

高等学校教学参考书

# 燃气轮机及燃气轮机装置

上册

И. И. 基里洛夫著



机械工业出版社

高等学校教学参考书  
**燃气轮机及燃气轮机装置**  
上册

И.И.基里洛夫著

陈丹之译



机械工业出版社

1959

## 內容簡介

本書是根據蘇聯國營機械工業出版社1956年出版的基里洛夫(И. И. Кириллов)著“燃氣輪機及燃氣輪機裝置”卷一而譯出。

原書共分二卷。第一卷敘述渦輪機的一般原理以及燃氣輪機，軸流式壓氣機和離心式壓氣機的原理，計算及構造特點，其中對於渦輪機通流部內的空氣動力學問題特別重視。

第一卷的內容可以作為一門獨立的教材。兩卷合起來就構成一套設計燃氣輪機，壓氣機以及燃氣輪機裝置所必需的基本知識。

本書可以作為研究燃氣輪機，燃氣輪機裝置以及壓縮機的工業大學學生的教學參考書。書中的前面三章也可供動力學院中研讀蒸汽輪機課程時之參考。此外，本書也可供設計渦輪機以及燃氣輪機裝置的工程技術人員使用。

蘇聯 И. И. Кириллов 著 'Газовые турбины и газотурбинные установки ТОМ I' (Машгиз 1956 年第一版)

\* \* \*

著者：基里洛夫 譯者：陳丹之

NO. 2880

1959年6月第一版 1959年6月第一版第一次印刷

887×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 字數415千字 印張17<sup>6</sup>/<sub>8</sub> 0,001—5,550冊

機械工業出版社(北京阜成門外百萬莊)出版

中央民族印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可證出字第008號

定價(10)2.10元

# 目 录

<p>序..... 4</p> <p>主要符号..... 5</p> <p>概論..... 7</p> <p>第一章 渦輪机原理中的基本知識.....16</p> <p>    1. 能量与动量方程式.....16</p> <p>    2. 理想可用功与压缩功.....19</p> <p>    3. 气体在喷管和扩压器中的流动.....23</p> <p>    4. IS-圖.....33</p> <p>    5. 速度三角形.....35</p> <p>    6. 叶栅的各种几何特性.....38</p> <p>    7. 欧拉公式.....40</p> <p>    8. 儒可夫斯基定理.....43</p> <p>    9. 反动度.....44</p> <p>    10. 渦輪机級的特性系数.....46</p> <p>    11. 气流流过叶型时的流动情况.....50</p> <p>    12. 軸流式渦輪机中不可压缩流体的结构.....54</p> <p>    13. 軸流式渦輪机中可压缩流体的结构.....57</p> <p>    14. 当<math>\rho c_x = \text{常数}</math>时軸流式渦輪机級內的气流的扭轉.....62</p> <p>第二章 渦輪机內的主要机械能損失.....67</p> <p>    15. 内部能量損失及外部能量損失.....67</p> <p>    16. 渦輪机的模化.....67</p> <p>    17. 机械能損失系数与叶栅阻力系数.....72</p> <p>    18. 叶栅的空气动力学試驗方法.....78</p> <p>    19. 旋轉模型的空气动力学試驗方法.....83</p> <p>    20. 叶型阻力.....86</p> <p>    21. 端部能量損失.....95</p> <p>    22. 軸向間隙对能量損失的影响.....98</p> <p>    23. 軸流式渦輪机中的徑向流动和不均匀的速度場.....105</p> <p>    24. 余速損失.....108</p> <p>第三章 燃气輪机的原理与計算特点.....115</p> <p>    25. 輪机級的主要特性系数.....115</p> <p>    26. 具有不同反动度的輪机級的比較.....123</p> <p>    27. 工作輪后面的軸向速度的选择.....128</p> <p>    28. 單級軸流式燃气輪机的計算方法.....130</p> <p>    29. 單級輪机的热力計算示例.....135</p> <p>    30. 多級輪机.....140</p> <p>    31. 重热系数.....141</p>	<p>    32. 多級燃气輪机的計算方法.....144</p> <p>    33. 多級燃气輪机的計算示例.....148</p> <p>    34. 徑流式輪机.....156</p> <p>    35. 輪机中的燃气流量随燃气的初态参数和終态参数的不同而引起的变化.....160</p> <p>    36. 輪机的外特性曲綫.....165</p> <p>第四章 燃气輪机零件的构造与計算.....168</p> <p>    37. 冶金学上的問題以及对材料的要求.....168</p> <p>    38. 燃气輪机中所采用的材料.....174</p> <p>    39. 輪机的叶片.....181</p> <p>    40. 輪盘和轉鼓.....187</p> <p>    41. 气缸.....192</p> <p>    42. 燃气輪机零件中的温度場.....196</p> <p>    43. 燃气輪机零件的冷却.....201</p> <p>    44. 曲徑气封.....204</p> <p>第五章 軸流式压气机的原理和計算特点.....209</p> <p>    45. 軸流式压气机級的各种方案及其特性系数.....209</p> <p>    46. 計算軸流式压气机用的实验数据.....212</p> <p>    47. 具有不同反动度的压气机級的比較.....218</p> <p>    48. 气流绕叶片高度方向上各不同截面流过时的流动条件.....221</p> <p>    49. 压气机級的特性曲綫的作法.....226</p> <p>    50. 多級軸流式压气机通流部的設計.....230</p> <p>    51. 多級軸流式压气机的計算示例.....235</p> <p>    52. 軸流式压气机的通用特性曲綫.....242</p> <p>    53. 軸流式压气机的构造特点.....244</p> <p>第六章 离心式压气机的原理和計算特点.....248</p> <p>    54. 离心式压气机級的各种方案及其特性系数.....248</p> <p>    55. 有限的动叶数和摩擦的影响.....250</p> <p>    56. 工作輪进、出口处的工作条件.....252</p> <p>    57. 离心式压气机的計算示例.....259</p> <p>    58. 离心式压气机的特性曲綫.....264</p> <p>    59. 各式压气机的比較.....266</p> <p>    60. 离心式压气机的构造特点.....268</p> <p>附录 I.....271</p> <p>附录 II.....272</p> <p>附录 III.....277</p> <p>参考文献.....274</p>
---	--

## 序

在这部分两卷出版的教科書中，包含着一套为了了解燃气輪机装置的各种制造原則以及設計高效率渦輪机（后者为燃气輪机装置中之主要部件）所必需的基本知識。第一卷全部闡述渦輪机的原理与設計。

直到現在为止，各式渦輪机的原理都是在彼此沒有充分联系之下發展起来的。蒸汽輪机原理的發展尤其特殊，其中建立了許多的傳統，这些傳統都是沒有科学根据的。举例來說，在蒸汽輪机原理中長期地沒有把旋轉的汽流中的慣性力考虑进去，可是燃气輪机和渦輪压气机原理在短期內就比蒸汽輪机原理更提高了一步。

如果我們相当深入地来研究一下渦輪机的原理，就可以明白，所有这些原理都具有一个共同的科学基础。远在1754年为雷荷那特·欧拉所奠定的渦輪机理論基础以及現代空气动力学上所达到的成就都同样适用于所有各式的渦輪机。因此傳統上把渦輪机和压气机截然划分为兩門課程的作法已經沒有絲毫根据。毫无疑問，最近在各种型式的渦輪机的理論之間所显现出来的密切联系和在各种理論的發展过程中長期所积累下来的丰富經驗的總結将会使最重要的动力机械的建造获得进一步的發展。

