

確定汽輪機最有利 真空條件的方法

中央人民政府燃料工業部
生產技術處編譯

燃料工業出版社

前 言

汽輪機的真空到底達到甚麼程度才算最經濟，全國各電廠迄今還沒有一定標準。有的電廠爲了盡量提高真空以降低汽耗，不惜多開循環水泵，致使廠用電增加；有的電廠爲了減少廠用電而忽視了煤耗的增加。一般電廠對於汽輪機在甚麼負荷情況下應多開或少開一台循環水泵，最多只能憑估計確定。

我們知道循環水泵所消耗的電力在廠用電中所佔百分數是很大的（平均23%左右）。汽輪機真空每增加1%，在全負荷時汽耗減低1.15%；在0.4負荷時汽耗減低2.5%。由此可見，確定汽輪機最有利的真空條件，對整個發電廠的經濟運行是有很大大意義的。

在這本小冊子中詳細敘述了我們想要知道的確定汽輪機最有利真空條件的方法。我們可以在大修後作熱效率試驗時順便作一部分試驗，求出微增出力 ΔN ，與凝汽器中壓力 P_2 的關係圖及一般通用曲線。以後在一年中選擇出冷却水溫度最高、最低及平均三個時期，分別作出溫度差 $\delta t = t_n - t_{20} (^\circ\text{C})$ 與冷却水溫度 t_{12} 及監視段處壓力 P_k 的關係，每次都在水泵不同組合方法下分別進行。有了這些資料以後，我們可逐步求出決定最有利真空條件運行方式的曲線。

本書出版後，希望各電廠、生產技術科研究出自己廠內的汽輪機試驗的步驟。由於缺乏經驗，在開始看本書和作試驗時一定會遇到一些困難。若經過研究仍不能解決，希望能告訴我們。在個別條件不夠的電廠，可以照本書所述用試驗方法來確定最有利的真空條件。

本書所述方法不適用於中央水泵房的發電廠，希望這類發電廠能根據本書中所述的原理研究出一種試驗方法，並告訴我們。

中央人民政府燃料工業部生產技術處

目 錄

前言	1
（一）總論	3
I. 極限的及最有利的真空	3
II. 決定汽輪機最有利真空度的條件	5
III. 蒸汽流量	5
IV. 冷却水的供給	7
（二）最有利真空的決定方法	8
I. 汽輪機 $\Delta N_2 = f(p_2, p_K)$ 曲線圖, 一般通用曲線	8
II. 凝汽器的特性曲線	16
III. 循環水泵所消耗的電力	20
IV. 運行方式曲線的繪製	20
V. 凝汽器的狀態	23
VI. 最有利真空狀態的維持	26
VII. 用試驗檢查方法確定最有利的真空	26
VIII. 運行方式曲線的計算	28
附錄	34

(一) 總 論

Ⅰ. 極限的及最有利的真空

大家已經知道，真空度對於汽輪機的運行影響很大，即真空度愈高，汽輪機中的熱力降也愈大；因此轉變為有效出力的熱力降愈大，所以設備的絕對熱效率也愈高。

提高真空度固然是欲使汽輪機的出力增加，但實際上却被最後一級葉片的通過蒸汽能力所限制。當汽輪機的最後一級各工作葉片之間的蒸汽通路出口斷面處達到極限壓力時（在傾斜面處蒸汽的膨脹也被利用），如蒸汽流量不變，真空度再繼續提高並不能使出力增加，因此在真空度提高的狀態下，對於所增加的熱力降之利用，已經超過工作葉片的限度，不再出力。此時這個真空的數值即稱為極限真空。

但是汽輪機真空度提高到合理的界限，在極限以內的真空度下，是可以確定出的。必須考慮到，真空度的提高與供給冷却水量所增加的耗電量有關。從這種關係而得到下述比較接近的真空度界限，這真空度的界限即稱為最有利的或經濟的真空度。

可是極限真空度僅僅為汽輪機的通汽部分所確定，特別為最後一級葉片的通過蒸汽能力所確定；而最有利的真空還與凝汽設備的運行情況有關，特別與循環水泵供給的冷却水有關。

假使供給到凝汽器去的冷却水量的調節是很理想的，同時以供給到凝汽器去的最小冷却水量為起點，例如在座標紙上的零點，則當逐漸增加冷却水量時（至凝汽器的蒸汽流量不變與冷却水的溫度不變時），汽輪機的微增出力 ΔN_g （圖1中的曲線1）及循環水泵消耗之電量 ΔN_n （圖1中的曲線2）將要增加，將微增出力和冷却水泵所消耗之能力兩者之差繪成與冷却水量有關係的曲線（圖1中的曲線3），可以得出最有利的冷却水量（或最有利的真空），這個最有利的真空相當於最大的贏得出力（圖1中曲線3上的 α 點，當水之流量為 W_1 時）。

