



低碳电力技术基础——第03讲

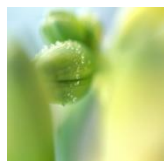
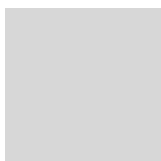
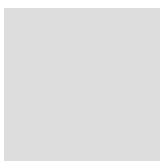
发电侧碳排放的计算方法

——教材 第2.1、2.2、2.3节

康重庆

清华大学电机系

cqkang@tsinghua.edu.cn



思考题回顾



- 你对气候变化的认识?
 - “低碳生活，由我做起”，请反思我们日常可以通过什么样的举动降低碳排放量?
 - 请思考，我们可以通过什么样的方法，降低清华大学整体的碳排放水平?
 - “碳足迹”，请估算一下自己每天/月/年的碳排放量。
-
- 大致分析光伏产业的耗能与污染?
 - 判断：如果火电碳排放强度降低，则全系统的碳排放量一定减少。
 - 大致思考一下，电力行业的低碳化途径?



目录



- 原理分析
 - 电力系统碳排放的计算原则
 - 影响电力碳排放的主要因素
- 单机碳排放计算方法
 - 基于排放系数法的单机碳排放计算
 - 基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算
 - 基于物料平衡法的单机碳排放计算
 - 算例分析与方法对比
- 电力系统宏观碳排放的计算





电力系统碳排放的计算原则

电力系统碳排放计算原则



- 碳排放计算国际规范（IPCC）：
 - 《IPCC 国家温室气体清单指南》（1995年）
 - 《IPCC 国家温室气体清单指南 1996**修订版**》（1996年）
 - **Revised** 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
 - 《IPCC 国家温室气体清单优良作法指南和不确定性管理》（2000年）
 - 《IPCC 2006**国家温室气体清单指南**》（2006年）
 - 《IPCC 2006**国家温室气体清单指南 2019修订版**》（2019年）
 - 2019 **Refinement** to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
 -



电力系统碳排放计算原则



- 针对能源部门，《IPCC 2006国家温室气体清单指南》给出了3类方法：
 - 第1类方法(T1)采用IPCC燃料缺省排放因子，建议在缺乏可靠国家统计数据情况下使用；
 - 第2类方法(T2)以特定国家燃料排放因子代替IPCC缺省值，国家燃料排放因子取燃料排放因子国家平均值，考虑到燃料品质和排放因子国际差异，相对T1方法更加准确；
 - 第3类方法(T3)采用工厂级数据，可以详细计及燃料产地、批次和品质差异，必要时可对特定燃烧技术建模和实测。
 - **区域差异？**
 - **三类方法精度递增，操作成本递增，推荐做法为：以T2方法为主、T3方法为辅，在有条件的行业和部门采用T3方法。**



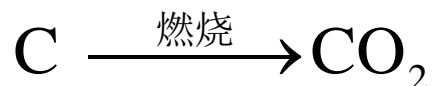
电力系统碳排放计算原则



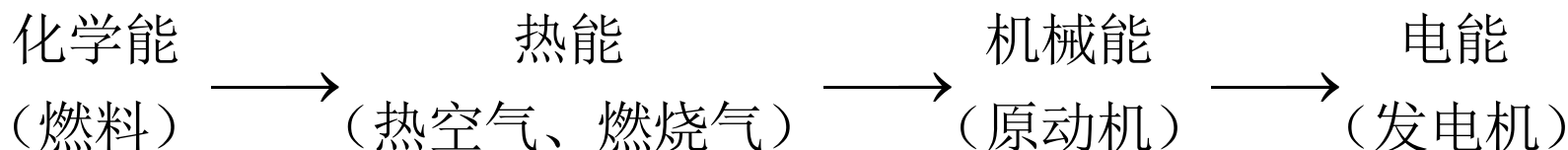
- 电力行业碳排放基本分析原则

- 电力生产环节是电力行业碳排放的主要来源，而火力发电是电力生产环节碳排放的主要来源

- 碳元素守恒：



- 能量守恒：





影响电力碳排放的主要因素



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



影响电力碳排放的主要因素



影响电力碳排放的主要因素：

分析对象	个体 (特定机组)	整体
碳排放强度	机组类型 燃料种类	电源结构
碳排放总量	机组类型 燃料种类 持续时间	电量结构

影响电力碳排放的主要因素



- 电力行业碳排放的影响因素分析

- 电力生产结构——决定火电电量，决定碳排放总量

- 一次能源结构
 - 电源装机结构
 - 发电电量结构

火电电量越低，
碳排放总量越低

影响电力碳排放的主要因素



- 电力行业碳排放的影响因素分析
 - 火力发电技术——决定碳排放强度
 - 燃料类型与特点
 - 发电技术类型与特点

技术越先进，
碳排放强度越低

影响电力碳排放的主要因素



● 电力行业碳排放的影响因素分析

○ 预备知识

- 能量单位：标准煤/标准油/卡路里/大卡/英热单位Btu ✓
- 利用小时数
- 厂用电率
- 发电煤耗/供电煤耗
- 收到基/发热量

○ 电力碳排放强度（不同的口径：发电、供电、用电）

影响电力碳排放的主要因素



- 利用小时数
 - 定义：表示发电厂发电设备利用程度的指标。它是一定时期内发电设备折合在满负荷运行条件下的运行小时数。
 - 计算方法：

$$\text{平均发电设备利用小时} = \frac{\text{报告期发电量}}{\text{报告期的平均发电设备容量}}$$

图形示意？

影响电力碳排放的主要因素



- 发电设备利用小时数

- 该指标不仅可用于一台机组、一个电厂，也可用于省级电网、地区电网乃至全国范围。
- 一年为8760小时（或8784小时）。因运行约束、故障检修、自然条件等原因，使发电设备的利用小时数下降。

- 6MW以上机组发电设备利用小时数

- 中国电力企业联合会公布：

类型	2009年	2012年	2021年
火电	4865	4965	4448
水电	3328	3555	3622
核电	7716	7838	7802
风电	2077	1893	2232

机组利用小时数决定了电力生产结构

影响电力碳排放的主要因素



● 厂用电率

- 厂用电——发电厂在发电过程中自身要有许多厂用电设备运行，对应于这些用电设备所消耗的电功率，称为厂用负荷，包括主厂房内负荷、输煤系统、脱硫系统、除灰系统、水处理系统、循环水系统等
- 厂用电率定义为厂用电量与发电厂发电量的百分比
- 2021年火力发电平均综合厂用电率为4.36%，2020年水电厂平均厂用电率为0.25%

