

# 冷凍空調系統智慧化之節能技術發展趨勢

## 一、前言

近幾年隨著工業科技及資訊化飛速進步，伴隨人類的生活型態改變及極端氣候變化，導致人們越加依賴暖空調系統(heating, ventilation and air conditioning, HVAC)，從過去資料顯示建築物占全球能源使用量的 40%，占二氧化碳排放總量 30%[1]，空調系統為建築物中最耗能的設備[2]，國際能源署(International Energy Agency, IEA)更是在「The Future of Cooling」中指出 HVAC 總用電量占比 20%，為全球總用電量的 10%，推估 30 年後成長比率將高達 45%，空調耗能將成為僅次於工業的第二大電力需求，於 2050 年耗能比將占建築物的 15%(如圖 1-1 所示)，同時反映在全球市場規模上 (2018 年達 1087 億美元)[3]–[5]，位處亞熱帶地區的臺灣對於空調系統的依賴性更是高於多數國家，未來日漸高升的空調耗能及用電量將遠高於前言所敘。

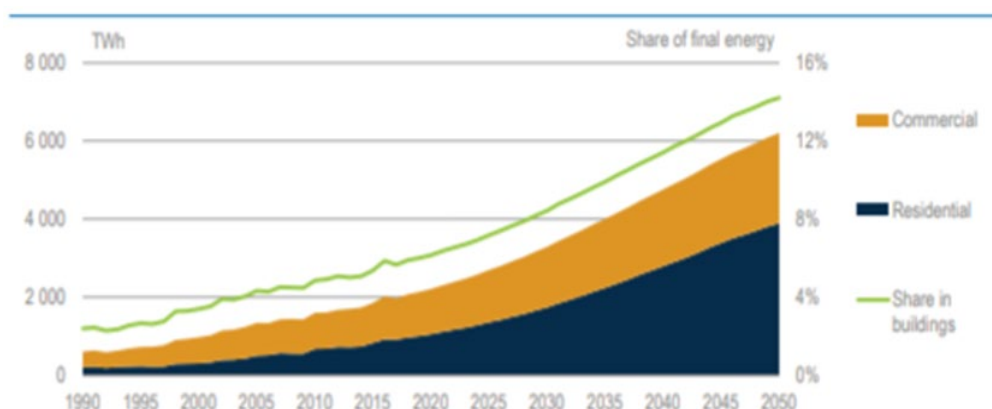


圖 1-1 2050 年全球空調系統耗能比 [5]

依據能源局統計資料顯示臺灣能源的消耗與電力的使用量日漸攀升，而能耗較大的系統，便以空調系統、空壓機系統及製程設備等為大宗，尤以空調系統為各部門共同之主要能耗來源，工業部門約占 7.2%及住商部門占 40.8%(如圖 1-2 所示)，故工業與住商部門共消耗全台灣 9.1%的能源，約 238 億度電，空調用電並非平均分布，與溫度具有高度正相關，若能有效降低空調用電，則可以使得尖峰用電下降，降低缺電狀況的發生。由於空調系統為建築物中增長最快的耗能來

源，提高空調系統的能源效率轉換，同時保持熱舒適性是極為重要的課題[6][7]，透過妥善的控制方法及控制器配置進行有效控制空調系統可以降低設備的能源耗損[8]，依賴電力之工業可以通過智慧化調用空調電力模式來降低電力投入之成本，單一設備過去在能源局主導之節能標章及其技術創新與改善等節能政策措施多年的努力下，國內業界推廣之設備效率提升已逐漸達到技術的物理極限，其所帶來的節能效果已趨近於飽和，美國建築能源管制規範(ASHRAE 90.1)發展建議(如圖 1-3 所示)未來若要接近零耗能建築的可能途徑為國際節能技術將朝系統能效方向邁進[9]。

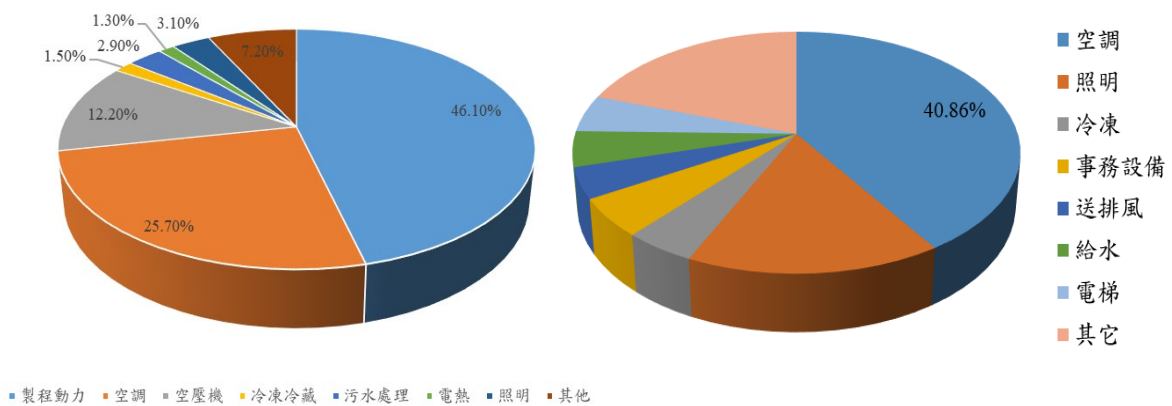


圖 1-2 台灣用電占比: 工業部門(左圖)及住商部門(右圖)

