

蒸汽汽輪机

(上册)

陸 振 國 編 譯

科 技 卫 生 出 版 社

蒸汽汽轮机

(上册)

陸振國編譯

科技卫生出版社

內 容 提 要

全書共分上下兩冊：上册分三章，第一章首先概括地敘述了汽輪機中所需的水蒸汽熱力學、各種導葉中蒸汽的流動情形、有損失和沒有損失的汽流、能的變換、沖動式和反動式汽機輪、汽輪機中各種損失及其效率等九節。第二章為汽輪機的類別及其構造、計算程序；沖動式汽輪的計算、反動式汽輪的計算等共四節。通過上面諸章節，可以明白各種汽輪機的熱力計算過程及方法。第三章包括零件設計與計算的一部分，共分為導葉、動葉和動葉的振動三節。下冊分四、五、六三章。第四章包括第二部分的零件設計與計算，分動輪、轉筒、軸和轉子、接合器、轉子的平衡、封汽裝置、軸承、機壳、底板、油泵和凝汽設備等十一節。各節的理論設計和構造並重，若干章節中還列舉豐富的計算例題以資參考。第五章為蒸汽汽輪機的調節共有七節，對於調節的種類（節流式、汽量式、聯合式）和其裝備、部分載荷與過載荷的調節原理敘述甚詳，而轉數調速器的說明則簡而實用，末附一計算實例，以助讀者易于體會。本章最後一節介紹汽輪機的安全設備。第六章為熱、能電能並用的汽輪機，共分三節：背壓式、撤汽式以及利用廢汽的汽輪機三大類，它們的經濟性能、功率、汽量消耗與調節的方法，均有頗為詳細的說明。

本書可作為高等學校、中等技術學校的動力專業及專修科的汽輪機教材或參考書；同時，對於電廠以及汽輪機廠中技術人員等，也可作為學習和參考之用。

蒸 汽 汽 輪 機 (上)

陸 振 國 編 譯

*

科技衛生出版社出版

(上海南京西路 2004 號)

上海市書刊出版業營業許可證出 093 號

中國科學院上海分院印刷廠印刷 新華書店上海發行所總經售

*

開本 787×1092 紙 1/27 印張 13 1/9 字數 257,000

(原大東、科技版共印 3,200 冊)

1958 年 12 月新 1 版 1958 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

印數 1—1,800

統一書號：15119·371

定價：(10) 2.00 元

前 言

正當我國大規模展開社會主義建設的今天，作為重工業中的先驅部門的動力工業，已成為國家所最迫切需要的一個工業部門了；而汽輪機又是動力工業的基礎，因此發展祖國的汽輪機製造和設計工業已成為刻不容緩的事了。鑒於這種情況，編者就根據了蘇聯的先進經驗以及在教學中的一些體會，彙編而成此書。本書主要闡明汽輪機的原理、零件設計和構造，並重點地介紹熱電兩出式汽輪機的一般必需知識。希望通過本書，能把將我所知道的一些知識有系統地介紹給祖國汽輪機的建設者——專業學生、技術人員和工程師們。同時也使我在這偉大的社會主義建設中能更多地貢獻自己的一分力量。本書的內容，主要係參考下列書籍而編譯：

Zietemann, Berechnung und Konstruktion der Dampfturbinen 1930.

М. И. Яновский, Конструирование и расчет на прочность Деталей паровых турбин 1947.

И. И. Кириллов и С. А. Кантор, теория и конструкции паровых турбин 1947.

Stodola, Dampf- und Gasturbinen 1924.

Schüle, Technische Thermodynamik 1930.

Kraft, Die neuzeitlichen Dampfturbinen 1954.

С. М. Лосев, Паровые Турбины 1954.

Dietzel, Dampfturbinen 1950.

А. Н. Сверчков, Ремонт и наладка паровых турбин 1951.

