

真空系統節約能源實務

彭元興*、鄧澤殷**、張清賀***、王益真****、

The Practical Aspects of Energy Conservation in Mill Vacuum Systems

Yuan-Shing Perng* Tser-Ying Teng** Ching-Ho Chang*** I-Chen Wang****

Summary

The design power of papermaking vacuum system ranged between 500 and 8000 hp, with power consumption ranked second only to the transmission system. It is often a least understood unit operation in papermaking processes. Adjusting vacuum system to achieve energy consumption minimization entails 1) survey of the vacuum system; 2) periodical maintenance of vacuum pumps and accessories; 3) replace and calibrate process instruments and indicators; 4) utilizing daily logs to understand the states of vacuum systems, periodical review of the operational data; and 5) utilizing walkabout management to discover problems effectively. Upon completion of the survey, a typical energy saving protocol will act in 4 parts according to 1) systematic problem; 2) specific pump problem; 3) incorrect operations and mismatched facilities; and 4) energy-saving principles for further illustration. We hope that the paper can be a useful reference to domestic papermakers and allows an ever optimized operational condition for the vacuum systems in the mills, so as to achieve maximum production while minimizing the cost of the vacuum systems. Therefore international competitiveness can be enhanced.

Key words : Vacuum pump, energy saving, seal water, paper machine, eccentric fan, forming section.

一、前言

雖然真空系統為抄紙機製程中不可分割的一部份，但是真空系統效率不良或是規格選用不適當時，會導致其他支援系統調整至最大化來補償，所以不會直接影響到抄紙作業。真空泵會隨時間而磨損，所以真空系統的性能亦會隨時間而衰退。實務上，當製程中的空氣流量隨著時間減少時，必須小幅調整真空系統來補償，雖然在實務上，大部份的現場人員都認為不需要如此麻煩。

真空系統在抄紙機製程中的設計馬力數在500-8000 hp，耗電量排名第二，僅次於傳動系統，往

往是在抄紙機製程中最不被了解的單元之一。效率不佳的真空泵會逐步增加生產成本，其增加的幅度往往會被忽略。例如：蒸汽耗用的提高、化學藥品添加量的增加、損紙量提高等。因此生產及維護單位必須定期測試真空系統的特性表現及追蹤相關趨勢，使真空系統維持在最適化狀態，以達到生產量最大化及真空系統成本最小化。

如何調控真空系統達到能源耗用最小化？建議造紙廠以五步驟來進行，以確保真空系統操作在最佳效率狀態，說明以下：

(1)真空系統調查。

- (2) 定期保養真空泵及附屬設備，包含皮帶、齒輪箱、馬達等。
- (3) 更換及校正製程儀器及指示錶，包括真空壓力錶、水封壓力錶、真空泵封水池的液位傳送器、馬達安培錶等。
- (4) 利用日常記錄來了解真空系統狀態，定期檢討操作數據。
- (5) 利用走動管理(EMBWA, Energy Management By Wandering Around)來有效發掘問題。

本文依據 Doug Sweet & Associates, Inc. Sweet 先生(Sweet, 2008, 2006,1996)的文獻及 TAPPI TIP 0502-01 的資料，整理對於有關真空系統節約能源與管理實務的指導原則，做為國內造紙業界的參考，期能降低單位產品的 CO2 排放量，以提升國際競爭力。

二、真空系統簡介

真空系統應用在抄紙機製程單元說明如圖 1，主要應用區域為網部成形區及壓水部。在網部成形區應用真空系統的單元有：1) 真空協助擾動刮水板抽吸箱(vacuum assisted pulsative foil suction boxes)、2) 低真空區域刮水板抽吸箱(low vacuum area of foil suction boxes)、3) 中真空區域刮水板抽吸箱(medium vacuum area of foil suction boxes)、4) 濕箱(wet boxes)-低真空區域平抽吸箱(low vacuum area of flat suction boxes)、5) 乾箱(dry boxes)-高真空區域平抽吸箱(high vacuum area of flat suction boxes)、6) 低真空區域伏輾(low vacuum area of couch roll)、7) 高真空區域伏輾(high vacuum area of couch roll)等。在壓水部應用真空系統則為利用毛毯抽吸箱(fabric suction boxes)來去除毛毯中的水份。

