

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

迴流效應於管板式太陽能集熱器效率改善

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-ET-7-032-001-ET

執行期間：93年01月01日至93年12月31日

執行單位：淡江大學化學工程與材料工程學系

計畫主持人：何啟東

計畫參與人員：陳宗慶、涂志偉、郭家展

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 3 月 22 日

行政院國家科學委員會/經濟部能源委員會
能源科技學術合作研究計畫成果報告

迴流效應於管板式太陽能集熱器 效率改善

計畫編號：NSC 93-ET-7-032-001-ET

執行期間： 93 年 1 月 1 日至 93 年 12 月 31 日

計畫主持人：何啟東

執行單位：淡江大學化學工程與材料工程學系

中 華 民 國 94 年 3 月

中文摘要

一般利用管板式太陽能集熱器於熱水器、蒸餾系統、流體加熱及乾燥之用途。影響管板式太陽能集熱器集熱效率的因素中，以流體流量與集熱器長寬比之影響最為顯著。本研究乃針對具迴流之管板式太陽能集熱器，探討具迴流效應與集熱器長寬比對集熱效率之影響，並與傳統之無迴流管板式太陽能集熱器作比較。結果顯示，迴流型管板式太陽能集熱器之集熱效率隨著迴流比增加而增加，且於固定流量下有最佳集熱器長寬比之設計參數。此外，在本文中亦探討因迴流操作增加之水力消耗，以求得經濟效益考量之最佳管板式太陽能集熱器的設計與操作參數。

關鍵字:太陽能集熱器、對流係數、長寬比、外部迴流、集熱器效率

英文摘要

The study presents a theoretical prediction of the performance of a sheet-and-tube solar water heater with external recycle and comparison with that of a conventional type collector. Analytical results show that the recycle effect can effectively enhance the collector efficiency compared with that in a single-pass device with the same flow rate. The desirable effect of increasing convective transfer rate and the undesirable effect of reducing heat transfer driving force are the two conflict effects produced by the recycle operation. It was found that the increment of convective transfer rate by increasing the recycle ratio could generally compensate for the decrement of the temperature difference, leading to improved performance, especially for low flow rate. Also, the collector efficiency increases with increasing collector aspect ratio (i.e., either increasing the tube length or decreasing tube number) for a specified collector area and the distance between tubes.

Keywords: solar collector, convective coefficient, aspect ratio, external recycle, collector efficiency

目錄

中英文摘要	I
1、前言	1
2、研究目的	3
3、文獻回顧	4
4、研究方法	5
4.1 太陽能集熱器吸收板之溫度分佈	5
4.2 圓管內之溫度分佈	7
4.3 能量結算	7
4.4 太陽能集熱器之效率	8
4.5 參數之經驗式	9
4.6 太陽能集熱器之流體於管內的流動型式	11
5、結果與討論	15
6、結論與建議	17
7、符號說明	61
8、參考文獻	64
9、計畫成果自評	67
10、附錄	68
研發成果資料表	69

1、前言

由於世界上人口不斷增加，能源消耗量因人類生命活動與工業生產需要而大幅增高，而其延伸而來的環境污染和石油資源儲存量與分配等問題，引起了所謂的能源危機，這促使能源科學便成為 21 世紀重要的科學研究之一。人類使用的能源有二種，一為地球本來儲存的能源，稱為非再生能源(non-renewable energy)或耗竭能源(depletable energy)，例如石油及煤等；另一種為自地球外來的連續能源，即再生能源(renewable energy)。非再生能源，如煤、石油、天然氣，這些積蓄了億萬年的化石能源，經過不斷的巨大消耗，已經不可逆轉地走向枯竭。根據世界各國的能源研究機構和專家經過縝密測算，得出了比較一致的結論：全球化石燃料的生產和消耗峰值將出現在 2030 至 2040 年之間。雖然國內擁有許多座核能發電廠，但是其所造成的生態污染，以及反核的擡伐聲浪，使得尋找替代能源的行動不得不加緊腳步進行。台灣的能源結構目前還是以非再生能源居多，本研究主要是促進太陽能的發展，除了非核家園目標外，尚可減輕如二氧化碳的排放，期望能對環境與氣候方面貢獻一點幫助。因此如何開發出完善的太陽能收集方法，對 98% 能源依賴進口的台灣是相當重要的課題。

在太陽能、風能、生物質能、潮汐能等各類可再生能源中，太陽能成為我們的首選。無論是從資源的數量、分布的普遍性，還是從清潔性、技術的可靠性來看，太陽能都比其它可再生能源更具有優越性。太陽能的利用可分為間接利用和直接利用兩方面。間接利用方面有水力發電、風力發電、潮流發電與利用化石燃料傳統的能量系統等。直接利用方面有太陽熱發電、太陽光發電、太陽熱熱泵冷暖房、溫室栽培等。而利用太陽能直接加熱物體的方法，其方式既簡單、也能夠獲得較高的效率。

太陽能即地球接收自太陽之輻射能，其直接或間接地提供地球上絕大部份之能源，並具有豐富、清潔的優點。地球與大氣圈每日不斷地自太陽獲得 1.7×10^{17} W 之輻射量，以每人所需平均量來說，此數目的確相當可觀，但是太陽輻射穿越大氣層後，因受到吸收、散射及反射等作用，故能直接到達地表的之太陽輻射僅剩下三分之一，加上照射到海洋上的能量，所以人們可以利用的能量便減少許多，但若能有效利用也足夠供給人們使用，可惜受到科技、經濟和社會等因素限制，只有其中一小部分被人類所利用。太陽能在先天上也有它的缺點，首先，它是稀薄的能源，需要廣闊面積才能收集到足夠人類使用的能量。其次，太陽能穩定性差，無法連續不斷地供應，通常於白天收集太陽能，有時會因為天氣狀況使收集效率降低，如雲層掩蔽等。而晚上並無太陽照射，因此太陽能必須加以儲存，以供夜晚或多雲日子使用，現在多以絕熱效果良好的容器作為儲存熱量的媒介。

在許多替代或是再生能源中，太陽能是最豐富且最容易取得的能源，但其不易收集且難以有效利用是太陽能最大的缺點。太陽能熱水器是利用太陽能收集器，以太陽輻射把水加熱的裝置，它是目前最簡便、實際應用最多的太陽能系統。而國內日照條件介於 500 至 900 W/m² 之間，單位面積的能源密度並不高，而台灣地區人口密度高，要尋找大面積的土地專供太陽能使用，有其實際的困難且土地成本亦甚為高昂，因此利用現有多餘空地如屋頂等加以裝設太陽能設備，是發展的一個重點方向。本研究則針對最簡單的太陽能集熱器來收集熱能，正因地狹人稠，所以如何有效利用太陽能且提高其效率以減少太陽能集熱器的使用面積就成為了我們的研究目標。在太陽能的應用上，目前國內發展最成熟、最普遍的太陽能利用是於熱水的加熱系統，而管板式太陽能集熱器主要用於社區及家庭中水之加溫及室內溫度之調節等。

影響太陽能集熱器效率之變因有很多，大致可歸納為氣候因素、設計因素及操作因素三類，其中氣候因素並非人為可以控制之因素，所以設計因素與操作因素便成為太陽能集熱器效率主要之研究方向。在設計因素上有改變集熱器裝置或吸收板型式等方法，目的在提高吸收板與流體間之對流熱傳係數，並盡量減少熱損失，以提高集熱器之效率。為促進其集熱器的效率，曾有學者提出許多有關改善設計因素的方法，包括：(1)增加熱傳面積^[1]；(2)促進流體於吸收板上之擾動及強制對流^[2,3]；(3)促進自由對流^[4]；(4)於吸收板頂部加裝一或兩層玻璃蓋，減少頂部的熱損失^[5]；(5)於固定吸收板面積及流體質量流率下，改變集熱器之長寬比^[6]，(6)改變吸收面之光學性質，可以提高吸收板吸收太陽輻射之能力，如選擇性吸收膜等。而選擇吸收膜日射吸收率高，低溫放射率低，其目的主要是為了增高集熱效率並設法抑制對流與放射向外氣放熱。面蓋層數增加，雖然可減少熱損失，當太陽光入射角度變大時，會使吸收板上之入射量減少，熱通過率亦愈小，故須有所取捨。在操作因素上亦可以改變流體進口溫度、流量、迴流比等條件，以促進流體之強制對流^[7]。另外，亦有學者提出，於熱交換器或質量交換器中加裝外部迴流裝置^[8,9]，可有效地提高熱傳或質傳效率。

本研究是針對於固定吸收板面積，於傳統之管板式太陽能集熱器中加裝迴流裝置，依不同的迴流型式、迴流比值、迴流組數、流體進口溫度、流體總質量流率和太陽光入射量之條件下，探討集熱器效率與水力消耗之影響。

2、研究目的

在化工廠製造流程中，常伴隨著許多動量，熱量及質量傳送的現象，如何設計及操作能使其最符合經濟效益，乃是化學工程師所必須面臨的課題。其中迴流裝置為最常見的設計，其作用在於提昇系統的熱傳或質傳效率，更廣泛的應用在吸收、萃取等各方面，例如：於熱擴散塔中，加入迴流可減低塔內的濃度梯度，減少自然擴散的效應，並增加熱擴散塔的分離效果；例如在精餾塔^[10]中我們都會加入迴流裝置來加強分離效果藉以提高產物的純度，在熱擴散塔^[11]中加入迴流裝置減少塔中的濃度梯度進而減少自然對流使熱擴散的效應能夠顯現出來，增加其熱擴散塔的分離度，另外薄膜萃取增加迴流裝置也是可以增加流速，增加萃取效果，而像空氣上揚反應器^[12,13]及環狀反應器^[14,15]加入迴流裝置的目的也都相同，所以，加入迴流裝置無疑的可以使溫度或濃度均勻，並提高加熱及分離的效率。對於分析包含流體流動、熱量及質量傳送的問題中，最著名的乃是格拉茲問題(Graetz Problem)^[16,17]。後來 Ho^[18,19]等提出平板型熱交換器及質量交換器也是針對迴流效應對系統的影響來探討，而此理論基礎繼續延伸至後來的多行程平板型熱交換器及圓管型熱交換器研究。

過去在管板式太陽能集熱器於不同之邊界條件之系統的研究中，並沒有學者針對內部迴流來討論對太陽能集熱器效率的影響，本研究亦是針對迴流效應於熱傳效率的提升有幫助，所以對管板式太陽能集熱器增加了迴流效應的因素來探討對集熱器效率的影響。

3、文獻回顧

本研究所討論之管板式太陽能集熱器為一種最簡單的太陽能收集器，其構造主要包括了玻璃面蓋、吸收板、圓管、絕熱層。板管式太陽能集熱器其詳細之研究，最早在 1942 年由 Hottel 和 Wertz^[20] 依據能量平衡的計算對建築物上之集熱器進行分析開始。之後 Whillier 與 Hottel^[21]，Bliss^[22]，分別對太陽能集熱器做了更多理論推導與分析，例如集熱器之熱損失係數、熱量移除係數等。1958 年 Tabor^[23] 提出兩平板之間熱對流的改良經驗式與降低玻璃蓋之輻射率的方式，另外他所提出的經驗式還可以計算具有選擇性吸收表面之集熱器的熱損失係數，Tabor 的研究成果不但改善 Hottel 等人先前提出的經驗式，也補充其不足的部分。1974 年 Moore^[24] 等人在相同的操作條件下，以水作為流體之集熱器其實驗結果與 Hottel 和 Wertz 之理論模擬預期之結果作進一步的比較下，結果顯示 Hottel 和 Wertz 之理論是相當可靠的，而 Hottel 等人的理論便常被使用在模擬太陽能集熱器之集熱效率的開發與研究。1970 年中期，新型的太陽能集熱器開始出現於市場上，從此開始 Hill^[25] 與 Garg^[26] 等人便陸續針對太陽能集熱方式之程序進行設計與改善。Klein^[27] 依照 Hottel 和 Wertz 的研究結果，於 1979 年提出太陽能集熱器吸收板至外界的熱損失係數，進而使太陽能集熱器的理論研究更為方便與完善。

有關太陽能集熱器的實際應用，Spotts^[28]，Yeh^[29] 等人分別以實驗和理論來探討管板式太陽能集熱器的實際效率。Nahar^[30] 以實驗來比較不同吸收板與玻璃面蓋之間的距離對集熱效率的影響，以得到最佳的間距。

近年來，太陽能集熱器的研究成果也轉移到了一些重要的程序當作熱源使用。Hawladar^[31] 與 Li^[32] 使用太陽能集熱器加熱流體，分別對熱泵與空調設備進行研究，其中 Hawladar 除了探討對系統效率的影響因子，並且得到使用太陽能當作熱源的成本回收周期。而 Koschikowski^[33] 更將太陽能集熱器應用於薄膜蒸餾上，對於海水淡化增加了程序選擇性，以期能夠取代傳統壓力差為驅動力之程序。這些實驗的主要目的除了廣泛的利用太陽能取代傳統非再生能源以符合時代潮流之外，尚對太陽能的發展與石油的節約有很大的助益。

4、研究方法

4.1 太陽能集熱器吸收板之溫度分佈

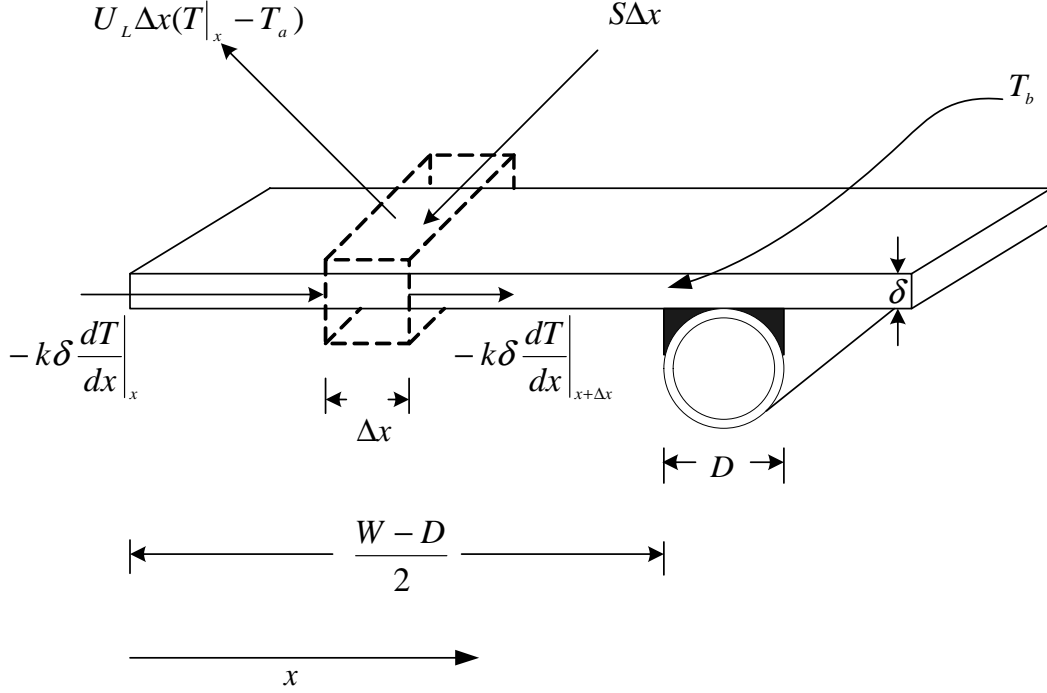


圖 1 太陽能集熱器之吸收板能量平衡之示意圖

圖 1 為太陽能集熱器之吸收板上的能量平衡示意圖,其能量平衡方程式為

$$S\Delta x + U_L\Delta x(T_a - T) + (-k\delta \frac{dT}{dx})|_x - (-k\delta \frac{dT}{dx})|_{x+\Delta x} = 0 \quad (1)$$

其中總熱損失係數 $U_L = U_t + U_b + U_e$, 此係數為吸收板頂部、集熱器底部與集熱器側面的熱損失係數的總和。式(1)整理後可得

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{U_L}{k\delta} (T - T_a - \frac{S}{U_L}) \quad (2)$$

其中 S 為吸收板上測得之太陽能入射量。此系統的邊界條件可寫為

$$\frac{dT}{dx}|_{x=0} = 0 \quad (3)$$

$$T|_{x=(W-D)/2} = T_b \quad (4)$$

在此定義參數 $m^2 = U_L/k\delta$ 與 $\psi = T - T_a - S/U_L$, 式(2)可以改寫成

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} - m^2\psi = 0 \quad (5)$$

同理, 邊界條件可以改寫成

$$\frac{d\psi}{dx}|_{x=0} = 0 \quad (6)$$

$$\psi|_{x=(W-D)/2} = T_b - T_a - S/U_L \quad (7)$$

由式(5)可以求得此二階常微分方程式的解為

$$\psi = C_1 \sinh mx + C_2 \cosh mx \quad (8)$$

式(8)中之常數 C_1 與 C_2 可以經由邊界條件式(6)與(7)求得。由上述過程可解得此二階常微分方程式的完整解為

$$\frac{T - T_a - \frac{S}{U_L}}{T_b - T_a - \frac{S}{U_L}} = \frac{\cosh mx}{\cosh m(W-D)/2} \quad (9)$$

由單位長度吸收板經由熱傳導的方式傳至圓管，以吸收板與圓管之交界處為基準的熱能可以經式(9)利用傅立葉(Forier)定律求得如下

$$q'_{fin} = -k\delta \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=(W-D)/2} = \frac{k\delta m}{U_L} [S - U_L(T_b - T_a)] \tan m \frac{W-D}{2} \quad (10)$$

由之前的定義參數可知 $k\delta m/U_L = 1/m$ ，而式(10)所描述之熱傳導量僅為圓管一側的吸收板所得到之熱量，所以圓管內流體由兩側之吸收板所得之熱量為式(10)的兩倍，即為

$$q'_{fin} = (W-D)[S - U_L(T_b - T_a)] \frac{\tanh m(W-D)/2}{m(W-D)/2} \quad (11)$$

式(11)可以改寫為

$$q'_{fin} = (W-D)F[S - U_L(T_b - T_a)] \quad (12)$$

其中標準吸收板效率係數 F 為

$$F = \frac{\tanh m(W-D)/2}{m(W-D)/2} \quad (13)$$

而圓管內流體所得之熱能尚包括圓管正上方吸收板所吸收的熱能，此一部份的熱能吸收可以表示為

$$q'_{ube} = D[S - U_L(T_b - T_a)] \quad (14)$$

由式(12)與(14)結果相加就可以得到單位長度的圓管內的流體所獲得的熱能為

$$q'_u = [(W-D)F + D][S - U_L(T_b - T_a)] \quad (15)$$

此外，式(15)利用熱傳的阻力串聯模式亦可表示為

$$q'_u = \frac{T_b - T_f}{\frac{1}{(h_{f,i}\pi D_i)} + \frac{1}{C_b}} \quad (16)$$

其中，圓管周圍與吸收板連接的部份之平均熱傳導係數 C_b 可由下式計算

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma} \quad (17)$$

其中 k_b 、 b 、 γ 分別是此連接部份之熱傳導係數、寬度以及平均厚度。我們可由式(16)解出 T_b 的關係式，並將結果代回式(15)可得

$$q'_u = WF'[S - U_L(T_f - T_a)] \quad (18)$$

其中集熱器效率因子 F' 為

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L[D + (W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{f,i}} \right]} \quad (19)$$

4.2 圓管內之溫度分佈

圖 2 為一管板式太陽能集熱器之裝置圖，本文主要討論加裝迴流裝置之管板式太陽能集熱器的集熱器效率。太陽能集熱器之理論推導是以能量結算的方式，分別對吸收板及流體做能量結算，利用所得之微分方程式，求出圓管內流體之溫度分佈，最後可解出流體出口溫度與集熱器之效率。

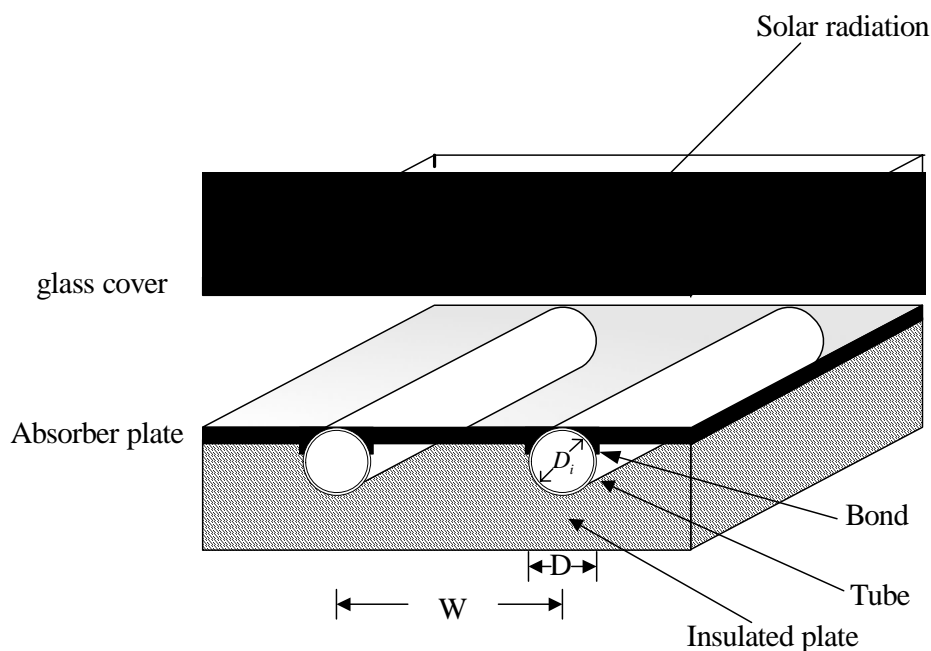


圖 2 管板式太陽能集熱器

首先我們做了以下之假設：

- (1) 各種物理性質不隨溫度改變。
- (2) 流體之溫度分佈僅為 z 方向函數。
- (3) 在穩定狀態下操作。

4.3 能量結算

若假設流體流動方向的溫度梯度可以忽略，對於吸收板作其能量平衡，可以得到單位長度吸收板傳遞至圓管內流體的能量為式(18)。同理，假設圓管內流體之溫度分佈為圓管軸方向的函數，故式(18)可寫為

$$q'_u = WF'[S - U_L(T_{f,i}(z) - T_a)] \quad (20)$$

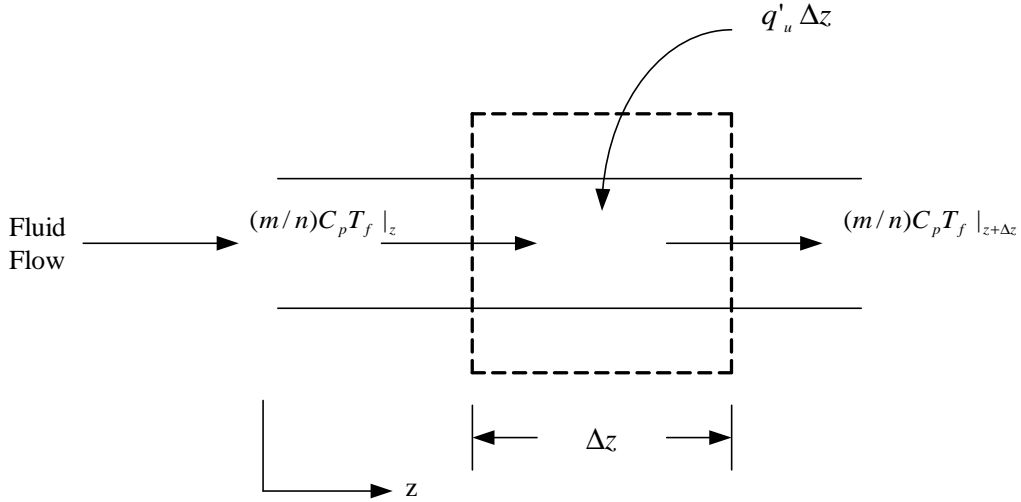


圖 3 圓管內流體能量平衡示意圖

圖 3 為圓管內流體能量平衡示意圖，經由能量平衡可以得到

$$\left(\frac{m}{n}\right)C_p T_{f,i} \Big|_z - \left(\frac{m}{n}\right)C_p T_{f,i} \Big|_{z+\Delta z} + q'_u \Delta z = 0 \quad (21)$$

合併式(20)與(21)，並將式(21)同除以 Δz 。因 Δz 為一極小值，所以式(21)可寫成一個一階常微分方程式

$$mc_p \frac{dT_{f,i}}{dz} - nWF'[S - U_L(T_{f,i} - T_a)] = 0 \quad (22)$$

由式(22)可得管板式太陽能集熱器之圓管內溫度統制方程式為

$$M_1 C_p \frac{dT_{f,1}(z)}{dz} - nWF'[S - U_L(T_{f,1}(z) - T_a)] = 0 \quad (23)$$

$$-M_2 C_p \frac{dT_{f,2}(z)}{dz} - nWF'[S - U_L(T_{f,2}(z) - T_a)] = 0 \quad (24)$$

其中 M_1, M_2 分別代表管 1 與管 2 中流體的流量。式(23)與(24)之邊界條件如下

$$Z = 0, \quad T_{f,1}(0) = T_{1,0}, \quad T_{f,2}(0) = T_{2,0} \quad (25)$$

$$Z = L, \quad T_{f,1}(L) = T_{1,L}, \quad T_{f,2}(L) = T_{2,L} \quad (26)$$

由式(23)-(26)可以得到圓管內溫度分佈分別為

$$T_{f,1}(z) = T_a + \frac{S}{U_L} + (T_{1,0} - T_a - \frac{S}{U_L}) \exp[-U_L WF' z / M_1 C_p] \quad (27)$$

$$T_{f,2}(z) = T_a + \frac{S}{U_L} + (T_{2,0} - T_a - \frac{S}{U_L}) \exp[U_L WF' z / M_2 C_p] \quad (28)$$

