

水泵節能改善之 節能績效量測與驗證方法

財團法人台灣綠色生產力基金會

水泵節能改善之節能績效量測與驗證方法

目 錄

一、收集資料與數據	1
1-1 改善前	1
1-2 改善後	1
二、測量方法與步驟	2
2-1 測試儀器之精度	2
2-2 測試位置方法及位置	2
2-3 量測表格	4
三、效益及計算說明	5
3-1 計算改善前水泵之各項參數($A_0 \sim A_5$)	5
3-2 計算改善後水泵效率	7
3-3 節能效益計算	8
3-4 粒子演算法	10
四、計算範例	11

水泵節能改善之節能績效量測與驗證方法

(綜合 IPMVP、ASHRAE、CNS 方法)

水泵節能改善績效量測與驗證方法定義為空調系統中，將既有（基準線）定速馬達控制器汰換為變速馬達控制器。此類專案可以減低電力需量(kW)及能源使用量(kWh)，即降低耗電量。通常在加裝變頻裝置時，馬達亦被更換成高效率馬達。變頻裝置通常應用於冰水主機之循環泵與水泵。再者、如何去計算節能量，是一個重要的課題。

再者要有改善前的測量數據與資料的處理，才能建立出改善前的基準線，而後再進行改善。在手法上為讓此系統能節能為原則，例如加入控制邏輯與最佳化程序等；改善完畢後，再進行測量與改善前基準線作耗能比較，計算得到節能量之多寡，為此改善後的證實(驗證)是較原先節省能源之。瞭解此原則後，再進行以下之數據收集與資料計算。

一、收集資料與數據

1-1 改善前

- 名牌資料
- 運轉時間表(馬達運轉時數)
- 水泵應用之定義與所在位置
- 水泵轉速(rpm)、工作流體溫度(°C)
- 水泵功率(仟瓦)、流量(公升/秒)、工作位差(公尺)

1-2 改善後

- 名牌資料
- 運轉時間表(馬達運轉時數)

- 水泵應用之定義與所在位置
- 水泵轉速(rpm)、工作流體溫度(°C)
- 水泵功率(仟瓦)、流量(公升/秒)、工作位差(公尺)
- 平均電費單價（包含基本電費及流動電費）（元/kWh）

二、測量方法與步驟

2-1 測試儀器之精度

要量測上述之運轉條件須使用到：（1）電功率計（2）流量計（3）壓力感測器，依照 CNS659 水泵檢驗法(總則)下相關規範，要求水泵測試儀器之精度如下表，而除了精度要求還需有效正報告，如此才能確保所測試之數據的可靠的。

表 1 測試儀器之精度

類別	精度
溫度計	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
流量計	$\pm 2.0\%$
壓力計	$\pm 2.0\%$
電功率計	$\pm 0.5\%$
迴轉儀	$\pm 2.0\%$

2-2 測試位置方法及位置

水泵之測試方法及位置將影響測試之結果，以下將分別說明壓力計、流量計及電功率計之測試支架設位置及測試方法。

A、壓力計

測定泵浦工作位差所用之壓力計，測試時需注意：應先將連接於壓力計與泵浦間之管內空氣，以三通活門完全排除(視液體自三通活門之細孔噴出即可)然後扭轉活門使壓力計及泵浦相通，在讀計壓計上所指示之數值。

B、流量計

流量的量測雖然影響沒有溫度大但仍不容忽視，不管是預先裝設之流量計，或是架設在管外的流量計都需注意裝設位置，流量的測試最怕紊流或是管內有氣泡，所以需依循下列方式避免測試數據錯誤。

- 確認管徑、材質、管壁厚度及流向
- 確認流體性質、溫度
- 需架設在水平管
- 需架設前後六倍管徑無彎管
- 確保管內無氣泡

C、電功率計

電力之量測雖屬三者中較易但也是最常出錯之地方，電力測試常有相序錯誤或漏測某一線路，所以需注意：

- 電力系統之回路

- 確保功因及相序無誤
- 是否會脫落導致短路
- 線路是否連接正確

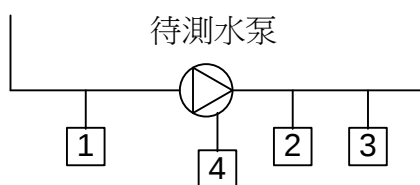


圖 1 水泵量測與驗證示意圖

圖 1 中量測點 1、2 為水泵的進出口壓差測量點，量測點 3 為流量計測量點，量測點 4 為電力分析儀測量點。

2-3 量測表格

表 2 水泵規格表

廠牌		試驗日期	年	月	日
製造編號		試驗號碼			
出水量	公升/秒	工作位差			公尺
轉速	轉數/分鐘	水泵動力			仟瓦
水泵效率	-	功率			仟瓦
電壓	伏特	電流			安培
頻率	赫茲	相數			-

