

微電腦空燃比與變頻控制器之應用

焦鴻文*、李毓仁**、劉興權***

摘 要

因油價高漲，地球溫室氣體效應急速惡化，節能減碳已成為當今生活與工業必須立即面對與解決的問題。在工業方面，工業用爐及鍋爐效率更是首要課題。目前工業用爐及鍋爐沒有任何事比效率更重要，對操作者或安裝測試者同樣重要，基於上述需求，較大型的爐子或鍋爐在過去十數年，機械式空燃比機構已被微電腦空燃比控制系統取代，微電腦空燃比控制系統利用操作曲線方式可解決機械式空燃比機構所無法解決的燃燒操作模式，更可以利用微電腦程式補償機械驅動元件所產生的機械損失。

現代化微電腦空燃比控制系統可整合許多不同功能在同一控制系統中，包括：燃燒機程式控制微電腦空燃比控制，火焰監測，燃燒負載調節器，操作時數計算器，啟動計算器故障訊息顯示與管理，個人電腦介面，氧氣/一氧化碳回饋控制，燃燒空氣送風機轉速控制，此外還可以提供“故障訊息”顯示與管理功能，更可以利用“監測器”作回饋控制。

燃燒最佳化-利用調節排氣中的含氧量是工業燃燒機多年新發展的技術，為了降低含氧量必須調節空燃比，這對傳統機械式空燃比結構有許多困難點。微電腦空燃比控制系統提供了具方便與經濟性的解決方案，利用微電腦空燃比控制系統可以連續，即時調節各種燃燒變數。

本文探討有關燃油及燃氣鍋爐(含熱媒鍋爐及蒸汽鍋爐)如何將原有的機械式空燃比控制機構修改成利用微電腦空燃比及變頻控制系來降低廢氣含氧量提高鍋爐效率，其具體結果有省油及省電兩部分，對國內鍋爐使用者提供經濟實惠的節能方案。

【關鍵詞】空燃比、氧氣/一氧化碳回饋控制、燃燒空氣送風機轉速控制

*工業技術研究院燃燒技術組燃燒爐技術研究室

**工業技術研究院工業節能技術組熱能應用研究室 副工程師

***昌傑企業有限公司 總經理

一、前 言

1. 油價上漲與節能

對於近期國際油價不斷攀升的成因，朱利安·李認為，主要還是基本面上的供需矛盾在“作怪”，投機和地緣政治等只是輔助因素，或者說起到了推波助瀾的作用。但與流行觀點不同的是，他認為當前的供需缺口在很大程度上應歸咎於供應不足，而非需求旺盛。

中國經濟近年以逾百分之十的高速增長，成為全球耗油量增長最大的國家，但產油量不足，成為石油入口大國。面對高油價，中國正努力尋找節能技術，而近年到訪中國的歐美領袖，亦大力向中國推介各種節能技術，反映在油價長遠趨升下，環保科技將成為有前途的新興行業。

新興經濟區對能源需求大增，國際期油炒賣活動熾熱，再加上部分產油區面對軍事衝突風險，在這三大因素刺激下，國際油價節節上升。

行政院擬多項節能措施對抗高油價，在行政院提出的「我國最近對抗高油價措施與南韓做法對照表」中，希望全面協助服務業自願性節能，讓飯店、百貨公司等簽署自願性節能協議，訂定三年百分之五以上節能目標；政府也希望擴大輔導工業部門節能，成立節能技術服務團，訂定三年百分之二到六的自願節能目標；推動高效率馬達改造，促進節能百分之五到二十五；全面輔導產業提升鍋爐效率百分之一到三。政府盼提供節能減碳技術服務，成立節能減碳技術服務團；對受能源價格調整影響較大的產業，成立個別產業節能服務團輔導；提供中小企業採行節能環保製程生產技術諮詢輔導。

再者，講到關於節能的部分，這部分和環保有一點點關係，但是實際上對於飯店來講，節能是牽涉到成本的問題。比如說最近電費即將調漲了，根據我們自家飯店的計算，目前調漲後的電價來講，一年平均一家飯店要增加將近八百萬的電費支出。

