



低碳电力技术基础——第05讲

用户侧的碳减排机理

康重庆

清华大学电机系

cqkang@tsinghua.edu.cn



第4讲-思考题



- 对于课程中介绍的输煤与输电间的碳排放比对，你认为还有哪些环节可以进一步深入分析？
- 根据课程中介绍的网损对应的碳排放计算方法，你能提出改进的分析方法吗？
- 自行调查数据，大致估算一下，我国电网侧碳排放总量与发电侧碳排放总量的比例？
- 感兴趣的同学，可阅读碳排放流相关资料。



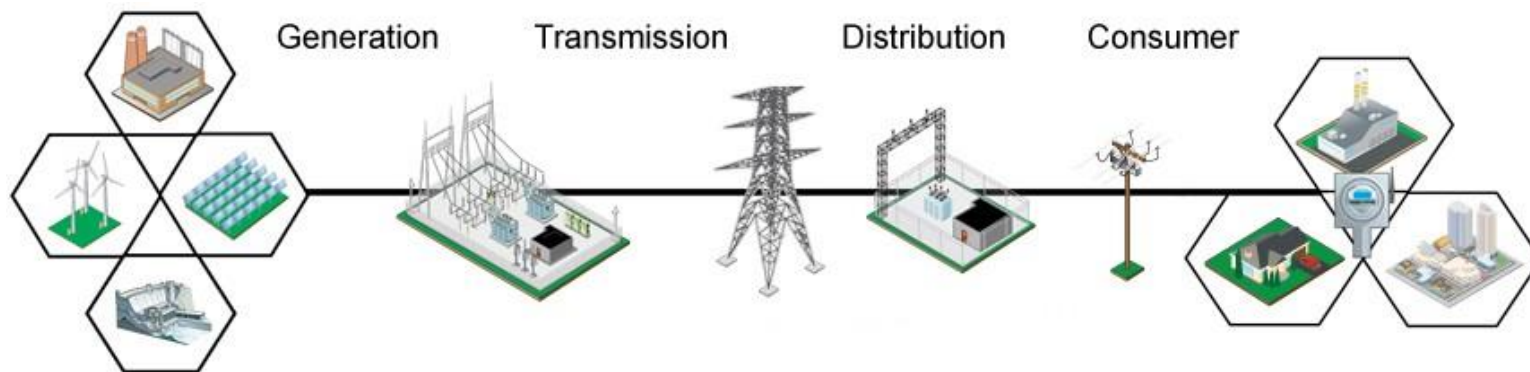


- **对用户侧碳排放的认识**
- **用电行为的描述**
- **用电环节与低碳电力的关系**
- **用电环节的低碳途径**
- **案例分析：电动汽车**





- 电力系统碳排放来源：
 - 发电环节——化石燃料燃烧、电厂建设……
 - 输电环节——六氟化硫泄露、**(输电损耗)** ……



用电环节的碳排放特点



- 电力系统碳排放来源：
 - 用电环节——电能是清洁的二次能源。
 - 对电力用户而言，电能的使用方式多种多样，但对于所有的方式而言，电能在使用过程中不产生直接碳排放。

用电环节和低碳电力间的关系为何？

用电环节与低碳电力的关系



- 电力行业生产与传输是为了满足用户的用电需求。虽然电能在使用过程中不产生碳排放，但实质上，电力用户（需求）是电力行业碳排放的本质原因。

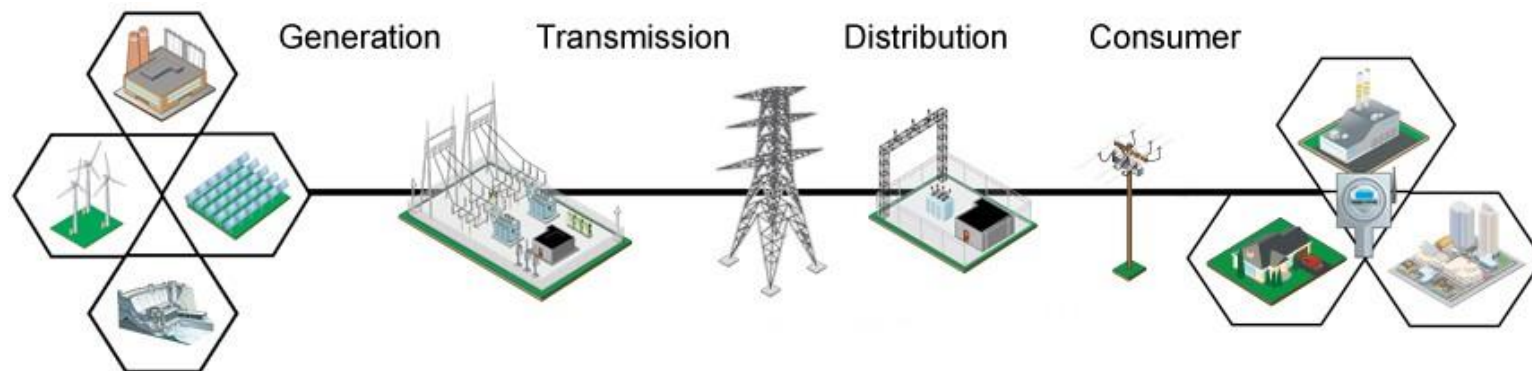
需求造成生产！

- 虽然电能在使用过程中不产生排放，但是电力用户的用电行为、方式与习惯对电力系统的低碳特征有着重要的影响作用。

用电环节与低碳电力的关系



- 为了充分了解用电环节对电力系统碳排放的影响与低碳减排的方法，需要首先对用电环节的基本特征进行分析和讨论。





用电行为的描述

用电行为的描述



- 电力负荷

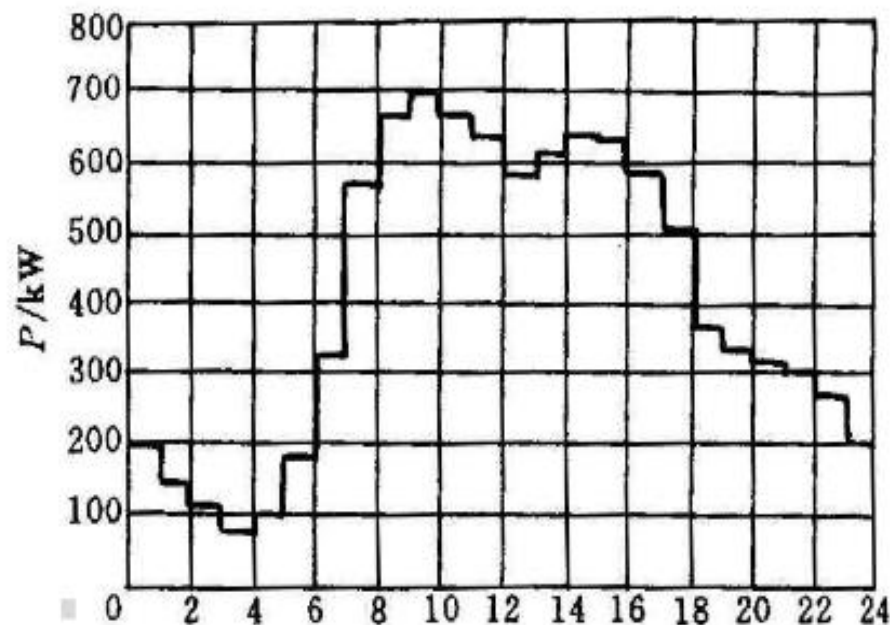
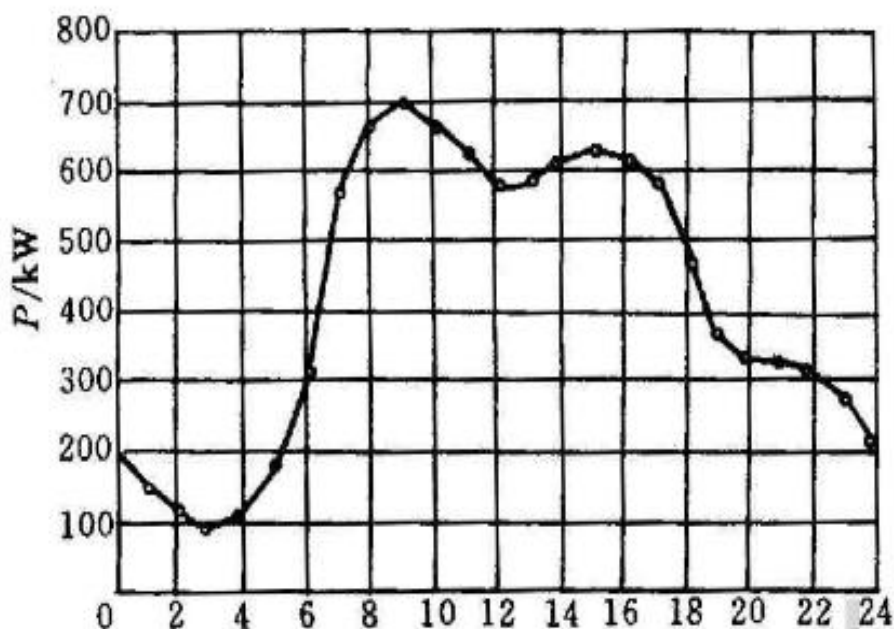
- 电力系统中所有用电设备所耗用的功率，简称负荷。

