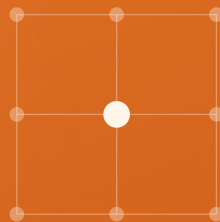
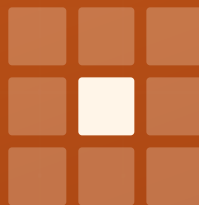

介子九维 · 著



九维能源

一部有趣的能源经济学读本

能源的价值，
不只是你拥有它的福利，
更在于你失去它的代价。



介子九维 · 胡彪 | 能源经济学读本

C O N T E N T S

目 录

P	前 言	——	iv
	<small>一部有趣的能源经济学读本</small>		
§	能源就是房间里的大象	.....	v
§	直觉, 是认知的囚笼	.....	vi
§	这本书写给谁? / 我会写得很"有趣"	.....	vii
I.	第一讲 你买的不是电, 是「随时可用」	——	001
	<small>能源的物理属性与价值起源</small>		
引|	引子 · 一头隐形的大象	.....	002
§1	一个价值千亿美元的「至暗时刻」	.....	003
§2	期权思维 · 为什么你为"可能性"付费	.....	006
§3	在钢丝上跳舞 · 电网的毫秒级平衡	.....	008
§4	闲置的账单 · 容量成本与冗余之价	.....	014
§5	刚与柔 · 电力商品的两副面孔	.....	016
§6	文明的代价	.....	019
?	思考题 · 你会选 A 套餐, 还是 B 套餐?	.....	021
II.	第二讲 你以为你买的是「一度电」, 其实买的是「那一刻的电」	——	022
	<small>负荷、速率与峰值的经济学</small>		
引|	引子 · 过剩, 也是一种稀缺	.....	023
§1	大都会的红色按钮	.....	024
§2	阿尔钦的洞见 · 速率, 而非总量	.....	027
§3	英萨尔的遗产 · 负荷因子的魔法	.....	029
§4	博伊特的定价 · 两部制的诞生	.....	031
§5	需求侧响应 · 看不见的发电厂	.....	033
§6	「插座」交易所	.....	034
?	思考题 · 我们到底为什么要"随时可用"?	.....	036
III.	第三讲 能源不一定是垄断, 但是「一定需要垄断」	——	037
	<small>固定成本、自然垄断与拉姆齐定价</small>		
引|	引子 · 一家独大, 为什么反而最省钱?	.....	038
§1	纽约街头的「地下战争」	.....	039
§2	都是成本, 但"性格"不同 · 房租与饭钱	.....	041
§3	高铁是否可以卖白菜价 · 拉姆齐定价	.....	043
§4	从电网到互联网 · 赢家通吃的宿命	.....	046
§5	垄断不可避免, 那我们该怎么办?	.....	048
§6	驯服巨头的平衡术	.....	050
?	思考题 · 航空公司的"绝对公平"实验	.....	052
IV.	第四讲 「廉价」能源的「陷阱」	——	053
	<small>价格、稀缺与短缺的经济学</small>		
引|	引子 · "廉价"能源的陷阱	.....	054
§1	半吊子市场化的教训 · 加州电力危机	.....	055
§2	打碎温度计, 并不代表烧退了	.....	058
§3	非价格竞争机制的代价	.....	060
§4	煤电顶牛的演进与挑战	.....	062
§5	价格波动的调节作用	.....	064
§6	从「暗补」走向「明补」	.....	065
?	思考题 · 台风夜的最后一箱矿泉水	.....	068

C O N T E N T S

目 录

V. 第五讲	边际，能源经济中最有魅力的词汇	069
	<i>边际机组、边际效用与边际定价</i>	
引	引子·走出“平均”的舒适区	070
§1	一个看似“摸鱼”的天价员工	071
§2	钻石与水的古老悖论	073
§3	昂贵的雇佣兵与统一出清	075
§4	天价账单与「让电于民」	077
§5	未来的电网，没有平均数	079
§6	走出「平均」的舒适区	080
?	思考题·效率与公平的边界在哪里？	083
VI. 第六讲	刚需，能源中的「伪命题」	084
	<i>需求弹性、时间与油页岩土</i>	
引	引子·给时间一点时间	085
§1	消失的「那一半」冬天·欧洲 2022	086
§2	阿尔钦的定律·需求第二定律	088
§3	希克斯的预言·诱致性创新	090
§4	杰文斯的「既往不咎」	092
§5	从电动车到碳中和	094
§6	给世界一点时间	096
?	思考题·一夜之间的 50 元地球税	098
VII. 第七讲	贴现率，决定新能源项目的「生死劫」	099
	<i>时间、耐心与资金成本</i>	
引	引子·如何给“未来”定价？	100
§1	时间是一台「缩小镜」	101
§2	给耐心定价·WACC 的面馆模型	103
§3	能源世界的「房东」与「租客」	105
§4	谁的耐心更值钱？	107
§5	廉价资金的时代终结	109
§6	耐心的最终定价·斯特恩之争	111
?	思考题·“永续电站”的道德按钮	114
VIII. 第八讲	能源的世界里，恐惧也有价格	115
	<i>风险溢价、契约网络与主权信用</i>	
引	引子·恐惧，也有自己的标价	116
§1	丹麦养老金的「慢钱」逻辑	117
§2	耐心的价格与恐惧的溢价	120
§3	高风险项目的优质资产重组	122
§4	PPA·锁定未来的现金流	124
§5	照付不议的经济学逻辑	126
§6	风险重塑与主权信用赋能	129
?	思考题·无条件兜底，是福还是祸？	132
IX. 第九讲	不确定性，也是「巨大的机会」	133
	<i>真实期权与波动率的红利</i>	
引	引子·真实期权·让波动成为朋友	134
§1	从死局中看到的「隐形资产」	135
§2	现实投资就是一张电影票	138
§3	坏消息也是好消息·波动率的魔术	140
§4	分步走的艺术·花小钱买“明白”	142
§5	留好退路，你才敢全速前进	144
§6	从「工程思维」到「金融思维」	146
?	思考题·百亿智算中心，现在 vs 等待	148
★	第一章·终章结语	149
∞	延 伸	150
	<i>关于作者·版权页</i>	

P R E F A C E

前言

一部有趣的
能源经济学读本

能源不只是关于煤炭、石油和电子，它关乎选择，关乎代价，关乎我们如何组织这个社会。

写在正文之前

能源就是房间里的大象

开关、插座与油枪，是现代文明最伟大的用户界面，也是最危险的幻觉。

如果我们为现代文明寻找一个最底层的隐喻，那一定是**能源**。它像血液一样流淌在城市的钢筋水泥森林里，维持着服务器的每一次心跳，驱动着物流网络的每一次吞吐。

但绝大多数时候，它对我们而言是透明的。我们生活在一个由开关、插座和油枪构成的"用户界面"之上，理所当然地认为，只要按下按钮，光明就会降临；只要踩下油门，动力就会涌现。

这种"无感"，是工业革命两百年来最伟大的成就，也是现代社会最危险的幻觉。

因为"无感"，我们对庞大系统的运作逻辑一无所知。不知道为了那一秒钟的亮灯，电网在背后进行了怎样惊心动魄的毫秒级平衡；不知道为了加油站那几块钱一升的汽油，地缘政治的棋盘上发生了怎样的博弈。

直到最近几年，这头房间里的大象开始变得躁动不安。从欧洲的能源危机到得州的史诗级大停电，从加油站价格牌的疯狂跳动到企业财报中飙升的能耗成本，那个**廉价、稳定、随叫随到的旧能源时代**，正在离我们远去。人们开始困惑，为什么风、光不要燃料费，电费却在涨？为什么装机最大，仍要拉闸限电？为什么工厂电价比居民还便宜？**物理学给不出答案**，它们是关于**"稀缺、配置与代价"**的问题。

” 要看懂这一切，你需要换一副眼镜。
这副眼镜，叫 **能源经济学**。

§ 直觉，是认知的囚笼

在能源的世界里，直觉往往是最大的陷阱。

这本书不想做一本温吞的科普读物，它是一台“直觉粉碎机”。我的目的，是带你从日常感知的表层，下潜到系统运行的底层，去看到那些反常识的真相。

反直觉 · 01

你以为你买的是“商品”，其实你买的是“服务”

电力不是大米，不能简单地囤积。当你支付电费时，你买的不仅仅是那一千瓦时的能量，你买的是整个系统为你提供的“随时随地、想用就用”的**确定性**。为了应对你可能一年只出现一次的峰值需求，全社会必须支付高昂的“冗余成本”。在能源经济学里，**可靠性本身就是最昂贵的商品**。

反直觉 · 02

你以为“免费”的能量最便宜，其实“系统”在标价

风和光确实是大自然的馈赠，边际成本接近于零。但在一个要求每分每秒都供需平衡的电网里，不确定性就是最大的成本。为了接入这些“看天吃饭”的能源，我们需要像保姆一样配置备用的火电、昂贵的储能来为它们“兜底”。**便宜的能量，往往伴随着昂贵的系统服务成本**。

反直觉 · 03

你以为可以打破“不可能三角”，其实只能做艰难的权衡

廉价、清洁、稳定，这三个目标在物理和经济逻辑上构成了著名的**能源不可能三角**。政客喜欢许诺“既要又要还要”，但经济学是一门关于取舍的学科，它会冷冰冰地告诉你，任何试图同时最大化这三个目标的尝试，最终都会付出**惨痛的代价**。我们能做的，是在约束条件下寻找最优解，而不是寻找完美解。

§ 这本书写给谁？

这不是一本写给象牙塔里学者的学术专著，我不打算用复杂的微积分公式来构建门槛。这是一本写给每一个身处能源变革时代的现代人的认知升级手册。

读者 · 决策者

政策制定者与企业管理者

为你提供决策的坐标系。善良的愿望不一定带来美好的结果，比如补贴可能扭曲价格信号，限价可能导致短缺。

读者 · 投资者

投资者

过去投的是"资源禀赋"（谁有煤矿谁发财），未来投的是"调节能力"（谁提供灵活性谁赚钱）。不理解 kW 与 kWh 在商业模式上的本质区别，模型将建立在沙滩之上。

读者 · 普通消费者

普通消费者

未来的电费不再是固定数字，而是随时间波动的曲线；你的电动汽车也将成为电网中一块"移动金砖"。

§ 我会写得很"有趣"

能源经济学研究的不是机器，而是人、博弈与复杂系统的涌现。我们将沿着"物理属性 → 市场机制 → 绿色转型 → 未来图景"的脉络，从"稀缺"讲起，聊到"虚拟电厂"。

„ 现在，请戴上这副能源经济学的眼镜，重新打量这个熟悉又陌生的世界。

第一讲

I.

你买的不是电， 是「随时可用」

在能源经济学的极限场景下，有一个反直觉的铁律，那就是当物理约束降临时，价格信号可能会飙升到无穷大，但你依然买不到你想要的那一束光。

开篇铁律

第 一 讲

引子 · 一头隐形的大象

能源平时温顺透明，甚至让你感觉不到它的存在。今天这第一讲，我们要直视这头大象最暴躁、最残酷的时刻。

在 本书的前言中，我们已经介绍了，能源是一头隐形的大象，平时温顺透明，甚至让你感觉不到它的存在。

但今天这第一讲，我们要直视这头大象最暴躁、最残酷的时刻。

在传统的商品经济中，我们信奉“有钱能使鬼推磨”。但在能源经济学的极限场景下，有一个反直觉的铁律，那就是当物理约束降临时，价格信号可能会飙升到无穷大，但你依然买不到你想要的那一束光。

稀缺，在能源世界里，不仅仅意味着“贵”，更意味着“无”。

” 一切，都要从那个冻结了 800 亿美元的寒夜说起。

§ 1 一个价值千亿美元的「至暗时刻」

让我们把时钟拨回到 2021 年 2 月 14 日的情人节晚上。

地点是美国得克萨斯州。对于这里的居民来说，这本该是一个普通的周日夜晚。尽管天气预报一直在警告一场名为“乌里”的寒潮即将抵达，但这对于大多数现代人来说，意味着什么呢？无非是把家里的恒温器从 20 度调到 25 度，裹上厚毯子，打开电视，或许再给自己热一杯可可。

我们现代人有一种根深蒂固的自信，这种自信源于我们对基础设施的极度信赖。**这种信赖感是工业革命两百年来赋予我们的特权。**

直到第二天凌晨，这种自信被彻底粉碎了。

气温骤降至零下十几度，得州数百万人在睡梦中被冻醒。他们下意识地伸手去按床头的开关，**却没有任何反应。**

这不是跳闸，不是小区故障，不是你应该去检查保险丝的小问题。根据联邦能源监管委员会（FERC）和北美电力可靠性公司（NERC）后来的联合调查报告，这不仅仅是一次停电，这是一场现代能源系统的“心脏骤停”。超过 450 万户陷入了持续数日的黑暗与极寒之中。

在那个时刻，所有的现代文明设施都失效了。冰箱里的食物开始腐烂，因为没有电；水管因为结冰而爆裂，因为没有暖气保护；甚至连做饭都成了奢望，因为很多电炉无法工作。医院的呼吸机只能依靠备用柴油发电机勉强维持，那是生命最后的防线。

而在普通人看不见的另一个平行世界，也就是得州电力的批发市场里，一场更惊心动魄的"金融风暴"正在上演。

如果你是一个精明的电力交易员，盯着当时的 K 线图，你会看到一根垂直的阳线，像火箭一样刺破了天际，那是一幅令人窒息的画面。

平时，得州的批发电力价格大约是每兆瓦时 22 美元左右。换算成我们熟悉的概念，一度电（1 千瓦时）的批发成本大概是 2.2 美分，也就是人民币 1 毛 5 分钱左右，非常便宜。但在那几天，这个价格像疯了一样跳涨 400 多倍，迅速触及了市场的法定上限，也就是 **9000 美元/兆瓦时**。

FIG. 1 · ERCOT WHOLESALE PRICE

FEB 2021



\$22 → \$9,000

美元 / 兆瓦时 · 77 小时内跳涨 400 倍，触及市场法定上限。平时一度电批发 2.2 美分，峰值约 9 美元。

这相当于什么？

想象一下，你平时去加油站加一箱油只要 300 块钱。突然有一天，你把车开进加油站，工作人员面无表情地告诉你，“先生，今天的油价涨了，加满这箱油需要 12 万人民币。”

你会不会觉得这是敲诈？这是发国难财？这是资本家在喝人血？

当时得州的很多媒体和政客就是这么骂的。但是，即便价格高到了这种离谱的程度，市场依然处于“有价无市”的状态。

为了防止整个电网彻底崩溃，电网的调度员不得不做出了一个极其残酷的决定，那就是切断负荷。他们像战地医院里截肢保命的外科医生一样，手动切断了约 20000 兆瓦（MW）的电力供应。每一个兆瓦的切断，都意味着成百上千个家庭陷入黑暗。

据达拉斯联储事后的估算，这场灾难造成的直接和间接经济损失高达 800 亿到 1300 亿美元。

” 为什么平时廉价如尘土的电力，在关键时刻会变得比黄金还贵？当我们每个月乖乖缴纳电费的时候，我们到底买的是什么？

如果你认为你买的是“能量”，是焦耳，是物理书上定义的做功的能力，那你就还没入门。因为在那个寒冷的冬夜，得州人不缺能量，地下埋着石油，空气里有氧气，甚至风还在吹。他们缺的，是**能源服务的有效交付**。

§ 2 其实你买的是「期权」

我们直觉上认为，电和水、大米、煤炭、石油一样，是一种标准的实物商品。

我去超市买一袋大米，这袋大米是上个月生产的，还是上个季度生产的，对我来说区别不大。因为大米可以储存。仓库里堆满了大米，如果今天买的人多，超市就多摆一点；如果买的人少，就放回仓库明天再卖。库存，是缓冲供需波动的护城河，是平抑价格的稳定器。

但经济学视角告诉我们，电力是大宗商品里的异类，甚至是"奇葩"。

电力有一个致命的物理特性，让它区别于地球上几乎所有其他商品，那就是**难以大规模、低成本地存储**。

是的，你会反驳我，我们有电池，有抽水蓄能，甚至有特斯拉的Powerwall。但请注意我的定语，也就是"大规模"和"低成本"。在整个城市、整个国家的用电量级面前，现有的存储技术就像是用茶杯去接瀑布，杯水车薪。

这意味着你此时此刻点亮台灯、驱动空调所消耗的那股电流，**几乎必须是此时此刻（精确到毫秒级），由几百公里外的某个发电厂刚刚生产出来的**。电力系统的供应链，是一条长度为零的时间链，**这一秒发出来的电，必须在这一秒用掉；这一秒需要用的电，必须在这一秒发出来**。

一旦理解了"无法存储"这个物理约束，你就会对"电费"产生全新的认知。

你付出的电费里，其实只有很小一部分是用来购买煤炭、天然气这些燃料成本（也就是能量本身）的。那么，绝大部分钱花哪儿了？

你是花钱买了一份"随时随地、想用就用"的权利。

在金融学里，这叫**看涨期权（Call Option）**。

你作为一个家庭用户，其实是跟电力公司签了一份极其霸道的合同，它的条款是这样写的。

"我（用户）不需要承诺我什么时候用电、用多少电。但是，只要我按下了开关，你（电力公司）必须在 0.1 秒内把电送到我手上。如果你送不到，就是你的违约。"

这简直是甲方的终极梦想。试想一下，如果你去餐厅吃饭，你跟老板说，"我不知道我什么时候来，也不知道我要吃多少，可能是半碗米饭，也可能是两百桌满汉全席。但我要求，只要我一进门，菜必须立刻、马上、热气腾腾地摆在桌子上，晚一秒钟都不行。"

没有任何餐厅敢接这样的单子，因为为了满足"随时随地"，餐厅必须雇佣几百个厨师、备好几千斤食材、24 小时待命，而你可能一年只来一次。电力系统，就是这样一家必须随时满足几亿人随机点餐的"超级餐厅"。

这就引入了能源经济学中最核心的概念之一，也就是**可靠性（Reliability）**，或者更准确地说，是**可用性（Availability）**。

” 在电力经济学里，最昂贵的不是点亮灯泡的那点能量，而是让你"想点亮时就能点亮"的那个**确定性**。你买的不是电，你买的是保供。

§ 3 在钢丝上跳舞

为了维持这份"确定性", 电力系统建立了一套极其复杂且昂贵的经济机制。为了让你听懂这 9000 美元电价背后的逻辑, 我们需要拆解四个层面的经济学原理。

LAYER 1 · 绝对的约束

电网是一辆几亿人骑的双人自行车

我们常说, 经济学是研究"约束条件"下的最大化行为。电力系统面临的约束条件, 是物理学给出的"死命令", 叫作**功率平衡**。

这个平衡不仅仅是数量上的相等, 更是质量上的稳定。这就涉及到了**电能质量 (Power Quality)** 的概念。

发电机转动的频率, 在中国是 50 赫兹, 在美国是 60 赫兹。这个频率, 就是电网的"心跳", 也是供需平衡的唯一指标。

想象一辆巨大的双人自行车。前面骑车的人是**发电厂** (供给侧), 他们在用力踩脚踏板。后面坐车的人是**千家万户** (需求侧), 但我们不仅不帮忙踩, 还在不停地捏刹车 (开启电器就是增加阻力)。

为了让车保持匀速直线运动 (维持 50 赫兹), 前面骑车的人必须根据后面捏刹车的力度, 实时调整自己的脚力。如果你突然开了一台大功率空调, 相当于猛捏了一把刹车。如果发电厂没有瞬间感知到, 车速 (频率) 就会瞬间慢下来。

根据 ERCOT（得州电力可靠性委员会）的数据，在寒潮最危急的时刻，电网频率一度跌到了 **59.302 赫兹**。

FIG. 2 · GRID FREQUENCY

ERCOT · 2021.02.15

60.000 → 59.302 Hz

距崩溃仅 0.7 赫兹，相当于人类心跳从每分钟 80 次骤降至 20 次，濒死的征兆。频率如同人体血液 pH 值，只能在极窄范围内波动。

你可能觉得，60 减去 59.302，才差了不到 0.7 赫兹，这有什么大不了的？

大错特错。在电力系统里，频率不是一个可以商量的数字。它像人体的血液 pH 值一样，只能在一个极窄的范围内波动。0.7 赫兹的跌幅，相当于人类的心跳从每分钟 80 次骤降到了 20 次，这是濒死的征兆。

一旦频率跌破某个临界点，发电厂的汽轮机叶片就会产生物理共振，巨大的离心力能把几十吨重的设备像切豆腐一样甩碎。为了自保，发电厂的保护装置会自动跳闸，这一跳，就是多米诺骨牌效应。前车一停，阻力还在，车速更慢，更多的电厂跳闸，整个电网像纸牌屋一样瞬间坍塌。这就是电力系统中说的**全停（Blackout）**。

所以，电网公司每天的工作，就是作为这辆自行车的“教练”，拿着鞭子盯着发电厂反复提醒，“后面捏刹车了，快踩！后面松刹车了，慢点！”为了维持这个平衡，每一秒钟的成本都是巨大的。

LAYER 2 · 成本的阶梯

为了那口醋而包的饺子

既然要时刻准备着“猛踩踏板”，电网就需要储备大量的发电机组。但这些机组的成本结构是完全不同的。这就涉及到了微观经济学里的核心概念，也就是**边际成本（Marginal Cost）**和**可调度性（Dispatchability）**。

我们可以把发电厂分为三类。

- 01 **基荷机组（Base Load）**，比如核电站、大型煤电。它们造价极其昂贵，但一旦建好了，发每一度电的燃料成本很低。它们就像是全职保姆，一年 365 天不停歇，提供了电网的基础电量。
- 02 **腰荷机组（Intermediate）**，比如高效的天然气电厂。随着人们早上起床、工厂开工，用电量上升，它们开始启动。
- 03 **峰荷机组（Peaker）**，这是最关键的一类。通常是简单的单循环燃气轮机，甚至是柴油机。它们的特点是造价相对便宜，启动极快，但燃料效率极低，发一度电巨贵无比。

在电力系统中，最宝贵的资源不是那些能一直发电的机器，而是那些具有**高可调度性**的资源，即那些你说开就能开、说停就能停、说大就能大、说小就能小的机组。

这就像我们打车。平峰期，有便宜的拼车（核电 / 煤电）。早晚高峰，拼车没了，你得叫快车（天然气）。如果是大年三十晚上暴雨倾盆，你还在荒郊野外，你可能得叫“专车”甚至加价三倍调度费（峰荷机组）。

这里有一个非常有趣的经济学比喻，可以称之为“饺子与醋”的悖论。

在电力行业，我们经常为了满足那一年中只有几十个小时的尖峰负荷（比如夏季最热的那几天），而不得不建设大量的电厂。这些电厂在一年中的其他 8700 个小时里，可能都在晒太阳、生锈，处于**备用（Reserve）**状态。

