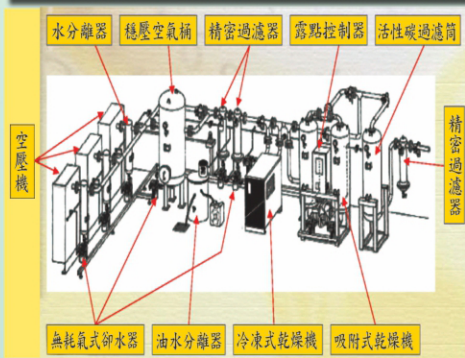
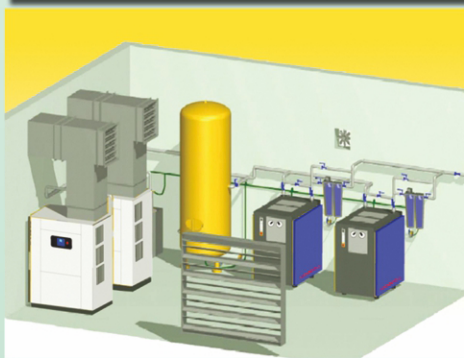
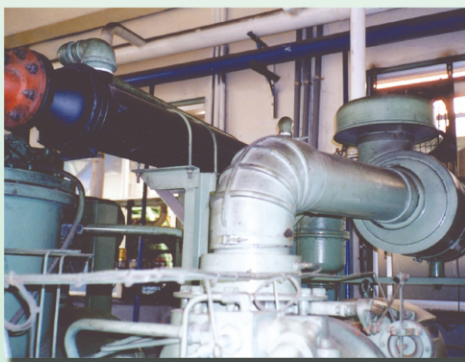


壓縮空氣系統

能源查核及節約能源案例手冊



委託單位：經濟部能源局
執行單位：工業技術研究院



目錄

摘要	1
前言	2
一、空壓機與週邊淨化設備	3
(一)空氣的特性與壓縮空氣的用途	3
(二)空壓機的分類與簡介	5
(三)選用空壓機的十大考量因素	8
(四)壓縮空氣的淨化處理	10
(五)壓縮空氣的儲存	17
(六)空壓機的安裝與機房設置要點	18
二、壓縮空氣基本節能概念	20
(一)壓縮空氣系統的節能原理	20
(二)壓縮空氣運轉成本的分析與計算	21
(三)壓縮空氣系統的節能效益	23
(四)壓縮空氣節能機會探討－洩漏	24
(五)壓縮空氣節能機會探討－假性需求	26
(六)壓縮空氣節能案例探討	28
三、供應側節能技術探討	31
(一)空壓機的性能與耗能比值	31
(二)壓縮空氣系統配置最適化	32
(三)壓縮空氣系統控制最佳化	34



(四)空壓機房的通風與佈置	37
(五)空壓機的效率管理	38
(六)空壓機的壓力損失管理	39
(七)空壓機的保養、維護與管理	40
四、佈置側節能技術探討	42
(一)壓縮空氣管路壓力降管理	42
(二)壓縮空氣管路的合理化佈置	43
(三)壓縮空氣管路的洩漏防治	44
五、使用端節能技術探討	47
(一)決定使用者需求與負載曲線	47
(二)杜絕不當與錯誤的壓縮空氣使用	48
(三)廢熱與廢冷凝水回收	49
六、壓縮空氣解決方案	51
(一)壓縮空氣系統需求的演變	51
(二)壓縮空氣系統的解決方案	52
結 論	54





摘要



壓縮空氣在工業上使用極為頻繁。不管製程或公用設施均少不了壓縮空氣系統，應用上極為廣泛，其效率之好壞，對於工業之能源使用效率影響頗大。本報告將深入探討壓縮空氣系統節能之事宜，以作為操作人員提高壓縮空氣系統能源效能之參考。

Compressed air is the most frequently applied process in industries. Most of the industrial processes or utilities can not work without Compressed air system.. Its operation efficiency has the great impact on the energy utilization efficiency for industrial processes. The energy saving issues for the Compressed air system will be deeply discussed in this report. The guidelines and suggestions of this report will be regarded as a reference for plant engineers to improve the Compressed air system energy efficiency.





前言

壓縮空氣取之於大氣回歸於大氣，具有低污染、不自燃、無味無嗅、安全及易於控制與傳輸等特性。廣泛應用於工業、礦業、工程業、醫療業甚至農業，可說是僅次於電力的普及能源之一，在歐美地區與電、水及蒸氣並稱四大工業能源。然而壓縮空氣卻是四大工業能源中能源轉換效率最低的一種。一般而言4kW的能源輸入，最高只能有1kW的壓縮能輸出；若以能源成本角度來看，一般工廠電力成本在1.5~2.0元/kWh，壓縮空氣成本將高達10~20元/kWh。

『空氣是免費的，壓縮空氣卻是極為昂貴的』。因此，如何有效的操作與控制、避免損壞以及節省壓縮空氣的能源浪費是工廠管理者必需面臨的重要課題。

本手冊內容從透過教導用戶正確的壓縮空氣系統節能概念開始，到如何規劃、佈置、建構和診斷節能控制系統止，共分成六個章節，進行系列性深入淺出的探討，提出實際可行的解決方案，期能協助各企業提高壓縮空氣的能源使用效率，共同為提高企業與國家的能源競爭力盡棉薄之力。

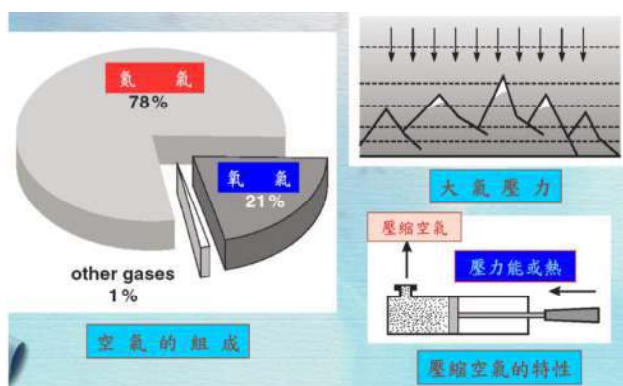


空壓機與週邊淨化設備

(一)空氣的特性與壓縮空氣的用途

1. 空氣的特性

乾空氣的成分，氮氣(N_2)佔78.03%氧氣 (O_2)佔20.93%二氧化碳 (CO_2)佔0.03%。分子量為28.96；比重在 $0^\circ C$ 、760 mmHg柱時， $r_0=1.2931 \text{ kg/m}^3$ ；比熱在 $25^\circ C$ 、1個大氣壓時， $C_p=0.241$ 大卡/ $\text{kg}-^\circ C$ 。每1立方米的空氣中約含有1億8千萬個微粒子($0.01\text{-}100\mu\text{m}$ 大小)，5-40公克重的水氣，0.01-0.03毫克的油霧，及少量的鉛、鋁、汞、鐵。



空氣的特性

2. 壓縮空氣的形成

壓縮空氣就是將大氣空氣經過空氣壓縮機壓縮後的空氣總稱。壓縮空氣是一種熱能的傳輸媒介，可以藉由管路系統遠距傳輸壓力能，也可以利用儲氣桶來儲存，最後再經由壓力的釋放達到做功的作用。



3. 大氣壓力(Atmospheric Pressure)

大氣壓力係由周圍空氣的分子重量所形成的，因此會隨著當時空氣的溼度、溫度與海拔高度而改變。

在海平面，大氣壓力為 $1,013 \text{ mbar} = 1.01325 \text{ bar} = 760 \text{ mm/Hg (Torr)} = 10.33 \text{ 米水柱} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2$ 。

4. 標準狀態(Standard)

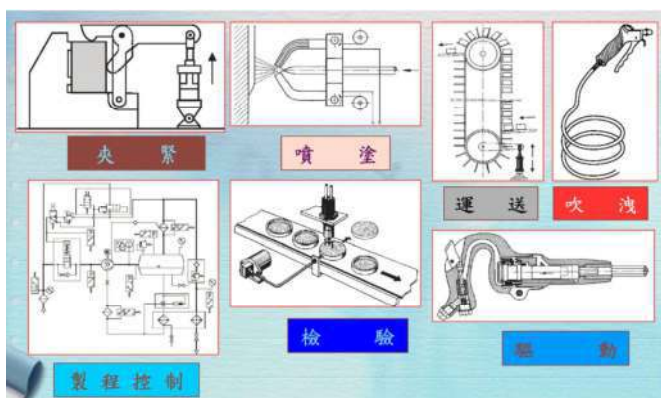
標準狀態的定義是：空氣吸入壓力為 0.1 MPa ，溫度為 15.6°C (國內行業定義是 0°C) 的狀態。如果需要用標準狀態，來反映考慮實際的操作條件，諸如海拔高度、溫度和相對濕度則將應實際吸入狀態轉換成標準狀態。

5. 常態空氣(Normal)

規定壓力為 0.1 MPa 、溫度為 20°C 、相對濕度為 36% 狀態下的空氣為常態空氣。常態空氣與標準空氣不同在於溫度及含水分。

6. 壓縮空氣的特性與用途

由於壓縮空氣具有，易於傳輸、方便儲存、重量輕盈、乾淨乾燥、使用安全、取之不盡、簡易使用、傳功快速及容易調節等特性。可作為「夾緊」、「運送」、「驅動」、「噴塗」、「吹洩」、「測試與檢驗」及「製程控制」等用途。廣泛應用於「輪運」、「食品」、「醫藥」、「化工」、「電子」、「汽車」、「鋼鐵」、「氣體分離」及「紡織化纖」等工業。



壓縮空氣的用圖



(二)空壓機的分類與簡介



空壓機的分類與簡介

空壓機依其壓力產生方式，可區分為正位移式(Positive Displacement Compressor)和動力式(Dynamic Compressor)等兩大類。另外以空氣是否與潤滑油的混合來分類，可以區分為有油式及無油式空壓機兩種。潤滑油對任何機械設備都具有潤滑與冷卻的作用，針對有油式空壓機，潤滑油還兼具有氣密的作用可以提升空壓機的容積效率，因此，從節能的觀點來看，有油式空壓機的能源效率絕對會高於無油式空壓機。

正位移式空壓機又可分為往復式及迴轉式兩類;動力式空壓機則可區分為離心式及軸流式兩類。正位移式空壓機是藉助空壓機以機械功來「壓縮」空氣的體積，同時提升壓力。任何非直接「壓縮」空氣的體積以提升壓力的方式都可歸類於動力式空壓機。各種空壓機的特性與優缺點簡述如下：

1. 往復式空壓機

是最早發明和應用最廣的一種，有單動、雙動、十字頭、膜片及浮動活塞等型式。它對工業界的貢獻是不可抹滅的，即使它已失去了往日的風采，逐漸的被螺旋式、離心式空壓機取代了主導的地位，但是它仍然具有一定的生存空間，可



見它仍然存在某些獨特的優越特性是其他類型的空壓機無法完全超越或取代的。

優點爲：使用壓力及馬力涵蓋範圍廣泛(由數bar到數百bar；1/4HP~1,500HP)，氣密性相當良好，因此適用多樣氣體(空氣、冷媒、氬氣、氧氣、乙炔…)在小風量的使用範圍仍具有相當的優勢，也可當做增壓機(Booster)來使用。

缺點爲：餘隙空間佔比大、單段式耗能比值差(2.0~3.0 CFM/HP)。零件種類繁雜，其中需要定期更換的消耗性零件數量、項目相當多，活塞環及閥組需經常維修與更換才能避免內部洩漏影響能源效率、噪音大(80~120dBA)、佔地面積亦大，運轉中會產生不同程度的振動，在安裝基座的設計上，除了要考量其靜荷重外，還應考量其動荷重才能避免不必要的後遺症。排氣是非連續性的間歇動作，當然會造成相當明顯的壓力脈動現象。在大風量的應用上已逐漸的被其他類型的空壓機所取代而退出市場。

2. 迴轉式空壓機

基本上區分爲單螺旋式、雙螺旋式、輪葉式、渦捲式及魯式等五種。

(1) 螺旋式

優點爲：耗能比值高(3.0~4.0 CFM/HP)、機件構造簡單、使用壽命長、噪音小(加裝隔音罩後約60~95dBA)、震動較往復式空壓機小，無須安裝機座，適合24小時連續運轉，與往復式空壓一樣具有定排量空壓機的共同特性—排氣壓力有相當廣闊的變化範圍。同時較往復式空壓機大幅減少了很多的消耗性零件，具有保養容易的優點，可快速啓動與關閉，相當適合節流控制使用。

缺點爲：製造成本相對比往復式高、壓力及馬力範圍稍窄(3~16bar；15~500HP)、適用氣體較少(空氣、氮氣、冷媒…)、容調運轉時效率不佳、部分負載時比較耗電(某些螺旋式空壓機的設計洩載時仍然需要大約70~80%的全載功率，較佳的設計也往往需要25%的全載功率)，單螺旋式需要一對副輪，氣密性及使用壽命不如雙螺旋式。公母轉子之間必須存在的間隙，造成氣密性不甚理想，是無油螺旋式空壓機能源效率不佳的主要原因。

(2) 輪葉式

優點爲：機件最簡單、體積小、耗能比值佳(2.8~3.8 CFM/HP)、運轉平順。

缺點爲：控制系統過於簡陋、噪音(80~95dBA)及震動較大、使用壽命相較螺



旋式短、以將壓縮空氣導回機體的方式做容調，以能源效率觀點而言不適合節流控制使用。目前國內後勤服務體系也不完整。

(3) 渦捲式

發展歷史最新，應用時間最短，優點為：噪音(50~80dBA)及震動最小、體積亦小、耗能比值佳(2.7~3.7 CFM/HP)。

缺點為：使用壓力及馬力涵蓋範圍甚窄(5~10bar，2~20HP)、控制系統簡陋、適用氣體少(空氣、冷媒…)、機件結構稍多、使用壽命相對螺旋式短、目前國內後勤服務體系也不完整。

