

高等学校交流讲义

燃气涡轮及压缩机

姚彪寰编

只限学校内部使用



中国工业出版社

5
3

高等学校交流讲义



燃气涡轮及压缩机

姚彪寰编

中国工业出版社

本讲义共分四篇、十四章。主要内容是叙述轴流式燃气涡轮、径流式燃气涡轮、透平压缩机和容积式压缩机的基本理论和计算方法，以及废气涡轮增压器和用于自由活塞压气机装置中的燃气涡轮的设计特点。此外，还对燃气涡轮装置的热循环和燃烧室以及各种用途的燃气涡轮装置的典型结构作了简单的叙述。

本讲义可作为高等工业学校内燃机专业燃气涡轮及压缩机课程的教学讲义，对于同类型专业的学生也可以作为参考书籍。

燃气涡轮及压缩机

姚彪寰 编

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可出字第110号）

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $15 \frac{1}{8}$ · 插页1 · 字数 353,000

1961年9月北京第一版·1961年9月北京第一次印刷

印数 0004-1,437 · 定价 (10-6) 1.85 元

统一书号: 15165·733 (一机·14)

前 言

本教材主要是由姚彪寰同志根据本人前两年为我专业学生授课时所编讲义整理而成，其中“活塞式压缩机”一章系由李厚生同志作了补充和改编。当时讲授时数为96学时。

燃气涡轮及压缩机本身的内容范围很广，对内燃机专业学生讲那么多内容尚值得研究。鉴于近年来国内外为了提高内燃机功率和经济性，已广泛采用了增压装置，为了使同学具备这方面的知识，本书着重地阐述了与废气涡轮增压器有关的内容。因此在使用这一教材时，各校可根据具体情况和要求，对内容作适当的增减。

本教材无论在其系统的安排、理论的完整和取材的全面等方面还有不少缺点。我们热诚地欢迎对本教材的批评和意见。

天津大学动力工程系内燃机教研室

目次

前 言	3
緒 論	6

第一篇 叶片机

第一章 燃气渦輪的概念	12
§ 1 燃气渦輪的工作原理	12
§ 2 燃气渦輪的分类	14
§ 3 燃气渦輪通流部分主要另件概述	17

第二章 軸流式叶片机叶柵中的气体流动	21
§ 4 叶柵的主要几何参数	21
§ 5 平面叶柵中的气流及叶型損失	22
§ 6 空間叶柵中的气流及端部損失	26

第三章 軸流式燃气渦輪	29
§ 7 气体在燃气渦輪噴管中的流动	29
§ 8 气体在燃气渦輪工作叶柵中的能量轉換	33
§ 9 燃气渦輪級內損失及級效率	34
§ 10 长叶片的理論与計算	44
§ 11 多級燃气渦輪的热力过程	53
§ 12 燃气渦輪的特性曲綫	57

第四章 軸流式燃气渦輪通流部分的設計方法	61
§ 13 燃气渦輪通流部分設計的主要原則	61
§ 14 軸流式燃气渦輪的計算方法	71

第五章 徑流式燃气渦輪	75
§ 15 徑流式燃气渦輪叶柵中的能量变换	76
§ 16 工作輪叶片通道中的气体流动	78
§ 17 徑流式燃气渦輪級效率及其	

与各参数間的关系	88
§ 18 徑流式燃气渦輪的計算方法	86

第六章 离心式压縮机

§ 19 离心式压縮机的結構及其工作原理	90
§ 20 离心式压縮机的主要参数	97
§ 21 空气在导向装置(叶輪进口)中的流动	100
§ 22 空气在叶輪中的流动	103
§ 23 叶輪的損失	107
§ 24 叶輪出口处空气參激的确定	109
§ 25 扩压器的理論与計算	110
§ 26 空气在輸气管中的流动	116
§ 27 离心式压縮机的特性曲綫	119
§ 28 离心式压縮机的計算方法	122

第七章 軸流式压縮机

§ 29 軸流式压縮机的結構及其工作原理	132
§ 30 軸流式压縮机級的主要参数	136
§ 31 沿叶片高度的叶型設計	141
§ 32 軸流級主要参数与叶柵空气动力系数間的关系	144
§ 33 多級軸流式压縮机	148
§ 34 軸流式压縮机計算方法的概述	151

第二篇 废气渦輪增压器及自由活塞发气机的燃气渦輪

第八章 废气渦輪增压器設計	154
§ 35 废气渦輪增压器的結構实例	154
§ 36 废气渦輪增压器的主要設計原則	157
§ 37 废气渦輪增压器主要部件的設計特点	162

第九章 自由活塞燃气渦輪	172
§ 38 自由活塞燃气渦輪的典型結構	172

§ 39 自由活塞燃气涡轮的设计特点.....	173	作原理.....	206
第三篇 燃气涡轮装置			
第十章 燃气涡轮装置的热循环.....	179	§ 49 滑片式压缩机工作过程的计算.....	211
§ 40 燃气涡轮装置的理想热循环.....	179	§ 50 罗茨式压缩机的工作过程.....	213
§ 41 燃气涡轮装置的实际热循环.....	183	§ 51 转子的构型.....	216
§ 42 结论.....	187	§ 52 罗茨式压缩机的计算方法.....	218
第十一章 燃烧室.....	191	§ 53 螺旋转子式压缩机.....	220
§ 43 概述.....	191	第十四章 活塞式压缩机.....	225
§ 44 燃烧室的工作过程.....	191	§ 54 活塞式压缩机的结构及工作原理.....	225
§ 45 燃烧室的构造.....	194	§ 55 活塞式压缩机的理想及实际工作过程.....	229
第十二章 燃气涡轮装置的概述.....	197	§ 56 多级活塞式压缩机.....	234
§ 46 封闭循环燃气涡轮机装置.....	197	§ 57 活塞式压缩机的气阀机构.....	237
§ 47 各种用途的燃气涡轮装置.....	198	§ 58 活塞式压缩机的计算方法.....	241
第四篇 转子式及活塞式压缩机		参考文献.....	
第十三章 转子式压缩机.....	206	243	
§ 48 转子式压缩机的结构及其工			

