

離心泵耗能標準與節能實務

簡煥然¹、鄭詠仁²、沈宗福²、盧江溪²

¹: 勤益科大冷凍空調與能源系 ²: 工研院機械與系統研究所

摘要

離心泵是應用最廣耗能最大的水輸送設備，也是所有工業中單一項目中最耗能的設備，因此由歐盟開始推動的離心泵低耗能選用，中國的離心泵耗能 GB 標準，加上我國 CNS 原有的泵浦與高效率馬達標準，使得國內使用者可以更清楚瞭解如何實務的來確認整體的輸送效率，本文將使用 CNSB4004 與 CNS11327 及 CNS11330 的相關泵浦規格，來進一步探討在現場實務上如何量測泵浦的耗電功率與輸出流功的關係，並如何使用上述的泵浦規格表，如何對照出泵浦耗電的合理性，並進一步以電價 2.02 元/kWh 計算每噸水的電費成本，以及如何建立日常管理規則以及判斷泵浦運轉是否有劣化的情況。

關鍵字：離心泵、耗能標準、日常管理、泵浦性能劣化、節能

1. 泵浦耗能與輸送成本

在能源短缺的今天，如何提高耗用大量電能的泵浦能源效率為嚴肅課題；離心泵浦是利用葉輪的轉動把軸功傳遞給流體，使泵體流動並提高其輸出壓力，也就是流體具有流功，而用來輸送液體的管路系統需要流體壓力來克服管路磨擦阻抗與液位高度差，使用者才能獲得所需的流量，流體的流功也因此由管路的阻抗磨擦生熱而消耗多數的流功，泵浦的流功是由泵送增加的全壓力(Nt/m^2)與流量(m^3/sec)的乘積，而泵浦的效率等於輸出泵功(kW)除以輸入的馬達軸功(kW)，當進一步考慮馬達效率時就可以計算出馬達輸入電功(kW)，也就是可以由馬達輸入電功來評估輸出流功的能源效率，馬達輸入電功的費用是以千瓦小時(kWhr)計算，就是馬達電功乘以運轉時數計算，同時使用者所獲得的流體總量也是流量乘以運轉時間計算，由這樣簡單的流體輸送成本計算使用者就可以進一步評估能源效率的高低，如圖(1)所示，圖中顯示泵浦的性能曲線表中可以增加一條每噸水成本曲線，其單位可以是($元/m^3$)或(kWh/m^3)，也就是在 H-Q 曲線上每一點的每噸水成本，很明顯在操作範圍以外的每噸水成本都會急速增加，如圖(2)所示，為泵浦廠提供的範例[22]包含每噸水所需的千瓦小時，這樣就更容易瞭解為何泵浦需要運轉在高效率區，在輸送過程中過高的管路阻抗也代表高昂的流體輸送成本，評估過程中必須優先考量管路系統的設計得到合理的管路阻抗，再根據阻抗值與流量值訂定泵浦與馬達的規格，而泵浦與驅動馬達的規格與效率分別由泵浦與馬達規範定

訂，本文將引用 CNS[1]-[5]、ISO[4]、GB[5]與 Eup[6]-[13]等規範或報告。

2. Eup 指令與泵浦耗能

歐盟是全球最重視節能與環保議題的組織，自上一世紀 80 年代起逐步推動產品 CE 安全指令，90 年代起進一步推動能源環保等指令，包含馬達能源效率[15]，歐盟 CEMEP 也於 1999 年將現行馬達能源效率明確定義區分為 eff1、eff2、eff3 等三個等級其中高於 eff1 值是屬高效率馬達，2003 年由經濟部標準檢驗局正式公告施行“CNS 14400 低壓三相鼠籠型高效率感應電動機”標準，相當 IE2 等級，在 2007 年 9 月，IEC 發表了 IEC60034-2-1 取代了已公布 30 年的 IEC60034-2，IEC 技術委員會進一步針對 IEC60034-30 草案研擬與討論，主要將馬達定義為 IE1、IE2 和 IE3 共 3 個等級 2005 年公佈的 Eup 2005/32/EC 指令[14]更進一步規範馬達、泵浦、風機、空調機等使用能源產品的能源效率，2008 年並作出更明確的建議或規範[7-11]，泵浦部份則陸續由 1999 年起陸續推動泵浦效率的技術文件或指引[6][12][13]，歐盟泵浦協會 EUROPUMP 也成為推動高效率、高產品安全泵浦的最重要組織，也努力確保歐盟地區的泵浦使用者能使用符合所需高品質泵浦產品，反過來說這些法規指令在無形中也造成無形的技術與市場障礙，讓台灣廠商要進入市場時需要更多努力。

Eup 指令要求下，從泵浦使用者到製造商都必須考慮實際運轉中可能節約能源的方法或程序，以下為作者基於經驗所作的建議：

- (1). 耗能包含泵浦、馬達、驅動器等及管路系統。
- (2). 以單位輸出流功與輸入電功做為耗能評價的基準，含成本(元/m³)或(kWh/m³)。
- (3). 泵浦耗能計算也必須反映管路系統負載變動。
- (4). 泵浦的操作範圍必須與管路系統負載變動匹配，並且位於較佳效率區。
- (5). 標準馬達效率會由 IE1 提高到 IE3，但沉水深井三相馬達尚未列入管制。
- (6). 變轉速驅動被納入能耗問題的解決方案之一。
- (7). 管路系統不再以傳統的壓損觀點看待，進一步追求低耗能的使用成本。

以上的項目可以協助泵浦使用者與製造商有更多共識以滿足能效議題。

3. 泵浦規格與相似定律

泵浦在經過百年發展以後陸上單級端吸離心泵的規格已經由 ISO[4]組織標準化，但這些規格並非強制性，國內離心泵的製造商也多遵循其規格[16]，如圖(3)所示，國內離心泵的規格表，在圖中顯示泵浦的規格有一些規律性，例如，葉輪直徑相同的泵浦會有相似的揚程，相同口徑的泵浦會輸出相似的流量，進一步的相似定律還包含轉速的變化及軸功的變化，請參考圖(4)所示，圖中的資料摘自 CNS 標準[1]，由圖中可以清楚發現泵浦相似定律：流量與

轉速的一次方成正比、揚程與轉速的二次方成正比、軸功與轉速的三次方成正比；請參考圖(5)所示，圖中的資料摘自 CNS 標準[1]，由圖中可以清楚發現泵浦相似定律：流量與葉輪外徑的一次方成正比、揚程與葉輪外徑的二次方成正比、軸功與葉輪外徑的三次方成正比；泵浦相似定律在更早年代 1948 年由 Stepanoff[20]針對不同型式與不同大小的離心泵之額定點進行統計，並使用比速率 N_s 來對離心泵產品作有系統的分類，請參考圖(6)所示，圖中的單位已換算成公制單位，該圖說明額定點的比速率 N_s 相同之泵浦有相似的結構，也就是等比例放大， N_s 不變，流量增大效率也提高，等比例縮小， N_s 不變，流量減少效率也降低，所以比速率 N_s 成為評比泵浦額定點效能最佳工具，而歐盟與美國 HI 合作在 1999 年重新更新 N_s -效率-流量曲線[13]，請參考圖(7)所示，圖中的 N_s 比速率值的流量單位是 m^3/sec ，但等流量曲線的流量單位是 m^3/hr ，比較這二張效率曲線圖就可以發現經過半世紀，其實泵浦額定點的效率並沒有大幅提高，但是對使用者來說比速率的計算還是不容易使用，因此，歐盟後來又在 2003 年進一步推出以流量為基礎的效率選用指引[6]，但附有揚程修正係數，也就是流量相同但揚程高者其效率會較低，該項指引[6]不單有額定點效率，類似 CNS A 效率，也包含有操作範圍最低效率要求，類似 CNS B 效率。