(4) 魯式

應用壓力低(0.5~3.0 bar)，通常作為鼓風機使用，運轉噪音非常大。

3. 離心式空壓機

尤以齒輪增速離心式空壓機為動力式空壓機的代表，在國內石化廠、化纖廠及大型電子廠相當常見

優點為：耗能比值最優(3.5~4.5 CFM/HP)、排氣穩定、排氣完全無油、涵蓋的風量，從30到數千 M^3/min ，適合大型機組使用(500HP以上較經濟)，堅固耐用，長期連續運轉的故障率極低，沒有像往復式空壓機一樣的壓力脈動現象，長期運轉後的效率也不會有顯著的差異(保養不良則另當別論)。

缺點為：購置及維護費用高，幾乎無法進行容量調整(多餘排氣只能洩放回到大氣，白做功)。不適合低風量(100HP以下)、高壓(50kg / cm^2 以上)的用途。環境因素的改變，例如進氣溫度、進氣壓力、溼度、水溫對離心式空壓機效率的衝擊較大，甚至會到完全不能使用的地步。在靜止中(備用)的離心式空壓機一旦遭受壓縮空氣系統的逆流將會反轉而嚴重損壞的風險。離心式空壓機與定排量式空壓機有截然不同的壓縮特性，操作人員最好要有離心式空壓機的基本概念以防止離心式空機獨具的氣室現象(Surge)，連續性的氣室很可能會造成離心式空壓機嚴重的損壞，修復的費用相當可觀。不能使用變速控制。電力系統頻率不同的地區，離心式空壓機完全不可以移地使用(即使可以更換齒輪箱內部的機件，所花費的成本也相當高，很可能不如購買新機)。同理，在電力系統頻率不穩定的地區選購離心式空壓機要特別的慎重。相關售後服務與技術支援通常必須仰賴國外原廠，購置時應特別注意代理商的技術與支援能力。



軸流式空壓機其應用馬力非常大(數千到數萬馬力)，國內目前並無人使用，在此不多做說明。

(三)選用空壓機的十大考量因素

在建置壓縮空氣系統時，除了購置費用以外，如何節約高額的電費開支？如何延長空壓機的壽命？如何平穩供氣壓力？及如何降低環境噪音與污染？一直是用戶殷切期待解決的問題。而如何在設置的初期正確的選用空壓機扮演著關鍵性的因素。列舉選用空壓機的十大考量因素如下：

1.壓縮空氣的用途

絕大多數的使用者在選購空壓機時，鮮少考慮壓縮空氣用途，因此經常造成混用或錯用。

2.最低使用壓力

訂購空壓機前，我們應該先了解各個用氣端的最高與最低使用壓力，再加上管路及淨化設備等的必要壓降與空壓機空重車的壓力範圍，就可決定空壓機的額定排氣壓力。若最高與最低使用壓力差，達3bar時，就必須考慮「高低壓分流」。然後根據尖、離峰的負載變化來選擇不同型的空壓機。「基載」使用離心式(單機>75CMM)或螺旋式(單機<60CMM)；「變動負載」使用多台螺旋式搭配變頻式；「瞬間負載」使用高壓縮空氣壓機與大型儲氣桶來因應。

3.尖離峰需求風量

絕大多數的用戶通常以「定馬力」的方式選用空壓機，事實上「定風量」才是比較正確的方法。用戶應該根據尖離峰的需求風量來選用與配置不同型式與大小的空壓機，設法讓每個用氣時段的耗氣量與空壓機的排氣量相一致。

4.用氣品質要求

如同沖洗水與飲用水需要不同的處理一樣，壓縮空氣也必須根據不同的用氣品質要求，進行不同的處理。通常我們將壓縮空氣分成廠用(PA)、儀用(IA)、呼吸用(BA)及特殊製程用(SPA)等。通常根據ISO 8573-1壓縮空氣品質標準，選用與配置不同型式與等級的乾燥機與精密過濾器，過好的品質浪費能源，不足的品質影響製程，必須慎重考量。



5. 控制技術

最早期的空壓機使用「機械式壓力開關」來進行單機ON/OFF控制，1980年代隨著PLC可程式控制器的興起，有所謂「多機順序控制」，不過都只停留在對空壓機本身的電器控制上，對省能並無幫助。直到1990年代後期空壓機才進入PC-Based的「多機連鎖控制」，2000年起「變頻控制」技術也風起雲湧。「多機連鎖」、「變頻變速」及「遠端監控」等技術，能有效抑制離心式的BOV及螺旋式的空車浪費(節約電費25-40%)，減少備機容量與投資(15-30%)，穩定供氣壓力($\pm 0.1\text{bar}$)。可由控制上達到近30%的省能效益。

6. 運轉效率

定馬力的結果，導致用戶通常決定了空壓機的馬力數後，就認為同一額定馬力的空壓機，在同一壓力之下排氣量越大，效率越高。話雖不錯，然而排氣量的量測標準、計量單位及馬達是否有超載等，卻暗藏玄機。不能只比較型錄上的標稱馬力與風量，重點是實際的「性能曲線」與「每馬風量」。

7. 安裝通風

相較製程與空調設備，空壓機價格相對低廉、耐操、要求不高。因此經常放置於工廠環境最差的角落，漏油、漏氣、漏水、高溫、西曬、潮濕、塵染、通風不良、熱端循環等現象比比皆是。除不利空壓機的運轉外，對於節能也有一定程度的影響。機房空間的大小，通風條件，噪音隔絕，廢熱、廢水回收等都影響能源的使用。此外「集中式」比「分散式」有較低的安裝、保養與監控成本，也可以減少週邊設備投資。

8. 冷卻方式

空壓機的冷卻方式基本上分為氣冷和水冷兩種。除非環境特殊，通常在200hp以下建議使用氣冷，200hp以上建議使用水冷。氣冷式不必額外投資冷卻水塔與水泵，但必須有良好的通風；水冷式運轉溫度不受環境的影響，有利空壓機的壽命，唯有結冰爆裂與阻塞的缺點。

9. 電源規格

台灣地區頻率為60HZ，200hp以下建議使用220V、380V電壓，200hp以上建議使用3300V電壓。而電壓需求與電壓降的穩定必須要求，離心機通常為高電壓，完全不能移動，啟動時對電網會造成衝擊，應該保持經常性運轉。

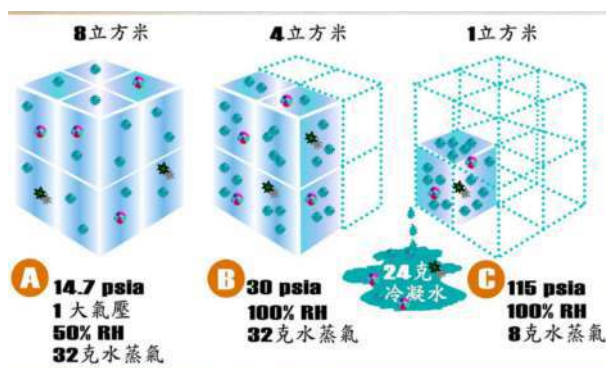


10. 維護保養

在保養費用上，必須著重耗材使用時數及原廠保固要求，避免使用坊間維修商低價劣品。以節能立場而言首要考量耗材的壓差及空壓機管理。機房要有適當的保養空間及必要的吊運設施與出入通道。工程人員與保養人員也應該施予不同的節能與維修專業訓練。

(四)壓縮空氣的淨化處理

任何空氣都含有一定量的水氣與塵粒(如油霧/油氣/ CO/CO^2 /異味/微粒),這兩種污染物皆為不可壓縮體,經壓縮後水氣會凝結為水,塵粒會被集結。如果沒有適當的處理與攔阻,這兩種污染物將隨著壓縮空氣經由管路系統侵入所有的用氣設備，造成：



- (1) 用氣設備及管路的腐蝕與洩漏。
- (2) 潤滑油的沖失。
- (3) 儀控設備的誤動作。
- (4) 氣壓閥與氣壓缸的緩滯與磨損。
- (5) 最終產品的污染。
- (6) 工具和空氣傳動設備也會因腐蝕和濕氣清洗掉潤滑油膜而遭損毀。



因此，工務單位人員必須根據各個製程對壓縮空氣品質的要求對照ISO 8573-1 國際標準，選用適當的乾燥機與過濾器並施與良好的預防保養才能避免這些令人頭痛的問題。

ISO 8573.1 Quality Classes					
Quality Classes	Solids max. particle size in microns	Moisture Dew Point °C °F		Oil Liquid & Gas mg/m ³ ppm _{w/w}	
0	as specified	as specified		as specified	
1	0.1	-70	-94	0.01	0.008
2	1	-40	-40	0.1	0.08
3	5	-20	-4	1	0.8
4	15	3	38	5	4
5	40	7	45	>5	>4
6	—	10	50	—	—

例如：許多半導體工廠均要求其CDA (CleanDryAir) 的品質等級為1.1.1代表CDA中，塵粒子大小必須小於0.1 μ ；含水量（壓力露點）必須低於-70℃；含油量必須少於0.01mg/M³。

壓縮空氣的淨化處理標準

主要的空氣污染物及來源

污 染 物	來 源
水 份	凝結(因溫度變化)
油霧／油氣	空氣污染／空壓機潤滑油
CO／CO ² ／NO _x	空氣污染／潤滑油使用過久
異 味	空氣污染
微 粒	空氣污染／空壓機磨損／管路髒污



水份

壓縮空氣中往往含有比在大氣壓力下更多的水份，而這些水份會造成許多不良的影響，直接、間接的使產品品質、生產力下降，使器具設備機器容易故障。水份與油份接觸後會形成乳化物，產生腐蝕性，破壞油品潤滑、散熱的效果，直接影響機械動作，造成機件損壞。水份會協助氧氣加速氧化，腐蝕機件。由於壓縮後之水份往往與油氣、雜質有過多的化學反應，並不適合人體吸收，因此壓縮空氣如用於人體呼吸系統，其水份應加以去除。一般的工業應用機具，可以 $+2^{\circ}\text{C}$ ~ $+10^{\circ}\text{C}$ 露點為設計之標準。工業中儀表空氣的品質，水分含量是以 -40°C 露點為設計之標準。人體呼吸系統之水分含量標準各國略有不同，原則上 -20°C 露點以下為宜。

油霧/油氣

空氣中油霧或油氣的產生主要是來自於工業生產的排放及汽機車廢氣的排放。空壓機中的潤滑油也會使空壓機的空氣出口端產生油霧或油氣；而油氣的多寡則取決於空壓機出口端的溫度及油的化學成分；油氣通常會在管路中凝結，如果沒有使用過濾系統將油氣過濾的話，在使用端往往會有油氣的存在。壓縮氣體中的油霧或油氣會造成人體的不適但不會造成立即的傷害，仍應避免。人體呼吸空氣的標準中，油霧/油氣的含量以 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 為上限，但仍應避免過高含量為宜。

一氧化碳

一氧化碳是壓縮空氣中最危險的污染物。一氧化碳通常會從空壓機的入口端進入，除非有良好的通風設計，否則空壓機本身運轉所產生的排煙將是一氧化碳的主要來源(尤其是引擎驅動的空壓系統)。其次是空壓機本身的潤滑油因受到溫度的影響而分解，使壓縮空氣中含有一氧化碳。一氧化碳之所以是致命的氣體是由於一氧化碳分子與紅血球的結合能力比氧分子高出300倍。一旦過量的一氧化碳與紅血球結合後，將造成身體組織極度的缺氧，導致組織嚴重傷害或死亡。

在血液中若有2%濃度的一氧化碳與紅血球發生結合現象時，將造成肌肉運動的障礙。當一氧化碳濃度到達5%時，將很快的對身體造成嚴重的傷害。人體中2%濃度的一氧化碳含量約為10 ppm；由於一氧化碳具有特殊的物理及化學性質，要將一氧化碳從空氣中去除是比較困難的；一氧化碳具有低沸點、低臨界溫度、不易被吸收之特性，且一氧化碳幾乎不溶於大部分的溶劑，因此不能將其吸附而加以去除。去除一氧化碳的方法是使用觸媒(催化劑)。使用觸媒去除一氧化碳的催化



作用原理是將一氧化碳氧化，使一氧化碳變成二氧化碳；而二氧化碳就可以以吸附的方式加以去除。一氧化碳在進行完整的催化過濾前，必須先將空氣中的水分、雜質粒子及油氣加以排除，否則這些成分將會使一氧化碳催化劑的效果降低。為了確保一氧化碳催化劑的壽命及效率，壓縮空氣必須保持乾燥。人體呼吸空氣的標準中，一氧化碳的含量以10 ppm為上限，應極力避免過高含量為宜。

二氧化碳

二氧化碳在大氣中存在的多寡取決於不同的環境，其含量高於一氧化碳，如果含量太高時，也會造成肌肉運動的障礙。由於二氧化碳是可以使用吸附劑將其去除的，因此，只要是安裝有去除二氧化碳的裝置，應可有效的除去二氧化碳。人體呼吸空氣的標準中，二氧化碳的含量以1,000 ppm為上限，但仍應避免過高含量為宜。

異味

如果空壓機設置地點正確，又能夠定時加以維護的話異味應不會自空壓機系統產生。一般而言，異味的來源主要是碳氫化合物(有機化合物，例：汽油、煤油、食物、...等)，而最有效將異味去除的方法便是使用活性碳過濾器；活性碳過濾器必須定時更換才能生效(更換的時間取決於異味的濃度多寡與使用頻率)。空氣中多少都存有碳的氧化物、氮、甲烷、氨、硫化物等，這些成分無法用活性碳過濾器徹底去除，而必須使用觸媒或其他吸附劑才能完全將這些成分排除。

呼吸空氣的標準

國 家	規 範	最大容許量			
		OIL/油 (mg/m ³)	CO(ppm)	CO ² (ppm)	H ₂ O/水 (mg/m ³)
澳 洲	AS 2299-1979	1	10	900	100 mg/m ³
法 國	M.T.74725	8		1600	
德 國	DIN3188	0.3	50	500	-51°C 露點
英 國	BS 4275	0.5	5	500	-50°C 露點



呼吸空氣的標準(續)

國 家	規 範	最大容許量			
		OIL/油 (mg/m ³)	CO(ppm)	CO ² (ppm)	H ₂ O/水 (mg/m ³)
印 度	BS 4001	1			-43°C 露點
紐西蘭	NZSS 2190		10	500	60mg/m ³
荷 蘭	Law NO.48721980	0.3	10	300	
南 非			10	500	H2S10ppm
美 國	Fed.Sp(a)B-B-A-1034	5	10	500	飽和 飽和
	OSHA	5	20	1000	
	CGA Grade D	5	20	1000	
	CGA Grade E	5	10	500	
	US Coastguard	5	20	1000	

