

# 變頻控制應用於螺旋式壓縮空氣系統之節能探討

國立臺北科技大學 李文興

本研究是以實驗方式，探討一個多台定頻空壓機並聯運轉之壓縮空氣系統中，在一台定頻壓縮機增設變頻器控制排氣量，結合壓縮空氣負載管理監控系統，控制定頻空壓機運轉台數，提供穩定壓力之壓縮空氣，並達到節約能源之效益。

## 壹、前言

空壓機普遍應用於各產業中，提供自動化生產所需之壓縮空氣足夠的供氣壓力，是生產流程順暢之要素，瞬間的壓降，即會影響產品品質。因此，供氣壓力的足夠是廠務人員首要的責任與希望；為了避免壓力不足而影響生產，一般而言會多開 1-2 台空壓機，以傳統的部分負載控制模式運轉，應付使用端需求的變化，但多開的空壓機長時間運轉在部分負載，造成系統運轉效率不佳。

傳統的螺旋式空壓機為定頻運轉，普遍採用加卸載或容調閥控制排氣量，空壓機在部份負載運轉時，加卸載控制模式之供氣壓力有劇烈變動之現象，容調閥控制雖可減緩壓力變動之功能，卻是降低運轉效率換取壓力平穩。變頻控制馬達轉速之節能方式，近幾年來在轉動設備(泵浦、送風機)中應用相當普遍；但變頻控制或直流馬達變速的空壓機，直至近一、兩年才普遍開發上市。由文獻或廠商型錄中可以得知，變頻(變速)空壓機在部分負載的耗電量比傳統的負載控制模式低，但新購置整台空壓機的投資費用高，國內使用者並不多。

本研究結果顯示，定頻空壓機增設變頻器控制排氣量，控制容量在 40%-100% 間，可以得到近似於線性變化的排氣量，部分容量的效率與滿載之效率相差不多。由此證明，既設之定頻空壓機可以增設變頻器控制排氣量，在該空壓機的 40%-100% 容量範圍，得到供氣壓力穩定且節能之效益。以排氣量 50% 之耗電比互相比較，容調、加卸載及變頻控制的耗電比例分別為 78.1%、63.7% 及 53.9%，變頻控制相對於容調、加卸載的節電效益分別為 24.2% 及 9.8%。惟空壓機增設變頻器前，需檢測該空壓機的性能曲線(排氣量、耗電量)，從性能曲線中研判壓縮轉子的間隙，間隙過大的空壓機，轉數降低後的空氣洩漏量增大，變頻後的效率不佳，變頻節能的效益無法顯現。變頻器的耗電量約為額定馬力之 4-5%，由實驗數據顯示，對於平均負載率在 85% 以上的空壓機，其節能效益不多，但可以提供系統穩定的供氣壓力。

單機變頻控制節能效益，對於系統整體的效益僅佔一小部分；考量改善投資成本及空壓機運轉效率，並聯運轉的壓縮空氣系統僅增設 1-2 台變頻控制的空壓機，搭配定頻空壓機滿載運轉，可得到穩壓及高效率的運轉模式。對於運轉中的壓縮空氣系統，掛錶取得日負載運轉資料，計算用氣量及壓力的需求，以模擬計算程式，模擬增設變頻控制及負載管理監控後，空壓機的加減機頻率，評估系統

壓力變動範圍及節能效益。評估結果可做為投資改善之參考數據，同時也可模擬系統未來實際改善的最佳化運轉控制模式。

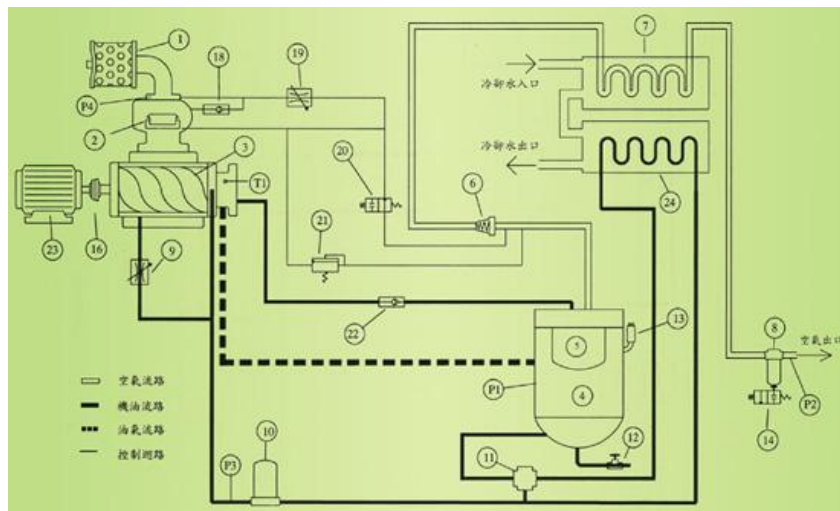
## 貳、壓縮空氣系統傳統控制模式探討

### (一)定頻單機容量控制模式

#### 1. 加卸載控制模式：

通常以壓力電磁開關或微電腦控制器，設定卸載壓力及壓差，以壓力感知器偵測排氣壓力，當排氣壓力達到卸載設定壓力值，洩放閥打開，停止對系統供氣，壓縮後排氣旁通回進氣口，同時進氣閥關至最小，維持壓縮機轉子空轉所需之空氣量(請參閱圖 1)。

