

双碳背景下中国城镇供热发展路径

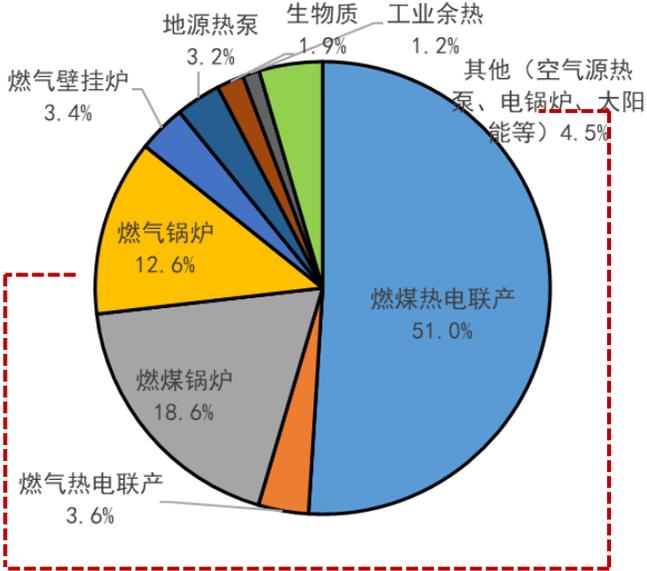
吴彦廷

清华大学建筑节能研究中心

2024年4月22日

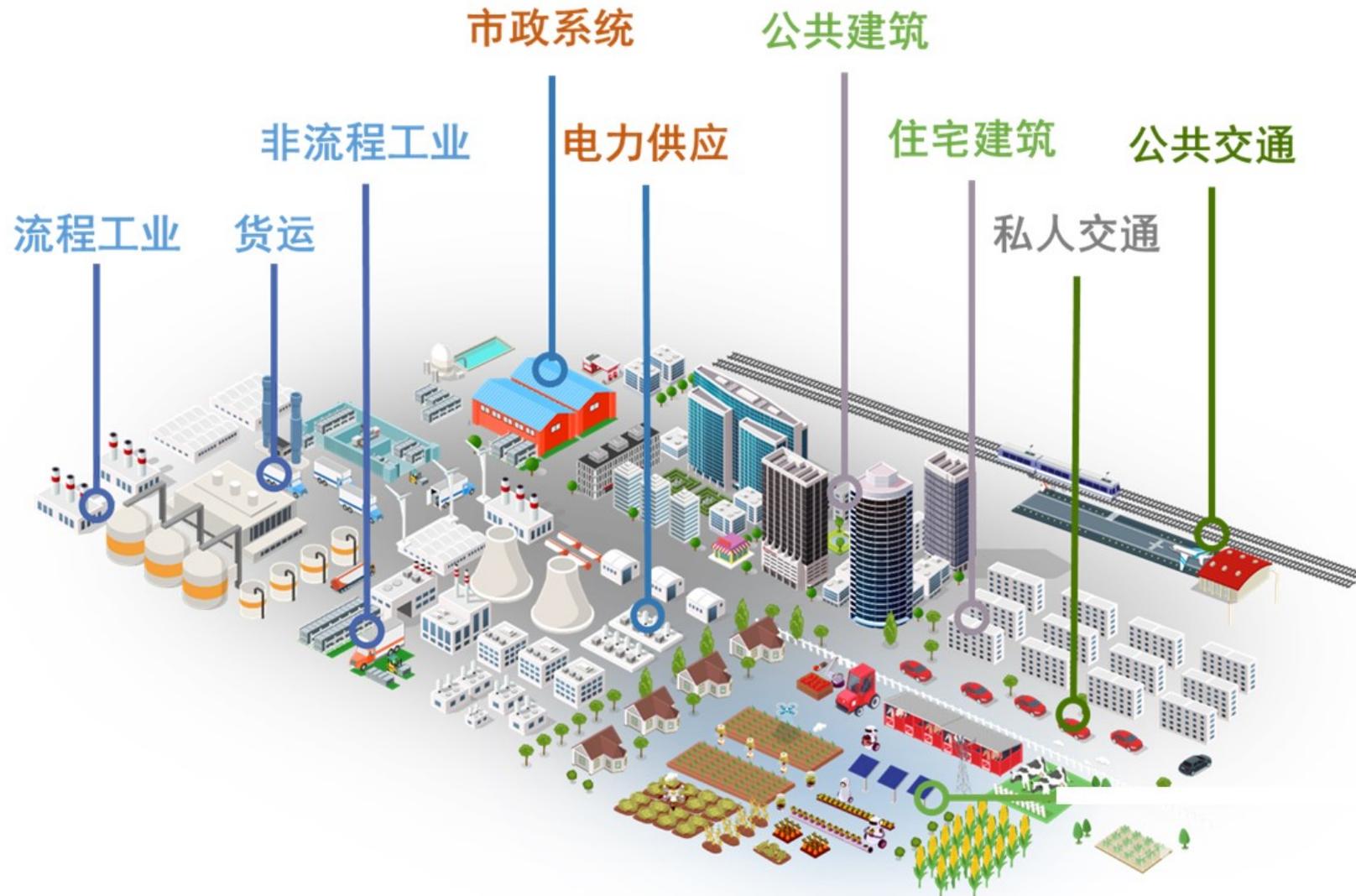
供暖减碳潜力巨大

- 北方供暖仍主要依靠化石能源
- 供热碳中和是能源系统实现碳中和的关键内容



化石能源供热
占比85.8%

城市能源碳中和的核心是电和热的零碳化

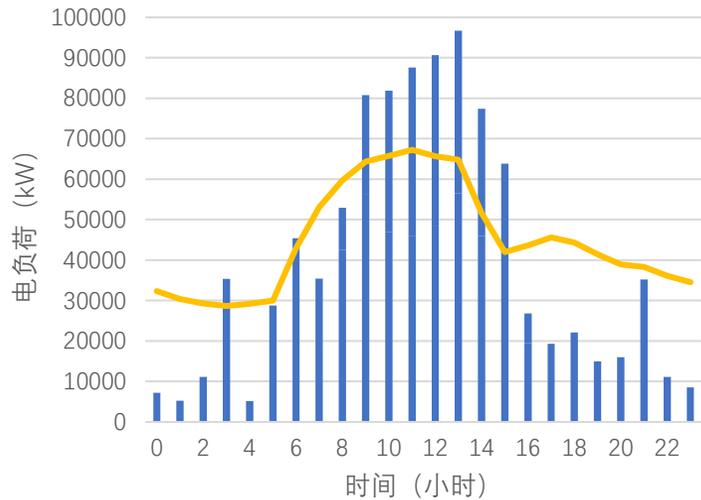


电力碳中和

- 建设以可再生能源发电为主新型电力系统
- 核心问题是如何解决供需不平衡
 - 可再生能源发电具有随机性和波动性，电力供需不平衡

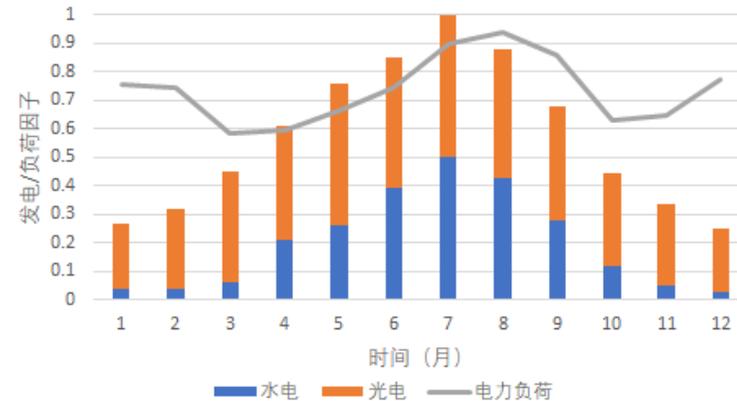
■ 短期不平衡

- 白天风光多，晚上少



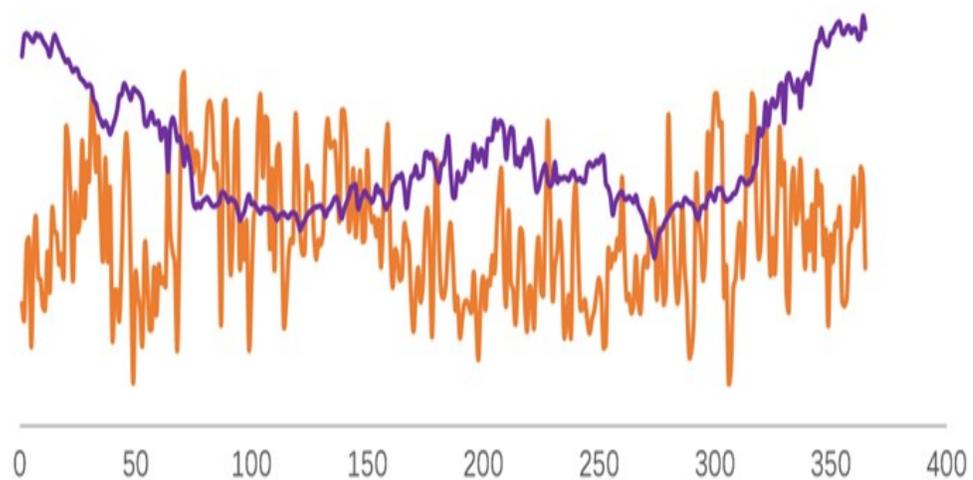
■ 长期不平衡

- 夏季水电光电多、冬季水电光电少



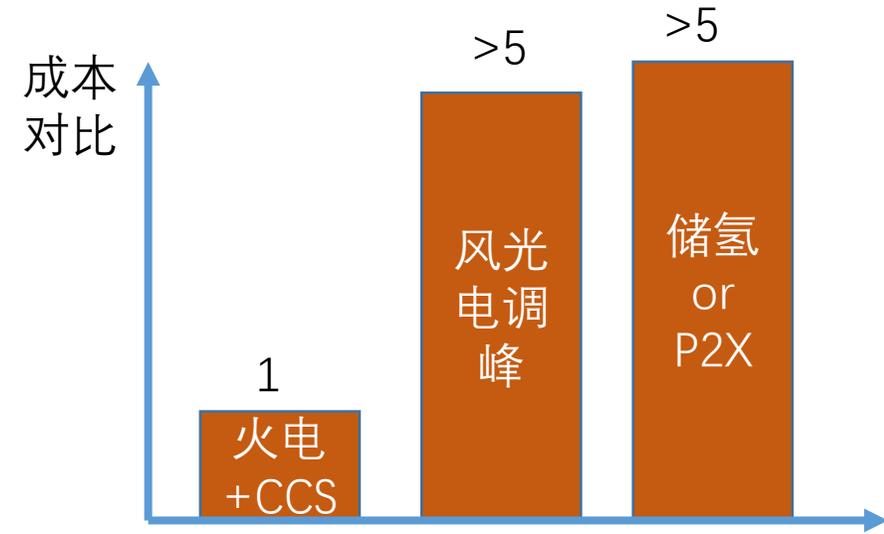
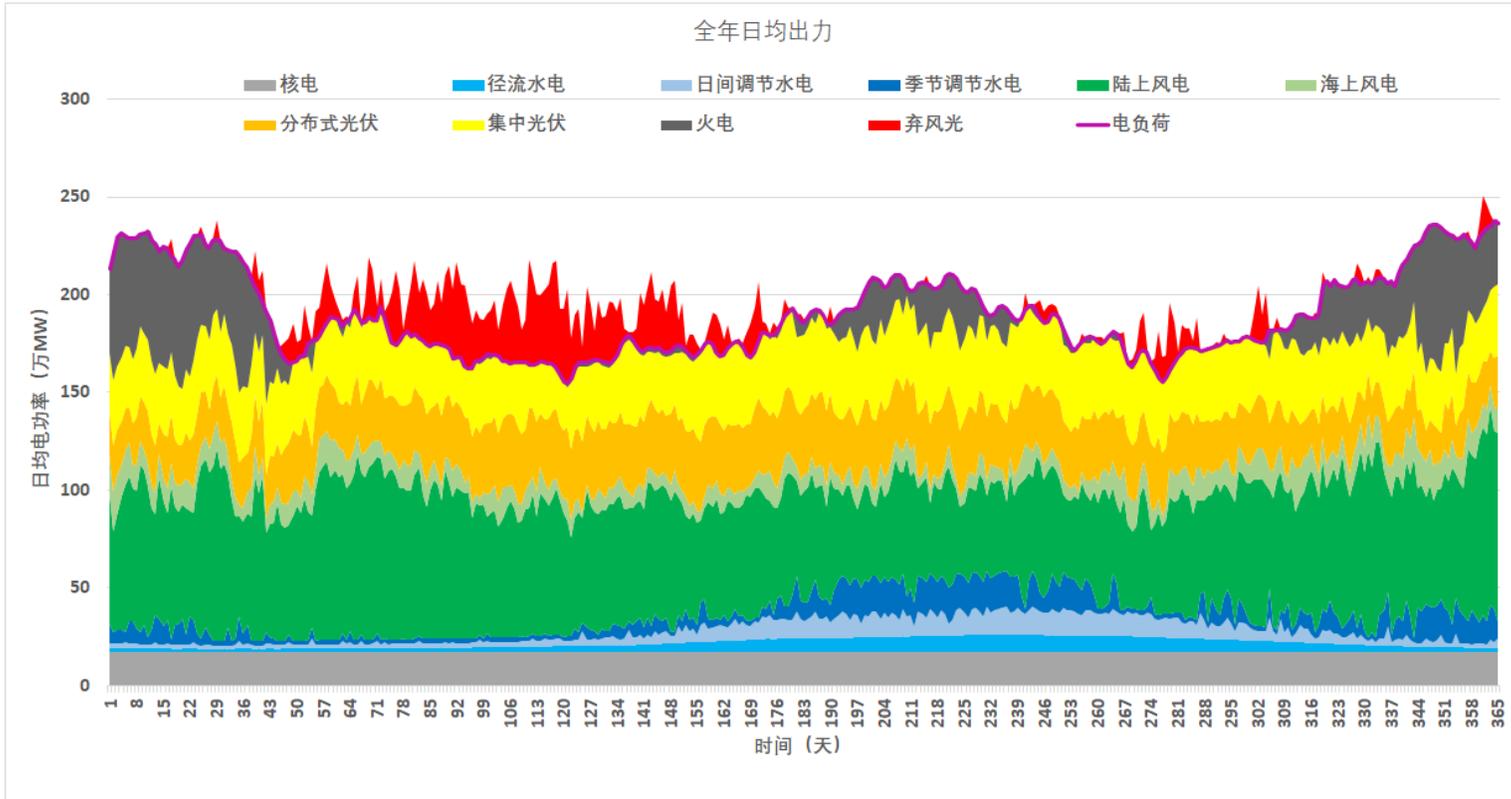
电力供需不平衡

