

Chapter 3

Heat Transfer Technologies

Update: 2014/5/6

(二)、風扇

風扇屬於主動式散熱裝置，目的是加快機體內的熱對流速度，將散熱片所傳導出來的熱能加速排出。

風扇包含了風扇葉片、外框、定子總成、轉子、驅動電路等。風扇的性能主要是考量散熱能力，連續運轉的壽命，以及噪音。一般來說轉速越快，風速越高、風壓越大，散熱能力越好，但消耗功率高，噪音往往也越大。

(2.1). 風扇種類

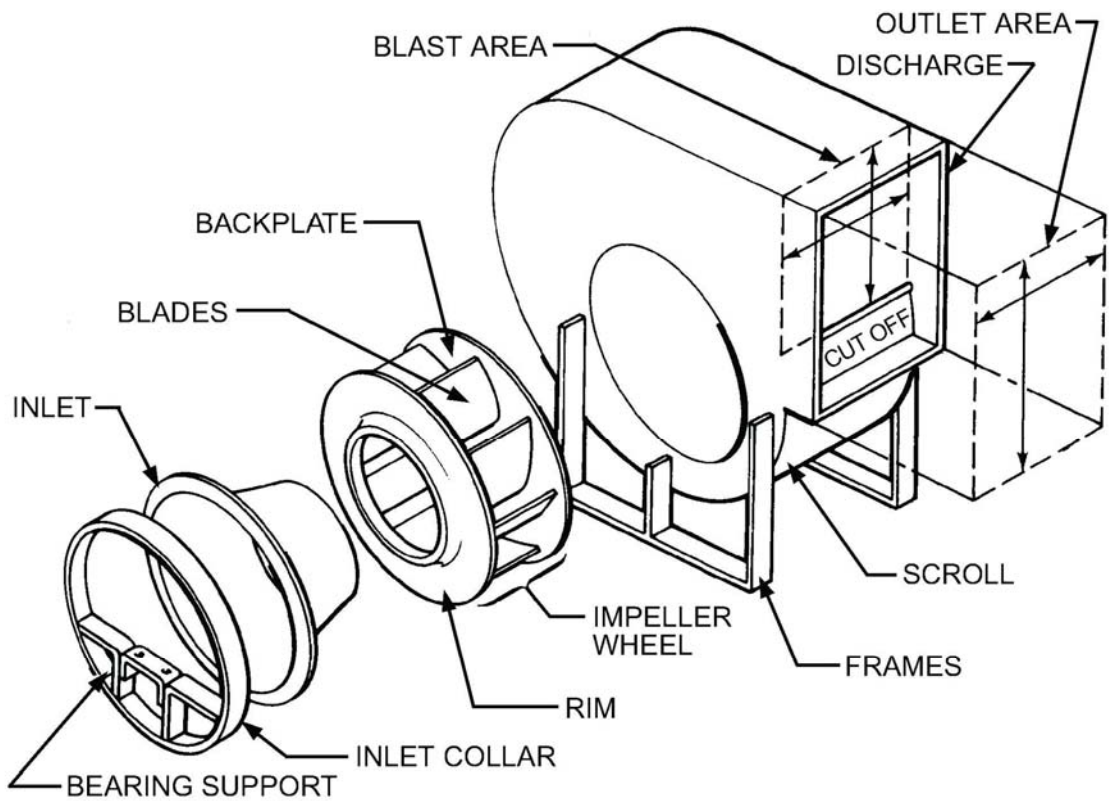
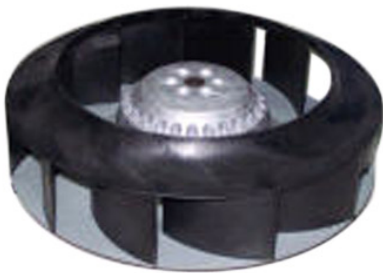
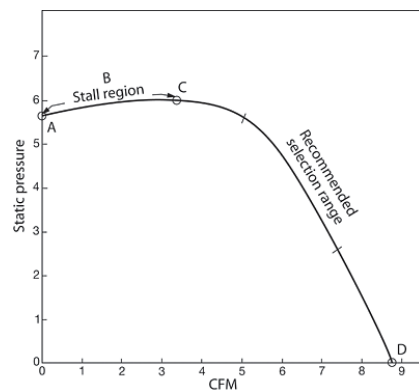


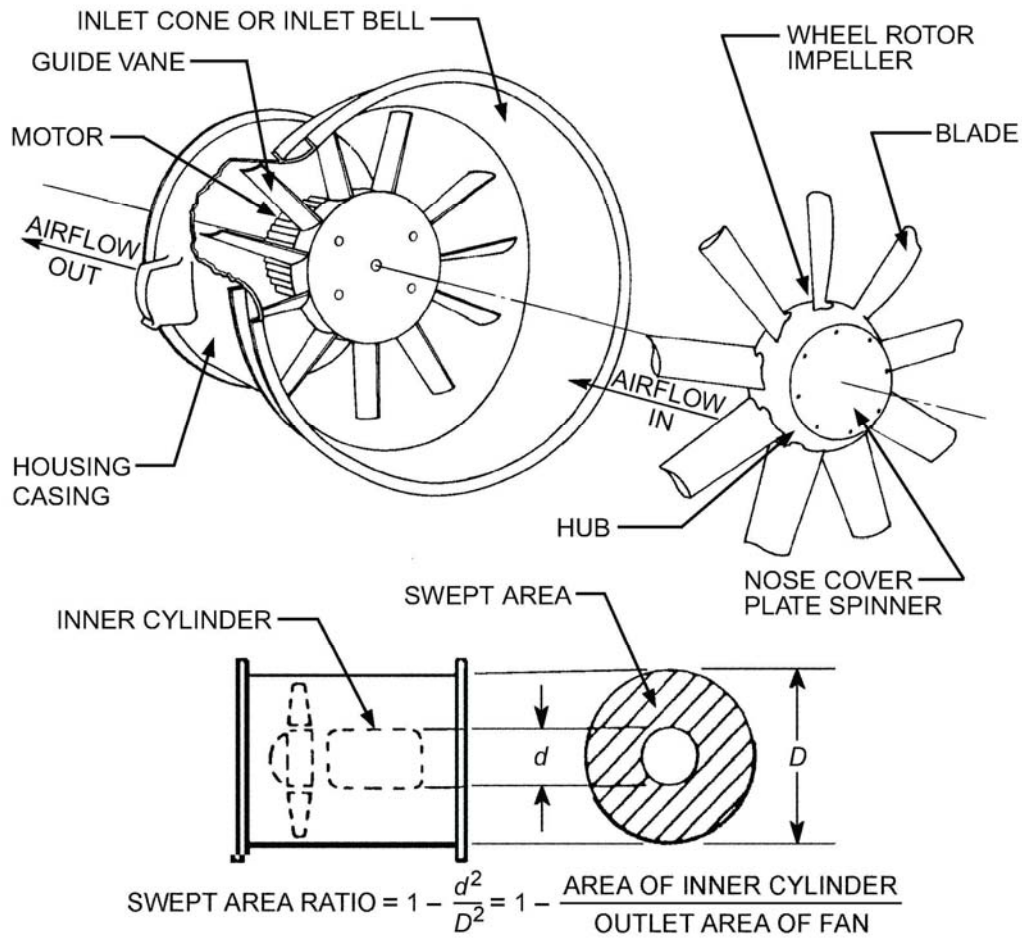
Fig. 1 Centrifugal Fan Components



離心式



離心式風扇的特性

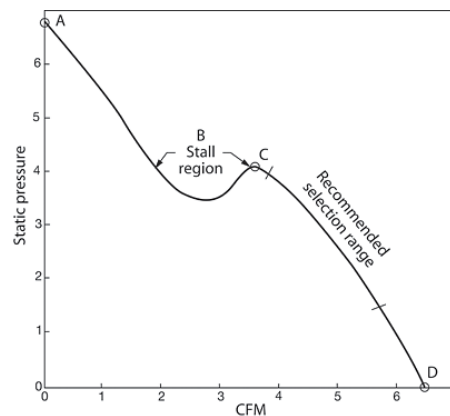


Note: The swept area ratio in axial fans is equivalent to the blast area ratio in centrifugal fans.

Fig. 2 Axial Fan Components



軸流式



軸流式風扇的特性

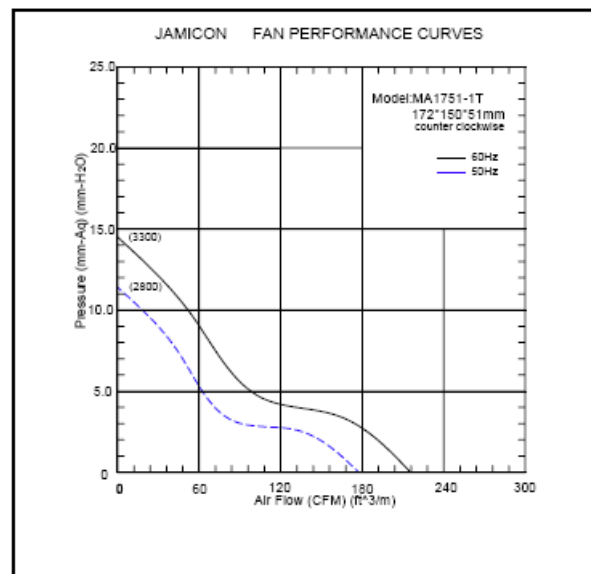
(2.2). 風扇規格

(2.2.1). 基本規格

最大風量 (CFM)，最大靜壓 (inches H₂O)，消耗功率(Watts)，噪音 (dBA)，轉速 (RPM).