在發展渦輪机一般原理的現阶段中，詳細地研究渦輪机內所發生的各种現象的物理本質是非常重要的。对于渦輪机制造业來說，近代空气动力学的主要成就是：通过它的方法可以揭露渦輪机中所發生的許多重要現象，并且指出改善叶片机构的途徑。因此在本書中，对于渦輪机內工作过程的研究特別注重。

一九四八年，当「燃气輪机」一書出版时，我曾經采用过某些步驟，从共同的观点上来討論輪机和軸流式压气机的原理。此后，根据这个原則开始在以加里宁命名的列宁格勒多科性工业大学中講課，后来又在別日茨基运输机器制造学院中講授，从这些講授过程中得出經驗：把这两門課程这样結合起来是完全合理的。

在本書中，这种思想要比以前出版的著作反映得更加广泛：渦輪机原理的所有基本問題都結合在前面兩章中說明，它們构成了本課程的基本內容。这两章以及卷一中的第三章所述的原理也直接适用于蒸汽輪机。在后面專門的几章中（第三、第五、第六章）給出各式輪机和压气机的計算特点。

在第四章以及其他專門几章中簡短地对渦輪机的設計制造問題加以叙述，并且对燃气輪机冶金学上問題的主要內容作了說明。后者在了解近代燃气輪机装置的一般建造問題时是必需知道的。

在編写本書时，書中的草圖以及許多計算都是由 E. Э. 基里洛娃所完成。

作者

# 主要符号

## 1 通流器的几何特征

- $u, z, r$ ——相应为圆周速度  $u$ , 轮机轴  $z$  以及半径  $r$  方向的座标轴;
- $d_1, d$ ——相应为导流机构和工作轮的平均直径;
- $l_1, l$ ——相应为导流机构和工作轮出口截面上的高度;
- $b_1, b$ ——相应为导叶和动叶的弦长;
- $t_1, t$ ——相应为导叶和动叶的节距;
- $\alpha_{0,u}, \alpha_{1,u}$ ——相应为导叶的进口角度与出口角度, 按  $u$  轴以及和叶型中綫相切的切綫之间的交角来计算;
- $\beta_{1,u}, \beta_{2,u}$ ——相应为动叶的进口角度和出口角度, 按  $u$  轴以及和叶型中綫相切的切綫之间的交角来计算;
- $\theta$ ——叶型弯曲角;
- $\delta$ ——間隙;
- $\Delta$ ——盖度;
- $S$ ——叶片的环通面积; 輪盘的側表面。

## 2 气流的速度与角度

- $c_0, c_1, c_2$ ——相应为級前, 导流机构与工作輪之間以及級后的气流绝对速度向量;
- $w_1, w_2$ ——相应为工作輪前与工作輪后气流的相对速度向量;
- $u$ ——圆周速度;
- $c_0 = 91.5 \sqrt{h'_{0n}}$ ——按照总等熵热降  $h'_{0n}$  来计算的假想速度;
- $c_c = \frac{1}{2} (c_1 + c_2)$ ——平均绝对速度向量;
- $w_c = \frac{1}{2} (w_1 + w_2)$ ——平均相对速度向量;
- $a$ ——声音的传播速度(音速);
- $M$ ——气流速度对当地音速之比;
- $\omega$ ——角速度;
- $n$ ——每分鐘的轉数;
- $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ ——相应为  $u$  轴和绝对速度向量  $c_0, c_1$  及  $c_2$  之間的气流角度<sup>⊙</sup>;
- $\beta_1, \beta_2$ ——相应为  $u$  轴和相对速度向量  $w_1$  及  $w_2$  之間的气流角度;

- $i$ ——冲角;
- $\epsilon$ ——叶栅中的气流轉折角;
- $\delta$ ——气流的偏轉角;
- $\rho\kappa$ ——运动反动度。

注: 1. 速度在  $u, z$  及  $r$  轴上的投影用相应于各該轴的第二个足注来标记。

2. 根部截面处的参数用一个撇 (') 来标记, 顶部截面处的参数用两个撇 (") 来标志。

## 3 参数

- $i$ ——焓;
- $i'$ ——等熵膨胀終点处的焓;
- $p$ ——压力;
- $t$ ——温度, °C;
- $T$ ——温度, °K;
- $\gamma$ ——重度;
- $\rho$ ——密度;
- $\nu$ ——比容;

- 記号 0——級前的参数;
- 記号 1——导流机构与工作輪之間参数;
- 記号 2——級后的参数;
- 記号  $n$ ——气体的滞止参数;
- 記号 I——渦輪机前的参数;
- 記号 II——渦輪机后的参数。

## 4 功, 热降与能量损失

- $A$ ——热功当量;
- $c_p$ ——等压比热;
- $c_v$ ——等容比热;
- $k$ ——等熵指数;
- $m = \frac{k-1}{k}, l$
- $n$ ——多变指数;
- $l_0$ ——理論功;
- $l$ ——有用功;
- $h_{0n} = i_{0n} - i_{2n}$ ——級中之可用热降;
- $h'_{0n} = i_{0n} - i'_2$ ——从級前的滞止参数膨胀到級后压力的等熵热降;

⊙ 角度  $\alpha_0, \beta_1$  及  $\beta_2$  在某些场合中是按和  $u$  轴相反的方向来计算, 此时它們的右上角就标以星号 ( $\alpha_2^*, \beta_1^*, \beta_2^*$ )。

$h_1 = i_0 - i'_1$ ——导流机构中的等熵热降;

$h_{1s} = i_{0s} - i'_1$ ——按滞止参数起算的导流机构中的等熵热降;

$h_2 = i_1 - i'_2$ ——工作轮中的等熵热降;

$\rho_r = \frac{h_2}{h_{0n}}$ ——热力反动度;

$h_\theta$ ——扩压器中的热力压头;

$\Delta h_1, \Delta h_2$ ——相应为导流机构和工作轮中的叶型损失;

$\Delta h_1$ ——端部能量损失;

$\Delta h_B$ ——余速损失;

$\Delta h_\theta$ ——扩压器中的能量损失;

$\zeta_1, \zeta_2$ ——相应为导流机构和工作轮中的能量损失系数;

$\psi, \Psi$ ——相应为导流机构和工作轮中的速度系数;

$h$ ——涡轮机级内的有效热降;

$H_{0n}$ ——整部涡轮机内从压力  $p_{1n}$  到  $p_{11n}$  的总等熵热降;

$H'_{0n}$ ——轮机内从压力  $p_{1n}$  到  $p_{11}$  的总等熵热降;

$H$ ——涡轮机内的有效热降;

$\alpha$ ——重热系数或能量消耗系数;

$\eta$ ——级或整个涡轮机的内效率; 叶栅效率;

$\eta_{noA}$ ——多变效率;

$\eta_e$ ——有效效率;

$\eta_s$ ——电效率;

$\eta_M$ ——机械效率。

## 5 流量与功率

$\mu$ ——流量系数;

$G$ ——气体的重量流量;

$Q$ ——气体的容积流量;

$N$ ——内功率;

$N_e$ ——有效功率;