若各項係數皆為已知，經由式(27)與(28)便可求出圓管內流體溫度分佈。

4.4 太陽能集熱器之效率

為了計算管板式太陽能集熱器之效率，首先假設吸收板之平均溫度 $T_{p,m}$ ，輸入系統參數 ($A_c, n, D, D_i, W, \tau_g, \alpha, C_p, \rho, \mu, k_f, k_s, k_i, \lambda_s, \epsilon_p, \epsilon_g I_0, T_a, V, m, T_{f,0}, R$)，先求出集熱器總熱損失係數 U_L ，其中我們忽略集熱器側面的熱損失，而加熱器吸收板至底部之熱損失係數，主要是熱流通過絕緣層之傳導熱阻，即

$$U_L = U_T + U_B + U_E \cong U_T + U_B \cong U_T + k_s / \lambda_s \quad (29)$$

其中 U_T 可利用學者 Klein^[34] 步 Hottel 與 Woertz^[20] 之後塵所求得之實驗式

$$U_T = \left\{ \frac{N}{\frac{C_{air}}{T_{p,m}} \left[\frac{(T_{p,m} - T_a)}{N + f} \right]^e + \frac{1}{h_w}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_{p,m} + T_a)(T_{p,m}^2 + T_a^2)}{\left\{ (\epsilon_p + 0.00591Nh_w)^{-1} + \frac{[2N + f - 1 + 0.133\epsilon_p]}{\epsilon_g} - N \right\}} \quad (30)$$

其中

$$f = ((1 + 0.089h_w - 0.1166h_w\epsilon_p)(1 + 0.07866N)) \quad (31)$$

$$C_{air} = 520(1 - 0.00005\beta^2), 0^\circ < \beta < 70^\circ; \text{若 } \beta > 70^\circ \text{ 則 } \beta = 70^\circ \quad (32)$$

$$e = 0.43(1 - 100/T_{p,m}) \quad (33)$$

而集熱器的外層玻璃面蓋與外界因空氣流動所產生之熱對流係數 h_w 由學者 Watmuff^[35] 等人所定義與風速大小有關之經驗式為

$$h_w = 2.8 + 3.0V \quad (34)$$

此處 V 表示外界風速。將式(30)代入式(29)即可得到 U_L ，然後假設流體迴流至管 1 進口之混合溫度，經由試誤法可得到此假設 $T_{p,m}$ 下之流體出口溫度 $T_{f,out}$ ，即可得到集熱器效率為

$$\eta = Q_u / A_c I_0 = mC_p (T_{f,out} - T_{f,0}) / A_c I_0 \quad (35)$$

對不同迴流型式之集熱器，其出口溫度 $T_{f,out}$ 分別為：迴流型式一： $T_{f,out} = T_{f,2}(0)$ ，迴流型式二： $T_{f,out} = T_{f,1}(L)$ ，迴流型式三： $T_{f,out} = T_{f,2}(0)$ 。平均吸收板溫度 $T_{p,m}$ 可經由下式計算

$$Q_u = mC_p (T_{f,out} - T_{f,0}) = A_c [S - U_L (T_{p,m} - T_a)] \quad (36)$$

由式(36)我們就可以得到新的 $T_{p,m}$ 為

$$T_{p,m} = \frac{S - [mC_p (T_{f,out} - T_{f,0})] / A_c}{U_L} + T_a \quad (37)$$

利用式(37)所求得的 $T_{p,m}$ 以試誤法直到 $T_{p,m}$ 之誤差值小於 10^{-3} ，此時便可以求得在此操作條件下正確之集熱器效率 η 。

4.5 參數之經驗式

圓管內流體若是處於層流，即雷諾數(Reynolds number)， $Re_D < 2100$ ，的狀態，納塞數(Nusselt number)， Nu_D ，與泛寧摩擦係數(fanning friction factor)， f_F ，可計算如下

$$Nu_D = \frac{h_{f,i} D_i}{k_f} = 3.656 \quad (38)$$

$$f_F = \frac{16}{Re_D} \quad (39)$$

當圓管內流體狀態為紊流，即雷諾數介於 $2100 < \text{Re}_D < 5 \times 10^6$ 此範圍間，此時納塞數與泛寧摩擦係數^[36,37]則計算如下

$$\text{Nu}_D = \frac{(f_F/8)(\text{Re}_D - 1000)\text{Pr}}{1 + 12.7(f_F/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (40)$$

$$f_F = 0.25(0.790 \ln \text{Re}_D - 1.64)^{-2} \quad (41)$$

其中式(21)中，普蘭特數(Prantle number)，Pr，和管長與管內徑的比值，其應用範圍分別為 $0.5 < \text{Pr} < 2000$ 和 $(L/D_i) \geq 10$ 。

在此模擬程序中，我們尚需要其他經驗公式去求得各項系統參數。其中摩擦係數的計算可由學者 Welty^[38]提出之公式計算

$$\lambda w_f = \frac{2f_F v^2 L}{D_i} \quad (42)$$

此摩擦係數主要是由改變流體之流量以及集熱器之長寬比值對系統摩擦損耗改變量的一個指標。而水力消耗可以下式來計算

$$H = m \lambda w_f \quad (43)$$

為了比較不同迴流型式之能量消耗，在此定義水力消耗增加率(increment of power consumption) I_p ：

$$I_p = \frac{H_R - H_0}{H_0} = \frac{M_1 \lambda w_{f,1} + M_2 \lambda w_{f,2} - 2M_0 \lambda w_{f,0}}{2M_0 \lambda w_{f,0}} \quad (44)$$

其中 $H_R = M_1 \lambda w_{f,1} + M_2 \lambda w_{f,2}$ ，表示具迴流型式之集熱器的能量消耗， $H_0 = 2M_0 \lambda w_{f,0}$ ，表示無迴流集熱器之能量消耗。此外無迴流型式以及具迴流型式之摩擦係數分別可由下式計算： $\lambda w_{f,0} = 2f_F v_0^2 L/D_i$ 、 $\lambda w_{f,1} = 2f_F v_1^2 L/D_i$ 與 $\lambda w_{f,2} = 2f_F v_2^2 L/D_i$ 。

而為了比較具迴流型式與無回流型式之太陽能集熱器的集熱效率，可以定義其集熱效率提升百分比 I_D 為

$$I_D = \frac{\eta_R - \eta_D}{\eta_D} \% \quad (45)$$

其中， η_R 和 η_D 分別為為具迴流和無迴流型式之集熱器的集熱器效率。

本模擬所採用之集熱器設計參數如下

$A_c = 2nW\lambda = 1.2 \text{ m}^2$ ； $L = A_c / 2W = 2 \text{ m}$ ； $W = 0.3 \text{ m}$ ； $\tau_g = 0.875$ ； $\alpha_p = \varepsilon_p = 0.96$ ； $\varepsilon_g = 0.88$ ； $I_0 = 0.5 \text{ and } 1.0 \text{ kJ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ； $D_i = 0.01 \text{ m}$ ； $D = 0.011 \text{ m}$ ； $T_a = 283 \text{ K}$ ； $N = 1$ ； $\beta = 45^\circ$ ； $T_{f,0} = 283, 293 \text{ and } 303 \text{ K}$ ； $V = 1.0 \text{ m s}^{-1}$ ； $\lambda_s = 0.05 \text{ m}$ ； $\delta = 0.005 \text{ m}$ ； $k_s = 4.5 \times 10^{-5} \text{ kJ s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ； $k_{fl} = 3.84 \times 10^{-1} \text{ kJ s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ； $m = 3 \sim 9 \text{ kg min}^{-1}$ 。

4.6 太陽能集熱器之流體於管內的流動型式

4.6-1 無迴流型式

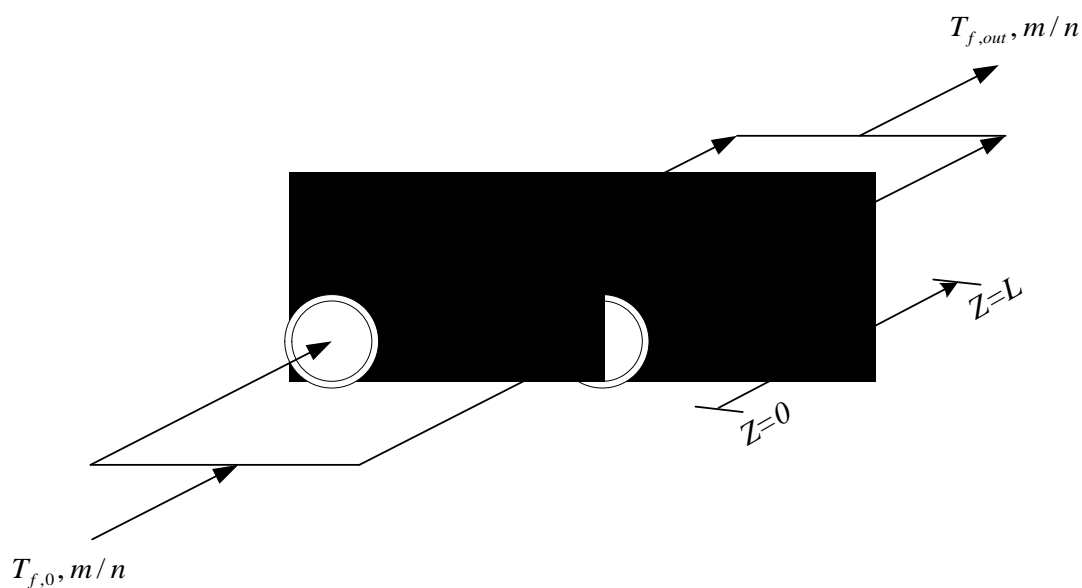


圖 4 無迴流型式之流動示意圖

圓管內的流量、流體流速與雷諾數分別為

$$M_0 = 1/2(m/n), \quad M_0 = 1/2(m/n) \quad (46)$$

$$v_0 = \frac{4M_0}{\pi D_i^2 \rho} \quad (47)$$

$$\text{Re}_0 = \frac{\rho v_0 D_i}{\mu} \quad (48)$$

集熱器於固定進口總流量所獲得之熱能為

$$Q_u = m C_p (T_{f,out} - T_{f,0}) \quad (49)$$

由流動示意圖可知此型式之邊界條件為

$$Z = 0, \quad T_{f,1}(0) = T_{f,0}, \quad T_{f,2}(0) = T_{f,0} \quad (50)$$

$$Z = L, \quad T_{f,1}(L) = T_{1,L} = T_{f,2}(L) = T_{2,L} = T_{f,out} \quad (51)$$

4.6-2 迴流型式一

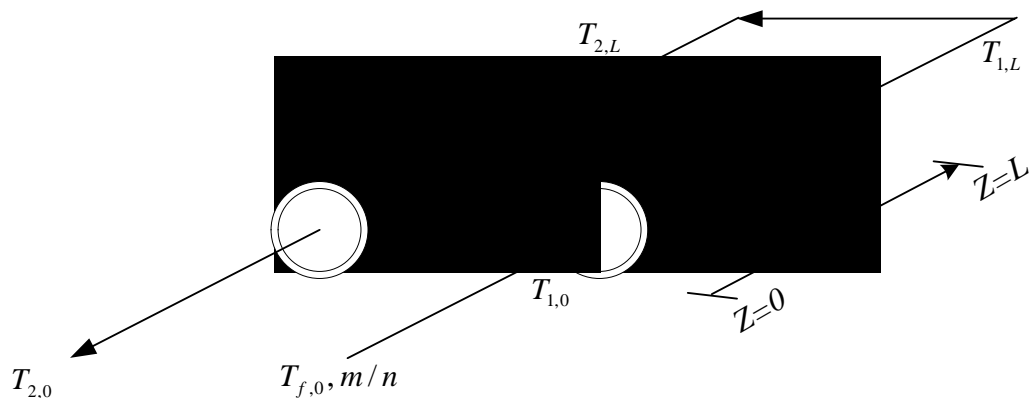


圖 5 迴流型式一之流動示意圖

圓管內的流量、流體流速與雷諾數分別為

$$M_1 = m/n, \quad M_2 = m/n \quad (52)$$

$$v_1 = \frac{4M_1}{\pi D_i^2 \rho}, \quad v_2 = \frac{4M_2}{\pi D_i^2 \rho} \quad (53)$$

$$\text{Re}_1 = \frac{\rho v_1 D_i}{\mu}, \quad \text{Re}_2 = \frac{\rho v_2 D_i}{\mu} \quad (54)$$

集熱器於固定進口總流量所獲得之熱能為

$$Q_u = mC_p (T_{f,out} - T_{f,0}) \quad (55)$$

由流動示意圖可知此型式之邊界條件為

$$Z = 0, \quad T_{f,1}(0) = T_{f,0}, \quad T_{f,2}(0) = T_{2,0} = T_{f,out} \quad (56)$$

$$Z = L, \quad T_{f,1}(L) = T_{1,L}, \quad T_{f,2}(L) = T_{2,L} \quad (57)$$

4.6-3 迴流型式二

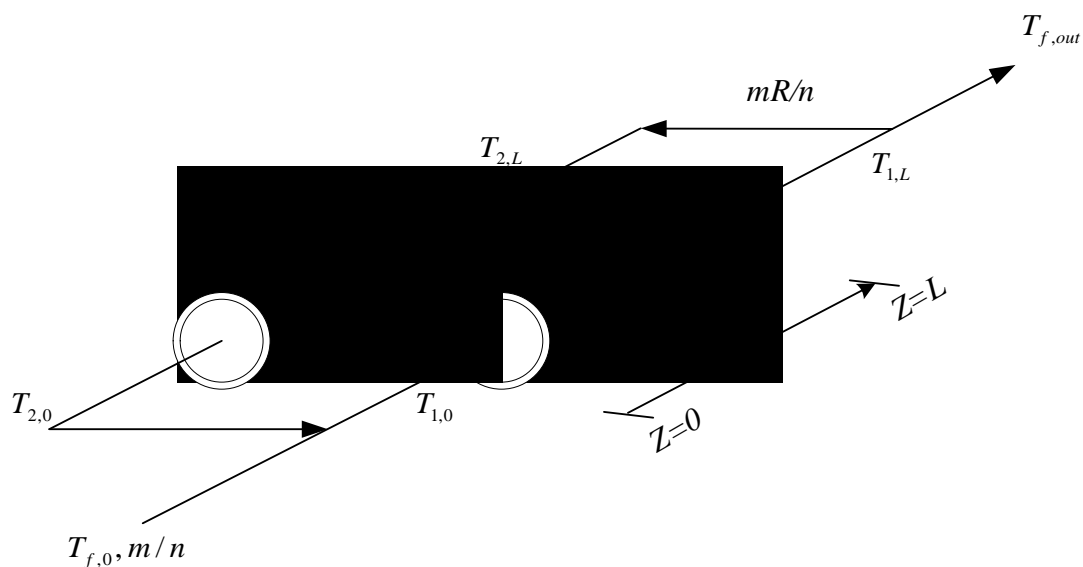


圖 6 迴流型式二之流動示意圖

圓管內的流量、流體流速與雷諾數分別為

$$M_1 = m(1+R)/n, \quad M_2 = mR/n \quad (58)$$

$$v_1 = \frac{4M_1}{\pi D_i^2 \rho}, \quad v_2 = \frac{4M_2}{\pi D_i^2 \rho} \quad (59)$$

$$\text{Re}_1 = \frac{\rho v_1 D_i}{\mu}, \quad \text{Re}_2 = \frac{\rho v_2 D_i}{\mu} \quad (60)$$

集熱器於固定進口總流量所獲得之熱能為

$$Q_u = mC_p (T_{f,out} - T_{f,0}) \quad (61)$$

由流動示意圖可知此型式之邊界條件為

$$Z = 0, \quad T_{f,1}(0) = T_{1,0}, \quad T_{f,2}(0) = T_{2,0} \quad (62)$$

$$Z = L, \quad T_{f,1}(L) = T_{1,L} = T_{f,out}, \quad T_{f,2}(L) = T_{2,L} \quad (63)$$

$$T_{1,0} = \frac{T_{f,in} + RT_{2,0}}{R+1} \quad (64)$$

4.6-4 迴流型式三

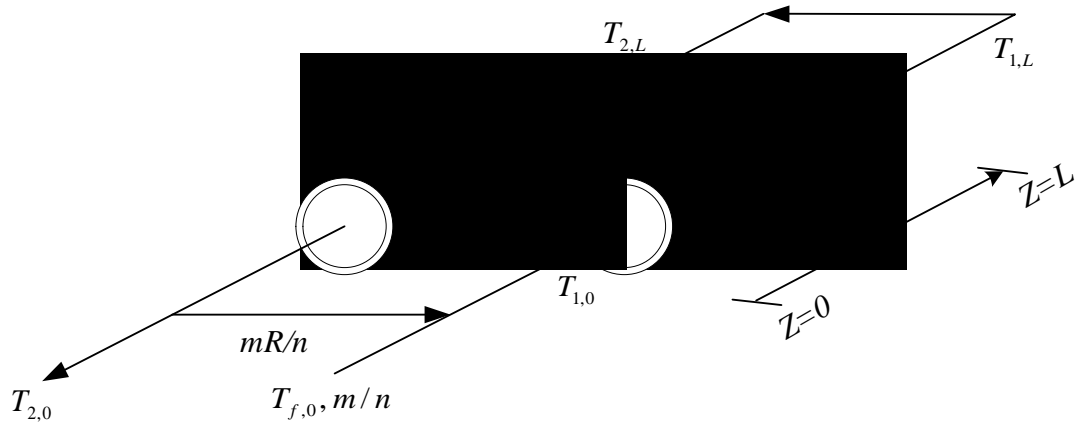


圖 7 迴流型式三之流動示意圖

圓管內的流量、流體流速與雷諾數分別為

$$M_1 = m(1+R)/n, \quad M_2 = m(1+R)/n \quad (65)$$

$$v_1 = \frac{4M_1}{\pi D_i^2 \rho}, \quad v_2 = \frac{4M_2}{\pi D_i^2 \rho} \quad (66)$$

$$\text{Re}_1 = \frac{\rho v_1 D_i}{\mu}, \quad \text{Re}_2 = \frac{\rho v_2 D_i}{\mu} \quad (67)$$

集熱器於固定進口總流量所獲得之熱能為

$$Q_u = mC_p (T_{f,out} - T_{f,0}) \quad (68)$$

由流動示意圖可知此型式之邊界條件為

$$Z = 0, \quad T_{f,1}(0) = T_{1,0}, \quad T_{f,2}(0) = T_{2,0} = T_{f,out} \quad (69)$$

$$Z = L, \quad T_{f,1}(L) = T_{1,L}, \quad T_{f,2}(L) = T_{2,L} \quad (70)$$

$$T_{1,0} = \frac{T_{f,in} + RT_{2,0}}{R+1} \quad (71)$$

5、結果與討論

本研究乃是由水通過管板式太陽能加熱器，並且加裝迴流裝置使得集熱效率提升，我們以不同設計參數，如迴流型式和迴流組數 n ，與操作參數，如進口溫度 $T_{f,0}$ 、迴流比值 R 、流體總質量流率 m 和太陽光入射量 I_0 來探討這些參數對集熱器效率的影響，結果分別如圖 8 至圖 25 所示。其中太陽能集熱器之效率會隨迴流組數和進口溫度而增加，但會隨著太陽光入射量、迴流比值和流體總流量增加而增加，此處迴流組數 n 與集熱器之長寬比值 ξ ($\lambda/2nW$) 的關係為迴流組數增加時，集熱器長寬比值便會減少，同理，迴流組數的變化可視為集熱器長寬比值的改變。在不同操作條件下，將具迴流裝置之結果與無迴流之集熱器作一番比較，其集熱效率提升百分比的結果分別列表於表 1 至表六。由集熱效率提升百分比 I_D 的結果顯示，在固定總流量下會有一個最佳集熱器長寬比值，這是因為流體在迴流效應下，流速提高而形成紊流。在紊流的狀態時，水之熱對流係數會比在層流時相對提高，而具迴流型式之集熱器於固定流體總流量時會比無迴流型式之集熱器更快達到紊流狀態，因此會產生最佳效率提升百分比。但是具迴流與無迴流形式之集熱器的流體速度皆達到紊流時，集熱效率便無法獲得有效率之提升，這是因為內部迴流會使得流體流速增加，雖然熱對流係數會因此增加，但是卻會使得圓管管壁與流體之間的溫度驅動力減小，尤其以具迴流型式之集熱器影響較大。因此，對具迴流型式集熱器而言，迴流效應所形成的預混效應會產生一個有利因素，即流體流速提高所形成的強力對流使得熱傳係數增加，與另一個不利的因素，即溫度驅動力減小。

對具迴流型式的集熱器而言，流體流速提高時，熱對流係數的提升會與溫度驅動力減少的作用相互抵銷，而迴流效應在本研究中對增加熱對流係數的影響尚比溫度驅動力減少之因素來的高，因此迴流比值的提升還是有助於集熱器集熱效率的增加。但對沒有外部迴流的加熱器形式而言，如太陽能集熱器型一的結果所示，流體流量太低與迴流組數 n 較多時，因為熱對流係數無法有效提升，且每組的流體流經之管長變短，故集熱效率無法獲得較大的改善。當太陽光入射量增加時，會對進口溫度較高的流體集熱效率之提升效果較為顯著，這是因為提升了流體與圓管壁之間的熱驅動力。

流體總質量流率對於集熱器之集熱效率也是一個重要影響因素，因流體總質量流率愈大，將可帶走愈多的熱量，我們以不同迴流型式、進口溫度、迴流比值和流體總質量流率來探討這些參數對集熱器效率的影響，結果分別如圖 26 至圖 31 所示；在迴流型太陽能集熱器中，雖然集熱器效率會隨著流體總質量流率與迴流比值的增加而增加，然而總質量流率與迴流比值增加亦帶來負面影響，除了總質量流率增加會使出口溫度降低，總質量流率與迴流比值增加也會造成水力消耗的增加。

太陽能集熱器之水力消耗大小只與流體流速有關，因此我們以不同迴流型式和不同迴流比值來探討水力消耗的增加量。表 7 至表 9 則表示不同迴流型式與無迴流型式比較之集熱器水力消耗增加率，如結果所示，水力消耗會隨流體總質量流率與迴流比值增加而增加，而管中單位時間內存在流體越多，亦可說迴流比值越高者，如型三之太陽能集熱器之結果所示，其水力消耗量相較於型一之集熱器就顯示出迴流所造成的能量損失比率增加不少。

對於太陽光入射量和進口溫度兩項參數，目的是討論總熱收集量 Q_u 與水力消耗之比值的變化，結果分別如圖 32 至圖 41 所示，結果顯示低流體總流量與迴流組數較多的條件下，水力消耗量與熱收集量相比較之下影響不大。綜合以上結

果，流體總質量流率關係太陽能集熱器兩個重要的結果，分別是集熱器效率與流體出口溫度，同時流體總質量流率亦會增加水力消耗率，以致操作成本提高。所以，針對不同熱源需要的產業，在決定流體質量流率之大小時，必須要先作操作條件之經濟效益的評估。

6、結論與建議

對於太陽能集熱器之總集熱效率，綜合前述之結果與討論，可以歸納下列結論：

- (1) 在各種不同流體流動型式的集熱器中，於一定吸收板面積及其他相同的設計因素與操作因素下，總集熱器效率大小比較依次為：太陽能集熱器型三>太陽能集熱器型二>太陽能集熱器型一>無迴流型太陽能集熱器。
- (2) 太陽光之入射量越大，集熱器之集熱效率提升百分比就越高。對於進口溫度較高之集熱器，太陽光之入射量越大與太陽光之入射量低的集熱器相比較，其集熱效率提升越高，但是對較低進口溫度的流體效率影響並不顯著。
- (3) 太陽能集熱器於相同的集熱面積下，迴流組數越多，集熱器的集熱效率就會越差，但對固定流體總質量流率下，會有一個最佳迴流組數的結果。
- (4) 流體總質量流率的增加會使得集熱器效率獲得提升，同時也會使水力消耗率增加。但應依照不同出口溫度的需要而選擇適當的流體總質量流率。
- (5) 迴流比值增加亦會增加集熱器效率，如太陽能集熱器型二與型三的結果所示。其中在高迴流比值時，與無迴流型式之集熱器相比較，效率無法獲得有效提升。故對型二與型三的集熱器而言，操作於接近紊流的狀態能有效提昇及熱效率並且可以抑制水力消耗的增加量。
- (6) 增加外部迴流比值會有兩個相互制衡的結果，優點是可以增加集熱器之集熱效率，缺點為增加水力消耗，但是外部迴流對於固定總流量的集熱器而言，能夠有效提升出口溫度，這是無迴流型式的加熱器無法獲得之益處。而針對不同產業的需要，如何選擇適當的操作條件以避免經濟效益的降低，也是選擇不同太陽能集熱器型式之重點。