風扇功率： $W_f = Q\Delta P$	風扇效率： $\eta = W_f / W_e$
W_f ：輸出功率(W)	$W_e = IV$ ：輸入功率(W)
Q ：風量(m ³ /sec)	V ：輸入電壓(volt)
ΔP ：風扇前後的壓力差(Pa)	I ：輸入電流(A)

例：JAMICON MA1751-TSeries 172x150x51 mm Two-way Rotation



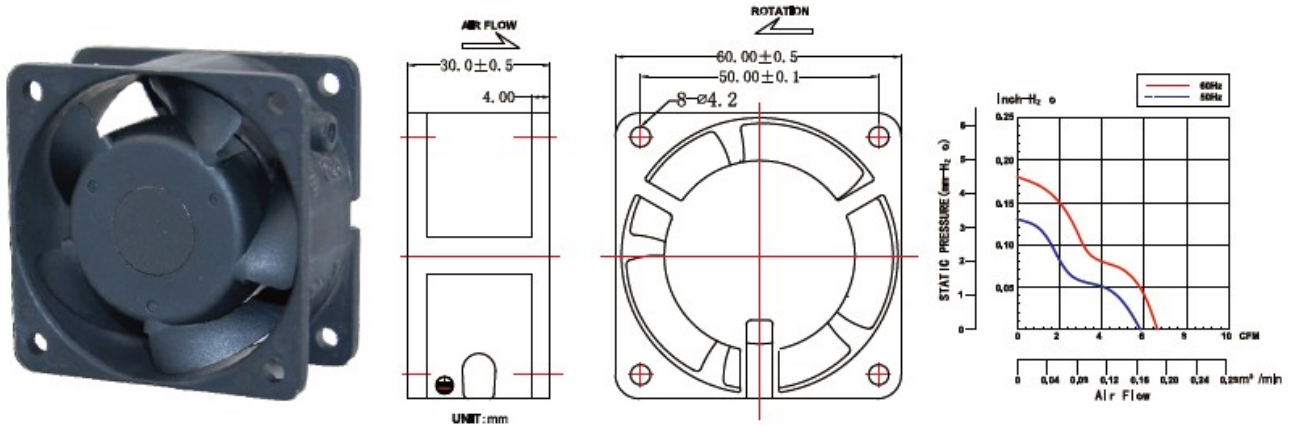
轉速：3100 rpm

風量：267 cfm = 0.126 m³/sec

壓力：0.630 inch H₂O = 157 Pa = 16 mm H₂O

輸入功率：37 W

60×60×30mm



Product ID: SJ6030HA1BAL

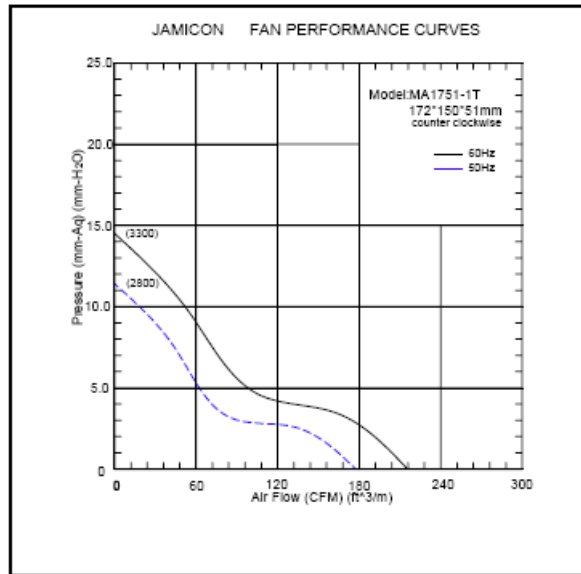
- Square Frame : 60 mm * 60 mm
- Housing Thickness : 30 mm
- Rated Voltage(V) : 110/120
- Freq.(hz) : 50/60
- Current(A) : 0.042/0.040
- Input Power(W) : 6/5
- Speed(RPM) : 2400/3000
- Air Flow(CFM) : 8.12/10.22
- Static Pressure(Inch-H₂O) : 0.07/0.12
- Noise Level(db-A) : 27/28

(2.2.2). 風扇特性曲線

風扇流量與兩端壓差的關係

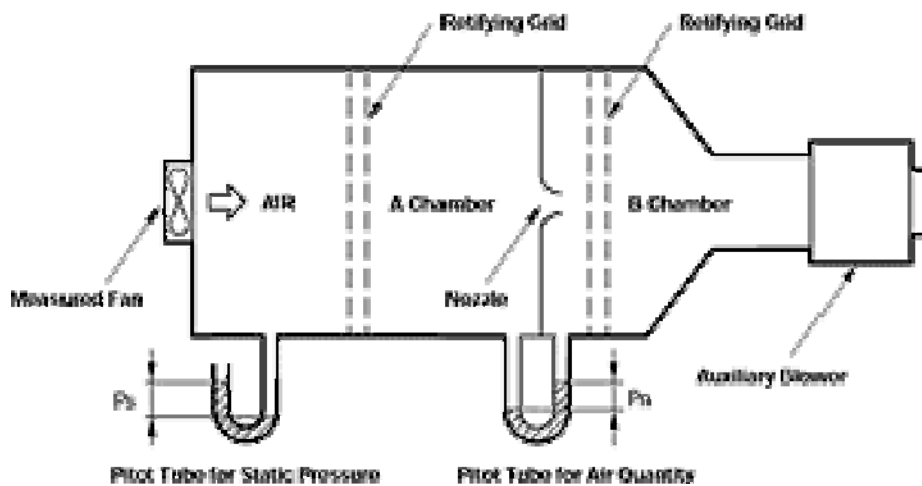
最大靜壓：風扇流量為零時，風扇兩端之壓差。

最大流量：兩端之壓差為零時，風扇之流量。



風扇性能測試台

AMCA Standard 210 測試程序

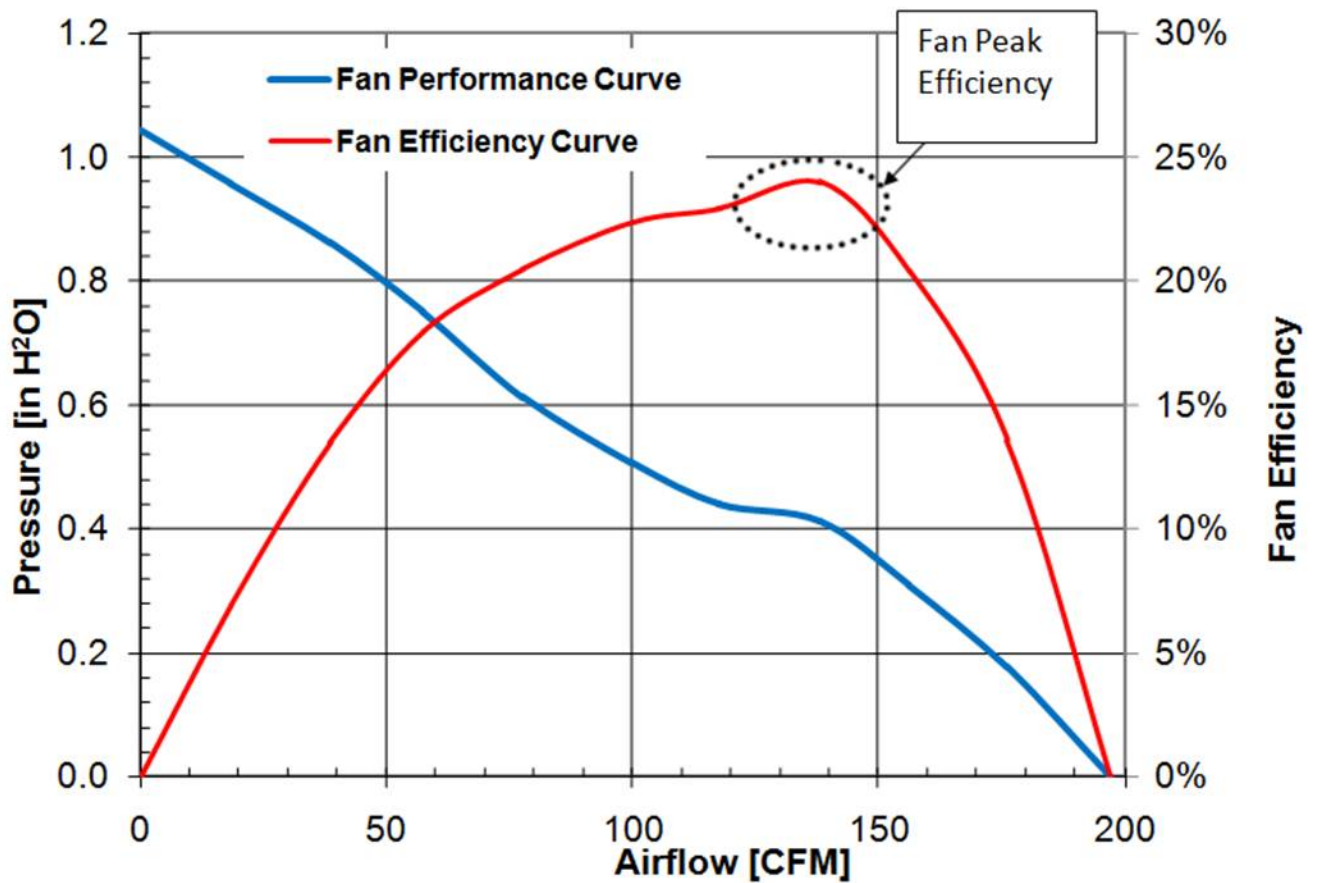


最大靜壓：將 nozzle 關閉，空氣流量為零，此時 chamber A 之壓力即為最大靜

壓。

最大流量：啓動輔助鼓風機，使 chamber A 之靜壓爲零($P_s = 0$)，此時之流量即爲最大流量。

其他流量：調整輔助鼓風機轉速，使 chamber A 之靜壓達到設定值，此時之流量即爲該壓力之流量。



風扇效率： $\eta = W_f / W_e$

風扇功率： $W_f = Q\Delta P$ (W)

