

國立台灣大學生農學院生物環境系統工程學研究所

碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

外殼晝光利用對空調及照明耗能影響之研究

The Effect of Daylighting Utilization for Different Building

Envelope Design on HVAC and Lighting Energy

傅群

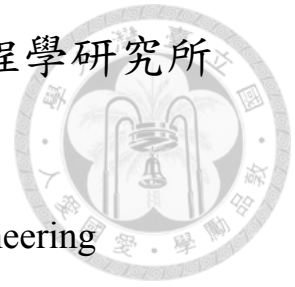
Chun Fu

指導教授：黃國倉 博士

Advisor : Kuo-Tsang Huang , Ph.D.

中華民國 104 年 6 月

June, 2015





謝誌

首先，必須感謝黃國倉老師數年來的悉心教導。從大三剛步入研究室時，慢慢學習如何閱讀國際期刊和建構基本知識，中間也給予許多參與計畫和國際研討會的機會，能和許多來自各地的專業人士有所交流和學習，到如今碩士畢業，已具備了足夠的專業知識和健全的軟體工具能力，以完成碩士論文的重大任務。

在研究室的夥伴們，包含了過去照料我們至深的文元和珮羚，畢業後還願意撥冗還關心我們研究室的狀況，實在備感溫馨和感激；還有一直以來為研究室付出和幫忙的學弟們，歷朕、嘉元和塤騰，承翰更是肩擔了研究室內的許多重責大任，希望未來研究室能交給你們繼續成長和茁壯；當然，還有已同窗六年的好友孟杰和鎧韓，在執行計畫或撰寫論文時，有你們的加油打氣和扶持，是我繼續支持下去的重要倚靠，也很懷念這段時間以來一起在研究室生活中的點滴。

最後，要特別感謝身邊的親人。感謝芷瑄從大學生涯就成為了我生命中的重要部分，一路上陪伴著我成長和步過各個關卡；也很感謝家人，永遠有個溫暖的家讓我依歸，壹玄和傳猷永遠是我碰上任何問題時，可以傾訴和討論的重要兄弟，最需要感謝的是教養我二十幾年的父母，願意無怨無悔的一直擔任我人生中的後盾和支持，如今雖是我得到了這個碩士學位的肯定，但這份榮耀肯定是屬於你們的。



中文摘要



台灣身處在亞熱帶的地區，全年強烈的直達日射及熱季較長的情況下，為了解決建築室內環境的高溫，需要消耗相當大量的空調能源。因此，常見的建築外殼設計策略有增設外遮陽板、縮減開口率、改變使用的玻璃材質等，藉由阻擋或減少直射進入室內的輻射熱來降低空調耗能，但是，也因此阻絕了部分晝光進入室內，而可能需要額外的人工照明以彌補照明量，如此一來，不但造成照明耗能增加，照明所連帶的發散熱也會造成額外的空調能源消耗。

除了建築能源的考量外，室內環境中的視覺舒適度也是需要被考慮的。過去有研究指出，視覺舒適度對人員的工作效率和學習效率是有正面影響的，而良好的外殼設計除了有助於提升視覺舒適度，也可以避免過亮晝光所帶來的不舒適感，所以，本研究會同時探討外殼設計對建築能源及視覺舒適度的影響。

為了深入了解不同外殼設計所致影響，本研究探討了不同室型、遮陽板設計、玻璃材質選用等因子，透過了光環境模擬軟體 DAYSIM 和建築能源模擬軟體 EnergyPlus，對全因子配列的 1458 個不同外殼設計辦公空間，分別進行光環境和建築能源的模擬，而後進行結果數據的 ANOVA(變異數分析)統計分析和相關探討，以得到各外殼設計策略的影響效果和挑選最佳的外殼設計組合。由於建築能源和視覺舒適度屬不同種類指標而難以挑選出最佳方案，因此，本研究透過引用文獻的人員生產力計算公式，將室內環境品質轉換為人員工作效率，以進行經濟上的評估和比較。

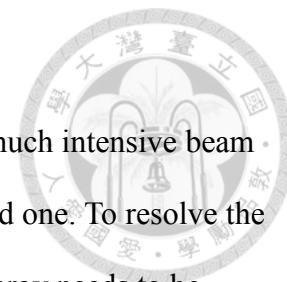
研究成果顯示，視覺舒適度和建築節能大致上呈現正相關，若提升可利用晝光比率(Useful Daylight Index, UDI(300-2000))，因晝光利用而帶來的照明節能和因發散熱減少的空調節能都會相當顯著；外殼設計策略上，室型、開口率和玻璃材質都有相當大的影響效果，然而，這些因子在建築能源間或與視覺舒適度間會出現需要權衡的情況，如開口率 40%時相較總平均值有 1.7 kWh/m².a 的空調節能效果，但也有-1.4%的 UDI(300-2000)負效果，因此必須謹慎的挑選因子的水準；三

種室型之中，具有最佳視覺舒適度及建築節能的是寬長型室型，因為採光較易而容易提升晝光品質，也能因此節省下建築能源，若和全開燈和大開窗的基線建築相比，在 UDI(300-2000)最多可改善 33.4%，在 UDI(>2000)最多可改善 62.6%，在建築能源最多可改善 56.9%(空調為 33.8%，照明為 23.0%)。



關鍵字：晝光利用、視覺舒適度、建築能源模擬、光環境模擬、建築外殼設計

Abstract

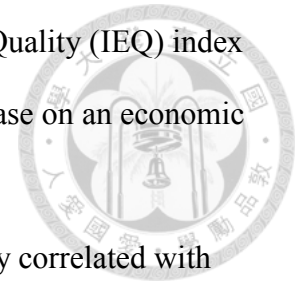


In Taiwan, which is in the subtropical area in Asia, there is much intensive beam radiation among whole year, and the hot season is longer than cold one. To resolve the problem of indoor high temperature, a large amount of HVAC energy needs to be consumed. Thus, some common strategies for building envelope design are exterior shading device, reducing the WWR (Window to Wall Ratio), or changing the glazing types. By blocking or reducing part of the radiation heat from outdoors, it helps to save more HVAC energy consumption. However, those strategies also hinders some daylight from entering into the room, therefore increasing additional artificial lighting to compensate for the lack of lights. So, lighting energy increases, and the heat gain from the lighting system also causes additional cooling energy.

In addition to consideration of building energy, visual comfort in indoor environment needs to be considered as well. Previous studies have pointed out that visual comfort have positive impact on both work and learning efficiency. A well designed building envelope can both enhance visual comfort and avoid the discomfort caused by excessive daylight. So, the impact of different building envelope designs on both building energy and visual comfort are conducted in this study.

In order to deeply understand influence of different building envelope design, this study investigated several factors, such as room shapes, shading device designs, glazing types, and so on. Through daylighting simulation tool (DAYSIM) and building energy simulation tool (EnergyPlus), totally 1458 office cases with different envelope designs are simulated. Then, the simulation results were analyzed through ANOVA (Analysis of variance) and discussed so as to find out influence of each factor and some optimal building envelope designs. Since building energy could not be compared with visual comfort directly, it's hard to find the best one among all cases. Hence, according to a

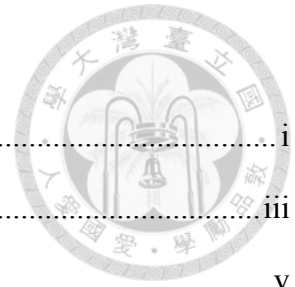
formula from a citation, which can convert Indoor Environment Quality (IEQ) index into human productivity, in order to evaluate and compare each case on an economic basis.



The simulation results shows that visual comfort is positively correlated with energy saving benefits. If UDI (Useful Daylight Index) is enhanced, the energy-saving benefits from less lighting demand and decreased HVAC energy due to less heat gain from lighting device will be significant. Among all factors of building envelope design, room shape, WWR, and glazing types are the most influential. However, sometimes there are compromise between building energy and visual comfort in these factors. For example, WWR of 40% has a mean effect of 1.7 kwh/m².a, which is compared to the total average of performance, but it also has negative impact of -1.4% on UDI(300-2000). As a result, it's necessary to carefully pick proper level of the factor. Among the three room shapes, the wider one has the best visual comfort and energy-saving benefit. Because it's easier to utilize the daylight and improves the quality of indoor daylight, more building energy could be saved. If compared to baseline, which is set as light-on during workhour and WWR of 80%, UDI(300-2000) could be improved by 33.4%, and UDI(>2000) could be reduced by 62.6%. In terms of building energy, it could be reduced by totally 56.9% (33.8% for HVAC energy, and 23.0% for lighting energy).

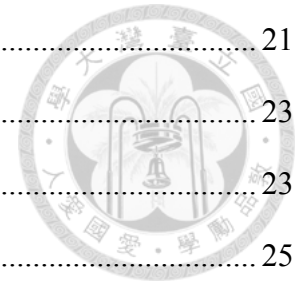
Keyword: daylight utilization 、 visual comfort 、 building energy simulation 、 daylighting environment simulation 、 building envelope design

目錄



謝誌	i
中文摘要	iii
英文摘要	v
目錄	vii
圖目錄	ix
表目錄	xi
第一章 研究動機與目的	1
1-1 研究動機	1
1-2 研究目的	2
1-3 研究流程	3
第二章 文獻回顧	5
2-1 晝光利用相關文獻	5
2-1.1 晝光利用對人員效率的影響	5
2-1.2 晝光利用對建築能源的影響	6
2-1.3 晝光利用對建築能源和視覺舒適度的影響	6
2-2 熱舒適度相關理論	9
第三章 研究方法	11
3-1 模擬工具介紹	11
3-1.1 EnergyPlus 簡介	11
3-1.2 DAYSIM 簡介	12
3-2 視覺舒適度和晝光利用指標介紹	15
3-2.1 Daylight Factor	15
3-2.1 Useful Daylight Index (UDI)	15
3-3 室內環境指標與人員生產力計算	16

3-4 柏拉圖最佳解	21
第四章 研究對象與選用因子	23
4-1 研究對象設定與說明	23
4-2 選用因子介紹	25
4-3 基線建築介紹	28
第五章 晝光模擬實測驗證	29
5-1 數值模型驗證方法	29
5-2 量測儀器介紹	32
5-3 模擬與實測結果比對	32
第六章 模擬分析與討論	35
6-1 晝光利用分析	35
6-2 建築耗能分析	37
6-3 辦公人員生產力分析	40
6-4 綜合分析	42
6-4.1 不分室型討論	42
6-4.2 分開室型討論	45
第七章 結論與建議	53
7-1 結論	53
7-2 建議	55
參考文獻	56

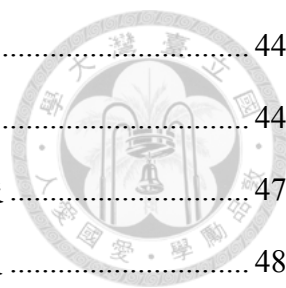


圖目錄



圖 1-1 研究流程	4
圖 2-1 是否有晝光利用的銷售成績比較[1]	5
圖 2-2 關鍵字”building energy”和”visual comfort”的逐年文獻數量圖	7
圖 2-3 PMV 與 PPD 之關係圖	10
圖 3-1 EnergyPlus 計算的三大部分(取自 EnergyPlus Engineering Reference)	11
圖 3-2 (a)熱輻射法計算示意圖 (b)光跡追蹤法計算示意圖	13
圖 3-3 Daylight Coefficient 分割網格及計算示意圖	14
圖 3-4 計算人員生產力及全年經濟損失的流程圖	17
圖 3-5 柏拉圖最佳解的示意圖	21
圖 4-1 辦公建築相關的時程安排	24
圖 4-2 工作區域及判斷開燈示意圖	24
圖 4-3 三種室型的平面圖	25
圖 4-4 某一方案的建築模型示意圖(窄長型、開口率 80%、遮陽板位置為 1:4) ...	27
圖 5-1 博雅教學大樓 4 樓平面圖	29
圖 5-2 博雅 402 教室平面圖及測點分布	30
圖 5-3 博雅 402 教室及周遭環境建模圖示	30
圖 5-4 實測與模擬結果的等高線圖	34
圖 6-1 UDI(300-2000)因子效果圖	36
圖 6-2 UDI(>2000)因子效果圖	36
圖 6-3 空調耗能因子效果圖	39
圖 6-4 照明耗能因子效果圖	39
圖 6-5 空調和照明耗能因子效果圖	39
圖 6-6 基線建築和柏拉圖最佳解方案的 MRT 分布比較	42
圖 6-7 不分室型下，建築耗能和晝光利用比較	43

圖 6-8 不分室型下，建築耗能和晝光利用的柏拉圖最佳解	44
圖 6-9 不分室型下，柏拉圖最佳解的綜合表現	44
圖 6-10 窄長型室型下，基線建築與柏拉圖最佳解的表現比較	47
圖 6-11 正方型室型下，基線建築與柏拉圖最佳解的表現比較	48
圖 6-12 寬長型室型下，基線建築與柏拉圖最佳解的表現比較	50



表目錄



表 4-1 本研究建築方案的基本資料	23
表 4-2 本研究採用的玻璃性能	26
表 4-3 本研究採用的因子與水準	27
表 4-4 基線建築的因子選用	28
表 5-1 驗證時電腦模型所使用的輸入值	31
表 5-2 TES-1339R 照度計詳細規格表	32
表 5-3 實測與模擬結果之誤差整理	34
表 6-1 UDI(300-2000)變異數分析表	35
表 6-2 UDI(>2000)變異數分析表	36
表 6-3 空調耗能變異數分析表	37
表 6-4 照明耗能變異數分析表	38
表 6-5 空調和照明耗能變異數分析表	38
表 6-6 三種室型基線建築的經濟損失	40
表 6-7 柏拉圖最佳解上方案的經濟損失(空調與照明權衡下的結果)	41
表 6-8 不分室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準及結果	45
表 6-9 不分室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準數	45
表 6-10 窄長型室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準及結果	46
表 6-11 窄長型室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準數	46
表 6-12 正方形室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準及結果	47
表 6-13 正方形室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準數	48
表 6-14 寬長型室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準及結果	49
表 6-15 寬長型室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準數	49
表 6-16 所有室型下，柏拉圖最佳解方案的改善率(對比基線建築)	51
表 7-1 各建築外殼設計因子是否具顯著影響	53



第一章 研究動機與目的



1-1 研究動機

人類史中，自從工業革命的到來，所有的科技和物質生活都有了日新月異的快速發展，然而，卻也造成了能源的大量消耗和環境的破壞，而建築能源又是佔了人類生活中很大的一部分，因此，要如何有效的節約建築所耗費的能源，一直是很受到重視、和持續被探討的議題。

以台灣位在的亞熱帶地區而言，全年強烈的直達日射常常會造成建築室內環境的高溫，為了維持室內的舒適度，往往會需要大量的空調能源來移除熱量。因此，在台灣常見的解決策略有增設外遮陽板、縮減開口率、改變使用的玻璃材質等，藉由阻擋或減少直射進入室內的輻射熱來降低冷房負荷，但是，這樣的作法同時也阻絕了部分的晝光進入室內，而可能造成因室內照明不足而需要人工照明補足的情況，如此一來，也會造成照明的能源需求增加，除此之外，人工照明的發散熱也會造成部分的冷房負荷，所以建築外殼的節能設計必須謹慎權衡這之間的取捨。

而除了能源上的議題外，建築環境內的舒適度也是需要被重視的，尤其在輻射強烈的台灣，建築開窗的設計很容易影響到室內人員的視覺舒適度，過大的開口容易造成過亮的晝光進入室內，造成眩光的情形而影響到工作效率，但是一味地降低開口，也會造成晝光利用的效果變差，而無法滿足一般人心裡對於室內晝光的需求。除此之外，人體若直接接受到進入室內的直達日射，也會造成相當的熱不舒適，因此，如何在建築開口設計外遮陽板時，同時考量建築能源和視覺舒適度，是個複雜但值得深入探討的議題。

1-2 研究目的



為了瞭解不同外殼設計對於建築能源和室內舒適度的影響，本研究的目的如下所列：

(一) 探討各建築外殼設計因子對建築能源及視覺舒適度的影響效果：

建築外殼設計相關的因子繁多，如開口大小、遮陽板的設計等，為了逐一了解每項因子對於建築能源、視覺舒適度的影響，本研究採用了建築能源和光環境的模擬工具，對全因子水準配列、不同外殼設計的 1458 個之樣本進行模擬，最後針對模擬的結果進行分析和討論。

(二) 探討在設計建築外殼時，建築能源和視覺舒適度之間的關係：

透過柏拉圖最佳解的概念，挑選出若干個擁有較佳建築節能和視覺舒適度的方案，並比較方案之間建築能源和視覺舒適度的權衡關係，以作為決策者做決定時的參考。

(三) 計算人員工作效率以進行經濟評估：

由於建築能源和視覺舒適度分屬不同類型的指標，沒有辦法在同樣的基準下進行比較，而因此難以再從柏拉圖最佳解前緣(Pareto Front)中挑出最佳方案。透過過去文獻的生產力計算公式，可將室內環境品質(作業面照度、熱舒適度、環境噪音和 CO₂ 濃度)轉換為室內人員效率，進而評估經濟上的價值，並由此嘗試找出最佳方案。