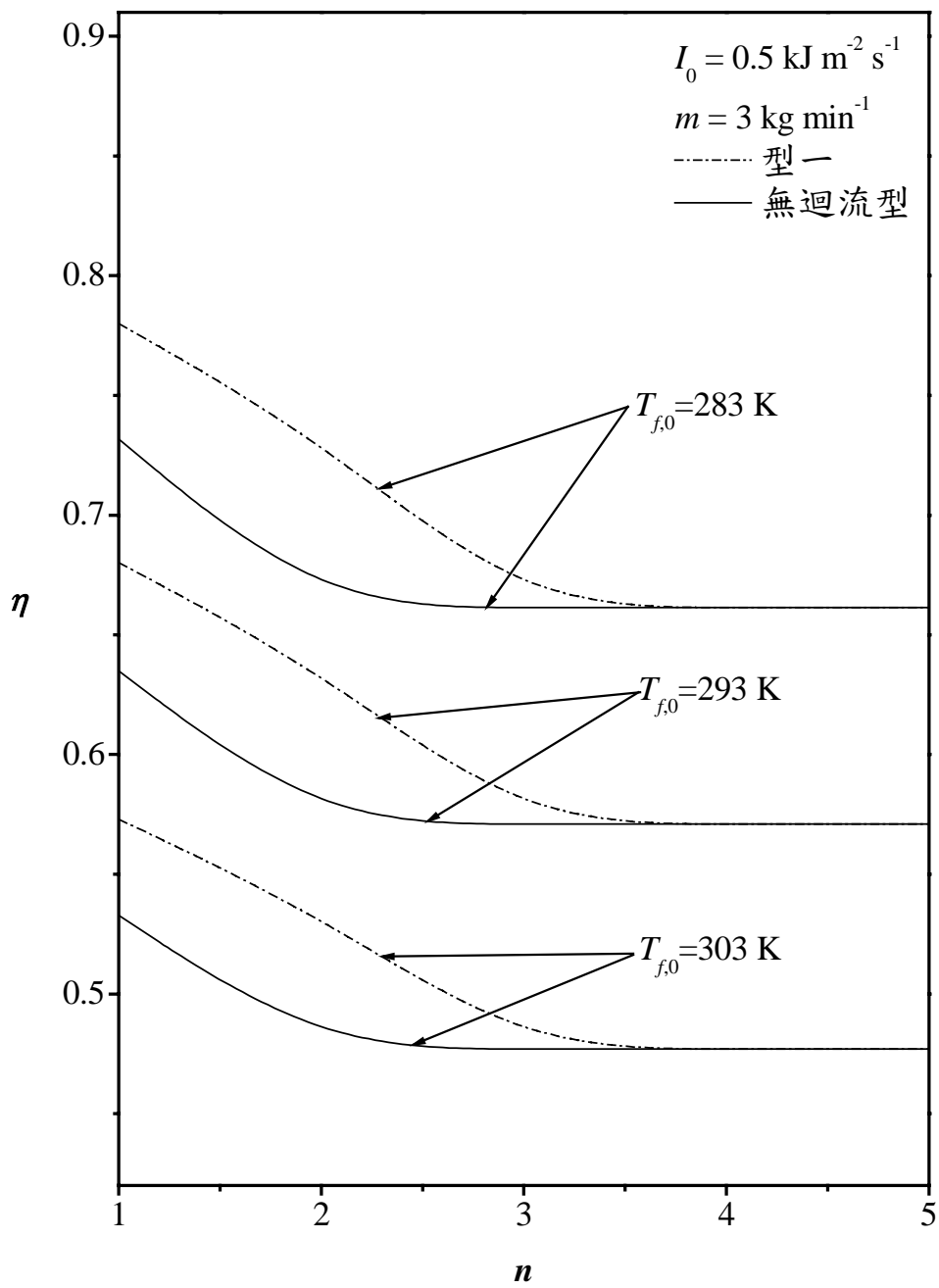


圖 8 太陽能集熱器(型一)迴流組數對集熱器的集熱效率之影

響; $I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $m = 3 \text{ kg min}^{-1}$ 。

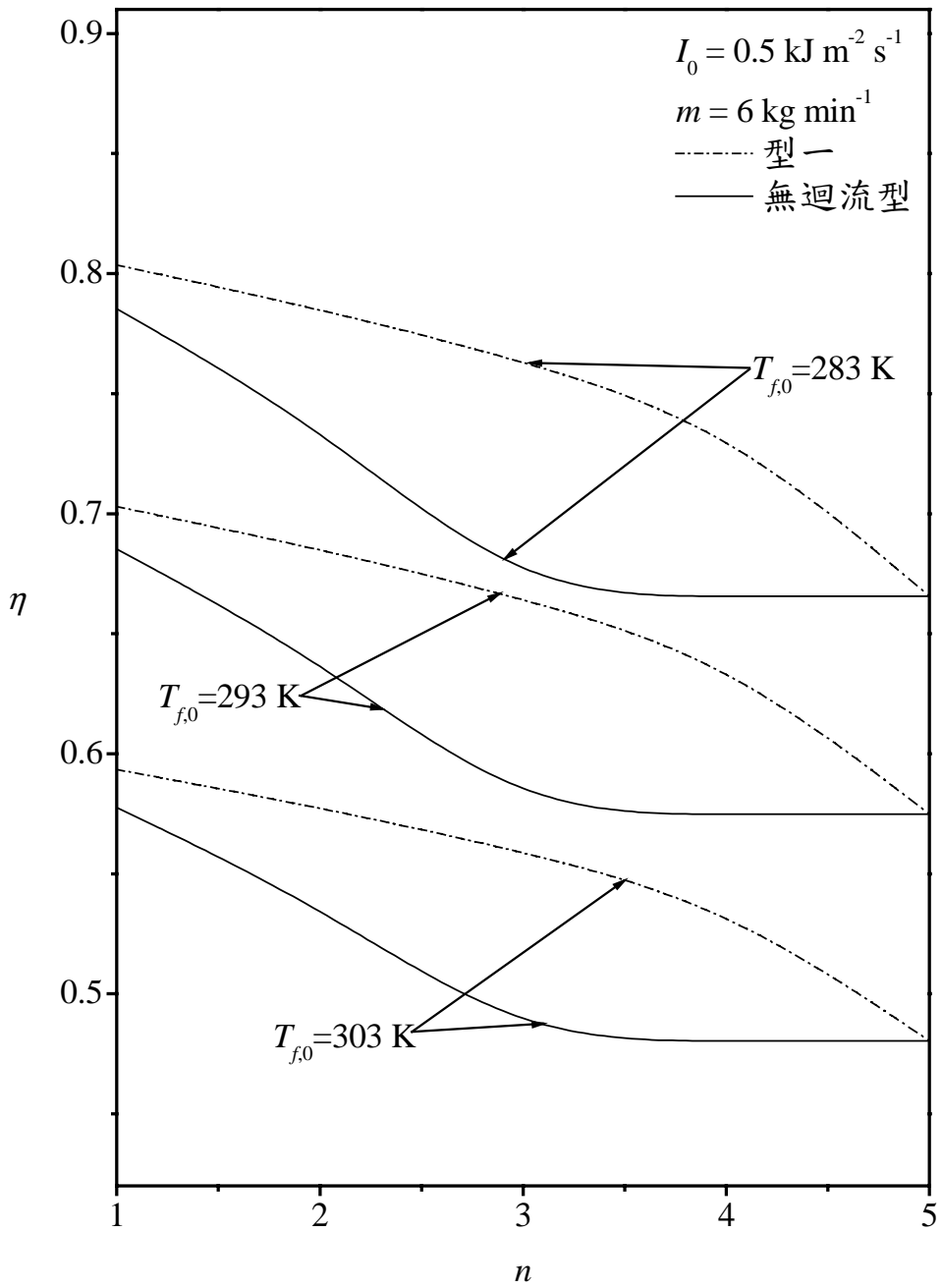


圖 9 太陽能集熱器(型一)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 6 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

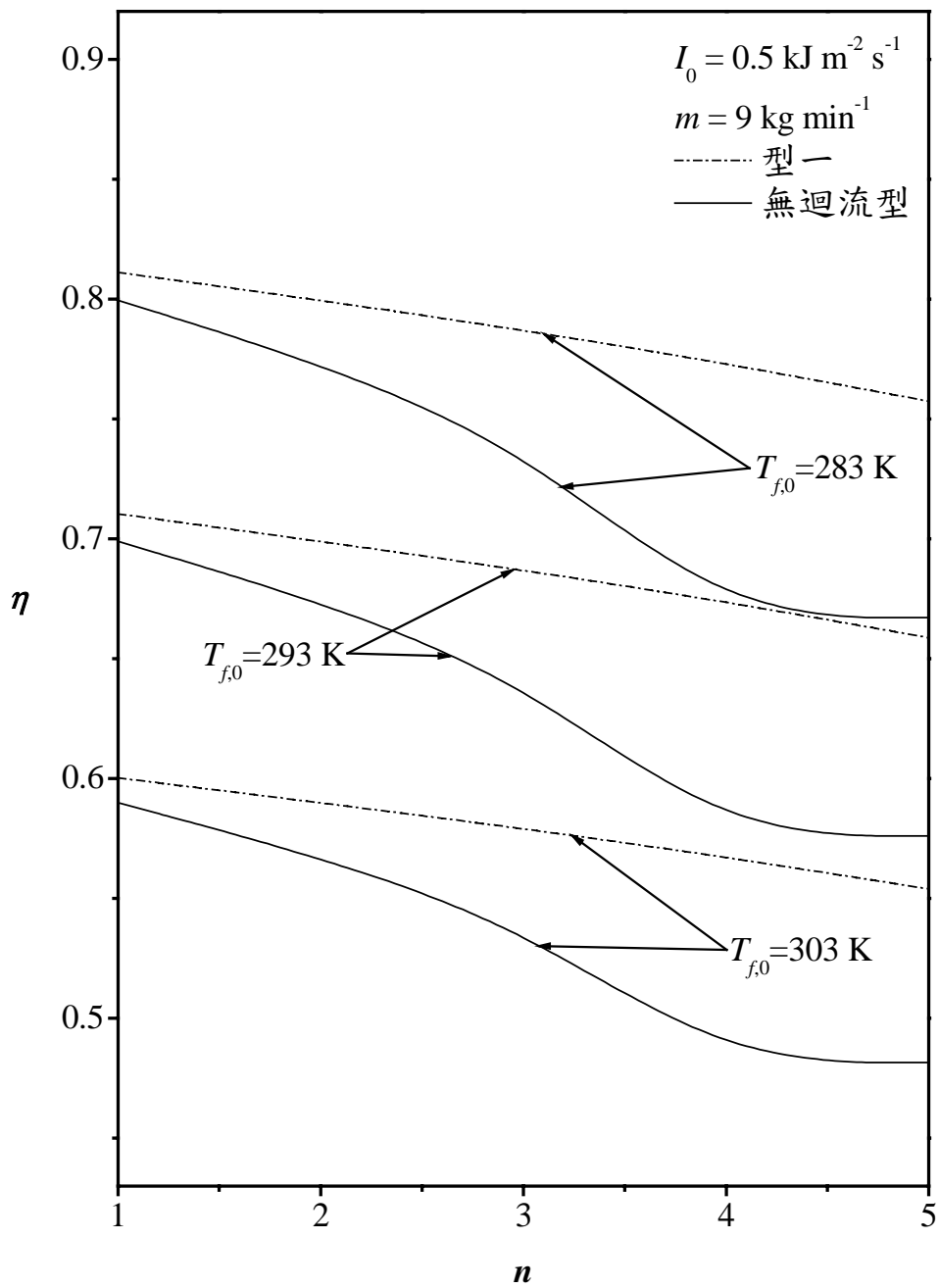


圖 10 太陽能集熱器(型一)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 9 \text{ kg min}^{-1} \text{ 。}$$

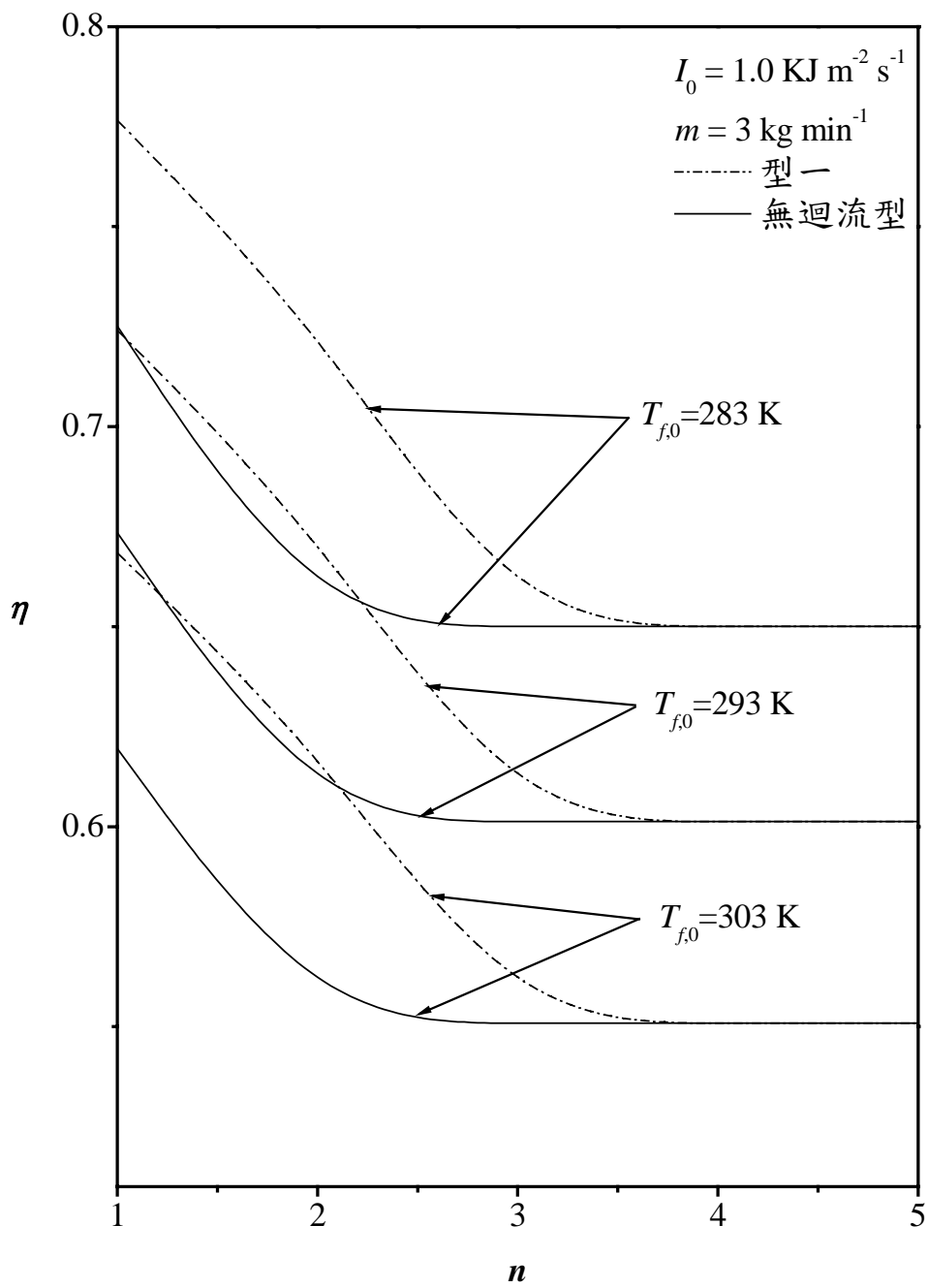


圖 11 太陽能集熱器(型一)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 3 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

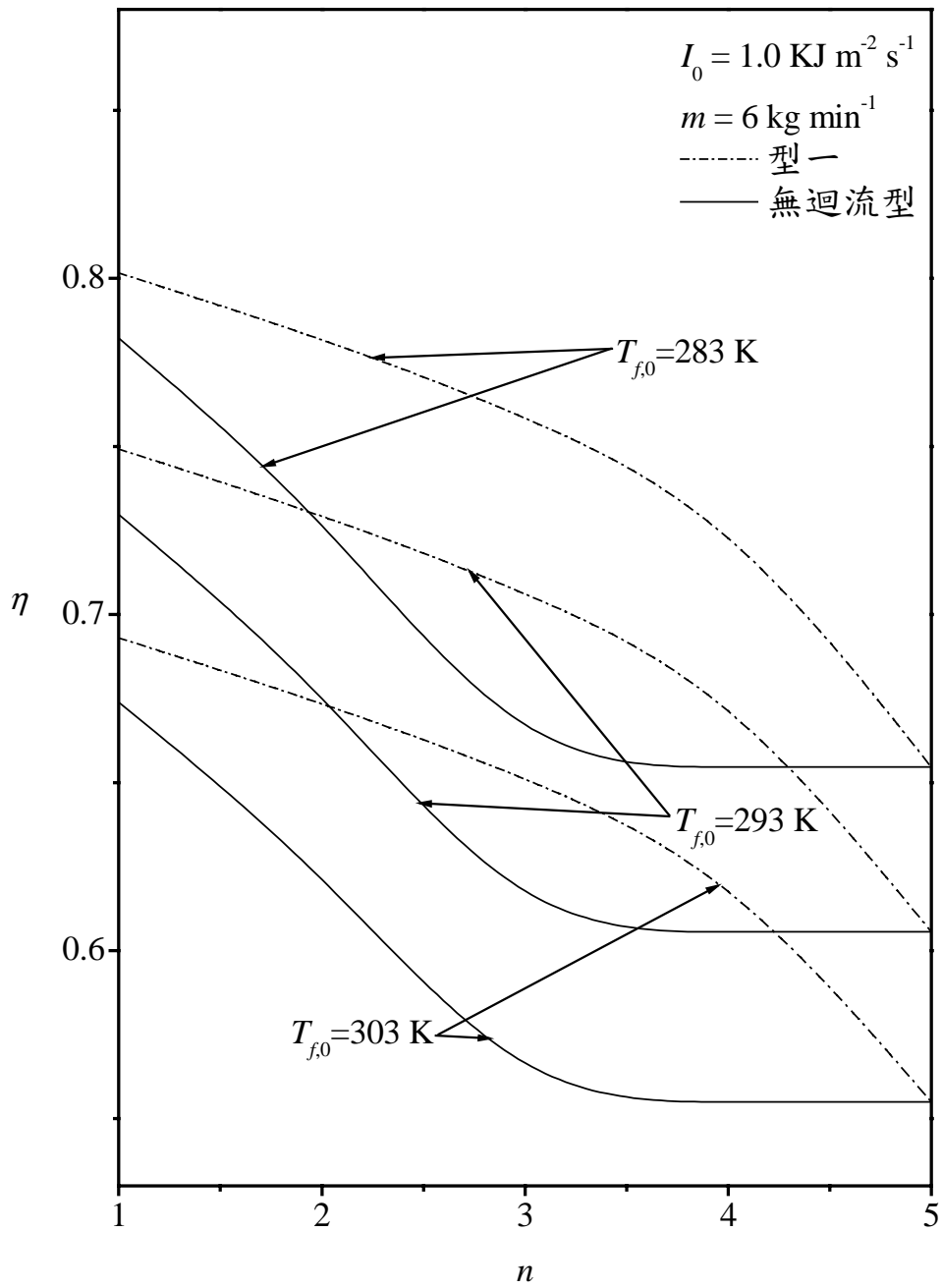


圖 12 太陽能集熱器(型一)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 6 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

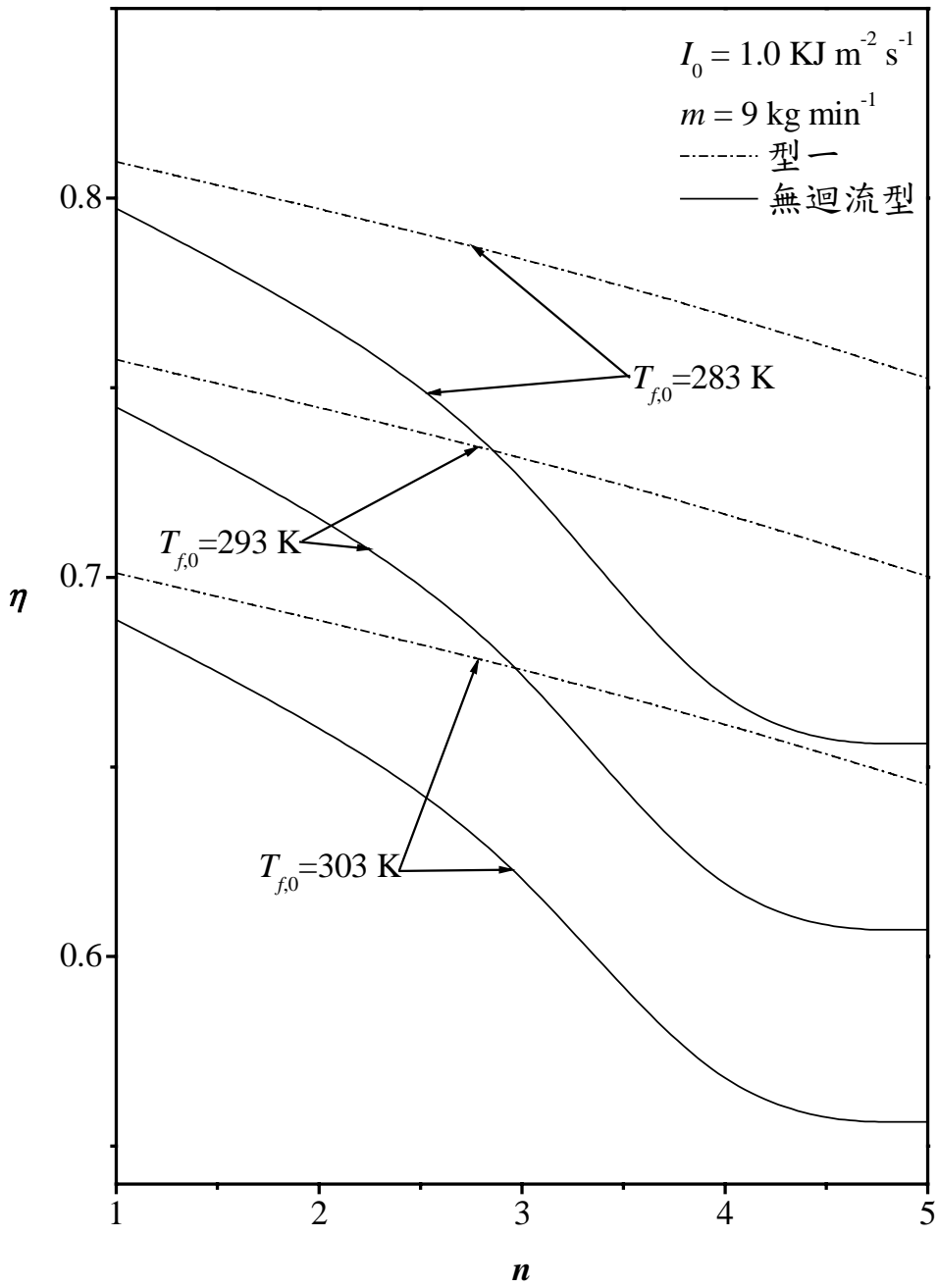


圖 13 太陽能集熱器(型一)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 9 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

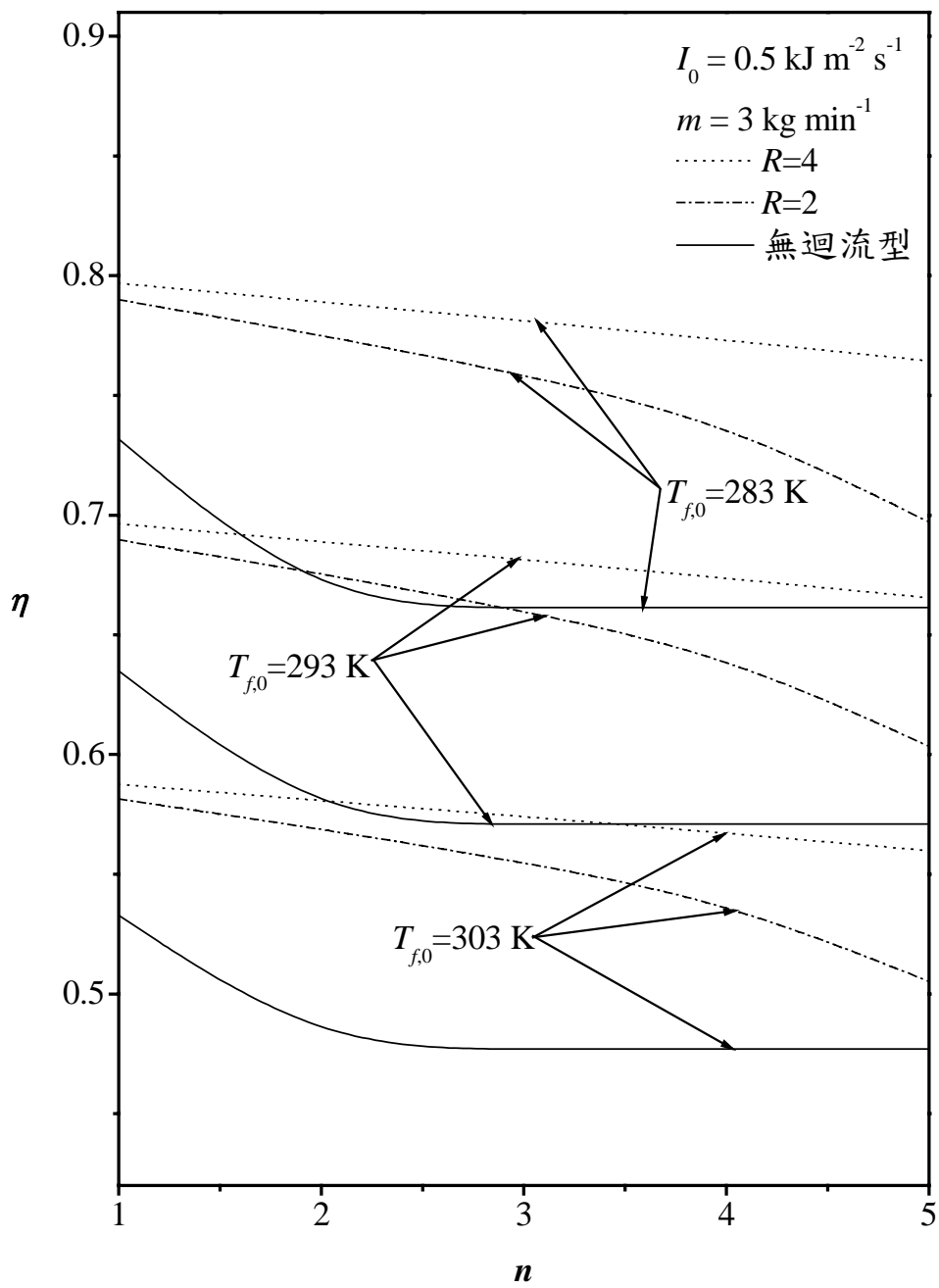


圖 14 太陽能集熱器(型二)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 3 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