”这就好比，为了吃那口至关重要的**醋**（关键时刻的几小时供电），我们包了一桌极其昂贵的**饺子**（建设了庞大的闲置机组）。

谁来为这桌平时不吃的“饺子”买单？当然是消费者。你的电费里，有一大块其实是“闲置”买单。

LAYER 3 · 稀缺的信号

9000 美元不是抢劫，是度量衡

现在，我们终于可以直面那令人咋舌的 9000 美元了。

很多人愤怒地指责，这是资本的贪婪，是趁火打劫。但在经济学家的眼中，这 9000 美元是**稀缺性的极致表达**，是系统在绝望中发出的**高分贝求救信号**。

经济学的理论告诉我们，价格起着传递信息的作用。在那 77 个小时里，9000 美元的电价在向整个经济体广播两条至关重要的情报。

情报一，对供给侧（发电厂）的重赏。它在喊，"不管你是核电、风电还是老旧的燃油机，不管你的机器有没有故障，哪怕你是用黄金在烧水，只要你能在这个瞬间发出 1A 的电，我就能给你天价的回报！"

这种天价，是为了把所有潜在的供给都"逼"出来。如果没有这个价格，可能很多电厂觉得天气太冷、管道冻住，维修太麻烦，干脆就不修了。但看到了 9000 美元，维修工人哪怕是用手去捂热管道，也要把机器开起来。

情报二，对需求侧（用户）的劝退。它在喊，"现在电太贵了！一度电要 9 美元（平时是 2 美分）！如果不是救命的电，求求你关掉吧！"

这 9000 美元，在经济学上有一个专门的术语，叫**停电成本**，或者更学术一点，叫**失负荷价值（Value of Lost Load, 简称 VoLL）**。

这个概念非常重要，它是能源经济学里衡量"短缺"的尺子。什么意思？其实就是问你，如果要切断你的电，我需要赔你多少钱，你才觉得不亏？或者反过来，为了避免停电，你愿意支付的最高价格是多少？

LOW VOLL**中学生 · ¥10 / h**

给 10 块钱，就愿意停电一小时去楼下踢球。

MID VOLL**芯片厂 · ¥ 10,000,000+**

停电一秒钟意味着整条生产线的晶圆报废。

对于一家正在做手术的医院，电就是命。命是无价的，所以它的 VoLL 接近无穷大。得州监管机构设定的这个 9000 美元上限，其实就是在模拟全社会的平均 VoLL。它试图量化**当我们失去光明和温暖时，我们愿意付出多大的代价来赎回它。**

所以，高价不是为了掠夺，而是为了**筛选**。通过价格，把有限的电力分配给评价最高、最急需的用途。

LAYER 4 · 度量可靠

如何给「靠谱」打分？

既然我们为了"随时可用"付出了这么多代价，那我们怎么知道电力公司干得好不好呢？这就需要引入两个关键的**供电可靠性指标**。

如果你问一个电力工程师，"你们那儿的电靠谱吗？"他不会跟你说"还可以"或者"挺好的"，而会甩给你两个数据，也就是**SAIDI** 和 **SAIFI**。

SAIDI · 系统平均停电持续时间

Duration

一年里平均每个用户停电了多少小时。美国约 120-240 分钟；上海核心区可能只有几分钟。

SAIFI · 系统平均停电频率

Frequency

一年里平均每个用户被停了几次电。

这两个指标，就是电力公司的"KPI"。为了把 SAIDI 从 100 分钟降到 10 分钟，电网需要投入的成本可能是指数级上升的。这又回到了经济学的基本原理，也就是**边际收益递减与边际成本递增**。

” 我们要问的不是"能不能永不停电"，而是"为了减少这一分钟的停电，值得我们多花**多少亿**的投资？"

§ 4 谁为「闲置」买单？

既然可靠性这么贵，那么在没有危机的平凡日子里，我们该怎么养活这些"救火队员"呢？这里涉及两种不同的制度安排，是能源经济学里争论不休的话题，也就是制度经济学大家罗纳德·科斯（Ronald Coase）所关心的**交易成本问题**在电力行业的投射。

得州是美国最"野"的市场，它信奉最纯粹的市场原教旨主义。

在得州，发电商只能靠卖电赚钱。如果你是一台备用的尖峰机组，一年里只有 10 个小时有机会发电，那你就必须在这 10 个小时里，把全年的建设成本、维护成本、工人工资全部赚回来。

这就是为什么得州允许电价涨到 9000 美元这么夸张的程度。这被称为**稀缺定价（Scarcity Pricing）**。

但这带来了一个经典的"缺钱问题"（**Missing Money Problem**）。

在现实中，监管者往往因为担心民意，不敢让电价真的涨到 9000 美元，或者涨的时间不够长。结果就是，那些备用电厂赚不够钱，纷纷倒闭或退役，等到真正的危机来临时，我们发现"救火队员"已经饿死了。

早在 2006 年，麻省理工学院的**保罗·乔斯科（Paul Joskow）**教授就一针见血地指出，这是由于可靠性作为一种公共品，其价值无法完全通过单一电能量市场回收。当系统面临稀缺时，**价格上限（Price Cap）**的人为设定，切断了发电机组回收固定成本的最后希望。

这种制度的好处是平时电价极低，效率极高，没有冗余。坏处是刀尖舔血。一旦预测失误，比如这次寒潮导致天然气管道冻结，系统就没有后手了。

那么是否有其他的选择呢？有！世界上很多地方，采用的都是更保守的**容量市场（Capacity Market）**策略。

简单说，就是电网每年给大家发一笔"保底工资"。只要你建了一个电厂，并且承诺"随叫随到"，哪怕你一度电不发，我也按你的装机容量给你发钱。

这样做的好处是安全感强，冗余度高，也就是保供能力强。坏处就是贵。由此导致平时电价里包含了一笔昂贵的"安保费"。

得州模式

稀缺定价

只靠卖电赚钱 · 平时电价极低 · 冗余为零 · 刀尖舔血

多数地区

容量市场

保底工资 + 电价 · 安全冗余高 · 长期成本高 · 含"安保费"

得州寒潮的教训，本质上是一次关于"效率与安全"的重新权衡。得州人为了追求平时极致的低电价，放弃了容量市场的"保险金"，结果在极端黑天鹅事件面前，支付了千亿美元的惨痛代价。

” 这正如那句老话所说，**免费的东西，往往是最贵的。**

§ 5 当「刚性」遇到「柔性」

理解了"我们是在为可靠性付费"，你就能解释很多生活中的反常现象，也能看懂未来电网的变革方向。

你可能会觉得不公平，为什么有些大型铝厂、化工厂，作为高耗能企业，电费单价居然比居民的还便宜？

不是因为他们关系硬，而是因为他们签了一种特殊的"契约"，那就是"可中断负荷"（Interruptible Load）。他们跟电网签订的合同是这样写的。

"平时给我便宜点。但是，如果在夏天最热的那天下午，或者冬天最冷的那天晚上，电不够用了，你可以随时把我的电断了，我给居民让路。"

看懂了吗？可中断负荷是一个出售了"可靠性"的用户。他们忍受了断电的风险，换取了低电价。你是一个购买了"高可靠性"的用户。你要求风雨无阻，所以你必须支付溢价。

在电力系统里，可靠性本身就是一种可交易的资产。这种交易，让电力资源流向了 VoLL 更高的地方（居民生活），而让 VoLL 较低的地方（工业生产）暂时让步，这就是经济学上的帕累托改进。

未来的电网，正在试图打破"刚性需求"的魔咒。

FIG. 3 · PARADIGM SHIFT

范式转移

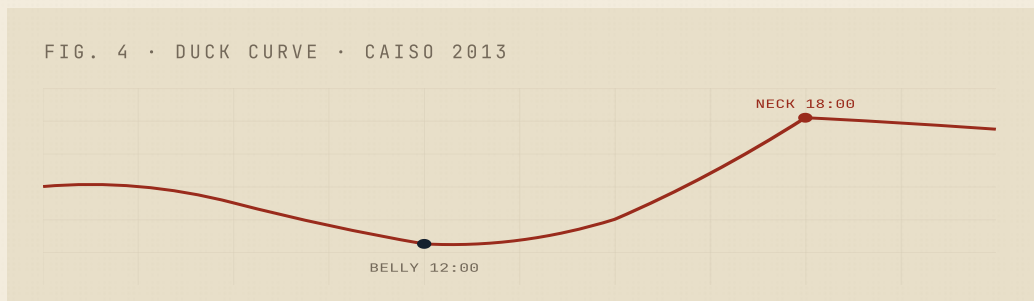
源随荷动 → 荷随源动

从"你尽管开灯，我拼命发电"到"风大了、电便宜了，你的电动汽车自动开始充电"。

以前，电网是“源随荷动”，你尽管开灯，我拼命发电。现在，正在转向“荷随源动”，风大了、电便宜了，你的电动汽车自动充电；风停了、电贵了，你的热水器自动暂停。这就是**需求侧响应（Demand Response）**。

想象一下，如果在那场寒潮中，得州 450 万户家庭的智能恒温器能接收到那 9000 美元的价格信号，哪怕自动将设定温度降低 1 度，可能就足以节省几千兆瓦的负荷，也许整个电网就不会崩溃。**未来的我们，不再是被动的消费者，我们将成为电网平衡的一部分，通过牺牲一点点微不足道的舒适度，来换取真金白银的回报。**

最后，我们还要谈谈现在最火的风电和光伏。它们非常清洁，边际成本接近于零。但它们有一个致命弱点，那就是**不可调度**。风什么时候吹、太阳什么时候出来，那是老天爷决定的。这就导致了一个著名的现象，叫**鸭子曲线（Duck Curve）**。



这一概念最早由加州独立系统运营商（CAISO）在 2013 年提出。想象一张 24 小时的负荷图。在白天，光伏大发，净负荷（总负荷减去光伏发电）被压得极低，曲线向下凹陷，像鸭子的肚子；太阳一下山，光伏瞬间归零，而此时人们下班回家，用电需求飙升，净负荷曲线陡然升高，像鸭子伸长的脖子。

这只"鸭子"给电网带来了巨大的经济压力。

01 爬坡压力，在日落时分，其他的发电机组（通常是燃气或燃煤）必须在极短的时间内（比如 3 小时）增加巨大的出力。这对机组的性能是极限挑战，就像让一个长跑运动员突然开始冲刺。

02 负电价，在阳光最好的正午，电可能多到用不完，新能源电站甚至要倒贴钱发电上网，这就是负电价。看似美好，其实这让传统的基荷电厂亏损严重，面临退役。

这就带来了一个新的经济学难题，当越来越多的"靠天吃饭"的能源进入电网，系统的**可靠性**不仅没有增加，反而可能变得更加脆弱。

为了弥补这种不确定性，我们需要配备更多的**备用资源**，比如巨大的电池组（储能），或者随时待命的天然气电厂。这些"备胎"的成本，其实应该算在谁的头上？这是一个我们在后续章节会深入探讨的棘手问题。

§ 6 文明的代价

最后，让我们把镜头从复杂的市场机制拉回到我们的日常生活。

当你下次在深夜里，随手按亮一盏灯，看书或者刷手机时，请停下来想一秒钟。

为了这一秒钟的光明，背后正发生着这些事。

01 数百公里外，巨大的涡轮机正在以每分钟 3000 转的速度飞速旋转，保持着严格的**供能质量**；

02 复杂的计算机算法正在每 4 秒钟进行一次全网扫描和计算，维持着脆弱的**平衡**；

03 数以亿计的资金沉淀在那些平时闲置、只为此刻待命的**备用机组**里；

04 期货市场上的交易员正在为明天的风速和光照下注，博弈着**稀缺**的信号。

这一切的庞大机器，这一切的精密算计，这一切的昂贵成本，都是为了一个目的。

„ 当你想要那束光的时候，光就在那里。

我们习以为常的便利，其实是现代工业文明用巨大的资源堆砌出来的奇迹。而经济学的作用，就是让我们看清这个奇迹背后的代价，并在“我们要多安全”和“我们付得起多少钱”之间，寻找那个最微妙的平衡点。

C O D A · 终曲



你买的从来不是电，
你买的是现代文明中
最奢侈的特权，
确定性。

Certainty is the most luxurious privilege of modern civilization.



LECTURE 01 · END
MESON · 9D

EXERCISE · 思考题

你会选 A 套餐，还是 B 套餐？

假设电力公司推出了一款"折扣套餐"。

A · 尊享版

不停电

¥0.40 / 度

电费不打折。保证像现在一样，除极个别不可抗力外，永远不停电。VoLL 视为无限大。

B · 经济版

可中断

¥0.20 / 度

电费打五折。但每年允许电力公司在电网最紧张的时候（通常是夏天的下午或冬天的晚上），远程控制你的空调暂停运行累计不超过 20 小时。每次不超过 1 小时，且会提前 10 分钟通知。

Q01

作为一个理性的消费者，你会选择哪个套餐？为什么？

Q02

如果你经营的是一家火锅店，或者是家里有一位依靠呼吸机生活的老人，你的选择会改变吗？

Q03

如果全社会只有 10% 的人选择了 B 套餐，这会让 A 套餐用户的电价变得更便宜还是更贵？这是否意味着 B 套餐的用户在某种程度上"补贴"了 A 套餐的用户，还是反之？

第二讲

II.

你以为你买的是「一度电」，
其实买的是「那一刻的电」

电费账单是按“量” (kWh) 算的，但电网的投资永远是按“峰” (kW) 投的。这是电力经济学最核心的矛盾，也是现代文明最昂贵的一张隐形账单。

第二讲 铁律

第二讲

过剩，也是一种稀缺

得州的故事是关于“没有电”的恐惧；纽约的故事，则是关于“太快用电”的代价。

在 上一讲的最后，我们伫立在 2021 年得克萨斯州的冰天雪地里，目睹了现代能源系统最脆弱的一面。当风力发电机叶片被冻结，当天然气管道被冰堵塞，我们痛切地领悟到一个道理，**能源不仅仅是商品，更是一种服务，一种关于“随时可用”的承诺。**当这种承诺失效时，我们面临的是生存资源的绝对稀缺，是“无电可用”的至暗时刻。

然而，能源经济学的迷人之处在于，它总是充满了反直觉的悖论。如果我们从冰封的得州向北跨越，在时间轴上回拨两年，来到盛夏的纽约，我们会看到截然相反的一幕。

在这里，危机不再源于“匮乏”，而是源于“过剩”；不再是因为我们拥有的太少，而是因为我们同一瞬间想要的太多。

” 如果得州的教训是关于“没有电”的恐惧，那么纽约的故事，则是关于「**太快用电**」的代价。

这正是我们在这一讲要深入探讨的主题，也就是**负荷**。

§ 1 大都会的红色按钮

让我们把目光聚焦到 2019 年 7 月 21 日的纽约市布鲁克林供电片区（Flatbush 供电网络），那场被高温与高负荷“逼出来”的险情。

如果你那天恰好身处这座水泥森林，你会经历一场终生难忘的闷热。那是整个夏天最难熬的一个周日，来自大西洋的热浪像一个巨大的透明盖子，死死地扣在美国东海岸。中央公园的气象站测得气温逼近 38 摄氏度，而在高楼林立的“峡谷效应”下，体感温度更是轻易突破了 43 度，整个城市像是一个巨大的蒸笼，沥青路面散发着扭曲光线的热气，地铁站里的空气粘稠得让人窒息。

到了傍晚时分，随着太阳西下，数百万下班回家的纽约人，或是刚刚结束周末聚会的家庭，几乎在同一时间做了一个几乎完全相同的动作，他们把手伸向空调控制面板，把它风力调到最大，温度调至最低。与此同时，百老汇的霓虹灯开始闪烁，餐馆的电烤箱火力全开，成千上万辆电动汽车滑入车库，插上了充电枪。

就在那一瞬间，在负责纽约供电的联合爱迪生公司（ConEdison）的指挥中心里，气氛从紧张瞬间变成了惊恐。

大屏幕上那条原本平滑上升的曲线，也就是工程师们紧盯着的“负荷曲线”（Load Curve），突然像一枚被点燃的火箭，垂直地向上蹿升，数字跳动得让人心惊肉跳，10000 兆瓦，11000 兆瓦……转眼间就突破了 12000 兆瓦的红色警戒线，这也就是我们常说的“峰值负荷”（Peak Load）。

那时候，整个电网系统的感觉，就像是一艘飞船的发动机还在疯狂轰鸣，但机身结构已经开始嘎吱作响，埋藏在曼哈顿地下的古老电缆因为承载了过大的电流而开始剧烈发热，变电站里变压器内部的绝缘油温度急剧升高，系统频率开始出现危险的波动，所有的物理指标都在警告着系统即将达到崩溃的边缘。

FIG. 2 · NYC PEAK LOAD

JUL 2019

12,000 MW

兆瓦·布鲁克林 Flatbush 电网区瞬时峰值突破红线。ConEdison 主动切断约 5 万户供电，以换取主电网的生存；这不是“缺电”，而是缺“那一瞬间通过电线的带宽”。

在这千钧一发之际，电网调度室里正面临着一个工程学上的难题，摆在他们面前的只有两个选项，要么硬扛，赌电网的冗余度能撑过这个峰值，但风险是整个纽约电网可能因为核心变电站烧毁而发生连锁性崩溃，重演 1977 年或 2003 年的全城大停电；要么弃卒保车，主动切断一部分人的供电，把负荷强制降下来，保住电网的主骨架。

最终，基于系统安全的最高准则，他们按下了那个意味着主动切断的红色按钮。

刹那间，布鲁克林和皇后区的约 **5 万名用户** 瞬间陷入黑暗，空调停转，电梯卡在半空，冰箱里的食物开始融化。虽然骂声一片，政府随后发起了无数轮听证会来质询这次“人为停电”，但从工程和经济学的角度看，联合爱迪生公司做出了唯一正确的选择，他们避免了一场可能持续数日的全面瘫痪。

这场被称为“预防性停电”的至暗时刻虽然在周一凌晨就开始陆续恢复，但完全的修复工作一直持续到了第二天的下午，对于身处其中的家庭来说，这无疑是一场漫长的煎熬。

看到这里，你可能会产生一个巨大的疑问，作为全球最发达的金融中心，难道连电都供不起吗？

这正是我们要纠正的第一个认知偏差。如果你去翻看那天的数据，你会发现**纽约并不缺“能量”**。在哈德逊河沿岸，在长岛，那些巨大的发电厂里，燃料堆积如山，天然气管道压力充足，发电机组也都完好无损。

” 纽约在那一刻缺的，不是 **kWh**（千瓦时，能量），而是 **kW**（千瓦，功率）。

它缺的不是能烧一年的煤，而是那一秒钟能通过电线的宽度；它缺的不是水库里的水，而是水管的粗细。这就把我们带到了能源经济学里一个最核心、也最常被误解的真相，在电力这个奇妙的世界里，决定成本高低的，往往不是你“用了多少”，而是你“用得有多快”。

§ 2 阿尔钦的洞见 · 速率，而非总量

为了讲清楚这个问题，我们需要借助理论的透视镜。我们要请出一位重量级的经济学家，**阿门·阿尔钦**（Armen Alchian）。

这位加州大学洛杉矶分校的传奇教授，被称为“经济学家中的经济学家”，他最擅长的，就是从看似平常的现象中提取出深刻的成本逻辑。早在1959年，阿尔钦在那篇经典的论文《成本与产出》（Costs and Outputs）中，就提出了一个修正传统成本理论的洞见，这个洞见后来成为了分析所有网络型产业的基石。

他发现，我们在谈论“成本”的时候，往往含糊不清，我们必须区分两个截然不同的维度，一个是**产出总量**（Volume of Output），即你要生产多少个杯子；另一个则是**产出速率**（Rate of Output），即你要在多短的时间内生产出这些杯子。

” 阿尔钦定律告诉我们，成本不仅取决于产出总量，更取决于产出速率。越是“赶工”，单位成本越会以非线性的方式陡然上升。

举个简单的例子，你要印100万本书。方案A是给你10年时间印完，那你只需要买一台印刷机，慢慢印，成本极低，因为资本的利用率极高。方案B是要求你明天早上必须印完，那你可能需要连夜购买1000台印刷机，雇佣1000个工人同时开工，虽然书的总量没变，但印完这一次后，这1000台机器就没用了。方案B中，每一本书分摊的固定资产成本，是方案A的数千倍。

在电力世界里，这个区分对应着两个最基本的物理单位，也是我们理解电费账单的两把钥匙。

度量 · KWH

总量的概念 对应"里程表"

这是"总量"的概念，对应我们常说的"度"，它就像汽车的里程表，代表你跑了多远。在经济学上，它主要决定了"变动成本"，也就是你每多发一度电，就需要多烧一份煤或气，这部分的成本是线性的，相对容易计算。

度量 · KW

速率的概念 对应"速度表"

这是"速率"的概念，对应我们常说的"功率"，它就像汽车的速度表，代表你跑得有多快。在经济学上，它决定了"固定成本"，就是为了支撑你跑到 200 迈的速度，你需要多大排量的引擎、多宽的轮胎、多粗的电线。这部分的成本是阶跃的、昂贵的。

回到纽约的故事。当你在凉爽的秋天，家里只开一盏灯的时候，你在电网这条高速公路上是独自慢跑，kW 数值很低，占用的资源极少；但你在酷热的夏夜，同时打开三个空调、电视、电脑和热水器时，你就像是开着一辆宽达 10 米的巨型卡车在飙车，kW 数值极高。

虽然你的电表（里程表）只是忠实地记录了你跑过的距离，但电网公司为了让你能开这辆巨型卡车上路，必须把原本只有两车道的高速公路扩建为十车道。

” 你的电费账单通常是按「量」（kWh）算的，
但电网的投资，却永远是按「峰」（kW）投的。

§ 3 英萨尔的遗产 · 负荷因子的魔法

既然电网必须按"峰值"来建设，这就引出了能源经济学里最尴尬的一个难题，也就是**资产闲置**。这是电力工业一百多年来试图解决的顽疾。

早在电力工业的拓荒时代，托马斯·爱迪生的前秘书、后来被称为"公用事业之王"的**塞缪尔·英萨尔**（Samuel Insull）就敏锐地意识到了这个问题。19世纪末的芝加哥，电力公司主要靠晚上的照明赚钱，白天的发电机都在晒太阳，英萨尔意识到，如果不能填补白天的低谷，电价永远降不下来。

因此，他极力推广**负荷因子**（Load Factor）这一概念，并将其作为管理电网效率的核心指标。所谓负荷因子，简单来说就是平均负荷与峰值负荷的比值，这个数值越高，意味着电网这台印钞机的空转时间越少。

英萨尔发现，当时的很多电车公司都拥有自己的小型发电厂，并不使用公共电网的电，于是他通过并购或提供极具吸引力的电价，诱使这些电车公司关停自备电厂，接入他的大电网。这神来之笔产生了奇效，居民在晚上开灯，电车在白天奔跑，两股原本错开的需求被英萨尔汇聚到了同一张网上，发电机组从此实现了昼夜连轴转，单位电能的固定成本被剧烈摊薄。

” 这就是**负荷因子**管理的魔法，
不增加一台发电机，却让利润大幅提升。

然而，哪怕是英萨尔也无法解决极端气候下的峰值问题。为了量化这个难题，现代工程师和经济学家们发明了三把尺子，它们是评价电力资产价值的通用语言。

尺 · 01

利用小时数 Utilization Hours

想象一下，为了应对纽约那个仅仅持续几十小时的高温，电网必须建设一座昂贵的燃气尖峰电厂，在一年中的 8760 个小时里，这座电厂可能只在最热的那 100 个小时里开机发电，剩下的 8660 个小时都在晒太阳。在中国，我们常说的“**火电利用小时数下降**”指的就是这个现象，当这个数字不断下跌时，火电厂的焦虑是肉眼可见的，因为这意味着资产的回报率在大幅缩水。