$N_s$ ——电功率。

注: 平均值或相对(无因次)值在字母上面画有一条线。

其他符号在正文中特别加以解释。

## 概 論

所謂輪機是這樣的一種原動機，在它的葉片機構中，流體的勢能化為動能，而動能又在工作輪中轉變為機械能，傳給不斷旋轉着的機軸。從運動學方面來看，輪機和活塞式原動機相比，其特點是非常簡單，因為它並沒有往復直線運動的部分，而連續的旋轉運動是這種原動機的特點。因此遠在太古時代就早已有過想建造輪機的許多嘗試[54]，[75]，[84]，[85]，而且這還在活塞式原動機發明之前。但是科學知識的不足，一般技術水平的低落以及經濟條件的不够長久地阻礙了蒸汽輪機和燃氣輪機的發展，而活塞式機器則長期地被當作工業上的主要原動機使用。

遠在上世紀的八十年代，電工學方面就已經獲得了很大的進展。那時候所建成的許多電力設備需要許多巨大的高速旋轉的原動機去帶動它們。而當時的科學技術水平已經能夠解決輪機發動機中所存在的主要問題。由於經濟上的前提已經成熟而技術方面也已經有了一般的成就，因此無數的發明家就獻出了自己的勞動來解決新的原動機問題。

由於許多發明家在各方面作了很多廣泛的試驗，使得蒸汽輪機獲得了非常快的發展並且達到了很完善的程度[54]。但是在蒸汽輪機發展的同時，也發展着一種和蒸汽輪機大不相同的燃氣輪機。

圖1示有一最簡單的燃氣輪機裝置示意圖，空氣在壓氣機1中壓縮到某一壓力後，就不斷地流入燃燒室2，燃料在這裡和空氣混合進行等壓燃燒，由於燃料的燃燒，空氣的溫度增高。燃燒產物在壓力和高溫之下通往輪機3，在輪機3中氣體膨脹作功。理想壓氣機中空氣的壓縮功可以用某一比例尺在*i-s*圖上用綫段 $h_c$ 表示出來，而理想輪機中氣體的膨脹功可以用綫段 $h_r$ 來表示（圖2）。 $h_r$ 和 $h_c$ 之差

相當於燃氣輪機裝置的有效功，這個功可以用機械能的形式通過輪軸傳給發電機4的轉子（圖1）或傳給其他機器變為機械能。

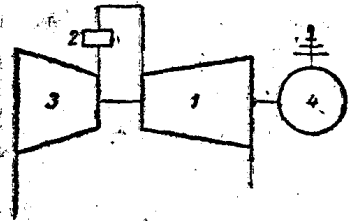


圖1 連續燃燒式燃氣輪機裝置的示意圖。

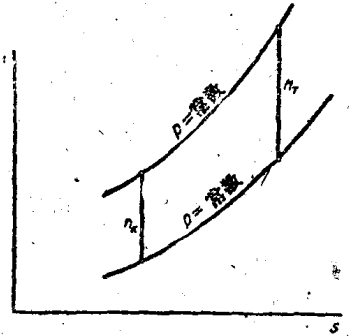


圖2 *i-s*圖上的輪機及壓氣機中的熱降。

按照上述原理來工作的原動機，我們以後就稱為連續燃燒式燃氣輪機裝置，或簡稱為一ГТУ НГ<sup>●</sup>。

隨着輪機前溫度的提高以及同時對壓力的適當提高，由於氣體的性質，膨脹功 $h_r$ 要比壓縮功 $h_c$ 大大增加，因此輪機前氣體的溫度愈高，那末從流過輪機的每公斤氣體中所獲得的有效功也就愈大，而原動機的經濟性也就愈高。為了使燃氣輪機裝置能達到很滿意的經濟指標，輪機前的氣體溫度就應當很高。

在實際渦輪機<sup>●</sup>中總有某些能量損失，這

● 在文獻中也可以找到另一通用的術語：「等壓燃燒式燃氣輪機裝置」。通常「燃氣輪機」這一術語就指的是燃氣輪機裝置。

● 「渦輪機」（Турбомашина）這一譯名中既包含着輪機也包含着壓氣機。——譯者



样一来，压缩功  $h_c$  以及膨胀功  $h_e$  和理想机器中的数值相比，前者就要增加，而后者就要减少。因为  $h_e$  和  $h_c$  要比  $h_r$  和  $h_k$  之差大好几倍，所以任何膨胀功的减少或压缩功的增大都会使它们的差值起几倍大的相对变化。因此，为了使燃气轮机装置能有效地工作，燃气轮机以及压气机中的机械能损失应当很小。

因此，为了要实现效率很高的燃气轮机装置，就必须解决两个问题：冶金学上面的问题——牵涉到耐高温合金的研究，以及空气动力学上的问题——包括轮机和压气机的通流部的改善问题。

如何解决燃气轮机装置的建造问题早就引起了许许多多的研究家和发明家的注意。远在1791年英国工程师约翰·拜勃耳就曾经建议一种具有煤气发生器、燃烧室、活塞式压气机和燃气轮机的燃气轮机装置。此后一直到十九世纪结束为止，有不少人曾经取得燃气轮机装置的专利权，但是这些装置都没有实现过。

由于蒸汽轮机的发明及其接着而来的迅速发展，人们对燃气轮机装置建造上的注意有些放松，但是许许多多发明家的思想仍旧为燃气轮机问题所吸引。

燃气轮机装置和蒸汽动力装置相比的许多特殊优点就是一个刺激因素。因为蒸汽动力装置是一种复杂的组合体，里面包含着锅炉、蒸汽原动机、冷凝器以及许多辅助机构，而上面所讲的燃气轮机装置只由几部分形式简单以及尺寸较小的部件所组成。此外，蒸汽动力装置需要用大量的冷却水，这在实际条件下常常是它的一个巨大缺点，而燃气轮机装置就不会有这些缺点，同时燃气轮机也具有轮机式原动机和活塞式原动机相比的所有优点。

1892年，俄国工程师П. Д. 古士明斯基曾经设计了一个方案，此后并且完成了一台不大的蒸汽——燃气轮机[32]，[33]，[85]。这台轮机的燃烧室（当时称作「燃气——蒸汽发生器」）是由一耐热合金制成的内筒以及钢制的外

壳所组成，两者之间放有蛇形管（图3）。水在50大气压以上的压力下经过蛇形管而流入燃烧室，同时就变成蒸汽，在燃烧室中还引入有煤油和10大气压左右的空气。

蒸汽和燃烧产物的混合物不断地通往径流式轮机的中心部分，这种轮机是由静止的和转动的轮子所组成，轮子上面则装有叶片。该装置当时是用在小型汽艇上的。

曾经制造了一个燃烧室并且试验

过，但当时碰到了温度调节上的很大困难。试验并没有做完，因为П. Д. 古士明斯基在1900年五月就逝世了。

1872年，德国工程师须托而采获得了「热空气式轮机」的专利权，此后这种轮机曾经在1900年到1904年之间制造过并且试验过。须托而采轮机是很有意思的，因为它已包含着最新式的连续燃烧式燃气轮机的所有元件。

在须托而采装置中（图4），空气是在一个10级轴流式压气机中压缩。从压气机出来的压缩空气进入加热器2，加热器管子外面充满着从燃烧室引来的炽热气体。空气经过加热后通往反动式轮机3。在轮机的旁边置有一烧无烟煤的燃气发生器4，它把燃气供给燃烧室。这部轮机是按200匹马力，2000转/分来设计的。试验的结果并没有发表，显然这些试验并没有成功。