泵浦相似定律的最大用處對設備商而言是大量降低產品開發風險，對使用者來說幫助也很大，透過簡單的計算就可以得到不同尺寸或轉速泵浦須要的輸入軸功或輸出流量、揚程的變化，有助於簡化與降低泵浦選用的工作與風險，雖然今天已有成熟的計算流體力學技術(CFD 技術)可以用在泵浦葉輪與泵殼流道計算，但畢竟如何快速進行計算以正確獲得新的規格或尺寸並產生合理的幾何，含 3D 幾何，再用計算流體力學技術進行細部計算，將是大幅降低開發時間與成本的最重要方法。

4. 離心泵效率標準

雖然已有效率-比速率-流量曲線可以參考，但各國仍訂定相關的標準來規範額定點效率與操作範圍效率，例如 CNS[1]的陸上清水離心泵效率，請參考圖(8)所示，圖中在額定流量下泵浦的效率必須高於 A 效率，而操作範圍的效率必須高於額定流量下的 B 效率值，也就是對軸功的上限加以限制也就是另一種能耗限制的方法，請參考圖(1)與圖(9)所示，另外本人基於產品壽命需求在圖中增加了振動曲線，其原因在於進一步說明是效率過低時，大部份的軸功將會變成振動與摩擦熱而影響泵浦的壽命，關於沉水深井泵泵部份，CNS 11327[2]也有相類似的作法。

歐盟除了在 2003 年推出泵浦指引[6]外，又在 2008 年的第七次論壇工作會議[7]中討論馬達驅動設備的相關效率議題，由於清水離心泵在 2005 年推動的 Eup 指令[14]列為第 11 項

產品(Lot 11)[8-9]，而此一文件包含有由 AEAT 公司執行的歐盟 SAVE 計畫[12]與由 Darmstadt 大學主持的調查計畫[11]的綜合結果，Darmstadt 大學的報告增加了效率-比速率-流量曲線的計算公式[11]，請參考圖(10)所示。該圖中的比速率 $N_s = \text{rpm} * (\text{m}^3/\text{sec})^{0.5} / (\text{m})^{0.75}$ ，也就是比速率之流量計算單位為 m^3/sec ，但在計算效率時的流量計算單位 m^3/hr ，式中的 C 值被整理成效率指標值[11]，如表 1 所示，該表中的縮寫代號為單級端吸泵(ES)/聯軸式單級端吸泵(ESOB)/直結式單級端吸泵(ESCC)/單級端吸管道泵(ESCCI)/立式多級泵(MS)/沉水深井泵(MSS)。表中 C 值是以市場中不合格比率(cut-off)作為產品最低能效的基準，例如，C10%的值代表產品效率值在市場上的產品只有 10%的產品不合格，因此，歐盟於 2008 年的工作會議[7]建議歐盟市場先由 C10% 啟動泵浦效率，未來的效率希望都能達到現行的 C20% 的水準，也就是泵浦效率值將會提高將近 8%-9%，例如由 70% 提高為 79%，雖然在後續的文件並沒有相關的實施時程與強制規定，但是家用熱水泵卻已經列入[9]，該項產品的能耗規定有別於上述的清水離心泵[8]，但將於 2014 年開始實施並將於 2020 年全面實施，要滿足此一規定的產品必須全面變頻控制以滿足變動負載需求。

歐盟在 2003 年推出泵浦指引[6]其作法是讓使用者更容易使用，使用簡潔的流量效率曲線加上揚程修正係數，請參考圖(11a-11d)所示，當製造商提供給採購者一型泵浦的規格時，使用者首先比對其最高效率點是否高於 optimum efficiency selections 曲線，類似 CNS A 效率曲線，若高於此一曲線代表高效率泵浦，若只高於 efficient selections 曲線，類似 CNS B 效率曲線，代表泵浦效率仍可接受，若低於 efficient selections 曲線代表性能不佳不建議使用，而使用者的操作點必須高於 efficient selections 曲線以確認泵浦都是運轉在合理效率範圍，由於泵浦的效率受揚程影響很大，圖中的修正係數 C 就是用來區別高揚程泵與低揚程泵的效率，也就是使用者可以找到修正係數 C 並由其 efficient selections 曲線值扣除 C 值就是合理的最低效率值，例如，操作點流量 100cmh/揚程 130m/2900 的 ESCC 泵浦效率為 68%，請參考圖(11a)所示，查圖得到 efficient selections 曲線值為 71%顯然高於製造商的 68%，另外查效率修正值 C 為 14.8%，在 71%扣除 14.8%等於 56.2%也就是製造商提供的產品是符合需求，因為 68%高於 56.2%，或者把製造商的 68%加上 14.8%等於 82.8%也高於 71%，此一例子說明效率會因揚程而變化並非只有流量就能決定，這也是當初 Stepanoff[20]會用比速率 N_s 的原因。

中國大陸的 GB 標準[5]也提出類似的平均效率曲線，GB 標準[5]內規定低於平均效率曲線 2%-3%者將被視為不符合能源效率，類似 CNS B 曲線，高於平均效率曲線 2%-3%者將被視為符合高能源效率，類似 CNS A 曲線，產品種類包含有單級離心泵、多級離心泵、豎軸多級離心泵(含深井泵)，請參考圖(12a-12f)所示，而 GB 標準的比速率計算法與歐盟不同，流量的計

算單位是 m^3/sec 並且在計算式多乘了係數 3.65，如下式：

$$Ns=3.65*rpm*(m^3/sec)^{0.5}/(m)^{0.75}$$

例如，操作點流量 100cmh/揚程 130m/2900 的單級離心泵浦效率為 68%，比速率 Ns 計算得到值 45.8，請參考圖(12a)所示，查圖流量 100cmh 得到曲線值為 78%顯然高於製造商的 68%，另外查比速率修正值約為 12%，在 78%扣除 12%等於 66%也就是製造商提供的產品是符合需求，因為 68%高於 66%，或者把製造商的 68%加上 12%等於 80%也高於 78%，另外，關於豎軸多級泵的效率部份，請參考圖(12c)所示，顯示豎軸多級泵屬於斜流泵居多，也就是比速率值多屬於 120-300 的範圍內規格，這也符合現有沉水式深井泵產品範圍。這二個例子說明效率會因揚程而變化而且比速率確實是個很好的指標並非只有流量，而且由計算例說明如何正確使用相關圖表來選用高效率產品；

