

# Hotelling三个模型的总结与对比

## 一、三者的基本内容

模型/理论	核心贡献	关键假设	主要结论
Hotelling 模型 (1931)	提出了可耗竭资源的跨期最优开采规律	资源有限、市场完全竞争、无技术变迁、无替代能源	资源净价 (价格-开采成本) 随时间按利率增长: Hotelling rule
Backstop 模型 (Nordhaus, 1973/1979)	引入可再生替代技术 (backstop technology), 解决 Hotelling 模型中 “价格无限上升” 困境	存在一种成本恒定的替代能源 (如太阳能) 可无限供给	资源价格随稀缺性上升至替代技术的边际成本上限时停止上升; 出现转折点 (switch point)
Hartwick 规则 (Hartwick, 1977)	提出可持续发展条件: 资源租金投资于人造资本可保持恒定消费	完全竞争、无人口增长、无技术进步、单一资源经济	若资源租金 (rents) 全部投资于资本积累, 则总资本 (自然资本+人造资本) 不变, 可实现恒定消费路径 (“Hartwick’s rule of sustainability”)

# 哈伯特峰值理论

## （二）理论提出

Hubbert通过分析美国本土48州的石油发现与生产数据，发现两者都遵循类似的S形累积增长曲线（logistic curve）。

他由此提出假设：“在一个封闭的资源系统中，资源的累积产量遵循Logistic函数，其导数——即每期的开采量——呈钟形分布。”

数学表达为：

$$\frac{dQ}{dt} = rQ \left( 1 - \frac{Q}{Q_{max}} \right)$$

其中：

- $Q(t)$ : 累积产量 (Cumulative Production)
- $Q_{max}$ : 最终可采储量 (Ultimately Recoverable Resources, URR)
- $r$ : 增长率 (Growth rate of production)

求解得：

$$Q(t) = \frac{Q_{max}}{1 + e^{-r(t-t_{max})}}, \quad P(t) = \frac{rQ_{max}e^{-r(t-t_{max})}}{(1 + e^{-r(t-t_{max})})^2}$$

由此，Hubbert得出结论：

在给定资源总量与技术条件下，资源产量将在某一时点  $t_{max}$  达到峰值，之后因耗竭而不可避免地下降。



上海财经大学  
SHANGHAI UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

# 能源需求的分析

## Understanding and Analyzing

## Energy Demand

刘江华

[liu.jianghua@shufe.edu.cn](mailto:liu.jianghua@shufe.edu.cn)





上海财经大学

SHANGHAI UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

# 目录

## CONTENTS

01

引言

02

能源需求的经济基础

03

能源需求分析理论的演化



上海财经大学

SHANGHAI UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

---

# 1 引言



## 1.1 能源需求的定义、用途与层级

### 一、能源需求的用途界定（Scope and Uses）

1. 作为燃料用途（Energy Use）：满足个人或工业生产中  
对热量、动力的需求（如烹饪、取暖、交通、发电）。→ 目的在于利用其热值（Heating Value）。
2. 作为非能源用途（Non-Energy Use）：能源产品用作原材料（如石油用于石化工业），利用其化学性质。

### 二、能源需求的层级划分（Levels of Aggregation）

1. 初级能源需求（Primary Energy Demand）：一个  
国家生产或进口的未转化能量（通常包括进口、出口和库存变化）。
2. 最终能源需求（Final Energy Demand）：终端用户（家庭、工业、交通等）直接消费的  
能量。

