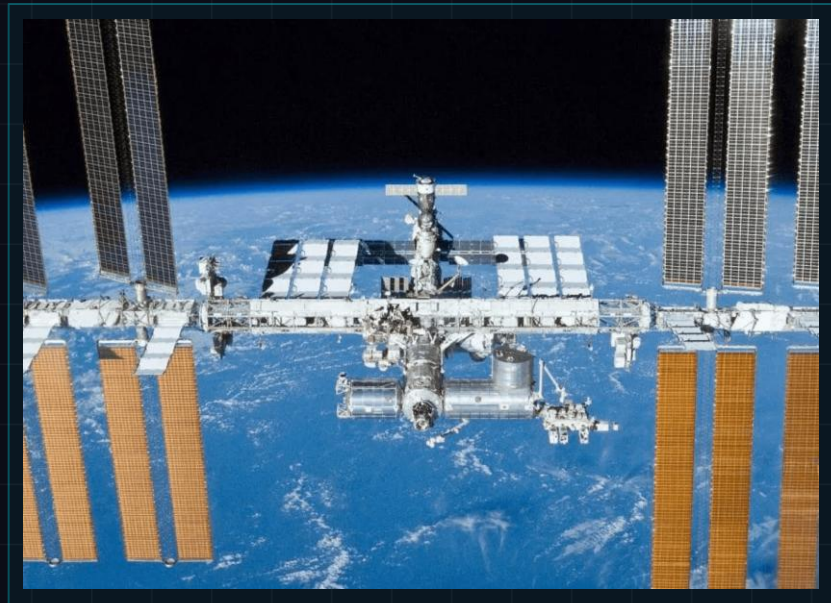


太空中的 太陽能發電模擬



01 // 研究動機

探索背景

全球戰略視野

各國積極發展衛星與綠能，
太空站的能源供應已成為核心戰略問題。

好奇心驅動

國際太空站（ISS）如何在極端環境下
維持 24 小時不間斷運作？

STRATEGIC_IMPORTANCE: HIGH

研究轉型

從實體到虛擬

捨棄靜態模型，改用Python打造
「虛擬實驗室」，實現高精確度模擬。

數位研究優勢

低成本、高效率，且能處理龐大的
環境變數與真實軌道數據。

METHODOLOGY: PYTHON_SIMULATION

02 // 研究問題與目標

[OBJECTIVE_01]

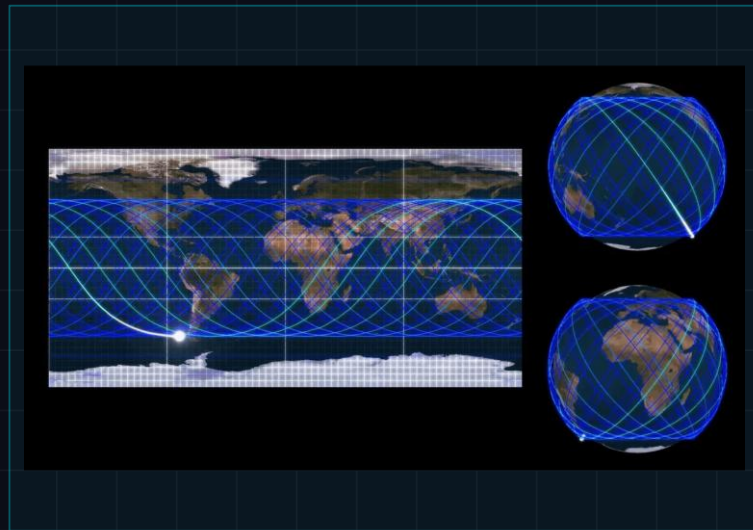
建立Python模擬環境，
精確模擬ISS的軌道週期與發電邏輯。

[OBJECTIVE_02]

預測能量生成、儲存與消耗，
評估電力供需平衡。

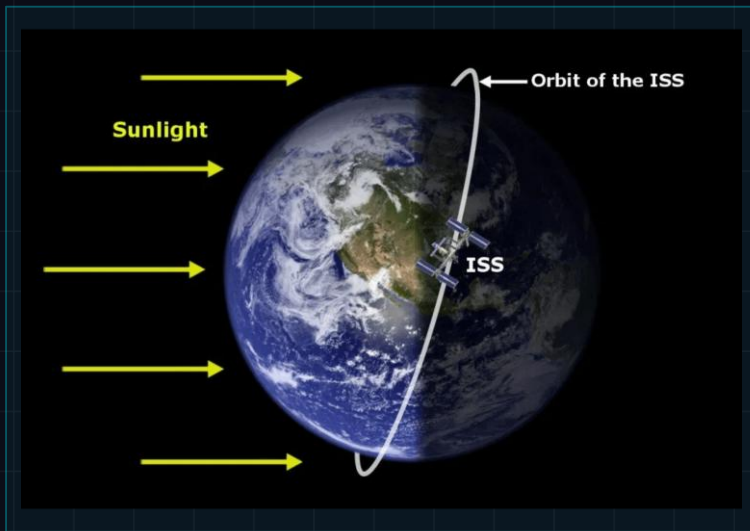
[OBJECTIVE_03]