电力系统的总负荷就是系统中所有用电设备消耗功率的总和。

- 负荷曲线

- 反映电力系统中电力负荷在一段时间内变化特征的曲线称为负荷曲线。

用电行为的描述



日有功负荷曲线

a) 依点连成的负荷曲线 b) 绘成梯形的负荷曲线

光滑曲线、折线

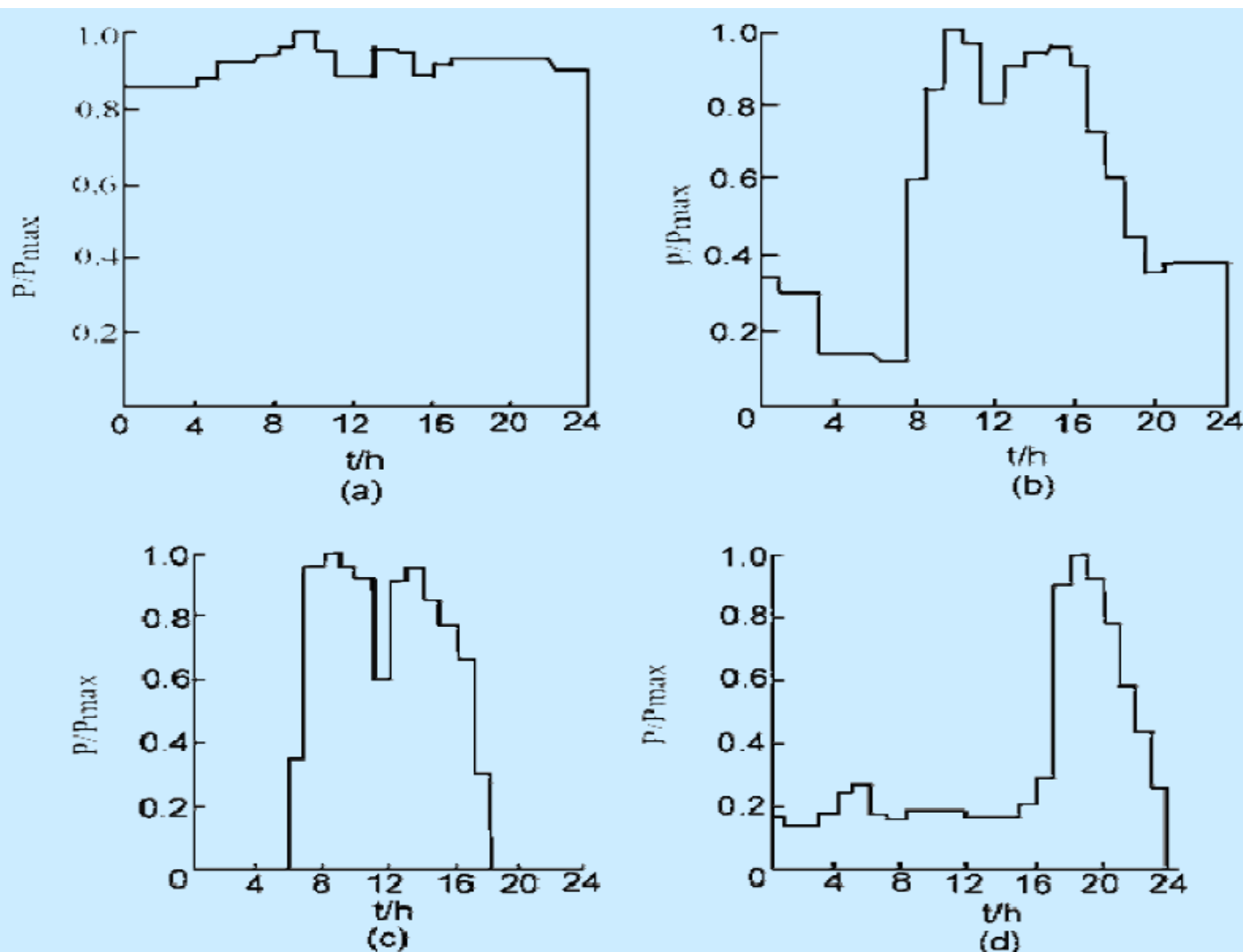


清华大学
Tsinghua University

EITab
Energy Intelligence Laboratory
清华大学电机系·智慧能源课题组



用电行为的描述



(a) 钢铁企业负荷
(b) 食品企业负荷
(c) 农村加工业负荷
(d) 市政生活负荷

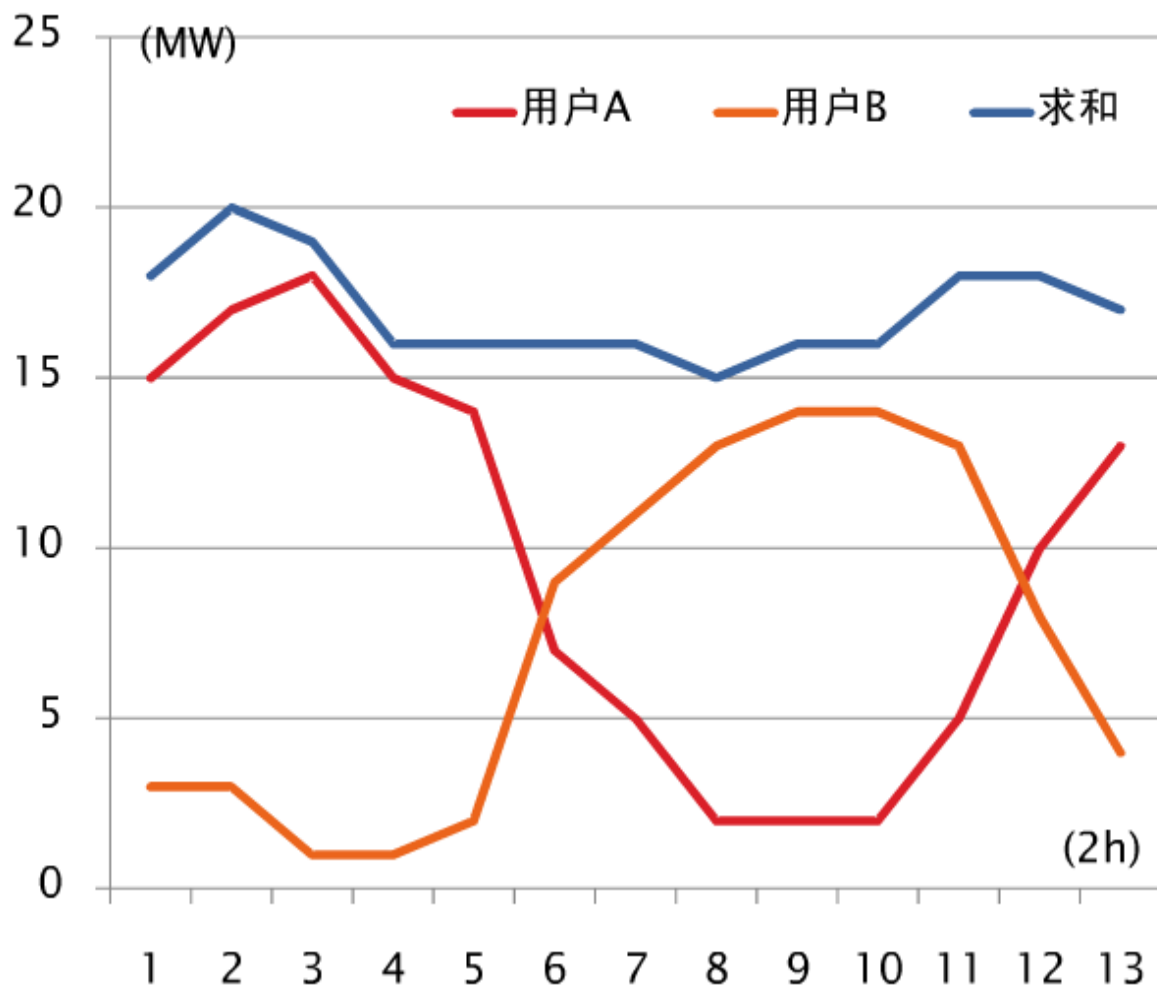
➤ 哪个曲线，
电力系统调度
人员最喜欢/
不喜欢？

用电行为的描述

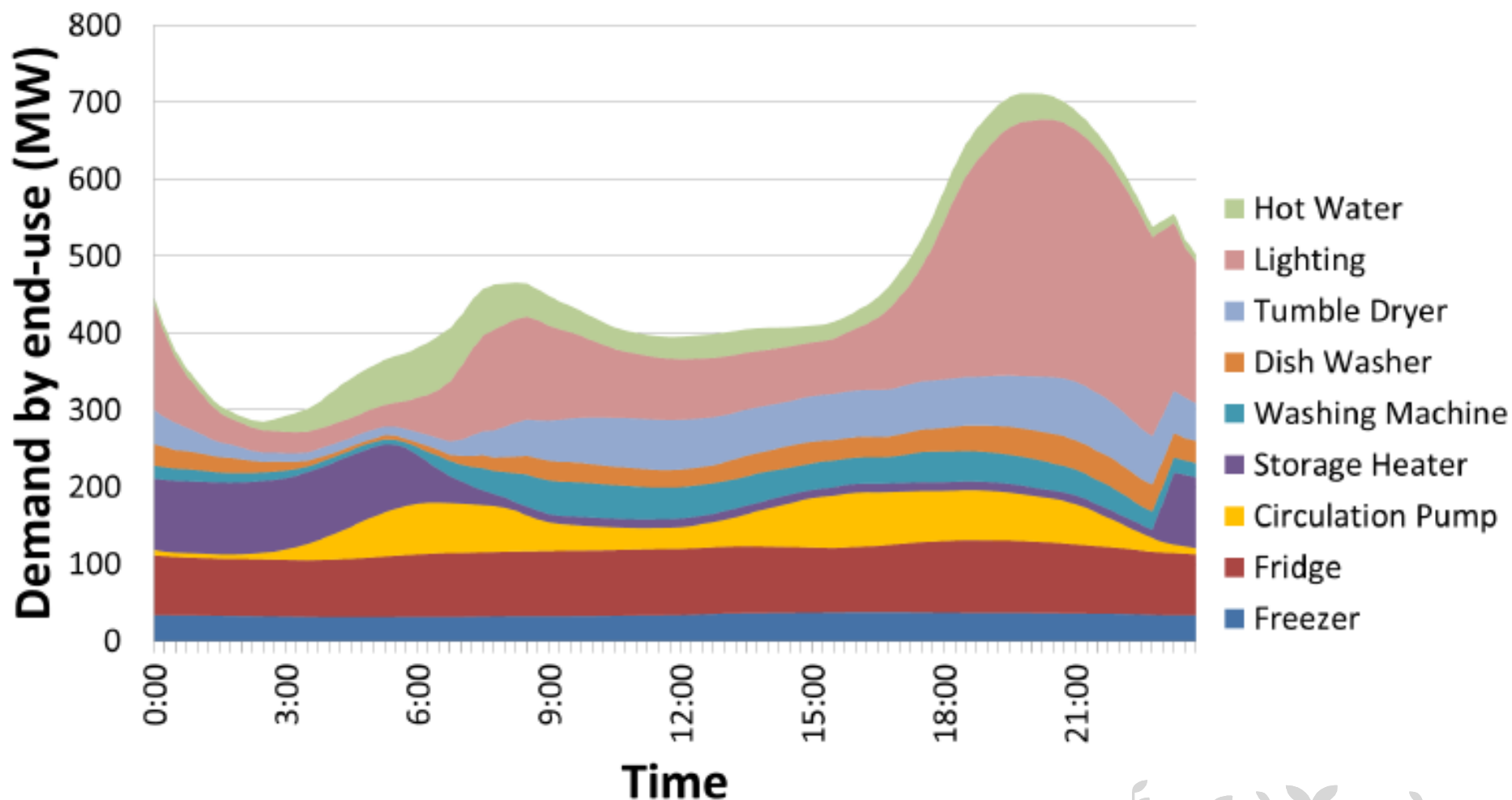


负荷的非同时性

- 电力系统负荷是由所有用户负荷的加总；
- 各用户的负荷可以由日负荷曲线来描述；
- 各用户用电时间存在差异，称之为负荷的非同时性；
- 如果用户负荷非同时性越大，加总的日负荷曲线就会越平缓（错峰效益）。



