

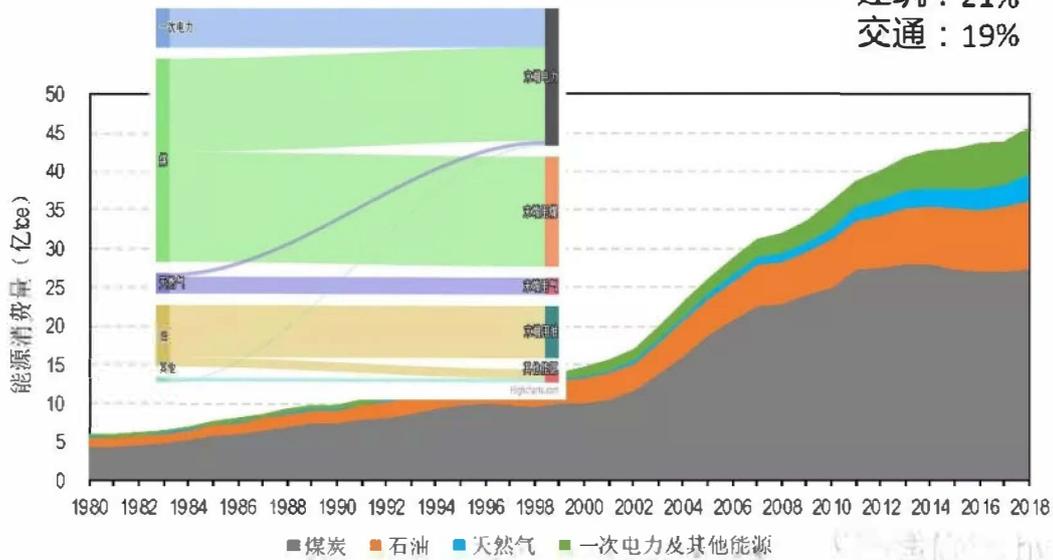
清洁供暖：能源革命中的一项重大行动

江亿

清华大学建筑节能研究中心

我国能源总量和消费结构

消费侧：
工业：60%
建筑：21%
交通：19%



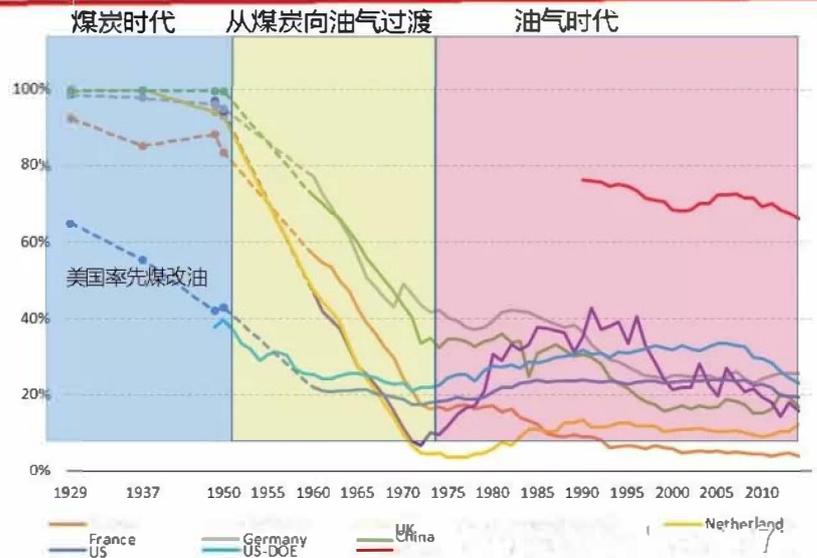
能源供给侧和消费侧革命

- 2014年6月习近平在中央财政领导小组上的讲话，四个革命一个合作：供给侧、消费侧、能源技术、能源体制；加强国际合作
- 目的：
 - 能源安全，立足国内多元化，加强能源储备建设
 - 大气治理，蓝天保卫战
 - 低碳发展，应对气候变化
 - 生态文明，改变人类社会发展模式
- 根据巴黎议定书，要实现地球升温不超过 2°C 的目标，2050年人类每年二氧化碳排放量不得超过150亿吨
- 中国目前二氧化碳排放量已超过100亿吨，如何届时降低到35亿吨

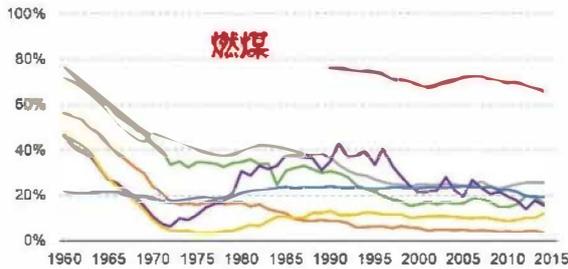
能源供给侧的革命

• 彻底改变以煤为主的能源结构

- 改变燃煤造成的大气污染
- 改变燃煤开采导致的生态破坏
- 降低燃煤使用过程中造成的碳排放



发达国家能源供给结构的变化



主要用能结构发展变化：
煤炭——油气——可再生



可否按照发达国家路径，实现天然气能源？

- 天然气在发达国家总的能源中占20%~40%
- 中国目前仅占7%，2017年天然气消费2404亿m³，其中进口924亿m³
- 1480亿m³国产燃气中，1250亿为传统天然气，230亿为非传统燃气
- 国际天然气贸易总量 11500亿，（包括管道气和LNG）
 - 我国进口量仅为924亿，约占8%
 - 日本进口1000亿，德国993亿，
- 如果中国未来天然气占总能源20%，每年需要7000亿，则至少进口5000亿，占国际天然气贸易总量43%
- 天然气是国际政治纠纷的主要手段之一