### 三、核心概念辨析

区分：能源需求（Demand） vs. 能源消耗（Consumption）。需求是潜在购买意愿；消耗是实际使用量。



## 1.2 能源需求的本质：派生需求 (Derived Demand)

分析传统	自上而下 (Top-Down) 模型	自下而上 (Bottom-Up) 模型
理论基础	新古典经济学 (Neoclassical Economics)	工程经济学 (Engineering Economics)
核心要素	宏观经济总量、价格、收入、弹性	终端设备、技术效率、设备周转率
分析对象	能源需求的宏观总量 (与GDP、价格的关系)	能源服务需求和实现该服务所需的具体能源投入
模型优势	捕捉宏观经济反馈效应 (如价格变化对整体经济的影响)	详细刻画技术节能潜力和非价格政策 (如能效标准) 的影响
模型缺陷	缺乏微观技术细节, 无法有效模拟能效政策	难以模拟宏观经济反馈, 存在“反弹效应” (Rebound Effect) 问题
典型模型	计量经济模型 (Econometric Models)、一般均衡模型 (CGE)	终端使用模型 (End-Use Models)、LEAP, MARKAL/TIMES 等



## 4 能源需求的经济基础

- 4.1 核心驱动力：派生需求与宏观经济要素
- 4.2 部门需求理论：效用最大化与成本最小化
- 4.3 价格与替代效应（投入品选择）
- 4.4 能源需求的动态性与时间维度
- 4.5 能源转型：发展中国家的结构性变化



### 4.1 核心驱动力：派生需求与宏观经济要素

#### 4.1.1 能源需求的本质：派生需求与服务驱动

##### 一、能源需求的经济学定位

能源不是最终消费品（**Non-final good**）

属于生产和生活的投入要素，其需求由其他部门或行为派生。

“隐含需求”逻辑：能源不直接产生效用，效用来源于服务功能（**heating, mobility, illumination** 等）。

##### 二、派生需求（**Derived Demand**）的理论基础

来源于马歇尔需求理论与投入产出理论

企业：能源是生产函数中的要素（**K-L-E** 模型）

居民：能源是耐用品服务的投入（**Capital-Energy Services Model**）

需求强度受到三类因素决定：

- ① 经济活动规模（**GDP**、产业结构、城镇化）
- ② 价格机制（价格弹性、交叉弹性、税费）
- ③ 技术效率（能效提升、电气化、替代燃料）



### 三、服务驱动视角（Energy Service Demand）

需求核心不在“能源量”，而在“功能输出”：

取暖→室温20°C；交通→人公里/货公里；生产→单位产出能耗

设备效率+行为习惯+技术路径共同决定能源消费量。

公式表达： $E = \frac{S}{\eta}$ ，其中E为能源需求，S为服务需求量， $\eta$ 为终端设备效率

### 四、理论与政策推导

服务驱动意味着不是“少用能源”，而是“少耗能实现同等服务”

能源需求管理的三个层次：

1. 降低服务需求总量（Demand Reduction）

2. 提升设备效率（Efficiency Improvement）

3. 燃料替代与电气化（Fuel Switching & Electrification）

节能政策从“能源端治理”转向“服务端重构”

碳定价、能效标准、消费补贴、电力市场改革、CCUS/氢能替代/技术

效率（能效提升、电气化、替代燃料）



### 4.1.2: 宏观驱动力之一：经济活动水平与弹性

经济活动水平是决定能源服务需求总量的最主要驱动力，能源需求总量与宏观经济增长呈现出显著的共生关系。

#### 一、核心概念：能源需求的收入弹性（Income Elasticity）

能源需求并非凭空产生，而是受制于经济体创造财富的能力。在宏观层面，能源消费量（**EC**）对经济活动水平（通常用国内生产总值**I**，即**GDP** 或人均收入）的敏感程度，通过收入弹性（ $e_t$ ）来量化。

$$e_t = \frac{(\Delta EC_t / EC_t)}{(\Delta I_t / I_t)}$$

定义：收入弹性衡量了当 **GDP** 或人均收入（**I**）变化1%时，能源消费量（**EC**）变化的百分比。

经济含义：它是预测长期经济增长背景下能源需求增速的关键工具。



### 二、收入弹性的经济学解读

收入弹性值的大小直接反映了经济发展阶段和能源利用效率。

- $e_t > 1$ （能源需求增速 > GDP 增速）：

特征： 常见于处于工业化和城市化加速阶段的发展中国家或新兴经济体。

原因： 此时经济结构中高能耗的重工业占比高；基础设施建设（如电网、道路）急剧扩张；家庭收入从满足基本生存转向追求舒适性服务（如拥有空调、汽车），能源消费呈现爆炸式增长，能耗增速往往超过 GDP 增速。

