

二相噴射泵的理論研發

Theoretical investigation of the two-phase jet pump

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-136

執行期限：89 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

主持人：李雨

執行機構及單位：國立臺灣大學應用力學研究所

一、中文摘要

二相噴射泵為一可直接用熱能來驅動的元件，除扮演泵的角色外，同時也具備直接熱交換器及冷凝器的功能；但其弱點為性能不高，故如何設計二相噴射泵使其性能提升實為一重要工作。針對此點，本計劃採用包含相變態的定常一維二相流理論及熱力學，同時考慮凝結、混合及增壓等現象，就二相噴射泵發展出一局部模式，該模式因對噴射泵內複雜現象有較深入的物理描述，且較現有文獻中的整體模式週延，故期望此一局部模式對未來二相噴射泵的設計能提供一較嚴謹的理論基礎。

關鍵詞：二相噴射泵、凝結、混合、增壓、局部模式

Abstract

The two-phase jet pump is a device, which is driven directly by thermal energy. It simultaneously performs the functions of a pump, a direct-contact heat exchanger, and a condenser. The weak point for the application of the jet pump is its low coefficient of performance, and thus it is important to design the jet pump such that its performance is maximized under different operating conditions. The present project employs the theory of steady one-dimensional two-phase flow with phase change, with the proper consideration of condensation, mixing and

pressure increase, to develop a local model for the two-phase jet pump. Such local model contains the essential physics of the complicated phenomenon in the jet pump, and is more detailed than the global model in the literature. Thus it is expected that the present local model can provide a more solid physical background for a proper design of the future two-phase jet pump.

Keywords: two-phase jet pump, condensation, mixing, pressure increase

二、緣由與目的

本計劃所擬探討者為如圖一所示的二相噴射泵，其主流體為具懸浮液滴的氣流(droplet flow)，副流體為過冷液體。此二相噴射泵乃俄人所研發，最早用於太陽能抽水裝置(見 Alad'ev et al., 1987)，其後 Fairuzov & Bredikhin (1995) 提議可用在太空載具所使用的冷卻系統上。熱源將主流體加熱成具懸浮液滴的二相流，進入漸縮漸擴的噴嘴(convergent-divergent nozzle, 即圖一所稱之 nozzle)後膨脹加速而注入漸縮(convergent)的錐形混合室(mixing chamber)中，造成局部低壓而吸入較冷的液體(副流體)。在二相流流經噴嘴時，因膨脹造成的減壓降溫，會使二相氣流中的液態成份增加(flash 現象)；在混合室內，被吸入的較冷副流(液)體與自噴嘴射入的較熱二相懸浮流混合，使氣相進一步冷卻並凝結，

在混合室與擴散器(diffuser)間的喉部(throat)區域所有氣相已凝結為液體。在凝結時因能量的釋放會造成壓力上升，此一現象文獻中又稱為凝結震波(condensation shock)，流出混合室後的液體在流經擴散器時將獲致進一步增壓。此增壓後的液體一分為二，其中一股流體流經散熱器(radiator)散熱降溫後，成較低溫的副流體；另一股流體經熱源加熱成具懸浮液滴的二相流，即主流體。在適當的設計下，流出二相噴射泵的液體壓力(圖一中狀態 4 的壓力， P_4)會高於主流體入口處的二相流壓力(圖一中狀態 1 的壓力， P_1)及副流體入口處的壓力(圖一中狀態 5 的壓力， P_5)，且壓力差 $P_4 - P_1$ 及 $P_4 - P_5$ 的大小分別足以克服相關連接迴路中的管路阻力，而使迴路得以循環不息。

在理論分析方面，Fairuzov & Bredikhin 以控制體積方式首先提出一整體模式(global model)；近日 Sherif et al. (2000)及 Lear et al. (2000)提出更詳細的整體模式，但其中噴嘴部份並沒有考慮動量守恆，故有一定缺失；然而即使修正此一缺點，整體模式還有先天的局限(見 Deberne et al., 1999)，要對二相噴射泵有更完善的設計，需要對其中的複雜物理現象有正確而週延的模擬，而這有待局部模式(local model)的建立。按 Deberne et al.，目前文獻中並無可用的局部模式；Deberne et al. 一文也只是對混合室中的等壓分佈假設作了局部的修正。本計劃的工作即為建立一適當的局部模式，以期對未來二相噴射泵的設計提供一項較週延的理論基礎。在此要說明的是噴射泵性能的優劣可以兩項指標來判斷，一為抽吸比(副流體與主流體的質量流率比)要大，另一為增壓比(噴射泵出口壓力與主或副流體的入口壓力比值)要高。