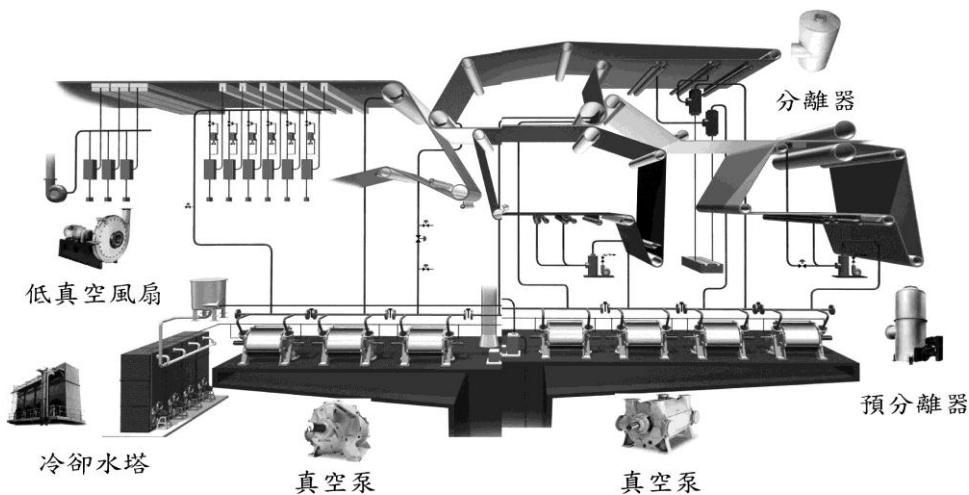


圖 1 真空系統應用在抄紙機製程單元示意圖(Nash, 2004)

典型真空系統流程以 U 型箱(Uhle box)為例，說明如圖 2。真空系統主要的單元有：抽吸單元、預分離器(pre-separator)、水封槽(seal pit)、真空泵(vacuum pump)、放流分離器(discharge separator)或消音器

(silencers)等。設計真空系統必須考慮：1) 成型區的配置需求、2) 真空度需求、3) 高真空脫水元件的開孔面積、4) 成型網或毛毯的厚度、型式、透氣度等，來確認空氣流量需求。

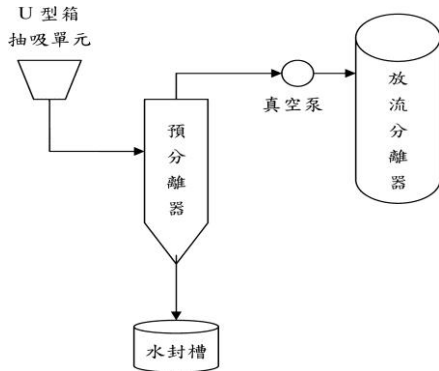


圖 2 U 型箱真空系統示意圖

三、真空系統調查

為使真空系統能源耗用最小化，可以藉由真空系統調查來發掘能源過度耗用的真正原因。真空系統調查需要藉由一些檢測數據，來使問題點逐步浮出表面。典型真空系統調查需要 2-3 天來進行，以徹底了解真空系統現況、抄紙機真空需求、一般操作面數據等。當然必須同時與現場操作人員及維修保養人員訪談、檢查毛毯水份及排水系統變化趨勢等。最後別忘了到地下室及抄紙機週圍，以實地觀察真空系統及抄紙機的表現。

真空系統調查需要全面性來了解整體真空協同脫水製程，從網部到壓水部。評估單元包括：真空脫水元件、抽吸輾、U 型箱、分離器、真空控制系統、水移除泵、封水桶及槽 (barometric seal tanks and chests)、真空泵、封水系統、冷卻塔、空氣/水排放系統等。真空系統的管路設計也必須加以評估及比較，以確認設計是否正確。真空元件參數必須跟 TAPPI TIP 0502-01 Paper machine vacuum selection factors 來必比較，甚至可以跟類似規模及紙種的抄紙機來比較，以找出瓶頸點及可能產生造成生產及品質等問題的源頭。

