

真空叶片机

原理

目 录

第一部分 緒論及叶片机中气体流动的基本方程

緒 論

§ 1	叶片机的概念和叶片机的主要型式	5
§ 2	叶片机在航空上的应用	5
§ 3	叶片机的发展概况	8
§ 4	航空渦輪噴气发动机中叶片机的发展趋向和对叶片机的要求	10
§ 5	解放后我国在叶片机方面的成就	12
§ 6	叶片机原理在航空发动机設計专业中的地位, 本課程的目的、內容和学习方法。	12

叶片机中气流的基本方程

§ 1	建立基本方程时的一些簡化假設	14
§ 2	連續方程式	15
§ 3	能量守恒方程	15
§ 4	热力学第一定律方程	18
§ 5	通用柏努力方程	19
§ 6	欧拉方程	21

第二部分 压气机

第一章 軸向式压气机方案及工作原理

§ 1—1	軸向式压气机方案	25
§ 1—2	軸向式压气机工作原理	28

第二章 級和基元級的增压比、效率和功率

§ 2—1	压气机的增压比	33
§ 2—2	基元級的絕热效率	34
§ 2—3	級的效率和功率	36

第三章 基元級中气流的速度图

引 言	38	
§ 3—1	确定基元級速度图的主要参数	38

§ 3—2	基元級的反力度与速度图	40
-------	-------------	----

第四章 平面叶栅特性和平面叶栅造型

引 言	46	
§ 4—1	叶型和叶栅参数	46
§ 4—2	平面叶栅中叶型上气体动力的基本方程	47
§ 4—3	平面叶栅的吹风数据和平面叶栅的特性	52
§ 4—4	反力度、流量系数和叶栅稠度对基元級有效功的影响	60
§ 4—5	反力度、流量系数和叶栅稠度对基元級效率的影响	61
§ 4—6	在大M数(但仍小于1)下叶栅的工作情况	63
§ 4—7	軸向式压气机基元級叶栅按平面叶栅吹风数据造型的方法	63

第五章 沿叶片高度气体参数的变化

引 言	72	
§ 5—1	級的軸向間隙中确定气流运动的条件	72
§ 5—2	环量沿半徑不变的流动; 等环量規律	75
§ 5—3	环量沿半徑变化的級	78
§ 5—4	环形旋轉叶栅中与平面叶栅中气体工作过程的区别	86

第六章 多級軸向式压气机

§ 6—1	多級軸向式压气机的等熵压缩功和絕热效率	88
§ 6—2	多級軸向式压气机的参数选择	92
§ 6—3	多級軸向式压气机的气体动力計算	100
§ 6—4	多級軸向式压气机計算示例	112

第七章 提高分級压头的途徑

§ 7—1	超音速級	123
§ 7—2	只有轉子沒有靜子的压气机	133
§ 7—3	采用大弯度和开縫叶型	134

第八章 离心式压气机

§ 8—1	离心式压气机的方案及工作原理	138
§ 8—2	离心式压气机中空气的压缩过程; 压气机的效率和压头系数	140
§ 8—3	空气在进气装置和导风輪中的流动	143
§ 8—4	空气在工作輪(叶輪)主体中的流动	146
§ 8—5	空气在扩压器中的流动	155
§ 8—6	空气在出气管中的流动	162
§ 8—7	离心式压气机的气体动力計算	163
§ 8—8	离心式压气机計算示例	166

第九章 压气机的特性和调节

引 言	171
§ 9—1 压气机的特性试验和压气机的特性曲线	171
§ 9—2 气体流动的相似性	179
§ 9—3 压气机的通用特性曲线	183
§ 9—4 压气机的分离和不稳定工作状态；喘振现象	187
§ 9—5 涡轮喷气发动机的压气机在非设计情况下工作的特点和产生喘振的条件	191
§ 9—6 涡轮喷气发动机压气机的调节	196
§ 9—7 轴向式压气机特性的算法	201