用电行为的描述



日负荷曲线特征



- 设某日的负荷序列为： $P_t, t = 1, 2, \dots, T$

- 日最高负荷： $P_{\max} = \max_{1 \leq t \leq T} P_t$

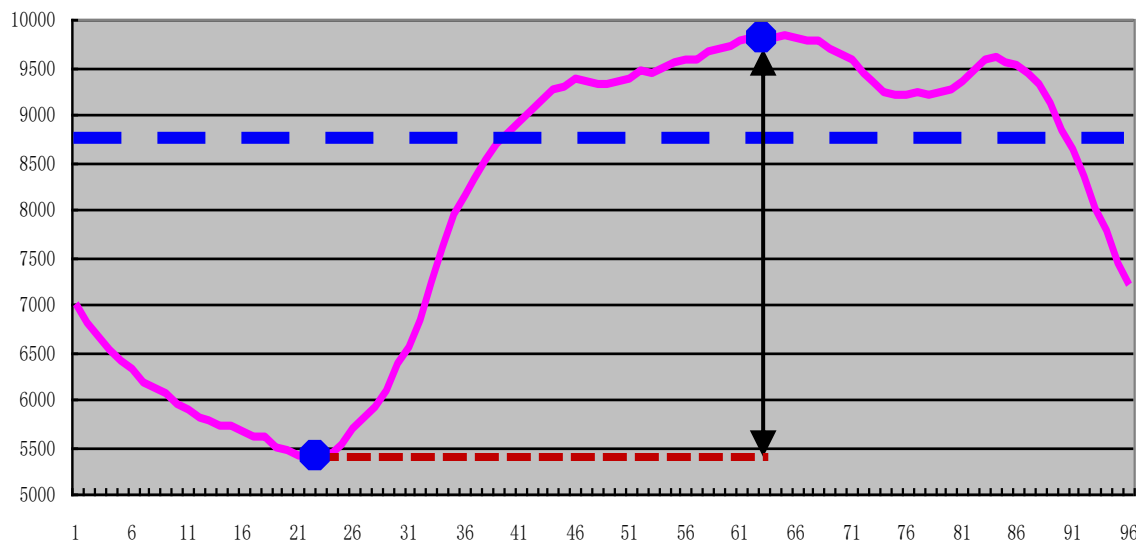
- 日最低负荷： $P_{\min} = \min_{1 \leq t \leq T} P_t$

- 日峰谷差： $L = P_{\max} - P_{\min}$

- 日平均负荷： $\bar{P} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_t$

- 日最小负荷率： $\beta = P_{\min} / P_{\max}$
- 日峰谷差率： $\alpha = L / P_{\max}$
- 日（平均）负荷率： $\gamma = \bar{P} / P_{\max}$

日负荷曲线



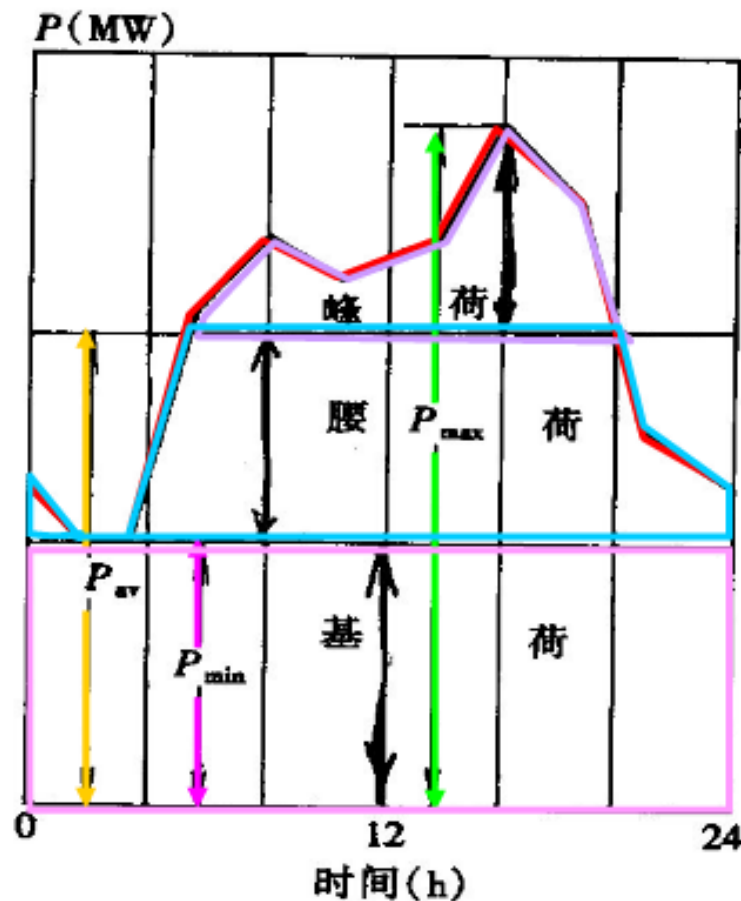
- 高峰/低谷（最高/最低）负荷：在一段时间内（一天）的最大/最小负荷称为高峰/低谷负荷
- 峰谷差：高峰负荷与低谷负荷间的差值



日负荷曲线特征



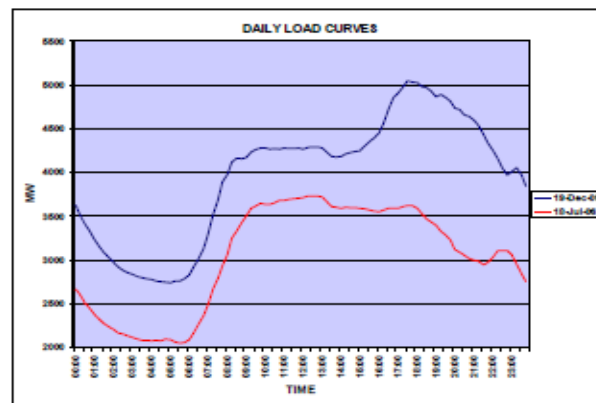
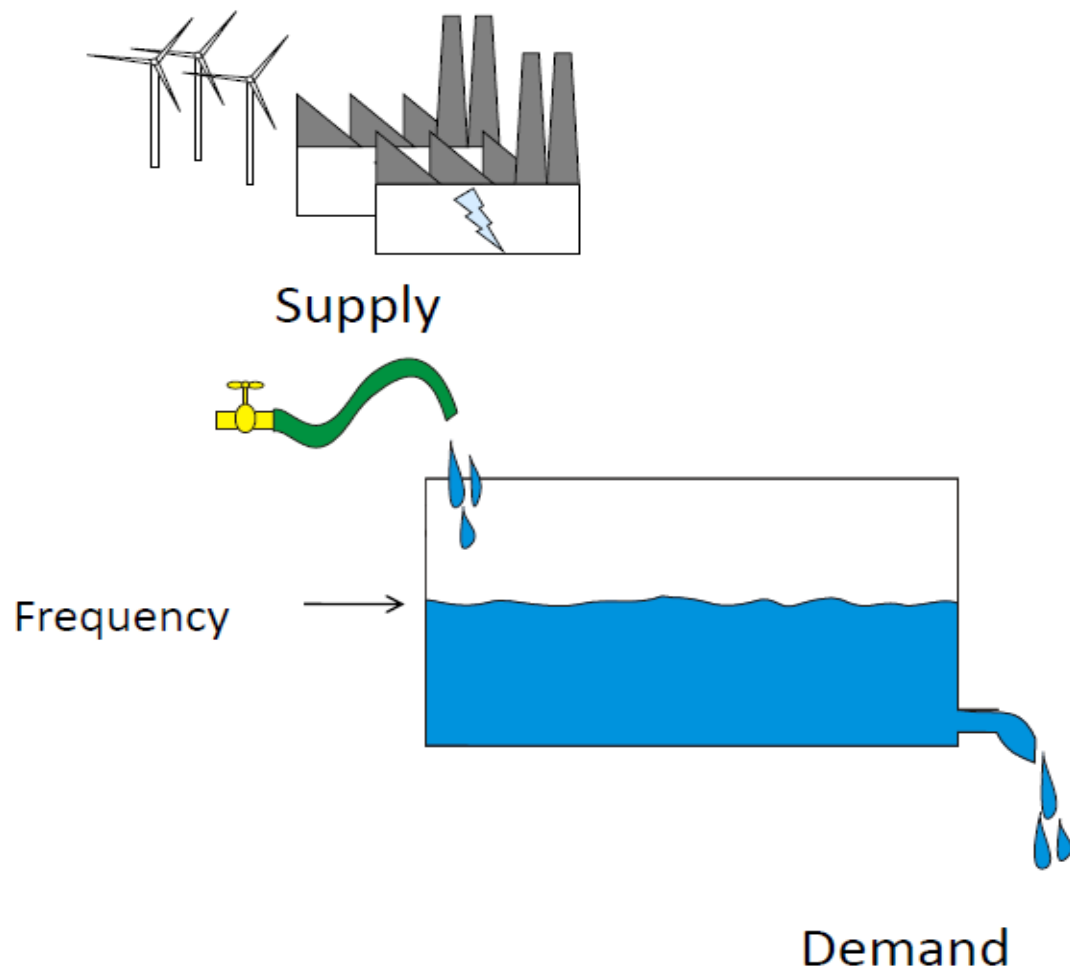
- 日负荷曲线的主要特征
 - 一天内负荷波动较大，存在明显的高峰负荷和低谷负荷，以及中间的过渡负荷水平——腰荷（平段）。
 - 低谷时段一般出现在每日的凌晨前后。
 - 峰时段因地区、因季节而异，有些地方存在早高峰、晚高峰这两个峰时段，有些地方则有早高峰、下午高峰、晚高峰这三个峰时段。





用电环节与低碳电力的关系

用电环节与低碳电力的关系



如何看待用电环节与低碳电力的关系?



- 在现有技术水平下，电能尚不能大规模存储，因此：
 - 电力系统中的功率需要时刻保持平衡，保证发电与用电时刻相等，否则将造成系统频率的不稳定。
 - 此外，还需充分考虑系统可能会发生的故障或事故影响，留出裕度，保证系统运行的可靠性。

如何看待用电环节与低碳电力的关系?