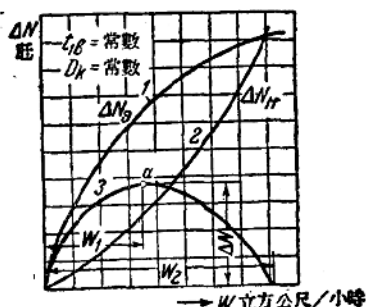


圖1 所贏得之出力與冷却水流量（最有利的真空）之關係圖

當冷却水量再繼續增加時， ΔN_g 與 ΔN_n 兩者之差減小。當水量為 W_2 時，兩者之差減少到等於零。也就是說冷却水量再繼續增加時（超過 W_1 值），從經濟觀點來看就沒有好處了。

根據上述，最有利的或最經濟的真空度之定義可敘述如下：在冷却水進口溫度不變及進入凝汽器中的蒸汽流量一定的情形下，汽輪機的微增出力與循環水泵所增加的消耗電力之差為最大時的真空度，稱為最經濟的或最有利的真空。或者這個意義也可這樣表示：送到電網去的電能最大時之真空

度即為最有利的真空度。

II. 決定汽輪機最有利真空度的條件

最有利真空度僅僅由汽輪機低壓部分的狀況來決定，因此用來確定最有利真空度及對真空有關係的，僅為汽輪機低壓部分及凝汽設備的運行條件。

主要條件是入凝汽器的蒸汽流量 D_K 、排汽壓力 P_2 、冷却水的進口溫度 t_{10} 、冷却水量 W （或使用中的水泵數量）、汽輪機出力的變化 ΔN 及循環水泵所消耗電力 ΔN_w 的變化。

根據蒸汽流量 D_K 及冷却水溫度 t_{10} 這兩個數值來選擇在運行情況下最有利的真空或最有利的冷却水量。其餘幾個條件用在實驗檢查工作中求出在進入凝汽器的一定蒸汽流量 D_K 及冷却水一定溫度 t_{10} 時最有利之真空度數值。

應該指出，決定最有利真空的條件，在實際工作中也就是選擇最有利的冷却水量，或者說，就是選擇應當使用幾台水泵。

III. 蒸汽流量

在其他條件不變的情況下，汽輪機發電能力的變化 ΔN 與排汽壓力 P_2 及經過最後一級葉片之蒸汽流量 D_K 的變化有關。根據這些關係就可以找出最有利真空的全部方法，同時並可使這個方法成為廣泛應用的方法，即適用於各型式汽輪機，如凝汽式汽輪機、一段或兩段抽汽式的汽輪機等。這樣對汽輪機凝汽部分的最有利的真空是按照進入凝汽器內的蒸汽流量數值來決定的，而與高壓部分的情況無關。

用測量從凝汽器流出的凝結水量的方法，可以求出進入

凝汽器內的蒸汽流量，但如以測量汽輪機中間監視段的壓力 P_k 的方法來代替上法，比較方便。

我們知道凝汽式汽輪機的中間壓力 P_k 的變化是與蒸汽流量成正比例的。帶有調整抽汽的汽輪機，其低壓部分，可以認為與凝汽式汽輪機一樣。所以選擇適當地方作為測量蒸汽壓力點後，對於每一台汽輪機均可用測量蒸汽壓力 P_k 的方法來代替直接測量蒸汽的流量 D_k 。

許多次汽輪機試驗的結果證明，用於回熱系統（如加熱器等）的非調整抽汽並不會使 $P_k = f(D_k)$ 直線型關係的特性發生變化。

根據汽輪機的許多試驗，還可以說，使用蒸發裝置同樣對 $P_k = f(D_k)$ 的關係特性沒有影響。

在那一監視段後，選擇進行測量蒸汽壓力 P_k 的地點應根據下列各項確定：

1. 無供回熱用抽汽的凝汽式汽輪機——在汽輪機的任何一級均可。
2. 帶有非調整抽汽的凝汽式汽輪機——在任何一級均可，但是應在供回熱用的最後一段低壓抽汽以前。
3. 帶有調整及非調整抽汽的汽輪機——在調整抽汽段的任何一級均可，但是要在最後一段非調整抽汽以前。