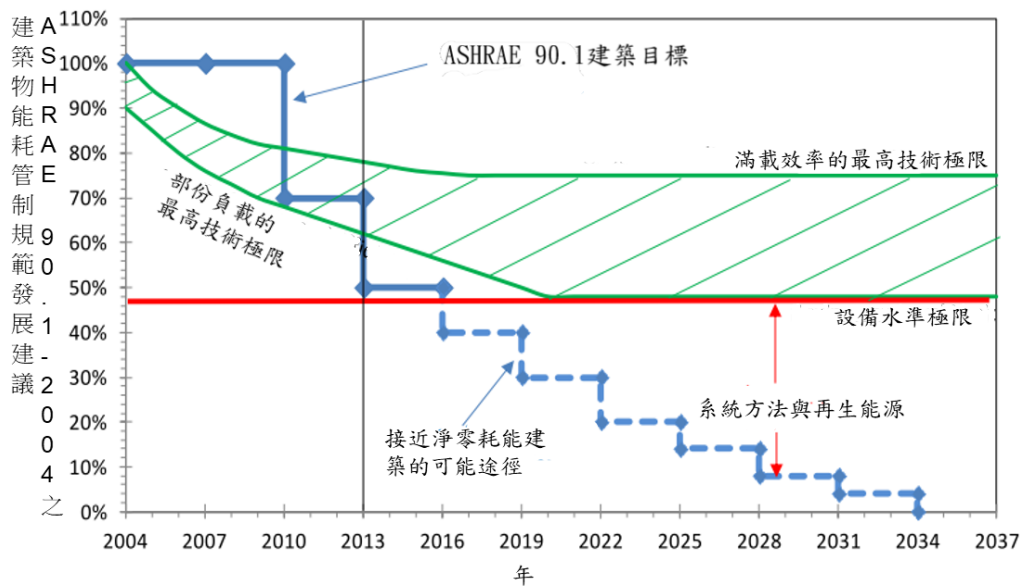
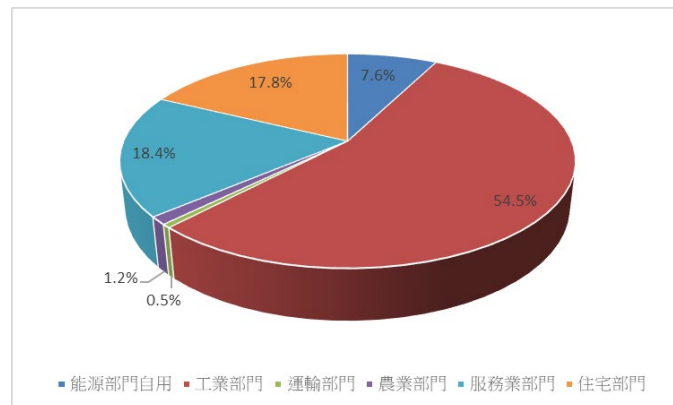


圖 1-3 美國建築物能源管制規範 (ASHRAE 90.1) 發展建議

依據經濟部能源局 2018 年能源統計，台灣地區服務業部門電力消費量 485.34 億度，約占全國總電力消費量 2614.38 億度電之 18.36%，其中零售業耗電約 41.25 億度(如圖 1-4 所示)。以國內主要食品零售業之冷凍空調耗電而言，便利商店冷凍空調年耗電量約 14 億度，超級市場之冷凍空調年耗電量約 9 億度，量販店之冷凍空調年耗電量約 2.5 億度，三者之冷凍空調總合年耗電量超過 23 億度(如表 1-1 所示)，而其中超市之冷凍冷藏系統耗電比例更高達 70%之高。



資料來源: 經濟部能源局 2018 年能源統計年報

圖 1-4 國內各部門電力消費比例

表 1-1 國內主要食品零售業冷凍空調系統耗電情形

商業場所	開店數	平均每店 電力容量	冷凍空調系統 年耗電量(億度)	冷凍/空調 用電比(%)
便利商店	10,574	25 kW	14 億度	50/25
超級市場	2,243	80 kW	9 億度	70/20
量販店	121	1,200 kW	2.5 億度	20/40

在美國，超市是商業建築中能耗最大者，冷凍空調設備耗電分別占賣場之 50%與 20%，其中耗能最大之冷凍冷藏設備則占商業部門之總能 7% [10]。而根據美國商業建築能耗調查，食品零售類建築能源使用強度(energy usage intensity, EUI)約 631 kWh/(m<sup>2</sup>·yr)，屬於前三大高耗能密度商業建築[11]。而在法國，大型超市之耗電占其全國總耗電之 4%，冷凍空調設備占賣場之 50%~70%，若要達

到平均建築能源使用強度(energy usage intensity, EUI)為 400 kWh/(m<sup>2</sup>·yr)則是相當大的挑戰 [12]。根據「超級市場節能技術手冊」調查統計[13]，國內生鮮超市每店每年用電量高達 114 萬度、每月平均用電 9.5 萬度。近年來，楊仁豪[14]針對國內生鮮超市用電設備調查與耗能解析，根據研究發現國內一般超市的 EUI 約為 600 kWh/(m<sup>2</sup>yr)，相較於國外確實仍屬於耗能密度較高的建築。更重要者是國內食品零售業之耗能比率逐年攀升，加上國內未來用電吃緊，在微利時代來臨，各家食品零售業者均積極尋求省能設備與技術，以節省公司營運成本，因此食品零售業整體省能技術開發為業者目前急需解決之一大問題。

