

風速實場量測最佳化建築物自然通風效率即時資訊平台開發研究

內政部建築研究所委託研究報告

108 年度

風速實場量測最佳化建築物自然通 風效率即時資訊平台開發研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 108 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

PG10801-0757

風速實場量測最佳化建築物自然通 風效率即時資訊平台開發研究

受 委 託 者：社團法人中華民國風工程學會

計畫主持人：蔡明修

協同主持人：黎益肇

研 究 員：陳善婷

研 究 助 理：王家驊

研 究 期 程：中華民國 108 年 1 月至 108 年 12 月

研 究 經 費：128 萬 5 千元整

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 108 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

圖次	III
表次	VII
摘 要	VIII
ABSTRACT	XV
第一章 緒 論	1
第一節 研究動機.....	1
第二節 研究目的.....	4
第三節 研究內容與方法.....	5
第二章 文獻回顧	13
第一節 建築室內自然通風分析與研究	13
第二節 BIM 在自然通風之應用相關議題	16
第三節 室內 PMV 熱舒適性指標	21
第三章 建物室內通風最佳化決策模式.....	25
第一節 以體感溫度為基礎之室內通風決策模式 ...	25
第二節 以 PMV 為基礎之室內通風決策模式	34
第三節 小結.....	39
第四章 實場資訊量測系統.....	41
第一節 實場資訊量測系統設計	41
第二節 實場資訊量測系統實作	46
第五章 建物自然通風數值模型資料庫.....	62
第一節 建置流程與方法.....	62
第二節 研究案例概述.....	63

第三節 風洞試驗.....	65
第四節 CFD 模擬	69
第五節 建物自然通風數值模型資料庫設計與實 作.....	75
第六節 建物自然通風數值模型資料庫建制	101
第六章 建物自然通風決策系統.....	106
第一節 系統分析.....	106
第二節 系統設計.....	110
第三節 系統實作.....	115
第七章 結論與建議.....	125
第一節 結論.....	125
第二節 建議.....	126
附錄一 採購評選會議意見回應.....	129
附錄二 第一次專家座談會意見與回應.....	133
附錄三 期中審查會議意見與回應.....	137
附錄四 第二次專家座談會意見與回應.....	143
附錄五 期末審查會議意見與回應.....	147
參考文獻	151

圖次

圖 1-1 視覺化多維度資訊整合架構(VMDIIF)圖	7
圖 1-2 混合式資料庫架構圖	8
圖 1-3 視覺化多維度資訊應用程式三層式架構圖	9
圖 1-4 計畫執行流程圖	11
圖 2-1 BIM 在建築物永續性分析的七大主要功能	18
圖 3-1 以體感溫度為基礎之室內通風情境分析圖	26
圖 3-2 最佳化自然通風配置評估機制	27
圖 3-3 室內最低體感溫度及最大換氣率推估方法示意圖	28
圖 3-4 室內即時體感溫度(T_r)及當前換氣率(E_r)推估方法示意圖	30
圖 3-5 室內即時體感溫度(T_r)及當前換氣率(E_r)推估方法示意圖	32
圖 3-6 室內最佳室內通風速率($\bar{U}_m$)及其對應開窗配置推估方法示意圖	33
圖 3-7 以 PMV 熱感舒適度指標之室內自然通風決策流程	36
圖 3-8 室內最佳室內通風速率($\bar{U}_m$)及其對應開窗配置推估方法示意圖	37
圖 3-9 室內風速矩陣(MSiV)示意圖(以前 500 點為例)	38
圖 3-10 室內 PMV 矩陣(MSiPMV)示意圖(以前 500 點為例)	38
圖 4-1 實場資訊量測系統架構圖	41
圖 4-2 實時外部風場資訊量測裝置架構	43
圖 4-3 實時室內通風環境量測裝置架構	44
圖 4-4 WindSonic 超聲波風速傳感器架設位置	48
圖 4-5 電源供應裝置	48
圖 4-6 信號轉換裝置	49
圖 4-7 DHT-22 溫濕度傳感器與粉塵傳感器模組	51
圖 4-8 LinkIt ONE 開發板與藍牙 wifi 天線	53
圖 4-9 LinkIt ONE 開發板室外執行程式	54
圖 4-10 室外實時資訊管理程式	54
圖 4-11 自製窗戶與雌黃開關、DHT-22 溫濕度傳感器	56
圖 4-12 LinkIt ONE 開發板室內執行程式	58

圖 4-13 室內實時資訊管理程式	58
圖 4-14 建物實場環境資料庫之實時外部風場資料表	59
圖 4-15 建物實場環境資料庫之實時室內環境資料表	59
圖 5-1 示範建築 3D 圖	63
圖 5-2 示範建築之 4 樓配置圖	64
圖 5-3 建研所循環式大氣邊界層風洞性能	66
圖 5-4 動態皮托管	67
圖 5-5 多頻道電子式壓力掃瞄器	68
圖 5-6 示範建築 4F 室內網格配置	73
圖 5-7 風洞試驗配置	75
圖 5-8 風洞實驗室之平均風速與紊流強度剖面	76
圖 5-9 超音波風速計與來風風向關係圖	78
圖 5-10 來風風向與風速比關係圖	78
圖 5-11 實場風速風向至比對資料庫資料流程	79
圖 5-12 全開(AO)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I.....	82
圖 5-13 全開(AO)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II.....	83
圖 5-14 關南側窗(CS)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I.....	84
圖 5-15 關南側窗(CS)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II....	85
圖 4-16 關東側窗(CE)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I.....	86
圖 4-17 關東側窗(CE)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II ..	87
圖 4-18 關北側窗(CN)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I.....	88
圖 4-19 關北側窗(CN)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II...	89
圖 4-20 開東側窗(OE)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I.....	90
圖 4-21 開東側窗(OE)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II...	91
圖 4-22 開南側窗(OS)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I.....	92
圖 4-23 開南側窗(OS)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II...	93
圖 4-24 開北側窗(ON)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I	94
圖 4-25 開北側窗(ON)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II...	95
圖 5-26 不同風向下之換氣率	96
圖 5-27 不同風向下之無因次平均風速	96
圖 5-28 無因次風速之累積機率分布(AO).....	97
圖 5-29 無因次風速之累積機率分布(CE).....	97
圖 5-30 無因次風速之累積機率分布(CN).....	98

圖 5-31 無因次風速之累積機率分布(CS)	98
圖 5-32 無因次風速之累積機率分布(OE).....	99
圖 5-33 無因次風速之累積機率分布(ON).....	99
圖 5-34 無因次風速之累積機率分布(OS)	100
圖 5-35 建物自然通風數值模型資料庫架構圖	101
圖 5-36 Revit 模型資料匯入 BIM 3D 模型資料庫流程圖	103
圖 5-37 建物自然通風數值模型資料庫實體關聯圖	103
圖 6-1 建物自然通風決策系統使用案例圖	106
圖 6-2 PMV 衣著量參數圖	107
圖 6-3 PMV 人體代謝率參數圖	108
圖 6-4 建物自然通風決策系統架構圖	110
圖 6-5 建物自然通風資料庫架構圖	111
圖 6-6 建物自然通風決策系統主介面	117
圖 6-7 建物自然通風決策系統 PMV 參數設定介面之下拉選單(UI)	118
圖 6-8 建物自然通風決策系統 PMV 參數設定介面之下拉選單(UI)	119
圖 6-9 建物自然通風決策系 PMV-1 開窗決策介面 (UI)	120
圖 6-10 建物自然通風決策系 PMV-2 開窗決策介面 (UI)	121
圖 6-11 建物自然通風決策系統建築樓層和風場資訊介面 (UI)	122
圖 6-12 建物自然通風決策系統體感溫度開窗決策介面 (UI) .	122
圖 6-13 建物自然通風決策系統「體感溫度決策模式」最佳開窗模 式顯示畫面	123

表次

表 2-1 12 個主要基於 BIM 之綠建築相關分析軟體及其功能與使用對象	20
表 2-2 針對不同程度的認同人體熱感係數和生理壓力的 PMV 分類	22
表 2-3 PMV 與各生物氣象人體熱感指數之對應	24
表 4-1 實場資訊量測系統之開發環境	46
表 4-2 WindSonic 超聲波風速傳感器規格表	47
表 4-3 DHT-22 溫度模組規格表	49
表 4-4 Grove Dust Sensor PM2.5 粉塵傳感器傳感器規格表	50
表 4-5 LinkIt ONE 開發板規格表	52
表 4-6 實時外部風場資訊量測裝置	55
表 4-7 實時內部風場資訊量測裝置	57
表 5-1 示範建築 4 樓開窗資訊	64
表 5-2 模擬參數設定	74
表 5-3 4 樓開窗部於各風向角之風壓係數 I	80
表 5-4 4 樓開窗部於各風向角之風壓係數 II	80
表 6-1 建物自然通風決策系統之開發環境	115
表 6-2 系統 PHP 程式語言功用說明	116

摘 要

關鍵詞：實場量測、自然通風、計算流體力學、風洞實驗、建築資訊模型、物聯網、PMV 熱感舒適度指標、體感溫度

一、研究緣起

面對全球暖化的威脅，減碳已成為世界共同倡議之方向。台灣在此潮流下，也積極朝建構永續宜居環境，提升智慧綠色科技應用之方向努力，希望在減低建築物能量消耗的同時，也能兼顧宜居空間的基本需求。而室內通風不僅影響空間的溫度，也關係建物使用者的健康。如何有效導入外部風場，利用自然通風機制減少建物空調能源之消耗或提供健康之居住環境是目前使用維護上之重要議題。而建築物內氣流環境與空氣品質之好壞常取決於室內之通風效果。台灣地處亞熱帶氣候區，全年有近半年的時間可以藉由自然通風的方式進行室內外空氣交換，以達到調節室內空氣溫度與品質之目的。

而營建工程隨著新技術及新工法之發展，工程內容之質量與多樣性劇增，建物資訊越趨複雜。營建業者與學者不斷使用新的資訊科技(Information Technology)，以提供生命週期各階段團隊更精確及實用之建物資訊，朝向建物生命週期資訊整合及智慧管理之目標邁進。而建築資訊模型(Building Information Modeling, BIM)的技術至今已推廣多年，各先進國家都將其列為目前優先發展之工程技術，持續推動並落實 BIM 技術之基礎。從生命週期來看，BIM 技術確實已逐漸推廣於工程規劃及設計階段，顧問公司或建築師採用 BIM 相關設計軟體進行規劃設計之案例也不斷增加。此發展可歸功於 BIM 具有優異的可視化圖形，並具有大量的尺寸、數量、材質、碰撞檢測等資訊與功能，對於設計單位能夠有效提升其內部檢討及溝通之效率。然而脫離設計建模(modeling)階段，因資訊整合不易，復以過去資訊管理系統開發不擅長如何將 BIM 之 3D 空間視覺介面帶入各階段之應

用中，是故 BIM 技術在營建施工乃至建物使用維護階段仍無法廣泛應用，有待產官學三方持續努力。

在上述背景下，行政院刻正推動之「數位國家・創新經濟發展方案(106~114 年)」、「前瞻基礎建設計畫」之「數位建設-營造智慧國土」與內政部「建構永續宜居環境」等重要相關政策。為此，本計畫以落實風工程技術及建築資訊模型(BIM)之創新多元整合應用與跨領域人才之培養為目標，結合 CFD 模擬、風洞實驗、物聯網(IoT)、建築資訊模型等技術，以建築內自然通風效率最佳化為導向，實現智慧化建築通風即時監控系統與機制，創造節能之居住環境，提升人民綠生活之居住品質，以達成「節能再生的低碳家園」、「潔淨健康的生活環境」與「國土建設永續發展」的整體政策目標。

綜言之，為了提供即時的室內自然通風決策資訊給住戶，必需有效整合即時外部風場及內部風場資訊。如何根據外部風場的狀態，即時求得最佳的建築開窗模式已產生最合適的室內通風效果一直是個難題。在建築物設計分析階段，可透過 CFD 分析模擬各種室外風場下，不同建物開窗方式所產生的室內通風結果。然此方法需大量的計算，無法提供建築物使用維護階段之即時決策使用。為此，本研究希望藉由建築物資訊模型之應用，一方面利用建築物資訊模型進行室內外風場實驗與模擬，求得室內自然通風的最佳化資訊；一方面以建築資訊模型作為資訊整合載體，將最佳化資訊結果整合於建築資訊模型資料庫中，進而透過資訊系統之開發，建立一個可以即時量測室外風場及室內環境參數，並據以查詢最佳通風策略之室內自然通風決策系統。

二、研究方法及過程

為建立最佳化通風分析，研究擬選定一有自然通風需求之目標建築進行分析。本建築位於台灣南部，為樓高 8 層且附近為空曠區域，室內空間寬敞無複雜隔間，適合於夏季進行自然通風。為求得此案例的自然通風最

佳化開窗模式，本研究將先後以風洞實驗及 CFD 數值模擬方式建立「建物自然通風數值模型」。也就是於風洞實驗中獲取建物開窗部位之建築表面風壓，再將對應之風壓係數導入 CFD 室內通風模型中進行不同開窗配置之通風分析，藉以求得該建物在不同外部風場環境下所對應不同開窗配置之室內自然通風資訊。

為了使「建物自然通風數值模型」能落實在建物營運維護階段，本次透過建物 BIM 空間模型與通風數值模型的資料串連，開發「BIM 建築物室內通風管理系統」。考量系統開發及使用成本之因素，本研究採用 Unity3D 作為 BIM 模型之加值應用開發工具，並利用自行發展之「視覺化多維度資訊整合架構」進行系統整合機制。

上述所使用之相關方法概述如下（詳細內容請詳報告章節）：

1. 風洞試驗

於風洞中設置目標建築之縮尺模型，量測在不同水平風向角下模型各開窗位置之風壓數據，其結果係作為建築壓力模擬驗證比對之依據，以及室內模擬區域開窗部之壓力邊界條件。

風洞試驗內容包括：

- (1) 來流風況：C 地況， $0^{\circ} \sim 337.5^{\circ}$ ，每 22.5° 轉風向角一次，共 16 個水平風向角。
- (2) 目標建築模型 1 座，包含半徑 100 公尺範圍內建築。
- (3) 針對目標建築物模型開口區域進行風壓量測，獲得表面風壓(時均值與均方根值)之空間分佈結果。

2. CFD 模擬

針對目標建築其中 1 個代表樓層之室內空間進行模擬，

- (1) 來流風況：根據風洞實驗量測之風壓結果，將 16 個水平風向角之風

壓數據輸入分析。

- (2) 針對目標樓層模擬數個可控制開關之窗戶情形，改變不同開窗條件(扣除完全不開以及僅開 1 扇窗的無法產生貫流通風狀況)求得各種條件下的室內空氣流場數值。

3. Unity 3D

Unity3D 遊戲引擎為現今廣被使用的遊戲引擎之一，主要可支持多平台系統之開發，例如 Windows、macOS、Linux 作業系統之線上與單機遊戲以及 Android、iOS 行動裝置應用程式(Application, APP)等。在開發上主要以物件導向的程式設計邏輯為基礎，並搭配 C#、JavaScript 程式語言，讓使用者以較為不受限的方式依照個人的需求進行程式的互動設計與開發。在開發的過程中，Unity 3D 遊戲引擎提供使用者一個 3D 可視化的場景進行開發，並結合 2D 使用者介面(User Interface, UI)的開發環境，讓使用者方便進行 3D 介面為基礎之遊戲開發，其中 Unity 也提供了多種 3D 模型格式的支持，其中包括 *.3ds、*.dxf、*.dae、*.obj、*.fbx 等，使得在本研究得已整合不同之 BIM 模型檔案，讓系統的製作上更為多元。除此之外 Unity3D 遊戲引擎還具有大量的第三方插件支援，協助使用者功能需求上的開發更為便捷。有鑒於此，本研究將利用 Unity3D 遊戲引擎高度的跨平台性、互動性、客制化、開發自由度及 3D 畫面呈現的能力為基礎，作為系統主要之開發環境，藉此開發出一個有利於 BIM 3D 模型加值應用及營建資訊整合的視覺化建物自然通風管理系統。

4. 視覺化多維度資訊整合架構

為有效拓展 BIM 於營建產業全生命週期之應用，根據既有 BIM 3D 模型與營建資訊管理系統整合之需求，本研究將利用自行設計之「視覺化多維度資訊整合架構(Visualized Multi-dimensional Information Integration Framework, VMDIIF)」，以 Unity3D 遊戲引擎及網頁為主要開發環境，並

結合虛擬實境(Virtual Reality, VR)之技術，提供一個以 BIM 3D 模型為基礎之圖形化操作介面，其中包含了三個主要之項目：「混合式資料庫(Hybrid Database)」、「系統維護管理模組」及「視覺化多維度資訊應用程式」，作為往後整合開發之參考。

三、重要發現

(1) 室內自然通風決策模式

在以室外風場及預先分析所得之室內 CFD 風場資訊為判斷依據為前題下，本研究以「體感溫度」及「PMV 熱感舒適度指標」等二種舒適度指標作為最適室內通風之決策因子，分別擬定以「目標體感溫度」及「最大舒適空間率」之決策模式作為「建築物室內通風決策系統」開發之用。然此系統並不限於此二種決策模式。只要可依據室外風場及室內 CFD 場資訊為基礎之決策方式皆可用以修正或新增至系統中，提供更完善之室內自然通風決策建議。

(2) 實場資訊量測系統

本研究透過「實時外部風場資訊量測裝置」、「實時室內通風環境量測裝置」、「外部風場實時網頁」與「建物實場環境資料庫」之建立，已經達成以「實場資訊量測系統」自動收集室內外通風環境資訊，並將資訊整理上傳至資料庫，為後續最佳化通風決策提供依據之目標。此外，「實場資訊量測系統」因採開放式架構進行開發，故後續仍可依照可能之室內通風環境決策之需求，在現有的實時量測裝置的基礎上擴充傳感器數量與類型以保證此系統未來之延續性。

(3) 建物自然通風模型數值資料庫

以風洞實驗得到建物表面風壓作為 CFD 室內自然通風模擬之邊界條件，並利用 CFD 模擬分析求得建築物室內風場分布資料、平均風速及換氣率等數據。透過整合上述 CFD 模擬數據與建築物 BIM 模型資料，完成「建

物自然通風模型數值資料庫」之設計、建置及資料儲存，以作為「BIM 建築物室內通風決策系統」的核心資料庫。

(4) BIM 建築物室內通風決策系統

完成「BIM 建築物室內通風決策系統」之開發。透過遊戲引擎平台之開發環境，成功整合上述「實場資訊量測系統」、「建物自然通風模型數值資料庫」及建築物 BIM 3D 模型，建置一個以建築模型為操作介面，可自由切換各樓層模型，並呈現各樓層室內外風場及環境即時資訊，更可依據室外風場狀況分別以體感溫度及 PMV 熱感指標提供最佳通風決策之系統。透過此系統之實作，也實現了將 CFD 等預先分析數據(pre-analysis data)進行儲存，進而帶入後續建物使用維護階段進行應用之方法論。

四、主要建議事項

建議一

本案研究成果提供相關學會團體建置資訊平台於實體公共建築展示空間：

立即可行建議

主辦單位：社團法人中華民國風工程學會

協辦單位：財團法人台灣建築中心

建議選擇具備基礎智慧建築設施設備之案場，利用本研究所建置之軟體系統針對該案場現有之可行設備進行整合，並發展合適展演教材與教具，透過展演方式使民眾經由系統操作，了解外部風場與室內自然通風關聯，進而推廣節能、智慧建築、物聯網應用等知識與概念，展現本所研究成果。

建議二

建議辦理風工程相關實場監測即時量測技術研究：中長期建議

主辦單位：社團法人中華民國風工程學會

基於本案研究成果建立之物聯網技術，可進一步擴增應用於風工程相

關之實場監測技術。例如建立戶外風環境即時資訊系統，可應用於社區、校園或大型戶外公共空間，提供即時區域微氣候資訊，實時判斷戶外微氣候之良窳，提供民眾戶外休憩活動之可靠指標，創造智能之宜居環境，進一步提升人民綠生活之居住品質。同時，戶外風場資料在經過長時間蒐集後，可與氣象站資料整合進行整合分析，透過大數據或人工智慧技術處理，可補強設計風速資料來源。本技術亦可應用於建築結構監測，搭配 GPS、加速度計、壓力量測等設備，即時監控並蒐集建築之風壓、振動等資訊，作為建築抗風之風洞實驗驗證或理論模式發展依據。

ABSTRACT

Keywords : field measurement, natural ventilation, CFD, wind tunnel experiment, BIM, IoTs, PMV, apparent temperature

I. Background

In the face of the threat of global warming, carbon reduction has become the world's collective initiatives. Under this trend, Taiwan is also actively striving to build a sustainable and livable environment and enhance the application of smart green technology. It is hoped that while reducing the energy consumption of buildings, it can also take into account the basic needs of livable space. Indoor ventilation affects not only the temperature of the space but also the health of the building user. How to effectively introduce external wind farms, use natural ventilation mechanism to reduce the consumption of building air conditioning energy, or provide a healthy living environment is an essential issue in current maintenance. The airflow environment and air quality in the building often depend on the ventilation effect in the indoor space. Taiwan is located in a subtropical climate zone; accordingly, it has been able to exchange indoor and outdoor air through natural ventilation to achieve the purpose of regulating indoor air temperature and quality almost for six months in one year.

With the development of new technologies and new construction methods, the quality and diversity of engineering technologies have expanded dramatically, and the building information has become more complicated. The construction industry and researchers continue to use information technology to provide more accurate and practical building information for all phases of the building life cycle, and to move toward the goal of building life cycle information

integration and smart management. The technology of Building Information Modeling (BIM) has been promoted for many years, and all advanced countries have served it as the priority engineering technology. From the perspective of the life cycle, BIM technology has gradually been well applied in the engineering planning and design stage. However, because the cross-stage information integration is severe, the BIM technology cannot be widely applied in the construction and maintenance phases of the building.

To provide immediate indoor natural ventilation decision information to residents, it is necessary to effectively integrate the external wind field and internal wind field information. How to get the best indoor ventilation mode based on the state of the external wind farm has been the most suitable indoor ventilation effect. In the stage of building design analysis, CFD analysis can be used to simulate the indoor ventilation results by different building windows conditions in various outdoor wind fields. However, this method requires massive calculations and cannot provide immediate decision-making for the maintenance phase of the building. To this end, this study hopes to use the building information model to conduct indoor and outdoor wind field experiments and simulations on the one hand, and to obtain the optimal information of indoor natural ventilation. On the other hand, the building information model is used as the information container for integrating the optimized information results. Then through the development of the information system, an indoor natural ventilation decision-making system that can measure the outdoor wind field, indoor environmental parameters, and query the optimal ventilation strategy can be established.

II. Research methods and processes

In order to establish an optimized ventilation analysis, the study plans to

select a target building with natural ventilation requirements for analysis. Located in the southern part of Taiwan, the building is an 8-story building with open space nearby. The interior is spacious and has no complicated compartments. It is suitable for natural ventilation in the summer. In order to obtain the natural ventilation and window opening mode of this case, this study will establish the "Numerical Model of Natural Ventilation of Building" by wind tunnel experiment and CFD numerical simulation. That is, obtaining the wind pressure of the building surface by the wind tunnel experiment, and then introduce the corresponding wind pressure coefficient into the CFD indoor ventilation model to conduct ventilation analysis of different window opening configurations. Accordingly, the indoor natural ventilation information corresponding to different window openings in different external wind field can be provided.

In order to implement the "Numerical Ventilation Numerical Model" in the building operation and maintenance phase, the "BIM Building Indoor Ventilation Management System" was developed through the connecting BIM space information with the numerical ventilation model. Considering the factors of system development and usage cost, we used Unity3D as a value-added application development tool for the BIM model and applied the self-developed "visualized multi-dimensional information integration architecture" to implement the system integration mechanism.

III. Conclusions

1. Indoor natural ventilation decision modes: under the premise of the outdoor wind field and the pre-analyzed indoor CFD wind field information, this study applied "apparent temperature" and "PMV" as the optimal factors for the indoor ventilation decision making. These two decision-making factors are

respectively used to develop the "somatosensory target temperature decision mode " and "maximum comfort-space rate decision mode " in the building indoor ventilation decision system. However, this system is not limited to these two decision modes. As long as the decision-making methods based on the outdoor wind farm and indoor CFD field information can be used to modify or add to the system, provide better indoor natural ventilation decision-making advice.

2. Real-time environment measuring system: through the establishment of "Real-time external wind field measuring device," "Real-time indoor ventilation environment measuring device," "External wind field real-time webpage," and "Building environmental database," the study has achieved real-time environment measuring system. The system automatically collects and stores information on the indoor and outdoor ventilation environment. Also, the real-time environment measuring system has been developed based on an open architecture. Therefore, the various sensors can be integrated into the system following the potential requirements of the different indoor ventilation decision-making necessary in the future.
3. Natural ventilation model database: the surface pressure of the building by wind tunnel experiment is taken as the boundary condition of the CFD analysis for natural ventilation simulation. The wind field distribution, average wind speed, and air exchange rate of the indoor space of the target building are obtained by CFD simulation analysis. Through the integration of the above CFD simulation data and BIM model data, the design, implementation, and data storage of the natural ventilation model database was completed as the core of the Building Indoor Ventilation Decision System.

4. BIM building indoor ventilation decision system: through the successful integration of the above-mentioned "real-time environment measuring system", "natural ventilation model database," and building BIM 3D model by the game engine platform, the development of "BIM Building Indoor Ventilation Management System" was completed. The system uses the BIM model as the operation interface, and can freely switch to each floor in the BIM model, and present the indoor and outdoor wind field and environment real-time information of each floor, and can provide optimal ventilation decision according to the indoor temperature field and the PMV thermal index. In addition, through the implementation of this system, the method of storing pre-analysis data such as CFD and carrying it into the subsequent construction and maintenance phase is also realized.

IV. Recommendations

For immediate strategies:

1. Applying the system to the public exhibition space: chose the proper exhibition place with necessary intelligent building facilities, equipment, softwares, and hardware system; use the developed system in this study to integrate the existing feasible equipment of the case. In turn, the development of suitable exhibition materials will enable the public to understand the relationship between external wind farms and indoor natural ventilation through the operation of the system and achieve the goal of promoting energy-saving, intelligent buildings, and Internet of Things applications.

For mid-term strategies:

2. The research of outdoor pedestrian wind environment real-time information system: based on the Internet of Things technology established in this study,

the advanced application of outdoor building microclimate can be developed. The establishment of an outdoor pedestrian wind environment real-time information system can be applied to communities, campuses, or large outdoor public spaces, providing instant regional microclimate information, real-time judgment of outdoor microclimates, and providing reliable indicators of outdoor recreation activities. Realizing this real-time information system, we can make it possible to create a smart and livable environment to further enhance the living quality of the people's green life.

3. Integration and development of indoor air quality intelligent management system: Based on the research results and experience and the relevant regulations of indoor air quality management, we can apply suitable indoor air quality measuring sensors and indoor mechanical ventilation/air conditioning solutions in the market to implement an indoor ventilation control system considering both of the natural and mechanical ventilation. Further, through this system, real-time data collection and analysis of indoor air quality and wind field can be carried out, and artificial intelligence algorithms such as deep learning can be combined to establish a ventilation decision mode suitable for different indoor spaces.

第一章 緒 論

第一節 研究動機

在全球暖化的威脅下，雖然政府大力推廣減碳行動，但也因氣溫逐步提升，建物使用者依賴空調之機械通風程度與日俱增。然而根據一項收集了來自 500 多個引入自然通風的建築和 40,000 個來自空調建築訪談的大型調查[33]，能引入自然通風模式建築中的乘客總體滿意度明顯優於空調建築，特別是與熱舒適性和空氣質量。建築物中較高的通風率可以有效地減少病態建築綜合症的發生[33]，同時提高居住者的生產力[48]。與單純空調建築相比，具有引入自然通風之建築具有更高的通風率，有可能提高居住者的健康和生產率，同時降低空調的能耗。隨著近年來業主對綠色環保的認識提高，引入自然通風之概念在歐洲，美國和世界其他地區越來越受歡迎。為此，如何提供既有空調建築使用者一個合適之自然通風控管機制，應是目前提升居住品質之重要方向，亦是目前必要的智能建築運營策略。

根據國內外之研究，現代人每天約有九成的時間處於室內，而室內環境品質的良好與否，深深地影響了人們的日常生活甚至長期的健康問題。行政院於 94 年通過「室內空氣品質管理推動方案」，並於 97 年通過「室內空氣品質管理法」，顯見於一般或公共建築物的室內環境管理中，尤其是在室內空氣品質的改善部分上已成為頗受重視的議題，而影響建築物內氣流環境與空氣品質的最重要因素則為室內通風。

室內通風可分為自然通風及機械通風兩種方式，自然通風是以自然的方式達到室內外空氣交換目的之過程，為一環保節能的方法，但易受到自然環境因素影響。機械通風又稱為強制通風，為利用通風機械所產生之動力促使室內外的空氣交換流動，其優點為容易控制，但常會耗費大量能源。

台灣地處亞熱帶氣候區，四面環海，風向主要受季節、海陸風或地形

風的影響，全年有近半年的時間可以藉由自然通風調節室內空氣之溫度與品質。基於節能性的考量，於建築設計之初應考量如何適當利用自然通風，才能避免能源的過度耗費。而就室內空氣流動之機制而言，自然通風可概分為風壓通風及浮力通風。其中，前者源於自然風力之作用，在建築內部與外部形成了風壓差異，因而造成空氣流動並促成通風之效果；後者係因室內空氣溫度之空間變化，因浮力效應導致空氣對流而產生之通風效應。

然如何協助建物根據實際風場最有效率地引入自然通風，則因整合的困難而仍有相當的努力空間。一般而言，為了引導外部環境風場進入建物，達到自然通風之效果，除必須掌握環境風場之實際狀況外，亦須有符合該建物室內空間配置之風場模型及良善之空間系統整合介面，方能在適合的時機主動提供整體通風口之開關決策與空間資訊給建物管理人員，達到引入自然通風之目標。

其中，為建立符合建物室內空間配置之風場模型，除了風洞實驗以外，計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD) 由於能夠模擬通過複雜幾何形狀和周圍的流體流動，業已成為被廣泛應用之分析技術。但儘管電腦計算硬體不斷有重大進展，進行 CFD 模擬所需的專業知識和資源成本極高，成本隨著問題的規模和複雜性而呈指數上升，因此目前仍僅在設計階段透過 CFD 之輔助完成設計，鮮少將分析成果導入建物使用維護階段。

再者，為掌握實際外部風場之狀況，必須自動化取得風速計等感測器之數據進行比對。受益於物聯網(internet of thing, IoT)技術之逐漸成熟，透過無線訊號將感測器數據上傳至雲端之相關軟硬體取得門檻大幅下降，然如何根據需求，妥善整合所收集到之風場數據資料則成為物聯網技術應用之關鍵。為此，有效整合建物外部實際風場資訊及室內通風風場模型，並提供友善之空間資訊介面，將是發展建築物自然通風系統之重要因素。而建築資訊模型(building information model, BIM)的加值應用，則為此提供可

行之整合環境與技術。

此外，建築行業正面臨著向數位化的轉變過程。各國政府機構和學術單位正積極透過規範、標準、指導手冊制定等行動，確定其建設部門績效的策略目標；而這些行動有很大一部分與建築資訊模型(BIM)的流程實施有關。期望建築行業從資料之收集，分析數據，甚至實現高採樣率（即大數據）收集的大量數據都能妥善發揮電腦計算之技術及潛力。而這些技術的創新也支持建築過程的創新，透過人與機器之間的數據共享(data sharing)，利益關係人間的協同合作(collaboration)，可視化(visualization)，以及情境模擬等功能，建築生命週期各階段之活動流程正逐漸改變中。因此，建築行業正面臨產品創新，因為建築概念的創新意義正在出現。這一新概念反映了建築物向用戶提供的服務正在發生變化的事實[52]。

BIM 已經被證明可以為土木建築工程專案帶來顯著的效益[53]。這些效益可以歸功於 BIM 的輔助設計優勢外，由於其資料庫關聯提供了 BIM 構建的詳細資訊，因此它還有可能以顯著的方式進行增值與擴展[45]。但是受限於目前 BIM 建模軟體功能之限制、開放性不足及開發門檻較高等因素，如何將建築物生命週期個階段資訊整合在同一個 BIM 模型中，並提供合適的使用者操作介面，仍有待努力。

綜言之，本研究以建立「BIM 建築物室內通風管理系統」為目的，針對一建築物建立一個考量室外環境風場狀態之室內通風風場數值模型；並輔以風洞實驗求得該建物與環境風場之參數組合，據以建立該建物之最佳化室內通風參數。最後再結合風場實測裝置所收集之即時資訊，以建築物 BIM 空間資訊模型為整合載體(container)，開發一個可協助建物使用者進行室內通風決策之輔助資訊系統。

第二節 研究目的

本研究擬針對建築物室內外通風特性，精進風場模擬技術，並開發物聯網室外實時風場實場量測及室內空間通風環境量測裝置，藉以根據室外風場、室內環境參數及建築物使用者之期望，建立建物室內自然通風最佳化演算模型；進而利用建築資訊模型(building information model)作為建物通風即時資訊之空間資訊載體(container)，提供室內通風控制之最佳化決策，達到節省能源、增進風能與舒適環境之效益。為此，本計畫擬定以下目的：

1. 擬定建物自然通風最佳化機制：透過文獻探討及專家座談並整合可行之技術，根據所實測之室內外風場資訊，以及所實測之即時風場資訊與空間分佈，以節省能源、增進通風以及建立舒適環境等目標，發展室內自然通風演算方法。
2. 開發建築物室內外實場量測物聯網系統：以 arduino 開放式軟硬體架構為基礎，結合既有之風場監測傳感器及建物環境數值偵測傳感器，開發建物室外風場量測物聯網裝置及室內通風環境量測物聯網裝置，藉以即時收集實時風場及環境資訊，以作為自然通風最佳化機制之決策依據。
3. 建築物自然通風資料庫建構：以研究建築案例為參考，透過風洞實驗進行室外風場實驗，獲取建物各通風口不同風向角下之邊界條件。進而透過計算流體力學(CFD)的方法進行室內自然通風數值模擬，求得「建物自然通風數值模型」，並據以建立「建築物自然通風資料庫」作為通風控制決策之數據基礎。
4. 開發「BIM 建築物室內通風管理系統」：研發以建築物 BIM 模型為資訊載體(information container)及使用者介面(user interface)之建築物室內風場管理系統，使即時室內風場資訊即時顯示於 3D 建物空間模型中，並提供實時的室內通風最佳化資訊，使建築物維護管理人員

能以直覺之 3D 圖資介面掌握建物之通風資訊與決策。

第三節 研究內容與方法

為建立「建築物自然通風資料庫建構」及最佳化通風分析，研究擬選定一目標建築進行自然通風分析。本建築位於台灣南部，為樓高 8 層且附近為空曠區域，室內空間寬敞無複雜隔間，適合於夏季進行自然通風。擬採用 2 部分進行，分別為風洞實驗以及 CFD 模擬。由於實驗設備以及縮尺模型考量，直接風洞實驗中進行建築室內外自然通風試驗的難度相當高，故本研究採用一個變通且有效的方式，即於風洞實驗中獲取開窗部之建築表面平均風壓，再將對應之風壓係數導入 CFD 室內通風模型中進行不同開窗配置之通風分析。

在開發「BIM 建築物室內通風管理系統」方面，本研究採用 Unity3D 作為 BIM 模型之加值應用開發工具，並利用自行發展之「視覺化多維度資訊整合架構」進行系統整合機制。分述如下：

1. 相關文獻與當地氣象資料收集
2. 風洞試驗

於風洞中設置目標建築之縮尺模型，量測在不同水平風向角下模型各開窗位置之風壓數據，其結果係作為建築壓力模擬驗證比對之依據，以及室內模擬區域開窗部之壓力邊界條件。

風洞試驗內容包括：

- (1) 來流風況：C 地況， $0^{\circ} \sim 337.5^{\circ}$ ，每 22.5° 轉風向角一次，共 16 個水平風向角。
- (2) 目標建築模型 1 座，包含半徑 100 公尺範圍內建築。
- (3) 針對目標建築物模型開口區域進行風壓量測，獲得表面風壓(時均值與均方根值)之空間分佈結果。

3. CFD 模擬

針對目標建築代表性樓層之室內空間進行模擬，

- (1) 來流風況：根據風洞實驗量測之風壓結果，將 16 個水平風向角之風壓數據輸入分析。
- (2) 模擬代表樓層所有可控制開關之窗戶情形，改變不同開窗條件，扣除完全不開以及僅開 1 扇窗的無法產生貫流通風狀況，求得各種開窗情況之室內空氣流動數據。

4. Unity 3D

Unity3D 遊戲引擎為現今廣被使用的遊戲引擎之一，主要可支持多平台系統之開發，例如 Windows、macOS、Linux 作業系統之線上與單機遊戲以及 Android、iOS 行動裝置應用程式(Application, APP)等。在開發上主要以物件導向的程式設計邏輯為基礎，並搭配 C#、JavaScript 程式語言，讓使用者以較為不受限的方式依照個人的需求進行程式的互動設計與開發。在開發的過程中，Unity 3D 遊戲引擎提供使用者一個 3D 可視化的場景進行開發，並結合 2D 使用者介面(User Interface, UI)的開發環境，讓使用者方便進行 3D 介面為基礎之遊戲開發，其中 Unity 也提供了多種 3D 模型格式的支持，其中包括 *.3ds、*.dxf、*.dae、*.obj、*.fbx 等，使得在本研究得已整合不同之 BIM 模型檔案，讓系統的製作上更為多元。除此之外 Unity3D 遊戲引擎還具有大量的第三方插件支援，協助使用者功能需求上的開發更為便捷。有鑒於此，本研究將利用 Unity3D 遊戲引擎高度的跨平台性、互動性、客制化、開發自由度及 3D 畫面呈現的能力為基礎，作為系統主要之開發環境，藉此開發出一個有利於 BIM 3D 模型增值應用及營建資訊整合的視覺化建物自然通風管理系統。

5. 視覺化多維度資訊整合架構

為有效拓展 BIM 於營建產業全生命週期之應用，根據既有 BIM 3D 模型與營建資訊管理系統整合之需求，本研究將利用自行設計之「視覺化多

維度資訊整合架構(Visualized Multi-dimensional Information Integration Framework, VMDIIF)」，以 Unity3D 遊戲引擎及網頁為主要開發環境，並結合虛擬實境(Virtual Reality, VR)之技術，提供一個以 BIM 3D 模型為基礎之圖形化操作介面，其中包含了三個主要之項目：「混合式資料庫(Hybrid Database)」、「系統維護管理模組」及「視覺化多維度資訊應用程式」，作為往後整合開發之參考(圖 1-1)。分述如下：

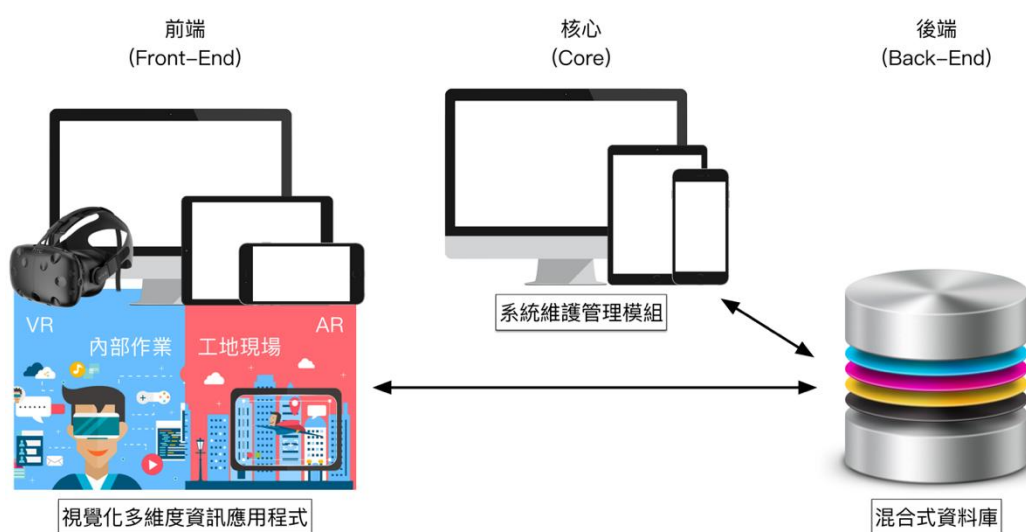


圖 1-1 視覺化多維度資訊整合架構(VMDIIF)圖

資料來源：本研究繪製

● 混合式資料庫

為了使系統之資訊能有效地進行整合，透過建立「混合式資料庫」，並利用其核心資料庫來作為整合既有 BIM 3D 模型資料庫與營建管理系統資料庫兩者之間的橋樑，串聯關鍵之資訊，同時可供後續功能擴充開發使用(圖 1-2)。

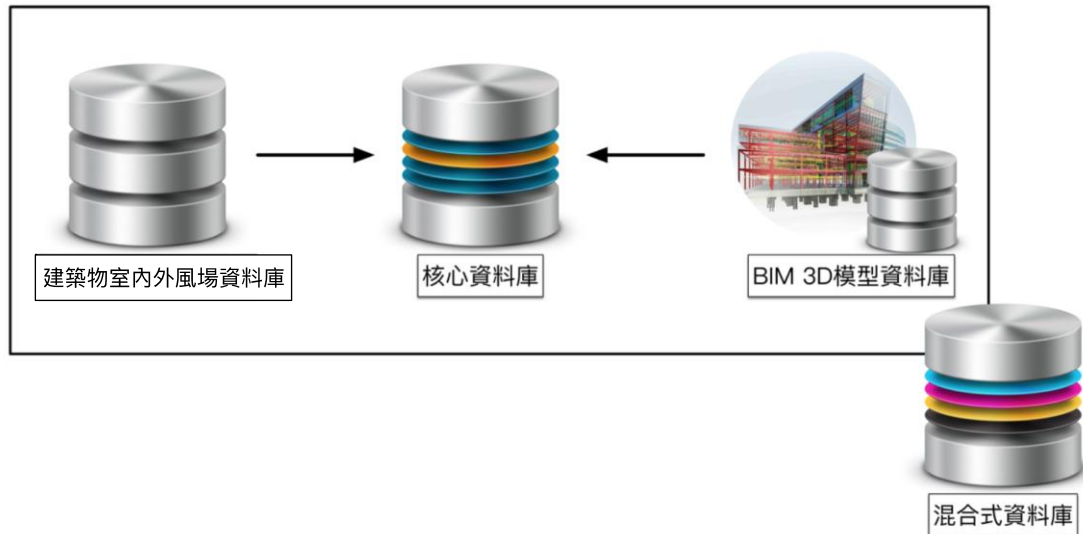


圖 1-2 混合式資料庫架構圖

資料來源：本研究繪製

其中「核心資料庫」主要負責「建築物室內外風場資料庫」與「BIM 3D 模型資料庫」之串連。其主要記載了 BIM 3D 模型中各空間與通風口構件之編碼與建築物室內外風場資料庫中各通風配置之關聯，以及後續「視覺化多維度資訊系統」功能中所需之資料及相關操作記錄。

- 系統維護管理模組

為了使開發之「視覺化多維度資訊系統」能更有效地與外部資料進行整合，透過「系統維護管理模組」以網頁的形式，經由網頁瀏覽器(Web Browser)針對「混合式資料庫」進行資料管理，將該項目作為架構核心，能以後續應用程式開發之功能需求進行「系統維護管理模組」功能之設計，進而擴充開發。

- 視覺化多維度資訊應用程式

以所建立之「混合式資料庫」為基礎，針對不同角度之營建管理需求及虛擬實境與擴增實境應用程式之使用行為進行功能分析與設計進而擴充開發，並根據不同之應用程式進行 UI 及核心功能設計。「視覺化多維度

資訊應用程式」主要以 BIM 為基礎作為圖形化操作介面，為了實現整合既有 BIM 3D 模型與營建管理系統，本架構將選擇有利於 3D 介面系統開發、整合性強、開發自由度高的 Unity3D 遊戲引擎作為「視覺化多維度資訊應用程式」之開發環境，透過 Unity3D 遊戲引擎之場景(scene)提供 3D 環境加上 2D UI 的開發方式作為主要介面，使其以較趨近於遊戲之操作方式，讓使用者在使用者體驗(user experience)上能更為直覺且有效率。因此本架構之「視覺化多維度資訊應用程式」主要將以三層式架構來實現(圖 1-3)。