表 3 水泵測試表

測試日期		年	月	日
項目	單位	情況		
轉速	轉/分鐘			
頻率	赫茲			
電壓	伏特			
電流	安培			
功率	仟瓦			
相數	-			
出水量	公升/秒			
工作位差	公尺			
水泵動力	仟瓦			
水泵效率	-			

三、效益及計算說明

3-1 計算改善前水泵之各項參數(A₀~A₅)

在水泵節能改善前，連續收集（1~3 個月）運轉資料，改善前取樣運轉資料的間隔時間，可以為 1 分鐘、5 分鐘或 15 分鐘，加以記錄，並且在紀錄期間，設法改變流量與水頭壓差，或者在整個量測紀錄的運轉期間，流量與工作位差就有明顯的變動為佳。舉例：如有閥門則調整閥門開度，一段時間後加以記錄數據，而後所得各項參數，由 CNS663 水泵動力及效率檢驗法 公式計算出效率，公式如下所示：

水泵之水動力 W (kW)

$$W = Q \times H \quad \dots\dots\dots(1)$$

Q：出水量（m³/sec）

H：工作位差（kPa）

改善前水泵之效率 e_{before}

$$e_{\text{before}} = \frac{W}{S} \times 100 \quad \dots\dots\dots(2)$$

S：耗電量（仟瓦）

在水泵基準線之建立可分為：特性曲線法(H-Q)、頻率法(F)、約定耗電法，三者皆有不同的適用範圍，可由下表 4 所示：

表 4 基準線建立方式

方法	水泵型式	改善前頻率	改善後頻率
H-Q 法	單個 或 多個並聯	定頻 或 變頻	定頻 或 變頻
F 法	單個	變頻	變頻
約定耗電	單個	定頻	變頻

H-Q 法為藉由 ASHRAE Handbook 的關係式，進行水泵基準線性能係數方程式的建立。然而為了建立出方程式必須先計算出方程式(3)中的 $A_0 \sim A_5$ 係數，定義出水泵基準線之方程式。再者、此方式可用在單個或多個水泵並聯下作基準線之建立，如下圖 2 所示，水路輸送管從 A 位置到 B 的位子之間視為一黑盒子。H-Q 法方程式定義如下所示，其中： S_{before} 為基準線之耗電量(kW)， $A_0 \sim A_5$ 為方程式之係數，Q 為流量(l/sec)，H 為工作位差(kPa)。

$$S_{\text{before}} = A_0 + A_1 \times Q + A_2 \times Q^2 + A_3 \times H + A_4 \times H^2 + A_5 \times Q \times H \quad \dots(3)$$

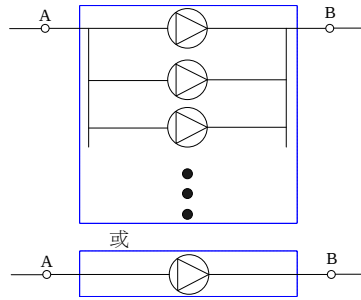


圖 2 黑盒子示意圖

F 法：基準線建立只為了作單個水泵改善，且為變頻水泵汰換成變頻水泵，也可使用頻率之回歸方法，如下方程式(4)所示：

$$S_{\text{before}} = A_0 + A_1 \times F + A_2 \times F^2 + A_3 \times F^3 + A_4 \times F^4 \dots (4)$$

約定耗電法：為定頻水泵汰換成變頻水泵，可經由一段長時間紀錄後，得到定頻下的平均耗電量即為約定耗電量，如方程式(5)所示：

$$S_{\text{before}} = kW_{\text{average}} \dots\dots (5)$$

3-2 計算改善後水泵效率

水泵節能改善後，每季(間隔 3 個月)連續監測記錄 1~2 週的運轉數據，資料蒐集的项目與基準線相同，取樣運轉資料的間隔時間，可以為 1 分鐘、5 分鐘或 15 分鐘。而後，完成改善前後數據之收集，便可逐筆計算水泵改善前後的節能量，由此觀念可由下圖 3 所示：

