

哈 尔 滨 工 业 大 学 講 义

汽 輪 机 凝 汽 装 置

特

格	里	亞	茲	諾	夫	著
邱		錫		濤		譯
徐		基		豫		校

1 9 5 8

汽 輪 机 凝 汽 装 置

格 里 亞 茲 諾 夫 著
邱 錫 濤 譯
徐 基 豫 校

江苏工业学院图书馆
藏 书 章

1 9 5 8

齊 麟 周 錫 齊 著

著 者 格 里 亞 茲 諾 夫
出 版 者 哈 爾 濱 工 業 大 學
印 刷 者 哈 爾 濱 工 業 大 學 印 刷 廠
訂 購 處 哈 爾 濱 工 業 大 學 印 刷 廠

著 者：格 里 亞 茲 諾 夫
出 版 者：哈 爾 濱 工 業 大 學
印 刷 者：哈 爾 濱 工 業 大 學 印 刷 廠
訂 購 處：哈 爾 濱 工 業 大 學 印 刷 廠

印 數 1—800 工 本 費 1.60 元
1958 年 4 月 出 版

序 言

作者曾于 1956—1957 学年第一学期在哈尔滨工业大学动力机械系講授过「凝汽裝置」这一課程。

在講授本課程时，考慮到汽輪机專業的研究生和学生已經按教学計劃学过了「傳热学」和「水泵及水輪机」的課程。因此，在本課程的講义中將不再討論「循环水泵和冷凝水泵」，並在一定程度上減少对「冷凝器中的傳热問題」的討論。在本課程的講义中同样不討論「冷凝設備的运轉」，因为在「汽輪机的安裝和运轉」的課程中已經講授了这方面的內容。

由于在汽輪机專業的教学計劃中沒有另外規定「凝汽裝置」課程的習題課和課外作業的时间，所以在本講义中採納了几个例題以供学生独立研究。

目 录

序 言

第一章 凝汽装置任务

§ 1—1 凝汽装置的功用	1
§ 1—2 背压 P_k 对汽轮功率的影响	5
§ 1—3 凝汽装置的任务	12
§ 1—4 冷凝器的型式	14
§ 1—5 凝汽装置的工作条件	19
§ 1—6 进入冷凝器的空气量	24
§ 1—7 冷凝器中分压力的分配	29
§ 1—8 冷却水量及其温度	35

第二章 表面式冷凝器

§ 2—1 表面式冷凝器的分类	37
§ 2—2 蒸汽参数沿通向抽气处的通道的变化	49
§ 2—3 传热系数的确定	50
§ 2—4 壁的热阻	55
§ 2—5 管壁对冷却水的放热系数 α_2	55
§ 2—6 蒸汽对管壁的放热系数 α_1	57
§ 2—7 假想的放热系数 α''_1 的确定	62
§ 2—8 管束放热系数 α''_1 的确定	68
§ 2—9 确定系数 α_1 的计算顺序	69
§ 2—10 冷凝器各部份热阻之间的关系	70
§ 2—11 冷凝器的平均传热系数	73
§ 2—12 冷却面积的 F_k 的确定	83
§ 2—13 冷却面积的结构设计	91

§ 2—14 管子直徑的確定.....	95
§ 2—15 冷凝器的水力阻力.....	97
§ 2—16 冷凝器的蒸汽阻力.....	99
§ 2—17 冷凝器管子的排列.....	102

第三章 冷凝器在變動工况下的工作

§ 3—1 凝汽裝置在變動工况下工作时各个數值的變化.....	105
§ 3—2 冷凝器的特性曲線.....	111

第四章 空氣 泵

§ 4—1 空氣泵的型式.....	115
§ 4—2 氣體射流的某些理論問題.....	118
§ 4—3 射汽抽氣器級的計算原理.....	124
§ 4—4 射汽抽器的計算方法.....	139
§ 4—5 抽氣器的特性曲線及其在變動工况下的工作.....	144