緒 論

在党的英明领导下，我国的社会主义各项建设事业正在飞跃前进。内燃机制造业和其他各项建设事业一样，也得到空前的发展。特别是1958年大跃进以来，使我国的内燃机制造业推向了新的发展阶段。

我们认为目前内燃机制造业的任务是：在大量生产和制造各种类型的内燃机以满足农业和工业的需要的同时，还要保证其经济性和可靠性。

大家知道，内燃机已有近百年的历史了；柴油机已成为现代最经济的热力发动机。但是，提高功率和改善其经济性始终是内燃机发展中一项重要的任务，在目前我国社会主义建设事业中更有其重大的意义。

近代柴油机一个很重要的发展方向是：采用增压以及与燃气涡轮联合工作，以提高其功率及经济性。

发动机的增压是采用专门的增压器来进行的，增压器将空气或可燃混合气先行压缩到增压压力 P_K 之后才输送入发动机的气缸中去。

增压器一般系由发动机直接驱动或者利用活塞式发动机的排气工作的废气涡轮来驱动。前者就是所谓机械驱动式增压（图1）；后者称为废气涡轮增压。

在机械驱动式增压中，增压器就是各种类型的空气压缩机，这些压缩机按其工作原理及结构的特征有下列各种类型：

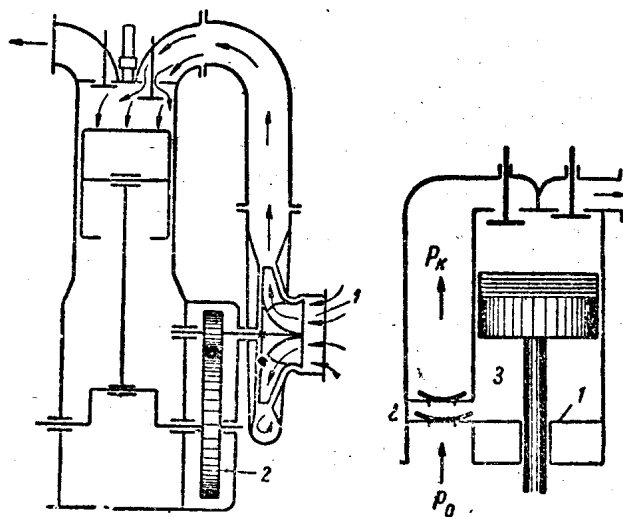


图1 机械式增压。

1. 透平压缩机 (a) 离心式压缩机；(b) 轴流式压缩机；(c) 斜流式压缩机或称混合式压缩机（图2）。

2. 容积式压缩机 (a) 活塞式压缩机（图3a）；(b) 转子式压缩机；转子式压缩机又可分为罗茨式压缩机（图3b）、滑片式压缩机（图3c）及螺旋转子式压缩机。

透平压缩机的基本工作原理是：利用旋转的叶片装置与空气间的相互作用使气流加速，然后又使前面的气体分子速度缓慢下来，逐渐遇到后面的气体分子，因而分子间的距离缩短而提高空气的压力，也就是直接改变空气的动能来实现压力的升高的。因此，透平压缩机中能量的变换大致分为二个阶段：

第一个阶段：将外界供给的机械能传给空气，使其获得动能；第二阶段：空气的动能部分地变成压力能，提高空气的压力。这两个阶段在透平压缩机中是同时进行的。这类压缩机的特点是：压缩过程中气流在连续流动着，同时整个工作过程系连续的。

容积式压缩机工作原理完全不同，它系依靠减少空气所占据的封闭空间的容积，即移

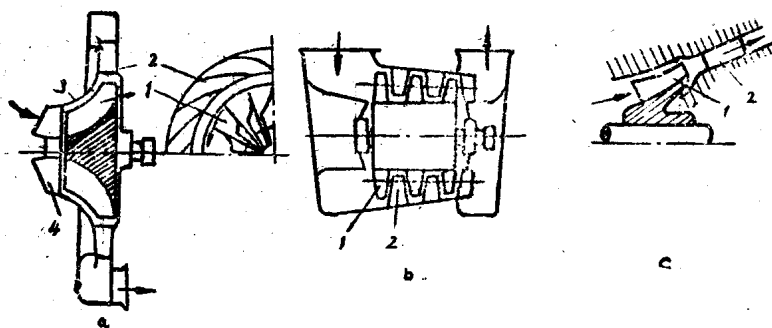


图2 透平压缩机:

a—离心式压缩机; b—轴流式压缩机; c—斜流式压缩式。

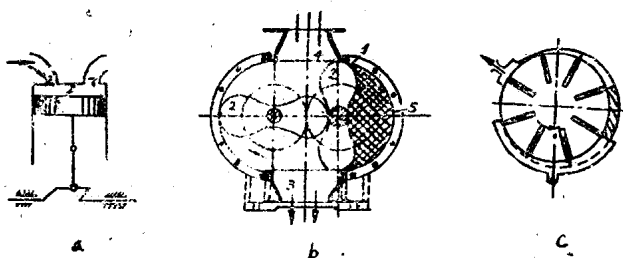


图3 容积式压缩机。

a—活塞式压缩机; b—罗茨式压缩机; c—滑片式压缩机。

动封闭空间的壁而使气体的分子接近, 提高单位容积内的分子数, 从而使压力提高。也就是直接改变空气位能来实现压力的升高的。这类压缩机的特点是: 压缩过程中没有气体的流动, 并且, 其工作过程是周期性的。

在活塞式内燃机的机械驱动式增压中, 以离心式压缩机和罗

茨式压缩机用的最多, 其次是滑片式压缩机和活塞式压缩机。

所谓废气涡轮增压, 与机械驱动式增压不同, 增压器不是由发动机驱动, 而是由利用活塞式发动机的排气能量工作的废气涡轮来带动的, 如图4所示。它是由活塞式发动机1, 废气涡轮2及离心式压缩机3所组成。后两个部件实质上是成为一个组合, 一般称为废气涡轮增压器。

废气涡轮增压是由废气涡轮和其装在同一根轴上的增压器(压缩机)所组成(图5)。废气涡轮部分的主要零件是: 进气螺形室1, 喷管7和装有工作叶片的轮盘(工作轮)10。

