

Journal of Energy & HVAC Engineering

冷凍空調&能源科技

《9月號／2025 雙月刊》



中智文化科技有限公司 主編
台北市松山區民生東路五段 137 巷 2 號 2 樓



153



台灣區冷凍空調工程工業同業公會、台灣冷凍空調學會 共同支持期刊

Panasonic

—— 全領域 專業空調 ——
守護美好呼吸 共創美好生活



資料中心 PUE 驗證技術之模擬

Simulation on performance evaluation of data center PUE

趙師磊¹、李魁鵬^{2*}、潘明憲³、劉子吉⁴、江柏頰⁵

Shih-Lei Chao¹, Kuei-Peng Lee^{2*}, Ming-Hsien Pan³, Tzu-Chi Liu⁴, Bo-Fu Jiang⁵

^{1,2*,5} 國立臺北科技大學能源與冷凍空調工程系所

^{1,2*,5} Department of Energy and Refrigeration, Air-Condition Engineering,

National Taipei University of Technology

^{3,4} 台灣智慧能源產業協會(TaiSEIA)

^{3,4} Taiwan Smart Energy Industry Association

摘要

資料中心的能源使用效率已成為日益重要的議題，PUE (Power Usage Effectiveness) 是衡量其效率的核心指標。本研究旨在深入探討氣候、規模與設備負載等關鍵因素對 PUE 值的影響。本研究利用能源模擬軟體 EnergyPlus，建立涵蓋不同月份、南北氣候、資料中心規模與用電密度等多元情境的模型進行分析。研究結果顯示資料中心的規模、用電密度、設備負載率和氣候條件對 PUE 值產生了明顯的影響。隨著資料中心規模的增加和用電密度的提高，PUE 值顯著降低；依設備卸載能力而定，IT 設備負載為 100% 時的 PUE 值並不依定都是最低的。

關鍵詞： 資料中心、能源模擬、PUE

Abstract

Energy efficiency has become a critical concern for data centers, and Power Usage Effectiveness (PUE) is a key metric for measuring it. This study uses the energy simulation software EnergyPlus to analyze how key factors—such as climate, scale, and equipment load—influence PUE values. The research covers a range of scenarios, including different months, northern versus southern climates, and varying data center sizes and power densities, with the goal of providing a quick reference and evaluation benchmark for PUE measurement. The results show that data center scale, power density, IT equipment load, and climatic conditions have a significant impact on PUE values. PUE decreases noticeably as data center scale and power density increase. A notable finding is that the lowest PUE value does not always occur at a 100% IT equipment load; this is dependent on the equipment's partial load efficiency.

Keywords: Data center, Energy simulation, PUE



一、前言

1.1 研究背景與動機

資料中心是現代社會數位基礎建設的重要支柱，支援著雲端運算、人工智慧、大數據與企業營運等多元技術。然而，其高能耗與廢熱排放也對環境與能源造成重大衝擊。因此，提升資料中心的能源效率與永續性成為全球共同關注的課題。PUE (Power Usage Effectiveness) 為目前最常用的能源效率評估指標，由 Green Grid [1] 提出，用以量化整體資料中心總能耗與 IT 設備實際耗能之比值。理論上，PUE 最小值為 1，代表所有能源都直接供應 IT 設備使用；值越小，代表效率越高。計算方式為[2]：

$$PUE = \frac{\text{Total energy consumption of data center}}{\text{Total energy consumption of IT equipment}}$$

本研究旨在探討不同參數對資料中心 PUE 值 (電力使用效率) 的影響。本研究將運用 EnergyPlus 能源模擬軟體建立標準化模型，並依據 ASHRAE 90.1 規範設定參數，確保研究的嚴謹性。

研究分析探討氣候、規模、設備負載等關鍵因素如何影響 PUE 值，其中將涵蓋不同月份、南北氣候、資料中心大小與用電密度等情境，為 PUE 值量測提供快速參考與評估基準，以利於資料中心業者提升能源效率，提供設計與建置明確的效率評估目標，進而推動產業的永續發展。

二、相關理論與方法

2-1 相關文獻

Lei 等人 (2021) [3] 針對資料中心在不同地理與氣候條件下的能源效率表現，建立了一套基於熱力與能量平衡原理的物理模型，用以預測美國各主要氣候區的電力使用效率 (PUE) 與用水效率 (WUE)。該模型涵蓋多種冷卻系統類型，包括傳統機械冷卻系統、利用環境條件的自然冷卻 (Free Cooling) 系統，以及結合冷卻水塔運轉

的混合式冷卻系統，並透過敏感度分析 (Sensitivity Analysis) 評估不同系統參數對能源與水資源效率的影響。研究中特別關注操作設定點 (如送風溫度、冷卻水供回水溫差等) 對 PUE/WUE 的變化關係，並模擬自由冷卻策略與冷卻塔運轉模式在各氣候區的應用潛力。模擬結果顯示，氣候條件 (尤其是乾球與濕球溫度特性) 對冷卻系統效能及整體 PUE 有顯著影響，且在氣候較涼爽的地區，自然冷卻的應用可大幅降低 PUE 值；相反地，在炎熱潮濕地區，需依賴更高效的機械冷卻或優化冷卻水塔策略才能維持較低的 PUE。雖然該研究並未採用 EnergyPlus 等動態建築能源模擬工具，而是以理論模型進行跨氣候區的年平均與敏感度分析，但其對於建立不同氣候區能源效率基準、比較冷卻技術優劣及設定模擬邊界條件具有重要參考價值，尤其適用於進行跨區域設計評估與節能策略規劃時作為初步判斷依據。

