



燃气轮机

(苏联)B.Б.烏瓦洛夫著

中華全國科學技術普及協會出版



20811

21

本書提要

这本小冊子講的是一种新型热机——燃气輪机。它簡明通俗地向讀者介紹了燃气輪机的構造、工作原理和应用。

另外也指出了应用燃气輪机的美好远景。

总 号: 277

燃气輪机

ГАЗОВЫЕ ТУРБИНЫ

原 著 者: В. В. УВАРОВ

原 編 者: ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО ПО
РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИ-
ЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

原出版者: ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

1954

譯 者: 罗 棣 菴

校 閱 者: 庄 前 鼎

出 版 者: 中华全國科学技术普及协会

(北京市文津街3号)

北京市書刊出版業營業許可証出字第 053 号

發 行 者: 新 华 書

印 刷 者: 北 京 市 印 刷 一

(北京市西便門南大街乙1号)

开本: $31 \times 43 \frac{1}{2}$

印張: $1 \frac{1}{2}$

1956年9月第1版

字数: 19,600

1956年9月第1次印刷

印数: 15,550

統一書号: 15051·3

定价: (7) 1角

卷首語

这本小册子的目的是为了向广大讀者介紹一种新型热机——燃气輪机。关于創造燃气輪机的历史，在这里將不叙述，因为这是一个大而專門性的問題。还必須注意，在这本著作中只叙述了燃气輪机的主要問題，同时尽量是以通俗的形式写出的，这一問題的詳細而严格的叙述，讀者可从后面所推薦的参考文献中去探求。

这本小册子是为非燃气輪机制造專業方面的工作人員写的，但專家們也可能在其中得到某些兴趣。

作者深信，燃气輪机在航空上已引起了巨大的革新，近年來將在國民經濟的各个部門中得到广泛的应用，吸引广大的工程界人士來参与这个工作，將加速它的应用过程。

当然，这本薄薄的小册子，是不能叙述有关燃气輪机理論和实践的一切問題，但和我們有关的最重要的問題是叙述了的。

小册子提到了在燃气輪机制造方面的主要困难，指出了这一新型热机——燃气輪机所揭發的那些实际上的巨大远景。

著 者

序 言

燃气輪机——是一种新型热机，在燃气輪机中燃料的能量首先轉換成热能，热能的一部分轉变为机械功（如同其他所有的热力裝置一样），而余下來的一部分，一般說來这是热能的一大部分，則散失在周圍介質里面了。

燃气輪机的特点，是它的工質是燃燒的产物（与活塞式內燃机相类似），燃燒产物的势能轉变成气流的动能，这种气流的能量傳給燃气輪的工作叶片，并进而傳給燃气輪机的机軸。

直到現在，还没有能够找出直接將燃料的化学能轉变为机械能的方法，換句話說，即还没有找到燃料氧化这一化学反应的热力学上的可逆过程，燃燒是热力学上燃料氧化的不可逆反应。

如热力学所証明的那样，只有在化学反应的进行是可逆过程时（其中包括燃料的氧化反应），才能得到最大的机械功，并把它叫做定温反应的最大功。

实际上，可逆地进行燃料氧化反应的这一問題和“直接地从燃料中获得电能”的問題是一样的性質，理論热力学証明：煤的氧化反应的最大功等于它的發热量，同时还与反应的温度無关。

在現代最好的汽輪機裝置的技術鑑定試驗中^{*}，只能將煤的發熱量的 35—38% 轉變為功。直接從煤獲得機械功或者電能，這是一個巨大的至今幾乎尚未研究過的問題之一。

燃氣輪機同樣也沒有解決這個問題，但是它的採用，可以有大大地提高燃料（其中包括煤）能的利用系數的遠景。隨着燃氣輪機在航空的應用上所得到的輝煌成就，在最近 10—15 年內對於燃氣輪機的興趣就猛烈地增長起來。毫不夸大地說，燃氣輪機的建造是廣泛應用於現代航空的氣輪噴氣式和氣輪螺旋式發動機的發展的主要條件之一。

現在，在固定式裝置中和在運輸上，燃氣輪機的應用还是非常少，如果認為在航空上應用的燃氣輪機有數十萬台的話；那麼，全世界所有各國的固定式燃氣輪機（功率高於 1,000 馬力）還不超過 200 台，而燃氣輪機車卻只有數十台。

