天然气密度越高则单位时间输送天然气越多。那么，为了保证较高的输气密度，通常采用加压的方式来实现天然气的远距离输送。考虑到天然气在输送过程中存在沿程的压力损失，需要在沿途各处架设中继加压站来维持输送压力在合理的范围内。压缩机是这类加压站中最主要的网络元件。





图 3-20 压缩机元件

### 3.4.2 天然气管道是如何分析的？

忽略径向流动，天然气管道中的工质流动可简化为一维、单相流动过程；近似考虑管道内的天然气温度等于环境温度，该流动过程可进一步处理为绝热过程。从而，质量守恒方程(3-8)和动量守恒方程(3-9)组成的水力模型即可用于天然气管道的分析。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0 \quad (3-8)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda \rho v^2}{2D} + \rho g \sin \theta = 0 \quad (3-9)$$

式中： $\rho$  是流体力质的密度， $v$  是流体力质的流速， $p$  是流体力质的压强， $\lambda$  是管道的摩擦系数， $D$  是管道的内径， $\theta$  是管道的倾角， $g$  是重力加速度， $x$  和  $t$  分别表示空间与时间。上述方程组是偏微分方程，配合天然气管道两侧的边界条件以及天然气管道在零时刻的初始条件，即可描述管道内天然气在时间、空间上的动态过程。

现从上述动态模型中推导天然气管道的稳态模型。在稳态条件下，管道内天然气的各项状态处于稳态值，不随时间改变而改变，从而有

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3-10)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} = 0 \quad (3-11)$$

联立方程(3-9)至(3-11)，并忽略其中远远小的波动项 ( $\frac{\partial \rho v^2}{\partial x} \approx 0$ )，忽略管道倾角 ( $\theta \approx 0$ )，从而推出

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda \rho v^2}{2D} = 0 \quad (3-12)$$

向上式中代入天然气的近似状态方程(3-13)与管道流量表达式(3-14)，

$$p = c^2 \rho \quad (3-13)$$

$$G = \rho v A \quad (3-14)$$

式中： $c$  是天然气中的声速， $G$  是管道内天然气的质量流量， $A$  是管道的横截面积。从而得到天然气管道的稳态模型：

$$\frac{\partial p^2}{\partial x} + \frac{\lambda c^2 G^2}{D A^2} = 0 \quad (3-15)$$

记一根长为  $L$  的天然气管道首端压力为  $p_f$ ，末端压力为  $p_t$ ，则  $p_f$  和  $p_t$  满足

$$p_f^2 - p_t^2 = \frac{\lambda L c^2}{DA^2} \cdot G^2 \tag{3-16}$$

这便是常用于天然气管道稳态分析的 Weymouth 方程。

### 3.5 耦合不同能源网络的网络元件

#### 3.5.1 耦合不同能源网络的网络元件有哪些？

在百余年的能源网络历史中，电力网络、供热网络、天然气网络等各个能源网络之间是相互割裂而独立运行的。能源互联网的出现就是要打破这些能源网络之间的壁垒，通过网络互联实现更为宽广的可行区域，提高系统整体的灵活性，实现广域上的资源优化配置。各式各样的耦合元件是实现不同能源网络互联互通的物理基础。

就电-热耦合而言，耦合元件包括热电联产机组（Combined Heat and Power, CHP）、电锅炉、热泵等；就电-气耦合而言，燃气轮机和电制气机组实现了电力网络和天然气网络的双向耦合；就热-气耦合而言，燃气锅炉则为两个系统提供了互联的通路。

本节对上述耦合元件进行简要的介绍。

##### 1) 热电联产机组

热电联产机组泛指那些同时供应电力和热力的机组。在单独的电力生产中，发电机燃烧燃料之后排出的较高温度的烟气未得到有效的利用。在热电联产中，蕴含于这部分高温烟气中的“废热”得到了有效的回收再利用，具体的方式包括 1) 通入热交换器加热供热网络中流回的低温水；2) 通入余热锅炉生产高品位的蒸汽，这部分蒸汽又可通入蒸汽轮机进一步生产电力或是留作他用。通过对燃料能量的梯级利用，热电联产机组相比传统的发电机极大地提升了燃料效率。