尺 · 02

容量因子 Capacity Factor

它是一个百分比，计算方法是用实际发电量除以理论上的全年满负荷发电量。对于那座尖峰电厂，它的容量因子可能只有 1%。这就好比你为了每年春节回老家那一趟能开得爽，专门买了一辆 500 万的法拉利，这辆车全年的“容量因子”极低，平均下来你开的每一公里，成本可能高达上万元。**尖峰时刻发的那一度电，其真实成本可能是平时的 10 倍、100 倍甚至更高。**

尺 · 03

可用率 Availability

虽然那座尖峰电厂一年只发了 100 小时的电（容量因子低），但这不代表它在偷懒。在剩下的 8600 多小时里，它必须时刻保持“可用”的状态，也就是锅炉是热的，工人是在岗的，指令一来，几分钟内就要顶上去。**容量因子衡量“结果”，可用率衡量“能力”。**我们为 kWh 支付能量费，但我们必须单独为可用率支付一笔“保费”，这就是著名的**容量市场**（或容量电价）的由来，因为那个静静趴在那里的电厂，虽然没有发货，但它提供了**可靠性**，正如我们在第一讲所说，**这本身就是一种昂贵的商品。**

§ 4 博伊特的定价·两部制的诞生

为什么电网如此害怕我们"同时"用电？如果说英萨尔发现了问题，那么通过数学模型精确描述并解决这个问题的，是另一位电力经济学的鼻祖，前法国电力公司（EDF）总裁、著名的经济学家 **马塞尔·博伊特**（Marcel Boiteux）。

二战后的法国，百废待兴，电力极度短缺，资金更是捉襟见肘，不可能像美国那样无限扩建电厂。在这样的背景下，博伊特在 1949 年发表了开创性的论文《边际成本定价》，这篇论文后来被奉为所有电力市场设计的"圣经"。

博伊特敏锐地指出，电力需求的"同时性"是成本的倍增器，这是一个关于概率的数学游戏。如果 1000 个用户错峰用电，大家商量好你用完了我再，就像接力赛一样，电网可能只需要配备 100 kW 的变压器就够了，这叫利用了差异性。

但如果这 1000 个用户非要"同时"用电，就像千军万马过独木桥，电网就得实打实地建设足以支撑这 1000 人同时使用的巨大容量。

” 这种"同时性"带来的拥堵成本，在居民生活中往往被掩盖了。

出于民生考虑，我们通常实行单一制电价，这其实是一种「交叉补贴」，是用电平稳的老实人，在补贴那些用电大起大落的人。

但在工业界，电网公司会撕下“均爱”的面纱，用一种带有“歧视”（经济学中，歧视并不是贬义词）的定价机制来约束用户，这就是著名的**两部制电价**。

为了理解这个机制，我们可以把它想象成企业办理的一条高端宽带专线，或者我们去健身房办的卡。所谓两部制，就是把电费单拆成两半。

电费 · 第一部分

电度电费 按 kWh 计费

覆盖的是燃料成本，多用多交，少用少交，这就像是你去健身房买了瓶水，或者在宽带上下载了多少 G 的数据，是按次、按量收费的。

电费 · 第二部分

需量电费 按 kW 计费

按你一个月最大的“峰值负荷”（kW）计费，覆盖的是容量成本，这就像是你办的“健身房年卡”，或者是你租的那条“千兆专线”的月租费。哪怕你一个月只有 15 分钟机器全开，功率飙到了 10000 kW，而剩下 29 天 23 小时 45 分钟你都只开了 1 kW 维持基本照明，对不起，这个月的需量费就得按那 10000 kW 的最高值来收。

为什么会有这样看似不近人情的规定？因为为了满足你那一分钟的狂飙，光缆的容量、交换机的端口、变压器的负荷，都必须实打实地为你预留，这个巨大的固定投入成本，不会因为你不用而消失。**那 15 分钟的峰值，就是你的痕迹和证据，证明了你系统容量的占用。**如果你不付这笔钱，这笔成本就得转嫁给其他没有制造高峰的用户，**那才是最大的不公平。**这套逻辑迫使工厂老板变得愈发精明，他们会想尽办法把那高耸的峰值削平，比如把高耗能的工序挪到夜间，或者安装储能电池在高峰期放电。这种行为，我们称之为**削峰填谷**。**只要这种转移没有制造出比原来更高的“新峰值”，它就能有效利用闲置资产，是对电网最友好的行为之一。**

§ 5 需求侧响应 · 看不见的发电厂

长久以来，电力行业都遵循着“源随荷动”的单向逻辑，需求侧是任性的上帝，想怎么用就怎么用，而供给侧则是卑微的仆人，拼命建设电厂，拼命加粗电线，去满足那个一年可能只出现一次的尖峰。但这就陷入了“面多了加水，水多了加面”的恶性循环。

经济学告诉我们，解决短缺不仅有“增加供给”这一条路，还有“抑制需求”，或者更优雅地说，也就是**引导需求**。这就是**需求侧响应**（Demand Response），有人形象地称之为「**负瓦特**」（Negawatts），意思是省下来的瓦特，和发出来的瓦特一样有价值。

让我们再次回到纽约那个即将熔断的傍晚。想象一下，电网不需要简单地拉闸断电，而是给全城 100 万个安装了智能开关或智能恒温器的用户发了一条短信，“**电网正处于极限状态。谁愿意在接下来的一小时里，把空调温度调高 2 度？作为回报，我给你的账户里打 5 美元。**”

” 如果 100 万人都响应，每人节省 2 kW，
瞬间就「**造**」出了一座 2000 兆瓦的发电厂！

这就是所谓的**虚拟电厂**（Virtual Power Plant），它不烧煤，不烧气，它烧的是“数据”和“激励”。它不需要历经数年的审批和建设，不需要冒着黑烟的烟囱，只需要一套智能的算法和合理的补偿机制。**它打破了“源随荷动”的僵局，开启了“源荷互动”的新时代。**

§ 6 「插座」交易所 · 每一个插座，都是一个市场

当我们理解了负荷的本质，理解了 kW 和 kWh 的区别，理解了峰值昂贵的逻辑，我们其实已经拿到了通往未来能源世界的钥匙。

未来的电网，将不再是一个单向流动的管道，而是一个庞大的、实时的交易网络。每一个插座，每一辆电动车，每一个家庭储能电池，都将是一个微型的交易所。

在这个网络里，价格将不再是那个贴在营业厅墙上、一年不变的数字，而是像心电图一样，随着供需关系和负荷曲线**实时跳动**的信号。

当风和日丽，新能源大发，负荷低谷时，在某些实行现货电力市场的地区，电价可能短时跌到很低，甚至出现**"负电价"**。而当风停日落，酷暑严寒，负荷尖峰时，电价会飙升到天际，这时候如果你能省下一度电，或者把你电池里的电卖回给电网，你就能获得可观的收益。

” 这不是科幻小说里的场景，这是**正在发生**的技术革命。
从被动地**"买电"**，到主动地管理我们的**"能源资产"**，
这是每一位现代人必须完成的认知升级。

C O D A · 终曲



你以为你买的是一度电，
其实买的是 **那一刻的电。**

Every watt is a bandwidth in the moment it is consumed.



LECTURE 02 · END

MESON · 9D

EXERCISE · 思考题

我们到底为什么要"随时可用"?

为了应对那哪怕只持续一小时的"尖峰时刻", 人类社会必须预留出庞大的、在绝大多数时间里都在"晒太阳"的闲置资产, 这就好比为了应对春节返乡那几天的拥堵, 我们把平日里车流稀少的马路全都修成了双向十车道。

路径 · A

不计代价的满足

∞ 成本 / 100% 可用

无限迁就峰值。花费巨额社会财富把钢筋水泥沉淀为闲置资产, 以换取一种"永远在线"的幸福错觉, 这是 20 世纪的电力哲学。

路径 · B

让需求适应供给

弹性 + 价格信号

通过价格机制、虚拟电厂、需求侧响应, 让需求侧在合适的时刻主动让路。资产利用率提高, 总成本下降, 但代价是"随时可用"的神话终结。

Q01

在资源有限的地球上, 究竟是"不计代价地满足一切欲望"代表了文明的进步, 还是"通过智慧让需求主动适应供给"才是更高级的进化?

Q02

你愿意交出一年 20 小时的空调控制权, 换 20% 的电费优惠吗? 你如何定义这种自由的价格?

Q03

当"负瓦特"与"正瓦特"等价交易, 节能就不再是道德问题, 而是生意, 这会反而鼓励更大的消费吗?

第三讲

III.

能源不一定是垄断， 但是一定需要垄断

在某些特定的行业里，竞争反而是昂贵的，而垄断却是有效率的。

这不是资本的邪恶，而是成本结构的宿命。

第三讲 铁律

第三讲

为什么有的生意，一家独大反而最省钱？

理解了"房租"和"饭钱"的区别，你才能看懂为什么供电、供气、供水等生意，往往只有一家独大。

在 上一讲，我们区分了"千瓦" (kW) 和"千瓦时" (kWh)，明白了电网为了应付那一瞬间的"尖峰时刻"，必须预留巨大的容量，这就像是餐馆为了大年三十的年夜饭，不得不把店面扩建得很大，哪怕平时大部分桌子都空着。

但是，建设运营这么大店面的花费中，巨大的"建设费"和每一盘菜里的"原料费"，在经济学上有着本质的区别。理解了这个区别，你才能看懂为什么有的生意（比如开面馆）遍地开花，而有的生意（比如供电、供气、供水等）往往只有一家独大，也就是我们所说的"垄断"。

” 为了讲清楚这个道理，让我们先把目光从现代电网移开，投向 19 世纪末那个混乱的 **纽约**。

§ 1 纽约街头的「地下战争」

如果在 1880 年的冬天，你穿越时空漫步在纽约的曼哈顿街头，你可能会目睹一场令现代人匪夷所思的“战争”。

那时候的街道总是泥泞不堪，但这并非完全因为天气，而是因为人为的破坏。据记载，当时的“煤气帮派”为争夺用户一度把竞争演成街头冲突，反复开挖路面、抢修管线，甚至传出过破坏对手管线的事件。

这就是著名的“**纽约煤气管道之战**”。

当时，人们笃信一个朴素商业真理，那就是“竞争是好的，垄断是坏的”。当时的特许经营授予相对分散，纽约城里同时存在多家煤气公司，为了抢客户，它们在同一片街区反复开挖、铺设和抢修管网，街道被折腾得一塌糊涂。市民们最初很开心，想着这么多公司抢着给我供气，价格肯定能跌到地板上。

但事情的走向，却给了所有人一记响亮的耳光。

街道被反复开膛破肚，交通瘫痪，马车陷在泥里动弹不得。更糟糕的是，煤气价格并没有像预期的那样大幅下降；相反，由于管道被反复破坏，工人们忙于打架而不是维护，供气的稳定性极差，时不时就断气，市民们不仅要忍受高昂的气价，还要忍受出门就掉进沟里的风险。

这场闹剧在 1884 年迎来关键转折，几家主要煤气公司最终合并，成立了“纽约联合煤气公司”（Consolidated Gas Co. of New York）。此后随着电力业务的整合，公司在 1936 年更名为业内知名的“联合爱迪生公司”（Consolidated Edison, Con Edison）。

从六家竞争，变成一家独大，按照我们通常的直觉，这简直是市场的倒退，是消费者的噩梦，对不对？

但奇怪的是，合并之后，街道反复开挖的内耗减少，供气也更稳定；就价格而言，有记载显示，纽约的煤气价格在 19 世纪 80 年代中期确实出现过一轮下行。

” 为什么在某些特定的行业里，
竞争反而是昂贵的，而垄断却是有效率的？

要回答这个问题，我们不能只看热闹，得学会算账。这笔账，得从“房租”和“饭钱”的区别算起。

§ 2 都是成本，但“性格”不同

做生意，有两类钱是必须花的。

成本 · 第一类

固定成本 就像是你开面馆要交的“房租”

无论你今天卖出了一万碗面，还是一碗面都没卖出去，甚至你关门歇业回老家过年了，这笔钱你都得照付，房东不会因为你生意不好就给你免租。

在工业世界里，这笔“房租”往往大得惊人。煤气公司在卖出第一立方米煤气之前，得先花几千万甚至数亿元把管道埋遍整个城市；发电厂在发第一度电之前，得先砸下几十亿去建大坝、买发电机；制药厂在卖出第一颗药片之前，可能得花十年二十年、数亿甚至更高的资金去搞研发。

经济学家通常把这部分先期的巨额投入，称为 **资本性支出**（CAPEX）。它就像是一个无论风雨都必须跨越的门槛，客观地横亘在所有后来者面前，只有跨过这道高门槛，你才有资格进入这个赛道。

成本 · 第二类

可变成本 就像是面馆里的“饭钱”

这笔钱的性格比较随和，它跟你的产量如影随形。你多卖一碗面，就得多计入一份牛肉钱的成本；你少卖一碗，就少计入一份成本；如果你不开张，这笔成本的计入就是零。

经济学家把这类支出称为 **运营性支出**（OPEX）。如果说 CAPEX 代表了“曾经的承诺”，那么 OPEX 就代表了“当下的行动”。

仔细观察会发现，这两类成本之间存在一种跷跷板般的对立，**想要降低未来的运营支出（少花饭钱），往往需要前期投入更多的资本支出（多交房租）**。想让每月电费少一点，现在就得买更贵的节能空调或装上保温层。这种“用现在的钱买未来省心”的权衡，贯穿能源经济学始终。

我们通常认为，商品的成本就是“总成本除以产量”，也就是平均成本。直觉告诉我们，买得越多，商家赚得越多。但如果我们将目光投向那些“房租”极高、而“饭钱”极低的行业，你会发现一个神奇的数学魔法，也就是**规模效应**。

以煤气公司为例，铺设全城管道需 1 亿（房租），每输送一立方米煤气需 1 块（饭钱）。若只服务一个仅用一立方米的客户，这一立方米的成本是**1 亿零 1 块**，简直是天价。但若服务全城 100 万户、每户用 100 立方米，那 1 亿的房租被庞大分母稀释，平摊到每立方米上可能只有 1 块，加上 1 块饭钱，总成本变成 **2 块钱**。

” 从 1 亿零 1 块，降到 2 块，
这就是 **规模经济** 最朴素的解释。

回到纽约的故事。同一条街下埋六根管道，意味着全社会支付六份昂贵的房租，但街上的住户并没有变多。结果就是每家公司只能分到很少的用户，每一立方米煤气背负的房租都沉重无比，多出的五根管道纯粹是浪费。

这种现象在经济学里叫 **自然垄断**（Natural Monopoly）。请注意“自然”二字，它不是指公司生来就是霸主，而是指一种客观规律，由成本结构决定，一家企业提供服务的总成本，在数学上必然低于由多家企业提供。在**这些行业里，垄断竟然是帮社会省钱的功臣**。

§ 3 高铁是否可以卖白菜价？

既然规模越大成本越低，那这类企业岂不是躺着数钱？只要我不停地扩大规模，成本就能无限接近于零？

恰恰相反，高固定成本的企业，往往面临着一个巨大的生存陷阱，稍有不慎就会全盘皆输。

让我们来做一个思想实验。假设你拥有一段高铁的经营权，你得先修这条铁路，投入了1000亿（房租）；高铁跑一趟，电费和司机的工资大概是1万元（饭钱）；这列火车有1000个座位。

现在，如果完全按照“完美市场竞争”的逻辑来定价，票价应该定多少？经济学教科书里有一个著名的原则，叫“**边际成本定价法**”，意思是在一个充分竞争的市场里，价格最终会跌到等于边际成本的水平。

什么是边际成本？就是多拉一位乘客，你多付出的成本。在高铁上，多拉一位乘客的成本几乎是零，因为座位是现成的，多一个人火车不会多烧多少电，司机也不会多要一份工资。严格来说，边际成本接近于那张车票的印刷费。

方案 · A

边际成本定价 ¥10

火车坐满了人，社会福利最大化（谁都坐得起），但1000亿修路钱一分钱都收不回来，你跑得越多亏得越多，最后破产，高铁停运。

方案 · B

平均成本定价 ¥1000

把1000亿房租硬摊进去，票价高得吓人，结果火车空着跑，只有富豪坐得起，造成巨大的资源浪费。

这也不行，那也不行，这就像是一个死结。

直到一位叫 **弗兰克·拉姆齐** (Frank Ramsey) 的数学天才出现，他才帮经济学家解开了这个扣子。虽然拉姆齐英年早逝，但他留下的 **拉姆齐定价法则** (Ramsey Pricing)，至今仍是公用事业定价理论里最重要的基准之一。

他的思路非常巧妙，既不能只收"饭钱"，也不能平均分摊"房租"，而是要**看人下菜碟**，也就是我们常说的"价格歧视"。

别听到"歧视"就觉得是坏事，就觉得是商家心术不正，在这里，它是目前让火车能跑起来的最优办法。拉姆齐认为，如果一个行业固定成本巨大、边际成本很低，价格就不能简单等于边际成本，而要在"企业不亏钱"的约束下，把加价主要放在需求更不敏感（弹性更小）的那部分需求上。这里的区分并不一定是"贫富"，而是看谁对价格更敏感；不敏感的多承担一点固定成本，敏感的少承担一点，从而把总体效率损失压到最小。

” 价格歧视，在这些行业里，
反而是一种**促进社会整体福利**的手段。

对于那些对价格不敏感、时间又特别宝贵的商务人士，我们卖商务座，票价定得高高的（比如 2000 元），这部分高票价不仅支付了他们那份"饭钱"和"房租"，还额外多承担了一大部分整列火车的房租。他们愿意付这个钱，因为他们赶时间，要在车上开会办公、舒适休息，还要享受高端的红酒。

对于那些对价格非常敏感的大学生或务工人员，我们给他们卖二等座，票价定得低低的（比如 200 元）。这个价格可能只比真实的边际成本略高一点，但这一点点微薄的盈余，也分担了一点点“房租”。**只要有这些人群坐车，总比空着座位强。**

你看，这就像是一个**精妙的众筹系统**，富人多出点，穷人少出点，大家都有车坐。

如果非要追求所谓的“绝对公平”，每个人都付一样的平均成本（比如 500 元），结果会怎样？大学生觉得贵，不坐了，去坐绿皮车，你的高铁座位空了一半。为了收回成本，你不得不把票价涨到 3000 元。结果商务人士也觉得不划算，去乘飞机了。**最后，火车停运，彻底歇菜。**

所以，当我们看到高铁分商务座、一等座和二等座，看到电力公司对工商业用电和居民用电实行不同价格，看到软件公司对企业版和学生版定不同的价时，不要急着骂商家“杀熟”或“势利眼”，**因为这背后，其实是固定成本这头巨兽，在逼着企业寻找生存的最优解。**

” 价格歧视不是商家的“势利眼”，
而是高固定成本行业**唯一可行**的生存策略。

§ 4 从电网到互联网

理解了"房租"与"饭钱"的逻辑，我们再戴上这副眼镜，去看看能源世界，你会发现，很多原本看不懂的现象，现在都清晰了。

还记得我们在第一讲里聊过的那个颠覆性观点吗？**你回家按下开关，灯亮了，你以为你买的是电能，其实你买的是"随时可用"的服务。**当时我们是从"用户体验"的角度去理解的，但今天，当你戴上"房租与饭钱"这副眼镜再重新审视这个观点时，你会看到账本背面那个惊人的数字。

为了维持这份"随时可用"，电网公司必须铺设横跨万里的高压线，建无数的变电站，并且让发电机时刻空转待命，**这些庞大的资产，就是电网必须支付的巨额"房租"。**无论你此刻有没有按下开关，这笔钱每一秒钟都在燃烧，它们在折旧，在产生利息，在消耗维护成本。

这就解释了为什么电力行业极度依赖**负荷率**。如果一家工厂白天开工，晚上停工，那它对电网来说就是个"坏客户"，因为为了满足它白天的用电高峰，电网必须把变压器修得很大，但到了晚上，这些设备闲置了，那就是巨大的浪费。

相反，像电解铝、大数据中心这样 24 小时连续用电的企业，虽然用电量巨大，但对电网来说反而是"好客户"，它们把那根昂贵的电线利用到了极致，**摊薄了每一秒的"房租"。**

这就引出了一个非常有趣的现象，**大工业用户的电价应该怎么定？**

如果完全按照纯粹的经济学成本逻辑，像电解铝这样的大客户，因为负荷极其稳定，服务成本极低，理应享受比居民更低的电价。在美国、欧盟等地的统计口径下，工业／非居民用电的平均电价通常**低于**居民用电；相对地，在中国，长期以来居民电价相对偏低，工商业用户在电价结构中承担了一定的交叉补贴。这并不是因为经济学理论失效了，而是我们引入了**"交叉补贴"**这一政策维度，为了保障民生，政策让工商业用户多承担了一部分**"房租"**。

如果说电网是传统的自然垄断，那么**互联网和软件行业**，就是把**"高固定成本、低可变成本"**推向极致的变种。

开发一套 Windows 操作系统，或者开发一款像《黑神话·悟空》这样的 3A 游戏，第一张光盘（或者第一个下载码）的成本可能是几亿美元，这是天价的**"房租"**。但是，压制第二张光盘，或者在网上下载一份拷贝，成本几乎是零，下载的话，甚至连光盘的钱都可以省了。

” 这就是为什么互联网行业特别容易出现**「赢家通吃」**的局面，
靠的是供给侧的规模经济与需求侧的网络效应相乘。

当年的滴滴和快的、优步，为什么要疯狂补贴车费、烧钱请全国人民打车？因为他们心里都清楚，**这个市场装不下两个巨头**，谁能率先冲过那个盈亏平衡点，谁能把用户规模做到最大，谁就能把平均成本降到对手无法企及的低位，从而彻底把对手挤出市场。**在这种行业里，竞争往往不是为了"共存"，而是为了"消灭"。**

这也就是为什么，在数字经济时代，我们看到的往往不是百花齐放，而是**几座大山并立**，这并非资本的邪恶，而是**成本结构的宿命**。

§ 5 垄断不可避免，那我们该怎么办？

讲到这里，你可能会感到一丝失望与无力，既然在这些行业里，垄断是效率的代名词，那我们这些消费者岂不是只能任人宰割？如果那家唯一的煤气公司突然把价格涨上天怎么办？如果那家唯一的高铁公司服务态度极差怎么办？

这就引出了经济学中非常重要的一章，也就是**管制**。对于自然垄断行业，政府的态度通常是，**允许你垄断，但我要管住你的手**。

管制 · 方法一

回报率管制 Rate of Return

这是最古老的方法。政府对电力公司或燃气公司说，**"你去投资吧，不管你花多少钱建电厂，我都保证你赚到 8% 的利润，但是更多就不被允许。"**

这听起来很公平，既保证了企业不亏本，又防止了暴利。但经济学家曾发现了一个著名的漏洞，叫**A-J 效应**（Averch-Johnson Effect），由哈维·阿弗奇（Harvey Averch）和利兰·约翰逊（Leland Johnson）在 1962 年提出。

如果监管机构承诺给企业固定的资本回报率，那么从单纯的财务逻辑来看，企业最理性的策略是什么？**是拼命省钱、提高效率吗？不完全是，企业其实更有动力去扩大投资规模**。因为在回报率锁定的情况下，投入的本金（有效资产）越多，能够获得的合法利润总额就越大。这在理论上会导致一种被称为**"镀金"**的现象，企业可能会倾向于建设过度冗余的电网，或采用不必要的高昂设备。

管制 · 方法二

价格上限 Price Cap

于是，后来出现了另一种更强调激励的方式，叫做**价格路径管制**（price cap）。监管者不逐项核你的实际成本，而是在一个监管周期内给出“价格上限”，并按通胀指数减去效率因子来调整；企业在周期内通过降本增效获得的收益可以部分留存，到了下一轮再重新评估与重置。

这时候政府说，“我不管你投资多少，反正电价我就定在5毛钱一度，在这个价格下，你能省出多少成本，利润就全是你的。”

这一招确实逼着企业去提高效率、去砍成本。但它也有副作用，**企业可能会为了省钱而牺牲质量**，比如减少维修次数，导致停电风险增加。

” 没有完美的制度。所谓管制，本质上就是政府这只「看得见的手」，试图模拟市场那只「看不见的手」，去逼着垄断企业像在竞争环境下那样行事。

这很难，就像让一个胖子去走钢丝，既要他保持平衡（企业生存），又要他姿态优美（服务好），还不能让他掉下去（系统崩溃）。

§ 6 驯服巨头的平衡术

从 19 世纪纽约街头那场荒诞的“煤气管道战争”讲起，我们一路拆解了高铁、电网乃至互联网巨头的生存逻辑。这一路走来，我们不仅是在学习能源经济学，更是在**重新审视人类社会组织资源的方式**。

在这些被称为“自然垄断”的行业里，“固定成本”就像一道难以逾越的壁垒，它不仅吞噬着天文数字般的资本，也凭借体量构建了坚固的物理屏障。**让其中最具优势的一家独占市场，反倒是全社会成本最低、效率最高的选择。**

但独占市场也充满风险，企业可能利用市场优势向议价能力弱的消费者索取过高价格；更隐蔽的则是**安逸的陷阱**，也就是没了竞争压力，巨头容易变得迟钝臃肿。1966 年哈维·莱本斯坦提出的 **X-非效率** 正是如此，组织懈怠让实际成本远高于理论最低值。

” 现代经济治理的核心智慧，
绝不仅是简单的“允许”或“禁止”，
而是一场**高难度的平衡艺术**。

若监管激励失衡，比如收益压得过低，或对可靠性与韧性的要求设得过松，企业就不愿做那些“看不见”的维护与加固投资，极端天气下便会暴露为大停电。2021 年得州寒潮中的电力危机，正是系统韧性短板被极端事件放大的写照。

我们既不能因担忧垄断弊端而退回重复建设，也不能因迷信规模而放任巨头失控，这本质上是**信息不对称**下永不停歇的动态博弈。这不仅是数学游戏，更是一场政治哲学实验，考验着社会在效率与公平之间拿捏尺度的能力。当我们终于规范了巨头，是否就可以高枕无忧？并非如此，**过于低廉的价格本身，可能就是一种被扭曲的信号**，会引向另一种形式的危机。

C O D A · 终曲



驯服巨头的，不是口号，
而是一张看不见的**制度之网**。

Scale is tamed not by outrage, but by contracts.



