

新式灌溉抽機之浸水深度 NPSH 及孔蝕問題

(SUBMERGENCE, NPSH, AND CAVITATION OF MODERN IRRIGATION PUMPS)

方 根 壽 (本會正會員)

本文于民國五十年春用中文書寫，將及一半，深恐文趣太偏，又感繪圖費時，因而中途廢止，五十一年美國農工學會邀約參加年會討論，得任職公司之協助，文圖順利完成，同時看到日本等國對此問題亦甚有研究，因之決意寄回國內，以與同好共同討論之。該英文稿與原稿未竟之中文稿完全不同，今承會方譯為中文，並寄下過目，非但得有切磋學問之機會，且藉此可以商酌術語之譯法，內心甚為感激也。

作者謹序 五十二年一月五日美國加州

引 言

原始之揚水器如阿氏螺旋，龍骨水車等，均無孔蝕問題發生。新式抽機概屬離心式，如普通離心抽機、混流抽機、軸流抽機及深井透平抽機等，於水力學上同屬一家，可以比速大小而區分之（圖一）。深井透平為灌溉用之重要抽機之一，其比速約在 2,000 至 4,000 之間，實為離心抽機系統中之一變型。早期之離心抽機，殆無不與蒸氣機相連，其轉速緩慢無比。對高速之利益，亦不甚明瞭，因之孔蝕問題亦不存在。自蒸汽透平與電動機問世以來，局面完全改觀。吾人今知離心抽機之轉速倍增，容量亦增倍，而水頭且 4 倍之，此即熟見之親和律 (Affinity law) 是：

$$Q \propto N \dots\dots\dots (1)$$

$$H \propto N^2 \dots\dots\dots (2)$$

設若抽機之轉速無一極限，則大型者既無人製造，亦無人購買。事實上速度過大，孔蝕現象隨之，小則影響抽機之性能，大則損壞機件。欲免孔蝕，則唯

NPSH 之資料是賴。藉此資料，可以推求最小浸水深度或最大汲水揚程。今轉速既趨增高，而抽水之需要浸水運轉者，自亦漸常。此外抽機之浸水，尚有以下兩種功用，順為提之：

(a) 抽機翼輪浸水時，起動時無需事前注水，灌溉抽機既多立式，浸水自屬必要。

(b) 汲水池所生之旋渦為抽機運轉之另一大問題，而增加浸水深度為抑制旋渦發生常用之一法。

浸水之抑制旋渦與免除孔蝕為純然不同之二事，世人混淆者多，亟宜注意，本文所提之浸水，專指免除孔蝕而言。

由上公式(1)與(2)中，顯見轉速之增加，實為減小抽機及其動力之體積與重量之最有效辦法。在自由競爭企業制度下，不論製者用者，誰不願選取高速呢？是則孔蝕之損害，與日俱增，自為必然之趨勢了。

當今太空時代，液體火箭推進系統中需用一個極高速抽機，以期減省其重量至最小，會不計工本，以求不畏孔蝕之抽機之產生。是以藉高速以減小體與重之利益，於軍用民用兩方，同具其重要性，太空專家與水利工程師，平時工作天壤異趣，獨于抽機之孔蝕一事上，彼此有共同研究之課題。

離心抽機之作用，可以翼輪之中心線為界（如立式，則以其進水口為界），分為兩部；界線以上之

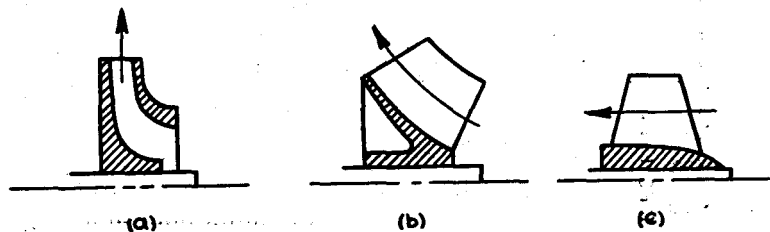


圖 1. 新式抽機翼輪之型式

- (a) 徑流或離心抽機 $N_s < 4200$
 - (b) 混流抽機 $N_s = 4200-9000$
 - (c) 軸流或螺旋抽機 $N_s > 9000$
- (美國水工協會之標準)

