

# 潔淨室用風機過濾器(FFU)規劃原則

Principle of Cleanroom FFU Planning

TCTA 2020 / ISSUE 25

張耿政 / Ken Chang

**TOPWELL**

[www.topwell-pes.com.tw](http://www.topwell-pes.com.tw)

# 潔淨室用風機過濾器(FFU)規劃原則

## 摘 要

如何以更低的初設成本去建造一間可以降低耗能或其他運轉費用之潔淨室是現今潔淨室設計建造的最大挑戰。本文討論潔淨室潔淨等級設計之相關設計條件包括循環風量次數、覆蓋率、風速與FFU尺寸之選擇的關聯，並對不同尺寸下FFU系統之初設成本及運轉耗能比較說明。

關鍵字：FFU；潔淨等級；循環風量次數；覆蓋率；風速；FFU尺寸。

## Principle of Cleanroom FFU Planning

### Abstract

It is a critical task for the cleanroom designer to build up a cleanroom at lower cost while achieving the lower operation cost under the same cleanroom cleanliness. This article discuss relationship between key design parameters including Air Change Rate(ACR), Ceiling Coverage, Air Velocity and FFU size selection. Meanwhile, the initial and operation cost comparisons are evaluated for different FFU size is also discussed..

Keywords: FFU; Cleanliness Class; Air Change Rate(ACR); Ceiling Coverage; Air Velocity ; FFU size

## 1.為何要討論潔淨循環風量選用的適正性

現今潔淨室規劃設計的最大挑戰，就是如何以更低的初設成本以及運轉成本達成設計目標。換言之，潔淨室設計者必須以不增加初設成本得前提下，建構達成一座高效能廠房，或是在考量邊際效益必須增加初設成本下，也要在最短的時間內可以回收。由於目前大型潔淨廠房幾乎都是採取風機過濾器(FFU)系統，而FFU系統不論是在建廠初設成本或空調耗電上皆佔有相當高的比重。以潔淨等級ISO5的廠房為例，FFU的製裝費用就佔約10%左右，而FFU的耗電佔去全體空氣側(加上外氣空調箱)的37%。因此如何較低的初設成本以及日後合理的運轉成本，規劃設計符合業主規範要求的潔淨室FFU系統，其重要性已不容忽視。

潔淨室環境的等級係依據國際標準所訂定的潔淨等及分類方式，再根據業主使用相關需求來訂定。以國內為例，早年潔淨等級標準都是參照美國聯邦標準209(FS 209)，以Class 1 至Class 100,000分類。直到國際標準化組織(ISO)頒布ISO 14644-1標準後逐漸取而代之(表1)。不過因長年成習之故，美國聯邦標準 209分類(FS209E)方式在本地業界者還大有人在。

表1：Airborne Particulate Cleanliness Classes [1] [2]

ISO CLASS[2]	Number of Particles per Cubic Meter by Micrometer Size						FS 209E[1]
ISO1	0.1 micron	0.2 micron	0.3 micron	0.5 micron	1 micron	5 microns	0.5 micron
ISO1	10	2					
ISO2	100	24	10	4			
ISO3	1,000	237	102	35	8		1
ISO4	10,000	2,370	1,020	352	83		10
ISO5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29	100
ISO6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293	1,000
ISO7				352,000	83,200	2,930	10,000
ISO8				3,520,000	832,000	29,300	100,000
ISO9				35,200,000	8,320,000	293,000	