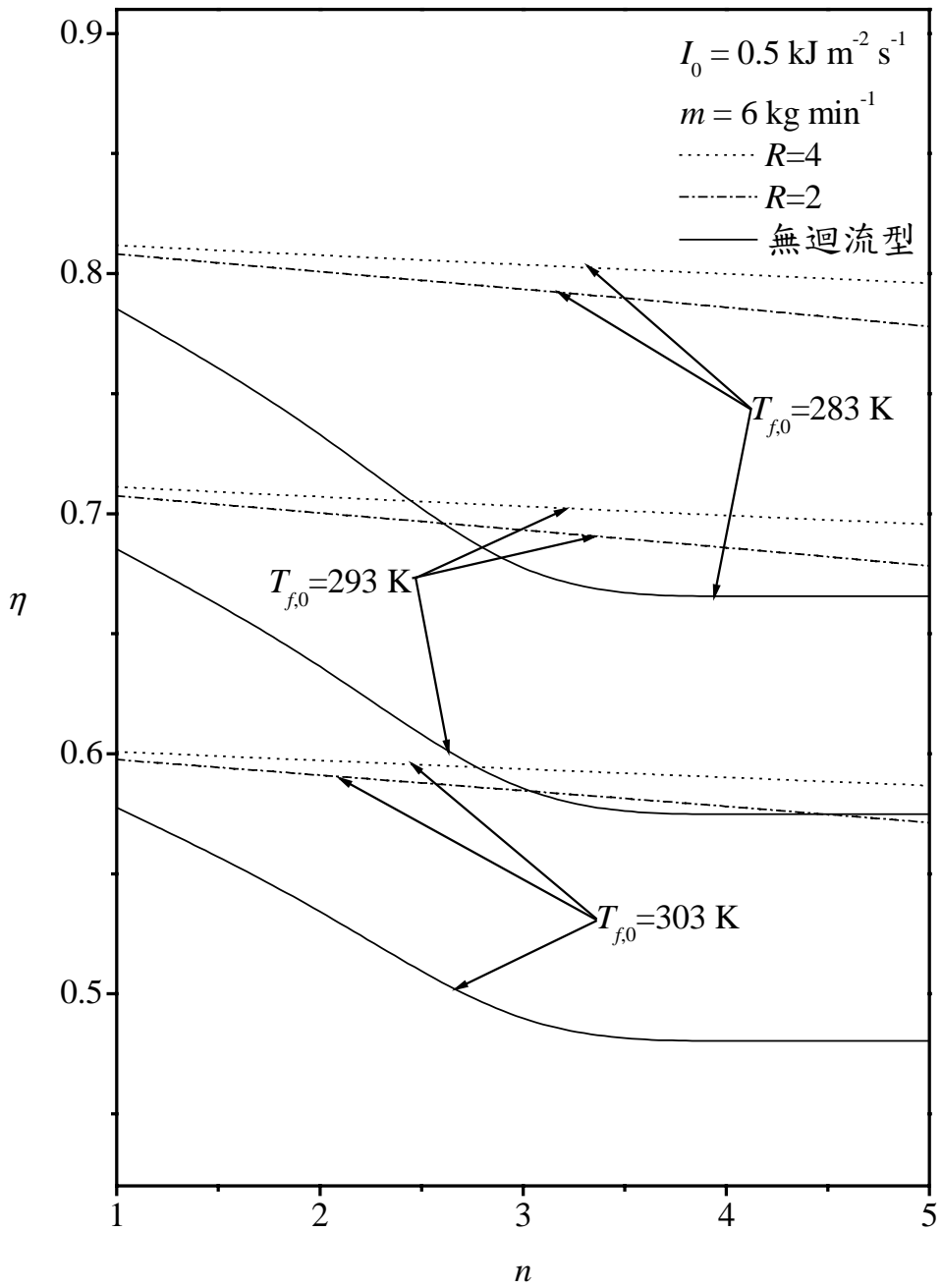


圖 15 太陽能集熱器(型二)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 6 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

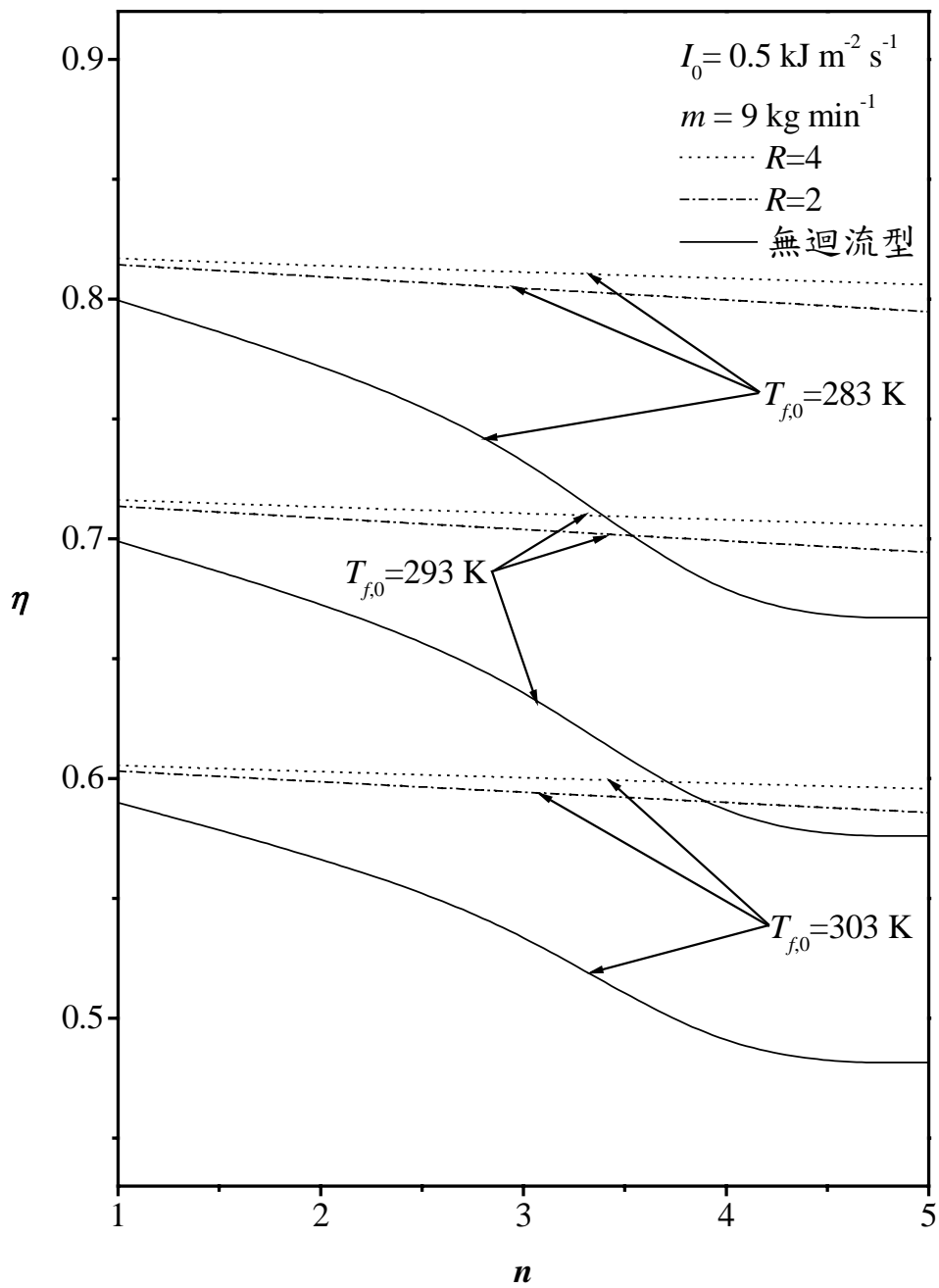


圖 16 太陽能集熱器(型二)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 9 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

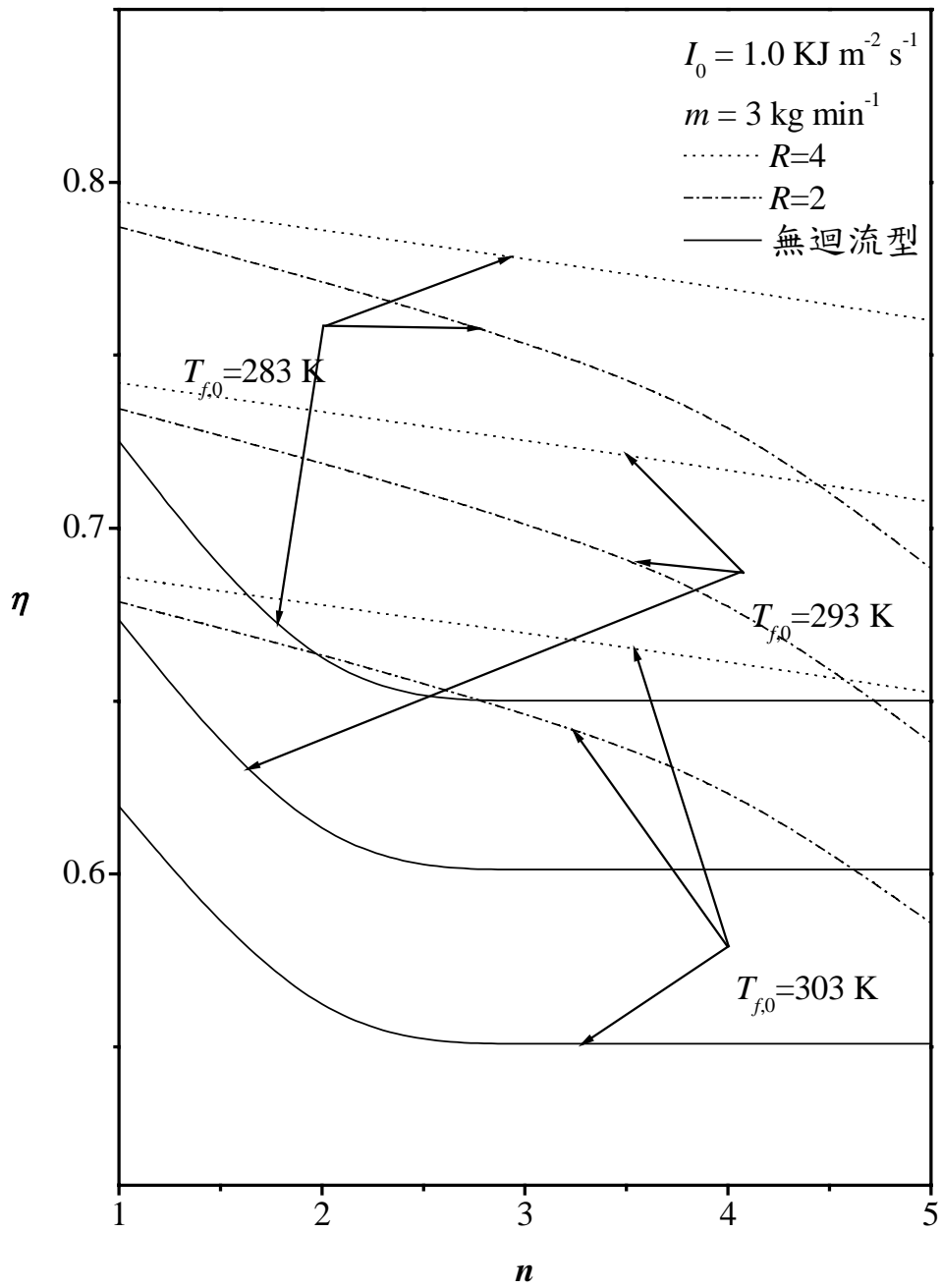


圖 17 太陽能集熱器(型二)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 3 \text{ kg min}^{-1} \circ$$

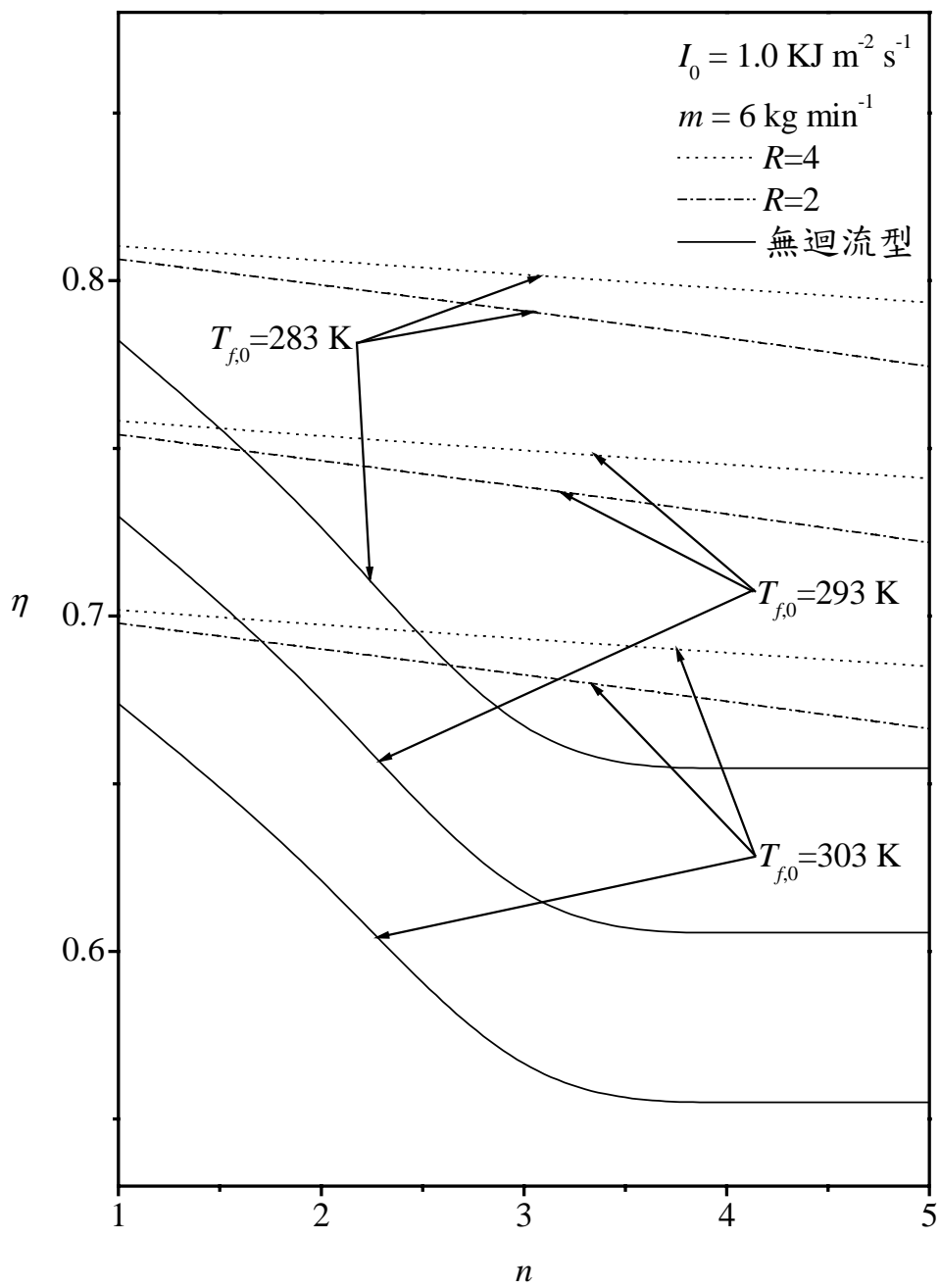


圖 18 太陽能集熱器(型二)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 6 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

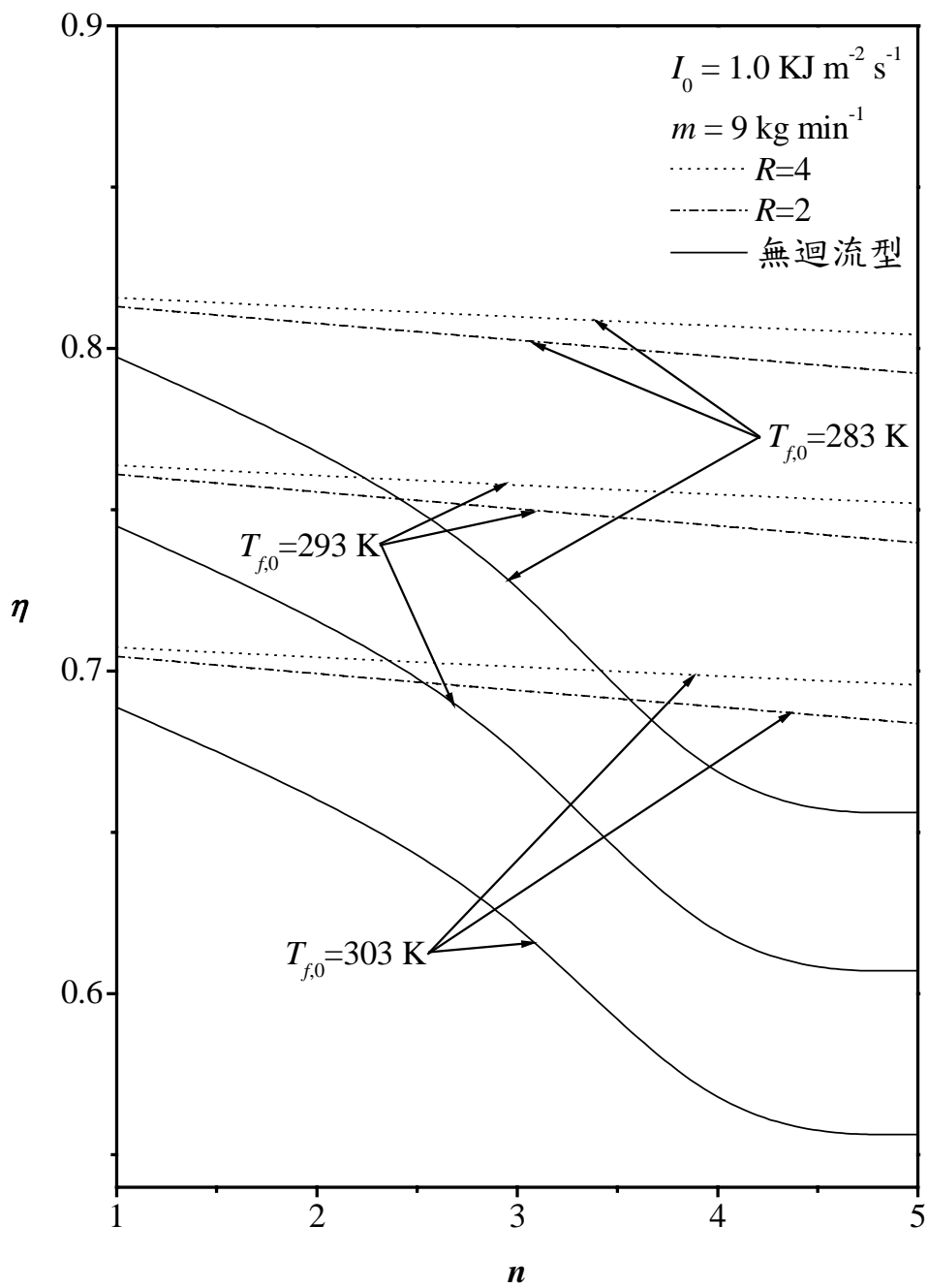


圖 19 太陽能集熱器(型二)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 9 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

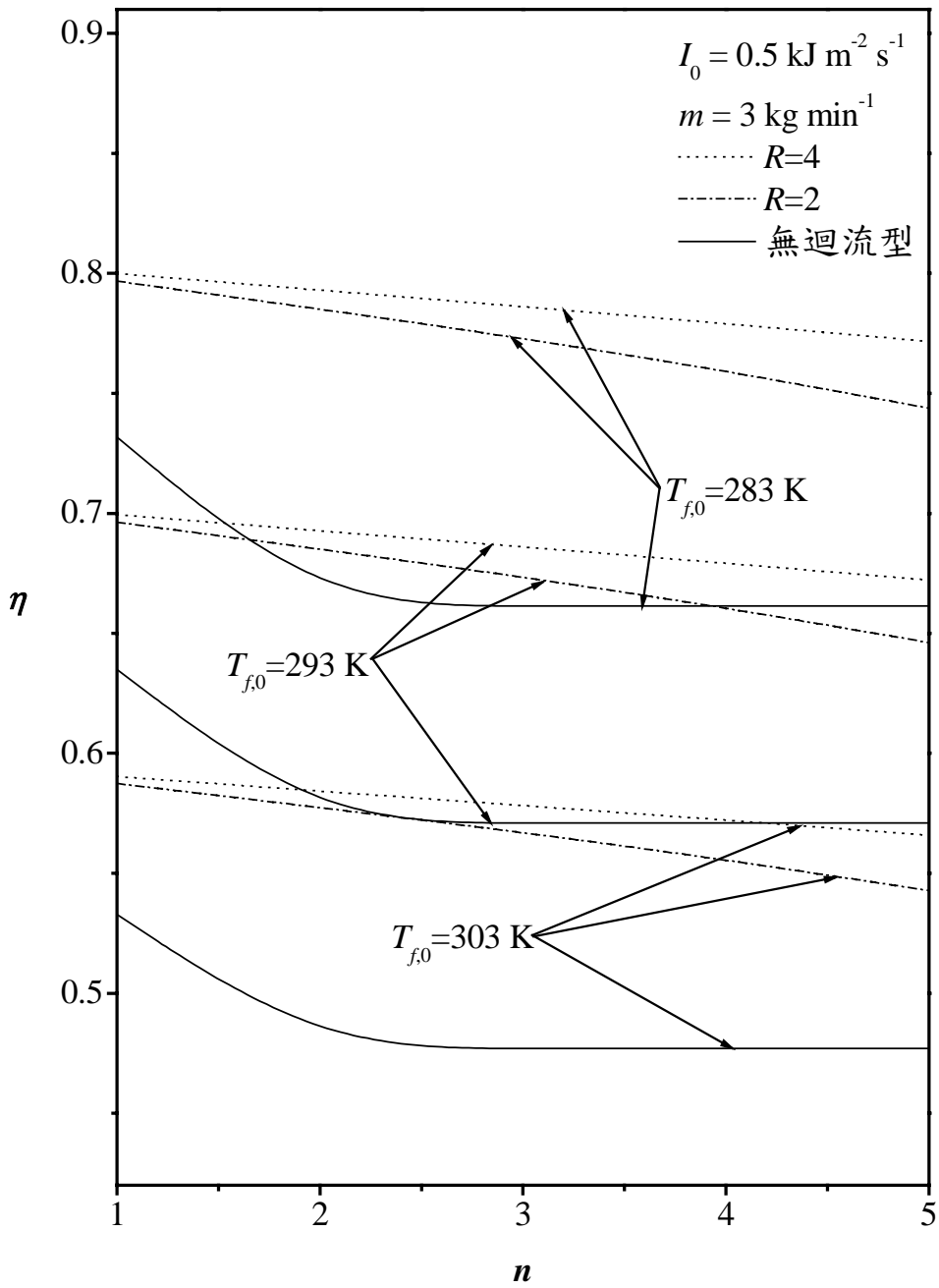


圖 20 太陽能集熱器(型三)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 3 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