- 平均意义上的看待
 - 发电结构问题
- 仔细分析火电机组运行造成的碳排放
 - 煤耗曲线
 - 调峰、备用

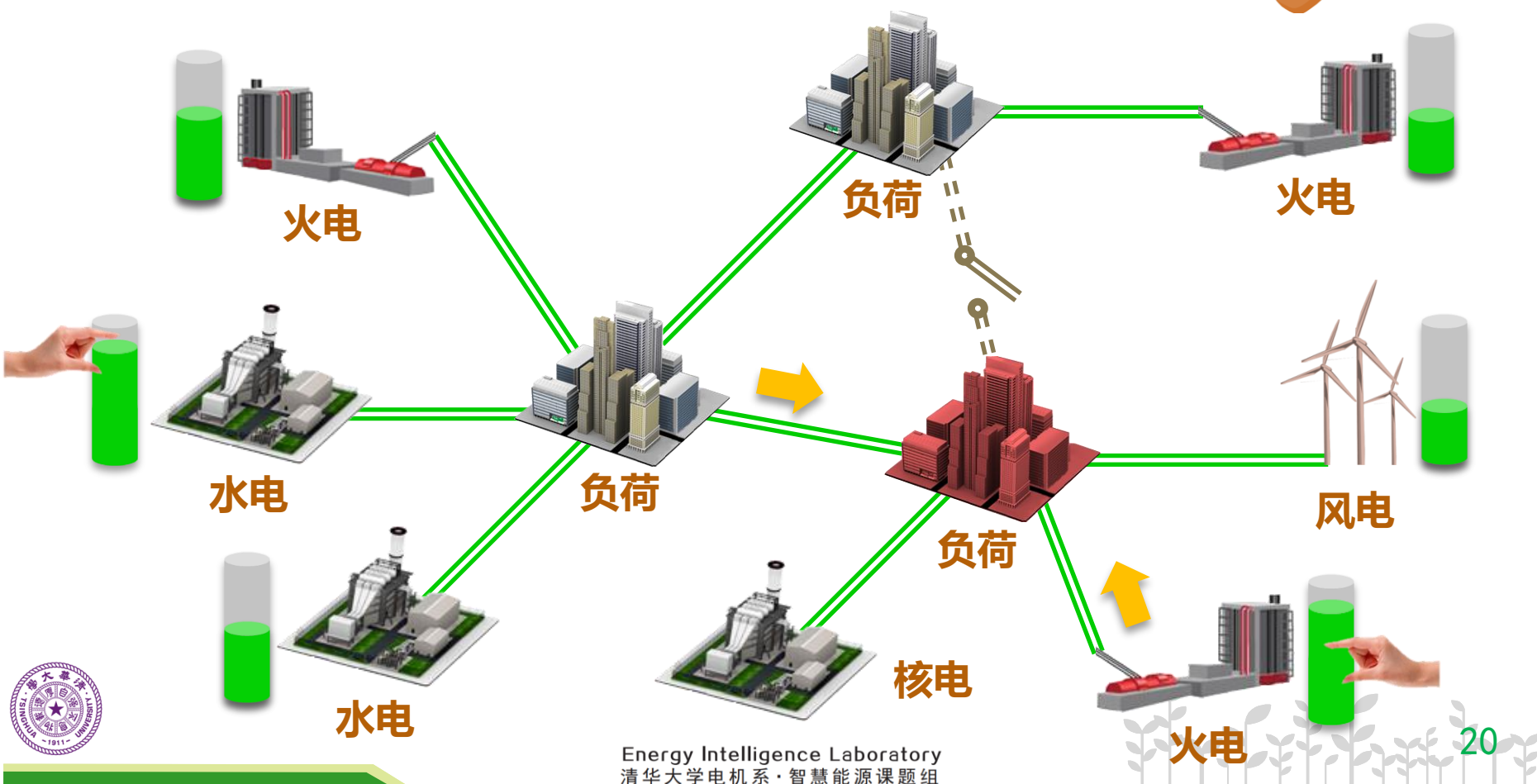
用电环节与低碳电力的关系



电网安全状况



线路过载



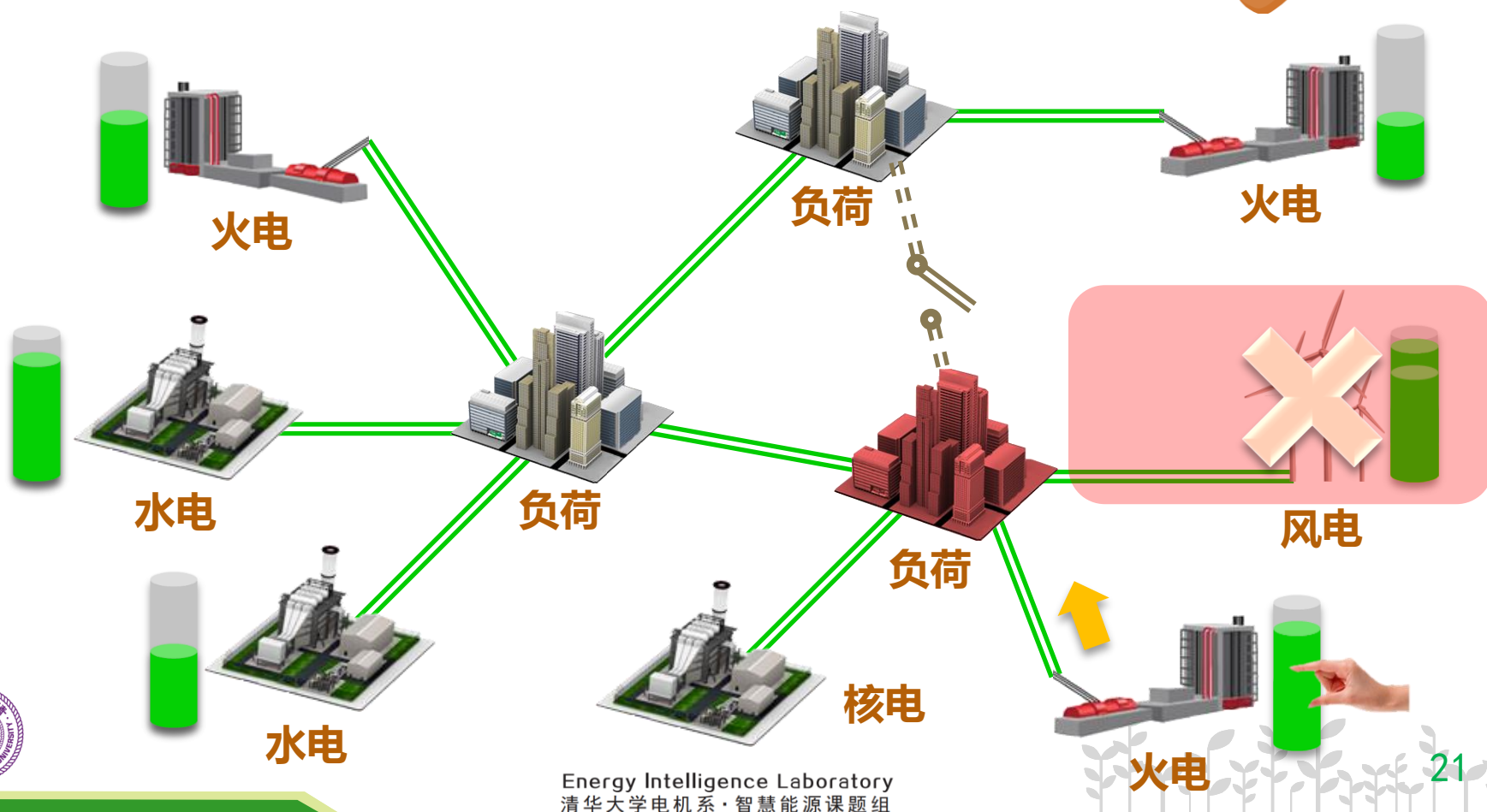
用电环节与低碳电力的关系



电网安全状况



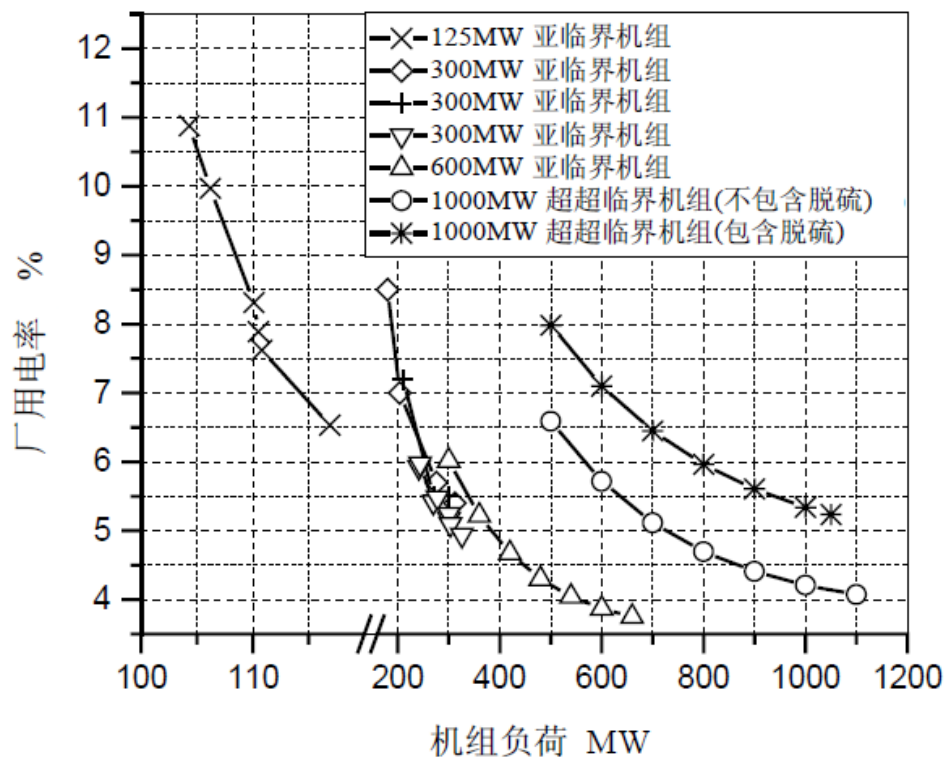
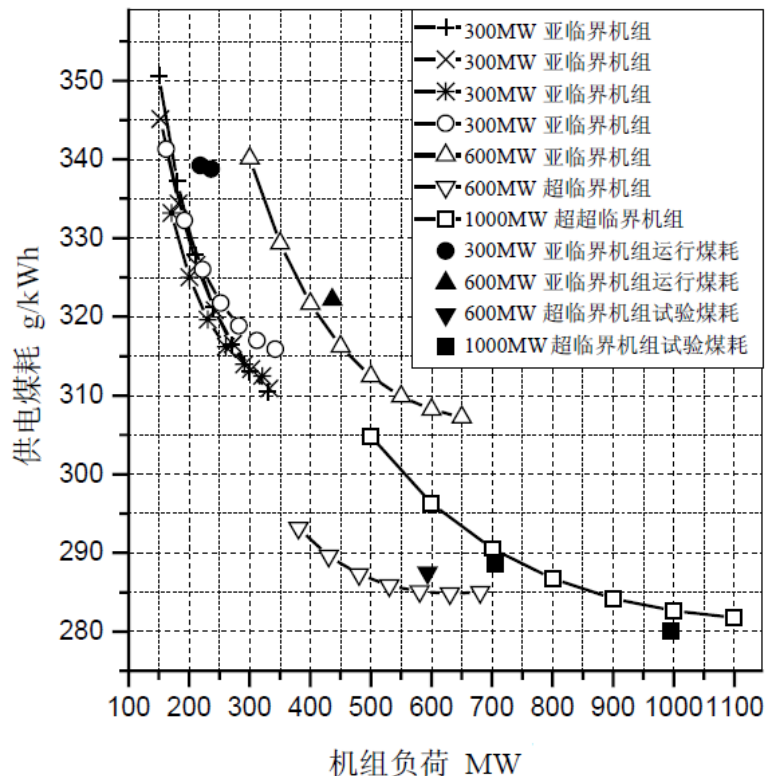
机组停运