卸載後之儲氣桶壓力，降低至潤滑冷卻油噴入轉子所需之壓力(通常為 1.8-2.7kg/cm<sup>2</sup>)。當卸載後壓降超過壓差設定值，洩放閥關閉，進氣閥全開，恢復全量供氣，供氣狀態為全量(加載)或零供氣(卸載)反覆變動。加卸載之最小壓差通常為 1kg/cm<sup>2</sup>以上，供氣壓力因加卸載而震盪不穩定。空壓機加卸載控制的性能曲線圖如圖 2 所示，排氣量不隨壓力上升而大幅降低，耗電量則隨壓力上升而增加，效率(cfm/hp)呈近似線性下降。



NO.	名稱	NO.	名稱
1	進氣過濾器	16	皮帶或聯軸器
2	進氣閥	17	馬達皮帶輪
3	壓縮機體	18	止回閥
4	油氣分離桶	19	節流閥
5	油氣分離器	20	洩放電磁閥(N.O.)
6	壓力維持閥	21	比例閥
7	後部冷卻器	22	回油止回閥
8	水分離器	23	壓縮機馬達
9	油流量調節閥	24	油冷卻器
10	油過濾器	T1	排氣溫度感測器
11	熱控閥	P1	排氣壓力感測器
12	洩油閥	P2	系統壓力感測器
13	安全閥	P3	油過濾器壓力感測器
14	洩水電磁閥(N.C.)	P4	進氣過濾器壓力感測器
15	機體皮帶輪		

圖 1. 空壓機內部流程圖

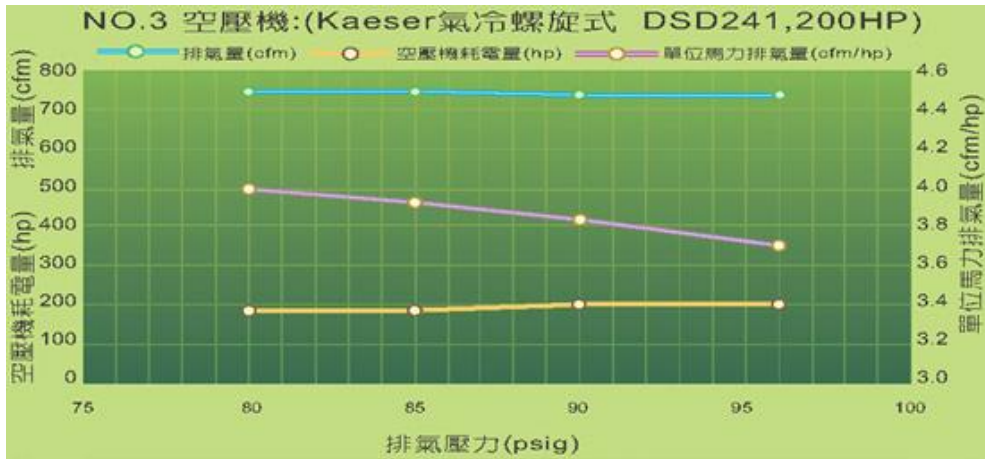


圖 2. 空壓機加卸載控制之性能曲線圖

### 2. 進氣節流控制模式(容調控制)：

在加卸載壓力區間內，以比例閥控制進氣閥開度，壓力超過容調啟動設定值時，進氣閥隨排氣壓力上升比例而關小進氣閥開度，調節空壓機排氣量，故排氣量隨壓力增加而減少，達到壓力變動和緩之目的。進氣閥(一般為蝶閥或氣缸閘閥)開度減少，壓縮機進氣壓力降低，壓縮比增加，壓縮行程中的洩漏量增加，空壓機的效率當然會下降。由圖 3 之空壓機容調控制之曲線圖可以觀察出，當壓力超過某一壓力值時，排氣量大幅下降，耗電量雖有減少，但降幅不如排氣量，空壓機的效率也急速降低，長時間運轉於此壓力，壓力雖然變動較為緩和，但運轉效率明顯不佳。