第三部分 气轮机

第一章 基本理论

引 言	213
§ 1—1 做功原理及主要参数	215
§ 1—2 气轮机平面叶栅中的实际流动	218
§ 1—3 气轮机效率	225

第二章 单级气轮机设计

§ 2—1 气轮机设计要求及设计过程简介	230
§ 2—2 气轮机流程设计	232
§ 2—3 叶片扭向设计	248
§ 2—4 叶片设计	258

第三章 多级气轮机级

§ 3—1 概 述	271
§ 3—2 多级气轮机设计及参数选择	272
§ 3—3 多机气轮机气动计算方法特点	275

第四章 气轮机特性

§ 4—1 气轮机在非设计状态下的工作	278
§ 4—2 实验法取得气轮机特性	279
§ 4—3 单级气轮机特性分析作法	281
§ 4—4 多级气轮机特性计算特点	289

第五章 其它型式的气轮机

§ 5—1 超音速气轮机	294
--------------------	-----

§ 5—2	冲力式气轮机	299
§ 5—3	速度分級的气轮机	301
§ 5—4	徑向气轮机	302

結 束 語

第一部分 緒論及叶片机中气体流动的基本方程

緒 論

§1 叶片机的概念和叶片机的主要型式

什么叫做叶片机？广义地讲，叶片机泛指这种旋轉式机器，它們的工作原理主要是建立在叶片与工质間的气体动力、能量交换、以及工质在叶片机中的能量轉換等基础上的。工质可以是液体，或气体。我們只讲工质为气体的叶片机。

由于叶片机是旋轉的机器，其中沒有往复运动的部件，因此轉子易于平衡，适合于高轉速運轉。我們知道，功率是跟轉速与力矩的乘积成比例的，所以高轉速的机器一般也意味着是功率大、尺寸小的机器。

由于叶片机的工作原理主要建立在叶片与工质間的气体动力，能量交换以及工质在叶片中的能量轉換等基础上面，所以在叶片机原理中很重視气流的組織，务使流动損失最小，能量的交换和轉換最为有效。

叶片机的主要組成部分为：（1）靜子，上装靜叶片，和（2）轉子（亦称工作輪），上装有工作叶片。

如果在叶片机軸上加入机械功，同时气流組織合适，則气体通叶片机后就得到增压。这种叶片机称为压气机。按气体流动大致方向，压气机主要可分为軸向式和离心式。

相反，如果高压高温的气体通过叶片机膨脹到低压低温状态，同时气流組織合理，則在叶片机軸上可以发出机械功。这种机器称为气輪机，亦称渦輪。按气流的大致流动方向，气輪机主要可分为軸向式和徑向式。

目前，在航空渦輪噴气发动机中主要用軸向式压气机和气輪机。它們的特点是效率高（能量損失小）徑向尺寸小，因而适合于大的气体流量。

§2 叶片机在航空上的应用

早在活塞式航空发动机中，叶片机已經广泛应用。首先，离心式增压器常用来提高这种发动机的升高度，同时，应用了增压器后，这种发动机的公升功率大大提高了。

此后，在活塞式航空发动机中采用了廢气渦輪。这种渦輪利用活塞发动机气缸所排出廢气中的能量，使它在渦輪的工作輪上轉变为机械功。这机械功一般用来带动离心式增压器，后者使发动机本身得到增压。这样的組合称为廢气渦輪增压器。利用这种組合，非但可以使发动机的升高度提高，公升功率增大，而且与带有机机械傳动式增压器的发动机相比，它的經濟性和特性都有所改善。离心式增压器和廢气渦輪是航空发动机中最早采用的叶片机，它們是作为增压系統的主要部件在发动机中应用的。

我們知道，由于飞行速度和飞行高度的提高，目前在飞行器上噴气式发动机已經几乎全部代替了活塞式发动机，在民用的飞机上絕大多数已經采用渦輪噴气式发动机和渦輪螺旋桨式噴气发动机。在国防方面，虽然冲压直流式发动机和火箭发动机应用日广，但是装有渦輪噴气式发动机的軍用飞机仍在不断发展。在現代战争中，有人駕駛的飞行器起着重要的作用。無論在反击敌人、占領陣地、清扫战坊、后勤补給，以及提高武装力量的机动性等方面，都需要有人駕駛飞机。在世界上还存在着帝国主义因而还存在着战争的根源和战争的可能性的情况下，加强国防观念是十分重要的。帝国主义不会自动退出历史舞台，时刻推行殖民主义政策，镇压殖民地人民的独立运动，不断扩军备战，梦想奴役全世界人民，因而一方面竭力发展導彈，~~梦想消除对苏联存在着的導彈差距~~，另一方面竭力发展有人駕駛飞机。按主席教导，对帝国主义进行斗争我們必須針鋒相对。因此，在航空方面，为了增强国防，发展高速、高空的歼击机，高速、高空、远程的轰炸机，以及其它如低空、高速的飞机，短跑道或垂直起飞，降落的超音速飞机，是完全必要的，而在这些飞机的动力装置中，都要用叶片机作为主要部件。

