抽排風節能技術
應用手冊

經　濟　部　能　源　署　指導

財團法人台灣綠色生產力基金會 編印

中 華 民 國 114 年 11 月

目錄

一、 前言 1

二、 抽排風機介紹 2

2.1 風機定義 2

2.2 風機基礎分類 2

2.2.1 軸流式風機 (Axial Flow Fans) 3

2.2.2 離心式風機 (Centrifugal Fans) 3

2.2.3 混流式風機 (Mixed Flow Fans) 4

2.2.4 橫流式風機 (Cross Flow Fans) 5

2.2.5 無殼式風機(Plug Fans) 6

2.2.6 EC 風機（Electronically Commutated Fan） 7

2.2.7 風機其應用特性 8

2.3 風機性能基礎判定 9

2.4 風機選型依據 10

2.4.1 靜壓 10

2.4.2 風量 11

2.4.3 噪音 11

2.4.4 風機整體效率 12

2.5 電氣規格 13

2.5.1 適用電壓與頻率 (Voltage & Frequency) 13

2.5.2 額定電流 (Rated Current / FLA) 14

2.5.3 馬達效率 (Motor Efficiency) 14

2.5.4 防護等級 (IP Rating) 15

2.5.5 絕緣等級 (Insulation Class) 16

三、 風機性能測試 18

3.1 性能測試的目的與重要性 18
3.1.1 風機設計驗證與標示符合性 18
3.1.2 品質管制 18
3.1.3 系統匹配選型與設計依據 19
3.1.4 能效評估 20
3.2 測試依據之國際與國內標準 21
3.3 關鍵性能測試項目與定義 22
3.4 測試環境與設備架設 (風室法) 23
3.5 噪音測試 24
四、 系統設計介紹 26
4.1 風管設計 26
4.1.1 速度法(Velocity Method) 26
4.1.2 等摩擦法（Equal Friction Method） 26
4.1.3 靜壓再得法(Static Pressure Recovery Method) 27
4.1.4 T 方法(Total System Design Method) 29
4.1.5 設計目標 30
4.2 風機匹配 31
4.3 風機耗能原因 32
4.3.1 系統設計因素（管路與配置） 32
4.3.2 設備因素（風機及驅動元件） 33
4.3.3 控制與運轉因素（策略與維護） 33
五、 局部排氣（Local Exhaust Ventilation, LEV） 35
5.1 排氣罩類型與適用情境 35
5.1.1 包圍型排氣罩（Enclosing Hood） 35
5.1.2 接收型排氣罩（Receiving Hood） 36

5.1.3 捕集型排氣罩（Capturing Hood）.....37
5.2 排氣罩設計原則.....38
5.2.1 局部排氣搬運風速.....39
5.2.2 排氣罩運行與維護要點.....40
六、 風機節能技術.....42
6.1 高效率風機與馬達選用.....42
6.2 風管系統優化與阻力降低.....43
6.3 變頻控制與智慧化管理.....44
6.4 維護管理與運行優化.....45
七、 節能案例分享.....46
八、 結語.....51
九、 參考文獻.....52

圖目錄

圖 1 軸流式風機.....3

圖 2 離心式風機.....4

圖 3 混流式風機.....5

圖 4 橫流式風機.....6

圖 5 無殼式風機.....7

圖 6 馬達銘牌.....13

圖 7 馬達效率分級圖.....15

圖 8 馬達絕緣等級圖.....17

圖 9 風機 Q–P 及系統阻抗曲線圖 20

圖 10 ISO 5801 風機測試管路安裝類別(ISO 5801:2017 手冊 P14)(Standardization, 2017) 22

圖 11 AMCA 風室法出口風箱圖(AMCA 210-25 手冊 P53) (AMCA, 2025) 24

圖 12 AMCA 風室法入口風箱圖(AMCA 210-25 手冊 P57) (AMCA, 2025) 24

圖 13 穆迪圖(Colebrook, 1939).....30

圖 14 局部排氣系統示意圖.....35

圖 15 包圍型排氣罩.....36

圖 16 接收型排氣罩.....37

圖 17 捕集型排氣罩.....38

圖 18 狹縫型排氣罩.....39

圖 19 IE3 及 IE4 效率比較圖(IEC, 2014).....43

圖 20 導流板圖.....44

圖 21 高雄某賣場停車場風機監控圖.....46

圖 22 高雄某賣場停車場風機圖.....46

圖 23 台中某賣場風機監控圖.....47

圖 24 台中某賣場停車場風機圖.....47
圖 25 新北某賣場風機監控圖.....48
圖 26 新北某賣場停車場風機圖.....48
圖 27 台中某賣場停車場風機監控圖.....49
圖 28 台北某百貨公司停車場風機監控圖.....50

表目錄

表 1 風機特性比較表.....9

表 2 馬達防護等級表.....16

表 3 局部排氣系統最小設計搬運風速表(Hygienists, 2010).....40

一、 前言

隨著國人生活品質提升及能源使用議題日益受到重視，隨著國人環境意識提升及建築能源使用量逐年攀升，加上台灣 2050 淨零轉型、邁向淨零排放目標，節能減碳成為重要的關鍵戰略行動之一。抽排風系統在各類建築中的能源消耗比例逐年攀升，特別是在大型商場、量販店、餐飲業及其他商業用途場所，其營運活動需仰賴抽排風設備以維持良好之作業環境與室內空氣品質。然而傳統抽排風設備普遍存在過度換氣、長時間運轉及風量控制不足等問題，導致系統整體能源消耗增加。因此，提升抽排風系統運轉效率、強化能源管理已成為重要課題。

依據能源主管機關歷年能源查核統計資料顯示，抽排風設備在部分商業場所之用電占比可達 10%～25%，其節能潛力相當可觀。若能藉由智慧化控制、需求調整策略、設備效率改善以及系統化管理等措施，不僅能有效降低能源耗用，更可兼顧空氣品質與環境安全，達成節能減碳之目標。

製造業場域之抽排風機節能應用與技術已另有相關技術手冊，內容涵蓋工廠製程排氣、局部排風、空污控制設備等工業用途之專業指引。因此，本手冊之內容範圍將聚焦於服務業用途場所之抽排風系統，包含商場、餐飲空間、停車場、辦公建築及其他以服務為主之場域，提供其適用之節能策略與實務案例，使相關從業人員能具體掌握改善方向。

本手冊主要針對服務業場所常見之抽排風需求，彙整系統運作原理、設備型式、節能診斷重點、控制策略及節能改善案例，協助使用者了解抽排風設備之能源行為，提高系統運轉效率，並評估具成本效益之節能改善方案。

財團法人台灣綠色生產力基金會與國立勤益科技大學冷凍空調與能源系吳友烈教授團隊合作，進行本手冊之編撰，期盼能提供各界在抽排風設備之規劃、選型、管理與維護等面向皆有所依循。未來亦期望藉此促進節能技術之推廣應用，提升建築能源使用效率，為節能減碳與永續發展貢獻一份心力。

二、 抽排風機介紹

抽排風機在各類通風與空調系統中扮演極為重要的角色，依據各種不同的工作場合與應用範圍，風機有各種不同的結構與尺寸大小。不同風機自然其可節能空間也不盡相同。為了能夠對症下藥，釐清如何才能有效改善風機系統耗電情形，首先必須對風機系統的設計與運作有一概念，以求提出合理且有效的風機節能措施。

2.1 風機定義

風機是一種將電能轉換為氣體動能與壓能的機械裝置，主要用於輸送空氣或其他氣體，以產生氣流或壓力。其基本構造包含電動機與裝有葉片的葉輪，藉由葉輪的旋轉，對氣體施加能量，使氣體流速增加並形成壓力差，從而推動氣流連續流動。風機的運轉能有效促進氣體流通，達到通風、換氣、冷卻、除塵及排煙等目的。透過風機的運作，可維持空氣循環、改善環境品質，並確保各類工業設備與建築設施的正常運行。鼓風機(Air Blower) 則是指出口壓力較大的風機，一般指在設計條件下，風壓為 30~200kPa 或是壓縮比為 1.3~3 的風機。

2.2 風機基礎分類

風機的基礎分類主要依據葉輪的構造特性及氣流的運動方向而定。風機在運轉時，藉由葉輪的旋轉使氣體獲得能量，產生靜壓與動壓的變化，進而形成穩定且連續的氣流循環，以達到空氣輸送與通風換氣的目的。其風機形式依照流體流動方向可分為 軸流式風機(Axial Flow Fans)、離心式風機 （Centrifugal Fans）、混流式風機 （Mixed Flow Fans）以及橫流式風機 （Cross Flow Fans）；依照機殼形式可分為蝸殼式風機 (Scroll Fans)以及無殼式風機(Plug Fans)；依照驅動方式可分為直結式風機(Direct Drive Fans)、皮帶式風機(Belt Drive Fans)以及 EC 風機(Electronically Commutated Fans)。各類型風機因其結構與氣流特性不同，而在使用場合上各具優勢，常應用於工業通風、空調系統及煙氣排放等不同領域。

2.2.1軸流式風機 (Axial Flow Fans)

軸流式風機（Axial Flow Fans），如圖 1 所示，是最常見的風機型式之一，其特點是空氣的流動方向與葉輪軸線平行，空氣以恆定距離直線穿過葉輪。當葉片旋轉時，葉片對氣體施加軸向的推進力，使空氣由進風口沿軸向排出至出風口，形成穩定的氣流。壓力的產生主要來自葉片的升力效應，氣體在通過葉片時能量增加，導致靜壓上升；同時，葉片對空氣的作用也產生切向分量，作為驅動扭矩的反作用，使氣流帶有一定旋轉運動。軸流風機結構簡單、重量輕、效率高、流量大，適用於通風、冷卻與換氣等大風量、低壓力比的應用，如工廠通風、隧道通風及冷卻塔做使用。其缺點為壓力提升能力有限，不適合高阻力管道系統，此外，若設計不當容易產生渦流(vortex)與噪音。為改善性能，常藉導流葉片或可調葉片設計，以提高效率與穩定度。

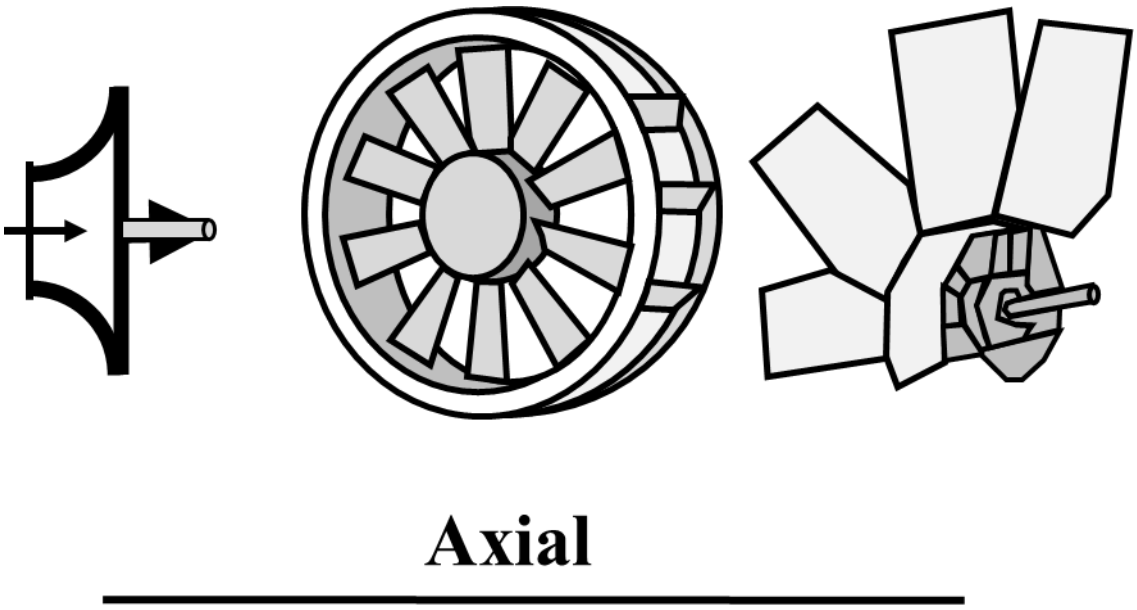


圖 1 軸流式風機

2.2.2離心式風機 (Centrifugal Fans)

離心式風機（Centrifugal Fans），是以葉輪旋轉產生離心力，使氣體由軸向進入、徑向排出的一種風機，如圖 2 所示。當空氣進入葉輪中心後，受葉片切向推動而改變流向，經由旋轉運動產生離心力，將氣體沿徑向甩出至外殼出口，形成

壓力上升與氣流輸送。壓力的提升主要源自離心力與氣體速度能轉換為壓力能的過程。根據葉片形狀不同，可分為前傾葉片、後傾葉片與徑向葉片三種，各具特性。離心式風機的優點是能產生較高靜壓，氣流穩定，可克服較大系統阻力，特別適合空調、集塵、鍋爐送風及排煙系統等需要中高壓力的場合，其效率穩定且噪音較低。缺點是體積較大、結構複雜，安裝空間需求高，且效率受葉片污染或磨損影響較為明顯。此外，流量相對軸流式風機較小，不適用於大風量低壓應用，為提升效能，常配合螺旋殼體或導流裝置以減少渦流損失並提高效率。

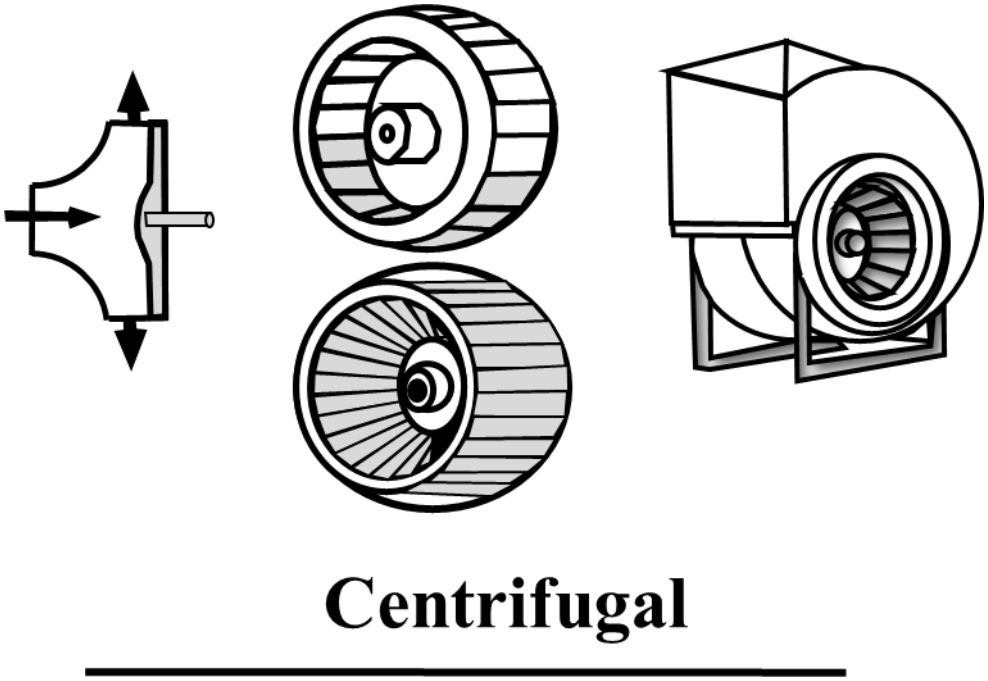


圖 2 離心式風機

2.2.3混流式風機 (Mixed Flow Fans)