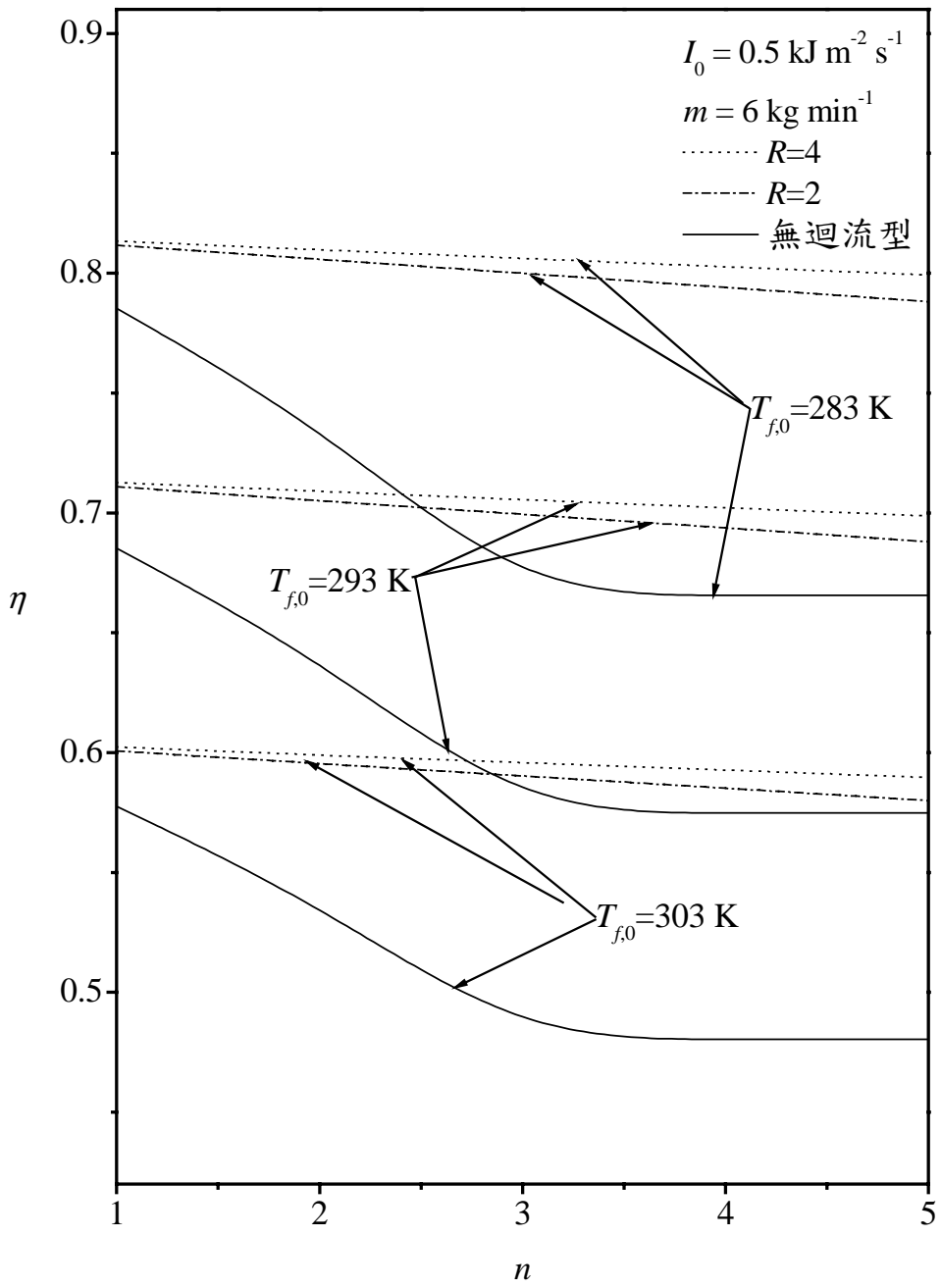


圖 21 太陽能集熱器(型三)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 6 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

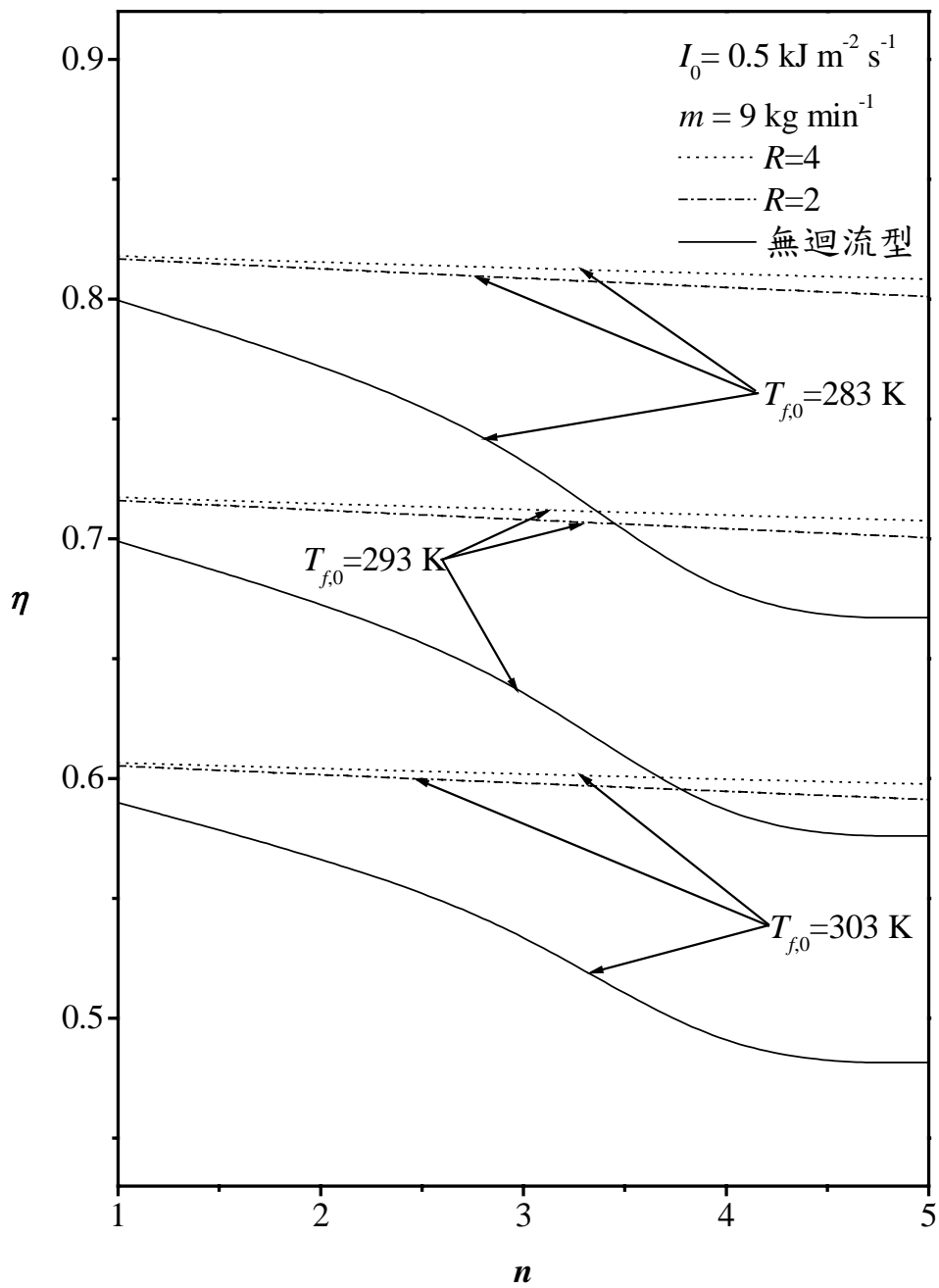


圖 22 太陽能集熱器(型三)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 9 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

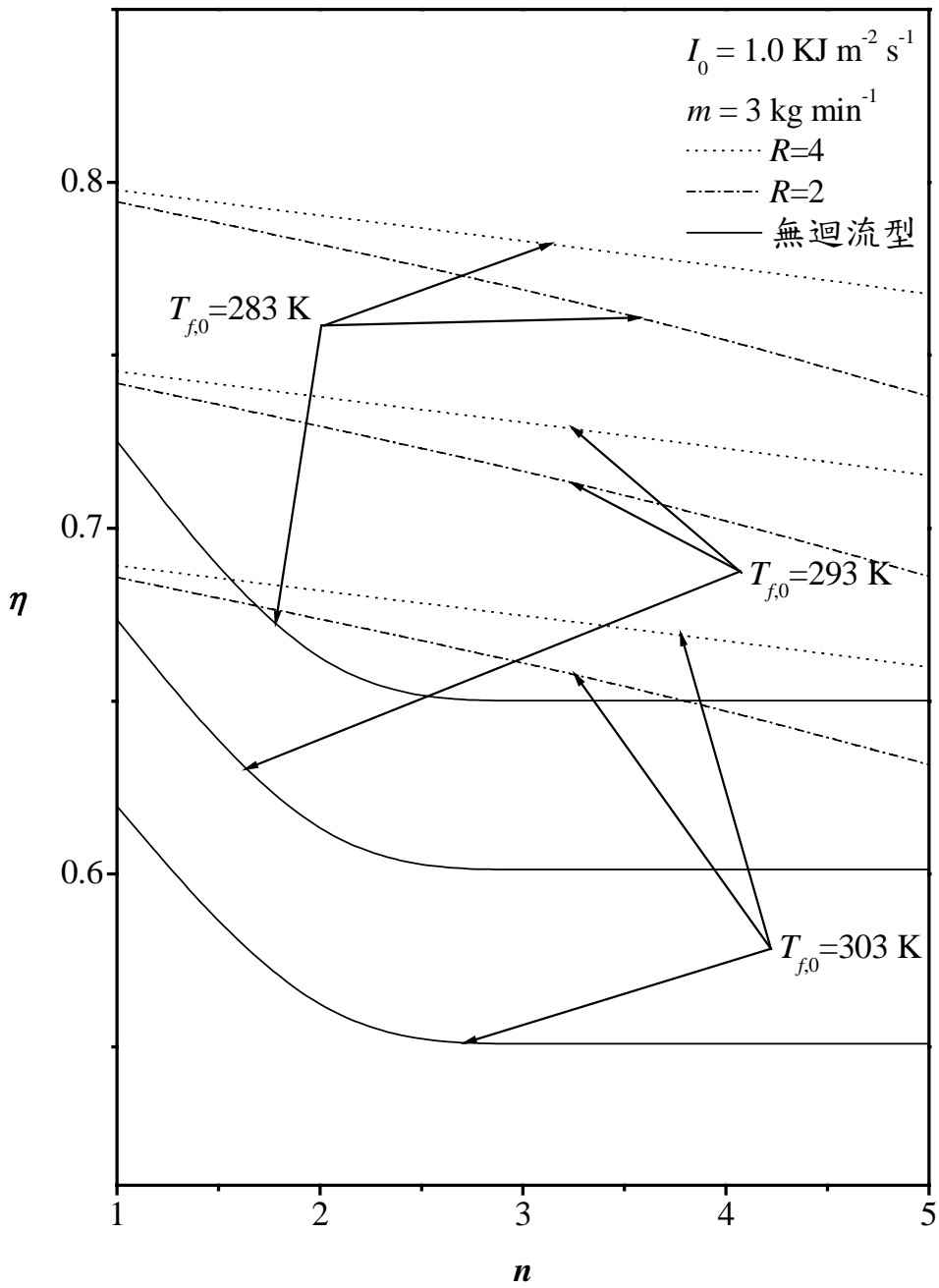


圖 23 太陽能集熱器(型三)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 3 \text{ kg min}^{-1} \circ$$

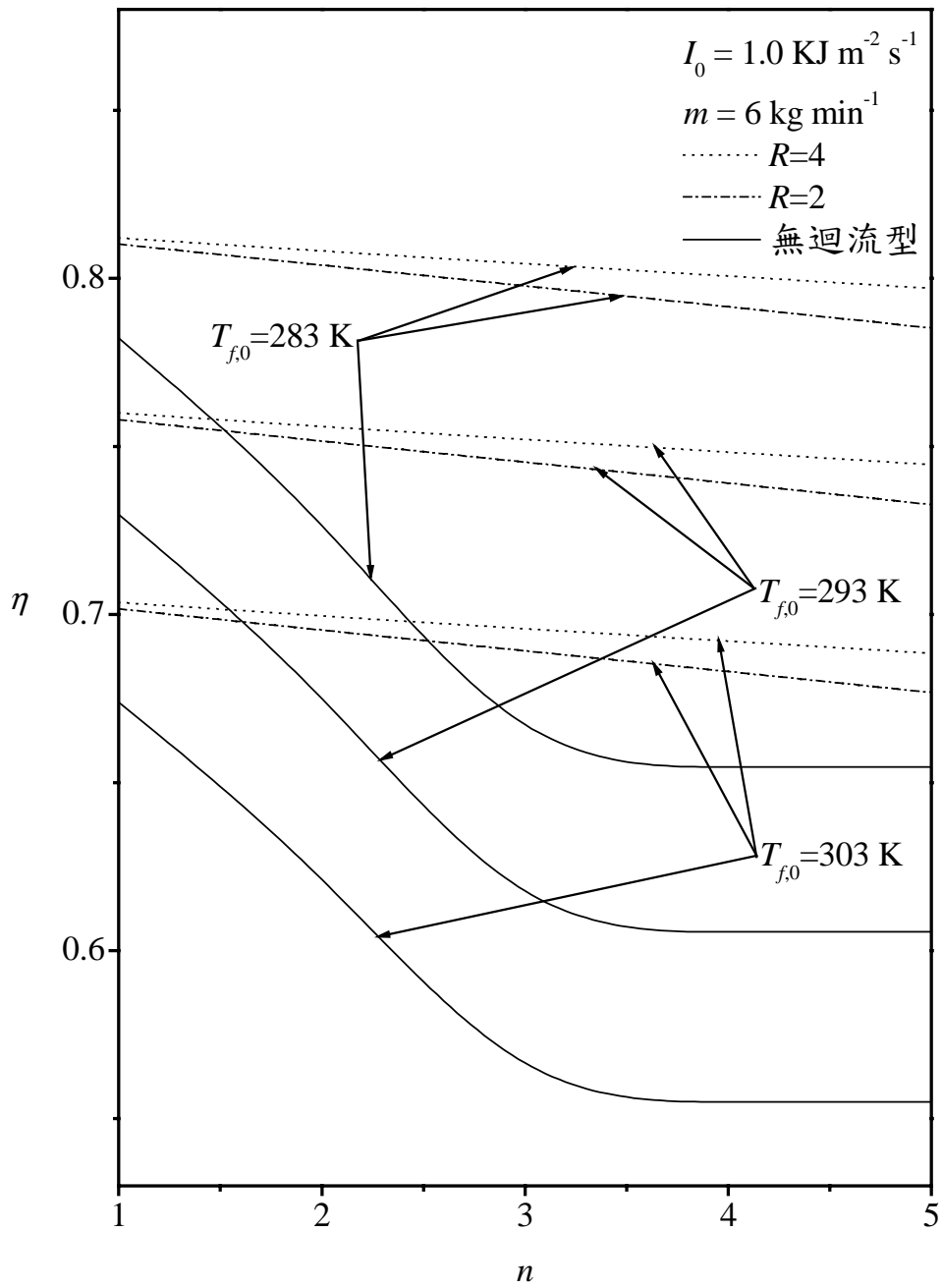


圖 24 太陽能集熱器(型三)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 6 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$$

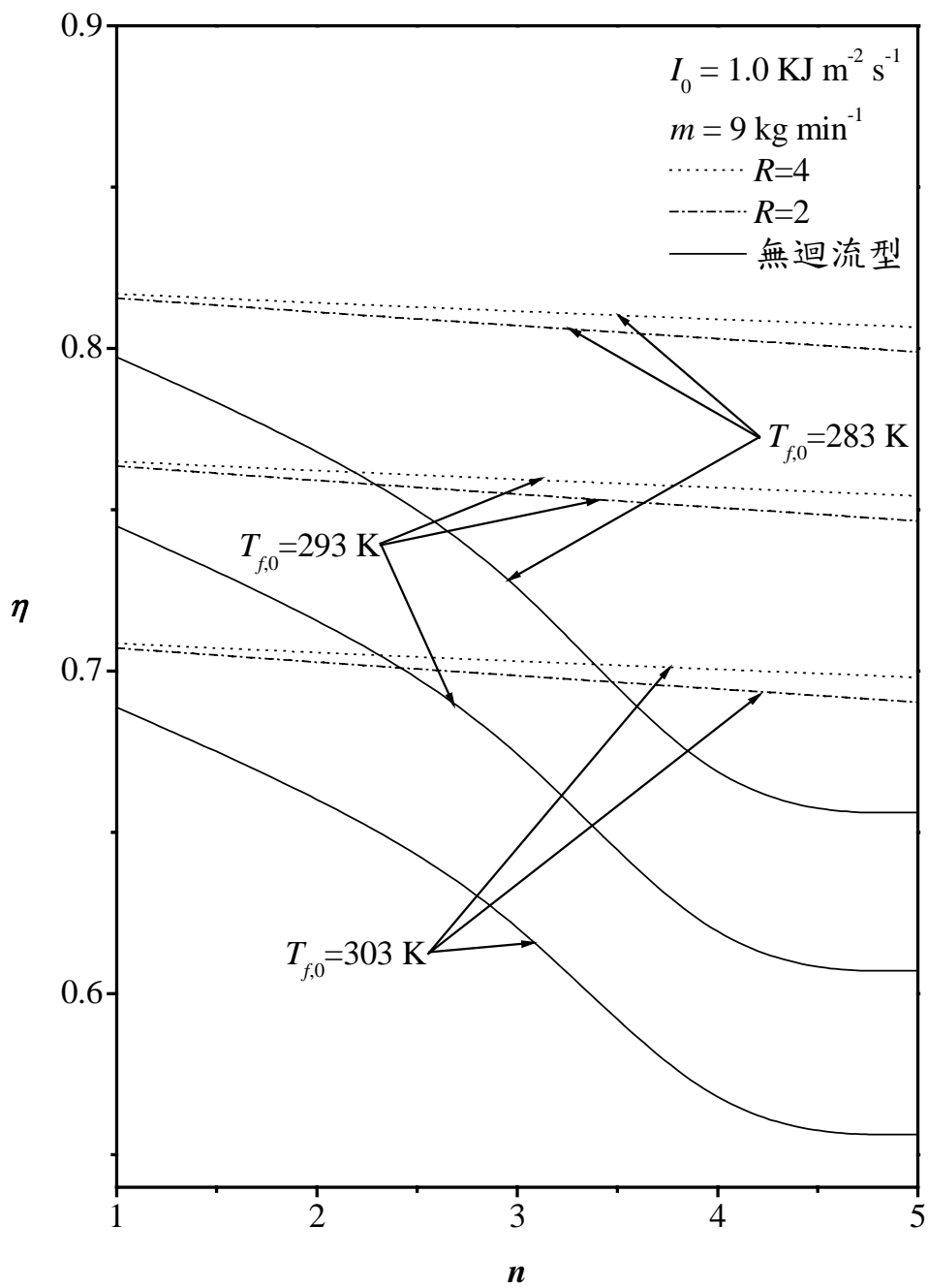


圖 25 太陽能集熱器(型三)迴流組數對集熱器的集熱效率之影響;

$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}, m = 9 \text{ kg min}^{-1} \text{。}$

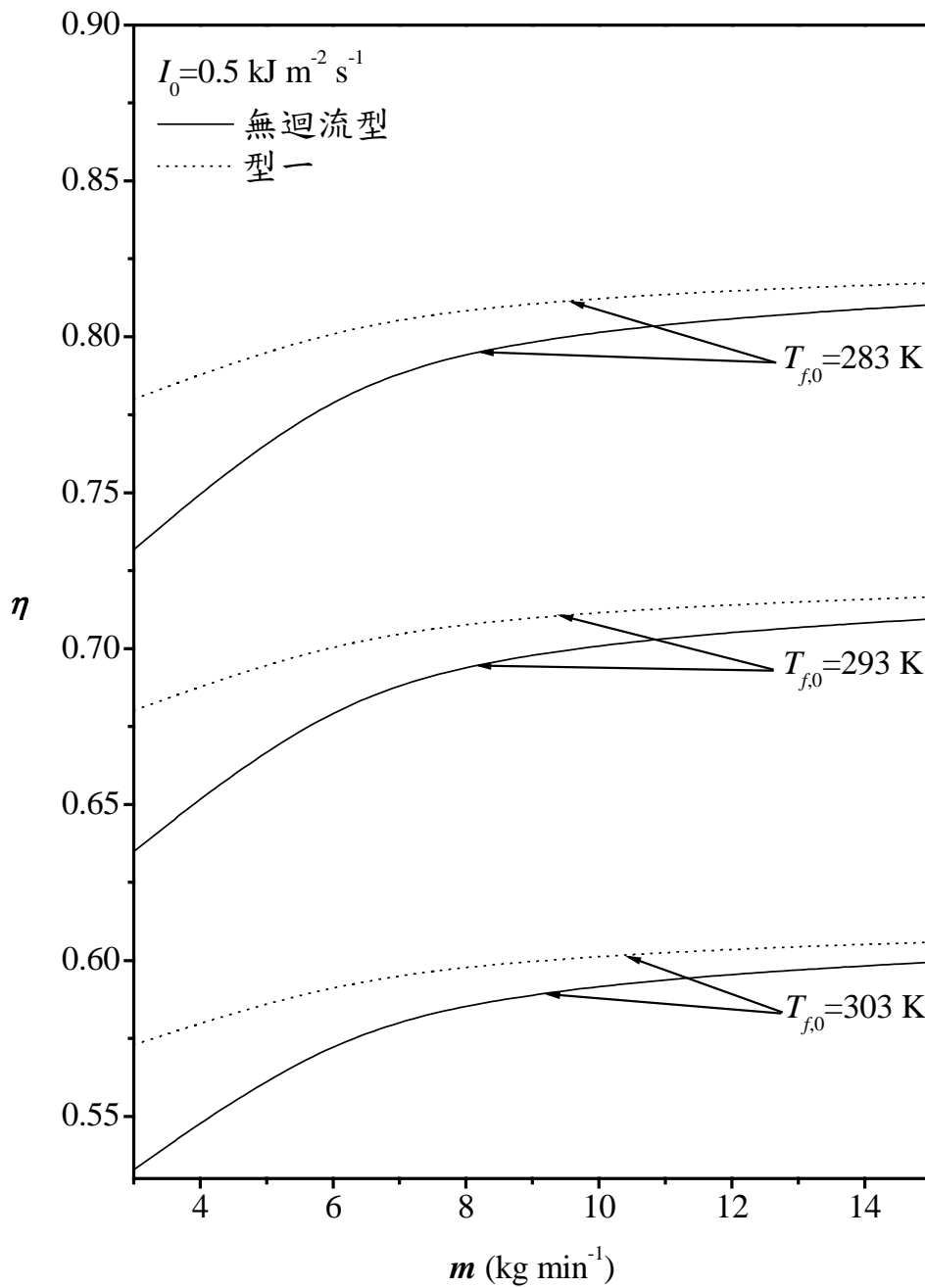


圖 26 太陽能集熱器(型一)流體總流量與迴流比對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{。}$$

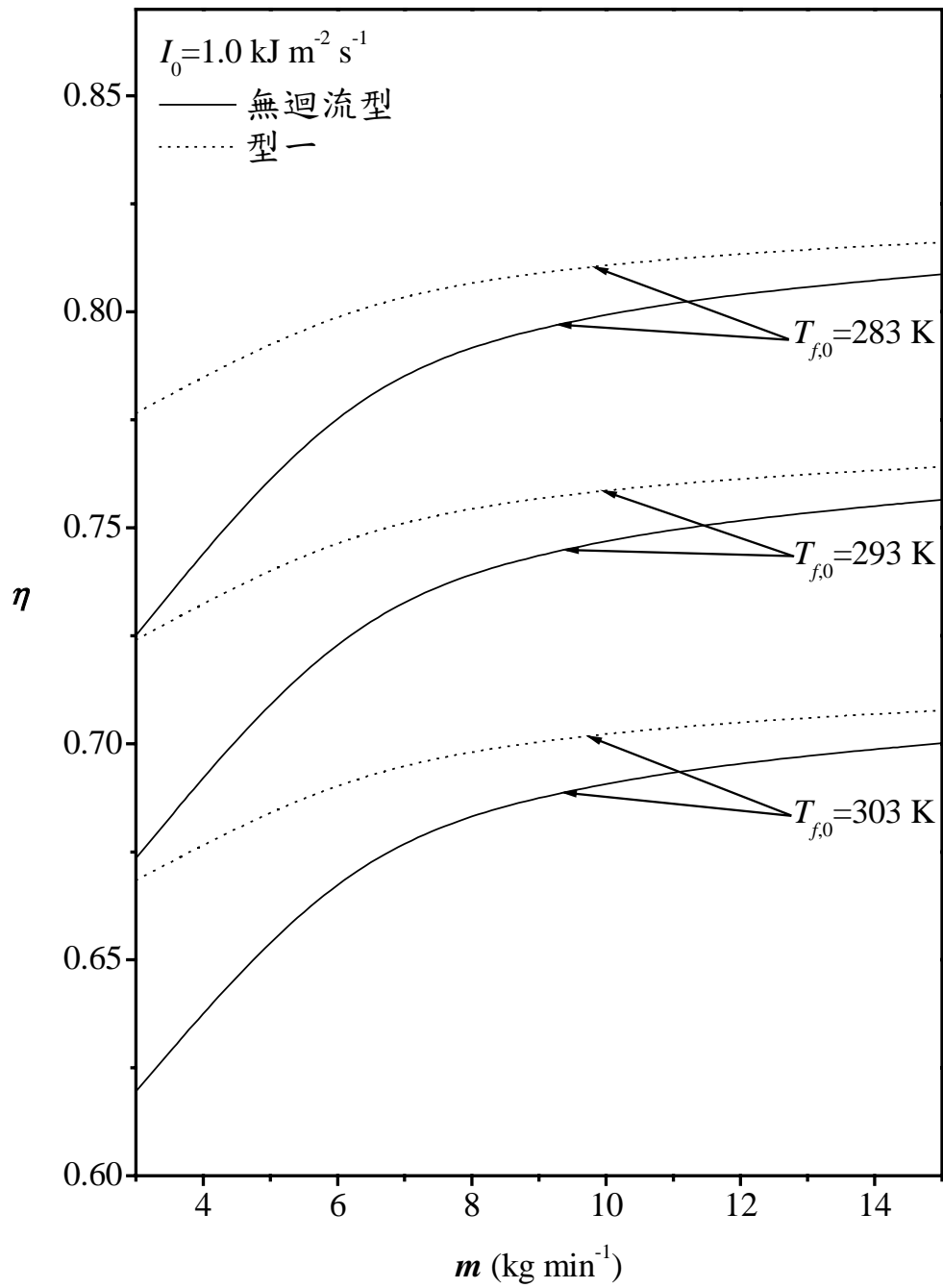


圖 27 太陽能集熱器(型一)流體總流量與迴流比對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{。}$$