1-3 研究流程

關於本研究整體的研究流程，可參考圖 1-1。研究的最一開始，首先從文獻中回顧過去在建築外殼設計上的策略，包含建築節能、晝光利用等等的目標，以了解常用的設計手法和相關的理論背景知識，除此之外，透過閱讀較為近期的文獻，也有助於掌握現今較為進步的模擬工具和新發展的指標或概念，藉此方能訂定數個影響力較大的因子並選取適當的因子水準，並且挑選較為準確和合適的模擬工具進行模擬研究。

在選取適當的因子及水準後，即進行全配列組合的 1458 個模擬樣本。本研究為求模擬結果的精準，採用了已驗證過且在學術界應用廣泛的 EnergyPlus 和 DAYSIM，分別針對建築能源和建築光環境進行模擬。EnergyPlus 負責輸出各個方案的建築耗能(包含了空調及照明耗能)，然而在照明耗能的計算上，需仰賴 DAYSIM 的晝光模擬資料轉換為照明開關的時程表，由於軟體間資料的輸出輸入和資料判斷等工作量龐大，因此，此處由 Matlab 軟體作為軟體間合作和進行簡單計算的平台。DAYSIM 還會另輸出視覺舒適度指標 UDI (Useful Daylight Index)，以用來評估視覺舒適度的表現。

此外，為了讓視覺舒適度和建築能源在數個最佳解中，能再進一步加以比較，本研究將最佳的幾個方案，室內環境品質(Indoor Environment Quality)轉換為人員生產力，以提供經濟的比較基準，由於此計算需要的環境因子包含了作業面照度、熱舒適度、環境噪音和 CO₂ 濃度，因此，需要 EnergyPlus 和 DAYSIM 輸出所需的資料以進行後續計算。

最後，根據計算出來的建築耗能、視覺舒適度指標和人員生產力，進行 ANOVA 統計分析以了解各因子的影響是否顯著、討論各因子水準的影響力，並且討論幾組擁有最佳性能表現的方案，同時也探討建築能源和視覺舒適度的關係。

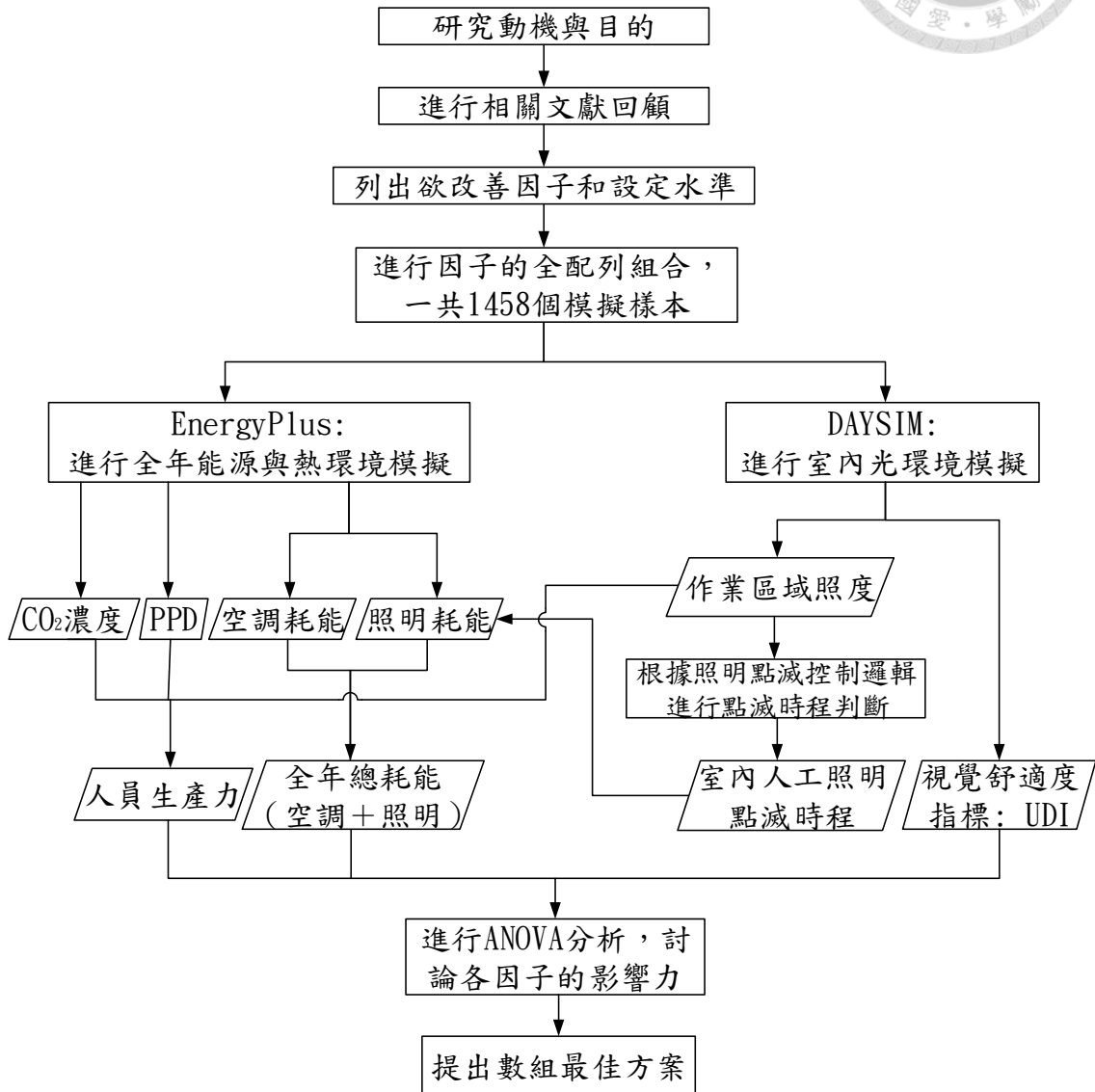


圖 1-1 研究流程

第二章 文獻回顧



2-1 晝光利用相關文獻

2-1.1 晝光利用對人員效率的影響

一直以來，晝光利用對建築環境而言，是相當廣泛應用而且重要的要素，其相關的議題包含：室內照明設計、視覺舒適度、照明節能、結合空調耗能考量的節能分析等。除了在建築美學的設計上，晝光是很重要的設計元素外，適當的晝光利用也可以影響人們的工作或是學習的效率。

在 1999 年，美國太平洋煤氣和電力公司(Pacific Gas and Electric Company)資助了一項調查晝光利用和零售商銷售成績關係的研究，Heschong [1]一共調查了 108 個功能和運作皆相仿的零售商店，其中三分之二左右的店家有著天井的採光，另外三分之一則無，在進行了長達 18 個月份的調查後，發現在有裝設天井引進晝光的情況下，店面的銷售成績都明顯的較好，平均而言，有採用天井採光的店家會較無採光的多 31%至 49%的銷售量(如圖 1-2)，另外，類似的研究也應用於調查晝光利用和學生學習表現的關係，Heschong, Wright [2]調查了三個小學校區，並分別進行了閱讀和數學的標準化測驗，結果顯示三個地區的晝光利用皆有利於測驗成績，因此較佳的晝光利用對於學校學童的學習表現也會有正面影響。

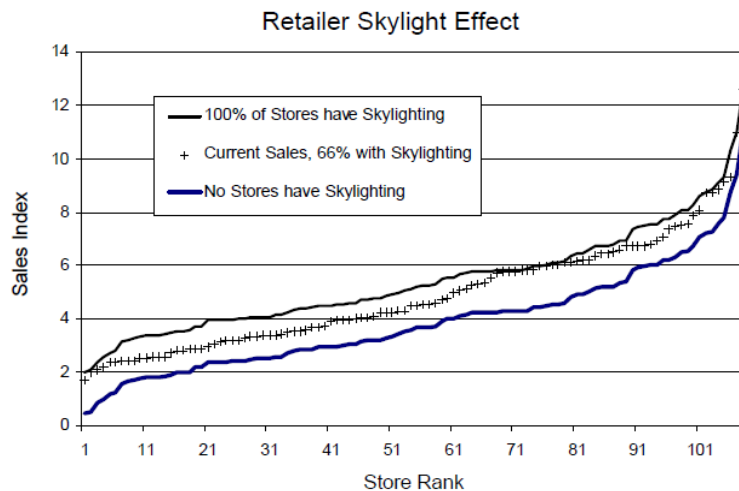


圖 2-1 是否有晝光利用的銷售成績比較[1]



2-1.2 晝光利用對建築能源的影響

然而，晝光引入的同時，進入建築室內的輻射熱也會造成冷房負荷的增加，尤其在直達日射強烈、熱季較長的亞熱帶台灣，空調能源幾乎是佔據建築能源整體的最大比例，因此，避免外界輻射熱以降低空調能源消耗，一直都是很重要且持續在討論的議題。外殼設計、裝設外遮陽板或是玻璃材質選用都是相當有效的策略，然而，這些空調節能策略通常也會因阻擋進入室內的晝光而增加照明能源，讓空調節能和照明節能呈現較為矛盾的關係，國內也有不少文章在探討這之間的關係。

陳聖仙 [3]為了進行建築節能的經濟效益評估，依據 ENVLOAD 與 PACS 理論之基礎，加上平均氣象年資料的逐時晝光利用分析，即可針對外殼設計的空調節能效益和照明節能效益進行分析，同時也探討在台灣不同氣候分區的效益。

陳逸倫 [4]欲研究外部遮陽對人工照明用電和空調負荷的影響，透過電腦動態模擬不同開窗率和遮陽板形式的情況，試圖建立在不同方位開口部對應的最佳遮陽板組合形式。結論包含(1)水平遮陽板設置以單片水平遮陽板最佳、(2)建議開窗率 25%以上，深度比 0.4 以上，而開窗率愈高時應配合深遮陽、(3)開窗率小於 20%，可不須設置遮陽板及 (4)冷房溫度宜設定在 26~28°C 間。

吳俊毅 [5] 的研究，以澎湖地區做為研究目標區域，根據當地的氣候資料進行模擬，評估三種不同的外遮陽型式(水平、垂直及格柵)，在 48 不同方位對建築室內自然採光與遮蔽太陽輻射熱的效果，並計算出對應的人工照明及空調用電量，以提出不同方位下能達最佳節能效果的開口及外遮陽組合。

2-1.3 晝光利用對建築能源和視覺舒適度的影響

在本研究的 2-2 節談論了晝光利用和建築能源的關係，也回顧了許多將空調和照明節能最佳化的國內研究，然而，在追求減少建築能源的同時，也應該將室內的晝光利用品質及人員的視覺舒適度納入考量，如同 2-1 節所述，晝光利用的

好壞很可能會影響人員的工作效率或學習表現，所以，若以經濟的角度視之，除了要考量建築節能所帶來的經濟效益外，也需要顧及在良好環境下人員工作表現上的產值，同時兼顧建築節能和視覺舒適度的考量是有其必要性的。

在討論建築能源和視覺舒適度的方面，是屬於近期相當熱門且仍在發展中的議題，若在 Scopus 資料庫中，鍵入關鍵字「building energy」和「visual comfort」進行搜索，可以發現此議題的相關研究，幾乎是在近十年間才有較為蓬勃的發展(見圖 2-2)，此發展主要要歸功於近期光環境模擬軟體的進步和新視覺舒適度指標的出現。

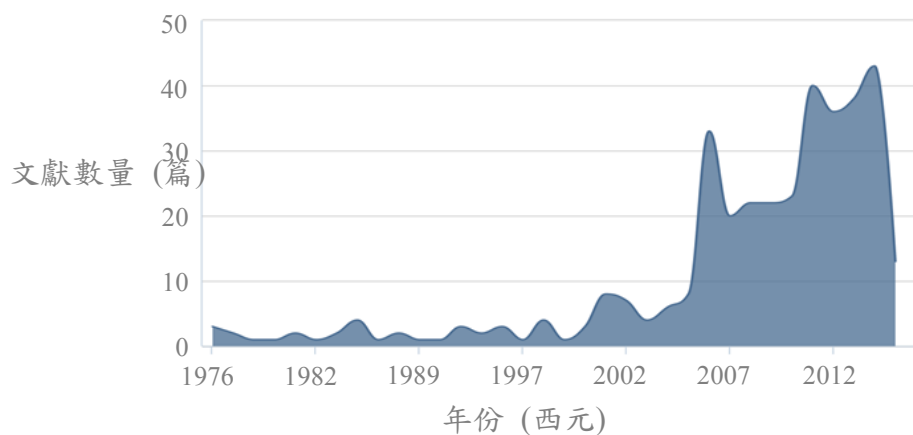


圖 2-2 關鍵字”building energy”和”visual comfort”的逐年文獻數量圖

目前國內外的相關文獻，如下依序介紹：

Ho, Chiang [6]進行了台灣教室在不同外遮陽設計上的最佳化研究，除了盡量減少照明能源消耗的目標外，也同時計算了均齊度以評估室內光環境的品質。結果發現，良好的設計除了可以將室內的均齊度由 0.25-0.35 提升至 0.40-0.42，若與無自動開關燈光系統的教室相比，也可以最多節省 71.5%的照明耗能。

David, Donn [7]研究了在熱帶地區不同建築外殼設計，對於空調和照明耗能的影響，也同時計算了可用晝光比率，以做為視覺舒適度的評估。外殼設計包含了不同的遮陽深度、窗戶高度等因子，最後根據 EnergyPlus 產出的晝光資料和能源數據進行分析探討，另外也提出了簡易的遮陽效益評估法，盼望能給設計階段

的使用者做為參考。

Reinhart and Wienold [8]提出了將建築耗能及晝光利用介面化的想法，盼望此介面可以提供非專業學者做為設計的參考，在文章中利用單側採光的空間作為示範，透過 EnergyPlus 和 DAYSIM 分別模擬出建築能源和晝光利用的相關指標，並利用簡單的圖表呈現有無遮陽、及使用者習慣不同所帶來的影響。

Yun, Yoon [9]研究對象為位於南韓的辦公空間，研究的第一部分利用實測和模擬資料比對，驗證光環境模擬軟體 DIVA-for-Rhino 和 DGP 簡算法的準確性，而後加入 EnergyPlus 在建築能源的模擬，接著討論不同調整遮陽板角度、燈光系統的策略，對於視覺舒適度和能源消耗的影響。

由於現在光環境模擬軟體的發展快速，也持續有新的視覺舒適度和晝光品質指標出現，無論是模擬技術的進步或是新指標的評估能力，都和以往有相當的差距，因此持續地嘗試應用不同技術或指標，探討晝光利用及建築能源的議題是相當重要的。而在輻射強烈、高溫的亞熱帶氣候區，近年來則較少見此方面的研究成果，因此，本研究欲探討在台灣的气候條件下，各種建築外殼設計的策略，在晝光利用下，對於建築節能、視覺舒適度和人員生產力的影響，提出具改善效益的策略及找出最佳的外殼設計方案。



2-2 熱舒適度相關理論

預測平均表決 (Predicted Mean Vote, PMV)，是由 Fanger [10] 在西元 1972 年提出的熱平衡模型，藉由超過 1300 位受試者的調查，在一個環境條件會改變的實驗室裡，根據受試者感受進行由 -3 至 +3 的投票 (-3 代表冷，+3 代表炎熱)，最後經由數學模型，來描述實驗數據中環境因子和生理因子之間的關係。此數學模型經不斷的發展後，至今 ISO-7730[11] 的 PMV 公式如下：

$$\begin{aligned} PMV = & \{0.303\exp(-0.036M) + 0.028\} \times \\ & \{(M - W) - 3.05[5.73 - 0.007(M - W) - P_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] \\ & - 0.0173M(5.87 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (MRT + 273)^4] \\ & - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \quad (2-1)$$

其中

M : 人體活動時的代謝率 (W/m^2)

W : 外部工作強度 (W/m^2)

t_a : 空氣溫度 ($^{\circ}C$)

P_a : 空氣中的水蒸氣分壓 (kPa)

f_{cl} : 人體著衣的表面積/人體裸體的表面積

t_{cl} : 衣物的表面溫度 ($^{\circ}C$)

MRT : 平均輻射溫度 ($^{\circ}C$)

h_c : 對流熱傳係數 (W/m^2K)

I_{cl} : 衣物的熱阻 (clo) ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2K/W$)

另一個發展出來的指標，預測不滿意度百分比 (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD)，則描述了多少百分比的人員對於室內熱環境感到不滿意，可由上述的 PMV 指標轉換之，計算方式如下：

$$PPD = 100 - 95 \times \exp[-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2] \quad (2-2)$$

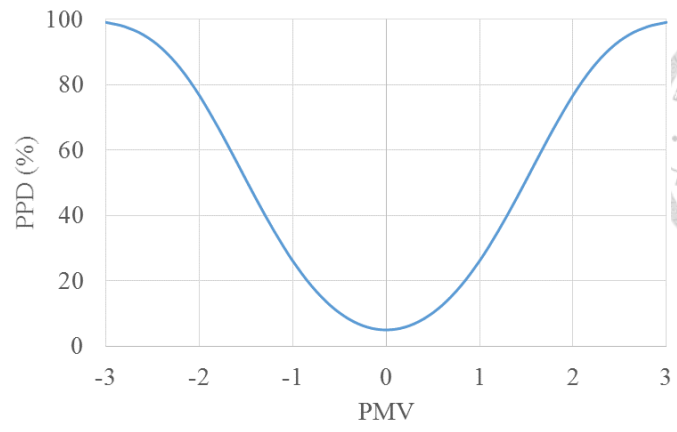


圖 2-3 PMV 與 PPD 之關係圖

第三章 研究方法



3-1 模擬工具介紹

3-1.1 EnergyPlus 簡介

由於影響建築能源的變因繁多，而且許多環境因子具有逐時變化的特性，因此必須透過能進行逐時動態解析的軟體進行分析。本研究挑選了由美國勞倫斯柏克利實驗室所開發的 EnergyPlus，是一個專門進行建築能源模擬的軟體，使用者可以透過建立建築幾何模型及設定機電系統等，此軟體即可計算建築全年的冷熱負荷需求，進而推算全年的能源消耗。此軟體在建築能源的模擬上有良好的精準度，並通過了 ASHRAE Standard 140 的驗證。