分析2026 年整年度的發電特徵，
為任務規劃提供數據支持。



FIG_02: ORBITAL_PATH_VISUALIZATION

03 // 文獻探討：動態能源循環



[FIG_03: ORBITAL_SUNLIGHT_EXPOSURE]

軌道特徵參數

軌道高度

約400公里(LEO)

日夜交替

每24小時16次

繞行週期

約90分鐘~92分鐘

環境挑戰

極端溫差與輻射

能源策略三要素

生成 55 分鐘日照區，太陽能板追蹤太陽將光能轉為電能。

儲存 將多餘電力存入鋰離子電池模組，應對陰影區需求。

消耗 35 分鐘陰影區，全站仰賴電池維持維生與實驗設備。

04 // 實驗設計：虛擬實驗室

[HARDWARE_ENVIRONMENT]

標準工作站電腦
數位運算處理單元

[SOFTWARE_STACK]

Python 3.x
NumPy (數值運算)
Matplotlib (數據可視化)

核心物理參數

設定值

太陽常數 (Solar Constant)	1361 W/m ²
太陽能板總面積 (Panel Area)	2500 m ²
光電轉換效率 (Efficiency)	30 %
電池儲能容量 (Battery Capacity)	200,000 Wh
基礎耗電負載 (Base Load)	80,000 W

06 // 技術細節：開發環境配置

[SYSTEM_ARCHITECTURE]

```
$ python --version  
Python 3.11.x (Stable)  
$ pip list  
numpy==1.24.x  
matplotlib==3.7.x  
scipy==1.10.x
```

開發挑戰：

解決機器學習套件的相容性與環境變數設定，確保模擬邏輯在不同硬體平台的一致性。

NumPy // 數值運算核心

處理大規模矩陣運算，將軌道物理參數轉化為高效能的數值陣列，實現秒級的時間步長模擬。

Matplotlib // 數據可視化

將龐雜的模擬運算數據轉化為清晰的 HUD 風格圖表，直觀監測太陽能板在不同軌道位置的輸出變化。

環境隔離 // VIRTUAL_ENV

使用虛擬環境確保依賴項隔離，避免版本衝突，提升研究的可重複性與穩定性。

05 // 模擬邏輯：物理原理

發電計算 // GENERATION

$$P_{\text{gen}} = I_{\text{solar}} * A_{\text{panel}} * \eta_{\text{eff}}$$

IF in_sunlight **ELSE** 0

計算當下太陽能板的輸出功率 (W)，
僅在受光區有效。

淨功率分析 // NET_POWER

$$P_{\text{net}} = P_{\text{gen}} - P_{\text{load}}$$

正值代表電池充電，
負值代表電池放電以維持維生系統。

能量變化 // ENERGY_DELTA

$$\Delta E = P_{\text{net}} * (dt / 3600)$$

將功率隨時間步長 (dt) 積分，
轉換為瓦時 (Wh) 更新電池狀態。

狀態限制 // CONSTRAINTS

$$0 \leq E_{\text{battery}} \leq E_{\text{max}}$$

模擬真實物理限制：
電池充滿後多餘能量轉為熱能，
耗盡則系統停機。

06 // 結果分析：單次軌道週期 (90 min)

[0-30 MIN:快速充電]

日出後發電功率跳升至 1000 kW，
電量以陡峭斜率直線上升。

[55-90 MIN:放電期]