E. Schmidt, Einführung in die technische Thermodynamik
1944.

由於編者才疏學淺，雖經多次整理，錯誤一定仍然難免，務請讀者隨時批評和指正。

符 號 說 明

A	$\frac{1}{427}$, 大卡/公斤公尺	Kcal/kg, 大卡/公斤
a	距離, 公分、公厘	k 係數, 不名數
at	氣壓, 公斤/平方公分	面壓力, 公斤/平方公分
ata	絕對氣壓, 公斤/平方公分	L 功率, 公斤公尺/公斤秒
b	寬度, 公厘	長度, 公分
C	離心力, 公斤	l 長度或高度, 公尺、公分、公厘
	常數, 不名數	$\ln$ 以 e 爲底的自然對數,
c	速度或絕對速度, 公尺/秒	$\lg$ 以 10 爲底的對數,
D	汽耗量, 公斤/馬力小時	M 質量, 公斤平方秒/公尺
	直徑, 公尺、公分、公厘	M_c 彎曲力矩, 公斤公尺
d	直徑, 公分、公厘	M_t 扭轉力矩, 公斤公尺
E	彈性係數 $= \frac{1}{\alpha}$, 公斤/平方公分	N_e 有效功率, 馬力或瓩
	節省熱量, 大卡/公斤	N_i 內功率, 馬力或瓩
e	2.71828, 不名數	n 轉數, 轉/分
	距離或偏心, 公厘	P 壓力, 公斤/平方公尺
F	面積, 平方公尺或公分	力, 公斤
	彈簧應力, 公斤	PS 馬力, 公斤公尺/秒
f	頻率或振動次數, 次/秒	p 壓力, 公斤/平方公分
	摩擦係數, 不名數	Q 熱量, 大卡
	彈簧壓縮程, 公厘	油耗量, 立升/秒
	面積, 平方公尺或公分	q 線形負荷, 公斤/公分
G	重量, 公斤	R 阻力, 公斤
G_s	單位流量, 公斤/秒	r 半徑, 公尺、公厘
g	重力加速度, 公尺/秒 ²	S 焓, 大卡/度
H	熱降, 大卡/公斤	重心, 不名數
h	熱降, 大卡/公斤	s 間隙或距離, 公厘
	厚度或提升程, 公厘	T 絕對溫度, 度
I	慣性力矩, 公分 ⁴	自由振動的週期, 秒
i	熱焓, 大卡/公斤	t 葉距, 公厘

符 號 說 明

時間, 秒	λ 角速度, 1/秒
u 週速, 公尺/秒	係數, 不名數
v 比容, 立方公尺/公斤	μ 粘度, 公斤秒/平方公分
速度, 公尺/秒	係數, 不名數
W 截面係數(抗阻力矩), 立方公分	γ/g , 公斤平方秒/公尺 ⁴
阻力, 公斤	ν 包愛霜值, 0.3
X 巴生司係數	ξ 位移, 公分
x 蒸汽乾度, 不名數	π 3.1416, 不名數
x_1 速度比, 不名數	ρ 熱降比, 不名數
y 撓度, 公分	σ_{zul} 容許應力, 公斤/平方公分
z 葉片數, 不名數	σ_r 徑向應力, 公斤/平方公分
α 膨脹度 = $\frac{1}{E}$, 平方公分/公斤	σ_t 切線向應力, 公斤/平方公分
α, β 角度, 度	σ_z 拉引力, 公斤/平方公分
係數, 不名數	τ 狹窄率, 不名數
γ 比重, 公斤/立方公尺	剪應力, 公斤/平方公分
角度, 度	φ 角度, 度
δ 角度, 度	噴管速度係數, 不名數
不平均率, 不名數	π 相對偏心, 不名數
間隙或厚度, 公厘	ψ 動葉速度係數, 不名數
ε 進汽率, 不名數	相對間隙, 不名數
延伸度, 不名數	ω 角速度, 1/秒
ζ 係數, 不名數	Φ_s, Φ_k 功能, 公斤公分
η 效率, 不名數	Φ_s, Φ_v 係數
θ D/l , 不名數	