- 中长期呢？对于电网和用户都是难点
 - 电网负荷的“鹰”，如何解决



火电季节性调峰

■ 火电是最经济的季节性调峰方式



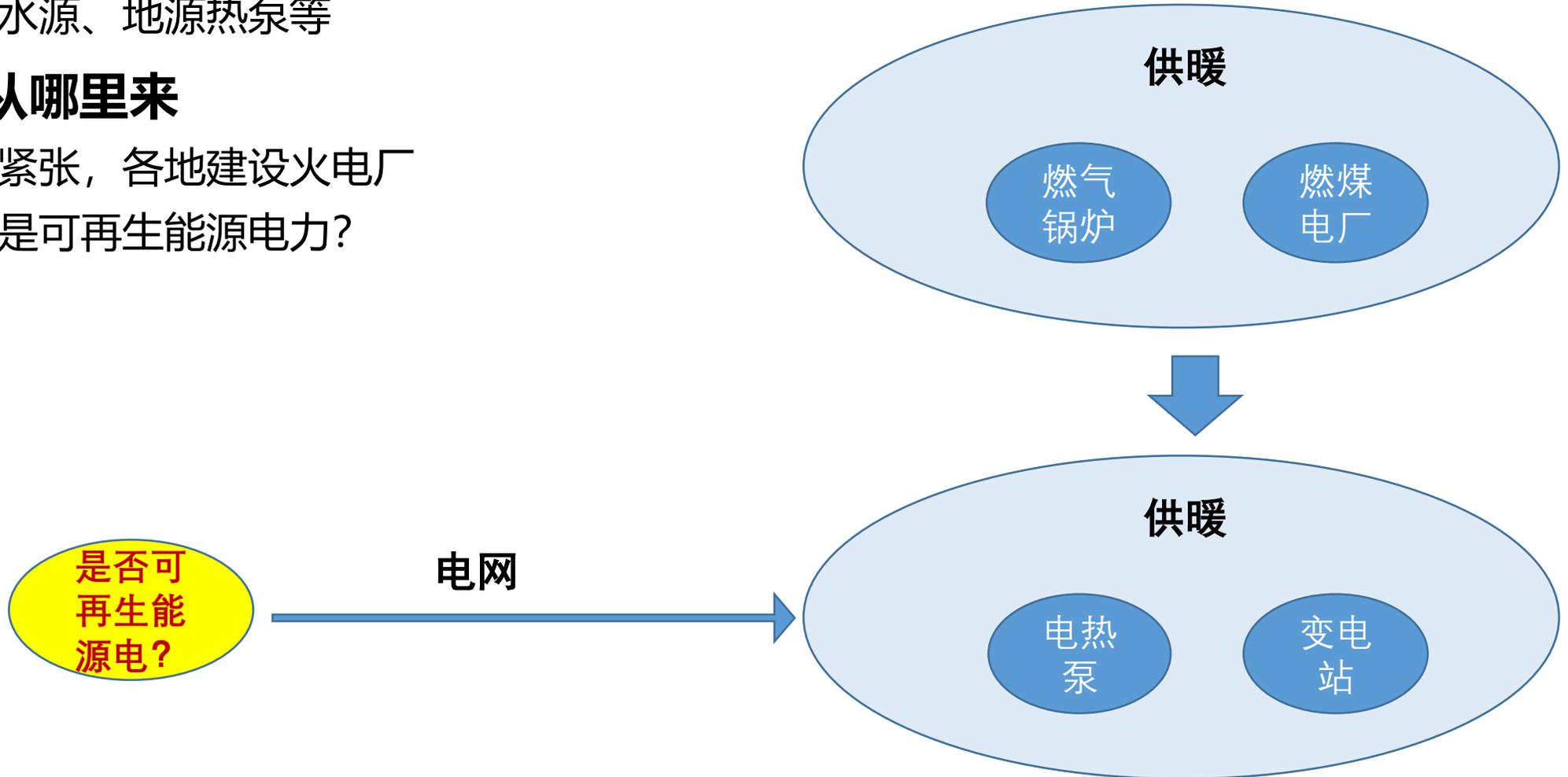
供暖零碳化途径

■ 电热泵

- 空气源、水源、地源热泵等

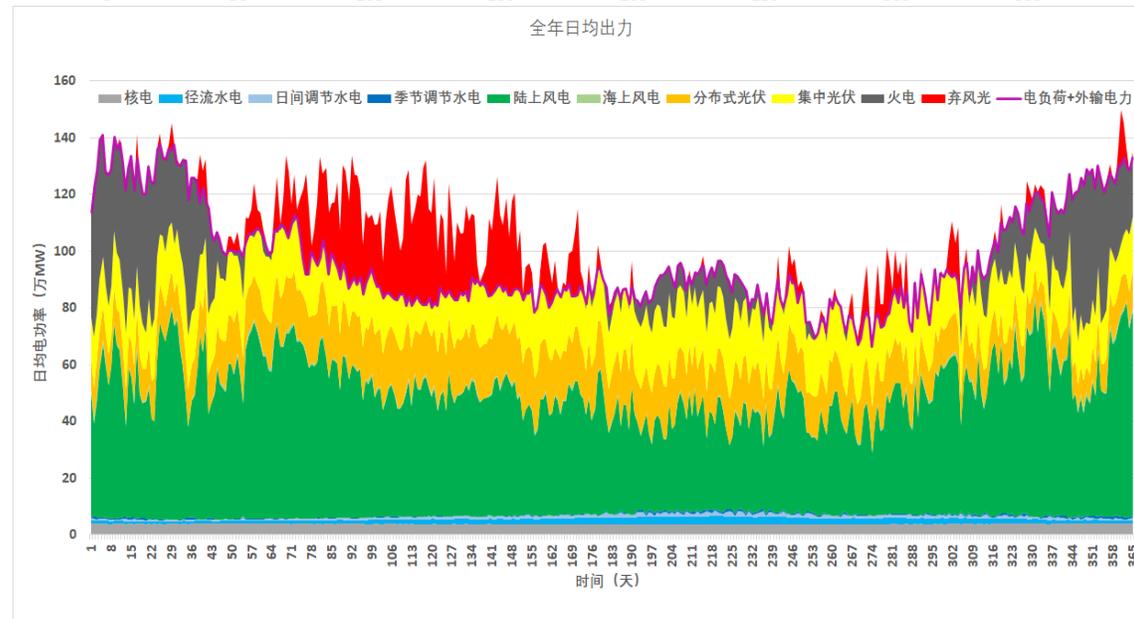
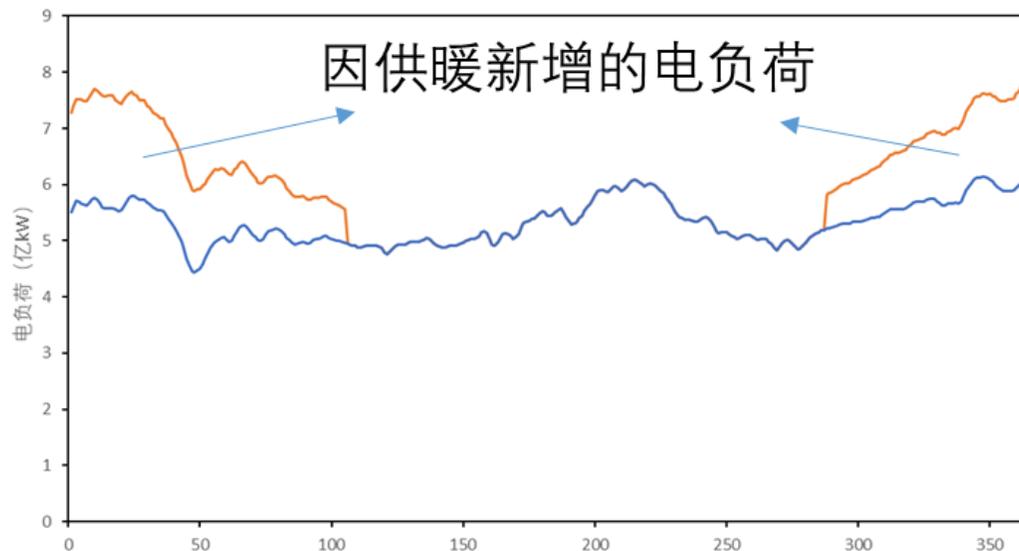
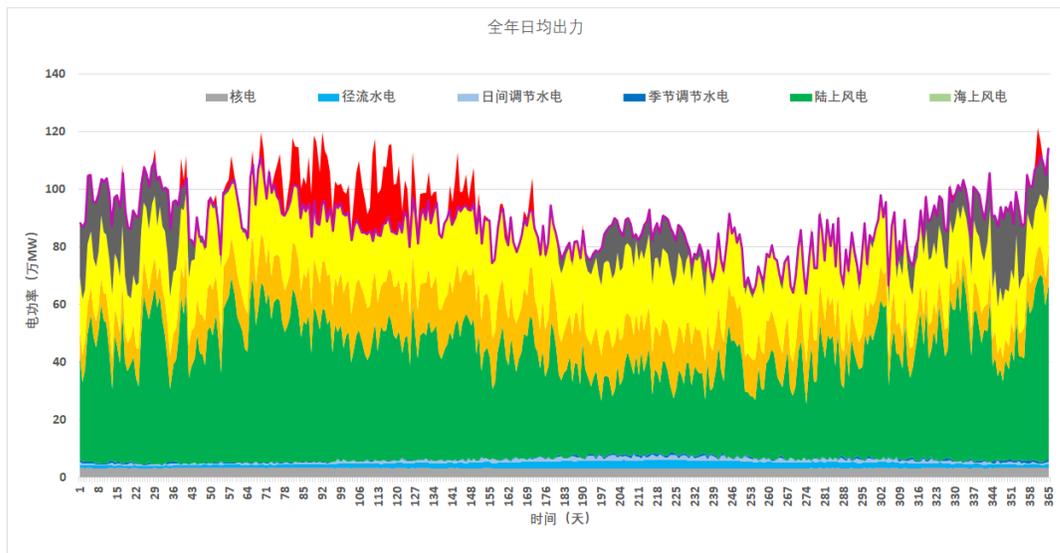
■ 电网的电从哪里来

- 全国用电紧张，各地建设火电厂
- 能否保证是可再生能源电力？



供暖用电主要来自于火电

- 电供热进一步推高冬季用电量，季节性电力缺口需要靠火电满足



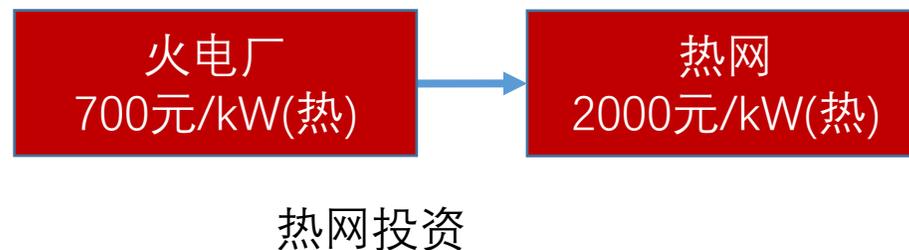
电热泵供热的边际成本

■ 投资