這個問題的發生並不是偶然的，怎樣來解釋這種情況呢？

為了解答這一問題，我們必須先來研究一下燃氣輪機為航空所廣泛採用的原因。

第一個原因——是燃氣輪的重量比率（單位功率所占的重量），要比活塞式內燃機小得多，可以用一些近似的數據來表明：在地面上工作的活塞式內燃機，每馬力重 0.4—0.5 公斤，而燃氣輪機則只有 0.08—0.1 公斤。隨着飛行高度的增加，這種差別將變得更大，例如：在離地 10 公里的高空中，活塞式內燃機的重量比率要比氣輪噴氣式發動機大 9—11 倍。

第二個原因——是大气層上的空氣溫度 T_0 甚低，例如在

^{*} 技術鑑定試驗——是一種術語，表示着整個試驗裝置的各部分都是處於最好的技術狀態中，同時運行和維護的人員也是第一流的。



10 公里的高空中，空气的温度等于 223°K^* 或 -50°C ，地面的空气温度一般为 288°K ，工作燃气在气輪噴管前的温度 T_3 为 $1,100^{\circ}-1,150^{\circ}\text{K}$ ，因此比值 $T_3/T_0(\tau)$ 在 10 公里以上的高空中约为 5。这个比值是决定燃气輪裝置的經濟性的主要指标之一，比值 T_3/T_0 越高，燃气輪裝置的工作就愈經濟。

第三个原因——和固定式相比較，航空发动机的時間較短（航空发动机为 200—500 小时，固定式則超过 10,000—20,000 小时），这样就能使航空燃气輪机中維持的燃气温度 T_3 比在固定式燃气輪机中为高。

在航空燃气輪发动机中 T_3 为 $1,100^{\circ}-1,150^{\circ}\text{K}$ ，而在固定式发动机中則为 $900-950^{\circ}\text{K}$ ，因此比值 T_3/T_0 。对于固定式发动机來說，比航空发动机要低得多（对于固定式为 3.2—3.5；对于航空上的为 5—5.5）。因此，现代的燃气輪发动机在高空飞行时（高于 10 公里），其效率可达 40—45%，超过了所有的其他型式的热机。

第四个原因——燃料是以流体的形态进入燃燒室內的，这样可使燃燒室的結構簡化（这一点对于固定裝置也适用）。

必須指出，对于航空上采用燃气輪机的光輝远景的深入而科学的分析，是結構学者 A. M. 留里克在 1936—1937 年所創造的。

由于上述諸原因，甚至还由于压气輪机压气机的成就，使燃气輪机在航空上得到了广泛的应用。

* 字母 T 是表示绝对温度的数值，也就是从绝对零度（在摄氏温标零度以下 273.16° 处的温度）算起的温度。绝对温标用字母 K 来表示，例如：水的沸点（在大气压力下）按照绝对温度温标來算， $T=100^{\circ}+273.16^{\circ}=373.16^{\circ}\text{K}$ 。

現在我們再研究一下，在其他領域中燃气輪机的發展看起來好像是停頓了的原因。

我之所以引用“看起來”這幾個字眼，是因為實際上在許多國家中已在進行着解決燃气輪机制造的主要問題的頑強工作。

為了提高在固定式發動机中比值 T_3/T_0 ，使它到達在航空發動机上的數值（5—5.5），則燃气輪机的溫度應為 $1,450^{\circ}$ — $1,500^{\circ}\text{K}$ ，而現在這個溫度只有 900 — 950°K 左右。

燃气輪噴管前的燃气溫度的提高，主要是受到燃气輪机各工作部件（噴管、葉片、輪鼓和擴散鈹等）的材料品質以及這些部件的冷卻情況的限制。

耐熱合金的獲得——這是一件足夠複雜的任務。因此，由於材料品質的改善而引起的溫度 T_3 的提高，是前進得很慢的，足可以這樣說，最近10年內由它而引起的溫度 T_3 的提高只有 50 到 70°C 。