厂用电率一定程度上影响电厂发电效率

影响电力碳排放的主要因素



- 火力发电标准煤耗

- 发电煤耗

- 火力发电厂每发1kWh电能平均耗用的标准煤量

- 供电煤耗

- 火力发电厂每向外提供1kWh电能平均耗用的标准煤量

- 可见，标准煤耗实质上是发电厂效率的表征，该指标可针对某台机组进行统计，也可针对系统所有机组统计平均水平。

对同一火电机组，发电煤耗 X 与供电煤耗 Y 的大小关系？

- ☐ A $X > Y$
- ☐ B $X = Y$
- ☒ C $X < Y$
- ☐ D 不确定

提交

影响电力碳排放的主要因素



● 火力发电标准煤耗

- 发电煤耗
 - 火力发电厂每发1kWh电能平均耗用的标准煤量
- 供电煤耗
 - 火力发电厂每向外提供1kWh电能平均耗用的标准煤量
- 可见，标准煤耗实质上是发电厂效率的表征，该指标可针对某台机组进行统计，也可针对系统所有机组统计平均水平。

两者的差异在于是否考虑厂用电

2009年我国6MW以上电厂：

- 平均发电煤耗320gce/kWh
- 平均供电煤耗340gce/kWh

2021年我国6MW以上电厂：

- 平均发电煤耗289gce/kWh
- 平均供电煤耗302gce/kWh

发电与供电煤耗参考值



发展改革委 环境保护部 能源局关于印发 《煤电节能减排升级与改造行动计划 (2014-2020年)》的通知

发改能源〔2014〕2093号

各省、自治区、直辖市、新疆生产建设兵团发展改革委（经信委、经委、工信厅）、环保厅、能源局，国家电网公司、南方电网公司，华能、大唐、华电、国电、中电投集团公司，神华集团、中煤集团、国投公司、华润集团，中国国际工程咨询公司、电力规划设计总院：

为贯彻中央财经领导小组第六次会议和国家能源委员会第一次会议精神，落实《国务院办公厅关于印发能源发展战略行动计划（2014-2020年）的通知》（国办发〔2014〕31号）要求，加快推动能源生产和消费革命，进一步提升煤电高效清洁发展水平，特制定了《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014-2020年）》，现印发你们，请按照执行。

发展改革委
环境保护部
能源局

2014年9月12日

发电与供电煤耗参考值



煤电节能减排升级与改造行动计划

(2014-2020年)

为贯彻中央财经领导小组第六次会议和国家能源委员会第一次会议精神，落实《国务院办公厅关于印发能源发展战略行动计划（2014-2020年）的通知》（国办发〔2014〕31号）要求，加快推动能源生产和消费革命，进一步提升煤电高效清洁发展水平，制定本行动计划。

一、指导思想和行动目标

（三十）发挥社会监督作用。充分利用12398能源监管投诉举报电话，畅通投诉举报渠道，发挥社会监督作用促进煤电节能减排升级与改造工作顺利开展。国家能源局各派出机构要依据职责和有关规定，及时受理、处理群众投诉举报事项，及时通报有关情况；对违规违法行为，要及时移交稽查，依法处理。

附件：

1. 典型常规燃煤发电机组供电煤耗参考值
2. 燃煤电厂节能减排主要参考技术

典型常规燃煤发电机组供电煤耗参考值



机组类型		新建机组设计供电煤耗	现役机组生产供电煤耗	
			平均水平	先进水平
100万千瓦级 超超临界	湿冷	282	290	285
	空冷	299	317	302
60万千瓦级 超超临界	湿冷	285	298	290
	空冷	302	315	307
60万千瓦级 超临界	湿冷	303 (循环流化床)	306	297
	空冷	320 (循环流化床)	325	317
60万千瓦级 亚临界	湿冷	—	320	315
	空冷	—	337	332
30万千瓦级 超临界	湿冷	310 (循环流化床)	318	313
	空冷	327 (循环流化床)	338	335
30万千瓦级 亚临界	湿冷	—	330	320
	空冷	—	347	337

发电煤耗
供电煤耗



厂用电率



发电碳排放强度
供电碳排放强度

典型常规燃煤发电机组供电煤耗参考值



国家发展改革委等部门关于发布《煤炭清洁 高效利用重点领域标杆水平和基准水平 (2022年版)》的通知

发改运行〔2022〕559号

各省、自治区、直辖市、新疆生产建设兵团发展改革委、工业和信息化主管部门、生态环境厅（局）、住房和城乡建设厅（委、管委、局）、市场监管局（厅、委）、能源局：

为贯彻落实党中央、国务院决策部署，对标实现碳达峰、碳中和目标任务，推动煤炭清洁高效利用，促进煤炭消费转型升级，现发布《煤炭清洁高效利用重点领域标杆水平和基准水平（2022年版）》，并就有关事项通知如下：

一、合理确定指标，充分发挥导向作用

对标国内外同行业先进水平，以及国家现行政策、标准中先进能效指标值和最严格污染物排放要求，确定煤炭清洁高效利用重点领域标杆水平。坚持绿色低碳发展理念，统筹考虑实现碳达峰目标要求、促进煤炭消费转型升级、便于企业操作实施等因素，参考国家现行标准中的准入值或限定值，以及国家政策文件明确的相关指标，科学确定煤炭清洁高效利用重点领域基准水平。本文件将视行业发展和标准制修订情况进行补充完善和动态调整，适时建立包括能耗、物耗、水耗、污染物和温室气体排放水平等在内的煤炭清洁高效利用综合评价指标体系。



清华大学
Tsinghua University

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



典型常规燃煤发电机组供电煤耗参考值



煤炭清洁高效利用重点领域标杆水平和基准水平（2022年版）

序号	重点领域	指标名称			指标单位	标杆水平	基准水平	参考标准和政策文件	
1	煤炭洗选	选煤 电力单耗	炼焦煤		千瓦时/吨	7	8.5	《选煤电力消耗限额》（GB 29446）	
			动力煤			3	4.5		
2	燃煤发电	供电煤耗	新建 机组	湿冷机组		克标准 煤/千瓦时	270	285	《全国煤电机组改造升级实施方案》（发改运行〔2021〕1519号），不含循环流化床机组
				空冷机组			285	300	
			现役 机组	湿 冷 机 组	超超临界1000MW		273	285·K	1. 系数K为《常规燃煤发电机组单位产品能源消耗限额》（GB 21258）中影响因素修正系数 2. 标杆水平为火电能效对标各类型机组指标前20%平均值 3. 参考《电力行业（燃煤发电企业）清洁生产评价指标体系》和机组运行情况，确定空冷机组和循环流化床机组供电煤耗
					超超临界600MW		276	293·K	
					超临界600MW		294	300·K	
					超临界300MW		299	308·K	
					亚临界600MW		302	314·K	
					亚临界300MW		311	323·K	
					空冷机组 循环流化床机组		湿冷+15		
		大气污染物 排放	烟尘排放浓度		毫克/立方米	10	GB 13223	1.《常规燃煤发电机组单位产品能源消耗限额》（GB 21258） 2.《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》（2015） 3.《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223）	
			二氧化硫排放浓度			35			
			氮氧化物排放浓度			50			