三、物理模式與結果討論

二相噴射泵內牽涉到二相流、串音速流、液柱斷裂及顆粒化、氣液二相混合、相變態、及凝結震波(condensation shock; 凝結引致局部壓力大幅上升)等複雜而有趣的現象，要完整地以理論方式加以描述及進行分析並不可能，因這要解的是三維非定常非固定邊界問題(因凝結造成變形中的液體體積不斷增加)。另一方面，目前文獻大都將圖一中的噴射泵分成噴嘴(nozzle)、混合室(mixing chamber)、及擴散器(diffuser)三部份，各部以控制體積方式進行分析，求出出入口的物理量，此類稱為整體模式的分析方法的主要缺點為並沒有包括所有的重要物理機制，也不能提供噴射泵的幾何尺寸設計。故本計劃將在上述兩項極端之間，採用一維二相流及二相共存的熱力學理論發展局部模式。因二相噴射泵內各部份有不同的主要物理機制，故所發展之局部模式依下列各部分述如下。

(1) 噴嘴(nozzle)

主流體在噴嘴內為具懸浮液滴的二相流，按 Fairuzov & Bredikhin (1995) 的實驗數據，因流速高($O(10\text{m/s})$ - $O(100\text{m/s})$)而噴嘴長度短($O(0.1\text{m})$)，故我們可假設噴嘴內的熱流過程為等熵(isentropic)過程；另因懸浮液滴的粒徑甚小，我們可假設氣、液二相間的速度差可以忽略，而以均勻流(homogeneous flow；見 Wallis, 1969)來處理。令 z 為沿噴射泵中心軸的座標， $z = 0$ 定在噴嘴的入口處，在一維而定常的理論下，所有物理量均為 z 的函數。令 ρ 、 u 、 p 、 h 、 s 、 T 、 x 及 A 分別為二相均勻流的密度、速度、壓力、焓、熵、溫度、品質(quality; 二相流中氣相的含量比例)及噴射泵的當地橫截面積，則在等熵條件下，質量、動量及能量守恆滿足

$$\rho_m u_m A = \dot{m}_1 = \text{const}, \quad (1a)$$

$$m_1 \frac{du_m}{dz} = -A \frac{dp_m}{dz}, \quad (1b)$$

$$m_1 \left(h_m + \frac{1}{2} u_m^2 \right) = E^* = \text{const}. \quad (1c)$$

上述各式中下標 m 表示流體為均勻的氣液混合流(homogeneous mixture)。在噴嘴入口處的熱力條件為已知的條件下(如 Fairuzov & Bredikhin 給定 p 及 T)，我們可算出其熵值 s^* ，在二相區內的等熵過程($s = s^* = \text{const}$)中，按照熱力學理論，如 r 為已知，則可求出其他熱力學性質，即

$$p = p(r), \quad x = x(r), \quad (1d)$$

$$T = T(r), \quad h = h(r). \quad (1e)$$

二相流中的聲速 a 亦為一熱力學性質，定義為

$$a = \sqrt{\partial p / \partial r|_s}, \quad (1f)$$

其值亦可透過(1d)求取，但值得注意的是二相區中的聲速(以 Fairuzov & Bredikhin 所採用的 R113 冷媒及實驗條件為例， $a = 60 - 80 \text{ m/s}$)小於純氣相中的聲速(約 120 m/s)。利用(1f)及(1a)，我們可由(1b)式導出

$$(M^2 - 1) \frac{1}{u} \frac{du}{dz} = \frac{1}{A} \frac{dA}{dz}, \quad (2)$$

其中 $M = u/a$ 為馬赫數。雖然(2)式是用於二相均勻流，其形態與單相氣流結果相同(見 Anderson, 1990)，在 $M < 1$ 時， u 隨 A 之增加而下降；在 $M > 1$ 時， u 隨 A 之增加而上升；在 $M = 1$ 時， $dA/dz = 0$ 。