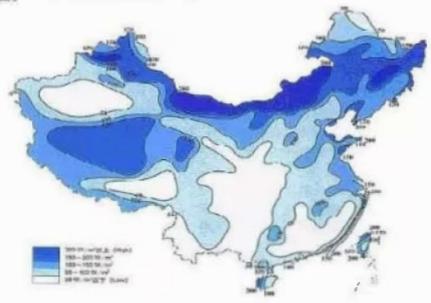
我国可以按照西方走过的路径从燃煤转为油气吗？

- 10万亿度电：
 - 可再生与核能3万亿，天然气7万亿，则需要1.4万亿m³天然气
 - 18亿tce燃料：
 - 8亿tce燃煤，0.7万亿m³天然气
 - 合计：需要2万亿可再生与核电，8亿tce，2.1万亿m³天然气
 - 碳排放：约50亿吨二氧化碳，不能满足升温不超过2K的要求
 - 将使用全球目前燃气总产量的60%，燃气对外依存度为85%
-
- **中国“缺油少气”的资源状况使我们很难按照西方的路径煤改油气**
 - **我国必须发展可再生能源与核能为主的能源供给系统，与发达国家同步**

我国可再生能源资源分布

- 可再生能源资源主要位于胡焕庸线以西
- 人口及经济活动主要聚集于胡线以东
- 规模化可再生能源需要“西电东输”
- 化石能源也主要分布于胡线以西
- 搭配成优质电源，长途输电

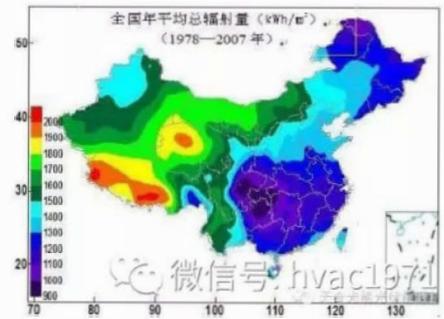
风能资源分布



水能资源分布



太阳能资源分布



太阳能光伏电池价格：2005年 60元/Wp，目前：<2元/Wp
青海省的光伏上网电价：0.31元/kWh，已经低于燃煤电厂电价
发展太阳能光电的主要障碍：电网调峰，安装光伏板的空间资源



我国未来的低碳能源消费与供给结构

		电力消费 (万亿kWh)		非电燃料消费 (亿tce)	
		2016	2050	2016	2050
需求预测	工业	4.1	5	16	12
	建筑	1.4	3	4.8	2.5
	交通	0.5	2	5	3.5
	总计	6	10	25.8	18
供给规划	水电	1.2	1.5	生物天然气	3.5
	风电	0.24	1.5	生物固态燃料	5.5
	光电	0.07	1	化石燃料	9
	核电	0.2	1.5	余热副产品 37亿GJ	
	火电	4.3	4.5		
	合计	6	10	25.8	18

10

低碳能源结构下的能源消费模式

- 电力将在终端能源中占三分之二以上
 - 可再生能源的主要输出形式是电力
 - 为了配合风电光电以及城市用电峰谷差调节，需要几乎等量的调峰火电
- 尽可能减少燃料直接燃烧方式在终端应用
 - 特殊需要的工业生产过程：钢铁、有色、化工、建材
 - 必须的民用需求：飞机、炊事等
- 城镇供暖尽可能不再使用锅炉直接提供热量
 - 建筑供热仅需要低品位热源
 - 采用可以产生高温的燃煤燃气锅炉供暖是巨大的浪费
 - 未来的主要方式应为热电联产和工业生产排出的低品位余热