废气涡轮增压器中的增压器, 绝大多数是采用离心式压缩机; 其主要零件是: 工作轮12(或称叶轮), 扩压器4和输气螺形室3。压缩机和涡轮机同装在转轴2上, 转轴的中間有轴承5支持着, 轴承的两端有油封8。气封9是用来防止从涡轮机方面来的高温气体与滑油和轴承接触。

从热力学的观点看来, 废气涡轮增压器并非独立的密闭循环, 而其热力过程仅仅是活塞式发动机工作循环的一部分。虽然如此, 从整个废气涡轮增压发动机的经济指标和功率指标来看, 废气涡轮增压器的效率仍然有着很重要的意义。

目前废气涡轮增压器在强化的活塞式发动机中普遍的被应用来提高发动机的功率。

在废气涡轮增压系统中, 随着压缩机中增压压力的提高, 相应地提高了涡轮机前的气体压力。涡轮机的功率就有可能超过压缩机所需要的功率, 这部分多余的功率经过传动装置传给活塞式发动机的曲轴, 从而提高了整个动力装置的功率和经济性。这样的装置称为复合式发动机, 如图6所示。

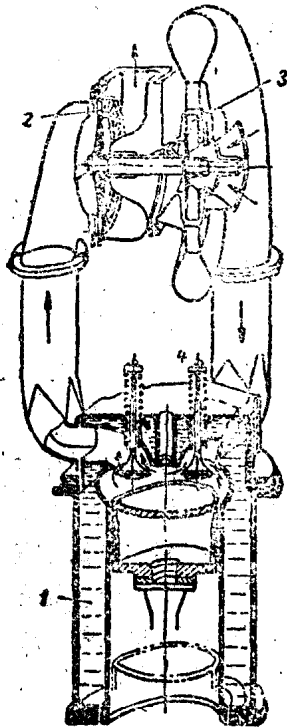


图4 四冲程发动机的
废气涡轮增压。

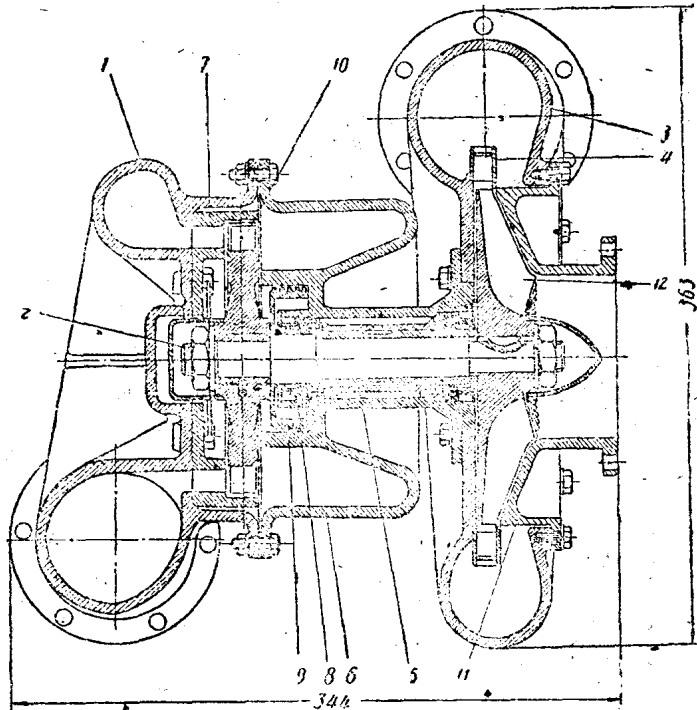


图5 废气涡轮增压器。

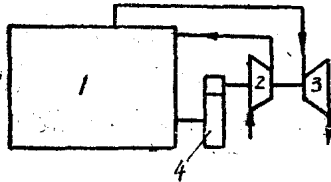


图6 复合式发动机装置
和示意图：

1—活塞式发动机； 2—压缩机；
3—涡轮机； 4—传动齿轮。

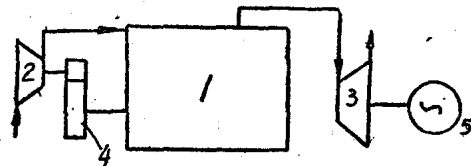


图7 燃气涡轮与活塞式内燃机联
合装置的示意图：

1—活塞式发动机； 2—压缩机；
3—燃气涡轮。

如果复合式发动机的增压压力继续提高，压缩机和涡轮机的功率增加比活塞式发动机功率的增加为快；当增压压力达到某一数值时，活塞式发动机的功率便等于压缩机所需要的功率，利用活塞式发动机排气工作的燃气涡轮的全部功率就是这联合装置的有效功率。这时，活塞式发动机起着高温高压发气机（活塞式燃烧室）的作用，因此称这种装置为机械式发气机——燃气涡轮装置（图7）。由于驱动活塞式压缩机的活塞式发动机不再向外输出功率，那么就可以不用曲柄连杆机构，这就是所谓自由活塞式发

动机。这时的联合装置，称为自由活塞燃气涡轮联合装置（图8）。

以上我们所谈的均属于燃气涡轮与活塞式发动机联合工作时所构成的联合动力装置的概况。现在来谈一下普通的燃气涡轮装置。

燃气涡轮装置是一种新型的热力发动机；由于它本身具备许多技术上的优点，例如（1）结构紧凑；（2）重量轻；（3）能燃烧多种燃料

和低质燃料；（4）制造和管理成本低；（5）不需要冷却水或仅需要少量冷却水；（6）起动仅次于柴油机。所以很受重视。

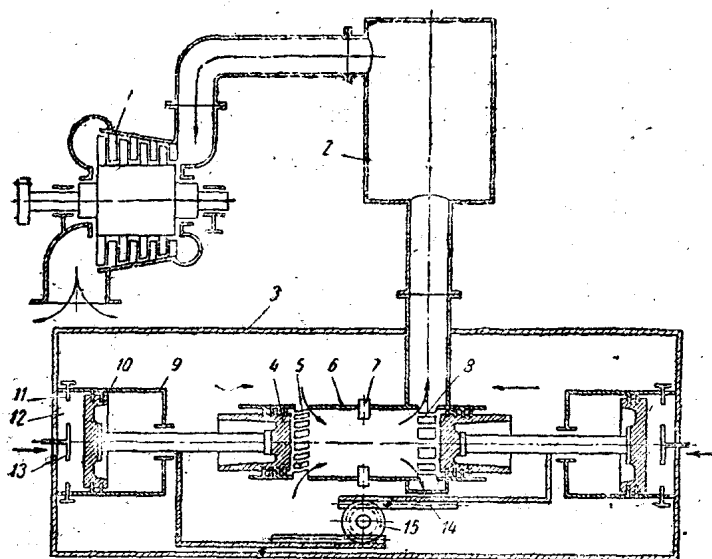


图8 自由活塞燃气涡轮联合装置：

1—涡轮机；2—燃气贮气箱；3—空气贮气箱；4—发动机活塞；5—进气孔；6—柴油机气缸；7—喷油器；8—排气孔；9—活塞式压缩机；10—压缩机活塞；11—压缩空气进气阀；12—压缩机工作气缸；13—吸气阀；14—齿条；15—齿轮。

