

Machine Learning - Assignment 11

Wei-Ju Lin

November 23, 2025

1 引言

面對全球氣候變遷與能源轉型，未來的人工智慧不僅需要預測氣候與能源需求，更必須能在多重目標之間做出決策。本研究提出兩個互相銜接的模型：

1. **監督式學習模型**：預測年度電力需求；
2. **能源決策最佳化模型**：決定最佳再生能源比例。

兩者結合後，AI 即可根據未來情境（GDP、氣溫、人口等）自動推估能源需求，再進行最佳政策規劃。

2 模型一：監督式學習預測年度電力需求

2.1 模型目的

年度電力需求 D 是能源政策評估中的關鍵變數，受到多種因素影響，包含 GDP 成長率 g 、氣溫異常值 ΔT 與人口 P 等。為了在後續的能源最佳化模型中進行政策推估，我們首先建立一個監督式學習模型，以歷史資料訓練年度需求的預測函數：

$$\hat{D} = f_{\theta}(g, \Delta T, P),$$

其中 f_{θ} 是具有可學習參數 θ 的回歸模型。

2.2 資料生成之假設

本作業以一組合理的線性模型模擬真實世界資料：

$$D_{\text{true}} = 10 + 2.5g + 15\Delta T + 0.05P + \varepsilon,$$

其中 ε 為平均為零的雜訊，模擬不可測量的需求變動或誤差。此式反映：

- GDP 成長會增加用電；
- 氣溫升高會大幅提升冷氣負載；
- 人口成長會微幅增加需求。

2.3 模型選擇：隨機森林 (Random Forest)

本研究採用隨機森林 (Random Forest) 作為需求預測模型。隨機森林透過建立多棵回歸樹並取平均，能有效降低單棵決策樹的高變異性，提升模型穩定度與預測準確度。

2.3.1 模型數學形式

令輸入特徵為

$$x = (g, \Delta T, P),$$

其中 g 為 GDP 成長率、 ΔT 為氣溫異常值、 P 為人口。隨機森林由 M 棵回歸樹 $\{T_m\}_{m=1}^M$ 組成，其預測函數可寫為

$$\hat{D} = f_{\theta}(x) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M T_m(x),$$

其中 θ 表示所有樹的參數集合， $T_m(x)$ 為第 m 棵樹對輸入 x 的預測。

每一棵回歸樹會將特徵空間以遞迴切分成多個區域 R_{mj} ，並在該區域中給出一個常數預測值 c_{mj} ，因此可寫成：

$$T_m(x) = \sum_{j=1}^{J_m} c_{mj} \mathbf{1}(x \in R_{mj}),$$

其中 $\mathbf{1}(x \in R_{mj})$ 為指示函數 (indicator function)。

2.3.2 為何適用於能源需求預測

本研究選擇隨機森林的原因如下：

- 能捕捉非線性，例如溫度上升可能以非線性方式推動電力需求；
- 能處理特徵交互作用，例如人口與氣溫同時上升時的合併效果；
- 能提供特徵重要性，有助於解釋哪些因素影響需求最多。

2.4 監督式學習與政策模型的連結

監督式學習模型所輸出的預測需求 \hat{D} 將作為模型二「能源決策最佳化模型」的輸入，用以求出最適再生能源比例：

$$(\text{監督式學習}) \rightarrow \hat{D} \rightarrow (\text{最佳化}) \rightarrow x^*.$$

3 模型二：能源決策最佳化模型

3.1 決策變數與目標

在已知年度能源需求為 \hat{D} 的前提下，政府需決定再生能源比例：

$$x \in [0, 1].$$

目標為最小化總社會成本 $J(x)$ 。

本模型同時考慮：

- 再生能源投資成本 C_{econ}
- 化石燃料排放造成的氣候成本 C_{clim}

3.2 經濟成本

將經濟成本設計為凸成本，當再生能源比例提高時，會因最佳場址先被使用、需更大儲能與電網升級、發電調度更困難等原因使邊際成本遞增，因此以二次函數建模：

$$C_{\text{econ}}(x) = ax^2, \quad a > 0.$$

此為標準凸函數，反映「比例愈高愈困難」的經濟成本特性。

3.3 氣候成本與損失權重

化石燃料供應比例為 $(1 - x)$ ，排放量為：

$$E(x) = (1 - x)e_F\hat{D},$$

其中 e_F 為每單位化石能源的排放係數。

氣候成本為：

$$C_{\text{clim}}(x) = \lambda e_F \hat{D}(1 - x).$$

其中 λ 為氣候損失權重。

氣候損失權重 λ 的意義 λ 是一個參數，將排放量轉換成對應的損失，用來衡量排放一單位 CO_2 所造成的氣候與經濟損害在決策中的重要性。

- λ 大：強調減碳 \rightarrow 最佳解 x^* 高；
- λ 小：偏重經濟 \rightarrow 最佳解 x^* 低。

與「碳的社會成本」(Social Cost of Carbon) 概念一致。

3.4 總損失函數

令 $B = \lambda e_F \hat{D}$ ，則總損失為：

$$J(x) = C_{\text{econ}}(x) + C_{\text{clim}}(x) = ax^2 + B(1 - x) = ax^2 - Bx + B.$$

3.5 最佳化求解

對 x 求導數：

$$\frac{dJ}{dx} = 2ax - B.$$

令其為零：

$$x^* = \frac{B}{2a} = \frac{\lambda e_F \hat{D}}{2a}.$$

考慮 $x \in [0, 1]$ ：

$$x^* = \min \left\{ 1, \max \left(0, \frac{\lambda e_F \hat{D}}{2a} \right) \right\}.$$