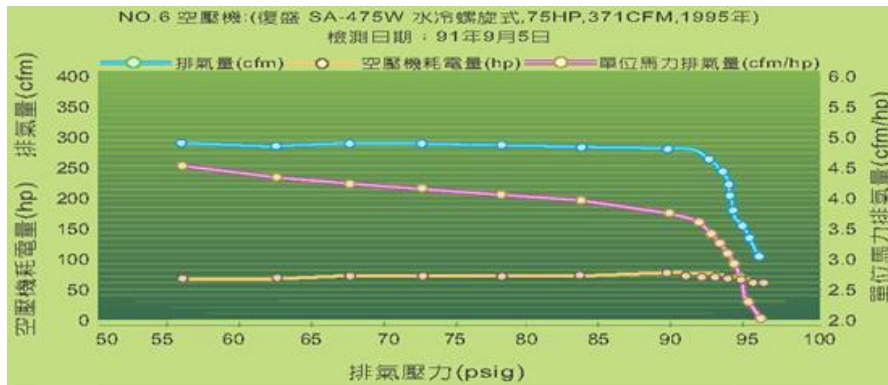


圖 3. 空壓機容調控制之性能曲線圖

### 3. 進氣迴流控制模式：

壓縮機轉子出口端，設有渦型控制閥，當壓力上升，藉由壓縮行程之改變，能迅速反應現場用氣情形，降低壓縮機組及馬達負荷。此項控制模式，類似冷媒螺旋式壓縮機的進氣滑塊設計，由旁通口進入渦型閥迴流至進氣口，達到調節排氣之功能。該項控制模式並未對進氣做節流，因此並無容調控制之壓縮比提高而增加耗電量的問題。惟該項控制模式在空壓機使用並不普遍，僅有部分大型空壓機列入選配的控制模式。其構造圖及壓縮行程示意圖如圖 4 及圖 5 所示，與容調控制、容調及加卸載並用控制與理想控制模式之耗功比較圖如圖 6 所示，由圖中顯示：在部分負載時的耗功率最低。

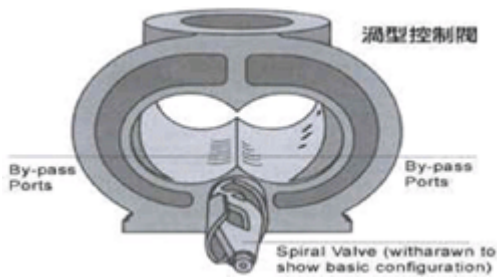


圖 4. 進氣迴流控制模式之轉子構造圖

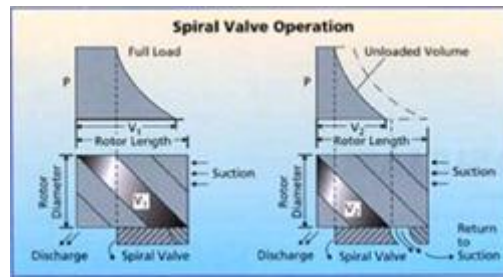
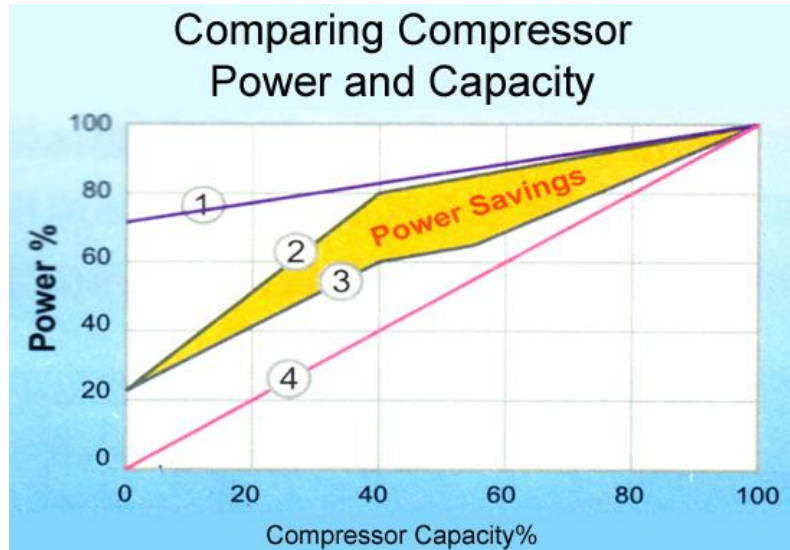


圖 5. 進氣迴流控制模式之壓縮行程示意圖



1. Suction Throttling Without Tank Blowdown at No Load
2. Suction Throttling With Tank Blowdown at No Load
3. Spiral Valve Controlled Compressor
4. Ideal Compressor

圖 6. 進氣迴流控制模式之耗功比較圖

## (二)系統並聯運轉控制模式

### 1. 卸載時間過久，空壓機自動停機：

該項控制設備為空壓機單機附屬設備，無需增加其他控制設備，直接在空壓機設定卸載停機時間，卸載時間超過設定值即可自動關機。此項控制方式雖為簡便，但需每台設定壓力及時間，設定不當時，無法發揮節省卸載耗電之功能，較不適合應用於系統整體控制。