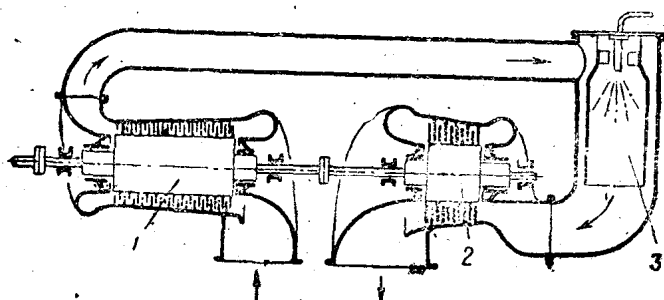


图9 最简单的燃气涡轮装置简图：

1—压缩机；2—燃气涡轮；3—燃烧室。

2，在涡轮机中膨胀大致到大气压力而产生机械功。燃气涡轮所发出的功率，一部分用来转动压缩机及一些附件。由于进入燃烧室内的空气量比燃料燃烧过程所需的空气量多得多，因此燃气涡轮所发出的功率大部分消耗于带动压缩机，这部分功率约占70%左右。其余部分的功率，则作为装置的有效功率输出而可加以利用。

从热力学中知道，消耗于压缩机的功等于：

$$L_k = \int_{P_1}^{P_2} V_k dP。$$

式中 V_k —压缩空气的容积； P_1 和 P_2 —空气压缩前后的压力。

涡轮机中的膨胀功则等于

燃气涡轮装置它系由压缩机，燃烧室和燃气涡轮三个基本部分所组成。压缩机和燃气涡轮往往是装置在同一根轴上的。图9所示为最简单的燃气涡轮装置的简图。

空气从进气管进入压缩机1；经压缩后使空气的压力升高到4~6个大气压，再将空气在压缩状态下送入燃烧室3，燃烧室装有喷油器，向燃烧室喷射某种燃料，例如柴油、煤油、重油或其他燃料。燃料在发动机起动时，由电火花塞点燃，以后便借燃烧区的高温气体来保持。因为燃烧区的温度要维持在2000°C左右，才能使燃料良好的燃烧，所以在燃烧室中有一部分空气通常并不参加燃烧，经由燃烧室焰管外周围的环形通道流过，然后在焰管后面与焰管内已经燃成高温的燃烧产物相混合，使其温度降低到涡轮机叶片所能承受的温度，目前一般是600~850°C。这些仍然具有相当高温的气体就从燃烧室冲向燃气涡轮

$$L_T = \int_{P_2}^{P_1} V_T dP$$

式中 V_T —气体膨胀时的容积； P_1 和 P_2 —膨胀始点和终点的气体压力。

因为压缩机中压力的升高等于涡轮机中的压力落差；而空气进入燃烧室中等在加热之后，气体的容积 V_T ，比燃烧室前空气容积 V_k 为大，因此由上两式比较，得：

$$L_T > L_k。$$

涡轮机的功与压缩机所需的功之差 $L = L_T - L_k$ 就是燃气涡轮装置的有效功。

我们来看图10所示的例子；图中所示为涡轮机的膨胀功（曲线1），压缩机的压缩功（曲线2）及燃气涡轮装置的有效功（曲线3）与压缩机的压力比 $\pi_k = \frac{P_1}{P_2}$ 之间的变化关系（气体的最高温度为 680°C ；压缩机前空气温度为 20°C ，压力为1大气压）。从图中可以看出，当 $\pi_k = 1$ 和 $\pi_k = 15$ 时，燃气涡轮装置的有效功等于零。当在一些中间的压力比，例如 $\pi_k = 4.2$ 时燃气涡轮装置的有效功达到最大值。

燃气涡轮装置有效功的上述变化特性与下列情况有关：随着压缩机的压力升高比的增加，压缩机内压缩终点的温度增加。因此随着压缩空气的温度逐渐接近涡轮机前给定的

气体温度，这就减少了燃烧室的加热量。图11所示为在涡轮机前各种气体温度 t_z 之下燃气涡轮装置效率与压力升高比的关系曲线，从图中可以看出，燃气涡轮装置效率也只有在某一个压力升高比 π_k 之下才得到最大值。因此，压力升高比 π_k 就是燃气涡轮装置工作过程一个重要的特性参数。此外当涡轮机前气体温度 t_z 增加时，燃气涡轮装置的效率也是提高，同时在图12中也可以看出随着涡轮机前气体温度 t_z 及涡轮效率 η_T 与压缩机效率 η_k 的增高，燃气涡轮装置的有效功增加很多。这样一来涡轮机前气体温度 t_z ，涡轮机效率 η_T 和压缩机效率 η_k 是影响整个燃气涡轮装置功率指标和经济指标最重要的特性参数。