當進一步把各相關標準的效率用相同比速率公式整理成比較圖時，以類似 CNS 的 A/B 效率值標示出陸上泵的效率部份，請參考圖(13)所示，這裡因受限於原始數據無法做成類似 Stepanoff[20]的比速率-效率-流量曲線圖，但已經可以清楚看出歐盟的 C10%效率值與 CNS A 效率值相當，而且歐盟的 A 效率值在低比速率 Ns 區域更追求高效率表現，在其他區域中國 A 效率值與歐盟 A 效率值相當，CNS A/B 效率值顯得相對偏低且缺乏能源效率競爭力，將不利於國內產品的國際競爭力。

有關沉水式深井泵的各國效率比較，本人根據各家公司產品的規格訂出各種大小井徑的深井泵單級規格由 P4 到 P12，如表 2 與表 3 所示，然後根據該表進行效率比較也得到類似結果，請參考圖(14)所示，這裡以公制的比速率為基礎比較了 CNS[2]、歐盟 C10%[11]、中國[5]的效率值，其中 CNS A/B 效率確實偏低，中國 A 效率確實較高；再進一步把取自八區的以往深井泵資料[19]進一步整理，這裡的比速率計算係以單級揚程為準，而原始採購資料中並未清楚標是深井泵的級數，所以，這裡的單級揚程是本人依據經驗推算後決定的，這裡以公制的比速率為基礎比較了八區資料[19]與歐盟 C10%[11]的效率值，請參考圖(15)所示，結果發現國內的深井泵效率約近半數符合歐盟 C10%[11]的要求部分甚至高於要求，請參考圖(16)所示，該圖顯示八區[19]的效率減去歐盟 C10%[11]效率的差值，結果圖中顯示確實有近半數的國產泵浦效率是很好的，但是以往製造商的測試設備未受 TAF 規範管制，數據可信賴度較低只能參考而已。

5. 馬達效率標準

由 1985 年保護臭氧層維也納公約的大原則，於 1987 年 9 月 16 日邀請所屬 26 個會員國在加拿大蒙特婁所簽署的環境保護議定書，該議定書自 1989 年 1 月 1 日起生效，在環保的持

續努力下京都議定書於 1998 年 3 月 16 日開放供簽署，歐美先進國家也陸續自 1997 年開始管制馬達效率，與台灣 CNS14400 同等效率標準有美國的 EPA-1997、加拿大的 CSA-380-98、澳大利亞和紐西蘭的 AS/NZS-1359.5(2006)、歐盟的 CEMEP-eff1(1999)、日本的 JIS C4212，我國是在 2002 年 1 月 9 日開始實施 CNS[21]馬達效率標準，歐盟[14]並於 2005 年針對耗能產品推出 Eup 指令，並持續在 Eup 指令下在 2008 年進一步訂出更高的效率標準[10]，使得高效率馬達又區分出 IE1、IE2、IE3 等三個等級，請參考圖(17)所示，我國 CNS[21]馬達效率高於 IE1 等級但低於 IE2 等級，IE3 等級就是 NEMA 等級，未來甚至可能會有 IE4 等級，在深井泵方面並無標準化的馬達可供參考，在 CNS 方面只有間單的規範，例如 CNS11330[3]，缺乏可供參考的詳細資料，在第八區的資料中經過整理的資料可以得到國內廠商生產的深井馬達效率綜合資料，請參考圖(18)所示，由圖中的統計資料可以清楚指出，大多數的深井馬達效率遠高於 CNS[3]的建議值，雖然第八區有效樣本有 202 件但仍遠遠不足，未來仍應做更廣泛的調查與整理。

泵浦是經過馬達的動力來源驅動，泵浦的能源消耗也包含馬達的耗能，因此，在節能實務上必須考慮馬達的 75%負載-100%負載，是否能完全符合泵浦操作範圍的需求，也就是操作範圍中最高軸功的需求是否小於馬達的 100%負載，在變頻應用領域中必須考慮的是絕緣等級以對抗電源側的諧波破壞。

本節與前一節分別討論泵浦與馬達的效率，以往的使用者與製造商也都分別針對其效率做驗收，但實務上卻有許多缺點，其中最大的缺點就是使用者在系統運作中無法有效建立起耗能監控的計畫，因為在線場監測中只能量測輸入電功與輸出流功，而無法進一步區分馬達效率或泵浦效率，因為泵浦或馬達都有磨耗產生與能衰減問題，因此，本文將在下節中提出實務作法以確認機組是否有潛在耗能過高問題。

6. 泵浦節能的實務做法

最基本的概念就是直接監測輸出流功與輸入電功並建立統計資料，再根據不同使用時數階段長期記錄數據，由數據的變遷來判斷機組是否有潛在耗能過高問題，並進一步以電價 2.02 元/kWh 計算每噸水的電費成本，以下針對陸上泵與深井泵分別詳細說明。

根據 ISO 2858[4]規格進行流功計算，並分別參考各標準 CNS[1]、GB[5]、歐盟[6]、歐盟 C10%[11]之泵浦效率就可以獲得軸功，並且引進馬達效率 CNS[20]就可以獲得輸入電功，本文的計算係以馬達效率 CNS[20]為基準，各國標準的流功-電功比較之計算結果，請參考圖(19)所示，圖中歐盟 A 效率所耗電功最少，CNS B 效率所需電功最高，二者的差異值可以高達 20%以上，顯示 CNS[2]的效率值確實過低，另外由圖中也可以發現比速率 N_s 對輸入電功的

影響確實相當明顯。

把 ISO 2858[4]規格如圖(19)的資料進一步整理，以額定點流量為單位計算額定點每噸水成本，請參考圖(20)所示，發現低流量產品的單位成本較高而且揚程高低影響很大，效率高也直接反映在成本單價上，當資料以額定點比速率 N_s 為單位計算額定點每噸水成本，請參考圖(21)所示，發現低比速率產品的單位成本較高而且高比速率產品其單位成本明顯下降，符合比速率與效率的關係而且相同比速率流量大者會有更低的單位成本。

由於深井泵為複數個葉輪與導葉組成多級泵型式，因此無法像陸上清水泵一樣使用固定功率的馬達來計算輸入電功，只能以各國標準的泵浦效率計算出單級軸功，此處的泵浦規格係以本人多年經驗並參考各廠商規格訂定，請參考表 2 與表 3 所示，並做成單級軸功比較圖，請參考圖(22)所示，在相同輸出單級流功下，中國 A 效率的單級軸功最低而 CNS B 效率的單級軸功最高，歐盟 C10%的單級軸功稍高於中國 A 效率的單級軸功，此一單級軸功統計圖將有助於使用者採購泵浦的參考，但無助於後續的維護監控耗能狀況。根據第八區現有的 202 台深井泵浦的出廠測試資料[19]統計其額定點的流功-電功統計圖，請參考圖(23)所示，其中多數集中在 30kW 以下，電功 50kW-80kW 並沒有泵浦，而且數據分散的狀態也有超過 10%的情形，把圖(23)的資料進一步整理，以額定點流量為單位計算額定點每噸水成本，請參考圖(24)所示，發現低流量產品的單位成本較高，效率高也直接反映在成本單價上，但是多數產品的成本在 0.6 元/m³ 以下，明顯與 ISO2858 圖(21)之多數產品的成本在 0.8 元/m³ 以下有差別。