2. CO₂ 減量議題

從 1990 到 2005 年，台灣燃料燃燒 CO₂ 排放量增加 130%，平均每年增加 5.7%。

其中 1990 至 2000 年平均年增率 6.8%；2000 至 2005 年平均年增率 4.0%。台灣人均排放量由 1990 年的 5.61 公噸增加到 2005 年的 11.41 公噸，已超過 OECD 國家 11 公噸的水準能源相關二氧化碳排放量貢獻佔比 -- 部門(含用電)佔比：雖然工業 CO₂ 排放佔 53.49% 最高，能源工業佔 4.77%，運輸佔 14.33%，商業佔 6.63%，住宅佔 12.66%，農林漁牧佔 1.27%。未來 8 年每年提高能源效率 2% 以上，使能源密集度於 2015 年

較 2005 年下降 20% 以上；並藉由技術突破及配套措施，2025 年下降 50% 以上。

二、產業現狀與需求

1. 鍋爐效率與法規

經濟部能源局於九十年九月十二日公告「鍋爐能源效率標準」，並依據能源管理法第十四條，於九十二年七月一日實施此標準，推動鍋爐之能源節約工作。公告之鍋爐效率標準內容，適用於水管式燃油鍋爐、水管式燃氣鍋爐、煙管式燃油鍋爐及煙管式燃氣鍋爐等四種對象。

我國已訂定新設鍋爐效率標準及既設鍋爐耗能合理化標準如下：

種類	容量(公噸/小時)	能源效率標準 (%)	備註
水管式燃油 鍋爐	三十以上	九十二·五	標準適用範圍及計算方式： 1、本效率標準適用於以燃油或 燃氣為燃料之蒸汽鍋爐， 不適用於貫流式鍋爐。 2、效率標準依國家標準 (CNS2141)之熱損失法計 算，並依燃料低熱值計算 涵蓋廢熱回收裝置之鍋爐 全載時之能源效率。
	十以上未達三十	九十一	
	五以上未達十	八十九·五	
	未達五	八十八·五	
水管式燃氣 鍋爐	三十以上	九十三·五	
	十以上未達三十	九十二·五	
	五以上未達十	九十一·五	
	未達五	九十·五	
煙管式燃油 鍋爐	三十以上	九十	
	十以上未達三十	八十九	
	五以上未達十	八十八	
	未達五	八十七	
煙管式燃氣 鍋爐	三十以上	九十二	
	十以上未達三十	九十一	
	五以上未達十	九十	
	未達五	八十九	

圖 1 新設鍋爐能源效率標準

2. 使用中鍋爐效率現況分析

(1) 汽電式鍋爐：適用於高溫高壓的場合(64~260KG/CM²)，效率介於 87-94%，主要使用於汽電廠、化工業高溫高壓製程為主(如 PTA 製程抽汽使用)。

(2) 水管式鍋爐：適用於使用蒸汽壓力較高的場合(15KG/CM² 以上)，效率介於 82-93%，主要使用於造紙業造紙、紡織業及化工業反應製程為主。

- (3)煙管式鍋爐:適用於使用蒸汽壓力介於 3-15 KG/CM² 效率介於 84-93 %，主要使用於食品業之殺菌消毒用、紡織業之漿紗及染整製程、鋼鐵業之鐵灌消毒用、電力電子業使用於清洗、化工業製程加熱為主。
- (4)熱媒鍋爐:適用於須固定溫度及高溫之場合(低壓)，效率介於 75-90% (視熱回收狀況)，主要使用於染整業之定型機、化纖業聚合及化工業製程為主。
- (5)貫流式鍋爐:啟動容易效率較低介於 73-80%，容量為 2T/小時以下，主要使用於食品業、汽車業及紡織業加熱製程為主。