我們知道，無論在渦輪噴气发动机或是在渦輪螺旋桨发动机中，压气机和气輪机都是主要的組成部分。图 0—1 表示一台具有离心式压气机的渦輪噴气发动机的原理图。图 0—2 表示一台具有軸向式压气机的渦輪噴气发动机的原理图。

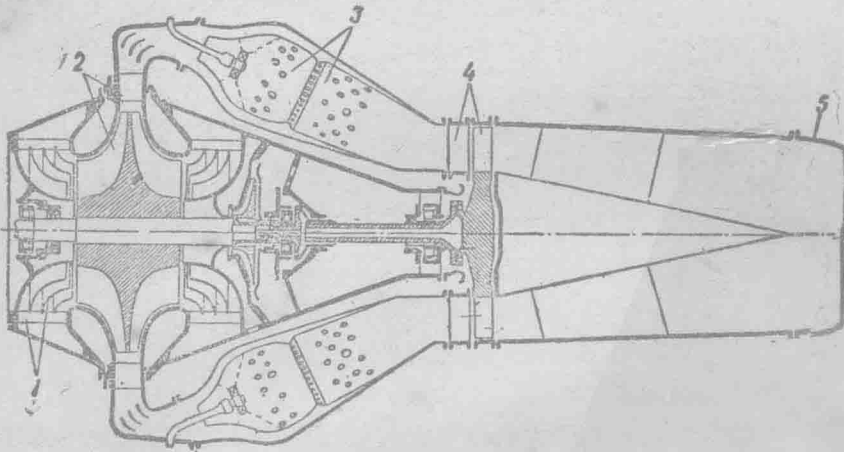


图 0—1 具有离心式压气机的渦輪噴气发动机原理图

1. 压气机的进气装置 2. 离心式压气机 3. 燃燒室 4. 气輪机 5. 尾噴口

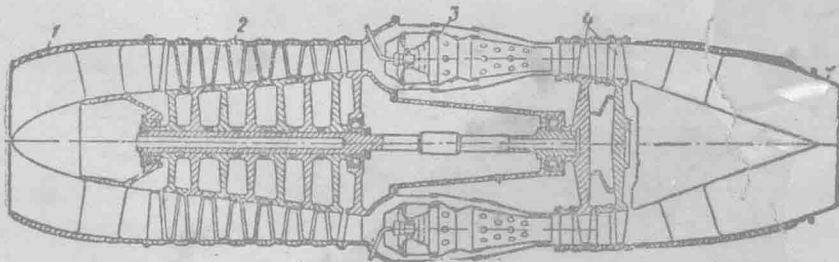


图 0—2 具有軸向式压气机的渦輪噴气发动机原理图

- 6 — 1. 进气装置 2. 軸向式压气机 3. 燃燒室 4. 双級气輪机 5. 尾噴口

图0—3和图0—4都表示涡轮螺桨发动机的原理图。两个方案的不同处在于前一方案中气轮机发出的功，通过同一根轴传给压气机和螺桨，而后一方案中气轮机通过两个分开的轴把功分别传给压气机和螺桨，两个方案中发动机的主要部分，都在图中表明。

