



使用孔口流量計進行工廠空壓機系統性能之量測案例研究

The plant air compressor system performance measurement case study by using orifice flow meter

盧江溪

工研院機械所
新興能源機械技術組
能源機械系統工程部

沈宗福

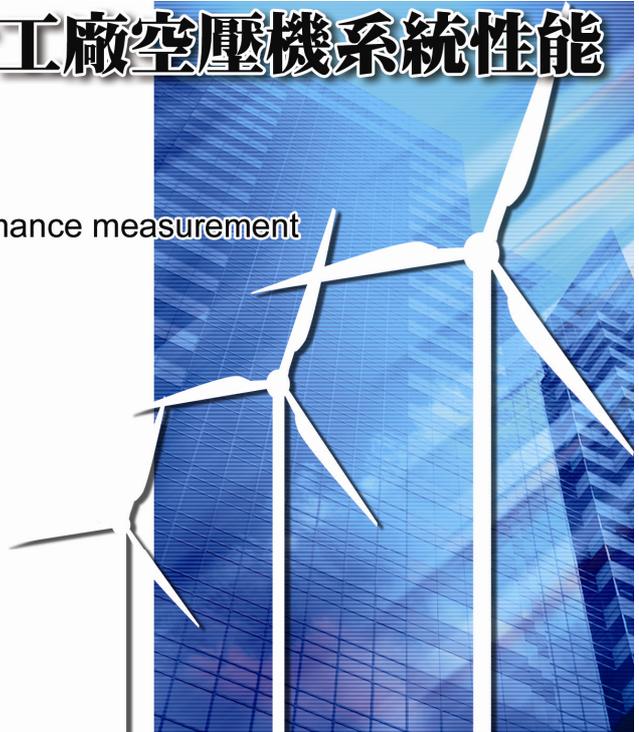
工研院機械所
新興能源機械技術組
能源機械系統工程部

吳江龍

工研院機械所
新興能源機械技術組
能源機械系統工程部

詹瑞麟

工研院機械所
新興能源機械技術組
能源機械系統工程部



關鍵詞

- 空壓機 Air compressor
- 量測 Measure
- 孔口流量計 Orifice flow meter
- 洩漏 Leakage

摘要

工廠空壓機流量量測方法有許多種，本文主要介紹孔口流量計的優缺點、使用方法及案例。此外，防止洩漏也是非常重要，一般工廠空壓洩漏介於10~30%之間，合理洩漏量應在10%以下，洩漏愈多浪費愈多，孔口流量計也可以應用在量測工廠的壓縮空氣洩漏量。

There are many kinds of measurement methods for factory compressed air flow. This article describes

the advantages and disadvantages of the orifice flow meter, methodology and case. In addition, to prevent leakage is also very important, General factory compressed air leakage between 10~30%, the leakage rate should be below 10% normally, the orifice flow meters can also be applied in measuring the leakage rate of compressed air at plants.

概論

壓縮空氣可說是僅次於電力的普及能源之一，空壓機提供壓縮空氣，普遍應用於生活中，如輪胎打氣等，更應用於工業中，幾乎任何工廠都需要空壓機提供壓縮空氣以應付工廠所需，如氣動工具與製程設備等。

空氣取之於大氣，似乎取之不絕用之不盡，然而，將空氣壓縮成所需壓力之壓縮空氣，所需動力卻是昂貴的。使用空壓機提供壓縮空氣需要電力，



電力價格一直上漲，反應到壓縮空氣成本也隨著上漲！提高壓縮空氣使用效率，降低空壓機耗能，達到節約能源降低成本，是工廠節能減碳一大課題。

提高壓縮空氣使用效率主要有幾個方法：選擇合適空壓機、提高空壓機運轉效率、節省空車運轉時間、使用高效率馬達、熱回收、系統壓降最小化、防止洩漏等。其中提高空壓機運轉效率方法必須知道空壓機的現況運轉效率與標準值比較。實驗室量測空壓機性能有標準(參考標準 CNS 3038 B7044、CNS 4485 B4021、CNS 10213 B7237)可遵行，對於工廠使用中的空壓機不適合以實驗室方法量測，此時可以現場使用三相電表與流量計量測，比較空壓機的單位耗能(kWh/m³)，即每產生 1 立方米壓縮空氣需要之耗電(kWh)值來決定，此值大，代表較耗電，此值小，代表較節能。