2.2 能源模擬程式理論

2.2.1 動態能源程式之架構

建築能源程式可用來分析建築及空調系統之負荷與能耗，有助於設計單位進行全面性的建築設計；而圖 2-1 為 EnergyPlus 主要的組成架構，其程式可藉由不同單位開發出的軟體做相互的連結，而模擬過程是藉由外在環境條件，對建築外殼構造與室內環境產生的熱環境影響，並結合內部設備依環境需求的耗能分析。圖 2-2 為 EnergyPlus 主程式的運算流程，內部程式包含了建築物結構表面熱平衡、室內空氣環境熱平衡、以及建築物設備模擬；在不同的熱平衡模擬時，亦可連結不同的外部程式，針對特定的熱平衡模擬，再傳回 EnergyPlus 程式。

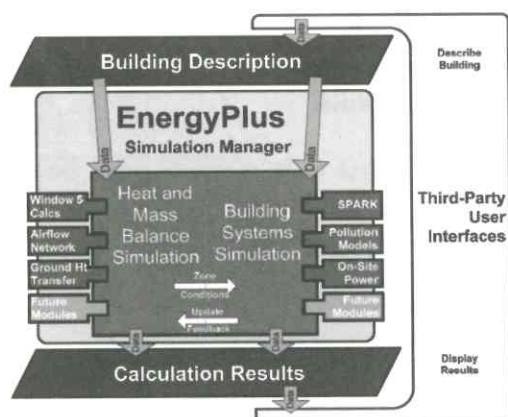


圖 2-1 能源模擬之架構及計算程式

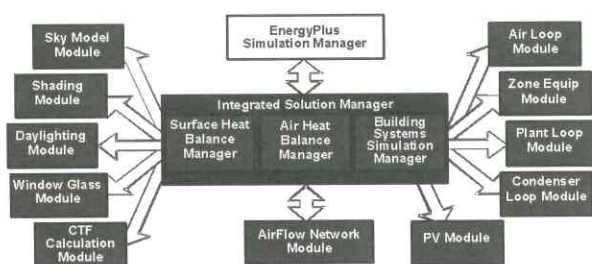


圖 2-2 能源模擬運算流程圖

EnergyPlus 主要是由負荷(Loads)、系統(Systems)、設備(Plants)和經濟(Economics)四個模組所構成，而相互聯繫形成一個建築系統。

(一)、負荷模擬

負荷模組是模擬建築外殼與室外環境，及室內負荷之間的相互影響，在負荷模組中有多種計算牆體傳熱與負荷的方法，EnergyPlus 採用熱傳遞轉移函數法(Conduction Transfer Functions, CTF)計算牆體熱傳，而採用熱平衡法(heat balance method)計算空間負荷。CTF 是基於牆體的內表面溫度，不同於一般基於室內空氣溫度的反應係數(response factor)，故能夠得到精確解；熱平衡法則是室內空氣、結構內外表面之間的熱平衡方程組的精確解法，突破傳遞函數法(Transfer Function Method, TFM)的侷限，如對流換熱係數及太陽輻射熱得可隨時間而變化。在每一時間步數，程式自建築內表面開始計算對流、輻射及熱傳，由於程式計算牆體內表面的溫度，可以模擬供暖與製冷系

統，並對熱舒適進行評估；區域之間的氣流交換，可透過所定義流量與排程來進行模擬，亦可藉由程式連結的 COMIS 模組，對自然通風、機械通風及煙囪效應等引起的區域間氣流，及污染物的交換進行精確的模擬。COMIS 是 LBNL 所開發並用來模擬建築外殼的滲透、區域之間的氣流，與污染物交換的分析軟體；而窗戶的熱傳與多層玻璃的太陽輻射熱得可用 WINDOW5 來解析，遮陽裝置可依使用者所定義，依室外溫度或太陽入射角進行控制，人工照明可依據採光照明進行調節；此外，EnergyPlus 針對 DOE-2 的採光照明模型進行修正，以較為精確地模擬傾斜表面上的天空散射強度。

(二)、系統模擬

EnergyPlus 採用模組化的方法，故時間間隔更加彈性，空調系統由多個部件所構成，如風機、冷熱水及、加濕器、除濕輪、蒸發冷卻、風機盤管等；每一物件的前後應設定節點以供連接，各部件可依實際建築的水或空氣迴路進行連結，並與空間進行多迴路的連接，故可模擬雙空氣迴路的空調系統(Dedicated Outdoor Air System, DOAS)；此外，已建立常用的空調系統與配置模組化，如定風量與變風量系統、組合式直接蒸發系統、熱泵、地源熱泵等型式。

(三)、設備模擬

EnergyPlus 的冷熱源設備包括吸收式冰水機、引擎驅動式冰水機、燃氣輪機式冰水機、鍋爐、冷卻塔、柴油發電機、太陽能電池等，這些設備分別用冰水、熱水與冷卻水迴路連接起來，而設備模型則採用曲線擬合的方法。

