



低碳电力技术基础

课程总结

康重庆

清华大学电机系

cqkang@tsinghua.edu.cn





课程内容总结与梳理



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



本学期课程总览



讲次	授课内容	讲次	授课内容
1	绪论与课程简介	9	电力行业减排路线及企业应对
2	电力行业碳排放基本概念 与排放源识别	10	参观调研：冀北电力公司
3	发电侧碳排放的计算方法	11	碳市场与碳交易
4	电网侧碳排放的分析方法	12	课程实验：碳交易模拟
5	用户侧的碳减排机理	13	电力系统低碳 评价指标体系与评价方法
6	CCUS与碳捕集电厂运行分析	14	特邀报告：清华校园碳中和展望
7	低碳电力调度	15	课程总结
8	低碳电力规划		

第1讲回顾



1、绪论与课程简介

- 低碳经济理念的诞生（标志性事件）
- 为何要倡导低碳经济
 - 全球气候变化的相关常识（关键指标，原因剖析）
 - 全球能源危机的相关常识（能源现状）
- 世界碳排放的现状格局，我国的碳排放现状
 - 我国碳排放在全球中的比例与发展趋势
- 国内与国际（欧洲与西方主要国家）的低碳发展目标与发展战略
- 为什么学习这门课程



第1讲回顾



“双碳”目标中，“双碳”的准确含义是什么？

- A 碳减排 碳捕集
- B 碳达峰 碳中和
- C 低碳电力 低碳能源
- D 低碳城市 低碳生活

51 /53
完成人数

96 %
完成率

100 %
正确率



A	共0人, 占比0%	>
B	共51人, 占比96%	>
C	共0人, 占比0%	>
D	共0人, 占比0%	>
未作答	共2人, 占比4%	>

第1讲回顾



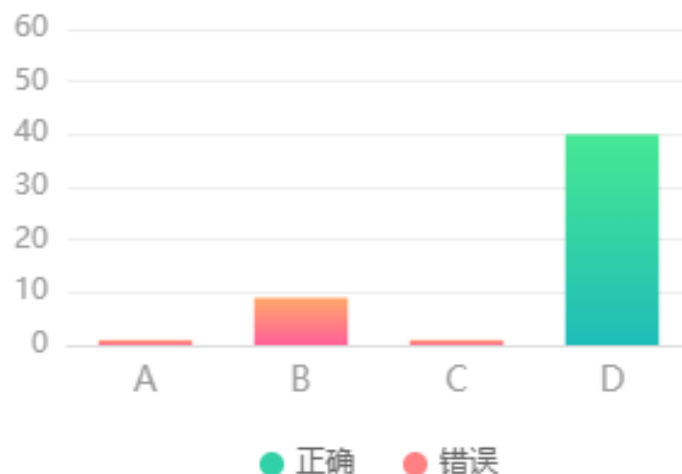
我国“双碳”目标的具体年份为？

- A 2025年实现碳达峰 2050年实现碳中和
- B 2030年实现碳达峰 2050年实现碳中和
- C 2025年实现碳达峰 2060年实现碳中和
- D 2030年实现碳达峰 2060年实现碳中和

51 /53
完成人数

96 %
完成率

78 %
正确率



A	共1人，占比2%
B	共9人，占比17%
C	共1人，占比2%
D <input checked="" type="checkbox"/>	共40人，占比75%
未作答	共2人，占比4%