1906年，法国工程师阿孟高和列马里在法国所建造的一台连续燃烧式轮机也颇感兴趣，这台轮机是烧煤油的。利用喷水到燃烧室中去的方法，使喷管前的燃气温度降低到560°C。轮

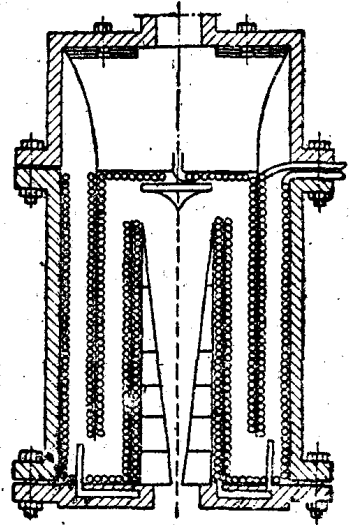


图3 П. Д. 古士明斯基的燃烧室。

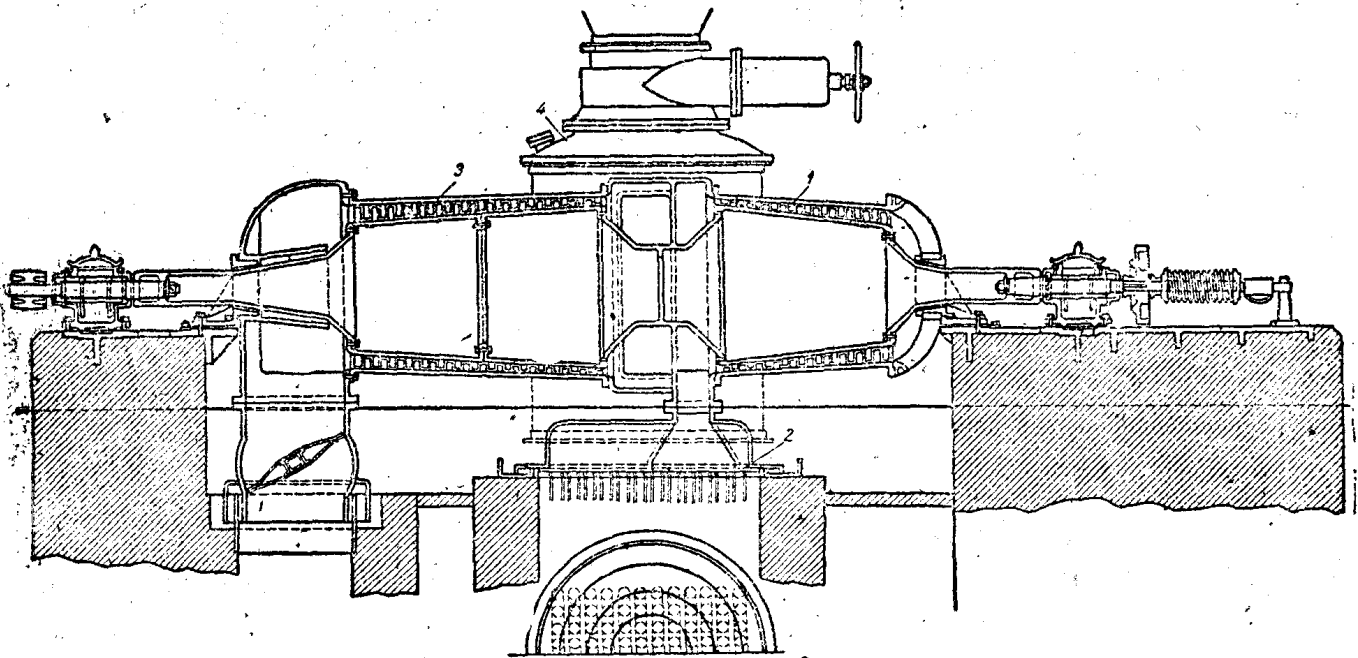


圖 4 須托而采的連續燃燒式燃气輪機裝置。

機的設計功率為 400 馬力，初壓約為 5 絕對大氣壓，轉數為 4250 轉/分，但是它所能發出的功率只比壓氣機需要的功率稍會高出一些。因此，拖動壓氣機用的能量是靠外部的能源來供給。

俄國工程師 B. B. 卡拉伏金曾經在 1906 年在法國發明並在 1908 年建造過一台斷續燃燒式燃气輪機裝置 (ГТУ ПГ)● (圖 5)。這種輪

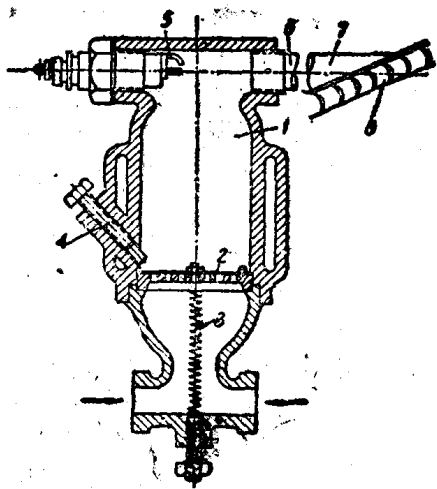


圖 5 B. B. 卡拉伏金的斷續燃燒式燃气輪機裝置。

機具有體積不大的開式燃燒室 (大約 230 立方公分左右)。空氣經過吸氣閥 2 進入燃燒室。這台輪機的燃料是採用汽油，汽油的蒸氣和空氣一道被吸到燃燒室中。然後通過火花塞把混合

物點燃。經過爆燃之後，燃燒產物流過管子 6 及噴管 7 並且在輪機 8 的工作輪中作功。燃燒室和噴管之間並沒有閥門，而噴管前的壓力 (約為 1.3~1.4 剩餘大氣壓) 是由管子 6 中流動着的气流的慣性力所造成。管子 6 做得相當長，這樣在膨脹終了時，由於運動氣柱的慣性力的作用，空氣就由閥門 2 吸入。彈簧 3 把閥門壓向閥座，螺栓 4 用以調節閥門的上升高度。沿着輪子周緣放有四個燃燒室，它們都有水冷卻。

該輪機工作輪的直徑為 15 公分，在 10000 轉/分之下能產生 1.6 匹馬力的功率。循環的周期約為 0.03 秒。機器的有效效率總共也不過 2% 左右。

如果我們把最初諸發明家 (他們的機器都不能有效地工作) 的燃气輪機裝置的種種方案和最近工作得很好的燃气輪機裝置相比較，那末就可以看出：從這些原動機的原理來看，它們之間是沒有多大區別的。那末為什麼早期的燃气輪機發明家不可能獲得進展而現在按照同樣的原理來完成燃气輪原動機時却能得到十分良好的結果呢？究竟是什麼東西過去妨礙着有

● 在文獻中也通用着其他術語：「等容燃燒式燃气輪機裝置」和「爆燃式輪機」。

效的燃气輪机的建造呢？講到焦耳循环，那在1851年就早已知道了[54]，近代的連續燃燒式燃气輪机就是按这个循环来工作的，而且热力学方面的知識在当时用来对这样的原动机进行热力計算也已經足够了。

主要的原因在于空气动力学上和冶金学上的問題一直到最近方才解决。

因为須托而采沒有实验数据可以用来計算軸流式压气机，同时在設計輪机叶片时也沒有足够的經驗，所以他不可能設計出高效率的原动机。当时在較好的場合之下，輪机的效率也許可达到70%左右，同时压气机的效率可能达到65%左右，而燃气輪机装置主要部件的这些指标只能使原动机在空轉下工作。