此軟體的計算包含了三大部分：(1)Surface Heat Balance, (2)Air Heat Balance, (3)Building Systems Simulation (見圖 3-1)。(1)的部分主要是處理關於表面的熱傳遞現象，包含了熱輻射、熱傳導等，另外也提供了內外遮陽、晝光計算的模組在內，建築的模型建立和材質定義都是建置在此部分內。(2)主要是用於室內風場的分析及診斷，然而本研究並無特別針對此部分進行探討，因此沒有在此部分設定參數。(3)是關於建築的設備、空調系統進行設定和管理，尤其空調的容量設計需要嚴密的計算，此部分提供了空調容量設計的估算方法，並且可以自由的設定空調系統的類型及調整相關的參數，此研究的空調主機容量即利用此部分的功能進行估算。

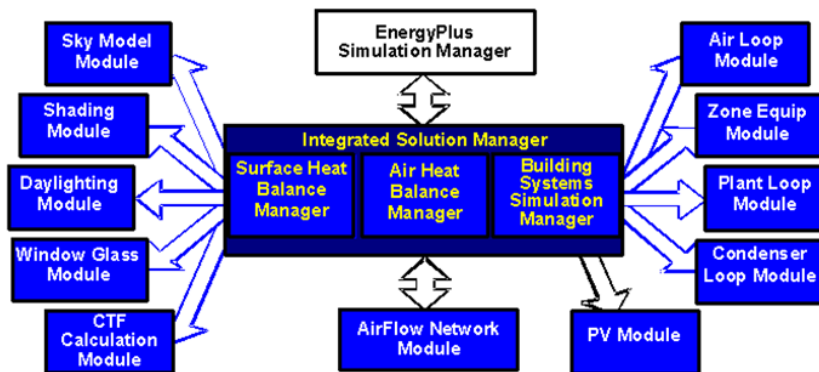


圖 3-1 EnergyPlus 計算的三大部分(取自 EnergyPlus Engineering Reference)

在 EnergyPlus 中，必須將空間劃分為數個熱區(Thermal zone)，每個熱區皆假設為同樣的環境條件(例如：溫度、濕度等)，另外，此設定也同時計算了該區域空調空間的體積，因此可以針對該熱區的環境條件及該空間的體積，進行整棟建築空調主機容量的估算。除此之外，關於照明、人員、空調系統的設定，也都是設置在 Zone 的分類中。

本研究除了透過此軟體模擬空調及燈光耗能，同時也模擬室內環境的相關參數，如溫濕度、二氧化碳濃度等，以進行室內人居環境品質的探討。本研究的燈光系統使用了「自動開關(on/off)的全區照明系統」，以 300 Lux 做為照明的門檻，若晝光不足則會由人工照明彌補，使用的照度資料為 DAYSIM 模擬出來的結果，經 Matlab 判斷工作區域是否需要補充照明後，再匯出為人工照明的時程表給 EnergyPlus 進行能源模擬。

EnergyPlus 光環境模擬方面採用了 split flux 的方法[12, 13]進行室內光環境的運算，會將透過窗戶進來的光線分為兩個部分，分別是 upward luminous flux 和 downward luminous flux，另外，此方法會針對窗戶上方和窗戶下方分別計算出平均的室內反射率，並以此進一步計算出室內的照度分布。此方法適合應用在幾何較為簡單的空間，而針對有外遮陽、或是遠離窗邊的情況，會有較明顯的誤差產生[14]。因此，為求有更精準的光環境模擬結果，本研究在光環境模擬的部分，會以 DAYSIM 進行模擬而不採用 EnergyPlus。

3-1.2 DAYSIM 簡介

目前光環境的相關模擬軟體繁多，而這些軟體的光環境計算模型大概可以分類為：(1)BRE split flux (2)Radiosity (3)Ray-tracing。(1)僅能模擬多雲的天氣情況(僅有擴散輻射)，而(2)和(3)可以模擬各種的天氣情況，因此後二者較為廣泛的應用在大部分的軟體中。

BRE split flux 是由 British Research Establishment (BRE)此研究機構所發展的光線計算模型，將光線的計算分為三個部分：Sky Component (SC)、Externally

Reflected Component (ERC)、和 Internally Reflected Component (IRC)，此模型適用的情況必須是周圍環境盡量沒有遮蔽物、並且沒有太多的室內反射(IRC)，因此，此模型在使用上必須注意許多限制和適用情況，以避免過大的誤差。

熱輻射法(Radiosity)原本的發展目的是解決輻射熱的傳遞計算，但到了1980年代，此模型也開始被應用在電腦圖形渲染(Rendering)。此模型假設所有的物體表面都會造成漫射(diffuse reflection)，並使用形狀因數(form factor, 定義為到達第二個表面和離開第一個表面的能量之間的比值)以計算反射之間的光線傳遞，在模擬中會將模擬的物體表面細切為若干個表面，進行這些表面之間反射的迭代計算(可參考圖 3-2 (a))。此模型適合計算整體光環境的場景，然而，若場景內的物體過於複雜則會大幅增加計算負荷量[15]。DIALux 和 AGi32 都是以此模型進行室內照明模擬。

光跡追蹤法(Ray-tracing)是針對有代表性、或欲得知的部分光環境進行模擬，外推出整個環境光線的分布，若只針對某視角的景象計算，此模型能夠避免計算其他視角相關的計算，因而提供較好的計算效率[16](可參考圖 3-2 (b))。此模型在計算整個光環境的情況時，必須進行數個視角的計算，在此情形下效率會比熱輻射法差。此模型的特性很適合視覺舒適度相關的模擬，除了對單一視角計算的較高效率外，能夠對於非漫射物體表面進行模擬也是其優點之一。V-Ray、以及學術上常用的 Radiance 和 DAYSIM 皆採用此模型進行光環境模擬。

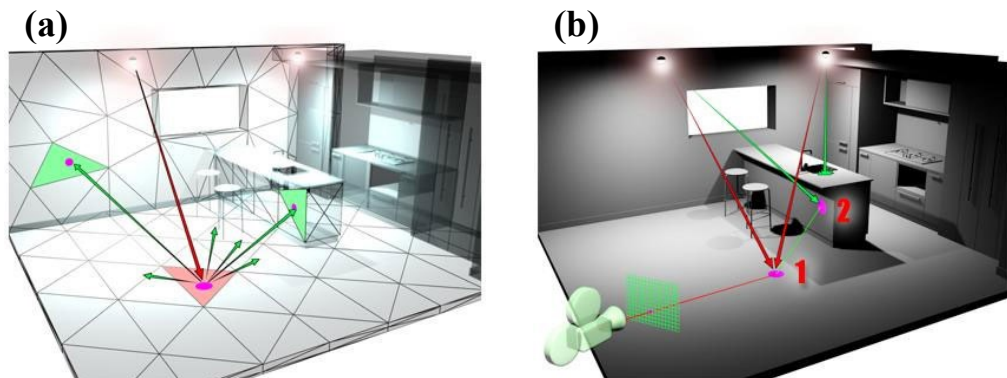


圖 3-2 (a)熱輻射法計算示意圖 (b)光跡追蹤法計算示意圖[17]

DAYSIM 是一個採用 Radiance 計算核心，並且經過實測驗證的光環境模擬軟體[18, 19]。Radiance 是模擬光環境功能相當強大的軟體，然而其模擬時間相當費時，而且軟體主要設計為針對單一時刻的天氣條件下進行模擬，因此不太適合進行全年的畫光品質評估。而 DAYSIM 則將 Radiance 的功能進一步擴展為能動態模擬全年不同天氣條件下的光環境，除此之外，為了解決 Radiance 模擬時間過長的問題，DAYSIM 結合了 Tregenza and Waters [20]所提出的畫光係數法(Daylight Coefficient)於運算中，此方法將天空視為一個半球面、並分割為數個網格，接著計算每一個網格對於室內某一點照度的比例，配合 Perez 天空模型給予每個網格亮度(luminance)，因此可以用來計算任意天空情況下的室內照度，可以很有效率地計算出室內的照度(可參考圖 3-3)。

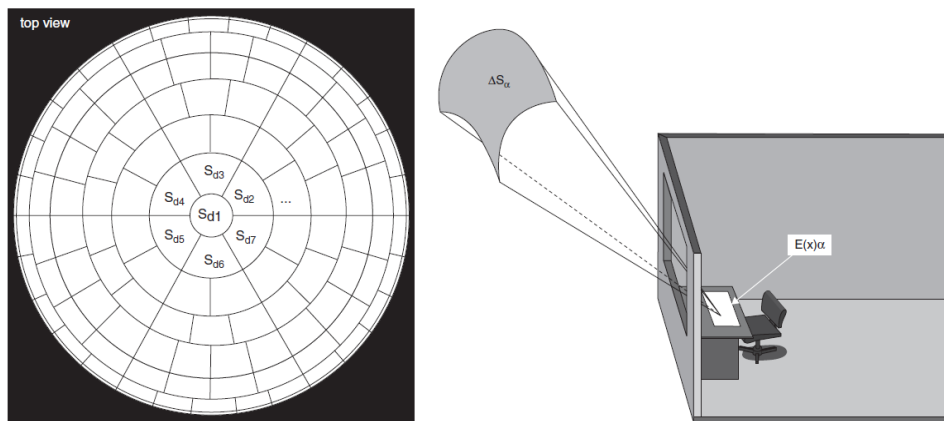


圖 3-3 Daylight Coefficient 分割網格及計算示意圖[21]

除了可以模擬全年的室內照度分布資料，此軟體也同時提供了視覺舒適度指標的計算，如「可用畫光比率」(UDI, Useful Daylight Index)和「畫光眩光機率指數」(DGP, Daylight Glare Probability)。另外，在遮陽板和燈光控制方面，可以配合其他建築能源模擬軟體匯出時程安排(hourly schedule)，進行軟體間的搭配。本研究將使用此軟體模擬室內的照度分布資料及可用畫光比率(UDI)，進行後續的畫光品質分析。



3-2 視覺舒適度和晝光利用指標介紹

3-2.1 Daylight Factor

此指數為最早發展的視覺舒適度指標之一，定義為室內某指定位置上的照度和室外全陰天(國際照明協會 CIE 所定義的天空模型)水平面照度的比值[22]，由於此指標還限制了室外必須無任何遮蔽物，因此，此指標和建築物方位、基地情況和當地天氣條件皆無關，隨著對於晝光利用品質需求增加，一些能反映氣候條件、室外周遭情況的新指標逐漸在近年來出現，此指標已逐漸不太適用於評估光環境的品質。

3-2.1 Useful Daylight Index (UDI)

Nabil and Mardaljevic [23]提出了可用晝光比率(Useful Daylight Index)，是一個可以進行全年晝光評估的指標，此指標的定義正如其名，為室內可供人為使用的晝光比率，因此過暗和過亮的晝光必須剔除於計算。此指標包含了一個低門檻和一個高門檻的照度值，將全年的照度以此兩個門檻分為三個區間，高於高門檻為令人感到不適的過亮晝光，低於低門檻為過暗晝光，介於兩門檻間則定義為可利用的晝光[23, 24]，以本研究而言，以 300 Lux 作為低門檻[7]、2000 Lux 作為高門檻。UDI(300-2000)即代表全年工作時間中，平均多少面積比例的室內晝光是介於 300 到 2000 Lux，而 UDI(>2000)則代表落於 2000 Lux 之上的平均面積比例。

本研究會以 UDI(300-2000)作為評估室內晝光利用品質好壞的視覺舒適度指標，UDI(>2000)則作為評估室內因過亮晝光而造成視覺不舒適的指標。

3-3 室內環境指標與人員生產力計算



除了建築能源和視覺舒適度的分析，為了更進一步找出最佳的案例，我們將室內環境品質(Indoor Environmental Quality, IEQ)轉換為人員生產力，以做為經濟方面的評估，我們納入了空氣品質、熱舒適度、聲音環境及視覺舒適度進行人員生產力和經濟損失的推估。

Jin, Overend [25]為了將室內環境品質轉換為經濟上可供分析的價值，探討了四項室內環境品質指標和人員生產力(Self-assessed productivity, SF)的關係，四項環境品質指標包含了室內預測不滿意度百分比(Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD)、CO₂濃度、等價噪音等級 (equivalent noise level)和作業面照度，透過在香港辦公空間的實際實驗和問卷調查，整理出了針對不同室內辦公環境情況下的人員生產力計算公式。本研究透過 EnergyPlus 輸出逐時 CO₂濃度和計算 PPD 所需的相關資料，而 DAYSIM 則提供了逐時的作業面照度，等價噪音等級則是假設為輕聲交談情況的 45(dBA)，因此可以透過公式推估逐時的人員生產力(Self-assessed Productivity, SP)，以及因為環境造成生產力下降的全年經濟損失，整體計算的流程圖可參考圖 3-4。

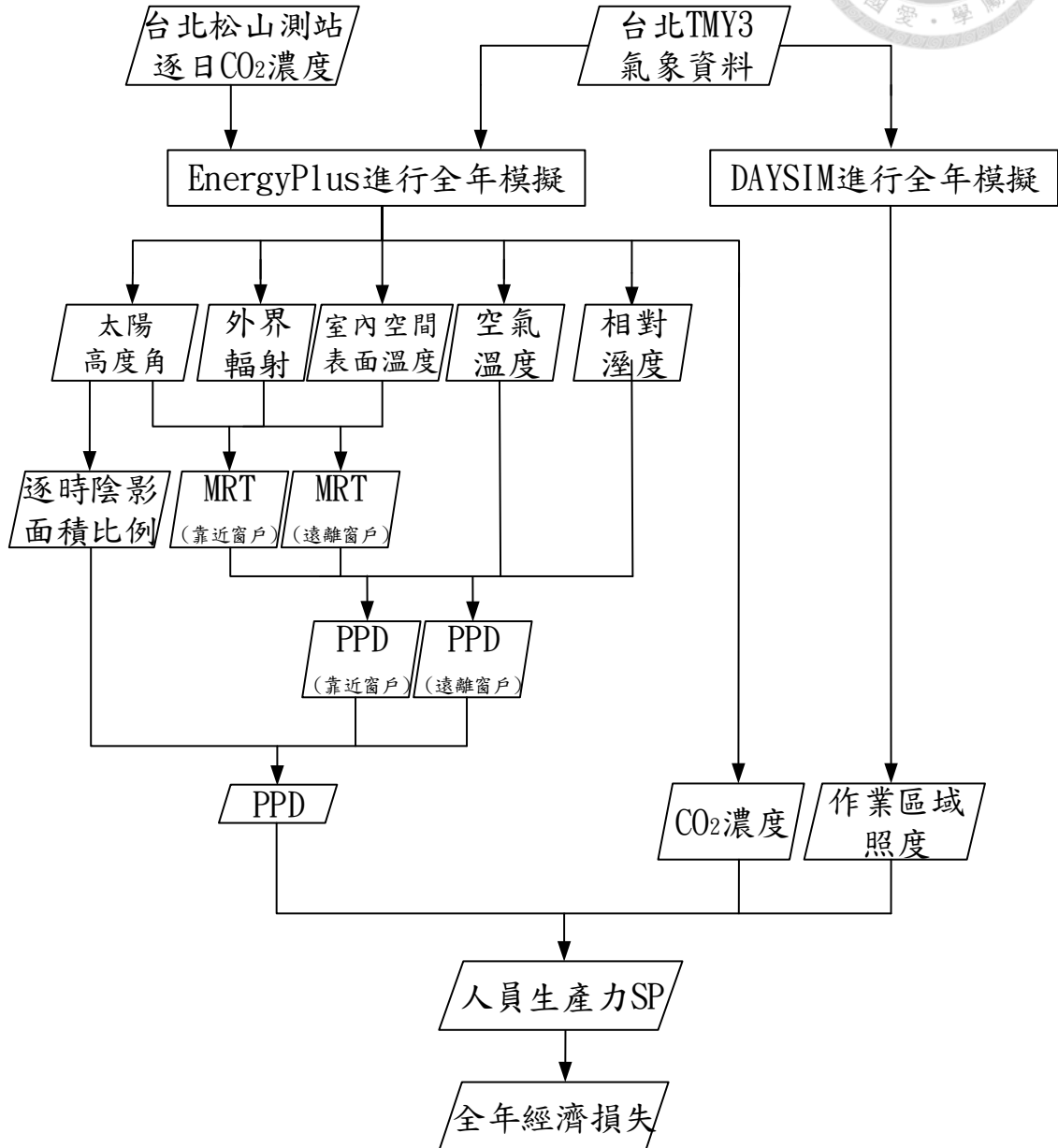


圖 3-4 計算人員生產力及全年經濟損失的流程圖

將四項室內環境品質轉換為人員生產力(SP)計算方式如下：

$$SP = 15.097 \times IES + 75.466$$

$$IES = 1 - \frac{\ln\left(\frac{-\ln(IEA/0.95)}{0.0312}\right)}{1.7568}$$

$$IEA = 1 - \frac{1}{1 + \exp[k_0 + \sum_{i=1}^4 k_i \varphi_i(\zeta_i)]}$$

$$\varphi_1 = 1 - \zeta_1$$

$$\varphi_2 = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 + \exp(3.118 - 0.00215\zeta_2)} - \frac{1}{1 + \exp(3.230 - 0.00117\zeta_2)} \right]$$

$$\varphi_3 = 1 - \frac{1}{1 + \exp(9.540 - 0.134\zeta_3)}$$

$$\varphi_4 = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-1.017 - 0.00558\zeta_4)}$$