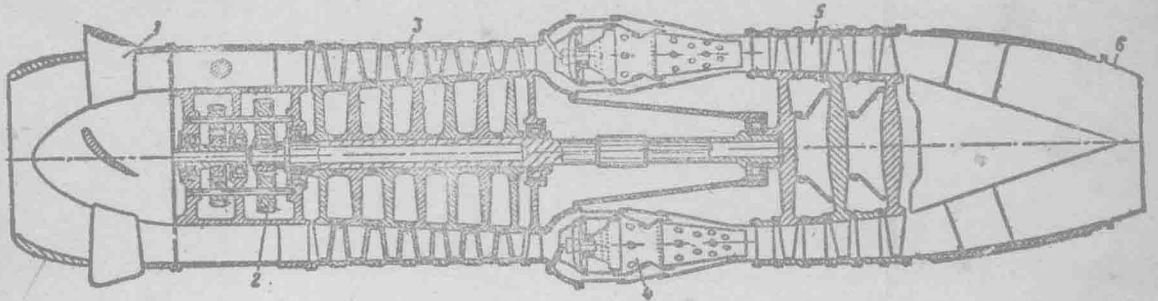


图0—3 涡轮螺桨发动机的原理图

单轴

- 1.空气螺桨 2.减速器 3.轴向式压气机 4.燃烧室 5.气轮机 6.尾喷口

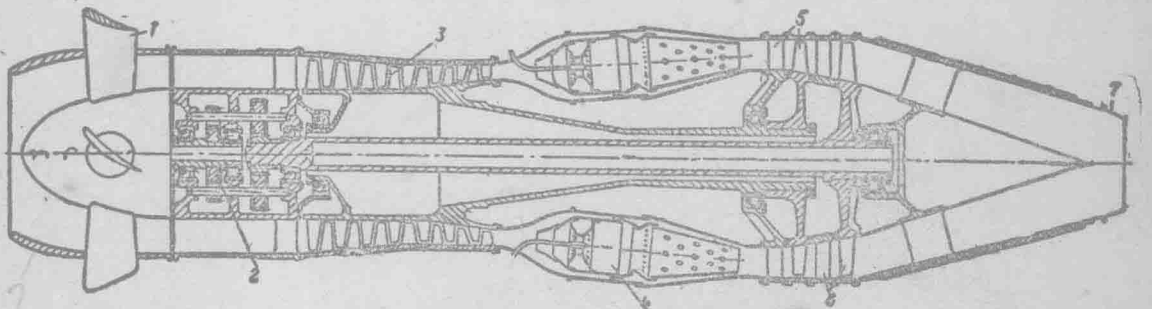


图0—4 具有分开式气轮机的涡轮螺桨发动机原理图

双轴

- 1.空气螺桨 2.减速器 3.压气机 4.燃烧室 5.转动压气机的
气轮机 6.转动螺桨的气轮机 7.尾喷口

在上述各方案中，压气机和气轮机都是发动机的主要部分。它们的特性直接影响着整台发动机的特性。而且在设计整台发动机的过程中，必须对其中的压气机和气轮机进行气体动力计算，并根据这些计算的结果，进行叶片的造型和构造设计。

此外，在液体火箭发动机中的涡轮泵也是属于叶片机的一类。在液体火箭发动机中，把燃料和氧化剂注入燃烧室的方法之一，是采用涡轮泵系统。如图0—5中所示。在这系统中，

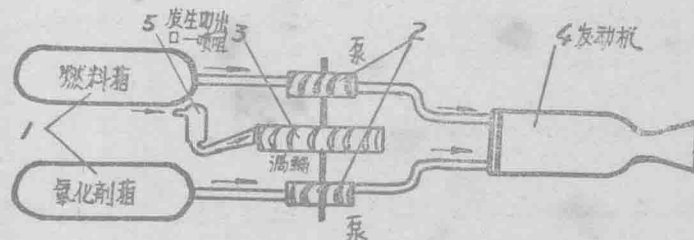


图0—5 液体火箭发动机的涡轮泵系统的示意图

渦輪的工質是由一蒸汽气体发生器供給的，在这发生器中一般使双氧水（过氧化氢） H_2O_2 分解，产生蒸汽 H_2O 和氧气，这混合气有足够的能量使渦輪产生机械功来带动燃料泵和氧化剂泵，使它們把燃料和氧化剂在高压下送入燃燒室。

以上談到叶片机在航空发动机上的主要用途，在課程中，只研究渦輪噴气发动机（包括渦輪螺桨发动机及其他以叶片机作为主要部件的发动机）中的叶片机。

§3. 叶片机发展概况

气輪机装置达到目前这样完善程度并成为实用的动力装置，虽然仅是二十世紀五十年代的事，但是叶輪机（气輪机）的概念却在時間上很早就产生了。在古代，早在紀元前150年，亚历山大城的赫罗就发明一蒸汽喷射机，称为“爱渥里泊尔（aeolipill）”它的大致形状如图0.6所示