目 錄

上 冊

前 言

符號說明

第一章 基本原理	1
(1.1) 緒言	1
(1.2) 對於水蒸汽的幾種最重要的關係	1
1. 壓力、溫度和容積 2. 熱量 3. 溫熵圖 4. 水蒸汽的 各種狀態變化 5. 循環過程、功能(功本領)和熱降	
(1.3) 蒸汽在管中的流動	17
1. 在直管中的流動 2. 在彎管中的流動	
(1.4) 蒸汽從噴管的流出	25
1. 不計損失的流動 2. 具有損失的流動 3. 蒸汽從斜切 噴管中流出(導汽設備)	
(1.5) 蒸汽汽輪機內能量的變換和蒸汽的工况	56
1. 蒸汽汽輪機的主要種類 2. 衝動式汽輪機 3. 反動式 汽輪機 4. 徑流式汽輪機	
(1.6) 最適宜的周速抑低方法	82
1. 蒸汽汽輪機的分類 2. 速度級 3. 壓力級	
(1.7) 蒸汽汽輪機的各项損失和各項效率	91
1. 噴管損失 2. 輪葉損失 3. 餘速損失(出口損失) 4. 輪阻損失和通風損失 5. 漏汽損失 6. 機械損失或空 轉損失 7. 由於冷卻和輻射所引起的損失 8. 漏汽損失	

9. 各種損失一覽：功率和效率	10. 性能數值	11. 熱量的重獲(熱量重獲係數)
(1·8) 蒸汽用量和熱量用耗	132	
(1·9) 載荷更動時，壓力分佈的變更和蒸汽用量的變動	137	
第二章 蒸汽汽輪機的計算	142	
(2·1) 構造式樣的選擇	142	
(2·2) 計算程序	143	
(2·3) 衝動式汽輪機的計算	147	
1. 單級汽輪機 2. 多級汽輪機 3. 導汽設備的計算 4. 動葉高度的計算 5. 各種計算舉例		
(2·4) 反動式汽輪機的計算	202	
1. 熱降的分配和直徑的選擇 2. 輪葉高度的計算 3. 計算舉例		
第三章 汽輪機零件設計與計算(一)	227	
(3·1) 導葉設備	227	
1. 擴張式噴管 2. 導管、導汽道 3. 中間汽封(中間軸腺) 4. 導輪或隔板的材料和其強度		
(3·2) 動葉	258	
1. 衝動式動葉 2. 反動式導葉和動葉 3. 輪葉的製造 4. 輪葉的固定設備 5. 封口設備 6. 輪葉的密封和加強措施 7. 特種輪葉(扭轉輪葉) 8. 動葉的製造材料 9. 動葉的強度計算		
(3·3) 汽輪機輪葉的振動	318	
1. 葉片振動的起因和種類 2. 雷勒方法 3. 計算舉例		

第一章 基本原理

(1.1) 緒言

蒸汽汽輪機的計算，是建立在正確的蒸汽過程變化的學識上的。所以蒸汽汽輪機的製造設計，必須在對蒸汽的各種性能，都已詳加研究闡明之後，才能逐步開展。第一座能够安全運轉的汽輪機是在 1883 年由拉伐爾設計製成的。這是一座單級的衝動式汽輪機，其轉速為 30,000 轉/分，用減速齒輪機構降低到每分 3,000 轉。在這座汽輪機上，拉伐爾應用了擴張式噴管，也就是現在稱呼的拉伐爾膨脹管或拉伐爾噴管。嗣後，巴生司製造成第一座反動式汽輪機，其轉速為 17,000 轉/分。旋由於功率大的動力機器需要量的增加，和汽輪機所用的材料問題獲得解決，遂使汽輪機製造工業，從本世紀初期起，得到了很大的發展；並且對於汽輪機效率的提高和操作安全方面，也逐漸予以注意。近年來，功率為 200,000 馬力以上的多汽缸汽輪機的製造，也已獲得成功。在我們這個時代裏，高壓的運用和各種損失的減少，都已有了顯著的進展和成就。