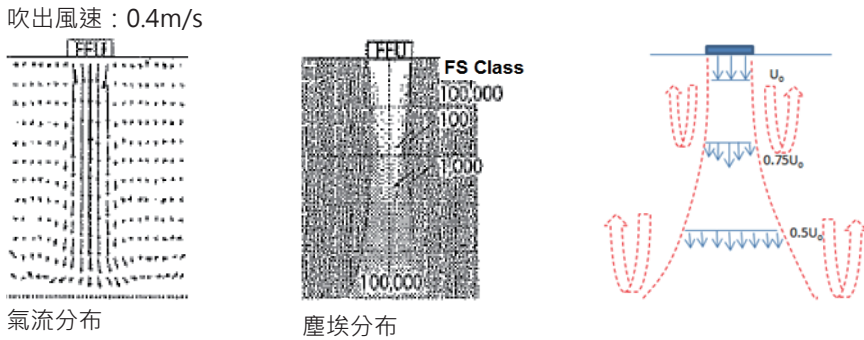
從潔淨度分類標準來看，空間中不同直徑的微粒並非維持單一數值，而是一定範圍的數量級；相同等級不同粒徑其數量級又未必相同，對於空調設計者而言，只要提供滿足該範圍的潔淨循環風量就能達標，但潔淨廠房內生產製程因不同行業而存異，更不論生產設備放列方式以及室內挑高需求。因此，對於滿足同樣特定的潔淨等級，無論在控制粒徑、換氣次數、採用高效過濾器(HEPA)或極高效過濾器(ULPA)等因素都會有所不同，而這些因素更影響之後的初設及運轉成本，更不論考量選用滿足不同潔淨等級的潔淨空調設計。根據胡石政[3]之研究，以Class 1,000之潔淨室為基準，若潔淨度提升至Class100的等級，其造價將提高至20~30倍之間，因此從「同級不同粒徑」或「異級」的觀點來看、潔淨等級需求對潔淨空調初設成本的影響不容小覷。

在運轉實務上，許多業主需求其實夾在兩個不同等級中，然而在與建造商的討論通常「料敵從寬」加嚴設計。比方說一個「準」ISO 7(FS CLASS 10,000)標準的環境需求，但遷就潔淨分類標準以求最大餘裕，便升級為ISO 6(FS CLASS 1,000)的設計，然而ISO 6的潔淨循環風量次數至少是ISO 7的二倍以上，除了增加FFU初設成本外，爾後FFU的操作也隨之增加成二倍以上；筆者早年曾經參與光電面板廠潔淨室設計，就曾經遇過類似情況，從而討論出「折衷設計」以降低成本。本文擬從「潔淨循環風量適正性」觀點出發，從換氣次數、覆蓋率及面風速的設計參數，來探討合理的FFU配置方式。

## 2.潔淨度、風速與換氣次數的匹配性

潔淨室的運作機制，乃是利用活塞效應利用氣流以迫淨(Purge)將受控制空間內的微粒推離，而活塞力道的大小，則取決於受控制空間正投影面上的風速。理論上若這個正投影面能夠完全覆蓋朝下吹的氣流，則能夠完全迫淨，在空調工程上可視為全面換氣。但基於物理上的限制，比方說燈具、排煙閘門、出風口下的設備...等阻擋投影面，使得環境「完全滿蓋」產生困難。另外從操作的觀點，真正高度淨化需求的區域並非全部，若要求「完全滿蓋」不僅浪費同時也不切實際。因此對於絕大部份的潔淨室，則將受控制空間內的微粒濃度依據設備、人員及操作方式產生的發塵量，定義在可接受的範圍內，然後再計算循環風換氣量的範圍，接著再確認正投影面上平均風速所轉換的動量是否足夠移除微粒，又不致因風速過快造成紊流強度(Turbulence Intensity)過大，氣流橫向動量傳遞量過大，造成微粒被對流傳遞到其它鄰近區域而未被排出潔淨室。

圖1：潔淨氣流剖面與機制



如圖1所示，FFU出口的流場(Flow Pattern)屬於典型的「噴流」(Jet)；當噴流進入空間後，與周邊靜止的空氣產生速度梯度，又因流體粘性的形成剪應力，流體的動能除朝下外亦開始往橫向傳遞，氣流因此往兩側擴散。此時，中心線速度降低，原本呈現拋物線的速度分布逐漸平均成直線，而噴流內的平均速度降低，並隨著與靜止空氣混合後粘性耗散而趨近零。

前述的流場物理現象，以潔淨室設計角度來看，由於潔淨氣流動能在氣流離開FFU後，因為氣流動能因剪應力形成紊流將能量往兩側擴散，朝下方的氣流因動能逐漸衰退，氣流平均速度開始下降。如果我們考慮FFU出口下方覆蓋投影面上不同高度的平面，我們會發現因為速度降低，氣流的通量越小，換氣次數也越來越少，氣流推擠微粒的能力越來越差(某些研究顯示潔淨氣流流速應維持在0.1~0.15m/s以上)。當然能維持的潔淨等級也越來越差，如圖1所示。另一方面FFU覆蓋投影面下越接近地面，氣流雖然更均一平整，但是氣流動能不足，推擠微粒的能力更等而下之。提高FFU風速不僅可加強氣流貫穿流場的能力，確保氣流均勻性，提高換氣次數，也係到揚塵的抑制效果。如果FFU出口流速足夠快，即便在潔淨室中段都可保持一定程度的均勻性，而這也是特殊用途的挑高潔淨室或AMHS用FFU風速較一般FFU為快的理由。