图0—6 赫罗的“爱渥里泊尔”示意图

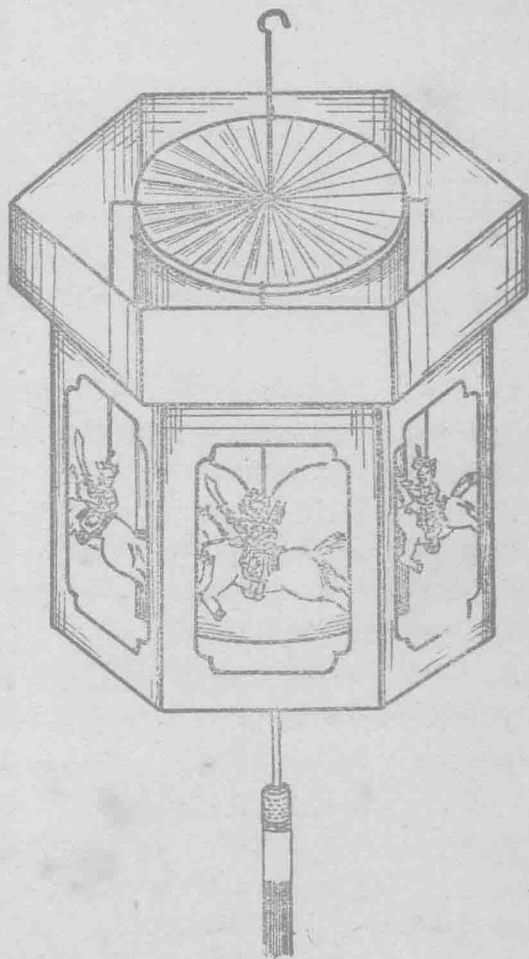


图0—7 走馬灯示意图

在中国，早在南宋高宗时代（公元1131~1162）就有走馬灯的記載。所謂走馬灯就是利用燃燒所产生的热气上升，推动用紙糊成的叶輪，使裝在叶輪軸的紙影（做成人馬狀）回轉，如图0.7所示。这可以說是燃气輪的始祖。

虽然回轉机器的概念发生很早，但是在原动机方面，一般却是往复式机器早于回轉式机器，例如蒸汽机在工业上实际应用早于蒸汽輪机，活塞式內燃机的发展却远远早于燃气輪机，只有水力和风力发动机却跳过了活塞式机器的阶段，一开始就制成叶輪的样子。这种发展規律的原因何在呢？可以說，所有創造发明都直接或間接为生产服务，这样直接或間接促进生产，但同时却受到当时生产技术水平的限制。水力和风力发动机的轉速很低，因此，即使机械制造技术水平不高，也能进行制造，在中国，早在元朝的时候（公元1300年左右）就有水轉翻車，到了明朝末年（1630年左右）又有了风轉翻車，都是非金属材料制成的，它們都用于农田灌溉，为农业生产服务。

但是热力叶輪机——汽輪机或气輪机——需要在高轉速下和高溫下才能有效地工作，而在十九世紀的前半期，生产力发展不足和当时小型分散生产的特点，无法促使这种高速高溫的回轉式发动机順利发展。事实上，要适当地設計和制造这些机器只有在热力学、机械学、材料力学、气体力学和冶金等各方面的一系列重要問題能够实际解决之后，才有可能。

当蒸汽輪机几乎在各方面都代替了蒸汽机的时候，很自然的并且也是富有誘感力的概念是直接使燃气繼續不断地推动叶輪，从而获得机械功，以便免掉鍋炉設备这样笨重的装置。但是为什么气輪发动机却迟迟直到近代才实现呢？两个主要因素限制了气輪发动机的很早实现。即缺乏效率高的旋轉式空气压气机和适合于高溫下工作的材料。航空事业的发展使空气动力学的領域丰富起来，在这一基础上就有可能設計和制造出效率高的压气机。同时冶金方面的新成就使耐高溫高强度的材料得以实现。当以上两个主要問題解决之后，气輪发动机才能实现。

航空上追求飞得更快、更高、更远，促进了气輪发动机的迅速发展，目前在航空領域內，气輪发动机已經几乎全部代替了活塞式发动机。

气輪发动机目前也在机車，汽車，船只以及发电站中使用，但是在这些方面，气輪发动机还远沒有成为主要的原动机，它們还需要繼續发展，它們的前途是无量的，照目前看来，在和平利用原子能方面，也只有通过蒸汽輪机或气輪机才能实现。