其中

SP ：人員生產力 (Self-assessed Productivity) (%)

IES ：室內環境滿意度 (Satisfaction with indoor environment)

IEA ：室內環境品質接受度 (Acceptance of indoor environment quality)

ζ_1 ：預測不滿意度百分比 (PPD)， $0\% \leq \zeta_1 \leq 100\%$

ζ_2 ：CO₂ 濃度 (ppm)， $500 \leq \zeta_2 \leq 1800$

ζ_3 ：等價噪音等級 (equivalent noise level) (dBA)， $45 \leq \zeta_3 \leq 72$

ζ_4 ：作業面照度 (Lux)， $200 \leq \zeta_4 \leq 1600$

然而，由於該文獻所進行的實驗調查有其實驗範圍限制，因此，本研究在引用其公式進行計算時，若發生代入參數超出範圍之上限或下限值時，會以該上限或下限值做為替代，例如計算 CO₂ 濃度時，超過 1800 (ppm) 的數值即以 1800 (ppm) 代入公式。另外，由於背景噪音無法由模擬得知，本研究假設為低聲交談情況的 45(dBA)，工作面的照度則以工作區域的平均照度輸入，並且假設有開燈的情況下即能達到最佳視覺舒適度(即 $\varphi_4=1$)。



雖然 EnergyPlus 提供了直接輸出 PPD 的功能，然而，在計算 PPD 的過程中，此軟體所計算的 MRT 時將其視為整個區域(Zone)的平均值，會低估了人受到室外輻射、以及所在空間位置的影響。而根據 La Gennusa, Nucara [26]研究指出，人體和周壁間輻射熱的交換及高強度的太陽輻射，都會明顯影響人在室內的熱舒適度，因此，該文獻透過一些物理和數學公式的推導，提出一個能確實反映這些現象、修改版本的平均輻射溫度(Mean Radiant Temperature, MRT)公式：

$$MRT = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^N F_{S \rightarrow i} T_i^4 + \frac{C_{dn}}{\epsilon_s \sigma} \left(\alpha_{irr,d} \sum_{j=1}^M F_{S \rightarrow j} I_{d,j} + C_s \alpha_{irr,b} f_p I_b \right)} \quad (3-10)$$

其中

F ：視角因數 (View Factor)

C_{dn} ：指示變數 (白晝時為 1，夜晚時為 0)

C_s ：指示變數 (人體直接受到直達日射時為 1，相反則為 0)

ϵ_s ：人體表面的發射率 (假設為 0.97)

σ ：波茲曼常數=5.67×10⁻⁸ (W/m²K⁴)

α_{irr} ：人體表面的吸收率 (假設為 0.7)

f_p ：投影面積因數 (Projected area factor) (計算可以參考[27])

I_d, I_b ：來自室外的輻射量 (W/m²) (d ：擴散輻射； b ：直達輻射)

由於室內空間大致可以根據是否受到直達日射，而區分為陰影區和非陰影區，此二區經上述公式所計算出來的 MRT 會因此有相當大的分別，所以本研究首先設定兩個點位，遠離窗戶的點位用來計算代表陰影區的 MRT，靠近窗戶的點位則用來計算代表非陰影區的 MRT。

接著，再透過 Fanger 所提出的 PMV/PPD 數學模型，將計算出的兩區 MRT 代入，並且假設室內空調環境的風速為定值 0.2 (m/s)；著衣量部分，由於本研究假設室內人員在寒冷的天氣下會自動調整著衣，因此，不討論冷不舒適的情況，假設全年皆為夏季衣著 0.5 (clo)，而後續資料處理時會將冷不舒適情況予以剔除；人體代謝率方面，假設辦公室內人員皆為靜態工作，因此以 1.2 (met)代入 (註: 1 met=58.15 W/m²)。由此，即可得到陰影區及非陰影區的 PPD 指標，當計算

出的 PMV 小於 0 時(即冷不舒適時刻)，PPD 則以 0% 替換原本計算結果。

接著，透過 EnergyPlus 輸出的太陽高度角以及建築空間的幾何，計算出逐時陰影面積相對整體空間面積的比例 δ_s ，並由此加權計算出加權平均後的 PPD，計算公式如下：

$$PPD = PPD_S \times \delta_s + PPD_{NS} \times (1 - \delta_s) \quad (3-11)$$

其中

PPD_S ：陰影區的 PPD(%)

PPD_{NS} ：非陰影區的 PPD(%)

δ_s ：陰影區面積/整體的空間面積

根據計算出來的逐時人員生產力(SP)，可以再進一步計算因為生產力下降而造成的全年經濟損失 C_{LP} ：

$$C_{LP} = \sum_{h=0}^{8760} \left[\left(1 - \frac{SP_h}{SP_{max}} \right) \times S \times N_h \times w_h \right] \quad (3-12)$$

其中

SP_h ：該時刻的人員生產力(%)

SP_{max} ：最大的人員生產力(文獻的最大值=90.6%)

S ：人員的時薪(假設為 125 元/小時)

N_h ：人員數量

w_h ：人員在室的比例(1 代表全員皆在室，0 代表無人在室)



3-4 柏拉圖最佳解

本研究同時探討了不同建築外殼設計下的建築能源、晝光利用和人員生產力，然而，在缺乏有效轉換方法以進行比較的情況下，尤其建築節能和晝光利用常常會出現彼此衝突的情況，難以挑選和比較出較佳的方案，因此本研究採用義大利經濟學家 Vilfredo Pareto 所提出的柏拉圖最佳解前緣(Pareto Front)的方式，來找出表現較佳的若干個方案。

雖然柏拉圖最佳解的概念是來自於經濟學的領域，然而此概念的應用卻相當廣泛，涵蓋了工程學、社會科學、博弈學等其他領域，是個進行決策分析上或評估市場狀態的良好工具。柏拉圖最佳解前緣的基本概念是，在改善某項目標的同時，無法同時改善另一項目標，亦即柏拉圖最佳解前緣上的任何方案，在不損害另一目標的情況下，皆已無改善的空間。因此，柏拉圖最佳解前緣上的點是無法比較其優劣，僅有著方案之間的權衡關係，至於如何挑選出最佳方案，則取決於決策者本身的考量或其他限制條件。

關於柏拉圖最佳解前緣在資料中的示意圖如圖 3-5 所示，假設 f_1 和 f_2 分別為欲極大化的兩目標值，可以看出柏拉圖最佳解前緣上的任何一點，都必須減少其中之一的目標值，才能改善另一目標值，而在柏拉圖最佳解前緣外的點，則都還尚有「不損及另一目標值情況下」的改善空間。

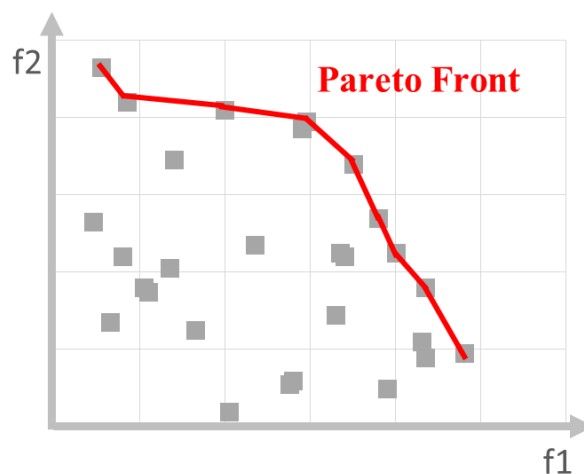


圖 3-5 柏拉圖最佳解的示意圖



第四章 研究對象與選用因子



4-1 研究對象設定與說明

此研究所研究的對象為標準建築辦公空間，模擬地點位於亞熱帶熱溼氣候的台北。採用的標準模型為建築的中間層，僅有面南的牆面為外牆，而其他牆面皆為鄰接其他室內空間的內牆並假設為絕熱(adiabatic)壁面。另外，面南的外牆設有與牆寬等寬的帶狀窗戶。室內的照明密度為 15 W/m^2 、人員密度為 0.15 人/m^2 、設備密度為 10 W/m^2 ，辦公室的工作時間為 9:00 – 17:00。空調設備部分，使用設定溫度(Thermostat Setpoint)為 24°C 的窗型空調機，為了讓不同的模擬樣本可以互相比較，同一室型的樣本會統一使用該室型基線建築所 autosize 的主機容量。關於材質的性質設定、人員和設備的時程安排，皆參考自內政部建築研究所出版的綠建築解說與評估手冊[28]。

表 4-1 本研究建築方案的基本資料

項目	模擬輸入之參數
(a)建築基本資料	
空間尺寸	室型一: $6.83(\text{m}) \times 9.80(\text{m})$ ；室型二: $8(\text{m}) \times 8(\text{m})$ ； 室型三: $9.80(\text{m}) \times 6.83(\text{m})$ ，高皆為 $3.5(\text{m})$
空間機能	標準辦公空間
開口面向方位	南方
(b)建築外殼熱性能	
外牆	U 值= $3.49(\text{W/m}^2\text{K})$ ；磁磚，水泥砂漿，鋼筋混凝土，水泥砂漿
隔間牆	U 值= $2.59(\text{W/m}^2\text{K})$ ；水泥砂漿，紅磚，水泥砂漿
(c)空調系統	窗型空調機(Unitary) (主機容量是透過基線建築案例進行 autosize 而得。 室型一: $2.30(\text{USRT})$ ；室型二: $2.45(\text{USRT})$ ；室型三: $2.59(\text{USRT})$)
(d)模擬氣象資料	台北 TMY3 氣象資料

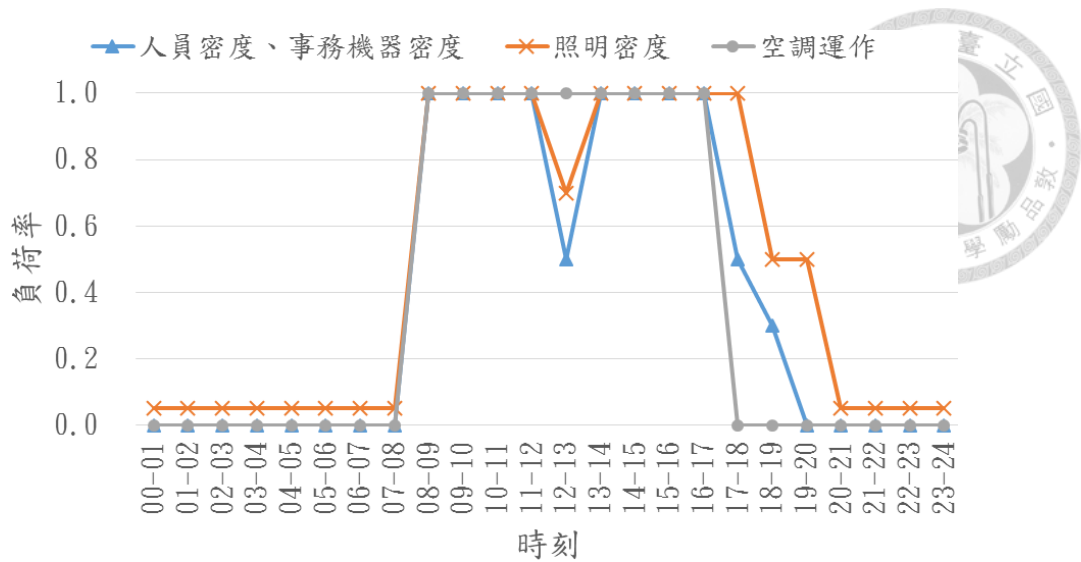


圖 4-1 辦公建築相關的時程安排

本研究的工作區域設定為距離東西兩側牆面 1 m，以及距離北面(無開窗之側)牆面 1.5 m 之區域。此外，為了考慮晝光利用帶來的節能效益，燈光控制系統採用了自動開關(on/off)的全區照明系統，考慮遠離窗邊的區域會有晝光不足的情況，以下為自動燈光控制的邏輯：在距離工作區域底側 1.0 m 內(遠離窗之側)的區域計算其平均照度，當平均照度小於 300 Lux 時，打開人工照明以解決照明不足問題。示意圖如圖 4-2。

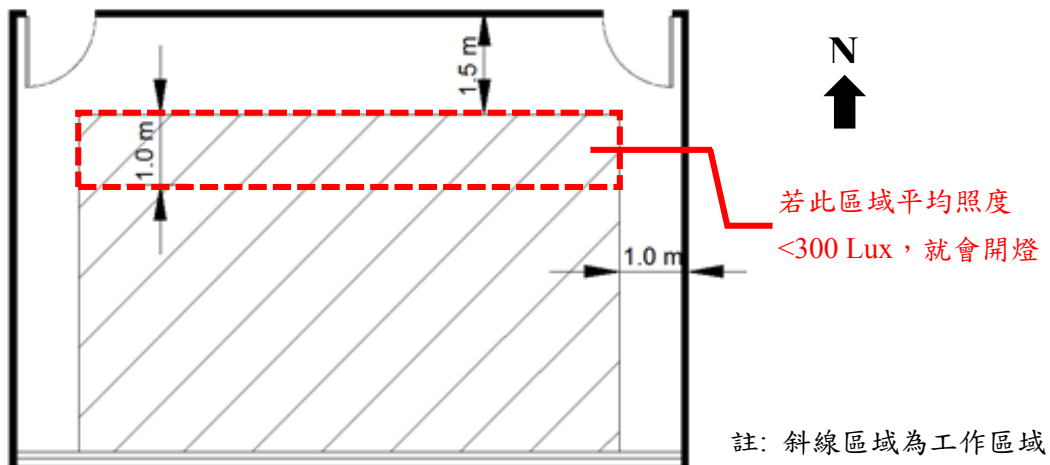


圖 4-2 工作區域及判斷開燈示意圖



4-2 選用因子介紹

為了瞭解不同建築外殼設計對於建築耗能和晝光利用的影響，分別對室型、開口率、遮陽板位置和深度、和屋頂和遮陽板反射率、和玻璃材質進行不同變數水準的安排。

本研究選用因子和其水準的介紹如下：

(1) 室型

為了因應不同室型空間的設計考量，在空調系統所需冷房之室內容積不變的情況下，本研究針對了三種室型進行研究，分別為窄長型、正方形、和寬長型三種室型，其寬深比分別為 2:3、1:1 和 3:2 (長寬尺寸為 6.83 (m)×9.80 (m)、8 (m)×8 (m)，和 9.80 (m)×6.83 (m))，可參考圖 4-3 的示意平面圖。

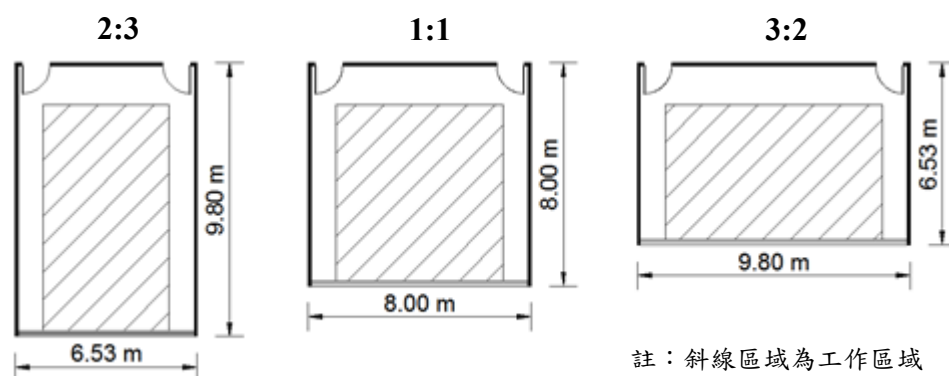


圖 4-3 三種室型的平面圖

(2) 開口率 (%)

開口率定義為建築開口面積佔該立面面積的比例，是建築設計中變化很大、同時對於採光和空調能源影響極大的因子，本研究由小至大分別探討 40%、60%、和 80%的開口率。

(3) 遮陽板深度 (m)

由於本研究開窗面南，因此採用水平遮陽板。不同深度會影響日射遮蔽效果及晝光導光效果，本研究採用的三種深度水準為 0.3 m、0.6 m 和 1.0 m。



(4) 遮陽板位置

遮陽板的擺放位置亦會影響導光效果。若定義遮陽板位置為遮陽板上方窗戶與下方窗戶的高度比例，本研究探討的三種水準為 1:1、1:2 和 1:4 (1:1 表示遮陽板恰於窗戶正中間；1:4 表示遮陽板位於距離窗戶上緣 1/5 處)。