用电环节与低碳电力的关系



● 煤电机组发电效率与工况的关系图



清华大学
Tsinghua University

EITab
Energy Intelligence Laboratory
清华大学电机系·智慧能源课题组



用电环节与低碳电力的关系



- 平均煤耗模型

$$AF(P_i) = a_1 + a_2 P_i + a_3 P_i^2$$

- 总煤耗模型

$$TF(P_i) = AF(P_i) \times P_i = a_1 P_i + a_2 P_i^2 + a_3 P_i^3$$

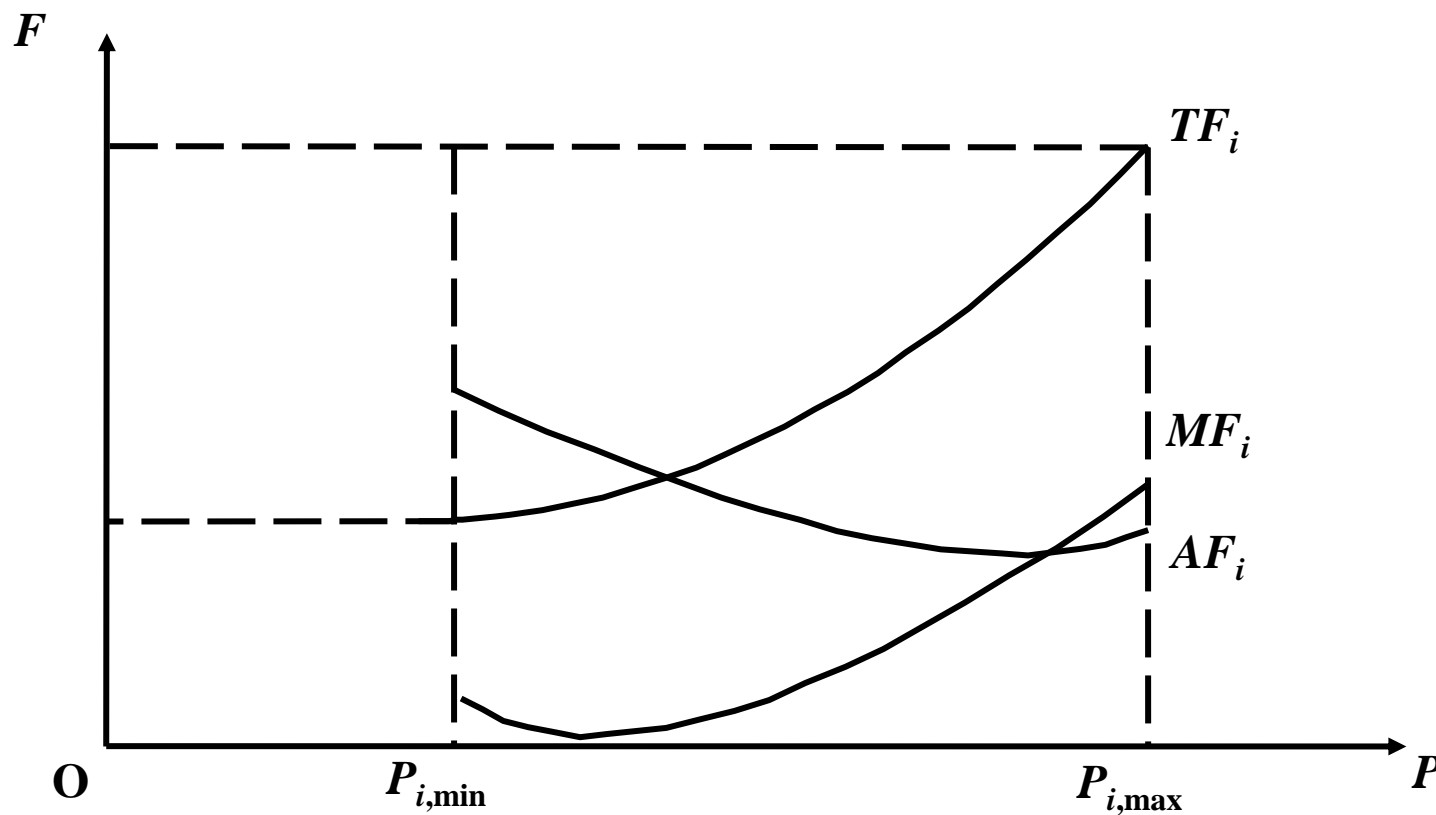
- 边际煤耗模型

$$MF(P_i) = \frac{d[TF(P_i)]}{d P_i} = \frac{d[AF(P_i) \times P_i]}{d P_i} = a_1 + 2a_2 P_i + 3a_3 P_i^2$$

用电环节与低碳电力的关系



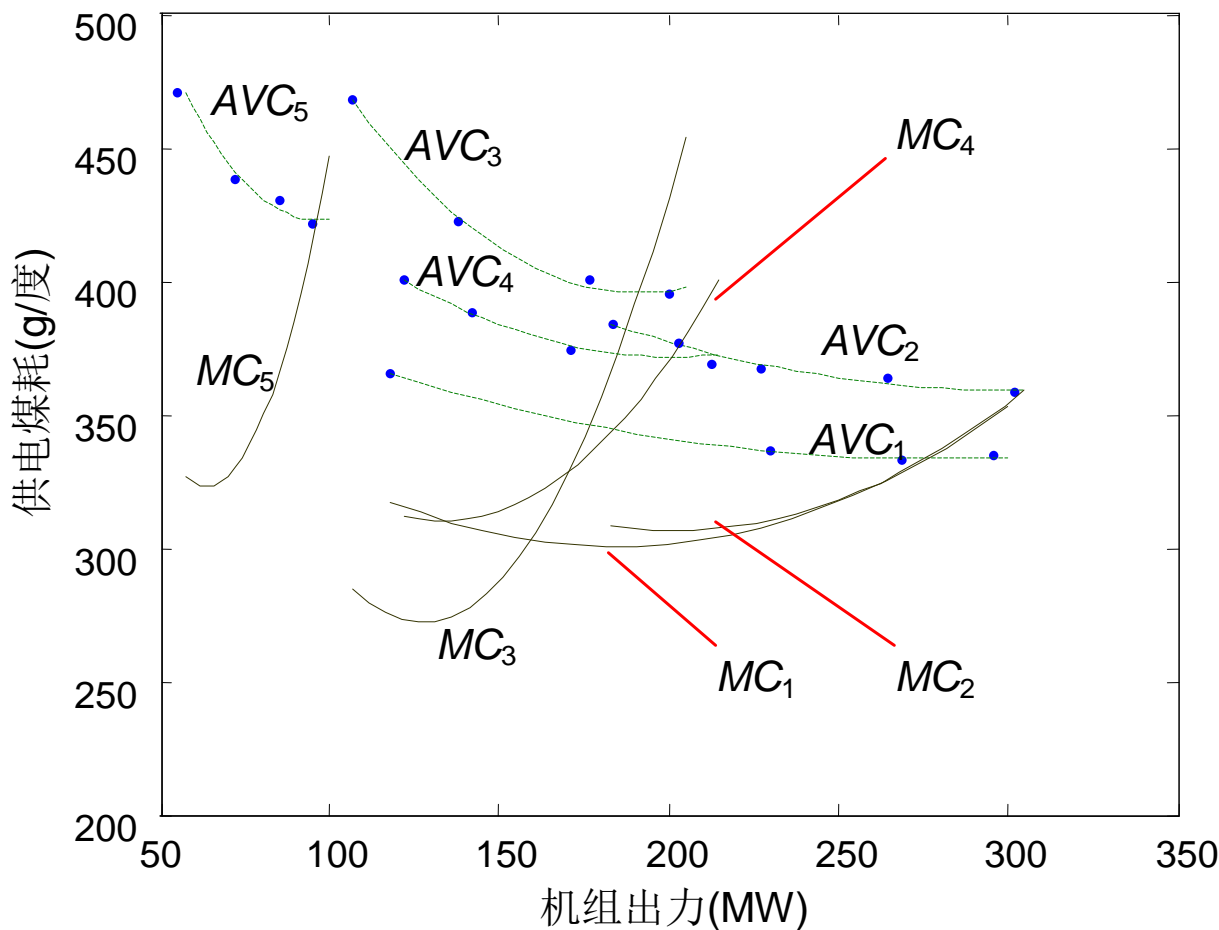
- 总煤耗、平均煤耗和边际煤耗（量纲不同）



用电环节与低碳电力的关系



● 山西5家火力发电厂的机组煤耗试验数据



- 煤耗，在图中分别表示为MC与AVC (Coal)
- MF与AF的交点为机组平均能耗最低点
- 总是在接近额定出力处达到交点

用电环节与低碳电力的关系



- 调峰
- 备用
- 与水电、风电等类型机组不同，燃煤机组存在最小出力限制，即机组向电网中输出的功率通常不能小于额定功率的40%~50%，输出功率的调节范围受限。因此对火电系统而言，夜间低谷负荷时段将造成发电环节效率的下降和成本的上升。
 - 向锅炉投放辅助燃料助燃——投油压负荷

为何不停机？

用电环节与低碳电力的关系



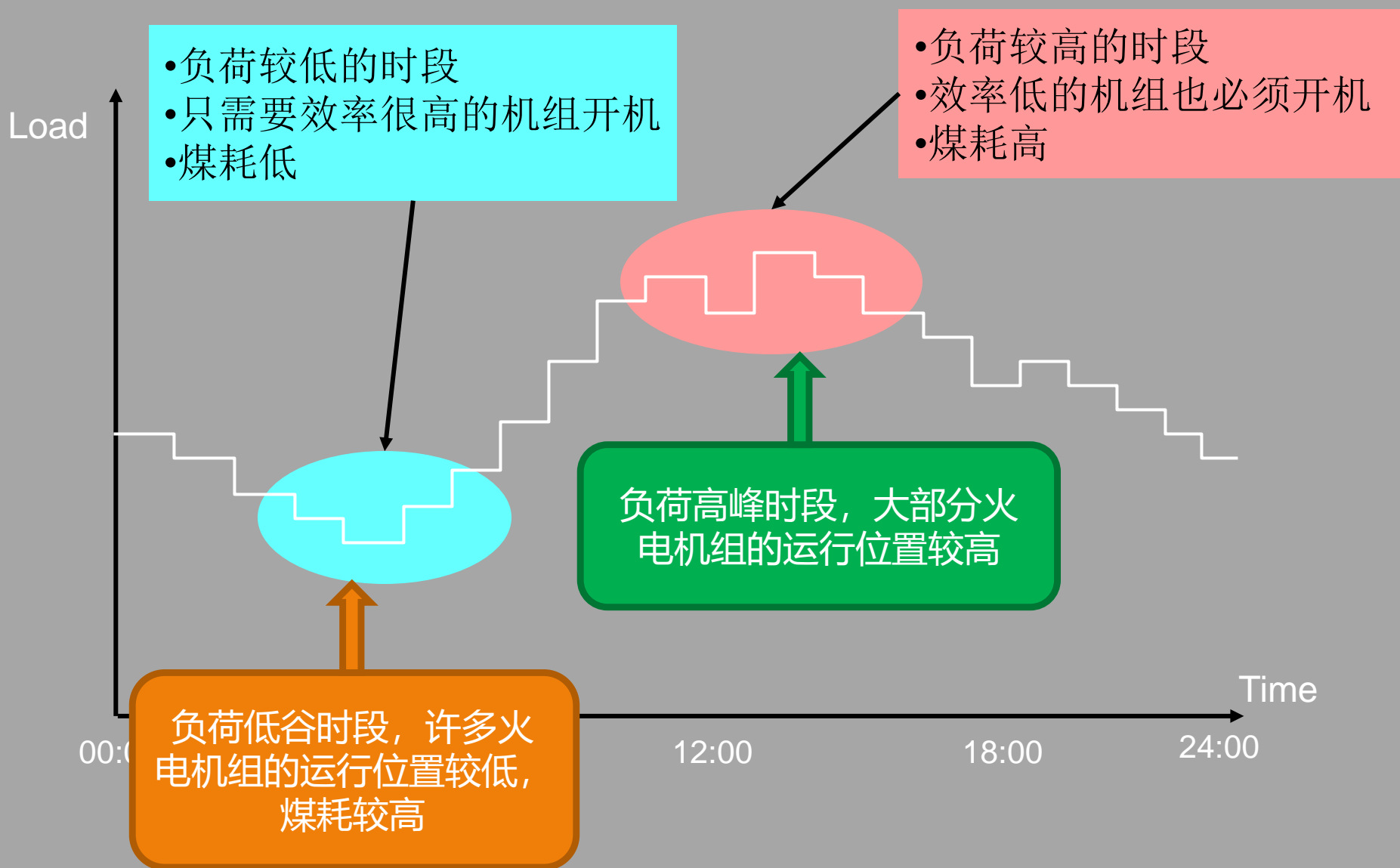
- 在极端情况下，若系统调峰能力和备用电源容量不能满足需要，为保证系统安全运行，将实施计划外的机组启停，带来额外成本。
 - 大中型火电机组平均启动成本：约30-60万元/次
 - 大中型火电机组平均启动时间：短则6小时，长则12小时以上