當基於本人經驗進一步評估各台深井泵的合理級數後，得到單級流功-電功統計圖，請參考圖(25)所示，其中在流功範圍 20kW-30kW 之間可以看到部份的泵浦有相對少的耗電功，而且在流功為 25kW 附近其耗電功差距有高達 20%以上，把圖(25)的資料進一步整理，以額定點流量為單位計算額定點每噸水成本，請參考圖(26)所示，發現整體上單級泵的單位成本都在 0.45 元/m³ 以下，但是低流量產品的單位成本較低這與效率-比速率-流量曲線的概念有差別，而且明顯與 ISO2858 圖(21)之產品成本分佈區勢不符，這部份值得更進一步探討，當資料以額定點比速率 N_s 為單位計算額定點每噸水成本，請參考圖(27)所示，發現高比速率產品其單位成本明顯下降，但是低比速率產品的單位成本並非較高，並不符合比速率與效率的關係，此一問題值得進一步探討。

由於以往使用者在採購深井泵時，針對整台的泵浦與馬達個別的規格提供數據資料，但缺乏級數的資料以致使用者無法用比速率 N_s 來評估其性能的優劣，事實上多數的泵浦使用者都有大量的泵浦在使用，長期下來的泵浦使用數量非常可觀，因此，泵浦製造商的技術能力的評估就是非常重要的關鍵，簡單來說技術好的泵浦公司其全系列產品的單級泵浦效率都會表現突出，也就是其效率-比速率統計值都會達到合理效能值，加上供應商減少有助於往後運

轉時降低維修保養的成本，在營運階段則針對流功-耗電功的管理，在管路裝置上必須考慮增設壓力表與流量計，電力量測工具也必須升級能量測輸入功率，以正確評估耗電功因為單純的電流評估方是長受電壓高低的影響，而且缺乏正確的流功值作為比較基礎容易誤判，以下為實務管理上的參考做法：

(1). 建立單級泵浦的效率-比速率統計與管理

用比速率 N_s 來評估製造商的技術優劣，評估範圍包含全系列產品，測試數據必須以至少 3 級以上且全尺寸葉輪外徑的泵浦進行測試，最後數據可以依據口徑來建立效率-比速率管制圖，如圖(28)所示，並以平均效率曲線做為新採購案的效率基準。

(2). 建立現有泵浦的流功-電功統計圖

使用者可以針對廠內的泵浦進行流功-電功數據的紀錄監測，並建立平均耗能曲線，當泵浦磨損之後流功-電功數據將會落在高耗能區，使用者容易判斷泵浦能源效率是否低下並決定是否維修或更新，如圖(29)所示，而此一數也可以作為採購新品的參考，並請供應商在出廠驗收試驗報告中增列流功與耗電功數據。

(3). 運轉中泵浦的耗能監控

使用者在監控運轉中泵浦時，常以需求水量與耗電流來判斷泵浦的磨耗情況，正常磨耗的泵浦其輸出流功的減少量會大於輸入電功的減少量，而非使用者認知的尚在合理範圍，如圖(30)所示，也就是使用者必須定期檢查泵浦的運轉數據，並確認泵浦耗能的合理性

7. 管路系統節能的實務做法

有關管路系統的節能方面在工研院與自來水第八區的研究[19]顯示，自來水供水負載的變動是隨季節時間、隨用戶人數的變動而變動，系統阻抗曲線的變動可以正確描述這種負載變動，其中的關鍵在於系統阻抗曲線的量測與正確計算，如圖(31)所示，其中阻抗曲線的計算法如下：

- (1). 量取出入口壓力、流量
- (2). 計算流量轉換成流速(m/sec)
- (3). 轉換壓力單位(Nt/m^2)
錶壓力： $P(kg/cm^2)$
- (4). 計算揚程損失 $H_L =$ 泵浦輸出揚程 H_t
- (5). 設定系統淨高 C_0 ，須考慮 U 形管效應
- (6). 帶入 $H_L(m)$ 、 C_0 與 $Q(m^3/min)$ ，計算 C_1 值

(7). 建立系統阻抗曲線，輸入 $Q(\text{m}^3/\text{min})$ 計算 $H_L(\text{m})$

$$H_L(\text{m}) = C_0 + C_1 * Q(\text{m}^3/\text{min})^2$$

(8). 依據 $Q(\text{m}^3/\text{min})$ 與 $H_L(\text{m})$ 重新選擇泵浦規格

許多的泵浦在安裝完成後並沒有再精確測試與分析，使得泵浦是否能在期望的操做點運轉，如圖(32)所示，細部說明如下：

- (1). 操作點 A 是最佳的操作點
- (2). 操作點 B 是在大流量低揚程區域
- (3). 操作點 B 代表管路為低阻力管路系統
- (4). 操作點 B 與操作點 C 應重新選用正確規格的泵浦
- (5). 操作點 C 代表管路為高阻力管路系統
- (6). 降低管路系統阻抗曲線，可以大幅降低運轉耗能

在許多管路系統節能評估的案例中發現只有少數的泵浦運轉在高效率區，多數是需要重新選用適合的泵浦才能得到節能效果，其原因在於系統設計支出無法正確評估系統阻抗曲線，這也導致選用的泵浦規格是無法正確操作在高效率的原因，所以，針對現有系統的節能改善方案必須同時考慮管路與泵浦規格的改善，如圖(33)所示，該案例為現有管路系統阻抗過高，細部說明如下：

- (1). 管路曲線 A 是原有系統。
- (2). 當產能要由流量 Q_1 的操作點 A 增加到流量 Q_2 時的操做點 C 時，泵浦的揚程必須大幅提高，也就是由 A 泵浦改成 C 泵浦，C 泵浦會比 A 泵浦大幅增加揚程與軸功率。
- (3). 當管路系統修正成管路曲線 B，代表管路阻力大為降低。
- (4). 當選用 B 泵浦，在管路曲線 B 的操作點 B 代表 B 泵浦在較低的揚程下，也可以獲得須要的流量 Q_2 ，這時 B 泵浦的功率比 A 泵浦高但低於 C 泵浦。
- (5). 同時兼顧降低管路系統阻抗曲線與泵浦性能可以大幅降低運轉耗能。

8. 變頻離心泵節能的實務做法

歐盟是最積極推動變頻泵的地區，早在歐盟的 SAVE 計畫[15]就把馬達變頻驅動列入未來節能的重點，傳統的定頻泵浦其操作點要變成流量、揚程都要變小時就必須對葉輪外徑加以車修，使流量-揚程曲線因葉輪外徑變小而下降，製造商為滿足顧客需求只能存放最大外徑葉輪以提供客戶要求車修葉輪所需，當使用變頻器改變泵浦轉速時，泵浦的操做點自然沿系統