煙管鍋爐作業現況

統計煙管鍋爐 59 座檢測數據，規格 10 噸/h(含)以下佔 49%，其中三迴煙道型式 48 座、四迴煙道型式 11 座，負載 25~95%、效率 72~88%、爐壁溫度 40~80°C、排氣溫度 160~320°C、排氣含氧 2~12%。其中附設排氣熱回收者只佔 9%：節熱器 2 座、複熱器 3 座，蒸汽系統執行冷凝水熱回收者已達 75%。

水管鍋爐作業現況

統計水管鍋爐 46 座檢測數據，規格 20 噸/h(不含)以上佔 48%，其中蒸汽壓 40kg/cm²G 以上 6 座，負載 22~96%、效率 77~91%、爐壁溫度 45~80°C、排氣溫度 117~462°C、排氣含氧 3~14%。其中附設排氣熱回收者已佔 74%：節熱器 8 座、複熱器 26 座，蒸汽系統執行冷凝水熱回收者已達 100%。

三、智慧型燃燒管理系統技術介紹

3.1 燃燒與效率

1. 燃燒控制理論說明

(1) 有關燃燒

燃燒是一種複雜的放熱化學反應，當燃料與氧化劑經由點火時燃燒即發生，在完全燃燒時燃料與氧化劑完全反應，事實上則沒有任何燃燒過程是完美的或完全的，當缺氧時會造成燃燒不完全。

(2) 燃燒效率(Combustion efficiency)

燃燒效率是燃燒器燃燒燃料能力的一種指標。煙氣中未燃盡的燃料(未燃碳)及過剩空氣(含氧)量常是評估燃燒器燃燒效率好壞之指標。燃燒器的較佳燃燒效率即是有較低的未燃盡燃料及可操作在較低的過剩空氣量下。好的氣體及液體燃燒器設計，其過剩空氣量大多操

作在 15% 以下，如此便可將未燃的燃料降至最低。藉由僅 15% 的過剩風量操作，燃燒過程的熱量較少被加熱在過剩空氣上，因此能增加有效的熱量運用於產生蒸汽上。以燃料角度而言，並非所有燃料均有相同的燃燒效率與燃燒機制，通常氣體及液體燃料，因其與氧化劑的燃燒機制屬於同相燃燒 (homogeneous)，因此效率將較異相燃燒 (heterogeneous) 之固體燃料的燃燒效率來得高。

(3) 鍋爐效率 (boiler efficiency)

鍋爐效率係指「鍋爐產生蒸汽所需要總發熱量與燃料所發出的總熱量比」，亦是鍋爐產生蒸汽每小時所吸收之熱量與燃料每小時之熱值比」，或是求出鍋爐所有的熱量損失，進而間接算出效率。簡言之，鍋爐效率一詞通常被熱效率或燃料轉換成蒸汽的效率所取代，一般熱效率不考慮熱輻射及對流的損失，因此並不能代表一座鍋爐真正的效率，而燃料轉換成蒸汽效率，則是實際將熱損失考慮進去，因此可視為鍋爐的整體效率。

(4) 鍋爐效率下降之原因

一般鍋爐效率會隨使用年限增加而逐漸下降，主要影響鍋爐效率的原因及改善方案包括：

A. 煙囪排氣溫度過高

煙囪排氣溫度若高於 200°C 以上，代表鍋爐內熱交換不良、後段燃燒等問題發生，除應檢視鍋爐燃燒狀況外，並可於鍋爐後段加裝熱交換器以回收熱量，唯需注意排氣溫度不可低於酸性氣體(如氯化氫、氧化硫等)之露點(Dew point)，以防止造成設備之低溫腐蝕。

B. 燃料水分過高

因燃料中含水率或是氫元素燃燒生成的水分，將會吸收熱量變成水蒸汽，隨煙道氣排出而形成熱損失。此點可經由燃料之前處理，如脫水等方式，以減少熱量損失。

C. 過量的燃燒空氣量

理想狀況之燃燒空氣量應該是計量空氣，唯為避免不完全燃燒情形，通常會加入適量之過量空氣，此過量空氣量必須隨燃燒設備、燃料等不同而有所不同。過量空氣不足，會產生燃燒不完全，燃燒空氣過量則會造成熱損失，因此必須配合鍋爐與燃燒器，通以正確的過量空氣。