上面簡略地敘述了燃气輪发动机概念的形成和实现的过程。恩格斯曾經說过：“科学的发生和发展从开始起便是由于生产所决定的。”燃气輪发动机的发展过程正証明这一規律是正确的。同时，通过燃气輪发动机的发展过程，我們也看到一門科学并不是孤立地发展起来的。航空叶片机原理这門科学，若不是由于其他科学知識的发展，特别是热力学和气体动力学方面的成就，就很难单独发展，这一事例說明各門科学間的相互联系。

叶片机的发展首先是通过实践。劳动人民在生产实践中掌握了一些自然規律，然后把它們应用到生产实践中去，为生产服务，象原始的水輪机和风車，显然是这样創倡出来的。但是應該指出，科学家所起的作用也是很大的。科学家通过辛勤的劳动，在实践中把自然界的現象概括成为理論，反过来又指导实践。象H.E 茹可夫斯基的叶柵理論和螺旋計算理論，至今对叶片机的气体动力計算还起着作用。这里我們不仅看到科学的发展的規律是实践——理論——实践，同时也看到在发展科学中劳动人民和科学家所起的作用。

§4 航空渦輪噴气发动机中叶片机的

发展趋向和对叶片机的要求

在渦輪噴气发动机中，首先得到广泛采用的压气机是离心式的。这个情况并不是偶然的，在活塞式航空发动机中的增压器无论是傳动式的或是廢气渦輪增压器都是离心式的。因此对这种增压器的工作原理、設計和制造已經积累起来丰富的經驗。而且离心式压气机的特性好，也就是易于适应較广的工作范围。这样很自然地离心式压气机首先在渦輪噴气发动机中广泛地采用。

但是随着对渦輪噴气发动机的要求的提高，情况也就逐渐改变了。目前在大推力、燃料消耗率低、迎面推力（公斤/米²迎面面积）大的发动机中，一般都采用軸向式压气机了，这主要是由于这种压气机比离心式压气机更适合于大的空气流量和高的增压比，而且效率較高。

航空压气机和气輪机的发展趋向取决于渦輪噴气发动机的发展趋向，目前渦輪噴气发动机的发展趋向可以归納为三个方向：（1）提高单位推力，以降低发动机重量推力比（或称比重）和提高单位迎面推力。（2）降低耗油率（公斤燃料/小时-公斤推力）以增加航程。（3）使发动机能更适应更大的工作范围。

从噴气发动机原理可以知道，影响渦輪噴气发动机单位推力和耗油率的設計参数主要是渦輪前的燃气温度和压气机的增压比。当渦輪前的燃气温度一定时，随着增压比的增大，单位推力起初跟着增大，在一定的增压比下单位推力达到最大值，然后就跟着增压比的增大而下降。耗油率的变化則相反，它起初跟着增压比的增大而下降，在某一增压比下达最小值，然后开始上升。当渦輪前的温度愈高，則相应的最大单位推力就愈大，而燃料消耗率只是在相应地提高增压比的情况下才可能减小。相应于最小耗油率的增压比大于最大单位推力的增压比，而且渦輪前燃气温度增高时，单位推力和燃料消耗率的最有利的增压比也都提高。

以上可知，如果要想使渦輪噴气发动机的推力和燃料消耗同时改善，必須同时提高渦輪前燃气温度和压气机的增压比。

目前渦輪前最高燃气温度达1200°K左右，限制这温度的主要因素是渦輪叶片的耐热强度。增压比能达到12左右，它主要受压气机的稳定工作条件及压气机出口温度太高的限制。

从目前渦輪噴气发动机的設計特点和工作特点来展望叶片机的发展趋向，可以分为三个方向：

第一类渦輪噴气发动机的发展方向是：大推力和低耗油率的渦輪噴气发动机。这一发展方向中的主要問題是要同时提高渦輪前的燃气温度和压气机的增压比。此外增大发动机的空气流量也是主要手段之一。