下面所載的各章節中，熱力學的原理是作為已經學習過的。這裏只是很扼要的解說關於汽輪機計算方面所需要的各種有關過程和圖表。

(1.2) 對於水蒸汽的幾種最重要的關係

1. 壓力、溫度和容積

各種狀態之間的變化關係是用實驗來確定的。通常以壓力 P 表示公斤/平方公尺，而以 p 表示公斤/平方公分；溫度則用攝氏溫度計 $t^{\circ}\text{C}$

表示,而絕對溫度: $T = t^{\circ} + 273^{\circ}$; 容積 v 以立方公尺/公斤表示。這些關係在高壓方面還沒有完全肯定。當壓力等於 p 時, 汽化是從相應的沸點溫度 t_s 開始的, 所以 t_s 是壓力的一個函數 $t_s = f(p)$ 。對於每個壓力, 它有固定不變的溫度。如果把相應的壓力和溫度記入座標中, 我們就得到圖 1.1 的 pt 曲線。

沸騰液體的容積以 v' 表示, 在正常的壓力下, 它的變動很小, 在高壓之下, 它的容積才迅速地增加。當汽化時, 容積在等壓和等溫下一直增加到乾蒸汽的容積 v'' 。

濕蒸汽的容積, 在同一壓力和溫度下, 比乾蒸汽為小。以 x 表示蒸汽的乾度, 以 y 表示液體的成分或濕度, 因此 $x + y = 1 (=100\%)$, 故濕蒸汽的容積為:

$$v = xv'' + yv' = xv'' + (1-x)v' = v' + x(v'' - v') \quad (1.1)$$

過熱蒸汽的溫度總比相應的沸點溫度 t_s 為高, 它的容積也較 v'' 為大。對於過熱蒸汽, 我們可採用與理想氣體相似的狀態方程式:

$$Pv = RT - BP \quad (1.2)$$

其中 B 是一個和溫度有關的係數, 它隨着溫度增加而減少。

根據茄倫大的推論, 莫利爾導出:

$$R = 47.1 \text{ 與 } B = \alpha + \beta \left(\frac{P}{100} \right)^2$$

式中係數
$$\alpha = \frac{2}{(T/100)^{\frac{10}{2}}}; \quad \beta = \frac{1.9 \cdot 10^8}{(T/100)^{14}}$$

按照林台的意見, 在 20 絕對氣壓以內, 實用上可以假定 $R = 47.1$; $B = 0.016$ 。以這些數據代入公式(1.2), 就得到過熱蒸汽的容積:

$$v = \frac{RT}{P} - 0.016 = \frac{47.1T}{P} - 0.016 \quad (1.3)$$

壓力超過 20 氣壓時, 這簡單的方程式就不夠正確。

在莫利爾圖表中，載有過熱蒸汽的容積，它適用於溫度直到 500°C 和壓力直至 225 氣壓的範圍。在 100 氣壓以內的中間數值，是用計算來加以確定的，均附在本書的後面(表 3)。

2. 熱量

一公斤水等壓地自 0°C 加熱至沸點 t_s ，所需的液體熱，假定為 q 大卡/公斤；從沸點起繼續加熱，使水完全變為蒸汽，這時所需的汽化熱假定為 r ，由此得總熱量為：

$$\lambda = q + r \text{ 大卡/公斤}$$

當壓力增大時，所需的汽化熱，逐漸減少(圖 1.1)；到達臨界點 $p = 225.5$ 氣壓和 $t = 374.2^{\circ}\text{C}$ 後，汽化熱就等於零。由於液體熱的增加，總熱量起初也隨着加多；壓力較大時(超過 25 氣壓)，因為汽化熱的減少，故總熱量又重新減小。熱量的記入，在圖 1.1 中是以溫度為函數；在圖 1.2 中，則以壓力為函數。

如果給水的溫度並不為 0°C ，而是 t_w ，此時水的熱焓為 i_w ，那麼欲使一公斤水變為全部蒸汽，則所需的熱量為：

$$\lambda_c = \lambda - i_w = \lambda - c \cdot t_w \cong \lambda - t_w \quad (1.4)$$