10

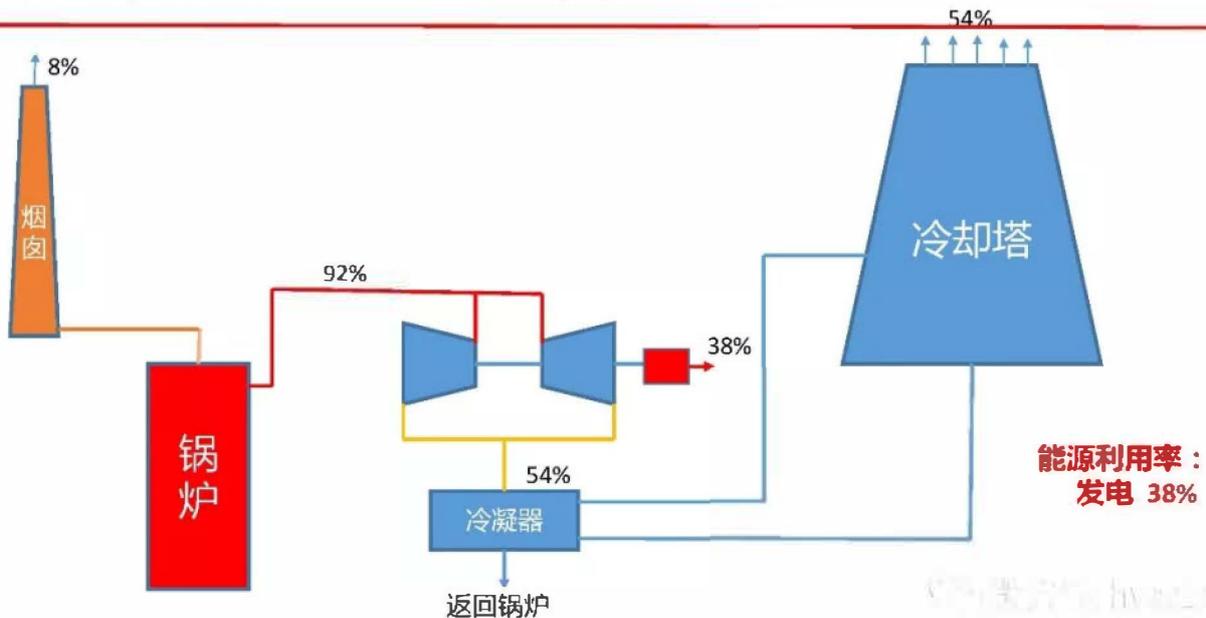
建筑供暖对能源的需求

温度对口， 梯级利用 —— 吴仲华

- 建筑供暖就是在20°C的室温条件下向建筑环境提供所要求的热量
- 原则上讲，任何可以向高于20°C环境释放的热量都可以作为建筑供暖热源
- 把电力直接转换为热量，把高品位能源低品位应用，是极大浪费
- 燃煤、燃气锅炉把可在上千度温度下输出的热量直接输出到20°C环境温度，也是极大的浪费
- 供暖是承接各类低品位热源，使各类低品位热源得以充分利用的最有效途径之一
 - 热电联产余热
 - 工业生产过程中的低品位余热