空氣乾燥機概論

空氣乾燥機可以排除所有您壓縮空氣系統中濕氣所造成的麻煩。絕大部份的水氣可因溫度降至3°C時的凝結作用，而在壓縮空氣進入空氣管線網路前被排除。空氣管線網路漏氣、壓降、和腐蝕便可防止，工具和儀控設備也就延長了壽命。常用的乾燥機有冷凍式與吸附式兩種，冷凍式乾燥機經由冷媒壓縮機，將飽和壓縮空氣中的水冷凝並排出，最低露點可達+2°C。吸附式乾燥機中的吸附劑可以把飽和壓縮空氣中的水吸收掉；依再生的方式可區分為無熱式、內部加熱式、外部加熱式及真空加熱式等形式，最低露點視吸附劑的種類而定可達-40°C~-70°C。其中，無熱式吸附式乾燥機，因造價低廉、結構簡單、故障率低，國內使用相當普遍。唯其再生時，必須耗用15~35%的壓縮空氣，加上業者為了節省成本有利競標，通常以定時切換的方式進行再生，不當的吹洩，屢見不鮮，以能源的角度來看，非常的不經濟並且極端浪費。

如何選擇適當的空氣乾燥機

空氣乾燥機的機型必需配合不同的使用條件做選擇。若是選擇了錯誤的機種，除了無法確保其性能之外，也會容易造成故障。選擇空氣乾燥機的主要條件



如下：

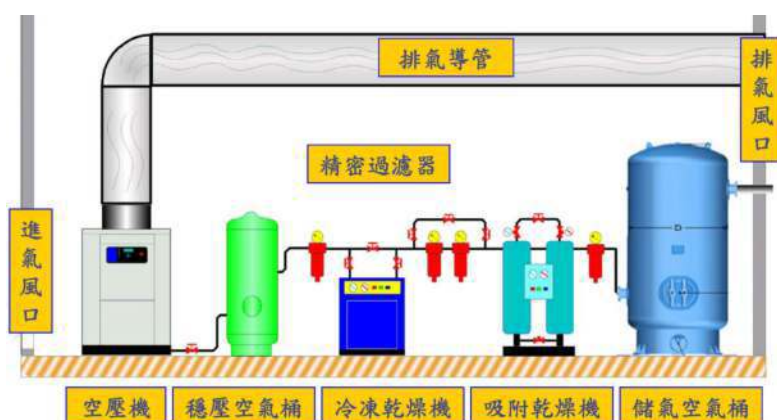
- (1) 流量大小(scfm, Nm³/hr, Nm³/min, l/sec)
- (2) 壓力露點要求(°F, °C)
- (3) 入口壓力(psig, bar, kg/cm²)與入口溫度(°F, °C)
- (4) 環境溫度或冷卻水溫度(°F, °C)
- (5) 最高容許壓力降(psig, bar, kg/cm²)

當使用場合和規格表所列的基準條件(CAGI ADF100標準為入口壓力100 psig (7 bar)，入口溫度100°F (38°C)，冷卻水溫度85°F (25°C)，環境溫度100°F (38°C) 最高容許壓力降5 psi (0.35 bar)；ISO 7183標準為入口壓力7 bar (100 psi)，入口溫度35°C (95°F)，環境溫度25°C (77°F)最高容許壓力降0.35 bar (5 psi))不同時，必須依壓力補正係數與溫度補正係數，重新計算基準空氣量來選擇正確的機種。

Op. pressure p [bar _{op}]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16
Factor f	0,62	0,72	0,81	0,89	0,94	1	1,04	1,06	1,09	1,1	1,12	1,15	1,17

Ambient temperature t _A [°C]	25	30	35	40	43
Factor t	1,00	0,92	0,85	0,79	0,75

空氣乾燥機的安裝





最佳的乾燥機安裝方式如上圖，在冷凍乾燥機的前頭搭配使用穩壓縮空氣氣桶(可避免脈衝應力、降低入口溫度及濕度)及除塵過濾器(減少熱交換器阻塞，提高效率，延長壽命)。吸附式乾燥機，搭配冷凍乾燥機一併使用效果最好，其入口應裝有精密過濾器(用以避免油氣與塵粒阻塞吸附劑)出口亦應裝有除塵過濾器(用以避免吸附劑的粉屑流出)。在安裝多台氣冷冷凍式乾燥機時，必須特別留意佈置安排，避免台與台之間發生熱短循環，影響熱交換效果。

精密過濾器的種類與性能

精密過濾器搭配乾燥機用以移除壓縮空氣中的水氣與污染物，應用最廣的有下列三種基本型式：

- (1) 除塵過濾器：藉由離心力，來過濾 $> 3\sim 5\mu\text{m}$ 大小的塵粒(無法過濾油滴)。初始壓力降約 $> 0.03\text{bar}$ ，最大容許壓力降為 0.5bar 。
- (2) 精密過濾器：利用不鏽鋼濾材，過濾水氣與 $> 0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 大小的油滴及塵粒。當入口溫度由 20°C 升高到 30°C 時，會有5倍多的油滴通過濾心流到下游管線中。使用時必須搭配前置除塵過濾器，初始壓力降約 $> 0.1\text{bar}$ ，最大容許壓力降為 0.7bar 。
- (3) 活性炭過濾器：以吸附方式捕捉 $> 0.01\mu\text{m}$ 大小的塵粒及過濾 $> 0.005\mu\text{m}$ 大小的油氣。使用時必須搭配前置精密過濾器，使用壽命約 $300\sim 500$ 小時。初始壓力降約 $> 0.02\text{bar}$ ，最大容許壓力降為 0.1bar 。

如何選擇適當的過濾器

- (1) 流量大小(scfm , Nm^3/hr , Nm^3/min , l/sec)。
- (2) 入口壓力(psig , bar , kg/cm^2)與入口溫度($^{\circ}\text{F}$, $^{\circ}\text{C}$)。
- (3) 最高容許壓力降(psig , bar , kg/cm^2)。

壓力補正係數

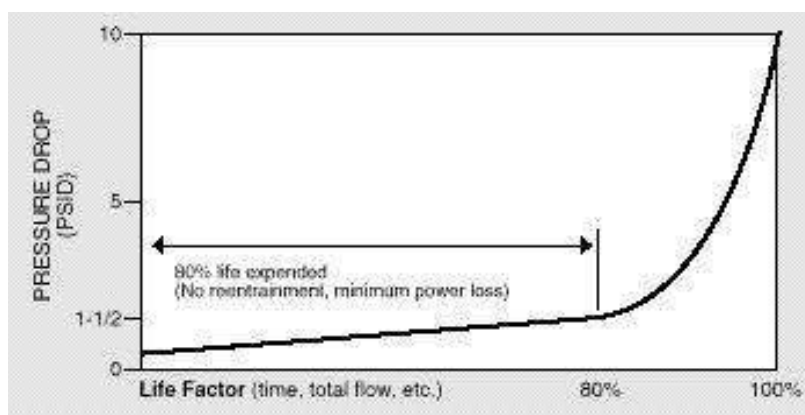
Pressure [bar _{op}]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Factor f	0,25	0,38	0,5	0,65	0,75	0,88	1	1,13	1,25	1,38	1,5	1,63	1,75	1,88	2



過濾器的安裝與維護

通常在空氣桶之後乾燥機之前，應裝設全流量的除塵過濾器，再根據下游不同的壓縮空氣品質要求，分別安裝不同容量與精度的精密過濾器，不必全數經由中央處理。安裝時應注意：出入口流向、精度順序、維修傍路配管、濾心更換空間、洩油及洩水管路、壓差表位置、保養維修標籤。

一般而言，當過濾器的壓差達到8~10psig(0.5~0.7bar)之前，就必須更換濾心，方符合經濟效益。



(五)壓縮空氣的儲存

壓縮空氣的儲存，在大部份壓縮空氣系統中所扮演的節能角色往往會被忽略了它的重要性。而正確且適宜的儲存裝置(空氣桶)可以提高空壓機的操作效率。

1.穩壓縮空氣氣桶(Primary Air Receiver Tank)

穩壓縮空氣氣桶除了可以減低壓力的脈動、降低壓縮空氣溫度、排放污染物(延長過濾器使用壽命)及排放冷凝水(減少乾燥機負荷)以外，最主要的是它可以大幅度的減少空/重或排放的頻率，避免馬達啟動過於頻繁，更重要的是抑制不必要的空車電能損失。

穩壓縮空氣氣桶通常置於空壓機及後部冷卻器之後，乾燥機與過濾器之前。其需求容積大小取決於空壓機的类型與排氣量。



2. 儲氣空氣桶(Secondary Air Receiver Tank)

儲氣空氣桶與穩壓縮空氣氣桶不同的是，它通常裝置在有經常性的波動而且有瞬間大耗氣需求的用戶端的上游處，類似汽車的啟動電瓶用以應付瞬間大啟動電流一樣，除了可以降低空壓機的裝置容量、節省購置費用，減少因空壓機容量過大的空車電能損失，也可以避免因瞬間的系統壓力降所造成的假性需求和氣動設備的失能或失效。在管路末端某處如有瞬間大風量的使用狀況，應考慮在此末端前增設穩壓縮空氣氣桶。

儲氣空氣桶的容積係根據瞬間用氣量與頻率計算之，無一定的法則可循。

高壓氣體容器作業安全衛生工作守則：

- (1) 氣體容器周圍二公尺內不得有易燃或揮發性物品。
- (2) 氣體出口不得沾有油漬。
- (3) 隨時檢查軟管接頭有無鎖緊或龜裂現象，尤其折彎角度過大，導管有折裂之虞。
- (4) 閥、旋塞開啓時，必須徐徐打開。
- (5) 隨時注意壓力與流量之變化。
- (6) 不得受陽光直接曝曬，應貯存於陰涼乾燥及通風良好之處。

購置空氣桶時應特別注意安全認證問題，不同的區域/國家通常有不同的壓力容器安全認證要求(如CNS, ASME VIII等)與檢驗週期。除此之外，也應注意安全閥、壓力表、卻水器、腐蝕裕度與材質等。

(六) 空壓機的安裝與機房設置要點

空壓機房必須設置於少灰塵、乾燥及通風良好的地方，並且要避免日光直射、雨水潑濺的可能。機房內應避免有熱源或熱管路通過，如無法避免時，應有適當絕熱。設置時也應考慮維修保養空壓機、定期檢查空氣桶時，吊運與進出的方便性與良好的照明。最重要的是必須有正確且足夠的通風散熱條件以避免機房環境溫度不當的升高。

1. 空壓機房環境溫度要求

空壓機房的容許環境溫度介於 $+5^{\circ}\text{C}$ ~ $+40^{\circ}\text{C}$ 之間。理想的環境溫度介於 $+20^{\circ}\text{C}$



~+30℃之間。當環溫低於+5℃時，管路與閥件會結冰，潤滑機油流動性很差(在環溫低於-10℃時必須額外添加抗凍劑)會造成空壓機當機。當環溫高於+35℃時，壓縮空氣的含水量會增加，空氣密度將下降，將導致排氣量的減少(每10℃環溫提高會減少排氣量2~3%)、機件與軸承快速磨損、壓縮空氣品質惡化。

2. 空壓機房空間要求

機房地面應保持水平並保有一定的保養空間及裝置的順序，多機安裝時應避免熱氣的短循環，裝置空氣桶時應防範物品掉落及腐蝕。噪音與防火必須符合國家安全規定。

3. 空壓機房的通風要求

機房入氣口應盡量位於低處，排風口則安裝於高於空氣桶的位置。22kW以下的空壓機可採自然通風，22kW以上的空壓機就必須採取強制通風，通氣速度最好低於3m/s最高不得超過5m/s，進氣風口面積的壓降一般設定在100pa。當環境特殊不易有理想進氣風口或環境骯髒、潮濕、污染多時，可考慮使用進氣導管來因應。當機房內同時有多台空壓機及機房內外溫差達20℃時，就必須加裝排氣導管，安裝時必須使其流速控制在6m/s以下，淨壓力降也應控制在50pa以下，適當支撐以避免震動的傳遞。導管過長或彎頭多時必須加裝輔助風扇(節能考量可加裝溫度開關)，導管最好有防音及防熱披覆可杜絕熱輻射及噪音，每台空壓機應有獨立的導管，使用收集式導管時應另加裝止回遮蓋，避免熱氣回流。

4. 空壓機房的防火與廢水處理

100kW以上空壓機必須有F30級以上的防火保護，機房內不能有易燃物，空壓機底部應設有漏油收集盤。空壓機的冷凝水通常含有油氣，必須經由油水分離器後，集中回收處理。



壓縮空氣基本節能概念

(一)壓縮空氣系統的節能原理

在第一章，我們已經概略介紹了有關壓縮空氣系統硬體設備的選用注意事項。第二章開始將針對壓縮空氣的節能概念做深入淺出的介紹，內容包含節能原理、運轉成本的計算與分析、節能效益及節能機會等項目。期盼能給各位讀者對壓縮空氣的節能有正確的認知與有效的做法。

$$\text{耗能} = \frac{\text{流量} \times \text{壓力}}{\text{效率}}$$

如上圖，壓縮空氣的「電費支出」＝「系統的流量」×「系統的壓力」÷「系統的效率」。而節能莫非就是要減少「電費支出」，為達此目的就必須設法減低「系統的流量」或降低「系統的壓力」或提高「系統的效率」。所有壓縮空氣的節能技術均據此原理發展出來，茲簡述如下：

1.減低「系統的流量」

根據經濟部能源局「能源用戶實地查核」走訪各行各業用戶的用氣經驗顯示，用戶空壓機的重車時數(有產生壓縮空氣的時數)約為總運轉時數的60%到75%之間，換言之，有25%到40%的時間處於空車狀態(只吃電不打風)。更值得注意的是，真正用於生產的壓縮空氣佔比通常低於50%(美國能源部的統計約為60%)。也就是說，您工廠的壓縮空氣電能約有一半是白白浪費掉的。壓縮空氣節能的第一步就是找到不當流掉的壓縮空氣並且採取有效的抑止方案，在不影響生產的前提下，減低「系統的流量」。