LECTURE 03 · END

MESON · 9D

EXERCISE · 思考题

航空公司的"绝对公平"实验

假设为了追求所谓的"绝对公平", 监管部门出台了一项新规定, 禁止航空公司进行任何形式的"价格歧视"。同一架飞机上, 取消头等舱和商务舱, 也取消所有的打折机票、早鸟票和红眼航班特价票, 所有座位必须按照"总成本除以座位数"得出的平均成本, 卖同一个价格。

现状 · 价格歧视

头等舱 + 经济舱 + 打折票

富人多出, 穷人少出

拉姆齐定价在运作, 对价格不敏感的商务人士多承担房租, 对价格敏感的学生少承担。座位填满, 边际收益覆盖可变成本, 房租被众筹摊平。

新规 · 绝对公平

所有人同一个价格

平均成本 = 总成本 / 座位数

打折票取消, 大学生和务工人员退出; 为覆盖成本票价继续上涨, 商务人士转飞竞争对手或改乘高铁; 空座率越来越高, 航班被迫削减……

Q01

这张"平均票价", 会比现在的打折经济舱贵还是便宜? 请用"房租 + 饭钱"的语言解释你的推理。

Q02

那些原本只买打折票才能出行的大学生和务工人员, 还能坐得起飞机吗? 他们的"出行权"在这场公平实验中发生了什么?

Q03

最终, 这家航空公司的航班数量是会增加, 还是会减少? 更抽象地问一句, 一个"人人都付一样钱"的世界, 会不会反而让每个人都坐不起飞机?

第 四 讲

IV.

「廉价」能源 的陷阱

能源不可能同时是清洁的、全天候可靠的、且极其廉价的。只要价格信号还在传递，市场就能找到解决短缺的方案。

第 四 讲 铁 律

第 四 讲

"廉价"能源的陷阱

稀缺不是短缺。价格被压低时，买不到往往不是因为物理枯竭，而是信号被阻断。

在 上一讲，我们拆解了能源行业的成本结构，明白了"房租"（固定成本）与"饭钱"（可变成本）的区别，也理解了为什么在自然垄断行业，通过价格歧视（如拉姆齐定价）来分摊巨大的固定成本，反而是有利于社会整体福利的最优解。

但成本仅仅是账本的一面，在资源配置的博弈中，决定资源最终流向的，往往是硬币的另一面，也就是价格。

我们在面对能源短缺时，直觉往往会责怪产能不够或资本贪婪，但本讲我们将深入探讨一个反直觉的经济学逻辑，那就是很多时候，买不到并不是因为物理上的枯竭，而是因为价格信号被阻断。

” 我们往往出于福利的初衷去压低价格，却意外地制造了**灾难性的短缺**。

如果说上一讲我们学会了如何算账，这一讲我们将透过价格这个信号灯，去理解供需平衡的精妙机制。

§ 1 半吊子市场化的教训

要理解价格机制失灵的后果，2000年发生在美国加利福尼亚州的电力危机是一个无法绕过的经典案例，它像一个巨大的实验室，向全世界展示了制度设计中的逻辑漏洞如何演变成一场社会灾难。

那时的加州，正处于互联网泡沫的顶峰，是全球科技创新的引擎。根据当时的统计数据，如果将加利福尼亚州视为一个独立的经济体，其GDP总量位居世界前五，这里拥有世界上最充裕的资本、最顶尖的人才和最现代化的基础设施，按理说，这里应该是电力保障最稳固的地区。

然而，从2000年5月开始，这个经济巨人的血管（电网）却开始频繁发生梗阻。危机最严重时，旧金山的红绿灯熄灭，交通陷入混乱；硅谷的芯片工厂被迫停工，因为对于对环境要求极高的晶圆制造而言，电压的微小波动都可能导致整批昂贵产品的报废；写字楼的电梯停运，人们被困在几十层的高楼中；加州实施了二战以来罕见的大规模轮流停电，数百万家庭陷入黑暗。

当时，公众的怒火指向了像安然公司（Enron）这样的能源交易商，指责他们通过复杂的金融衍生品操纵市场、哄抬电价。确实，美国联邦能源管理委员会后来调查证实，安然等公司的交易员利用了规则漏洞，实施了一系列代号离奇的操纵策略。例如所谓的“洗电”，就是将加州的电力先出口到邻近州，抹去原产地标签，再以不受价格上限限制的“进口电”名义高价卖回加州；还有臭名昭著的“死亡之星”策略，通过安排虚假的电力传输制造线路拥堵假象，进而骗取电网支付的拥堵缓解费。

但经济学分析需要追问的是，什么样的制度土壤孕育了这场危机？

深层原因在于当时加州推行的一项极其矛盾的电力体制改革（AB 1890 法案），他们设计了一个“价格双轨制”的怪胎。

批 发 端 · 发 电 侧

完全自由竞争

加州电力交易所（CalPX）撮合，电厂卖给电网的价格完全放开，无任何上限；政策制定者希望由竞争压低成本。

零 售 端 · 用 户 侧

严格价格上限

公用事业公司卖给居民的电价锁定在 1996 年水平，并冻结至 2002 年，以兑现改革不涨价的政治承诺。

这种机制设计制造了一个巨大的、致命的“剪刀差”。

2000年夏天，加州遭遇了异常的酷热和干旱。干旱使得美国西北部（华盛顿州和俄勒冈州）输入加州的水电大幅减少，高温则让空调用电负荷激增，与此同时，作为主要发电燃料的天然气现货价格也在全美范围内上涨。

在自由竞争的批发市场上，电价像脱缰的野马，从平时的每兆瓦时 30 美元（约合人民币 0.25 元/千瓦时）飙升至 300 美元（约合人民币 2.5 元/千瓦时）甚至更高，而在零售端，价格却纹丝不动。

处于中间环节的公用事业公司陷入了绝境。它们必须以每千瓦时 30 至 50 美分（约合人民币 2.5 至 4 元/千瓦时）甚至更高的批发高价买电，却只能以约 6 美分/千瓦时（约合人民币 0.5 元/千瓦时）的冻结价格卖给用户，此时的逻辑不再是简单的利润变薄，而是卖一度亏一度的价格倒挂，且亏损幅度巨大。

加州最大的公用事业公司太平洋瓦电（PG&E）在短短几个月内亏损上百亿美元，现金流彻底枯竭，被评级机构降为垃圾级，最终于 2001 年 4 月申请破产保护。由于担心公用事业公司付不起账，发电企业开始拒绝供电，或者选择将电力卖给邻近的州，甚至有电厂在高峰时段选择“停机检修”，以规避回款风险。而对于硅谷的家庭和企业来说，电费账单毫无变化，价格信号完全被屏蔽，空调依然开到最大。

一边是供给端因为亏损和风险而收缩，另一边是需求端因为价格屏蔽而毫无节制，巨大的供需缺口无法通过市场手段弥合，最终只能通过物理手段，也就是粗暴的拉闸限电，来强行平衡。

” 如果人为割裂价格传导链条，
让价格无法反映真实的稀缺程度，
短缺就不是偶然，而是必然。

§ 2 打碎温度计，并不代表烧退了

我们在讨论能源及公用事业政策时，往往容易陷入一个误区，把价格仅仅看作是消费者需要支付的成本或代价。如果价格只是成本，那么出于仁慈和福利的考量，自然是越低越好，谁不希望用上更加便宜的电和水呢？

但诺贝尔经济学奖得主弗里德里希·哈耶克（F.A. Hayek）在他那篇经典的论文《知识在社会中的运用》（The Use of Knowledge in Society, 1945）中深刻指出，价格的本质，不是财富的分配工具，而是一套分散化、高效率的信息传递系统。

价格就像一个温度计，它汇聚了成千上万个分散个体的知识、判断和偏好，并将这些复杂的局部信息浓缩成一个简单的数值。当电价在高峰时段上涨，它不仅仅意味着你要多掏钱，它更是在向全社会广播一个紧急的经济情报，那就是此刻电力资源相对稀缺，获取它的代价变高了。

” 对供给侧，它是一个「动员令」；
对需求侧，它是一个「劝退信」。

这个过程不需要主管部门下发红头文件，不需要街道办上门动员，也不需要复杂的审批流程，价格信号本身就能指挥千军万马，引导供需双方进行自发的、即时的协作。

然而，当我们实施严格的价格封顶或长期压制价格时，我们实际上是做了什么？我们是在用人为的手段，打碎了这个温度计，或者用胶带把温度计的读数强行粘在我们想要的温度。

当你把电价强行按在合理水平之下时，你其实是在向市场发送严重失真的虚假情报。你对电厂说，“电很不值钱，你们别急着发，发了也不挣钱”；你对用户说，“电多的是，资源无限，尽管用，别客气”。

这就解释了经济学中两个极其重要概念的区别，**稀缺 (Scarcity)** 与 **短缺 (Shortage)**。

稀 缺 · SCARCITY

客观事实

资源总是有限的，我们永远无法用有限的资源满足无限的欲望；煤炭、天然气、环境容量皆如此，即便价格放开依然存在。

短 缺 · SHORTAGE

经济现象

在特定价格水平下，意愿购买量超过了意愿供给量；只要价格能自由浮动，市场最终会出清，短缺其实是可以避免的。

稀缺是不可避免的，但短缺是可以避免的。所谓短缺，本质上就是价格没有起到筛选需求和激励供给的作用。

§ 3 非价格竞争机制的代价

当然，维持价格稳定，特别是民生领域的价格稳定，体现了政府保障基本公共服务的善意，但经济学分析要求我们不仅要看"初衷"，更要看"看不见的代价"。当价格机制被抑制，无法通过价格高低来筛选需求时，"谁能买到"这个问题依然需要解决。

当"出价高者得"的规则被暂停，社会必然会演化出其他的分配机制，也就是**非价格竞争**（Non-price Competition），而这些机制，往往伴随着巨大的社会成本和效率损失。

代价 · 第一类

"排队"带来的无谓损失

在委内瑞拉陷入经济危机期间（2014至2019年），该国爆发了恶性通货膨胀，货币沦为废纸，但政府仍将汽油价格死死锁定在几十年前的补贴水平，导致加满一箱油的钱甚至买不到一枚鸡蛋，汽油价格一度比水还便宜。但这并非福利，司机往往需要排队数小时甚至过夜才能加到油，名义上几乎免费的汽油，对于急需送货的卡车司机而言意味着生意的流失。更关键的是，**排队是一种"负和博弈"**，你在排队时消耗的时间和精力，并没有转化为加油站老板的收入，也没有增加社会的总产出，而是纯粹地蒸发了，这在制度经济学上被称为**租值耗散**（Rent Dissipation），这种看不见的成本，往往比直接涨价更昂贵。

代价 · 第二类

资源配置效率的错配

在缺乏价格信号引导的情况下，电力等关键资源可能无法优先保障那些最具社会价值或经济效益的领域。想象一下，如果电力短缺且价格不涨，只能通过行政手段进行拉闸限电，在实际执行中，由于信息不对称，很难做到绝对精准，可能会出现“一刀切”的情况。一家正在赶工期、违约金高达数亿的高科技出口企业，与一家产能过剩、能效低下的高耗能小厂，可能面临同样的限电比例。而如果价格机制起作用，高科技企业会愿意支付平时 10 倍的电价来保住生产，低效小厂则会因为电价超过利润红线而主动停产，稀缺的电力就自然流向了创造价值更高的地方。

代价 · 第三类

潜在的质量风险与反向淘汰

南非国家电力公司（Eskom）的衰落是一个警示。由于长期维持远低于成本的低电价（出于政治承诺），Eskom 不仅无力建设新电厂，连现有电厂的维护资金都捉襟见肘，结果是设备老化、故障频发，南非最终陷入了长达十几年的电力危机。这说明廉价必须建立在技术进步和成本降低的基础上，而非单纯的行政管制，击穿了成本底线的低价，最终会让消费者付出「无电可用」的更高代价。

§ 4 中国煤电价格机制的演进与挑战

目光回到国内，中国能源行业在快速发展的过程中，也曾长期面临“计划”与“市场”双轨并行的结构性矛盾，其中最典型的，就是行业内俗称的**煤电顶牛**现象，其核心在于“市场煤”与“计划电”的脱节。

自 2013 年以来，电煤价格逐步实现市场化，随行就市，受国际大宗商品周期和国内供需影响，波动剧烈；而下游的上网电价在很长一段时间内保持相对固定，调整周期长，缺乏弹性。当煤炭价格大幅上涨时，发电企业就夹在中间，面临巨大的经营压力，发电的边际燃料成本可能已经超过了上网电价的收入，出现“发一度亏一度”的倒挂局面。

” 这对火电厂是两难困境，
减少发电难以落实保供的政治责任，
全力发电则面临严重的财务亏损。

这种机制上的摩擦，曾在 2021 年秋季导致了部分地区的电力供应紧张。当时煤价飙升至历史高位，电厂库存告急，部分机组不得不进行“技术性检修”，尽管我们拥有全球规模最大的发电装机容量，但部分工业大省仍不得不启动“有序用电”方案。许多工厂接到了“开三停四”甚至“开二停五”的错峰生产通知，在一些极端时刻，城市的景观照明被迫熄灭，红绿灯停止工作。这并非电厂不愿承担责任，而是客观的经济规律在起作用，任何企业都无法长期在深度亏损的状态下维持高负荷运转。

同样的逻辑也体现在 2017 年冬季的华北“气荒”中。那一年，为了打赢蓝天保卫战，大规模的“煤改气”工程集中推进，随着供暖季到来，天然气需求爆发式增长。上游为了填补缺口，LNG 现货价格一度飙升破万，但在终端零售环节，居民用气价格维持在较低水平，承担保供任务的燃气企业“卖一方亏一方”，最终新装的壁挂炉成了摆设，部分农村地区出现断供。

这些现象让我们深刻认识到，真正的能源安全，不仅需要物理上的产能建设（建更多的电厂、修更多的管道），更需要理顺经济上的价格机制。正是基于对这一规律的认识，国家发展改革委在 2021 年 10 月印发了著名的 1439 号文（《关于进一步深化燃煤发电上网电价市场化改革的通知》），有序放开全部燃煤发电电量上网电价，并扩大了市场交易电价的上下浮动范围。这标志着中国电力体制改革迈出了关键一步，让电价真实反映煤炭成本的波动，疏导上下游价格矛盾。

§ 5 价格波动的调节作用

如果说低价管制在特定条件下可能引发短缺，那么允许价格适度波动，往往是缓解短缺、恢复平衡的有效手段。这背后的逻辑并不冷酷，而是基于系统效率的考量，在能源市场化改革的进程中，我们需要重新认识“高价”在极端情形下的积极意义。

01 价格是供给的“动员令”，当价格允许上涨时，会激发潜在的供给能力，平时因为成本高而停备的机组会重新启动，拥有自备电厂的工业企业会增加发电，储能设施会在高价时段全力放电。在 2022 年夏季的高温中，部分现货市场试点地区出现的高电价，就成功引导了发电侧提升顶峰能力，保障了供需平衡。

02 价格是需求的“调节器”，高峰时段上涨会引导用户主动削峰填谷，工业用户调整生产班次，电动汽车选择在半夜低谷期充电（这正是 V2G 技术的基础）。这种“需求侧响应”（Demand Response），实际上是将宝贵的电力资源留给了医院、数据中心、精密制造等边际效用更高、更不可中断的领域。

03 价格波动驱动长期创新，正是因为能源价格的波动和潜在的套利空间，才驱动了储能技术、虚拟电厂（VPP）、节能技术和新能源汽车的蓬勃发展。如果电价永远一成不变，储能电站就失去了“低买高卖”这一最核心的生存土壤；如果能源永远极其廉价，企业也就没有动力去研发高能效的设备。*价格机制是技术进步最持久的动力源。*

§ 6 从「暗补」走向「明补」

通过前面的分析，我们已经明白，价格不敏感导致的供需错配，是许多能源短缺事件的幕后推手，但这是否意味着政府应该完全放手，任由价格剧烈波动冲击普通人的生活呢？答案显然是否定的。

结合中国的实际情况，我们追求的是“有效市场”与“有为政府”的结合。对于电力、供暖这类兼具商品属性和公共服务属性的产品，正确的思路是“价格机制加精准保障”，而非简单地“按住价格”。

思路 · 一

还原能源的商品属性

逐步建立和完善电力现货市场，让电价能反映实时的供需成本、燃料成本和环境成本；解决“煤电顶牛”等体制性问题，让市场在资源配置中起决定性作用。这正是国家目前大力推动电力体制改革、建设全国统一电力市场的核心方向。

思路 · 二

兜底民生需求

对于居民基本生活用电、用气，继续保持相对稳定的价格或实行阶梯定价，通过交叉补贴（工商业用户补贴居民用户）等方式，确保普通家庭的基本能源需求不受市场剧烈波动的冲击。

思路 · 三

从“暗补”转向“明补”

传统的全面低电价实际上是一种“暗补”。在这一模式下，住大别墅、开大排量汽车、全屋恒温的高收入群体，因为用能量大，反而享受了更多的补贴金额，这在公平性上是有待商榷的。

未来的政策优化方向，是让工商业电价和居民高端用电逐步反映成本，同时由政府为低收入群体、农村地区进行直接的资金补贴或发放**能源消费券**，这样既保障了公平，又保留了市场对节约用能的激励。

无论是美国加州的教训，还是国内“煤改气”和电力保供的实践，都指向同一个方向，**建立灵敏、真实的价格机制，是实现能源安全与高质量发展的必由之路**。对于身处能源大转型时代的我们来说，需要建立一个新的认知，能源不可能同时是清洁的、全天候可靠的、且极其廉价的，这就是业内常说的**能源不可能三角**。当我们追求更清洁的蓝天与更可靠的电力供应时，必须准备好接受更能反映真实成本、具有一定波动性的能源价格，这不仅是为商品付费，更是为“随时可用”的安全感付费。

” 只要价格信号还在传递，
市场就能找到**解决短缺的方案**。

C O D A · 终曲



只要价格信号还在传递，
市场就能找到 **解决短缺的方案**。

As long as prices speak, the market answers back.



LECTURE 04 · END

MESON · 9D

EXERCISE · 思考题

台风夜的最后一箱矿泉水

假设一场台风导致某城市断水断电，道路中断。全城物资告急，大部分商店已被抢购一空，只有一家超市的仓库里还有一批存量矿泉水。政府接管了这个超市并支配这批水的处置，他们提出了两个方案。

方案 · A

维持原价 先到先得

公平 · 失效率

门口排起长队，前几个人出于恐慌将水买光囤积，后面真正急需的人（比如需要冲奶粉的母亲）可能一瓶也买不到。

方案 · B

不限价格 价高者得

效率 · 失公平

水不再被过度囤积，能筛选出真实急需，但低收入群体可能因为买不起而陷入生存危机，也常被视为不道德。

Q01

请利用本讲学到的“双轨制”或“明补”思路，设计一个既能利用价格机制防止囤积、又能保障弱势群体生存权利的“第三种分配机制”。

Q02

能否将“涨价”带来的超额收益，通过某种方式返还给消费者？或者引入可交易的配额，让每人先得到一份基本定量，余量再由价格撮合？

Q03

如果你是这座城市的政策设计者，你会如何在公平与效率之间找到那把最微妙的平衡尺？

第五讲

V.