計算單位耗能需要得到空壓機全載輸入耗電與空壓機全載輸出氣量兩種數據，輸入耗電使用三相電表或電力計量測，輸出氣量使用流量計量測。將輸入耗電除以輸出氣量即得到單位耗能值(kWh/m³)。以壓力 7bar(100 psig)微油螺旋式 100hp

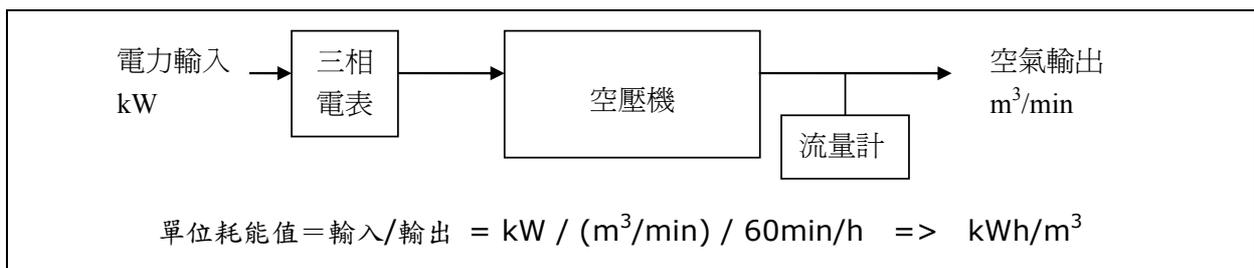
空壓機為例，新機合理值在 0.115 kWh/m³ 以下。

工廠使用中空壓機流量量測方法有許多種，本文主要介紹孔口流量計的優缺點、使用方法及案例。此外，防止洩漏也是非常重要，一般工廠空壓洩漏介於 10~30%之間，合理洩漏量應在 10%以下，洩漏愈多浪費愈多，孔口流量計也可以應用在量測工廠的壓縮空氣洩漏量。

空壓機流量量測種類

輸入耗電使用三相電表或電力計量測，一般三相電表有固定式數位式電表(圖一)、固定式類比式電表(圖二)，若待測空壓機前端沒裝專用電表，也可以使用攜帶式電力計量測(圖三)。

固定式數位式電表與類比式電表可以顯示累積功率必需安裝於每台機器，攜帶式電力計可以顯示電壓、電流、功因、功率與累積功率等功能並可以移動量測。



圖一 固定式數位式電表



圖二 固定式類比式電表



圖三 攜帶式電力計



流量計有適用於氣體、液體等不同種類，工廠壓縮空氣為氣體。工廠空壓機現場壓縮空氣流量量測方法常見有孔口流量計、熱線式質量流量計、差壓流量計等幾種方法。以下分別介紹：

孔口流量計

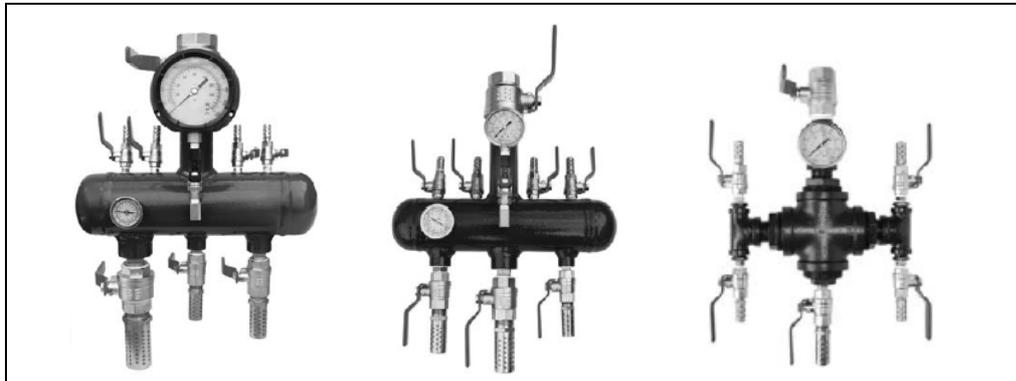
本文中孔口流量計以加拿大製造儀器 LP 孔口流量計為案例探討，依量測出氣量大小有不同型號，以型號 LP07 為例量測出氣量可達 1600 cfm(cubic feet per minute, 立方英尺/分)，型號 LP150 量測出氣量可達 800cfm，型號 LP50 量測出氣量可達 200cfm 等(圖四)[1]。