另外，圖1中噴流外靜止空氣的部份，噴流因紊流作用作橫向擴散，微粒也會被輸送到鄰近區域而不會被吹到地面，從而將持續將污染物流在潔淨區劃內，如果要避免此一狀況，就是將噴流涵蓋的區域變大，也就是增加潔淨氣流的覆蓋率。通常為滿足潔淨等級需求，除了前述循環風量次數要求外還要兼顧考量FFU覆蓋率。尤其是針對微小粒徑(0.1 $\mu$ m)及其高潔淨等級(ISO 6及更高)要求之環境，在較低FFU覆蓋率時容易在無FFU覆蓋之下方形成氣袋區(Air Pocket)，部份橫向移動的氣流誘引微粒至盲板覆蓋的低壓迴流區域(氣袋區)，造成污染物滯流無法排除使得微粒滯留累積，所以在高潔淨等級時取較高覆蓋率通常是解決問題的方案；表2為Jaisinghaninn[4]所提出FFU覆蓋率之建議。

表2 FFU覆蓋率之建議

Class	Ceiling Coverage (Percentage)
ISO 8 (Class 100,000)	5 – 15%
ISO 7 (Class 10,000)	15 – 20%
ISO 6 (Class 1,000)	25 – 40%
ISO 5 (Class 100)	35 – 70 %
ISO 4 (Class 10)	50 – 90%
ISO 3 (Class 1)	60 – 100%
ISO 1-2	80 – 100%

但流場的空間位置與潔淨氣流的關連性是甚麼?我們可以考慮以下情境：一座面積2,400m<sup>2</sup>、高5.2m，FFU覆蓋率25%的潔淨室(圖2)，其高架地板開孔率設定25%，FFU風速分別為0.35m/s、0.40m/s、0.45m/s的情況下，利用計算流體力學(CFD)方法，去試算高架地板上高度1m、2m、3m、4m、5m各個截面換氣量以及平均速度。從計算結果(圖3)可以看到，潔淨室不同高度斷面上的平均速度變化受初始FFU離風速度影響，當出風速度為0.45m/s時，即便到達高架地板上1m的高度仍還可以保持0.1m/s的風速，換氣次數仍保持在75次/h。而0.4m/s以下幾乎不到0.1m/s，有效換氣次數偏低，氣流推擠微粒的能力也越差。當然，以此趨勢來看，如果潔淨室挑高降至4m甚至3.5m，FFU離風面速0.4m/s吹至高架地板上方時，潔淨氣流應當還有0.1m/s的平均風速，當然也就足夠推擠微粒。

圖2：用於試算的一座ISO 5等級潔淨室

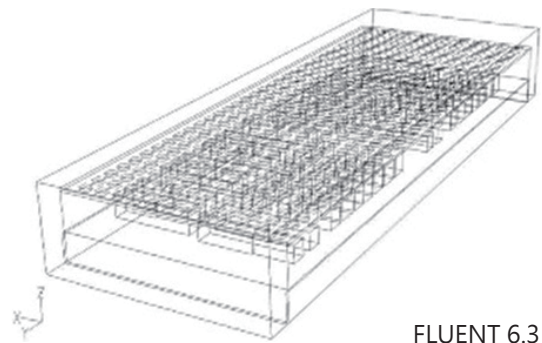
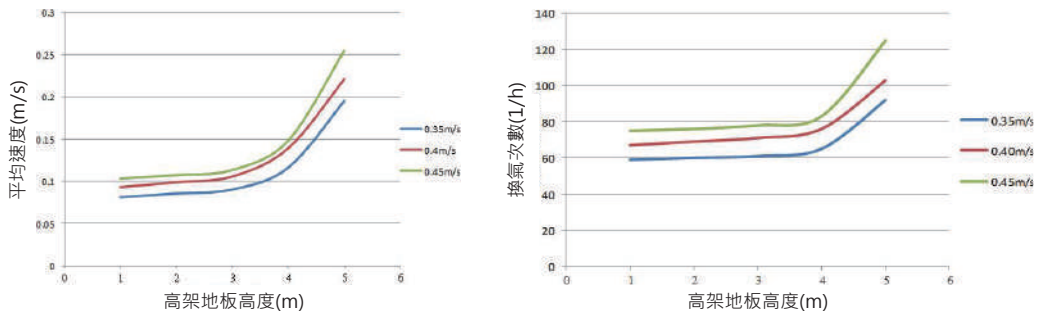