在日内总用电量相等的情况下，若清洁机组发电出力曲线不变，发电侧碳排放与负荷曲线的峰谷差之间的关系为？

- ☒ A 正相关
- ☐ B 负相关
- ☐ C 不一定

提交

用电环节与低碳电力的关系

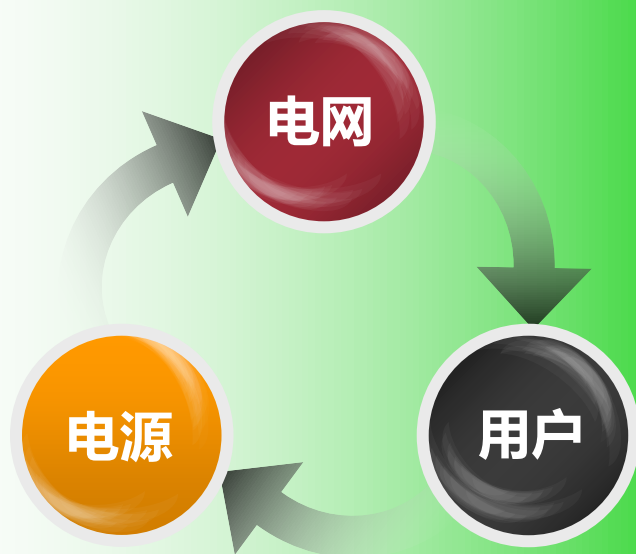


用电环节与低碳电力的关系

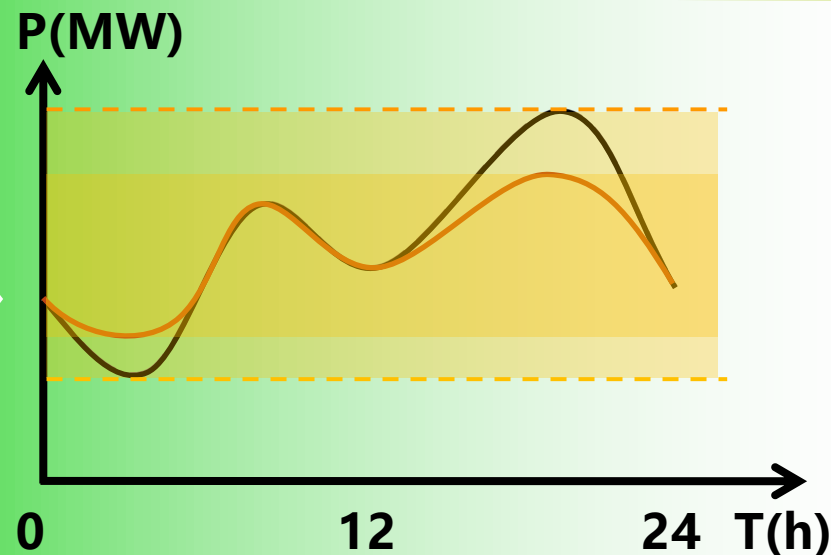


- 因系统中存在调峰、备用等需求，使得电力系统中发电的生产效率下降，输变电设备的利用率亦下降，发电成本和输电成本相应上升。
- 对电力系统而言，电力负荷大规模、剧烈的起伏和波动将对电力系统的低碳化带来不利影响。

用电环节与低碳电力的关系



日负荷曲线



$$\text{用户侧负荷率} = \frac{\text{日平均负荷}}{\text{日最大负荷}}$$

↑ 1%

节省发电煤耗

↓
2.3
gce/kWh

用户侧负荷率

↑ 10%

节约煤耗
减少碳排放

↓
10%

用电环节与低碳电力的关系

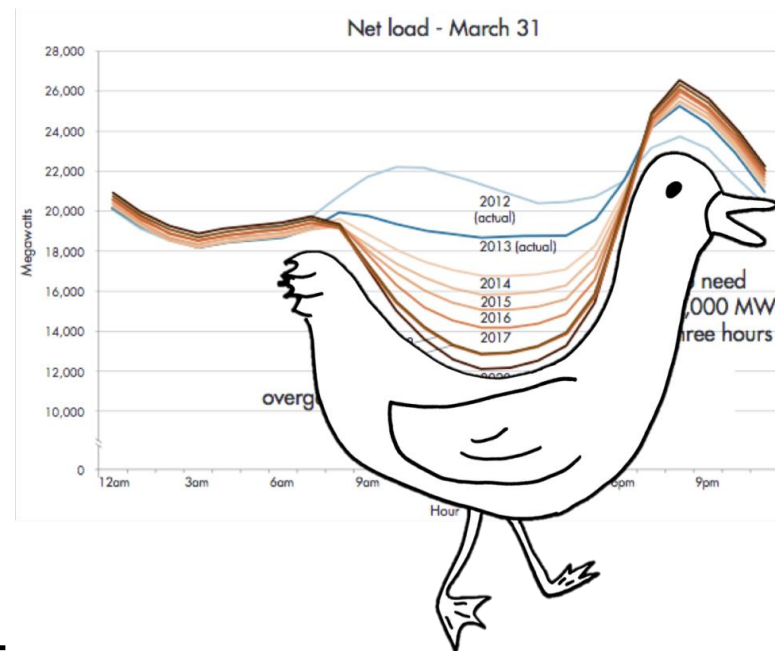


- 一般地，地区负荷峰谷差越大，负荷率越低，低碳水平就越低
- 考虑极端情况：负荷曲线为恒定水平线？
 - 纯火电系统
 - 新能源接入
- 如何提高负荷率？

鸭形曲线 (Duck Curve)



- 鸭形曲线的由来
 - 可再生能源渗透率不断提高
 - 午后光伏出力增加
 - 造成午后出现净负荷低谷
- 鸭形曲线的危害
 - 使得傍晚净负荷爬升速率增大
 - 给电网调峰带来负担



加州电力市场鸭形曲线





用电环节的低碳途径

用电环节的低碳途径

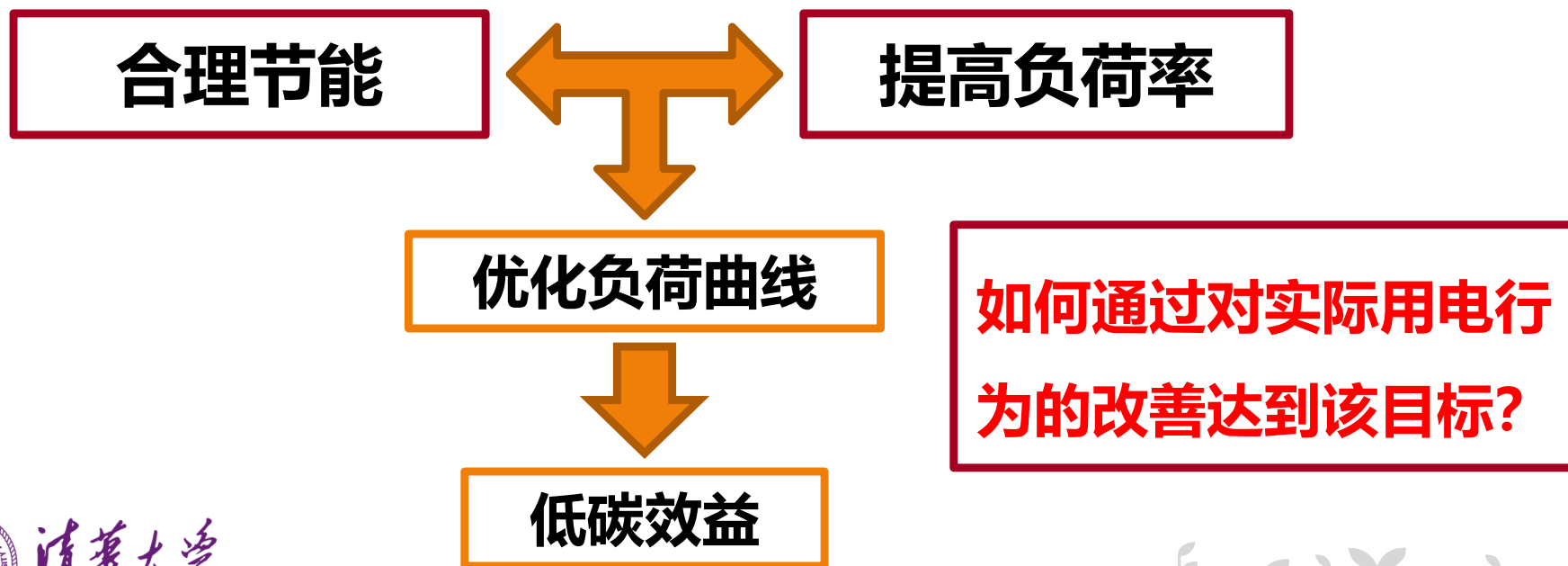


- 用电环节实现低碳减排——原理
 - 从用电环节出发，大力节约用电，优化负荷曲线，与发电环节相配合，共同提高电力系统的运行效率
 - 主要通过两方面实现

用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——原理
 - 节能——合理降低不必要的电能需求
 - 提高负荷率——降低系统调峰需求，提高设备利用水平



用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——措施
 - 机制——需求侧管理
 - 分时电价
 - 实时电价
 - 可中断负荷
 - 其它管理机制
 - 用电技术/负荷控制/需求响应
 - 电动汽车
 - 智能表计
 - 储能元件
 - 基于电压的负荷控制
 - 需求响应

用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排

- 主要措施——需求侧管理

- 在政府法规和政策的支持下，采取有效的激励和引导措施以及适宜的运作方式，通过发电公司、电网公司、能源服务公司、社会中介组织、产品供应商、电力用户等共同协力，提高终端用电效率和改变用电方式，在满足同样用电功能的同时减少电量消耗和电力需求，达到节约资源和保护环境，实现社会效益最好、各方受益、最低成本能源服务所进行的管理活动

用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——措施

- 需求侧管理——分时电价

- 峰谷分时电价是指根据电网的负荷变化情况，将每天24小时划分为高峰、平段、低谷等多个时段，对各时段分别制定不同的电价水平，以鼓励用电客户合理安排用电时间，削峰填谷，提高电力资源的利用效率