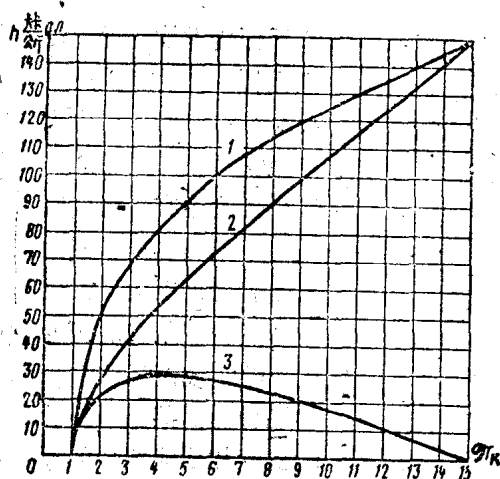


图10 燃气涡轮装置的功随压力升高比 π_k 的变化曲线：

1—涡轮机中的膨胀功，2—压缩机中的压缩功，3—燃气涡轮装置的有效功。

燃气涡轮原理的运用在活塞式机器之前，我国南宋时，即大约公元1150年的时候，每年春节开始流行走马灯，那时称为马骑灯。走马灯的原理是由灯或腊烛燃烧时产生的燃气上升，而冲击到纸轮倾斜的叶片，使纸轮连续旋转。因此，不论就其作用原理或其结构来说，都具有今日燃气涡轮的雏型，虽然当时并没有进一步的把这原理用来推动机器，但这足够说明了燃气涡轮的基本工作原理最先的发明者和创造者是我国人民。

如果以1791年英国约翰·巴贝尔 (John Barber) 所取得的第一台燃气涡轮装置专利权作为燃气涡轮发展开始的话，那末距今已有一百多年的历史了。

燃气涡轮的发展初期以致到现在其经济性很低，它无法与柴油机和蒸汽涡轮相抗衡。

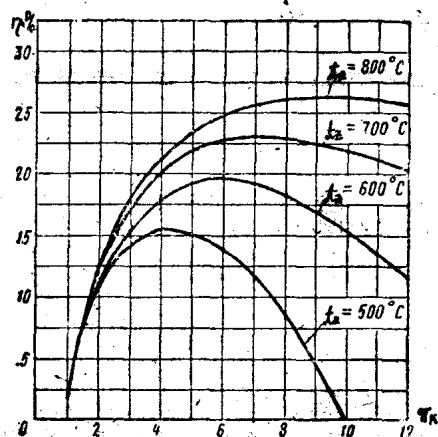


图11 在涡轮机前各种气体温度下，燃气涡轮装置的效率随压力比 π_k 的变化曲线。

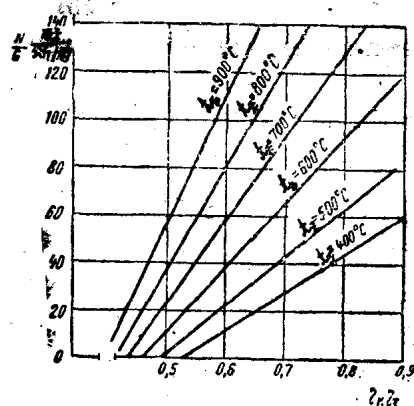


图12 燃气涡轮装置的单位功率与涡轮机前温度 t_2 及涡轮机和压缩机效率 η_r, η_k 之间的关系。

要使它得到較佳的經濟性，就必需：燃气涡轮的叶片在高温气体下工作，以及燃气涡轮和压缩机本身要有很高的效率。

由此可見，燃气涡轮在其发展的道路上所遇到的严重障碍，可以说基本上可归结为冶金工业和高速空气动力学（气体动力学）发展的問題。要順利地解决这些問題，需要有高度的工业技术水平和理論水平。象十九世紀前半期，生产力不足和当时小規模分散性的生产特点，当然很难促使燃气涡轮的发展。所以，在热力学、机械学、材料力学、冶金学及气体动力学各方面一系列重要理論获得之前，燃气涡轮在技术中的应用就因此而受到阻碍。

在最近的年代里，由于冶金工业的发展，已經制造出各种耐热鋼和耐热合金，这才有可能解决燃气涡轮叶片在高温气体下工作的問題。

燃气涡轮的发展除了与冶金工业的发展有密切的联系之外，还与机械制造业的发展紧密地連系着，尤其是与蒸汽涡轮制造业。制造蒸汽涡轮方面的大規模生产上和研究上所积累的經驗，在很大程度上为設計和制造燃气涡轮奠定了基础。另一方面，由于气体动力学飞跃的发展，从而解决了叶片机通流部分气体流动的一些基本問題，給理論方面具备了必要的条件。同时，紧接着第一次世界大战之后，在活塞式航空发动机上应用的废气涡轮增压器，曾經用过很多的耐热材料，而这些耐热材料現在也都用在燃气涡轮上。所有这些成就，都为燃气涡轮的发展开辟了道路，从而推进了燃气涡轮在工业上的应用。

在第二次世界大战末期，燃气涡轮开始应用在航空上，这种发动机表现了一系列超越活塞式航空发动机的重要优点。現在，在超音速的飞行中，燃气涡轮已为最主要的发动机了。

近几年来，航空燃气涡轮制造业中所达到的成就，在极大的程度上推进了为固定和运输上的动力装置設計和制造燃气涡轮的工作。就經濟性方面來說，現代固定式燃气涡轮装置既不及柴油发动机，也不及大型蒸汽动力站。所以具有一定經濟性的固定式燃气涡轮目前还是很少。目前，燃气涡轮的設计和研究工作者們正致力于寻找提高燃气涡轮經濟性的可能途径。事实上，近来在这方面的工作已經获得了显著的成就。目前，燃气涡轮機車和船舶燃气涡轮装置已制造出来了。汽車用燃气涡轮已經进行許多試制和試驗的工作。无疑地，在最近年代里使燃气涡轮的应用的范围得以迅速的扩大。

第一篇 叶片机

第一章 燃气涡轮的概念

§ 1 燃气涡轮的工作原理

燃气涡轮是燃气涡轮装置中一个极重要的部件。燃气涡轮的作用，在于将燃烧室排出的气体中的能量，借膨胀的作用转换为功，也就是说，工作气体的势能在这里变成动能，并且由于动能而对外作机械功。

燃气涡轮系由两个主要部分组成：即装有导向叶片的喷管装置和带有工作叶片的工作轮，如图13所示。

燃气涡轮中气体能量的变换是发生在喷管装置的导向叶片2及工作轮1上的工作叶片3内。燃气涡轮所有旋转部分称为转子；不运动部分称为定子。气体从喷管装置入口起到工作轮出口为止的通路称为燃气涡轮的通流部分。一系列导向叶片和一系列工作叶片组成燃气涡轮的一级。