第五章 冷凝器另件的強度計算

§ 5—1 冷凝器管子的強度計算.....	152
§ 5—2 管板和縱向連桿的強度計算.....	155
§ 5—3 冷凝器殼體的計算.....	158

第一章 凝汽裝置的任务

§1—1 凝汽裝置的功用

所有蒸汽动力裝置都是按一定的封閉循环進行工作的。現在來研究一下热力設備的最簡單的循环，即郎肯循环。汽輪机是郎肯循环中主要設備之一（圖 1）。

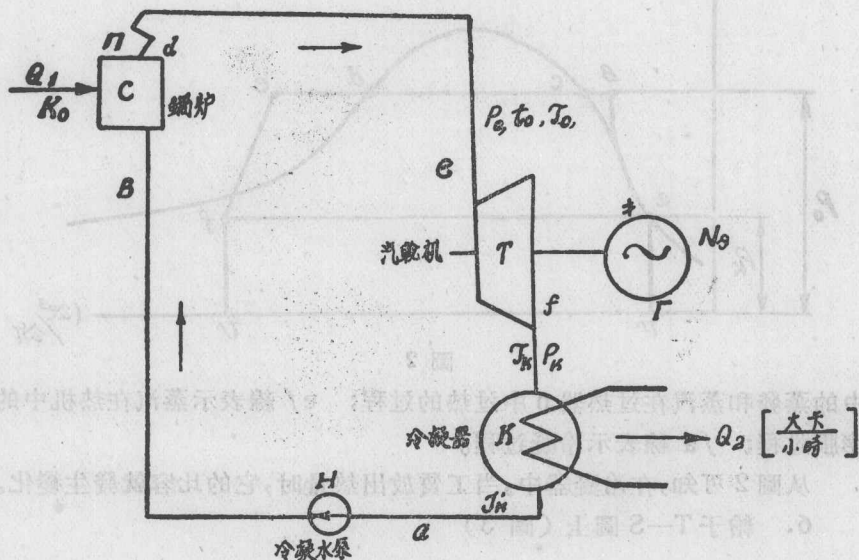


圖 1

在郎肯循环中有冷凝器 K，冷凝器起冷源作用，这就是說，在冷凝器中汽輪机排汽的热量被冷却剂帶走。如众所知，設備的絕對效率，或理想循环的热效率与初参数和終参数有关，

即：

$$\eta = \frac{J_o - J_k}{J_o - J'_k}$$

在蒸汽背压降低时，工質开始放热的温度也降低了。

这就使得热力循环的温差增加，热降也增加，因而，在其他条件相同时，循环效率提高了。

现在把郎肯循环绘在各种坐标上：

a. 绘于 $P-v$ 坐标上

圖 2 上的符号与圖 1 上的符号是互相对应的。線 ab 表示水在冷凝水泵 H 中的压缩过程；線 bc 、 cd 和 de 分别表示水的加热，水在鍋爐 K

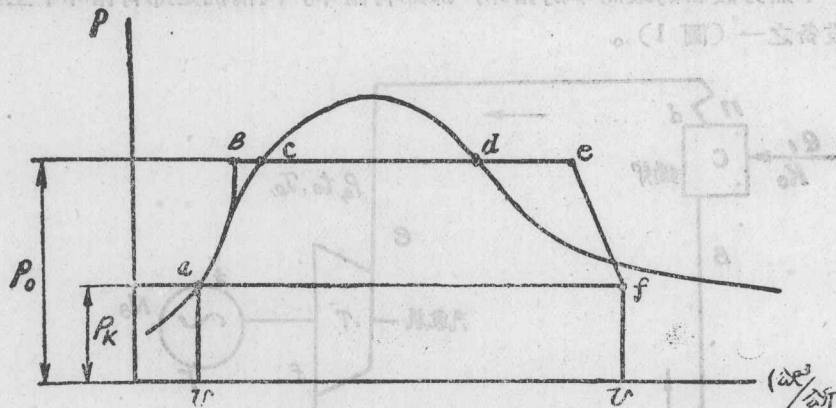


圖 2

中的蒸發和蒸汽在过热器 n 中过热的过程； ef 線表示蒸汽在热机中的膨胀过程； fa 線表示冷凝过程。

从圖 2 可知，在冷凝器中，当工質放出热量时，它的比容就發生變化。

6. 绘于 $T-S$ 圖上 (圖 3)