影响电力碳排放的主要因素



● 收到基

- 我国在碳排放基础数据方面相对薄弱，多数行业 and 部门只能采用T1方法。然而，电力行业具有一定的特殊性，锅炉经济运行要求对入炉煤质和耗量进行经常性检测和统计，部分电厂具有详细的煤质日报和经济日报数据，其中有详细的煤耗、煤炭热值和碳含量数据，这为电厂碳排放计算提供了重要数据条件。
- 不同于 CH_4 和 N_2O 排放依赖于特定燃烧技术， CO_2 排放由燃料碳含量决定，通常锅炉燃烧率在99%以上，飞灰和炉渣中碳残留可以忽略不计。因此，电力行业碳排放计算具备采用T3方法的条件，在现有数据基础上，基于收到基的统计与分析可实现工厂级精度的碳排放计算。

影响电力碳排放的主要因素



收到基

- 在煤质分析中得出的煤质指标，根据不同需要，可以用不同的基准来表示。
- “基”是表示化验结果是以什么状态下的煤样为基础而得出的。
- 收到基，即以收到状态的燃料为基准计算燃料全部成分的组合，as received，又称应用基。
- 煤的收到基是以（用户在接受商品煤时）煤的全部成分为基准的一种划分，如收到基发热量、收到基灰分、干燥无灰基发热量等，应用时具体情况具体分析。
- 煤的成分组成是用质量百分数来表示的，即

$$C+H+O+N+S+A+M=100\%$$

- C、H、O、N、S、A、M分别表示煤中碳、氢、氧、氮、硫、灰分、水分的质量百分数。
- 煤的成分分析基准中收到基是以收到状态的煤取样分析其成分组成，用下角标ar表示，即

$$C_{ar}+H_{ar}+O_{ar}+N_{ar}+S_{ar}+A_{ar}+M_{ar}=100\%$$

影响电力碳排放的主要因素



● 燃料的发热量

- 单位质量的燃料在完全燃烧时所发出的热量称为燃料的发热量，分为高位发热量和低位发热量两类：
- **高位发热量**是指1kg燃料完全燃烧时放出的全部热量，包括烟气中水蒸汽凝结成水所放出的汽化潜热。
- **汽化潜热**是温度不变时单位质量的某种液体在汽化过程中所吸收的热量。水蒸气通常是以气体状态排出，烟气中水蒸气的潜热没有被利用。
- 从燃料高位发热量中扣除烟气中水蒸汽的汽化潜热，称燃料的**低位发热量**。低位发热量最接近工业锅炉燃烧的实际发热量，常用于设计计算。



基于排放系数法的单机碳排放计算

基于排放系数法的单机碳排放计算



- 根据电力行业的生产统计数据进行碳排放计算
 - 电力生产造成的碳排放——单机层面

$$E_{\text{gen}i} = G_i \cdot e_i$$

- $E_{\text{gen}i}$: 机组 i 的碳排放总量
- G_i : 机组 i 的发电量
- e_i : 机组 i 生产单位电能的碳排放量, 简称碳排放强度

基于排放系数法的单机碳排放计算



- 根据电力行业的生产统计数据进行了碳排放计算
 - 火电机组发电量的计算方法——单机层面

$$G_i = P_i \cdot T_i$$

- P_i : 机组 i 的容量
- T_i : 机组 i 的发电利用小时数


基于排放系数法的单机碳排放计算



- **方法1：**由 EF_E 计算火力发电碳排放强度 e_i

- 基本计算公式

$$e_i = 3.6 \times 10^{-6} \cdot \frac{EF_E}{\eta_i}$$



燃料特性
机组特性

- 系数：KWh与TJ的转换系数
- EF_E ：机组 i 所用燃料（单位能量值）的碳排放系数（ kgCO_2/TJ ）
- η_i ：机组 i 的综合发电转化效率

基于排放系数法的单机碳排放计算



• 方法2：由 EF_M 计算火力发电碳排放强度 e_i

不妨设 A kg原煤燃烧产生 B kgCO₂排放

➤ 碳排放系数 EF_M 为： $EF_M = \frac{B}{A} (\text{kgCO}_2 / \text{kg})$

➤ A kg原煤对应的标准煤 C 为： $C = A \cdot \frac{q}{7000} (\text{kg})$

其中，燃料热值 q 单位为kcal/kg

➤ A kg原煤的发电量 D 为： $D = \frac{1000 \cdot C}{r_i} = A \cdot \frac{q}{7000} \cdot \frac{1000}{r_i} = \frac{Aq}{7r_i} (\text{kWh})$

其中， $1000C$ 表示kg单位转换为g，机组标准煤耗 r_i 单位为gce/kWh

➤ 发电机碳排放强度 e_i 为： $e_i = \frac{B}{D} = \frac{B}{\frac{Aq}{7r_i}} = 7r_i \cdot \frac{1}{q} \cdot \frac{B}{A} = 7r_i \cdot \frac{EF_M}{q} (\text{kgCO}_2 / \text{kWh})$

$$e_i = 7 \cdot r_i \cdot \frac{EF_M}{q}$$

基于排放系数法的单机碳排放计算



- 发电碳排放强度

- 对燃煤机组，碳排放强度可按下列式计算：

$$e_i = 7 \cdot r_i \cdot \frac{EF_M}{q}$$

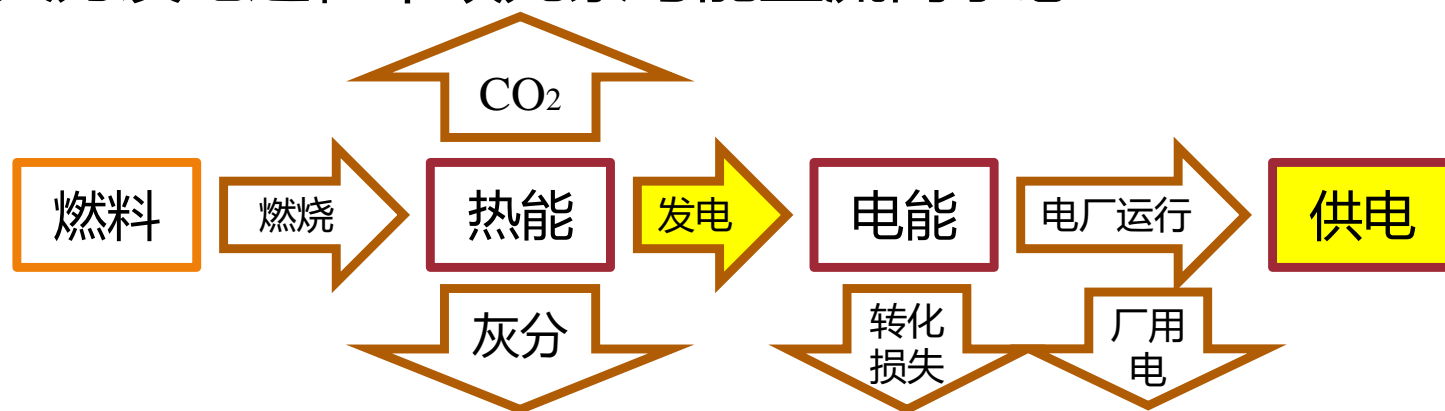
- r_i ：机组 i 的标准煤耗 (gce/kWh)
 - q ：机组 i 所用煤炭的燃烧热值 (kcal/kg)
 - EF_M ：机组 i 所用煤炭的（单位质量）碳排放系数 (kgCO₂/kg)