輸入功率： $W_e = IV$ (W)

(2.2.3). 其他轉速的性能計算

若以之風扇在 A 轉速的性能，擬推估該風扇在 B 轉速的性能

風扇流量與轉速成正比

$$\frac{Q_A}{Q_B} = \frac{n_A}{n_B}$$

風扇壓力差與轉速平方成正比

$$\frac{Q_A}{Q_B} = \left(\frac{n_A}{n_B} \right)^2$$

風扇消耗功率與轉速三次方成正比

$$\frac{Q_A}{Q_B} = \left(\frac{n_A}{n_B} \right)^3$$

例：已知風扇在 3000 RPM 的風量為 210 CFM，壓力差為 0.1” H₂O，消耗功率為 22 W 請計算該風扇在 3500 RPM 的性能。

(2.2.4). 風扇性能計算

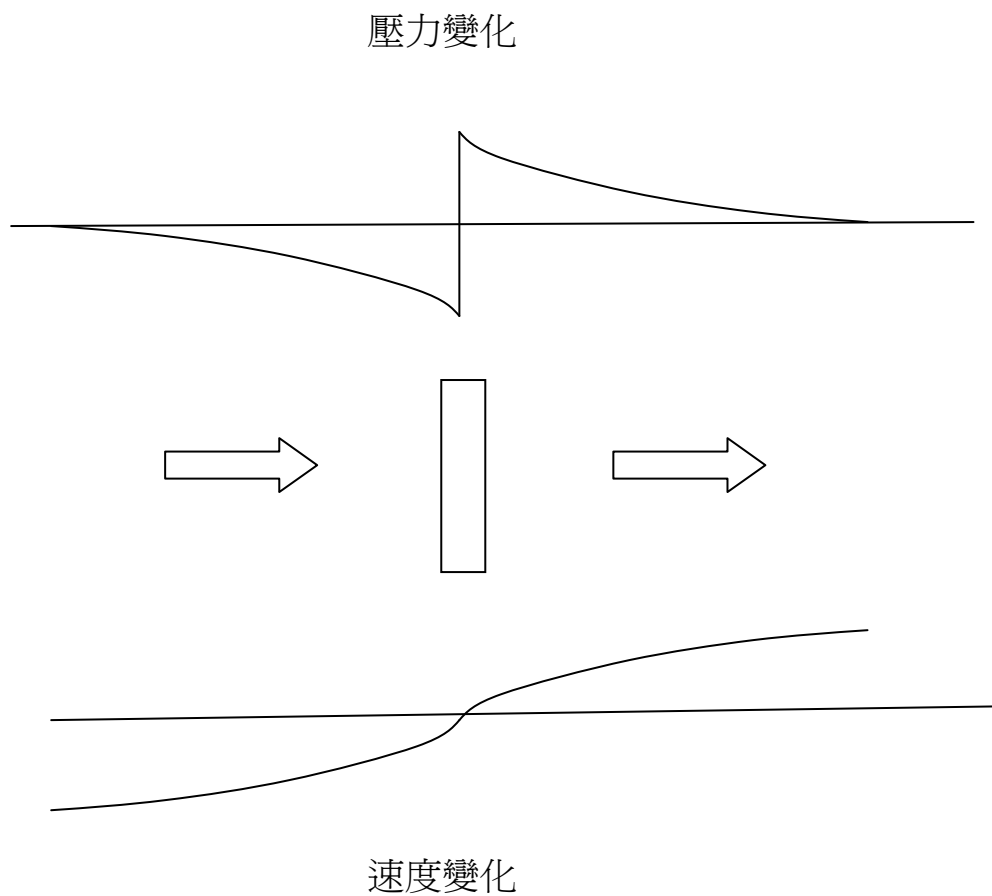
V_1 ：風扇前氣流速度

V_2 ：風扇後氣流速度

V_3 ：風扇後方遠處氣流速度

A_3 ：風扇後方遠處氣流面積

A_p ：風扇面積



遠方的空氣為靜止，當空氣流靠近風扇時，受到風扇吸力的影響，會加速流動，壓力則下降。 V_1 為風扇前氣流速度，氣流經過風扇後，速度不變， $V_1 = V_2$ ，但壓力提高，氣流會繼續加速前進，壓力則逐漸降低，直到壓力成為環境壓力，此時速度會提高， $V_3 > V_2$ 。

故遠方的空氣從前方流向風扇，流經風扇後，再流向遠後方，氣流的速度變化為 $V_1 = V_2 < V_3$ ，壓力變化則為 $P_1 < P_0 = P_3 < P_2$ 。氣流速度增加，往後的動量

的增加量即為風扇的推力。

$$\rho A_p V_1 = \rho A_p V_2 = \rho A_3 V_3 = \dot{m} : \text{流經風扇的氣流}$$

$$F = \dot{m} V_3 : \text{從風的動量變化來計算風扇推力}$$

$$F = A_p (P_2 - P_1) : \text{從風扇兩側的壓力變化來計算風扇推力}$$

$$P_0 = P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 : \text{風扇前 Bernoulli equation}$$

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho V_3^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 : \text{風扇後 Bernoulli equation}$$

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \rho V_3^2$$

$$F = A_p (P_2 - P_1) = \frac{1}{2} A_p \rho V_3^2 = \rho A_p V_1 V_3$$

$$\frac{1}{2} \rho A_p V_3^2 = \rho A_p V_1 V_3$$

$$V_1 = \frac{1}{2} V_3$$

風扇所做的功為

$$W = V_1 F = \rho A_p \frac{1}{4} V_3^3$$

通常風扇由馬達來帶動，若已知馬達的輸出馬力，則可計算 V_3 ，及風扇前的風速。

$$V_3^3 = \frac{4W}{\rho A_p}$$

$$V_1 = \frac{1}{2} V_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{4W}{\rho A_p} \right)^{\frac{1}{3}}$$

風扇的風量為

$$Q = A_p V_1 = \left(\frac{A_p^2 W}{2\rho} \right)^{\frac{1}{3}}$$

風扇前的風壓為

$$P_2 - P_0 = \frac{1}{2} \rho (V_3^2 - V_2^2) = \frac{3}{8} \rho V_3^2 = \frac{3}{8} \rho \left(\frac{4W}{\rho A_p} \right)^{\frac{2}{3}}$$

例，有一工業用電扇，已知葉片直徑為 1 m，以 1hp 的馬達驅動，若風扇效率 70%，請計算風量。

(2.3). 系統阻抗

系統是指空氣從大氣流入，再流回大氣的過程中，所遭遇的所有物件，包括風管，氣道，鰭片，閥門，閘片等。系統阻抗是指空氣流過系統時所產生的阻力。

(2.3.1). 摩擦因子(Friction factor)