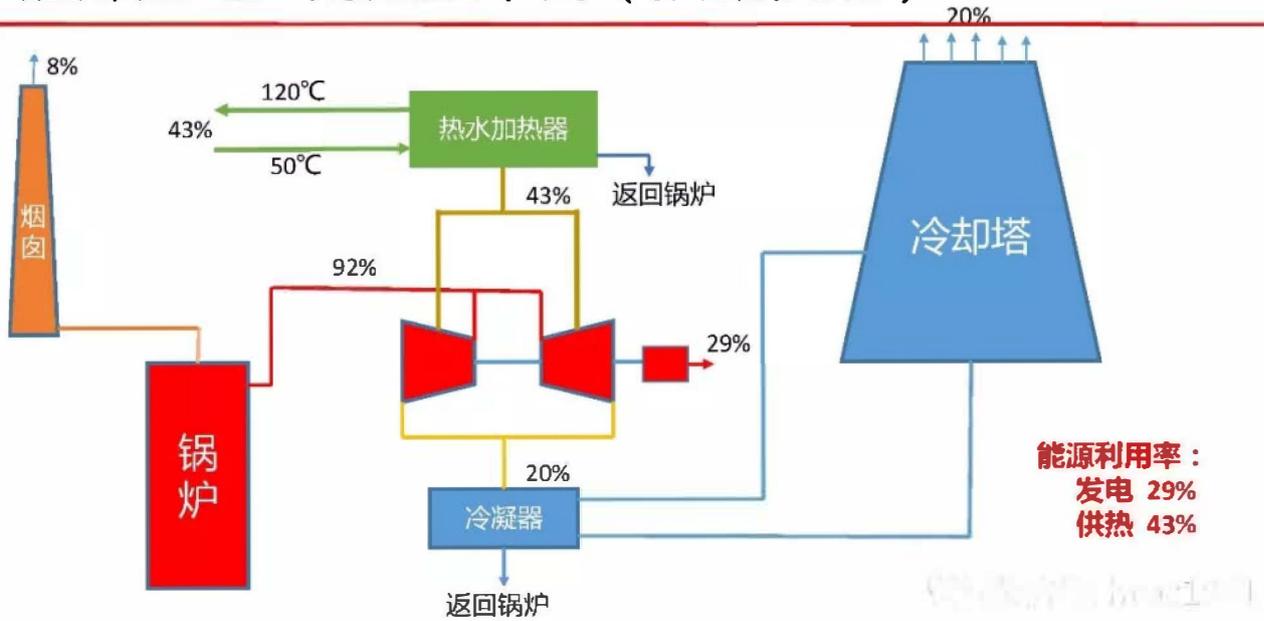
《建筑节能工程施工质量验收规范》

燃煤热电厂的热量平衡

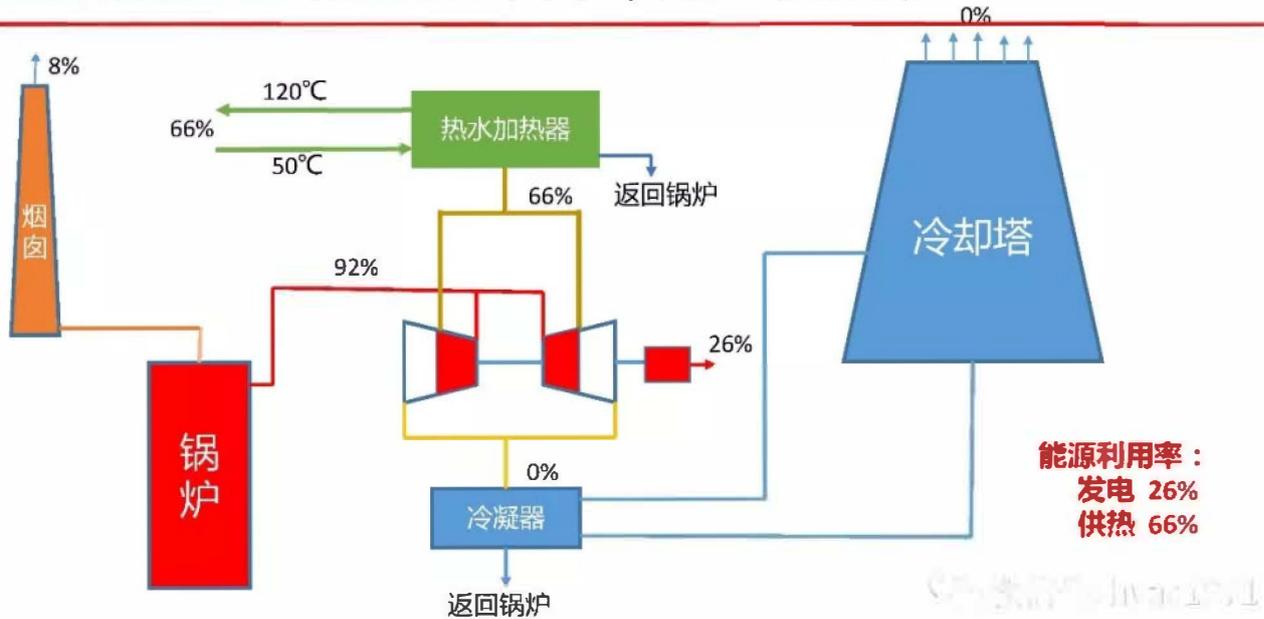


《建筑节能工程施工质量验收规范》

燃煤热电厂的热量平衡（抽凝供热）



燃煤热电厂的热量平衡（背压供热）



对几种热电联产方式的评价

热电联产方式	灵活性，热电独立调节	总的热效率	发电效率
经典的抽凝式	热量可在全范围内调节 电量在30%范围内调节 热量输出受电量输出约束	冷凝器低温余热排掉 ~70%	随热量加大而降低 为纯发电工况的75%
改造为背压方式	热电同步调节，不可独立变化	无冷凝排热，100%	为纯发电工况的约67%
抽凝+吸收式热泵（50°C回水）	通过排放部分冷凝热调节，降低了效率 减少总蒸汽量，热电同步	仍排掉部分余热，总热效率~80%	为纯发电工况的约70%
抽凝+吸收式热泵（25°C回水）	热量可在全范围内调节 电量在30%范围内调节 热量输出受电量输出约束	最大负荷下无冷凝排热，100% 部分负荷时，排除低温冷凝热	为纯发电工况75% 随热负荷降低，发电效率提高
抽凝+吸收式热泵+蓄热水箱+电动热泵	热量、电力输出都可大范围内独立调节	100%，部分热负荷时减少夜间主蒸汽量仍可保持高热效率	为纯发电工况的73%

热电联产和工业余热可以满足城镇供热

- 我国北方地区现有热电厂总装机容量5.8亿kW，可输出热量8.7亿kW
- 我国北方可利用工业余热输出2.7亿kW
- 我国北方县以上城镇可以利用热电联产和工业余热满足冬季供暖基础负荷需要
- 山东省是我国人均火力发电装机容量第一大省，也是人均工业能耗第一大省，应该用热电联产和工业余热解决全省冬季供暖问题
- 需要提供燃气调峰热源，在高峰负荷时提供20%~30%的热量，并可作为备用、应急、应对天气的短期变化
 - 当有天然气供应时，可采用末端天然气锅炉调峰方式，使调峰热源尽可能接近终端用户，实现更好的调峰效果
 - 即使天然气提供25%的负荷，其耗气量仅为总热量的十分之一，全国200亿

未来会有足够的热电厂和工业余热吗？

- 为了配合风电、光电，以及应对城市用电峰谷差，在缺少水电资源条件地区，必须配置几乎等量的煤电燃气电调峰电源
- 风电发展越多，要求配置的调峰火电就越多
- 未来电负荷还会持续增长
 - 末端能源由电力替代燃料
 - 电动汽车将成为主导方式（2050年）
- 制造业用能还会持续增加
 - 我国目前人均制造业用能低于美国
 - 尽管产业结构调整，但经济发展制造业用能总量会适当增长