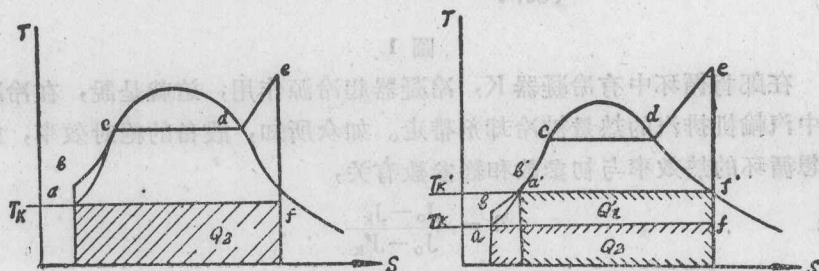


圖 3

被冷却水帶走的热量 Q_2 可达到从鍋爐中得到的热量的 50—60%。蒸汽的干度几乎是从 1 變到零。从圖 3 可知，循环的效率随温度 T_k （压力 P_k ）的降低而增加。热效率与冷凝器压力 P_k 的关系为一条曲線（圖 4）。

在作此曲線时，假定初参数 $P_0=35$ 大气压、 $t_0=435^\circ\text{C}$ ，並且蒸汽在汽輪机中的膨脹过程是絕热的。

这样，在理論上，降低冷凝器中的压力，即提高真空度，总是有利的，但是实际上，在每一个具体情况下，压力 P_k 都必須个别地予以確定。

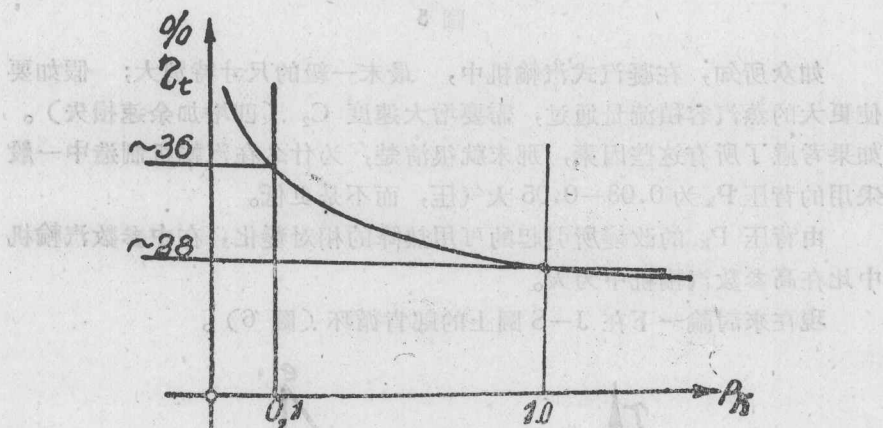


圖 4

需要这样做是因为在維持汽輪机排汽管內的真空时，需要消耗一定的能量來帶动凝汽裝置的輔助設備。所以，虽然可用热降和汽輪机的功率随压力 P_k 的降低而增加，但是消耗于冷凝設備的能量也增加了。

从圖 5 可以看出：当压力达到一定值 P'_k 时，功率 N 的增加等于零；繼續降低背压就无益了。

背压 P_k 的降低和比容 v_2 的增大，必定使排汽部分的尺寸，主要是汽輪机最末一級的尺寸顯著地增加。这一点影響着背压的选择。

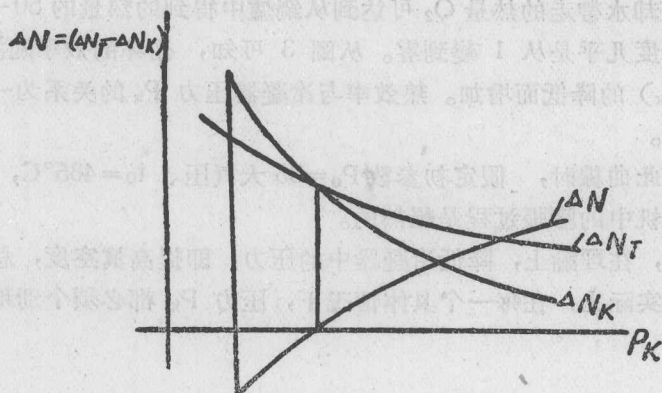


圖 5

如众所知，在凝汽式汽轮机中，最末一级的尺寸特别大；假如要使更大的蒸汽容积流量通过，需要增大速度 C_2 （即增加余速损失）。如果考虑了所有这些因素，那末就很清楚，为什么在汽轮机制造中一般采用的背压 P_K 为 0.03—0.05 大气压，而不是更低。