$$\Delta P = \frac{1}{2} f \frac{L}{d} \rho u^2$$

層流 $f = \frac{64}{\text{Re}}$ ，其中 $\text{Re} = \frac{\rho u D}{\mu}$

摩擦因子與雷諾數及管壁粗糙度有關。雷諾數越高則摩擦因子越小。管壁越粗糙則摩擦因子越大。

Moody Diagram

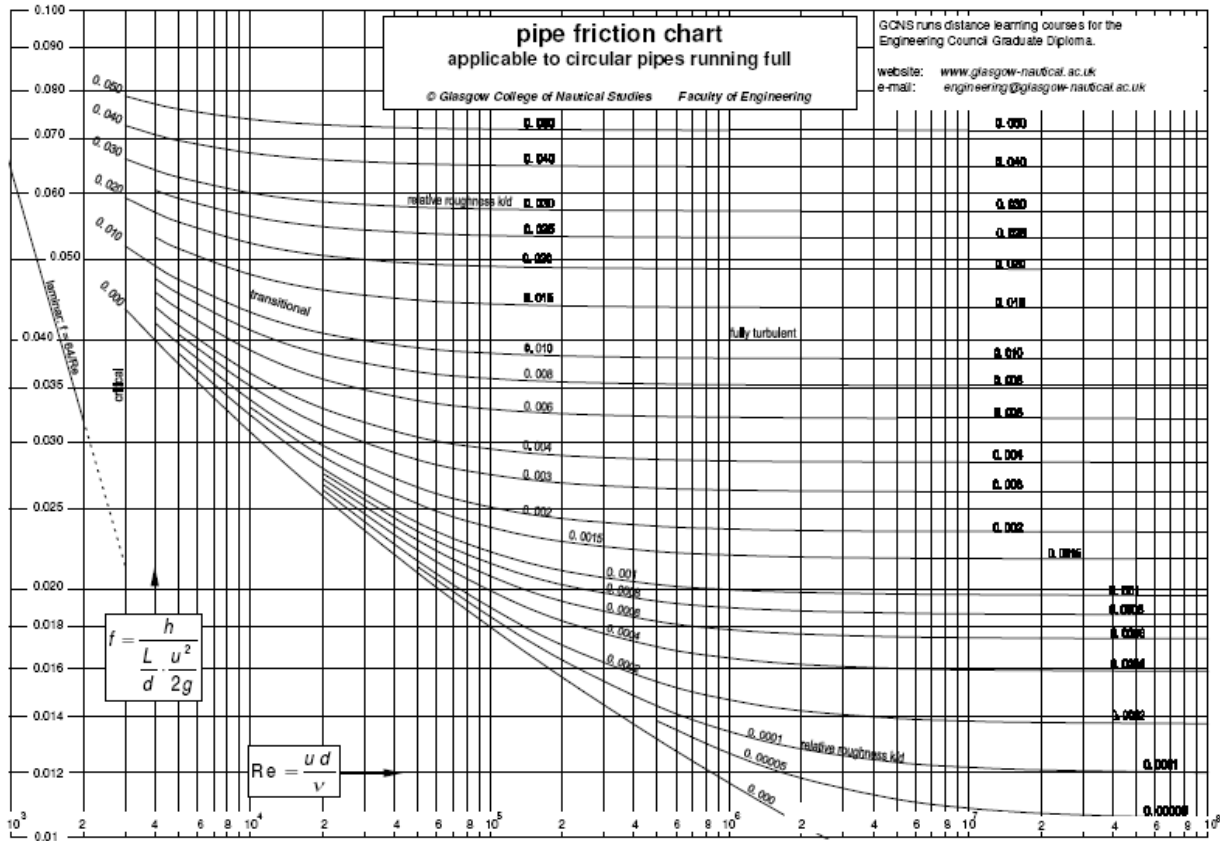


圖 2.3.1：管流的摩擦因子

摩擦因子經驗公式

Colebrook equation :
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} + \frac{\epsilon}{3.72d} \right]$$

Swamee & Jain :
$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2}$$

ϵ : 管內表面粗度

$\frac{\epsilon}{d}$: 無因次化的表面粗度參數

$\text{Re} = \frac{\rho u D}{\mu}$: 雷諾數

表面粗度：管路表面粗糙度與管徑的比值

$\varepsilon = \text{relative roughness of tube or duct wall (mm)}$

$\varepsilon / d_h = \text{the roughness ratio}$

Surface	mm
Copper, Lead, Brass, Aluminum (new)	0.001 - 0.002
PVC and Plastic Pipes	0.0015 - 0.007
Epoxy, Vinyl Ester and Isophthalic pipe	0.005
Stainless steel	0.015
Steel commercial pipe	0.045 - 0.09
Stretched steel	0.015
Weld steel	0.045
Galvanized steel (鍍鋅鐵管)	0.15
Rusted steel (corrosion)	0.15 - 4
New cast iron	0.25 - 0.8
Worn cast iron	0.8 - 1.5
Rusty cast iron	1.5 - 2.5
Sheet or asphalted cast iron (瀝青)	0.01 - 0.015
Smoothed cement	0.3
Ordinary concrete	0.3 - 1
Coarse concrete	0.3 - 5
Well planed wood	0.18 - 0.9
Ordinary wood	5

(2.3.2). 管路系統基本元件

管路系統基本元件包括長管，管件，閥件。

$$\text{長管：} \Delta P = \frac{1}{2} f \frac{L}{d} \rho u^2$$

管徑：圓管的管徑即為其直徑。非圓管的管徑採用水利直徑(Hydraulic diameter)。

$$d_h = \frac{4A}{p} \text{，其中 } A \text{ 為截面積，} p \text{ 為浸濕的周長。}$$

 [例]，有一個空氣方管，邊長為 30cm，請計算水利直徑與等效直徑。

例，有一個 PVC 扁形空氣通道，邊長為 0.5cm×3cm，長度 30cm，若空氣流速為 0.5m/sec，請計算所需壓力。

管件： $\Delta P = \frac{1}{2} K \rho u^2$ ， K ：Minor loss coefficient

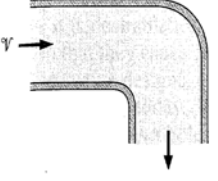
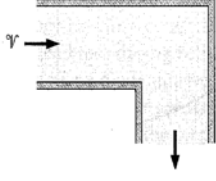
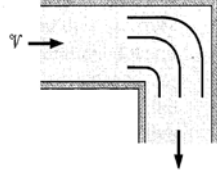
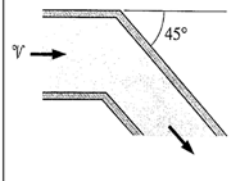
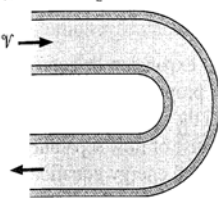
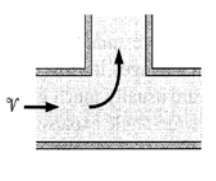
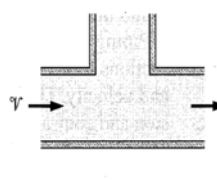
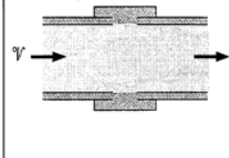
彎管，T 形接頭，大小頭，出口，入口。



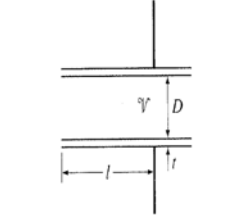
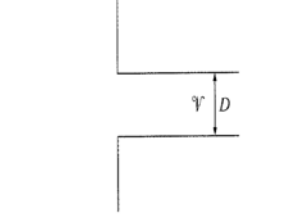
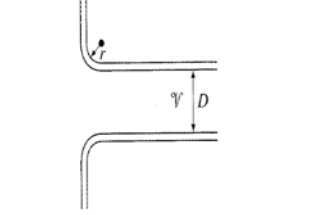
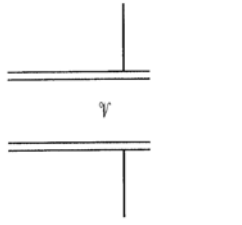
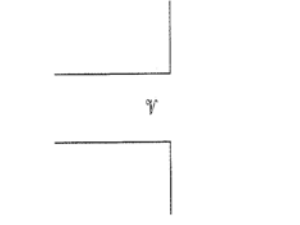
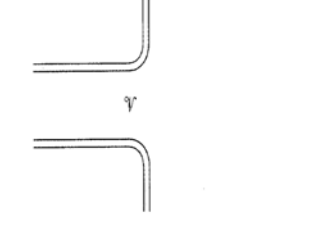
Type of Component or Fitting	<u>Minor Loss Coefficient</u> - K -
Flanged Tees, Line Flow	0.2
Threaded Tees, Line Flow	0.9
Flanged Tees, Branched Flow	1.0
Threaded Tees, Branch Flow	2.0
Threaded Union	0.08
Flanged Regular 90° Elbows	0.3
Threaded Regular 90° Elbows	1.5
Threaded Regular 45° Elbows	0.4
Flanged Long Radius 90° Elbows	0.2
Threaded Long Radius 90° Elbows	0.7
Flanged Long Radius 45° Elbows	0.2
Flanged 180° Return Bends	0.2
Threaded 180° Return Bends	1.5

各式彎管：

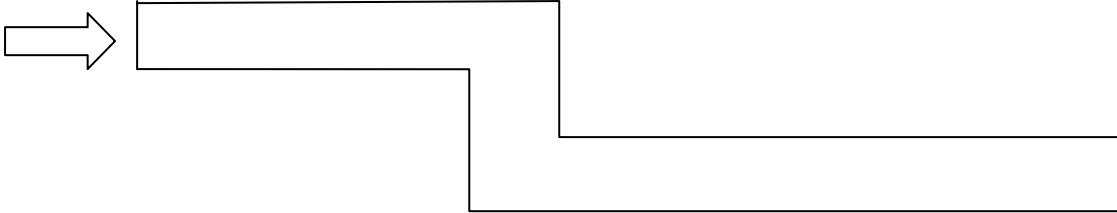
TABLE 14-4 (Concluded)

<p><i>Bends and Branches</i> 90° smooth bend: Flanged: $K_L = 0.3$ Threaded: $K_L = 0.9$</p> 	<p>90° miter bend (without vanes): $K_L = 1.1$</p> 	<p>90° miter bend (with vanes): $K_L = 0.2$</p> 	<p>45° threaded elbow: $K_L = 0.4$</p> 
<p>180° return bend: Flanged: $K_L = 0.2$ Threaded: $K_L = 1.5$</p> 	<p>Tee (branch flow): Flanged: $K_L = 1.0$ Threaded: $K_L = 2.0$</p> 	<p>Tee (line flow): Flanged: $K_L = 0.2$ Threaded: $K_L = 0.9$</p> 	<p>Threaded union: $K_L = 0.08$</p> 
<p><i>Valves</i> Globe valve, fully open: $K_L = 10$ Angle valve, fully open: $K_L = 5$ Ball valve, fully open: $K_L = 0.05$ Swing check valve: $K_L = 2$</p>		<p>Gate valve, fully open: $K_L = 0.2$ $\frac{1}{4}$ closed: $K_L = 0.3$ $\frac{1}{2}$ closed: $K_L = 2.1$ $\frac{3}{4}$ closed: $K_L = 17$</p>	