混流式風機（Mixed Flow Fans），如圖 3 所示，又稱複合流風機，是介於軸流式與離心式之間的風機型式。其工作原理為空氣沿軸向進入葉輪後，經葉片導向在 30°至 80°的角度斜向排出。葉片設計具有彎曲延伸的形狀，使氣流同時受到軸向推力與離心力的作用，因此壓力上升是由葉片升力與離心效應共同造成的。混流式風機的流量與壓力性能介於軸流與離心風機之間，既能提供較大的風量，又可產生中等靜壓，適用於空調通風、隧道送排風及船舶、地下停車場等需要中

高壓風量的環境。其主要優點包括體積小、效率高、氣流穩定、噪音較低，並能在有限空間內提供良好通風效果；由於氣流方向傾斜，可減少氣流分離與渦流損失。缺點則是結構較複雜、製造成本較高，且維修不易，在高靜壓需求下效能仍不及離心式風機，在大風量低壓應用上又略遜於軸流式風機。

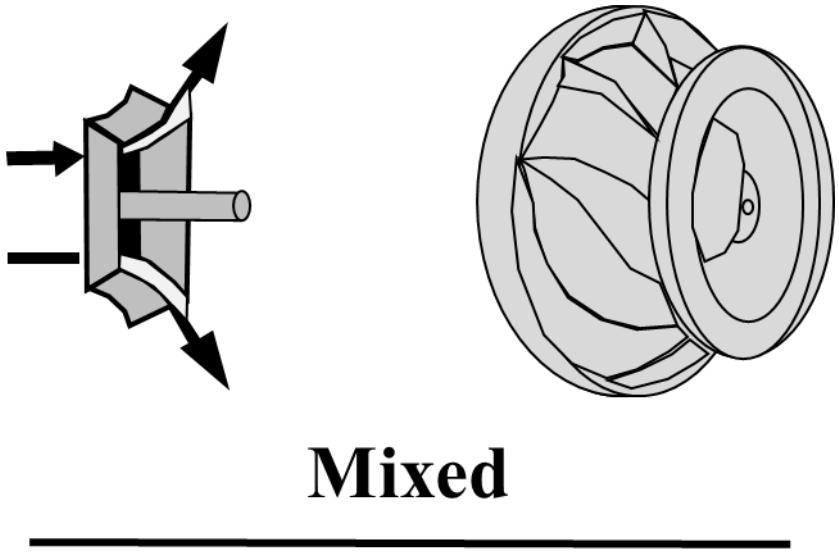
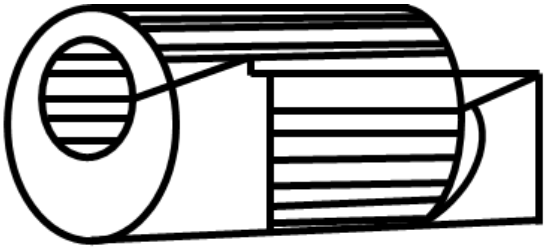


圖 3 混流式風機

2.2.4橫流式風機 (Cross Flow Fans)

橫流式風機（Cross Flow Fans），如圖 4 所示，又稱切向流風機，其氣流運動方向與葉輪軸線垂直。當葉輪旋轉時，氣流從葉輪一側切向進入，穿過葉片後在葉輪內部形成穩定的渦流，接著再次穿過葉片被導向出口排出。這種風機的氣流必須通過葉片兩次，因此能在較長的葉輪寬度上產生均勻的風速分佈。雖然外觀與離心式風機相似，但作用原理不同：離心式風機依靠離心力排氣，而橫流式風機主要利用葉片產生的渦流效應與壓力差維持氣流循環。其優點包括氣流分佈均勻、風速穩定、結構扁平、厚度小，特別適合應用於空調盤管、散熱器、電子設備冷卻及空氣簾機等需要長方形出風口與均勻風場的場合。此外，橫流式風機運轉平穩、噪音低、成本較低。缺點是壓力提升能力有限，僅適用於小阻力系統，效率較低，氣流在葉輪內的兩次通過容易造成能量損失，且不適合長距離或高靜壓輸送用途。



Cross Flow Fans

圖 4 橫流式風機

2.2.5無殼式風機(Plug Fans)

無殼式風機（Plug Fans）是一種將馬達與葉輪直接整合、並以自由出風方式運作的風機形式如圖 5 所示。其最大的特徵是沒有傳統離心風機所使用的「蝸殼結構」，因此又稱為無蝸殼風機、自由出風風機或無殼式離心風機。由於沒有風蝸限制，其氣流分布更為均勻，尤其適合空調箱（Air Handling Unit,AHU）、新風機組、資料中心冷卻系統以及各種需要搭配濾網或盤管的設備使用。無殼式風機通常採用後傾式離心葉輪，可在中高靜壓條件下運作，並支援模組化安裝，是現代節能風機發展的主流之一。在驅動方式方面，傳統無殼式風機多使用皮帶傳動或感應馬達，但隨著節能需求提升，現代則大量採用永磁式無殼風機（Permanent Magnet Plug Fan）。

永磁同步馬達（Permanent Magnet Synchronous Motor,PMSM）具有高效率及低損耗等特性。永磁式無殼風機大多搭配變頻器（Variable-frequency Drive,VFD）進行調速，使風量與靜壓可精準控制。永磁式無殼風機具備安靜、維護低、運轉平順的特點，特別適合中高靜壓且需要變風量控制的區域。無殼式風機因其高效率、易安裝、低噪音以及搭配風牆架構後的高可靠度特性，已逐漸成為空調與通風系統更新改裝的首選方案。其衍生技術，如永磁式無殼風機與 EC 風機，更進一步提升節能效益。

無殼式風牆（Shroudless Air Wall） 是近年於潔淨室、製程排氣與大型空調系統中逐漸受到重視的氣流管理技術，其核心概念是利用風機或噴流裝置直接在開放空間中形成具有方向性與穩定性的高速氣流層，藉由噴流的動壓與慣性作用將空氣隔離成不同區域，而不需要傳統的金屬風管或殼體包覆。此種設計可大幅降低風管製作、安裝與後續維護成本，同時避免傳統風管因彎頭、縮徑或粗糙度造成的額外靜壓損失，使系統整體能耗下降。無殼式風牆常應用於需避免交叉污染的場合，如半導體製程、實驗室操作區、倉儲空調分區等。由於風流直接作用於空間，反應速度快，亦可搭配感測器與 EC 風機進行即時調整，以維持風速、風量及氣流方向的穩定性。此外，在風道阻力大幅減少的情況下，風機可於較低靜壓下運轉，有助於降低噪音與能源消耗。

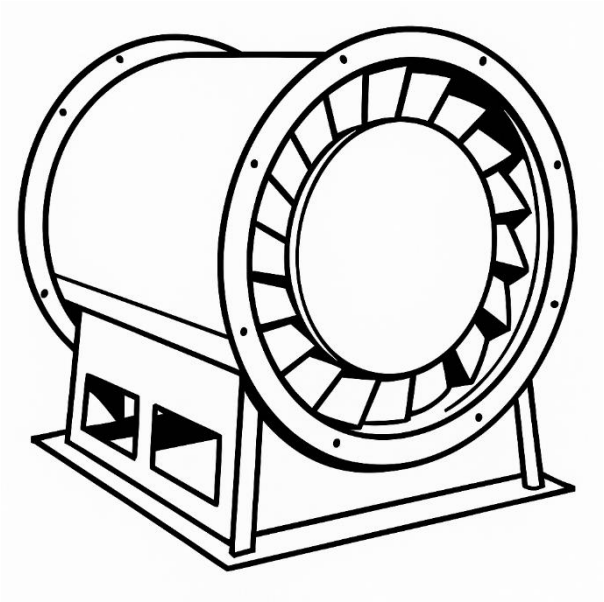


圖 5 無殼式風機

2.2.6 EC 風機（Electronically Commutated Fan）

EC 風機（Electronically Commutated Fan）是一種結合交流供電與直流無刷馬達技術的高效率風機，其核心為 EC 馬達，即「無刷直流馬達（Brushless DC Motor,BLDC）加上內建電子換相控制器」。EC 風機以 AC 市電輸入後，內部驅動器會先進行整流，再透過電子方式控制換相，使馬達能在低損耗、高效率的狀

態下運作。實測研究指出，住宅通風系統中傳統風機馬達的消耗電功率約比 EC 風機馬達高約 40%，EC 風機的單位功率(Specific Fan Power,SFP）則高出約 43%(Alavy et al., 2020)，是近年節能改造與設備升級的重要技術。由於採用無刷結構，EC 風機具有低噪音、震動小、壽命長等優點，並且具備優異的變速能力。其內建控制器可使風量、靜壓與轉速可精準調整，不需另加變頻器，大幅簡化控制與安裝。此特性使 EC 風機特別適合應用於變風量（Variable Air Volume,VAV）系統、壓差控制、資料中心冷卻、潔淨室空調與能源管理系統中。

在結構形式上，EC 風機常與無殼式風機結合形成 EC Plug Fan，並廣泛用於空調箱、新風機組與風扇濾網機組。當多台 EC 無殼風機以矩陣排列形成 無殼式風牆（Fan Wall Unit） 時，能提供高可靠度與冗餘能力（N+1），並可透過分台運轉與調速達成極佳的節能效果。每台風機具獨立驅動器與監控能力，可即時回報轉速、消耗電功率、故障狀態，使運轉管理更智慧化與安全。EC 風機結合高效率、智慧化、易整合與低維護等優勢，是提升節能與可靠度的核心元件之一，特別適用於建築節能、工業通風、資料中心與潔淨空間等領域。

2.2.7風機其應用特性

常見風機包括軸流式、離心式、混流式與橫流式，各類型因風量、風壓及結構特性不同，適用場所也有所差異。軸流式風機具備風量大、效率高與體積小等優點，適合阻力較低的通風環境，例如工廠換氣、隧道與冷卻塔，是大風量用途中最經濟的選擇，但其靜壓較低，不適用長管路或高阻力系統。離心式風機能提供中高風壓，克服複雜管路阻力能力佳，常用於空調箱、排煙系統及集塵設備。混流式風機結合軸流與離心特性，兼具較大風量與中高壓力，體積適中並具較低噪音，適用於停車場排風與樓梯間加壓。橫流式風機則以扁平結構與均勻出風見長，多應用於冷氣機、暖風機與電子設備散熱，如表 1 所示。

表 1 風機特性比較表

風機類型	風量	風壓	體積	投資成本	適用場所/特性
軸流式	大	小~中	最小	最低	工廠換氣、隧道、冷卻塔、一般通風；適合大量風量、低壓損
離心式	中	中~高	中等偏大	中～高	空調箱、送風及排煙、集塵系統、長管路；適合高靜壓、長距離輸送
混流式	大	中~高	中	中	停車場排風、樓梯間加壓、消防排煙；兼具軸流+離心特性，風量大、風壓中高、噪音較低
橫流式	中	低	長條型、扁平	低	冷氣機、暖風機、電子設備散熱；適合扁平、小型空間、低噪音

2.3 風機性能基礎判定

風機性能的基礎判定主要根據兩項關鍵指標：風量（Air Volume）與風壓（Air Pressure）。風量是指風機在單位時間內輸送的空氣體積，通常以 CMH 或 CFM 表示，代表風機的輸送能力；風壓則是風機克服系統阻力、推動氣流所需的壓力。風壓由全壓、靜壓及動壓三個部分組成，如公式(1)所示，全壓綜合反映風機的總能量輸出，是評估性能的重要依據。靜壓是單位表面積上氣體分子對各方向施加

的壓力，反映系統內部的能量儲存能力；動壓則表示將空氣由靜止加速至某一速度所需的壓力，與氣體速度平方成正比，如公式(2)所示，代表氣流的動能。風量與風壓之間存在反比關係，風量增大時，風壓下降，反之亦然。

$$P_t = P_s + P_d \tag{1}$$

其中，P_t代表全壓(Pa)；P_s代表靜壓(Pa)；P_d代表動壓(Pa)。

$$P_d = \frac{1}{2} p V^2 \tag{2}$$

其中，P_d代表動壓(Pa)；p代表密度(kg/m^3)；V代表風速(m/s)。

2.4 風機選型依據

本小節旨在說明影響抽排風機性能的主要評估依據與關鍵指標。風機的選型需綜合考量風量、風壓、效率、轉速、噪音及使用環境等因素，以確保其運轉性能符合系統需求。透徹理解這些參數之間的相互關係，有助於在設計與應用階段進行合理匹配，達成高效、穩定且節能的運轉效果。各型風機在性能特性上存在差異，建議於選型前詳細參閱所選產品之規格書與性能曲線，以獲得最適合的應用方案。(相關資料來自 AMCA 210-16 / ASHRAE 51-16、CNS 8749 C4354 以及 AMCA 300-14)

2.4.1靜壓

靜壓是風機性能參數中最容易被誤解也最為關鍵的一個。您可以將其想像為風機推動空氣前進的「力道」或「推力」。當空氣在風管系統中流動時，會因摩擦、轉彎、截面積變化以及經過濾網、百葉、防火閥等元件而產生阻力。靜壓就是風機為了克服這些全部阻力所必須建立的壓力，其常用單位為 Pa (Pascal，帕)或 mmAq (Millimeter of Water Column，毫米水柱)。如果說風量是「目標」，那麼靜壓就是達成目標所需的「能力」。在選型時，必須精確估算整個管路系統的總阻力（稱為「系統阻力」)，並選擇靜壓能力大於該阻力的風機。若風機的靜壓能力不足，即使其標稱風量再大，空氣也無法被有效推送到最遠端，導致系統末端