提高渦輪前的温度有两个途徑：即渦輪叶片的有效冷却和研究新的耐高温材料，在最近的将来，把渦輪前的温度提高到1400°~1600°K，似乎是很可能的。

在提高增压比方面遇到一个最困难的問題就是增压比很高的压气机的稳定工作范围很窄，当空气流量低于設計状况时，压气机的前面几級中可能失速，甚至发生喘振，而后面几級却形成气流阻塞，使效率恶化，目前采用的解决办法有：調节进气道面积；放气；采用可調轉的叶片；采用双轉子压气机等。

目前这一类涡轮喷气发动机的推力已达10,000公斤以上，最低燃料消耗率已降至0.75~0.8公斤/公斤·小时左右，比重在0.2公斤/公斤推力左右。

还值得提出的是在提高压气机的增压比时，除了采用增加级数的办法外，还可采用超音速级作为压气机的第一级的办法。

第二个方向是小型涡轮喷气发动机。关于小发动机（小流量）能否代替大发动机的問題，目前尚有爭論，但小发动机設計能有效地降低比重却是事实，现有的靶机所用的小发动机比重已降至0.085左右，一般地也在0.15左右，而大发动机的比重却在0.2左右。

小发动机比重小的緣故是基于 $\frac{3}{2}$ 次方規律，也就是說：一台設計参数一定的涡轮喷气

发动机的推力是跟流量，因而也是跟迎风面积成正比，因此是跟尺寸的二次方成正比，而发动机的重量則是跟尺寸的三次方成正比。

相反的意见是：对于小发动机來說，雷諾数低，叶片机效率差，而且附件不按 $\frac{3}{2}$ 次方規律降低重量，总的迎面阻力增大，并且单位推力的制造成本增大。

第三个方向是大推力（大流量）、大M数、低增压比的涡轮喷气发动机，对于这种发动机，由于这类发动机主要在大M数飞行条件下工作，这时冲压效果很大，因此压气机的增压比不需要很高的数值。但由于飞行状态变化大要求压气机特性平稳。而涡轮所遇到的問題仍然是提高进气温度的問題。

目前这种发动机的設計水平为：推力在9000公斤以上；比重在0.2以下；燃料消耗率約1公斤/公斤·小时；单位迎面推力为8400公斤/米²左右。

总的来讲，为了提高发动机的推力；降低比重和燃料消耗率努力的方向是增大流量、提高气輪机的进气温度和压气机的增压比，提高增压比的办法主要是增加压气机的级数，但也有利用超音速级的。在設計中也有利用减小尺寸来降低比重的办法，对主要在大M数飞行状况下工作的发动机來說，还需要发展大流量低增压比特性平稳的压气机。

在进行設計航空涡轮喷气发动机的压气机和气輪机时，需要根据飞行器对发动机的要求，提出設計压气机和气輪机的原始数据，这些数据对压气机来讲至少应包括空气流量 G_B 、設計飞行高度、設計飞行M数、和增压比；而对气輪机来讲，至少应包括燃气流量 G_r 、气輪机进口处燃气的状况、气輪机該发出的功率和它的轉速。

当上述設計参数已經規定后，在設計航空压气机和气輪机时，一般应考虑到下列四方面的要求。首先，我們以常識可以知道，整台发动机中工作过程的完善程度，决定于它的部件在工作中完善与否，因此，我們必須尽可能設法提高压气机和气輪机的效率。其次，整台发动机的尺寸，由其部件的尺寸所决定。因此我們要尽可能使压气机和气輪机的尺寸縮小。特别是它們的迎风面积。第三，我們要設計出重量輕的压气机和气輪机以減輕整台发动机的重量。第四，我們应注意压气机和气輪机工作的可靠性和稳定性，因为它們影响整台发动机工作的可靠性和稳定性。这些要求，归納起来是：1) 效率高；2) 尺寸小；3) 重量輕；4) 工作平稳可靠。这些要求之間往往发生矛盾。分析这些矛盾和解决这些矛盾是航空叶片机的設計者應該注意的問題，也是研究航空叶片机的中心問題。應該指出，正是在解决这些矛盾的过程中，航空叶片机得到了发展。

§5 解放后我国在叶片机方面的成就

我国人民一向勤劳朴实，并富于创造性，前面已经提到，早在宋高宗时代（公元1131～1162年）就有走马灯的记载，走马灯是燃气轮机的鼻祖；在元朝时代（公元1300年左右）就有了水转翻车，到了明末（1630年左右）又有了风转翻车，这些都是原始的水力叶片机和风力叶片机。可惜当时在封建社会中，劳动人民受到重重剥削，困于生活，统治阶级对于发明创造漠不关心，以致劳动人民的智慧得不到发扬光大。