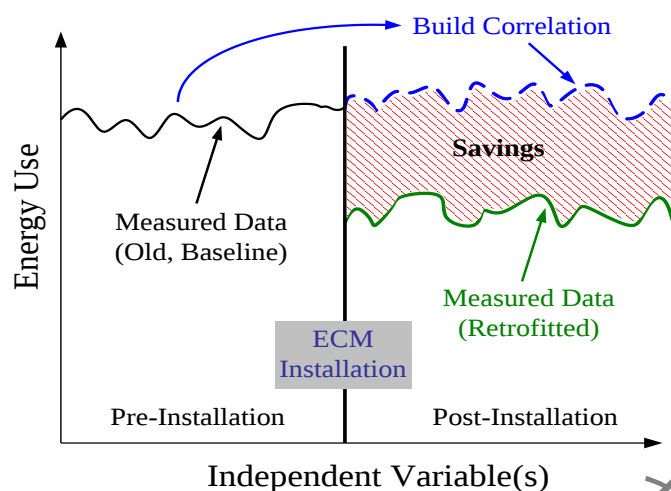


圖 3 改善前後的節能量示意圖

水泵之水動力 W (kW)

$$W = Q \times H \quad \dots\dots(6)$$

Q ：出水量 (m^3/sec)

H ：工作位差 (kPa)

改善後水泵之效率 e_{after}

$$e_{\text{after}} = \frac{W}{S} \times 100 \quad \dots\dots(7)$$

S ：耗電量 (仟瓦)

3-3 節能效益計算

(1) 每季記錄一短期的運轉資料，以部分約定運轉資料的方式，計算每季之節能效益：

改善後連續記錄 1~2 週運轉資料，計算累計的節能量 E_s (kWh)：

$$E_s = \sum \left[\frac{(S_{\text{before}} - S_{\text{after}}) \times t}{60 \text{ min/hr}} \right] \quad \dots\dots(8)$$

t ：記錄運轉資料的間隔時間 (min)

日平均節能量 E_{s-dav} (kWh/日)：

$$E_{s-dav} = \frac{E_s}{d} \quad \dots\dots(9)$$

d：累計記錄的天數

以雙方約定每季的使用天數，乘以日平均節能量 E_{s-dav} ，計算出改善後每季的節能量 $E_{s-saving-s}$ 。

$$E_{s-saving-s} = E_{s-dav} \times D \quad \dots\dots(10)$$

D：約定每季水泵的運轉天數（日/季）

以雙方約定每季的使用天數，乘以日平均節能量 E_{s-dav} 及平均電費單價 U_e ，計算改善後每季的節能金額 $F_{s-saving-s}$ 。

$$F_{s-saving-s} = E_{s-dav} \times D \times U_e \quad \dots\dots(11)$$

U_e ：平均電價單價(元/kWh)

(2) 以連續監控系統，記錄運轉資料，累計計算節能效益：

採用連續監控系統，記錄及計算節能效益，長期累計累計量及節能金額，計算方式如下所示：

間隔 t 時間記錄 1 筆運轉資料，長期累計的節能量 $E_{s-saving-t}$ ：

$$E_{s-saving-t} = \sum \left[\frac{(S_{before} - S_{after}) \times t}{60 \text{ min/hr}} \right] \quad \dots\dots(12)$$

間隔 t 時間記錄 1 筆運轉資料，長時間累計的節能金額

$F_{s-saving-t}$ ：

$$F_{\text{saving-}t} = \sum \left[\frac{(S_{\text{before}} - S_{\text{after}}) \times t \times U_e}{60 \text{ min/hr}} \right] \dots\dots(13)$$

3-4 粒子演算法

本研究在建立基準線(H-Q 法)之時，為了快速求解出回歸方程式的 $A_0 \sim A_5$ 的係數，才能定義出水泵基準線的性能係數方程式，在演算的過程中，使用粒子演算法則(PSO)來進行程式的撰寫。將其應用於搜尋求解與最佳化的相關問題。本演算法尋找行為是藉由最佳的點來帶動群體的一種概念，在這同時也會加入個體的過去經驗(較佳值)去移動自己，使所有的粒子尋找出最佳求解的位子與數值。此外吾人引用前述(ASHRAE)基準線模型定義求解方程式，而以最小累計誤差為最佳解，其公式如下所示：

$$Z = \sum_1^i S_i - (A_0 + A_1 \times Q_i + A_2 \times Q_i^2 + A_3 \times H_i + A_4 \times H_i^2 + A_5 \times Q_i \times H_i) \dots\dots (14)$$