一直到十九世紀末叶，耐热鋼方面的問題也并不見得好些。为了在較低的輪机效率和压气机效率之下使燃气輪机装置的有效效率能够达到稍微满意的数值起見，就必須把輪机前的燃气温度提高到700~800°C或更高，而这在当时來說是不可能做到的，因为在当时机器制造业中，既沒有現成的耐热材料，又沒有对輪机零件进行过冷却試驗。

为了解决以上問題，就需要对模型和实物装置作理論上和实验上广泛的研究。

1908年德国工程师霍尔茨华脫建議了一种独特的斷續燃燒式燃气輪机装置，它的結構圖样如圖6所示。在霍尔茨华脫輪机中，燃料是由閥門2引入燃燒室，而压缩空气則由压气机

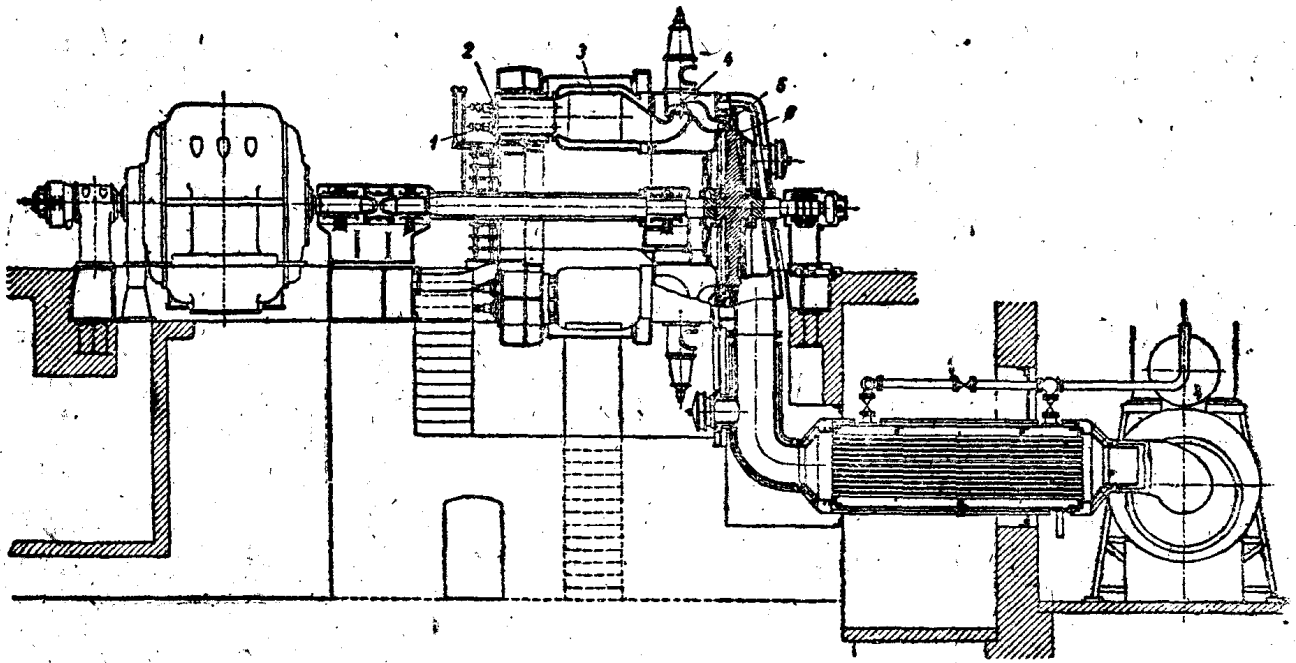


圖6 霍尔茨华脫的斷續燃燒式燃气輪机装置。

通过閥門1压入。卡拉伏金和霍尔茨华脫燃气輪机装置之間的根本区别就在于压气机和閥門的采用。当閥門关闭时，处于压力之下的燃燒室中的混合物就燃燒起来，也就是說，燃燒是在等容下进行的，正因为如此，所以在燃燒的时间中压力增大了好几倍。燃料經過燃燒之后，高温气体經過閥門4流入膨脹噴管5并且以很高的速度进入輪机的工作輪6中。燃燒室、噴管

以及輪机的工作輪都是用水来冷却。这样使得冶金学問題的解决就比較容易了。在这种装置中，离心式压气机是用蒸汽輪机来带动，蒸汽輪机用的蒸汽利用燃燒室的冷却和輪机所排出的廢气热量来产生。

在这种装置中，压气机所起的作用并不像以前所討論过的装置那样大，因为这里压缩空气的排出压力要比連續燃燒式燃气輪机装置的

来得低。

以上所討論的断續燃燒式燃气輪机装置比連續燃燒式燃气輪机装置来得貴，同时也复杂得多，因为对于它本身來說，需要有閥門机构，而对于蒸汽輪机來說，又需要有冷凝設備。

按照霍尔茨华脫的设计方案，曾經建造了几个断續燃燒式燃气輪机装置，但其中沒有一个装置曾經長期運轉过。这些装置的效率都不超过14%。

1928年瑞士布郎·白佛里公司(BBC)又重新建造具有二次脉冲过程的霍尔茨华脫燃气輪机装置。这种装置曾經在德国用高爐煤气进行过試驗。試驗的結果似乎是不錯的，因为該公司曾經对功率为5000馬力的类似装置接受过定貨，在1939年开始制造。这种輪机装置的最大經濟效率約为18~20%。

在断續式燃气輪机装置上所做的研究工作曾經对燃气輪机的整个發展过程产生良好的影响。在布郎·白佛里公司所得經驗的基础上，开始生产[韋洛克斯]型鍋爐，鍋爐中的燃燒是在压力下进行的。空气用軸流式压气机压入[韋洛克斯]鍋爐，压气机用燃气輪机来带动，而燃气輪机則利用鍋爐排出的廢气来工作。这种型式的装置到現在尚在制造着。

正当霍尔茨华脫对他的断續燃燒式燃气輪机提出改进以及各地設計師的注意力为这种型式的燃气輪机装置所吸引时，B. M. 馬可夫斯基教授清楚地看到了連續燃燒式燃气輪机装置的应用远景并且把他的精力貢獻在这种装置的發展上面[41]。馬可夫斯基曾經在哈尔科夫建立过燃气輪机實驗室，那里除了解决許多理論問題之外，还作成了采用气体燃料来工作的連續燃燒式燃气輪机装置的设计方案。1939年功率

約为1000馬力的燃气輪机(圖7)曾經在哈尔科夫汽輪發電机制造厂中造出并且装置在哥尔洛夫克的地下煤气化的矿坑里。把煤先在地下煤气化，这种想法首先是由Д. И. 門得雷也夫(1888年)以及后来的著名英国学者B. 拉姆西所提出，B. И. 列宁曾經对这种想法作过很高的评价，認為它是偉大的技术問題之一。B. M. 馬可夫斯基曾經想把这种思想加以实现。