水頭，係由翼輪之動作所產生，然液體無張力，自不能為翼輪所拖拉而上升，必需有外力推押之而入翼輪範圍內方可，此外力即大氣壓力是。普通物理學上，吾人得知氣壓計內水柱升高之高度，即當大地氣壓力減去水之蒸氣壓。但是僅僅使水進入翼輪範圍之內，翼輪尚不能接着順利的完成其任務，欲得無孔蝕之運轉，則必須供給額外之能量。此額外之能量者，吾人將以必需淨吸距 (Required NPSH) 稱之，乃今日抽機上最熱烈討論之問題也。

NPSH 資料之應用

NPSH代表“Net Positive Suction Head.”

此術語未能表達事之真義，不如僅取字首而稱NPSH之為愈。又 NPSH 為一較新課題，教科書中鮮見其詳，其見于商業雜誌中者，往往拖泥帶水，不無歧途忘羊之嫌。實則就應用而言，其問題固極簡單，而灌溉作業，專用清水，問題尤簡，僅一簡便公式如下。
(單位：呎)

最小浸水深度 = 必需淨吸距 - 氣壓計水柱高... (3)

式中之必需淨吸距，係由製造廠供給。氣壓計水柱高已如前述，為大氣壓力減去水蒸汽壓力。如所得結果為負數，表示抽機可提升汲水揚程，及僅需浸水排氣即可起動。

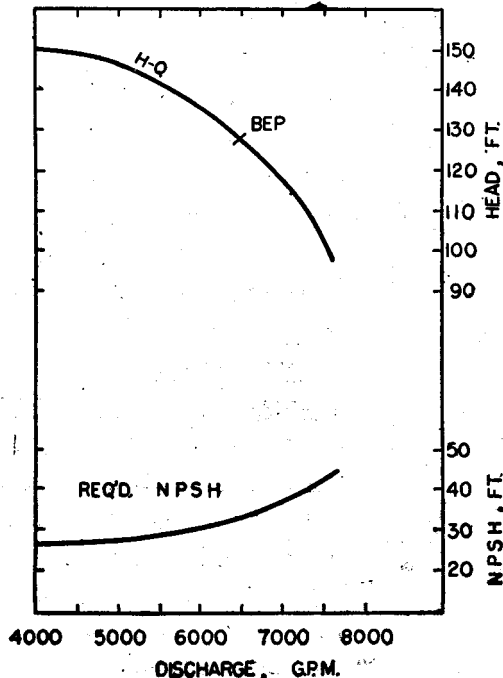


圖 2. 18" x HC 抽機之必需 NPSH 值 1770 RPM 翼輪號碼 2185

例：芝加哥 (ASAE 年會地點，海拔 600 呎) 大氣壓 = 33.2 呎

夏季高溫設為 100°F，其蒸汽壓 = 2.2 呎

則氣壓計水柱高 = 31.0 呎

如用圖 2 之抽機。

于流量 6,000 GPM 時，必需 NPSH 為 30.3 呎則最小浸水深度為 -0.7 呎，即抽機僅需浸水排氣而起動。

于 7,500 GPM 時，必需 NPSH 為 40.2 呎，則最小浸水深度為 11.2 呎。

任何應用問題，應該區別必需之 NPSH 與可用之 NPSH。單稱 NPSH 則極易混淆，必需 NPSH 為抽機于無孔蝕運轉時，在翼輪進水口處之最低淨能，其數值因抽機設計不同而異。不同之抽機，此值固異，即同一之抽機亦因流量與速度不同而變。液體不同，其值亦改，所幸灌溉工程師不必注意後者之影響。此值必須由製造廠供給，彼等亦無易致之方，必藉試驗而得之。

一個 NPSH 試驗，(詳見 F 節) 頗化工本，于大型抽機尤然。而目前之理論研究，不能正確推算必需 NPSH 之數值，將來能否辦到，亦無把握，此為今日抽機工程師之一大問題。過去二十年中，未有比孔蝕問題更令人注意者，而所謂孔蝕問題者，無非是必需 NPSH 之求得與其解釋。NPSH 曲線既日趨重要，已漸見列入抽機之性能圖中，與 H-Q，效率與馬力曲線等並為用者所重了。