如實際所示那樣，燃气輪机各部件（主要是它的葉片）的冷卻也不是一件簡單的任務，因為從一些專利的記述和某些試驗的結構看出，再進一步就沒什麼發展。

在固定式燃气輪机中，比值 T_3/T_0 不僅影響到它的經濟性，而且還在很大的程度上影響着裝置的尺寸。例如：功率為 $27,000$ 瓩裝置，當比值 $T_3/T_0=3.15$ 時，空氣預熱器（回熱器）的面積為 $10,000$ 平方公尺；把比值 T_3/T_0 提高到 5.2 時，可以使回熱器的面積減少三分之二，而將裝置的經濟性提高約 50% 。

提高 T_3/T_0 到 5.5 — 6 時，即可能建造功率為 10 萬— 20 萬瓩而其結構又比現代汽輪机大為簡化的燃气輪机。

因此，沒有將噴管前的燃氣溫度提高到 $1,300-1,600^{\circ}\text{K}$ ，是目前固定式和運輸上的燃氣輪機發展停滯的主要原因。把燃氣輪機這一主要問題引向解決的頑強工作，毫無疑義，將會使燃氣輪機在國民經濟的各個領域內得到廣泛的應用。

在燃氣輪機製造的發展中所遇到的另一個障礙是：直到現在還沒有找到在燃氣輪燃燒室內燃燒固體燃料的有效方法，也就是從燃燒產物中清除灰塵、煤渣和其他污垢物的方法。在工作氣體內含有固體顆粒會引起燃氣輪葉片的迅速磨損，甚至不能使用。在鍋爐裝置的爐內燃燒的經驗，只是在很小的程度上能在燃氣輪裝置上利用。

以上這兩個原因應認為是極其重要的，但第三個原因也具有相當大的意義：回熱器面積的效能很小，因此回熱器就笨重，而且它的維護和運行上都會有困難。所以使回熱器內的過程增強（在小的流體阻力下），也是燃氣輪機的重要任務。

如果所有三個停滯不前的原因都能解決，那麼燃氣輪機能帶給些什麼呢？

由於在氣輪機的流體力學和壓氣機方面的現代成就，由於採用了回熱、空氣壓縮的冷卻和多級燃燒，使有效熱效率可能提高到 $55-60\%$ （現在的热效率只有 $30-32\%$ ），甚至在極簡單的燃氣輪機中（在沒有冷卻器、回熱器和中間燃燒室的壓氣機中），當比值 $T_3/T_0=5.5-6.0$ 時，其效率也有 $40-45\%$ 。

應該指出，上述效率的數值，只有大型燃氣輪機（功率高於 $5,000$ 馬力）才易於達到，對於小型燃氣輪機（ $200-300$ 馬力）則較困難。

除開提高比值 T_3/T_0 外，在簡單燃氣輪機中還必須提高等

于比值 P_2/P_0 的压力升高程度 π_K 。

为了在不改变燃气温度的情况下，掌握燃气輪中固体燃料的燃燒，并且不采用热交换器，这便有可能制造燃气輪機車来代替蒸气機車，这种燃气輪機車的經濟性在最佳情况时可达20%，在运行时为13—15%；而現在的蒸气機車的經濟性在最佳情况时为7—8%，在运行时为5—6%。

燃气輪機車的应用將會帶來巨大的經濟效果，这可以用后面的原因來加以說明：第一、燃气輪機車实际上是可以利用任何品質的固体燃料來工作，其中也包括碎小的燃料（不应忘記，蒸气機車用碎小燃料工作时，其效率將小于5—6%，这是因为由烟筒帶走的燃料可能达到30—40%）；第二、燃气輪機車所消耗的燃料比蒸气機車要小40—50%，如果考虑到在苏联所开采的煤的一大部分用在蒸气機車上，那么將蒸气機車改为燃气輪機車，就能节省約等于大型电站全部消耗的煤。

这句话也可以这样說：如果用燃气輪機車來代替蒸气機車，那么，所节省下來的燃料將足以供給全苏联所有的热电站用。很容易制成功率大于8,000馬力的燃气輪机，而这种功率已大大超过了現代蒸气機車的功率。