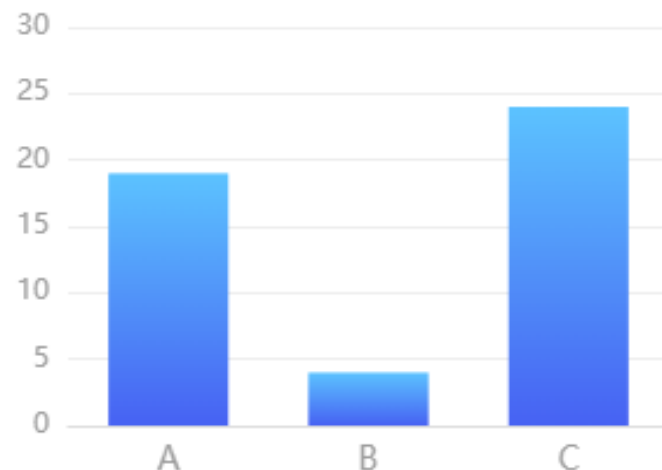
第1讲回顾



投票人数：47

你对气候变化的看法：

- A 我相信气候变化
- B 我认为气候变化是阴谋
- C 我需要学习专业知识再判断



A 共19人，占比36%

B 共4人，占比8%

C 共24人，占比45%

未作答 共6人，占比11%



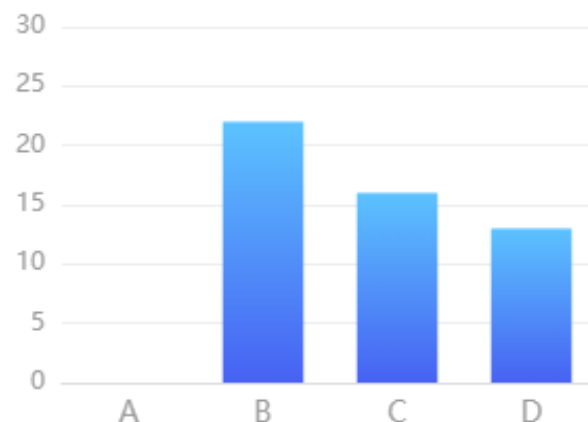
第1讲回顾



你认为在气候谈判中，下列哪项指标有利于中国？

- A 碳排放总量
- B 人均碳排放
- C 单位GDP碳排放
- D 可以设立更好的指标

投票人数：51



A 共0人，占比0%

B 共22人，占比42%

C 共16人，占比30%

D 共13人，占比25%

未作答 共2人，占比4%

第2讲回顾



2、电力行业碳排放基本概念与排放源识别

- 电力行业在低碳经济中的角色、责任与地位
 - 电力行业碳排放与全社会碳排放的关系
- 全生命周期评价及其在电力行业中的应用
- 发电碳排放的主要来源
 - 各类发电技术碳排放的来源与原理
 - 各类发电技术碳排放相关的基本特征
- 电网环节碳排放的主要来源
- 用户侧碳减排的机理



第2讲回顾



你觉得碳排放中的“碳”指什么？

- A 煤炭
- B 二氧化碳
- C 温室气体
- D 还需要进一步学习

50 /55
完成人数

91 %
完成率

44 %
正确率



答题分布

A	共0人, 占比0%	>
B	共27人, 占比49%	>
C	共22人, 占比40%	>
D	共1人, 占比2%	>
未作答	共5人, 占比9%	>

第2讲回顾



你认为下面哪个选项正确？

A

热值 q 越高的燃料，其碳排放因子 EF_M 通常越大，因为其含碳量越密集

B

热值 q 越低的燃料，其碳排放因子 EF_M 通常越大，因为燃烧产生同样热量所需要的燃料越多

46 / 55
完成人数

84 %
完成率

35 %
正确率



答题分布

A	共16人，占比29%	>
B	共30人，占比55%	>
未作答	共9人，占比16%	>

第2讲回顾



某一电力系统，包括火电和风电两类电源，其中火电的平均碳排放强度为 $0.85\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ 。那么该电力系统中，单位网损对应的碳排放——

- A 小于 $0.85\text{kgCO}_2/\text{kWh}$
- B 等于 $0.85\text{kgCO}_2/\text{kWh}$
- C 大于 $0.85\text{kgCO}_2/\text{kWh}$
- D 不确定

48 / 55
完成人数

87 %
完成率

81 %
正确率



答题分布

A	✓	共39人, 占比71%	>
B		共0人, 占比0%	>
C		共7人, 占比13%	>
D		共2人, 占比4%	>
未作答		共7人, 占比13%	>