國內目前中央空調系統控制技術的現況是以 PLC 儲存指令，執行邏輯、順序、計時、計數與演算等功能，藉數位或類比模組輸入輸出信號，進行單一設備控制，進一步藉由 IOT 閘道器及雲端通訊控制去進行遠端能源管理系統 (Energy Management System, EMS)資料的收集，目前中央空調系統逐漸邁向以人工智慧相關控制方式對次系統設備及物件之集和進行群控，並進行有系統的整合及控制策略達到前言所述的提高空調系統的能源效率轉換，保持熱舒適性的需求 [1][5][15][16]，本研究以國內外工業空調系統智慧節能技術相關文獻為分析對象，探討現今及未來空調系統智慧節能技術發展趨勢及技術重點，未來將擬定合適於我國之策略導向，以達到空調系統智慧節能技術發展與策略之目標。而國內食品零售業者長期積極尋求整體節能之節能方案，但坊間之相關技術產品並無法滿足國內業者之需求，無論是價格或功能(尤其節電效益)等，同時國內目前尚無智慧化控制與系統整合技術(大部分為一般或單一控制等級)，透過智慧控制技術不僅可以隨時讓冷凍系統處於最佳運轉狀態而達到節電效果，並且可以有預知保養(predictive maintenance)，進而減省大量人力成本與運轉成本，提升其市場競爭力。而由於國外技術產品價格昂貴回收期長，因此無法業者採用意願相對不高，依據過往工研院開發變頻控制技術並實際應用於國內超市/便利店即為實際案例，因此規劃開發符合國內食品零售業者需求之冷凍系統智慧化節能控制技術將是本研究未來之主要發展重點。

## 二、國際現況

由於國際對於系統化與智慧化之定義尚不明確，本研究收集分析國際文獻資料，並針對冷凍空調系統化與智慧化之定義分述如下：

單一設備效率發展已達物理極限，節能效益成長不顯著。考量一系統中全部設備與整合各感測資訊，達到整體系統/次系統優化控制，而達到系統節能成效，ASHRAE90.1 已建議中央空調系統應考量整體使用效率，而非看單設備效率，如圖 2-1 所示。

### Chilled Water System Example (Alternate)

Alternate Systems Approach

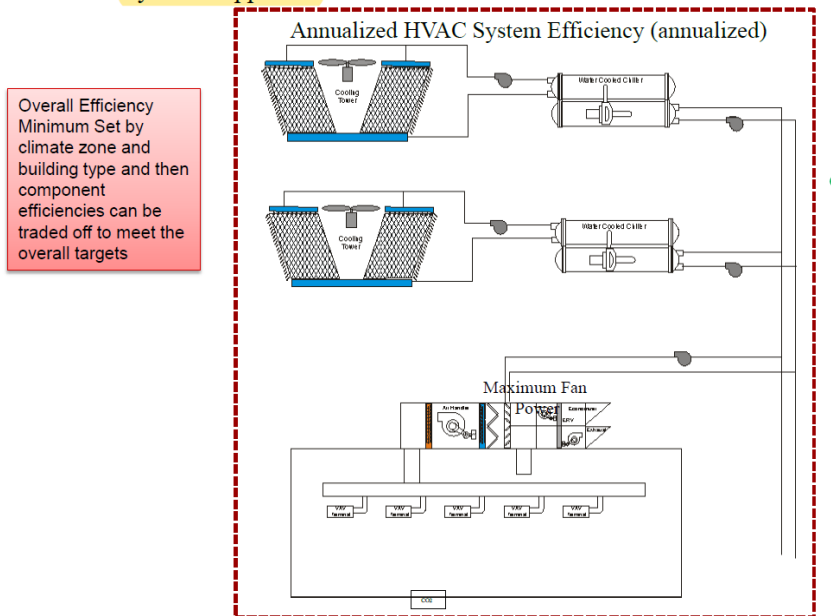


圖 2-1 ASHRAE90.1 建議之空調全系統效率概念圖

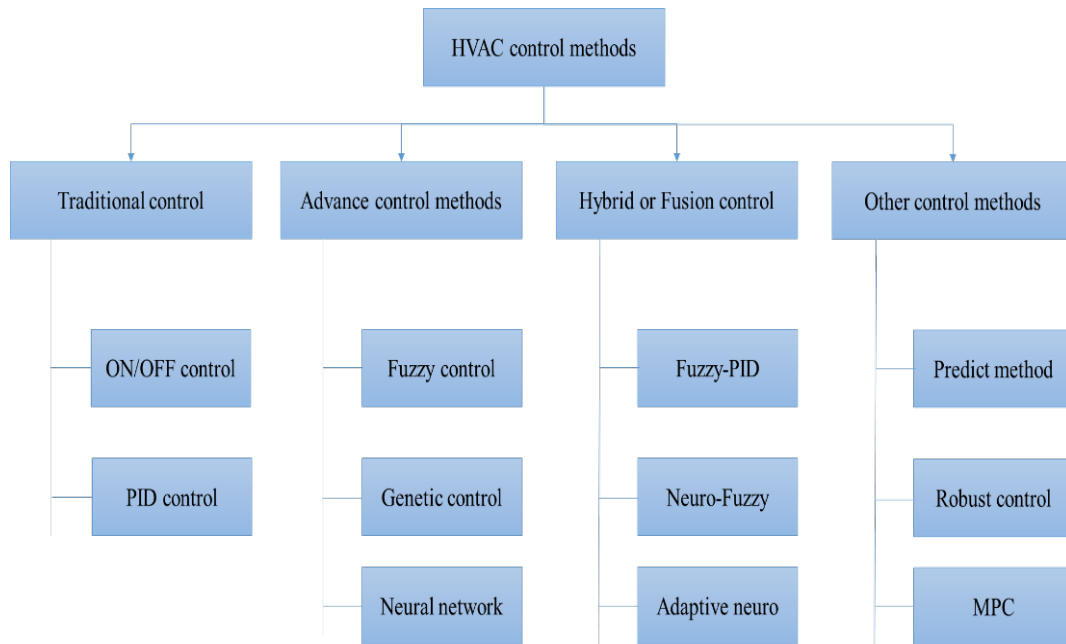
具備機械學習與 AI 演算邏輯，可提供整體系統最佳化決策（EX:整體最小耗能或最佳效率）功能，並具備自我學習與策略更新機制。整合上述文獻分析，本研究針對無智慧化控制、一般自動控制、輔助智慧化控制及全智慧化控制進行分類，並針對其定義、方法、功能效益及相關產品有初步的定義，如表 2-1 所示。