的實際風量遠低於設計值，造成通風失效。因此，一個成功的系統設計，必然是風機能力與系統阻力精確匹配的結果。

2.4.2風量

風量是指風機在單位時間內所能處理或輸送的空氣體積，是評估其通風換氣能力的根本指標，常用的計量單位包括 CMH (Cubic Meters per Hour，立方公尺/小時)，如公式(3)所示、CMM (Cubic Meters per Minute，立方公尺/分鐘)，以及 CFM (Cubic Feet per Minute，立方英尺/分鐘)。在規劃通風系統時，風量的計算是首要步驟。它需要根據空間體積、使用人數、內部熱源與污染物產生率等因素，計算出滿足法規（如建築技術規則）或特定製程需求的「換氣次數」(Air Changes per Hour, ACH)，換氣次數（ACH）可由公式(4)估算。選擇風量過小的風機，將導致污染物、熱氣或濕氣積聚，無法達到預期的通風效果；反之，選擇風量遠超需求的風機，則會造成不必要的能源浪費、過強的氣流感與潛在的噪音問題。值得注意的是，風機的實際輸出風量並非定值，它會隨著安裝現場的系統阻力變化而改變。

$$Q = A\ V \tag{3}$$

其中，Q代表風量(m^3/h)；A代表面積(m^2)；V代表風速(m/h)

$$N = \frac{Q}{Vol} \tag{4}$$

其中N代表換氣次數(h^{-1})；Q代表每小時進入房間的風量(m^3/h)；Vol代表房間體積(m^3)。

2.4.3噪音

風機在運轉過程中所產生的噪音主要來自三個來源：氣動噪音、機械噪音以及電磁噪音。其中，氣動噪音為氣流通過葉片、導流件或外殼時，因渦流、氣流分離與壓力脈動所引起的聲波，是風機主要的噪音來源，多屬高頻噪音，這是風機噪音中的最主要部分；馬達軸承運轉、結構振動則屬機械噪音；而電磁噪音則

由馬達磁場不平衡所導致。風機噪音通常以 dBA（A 加權分貝） 為單位表示，此加權方式能模擬人耳對不同頻率的敏感度，更能反映實際聽覺感受。噪音大小會隨風機轉速、風量及靜壓的提高而增加，特別在高轉速與高壓應用中最為明顯。為控制噪音，設計階段應選用低噪音葉片形式、減震底座及柔性接頭，並保持氣流順暢以降低湍流(Turbulence)。必要時可採用消音箱、吸音棉、隔音罩或軟管連接等降噪措施。過高的噪音不僅影響作業人員健康，也降低建築環境舒適度，因此風機選型除性能外，亦須符合環保與建築聲學相關標準。

2.4.4風機整體效率

風機整體效率是衡量其能源轉換能力的指標，代表風機輸出的「空氣功率」（風量與總壓的乘積）與馬達輸入的「電功率」之間的比率，如公式(5)所示，以百分比 (%) 表示。高效率是節能風機的核心特徵。它意味著能用更少的電力來完成同樣的空氣輸送任務。風機的效率會在其操作範圍內不斷變化，在性能曲線上會呈現一個峰值，該點被稱為「最佳效率點」(Best Efficiency Point, BEP)。工程設計上的目標，就是盡可能讓系統的實際「操作點」落在最佳效率點附近（通常是峰值效率的 90%區間內），以實現最高效、最節能的運轉方式。

風機整體效率通常可拆解為三個主要部分：葉輪效率、傳動效率與馬達效率。葉輪效率反映風機本體的流體力學性能；傳動效率則視採用皮帶、聯軸器或直連方式而異，其中皮帶傳動效率較低，而直連式損失最小；馬達效率則與馬達效率等級（如 IE3、IE4、IE5）相關。在實際系統中，風機整體效率不僅受到葉片型式、流場均勻性、葉輪轉速及製造精度影響，也會因風管布置、進出風環境、濾網阻力累積與安裝方式而改變。因此，即使選用高效率風機與馬達，若系統阻力偏高或安裝條件不佳，仍可能導致整體效率下降。

$$\eta = \frac{Q \ \ P_t}{P_{in}} \ \ 100\% \tag{5}$$

其中，η代表風機效率；Q代表風量(m^3/s)；P_t代表全壓(Pa)；P_{in}代表輸入電

功率(W)。

2.5 電氣規格

風機電動機的電氣規格是確保設備安全、穩定運轉的核心依據，主要說明馬達及相關電氣元件的額定條件與設計限制。風機電動機電氣規格通常包括電源電壓（如單相 220V 或三相 380V）、頻率（50Hz 或 60Hz）、額定功率（kW 或 HP）、絕緣等級、IP 防護等級以及轉速（rpm）等，如圖 6 所示。為確保風機可靠與節能運作，應依規格選用合適的電源與保護裝置，並由具有合格證照的室內配線技術士進行配線、接地與維修，以防止電氣故障、觸電及火災等安全事故，確保風機系統長期穩定且安全的運轉。(資料來源:CNS 14400-1、IEC 60034 series 以及 IEC 60529)

圖 6 馬達銘牌

2.5.1適用電壓與頻率 (Voltage & Frequency)

風機的適用電壓與頻率（Voltage & Frequency）是選型與安裝時最基本且關鍵的電力條件。電壓的單位為伏特（Voltage,V），頻率的單位為赫茲（Hz），台灣的標準工業與商業用電頻率為 60Hz。不同國家可能採用 50Hz 或 60Hz 系統，因此在採購進口設備時必須特別注意與電力系統匹配性。常見供電方式包括單相 220V、三相 220V 或三相 380V，應與風機銘牌上標示的額定電壓完全一致。若頻率不符，會造成馬達轉速改變，影響風量與風壓性能；若是電壓過高或過低，

則可能導致馬達電流異常、過熱甚至線圈燒毀，特別是在送電瞬間，錯誤的電壓可能直接造成絕緣擊穿與永久性損壞。因此，在安裝前應確認現場供電條件、線路容量及保護裝置均符合規範，確保風機能在額定電氣參數下安全、穩定地運轉。

2.5.2額定電流 (Rated Current / FLA)

額定電流（Rated Current/Full-Load Amperage,FLA）是指馬達在輸出其額定功率時，從電源汲取的電流值，單位為安培（A）。這是風機電氣設計中極為重要的參數，它直接關係到設備的安全與可靠性。額定電流標示於馬達銘牌上，為電氣系統中所有保護與配線設計的依據。包括電源線的線徑選擇、無熔絲斷路器（NFB）的容量設定、電磁接觸器及熱動過載繼電器等的電器元件相關規格，皆需根據額定電流來配置。若選用過小的線徑或保護元件，可能導致過熱或誤動作；反之，過大的設定又會降低保護靈敏度，導致設備在過載時無法及時切斷電源。當風機因堵轉、軸承故障或風道阻塞導致電流異常上升時，正確設定的保護裝置可立即動作，防止馬達線圈燒毀並保障系統安全。因此，了解並正確應用額定電流，是確保風機長期穩定安全運轉與防止因電氣故障的關鍵要素。

2.5.3馬達效率 (Motor Efficiency)

指馬達將輸入的電能有效轉換為輸出機械能（轉矩與轉速）的百分比。國際上普遍採用 IE 等級（International Efficiency）來劃分效率水平，如 IE1 (標準效率)、IE2 (高效率)、IE3 (超高效率) 、 IE4 (極超高效率)以及 IE5 (超優質效率)，如圖 7 所示。馬達效率是決定風機系統長期耗電量的關鍵因素。選用 IE3 或更高效率等級的馬達，雖然初期購置成本可能較高，但其在整個生命週期內所節省的電費非常可觀，完全符合經濟效益與當前的綠色節能趨勢。在許多國家的政府法規及綠建築標章（如 LEED、EEWH）中，採用效率等級 IE3 以上馬達已是強制性或加分要求。

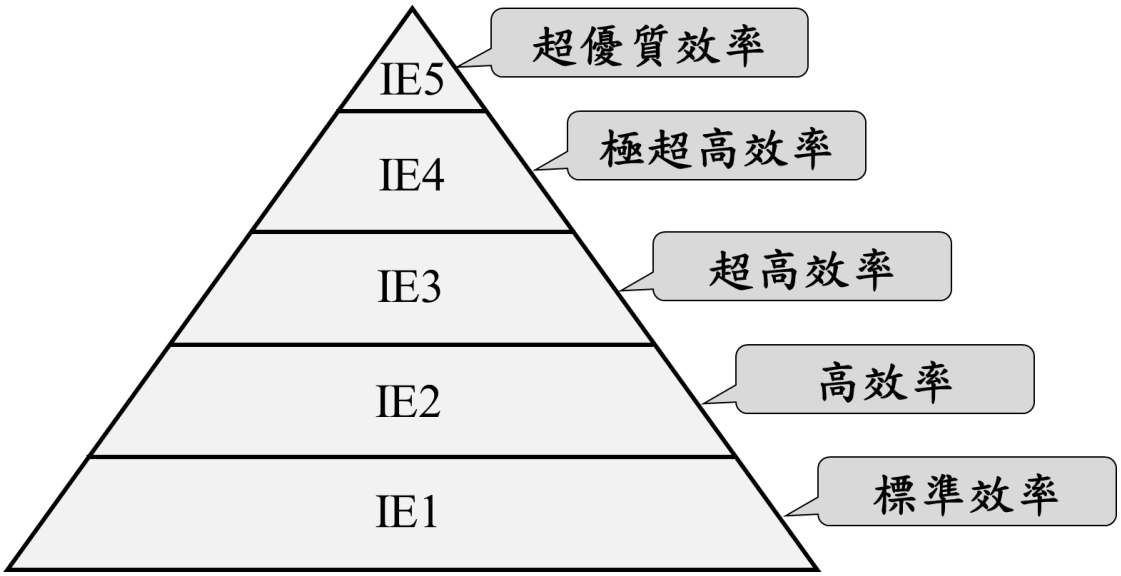


圖 7 馬達效率分級圖

2.5.4防護等級 (IP Rating)

全名為 Ingress Protection Rating，是一套國際標準的編碼系統，用以表示電氣設備外殼對固態異物（如灰塵、手指）和液體（如水滴、噴射水柱）侵入的防護能力，如

表 2 所示。IP 等級直接決定了風機可以被安裝在何種環境中。一個 IP 等級由兩位數字組成，例如 IP55：第一位數字 "5" (防塵)： 代表無法完全阻止粉塵進入，但其侵入量不足以影響設備的正常運作。這使其適用於大多數工業環境，如木工廠、紡織廠或金屬加工廠。第二位數字 "5" (防水)： 代表可以承受來自任何方向的低壓水柱直接噴射。這意味著設備可以安裝在戶外（需有基本遮蔽）或需要定期用水清洗的場合（如食品加工廠）。

表 2 馬達防護等級表

馬達防護等級			
防塵等級(第一位數)		防水等級(第二位數)	
0	無防護	0	無防護
1	防直徑>50mm固形異物侵入	1	防垂直水滴侵入
2	防直徑>12mm固形異物侵入	2	防垂直15˚範圍內水滴侵入
3	防直徑>2.5mm固形異物侵入	3	防垂直60˚範圍內水滴侵入
4	防直徑>1.0mm固形異物侵入	4	防全範圍水滴噴濺侵入
5	防塵	5	防全範圍噴射水柱
6	完全防塵	6	防全範圍強力噴射水柱
		7	防浸水一公尺，三十分鐘
		8	可在水面下長時間使用

2.5.5絕緣等級 (Insulation Class)

指馬達內部線圈所使用的絕緣材料能夠承受的最高溫度極限。可以將其視為馬達線圈的「耐熱外套」。常見的等級由低至高有 A, E, B, F 及 H 等。絕緣等級決定了馬達的「溫度裕度」和整體耐用性，如圖 8 所示。例如 F 級 (Class F)，其容許的最高耐熱溫度為 155°C。當風機在高溫環境下運行、長時間連續工作或負載較重時，馬達溫度會顯著上升。較高的絕緣等級意味著更大的安全緩衝空間，能有效防止線圈因過熱而劣化、短路，從而顯著延長馬達的使用壽命。

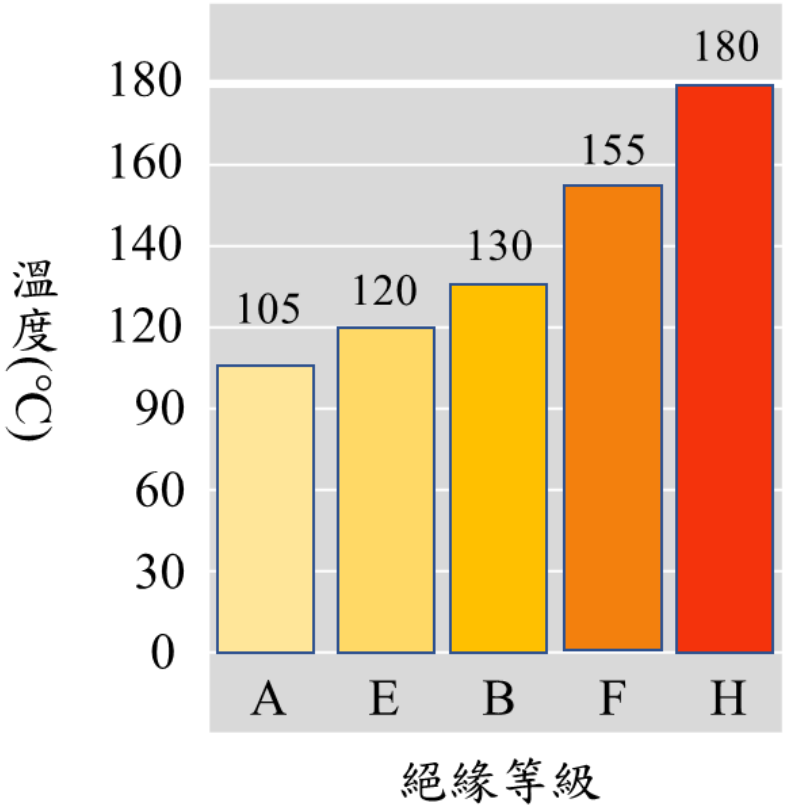


圖 8 馬達絕緣等級圖

三、 風機性能測試

3.1 性能測試的目的與重要性

風機性能測試主要目的在於確認風機於實際運轉中表現是否與設計規格及標示參數相符，確保設備符合設計需求與使用規範。主要透過量測風量、全壓及靜壓、消耗電功率、效率及噪音等關鍵參數來達成。此過程不僅確保風機能在預期的操作條件下穩定運行，更能評估其能源效率與經濟性，為系統設計、設備選型及能耗管理提供科學依據。其重要性首先體現在能源效率，風機常為建築空調、工業排風及製程通風的主要能耗設備，若性能不符設計，會導致能耗上升與運轉成本增加。其次，可靠性與安全性亦仰賴性能測試，因為不適當的壓力或風量可能造成系統失衡、設備過載或振動噪音問題，影響系統穩定與操作人員的工作環境。

3.1.1風機設計驗證與標示符合性

風機在設計與製造完成後，必須經由標準化性能試驗進行驗證，以確保其實際運轉表現符合設計與規範要求。性能測試的主要項目包括風量、全壓、靜壓、消耗電功率、效率及噪音等關鍵參數。國際上常用的測試標準為 AMCA 210（ANSI/AMCA Standard 210）與 ISO 5801。兩者皆規範了在風室（Air Chamber）中進行風機性能測試的方法，內容涵蓋測試設備佈置、風道尺寸、測點位置、數據修正公式以及不確定度評估原則。藉由遵循這些標準，可確保試驗結果具可比性與重現性，消除因測試條件、儀器誤差或環境差異造成的偏差。透過標準化量測，不僅能客觀比較不同廠牌或型式風機的性能，也可作為品質檢驗、設計驗證與能效評估的依據，確保風機產品符合國際性能標準並維持穩定可靠的運轉品質。