(四)、經濟模組

模組計算出能源使用成本，並且可進一步比較各種不同建築設計之成本與效益，或是既有建築更新後可得之能源成本節約量。

2.2.2 關鍵模型假設

資料中心與傳統商業建築的主要區別在於資料中心 IT 設備常年需要高負載冷卻。為了在建立資料中心能源使用和冷卻系統原型能源模型時考慮這種特點，需引入送風和回風接近溫度的概念。其中，送風溫度指空氣處理器 (AHU) 送風溫度與 IT 機櫃進風溫度之間的差值，而回風溫度則表示 AHU 回風溫度與 IT 機櫃出口空氣溫度之間的差值。接著，在 EnergyPlus 中實施這兩種接近溫度以啟用資料中心的年度模擬。

2.2.2.1 IT 設備運轉環境設定說明

ASHRAE Technical Committee TC 9.9 在《Thermal Guidelines》一書中，為 IT 電子設備指定了推薦的安全運行環境如下。在開啟和關閉狀態下，IT 設備需要不同的環境條件。當 IT 設備開啟時，進入設備的空氣條件被分為建議操作環境(recommended operating environment)和允許操作環境(allowable operating environment)推薦操作環境定義了 IT 設備最可靠的極限範圍，同時實現資料中心的高效運行。然而，IT 設備應該在允許的操作環境的範圍內運行。ITE 進口溫度是影響 IT 設備可靠性和性能的最重要參數，因此，它是資料中心原型模型的控制目標。在這項資料中心 PUE 驗證技術的研究中，我們將溫度和濕度設定為符合推薦操作環境的標準。如圖所示，A1 至 A4 類資料中心所需的乾球溫度為 18-27°C，濕度必須在露點溫度-9°C、相對濕度在 50%~70%之間（我們設定為 60%），並且露點溫度必須在 15°C 內。

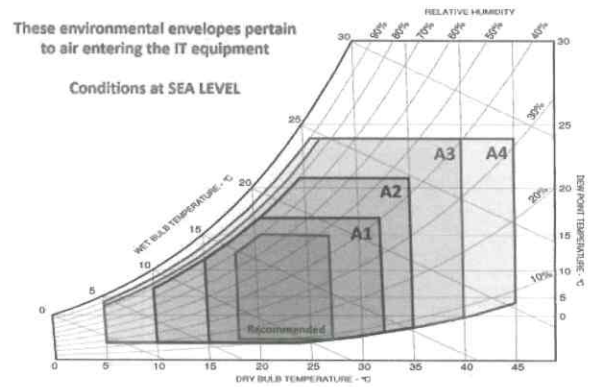


圖 2-3 資料中心各等級之空調操作環境(建議濕度 70%)

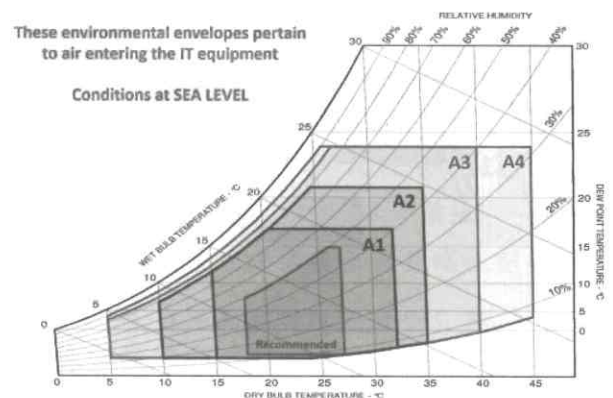


圖 2-4 資料中心各等級之空調操作環境(建議濕度 50%)

2.2.2.2 TMY3 標準氣象年

建築室內之熱環境與外界氣候息息相關，故在模擬建築環境的變化之前，須掌握外在環境的諸多氣象要素，才能真正反應室內熱環境情況。標準氣象年 TMY (Typical Meteorological Year)，其規範由美國的國家可再生能源實驗室 (NREL, National Renewable Energy Laboratory) 所規範，依據長時間氣象資料收集，統整成平均氣象年之格式，可變動為代表當地的典型氣候使用，故又稱為平均氣象年。台灣早期標準氣象年由林憲德 & 黃國倉 [4] [5] 等人在文章中提及可排除極端氣候現象，其內容採用全年逐時數據，共 8160 小時，紀錄數值包含溫度、相對濕度、露點溫度、氣壓、風速……等，一共 24 項逐時數據。



三、研究方法

3.1 建築模型設定

M. Bailey 等人根據建築面積及冷卻能力將資料中心案類型劃分[6]，按照統計特性定義出兩種規模的資料中心：(1)小型資料中心，涵蓋面積小於 185.7 m² 的三種資料中心種類 (Server closet、Server room、Localized data center)，此論文設定小型資料中心代表位於建築物內部的嵌入式；(2)大型資料中心，涵蓋面積大於 185.7 m² 的兩種資料中心種類 (Mid-tier data center、Enterprise-class data center)，在此論文設定大型資料中心代表獨立型。

3.2 外牆設定

本研究討論大型小型資料中心位於建築物內部，通過建築物外殼的熱量增加很小，假設資料中心及其相鄰區域均是調節區域，因此假設小型資料中心的外殼是絕緣的；而大型資料中心是獨立的中心，根據 ASHRAE 90.1 標準的要求，將外牆 U 值設定為 0.584 W/m²-K。