在我們的模式中，我們的計算步驟如下。在給定一個 z 位置下，所有的熱流性質及 A 值均為已知(如始起條件)，我們猜一 dA/dz 值，以 4 階 Runge-Kutta 方法解(2)式，得下游 $z + \Delta z$ 處之 u 值後，即可由(1a)式求出 r ，再由(1d)、(1e)及(1f)求出 p 、 x 、 T 、 h 及 a ，然後我們檢查(1c)式是否成立，如是則我們按前述步驟繼續計算更下游 $z + 2\Delta z$ 處的值；如否則重猜一新的 dA/dz 值，並重覆上述計算，直到(1c)在 $z + \Delta z$ 處能被滿

足。因此，我們的局部模式除可模擬噴嘴每一截面的平均熱流場特性外，尚可計算出 A ，即噴嘴的外形亦可一併予以設計。為了驗證上述理論，我們以 Fairuzov & Bredikhin 一文中編號 IC-EU-2 的噴射泵進行模擬，該噴射泵的各部尺寸(見圖一)為 $d_1 = 15 \text{ mm}$ 、 $d_2 = 7.7 \text{ mm}$ 、 $d_3 = 8.4 \text{ mm}$ 、 $d_4 = 14 \text{ mm}$ 、 $d_5 = 3.8 \text{ mm}$ 、 $d_6 = 12 \text{ mm}$ 、 $L_1 = 20 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 90 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 75 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 60 \text{ mm}$ 、 $L_5 = 15 \text{ mm}$ ；另外副流體共由 24 個出口直徑為 0.75 mm 的小噴嘴以與噴射泵中心軸成 50° 夾角的方向噴入混合室內。操作條件方面，主流體入口(以下標 1 表示)處 $T_1 = 324.8^\circ \text{ K}$ 及 $x_1 = 0.36$ ，副流體入口處(以下標 5 表示)為 $T_5 = 264.2^\circ \text{ K}$ ，噴射泵出口處(以下標 4 表示) $T_4 = 300.3^\circ \text{ K}$ 及質量流率 $m_4 = 0.144 \text{ kg/s}$ ；另抽吸比 $f = m_5 / m_1 = 2.36$ 。因 $m_1 + m_5 = m_4$ ，故我們可算出 $m_1 = 0.0429 \text{ kg/s}$ 及 $m_5 = 0.1011 \text{ kg/s}$ ；另由熱力學可算出 $s_1 = 1.6003 \text{ kJ/kg}$ 、 $r_1 = 23.31 \text{ kg/m}^3$ 、 $h_1 = 299.7 \text{ kJ/kg}$ 及 $p_1 = 0.11668 \text{ MPa}$ ，再由(1a)及(1c)式可算出 $u_1 = 10.4 \text{ m/s}$ 及 $E^* = 12.858 \text{ kJ/s}$ ，則可用上述步驟對(2)式進行計算，結果如圖二所示。結果顯示 IC-EU-2 噴射泵的幾何尺寸設計確可將入口處的次音速二相懸浮流加速到超音速，因而造成噴嘴出口處的壓力降至 0.0462 MPa ，此值與混合室中的實驗值(約 0.044 MPa)相符；此一低壓值可以促進副流體抽吸效應，對噴射泵的性能提升有所助益。由 E/E^* 值的結果我們可看出(1c)式的能量守恆誤差可達 0.01% ；另圖二亦顯示了主流體在噴嘴內各項重要熱流性質的分佈。

(2) 混合室(mixing chamber)

在混合室內，主、副流體有很大的速度與溫度差，我們並不能如上節般採用均勻流的假設，而須採用分離流(separated model；見 Wallis, 1969)模式來處理，即將混合室內的流體考慮為由兩相組成，一為