D. 燃燒不完全

燃料燃燒不完全，除造成熱量損失外，亦可能造成空氣污染物之

生成，如一氧化碳及未燃碳等。因此良好之燃燒條件與適當調整燃燒裝置，將是避免因燃燒不完全造成熱損失之主要作法。

E. 爐體熱損失

隨設備不同，爐體之熱損失亦不盡相同。此點與鍋爐原始之設計有關，當然適當之保溫與絕熱是避免大幅爐體熱損失之正確作法。

F. 其他

如熱傳面之結垢、積灰及飼水品質不良等等。

影響燃燒效率的因素有四個因素：1. 空氣：溫度，壓力，溼度；2. 燃料：熱值，溫度，黏度，比重，氣體燃料壓力變動(燃氣時)；3. 污垢：燃燒機積垢，鍋爐積垢；4. 機械系統：機械遲滯現象。

(5) 燃燒效率與排氣含氧量

利用 Siegert 公式可得知每減少排氣中 1% 含氧量約可提高效率如下：

- 天然氣：約 0.6 %
- 輕油：約 0.7 %
- 重油：約 0.75 %

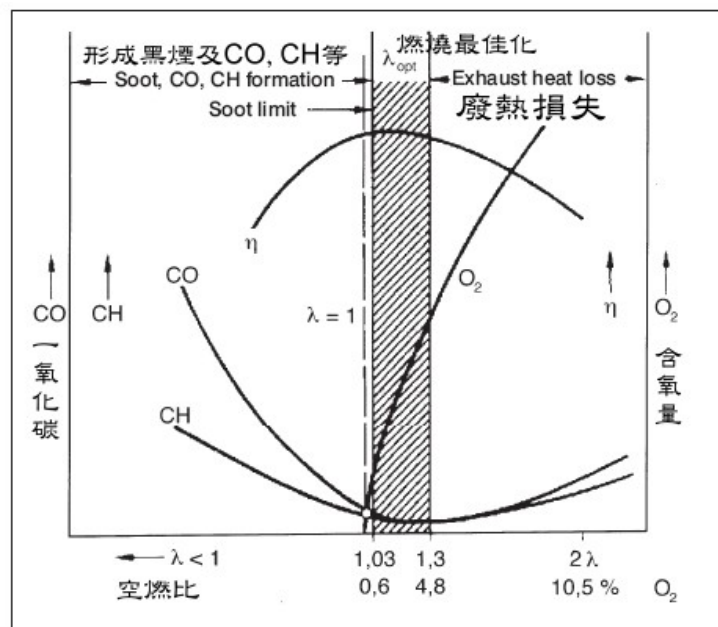


圖 2 燃燒效率與排氣含氧量示意圖

3.2 廢氣含氧量連續監測回饋控制技術

目前主要含氧量回饋控制系是利用氧化鋯的氧氣探測棒，即所謂的 Lambda 控針，利用它來監測並使工業用爐之燃燒最佳化，它的優點如下：

1. 直接監測爐子排氣，不須採樣
2. 應時間短， $t_{90} < 15$ 秒
3. 維修少

利用含氧量回饋控制系統不但能補償燃燒，同時可調節空燃比在最佳狀態。過多的空氣量會降低 CO_2 值並升高廢氣溫度影響鍋爐效率；利用 Siegert 的方式，廢氣中含氧量與廢氣溫度差公式 $t_{\text{waste gas}} - t_{\text{intake air}}$

Siegert's Formula:

$$q_a = (t_a - t_i) \cdot \left[\frac{A_2}{21 - O_2} + B \right] [\%]$$

$$\eta_f = 100 - q_a$$

q_a = waste gas loss

η_f = furnace efficiency

氧氣回饋系統操作原理

1. 燃燒機啓動時

Lamtec 系統會檢查“預排氣”時的氧氣含量是否在 18 % 至 24 % 之間，點火後如果氧氣含量在 45 秒內不降低 14 % 以下，系統會輸出“基本負載無調節作用”。