經過全面性的真空系統調查後，典型大部份真空系統會提高能源耗用及/或降低效率的原因，整理如下：

- (1) 封緘水溫度過高。
- (2) 真空泵背壓 (back pressure) 過高。
- (3) 封緘水壓力過高。
- (4) 使用同步 (synchronous) 馬達與感應 (induction) 馬達對於功率因數的影響。
- (5) 從循環系統來的封緘水流量過高，沒有經過適當的冷卻或冷卻水塔操作不良。
- (6) 封緘水壓力太高。
- (7) 流孔板及噴嘴損壞或不見。
- (8) 在泵及管路中有結垢累積。
- (9) 泵馬達、外殼 (casting) 或凸輪 (lobes) 磨損。
- (10) 還使用舊型、效率低的真空泵。
- (11) 高程度管路損失及不正確系統設計。

四、系統問題案例

造成真空系統會提高能源耗用及/或降低效率的系統問題，主要原因有：1) 封緘水溫度過高、2) 因為封緘水供應源壓力不穩定或封緘水壓力過高，導致封緘水流量過高、3) 因為系統設計或操作問題，導致真空泵背壓過高、4) 使用同步馬達與感應馬達，以影響功率因數等四類狀況，分別說明如下：

1. 封緘水溫度過高

提高真空泵封緘水的溫度 (超過 32-38 °C 時) 會降低真空泵的效率及同步降低真空泵的容量。在設計真空泵封緘水的循環回收系統中，水溫最好不要超過 45 °C，因為溫度提高會使真空泵的效率很快下降，例如：在真空度 500 mmHg 時，當溫度 27 °C 升高至 43 °C，其效率下降 10%；但在真空度 125 mmHg 時，其效率只下降 5%。實務上，許多案例顯示在高真空應用時，例如抽吸伏輾，甚至會降低容量 25% 以上。這表示抽吸伏輾會因真空容量不足而影響脫水能力，或是增加額外的能量來達到設定的真空度。這種案例發生主要原因來自節約用水計畫的推動，封緘水被密閉化而沒有考慮到封緘水降溫的問題。

如何達到降低封緘水用量而不犧牲真空泵的表現？這可以在節約用水計畫中，考量利用冷卻水塔或熱交換器來冷卻封緘水。應用冷卻水塔來處理較髒的封緘水，已有許多成功的案例可參考。系統增設冷卻水塔時，需要操作人員監控、定期保養，有時亦可考慮添加水處理藥品。

要特別注意的是，封緘水的溫度並不會直接影響真空泵的能源耗用，這表示現有真空系統封緘水操作在 16 °C 或 43 °C 時，其能源耗用是一樣的。但是較冷的封緘水會強化真空泵表現，提升容量及得到較高的真空度。

案例 1

新設抄紙機原設計為 6 台真空泵，使用過濾後 43 °C 的白水來做為封緘水。當封緘水水溫降至 32 °C 時，真空系統只需要 5 台真空泵。這表示可以節省建造成本美金 250,000 元，操作成本美金 85,000 元/年 (Sweet, 2006)。

2. 封緘水流量過高

封緘水流量過高時，會增加真空泵功率需求 2-5% 或更高，這會跟真空泵型式及操作條件有關。另外額外多出的水量必須泵入及泵出真空系統，這也需要能源。造成封緘水流量過高的原因，主要為封緘水供應源壓力不穩定及/或缺乏封緘水流孔板(orifice)來計量。同時當使用噴淋噴嘴(spray nozzles)時，噴嘴會因長期使用而磨損，會使額外的水量流入真空系統。實務上，大部份抄紙機的真空系統封緘水壓力在 30-40 psi，而供應商建議值為 10-15 psi。

案例 2

280" 的裱面紙板抄紙機，有 9 台 10000 cfm 真空泵，馬達動力為 4500 hp。當降低封緘水源頭壓力從 30 psi 至 10 psi 時，真空系統可立即節省 210 hp 動力，表示只是調整閥設定點，就可以節省美金 54,600 元/年 (Sweet, 2006)。

3. 真空泵背壓

在較舊型的真空系統可能會產生背壓現象，因為當真空系統擴充時，並沒有同步改善空氣/水排放的配置排列。理論上，在真空泵出口端所量測的背壓不能超過 1 psig。背壓的產生亦可能為纖維及結垢在排放管中累積。在使用排放液池(ump)的設計中，假如在液池中的水位偏高時，亦會造成背壓現象，導致在液池中空氣/水的分離效果不佳。