最后，不采用昂貴的电力傳動的燃气輪的曳引性能，也不比蒸气机差（后者的曳引性能被認為是理想的）。

由于燃气輪机的应用，它的效果將是巨大的，但是要把这个可能变为现实，則还須从事許多工作。

燃气輪机——这还是工程上的“空白点”，要掌握它还必須付出巨大的科学和生产的力量。

燃气轮机的基本工作原理

燃气轮机的工作通过下图表示出来(图1a): 空气自大气中进入空气过滤器 Φ , 然后沿着管道1进入压气机 K 中, 在压气机中空气的压力提高到 p_2 , 接着压缩空气沿着管道2进入燃烧室 KC ; 同时从燃料箱 B 出来的燃料在燃料泵 H 的作用下, 沿着管道6被送入燃烧室 KC 中。

燃料的燃烧产物由燃烧室出来, 就沿着管道3进入燃气轮机 T 中, 在燃气轮机中燃烧产物对燃气轮机的叶片做功, 做功的结果是使轴7廻转, 轴7除带动压气机 K 和燃料泵 H 外, 还带动发电机 $\partial\Gamma$ (或者其他形式的需要能量装置)。

在燃烧室出口处, 燃烧产物的压力 p_3 比压缩空气的压力 p_2 要小2—3%, 但它的温度 T_3 却要比压缩空气的温度 T_2 高得多(一般为数百度)。

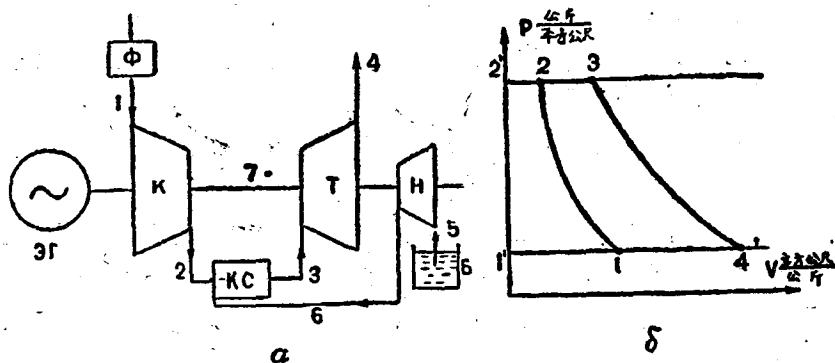


图1 简单的燃气轮机装置。a 装置图; 6 热力循环。

沿着管道4离开燃气輪的燃燒产物的压力 p_4 只略大于大气压力（一般大0.01—0.02大气压）。

虽然压力比值 p_2/p_1 和 p_3/p_4 几乎是彼此相等，但是，由燃气輪得到的功却比压气机和燃料泵中所消耗的功要大得多。这是因为在燃气輪前的燃气温度大大地高于压缩空气的温度 T_2 。

如果注意到燃气像空气一样，比容会随着压力的改变而沿着圖綫1—2—3—4变化，那么就能得到如圖1δ所示的圖形，这里是取比容作为横座标，压力作为縱座标。

从1点到2点是在压气机 K 中进行空气的压缩，从2点到3点是在燃燒室 KC 内燃燒过程的进行，因此温度急剧地增高，当然比容也急剧地增大（因为压力几乎是保持不变，所以在圖上实际上是一水平綫2—3）。在3点已經是燃气——燃料的燃燒产物，这种燃气进入燃气輪并在其中膨胀（3—4綫）作功。如前所述，压力 p_4 只是略大于大气压力，所以4—1綫也几乎是水平的。

在研究热力循环的时候（圖1δ），我們忽略了由于燃料在空气中燃燒而引起的空气化学性質的改变，也就是說，我們把空气从2到3看作是被外界所加热。实际上由于空气和燃料的化学反应，也会使它的比容发生变化，但是这种变化一般說来非常小，而在大多数的情况下是可加以忽略。如果在燃气輪中进行的所有过程中都沒有能量的损失（理想情况），或者，按照热力学上的术语来说是可逆的；那么，如圖1δ所示的圖綫外形的改变就会很小，当然，各交点（1,2,3,4）可能占据新的位置。在这种情况下，面积1—2—3—4表示通过裝置的



每公斤空气对发电机 $\mathcal{E}T$ 所作的功，面积 $1'-2'-2-1$ 是指压气机所消耗的功，而燃气轮所作的功，则用面积 $1'-2'-3-4$ 来表示。同时还必须重复一遍，所有的这些面积都是指理想机器所作的功。