另一方面，可用 NPSH 係決定于抽機之裝置環境，任何已知之裝置場面，均可計算其可用之 NPSH。欲將抽機操作無孔蝕，在任何流量下，其可用之 NPSH 必須等于或大于其必需之 NPSH。

對於浸水之抽機：(單位：呎)

$$\text{可用 NPSH} = \text{大氣壓力} + \text{浸水深度} - \text{汲水管磨損} - \text{蒸汽壓} \dots \dots \dots (4)$$

多數灌溉抽機，磨損可略

$$\text{故，可用 NPSH} = \text{氣壓計水柱高} + \text{浸水深度} \dots \dots \dots (4a)$$

於抽機具有汲水揚程時：

$$\text{可用 NPSH} = \text{氣壓計水柱高} - \text{汲水揚程} \dots \dots \dots (4b)$$

必需 NPSH 之試驗室測定法

試驗室中常以減少抽機之汲水頭，或增加其轉速或二者並用以人工造成孔蝕現象。其特徵有如：

(a) 騒音與振動，(b) 翼輪之蝕點與 (3) 揚程及效率降低。騒音與振動並非所有孔蝕發生時均有之，故不能用為檢定之標準。翼輪之蝕點須歷久方現，且須拆卸外殼，方能見到，是故，揚程及效率之降低，成為測定必須 NPSH 之最有效方法。效率之降低對高比抽機言，或略較準確，而揚程降低則較簡便而省設備也。

欲得不同之轉速，需有直流馬達或其變速裝置，其設備昂貴，其試驗法繁冗。故變速之 NPSH 測定法，遠較改變汲水頭者為遜。

應用後法以作一完全之 NPSH 試驗，復有二途可循：第一法於各種汲水水頭下作一連串之 H-Q 完全曲線，如圖 3 所示者，於汲水條件不足時，水頭失常，其與正常曲線分歧處即用以決定該流量下之必需 NPSH。第二法姑謂之定流量法，遠較簡便妥適。其法維持流量不變，逐漸降低汲水頭直至總揚程降低為止，然後計算該流量下之必需 NPSH。

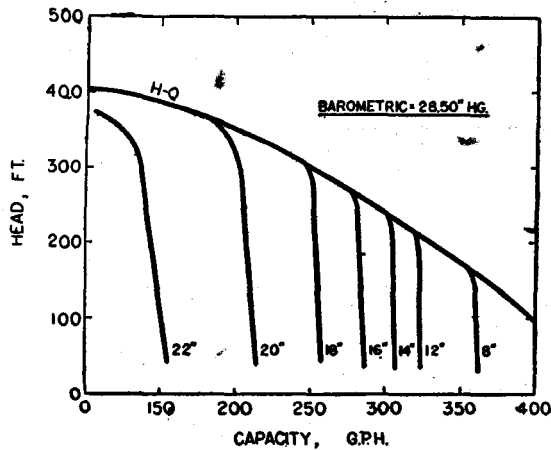


圖 3. 5 級 8"×LC 抽機之 NPSH 試驗 2900 RPM
圖示各種汲水揚程下水頭之降落

至論曲線降落之形式，自急降至漸降，變域很大。此差異因抽機與不同流量而異，高比速抽機因翼輪水道寬廣，不易為孔蝕氣泡所阻塞，故降落常較緩慢，欲決定某流量下之 NPSH 之正確數值，因此往往不易。在此場合下，經驗與判辨之運用，十分重要。圖 4(a) 為一急降型，而圖 4(b) 示漸降型，二者均取自實際試驗之結果。

變改汲水頭之試驗設備，可分三大類如下：

- (a) 變更水位法 (圖 5 (a))
- (b) 節制汲水法 (圖 5 (b))
- (c) 閉圈式法 (圖 5 (c))