(5) 天花板反射率

晝光導光效果和室內天花板的反射率有直接的相關。本研究探討了不同表面處理的天花板，水準分別為 0.5、0.6 和 0.9。

(6) 遮陽板反射率

不同表面處理的遮陽板也會影響晝光導光效果，本研究探討的兩種反射率水準為 0.5 和 0.9。

(7) 玻璃種類

不同的玻璃材質對應的性能(見表 4-2)，會影響進入室內的輻射熱和可見光。可見光透過率描述了多少晝光之可見光可進入室內，U 值和進入建築室內的熱傳導有關，SHGC(Solar Heat Gain Coefficient)則代表輻射熱穿透玻璃的程度。採用的三種玻璃分別為清玻璃、低輻射玻璃和染色玻璃。

表 4-2 本研究採用的玻璃性能

	厚度(mm)	可見光透過率(%)	U-value(W/m ² K)	SHGC
清玻璃 (Clear Glass)	6	0.91	5.51	0.90
低輻射玻璃 (Low-E Glass)	24	0.70	1.66	0.51
染色玻璃 (Tinted Glass)	20	0.55	2.70	0.37

採用的因子和水準如表 4-3 所列，進行全配列的總模擬次數為 $3^5 \times 2^1 = 1458$ 次。圖 4-4 為其中一個方案的建築模型示意圖。

表 4-3 本研究採用的因子與水準

室型	開口率 (%)	遮陽板深 (m)	遮陽板位置	天花板反射率	遮陽板反射率	玻璃種類
窄長型	40	1.0	一比四	0.9	0.9	清玻璃 (Clear Glass)
正方形	60	0.6	一比二	0.6	0.5	低輻射玻璃 (Low-E Glass)
寬長型	80	0.3	一比一	0.5	—	染色玻璃 (Tinted Glass)

註：窄長型=6.83 (m)×9.80 (m)；正方形=8 (m)×8 (m)；寬長型=9.80 (m)×6.83 (m)

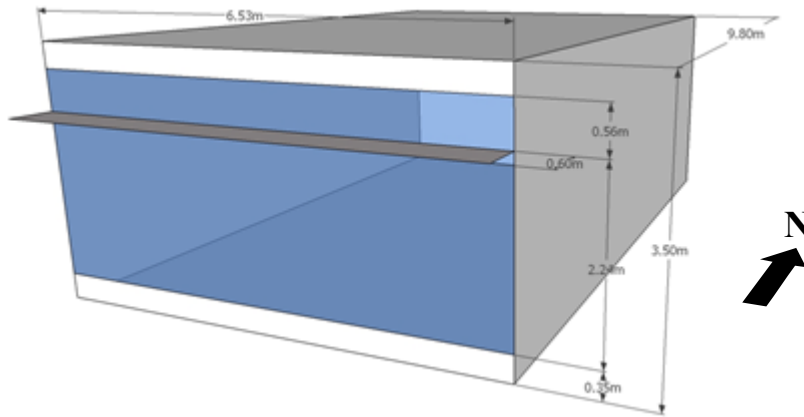


圖 4-4 某一方案的建築模型示意圖(窄長型、開口率 80%、遮陽板位置為 1:4)



4-3 基線建築介紹

為了瞭解使用不同策略所帶來的效益如何，因此本研究分別對三種室型各設置了一個基線(Baseline)的建築案例以供比較。為了看出遮陽板和其他策略的效益，基線建築所選用的都是較為常見且性能較差的因子水準，除此之外，也不另外設置遮陽板。照明系統在工作時刻為全開燈，不會針對不同的晝光利用而自動調節開關。而其餘的設定則與其他方案相同。

表 4-4 基線建築的因子選用

室型	開口率(%)	天花板反射率	玻璃材質
窄長型	80%	0.5	清玻璃
正方型	80%	0.5	清玻璃
寬長型	80%	0.5	清玻璃

第五章 晝光模擬實測驗證



5-1 數值模型驗證方法

在進行 DAYSIM 的光環境模擬之前，為了驗證 DAYSIM 模擬結果的準確度，我們選擇在台灣大學博雅教學館四樓的 402 教室進行晝光照度實測，同時也在 DAYSIM 中建立該教室的幾何模型和進行相關參數設定，而後進行實測結果及模擬結果的比較並討論誤差。博雅 402 教室長 7.2 公尺、寬 3.8 公尺(圖 5-2)，此教室在採光面(鄰接外界環境之面)和靠近中央走廊面，都設置了與牆面同大小的窗戶(即開口率為 100%)。

圖 5-2 中也顯示了照度測點的分布，量測晝光照度的網格大小為 1 (m) × 1 (m)，量測高度為 0.7 (m)，一共測量 18 (3×6)個測點，由於儀器數量的限制，必須逐點測量照度，量測順序如圖中的紅色虛線和箭頭方向所示。為求模擬的輸入值能確實反映真實情況，透過屋頂無遮蔽處所架設的小型氣象站，同時收集當時的全天空日射量和擴散輻射量，以作為 DAYSIM 進行晝光模擬時所需的氣象資料。

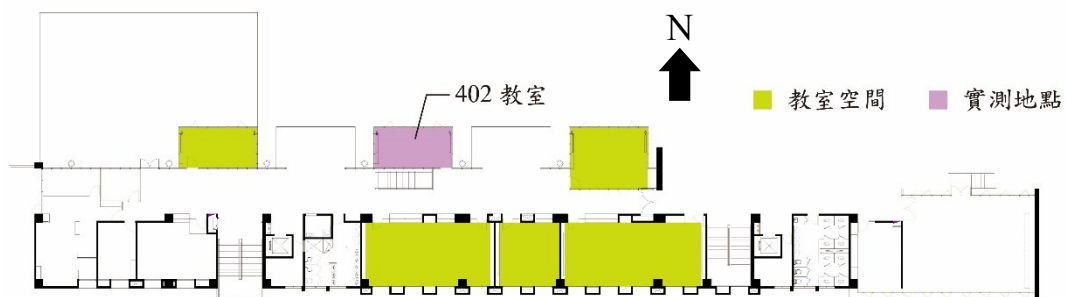


圖 5-1 博雅教學大樓 4 樓平面圖

中間層且有相當的樓高，理論上經建築外界地面反射的晝光不容易進入室內，所以在模擬中會假設地面反射率為 0。



表 5-1 驗證時電腦模型所使用的輸入值

項目	材質/表面處理	反射率(%)	可見光 穿透率(%)	參考資料 /備註
地板	磨石子地坪 (教室)	0.39	—	[29]
	石英磚 (走廊)	0.30	—	[30]
牆壁	白色油漆	0.50	—	[30]
教室黑板	綠色油漆	0.20	—	[29]
天花板	白色油漆 (教室)	0.50	—	[30]
	企口鋁板天花 (走廊)	0.80	—	
窗簾	淺色布料	0.50	—	[29]/註 1
窗戶	6mm 清玻璃	—	0.88	[30]
	6mm 噴砂玻璃	—	0.64	
地面	—	0.00	—	註 2

註 1：假設反射率和白色油漆相同

註 2：402 教室為建築之中間層且距離地面有相當高度，所以假設地面反射率為 0



5-2 量測儀器介紹

在現場採用的照度量測儀器為 TES-1339R，為國內 CNS 5119 標準中的 A 級，擁有相當足夠的準確性和測量範圍，其輕便的可攜帶性也相當適合本研究需逐點量測的需求。

表 5-2 TES-1339R 照度計詳細規格表

	
型號	TES-1339R 專業級照度計
級別	CNS 5119 標準— A 級
量測單位	Lux (照度)或 fc(呎燭光) (1 fc = 10.76 Lux)
測量範圍	0 至 999,900 (Lux) 0 至 92927 (fc)
解析度	0.01 (Lux), 0.001 (fc)
準確度	±3%讀值±5 位(2856° K 標準白熾燈校正)

5-3 模擬與實測結果比對

為了驗證 DAYSIM 晝光模擬的精確度，我們採用了兩個指標計算實測和模擬結果的誤差，分別為平均偏差(Mean Bias Error, MBE)和均方根誤差(Relative Root Mean Square, RMSE)。此兩指標常用在統計上計算兩組數據的相似程度，前者是量化數據間的差值是否有明顯的趨勢，可以藉此看出模擬是否有高估或低估的趨

勢，後者則是量化數據間的離散程度，藉此指標可以得知模擬結果是否過於偏離實測值，兩者計算公式分別如下：

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_{test,i} - x_{ref,i})}{x_{ref,i}} \quad (5-1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_{test,i} - x_{ref,i})^2}{x_{ref,i}^2}} \quad (5-2)$$

其中

$x_{test,i}$ ：各點的模擬結果

$x_{ref,i}$ ：各點的實測結果

N ：數據個數

由圖 5-4，可以看出實測和模擬的分布情況是相當類似的，但是數值上卻仍有數百勒克斯(Lux)的差異。尤其在 2014/11/07 和 2014/11/23 兩天，因為天氣情況較為不穩定，此兩天的直達日射容易受到雲量多寡的影響，而造成模擬上的誤差，平均偏差和均方根誤差都超過 20% (見表 5-3)；2015/03/27 的天氣則因雲量較多而幾乎無直達日射，因此，平均偏差僅-10.33%，均方根誤差為 14.45%。當然，除了天氣的影響外，較為近期的測量因操作較熟練而可以縮短測量時間，此亦增加了驗證上的準確度。

雖然結果的平均偏差和均方根誤差都仍有 10%以上，然而光線本身很容易受到周遭環境和物體材質的影響，因此目前技術上難以模擬的相當準確。Reinhart and Pierre-Felix [19]建議光環境模擬的操作上，平均偏差應在正負 15%的範圍內，均方根誤差應在 35%之內，若可達到此標準，大概就可以將模擬結果歸類於「可信賴」(Reliable)。

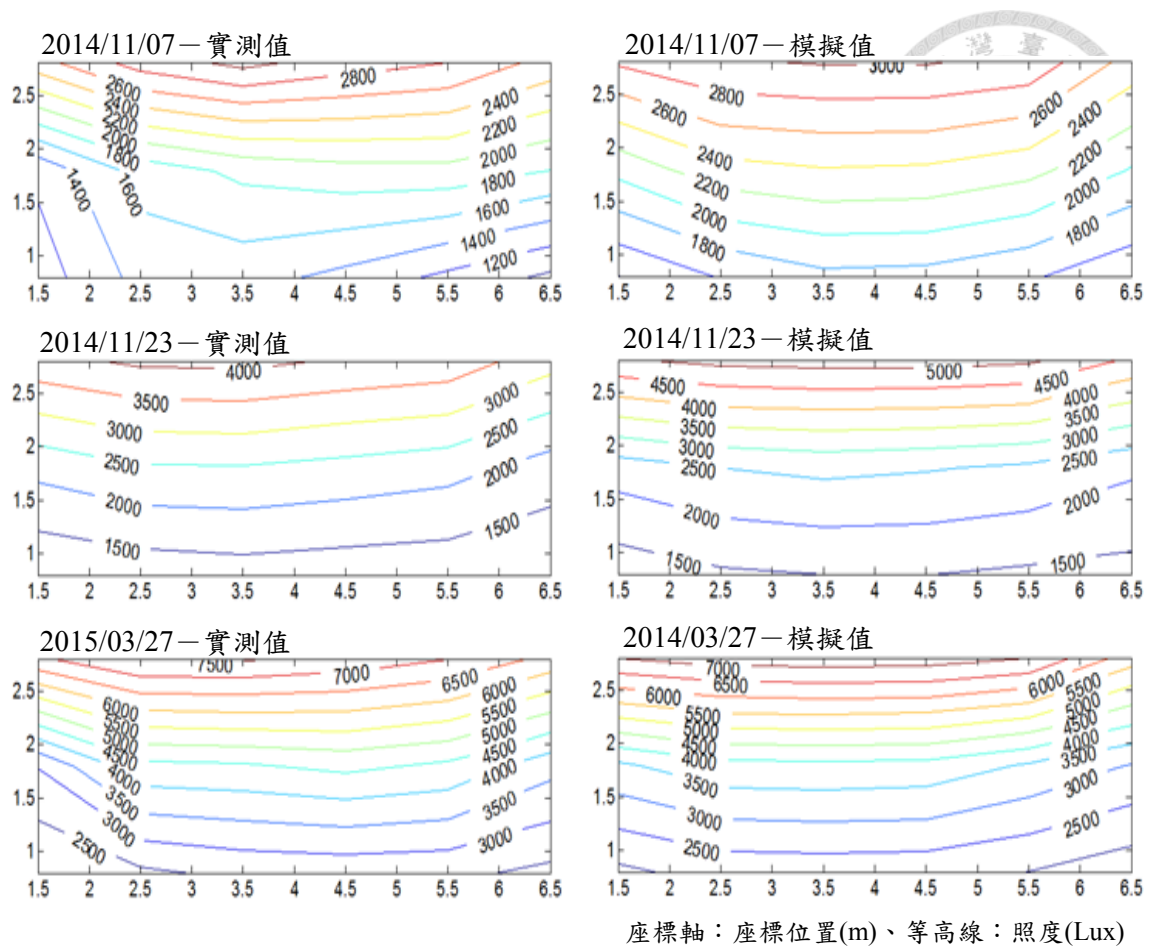


圖 5-4 實測與模擬結果的等高線圖

表 5-3 實測與模擬結果之誤差整理

	2014/11/07	2014/11/23	2015/03/27
平均偏差(MBE)	21.37%	20.43%	-10.33%
均方根誤差(RMSE)	28.04%	22.90%	14.45%

註：紅色字表示超出建議誤差範圍

第六章 模擬分析與討論



為了瞭解不同建築外殼設計對於晝光利用及耗能的影響，我們以 300 到 2000 Lux 作為上下限的 UDI(300-2000)作為晝光利用的指標，能源方面則探討人工照明和空調的耗能，分別進行了因子的 ANOVA 分析(變異數分析)，以及 UDI(300-2000)和耗能之間關係的比較。

6-1 晝光利用分析

由 UDI(300-2000)的變異數分析表(表 6-1)，可以得知室型、開口率、遮陽板深度、天花板反射率和玻璃材質會對晝光利用造成顯著影響(顯著水準(α)=0.01)。尤其室型、開口率和遮陽板深度這三個因子影響程度特別大，對 UDI(300-2000)的影響效果可達-5.1~3.0%；至於過亮晝光 UDI(>2000)部分，由 UDI(>2000)的變異數分析表(表 6-2)，可以得知每項因子皆會對過亮晝光造成顯著影響(顯著水準(α)=0.01)，效果較為明顯的因子為室型、開口率、遮陽板深和玻璃材質，有-6.5~5.6%的效果。其餘效果不明顯因子雖在統計上有顯著影響，然而造成的效果相對較為微小。

表 6-1 UDI(300-2000)變異數分析表

	平方和	自由度	平均平方和	F-value	是否具顯著影響
室型	18964.8	2	9482.4	496.9	是**
開口率	7310.1	2	3655.1	191.5	是**
遮陽板深	755.9	2	377.9	19.8	是**
遮陽板位置	18.8	2	9.4	0.5	否
天花板反射率	401.1	2	200.5	10.5	是**
遮陽板反射率	1.5	1	1.5	0.1	否
玻璃材質	198.8	2	99.4	5.2	是**
誤差項	27555.2	1444	19.1		
總和	55206.1	1457			

註：**顯著水準(α)=0.01；*顯著水準(α)=0.05

表 6-2 UDI(>2000)變異數分析表

	平方和	自由度	平均平方和	F-value	是否具顯著影響
室型	23725.0	2	11862.5	621.6	是**
開口率	34036.6	2	17018.3	891.8	是**
遮陽板深	2608.1	2	1304.1	68.3	是**
遮陽板位置	763.4	2	381.7	20.0	是**
天花板反射率	1433.2	2	716.6	37.6	是**
遮陽板反射率	236.6	1	236.6	12.4	是**
玻璃材質	28918.8	2	14459.4	757.7	是**
誤差項	6099.2	1444	4.2		
總和	97821.0	1457			

註：**顯著水準(α)=0.01；*顯著水準(α)=0.05

由圖 6-1、圖 6-2 可以看出，較大的開窗（室型：寬長型、開口率：80%）雖有利於可利用晝光的比率，但同時也容易引入更多的過亮晝光，而產生不舒適的感受；而較深的遮陽板則是既能增加可利用晝光亦能減少過亮晝光；玻璃材質雖然對可利用晝光效果不明顯，但對過亮晝光的效果卻是相當巨大，尤其可見光透過率低的染色玻璃可以減少許多的過亮晝光引入。