© 2017 清华大学出版社

发展热电联产热源面对的主要问题

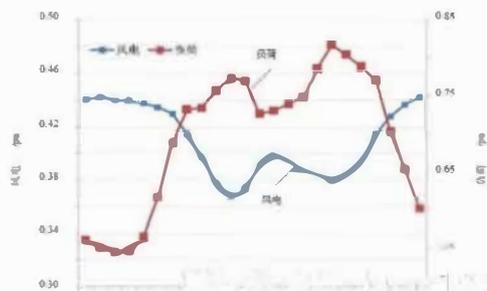
- 热电联产“以热定电”，失去对电力的调峰功能，导致冬季大量弃风，怎样解决电力调峰和热电联产之矛盾，成为关键
- 严寒期需要的电力少，热量多；而热电联产电厂热电比例有限，导致由于缺少电负荷，机组无法运行，从而无法供热

© 2017 清华大学出版社

我国目前的弃风弃光现象

• 2015年我国弃风弃光状况

省份(地区)	总风电量/弃风电量/(TWh)	弃风、弃光率/%	弃风、弃光占全国比例/%	
甘肃	8.19	2.62	36.8	27.5
吉林	2.72	0	30.8	6.9
新疆	7.11	1.51	30.7	21.9
蒙西	7.25	—	21.6	18.4
黑龙江	1.86	0	20.5	4.7
辽宁	1.91	0	14.5	4.9
宁夏	1.25	0.28	11.0	3.9
蒙东	1.85	0	10.9	4.7
湖北	1.89	0	9.9	4.8
青海	0	0.25	2.9	0.6
山西	0.26	0	2.4	0.7
山东	0.08	0	0.6	0.2



采用直接电热方式变电为热是解决途径吗？

- 电厂设置大型电锅炉和蓄热装置
 - 可为电网调频调压，缓解电力负荷峰谷差变化
 - 把多余的电力转换为热量，提高源侧热电比，缓解热电比不匹配问题
- 末端发展电热直接采暖
 - 电热膜、电热缆、电磁，石墨烯、量子？
 - 通过电热减少需求侧热电比，改善热电比不匹配现象
 - 在设置峰谷电价时，还能起到一定的电力调峰作用
- 电变热方式，一份电仅转变为一份热，高能低用，高污染、高碳排放

© 2015 中国电力出版社

电供暖助力电力系统发展

- 解决热电比在供给侧和消费侧之间的不匹配问题
 - 消费侧的热力需求转换为电力需求
 - 减少了消费侧的热电比，或增加了供给侧的热电比
- 改善电网灵活性，应对电源侧和负荷侧峰谷差变化
 - 增加“蓄能”、“需求侧响应”的用电末端，应对电网峰谷变化
 - 减少冬季弃风弃光现象
 - 为进一步发展可再生能源提供空间
- “消纳”风电、光电 还是 “替代化石能源”？
 - 发展可再生能源不是初心，替代化石能源才是最主要的目标！
 - 评价指标不是发展和消纳了多少风电
 - 真正的评价指标是由于发展风电，替代了多少燃煤！

《中国能源报》2017.11.1

“消纳” 还是 “替代” ？

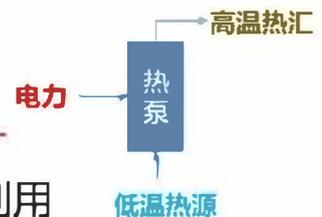
- 建立了**1MW**风电，冬季运行1000小时，发电1000MWh，通过电锅炉消纳，冬季产生1000MWh的热量，替代了**130吨**标煤
- 建立了**0.5MW**风电，冬季运行1000小时，发电500MWh，通过电动热泵供暖，产生1500MWh热量，替代了**195吨**标煤
- 两种方式全都“全部消纳”风电，哪个贡献大？

《中国能源报》2017.11.1

评价电供暖方式适宜性的标准

- 电热转换效率
 - 单位电力替代最多的化石能源
- 对电网侧灵活调节的能力
 - 可否实现需求侧响应？
- 对供暖末端的调节能力
 - 可否支持“部分时间、部分空间”的运行模式
- 经济性，要求的初投资
 - 要全面考虑电网扩容投资和末端装置投资

电热转换效率是评价的首要标准



- 电力来之不易，是最高品位的能源，应充分有效利用
- 电动热泵是高效的电—热转换的最好途径
 - COP取决于低温热源和高温热汇的温度
 - 地下换热或中水：低温热源10°C，高温热汇45°C，COP可以达到4~5
 - 空气源热泵：室外低温热源-10°C，高温热汇45°C，COP可接近3
 - 空气源热泵：室外低温热源-10°C，高温热汇70°C，COP在2左右
 - 尽可能寻找低温热源，尽可能降低高温热汇温度，提高热泵效率
- 任何电直接发热的方式，COP只能是1，与热泵相差2到5倍！
 - 电锅炉、电热膜、电热缆、石墨烯、纳米、、、，如果没有低温热源，就只能是直接的电热转换，其效率只能为100%，也就是COP=1
 - 能量守恒定律不可能违背