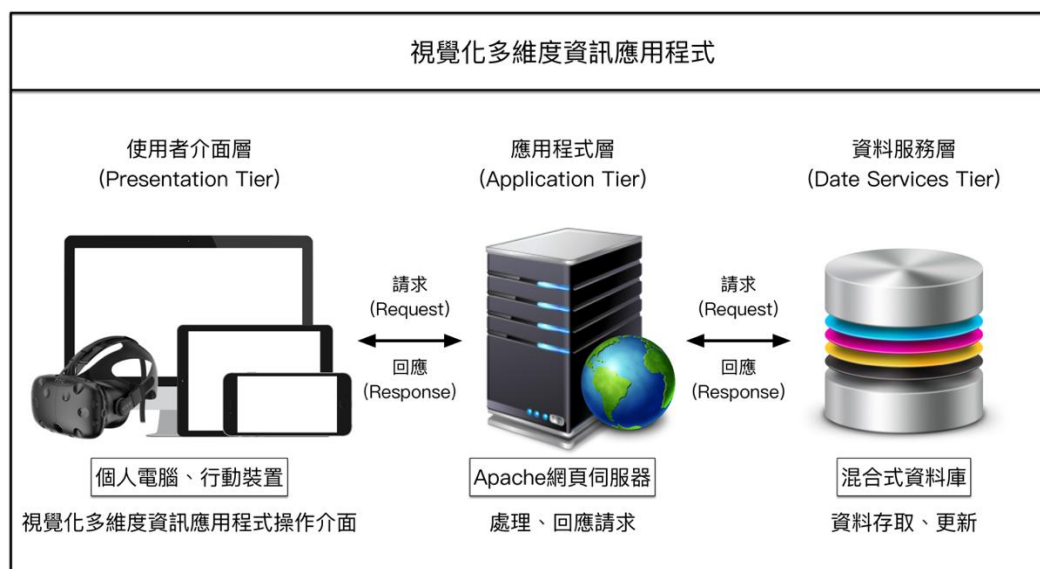


圖 1-3 視覺化多維度資訊應用程式三層式架構圖

資料來源：本研究繪製

本計畫之研究步驟分為如後三部分說明(參見圖 1-4)：

1. 建物自然通風數值模型之建立：
 - (1) 當地氣象資料蒐集分析。
 - (2) 目標建築量體模擬區域格網建置。
 - (3) 建築表面風壓模擬與驗證。
 - (4) 建築室內區域格網建置。

(5) 不同風向與開窗情況下之室內通風模擬。

(6) 資料彙整與通風最佳化分析。

2. 風洞實驗：

(1) 目標建築縮尺模型與附近地形地貌製作。

(3) 試驗儀器整備。

(4) 16 組風向之風洞試驗量測。

(5) 開窗部風壓係數分析。

3. BIM 建築物室內通風管理系統之開發：

(1) 案例建築物 BIM 模型建立

選擇具有自然通風需求與條件之合適案例，利用 BIM 建模軟體建立其 BIM 模型。不僅作為自然通風模型設計及風洞試驗模型製作之依據，更可作為 BIM 建築物室內通風管理系統之 3D 操作環境。

(2) 建築物自然通風資料庫設計與實作

此資料庫為 BIM 建築物室內通風管理系統之資料核心，將針對通過測試之自然通風數值模型之參數架構進行設計與實作，用來儲存數值模型之所有相關參數及分析結果。在完成此資料庫實作後，將進一步以前述「混合式資料庫」之架構，建立核心資料庫，藉以串連 BIM 模型之空間及通風相關構件及數值模型分析結果。

(3) 建築物室內外實場量測物聯網系統研究與實作

以風速計為風場量測裝置，結合 arduino wifi 基板及 arduino IDE 平台開發風場實場數據自動收集裝置，藉以收集建築物環境風速，並自動上傳至「建築物自然通風資料庫」。

(4) BIM 建築物室內通風管理系統開發實作

利用系統分析與設計(system analysis and design)之方法，針對建築物室內通風管控及相關設施維護管理功能之需求進行收集與分析，並利用前述「視覺化多維度資訊整合架構」為基礎，設計「BIM 建築物室內通風管理

系統」之程式架構。並以 Unity3D 為開發環境，彙整案例 BIM 模型及所建立之混合式資料庫，逐一針對前步驟所設計之功能進行系統開發實作。

(5) BIM 建築物室內通風管理系統測試與修正。

(6) 整體結果評估。

(7) 專家意見整合與報告撰寫。

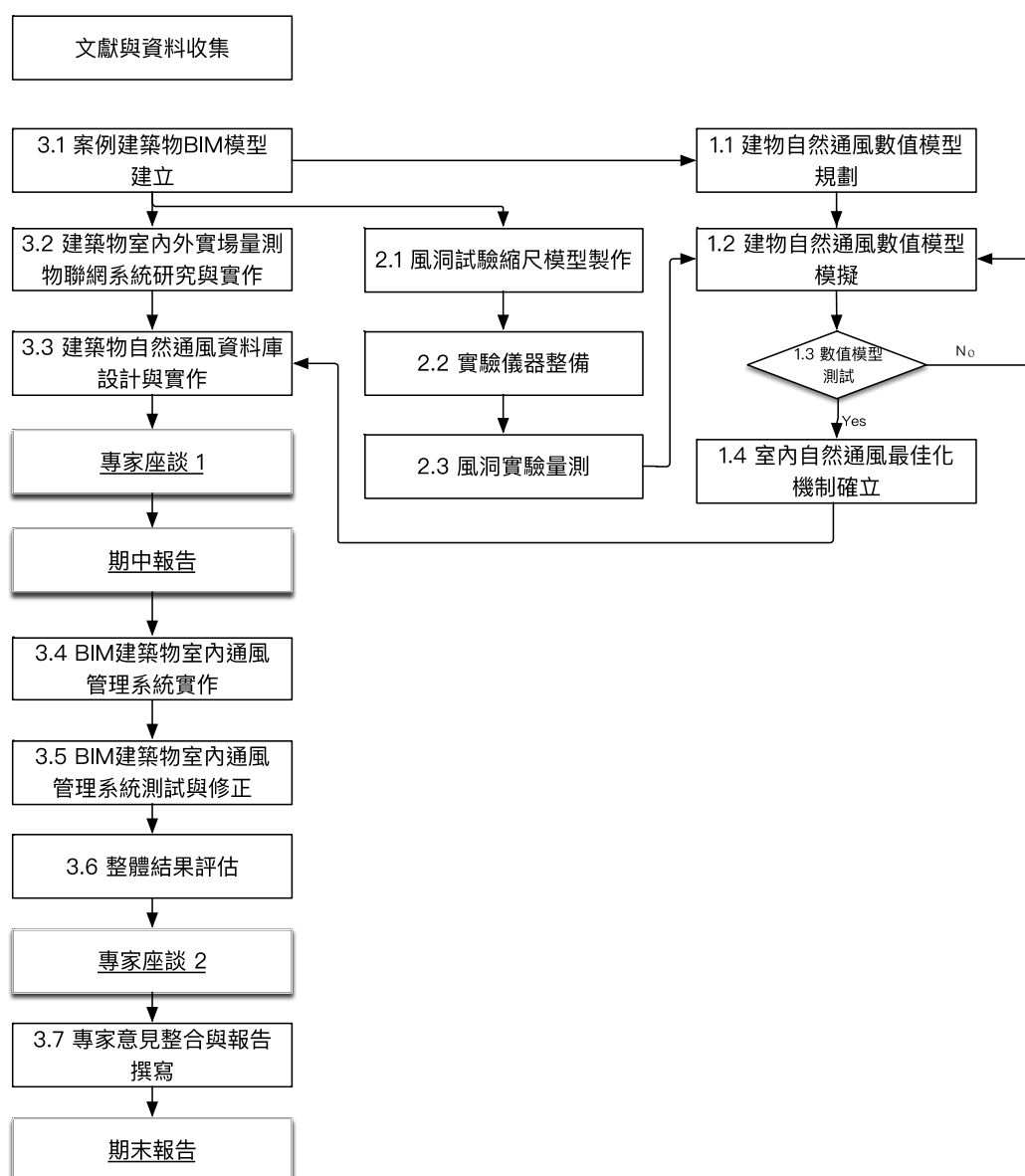


圖 1-4 計畫執行流程圖

資料來源：本研究繪製

第二章 文獻回顧

第一節 建築室內自然通風分析與研究

內政部建築研究所於 2010 年起持續針對建築自然通風進行研究，發展了一個適用於台灣濕熱氣候的風壓通風計算模式 TAIVENT (Taiwan Natural Ventilation Model)，模式結合了台灣中央氣象局的氣象資料（平均風速、盛行風向、氣溫、濕度）可計算各種建築物座向、室內隔間、開口位置、大小及是否有裝紗窗或百葉窗的風壓通風量和換氣率。隔年(2011)擴展本模式，使其能同步考量風壓通風與浮力通風。接著 2012 年在都會地區的建築群狀況下，利用風洞實驗風壓實驗結果探討集合式住宅對建築物自然通風的影響，及建築物在其他建築物的遮蔽下之風壓通風。後續(2014 年)亦針對大型建築物進行自然通風之分析，探討了圓頂室內集會場館與矩形廠房 2 種典型之大型建築物，針對建築物開口位置與大小對室內自然通風功效之影響進行研究，並分析因建築物內外部間之壓力與溫度差異對室內氣流造成影響之程度與機制。以獲得量化之整合結果，並提供相關建築通風配置規劃與設計之重要參考。2015 年透過實測以探討自然通風於住宅與複合式通風教室之空調節能抵減效果。在選定之樣本室內與戶外分別進行長期之溫濕度量測，以獲知室內之溫熱環境變化與判斷空調啟停時間。在空調節能之效益上則以冷房度時法計算以描述空調啟用時間之空調耗能量，最後透過與理論上應開之空調時間比對換算空調折減率。此外，針對各實測案例進行空間測繪以換算於相異開窗與空間配置下之自然通風潛力 (VP)，藉以分析其與實際空調折減效果之關係。

綜觀國內外有關建築室內通風的研究者頗多，典型者如 Chen 等[15]以實驗與計算流體動力學(CFD)方法分別進行了建築物內強制通風、自然通風、混合通風和置換式通風方面的研究。Chen 等[15]運用雷諾應力模式與標準 k- ϵ 模式模擬室內風場。江哲銘[1]指出當室外風速超過 1.5 m/s，風

力即可促成自然之換氣。Dascalaki 等[17]利用 COMIS(conjunction of multizone specialists)模式預測與實場量測比較研究建築物單側通風與貫流通風的通風量。周[2]針對台灣的氣候環境，以實驗及數值解析對室內風場進行研究，指出春、秋兩季為台灣適合自然通風之時期。陳念祖[8]進行風洞試驗量測配合 CFD 數值模擬研究高架地板置換式的自然通風方式對室內氣流路徑、分佈、換氣效率及舒適度的影響。Ohba 等[18]以貫流通風模型進行風洞試驗，結果顯示室內風場會受到室外風場的影響。Haghighat 等[19]基於質量與能量守恆，融入射流特徵方程式發展出了一個簡化之數值模型，以預測自然通風與機械通風於一個房間中的空氣流動模式及熱分佈。Heiselberg 等[20]經由實驗量測與理論分析，探討不同類型窗戶開口對房間內的熱舒適性、氣流場特性及開口流量係數的影響。Chang 等[21]應用大渦模擬(LES)方法，針對不同的窗戶開口配置以探討換氣率及污染物擴散情形，結果發現迎風面開口為影響空氣品質的顯著因素。Allocca 等[22]利用 CFD 模式與解析法檢討使用風壓、浮力或兩者合併下的單側通風與室內條件組合的室內流況，結果認為在正確性的考量下必須同時進行室外及室內環境的風場模擬。Jiang 等[23]使用 LES 模擬建築物貫流通風及迎風面、背風面單側通風之氣流場，並以風洞試驗量測比對驗證，探討由風力驅動之自然通風機制。Kurabuchi 等[24]經由風洞試驗與 LES 比對研究，提出局部動力相似理論。邱[4]採用標準 $k-\epsilon$ 模式模擬建築物室內裝設通風管對自然通風之影響，結果顯示裝設通風管後可顯著提升室內換氣率。Tan 等[26]提出了一結合 CFD 與多重區塊的模式以預測大型建築的中庭自然通風。Mochida 等[27]由實場量測證實於夏季時可透過控制窗戶開口以改善室內的熱舒適性。蘇[7]利用電腦模擬解析的方法，並透過與理論公式預測值的比較，對影響中庭浮力自然通風換氣量及中性面位置遷移的各個因素進行研究和分析。Seifert 等[28]以 CFD 分析改變風向角、氣流路徑及開口大小對貫流通風換氣率的影響。Evola 等[29]以 $k-\epsilon$ 模式與重整化群

(Renormalization Group, RNG)模式探討建築風壓通風。Karava[30]等經由風洞模型試驗，針對兩相鄰牆壁窗戶開口產生之貫流通風探討建築物內部壓力及流量係數，並證實了氣流流速會因不同的流量係數而變化。陳[8]針對單室居室之單側及相對側開口探究加裝導風板對自然通風效益之影響。Hu等[31]以 LES 檢討來流為紊流的建築貫流通風效應，並針對來風在垂直與平行於建築開口的兩個情況，探討其對建築周遭及開口處之氣流場及開口換氣率的影響。Gao 等[32]以追蹤氣體實地量測，探討傳染性呼吸系統疾病在室內環境中的空氣傳播。陳[5]以風洞模型試驗研究風壓通風的影響參數，包括風速、風向角、室外風場和通風開口的大小、形狀對通風量和流量係數的影響，並利用理論分析建立了一個風壓平衡模式。Chu 等[40]使用風洞縮尺模型試驗，針對兩相對面上各有一開口及兩相鄰面上各有一開口之貫流通風配置，探討紊流對貫流通風的通風量及流量係數之影響。後續朱等[6]繼運用理論分析及風洞試驗探討風壓通風的影響參數。Tung 等[39]使用追蹤氣體進行實驗量測，探討在空間中固定位置污染源情況下三種不同通風方案對污染氣體流擴散之情形，並分析其換氣率及通風性能優劣。Chu 等[34]以風洞試驗探討室內隔間建築的貫流通風，指出通風量會隨室內開口的面積增大而增大，而當迎風面與背風面開口面積相同時達到最大通風量。

在室內自然通風評估方法部分，陳瑞玲等[9]發展適用於台灣氣候之風壓通風計算模式 TAIVENT，並將簡易模型之各風向之表面風壓資料建構成資料庫供模式使用。另利用風洞實驗及 CFD 模擬，探討 3 種型態之集合式住宅對於建築物自然通風之影響，以及建築物在遮蔽狀況下對通風之影響[11]。林憲德等[13]為快速評估綠建築室內通風以獲得節能效益，定義自然通風潛力 VP(Ventilation Potential)，採用室內配置之幾何參數來進行估算。黃瑞隆等[14]透過實測以探討自然通風於住宅與複合式通風教室之空調節能抵減效果，透過與理論上應開之空調時間比對換算空調折減率，針對各

實測案例進行空間測繪以換算於相異開窗與空間配置下之自然通風潛力。

總合來說，室內自然通風評估方法由繁至簡可分為 3 大類：

- (1) 建構建築室內及室外計算域進行模擬，其結果較為精確。但由於計算量大以及網格建置之前置作業繁複，不利於實現通風資料庫建置工作。
- (2) 考量附近建築以及來風特性後獲得建築表面風壓資訊(透過風洞實驗會 CFD)，做為室內空間通風模擬之邊界條件，模擬工具採 CFD 或簡易之通風模式如 TAIVENT[9]。而 CFD 可以建構較符合實際的室內空間配置，並在目前計算機可負荷之運算量下，獲得完整且可信之室內風場資訊，對於建置完整通風資料庫並做為後續決策之參考具有其優勢。
- (3) 採用自然通風潛力進行自然通風評估，透過開窗位置、戶外風速及室內幾何配置狀況，初步推估通風效益。優點是快速，對於綠建築指標評估有其必要性，但無法獲得合理之風速及風場分布狀況。

第二節 BIM 在自然通風之應用相關議題

BIM 在 2003 年起由學者 Jerry Laiserin 及產業界之推廣至今，已成為世界各國營建產業主要之發展方向。英國積極聚焦於 BIM 實施標準、編碼規範及導入機制之制定；美國則以實現擬建築環境(virtual building environment, VBE)及虛擬設計與施工(virtual design and construction, VDC)為目標，積極透過 BIM 之技術建立一協同設計環境，將個專業設計團隊成員及早帶入 BIM 環境中，提升設計能量。中國大陸則將 BIM 定為國家關鍵科研主軸，自 2011 年起積極結合產業及學界之力量，發展適合自身之 BIM 設計及應用軟硬體。除此之外，日本、南韓、香港、新加坡、馬來西亞

亞、澳洲、紐西蘭等國家也都相繼投入 BIM 之發展行列，期待將營造產業帶入下一個 3D 世代之中。在各國快速發展的過程中，隨著應用案例與成果的逐漸累積，學術界也開始深入檢討 BIM 的發展問題與未來方向，其一便是對 BIM 於建物使用維護階段以及該階段對綠建築的支持應用不彰之批判。

針對 BIM 在建築工程生命週期各階段之應用方面，許多國際研究指出目前 BIM 對施工(construction)及營運維護(operation-maintenance)階段的應用支持能力十分有限[42]。圖 2-1 為針對 BIM 在建物永續性能分析上所能提供的七大分析功能，自然通風(natural ventilation)為其中的一個重要項目。然文獻也指出 BIM 在綠建築或自然通風之應用主要用以協助建築師及工程師進行有關建築永續發展重要決策之分析[38, 29]，而此發展嚴重偏向於建築設計階段[42]。此外，目前的研究已經認識到基於 BIM 的分析預測方法在實現建築物永續性方面的缺點。例如，大多數綠色建築證書，如 LEED，都是基於預測而非實際績效[41]。然而，在對 LEED 建築物能源性能的調查中顯示 28-35% 的 LEED 建築物每層建築面積比“傳統建築物”使用的能量更多[35]，這對 LEED 證書的有效性和合法性提出了挑戰。因此，最近的趨勢是要求追蹤所有 LEED 專案之實際能源績效以確定其能效標準[43]探究此趨勢的背後原因，儘管設計階段分析預測模型確實可能產生偏差，然而缺乏可行的機制將設計階段產生的靜態分析及預測模式，帶入建築物使用維護階段進行動態管理，也是造成上述問題之關鍵。

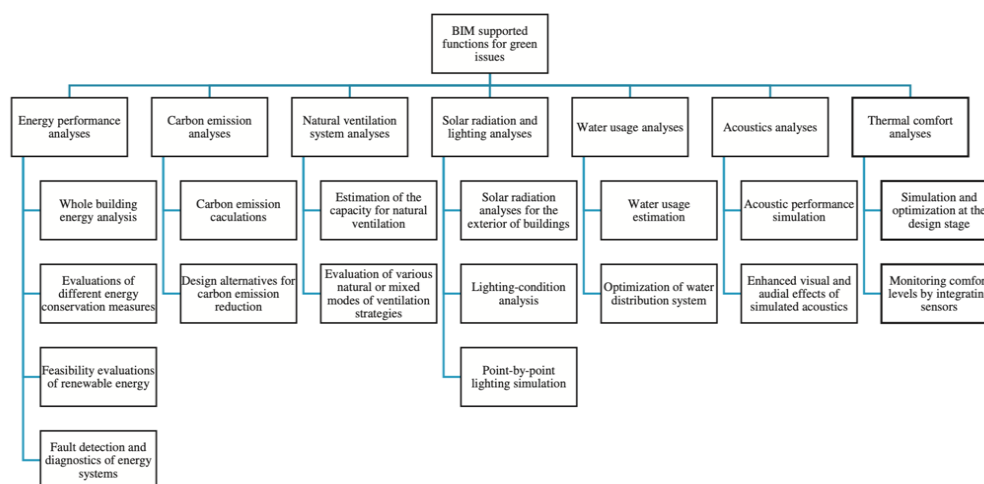


圖 2-1 BIM 在建築物永續性分析的七大主要功能

資料來源：摘錄自[42]

再加上目前綠建築的於此同時，目前雖然 BIM 主要被認為是綠色建築設計階段的重要工具，但其在建築，設施和運營管理階段的潛在價值已日益得到認可[50]。BIM 可以促進數據交換和整合，提供可視化的建築性能分析，並在綠色建築的生命週期中加強各利益相關方的溝通和協作。其次，越來越多的 BIM 供應商也開始認識到 BIM 對 FM 的好處，因此逐漸將其重點從設計階段轉移到運營和維護階段[41]。在這種趨勢下，目前需要更多的研究來開發支持 BIM 的綠色設施管理。

目前 BIM 在臺灣仍屬逐步推廣階段，如何將 BIM 導入建築設計及工程設計流程仍有技術及規範上之瓶頸。內政部建築研究所為國內公部門最為積極投入 BIM 相關研究的政府機關，並推動一系列建築資訊整合分享與應用研發推廣計畫，以提升國內建築環境品質及營建產業能量與競爭力，主要主軸包含「普及推廣應用」、「延伸深化應用階段」、「開發本土應用」、「整合研究力量及成果」等四大主軸，進行相關推廣與研究工作。其「BIM 導入台灣綠建築設計案例實作研究(2014)」研究計畫中，從 BIM 綠建築設計專案需求、BIM 綠建築建模需求、BIM 綠建築設計作業流程、BIM 綠建築實際案例實作、及 BIM 綠建築設計檢核等五個層級示範 BIM

如何導入台灣綠建築設計；「應用 BIM 輔助建築設施管理之國內案例探討(2014)」則透過專家及業界訪談，探討 COBie 標準本土化之編碼、軟體工具及建物屬性等相关議題；「臺灣 Green BIM 綠建築資訊模型應用架構研究(2015)」分別就 Green BIM 施工營造、綠建築設計、審照自動化、產業聚落等向度進行可行性應用的探討；「英國在設施管理(FM)應用建築資訊建模(BIM)的發展趨勢(2016)」收集英國目前對於設施管理(FM)的發展政策及目前運用 BIM 進行設施管理(FM)的案例進行分析，推估未來發展的趨勢及推動體系，配合取得資料及我國政府體制，提出未來推動建議；「國內公有集合住宅應用 BIM 改進維護管理作業之研究(2017)」針對國內公有集合住宅之設施維護管理功能擬定業主之 BIM 應用需求說明書。

在大量研究中，都顯示 BIM 確可為建築物生命週期各階段帶來巨大效益。但是，在運營階段使用 BIM 進行設施管理 (FM) 乃至支持綠建築營運上仍然十分有限。其主要有三個原因：(1) 缺乏對綠色 BIM 運營管理效益的認識；(2) 對運營管理的資料交換缺乏明確的定義；(3) 缺乏明確界定的使用案例(use cases)符合實踐者遵循的行業標準/指南[42]。綜觀此三原因，似有雞生蛋蛋生雞之困境，因而使得 BIM 在設施維護管理階段的應用發展更趨保守緩慢。儘管產業界及學術界不斷探討資料交換機制與標準，各國也持續推出新一代的標準/指南，然若無明確且可參考的應用案例，建築物相關利益關係人(stockholders)依舊難以評估 BIM 在建物設施維護管理階段之應用效益，造成 BIM 在維護管理階段之發展障礙。因應此現象，本研究希望藉由簡易且相對快速的開發工具與機制，針對建物自然通風之監管需求，實作一可應用的 BIM 自然通風監控管理系統，藉以提供一相對明確的使用案例給相關使用者做為參考與評估。

BIM 目前在建築物自然通風之相關研究與應用多被歸屬於綠建築 (green building)之範疇中並衍生為 green BIM 之專業領域。表 1 收集歸納目前 12 大普遍之 BIM-based 綠建築分析軟體。從表中可發現多數主流分

析軟體皆支援自然通風分析。然其中除了 Autodesk 的 Green Building Studio 及 eQuest 支援營運維護管理階段使用之外，其餘則僅能用於設計階段。因此，如何將分析結果實際落實於建築物的營運維護階段，藉以發揮設計之功效仍需要有進一步的資訊系統進行整合。

表 2-1 12 個主要基於 BIM 之綠建築相關分析軟體及其功能與使用對象

BIM software	Green analyses ^a						Users ^b	Users ^c
	E	CE	NV	SD	A	W		
Autodesk® Green Building Studio	✓	✓	✓	✓		✓	A/D	De/OM
Integrated Environmental Solutions® Virtual Environment	✓	✓	✓	✓		✓	A/D/E/O	De
Bentley Hevacomp	✓	✓	✓				D/E/C	De
AECOSim	✓	✓		✓			E/C/D	De
EnergyPlus	✓	✓		✓		✓	E/A	De
HEED	✓	✓					O/A/D/C	De
DesignBuilder Simulation	✓	✓	✓	✓			C/E/A	De
eQUEST	✓		✓	✓			A/E/C	De/C/OM
DOE2	✓		✓	✓			A/E/C/U/G	De
FloVENT			✓				E	De
ODEON Room Acoustics Software					✓		A/E	De
TRNSYS	✓		✓	✓			A/E	De

^a E for energy, CE for carbon emissions, NV for natural ventilation, SD for solar and day lighting, A for acoustic, W for water.

^b A for architects, D for designers, E for engineers, O for owner, C for consultants, U for utility companies, G for government.

^c De for design, C for construction, OM for operation and maintenance.

資料來源：[50]

此外，Kamel 及 Memari [54]將 BIM 在綠建築/能源模擬及管理之主要貢獻區分(1)自動建模、(2) 促進能源及環境管理系統中的輸出呈現、(3)增強既有建材屬性的相關資料庫、(4)建築使用狀態相關的建築資訊存儲與管理。其中建模自動化是 BIM 在建築物模擬中應用的主要好處之一[47,43]，與傳統的模擬建模過程相比，它可以節省時間，降低成本並減少人為錯誤。其中包括開發 BEM 工具中的數學模型，使用與幾何，材料屬性，設備和時間表相關的數據。而 BIM 在綠建築及模擬中的第二個主要應用是促進能源及環境管理系統中的輸出呈現[41]，特別是在沒有 GUI 的電腦計算工具中。例如，Tu 和 Vernatha[49]研究了基於 BIM 的能源管理支持系統（BIM-EMSS）的概念框架，該系統使用 Revit 開發的 BIM 模型，通過採用傳感器和 eQuest 進行實時能源模擬。此外，智能電錶可以使用 BIM 模

型中可用的幾何數據來顯示輸出，這使得用戶得以監控建築物中不同區域的實時(real time)狀態[41]。應用 BIM 的第三個主要方向是建築使用狀態相關的建築資訊存儲與管理。例如，實時能量監測系統產生關於家庭能量消耗，溫度和使用狀態的即時資訊。Alahmad 等人[38]討論了在實時能量監測系統中採用 BIM 模型的一個例子，並提出實時電力監控（RTPM）系統及其硬體組件和一個名為實時電氣 BIM 模型（RE-BIM 模型）的軟體系統組合。此外，將 BIM 整合到建築能源模型中可以有助於實時監控災難變化、設施升級和執行能源管理策略[34]。最後，BIM 還可以增強既有建材屬性的相關資料庫，這些資料庫用於綠建築模擬建模。例如，現有的資料庫可以提供熱性質(如材料的導熱性)，但是某些項目可能需要進一步的建築物生命週期評估（LCA）調查方能求得。此時可以將 BIM 用作 CAD 工具和模擬工具之間的中介程式(middleware)，用以新增 LCA 所需的額外屬性[36]。而 Porter 等[53]以 ANSYS Workbench 之 CFD 分析環境為基礎，建立將 BIM 模型導入此 CFD 分析軟體之機制，藉以實現對現實世界環境和物體模型進行流體動態模擬的挑戰。

根據上述所整理之內容可以發現在資訊整合傳遞的過程中，資訊的可視化已成為目前技術發展之重點。亦即現今的設施維護管理系統、綠建築管理及相關模擬程式已漸漸朝向以 3D 視覺化圖形操作介面作為基礎，有別於以往傳統 2D 文字之系統，讓使用者更直觀地操作及快速查詢到相關資訊，進而讓相關工作人員能提高工作效率。

第三節 室內 PMV 熱舒適性指標

為使用自然通風之方式提供舒適之生活空間，本研究將採 PMV 熱舒適度指標作為主要之決策考量依據之一。人類的熱感主要與他或她的身體整體的熱平衡有關。這種平衡受到身體活動和衣服以及空氣溫度、平均輻

射溫度與空氣流速和空氣濕度等環境參數的影響。當估計或測量這些因素時，可以通過計算預測 PMV 指標來預測個人身體的熱感覺。

PMV 是基於人體的熱平衡來預測九點熱感量表上的大群人的投票的平均值（參見表 2-2）的指數。當體內的內部熱量產生等於對環境的熱量損失時，獲得熱平衡。在溫和的環境中，人體溫度調節系統將自動嘗試改變皮膚溫度和汗液分泌以維持熱平衡。

表 2-2 針對不同程度的認同人體熱感係數和生理壓力的 PMV 分類

PMV	熱感知	生理壓力等級
-3	極度寒冷 Very cold	極度冷壓力 Extreme cold stress
-2.5	寒冷 Cold	強烈冷壓力 Strong cold stress
-1.5	涼爽 Cool	適度冷壓力 Moderate cold stress
-0.5	微涼 Slightly cool	輕微冷壓力 Slight cold stress
0	舒適 Comfortable	沒有熱壓力 No thermal stress
0.5	微暖 Slightly warm	輕微熱壓力 Slight heat stress
1.5	溫暖 Warm	適度熱壓力 Moderate heat stress
2.5	炎熱 Hot	強烈熱壓力 Strong heat stress
3	極度炎熱 Very hot	極度熱壓力 Extreme heat stress

資料來源：[25]

PMV 指標值可透過公式 2-1~2-4 迭代來求解 t_{cl} 和 h_c [25]，進而針對代謝率，衣物絕緣，空氣溫度，平均輻射溫度，空氣速度和空氣濕度的不同組合計算 PMV。

$$\begin{aligned}
 PMV = & [0.303 \cdot \exp(-0.036 \cdot M) + 0.028] \cdot \left\{ (M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a] - 0.42 \cdot [(M - W) \right. \\
 & 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5.867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \\
 & \left. [(t_{cl} + 274)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (2-1)
 \end{aligned}$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - l_{cl} \cdot \left\{ 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[(t_{cl} + 274)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (2-2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} & \text{for } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{for } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (2-3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290l_{cl} & \text{for } l_{cl} \leq 0.078m^2 \cdot K/W \\ 1.05 + 0.645l_{cl} & \text{for } l_{cl} > 0.078m^2 \cdot K/W \end{cases} \quad (2-4)$$

其中，M 為人體代謝率，w 為有效機械功率， l_{cl} 為衣著量， f_{cl} 為服裝表面積， t_a 為氣溫， t_r 代表平均輻射溫度， v_{ar} 代表相對風速， P_a 代表水蒸氣壓， h_c 為對流換熱係數， t_{cl} 為衣物表面溫度。其中要注意的是，人體代謝率 $1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2$ ，衣著量 $1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ 。

在上述公式中，可知 PMV 熱感指標值將受到個體本身參數及環境參數之交互影響。環境參數部分包括：有效機械功率(w)、氣溫(t_a)、平均輻射溫度(t_r)、相對風速(v_{ar})、水蒸汽壓(P_a)、對流換熱係數(h_c)；個體本身參數包括：人體代謝率(M)、衣著量(l_{cl})、服裝表面積(f_{cl})及衣物表面溫度(t_{cl})等。PMV 不僅受人體代謝率、有效機械功率及氣溫之影響(公式 2-1)，其主要參數：衣物表面溫度(t_{cl})又同時受到人體代謝率(M)、有效機械功率(w)、對流換熱係數(h_c)及平均輻射溫度(t_r)之影響，且與氣溫(t_a)具有交互迭代影響的過程(公式 2-2)。而對流換熱係數(h_c)在室內衣物表面溫度(t_{cl})與氣溫差異之狀態下，主要受室內相對風速(v_{ar})之影響(公式 2-3)。

在以室內自然通風之考量環境下，因不考慮日照及人員動態的因素，可將有效機械功率(w)設為 0，平均輻射溫度(t_r)則可假設與氣溫(t_a)相同，相

對風速(v_{ar})則與室內氣流風速相等。綜言之，在得知室內空間使用者特性及室內風速、相對濕度及氣溫的狀態下，即可透過計算推測出當下環境使用人的 PMV 指標。

此外，PMV 指標與不同生物人體熱感指數間皆具有可對應之級別(表 2-3)，故利用可間接測量計算，又可與其他指標對應之 PMV 熱感指標作為本研究自然通風之室內舒適度指標應屬合適。

表 2-3 PMV 與各生物氣象人體熱感指數之對應

Thermal perception	Indices					
	UTCI	WBGT	SET	PMV	PET	
極度寒冷(極度冷壓力)	<-40			-3	<4	
(非常強烈冷壓力)	-40to-27					
寒冷(強烈冷壓力)	-27to-13			-2.5	4-8	
涼爽(適度冷壓力/中等危險)	-13to0		<17	-1.5	8-13	
微涼(輕微冷壓力)	0to+9			-0.5	13-18	
舒適(沒有熱壓力/無危險)	+9to+26	<18	17-30	0	18-23	
微暖(輕微熱壓力)				0.5	23-29	
溫暖(適度熱壓力/警告)	+26to+32	18-23	30-34	1.5	29-35	
炎熱(強烈熱壓力/極端警告)	+32to+38	23-28	34-37	2.5	35-41	
(非常強烈熱壓力)	+38to+46				>41	
極度炎熱(極度熱壓力/危險)	>+46	28-30	>37	3		
燠熱(極端危險)		≥30				

資料來源：[37]

第三章 建物室內通風最佳化決策模式

為達到實測建築物外部風場，並根據建物通風口開閉狀況推測室內風場分佈，據以提供建物使用者合適開窗模式之目的，需先針對室內自然通風之開窗決策模式進行探討與建立，以作為後續決策資訊系統開發之依據。

一般而言，透過室內自然通風不僅可交換室內外空氣，以換氣的方式將室外新鮮空氣帶入室內；另一方面亦可引進室外氣流，帶動室內空氣流動，營造一有風場之舒適環境。前者換氣之成效關鍵在於換氣率大小，後者舒適度則不僅需考量風速大小，亦需兼顧環境溫溼度等相關參數而定。而換氣率僅提供室內氣體更新速度，屬於整體空間指標，無法呈現風速對於改善熱舒適性的良窳。此外，空氣交換率在通風口全開狀況下即可達到最佳效率，並無需考量外部風場作為建築開窗方式之選擇，故本研究以舒適度為主要室內自然通風之決策目標，並據以擬定決策模式，並提供各通風決策之換氣率資訊，使使用者了解當下合適之室內通風決策訊息。為此，本案建物室內通風最佳化決策模式將從「體感溫度」及「PMV 熱感舒適度指標」兩種影響室內空間舒適度之角度，分別建立可行之室內通風最佳化決策模式。

第一節 以體感溫度為基礎之室內通風決策模式

根據研究之發想及目的，本研究以實時室外風場、實時室內環境溫溼度值及 CFD 分析模擬所得之室內風速等資料，綜合判斷出合適之室內自然通風開窗配置。圖 3-1 為利用體感溫度作為判斷依據所擬定之情境分析圖。圖中，通風方式分為「自然通風」及「機械通風」兩種，而通風目的則包括增溫及降溫兩種。根據自然通風最低體感溫度(T_{min})、無通風下之體感溫度(T_0)、目標體感溫度(T_t)及當前體感溫度(T_r)，可將室內通風情境分為：「自然通風-降溫(情境 A)」、「機械通風-降溫(情境 B)」、「部分閉窗-

增溫(情境 C)」及「機械通風-增溫(情境 D)」等四大類。

圖 3-1 中，當目標體感溫度(T_t)低於當前體感溫度(T_r)，且兩體感溫度都高於自然通風最低體感溫度(T_{min})時(情境 A)，表示可透過自然通風帶提升室內風速，達到降低體感溫度的目標。而當目標體感溫度(T_t)低於自然通風最低體感溫度(T_{min})時(情境 B)，表示無法單獨透過自然通風方式降溫，故需搭配機械通風進行進一步降溫。此外，當目標體感溫度高於當前體感溫度卻低於無通風體感溫度(T_0)時(情境 C)，則表示目前開窗狀態下的風速過高，應稍微降低室內風速，故僅需配合當下外部風場狀況搭配較低室內平均風速之開窗模式於以調節即可。最後，當目標體感溫度高於當前體感溫度及無通風體感溫度時(情境 D)，則表示開窗狀態下將造成人員感到寒意，故需透過全部關窗及機械增溫的方式提供舒適之室內環境溫度。

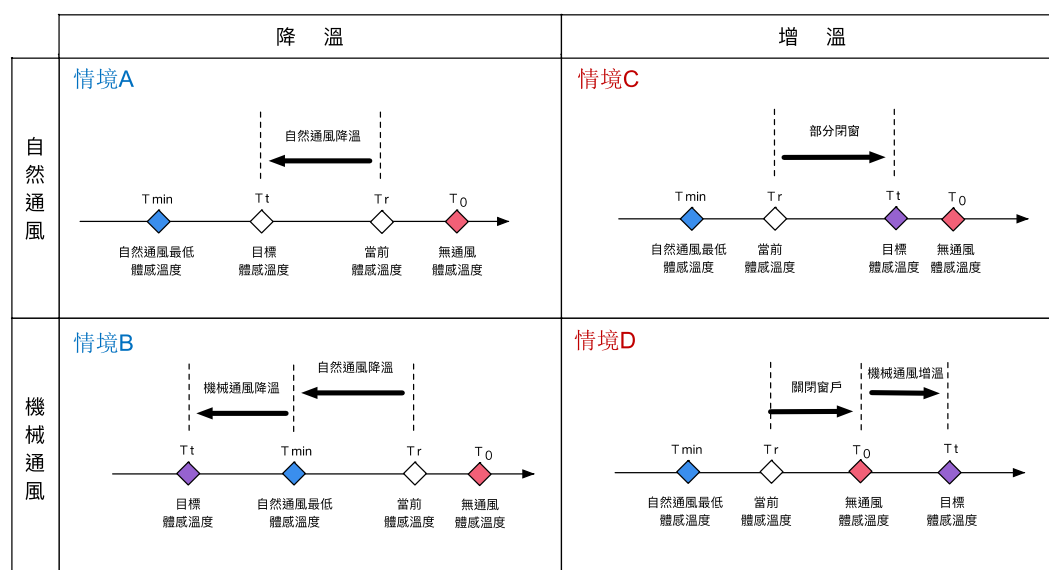


圖 3-1 以體感溫度為基礎之室內通風情境分析圖

資料來源：本研究繪製

為實現圖 3-1 之情境，本研究擬訂圖 3-2 之最佳化自然通風配置評估流程。首先根據即時測得之室外風速(V)及風向(D)，從 CFD 模擬分析的結果中求得室內自然通風最低體感溫度(T_{min})，並同時估算無通風下之體感溫度(T_0)；再根據當下之室內窗口(通風口)之開關狀態(S_i)，估算室內當前之

體感溫度(T_r)。在求得 T_{min} 及 T_r 之後，若 T_r 高於建物使用人所設定的目標體感溫度(T_t) ($T_r \geq T_t$)，則可進一步考慮目標體感溫度(T_t)是否高於當時室外風場下之最低體感溫度(T_{min})，若 $T_t \geq T_{min}$ ，且當時室外的懸浮微粒濃度低於健康門檻值，則可使用自然通風之方式使室內體感溫度下降至 T_t 。反之，若當下都不符合上述狀況，則表示自然通風無法滿足目標體感溫度，或室外空氣環境不佳，建議採用機械通風。然本研究以自然通風機制為主要研究對象，以下將僅就自然通風之評估方式進行研究與系統建立，機械通風之細部決策機制將不包含於本研究範圍中。根據圖 3-2 判斷流程，以下將就其中的「室內最低體感溫度(T_{min})估算方法」、「室內即時體感溫度(T_r)估算方法」、「室內無通風體感溫度(T_0)估算方法」及「室內最佳開窗配置推估方法」進行說明：

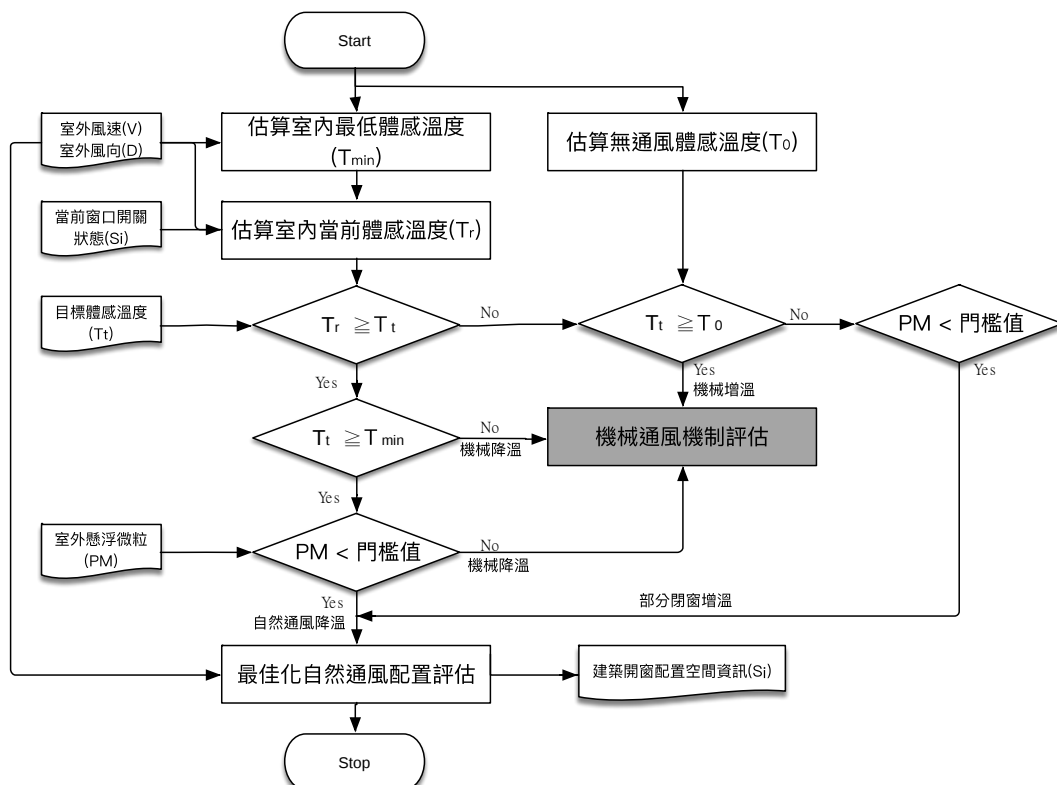


圖 3-2 最佳化自然通風配置評估機制

資料來源：本研究繪製

一、室內最低體感溫度(T_{min})估算方法

為達到以自然通風方式提供舒適居住空間之目標，必須先得知建築物在當時外部風場下，所能導入的最大風量及其為室內環境所能造成的影響。為此，在考量以 CFD 模擬分析為基礎依據的前提下，本研究擬定由外部風場之風速及風向為輸入值(input values)，從 CFD 模擬所得之結果中匹配求得該外部風場下之室內最大通風速率($\hat{U}_m$)，進而求得其對應的室內最低體感溫度(T_{min})及最大換氣率(E_a)。其步驟如圖 3-2 所示：