第3讲回顾



3、发电侧碳排放的计算方法

- 影响发电机碳排放特性的主要影响因素
 - 电力生产基本概念的含义与计算方法（厂用电率等）
 - 基本的能量计算/换算方法（标准煤计算）
- 发电环节碳排放的主要计算方法
 - 单台发电机组的碳排放分析
 - 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
 - 全电力系统的碳排放计算分析（会根据已知条件进行计算）

第3讲回顾



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

49 / 55
完成人数

89 %
完成率

76 %
正确率

答题分布



A	共12人，占比22%	>
B	共0人，占比0%	>
C <input checked="" type="checkbox"/>	共37人，占比67%	>
D	共0人，占比0%	>
未作答	共6人，占比11%	>

第3讲回顾



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

48 /55 完成人数 | 87 % 完成率 | 17 % 正确率



答题分布

A	共1人，占比2%
B <input checked="" type="checkbox"/>	共8人，占比15%
C	共39人，占比71%
未作答	共7人，占比13%

第3讲回顾



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



答题分布

A	共2人，占比4%	>
B	共2人，占比4%	>
C	共44人，占比80%	>
未作答	共7人，占比13%	>

第3讲回顾



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？



$X > Y$

41 / 55
完成人数

75 %
完成率

85 %
正确率



$X = Y$



$X < Y$



● 正确 ● 错误

答题分布

A	共6人, 占比11%	>
B	共0人, 占比0%	>
C	共35人, 占比64%	>
未作答	共14人, 占比25%	>



清华大学
Tsinghua University

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



第4讲回顾



4、电网侧碳排放的分析方法

- 电网环节碳排放的主要来源
 - 电网损耗对应的碳排放的基本计算方法
 - 六氟化硫相关内容
- 输电与输煤的低碳特征比较与权衡
 - 输电方案碳排放分析方法
 - 输煤方案碳排放分析方法

第4讲回顾



我国2023年全社会用电量9.22万亿千瓦时，假设平均线损率为6%，则电力损耗造成的碳排放量近似为？

- A 3.1 亿吨
- B 4.7 亿吨
- C 0.47 亿吨

45 /56
完成人数

80 %
完成率

9 %
正确率



答题分布

A	✓	共4人, 占比7%
B		共35人, 占比63%
C		共6人, 占比11%
未作答		共11人, 占比20%

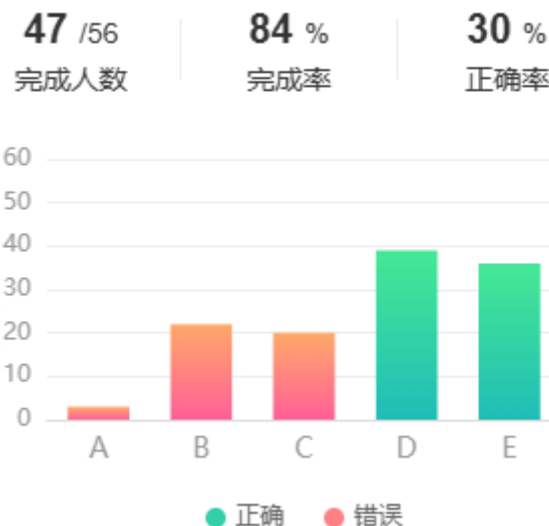
● 正确 ● 错误

第4讲回顾



对于某单向送受端互联电网，假定送电结构不变，设X为所计算出的输送到受端电网的折合碳排放强度，Y为电网送端火电碳排放强度，请问X与Y之间的大小关系？

- A X一定大于Y
- B X一定不大于Y
- C 取决于受端的电量需求
- D 取决于送端火电发电量占比
- E 取决于输电线路损耗



答题分布

BC	✗	共3人, 占比5%
CD	✗	共2人, 占比4%
BCDE	✗	共6人, 占比11%
DE	✓	共14人, 占比25%
ACDE	✗	共2人, 占比4%
B	✗	共1人, 占比2%
CDE	✗	共6人, 占比11%
BCE	✗	共1人, 占比2%
A	✗	共1人, 占比2%
BDE	✗	共5人, 占比9%
BD	✗	共4人, 占比7%
BE	✗	共2人, 占比4%
未作答		共9人, 占比16%