- 电热泵供暖系统投资4800元/kW
- 热网投资2700元/kW

■ 运行费

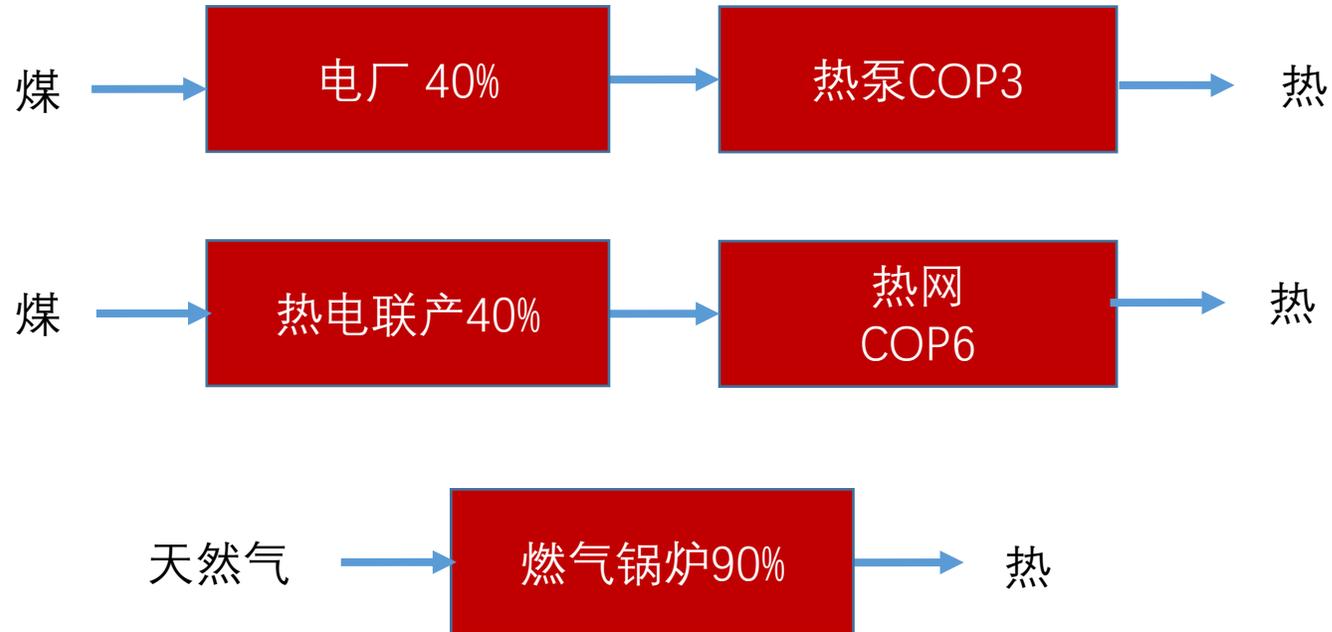
- 热泵COP: 3~4
- 热网COP: 6~8



电供热碳排放不低

■ 单位热量排碳量

- 热泵 $1/3 * 0.75 = 0.25$ kg/kW.h(热)
- 天然气锅炉 $1/0.9 * 10 * 1.9 = 0.21$ kg/kW.h(热)
- 燃煤热电联产 $1/6 * 0.75 = 0.125$ kg/kW.h(热)

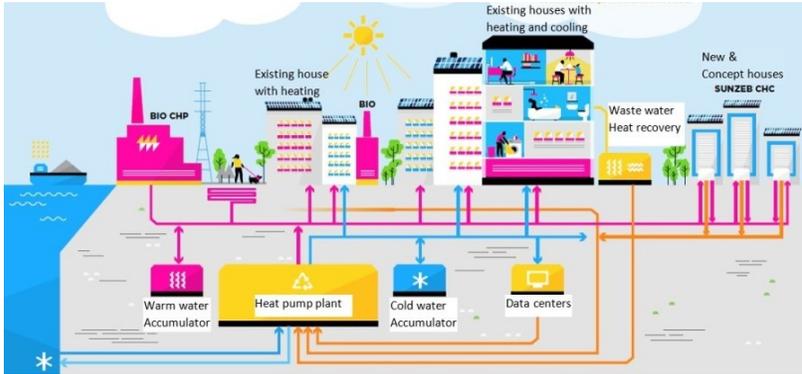


国外的供暖低碳发展路径

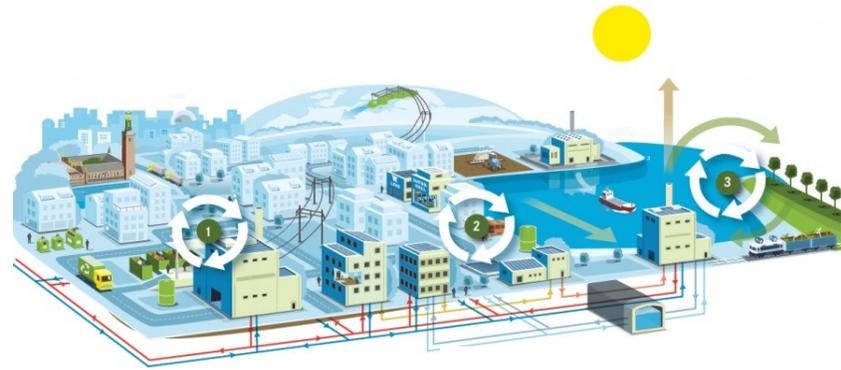
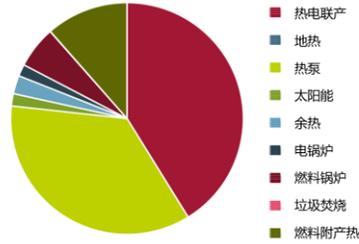
■ 西方国家电采暖，加重电力系统负担