由于热电联产机组的供热量来源于发电的副产物，即高温烟气，所以其输出的热功率与电功率之间存在一定的耦合。

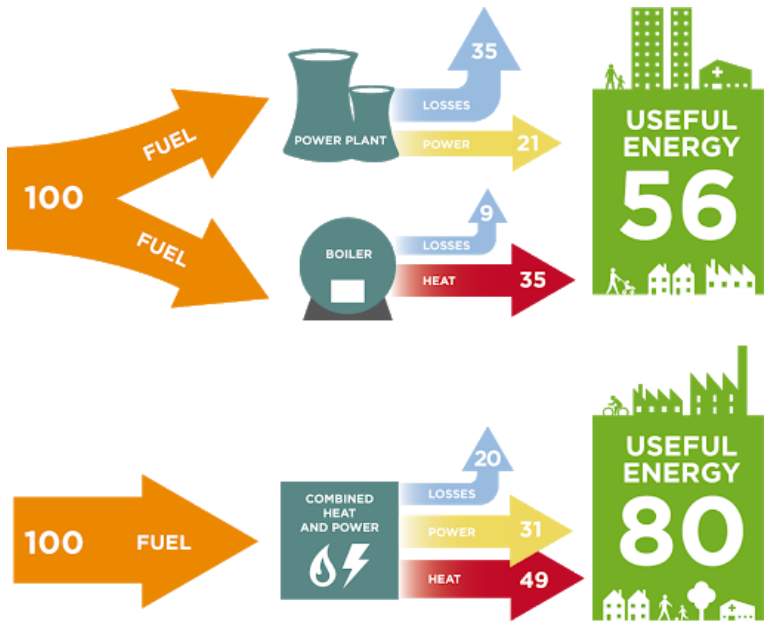


图 3-21 CHP 机组通过梯级利用提升供能效率

##### 2) 电锅炉

电锅炉是一种消耗电能来供给热能的网络元件，从而构成了电网与热网之间的耦合。相比燃煤、燃气等燃烧化石燃料的锅炉，电锅炉占地面积更小，更加环保，且无需燃料的供给通道，从而运行更加安全可靠。但是其供能成本显著高于其他锅炉，所以常用于小规模供热或者用于电网“填谷”。

### 3) 热泵

热泵也是一种消耗电能来供给热能的网络元件，其区别于电锅炉的地方在于：热泵以逆循环的方式实现了热量从低温物体向高温物体传递，可实现 1 单位电能供应 3 单位以上热能的效率，其耗电元件是驱动逆循环的压缩机；电锅炉通过电流的热效应来供应热能，故消耗 1 单位电能不可能产生超过 1 单位的热能，其耗电元件是电阻棒（丝）。

凭借极高的供能效率，近年来热泵在供热网络中得到了越来越广泛的应用，在电力网络与供热网络之间形成了较强的耦合关系。

### 4) 燃气轮机

燃气轮机是一种燃烧天然气来发电的网络元件，构成了从天然气网络向电力网络的耦合。在燃气价格较为低廉的国家，如美国，燃气轮机得到了大规模的应用，使得电-气耦合日益突出。相比其他化石燃料发电，燃气轮机具有规模多、爬坡快、灵活性强等诸多优点。燃气轮机的主要构成包括压缩机、燃烧室和涡轮，其中压缩机用于从外界吸收空气并压缩，帮助天然气充分燃烧；燃烧室将压缩空气与天然气充分混合并燃烧，产生高温高压的烟气；涡轮利用燃烧室产生的高温高压烟气膨胀来推动透平做功，带动发电机旋转发电。