表 2-1 目前一般節能控制策略之分類與定義

	無智慧化控制	一般自動控制	輔助智慧化	全智慧化
定義	一般啟停控制 規劃的排程	基本單設備控制· 依目標值進行調整之 控制	具備最佳化演算控制 或決策者	具最佳化演算策略 並含自我學習更新機制
方法	啟停控制 一般排程控制	PID控制 一般模糊控制	基因演算法 類神經演算法 模糊-基因演算法	基因演算法+耗能模型 預測更新
功能	室內空調啟停 ON/OFF	室內溫度控制 25°C	室內溫度建議： 早：24.0°C 晚：26.0°C	室內溫度動態調控 並依人流多寡調整 24.0°C~26.0°C
	水泵啟停 ON/OFF	水泵流量控制 1500LPM	水泵流量設定 早：1500LPM 晚：1000LPM	水泵流量動態設定 並依負載需求調整 1500LPM~1000LPM

2018 年 Behrooz 等人彙整有關過去 10 年應用於空調系統之各類控制技術，其實空調系統與冷凍系統之基本控制原理與方法是相同，主要分為為傳統控制(Classical control)、硬控制(Hard control)、軟控制(Soft control)、綜合控制(Fusion control)和其他控制方法，同時也可以被歸類為傳統控制、先進控制、智慧控制和其他控制等方法，而其中部分控制方法有些重疊，不同應用控制方法如圖 2-2 所示[8]，而本文依據技術文獻分析後，將冷凍系統節能控制技術特點大致分類為(1) 無智慧化控制，為一般啟停控制規劃的排程，主要為控制冷凍系統的啟停；(2) 一般自動控制，依目標值進行調整之控制，主要為控制冷凍櫃內溫度；(3) 輔助智慧化控制，具備邏輯演算能力，但由使用者進行決策，主要為提供情境下的溫度或節能控制建議，如分別增加變頻系統、除霜控制、除霧控制等控制功能；(4) 全智慧化控制，具備邏輯演算能力，動態進行節能控制，並能給於使用者適當的反饋及決策建議，主要為冷凍系統之溫度與耗電的動態監控及調整，隨時維持於最佳之運轉模式。



資料來源：Afroz[8]

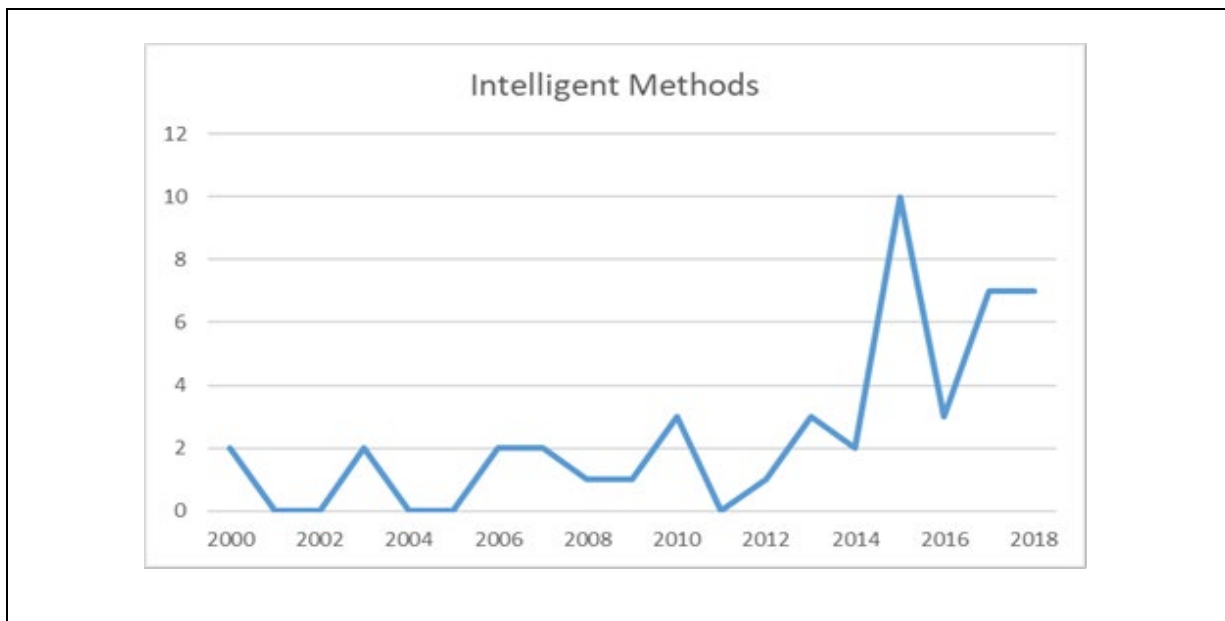
圖 2-2 不同控制技術分類

傳統控制方法為對啟停控制規劃排程的起/停控制(ON-OFF)為無智慧化的控制方法和依目標值進行調整之比例-積分-微分控制方法(Proportional, Integral and Derivative, PID)為一般自動控制方法，起停控制方法的優點是建設成本低及操作直觀且方便，缺點是準確性低且效率不高，不足以應付現今環境，而 PID 已是現今最多場域選用的控制方法，但控制調整較為複雜且在應付現今的多變量環境下，較難保持系統的高穩定性；輔助智慧化的方法，以最大程度的減少空調系統的能源使用量和操作控制所需的工作量，同時最大限度地維持熱舒適度及室內空氣品質，如模型預測方法(Model Predictive Control, MPC)、自適應控制(Adaptive control)及其他非線性控制(Non-Linear control)等方法，其能進行多變量控制，在現今的環境予以適當的回饋的同時仍維持一定的穩定性，對於非線性的動態過程變化可以快速的更改參數去應對，但在各式場域皆需要根據不同條件設計合適的控制器，面臨冷凍空調系統過多不穩定的狀態及操作複雜性時會受到一定的限制；智慧化控制具備邏輯演算能力，常見如類神經網路控制(Neural Network)、模糊邏輯控制(Fuzzy Logic)及遺傳演算法(Genetic Algorithm)等控制方法，在各場域的冷凍空調系統存在許多外界干擾、系統突發事件、設備及人為的

