

# Machine Learning - Assignment 11

Wei-Ju Lin

November 25, 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，包含經濟成長率  $g$ 、氣溫  $T$ 、人口  $P$  與匯率 (元/美元)  $r$  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：

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

其中  $f_{\theta}$  是具有可學習參數  $\theta$  的回歸模型。

### 2.2 資料集

本研究從多個官方來源蒐集所需變數：

- 經濟成長率、匯率、人口資料：中華民國統計資訊網
- 氣溫資料：交通部統計查詢網
- 用電量：經濟部能源署能源統計專區

所有資料經過適當轉換，統一為「以季為時間間隔」的格式。研究將民國 106 年以前的觀測值作為訓練集，107 年以後的觀測值作為測試集。

## 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

$$x = (g, T, P, r),$$

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  $\theta$  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：

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

## 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  $C_{\text{econ}}$
- 化石燃料排放造成的氣候成本  $C_{\text{clim}}$

### 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  $\lambda$  為氣候損失權重。

**氣候損失權重  $\lambda$  的意義**  $\lambda$  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  $\text{CO}_2$  所造成的氣候與經濟損害在決策中的重要性。

- $\lambda$  大：強調減碳  $\rightarrow$  最佳解  $x^*$  高；
- $\lambda$  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  $x \in [0, 1]$ ：

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