被選擇測量的地點最好能利用壓力表來測量壓力，而不是利用真空表測出真空。

應該指出，假使汽輪機的通汽部分積有由鍋爐帶來的水垢，則 $P_k = f(D_k)$ 的關係可能改變很多，所以必須要檢查汽輪機通汽部分的狀態。但是應該記住，僅僅測量點以後

通汽部分積有水垢對於 $P_K = f(D_K)$ 的關係才有影響。

IV. 冷却水的供給

根據供水到凝汽器中去的方法和特性，凝汽器裝置可以分爲下列幾類：

(1) 有轉速一定並獨立使用的循環水泵（一般爲兩台，與其他凝汽器不能併列使用）的凝汽裝置，這樣裝置如欲大量調節冷却水量，只有增開或停止使用水泵的台數。

(2) 帶有轉數一定並獨立使用的循環水泵（一台，兩台）的凝汽裝置，但在凝汽器前設有聯絡閘板門，可將幾組凝汽裝置的水泵並聯起來以便調整供給凝汽器的水量。例如在兩台汽輪機的凝汽器間，裝有聯絡閘板門，又如每台汽輪機有兩台循環水泵時，就可以這樣編組：一台水泵供給一台汽輪機，三台水泵供給兩台汽輪機，兩台水泵供給一台汽輪機，因此這樣編組比上節所述的有較大調整的可能性。

(3) 帶有可以獨立使用的循環水泵（一台，兩台）的凝汽裝置，但它們的轉速可以變動，藉以調整水量。

(4) 以中央河邊水泵室供給冷却水的凝汽裝置，水泵先將水送到總匯水管，從總匯水管再將冷却水分別送到各個凝汽裝置。

全蘇熱工技術學院汽輪機實驗室研究結果說明，在冷却水系統中，使用帶有調整轉速的水泵（例如液體接合輪），從經濟上來看是不合算的。由列寧格勒第五發電廠的實際工作經驗中證明，以帶有兩段速度的電動機也能得到上述的結果。

在壓力側利用節流調整門來減小水量變更水泵的出力，一般同樣得不到實際的效果。

因此對於實際最有利的辦法是如何將轉速一定的可獨立使用的水泵組織並配合起來使用，以確定最有利的真空。在蘇聯大多數汽輪機的裝置均是用這種組合方法來供給的。

此時水泵係按照壓力側水門全面的情況下運轉的，即未考慮到節流調整。

對於中央統一供水（河邊水泵）的凝汽裝置確定其經濟真空的問題是比較複雜的，需要進行一系列的補充測量，本文將不作討論。

（二）最有利真空的決定方法

最有利真空決定方法係根據汽輪機最後一級之工作情況與凝汽器之工作情況的比較。從下面所列代表汽輪機及凝汽器之運行特性曲線中，可以很簡單地求出最有利的真空，並畫出運行方式曲線。

Ⅰ. 汽輪機 $\Delta N_2 = f(P_2, P_K)$ 曲線圖，一般通用曲線

$$\frac{\Delta N_2}{P_K} = f\left(-\frac{P_2}{P_K}\right)$$

這個曲線圖的目的是求出在凝汽器中的壓力 P_2 及進入凝汽器中的蒸汽流量（ P_K 為汽輪機監視段處的壓力）對汽輪機出力變化的影響。

為繪製這曲線圖所必需的試驗於進行時，與凝汽器的運行方式無關。所以做這些試驗與做凝汽器的試驗不發生關係。

這些曲線的繪製係根據蘇聯列寧格勒斯大林金屬工廠阿·斯·齊利貝爾瑪工程師所研究出的汽輪機出力與凝汽器真空度兩者之間的一般關係，汽輪機出力之變化及凝汽器之真空度均以與進入凝汽器的蒸汽流量有關係的數值表示（圖4中

$$\left(\frac{N_1}{P_K}, \frac{P_2}{P_K} \right)。$$

在繪製這關係曲線時，原點的選擇方法列入附錄 2 中。

(1) 進行試驗的條件

爲了繪製一般通用曲線，要做兩類試驗，每類試驗均在經過汽輪機監視段後汽輪機低壓部分的蒸汽流量一定不變時進行：第一類試驗是當 100% 蒸汽流量時，第二類試驗是當大約等於 40 % 蒸汽流量時。