对电网侧有灵活调节能力

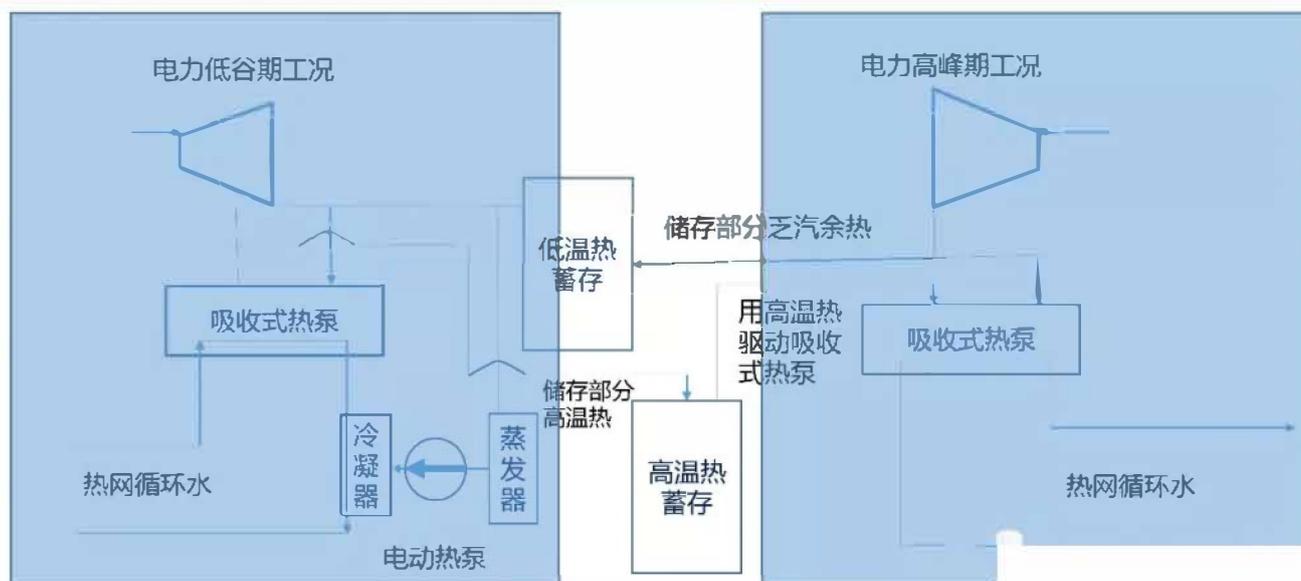
- 需求侧响应：
 - 电网供不应求时，停止用电
 - 电网供大于求时，加大用电量
 - 快速响应电网变化，迅速进行调节
- 在保证供暖效果的前提下进行调节
 - 需要蓄热措施，使得在停止用电的周期内，不影响室内热舒适
 - 采用蓄热水箱，或其它蓄热方式，通过电锅炉蓄热
 - 蓄热式电暖器：放热过程可否控制？如果不能控制则效果很差
 - 利用末端建筑围护结构热惯性蓄热
 - 停止3~4小时，并不影响室内热舒适
 - 完全可以根据电力供需状况，试行间歇供暖
 - 现代IT技术使得分散到各处的热泵与集中于一处的大型电锅炉有同样的调峰速度

© 2013-2014 hvw-911

不应发展直接电热方式，可以有更好方式解决热电协同问题

© 2013-2014 hvw-911

燃煤电厂吸收式热泵的热电协同模式



吸收式热泵方式的热电协同流程参数

- 热网供水温度：115℃，回水30℃
- 电力负荷高峰期（白天）
 - 全功率发电，冷凝温度30℃，发电30万kW
 - 用高温蓄水罐中热水驱动吸收式热泵，热水罐温度：145℃，90℃，输出热量30万kW
 - 排出30℃余热45万kW，存到低温罐中23万kW，进入吸收式热泵22万kW
 - 吸收式热泵输出热量52万kW=22万（乏汽余热）+30万（高温热量）
- 电力负荷低谷期（夜间）
 - 最大抽汽量抽汽，发电23万kW，150℃抽汽热量35万kW，乏汽17万kW
 - 抽汽热量存入高温罐，乏汽17万与白天存入23万共40万kW
 - 用电动热泵提升乏汽余热分级加热循环水，COP=4，功率14万kW，输出热量14+40=54万kW
 - 对外输出电力：23万-14万=9万kW
- 白天12小时发电360万kWh，夜间12小时输出电力108万kWh，
- 稳定输出热量53万kW，热效率100%（按照进入的蒸汽热量）

抽凝机组+电锅炉的热电协同

- 电力负荷高峰期（白天）：
 - 全功率发电，输出电力30万kW
 - 利用夜间蓄存的热量供热，乏汽从冷却塔排出
- 电力负荷低谷期（夜间）：
 - 最大抽汽量抽汽，发电23万kW，抽汽34万kW，乏汽从冷却塔排出
 - 采用14万kW电锅炉产生热水，输出9万kW电力
 - 产热量34万+14万=48万kW热量，一半用于夜间供热，一半用于白天供热
 - 全天恒定供热功率 24万kW，白天热效率40%，夜间热效率76%
- 白天发电30万kW，夜间输出电力9万kW，与吸收热泵方式相同
- 全天输出热量 24万kW，为吸收式热泵方式的50%

© 2015 清华大学出版社

两种热电协同方式调节性能比较

- 不需要对主蒸汽流量进行快速调节，仅在供暖部分负荷时夜间减少主蒸汽流量
- 吸收式热泵方式通过改变抽汽量和调节大型离心热泵转速和台数实现电力“爬坡”和减载，其调节速度取决于抽汽阀门性能，不会影响汽机的震动
- 抽凝机+电锅炉方式通过改变抽汽量和调节电锅炉功率实现电力侧的调节。调节性能二者接近