基于排放系数法的单机碳排放计算



计算口径问题！

- 火力发电碳排放强度——剖析
 - 火力发电过程中碳元素与能量流向示意

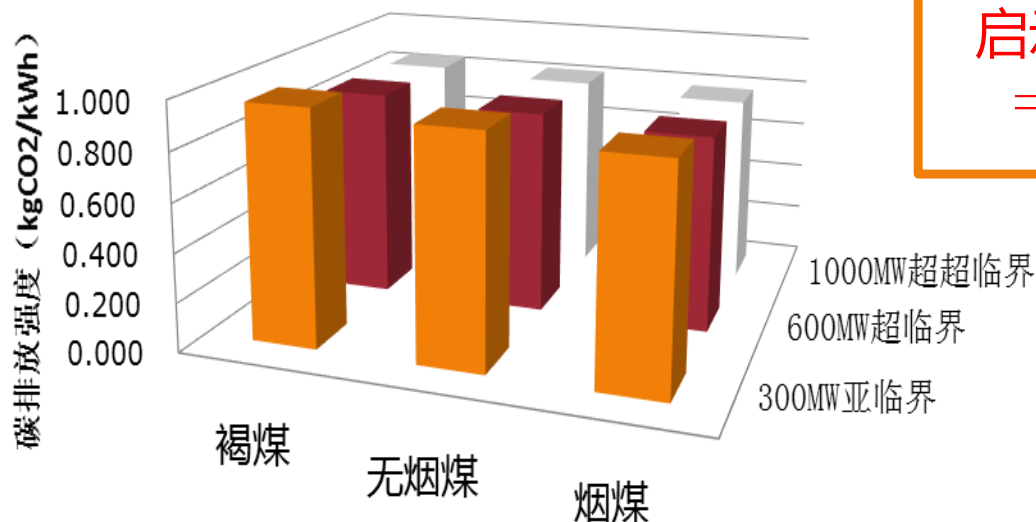


- 电厂每发电/上网 1 kWh 的电能，对应的碳排放如何计算？

基于排放系数法的单机碳排放计算



典型场景下的碳排放强度



启示：碳排放量
=发电度数打8~9折！

	褐煤	无烟煤	烟煤
300MW亚临界	0.964	0.937	0.899
600MW超临界	0.860	0.836	0.802
1000MW超超临界	0.845	0.822	0.789



2023 年全国发电量 9.3 万亿度，总碳排放量的估算值？

- ☐ A 20-40 亿吨
- ☒ B 40-60 亿吨
- ☐ C 60-80 亿吨

提交

基于排放系数法的单机碳排放计算



- 如何看待这个结算过程？
 - “平均”！
 - 仅取决于燃料 EF_M/EF_E ？
 - 不同类型燃煤机组（超超临界、超临界、亚临界……），碳排放强度存在差异。
 - 同一火电机组，每个时刻出力不同，煤耗不同，碳排放强度不同！
- 工况——分时，计量！