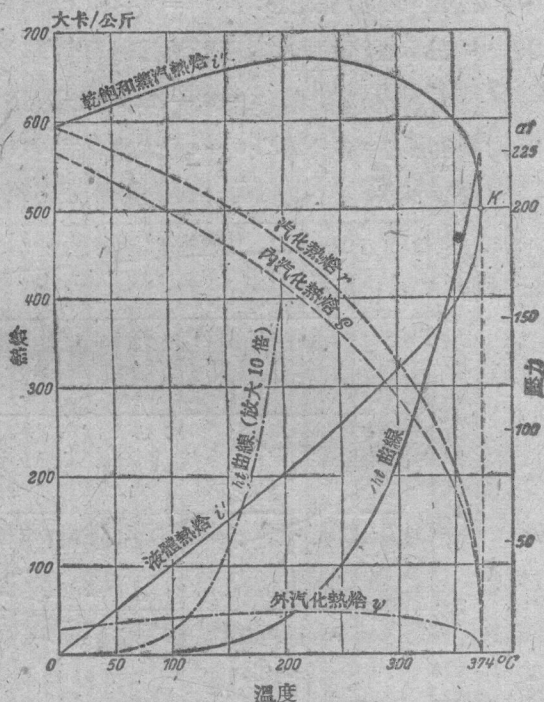


圖 1.1 飽和蒸汽熱焓，以及壓力和溫度的關係

比熱在壓力直至 5 氣壓時為 $c \approx 1$ 。

$$\text{熱焓 } i \text{ 的方程式是: } i = u + APv \quad (1.5)$$

其中 u 表示蒸汽的內能, 因此沸騰液體的熱焓有:

$$i' = u' + APv' \text{ 大卡/公斤} \quad (1.5a)$$

它比液體熱 $q = u' + AP(v' - v_0)$ 大些, 式中 v_0 表示液體在 0°C 時的容

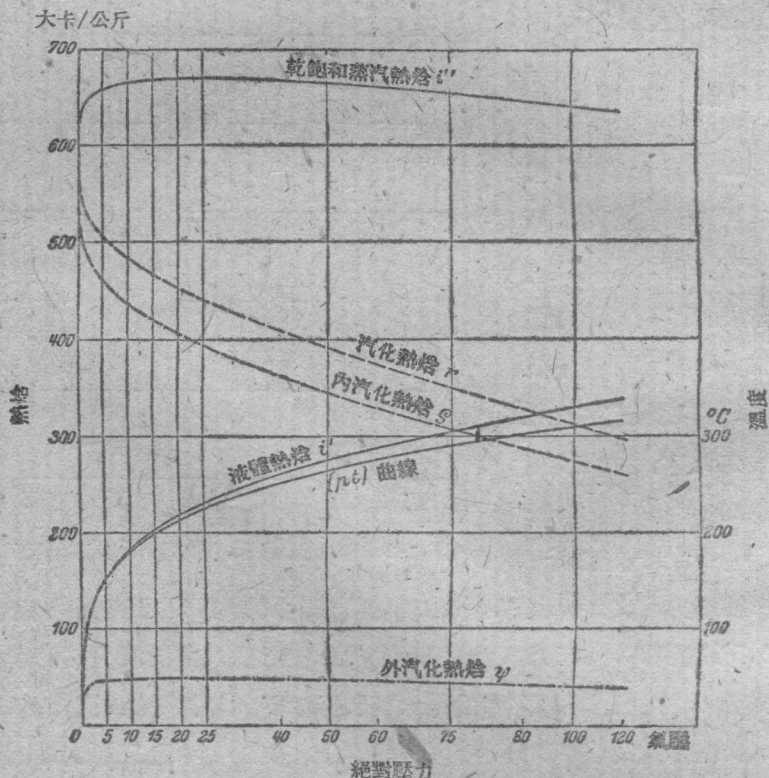


圖 1.2 飽和蒸汽的熱焓和壓力的關係

積; v' 和 v_0 的區別, 只是在壓力相當大時才值得注意。

乾飽和蒸汽的熱焓是:

$$i'' = u'' + APv'' \text{ 大卡/公斤} \quad (1.5b)$$

所以它較蒸汽的總熱量 $\lambda = u'' + AP(v'' - v')$ 稍大。

依據上面的關係，我們也可從

$$\lambda - q = u'' + AP(v'' - v') - [u' + AP(v' - v_0)]$$

$$\text{得} \quad i'' - i' = r \quad (1.6)$$

其中 $v' \approx v_0$ ，故可以約去。

含有蒸汽成分或乾度 x 的濕汽所需的汽化熱，只為 xr 大卡/公斤，因此它的熱焓是：

$$i = i' + xr = i' + x(i'' - i') \text{ 大卡/公斤} \quad (1.7)$$

溫度為 t 的過熱蒸汽需要更多的熱量，其過熱量為：

$$c_{pm}(t - t_s) \text{ 大卡/公斤} \quad (1.8)$$

所以過熱蒸汽的熱焓等於：

$$i = i' + c_{pm}(t - t_s) \text{ 大卡/公斤} \quad (1.8a)$$

因為每度每公斤所需的比熱 c_p 並不完全相等，它是隨着溫度和壓力的變化而不同的，所以式中應該採用平均比熱 c_{pm} 。從沸點 t_s 到溫度 t 的過熱蒸汽的平均比熱 c_{pm} 都載在本書後面的表 4 中。

對於各種溫度不同的熱焓以壓力為函數，示於圖 1.3 中。由圖上顯然可以看出，熱焓是隨着壓力的增加而減少的；因此，高壓蒸汽所需的熱量比低壓蒸汽要少些。這也能由圖 1.4 查出，後者表示各種不同壓力的熱焓和溫度的關係；這裏可以看出，溫度愈高，對於各種不同壓力下的熱焓差別也愈小。

3. 溫 熵 圖

(甲)溫熵圖上的面積，通常可以視作加入的或者放出的熱量 Q 。若以縱軸表示絕對溫度 T ，橫軸表示熵值 s ，則得：

$$dQ = Tds; Q = \int Tds \quad (1.9)$$

因為加入的或者放出的熱量 Q 也等於：

$$dQ = cdt = c dT = T ds$$

其中 c 表示比熱(水的比熱 $c \approx 1$)，由此就得到以 0°C 為起始點的液體

熵：
$$s' = \int_0^{t_{s'}} c \frac{dT}{T} = \int_0^{t_{s'}} \frac{dT}{T} = \ln \frac{T_s}{T_0} = \ln \frac{T_s}{273} = 2.303 \log \frac{T_s}{273} (1.10)$$