2. 氧氣監測範圍

在爐子操作時，Lamtec 系統會不斷地監測模擬氧氣含量

在目標含氧量設值之外，還有一個最大和二個最小容許值，當監測到的含氧量超出範圍時，系統會產生“故障”訊息與警報。

3. 氧氣操作曲線

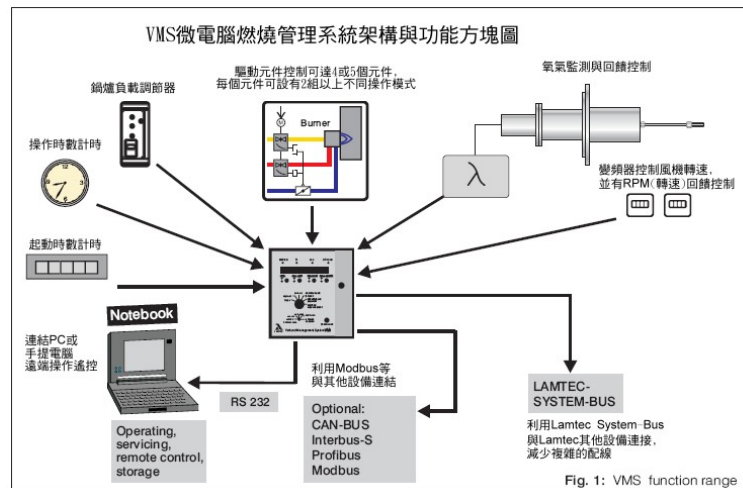
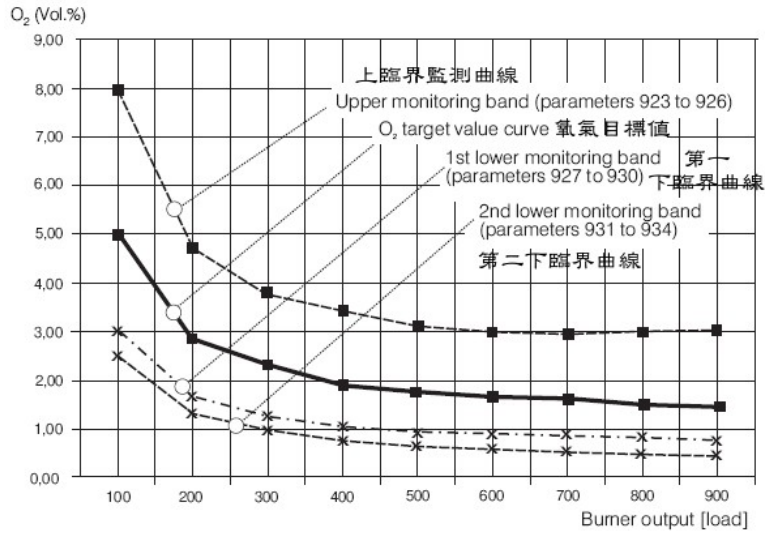


圖 4 氧氣回饋控制系統架構圖

3.3 廢氣可燃氣體 (CO/H₂) 連續監測回饋控制技術

一氧化碳回饋控制的原理是利用特殊的感測器(CO/H₂)主動找到燃燒的最佳狀態，即可能產生 CO 的邊緣並設定及維持在這個點的操作。這是利用 KS1 感測器的感應調整空燃比直到缺氧燃燒，然後操作曲線則在這點構成的曲線上緣操作，這曲線就是燃燒的最佳狀態。實際操作這曲線是利用 KS1 隨時模擬監測的雖然如何排氣中的含氧量還是隨時監測但利用 KS1 測得的 CO 邊際燃燒條件修正降低含氧量。

監測與燃燒過程的控制可以節約能源並保護環境與人體健康，僅僅監測廢氣中的氧氣成份是無法瞭解燃燒是否完全。因此監測並減少廢氣中不完全燃燒的成份是很重要的，那就是 CO 及 H₂ (氫氣)。利用結合式