圖3：潔淨室不同高度截面換氣次數與風速的變化



由以上的說明，很清楚的看到潔淨室高度對於潔淨氣流的影響。所以在潔淨室設計中僅定義換氣次數是不夠的，還必須要考量維持淨化條件的有效高度。其它影響因素尚包括製程設備發塵量、人員及操作方式，以及過往操作因素來決定各潔淨等級分類循環風量次數(Air Change Rate, ACR)。通常較低的ACR次數反映在竣工或製程尚未運轉，沒有人員或製程污染下。一旦開始正式運轉，循環風量次數就要隨之增加，才能維持潔淨等級，所以FFU系統設計上耍有一定的可調餘裕以因應製程負載的變化。

在ISO 14644-4的附錄B中，曾給出醫藥產品與微電子業潔淨等級與換氣次數、氣流型式的對照表的範例(如表3所示為B.2微電子業的範例)，許多讀者認定本表就是ISO 14644所頒布的設計標準。必須說明的是ISO組織僅針對潔淨度分類以及量測方式作出建議，而換氣次數及平均風速則為買方與賣方依據規範討論，兩造合意的結果。以目前產業界實務來看，從半導體IC晶圓廠到封裝測試廠，從光電業之面板廠到模組廠或LED廠，以筆者參與多次潔淨室設計案比對後發現，ISO 14644-1的附錄三給出的參考範例數值仍屬過度保守，與「真實」潔淨需求差，異頗大，其循環風量次數設計也絕對不同。若依據Rule of Thumb以ISO 5為例，表列的是「單一方向流(U)」，也就是指FFU滿佈的情況下。但實務上25%的覆蓋率即可達成目標。雖然如此在竣工試車階段，為滿足潔淨規格還須進行調校。另外在正式運轉階段，FFU系統還要因應製程工藝的改變，或增設化學濾網(AMC Filter)等額外需作調整，為避免建廠期間過度投資，選取較低循環潔淨風量次數設計，同時選用可調風量FFU風機，依照實際操作環境透過中央監控調整風量。換言之，選用DC直流變頻馬達(或EC motor)驅動的FFU可提供以上操作彈性。

表3：ISO 14644-4的附錄B中B.2循環風量次數(ACR)範例

ISO Class	FS 209E Class	Air flow Type	Average Velocity(m/s)	Air Change Rate
Better Than ISO 3		Uniform	0.3-0.5	NA
ISO 3	1	Uniform	0.3-0.5	NA
ISO 4	10	Uniform	0.3-0.5	NA
ISO 5	100	Uniform	0.2-0.4	NA
ISO 6	1,000	Non-Uniform/Mixed	NA	70-160
ISO 7	10,000	Non-Uniform/Mixed	NA	30-70
ISO 8	100,000	Non-Uniform/Mixed	NA	10-20

除了潔淨風量調整外，變頻FFU可提供的另一個好處即為調整潔淨室的壓力。一般潔淨室提供正壓其目的在防止污染物從非潔淨區或潔淨等級較低進入潔淨區。值得注意是在建立不同潔淨區間之壓差時，尤其是Ball Room系統設計時，可透過中央監控系統控制DC FFU，藉由調整FFU轉速來提高局部室壓。但若是以運轉節能優先考量，則需先評估其他影響室壓因素，例如高架地板開孔率及配置、回風空間及乾盤管阻抗壓損，而不是盲目的調整FFU。