時間延遲及使用者熱舒適性的個別化等非線性及非穩態的系統複雜性問題，若針對各系統建構合適控制器是有困難的，因此智慧控制基於資料科學建構模型，藉由大量資料的更迭及不同變量的輸入使模型更適用於各場域的系統不穩定性及操作複雜性等個別化問題，並逐漸邁向自動決策及即時更新的能力，更能對使用者建立良好的舒適性及系統效能的回饋，但在資料前處理及前期模型訓練需要時間及大量的資料量輔助；綜合控制即是指綜合軟控制及硬控制或兩種軟控制方法的組合，依據過去數據指出使用綜合方法比單獨使用一種控制方法在效率上有更佳表現。

依據上述，冷凍空調系統的控制方法主要分為四種，無智慧化控制、一般自動控制、輔助智慧化控制及智慧化控制方法，無智慧化控制及一般自動控制方法仍應用在大多數空調系統的場域，但是由於技術的侷限性及擴充彈性，在未來發展較難單一運作，需要透過其他先進控制方法的整合才會符合使用者的需求及系統控制技術的發展趨勢[10]。技術發展趨勢導向從半世紀前對如 MPC 等預測方法的廣泛研究，但礙於大型商業的複雜環境漸增，MPC 其參數的調整性越加困難導致建置成本及錯誤率攀升[11]，到現今對於軟控制(智慧控制)如結合了遺傳演算法、類神經網絡或基於模糊邏輯控制等控制方法的應用提升，不但在提高系統效率及熱舒適度上有良好的表現，透過需量反應(Demand Response)的呼應在複雜的環境下也相對好實現，回顧常被應用於智慧化控制各式空調系統中的強化學習(Reinforcement learning)，其通過環境及使用者回饋直接集成至控制邏輯中來適應環境及人為喜好，輔助智慧化及智慧化控制逐年發展呈上升趨勢(如圖 2-3 所示)，而從控制策略及各種類文獻逐年發表數量說明無智慧化及一般自動控制呈現下降趨勢。從技術發展上可以分類為(非)線性模型類型及建立模型的方法，冷凍空調系統多為複雜的多為非線性系統，但多數研究將其視為線性或透過線性化的相關方法進行模型設計，而建立模型的方法則是以數學模型、資料科學或綜合前兩種的方法去生成模型，如今越多研究著眼於冷凍空調系統整體的運行(包含系統運作要素、各區域熱條件及其他可能影響條件)。





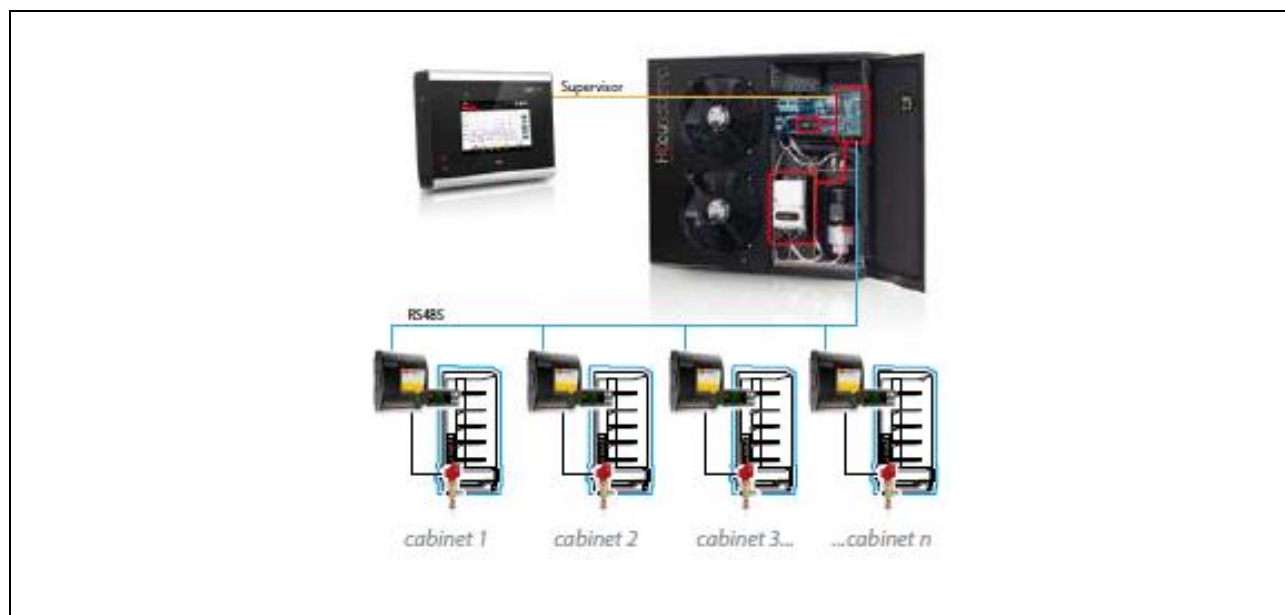
資料來源：Belic[10]