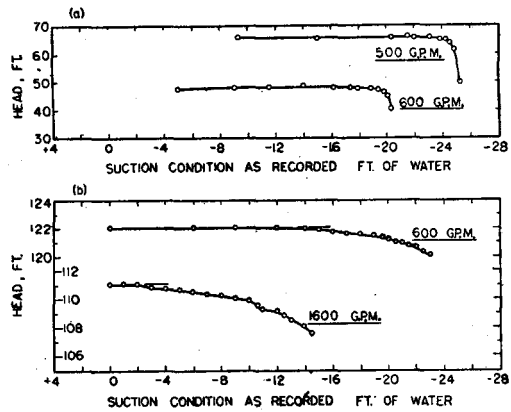


圖 4. NPSH 試驗資料 (a) 急降型 (b) 漸降型

(a) 法甚合理且接近現場情形，因為絕大多數抽機，灌溉用者在內，均係裝置於大氣壓力之下。其孔蝕之發生，可說都是由於水位太低之故。所以此設備之想法簡單，其所得之結果亦可靠。可是試驗起來，十分不易。欲水位變更如意，汲水池要很深才可。如何變更水位而維持之並不簡單。如何伸縮軸與管之長度以置翼輪於水位上下適當位置，亦非易事。故此法極少用者。

(b) 法費用最省，因之用者甚多，但由於下列諸因，其所得結果最不足取：

- (甲) 因閘節制進水，流型受束與歪變，致加速孔蝕之發生，所得之結果，雖常處安全一方，但不準確。
- (乙) 由閘節制進水，不能產生汲水壓力而不少抽機于高流量時常需之。又于低流量時，其能產生之真空又嫌不够，是以此法可應用之範圍甚狹。
- (丙) 於汲水情況變化時，欲維持流量一定，常需人經常操縱汲水側與出水側之閘門。甚需耐性與注意力，方可得滿意之結果。

最後之 (c) 法，遠稱優勝，取予空氣，即可以任意變更貯水槽內之壓力，絕無上下水位與開關閘門之煩，不論高汲水揚程或高汲水水壓，得之不費吹灰之力。作者採用井式微量壓力計 (well type inanometer)，直接記錄抽機之淨水頭，無須加減進水與出水二方水頭之煩，省時省工不少。在正常抽機運轉下，壓力計上之水銀柱不因汲水情形改變而升降。一經降落，即示孔蝕之開始，即錄之以求算必需之 NPSH。