由噴嘴流入的高速二相懸浮相(如同上節, 本節仍將以下標 m 表示), 一為被抽吸進的過冷液相(以下標 l 表示), 二相在混合室內作質量、動量與能量交換。在混合室近入口處, 超音速的主流體(二相懸浮狀態)與低速的副流體(過冷液體)激烈混合, 其間並牽涉到副流體液柱在噴出後因流體不穩定所引致的斷裂問題, 為噴射泵內流場最複雜的區域, 要以嚴謹的理論方式加以描述並非易事, 所幸造成主要增壓的凝結震波效應並不發生在此, 故本模式以控制體積方式來近似處理此最複雜的區域, 此控制體積所涵蓋範圍乃混合室的前段, 其左邊界為 $z = L_2$ (見圖一), 右邊界為 $z = L_2 + L_{CV}$, 其中 L_{CV} 為一可選取之值, 經由對 Fairuzov & Bredikhin 噴射泵幾何尺寸和實驗結果的分析、物理判斷及數值嘗試, L_{CV} 可選取為一約與 d_3 相近之值, 就 IC-EU-2 的案例言, L_{CV} 約較混合室長度少一個因次。在 $z > L_2 + L_{CV}$ 後, 我們用局部方式來處理, 茲分述如下。

(a) $z \leq L_2 + L_{CV}$ 的區域: 在此控制體積內, 我們的分析基本上與前人文獻中的整體模式相類同, 唯一不同的是我們的控制體積只是混合室入口端的一小段, 而文獻中則為全混合室。本部份研究主要是要求取 $z = L_2 + L_{CV}$ 處的各项熱流性質, 以供下游區域計算所需始起條件。另外, 過冷液體是以液柱狀況噴出, 按流力穩定學(見 Drazin & Reid, 1981), 液柱會斷裂成球狀液滴, 因發生不穩定後最快增長的干擾波長為 4.508 倍的液柱直徑(d_s), 即最後形成的球狀液滴的體積為 $2.254d_s(\rho / 4)d_s^2$, 按照質量守恆, 我們可算出過冷液體所形成的液滴直徑 $d_p \approx 1.5d_s$, 此值將用於下節的計算。我們將假設過冷的副流體在 $z = L_2 + L_{CV}$ 處已形成球狀液滴狀況, 其粒徑(按 IC-EU-2 的狀況為 1.1257mm)遠大於主流體的懸浮液滴者。

(b) $z > L_2 + L_{CV}$ 的區域:

在此區域內, 二相懸浮相須滿足的質量、動量及能量守恆分別為

$$\frac{d}{dz} (r_m a u_m A) = - \dot{m}_{gl} A \quad (3a)$$

$$\frac{d}{dz} (r_m a u_m^2 A) = -A \frac{d}{dz} (ap) - f_{lg} A \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} \left[r_m a u_m \left(h_m + \frac{1}{2} u_m^2 \right) A \right] \\ = - \dot{m}_{gl} h_{gl} A - f_{lg} (u_m - u_l) A \end{aligned} \quad (3c)$$

同理液相方面我們也可用三條類同的式子來表示其所遵從的守恆關係, 但在本計劃中, 我們採用下列兩相(二相懸浮相及液相)的總體守恆關係來處理,

$$r_m a u_m A + r_l (1 - a) u_l A = m_4 = \text{const} \quad (3d)$$

$$\frac{d}{dz} (r_m a u_m^2 A + r_l (1 - a) u_l^2 A) = -A \frac{dp}{dz} \quad (3e)$$

$$\begin{aligned} r_l (1 - a) u_l A \left(h_l + \frac{1}{2} u_l^2 \right) \\ + r_m a u_m A \left(h_m + \frac{1}{2} u_m^2 \right) = E_t = \text{const} \end{aligned} \quad (3f)$$

經由因次分析, 在上述各式中我們忽略了牆壁的阻力及熱傳; 如要包括這些次要效應, 在本模式的架構下也能一併處理。在解(3a)-(3f)各式時, 我們需要知道單位體積單位時間內二相懸浮相中的氣相凝結量 $\dot{m}_{gl}$ 及單位體積內液相所施予二相懸浮相的力 f_{lg} 。如過冷液相成球狀懸浮於二相懸浮相中, 我們可用如下方式來求取 $\dot{m}_{gl}$ 及 f_{lg} 。因氣相的凝結來自於過冷液相的冷卻, 故

$$\dot{m}_{gl} h_{gl} = q_{ml} \quad (4)$$

其中 h_{gl} 為凝結所釋放的熱量, 可由熱力學求出; q_{ml} 為單位體積內氣相被過冷液相所吸走的熱量, 就流場中直徑為 d_p 的單一球體, 其 Nusselt 數(Nu)與 Reynolds 數(Re)及