圖 2-3 智慧化控制逐年發表量

相較於傳統的空調系統，在空調系統中運用 AI 相關方法能有效實現降低能耗及整體成本，輔助智慧化控制及智慧化控制方法所具備的優勢，如(1)能耗更低、(2)設備性能可預測性及(3)系統遠端控制及調整，通過空調系統智慧化更能在使用者舒適度提升的同時降低能源耗損(Ahmadetal.,2016)。在節能方面通過設備監控數據及環境變化量的蒐集，能進行即時的能耗診斷、能耗預測及設備故障預測，進而提高系統運作的效能，同時通過外氣及人流變化來調節空調系統，達到自適應的效果，在最低耗能的情況下保持良好的人體舒適度(Zhangetal.,2019)。市場需求越加成長，根據 ZionMarket 的研究報告指出 2025 年，全球空調系統智慧化市場預計將達到近 283 億美元，而 2018 年已為 83 億美元(ZionMarket,2019)，目前社會正逐漸擺脫獨立的設備進入 AIoT 的領域，空調系統智慧化需要透過 IoT 技術來實現遠端控制與管理，AIoT 的實際應用正飛快成長，同時我們必須注意系統資訊安全的問題，空調系統將邁向系統化與智慧化的里程，如 HoneywellD6 可根據用戶位置判斷啟停時間，並藉由交流電變化量控制運作時間，現今空調系統市場越來越多的企業和新創公司涉足 AIoT 的領域，對於恆溫器及控制器上已有成熟產品，如 Tado 智能恆溫器、GoogleNest 智能恆溫器及

Honeywell 智能控制器等，透過越多成熟的 IoT 裝置運用於空調系統上將為用戶帶來高節能及舒適度的環境，為實現空調系統智慧化效益最佳化，設備彼此間的串連已是關鍵要素，如何在通訊和連接上進行廣泛的機器學習應用及部屬是當今的重要課題。

近年來，國外食品零售業已開始朝系統與智慧化之整體節能技術開發，2016 年 12 月 CAREL 與通用富士(general Fuji refrigeration)合作[14]，研發了中國市場的第一台 Hecu 變頻冷凝機組並安裝於廣州益萬家(YiWanJia)超市，該超市銷售面積 3000 m<sup>2</sup>，製冷系統採用 HECU 高效解決方案。由於 SCI BLDC 渦卷式壓縮機與 CAREL 直流變頻器結合，可隨不同冷凍負載進行調變，因此其能效較其它技術更高，如圖 2-4 所示。此案自 2017 年 1 月開始透過 PlantVisorPRO 能管系統平台擷取能耗資料，經過兩個月數據分析，益萬家新展店 R410A 變頻機組較一般傳統 R404A 定頻機組門市平均節能為 27%；月節省費用 7600¥；預計回收年限約 16 個月，且具有較高之食品溫度控制品質。現在 Hecu 冷凍冷藏控制系統正應用於便利店與中型超市。



資料來源：Generalfushi & CAREL [14]

圖 2-4 Hecu 冷凍冷藏控制系統架構

國際系統整合(system integration, SI)大廠施耐德電氣(Schneider Electric)發展 IoT 的軟體、系統和服務協助超市業者，並利用數位化(digitization)來確保業務連續性、預防損失、設備可靠性、能源和運營效率以及互聯，以吸引消費者購物體驗[15]。該公司於 2016 年與埃及家樂福合作，透過 EcoStruxure™系統整合工具軟體，對於 19 家店之大型賣場進行能源與資訊管理。例如多站點遠端操作(multi-site remote operation)，使用可靠高效的工具確保超市系統隨時處於正常運行狀態，除維持賣場環境舒適度外，並解決超級市場的冷凍冷藏系統管理、維護問題和設備故障。此系統主要優點如下：平均節省 10%的運營成本，將業務連續性提高 8%，並將能源成本降低 5%。全天候監控即時資產狀況，並從任何智慧化設備遠端判斷問題。簡化維護工作流程，加快故障排除速度並減少停機時間。透過適當的溫度，濕度和氣流控制，改善賣場之舒適度。監控食品溫度以確保產品質量並符合 HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points) 法規。

而如施耐德電氣所開發的 Eliwell™系統工具，提供了冷凍冷藏系統一系列控制器，這些控制器可確保最佳地保鮮和冷凍食品，同時提供最高的能源效率(如圖 2-5 所示)。Eliwell™的監控系統透過智慧化演算法和便捷的工具，不僅簡化維護工作且提高了效率，其主要之控制功能如下：壓縮機機組(compressor rack)控制、冷藏櫃控制與冷藏室控制、溫度監控、冷媒洩漏檢測。其優點包括：整合具開放式管理之先進控制和監控系統，以提供超市冷凍冷藏系統管理解決方案，可全面了解能效控制、食品品質和維護優化；展現先進冷凍冷藏系統之能源效率，並減少食物損失；透過計畫性(scheduled)和預測性維護來延長組件使用壽命。