现在我们

来初步讨论气体在燃气涡轮通流部分的工作过程。经燃烧室加热后的气体以速度 C_2 进入导向叶片的通道（通道一般具有渐缩的形状），这里气体开始膨胀，一部分压力能转变为气体排出时的动能，使气体的绝对速度从 C_2 增到 C_1 （图14）。这时，气体的压力和温度都降落。

气体从喷管装置 I 排出时与工作轮的转动平面成一角度 α_1 。这时，气体以相对速度 W_1 及 β_1 角进入工作轮 II； W_1 的大小和方向则由绝对速度 C_1 和工作轮的轮缘速度 u 的大小及方向来确定。

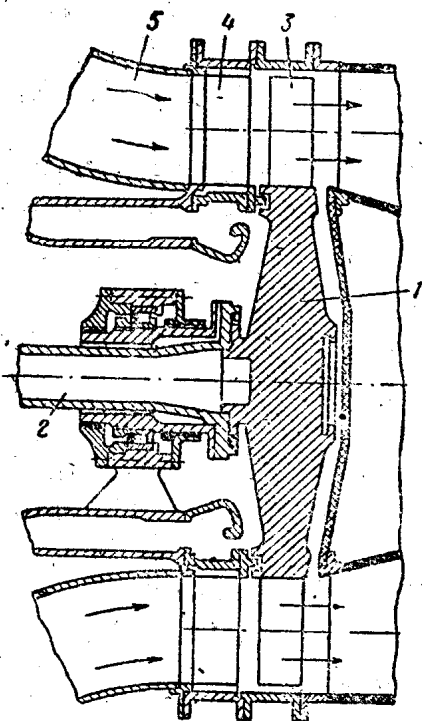


图13 单级燃气涡轮的剖面图。

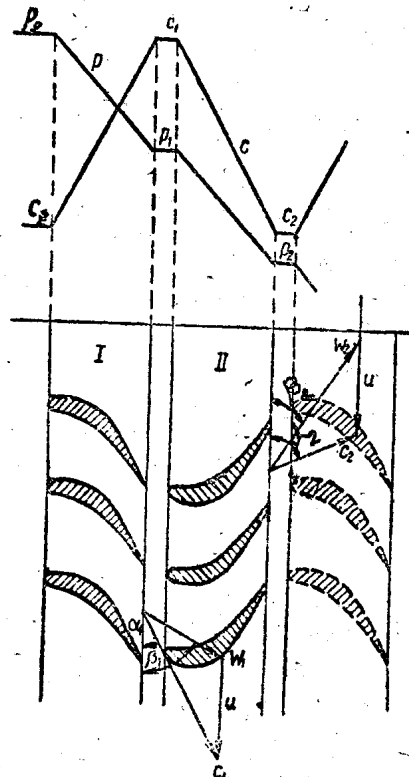


图14 燃气涡轮级的简图。

工作叶片间的通道一般也具有渐缩形状，气体在其间继续膨胀，也就是说，气体从压力 p_1 膨胀到工作轮后的压力 p_2 。因此，在工作轮叶片间的通道内气体获得加速，于是工作轮出口处气体的相对速度 W_2 便大于相对速度 W_1 。此时，气体的相对速度 W_2 与转动平面成一角度 β_2 。同时，气体的绝对速度终于从 C_1 下降到 C_2 ，这是因为气体在喷管中所获得的一部分动能传给了工作叶片的缘故。

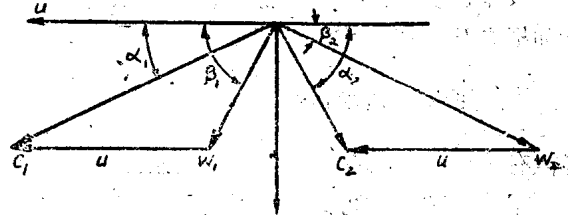


图15 速度三角形。

气体在工作轮进口与出口的速度三角形示于图15。由此可算出气体在工作轮出口的绝对速度 C_2 的大小和方向。显然，速度 C_2 愈大，燃气涡轮上没有利用的能量也愈大，即所谓燃气涡轮的余速损失 $\frac{C_2^2}{2g}$ 愈大。

由于气体沿喷管装置和工作轮的叶片间通道作相对运动时，发生气流折转和流体的加速，因而在叶片的凹面形成压力的增高，而在叶片的凸面则形成压力的下降。图16所示为沿燃气涡轮叶片外形的压力分布图，气流之所以如图中的分布情况，是因为气流在通道内折转时，气体质点在离心力的作用下，使这些质点投向叶片的凹面部分。作用在叶片表面上的压力的合力形成一力矩，使工作轮旋转。

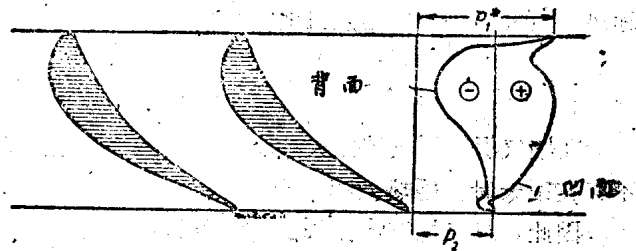
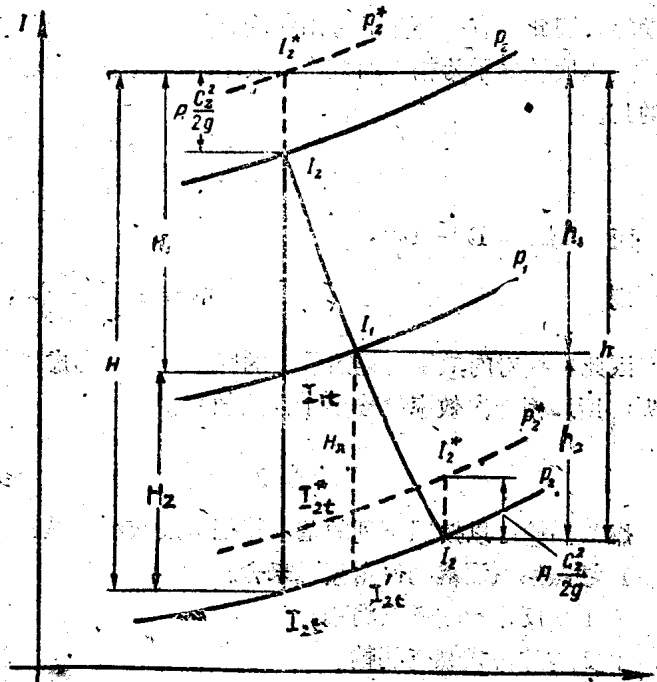