3.1.2品質管制

風機作為空調與通風系統中的核心設備，其性能品質直接關係到系統的穩定性、能源效率與使用壽命。為確保產品一致性與可靠性，製造廠需透過量產抽驗

或例行性能試驗建立性能基準，並定期監控不同批次風機的關鍵性能曲線，包括風量、全壓、靜壓、效率、消耗電功率與噪音等指標。所有量測數據須具備可追溯性，並維持量測設備的校正與精度一致，以確保測試結果的準確性與公信力。當發現性能曲線偏移或效率下降時，應立即啟動異常處置程序，追溯製程環節，檢查原材料品質、葉輪平衡、電機特性與組裝紀錄，找出偏差原因。必要時進行調整、重新測試與放行判定，確保產品性能恢復至標準範圍內。透過持續的檢測與品質監控，不僅能保障風機出廠品質穩定，也能提升整體系統的運轉效率與使用安全性。

3.1.3系統匹配選型與設計依據

透過風機製造廠商提供風機精確性能曲線 Q–P 圖，並繪製系統阻抗曲線（包含管路、彎頭、閥件、濾網、盤管與風管末端）交會比對，以判定最佳效率點 (Best Efficiency Point, BEP)(Kabbara et al., 2023)，如圖 9 所示，並預留濾網髒污堵塞與季節性變化之壓損裕度。依運轉點分佈評估風機變頻控制之靜壓及流量、感測器佈置與設定值，避免節流與旁通造成無效能耗。對多機系統，比較串、並聯與分區配置之曲線疊加與切換邏輯，規畫 N+1 配置與最低轉速限制，確保部分負載效率與啟停壽命。

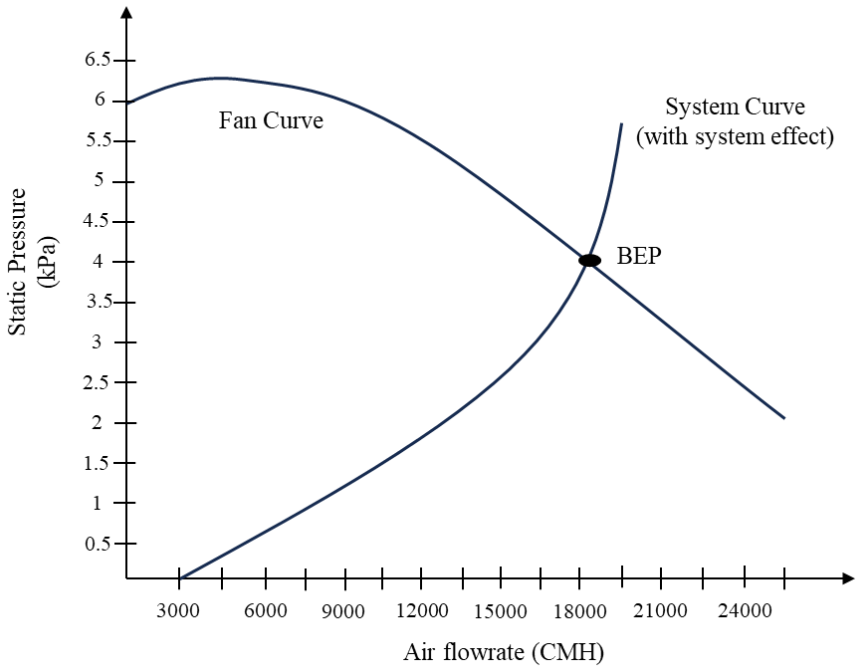


圖 9 風機 Q–P 及系統阻抗曲線圖

3.1.4能效評估

風機能效評估的目的在於量化其能源使用效益，確保設備在實際運轉中達到最佳效率。透過標準化測試量得的風量、全壓、靜壓、消耗電功率與噪音等資料，可建立風機的基準運轉點與性能曲線，並據此計算風機的單位功率(SFP)，其定義為風機在運行時，將空氣移動每單位流量所需的電功率，其為風機輸入電功率與風量之比值，如公式(6)所示。藉由比較不同葉輪型式、葉片角度、葉尖間隙、馬達效率等級及控制策略（如變頻控制），可評估其節能潛力與性能差異。進一步將測試結果套用至實際運轉負載曲線中，可換算全年耗電量、運轉成本及相對應的 CO_2 排放量，從而量化各項改良方案的能源與環境效益。透過持續的能效評估，可提供風機設計與系統調整的依據，確保設備長期維持高效率、低能耗與穩定運行的目標。

$$SFP = \frac{P_{in}}{Q} \tag{6}$$

其中，SFP代表單位風量耗電量(Wh/m^3)；P_{in}代表風機輸入電功率(W)；Q代表風機風量(m^3/h)。

3.2 測試依據之國際與國內標準

- 國際標準：

AMCA 210：美國空氣流動和控制協會 (Air Movement and Control Association, AMCA)，為業界最權威的風機性能測試標準之一。其目的在於規範風機於實驗室測試中的統一方法，統一量測風量、全壓、靜壓、消耗電功率、轉速及效率等性能參數，確保數據的準確性與可比性，規範了多種測試裝置，依應用情境設置四種安裝類別（A~D），A 為自由進氣、自由排氣；B 為自由進氣、管道排氣；C 為管道進氣、自由排氣；D 為管道進氣、管道排氣(AMCA, 2025)。依據該標準進行測試，可獲得完整的性能曲線，並作為產品設計、型號選擇、能效評估及國際認證的重要依據，因此已成為全球風機性能檢測最廣泛採用的國際標準。

ISO 5801：國際標準化組織所制定風機測試標準，為國際通用之風機測試規範之一，主要目的在於提供一致且可比較的性能數據。標準規定了風機在標準化風道中進行測試的方法，可量測風機的風量、全壓、靜壓、消耗電功率與效率等指標，依實際應用情境設置四種安裝類別（A~E），A 為自由進氣、自由排氣；B 為自由進氣、管道排氣；C 為管道進氣、自由排氣；D 為管道進氣、管道排氣；E 為自由進氣、自由排氣，但測試裝置中無隔板分隔(出口氣流可能會回流至進口，影響風機測試數據)，如圖 10 所示(Standardization, 2017)，以模擬自由進排氣與管道連接及隔板分隔的不同工況。此規範廣泛應用於通風、空調、工業除塵與節能研究。

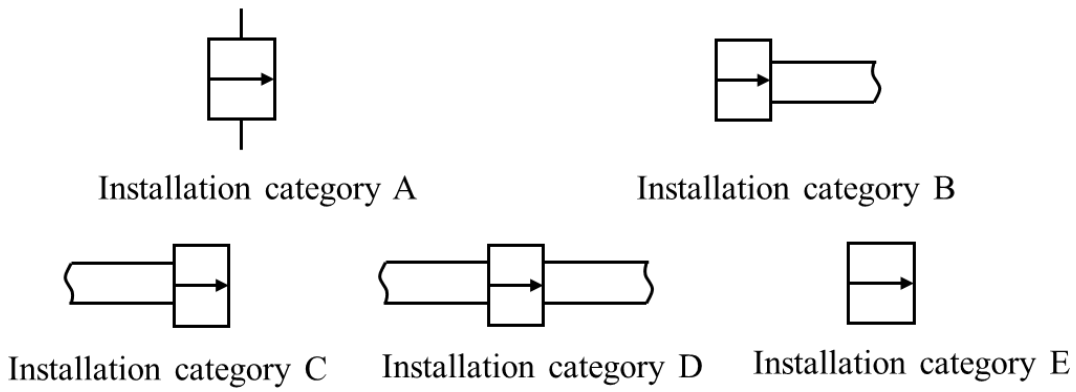


圖 10 ISO 5801 風機測試管路安裝類別(ISO 5801:2017 手冊 P14)(Standardization, 2017)

- **國內標準：**

CNS 7778：為我國《工業用風機-以標準化風道進行性能試驗》之國家標準，等同採用 AMCA 210 及 ISO 5801，用於量測並評定風機之空氣動力性能。量測項目含風量、全壓及靜壓、消耗電功率、效率、轉速。試驗系統包含噴嘴量測段、整流段與輔助風機及節流裝置，透過壓差計與電力分析儀取得數據。與 AMCA-210 相同，管路設置四種安裝類別（A~D），A 為自由進氣、自由排氣；B 為自由進氣、管道排氣；C 為管道進氣、自由排氣；D 為管道進氣、管道排氣，以模擬自由進排氣與風管連接的不同工況(經濟部標準檢驗局, 2015)。結果須換算至標準狀態，並揭示安裝類別、設備佈署、儀器精度、修正與不確定度，不同安裝型式之結果不得互用。最終報告以性能曲線與表格及符合性判定呈現，可用於型式認證、能效標示與出廠檢驗。

3.3 關鍵性能測試項目與定義

風機性能測試的主要目的在於評估其輸送能力、能效表現與實際應用適用性。關鍵測試項目包括：風量，即單位時間內風機輸送之空氣體積，是衡量風機輸送能力的基本指標；全壓及靜壓，全壓指風機所提供的總體壓力，代表風機克服系統阻力所需的總體壓力差，靜壓指風機在運轉時，垂直於氣流方向的壓力分量，用以克服系統阻力，使空氣能夠順利流動；風機效率則為風機將輸入電功率轉換

為有效氣流能量的程度，反映了風機在實際工作中的能量利用效率；消耗電功率為風機在運轉時所需之電能，與運行成本及節能相關；此外，轉速影響風機之風量與壓力，測試過程需保持穩定運行；噪音則關乎操作環境舒適性與法規要求。透過上述指標的綜合評估，可建立風機性能曲線，作為設計、選型及品質管制的重要依據。

3.4 測試環境與設備架設 (風室法)

風室法 (Air Chamber)為風機性能試驗的標準作法，將受測風機接到一個大型、低流速及壓力均勻的密閉風室，配合噴嘴壓差及標準化風道測得流量，並同步量測全壓、靜壓、轉速與消耗電功率。系統主要由：風室 （Plenum Chamber），一密閉箱體，用於穩定氣流與壓力；設隔板的多孔噴嘴 （Nozzles），提供跨量程精確流量測定；輔助風機 （Auxiliary Fan），提供或調節系統流量與壓力，使受測風機能在多個工況下穩定運轉；壓力計 （Manometer），量測噴嘴前後壓差及風室內全壓及靜壓；電力分析儀 （Power Analyzer），監測風機電壓、電流與消耗電功率及功率因數；轉速計 （Tachometer），量測風機葉輪實際轉速。並依 AMCA 210 或 ISO 5801 方法修正空氣密度與可壓縮性，確保結果準確、可比對與可追溯。AMCA 測試標準多嘴噴箱分為出口風箱如圖 11 所示，及入口風箱如圖 12 所示(AMCA, 2025)。

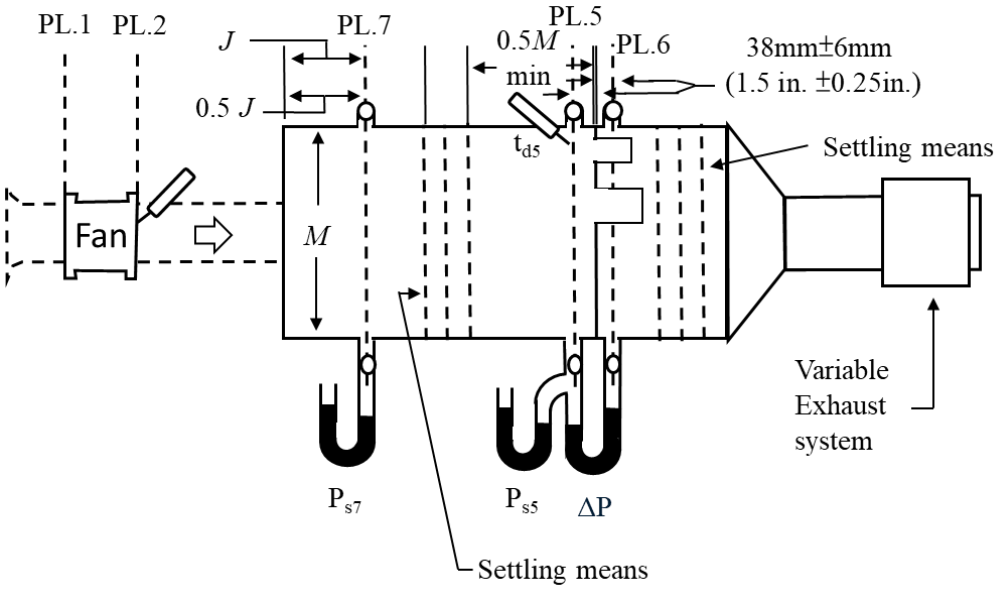


圖 11 AMCA 風室法出口風箱圖(AMCA 210-25 手冊 P53) (AMCA, 2025)

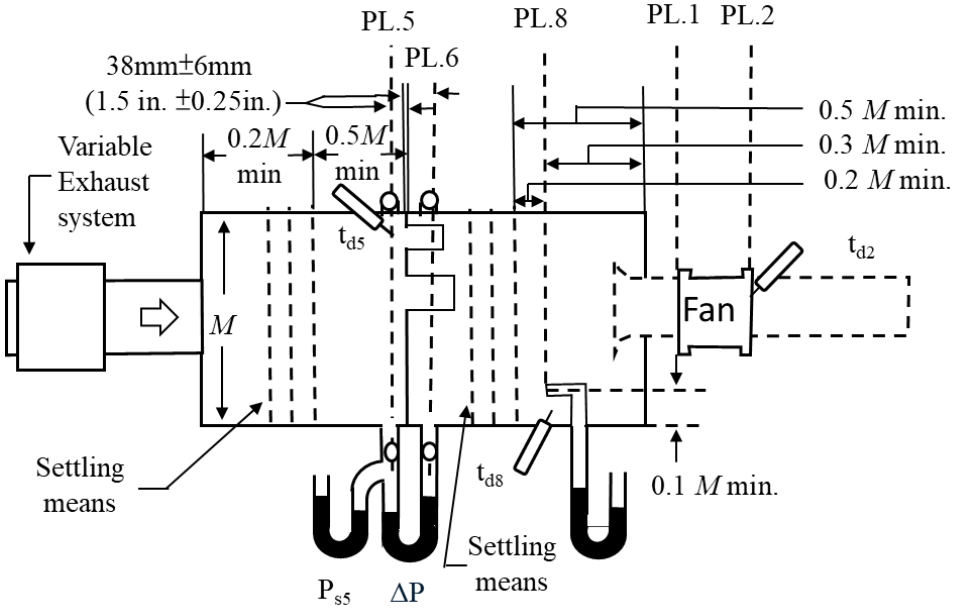


圖 12 AMCA 風室法入口風箱圖(AMCA 210-25 手冊 P57) (AMCA, 2025)