- $0 < e_t < 1$ （能源需求增速 < GDP 增速）：

特征： 常见于发达经济体或已完成工业化初级阶段的国家。

原因： 经济结构已转向低能耗的服务业为主；技术效率（能效）水平较高，通过技术进步能够以更少的能源投入满足更多的产出；市场趋于饱和，增量能源服务需求放缓。

- $e_t \approx 0$  甚至负值：

特征： 处于深度能源转型和节能减排政策严格执行阶段的少数发达国家。能源需求可能达到峰值后缓慢下降。

### 三、结论：收入驱动与脱钩

收入弹性分析是理解能源需求与经济增长“脱钩”（Decoupling）现象的理论基础。



### 4.1.3 宏观驱动力：产业结构与能源强度

核心观点：产业结构变化和技术效率改进共同体现在能源强度（Energy Intensity, EI）指标中，是影响国家能源需求的关键长期因素。

#### 一、核心概念：能源强度（EI）

##### 1. 定义与量化

能源强度EI衡量经济体或特定部门能源利用效率的宏观指标。它定义为：

$EI_t = \frac{E_t}{I_t}$ ，其中 $EI_t$ 为第t年的能源消费总量； $I_t$ 为第t年的产出价值（通常为GDP或部门增加值）。

##### 2. 经济意义

能源强度的下降（即EI变小）是能源经济学和国家能源战略（如节能减排目标）的核心目标之一，意味着经济活动正在以更少的能源消耗创造更多的价值。



## 二、能源强度的分解分析（Decomposition Analysis）

对能源强度（EI）变化的分析，通常将其分解为两种主要的驱动机制，这两种机制的相对贡献程度，决定了国家能源需求的未来走向：

### 1. 结构效应（Structural Effect）：

机制：指一个经济体内部，能源消耗强度不同的各个经济部门（如第一、二、三产业）的比重发生变化。

影响：当经济活动从高能耗的第二产业（重工业、制造业）向低能耗的第三产业（服务业、信息技术）转移时，即使各部门内部的效率不变，总体的能源强度也会因结构优化而降低。

### 2. 效率效应（Intensity Effect 或 Technical Effect）：

机制：指在特定部门内部，由于技术进步、管理优化或能效投资，使得生产单位产出所需的能源投入减少。

影响：它是技术进步的体现。工业部门采用更高效的电机或设备，家庭部门使用更高效的电器，在产出结构不变的情况下，总体的能源强度因技术提高而下降。



### 4.1.4 宏观驱动力：人口因素与总结

核心观点：人口规模、结构与城市化是影响能源服务需求基数和模式的长期、基础性决定因素。

#### 一、人口因素对能源需求的影响

##### 1. 人口规模（Population Size）：

人口规模直接决定了能源服务需求的潜在用户基数。在其他条件不变的情况下，人口增长必然带来总能源需求的增长。它是能源需求方程中最基础的乘数项。

##### 2. 城市化率（Urbanization Rate）：

城市化是驱动能源需求结构性变化的关键因素。城市居民通常具备以下特征：

收入更高：增加对高能耗商品和服务的需求。

消费模式集中：倾向于使用商业能源（如电力、天然气）而非传统生物质能。

设施要求：对集中供暖、制冷、私人交通和现代化公共服务（如地铁）的需求增加，从而显著提高人均能源消费量。



### 3. 人口结构（Demographic Structure）：

人口的年龄结构变化将影响不同部门的能源需求：

老龄化：可能会降低交通和工业部门的能源需求，但会增加住宅和医疗等服务部门的能源需求。

劳动力人口比例高：通常会带动工业产出和通勤交通的能源需求增长。

### 二、价格与气候（补充驱动因素）

除了人口和经济总量外，还有其他重要因素影响能源服务需求的实现：