基于发电机组能量转换效率的 单机碳排放计算



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

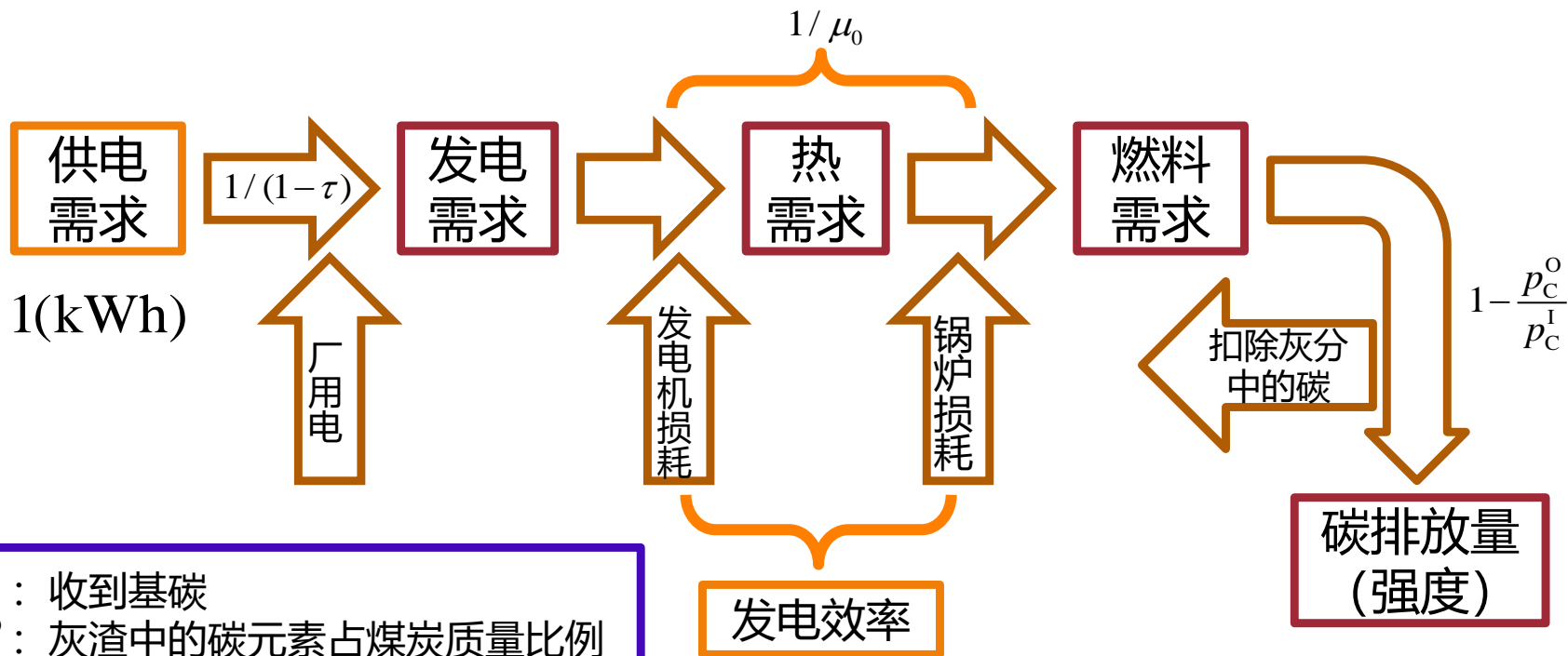


基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算



火电机组发电过程的流程分析

- 固定供电量， “倒推” 计算燃料需求， 进而计算碳排放

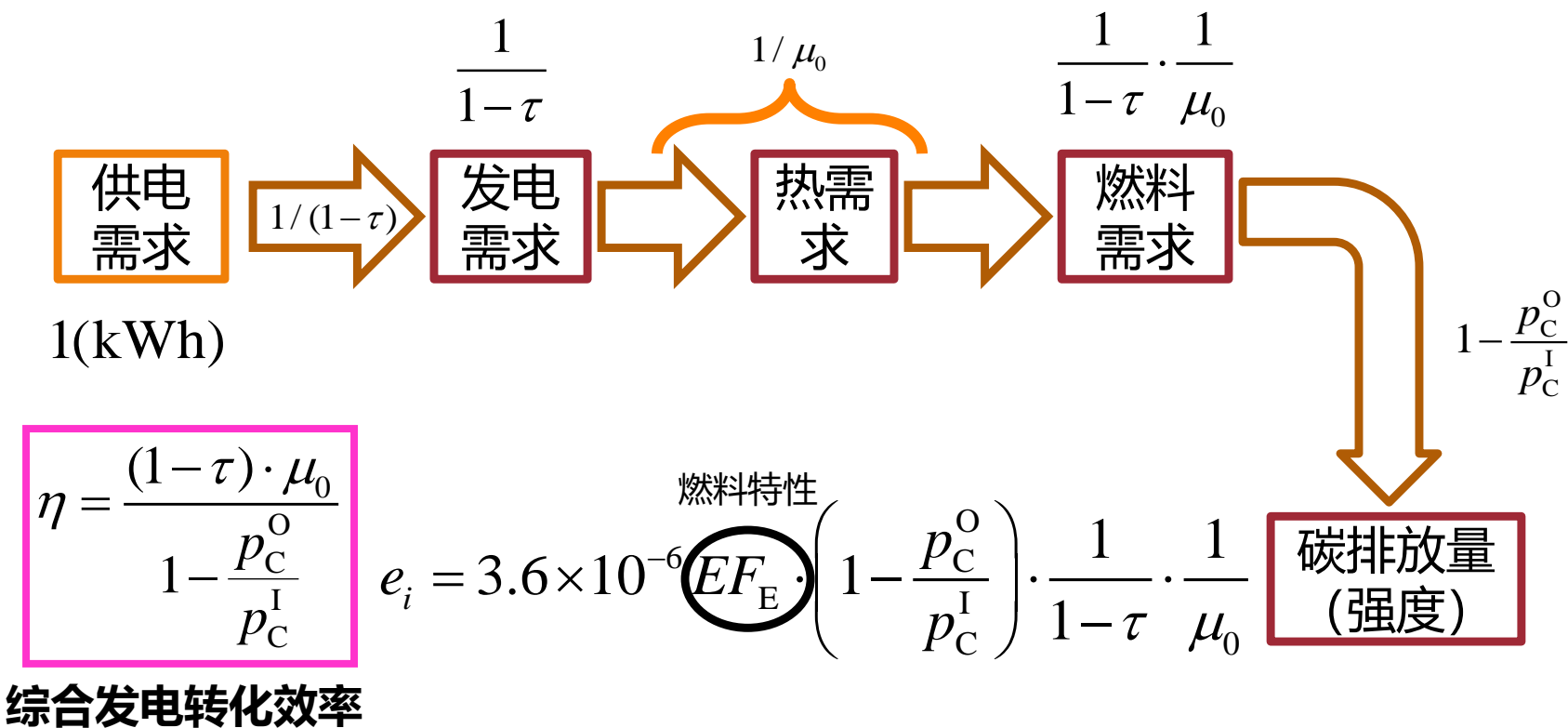


p_C^I : 收到基碳
 p_C^O : 灰渣中的碳元素占煤炭质量比例
 τ : 额定工况下的厂用电率
 μ_0 : 额定工况下的发电效率

基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算



- 由上述能流关系可得发电碳排放强度的计算公式：



基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算



- 电力行业碳排放的影响因素分析
 - 以燃煤发电技术为例，碳排放强度主要受以下因素影响：
 - 发电所用煤的品质（地理条件/运输条件）
 - 锅炉燃烧效率与燃烧充分度（超临界/超超临界/亚临界/IGCC……）
 - 厂用电设备的特性（冷却技术/脱硫/脱硝）
 - 发电厂运行状态（满出力/最小出力）对碳排放强度的影响

$$e = e(p)$$

基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算



- 电力行业碳排放的影响因素分析
 - 发电厂运行状态（工况不同，厂用电和发电效率将有所差异，从而影响综合发电转化效率 η ，进而影响碳排放强度 e ）

$$\eta = \eta(p) \quad \Rightarrow \quad e = e(p)$$

基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算



• 电力行业碳排放的影响因素分析

- 考虑各类影响因素后，火电机组供电碳排放强度可近似由下式表示：

$$e(p) = \underbrace{EF_E}_{\text{燃料特性}} \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{p_C^O}{p_C^I}\right)}_{\text{燃烧效率}} \cdot \frac{1}{1 - \underbrace{\tau}_{\text{运行状态影响}} \cdot \underbrace{f_\tau(p)}_{\text{基础(额定)效率1}}} \cdot \underbrace{\mu_0}_{\text{基础(额定)效率1}} \cdot \underbrace{f_\eta(p)}_{\text{基础(额定)效率1}} - \sum \mu_i^A$$

- p_C^I : 收到基碳
- p_C^O : 灰渣中的碳元素占煤炭质量比例
- τ : 额定工况下的厂用电率
- μ_0 : 额定工况下的发电效率
- $f_\tau(p)$: 不同出力水平对厂用电率的影响函数
- $f_\eta(p)$: 不同出力水平对发电效率的影响函数
- μ_i^A : 其它设备（脱硝、脱硫与冷却等设备）对机组发电效率的影响之和

基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算



• 电力行业碳排放的影响因素分析

- 其中，综合发电转化效率：

$$\eta(p) = \frac{(1 - \tau \cdot f_{\tau}(p)) \cdot (\mu_0 \cdot f_{\eta}(p) - \sum \mu_i^A)}{1 - \frac{p_C^O}{p_C^I}}$$

- p_C^I ：收到基碳
- p_C^O ：灰渣中的碳元素占煤炭质量比例
- τ ：额定工况下的厂用电率
- μ_0 ：额定工况下的发电效率
- $f_{\tau}(p)$ ：不同出力水平对厂用电率的影响函数
- $f_{\eta}(p)$ ：不同出力水平对发电效率的影响函数
- μ_i^A ：其它设备（脱硝、脱硫与冷却等设备）对机组发电效率的影响之和

基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算



- 从上式可以看出，厂用电、燃烧效率等因素均在一定程度上影响综合发电转化效率 η ，使其在基础发电效率 μ_0 的附近变化

$$\eta(p) = \frac{(1 - \tau \cdot f_{\tau}(p)) \cdot (\mu_0 \cdot f_{\eta}(p) - \sum \mu_i^A)}{1 - \frac{p_C^O}{p_C^I}}$$