在做每類試驗時蒸汽流量一定不變這一基本條件應嚴格遵守，以消除在試驗過程中蒸汽流量可能的變化對汽輪機出力所產生之影響，並使出力僅僅隨着凝汽器中壓力 P_2 的變化而變化。

因此必須保證汽輪機負荷固定，上下變動很小，並在試驗時藉助同步器用手動調整通過汽輪機低壓部分的一定蒸汽流量，即變動調速汽門的開度，維持監視段處的一定蒸汽壓力。

新蒸汽的規範（汽壓，汽溫）在全部試驗時間以內應維持它們的額定數值固定不變。

對於供給回熱式非調整抽汽的汽輪機，當進行試驗時低壓加熱器應仍在使用中。

假使運行情況許可時，其餘的加熱器（中壓及高壓）可以停止使用。

假使它們也在使用中，在全部試驗時間以內，必須維持通過這些加熱器的凝結水量不變。

對於帶有調整抽汽的汽輪機，在試驗時間內，調整抽汽應停止使用，此時抽汽調整裝置同樣可以停止不用。

如蒸汽門在向開啓的一側楔牢，可以得到更準確的結

果，但此時應完全保證汽門能關閉的可能性。同步器的彈簧應該很輕的壓向負荷提高的一側，如此在系統中負荷有小的變動，可避免調速汽門的關閉。

在楔牢前，應該測定適應做試驗時的負荷所用楔子的必要尺寸。

在楔牢一個一個汽門時，比較方便的辦法是放入兩半按中心方向切開的管子，按照圖 2a 利用鐵絲綁緊。

將轉式伺服馬達楔牢時，比較方便的辦法是在伺服馬達中心軸的尖端頭上，套上一頭做成方孔的彎曲槓桿，這個槓桿倚托在汽輪機本體的零件上，如圖 26 所示。

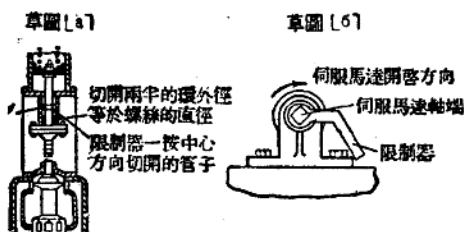
在裝置限制器時，必須注意，限制器不能跳開，以免造成汽輪發電機的負荷驟然增加，因為同步器係向機組負荷提高的一側按緊了一些。

在試驗結束以後，或在不做試驗時以及在發生任何事故時，限制器應該去掉，此時應預先使同步器回到相當於汽門原定開度的正常位置。

爲了得到一般通用特性曲線，上述試驗必須在凝汽器中使壓力 P_c 儘可能大的變化範圍內進行，即在下列的條件下進行：

- (1) 在裝置所規定的循環水進口溫度最低時；
- (2) 當凝汽器很乾淨時；
- (3) 在冷却水流量最大時。

在這些情況下凝汽器中壓力的低限將由冷却水的進口溫度、凝汽器的蒸汽負荷及抽氣器的運行是否良好等條件來決定，而高限則由汽輪機的排汽室最大強度所允許的最大延長時間來決定。



註：限制器在上下兩處
用鐵絲或卡子綁緊

註：伺服馬達軸方頭上的
限制器應裝得很緊

圖 9 調速汽門開度限制器草圖

一般通用特性曲線的變化規律是這樣的，在極限真空開始有影響的 $\frac{P_2}{P_K}$ 值很小的範圍內，曲線有一彎曲，而在 $\frac{P_2}{P_K}$ 值大的範圍內，曲線有直線特性。所以在 $\frac{P_2}{P_K}$ 值很小的範圍內，很詳細地測取曲線特性是很重要的。

這一段曲線將在 100 % 蒸汽流量情形下做完第一類試驗後繪製出來，所以當做這個試驗時特別重要的是要有最高真空，並且在繪製的曲線上要有足夠多的點數。

在做試驗時，要測量下述各數值：

- (1) 汽輪機的負荷——用帶有相當精細刻度的準確電力表以測量汽輪機的負荷 N_e (瓩)；
- (2) 凝汽器喉部即排汽室下部處的真空 H (公厘水銀柱)；
- (3) 大氣壓力 B (公厘水銀柱)；
- (4) 監視段處的壓力 P_K (絕對大氣壓，公斤/平方公分)；
- (5) 至汽門前的蒸汽壓力 P_1 (絕對大氣壓，公斤/平方公分)；
- (6) 新蒸汽溫度 t_1 ($^{\circ}\text{C}$)。