能源价格：价格通过弹性机制，影响消费者对能源服务的购买意愿和工业部门的成本决策。

气候条件：气候直接决定了对温度调节类服务（制冷、供暖）的必要性，是区域能源需求的重要外生变量。

综上，能源需求总量是多种宏观驱动力共同作用的结果：经济活动水平（GDP/收入）：决定能源服务需求的总规模。人口因素：决定消费主体的数量和分布（基数效应和城市化效应）。产业结构与效率：决定服务实现的能耗强度（结构效应和技术效应）。



### 4.2 部门需求理论：效用最大化（家庭部门）与成本最小化（工业/商业部门）

#### 一、家庭部门：基于效用最大化的能源决策

家庭的能源消费行为是典型的消费者需求理论应用。家庭的目标是效用最大化，即在有限收入（ $I$ ）的预算约束下，通过在所有竞争性需求（食物、住房、娱乐等）中分配支出，来获得最大的满足度和舒适度（*Utility*）。能源本身并非家庭的最终目的，他们真正追求的是能源服务，如照明、室内温度调节和移动性。能源本身是一种投入，其购买量是由家庭在寻求最大满足的过程中，对这些服务的需求所派生出来的。

家庭对能源的需求主要受以下因素影响：

- 可负担性（收入）：家庭收入（ $I$ ）是决定其对高能耗服务的预算约束。收入水平直接决定了家庭是否能够负担更高层次的能源服务（如拥有多台空调或大排量汽车）。
- 非经济偏好与外部条件：这类因素包括家庭对舒适度的追求、生活方式的偏好，以及作为外生变量的气候条件（决定了供暖或制冷服务的刚性需求）。
- 设备选择与成本：能源需求的实现依赖于终端设备。因此，家庭的决策会权衡电器的相对价格（资本投入成本）和相对运营成本（能源消耗成本）。效率更高的设备通常资本成本较高，但运营成本较低。



### 三、家庭能源选择的多层次深化

家庭的能源消费是一个复杂的、具有**时间维度的多阶段决策过程**：

**第一层次（长期决策）**：涉及对高能耗耐用品的拥有决策。例如，家庭决定是否拥有汽车、房屋的面积大小，或是否接入天然气管网。这些是长期不变的能源消费能力的设定。

**第二层次（中期决策）**：涉及设备选择的类型和效率。在决定拥有某类设备后，家庭选择具体的型号，如电动车 vs 燃油车，或购买高能效等级的电器。

**第三层次（短期决策）**：涉及设备的使用频率和强度。例如，用户对空调温度的设定、是否及时关灯、或每月开车里程。这直接影响瞬时的能源消耗量。

结论：

能源需求分析必须深刻理解家庭在预算约束下，如何动态平衡对能源服务的直接需求、设备投入的资本成本（长期）以及能源使用的运营成本（短期）。只有捕捉到这种多层次的效用最大化过程，才能有效预测家庭能源需求的演变。



### 4.2.2 工业/商业部门：基于成本最小化的能源决策（供给侧）

核心观点：工业和商业用户将能源视为生产投入要素，其决策严格遵循生产者理论中的成本最小化原则，以实现利润最大化。

#### 一、理论动机：成本最小化

工业和商业部门的能源消费，本质上是供给侧的经济决策。工业用户的最终目标是利润最大化，而实现这一目标的必要条件是：在给定期望的产出水平（ $Q$ ）下，通过最优配置投入品（包括资本、劳动、能源等），将总生产成本降至最低。

因此，工业和商业用户需要能源作为生产的投入品，这种情况下，工商业部门对能源的需求是完全派生于其生产活动和成本结构的。



### 二、成本函数与派生需求

为了精确分析工业能源需求，经济学家通常采用成本函数模型来描述生产过程：

#### 1. 投入要素与模型结构：

工业的投入要素包括能源（燃料价格 $P_f$ ）、其他投入品（如劳动力、材料等价格向量 $P_o$ ）以及固定要素（如设备存量 $X$ ）。成本函数 $C$ 表示为这些投入品价格和产出水平的函数： $C(P_f, P_o, X, Q)$ 。