Prandtl 數(Pr)的關係為(見 Soo, 1967)

$$Nu = \frac{d_p h}{k} = 2 + 0.459 Re^{0.55} Pr^{0.33}$$

如體積 V 內有 N 個液球，並採用

$$1 - a = N(p/6)d_p^3 / V$$

則

$$q_{ml} = \frac{3}{2} \frac{k}{d_p^2} (T_m - T_l) Nu (1 - a) \quad (5a)$$

其中 k 為氣體的熱傳導係數。同理我們可由單一球體在流場中所受阻力出發，可導出(參考 Clift et al., 1978)

$$f_{lg} = \frac{r_l(u_m - u_l)}{t_l} (1 + 0.15 Re^{0.683})(1 - a) \quad (5b)$$

其中 t_l 為液球的鬆弛時間。上述(5a)及(5b)式乃在液球成稀薄狀況下導出，在較下游處需要加以修正，其中我們採用了多孔介質流的理論(Scheidegger, 1974)。

在 $z = L_2 + L_{cv}$ 處，我們以上述(a)部分的控制體積分析所獲結果來作本區的始起條件，配合熱力學的相關狀態方程式，我們可以 Runge-Kutta 方法，對(3a)-(3f)進行數值求解。在(5a)及(5b)式中，液球直徑 d_p 會因氣相凝結而隨着 z 之增加而加大，且過冷液球的溫度會因吸熱而增溫，我們在每計算一步後均需以質量及能量守恆來加以更新。

(3) 擴散器(diffuser)

在正常設計及操作下，擴散器內均為純液態狀況，其質量、動量及能量守恆方程式類同(1a)-(1c)，只在動量守恆式中加入牆壁的阻力項。我們將以混合室的出口結果為本區計算之始起條件。

經由計算，我們的結果與 Fairuzov & Bredikhin 在噴射泵出口處的壓力量測結果相符，相關細節請洽主持人。

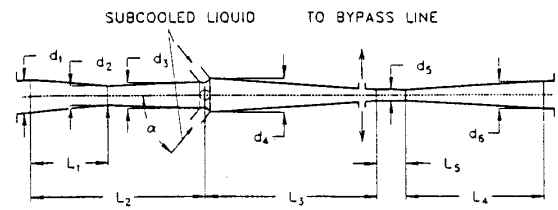
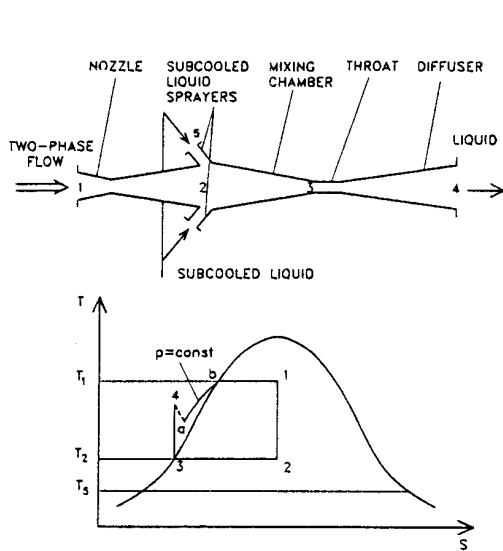
四、結論