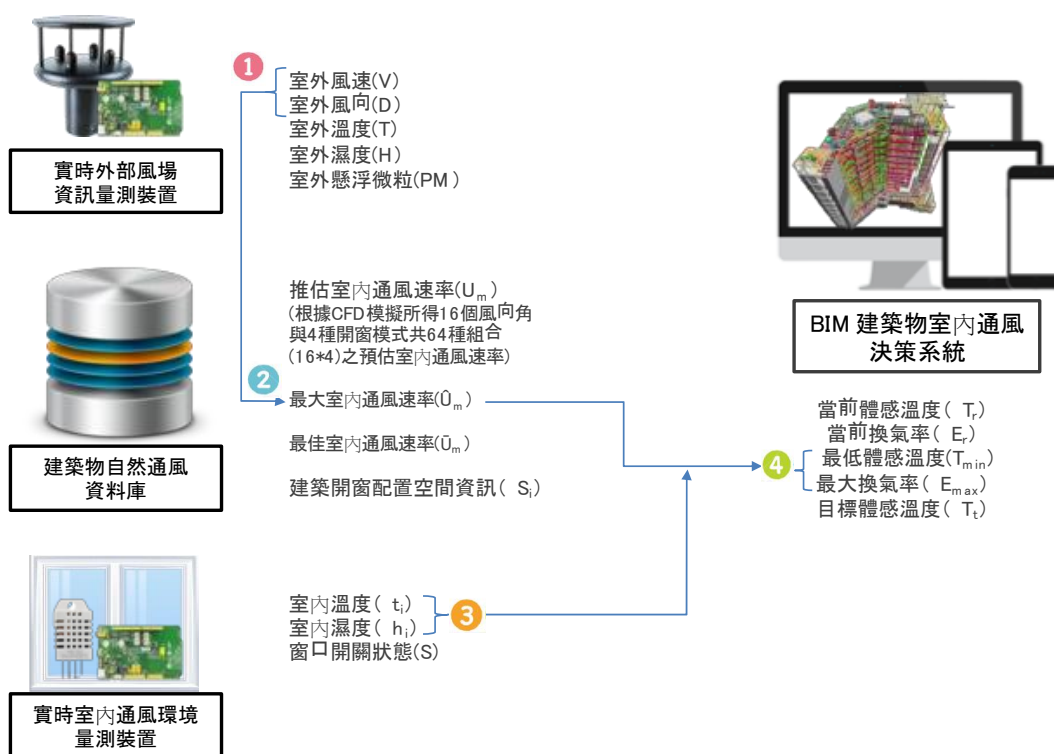


圖 3-3 室內最低體感溫度及最大換氣率推估方法示意圖

資料來源：本研究繪製

Step1. 取得室外風速及風向：

利用實時外部風場資訊量測裝置(詳第4章),取得即時之室外風速值(V)及室外風向(D)。根據室外風速及室外風向,將可判斷最大室內通風速率($\hat{U}_m$)。此最大室內通速率也代表該建築物空間在當下室外風場下,所能導入之最大風量,故而可根據 $\hat{U}_m$ 求得最低體感溫度及對應之最大換氣率。

Step2. 推估最大室內通風速率($\hat{U}_m$)

以所測得之實時室外風速(V)及風向(D)值為輸入值,從該建物室 64 組 CFD 模擬分析結果中搜尋出該風速及風向下所對應之最大室內通風速率($\hat{U}_m$)。

Step3. 取得室內溫濕度值

利用實時室內通風環境量測裝置(詳第4章),取得即時之室內氣溫(t_i)及相對濕度(h_i)。

Step4. 計算最低體感溫度

利用步驟2所求得之最大室內通風速率($\hat{U}_m$)及步驟3之室內溫度(t_i)及相對濕度(h_i),透過公式3-1及公式3-2求得該室外風場下的室內最低體感溫度(T_{min})。

$$T_{min} = 1.07t_i + 0.2e - 0.65\hat{U}_m - 2.7 \quad (3-1)$$

$$e = \frac{h_i}{100} \times 6.105 \times \exp \frac{17.27T_i}{237.7+T_i} \quad (3-2)$$

二、室內即時體感溫度(T_r)估算方法

室內當前體感溫度不僅受室外風場所影響，也會因建築物通風口當下實際的開閉狀況而有所改變。圖 3-3 說明如何根據當下的室外風場及建築物通風口開閉狀態，求得室內當前之體感溫度(T_r)。步驟分述如下：

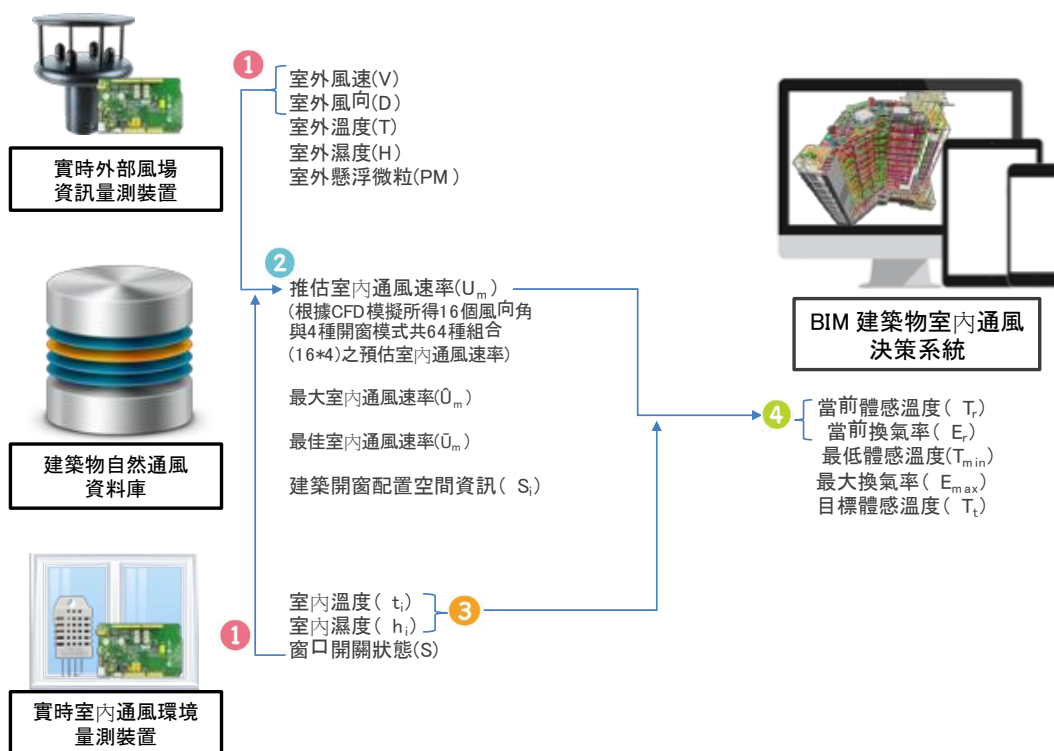


圖 3-4 室內即時體感溫度(T_r)及當前換氣率(E_r)推估方法示意圖

資料來源：本研究繪製

Step1. 取得室外風速、風向及室內窗口開關狀態：

同時利用實時外部風場資訊量測裝置及室內通風環境量測裝置，取得即時之室外風速值(V)、室外風向(D)及室內窗口開關狀態(S)。

Step2. 推估當下室內通風速率(U_m)

以所測得之實時室外風速(V)、風向(D) 及室內窗口開關狀態(S)為輸入值，從該建物室 64 組 CFD 模擬分析結果中搜尋出該風速、風向及開窗狀態下所對應之當下室內通風速率(U_m)。

Step3. 取得室內溫濕度值

利用實時室內通風環境量測裝置，取得即時之室內氣溫(t_i)及相對濕度(h_i)。

Step4. 計算當前體感溫度

利用步驟 2 所求得之當下室內通風速率(U_m)及步驟 3 之室內氣溫 (t_i)及相對濕度(h_i)，透過公式 3-2 及公式 3-3 求得該室外風場下的室內當前體感溫度(T_r)。

$$T_r = 1.07t_i + 0.2e - 0.65U_m - 2.7 \quad (3-3)$$

三、室內無通風體感溫度(T_0)估算

室內無通風下之體感溫度(T_0)為通風口全部關閉，且無機械通風下之體感溫度，亦即室內相對風速為 0m/s 下之體感溫度。因此， T_0 之估算如圖 3-4 所示，僅需根據即時測得之室內氣溫 (t_i)及相對濕度(h_i)，利用公式 3-3 進行計算即可獲得。

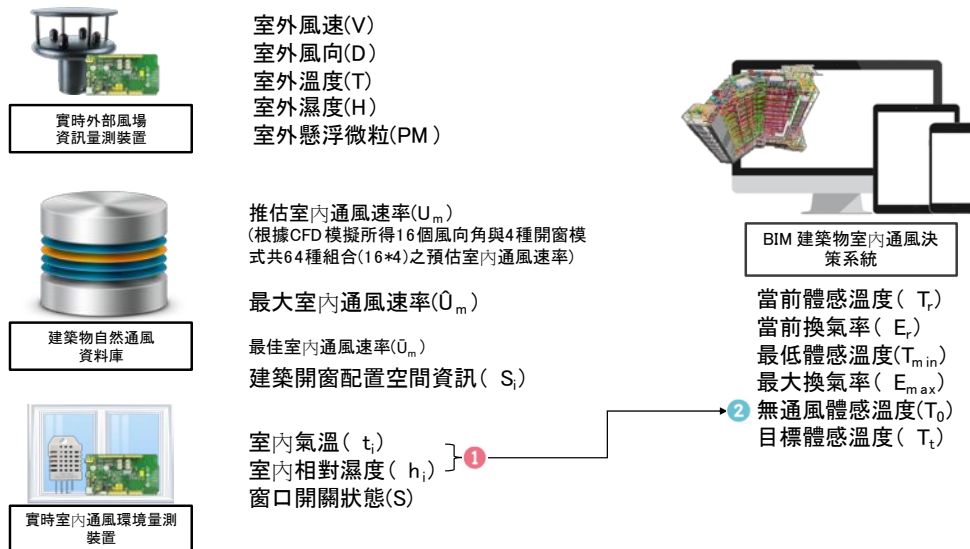


圖 3-5 室內即時體感溫度(T_r)及當前換氣率(E_r)推估方法示意圖

資料來源：本研究繪製

四、室內最佳開窗配置推估方法

本研究以「符合建築物使用人所設定之目標體感溫度(T_t)」為室內自然通風最佳化原則，根據當前體感溫度(T_r)、最低體感溫度(T_{min})及目標體感溫度(T_t)進行最佳化之評估。圖 3-5 說明求得最佳化室內開窗配置之推估步驟。分述如下：

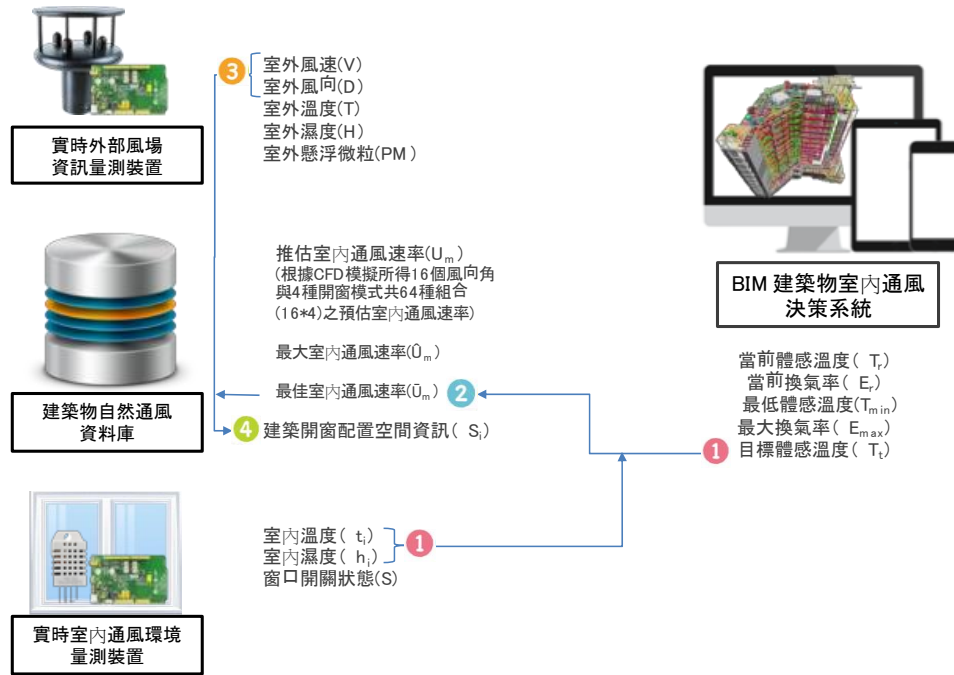


圖 3-6 室內最佳室內通風速率($\bar{U}_m$)及其對應開窗配置推估方法示意圖
資料來源：本研究繪製

Step1. 取得目標體感溫度及室內溫濕度值

取得建物使用人所設定之目標體感溫度(T_t)，並利用實時室內通風環境量測裝置，取得即時之室內氣溫(t_i)及相對濕度(h_i)。

Step2. 推估最大室內通風速率($\bar{U}_m$)

透過公式 (3-4) 推算目標體感溫度所對應之最佳室內通風速率($\bar{U}_m$)。

$$\bar{U}_m = \frac{1.07t_i + 0.2e - T_t - 2.7}{0.65} \quad (3-4)$$

Step3. 取得室內溫濕度值

利用實時室內通風環境量測裝置，取得即時之室內氣溫(t_i)及相對濕度(h_i)。

Step4. 推求建築最適開窗配置

以所求得之最佳室內通風速率($\bar{U}_m$)為目標值，並根據實時室外風速(V)

及風向(D)值，從該建物室 64 組 CFD 模擬分析結果中搜尋出該室內通風速率所對應之最適建築開窗配置(Si)。

以體感溫度為決策目標之模式較為直覺，計算方式亦為簡便。僅需根據外部風場（風速及風向）之狀況，計算各開窗配置之相對應室內平均風速，即能計算出不同開窗配置之可能體感溫度，藉以根據室內人員之目標體感溫度，提供最符合其目標溫度之開窗模式。然此決策模式並無考慮室內風場之均勻程度，可能產生整體達標卻部分室內區域無風(高體感溫度)之狀況。

第二節 以 PMV 為基礎之室內通風決策模式

如 2-3 節之回顧，PMV 熱感舒適度指標主要考慮了身體活動和衣服以及空氣溫度、平均輻射溫度與空氣流速和空氣濕度等環境參數，藉以評估出個人身體整體的熱平衡，並決定當下之熱感舒適度。

根據表 2-2，PMV 指標值介於-3(極度寒冷)及+3(極度炎熱)之間，其值越接近 0(舒適)越感舒適。在表中九個舒適度層級中，一般可接受的舒適範圍可界定於 -1.5(涼爽)及 1.5(溫暖)之間。在此區區間內，皆屬可接受的舒適環境。為此，若以 PMV 指標作為決策因子，應以「最大舒適室內面積」為決策目標，探求如何將室外風場引入室內，營造最大面積的舒適空間 ($-1.5 \leq PMV \leq 1.5$)。

此外，為求得室內 PMV 指標值，本研究需根據公式 2-1~2-4，透過各參數的即時量測及迭代計算推測出 PMV 值。PMV 計算公式中的參數眾多，包含個人參數及環境參數兩類(表 3-1)。其中個人參數受該室內環境的使用目的、方式及使用者穿著、運動狀態而影響。然因本研究以室內整體環境為關注目標，故並非針對個別單一人進行 PMV 計算。故個人參數數值之決定，本研究採使用者設定之方式，請設定者針對該環境多數的使用者狀

況進行人體代謝率(M)及衣著量(I_{cl})的選擇設定，再利用公式推估服裝標面積(f_{cl})及衣物表面溫度(t_{cl})。環境參數之設定則可透過傳感器自動量測配合公式推估之方式，取得該參數數值。其中，又因本案以建築室內自然通風為研究場域，因此有效機械工率(w)將假設為 0，而平均輻射溫度(t_r)則假設與室內氣溫(t_a)相同。

表 3-1. 本研究 PMV 舒適度值計算參數之說明

參數類別	參數名稱	單位(值域)	數值求取方式說明
個人參數	人體代謝率(M)	瓦每平方米(W/m^2)(46 W/m^2 ~ 232 W/m^2)	使用者設定 (預設值：站立 1.2)
	衣著量(I_{cl})	每平方米凱爾文每瓦($m^2 \times K/W$) (0 $m^2 \cdot K/W$ to 0.310 $m^2 \cdot K/W$)	使用者設定 (預設值：短袖 0.54)
	服裝表面積(f_{cl})	平方米(m^2)	程式推估
	衣物表面溫度(t_{cl})	攝氏度($^{\circ}C$)	程式推估
環境參數	有效機械功率(w)	瓦每平方米(W/m^2)	自然通風，假設值=0
	氣溫(t_a)	攝氏度($^{\circ}C$) (10 $^{\circ}C$ to 30 $^{\circ}C$)	Sensor 自動量測：溫濕度計
	平均輻射溫度(t_r)	攝氏度($^{\circ}C$) (10 $^{\circ}C$ to 40 $^{\circ}C$)	室內環境，假設值= t_a
	相對風速(v_{ar})	米每秒(m/s) (0 m/s to 1 m/s)	CFD 計算值
	水蒸氣壓(P_a)	帕(Pa) (0 Pa to 2 700 Pa)	Sensor 自動量測：溫濕度計，根據溫濕度計算推估。
	對流換熱係數(h_c)	瓦特每平方米凱爾文($W/(m^2 \times K)$)	程式推估

資料來源：本研究整理

根據上述規劃，圖 3-6 為本研究所擬之 PMV 熱感舒適度指標為基礎之室內自然通風決策分析流程。個步驟分述如下：

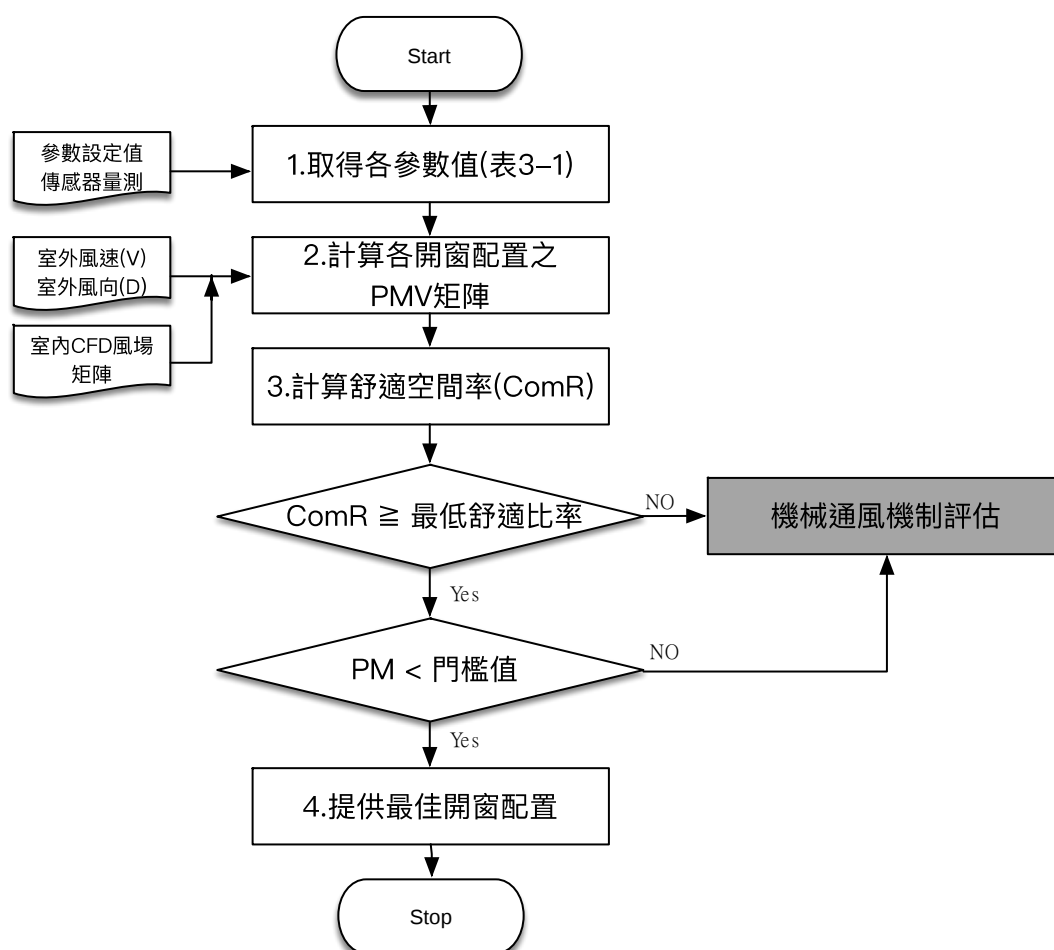


圖 3-7 以 PMV 熱感舒適度指標之室內自然通風決策流程

資料來源：本研究繪製

1. 取得各參數值：

根據表 3-1 之方式，透過設定值、傳感器量測及程式計算推估的方式，取得計算 PMV 指標所需知參數值。

2. 計算各開窗配置之 PMV 矩陣：

根據風速計即時量測之室外風向與風速，從「建築物自然通風資料庫」中選擇符合該風場之室內 CFD 模擬分析數據，並據以在計算程式中產生包含各開窗模式(S_i)之室內風速矩陣(MS_iV)。繼而根據室內風場矩陣及步驟 1 所得之各參數值計算各開窗配置之 PMV 矩陣(MS_iPMV)。

如圖 3-7 示意圖所示，室內風速矩陣(MS_iV)為一室外風場下各對應開窗配置(Si)之室內 CFD 風速網格數據。本研究顧及運算量，每一室內 CFD 風場網格包含 500 個風場格點，紀錄每一格點透過 CFD 計算所得之室內風速與風向。此步驟即從室內自然通風資料庫中，取出所對應之室內風速網格數值，並轉換為計算用之室內風速矩陣(MS_iV)作為輸入值(圖 3-8)，再透過公式 2-1~2-4 計算各格點之 PMV 值，建立該室內風速矩陣所對應之 PMV 矩陣(MS_iPMV) (圖 3-9)。

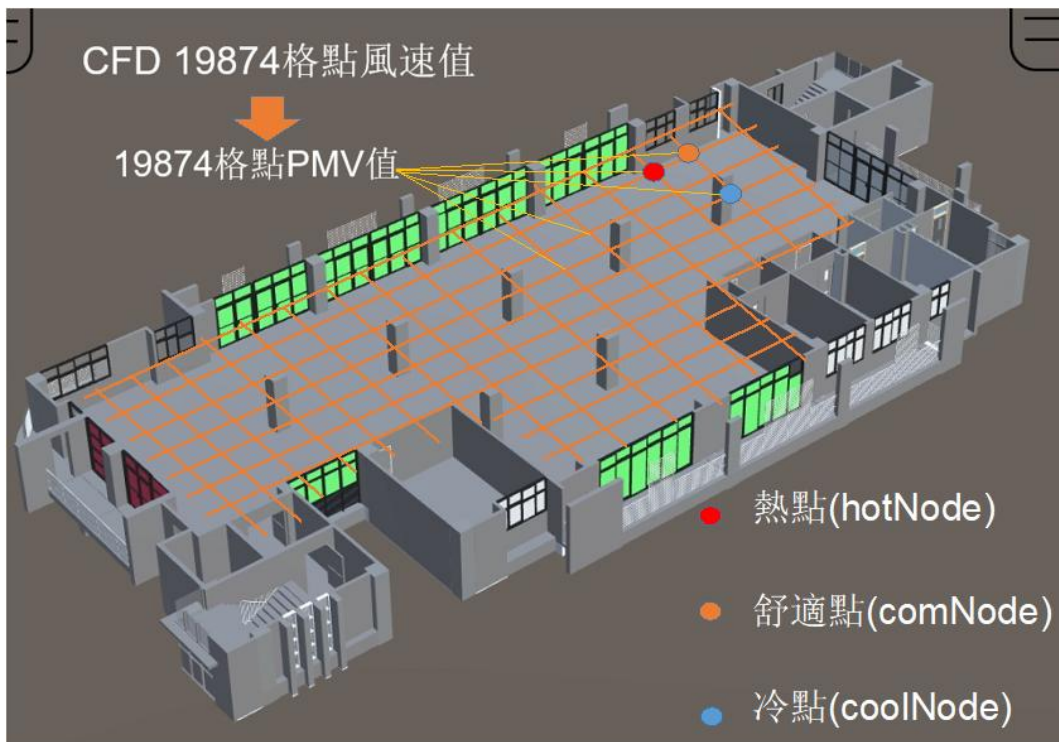


圖 3-8 室內最佳室內通風速率($\bar{U}_m$)及其對應開窗配置推估方法示意圖
資料來源：本研究繪製

		開窗模式(Si)			
		1	2	3	4
網格點	1	V(1,1)	V(2,1)	V(3,1)	V(4,1)
	2	V(1,2)	V(2,2)	V(3,2)	V(4,2)
	3	V(1,3)	V(2,3)	V(3,3)	V(4,3)
	4	V(1,4)	V(2,4)	V(3,4)	V(4,4)
	...	~	~	~	~
	...	~	~	~	~
	498	V(1,498)	V(2,498)	V(3,498)	V(4,498)
	499	V(1,499)	V(2,499)	V(3,499)	V(4,499)
	500	V(1,500)	V(2,500)	V(3,500)	V(4,500)

圖 3-9 室內風速矩陣(MSiV)示意圖(以前 500 點為例)

資料來源：本研究繪製

		開窗模式(Si)			
		1	2	3	4
網格點	1	PMV(1,1)	PMV(2,1)	PMV(3,1)	PMV(4,1)
	2	PMV(1,2)	PMV(2,2)	PMV(3,2)	PMV(4,2)
	3	PMV(1,3)	PMV(2,3)	PMV(3,3)	PMV(4,3)
	4	PMV(1,4)	PMV(2,4)	PMV(3,4)	PMV(4,4)
	...	~	~	~	~
	...	~	~	~	~
	498	PMV(1,498)	PMV(2,498)	PMV(3,498)	PMV(4,498)
	499	PMV(1,499)	PMV(2,499)	PMV(3,499)	PMV(4,499)
	500	PMV(1,500)	PMV(2,500)	PMV(3,500)	PMV(4,500)

圖 3-10 室內 PMV 矩陣(MSiPMV)示意圖(以前 500 點為例)

資料來源：本研究繪製

3. 計算舒適空間率(ComR_i)

根據上步驟所得之 PMV 矩陣，利用公式 3-5~3-8 計算各開窗模式下之「舒適空間率(ComR_i)」、「冷空間率(CoolR_i)」、「熱空間率(HotR_i)」。

$$ComR_i = \frac{No.Of (comNode_{ij})}{N} (comNode_{ij} \in -1.5 \leq PMV(i, j) \leq 1.5) \quad (3-5)$$

$$CoolR_i = \frac{No.Of (CoolNode_{ij})}{N} (coolNode_{ij} \in -3 \leq PMV(i, j) \leq -1.5) \quad (3-6)$$

$$HotR_i = \frac{No.Of(HotlNode_{ij})}{N} \quad (hotNode_{ij} \in 1.5 \leq PMV(i,j) \leq 3) \quad (3-7)$$

其中，i:開窗配置編號(i=1~4)；j:網格點編號(j=1~19874)；N: 總網格數(N=19874)；comNode_{ij}: 舒適點；coolNode_{ij}: 冷點；hotNode_{ij}: 熱點；S_i: 編號i之開窗配置；BS: 最佳開窗配置。

若各開窗配置之舒適空間率(ComR_i)皆小於使用者所設定之「最低舒適比例」，或室外空氣品質過差，不適合自然通風，則表示目前外部風場無法提供足以滿足室內人員需求之溫感舒適空間，故應建議採用機械通風機制。

4. 決定最佳開關配置

當舒適空間率(ComR_i)符合使用者最低需求，且室外空氣品質良善時，則可再根據上步驟所求得之舒適空間率(ComR_i)，以公式 3-8 選擇具有最高舒適空間率之開窗配置(BS)作為最佳自然通風建議，提供室內人員依此開窗配置進行開關窗行為。

$$\text{最佳開窗配置(BS)} \in S_i \text{ with Max(ComR}_i) \quad (3-8)$$

第三節 小結

本研究採結合實時外部風場及先期 CFD 室內風場分析數據之方式，建立一可行之室內自然通風決策模式。為此本研究針對此一應用模式之特性，分別以「體感溫度」及「PMV 熱感舒適度指標」之方式建立本研究之最佳室內通風決策模式。以體感溫度為基礎之決策模式較為直覺簡單，提供室內人員以體感溫度為控制目標選擇合適之開窗配置。然目前演算法僅以室內平均風速作為室內體感溫度之計算基礎，忽略室內風速分佈不均之現象，故可能產生平均體感溫度與真實體感不符之情形。另一方面，以 PMV 熱

感舒適度指標為基礎之決策模式，則不僅採用轉換後之 PMV 熱感舒適度作為決策指標，更採用整體 CFD 空間風速網格之數據進行整體空間運算，降低室內舒適度不均勻的狀況。雖此模式更為先進，然計算量也更大。

第四章 實場資訊量測系統

根據上一章「建物室內通風最佳化決策模式」所闡述之兩種室內體感溫度估算方式可知，本研究需要收集實時之室外風速(V)、風向(D)、室外溫度(T)、相對濕度(H)室外懸浮顆粒(PM)以及室內溫度(ti)、相對濕度(hi)與室內窗口(通風口)之開關狀態(Si)資訊。故本研究將通過以 arduino 開放式軟硬體架構為基礎，結合既有之環境監測傳感器與設備，利用 arduinoIDE、MySQL 等軟硬體整合平台，建立「實場資訊量測系統」，以達到即時收集建築室內外環境資訊，作為最佳室內通風最佳化決策之依據。

第一節 實場資訊量測系統設計

本研究將需要收集的資訊分為實時室外資訊和實時室內資訊，故設計「實時外部風場資訊量測裝置」與「實時室內通風環境量測裝置」為「實場資訊量測系統」之資訊量測裝置，以滿足其需要同時收集室內外資訊之需求。同時為了管理並在「建物自然通風決策系統」中呈現收集到的資訊，本研究將建立「實時資料管理程式」將收集到之資訊實時上傳至「建物實場環境資料庫」。實場資訊量測系統架構圖，如圖 4-1 所示。

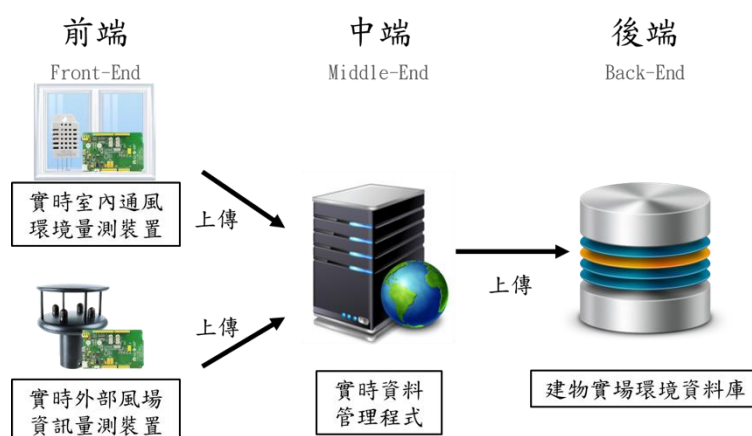


圖 4-1 實場資訊量測系統架構圖

資料來源：本研究繪製

一、實時外部風場資訊量測裝置

「實時外部風場資訊量測設備」目的為實時收集室外風速、風向、溫濕度以及懸浮顆粒物資訊。因此需要風場量測設備、溫濕度量測設備、懸浮顆粒物量測設備，以下將詳細說明各項之內容。

風場量測設備

本研究採用由 GILL Instruments 公司開發的 WindSonic 超聲波風速傳感器作為風速、風向量測之設備。由其採用 2 軸超聲波感測器替代常規杯形和葉片或螺旋槳，並且擁有 0-60m/s 的風速範圍與 0-359° 的風速範圍，以達到精準量測風速、風向之目的。

1. 溫濕度量測設備

本研究採用 Arduino DHT-22 溫度模組作為室外溫濕度量測之設備。DHT-22 溫濕度模組是一款含有已校準數位信號輸出的溫濕度複合感測器，其應用專用的數位模組採集技術和溫濕度傳感技術，確保產品可以長期穩定地量測室外溫濕度資訊。

2. 懸浮顆粒物量測設備

為了收集室外空氣中的懸浮顆粒物，本研究使用 Grove Dust Sensor PM2.5 粉塵傳感器模組。此粉塵傳感器可以通過在給定的單位時間內，計算羅脈衝佔用時間（LPO 時間）來測量空氣中的顆粒物水平，進而提供可靠的粉塵數據。然而此傳感器使用計數法測試粉塵濃度，測量結果單位為 pcs/0.01cf，且測得之數據為空氣中顆粒直徑大於 1 微米的懸浮物，故數據不可使用 pm2.5 之標準進行判斷空氣品質，但其量測結果依舊可以將其作為空氣品質之參考依據。

3. 實時資訊收集與傳輸設備

為了達到自動收集環境資訊並自動上傳之目的，本研究採用 LinkIt ONE 開發板進行操作。LinkIt ONE 是一款針對穿戴式與物聯網這兩個議題

所開發的 Arduino 相容板，故可穩定地自動收集各式傳感器之資訊。同時因其具備物聯網所需的各種規格，包括 GSM、GPRS 行動網路、SD 卡、Wi-Fi 等，故可以通過燒錄編寫好之執行程式將收集到之資訊傳送至網頁伺服器中已編寫好之實時資訊管理程式。最後上傳至「建物實場環境資料庫」，達到室外資訊傳遞之目的。

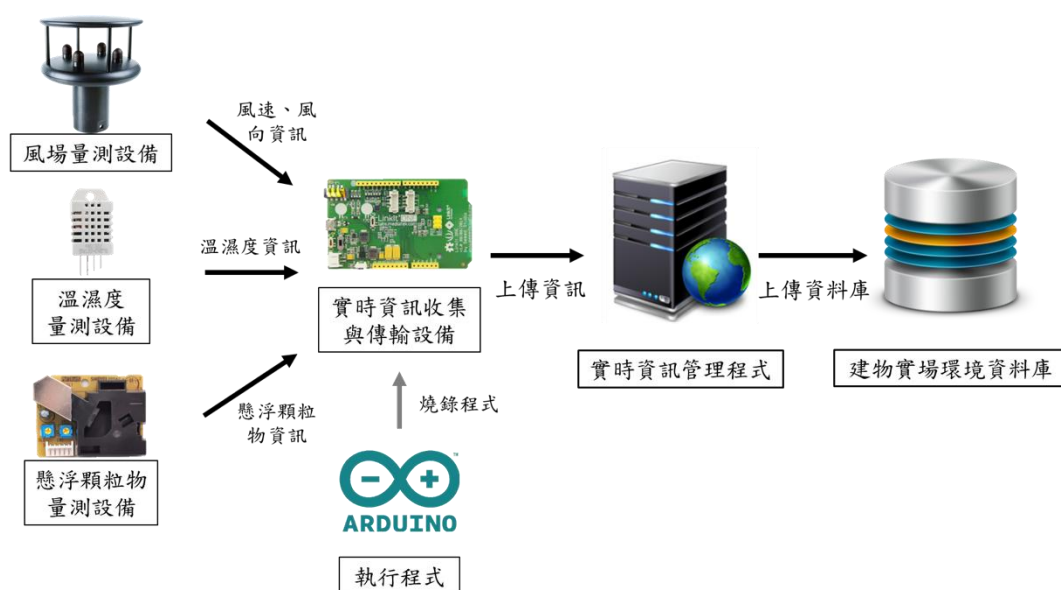


圖 4-2 實時外部風場資訊量測裝置架構

資料來源：本研究繪製

二、實時室內通風環境量測裝置架構

「實時室內通風環境量測設備」目的為實時收集室內溫濕度、通風口開關狀態資訊。因此需要溫濕度量測設備、通風口開關狀態監測裝置以及實時資訊收集與傳輸設備，以下將詳細說明各項之內容。

1. 溫濕度量測設備

因測量環境差異不大，故在此沿用上一節所使用之 DHT-22 溫濕度傳感器。

2. 通風口開關狀態監測裝置

為了達到實時監測通風開關狀態之目的，本研究採用磁簧開關進行操作。磁簧開關通過將兩片磁簧片密封在玻璃管內，中間間隔有一小空隙，當外來磁場時將使兩片磁簧片接觸進而導通。一旦磁體被拉到遠離開關，磁簧開關將返回到其原來的位置。本研究將磁簧開關兩側分別固定在窗框與相鄰之窗扇處，窗戶關閉時使磁簧開關兩側相鄰進而形成通路；窗戶開啟時磁簧開關兩側相離，進而形成斷路，再通過判讀此迴路是否通路以判斷窗戶是否關閉。

3. 實時資訊收集與傳輸設備

因測量環境差異不大，故在此沿用上一節所使用之 LinkIt ONE 開發板。將收集到之室內溫濕度、室內空氣污染物以及通風口開關狀態資訊上傳至「建物實場環境資料庫」。

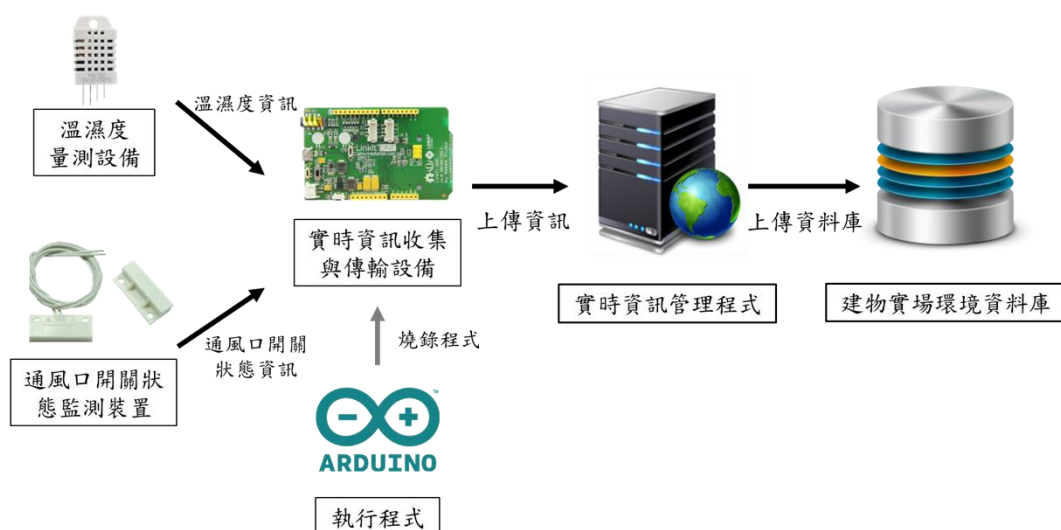


圖 4-3 實時室內通風環境量測裝置架構

資料來源：本研究繪製

(三)、實時資訊管理程式

「實時資訊管理程式」目的為將「實時外部風場資訊量測設備」與「實

時室內通風環境量測設備」收集到之室外風速、風向、溫濕度以及懸浮顆粒物資訊與室內溫濕度、通風口開關狀態資訊上傳至「建物實場環境資料庫」，進而更好地管理建物實時資訊。

四、建物實場環境資料庫

「建物實場環境資料庫」目的為存儲「實時資訊管理程式」上傳之資訊，進而為後續最佳化通風決策提供依據。

第二節 實場資訊量測系統實作

本研究將根據圖 4-1 所示之實場資訊量測系統架構圖進行系統實作，「實場資訊量測系統」之資訊量測裝置主要設計於 LinkIt ONE 開發板，通過使用跨平台應用軟件 Arduino IDE 以 C/C++ 為開發語言，收集各項設備量測之數據，並搭配 PHP 程式語言，並將收集整理到之資訊上傳至遠端伺服器；同時在 Apache 網頁伺服器以 PHP 程式語言編寫實時資訊管理程式，以接受從 LinkIt ONE 開發板傳送之資訊，並將其上傳至使用 MySQL 建立之「建物實場環境資料庫」達到資訊實時上傳之目的。「實場資訊量測系統」之開發環境，如表 4-1 所示。

表 4-1 實場資訊量測系統之開發環境

Operation System	 Windows 10	Windows 10 (x64)
Developing Tool	  	Arduino IDE 1.8.5 Visual Studio Code 1.27.2 FileZilla 3.42.1
Server	 APACHE HTTP SERVER PROJECT	Apache 2.4.6
Database		6.3.9-MySQL

資料來源：本研究整理

確定系統開發環境與開發架構後，接下來將進行「實場資訊量測系統」之實作，以下將詳細說明各項之內容。

一、實時外部風場資訊量測裝置實作

1. 風場量測設備

本研究將風場量測設備固定與目標建築物頂端，通過 LinkIt ONE 開發板與其連接以收集量測之風速、風向，再通過風洞試驗將設備測得的風速、風向轉化為實際之風速、風向。風場量測設備使用 WindSonic 超聲波風速傳感器以精準量測風速、風向，再通過與 LinkIt ONE 開發板相連，達到資訊上傳之目的。然而因為 WindSonic 超聲波風速傳感器並非是為 Arduino 所製造之感測器，以下為 WindSonic 超聲波風速傳感器規格表。

表 4-2 WindSonic 超聲波風速傳感器規格表

產品規格	
測量範圍	風速0-60m/s、風向0-359 ^o (no dead band)
準確性	風速 $\pm 2\%$ @ 12m/s、風向 $\pm 2^{\circ}$ @ 12m/s
解析度	風速0.01m/s (0.02 knots)、風向1 ^o
響應時間	0.25 seconds
閾值	0.01m/s
超聲波輸出率	0.25, 0.5, 1, 2 or 4 Hz
參數	風速和風向或U和V (矢量)
電源輸入	9mA @ 12V
訊號輸出	0-20mA

資料來源：本研究整理

為了數據轉發方便，本研究將 WindSonic 超聲波風速傳感器風速測量範圍由 0-60m/s 調整為 0-50m/s，風向測量範圍保持不變。後將傳感器架設於目標建物樓頂，以測量建築室外風速(V)與風向(D)，如圖 4-4 所示。



圖 4-4 WindSonic 超聲波風速傳感器架設位置

資料來源：本研究拍攝

WindSonic 超聲波風速傳感器之電源輸入規格為穩定 $5.5\text{mA}@12\text{V}$ ，而 LinkIt ONE 開發板最多只能提供恆定 5V 之電壓，因此本研究將為 WindSonic 建立電源供應裝置，為其提供溫度之電源，如圖 4-5 所示。

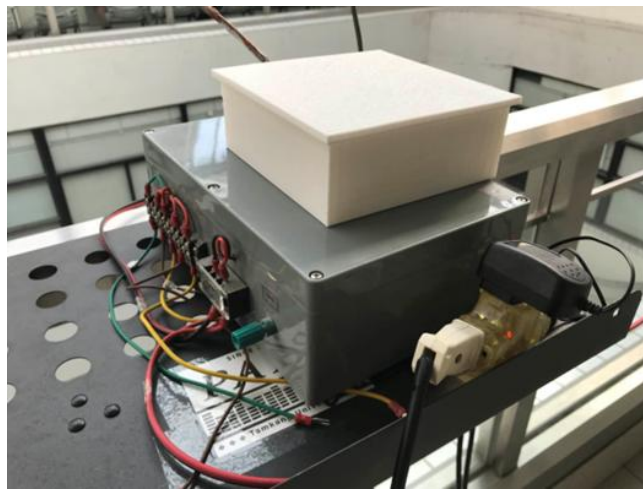


圖 4-5 電源供應裝置

資料來源：本研究拍攝

同時由於 WindSonic 輸出電流範圍為 $0\text{-}20\text{mA}$ ，若直接將其連接 LinkIt ONE 開發板，會導致 LinkIt ONE 開發板負擔過大，故本研究通過使用 $250\ \Omega$ 電阻，將 $0\text{-}20\text{mA}$ 電壓資訊轉換為 $0\text{-}5\text{V}$ 電壓資訊，以降低 LinkIt ONE

開發板之負擔，並提高資訊的準確性。如圖 4-6 所示。

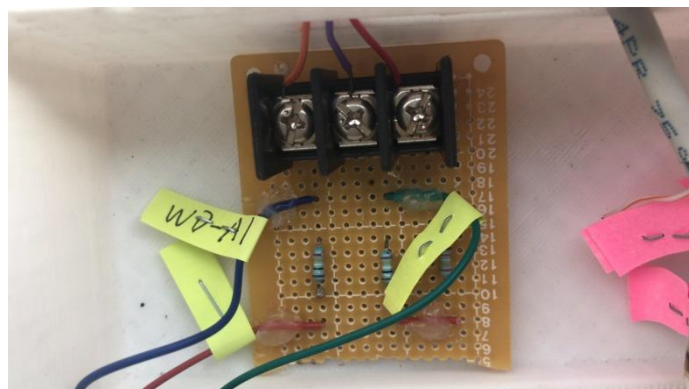


圖 4-6 信號轉換裝置

資料來源：本研究拍攝

2. 溫濕度量測設備

本研究採用 Arduino DHT-22 溫度模組作為室外溫濕度量測之設備。因 DHT-22 溫濕度傳感器本是一款為 Arduino 開發板使用之量測設備，故可直接與 LinkIt ONE 開發板連接，達到設備供電與量測資訊收集之目的。由於 DHT-22 溫濕度傳感器並不防水，故將其固定於 WindSonic 超聲波風速傳感器旁遮雨位置，以達到精準測量室外溫濕度目的。