第一類試驗

$P_A = \dots\dots\dots$ 大氣壓

表 1

所欲測定數值的名稱	符號	試驗次數					試驗單位	試驗的數值					備註
		1	2	3	4	5		最小	最大	最小	最大		
凝汽器內的真空	H	最大					公厘水銀柱					平均的校正過的測量值	
大氣壓力	B	同上					同上					同上	
排氣壓力	$B-H$	最小					同上					同上	
同上	P_2	最小					大氣壓					$P_2 = \frac{B-H}{155.5}$	
汽輪機負荷	N_3	最大					瓩					平均校正過的測量值	
新蒸汽的壓力	P_1	最大					大氣壓					同上	
新蒸汽的溫度	t_1						°C					同上	
新蒸汽壓力的校正係數	β_{P_1}											根據校正曲線將在壓力 P_1 及溫度 t_1 情況下蒸汽消耗量及保壓條件下的消耗量	
新蒸汽溫度的校正係數	β_{t_1}												
化成保證條件下的汽輪機的負荷	N_{mp}						瓩					$N_{mp} = \frac{N_3}{\beta_{P_1} \cdot \beta_{t_1}}$	
微增出力	ΔN	0					瓩					以最大真空下做試驗的出力為 0	

① 在沒有校正曲線時，微增出力 ΔN ，即根據未校正過的出力 N_3 來確定。

以上這些測量應根據統一信號同時進行。

對於進入凝汽器的某一定蒸汽流量，可以用任何方法使凝汽器內的真空度從最大值變化到最小值。

但是最簡單的方法是用放入空氣的方法來變化真空，即人工地使抽氣器過負荷。

因此在抽氣器前抽氣管上焊上一帶有 0.5—1 吋考克的小管子，經過這個小管子放入空氣。

調整冷却水量以變化真空比較複雜，所以在任何時候總是採用放入空氣的辦法為宜。

試驗是先將放入空氣的考克關閉，使真空達到最大時開始，然後用放入空氣的方法漸漸變化真空而到達最低真空，每點之間的間隔取等於大約 10 公厘水銀柱。

開始試驗後應根據統一信號每隔 2.5 分鐘不斷地進行記錄工作。

根據不斷的記錄可以很容易地測出汽輪機內部在試驗過程中的既定狀態（常數 P_k ，新蒸汽的及凝汽器內的真空），同樣地可測出在每次試驗起始時的工作狀態（各數值的讀數）。

對於每一點應該至少取 5—6 個讀數。

（2）計算試驗的結果

試驗完畢後，分析計算試驗結果的步驟如下：

根據試驗的記錄，選擇能代表既定情況的試驗之間隔，得出每一試驗的平均值，根據廠家供給之電力表說明書，校正周圍環境的溫度，真空表及大氣壓力表的微管現象，根據表 1 計算每類試驗的凝汽器中壓力 P_2 及微增出力 ΔN_0 。

這兩類試驗的結果畫成 $\Delta N = f(P_2)$ 關係曲線，此時得到

相當於這兩類試驗的兩根曲線（圖3）。曲線1相當於100%蒸汽流量，曲線2相當於40%蒸汽流量。取最小壓力 P_2 及相當於已知蒸汽流量 D_k 的最大出力 N_3 為起始讀數（見表1）。

為了使所得曲線與一般通用曲線 $\frac{\Delta N_3}{P_k} = f\left(\frac{P_2}{P_k}\right)$

（圖4）相符合，必須求出微增出力讀數的原點 P_2^{01} 及 P_2^{02} 。

因此取任意值 P_2^{02} （圖3）為曲線2的原點，按照公式 $P_2^{01} = P_2^{02} \frac{P_{k1}}{P_{k2}}$ ① 求出曲線的原點（ P_2^{01} ）。假使所得到的壓力值 P_2^{01} 超出按照試驗點畫出的曲線範圍，即小於第一類試驗的最小壓力 P_2 時，應在比較高的壓力 P_2 時選擇原點。重新計算後即可得到曲線1上的原點。