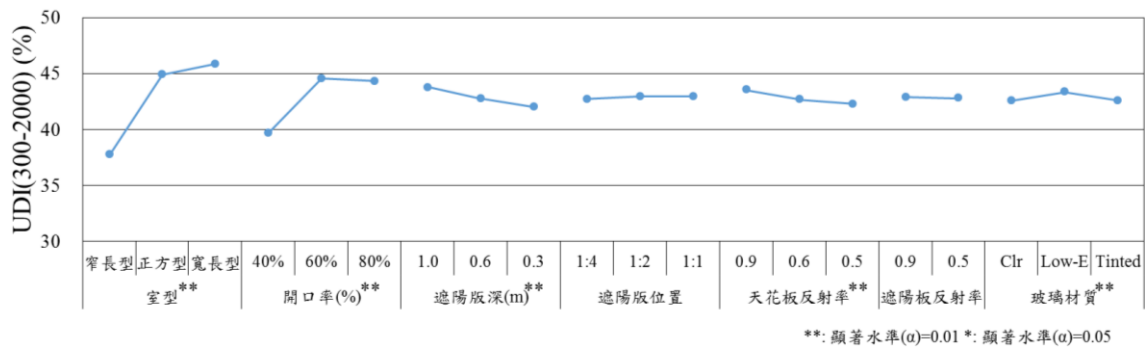


圖 6-1 UDI(300-2000)因子效果圖

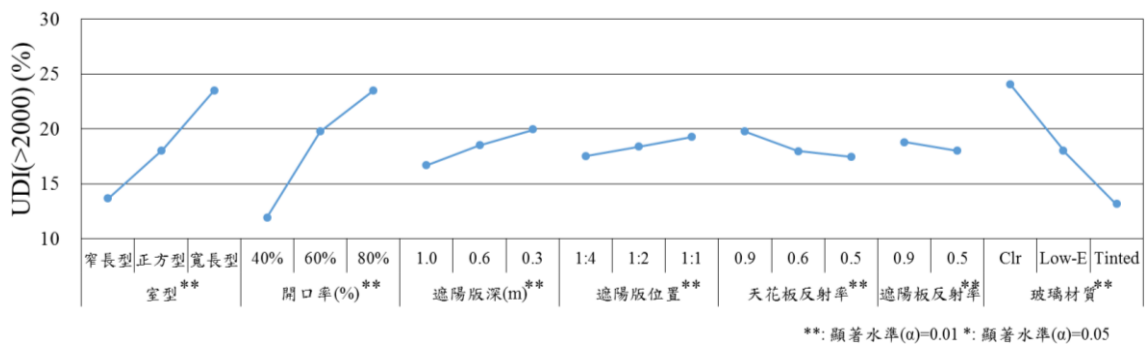


圖 6-2 UDI(>2000)因子效果圖



6-2 建築耗能分析

由建築耗能變異數分析表(表 6-3、表 6-4)，對於空調耗能有顯著影響的因子有室型、開口率、遮陽板深度、天花板反射率和玻璃材質(顯著水準(α)=0.01)，其中天花板反射率影響效果相對較小(可參考圖 6-3)，推測應該是受到該水準的照明系統發散熱影響(較多的人工照明會造成較多的發散熱)，而其餘因子對於空調耗能的影響效果為-4.7~5.1 kWh/m².a；至於照明耗能方面，雖然每個因子皆有顯著影響(顯著水準(α)=0.05)，但影響效果較為明顯的僅有室型、開口率、天花板反射率和玻璃材質，影響效果為-6.1~7.4 kWh/m².a。

若將兩項耗能相加、進行 ANOVA 分析(見表 6-5)，結果顯示每個因子皆有顯著影響(顯著水準(α)=0.01)，亦表示無論各因子對空調和照明耗能的效果是否會互相抵銷，皆會對空調和照明能源的總和造成顯著影響。

表 6-3 空調耗能變異數分析表

	平方和	自由度	平均平方和	F-value	是否具顯著影響
室型	3569.9	2	1785.0	384.6	是**
開口率	4282.6	2	2141.3	461.4	是**
遮陽板深	1529.9	2	764.9	164.8	是**
遮陽板位置	2.5	2	1.2	0.3	否
天花板反射率	286.4	2	143.2	30.9	是**
遮陽板反射率	18.5	1	18.5	4.0	是*
玻璃材質	23392.8	2	11696.4	2520.4	是**
誤差項	6701.1	1444	4.6		
總和	39783.8	1457			

註：**顯著水準(α)=0.01；*顯著水準(α)=0.05

表 6-4 照明耗能變異數分析表

	平方和	自由度	平均平方和	F-value	是否具顯著影響
室型	45455.6	2	22727.8	4897.6	是**
開口率	21320.8	2	10660.4	2297.2	是**
遮陽板深	32.9	2	16.5	3.5	是*
遮陽板位置	285.6	2	142.8	30.8	是**
天花板反射率	1556.3	2	778.1	167.7	是**
遮陽板反射率	94.0	1	94.0	20.3	是**
玻璃材質	7922.4	2	3961.2	853.6	是**
誤差項	5209.6	1444	3.6		
總和	81877.2	1457			

註：**顯著水準(α)=0.01；*顯著水準(α)=0.05

表 6-5 空調和照明耗能變異數分析表

	平方和	自由度	平均平方和	F-value	是否具顯著影響
室型	74108.5	2	37054.2	7984.7	是**
開口率	9479.0	2	4739.5	1021.3	是**
遮陽板深	1117.5	2	558.8	120.4	是**
遮陽板位置	283.4	2	141.7	30.5	是**
天花板反射率	3178.0	2	1589.0	342.4	是**
遮陽板反射率	196.0	1	196.0	42.2	是**
玻璃材質	4253.0	2	2126.5	458.2	是**
誤差項	20350.8	1444	14.1		
總和	112966.2	1457			

註：**顯著水準(α)=0.01；*顯著水準(α)=0.05

由圖 6-3，可以看出影響空調耗能較大的因子為室型、開口率、遮陽板深和玻璃材質。這是因為這些因子都直接關係到進入室內的輻射熱多寡，如室型和開口率會決定該空間的開口面積大小，遮陽板深會影響遮陽板遮蔽日射和導光的性能，不同玻璃材質的性能會影響穿透進來的輻射熱。值得注意的是，關於照明耗能的圖 6-4 中，可以發現前述的三個影響空調能源較大的因子(開口率、遮陽板深和玻璃材質)，有著和空調耗能幾乎完全相反的趨勢，如開口率愈大，空調耗能愈多而照明耗能愈少，這個現象主要是因為引進更多晝光而減少照明需求時，也會

需要更多的空調能源以移除進入室內的輻射熱。室型方面，可以觀察到窄長型室型因較不利於晝光利用而有較高照明耗能，同時由於照明發散熱也會增加空調負荷，因此，窄長型在照明及空調耗能上皆相對較高，寬長型則反之。

大致而言，若要選出較佳的各因子水準(可參考圖 6-5)，寬長型的室型、60%的開口率(中型開口)、較深的遮陽板、一比一的遮陽板位置、染色玻璃材質和較高的材質反射率這些策略，對於節省能源會有較佳的效果。

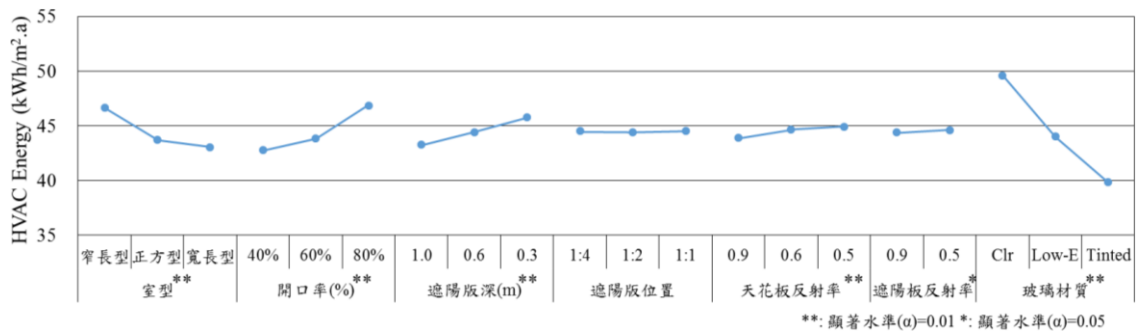


圖 6-3 空調耗能因子效果圖

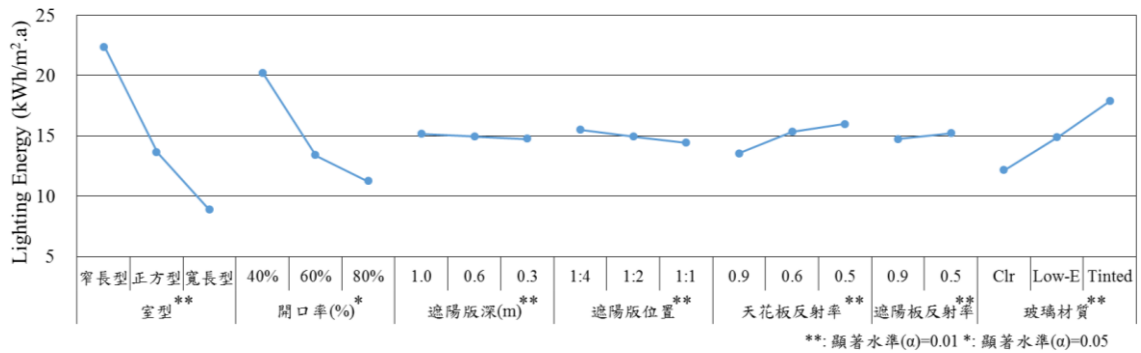


圖 6-4 照明耗能因子效果圖

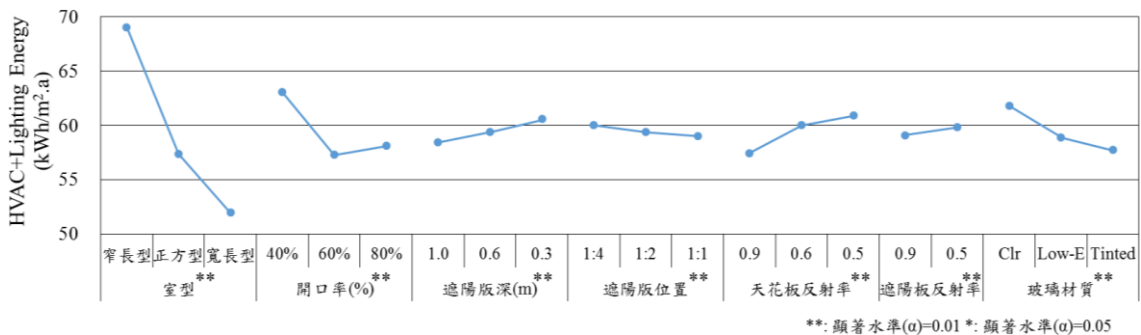


圖 6-5 空調和照明耗能因子效果圖



6-3 辦公人員生產力分析

由於此項指標的計算過於繁複而龐大，因此，本研究僅針對基線建築及柏拉圖最佳解的方案進行人員生產力的計算及分析。

雖然在引用的人員生產力計算公式中，涵蓋了 PPD、CO₂ 濃度和作業面照度所帶來的影響，然而，由於 CO₂ 濃度在人員生產力公式的計算中影響甚小，因而可忽略之，作業面照度的不足可以由人工照明補足，作業面過亮所造成的不舒適也因未在公式中反映，因此，此研究計算出來的生產力經濟損失，事實上僅和室內的熱不舒適度有關係。

首先，由表 6-6 可以看到基線建築的三種室型的年經濟損失都非常巨大，造成這些損失的原因主要是人在室內的熱不舒適所引起，尤其高達 80% 開口率的窗戶會導致大量的輻射熱進入室內，使得在強烈直達日射照射時的 MRT 會大幅增加，因而使得人員生產力變為不佳，進而造成經濟損失。

表 6-6 三種室型基線建築的經濟損失

室型	開口率(%)	天花板反射率	玻璃材質	經濟損失(元/年)
窄長型	80%	0.5	清玻璃	42109
正方型	80%	0.5	清玻璃	57955
寬長型	80%	0.5	清玻璃	81139

然而，若針對柏拉圖最佳解的方案進行分析(見表 6-7)，可以發現除了其中一個方案損失為 3999 (元/年)外，其餘的經濟損失皆為 0 (元/年)，和基線建築的結果相比，可以看出良好的外殼設計可以節省下相當大的人員生產力經濟損失。若探究其原因，可以從全年工作時間內的 MRT 分布進行探討。圖 6-6 是針對三種室型的全年 MRT 繪製盒鬚圖，柏拉圖最佳解的方案則是由各室型中各挑選一個作為代表(表 6-7 中有打*號之方案)，並且所在位置皆為距離窗戶一公尺處，即使在空調的環境下，室內空氣溫度皆能維持在舒適範圍內，但基線建築的極端 MRT 溫度仍然可以高達 45 (°C)左右，而有較佳外殼設計的柏拉圖最佳解方案，除了可

以明顯的減少極端溫度的出現，第三四分位數(即圖形中「盒子」的上端)也都較基線建築低不少，使得全年中因熱不舒適所引起的經濟損失降低許多。

表 6-7 柏拉圖最佳解上方案的經濟損失(空調與照明權衡下的結果)

室型	開口率 (%)	遮陽板深 (m)	遮陽板位置	天花板 反射率	遮陽板 反射率	玻璃材質	經濟損失 (元/年)
*窄長型	80	1	一比四	0.9	0.5	清玻璃	3999
窄長型	80	1	一比二	0.9	0.5	Low-E	0
窄長型	80	1	一比二	0.9	0.9	Low-E	0
窄長型	80	1	一比一	0.9	0.9	Low-E	0
窄長型	80	1	一比一	0.9	0.9	染色	0
*正方形	80	1	一比二	0.9	0.5	染色	0
正方形	80	1	一比一	0.9	0.5	染色	0
正方形	80	1	一比二	0.9	0.9	染色	0
正方形	80	1	一比一	0.9	0.9	染色	0
*寬長型	60	1	一比一	0.9	0.9	染色	0
寬長型	60	1	一比二	0.9	0.9	染色	0
寬長型	60	1	一比一	0.9	0.5	染色	0
寬長型	60	1	一比二	0.9	0.5	染色	0
寬長型	60	1	一比四	0.9	0.5	染色	0
寬長型	60	1	一比一	0.6	0.5	染色	0
寬長型	60	1	一比一	0.5	0.5	染色	0

*為圖 6-6 中，比較 MRT 的方案

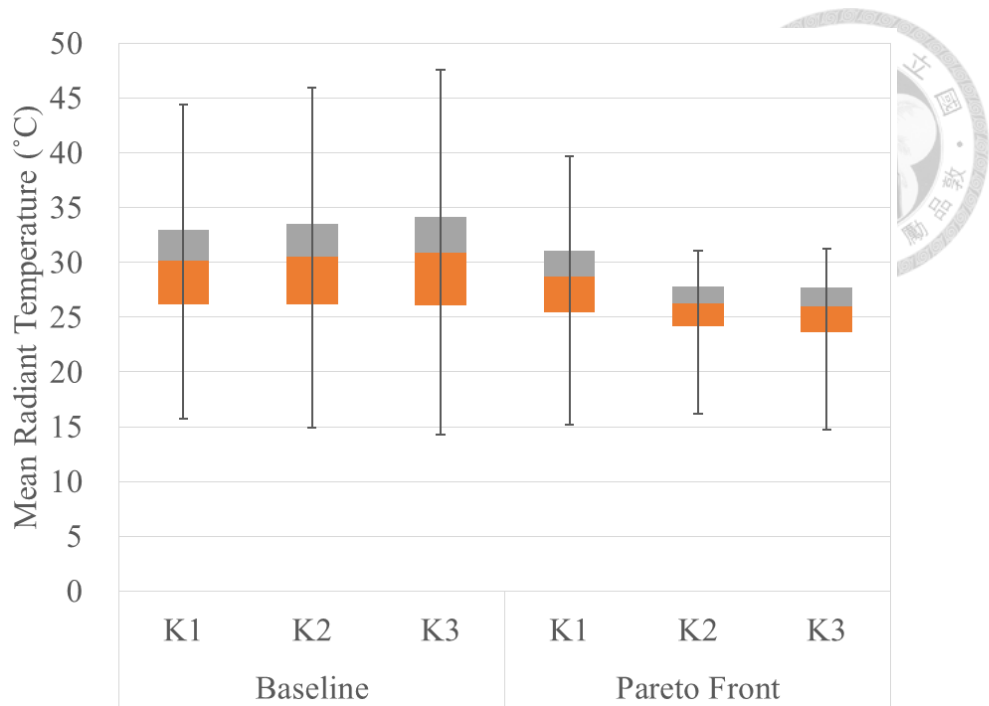


圖 6-6 基線建築和柏拉圖最佳解方案的 MRT 分布比較

6-4 綜合分析

雖然人員生產力的經濟損失也是建築外殼設計考量的重點之一，然而，進行所有方案分析的時間和人力過於龐大，而且柏拉圖最佳解的方案大部分的經濟損失也皆為零，因此在本節僅探討建築能源和晝光利用的關係，不加入生產力的經濟損失一起探討。

6-4.1 不分室型討論

圖 6-7 中，比較了 1458 個不同的方案在建築耗能和晝光利用上的表現，縱軸代表由下至上漸增的建築耗能，橫軸代表由左至右漸增的晝光利用指標，而為了大致區分出較佳的情況，透過繪製建築能源和 UDI(300-2000)的平均線，可以分出四個區域，右下為擁有較低耗能和較多晝光利用的最佳區域，左上則兩者皆差，右上和左下則代表建築能源和晝光利用其中之一表現較差。另外，由圖可以看出室型對於分布有相當大的影響，尤其窄長型室型的方案幾乎都落於最差的區域(同時有較差的晝光利用和高耗能)，而寬長型的方案則幾乎落於最佳區域，原