4. 馬達及傳動考量

真空泵使用感應馬達與同步馬達，利用 V 型皮帶(V-belt)或齒輪減速機(gear reducer)來帶動，有時亦使用蒸汽渦輪機(steam turbine)來帶動整排的真空泵。因為 V 型皮帶傳動的機械效率小於齒輪減速機，所以建議在較大馬力(高於 200 hp)的傳動使用齒輪減速機。當進行傳動設備比較時，必須包含所有 V 型皮帶的成本，例如：馬達需要特殊軸承的成本、需要 jack-軸(jack shaft)及聯軸器(coupling)以消除從馬達軸承帶來的負荷。jack-軸需要計入防護罩(guarding)及基礎(foundation)等成本。

案例 3

210" 的回收漿裱面紙板抄紙機，有 8 台真空泵，馬達動力為 3600 hp，使用 V 型皮帶傳動。雖然節省了起初建造成本，但是與齒輪減速機比較，保守估計會增加 3% 的傳動損失，因此系統需要額外的 110 hp 來傳動，相當於美金 28,600 元/年的操作成本 (Sweet, 2006)。

在真空泵使用同步馬達乃基於可靠度、空間考量及不需要功率傳動設備(V 型皮帶或齒輪減速機)。但是同步馬達使用在真空系統必須依據廠內有正確的功率因數，因為電效率會隨著功率因素而改變，所以評估的考量點為真空泵操作在定速狀態。另外有些造紙廠使用高速同步馬達(1200 or 1800 rpm)及利用齒輪減速機來帶動，與大馬力及低速同步馬達相比

較，更能節省能源。

5.馬達尺度及真空泵馬力

如何選用合適的馬達尺度來符合真空泵馬力需求？許多造紙廠往往會選用較大尺度的馬達以降低備品及庫存管理。在許多案例中顯示，真空系統往往使用淘汰的磨漿機馬達，其馬力數超過真空泵需求的50%以上。

但是使用較大尺度的馬達所需考量的問題點為：1) 馬達操作在 75% 負荷以上時，具有最高的效率，2) 假如真空系統發生問題，導致需要較高馬力時，通常不會被發現，除非是超載跳脫。在許多案例中顯示，造紙廠往往是把正確尺度的馬達更換為較大尺度的馬達，以避免負荷過載及馬達跳脫，而不是把真空系統負荷增加的真正原因找出來及解除。

案例 4

216”的文化用紙抄紙機，配置 6000 cfm 真空泵，馬力需求為 365 hp，但是特性曲線需求只需 220 hp。因為使用 450 hp 的馬達而不是正確尺度的 300 hp，所以問題就被遮掩而無法顯現。假如正確解決問題的話，可以節省美金 42,00 元/年(Sweet, 2006)。

五、特定泵問題案例

許多案例中顯示特定真空泵的馬力需求突然增加，而不是整體真空系統，這可以由特定泵因負荷增加而跳脫案例來證明。可能的原因有：1) 老舊效率不佳真空泵、2) 結垢累積、3) 水氣共沸/封緘水流量過高、4) 管路損失或不良系統設計等四類狀況，分別說明如下：

1.老舊效率不佳真空泵

雖然目前有許多水環真空泵已運轉近十年以上，但在 1950 至 1960 年代所設計的真空泵較目前新設計的效率為差，新型真空泵可以降低 25% 以上的耗能。案例中顯示，真空泵升級改造可以逐步汰換方式

來進行，並不需要額外的停車安排。同時新型、較大容量的真空泵可以降低現有真空泵數量一半以上，在抄紙機地下室可以騰出較多的空間來利用。

案例 5

在抄漿機平箱中使用有 50 年歷史的 6000 cfm 真空泵，假如改造為新型真空泵，可以節省馬力 124 hp，封緘水流量 105 gpm，相當於美金 32,200 元/年的操作成本，這約當於新購高效率真空泵成本的 50-75% (Sweet, 2006)。

2.結垢累積

在真空泵中碳酸鈣結垢累積，會增加馬力需求 20-30% 以上，嚴重的時候，甚至會鎖死真空泵。這現象在夏季，水溫升高時，特別容易發生。案例中證明強化水處理及執行除垢計畫，可以有效來抑制結垢累積。目前已有許多造紙廠把封緘水循環再利用，配置有冷卻水塔來降溫，這方式可以較有效的來控制水質。跟化學藥品供應商密切合作，可以達到有效控制真空泵的結垢問題。