一般地，以下机组中综合发电转化效率最大的是：

- ☐ A 燃煤机组
- ☐ B 燃油机组
- ☒ C 燃气机组

提交

基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算



- 如何看待这个计算过程？
 - 可以分时段计算
 - 考虑不同工况
 - 数据需求量大



基于物料平衡法的单机碳排放计算



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



基于物料平衡法的单机碳排放计算



- 燃煤产生的CO₂排放源于可燃质中碳元素，灰分无机盐化学反应的影响很小，可以忽略不计。以M_C(kg)表示煤炭可燃质的碳元素质量，按照氧化反应的原子量关系，其完全燃烧释放CO₂质量(kg)为：

$$M_{CO_2} = M_C \times 44 / 12$$

- 在燃煤电厂入炉煤质数据中，收到基碳C_{ar}(%)为基本检测项目，表示收到基标准下可燃质中碳元素质量比例。以M(kg)表示收到基煤的质量，有：

$$M_C = M \times C_{ar}$$

基于物料平衡法的单机碳排放计算



- 由上，煤炭充分燃烧产生CO₂排放量为：

$$M_{CO_2} = M \times C_{ar} \times 44 / 12$$

- 上式两端除以发电量，得机组发电碳排放强度：

$$e = m \times C_{ar} \times 44 / 12$$

- m ：机组单位发电煤耗量，单位为kg/kWh。注意，这里不是标煤，而是实际煤耗量（原煤）。

基于物料平衡法的单机碳排放计算



- m 与机组标煤耗的关系可由下式确定：

$$m = \gamma b_{Gi} / Q_{net}$$

- γ ：标煤能量转换系数，取29.3MJ/kgce (1kgce=29.3MJ)
- b_{Gi} ：机组标煤耗，单位为kgce/kWh
- Q_{net} ：机组用煤炭的低位发热量，单位为MJ/kg

发电煤耗
供电煤耗

To:	TJ	Gcal	Mtoe	Mbtu	GWh	Mtce
From:	multiply by:					
TJ	1	238.8	2.388×10^{-5}	947.8	0.2778	3.4123×10^{-5}
Gcal	4.1868×10^{-3}	1	10^{-7}	3.968	1.163×10^{-3}	1.4290×10^{-7}
Mtoe	4.1868×10^4	10^7	1	3.968×10^7	11630	1.429
MBtu	1.0551×10^{-3}	0.252	2.52×10^{-8}	1	2.931×10^{-4}	3.5997×10^{-8}
GWh	3.6	860	8.6×10^{-5}	3412	1	1.2283×10^{-4}
Mtce	29306	7×10^6	0.7	2.778×10^7	8141.21	1



在我国电力系统中，对同一火电机组，机组标煤耗 X 与机组原煤耗 Y 的大小关系？

☐ A $X > Y$

☐ B $X = Y$

☒ C $X < Y$

提交

基于物料平衡法的单机碳排放计算



- 由此，机组供电碳排放强度可表示为：

$$e = \gamma b_{Gi} / Q_{net} \times C_{ar} \times 44 / 12$$

- 进一步考虑锅炉燃烧率的影响以及煤炭中灰分的影响，对煤炭不完全燃烧的碳流失进行修正，可得：

$$e = \gamma b_{Gi} / Q_{net} \times (C_{ar} - A_{ar} \times C_a) \times 44 / 12$$

- A_{ar} ：收到基灰分 (%)
- C_a ：灰渣中碳含量 (%)



算例分析与方法对比

算例分析



- 问题：一台600MW超临界燃煤机组满出力一天的碳排放强度和碳排放量
- 采用三种方法分别计算
- 已知条件各不相同，取决于掌握数据的情况

算例分析



- 基于排放系数法

- 已知条件:

- 供电煤耗: 290 gce/kWh
- 所用燃料煤:
 - 所用煤炭的碳排放系数 $2.53 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$
 - 所用煤炭的燃烧热值 6400 kcal/kg

算例分析



- 基于排放系数法

- 求解:

- 满出力一天电量: $600\text{MW} \times 24\text{h} = 14.4\text{GWh}$ $G_i = P_i \cdot T_i$

- 排放强度:
$$e_i = 7 \cdot r_i \cdot \frac{EF_M}{q}$$

$7 \times 290\text{gce/kWh} \div 6400\text{kcal/kg} \times 2.53\text{kgCO}_2/\text{kg} = 0.802\text{kgCO}_2/\text{kWh}$

- 日排放量:
$$E_{\text{geni}} = G_i \cdot e_i$$

$$E = 14.4\text{GWh} \times 0.802\text{kgCO}_2 / \text{kWh} = 11548.8(\text{吨})$$

算例分析



- 基于能量转换效率法

- 已知条件:

- 厂用电率: 3%
- 燃料煤: $94600\text{kgCO}_2/\text{TJ}$, 碳元素质量比例74%, 灰渣中碳元素占煤炭质量的3%
- 额定工况下发电效率: 43%, 脱硝、脱硫与冷却等设备对机组发电效率的影响1.5%
- 机组全天工作在额定状态: $f_{\tau}(p) = f_{\eta}(p) = 1$

算例分析



• 基于能量转换效率法

◦ 求解:
$$e(p) = EF_E \cdot \left(1 - \frac{p_C^O}{p_C^I}\right) \cdot \frac{1}{1 - \tau \cdot f_\tau(p)} \cdot \frac{1}{\mu_0 \cdot f_\eta(p) - \sum \mu_i^A}$$

$$= EF_E \cdot \left(1 - \frac{p_C^O}{p_C^I}\right) \cdot \frac{1}{1 - \tau} \cdot \frac{1}{\mu_0 - \sum \mu_i^A}$$

注意
单位

$$= 94600 \text{kgCO}_2/\text{TJ} \cdot \left(1 - \frac{3\%}{74\%}\right) \cdot \frac{1}{1 - 3\%} \cdot \frac{1}{43\% - 1.5\%} \cdot \left(\frac{3.6}{10^6}\right) \text{TJ/kWh}$$
$$= 0.812 \text{kgCO}_2/\text{kWh}$$

$$E = e(p) \cdot G$$
$$= 0.812 \text{kgCO}_2/\text{kWh} \times 600 \text{MW} \times 24 \text{h}$$
$$= 11692.8 (\text{吨})$$

算例分析



- 基于物料平衡法

- 已知条件:

- 燃料煤：收到基碳74%，收到基灰分30%，灰渣中碳元素质量分数10%，低位发热量26.8MJ/kg
 - 供电煤耗：290gce/kWh

算例分析



- 基于物料平衡法

- 求解：

$$\begin{aligned} e &= \gamma b_{Gi} / Q_{net} \times (C_{ar} - A_{ar} \times C_a) \times 44 / 12 \\ &= 29.3 \text{MJ/kgce} \times 290 \text{gce/kWh} \div 26.8 \text{MJ/kg} \times (74\% - 30\% \times 10\%) \times 44 / 12 \\ &= 0.825 \text{kgCO}_2/\text{kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= e \cdot G \\ &= 0.825 \text{kgCO}_2/\text{kWh} \times 600 \text{MW} \times 24 \text{h} \\ &= 11880 (\text{吨}) \end{aligned}$$