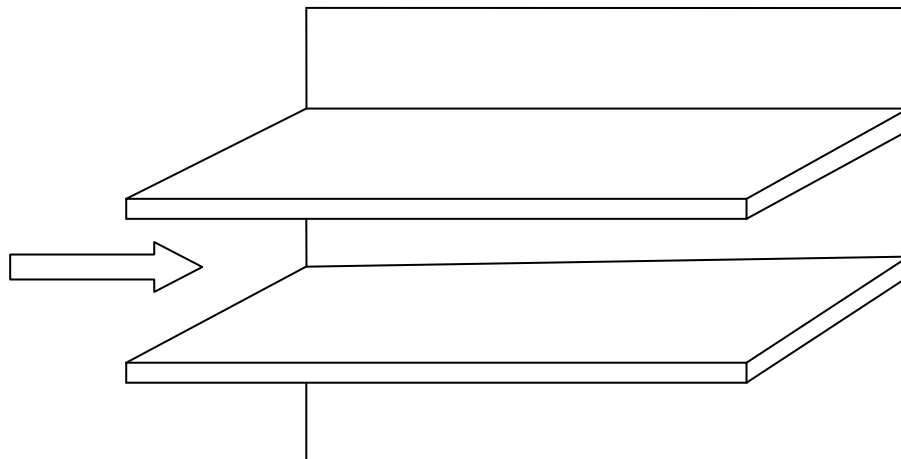
入口與出口：

<p>Reentrant: $K_L = 0.80$ ($t \ll D$ and $l \sim 0.1D$)</p> 	<p>Sharp-edged: $K_L = 0.50$</p> 	<p>Well-rounded ($r/D > 0.2$): $K_L = 0.03$ Slightly rounded ($r/D = 0.1$): $K_L = 0.12$ (see Fig. 14-36)</p> 
<p>Reentrant: $K_L = 1.0$</p> 	<p>Sharp-edged: $K_L = 1.0$</p> 	<p>Rounded: $K_L = 1.0$</p> 

例，有一個 PVC 扁形空氣通道，邊長為 0.5cm×3cm，總長度 300cm，包括兩個 90 度彎頭，若空氣流速為 0.5m/sec，請計算所需壓力。



平板鰭片



$$\frac{1}{2} \rho u_0^2 + P_0 = \frac{1}{2} \rho u_1^2 + P_1$$

$$P_1 - P_0 = \frac{1}{2} \rho f_i \frac{L_i}{D_i} u_1^2 + \frac{1}{2} \rho K u_1^2$$

$$\frac{1}{2}\rho u_0^2 = \frac{1}{2}\rho u_1^2 + \frac{1}{2}\rho f_i \frac{L_i}{D_i} u_1^2 + \frac{1}{2}\rho K u_1^2$$

$$u_0^2 = (1 + f_i \frac{L_i}{D_i} + K) u_1^2$$

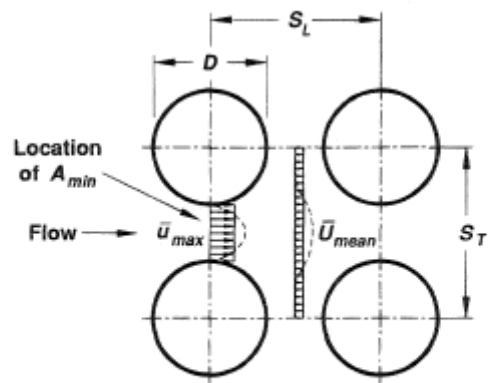
$$u_1 = \frac{u_0}{\sqrt{1 + f_i \frac{L_i}{D_i} + K}}$$

例，平板鰭片的長度 3cm，寬度 10cm，厚度 3mm，間距 1cm，若風扇出口速度為 2.0m/sec，請計算鰭片內的風速。

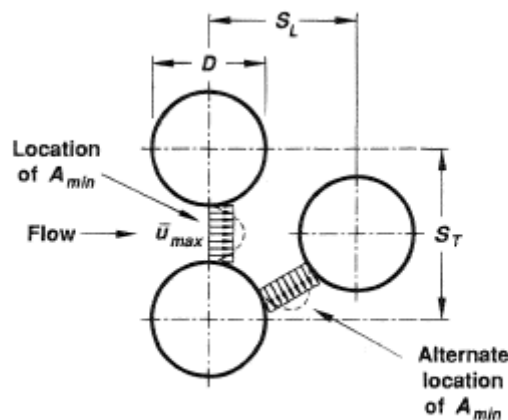
例，鰭片的基部溫度 100°C，大氣溫度 25°C 寬度，請計算鰭片內的熱傳系數。

例，請計算單一鰭片的熱傳量。

柱狀鰭片：對齊排列(in-line) 與交錯排列(staggered)



(a) IN-LINE



(b) STAGGERED

$$\Delta P = \frac{2f'G_{\max}^2 N}{\rho} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14}$$

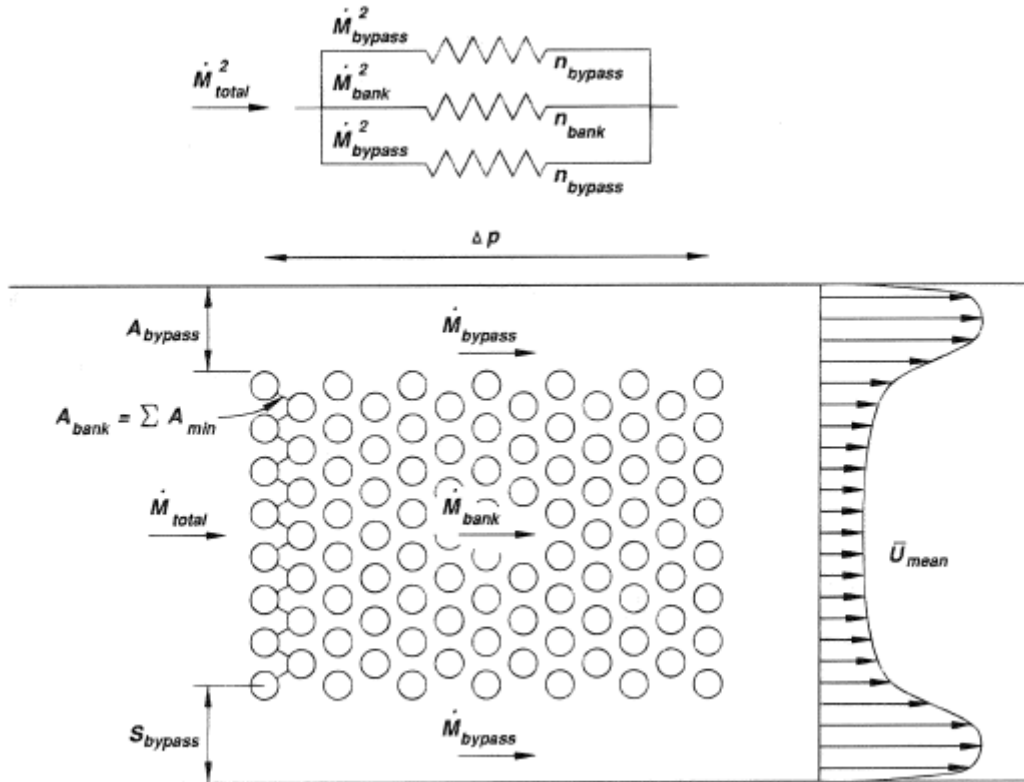
G_{\max} : mass velocity at minimum flow area ($\text{kg}/\text{m}^2\text{-sec}$)

ρ : density at free stream condition

N : number of transverse rows

$$f' = \left\{ 0.25 + \frac{0.118}{[(S_T - D)/D]^{1.08}} \right\} \text{Re}_{\max}^{-0.16} \quad \text{for in-line arrangement}$$

$$f' = \left\{ 0.044 + \frac{0.08S_L/D}{[(S_T - D)/D]^{0.43+1.13D/S_L}} \right\} \text{Re}_{\max}^{-0.15} \quad \text{for staggered arrangement}$$



$$\frac{1}{2} \rho u_0^2 = \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 + \Delta P$$

$$u_\infty = \sqrt{u_0^2 - \frac{2}{\rho} \Delta P}$$

$$u_0 = \frac{A_f}{A} u_\infty + \frac{A_d}{A} u_1$$

$$u_1 = \frac{A}{A_d} u_0 - \frac{A_f}{A_d} u_\infty$$

$$u_{\max} = \frac{S_T}{S_T - D} u_\infty \quad \text{for in-line arrangement}$$

$$u_{\max} = \frac{S_T/2}{\sqrt{(S_T/2)^2 + S_L^2} - D} u_\infty \quad \text{for staggered arrangement}$$

$$G_{\max} = u_{\max} \rho$$

$$\Delta P = 2f'u_{\max}^2 \rho N \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14}$$