图16 沿燃气涡轮叶片外形的压力分布图。

燃气涡轮中气体的膨胀过程在 $I-S$ 图上表示（图17）。在图上 I_2 点相当于燃气涡轮进口处的气体状态。线 I_2-I_{1t} 和 $I_1-I'_{2t}$ 表示当摩擦损失为零，忽略与外界的热交换时，气体在导向叶片装置与工作轮中的膨胀过程。伴随着各种各样损失的实际的膨胀过程，可以假想地以某一位于绝热线右边的多变曲线来表示。



气体膨胀的实际过程，在燃气涡轮的两部分中分别以线

图17 燃气涡轮中气体膨胀过程的 $I-S$ 图。

段 $I_2 - I_1$ 和 $I_1 - I_2$ 表示。在燃气涡轮的计算中，实际上采用燃气涡轮进口处的滞止参数较为方便。在 $I-S$ 图上相应于气流速度为零的气流在燃气涡轮进口处的状态确定于 I_2^* 点。它是在将 $I_{2t} - I_1$ 线段向上延长 $A \frac{C_2^2}{2g}$ 一段的地方。

气体在燃气涡轮里的膨胀功部分地转变为工作轮圆周上的功，而另一部分消耗于抵偿各种损失及提高气流的动能。

当给定气体初始状态 (p_2^* 和 T_2^*) 及压力落差 $\frac{p_2^*}{p_2}$ 时，热焓差 $I_2^* - I_2$ 与膨胀过程的特性有关。当等熵膨胀过程时，这差值达到最大。 $H = I_2^* - I_{2t}$ 的值通常称为绝对膨胀功或可用热焓差。它可以由一公斤气体理论上可能作的功来确定，这种功就是在摩擦损失及燃气涡轮后气体速度等于零的条件下所得到的。

由于燃气涡轮内的损失实际热焓差 $h = I_2^* - I_2$ 小于可用热焓差 H 。在燃气涡轮内实际热焓差 h 与可用热焓差 H 的比，叫做绝热效率：

$$\eta_{ad} = \frac{h}{H} \quad (1)$$

在燃气涡轮里气流损失愈小，则实际热焓差愈大及绝热效率愈高。在理想的情况下，不存在损失时，绝热效率等于 1。

因此，从克服气流损失而消耗气体能量的观点看来，绝热效率可用来评定燃气涡轮的完善程度。

有效功小于可用功，不仅由于气流损失的影响，而且同时由于气体从燃气涡轮流出时具动能，因此，有一部分的可利用能没有被利用来转动工作轮。可用热焓差转变为轴上的功，其程度被表示为相对内效率的大小，而这个效率可理解为燃气涡轮轴上有效功对可用能的比值：

$$\eta_r = \frac{AL_T}{H}, \quad (2)$$

而 $AL_T = I_2^* - I_2$ ，

$$\eta_r = \frac{-I_2^*}{I_2 - I_{2t0}} \quad (3)$$

因此，相对内效率与绝热效率的区别，不仅考虑到气流损失，而且还考虑到所需余速损失，所以相对内效率始终小于绝热效率。

§ 2 燃气涡轮的分类

燃气涡轮可以按照下列的基本特征分成数种类型：

1. 按照燃气涡轮的作用原理来分：

(1) 反作用式燃气涡轮；

(2) 冲击式燃气涡轮。

这是历史传统的一种分类方法。所谓反作用式燃气涡轮，就是燃气涡轮中气体不仅在喷管装置中膨胀，而且在工作轮内还继续膨胀。如图14所示，就是这种燃气涡轮的示意图。其之所以称为“反作用式燃气涡轮”，是因为工作轮内相对速度的增加所产生作用在

工作叶片上的力可以看作流出的气流股的反作用力的缘故。

燃气涡轮级内热焓差在喷管和工作轮内的分布，是用所谓反作用度 ρ_r 来表示的，反作用度，就是工作轮内的可用热焓差 H_2 与级的可用热焓差 H 之比，（参看图17），即：

$$\rho_r = \frac{H_2}{H} \quad (4)$$

假若气体已在喷管中膨胀到工作轮后的压力，而在工作叶片间通道中气体不再膨胀，

这时，气体在工作轮进口和出口的相对速度 W_1 和 W_2 在数值上是相等的，这种燃气涡轮称为冲击式燃气涡轮（图18）；其速度三角形示于图19上。显然，冲击式燃气涡轮中的反作用度 ρ_r 是等于零的。

冲击式燃气涡轮中作用在工作叶片上的力只是由于气流速度改变方向，也就是气流冲击作用的结果。

其实将燃气涡轮分为反作用式和冲击式，只是就具有短叶片的燃气涡轮这个意义上来说的。

以后我们将会看到（见§10），如果具有长叶片的燃气涡轮，这种分类法是与在燃气涡轮通流部分中的现象的本质不符合的。近代的一切燃气涡轮都有反作用度。因而冲击式燃气涡轮的概念应该认为是陈旧的。