此法之缺點在於費用高昂，不能利用原有之試驗

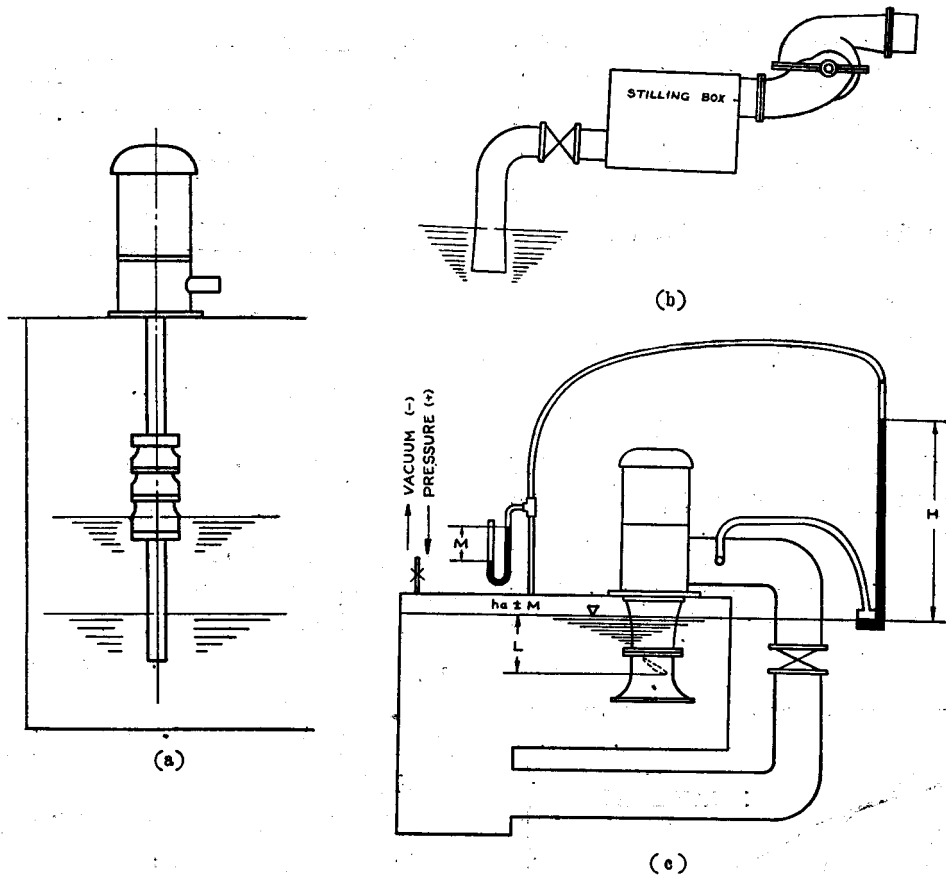


圖 5. NPSH試驗之設備 (a) 變更水位法 (b) 節制汲水法 (c) 閉圈式法

設備，須專設一套以行之。非但要額外投資，且需額外廠房場所，至于大型抽機之試驗，單就貯水槽一項，所費已甚不貲。

影響必需 NPSH 值之因子

前曾言之，必需之 NPSH 須由試驗得之，理論推算值並不正確。但另一方面，各種大小之抽機，各種流體及各種速度等，不可能一一進行試驗。吾人不

得不採信各種變常數 (Parameter) 用外插法以估計 NPSH 值而謀孔蝕之避免。此等變常數請述如次：

1. σ (Sigma) 曹馬氏孔蝕係數

σ 為研究孔蝕上最重要之因子，其定義如下：

$$\sigma = \frac{h_{sv}}{H} = \text{常數} \dots \dots \dots (5)$$

式中 H 為總揚程， h_{sv} 為開始發生孔蝕現象之臨界點上之可用 NPSH 或必需 NPSH 值。方程式 (5) 常稱

曹馬相似定律，係一切孔蝕模型試驗之基礎。同一抽機在各種轉速下，或相似抽機在相似情形下運轉時，設若 σ 相同，則孔蝕情形亦相同。應用之方式有二：

- (a) 同一抽機在不同速度運轉時 (圖 6 (a))。點 1 與點 2 為相符點，則二點有相似之孔蝕現象，假如

$$\sigma_1 = \sigma_2$$

$$\text{即 } \frac{(NPSH)_1}{H_1} = \frac{(NPSH)_2}{H_2}$$

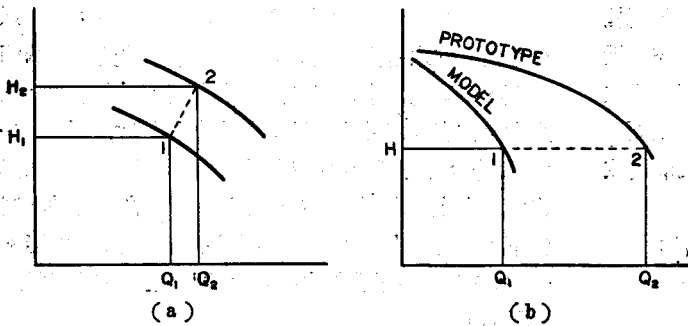


圖 6. σ 之應用 (a) 轉速改變 (b) 模型試驗

亦即，必需之NPSH與 N^2 成正比。

(b) 相似之抽機在相符點運轉時 (圖6 (b))，大型抽機之性能測定，所費甚大，其 NPSH 測定尤然。孔蝕之模型試驗，欲得良好結果，則其浸水深度與水頭須與原型 (Prototype) 者相同。因為如此則二點有相同之比速，可用之 NPSH 同而 σ 亦同。倘不能做到同浸水度與同水頭，則 σ 值必須維持相同。

加州理工學院之精細試驗，應用抽機轉速 $\pm 12\%$ 時，證明上述關係甚為正確 [1*] 然 Krism [2] 與他人試驗結果，發見在高速度時，實測值比理論推算值為小。作者曾作多次試驗，比較之下發見當速度相差不大時，上述關係相當正確。倘速度相差甚大，如 1750 RPM 與 3500 RPM 之間，則偏差增加。

圖 7 為專門研究速度對 NPSH 值影響之試驗，結果證明在 1550 至 1760 RPM 範圍內，實測值與理論值十分相吻合。由 Holl 與 Wislicenus [3] 所作之理論研究，詳細說明背離現有定律之原理，然對實用目的而言， σ 對解決孔蝕問題，可說非常有用。