3.3 HVAC 系統設定

小型資料中心在 HVAC 系統方面，通常採用直膨式空調系統，直膨式系統又可分為水冷直膨式與氣冷直膨式兩種，其系統主要構成元件可分為壓縮機，冷凝器，膨脹閥與蒸發器等四大元件。冷媒循環過程為壓縮機將蒸發器的常溫低壓氣態冷媒吸入壓縮後成為高溫高壓的氣態冷媒，送至冷凝器，經低溫冷卻水冷卻(或強制送風冷卻)後，成為常溫低壓之液態冷媒，經膨脹閥膨脹降壓，轉為低溫低壓之液態冷媒，液態冷媒送至蒸發器，在蒸發器蒸發吸收來自 IDC 機房之冷卻負荷後，成低溫低壓之氣態冷媒，再回至壓縮機，如此不斷反覆循環，由於冷媒在蒸發器膨脹為氣

態冷媒，在膨脹過程中不斷向外界吸熱而達到冷卻的效果，因此故名為直膨式冷媒循環系統。

本研究論文模擬將小型資料中心空調系統設定為氣冷 DX computer room air conditioners (CRAC)，一般設置於資料中心機房內；對於小型 IDC 機房或電信網路機房也較常採用氣冷直膨式系統，優點為施工容易及操作方便；缺點為比較耗能。大型資料中心通常使用中央空調系統，中央空調系統冰水主機主要構成元件可區分為冷媒系統(壓縮機，冷凝器，膨脹裝置，蒸發器)，及水路系統(冷卻水塔，冷卻水循環泵，一次冰水循環泵，二次冰水循環泵)等元件。系統運行方式則為，冷卻水塔經散熱後供應低溫冷卻水經由冷卻水循環泵輸送至冰水主機(冷凝器)，作用為吸收冷媒於冷凝器散發之熱量後轉成高溫冷卻水，返回冷卻水塔；冰水主機(蒸發器)供應冰水經由一次循環泵，二次循環泵輸送至空調冷卻負載側，低溫冰水吸收空間冷卻負載之熱量後轉成高溫冰水，返回冰水主機，此系統稱為中央空調循環系統。其冰水主機依據冷卻方式可為氣冷式或水冷式，氣冷式需將主機置於戶外平面空曠處或屋頂，適用於水源取得不易之處，其優點為不需架設冷卻水塔等循環設備，減低成本；缺點為散熱性能較水冷式差。

3.4 機房設備負荷設定

考慮到在實際運行中，資料中心的負載通常不是恒定的，而是會因為各種因素而有所波動，例如應用程式的使用量、網絡流量、機房人員的活動等。因此，在設計 HVAC 系統時，需要考慮到不同負載下的能效表現。各月的 ITC 機房設備負荷設定將參考 ASHRAE 90.1-2019 附錄 G[7]，使用此月度負載分佈的設定，是為了配合資料中



心不同季節間負載變化的趨勢而設定的，透過這樣的分佈設計，可以更精確地模擬 HVAC 系統，得到更符合全年實際情況的模擬結果，以計算出年化 PUE。除了年化 PUE，本研究一併訂定出臺灣南北氣候區在 ITC 機房設備在不同負載下各月的建議 PUE 數值，此值更符合測量方瞬時測量 PUE 的模擬結果。

3.5 其他設定與總覽

為了確保案例具有代表性，建築結構、照明和空調系統的熱性能根據 ASHRAE 標準 90.1-2019(附錄 G) PERFORMANCE RATING METHOD 所定義之 Baseline 設計條件進行大型資料中心與小型資料中心之建模，此外，還參考了 Kuei-Peng Lee 與 Hsiang-Lun Chen 的研究論文[8]，該研究探討了全球氣候區資料中心水側自然冷卻的節能效益，以及 Kaiyu

Sun 等人的研究論文[9]，該研究提供了資料中心建模的原型能源模型。

四、結果與討論

4.1 大型資料中心模擬結果分析

本研究針對各月份、南北氣候、資料中心規模大小、用電密度高低及不同設備負載率共產生了 32 種模擬結果。首先，我們分析了大型資料中心高電力密度情境下各項設備負荷率的耗能占比。以 1A 氣候區大型資料中心高電力密度 100%設備負荷率模擬結果為例（如圖 4-1 所示），觀察到 IT 設備的耗能占比最高，約佔整間資料中心的 73%，另外，UPS、配電損失及照明佔 3%，剩餘的 24%則為空調耗能，包括冰水主機、空調箱風機、水泵和冷卻水塔等。接著，將每個月份的總耗能除以相應的 IT 設備耗能，計算出每月的 PUE 建議值。

表 4-1 1A 氣候區大型資料中心高電力密度 100%設備負載之各設備月耗能表

	IT 設備 (MWh)	UPS 配 電損失 (MWh)	照明 (MWh)	冰水 主機 (MWh)	風機 (MWh)	水泵 (MWh)	冷卻水 塔 (MWh)	總耗電量 (MWh)	PUE
Jan	2,133	89	4	322	171	93	37	2,849	1.335
Feb	1,927	80	3	291	170	84	41	2,595	1.347
Mar	2,133	89	4	324	207	94	47	2,897	1.358
Apr	2,064	86	3	318	222	91	61	2,845	1.378
May	2,133	89	4	341	172	92	67	2,898	1.358
Jun	2,064	86	3	332	182	90	66	2,823	1.368
Jul	2,133	89	4	346	208	93	68	2,941	1.379
Aug	2,133	89	4	346	230	94	67	2,963	1.389
Sep	2,064	86	3	331	166	89	64	2,804	1.358
Oct	2,133	89	4	336	188	93	68	2,910	1.364
Nov	2,064	86	3	317	201	90	57	2,819	1.366
Dec	2,133	89	4	324	230	94	47	2,920	1.369