從所得到的曲線的原點（壓力為 P_2^{01} 及 P_2^{02} 時）進行微增出力 ΔN_3 的計算，此時根據讀數距離原點的方向（上或下），微增出力 ΔN_3 為一或+號。

按照表2進行每類試驗的計算。

$P_k = \text{常數}$

表 2

P_2	ΔN_3	$\frac{P_2}{P_k}$	$\frac{\Delta N_3}{P_k}$	表中 P_2 各值之間的距離是從這樣來考慮選擇的，即在最後的通用曲線上得到足夠多數量的點
大氣壓	旺	大氣壓/大氣壓	旺/大氣壓	
最 小	+	+	+	
P_2^{01}	0	0	0	
最 大	-	-	-	

① 在其他所有運行情況不變時，凝汽器內的壓力與進入凝汽器內的蒸汽流量成直線比例——譯者註。

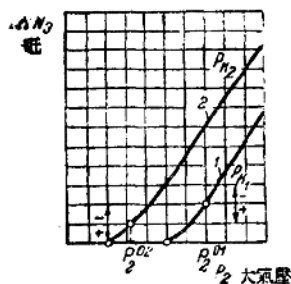


圖3 微增出力 ΔN_3 與凝汽器中壓力 P_2 的關係圖

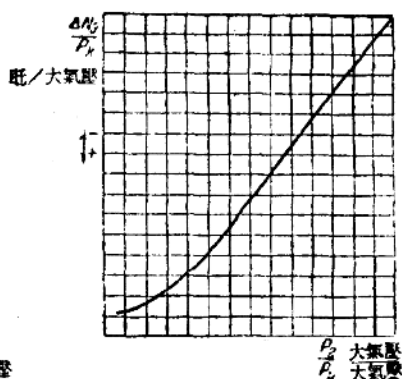


圖4 一般通用曲線

根據這兩類試驗所得的參數 $\frac{\Delta N_3}{P_\kappa}$ 及 $\frac{P_2}{P_\kappa}$ 在總圖上畫出一般通用曲線（圖4）。

$$\frac{\Delta N_3}{P_\kappa} = f\left(\frac{P_2}{P_\kappa}\right).$$

爲了繪出最後的曲線，根據從通用曲線上任意採用的數值 $\frac{P_2}{P_\kappa}$ ，按照下表進行初步的計算：

$P_\kappa = \text{常數}$						表 3
P_2	大氣壓	P_2'	P_2''	—	P_2'''	
P_2/P_κ	大氣壓/大氣壓	—	—	—	—	根據一般通用曲線
$\Delta N_3/P_\kappa$	瓩/大氣壓	—	—	—	—	
ΔN_3	瓩					

用同樣方法進行監視段處壓力 P_k 等於其他各值時的計算，所選 P_k 值的多少一般根據所希望有的曲線的比例密度而定。

將計算的結果畫成最後的曲線 $\Delta N_3 = f(P_2, P_k)$ (圖5)，

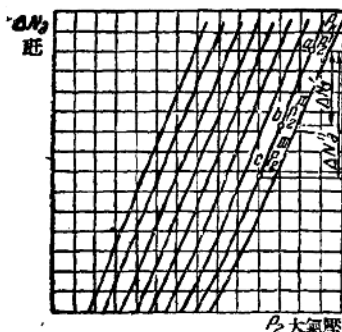


圖5 汽輪機出力的變化 ΔN_3 與凝汽器中蒸汽壓力 P_2 及監視段壓力 P_k 的關係圖

表示微增出力的縱座標上的零點之位置可以任意選擇。

爲了簡化曲線圖的應用方法，建議在縱座標上不指明出力的數值，而在此座標上僅繪出帶有比例的刻度。應用此曲線圖時，必須記住，出力的變化應根據屬於同一曲線上的各點，即同一壓力 P_k 值來決定。

II. 凝汽器的特性曲線

這些曲線的目的就是要求出冷却水的進口溫度，凝汽器的負荷 D_k (監視段處的壓力如爲 P_k 時) 及冷却水量 W 對凝汽器中壓力 P_2 的影響。

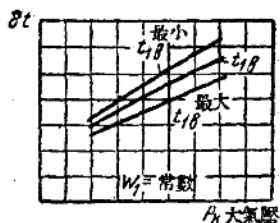


圖6 溫度差 $\Delta t = t_{12} - t_{22}$ 與冷却水的溫度 t_{12} 及監視段處壓力 P_k 的關係圖。第一種水泵使用組合法-