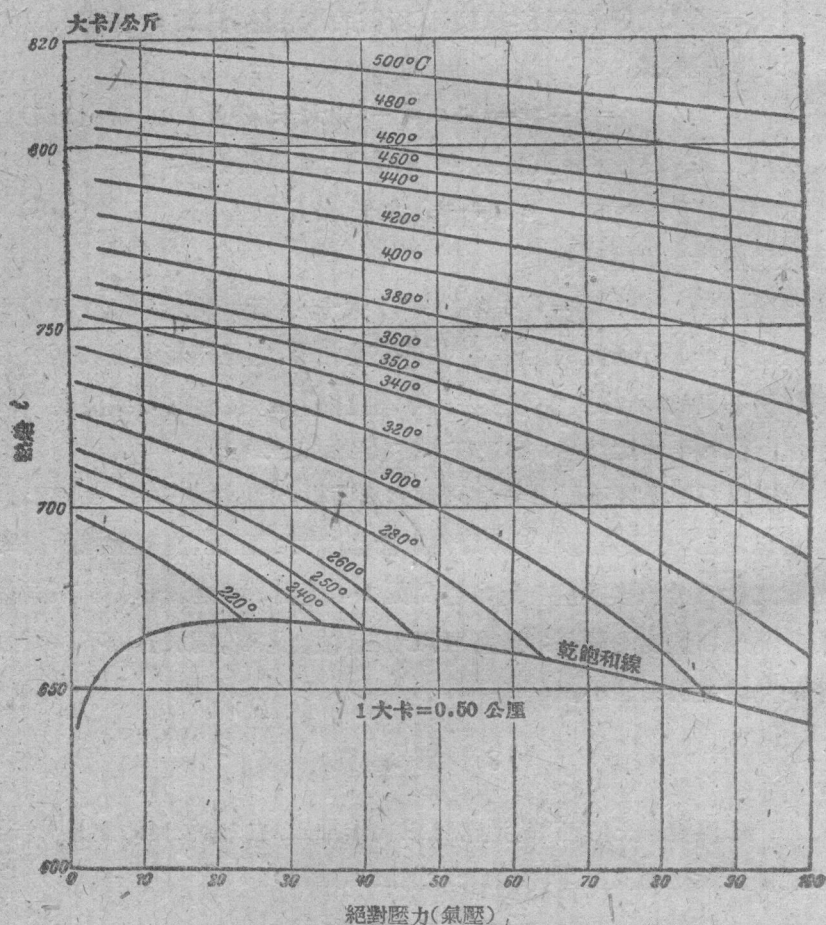


圖 1.3 過熱蒸汽熱焓和壓力的關係

由不同的壓力和不同的溫度算得的 s' 值 畫入溫熵圖中，就得一下界限線（或飽和液體線） OC （圖 1.5）。界限線之下，從 0 到存在的壓力或者到存在的溫度直至橫座標軸（絕對零線）為止的面積 $oOCC_1$ 就