Total	25,116	1,046	42	3,927	2,347	1,097	690	34,265	1.364
占比	73.30%	3.05%	0.12%	11.46%	6.85%	3.20%	2.02%		

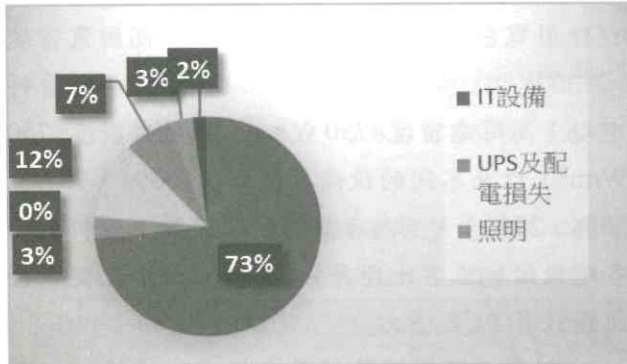


圖 4-1 1A 氣候區大型資料中心高電力密度 100%設備負載之各設備耗能占比

4.2 乾溼球溫度對資料中心耗能的影響

空調系統在資料中心中起著重要的作用，它對內部的能源消耗有顯著影響。具體而言，不同類型的空調系統會受到不同外部氣溫條件的影響。本研究設定兩種規模的資料中心種類為：大型資料中心代表獨立型及小型資料中心代表位於建築物內部的嵌入式；大型資料中心在 HVAC 系統方面，採用中央空調系統，小型資料中心使用氣冷直膨式空調系統。

對於中央空調系統來說，由於使用冷卻水塔，因此受濕球溫度的影響更為顯著，當外部濕球溫度升高時，中央空調系統需要更多的冷卻水來冷卻空氣，以維持室內的溫度和濕度，這導致冷卻水塔需要消耗更多的能量來提供足夠的冷卻效果，進而增加了空調系統的能源消耗；另一方面，氣冷直膨式空調系統，它主要受乾球溫度的影響。當外部乾球溫度升高時，直膨式空調系統需要更多的冷卻能量來保持室內的溫度穩定，這意味著壓縮機需要更多的能量來提供足夠的冷卻效果，從而增加了空調系統的能源消耗。

在本研究的能源模擬結果中，展示了在

不同資料中心規模、用電密度和設備負載率的情況下，各月份的設備耗能量，以此計算了每個月份的 PUE 值，方法是將總用電量除以 IT 設備耗能量，然後，將每個月份的乾溼球溫度與對應的 PUE 值進行迴歸分析，得到了一條迴歸曲線。在大型資料中心高電力密度和 75% 設備負載率的情況下，對 1A2A 氣候區的 12 個月份的濕球溫度和 PUE 值進行了迴歸分析。結果如圖 4.2 顯示，迴歸模型的擬合度很好，其中的 R 平方值為 0.77，超過了 0.75。值得注意的是，我們的研究共有 32 組迴歸方程式，其中所有方程式的 R 平方值都超過了 0.75，這表示迴歸模型的擬合結果都良好。

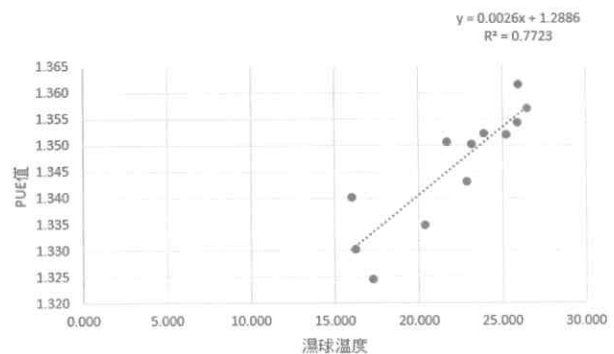


圖 4-2 1A 氣候區大型資料中心高電力密度 75% 設備負載濕球溫度與 PUE 迴歸曲線

4.3 分析各影響因素後的全年建議 PUE 值表

若測量方能提供長期電力消耗的數據，我們可以更全面地評估資料中心的能源消耗情況。為此，本研究論文提供了全年資料中心耗能狀況的評估表，稱為全年 PUE 值影響因素評估表如。



表 4-2 全年 PUE 值影響因素評估表

	1A 大型 機房 高 IT	1A 大型 機房低 IT	1A 小型 機房 高 IT	1A 小 型機房 低 IT
PUE	1.381	1.400	1.561	1.551
	2A 大 型機房 高 IT	2A 大型 機房低 IT	2A 小 型機房 高 IT	2A 小 型機房 低 IT
PUE	1.374	1.393	1.512	1.501

該評估表基於 ASHRAE 90.1 附錄 G 中的資料，其中包含了不同月份的機房設備負載概況，將 25%、50%、75% 和 100% 的設備負載率分別分配到各个月份中，以模擬真實資料中心運作時負載不是單一值的情況，這樣可以更真實地還原資心的運作狀態。為一個名為「PUE 值影響因素評估表」的工具，以便測量方在短期 PUE 值測