其中：Z 為累計誤差。

而後，再利用 Visual Basic 程式語言進行撰寫這整個求解過程，如下圖 4 所示。在這同時需考慮先前所敘述的個體與群體以及過去經驗的部份，再以前述方程式進行求解，一次次的逼進較佳的求解值，主要是為了使建立出來的水泵基準線回歸係數與所對應的解達到最小

的誤差。

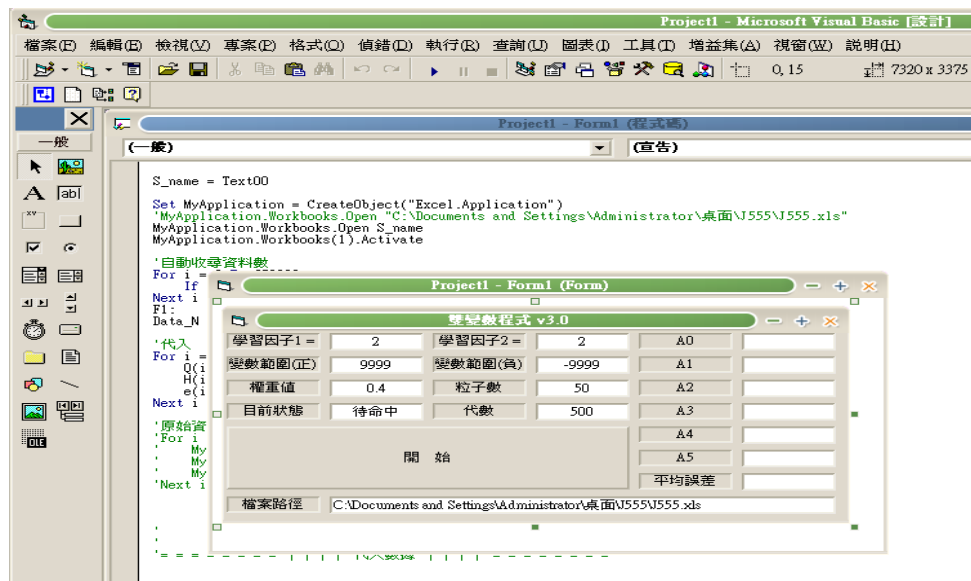


圖 4 程式撰寫

四、計算範例

首先，在以上程序都完善明確地記錄後，改善前收集數據如下表 5 所示(同圖 5)。藉由量測而來的數據進行改善前水泵的基準線建立，使用 H-Q 之方法，而圖 6 為實際量測情形。

表 5 改善前測量數據

資料編號	流量 (m ³ /sec)	工作位差 (kPa)	耗電量 (kW)
1	0.02935	135.140	13.12
2	0.02926	136.086	13.08
3	0.02924	135.483	13.07
4	0.02926	136.448	13.08

5	0.02907	135.724	13.00
6	0.02906	135.604	12.99
7	0.02923	135.604	13.07
8	0.02927	136.448	13.08
9	0.02930	135.121	13.10
10	0.02930	136.086	13.10
11	0.02916	135.845	13.04
12	0.02923	135.966	13.07
...	...	...	...
498	0.01393	230.465	4.84