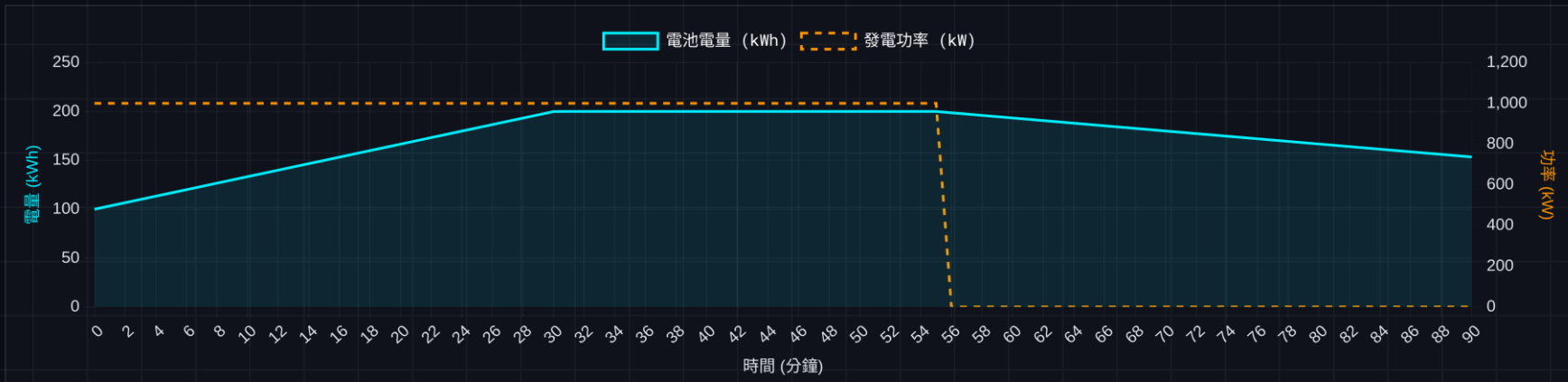
進入陰影區，發電歸零，全站依賴
電池維持 80 KW 基礎負載。

[30-55 MIN:飽和浮充]

電池達到 200 kWh 飽和，多餘電
力轉為熱能輻射，保護電池壽命。

[安全餘裕]

週期結束時電量仍剩約 50%，確保
系統具備應對突發狀況的韌性。



07 // 結果分析：24 小時連續運行

CYCLE_PATTERN

高頻循環特徵

電量曲線呈現規律的「鋸齒狀」，每日經歷 16 次完整的充放電循環。相比地表設備，太空站能源系統面臨極高頻率的物理狀態切換。

DESIGN_VERIFY

系統設計驗證

2500 m² 的太陽能板面積足以應對 80 kW 的基礎負載。模擬顯示電量峰值能達到飽和，且谷底始終保持在安全餘裕之上，未觸及零值。

LIFE_CHALLENGE

電池壽命挑戰

頻繁的充放電對**鋰離子電池**是嚴峻考驗，需精確監控充放電深度 (DoD)。在無突發高耗電實驗下，系統表現極其穩定，具備高度可預測性。

08 // 結果分析：2026年整年度預測

β 角(Solar Beta Angle)影響

太空站軌道面隨時間緩慢旋轉，導致陽光入射角度改變，產生顯著的季節性電力差異。

季節性特徵對比

[日食季 / ECLIPSE_SEASON]

β 角較小，每圈皆經過地球陰影（約35min），電池循環負擔最重。

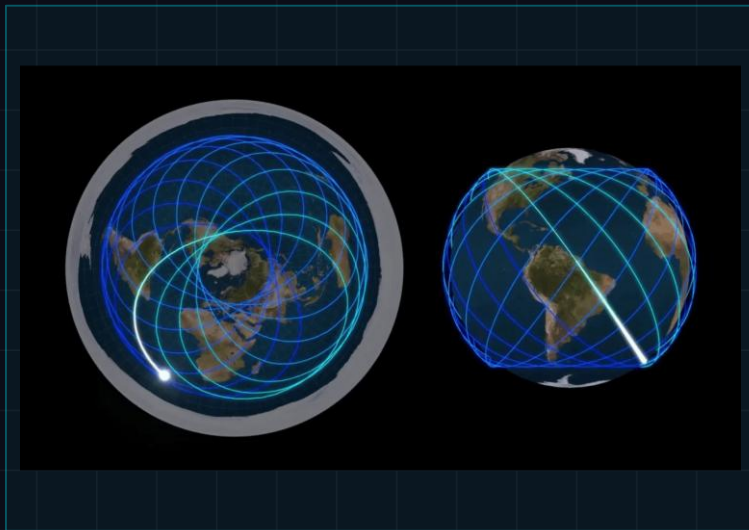
[全日照季 / FULL_SUN_SEASON]

β 角極大，太空站沿晨昏線飛行，24 小時皆有陽光，電池幾乎不需放電。

年度電力趨勢

每日最低電量與陰影時間呈現高度負相關。

在全日照的日子，系統穩定性最高，是執行關鍵任務的最佳時機。



FIG_08: ANNUAL_ORBITAL_PATH_VARIATION_ANALYSIS

09 // 任務規劃建議：數據驅動決策

高功率實驗窗口 // OPTIMAL

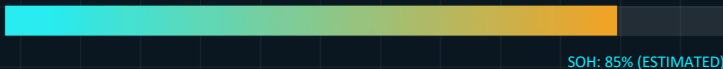
- 最佳時機：2、4、6、8、10、12 月中旬。
- 環境特徵：全日照季 (High Beta Angle)，電力供應近乎無限。
- 建議操作：進行高耗電科學實驗、大型設備壓力測試。