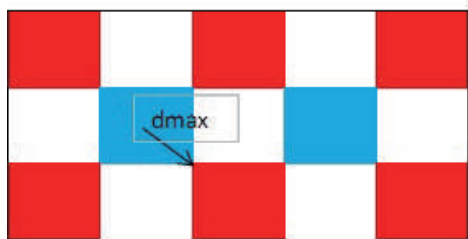
### 3.FFU尺寸之選用考量

潔淨室流場分為單一方向流(Unidirectional Airflow)、非單一方向流(Non-unidirectional Airflow)以及兩者折衷的混流(Mixed Flow)式。潔淨室採用單一方向流設計的優點，在於提供一均勻流場環境以防止汙染粒子累積於氣袋區。而FFU尺寸的選用，在非100%覆蓋率下，FFU之間間距大小也直接影響上述汙染粒子累積於氣袋區域的大小。縱觀FFU使用尺寸的歷史，從早期2' x4'，隨著風車噪音、振動等性能提升，更大尺寸如3' x4' 或2.5' x5' (日規潔淨室常用)，甚至4' x4' 也在降低初設成本考量下大量被採用。目前台灣市場使用情況依據產業別區分如下：

- IC半導體廠晶圓廠、液晶面板廠等潔淨室大多採用4' x4'，其潔淨室特點為較高潔淨等級要求(ISO 3~ISO 6)，以及潔淨室天花板挑高大且上方回風層空間充裕。
- 半導體封裝測試廠、LED及模組廠等較低潔淨等級潔淨室大多採用2' x4'，其潔淨室特點為較低潔淨等級要求(ISO 5~ISO 7)，以及潔淨室天花板挑高小且上方回風層空間窄。

在黃佳松[5]之研究指出，當安裝4' x4' FFU尺寸且氣流在25%覆蓋率下，在天花板下方2米處(Uh)氣流才顯現均勻流場。從流場模擬結果顯示，天花板無安裝FFU中心點距離FFU下方約0.85m(dmax)，若以此三角關係簡易推論，若FFU尺寸改其它較小尺寸時，在縮減dmax間距，是可提高均勻流場高度。如圖4顯示，相較於使用4' x4' FFU，在使用4' x3' FFU時，均勻流場高度可提高0.24m；在使用5' x2.5' FFU時，均勻流場高度可提高0.03m；在使用4' x2' FFU時，均勻流場高度可提高0.42m。

圖4：均勻流場高度簡易估算



4' x4' FFU ceiling coverage : 25%

天花板下方無FFU覆蓋處心距離FFU最遠: dmax=0.85

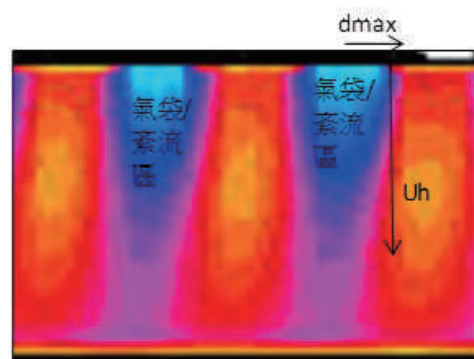
均勻氣流高度(距FFU下方): Uh=2m

如FFU尺寸變更如下, dmax及Uh分別為

3' x 4' dmax=0.75m, Uh=1.76m

2.5' x 5' dmax=0.84m, Uh=1.97m

2' x 4' dmax=0.67m, Uh=1.58m





由以上說明可知、小尺寸的FFU在均布條件下是可以提高氣流均勻度，從另一方面來說亦即增加了覆蓋率，提高潔淨度。但如果要兼顧初設成本及運轉成本，還是可以在固定面積內、均布條件下可涵蓋防護範圍，折衷採用稍大FFU尺寸。由於現今潔淨室幾乎都是採取FFU系統設計，而FFU系統不論是在建廠初設成本或空調耗電上皆佔有相當高的比重，因而要以更低的初設成本去建造一間可以降低耗能或其他運轉費用，FFU的設計選用重要性已不容忽視，以下分別針對不同FFU尺寸，提供潔淨室初設成本與FFU運轉成本分析比較。表4顯示相較於2' x4'，若採用較大尺寸4' x4' FFU設計，單就FFU設備就可省30%，如加上相關系統的初設成本最高可降低25%。