2.降低「系統的壓力」

穩定的系統壓力對製程有相當大的影響，用戶為求穩定的壓力及設置的方便性，通常採取同一水準的高吐出壓力，經過不同調壓閥分別調整到末端需求壓力



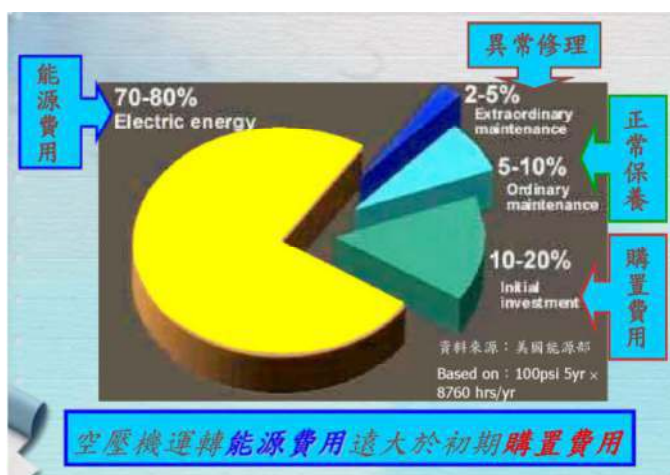
的方式來確保現場需求。此舉當然會造成電能的損失。根據查理定律「壓力」×「體積」＝常數，也就是說同馬力的空壓機，在吐出壓力越高時，其排氣量就越少，一般而言2psi的壓力降相當於1%的電能損失。在能源查核過程中，以7k~9k的空壓機吐出壓力提供5k,3k甚至1k的末端壓力使用，屢見不鮮，在昇壓再降壓的過程中，電能的浪費不言可喻。此外，乾燥機、過濾器、管徑及管路佈置等所造成的壓降也是很重要的因素。

3.提高「系統的效率」

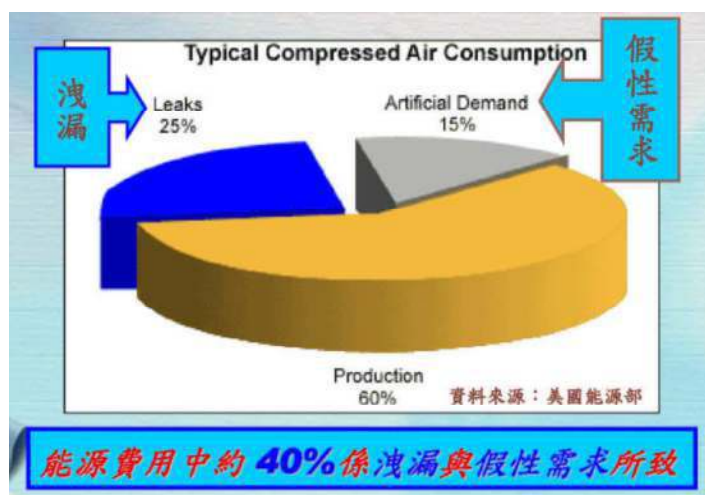
「系統的效率」泛指空壓機的耗能比值(單位馬力的排氣量)及馬達的運轉效率。此外，廣泛的系統效率還包含了空壓機的設計壓力與壓縮段數、進氣溫度與壓力露點的高低、系統控制的優劣、淨化設備與週邊設備的效率、冷卻系統的優劣..等。事實上，整個壓縮空氣系統是否能做到最佳能源效率，在構建壓縮空氣系統時就已掌握成敗的關鍵。

(二)壓縮空氣運轉成本的分析與計算

壓縮空氣系統在7bar及24小時連續運轉5年後，能源費用約佔總費用的70~80%、購置費用約佔10~20%、正常保養約佔5~10%、異常維修約佔2~5%。換言之，能源費用約為購置費用的5倍之多。然而，根據美國能源部(DOE)對能源費用的調查與分析，得知真正用於生產有關的只有60%，其餘25%起因於洩漏、15%根本是假性需求。



壓空總運轉成本分析



壓空運轉能源成本分析

壓縮空氣的運轉能源成本可以下列簡單的公式加以計算：

假設；馬達的伺服係數為SF1.1，馬達的效率為90%，基本電費為2元 / kW-hr，每年重車運轉時數為8,000小時。則，每台標稱100馬力的空壓機每年所耗用的電費為 $(100\text{hp} \times 0.746 \text{ kW/hp} \times 1.1 \times 2 \text{元} \times 8,000 \text{小時}) / 0.9 = 1,458,844 \text{元/年}$ 。簡單來說，空壓機24小時運轉每一馬力一年的電費在電費率2元/度時，約14,600元。在電費率1.5元/度時，約11,000元。

空壓機電能成本計算公式

$$\text{電能成本} = \frac{\text{總馬力數(HP)} \times 0.746 \times \text{電費(元/度)} \times \text{使用時數}}{\text{馬達效率}}$$

在不考慮空車與容調的額外電能浪費的前提下，一台20hp的空壓機的排氣量為 $145.2 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，總耗用電能為14.79kW，在馬達效率為90%的條件之下，總耗電能為16.43kW，若基本電費為2NTD / kWh，則每小時會耗電費32.86NTD/h、每立方米必須耗電費 0.226 NTD/m^3 。



而空車(只耗電不送風)及容量調整(以控制進氣閥門的開度來調節排氣量)的耗電量，隨空壓機型式與控制方式的不同而有所不同。

1. 油潤螺旋式空壓機的容調與空車：

油潤螺旋式空壓機通常利用進氣容量調整閥來達成穩壓的功能，卻因此犧牲相當可貴的效率。一般而言在輸出壓縮空氣量為50%時，會耗用近85%的電能；在輸出壓縮空氣量為20%時，會耗用近55%的電能；在完全空車的情形下也至少需耗掉27%的電能。單機如此，多機時更會多台同時容調與空車，非常耗能。

2. 油潤變頻螺旋式空壓機的容調與空車

相對非變頻空壓機而言，變頻螺旋式空壓機在輸出壓縮空氣量為50%時，耗用近52%的電能；在輸出壓縮空氣量為20%時，耗用近28%的電能；在完全空車的情形下只需耗掉12%的電能，確實有相當優秀的節能效果。主要的缺點是造價相對較高，最好能搭配一般螺旋式多機連鎖方式一起使用，才能有效降低初期的投資費用。

3. 離心式空壓機的容調與空車

離心式空壓機基本上為定壓力輸出，通常使用IGV及BOV來進行容量調節，事實上其原設計目的係用來避免產生Surge現象。因此，離心式空壓機的耗電量跟著輸出壓力高低，並無顯著的變化。換言之，離心式空壓機並不適合做為容量調整使用。在查核的過程中經常發現多台離心式空壓機同時開啓IGV及Blow Off的狀況，電能浪費之巨，可想而知。

(三) 壓縮空氣系統的節能效益

根據美國能源部，針對美國國內企業所實施的壓縮空氣系統節能改善的調查與統計資料指出，在「減少壓縮空氣洩漏」方面：平均節能率為26.3%，最大節能率為59.3%，平均投資回收年限(ROI)為0.9年。在「降低系統壓力」方面：平均節能率為2.0%，最大節能率為10.6%，平均投資回收年限(ROI)為1.3年。在「安裝/調整空車控制系統」方面：平均節能率為10.5%，最大節能率為33.5%，平均投資回收年限(ROI)為0.8年。在「採用多機連鎖」方面：平均節能率為7.6%，最大節能率為33.6%，平均投資回收年限(ROI)為2.7年。在「減低總運轉時數」方面：平均節能率為2.6%，最大節能率為15.8%，平均投資回收年限(ROI)少於0.1年。合計平均節能率為43.7%，最大節能率為65.0%，平均投資回收年限(ROI)為0.8年。



由此可知，即便像美國如此的科技大國，在壓縮空氣系統節能方面仍有如此大的改善空間，位處開發中國家的台灣，理當有更為可觀的節能空間。

1.減少壓縮空氣洩漏

壓縮空氣洩漏的成本通常超越您的想像。基於操作壓力為7bar，每年運轉小時為2,000小時。根據實際量測所得，一個6.4釐米的孔，每分鐘的洩漏量為51.2 l/s，每年2,000小時的運轉時數下就耗掉34,040度電，若以台灣地區每度平均電費為2元計算，浪費電費達新台幣68,080元。同理12.7釐米的孔，每年浪費電費達27萬元。

2.降低空壓機的吐出壓力

一台75kW (100hp)的空壓機在操作條件為壓力為7bar，每年運轉小時為2,000小時之下，每降低吐出壓力50kPa (0.5bar)，每年可減少電度5,975度，以每度電費2元計，每年可節省電費支出新台幣11,950元。每降低吐出壓力100kPa (1.0bar)，每年可減少電度11,950度，每年可節省電費支出新台幣23,900元。

3.降低空壓機吸入口的進氣溫度

一台75kW (100hp)的空壓機每降低進氣口溫度10°C，在操作壓力為7bar，每年運轉小時為2,000小時之下，以每度電費2元計算，每年可節約電度4,950度，相當於節省電費支出新台幣9,900元。

4.安裝/調整空壓機的空車控制系統

藉由適當的空車控制系統改善，對單一台空壓機而言，每一項空車控制的改善，平均有3%~20%的節能效益。

5.採用多機連鎖的節能效益

未連鎖前，空壓機根據本身的壓力設定範圍空重車運轉，將形成多台空壓機一起空車的現象；經連鎖後，會只剩下一台在空重車。假定有五台100hp空壓機同時運轉，連鎖前後的電力耗用約為1.25:1.00。每度電為2元，每年運轉時數為2,000小時，每年將可節省電費達新台幣26萬元。運轉時數8,000小時，可省電費102萬元。

(四)壓縮空氣節能機會探討－洩漏

根據美國能源部統計資料指出：一般工廠之壓縮空氣洩漏量達30%~50%，管



理較佳工廠或新廠則控制在10%~30%；5%~10%則是較可接受的範圍(壹支1/4"口徑管洩漏量約為2.8 M³/min，若以每年8,000小時，每度電2元，孔口洩放係數61%計算，每年將流失20萬台幣，相當於150個60Watt燈炮壹年的電費)。因此『洩漏』對於壓縮空氣系統運轉能源費用而言，是最致命的頭號敵人。

1. 壓縮空氣的洩漏主因與解決方案

(1) 卻水閥/卻水器經常性或持續點狀排氣，造成被合理化的洩漏。

解決方案：使用「無耗氣式自動卻水器」

(2) 以半開閥方式排水，造成被合理化的洩漏。

解決方案：使用「無耗氣式自動卻水器」

(3) 無熱式吸附式乾燥機定時排氣，造成被合理化的洩漏。

解決方案：增設「露點控制器」或改用「加熱式吸附式乾燥機」

(4) 管路及管路接頭的洩漏。

解決方案：做成巡檢計畫定期檢漏與更換。

(5) 後端連接軟管破裂與接頭不良所造成的洩漏。

解決方案：做成巡檢計畫定期檢漏與更換。

(6) 調壓閥及三點組合等維護不良所造成的洩漏。

解決方案：做成巡檢計畫定期檢漏與更換或集中於供應端實施淨化處理。

(7) 停用的用氣設備未能及時拆除或阻絕所造成的洩漏。

解決方案：及時拆除或增設阻絕用關斷閥。

(8) 氣壓缸損壞所造成的洩漏。

解決方案：做成巡檢計畫定期檢漏與更換

(9) 未能及時關閉應該OFF掉的閥門，造成疏忽性的洩漏。

解決方案：做成巡檢計畫及時關閉應該OFF掉的閥門。



另一個有效的方法是重新評估系統所需之壓力，大部份氣動工具之設計壓力為90psig至100psig之間(雖有某些應用需要100psig以上之壓力)。但我們經常將空壓機容量(capacity)的問題一律以提昇系統壓力來解決，這只會使得問題更形嚴重；因為在較高的壓力下，系統洩漏率會增加，工具(設備)使用更多的空氣，但卻很少能因此作更多的工作，提昇壓力所需的額外能源只會增加電力的消耗。以一部單段螺旋式空壓機為例，每升高壓力1psi(0.07kg/cm^2)需要增加0.5%之功率消耗。若壓力從100psig提昇至125psig，功率的增加(即電力成本)為12.5%。

(五)壓縮空氣節能機會探討—假性需求

壓縮空氣假性需求的主因與解決方案：

1. 「空壓機的額定排氣壓力與後端使用壓力差距(> 2 bar)過大(過高壓力會增加洩漏量，使工具耗更多的氣並增加磨損)」

解決方案：採用高低壓分流系統

因每降低設定壓力1 $\text{kg/cm}^2\text{G}$ ，約可節能5%~7%，增加排氣量8%。以100HP空壓機為例，當排氣壓力由7.5K過壓使用至8.5K時，每年需多耗NTD 100,000元。

2. 「壓力波動幅度過大，必須額外提高空壓機的排氣壓力」

解決方案：依空壓機的排氣量選定穩壓縮空氣氣桶

3. 「缺乏整合性的空壓機管控與監控系統，造成多台的空車損失」

解決方案：採用主副機連鎖控制系統

由主機所接收的系統壓力高低來控制所有副機的啟動頻率，將多台的空車時間集中到一台達到省能的功效。一般而言有20%~30%的省能效果。

4. 「空壓機的額定容量過大，造成空車與洩漏損失(容量越大，洩漏也會越大)」

解決方案：採用主副機連鎖控制系統搭配變頻空壓機及遠端監控系統

將經由主副機控制後唯一用來當空車使用的空壓機改為變頻控制空壓機，可達到完全節能的效果，同時可將系統壓力持續穩定在 $\pm 0.01\text{bar}$ 的範圍。而遠端監控系統可長期紀錄耗氣與耗電數據；進行比較分析後，提早發現不合理的洩漏與電費浪費。