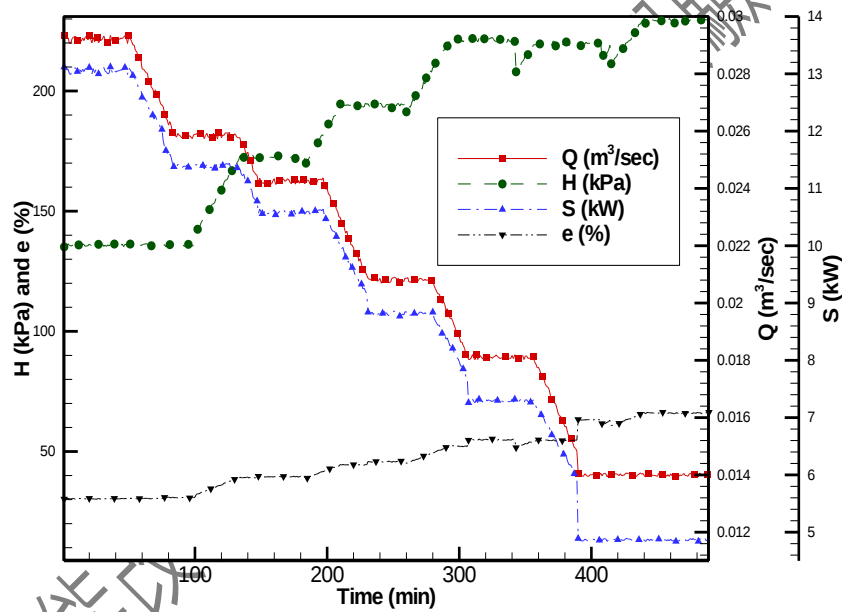


圖 5 測量數據



圖 6 實際量測圖

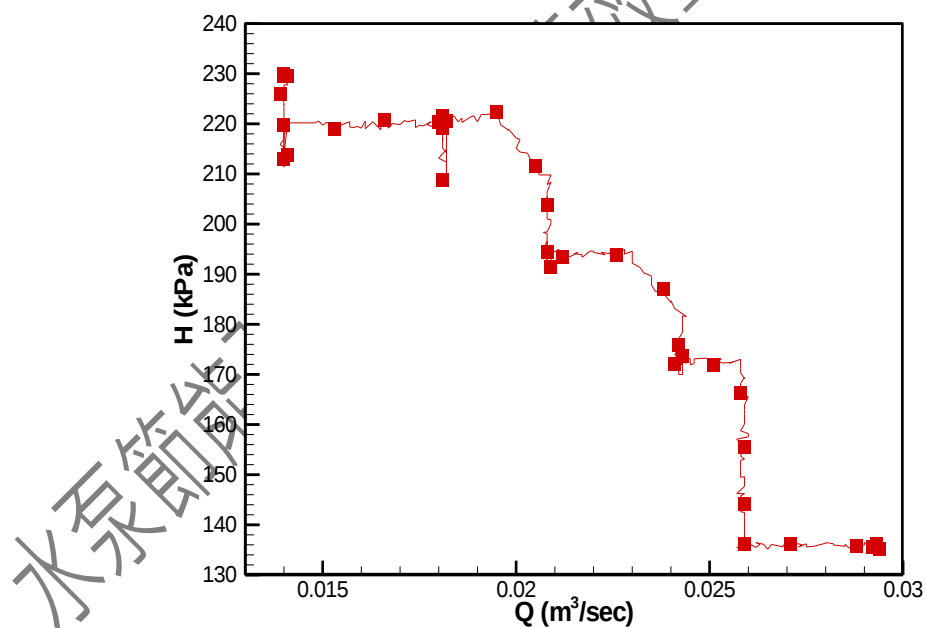


圖 7 操作曲線

於後，進行水泵基準線 $A_0 \sim A_5$ 係數回歸，開啟的程式，其中學習因子與權重值、代數、粒子數等使用預設的數值，如有需要再進行細

部調整。另外，吾人先將數據放入 Excel 中，再進行運算，程式將經過短暫的計算後得到建立水泵基準線 $A_0 \sim A_5$ 係數回歸，如下圖 8 所示。

學習因子1 =	2	學習因子2 =	2	A0	10.372451971
變數範圍(正)	9999	變數範圍(負)	-9999	A1	11.280554603
權重值	0.4	粒子數	50	A2	3937.8688401
目前狀態	完成	代數	500	A3	-0.082547370
開 始				A4	0.0001123314
				A5	2.0480315764
				平均誤差	0.7915331145
檔案路徑		C:\Documents and Settings\Administrator\桌面\W555\W555.xls			

圖 8 完成運行圖(VB)

由此過程可以得知，粒子演算法迅速的計算出的各項參數，利用改善前的數據，相當容易的建立出基準線而且平均誤差只有 0.79%，至此完成改善前之基準線建立，而於改善後再次測量：耗功、流量以及工作位差，代入基準線中，就可以得到改善前的耗電量，再與改善後的相減之，就可以得到相同條件下的節省能量，然而在回歸與實際的數據比較圖中，如圖 9，如圖可知兩者的差異甚小。