因主要是照明耗能的節能潛力較空調大，擁有較大開口的方案不但可以有較佳的畫光利用，也可以節省相當可觀的照明耗能。

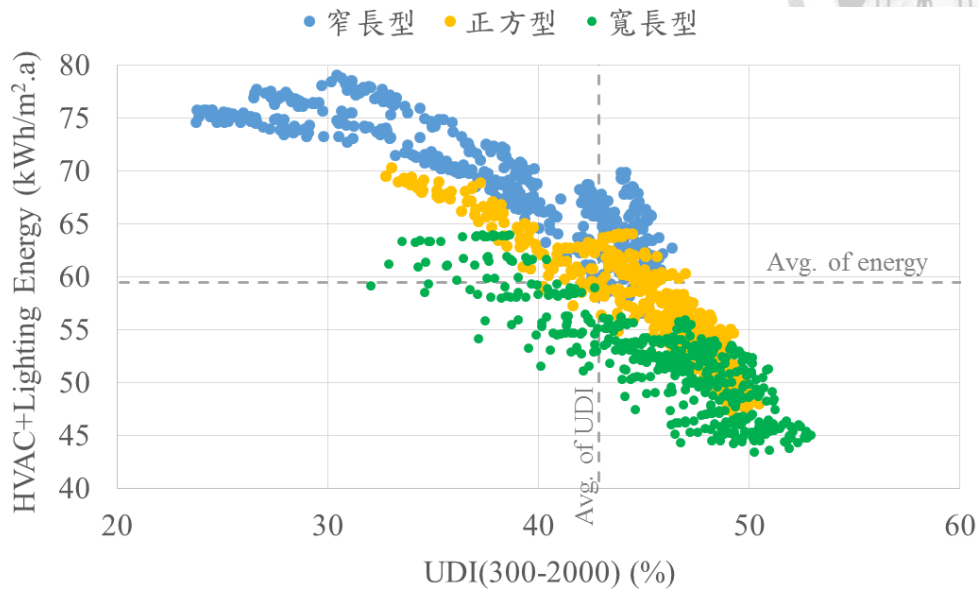


圖 6-7 不分室型下，建築耗能和畫光利用比較

由於沒有一個方案是同時擁有最低的建築耗能以及最佳的畫光利用(即 UDI(300-2000)最高)，因此在圖 6-8 中，列出了幾個相對較佳的方案，由圖可以看出這些方案無論在建築能源還是 UDI(300-2000)，表現其實都相當接近，在圖 6-9 中，則是進一步再將空調及照明能源分開，並且同時列出過亮畫光 UDI(>2000)的部分，同樣也可以看出每項數據的差距也都不明顯。因此，以所有的方案而言，這 7 個方案有著最佳表現的建築外殼設計。

表 6-8 則表列出了這 7 個最佳方案的選用因子水準。首先，可以注意到室型皆為寬長型(9.80 m × 6.83 m)，而且開口率皆為第二水準的 60%，可以知道此種室型的空間深度較短是有利於畫光利用的，同時又可以減少照明能源的需求，然而，開口率若選擇第一水準的 80%，又會造成過亮的畫光增加及增加空調負荷，因此，60%的開口率和寬長型室型會是較佳的搭配組合；而遮陽板的部分，遮陽板深度都為 1 m，至於設置的位置和反射率則較無明顯一致性；玻璃材質的選用，則都剛好選中染色玻璃，此種玻璃的特性為較低的可見光透過率和 SHGC，

不過，在有著足夠開口面積的情況下，仍然有不錯的畫光利用表現，同時也可以阻擋來自太陽的短波輻射。

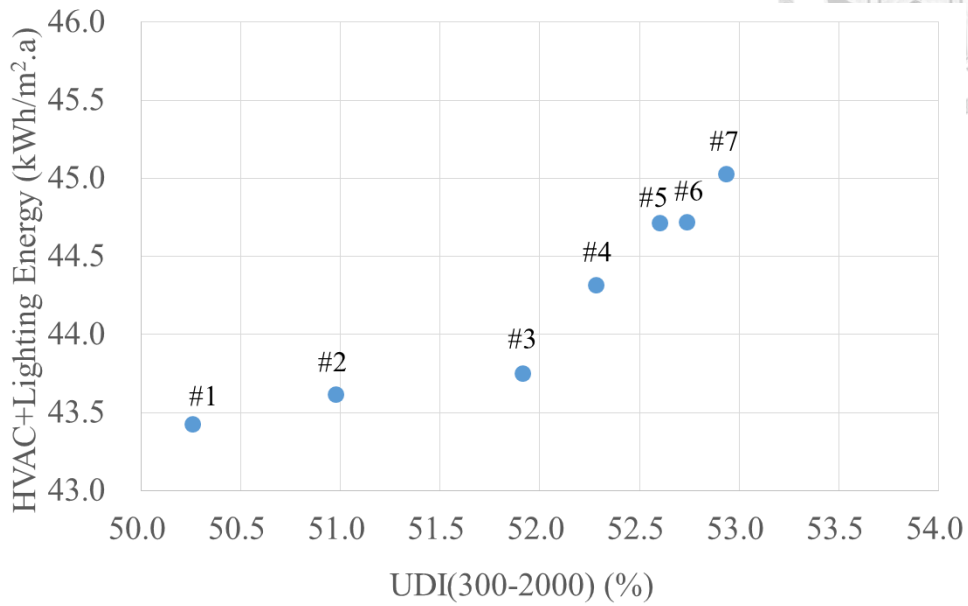


圖 6-8 不分室型下，建築耗能和畫光利用的柏拉圖最佳解

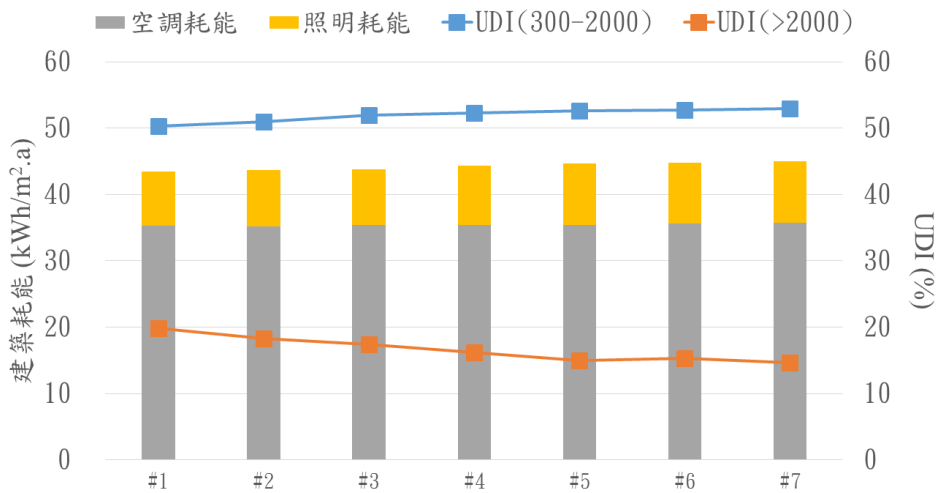


圖 6-9 不分室型下，柏拉圖最佳解的綜合表現

表 6-8 不分室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準及結果

	室型	開口率 (%)	遮陽板深(m)	遮陽板位置	天花板反射率	遮陽板反射率	玻璃材質	UDI(300-2000)(%)	空調耗能 (kWh/m ² .a)	照明耗能 (kWh/m ² .a)	空調及照明耗能 (kWh/m ² .a)
#1	寬長型	60	1.0	一比一	0.5	0.5	染色	52.9	35.7	9.3	45.0
#2	寬長型	60	1.0	一比一	0.6	0.5	染色	52.7	35.7	9.1	44.8
#3	寬長型	60	1.0	一比四	0.9	0.5	染色	52.6	35.4	9.3	44.7
#4	寬長型	60	1.0	一比二	0.9	0.5	染色	52.3	35.4	8.9	44.3
#5	寬長型	60	1.0	一比一	0.9	0.5	染色	51.9	35.4	8.4	43.8
#6	寬長型	60	1.0	一比二	0.9	0.9	染色	51.0	35.2	8.4	43.6
#7	寬長型	60	1.0	一比一	0.9	0.9	染色	50.3	35.3	8.1	43.4

表 6-9 不分室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準數

	室型	開口率(%)	遮陽板深(m)	遮陽板位置	天花板反射率	遮陽板反射率	玻璃材質
	寬長型	40%(1)	1.0 m (1)	一比四 (1)	0.9 (1)	0.9 (1) 0.5 (2)	清玻璃 (1)
		60%(2)	0.6 m (2)	一比二 (2)	0.6 (2)		Low-E (2)
		80%(3)	0.3 m (3)	一比一 (3)	0.5 (3)		染色 (3)
#1	寬長型	2	1	3	3	2	3
#2	寬長型	2	1	3	2	2	3
#3	寬長型	2	1	1	1	2	3
#4	寬長型	2	1	2	1	2	3
#5	寬長型	2	1	3	1	2	3
#6	寬長型	2	1	2	1	1	3
#7	寬長型	2	1	3	1	1	3

6-4.2 分開室型討論

由於室型的不同，會讓室內空間採光的深度受到影響，進而影響 UDI(300-2000)和照明能源的需求，因為本研究採用帶狀開窗，室型同時也影響了開口面積的大小。因此分開室型，進行該室型內的建築外殼設計和結果討論是有必要的。

表 6-10 是窄長型(6.83 m × 9.80 m)的室型下，基線建築和柏拉圖最佳解的選用因子水準和結果。由於窄長型的室型難以引用晝光至室內較深的位置，因此在開口率的部分都選用了 80% 的最大水準。不過，大開口的情況下也容易造成過多

的輻射熱和過亮晝光進入室內，每個柏拉圖最佳解的方案也都選用了1.0 m 深的遮陽板來解決此問題，若和基線建築的方案比較，可以看到裝設遮陽板不僅不會傷害晝光利用的表現，也能降低許多空調耗能。玻璃材質的選用則和注重的目標有關，若選擇可見光透過率及 SHGC 都較高的清玻璃，則會有較高的晝光利用品質及較高的建築耗能，反之，若選擇性能相反的染色玻璃，則會有相反的效果，這端看設計者的考量為何。

表 6-10 窄長型室型下，柏拉圖最佳解方案各因子選用水準及結果

	開口率 (%)	遮陽板深(m)	遮陽板位置	天花板反射率	遮陽板反射率	玻璃材質	UDI(300-2000)(%)	空調耗能 (kWh/m ² .a)	照明耗能 (kWh/m ² .a)	空調及照明耗能 (kWh/m ² .a)
基線建築	80	—	—	0.5	—	清玻璃	44.8	63.9	31.3	95.2
#1	80	1.0	一比四	0.9	0.5	清玻璃	46.3	50.6	12.1	62.7
#2	80	1.0	一比二	0.9	0.5	Low-E	45.9	45.1	15.0	60.1
#3	80	1.0	一比二	0.9	0.9	Low-E	45.5	44.9	14.7	59.6
#4	80	1.0	一比一	0.9	0.9	Low-E	45.3	45.0	13.9	58.9
#5	80	1.0	一比一	0.9	0.9	染色	44.9	39.7	16.8	56.5

表 6-11 窄長型室型下，柏拉圖最佳解方案各因子選用水準數

	室型	開口率(%)	遮陽板深(m)	遮陽板位置	天花板反射率	遮陽板反射率	玻璃材質
	窄長型	40%(1)	1.0 m (1)	一比四 (1)	0.9 (1)	0.9 (1) 0.5 (2)	清玻璃 (1)
		60%(2)	0.6 m (2)	一比二 (2)	0.6 (2)		Low-E (2)
		80%(3)	0.3 m (3)	一比一 (3)	0.5 (3)		染色 (3)
#1	窄長型	3	1	1	1	2	1
#2	窄長型	3	1	2	1	2	2
#3	窄長型	3	1	2	1	1	2
#4	窄長型	3	1	3	1	1	2
#5	窄長型	3	1	3	1	1	3

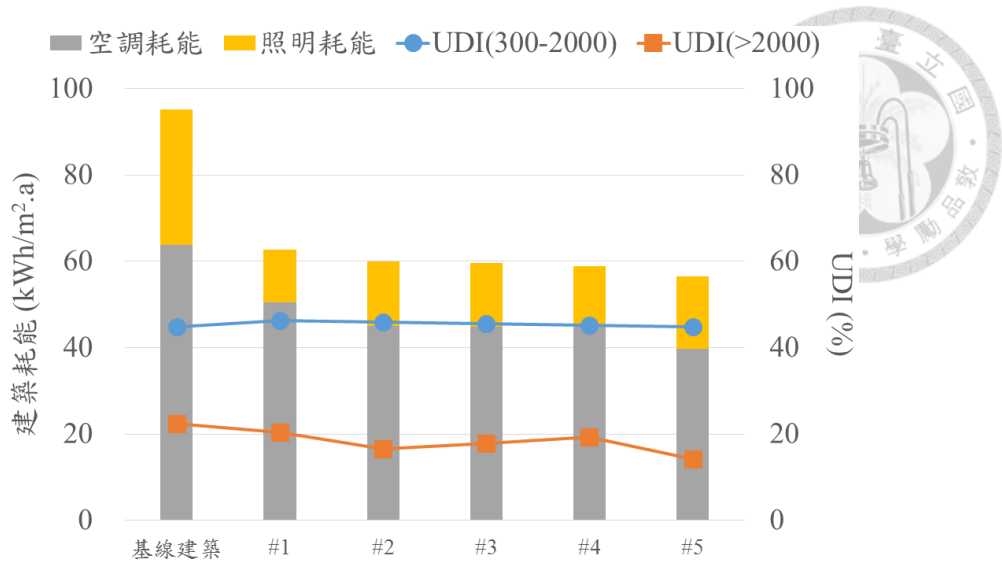


圖 6-10 窄長型室型下，基線建築與柏拉圖最佳解的表現比較

表 6-12 是正方形室型(8.00 m × 8.00 m)的狀況。類似窄長型室型的情況，由於晝光引入室內深處的效果不佳，因此，在開口率仍然選用了 80% 的大開口率，同樣地，遮陽板的設置對於晝光利用和空調能源的節省都有相當的助益，而玻璃材質則都全部選用了染色玻璃，原因是窗戶已經引入太多輻射熱和過亮晝光，因此選用可見光透過率及 SHGC 都較低的染色玻璃會是較佳的策略。

表 6-12 正方形室型下，柏拉圖最佳解方案各因子選用水準及結果

	開口率 (%)	遮陽板深(m)	遮陽板位置	天花板反射率	遮陽板反射率	玻璃材質	UDI(300-2000)(%)	空調耗能 (kWh/m².a)	照明耗能 (kWh/m².a)	空調及照明耗能 (kWh/m².a)
基線建築	80	—	—	0.5	—	清玻璃	45.1	66.3	31.3	97.6
#1	80	1.0	一比二	0.9	0.5	染色	50.5	37.4	10.6	48.0
#2	80	1.0	一比一	0.9	0.5	染色	50.0	37.5	10.4	47.9
#3	80	1.0	一比二	0.9	0.9	染色	49.8	37.3	10.4	47.7
#4	80	1.0	一比一	0.9	0.9	染色	49.1	37.3	9.9	47.2

表 6-13 正方形室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準數

	室型	開口率(%)	遮陽板深(m)	遮陽板位置	天花板反射率	遮陽板反射率	玻璃材質
	正方形	40%(1)	1.0 m (1)	一比四 (1)	0.9 (1)	0.9 (1)	清玻璃 (1)
		60%(2)	0.6 m (2)	一比二 (2)	0.6 (2)	0.5 (2)	Low-E (2)
		80%(3)	0.3 m (3)	一比一 (3)	0.5 (3)		染色 (3)
#1	正方形	3	1	2	1	2	3
#2	正方形	3	1	3	1	2	3
#3	正方形	3	1	2	1	1	3
#4	正方形	3	1	3	1	1	3

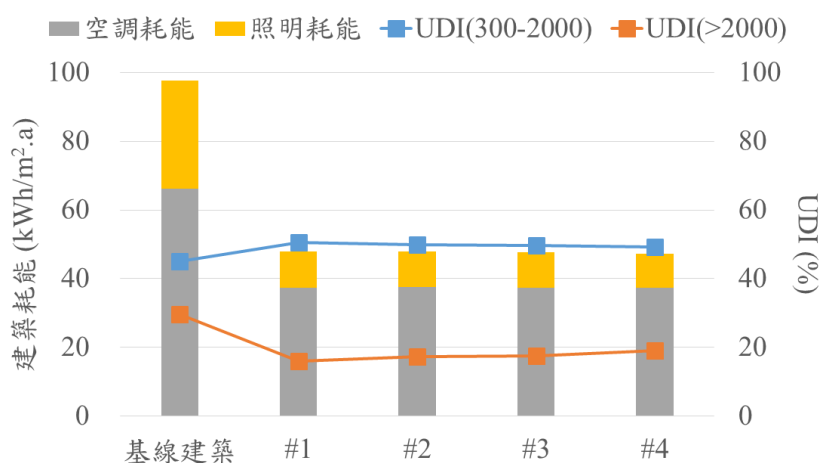


圖 6-11 正方形室型下，基線建築與柏拉圖最佳解的表現比較

寬長的室型狀況，如表 6-14 所列。由於此室型的空間深度較短，較能輕易的引用晝光至深處，因此開口率部分選用了第二水準的 60%，不需要最大的開口率即能達成良好的晝光利用及建築節能效果。由於此室型的帶狀開窗面積相當大，所以遮陽板所帶來的效益也格外明顯，在 UDI(300-2000)至少增加 10.6 % 的可利用比率，空調能源也節約了至少 24.8 (kWh/m².a)。為了解決大開口所造成的輻射熱和過亮輻射引入，玻璃材質在此皆選用了染色玻璃。