表4：FFU尺寸與潔淨室相關系統初設成本比較

	2' x4' DC FFU			2.5'x5' (or 3'x4') DC FFU			4' x4' DC FFU		
	單價(NTD)	數量	總價	單價(NTD)	數量	總價	單價(NTD)	數量	總價
FFU設備費用	9,000	4,500	40,500,000	10,600	3,100	32,860,000	12,500	2,300	28,750,000
FFU電控費用	1,500	4,500	6,750,000	2,000	3,100	6,200,000	2,400	2,300	5,520,000
FFU安裝費用	300	4,500	1,350,000	400	3,100	1,240,000	500	2,300	1,150,000
Ceiling Grid費用	1,500	11,000	16,500,000	1,350	11,000	14,850,000	1,200	11,000	13,200,000
TOTAL:			65,100,000			55,150,000			48,620,000
TOTAL(%)			100%			85%			75%
其他優劣	1.重量較輕安裝較容易			1.重量略重但安裝不難			1.重量重安裝較難		
	2. 安裝時，ceiling上方需較小空間			2. 安裝時，ceiling上方需較小空間			4. 安裝時，ceiling上方需較大空間		
	3.風機效率較差(40~50%)			3.風機效率較高(50~55%)			2.風機效率較高(55~60%)		

FFU風機效率取決於四大要素:控制器、馬達、扇葉及箱體導流設計。一般而言，例如以2x4 FFU而言，受限於寬度其所能選用扇葉直徑也較小，相對效率也較低。而在電機(控制器及馬達)方面，雖然理論上都可針對不同FFU尺寸風扇需求設計出效率相當者;但實務上，較小功率之電機效率還是不如較高功率電機。由於各廠牌設計上有所差異，綜觀市售各型FFU效率，還是以尺寸越大效率越高，以表5的三種型式為例，分別為50%(2' x4' )、55%(2.5' x5' )以及60%(4' x4' )。表六顯示FFU尺寸越大總體運轉電費越低，以十年累計計算，比起選用2' x4' FFU，若使用2.5' x5' FFU運轉成本為93%，若使用4' x4' FFU運轉成本為83%。

表5：FFU尺寸與運轉成本比較

TOPWELL FFU耗電分析運用軟體(DC FFU)										C.FFU尺寸與安裝空間需求									
設備型式	2x4	2.5x5	4x4	循環風量(CMM): 15000															
數量	1000	667	500																
FFU設計風量(CMM)	15	23	30																
FFU整機效率(%)	50	55	60																
濾網初始壓損(Pa)	75	75	75																
FFU機外靜壓(Pa)	80	80	80																
濾網年增壓損(Pa)	10	10	10																
電價(NTD/KW-Hr)	2.7	2.7	2.7																
2x4	迴轉時間	Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
	風量(QCMM)		15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0		
	全靜壓(TSPPa)		155	165	175	185	195	205	215	225	235	245	255	265	275	285	295		
	單台耗電(W)		78	83	88	93	98	103	108	113	118	123	128	133	138	143	148		
	單台年耗電費(NTD)	新台幣	1,833,030	1,951,290	2,069,550	2,187,810	2,306,070	2,424,330	2,542,590	2,660,850	2,779,110	2,897,370	3,015,630	3,133,890	3,252,150	3,370,410	3,488,670		
2.5x5	迴轉時間	Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
	風量(QCMM)		23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0		
	全靜壓(TSPPa)		155	165	175	185	195	205	215	225	235	245	255	265	275	285	295		
	單台耗電(W)		108	115	122	129	136	143	150	157	164	171	178	185	192	199	206		
	單台年耗電費(NTD)	新台幣	1,703,422	1,813,320	1,923,218	2,033,116	2,143,015	2,252,913	2,362,811	2,472,709	2,582,607	2,692,505	2,802,403	2,912,301	3,022,199	3,132,097	3,241,995		
4x4	迴轉時間	Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
	風量(QCMM)		30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0		
	全靜壓(TSPPa)		155	165	175	185	195	205	215	225	235	245	255	265	275	285	295		
	單台耗電(W)		129	138	146	154	163	171	179	188	196	204	212	220	228	236	244		
	單台年耗電費(NTD)	新台幣	1,527,525	1,626,075	1,724,625	1,823,175	1,921,725	2,020,275	2,118,825	2,217,375	2,315,925	2,414,475	2,513,025	2,611,575	2,710,125	2,808,675	2,907,225		