由背压 P_K 的改变所引起的可用热降的相对变化，在中参数汽轮机中比在高参数汽轮机中为大。

现在来讨论一下在 J—S 图上的郎肯循环（图 6）。

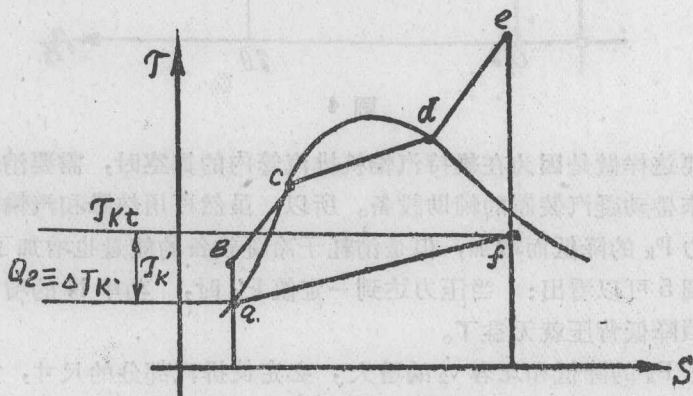


圖 6

从圖中可以看出，在冷凝器中，由于蒸汽（工質）放出了热量，它的热焓减少了。

通常認為，汽輪机裝置的 $Q_2 = J_k - J'_k = \Delta J_k$ 值可近似地取为常数。
对在高度真空中工作的汽輪机 $\Delta J_k = 510 - 530$ 大卡/公斤

§1-2 背壓 P_k 對汽輪机功率的影響

在冷凝器中維持一定的压力是有其重大意义的，因为它对汽輪机的功率 N 有影響。

現在对该影響加以分析。

汽輪机的內功率 N_i 等于：

$$N_i = \frac{G_k H_o \eta_i}{860} \text{ 瓩}$$

或

$$N_i = \frac{G_k}{860} \left(H_o \eta_i - \frac{C_2^2 A}{2g} \right)$$

式中： $H_o \eta_i$ ——沒有余速損失时，一公斤蒸汽在汽輪机中所作的功：

G_k ——蒸汽流量，公斤/小时。

汽輪机的內功率随着汽輪机出口处压力的變化而改變（假定汽輪机前的各初参数和流量不變）。

若假定流通部分的效率 η_i 不變（ η_i 變化很小，因为对凝汽式汽輪來說， P_k 的改變对各級間压力分布的影響是不大的，並且在流量不變时，各級的压力降几乎也不變），則內功率 N_i 的值僅僅是 P_k 的函数。

現在把功率的變量寫成下式：

$$\Delta N_i = \frac{G_k}{860} \left[\frac{\partial H_o \eta_i}{\partial P_k} - \frac{2A}{2g} C_2 \frac{\partial C_2}{\partial P_k} \right] \Delta P_k$$

$$\text{因 } H_o = \frac{A k}{k-1} P_o v_o \left[1 - \left(\frac{P_k}{P_o} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

$$\text{所以 } \frac{\partial H_o}{\partial P_k} = \frac{A k}{k-1} P_o v_o \left(\frac{1}{P_o} \right)^{-\frac{k-1}{k}} \frac{k-1}{k} P_k^{\frac{k-1}{k}-1} =$$

$$= -Av_0 P_0 \frac{1}{k} P_k^{-\frac{1}{k}} = -Av_0 \left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{-\frac{1}{k}}$$

对于絕热过程汽轮机中的参数变化为 $v_0 \left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{-\frac{1}{k}} = v_{kt}$ (圖 7),

因此,
$$\frac{\partial H_0}{\partial P_k} = -Av_{kto}$$

由速度三角形得:

$C_2^2 = W_2^2 + U^2 - 2W_2 U \cos \beta_2$, 对 P_k 微分, 得:

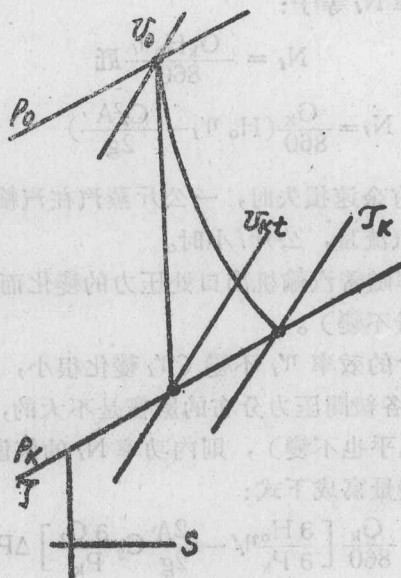


圖 7

$$2C_2 \frac{\partial C_2}{\partial P_k} = 2W_2 \frac{\partial W_2}{\partial P_k} - 2U \cos \beta_2 \frac{\partial W_2}{\partial P_k} = 2(W_2 - U \cos \beta_2) \frac{\partial W_2}{\partial P_k}$$

在微分时, 假定角 β_2 是不变的, 这个假定在汽流未达临界速度, 或者在斜切部份中偏轉角还不大时是正确的。

根据最末一级工作叶片出口截面的連續方程式, 可以得到:

$$G'_k v_k = F W_2 \text{ 或 } W_2 = \frac{G'_k}{F} v_k$$

式中: v_k —— 当蒸汽在汽轮机内的膨胀过程为实际过程时, 汽轮机最末一级出口处的比容;

G'_k —— 流经汽轮机最末一级的蒸汽流量, 公斤/秒即: $G'_k = \frac{G_k}{3600}$

将连续方程式微分后, 得:

$$\frac{\partial W_2}{\partial P_k} = \frac{G'_k}{F} \frac{\partial v_k}{\partial P_k}$$

若代入上式, 则得:

$$2C_2 \frac{\partial C_2}{\partial P_k} = 2(W_2 - U \cos \beta_2) \frac{G'_k}{F} \frac{\partial v_k}{\partial P_k}$$

对于汽轮机中蒸汽状态变化的实际过程, 可以近似地写出:

$$v_k^n P_k = v_o^n P_o = \beta'$$

若把指数的值认作一常数, 则得:

$$\frac{\partial v_k}{\partial P_k} = -\frac{1}{n} \beta' P_k^{-\frac{1}{n}-1}$$

和
$$2C_2 \frac{\partial C_2}{\partial P_k} = -2(W_2 - U \cos \beta_2) \frac{G'_k}{F} \frac{1}{n} \beta' P_k^{-\frac{n+1}{n}}$$

若假定 $v_k = v_{kt}$, 并且考虑到 $v_k = \beta' P_k^{-\frac{1}{n}}$, 则可得:

$$\frac{\partial H_o}{\partial P_k} = -A \beta' P_k^{-\frac{1}{n}}$$

在适当地化代后, 可得求内功率增量 ΔN_i 的方程式:

$$\Delta N_i = \frac{G_k}{860} \left[-A \beta' P_k^{-\frac{1}{n}} \eta_i + \right.$$

$$\left. + \frac{A}{g} (W_2 - U \cos \beta_2) \frac{G'_k}{F} \frac{1}{n} \beta' P_k^{-\frac{1+n}{n}} \right] \Delta P_k$$

$$\text{或} \quad \frac{\Delta N_l}{G_k} = \frac{A}{860} \left[\frac{G'_k \beta'}{F g n} P_k^{-\frac{1+n}{n}} \left(\frac{G'_k}{F} \beta' P_k^{-\frac{1}{n}} - U \cos \beta_2 \right) - \beta' P_k^{-\frac{1}{n}} \eta'_l \right] \Delta P_k$$

蒸汽膨脹多變指數 n 的值处在 $1 \sim k$ 的範圍之內，因此对于过热蒸汽 $1.3 > n > 1$ 。

、为了分析簡單起見，假定 $n=1$ ，則便得更簡單的求 ΔN_l 的方程式即当 $n=1$ 时，求 $\frac{\Delta N_l}{G_k}$ 的方程式如下所示：

$$\frac{\Delta N_l}{G_k} = \frac{A}{860} \left[\frac{G'_k \beta'}{F g P_k^2} \left(\frac{G'_k}{F} \beta \frac{1}{P_k} - U \cos \beta_2 \right) - \beta \frac{\eta'_l}{P_k} \right] \Delta P_k$$

$$\text{或} \quad \frac{\Delta N_l}{G_k} = \frac{A \beta}{860} \left\{ \left[\frac{\beta}{F 3600} \frac{P_k}{G_k} - U \cos \beta_2 \right] \frac{1}{3600 F g \left(\frac{P_k}{G_k} \right)} - \eta'_l \right\} \frac{\Delta P_k}{P_k}$$