表 4-3 DHT-22 溫度模組規格表

產品規格	
測量範圍	溫度-40~80度C、濕度0~99.9%RH
精度	溫度±0.5度C、濕度±2%RH(10~90%RH)
解析度	溫度0.1度C、濕度0.1%RH
衰減值	溫度<1度C/年、濕度<1%RH/年
響應時間	2 seconds
傳感器類型	溫度-電阻式傳感器、濕度-電容式傳感器
電源輸入	DC3.3~5.5V

資料來源：本研究整理

3. 懸浮顆粒物量測設備

本研究使用 Grove Dust Sensor PM2.5 粉塵傳感器傳感器。因此粉塵傳感器本是一款為 Arduino 開發板使用之量測設備，故可直接與 LinkIt ONE 開發板連接，達到設備供電與量測資訊收集之目的。由於此粉塵傳感器並不防水，故將其固定於 DHT-22 溫濕度傳感器旁，以達到測量室外懸浮顆粒物之目的。

表 4-4 Grove Dust Sensor PM2.5 粉塵傳感器傳感器規格表

項目	最小值	正常值	最大值	單位
電壓	4.75	-	5.25	V
等待狀態電流	-	90	-	mA
檢測範圍	-	0~28,000 或0~8000	-	pcs/liter 或 pcs/0.01cf
工作溫度範圍	0	-	45	°C
輸出方式	Negative Logic, Digital output, Hi over 4.0V(Rev.2) Lo: under 0.7V			
可檢測顆粒直徑	>1 um			
模塊尺寸	59(W) × 45(H) × 22(D) [mm]			
可適應濕度範圍	95%以下			

資料來源：本研究整理



圖 4.7 DHT-22 溫濕度傳感器與粉塵傳感器模組

資料來源：本研究拍攝

4. 實時資訊收集與傳輸

為了達到自動收集環境資訊並自動上傳之目的，本研究採用 LinkIt ONE 開發板進作為實時資訊收集與傳輸設備。

由於 WindSonic 超聲波風速傳感器的電流資訊經過信號轉換，從對於 0-50m/s、0-359° 的 0-20mA 轉換為 0-5V，且由於風速、風向與電流的關係為等比例函數，故可得風速(V)、風向(D)值與電壓值(Vs)之關係為公式(4-1), 公式(4-2)所示。

$$V = 10V_s \quad (4-1)$$

$$D = 120V_s \quad (4-2)$$

同時因為 WindSonic 超聲波風速傳感器、DHT-22 溫濕度傳感器、粉塵傳感器傳感器之相應時間皆不相同，且室外風場資訊並不需要高頻率上傳至「建物自然通風決策系統」，同時過多的資訊量會導致資料庫負擔過大，故本研究取各傳感器十分鐘測量之資訊之平均值代表此時間段的資

訊。

表 4-5 LinkIt ONE 開發板規格表

規格	功能	規格
微處理器 (MPU)	晶片 核心 時脈	MT2502A ARM7EJ-S™ 260MHz
PCB 大小	尺寸	3.3 x 2.1 inches
記憶體	快閃 RAM	16MB 4MB
電源	使用電池 GPIO 供應電流量	3.7~4.2V 鋰電池 0.3~3mA
Digital IO 接腳	接腳數量 電壓	16 (D0~D13, SDA, SCL) 3.3V
類比輸入接腳	接腳數量 電壓	3 (A0, A1, A2) 0~5V
PWM 輸出接腳	接腳數量 電壓 最大解析度	2 (D3 and D9) 3.3V 13bit@1.6KHz 8bit@50.8KHz 4bit@800KHz
外部中斷	接腳數量	2 (D2 and D3)
I2C (僅限 master)	組數 Speed	1 (SDA, SCL) 100Kbps, 400Kbps, 3.4Mbps
SPI (僅限 master)	組數 速度	1 (MOSI, MISO, SCK, SS) 104Kbps~26Mbps
UART	組數 電壓	1 (D0[RX], D1[TX]) 3.3V
UART on USB	Set Count	1
通訊功能	GSM GPRS Bluetooth Wi-Fi (MT5931)	850/900/1800/1900MHz Class 12 2.1 SPP and 4.0 GATT (Dual Mode) 802.11b/g/n
定位功能	GNSS (MT3332)	GPS/GLONASS/BeiDou
儲存媒體	內建快閃記憶體 SD 卡支援	10MB 最大達 32GB (Class 10)
最大執行檔大小	RAM (Code+R0+RW+ZI+Heap)	2MB

資料來源：本研究整理

將 WindSonic 超聲波風速傳感器、DHT-22 溫濕度傳感器、粉塵傳感器傳感器分別連接到 LinkIt ONE 開發板的數位腳位與類比腳位，以收集各傳感器輸出之電流資訊，再通過燒錄之執行程式的方式，將各項電流資訊

轉換為十分鐘內風速、風向、溫濕度、懸浮顆粒物平均值資訊，最後使用藍牙與 wifi 天線將 LinkIt ONE 開發板連接網路，將資訊上傳至網頁伺服器。

本研究通過在 Apache 網頁伺服器，使用 PHP 程序語言編寫之實時資訊管理程式接收 LinkIt ONE 開發板，並上傳至「建物實場環境資料庫」。

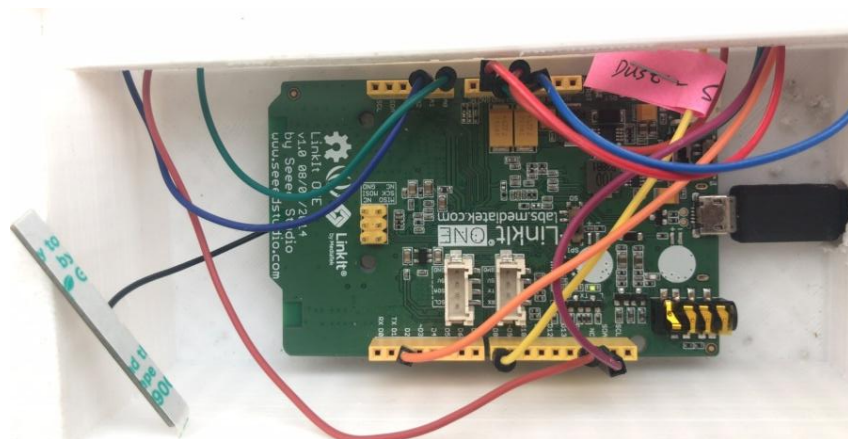


圖 4-8 LinkIt ONE 開發板與藍牙 wifi 天線

資料來源：本研究拍攝



圖 4-9 LinkIt ONE 開發板室外執行程式

資料來源：本研究整理

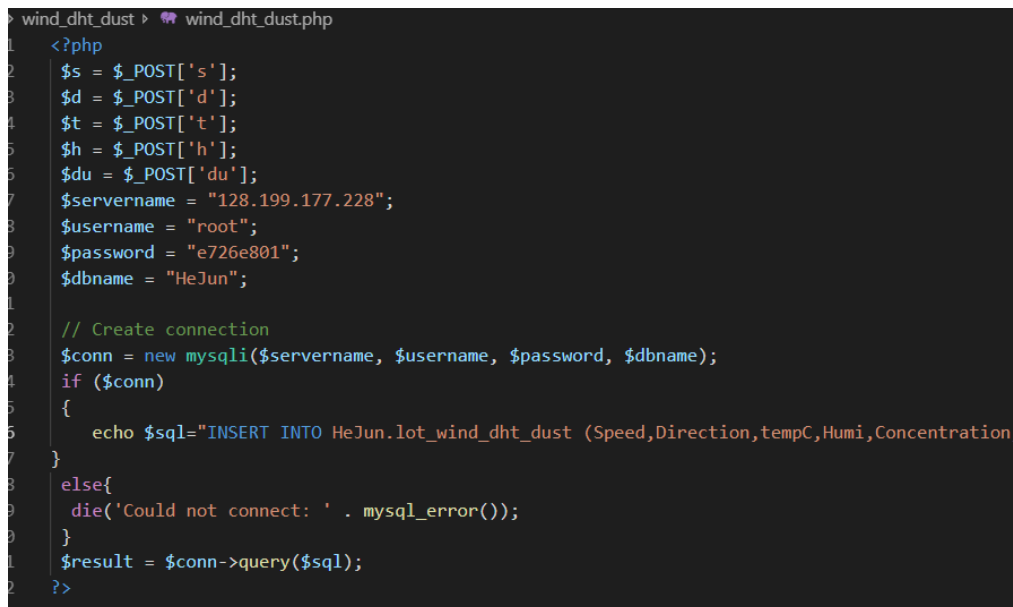


圖 4-10 室外實時資訊管理程式

資料來源：本研究整理

綜合上述之規劃與設計，以下歸納本研究「實時外部風場資訊量測裝置」所具備之量測傳感器項目與說明：

表 4-6 實時外部風場資訊量測裝置

裝置名稱	傳感器名稱	功能說明	整合方式
風場量測設備	Winsonic 風速計	精準量測風速、風向	1. 製作信號轉換裝置 2. Linkit One 基板整合，進行 wifi 資料傳輸
溫濕度量測設備	DHT-22 溫度模組	室外溫濕度量測	Linkit One 基板整合，進行 wifi 資料傳輸
懸浮顆粒物量測設備	Grove Dust Sensor PM2.5 粉塵傳感器	測量室外懸浮顆粒物	
實時資訊收集與傳輸	LinkIt ONE 開發板	自動收集環境資訊並自動上傳	

資料來源：本研究整理

二、實時室內通風環境量測裝置實作

1. 溫濕度量測設備

因測量環境差異不大，故此沿用「實時外部風場資訊量測裝置」所使用之 DHT-22 溫濕度傳感器，並直接與 LinkIt ONE 開發板連接，達到設備供電與量測、收集溫濕度資訊之目的。

2. 通風口開關狀態監測裝置

為了研究之方便，現將磁簧開關固定於自製窗戶上，以模擬實際通風口開關狀態。本研究將磁簧開關兩側分別固定在窗框與相鄰之窗扇處，窗戶關閉時使磁簧開關兩側相鄰，進而形成通路；窗戶開啟時磁簧開關兩側相離，進而形成斷路，再透過 LinkIt ONE 判讀此迴路是否通路以判斷窗戶是否關閉。



圖 4-11 自製窗戶與雌黃開關、DHT-22 溫濕度傳感器

資料來源：本研究拍攝

3. 空氣品質量測設備

本研究使用 Grove – Air quality sensor v1.3 空氣品質感測器。因此空氣品質感測器本是一款為 Arduino 開發板使用之量測設備，故可直接與 LinkIt ONE 開發板連接，達到設備供電與量測資訊收集之目的。達到測量室內空氣品質之目的。

4. 實時資訊收集與傳輸設備

為了達到自動收集環境資訊並自動上傳之目的，「實時室內通風環境量測」同樣採用 LinkIt ONE 開發板進行操作。將 DHT-22 溫濕度傳感器、磁簧開關分別連接到 LinkIt ONE 開發板的數位腳位與類比腳位，以每十秒收集一次各傳感器輸出之電流資訊。再通過燒錄之執行程式將各項電流資訊轉換為實時室內溫濕度、通風口開關狀態資訊，最後使用藍牙與 wifi 天線將 LinkIt ONE 開發板連接網路。並將資訊上傳至網頁伺服器中。

本研究通過在 Apache 網頁伺服器，使用 PHP 程序語言編寫之實時資訊管理程式接收 LinkIt ONE 開發板，並上傳至「建物實場環境資料庫」。

綜合上述之規劃與設計，以下歸納本研究「實時內部風場資訊量測裝置」所具備之量測傳感器項目與說明：

表 4-7 實時內部風場資訊量測裝置

裝置名稱	傳感器名稱	功能說明	整合方式
溫濕度量測設備	DHT-22 溫濕度傳感器	室內溫濕度量測	Linkit One 基板 整合，進行 wifi 資料傳輸
通風口開關狀態監測裝置	磁簧開關	判斷窗戶開關	
空氣品質量測設備	Grove – Air quality sensor v1.3 空氣品質感測器	室內空氣品質量測	
實時資訊收集與傳輸設備	LinkIt ONE 開發板	自動收集環境資訊並自動上傳	

資料來源：本研究整理

三、建物實場環境資料庫

本研究將「實場資訊量測系統」分為「實時外部風場資訊量測裝置」與「實時室內通風環境量測裝置」，故「建物實場環境資料庫」也將分別包括實時外部風場資訊與實時室內通風環境資訊兩個部分，分別建立資料表。

如圖 4-14 所示，實時外部風場資訊包括風速、風向、室外溫濕度、懸浮顆粒物與測量時間此六項資訊，如圖 4-15 所示；實時室內通風環境資訊報室內溫濕度、窗口開關狀態與測量時間此四項資訊。



```
all | Arduino 1.8.5
文件 編輯 項目 工具 幫助
all $
1 /*
2  讀取DHT-22之溫濕度值
3  讀取磁簧開關迴路是否通路
4  每十秒收集溫度、濕度值、迴路狀況並上傳
5  至 128.199.177.228/xiaokeai/xiaokeai.php
6  */
7 #include "LDHT.h"
8 #include <LWiFiClient.h>
9 #include <LWiFi.h>
10 #include <LWiFiServer.h>
11 #include "Air_Quality_Sensor.h"
12
13 #define WIFI_AP "E801_2.4GHz"
14 #define WIFI_PASSWORD "E801E801"
15 #define WIFI_AUTH LWIFI_WPA
16 #define DHTPIN 2 // what pin we're connected to
```

圖 4-12 LinkIt ONE 開發板室內執行程式

資料來源：本研究整理



```
xiaokeai.php
1 <?php
2 $t = $_POST['t'];
3 $h = $_POST['h'];
4 $a = $_POST['a'];
5 $b = $_POST['b'];
6 $c = $_POST['c'];
7 $servername = "128.199.177.228";
8 $username = "root";
9 $password = "e726e801";
10 $dbname = "HeJun";
11
12 // Create connection
13 $conn = new mysqli($servername, $username, $password, $dbname);
14 if ($conn)
15 {
16     echo $sql="INSERT INTO HeJun.xka( temp , humi,state,pollution,quality,time) VALUES ('$t',
17 }
18 else{
19     die('Could not connect: ' . mysqli_error());
20 }
21 $result = $conn->query($sql);
22
23 ?>
```

圖 4-13 室內實時資訊管理程式

資料來源：本研究整理

MySQL Workbench

Navigator: lot_wind_dht_dust

MANAGEMENT

- Server Status
- Client Connections
- Users and Privileges
- Status and System Variable
- Data Export
- Data Import/Restore

INSTANCE

- Startup / Shutdown
- Server Logs
- Options File

PERFORMANCE

- Dashboard
- Performance Reports
- Performance Schema Setup

SCHEMAS

- Filter objects
- HeJun

Query: SELECT * FROM HeJun.lot_wind_dht_dust ORDER BY id DESC;

Result Grid

id	Speed	Direction	tempC	Humi	Concentration	時間
3415	1.69	205.34	29.58	85.73	156.34	2019-06-22 01:07:29
3414	2.73	209.35	29.52	86.46	138.75	2019-06-22 00:57:25
3413	1.59	198.56	29.6	86.91	152.28	2019-06-22 00:47:23
3412	1.69	205.94	29.61	88.65	0.62	2019-06-22 00:37:19
3411	1.7	201.52	29.6	89.78	389.63	2019-06-22 00:27:16
3410	1.5	205.76	29.61	90.36	142.14	2019-06-22 00:17:11
3409	2.14	204.93	29.65	90.2	268.64	2019-06-22 00:07:08
3408	2.3	197.5	29.59	90.51	357.34	2019-06-21 23:57:06
3407	1.96	203.38	29.59	90.45	0.62	2019-06-21 23:47:02
3406	1.46	188.42	29.65	90.03	226.54	2019-06-21 23:36:59
3405	0.92	197.63	29.6	90.25	286.19	2019-06-21 23:26:55
3404	1.35	191.87	29.72	90.08	254.69	2019-06-21 23:16:52
3403	1.34	210.13	29.78	90.47	445.71	2019-06-21 23:06:48
3402	1.51	199.69	29.9	89.88	395.93	2019-06-21 22:56:45
3401	1.05	174.92	29.94	89.76	188.46	2019-06-21 22:46:41
3400	0.98	210.3	30.05	89.49	486.55	2019-06-21 22:36:39
3399	0.94	212.42	30.09	88.87	293.87	2019-06-21 22:26:37
3398	1.44	228.59	30.2	88.48	0.62	2019-06-21 22:16:33
3397	0.96	236.85	30.39	86.49	349.29	2019-06-21 22:06:31
3396	1.78	212.92	30.78	83.79	556.81	2019-06-21 21:56:27
3395	2.23	212.98	31.08	82.43	0.62	2019-06-21 21:46:24

Output: Action Output

1 01:14:56 SELECT * FROM HeJun.lot_wind_dht_dust ORDER BY id DESC LIMIT 0, 5000

圖 4-14 建物實場環境資料庫之實時外部風場資料表

資料來源：本研究繪製

MySQL Workbench

Navigator: lot_wind_dht_dust

MANAGEMENT

- Server Status
- Client Connections
- Users and Privileges
- Status and System Variable
- Data Export
- Data Import/Restore

INSTANCE

- Startup / Shutdown
- Server Logs
- Options File

PERFORMANCE

- Dashboard
- Performance Reports
- Performance Schema Setup

SCHEMAS

- Filter objects
- HeJun

Query: SELECT number,temp,humi,state,time FROM HeJun.

Result Grid

number	temp	humi	state	time
8979	28.70	51.60	ooen	2019-06-13 14:49:12
8980	25.30	65.00	ooen	2019-06-13 14:49:14
8981	31.90	65.00	ooen	2019-06-13 14:49:17
8982	28.70	64.80	ooen	2019-06-13 14:49:20
8983	28.70	64.90	ooen	2019-06-13 14:49:22
8984	28.70	65.00	ooen	2019-06-13 14:49:25
8985	28.70	65.00	ooen	2019-06-13 14:49:27
8986	28.70	64.30	ooen	2019-06-13 14:49:30
8987	28.70	65.20	ooen	2019-06-13 14:49:33
8988	28.70	65.10	ooen	2019-06-13 14:49:35
8989	28.70	65.10	ooen	2019-06-13 14:49:38
8990	28.70	65.20	ooen	2019-06-13 14:49:41
8991	28.70	65.20	ooen	2019-06-13 14:49:43
8992	28.70	65.20	ooen	2019-06-13 14:49:46
8993	28.70	65.20	ooen	2019-06-13 14:49:49
8994	28.70	65.20	ooen	2019-06-13 14:49:51
8995	28.70	65.20	ooen	2019-06-13 14:49:54
8996	28.70	65.20	ooen	2019-06-13 14:49:56
8997	28.70	65.20	ooen	2019-06-13 14:49:59
8998	28.20	65.20	ooen	2019-06-13 14:50:02
8999	28.20	65.20	ooen	2019-06-13 14:50:04
9000	28.20	65.20	ooen	2019-06-13 14:50:07
9001	28.20	65.20	ooen	2019-06-13 14:50:09

Output: Action Output

1 01:14:56 SELECT * FROM HeJun.lot_wind_dht_dust ORDER BY id DESC LIMIT 0, 5000

圖 4-15 建物實場環境資料庫之實時室內環境資料表

資料來源：本研究繪製

第五章 建物自然通風數值模型資料庫

第一節 建置流程與方法

本研究選定一示範建築進行室內自然通風資料庫建置，主要採用 CFD 模擬來獲得自然通風資料。一般在進行室內自然通風(或風壓通風)模擬時，需給定開窗部的風壓邊界條件，於此採用風洞實驗來獲得風壓資料。在進行不同來風風向角的風壓實驗後，以各風向角的風壓資料搭配不同開關窗情境來建置自然通風資料庫，做為決策系統回饋通風資訊之依據。

一般而言，就現有計算機能量直接模擬(DNS)在實務上是難以實現且不符合經濟效益。雖然大渦模擬(large eddy simulation)可有效降低計算量，且就現有的紊流模式來看，其精度高於其他模式，然計算量仍嫌偏高，於目前在工程應用上較難實現。而最常被使用的 standard $k-\epsilon$ model 在建築屋頂區域具有紊流動能高估的問題(Murakami et al.,1990)，但基於 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)穩態(steady-state)計算的 standard $k-\epsilon$ model 還是具有且高成本效益的特性，因此許多學者對於 standard $k-\epsilon$ model 提出有效的修正方式，諸如 RNG、realizable $k-\epsilon$ model 等紊流模型。本研究之室內通風數值模擬採用 RANS 進行評估，據以獲得合理且完整之室內通風資訊。

第二節 研究案例概述

示範建築為位於屏東的一處安養院(如圖 5-1)，主建物為地上 8 層地下 1 層，尺寸為長 21.9 m×寬 51.7 m×高 33.9m，西側有 2 層樓高的附屬建築。量測戶外風速之超音波風速計預定架設於主建物西南側之屋凸，向上架高於 3 公尺位置。

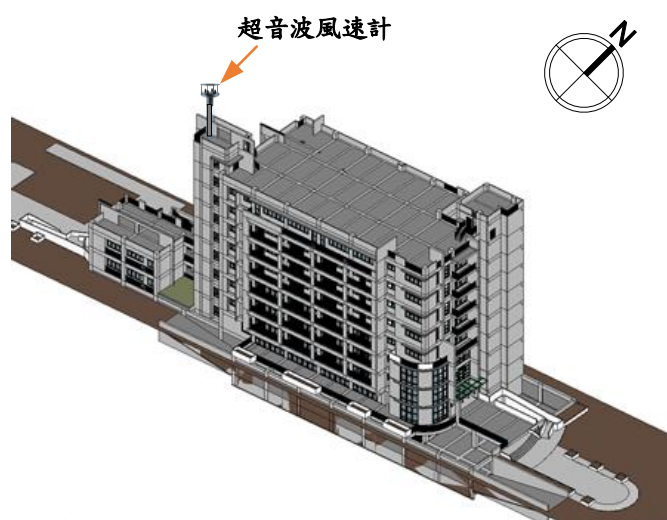


圖 5-1 示範建築 3D 圖

資料來源：本研究繪製

本棟建築各樓層平面配置略有不同，其中 5 樓至 6 樓為安養臥房，其它樓層為開放空間，提供白天休憩活動之用。本研究先針對 4 樓的開放空間進行模擬分析，其平面圖如圖 5-2 所示。在扣除男女廁所等長時間關門區域後，在這個空間中北側有 3 面門窗(N1-N3)，東側有 2 面(E1、E2)，南側則有 7 面(S1-S7)。開窗模式設定部分，將開窗模式分為北面(N)、東面(E)、南面(S)上的窗戶統一開關。因此將會有(1)全開(AO)；(2)關北側窗(CN)；(3)關東側窗(CE)；(4)關南側窗(CS)等 4 種模式。開窗位置面積資訊如表 5-1 所示，該樓層樓地板面積為 669.638 m²，挑高 3.52 m。本案目前之 CFD 模擬皆以全開窗之形式進行分析模擬。此外，為使模擬結果更符合建物實際狀況，理論上應考慮窗戶形式及開窗方式（半開或全該）。然本案例窗戶

多以全開窗為主，故模擬時皆以全開與全閉為模擬情境。雖本案並未考慮窗戶形式，但仍將窗戶面積視為主要模擬參數，故模擬之結果確實與窗戶開口大小有直接關係。然若未來案例有窗戶形式之考慮需求，其模擬結果也將能導入本系統資料庫中，而產生更貼近其需求之決策資訊。

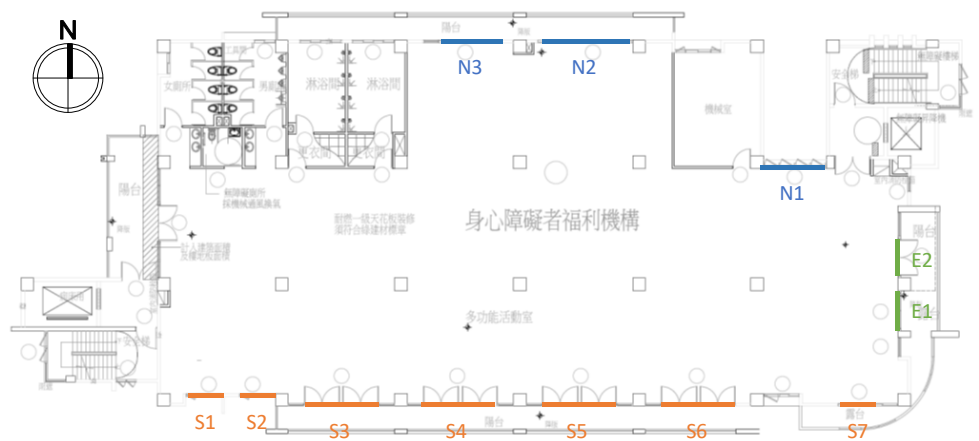


圖 5-2 示範建築之 4 樓配置圖

資料來源：本研究整理

表 5-1 示範建築 4 樓開窗資訊

開窗方位	編號	窗戶面積 (m ²)
北	N1	3.582
	N2	1.488
	N3	1.241
東	E1	1.004
	E2	5.640
南	S1	3.440
	S2	3.440
	S3	8.973
	S4	8.973
	S5	8.973
	S6	8.973
	S7	9.362

資料來源：本研究整理

第三節 風洞試驗

本研究風洞試驗於內政部建築研究所風洞實驗室進行，其風洞本體為一垂直向的封閉迴路系統，總長度為 77.9m，最大寬度為 9.12m，最大高度為 15.9m，為東南亞目前最大之建築風洞實驗室。

整個風洞本體具有兩個測試區段，第一測試區中配置有兩個旋轉盤，第一座旋轉盤直徑 1m，安置於距測試區入口處 3m 處，從事一般流體力學研究；第二座旋轉盤直徑 2.6 m，置於可移動式軌道上，定位於距測試區入口端約 25.5m 或 31.5m 處，並以機械控制使其做旋轉及上下運動，以進行建築物受風力作用的空氣動力學研究及污染擴散試驗為主。第二測試區則配置一座旋轉盤，位於風洞本體整流段出口 15m 處，轉盤直徑為 2.6 m，主要用途以橋梁測試為主。

建築風壓試驗於本實驗室第一測試段之第二旋轉盤進行，本測試段長 36.5m、寬 4m、高 2.6m，最高風速為 30m/s。風洞頂部為可調式上蓋板，以維持測試段壓力梯度為零，並將阻塞比降到最低。實驗室相應性能參數與配置圖如圖 5-3 所示。

一、循環式風洞性能

(一)、風洞尺寸

測試段長度	36.5 m
測試段寬度	4 m
收縮比	4.7:1

(二)、驅動系統

總功率	500 kW
風扇型式	直接傳動軸流式風扇
風速控制	變頻器控制馬達轉速

(三)、風速

最高風速 30 m/s
邊界層厚度 最高 200 cm
紊流強度 測試區處約 2 %

(四)、順風向壓力梯度 零梯度由可調式上蓋板調整

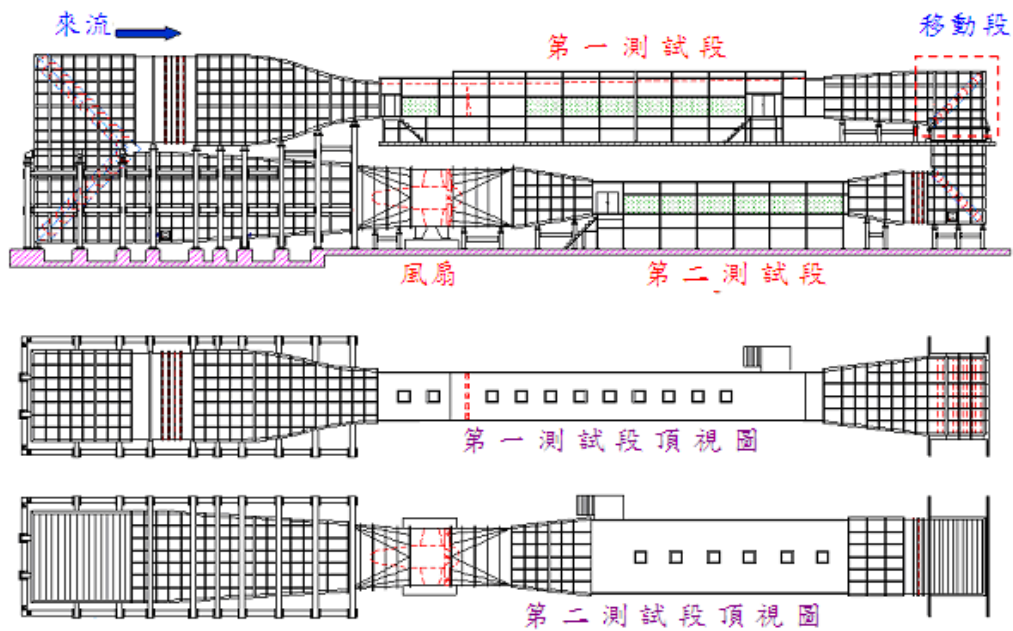


圖 5-3 建研所循環式大氣邊界層風洞性能

資料來源：本研究整理

二、風速量測設備

(a) 皮托管

本研究採用皮托管進行來流平均風速之量測，由皮托管所量測到的壓力差值，利用伯努利方程式(Bernoulli equation)計算出相應之風速。

(b) 熱線測速儀

來流風速剖面量測採用 Dantec 公司生產之熱線(hot-wire)測速儀進行。本熱線測速儀是利用電流通過金屬導線時會使導線溫度升高，而當流體流經金屬表面時會帶走部分熱量之原理來量測流體之速度。當探針(probe)所在位置之電阻 R 值因溫度之改變而改變時，使得電橋失去平衡。本實驗室

所有之恆溫式流速儀，利用補償電路(compensating circuit)，因應流速之變動，對流經探測元之電流做瞬間之改變來維持探測元之操作溫度固定不變(因而探測元之電阻亦不變)，使電橋保持平衡狀態。如此即可經由回饋電壓的變化來得知所要量測流場中流速之變化。實驗將測速儀裝設於可垂直與橫向移動的移動機構，測針擺設位置均以電腦控制。

(c) 動態皮托管

為量測實驗中相應示範建築物屋凸設置超音波風速計位置之風速以及風向，實驗中採用動態皮托管(或稱眼鏡蛇探針 cobra probe)進行量測(如圖 5-4)。動態皮托管屬於三維脈動風速探頭，有 4 孔壓力探頭，用來測量三維風速和靜態壓力，並且能測量頻率回應大於 2kHz，風向角在 $\pm 45^\circ$ 內的紊流。它適用在紊流大、風向不明的測量場合，相當適合針對建築頂部位置風場易受到女兒牆或屋凸影響的情況。



圖 5-4 動態皮托管

資料來源：本研究整理

三、壓力量測設備

前述之建築表面風壓量測方法涉及壓力之量測，故本計畫採用多頻道電子式壓力掃描閥，用來同步擷取作用於建築物表面的瞬時壓力，經過適當的處理便可得到該開窗位置之平均、擾動壓力。本儀器為 SCANIVALVE 公司之產品，如圖 5-5 所示，其元件包括：

- (1) 壓力訊號處理系統(RADBASE3200)
- (2) 最多可支援 8 組類比訊號轉換成數位訊號之轉換器(A/D MODULE)
- (3) 最多可支援 8 組壓力感應模組，共 512 個壓力量測點。
- (4) 其類比訊號轉換成數位訊號(A/D convert)解析度達 16bit。
- (5) 最大採樣速率可達 500Hz
- (6) 採用 USB 介面傳輸。
- (7) 具備網路控制與傳輸功能。
- (8) 壓力感應器模組特性：
- (9) 壓力感應範圍為 ± 10 in H₂O。
- (10) 誤差範圍為 $\pm 0.2\%$ 。

實驗中將各個風壓孔之壓力訊號經 PVC 管傳遞至壓力感應器模組，其量得之訊號傳至壓力訊號處理系統計算後所得壓力值傳回電腦。

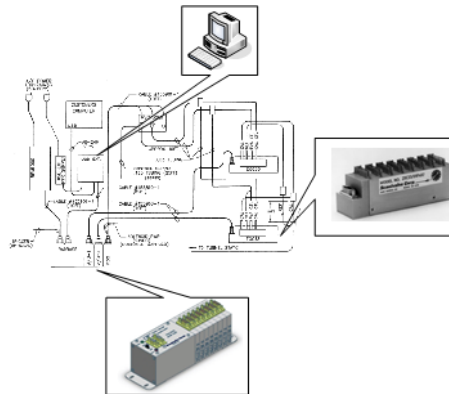


圖 5-5 多頻道電子式壓力掃描器

資料來源：本研究整理

第四節 CFD 模擬

近年來由於電腦效能大幅提升，以數值模擬方法代替實驗可大幅節省許多金錢與時間的付出，因此以數值模式來模擬空間中流體分布的研究成為另一種符合經濟性及實用性的選擇，而數值模擬在室內通風的應用愈趨普遍。相較於風洞試驗，數值模擬可在無縮尺狀況下模擬建築室內通風，並較經濟地獲致完整之風場資訊，對於分析探討室內通風問題有莫大的助益，唯計算域、格網解析度、紊流模式選定等相關之參數設定需要謹慎選擇及建構。

本研究採用泛用型計算流體力學軟體 FLUENT 進行風場模擬工作，其乃基於以有限體積法(finite-volume method)為架構所建構出來的計算流體動力學程式，以求解如下之連續方程式與動量方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (5-2)$$

其中， u 、 v 、 w 為速度在 x 、 y 、 z 三個方向之分量； t 為時間； f_x 、 f_y 、 f_z 為場加速度在 x 、 y 、 z 座標上之分量； p 為壓力； ρ 與 ν 分別為流體之密度與運動黏滯度(kinematic viscosity)。FLUENT 採用有限體積法為主要架構，進而求解連續方程式與動量方程式在流場的速度及壓力，以克服對於複雜幾何形狀計算域的適用性問題。

有限體積法可將非線性偏微分方程轉變為網格單元上的線性代數方程，然後通過求解線性方程組得出流場的解。網格劃分可以將連續的空間劃分

為相互連接的網格單元。每個網格單元由位於幾何中心的控制點和將網格單元包圍起來的網格面或線構成，以求解流場控制方程，最後獲得所有控制點上流場變數的值。

FLUENT 中用於計算通量的方法包括一階上風格式(first order upwind method)、指數律格式、二階迎風格式(second order upwind method)、QUICK 格式、中心差分格式等形式。

使用 FLUENT 求解的基本步驟如後：

- (1) 選擇計算格式。在使用分離求解器時，選擇壓強插值格式。
- (2) 在使用分離求解器時，選擇壓強和速度的耦合方法。
- (3) 在使用分離求解器時，選擇多孔介質速度方法。
- (4) 選擇用於計算導數的梯度選項。
- (5) 設置鬆弛因子(relaxation factors)。
- (6) 在使用耦合求解器時，選擇使用 FAS 多重網格法。
- (7) 對所選用的模型和求解器進行細節設置。
- (8) 對流場進行初始化(initialization)。
- (9) 選擇求解過程監視器(monitor)。
- (10) 開始疊代運算計算。
- (11) 如果計算不收斂，可嘗試調整鬆弛因子、或格網品質等方式來解決。

一、紊流模型

若將速度與壓力分別以一個均值 (mean) 和一個擾動量 (fluctuation) 的和表示：

$$u = \bar{u} + u'; \quad v = \bar{v} + v'; \quad w = \bar{w} + w'; \quad p = \bar{p} + p' \quad (5-3)$$

繼而代入(5-1)式至(5-3)式，將方程式作時間平均，而基於雷諾平均原則（Reynolds averaging principle）可得如後之為指標(index notation)型式之方程式：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5-4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + f_j \quad (5-5)$$

依據 Boussinesq 渦旋-黏滯度假說（eddy-viscosity hypothesis），(5-5)式中的紊流應力（Reynolds stress）項可表示為：

$$-\overline{u'_i u'_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (5-6)$$

其中， ν_t 為渦旋或紊流黏滯度（eddy/turbulent viscosity）； k ($= \overline{u'^2 + v'^2 + w'^2} / 2$) 為紊流動能（turbulent kinetic energy）， δ_{ij} 為 Kronecker delta 函數。

在 k- ϵ model 中，渦度黏滯度(eddy viscosity)可由以下公式求得：

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5-7)$$

而典型紊流傳輸方程-紊流動能和紊流消散率表示如後：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5-8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + \\ &C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \end{aligned} \quad (5-9)$$

其中等號右邊分別表示生成項(production term)、消散項(dissipation term)和壁面項(wall term)。各項常數分別為 $C_\mu = 0.09$; $C_{\epsilon 1} = 1.45$; $C_{\epsilon 2} = 1.92$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\epsilon = 1.3$; $Pr_t = 0.9$ 。

本研究紊流模型採用 Realizable k- ϵ model，與 standard k- ϵ model 和 RNG k- ϵ model 不同的地方在於 C_μ 不再是常數，為平均剪應率的函數，採用以下公式進行計算：

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\epsilon}} \quad (5-10)$$

其中

$$\begin{aligned} U^* &= \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \\ \tilde{\Omega}_{ij} &= \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk}\omega_k \\ \Omega_{ij} &= \overline{\Omega_{ij}} - \epsilon_{ijk}\omega_k \end{aligned} \quad (5-11)$$

$\overline{\Omega_{ij}}$ 為以角速度 ω_k 旋轉的旋轉坐標系中得到的平均旋轉張量(rotation tensor)，而模式常數 A_0 和 A_s 定義如後：

$$A_0 = 4.04, A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (5-12)$$

一、模擬設定

(1) 格網配置

針對 4 樓室內三維空間離散採用結構化網格(如圖 5-6)，比起非結構化網格，在有限體積法結構化網格較能夠得到收斂且數值誤差較小的結果。格網使用非均勻配置，靠近固體邊界(如天花板、地板、牆面)處採較細密網格，讓計算精度以及計算效率能得兼。計算域中最小網格為 0.1m，最大網格為 0.3 m，總網格數量為 411,219。

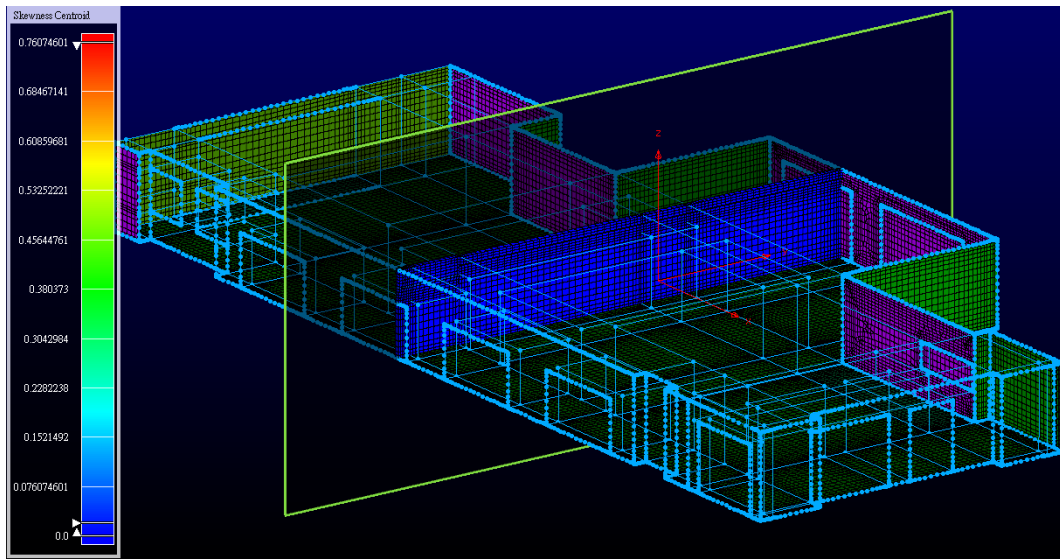


圖 5-6 示範建築 4F 室內網格配置

資料來源：本研究繪製

(2) 參數與邊界設定

在室內自然通風的風場中，鮮少遇有週期性渦流運動，故採用穩態解(Steady-state)進行模擬具有其優勢，可在短的時間內獲得風場整體平均資訊。此外，採用修正後的雙方程式(two equations)之紊流模型 Realizable k- ϵ model，對於鈍形體產生之尾流(wake)可適當修正。連續方程式、動量方程式、閉合方程式(closure equation; k & ϵ)之殘差均採用 10^{-4} 。相關模擬設定詳見表 5-2。

在邊界條件部分，於天花板、地板以及開窗處給定壁面(wall)條件，開窗部則依壓力大小給定壓力入流(pressure-inlet)或壓力出流(pressure-outlet)。另假設出入口風壓變化不顯著、紊流微弱，設定紊流強度(turbulence intensity)為 0.05%，紊流積分長度尺度(turbulence integral length scale)為 1 m。

表 5-2 模擬參數設定

參數	設定
模式 Scheme	穩態 Steady-state
紊流模型 Turbulence model	Realizable k- ε model
殘差 Residual	Continuity: 10^{-4} X-velocity: 10^{-4} Y-velocity: 10^{-4} Z-velocity: 10^{-4} Turbulence kinematic: 10^{-4} Turbulence dissipation: 10^{-4}
邊界條件類型	壓力入流 Pressure-inlet 壓力出流 Pressure-outlet 壁面 Wall
入流與出流口之紊流強度	0.05 %
入流與出流口之紊流長度尺度	1 m

資料來源：本研究整理

第五節 建物自然通風數值模型資料庫設計與實作

一、風洞實驗設定與量測

由於示範建築位於屏東郊區，附近無明顯之建築聚落，依據建築物耐風規範建議設定來風為開闊地況來進行風洞實驗，風洞試驗配置如見圖 5-7，建築高度平均風速(UH)為 10.3 m/s。本研究風洞模型縮尺為 1/150，模型尺寸為長 0.15 m×寬 0.34 m×高 0.23 m。模型以壓克力製作，並在 1 至 8 樓開窗位置佈設風壓孔。各樓層開窗配置因造型而各異，其中 1-3 樓各 9 個風壓點，4 至 8 樓各 12 個風壓點，共計 87 個風壓點。建築模型放置於風洞旋轉盤中央，以轉動旋轉盤方式模擬不同的風向。試驗以每 22.5°為間隔來旋轉，共進行 16 組風向角之風壓試驗。每組風壓試驗採樣頻率為 150 Hz，量測時間為 5 分鐘。

另於模型屋凸向上 0.02m 處(相應實場為 3 m)架設動態皮托管，以量測風速及風向風向，作為與實際來風風向與風向轉換之依據。由於風速計並非位在轉盤中心點，於實驗中每次旋轉轉盤後，須針對動態皮托管之水平座標進行修正。