- 纽约市研究了若70%的建筑全部采用电供暖方式，则冬季的用电负荷将是现状的2倍，需要对城市电力系统进行大规模的扩容

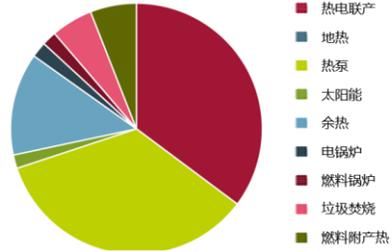
■ 北欧具备条件的城市采用多能源的集中供热系统来实现



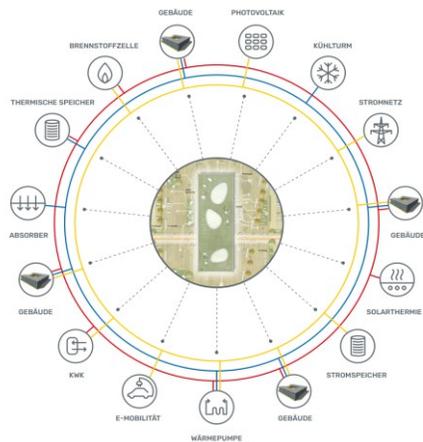
芬兰2050零碳供热计划



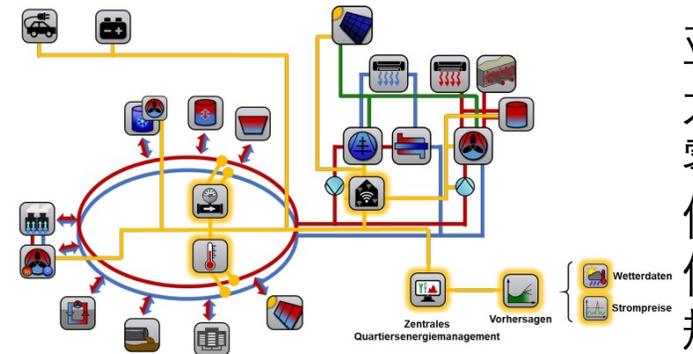
瑞典2050零碳供热计划



■ 德国、英国等也在新建区域采用集中供暖模式



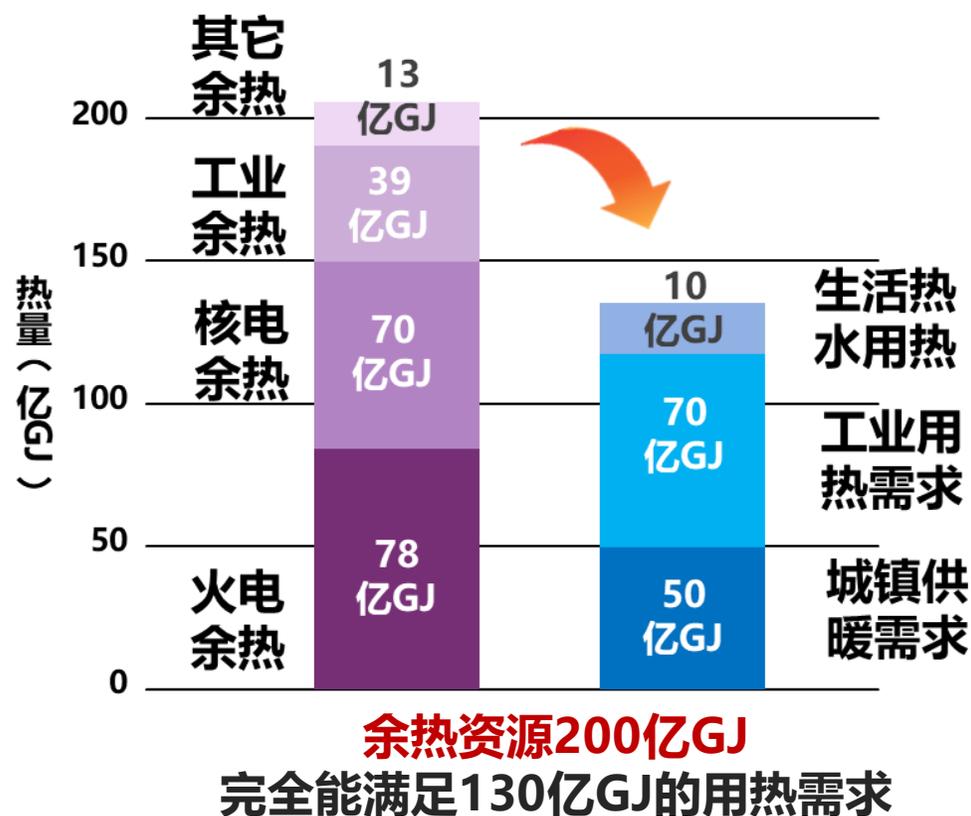
德国尤利西零碳示范园



亚琛大学零碳供暖供冷规划

工业余热的潜力分析

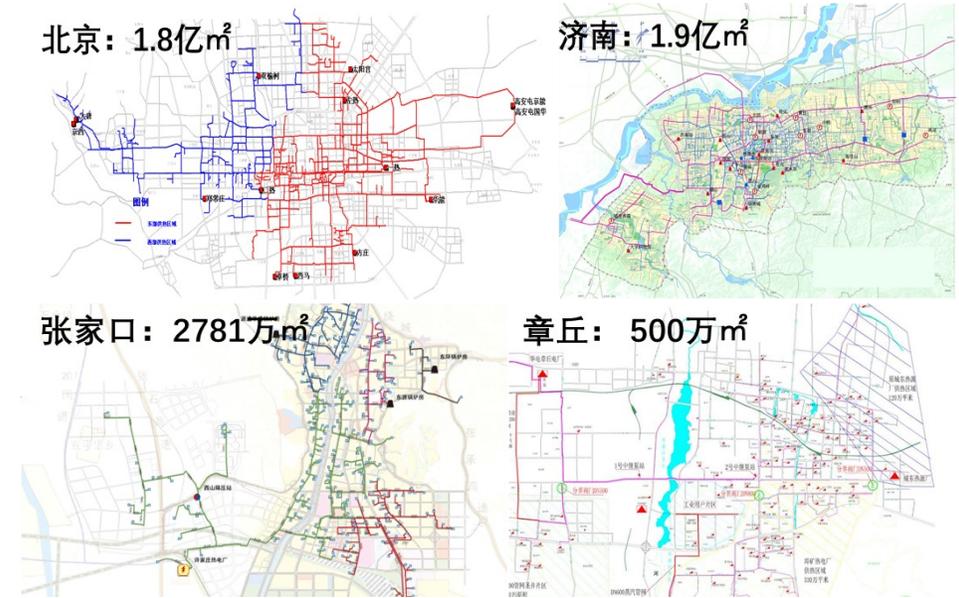
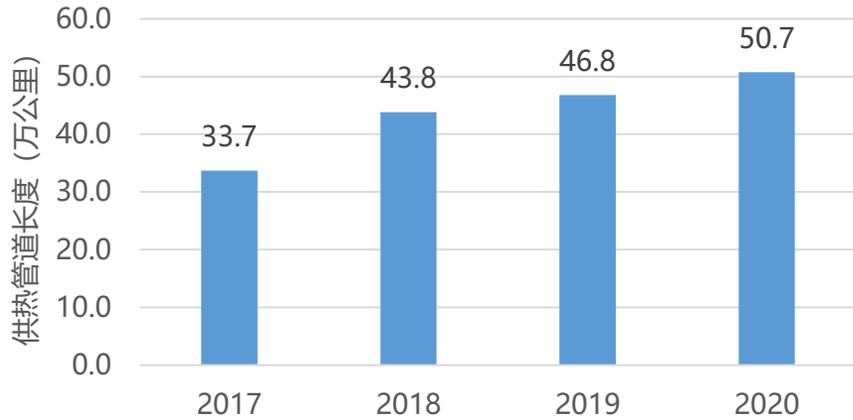
- 建筑及非流程工业150°C以下的用热需求130亿GJ
- 低品位余热200亿GJ完全可以满足用热需求



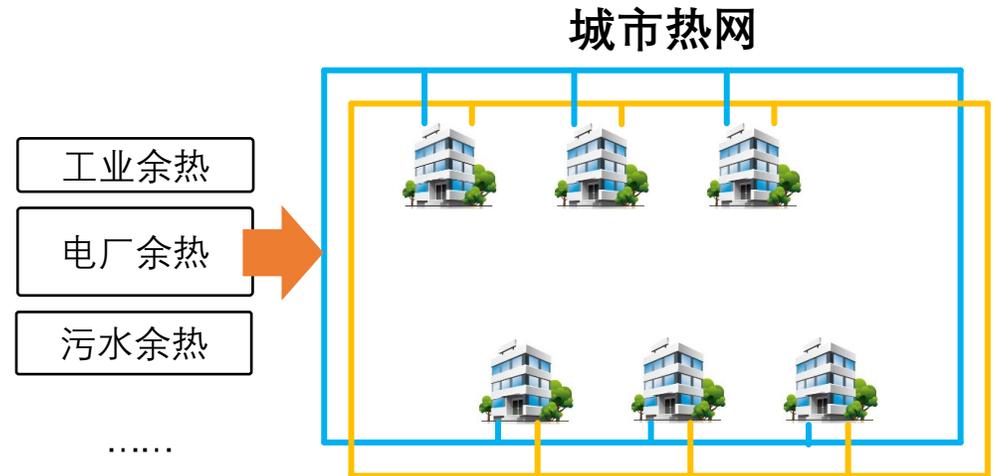
集中热网是宝贵的资源

■ 我国是集中供热为主的国家，拥有完善的集中供热管网

- 截至2020年底，我国集中供热管线总长度约为50.7万公里
- 大中小城市、城镇均有较为完备的集中供热网



■ 充分利用已有的热网基础设施，低成本地输送各类余热



低品位余热供暖的难题

低品位余热利用存在三个难题

余热产生、热网输送、需求之间**温度**不匹配

□ 温度变换器——吸收式换热

余热产生的波动和供热需求变化之间**时间**不匹配

□ 大规模储热技术

余热远离热负荷，供需之间**空间**不匹配

□ 长输供热技术



余热温度：30~60°C

时间规律：取决于产品生产需求

热网温度：120°C/20°C

采暖温度：45°C/35°C(地暖)或60°C/45°C(散热器)