边际，能源经济中
最有魅力的词汇

决定价格高低、甚至决定系统生死的，从来不是
沉默的大多数，而是站在悬崖边上的“最后一位”。

第五讲 铁律

第五讲

走出"平均"的舒适区

在秒级平衡的电力系统里，平均值往往是致命的误导。真正决定生死的，是那个最昂贵的"边际"。

在 上一讲中，我们透过大量的案例看到，短缺往往源于价格机制失灵。这就引出一个新问题，既然管死价格会短缺，那放开后，价格多少才合理？

绝大多数人的直觉是"成本均摊"，把所有电厂的成本加起来除以总电量，算个温情脉脉的平均数。然而，今天我们要解剖这个直觉。在电力这样需要实时（秒级）保持供需平衡的系统中，平均值往往是致命的误导。

” 决定价格高低、甚至决定系统生死的，从来不是沉默的大多数，而是站在悬崖边上的「**最后一位**」。

这背后的推手，就是今天要讲的主角，也是能源经济学中最顶级、最有魅力的词汇，**边际**（Margin）。

§ 1 一个看似"摸鱼"的天价员工

让我们把目光投向浙江，这个用电负荷屡创新高的经济大省。在杭州或宁波的边缘，坐落着几座关键的燃气调峰电厂。如果你是一个不知情的路人，在一年里绝大多数日子经过这里，你都会以为这是一座"半停工"的工厂。高耸的烟囱里很少冒出热气，巨大的冷却塔下听不到水流的轰鸣，厂区里安静得只能听见风吹过高压线的声音。

附近的居民偶尔路过，也许会指着那紧闭的大门议论，"看，这个厂怎么老闲着？这么贵的地皮，这些进口的设备，一年也转不了几回。我们的电费里，是不是都替他们摊了这些闲置成本？"

确实，从财务报表上看，这是最昂贵的资产之一。它们往往安装的是昂贵的重型燃气轮机，烧的是天然气，燃料成本通常也高于煤电。它就像一个拿着全额高薪的高级员工，大半年都在"摸鱼"。但是，只有电力调度中心的调度员知道，这个"闲人"存在的全部意义。

每年七八月的"迎峰度夏"时刻，副热带高压像一个巨大的蒸笼罩住整个长三角，数千万台空调叠加工业生产，把系统推到极限。红色的警报灯在调度大屏上闪烁，平日里兢兢业业工作的燃煤电厂（基荷机组）、核电站、漫山遍野的光伏板，都已经拼尽了全力，出力已经顶到了嗓子眼，再也挤不出一滴电。

就在电网频率开始微跌，系统即将不堪重负的前一刻，调度员会打给燃气调峰电厂一个重要的电话，指令其开机启动。瞬间，那座沉睡了大半年的燃气电厂，会像睡狮猛醒一般，发出震耳欲聋的咆哮，昂贵的天然气被喷入燃烧室，转化成宝贵的电流，注入电网大动脉。也许它只工作了三个小时，突然一场雷雨袭来，气温骤降，负荷回落，它吐出一口长气，又回去"睡觉"了。

当那个下午两点半，你满头大汗地从户外跑进屋，按下空调遥控器，享受到那一阵救命的凉风时，你消耗的那一度电，应该怎么算钱？是按照那座常年工作的核电站几毛钱的成本算？还是按照那座燃气电厂几块钱的成本算？还是把它们"平均"一下？

” 平均值思维听起来既公平又科学，
但它其实是经济学中最深、最迷人的陷阱。

§ 2 钻石与水的古老悖论

为了把"边际"这个概念讲透，我们需要暂时离开繁忙的调度大厅，回到18世纪，去看看那个困扰了经济学鼻祖亚当·斯密（Adam Smith）一生的悖论。

1776年，斯密在划时代的巨著《国富论》（An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations）中困惑地写道，"没什么东西比水更有用，但它几乎买不到任何东西；相反，钻石没有什么使用价值，却经常可以交换到大量的其他物品"。这就是著名的"水与钻石悖论"（Diamond-Water Paradox）。

这个谜题像一朵乌云，笼罩在古典经济学的头顶近百年，直到19世纪70年代，一场被称为**边际革命**（Marginal Revolution）的思想风暴席卷了欧洲。三位来自不同国家的杰出头脑，英国的威廉·斯坦利·杰文斯、奥地利的卡尔·门格尔、以及长期在瑞士洛桑任教的列昂·瓦尔拉斯，几乎在同一时期，独立地找到了破解谜题的钥匙。

他们的答案石破天惊，决定物品价格的，从来不是它对你整体有多重要（总效用），而是"这一个"单位对你有多重要（**边际效用**）。

在正常情况下，水到处都是，你用的这一捧水，可能只是为了洗手，这一捧水的效用极低，所以价格就低。但是，如果你身处塔克拉玛干沙漠腹地，三天没喝水了，此时，你面前出现了一瓶水，它就是你的命，为了得到它，你愿意用全部身家去交换。此时，水的边际效用无穷大，价格也就变成了天价。

看懂了这个，你就看懂了电力系统。平常日子的电力，就像生活中的水，供给充裕，边际成本很低，而那个一年只工作几十小时的燃气调峰电厂，就是沙漠里的那瓶水。当大家都在开空调，电网负荷达到极限时，为了满足你刚按下的那个空调遥控器按钮，系统必须调用的"那最后一台发电机组"，就是那个身价昂贵的燃气机组。

这台机组，在经济学里有一个极其重要的名字，叫**边际机组**（Marginal Unit）。此时此刻，整个市场上每一度电的真实价值，不再是那廉价的水电或煤电，而是由这台最昂贵的机组决定的。因为如果你不支付这个高价，这台机组就不会启动，电网供需就会失衡，所有人都会没电用。

” 经济学里的「**边际**」，
指的是每新增一单位投入或产出所带来的变化量，
在电力系统中，它就对应着那个决定生死的“**最后一位**”。

§ 3 昂贵的雇佣兵与统一出清

讲到这里，很多人的脑子里可能会冒出一个朴素的想法，"我承认那最后一台机组很贵，但是大部分电还是由便宜的机组发的呀？为什么不能把便宜的和贵的中和一下，算个平均价卖给我？"这是一个非常诱人、但也非常危险的想法，这恰恰是计划经济思维与市场经济思维的分水岭。

为了彻底击碎这个平均价幻觉，让我们把复杂的电网，想象成一支正在保卫城市的军队，这支军队由三种士兵组成。

-
- 01 义军**（对应风电、光伏、水电），他们不需要军饷（没有燃料费），只要天气给力，他们就拼命干活，甚至还会倒贴钱（负电价）。
-
- 02 常规军**（对应核电、大型高效煤电），他们纪律严明，每天消耗固定的口粮（核燃料、煤炭）。
-
- 03 雇佣兵**（对应燃气轮机、应急柴油机），这帮人平时住在豪华酒店里喝香槟，收着高昂的"待命费"，只有在战况最激烈、正规军顶不住的时候，指挥官才会咬牙把他们请出来，一上场，每小时要价就是天文数字。
-

现在，战斗（用电需求）打到了最激烈的晚高峰，指挥官被迫请出了每小时收费 10 块钱的“雇佣兵”。这一小时的战斗工资，该怎么发？

如果你坚持“平均主义”，给义军发 1 分钱，正规军发 3 毛钱，雇佣兵发 10 块钱，然后向用户收个平均费，大概 4 毛钱。听起来很公平？大错特错。如果真的这么做，市场将在瞬间崩塌。设想一下，如果我也能像雇佣兵一样，平时睡觉，关键时刻出来打一枪就能拿 10 块钱，那我为什么要辛辛苦苦当那个只拿 3 毛钱的正规军？

为了避免这种逆向选择，很多电力现货市场采用了一条关键规则，那就是**统一边际价格 / 统一出清**（pay-as-cleared），也就是在同一时段、同一价格区（或同一节点），所有被调度的电量按当时的边际价格结算。

统一出清规则简单粗暴，但有效，只要“雇佣兵”上场了，那么战场上所有的士兵，不管是义军还是正规军，这一小时统统按“雇佣兵”的价格结算。在那个尖峰时刻，不管是风电、水电还是煤电，统统结算 10 块钱。

为了直观看到“最后一位”能把价格推到多夸张，看一眼英国在极端紧张时刻的真实案例。按当时汇率粗略折算，**9724.54 英镑/兆瓦时**相当于每度电约七八十元人民币的量级，这就是为了买那“救命一刻”所支付的**边际价格**。

” 2022 年 7 月 20 日，伦敦热浪下的英国平衡机制中，一笔 12 时段的边际出清价一度达到 **9724.54 英镑/兆瓦时**。

§ 4 天价账单与“让电于民”

英国的案例虽然惊人，但毕竟还是买到了电。如果我们把目光投向大洋彼岸，你会看到现实中更极致、也更残酷的一幕。那一刻，市场上连最贵的“雇佣兵”都已经死光了，价格这只“看不见的手”开始展现它最冷酷的逻辑。

2021年2月美国得克萨斯州的 Uri 寒潮，正是“边际定价”最惊心动魄的终极演绎。供给端，大批平日里稳如泰山的“常规军”因为设备冻结而趴窝；需求端，极寒天气让取暖负荷如火箭般蹿升。按照得州这种纯粹能量市场（Energy-Only Market）规则，那一刻的电价直接击穿了所有人的想象，死死钉在了市场规定的天花板上，也就是 **9000 美元/兆瓦时**。

没有任何一台物理机组真的报出这个价格。在这个极端时刻，所有的“常规军”和“雇佣兵”都已满负荷运转，却依然填不满巨大的亏空，此时，市场寻找“最后一位”的目光，被迫跨越了发电侧，投向了用户侧。此时的“边际”不再是某台昂贵的机器，而是“被切除的负荷”。市场不再问“发一度电要多少钱”，而是开始问一个更可怕的问题，“如果你不得不失去这度电，你会有多痛苦？”

这就是**失负荷价值**（VOLL, Value of Lost Load）所衡量的残酷真理，当所有电源都耗尽，为了避免断电造成的社会瘫痪与生命损失，社会愿意付出多大的代价。得州公共事业委员会（PUCT）正是基于这个底层逻辑做出了那个极具争议的决定，既然电网已经实施了负荷切除，说明系统处于极度短缺，“可靠性”本身就成为了最稀缺的商品。PUCT 下发行政命令，强行将负荷切除期间的电价钉在 9000 美元/兆瓦时的上限，这本质上是在向全市场宣告，此时此刻电的价值，等于为了不失去光明，社会愿意付出的**最大赎金**。

2022年6月，澳大利亚国家电力市场（NEM）也经历了一次惊魂时刻。当时澳洲现货电价像一匹脱缰的野马，在多个地区持续高位运行，市场价格上限（Market Price Cap）高达15100澳元/兆瓦时。但如果这匹野马跑得太久，电力零售商就会因现金流枯竭而瞬间破产。于是**累计价格阈值**（Cumulative Price Threshold）规则生效，当7天内累计价格总和超过阈值，系统自动触发“管理价格期”，强行将现货价格压低到300澳元/兆瓦时的临时上限。

左手是15100澳元的天价上限，用来刺激生产；右手是300澳元的管理上限，用来防止市场猝死。得州与澳洲的案例放在一起，构成了一幅完整的市场图景，稀缺会推高价格作为呼救信号，也会在信号过于强烈时触发保护机制这个安全阀。

那么这一幕会在中国发生吗？2022年8月的四川缺电事件提供了对照。持续极端高温与少雨干旱，让水电出力大幅下滑，高温又推高了用电负荷。面对巨大的供需缺口，中国并没有像得州或澳洲那样让价格飙升到几十块钱一度，而是启动了一套被称为“有序用电”的机制，核心原则是**让电于民**。工厂停产、商圈熄灯，用行政手段的“量调节”代替了市场手段的“价调节”。好处是社会稳定，代价是工厂停产带来的经济损失，以及价格信号没有传导给普通用户。

§ 5 未来的电网，没有平均数

边际定价最迷人也最疯狂的地方在于，它不仅能把价格推上云端，也能把价格砸进地狱。随着风能、太阳能等新能源比例的指数级增长，我们熟悉的那个温情脉脉的"平均电价"将彻底失去参考价值，取而代之的，是一条惊心动魄的鸭子曲线。早在 2013 年，加州独立系统运营商（CAISO）就预言了这一幕，当光伏大规模接入，白天净负荷暴跌为鸭子的肚子，太阳落山后晚高峰猛增，又拉出鸭子的脖子。

2023 年"五一"假期的山东就出现了令人咋舌的一幕。由于假期工厂放假，工业用电骤降，而那几天的阳光却好得惊人。中午时段，数以亿计的光伏板全力输出，电力供应瞬间严重过剩。从 5 月 1 日到 2 日，山东实时现货市场出现了连续 22 小时的负电价，最低价格一度下探到 **负 85 元/兆瓦时**。这时的边际价格为负，意味着发电厂不仅不收钱，还要倒贴钱给电网。

虽然造成供大于求的源头是新能源大发，但导致价格跌穿零线的，往往是不得不继续运行的煤电机组。对大型煤电厂来说，它们就像一辆在高速公路上飞奔的重型卡车，刹车和重新启动的成本极其高昂，动辄几十万元。与其停机再重启，不如咬牙报个负价，保持最低负荷运行。但只要等到晚上七点，太阳落山，光伏出力瞬间归零，空调、炊具齐开，负荷猛增，系统必须瞬间调用极其昂贵的储能电池或备用燃气机组，边际成本又会像火箭一样，从"倒贴钱"窜升到"天花板价"。谁掌握了对"边际"的敏感度，谁就掌握了财富的密码。

§ 6 走出「平均」的舒适区

回到开篇我们提到的那座浙江燃气调峰电厂，当它们再次轰鸣的时候，希望你不再把它看作是电力公司的浪费，或者行业的低效，它其实是一个昂贵的承诺。我们之所以总是被平均值欺骗，是因为我们的思维惯性被工业时代的流水线所驯化，习惯了用“平均利用率”“平均产出”来衡量一切价值。

但边际思维给了我们一记响亮的耳光，它冷静地告诉我们，这个世界的崩溃，从来不是因为平均值的下降，而是因为边际的失守。让我们跳出电力系统，看看人体最精密的“调度中心”，也就是大脑。它仅占体重的 2%，却霸道地消耗了身体 20% 的能量预算。即便你躺在沙发上发呆，甚至在熟睡，它依然在疯狂燃烧葡萄糖。

在追求“平均效率”的人看来，这简直是极大的浪费，仿佛一台空转的机器。但用电力系统的语言来说，这种昂贵的消耗不叫浪费，而叫**旋转备用**（Spinning Reserve）。大脑必须时刻维持这种高能耗的“热启动”状态，才能在危机降临的那几毫秒内，瞬间拉满算力，调动全身肌肉做出反应。它烧掉的那些看似多余的能量，买的不是日常思考，而是生死关头的“即时响应权”。

如果大脑像电脑一样为了节省能量而选择“休眠”或“冷停机”，等剑齿虎扑到我们祖先面前再申请启动程序，那人类的进化史早就终结了。**生物学不讲效率，只讲生存，而生存依赖的是冗余，不是平均。**

再看看金融世界。为什么银行要被强制保留存款准备金？那些按规定缴存在央行、收益很低的准备金，难道不是一种巨大的效率损失吗？但金融危机反复教训我们，当恐慌（挤兑）发生时，决定银行生死的，不是它平均每天赚多少钱，而是它在那一刻能不能拿出足够的现金。准备金，就是金融系统的“燃气调峰电厂”。

把这个逻辑投射到我们个人的职业与生活中，你会发现更加深刻的隐喻。我们常常陷入一种“平均忙碌”的陷阱，把日程表填得满满当当，追求每一小时的饱和工作。一旦行业剧变、面临裁员，或家中突发变故，那些把时间塞满、没有任何“边际冗余”的人，往往是最先崩溃的。因为他们没有时间去学习新的技能（备用燃料），没有精力去建立新的人脉（备用线路），没有存款去应对收入的断档（储能电池）。

走出平均的舒适区，意味着重新定义效率。真正的效率，不是在风平浪静时跑得有多快，而是在惊涛骇浪中站得有多稳。那些为了“最后一刻”所做的准备，绝不是浪费，而是系统的安全气囊。

所以，拥抱你的边际时刻吧。不要因为平时用不上，就废弃你的“备用发电机”；不要因为平均分很高，就忽略了那门能救命的“偏科”；不要因为追求平庸的安稳，就交出了你在危机时刻的**定价权**。

” 当大浪淘沙、潮水退去，
真正决定你依然站立的，
不是你平均每天做了什么，
而是你在那**最艰难**的一刻，手里还握着什么。

C O D A · 终曲



真正决定系统生死的，
是站在悬崖边上的**最后一位**。

The margin decides the mountain.



LECTURE 05 · END

MESON · 9D

EXERCISE · 思考题

效率与公平的边界在哪里？

我们今天把"边际定价"的逻辑推演到了极致，为了效率，价格必须反映最昂贵的"最后一位"成本。如果我们将这个逻辑移出电力行业，应用到生活的其他领域，你会发现"效率"与"公平"的冲突无处不在。

场景 · A

急诊动态加价

效率优先

半夜急诊室爆满，医生资源极度紧缺（边际成本极高），挂号费涨到 5000 元以筛选出真正命悬一线的病人。符合效率，但是否符合道德？

场景 · B

春运自由票价

稀缺反映

除夕前三天票价自由浮动，让真正急需回家的人能买到票。是否比拼手速抢票更公平？为什么我们没有这样做？

Q01

在分配稀缺资源时，"金钱（价格）"和"时间（排队）"这两种手段，哪一种在道德上更正义？

Q02

如果完全用价格机制来筛选医疗、教育、交通等稀缺资源，会发生什么？效率的边界到底应该划在哪里？

Q03

试着用本讲学到的"边际"与"旋转备用"思维，重新审视你自己的职业与生活，你为哪个"最后一刻"储备了什么？

第 六 讲

VI.

刚需，能源中的「伪命题」

资源是稀缺的，但人类利用资源的方式是无穷的。所谓的“刚需”，其实是一个被时间限定了范围的命题。

第 六 讲 铁 律

第六讲

给时间一点时间

在短期内，我们都是现有能源系统的人质；但只要给点时间，我们都是充满智慧的破局者。

在 上一讲的最后，我们盯着那台一年只开几十个小时的尖峰发电机，得出了一个结论，为了应对那一瞬间的极值需求，我们必须为高昂的边际成本买单，因为在那一刻，只要缺了电，整个系统就会崩塌。

这时候，一个更深层、也更令人困惑的问题浮出了水面，为什么我们非要在那一刻用电不可？为什么当价格飙升到天际的时候，我们不能少用一点，或者换个用法？

” 这就触及到了能源经济学里最核心、也最常被误读的概念之一，**刚需**。

能源往往被描绘成一种无可奈何的必需品，石油是工业的血液，天然气是过冬的命脉。但经济学的深层逻辑告诉我们，这种直觉只对了一半，**在时间的维度里，很少有什么是绝对不可替代的。**

§ 1 消失的「那一半」冬天

为了看清这一点，让我们把目光投向 2022 年的欧洲。那里曾发生过一场惊心动魄的能源大实验，这场实验的结果，不仅狠狠地冲击了我们对于“刚需”的固有认知，更让那些沉睡在教科书里的经典经济学理论，在现实的硝烟中焕发出了**惊人的解释力**。

2022 年，对欧洲能源市场来说，是噩梦般的一年。俄乌冲突爆发，俄罗斯通往欧洲的天然气管道阀门被逐渐拧紧，甚至面临彻底切断的风险。当时的舆论场充斥着一种恐慌情绪，各大投行的分析师、能源专家甚至政治家们都在警告，欧洲的天然气的需求是高度刚性的，一旦供应中断，工厂将大规模倒闭，家庭将在寒冬中瑟瑟发抖，欧洲经济将面临类似心脏骤停的打击。

这种恐慌并非杞人忧天。过去几十年里，欧洲构建了一套建立在廉价俄罗斯管道天然气基础上的生活和工业体系，天然气不仅用来烧水做饭，更是化工产业的原料，是发电厂的燃料，是千家万户取暖的生命线。按照这个逻辑，欧洲对天然气的需求应该近似于一条死硬的直线，面对供应短缺，唯一的结局就是价格飙升到天际，直到买光市场上最后一立方米气为止。

” 按照传统直觉，能源需求就像一块坚硬的磐石，
无论价格风吹雨打，它都纹丝不动。

然而，事实给了所有人一个巨大的惊叹号。一年之后，国际能源署（IEA）发布了复盘数据，2022年欧盟的天然气需求量非但没有维持“刚性”，反而出现了一种断崖式的下跌，全年用气量骤降了**550亿立方米**，降幅高达**13%**。这个下降的量，足够供应超过4000万户欧洲家庭整整一年的用气，是欧盟历史上创纪录的最大降幅。

更让人大跌眼镜的是，尽管天然气用量暴跌了13%，欧洲的经济并没有崩溃，工业产出也没有像预言那样腰斩，虽然痛苦确实存在，但整个社会依然在运转，工厂依然在出货，老百姓也没有大面积冻伤。

那个我们以为坚不可摧、绝对不能少的“刚需”，怎么突然间就凭空消失了13%？这550亿立方米的缺口，是被谁填补了？又是怎么被填补的？

” 短期来看，我们或许是现有能源系统的人质；
但只要给点时间，
我们都是充满智慧的破局者。

§ 2 阿尔钦的定律·需求第二定律

要解释这个现象，我们必须再次请出传奇经济学家 **阿门·阿尔钦**（Armen Alchian）。早在 1964 年，阿尔钦和他的同事威廉·艾伦（William Allen）在那本经典的《大学经济学》（University Economics）中，提出了一个极具洞察力的观点，后来被学界称为**需求第二定律**。

大多数人只知道“需求第一定律”，也就是价格上升，需求量下降。但阿尔钦敏锐地发现，这个定律里少了一个关键变量，那就是**时间**。阿尔钦指出，**需求对价格的弹性，会随着时间的推移而变大**。

当价格发生变化时，你在第一天做出的反应，和你在第一百天做出的反应，是截然不同的。时间越长，你寻找替代品的能力就越强，你的办法就越多，你的“刚需”就越不刚。为什么会有这种区别？**核心在于约束条件的变化**。

” 为了把这个道理讲透，
我们还需要引入**莱夫·约翰森**的“油灰—陶土模型”。

诺贝尔经济学奖得主、挪威经济学家莱夫·约翰森（Leif Johansen）在1959年提出的**油灰—陶土模型**（Putty-Clay Model），精妙地刻画了时间的作用。资本和技术的选择，在投资发生之前，就像油灰（Putty），是软的，可以随意塑形，你可以选择烧煤的锅炉，也可以选择烧气的，甚至可以选择用电的。但一旦投资完成，设备安装到位，资本就变成了陶土（Clay），硬化了，定型了，再想改变就很不容易。

短期 · 陶土状态

被硬化资产锁定

燃气锅炉刚装好，拆了要钱，改造也要钱，你被过往的沉没成本锁在天然气这棵树上，只能做“行为弹性”，调低室温、穿厚毛衣、缩短洗澡。

长期 · 油灰状态

重塑约束条件

设备到了寿命终点，或气价高到“长痛不如短痛”，你把锅炉拆了换成空气源热泵，从天然气用户变成电力用户，这是结构弹性。

IEA 的数据显示，2022 年欧洲家庭平均把智能温控器的设定温度下调了 0.6°C，同时全年安装了约 280 万台热泵。前者是行为弹性，后者是结构弹性，**时间**把坚硬的陶土，重新变回了柔软的油灰。

§ 3 希克斯的预言 · 诱致性创新

1972年诺贝尔奖得主约翰·希克斯（John Hicks）早在1932年的著作《工资理论》（The Theory of Wages）中，就提出了**诱致性创新**理论。希克斯认为，生产要素相对价格的变化，本身就是一种激励，它会诱导企业去发明或采用新的技术，以节省那种变得昂贵的要素。通俗点说，**贵，就是创新的发令枪**。

2022年，欧洲工业用气量减少了近四分之一（约25%），但奇迹出现了，欧洲的工业产值仅下降了约8%左右。用气少了25%，活儿却只少干了8%，这中间巨大的缺口是怎么填上的？企业展现出了惊人的替代能力，这种替代分成了三个层次。