量時能夠快速參考。該表格結合了多個關鍵影響因素，包括資料中心所屬的氣候區域（1A：台中以南含台中，2A：台中以北），資料中心規模（大型：面積大於等於 185.7 m²；小型：面積小於 185.7 m²），用電密度高低（大型資料中心：高用電密度 >2500 W/m²，低用電密度 ≤2500 W/m²；小型資料中心：高用電密度 >750 W/m²，低用電密度 ≤750 W/m²）以及不同的設備負荷率（100%、75%、50%、25%）。至為各關鍵影響因素下資料中心各項設備耗能占比逐月分析圖，可藉由此耗電占比圖計算 PUE 值。

測量方可根據其所屬資料中心的特徵，在評估表中查找相對應的條目，並依據當下的月份，獲取建議的 PUE 值。這些建議值可供測量方與實際測量值進行對比，從而更全面地評估資料中心的設計和能源效率優劣。

表 4-3 1A 氣候區大型資料中心高電力密度各設備負載率之各月 PUE 建議值表

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
100%	1.320	1.332	1.343	1.363	1.343	1.352	1.363	1.373	1.343	1.349	1.350	1.353
75%	1.325	1.330	1.335	1.351	1.352	1.354	1.357	1.361	1.352	1.350	1.343	1.340
50%	1.366	1.371	1.373	1.387	1.399	1.398	1.398	1.399	1.399	1.394	1.382	1.374
25%	1.619	1.628	1.627	1.646	1.669	1.671	1.673	1.670	1.668	1.666	1.647	1.622

表 4-4 1A 氣候區大型資料中心低電力密度各設備負載率之各月 PUE 建議值表

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
100%	1.339	1.347	1.357	1.375	1.364	1.369	1.379	1.388	1.365	1.367	1.365	1.365
75%	1.343	1.349	1.353	1.369	1.373	1.375	1.378	1.382	1.374	1.371	1.363	1.358
50%	1.389	1.394	1.396	1.411	1.424	1.424	1.424	1.425	1.425	1.419	1.407	1.397
25%	1.650	1.654	1.656	1.673	1.698	1.704	1.709	1.708	1.702	1.696	1.673	1.665

表 4-5 1A 氣候區小型資料中心高電力密度各設備負載率之各月 PUE 建議值表

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
100%	1.533	1.540	1.549	1.566	1.565	1.581	1.595	1.600	1.575	1.569	1.557	1.555
75%	1.527	1.531	1.536	1.550	1.564	1.578	1.588	1.587	1.575	1.564	1.545	1.537
50%	1.530	1.533	1.536	1.549	1.573	1.585	1.594	1.591	1.585	1.570	1.546	1.534
25%	1.634	1.633	1.628	1.629	1.654	1.665	1.669	1.660	1.670	1.653	1.633	1.621



表 4-6 1A 氣候區小型資料中心低電力密度各設備負載率之各月 PUE 建議值表

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
100%	1.513	1.520	1.529	1.546	1.548	1.563	1.576	1.579	1.557	1.550	1.537	1.534
75%	1.512	1.516	1.521	1.537	1.553	1.566	1.576	1.576	1.564	1.552	1.532	1.522
50%	1.527	1.508	1.534	1.551	1.578	1.591	1.600	1.596	1.589	1.573	1.547	1.533
25%	1.622	1.622	1.624	1.638	1.682	1.697	1.707	1.700	1.696	1.673	1.639	1.615

表 4-7 2A 氣候區大型資料中心高電力密度各設備負載率之各月 PUE 建議值表

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
100%	1.317	1.326	1.337	1.354	1.337	1.348	1.362	1.373	1.340	1.344	1.343	1.350
75%	1.320	1.323	1.328	1.341	1.345	1.350	1.356	1.361	1.348	1.344	1.335	1.337
50%	1.361	1.362	1.365	1.375	1.392	1.393	1.397	1.398	1.395	1.387	1.372	1.370
25%	1.610	1.612	1.611	1.624	1.660	1.666	1.672	1.669	1.664	1.657	1.627	1.614

表 4-8 2A 氣候區大型資料中心低電力密度各設備負載率之各月 PUE 建議值表

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
100%	1.334	1.341	1.350	1.365	1.357	1.365	1.378	1.387	1.361	1.361	1.356	1.361
75%	1.337	1.341	1.346	1.358	1.366	1.370	1.377	1.382	1.370	1.364	1.354	1.354
50%	1.383	1.385	1.387	1.398	1.416	1.419	1.424	1.425	1.421	1.412	1.397	1.393
25%	1.659	1.668	1.670	1.693	1.704	1.707	1.709	1.707	1.704	1.703	1.688	1.672

表 4-9 2A 氣候區小型資料中心高電力密度各設備負載率之各月 PUE 建議值表

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
100%	1.532	1.538	1.548	1.560	1.551	1.570	1.597	1.599	1.561	1.546	1.550	1.553
75%	1.526	1.528	1.534	1.543	1.548	1.565	1.590	1.586	1.560	1.537	1.537	1.535
50%	1.528	1.529	1.534	1.541	1.555	1.571	1.596	1.589	1.567	1.540	1.538	1.531
25%	1.631	1.629	1.625	1.619	1.641	1.650	1.667	1.659	1.650	1.627	1.622	1.621