* 方括弧內之數字係指文後之參考文獻

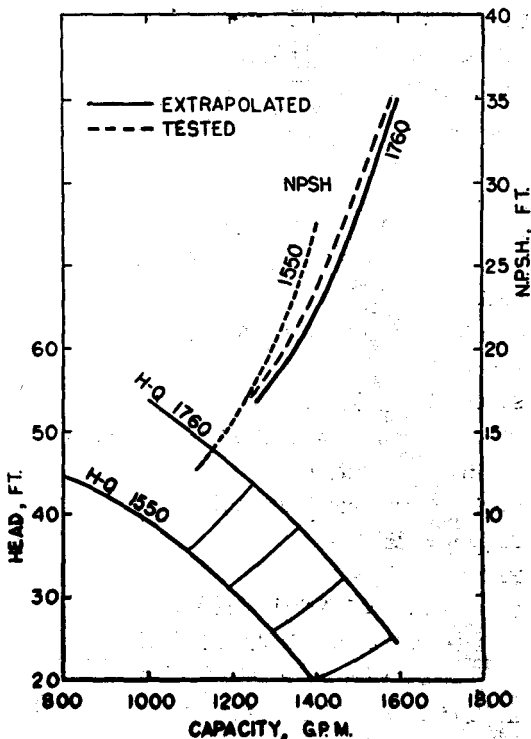


圖 7. NPSH 實測值與外插值之比較 12" MC 抽機 N_s 3080

2. S, 汲水比速，其定義如下：

$$S = \frac{N_1 \sqrt{Q}}{(NPSH)^{3/4}} \dots \dots \dots (6)$$

汲水比速用以描述翼輪之汲水特性正如此速 N_s 之用以描述抽機之類型者，有類似性質，S 值愈大則必需 NPSH 值愈小，然 S 與 N_s 及 σ 間有一定之關係：

$$\frac{N_s}{S} = \sigma^{3/4} \dots \dots \dots (7)$$

正以此故，S 值非為獨立變常數，並未予吾人以推算 NPSH 值之額外工具。

3. C_{m1} , U_1 與 β_1

C_{m1} 為進水貫速， U_1 為進水周速， β_1 為翼板進水角。此三要素決定翼輪之進水三角 (圖 8)。

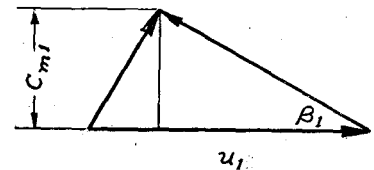


圖 8. 進水速角度三角

任何設計中，三者間彼此關係固定，欲知每個因子對孔蝕之影響，不易單獨決定。

流量小即 C_{m1} 小，轉速低即 U_1 低，故 C_{m1} 與 U_1 對孔蝕之密切關係，甚易識別。一般人並認為小 β_1 導致小 NPSH 值亦為一公認成立之事實。實則從圖 1 來看，維持流量或 C_{m1} 一定，則減小 β_1 時，勢非將翼輪之進水孔加大不可，換言之，翼輪進水處之原設計為大型抽機而當小型抽機使用，效率之損失，自不能免了。

各方人士曾製出多種簡單公式與圖表，用 C_{m1} 或 $C_{m1} \times U_1$ 來推求 NPSH 值。此等公式圖表之準確性，未為他人所證實，故未廣為採用。本人曾整理立式透平 ($N_s = 2000 - 4000$) 之眾多試驗，試求最高效率處之 C_{m1} 與其 NPSH 值之相關性，算出 K 值如表一所示者。此等 K 值變域甚小，表示 C_{m1} 與 NPSH 間有顯著之相關。又 K 值隨轉速而異，可見 U_1 亦有關聯。可是 K 值之變域雖小，新出之抽機並不能因此而減免其 NPSH 試驗。其故有二：

- (1) K 平均值相差雖小，而影響 NPSH 值則大，
- (2) K 值僅適用於最好效率處，此處之左右兩邊，K 值增大。

4. 衝角與分離 (Angle of Attack and Separation)