的 KS1 / KS1-D 探測器可以很快的即時偵測 CO 與 H₂，並作為回饋控制用。

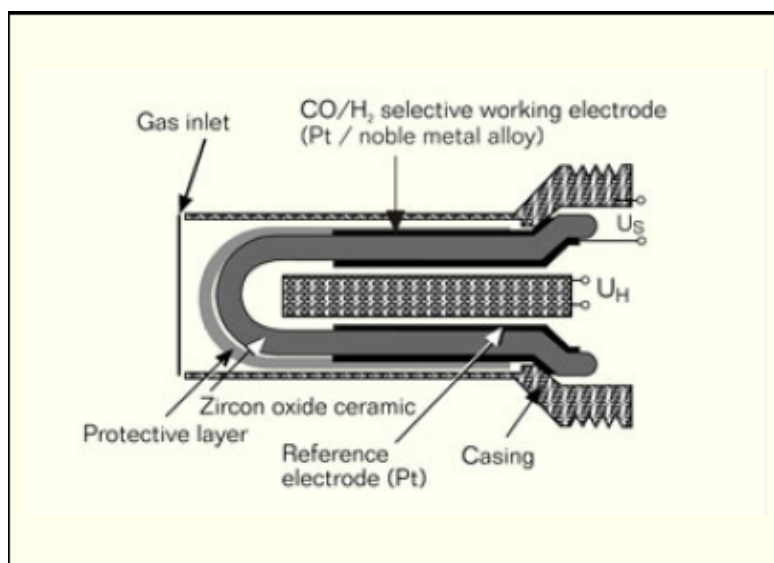


圖 5 結合式探測器 KS1 的構造圖

探測器的電壓值是 O₂ 與可氧化氣體 CO/H₂ 混合反應的電位值之總和。因此即時 CO 及 H₂ 的濃度很低，它的混合電位值仍然遠大於純 O₂ 的訊號，反應快速 t₆₀ 在 2 秒之內。(如下圖)