節能與維護期 // CRITICAL

- 警戒時機：1、3、5、7、9、11 月底。
- 環境特徵：長陰影期，電池每日經歷深度放電循環。
- 建議操作：暫停非必要維護，確保電池儲備以應對緊急狀況。

10 // 深度分析：電池健康度 (SOH)

[BATTERY_AGING_MODEL]



老化模擬：

模擬顯示每日 16 次的高頻循環對鋰電池壽命有顯著影響。透過控制**充放電深度 (DoD)** 在 50% 以內，可有效延長電池使用年限至 10 年以上。

[DoD_CONTROL_STRATEGY]

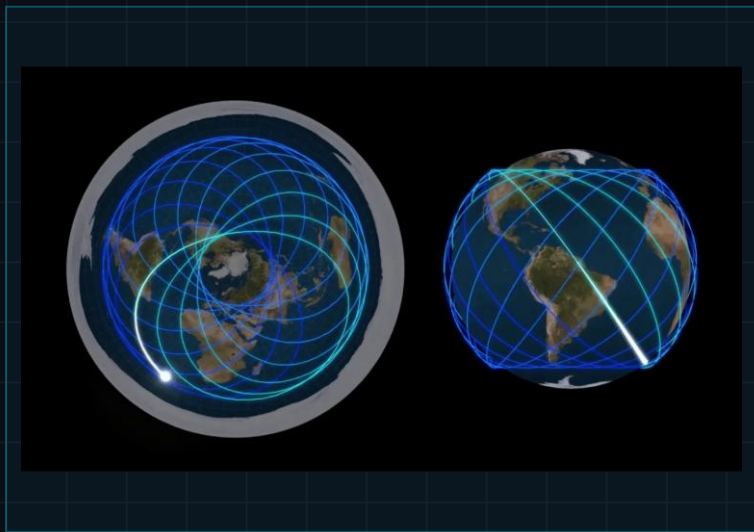
優化策略：

在全日照季期間，系統自動調高電池飽和點，減少不必要的微循環。在日食季則啟動「深度保護模式」，限制非必要實驗的電力消耗，確保電量谷底不低於 40%。

THERMAL_MANAGEMENT

多餘電力透過分流器轉為熱能輻射，需精確平衡電池溫度以維持化學穩定性。

11 // 專題探討： β 角幾何關係



FIG_12: ORBITAL_PRECESSION_VISUALIZATION

[GEOMETRIC_PRINCIPLE]

β 角定義為太陽向量與太空站軌道面之間的夾角。當 β 角絕對值大於 69° 時，太空站將進入全日照狀態。

[ORBITAL_PRECESSION]

由於地球並非完美球體（赤道隆起），導致軌道面產生**進動 (Precession)**，這使得 β 角隨時間呈現約 60 天一個週期的波動。

[PREDICTIVE_VALUE]

透過數學模型精確預測 β 角變化，可提前數月規劃能源密集型任務，避免在陰影期過度消耗電池。

12 // 未來展望：從太空到地球

技術遷移與綠能回饋

TECH_TRANSFER

太空站的高效率太陽能板與電池管理技術，可直接應用於地表極端環境（如極地、高山）的微電網建設，推動全球綠能轉型。

無線能量傳輸（WPT）

WPT_CONCEPT

探討將太空收集的巨大太陽能，透過微波或雷射精確傳輸回地球接收站的可能性，實現 24 小時不間斷的清潔能源供應。

數位孿生系統升級

DIGITAL_TWIN_2.0

未來模擬將納入宇宙射線、微隕石撞擊、以及太陽能板材料衰退等更多動態參數，建立一個全方位的太空資產管理預測系統。

13 // 評鑑與結論：數位孿生

研究挑戰 // CHALLENGES

航太工程文獻獲取難度高，數據比對與假設需極大耐心，AI 模型訓練過程複雜且具挑戰性。

虛擬優勢 // ADVANTAGES

克服了物理環境（真空、微重力）的限制，展現數位研究的高機動性與低成本壓力測試能力。

未來展望 // FUTURE

期許納入更多環境參數（如太陽能板衰退率），建立更高精確度的預測系統，實際應用於能源管理。



[CORE INSIGHT]

在數位時代，只要具備邏輯思維與運算工具，就能在虛擬世界中精確探索宇宙的奧秘。

謝謝聆聽

THANK YOU FOR LISTENING

獨立研究報告：太空中的太陽能發電模擬
SIMULATION OF SOLAR POWER GENERATION IN SPACE