3.5 噪音測試

風機噪音測試的目的在於評估風機於不同運轉條件下的聲學性能，確保風機符合環保法規、設計規範及使用需求。由於風機運轉時會因葉片切割氣流、渦流干擾及機械振動而產生噪音，若未加以控制，不僅影響作業環境舒適度，亦可能

導致職業安全與噪音問題。

國際常用標準為 AMCA 300 及 ISO-3744，AMCA 300 主要規範在混響室(Reverberation Chamber)中進行風機聲學測試，確保聲學數據在可比對與一致性上具有可靠性。在測試方法上，AMCA 300 採用混響室法（Reverberant Room Method），利用多個麥克風在室內不同位置收集聲壓數據，並透過統計能量平均方式，計算出風機的聲功率級（Sound Power Level, Lw）(Air Movement and Control Association International, 2010)，如公式(7)所示。此方法優點是可降低駐波與反射影響，測得數據精度較高。ISO 3744 則採自由場法（Free-field over reflecting plane Method），在近似自由場的半消聲環境中，於多個麥克風測點量測聲壓，依規定的計算方式轉換為聲功率級(Standardization, 2010)。此法操作較為靈活，場地需求低，但精度相較混響室法略低。

$$L_w = 10\ log\ \frac{P}{P_0} \tag{7}$$

其中，L_w代表聲功率級(dB)；P代表聲功率(W)；P_0代表基準聲功率(W)，為$10^{-12}W$。

四、 系統設計介紹

4.1 風管設計

風管設計的核心目標在於滿足換氣、送排風量、溫濕度及舒適性需求的同時，降低壓損與能耗，確保整體系統高效、安靜且穩定運行。設計過程需兼顧氣流分配均勻，使各末端風量達到設計值，同時控制噪音與振動，避免因風速過高或局部壓損過大而影響舒適度。此外，為了減少風量洩漏與冷熱損失，應提升風管氣密性與保溫性能，並考量風管佈局的緊湊性與檢修便利性，使系統與建築結構及其他專業設備協調整合，以確保系統長期安全可靠運行。

4.1.1速度法(Velocity Method)

速度法是風管設計中最為直觀且簡便的方法之一，其基本原理是根據風管內設計風速，來決定風管的截面積大小，從而確保所需的風量，如公式(8)所示。通常在系統中，主管路與支管會依不同用途及噪音要求不同的設計風速，以兼顧風量與噪音控制。速度法的優點是計算過程簡單、設計快速，且能清楚反映風速與風管尺寸之間的關係。然而，其缺點是未能兼顧壓力平衡與能耗控制，若僅依風速來決定截面積，可能造成系統局部壓降過大、能耗上升，或風速過快導致噪音與震動問題。因此速度法常用於初步設計階段，或小型、簡易系統中，後續仍需配合其他方法修正，才能達到最佳運轉效率。

$$A = Q/V \tag{8}$$

其中，A 代表截面積(m^2)；Q代表風量(m^3/s)；V代表風速(m/s)。

4.1.2等摩擦法（Equal Friction Method）

等摩擦法是通風與空調系統中最常用的風管設計方法之一，其核心概念是：在整個主風管與各分支管路中，每單位長度的摩擦損失（壓降）相等。透過這種設計方式，可使整個風管網路在相同的摩擦條件下輸送空氣，簡化設計計算並確保氣流分布均勻。

其主要設計步驟如下所示：

1.確定總風量與系統佈局：依照通風或排氣需求，決定各區域的送風量與風管配置。

2.選定允許摩擦損失率：一般以每公尺風管的壓降表示（如 0.8～1.5 Pa/m），此值需兼顧風速、噪音與能耗，摩擦損失越大，風速越高，但噪音與能耗也相對增加。

3.確定主幹管尺寸：根據起始風量與所選摩擦損失，查用風管設計圖表或公式(9)，反求風速與管徑。

4.設計各分支管：沿主幹分流後，風量減少，依相同摩擦損失原則調整分支管直徑。此時每條支管的單位摩擦損失與主幹相同，因此壓力損失大致均衡。

5.修正與平衡：在末端風口前加入局部損失（如彎頭、三通、風閥）修正，必要時進行壓力平衡計算以確保各風口風量一致。

等摩擦法的優點是計算簡單、設計快速、壓力分佈均勻，適用於大多數中低壓風管系統。缺點是當風管系統極為複雜或風量差異大時，部分支路可能需再以速度法或是靜壓再得法微調，以達最佳能效與噪音控制。透過合理運用等摩擦法，可在兼顧節能、靜音與造價的前提下，達到穩定且高效的送風系統設計。

$$\Delta P = f \ \frac{L}{D} \ \frac{\rho \ V^2}{2} \tag{9}$$

其中，ΔP代表摩擦損失(Pa)；L代表風管長度(m)；D代表風管直徑(m)；ρ代表空氣密度(kg/m^3)；V代表風速(m/s)。

4.1.3靜壓再得法(Static Pressure Recovery Method)

靜壓再得法是一種較為進階的風管設計方法，其作用是讓主管路及支管保持相同的靜壓，過程中改變風管下游處截面積，從而降低動壓，再利用風管中風速降低時所釋放的動壓轉換為靜壓，並在分支點重新分配壓力，使系統中各管路的

阻力趨於平衡(Kabbara et al., 2023)。透過合理配置風管截面積與分支點設計，可以減少不必要的能耗，提升整體送風效率。

其主要設計步驟如下所示：

1.確定系統佈局與風量分配：依空調區域負荷或換氣需求，確定主幹及各支管的風量，並繪製系統流程圖，標明主要分支點與末端風口位置。

2.選定主幹管起點條件：根據總風量與風速確定主幹管起點風管尺寸，並利用公式(2)計算該段的速度壓。

3.逐段降低風速：沿風管氣流方向，風量逐漸減少，設計時應使風速依次遞減（例如每一段降低 10～20%），以減小摩擦損失並產生靜壓回復。

4.計算靜壓再得（Static Regain）：依公式(10)，計算每一段風速降低由風速變化所造成的靜壓差ΔPs。

5.校核壓力平衡：若某支管路壓降過低或過高，可調整該段風速或管徑，使各末端靜壓近似相同，必要時可微調分支管路風速或加裝節流閥。

6.反算總壓降與選定風機：計算整個主幹路徑的總壓降（含起點段的速度壓與各段損失），以確定風機全壓需求。

與速度法與等摩擦法相比，靜壓再得法能更有效地降低運轉能耗與噪音，特別適合大型、複雜或節能要求高的系統。其設計過程需較多計算，包括各管路的動壓、靜壓轉換比例及總壓降分佈，因此在應用上相對複雜。其優點是能達到最佳能效、降低風機負荷，及延長設備壽命。但缺點是設計與施工成本較高，且需要精確的安裝與測試平衡調整 (Testing, Adjusting, and Balancing,TAB)。因此，靜壓再得法常用於高效能建築或重要設施的通風系統中，確保穩定、節能與舒適的運行效果。

$$\Delta Ps = P_{s1} - P_{s2} \tag{10}$$

其中，ΔPs代表靜壓差；P_{s1}代表空氣在位置一的靜壓值；P_{s2}代表空氣在位置二的靜壓值。

4.1.4 T 方法(Total System Design Method)

風管設計中的 T 方法是空調通風系統設計中常用的一種壓力平衡法，屬於等摩擦損失法的改良形式，廣泛應用於中央空調系統、廠房排風及潔淨室通風系統中。其核心目標是使各支管從分岔點到末端的全壓損失（Total Pressure Loss）相等，確保各區風量分配合理，系統運行穩定且節能。在風管系統中，空氣由風機輸送後會經過多次分岔，若各支管壓損差異過大，風量會自動偏向阻力小的支路，導致部分區域風量過多或不足。T 方法即是針對此問題，在每個 T 型分岔點（主幹管與支管交會處）進行壓力平衡設計，使從風機出口至各末端送風口的總壓降一致，如公式(12)所示。這樣能確保各支路在風機啟動時自然達到設計風量，而不需大量依靠風閥調整。

其主要設計步驟如下所示：

1.確定風量與系統佈局：依據各空調區域的冷負荷與送風需求，計算各支路風量並繪製管線圖。

2.選擇初始風速：根據設計值選擇風速，選速過高會增加噪音與壓力損失，過低則浪費材料。

3.計算各段壓損：利用公式及摩擦係數表如圖 13 所示，計算各管段摩擦損失及局部壓損（彎頭、變徑、風口等），直管摩擦損失如公式(9)所示，局部摩擦損失如公式(11)所示，總壓損如公式(12)所示。

4.壓力平衡調整：以最遠路徑為基準，逐段比較其他支路的壓降，透過調整管徑或局部阻力（例如使用節流片或平衡閥）來使壓力一致。

5.校核風機靜壓：完成平衡後，計算系統總壓損以選擇合適風機靜壓。

T 方法的優點為，風量分配自然平衡，可減少風閥調整。系統總靜壓較低，能降低風機能耗以及設計結果兼顧經濟性與運行穩定性。缺點為計算步驟較複雜，需多次迭代，若分支管路過多或風管形狀不規則，手算較為困難，因此在實務上，T 方法常配合電腦輔助設計，如 Duct Sizer、AutoCAD MEP 或 CFD(Computational

Fluid Dynamics，CFD）模擬進行，以更精確地模擬氣流分布與壓力變化。T 方法特別適用於中大型空調系統或潔淨室設計中，能確保風速與壓力穩定，減少風量偏差與能耗。它結合理論與實務，是目前設計師在平衡系統效能與施工經濟性時的重要工具之一。

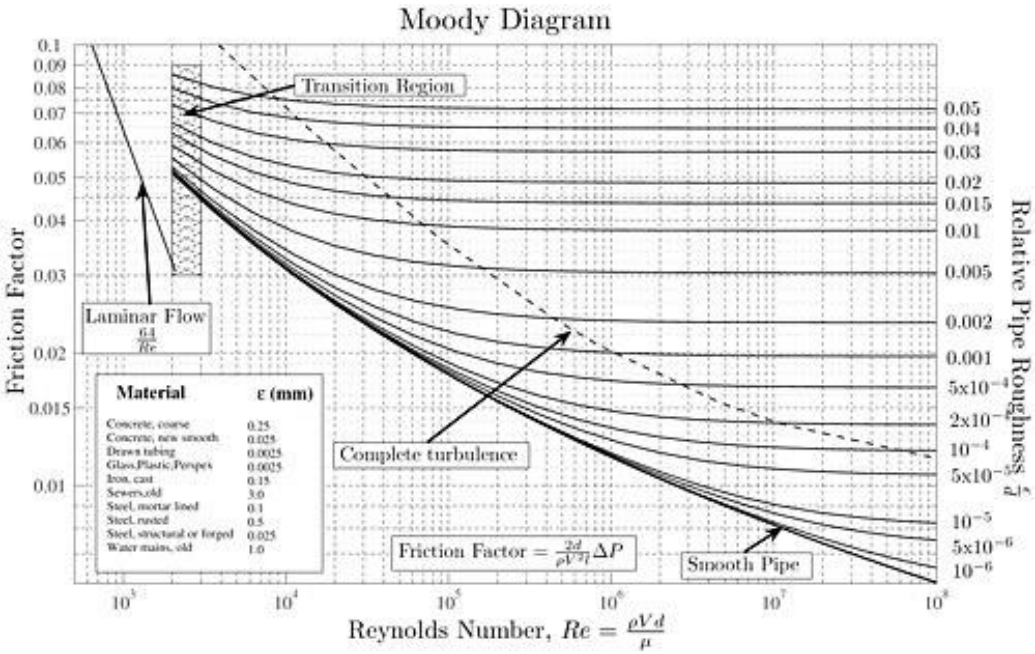


圖 13 穆迪圖(Colebrook, 1939)

$$\Delta P_{local} = K \ \frac{p \ V^2}{2} \tag{11}$$

其中，ΔP_{local}代表局部摩擦壓損(Pa)；K代表管件損失係數；p代表空氣密度(kg/m^3)；V代表風速(m/s)。

$$\Delta P_T = h_f + h_L \tag{12}$$

其中，ΔP_T代表管路總壓損(Pa)；h_f代表管路損失(Pa)；h_L代表管件損失(Pa)。

4.1.5設計目標

在風管系統設計的核心目標，是在滿足建築物換氣、送排風量及室內溫溼度與舒適度要求的前提下，達成高效、節能與穩定運行。設計時應以最小壓降與最低能耗為原則，使空氣能順暢輸送或排放至各區域，同時有效控制風速、噪音與振動，維持空間寧靜與舒適。風速的選擇須兼顧效率與聲學表現，避免因速度過

高造成渦流或氣流噪音；在必要位置配置消音器或柔性接頭，以減少機械振動的傳遞。

為確保風管系統運轉的氣密性與保溫性，風管連接及接縫處應採用合適的密封與絕熱材料，以降低漏風率與冷熱能量損失，提升整體能源利用效率。同時，風管佈局應緊湊合理且便於檢修，並與建築結構、給排水、電氣及消防等系統協調配置，避免交叉干擾。設計時亦須遵循防火安全、衛生及通風法規，確保系統運作安全可靠。此外，風管設計還應兼顧經濟性與可施工性，在材料選擇、加工方式及安裝路徑上取得成本與性能的平衡，並預留後期維護與擴充空間。最終目標是建構一套兼具節能、低噪、耐久與易維護的送排風系統，確保建築環境長期穩定且舒適。

4.2 風機匹配

風機匹配的目的在於使風機的工作點位於系統曲線與風機性能曲線的交會處，並落在風機的高效率區域，以確保系統運行穩定且能量利用率最佳。設計時應以最不利路徑為依據，計算系統的總靜壓，包含直管摩擦損失、局部配件壓降、盤管、濾網及消音器等阻力項，並預留約 10%～15% 的風量與全風壓餘量，以因應濾網髒污、季節變化或系統老化造成的管路壓損上升。

在風機選型上，應優先採用高效率機種，並搭配變頻器控制，以定壓或變壓策略調節運轉速度，使風機於部分負載條件下仍能維持高效率，達到節能效果並避免進入失速區域。運轉時需校核風機轉速、噪音與振動情形，必要時可透過降低轉速、加大葉輪或配置消音器等方式改善聲學表現與舒適度。此外，風機與管道系統的介面設計亦極為重要。應確保風機進口前設有足夠長度的直管段，以形成均勻穩定的進氣流場；出口端則建議設置擴散段以降低流速與動壓損失，減少風管阻力與渦流生成，避免形成風管系統效應(System Effect)。系統效應指的是：風機在實際系統中的性能，與製造商在標準化測試條件下的性能曲線不同所造成的性能損失，常見於彎頭於接近風機出入口、濾網或進風口

阻塞以及風機出口突然縮徑或突然擴張，系統效應會造成風量及靜壓值降低、風機效率下降以及風機消耗電功率增加。同時應檢核機外靜壓、軸承壽命、電動機馬力、防振基座及漏風等級，確保風機與系統在結構與性能上匹配良好。透過上述措施，可使風機系統長期維持高效率、低噪音與穩定運轉，達成節能與舒適兼顧的設計目標。