© 2015 清华大学出版社

两种热电协同方式的综合比较

- 同样燃煤量，同样的对电侧调节性能，热量输出相差一倍，吸收式热泵方式可以实现总热效率达到100%，30万kW机组输出50万kW热量
- 抽凝+电锅炉方式对热网回水无要求，而吸收式换热器需要低温水温度 ($<30^{\circ}\text{C}$)，回水温度升高，性能恶化 (要求蓄水箱容量加大，要求电动热泵容量加大，夜间输出电力降低)
- 二者投资比较：
 - 单位供热量需要的储热罐容积接近
 - 吸收式热泵+电动热泵 投资 高于电锅炉+热交换器
 - 30万kW机组的吸收式热泵+电动热泵 投资 约3亿，但可以优化后降低
 - 热电协同方式增加24万kW供热能力，增加的投资相当于1200元/kW

《热电联产与集中供热》

改善源汇之间热电比不匹配的途径 (1)

- 深度挖掘热电联产供热潜力
 - 抽凝方式：电力输出为额定容量的75%，热量输出为额定电力容量的1.15倍
 - 改背压机：电力输出为额定容量的70%，热量输出为额定电力容量的1.7倍
 - 改吸收式：电力输出为额定容量的75%，热量输出为额定电力容量的1.65倍
 - 热电协同改造：在电力高峰期提供额定电力，热量输出为额定电力容量2倍
- 燃煤机组的供热能力，如果基础负荷为40W/m²
 - 2X20万机组，输出热量64万kW，可为1600万m²建筑提供基础负荷
 - 2X30万机组，输出热量96万kW，可为2400万m²建筑提供基础负荷
 - 目前大多数热电联产机组输出热量远远不足，却盲目增建电厂，而由于电负荷不足，仍不能解决热源不足问题
 - 原因：
 - 未能充分回收各类余热
 - 没有足够的和位置合理的调峰热源
 - 回水温度偏高，难以回收低品位余热

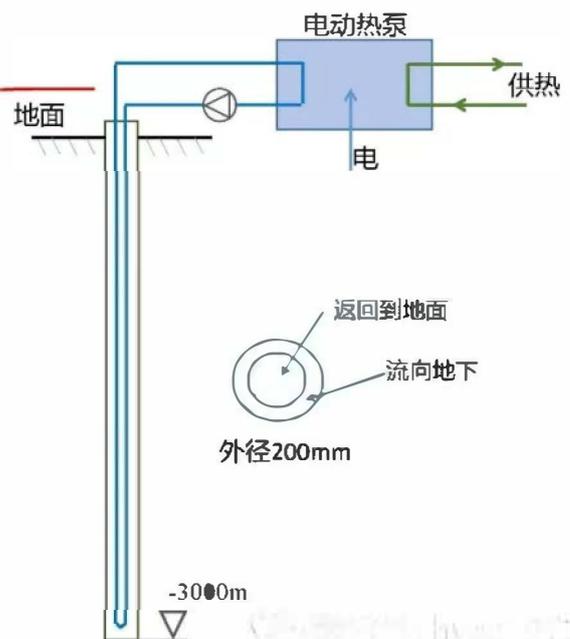
《热电联产与集中供热》

改善源汇之间热电比不匹配的途径（2）

- 充分回收、利用各种工业余热，可有效改善热电比不匹配问题
- 发展电动热泵，提供20%到25%的建筑供暖热源
 - 增加终端对电力的需求，减少终端对热量的需求，有效改善热电比状况
- 周边农村发展部分电动热泵方式，高寒地区农村发展部分电热式
- 中水、污水源热泵
 - 应充分利用城市的中水、污水资源，可满足城市5%以上建筑供暖
 - COP可达4以上，在山东有很多成功应用案例

中深层换热型地源热泵

- 浅层地热方式需要“夏蓄冬用”，需要冬夏平衡
- 中深层地热热泵，可自行恢复地温
- 初投资：0.6万/kW, ~250元/m²
- 运行费：COP为5以上，20kWh/m²
- 在西北已有400万以上的工程案例
- 对地质条件要求低，只影响钻井成本
- 在某些场合可在山东地区应用



超低温空气源热泵

- 我国近年来在此领域技术和产品有巨大进展，世界领先
 - 一室一机热风式：采用三缸双极压缩机，零下25°C时COP达到2
 - 几千平米建筑热水式：采用双极螺杆压缩机，零下25°C时COP到2
 - CO₂与氟利昂复叠式热泵：提供热水或热风，零下30°C时COP到2
 - 采用新的调节方式，使得在外温降低时制热量基本不降
-
- 山东省完全可以发展一批空气源热泵的供暖
 - 初投资：~1.5元/W

© 2013 清华大学

降低对热量的需求
是清洁供暖的基础

© 2013 清华大学

强化保温，进一步降低热量需求

- 经过20年建筑节能工作，目前山东省冬季供暖热耗已经从10年前的0.3~0.7GJ/m²下降到目前0.15~0.3GJ/m²
- 一些新建的保温良好的建筑在山东耗热量可达在0.1GJ/m²
- 进一步改善保温，并提高气密性，还可以进一步降低热耗
- 进一步需要解决的问题
 - 室温过高问题：外温0°C时，25°C比20°C多耗热25%
 - 室温过热导致开窗散热，热量会增加50%
 - 解决室温均匀性调节问题