算例分析



• 计算方法比对——计算结果

计算方法	碳排放强度	碳排放量
基于排放系数法的单机碳排放计算	0.802kgCO ₂ /kWh	11548.8t
基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算	0.812kgCO ₂ /kWh	11692.8t
基于物料平衡法的单机碳排放计算	0.825kgCO ₂ /kWh	11880.0t

算例分析



- 比较： 误差来源？

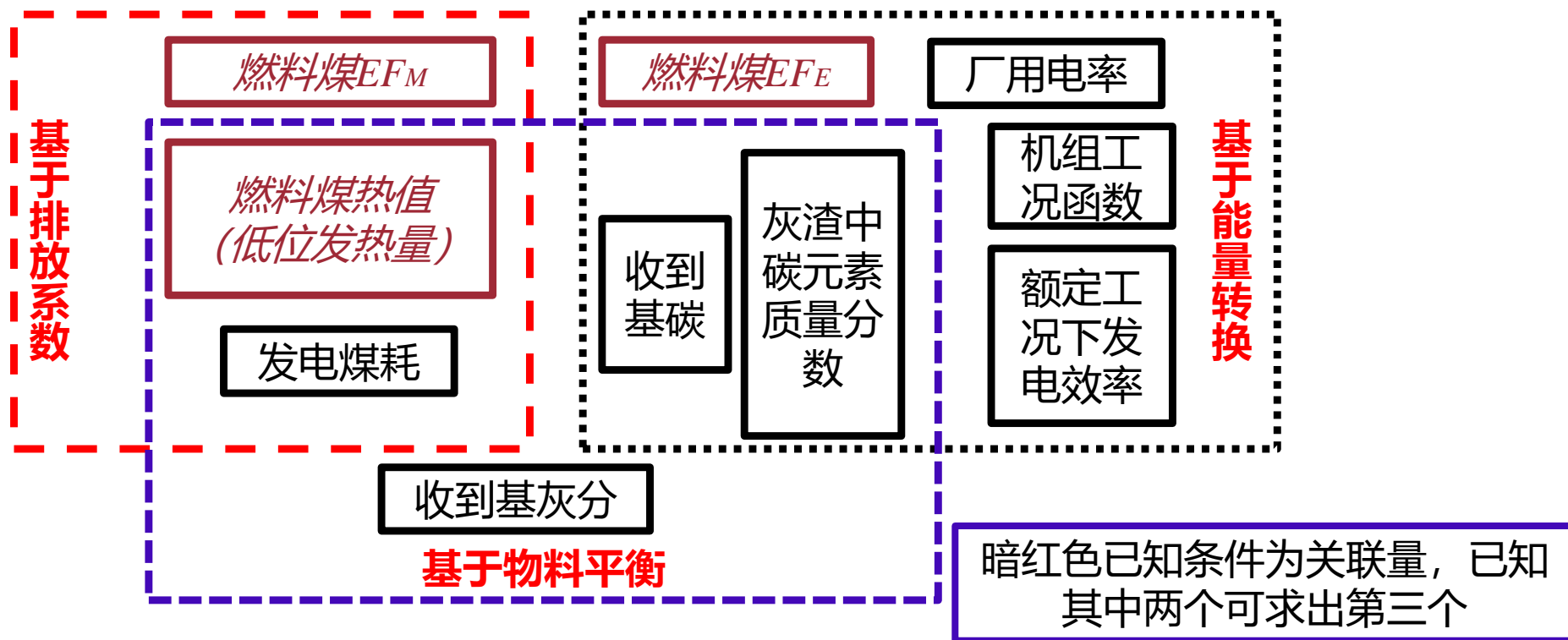
- 已知条件的并集：

- 供电煤耗：290gce/kWh
- 所用燃料煤：2.53kgCO₂/kg、6400kcal/kg（低位发热量26.8MJ/kg），94600kgCO₂/TJ，收到基碳74%，收到基灰分30%，灰渣中碳含量10%（灰渣中的碳元素占煤炭质量比例比为3%）。
- 厂用电率：3%
- 额定工况下发电效率：43%，脱硝、脱硫与冷却等设备对机组发电效率的影响1.5%
- 机组全天工作在额定状态

算例分析



• 计算方法比对——计算所需条件



方法小结与对比



计算方法	基于排放系数法的单机碳排放计算	基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算	基于物料平衡法的单机碳排放计算
特点与适用对象	方法简单，对数据要求较低。用于缺乏详细数据条件下的初步核算	分析全面，充分考虑发电机组运行机理及各类影响排放的因素。适用于面向机组运行的碳排放精细化分析	方法直接有效，充分考虑发电厂的统计数据。适用于发电厂能耗与碳排放的统计与管理
使用局限性	未考虑不同地区燃料品质差异，难以保证地区、企业碳排放数量的准确性	对计算数据种类和准确性要求较高，计算成本较大，若基础数据获取有困难则不能保证计算可行性	仅从统计角度实现排放计算，未考虑电力系统运行实际，不利于碳排放分析的拓展
计算精度	较低	高	中
计算复杂度	较低	高	中
应用难度	较低	高	中
数据依赖度	低	高	高
适用范围	面向系统的宏观计算	面向单机的精细分析	面向发电厂的统计分析



电力系统宏观碳排放的计算



电力系统宏观碳排放的计算



- 电力系统碳排放的宏观统计法
 - 宏观统计法面向系统层面的宏观计算，关注较长时间、较大范围内电力系统的排放总量。该方法多服务于宏观的经济、能源战略规划。
 - 思路1：根据系统内所有电厂燃料消耗的统计数据完成
 - 思路2：通过电力生产统计数据完成

电力系统宏观碳排放的计算



- 基于燃料消耗的统计数据的宏观统计法
 - 基于各类燃料的碳排放系数 EF_{Mi} ，根据各类能源消耗的总量 M_i ，统计计算碳排放总量，相当于物料平衡法。