2. 按照燃气涡轮内气流的方向来分：

（1）轴流式燃气涡轮；

（2）径流式燃气涡轮；

（3）混流式（或称对角流式）燃气涡轮。

气体的流动方向与机轴平行的燃气涡轮，称为轴流式燃气涡轮（参看图13）。

气体的流动方向与机轴垂直的燃气涡轮，称为径流式燃气涡轮（图20）。

假若气体是从外缘流向中心的，则称为向心式燃气涡轮（图21a）。气体是从中心流向外缘的，则称为离心式燃气涡轮（图21b）。

气体是沿着某个倾斜于工作轮的旋转面而流动的，这种燃气涡轮称为混流式（或称对角流式）燃气涡轮（图22）。

3. 按照燃气涡轮所采用的级数来分：

（1）单级燃气涡轮；

（2）多级燃气涡轮。

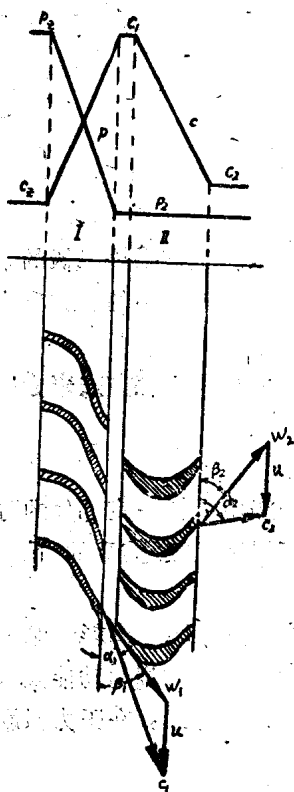


图18 冲击式燃气涡轮的简图。

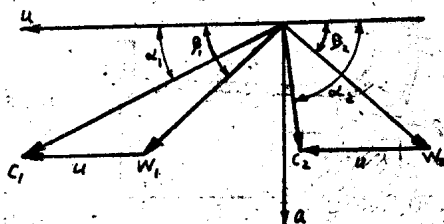


图19 冲击式燃气涡轮级的速度三角形。

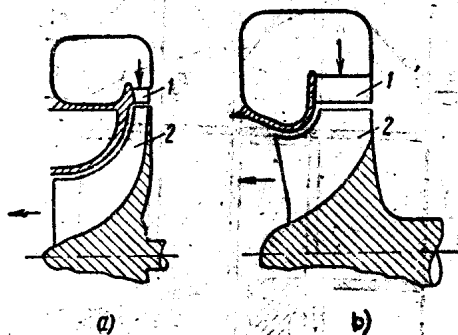


图20 径流式燃气涡轮。

1—导向叶片，2—工作叶片。

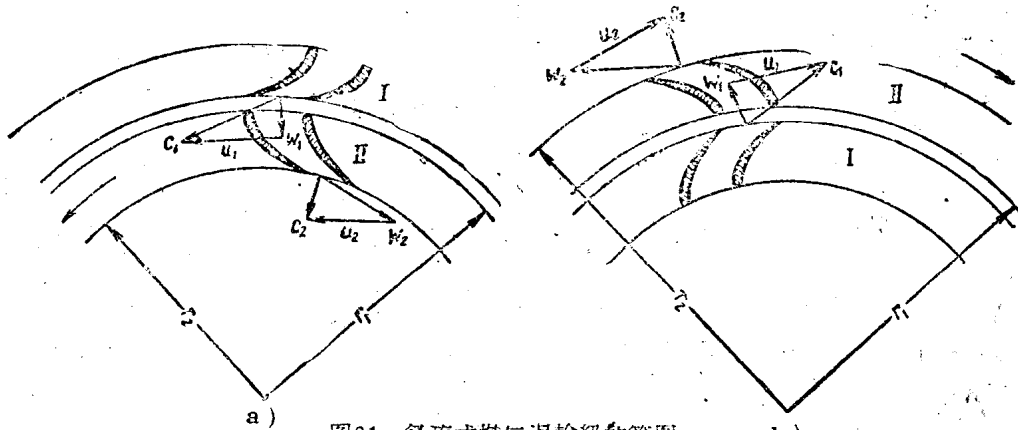


图21 径流式燃气涡轮级的简图:

a—向心式; b—离心式。

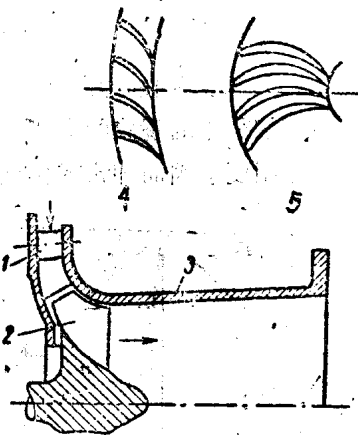


图22 混流式(对角流式)燃气涡轮:

1—导向叶片;2—工作叶片;3—排气扩压器;4—叶片根部截面的叶型;5—叶片顶部截面的叶型。

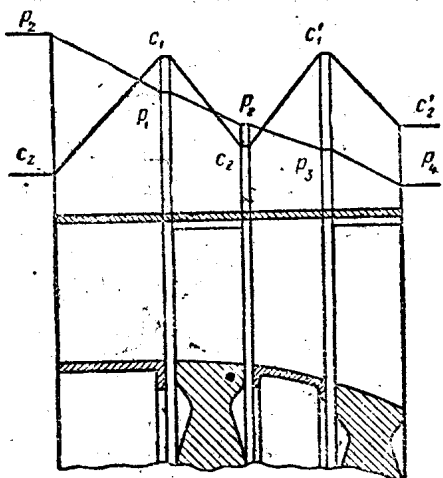


图23 压力级燃气涡轮。

在各种燃气涡轮中有采用单级的也有采用多级的。为了改善发动机的经济性,要提高压缩机中的压力升高比,这时就必须采用多级燃气涡轮。

4. 按照在多级燃气涡轮中压力降的消耗方法来分:

- (1) 压力级燃气涡轮;
- (2) 速度级燃气涡轮。

在压力级燃气涡轮中,每一级中消耗一定部分的可用压力降,而且压力从第一级至以后数级逐级下降(图23)。

在速度级燃气涡轮中,所有的压力降均消耗于第一级中,因压力下降使气流速度增加而所得到的动能渐次在以后的各级中利用(图24)。由此可见,在压力级燃

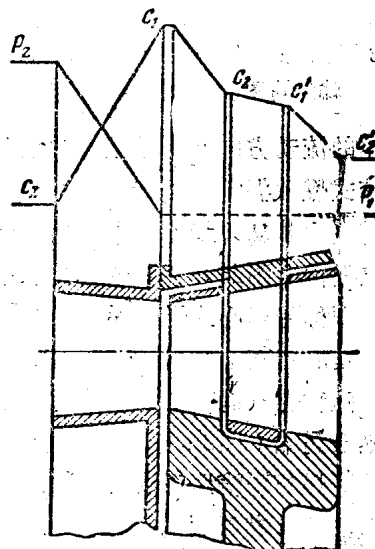


图24 速度级燃气涡轮。