整个燃气轮装置的效率 $\eta_{\Gamma T}^*$ 标志着已燃燃料的发热量中有多大一部分转变成为了机械功，它是决定于压气机的效率 η_K 、燃气轮本身的效率 η_T 以及空气温度和在喷管前燃气温度的比值 $\tau = T_3/T_0$ 。

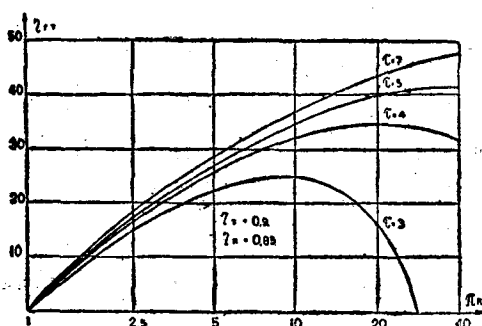


圖 2 在各种 τ 下 $\eta_{\Gamma T}$ 随 π_K 的变化而改变的图表。
的影响是多么显著。

圖 2 表示出了在各种 τ 值下， $\eta_{\Gamma T}$ 随着压气机中空气的压缩比 π_K 的改变而变化的图表（横座标是取的对数值）。

从图表上看得很清楚， τ 对于 $\eta_{\Gamma T}$

必须注意，随着 τ 的增高，效率 η_T 和 η_K 的影响便会减小；也就是燃气轮装置的工作温度 T_3 越高，则压气机和燃气轮机流体力学方面的完善程度的影响就愈小。

当燃气轮机和压气机的效率变坏时，例如由 90—85% 降

* $\eta_{\Gamma T} = \frac{L_{\Gamma T} - L_{K\Gamma}}{Q}$ 式中 $L_{\Gamma T}$ ——在燃气轮中每公斤燃气实际所作的功，
 $L_{K\Gamma}$ ——在压气机中压缩每公斤空气实际所消耗的功， $(L_{\Gamma T} - L_{K\Gamma})$ ——
这是指燃气轮装置的有效功； Q ——所消耗的热量。

到 85—80%，則当 $\tau=3$ 时，其燃料耗率增加 18%，如果燃气輪裝置于 $\tau=7$ 下工作，則燃料耗率仅增加 2%。

必須指出，只是在最近 10—15 年內，燃气輪机和压气机的效率才到达上面所說的数值。

現在，在燃气輪机和压气机的流体力学方面的完善程度已到达如此水平，以致在有关这方面的更进一步的提高只能是非常小的。实际上，如果燃气輪机的相对效率到达 90%（在个别情况甚至达 92%），那么在燃气輪机中的損失只有 8—10%，当然，要完全消除这种損失是不可能的。

因此，提高簡單燃气輪机的經濟性只剩下了一条道路，就是提高燃气的温度（也就是 τ ）和同时提高压縮空气的压力（也就是 π ）。

但是，燃气輪裝置的經濟性也可以由裝置的复杂化来提高。

帶有回热器的燃气輪机

圖 3 a 表示的是稍微复杂些的燃气輪机裝置圖。这里与圖 1 a 所示的簡單燃气輪裝置的不同处，在于它具有叫做回热器 P 的压縮空气預热器，压縮空气在那里被从燃气輪排出的燃气所加热。这种燃气輪裝置的工作，几乎和簡單燃气輪裝置一样：空气自大气中通过过滤器 Φ 而被吸入压气机 K 中，在这里被压到一定的压力，然后就沿管道 2 进入回热器 P 中。在回热器中空气被加热后，就沿管道 2' 进入燃燒室 KC ，燃料也沿着管道 6 送入燃燒室內。