翼板角度之設計，係於最好效率處 (BEP) 與流體之相對速度方向一致，此處之兩方，流向與板角之間有角度，流體之分離隨之發生而引起孔蝕現

象。表一中之 K 值亦見向左右兩方增大。他人如 Krisam [2], Widder [2], Ramkin [7], 與 Minami [9] 等均有同樣報告。本人並曾將抽機作正反旋轉試驗, 發現反轉時流量雖大減而 NPSH 值反增, 此除不良衝角外, 並無其他理由可以解釋。同時該實驗給彼等欲以 β_1 為推算 NPSH 之變常數者以難以置答之問題, 因為 β_1 與 $(180-\beta_1)$ 之三角函數之絕對數值相等故也 [5A]。

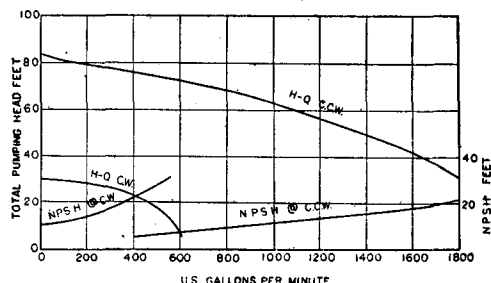


圖 9. 抽機正反旋轉之性能比較 1760 RPM 單級 12" 立式透平

表一 各種大小立式透平抽機在最好效率處之 K

$$\text{值 NPSH} = \left(K \frac{Q}{A} \right)^2$$

Q, 流量, GPM

A, 翼輪之進水淨面積, 平方吋

Size of Pumps	K at 3500 RPM	K at 1750 RPM
4a	0.109	—
4b	0.113	—
6a	0.112	—
6b	0.115	—
6c	0.109	—
6d	0.107	—
7	0.112	0.103
8a	0.105	0.091
8b	0.105	0.090
8c	—	0.099
8d	—	0.097
10a	—	0.089
10b	—	0.103
10c	—	0.103
10d	—	0.087
12a	—	0.104
12b	—	0.088
12c	—	0.097
14a	—	0.092
14b	—	0.089
14c	—	0.090
16a	—	0.085
16b	—	0.099
Average	0.109	0.094

大多數之軸流抽機即因有分離現象之故, 不宜使用于低過 BEP 太甚之流量。在立式透平抽機中亦見有同樣現象發生, 本人曾做過若干次 NPSH 試

驗, 自高流量直做到零流量為止, 發現在零流量流附近, 雖汲水情形未再降低而有強烈之振動與聲音, Appel 氏 [6] 亦有同樣報告。

5. 其他因子

下列諸因子, 已知與 NPSH 有關, 但本文不擬詳述, 僅列之如次:

- 熱能標準 相對進水速度與絕對進水速度
- 翼輪之修小比重 翼輪封座之調節
- 進水池之設計 翼板之數目與曲面

結 論

1. 新式灌溉抽機概為離心式, 有利于高速之運轉, 可以節省重量與費用故也。
2. 高速招致孔蝕, 欲免孔蝕, 須有 NPSH 資料以決定最小浸水深度或最大蝕水揚程。
3. 廠家供給之必需 NPSH 值應為實際測定者, 推算值不正確, 試驗法中則以閉圈法最為可靠。
4. 根據各種文獻與作者之試驗, 重要因子如 σ , S, C_{m1} , U_1 與 β_1 等均一一述及, 以便援用外插法求出 NPSH 值而免孔蝕之損害。

名 詞 翻 譯

- Pump 抽機, 唧機, 幫浦 (俗)。
- Submergence 浸水深度, 浸水。
- NPSH 即用 NPSH 或淨吸距。
- Cavitation 穴蝕 (見機工名詞翻譯), 孔蝕。
- Impeller 翼輪, 輪槳 (本人前曾用此)。
- Vane 翼板。
- Available NPSH 可用淨吸距, 可用 NPSH。
- Required NPSH 必需淨吸距, 必需 NPSH。
- Discharge 出水量, 流量
- Capacity 出水量, 流量, 容量。
- Suction Head 汲水頭。
- Suction lift 汲水揚程。
- Discharge Head, Head 出水揚程, 揚程, 出水水頭。
- Specific Speed 比速。
- Suction Specific Speed 汲水比速。
- Parameter 變常數。
- Prototype 原型。
- C_{m1} , Inlet through Velocity 進水貫速。
- U_1 , Inlet Peripheral Velocity 進水周速。
- β_1 entrance Vane Angle 翼板進水角。
- Angle of Attack 流之衝角, 衝角。
- Separation 流之分離, 分離。
- Sump 汲水池, 進水池。