4.3 風機耗能原因

風機耗能過高的後果不只電能浪費，還會使系統整體運轉效率低落。壓差過大與冗餘風量會轉化為無效功，尖峰需量與基本電費同步增高。其次，過熱與振動會大幅增加軸承、皮帶、馬達與變頻器的熱負荷與磨損，保養頻率與成本大幅上升、停機風險擴大。長期則使設備壽命縮短、碳排放與額外負荷增加。風機系統主要耗能原因包含以下三種：系統設計因素、設備因素及控制與運轉因素。

4.3.1系統設計因素（管路與配置）

風機能耗與風管系統設計息息相關，倘若設計不當，將導致壓力損失上升與運轉能效下降。當風機設計風速過高或風管管徑過小時，氣流摩擦率明顯增加，沿程壓降上升，使風機需提供更高靜壓才能維持風量，造成耗能與噪音同步上升。若彎頭半徑不足、採用直角三通或擴縮角度過陡，會產生嚴重的紊流與渦流，導致局部損失（Local Loss）大幅增加。此外，風機進出口端若缺乏足夠直管段或整流裝置，會破壞氣流穩定性，使風機進出口系統效應惡化，風機實際性能低於額定值。風室或箱體轉換不順暢亦會造成壓力不均與附加損失。若風管漏風或風機選用之壓力等級過高，系統靜壓值被迫提升，導致風機功率上升、運行點偏離最佳效率區，進而增加能耗與運轉噪音。為確保氣流分配均勻並達到最低能耗與最佳效率，設計階段應同時考量風速、管徑比例、彎頭半徑、分歧角度及整流措施。若忽略管件佈局與細部流場特性，其引入的局部壓損將使整體系統效能顯著

降低。研究指出，在初期設計階段考量管件配置，會比傳統設計方式節能高達52%(Kabbara et al., 2023)。

4.3.2設備因素（風機及驅動元件）

風機及其驅動元件的性能直接決定系統能效與運轉穩定性。當風機運轉點偏離最佳效率點（BEP）時，氣流將產生渦流與附加損失，造成效率急遽下降並伴隨噪音與振動增加。若風機選型不當，例如選用過大風量或過高壓力等級，風機將長期於低效率區域運行，導致能耗偏高與設備過早磨損。

傳動機構亦是影響能耗的重要環節，皮帶傳動若鬆弛、打滑或皮帶輪軸心偏移，會使傳動效率下降並增加軸承負荷；馬達與風機若未正確對心，則產生額外振動與機械損失。馬達效率等級不足或長期處於輕載運轉狀態，會使電能轉換效率降低，同時增加無功功率與溫升。消音器與回風段設計不當亦可能造成氣流阻塞與安裝效應損失。綜上所述，風機及驅動元件若未在設計效率範圍內協同運行，將導致整體系統能效降低、故障率上升與運行成本顯著增加。

4.3.3控制與運轉因素（策略與維護）

在風機運轉階段，控制策略與日常維護的缺失，常是引發額外能耗的關鍵因素。若風機控制方面採用恆定靜壓控制（constant static pressure）而不引入靜壓重置 (Static Pressure Reset, SPR)，當負載降低時，末端 VAV (Variable Air Volume) 將長期保持打開小開度方式以維持風量，造成節流損失與風量過量，導致風機運轉於高壓損區域，大幅增加風機電功率消耗。VAV 系統主要透過開關風門或調整由風扇驅動的氣流來控制負荷，例如負載需要更大的進/排氣風量，風門開度會增加，直到達所需要的需求，在風門開度增加期間風管內壓力會下降，從而對風機發出訊號，驅動風機做加減載以增加進/排氣量(Okochi & Yao, 2016)。相關研究指出，引入靜壓重置可將風機能耗降低可達 19%至 60%範圍，相比恆壓控制更具節能潛力(Ahmed Tukur, 2016)。此外，濾網與盤管長期未維護、積塵累積將增大

壓力損失，使風機必須輸出更高壓力來克服阻力，造成電功率漸增。

系統中的的感測器漂移或校正不精，也是影響壓損估算與控制策略準確度的重要因素。一旦控制回路接收到錯誤靜壓或風量訊號，就可能錯導風機施加過高壓頭，造成壓損與風量過剩。再者，控制策略若未整合需求型調節（如分區控制、需求控制通風）或與 SPR 重調機制結合，系統可能長期於非最佳運行點運作。

五、 局部排氣（Local Exhaust Ventilation, LEV）

在工業生產過程中，作業活動會產生各類污染物，如粉塵、煙霧、氣體、蒸汽及油霧等，若未能及時排除，將導致室內空氣品質惡化，影響作業人員的呼吸健康與工作安全。為有效控制污染物的擴散，常採用局部排氣系統，在污染源產生位置即進行捕捉與排除，屬於最直接且效率最高的通風控制方式(Cao et al., 2024)。局部排氣系統主要由排氣罩（hood）、管道（duct）、空氣淨化處理設備（air cleaning device）及風機（fan）組成，如圖 14 所示。污染物經排氣罩捕集後，透過管道輸送至淨化設備進行過濾、吸附或洗滌處理，最後由風機將處理後空氣排放至室外。排氣罩應設置於污染源最接近且氣流能有效包覆的位置，以提高捕集效率並降低排風量需求。

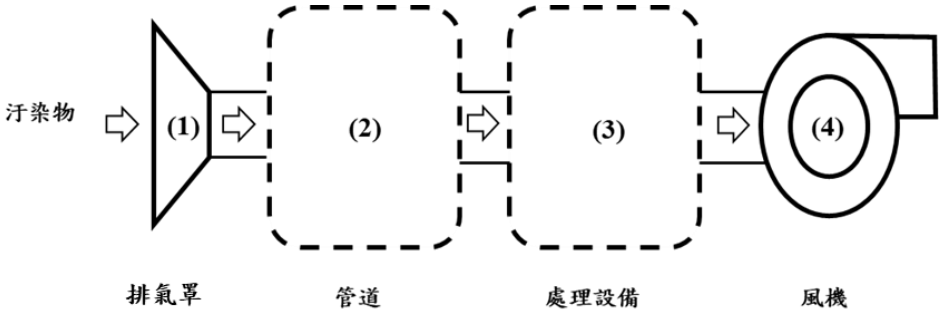


圖 14 局部排氣系統示意圖

5.1 排氣罩類型與適用情境

排氣罩是抽排風系統的第一道捕集裝置，其設計與選型直接影響污染物的捕集效率與整體能耗。常見排氣罩主要分為三大類：包圍型（Enclosing Hood）、接收型（Receiving Hood）與捕集型（Capturing Hood）。綜合而言，排氣罩的選用應根據污染物性質、逸散方式、作業型態及能源效率考量，才能在兼顧安全與節能的前提下發揮最佳效能。

5.1.1 包圍型排氣罩（Enclosing Hood）

包圍型排氣罩為當污染物的釋放範圍位於局部排氣系統氣罩的涵蓋區域內，

如圖 15 所示。此類排氣罩依包覆程度可分為全封閉與部分包圍兩種。全封閉型氣罩將工作區域完全隔離於密閉空間中，如手套箱、噴漆艙或磨料噴砂房，操作者透過外部控制或手套操作，能有效防止污染物逸散。部分包圍型氣罩則設有供材料或操作者進出的開口，為兼顧操作便利與污染控制而設計，例如焊接作業箱體或化學實驗室通風櫃。

包圍型氣罩因在罩體內形成局部負壓，能以相對較小風量達成良好的污染物控制效果。然而，氣罩內部常因氣流渦流而出現停滯區，特別是在開口附近易造成濃度差異與局部高污染區，故不宜讓操作人員頻繁穿越。設計時應根據操作需求、開口大小與使用頻率綜合考量，並將進氣口與排氣口設置於氣流停滯最小、擴散最弱的位置，以促進氣流均勻推送與污染物順利排出。包圍式氣罩為所有氣罩型式中控制效率最高者，特別適用於高濃度粉塵、有害氣體或揮發性化學物之作業環境(曾麗靜 & 黃榮芳, 2011)。

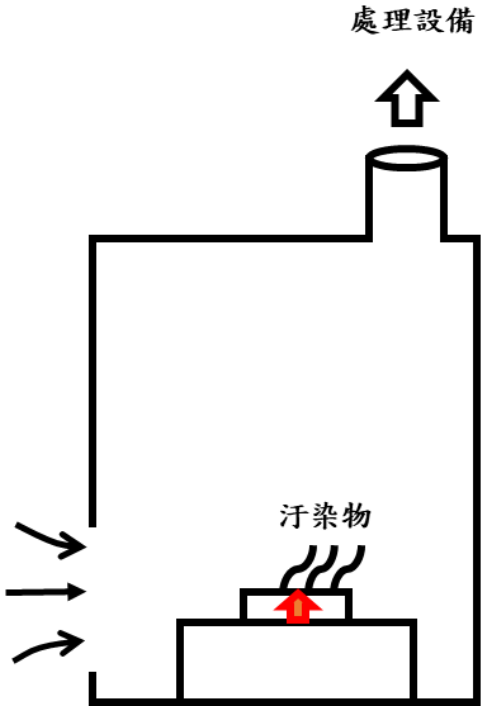


圖 15 包圍型排氣罩

5.1.2接收型排氣罩（Receiving Hood）

接受型氣罩是一種藉由污染物自身的運動方向與動能來進行捕集的氣罩形

式。當污染物具有明顯的流動慣性或浮力時，可利用其自然運動趨勢導引進入排氣罩內。例如，高溫煙氣因受熱浮力作用自然上升，若將氣罩設置於熱源上方，即可使煙氣隨氣流慣性與浮升力自動被吸入罩內，而無需額外提高抽風速，如圖 16 所示。此類設計常見於鍋爐煙罩、廚房油煙罩、焊接排煙罩或高溫加熱爐的懸吊式罩體，在處理高溫或具上升氣流特性的污染源時特別有效。

接受型氣罩的主要優點在於結構簡單、安裝容易、維護方便，且可利用污染物本身動能減少抽風量與能耗。然而，其捕集效率高度依賴氣流方向與穩定性。若外部環境氣流紊亂、作業空間通風不均或罩口位置偏離污染源運動軸線，污染物便可能逸散至作業區，造成控制失效。設計時應考量污染物流向、罩口形狀與距離，並保持環境氣流穩定，以確保污染物能順利導入罩內。此類氣罩適用於具明顯方向性或熱浮升力之污染源，但不宜用於低速、無慣性或分散型污染物的捕集作業(曾麗靜 & 黃榮芳, 2011)。

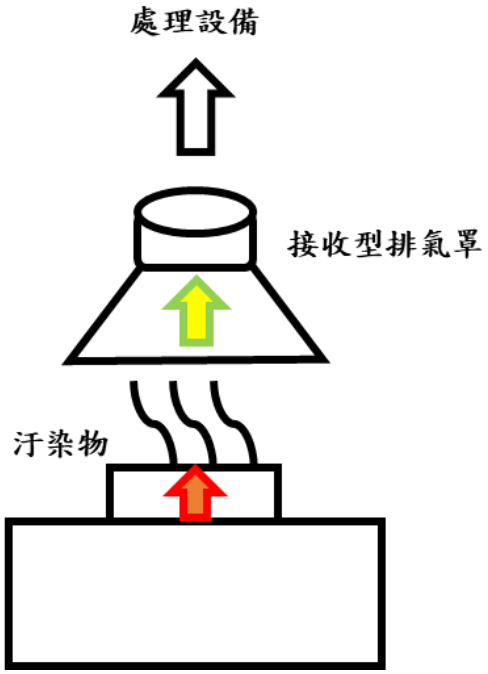


圖 16 接收型排氣罩

5.1.3捕集型排氣罩（Capturing Hood）

捕集型排氣罩，是將排氣罩設置於污染源的外圍區域，藉由罩口產生的吸

入氣流將污染物導向罩內並排入管道的氣罩形式。此類氣罩不直接包覆污染源，而是利用局部負壓在污染源周圍形成「捕集氣流區（capture zone）」，使逸散的粉塵、氣體或煙霧被吸入系統，如圖 17 所示。常見應用包括車庫廢氣抽排管、焊接抽氣罩、實驗操作檯及抽風工作桌等。

捕集型氣罩通常用於污染源位置固定或排放方向不明確的作業環境，可設為固定式或可移動式以因應不同操作需求。其設計重點在於必須在污染源附近產生足夠吸力，使氣流速度能克服污染物擴散與環境干擾，確保污染物能被穩定捕集。罩口距離過遠、開口面積過小或受外部氣流擾動時，氣流誘導效果將急遽下降，導致捕集效率降低。因此設計時需透過適當的罩口尺寸、風量與距離控制，確保在最低能耗下維持有效的捕集範圍。外裝式氣罩結構簡單、彈性高，是一般工業場所中最常見的局部排氣形式之一(曾麗靜 & 黃榮芳, 2011)。

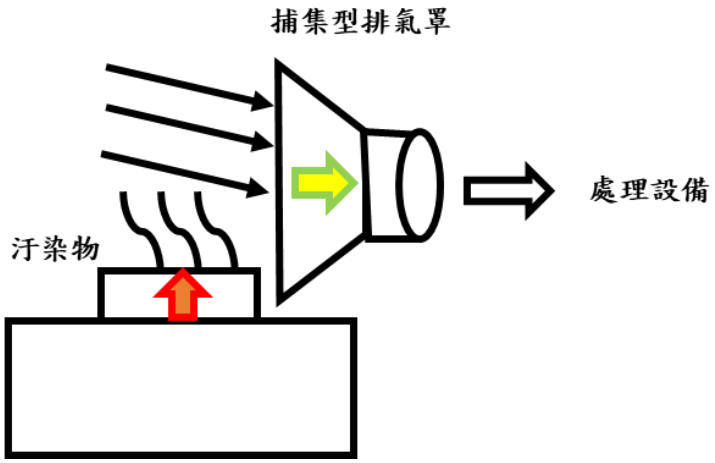


圖 17 捕集型排氣罩

5.2 排氣罩設計原則

排氣罩的設計是整體排風系統成效的核心，其首要原則在於確保污染物能在源頭被有效捕集，避免擴散至作業環境。設計時需兼顧氣流動力學、作業安全以及節能考量。首先，排氣罩口位置應盡量靠近污染源，並依污染物的擴散方向與速度配置，減少捕集汙染物距離與氣流干擾，使有害物質降到最低。其次，排氣罩口形狀與尺寸必須與污染源型態匹配，例如長條型污染源可設計狹縫型排氣罩，

如圖 18 所示。此外，排氣罩口周邊應避免阻礙氣流的結構，以降低渦流產生，提升捕集汙染物效率。在氣流控制方面，必須提供足夠的汙染物捕集速度，以確保污染物能被引導至排氣罩口而非外逸。捕集速度需依污染物性質而異，輕質氣體或熱煙氣可使用較低風速，重粉塵或有毒氣體則需較高風速。設計時應考慮風量、靜壓與風管阻力，以使風機運轉於接近最佳效率點，避免過度能耗。