第5讲回顾



5、用户侧的碳减排机理

- 用电行为的描述（深刻理解负荷曲线）
- 用电环节对电力系统碳排放的影响机理
 - 与用电负荷相关的概念
 - 电力系统运行相关的概念（煤耗曲线）
- 用电环节实现低碳减排的技术与机制
 - 电价机制
 - 电动汽车技术
 -



第5讲回顾



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

50 / 58
完成人数

86 %
完成率

66 %
正确率



答题分布

A	✓	共33人, 占比57%
B		共7人, 占比12%
C		共10人, 占比17%
未作答		共8人, 占比14%

第5讲回顾



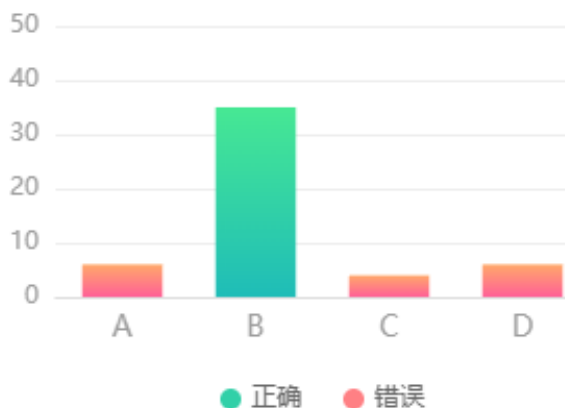
如果你工作后有一辆电动汽车，本着低碳用电的思想，你选择如下哪个方式进行充电？

- 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

51 / 58
完成人数

88 %
完成率

69 %
正确率



答题分布

A	共6人，占比10%
B <input checked="" type="checkbox"/>	共35人，占比60%
C	共4人，占比7%
D	共6人，占比10%
未作答	共7人，占比12%

第6讲回顾



6、CCUS与碳捕集电厂运行分析

- CCUS技术简介
 - 碳捕集、利用、存储等环节
- 碳捕集电厂简介
- 碳捕集电厂基本模型与基准运行方式
- 碳捕集电厂灵活运行方式
- 碳捕集电厂的技术经济影响

第6讲回顾



我国2023年发电量 9.3 万亿千瓦时，若所有的CO₂按80%的比例进行碳捕集封存，需要封存的量大约是多少？

- A 0.3Gt
- B 4.0Gt
- C 8.0Gt
- D 15Gt

46 /58
完成人数

79 %
完成率

83 %
正确率



答题分布

A	共0人, 占比0%
B <input checked="" type="checkbox"/>	共38人, 占比66%
C	共8人, 占比14%
D	共0人, 占比0%
未作答	共12人, 占比21%

第6讲回顾



一台600MW燃煤机组一天满负荷运行的碳排放量大约是多少？

- A 1吨
- B 100吨
- C 1000吨
- D 10000吨



答题分布

A	共3人, 占比5%
B	共13人, 占比22%
C	共9人, 占比16%
D <input checked="" type="checkbox"/>	共18人, 占比31%
未作答	共15人, 占比26%

第7讲回顾



7、低碳电力调度

- 电力系统调度简介
 - 什么是调度、三公调度、低碳调度理念、电力调度的难题、各类资源的调度、新型电力系统的调度难点
- 低碳电力调度的数学模型
 - SCED、SCUC、低碳调度要素的刻画
- 典型调度案例分析

第7讲回顾



以下哪些是中国三北地区弃风弃光严重原因（多选）？

- ☐ A 新能源过于集中
- ☐ B 远离负荷中心
- ☐ C 火电机组调节性不够
- ☐ D 风电预测精度远低于国际先进水平

答题分布

ABC	✓	共20人, 占比36%
ABCD	✗	共7人, 占比13%
ABD	✗	共3人, 占比5%
BC	✗	共5人, 占比9%
AB	✗	共5人, 占比9%
AC	✗	共1人, 占比2%
ACD	✗	共2人, 占比4%
BCD	✗	共3人, 占比5%
CD	✗	共1人, 占比2%
未作答		共9人, 占比16%