时间规律：季节性需求、昼夜不稳定

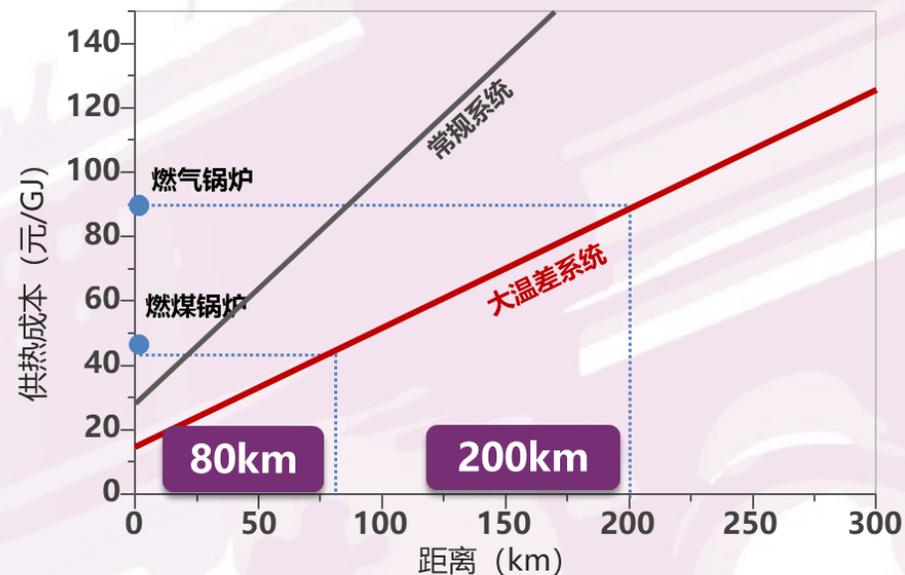
解决空间不匹配——长输供热技术

- 余热源大多远离城市负荷区，如何安全经济地长距离输热？

- 大温差长输供热技术

- 与燃气供热相比，经济供热距离为200km

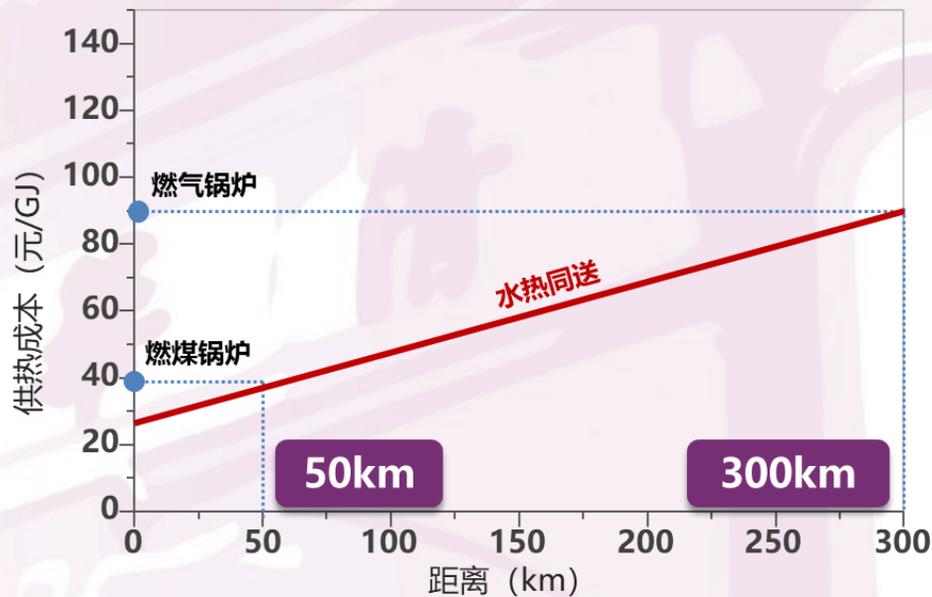
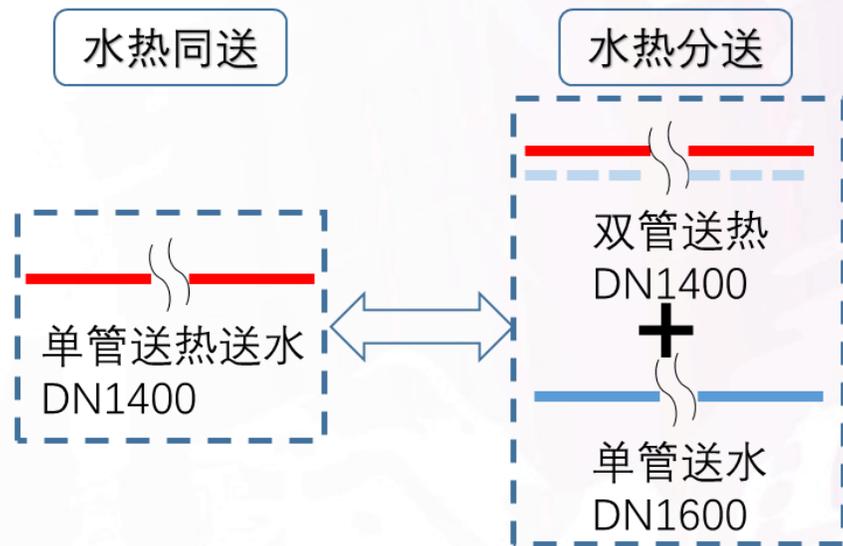
- 供回水温差扩大至110℃，比传统热网增加供热能力60%以上，大幅降低热量输送成本
- 降低回水温度提高余热回收系统效率，降低热量成本



解决空间不匹配——长输供热技术

■ 沿海核电和火电水热同送技术

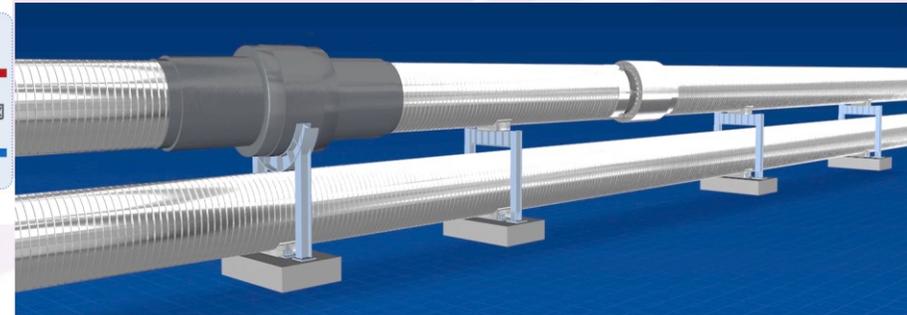
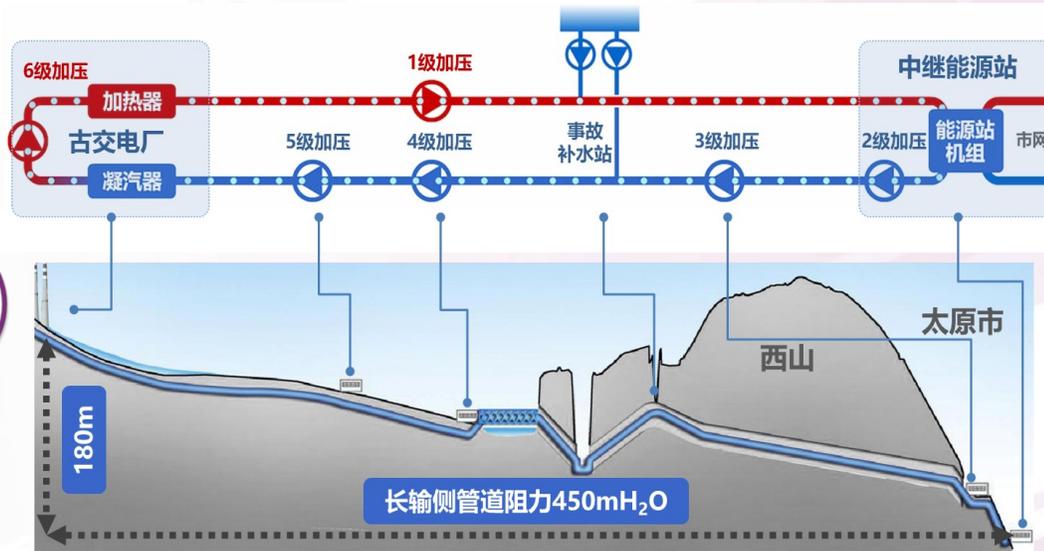
- 用单根长输管线输送热淡水，水和热量同时输送，省去了回水管道，大幅节约输送成本
- 水热同送输热成本相比传统长输供热低40%
- 不考虑输水成本，水热同送经济供热半径与燃煤相比为50km，与燃气相比为300km



解决空间不匹配——长输供热技术

■ 输送距离长带来的问题

- 长距离、大高差，管道沿程阻力与高差之和远超管道承压等级
- 长距离输热，沿程热量损失大



镀锌铝钢板外护 聚氨酯保温管



预装配分体式绝 热支座



隔热管道用膨胀节



预制保温固定节

多级热网泵配置技术

六级泵循环加压工艺

长输热网成套减热损设备及技术

解决空间不匹配——长输供热技术

■ 太原（太古）大温差长输供热示范工程

- 单体供热规模7600万m²
- 长输热网回水日平均温度32.2℃
- 供热半径超过70km，其中热源至隔压站37.8km
- 全网高差260m，其中热源至隔压站高差180m
- 全程温降小于1℃