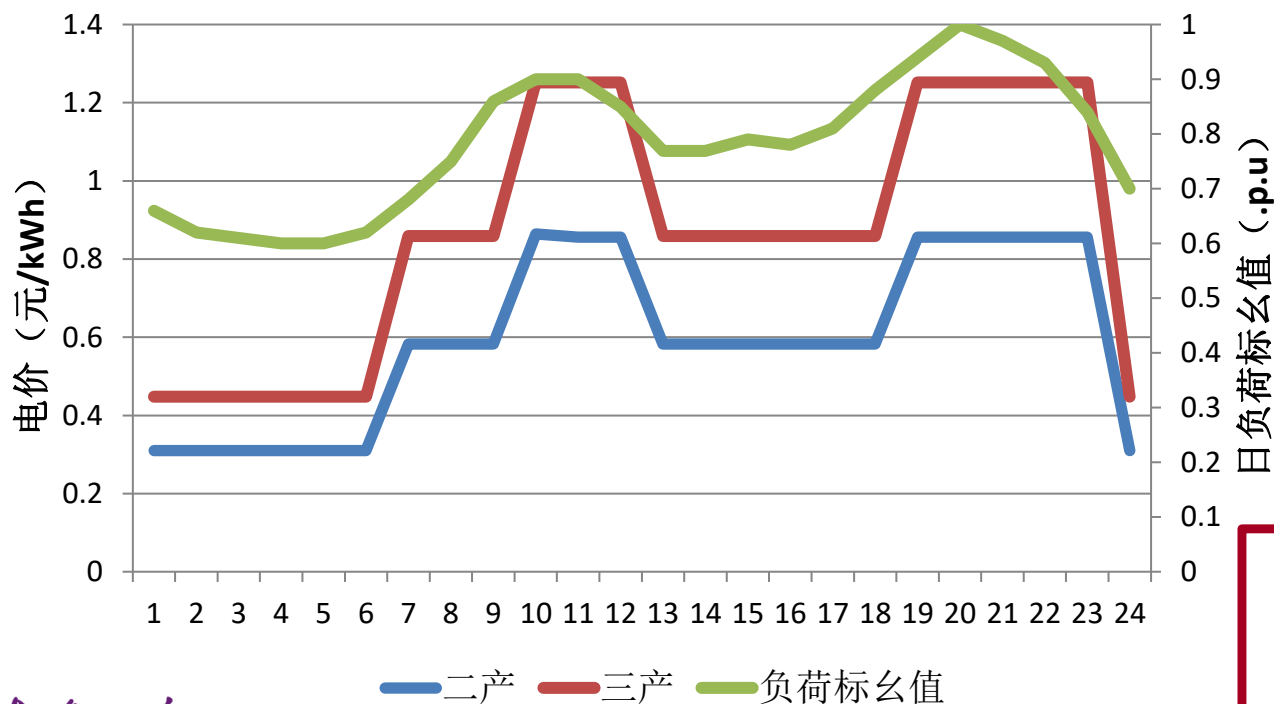
运用价格机制调整负荷曲线

用电环节的低碳途径



● 用电环节实现低碳减排——措施

○ 需求侧管理——分时电价



高峰负荷，高电价
低谷负荷，低电价



清华大学
Tsinghua University

Energy Intelligence Laboratory
清华大学电机系·智慧能源课题组

用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——措施
 - 需求侧管理——分时电价
 - 在用电高峰期间，提高电价，削减尖峰负荷
 - 减少调峰需求，降低必开机组容量
 - 大规模实行下，可适当减少装机需求
 - 在用电低谷期间，降低电价，鼓励电力消费
 - 提高低谷负荷，缓解火电压负荷调峰压力，提高发电效率
 - 提高系统负荷率，增加系统设备利用率

用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——措施
 - 需求侧管理——实时电价
 - 可根据系统运行的实时状态（负荷高峰、低谷/风电、光伏、小水电/阻塞……）提供价格信号，指导用户用电行为
 - 需要依靠智能表计实现
 - 可能造成电价尖峰

全面大规模的实施尚有难度

用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——措施

- 需求侧管理——可中断负荷

- 可中断负荷控制是根据供需双方事先的合同约定，在电网峰荷时段系统调度人员向用户发出请求信号，经用户响应后中断部分供电或转移至其它时段用电的一种方法，它特别适合可以放宽对供电可靠性苛刻要求的“塑性负荷”

用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——措施
 - 需求侧管理——可中断负荷
 - 最主要的适用对象包括：
 - 有能量（主要是热能）贮存能力的用户，可利用贮存的能量调节进行避峰
 - 有燃气供应的用户，可以燃气替代电力躲避电网尖峰
 - 对用电可靠性要求不高的用户，可通过减少或停止部分用电躲开电网尖峰
 - 具备高比例空调负荷的用户，可以利用室内温度变化的惯性特性控制空调系统

用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——措施
 - 需求侧管理——其他管理机制
 - 工业用户优化调整生产班制——错峰生产
 - 调整生产班制是用户为了适应分时电价措施，降低成本，避免用电集中在高电价时段的一种有效方法
 - 生产班制的调整包括生产班制的增加、削减以及转移
 - 企业可以根据自身生产能力以及耗电量自行决定采取何种生产班制，以降低电力成本

用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——措施
 - 需求侧管理——其他管理机制
 - 工业用户优化调整生产工序
 - 通过改进工序，用户也可以达到错峰、避峰用电的目的
 - 用户改进工序，能够将原本在系统负荷高峰时段（往往也是高电价时段）进行的高能耗工序，转移到系统负荷低谷时段（往往也是低电价时段），实现了降低生产成本，并有利于降低系统最大负荷

用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——措施
 - 智能电表技术
 - 可灵活显示分时电价、实时电价等其它信息，引导用户合理用电
 - 是实时电价等需求侧管理的技术实现基础



用电环节的低碳途径



● 用电环节实现低碳减排——措施

- 基于**碳表系统**的产品 “**碳耗码**”
- 使用手机扫描衣服标签上的二维码，除了产品克重、尺寸等基本信息，还可以看到该产品在**纺布、制衣、整烫、包装等各个生产工序的碳排放量**
- 为企业所生产的**每件衣服都打上“碳耗”标签**，为企业出口产品碳排放认定提供依据，同时也为企业开展基于“**低碳响应**”的减碳方式提供引导



用电环节的低碳途径



• 用电环节实现低碳减排——措施

◦ 储能技术——移峰填谷直接手段

- 抽蓄（地理环境要求高）
- 超级电容
-



用电环节低碳效益分析与计算方法



- 用电环节实现低碳减排——低碳效益
 - 需求侧管理——低碳效益来源

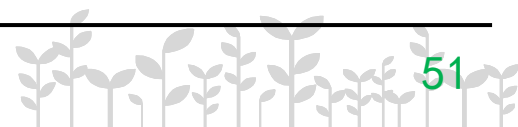
减排途径	减排机理
用户互动降峰	<ul style="list-style-type: none">➤ 智能电表➤ 实时电价➤ 减少火电机组的启停次数➤ 减少装机➤ 降低备用容量
用户互动节能	<ul style="list-style-type: none">➤ 智能电表➤ 实时电价➤ 高效用电➤ 碳交易

用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——低碳效益分析
 - 需求侧管理——实证分析
 - 云南省需求侧管理对负荷曲线的改善效果——基础数据

	最高负荷（万千瓦）	峰谷差（万千瓦）	负荷率
2015冬季	3010	1173.9	79.50%
2015夏季	3010	1204.0	78.46%
2020冬季	3941	1655.2	77.42%
2020夏季	3941	1694.6	76.33%



用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——低碳效益分析
 - 需求侧管理——实证分析
 - 云南省需求侧管理对负荷曲线的改善效果——推荐场景

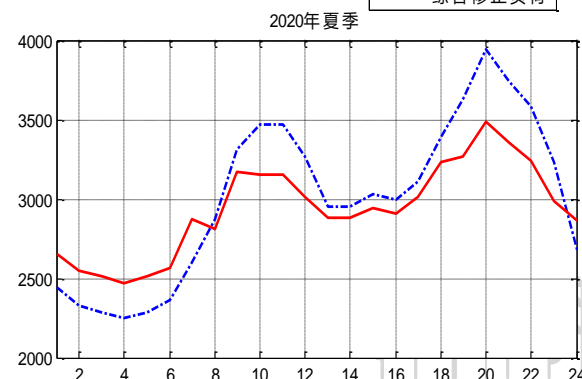
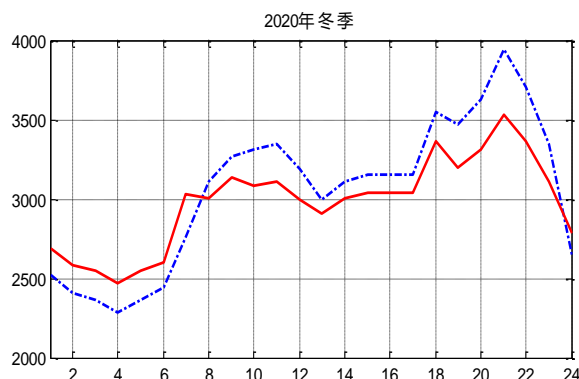
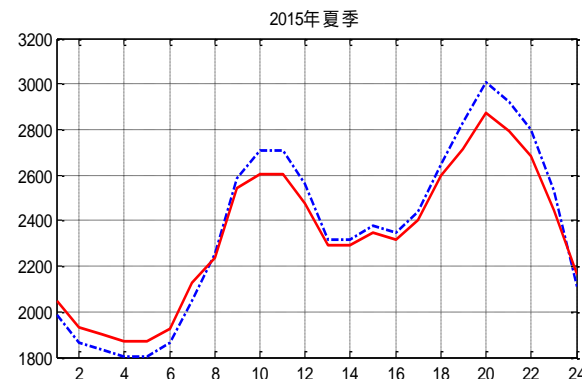
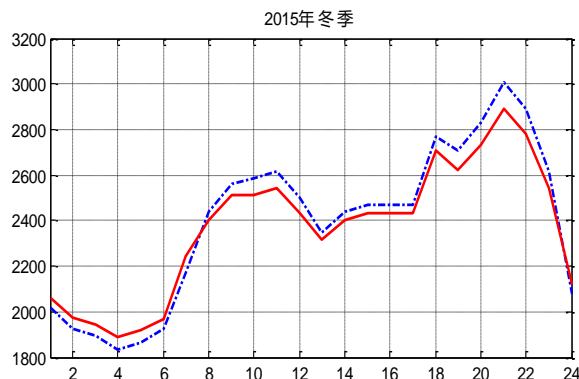
条件	最大负荷（万千瓦）			负荷率		
	基准	推荐场景	削减比例	基准	推荐场景	提升百分点
2015冬	3010	2873.7	4.53%	79.50%	82.09%	2.59
2015夏	3010	2866.1	4.78%	78.46%	81.23%	2.77
2020冬	3941	3479.3	11.72%	77.42%	84.83%	7.41
2020夏	3941	3468.3	11.99%	76.33%	83.92%	7.59



用电环节的低碳途径



- 用电环节实现低碳减排——低碳效益分析
 - 需求侧管理——实证分析
 - 云南省需求侧管理对负荷曲线的改善效果——推荐场景



— 基准典型负荷
— 综合修正负荷



案例分析：电动汽车



清华大学
Tsinghua University

EI Lab
Energy Intelligence Laboratory
清华大学电机系·智慧能源课题组



电动汽车技术



- 电动汽车：
 - 燃料电池电动汽车
 - 纯电动汽车
 - 混合动力电动汽车



比亚迪 汉EV
电动汽车



清华大学
Tsinghua University

EITab
Energy Intelligence Laboratory
清华大学电机系·智慧能源课题组





- 用电环节实现低碳减排——措施

- 电动汽车技术

- 可依靠灵活优化的充电方式改善负荷特性，优化系统负荷特性，提升负荷率
 - 常规（慢）充电
 - 快速充电
 - 换电（池）



● 用电环节实现低碳减排——措施

○ 电动汽车技术——常规充电

- 蓄电池在放电终止后，应立即充电，大小约为15A。常规蓄电池的充电方法都采用小电流的恒压或恒流充电，一般充电时间为5~8小时，甚至长达10~20个小时。
- 常规充电的充电器和安装成本比较低，可充分利用电力低谷时段进行充电，降低充电成本，提高充电效率和延长电池的使用寿命。常规充电模式的主要缺点为充电时间过长，有紧急运行需求时难以满足。