### 2. 壓力開關控制加減機模式：

在空壓機中加裝壓力開關控制器，控制空壓機在壓力區間內開關，以系統壓力控制並聯運轉中空壓機之加減機，主要以避免瞬間壓力不足時，能即時起動空壓機為目的，在用氣量少而系統壓力升高時，亦可以減機節省卸載耗電，其加減機示意圖如圖 7 所示。

此種控制模式，需要配合各空壓機的加卸載壓力設定，控制調整較困難；某一兩台空壓機開關機較頻繁，容易損壞空壓機。以圖 7 之加減機順序為例，2 號空



壓機開關機較其它空壓機開關頻繁，尤其在壓力變動劇烈的時段，開關機更頻繁，容易損壞。為避免加減機頻繁，通常選定 1-2 台空壓機在加減機設定壓力區間內，以加卸載方式調節供氣量。

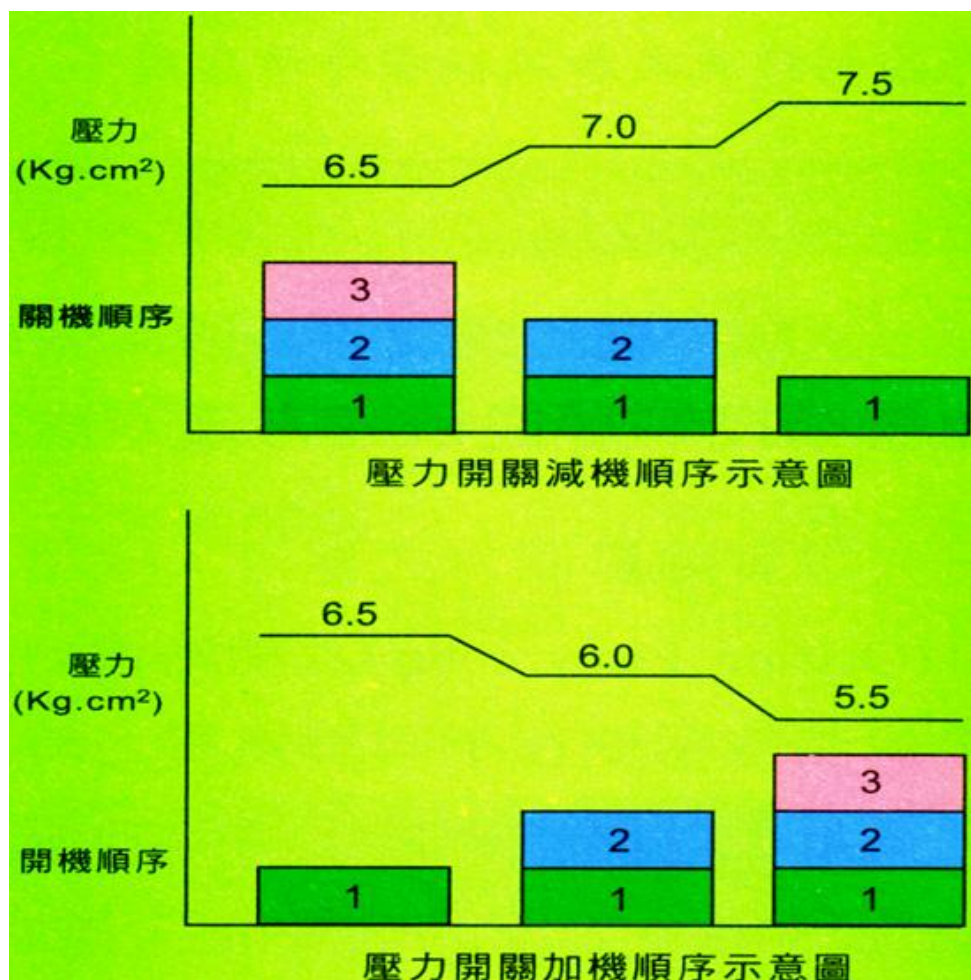


圖 7. 壓力開關控制模式之加減機順序示意圖

### 3. 順序控制加減機模式：

針對壓力開關控制模式之某特定空壓機開關頻繁的缺點改良，以輪流順序方式控制空壓機加減機；即先停機者在壓力不足時優先開機運轉，其控制模式如圖 8 所示，壓力太高時的減機順序為 1→2→3，壓力不足時的加機順序為 4→1→2。此種控制模式為目前各空壓機廠商常用之控制模式，缺點為各空壓機需同一廠牌，且馬力數需相同或相近，方能整體監控系統操作。



圖 8. 順序控制模式之加減機順序示意圖