在馬可夫斯基輪机的燃燒室中，地下煤气是靠活塞式压气机来輸送，压缩空气在3~4絕

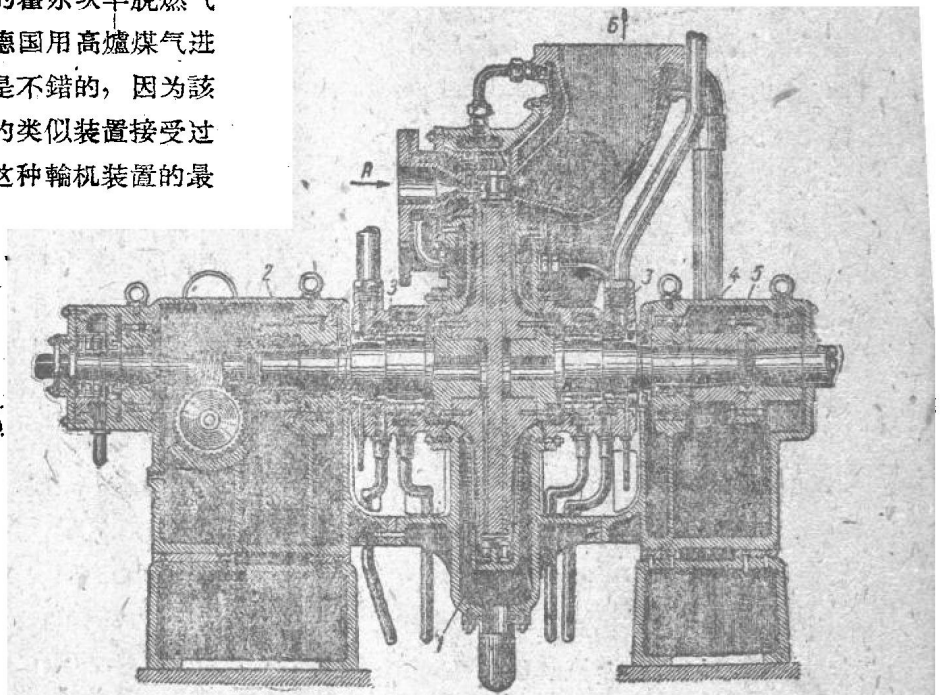


圖7 B. M. 馬可夫斯基的連續燃燒式燃气輪机装置。

A—燃气的入口；B—燃气的出口；1—用水来冷却的工作輪；2—支持一止推軸承；3—气封；4—后支持軸承；5—联轴器。

对大气压的压力下从矿坑的鼓風装置送入燃燒室。

这台輪机有一两列速度級。工作輪的轉數  $n = 4800$  轉/分，平均直徑处之圓周速度为 215 公尺/秒。叶片是焊接在輪盘上面。承受高溫的輪机零件是用水来冷却。为了这一目的，用一特殊水泵把水从輪机空心軸的一端打过去，然后再穿过輪盘中的徑向鑽孔进入絕緣上的环形空腔中。水在徑向鑽孔中的自然对流使叶片得

以冷却。冷水受热后从空心轴的一端流走。

此后，連續燃燒式燃气輪机装置获得了迅速的發展，人們开始把它們应用在石油煉制厂，而且还想把它們用作機車，輪船以及發电厂中的主要原动机。同时上面所提及的两个問題引起了設計师們的很大注意。

空气动力学問題是和輪机以及压气机都有关系的。这里要指出，燃气輪机本身效率对于整个装置耗热量的影响要比压气机效率的影响为大，因为輪机的功率大于压气机的功率，但是輪机的效率比較容易达到很高，而提高压气机的效率則比較困难。过去对压气机改善問題之所以特別重視，其原因就只能用以上所講的情况来解釋。至于輪机，那末在本世紀的二十年代对于在良好条件下工作的蒸汽輪机級組來說（这就是說，叶片很長，蒸汽处于过热状态，每級出口处的汽流动能完全加以利用），其效率已經达到86%，甚至更高些。这用比較簡單的方法已經能达到——利用相当粗糙的實驗方法所求得的叶型。

压气机問題要比輪机問題复杂得多。不久之前尚認為离心式压气机的效率不可能达到75%以上，这对燃气輪机装置的設計师來說已經不能滿足。想造出效率很高的軸流式压气机的企圖長期来都不曾实现，看起来軸流式压气机通流部的設計似乎很簡單，可以把它看作是和輪机相反的导流机构。远在二十世紀之初，柏生氏就已經做过这种嘗試，但是他並沒有成功，同时他所制造出来的軸流式压气机的效率不會超过50%，在当时來說，这要比离心式压气机的效率低得多了。

以上所談的种种失敗，其原因在于輪机中和压气机中所进行的工作过程彼此之間差別很大。这种差別是：在輪机的叶片机构中是化势能为动能，而这样的能量轉換过程要使叶道中的工質發生加速运动；可是在压气机中却正好相反，从轉子軸傳給空气的机械功化成气流的动能，然后气流的动能再化为势能，而在

这样的能量轉換过程中要使气体流过叶型时發生減速运动。

輪机的叶型构成收縮式的叶道，虽然設計师在选择各种不同的叶型时往往沒有充分的理論根据或实验資料，但是这些叶型多少总能給出良好的結果。即就目前來說，蒸汽輪机和燃气輪机的設計师也并不是总拥有充分的供設計叶型用的空气动力学上的特性数据。

当然，像这样的实际經驗如果用来設計压气机就不可能获得成功。因为气流是以減速度流过压气机的叶型，所以就必須給叶片以一定的形状，只要形状稍有偏差，就会使压气机的效率大大降低。而且在設計压气机的通流部时，絕不容許違背任何理論上的要求。可以这样說，在設計輪机通流部时，有时可以容許某些不準確之处存在，而且它們的影响也不大，但是它們在压气机中影响就很大。只有对压气机中的工作过程进行深入的研究才能得出正确的結論，并且使設計师不致走入歪路。

由于以上所說的原因，在設計軸流式压气机时应当根据研究得很透澈的理論以及丰富的实验材料，使設計师所选的通流部的尺寸和形状足以保証压气机所必需的特性。長期以来，設計师都沒有使用这些必要的資料設計效率很高的軸流式压气机。如果我們对压气机通流部的流体力学方面的系統研究能探索到压气机工作过程中的詳情細节（这从空气动力学的晚近發展来看是完全可以做到的），那末就有可能使軸流式压气机达到很高的效率。

1937年匈牙利工程师揚特拉西克在提高燃气輪机装置的效率方面最先达到了很大的成就，那时候他正在布达佩斯开始試驗功率为100馬力的單軸燃气輪机装置。这个装置是由一个十級的压气机以及轉数为16500轉/分的七級燃气輪机所組成，压气机就用这台燃气輪机来带动。空气先压缩到2.2剩余大气压，然后引往薄板式空气預热器。輪机的轉子用从压气机中抽出来的空气有效地冷却。当燃气的初温为

475°而空气的进口温度接近于零度时，装置的有效效率曾经达到21.2%。后来曾经在540°的温度之下继续进行过试验。

1940年，在涡轮机和压气机效率的提高方面也获得了很大的进展，当时著名的捷克学者斯托陀拉发表了装置在涅雪特尔的连续燃烧式燃气轮机装置的试验数据，这一装置是由布郎·白佛里公司所建造，当初温度为550°时，装置的功率约为4000千瓦左右，轮机的效率约为88%，压气机的效率约为84%，而不用回热器时的装置总效率达到18%〔124〕。从这时候开始，空气动力学上的问题得到进一步的解决。