阻抗曲線變動，使用者只須調整轉速即可無須再對葉輪車修以調整外徑，如圖(34)所示，葉輪轉速變化對泵浦操作點的影響仍然遵循相似定律，流量變化正比於轉速的一次方，揚程變化正比於轉速的二次方，流功變化正比於轉速的三次方，而轉速的變化也會對驅動馬達造成影響，轉速降低馬達效率也會降低，另外馬達輸出負載降低也會降低效率。

使用三相感應馬達驅動的變頻泵浦與定轉速泵浦的流功-電功曲線做比較時，將會發現在額定點變頻泵的耗電量較高，泵浦額定點效率不變，變頻泵須包含變頻器的額外耗電量約增加 3%，還要加上變頻器本身會有電壓降使得馬達耗電量約增加 1.5%，當然也可以選用升壓型變頻器，或選用額定電壓稍低專為變頻器設計的馬達，這二項因素是造成變頻泵耗電增加的原因，反觀定轉速泵浦在額定點本來就有最高效率，在免除額外負擔後當然耗電量會比變頻泵低，但是，假若驅動馬達換成永磁同步馬達其結果就不同，因為永磁同步馬達的效率可以高於感應馬達約 15%，在減去驅動器的額外耗電量後仍可以保有 10%以上的節電效果[17]，如圖(35)所示，圖中定轉速泵浦在額定點附近會比感應變頻泵省電，但在高流量區域耗電量急遽上升，其中的原因是定頻馬達負載加大時滑差也加大以提供額外的扭矩，反觀感應變頻器會調整其磁通向量以補足扭矩的需求，這時感應馬達效率得以維持稍降不致劣化，所以耗電量相對降低，而在低流量區域，定頻泵輸出低流量時仍然維持高揚程輸出，但由系統阻抗曲線瞭解這時系統所需的揚程也相對降低，也就是過高的揚程輸出變成無效的流功，這也是圖中變頻泵因轉速降低而耗功也大幅降低的原因，當然永磁同步變頻泵永遠都會有更低的耗電能表現。

一般習用的恆壓變頻泵可以節約電能的原因與前面小節相同，但可以由流量-揚程曲線做更進一步說明，如圖(36)所示，圖中的面積 A-D-A' 就是代表可以節能的區域，因為流功就是壓力與流量的乘積，該面積代表揚程與流量的乘積就相當於流功，關於如何獲得更多節能的方法是值得進一步研究。

變頻泵在過濾系統之變動負載應用，當換新濾材時系統的阻抗曲線最低，在所需的流量下用最低的轉速即可，當系統運轉愈久阻抗曲線會隨過濾材的組塞而增加，但是系統運轉又必須維持相同流量，這時提高轉速就可以維持穩定輸出水量，如圖(37)所示，圖中的等流量曲線就代表泵浦實際上的操作點，也就是過濾系統的負載曲線。

變頻泵在空調系統之變動負載應用，空調系統的負載變動來自於熱負載變動，熱負載變動可能來自於環境溫度、室內人數增減、陽光日曬、辦公時間、辦公室數量等原因，熱負載變動時系統循環冰水的流量也需要配合變動，當然管路系統中的控制閥也必須跟著調整，這些調整就會反映在管路阻抗曲線的變動，這時具有變轉速功能的泵浦才能滿足熱負載變動的需求，如圖(38)所示，圖中的負載曲線就代表泵浦實際上的操作點。

雖然已經知道變頻泵是可以節省許多電能，但是對於變動的阻抗曲線之負載曲線如何進一步規範其節能的能力，並區別變頻系統的優劣，歐盟[9]首先於 2008 年對家用熱水泵做出規定，其中能源效率指標值(EEI)是一變頻泵在運轉時間內耗電功與定轉速泵也在相同時間內耗電功的比較，而定轉速泵的耗能基準是由列入樣本的定頻泵在額定點之流功-耗電能數據所統計出來，目前已訂出的指標等級，如表 4 所示，其中定頻泵有較佳效率者其 EEI 值可以達到 0.8 左右，要達到 2014 年 EEI 值 0.4 者就必須是變頻泵才行，而要達到 0.3 以下者就必須要使用永磁同步馬達才可能，在 2020 年歐盟的目標是 EEI 值 0.24 以下，此一變頻技術評估方法頗值得國內參考，以下作一簡單介紹。

首先針對應用範圍內的產品建立基本樣本，並採用其額定點的流功-電功值納入統計，並進一步得到其模擬曲線做為耗能基準線，如圖(39)所示，圖中的曲線包含各家公司的產品由小功率到大功率，其次，針對變動負載訂出工作時間分配，系統負載有變動就不會是在相同負載下持續工作，訂出合理的時間分配是必要的，當然不同應用條件必然會有不同的工作時間分配，如表 5 所示，步驟 3，再依據負載條件訂出該條件下的不同流功與耗電功，負載條件可以是流量或揚程，如圖(40)所示，圖中是以不同流量做為不同負載的條件，最後，依據流功計算出耗能基準線的不同耗電功，再把這些耗電功分別乘以時間分配後二者在相除就可以得到 EEI 值，這樣的方法非常有助於區別變頻系統的效能值得推廣。

9. 結論與建議

- (1). 離心式泵耗能標準未來在 2014 年開始在歐洲逐步實施，家用熱水循環泵，中國大陸也藉由產品安全檢查來確認產品是否符合 GB/T2816-2002 的軸功效率。
- (2). CNS 之泵浦相關標準的內容需要大幅修正，目前已無法滿足 Eup 等國際法規，未來將傷害台灣泵浦產品的國際競爭力。
- (3). 採購合約的內容中應把產品的級數、消耗電功列入並且須包含操作範圍內的測試點的數據，也包含單級全尺寸葉輪的單級揚程、流量、比速率、效率、軸功、單位成本等。
- (4). 建議泵浦使用單位統計各型大小泵浦的效率-比速率統計值，多級泵應把單級的比速率做正確計算，未來這些數據可以做為採購案規格的參考。
- (5). 管路系統須增加流量與壓力量測裝置，才能獲得正確流功值，電力量測工具必須能量測輸入電功。
- (6). 流功-電功曲線為最可靠有效的監測方法，可以正確監控運轉耗能與泵浦磨損狀況，採購合約中泵浦驗收工作必須包含現場量測操作範圍內的流功-電功曲線，並做為未來營運耗

能監控的參考數據。

- (7). 單級流功-電功曲線也必須在完成現場測試驗收完成後記錄，就是整機在操作範圍內的流功-電功曲線測試完成後，在除以級數就可以得到單級流功-電功曲線，以做為未來採購時預估泵浦電力需求及評估耗能的參考。
- (8). 採購合約中泵浦驗收工作必須包含現場管路系統阻抗曲線量測，作為確認泵浦操作點是否在高效率區的依據，並做為未來擴大產能時管路設計變更的參考依據。
- (9). 耗能管理應列入日常管理的一環，尤其管路系統負載變動時，必須記錄不同負載下的管路阻抗曲線，計算泵浦在變動負載下的流功-耗電功值並進行分析，才能達成節能目標。
- (10). 製造商陸續投入 TAF 實驗室的建立，未來取得的數據可信賴度相對提高，但如何進行使用大小不同的樣本泵浦分別在不同的 TAF 實驗室進行測試，以評比各實驗室的數據誤差的相依性測試將必須被執行，以避免測試報告良莠不齊的現象。
- (11). 大量使用泵浦的公司或團體建議以全產品線進行製造商技術評比工作，以確保製造商提供的技術與產品確實可靠，能確保製造商都能持續提供高能源效率及使用壽命長的產品。
- (12). 多數的泵浦運轉於負載變動狀況，變頻系統效能指標 EEI 制度值的建立，另外進一步研究，如何使泵浦機組的控制策略能配合管路系統的變動將是下階段的研究重點。