圖 5-7 風洞試驗配置

資料來源：本研究拍攝

風洞入流地況按開闊地況鋪設，入流平均風速剖面公式乃依據指數率 (power law) 回歸，其公式如後：

$$\frac{U(z)}{U_H} = \left(\frac{z}{H} \right)^\alpha \quad (5-13)$$

其中 z 為離地面高度， H 為主建築高度， U_H 為主建築高度處風速， α 為指數。由風洞實驗室量得之來流平均風速回歸得到 α 為 0.15，近地表紊流強度約為 16.5%，主建築高度處約為 14%，實驗流況之平均風速以及紊流強度剖面如見圖 5-8。同樣地，我們可以將實驗紊流強度剖面回歸成如下公式：

$$Iu(z) = 0.165 - 0.148 \left(\frac{z}{H} \right)^{(\alpha+0.58)} \quad (5-14)$$

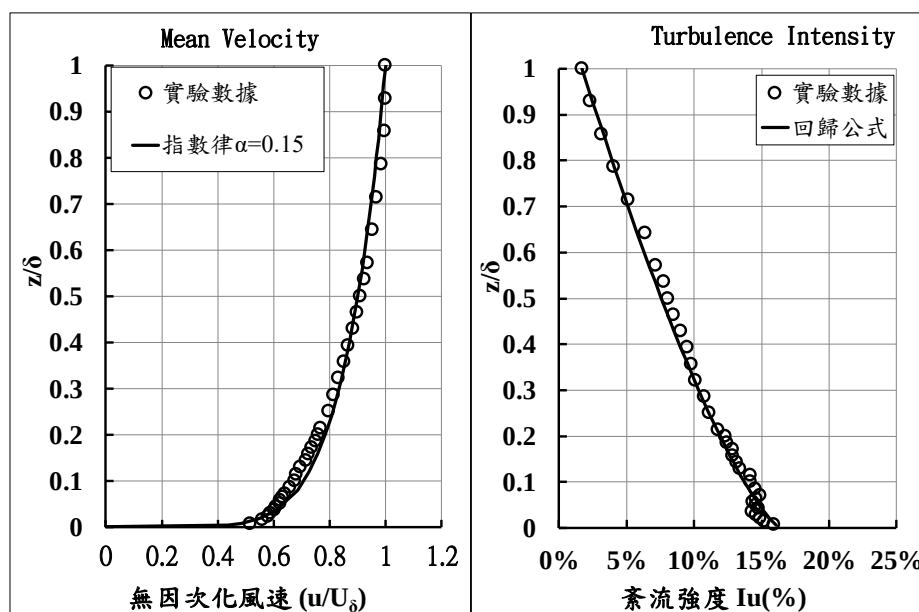


圖 5-8 風洞實驗室之平均風速與紊流強度剖面

資料來源：本研究繪製

二、風速轉換

本研究目標透過建築頂部架設單一超音波風速計，來推估當時來風的

風速與風向，進而得到建築開窗部風壓以及對應之 CFD 模擬資料。因此，儘可能將風速計架設於建築的制高點，減少其受到屋凸或女兒牆的影響而無法鑑別或對應來風的風速及風向。

為推估來風的風速與風向，首先在風洞實驗中同步量測建築頂部風速計之風向，並與來風的夾角合成後獲得風速計對應之風向，將其對應之來流風向繪製成圖 5-9 之關係圖。可以看出，基本上風速計風向隨著來風風向角增加而增加，但其增加的關係並非線性，故進一步回歸出風速計風向-來風風向的 5 次多項式，以利後續決策系統導入應用。

其次，頂部風速計量測之風速受到建築頂部或高處結構所影響而產生加減速的情形，位找出建築頂部風速與來風風速關係，於此定義風速比 U_r 如後：

$$U_r = \frac{U_H}{U_{sensor}} \quad (5-15)$$

其中 U_{sensor} 為超音波風速計量得風速，由各風向量得來風與風速計之風速比，結果如見圖 5-10。可以發現，風速比在 0.89-1.12 之間。東北風 (45°) 以及東風時 (90°) 時受到頂部風場減速的關係，風速比大於 1。其餘風向時，頂部風場則呈現加速的狀況，風速比均低於 1。

由實場量測資料至取得對應資料庫方法，分為以下步驟進行：

- (1) 實場資料：利用超音波風速計獲得現場之風速、風向資料。
- (2) 風向轉換：利用實驗所率訂出的關係式，按標準之 16 個風向進行來風風向分類。
- (3) 風速轉換：利用實驗量得之來風風向所對應的風速比，由建築頂部風速計量得知風速推估來風風速 U_H 。
- (4) 資料庫對應：依據對應風向的標準風速 CFD 風場資料，乘上建築高

度處之來風風速以獲得平均風速、通風量、空氣交換率等風場相關資訊。

風速轉換流程置資料庫對應方式詳見圖 5-11。

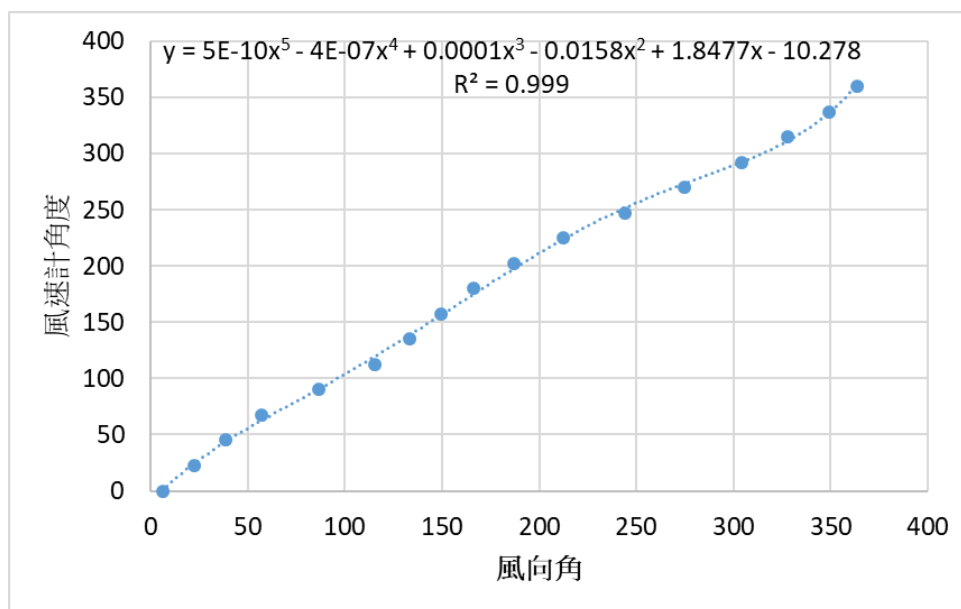


圖 5-9 超音波風速計與來風風向關係圖

資料來源：本研究繪製

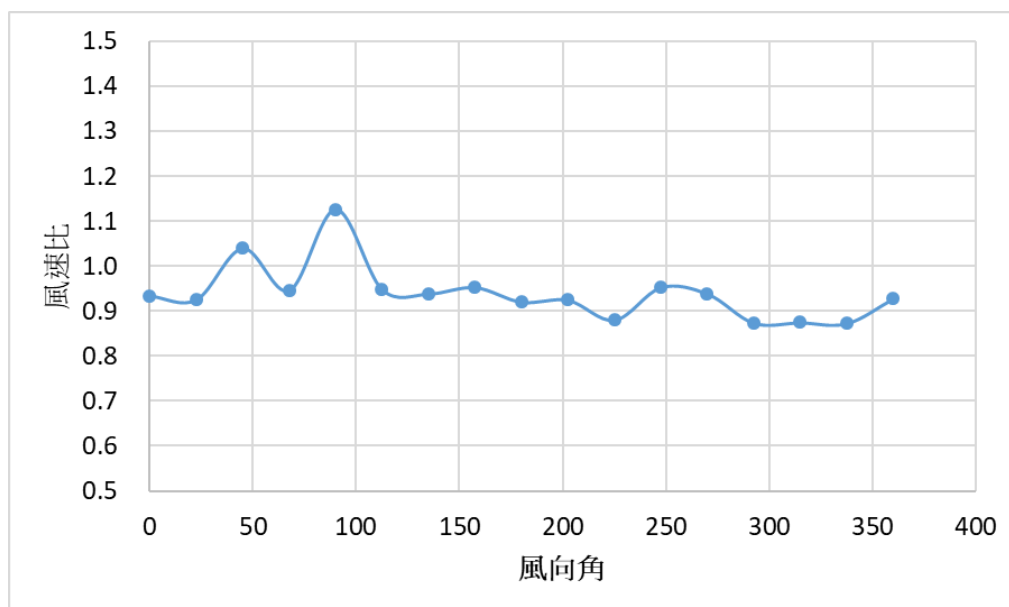


圖 5-10 來風風向與風速比關係圖

資料來源：本研究繪製

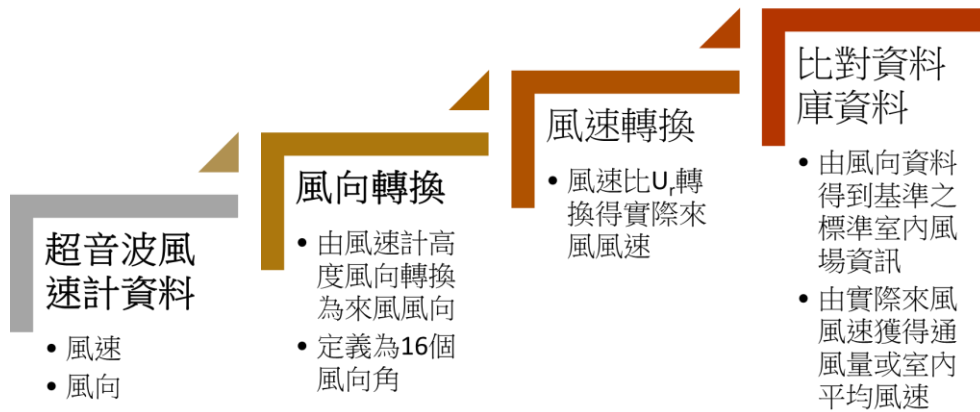


圖 5-11 實場風速風向至比對資料庫資料流程

資料來源：本研究繪製

三、表面風壓量測結果

將風洞試驗量得之風壓 p 進行無因次化，得到風壓係數 C_p ，其公式如後：

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_H^2} \quad (5-16)$$

表 5-2 為風壓係數結果，基本上迎風面風壓為正值，背風面及側風面風壓為負值，部分風向局部位置因為造型變化及不對稱的關係而產生與上述略有不同的風壓分布。

CFD 模擬在帶入開窗部風壓資料時，任意給定入流(inlet)或出流(outlet)，雖然 CFD 模擬會依據壓力平衡計算，修正面上的速度為入流或出流。但建議先合理給定開窗部屬於 pressure-inlet 或 pressure-outlet，對於模擬收斂速度會有極大的幫助。故本研究先以開窗部的壓力對於面積的權重平均後，得到粗估之內壓值。在以此內壓值為標準，壓力高於此值者設為 pressure-inlet，低於此值者則設為 pressure-outlet。

表 5-3 4 樓開窗部於各風向角之風壓係數 I

角度	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5
S401	-0.183	-0.238	-0.266	-0.234	-0.077	-0.168	0.034	0.391
S402	-0.192	-0.231	-0.262	-0.235	-0.124	-0.180	0.029	0.358
S403	-0.194	-0.278	-0.339	-0.305	-0.078	0.026	0.299	0.590
S404	-0.217	-0.293	-0.352	-0.354	-0.125	0.097	0.398	0.671
S405	-0.243	-0.307	-0.349	-0.401	-0.252	0.149	0.499	0.727
S406	-0.278	-0.308	-0.351	-0.437	-0.468	0.121	0.497	0.782
S407	-0.315	-0.292	-0.327	-0.382	-0.605	-0.100	0.740	0.753
E401	-0.408	-0.390	0.374	0.603	0.775	0.819	0.655	-0.099
E402	-0.383	-0.522	0.472	0.746	0.822	0.809	0.671	-0.001
N401	0.768	0.816	0.708	0.374	-0.487	-0.404	-0.345	-0.308
N402	0.805	0.771	0.510	0.123	-0.133	-0.430	-0.368	-0.329
N403	0.805	0.685	0.400	0.129	-0.048	-0.387	-0.372	-0.309

資料來源：本研究整理

表 5-4 4 樓開窗部於各風向角之風壓係數 II

角度	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5
S401	0.793	0.818	0.545	0.075	-0.205	-0.439	-0.444	-0.416
S402	0.827	0.755	0.520	0.237	-0.031	-0.312	-0.436	-0.406
S403	0.829	0.698	0.433	0.163	-0.016	-0.221	-0.426	-0.366
S404	0.794	0.596	0.323	0.090	-0.027	-0.176	-0.412	-0.337
S405	0.541	0.336	0.116	-0.052	-0.037	-0.126	-0.364	-0.268
S406	-0.560	-0.364	-0.250	-0.193	-0.057	-0.178	-0.271	-0.265
S407	-0.547	-0.393	-0.269	-0.216	-0.061	-0.162	-0.256	-0.258
E401	-0.270	-0.239	-0.295	-0.260	-0.047	0.062	0.263	0.590
E402	-0.249	-0.323	-0.359	-0.395	-0.240	0.075	0.329	0.654
N401	-0.241	-0.366	-0.404	-0.448	-0.376	0.090	0.419	0.718
N402	0.788	0.884	0.778	0.452	-0.091	-0.620	-0.431	-0.406
N403	0.662	0.863	0.784	0.554	0.028	-0.608	-0.449	-0.418

資料來源：本研究整理

四、通風模擬結果

首先設定標準風速 $U_H=1$ m/s 進行模擬以建置標準資料庫，本研究現已完成全開(AO)以及關南側窗(CS)資料庫建置，在 1.5 m 高處平面之無因次風速(u/U_H)等值圖如見圖 5-12 至圖 5-15。

初步先計算 pressure-inlet 面上的流量以推估換氣率，換氣率指單位時間內空氣更換的次數，通過單位時間進入房間的風量 (m^3/h) 除以房間體積(m^3)計算而得，其公式為：

$$N = \frac{Q}{V} \quad (5-17)$$

其中， N 為換氣次數， Q 為空氣流量， V 為房間體積。比較 AO 以及 CS 的換氣率(圖 5-16)可以看出，基本上 AO 的換氣效果是遠高於 CS 的。平均看來，在標準風速下 AO 的換氣率會是 CS 的 3 倍左右。

另取高度 1.5 m 處平面的無因次平均風速來看(圖 5-17)，AO 的風速大致上均高於 CS，這對於夏季需要良好的通風來降低體感溫度提升舒適度，將會是一大優勢。但在冬季因東北季風較強，強烈的東北風會使得，此時 CS 反而會是較佳的選擇。此外，過強的風反而造成紙類物品容易被吹飛的情況，使得公共空間遊憩品質降低。以上因素需要綜合考量進入決策系統內。

在 1.5 公尺高度處，將均勻分布 19874 個測點的無因次風速資料擷取出來，作為後續開窗決策之資料庫基礎。將 7 種開窗條件下，16 組風向角之分布繪製如圖 5-18 至圖 5-24。由累積機率圖整體來看，線段越靠右表示測點落在高風速區較多，反之則落在低風速區較多，無因次風速強度分布由高至低分別為 $OE < ON < OS < CS < CN < CE < AO$ 。在實際操作決策層面時，將頂部風速計量測到的風速風向經由 5.2 節的公式轉換計算後，加上室內溫溼度量測資料以及設定之人體代謝率、衣著量等資訊，得到資料庫中各測點的 PMV 值，最後選擇測點之 PMV 落在 ± 1.5 較多之開窗配置，詳細決