孔口流量計使用多個不同尺寸已知流量的孔口閥門來量測空壓機出風量。孔口流量計充當空壓機的負荷，通過打開已知的流量的孔口閥門，使壓縮空氣洩放至大氣。要測試時，先從系統隔離空壓機。打開孔口閥門以允許壓縮空氣通過已知精度的加工

孔，使壓縮空氣洩放至大氣，直到空壓機可以保持在選定的測試壓力。待壓力穩定之後，統計所有打開之孔口閥門氣量值，即可得到在特定壓力下之氣量，此值為 FAD 自由空氣量(Free Air Delivered)，量測值必需經過溫度、壓力修正，量測時同時紀錄流量計上之溫度表與壓力表，透過原廠提供之試算表取得修正後氣量。透過在各種不同壓力下測試，幾分鐘內即可得到空壓機的性能曲線。同時測量壓縮機輸入電源，可以得到空壓機完整的操作特性。空壓機性能建立之後，還可以量測系統洩漏量和工廠實際耗氣值。圖五為 LP07 安裝實例。

熱線式質量流量計

熱線式質量流量計在管內安裝熱線(Hot Wire)、溫度感測器(圖六)，熱線是用來量測空氣質量流率、它的工作原理為熱線被空氣冷卻時、為了維持固定溫度、會加大電流以增加發熱功率。空氣



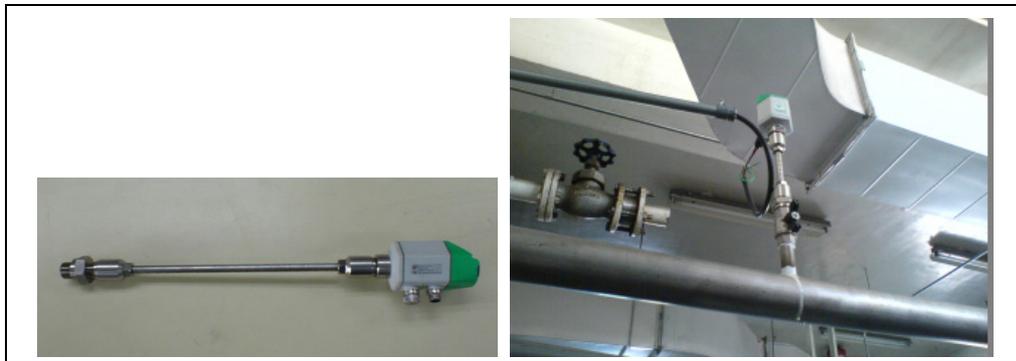
圖四
孔口流量計：
LP07(左)、
LP150(中)、
LP50(右)



圖五
LP07 安裝實例



圖六
熱線式流量計[2]



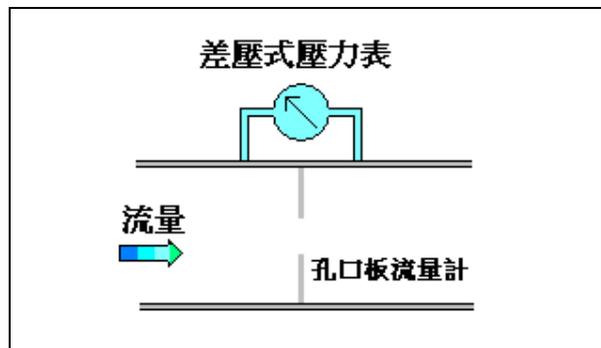
圖七
CS 質量流量計(左)
與安裝實例(右)