解决空间不匹配——长输供热技术

■ 目前我国北方城市大温差长输供热快速发展

- 在太原、石家庄、济南、银川、郑州、呼和浩特、西安等省会城市大规模应用，供热规模**11.2 亿m²**



太原
供热面积: 10600万m²



石家庄
供热面积: 18500万m²



呼和浩特
供热面积: 9000万m²



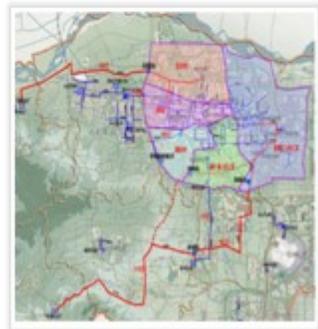
西安
供热面积: 7500万m²



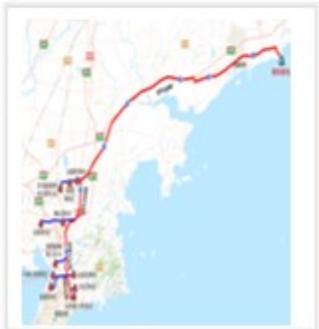
济南
供热面积: 28000万m²



银川
供热面积: 11219万m²



郑州
供热面积: 12000万m²



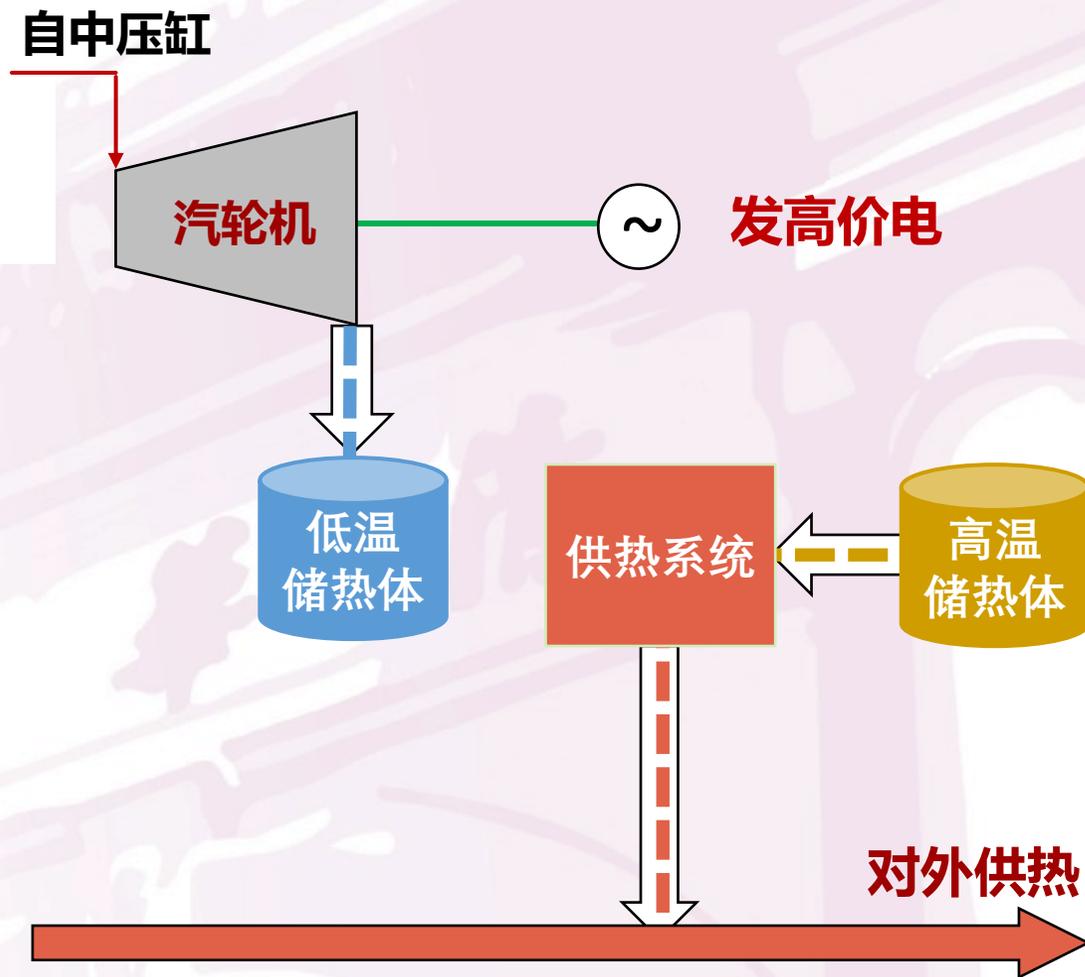
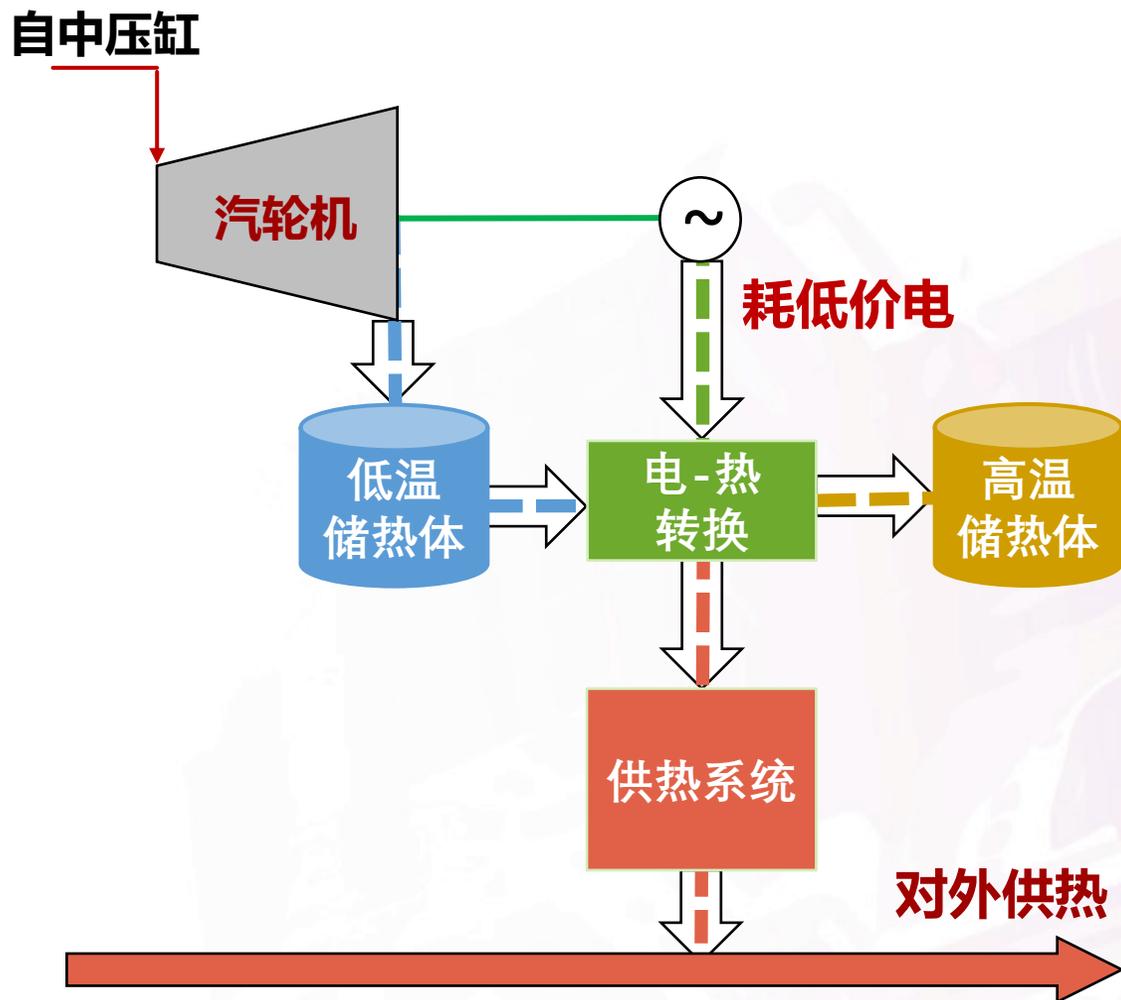
青岛
供热面积: 5000万m²

项目进度	项目工程	供热面积	供热能力	长度	管径	运行温度 (°C)	设计温度 (°C)	
		(万m ²)	(MW)	(km)				
已建成	石家庄西柏坡长输供热	8500	—	45	4×DN1400	115/39.7	130/20	
	太原古交长输供热	8000	2205	37.8	4×DN1400	118/43	130/30	
	阳城电厂至晋城市长输供热	3000	—	26	2×DN1400	—	130/30	
	银川市长输供热	一期	3770	1795	46	2×DN1400	126/39	130/30
		二期	3179	1475	39	2×DN1400	125/40	130/30
	郑州市长输供热	裕中电厂	2700	1200	35	2×DN1600	120/40	130/55
		登封电厂	4667	2100	60	2×DN1600	—	130/30
托克托电厂至呼市长输供热		8000	—	70	4×DN1600	—	120/20	
					4×DN1400			
施工建设阶段	海阳核电至莱阳乳山长输供热	3050	1372.5	67	2×DN1000	—	120/30	
	国能费县电厂至临沂长输供热	3000	—	44	2×DN1400	—	125/40	
规划设计阶段	红沿河核电站核能长输供热工程	一期	2000	627	80.2	2×DN1600	—	125/15
		远期	7740	2316	114.6			
	济南长输	聊热北线	12000	—	92.2	2×DN1600	—	120/10
		聊热南线	5200	—	40.8	2×DN1400	—	120/27
	西安长输	铜川-美鑫长输	—	3754	74	2×DN1600	—	120/20
			—	—	—	2×DN1400		
			—	—	—	2×DN1200		
	蒲城长输	—	2580	120	2×DN1400	—	120/20	
秦岭长输		—	1030	100	2×DN1200	—	120/20	
海阳核电向青岛供热长输	5000	—	100	2×DN1600	—	125/15		

解决时间不匹配——热电协同技术

■ 低电价时段将低价电以热的形式储存起来

高电价时段，释放储存的热量，增加发电



解决时间不匹配——跨季节储热技术

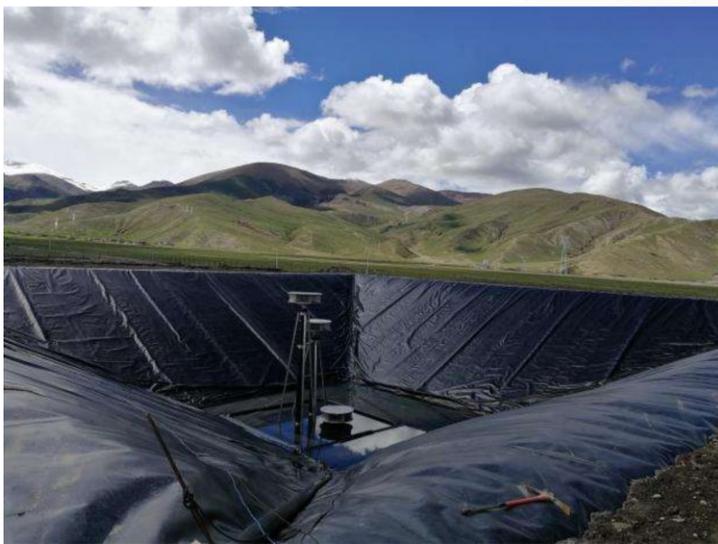
- 余热量受产品的生产影响：
 - 产量变化引起余热量的波动
 - 非采暖季仍有大量余热产生
- 大型跨季节储热充分有效地回收全年各类余热，平衡余热与供热负荷的时间不匹配
- 提高供热系统的可靠性



解决时间不匹配——跨季节储热技术

■ 大型跨季节储热水池

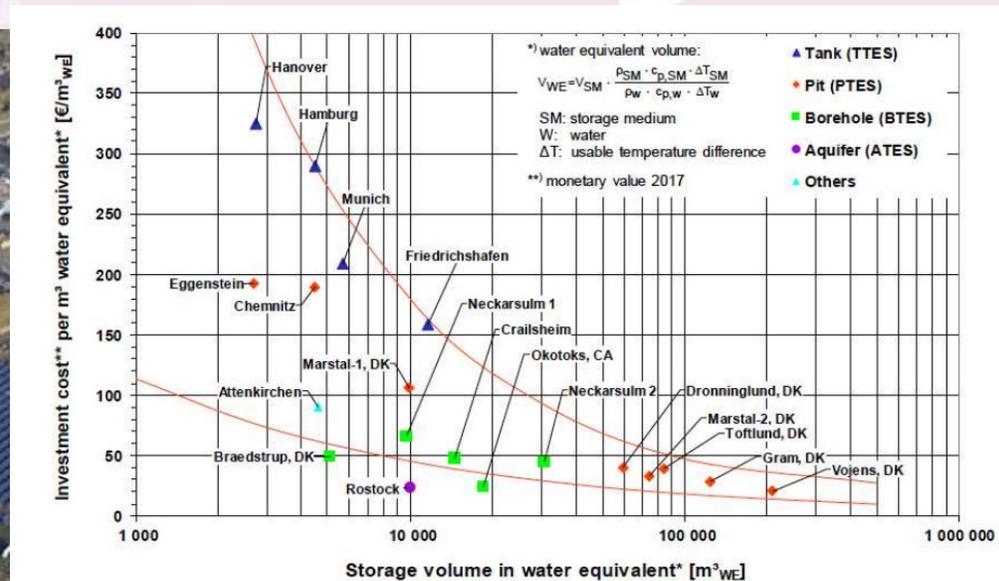
- 中国、德国、美国、法国、丹麦、瑞士、奥地利、韩国、英国、西班牙等国都有应用
- 储能的形式多样，罐式（卧式、立式）、坑式、箱式、利用地下自然形成的坑洞等
- 蓄热水池容积越大投资越低
 - 2015年建成的丹麦Vojens蓄热水池容积21万m³，投资仅24欧元/立方米，折合人民币不到200元/立方米