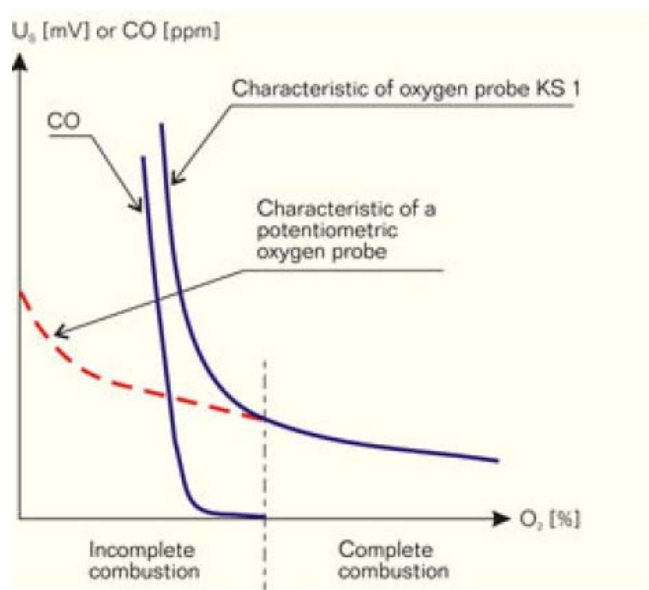


圖 6 KS1/KS1-D 混合式探測器的特性 U(O₂)與電位式 O₂ 探測器的比較
LAMTEC CO/O₂ 控制已在許多廠證實它的效益



圖 7 Nestle Weiding 廠實例

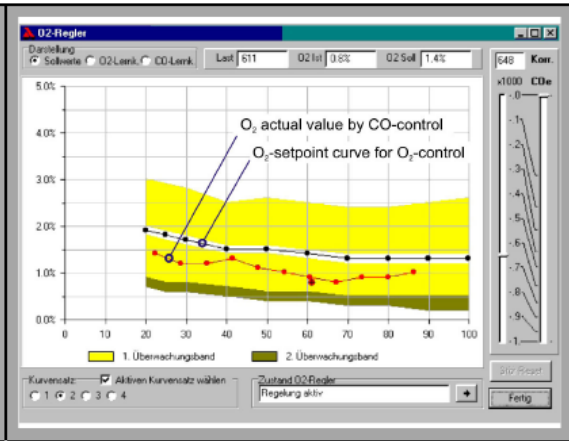


圖 8 Nestle 廠的特性曲線

3.4 送風機變頻控制技術

目前風機控制設備現狀，在各種工業用風機中，如鍋爐鼓、引風機等，大部分是額定電壓運行，風機流量的設計均以最大風量需求來設計，其調整方式採用檔板，風門、回流、起停電機等方式控制，無法形成閉環控制，也很少考慮省電。電氣控制採用直接或 Y—△ 啟動，不能改變風機的轉速，無法具有軟啟動的功能，機械衝擊大，傳動系統壽命短，震動及雜訊大，功率因數較低等是其主要難點。

變頻調速的節能意義：風機水泵類負載多是根據滿負荷工作需用量來選型，實際應用中大部分時間並非工作於滿負荷狀態。由於交流電機調速很困難，常用擋風板、回流閥或開／停機時間，來調節風量或流量，同時大電機在工頻狀態下頻繁開／停比較困難，電力衝擊較大，勢必造成電能損耗和開／停機時的電流衝擊。採用變頻器直接控制風機、泵類負載是一種最科學的控制方法，當電機在額定轉速的 80% 運行時，理論上其消耗的功率為額定功率的 80%³，即 51.2%，去除機械損耗、電機銅、鐵損等影響。節能效率也接近 40%，同時也可以實現閉環恆壓控制，節能效率將進一步提高。由於變頻器可實現大的電動機的軟停、軟起，避免了啟動時的電壓衝擊，減少電動機故障率，延長使用壽命，同時也降低了對電網的容量要求和無功損耗。為達到節能的目標推廣使用變頻器已成為各地節能工作部門以及各單位節能工作的重點。因此，大力推廣變頻調速節能技術，不僅是當前企業節能降耗的重要技術手段，而且也是實現經濟增長方式轉變的必然要求。

風量控制說明

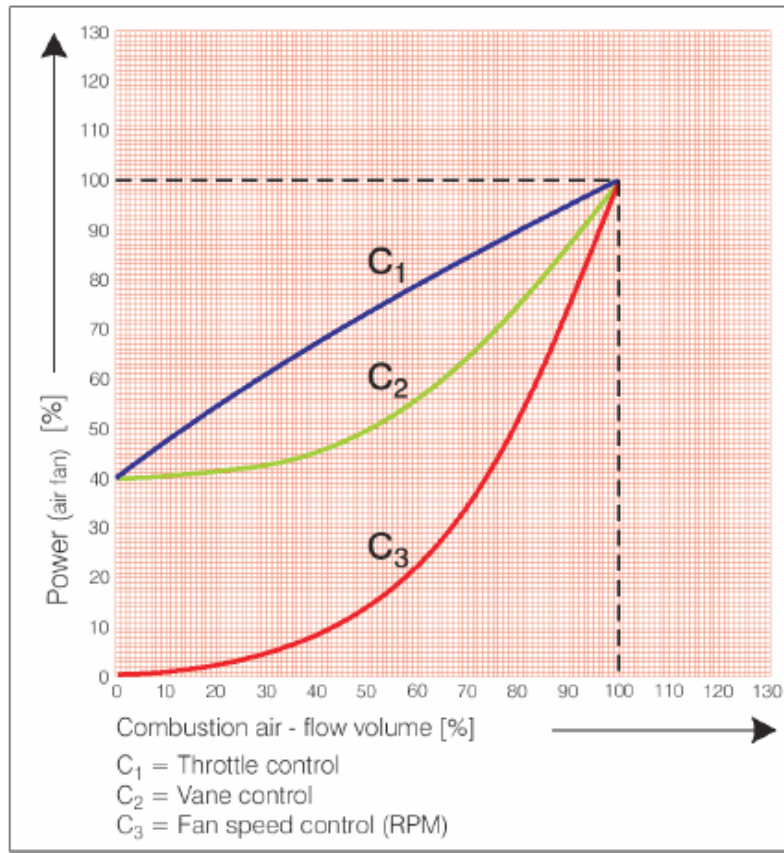


圖 9 變頻控制說明

Plant data: Combustion air fan 100 kW
 Operating hours total 7200Hr / Year
 from this 700 h Full burner load
 2000 h 70 % burner load
 3000 h 50 % burner load
 1500 h 20 % burner load