流量越大、帶走的熱就越多、所需的電流就越大。所以熱線是依據電流量的變化來得知空氣的「質量」流率。圖七為德國 CS 生產之質量流量計。

差壓式流量計

差壓流量計將流量計裝置、差壓、壓力、溫度、計算顯示集成為一個整體流量計(圖八)。可以直接從表上顯示流量，業界一般常用通過 4-20mA 電流訊號長距離傳送暫態流量值,以做為監控使用。圖九為差壓式流量計安裝實例。

差壓式流量計安裝在空壓管上，使用法蘭與管路連接，安裝後即不再拆下;熱線式質量流量計安裝時必須在管上裝設安裝孔，將熱線式質量流量計插入安裝孔後固定，因為水分會影響量測結果，所以必須安裝在乾燥機後。孔口流量計則可以有許多接法，不怕水分，可隨時安裝與拆卸，相對方便。



圖八 差壓式流量計



圖九 差壓式流量計安裝實例



孔口流量計的優缺點

■優點

- (1) 純機械結構，計量精度高，數據可供參考。
- (2) 方便工廠現場量測單機性能。一台量完即可拆下移至另外一台空壓機量測。可建立全廠空壓機基本性能。
- (3) 可以由不同尺寸的組合達成量測氣量範圍寬廣的目標，且本機型最小解析度可達 10 cfm 的誤差值。
- (4) 不怕水分，無電子零件，可靠。
- (5) 只需針對壓力與溫度進行氣量值的修正，簡單方便實用

■缺點

- (1) 現場需在輸氣管路上增加三通歧管以安裝流量計、需事先裝置三通、關斷閥與量測歧管。
- (2) 量測大流量時，體積、重量較大至少需求 2 人安裝。
- (3) 量測時噪音大，需戴全罩式耳塞。

孔口流量計使用方法

孔口流量計係評估空壓機性能的一種工具，主要應用有三種：(1)單機性能量測、(2)工廠洩漏量測與(3)工廠總用氣量量測。

機身裝有溫度計、壓力表可以讀出量測值，以 LP07 為例，有 1 個 2"進氣孔及 8 個(出氣量分別為 10、15、25、50、100、200、400、800cfm)出氣孔。

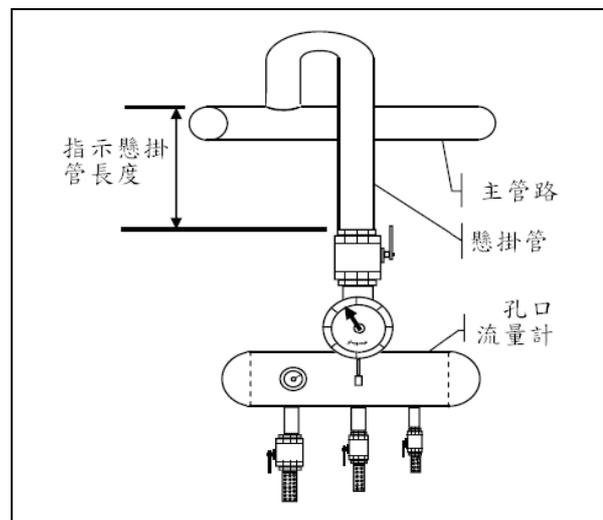
以量測 7bar(100 psig)空壓機為例，使用時首先於管路施工時，預留待測試歧管 2 英吋及關斷閥，將孔口流量計裝在關斷閥，將空壓機與用氣現場主管路通路關閉，調整空壓機出口，內部設定輸出壓力至 8.5bar，以避免量測時達到最高壓力作動造成空