西藏浪卡子太阳能蓄热水池
15,000m³



丹麦Vojens太阳能蓄热水池
210,000m³



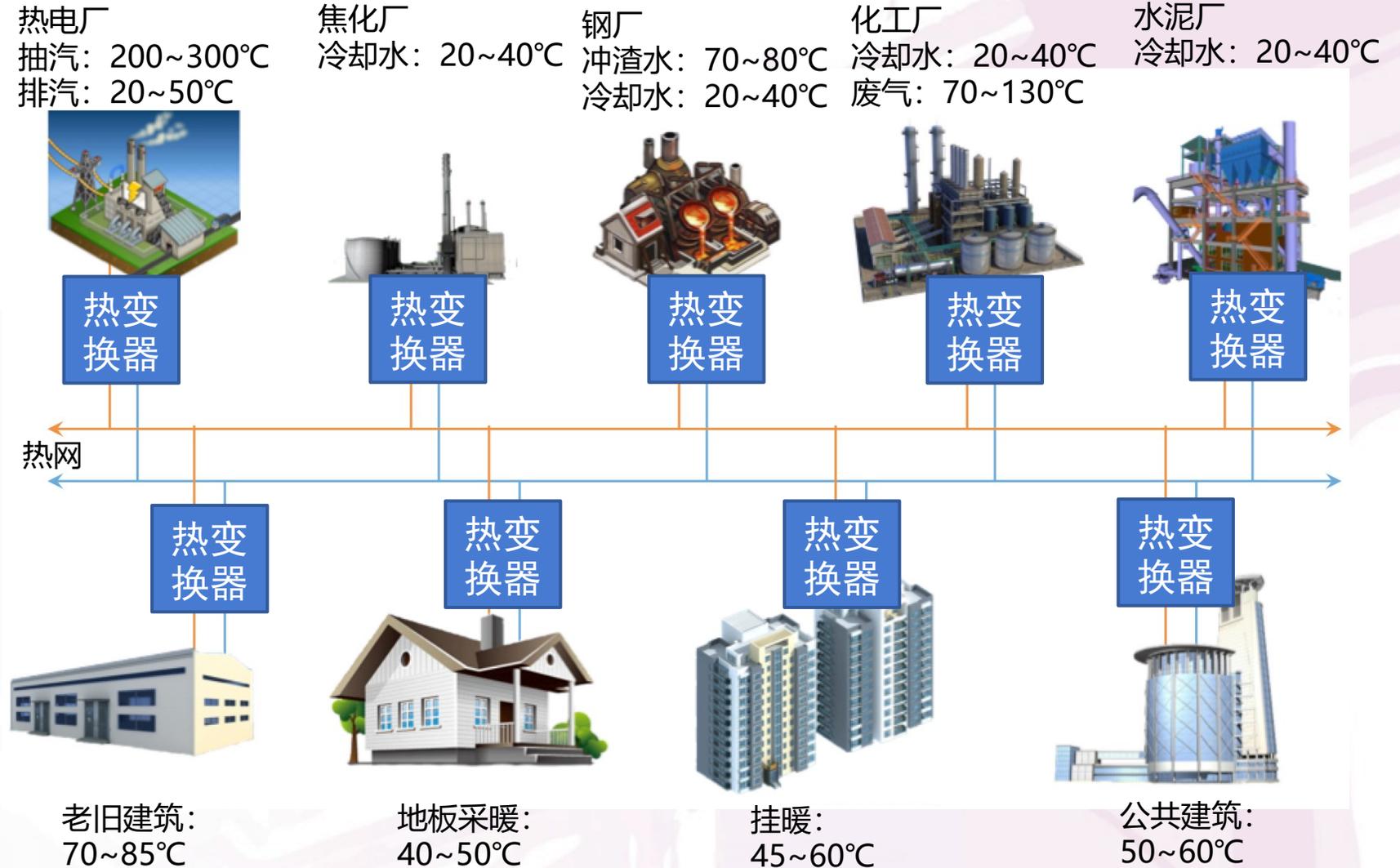
不同容积蓄热水池投资

解决温度不匹配——热变换器

■ 温度不匹配问题:

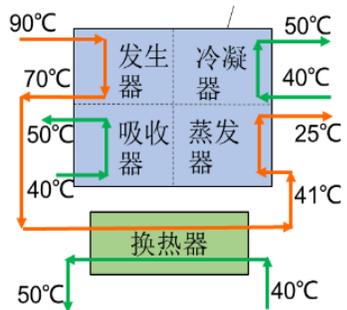
- 不同低品位余热通过同一张网输热
- 需求不同温度的热用户

■ 采用各类吸收式换热和吸收式与压缩式热泵联合换热的热变换器实现不同温差间的热量传递和变换的方法



解决温度不匹配——热变换器

- 吸收式、压缩式、压缩吸收复合式，以及分布与集中式等适用于不同场景的热变换器



分体型



模块机

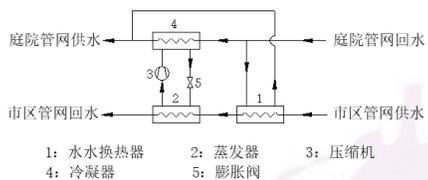


补燃型



楼宇型

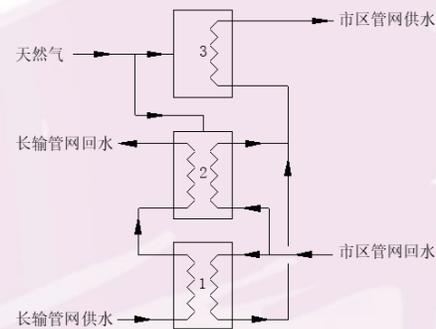
吸收式换热技术



- 1: 水水换热器
- 2: 蒸发器
- 3: 压缩机
- 4: 冷凝器
- 5: 膨胀阀



压缩式换热技术

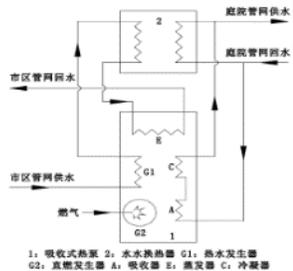


- 1: 板式换热器
- 2: 直燃型吸收式热泵
- 3: 燃气调峰锅炉

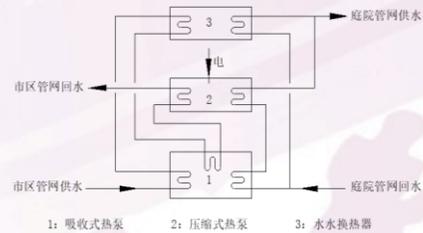


- 1: 直燃型吸收式热泵
- 2: 供水加压机
- 3: 回水加压机

大型集中式吸收式换热技术



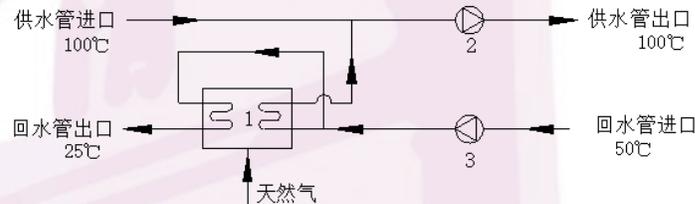
补燃型吸收式换热技术



- 1: 吸收式热泵
- 2: 压缩式热泵
- 3: 水水换热器



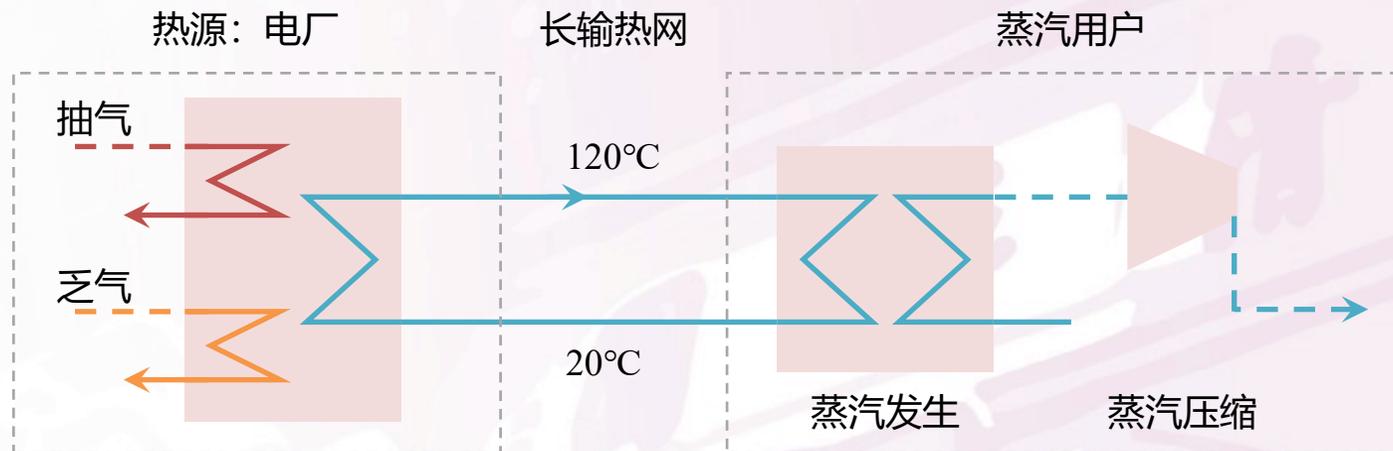
压缩/吸收复合式换热技术



解决温度不匹配——热变换器

■ 长输热水生产蒸汽满足工业用热需求

- 以长输热网高温供水为驱动，通过直接闪蒸或者高温热泵提热的方式，生产低参数蒸汽，然后使用蒸汽压缩机，将蒸汽压缩至需求压力。
- 技术特点：
 - 可根据需求生产不同参数的蒸汽
 - 容量范围广，启停方便
 - 适合用汽点分散、负荷不稳定、参数需求差异大的用户