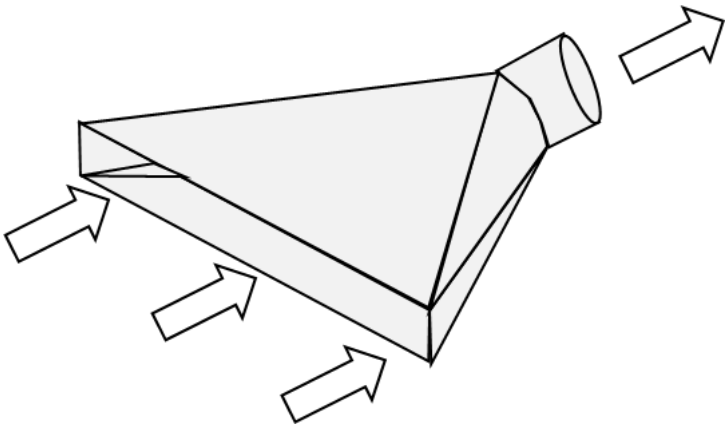


圖 18 狹縫型排氣罩

5.2.1局部排氣搬運風速

當排氣罩將作業過程中產生的氣體、粉塵或纖維顆粒污染物吸入後，這些物質會隨氣流進入風管並被輸送至後續處理設備。在此過程中，管內空氣的流速必須高於某一臨界速度，以確保污染物能被穩定帶走而不沉積於管壁。若管道氣流速度過低，污染物將因重力或渦流作用而停滯、沉降，導致管路堵塞、腐蝕或降低排氣效率。

能夠防止污染物沉積於風管所需的最低速度稱為搬運風速（Transport Velocity），確保搬運風速才能確保污染物隨氣流順利輸送至處理設備。不同種類或性質的污染物，其所需搬運風速差異很大，例如輕質煙霧或氣膠所需速度較低，而重粉塵或黏性物質則需更高速度以避免附著，可依照《工業通風設計實務手冊》(Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design)局部排氣系統最小設計搬運風速設計排氣罩風速(Hygienists, 2010)，如表 3 所示。此外，實際系統中的風管常包含彎頭、三通、漸縮與漸擴段等複雜構件，這些區域會產生渦

流及回流現象，增加沉積風險。因此設計時應採用略高於理論值的搬運風速，並於容易沉積汙染物的位置設置檢修孔或清理口，定期進行清潔維護，以維持局部排氣系統的穩定與安全運轉(勞動部職業安全衛生署, 2023)。

表 3 局部排氣系統最小設計搬運風速表(Hygienists, 2010)

汙染物性質	實例說明	建議設計風速 (m/s)
蒸氣、氣體、煙霧	—	5~10
金屬煙霧（Fumes）	焊接作業	10~13
極細輕粉塵（Very fine light dust）	棉絨、木粉、印刷粉	13~15
乾性粉塵與粉末（Dry dusts & powders）	橡膠粉、電木粉塵、麻絨、棉塵、輕刨屑、肥皂粉、皮革屑等	15~18
一般工業粉塵（Average industrial dust）	研磨粉、乾拋光絨、麻絨、咖啡豆粉、鞋粉、花崗岩粉、矽粉、一般物料處理、磚切割、黏土粉、鑄造砂(一般)、石灰石粉、包裝與石棉稱量	18~20
重粉塵（Heavy dusts）	濕木屑、金屬屑、鑄造砂、噴砂粉、木塊、銅屑、鐵屑、鉛塵等	20~23
重或潮濕粉塵(Heavy or moist dusts）	含小碎屑的鉛塵、潮濕水泥粉、黏性拋光絨、石灰粉等	>23

5.2.2排氣罩運行與維護要點

排氣罩在實際使用中，除了設計合理外，長期穩定運行與妥善維護同樣關鍵，

即使初期性能良好，也可能隨時間退化，導致汙染物捕集效率下降與能耗增加。首先，在運轉管理上應確保風機、風管與排氣罩協同運作，並定期檢查排氣罩口吸力是否符合設計值。若發現汙染物捕集效果不佳，可能是管路堵塞、濾網積塵或風機性能衰退，需及時排查與修復。其次，排氣罩口周邊環境應保持暢通，避免被物品遮擋或誤將污染源置於排氣罩口外，否則容易造成逸散。對於需要補充進風的系統，應確認補風量充足，避免室內壓力不平衡而降低汙染物捕集效果。

在維護方面，建議建立定期檢測制度，包括量測風量、靜壓與污染物捕集速度，並與原始設計數據比對，以評估性能變化。若有油煙、粉塵或化學腐蝕性氣體，應定期清理排氣罩口與風管內壁，必要時更換濾材與防腐塗層，確保系統壽命。

六、 風機節能技術

風機作為空調、通風與工業排風系統中的主要動力設備，其能耗在整體建築與工廠能源消耗中占有相當比例，因此如何提升風機系統的能源效率，一直是節能設計與改善的重點。風機節能技術不僅限於單機效率的提升，更涵蓋系統匹配、管路設計、控制方式及運行維護等多層面。若設計階段忽略效率問題，或運轉管理不當，將造成過大能耗與不必要的運行成本。現行的節能措施大致可分為：提升風機本體效率、優化風管與安裝條件、導入變頻與智慧控制、採用高效馬達及傳動方式，以及加強系統維護管理。這些技術不僅可降低耗能，也能延長設備壽命並改善使用環境。風機節能技術應以「系統整體效率」為核心，兼顧設備選型、安裝與管理，以達成節能減碳與降低營運成本的雙重目標。

6.1 高效率風機與馬達選用

高效率風機（High-Efficiency Fan）是指在相同風量與靜壓需求下，能以較低消耗電功率達成輸送空氣功能之風機，高效率風機的特徵包含具高效葉輪設計（低渦流設計、最佳化葉片角度）以及採用高效率馬達技術（如 EC Motor 或 IE4/IE5 馬達）。其效率評估通常包含風機靜壓效率、全壓效率、電機效率及整體系統效率（Fan System）選擇高效率風機與馬達是風機系統節能的首要手段，高效能風機通常具有經優化的葉輪設計與流道結構，可減少渦流與能量損失，確保在額定工況下提供較高的效率。風機馬達方面，採用符合 IE3 或 IE4 等級的高效率電機，能將電能轉換為機械能的效率提升。以 15kW/4P/60Hz 馬達舉例，依照 IEC 60034-30-1 規範，目前較節能的 IE4 馬達效率為 94.1%，上一代 IE3 馬達效率為 93%，其效率提升了 1.1%(IEC, 2014)，如圖 19 所示，從長期運行的角度來看，具備相當可觀的節能潛力。此外，直驅式傳動相較皮帶傳動可避免因打滑與磨耗造成的能量浪費，並減少維護頻率。在風機選型時，應盡量使設計運行點接近其最佳效率點，避免因偏離設計曲線而導致效率降低。若系統常在部分負載

運行，應選擇風機性能曲線較平坦的風機型號，以確保不同負載下皆能維持合理效率。透過正確選型與高效率元件的應用，可在系統全生命週期內大幅降低能耗，並兼顧可靠性與經濟性。

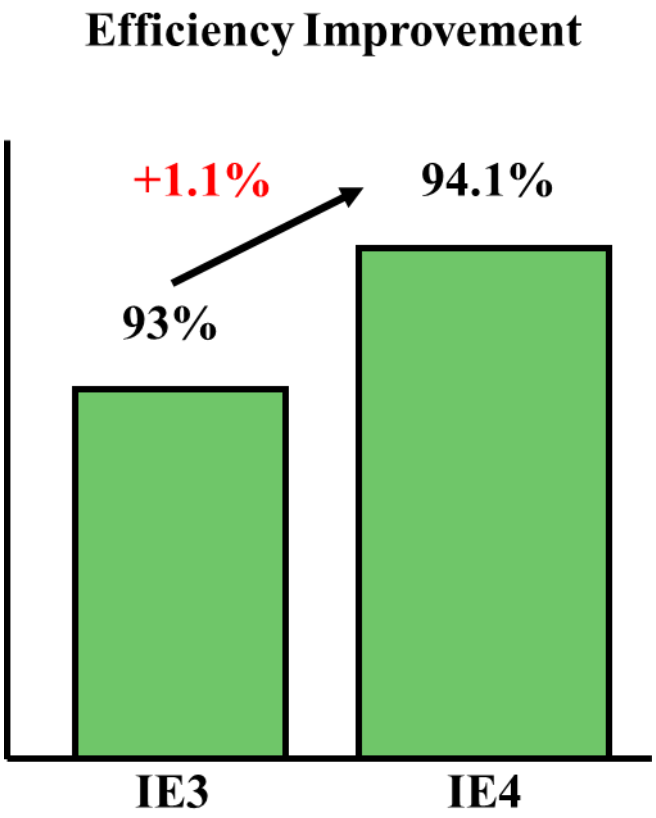


圖 19 IE3 及 IE4 效率比較圖(IEC, 2014)

6.2 風管系統優化與阻力降低

風管系統的設計與安裝品質直接影響風機的耗能表現，若管路過長、彎頭過多或截面尺寸不當，皆會使靜壓損失增加，迫使風機必須輸出更高壓力以維持需求風量，進而造成能源浪費。因此，優化風管配置是提升風機節能效率的重要措施。常見作法包括直角管更換為彎頭，減少不必要的彎頭，選用合適的風管管徑以控制風速、避免突縮或突擴造成的局部壓損，以及使用低阻力風口與消音器；此外，在三通管路中加裝導流板（guide vane），如圖 20 所示，亦能抑制分流湍動與逆流現象，顯著降低局部損失(Gao et al., 2018)。除了局部元件的改良外，風

管設計亦應從系統整體效率的角度進行優化，可利用 CFD 模擬預先分析流場分布，避免高渦流區與壓損集中的不良幾何，並在規劃階段優先配置短而直的主幹管線，將彎頭及變徑集中於風量較小的支路，以降低主風道的壓損。風管尺寸方面，可採用等壓法或等摩擦法，使各區段風速維持在合理範圍，兼顧能效與噪音控制。初期若能與設備廠商協同整合，亦有助於提升整體系統性能。施工階段則需確保風管密封性，避免漏風導致實際風量不足，使得系統不得不提高送風壓力而增加能耗。經過合理布局與施工品質控管，不僅可降低風機能耗，也能確保風量分布均勻，提升整體空調系統效能。

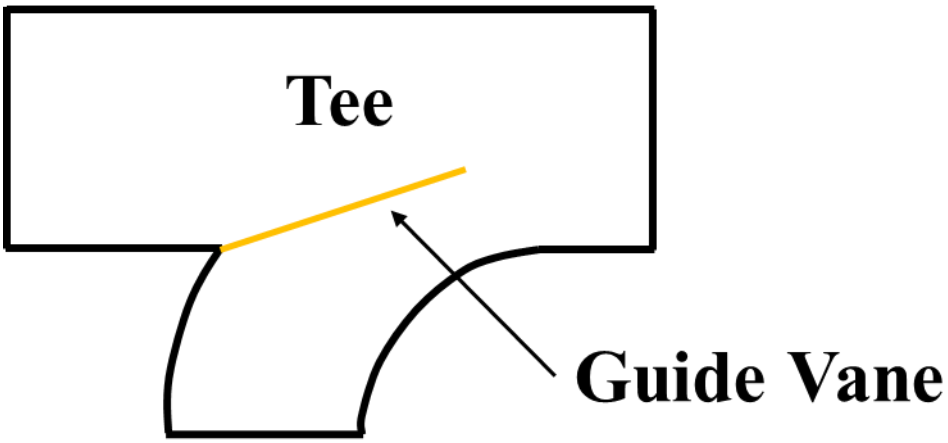


圖 20 導流板圖

6.3 變頻控制與智慧化管理

傳統風機多以定速運行，再以風門調節風量，然而此方式在部分負載時會造成大量能耗浪費。導入變頻器可依實際需求調整風機轉速，根據風機轉速與消耗電功率關係(風機定律)，如公式(13)所示，風機由滿載 60HZ 轉速降低 10%，其理論消耗電功率可降低約 27%，節能效果顯著。因此，在相同工作條件下，VFD 系統比傳統控制系統更有效率，採用 VFD 的馬達系統可以實現更精準的控制，並且維護需求更低，研究指出，在任何適用系統上安裝變頻器均可降低至少 5~15%的能耗(Kapp et al., 2024)。除了基本的變頻控制之外，智慧化能源管理系統亦能透過感測器與自動化控制，根據室內環境條件，如溫濕度、一氧化碳(CO)、

二氧化碳(CO_2)或壓差，即時調整風機運行，這不僅避免長時間滿負荷運轉造成浪費，還能提升環境舒適度與空氣品質。風機性能參數如風量、靜壓、轉速、消耗電功率與效率等若能即時回傳至中央監控（Facility Monitoring & Control System,FMCS），則可協助系統監控實際運轉狀況，快速辨識異常或效率下降問題，透過數據化管理，中控可自動調整最佳運轉點，避免超負荷或低效率區域運轉，進一步提升整體節能效益與系統可靠度。

$$\frac{W_1}{W_2} = (\frac{N_1}{N_2})^3 \tag{13}$$

其中，W_1為調整前消耗電功率(kW)；W_2為調整後消耗電功率(kW)；N_1為調整前轉速(r.p.m.)；N_2為調整後轉速(r.p.m.)。

6.4 維護管理與運行優化

再高效率的風機與管路設計，若缺乏適當的維護管理，也可能導致效率下降與能耗上升。常見問題如濾網積塵、風機馬達軸承潤滑不良、風機葉片附著污垢或變形，都會增加運行阻力，降低系統效率，甚至縮短設備壽命。因此，應建立完善的維護制度，包含定期清潔或更換濾網與風道、檢測與更換風機馬達潤滑油、監控馬達電流與軸承振動，以及確保皮帶張力或聯軸器正常。若配合智慧監測裝置，能即時掌握能耗異常並進行預防性維修，避免能量浪費擴大。除此之外，運行策略亦影響能效，例如合理安排風機啟停順序、避免同時高負載運轉、或利用夜間低負荷時段進行節能模式。

七、 節能案例分享

案例一

高雄某賣場停車場送排風機系統，採用 1HP 軸流式噴流風機 25 台，風機有安裝變頻器，依現場停車場實際使用情形，並配合溫度及一氧化碳（CO）濃度控制風機轉速，風機變頻器平均運轉頻率約為 55Hz，整體風機節能效率可達 20%。