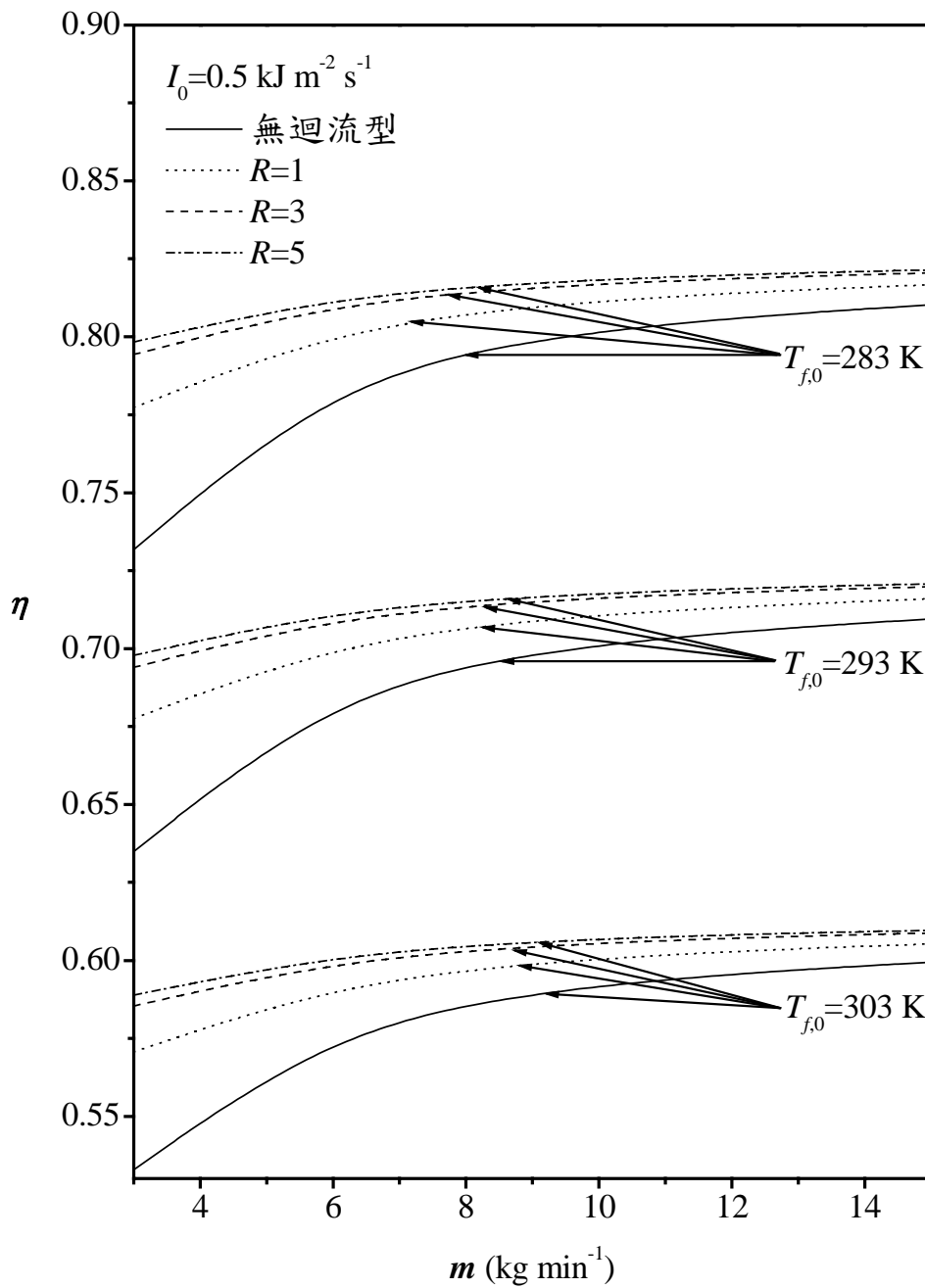


圖 28 太陽能集熱器(型二)流體總流量與迴流比對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{。}$$

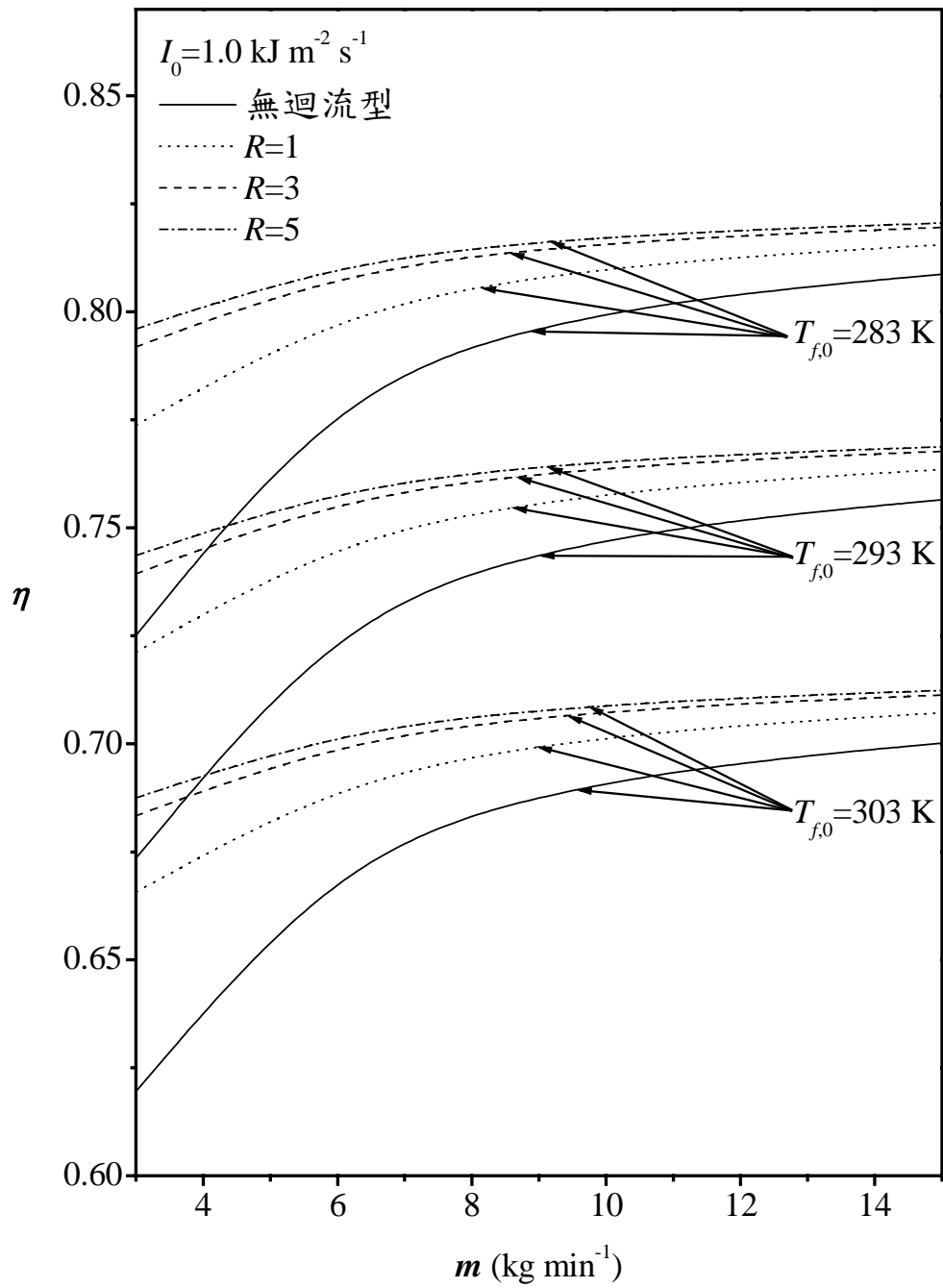


圖 29 太陽能集熱器(型二)流體總流量與迴流比對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{。}$$

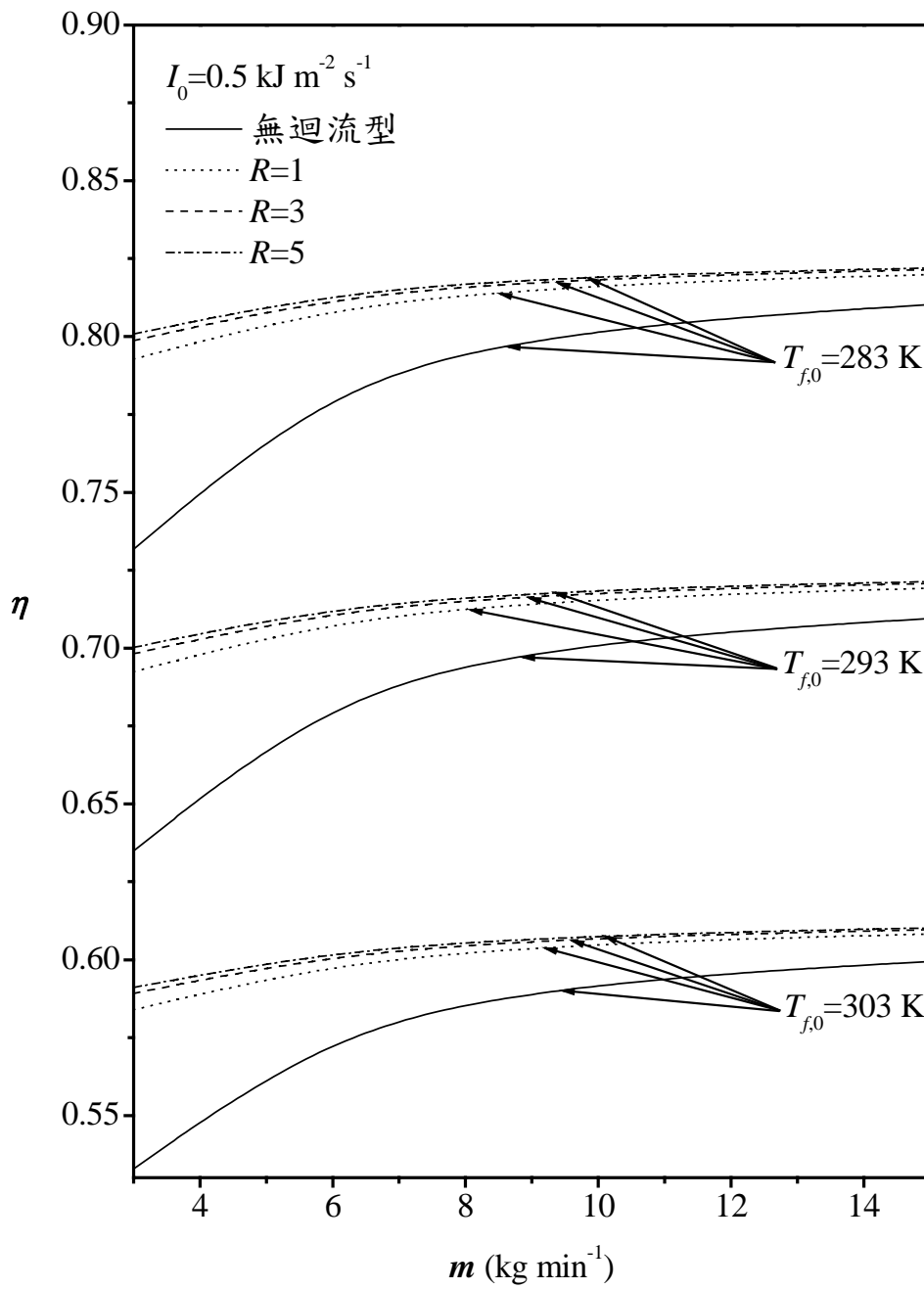


圖 30 太陽能集熱器(型三)流體總流量與迴流比對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{。}$$

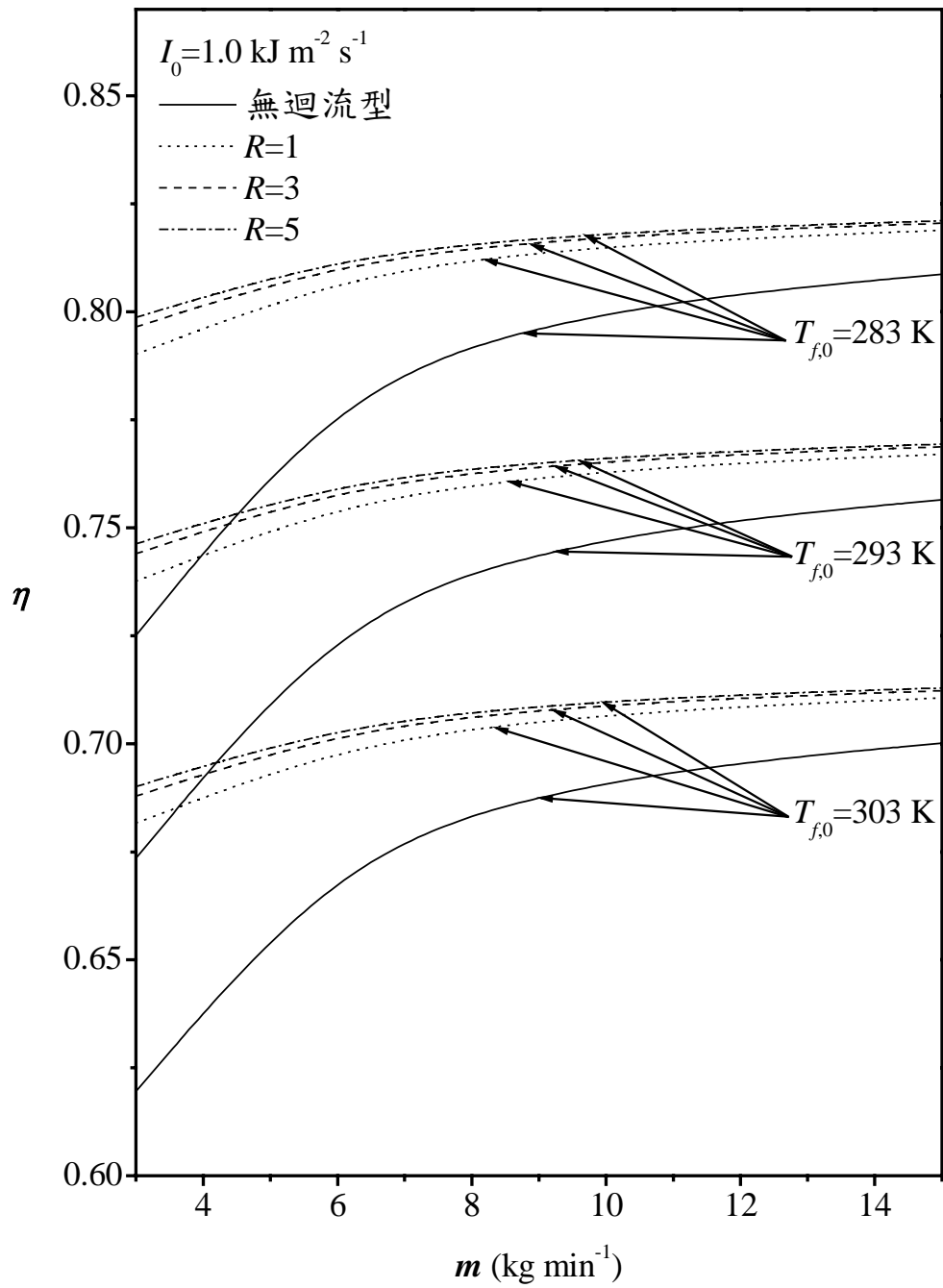


圖 31 太陽能集熱器(型三)流體總流量與迴流比對集熱器的集熱效率之影響;

$$I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{。}$$

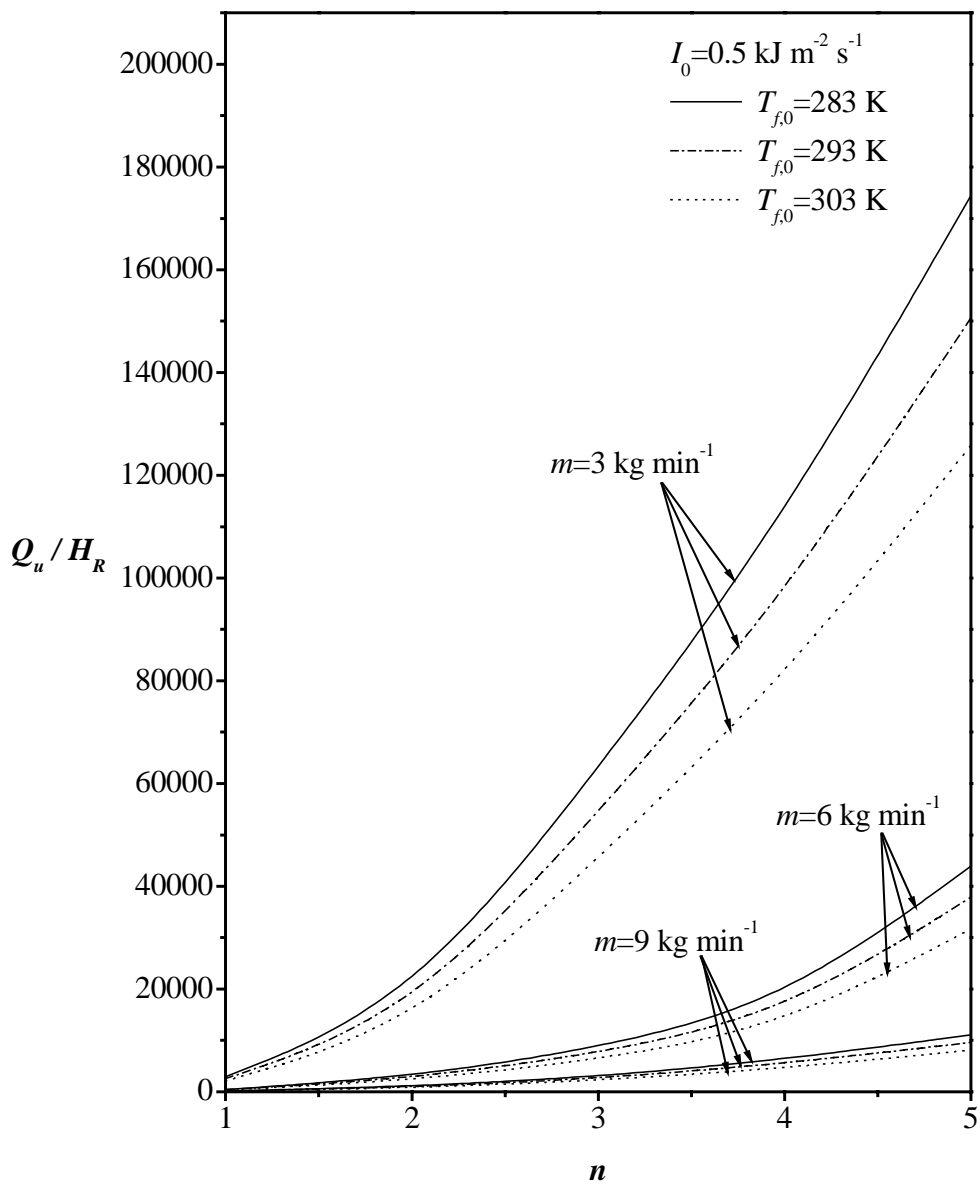


圖 32 太陽能集熱器(型一)迴流組數對 Q_u / H 之影響; $I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

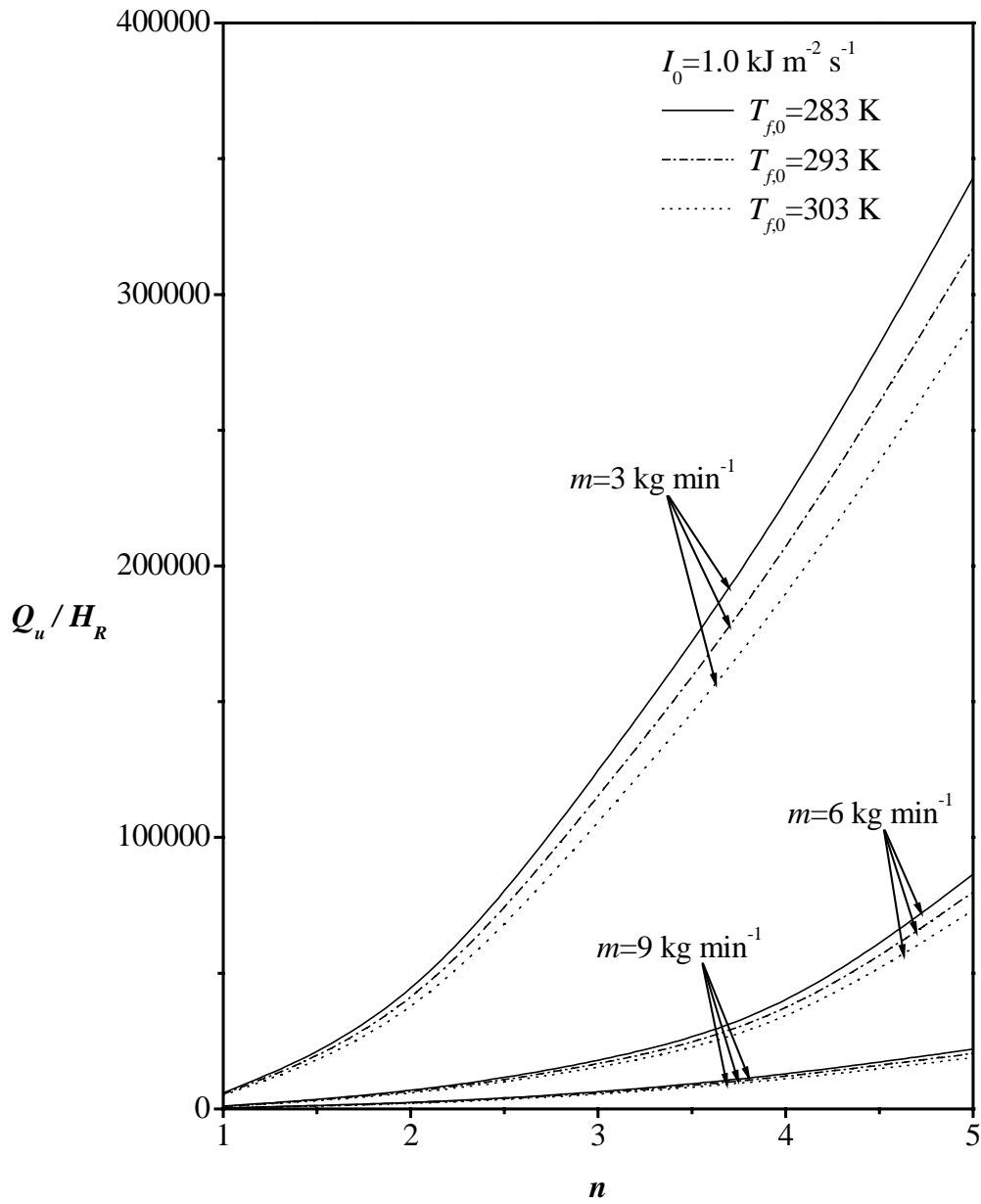


圖 33 太陽能集熱器(型一)迴流組數對 Q_u / H 之影響; $I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