載無法繼續測量，量測完畢後必需調回空壓機原定壓力值。將電力計之勾表及電壓夾安裝於電源輸入端並開啓量測(圖十所示)。

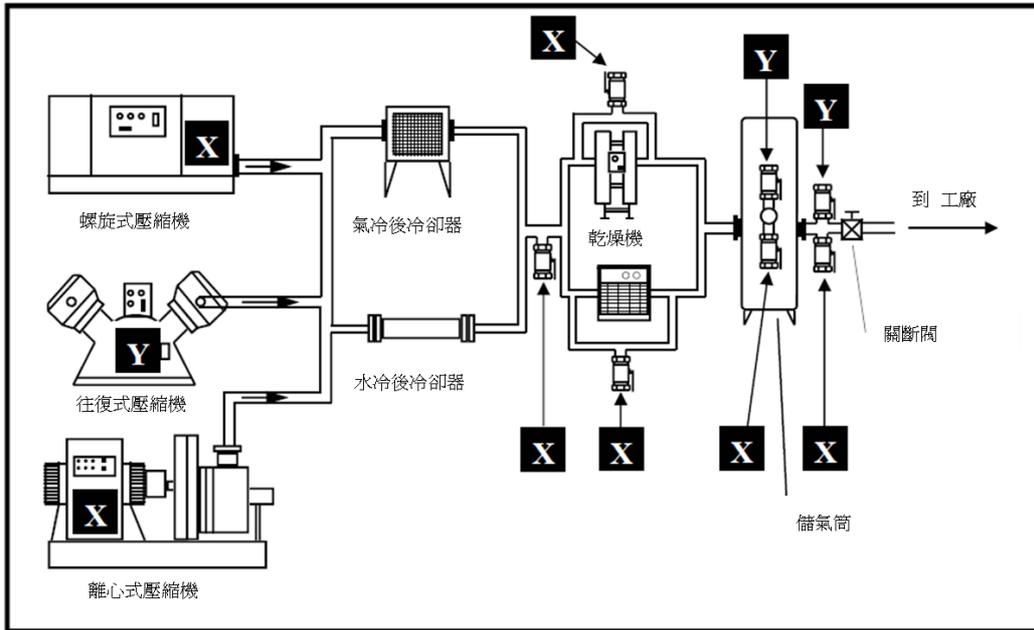
開啓空壓機使空壓機全載輸出，調整測試歧管關斷閥，使壓力維持在 100psig (約 7bar)，待壓力穩定後(一般約 10 分鐘，依系統而定)，紀錄孔口流量計上壓力值、溫度值與出氣孔組相加之氣量。以 7bar(100 psig)空壓機而言，量測此點即可比較與新機之單機性能與出風量差異，若要完整性能曲線，只需測試幾點不同壓力點之出風量，即可畫出性能曲線。

實務上，壓力值不會剛好停在 100psig (約 7bar) 上，測試時盡量維持在 98 - 100 psig 範圍內。由於量測時高壓氣體由出氣孔排出大氣會產生大量噪音、水氣、油氣，必需帶耳罩、眼罩、穿雨衣、安全鞋。

舉例來說 :100HP 空壓機氣量 14m³/min (=494.48cfm=14m³/min×35.32)要量測時必需打開口徑 490cfm(400、50、25、15 cfm 出氣孔)，因為空壓機年份新舊有別，舊機氣量可能衰退很大，在量測時視情況加以調整氣量大小，使壓力維持在希望值。



圖十 安裝管路尺寸[1]



圖十一
孔口流量計
安裝位置[1]

表一 原廠提供之電子試算表

Test psig	Test Air Temperature (deg. F)	Total Orifices Opened (cfm)	Press. & Temp Corrected Flow (cfm)	Compressor Power (kW)
102	108	265	280	78
98	108	275	280	76
86	107	300	274	71

■安裝位置

孔口流量計安裝位置依不同空壓機總類可以有不同選擇，如圖十一[1]，螺旋式空壓機與離心式空壓機可以安裝在「X」位置上，往復式空壓機必須可以安裝在「Y」位置上，這是因為往復式空壓機輸出壓力不穩定，必須先經過空氣筒穩壓後壓力才會穩定。

■氣量修正

實際應用時，氣量修正可以直接使用原廠提供之電子試算表運算修正(表一)。直接鍵入壓力(Test psig)、溫度(Test Air Temperature)、氣量(Total Orifices Opened)即可自動計算修正後風量(Press & Temp

Corrected Flow)。再紀錄輸入電力(Compressor Power)，即可計算單位耗能。因為原廠提供之單位為英制，使用上必須注意。

舉例如下：

溫度 90°F，壓力在 100psig 時，合計孔打開 410cfm，軟體自動修正，修正後氣量為 418 cfm，如表二所示。

$$\frac{\text{計算耗能比爲}}{84} = \frac{84}{(418/35.32) \times 60} \approx 0.1183$$

(kWh/m³, 1m³/min=35.32cfm)