01 燃料替代，原本烧天然气的锅炉改烧燃油，还有一部分企业转向了现代化的生物质颗粒燃料，它们不仅能提供稳定的热能，还被视为清洁能源。这是物理层面的直接切换。

02 工艺优化与效率提升，以前气价便宜时，管道漏气没人管，废热直接排掉；气价一涨，阀门被拧紧，余热回收装置被装上，这种由价格逼出来的效率提升往往是永久性的。

03 产业链的空间重构，这是最高级的智慧，以德国巴斯夫（BASF）为例，当欧洲气价暴涨时，它们停止在欧洲本土生产氨，改为直接从美国或中东进口液氨，把高能耗的中间环节外包出去。

以巴斯夫的空间重构为例，逻辑转换非常精妙。以前，我买天然气，自己造氨，再造化肥；现在，我直接买氨，再造化肥。对巴斯夫的最终产品（化肥、胶水）来说，产出并没有大幅减少，市场份额保住了。但对欧洲的天然气账单来说，生产氨的那部分巨大需求彻底**消失**了。这就是能源强度的全球外包。

欧洲把高能耗的中间环节，外包给了能源更便宜的国家（比如拥有廉价页岩气的美国），从全球来看，能源消耗总量可能没变，只是从欧洲转移到了美国，但对欧洲局部市场而言，这部分所谓的“刚性需求”被连根拔起。

这给我们一个巨大的启示，如果你只盯着欧洲看，天然气是制氨的刚需；但如果你盯着全球看，欧洲的天然气就不是刚需，因为氨本身是可以流动的。

” 所谓的“刚需”，
往往只是你视野不够宽时产生的错觉。
只要贸易是自由的，本地的资源限制就无法长期锁住全球的生产力。

§ 4 杰文斯的「既往不咎」

讲到这里，我们需要回过头来审视一个幽灵，一个在短期内把我们变成“人质”的幽灵，**沉没成本**。为什么我们在短期内换不了锅炉？因为我们之前的钱已经花出去了。早在 1871 年，边际革命的先驱、英国经济学家威廉·斯坦利·杰文斯（William Stanley Jevons）在他的巨著《政治经济学理论》中，就写下了一句振聋发聩的名言，“**既往之事，已如覆水**”（Bygones are forever bygones）。

杰文斯告诉我们，在做决策时，此时此刻之前发生的一切成本、投入、努力，都应该被视为“泼出去的水”，不应干扰当下的决定，决策只应该基于当下对未来的预期。然而理论是丰满的，现实是骨感的，在物理世界里，沉没成本往往表现为一种资产专用性，那台燃气锅炉除了烧气什么都干不了，这种物理锁定导致我们在短期内不得不忍受高气价。但这恰恰反证了长期弹性的必然性，一旦设备到了寿命终点，物理锁定解除，杰文斯的理论之光就会瞬间照进现实。

” 既往之事，已如覆水；
决策只应该基于 *当下对未来的预期*。

把这套理论投射到日常判断中，我们常犯的三个认知误区都可以被粉碎。

误区 · 一

"需求预测就是画直线"

有人认为，过去十年用电增长 5%，所以未来十年也增长 5%。这种线性外推最大的错误，就是忽略了希克斯的诱致性创新和阿尔钦的时间弹性。一旦价格信号改变，技术路线和消费行为都会发生偏转，我们应该**避免用静态的眼光，去度量动态的人性**。

误区 · 二

"涨价会杀死制造业"

涨价在短期内确实会有需求上的破坏，正如欧洲部分高耗能产能的永久关闭，但长期看，高价是进化器，它筛掉了低效产能，留下了那些能像巴斯夫一样进行全球资源配置的强者。

误区 · 三

"只要价格跌回来，一切都会照旧"

这叫**棘轮效应**（Ratchet Effect），由美国经济学家詹姆斯·杜森贝里在 1949 年提出。那些在 2022 年花大价钱装了热泵、建立了全球液氨供应链的企业，会在气价下跌后重新装回燃气锅炉吗？很难。即使价格回落，新设备已经安装、新供应链已经磨合，那些被替代掉的需求，**大概率很难再自动回到从前的水平**。

§ 5 从电动车到碳中和

这套逻辑不仅适用于欧洲的天然气，也适用于我们身边的每一个角落。回想十年前，大家怎么看电动车？"续航短、充电难、也就是个大号玩具"，那时候燃油车是绝对的刚需，是家庭出行的唯一选择。但随着电池技术的进步（供给侧变化）和油价的几次波动（价格信号），临界点被突破了。

现在的网约车司机，如果你让他开燃油车跑单，他会跟你急，因为在每天几百公里的里程下，电车的成本优势构成了新的"刚需"。更有趣的是，一旦一个人习惯了在家里充电、习惯了电机起步的平顺，即便油价跌回 5 块钱，他也很难再换回燃油车了。这就是结构性改变带来的**需求锁定**。

” 过去的"刚需",
在下一轮结构性变革面前,
也不过是一次性的锚。

为什么以阿瑟·庇古（Arthur Pigou, 1920年《福利经济学》作者）为代表的经济学家普遍推崇碳税或碳交易，而不是直接下行政命令禁止排放？因为碳税本质上是给全社会发出的一个长期价格信号。政府不需要知道哪家工厂应该关门，也不需要知道哪种技术是未来的方向，只需要把碳的价格加上去，然后交给**时间**。

第一年，企业可能会骂娘，会交钱买排放权，这叫短期刚性；第三年，企业会开始改造设备，优化流程，这叫中期调整；第十年，整个产业结构会发生翻天覆地的变化，原本高碳的行业可能彻底消失，或者变成了低碳行业，这叫长期结构性变革。

通过价格信号，利用长期的需求弹性来解决问题，远比一刀切的行政命令要平滑得多，也高效得多。

” 政府只需要把**碳**的价格加上去，
然后把剩下的，交给**时间**。

§ 6 给世界一点时间

所谓的"刚需"其实是一个伪命题，或者说，它只是一个被时间限定了范围的命题。在极短的时间内，如果你没有准备，一切都是刚需，市场就会呈现出狰狞的面目，比如价格暴涨或者短缺限电。但在长期的河流中，很少有什么是绝对不可替代的，人类之所以能繁衍至今，靠的不是死守某一种资源，而是不断地寻找替代品。

煤炭不够了？我们挖石油。石油太贵了？我们搞天然气。化石能源的大量使用影响人类的生存环境了？我们捕获太阳和风。**资源是稀缺的，但人类利用资源的方式是无穷的。**

作为能源行业的从业者或观察者，我们必须时刻保持这种动态的视角，分清"行为"与"结构"（看到用量下降，要问是大家在挨冻，还是大家换了设备），敬畏"时间"的力量（永远不要说"这个行业离不开XXX"），理解"过往"的束缚（转型之所以难，往往不是因为新技术不好，而是因为旧的资产还在那里）。

这就引出了一个非常关键也非常痛苦的问题，既然长期看我们都能成为破局者，为何短期内还是会那么痛苦？阻碍我们拥抱未来的，从来不是**对未来的无知**，而是我们不知道该如何为"现在"与"未来"**定价**，这正是下一讲要清算的账本。

” 给世界一点时间，
没有什么是绝对的刚需；
而正是在那段时间里，
人类完成了对自己的重新定义。

C O D A · 终曲



给世界一点时间，
没有什么是绝对的 **刚需**。

Given time, no need is ever truly rigid.



LECTURE 06 · END

MESON · 9D

EXERCISE · 思考题

一夜之间，50 元的「地球税」

假设从明天开始，为了应对极端气候变化，全球达成一致，宣布每升汽油强制征收 50 元人民币的"地球税"，也就是说，油价一夜之间从 8 元涨到了 58 元。面对这样一条新闻，你的生活和城市会发生怎样的连锁反应？

方案 · A

先贵·后省·结构替代

电动车 + 家充

购置成本略高，但每公里成本极低，且几乎不再受油价波动影响。十年时间足以让一座城市完成出行网络的换血。

方案 · B

先省·后贵·沿用旧系统

燃油车 + 加油站

购置便宜，但每公里的使用成本随着"地球税"一夜翻了七倍。十年累计下来，账面损失远超过购车差价。

Q01

第一周，你的生活会有什么变化？（提示，想想你的行为弹性）

Q02

第十年，你所在的城市会发生什么变化？（提示，想想结构弹性，比如满大街的电动车）

Q03

为什么我们明知道方案 A 长期更划算，却在没有这根"税收鞭子"的时候，仍然选择方案 B？这笔关于"时间"的账本，我们下一讲再清算。

第七讲

VII.

贴现率，决定新能源 项目的「生死劫」

贴现率是连接“现在”与“未来”的汇率。它冷酷无情，因为它严谨地反映了我们内心对未来的真实估值；它又充满温情，因为每一次人为地降低它，都代表着我们愿意为一个更长远的愿景，牺牲当下的享乐。

第七讲 铁律

第七讲

如何给"未来"定价？

斩断了"过去"的纠结之后，投资决策中另一个更棘手、也更具决定性的问题浮出水面，如何给"未来"定价？

在 上一讲，我们通过沉没成本的概念，学会了对"过去"保持一种理性的冷酷，不管之前砸进去多少真金白银，只要它不再产生效益，就应当被视为零。斩断了对"过去"的纠结，今天我们要面对投资决策中另一个更棘手、也更具决定性的问题，如何给"未来"定价？

我们通常认为，决定能源转型能否成功的关键是技术，是太阳能板效率够不够高、电池储能强不强。但经济学视角告诉我们，真正的主宰者是**时间**。你对未来的耐心程度，决定了你会看见一个什么样的能源世界。

” 这个衡量耐心的指标，在金融学里叫「**贴现率**」；
在经济学的底层逻辑里，它是**时间的标价**。

§ 1 时间是一台「缩小镜」

不妨先做个思想实验，如果在“现在的 100 元现金”和“一张一年后兑现的 100 元支票”之间二选一，你会选哪个？绝大多数人都会毫不犹豫地选择前者，因为理性的判断告诉我们，一年后的承诺充满了不确定性，也许支付方破产了，也许通货膨胀让钱不值钱了，或者仅仅是因为你现在的急需。这种不想等待的心理，经济学家欧文·费雪在《利息理论》中称之为不耐（Impatience）。

想象你手里拿着一架望远镜，当你用它看远处的风景时，物体会变大。但贴现率这架“望远镜”是倒着拿的，你看得越远，东西就越小。

贴 现 率 · 5%

温和缩小

明年的 1 元，今天值 0.95 元；30 年后的 1 元，今天值 0.23 元。远期价值仍有分量。

贴 现 率 · 10%

急速缩小

明年的 1 元，今天值 0.91 元；30 年后的 1 元，今天只剩 0.06 元。远期收益近乎消失。

光伏、风电等清洁能源项目是典型的"重资产、长周期"生意。它们要求你在发令枪响时就砸下巨额资金（CAPEX，资本性支出），然后在此后 25 到 30 年的漫长岁月里，靠着每天卖电的收入积少成多。当贴现率飙升时，这种现金流模式的脆弱性就暴露无遗，那些要在第 15 年、第 20 年才能兑现的远期收益，被高昂的资金成本无情折价，导致未来赚回来的钱加总起来，都无法填平今天的初始投入。

把视角拉回微观，同样的逻辑也支配着我们每个人的生活，这就是经济学中著名的**能效悖论**（也被称为"能效缺口"）。一级能效的变频空调比三级能效的贵 1500 元，但每年能省 500 元电费，按理性计算 3 年就能回本，之后全是赚的，回报率高达 33%。但在现实中，极其庞大的人群（特别是低收入群体）会毫不犹豫地选择便宜的那款。

在手头拮据、房租还没着落的人眼中，"今天少掏 1500 元"的效用，高于"未来每年省 500 元电费"的远期回报，活在当下的压力迫使他们放弃了未来的收益，这种状态体现了**极高的个人贴现率**。

这种逻辑同样解释了部分发展中国家以及不发达国家依赖廉价煤炭的现状，**生存成本的高昂让这些国家的时间变得昂贵**，于是出于环保的选择被延后了。

” 贴现率越高，未来的价值在今天看来就越微不足道；
在能源投资的视角下，
这个"缩小倍数"往往就是一道生死线。

§ 2 给耐心定价 · WACC 的面馆模型

你可能会问，这个决定未来的贴现率，在商业世界里到底是谁定的？它背后有一个专业的金融指标，叫 WACC（Weighted Average Cost of Capital，加权平均资本成本）。为了便于理解，可以用一个简单的“面馆模型”来拆解它。想象你要开一家面馆，需要 100 万启动资金，这笔钱通常来自两个方面。

来源 · 第一类

借来的钱 债务成本

你向银行贷了 70 万，利息 3%。这 3% 是你必须付的硬成本，不管面馆赚不赚钱，这笔利息雷打不动。

来源 · 第二类

自己的钱 股权成本

你掏了 30 万，你可能会觉得这钱是自己的，没有成本。大错特错，经济学告诉你，如果这 30 万不投面馆，你可以去买理财赚 4%，或者投隔壁奶茶店赚 10%。这个**机会成本**，就是你的股权成本。

WACC 就是把债务成本和股权资本要求的回报，按照资本结构加权平均后的结果。如果一个项目的 WACC 算出来是 6%，那么这个项目的内部收益率（IRR）能不能跑赢这 6%？如果跑不赢，从金融逻辑上说，这笔钱就没有被高效使用。

在能源行业，WACC 就是那把决定生死的尺子，而不同身份的玩家手里握着的尺子长度不同。

国有 · 公有制企业

WACC 6% – 8%

作为国家队信用评级高，银行抢着借钱，利息低；股权回报要求相对稳定，往往还有社会责任考量。

非公有制企业

WACC 10% – 20%

银行觉得风险大，贷款利息高；投资人要求的回报率高，可能要到 20%，整体资本成本远高于国有主体。

” 同样的太阳，同样的风，同样的设备，
在 WACC 8% 的央企眼里是金矿，
在 WACC 10% 的民企眼里可能是一片废土。

§ 3 能源世界的「房东」与「租客」

如果把视角拉大，你会发现，整个人类能源转型的历史，本质上是从**租客模式**向**房东模式**的切换，这种切换让能源行业患上了一种严重的“利率敏感症”。

传统的火电（煤电、气电）可以看作是“租房”。相对于发出的电量，建一个燃气电厂挺“便宜”的，设备不算太贵，但它后续的运行非常贵，你每天都要买煤炭或者天然气，这就像你租房子，每个月都要交高昂的房租（燃料成本）。对这种租房模式，你对贴现率是不太敏感的，因为大笔支出分摊在未来的每一天，未来的钱本来就贬值了，你晚付反而划算。

风能、太阳能、水电、核电则是典型的**买房**。太阳光和风是免费的，水流是大自然的赠礼，核燃料在总成本中占比也很低。这些能源的特点是，一旦建成并不需要付房租（燃料费接近于零），然而在入住之前，你需要支付一笔巨大的购房款（也就是建设工程款）。

” 能源转型一个容易被忽视的结构性变化，
系统在很大程度上正从**高运营成本**向**高资本成本**迁移。

在这个买房模式下，贴现率（或者说资金成本）就成了生杀予夺的关键指标。2023年7月，瑞典能源巨头 Vattenfall 大瀑布电力公司宣布，停止按原方案推进位于英国诺福克海岸的海上风电项目 Norfolk Boreas，并暂不作出投资决定。这个装机约 1.4 吉瓦的项目此前已获得英国差价合约（CfD），官方口径称其可满足约 150 万户英国家庭用电，Vattenfall 也因此确认了约 55 亿瑞典克朗的减值与拨备。

真正改写这个项目财务模型的，不是“风不够大”，而是通胀、供应链压力和更高的资本成本。自项目立项以来，全球通胀推高了风机和钢材的价格，导致建设成本暴涨；为了对抗通胀，各国央行加息，企业融资的利息也变贵了。在大瀑布电力公司的财务模型里，未来的电费收入看起来还是那么多，但在更高的利息面前，这些“未来的钱”折算到现在，变得不值钱了。

原本有利可图的绿色梦想，变成了一个财务黑洞。资金成本的上升直接锁死了项目的财务可行性，风能资源以及技术水平在沉重的首付压力面前失去了原有的支撑作用。

” 一旦进入“买房模式”，
贴现率就变成了那把生杀予夺的尺子。

§ 4 谁的耐心更值钱？

明白了上述原理，我们再回看中国能源市场，就会发现一个经常被忽视的“中国优势”。在中国，大型水电、核电、深远海风电这类回收期极长的超级工程，总体上以央企和其他国资主体为主，尤其在核电和大型海上风电领域，这一点更为明显。这既和行政准入、监管安排有关，也和资金成本有关。

中国的大型央企，某种程度上扮演了**全社会最耐心资本**的角色，得益于国家信用的背书，它们能够以低廉的利率从银行获得贷款，或者发行债券。

为了推动绿色转型，人民银行在 2021 年 11 月推出了**碳减排支持工具**，采取“先贷后借”的机制，对金融机构发放的符合条件的碳减排贷款，按贷款本金的 60% 提供资金支持，利率最初为 1.75%（2026 年 1 月又从 1.5% 下调至 1.25%），期限 1 年、可展期两次。这一工具直接压低了金融机构的资金成本，并通过贷款利率传导，间接降低了绿色项目的融资成本和 WACC，相当于给绿色投资注入了**更低成本、更有耐心**的资金。

” 在中国能源转型的棋盘上，
最耐心的资本握有的是**最长的那把尺子**。

低成本资金通道使得中国的央企能够佩戴上一副"倍数很小"的倒持望远镜。在纯粹的市场逻辑下，一个要回本 12 年的海上风电项目，如果按照 8% 的商业贷款利率计算，可能净现值（NPV）是负的，属于垃圾资产；而在优惠的政策资金加持下，折现率降低，未来的现金流"变大"了，它变成了优质资产。

反观英国的欣克利角 C 核电站（Hinkley Point C），这个由法国电力主导、中广核曾参股的项目，它的差价合约（CfD）中的执行价，以 2012 年价格计为每兆瓦时 92.5 英镑的天价，并随通胀调整。欣克利角 C 之所以昂贵，核心逻辑确实在于"时间"，核电项目建设周期往往超过十年，而该项目的现实工期已经被拖得更长；在漫长建设期里，融资成本不断累积，资本市场要求的风险溢价又很高，部分行业资料甚至指出，在这类项目中，资本成本大约占整体成本的三分之二。

” 你以为自己是在为原子核裂变产生的能量付费，
实际上相当大一部分支出，
是在为资本对长期不确定性的恐惧买单。

§ 5 廉价资金的时代终结

然而，故事并没有结束，天下没有免费的午餐，也没有永远廉价的资金。过去十多年里，欧美等主要发达经济体经历了一段罕见的超低利率时期，欧元区在部分年份甚至实行过负利率。那是一段对新能源尤其友好的融资环境，钱太便宜了，贴现率太低了，资本自然愿意涌向那些回报发生在未来的风电场和光伏站。

但是那个时代似乎正在结束。随着通胀的回归和地缘政治的动荡，全球主要经济体（特别是欧美）的利率水平大幅回升，这对于极度依赖廉价资金的能源转型来说，无疑是一次**精准打击**。瑞典大瀑布电力公司百亿风电项目的猝死，仅仅是这场风暴的冰山一角，挪威能源巨头 Equinor 与 BP 合作的纽约 Empire Wind 海上风电的变局，把贴现率的生杀大权展现得淋漓尽致。

2024 年初，海上的风还是那么吹，资本市场的风向彻底变了，纽约的 Empire Wind 2 项目不得不终止了原有的购电协议。为什么？因为在这个典型的买房模式里，通胀把设备和施工的首付推上了天，同时高企的融资成本又把沉重的利息，硬生生地塞进了未来的每一笔现金流里。当资金成本飙升，旧的财务模型就彻底失去了成立的前提，同一片海域，在更高的资本成本面前，原本的估值瞬间失效，这时候如果强行推进，就是**灾难**。

所以，Equinor 与 BP 宁可舍弃前期投入，也要与纽约州结束旧合同，最终支付给纽约的巨额履约保证金，就是我们在上一讲学过的，对“沉没成本”进行理性的斩断。然而，一旦打破旧合同的死局，重新对齐资金的耐心，生意照样可以做。这不，紧接着同一片海域的 Empire Wind 1 项目，就在新的合同框架下继续推进了。只要电价重新谈，未来的预期收益能覆盖飙升的资金成本，项目就又回到了财务可行的轨道上。这来回的进退之间，没有任何情绪，全是资本在利用贴现率给未来无情地重新定价。

这些大洋彼岸的算计，也给我国的能源战略提了个响亮的醒。虽然我们拥有举世无双的制造能力，硬是把光伏板和风机的物理成本降到了极低，但我们绝不能因此就忽视了金融成本的波动，只要还在玩“买房模式”，贴现率就永远能瞬间改变游戏规则。

由此，我们也可以说，降低全社会的融资成本，建立绿色金融的低利率通道，其重要性并不亚于研发一种更高效率的发电技术。

” 在这场没有情绪的资金博弈里，
降低融资成本本身，
就和提升发电效率同样重要。

§ 6 耐心的最终定价 · 斯特恩之争

我们要从商业计算上升到伦理高度，贴现率决定项目生死，也决定了我们对子孙后代的命运，这就是气候变化经济学中著名的**斯特恩之争**。2006年，前世界银行首席经济学家尼古拉斯·斯特恩（Nicholas Stern）发布了著名的《斯特恩报告》，其标志性结论之一是，为了避免气候变化最坏的后果，人类现在付出的减排成本，大致可以控制在全球 GDP 的 1% 左右。

真正让经济学界炸锅的，不只是这个结论，而是他采用的贴现参数。斯特恩把“纯时间偏好率”压到了约 0.1%，并在此基础上导出了约 **1.4%** 的社会贴现率；而诺贝尔经济学奖获得者诺德豪斯等经济学家，更偏市场取向的模型，常使用大约 **4% 到 4.3%** 的消费贴现率。

诺德豪斯 · 4%

市场取向

假设 100 年后灾难损失 100 万亿美元，折现到今天仅约 1.98 万亿美元，当下的减排就显得不划算，让未来的人自己解决吧。

斯特恩 · 1.4%

伦理取向

同样 100 万亿美元的损失，折现到今天约 24.9 万亿美元，当下的痛苦感瞬间放大了十几倍，逼迫我们必须行动。

斯特恩的逻辑是伦理层面的，如果你使用高贴现率，实际上是在说，未来出生的人，他们的命没有我们值钱。他认为，一个出生在 2100 年的孩子，应当拥有和我们一样的生存权，如果人人生而平等，那么代际之间也应当平等，时间不应当成为歧视的理由，所以纯时间偏好应该接近于零。

反对方则认为，如果现在的贴现率定得太低，意味着这一代人要勒紧裤腰带过苦日子，去补贴未来概率比我们更富裕的子孙，这公平吗？把钱留给子孙自己去投资，也许回报率比现在更高。这场争论没有标准答案，它深刻地揭示了能源转型的伦理困境。

我们今天在电费里多交的每一分"可再生能源附加费"，本质上都是我们在压低自己的社会贴现率，强迫自己变得更有耐心，以便给未来的子孙后代留出空间。

回到这一讲的主题，我们从瑞典大瀑布电力公司在英国风电场的撤资出发，拆解了 WACC 的计算公式，剖析了"买房"与"租房"的能源模式，最后上升到了对待子孙后代的道德伦理；**所有的这一切，都汇聚在"贴现率"这一个小小的百分数里。**

下次当你看到一座巨大的风车在远方缓缓转动时，希望你能读懂它背后的含义，那既是凝聚科技的钢铁和叶片，也是凝固的**耐心**和跨越代际的期许。

” 贴现率是连接*现在与未来*的汇率，
它既冷酷，也温情；
每一次人为地降低它，都代表着我们愿意为更长远的
愿景，
牺牲当下的享乐。

C O D A · 终曲



贴现率是连接现在与未来的汇率，
也是 **耐心**的标价。

Patience is the ultimate currency of tomorrow.