第7讲回顾



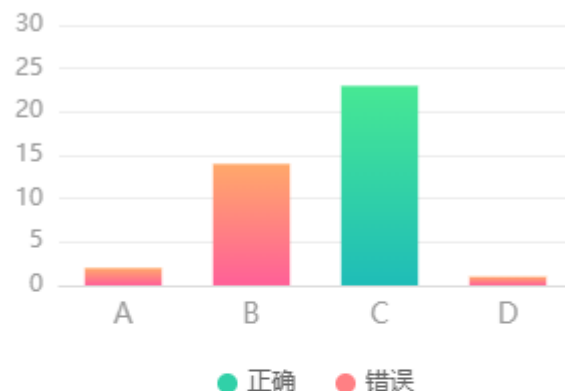
2023年，全社会用电量9.22万亿千瓦时，若由于低碳调度，新能源发电量（风电和光伏）占总用电量比例提升1%，其他类型机组发电量按原有发电比例相应减少，则碳排放减少约为？

- A 1.04 亿t
- B 0.78 亿t
- C 0.52 亿t
- D 0.26 亿t

40 /56
完成人数

71 %
完成率

58 %
正确率



答题分布

A	共2人，占比4%
B	共14人，占比25%
C <input checked="" type="checkbox"/>	共23人，占比41%
D	共1人，占比2%
未作答	共16人，占比29%

第 8 讲回顾



8、低碳电力规划

- 什么是电力系统规划
- 传统电力系统规划
- 低碳电力系统规划新理念
- 低碳电力系统规划模型与方法
- 低碳电力系统规划案例分析

第8讲回顾

• 给定系统：

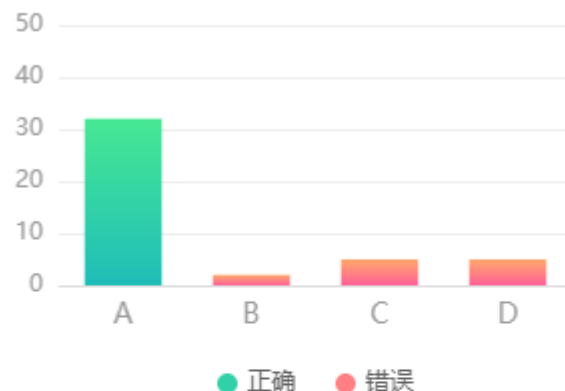
- 最高负荷670MW，年用电量3350GWH
- 水电380MW；火电400MW，电力备用率16%
- 水电/火电年利用小时数：3000h/5000h

- ☐ A 电力平衡，电量不平衡
- ☐ B 电力平衡，电量平衡
- ☐ C 电力不平衡，电量不平衡
- ☐ D 电力不平衡，电量平衡

44 /56
完成人数

79 %
完成率

73 %
正确率



答题分布

A	共32人，占比57%	>
B	共2人，占比4%	>
C	共5人，占比9%	>
D	共5人，占比9%	>
未作答	共12人，占比21%	>

第8讲回顾



电源电网规划一体优化决策需要考虑哪些因素？

- A 电源投产的同一期先后和多期之间时间耦合约束
- B 系统运行要求如调峰、线路潮流限制等
- C 环保需求，如碳排放约束等
- D 对政策性需求的兼容性

48 /56
完成人数

86 %
完成率

98 %
正确率



答题分布

ABCD ☒

共47人, 占比84%



BCD ☒

共1人, 占比2%



未作答

共8人, 占比14%



第9讲回顾



9、电力行业减排路线及企业应对

- 碳减排模式分析与路线图
 - 碳排放轨迹模型、定峰/定期/定速/定年减排模式
- 我国电力企业发展历程
 - 我国电力企业发展的四个阶段、电力行业格局的变化、电力企业组织架构、电网调度管理的任务和内容、五级调度
- 电力企业的低碳挑战及应对策略
 - 发电企业及电网企业的挑战、策略分析及发展建议