策流程詳見 3.2 節。

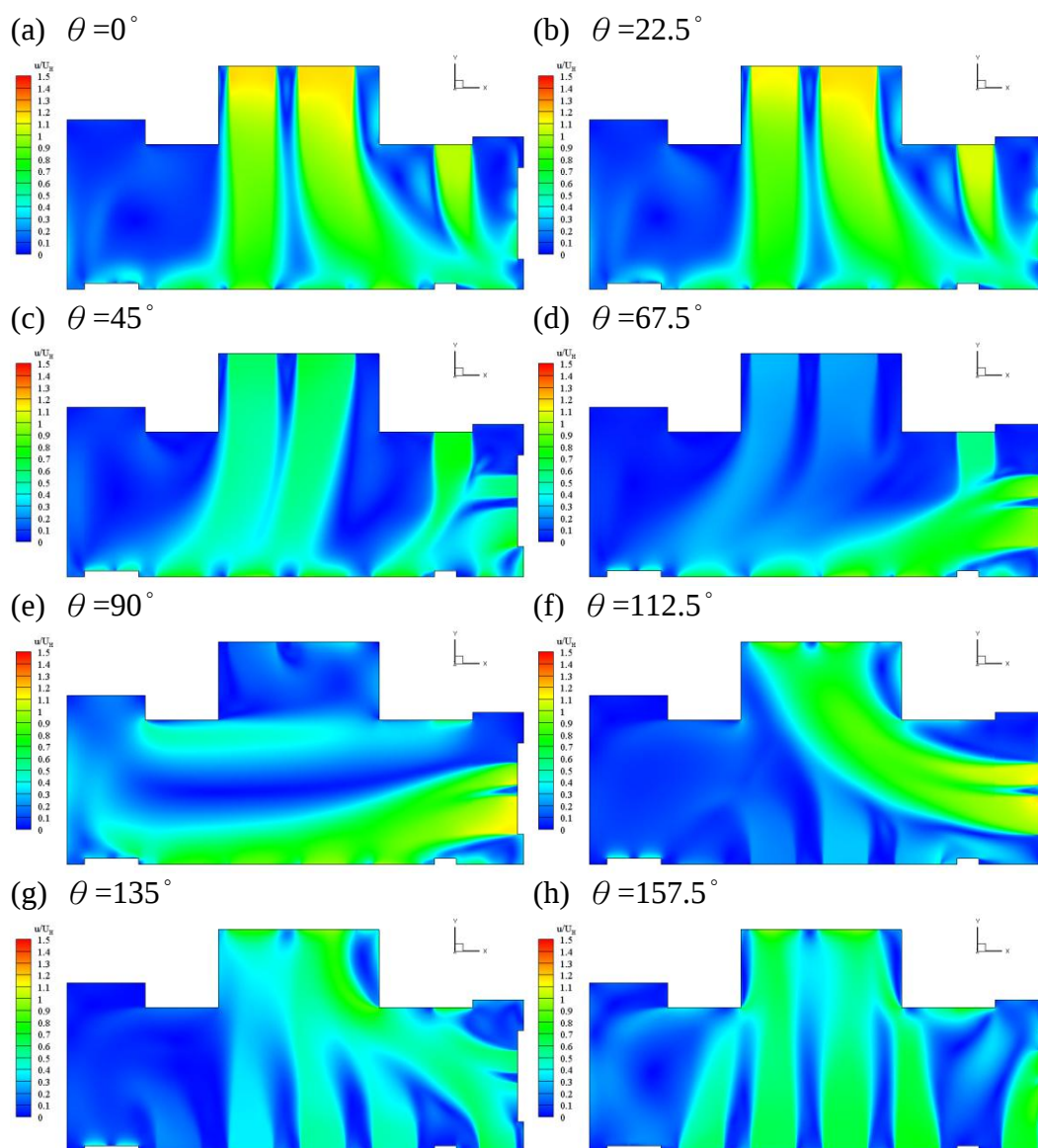


圖 5-12 全開(AO)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I

資料來源：本研究繪製

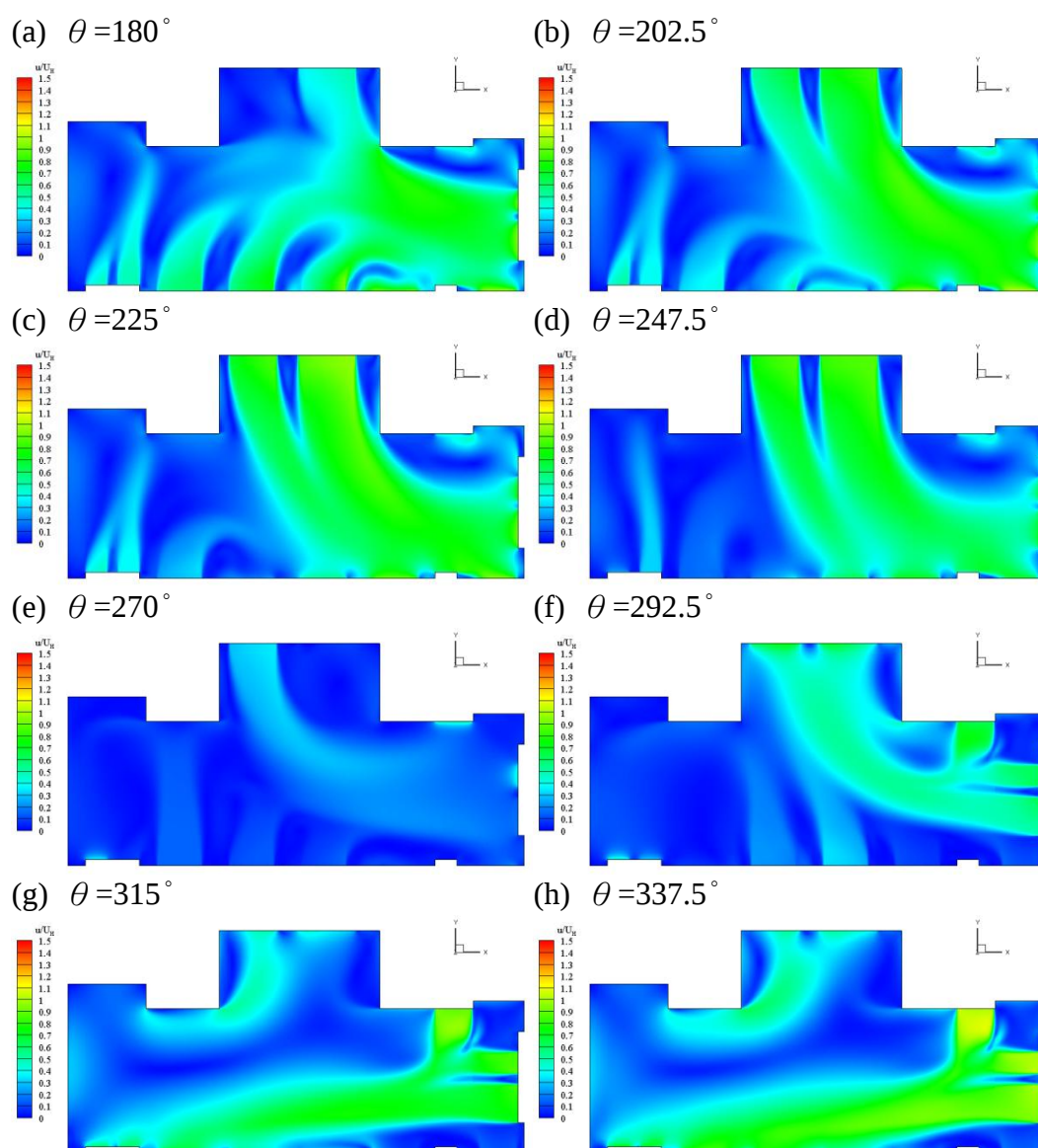


圖 5-13 全開(AO)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II

資料來源：本研究繪製

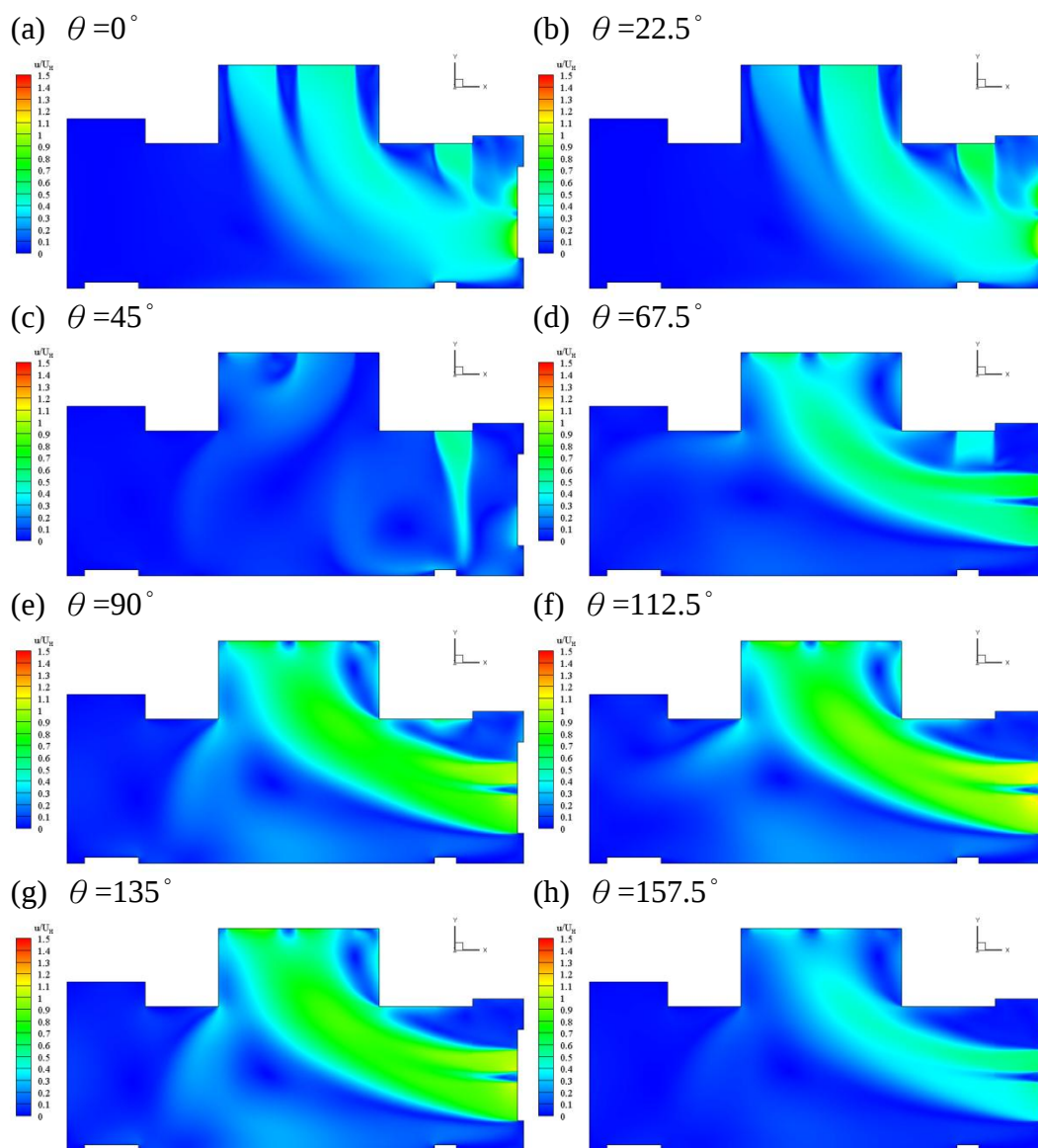


圖 5-14 關南側窗(CS)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I

資料來源：本研究繪製

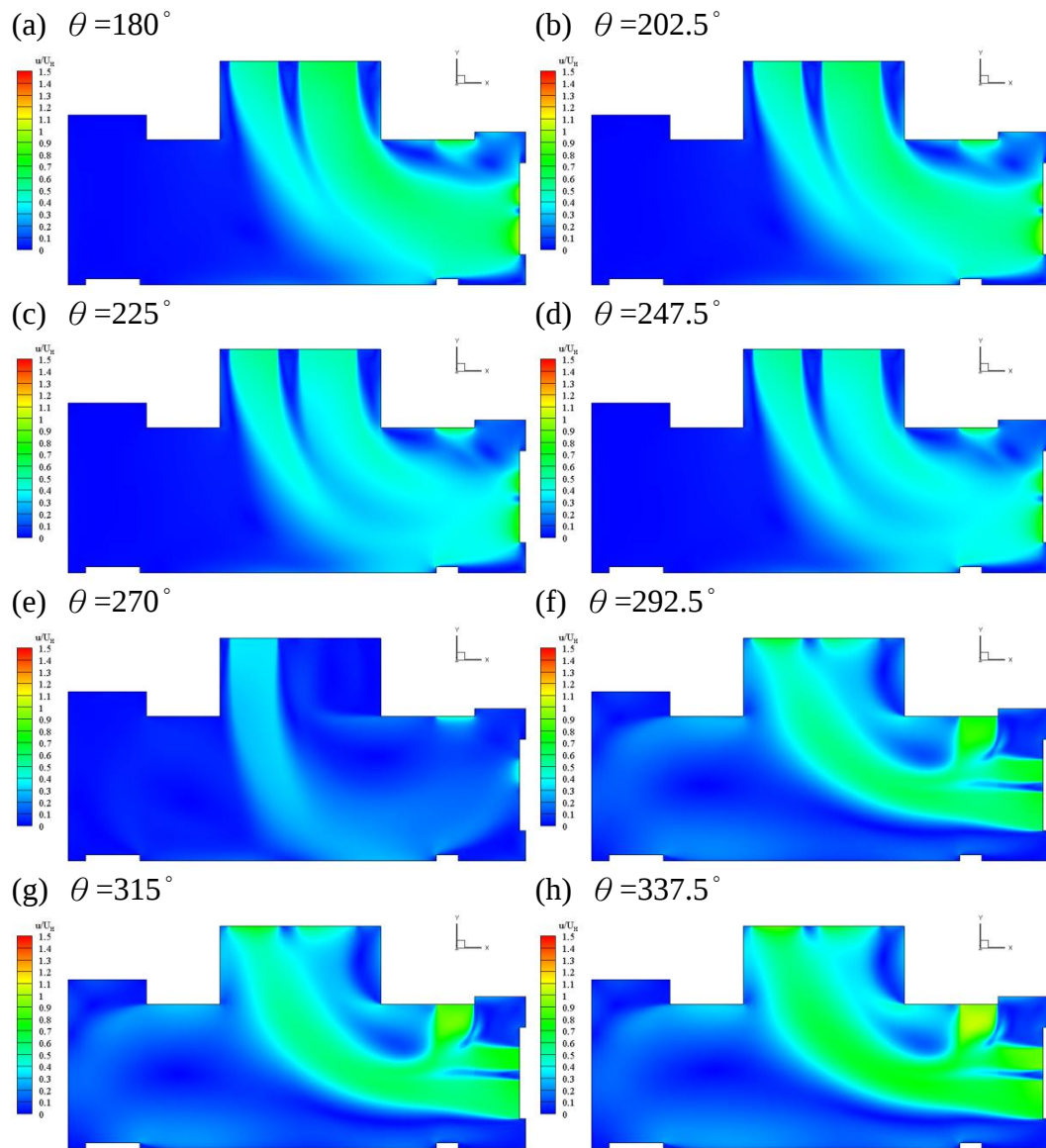


圖 5-15 關南側窗(CS)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II

資料來源：本研究繪製

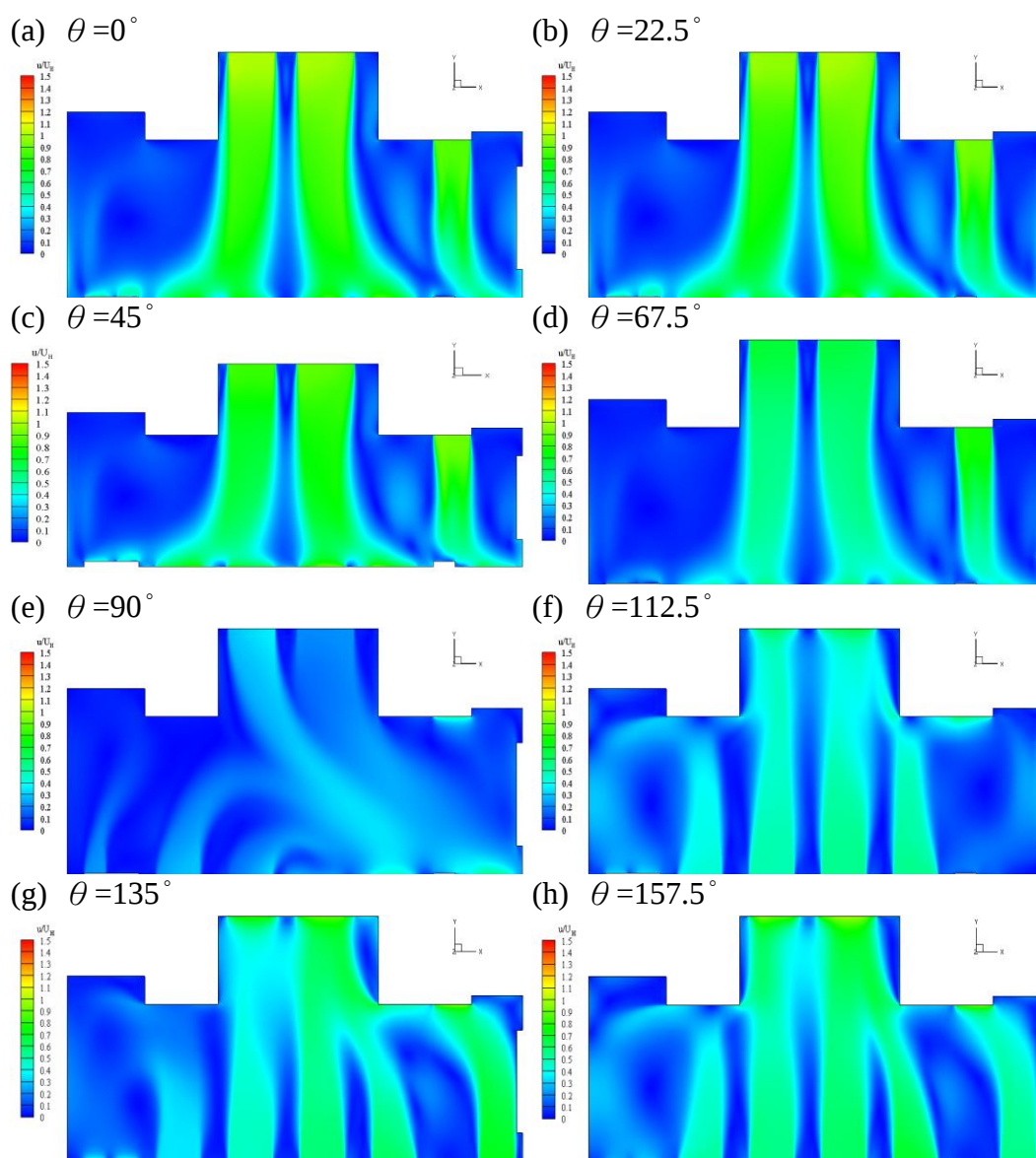


圖 4-16 關東側窗(CE)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I

資料來源：本研究繪製

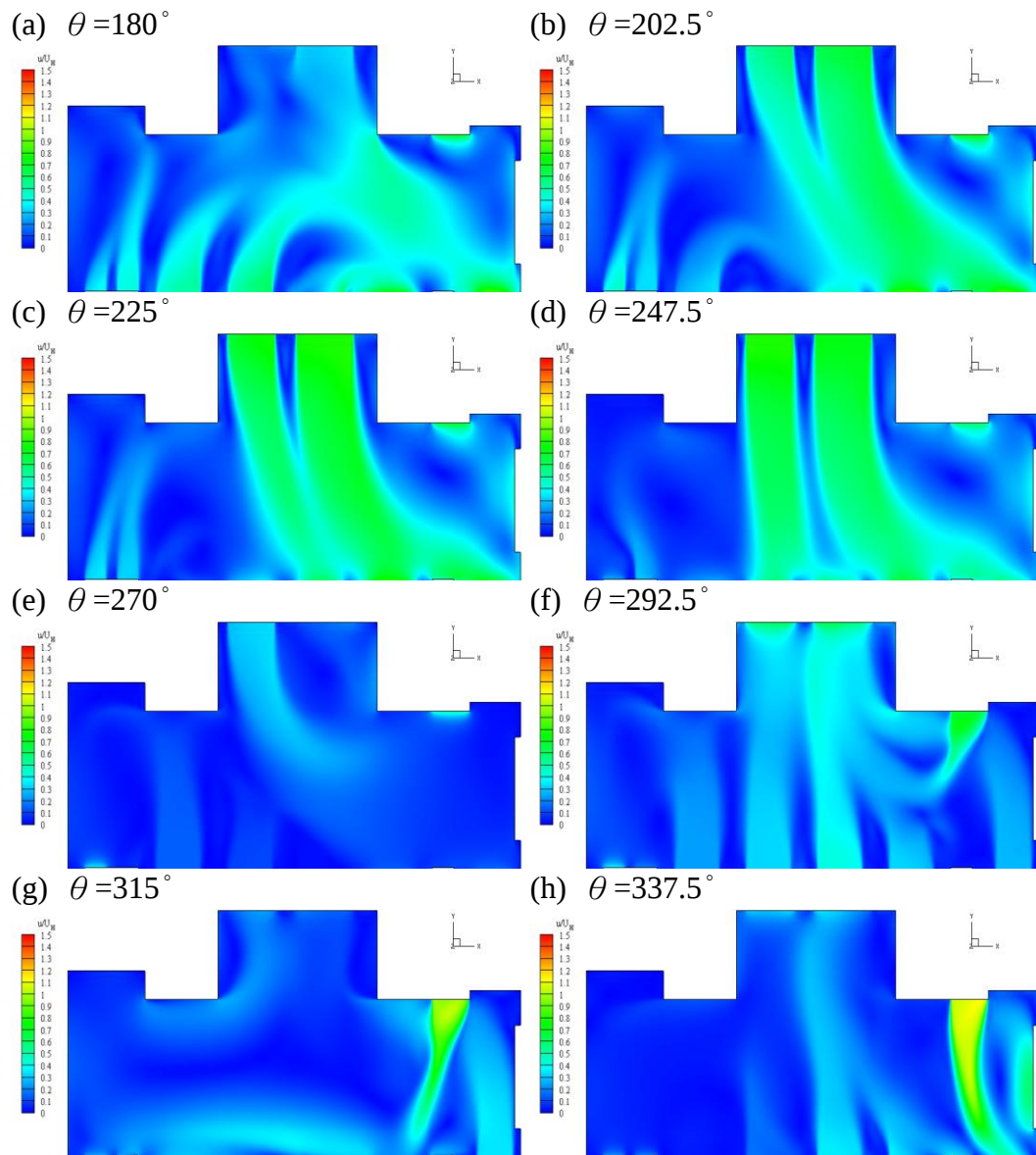


圖 4-17 關東側窗(CE)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II

資料來源：本研究繪製

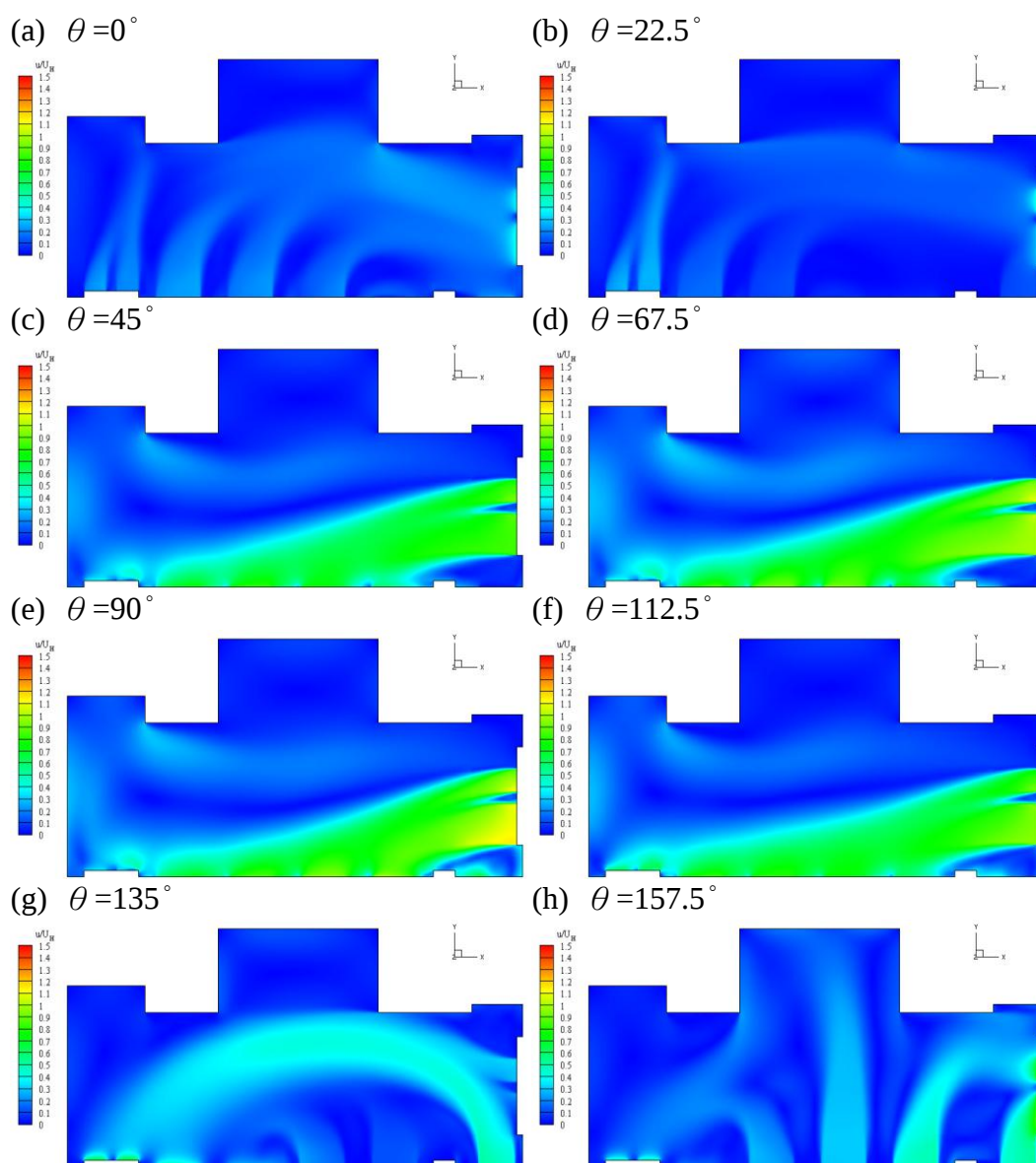


圖 4-18 關北側窗(CN)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I

資料來源：本研究繪製

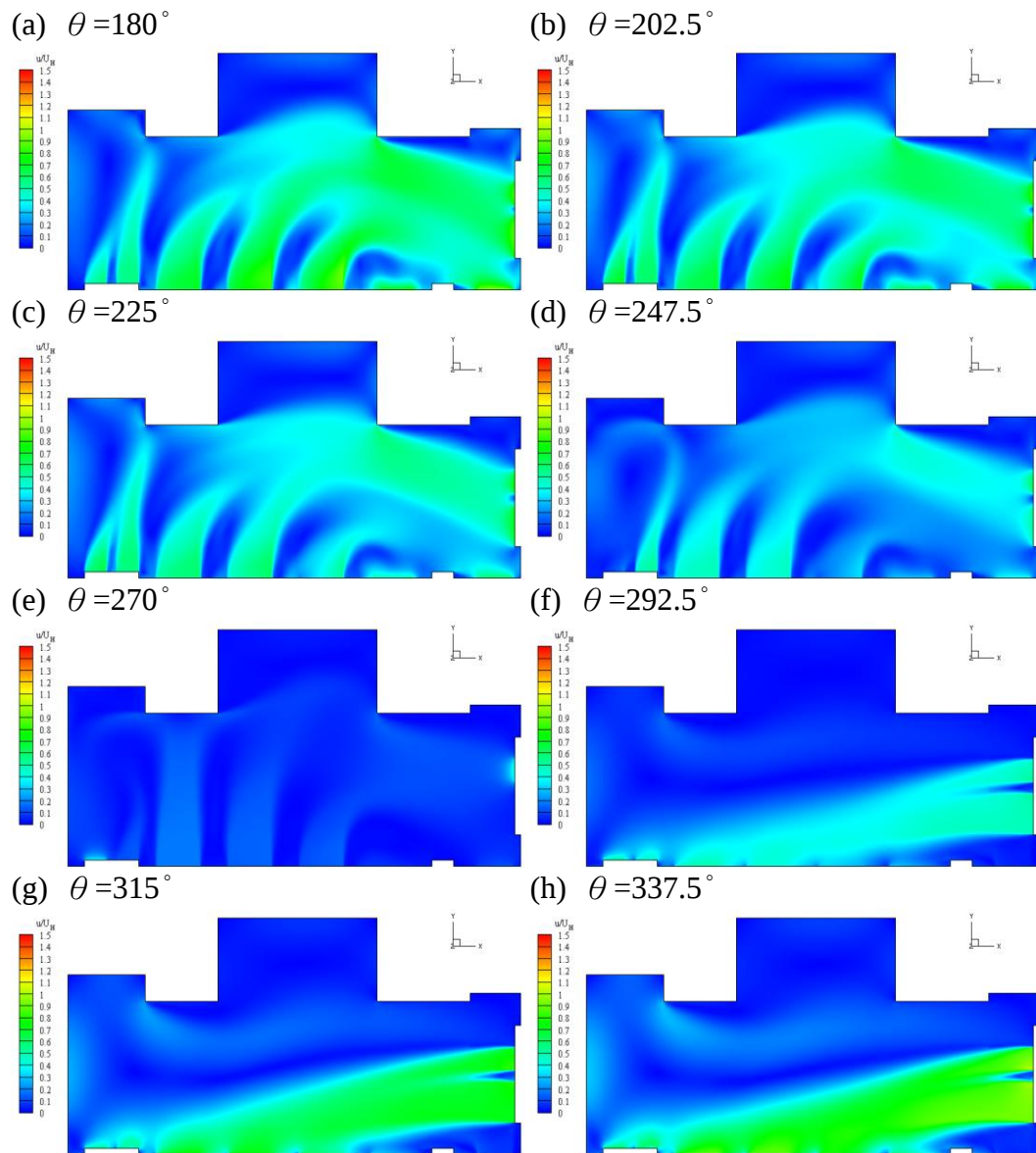


圖 4-19 關北側窗(CN)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II

資料來源：本研究繪製

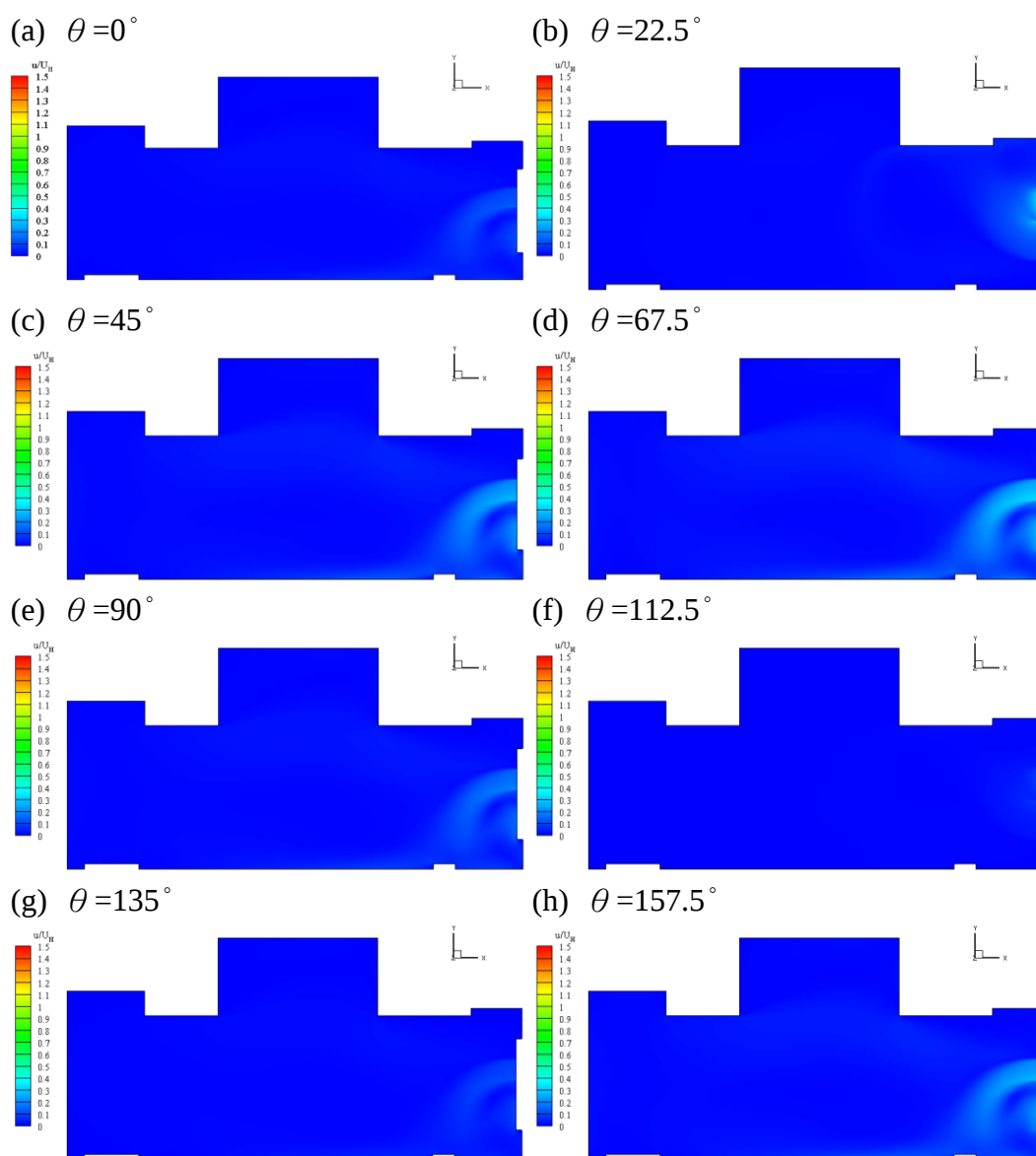


圖 4-20 開東側窗(OE)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I

資料來源：本研究繪製

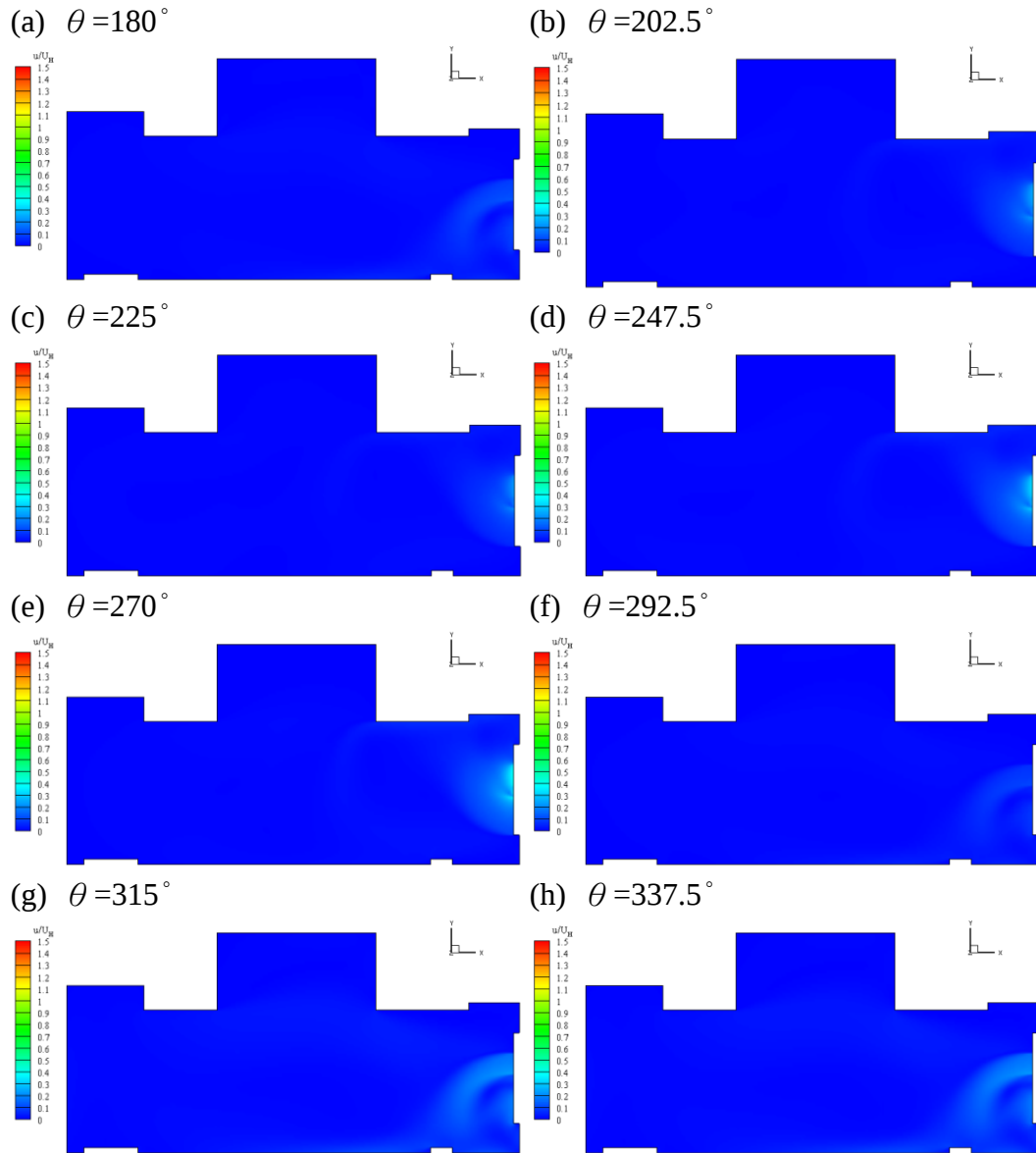


圖 4-21 開東側窗(OE)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II

資料來源：本研究繪製

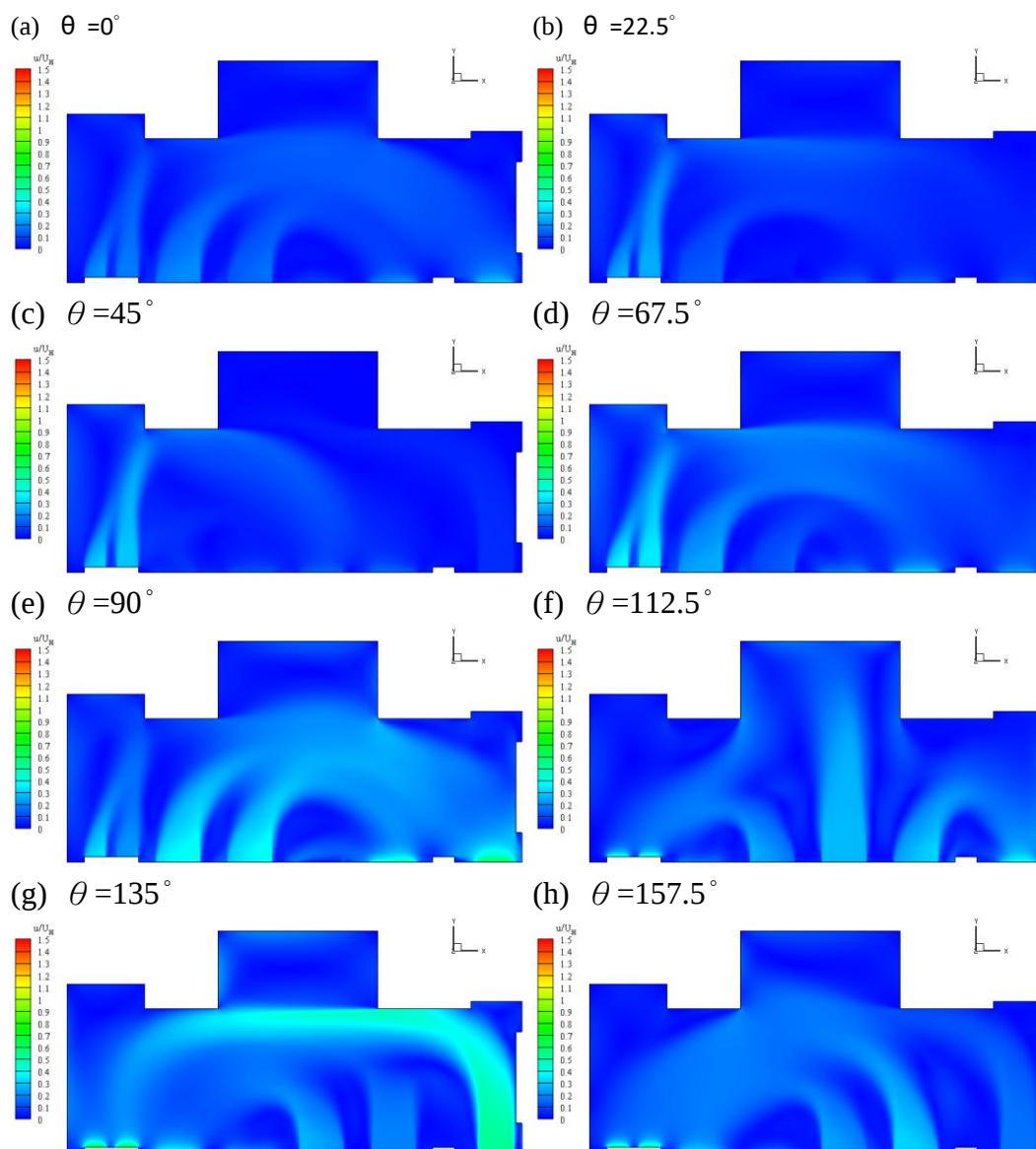


圖 4-22 開南側窗(OS)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I

資料來源：本研究繪製

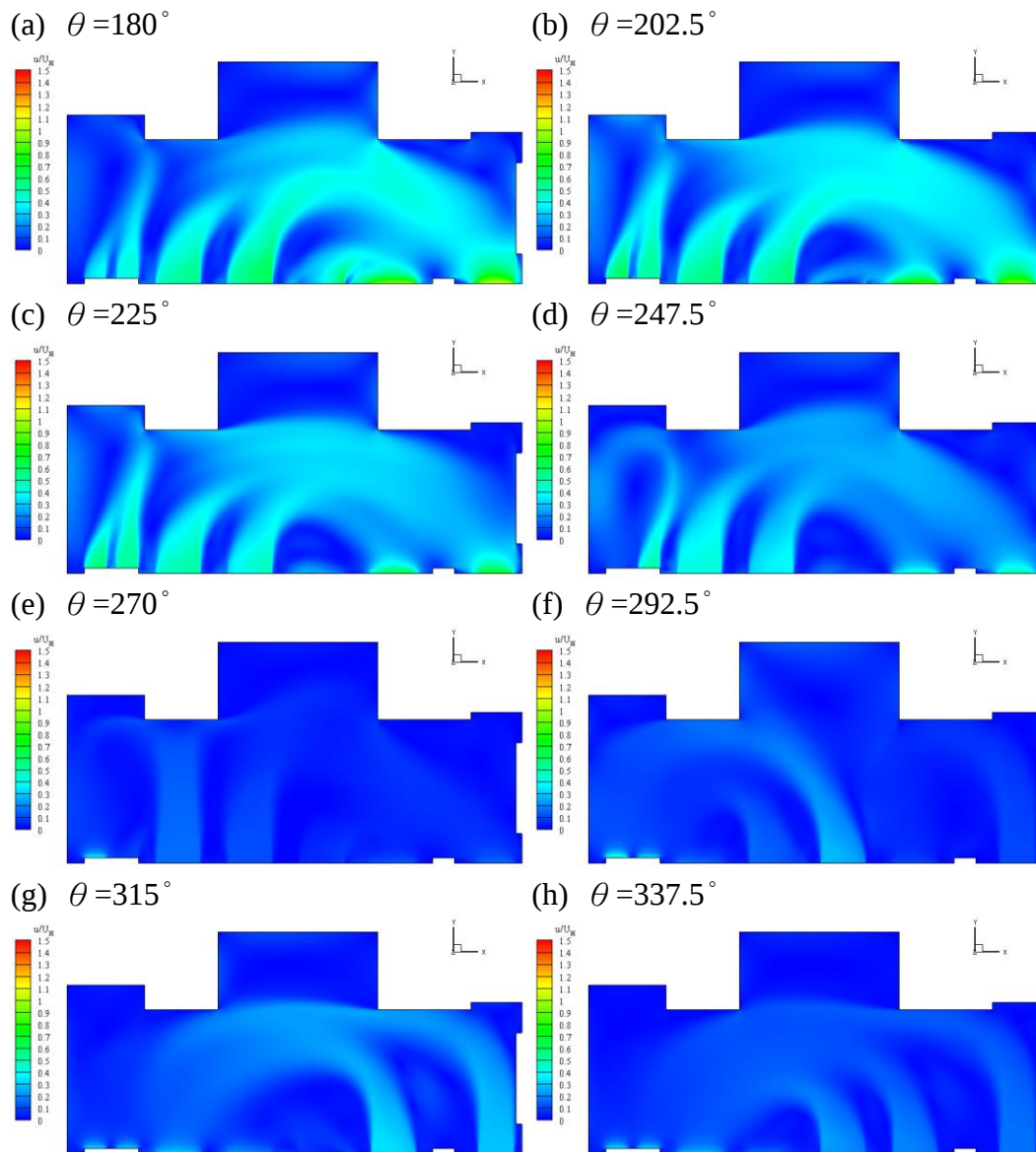


圖 4-23 開南側窗(OS)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II

資料來源：本研究繪製

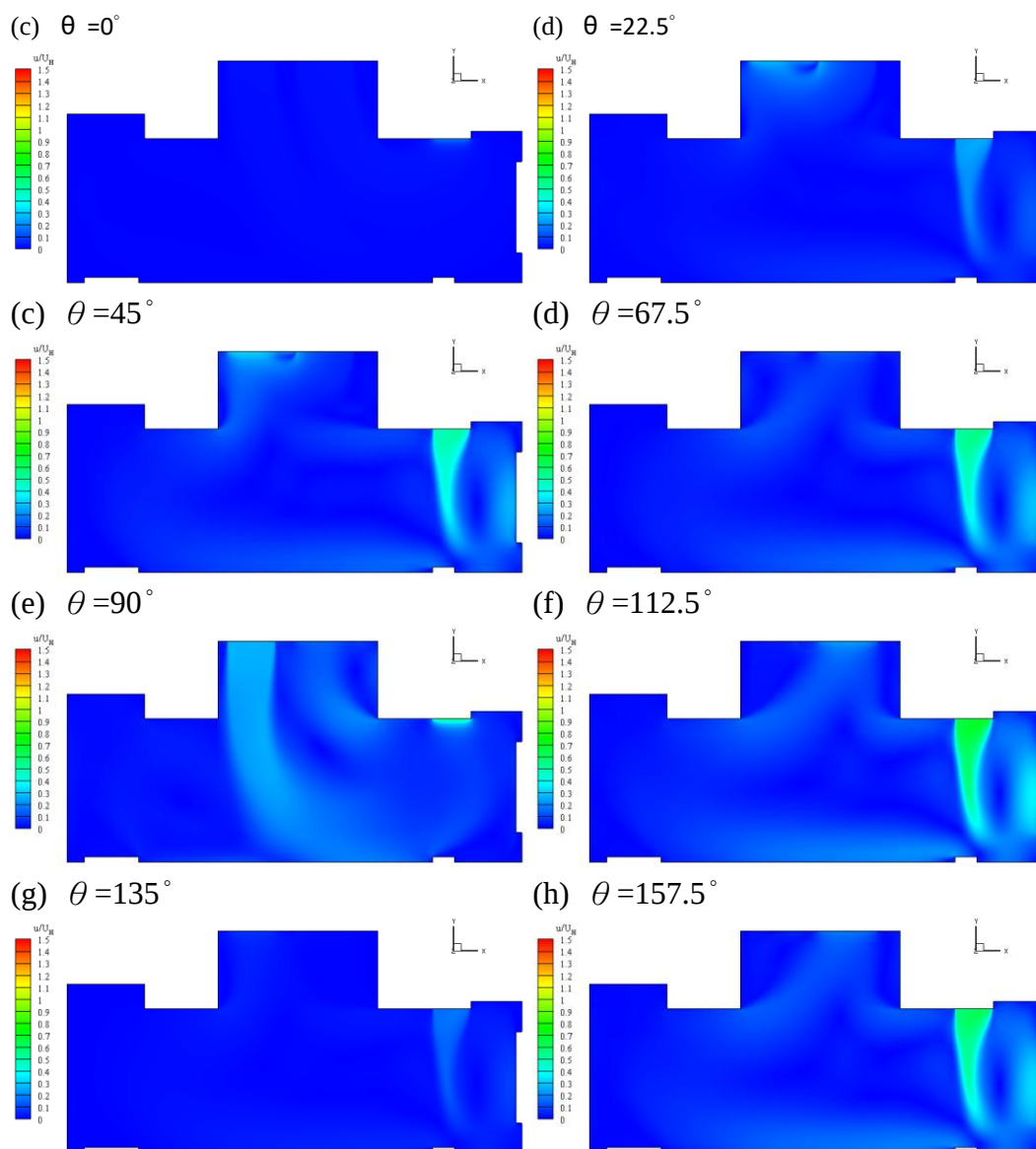


圖 4-24 開北側窗(ON)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 I

資料來源：本研究繪製

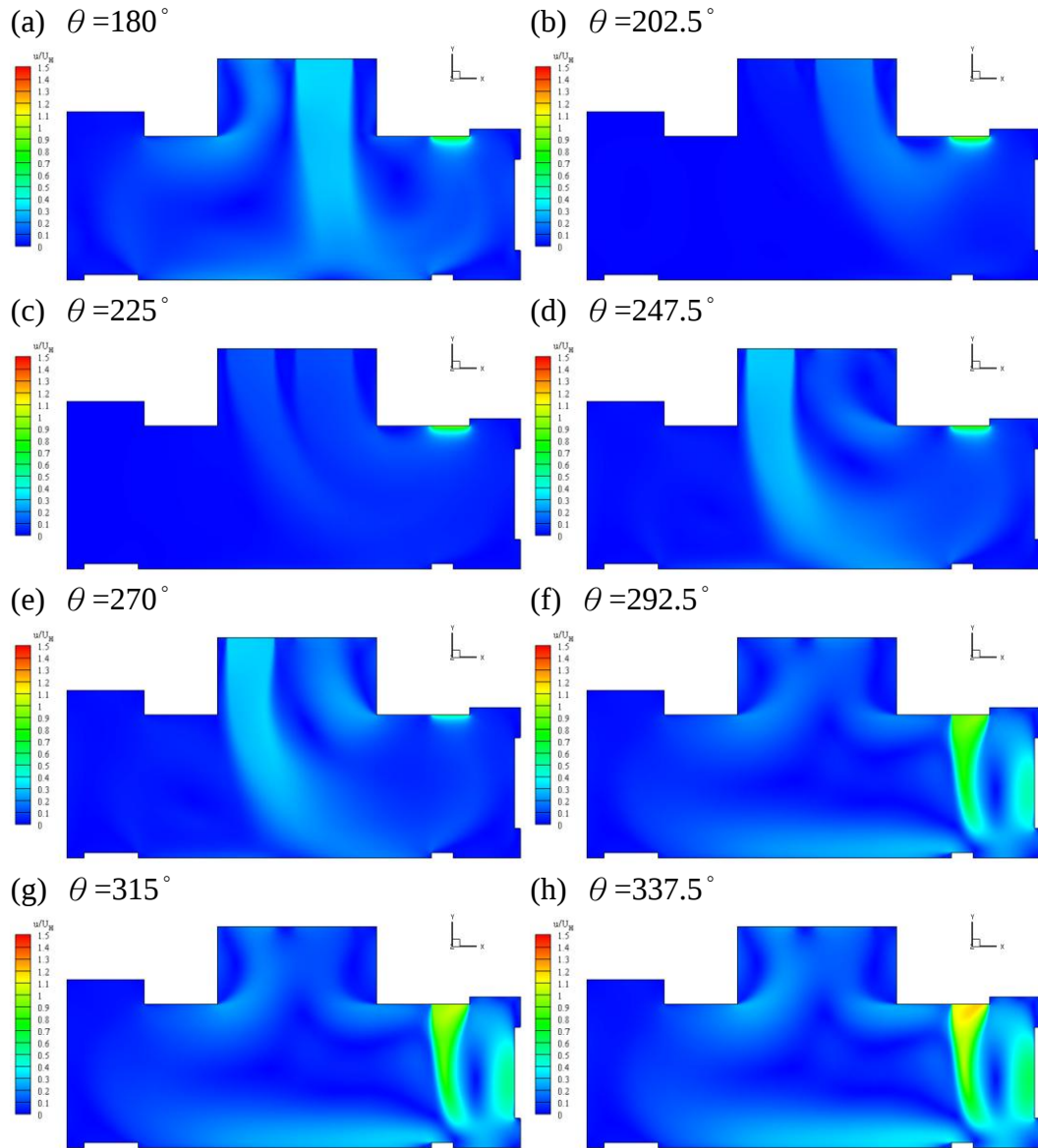


圖 4-25 開北側窗(ON)狀況下之 1.5m 高處平均風速等值圖 II

資料來源：本研究繪製

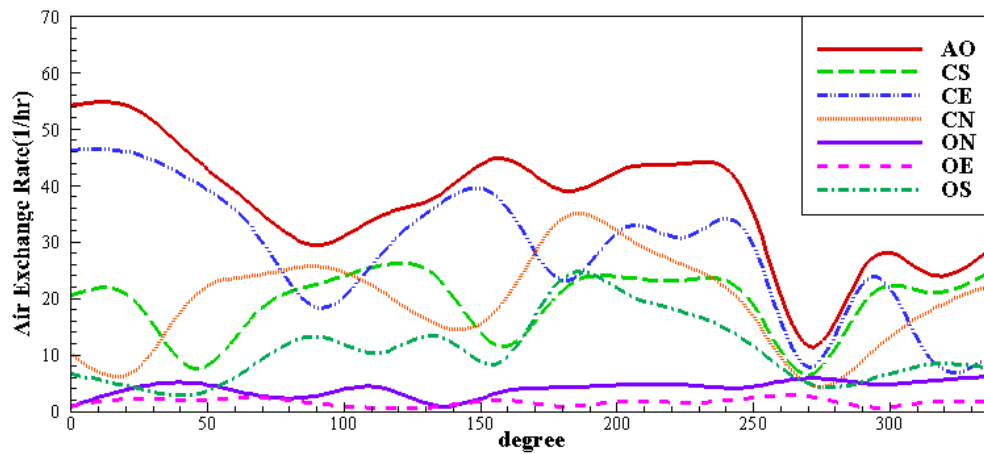


圖 5-26 不同風向下之換氣率

資料來源：本研究繪製

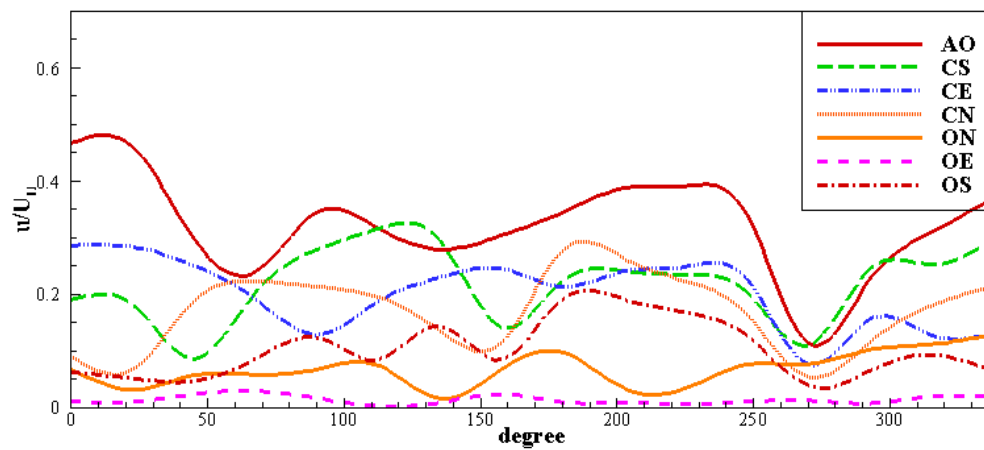


圖 5-27 不同風向下之無因次平均風速

資料來源：本研究繪製

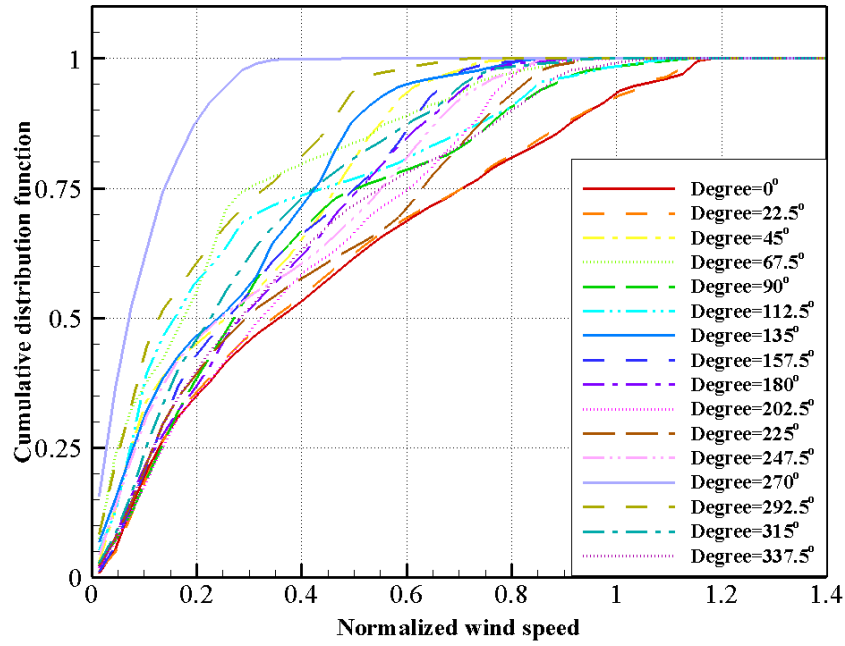


圖 5-28 無因次風速之累積機率分布(AO)

資料來源：本研究繪製

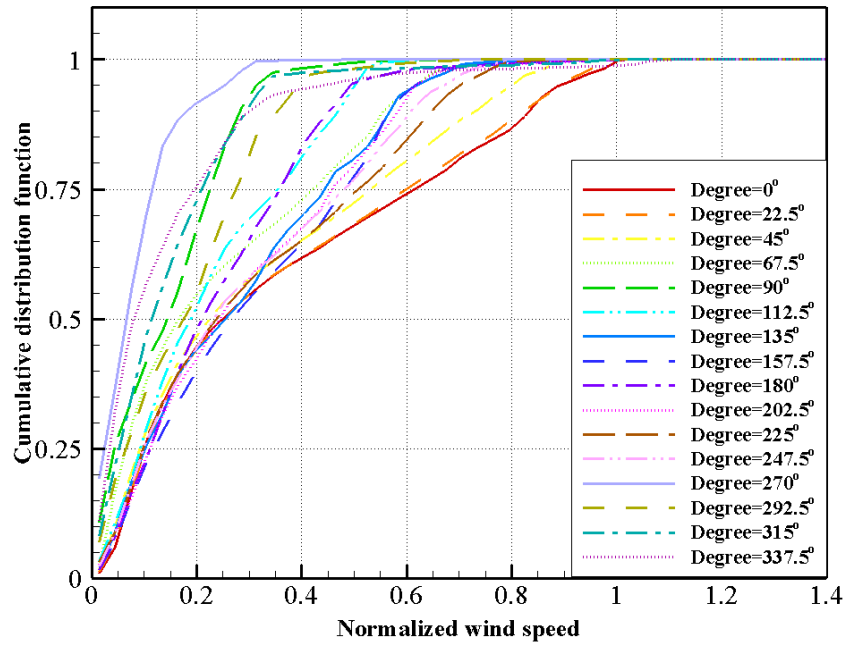


圖 5-29 無因次風速之累積機率分布(CE)

資料來源：本研究繪製

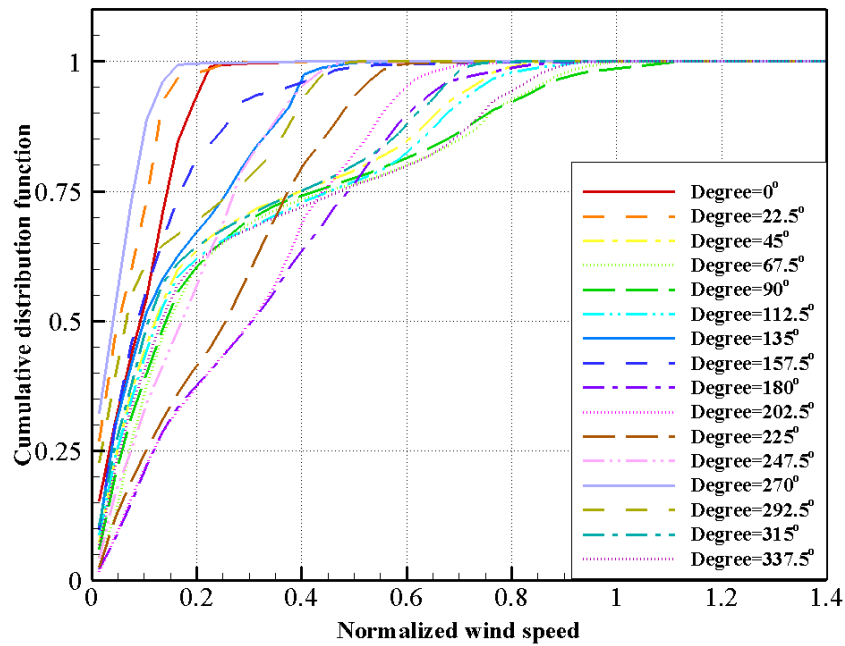


圖 5-30 無因次風速之累積機率分布(CN)

資料來源：本研究繪製

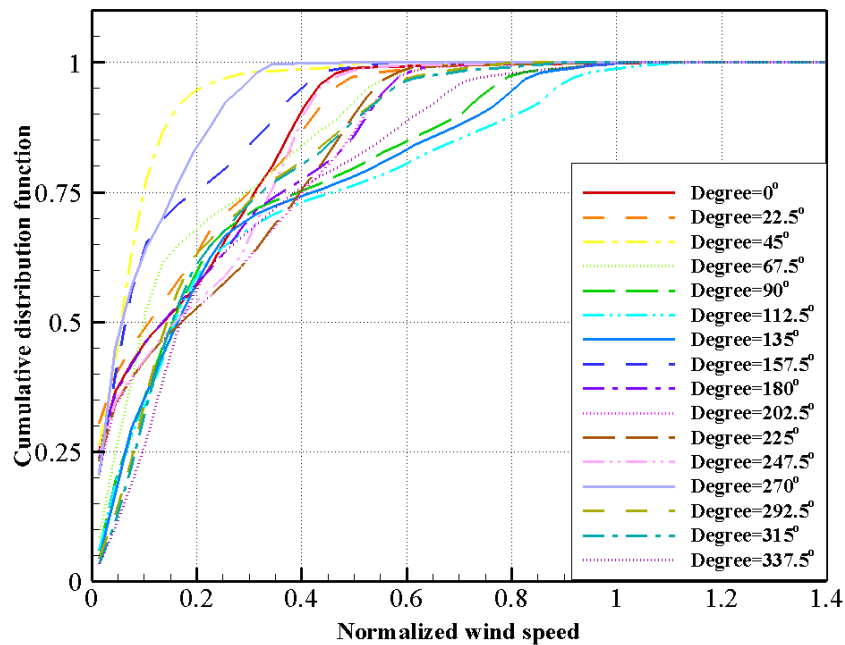


圖 5-31 無因次風速之累積機率分布(CS)

資料來源：本研究繪製

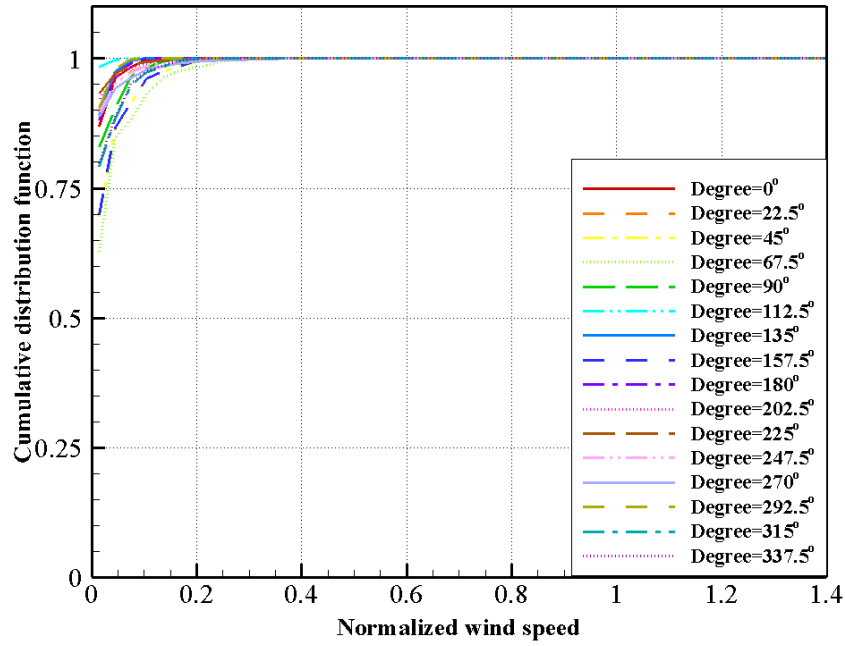


圖 5-32 無因次風速之累積機率分布(OE)

資料來源：本研究繪製

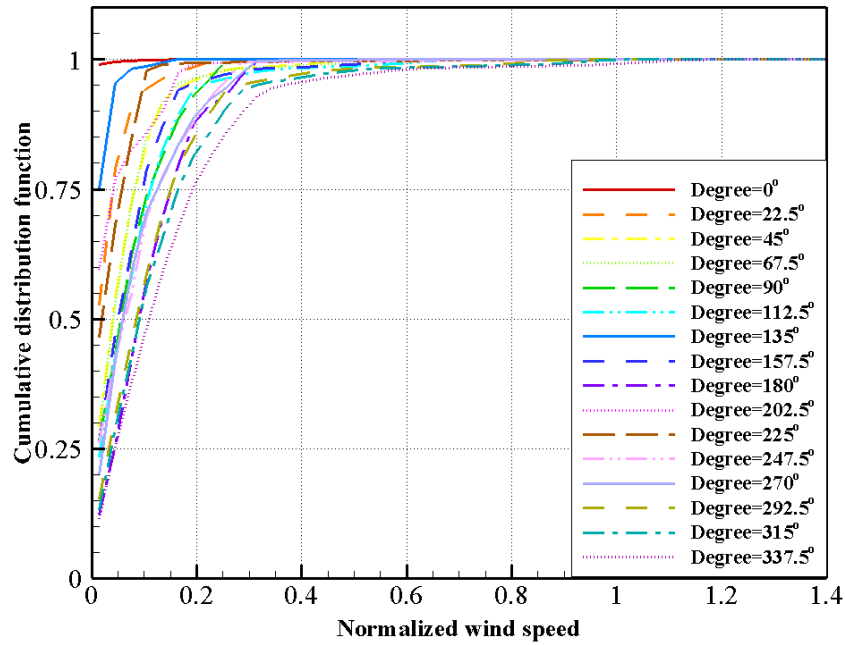


圖 5-33 無因次風速之累積機率分布(ON)

資料來源：本研究繪製

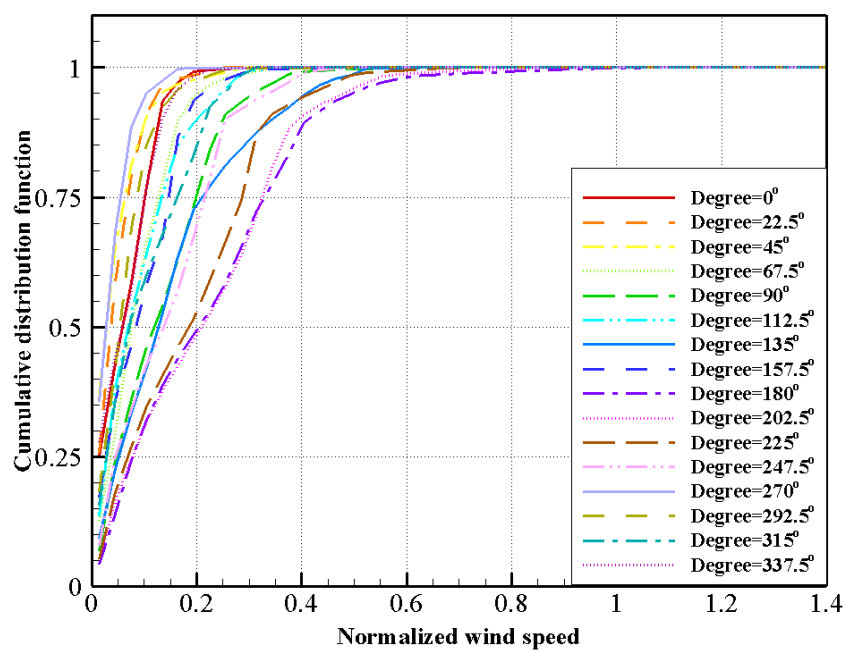


圖 5-34 無因次風速之累積機率分布(OS)

資料來源：本研究繪製

第六節 建物自然通風數值模型資料庫建制

在得到建物的 CFD 通風模擬結果後(圖 5-12~15)，可以得知在不同開窗模式下的室內平均風速值。而也為了使通風管理決策系統能根據第三章所提出之「建物室內通風最佳化決策模式」進行推估與決策建議，本研究將進一步將上述 CFD 模擬分析之數值儲存到資料庫中，以發揮後續資料管理及使用之效能。此外，由於通風決策系統必須將 CFD 的資訊顯示在建物 BIM 模型之中，因此在資料庫中也必須將 BIM 3D 模型與 CFD 模擬分析資料進行整合。圖 5-25 為上述資料庫整合之示意圖，主要夠過「建物自然通風數值模型資料庫」的設計，整合 CFD 模擬分析資料並串連 BIM 3D 模型資料。

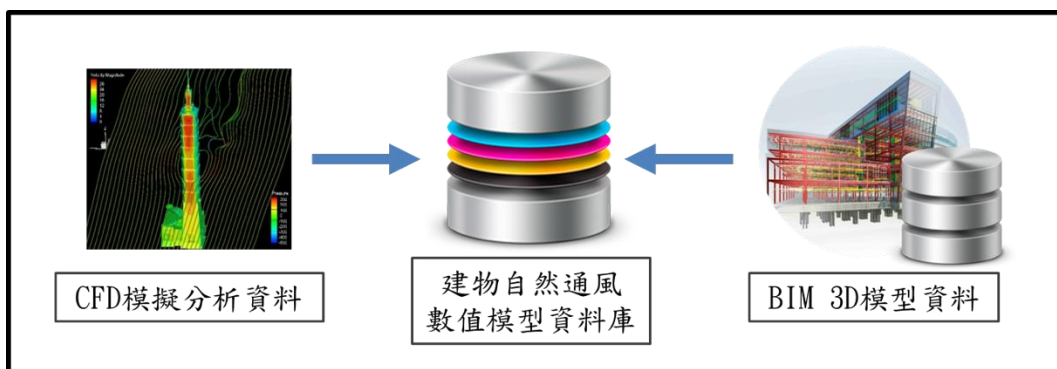


圖 5-35 建物自然通風數值模型資料庫架構圖

資料來源：本研究繪製

本架構選擇以 MySQL 資料庫系統作為「建物自然通風數值模型資料庫」架構之基礎，其主要原因為 MySQL 資料庫系統效能高、查詢速度快、可擴充性佳，是為業界常用的資料庫系統。

在此將以研究案例之既有 Revit 專案 BIM 3D 模型資料與 CFD 模擬分析資料為主要對象，透過建立一個能有效整合 BIM 3D 模型與 CFD 模擬分析資料之核心資料庫，串聯兩者資訊之核心項目，並以此為基礎，依照後續建築室內通風決策之需求擴充系統之資料庫，以利所有資訊之串聯。「建

物自然通風數值模型資料庫」主要包含：CFD 模擬分析資料、BIM 3D 模型資料兩部分，分述如下：

一、CFD 模擬分析資料：

根據本章第五節所得之室內自然通風模擬結果，以及第三章之自然通風決策模式，可知本研究所需的 CFD 模擬分析資料包括：室內通風組合(Si)、室外風向角(D)、室內平均通風風速(Um)，分述如下：

室內通風模式：根據第二節研究案例概述可知通風口共有三處，在扣除無法形成有效通風的模式後，室內通風模式共有 4 種，其分別為：全開(AO)，關北側窗(CN)，關東側窗(CE)，關南側窗(CS)。

室外風向角：根據第五節風洞試驗之設定每 22.5° 為間隔來分隔風向，故此處資料為 16 組風向角，其分別為：北、北北東、北東、東北東、東、東南東、南東、南南東、南、南南西、南西、西南西、西、西北西、北西、北北西。

室內平均通風風速：根據第三章之設計，室內平均通風風速為室內整個空間內之平均風速，本研究將圖 5-12 至 5-15 所得到平均風速等值圖轉化為整個空間內之平均風速。同時可從 5-12 至 5-15 中得知每一種室內通風模式(共 4 種)與每一組室外風向角(共 16 組)的組合皆會有一筆對應之室內平均通風風速。故室內平均通風風速共有 64 個。