3.水氣共沸/封緘水流量過高

在真空系統中，會有少數真空泵有製程水氣共沸及封緘水流量過高等現象，這可能是因為噴淋噴嘴磨損或流孔板不見無法計量等。真空泵產生水氣共沸及封緘水流量過高等現象時，不僅需求馬力數會增加，同時會造成真空度不穩定，這可以由馬達安培錶中指針晃動來證實。產生水氣共沸現象，表示在抽吸單元與真空泵之間並沒有空氣/水分離器單元。在有預分離器單元時，可能的原因為分離器容量不足、落下管的管徑及高度不足、偏低的 NPSH 等。以上這些參數，在真空系統調查時，必須加以逐項確認。

六、不正確操作及錯用設備案例

真空系統效率不佳亦有可能來自不正確操作及錯用設備，典型案例有：1) 在低真空脫水板使用真

空泵而不是離心風扇、2) 誤解真空度控制步驟(真空節流與真空排放) (vacuum throttling vs. vacuum inbleed)、3) 在特別高或低真空應用時，錯用真空泵等三類狀況，分別說明如下：

1. 低真空脫水板使用離心風扇

在抄紙機低真空需求區建議使用離心風扇，特別在成形區中的脫水板及頂網(top wire)及楔隙成形器(gap former)的抽吸箱等。雖然真空泵操作在 300 rpm 似乎比離心風扇操作在 3600 rpm 較可靠，但是從能源觀點來看剛好相反。

首先，不建議把低真空區連接到平箱集管(header)上，因為當從低真空度(2-3“ Hg)膨脹至平箱系統(10-15”Hg)時，真空度會喪失。同時在低真空度 3“ Hg 時，操作相同容量的馬力數，離心風扇較真空泵節能 50-60%。所以當真空度需求在 4” Hg (54” H₂O)以下時，建議使用離心風扇而不是真空泵。目前已有高負載、不鏽鋼製的風扇，提供較佳及可靠的應用。

案例 6

280”的牛皮紙袋抄紙機，真空脫水板使用 1940 年 Vintage 真空泵，馬達動力為 150 hp，真空泵馬力需求為 65 hp。當改造為 48 hp 馬達的風扇只需 17 hp，立即節省 48 hp，表示可以節省美金 12,500 元/年

(Sweet, 2006)。

2. 誤解真空度控制步驟

因為不正確控制及/或管路損失，導致部份真空泵操作在較抽吸單元需求高的真空度。真空泵馬力耗用會隨著真空度提高而增加。真空度控制必須利用排洩閘來調整真空程度，而不是利用節流閘。真空泵操作在比抄紙機抽吸單元需求真空度高 1” Hg 即可，因此需要在抽吸單元及真空泵出口處安裝較精準的真空壓力錶，以校準上述狀態及有效解決問題。

案例 7

傳統家庭用紙廠改造為 TAD 製程，新增加真空泵配置至原真空系統中，其中一組真空系統過度設計，有 3 台真空泵相連接。開車數年後，發現在特定應用時只需要 1 台真空泵，同時真空度過度設計操作在 23” Hg 而抽吸單元只需要 15” Hg。因此關掉過多的真空泵及重新調整真空度設定，可以節省動力 530 hp，相當於美金 138,000 元/年(Sweet, 2006)。

3. 過時或錯用真空泵

典型取代過時低效率或錯用真空泵的節能案例說明如表 1，特別在高或低真空應用時，可以有效降低真空系統能源耗用。

表 1 典型取代過時低效率或錯用真空泵的節能案例(Sweet, 2006)

目前泵型號	建議泵型號	真空程度 ("Hg)	馬力節省 (hp)	備註
H-12A@200 rpm	904-P1@240 rpm	15	45	新型取代舊型
904-S1@257 rpm	904-S2@257 rpm	20	27	低真空泵使用在高真空需求
CL-6002@300 rpm	CL-6001@300 rpm	10	30	高真空泵使用在低真空需求

七、節能指導原則

真空系統定期檢查可以有效降低能源浪費，即時替換或校正儀錶以確認正確的表示真空程度。主要操作參數必須加以監控、檢討及記錄。紙匹及織物的水

份必須定期檢測以確認有效的使用真空系統。利用走動管理(EMBWA)，是最有效的真空系統能源管理方法之一。

對於真空系統最適化的指導原則，請參考 TAPPI

TIP 0404-55 “Performance evaluation techniques for paper machine vacuum system”。真空系統耗能最小化的指導原則，說明如下：