© 2017 清华大学出版社

实现均匀性调节的新途径

- 初调节做好水力平衡，可解决基本的温度平衡，但由于各种因素变化，还会出现变化的不平衡，过量供热还可达10%~20%
- 解决室温动态调控问题
- 另一思路：
 - 降低供水温度
 - 增加室内换热能力（如地板辐射采暖）
 - 末端实行“大流量、小温差”，一次网是“小流量、大温差”
 - 当末端供回水温差5°C时，运行过程中的不均匀问题就不再出现
 - 流量增大后如何不增加循环泵电耗？

© 2017 清华大学出版社

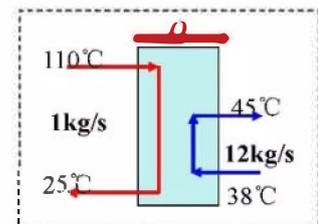
降低循环水泵电耗的途径

- 目标：供热季每平米电耗不超过1kWh
- 实现途径
 - 尽可能减少热力站内的局部阻力
 - 检查水泵工作效率，目前一些循环泵的运行工作点效率仅为30%~40%
 - 由于选择的扬程过大，导致实际工作点远离效率最高点
 - 必须根据实测扬程更换水泵，靠变频不能改善水泵效率
 - 各地都有不少工程案例通过更换小扬程水泵，提高了效率，把循环泵电耗降低到0.5kWh/m²以下
 - 如果流量增加一倍，扬程降低一倍，效率再由30%提高到60%，则泵的电耗可降低到一半

推广楼宇吸收式换热站



- 目标：
 - 一次网实现小流量、大温差，如：供水温度110°C，回水温度25°C
 - 楼内实现大流量、小温差，如：供水45°C，回水38°C
 - 一次网与楼内管网流量比：1：12
- 把热力站移到建筑内或建筑旁边
- 采用吸收式换热器为核心的楼宇换热站
- 定压、补水、计量都集成到一起
- 体积：500kW供热量，占地1.2平米，高3米
- 已经在赤峰、唐山迁西等地使用，最长达5年
- 收益：实现末端均匀供热，降低回水温度，降低二网泵耗



对分户计量、按热量收费方式的认识

- 北欧并没有分户计量，而是分栋计量
- 户间传热是客观现象，将导致不同位置，同样室温的热耗差3倍！
- 所谓根据房间位置对热量进行修订的方式与分户计量自相矛盾
- 目前房屋保温状况差别大，高能耗老旧房屋大多数是低收入人群居住，按照面积收费可缓解这一矛盾，按照热量收费必须首先解决低收入人群居住的保温差建筑的改造或对这一人群的补贴
- 目前实施状况：
 - 没有一个供热企业能够给出真实的各户的实测用热数据，已有数据或偏差很大，完全不可用，或属人为编造
 - 对热表的维护、标定也属很难操作的现实问题

© 2015 清华大学出版社

对分户计量、按热量收费方式的认识

- 热改的目的：
 - 保温好得建筑可从热费上得到回报
 - 通过行为节能，避免过量供热
- 实现途径：
 - 计量应“先总再分”
 - 在热力站严格计量热量，按照热量考核、承包热力站管理者
 - 在楼栋入口计量每栋热量，按照热量核算，各户按面积分摊
 - 采用热力站或楼栋承包制，由专人负责调节、维护，按照热量核算
 - 首先还要解决居住在老旧建筑得低收入人群得补贴问题或节能改造经费

© 2015 清华大学出版社

农村清洁取暖方式

- 因地制宜，根据当地的资源环境状况确定相应的清洁取暖方式
- 粮产区一定优先利用秸秆作为供暖的首选热源
 - 压缩为颗粒，便于储存、高效燃烧、超净排放
 - 大规模制沼气，再将其中的CO₂分离，得到纯净的燃气
- 其它类型的农村，优先发展分散的电动空气源热泵供暖
 - 是北京农村“煤改电”的成熟经验
 - 北京采用热泵制热水，最终水暖的方式，初投资高，用电多、故障高
 - 在鹤壁等地推广的空气源热泵热风方式，很好地解决了上述问题
 - 实现三个一：投资每户一万元，用电每年一千元，操作一键式

农村的清洁取暖方式

- 要分散不要集中
 - 目前农村住房特点：平日空置率高，节假日合家团聚
 - 分散式可以实现“有人开，无人关”，实现节能
- 分散式空气源热泵的末端方式
 - 制备热水，用散热器或地暖的方式由于热惯性大，不适合农村特点
 - 直接产生热风，实现快速启停
 - 末端改为下送风方式，不会有吹风感，也可以得到较好的舒适性
 - 所谓“干燥”是由于房间气密性不好，撒气漏风所致，改善气密性就可以解决干燥
 - 散热器充当冷凝器，直接散热：可以获得很好的舒适性（天津大学，北京工业大学都有研究样机）



实事求是，因地制宜
科学办事，避免蛮干
打赢蓝天保卫战

谢谢