二、BIM 3D 模型資料：

為了使 CFD 的結果能反應在 BIM 3D 模型中，建物自然通風數值模型資料庫也必須提供各 CFD 模擬分析資料所對應之建物空間資訊。根據上述之 CFD 模擬所需資料，其應實際對應的 BIM 空間資訊應僅包括各樓層平面及其通風窗口之物件。透過 CFD 中的室內通風組合與 BIM 模型中的通風窗口進行串聯，即可透過資料庫之操作快速求得各室內通風模式所對應之窗口樓層與位置。

為了將 Revit 建模軟體所建立之 BIM 3D 模型資料匯入本架構之 BIM 3D 模型資料庫中，根據本研究之 BIM 3D 模型資料匯入資料庫流程，如圖 5-26 所示，需於 Revit 建模軟體中透過 ODBC 的方式將資料匯入本研究所使用之 BIM 3D 模型資料庫中。

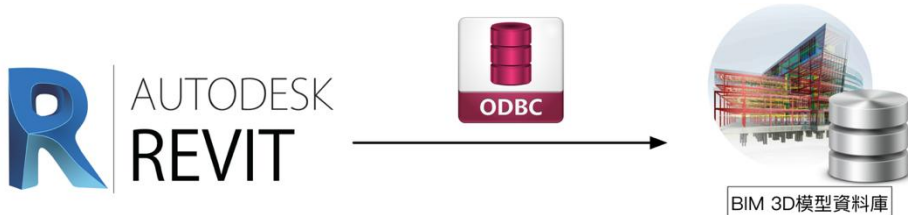


圖 5-36 Revit 模型資料匯入 BIM 3D 模型資料庫流程圖

資料來源：本研究繪製

依據上述資料分析之結果，建物自然通風數值模型資料庫之 ER-model 設計如圖 5-27 所示。各實體(entity)、屬性(attributes)及相關的關聯 (relationship)分述如下

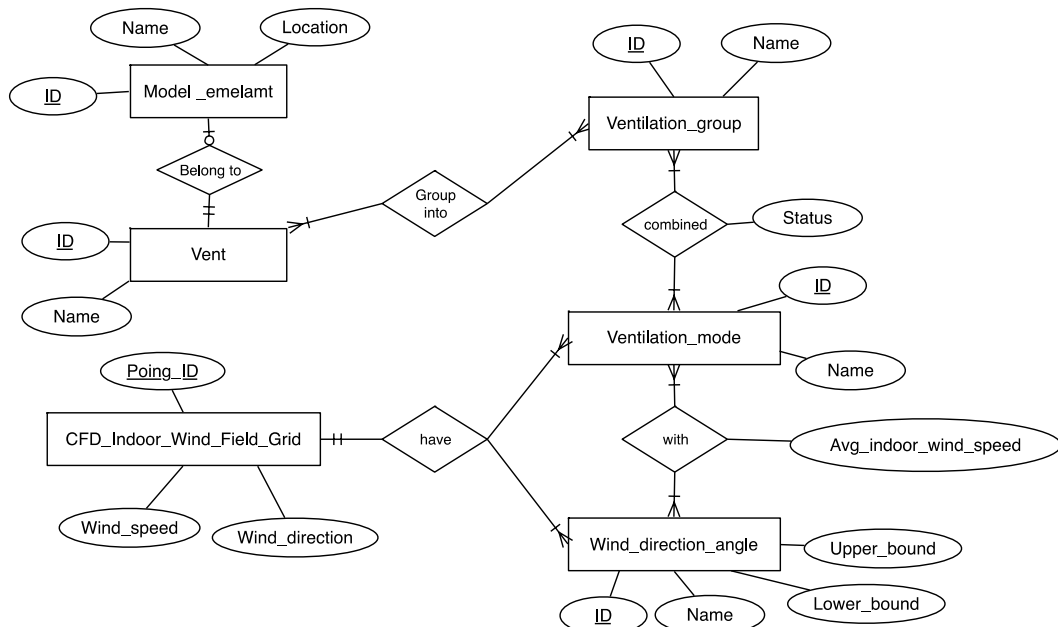


圖 5-37 建物自然通風數值模型資料庫實體關聯圖

資料來源：本研究繪製

實體(entity)：

建物自然通風數值模型資料庫中之實體分別為，「模型構件(Model_element)」、「通風口(Vent)」、「通風群(Ventilation_group)」、「風向角(Wind_direction_angle)」、「通風模式(Ventilation_mode)」、「CFD室內風場網格(Indoor_wind_field_grid)」。
故建物自然通風數值模型資料庫中，包括上述 model_element、vent、ventilation_mode、wind_direction_angle、ventilation_group、indoor_wind_field_grid 六張實體資料表(table)。

屬性(attributes)：

「模型構件(Model_element)」中包括構件 id，構件名稱以及構件所處之位置；「通風口(Vent)」中包括通風口 id 與通風口名稱；「通風群(Ventilation_group)」中包括通風群 id 與通風群之名稱；「風向角(Wind_direction_angle)」中包括了風向角 id、風向角之起始角度(Lower_bound angle)與終始角度(Upper_bound angle)及各風向角對應各通風模式之室內平均風速 (Avg_indoor_wind_speed)；「通風模式(Ventilation_mode)」中包括通風模式 id、名稱及此通風模式下各個通風群的開裝狀態(Status)。之室內平均通風風速。CFD 室內風場網格(Indoor_wind_field_grid)則包括各風向角在對應不同開窗模式時，透過預先 CFD 模擬分析所求得之室內風場網格各點之格點編號(Point_ID)、風向(Wind_speed)及風速(Wind_direction)。

第六章 建物自然通風決策系統

第一節 系統分析

根據第三章所擬訂之室內自然通風決策模式，此章節整合上述室外風場物聯網量測裝置、室內物聯網監測裝置及各資料庫之成果，實作「建物自然通風決策系統」，讓使用者能夠使用在個人電腦及行動裝置可執行之應用程式了解建築物的室內通風情況並取得最佳化通風決策方案。為此，本研究利用使用案例圖(Use Case Diagram)進行「建物自然通風決策系統」功能之分析。如圖 6-1 所示，建物自然通風決策系統主要功能分別包括：(1)PMV 參數設定、(2)PMV 之開窗建議、(3)體感溫度之開窗建議三個主要功能。各功能之細部功能分述如下：

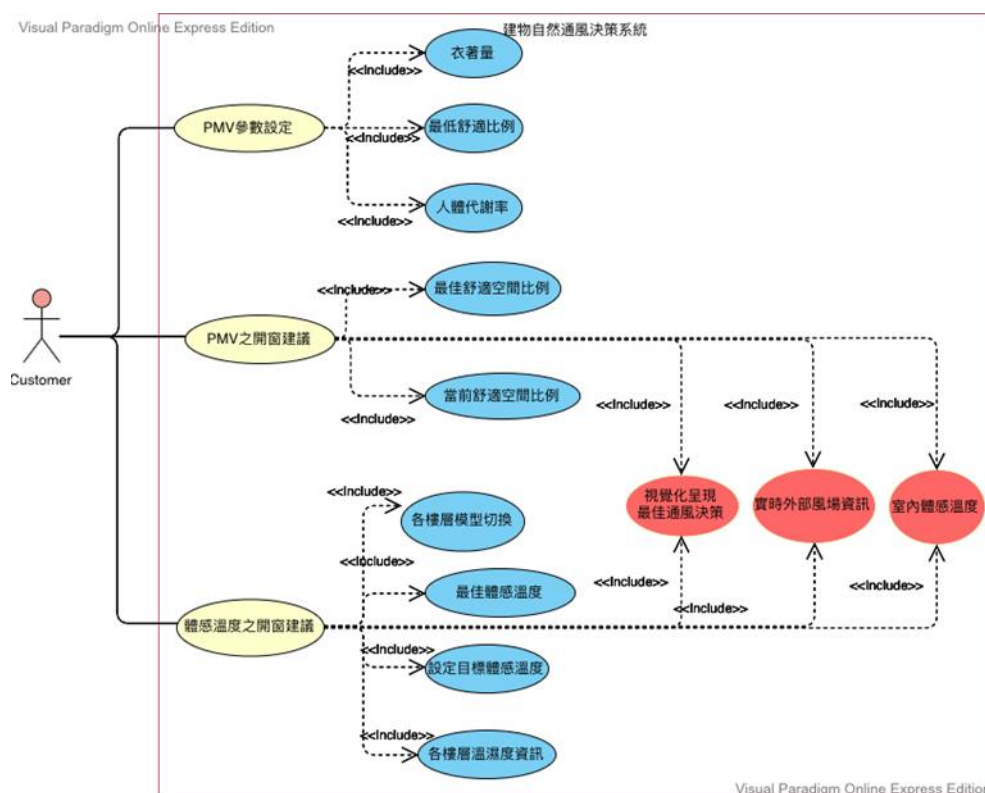


圖 6-1 建物自然通風決策系統使用案例圖

資料來源：本研究繪製

一、PMV 參數設定

提供使用者根據室內環境的使用方式，選擇符合的 PMV 設定參數，使 PMV 之計算更能符合使用者現況與需求。其設定功能包括：

1. 衣著量設定：衣著量設定包括對上身和下身衣著的設定
2. 最低舒適比例：舒適比例是 PMV 值在-1.5~1.5 之間的空間所佔的比例，最低舒適比例就是使用者想要的最低的舒適空間比例
3. 人體代謝率：在不同運動狀態下的人體代謝率會有所不同，通過選擇活動方式來估算人體代謝率

Clothing Description	Garments Included [†]	I_{cl} , (clo)
Trousers	1) Trousers, short-sleeve shirt	0.57
	2) Trousers, long-sleeve shirt	0.61
	3) #2 plus suit jacket	0.96
	4) #2 plus suit jacket, vest, T-shirt	1.14
	5) #2 plus long-sleeve sweater, T-shirt	1.01
	6) #5 plus suit jacket, long underwear bottoms	1.30
Skirts/Dresses	7) Knee-length skirt, short-sleeve shirt (sandals)	0.54
	8) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, full slip	0.67
	9) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, long-sleeve sweater	1.10
	10) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, suit jacket	1.04
	11) Ankle-length skirt, long-sleeve shirt, suit jacket	1.10
Shorts	12) Walking shorts, short-sleeve shirt	0.36
Overalls/Coveralls	13) Long-sleeve coveralls, T-shirt	0.72
	14) Overalls, long-sleeve shirt, T-shirt	0.89
	15) Insulated coveralls, long-sleeve thermal underwear tops and bottoms	1.37
Athletic	16) Sweat pants, long-sleeve sweatshirt	0.74
Sleepwear	17) Long-sleeve pajama tops, long pajama trousers, short 3/4 length robe (slippers, no socks)	0.96

圖 6-2 PMV 衣著量參數圖

資料來源：Wikipedia

Activity	Metabolic Rate		
	Met Units	W/m ²	(Btu/h·ft ²)
Resting			
Sleeping	0.7	40	(13)
Reclining	0.8	45	(15)
Seated, quiet	1.0	60	(18)
Standing, relaxed	1.2	70	(22)
Walking (on level surface)			
0.9 m/s, 3.2 km/h, 2.0 mph	2.0	115	(37)
1.2 m/s, 4.3 km/h, 2.7 mph	2.6	150	(48)
1.8 m/s, 6.8 km/h, 4.2 mph	3.8	220	(70)
Office Activities			
Reading, seated	1.0	55	(18)
Writing	1.0	60	(18)
Typing	1.1	65	(20)
Filing, seated	1.2	70	(22)
Filing, standing	1.4	80	(26)
Walking about	1.7	100	(31)
Lifting/packing	2.1	120	(39)
Driving/Flying			
Automobile	1.0–2.0	60–115	(18–37)
Aircraft, routine	1.2	70	(22)
Aircraft, instrument landing	1.8	105	(33)
Aircraft, combat	2.4	140	(44)
Heavy vehicle	3.2	185	(59)
Miscellaneous Occupational Activities			
Cooking	1.6–2.0	95–115	(29–37)
House cleaning	2.0–3.4	115–200	(37–63)
Seated, heavy limb movement	2.2	130	(41)
Machine work			
sawing (table saw)	1.8	105	(33)
light (electrical industry)	2.0–2.4	115–140	(37–44)
heavy	4.0	235	(74)
Handling 50 kg (100 lb) bags	4.0	235	(74)
Pick and shovel work	4.0–4.8	235–280	(74–88)
Miscellaneous Leisure Activities			
Dancing, social	2.4–4.4	140–255	(44–81)
Calisthenics/exercise	3.0–4.0	175–235	(55–74)
Tennis, single	3.6–4.0	210–270	(66–74)
Basketball	5.0–7.6	290–440	(90–140)
Wrestling, competitive	7.0–8.7	410–505	(130–160)

圖 6-3 PMV 人體代謝率參數圖

資料來源：Wikipedia

二、PMV 之開窗建議:

提供使用者在最佳舒適空間比例下的開窗模式，使使用者獲得更好的舒適環境

1. 最佳舒適空間比例:通過實時室外風場資訊、衣著量、最低舒適比例、人體

代謝率的設定，計算出舒適空間比例最高的比例

2. 當前舒適空間比例:通過當前的開窗模式以及室外風場資訊、衣著量、最低舒適比例、人體代謝率的設定，計算出當前的舒適空間舒適空間比例

三、體感溫度之開窗建議

提供使用者根據所設定的目標體感溫度獲得最佳開窗模式，使使用者獲得想要的體感溫度。

1. 各樓層之間切換:通過各樓層的按鈕，可以切換各個樓層的模型以及對應的外部風場資訊等；
2. 設定目標體感溫度:通過設定目標體感溫度，進而通過計算出最佳的開窗模式；
3. 最佳體感溫度:通過室外風場資訊計算出最佳的體感溫度；
4. 各樓層溫濕度資訊:顯示各個樓層的溫濕度資訊。

第二節 系統設計

本節將根據下圖 6-2 所示之系統架構進行「建物自然通風決策系統」設計，並根據上節系統功能需求分析之結果進行應用程式功能之設計，確認各功能之細節、事件所發生之先後順序及功能間之互動模式與行為。以下將詳細說明各項之內容。

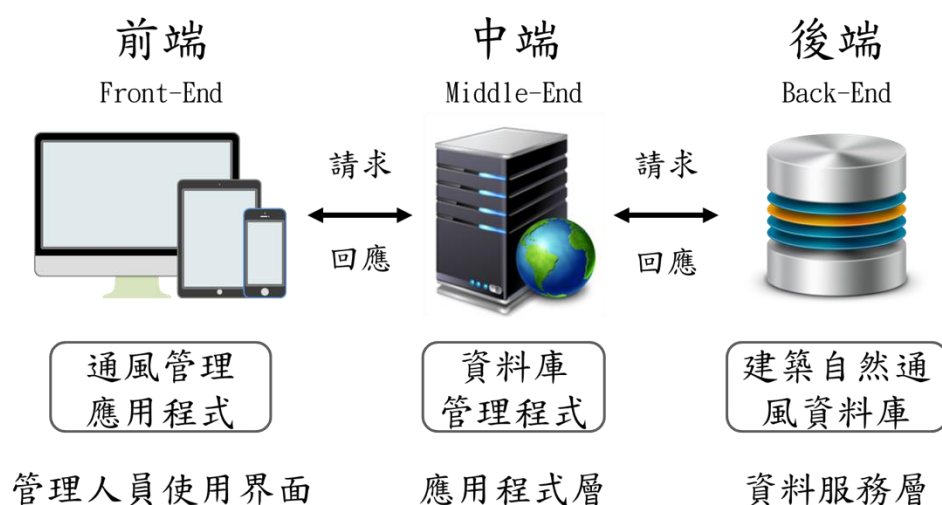


圖 6-4 建物自然通風決策系統架構圖

資料來源：本研究繪製

一、建築自然通風資料庫

為了有效地整合「建物自然通風決策系統」所需之模擬分析資料、空間模型資料與實場量測資料，除第五章第五節中通過整合既有 BIM 3D 模型資料與 CFD 模擬分析資料所得到之「建物自然通風數值模型資料庫」，本研究還將第三章所建立之「建物實場環境資料庫」與其整合，建立「建物自然通風資料庫」，如圖 6-4 所示。

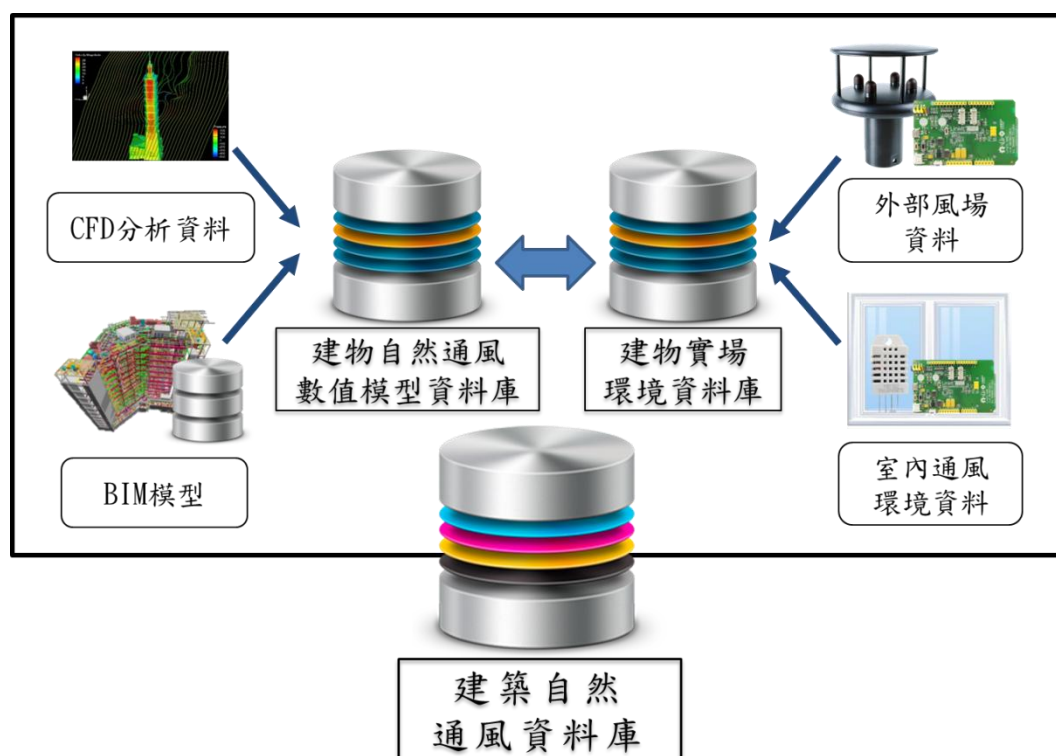


圖 6-5 建物自然通風資料庫架構圖

資料來源：本研究繪製

二、通風管理應用程式設計

本節將根據第六章第一節「建物自然通風決策系統」功能需求分析之結果，進行其功能之設計，主要將利用循序圖進行「建物自然通風決策系統」功能之設計，清楚地了解各資訊的呈現目的，以利後續系統實作時參考使用並能夠清晰地掌握各功能之細節，分別為：實時外部風場資訊顯示、各樓層室內溫濕度資訊顯示、室內體感溫度顯示、設定目標體感溫度、各樓層模型切換、視覺化呈現最佳化通風決策，共六種功能。以下將根據各功能進行功能設計之說明。

三、PMV 參數設定

PMV 參數設定功能主要目的是可以讓維護管理人員可以通過自己的實際情況去設置當前的衣著量、人體代謝率、最低舒適空間比例，通過這個設定，應用程式把這些資料上傳到資料庫。

四、PMV 下之開窗建議

PMV 下之開窗建議功能主要目的是為讓建物維護管理人員可以在「建物自然通風決策系統」之「PMV」界面中直接看到目前的開窗模式下外部實時風速、風向、溫濕度資訊，最主要的是可以看到在此開窗模式下的舒適空間比例，通過「參數設定」之衣著量、人體代謝率和最低舒適空間比例得出最佳舒適空間比例。因此應用程式將透過「資料管理程式」，進而讀取「建物自然通風資料庫」中的實時外部風場資訊，最佳舒適空間比例通過第三章第二節之計算方式計算得出。

五、設定最低舒適比例

設定最低舒適比例功能主要目的是為了讓建築物維護管理人員可以在「建物自然通風決策系統」之「PMV 參數設定」中設定使用者最低的接受比例，進而把數據匯入「建物自然通風資料庫」。

六、最佳舒適空間比例

最佳舒適空間比例功能主要目的是為了讓建築物維護管理人員可以通過參數的設定和當前室外風場資訊而計算出最佳的舒適空間比例。因此應用程式將透過請求「資料管理程式」，進而讀取「建物自然通風資料庫」中的實時外部風場資訊，通過第三章第三節所提之室內最佳開窗配置推估方法，得到最佳化通風決策

七、當前舒適空間比例

當前舒適空間比例功能主要目的是為讓建築物維護管理人員可以在「建物自然通風決策系統」之「PMV」中可以直觀的看到在當前的室外風場下，當前的開窗模式下的舒適空間比例。因此應用程式將透過請求「資料管理程式」進而讀取「建物自然通風資料庫」中的實時外部風場資訊，再根據 3.2 節之計算方式計算出當前的舒適空間比例

八、體感溫度之開窗建議

體感溫度之開窗建議功能主要目的是為讓建築物維護管理人員可以在

「建物自然通風決策系統」之「體感溫度之開窗建議」中直接看到各個樓層的溫濕度資訊、外部風場，也可以設定目標之體感溫度進而計算出最佳的開窗模式。因此應用程式將透過「資料管理程式」，進而讀取「建物自然通風資料庫」中的實時外部風場資訊，最佳舒適空間比例通過第三章第一節之計算方式計算得出。

九、實時外部風場資訊顯示

實時外部風場資訊顯示功能主要目的為讓建築物維護管理人員可以在「建物自然通風決策系統」主界面中直接查看外部實時風速、風向、溫濕度以及懸浮顆粒資訊，進而了解實時之外部風場資訊。因此應用程式將透過請求「資料管理程式」，進而讀取「建物自然通風資料庫」中的實時外部風場資訊。

十、各樓層室內溫濕度資訊顯示

各樓層室內溫濕度資訊顯示功能，通過在「建物自然通風決策系統」主界面中顯示各個樓層的室內實時溫濕度，使建築物維護管理人員可以直觀了解各樓層的室內環境資訊，進而達到建築全樓層通風管理之目的。因此應用程式同樣將透過請求「資料管理程式」，進而讀取「建物自然通風資料庫」中的實時室內環境資訊。

十一、室內體感溫度顯示

室內體感溫度作為「建物自然通風決策系統」做出通風決策之主要參數，也為建築使用者最直觀之感受指標。故室內體感溫度顯示顯示功能，通過在各個樓層模型中顯示其室內實時體感溫度，使建築使用者可以直觀地了解當前樓層之舒適程度。根據第三章第二節所闡述，室內實時體感溫度需根據當下室外風場、建築物通風口開閉狀態及室內溫濕度推算得出。故應用程式同樣將透過請求「資料管理程式」，進而讀取「建物自然通風資料庫」中的實時室內外環境資訊，再根據第三章所設定之室內即使體感溫度估算方法計算得出。

十二、設定目標體感溫度

通過在樓層界面中輸入目標體感溫度，將其成為室內最佳開窗配置之參考依據，通過第三章第三節所提之室內最佳開窗配置推估方法，得到最佳化通風決策。

十三、各樓層模型切換

為了讓建築物維護管理人員和建築使用者更好地掌握各樓層之室內通風環境與舒適程度，通過各樓層切換之功能將界面切換至任一樓層的 3D 模型中，進而了解當前樓層的室內通風情況與舒適程度，並得到視覺化的最佳化通風決策。

十四、視覺化呈現最佳化通風決策

為了可以讓建築護管理人員和建築使用者可以在設定目標體感溫度的方式後，得到最佳的通風決策，視覺化呈現最佳化通風決策功能通過輸入目標體感溫度，在「建物自然通風資料庫」查詢出最接近目標體感溫度之通風決策，以及對窗戶 id，在樓層模型的通風口處通過改變顏色的方式，以視覺化的形式呈現最佳化通風決策。

十五、系統可擴充性和相容性

(1) 建築模型

從本系統所涉及的建築模型看，在未來，我們只要匯入需要使用本系統的建築模型，就可以繼續使用這個系統。

(2) 資料庫

從資料庫看，我們在設計與系統相關的資料庫時都有考慮到其在未來的擴充性，各個資料表的獨立性和相關性都充分考慮設計。

第三節 系統實作

本研究將根據上一節圖 6-2 所示之建物自然通風決策系統架構圖進行系統實作，「通風管理應用程式」主要設計於 Unity 遊戲引擎，將 BIM 3D 模型進行再使用，搭配 Unity 遊戲引擎與 C# 程式語言，並透過網路的連線即時讀取建築自然通風資料庫中之通風資訊，並發佈為個人電腦及行動裝置可執行之應用程式，而本研究建立「建物自然通風決策系統」之開發環境，如表 6-1 所示。

表 6-1 建物自然通風決策系統之開發環境

Operation System	 Windows 10	Windows 10 (x64)
BIM Model		Autodesk Revit 2018
Developing Tool		Unity 2018.3.14f1
		Visual Studio Code 1.27.2
		FileZilla 3.42.1
Server		Apache 2.4.6
Database		6.3.9-MySQL

資料來源：本研究整理

確定系統開發環境與開發架構後，接下來將進行「建物自然通風決策系統」之實作，本研究將透過 Unity 遊戲引擎結合完成前處理之 BIM 3D 模型進行應用程式開發，分別依照其三層式架構中的使用者介面層、應用

程式層、資料服務層，依序進行實作，開發「建物自然通風決策系統」之目的。以下將詳細說明各項之內容。

一、資料服務層

建築自然通風資料庫之 MySQL 資料庫系統主要架設在 Apache 伺服器下，並透過 MySQL Workbench 資料庫管理軟體進行資料的管理與維護。本階段將使用本章第二節所設計之「建物自然通風資料庫」作為「建物自然通風決策系統」之資料庫。

二、應用程式層

「建物自然通風決策系統」之應用程式層主要使用 Apache 網頁伺服器，透過在網頁伺服器上建立 PHP 程式語言處理通風管理應用程式之請求，對後端建築自然通風資料庫執行相對應之工作，使用者在操作應用程式時依據各功能操作需求針對後端資料庫之資料進行讀取。本研究在 Apache 網頁伺服器中建置了 outdoorInformation_search.php、indoorInformation_search.php、somatosensoryTemperature_calculation.php、optimizationDecision_search.php，共四個的 PHP 程式語言，其個別負責之功能如表 6-2 所示。

表 6-2 系統 PHP 程式語言功用說明

程式名稱	功能
outdoorInformation_search.php	負責查詢實時外部風場資訊之功能
indoorInformation_search.php	負責查詢各樓層實時室內環境資訊之功能
somatosensoryTemperature_calculation.php	負責以查詢到之查詢到之室外風向、風向與室內通風口狀態為依據，查詢當前室內通風速率，並與查詢到之室內溫濕度資訊組合計算，得到室內體感溫度
optimizationDecision_search.php	負責送出使用者輸入之目標體感溫度，以查詢得到之室外風速、風向與室內溫濕度為依據，查詢最接近目標體感溫度之決策

資料來源：本研究整理

三、使用者介面層

此層級負責提供使用者一合適之系統圖形介面，使系統使用者以方便

簡易之方式操作「通風管理應用程式」。主要實作畫面及其操作說明如下：

1. 系統主頁

進入系統會看到建築自然通風決策系統首頁（如圖 6-3 所示），下方對應著 6-1 圖中所應包括之三個主要功能：(1)PMV 參數設定、(2)體感溫度以及(3)PMV。使用者在初次使用該系統時須先使用「PMV 參數設定」功能先行設定主要參數。



圖 6-6 建物自然通風決策系統主介面

資料來源：本研究繪製

2. PMV 參數設定：

根據第 3.2 節中之 PMV 參數說明(表 3-1)及決策過程，本功能僅需設定人體代謝率、衣著率及最低舒適比率。在主頁選擇 PMV 參數設定功能後，將進入的圖 6-6 所示之功能頁面。本左邊提供為 PMV 值所對應的熱感覺供使用者參考，右邊則為 PMV 的參數：人體代謝率、衣著量以及最低舒適比例之設定區域。

人體代謝率：將隨室內人員之主要活動行為而定，因此需先選擇活動

類別：休息、平面步行、普通辦公室作業、專業活動、休閒活動等五種。以本研究安養中心為例，其室內活動主要以靜躺為主，因此可選擇「休息」，進而進入次要類別，選擇「睡覺（人體代謝率=40W/m²）」便能完成人體代謝率之設定

衣著量：主要根據室內多數人員之衣著型態而定。本系統提供上半身及下半身之衣著形式選擇，進行衣著量之設定。同樣以本研究案例為例，因當地氣候炎熱，室內工作人員穿著多以短袖搭配長褲或長裙為主，故可選擇選擇上半身：短袖，下半身：褲子之設定。

PMV 參數設定

	主類別	次類別
人體代謝率	休息	睡覺
衣著量	短袖	褲子
最低舒適比例	40%	

修正 確認

PMV 值在-1.5-1.5 所占的比例

PMV 對應熱感覺

圖 6-7 建物自然通風決策系統 PMV 參數設定介面之下拉選單 (UI)

資料來源：本研究繪製



The screenshot shows the 'PMV 參數設定' (PMV Parameter Setting) interface. On the left is a vertical temperature scale from -3 (極度寒冷) to 3 (極度炎熱). The main area contains three dropdown menus: '人體代謝率' (Human Metabolism Rate) with '休息' (Rest) selected, '衣著量' (Clothing Amount) with '短袖' (Short-sleeved) selected, and '最低舒適比例' (Minimum Comfort Ratio) with '40%' selected. A red box highlights the expanded dropdown for '人體代謝率', showing options: '睡覺' (Sleeping), '靜坐' (Sitting), '坐著從事' (Sitting and working), '站著輕微' (Standing lightly), and '站著中度' (Standing moderately). A red arrow points to this dropdown with the label '次類別的下拉選單' (Sub-category dropdown menu). At the bottom are '修正' (Modify) and '確認' (Confirm) buttons.

圖 6-8 建物自然通風決策系統 PMV 參數設定介面之下拉選單 (UI)

資料來源：本研究繪製

3. 最低舒適比例：

此比例主要是室內人員對舒適空間率(ComR)之最低接受比率(0%~100%)。其比率越高表示可接受的舒適空間比率門檻值越高。圖 6-8 中之選擇為 40%。然後點擊確認，就會跳回系統的首頁，如果想要修正設定的參數，點擊修正後進行修改再點擊確認即可完成 PMV 參數的設定。

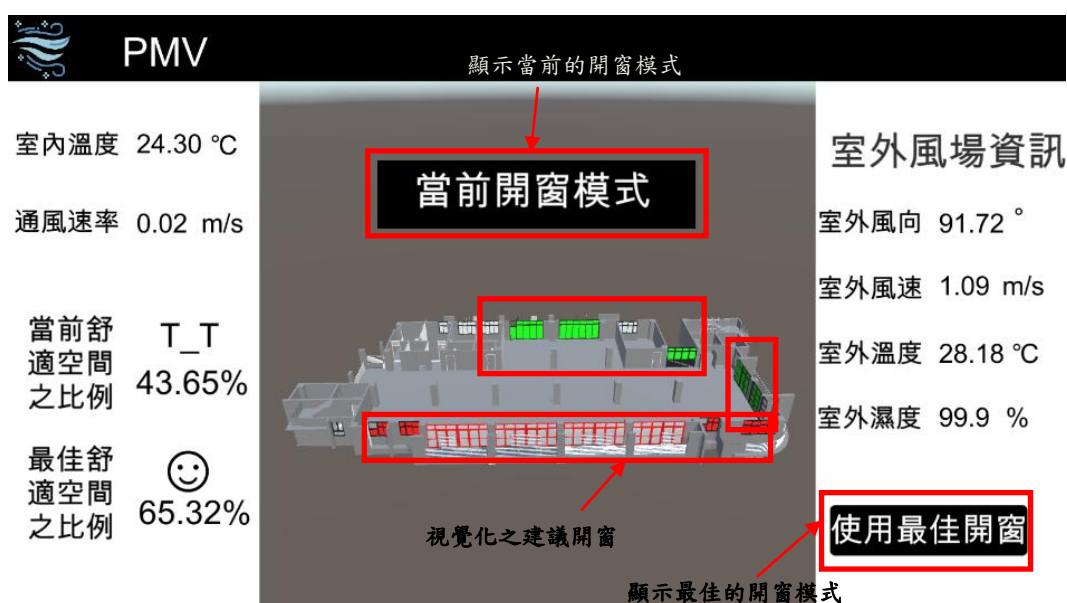


圖 6-9 建物自然通風決策系 PMV-1 開窗決策介面 (UI)

資料來源：本研究繪製

4. PMV 決策模式頁面

在我們回到主頁後點擊 PMV，即進入 PMV 決策模式頁面(圖 6-9)。畫面中間會顯示當前的開窗模式，紅色為關，綠色為開，左邊會顯示當前的室內溫度、通風速率、當前舒適空間比例以及最佳舒適空間比例，右邊會顯示室外風場的資訊，包括室外風向、室外風速、室外溫度及室外濕度。下方還有一個使用最佳開窗的按鈕，在按下按鈕後，畫面會顯示最佳的開窗模式（如圖 6-10 所示）。點擊畫面左上角的圖示，會回到系統首頁。

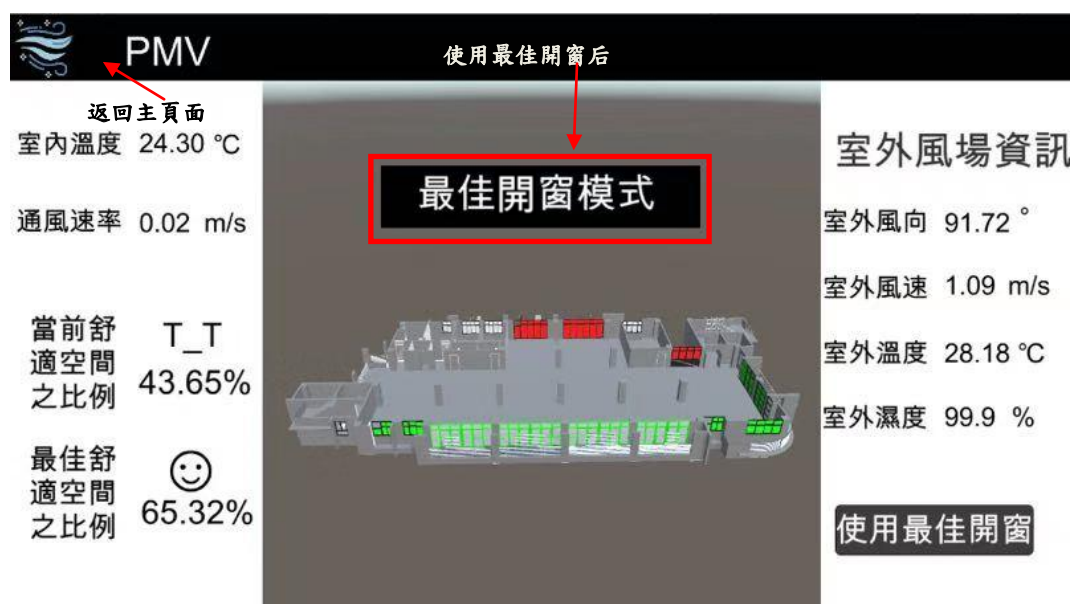


圖 6-10 建物自然通風決策系 PMV-2 開窗決策介面 (UI)

資料來源：本研究繪製

5. 體感溫度決策模式頁面

於首頁中點擊「體感溫度」及進入體感溫度決策功能頁面(圖 6-11)。畫面中央為建築的模型，左側為各樓層的溫濕度情況，右側為室外風場資訊，我們點擊左方「樓層」圖示，會跳到樓層的畫面(圖 6-12)。圖 6-11 左側為室內溫濕度、通風速率、換氣率、最大換氣率、當前體感溫度及最低體感溫度，右側為室外風場資訊。在「目標體感溫度」之文字輸入框中，使用者可以設定想要的體感溫度並點擊查詢。系統便會立即根據當下的室外風場，從資料庫中選擇最接近目標體感溫度之最佳開窗模式(圖 6-13)。此外，本系統也預留自動化開窗系統之開關控制，當連接額外的窗戶空置裝置後，即可透過此開關遠端控制窗戶的開關。

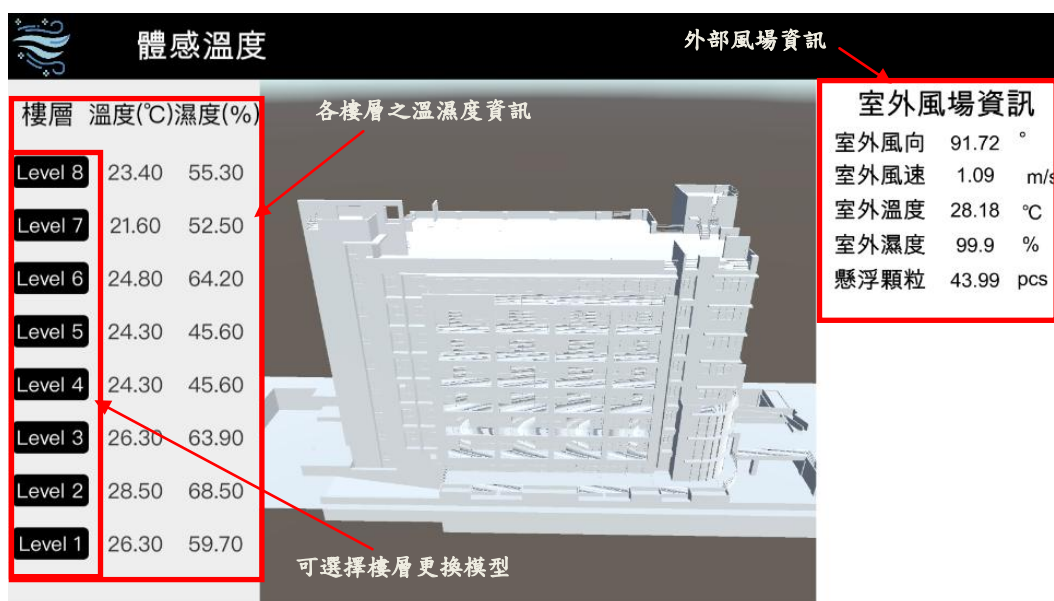


圖 6-11 建物自然通風決策系統建築樓層和風場資訊介面 (UI)

資料來源：本研究繪製

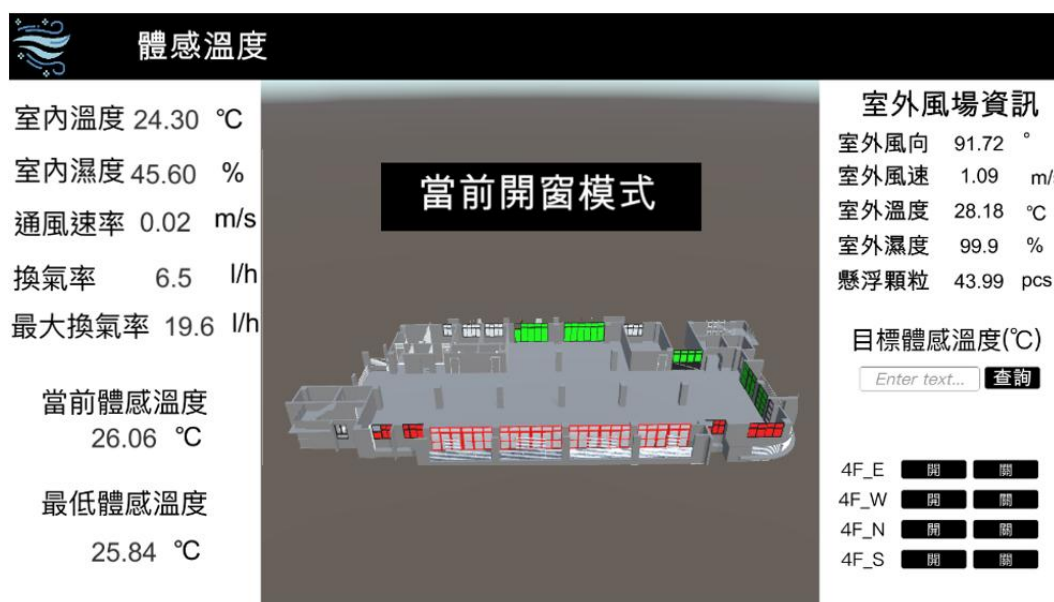


圖 6-12 建物自然通風決策系統體感溫度開窗決策介面 (UI)

資料來源：本研究繪製

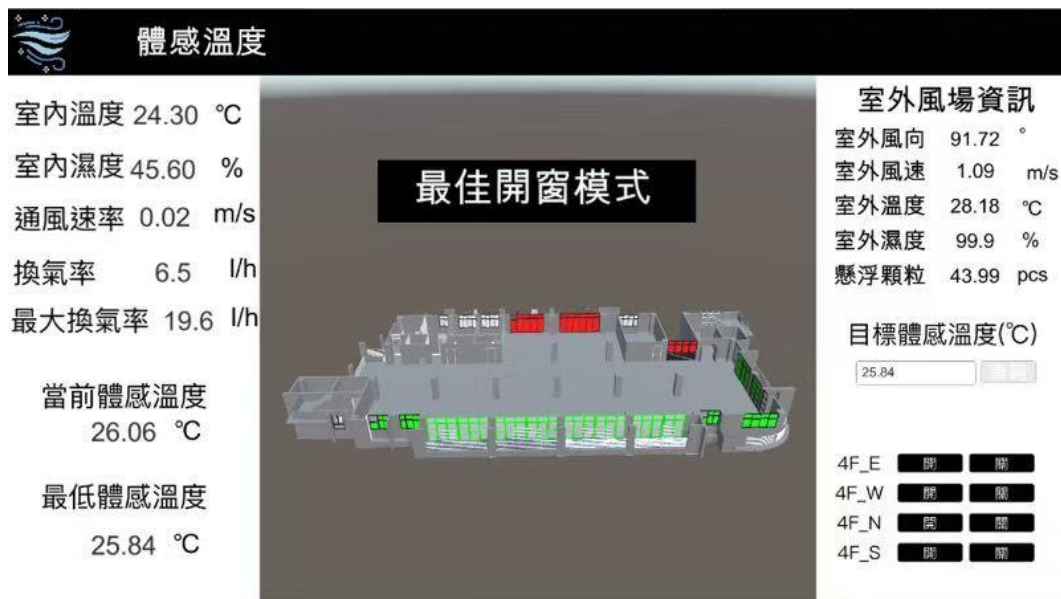


圖 6-13 建物自然通風決策系統「體感溫度決策模式」最佳開窗模式顯示畫面

資料來源：本研究繪製

第七章 結論與建議

第一節 結論

本研究目的為建立一套可以在建築營運維護階段使用的建物自然通風決策系統。為此，本研究首先完成「建築物實場量測系統」之開發，實現實時量測室內外通風環境數據之目標，進而建立「建物自然通風模型數值資料庫」，使建築物室內通風CFD模擬分析數據得以儲存於雲端資料庫中，進而透過集思廣益：分別擬定以「體感溫度」及「PMV 熱感舒適度指標」為決策因子之室內通風決策模式，最後以建築物 BIM3D 模型為資訊展現工具，完成「建築物室內通風決策系統」之設計與實作。本研究之結論及說明如下：

(1) 室內自然通風決策模式

為建立「建築物室內通風決策系統」，本研究在計畫期間整合專家建議，以「體感溫度」及「PMV 熱感舒適度指標」等二個舒適度指標為決策因子，輔以「換氣率」之通風資訊，分別擬定以「目標體感溫度」及「最大舒適空間率」之決策模式。此決策模式皆以室外風場及預先分析所得之室內 CFD 風場資訊為判斷依據，提供使用者不同之決策方法。因此，未來依此決策模式所建置之建築物室內通風決策系統亦可在依憑室外風場及室內 CFD 場資訊之前提下，透過決策模式之修正或新增，提供更完善之室內自然通風決策建議。