#### 2. 成本最小化与需求方程：

生产者通过选择最优的投入组合以最小化该成本函数。最小化过程，特别是通过Shephard引理等方法，可以直接导出对特定燃料的派生需求方程。例如，对于货运服务，对运输服务的需求（ $FT$ ）是产出、燃料价格和投入品价格的函数：

$$Demand = g(P_T, P_f, P)$$

这清晰地表明，能源（燃料）的需求是其价格和其他所有投入品价格共同作用的产物。



### 三、能源与投入品的替代性

工业部门能源需求的敏感性集中体现在投入品之间的替代性上：

- 能源-资本替代效应：这是工业能源分析的核心。当能源价格（ $P_f$ ）相对上涨时，工业决策者会倾向于减少能源消耗，并转向用更昂贵但更有效率的设备（资本）来替代能源投入，以重新实现成本最小化。例如，投资高效电机或余热回收设备。
- 燃料间替代效应：工业用户会根据不同燃料的相对价格和技术可行性，灵活地在煤炭、天然气、电力之间进行燃料切换。

结论：

工业部门的能源需求分析必须基于供给理论，关注产出、投入品价格和技术之间的复杂交互关系。这种成本驱动的派生性质使得工业部门对价格信号和能效技术的响应具有高敏感性和可预测性。



### 4.3 价格与替代效应（投入品选择）

本节将价格机制作为连接宏观经济驱动力和微观部门决策（效用/成本最小化）的核心桥梁。价格信号不仅影响能源的消费总量，更关键的是驱动了投入要素之间的替代选择。

#### 一、价格弹性与需求曲线的移动

##### 1. 自身价格弹性（Own-Price Elasticity）：

这是最基本的量化指标，衡量当能源产品自身的价格发生变化时，该能源的需求量变化的敏

感程度：
$$e_p = \frac{(\Delta EC/EC)}{(\Delta P/P)}$$

$e_p$ 通常为负值。其绝对值越大，表示需求对价格变化越敏感（弹性越大）。

短期内，由于设备库存惯性，消费者和生产者只能通过调整使用频率或行为来应对价格变化，因此需求弹性较低。

长期内，价格变化会激励主体更新设备或调整生产技术，使得需求弹性更高，响应更为全面和累计。

2. 需求曲线的移动：价格变化导致的是需求曲线上的点移动（需求量变化）。而宏观因素（如收入/GDP、人口）和非价格政策（如能效标准）的改变，则会导致整条需求曲线的平移（需求变化）。



### 二、交叉价格弹性与燃料间的替代性

交叉价格弹性 (Cross-Price Elasticity) 衡量了一种能源产品 (A) 的价格变化对另一种能源产品 (B) 的需求量的影响。这是分析能源结构转型的关键工具。

$$e_{AB} = \frac{(\Delta EC_B / EC_B)}{(\Delta P_A / P_A)}$$

- **替代品 (Substitutes):** 如果  $e_{AB} > 0$ , 则 A 和 B 互为替代品。例如, 天然气价格上涨 ( $\Delta P_A > 0$ ) 导致用户转向电力 ( $\Delta EC_B > 0$ ), 需求增加, 即“煤改气”或“油改电”等能源替代现象。
- **互补品 (Complements):** 如果  $e_{AB} < 0$ , 则 A 和 B 互为互补品。例如, 汽车价格上涨 ( $\Delta P_A > 0$ ) 导致燃油需求下降 ( $\Delta EC_B < 0$ )。