在此方程式中，系数 $\beta = P_v$ 。如果令 $\frac{P_k}{G_{k1}} = v$ (式中 $G_{k1} = \frac{G_k}{1000}$

吨/小时)，則 $\frac{\Delta P_k}{P_k}$ 將等于 $\frac{\Delta v}{v}$ 。这样，就得到求 $\frac{\Delta N_l}{G_{k1}}$ 方程式的最終

形式：

$$\frac{\Delta N_l}{G_{k1}} = 0,00273 \beta \left[\left(\frac{\beta}{3.6 F v} - U \cos \beta_2 \right) \frac{1}{3.6 F g v} - 10^4 \eta'_l \right] \frac{\Delta v}{v}$$

由方程式可知，当最末一級动叶片出口处的汽流未达臨界速度时，汽輪机功率的增量除了結構上的因素外，僅与比值 $\frac{P_k}{G_{k1}} = v$ 有关；

並且当汽輪机最末一級的流通截面是一已知定值时，功率的增量可以用通用曲線（圖 8）表示，該曲線适用于任何流入冷凝器的蒸汽流量。

圖 8 的曲線表明：当压力 P_k 降低时，在很大範圍內，功率的增量 ΔN_l 随着 P_k 的降低按直線关系變化着；到某一程度后，增量 ΔN_l 增長得較慢；当 $v = v_{\text{пред}}$ 时，功率 ΔN_l 不再增加，此时的压力 P_k 謂之冷凝

器的極限压力，或称極限真空。

現在用具体例子來研究这个原理。

例 1.

求由于汽輪机最末一級后压力 P_k 的變化所引起的功率的增量 ΔN ，

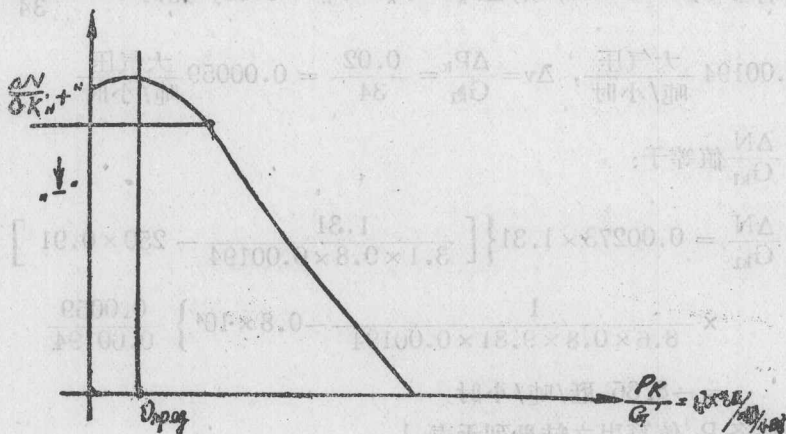


圖 8

若已知該凝汽式汽輪机在設計工况下工作时的参数为： $G_{k1}=34$ 吨/小时， $P_k=0.046$ 大气压， $v_k=28.45$ 公尺³/公斤和 $\eta'_1=0.8$ 。

汽輪机最末一級的各尺寸如下：

$$D_{ncp}=16 \text{ 公尺}, l_n=372 \text{ 公厘}, \beta_2=30^\circ.$$

汽輪机轉速 $n=3000$ 轉/分。

解：

根据上面已知的条件可以求得：

a. 最末一級动叶片的出口面積 F_n

$$F_n = \pi D_{ncp} l_n \tau \sin \beta_2 = 0.8 \text{ 公尺}^2$$

6. 圓周速度 U_n

$$U_n = \frac{\pi D_{ncp} n}{60} = 250 \text{ 公尺/秒}$$

b. 系数 β

$$\beta = P_k v_k = 1.21 \text{ 大气压} \cdot \text{公尺}^3 / \text{公尺}$$

現在任意假定一压力 P_k' 的值，則按此 P_k' 值可以求出 ΔP_k 、 v 、 Δv 值。

$$\begin{aligned} \text{若令 } P_k' = 0.066, \text{ 則 } \Delta P_k = P_k' - P_k = 0.02, \text{ 此时 } v &= \frac{0.066}{34} = \\ &= 0.00194 \frac{\text{大气压}}{\text{吨/小时}}, \Delta v = \frac{\Delta P_k}{G_{k1}} = \frac{0.02}{34} = 0.00059 \frac{\text{大气压}}{\text{吨/小时}} \end{aligned}$$