输送热水生产蒸汽流程示意图

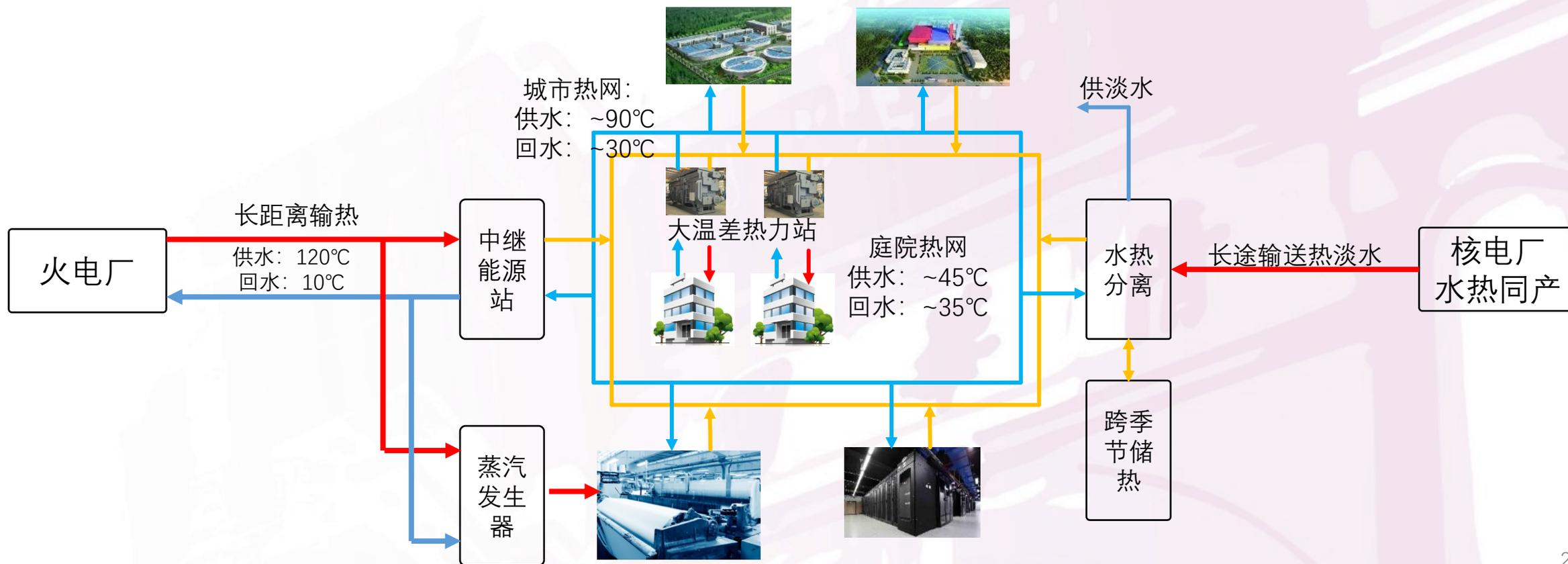
北方城镇零碳供热模式

■ 以余热为主的零碳清洁供热模式

- 1、降低热网回水温度
- 4、跨季节储热调峰

- 2、回收余热供热
- 5、给非流程工业供热

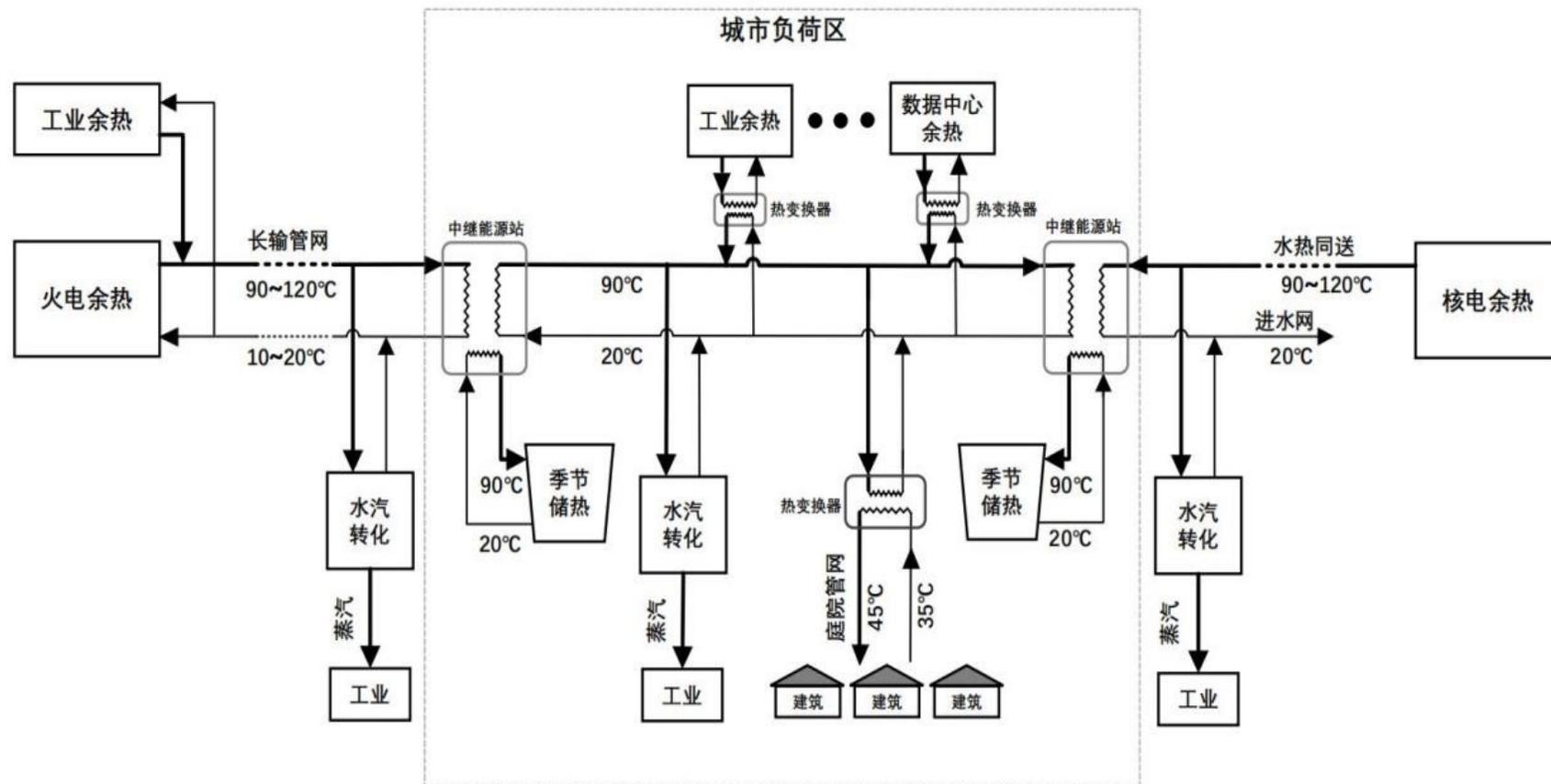
- 3、大温差长距离输热、水热同送



北方城镇零碳供热模式

■ 以余热为主的零碳清洁供热模式

- 余热利用
- 长输供热
- 低温回水
- 热电协同
- 蓄热调峰



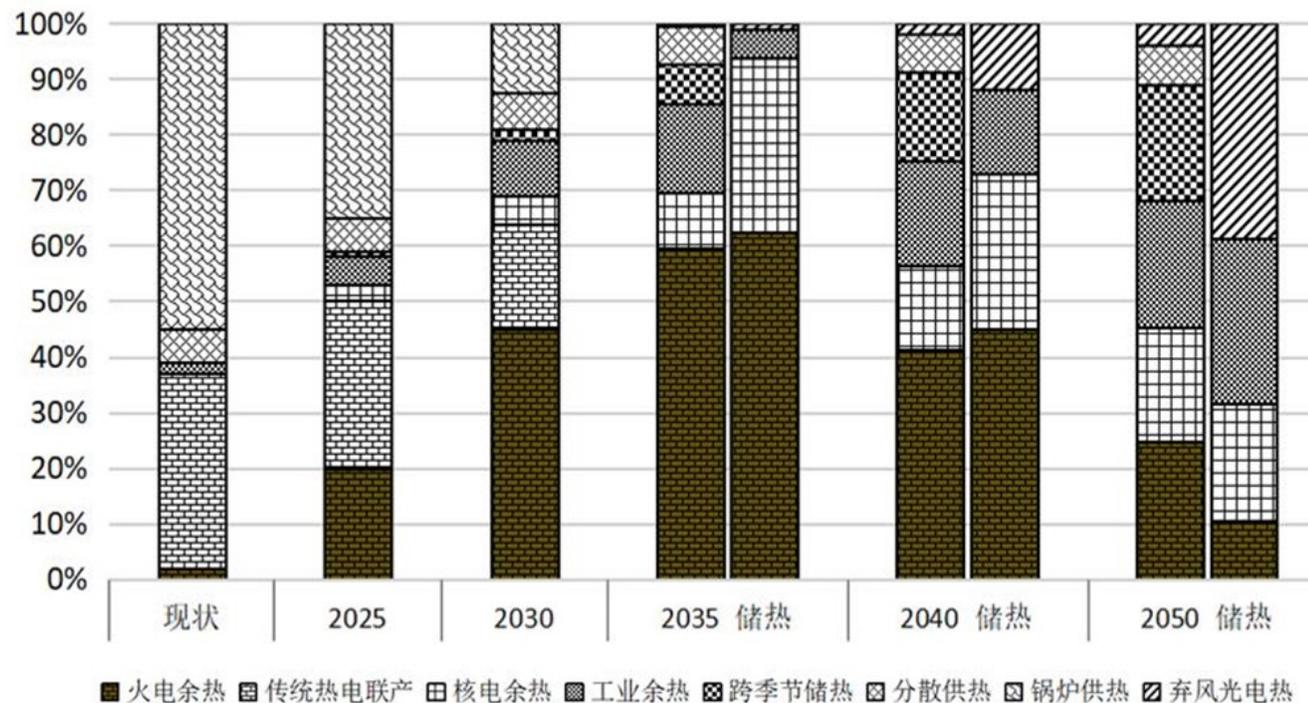
分散供热作为辅助

- **各类电动热泵——用于热网难以覆盖、不具备规模的区域**
 - 土壤源
 - 水源
 - 空气源
 -

供热碳中和模式

- 2050年实现城市供热碳中和，供暖规模为200亿m²，非流程工业供热70亿GJ

	供热 (亿GJ)	扣除热损的供热 (亿GJ)
火电	30.9	29.0
核电	28.7	27.0
工业余热	25.4	23.9
弃风光电	13.4	12.7
集中供热其它耗电	29.8	29.3
分散采暖	8.2	8.2
合计	136.4	130.0



两种供热方案对比

■ 余热供暖方案远优于全面电气化方案

- 全面电气化方案总体投资增加8.2万亿元，总运行费用增加0.41万亿元
- 余热供热为主的方案供热成本66元/GJ
- 全面电气化方案供热成本154元/GJ

投资	余热为主供热方案 (万亿元)	全面电气化供热 (万亿元)
风电光伏	2.96	7.21
火电厂 (含ccus)	0.20	1.25
跨区输电及区域电网	1.85	6.63
余热、热泵及电加热	0.81	0.20
跨季节储热	0.55	
跨区域热网	1.10	
分散采暖	0.09	0.47
合计	7.57	15.76
运行费用	余热为主供热方案 (万亿元)	全面电气化供热 (万亿元)
火电厂燃料及CCUS	0.11	0.37
运行维护费	0.08	0.23
合计	0.19	0.60

结论与建议

- **结合我国国情，构建以余热为核心的城镇清洁低碳供热模式，是切实可行的供热碳中和之路**
- **加快制定全国清洁低碳供热规划和政策，引导科学合理的北方城镇供热发展之路**
- **支持推动以余热利用为核心的北方供热事业，为实现碳中和做贡献**



谢谢，敬请指导！

Email: wuyanting@tsinghua.edu.cn