參考文獻

1. G.F. Wislicenus et al, "Cavitation Characteristics of Centrifugal Pumps Described by Similarity Consideration," ASME Trans. January 1939.
2. A. J. Stepanoff, "Centrifugal and Axial Flow Pumps," 2nd Edition 1957, John Wiley and Sons.
3. Holl and Wislicenus, "Scale Effect on Cavitation," ASME Paper No. 60-WA-151.
4. Val Labanoff, "What is this NPSH?" The Oil and Gas Journal, February 1958.
5. Stapanoff and Stahl, Cavitation criterion for Dissimilar Centrifugal pumps,, Journal of Engineering for Power Trans. ASME Series A Vol. 84 1962 P. 329-36.
5. A. E. S. Fang, Discussion on Reference 5
6. D.W. Appel, "Cavitation Along Surfaces of Separator," ASME Paper No. 60-WA-265
7. Rankin, "Effect of NPSH on the Head-Capacity Curve of High Specific Speed Pump," Cavitation Symposium, ASME, Hydraulic Division Conference, Mar 9, 1960, Houston, Texas.
8. Standards of Hydraulic Institute, 10 th Edition, 122 East 42 nd Street, New York 17. New York.
9. Minami et al "Experimental Study on Cavitation in Centrifugal Pump Impellers, Bulletin JSME Vol. 3 No. 3 1960, P. 19.
10. Stapanoff and Stahl, Cavitation Criterion for Dissimilar Centrifugal Pumps, Journal of Engineering for Power Trans. ASME Series A Vol. 84, 1962 P. 329-36.

廿年滄桑記我國第一次農工學會之籌備經過

方 根 壽

二十年了，際此國家多難，諒大家多少有些往事怕重提吧！經十多年之心機，最後終與身陷竹幕之K君取得聯絡，來信開頭即說：「收到來信，使我年輕了二十年」，屈指一算，正是二十年前事，當時筆者尚就在學乘暑假之暇，自貴州之遵義，搭了一輛五里一小修，十里一大修之「老爺車」上重慶，與素不相識之三君相叙如故，K君工匠出身，時為某機械廠經理，H君學農經，時任合作金庫經理，而C君學農兼工，時為中央大學農具學講師，為大後方數一數二之農具人才，四人徒以有志提倡農具，故頓成好友，K君尤有義風，建議大家結拜為兄弟，矢志農具事業，餘三人未表異見，只感時代不同延而未辦，但自此經常聚會，討論方策，第一、就K君機械廠之設備成立「中央」農業機械廠，（翌年本人投筆從農，主持廠務一年）第二、籌設中國農具學會。

重慶酷熱，日機轟炸頻仍，機關下鄉疏散，欲得足夠之法定發起人不大容易，幸本人暑假有空，兩腿亦健，經二個月之奔走，居然得准成立，遠地之農具有關學者，由通信贊助者，就記憶所及，有

桂林之孫清波先生，貴州之盧守耕，金城、詹純鑑先生，成都則有劉永濟與林查理（Riggs）先生。

翌年二月，中國農具學會假渝市合作大會堂正式成立，到會人數疏落約只三十餘人，且無一位真正之農具學者，記得社會部代表曹沛茲（在臺）致詞中有云「這個會開始時，雖不如其他學會的敷張與熱鬧，但將來前途是極遠大的」果然二十年後，自由中國農工人才濟濟，且作技術援外，蜚聲國際，今日之學會雖非當日學會之延續，但精神仍然一貫。

成立大會亦有宣讀論文一項目，C君報告「去稗機之設計」，其時平價米色黑多稗，這種機器實為人人所祈求者，本人對農具一無所知，但籌備諸人以我跑腿有功，硬要登台宣讀論文，幸C君借我一篇「筲麻籽去壳機」，度過難關，其時因軍事需要，政府提倡植筲以取其油，所以那去壳機亦係適合時宜之農具，會後由二三留美學人之建議，改農具學會為農業工程學會，此第一次學會成立之經過也。H與C兩君不幸亦身居大陸經三反五反之挫折，默默不願通信以召禍，真是如幻如夢不可想像啊！