表 4-10 2A 氣候區小型資料中心低電力密度各設備負載率之各月 PUE 建議值表

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
100%	1.512	1.517	1.527	1.540	1.534	1.552	1.578	1.579	1.544	1.527	1.531	1.532
75%	1.510	1.512	1.519	1.529	1.537	1.554	1.578	1.575	1.549	1.525	1.524	1.519
50%	1.524	1.503	1.531	1.542	1.558	1.576	1.603	1.595	1.572	1.542	1.538	1.528
25%	1.618	1.612	1.616	1.626	1.653	1.677	1.711	1.698	1.674	1.631	1.624	1.613

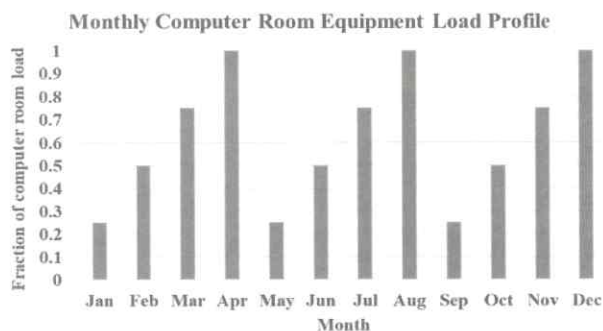


圖 4-3 ASHRAE 90.1 附錄 G 各月機房設備負載

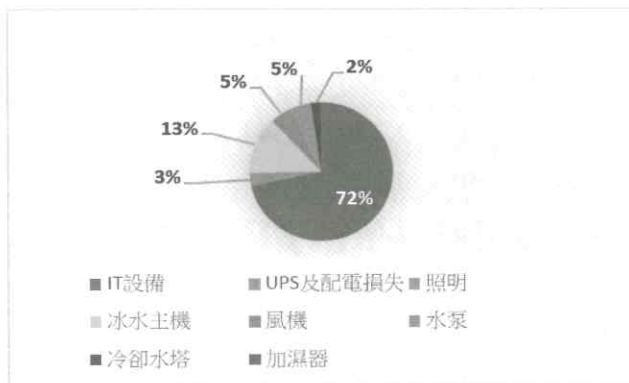


圖 4-4 1A 氣候區大型資料中心高電力密度之設備耗能占比年分析圖



圖 4-5 1A 氣候區大型資料中心低電力密度之設備耗能占比年分析圖

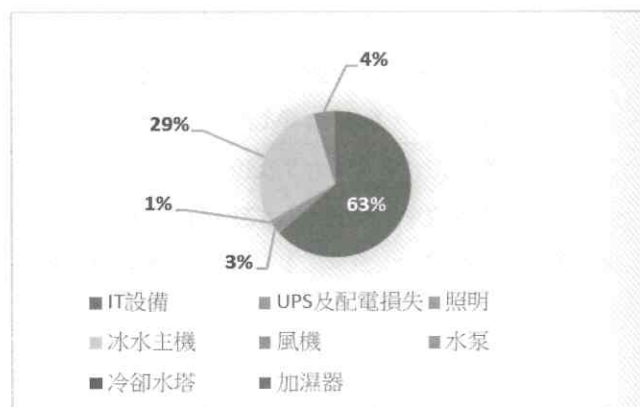


圖 4-6 1A 氣候區小型資料中心高電力密度之設備耗能占比年分析圖

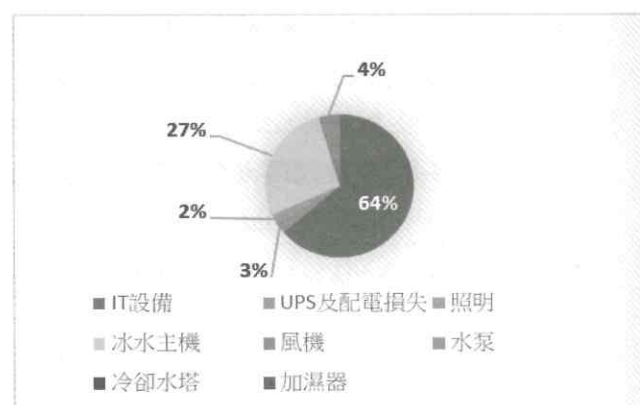


圖 4-7 1A 氣候區小型資料中心低電力密度之設備耗能占比年分析圖

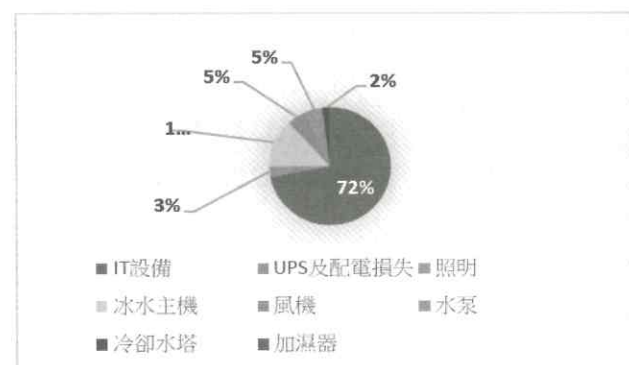


圖 4-8 2A 氣候區大型資料中心高電力密度之設備耗能占比年分析圖

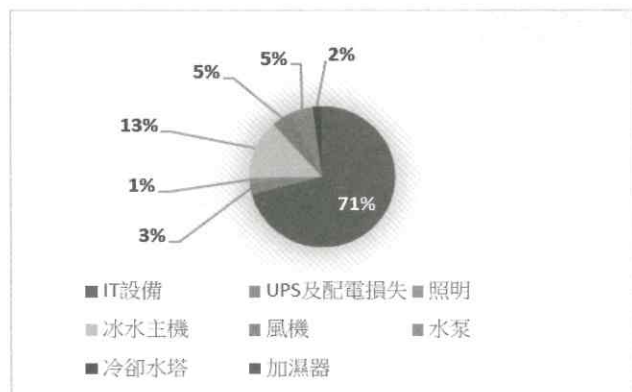


圖 4-9 2A 氣候區大型資料中心低電力密度之設備耗能占比年分析圖

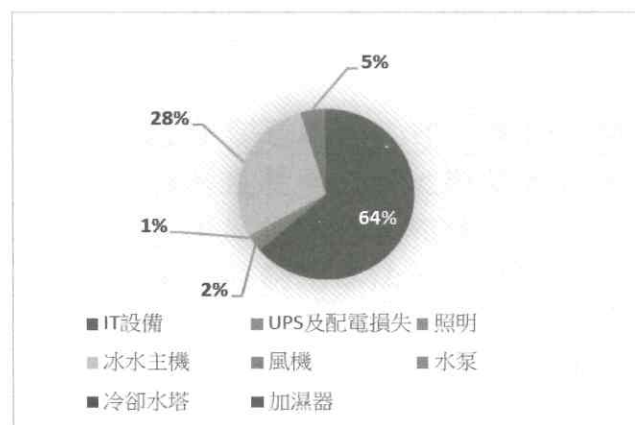


圖 4-10 2A 氣候區小型資料中心高電力密度之設備耗能占比年分析圖

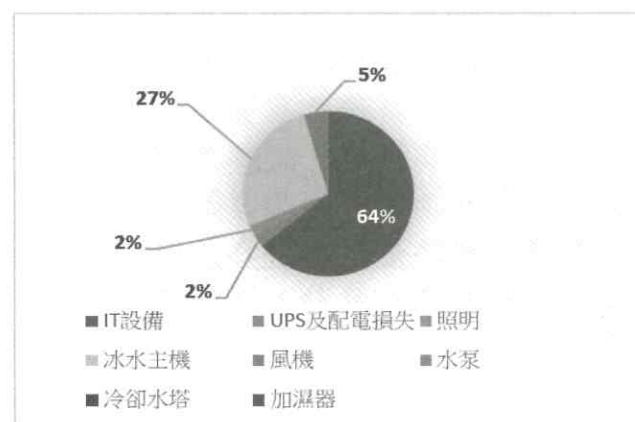


圖 4-11 2A 氣候區小型資料中心低電力密度之設備耗能占比年分析圖

五、結論

綜上所述，本研究獲得以下結論：

1. 資料中心的規模、用電密度、設備負載率和氣候條件對 PUE 值產生了明顯的影響。研究結果顯示，隨著資料中心規模的增加和用電密度的提高，PUE 值顯著降低，這表明整體 IT 設備的用電效率得到了提升。