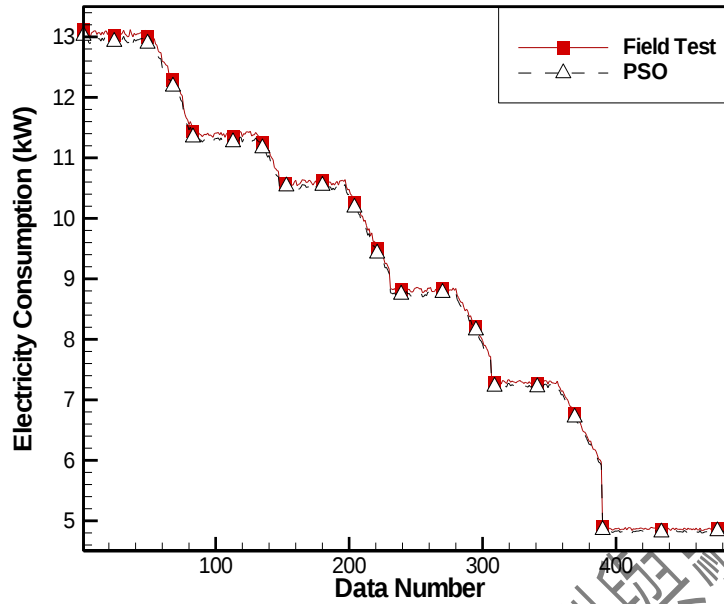


圖 9 回歸與實際數據比較

而後，再將 $A_0 \sim A_5$ 代入方程式(3)中，完成所建立出來之方程式，待改善後進行節能績效的驗證。

$$\begin{aligned}
 S_{\text{before}} = & 10.3724519 + 11.2805546 \times Q + 3937.86884 \times Q^2 \\
 & - 0.08254737 \times H + 0.00011233 \times H^2 + 2.04803157 \times Q \times H \\
 & \dots\dots (15)
 \end{aligned}$$

經過汰換成高效率的水泵以及搭配完善的控制程序後，再進行改善後的量測驗證，收集數據如同改善前：水流量、工作位差以及耗電量，可以如下表 6 所示，同時利用公式(15)回歸計算改善前之後電量，再行計算改善前後所節省之能量，利用公式(8)使用部分約定的方式來進行計算，紀錄期間累計的節能量為 721.3418kWh，再利

用公式(9)計算出日平均節能量為 14.75137kWh，循序漸進使用公式(10)，約定每季為 65 天，每季節能量約為 958.84kWh，最後利用公式(11)算出每季節能金額為 3356 元，而一年四季共可節省 13,424 元，然而如圖 10 可以看出改善前與改善後之明顯比較。

表 6 改善後測量數據

資料 編號	流量 (m ³ /sec)	工作位差 (kPa)	改善後測量 耗電量(kW)	回歸改善前 耗電量(kW)
1	0.02579	135.4833	8.581178	11.31674
2	0.02574	135.4830	9.223214	11.29216
3	0.02587	135.8449	8.595143	11.35645
4	0.02589	136.4481	9.962751	11.36695
5	0.02589	141.3945	10.44724	11.37530
6	0.02593	142.4808	9.019342	11.39815
7	0.02583	142.6010	11.18384	11.34775
8	0.02591	144.1693	11.12543	11.39259
9	0.02582	145.7377	9.262928	11.35122
10	0.02588	146.2203	10.74111	11.38359
11	0.02574	146.2203	10.24202	11.31162
12	0.02585	147.6680	9.080414	11.37309
	...	...	...	...
643	0.02234	193.8746	7.699222	9.678508

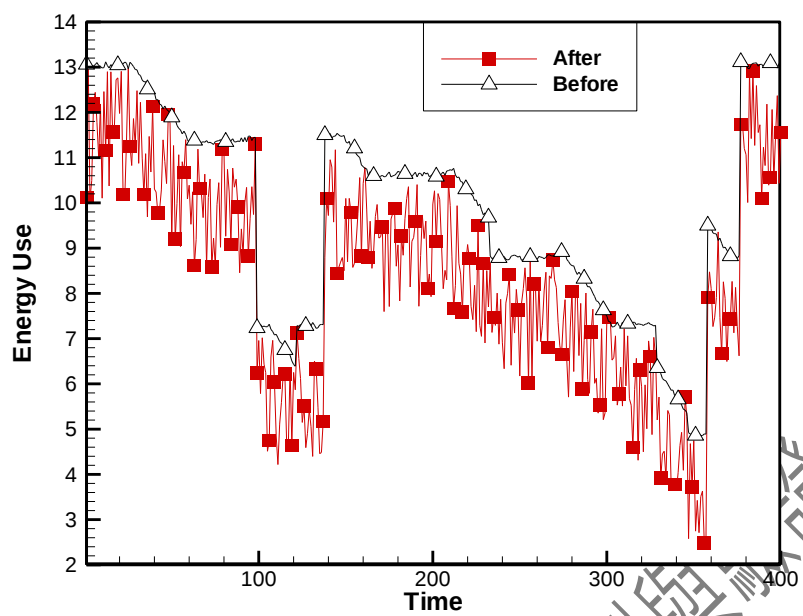


圖 10 改善前與改善後耗電量比較