### 5) 电制气机组

电力网络中的负荷具有较明显的峰谷效应，同时近些年来广泛接入的可再生能源在出力上具有显著的波动性，这些特点使得如何充分消纳可再生能源成为一个难题。电制气机组是一种消耗电能来生产天然气的网络元件，构成了从电力网络向天然气网络的耦合，为消纳可再生能源提供了又一有效途径。

电制气技术包括“电解水反应”和“甲烷化反应”两个步骤，分别完成了电到氢气和氢气到天然气的转换。目前，制约电制气机组发展与应用的瓶颈在于过高的建设成本和有限的转换效率。



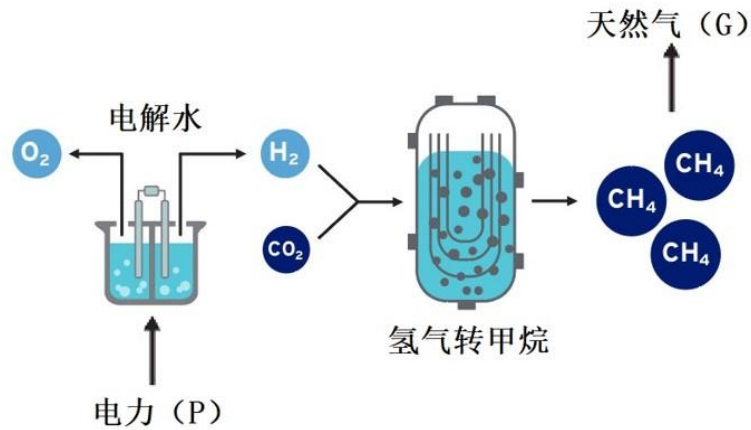


图 3-22 电制气过程的示意图

#### 6) 燃气锅炉

燃气锅炉是燃烧天然气来供给热能的网络元件, 构成了供热网络与天然气网络之间的耦合, 丰富了供热网络的热能来源。

### 3.5.2 “燃气-蒸汽”联合循环机组是如何工作的？

“燃气-蒸汽”联合循环机组是一种典型的热电联产机组, 其基本组成包括燃气轮机、余热锅炉和蒸汽轮机。因为其工作流程包含“燃气循环”和“蒸汽循环”两个过程, 所以得名“燃气-蒸汽”联合循环。“燃气循环”是指天然气通入燃气轮机燃烧、做功并发电, 燃气轮机排出的高温高压烟气经过余热锅炉加热冷凝水, 产生高温高压蒸汽, 换热后的低温烟气经净化后由烟囱排出; “蒸汽循环”是指由余热锅炉生产的高品位蒸汽送入蒸汽轮机进一步做功发电, 做功完毕后蒸汽冷凝成水, 送回余热锅炉重新吸收高温烟气的废热, 此过程中还可从蒸汽轮机的中压级汽缸抽取一定比例的做功的中品位蒸汽用于供热目的。余热锅炉是“燃气循环”和“蒸汽循环”耦合的关键元件。