In-line arrangement:

$$u_{\max} = \frac{S_T}{S_T - D} u_{\infty}$$

$$u_{\infty} = \sqrt{u_0^2 - 4f'u_{\infty}^2 \left(\frac{S_T}{S_T - D} \right)^2 N \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14}}$$

$$\left\{ 1 + \left\{ 1 + \frac{0.472}{[(S_T - D)/D]^{1.08}} \right\} \text{Re}_{\max}^{-0.16} \left(\frac{S_T}{S_T - D} \right)^2 N \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} \right\} u_{\infty}^2 = u_0^2$$

$$u_{\infty} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left\{ 1 + \frac{0.472}{[(S_T - D)/D]^{1.08}} \right\} \text{Re}_{\max}^{-0.16} \left(\frac{S_T}{S_T - D} \right)^2 N \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14}}} u_0$$

(2.3.3). 串聯管路

所有管件串聯，流量相同，壓力降相加。

各管件的管徑不同，雖然流量相同，但流速不同。

通常流速最高的管件壓力降最大。

$$\frac{1}{2}\rho u_1^2 + P_1 + \rho gh_1 = \frac{1}{2}\rho u_2^2 + P_2 + \rho gh_2 + \sum \frac{1}{2}f_i \frac{L_i}{D_i} u_i^2 + \sum \frac{1}{2}K_i u_i^2$$

$$u_i = \frac{Q}{A_i}$$

$$\frac{1}{2}\rho u_1^2 + P_1 + \rho gh_1 = \frac{1}{2}\rho u_2^2 + P_2 + \rho gh_2 + \sum \frac{1}{2}f_i \frac{L_i}{D_i} \left(\frac{Q}{A_i}\right)^2 + \sum \frac{1}{2}K_i \left(\frac{Q}{A_i}\right)^2$$

$$\sum \frac{1}{2}f_i \frac{L_i}{D_i} \left(\frac{Q}{A_i}\right)^2 + \sum \frac{1}{2}K_i \left(\frac{Q}{A_i}\right)^2 = Q^2 \left(\sum \frac{1}{2}f_i \frac{L_i}{D_i} \left(\frac{1}{A_i}\right)^2 + \sum \frac{1}{2}K_i \left(\frac{1}{A_i}\right)^2 \right)$$

已知流量，求壓力降：

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho u_2^2 - \frac{1}{2}\rho u_1^2 + \rho gh_2 - \rho gh_1 + \sum \frac{1}{2}f_i \frac{L_i}{D_i} \left(\frac{Q}{A_i}\right)^2 + \sum \frac{1}{2}K_i \left(\frac{Q}{A_i}\right)^2$$

已知壓力降，求流量：

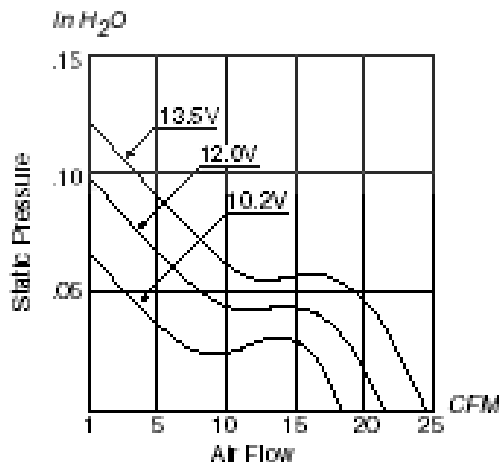
$$Q^2 = \frac{\frac{1}{2}\rho u_1^2 + P_1 + \rho gh_1 - \left(\frac{1}{2}\rho u_2^2 + P_2 + \rho gh_2\right)}{\sum \frac{1}{2}f_i \frac{L_i}{D_i} \left(\frac{1}{A_i}\right)^2 + \sum \frac{1}{2}K_i \left(\frac{1}{A_i}\right)^2}$$

已知壓力降及流量，求管徑或管長：

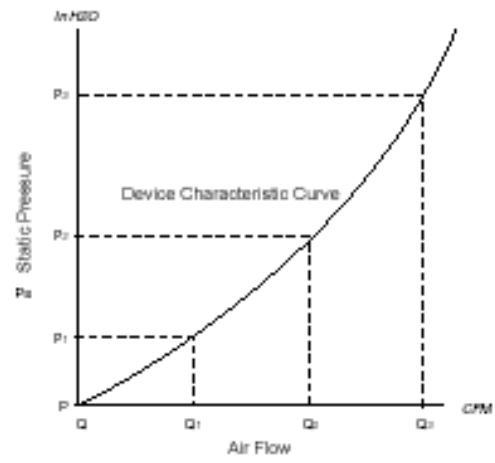
$$\sum \frac{1}{2}f_i \frac{L_i}{D_i^5} \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 Q^2 = \frac{1}{2}\rho u_1^2 + P_1 + \rho gh_1 - \left(\frac{1}{2}\rho u_2^2 + P_2 + \rho gh_2\right) - \sum \frac{1}{2}K_i \left(\frac{Q}{A_i}\right)^2$$

(2.4). 風扇操作點

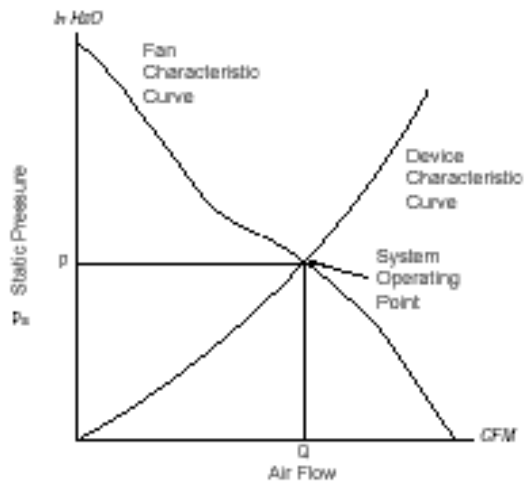
風扇性能曲線與系統阻力曲線的交點即為風扇操作點。



風扇性能曲線



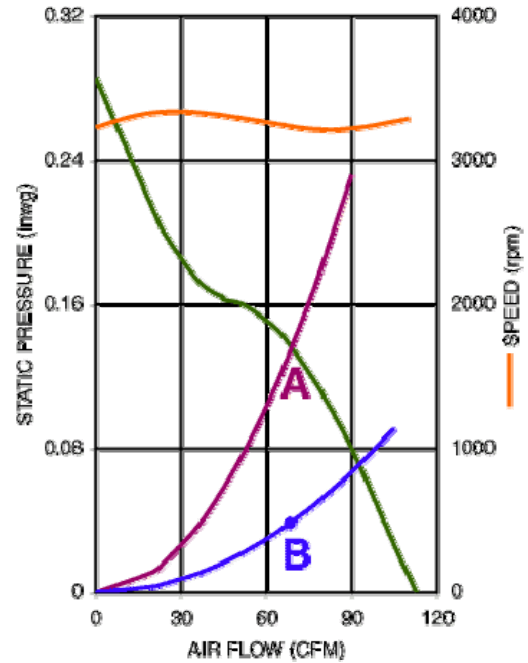
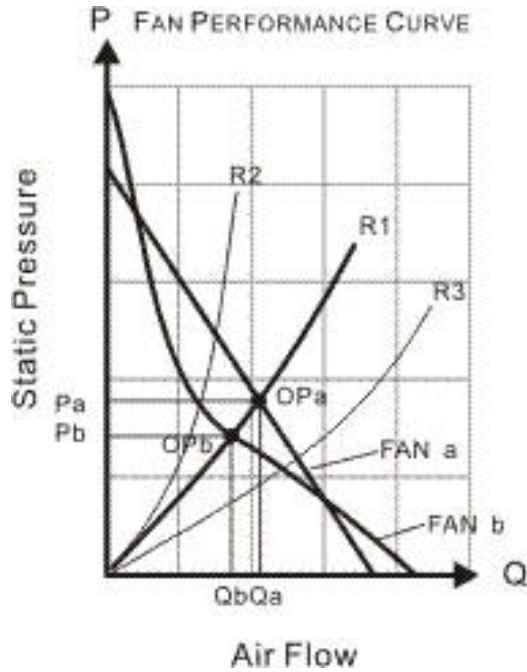
系統阻力曲線