表 6-14 寬長型室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準及結果

	開口率 (%)	遮陽板深 (m)	遮陽板位置	天花板反射率	遮陽板反射率	玻璃材質	UDI(300-2000)(%)	空調耗能 (kWh/m ² .a)	照明耗能 (kWh/m ² .a)	空調及照明耗能 (kWh/m ² .a)
基線建築	80	—	—	0.5	—	清玻璃	39.7	69.4	31.3	100.7
#1	60	1.0	一比一	0.5	0.5	染色	52.9	35.7	9.3	45.0
#2	60	1.0	一比一	0.6	0.5	染色	52.7	35.7	9.1	44.8
#3	60	1.0	一比四	0.9	0.5	染色	52.6	35.4	9.3	44.7
#4	60	1.0	一比二	0.9	0.5	染色	52.3	35.4	8.9	44.3
#5	60	1.0	一比一	0.9	0.5	染色	51.9	35.4	8.4	43.8
#6	60	1.0	一比二	0.9	0.9	染色	51.0	35.2	8.4	43.6
#7	60	1.0	一比一	0.9	0.9	染色	50.3	35.3	8.1	43.4

表 6-15 寬長型室型下，柏拉圖最佳解方案的各因子選用水準數

	室型	開口率(%)	遮陽板深(m)	遮陽板位置	天花板反射率	遮陽板反射率	玻璃材質
	寬長型	40%(1)	1.0 m (1)	一比四 (1)	0.9 (1)	0.9 (1)	清玻璃 (1)
		60%(2)	0.6 m (2)	一比二 (2)	0.6 (2)	0.5 (2)	Low-E (2)
		80%(3)	0.3 m (3)	一比一 (3)	0.5 (3)		染色 (3)
#1	寬長型	2	1	3	3	2	3
#2	寬長型	2	1	3	2	2	3
#3	寬長型	2	1	1	1	2	3
#4	寬長型	2	1	2	1	2	3
#5	寬長型	2	1	3	1	2	3
#6	寬長型	2	1	2	1	1	3
#7	寬長型	2	1	3	1	1	3

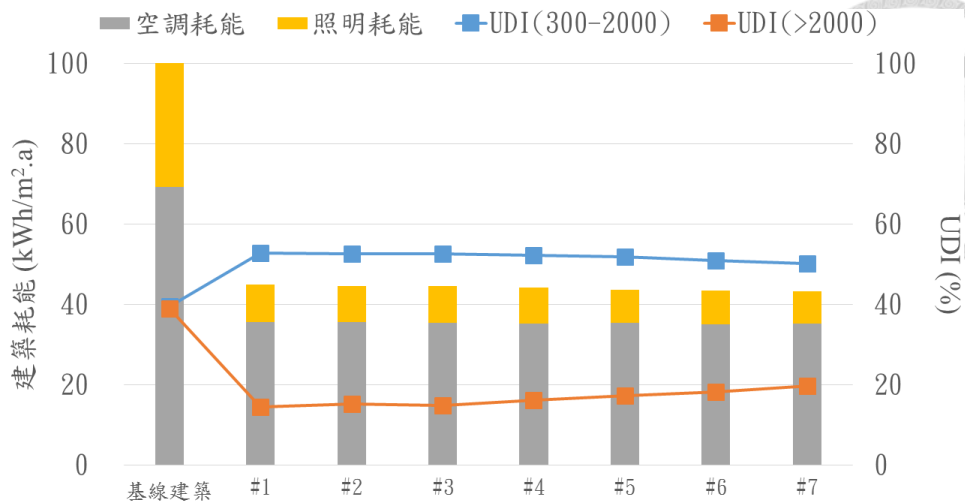


圖 6-12 寬長型室型下，基線建築與柏拉圖最佳解的表現比較

為了更能顯現不同室型下，外殼設計所能帶來的改善效益，表 6-16 計算了視覺舒適度和建築能源的改善率，改善率 $\Delta(\%)$ 的計算方式如下：

$$\Delta(\%) = \frac{(X_b - X_o)}{X_o} \times 100\% \quad (6-1)$$

其中

X_b : 外殼改善後的表現

X_o : 該室型的基線建築表現

首先是 UDI(300-2000)，此指標代表了室內可利用晝光的比例，可以發現窄長型室型能改善的效果相當有限，最多僅能改善 3.3%，原因是此種室型的空間深度過深、不利於採光，常常室內較深的晝光環境會過暗，而即使利用外遮陽板的導光來改善，效果也是相當有限，而其他兩種室型由於空間深度淺、採光較易，較大的問題反而是室內的光環境容易過亮，但透過良好的外殼設計就能有效的減少過量的晝光進入室內，而因此大幅提升可利用晝光的比例。UDI(>2000)則代表了過亮晝光的比例，可以看到各個室型能改善的效果都可以達到數十的百分比率，意即良好的外殼設計對於改善過亮晝光是相當有貢獻的，值得注意的是，寬長型室型能改善的比例高達 60% 左右，是因為此種室型本來就很容易引入過量的晝光，因此外殼設計的改善效果才會更為顯著。

表 6-16 同時也顯示了能源上的改善效果，而為了瞭解節能效果是來自哪個部分，因此拆為空調和照明能源分別進行探討。空調能源部分，無論何種室型，良好的外殼設計都有相當好的節能效益，尤其是寬長型的室型，由於進來的輻射熱較容易過量，效果就較其他室型顯著。照明能源部分，窄長型室型由於採光較為困難，必須利用透過率佳但 SHGC 也高的玻璃，才能使更多的晝光進入室內，然而這也使得進來的輻射熱增加而降低空調節能的效果，因此，可以看到在此室型中，必須面臨空調和照明節能的權衡，相對地，正方形和寬長型的室型，則能透過良好的採光有效降低照明能源，同時透過良好的外殼設計減少熱輻射所得，也能達到良好的空調節能效果。

表 6-16 所有室型下，柏拉圖最佳解方案的改善率(對比基線建築)

改善率(%)	窄長型					正方形				寬長型						
	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
UDI(300-2000)	3.3	2.4	1.5	1.0	0.1	11.8	10.7	10.3	8.9	33.4	32.9	32.5	31.7	30.8	28.5	26.6
UDI(>2000)	8.3	25.5	20.1	13.6	36.4	46.3	41.7	41.1	35.7	62.6	60.9	61.7	58.5	55.6	53.4	49.5
空調能源	14.0	19.8	19.9	19.9	25.4	29.6	29.5	29.7	29.7	33.4	33.5	33.8	33.8	33.8	34.0	33.8
照明能源	20.1	17.2	17.5	18.3	15.2	21.2	21.5	21.5	21.9	21.9	22.1	21.8	22.2	22.8	22.7	23.0
總能源	34.2	36.9	37.4	38.2	40.6	50.8	51.0	51.2	51.6	55.3	55.6	55.6	56.0	56.6	56.7	56.9
基線建築表現 (UDI 及建築 能源)	UDI(300-2000)=44.8%; UDI(>2000)=22.4%;空調耗能 =63.9 kWh/m ² .a;照明耗能 =31.3 kWh/m ² .a					UDI(300-2000)=45.1%; UDI(>2000)=29.7%; 空調耗能=66.3 kWh/m ² .a;照明耗能 =31.3 kWh/m ² .a				UDI(300-2000)=39.7%; UDI(>2000)=39.1%;空調耗能=69.4 kWh/m ² .a;照明耗能=31.3 kWh/m ² .a						



第七章 結論與建議



為了得到各建築外殼設計，對建築能源和視覺舒適度的影響，以及探討這兩者之間的關係，本研究利用了大量的模擬樣本產出結果，並進行統計分析及討論，並同時尋求最佳的設計策略和方案。

7-1 結論

1. 根據此研究的結果分析，在建築外殼設計的策略上，擁有最大的影響效果就屬室型、開口率及玻璃材質。就能源觀點而言，室型寬長型因晝光利用佳，會有較好的照明節能及因較少照明發散熱而得的空調節能；開口率在空調及照明節能有相反趨勢，但以加總而言，60%的開口率節能效果最佳；玻璃材質上，同樣在空調及照明節能有著相反的趨勢，加總而言，染色玻璃會有最佳節能效果。以視覺舒適度而言，寬長型室型雖有利於UDI(300-2000)(可利用晝光比率)，但也容易造成UDI(>2000)(過亮晝光比率)增加，窄長型則反之；開口率80%也有著和寬長型室型類似的問題，而較小開口率則反之；玻璃材質雖然對UDI(300-2000)影響不大，但對於UDI(>2000)有著相當明顯的影響力，尤其染色玻璃可以減少相當多的過亮晝光。

表 7-1 各建築外殼設計因子是否具顯著影響

因子	空調能源		照明能源		空調及照明能源		UDI(300-2000)		UDI(>2000)	
	是否有顯著影響?		是否有顯著影響?		是否有顯著影響?		是否有顯著影響?		是否有顯著影響?	
	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
室型	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
開口率	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
遮陽版深	是	是	是	否	是	是	是	是	是	是
遮陽版位置	否	否	是	是	是	是	否	否	是	是
天花板反射率	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
遮陽板反射率	是	否	是	是	是	是	否	否	是	是
玻璃材質	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是

2. 就建築能源和視覺舒適度整體的趨勢而言，UDI(300-2000)大致上有著和節能一致的趨勢，亦即晝光利用品質越佳，也越能達到較佳的建築節能。不過，在較佳的幾個點(即柏拉圖最佳解)仍會出現晝光利用跟建築節能之間的權衡關係，至於如何進行挑選，則仍須仰賴決策者的偏好或其他限制條件。

3. 三種室型中，寬長型的空間能達到較佳的晝光利用和建築節能，UDI(300-2000)較總平均高 3.0 %；建築節能較總平均高 7.5 kWh/m².a。原因是此室型的深度較淺、引入晝光較其他室型容易，即使在基線建築的過亮晝光比例相當高，但藉由良好的外殼設計，可以在遮擋過亮晝光之餘，引入適量且充足的晝光，不僅能提高可利用晝光而增進視覺舒適度，也能達成較良好的照明節能，而因此減少的照明發散熱也能節省相當的空調耗能。

4. 不同室型的情況下，也有著不同的最佳化設計策略。窄長型的空間，由於空間較深、採光不易，因此需要較高的開口率以引進足量的晝光，而玻璃的選用上也因此可以選用到透過率較佳的材質；正方型的空間，同樣因為空間較深而因此選用到高開口率的水準，然而，在已有足夠晝光的情況下，採用的玻璃就以 SHGC 較低的染色玻璃為主，以阻絕大部分的輻射熱；寬長型的空間，則因為空間深度淺、引入晝光效果較佳，因此，最佳的開口率水準反而會選用第二水準的 60%開口率，以減少過多的輻射熱和過量晝光進入室內，在晝光充足的情況下，同樣會使用 SHGC 較低的染色玻璃以降低空調耗能。

5. 若和基線建築相比，寬長型的室型在建築能源和視覺舒適度上都有顯著的改善效果，UDI(300-2000)最高可改善 33.4%，UDI(>2000)最高可改善 62.6%，建築能源最多改善 56.9%(空調為 33.8%，照明為 23.0%)，原因是寬長型的基線建築本身就較易面臨較嚴重的輻射熱和過亮晝光問題，不過，透過良好的外殼設計就可以有效解決這些問題，並且達到很好的晝光利用及照明節能效益；反而，窄長型室型在改善效果上，UDI(300-2000)最高僅能改善 3.3%，UDI(>2000)最高可改善 36.4%，建築能源最多改善 40.6%(空調為 25.4%，照明

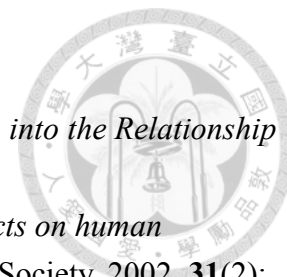
為 15.2%)，主要是因為能引入的晝光本來就已很有限，因此難以提高晝光利用效果和相關的照明節能效益。



7-2 建議

1. 雖然本研究將室內環境品質轉換為經濟上的價值後，對於挑選最佳結果並無顯著的幫助，然而，此法仍不失為往後結合人員生理感受和建築能源的好方法，可以有效的進行綜合的經濟評估。當然，若能針對台灣的环境，建立屬於台灣的數學模式，會更有在本地應用的價值。
2. 本研究僅針對南向進行評估，然而開口部面向方位不同所致的建築能源和晝光利用情況亦有相當的差異，未來宜進行其他方位的探討。
3. 晝光眩光機率指數(DGP, Daylight Glare Probability)雖然計算量大，然而，可以提供更佳的眩光情況評估，因此可以視模擬量規模的大小，考慮納入視覺舒適度之評估。

參考文獻



1. Heschong, L., *Skylighting and Retail Sales: An Investigation into the Relationship Between Daylighting and Human Performance*. 1999.
2. Heschong, L., R.L. Wright, and S. Okura, *Daylighting impacts on human performance in school*. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 2002. **31**(2): p. 101-114.
3. 陳聖仙, *建築節能設計經濟效益評估：外殼、晝光、照明、空調之綜合評估*, 1995, 國立成功大學碩士論文
4. 陳逸倫, *電腦模擬建築物自然採光與外部遮陽節約能源綜合評估之研究*, 2001, 淡江大學碩士論文
5. 吳俊毅, *建築外遮陽設施對室內自然採光與節約能源綜合評估研究---以澎湖地區 48 方位為例*, 2008, 淡江大學碩士論文
6. Ho, M.-C., et al., *Optimal sun-shading design for enhanced daylight illumination of subtropical classrooms*. *Energy and Buildings*, 2008. **40**(10): p. 1844-1855.
7. David, M., et al., *Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades*. *Building and Environment*, 2011. **46**(7): p. 1489-1496.
8. Reinhart, C.F. and J. Wienold, *The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylight spaces*. *Building and Environment*, 2011. **46**(2): p. 386-396.
9. Yun, G., K.C. Yoon, and K.S. Kim, *The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings*. *Energy and Buildings*, 2014. **84**(0): p. 70-85.
10. Fanger, P.O., *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. 1970: McGraw-Hill.
11. Standardization, I.O.f., *ISO 7730: Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*. 1994: ISO.
12. Hopkinson, R.G., J. Longmore, and P. Petherbridge, *An Empirical Formula for the Computation of the Indirect Component of Daylight Factors*. *Transaction of the Illuminating Engineering Society (London)*, 1954. **19**(7): p. 201-218.
13. Lynes, J.A., *Principles of natural lighting*. 1968, London: Applied Science Publishers.
14. Ramos, G. and E. Ghisi, *Analysis of daylight calculated using the EnergyPlus programme*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. **14**(7): p. 1948-1958.
15. Cohen, M.F. and J.R. Wallace, *Radiosity and Realistic Image Synthesis*. 2012: Elsevier Science.
16. Larson, G.W. and R. Shakespeare, *Rendering With Radiance: The Art And Science Of Lighting Visualization*. 2004: Booksurge Llc.

17. Chu, V. 3D 場景之燈光設定. 2003; http://www.e-waves.com/dna_0703.htm
18. Reinhart, C.F. and O. Walkenhorst, *Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds*. Energy and Buildings, 2001. **33**(7): p. 683-697.
19. Reinhart, C. and B. Pierre-Felix, *Experimental validation of autodesk® 3ds max® design 2009 and daysim 3.0*. LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America, 2009. **6**(1): p. 7-35.
20. Tregenza, P. and I. Waters, *Daylight coefficients*. Lighting Research and Technology, 1983. **15**(2): p. 65-71.
21. Hensen, J.L.M. and R. Lamberts, *Building Performance Simulation for Design and Operation*. 2012: Taylor & Francis.
22. Moon, P. and D.E. Spencer, *Illumination from a non-uniform sky*. 1942.
23. Nabil, A. and J. Mardaljevic, *Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors*. Energy and Buildings, 2006. **38**(7): p. 905-913.
24. Nabil, A. and J. Mardaljevic, *Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings*. Lighting Research and Technology, 2005. **37**(1): p. 41-59.
25. Jin, Q., M. Overend, and P. Thompson, *Towards productivity indicators for performance-based façade design in commercial buildings*. Building and Environment, 2012. **57**(0): p. 271-281.
26. La Gennusa, M., et al., *The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation—a generalised algorithm*. Building and Environment, 2005. **40**(3): p. 367-375.
27. Rizzo, G., G. Franzitta, and G. Cannistraro, *Algorithms for the calculation of the mean projected area factors of seated and standing persons*. Energy and Buildings, 1991. **17**(3): p. 221-230.
28. 內政部建築研究所, *綠建築解說與評估手冊*. 2009, 台北: 內政部建築研究所.
29. 周鼎金, *學校教室照明與節能參考手冊*. 2004, 臺北市: 教育部.
30. Santamouris, M. and D.N. Asimakopoulos, *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. BEST (Buildings, Energy and Solar Technology) Series. 2001: James & James.