5. 「管路管徑過小或佈置不當，造成假性壓力降」

解決方案：設定管路壓降目標並架構環狀管路系統

6. 「機房通風不良，致使空壓機進氣溫度過高，造成排氣量減少」

解決方案：裝置空壓機排氣導風管與機房通風設施

當空壓機總馬力數大於30hp以上時，機房就必須採取強制通風。規劃時應根據總熱量、通氣流速及壓降限制等參數，計算出必要的通氣流量，得到適當的進出風口面積。

7. 「未能了解空壓機的真正效率為耗能比值($M^3/min/HP$)」

解決方案：要求廠商提供空壓機出廠耗能比值性能表。

8. 「未能定期實施空壓機的效能檢測，汰換效率差的空壓機」

解決方案：定期實施空壓機效能檢測

對照AMSE PTC9(適用正位移式空壓機)&PTC10標準(適用動力式空壓機)每年檢測一次。

9. 「保養維護不良，造成壓力的損失」

解決方案：定期檢視空壓機機體→機組→穩壓桶→乾燥機出入口→過濾器出入口→儲氣筒→調壓閥出入口→最末用氣端等的壓力差，適時更新與維修。

10. 「任意或錯誤的壓縮空氣使用」

解決方案：教導正確的使用觀念

避免使用壓縮空氣作為個人清潔；低壓用途考慮使用低壓縮空氣壓機或鼓風機；盡量使用電動驅動設備；改善噴嘴效率等。

11. 「未能於大用氣端，設置適當的儲氣桶來應付瞬間用氣需求，造成假性壓力降」

解決方案：於有瞬間用氣端加裝較大的儲氣筒

儲氣筒大小必須根據瞬間用氣量、用氣時間與最低使用壓力等因素計算，並盡量靠近用氣端位置。



12. 「壓縮空氣品質過高(增加壓降、洩漏、再生耗氣、保養需求)或過低(降低設備壽命、產生誤動作、污染產品、生產損失)」

解決方案：檢討各用氣端品質要求，分級分流供應根據ISO 8573-1國際標準來規劃；呼吸用氣則必須根據各國的呼吸用氣標準來規劃。

13. 「空壓機馬達長期於超載下運轉(比較銘牌額定電流與實際電流)造成實際耗能高於額定耗能」

解決方案：注意實際耗電與銘牌耗電的差異

許多空壓機的馬達都有SF預留值，代表其實際耗電量通常會高出額定耗電量10%~20%，尤其進口空壓機的型錄排氣量多半定義在SF底下，購置新機時必須特別注意。

14. 「使用冰水做為空壓機的冷卻水」

解決方案：除非環境溫度極高，使用氣冷或冷卻水塔

在節能查訪過程中發現，有許多用戶(電子業居多)喜好使用冰水做為空壓機的冷卻循環水，也偏愛水冷式空壓機。其實只要做好機房通風，氣冷式空壓機可省下冷卻水塔、水泵、水處理及冰水超昂貴的費用。除非環境不許可氣冷式是較佳的選擇。尤其在大陸型氣候地區，冬季氣溫會降到0℃以下，常有冷卻器結冰暴管的問題發生，必須特別注意。此外，氣冷式空壓機的排熱只要簡單的過濾就可以有效回收，做為空間或鍋爐補充水的預熱源，確實一舉兩得。

(六)壓縮空氣節能案例探討

『某某公司』目前現場使用近23台(合計約2,655HP)水冷及氣冷往復式空壓機與2台無油螺旋式(合計約120HP)。因廠房面積遼闊，分落廠房四周安置(主要分為8區)，提供製程所需壓縮空氣。

壓縮空氣的主要用途包括：

- * 提供泥漿輸送用氣動泵浦所需的壓縮空氣。(7k，連續使用，用量約佔40%)
- * 作為上釉噴塗氣源。(4k，高頻率間歇性使用，用量約佔30%)
- * 粗胚表面清潔用途。(5k，間歇性使用，用量約佔20%)
- * 廢水回收及其他用途。(3~5k，間歇性使用，用量約佔10%)



1. 目前使用現狀說明

(1) 空壓機效率方面

目前使用中的空壓機，扣除暫停使用的噴水無油螺旋機外，清一色皆為往復活塞式空壓機，使用年限長達11到27年，以保養的觀點而言相當優秀。唯其真正的能源效率為何？不可得知。根據本人四年多以來能源查核及空壓機檢測經驗顯示，近6成以上空壓機在使用10年後其耗能比值($M^3/min/Hp$ 每馬力所能產的風量)會只下降到原機的3成到5成之間(往復活塞式空壓機因氣缸磨損、內部洩漏與進排氣閥密閉不良等因素，尤其嚴重)造成的電費損失遠超過其殘餘價值。『某某公司』未曾對現有空壓機進行過能源效率檢測，可預期的節能空間相當可觀。

(2) 壓力設定方面

依照貴廠用氣壓力使用要求處於4~7k之間。唯實際上空壓機的吐出壓力多半處於8k以上。而空壓機的吐出壓力高於實際需求時，就會增加耗能(空壓機設定壓力每增高1 Kg/cm^2G 會減少約8%的風量，增加約6%的電力消耗)。此外，空壓機設定壓力越高，同樣的洩漏率，洩漏量也會越高。另外也觀察到部分乾燥機及精密過濾器之入出口壓力差很大(表示其內部已經嚴重阻塞)，造成假性壓力降，耗能亦多。

2. 節能改善建議

(1) 建置中央供氣的空壓站

將目前的八個空壓站區塊簡化成2~3區，以機台大馬力(約200~300hp)空壓機作為基載使用，保持經常性100%全載運轉，並採用「多機連鎖控制」以節省空車的電力浪費(多機連鎖控制可依據現場用氣量變化調整空壓機啟動的台數與馬力數，可減少約15-35%的空車電力損失)。預算足夠的話可依據用氣變化範圍增設變頻螺旋式來當變動負載使用。

(2) 採用壓力感測器式的螺旋式或離心式空壓機：

往復式空壓機新機的容積效率(<75%)及耗能比值(約 $0.095 M^3/min$)較螺旋式(>90%及 $0.12 M^3/min$)低，相對耗電多。若以一台馬力數100hp、每年運轉8,000小時、每度電2元計算，每100hp往復式空壓機相較螺旋式空壓機每年必須多耗電費約 $1,400,000 \times 0.15 = 210,000$ 元。

往復式空壓機的空重車多使用機械式壓力開關進行控制，空重車壓力所能控制的範圍為2k。換句話說，當末端所需最低操作壓力為6k時，空壓機的空重車壓力必須介於6~8K(不考慮管路壓降時)。相對使用壓力感測器的空壓機其空重車壓



力所能控制的範圍為1k，空壓機的空重車壓力只需6~7K。75kw (100hp)的空壓機在操作條件為壓力為7bar，每年運轉小時為2,000小時之下，每降低吐出壓力50kPa (0.5bar)，每年可減少電度5,975度，以每度電費2元計，每年可節省電費支出新台幣11,950元。每降低吐出壓力100kPa (1.0bar)，每年可減少電度11,950度，每年可節省電費支出新台幣23,900元。

(3)管制壓差

- (a)選擇空重車壓力範圍較小($\pm 0.5\text{bar}$ 內)的空壓機(傳統機械式壓力開關的空重車壓力範圍接近2bar，會造成多餘的電能損失)
- (b)選擇全罩、預濾式箱體的空壓機，可以減少進氣過濾器及冷卻器阻塞的機會，延長進氣過濾器及冷卻器的壽命。
- (c)有效監測進器過濾器的壓差， > 6 吋水柱時應更換。
- (d)有效監測空壓機內部壓損(油細分離器、機油過濾器及內部洩漏等)保持壓損 $< 0.5\text{bar}$ ，適時更新。
- (e)將空壓機的重車壓力設定為 $6\text{Kg/cm}^2\text{G}$ ，空車壓力設定為 $7\text{Kg/cm}^2\text{G}$ (空壓機設定壓力每減少 $1\text{ Kg/cm}^2\text{G}$ 可增加約8%的風量，減少約6%的電力消耗)。

3.節能效益分析

- (a)將現有往復式空壓機改用螺旋式空壓機，本身的效率改善可由經常用量2,300hp降為1,800hp左右。可節省電力500hp，以每年運轉8,000小時、每度電2元計算，每年平均可節省電費約5,500,000元。(1)
- (b)設定壓力降低 $1\text{ Kg/cm}^2\text{G}$ 可節省電力6%既138hp，每年運轉8,000小時、每度電2元計算，每年平均可節省電費約1,518,000元。(2)
- (c)採用「多機連鎖控制」可節省空車電力損失約15%既345hp，每年運轉8,000小時、每度電2元計算，每年平均可節省電費約3,795,000元。(3)

合計每年可節省約(a)+(b)+(c)=10,813,000元/年。

4.投資報酬率估算

估計設備費用(含螺旋式空壓機與冷凍式乾燥機與空氣桶與 $3\mu\text{m}$ 除塵過濾器及 $0.1\mu\text{m}$ 精密過濾器與多機連鎖控制系統等)約10,183,000元。(管路費用需另外估算)

投資報酬率(ROI)=10,183,000元/12,607,000元 \times 12月/年=『10月』可回收。



供應側節能技術探討



(一)空壓機的性能與耗能比值

空壓機的性能通常指向容積效率＝吸氣狀態時之空氣流量÷壓縮機之衝程位移容積。餘隙比 ϵ 定義為餘隙容積與衝程容積之比。餘隙容積越大，容積效率越差；活塞式空壓機有吸氣與排氣閥門等裝置，餘隙容積佔比較螺旋式大，除非採用多段式壓縮，其容積效率相對螺旋式為差。

一般使用者多以定馬力的方式來選用空壓機，在同一額定馬力下空壓機的排氣量，似乎就成為判斷空壓機性能優劣的唯一標準。就長期能源耗用的觀點而言，空壓機的性能，不在型錄上的標稱風量，重要的是『耗能比值』。

『耗能比值』定義為空壓機每馬力的排氣量。此處所稱的馬力及排氣量，並非型錄上的額定值，係指在指定壓力下空壓機換算為標準狀態下的吐出風量與實際的總耗電量之比(CFM/HP或 $M^3/min/HP$)。不同型式的空壓機有不同的耗能比值表現，在7barg的吐出壓力下，單段活塞式空壓機的標準耗能比值約為2~3CFM/HP，螺旋式空壓機的標準耗能比值約為3~4 CFM/HP，離心式空壓機的標準耗能比值約為3.5~4.5 CFM/HP。

空壓機的額定馬力指的是馬達銘牌馬力，而馬達真正的耗電量與馬達的效率、公因係數及伺服係數有關。至於空壓機的總耗電量除了馬達的耗電量之外，還必須包含風扇馬達(氣冷式)、油泵馬達及其他需要耗能的裝置。比較簡單的做法就是在定壓力之下，以電力計量測輸入電源側的耗電量。

至於空壓的排氣量牽涉量測的方法、標準及排氣量的稱呼標準。空壓機常用的量測標準有ISO 1217及AMSE PTC9(適用正位移式空壓機)&10(適用動力式空壓機)兩種。排氣量的稱呼標準則有近乎10種，較常見的有FAD(進氣狀態的壓力與溫度)、 $NM^3/min(1\ atm\ 0^\circ C\ 0\%RH)$ 、SCFM(14.7 psiA 60°F 0%RH)等三種。以台灣海島型氣候換算的結果，差距可達15~20%不等。



如圖兩台額定50hp螺旋式舊空壓機在輸出壓力為100psig時風量各為200CFM及155CFM差異22.5%；耗能比值則各為3.8CFM/HP及2.5CFM/HP差異33%，差異值並不相同。主要原因為，實際耗能各為52.6hp及60hp(吃到馬達伺服係數)均超過額定馬力值。

對用戶而言『耗能比值』才是判斷空壓機性能優劣最為重要的指標。

(二)壓縮空氣系統配置最適化

壓縮空氣系統隨著不同的使用者要求而有不同的配置方式。其對壓縮空氣的節能與維護有相當程度的影響，扼要說明如下：

1.主電氣箱

必須依照CNS9829/C1118國家標準，選用適當規格之主電源線、接地線及無熔絲開關(NFB)以確保電氣使用安全。輸入電源電壓應保持在額定電壓 $\pm 10\%$ 以內，三相電壓差須在3%以內。

2.進氣預濾網

目前國外進口或國內較新設計的空壓機，均裝設有進氣預濾網，目的在減少外界粉塵入侵、保持機組內部清潔、延長熱交換器阻塞時間、降低冷卻油溫，可有效提高空壓機之能源效率。

3.微電腦連鎖控制器

多機連鎖是變動性負荷和高效率能源系統的最佳解決方案，微電腦控制器(指單晶片微處理器者，非PLC或僅有PCB版)其壓力調整精度介於 $\pm 0.1\text{bar}$ ，且無機械校正問題(傳統壓力開關式控制器，其壓力調整精度近2bar，需經常校正)，只要使用得當，良好的『微電腦多機連鎖控制系統』對於節能將有非常可觀的貢獻(10~15%)；在空壓機上的應用也已經非常成熟、穩定。

4.空氣壓縮機

使用者應根據用氣需求，包括使用壓力、耗氣量曲線、用氣品質要求、環境條件等因素，選擇適當規格與型式的空氣壓縮機(氣冷、水冷；微油、無油；低壓、高壓；單機、多機)。



5. 穩壓用空氣桶

此處所指穩壓用空氣桶與用戶端之大型儲氣桶(形同備用電池)功能不同。由空壓機直接排出的壓縮空氣其脈動大、溫度高、飽含水分。應該先接到穩壓用空氣桶中，進行穩壓、降溫及排水。其購置費用十分低廉，卻往往因空壓機設備廠商缺乏相關常識，經常被忽略而未加安裝。

6. 前置精密過濾器(過濾精度 3μ)

如同穩壓用空氣桶，前置精密過濾器也經常被忽略而未加安裝。前置精密過濾器主要功能在於：將進入冷凍式乾燥機前的壓縮空氣中的雜質事先過濾掉，避免壓縮空氣中的雜質卡在冷凍式乾燥機內部鰭片式散熱盤管上，影響熱交換面積與效率，造成無謂的能源消耗。

7. 冷凍式乾燥機

冷凍式乾燥機利用冷凍乾燥原理，來除去壓縮空氣中的水分(環溫 27°C 環濕 $70\%\text{RH}$ 時，每日每 100CFM 約有22加侖的水會經由空壓機吸入壓縮空氣系統中)其壓力露點為 $2^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ 。冷凍式乾燥機已是壓縮空氣系統中不可或缺的要件，選用時應考慮：入口溫度限制、處理風量、總壓降、冷媒壓縮機效率、使用冷媒、自動排水器優劣及內部管路材質(不銹鋼較佳)等。