圖 21 高雄某賣場停車場風機監控圖

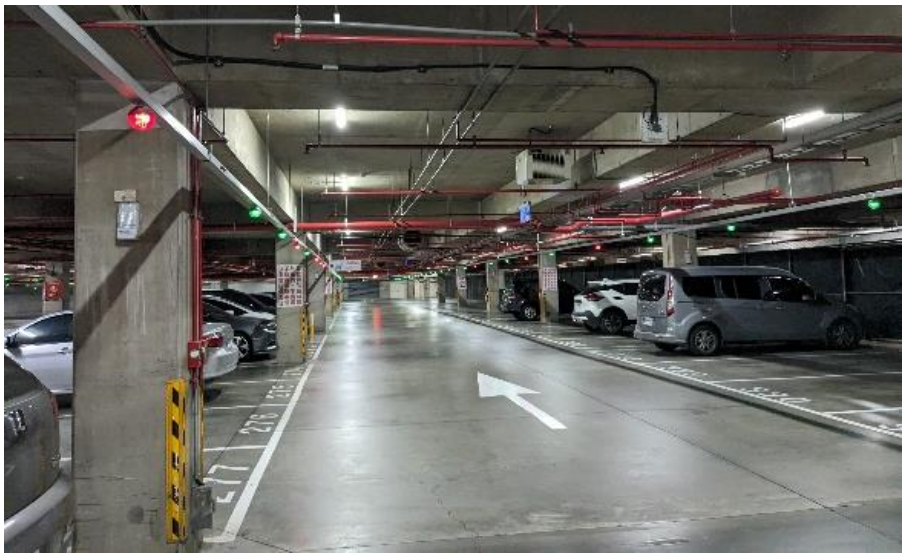


圖 22 高雄某賣場停車場風機圖

案例二

台中某賣場停車場送排風機系統，採用 900W 軸流式噴流風機 30 台，風機有安裝變頻器，依現場停車場實際使用情形，並配合溫度及一氧化碳（CO）濃度控制風機轉速，風機變頻器平均運轉頻率約為 51Hz，整體風機節能效率可達 34%。

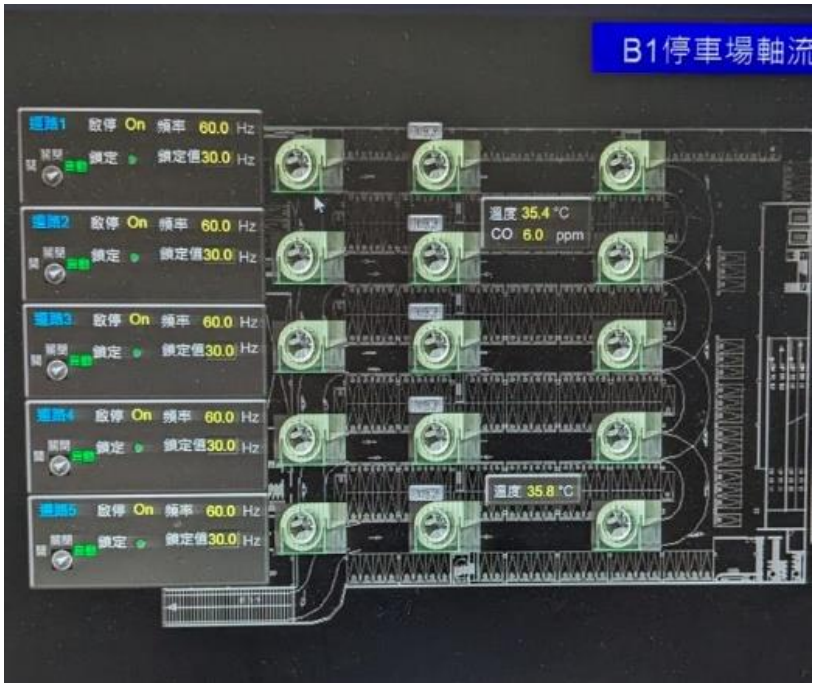


圖 23 台中某賣場風機監控圖

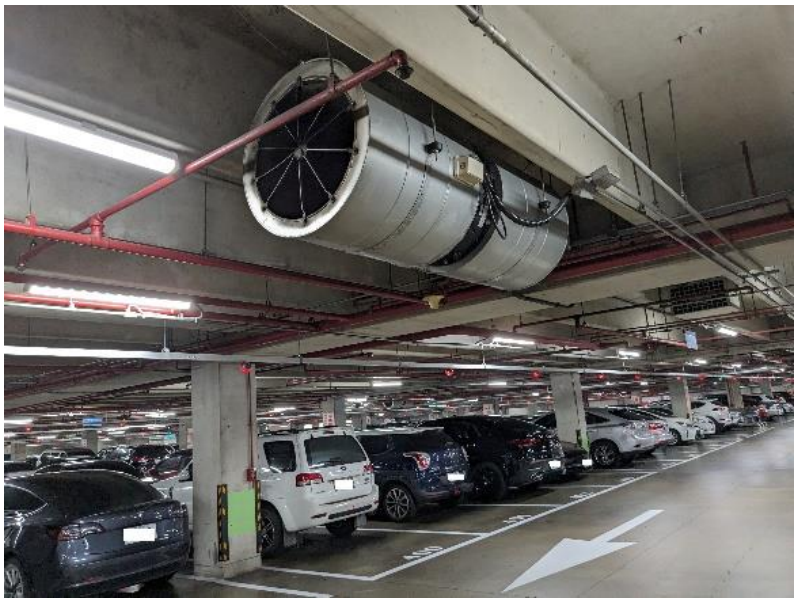


圖 24 台中某賣場停車場風機圖

案例三

新北某賣場停車場送排風機系統，採用 1HP 軸流式噴流風機 33 台，風機有安裝變頻器，依現場停車場實際使用情形，並配合溫度及一氧化碳（CO）濃度控制風機轉速，風機變頻器平均運轉頻率約為 48Hz，整體風機節能效率可達 44%。

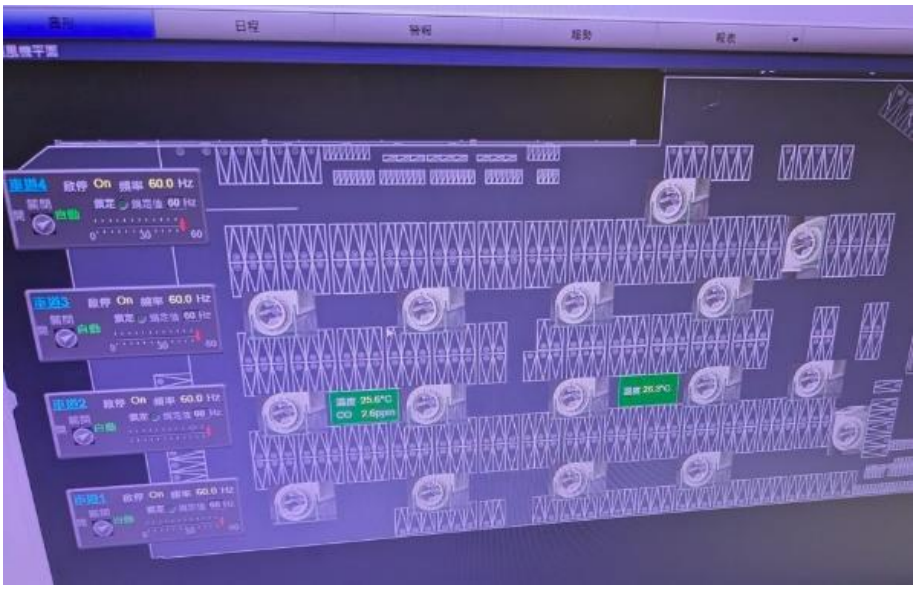


圖 25 新北某賣場風機監控圖

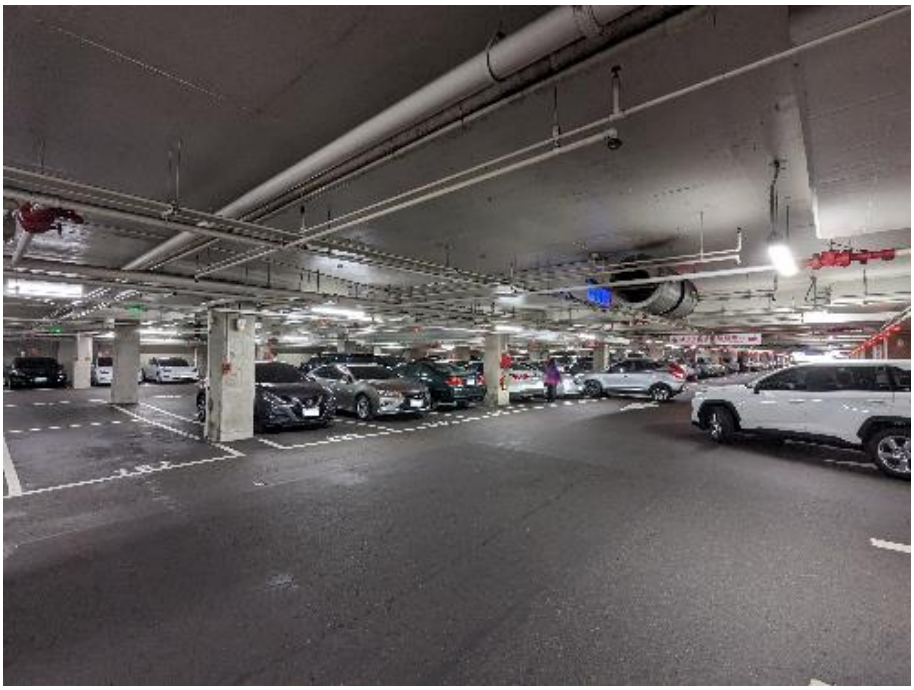


圖 26 新北某賣場停車場風機圖

案例四

台中某賣場停車場送排風機系統，汽車停車場使用 20HP 排氣風機 2 台、機車停車場使用 7.5HP 排氣風機 2 台，風機有安裝變頻器，依現場停車場實際使用情形，進行風機啟停時間控制，年運轉時間由 5,475 小時調整至 3,375 小時，風機整體節能率可達 38%。

圖 27 台中某賣場停車場風機監控圖

案例五

台北某百貨公司停車場送排風機系統，使用 40HP 排氣風機 2 台、20HP 排氣風機 2 台、15HP 排氣風機 2 台、10HP 排氣風機 5 台、7.5HP 排氣風機 3 台，風機有安裝變頻器，依現場停車場實際使用情形，並配合一氧化碳（CO）濃度控制，風機變頻器平均運轉頻率約為 42 Hz，風機整體節能率可達 60%。

圖 28 台北某百貨公司停車場風機監控圖

八、 結語

抽排風機系統在現代建築與工業製程中，肩負著維持空氣品質、保障作業安全與提升舒適性的重要角色。然而，若系統設計或風機運轉不佳，往往會導致能耗過高、噪音增加與維護成本攀升等問題。綜觀其運行特性，風機的效率取決於風量、壓力與系統阻力之間的平衡，若能合理規劃管路、選用高效率風機馬達，並確保實際運行點接近最佳效率點，便能在滿足需求的同時，有效降低能源浪費與設備損耗。由此可見，抽排風機不僅是單純的送風或排風設備，更是能源管理與環境控制的重要環節。

展望未來，抽排風機系統的發展方向將朝向高效率化、智慧化與低碳化邁進，透過導入變頻控制與智慧監測，即時依環境條件調整運行模式，可避免長時間滿負荷運轉所造成的能耗浪費，而完善的維護策略，亦能確保系統長期穩定與高效。隨著節能減碳與永續建築趨勢推進，抽排風機系統的角色將更為關鍵，其設計與管理不僅影響營運成本，更直接關乎社會永續發展目標。因此，推動抽排風機的節能與優化，已是建築與工業不可忽視的重要課題。

九、 參考文獻

Administration, U. S. E. I. (2025). *Annual Energy Outlook 2025*. U. S. E. I. Administration. https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=65564

Ahmed Tukur, K. P. H., and Kelly Kissock. (2016). *Energy Savings from Robust Control of Static Pressure Based upon Zonal Occupancy for Multiple-Zone VAV Systems* 2016 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, https://www.aceee.org/files/proceedings/2016/data/papers/3_219.pdf

Air Movement and Control Association International, I. (2010). *AMCA 300: Reverberant Room Method for Sound Testing of Fans* (AMCA 300).

Alavy, M., Li, T., & Siegel, J. A. (2020). Energy use in residential buildings: Analyses of high-efficiency filters and HVAC fans. *Energy and Buildings*, *209*, 109697. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109697

AMCA. (2025). *Laboratory Methods of Testing Fans for Certified Aerodynamic Performance Rating (AMCA 210-25)*.

Berardi, U. (2015). Building energy consumption in US, EU, and BRIC countries. *Procedia engineering*, *118*, 128-136.

Cao, X., Dai, X., & Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, *128*, 198-213.

Cao, Z., Liu, Z., Zhang, C., Wang, Y., Bai, Y., & Wu, S. (2024). Performance analysis of a novel movable exhaust ventilation system for pollutant removal in industrial environments. *Journal of Building Engineering*, *97*, 110569. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110569

Colebrook, C. F. (1939). Friction Factors for Pipe Flow. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, *11*(4).

Gao, R., Liu, K., Li, A., Fang, Z., Yang, Z., & Cong, B. (2018). Study of the shape optimization of a tee guide vane in a ventilation and air-conditioning duct. *Building and Environment*, *132*, 345-356. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.006

Hygienists, A. C. o. G. I. (2010). *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design* (27th ed. ed.). ACGIH.

IEC. (2014). *Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)* (IEC 60034-30-1).

Kabbara, Z., Jorens, S., Ahmadian, E., & Verhaert, I. (2023). Improving HVAC ductwork designs while considering fittings at an early stage. *Building and Environment*, *237*, 110272.

https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110272

Kapp, S., Wang, C., McNelly, M., Romeiko, X., & Choi, J.-K. (2024). A comprehensive analysis of the energy, economic, and environmental impacts of industrial variable frequency drives. *Journal of Cleaner Production*, *434*, 140474. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140474

Okochi, G. S., & Yao, Y. (2016). A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *59*, 784-817. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.328

Standardization, I. O. f. (2010). *ISO 3744: Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure — Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane* (ISO 3744).

Standardization, I. O. f. (2017). *ISO 5801:2017 Fans — Performance testing using standardized airways*. ISO.

Xu, Z., Liu, S., Hu, G., & Spanos, C. J. (2017). Optimal coordination of air conditioning system and personal fans for building energy efficiency improvement. *Energy and Buildings*, *141*, 308-320.

勞動部職業安全衛生署. (2023). *附錄 1－工業通風局部排氣裝置設置參考手冊*. 勞動部職業安全衛生署. https://www.osha.gov.tw/media/tlsc3hi0/%E9%99%84%E4%BB%B61-%E5%B7%A5%E6%A5%AD%E9%80%9A%E9%A2%A8-%E5%B1%80%E9%83%A8%E6%8E%92%E6%B0%A3%E8%A3%9D%E7%BD%AE%E8%A8%AD%E7%BD%AE%E5%8F%83%E8%80%83%E6%89%8B%E5%86%8A.pdf

曾麗靜, & 黃榮芳. (2011). 氣罩型式與捕集效率關聯性. *工業安全衛生*(270), 50-61. https://doi.org/10.6311/ISHM.201112_(270).0005

經濟部標準檢驗局. (2015). *工業用風機－以標準化風道進行性能驗測* (CNS 7778).