在燃燒室內进行着燃燒，燃气沿着管道 3 进入燃气輪 T 中，



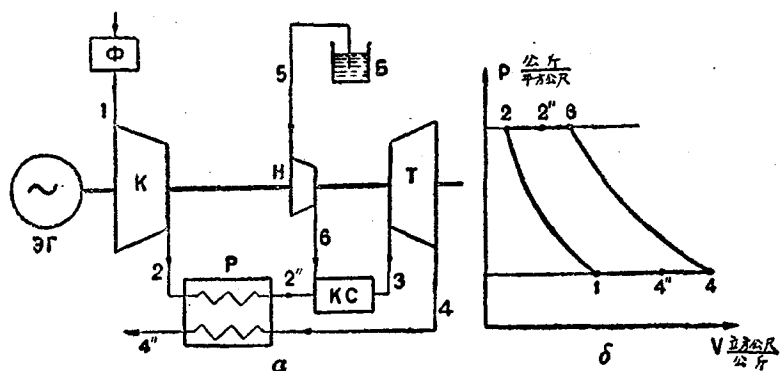


圖 3 帶有回熱器的燃氣輪裝置。а 裝置圖； б 熱力循環。

并在其中作功。燃燒產物沿着管道 4 從燃氣輪到達回熱器，在這裡使壓縮空氣加熱而它本身則被冷卻。通過管道 4'' 燃氣排入大氣中。

回熱器通常是預熱器，管內是空氣，管外是從燃氣輪排出來的燃氣。由於有了回熱器，使在燃燒室內獲得與簡單燃氣輪裝置相同溫度的燃氣所消耗的燃料便會減少。

圖 3 б 表示着在裝置不同處空氣（燃氣）的比容和壓力變化的圖形：1 點相當於空氣在大氣中的狀態，2 點——是在壓氣機內壓縮後進入管道 2 時的空氣狀態。

在通過空氣回熱器內的管道時，由於流動阻力而使空氣的壓力稍有降低，但它的溫度却有顯著的增高，因而其比容也就隨着增大。空氣的這段加熱過程相當於圖上 2—2'' 的綫段。

在燃燒室內由於燃料的燃燒，使燃氣的溫度和比容進一步增長，在這種情況下，空氣的化學變化仍可忽略，可以認為空氣是被外界所加熱的。

決定燃气輪裝置的經濟性的回熱比 σ 具有很大的意義。如果說用 T_2'' 表示空氣離開回熱器時的溫度， T_4 表示燃气離開燃气輪時的溫度， T_2 表示空氣離開壓氣機的溫度（回熱器前），那麼回熱比就是在回熱器內空氣實際上的溫度增加值（ $T_2'' - T_2$ ）與理論上可能的溫度增加值（ $T_4 - T_2$ ）的比值，也就是

$$\sigma = \frac{T_2'' - T_2}{T_4 - T_2}。$$

回熱比越大，燃气輪裝置的工作就愈經濟，但這只在某一定界限以內才正確，因為要提高空氣的溫度就必須增加回熱器的面積，也就是增加管道的長度；但是管道的長度愈長，空氣的壓力降落也就愈大。因而在氣輪前的燃气壓力 p_3 將降低，結果，燃气輪的工作也會因此而變壞。

圖4表示着在不同的 π_k 值和 τ 值下，燃气輪裝置的效率 $\eta_{\Gamma T}$ 隨回熱比 σ 而改變的關係。

從曲綫上可以看出，燃气輪裝置的效率是隨 σ 的增大而增加的，但與此同時，在大的回熱比下 π_k 就降低了。

π_k 的降低會使燃气輪的比功率 N_y 下降（比功率是指 1 公斤空氣在每小時內所發出的功率）。

如果把比功率看作是對於不同的 π_k 值和 τ 值而說的，並且用 T_0 （周圍空氣的絕對溫度）來除它，那麼就可以得到圖 5 上所示的圖表；從這個圖表可以看出： τ 值的改變將會顯著地影響到燃气輪裝置的比功率。

回熱器的相對面積 f_p （也就是回熱器的面積對燃气輪裝置所發出的功率的比值）和比功率 N_y 成反比，這就意味着得到大的比功率的情況下，相應的回熱器相對面積是小的，例如：