8. 管路精密過濾器(過濾精度 1μ 、 0.01μ 、活性碳)

管路精密過濾器用以過濾壓縮空氣中的油份、雜質及/或氣味等。是否需要加裝與如何加裝？完全根據用氣品質要求來決定。選用時應注意：入口溫度限制、處理風量、總壓降、本體防銹處理、過濾效率及有無壓差過大指示等。

9. 吸附式乾燥機

吸附式乾燥機利用乾燥吸附筒中的分子篩與氧化鋁，將壓縮空氣中的水分子加以吸附，達到除水的功能。其壓力露點可高達 -40°C 到 -100°C ，幾近完全乾燥；至於是否需要加裝吸附式乾燥機？應根據用氣品質要求來決定。選用時應考慮：入口溫度限制、處理風量、總壓降、每一循環時間與洩放空氣量及露點偵測與控制功能等(建議應備有露點控制器)。搭配冷凍式乾燥機一併使用，節能效果更佳。

10. 後置精密過濾器(過濾精度 3μ)

後置精密過濾器係搭配吸附式乾燥機使用，用以過濾粉狀的分子篩與氧化



鋁。選用時應注意：入口溫度限制、處理風量、總壓降、本體防銹處理、過濾效率及有無壓差過大指示等。

11. 自動洩水器

自動洩水器是壓縮空氣系統中最不起眼，最不被重視的配件，卻是洩漏的最大元兇。新型『無耗氣式自動洩水器』排水時不會排氣，是最佳的選擇。

12. 油水分離器

不論微油或無油式空壓機，其冷凝水中都含有不同程度的油份，標準的做法應該將冷凝水導入油水分離器將油份分離後，再予以回收利用。

13. 空壓機房管路配置

空壓機出口最好連接一只“三通”(作為備用或偵測連接口)，並加裝“關斷閥”(近空氣桶側)，方便保養時隔離系統壓力。空氣桶入口通常為較低位置者，出口位置較高(穩壓及降溫效果較好)。裝設精密過濾器或乾燥機管路時，均必須考慮規劃旁路管路(Bypass Piping)，方便日後保養、維修與更換。另外，實施配管時，應考量管路之撓性要求，盡量避免管路共振；空壓管路需保持至少1/100之傾斜，便利管路中水分排洩。選用空壓管路材質時，首重防銹與防腐性，管路光滑度對壓降也有很大影響，必須慎重考慮。

(三) 壓縮空氣系統控制最佳化

壓縮空氣系統的控制方式，隨著系統中空壓機的型式、空壓機的台數及工廠用氣的變化程度而不同。茲以單機與多機兩大類分述如下：

1. 單機控制

(1) ON/OFF

空壓機在系統壓力低於空壓機的重車壓力時，啟動充壓，當系統壓力上升至空車壓力時，關閉停機。此種控制方式通常藉由機械式壓力開關來達成。因為過於頻繁的ON/OFF容易破壞馬達的絕緣，僅適用於用氣循環少與馬力數小的場合。

(2) 空重車控制>Loading/Unloading)

類似ON/OFF控制，只是空壓機持續保持定速運轉，不會關閉停機。唯此種調



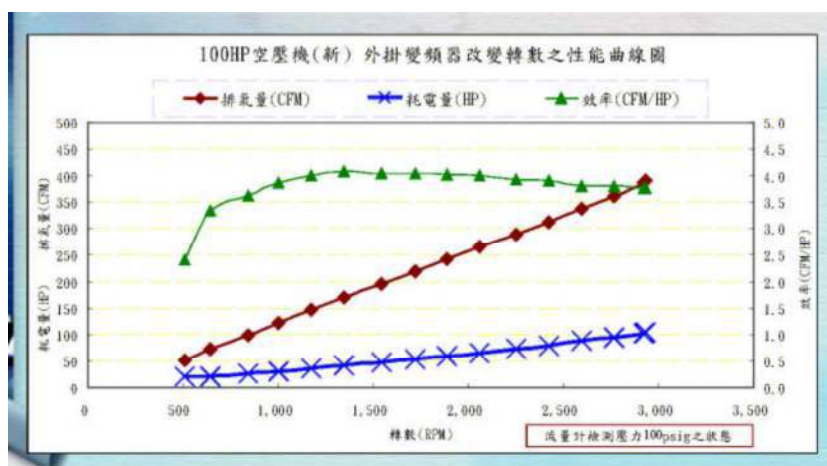
整即便在螺旋式空壓機完全不輸出壓縮空氣時，仍會有15-35%的耗電量，非常不經濟。

(3)容調控制

藉由進氣閥門的開度調整，變化空壓機的排氣量，來保持穩定的系統壓力。此種控制廣泛運用於螺旋式與離心式空壓機。

(4)變頻控制

利用變頻器來改變變頻馬達的轉速，控制空壓機的排氣量，可以達到穩定壓力及節能的雙重效果。根據實測結果變頻空壓機的最佳效率點落在30~90%之間。



空壓機的性能曲線圖(變頻控制)

2.多機控制

(1)手動控制

使用者根據經驗來啟動或關閉多台空壓機。結果通常是開機量遠大於實際需求，造成多台空壓機同時空重車或容調的現象(空壓機的馬力數越大越嚴重)電力的浪費相當可觀(25~40%)。

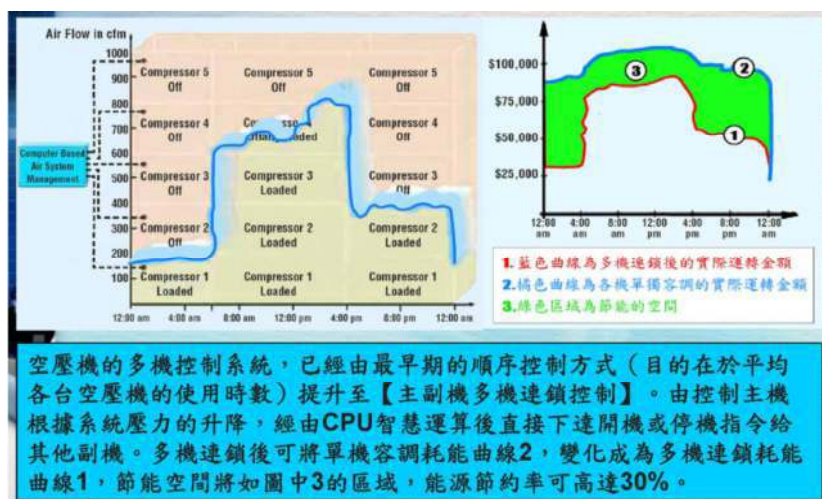


(2) 順序控制

利用PLC順序控制器，切換空壓機的啟動順序，最大的功用在於平均空壓機間的運轉時數，對於節能並無實質的效果。

(3) 多機連鎖

多機連鎖是變動性負荷和高效率能源系統的較佳解決方案，可經由各空壓機的微電腦控制器(指單晶片微處理器者，非PLC或僅有PCB版)進行主副機連鎖連結，統一由主機下達開關機指令給每一台副機，達到只有一台空壓機在空車運轉，可有效縮短每一台空壓機的空車時數。良好的『微電腦多機連鎖控制系統』對於節能有非常可觀的貢獻(15~30%)；在空壓機的應用上也已經非常成熟、穩定。目前唯一比較棘手的問題在於不同廠牌空壓機之間，控制邏輯設計上的不同，不容易進行連鎖。



壓空系統控制最佳化－多機

(4) 多機連鎖＋變頻

以變頻空壓機來取代多機連鎖後僅剩的空車副機，達到完全節能的效果。並可使系統壓力穩定於 ± 0.1 bar之間。是壓縮空氣控制系統的最佳節能解決方案。



(四)空壓機房的通風與佈置

壓縮空氣空氣因為其便利性與安全性甚佳，加上無味無臭的特性，不若漏電危險與漏水滿地，非常容易被忽略，通常被安置在工廠的最角落。空壓機房昏暗、狹小、悶熱、吵雜、泥濘、塞滿廢棄物的情形比比皆是。遑論如何通風與佈置，唯壓縮空氣系統的通風與佈置對壓縮空氣系統的穩定與節能都有重要的影響，分別說明如下：

1. 機房通風

如2.3節說明：每降低空壓機的進氣溫度 10°C 可以提高其排氣量2~3%。一台75kW (100hp)的空壓機，每降低進氣口溫度 10°C ，在操作壓力為7bar，每年運轉小時為2,000小時之條件下，以每度電費2元計算，每年可節約電度4,950度，等於節省電費支出新台幣9,900元。此外，空壓機的排氣溫度跟著降低，可延長潤滑油的壽命，軸承潤滑性會更好，拋油量也會減低。同時提升乾燥機與精密過濾器的操作性能減少耗電。

機房空壓機的總馬力數低於25hp時，只要有適當面積的進風口與排風口，採用自然通風即可。當空壓機的總馬力數高過30hp時，就必須實施強制通風。強制通風隨機房條件的差異與季節溫度的變化，必須採取不同型式的通風方式。建構之前最好詢問有經驗的廠商，協助計算通風口面積、通氣流速、排風扇流量及導風管截面積等。

2. 機房佈置

空壓機出口連接備用“三通”與流量計，裝置“關斷閥”及散熱導風管。空氣桶入口在低位，出口在高位。精密過濾器與乾燥機均規劃旁路管路，管路高度必須足夠拆換濾芯。包含空壓機各段冷卻器、空氣桶、乾燥機、精密過濾器等所有卻水口，均裝設無耗氣式自動卻水器，將冷凝水統一收集至油水分離桶分離油份後再加以回收利用。實施配管時，應考量管路之撓性要求，盡量避免管路共振。空壓管路需保持至少1/100之傾斜，便利管路中水分排洩。選用空壓管路材質時，應考量防銹、防腐性與管路光滑度。擺設氣冷式空壓機及乾燥機時應特別其散熱器與馬達的熱氣流向，避免前台熱風流向後台。水冷式系統的冷卻水管上應裝有壓力表及溫度表，便於監控冷卻水的問題。空壓機房基於保養、維修及入風要求，必須保有一定的保養空間。一般而言，空壓機的四面最好與牆面保持90CM的距離；100hp以上大型空壓機機房，則應備有吊車，通道及出入口也應夠大，方便日後維修時，機體、馬達、油氣桶等的吊裝與運搬。



(五)空壓機的效率管理

所有的公用設備在正常使用一段時間之後，其能源效率都會變差。空壓機當然也不例外。

電動空壓機的效率總成包含容積效率、機械效率及驅動馬達的效率等。其中容積效率會因為機殼洩漏、間隙擴大、過濾材與內部管路壓降增加、進排氣閥與活塞環洩漏、熱交換效率變差等因素而下降；機械效率則會因為潤滑不良、軸承或機件磨損、傳動齒輪或皮帶效率降低等因素而下降；驅動馬達的效率則會隨著絕緣值的逐漸下降、銅損與鐵損的增加、軸承磨損等因素而降低。

項次	廠別	機號	機型	額定馬力 HP	測定壓力 kg/cm ² G	平均電壓 Volts	平均電流 Amps	實測風量 m ³ /min	設計馬力 HP	耗能比值 m ³ /min/HP	標準值 m ³ /min/HP	差異 %	備註
1		1	Si	100	7	205	297	10.903	127.22	0.085702	0.113	75.84242	當緊急備機
2.1		2	Si	75	7	205	247.5	4.639	106.01	0.04376	0.113	38.72568	汰換
3	高壓機	3	Hi	30	7	215.55	75.5	3.426	34	0.100765	0.113	89.17231	移往他處使用
2.2		2	Si	75	7	207.5	247.5	2.866	107.3	0.02671	0.113	23.63731	汰換
2.3		2	Si	75	7	205	247.5	3.844	106.02	0.036257	0.113	32.06611	汰換

空壓機的容積效率及馬達效率會隨著使用時間的增加而降低（起因於內部洩漏、間隙擴大、機件磨損增加、熱交換效率變差等因素）。耗能比值因而下降。用戶必須定期實施空壓機的『效能檢測』，再根據檢測結果，進行開機順序的調整及必要的汰換工作。

空壓機不若其他公用設備(如鍋爐、燃燒器、發電機、鼓風機及冷卻水塔等)因為有環保上的要求，必須根據法規要求定期進行檢測，也有統一的檢測標準。因此，大部分的用戶在無強制要求與檢測標準的情況下都忽略了。事實上空壓機的檢測最好每年配合歲修連同系統洩漏檢點一併執行。檢測時，可尋求國內較具規模的製造廠，依據ASME PTC9(適用正位移式空壓機)標準實施。至於離心式空壓機則可使用攜帶型插入式流量計與電力計做比較性的檢測。

除了空壓機本身的效率外，控制方式的優劣也有決定性的影響(參見3.3節說



明)。螺旋式空壓機的控制首重空車時數的管理，可藉由主副機連鎖與變頻控制技术加以管理，會有近30%的節能效益。而離心式空壓機最好能搭配螺旋式空壓機一起使用，讓離心式空壓機做為基載機(100%負載)，設法使進氣閥IGV全開BOV全關，至於變動性負荷方面，則由螺旋式空壓機負責。

管理學上常說「沒有數據，就不能管理」。空壓機的效率管理也一樣，為求最好的管理，安裝適當的流量計、露點計及SCADA遠端監控軟體也是必要的。

(六)空壓機的壓力損失管理

除了空壓機的能源效率之外，空壓機的內部壓力損失同樣對能源的消耗也有一定程度的影響。泛用的概念為每2psi的壓力損失將有1%的能源耗損。因此，如何管理並降低空壓機的內部壓力損失也是壓縮空氣節能中另一個重要的課題。

許多用戶甚至空壓機業者，在系統壓力過低時，到底是風量不足與/或壓降過大常常混淆不清。以水為例做說明，比如說我們住在管路末端的五樓，在停水期間雖然水泵浦正常運轉，還是抽不到水(水壓夠、水量不足)。復水後，因為管路前端瞬間用水量大，管路末端的我們還是必須等上一段時間後才会有水(水量夠、水壓不足)。風量不足可能是用量增加、可能是洩漏擴大、可能是效率降低所引起；壓降過大則可能是阻塞增大或洩漏變大等因素。兩者的肇因不同解決方案也不同，不可混為一談。分就三種常用空壓機的壓損原因說明如下：