在这同一时期中，金相学和冶金学方面也有了些进步，当时已经可以建造燃气温度为550°的固定式燃气轮机，此后还可造温度更高的燃气轮机而用不到去冷却轮机的叶片。

同时在第一次世界大战之后，燃气轮机在航空上已经得到了广泛的应用，在那里它是用来带动离心式压气机以增加内燃机的进口空气压力，使得飞机在高空飞行下的功率可以提高。这种型式的轮机都是采用从内燃机排出的温度很高的废气来工作。无论是在苏联或外国，增压用的机组过去和现在都在不断大量制造着。它们在航空事业的发展中起着重要的作用。

由于连续燃烧的固定式燃气轮机装置以及增压机组方面有了成功的运转经验，使得燃气轮机装置的应用范围得以扩大。在航空上获得了辉煌的成就：曾经建造出效率极高的涡轮喷气发动机，在这种发动机中用燃气轮机来转动压气机，而轮机所排出的燃气在相当高的压力和温度之下流入反作用喷管。因此，燃气轮机应用于飞机时已经是和反作用运动原理的使用联系在一起了。

运动的反作用原理并不是新的东西，它在古代的时候就已经知道了。K. Э. 齐柯夫斯基曾经非常完备地研究过反作用运动原理。而且很早就已经发明了具有压气机设备的各种不同型式的飞机，而作为喷气发动机的压气机设备则

用内燃机或燃气轮机来转动。但是如果要实现高效率的涡轮喷气发动机，那只有在晚近由于轮机和压气机的效率已经能达到很高的数值而在冶金学方面也有了成就之后才能做到。

在涡轮喷气发动机中，强有力的涡轮机和活塞式内燃机相比无论在重量上或者在它们的横断面积上（这对高速的飞机来说，具有决定性的意义）都显得特别优越。

为了建造涡轮喷气式发动机，就需要进行广泛的试验以改善轮机和压气机。

过去从来也不会想望过，利用蒸汽轮机通流部的原始设计方法就会保证燃气轮机获得应有的高效率。因此曾经对轮机通流部中气流的空结构特别加以注意，经过大量的试验工作之后，现在单级燃气轮机的效率（如果不考虑气流离开工作轮时的动能损失）可以达到90~92%。

同时在轴流式压气机的制造方面也获得了很大的进展。航空用轴流式压气机的工作条件特别严重，因为我们想把级数减少就需要使气流的速度很大，接近于音速。尽管如此，通过大量的实验，还是制成了相当完善的叶型，使得航空用压气机的效率达到82%以上。

由于轮机和压气机可以达到较高的效率，因此当轮机前的燃气温度约为800°时就有可能造出供飞机用的效率很高的航空发动机，但是在上述的条件之下，轮机叶片的温度约为700°，而叶片中的短期应力可以超过2000公斤/公分<sup>2</sup>，因此航空燃气轮机的材料问题仍旧是设计师们所注意的中心。

各种各色的镍——铬钢曾经用来作为燃气轮机叶片材料，但是在涡轮喷气式发动机中，这些叶片的效果并不好。因此不久就改用特制的合金来制作叶片，这种合金的含镍量达80%，并且有大量的铬，同时还应用过含有大量钴的钢以及特制的钴合金。轮机轮盘的工作条件要比叶片来得轻松，因为轮盘的温度可以通过冷

却来降低。

最近，燃气輪机的材料問題已經解决得相当成功了，在某些航空燃气輪机中，燃气的溫度已經可提高到 $900^{\circ}$ ，而且还設計出溫度更高的航空燃气輪机。

为了改善航空燃气輪机而作的大量研究对此后所有的燃气輪机的發展都起了極大的影响，但是摆在航空燃气輪机設計师們面前的各种問題和其他类型的燃气輪机相比在各方面都具有不同的性質。

对于固定式，船用式以及其他型式的燃气輪机來說，空气动力学上面的問題在本質上还是和航空燃气輪机上一样的。但是要設計一台固定式的压气机就容易得多，因为对压气机的尺寸和重量方面都没有限制，而它們却使得航空用压气机的实现非常困难并且需要在很高气流速度下把压气机的級数做得很小。根据以上对問題所作的簡單說明，供固定式燃气輪装置用的軸流式压气机的級数通常都要比航空燃气輪机装置用的压气机多得多。虽然在航空用压气机和固定式压气机的构造方面有这样的一种区别，但是对其他各式的燃气輪机装置來說，采用航空上所获得的經驗是有很大价值的。

固定式，船用式以及其他型式燃气輪机的設計方法和航空燃气輪机的設計方法有着很大的不同，在航空燃气輪發動机中，輪机的后面置有反作用噴管以利用輪机所排出来的气流的动能。正因为如此，所以在航空燃气輪机中采用很高的軸向速度，这样就有可能根据强度的要求来縮短工作叶片的長度。而固定式燃气輪机往往做成多級，燃气的軸向速度不大。

固定式以及船用燃气輪机的叶片机构和其他零件的工作条件在原理上也是和航空燃气輪机上它們的工作条件有区别的。航空燃气輪机的使用期限能接近300小时左右就已經認為很高，可是对于固定式或船用燃气輪机來說，这一使用期限需要加長到5~10万小时，这無論是对材料的要求或容許应力的大小上來說，都

起了根本的变化。因此，固定式燃气輪机的溫度要比航空用燃气輪机的选得低：大約 $650^{\circ} \sim 700^{\circ}$ ，但是也有溫度超过 $800^{\circ}$ 的燃气輪机装置。在以上所說的固定式燃气輪机的工作条件之下，要寻找适当的材料是一个很重要但也是很困难的問題。

最近，固定式燃气輪机方面的技术已經有了很大的进展。构造新穎的燃气輪机装置在許多場合下可以造得和現代蒸汽动力装置同样經濟，而在某些場合下甚至还比后者有更高的經濟指标。但是要達到很高的效率就不得不把燃气輪机装置复杂化，加用体积很大的热交换器，这样它在相当程度上就丧失了它的主要优点——簡單。

固定式燃气輪机装置發展中的另一障碍是它們必需采用液体或气体燃料。为要克服这种困难，可以采用煤气發生器或者在特殊的燃燒室中燃用

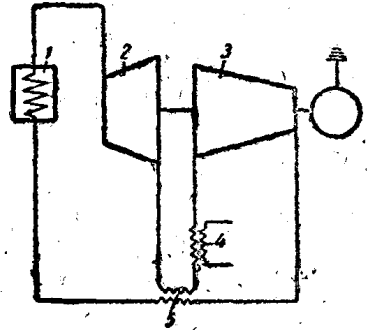


圖8 閉式燃气輪机装置簡圖。

粉状燃料的办法，或者在普通的爐子中燃用固体燃料，作为空气的加热器（圖8）。后面所說的这种系統就是所謂封閉系統，同一質量的空气就在系統中循环不停。空气先在空气輪机2前面的表面加热器1中加热，在加热器的爐膛中可以燃燒任何燃料，熾热的空气流出輪机之后就流过預热器5（称为回热器），在其中把它的部分热量交給那股流向加热器1去的空气。回热器之后置有冷却器4，在冷却器中，这股从輪机中排出的乏气再用冷却水来冷却，把它的溫度繼續降低，冷却过的空气流往压气机3，在其中进行压缩，然后在高压下重新压入加热器。

在閉式燃气輪机装置中，压气机前面的空气压力可以大大地高于大气压力，这样就有可能解决另一个問題——建造功率很大的燃气輪

机装置問題。事情是这样，在燃气輪机中，工質的容积流量起着很大的影响，它限制着輪机的功率，在封閉的系統中，循环着的空气或其他气体在所有時間中都处于高压之下，正因为如此，它的容积流量在原理上就可以任意减小而重量流量則并不改变。按照这样的办法，就可以造成功率为50000或甚至为100000仟瓦的燃气輪机装置。