10. 致謝

本研究的經費來自於經濟部能源局，由工研院機械與系統研究所執行，感謝計畫同仁的努力與協助，也謝謝自來水公司第八區提供的詳細數據，該單位人員的大力協助使本項研究結果更具有參考價值。

10. 參考資料

1. CNS 2138 B4004 小型渦卷泵
2. CNS 11327 B4064 深井用沉水電動機泵
3. CNS 11330 4428C 低壓三相鼠籠型感應電動機(深井用沉水電動機泵用)
4. ISO 2858 End suction centrifugal pumps (rating 16 bar)-Designation, nominal duty point and dimensions
5. GB 19762 清水離心泵能效限定值及節能評價值
6. European guide to pump efficiency for single stage centrifugal pumps May 2003
7. Meeting of the Ecodesign Consultation Forum, 27, 28, 29, May 2008
Annex 2: Working document on possible eco design requirements for single stage end suction, vertical multistage and submersible multistage pumps
Annex 2: Working document on possible ecodesign requirements for 0.75-200(370) kW electric motors
Annex 2: Working document on possible ecodesign requirements for standalone glandless circulators
http://ec.europa.eu/energy/efficiency/ecodesign/forum_en.htm
8. Lot 11 Water Pumps (in commercial buildings, drinking water pumping, food industry, agriculture) final, AEA Energy & Environment, 2008
9. Lot 11 Classification of Circulators final, AEA Energy & Environment, 2008
10. Lot 11 Motors final, ISR University of Coimbra, 18, Feb, 2008
11. A method to define a minimum level of pump efficiencies based on statistical evaluations, Technical University Darmstadt, 2008
12. Studying on improving the energy efficiency of pumps, ETSU, AEAT PLC, European Commission, Feb, 2001
13. Attainable efficiencies of volute casing pumps, EUROPUMP Guide No. 2, 1999
14. Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-using products and amending Council Directive [92/42/EEC](#) and Directives [96/57/EC](#) and [2000/55/EC](#) of the European Parliament and of the Council
15. Improving the penetration of energy efficient motors and

drives , SAVEII-Motors-Final-Report-Mar-2000

16. WXA 離心泵型錄，萬事興泵浦，萬事興實業有限公司，2006
17. AVF 無軸封永磁罐裝泵技術報告，內部報告，協磁泵浦，協磁股份有限公司，2009
18. 郭欽弘, 黃建民 馬達動力系統-泵浦的選用與能源效率分析 「機械工業雜誌」, (299), 20080201
19. 賴慶峰, 林志憲, 盧江溪, 簡煥然, 王炳鑫, 吳安邦, 沈宗福, 黃國洲 自來水給水用深井泵及其系統之節能策略探討 「中華民國自來水協會第 屆自來水研究發表會」, (26 屆), 20091117
20. Alexey J. Stepanoff, Centrifugal and axial flow pumps : theory, design, and application, Wiley, 1948
21. CNS 14400 C4482 低壓三相鼠籠型高效率感應電動機(一般用)
22. CH 離心泵型錄，葛蘭富泵浦，Grundfos 公司

表 1[11]

| | Quantity cut-off | | | | | | | | | |
|----------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 5% | 10% | 15% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% |
| C (ESOB 1450) | 134.38 | 132.58 | 131.70 | 130.68 | 129.35 | 128.07 | 126.97 | 126.10 | 124.85 | 122.94 |
| C (ESOB 2900) | 137.28 | 135.60 | 134.54 | 133.43 | 131.61 | 130.27 | 129.18 | 128.12 | 127.06 | 125.34 |
| C (ESCC 1450) | 134.39 | 132.74 | 132.07 | 131.20 | 129.77 | 128.46 | 127.38 | 126.57 | 125.46 | 124.07 |
| C (ESCC 2900) | 137.32 | 135.93 | 134.86 | 133.82 | 132.23 | 130.77 | 129.86 | 128.80 | 127.75 | 126.54 |
| C (ESCCI 1450) | 138.13 | 136.67 | 135.40 | 134.60 | 133.44 | 132.30 | 131.00 | 130.32 | 128.98 | 127.30 |
| C (ESCCI 2900) | 141.71 | 139.45 | 137.73 | 136.53 | 134.91 | 133.69 | 132.65 | 131.34 | 129.83 | 128.14 |
| C (MS 1450) | 134.83 | 134.45 | 133.89 | 132.97 | 132.40 | 130.38 | 130.04 | 127.22 | 125.48 | 123.93 |
| C (MS 2900) | 139.52 | 138.19 | 136.95 | 135.41 | 134.89 | 133.95 | 133.43 | 131.87 | 130.37 | 127.75 |
| C (MSS 2900) | 137.08 | 134.31 | 132.89 | 132.43 | 130.94 | 128.79 | 127.27 | 125.22 | 123.84 | 122.05 |

表 2[僅供參考]

| 型號 | 單級揚程 m | 轉速 rpm | 流量 m ³ /hr | CNS B效率 % | CNS A效率 % | 中國 B效率 % | 中國 A效率 % | 流功 I kW | 比速率 Ns | 歐盟 C10% 效率 |
|----|--------|--------|-----------------------|-----------|-----------|----------|----------|---------|--------|------------|
| P4 | 6.6 | 3450 | 1 | 12.7% | 24.7% | 0.0% | 0.0% | 0.02 | 108.16 | 19.5% |
| P4 | 6.6 | 3450 | 2 | 30.7% | 30.7% | 0.0% | 0.0% | 0.04 | 152.97 | 35.9% |
| P4 | 6.6 | 3450 | 3 | 29.0% | 34.0% | 40.0% | 45.0% | 0.05 | 187.35 | 43.8% |
| P4 | 6.4 | 3450 | 5 | 33.3% | 38.3% | 47.8% | 52.8% | 0.09 | 247.51 | 52.2% |
| P4 | 6.4 | 3450 | 8 | 37.0% | 42.7% | 54.0% | 59.0% | 0.14 | 313.08 | 57.7% |
| P6 | 14 | 3450 | 8 | 37.0% | 42.7% | 54.0% | 59.0% | 0.30 | 174.06 | 52.1% |
| P4 | 5 | 3450 | 10 | 38.7% | 44.7% | 56.5% | 61.5% | 0.14 | 421.23 | 59.4% |
| P6 | 15 | 3450 | 10 | 38.7% | 44.7% | 56.5% | 61.5% | 0.41 | 184.79 | 54.9% |
| P6 | 14 | 3450 | 14 | 41.0% | 47.3% | 59.3% | 64.3% | 0.53 | 230.26 | 60.3% |
| P6 | 13 | 3450 | 18 | 43.0% | 50.0% | 61.2% | 66.2% | 0.64 | 276.01 | 63.5% |
| P6 | 13 | 3450 | 25 | 45.3% | 53.3% | 63.3% | 68.3% | 0.88 | 325.28 | 66.4% |
| P6 | 13 | 3450 | 33 | 48.0% | 56.0% | 65.0% | 70.0% | 1.17 | 373.72 | 68.1% |
| P6 | 12 | 3450 | 45 | 50.5% | 59.3% | 66.7% | 71.7% | 1.47 | 463.41 | 69.0% |
| P8 | 24 | 3450 | 45 | 50.5% | 59.3% | 66.7% | 71.7% | 2.94 | 275.54 | 69.4% |
| P8 | 24 | 3450 | 60 | 53.0% | 62.0% | 68.0% | 73.0% | 3.92 | 318.17 | 71.4% |