往復式空壓機的壓損主要產生在活塞環的必要洩漏、空氣通過進排氣閥時的壓降、進氣過濾器、油水分離器、機油過濾器、內部管路、各壓縮段中間冷卻器及後部冷卻器等阻塞及/或洩漏的壓降等。

螺旋式空壓機的壓力損失包含進氣過濾器、油細分離器、機油過濾器、各壓縮段中間冷卻器及後部冷卻器等阻塞與進氣控制閥容調時的壓損，及因各壓縮段卻水器排水、空車洩載排放的洩漏，及內部管路阻塞或洩漏造成的壓力損失等。

離心式空壓機的壓力損失除上述螺旋式空壓機的壓損原因外還包含BOV排放的洩漏及渦輪葉片沾黏、損傷所造成的效率損失等。

空壓機的壓力損失管理綱要：

- (1)選擇空重車壓力範圍較小($\pm 0.5\text{bar}$ 內)的空壓機(傳統機械式壓力開關的空重車壓力範圍接近2bar，會造成多餘的電能損失)



- (2) 選擇全罩、預濾式箱體的空壓機，可以減少進氣過濾器及冷卻器阻塞的機會，延長進氣過濾器及冷卻器的壽命。
- (3) 裝置壓差計並有效監測進器過濾器的壓差，大於6吋水柱時應更換。
- (4) 有效監測空壓機內部壓損(油細分離器、機油過濾器及內部洩漏等)保持壓損經常小於0.5bar，適時更新。
- (5) 採取有效的控制，減少空車及BOV排氣的損失。
- (6) 選用無耗氣式自動卻水器，杜絕排放冷凝水時的壓縮空氣排氣。
- (7) 選用黏度較高的合成潤滑機油，可避免潤滑油碳化阻塞內部管路產生額外壓差，減少機件磨擦損失。

(七) 空壓機的保養、維護與管理

1. 空壓機的日常管理重點

- (1) 根據設備原廠的保養計畫表或操作手冊的規定時程，針對微油式空壓機的「三濾一油」在使用時數屆滿或壓差過高時，定期進行保養與維護。
- (2) 製作『日常點檢表』檢視並紀錄：空壓機各壓縮段的運轉壓力、進氣溫度、操作溫度、震動值等及三相電流、輸入電壓、潤滑油壓油溫、進氣過濾器壓差、機油過濾器壓差、油細分離器壓差、空重車時數及警告與停機訊息等(較佳的做法是利用監控紀錄軟體由電腦直接紀錄並做成即時與歷史運轉紀錄或曲線，便於分析與改善)。
- (3) 使用合成潤滑機油，可有效降低空壓機的排氣溫度增加容積效率，避免潤滑油碳化阻塞內部管路產生額外壓差，抑制潤滑油乳化與揮發減少潤滑油的補充量與污染，提高機體軸承的潤滑性延長轉子或渦輪葉片的壽命，亦可減少後端乾燥機及精密過濾器的負荷與阻塞機會。
- (4) 檢視並量測水冷式冷卻器的入出水壓差及水溫差，在水溫差 $> 10^{\circ}\text{C}$ 時，進行清洗或更換，檢視並量測氣冷式冷卻器的入出溫差，在溫差變化增大時，進行清洗或更換。
- (5) 油封、油管、控制管路洩漏及傳動皮帶緊度的點檢與調整。



(6) 空壓機主馬達的殼溫、軸承潤滑、散熱、電源線溫的點檢。

(7) 定期檢視冷凝水的含油量及酸鹼值。

(8) 各冷凝水排放口的排放檢查及洩漏管制。

2. 空壓機的年度管理重點

(1) 螺旋式空壓機：包括機體震動、軸承頻譜及馬達絕緣值的量測、馬達軸承施打黃油、皮帶表面檢查、冷卻器清理、安全閥試動作。

(2) 往復式空壓機：除上述螺旋式空壓機的檢查項目外，還包含進排氣閥積碳清理及閥片檢查、活塞環及刮油環磨損檢查，及壓力表、溫度表、壓差計、電流表、壓力開關等的校正與維修。

(3) 離心式空壓機：除上述螺旋式空壓機的檢查項目外，還包含IGV及BOV閥門調整、渦輪葉片的檢查與平衡校正等。

3. 壓縮空氣系統的年度管理重點

(1) 量測系統總壓差，找出壓損發生的原因，改正之。

(2) 進行空壓機的效能檢測，再根據檢測結果，進行開機順序的調整及必要的汰換工作。

(3) 按照洩漏防治步驟(見後續4.3節)，進行洩漏管理。

(4) 量測系統淨化後端的塵粒大小、壓力露點及含油量是否符合壓縮空氣系統的品質要求。

(5) 設備配置錯誤或不當用氣的改正，進行操作人員的訓練。

(6) 檢討「空車比例」、「壓縮空氣品質(見1.4節)」、「不當用氣點(見5.2節)」、「過壓使用」、「Blow-Off比例」等，進行合理化管理。

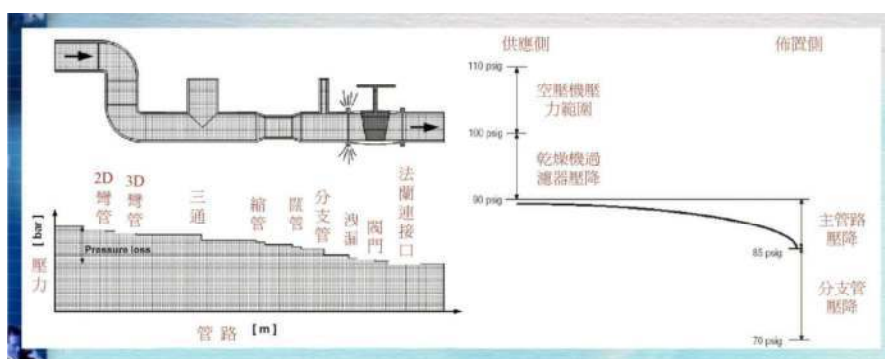
空壓機房基於保養、維修及入風要求，必須保有一定的保修空間。一般而言，空壓機的四面最好與牆面保持90CM的距離；100hp以上大型空壓機機房，則應備有吊車方便機體、馬達、油氣桶、冷卻器等吊裝。



四

佈置側節能技術探討

(一) 壓縮空氣管路壓力降管理



壓空管路的壓力降來源

壓縮空氣系統的管路壓力降來源包含空壓機本身空車到重車的壓力範圍(一般壓力開關控制約 $2\sim 3\text{ kg/cm}^2\text{G}$ ，壓力感測器控制約 $0.5\sim 1\text{ kg/cm}^2\text{G}$ ，變頻控制約 $0.1\sim 0.3\text{ kg/cm}^2\text{G}$)，冷凍式及吸附式乾燥機本身的必要壓差，精密過濾器組等附屬設備的必要壓差；管路中直管、彎管、三通、縮管、擴管、分支管、連接管、閥件等的壓損；整個管路系統中洩漏所造成的壓力降及經過後端三點組合、調壓閥的壓差等等。若不能有效管理此等壓力降，就必須以提高空壓機的排氣壓力來彌補。而每調高空壓機的排氣壓力 1.0 bar 將導致 6% 的電力及 8% 的排氣損失，以一台 100 hp 空壓機而言，每年運轉 $8,000$ 小時，將導致近 $100,000$ 元的電費損失。

壓力降管理要點：

- (1) 慎選初始壓差值較小的乾燥機(0.3 bar 內)與精密過濾器(0.2 bar 內)等空壓附屬設備，適時($>0.7\text{ bar}$)加以更換。



- (2) 根據壓縮空氣管路佈置綱要(見2.5-3說明)規劃環狀管路系統。
- (3) 設定管路壓差目標，總壓差值 $<$ 空壓機排氣壓力的10%。
- (4) 按管路壓差目標計算管徑大小並選用摩擦係數小的管路材質。
- (5) 採用壓差值較小的三點組合、調壓閥、管路閥件(如閘閥、球閥)及彎曲半徑大的彎管。
- (6) 必要的三通接管處儘可能使用同一管徑，並順壓縮空氣的流動方向以“y”型入管。
- (7) 採用空重車壓力控制範圍窄(變頻、壓力感測器)的空壓機。儘可能接近系統最低需求壓力，來設定空壓機的排氣壓力。
- (8) 選用適當尺寸大小及初始壓力差值較低的過濾器與注油器等，定期檢視並在壓差值變大時(超過7psi)，隨即更換。
- (9) 儘可能縮減壓縮空氣管路長度，並定期進行洩漏防治。
- (10) 單一高壓需求點，可另設增壓機或以獨立的壓縮空氣系統供應。

要避免不必要的壓力降損失並不需要巨額的投資，簡易的管理，合宜的控制與調整就可以完成，節能率可達10~15%，平均節能回收年限1.3年。

(二)壓縮空氣管路的合理化佈置

在大能源用戶能源查核過程中發現，近9成的用戶對壓縮空氣洩漏防治感到頭疼，近5成的用戶其壓縮空氣系統管路佈置不當，所造成的能源損失往往超過壓縮空氣系統總能源費用的35%(每100馬力壓縮空氣系統的損失接近40萬台幣)。其中管路佈置若在規劃或一開始施工時，未能有良好的配置，日後一旦洩漏、腐蝕或壓降產生，除非重新配管，幾乎無計可施。

壓縮空氣管路的佈置要點如下：

- (1) 主幹管必須採用環狀管路佈置，並依管路壓降目標計算管徑大小。整個主幹管管路的管徑也應一致，並在適當的位置裝設球閥或閘閥及壓力表或壓力偵測孔，以利日後洩漏防治及壓降管理。為方便管路卻水，主幹管管路應有1/100的斜度或採用上升管路，並在管路低點安裝卻水管及無耗氣式卻水器。



- (2) 分支管除依管路壓降目標計算管徑大小外，也應在適當的位置裝設球閥或閘閥及壓力表或壓力偵測孔。
- (3) 連接管最小使用1/2"管徑，壓降可降到最低。並在管路低點安裝卻水管、球閥及無耗氣式卻水器。
- (4) 用氣設備的接管最好為硬管或高壓軟管，避免使用伸縮軟管。接合處應使用「雙密封低壓降快速接頭」可有效減少洩漏發生及壓降損失。
- (5) 用氣端之前應裝有調壓閥，一則穩定供氣壓力，一則可避免過壓使用，可同時減少過壓損失及設備磨損。
- (6) 依不同的壓縮空氣品質要求及操作溫度，選用適當的管路材質，並應留意管路摩擦係數對壓降的影響。
- (7) 壓縮空氣管路最好採用明管配管，除非萬不得已，避免埋設地下管路(容易腐蝕並增加洩漏檢修的困難)。
- (8) 可行的話，每個樓層的壓縮空氣管路高度盡量不超過2米高，可縮短管路長度，減低壓降，方便卻水、維修與檢漏。
- (9) 寒帶地區的壓縮空氣管路通過室外時，應注意保溫以免管路內部冷凝水結冰，阻塞管路。
- (10) 高、中、低壓管路系統最好使用電動閥門連接，除可作為緊急供氣連通外；若壓力感測器與電動閥門能有效配合時，可將較高壓系統多餘的壓縮空氣導入較低壓的系統內，對壓縮空氣節能有意想不到的大功效。

(三) 壓縮空氣管路的洩漏防治

幾乎每一個工廠的壓縮空氣管路都有洩漏，也都知道應該要檢漏與防漏。只是一提到管路洩漏檢修，往往一個頭兩個大，不知該從何下手。

大型工廠(如鋼鐵、化工、造紙等)的壓縮空氣管路通常為戶外高架的型態，直徑由6~30英吋不等，長度可以綿延數千到數萬公尺。談檢漏與防漏真是曠日費時、難上加難。

中大型工廠(如紡織、電子、食品等)的壓縮空氣管路通常為室內高架的型態，直徑由3~10英吋不等，長度約數百到數千公尺。管路錯綜複雜，支管繁複，雖不



若大型工廠困難，然而要真正執行檢漏與防漏也不容易。

小型工廠(如金屬、機械、製藥等)的壓縮空氣管路通常為室內中高架的型態，直徑由2~5英吋不等，長度約數十到數百公尺。管路曲折，支管繁複，加上缺乏洩漏防治管理與管路佈置圖，洩漏處處的情形，屢見不鮮。

其實洩漏防治，只要掌握洩漏防治步驟，每個人都了解，都能做。

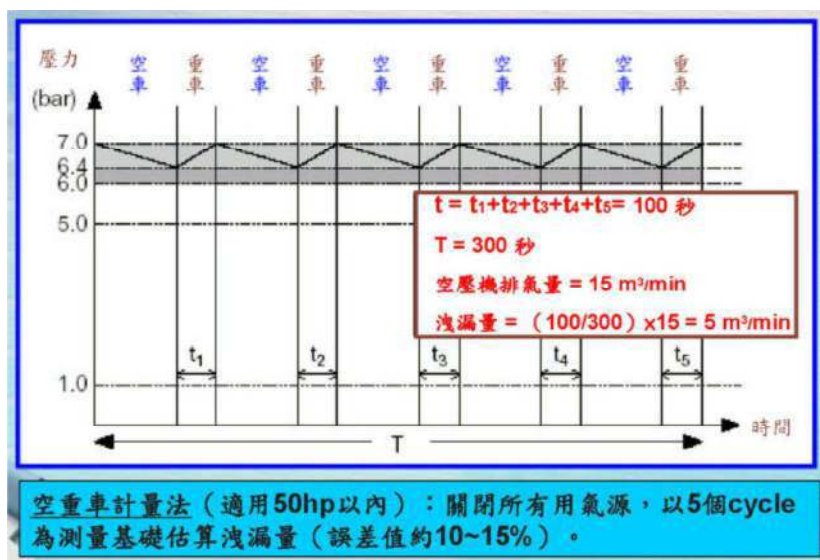
1. 主要洩漏點

壓縮空氣管路的主要洩漏點包含管接頭、法蘭接合面、空氣桶上安全閥、關斷閥、快速接頭、氣動工具本身及軟管等。

2. 壓縮空氣管路的洩漏防治步驟

(1) 『定量』－ 估算洩漏量。

- (a) 大型工廠及中大型工廠應該在管路上適當位置裝設關斷閥、壓力表及插入式或固定式流量計。利用關斷閥隔離出區塊，再分區段根據前後流量計的數據差來估算各個區段的洩漏量。
- (b) 小型工廠可利用「空重車計量法」或管路前後壓力差來估算各個區段的洩漏量。