表二 填入孔口流量計的試算表格，計算修正後風量

壓力	測試空氣	合計孔	壓力&溫度	空壓機
PSIG	溫度	打開	修正流量	電力
	(°F)	(cfm)	(cfm)	(kw)
100	90	410	418	84

測試壓力性能修正值如下：

測試壓力性能在 110 psig 時修正值為 108%，測試壓力性能在 90 psig 時修正值為 91%，測試壓力性能在 100 psig 時為 100%不需修正，如表三所示。修正前量測 200cfm，在壓力 110psig 時流量修正為 $200 \times 108\% = 216\text{cfm}$ 。

工廠洩漏量測與總用氣量量測

工廠壓縮空氣洩漏量測主要有以下步驟：

- (1) 關閉空壓機至工廠關斷閥，開啓空壓機全載輸出氣量，使孔口流量計壓力穩定在 98-100psig 之間（最好準確測試在 100psig），實際空壓機壓縮空氣的氣量等於出氣孔口打開數的總和(Test1)。

- (2) 在工廠不生產時，關閉所有用氣元件，打開工廠關斷閥，運轉幾分鐘使系統壓力穩定，重覆測試步驟 1，得到孔口流量計出氣孔口打開數的總和 (Test2)。
- (3) 以 Test1 總氣量減去 Test2 氣量，即得到工廠洩漏量。
- (4) 量測工廠洩漏量測大約要 15 分鐘結果才會完成，二者步驟要穩定壓力在 98-100psig 中相同的壓力。
- (5) 洩漏量測必需在工廠不生產時，例如週末、維護關機、午休等。

工廠總用氣量量測方法為工廠生產時，步驟同「工廠壓縮空氣洩漏量測步驟」一樣。Test1 總氣量減去 Test2 氣量，即得到工廠總用氣量。

成本評估案例

以下說明利用空壓機耗能量測評估設備維護更新成本案例：

某紙品相關產業待測 100HP 空壓機有 14 台，基本資料如表四所示，大部份的機器性能經維護保養後仍維持很好。

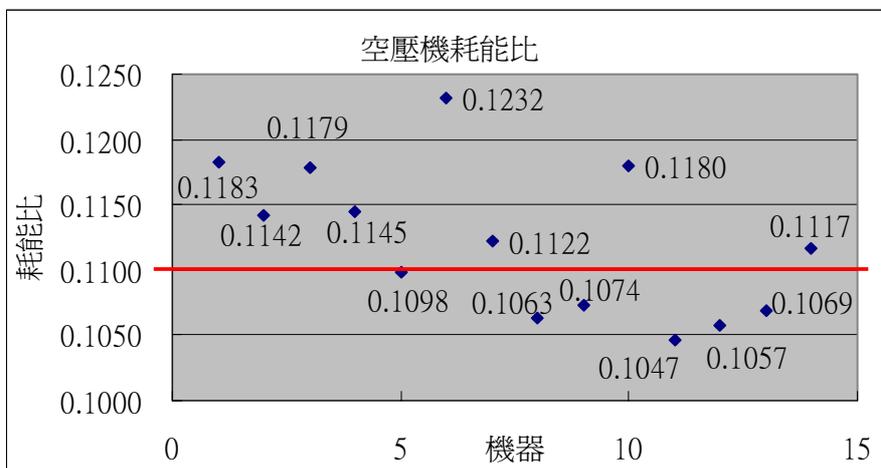
表三 不同壓力下，流量修正值(原廠測試數據)

psig	流量 cfm									修正值%
120	11.7	17.5	29.0	58.5	117.0	234.0	468	936	1170	117%
110	10.8	16.3	27.0	54.0	108.7	217.0	435	870	1087	108%
100	10.0	15.0	25.0	50.0	100	200.0	400	800	1000	100%
90	9.0	13.6	22.7	45.5	91.0	182.0	364	728	910	91%
80	8.2	12.4	20.6	41.2	82.5	165.0	330	660	825	83%
70	7.3	11.0	18.4	37.0	73.7	147.6	295	590	738	74%
60	6.5	9.7	16.2	32.5	65.0	130.0	260	520	650	65%
50	5.6	8.5	14.0	28.0	56.5	113.0	226	452	565	57%