| 型號 | 單級揚程 m | 轉速 rpm | 流量 m ³ /hr | CNS B效率 % | CNS A效率 % | 中國 B效率 % | 中國 A效率 % | 流功 I kW | 比速率 Ns | 歐盟 C10% 效率 |
|-----|--------|--------|-----------------------|-----------|-----------|----------|----------|---------|--------|------------|
| P8 | 22 | 3450 | 75 | 54.0% | 63.5% | 69.1% | 74.1% | 4.49 | 379.71 | 72.5% |
| P8 | 20 | 3450 | 90 | 55.0% | 65.0% | 70.4% | 75.4% | 4.90 | 446.78 | 72.6% |
| P8 | 18 | 3450 | 120 | 57.0% | 67.0% | 71.2% | 76.2% | 5.88 | 558.32 | 71.8% |
| P10 | 44 | 3450 | 60 | 53.0% | 62.0% | 68.0% | 73.0% | 7.19 | 201.94 | 68.3% |
| P10 | 40 | 3450 | 75 | 54.0% | 63.5% | 69.1% | 74.1% | 8.17 | 242.51 | 71.2% |
| P10 | 36 | 3450 | 90 | 55.0% | 65.0% | 70.4% | 75.4% | 8.82 | 287.50 | 73.1% |
| P10 | 32 | 3450 | 120 | 57.0% | 67.0% | 71.2% | 76.2% | 10.45 | 362.64 | 74.6% |
| P10 | 28 | 3450 | 160 | 58.3% | 69.0% | 72.3% | 77.3% | 12.20 | 462.84 | 74.5% |
| P10 | 28 | 3450 | 190 | 59.2% | 70.2% | 72.8% | 77.8% | 14.48 | 504.37 | 74.3% |
| P12 | 44 | 3450 | 160 | 58.3% | 69.0% | 72.3% | 77.3% | 19.16 | 329.77 | 75.7% |
| P12 | 40 | 3450 | 190 | 59.2% | 70.2% | 72.8% | 77.8% | 20.69 | 385.99 | 76.0% |
| P12 | 38 | 3450 | 210 | 59.5% | 70.5% | 73.1% | 78.1% | 21.72 | 421.71 | 75.9% |
| P12 | 36 | 3450 | 260 | 60.3% | 71.3% | 73.6% | 78.6% | 25.48 | 488.66 | 75.5% |
| P12 | 34 | 3450 | 320 | 61.0% | 72.0% | 74.2% | 79.2% | 29.62 | 565.86 | 74.4% |
| P12 | 34 | 3450 | 360 | 61.0% | 72.0% | 74.6% | 79.6% | 33.32 | 600.19 | 73.9% |

表 3[僅供參考]

| 型號 | 單級揚程 m | 轉速 rpm | 流量 m ³ /hr | 流功 I kW | 比速率 Ns | CNS B泵軸功 (kW) | CNS A泵軸功 (kW) | 歐盟 C10% 軸功 (kW) | 中國 B泵軸功 (kW) | 中國 A泵軸功 (kW) |
|----|--------|--------|-----------------------|---------|--------|---------------|---------------|-----------------|--------------|--------------|
| P4 | 6.6 | 3450 | 1 | 0.02 | 108.16 | 0.14 | 0.07 | 0.09 | | |
| P4 | 6.6 | 3450 | 2 | 0.04 | 152.97 | 0.12 | 0.12 | 0.10 | | |
| P4 | 6.6 | 3450 | 3 | 0.05 | 187.35 | 0.19 | 0.16 | 0.12 | 0.13 | 0.12 |
| P4 | 6.4 | 3450 | 5 | 0.09 | 247.51 | 0.26 | 0.23 | 0.17 | 0.18 | 0.16 |
| P4 | 6.4 | 3450 | 8 | 0.14 | 313.08 | 0.38 | 0.33 | 0.24 | 0.26 | 0.24 |
| P6 | 14 | 3450 | 8 | 0.30 | 174.06 | 0.82 | 0.71 | 0.59 | 0.56 | 0.52 |
| P4 | 5 | 3450 | 10 | 0.14 | 421.23 | 0.35 | 0.30 | 0.23 | 0.24 | 0.22 |
| P6 | 15 | 3450 | 10 | 0.41 | 184.79 | 1.06 | 0.91 | 0.74 | 0.72 | 0.66 |
| P6 | 14 | 3450 | 14 | 0.53 | 230.26 | 1.30 | 1.13 | 0.88 | 0.90 | 0.83 |
| P6 | 13 | 3450 | 18 | 0.64 | 276.01 | 1.48 | 1.27 | 1.00 | 1.04 | 0.96 |
| P6 | 13 | 3450 | 25 | 0.88 | 325.28 | 1.95 | 1.66 | 1.33 | 1.40 | 1.30 |
| P6 | 13 | 3450 | 33 | 1.17 | 373.72 | 2.43 | 2.09 | 1.71 | 1.80 | 1.67 |
| P6 | 12 | 3450 | 45 | 1.47 | 463.41 | 2.91 | 2.48 | 2.13 | 2.20 | 2.05 |
| P8 | 24 | 3450 | 45 | 2.94 | 275.54 | 5.82 | 4.96 | 4.24 | 4.41 | 4.10 |
| P8 | 24 | 3450 | 60 | 3.92 | 318.17 | 7.40 | 6.32 | 5.49 | 5.76 | 5.37 |

表 4

| Class | Energy Efficiency Index (EEI) |
|-------|-------------------------------|
| A** | EEI < 0.20 |
| A* | 0.20 ≤ EEI < 0.30 |
| A | 0.30 ≤ EEI < 0.40 |
| B | 0.40 ≤ EEI < 0.60 |
| C | 0.60 ≤ EEI < 0.80 |
| D | 0.80 ≤ EEI < 1.00 |
| E | 1.00 ≤ EEI < 1.20 |
| F | 1.20 ≤ EEI < 1.40 |
| G | EEI ≥ 1.40 |

表 5

| 負載 Q | 時間 t |
|------|-------------------|
| 100% | t _{100%} |
| 75% | t _{75%} |
| 50% | t _{50%} |
| 25% | t _{25%} |