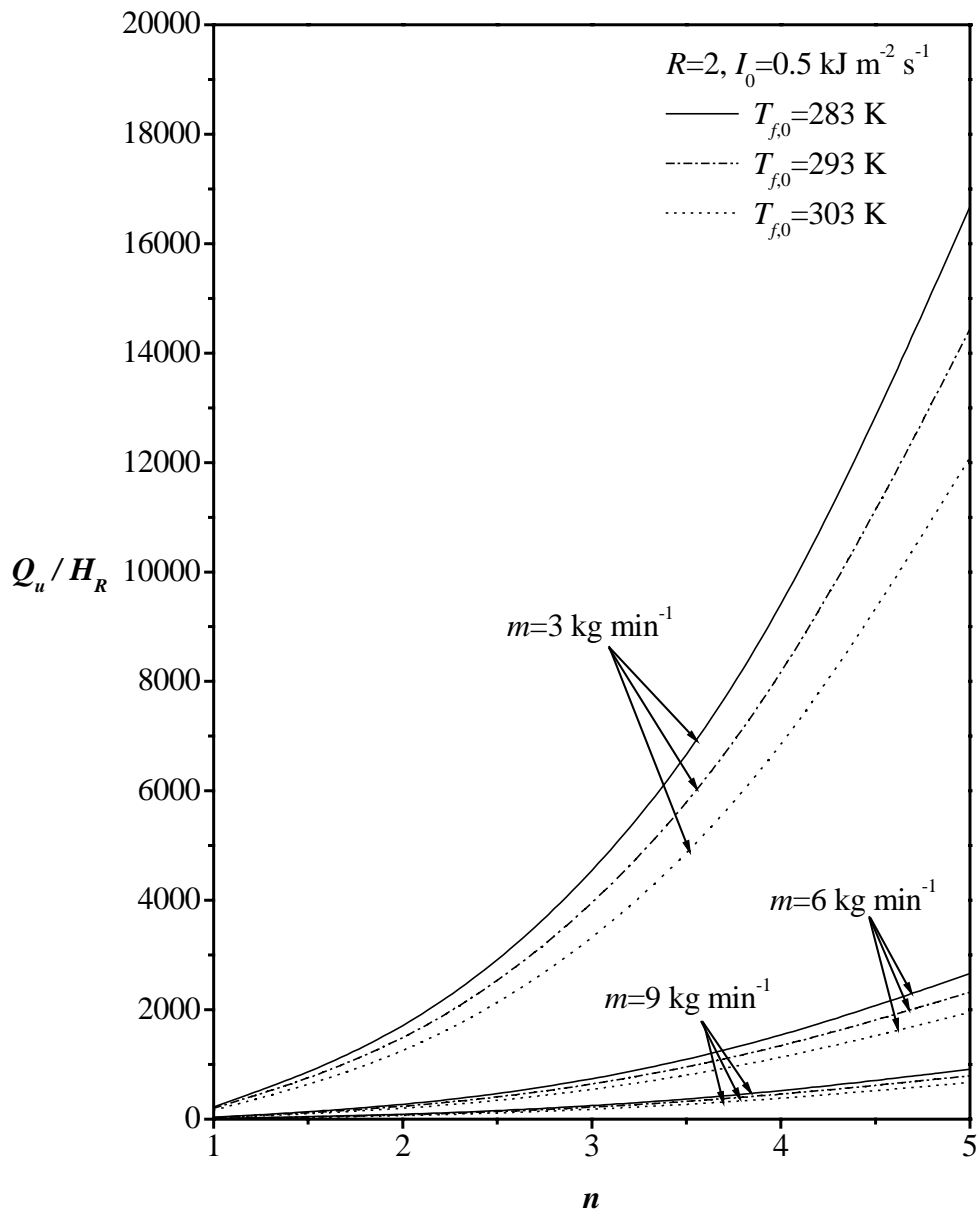


圖 34 太陽能集熱器(型二)迴流組數對 Q_u / H 之影響; $R=2; I_0=0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

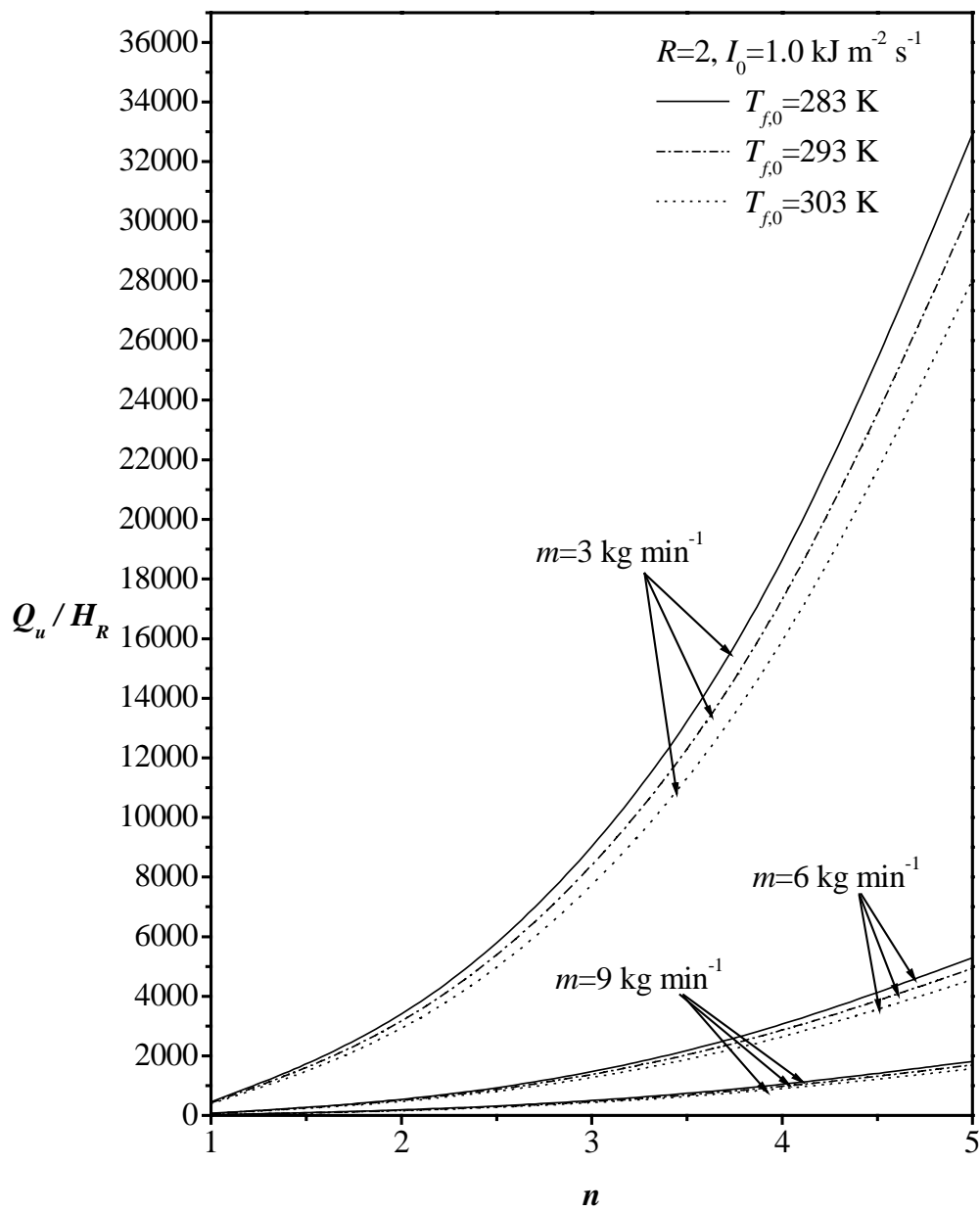


圖 35 太陽能集熱器(型二)迴流組數對 Q_u / H 之影響; $R=2; I_0=1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

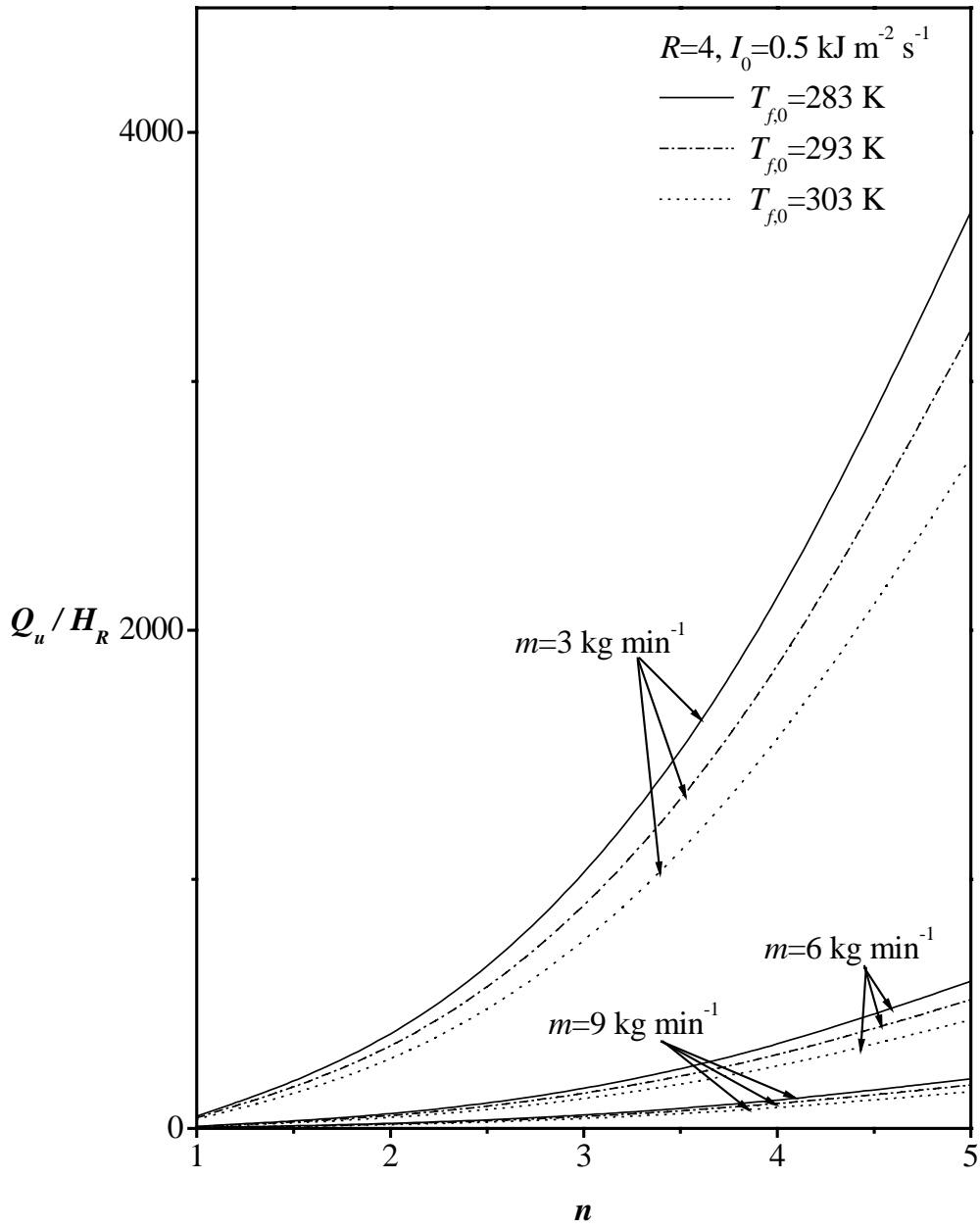


圖 36 太陽能集熱器(型二)迴流組數對 Q_u / H 之影響; $R=4; I_0=0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

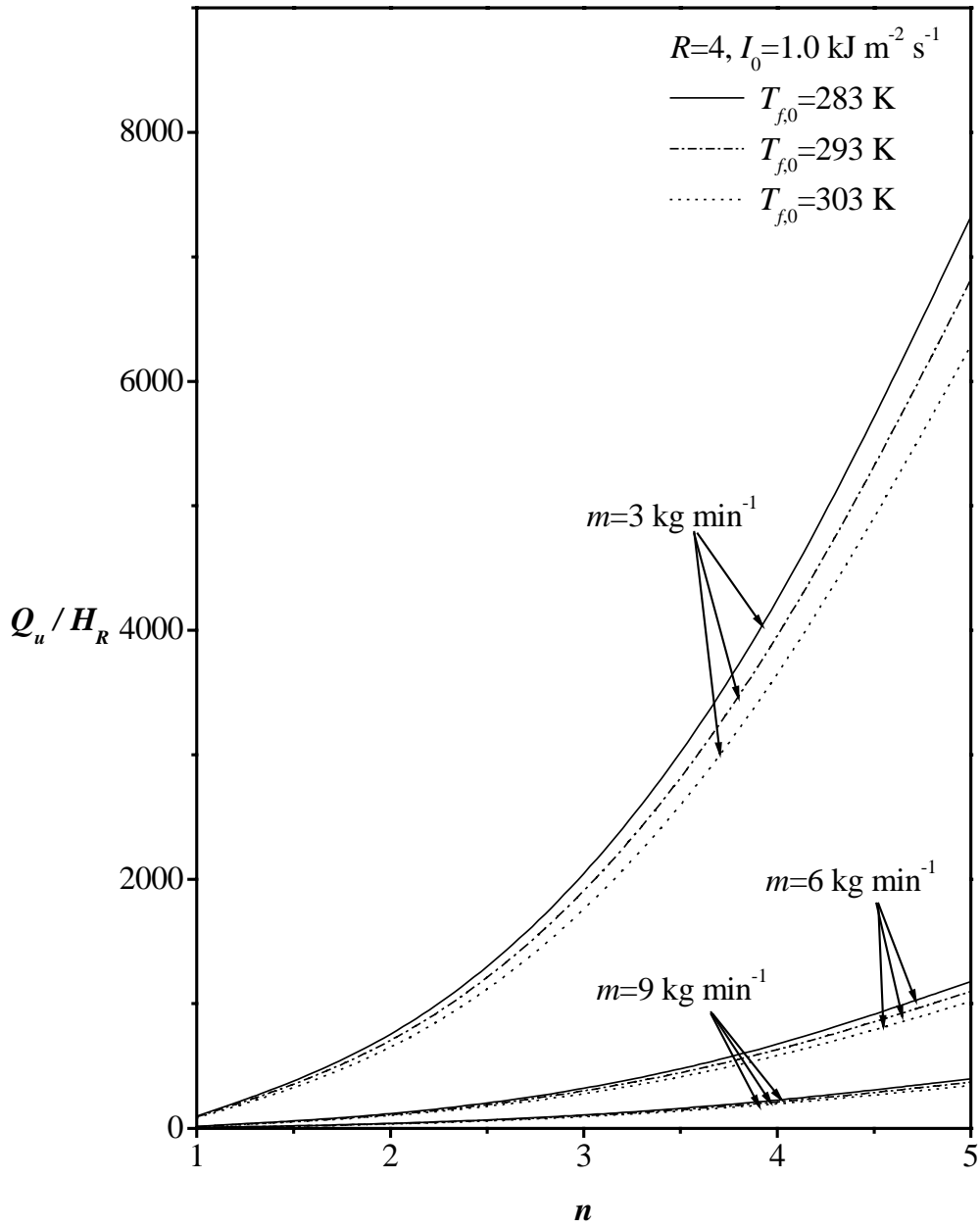


圖 37 太陽能集熱器(型二)迴流組數對 Q_u / H 之影響; $R=4; I_0=1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

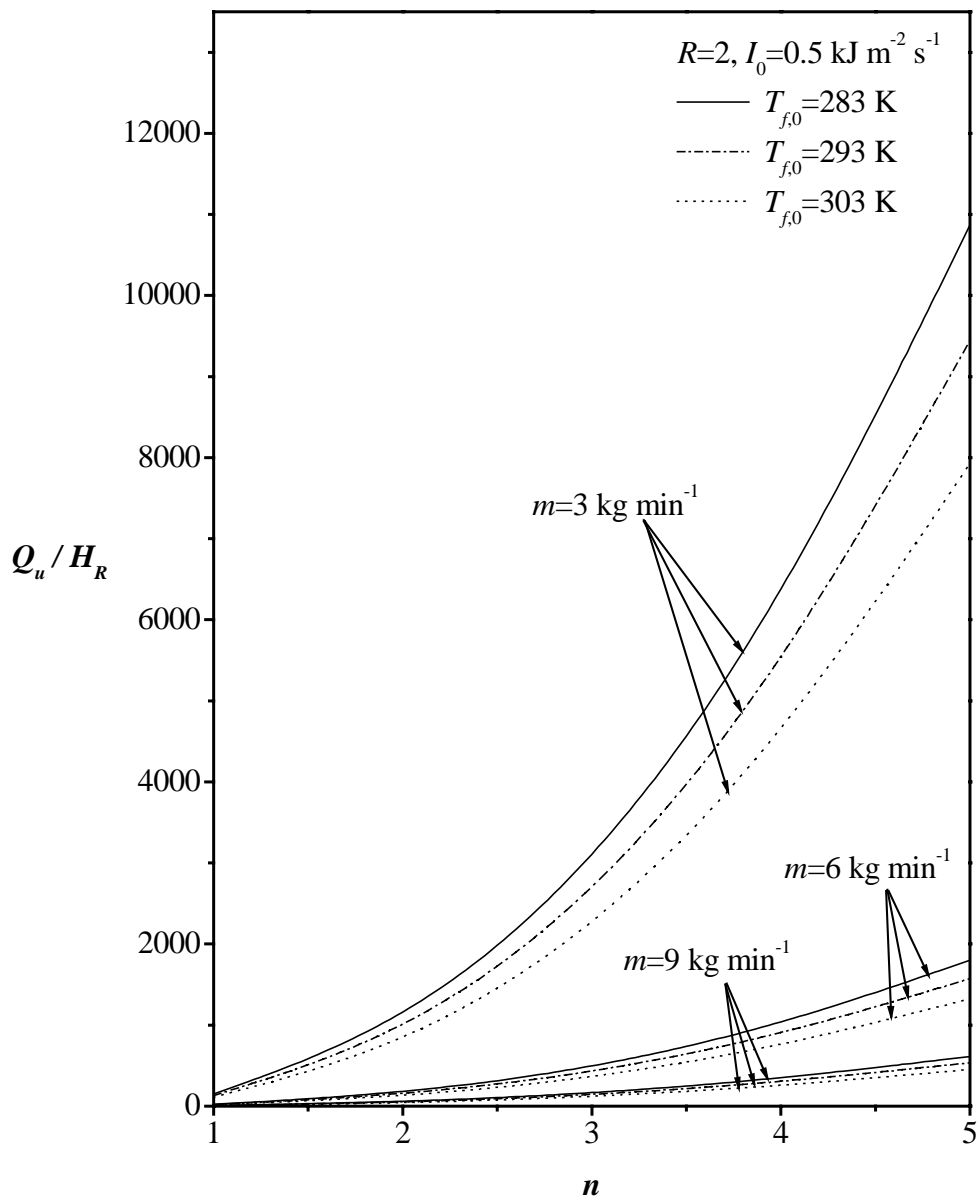


圖 38 太陽能集熱器(型三)迴流組數對 Q_u / H 之影響; $R=2; I_0=0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

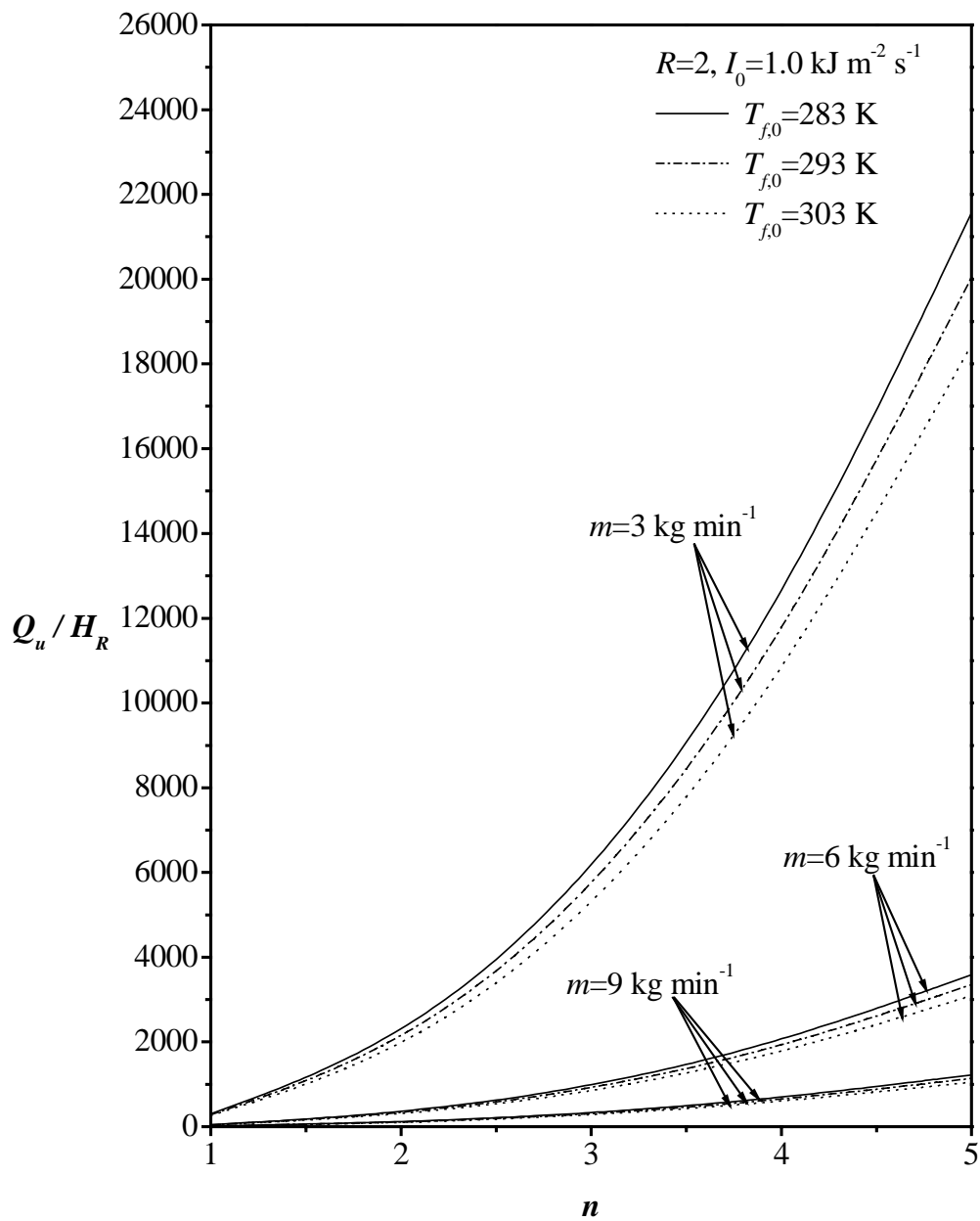


圖 39 太陽能集熱器(型三)迴流組數對 Q_u / H 之影響; $R=2; I_0=1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

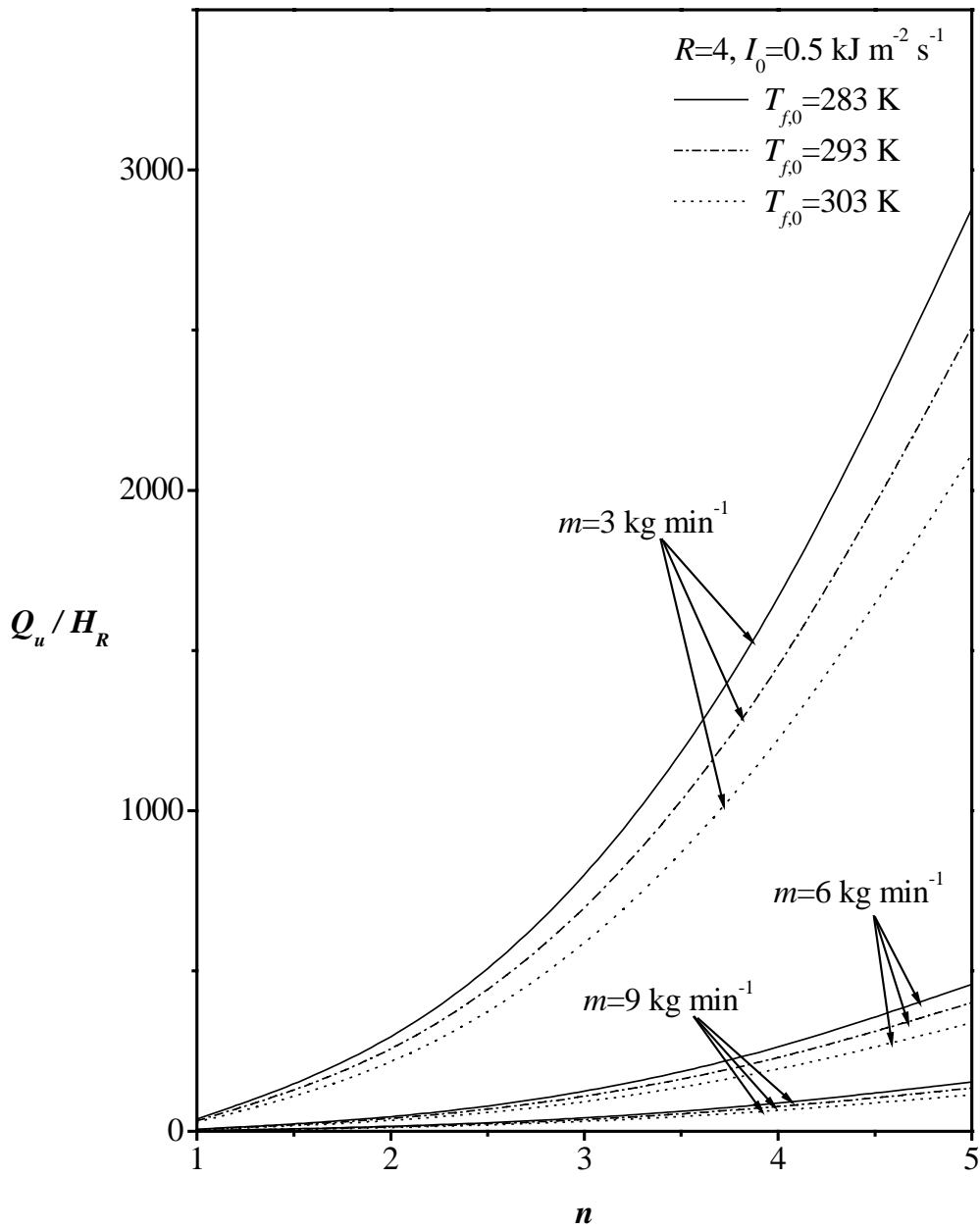


圖 40 太陽能集熱器(型三)迴流組數對 Q_u / H 之影響; $R=4; I_0=0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