圖5. FFU安裝方式與空間說明

價稱	機款	規格尺寸 L / W / H	安裝需求高度 (H)
2*4	DC 1-220V-60	1172*572*265	660 mm
2*4	DC 1-220V-60	1172*572*327	660 mm
4*4	DC 1-220V-60	1172*1172*368	1250 mm
4*4	DC 1-277V-60	1136*1136*400	1210 mm
5*2.5	DC 1-220V-60	1472*722*368	810 mm

FFU安裝說明

注意：安裝需求高度依現場狀況會有所不同

由於一般半導體封裝測試廠、LED及模組廠等其潔淨室潔淨等級要求(ISO 5~ISO 7)，且潔淨室天花板高度矮且上方回風層空間窄，加上維修時更換濾網或風機時考量，幾乎大多採用2' x4' FFU。然而只要FFU為長方形設計時，即可有效減少安裝空間需求。參考上圖5安裝說明，可發現在採用2.5' x5' 尺寸時就可兼顧安裝空間需求下(從66cm到81cm)，適當採用加大之FFU尺寸，就可有效降低初設成本及享有較高效風機帶來的較低運轉成本。

## 4. 結論

簡而言之，降低潔淨室FFU相關系統的初設成本最有效方式就是減少FFU安裝數量，而達到降低數量則要透過下列步驟：

1. 符合潔淨等級的潔淨風量設計選用。
2. 採用無段調速直流無刷(或EC)馬達FFU，可容許即使初始安裝較少數量下，日後實際運轉如有需求，可提高運轉風量以確保循環風量次數(ACR)設計需求。
- 3 選用較大尺寸FFU，在相同設計條件下(ACR)，可容許初始安裝較少數量。

至於要降低潔淨室FFU運轉成本最有效方式：

1. 採用高效無段調速直流無刷(或EC)馬達FFU並搭配中央監控系統，在確保潔淨等級下盡量調降實際運轉循環風量次數(ACR)。
2. 選用較大尺寸FFU，在相同設計風速條件下，較大尺寸FFU可提供較高的運轉效率。
3. 目前採用2' x4' 尺寸設計安裝之潔淨室，建議將FFU設計尺寸逐步放大，在滿足設計上之循環風量及覆蓋率並兼顧安裝維修空間限制下，若改成2.5' x5' 為例，即可立即降低初設成本15%及運轉電費7%。

適當採用加大之FFU尺寸，可立即有效降低初設成本及享有較高效風機帶來的較低運轉成本，實乃在潔淨室設計上不容忽視之關鍵因素。

## 參考文獻

1. Institute of Environmental Sciences Contamination Control Division Recommended Practice IES-RP-006.2 "Testing Cleanrooms "
2. International Organization for Standardization ISO 14644-1 Cleanrooms and associated controlled environments - Part 1: Classification of airborne particulates
3. International Organization for Standardization ISO 14644-2 Cleanrooms and associated controlled environments - Part 2: Specifications for testing and monitoring to prove continued compliance with ISO 14644
4. 胡石政、陳明坤，半導體潔淨室節約能源之可行方法。中國冷凍空調雜誌，第35期，P88-93，1997。
5. Rajan Jaisinghani，Energy Efficient Low Operating Cost Cleanroom Airflow Design。ESTECH 2003。
6. 黃佳松，半導體廠潔淨室氣流模擬分析與省能運轉策略。國立台北科技大學冷凍空調工程系碩士論文，2005。
7. <https://pdfs.semanticscholar.org/e1df/52561635e5789c0c75ed06289587d5707a7.pdf>
8. <https://www.terrauniversal.com/cleanrooms/cleanrooms-ffu-lighting.php>

作者介紹：

張耿政 / Ken Chang

University of Texas at Austin 環工碩士

現任奇立實業股份有限公司協理

**潔淨室用風機過濾器(FFU)規劃原則**  
**Principle of Cleanroom FFU Planning**

張耿政 / Ken Chang

**TOPWELL**  
[www.topwell-pes.com.tw](http://www.topwell-pes.com.tw)