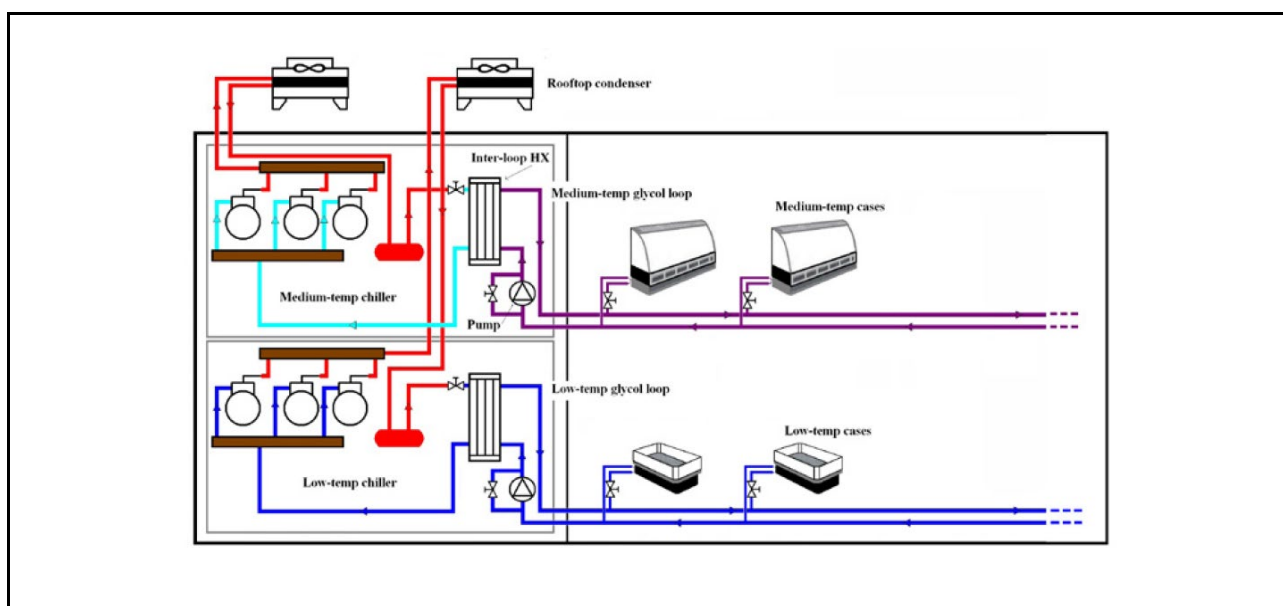
Eliwell™ by Schneider Electric products and solutions



資料來源：[15]

圖 2-5 施耐德電氣 Eliwell™之控制器與產品

2018 年 國際冷凍協會(International Institute of Refrigeration, IIR)主席 Renato Lazzarin 與副主席 Yunting Ge 基於能源與環保議題，提出超市冷凍系統之先進作法[16]，透過修改冷凍系統之配置與元件，以降低耗能。而新系統(分散式)則不僅操作效率提高，且減少冷媒填充與冷媒洩漏。另外，採用二次冷媒系統(secondary loop system)則機房與賣場分開，亦可減少冷媒排放，如圖 2-6 所示[17]。同時最近亦在發展單獨壓縮機之展示櫃與水冷式冷凝機組。

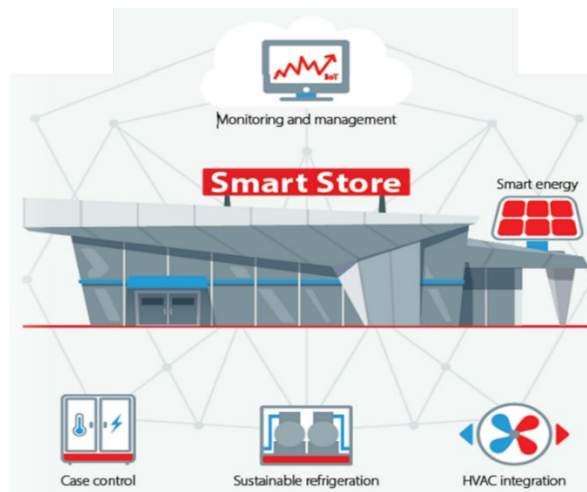


資料來源：Subbaram Naidu & Rieger [17]

圖 2-6 二次冷媒系統示意圖

國際冷凍冷藏系統之先驅者 Danfoss 公司於 2018 年提出 smart store 節能方案(如圖 2-7 所示)，透過 5 種方法實現效率最大化，管理食品零售業的運營效率。電氣化、數位通訊和應對氣候變化等大趨勢正在為全球食品行業帶來機遇和挑戰。其針對全球五大趨勢提出五種技術策略，相互結合將有助於超市(食品零售業)保持領先地位，並在某些情況下受益於社會的新興需求[18]。





資料來源：danfoss [18]

圖 2-7 智慧商店示意圖

使用智慧化展示櫃控制技術降低運營成本：為了優化製冷效率，使容量與需求匹配非常重要。例如 Danfoss ADAP-KOOL®系列這樣的自調式展示櫃控制器 (adaptive controller) 可以平衡製冷性能和負載。而且，自適應過熱控制算法可保持最低的穩定過熱，維持足夠的冷卻空間。高級控制器通過系統管理器連接到 Internet 和壓縮機組(rack compressors)控制器。其不僅易於使用，簡化製冷系統的複雜性，並可集中以系統化方式優化效率。

連接到互聯網以消除食物浪費並削減服務成本：將冷凍系統連接到雲端不僅是一種趨勢。它為節省金錢和提高食品安全性提供了無限可能。使用線上即時監測，可以優化效率並節省整個零售鏈的成本。未來將可使用大數據在設備發生故障之前，準確預測哪些設備有發生故障的風險(即所謂預知保養)。

將選擇冷媒作為長期決策：冷媒選擇不僅對安裝有影響，而且對商店的使用壽命也有重大影響。例如，二氧化碳曾經被視為昂貴的選擇，最適合在寒冷的環境溫度下使用。但隨著如 Danfoss Multi Ejector Solution™ 之類的新技術開發，使其成為適用於所有氣候區和商店規模的可行方案，越來越國際業者受歡迎。在這種情況下，一個天然的，低 GWP 的替代品可能是一個不錯的長期選擇。