風扇操作點

相同風扇搭配不同系統，操作點會不一樣。

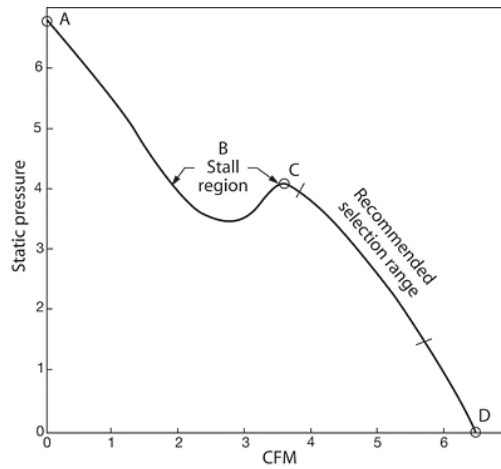
相同的系統，搭配不同特性的風扇，操作點會不一樣。



選擇風扇必須考慮系統組麗特性與風扇特性的搭配，非僅以風扇最大風量與最大靜壓作為選擇依據。

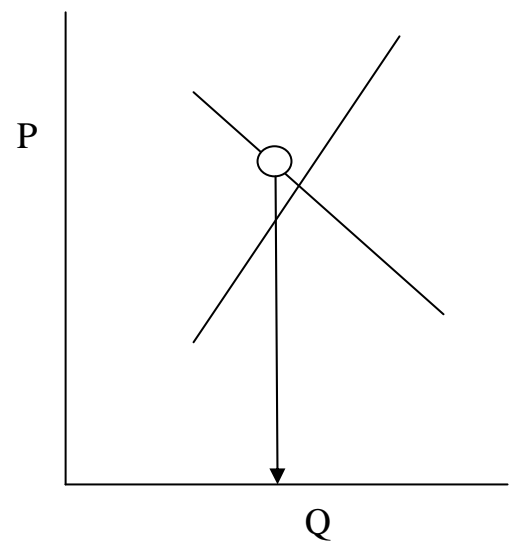
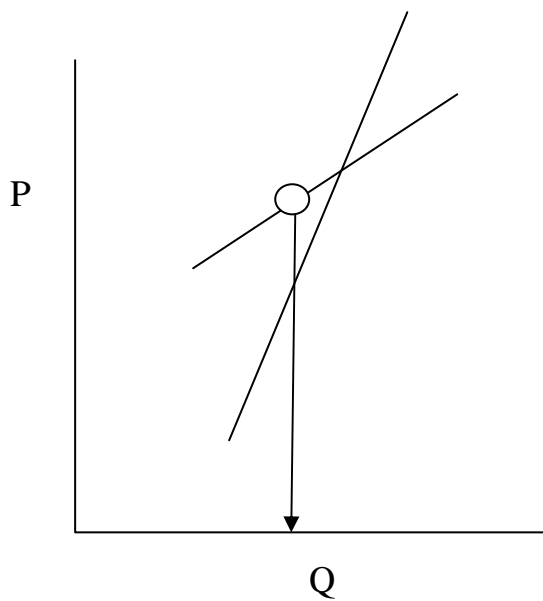
要改善系統阻抗設計應自系統進出風口之大小調整、系統內元件排放位置調整等，再經由風洞之測試即可調整及驗證出最佳的系統阻抗。

風扇的失速區(Stall region)



$\frac{dP}{dQ} > 0$ ，流量增加，壓力上升。

$\frac{dP}{dQ} < 0$ ，流量增加，壓力下降。

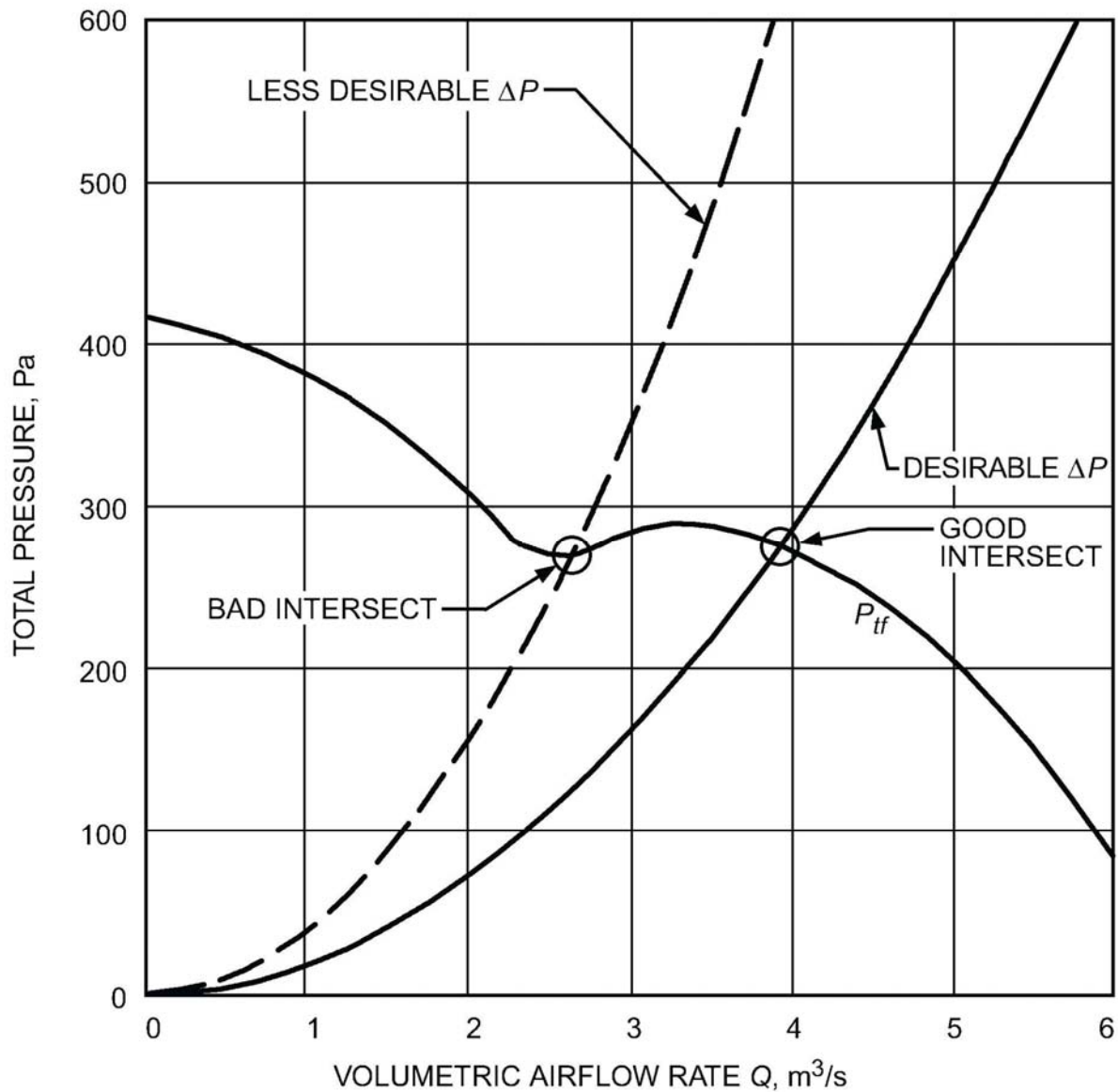


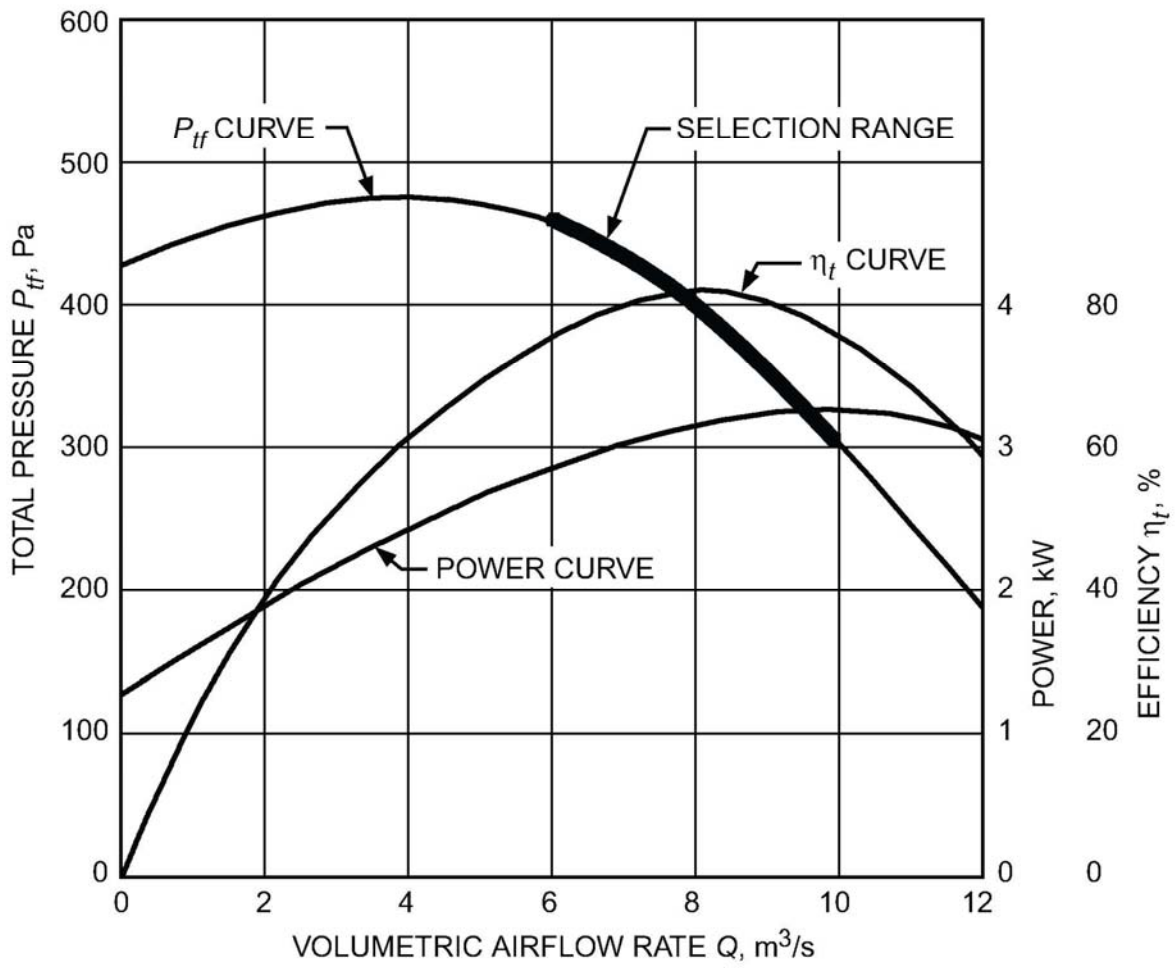
當風扇壓力高於系統壓力時，風扇壓力下降，流量增加，則系統壓力會上升，而達到平衡點。