- t_{100%} + t_{75%} + t_{50%} + t_{25%} = 100%
- 運行時間比例與應用系統相關
- 負載 Q 的比例次系統應用時的最大流量為 100%

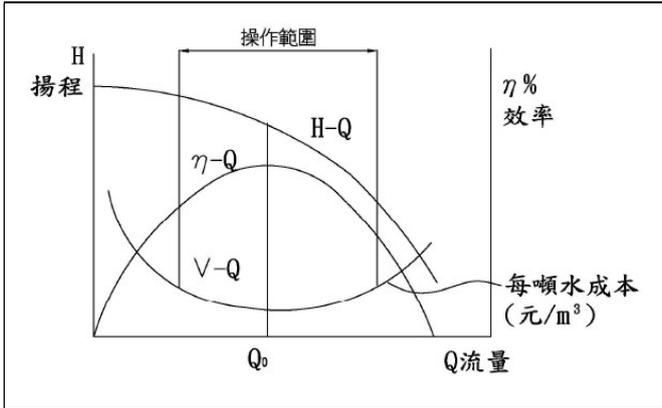


圖 1

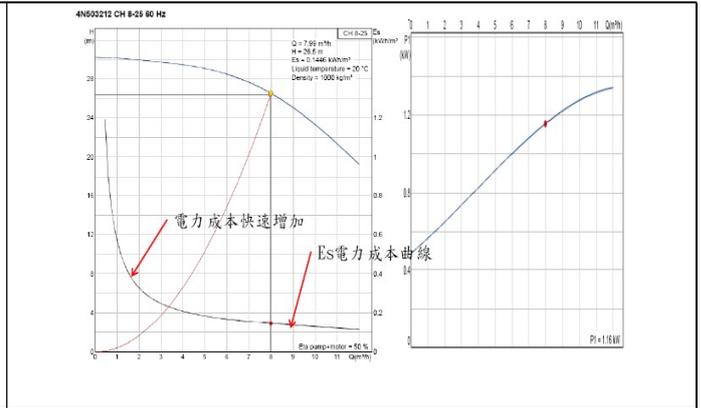


圖 2 [22]

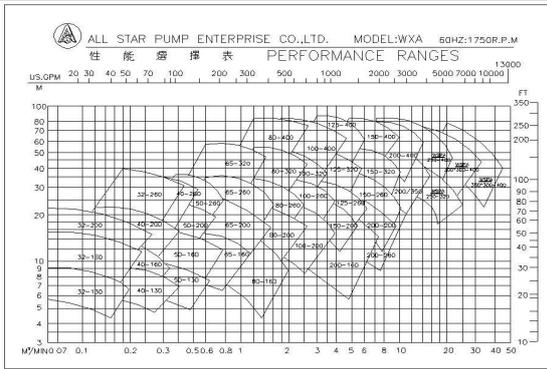


圖 3 [16]

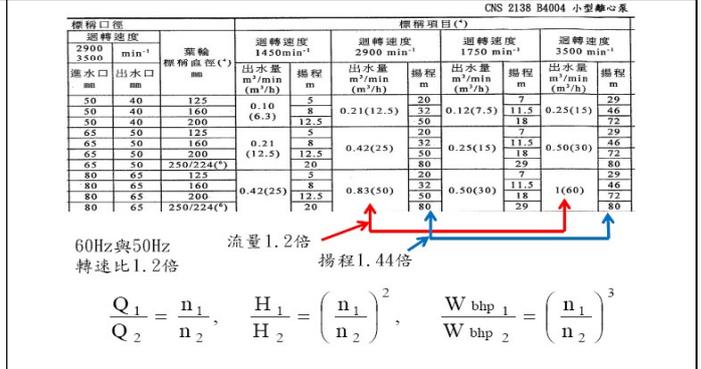


圖 4 [1]

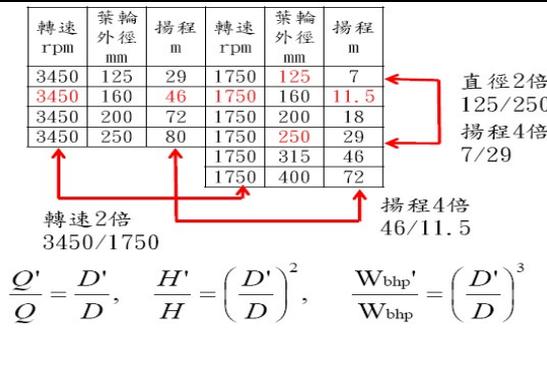


圖 5 [1]

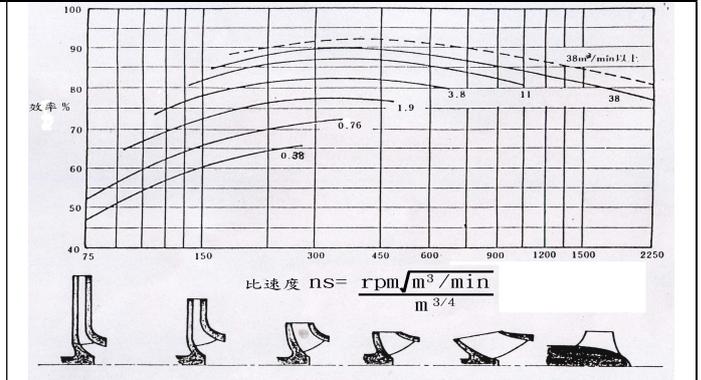


圖 6 [20]

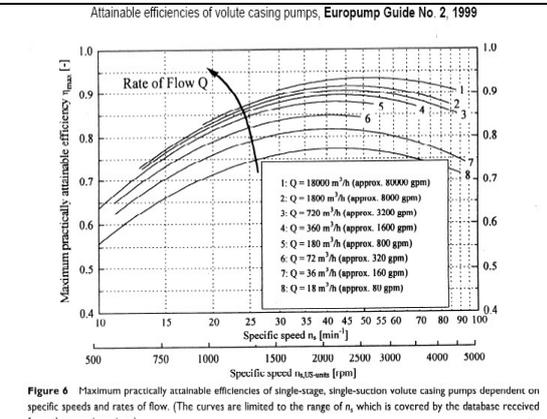


圖 7 [13]

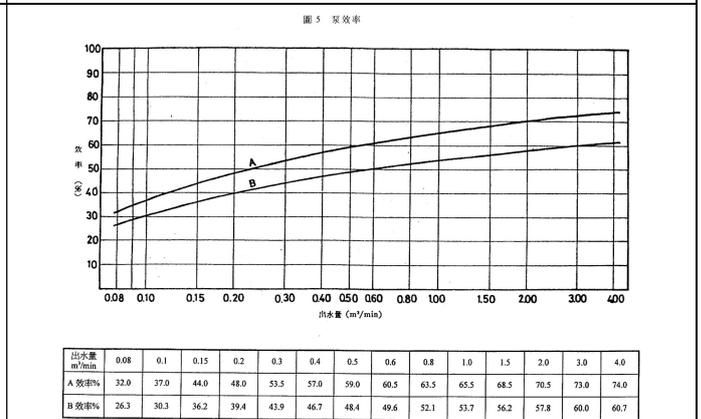


圖 8 [1]