表四 待測空壓機銘板基本資料

機器	壓力 (PSI)	氣量 (cfm)	馬力 (hp)	年份 (年)
A1	157	364	100	1999
A2	132	409	100	2000
A3	132	426	100	1999
A4	132	433	100	2002
A5	132	433	100	2002
A6	132	433	100	2002
A7	131	452	100	2008
A8	188	518	100	2009
A9	107	450	100	2000
A10	107	493	100	2003
B1	131	452	100	2005
B2	131	452	100	2005
B3	132	443	100	2003
B5	132	443	100	2003



圖十二 空壓機耗能比分佈

將 14 台 100hp 空壓機依序使用 LP150 量測，空壓機氣量 14cm³ 要量測時約需打開口徑 490cfm，因為空壓機年份新舊有別，調整氣量大小使量測時壓力穩定在 100psig 點附近，待氣量平衡穩定後，記錄機器代號、壓力、溫度、氣量與記錄電力計量測電力值填入下表中，修正後氣量、耗能比如表五所示，

14 台空壓機耗能比分佈如圖十二。



表五 空壓機量測後數據

機器	壓力 (psig)	溫度 (°F)	修正前流量 (cfm)	修正後 (cfm)	電力 (kW)	修正後流量 (m ³ /min)	耗能比 (kWh/m ³)
A1	99	86	425	428	86	12.137	0.1183
A10	100	96	460	472	92	13.380	0.1142
A2	100	90	410	418	84	11.856	0.1179
A3	100	90	410	418	81	11.856	0.1145
A4	100	98	425	437	82	12.386	0.1098
A5	100	80	390	394	83	11.167	0.1232
A6	101	86	425	435	83	12.347	0.1122
A7	101	90	440	452	82	12.832	0.1063
A9	100	94	450	460	93	13.064	0.1180
B1	100	85	450	456	81	12.949	0.1047
B2	200	84	440	446	80	12.649	0.1057
B3	101	95	435	449	82	12.748	0.1069
B5	100	87	425	432	82	12.254	0.1117

表六 馬力在 75HP~125HP、7kg/cm² 壓力值的螺旋式空壓機建議耗能比

馬力在 75HP~125HP 壓力值在 7kg/cm ² 能效分級基準值		1 級 高級耗能比 (kWh/m ³)	2 級 中級耗能比 (kWh/m ³)	3 級 基本耗能比 (kWh/m ³)
微油螺旋式 空壓機	氣冷式	0.1016	0.1150	0.1300
	水冷式	0.0966	0.1083	0.1250
無油螺旋式 空壓機	氣冷式	0.1100	0.1250	0.1416
	水冷式	0.1050	0.1183	0.1366

表七 更新後空壓機節能比率及預估節能費用(以 0.11kWh/m³ 計算)

機器	電力耗能(kW)	節能比率 (%)	更新設備耗能比 0.11kWh/m ³ 預估每年節省費用(元)
A1	86	7.56%	104,278
A10	92	3.85%	56,510
A2	84	7.18%	96,384
A3	81	4.08%	53,126
A5	83	11.96%	157,960
A6	83	2.04%	27,144
A9	93	7.29%	107,967
B5	82	1.57%	20,577



草擬中有關 $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 壓力值的螺旋式空壓機耗能比(kWh/m^3)，馬力在 75HP~125HP 之建議值如下表六所示[3]。