Burner capacity	Related to position of flap	RPM control
100 %	700h * 100 kW = 70,000kWh	700h * 101 kW = 70,700kWh
70 %	2,000h * 84 kW = 168,000kWh	2,000h * 35kW = 70,000kWh
50 %	3,000h * 72 kW = 216,000kWh	3,000h * 14kW = 42,000kWh
20 %	1,500h * 40 kW = 60,000 kWh	1,500h * 9 kW = 13,500kWh
	514,000 kWh	196,200 kWh
	Savings of: 317,800kWh * 2 (NT\$/kwh) = NT\$ 635,600	



圖 10 變頻控制效益計算

3.5 安全與操作維修

燃燒控制系統最重要的要件是：可靠性，即無論“監測器”或“驅動器”故障都不會影響操作的安全性，在任何故障發生或引發災害之前燃燒機必須立即關閉，微電腦空燃比控制系統因此必須符合“歐盟”相關的標準與規範。

首先，自動化燃燒機控制系統(EN298)及自動化燃油燃燒機控制系統(EN230) 必須適用，最新的標準則為(EN12067-2)，此外所有相關於燃燒機的標準也要符合，例如：(EN676)有關燃氣燃燒機及(EN267)有關燃油燃燒機的標準。此外，因為這些燃燒機是安裝於各種工廠所以與這工廠相關的規定與標準都必須符合這些包括燃燒設備應用的領域。如：

- 1.EN50156 燃燒爐與相關設備所使用的電子設備
- 2.EN1295 水管鍋爐及附屬設備
- 3.EN12952 鍋爐設備
- 4.EN746-2 工業用加熱設備

上述規定有時候有相互矛盾的地方，燃燒管理系統則必須適用並解決這些問題。

四、結 論

依據測試國內業界產汽量 10~55 噸範圍之我國燃油蒸汽鍋爐，經驗顯示多數鍋爐作業負載在 50~80%，排氣含氧量在 3~7%，排氣溫度在 170~210℃，鍋爐效率以 82~87%最為普遍，經由設備裝置及操作條件改善以求能源耗用減量仍具潛力。運用智慧型監控管理-安裝智慧型監控系統建立作業標準，運用實測數據即時分析指引合理作業條件，可以減少異常損失有助於降低生產成本。節約能源兼得環保效益地球溫室氣體減量是現今國際上極為重視的課題，從燃燒排放二氧化碳氣體減量獲致效果最大。

五、參考文獻

- 1.尚金、劉洪、劉浩遠，「高油價對世界經濟的影響」，96年12月。
- 2.「油價長遠趨升節能莫再遲疑」中國新聞網97年7月28日。
- 3.「行政院擬多項節能措施對抗高油價」中央社97年7月9日。
- 4.「飯店的節能與環保觀念」馬斯哥部落格97年6月26日。
- 5.「工業鍋爐能源效率提昇規劃」工業技術研究院97年4月23日。

6. 「FMS 燃燒管控系統說明書」 LAMTEC 96 年 10 月。
7. 「燃燒工程用偵測器與系統」 LAMTEC 96 年 10 月。
8. 「Save Energy-Reduce Pollution」 LAMTEC 94 年 5 月。
9. Hans-Jürgen Altendorf, LAMTEC, Germany “*Capabilities of an electronic controller for combustion processes with fuel/air compound control*”
10. 萬皓鵬、楊熾森，台灣綠色生產力基金會-節約能源中心工業技術研究院能源與資源研究所，「鍋爐效率剖析與能源節約技術」。