LECTURE 07 · END

MESON · 9D

EXERCISE · 思考题

「永续电站」的道德按钮

假设你是一个能源政策的制定者。现在有一种黑科技，我们姑且叫它“永续电站”，它极其昂贵，建设需要 50 年，但一旦建成，可以供人类免费使用一万年。作为政策制定者，你会动用国家力量（强制低贴现率）来强行上马这个项目吗？

按钮 · A

强制低贴现率

当代重税 · 子孙
受益

向当代人征收重税让他们过苦日子，以换取他们不一定能看到的那个“天堂”。在道德上，这是否正义？

按钮 · B

按市场贴现率

当代轻松 · 未来
再议

让未来比我们更富裕的子孙自己去投资，或许他们的技术更先进、回报率更高，代际之间不必由当代人硬扛。

Q01

你会在哪里划定那条“牺牲当下、成全未来”的界线？代际公平是一种天赋的伦理，还是一种可以谈判的契约？

Q02

如果当代人行使贴现率来“折价”未来的灾难，那么谁代表了未出生者的利益来谈判？

Q03

这既是一笔经济账，也是一笔政治账。如果是你，你会如何按下那个决定命运的按钮？

第八讲

VIII.

能源的世界里， 恐惧也有价格

如果说贴现率是耐心的价格，那么本讲要探讨的，正是“恐惧的价格”。风险既不会凭空创造，也不会被彻底消灭，它只能在不同主体之间被重新分配。

第八讲 铁律

第八讲

恐惧，也有自己的标价

阻碍耐心的，还有一种更为现实的力量，那就是不确定性。风险溢价，往往是决定能源等重资产项目成败的另一只看不见的手。

在 上一讲，我们透过“贴现率”这个视角，看到了“耐心”在商业世界里的巨大价值。我们明白了，如果我们对未来有足够的信心，那么时间就是我们的朋友，我们愿意为了明天的长期收益而放弃当下的短期利益。

然而，现实的商业环境往往比理论模型更为复杂。阻碍耐心的，还有一种更为现实的力量，那就是**不确定性**。当投资者表示“不愿意等待”时，往往绝非出于短视，而可能是源于对未知的恐惧，他们担忧未来的承诺无法兑现，担忧项目烂尾，担忧政策调整，担忧市场崩盘。这种恐惧，在金融与经济学领域有一个更专业的统称，即**风险**。

” 如果说贴现率是耐心的价格，
那么本讲我们要探讨的，
正是「**恐惧的价格**」，
它往往是决定能源等重资产项目成败的另一只看不见的手。

§ 1 丹麦养老金的「慢钱」逻辑

我们将目光投向北欧的哥本哈根，剖析现代能源史上最成功的一次商业转型背后的资本逻辑。这个故事的主角，是曾经的"黑色巨人"，也就是丹麦国家能源公司（DONG Energy，即现在的 Ørsted 沃旭能源）。时间回到 2010 年前后，DONG Energy 正面临一个巨大的困境，他们决心从一家依赖煤炭和石油的传统能源公司，转型为全球最大的海上风电开发商，但他们最大的挑战在于巨大的资金缺口。

建设海上风电场属于极重资产投资，一个大型风电场的造价往往高达数十亿欧元，而且投资回收期极其漫长，往往需要 15 年甚至 20 年。对于一家上市公司来说，如果大量资金都被这些"回本慢"的重资产锁死，财务报表将承受巨大压力，股价可能大幅下挫，后续项目也会面临资金断裂。按照常规商业逻辑，这似乎陷入了难以破解的困局，试问谁会愿意在一个回收期长达 20 年的项目中沉淀巨额资金呢？

” 然而 DONG Energy 并没有被"回本慢"困住，
而是把海上风电项目拆成两段。

前端是许可、设计与施工，具有风险高、现金流不稳定的风险特征；后端是并网后的运营，现金流稳定、久期很长。围绕这两段，他们系统化运用了一套后来被行业称为**资产轮转**（asset rotation，也常被称为 farm-down）的做法，开发商在前端承担关键的不确定性，把项目推进到并网等里程碑；当工程与技术风险被大幅压缩后，再向长期资金出让部分股权，让更偏好确定性的资金接手运营期现金流。

那么由谁来接手呢？不是要求极短投资回收期的风险投资机构（VC），也不是追求绝对高增长的私募股权投资基金（PE），而是资本市场中风险偏好更低、追求稳健收益的机构，**养老基金**。2011年，在丹麦 Anholt 海上风电项目这一标志性交易中，PensionDanmark 与 PKA 两家大型养老基金以约 60 亿丹麦克朗的对价，取得了该项目 50% 的权益。

这在当时引发了业界的广泛关注，这类并网后现金流相对稳定的海上风电资产，通常并不以“高回报”取胜，而更像是单个位数回报的长期配置。在习惯了赚快钱的市场看来，这种回报周期显得过于漫长，但这场交易的双方都认为自己获得了极大的商业利益。

对 DONG Energy 来说，他们通过出让部分股权，快速回笼了巨额资金。他们放弃了未来 20 年的长期现金流，换取了当下的流动性，用于滚动开发下一个风电项目。通过这种“轻资产化”的轮转，他们大幅提升了资金周转率，迅速确立了全球海上风电的霸主地位。

对养老基金来说，这却是难得的机遇。养老基金的资金性质非常特殊，它们背负着未来几十年给退休人员发放养老金的**长久期负债约束**，最怕的不是“收益低”，而是“本金亏损”和“净值波动”。而这个已经建成并网的海上风电场，拥有政府承诺的长期补贴电价，并锁定了长达 15 年的长期运维（O&M）合同，它就像一项底层资产极度优质的**类固定收益产品**，虽然收益率有限，但现金流极其稳定，对于养老基金而言，“确定性”本身就是最大的溢价。

开 发 商 · DONG ENERGY

高风险 · 快进快出

承担建设期工程风险与技术不确定性，要求 15% 甚至更高的项目回报率，通过出让并网后股权快速回笼资金。

养 老 基 金 · PENSION DANMARK

低风险 · 细水长流

承接运营风险、享受并网后确定性现金流，心满意足地接受个位数左右的回报，追求稳健的资产保值。

” 在成熟的资本市场中，能够容忍超长投资回收期的底层资产，往往具备**极高的现金流安全性**；反之，被要求两三年内必须回本的项目，恰恰反映出资本对其底层风险的**极度担忧**。

§ 2 耐心的价格与恐惧的溢价

由丹麦的案例，我们可以清楚地看到，我们在之前章节讨论的是"物"的成本，那么这一讲我们要讨论的，是"心理"的成本。什么叫心理成本？就是你的耐心和避险情绪值多少钱。我们必须对这两个概念进行抽丝剥茧般的层层剖析。

试想一下，如果你的好朋友，一位有着十多年稳定工作、从无违约记录的体制内员工，找你借 10 万块钱装修房子，承诺一年后偿还，不谈出于友情的完全免息的情况，你可能也只会要求极低的利息，这就是你出让资金流动性所获得的补偿，在金融学中常用**无风险利率**（Risk-Free Rate）来近似刻画，这即是资金纯粹的时间价值。

但是，如果是一个常年没有稳定工作、且宣称要去参与高风险投机项目的朋友找你借 10 万块，同样承诺一年后还，你会收多少利息？3%？绝对不可能！你可能会要求 30%，甚至 50%。因为你充满疑虑，你不知道他明年是否具备偿债能力，你不知道他的高风险项目能否如期兑现利润，你更担心产生坏账。为了对抗这种巨大的不确定性，你必须要求极高的回报补偿，如果他不能承诺短期内回本、半年翻倍，你根本不敢将资金贷出。

这正是问题的关键所在，资本要求的高回报、短回收期，并非因为该标的更具投资价值，恰恰是因为其违约风险极高。这超出无风险利率的息差，即为**风险溢价**（Risk Premium），在债券和信贷市场中，这一利差通常被称为“信用利差”，这是市场对不确定性进行的**风险定价**。

我们再把视角拉回到能源行业。为什么同样是建设光伏电站，在不同国家与市场，资金成本会出现巨大落差？国际能源署（IEA）关于清洁能源转型资本成本的研究给出过一个直观对比，以公用事业级光伏项目为例，在欧洲、美国等成熟市场，新项目的名义税后加权平均资本成本（WACC）大致处在**2.6% 到 5.0%**的区间；而在印度，同类项目往往在**8.8% 到 10.0%**左右，风险更高的市场还可能更贵。

这并不是因为组件不同、光照不同，而是因为在信贷资本眼中，成熟市场主权信用更强、政策与电网更稳定、汇率与回款风险更可控；而部分新兴市场则存在产业政策变更、汇兑损失、终端电费拖欠等系统性风险，资金成本多出来的那几个百分点，本质上就是资本向不确定性收取的**风险补偿金**。这就引出了一个不容忽视的产业现实，技术成本并不是决定度电成本（LCOE）的唯一因素，风险溢价往往具有更强的决定性作用。即使光伏组件的硬件成本大幅下降，如果东道国的宏观风险溢价过高，清洁能源的综合成本依然居高不下。

” 在最终的上网电价中，
必须包含一大部分用来**安抚资本避险情绪**的对冲溢价。

§ 3 高风险项目的优质资产重组

既然底层风险决定了资本的回报要求，那么能源行业的超级工程，那些动辄投资几百亿的核电机组、跨海输电网络、大型海上风电场，是如何获得融资并建设运转的呢？要知道，这些重资产项目面临的风险错综复杂，建设期可能发生工程延误或超支（**完工风险**），投产后燃料价格可能剧烈震荡（**原材料风险**），并网后可能面临消纳困难（**市场风险**），甚至东道国政策可能突然变更（**政策风险**）。

如果将所有风险敞口全部暴露给股权投资人，资本必然会索取极度苛刻的回报率，若基础设施项目需满足 50% 的内部收益率，倒算出的电价将大幅攀升，没有任何工商业及终端居民用户能够承受。这就形成了一个难以化解的负面循环，由于底层风险过高，从而推高资金成本，导致终端电价失去竞争力，最终致使项目失去经济可行性而流产。

为了打破这一融资僵局，金融界运用了一套精妙的机制，它像是一场针对风险的“庖丁解牛”式的拆解。第一步操作，便是**风险隔离**。发起人（Sponsor）不会直接用母公司主体去承接数十上百亿的贷款，而是会注册成立一个专门的项目公司或特殊目的载体（SPV, Special Purpose Vehicle）。这个 SPV 在法律和财务上建立了严密的风险防火墙，若项目不幸发生实质性违约，债务的清偿仅以该 SPV 的资产和未来现金流为限，银团及债权人无法向上穿透追索至母公司的资产负债表，这在业内被称为“无追索权”或“有限追索权”项目融资。

但这仅是防守手段，化解风险的核心逻辑真正在于拆解底层风险，并将其剥离转移给最有能力管控该风险的参与主体。以一个典型的新建电站项目为例，我们来看看它如何通过契约网络进行结构化组装。

01 完工风险，首当其冲，谁最擅长工程建设与造价控制？工程总承包商。SPV 会与承包商签订一份固定总价的 EPC（设计采购施工总承包）合同，合同严格设定商业运行日，并明确约定，若未能在约定日期前并网发电，总承包商需承担巨额的误期损害赔偿金，借此完工延期和超支的风险被剥离。

02 技术与运行风险，谁最了解核心机组的性能？设备主机生产商。SPV 与设备商签订长期服务协议，明文规定若机组可用率不达标或出现严重故障，供应商须负责维修，并就停机造成的发电损失予以赔偿，技术缺陷导致的性能风险由此锁定在设备供应端。

03 燃料供应风险，谁最熟悉大宗商品周期的波动？上游矿企或气源方。SPV 与供应商签订长期燃料供应协议，原材料价格大幅波动的敞口由此被有效对冲或平抑。

通过上述底层风险的层层剥离与结构化缓释，原本高风险的开发项目，被重塑为一个具有底层现金流稳定、风险可控特征的优质基础设施资产，信贷资本的避险情绪得到极大安抚，债务融资的综合成本自然随之下降。金融机构在进行尽职调查时，只要确认这些核心商业合同形成了严密的逻辑闭环且具备法律约束力，便愿意提供长期的低息银团贷款。所以，当你看到一座现代化的电厂时，你看到的不仅仅是钢铁与混凝土的物理构造，更是一系列严密法律契约的集合体，正是这些合同机制，将无形的商业风险有效地**关进了制度的笼子**。

§ 4 PPA · 锁定未来的现金流

在所有的风险中，最令投资人担忧的，莫过于面临消纳困难或批发电价暴跌的情形，这是最为关键的市场风险敞口。为了消除这一最大痛点，电力市场诞生了一项具有基石意义的协议模式，即**购售电协议**（PPA, Power Purchase Agreement）。

谷歌（Google）或亚马逊（Amazon）这些科技巨头，为了给大规模的数据中心提供绿电支持，往往会签下巨额的长期 PPA。在这份协议里，买方企业承诺，在未来 10 年或 20 年的长周期内，无论现货市场电价如何剧烈波动，都将以一个固定的结算价格（比如 0.4 元/度）收购该电站发出的每一度绿色电力。

有了这份协议作为强力信用背书，投资人面临的**最大痛点**，即市场价格波动风险，被有效对冲，该底层资产从一个高度依赖现货电价的强周期生意，转变为具备稳定票息特征、资产久期长达 15 至 20 年的**类固定收益债券**。这就是为什么在成熟的电力市场中，同样是新能源项目，只要持有优质企业信用背书的 PPA，金融机构就愿意以极低的利率提供信贷支持，因为信审看重的并非发电设备硬件本身，而是那份锁定了未来长期现金流量的购电契约。

而一个典型的反面对照是美国德克萨斯州电力市场（ERCOT），该市场具有高度自由化的特征，许多独立发电商（IPP）在缺乏长期 PPA 锁定的情况下，直接将电量暴露在纯现货市场中，其后果便是**极端的收益波动**。在电能供大于求时，节点电价甚至跌至负值，电站面临严重亏损；而在遭遇极端天气（如 2021 年 2 月席卷全州的"乌里"极寒风暴）冲击电网系统平衡时，现货电价又可能瞬间飙升数百倍，甚至一度触及每兆瓦时 9000 美元的系统价格上限（前文有过叙述）。

这种剧烈的价格波动率，本身构成了极高的市场风险，在纯现货市场环境下，若要吸引资本投资新建电源装机，投资者必然会要求畸高的风险溢价作为补偿，除非市场机制能提供极具诱惑力的短期暴利预期，否则长线资本往往望而却步。

芝加哥经济学派的奠基人之一、经济学家弗兰克·奈特（Frank Knight）在其基于康奈尔大学博士论文并于 1921 年出版的著作《风险、不确定性与利润》中曾指出，利润本身就是对承担不确定性的风险补偿。奈特在这部学术著作中首次严格区分了可计算概率的**风险**与无法计算概率的**不确定性**，从而奠定了现代风险定价理论的基石。而在能源基础设施投资领域，核心逻辑恰好反其道而行之，产业资本通过 PPA 等结构化合同设计来消灭或转移不确定性，进而大幅压低必须支付给金融资本的"利润"（即加权融资成本），从而使巨额资本开支的基建项目在财务模型上具备可行性。

§ 5 照付不议的经济学逻辑

讲到这里，细心的专业读者可能会发现一个逻辑闭环上的漏洞。如果通过签订合同网络将风险都转移出去了，那真实的风险最终流向了哪里？难道凭空蒸发了吗？这引出了一个极具争议的话题。

我们来看一个真实的、发生在国际能源博弈桌上的案例，它涉及一种更为极致的能源行业惯例，即**照付不议**（Take-or-Pay）条款。故事的主角是印度最大液化天然气进口商 Petronet LNG，以及卡塔尔的天然气巨头 RasGas。早在 1999 年，那个全球能源需求进入新一轮扩张周期的前夜，为了缓解国内能源短缺的压力，印度决定大举引进海外天然气。

但是，将卡塔尔气田的天然气输送至印度终端，需要极其庞大且昂贵的跨国基础设施，卡塔尔本土需新建天然气液化设施，中游需定制专业的 LNG 远洋运输船，而印度本土则需投建大型接收站与气化终端，这是一笔动辄数十亿、甚至更高量级的重资产投入。卡塔尔作为上游供应商深知，万一巨额资本投入转化为固定资产后，印度突然因宏观需求疲软或现货价格下跌而违约拒收，这套庞大的跨国基建岂不成了巨大的沉没成本？这种极易被商业伙伴“套牢”的深层隐患，正是诺贝尔经济学奖得主奥利弗·威廉姆森（Oliver Williamson）在其 1985 年出版的名著《资本主义经济制度》中所系统阐述的**资产专用性风险**。

为了对冲这一巨大的风险，卡塔尔坚持在供气协议中嵌入一条不可妥协的核心条款，即“照付不议”规则。其核心约束条款在于，印度每年必须履行最低约定规模（如 750 万吨）的 LNG 采购义务，如果印度实际消纳能力不足，或者因现货价格走低不愿执行长协结算价，买方可以不提取实物天然气，但对应的合同货款必须按期足额支付。

果不其然，到了 2015 年，全球能源基本面发生剧变，原油及大宗商品价格暴跌，国际现货市场的 LNG 价格大幅跳水，而印度与卡塔尔签署的是挂钩高油价的长期协议，进口成本居高不下。印度进口商经测算后发现，按原合同价执行面临着严重的倒挂，将承受巨额的财务亏损。当时，印度 Petronet 单方面削减了提货计划，依据照付不议条款的法律约束力，卡塔尔 RasGas 随即开出了一张高达十多亿美元（约合近百亿人民币）的罚单，要求印度为未履约提货部分的款项进行赔付。

此举引发印度国内舆论的强烈反弹，诸多声音指责当时的谈判代表签署了严重损害国家利益的“**不平等条约**”。但若摒弃情绪化视角，运用契约经济学与风险定价的逻辑重新审视该案例，则会得出截然不同的结论。若缺乏照付不议的刚性约束，卡塔尔上游气源方所承担的市场消纳与价格崩盘风险将不可估量，为了对冲此类尾部风险敞口，供应商势必会在初始谈判时大幅提高合约气价，或者干脆从内部风控层面否决投建该重资产液化终端的提案。

印度当初接受该条款，本质上是在进行一次**跨期风险置换**，买方自愿承担远期的价格下行与国内需求不振风险，以此作为对价，换取卖方当期的巨额资本开支承诺以及国家能源的长期安全保供。在此商业逻辑下，该条款更像是买方为“国家能源供应安全”购买的一份保单。

2015 年底前后，双方最终重返谈判桌，一方面调整定价公式，使价格更贴近当时的市场环境；另一方面，Petronet 避免了立即支付十亿美元级别少提货责任的冲击，但需要在合同剩余期限内通过补提、补付等方式消化欠量，并额外签下新增约 1 百万吨/年的长期供气安排，使双方长期承诺上升到约 850 万吨/年的水平。这看似是国际商业博弈下的阶段性妥协，但其底层逻辑依然坚如磐石，**所有实质性的商业风险，最终都必须被准确定价并找到承担方。**

印度凭借高溢价锁定的不仅仅是物理形态的化石能源，更是国家宏观层面的“能源安全底线”，虽然后续大宗周期急速下行，事后验证这笔风险对冲的“保费”显得过于高昂，但从商业契约伦理上讲，我们不能因为“极端断供危机”最终并未发生，就反过来指责当初支付保费的决策毫无合理性。

” 该条款更像是买方为**国家能源供应安全**购买的一份保单；
所有实质性的商业风险，最终都必须被**准确定价并找到承担方**。

§ 6 风险重塑与主权信用赋能

现在，我们可以回答那个核心问题了，谁是谁那张复杂契约网络背后最终兜底风险的主体？在现代金融体系中，存在着某种意义上的**风险守恒定律**，这意味着风险既不会凭空创造，也不会被彻底消灭，它只能通过金融与制度设计，在不同交易主体与社会部门之间进行转移与重新分配。

当 DONG Energy 急于将处于运营期的海上风电资产溢价转让给养老基金时，它实质上是将远期的运维风险置换给了那些负债久期长达几十年的未来退休群体；当谷歌签署长期 PPA 绿电协议时，它是凭借自身雄厚的资产负债表与核心主业的超额盈利能力，替底层新能源项目扛下了批发电价剧烈波动的市场风险；当印度政府接受跨国长协的“照付不议”条款时，实质上是全印度的终端工业用户和居民家庭在分担未来气价倒挂的潜在沉默成本。

而在大量涉及公共利益与产业扶持的基础设施项目中，这个替项目分担巨额风险的关键“压舱石”，往往是隐形的**国家主权信用**。在享受标杆上网电价或政府财政补贴的新能源项目中，承诺未来 20 年保量保价全额收购的主体，表面上看是电网企业，穿透到底层，其实是广大的纳税人与全社会终端用户，是整个社会体系通过缴纳可再生能源电价附加或让渡财政税收，为这些早期绿色产业的艰难起步提供了主权级别的隐性担保。

因此，当你惊叹于我国的基础设施建设效率，或者羡慕某个重大工程超低的债务融资成本时，绝不能主观认定该项目的底层风险凭空消失了，而是因为我国的治理体系内，存在一套行之有效的机制，能够将特定重大项目的风险进行深度的**社会化或主权化**分担。宏观数据上所谓的“低成本资金”，本质上是我国“高主权信用”在产业投资端的直接货币化变现。

反之，在法治环境欠缺、契约精神匮乏的新兴市场国家，为何推进大型基建项目举步维艰？为何跨国赞助商要求的 PPA 结算电价居高不下（其中往往包含了极其高昂的国家主权风险溢价）？这是因为跨国资本无法寻找到足以信任的底层信用支撑体系。他们深度担忧政府换届导致的单方面 PPA 违约（**主权风险**），担忧主权货币暴跌引发的汇兑损失（**金融风险**），担忧司法体系无法公正保障商业契约的强制执行（**法制风险**）。正是这种系统性、不可对冲的宏观不确定性，迫使资本不得不索要极高的风险溢价进行自我保护，要么通过极短的投资回收期榨取暴利对冲潜在损失，要么直接实行一票否决式的投资规避。

这深刻地解释了为何“信用”是现代市场经济中最为核心的硬通货。一国的法治环境越完善、产业政策越具有长效连贯性、契约精神越受全社会尊重，其宏观经济的总融资成本就越低。这在无形中极大地降低了全要素生产率的摩擦成本，使得那些高度依赖长周期资本投入的重大基础设施（如特高压网络、核电机组群、骨干智能电网）能够获得充裕的长线低息资金，得以顺畅建设与高效运转。

” 一国的法治越完善、政策越连贯、契约精神越受尊重，其宏观经济的总融资成本就越低。

C O D A · 终曲



风险永不消失，
它只在不同主体之间 **被重新分配。**

Risk is never erased, only reassigned.