(2) 實場資訊量測系統

本研究通過建立「實時外部風場資訊量測裝置」、「實時室內通風環境量測裝置」、「外部風場實時網頁」與「建物實場環境資料庫」，已經達成以「實場資訊量測系統」自動收集室內外通風環境資訊，並將資訊整理上傳至資料庫，為後續最佳化通風決策提供依據之目標。此外，「實場

資訊量測系統」因採開放式架構進行開發，故後續仍可依照可能之室內通風環境決策之需求，在現有的實時量測裝置的基礎上擴充型傳感器數量與類型以保證此系統未來之延續性。

(3) 建物自然通風模型數值資料庫

本研究透過風洞實驗得到建物表面風壓作為 CFD 室內自然通風模擬之邊界條件，利用 CFD 之模擬分析求得建築物之室內風場分布、平均風速及換氣率等數據，進而整合此 CFD 模擬數據與建築物 BIM 模型資料，完成「建物自然通風模型數值資料庫」之設計、建置及資料儲存，以作為「BIM 建築物室內通風決策系統」的核心決策雲端資訊資料庫。

(4) BIM 建築物室內通風決策系統

本研究已經完成了「BIM 建築物室內通風決策系統」之開發。透過遊戲引擎平台之開發環境，本研究成功整合上述「實場資訊量測系統」、「建物自然通風模型數值資料庫」及建築物 BIM 3D 模型，建置一個以建築模型為操作介面，可自由切換各樓層模型，並呈現各樓層室內外風場及環境即時資訊，更可依據室外風場狀況分別以體感溫度及 PMV 熱感指標提供最佳通風決策之系統。透過此系統之實作，也實現了將 CFD 等預先分析數據(pre-analysis data)進行儲存，進而帶入後續建物使用維護階段進行應用之方法論。

第二節 建議

根據本計畫的研究成果，於此提出下列建議，以下分別從立即可行的建議及中長期性建議加以例舉。

建議一

本案研究成果提供相關學會團體建置資訊平台於實體公共建築展示空間：

立即可行建議

主辦單位：社團法人中華民國風工程學會

協辦單位：財團法人台灣建築中心

建議選擇具備基礎智慧建築設施設備之案場，利用本研究所建置之軟硬

體系統針對該案場現有之可行設備進行整合，並發展合適展演教材

與教具，透過展演方式使民眾經由系統操作，了解外部風場與室內

自然通風關聯，進而推廣節能、智慧建築、物聯網應用等知識與概

念，展現本所研究成果。

建議二

建議辦理風工程相關實場監測即時量測技術研究：中長期建議

主辦單位：社團法人中華民國風工程學會

基於本案研究成果建立之物聯網技術，可進一步擴增應用於風工程相關之實場監測技術。例如建立戶外風環境即時資訊系統，可應用於社區、校園或大型戶外公共空間，提供即時區域微氣候資訊，實時判斷戶外微氣候之良窳，提供民眾戶外休憩活動之可靠指標，創造智能之宜居環境，進一步提升人民綠生活之居住品質。同時，戶外風場資料在經過長時間蒐集後，可與氣象站資料整合進行整合分析，透過大數據或人工智慧技術處理，可補強設計風速資料來源。本技術亦可應用於建築結構監測，搭配 GPS、加速度計、壓力量測等設備，即時監控並蒐集建築之風壓、振動等資訊，作為建築抗風之風洞實驗驗證或理論模式發展依據。

附錄一 採購評選會議意見回應

項次	審查意見	研究團隊回應
1	本研究資訊平台之開發關係發展作為設計模擬工具或環境調控最佳化工具應先釐清。	本研究旨在建立一個平台，故選定一目標建築為範例，所建立的技術與方法在經過演練後，可順利轉移至欲應用本技術之建築，並進一步推廣 BIM 與可靠之室內通風資訊結合技術。針對委員所提之寶貴建議，研究團隊回覆如下： 1. 本計畫所開發之室內通風管理系統在於將建築物的 BIM 3D 模型匯入 unity3D 開發平台作為系統之主要功能操作與通風策略資訊展示介面。而系統中所需的所有通風模擬分析、通風策略、室外風場量測等資訊則全部整合在「建築物室內外風場資料庫」之中。透過資料庫與系統之間的連動，動態顯示重要的通風操作策略給建物使用者，藉以達成資訊整合應用之目的。上述之資料庫及 BIM 管理系統可提供一個示範性機制，展示如何簡易地將設計階段的分析數據經由系統的串連，延續到建物使用維護階段當中。而這整合方法與技術也是目前業界所需要的，更是未來應用的趨勢方向。對於上述系統開發之機制，目前研究團隊已
2	如作為設計模擬工具，對於變數(因子)如建物之配置、朝面、開口(高低位置、窗戶大小、種類)、導風牆、窗簾以及建物內部隔間(可彈性調整隔間及進出風口)是否納入測試考量。	
3	研究團隊可否增列綠建築背景人員參與，另成員對於程式語言之撰寫能力是否充分運用，請說明。	
4	請說明風場實驗量測物聯網所應用之通信技術與架構是否考慮未來商業應用之實用性、普及性及不受干擾等因素。	
5	員工薪資(履約期間)是否均超過 3 萬元以上。	
6	預期目標第 2 項建立「建築物室內外最佳化通風演算模型」，請說明「最佳化」的意義為何?以及為達最佳化演算所必須蒐集分析參數及數據量的最少要求?	
7	本計畫目的的第 4 項「BIM 建築物室內通風管理系統」，「...，使即時室內風場資訊即時顯示於 3D 建物模型中...」，請問所述「室內風場資訊」是指那些資訊，由於各建築物所在地、方位及週遭環境、樓層高、室內	

	隔間等都不相同，如何提供「即時室內風場資訊」	培植 8 位程式開發專長之研究人員，且持續進行相關程式之開發，在三年的過程中已累積相當之整合系統開發經驗。故本團隊具備合適之經驗與能力完成上述之開發。而所開發完成之系統程式也可提供業主單位作為後續推廣與應用，希望能發揮此研究之後續價值。 2. 此外，本計畫所建立之「建築物室外風場實場量測物聯網裝置」雖然屬於小型適用範圍，然其所使用之整合基板及資料傳輸程式也都可提供作為後續複製應用或進階研究之基礎。此外，本計畫所使用之超音波風速計已屬於內政部建研所之現有設備，故本團隊可在計畫結束前提供技術轉移。 3. 有關建築物室內外通風資料庫的建置，主要方法為針對目標建築建構 1/150 縮尺的風壓模型進行風壓量測，並依現場狀況建置周遭地形地物，以模擬現地之風場狀況。初步判定目標建築當地地況為郊區地形，實驗入流邊界層的配置將以此進行排列。配合氣象局測站量測之風向資料，進行 16 個風向角之風壓量測。導入不同風向的風壓資料後，統合進行不同開窗配置之室內模擬，以建置完善考量周遭
8	都會地區，高樓林立，建物室外風場入口風壓與建物本身造型與鄰棟建物距離及高度有關，請說明本計畫對該部份的模擬模式是否考慮鄰房存在效果。	
9	通風管裡與建物室內隔間方式有關，請說明本系統的開發是否會對自然通風與原有室內機械空調系統之使用界定，提出意見。	
10	服務建議書第 16 頁，研發方法與原因:2 風洞試驗，目標建築之縮尺比例為何?	
11	請說明目標建築縮尺模型、附近地形地貌製作與建築物 BIM 模型建立關係及前置相關作業等。	
12	請說明自然通風季節性的問題，及其對空氣品質與室內外空氣交換率等影響。	
13	履約期間全職員工不含加班費薪資多少?()	
14	目前團隊所提通風最佳化的要件為何?請補充說明。	
15	日本株式會社在 107 年有提出 VR 成果，本案的 VMDIIF 預期成效是否會朝該方向研究?	
16	諸多平台資訊整合，請再說明各階段輸入邊界或元件項目。	

17	本案「預期成果及效益」內可完成且移轉的軟硬體等資產為何？是 BIM 的樣版、元件或實測探測器？請列舉具體項目，並將來在本所設備資源上優先測試。	地形、來流風況、風向、開窗組合之通風資料庫，作為自然通風開窗決策的依據。
18	自然通風對建築物使用效率？比率是多少？目前軟硬體可連動性如何？	4. 室內通風的舒適度，除了考慮風速外，室內環境的溫濕度也是需要綜合考慮的指標。本研究初步規劃以空氣交換率作為最佳化判定指標，而體感溫度亦是可參考的指標。後續亦可探討在不同季節時，目標建築室內空間應導入之較佳氣流速度，作為自然通風決策之參考。
19	以實場量測風速達到自然通風建築物目前有多少數量？短中長期需求量是多少？目前困難是什麼，解決策略是什麼？	本研究之主要價值除了示範一種簡單的方式將複雜分析成果透過 BIM 模型帶到使用維護階段，提供建物使用者使用之外；同時也希望透過計畫中所舉辦之專家座談會，邀請工程業界（相關技師）、研究單位、物聯網業者及綠建築相關專家，針對本計畫所發展之系統與機制進行探討，藉以透過本計畫系統之具體展示，彙整關鍵的需求意見，提升未來應用的策略與價值。

附錄二 第一次專家座談會意見與回應

審查委員	審查意見	研究團隊回應
林教授文欽	舒適性門檻除了風速以外，另要考慮如溫度、溼度、太陽輻射熱等外部條件，請另外思考是否搭配機械通風設備。	本研究初步規劃以風速、溫度、濕度計算體感溫度做為決策條件，輻射熱量測設備後續可以考慮進來。未來亦可在資料庫建置中加入機械通風設定，以完備混合通風應用。
	本研究建置之室內通風資料庫，利用外部風場資料，找出對應之室內通風狀況，可歸屬於 AI、智慧建築領域。	感謝委員對研究方向之建議。
	開發之程式能否採用外掛資訊方式結合其它 BIM 軟體，以應用至設計端？	本研究所開發之自然通風管理系統以建築物營運維護管理階段為主要使用情境，因此在考量使用成本與技術門檻之情形下，本研究採用第三方開發平台進行系統建置，而非在既有 BIM 軟體中進行開發。然在本研究完成雛型系統之開發後，確實可以本系統內所建置資料庫為基礎，在不同 BIM 軟體中開發相同功能之外掛程式。讓設計端可直接讓設計模型提供自然通風管理之功能。
	無線傳輸方式能否採用免費之無限傳輸技術 LORA，以降低成本。	LORA 雖然具有距離範圍長，低功耗，免牌照的頻段、基礎設施以及節點 / 終端的低成本特性，但考量本研究所需傳輸量、速度及頻率上的需求，目前仍以自建 WIFI 或 4G 網路傳輸為主。
	風場資料庫之型式與採用的軟體為何？	本研究採用 mysql 作為資料庫軟體。

林副執行長杰宏	選擇之示範建築請說明情需求、營運方式以及使用情形。	感謝建議，將於期中報告中補充。
	室內體感溫度指標建議可以採用 PMV。	PMV 指標是非常完善之體感溫度指標，但需要黑球溫度計等設備，後續可尋求適當之量測設備來進行。
	除了日間的自然通風考量外，商辦大樓的夜間新風換氣如能善用自然通風，可有效降低空調使用，	感謝建議，將納入後續研究考量。
	有關自動開關窗智慧化設備已有廠商開發應用，可至台灣建築中心取得相關資訊。	將至台灣建築中心蒐集相關資訊。
	自動開關窗引進自然通風成本較高，一般建築可配合吸頂式風扇，在較低成本狀況下，達到通風換氣需求。	未來可針對混合通風案例進行分析。
周教授鼎金	本研究利用通風 CFD 模擬建置資料庫，透過決策系統決定，其模式概念相當不錯，並具有可行性。	感謝肯定。
	本研究概念如能導入實際智慧建築，自然通風效能對於智慧建築外層環境評分將大大加分。	感謝建議。
	室內環境的舒適度可以參考 EN-15251 等相關規範。	感謝建議，將蒐集相關參考資料。

	可以利用能源分析模式，考量浮力通風以及預測該建築的室內溫溼度。	感謝建議，本年度以自然通風為主要考量，未來可朝向結合浮力與自然通風建構資料庫。
游經理中榮	本研究可應用至不同場景之通風，如捷運機廠沒有自然通風，多採用強制排風方式。採用 BIM 內建的 CFD 與實際狀況有所落差，可應用本方法改善。	目前 BIM 軟體內建之 CFD 軟體較為陽春，模擬結果的可靠度與使用者的背景知識會有直接關係，可透過專接協助進行相關模擬以改善結果。
	本研究應可成功推廣至智慧建築，但是否能導入至綠建築標章評分？	此部分可與建研所或台灣建築中心討論可行性。
	自動控制技術為每間公司的 know how，有關自動開窗控制部分可以尋求後端整合 (BIM) 公司進行技術可行研究。	本研究預計於除行系統完成後，尋求台灣建築中心之協助，進行後端控制之整合嘗試。
	BIM、IOT、智慧建築等技術之間的介面是否能夠標準化並進行整合？	資料標準化及資料交換協定的訂定確有必要。然本研究初步以完成建置自然通風決策雛形系統為目標，藉以驗證本研究理念之可行性。後續待相關標準化、交換協定標準確定後，將可進一步使本研究結果與之整合。
游教授壁菁	目前研究之決策在於開窗，是否有考量在有隔間狀況下對於模擬的干擾？	本階段研究鎖定在 4 樓空間配置下建構資料庫，亦可針對其它有隔間樓層進行。
	室內空間中不同位置的目標溫度因風速會有所不同，這部分該如何進行開窗決策？	目前採用 1.5 m 高之平均風速進行體感溫度決策，後續可考量使用者使用區域之風速作為主要決策考量。

	本研究主要應落實在公共空間的應用，此部分對於自然通風的需求較大。	感謝應用建議。
	建議可以加入室內PM2.5、CO ₂ 等空氣品質監測之控制邏輯，亦可考慮下雨天自動關窗等模式。	本平台未來可透過相關監測設備連結至所開發之 IOT 設備，並加入決策因子以實現，並納入下雨監測系統以實現相關智慧化控制。
	建議可以加入有空調狀況下的連動模式，以控制進氣量。	感謝建議，本年度以自然通風為主要考量，未來可朝向結合機械與自然通風建構資料庫。
陳組長建忠	建議後續可以應用至實際案例或遠端監控方式，以展現成果。	本研究未來將尋求實際建築進行展演，並透過遠端監控方式展示成果。
	產出資料可以結合至相關BIM軟體進行應用。	本研究所開發之自然通風管理系統以建築物營運維護管理階段為主要使用情境，因此在考量使用成本與技術門檻之情形下，本研究採用第三方開發平台進行系統建置，而非在既有 BIM 軟體中進行開發。然在本研究完成雛型系統之開發後，確實可以本系統內所建置資料庫為基礎，在不同 BIM 軟體中開發相同功能之外掛程式。讓設計端可直接讓設計模型提供自然通風管理之功能。
	建議考慮空氣氣味或空氣品質問題做為決策考量。	可以透過相關監測設備連結至所開發之 IOT 設備，並加入決策因子以實現。
郭副研究員建源	當附近增加建築物後，風壓通風資料是否要更新？	除風洞實驗外，風壓資料亦可透過簡易CFD 模擬建置，在鄰近建築配置改變時，依據建置好的模型進行修正模擬，更新通風資料庫。
	除了實體展示外，是否能有虛擬系統展示系統？	感謝建議，可朝此方向建構簡易之虛擬展示系統。

附錄三 期中審查會議意見與回應

審查委員	審查意見	研究團隊回應
陳技師俊芳	本案之示範案例無室內分間牆或障礙物，與各類用途多有分間牆，故有落差。建議敘述不影響自然通風之分間牆或障礙物形式（高度、透氣率等），以符合實際情況。	本研究選定場址為開放之公共空間做為風場資料庫建置之基礎，作為初步應用於資訊平台之資料。未來應用時可視實際狀況，針對 CFD 模型增加或修改隔間牆、障礙物等情境以符合所需。
	室內通風最佳化機制，增溫通風之適用時機為何？若無，建議可以刪除，以符合實際情況。	自然通風增溫之情境可能發生於外部風場風速大，而室內窗戶全開下室內體感溫度較低，而室內人員希望透由關閉部分窗口，達到小幅度增加室內體感溫度之狀況。此狀況在台灣氣候下雖少發生，然考量模式的完整性及不影響既有系統的運作下，本研究仍保留此狀況於系統演算法中。
	簡報顯示之室內濕度小於 30%，是否為筆誤或有特殊考量。	確為筆誤，已修正。
	建議當室外溫度過高或者懸浮顆粒超標時，即予關閉門窗，不進行自然通風，為最佳化機制之優先選項。	同意委員意見，本研究將室外空氣狀況納入通風決策模式之中。
楊教授宏宇	智慧型建築涵蓋溫度、相對濕度、風場及 BIM 模型對自然通風效率產生實質的效果。	本研究將嘗試以案例某一夏日時段之氣象資料進行本系統決策演算法之模擬，分析出採用本系統決策下所減少之機械空調使用時間，藉以評估可能之實質效果。

	溫度及相對濕度分佈與室內隔間及風險關係密切，不同的參數會產生不同的結果。	溫度與相對濕度分佈確實影響結果頗大。在理想狀態下，實應量測室內不同隔間之多點溫度與相對濕度數據，以求得更細緻之效果。然本研究所建構之自然通風決策模式與管理系統確已考量相對濕度及溫度等因素，故在此架構下，若實際應用案例卻可收集各隔間之溫濕度值，且室內 CFD 風場資訊也都具備，本系統仍可提供決策訊息。
	風場分佈以室內間隔、人員聚集處、天花板高度、擺飾皆有相互影響。使用平均風速處理太過粗劣，應考慮上述影響因素進行細部室內風場之探討。	本研究選定場址為開放之公共空間做為風場資料庫建置之基礎，作為初步應用於資訊平台之資料。未來應用時可視實際狀況，針對 CFD 模型增加或修改隔間牆、障礙物等情境以符合所需。 此外，使用平均風速進行決策確實太過粗劣，後續成果將納入 PMV 指標，以舒適區域所佔百分比進行決策，以精細化評估室內空間的舒適性。
江研究員 逸章	建築數位化，智慧化確實為建築未來發展趨勢。因此，與 BIM 結合應用也可以協助使用於維護階段，提高室內環境健康及舒適。	感謝委員肯定。
	本案題目有「效率」二字，建議應與報告書中(或期末)呈現效率如何得出。	同意委員建議。目前本研究之效率以室內換氣率為主要指標。然為更佳符合此名題，本研究將於期末報告中，加入以 PMV 指標作為室內舒適空間比率之決策方式，提供自然通風對舒適空間比率之間的關係。
	以體感溫度作為決策主要依據方向正確，唯應參考專輯會議時之建議採 PMV，PPD index，作為未來資料(庫)依循標準。	感謝委員建議。本研究將再增加 PMV 為決策因子，建立以該因子為決策依據之模式，並於資訊系統中完成功能實作。

	P. 49 錯字請修正。	感謝委員建議，已修正。
黃總經理 健瑋	建議外部通風環境資料應可持續收集外部風場環境的持續性。溫熱環境內外關係者都是開關窗的判斷因素，如內外部溫差過高時，是否該開啟窗。	感謝委員建議，在一般狀態下，將持續開啟設備收集風場資訊。
	本系統開發有助於節能減碳，對於台灣中間季節期間善用自然通風，則有助減少機械通風換氣的使用，進而降低能源的使用。	感謝委員肯定。
	檢查本計畫所採用的建築模型而已，開窗位置與有隔間牆的實務狀況時，可能影響其效率，建議未來研究課探討垂直通風的可能。	本研究選定場址為開放之公共空間做為風場資料庫建置之基礎，作為初步應用於資訊平台之資料。未來應用時可視實際狀況，針對 CFD 模型增加或修改隔間牆、障礙物等情境。誠然，未來亦可進一步納入垂直通風分析，以豐富自然通風之資料庫。
	現階段目標主要協助管理人員可視化的通風環境決策系統，如何結合機械式自動開關窗應更加便利。	同意委員建議，本研究在無配合廠商之條件下，自行設計一窗戶開關自動控制裝置（詳圖 4-11）以模擬本系統具有與機械式自動開關窗裝置進行整合之能力。未來若能尋求實際機械式控制系統，將主動嘗試進行整合。
	本計劃研究應結合更多 sensor，如冬季熱水器產生的一氧化碳或其他有害氣體，效益應能擴大。	目前系統採開放式架構進行開發，具備 sensor 擴充之能力。在研究過程中，亦已因專家建議等實際需求，不僅建立室外風場量測裝置，更增加窗戶磁簧感應裝置及室內外溫濕度及空氣微粒傳感器等裝置。故相信委員所述有害氣體相關傳感器亦能整合於本系統中。然因目

		前未能取得一氧化碳及其他有害氣體之傳感器，故尚未能完成整合。
鄭教授啟明	本案整合了風場實場量測。風洞試驗物理模擬，CFD 數值模擬，建築資訊，其研究成果具有推廣實用價值，計劃案規劃完善，目前已有良好的進度，期待能順利完成。	感謝委員肯定。
	本計畫限於計算能量，僅針對第四層樓的通風估計，請試評估目前數值計算能力建構整棟樓房的可行性。	目前本案例在 7 種開窗配置下，各需要進行 16 組風向角模擬，共有 112 組模擬個案。目前以 2 台 I7 電腦，運行約 2 周時間可完成資料庫建置。本棟建築涵蓋 8 個樓層，如有足夠的電腦(16 台或更多)，同樣可於 2 周內完成整棟樓層資料庫建置。
	研究計劃為求各項數據的正確性，無論是檢測儀器或是改值計算模式均採用品質較高，代價亦較高的元件，未來在實用時，是否可以採用較為經濟的元件，以利推廣。	傳感器所測得數據之精確性確實十分重要。以目前本研究之成果，其各項傳感器卻能以更正確且成熟之裝置進行取代。然本計畫之主要目的與價值在於建立一可行之架構，將 CFD 模擬分析之數據透過資料庫之儲存，結合實時風場量測裝置，即時提供建物使用者一合理之自然通風開關窗決策資訊。故本研究以建立並實現此一方法論為主。
羅教授元隆	部分錯字請訂正 (1) P.2 倒數第四行：本特透→本次透 (2) P.26 第九行：女綠建築→綠建築 (3) P.36 第七行：在死區的	感謝委員細心審視，已修正。

	本研究的開窗案例包括全開及雙側開窗。是否可以考慮單側開窗的案例？	後續將增加單側開窗之資料庫，做為決策選項之一。
	實場量測以此淡江大學工學大樓為主，後續又有屏東大樓的實場量測，兩者有和關聯？量測溫濕度的用途為何？	淡江大學工學大樓之實場量測主要為物聯網與即時資訊平台測試。屏東大樓並未進行實場量測，主要以其為研究主體，利用風洞實驗及 CFD 建置室內自然通風資料庫，並進行即時資訊平台試作。除此之外，室內溫濕度量測主要用來計算體感溫度以及 PMV 指標。
	CFD 的模型是以全棟建物建模還是僅有四樓？	目前僅針對四樓 CFD 模擬分析，並建置資料庫，以作為驗證本研究方法之可行性。
陳組長建忠	計畫宜先瞭解人的需求，量測建築物內外物理量及模擬演算後，再決定採自然通風或機械通風。	誠如委員所言，決策模式應適當考量室內外環境之狀況。後續將採用 PMV 評估室內自然通風舒適度是否可達標，以及戶外空氣品質狀況等條件，來決定採自然通風或機械通風。
	請多參閱本所歷年相關研究或涉略智慧監控領域，以免應用不足或重複情形。	將拜訪相關專業人士以及蒐集所內歷年研究資料，以避免此情況發生。
	本案應由居室安全、健康、舒適等條件下，分析風洞試驗及 CFD 模擬之優勢，以探求利基。	考量附近建築以及來風特性後獲得建築表面風壓資訊(風洞實驗)，做為室內空間通風模擬之邊界條件，模擬工具採 CFD 或簡易之通風模式。而 CFD 可以建構較符合實際的室內空間配置，並在目前計算機可負荷之運算量下，獲得完整且可信之室內風場資訊，對於建置完整通風資料庫並做為後續決策之參考具有其優勢，此部分在期末報告中將詳細說明。
王副所長安強	簡報所示題目較切合研究要旨，惟題目不宜再修改，相關內容疑義建請研究團隊於	研究題目依據合約訂定，委員所提出之相關內容疑義，將於期末報告中詳細說明。

	報告書內詳細說明。	
	本計畫開發之平台，未來於實務應用需考量系統建置成本，特別是相關感測器費用勿過於昂貴而影響應用普及性。	感謝提醒，ariduno 主板及其相關監測設備費用相對低廉，而超音波風速計購置成本亦不會太高。
郭副研究員建源	研究以體感溫度作為決策基礎，但影響使用者室內舒適性條件很多，可能包括：年紀、性別、著衣量，乃至身體健康程度等。若僅採用體感溫度作決策標準，或可達到節能之目的。但對居室使用者未必是最舒適程度，反而可能降低系統使用率。建議再釐清。	後續將採納 PMV 做為決策指標，此指標採用問卷方式，已考慮年紀、性別等統計資訊，並納入衣著量、人體代謝率等狀態訊息，應可做出對於人體最舒適之決策。
	本計畫以BIM為決策管理平台，涉及許多物理量的運算，以評估是否達到適用自然通風門檻，報告書內未提出運算頻率，在極端狀況下，風速風向變化極大，是否可能產生窗戶時開時關之情形，有何機制避免此類問題發生。	誠然，風速風向隨時間的變化是不穩定的。依據現地監測資料，夏季季風的變化相對穩定，故本研究基本上以每 1 小時進行開窗決策，同時利用每 10 分鐘的風向資訊判斷是否要進行額外決策。未來亦可利用長時間之現場監控數據，透過統計或 AI 學習系統，決定決策頻率，以做出有效之決策判斷。

附錄四 第二次專家座談會意見與回應

審查委員	審查意見	研究團隊回應
蕭葆義教授	PMV 溫熱指標是否有考量年齡、性別差異？	PMV 是以預測不滿意百分率，表示在該 PMV 舒適指標中，有多少百分比的人感到不舒適，樣本已適當考量年齡、性別等分布，故應不需再額外考量年齡與性別之差異。
	本系統對於標的建築進行通風最佳化，提升效益是多少，是否能提供量化指標？	礙於研究案例的實際狀況與配合程度，目前無法透過實際案例進行通風最佳化效益提升之實場觀察與量測比較。然為顯示本案所建通風決策機制之成效，本計畫擬收集案例當地夏季氣象及風場資料作為輸入值，利用本案所建之自然通風決策程式計算案例在夏季中最佳的自然通風開窗狀況，藉以推估出在使用本系統下，案例可不使用空調的時間數量。透過此不使用空調之時數，將可與全天候開啟空調之狀況進行對比，繼而作為量化指標以供參考。
	風洞試驗和室內通風分析有何關聯？	本研究採用風洞實驗量測之開窗部風壓，作為 CFD 模擬之邊界條件，以反映風壓所形成之自然通風效應。
	建議將系統操作流程及使用手冊做為附錄。	為提升本案研發成果之後續可用性，本案於起始便朝製作系統操作流程及使用手冊之方向進行。故本案將視最後手冊之內容頁數，選擇合適之方式將系統操作方式附加於結案成果中。
	能否直接使用實際監測資料作為自然通風判定標準？	是的，為了進行室內自然通風之即時決策，必須即時監測外部風場（風速、風向）及室內外溫濕度等數值進行計算，方能透過資料庫的查詢，找出最佳的室內開窗方案。

王文安教授	本計畫最重要的部分為方法論的確定，也是本計畫最主要的貢獻，建議目前應針對此部分進行總結與歸納。	誠如專家之意見，本案核心目的即在於透過室內自然通風決策模式與電腦系統之開發，發展一能將設計分析資訊導入建築使用維護階段之方法架構與開發流程。根據目前之研究成果，也初步證實此方法確實可行。在未來有限的時間下，本案將更努力展現此方法論的架構與價值，望為往後之發展提供一可行且簡易的建議方向。
	本研究切入點主要為建築內流場，著重於居民的舒適性。而在目前的社會環境下，考量健康應比舒適性更為重要。	同意專家所述。目前本案之建築內流場資訊在考慮即時外部風場及內外部溫濕度資訊的前提下，從 CFD 的模擬分析結果中，同時可得知不同窗戶開關狀態下之換氣率、室內平均體感溫度及舒適空間比率，其中換氣率為健康指標，體感溫度及舒適空間比率為舒適性指標，故本系統並未僅考慮舒適性而捨棄健康考量。雖目前系統是以 PMV 值為基礎進行舒適空間比率之計算決策模式，然仍將換氣率列為主要自然通風之顯示資訊。
	PMV 分析是否應採用不同的分區評估，如在臥室是躺著，或是在客廳是坐著的人體代謝狀態是不同的。	本研究在假設目標空間主要活動狀態夏季站立之預設狀態，人體代謝率或衣著量可由系統選單選擇後即時呈現評估及決策結果。
	沒有考慮窗戶開口的寬度，求不出對應面積的換氣率	將於期末報告中補充窗戶開口資訊。
	似乎沒有考慮周圍環境對於建築周圍風場的影響？	風洞實驗已考慮鄰近建築及來流風況，故風壓資訊已包含周圍環境影響。
簡志文經理	本公司有換氣和通風 sensor 的廠商資訊，可提供研究單位資料並給予技術支援。	感謝專家給予技術及產品資訊。本案將透過專家之協助，持續收集市場與通風相關之監測儀器與技術。

郭建源	利用 CFD 建置風場資料庫，而室內溫濕度採用單一位置資料，如何考慮如建築西曬等溫濕度分布不均的狀況？	理論上，開窗的室內空間在無明確的熱源(冷源)或除溼(加濕)設備下，溫濕度在小範圍空間內變異並不會太大。技術層面上，可適當增加溫濕度計，確認空間分布的變異性，以增加模式的可靠度。
	評估 PMV 時，網格點溫度在空間分布上會有不同，例如日照都或廚房如果開火烹飪時會差別，如何呈現此部分的影響？	本研究目前鎖定為長照單位之公共活動空見，先假設溫度分布為均勻之狀態應為合理。未來可針對標的空間需求，適當配置溫濕度計，求取更精確之溫濕度空間分布。
	本研究在技術上的發展應已足夠，建議進一步考慮介面呈現以及成果展現部分。	感謝專家意見，本案正積極整合成果，並同時優化自然通風決策系統之操作介面，以提升系統之可操作性能。此外也已接洽智慧建築中心，針對未來移植本研究結果，進行智慧建築教育展示之方法與細節進行洽談。

附錄五 期末審查會議意見與回應

委員姓名	委員建議與提問	回覆
社團法人中華民國建築技術學會	1. PMV 有沒有考慮熱輻射； 2. 台灣整年溫度較高，又有室內空調，自然通風系統他沒有必要 3. 使用 ISO7730 作為參考	1. 本研究案在設計 PMV 值作為參考依據時，有考慮到熱輻射溫度的部分，其熱輻射溫度是根據室內的實時數據配合 CFD 模擬所計算出來的數據 2. 同意專家觀點，但是雖然整體上台灣整年溫度較高，但在部分地區仍然以自然通風為主（屏東），而且目前人們越來越重視環保和健康，所以本研究案提供的不只是自然通風系統，也考慮到自然通風和機械通風相配合。 3. 已經使用 ISO7730 作為參考。
中華民國全國建築師公會	1. 本平台能否供設計業者，輸入個別建築條件及所在區位，進而產出室內通風策略？建議後續計劃完善之 2. 有效通風面積（開窗形式）能否提供設定？	1. 本研究並非提供 CFD 模擬工具，而是提供一個能裝載 CFD 模擬結果，並據以提供建築物使用者自然通風開關窗依據之決策系統。 2. 本案目前之 CFD 模擬皆以全開窗之形式進行分析模擬。考慮窗戶形式確實將使模擬成果更符合建物實際狀況。雖本案並未考慮窗戶形式，然若未來案例有

		窗戶形式之考慮需求，其模擬結果也將能導入本系統資料庫中，而產生更貼近其需求之決策資訊。
中華民國景觀工程商業同業公會全國聯合會	未來應朝與商用機控設備連結整合之方向近一步研究，可收集目前商用樓的自動化或智慧化的產品，加以整理，以增加本研究的應用度	同意委員建議。目前本案僅有室外風速計採用實際商用設備，其餘室內外傳感器皆屬自行研發裝置，具有研究價值，然適用性有限。故未來推廣之重點在於與實際商用機控監測設備的連結。然經本案透過訪談與資料查詢，發現目前多數之室內溫濕度傳感器、空氣品質偵測傳感器等相關產品眾多，然多屬於家用終端產品，屬封閉裝置，不易整合。而具整合潛力之傳感器裝置則多屬客製化商品，且技術不高，其關鍵考量反而在成本與市場規模。綜言之，本案所需之傳感器整合技術不難，多數廠商皆能針對此案之設計提供高品質之商用裝置。而本案系統以資料庫為整合核心，故只需考量將傳感器數據上傳資料庫，即可整合入本系統中，故本系統在整合商用裝置上應無困難。
楊宏宇教授	1. 整合風工程及 BIM 技術配合 IOT 及 AI 導入自然風之模式是智慧型技術的表現。難於精準測量高樓層實時風速容易影響自然風量測結果。 2. 經由建築室內外最佳化通風演算模型但高樓層風速風向	1. 感謝委員肯定 2. 本研究案在淡江大學工學大樓實場量測主要是為物聯網與即時資訊平台測試，如果未來本系統投入使用，其也可以使用更

	相對濕度不易取得之數據無法真正表現其通風狀況 3. 建築周圍參數設定過於簡化，其計算所得之風無法涵蓋相對位置及其他建築物所帶來的通風影響	精準的設備去替代目前的儀器設備。 3. 本研究選定場址為開放之公共空間做為風場資料庫建置之基礎，作為初步應用於資訊平台之資料。未來應用時可視實際狀況，針對 CFD 模型增加或修改隔間牆、障礙物等情境。未來應用時可視實際狀況，針對 CFD 模型增加或修改隔間牆、障礙物等情境以符合所需。
潘振宇教授	台灣的氣候長年高溫高濕，自然通風無法滿足需求，應與機械通風（空調）相互配合方能完整系統架構。	同意委員建議。室內通風決策系統確實應同時包含自然通風（換氣）及機械通風（換氣）之交互協同功能。然不同通風換氣型態皆有不同之決策模式。其中自然通風必須同時考量室外風場即室內環境因素，尤為複雜。故本案先針對市內自然通風之決策提出一創新之解決概念與系統架構實作。根據此系統架構，未來方可進一步納入機械通風換氣決策模式。
張景鐘教授	本計劃結合風場實時量測、風洞試驗、CFD 數值模擬與建築資訊自然通風決策系統，深具實用價值。 1. 當量測傳感器故障，導致系統參數不準時，如何因應？ 2. PMV 報告中之中文名詞不一致，請統一。 3. PMV 計算各係數需人工輸入	1. 確有此狀況。故系統將加入參數不合理值的偵測機制，當發現參數值超出合理範圍時，系統將主動產生警告，並提醒系統管理者手動輸入參考值。 2. 感謝委員細心發現。

	入，建議盡量提供簡單表格和建議數值，供參考使用。 4. 資訊資料庫未來需要更多的案例資料，本資訊系統要保留未來擴充性和相容性之可能。	3. 在本案的 PMV 參數設定的頁面，已經使用衣著選項和當前狀態來替代輸入數值 4. 在本系統的設計階段就已經充分考慮到系統的未來擴充性和相容性。
吳毓庭教授	1. P.71 建議加回歸分析。 2. 建議評估紊流強度。	1. 於成果報告中加入風速及紊流強度回歸公式。 2. 於成果報告中加入紊流強度回歸曲線以及公式。

參考文獻

1. 江哲銘 (1997)《建築物理》，三民書局印行，台北，89-94。
2. 周伯丞(2000)，建築軀殼開口部自然通風效果之研究，國立成功大學建築研究所博士論文。
3. 陳念祖(2000)，高架地板置換式自然通風對室內通風效率之影響，國立成功大學建築研究所碩士論文。
4. 邱瓊萱(2004)，通風管管頂型式對室內通風效益影響之研究，國立成功大學建築研究所碩士論文。
5. 陳彥志(2008)，室外風場對風壓通風影響之研究，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
6. 朱佳仁、邱英浩、陳彥志、王宇文，2009，建築開口對風壓通風影響之研究，中華民國建築學會建築學報，第 69 期，第 17-33 頁。
7. 蘇裕民 (2006)，小型建築中庭空間浮力通風之解析，國立台灣科技大學建築研究所碩士論文。
8. 陳念祖(2007)，建築開口部裝設導風板對自然通風之效果，國立成功大學建築研究所博士論文。
9. 陳瑞鈴、朱佳仁，2010，台灣地區建築物室內自然通風模式之建立研究，內政部建築研究所協同研究報告。
10. 陳瑞鈴、朱佳仁，2011，熱浮力效應對建築物室內通風影響之研究，內政部建築研究所協同研究報告。
11. 陳瑞鈴、朱佳仁，2012，集合式住宅對建築物自然通風的影響，內政部建築研究所協同研究報告。
12. 方富民、黎益肇，2014，大型建築物自然通風之分析研究，內政部建築研究

所委託研究報告。

13. 林憲德等，2014，綠建築評估手冊-基本型(2015 年版)，內政部建築研究所委託研究報告。
14. 黃瑞隆等，2015，自然通風與室內熱環境之實證研究，內政部建築研究所委託研究報告。
15. Chen, Q., and Jiang, Z., 1992, Significant questions in predicting room air motion, ASHRAE Transaction, 98(1), 929-939.
16. Chen, Q., 1996, Prediction of room air motion by Reynolds-stress models, Buildings & Environment, 31, 233-244.
17. Dascalaki, E., Santamouris, M., Bruant, M., Balaras, C.A., Bossaer, A., Ducarme, D., and Wouters, P., 1999, Modeling large openings with COMIS, Energy & Buildings, 30, 105-115.
18. Ohba, M., Irie, K., and Kurabuchi, T., 2001, Study on airflow characteristics inside and outside a cross-ventilation model, and ventilation flow rates using wind tunnel experiments, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 89, 1513-1524.
19. Haghighi, F., Li, Y., and Mergi A. C., 2001, Development and validation of a zonal model-POMA, Building & Environment, 36, 1039-1047.
20. Heiselberg, P., Svild, K., and Nielsen, P. V., 2001, Characteristics of airflow from open windows, Building & Environment, 36, 859-869.
21. Chang, T.J., Huang, M. Y., Wu, Y. T., and Liao, C.M., 2003, Quantitative Prediction of Traffic Pollutant Transmission into Buildings, Journal of Environmental Science and Health Part A : Toxic/Hazardous Substance & Environmental Engineering, A38, 1025-1040.

22. Allocca, C., Chen, Q., and Glicksman L.R., 2003, Design analysis of single-side natural ventilation, *Energy & Building*, 35, 785-795.
23. Jiang, Y., Alexander, D., Jenkins, H., Arthur, R., and Chen, Q., 2003, Natural ventilation in building : measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 91, 331-353.
24. Kurabuchi, T., Ohba, M., Endo, T., Akamine, Y., and Nakayama, F., 2004, Local dynamic similarity of cross-ventilation, Part 1 : Theoretical framework, *International Journal of Ventilation*, 2, 371-382.
25. International Standard ISO 7730, 2005, Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, Switzerland.
26. Tan, G., and Glicksman, L. R., 2005, Application of integrating multi-zone model with CFD, *Energy and Buildings*, 37, 1049-1057.
27. Mochida, A., Yoshino, H., Takeda, T., Kakegawa, T., and Miyauchi, S., 2005, Method for controlling airflow in and around a building under cross- ventilation to improve indoor thermal comfort, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 93, 437-449.
28. Seifert, J., Li, Y., Axley, J., and Rosler, M., 2006, Calculation of wind-driven cross ventilation in buildings with large openings, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 94, 925-947.
29. Evola, G., and Popov, V., 2006, Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings, *Energy & Buildings*, 38, 491-501.

30. Karava, P.m, Stathopoulos, T., and Athienitis, A. K., 2007, Wind-induced natural ventilation analysis, *Solar Energy*, 81, 20-30.
31. Hu, C. H., Ohba, M., and Yoshie, R., 2008, CFD modeling of unsteady cross ventilation flows using LES, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 96, 1692-1706.
32. Gao, N. P., Niu, J. L., Perino, M., and Heiselberg, P., 2008, The airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings : Tracer gas simulation, *Building & Environment*, 43, 1805-1817.
33. Brager, G., and Baker, L., 2009, Occupant satisfaction in mixed-mode buildings. *Building Research & Information* 37:369–380.
34. Chu, C.R., Chiu, Y.H., Chen, Y.J., Wang, Y.W., and Chou, C.P., 2009, Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross-ventilation, *Building & Environment*, 44, 2064-2072.
35. Newsham, G.R., Mancini, S., and Birt, B.J., 2009, Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but... *Energy & Buildings* 41:897–905.
36. Schlueter, A., and Thesseling, F., 2009, Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. *Automation in Construction* 18:153–163.
37. ANSI/ASHRAE Standard 55-2010, 2010, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta GA.
38. Alahmad, M., Nader, W., and Neal, J., et al, 2010, Real time power monitoring & integration with BIM. IECON - th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society
39. Tung, Y. C., Shih, Y. C., Hu, S. C., and Chang, Y. L., 2010, Experimental

- performance investigation of ventilation schemes in a private bathroom, *Building & Environment*, 45, 243-251.
40. Chu, C. R. Chiu, Y. H., and Wang, Y. W., 2010, An experimental study of wind-driven cross ventilation in partitioned buildings, *Energy & Buildings*, 42, 667-673.
41. Watson A, 2011, Digital buildings – Challenges and opportunities. *Adv Eng Inf* 25:573–581.
42. Woo J. H., Diggelman, C., Abushakra, B., 2011, BIM-based energy monitoring with XML parsing engine. In: *Proceeding of the 11th ISARC*. Seoul, Korea, pp 544–545.
43. USGBC, 2013, *Guide to LEED Certification*.
44. Jalaei, F., 2014, Integrating Building Information Modeling (BIM) and Energy Analysis Tools with Green Building Certification System to Conceptually Design Sustainable Buildings. *ITcon* 19:494–519.
45. Porter, S., Tan, T., Tan, T., and West, G., 2014, Breaking into BIM: Performing static and dynamic security analysis with the aid of BIM. *Automation in Construction* 40:84–95.
46. Holmström, J., Singh, V., and Främling, K., 2015, BIM as Infrastructure in a Finnish HVAC Actor Network: Enabling Adoption, Reuse, and Recombination over a Building Life Cycle and between Projects. *J Manage in Eng* 31:A4014006–12.
47. Tuohy, P.G., and Murphy, G.B., 2015, Closing the gap in building performance: learning from BIM benchmark industries. *Archit Sci Rev* 58:47–56.
48. Allen, J.G., MacNaughton, P., Satish, U., et al, 2016, Associations of Cognitive

- Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. *Environmental Health Perspectives* 124:805–812.
49. Tu, K. J., and Vernatha, D, 2016, Application of building information modeling in energy management of individual departments occupying university facilities. *Int. J. Civil Environ. Struct Constr Archit Eng* 10:225–231.
50. Lu, Y., Wu, Z., Chang, R., and Li, Y., 2017, Building Information Modeling (BIM) for green buildings_ A critical review and future directions. *Automation in Construction* 83:134–148.
51. Somboonwit, N., Boontore, A., and Rugwongwan, Y., 2017, Obstacles to the automation of building performance simulation: adaptive building integrated photovoltaic (BIPV) design. In: *th AMER International Conference on Quality of Life*. Bangkok, Thailand, pp 25–27.
52. Pasini, D., 2018, Connecting BIM and IoT for addressing user awareness toward energy savings. *Journal of Structural Integrity and Maintenance* 3:243–253.
53. Porter, S., Tan, T., Wang, X., and Pareek, V., 2018, LODOS - Going from BIM to CFD via CAD and model abstraction. *Automation in Construction* 94:85–92.
54. Kamel, E., and Memari, A.M., 2019, Review of BIM's application in energy simulation_ Tools, issues, and solutions. *Automation in Construction* 97:164–180.
55. Issa, J., Ramaji, John, I., Messner, Robert, M., and Leicht, 2016, Leveraging building information models in IFC to perform energy analysis in OpenStudio, Salt Lake City, pp. 251-258.