本計劃採用包含相變態的定常一維二相流理論及熱力學，成功地對二相噴射泵

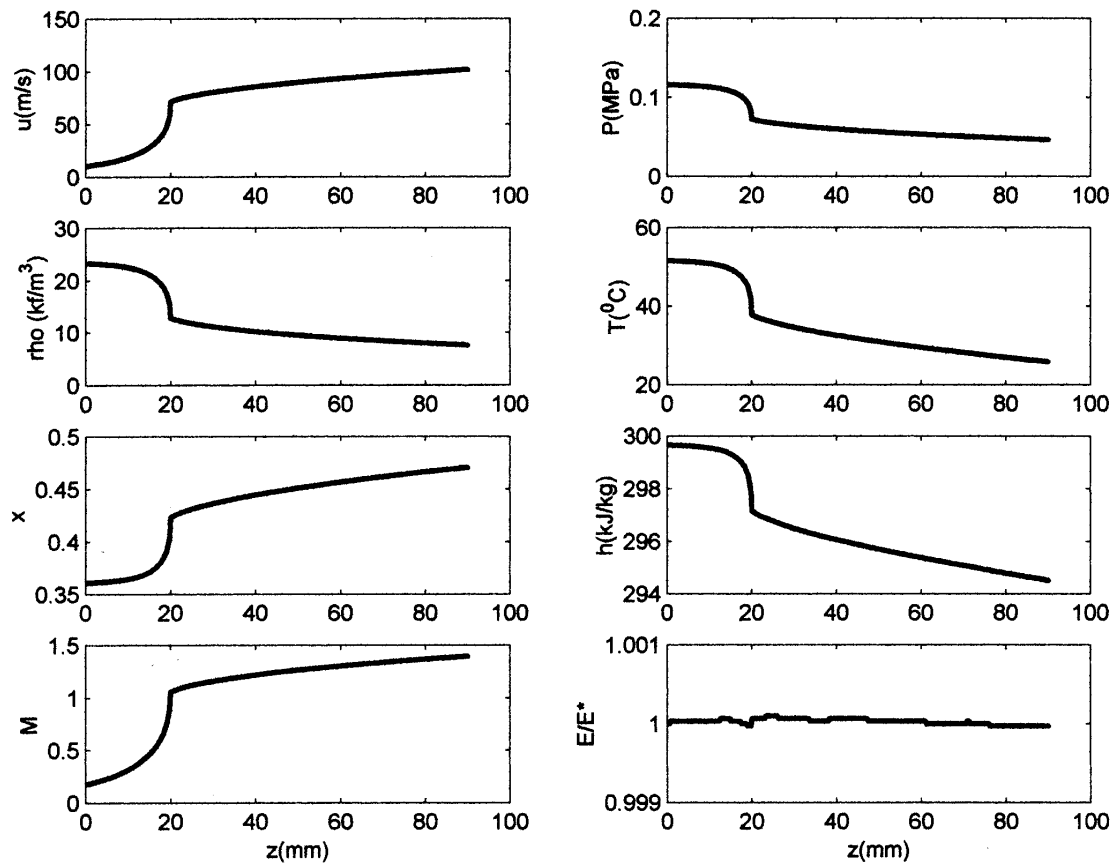
發展出一局部模式，除可對二相噴射泵的研究提供更過的理論基礎外，對實際設計工作也有具體助益。目前主持人嘗試將該模式用於研發以低階熱源如太陽能來驅動的二相噴射泵及相關系統。

五、參考文獻

1. Alad'ev, I. T., Kabakov, V. I., Aihilov, B. M., Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika), Vol.23, pp.83-87 (1987).
2. Anderson, J. D. Jr., "Modern compressible flow," McGraw-Hill, 1990.
3. Clift, R., J. R. Grace and M. E. Weber, "Bubbles, drops, and particles," Academic Press, (1978).
4. Drazin, P. G. and Reid, W. H., "Hydrodynamic stability," Cambridge University Press (1981).
5. Deberne, N., J. F. Leone, A. Duque and A. Lallemand, Int. J. Multiphase Flows, V.25, pp.841-855 (1999).
6. Fairuzov, Y. V. and Bredikhin, V. V., AIAA J. Thermophysics and heat transfer, Vol.9, No.2, pp.285-291 (1995).
7. Lear, W. E., S. A. Sherif and J. M. Steadham, Int. J. Energy Res., V.24, pp.1373-1389 (2000).
8. Scheidegger, A. E., "The physics of flow through porous media," 3rd ed., University of Toronto Press, (1974).
9. Sherif, S. A., W. E. Lear, J. M. Steadham, P. L. Hunt and J. B. Holladay, Int. J. Mech. Sci., V.42, pp.185-198 (2000).
10. Soo, S. L., "Fluid Dynamics of Multiphase system," Blaisdell, (1967).
11. Wallis, G. B., "One-dimensional two-phase flow," McGraw-Hill, New York, 1969.



圖一：本計劃所擬探討的二相噴射泵各部示意圖、吸熱迴路的熱力學循環、及各處幾何尺寸定義 本圖錄自 Fairuzov & Bredikhin (1995)。



圖二：主流體在噴嘴內的速度(u)、壓力(p)、密度(ρ)、溫度(T)、品質(x , quality)、焓(h)、馬赫數(M)及總能量比率(E/E^*)的變化。