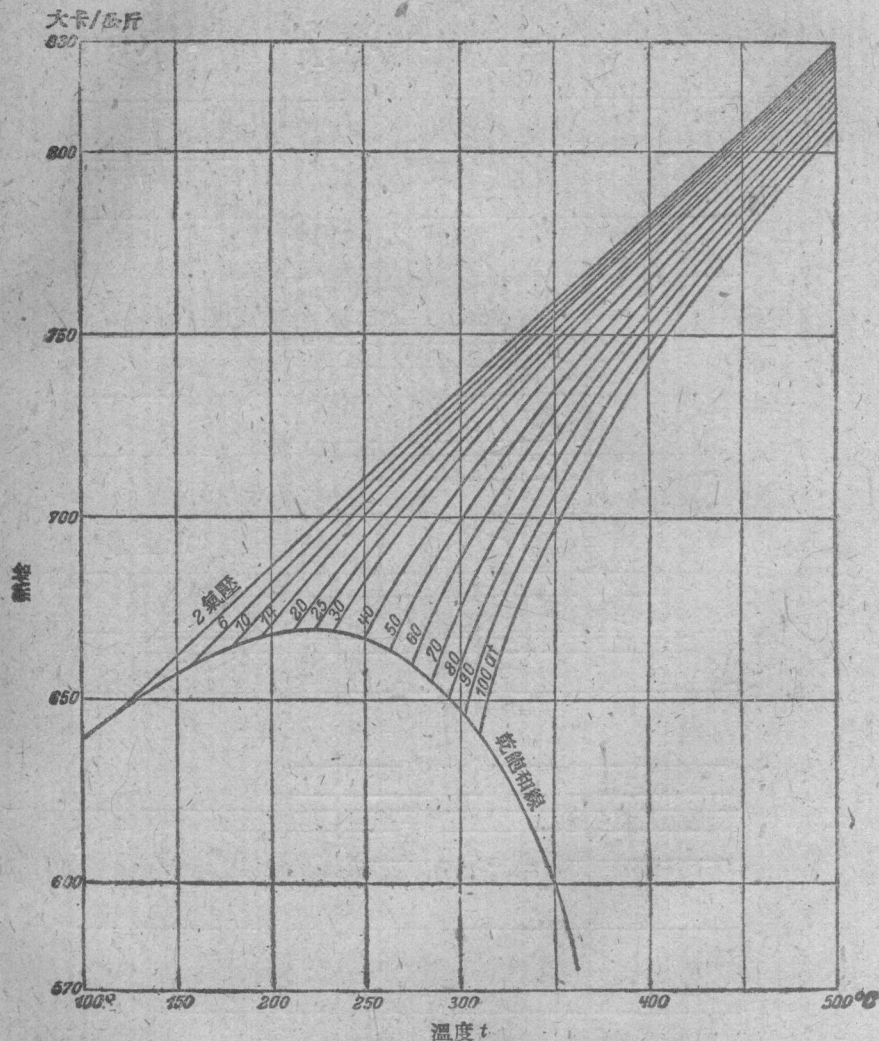


圖 1-4 過熱蒸汽的熱焓和溫度的關係

是液體熱焓 q 。當給水汽化時，因為溫度和壓力都不變動，所以汽化熱焓 r 可用長方形面積 $C_1 C B B_1$ 表示，也就是 $r = T_s (s'' - s')$ ，其中 s'' 表示乾飽和蒸汽的熵，因此得：

$$s'' - s' = \frac{r}{T_s} \quad s'' = s' + \frac{r}{T_s} \quad (1.11)$$

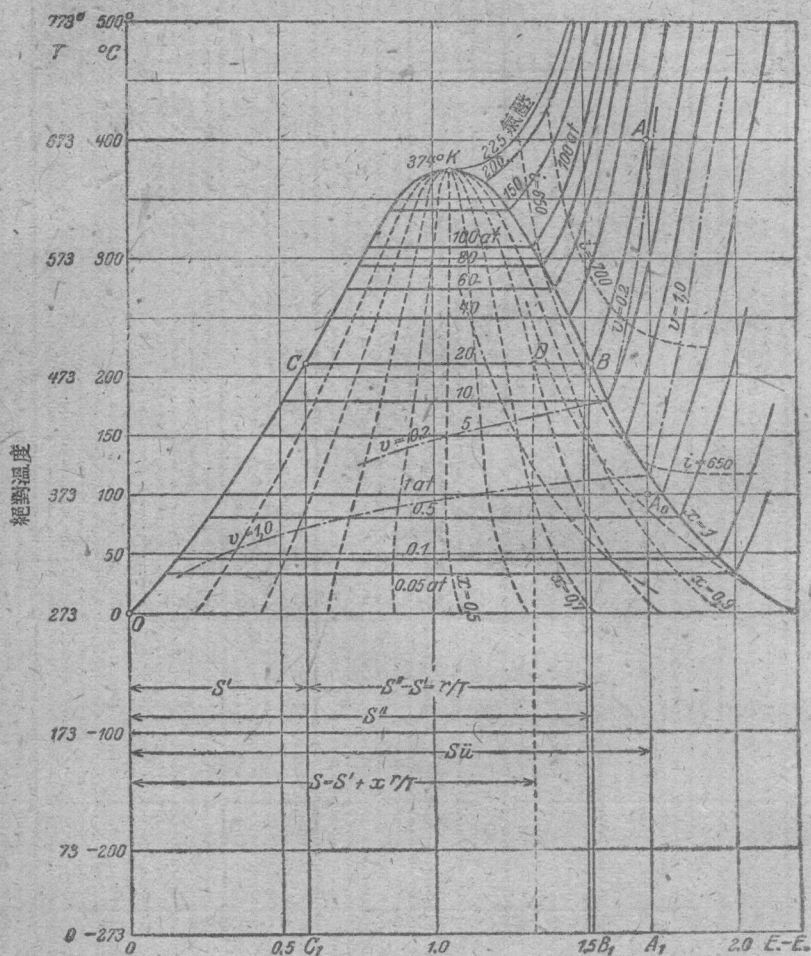


圖 1.5 溫熵圖

熵 B