- 用电环节实现低碳减排——措施
 - 电动汽车技术——快速充电
 - 快速充电又称应急充电，是以较大电流短时间在电动汽车停车的20分钟至2小时内，为其提供短时充电服务，一般充电电流为150~400A。
 - 大规模快速充电可能对电网运行效率带来不利影响。

如果你工作后有一辆电动汽车，本着低碳用电的思想，你选择如下哪个方式进行充电？

- ☐ A 上班时常规充电
- ☒ B 回家后深夜常规充电
- ☐ C 上班时快速充电
- ☐ D 回家后深夜快速充电

提交



● 用电环节实现低碳减排——措施

○ 电动汽车技术——换电（池）

- 即电池组快速更换，通过直接更换电动汽车的电池组来达到为其充电的目的。由于电池组重量较大，更换电池的专业化要求较强，需配备专业人员借助专业机械来快速完成电池的更换、充电和维护。
- 有利于提高车辆使用效率，也提高了用户使用的方便性和快捷性；对更换下来的蓄电池可以利用低谷时段进行充电，降低了充电成本，提高了车辆运行经济性。





- 用电环节实现低碳减排——措施
 - 电动汽车技术——对电网的影响
 - 由于电动汽车的充电需求，会对电网的电力电量需求带来显著影响：
 - 若大量电动汽车集中在负荷高峰期充电，将进一步加剧电网负荷峰谷差，加重电力系统的负担。
 - 电动汽车充电负荷属于非线性负荷，所使用的电力电子设备将产生一定的谐波，有可能引起电能质量问题。

用电环节低碳效益分析与计算方法



- 用电环节实现低碳减排——低碳效益
 - 电动汽车技术——低碳效益来源
 - 电动汽车的使用，将使交通工具驱动力由化石燃料转为电能，而相应的，其传统的因汽油燃烧而产生碳排放将转为间接的发电碳排放，从而存在减排潜力。
 - 通过合理优化的充电策略，可改善电网的负荷特性，与需求侧管理有同样的低碳优化效果。



● 用电环节实现低碳减排——综合低碳效益分析

● 电动汽车的负荷整形能力

电动汽车将成为负荷侧重要的互动设备，科学的充电电价将引导电动汽车在时间和空间上合理安排充电时间。

第 j 年提升低谷负荷能力因子

$$\lambda_j = \eta_j \times NEV_j \times p_j / P_j^{low}$$

- η_j : 第 j 年在低谷时段充电的电动汽车比例
- NEV_j : 第 j 年电动汽车的保有量
- p_j : 在第 j 年电动汽车的平均充电功率
- P_j^{low} : 第 j 年典型负荷曲线的低谷负荷

用电环节低碳效益分析与计算方法



- 用电环节实现低碳减排——低碳效益
 - 电动汽车技术——低碳效益分析
 - 单辆电动汽车相比常规汽车的低碳效益计算

$$\Delta E_{e0} = s_t \cdot EF_{M_oil} - s_e \cdot e_e$$

- s_t : 常规汽车的单位里程耗油耗
- EF_{M_oil} : 单位燃料油的碳排放因子
- s_e : 电动汽车的单位里程耗电耗
- e_e : 发电碳排放强度



- 用电环节实现低碳减排——低碳效益
 - 电动汽车技术——低碳效益分析
 - 宏观低碳效益计算

$$\Delta E_h = \sum_i (\Delta E_{h0})_i \cdot N_{hi} \cdot L_i$$

- i : 车型号 (大型车/中型车/小型车.....)
- N_{hi} : 型号 i 的电动车的数量
- L_i : 型号 i 的电动车平均行驶距离



- 用电环节实现低碳减排——措施
 - 电动汽车技术——实证分析
 - 广东省电动汽车保有量发展场景预测

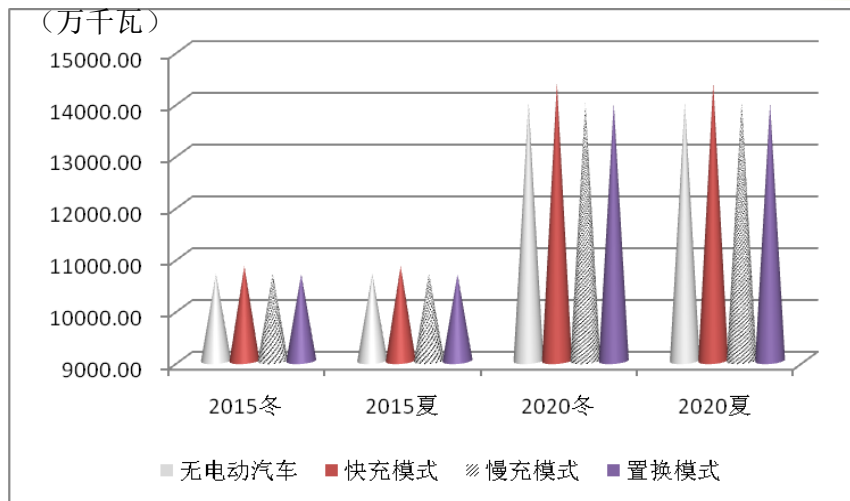
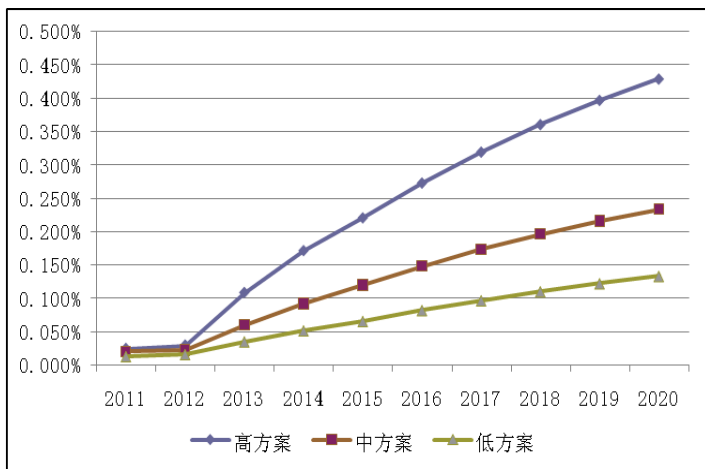
年份/发展场景	低方案	中方案	高方案
2012	2万	3万	4万
2015	10万	20万	40万
2020	25万	50万	100万

用电环节的低碳途径

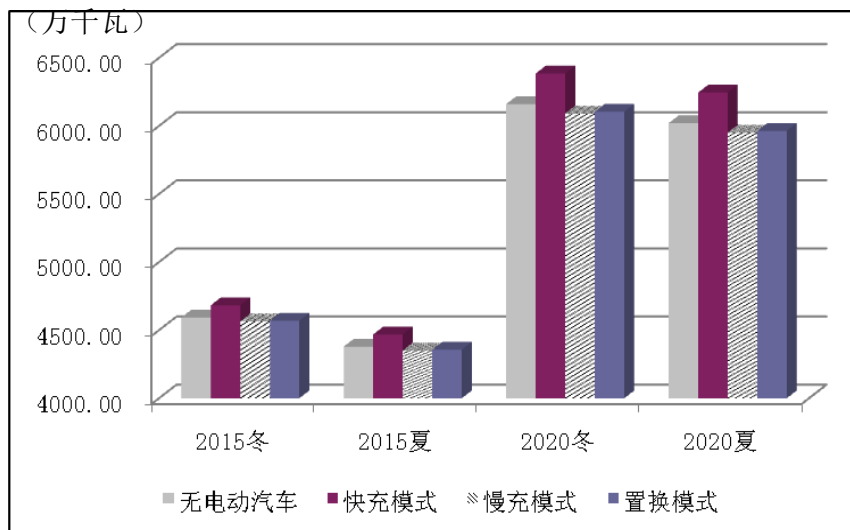


- 对广东电网运行影响
 - 用电量
 - 最大负荷
 - 峰谷差

电动汽车用电占广东电网电量比例



不同充电模式下广东电网最大负荷

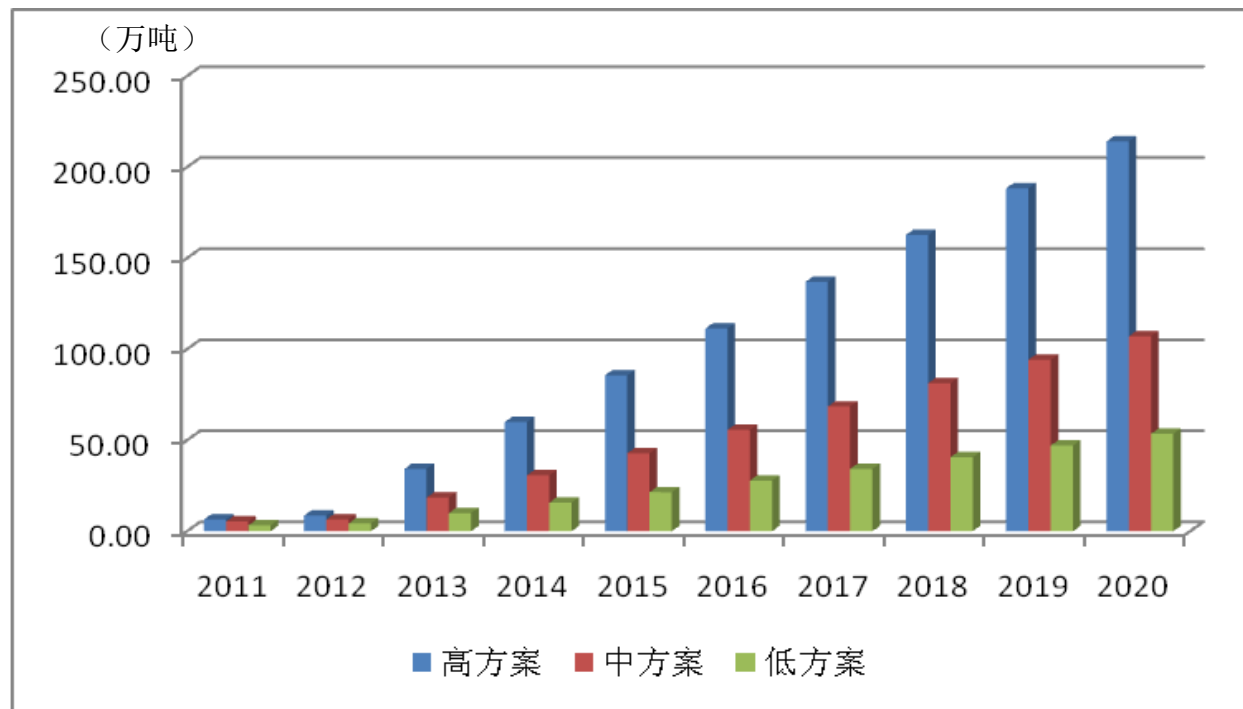


不同充电模式下广东电网峰谷差

用电环节低碳效益分析与计算方法



- 用电环节实现低碳减排——低碳效益
 - 电动汽车技术替代常规汽车减排——实证分析



中方案下，广东电网十年内通过电动汽车累计二氧化碳减排约510万吨

2023年底，广东新能源汽车保有量达到289万辆，高于高方案的数量设定！

电力系统碳排放小结



- 用电环节 vs 发电环节

哪一侧才是电力行业真正的排放“源头”？

输电环节又是什么角色？

- 低碳电力 & 低碳发展

各个环节都需要注意什么？