$$E_{\text{Total}} = \sum_i EF_{Mi} \cdot M_i$$

- 需要以准确、权威的各类能源的消耗统计数据做依托。

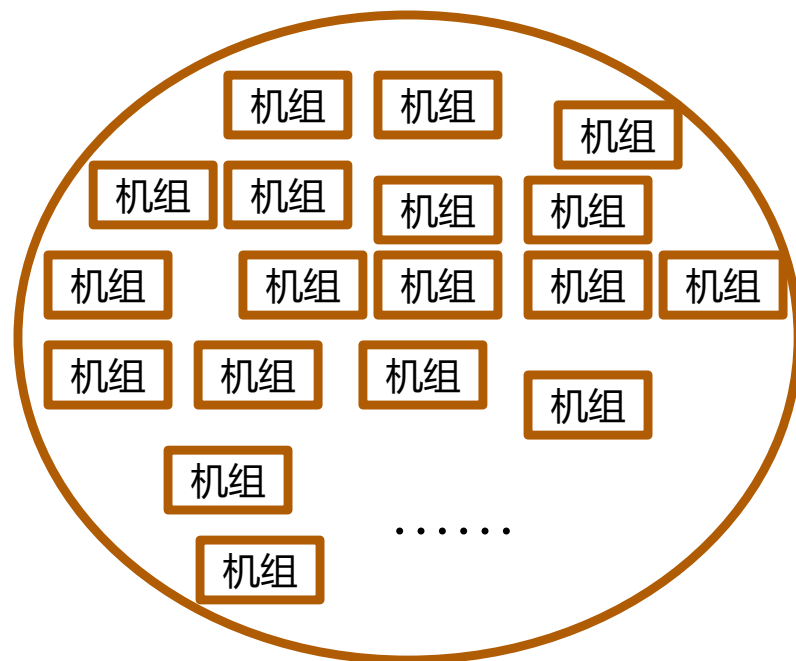
电力系统宏观碳排放的计算



- 基于电力生产统计数据的宏观统计法：
 - 一个电力系统的电力生产碳排放总量的计算如何实现？

$$E_{\text{gen}} = \sum_{i \in U_T} G_i \cdot e_i$$

一台机组



- 数据调研、搜集
- 合理假定与近似

电力系统宏观碳排放的计算



- 电力行业主要统计哪些数据和指标

- 装机容量
- 发电量
- 厂用电率
- 全社会用电量
- 网损率

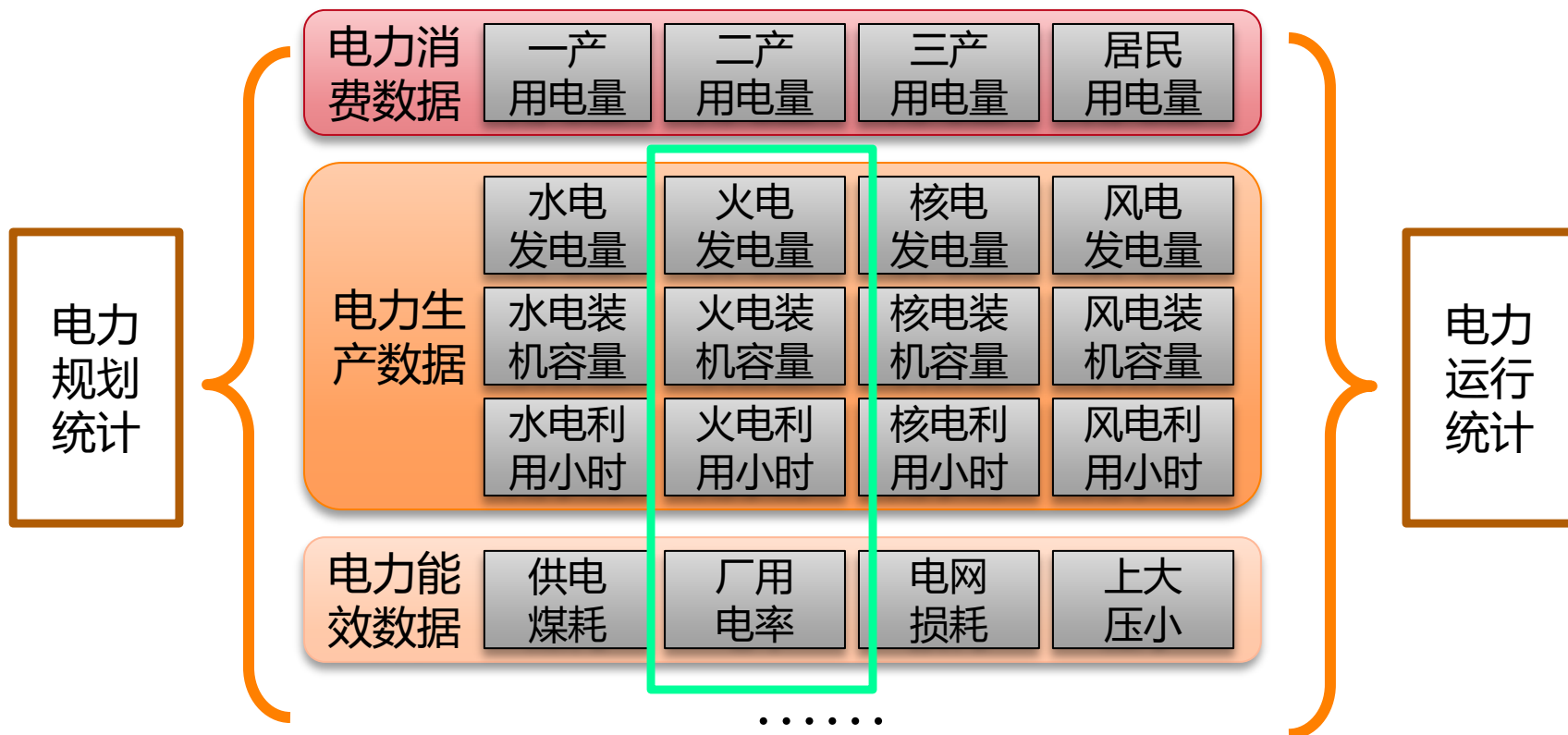
统计
口径

- 统调/非统调/全口径
- 输电网/配电网/全网

电力系统宏观碳排放的计算



- 中电联年度电力生产快报中所公布的数据



目录



- 原理分析
 - 电力系统碳排放的计算原则
 - 影响电力碳排放的主要因素
- 单机碳排放计算方法
 - 基于排放系数法的单机碳排放计算
 - 基于发电机组能量转换效率的单机碳排放计算
 - 基于物料平衡法的单机碳排放计算
 - 算例分析与方法对比
- 电力系统宏观碳排放的计算



作业：发电侧碳排放计算



- 结合所学知识，**选择或构造**适当计算方法，**搜集**有关数据，计算自己家乡所在省（直辖市、自治区，按学籍信息）**2023年**的：
 - 本地发电碳排放总量（万吨CO₂）
 - 本地火电碳排放强度（kgCO₂/kWh）
 - 本地发电综合碳排放强度（kgCO₂/kWh）
- 提交：
 - 作业报告：原始数据**及其来源**、计算方法和过程、计算**结果及分析讨论**
 - 填写Excel汇总表（模板详见网络学堂作业附件）

	A	B	C	D	E	
1	姓名	学号	所在省级行政区名称	本地总发电量（亿度）	本地火电发电量（亿度）	
2	清小华	2019010001	湖北省	2972.9	1485.3	
	F	G		H		I
本地发电碳排放总量（万吨CO2）		本地火电碳排放强度（kgCO2/kWh）		本地发电综合碳排放强度（kgCO2/kWh）		备注
13791.0		0.928		0.464		

- 10月11日（周五）晚上24点之前提交到网络学堂
- 10月14日（周一）课上教师讲评，邀请几个同学讲解