整合每家商店的系統以獲得規模經濟：一般超商/超市單獨的製冷系統都將熱量釋放大氣中，大多數零售商都為加熱和熱水系統額外再付費。若能將這些



設施共同整合，則可以減少商店的碳足跡，同時降低安裝和運營成本。整合後，商店的製冷系統通常也可以提供全部熱量，甚至不需要鍋爐。這種集中方案過去並不容易實現，但是，隨著二氧化碳的日益普及-而 Danfoss 的專用熱回收裝置則克服了此技術挑戰。

通過最適化需求降低能源價格：當超市能源效率方面提升後，在管理需求模式中逐漸地發現，成本降低速度變快。一旦最大負載減少，可以幫助降低商店一年中剩餘時間的能源價格，並可以節省基礎設施，例如使用較小的變壓器。在某些情況下，這種靈活性可以使零售商從其能源供應商處獲得獎勵。公用事業公司越來越多地尋求幫助，以使能源生產與需求相匹配-離峰電價優惠或尋求暫時減少用電量以管理短期“需量反應”事件(DR)。有多種方法可以達到此目的，例如使用電池組，更改維護安排或熱存儲能量。這可能包括預冷的冰櫃或使用製冰機裝載過量的可再生能源。

### 三、結論與建議

國際空調系統控制與智慧化技術的方法逐漸導向 AIoT 及智慧控制的方向，空調系統的智慧化及系統化將迎來新的節能機會，系統能耗最小化、熱舒適性、室內空氣品質及使用者的偏好是空調系統關鍵優化的目標，其進行系統化及智慧化最大的進步在於對系統設備中各類系統整合及資料的準確控制及靈活運用，同時有效改善建築物中空調系統的效能及設備壽命，實現能效提升且成本降低。國際空調系統控制與智慧化技術的方法逐漸導向 AIoT 及智慧控制的方向，未來將空調系統智慧化及串聯其他設備的控制系統將是提升整體能效之控制策略，

同樣，由目前國際發展趨勢發現，在食品零售業近年來已開始朝系統整合與智慧化節能與管理技術發展，國內目前尚未有整體智慧控制節能方案，基於此產業之人力與能源成本之因素，未來可以依循國外之成功案例作法，透過先進控制方法及控制器匹配，進行智慧化控制，以提升冷凍系統設備的能效，可減少人力

與電力成本，逐漸建立食品零售業之系統化與智慧化之節能技術，不僅可解決目前食品零售業所面臨之問題(人力與能源成本)，提升其市場競爭力，亦可促進產業技術升級與擴大節能減碳效益。

#### 四、參考文獻

- [1] M. W. Ahmad, M. Mourshed, B. Yuce, and Y. Rezgui, “Computational intelligence techniques for HVAC systems: A review,” *Building Simulation*, vol. 9, no. 4, pp. 359–398, 2016, doi: 10.1007/s12273-016-0285-4.
- [2] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, “A review on buildings energy consumption information,” *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [3] I. Energy Agency, “Key World Energy Statistics 2015,” *International Energy Agency*, 2015.
- [4] I. E. Agency, “Key World energy Statistics 2019,” *International Energy Agency*, 2019.
- [5] F. Birol, “The future of cooling: opportunities for energy-efficient air conditioning,” *International Energy Agency*, 2018.
- [6] M. Shin and J. S. Haberl, “Thermal zoning for building HVAC design and energy simulation: A literature review,” *Energy and Buildings*, vol. 203. Elsevier Ltd, p. 109429, Nov. 15, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109429.
- [7] W. Jung and F. Jazizadeh, “Human-in-the-loop HVAC operations: A quantitative review on occupancy, comfort, and energy-efficiency dimensions,” *Applied Energy*, vol. 239. Elsevier Ltd, pp. 1471–1508, Apr. 01, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.070.
- [8] Z. Afroz, G. M. Shafiullah, T. Urmee, and G. Higgins, “Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 83. Elsevier Ltd, pp. 64–84, Mar. 01, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.044.
- [9] R. Lord, “Potential Opportunities for use of the Smart Grid for Commercial

HVAC Equipment,” 2015.

[10]F. Belic, Z. Hocenski, and D. Sliskovic, “HVAC control methods - A review,” in *2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2015 - Joint Conference SINTES 19, SACCS 15, SIMSIS 19*, Nov. 2015, pp. 679–686, doi: 10.1109/ICSTCC.2015.7321372.

[11]A. Afram and F. Janabi-Sharifi, “Theory and applications of HVAC control systems - A review of model predictive control (MPC),” *Building and Environment*, vol. 72. Elsevier Ltd, pp. 343–355, Feb. 01, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.11.016.

[12]C. Zhang, X. Xue, Y. Zhao, X. Zhang, and T. Li, “An improved association rule mining-based method for revealing operational problems of building heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems,” *Applied Energy*, vol. 253, p. 113492, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113492.

[13]Zion Market, “Global Smart HVAC Control Market Will Reach USD 28.3 Billion By 2025: Zion Market Research,” 2019.

[14]Generalfushi and CAREL, “Hecu sistema Real comparison between different technologies,” 2016.

[15]“Schneider Electric,” *Schneider Electric*, 2020.

<https://www.se.com/ww/en/work/solutions/for-business/retail/supermarkets.jsp#>.

[16]IIF-IIR and L. R, “Advancements in supermarket refrigeration, 37th Informatory Note on refrigeration technologies.,” Mar. 2018. <https://iifiir.org/en/fridoc/141137> (accessed Jun. 19, 2020).

[17]D. Subbaram Naidu and C. G. Rieger, *Advanced control strategies for heating, ventilation, air-conditioning, and refrigeration systems - An overview: Part I: Hard control*, vol. 17. 2011.

[18]danfoss, “Smart store,” *Smart store*, 2020.

<https://www.danfoss.com/en/markets/food-and-beverage/dcs/smart-store/#tab-contact-us>.