(2) 『偵測』－ 找出洩漏點。

針對洩漏量較大的區段，利用「超音波探漏計」、「肥皂泡沫」等方式找出洩漏點。

(3) 『定位』－ 標示洩漏點。

簡易洩漏點可立即檢修。不易處理洩漏點，以貼標籤或噴漆方式標示。

(4) 『處理』－ 檢修與驗證。

根據下述「壓縮空氣管路的洩漏檢修要點」處理。

(5) 『預防』－ 持續改善。

成立壓縮空氣系統查漏小組，依據『定量』=>『偵測』=>『定位』=>『處理』的管理循環，列入ISO 9000品質管理系統程序中，每月定期持續進行改善。



使用端節能技術探討



(一)決定使用者需求與負載曲線

傳統上，決定壓縮空氣系統需求的方式，不外乎下列三種途徑：

1. 委託空壓機販賣商免費規劃

空壓機販賣商基於自身利益的考量及對壓縮空氣系統的認知的不足(只專注於空壓機本身)。或拷貝他廠經驗，或道聽塗說，或為節省成本，或競爭搶單的結果。免費規劃的系統，經常造成系統壓降過大、合理化洩漏、空車過多、低耗能比值、壓縮空氣品質過高或過低及過壓使用等耗能現象。

2. 委託工程公司整廠規劃

由優質的工程公司進行整廠壓縮空氣系統規劃是比較好的選擇。缺點是國內專業的壓縮空氣系統工程顧問公司並不多見，通常會將壓縮空氣系統與其他工程合併規劃(如空調工程、水電工程等)結果是工程顧問公司，將廠內公用單位自行彙整的資料或規格，轉交由空壓機販賣商來選配與規劃；耗能現象還是難以避免。

3. 廠內公用單位自行彙整

使用單位及公用單位人員為確保不出問題，通常都會提出最尖峰負荷、最高的壓力與最佳的品質要求，當作系統規劃的標準。疊床架屋的結果，形成過壓使用、容量過大、空車過多、壓縮空氣品質過高等現象。

正確的決定使用者需求：

其實只要按照「典型壓縮空氣使用者壓力與用量需求規劃表」分別針對「壓縮空氣用途」、「使用壓力」、「需求風量」、「平均使用量」、「尖峰使用量」與「品質要求」等參數，進行使用者調查，填入表中，計算出尖峰與平均總用氣量。再乘上20%的洩漏預估及10~30%的擴充欲度考量，就可以得到尖峰與平均總規劃量。



典型壓縮空氣系統使用者壓力與用量需求規劃表										
使用點	用氣設備	需求壓力 PsiG	需求風量 SCFM	平均使用率 %	尖峰使用率 %	平均用氣量 SCFM	尖峰用氣量 SCFM	露點要求 ℃	線壓力 PsiG	備註
Pa1	空氣馬達	90	20	25	20	5	6	20	95	
Pa2	空氣噴槍	80	5	50	20	2.5	3	5	95	
Pa3	氣動砂輪	90	20	30	15	3	3.45	20	93	
Pa4	氣壓缸	90	30	75	10	22.5	24.75	5	92	
Pa5	氣動泵	90	15	25	0	3.75	3.75	5	85	
Pa6	儀表用氣	60	25	15	30	3.75	4.88	-20	93	
Pa7	掛絲用氣	150	30	100	0	30	30	5	93	
Pa8	一般清潔用	90	20	30	20	6	7.2	20	95	
Pa9	產品清潔用	80	30	50	20	15	23	-20	90	
						總使用量	91.5	106.03		
						洩漏預估	18.3	21.2	【洩漏預估 20%】	
						欲度考量	9.15	10.6	【欲度考量 10%】	
						總規劃量	118.95	137.83		

當無法取得各用氣端的實際耗氣量數值時，就只能根據過去的經驗或一般設備耗氣量標準加以估算；為免過度估算，可以70%的估算值當做平均總用氣量，以100%的估算值當做尖峰總用氣量。然後，將尖端總規劃量除以3，來選用3台具「主副機多機連鎖控制」功能的空壓機；最後，再搭選另1台同樣容量大小的空壓機當備機。如此一來，既可有效因應不同時間點的風量需求，又可將總空車時數降到最低；同時可使初期備機投資金額減到最少。未來產量增加時，又可逐台逐台增購併入連鎖，一舉數得。另外，在建構壓縮空氣系統的同時，若能一併選用「遠端監控系統」利用其所提供的即時與歷史運轉紀錄功能，作成耗氣量與負載曲線，對耗能分析與節能改善措施釐定，會有非常大的助益。

(二)杜絕不當與錯誤的壓縮空氣使用

在工廠的用氣端，經常可發現以下幾類不當與錯誤的壓縮空氣使用問題，工廠中高層管理者必須特別注意，明文規範禁止或採用其他相對省能的替代方案。

1.未調壓的壓縮空氣使用端

未調壓的壓縮空氣使用，除了會增加壓縮空氣的使用量及無謂的能源耗用外，同時也會增加工具與設備的磨損率。建議每一個用氣端都應裝置調壓閥。

2.未能及時拆除或隔離壞廢與停用設備

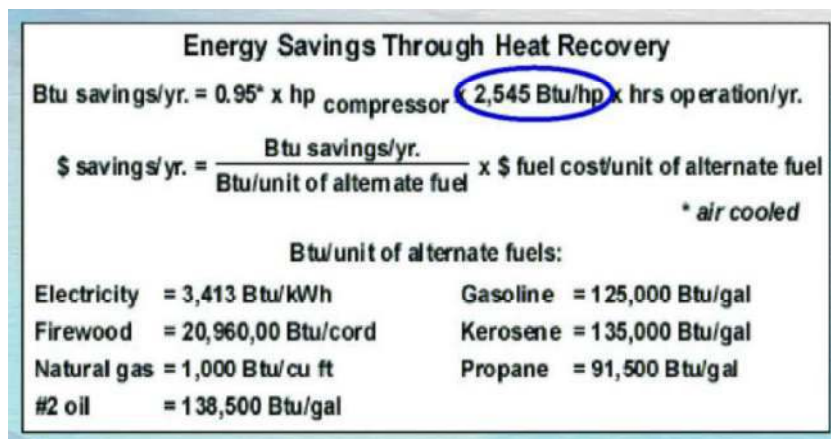
由於同一壓力的管路系統一般都互相連通，壓縮空氣自然會沿著連通的管路回流到壞廢與停用設備，經常造成額外的壓縮空氣流失。又不易發覺。



3. 錯誤的壓縮空氣使用(壓縮空氣的能源轉換效率僅25%)

較常見的有：個人清潔、吹洩乾燥、吹洩清潔、製程冷卻、產生渦流、產生真空、氣動攪拌、氣動填料、氣動粉碎、電器箱的冷卻、驅動氣動馬達和驅動氣動泵浦等。事實上，在無電氣安全顧慮及需求壓力不高的情況下，改用低壓鼓風機、電動真空泵浦、電風扇、電動攪拌機、電動馬達及其他電動設備或電動工具等替代壓縮空氣使用，其能源效率通常高出使用壓縮空氣達數倍之多。

(三) 廢熱與廢冷凝水回收



壓空系統廢熱回收效益

空氣經過空氣壓縮機壓縮後，會產生相當可觀的壓縮熱，而絕大多數的壓縮熱可簡易進行回收，回收的效益可參考上表簡單估算。

空氣壓縮機的廢熱與廢氣回收方式：

1. 水冷螺旋式空壓機廢熱回收

透過加裝適當的熱交換器，可簡易進行

- (1) 製程用水的加熱。
- (2) 鍋爐熱水的預熱。



(3)熱泵用水預熱。

(4)空氣加熱。

2.氣冷螺旋式空壓機廢熱回收

只要安裝正確的排氣導風管與簡單的過濾。冬季時，將空壓機的廢熱導入工廠進行空間預熱，可以省下可觀的空調費用。

3.氣冷螺旋式空壓機廢氣回收

在排氣風扇後端加裝風力發電機，也可以產生一定的電力，作為低階的用電。

4.空壓機廢水回收

將空壓機各段的冷凝水經過油水分離後，集中回收，可作為冷卻水塔或其他製程的補充水。



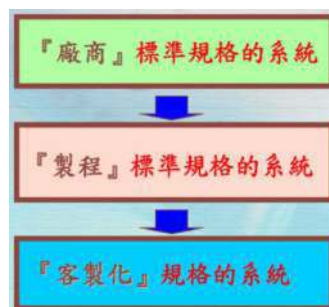
六

壓縮空氣解決方案



(一) 壓縮空氣系統需求的演變

壓縮空氣系統需求的演變，由1960年代，完全依照廠商標準；演化到1980年代，相互拷貝的製程標準；2000年起逐漸進化到量身訂做的客製化標準。隨著進口與國產空壓機品質差距的縮短，用戶開始由只關心「乾淨、乾燥、穩壓、耐用」的需求，提升到對壓縮空氣節能的覺醒。「節能」已經成為未來建構壓縮空氣系統最為重要的關鍵因素。說明如下：



1. 「廠商」標準規格的壓縮空氣系統使用狀況

廠牌少，沒得選擇。只能使用廠商設計的標準壓力、標準品質與規格化的系統流程，來選用及構建壓縮空氣系統。

運轉結果：過高及不穩定的排氣壓力，過高的系統壓降，過高或過低的空氣品質(塵、水、油)。造成系統既不穩定又耗能。

2. 「製程」標準規格的系統使用狀況

廠牌多，特點亦多，不知如何選擇。只好參考或拷貝其他同業的標準與需求來設定壓力、品質及系統流程，選用及構建壓縮空氣系統。這個階段最常聽到的一句話就是「您有沒有相關同業的使用實績？」。事實上，壓縮空氣系統與水、電一樣，皆屬公用系統，基本上與行業別並不相關。

運轉結果：為求「乾淨、乾燥、穩壓、耐用」的需求。仿造同業領導廠商的標準，過高的容量、壓力與品質處處可見，因而造成相當多無謂的洩漏與假性需求，也降低了自身的成本競爭力。



3. 「客製化」規格的系統

所謂「客製化」就是根據每個工廠不同的製程需要與環境條件進行量身打造工程。常見的措施有：高低壓分流、多機連鎖、變頻控制、環狀管路、遠端監控、無耗氣式卻水器、穩壓氣桶、排氣導管、進氣溫度管制、壓降管理、洩漏防治及可隨時根據不同的用量需求自動調整的控制系統等。可達到穩定的壓力、合理的系統壓降與適當的空氣品質，既穩定又節能。

要達到客製化的最佳系統，在新建廠時，應該尋找有真正空壓機設計、研發及壓縮空氣系統節能專業的廠商或工程公司共同討論，範圍應該包括：品質、壓力與容量的設定、空壓機及淨化設備的選擇、單機與多機的節能控制模式、機房的佈置、管路與管徑的設計、洩漏與壓降防治措施、將來效能檢測的方法、耗能的量測等。至於舊系統的改善，就必須尋求有經驗的節能專家或團隊進行系統「節能診斷」，找出不當耗能點，逐一改善。

(二) 壓縮空氣系統的解決方案

1. 供應側(Supply Side)

- (1) 環境：一次與二次電源，進氣環境條件，機房通風與散熱條件。
- (2) 空壓機：吐出壓力、進氣閥開度與壓差、排卸閥開度、壓縮機能源效率、空重車比例、台數與馬力數等。
- (3) 穩壓縮空氣氣桶的大小與卻水器的形式與洩氣比例
- (4) 乾燥機的壓力露點、台數、處理量與卻水器的形式與洩氣比例。
- (5) 精密過濾器的精度、壓差、規格與卻水器的形式與洩氣比例
- (6) 供應側的管路佈置與大小。
- (7) 空壓機控制與監視方式。
- (8) 冷卻水出入口溫差。
- (9) 壓縮空氣出口的含油量與含水量。
- (10) 廢熱、廢水、廢氣能源回收。



2. 佈置側(Distribution Side)

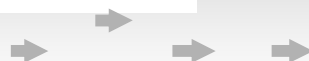
- (1) 管路的材質、壓差、洩漏點、管路閥形式、佈置型式與管徑大小。
- (2) 支管的材質、壓差、洩漏點、管路閥形式、佈置型式、快速接頭、延伸管與管徑大小。
- (3) 儲氣桶容量大小。
- (4) 調壓閥的壓力調整範圍。
- (5) 末端壓力與含油含水量與實際需求的差異。

3. 用氣端(Demand Side)

- (1) 各個使用點的最高與最低壓力。
- (2) 各個使用點的含油量與含水量。
- (3) 各個使用點的尖端最大用氣量、平均用氣量與最低用氣量。
- (4) 機台洩漏點的防治。
- (5) 不當用氣點的改善。
- (6) 尋找用氣替代方案。



結 論



高效率的壓縮空氣系統是一項十分專業的氣壓技術和工程範疇。而一般使用者因缺乏正確的使用觀念與管理數據，往往只在乎初期購置金額的多寡，任由業者不當配置及無效率地濫用，鮮少注重節能效益，坐失改善良機，導致大量的能源浪費而不自知，至為可惜。

35%的壓縮空氣耗能改善並不需要巨額的投資；50% 的壓縮空氣耗能改善兩年內就可回收。在全球油價不斷攀升及能源日益短缺的情形下，電費不斷調漲是必然的趨勢。因此，用戶該如何提昇用電品質與規劃高效率的壓縮空氣節能系統，已成為現階段刻不容緩的要務。希望本文能喚起所有參與工廠佈置與規劃的廠務工程師、建廠工程師及工程規劃人員，重視壓縮空氣系統的節能改善工作，積極投入規劃與建構高效率的壓縮空氣系統。貢獻己力來強化企業競爭能力，確保企業的最大效益。





經濟部能源局
BUREAU OF ENERGY, MOEA

<http://www.moeaboe.gov.tw>



工業技術研究院
Industrial Technology
Research Institute

能源資訊網

<http://emis.erl.itri.org.tw>

經濟部能源局廣告品