第9讲回顾



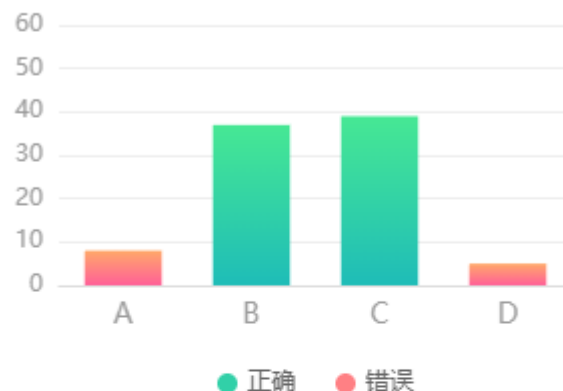
总排放额度一定时，以下关于减排模式表述正确的是？

- ☐ A 排放峰值相等时，排放峰值年越靠前，减排区最初几年减排难度越大
- ☒ B 排放峰值相等时，排放峰值年越靠前，减排区最初几年减排难度越小
- ☒ C 排放峰值年相等时，排放峰值越低，峰值年之前减排难度越大
- ☐ D 排放峰值年相等时，排放峰值越低，峰值年之后减排难度越大

45 /55
完成人数

82 %
完成率

80 %
正确率



答题分布

BC	✓	共36人, 占比65%	>
A	✗	共1人, 占比2%	>
AC	✗	共3人, 占比5%	>
AD	✗	共4人, 占比7%	>
BD	✗	共1人, 占比2%	>
未作答		共10人, 占比18%	>

第 11 讲回顾



11、碳市场与碳交易

- 碳减排与碳交易概述
- 碳交易原理分析
- 碳市场相关的补充交易品
- 国内外碳交易实践
- 碳市场与电力市场

第 11 讲回顾



下列哪种气体不属于《京都议定书》明确要削减排放的6种温室气体？

A SF_6

B SO_2

C CH_4

D N_2O

37 / 57

完成人数

65 %

完成率

57 %

正确率



答题分布

A	共1人, 占比2%	>
B <input checked="" type="checkbox"/>	共21人, 占比37%	>
C	共2人, 占比4%	>
D	共13人, 占比23%	>
未作答	共20人, 占比35%	>



清华大学
Tsinghua University

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

第 11 讲回顾



假设一个高耗能电厂今年刚引进了先进的碳减排技术，在碳市场中，选择哪种免费的配额分配方法对该电厂当前更有利？

- A 历史排放法
- B 行业基准线法
- C 两者不定

39 /57
完成人数

68 %
完成率

56 %
正确率



答题分布

A <input checked="" type="checkbox"/>	共22人, 占比39%	>
B	共17人, 占比30%	>
C	共0人, 占比0%	>
未作答	共18人, 占比32%	>



第 11 讲回顾

燃煤、燃气机组的综合发电成本约为 260 元/MWh、660 元/MWh，燃气机组的发电碳排放强度约为燃煤机组的一半，则当碳价为多少时，燃气机组的总发电成本（包含碳排放成本）将低于燃煤机组的成本？

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| A 50 元/tCO ₂ | B 350 元/tCO ₂ |
| C 765 元/tCO ₂ | D 1000 元/tCO ₂ |

42 / 57
完成人数

74 %
完成率

10 %
正确率



答题分布

CD	✗	共16人, 占比28%	>
B	✗	共7人, 占比12%	>
C	✗	共7人, 占比12%	>
AB	✗	共4人, 占比7%	>
D	✓	共4人, 占比7%	>
BCD	✗	共2人, 占比4%	>
BC	✗	共2人, 占比4%	>
未作答		共15人, 占比26%	>



清华大学
Tsinghua University

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

第 13 讲回顾



13、电力系统低碳评价指标体系与评价方法

- 授课教师：王毅（香港大学）
 - 指标体系的一般理念
 - 电力系统低碳评价的指标体系
 - 指标体系制定原则
 - 指标体系内容介绍
 - 电力系统低碳评价方法介绍
 - 电力系统低碳特征评价实证分析