2. 本研究之分析結果顯示，因為氣候關係，北部 2A 氣候區的 PUE 值低於南部 1A 氣候區。在氣溫較低的地區，空調耗電量相對較低，IT 設備所佔比例較高。
3. 依設備卸載能力而定，IT 設備負載為 100% 時的 PUE 值並不依定都是最低的。

六、誌謝

本研究感謝台灣智慧能源產業協會 (TaiSEIA) 在研究設計與實務模擬過程中的協助與支持。TaiSEIA 致力於資料中心能效指標的推廣與制度建構，提供了技術諮詢，使模擬模型更貼近實際運轉條件，進一步強化了模擬結果與真實機房的對應性。感謝 TaiSEIA 持續扮演產官學界之橋樑，推動資料中心能源效率提升與驗證技術發展，為本研究提供堅實後盾。

七、參考文獻

- [1] ASHRAE Technical Committee TC 9.9. (2019). Thermal Guidelines.
- [2] Lei, L., et al. (2021). Modeling and sensitivity analysis of data center energy and water use across climate zones and cooling system types. Energy and Buildings, 241, 110944.
- [3] 台灣綠色產業基金會 (編). (2021). 2021 年非生產性質行業能源查核年報。臺北：經濟部能源局。
- [4] 林憲德、黃國倉. (2005). 臺灣 TMY2 標準氣象年之研究與應用. 建築學報, 53, 79-94.
- [5] 林憲德、張思源. (1987). 建築空調耗能分析用平均氣象年資料之研究. 行政院國家科學委員會, 台灣。



- [6] Bailey, M., Eastwood, M., Grieser, T., Borovick, L., Turner, V., & Gray, R.C. (2006). Special Study: Data Center of the Future. IDC #06C4799.
- [7] ASHRAE.(2019)Standard.90.1-2016(Appendix G): Performance Rating Method.
- [8] Lee, K.-P., & Chen, H.-L. (2013). 全球氣候區資料中心水側自然冷卻節能效益之研究。Journal Name, 64, 103-112.
- [9] Sun, K., Luo, N., Luo, X., & Hong, T. (2021). Prototype energy models for data centers. Energy and Buildings, 231, 110603.