### 三、投入品替代效应：能源与资本的权衡

在工业和商业部门，价格替代性上升到投入要素替代的高度（基于成本最小化原则）：

#### 1. 能源与资本的替代（Energy-Capital Substitution）：

工业用户在生产过程中，总是寻求在能源（运营成本）和资本（设备投入）之间找到最优的平衡点。

当能源价格相对于资本价格（设备成本）上涨时，生产者会倾向于用更昂贵的高效设备（资本）来替代高能耗的能源投入，以维持总成本的最小化。这种效应是能效投资（如更换高效电机、改进保温）的经济学驱动力。

#### 2. 派生需求的深化：

价格信号影响的不是对能源本身的偏好，而是对服务成本的认知。价格替代效应通过改变投入组合，从而影响了单位能源服务所需的最终能源量。这种权衡是工业能源需求模型中捕捉技术效率变化的微观基础。



能源转型——能源阶梯：发展中国家的结构性变化

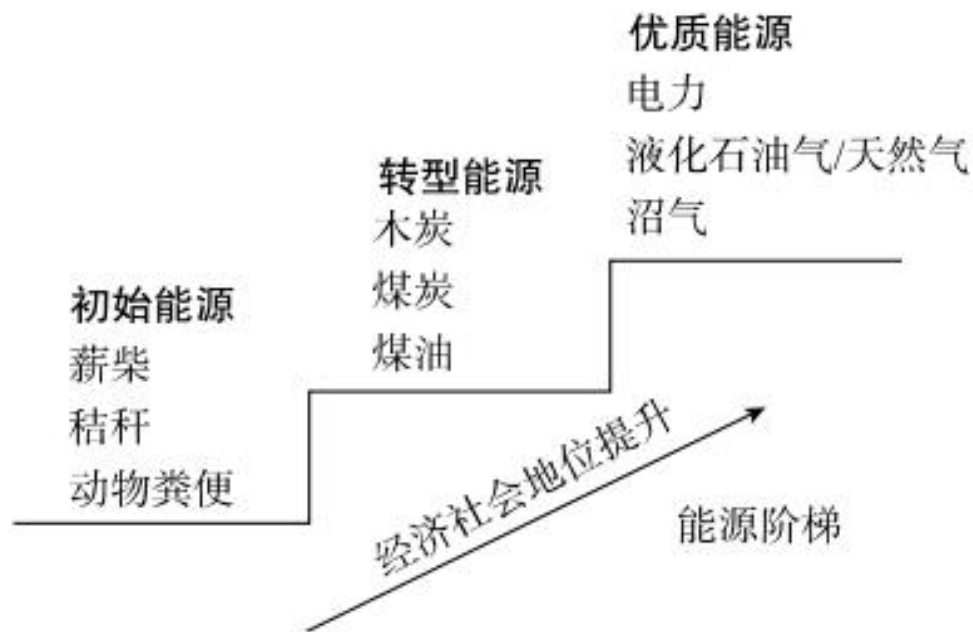


图 2 能源阶梯理论示意图

资料来源：Kroon, B. V. D., R. Brouwer, and P. J. H. V. Beukering, "The Energy Ladder: Theoretical Myth or Empirical Truth? Results from a Meta-Analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20 (4), 504-513.

- 小组作业（详见Canvas）

编号	指标名称	计算公式	时间跨度	可视化要求
1	年度一次能源消费量增速	$G_t = \left( \frac{\text{Energy}_t}{\text{Energy}_{t-1}} - 1 \right) \times 100\%$	1966-2023	折线图：展示每年增速的变化。
2	每10年平均增速（滚动）	$CAGR_{t,t+9} = \left( \frac{\text{Energy}_{t+9}}{\text{Energy}_t} \right)^{1/10} - 1$	1965-2023	折线图：以每10年为周期，计算滚动平均年增长率，用于平滑趋势。
3	总平均增速（CAGR）	$CAGR = \left( \frac{\text{Energy}_{2023}}{\text{Energy}_{1965}} \right)^{1/58} - 1$	1965-2023	柱状图：显示单一的复合年均增长率。
4	一次能源需求弹性	$E_t = \frac{\% \Delta \text{Energy}_t}{\% \Delta \text{GDP}_t} = \frac{G_{\text{Energy},t}}{G_{\text{GDP},t}}$	1979-2023	折线图：展示每年的弹性系数。
5	能源强度	$I_t = \frac{\text{Energy}_t}{\text{GDP}_t}$	1979-2023	折线图：展示每年的能源强度变化（单位需清晰标注）。