一、預估新設備耗能比值 $0.11\text{kWh}/\text{m}^3$ 之節能

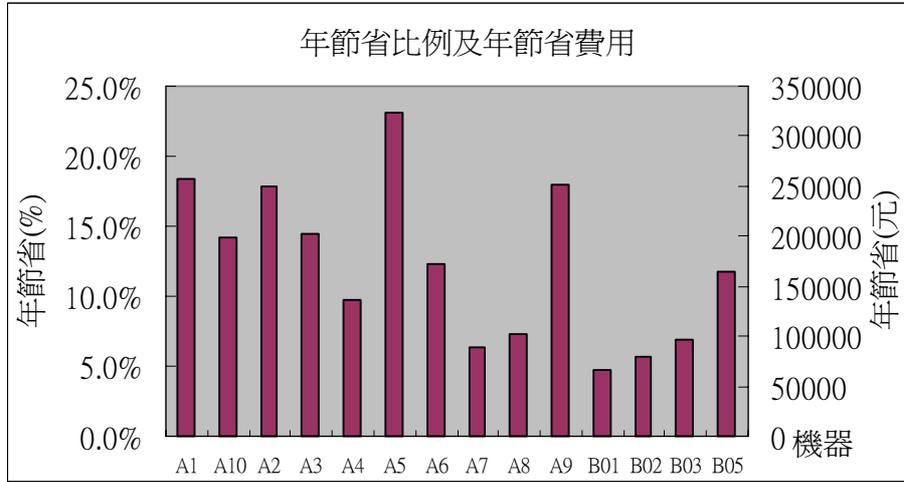
14 台空壓機耗能比如表五所示，新設備耗能比預估值是 $0.11\text{kWh}/\text{m}^3$ ，每度電(kWh)以 2 元計算，機器工作時間一年以 8000h 計，將超出 $0.11\text{kWh}/\text{m}^3$ 耗能比之空壓機更新後，其機器節能比及預估節能費用如表七所示。

二、預估新設備耗能比值 $0.10\text{kWh}/\text{m}^3$ 之節能

14 台空壓機年節省比例與節省費用如表八所示，購買新設備耗能比是 $0.10\text{kWh}/\text{m}^3$ ，每度電(kWh)以 2 元計算，機器工作時間一年以 8000h 計，將超出 $0.10\text{kWh}/\text{m}^3$ 耗能比之空壓機更新後，其節能比及預估節能費用如表八所示，預估投入設備費用 80 萬元，機器編號 A5，2002 年出廠，更新後年節省 23.2%，年節省費用 305,788 元，預估回收年限 2.6 年，管理者可以編入年度設備更新預算，可幫公司省錢，並且節能減碳。

表八 更新後空壓機節能比率及預估節能費用(以 $0.10\text{kWh}/\text{m}^3$ 計算)

機器	電力耗能(kW)	節能比率(%)	更新設備耗能比 $0.10\text{kWh}/\text{m}^3$ 預估每年節省費用(元)	預估投入設備費用 80 萬元 預估回收年限(年)
A1	86	18.3%	252,561	3.2
A10	92	14.2%	208,897	3.8
A2	84	17.9%	240,214	3.3
A3	81	14.5%	188,743	4.2
A4	82	9.8%	127,558	6.3
A5	83	23.2%	305,788	2.6
A6	83	12.2%	162,898	4.9
A7	82	6.3%	82,603	9.7
A8	92	7.4%	108,488	7.4
A9	93	18.0%	266,779	3.0
B01	81	4.7%	60,912	13.1
B02	80	5.7%	73,201	10.9
B03	82	6.9%	89,786	8.9
B05	82	11.7%	154,059	5.2



圖十三
空壓機年節省費用與比例
(耗能比 0.10kWh/m³)

如果製造廠商的設備效能好，節能比例會更好，工廠管理階層或廠務工程師依照節能比與預估節省費用，來判斷設備使用與維修、更新的依據、投入成本或回收期是否划算，目前空壓機已使用 5 年以上，可將效能較差與故障高之設備列入優先汰舊換新順序並編列預算更新，並優先使用效能高之機器於平日運轉。

MULTI-ORIFICE FLOW METER OPERATION MANUAL.

[2] CS VA400 操作手冊.

<http://www.cs-instruments.com.hk/new/index.php>

[3] 工業技術研究院「容積式壓縮機能源效率分級基準建議案」草稿，2010.7

結論

本應用案例顯示當工廠空壓機系統投入 80 萬元進行一台更新，若年節省超過 15% 以上時，設備的更新費用可以在 5 年內回收，若年節省超過 23.2% 以上時，設備的更新在 3 年內可以回收。而本案例所使用的流量計使用簡易，檢測快速，具有可攜帶式和量測方便性，是業界可以接受的一種工廠現場空壓機量測性能的方法。

參考資料

[1] LP METER IMPACT RM COMPRESSED AIR