当然，我們絕不能就因此而得出結論：固定式燃气輪机在最短期間內就可以代替蒸汽动力装置或內燃机。这些有过功劳的原动机，无疑在很長的期間內仍旧要在动力事业中起着卓越的作用。但是現在就可以确信，在一定的有利条件之下，燃气輪机可以和其他的固定式原动机相竞争。分析各种有利于燃气輪机使用的情况对它們的順利發展有着很重要的作用。

在許多場合下，燃气輪机和其他的原动机相比有着这样的优点，使得用它来工作已經是絕對有利了。譬如說，在有些工业部門中，为了生产上的需要要用压缩空气，而在生产过程中又可以得到熾热的气体，那末在这些部門中就没有其他的原动机可以和燃气輪机相竞争了。在苏联以及外国，燃气輪机都曾在一定場合下应用于石油煉制厂中，此时在生产过程中需要用3绝对大气压以上的空气，而結果在生产过程中却得到了温度在500°以上以及压力为3绝对大气压左右的气体。

在高爐装置中，燃气輪机也可用作带动鼓風机的原动机。这使燃气輪机所排出的部分热量有了利用的可能，并且因而使整个装置比起用蒸汽輪机来带动鼓風机的情况来有更高的效率。

燃气輪机用来作为机車头的原动机也有着美丽的远景，在机車头上面它需要和蒸汽机相竞争，而蒸汽机却具有活塞式原动机的缺点，并且效率很低。燃气輪机几乎可以不用水来工作，它的这种性能对于铁路運輸事业來說是非常珍貴的。已經造成了用燃气輪机来开动的实

驗用机車头，它們已經显示出很好的运轉品質。燃气輪机装置在这方面的更大进展是与固体燃料的应用問題相密切連系的。

燃气輪机装置的尺寸不大，并且可以不用水来工作，这对于移动的发电厂來說也是很大的优点。

我們有理由期待，燃气輪机装置还会广泛地应用于船舶上，因为对于船舶來說，燃气輪机装置在尺寸和重量上的有利指标有着很大的意义。实验用的船用燃气輪机装置已經經過了長期的試驗，并且得到了良好的結果。

最近甚至在汽車工业方面也想使用燃气輪机来作为主要原动机。

根据以上所講可以得出結論：燃气輪机装置有着希望很大的發展远景，在現代化的技术条件之下，燃气輪机正在以很快的速度改善着。而近几十年来我們在蒸汽輪机的原理和构造方面所积累的丰富知識促进了它的迅速改善。

在苏联有着極有利的进一步發展燃气輪机的基础。燃料的节约，机器的尺寸和重量的减小，劳动生产力的提高等等問題成为我們工业的注意中心。因此就产生了設計新的，比蒸汽輪机更加完善的原动机問題。

燃气輪机装置的尺寸和重量在良好的条件之下要比蒸汽輪机装置輕巧得多，同时所需要的管理人員也較少，而且当功率較小时，它的效率可以超过蒸汽动力装置的效率。因此在一定的工作条件之下，燃气輪机装置可以得到很經濟的效果。为了燃气輪机装置的順利發展，了解那些特別簡單有效地应用燃气輪机的工业部門是非常重要的。

为了解决燃气輪机的问题，必須在燃气輪机装置的热力学，渦輪机通流部的空气动力学以及高溫下的材料强度方面进行多方面的研究。而本書就是專門来研究这些問題的，其中对空气动力学問題特別加以注意，后者构成整个第一卷中的主要内容。



# 第一章 渦輪機原理中的基本知識

## 1 能量与动量方程式

渦輪機是由一个或許多个彼此串接的級所組成，气体的势能就在这些級中化为动能，然后再变成机軸的机械能。每一輪級是由导流机构 I 及工作輪 II 所組成，气体在其中膨脹（圖 9 a）。压气机的級可以看作是倒过来的輪機級，压气机級中也进行着能量变换，但变换的形式恰巧和渦輪機級中相反，因此在压气机級的叶片机构中产生压缩过程（圖 9 b）。

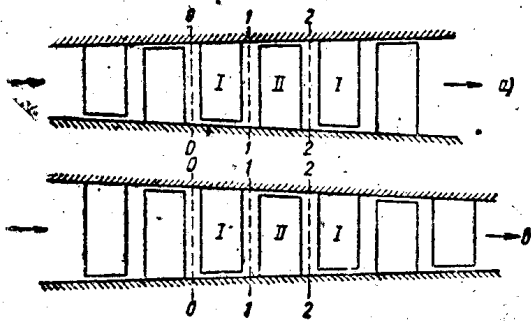


圖 9 軸流式渦輪機簡圖：  
a—輪機；b—压气机。

現在來討論一下渦輪機級內气体的一元运动。級前的截面我們用符号 0—0 来表示，导流机构和工作輪之間的截面用符号 1—1 来表示，而級后的截面則用 2—2 来表示。所有以上截面中的气流一切参数都注以和这些符号相对应的标记。

为了討論起来簡單起見，我們首先可把渦輪機級內的气体运动看作是变截面管子中的气体流动，并且在輪機級內，截面 1—1 与 2—2 之間有机械能輸出，而在压气机級內則有机械能加入。

令截面 0—0 及截面 1—1 处气体的能量各为  $E_0$  及  $E_1$ ，我們首先列出导流器前后截面处之能量方程式。如果和外界不發生热交换，則气体在渦輪機級內的流动将是絕热的，同时对

于稳定流动來說，能量守恒定律可以用下式来表示

$$E_0 = E_1 \quad (1)$$

为了方便起見，我們把气体的能量分成动能和势能两部分，而势能又可分成內能和压力能。

在  $\Delta t$  時間之內流过截面 0—0 处的气体質量的动能可以写成：

$$\frac{1}{2} m \cdot \Delta t \cdot c_0^2,$$

此处  $m$ ——每秒钟流过的气体質量； $c_0$ ——截面 0—0 处的气流速度。

在截面 0—0 处，每公斤气体的內能为

$$u_0 = c_v T_0,$$

但是根据克拉珀龙方程式

$$\frac{p_0}{\rho_0} = gRT_0,$$

所以

$$u_0 = \frac{c_v}{gR} \cdot \frac{p_0}{\rho_0},$$

式中  $p_0$ ,  $\rho_0$  及  $T_0$ ——相应为截面 0—0 处气体的压力，密度和絕对温度；

$c_v$ ——等容比热；

$R$ ——气体常数。

因为  $c_p - c_v = AR$  及  $\frac{c_p}{c_v} = k$ ,

式中  $c_p$ ——等压比热； $A$ ——热功当量，因此內能可表示成：

$$u_0 = \frac{A}{g} \frac{1}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0}.$$

內能  $u_0$  是对 1 公斤气体而言，但是在截面 0—0 中流过的气体为  $gm\Delta t$  公斤，所以其內能为

$$gm\Delta t u_0 = m\Delta t \frac{A}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0}, \quad (2)$$

气体的压力能为气体压力在推动气体質量流过 0—0 截面时所做的功  $L_{\text{压力}}$ 。令截面 0—0 处之面积为  $f_0$ ，則得  $\Delta t$  時間內压力所作的功为：

$$L_{\text{压力}} = p_0 f_0 c_0 \Delta t,$$