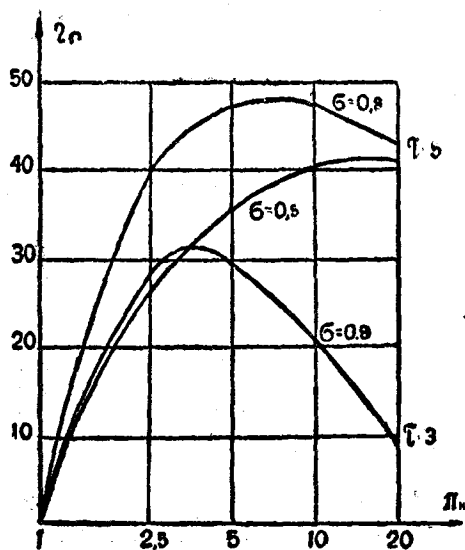


圖 4 在不同的回熱比 σ 值下, η_{IT} 隨 π_k 改變的圖表。

工作於 $\pi_k = 5$ 和 $\tau = 3$ 的燃气輪裝置的回熱器面積, 比工作於 $\pi_k = 15$ 和 $\tau = 5$ 的燃气輪裝置的回熱器面積要大 2.4 倍。進一步來分析在大的回熱比下燃气輪裝置的效率隨 π_k 而改變的曲線, 從圖 4 可看出: 在 $\sigma = 0.8$ 和 $\tau = 5$ 的數值下, η_{IT} 隨 π_k 的改變要遠比沒有回熱器的燃气輪裝置的小 (與圖 2 相比較)。當 π_k 從 2.5 改變到 20 時, 第一種情況的燃气輪裝置的效率的

範圍是 40—48%; 而第二種情況的燃气輪裝置的效率的範圍則是 17—40%。因此, 帶有回熱器的燃气輪, 當負荷改變時具有較穩定的效率。

確定最佳的回熱比, 是一項技術經濟問題; 因為應用回熱設備會使裝置昂貴, 所以要把它做得更經濟些。

值得有趣地指出: 在理想的壓氣機和燃气輪機的情況下, 當 σ 趨近於 1 時, 燃气輪裝置的效率趨近於熱力裝置效率可能的最大值, 也就是卡諾循環* 的效率, 而且 π_k 也趨近於 1。

當然, 這純粹是一種抽象的概念, 因為在這種情況下比功

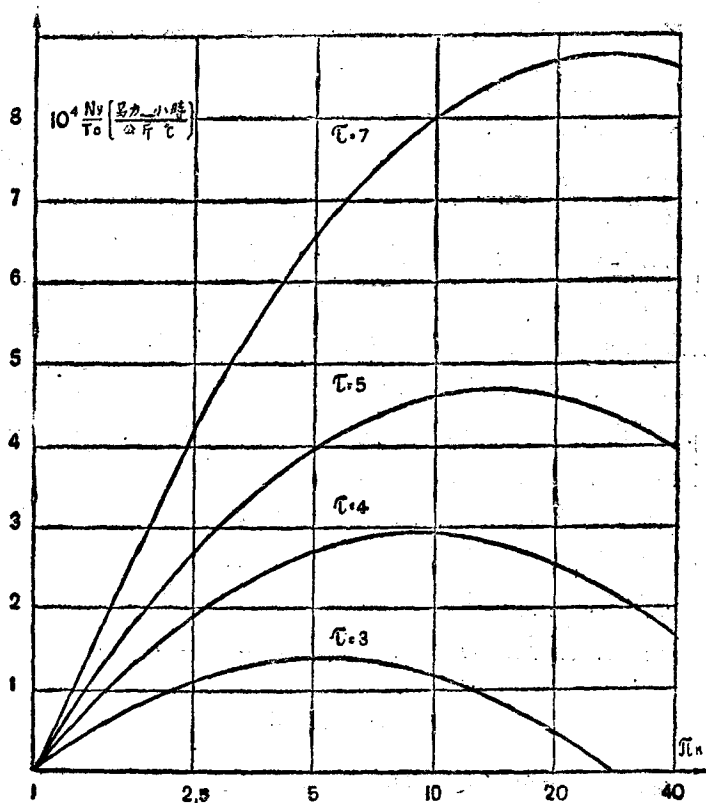


圖 5 在不同的 τ 值下 $\frac{Ny}{T_0}$ 随 π_k 改变的图表。

率趋近于零，而通过燃气轮装置的空气流量就趋向无穷大。当然，会产生这样的问题：在不很大的空气流量下能否使经济性与卡诺循环相接近呢？为了达到这一点，必须使压气机中的空气压缩过程是定温的，也就是在常温 T_0 下压缩，这样，就必须