### 4.3 能源需求分析理论的演化 (The Evolution of Theories of Energy Demand Analysis)

#### 一、早期阶段：经验统计与宏观弹性模型 (1950s-1970s)

##### 1. 宏观计量模型 (Aggregate Elasticity Models)

基于国家层面数据，通过回归分析估计价格弹性与收入弹性。

典型模型： $E = \alpha P^\beta Y^\gamma$

Price elasticity ( $\beta$ ) 通常为 -0.2 至 -0.5；Income elasticity ( $\gamma$ ) 为 0.6 至 1.2。

代表研究：Houthakker (1951)、Berndt & Wood (1975)。

##### 2. 局限性：

忽视能源与资本、劳动、技术间的替代关系；

缺乏结构性解释 (“黑箱”模型)；

难以刻画长期技术进步与政策因素。



### 二、结构化阶段：需求系统与替代性分析（1970s-1990s）

#### 1. 跨价格效应与可替代性（Substitution and Cross-Price Effects）

引入消费者理论与生产理论框架：

Stone-Geary Utility Function、CES/Cobb-Douglas函数。

能源与资本、劳动、材料之间的替代弹性成为研究重点。

#### 2. 典型模型：

AIDS 模型（Almost Ideal Demand System, Deaton & Muellbauer, 1980）

Translog 成本函数模型（Christensen, Jorgenson & Lau, 1973）

CES 函数模型（Solow, 1957; Berndt & Wood, 1975）

#### 3. 主要贡献：

从单一能源转向能源结构（coal-oil-gas-electricity）分析；

结合生产要素替代与技术效率变化。



### 三、微观化阶段：家庭与企业层面的能源行为分析（1990s-2010s）

#### 1. 家庭层面（Household Energy Demand）

离散选择模型（Discrete Choice Model）：能源消费决策与耐用品选择。  
价格弹性与收入弹性存在显著异质性。

代表模型：Logit/Probit模型、Durable Good Adoption Model。

#### 2. 企业层面（Firm Energy Demand）

成本最小化与能源投入结构（Energy-Capital-Labor substitution）。

技术效率分析（DEA/SFA）结合能源强度。

#### 3. 数据支持：

微观调查数据（CHNS、CGSS、WBES、RECS）；

面板数据方法（FE、RE、DID）。



## 四、行为与技术阶段：跨学科与动态模型（2010s-至今）

### 1. 行为能源经济学（Behavioral Energy Economics）

能源消费中的偏好异质性、信息不对称与行为偏差。

“能源效率悖论（Energy Efficiency Paradox）”与“能源贫困”。

模型方法：混合Logit、实验与现场实验。

### 2. 动态能源需求模型（Dynamic Models）

结合能源价格预期与资本存量调整（Partial Adjustment Model）。

将能源需求纳入气候政策模拟（如E3ME、CGE模型）。

### 3. AI与机器学习在能源需求预测中的兴起

神经网络（ANN）、随机森林（RF）、LSTM等非线性建模方法；

多源数据融合（宏观 + 微观 + 行为数据）。



阶段	理论特征	代表模型	关键突破	局限性
1950s–1970s	宏观弹性模型	双对数、线性回归	定量估计能源需求弹性	忽视结构性机制
1970s–1990s	成本与替代性分析	CES、Translog、AIDS	引入替代效应与成本最小化	参数复杂、数据要求高
1990s–2010s	微观行为分析	Logit、Probit、Panel Models	捕捉异质性与政策响应	静态分析为主
2010s–至今	行为与AI融合	Dynamic、Machine Learning	模型预测与行为机制结合	可解释性不足