當風扇壓力低於系統壓力時，風扇壓力上升，流量減少，則系統壓力會下降，而達到平衡點。

當風扇壓力高於系統壓力時，風扇壓力下降，流量減少，則系統壓力會下降，使風扇與系統壓力相差更多。

當風扇壓力低於系統壓力時，風扇壓力上升，流量增加，則系統壓力會上升，使風扇與系統壓力相差更多。





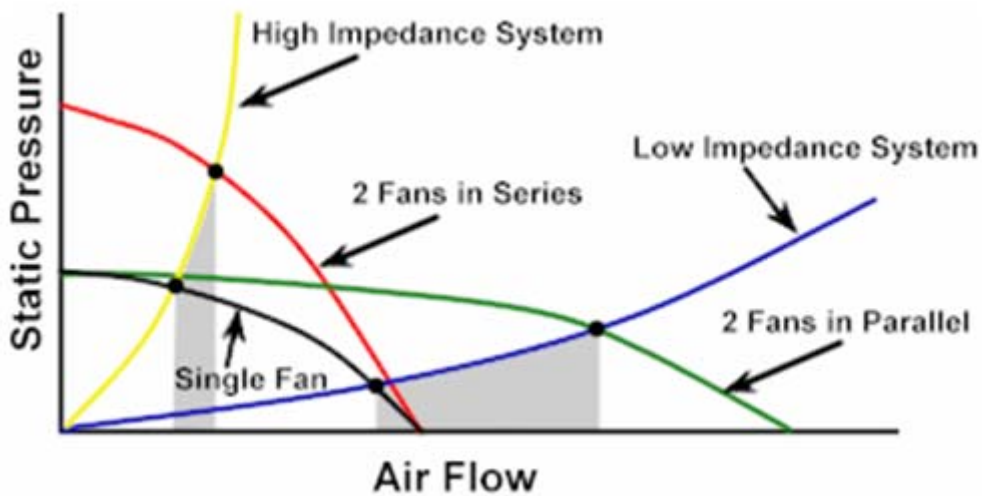
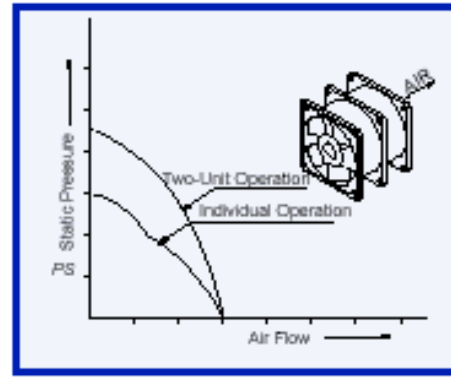
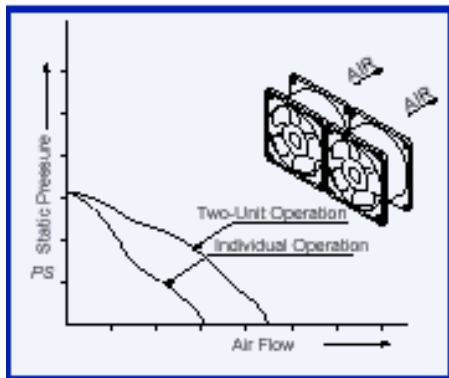
Curve shows performance of a fixed fan size running at a fixed speed.

並聯風扇與串聯風扇

若風扇特性相同：

並聯風扇的流量相加，壓力不變，是用於流量大，流阻小的系統。

串聯風扇的壓力相加，流量不變，是用於流量小，流阻大的系統。



流阻大的系統，串聯風扇的流量增加有限。

流阻大的系統，並聯風扇的流量沒有增加。

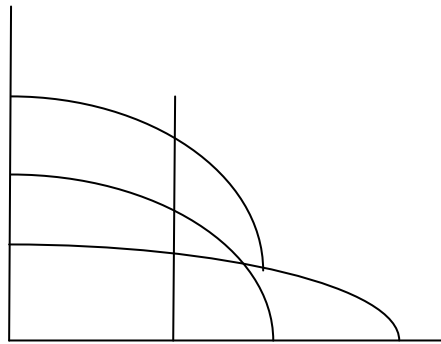
流阻小的系統，並聯風扇的流量增加較多。

流阻小的系統，串聯風扇的流量沒有增加。

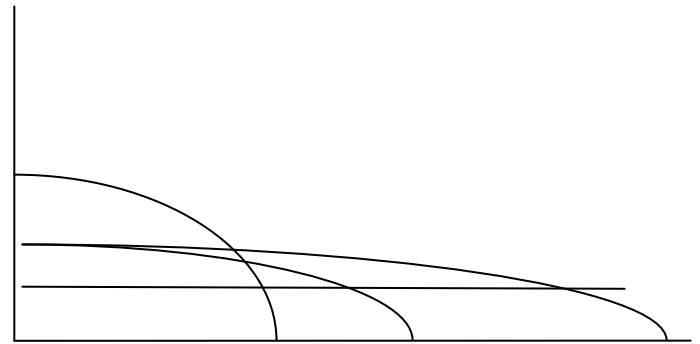
若風扇特性不同：

串聯風扇：相同流量的壓力相加，較小的流量為上限。

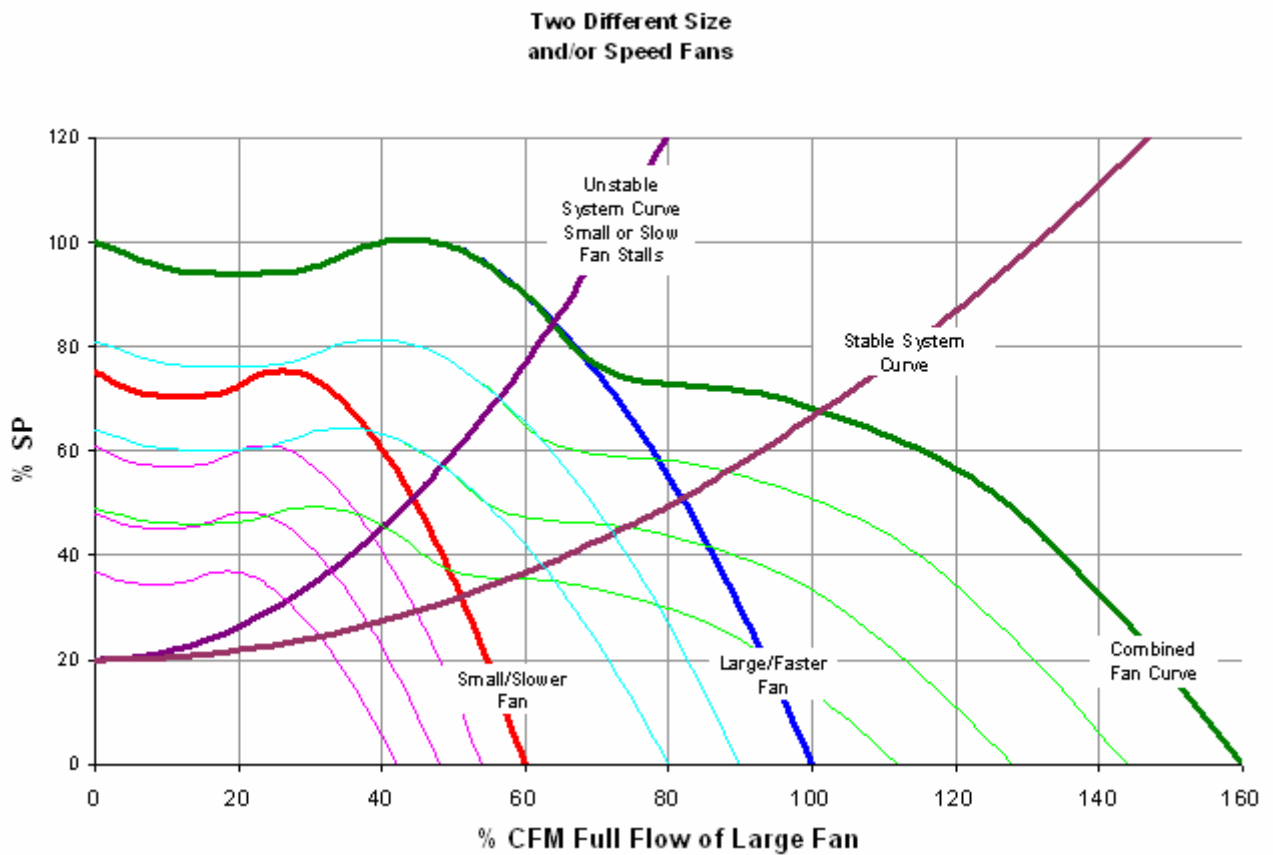
並聯風扇：相同壓力的流量相加，較低的壓力為上限。



串聯風扇



並聯風扇



(2.5). 設計實例