LECTURE 08 · END

MESON · 9D

EXERCISE · 思考题

无条件兜底，是福还是祸？

我们常说“羊毛出在羊身上”。既然通过 PPA 或国家财政补贴将前端产业风险转嫁给终端消费者，能有效压低融资成本，那是否所有大型基础设施都理应由全社会提供无条件的信用兜底？短期低融资和长期低用能成本之间，是否真的等价？

方案 · A

保本微利 · 全社会兜底

短期低融资 · 长期高风险

彻底剥离产业资本参与市场竞争的生存风险，短期内压低资本的准入门槛与融资成本，但市场主体可能失去优胜劣汰的危机感。

方案 · B

市场竞争 · 主权适度背书

优胜劣汰 · 长期低成本

保留产业端的竞争性风险与技术迭代压力，主权信用仅对公共基础设施或关键环节进行有限度背书。

Q01

请参考阿克洛夫与斯蒂格利茨奠基的**信息不对称理论**中的“道德风险”与“逆向选择”机制，若市场主体失去了优胜劣汰的竞争生存危机感，长期处于“稳赚不赔”的政策温室中，是否还会具备精细化控制造价、推动前沿技术迭代的**内生驱动力**？

Q02

当产业端风险被无节制地社会化兜底，中国能源产业技术创新与降本增效的核心源动力又将从何而来？

Q03

如果你是一位能源政策设计者，你会在“市场纪律”与“主权背书”之间划下怎样的分界线？

第九讲

IX.

不确定性， 也是「巨大的机会」

风会熄灭蜡烛，却能使火越烧越旺。传统的刚性投资计划像蜡烛，害怕风（不确定性）；而植入了真实期权思维的策略像火，它利用波动来让自己变得更强大。

第九讲 铁律

第九讲

真实期权 · 让波动成为朋友

在某种特定的条件下，不确定性越大，你的机会反而越值钱；“慢吞吞”地观望，比“火急火燎”地行动，在经济账上要划算得多。

在 上一讲，我们花了很多笔墨去讨论“风险溢价”，因为未来充满不确定性，所以我们要为这种恐惧支付代价。当时讨论的逻辑是，不确定性是我们的敌人，我们必须花钱（提高回报率要求）来抵消它。

但今天，第一章的最后一讲，我要带大家进行一次思维上的“撑杆跳”。我想请大家换一副眼镜，去审视那个名为“不确定性”的怪物。如果我们换一种策略，不确定性还是那个可怕的敌人吗？

经济学里有一个极其精彩、同时也极具颠覆性的分支，叫做**真实期权**（Real Options）。它会告诉你一个让人大跌眼镜的结论，在某种特定的条件下，不确定性越大，你的机会反而越值钱；在这个波动剧烈的世界里，有时候“慢吞吞”地观望，比“火急火燎”地行动，在经济账上要划算得多。

” 别急，让我们先把目光投向 2008 年前后的**美国墨西哥湾**沿岸，看看一家把“绝境”翻转为“印钞机”的能源公司。

§ 1 从死局中看到的「隐形资产」

故事的主角叫谢尼埃能源公司（Cheniere Energy），它的掌门人叫谢里夫·苏基（Charif Souki）。这是一位充满争议但在能源史上留下了浓墨重彩一笔的人物。

在 21 世纪初，美国能源界有一个坚硬得像铁板一样的判断，美国的天然气供给跟不上了。传统供给增长乏力，需求还在上升，市场普遍相信美国必须大规模依赖 LNG 进口。苏基选择押注这个共识，他背负巨额债务，在路易斯安那州的萨宾帕斯建设了一个庞大的液化天然气（LNG）进口接收站。这个工程让来自海外的 LNG 船靠岸，把液态天然气重新气化，再送进美国管网，卖给当时被认为“如饥似渴”的美国市场。

然而，就在工程投运前后，黑天鹅扇动了翅膀。带来这场冲击的推手，正是一场改变全球能源版图的页岩气革命。水力压裂和水平井技术大规模铺开之后，美国天然气供给迅速抬头，Henry Hub 天然气价格在 2008 年夏天接近每百万英热单位 13 美元，随后一路下滑，一年后跌到 4 美元以下，后来甚至进入 3 美元左右的低位。

一夜之间，美国从“担心不够用”的进口市场，转身变成了低价天然气充盈的供给市场。苏基的进口接收站瞬间被市场打上了“毫无用武之地”的标签。逻辑很简单，没有哪艘 LNG 船愿意把气运到一个价格明显低于其他市场的地方来卖，那根本算不上做生意，纯粹是在做慈善。谢尼埃公司的股价从接近 40 美元跌到约 1 美元，华尔街的分析师们都在计算它破产的倒计时。按照传统的会计准则和净现值（NPV）模型，那些耗资数十亿美元建设的巨大储罐、深水码头和再气化设施，仿佛只剩下冰冷的沉没成本。

但是，苏基没有申请破产，他在那一堆被市场判了死刑的废墟中，看到了别人看不见的**隐形资产**。他敏锐地意识到，虽然“进口”这门生意死了，但他手里握着的一样东西没死，那就是**位置和基础设施所带来的连接能力**。他拥有现成的深水码头（船能靠岸）、巨大的储罐网络（气能存）、连接美国干线管道的接口（气能通），以及最难拿到的联邦能源审批许可。

如果不做进口，能不能做出口？当时，亚洲和欧洲的天然气价格依然维持在远高于美国本土价格的水平，许多长协价格还与国际油价挂钩。美国国内低价气与海外高价气之间，突然撕开了一个巨大的**套利窗口**。如果能在萨宾帕斯加装液化设备，把美国的廉价天然气液化成 LNG 再运出去，昔日被市场嘲笑的废铁，就能瞬间化身为连接美国气田与全球市场的印钞机。

2010 年前后，谢尼埃开始推动萨宾帕斯从"进口接收站"转向"可进口、可出口"的双向 LNG 终端。这个决定需要的是百亿美元量级的再投资、漫长的审批、长期买方合同和巨额融资。当时所有人都觉得他疯了，因为传统的 NPV 模型会不断警告国际天然气价格会波动，亚洲气价可能会跌，价差可能会消失，风险极大。但结果我们都知道了，谢尼埃后来成为美国最大的 LNG 生产与出口商，也是全球第二大 LNG 生产商之一，市值超过 400 亿美元。它凭借萨宾帕斯这张"可转换的接口牌"，把美国本土 LNG 出口时代提前推到了世界面前。

在传统视角下，当页岩气革命发生时，苏基的进口终端价值归零；但在**真实期权**的视角下，那个终端早已超越了单一"进口设施"的物理定义，它本质上是一个"接入全球天然气市场的接口"。这个接口本身就是一个**期权**，它赋予了拥有者一个权利，当美国气价高于海外市场时，码头可以服务于进口；当美国气价低于海外市场时，只要追加液化投资，它又可以转身服务于出口。苏基之所以能翻身，是因为他不仅看到了钢筋水泥的物理价值，更看到了这些设施在极端市场波动下"转换用途"的灵活性价值。

” 真正值钱的，
不是某一个固定方向的生意，
而是在两个方向之间切换的资格，
这笔财富的名字，叫做"选择权"。

§ 2 现实投资就是一张电影票

为了理解谢尼埃案例背后的经济学逻辑，我们必须先把“投资”这个概念，从一锤子买卖的思维中解放出来。在传统的投资决策（比如现金流折现法 DCF）里，我们往往假设一条路走到黑，要么现在投，要么永远不投。这就像是你要去游泳，一旦决定跳下去，就必须游完全程，哪怕水温突然变得冰冷刺骨，你也爬不上来。在这种刚性的假设下，未来的波动（比如气价突然暴跌）纯粹是坏事，是你需要用风险溢价去补偿的成本。

但是现实世界更像是买一张电影票。想象一下，你花 50 块钱买了一张下周上映的电影票，这张票给了你一个**权利**，**但没有给你义务**。下周到了，如果听说那部电影口碑极烂，你可以选择不去把时间浪费在电影院里，损失仅是那 50 块的票价（这就叫有限的下行风险）；如果那部电影口碑爆棚，成为了影史经典，你就可以凭票入场，享受一场视听盛宴（这就叫无限的上行收益）。

” 这张票就是一个标准的看涨期权（Call Option），核心特征是**收益不对称，亏损有限，收益无限**。

回到谢尼埃的例子。如果苏基在 2000 年时思维是僵化的，他建设的就仅仅是一个“进口工厂”，那他确实死定了；但他（或许是无意中）构建了一个具有**可转换性**的资产组合。那些土地、管道连接权、环保许可，就是那张“电影票”。这笔钱花出去（虽然很贵，几十亿美金），买到的远超处理进口气的单一能力，它直接赋予了苏基一个宝贵的资格，即在未来几十年内，无论气价是涨是跌，都能通过追加投资（加装液化模块）来套利的资格。

这种局面绝非单凭“运气”造就，它在数学层面彻底改变了回报的结构。当我们拥有“选择权”的时候，我们实际上是在重塑亏损和收益的形状。进口业务受挫时，损失被限制在已经投入的那部分资产和债务压力之内；但一旦页岩气爆发、出口窗口打开，原本看似沉没的基础设施又会变成攫取价差的入口。

这就是真实期权的第一条核心逻辑，投资绝非一道非黑即白的“**Yes or No**”判断题，它本质上是一道关于“**Now or Later**”或者“**Switch（转换）**”的**动态选择题**。即使现在的净现值（NPV）看起来一般，但如果你拥有了“未来根据情况调整决策”的权利，这个项目的真实价值可能会高得惊人。这里我们要引入一个专门的术语，叫做**转换期权**（Option to Switch）。

” 一个能同时烧煤和烧生物质的锅炉，肯定比只能烧煤的锅炉贵；
多出来的成本，就是你为「转换权」支付的期权费；
当煤价暴涨或碳税来袭时，这个转换权就会让你从亏损变成盈利。

§ 3 坏消息也是好消息 · 波动率的魔术

在第八讲，我们反复强调过，投资者厌恶风险、厌恶波动，如果一个资产的价格上蹿下跳，我们通常会给它打个折扣。但是，当你手里握有"期权"的时候，情况完全反转了。**对于期权持有者来说，世界越乱，波动越剧烈，你手里的期权就越值钱。**这听起来像是歪理邪说，让我们看一个真实的经典案例，1996年秘鲁安塔米纳（Antamina）铜锌矿的竞标，这是真实期权理论在现实中的应用的最著名案例之一。

当时秘鲁政府要拍卖这个巨大的铜锌矿，但矿到底有多少储量？未来的铜价和锌价会是多少？没人知道，这充满了极大的不确定性。按照传统的估值方法，要预测未来20年的铜价和锌价，估算储量，然后折现。因为不确定性太大，大多数矿业公司给出的估值都不会太激进，他们要把巨大的风险折价算进去，担心如果中标后金属价格大跌，自己将背上沉重的包袱。

但是，有着"真实期权思维"的竞标者是由加拿大矿业公司 Rio Algom 和 Inmet 组成的联合体。他们中标报价的奇妙之处在于把竞标本身写成了一个分阶段的合约，他们将先支付2000万美元的前期款，再承诺一个高达25亿美元的投资额度；可是在接下来的两年里，真正必须先投入的，是勘探和可行性研究这笔小得多的钱。如果两年后发现矿不行，或者金属价格环境变坏，他们可以选择放弃，把矿权退回去，损失被限制在前期款和早期勘探投入上。

情况 · 一

铜价风平浪静

如果铜价一直不死不活，矿可能确实不值钱，财团选择放弃，损失只是一小笔勘探费。下行被严格封顶。

情况 · 二

铜价疯狂波动

勘探结果显示储量远超预期，或铜锌市场前景变得诱人，财团立刻行权，把承诺转化为开发投资，矿山进入生产。

在这个模型里，**铜价的波动率越高，这个矿反而越值钱**。因为你有"放弃"的权利，所以"坏消息"（铜价暴跌）对你的伤害是有限的，封底了，最多亏损勘探费；而因为你有"执行"的权利，"好消息"（铜价暴涨）对你的收益是无限的。既然下限锁死，上限开放，那么波动越大，触碰到那个"暴赚"区间的概率就越高，而触碰"暴亏"区间的后果却被屏蔽了。

这就是为什么在能源和资源行业，这类受地缘政治、技术变革影响极大的高波动行业，真实期权思维比在传统制造业里更重要。当市场看不清方向的时候，传统的管理者会感到恐慌，因为他们担心一旦投错就万劫不复；但拥有真实期权思维的管理者（如当年的 Rio Algom / Inmet 联合体）会感到兴奋，他们会像在**暴风雨中冲浪**一样，利用巨大的波动来获取超额收益。

” 这种等待并观察的权利，在金融学里被称为「**延迟期权**」（Option to Defer）。它告诉我们，在迷雾中，“现在不行动”本身就是一种**高价值的行动**。

§ 4 分步走的艺术 · 花小钱买"明白"

理解了"转换"和"等待"的价值，我们再来看看具体的操作手法。在工程浩大的能源领域，最常见的真实期权策略叫**分阶段投资**，或者叫"复合期权"。还记得上一讲提到的那位从煤炭巨头华丽转身为海上风电霸主的**沃旭能源**（Ørsted，当时叫 DONG Energy）吗？我们今天从投资决策的节奏，来看看它的成功秘诀。

在 2010 年左右，海上风电还是一个极其昂贵且技术不成熟的领域。如果当时沃旭直接宣布"我们要建 100 个海上风电场，总投资 5000 亿"，那它的股东估计会把它送进疯人院。沃旭采取了典型的"实物期权"策略，选择**分步走**。

01 第一阶段 · 买门票。先在 Avedøre 电厂附近做小型近海示范项目；更早之前，丹麦海上风电产业已经从 Vindeby 这类近海小风场开始，一点点把风机、海缆、施工船、运维组织这些陌生环节摸清楚。这笔钱买到了"信息"，让团队真正理解海上盐雾、强风、基础施工、海底电缆、吊装窗口和运维船调度的真实难度，是一笔昂贵的**学费**，也就是**期权费**。

02 第二阶段 · 行权或作废。拿着第一阶段买来的"确定性"，建设著名的 Anholt 海上风电场（当时丹麦最大）。技术风险不再是黑箱，而是可以被拆解、被报价、被管理的具体问题；每一个风电场的建成，都成为通向下一个更大项目的**新期权**。

01 第三阶段·扩张期权。当英国的 Hornsea 项目启动时，沃旭已经拥有了别人很难复制的“执行能力”。Hornsea One 投运时成为全球最大海上风电场之一，海上风电的单机容量、施工组织、供应链和融资模式都已远比早年成熟，沃旭顺势大规模行权，把早年一步步买来的信息，变成了全球扩张的能力。

在这个过程中，每一个阶段的投资，本质上都是在购买一个**看清未来**的权利。这就像是闯关游戏，你不需要在第一关就支付通关的全部费用，你只需要支付第一关的门票，如果打通了，你会获得进入第二关的资格（期权）；如果第一关就挂了，或者发现游戏不好玩，你随时可以止损退出。

这种策略在经济学上还有一层深意，它把“大而不能倒”的风险，切碎成了无数个“小而可以倒”的试错，用**时间的推移**，换来了**信息的逐渐透明**。如果摒弃这种分步策略，转而像某些激进的公司那样在技术尚未验证时就大规模铺开，一旦遇到像早期风机齿轮箱普遍故障那样的系统性风险，结局往往是灾难性的。

” 把“大而不能倒”的风险，
切碎成无数个“小而可以倒”的试错，
用**时间换信息**。

§ 5 留好退路，你敢全速前进

除了"转换""等待"和"分步"，真实期权思维里还有一个常常被忽视的杀手锏，叫做**放弃期权**（Option to Abandon）。我们中国人讲究"破釜沉舟"，讲究"有进无退"，但在商业投资里，没有退路往往意味着巨大的折价。

类似于英国的 **Aggreko**（亚力克）这样的公司，专门出租集装箱式的柴油或天然气发电机。对很多急需用电的工厂或发展中国家的矿山来说，租这些设备的单价比自己建电厂要贵得多，从 NPV 角度看，长期租设备就是亏本买卖。

但为什么那么多精明的矿主愿意租？因为他们买的是"**随时不玩了**"的权利。开矿这件事，风险极大，万一矿产价格崩盘，矿山就要关闭。如果是矿山自己建的电厂，那几千万元的设备就砸在手里了，拆都拆不走（沉没成本），而且拆除电厂本身可能还需要一大笔费用（比如环保恢复）。但如果你用的是 Aggreko 这类租赁式临时电源，项目一旦收缩，你可以按照合同条款退租、缩容或搬迁设备，你的损失被截断了。多付的那笔租金，实际上就是你为这份"**可退出、可缩放、可迁移**"的权利支付的"期权费"。

我们不妨再拿核电站当个反面教材。核电站为什么在财务上风险巨大？高昂的建设成本只是表象，其核心致命点在于它的“退出键”极其昂贵。一旦建成，你想“不玩了”，退出成本依然沉重，退役、乏燃料管理、场址恢复和长期监管都可能持续几十年，单个项目的成本可能达到十亿美元量级，个别大型项目甚至更高，**没有一键退出的自由**。这使得投资者在面对核电项目时，天然会把漫长工期、监管不确定性和退役责任一起写进风险溢价。

在能源转型期，这一点尤为重要。比如现在的德国，很多煤电厂都处在逐步退出和重新定位的压力之下。如果管理者聪明的话，他们在进行最后一轮设备改造时，就会考虑植入“**转换期权**”。例如，他们在修缮锅炉、汽轮机、热网和厂区管线时，会前瞻性地保留未来接入生物质燃料、工业余热、电锅炉、热泵或热储能系统的空间。虽然这会增加当前的改造成本（期权费），但它赋予了这座电厂在煤电退出之后的**第二条命**，这就是通过设计，人为地创造出了“放弃”或“转型”的路径。

” 多付的那笔代价，买来的是一种极度舒适的**确定性**，
无论世界怎么变，
我都不会被一座固定资产**牢牢套死**。

§ 6 从「工程思维」到「金融思维」的跃迁

讲到这里，我们对真实期权的拼图已经完整了。这一讲的内容和前面的八讲有一个本质的区别。前八讲，我们更多是在用**工程思维**看成本，围绕固定成本、边际成本和贴现率展开分析，那是一个相对静态、线性的世界，我们追求精确，追求最优解。而真实期权，带我们进入了**金融思维**的领域，在这个领域里，时间是非线性的，风险是动态的，而最大的价值往往藏在那些“看不见”的可能性里。

真正的战略家早已剥离了赌徒的心态，他们从不把筹码押注在某种确定的未来上，他们构建的核心优势在于，无论未来怎样，我都有应对的招数。谢尼埃赌的是无论美国气价与国际气价的价差如何变化，占据连接世界的咽喉就能活（转换期权）；Rio Algom / Inmet 赌的是花小钱看一眼，有好牌再下注（等待期权）；沃旭赌的是每走一步都能让我更看清下一步（分阶段期权 / 扩张期权）。他们通过支付一点点成本（期权费），构建了一个**下有保底、上不封顶**的收益结构，他们懂得在迷雾中先迈出一小步，看看脚下的路，再决定下一步的方向，在这个不确定的世界里保有最大的**生存弹性**。

最后，我想引用塔勒布在《反脆弱》里的一句话来作为这一章的结束，“风会熄灭蜡烛，却能使火越烧越旺。”传统的刚性投资计划就像蜡烛，害怕风（不确定性）；而植入了真实期权思维的投资策略就像火，它利用风（波动）来让自己变得更强大。

” 你要做**蜡烛**，还是要做**火**？

C O D A · 终曲



不确定性不是敌人，
而是被我们包装成 **期权** 的盟友。

Volatility is not a tax, but a fee for the right to wait.



LECTURE 09 · END

MESON · 9D

EXERCISE · 思考题

百亿智算中心 · 现在 vs 等待

把目光从能源转向当下最火热的人工智能数据中心（AI Data Center）。这个领域的技术更迭速度极快，英伟达的 GPU 芯片几乎每隔一到两代就会出现显著跃迁，从 H100 所在的 Hopper 架构，到 Blackwell B200/GB200，再到未来更先进的平台，算力、互连、能效和液冷要求都在快速变化；同时，液冷技术、光互连技术也在飞速演进。如果你是一家大型云服务商的 CEO，你面临一个两难选择。

方案 · A

All-in 现在

100 亿一次性押注

立刻投入 100 亿美元，建设基于当前主流 GPU 平台的大型智算中心，抢占市场份额。但下一代芯片交付后，旧设备的残值可能瞬间被压低。

方案 · B

基础设施 + 模块化

先骨架 · 后填肉

先把电力接入、机房、液冷管道和网络骨架这些长寿命基础设施搭起来，把部分算力模块留到下一代 GPU 平台大规模交付后再上。

Q01

运用今天学到的真实期权思维，你会如何设计你的投资策略？有没有办法既不完全踏空现在的市场，又保留未来升级新技术的权利？

Q02

在基础设施（机房、电力、水冷管道）和计算设备（服务器、GPU）之间，哪部分应该先行，哪部分应该等待？

Q03

这其中是否存在模块化设计带来的期权价值？你会为哪一部分支付额外的“期权费”？

FINALE · 终章 结语



在第一章的一至九讲里，我们完成了一次对能源世界观的底层重构。我们穿透了“买电就是买能量”的表象，看到了“随时可用”这一服务的昂贵代价；我们粉碎了平均值的温情面纱，领教了边际机组在悬崖边上的定价权；我们更是重新校准了时间的刻度，明白了贴现率和期权是如何量化我们的耐心与恐惧。

至此，第一章的九讲内容全部讲完，感谢大家一路相伴，希望这一章的内容能给大家带来一些新的思考与启发。我们第二章见。

Chapter One has rewritten the operating system through which we read energy.



第 一 章 · 完

CHAPTER ONE · END

MESON · 9D

关 于 作 者

介子九维

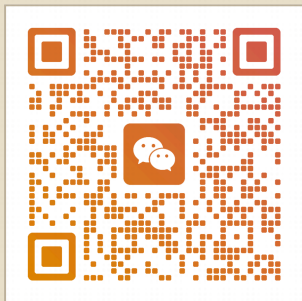
本 名 胡 彪

新能源领域政策研究员，长期关注能源经济学领域的电力市场、能源转型，以及现代文明背后那些看不见的底层约束与代价。

《九维能源》是他写给每一位现代人的能源经济学读本，以最日常的故事、最反直觉的追问，带你重新理解这头隐形的大象。

” 能源的价值，
不只是你**拥有**它的福利，
更在于你**失去**它的代价。

个 人 微 信



介子九维·胡彪

扫码加我为朋友

微 信 公 众 号



九 维 能 源

扫码关注·持续更新

版 权 页

九维能源

一部有趣的能源经济学读本。

用经济学的视角，重新理解能源世界的底层逻辑。

能源的价值，
不只是你**拥有**它的福利，
更在于你**失去**它的代价。

作 者

介子九维

本 名 胡 彪