$\frac{\Delta N}{G_{k1}}$ 值等于：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta N}{G_{k1}} &= 0.00273 \times 1.31 \left\{ \left[\frac{1.31}{3.1 \times 0.8 \times 0.00194} - 250 \times 0.91 \right] \right. \\ &\quad \times \left. \frac{1}{8.6 \times 0.8 \times 9.81 \times 0.00194} - 0.8 \times 10^4 \right\} \frac{0.0059}{0.00194} \\ &= -8.35 \text{ 瓩/吨/小时} \end{aligned}$$

按各 P_k 值算出之結果列于表 1

表 1:

P_k'	ΔP_k	v	Δv	$\frac{\Delta v}{v}$	$\frac{\Delta N}{G_{k1}}$
0.046	0	0.00135	0	0	0
0.066	+0.02	0.00194	+0.00059	+0.304	-8.35
0.056	+0.01	0.00165	+0.000294	+0.178	-4.25
0.036	-0.01	0.00106	-0.000294	-0.278	+0.89
0.026	-0.02	0.00077	-9.00059	-0.767	-25.20

$\frac{\Delta N}{G_{k1}}$ 与 v 的关系曲繪在圖 9 上。

由圖 9 可知，函数 $\frac{\Delta N}{G_{k1}}$ 在 $v = v_{\text{пред}}$ ，或 $P_k = (P_k)_{\text{пред}}$ 时为最大值。

極限压力 $(P_k)_{\text{пред}}$ 是这样的压力：在該压力下，繼續降低背压而

增加的热降已經不能利用，也就是已經完全利用了汽輪机最末一級动叶片斜切部分的膨脹能力。

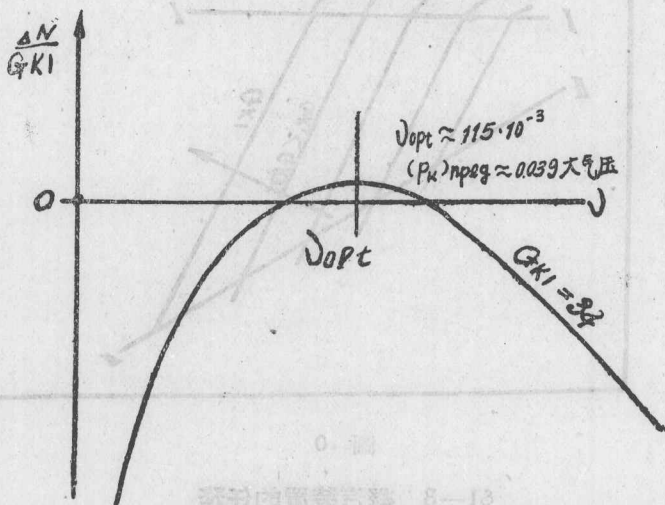


圖 9

当 $P_K > (P_K)_{\text{пред}}$ 时，蒸汽的膨脹已發生在动叶片之外。

按各种流入冷凝器的蒸汽流量可以得出类似圖 9 上曲線的曲線族，这样的曲線繪在圖 10 上。

由圖 10 的曲線可知，極限压力隨蒸汽流量 G_K 的減少而降低。实际上，由于蒸汽流量的減少汽輪机最末一級的热降也減少了，因而，更有可能來降低压力 P_K ，因为此时最末一級的斜切部分由于热降的減少而不「工作」了，或者以不大的偏轉角「工作」着，因此就增大了利用斜切部分的可能性。

由圖的 10 曲線同样可知，在線 I—I 与 II—II 範圍內， $\frac{\Delta N}{G_{K1}}$ 值的改變几乎与压力 P_K 的變化成正比。

对于大多数中压汽輪机，可以認為，若冷凝器內的压力改變 ± 0.01 大气压，則汽輪机功率的變化約为冷凝工况下名义功率的 $\pm 1\%$ 。