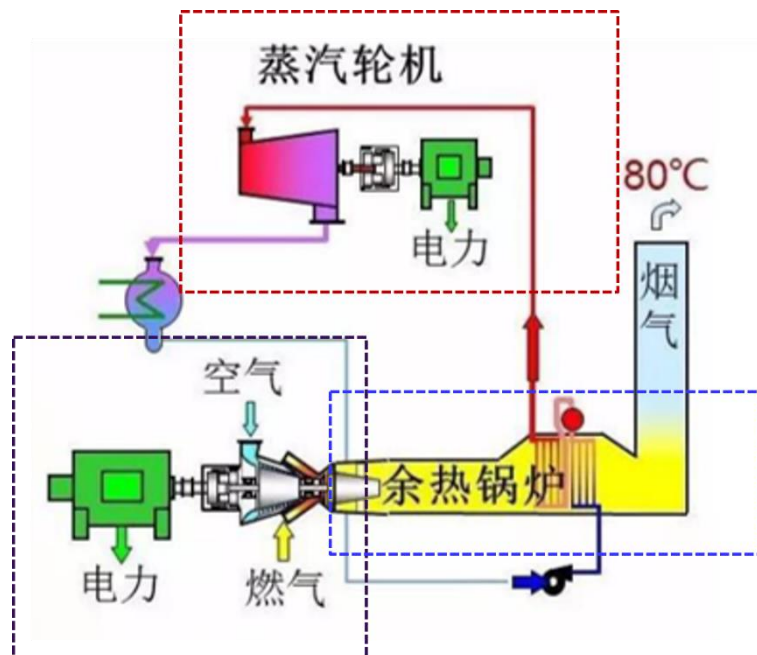
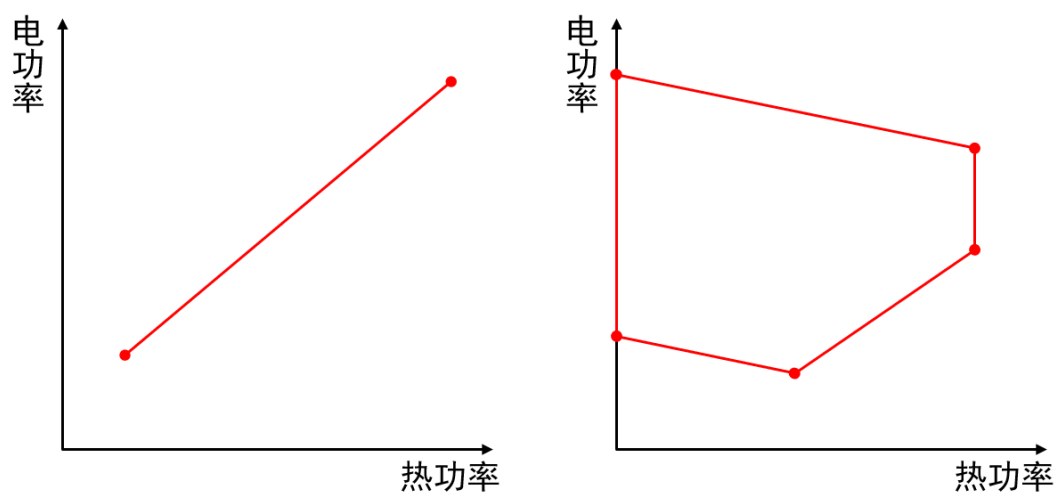


图 3-23 “燃气-蒸汽”循环机组的工作流程

### 3.5.3 “抽凝式”热电联产机组和“背压式”热电联产机组的区别是什么？

根据热电联产机组中蒸汽轮机的蒸汽抽取比例是否可调, 可将热电联产机组区分为背压式机组和抽凝式机组。背压式机组应用较早, 其蒸汽轮机允许抽取蒸汽, 但是抽汽比例固定无法调节, 使得该类型热电联产机组的电-热可行域为平面中的一条线段; 抽凝式机组中蒸汽轮机抽取用于供热的蒸汽比例可调, 根据需要的不同可选择纯凝工况、最大抽汽工况和部分抽凝工况, 从而其电-热可行域体现为平面中的一个凸多边形。

背压式机组输出的电功率与热功率为线性关系, 比例固定, 体现为电与热的强耦合, 灵活性相对较差, 但是也具有供能效率更高的优点; 而抽凝式机组输出的电功率与热功率之间耦合更弱, 具有更大的电-热可行域, 从而在热电联合运行中具有更强的灵活性, 有利于帮助电网实现调峰需求, 发挥多能互补的优势。



(a) 背压式热电联产机组

(b) 抽凝式热电联产机组

图 3-24 不同类型的热电联产机组的电-热可行域