第 13 讲回顾



如果选择指标进行低碳化评价，你会选择

- A 系统碳排放强度
- B 电网综合网损率
- C 可再生能源接纳力度
- D 负荷峰谷差
- E 以上指标均可选

35 /57
完成人数

61 %
完成率

83 %
正确率



答题分布

A	共6人, 占比11%	>
B	共0人, 占比0%	>
C	共0人, 占比0%	>
D	共0人, 占比0%	>
E	共29人, 占比51%	>
未作答	共22人, 占比39%	>



清华大学
Tsinghua University

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

第 13 讲回顾



从促进电力系统低碳化的角度看，下列哪个属于正型指标？

- A 系统碳排放强度
- B 可再生能源开发程度
- C 电网综合网损率
- D 小火电装机比例

39 /57
完成人数

68 %
完成率

95 %
正确率



答题分布

A	共1人, 占比2%	>
B <input checked="" type="checkbox"/>	共37人, 占比65%	>
C	共1人, 占比2%	>
D	共0人, 占比0%	>
未作答	共18人, 占比32%	>






51 %
正确率

	取值下限	取值上限	A省	B省
系统煤电碳排放强度 kgCO ₂ /kWh	0.70	1.10	0.80	0.90
可再生能源开发比例%	0	100	40	60
电网综合网损率%	2	10	6	8

Category	正确 (Correct)	错误 (Incorrect)
A	20	0
B	18	0
C	1	0

- ☐ A A省
- ☐ B B省
- ☐ C A、B两省一样好

答题分布

A 	共20人, 占比35%	
B	共18人, 占比32%	
C	共1人, 占比2%	
未作答	共18人, 占比32%	



清华大学
Tsinghua University



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

第 14 讲回顾



14、清华校园碳中和展望

- 授课教师：杜尔顺（清华大学）
 - 清华校园碳中和的背景、内涵和意义
 - 清华校园碳中和的总体方案思考
 - 电气热协同的校园柔性零碳能源系统
 - 欧洲出访考察总结



展望

课程展望——低碳电力技术



- 低碳电力技术是一个新的研究领域，涉及电气工程与经济、气候、环境、化学工程、热能动力工程等学科的交叉和融合
 - 电力工程
 - 化学工程：各种“去碳”的新技术、新材料、新工艺
 - 热能动力工程：各类“低碳”电源、高效发电技术、电动汽车等
 - 公共管理：宏观政策的建模与决策、机制实施与执行等等
 - 经济：交易机制设计、成本效益评估、创新金融工具的运用、融资渠道、技术引进等等.....
 - 气候与环境：各种气候变化趋势的分析、极端气候灾难的风险评估等等

课程展望——低碳对电工学科的意义



- 低碳理念为电工学科的发展提供了巨大的机遇和挑战
- 低碳电力：将电工学科的发展与国家的能源发展、环境变化应对等重大战略紧密结合
- 低碳电力技术是电力学科更好融入以“能源-经济-环境”多要素协调为背景的“大能源系统”的契机，持续提升电工学科在大能源系统中的地位
- 学术方向正在发展之中，课程建设时间不长，还需要不断发展和完善

课程展望——对个人低碳意识的培养



- 养成节约、节能的生活作息习惯
 - 随手关灯、关电脑
 - 乘坐公共交通出行
 -
- 引导周围同学，低碳工作生活，人人从我做起

进一步学习和研究低碳电力技术的建议



- 技术+政策
 - 并重，技术为主
- 关注国际国内的动向
 - 气候变化谈判
 - 节能减排目标
- 新观点、新问题
 - 学术推动力
- 携手其他专业的同学？ 学科交叉





希望本课程的一些理念和方法对今后的学习和工作有所启发
课程中的不完善内容，希望理解，不要影响大家独立思考
对于课程的建议或意见，可通过网络学堂提出

感谢大家一学期的配合！