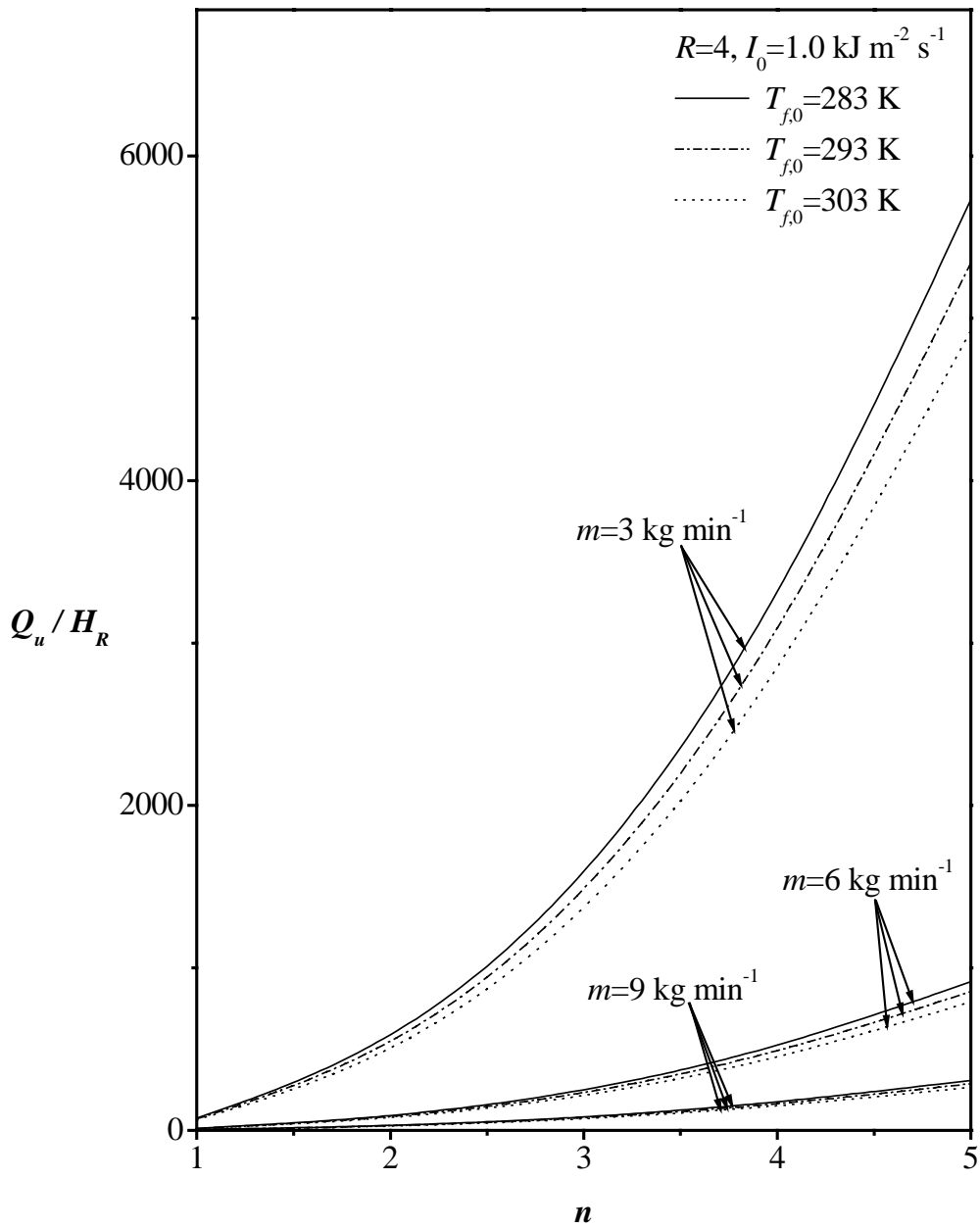


圖 41 太陽能集熱器(型三)迴流組數對 Q_u / H 之影響; $R=4; I_0=1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

表 1 具迴流管板式太陽能集熱器(型一)集熱效率提升百分比； $I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

I_D (%)									
n	$T_{f,0} = 283 \text{ K}$			$T_{f,0} = 293 \text{ K}$			$T_{f,0} = 303 \text{ K}$		
	$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$			$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$			$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$		
	3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0
1	6.60	2.32	1.45	7.12	2.58	1.64	7.53	2.75	1.76
2	10.62	6.61	3.39	11.20	7.16	3.74	11.69	7.58	3.98
3	0.00	14.75	6.61	0.00	15.67	7.17	0.00	16.45	7.59
4	0.00	10.66	15.92	0.00	11.26	16.96	0.00	11.77	17.82
5	0.00	0.00	13.52	0.00	0.00	14.34	0.00	0.00	15.04

表 2 具迴流管板式太陽能集熱器(型一)集熱效率提升百分比； $I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

I_D (%)									
n	$T_{f,0} = 283 \text{ K}$			$T_{f,0} = 293 \text{ K}$			$T_{f,0} = 303 \text{ K}$		
	m (kg min ⁻¹)			m (kg min ⁻¹)			m (kg min ⁻¹)		
	3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0
1	7.10	2.47	1.54	7.51	2.67	1.69	7.88	2.83	1.80
2	11.54	7.10	3.62	12.01	7.53	3.89	12.46	7.91	4.11
3	0.00	16.01	7.10	0.00	16.76	7.54	0.00	17.46	7.93
4	0.00	11.58	17.27	0.00	12.06	18.11	0.00	12.52	18.90
5	0.00	0.00	14.68	0.00	0.00	15.35	0.00	0.00	15.98

表 3 具迴流管板式太陽能集熱器(型二)集熱效率提升百分比； $I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

		I_D (%)								
R	n	$T_{f,0} = 283 \text{ K}$			$T_{f,0} = 293 \text{ K}$			$T_{f,0} = 303 \text{ K}$		
		$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$			$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$			$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$		
		3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0
2	1	7.95	2.90	1.86	8.62	3.23	2.10	9.12	3.46	2.25
	2	17.20	8.72	4.66	18.32	9.50	5.17	19.26	10.09	5.52
	3	14.70	19.21	8.97	15.60	20.60	9.80	16.35	21.72	10.42
	4	11.70	18.08	19.87	12.35	19.33	21.36	12.92	20.36	22.55
	5	5.40	16.87	19.13	5.68	17.99	20.53	5.92	18.92	21.65
4	1	8.90	3.37	2.18	9.67	3.77	2.47	10.26	4.03	2.65
	2	19.29	9.64	5.27	20.63	10.55	5.86	21.73	11.22	6.27
	3	18.11	20.74	9.89	19.33	22.32	10.85	20.33	23.57	11.55
	4	16.88	20.15	21.22	17.97	21.65	22.89	18.88	22.86	24.20
	5	15.57	19.57	20.83	16.54	20.99	22.44	17.35	22.14	23.72

表 4 具迴流管板式太陽能集熱器(型二)集熱效率提升百分比； $I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

		I_D (%)								
R	n	$T_{f,0} = 283 \text{ K}$			$T_{f,0} = 293 \text{ K}$			$T_{f,0} = 303 \text{ K}$		
		$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$			$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$			$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$		
		3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0
2	1	8.55	3.09	1.97	9.07	3.35	2.16	9.54	3.55	2.30
	2	18.68	9.35	4.98	19.59	9.97	5.37	20.44	10.51	5.69
	3	15.98	20.84	9.62	16.70	21.95	10.28	17.39	22.98	10.84
	4	12.71	19.61	21.54	13.25	20.62	22.74	13.76	21.56	23.83
	5	5.90	18.30	20.75	6.12	19.22	21.87	6.34	20.06	22.89
4	1	9.56	3.59	2.31	10.17	3.90	2.54	10.70	4.14	2.71
	2	20.93	10.35	5.62	22.02	11.06	6.08	23.02	11.67	6.46
	3	19.66	22.48	10.60	20.65	23.75	11.36	21.56	24.90	12.00
	4	18.33	21.85	22.99	19.22	23.06	24.34	20.05	24.16	25.54
	5	16.91	21.22	22.57	17.70	22.37	23.87	18.44	23.42	25.04

表 5 具迴流管板式太陽能集熱器(型三)集熱效率提升百分比； $I_0 = 0.5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

		I_D (%)								
R	n	$T_{f,0} = 283 \text{ K}$			$T_{f,0} = 293 \text{ K}$			$T_{f,0} = 303 \text{ K}$		
		$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$			$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$			$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$		
		3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0
2	1	8.89	3.35	2.15	9.66	3.74	2.44	10.24	4.00	2.62
	2	18.71	9.38	5.09	19.99	10.25	5.66	21.04	10.90	6.05
	3	16.87	20.17	9.54	17.96	21.68	10.45	18.86	22.88	11.12
	4	14.81	19.30	20.66	15.71	20.69	22.24	16.47	21.82	23.50
	5	12.45	18.39	20.08	13.16	19.68	21.59	13.76	20.73	22.79
4	1	9.33	3.58	2.32	10.16	4.00	2.63	10.78	4.29	2.82
	2	19.89	9.92	5.45	21.30	10.87	6.07	22.45	11.56	6.49
	3	18.85	21.10	10.11	20.14	22.73	11.10	21.21	24.02	11.82
	4	17.78	20.58	21.51	18.96	22.14	23.22	19.94	23.38	24.56
	5	16.65	20.06	21.16	17.72	21.55	22.82	18.62	22.75	24.13

表 6 具迴流管板式太陽能集熱器(型三)集熱效率提升百分比； $I_0 = 1.0 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

		I_D (%)								
R	n	$T_{f,0} = 283 \text{ K}$			$T_{f,0} = 293 \text{ K}$			$T_{f,0} = 303 \text{ K}$		
		$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$			$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$			$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$		
		3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0	3.0	6.0	9.0
2	1	9.55	3.56	2.29	10.16	3.87	2.51	10.69	4.11	2.68
	2	20.31	10.06	5.43	21.34	10.75	5.87	22.30	11.34	6.23
	3	18.31	21.87	10.23	19.20	23.08	10.95	20.02	24.18	11.56
	4	16.09	20.93	22.39	16.82	22.05	23.66	17.51	23.08	24.82
	5	13.52	19.95	21.76	14.10	20.99	22.98	14.65	21.95	24.08
4	1	10.02	3.81	2.46	10.67	4.14	2.70	11.24	4.40	2.88
	2	21.58	10.64	5.81	22.73	11.38	6.29	23.78	12.02	6.68
	3	20.46	22.88	10.84	21.51	24.19	11.62	22.47	25.37	12.28
	4	19.30	22.31	23.30	20.26	23.57	24.68	21.15	24.70	25.91
	5	18.09	21.75	22.93	18.95	22.95	24.26	19.76	24.05	25.46

表 7 具迴流管板式太陽能集熱器(型一)水力消耗增加率。

n	I_p		
	m (kg min ⁻¹)		
	3 kg min ⁻¹	6 kg min ⁻¹	9 kg min ⁻¹
1	5.35	5.50	5.58
2	6.12	5.35	5.44
3	3.00	7.60	5.35
4	3.00	6.12	8.30
5	3.00	3.00	7.02

表 8 具迴流管板式太陽能集熱器(型二)水力消耗增加率。

		I_p		
		$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$		
R	n	3 kg min^{-1}	6 kg min^{-1}	9 kg min^{-1}
2	1	81.91	86.23	88.48
	2	89.04	81.91	84.52
	3	67.08	109.30	81.91
	4	55.12	89.04	118.98
	5	43.11	76.13	101.36
4	1	388.29	413.44	426.67
	2	415.83	388.29	403.42
	3	311.14	512.79	388.29
	4	254.32	415.83	559.21
	5	218.06	354.19	474.74

表 9 具迴流管板式太陽能集熱器(型三)水力消耗增加率。

		I_p		
		$m \text{ (kg min}^{-1}\text{)}$		
R	n	3 kg min^{-1}	6 kg min^{-1}	9 kg min^{-1}
2	1	123.54	130.36	133.90
	2	133.86	123.54	127.65
	3	100.76	164.41	123.54
	4	82.74	133.86	179.01
	5	71.21	114.39	152.43
4	1	503.92	537.42	555.06
	2	538.60	503.92	524.06
	3	402.53	664.68	503.92
	4	328.74	538.60	725.06
	5	281.66	458.48	615.19

7、符號說明

A_c	集熱器總面積， m^2
b	圓管周圍與吸收板連接部份之寬度， m
C_b	圓管周圍與吸收板連接部份之平均熱傳導係數， $\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
C_p	常壓下空氣之比熱， $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
D	圓管外徑， m
D_i	圓管內徑， m
e	定義於式(33)
F'	吸收板效率係數，定義於式(19)
f_F	汎寧摩擦係數
f	定義於式(31)
H	水力損耗， kJ s^{-1}
$h_{f,i}$	流體之熱對流係數， $\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$
h_w	玻璃面蓋與外界之對流熱傳係數， $\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$
I_0	太陽光入射量， $\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$
I_D	集熱器效率上升百分比
I_p	能量消耗增加比值
k_b	圓管周圍與吸收板連接部份之熱傳導係數， $\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
k_f	水之熱傳導係數， $\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
k_s	太陽能集熱底部絕熱層之熱傳導係數， $\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
k_t	圓管之熱傳導係數， $\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
L	圓管長度， m
λ	於不同長寬比下，每支圓管的長度， m
λ_s	太陽能集熱底部絕熱層之厚度， m
λw_f	摩擦損耗， kJ kg^{-1}
$\lambda w_{f,0}$	無迴流型式之摩擦損耗， kJ kg^{-1}

$\lambda w_{f,1}$	圓管 1 之摩擦損耗，kJ kg ⁻¹
$\lambda w_{f,2}$	圓管 2 之摩擦損耗，kJ kg ⁻¹
M_1	圓管 1 之流體流量，m s ⁻¹
M_2	圓管 2 之流體流量，m s ⁻¹
m	流體總質量流率，kg min ⁻¹
N	玻璃面蓋數
Nu	納塞數
n	迴流組數
Pr	普蘭特數
Q_u	每單位時間內水所帶走的有效能量，W
q'_{fin}	單位長度吸收板傳遞至圓管內之能量，W m ⁻¹
q'_{tube}	單位長度圓管上方吸收板傳遞至圓管內之能量，W m ⁻¹
q'_u	單位長度吸收板傳遞至圓管內之能量，W m ⁻¹
R	迴流比值
Re_D	雷諾數
Re_0	無迴流型式之雷諾數
Re_1	管 1 之雷諾數
Re_2	管 2 之雷諾數
S	於吸收板處所測得之太陽光入射量，kJ m ⁻² s ⁻¹
T_a	大氣溫度，K
T_b	圓管之管壁溫度，K
$T_{f,j}$	流體於不同位置 j 之溫度，K
$T_{f,i}(z)$	集熱器中圓管 i 通道於之空氣溫度，K
$T_{f,0}$	流體進口溫度，K
$T_{f,out}$	流體出口溫度，K
$T_{p,m}$	吸收板平均溫度，K

U_B	吸收板底部至外界之熱損失係數， $\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$
U_E	集熱器側面至外界之熱損失係數， $\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$
U_L	集熱器之總熱損失係數， $\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$
U_T	吸收板至外界之熱損失係數， $\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$
V	外界風速， m s^{-1}
v	管內流體流速， m s^{-1}
W	兩圓管之間距， m
x	圓管徑方向
z	圓管軸方向

希臘字母:

β	集熱器之傾斜角度，degree
γ	圓管周圍與吸收板連接部份之平均厚度， m
δ	吸收板厚度， m
ε_g	玻璃面蓋之輻射係數
ε_p	吸收板之輻射係數
η	集熱器效率
η_D	無迴流型集熱器集熱效率
η_R	具迴流型集熱器集熱效率
ρ	液體密度， kg m^{-3}
σ	史蒂芬波茲曼係數(Stefan-Boltzmann Constant)= $5.67 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$
ξ	太陽能集熱器之長寬比， $\lambda/2nW$
ψ	因次溫度

8、參考文獻

- [1] Seluck, M. K., *Solar Air Heaters and Their Applications*, A. A. M. Sayigh ed., Academic Press, New York (1977).
- [2] Yeh, H. M. and Ting, Y. C., "Efficiency of Solar Air Heaters Packed With Iron Filings," *Energy*, **13**, 543 (1988).
- [3] Yeh, H. M., Ho C. D. and Hou J. Z., "Collector Efficiency of Double-Flow Solar Air Heaters with Fins Attached," *Energy*, **27**, 715 (2002).
- [4] Kreith, F. and J. F. Kreider, *Principles of Solar Engineering*, McGraw-Hill, New York (1978).
- [5] Yeh, H. M., Ho C. D. and Hou J. Z., "Collector Efficiency of Double-Flow Baffled Solar Air Heaters," *J. Chin. Inst. Chem. Engrs*, **31**, 617 (2000).
- [6] Yeh, H. M., Ho C. D. and Lin C. Y., "Effect of Collector Aspect Ratio on The Collector Efficiency of Upward Type Baffled Solar Air Heaters," *Energy Conversion and Management*, **41**, 971 (2000).
- [7] Ho, C. D., Yeh C. W. and Hsieh S. M., "Improvement in Device Performance of Multi-Pass Flat-Plate Solar Air Heaters with External Recycle," *Renewable Energy*, (In Press).
- [8] Ho, C. D., Yeh H. M. and Yang W. Y., "Improvement in Performance on Laminar Countercurrent Concentric Circular Heat Exchangers with External Refluxes," *International J. of Heat and Mass Transfer*, **45**, 3559 (2002).
- [9] Ho, C. D. and Chiang S. C., "A Theoretical Study of The Improvement in Performance of Double-Pass Mass Exchangers with External Refluxes Separated by An Idealized Permeable Barrier," *Chem. Eng. Journal*, **89**, 253 (2002).
- [10] McCabe, W., J. Smith and P. Harriott, *Unit Operations of Chemical Engineering*, 5th ed., McGraw-Hill, New York (1993).
- [11] Ho, C. D., H. Chang and J. J. Guo, "Effects of Inclined Angle and Aspect Ratio on Heavy Water Separation Efficiencies in Double-Flow Thermal-Diffusion Columns with External Refluxes," *Sep. Sci. Technol.*, **39**, 975 (2004).
- [12] Hornut, J. M., H. Dhaouadi, S. Poncin, N. Midoux, J. M. Hornut and G. Wild, "Hydrodynamics and Flow Regimes in External Loop AirLift Reactor," *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 5211 (1999).
- [13] Camarasa, E., E. Carvalho and L.A.C. Meleiro etc., "A Hydrodynamic Model Air-Lift Reactors," *Chem. Eng. Processing*, **13**, 121 (2001).
- [14] Couvert, A., M. Roustan and P. Chatellier, "Two-Phase Hydrodynamic Study of a Retangular Air-Lift Loop Reactor with An Internal Baffle," *Chem. Eng. Science*, **54**, 5245 (1999).
- [15] Heiszwolf, J. J., L. B. Engelvaart, M. G. Eijnden, M.T. Kreutzer, F. K. Jacob and A. Moulijn, "Hydrodynamic Aspects of The Monolith Loop Reactor," *Chem. Eng. Science*, **56**, 805-812 (2001).

- [16] Shah, R. K. and A. L. London, *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*, Academic Press, New York (1978).
- [17] Dang., V-D. and M. Steinberg, "Convective Diffusion with Homogeneous and Heterogeneous Reaction in A Tube," *J. Phys. Chem.*, **84**, 214 (1980).
- [18] Papoutsakis, E., and D. Ramkrishna, "Conjugated Graetz Problems. I: General Formalism and A Class of Solid-Fluid Problems," *Chem. Eng. Sci.*, **36**, 1381 (1981).
- [19] Yeh, H. M., S. W. Tsai and M. C. Hsiey, "On The Examination of Recycle on Heat (and Mass) Transfer in Concentric Tubes, *Can. J. of Chem. Eng.*, **66**, 258 (1988).
- [20] Hottel, H. C. and Woertz B. B., "Performance of flat-plate solar-heat collectors," *Trans. ASME*, **64**, 91 (1942).
- [21] Hottel, H. C. and A. Whillier, "Evaluation of Flat-Plate Collector Performance," *In Trans. of the Conf. on the Use of Sol. En. Univ. of Arizona Press*, **2**, 74 (1958).
- [22] Bliss, R. W., "The Derivations of Several 'Plate Efficiency Factors' Useful in The Design of Flat-Plate Solar-Heat Collectors," *Solar Energy*, **3**, 55 (1959).
- [23] Tabor, H., "Radiation, Convection, and Conduction Coefficients in Solar Collectors," *Bulletin of the Research Council of Israel*, **6C**, 155(1958).
- [24] Duffie, J. A. and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, New York (1980).
- [25] Hill, J. E. and E. R. Streed, "A Method of Testing for Rating Solar Collectors Based on Thermal Performance," *Solar energy*, **18**, 421 (1976).
- [26] Garg, H. P., "Design and Performance of a Large-size Solar Water Heater," *Solar energy*, **14**, 303 (1973).
- [27] Klein, S. A., "Calculation of flat-plate loss coefficients," *Solar Energy*, **17**, 79 (1975).
- [28] Spotts, R. W., "Comparison of Experimental Versus Predicted Thermal Performance for a Flat Plate-Flat Mirror Collection Ssystem for a Domestic Solar Water Heater," *Proceedings of the Annual Meeting - American Section of the International Solar Energy Society*, **4**, 491 (1981).
- [29] Yeh, H. M., C. D. Ho and C. W. Yeh, "Effect of Aspect Ratio on The Collector Efficiency of Sheet-and-Tube Solar Water Heaters with The Consideration of Hydraulic Dissipated Energy," *Renewable Energy*, **28**, 1575 (2003).
- [30] Nahar, N. M., "Studies on Gap Spacing Between Absorber and Cover Glazing in Flat Plate Solar Collectors," *International Journal of Energy Research*, **13**, 727 (1989).
- [31] Hawlader, M. N. A., S. K. Chou and M. Z. Ullah, "The Performance of A Solar Assisted Heat Pump Water Heating System," *Applied Thermal Engineering*, **21**,

- 1049 (2001).
- [32] Li, Z. F. and K. Sumathy, "Experimental Studies on A Solar Powered Air Conditioning," *Solar Energy*, **71**, 285 (2001).
- [33] Koschikowski, J., M. Wiegghaus and M. Rommel, "Solar Thermal-Driven Desalination Plants Based on Membrane Distillation," *Desalination*, **156**, 295 (2003).
- [34] Klein, S. A., "Calculation of Monthly Average Transmittance-Absorptance Product," *Solar Energy*, **23**, 547 (1979)
- [35] Watmuff, J. H., W. W. S. Charters and D. Proctor, "Solar and Wind Induced External Coefficients for Solar Collectors," *Complex*, **2**, 56 (1977).
- [36] Petukhov, B. S., *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, New York (1970).
- [37] Gnielinski, V., "New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow," *Int. Chem. Eng.*, **16**, 359 (1976).
- [38] Welty, J. R., C. E. Wick and R. E. Wilson, *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 3rd ed., New York (1984).

9、計畫成果自評

本次計畫之成果與當初所設定之目標相符，各項數據之結果也十分符合預期。本研究之成果除了可應用於太陽能熱水加熱器之外，還可以提供蒸餾設備之進口水溫的提升裝置，對於非再生能源的節省與利用上有相當的貢獻。在連續式的操作中，水的進口溫度對於集熱效率有相當大的影響，但是水的進口溫度越高雖然會導致集熱效率下降，但是卻能夠提升水的出口溫度，對於蒸餾設備與一些需要較高溫度作為驅動力之系統，較高之出口溫度對於這些系統有著相當的幫助。藉由迴流裝置可以使流體在同樣的進口總流量下，除了提升集熱效率以及出口溫度之外，對於縮小集熱器體積而又能達到相同集熱效率是可以預期的。這些結果有助於本研究群未來進行的海水淡化設備的模擬與實驗設計。

10、附錄

表 10 水在不同溫度下之物理性質

T (K)	ρ (kg m ⁻³)	C_p (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	$k_f \times 10^{-3}$ (kJ s ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹)	$\mu \times 10^4$ (kg m ⁻¹ s ⁻¹)
273	1002	4.218	0.552	17.9
293	1001	4.182	0.597	10.1
313	995	4.178	0.628	6.55
333	985	4.184	0.651	4.71
353	974	4.196	0.668	3.55

研發成果資料表

日期：93年3月18日

計畫名稱：迴流效應於管板式太陽能集熱器效率改善		
計畫主持人：何啟東		
計畫編號：NSC 93-ET-7-032-001-ET		
論文	期刊	The recycle effect on the collector efficiency improvement of double-pass sheet-and-tube solar water heaters with external recycle (Submitted to Renewable Energy).
	研討會	何啟東,陳宗慶,涂志偉, 2004, ”迴流效應於管板式太陽能集熱器效率改善”, 輸送現象與其應用研討會專輯, Taiwan, Taiwan, p.94.
技術報告		
專利	申請	
	獲得	
	應用	
與產業界、研發機構互動成果		
可利用之產業及可開發之產品	太陽能熱水器，海水淡化，太陽能空調設備，乾燥設備。	
技術特點	利用迴流裝置來改善太陽能集熱器效率。	
推廣及運用的價值	提高流體溫度可應用於海水淡化之前置作業，譬如蒸發器製備純水及薄膜蒸餾等等。	