- (1)在低真空需求應用時，例如真空脫水板，不要使用真空泵，建議改用風扇或抽風機。
- (2)控制真空度時，在水環真空泵不能使用節流閥來控制，建議改用排放閥，把空氣排放出系統。
- (3)平箱真空度逐步增加，以達到乾度最大化及牽引負荷最小化。
- (4)去除不需要的真空箱(移除或與成形網不接觸)。假如需要額外真空泵時，特別在低基重及較開放紙匹抄造時，可以經由冷卻紙匹溫度，來降低紙匹固形份，部份水分會隨著空氣而去除等方法，來抽吸在紙匹中過多的空氣。額外的平箱會增加牽引負荷。適宜的平箱配置不僅可以去除更多的水份，而且可以降低約10%的牽引負荷。
- (5)確認 U 型箱溝縫尺度適當，以提供足夠的流量及停留時間。
- (6)確認適宜的真空泵應用環境(高真空泵 vs. 低真空泵設計)
- (7)避免從抽吸點處產生製程水氣泡帶液現象。
- (8)在進入泵前，使用水/空氣分離設備，以避免在泵中形成兩相流動。
- (9)使用適宜的分離器移除泵設計(separator removal pump design)。
- (10)把不需要的真空泵移除。
- (11)每年檢查真空泵內部間隙及/或處理量。假如處理量少於設計量 80%時必須考慮加以整修。
- (12)進行定期保養真空泵及附屬設備，包括皮帶、齒輪傳動及馬達。
- (13)替換及校正儀錶及製程儀器，包括真空錶、封緘水壓力錶、在真空泵液池的液位傳送器、

馬達安培錶等。

- (14)過時的真空泵必須儘速淘汰，不必考慮整修，例如：Nash Number series-no letter, H, K and L ,Roots Conneville, Bingham 等。

八、結論

低效率的真空系統並不會直接影響到抄紙作業，所以問題不容易突顯出來。真空系統的設計及操作問題，假如沒有經由仔細的系統檢查，不會被發掘。真空系統的低效率及馬力浪費會有加成效應，例如較熱的封緘水、真空泵內結垢累積、錯用真空泵、不正確真空控制等因素，導致與管理良好的真空系統相比較，會高出 30-50%的能源耗用。因此如何依以上建議原則，生產及維護單位落實定期測試真空系統的特性表現及追蹤相關趨勢，使真空系統維持在最適化狀態，以達到生產量最大化及真空系統成本最小化。

九、參考文獻

- 1.Nash, 2004, Vacuum systems for the paper industry, paper-S-1027A-1204, Gardner Denver
- 2.Sweet D.F., 2008, Vacuum systems and dewatering issue, 2008 PaperCan Conference Proc., Atlanta, TAPPI
- 3.Sweet D.F., 2006, Energy considerations for new and existing paper machine vacuum systems, 2006 Papermaker's Conference Proc., Atlanta, TAPPI
- 4.Sweet D.F., 1999, Troubleshooting guide helps mills indentify vacuum system problems, Pulp and Paper 52-55
- 5.TAPPI TIP 0502-01 Paper machine vacuum selection factors
- 6.TAPPI TIP 0420-12 Guidelines for measurement of vacuum pump air flow

7.TAPPI TIP 0404-55 Performance evaluation techniques for paper machine vacuum systems

8.彭元興，王益真，鄧澤殷，張清賀，徐宗琦，林杏秋，(2008)“抄紙機節約能源的潛力與機會”，漿紙技術 12(4):13-33

*彭元興，大葉大學環工系教授

*Yuan-Shing Perng, Professor, Dept. of Environmental Engineering, Da-Yeh University.

**鄧澤殷，博士班研究生，大葉大學環工系

** Tser-Yin Deng, Post-graduate (for Ph.D.) , Dept. of Environmental Engineering, Da-Yeh University.

***張清賀，博士班研究生，大葉大學環工系

***Ching-Huo Chang, Post-graduate (for Ph.D.) , Dept. of Environmental Engineering, Da-Yeh University.

****王益真 行政院農委會林業試驗所木材纖維組研究員兼木纖組組長

****Eugene I. Wang, Senior Scientist and Head of Division of Wood Cellulose, Taiwan Forestry Research Institute.