1949年解放以来，在党的英明领导和总路线的光辉照耀下，人民的积极性和创造性得到空前的发挥。

在叶片机的制造方面，1955年我国已制成了6000瓩的蒸汽轮机，到了1960年已能制造100000瓩的蒸汽轮机组了。在1956年就制造成功高压离心式鼓风机，流量为每小时45000立方米，同样，在航空方面也取得很大成就。

解放后在党的领导下，叶片机方面的科研工作也大力开展，科学研究机构相继成立，同时在苏联的援助下，我国的科学技术水平正在迅速发展提高。

自1958年以来，设有航空燃气轮机发动机设计和制造专业的各高等院校，通过了三结合的方式进行了许多实际工作，同时科学研究工作也蓬勃发展，促使教学质量大大提高。相信在党的教育工作方针指导下，祖国在叶片机的教学、科学研究和生产方面正象其它方面一样，必将有迅速的发展和提高。同学们应努力学习，刻苦钻研，又红又专争取在这方面做出有益于人民的贡献。

§6 叶片机原理在航空发动机设计专业中的地位，本课程的目的、内容和学习方法

在航空燃气轮发动机设计专业的教学计划中，叶片机原理是专业理论课程之一，这课程是建立在热力学和气体力学基础上的，它和涡轮喷气发动机原理发生密切的关系，这课程的目的归结为：

1. 研究叶片机特性。因为叶片机的特性对涡轮喷气发动机直接发生影响；
2. 阐明叶片机的气体动力计算方法以及叶片造型的方法，这是设计涡轮喷气发动机时首先必须掌握的；

3. 介绍叶片机原理的发展现状和发展趋势，为进一步研究叶片机打下基础。

本课程的教学环节包括：讲课、实验和课外作业。

压气机和气轮机合并成为一门课程——叶片机是合乎科学逻辑的，因为它们具有共同的理论基础，本课程的主要内容包包括三部分：第一部分为绪论和叶片机的基本方程；第二部分为压气机原理，其中又分为轴向压气机和离心压气机；第三部分为气轮机。

学习叶片机原理时应注意

1. 叶片机原理是建立在热力学和气体动力学基础上面的，因此对这两门课的有关部分应掌握烂熟，理解透彻，特别是基本方程部分（包括能量方程，柏努利方程，欧拉方程等；

各过程在温焓图、焓焓图和压容图上的表示；相似理論；气体在噴管中的流动；机翼理論等等。

2. 航空叶片机原理是学生在专业計劃中最早碰到的专业理論課程。专业課中所对待的問題一般与基础課中不同，主要是影响因素多，解决途徑也比较多样化，学生应通过这門課程的学习，培养对課程內容的提炼、总结和找出主要矛盾的能力。学生还应该养成听课記笔记的习惯。筆記本上要留出空白余地，以便在复习和閱讀参考书后写补充笔记和心得。这样写成的笔记才是辛勤劳动的成果，以后考試复习时可以作为依据，实际工作中也有参考价值。

3. 在課程进行中，应该密切师生联系，这样更可以起“教学相长”的作用。

叶片机中的流动，实际是一种带粘性的可压三元非定常流动。

叶片机中气流的基本方程

§ 1 建立基本方程时的一些简化假设

叶片机原理中经常利用那些把叶片机流程部分中各截面的气体参数联系起来的方程，在本章中要复习这些基本方程。

在讨论这些基本方程之前，先说明如下：

1) 由于流程形状复杂，摩擦阻力和附面层的存在，气体参数不仅沿叶片的流程部份变化，而且在任意横断面上的各点它们也不相同，因此在叶片机中气流一般是三元的。

2) 由于旋转的工作轮上叶片的数目是有限的，因此在流程中任一点的气体参数是跟时间周期地变化的。也就是说，气体运动是周期性非定型的流动。

对于三元的，周期性非定型的流动，联系气体参数的基本方程异常复杂、难于应用，因此在列出这些方程时常作一系列简化假设，使方程大大简化。同时，实验指出，对于航空叶片机的计算和研究，这些经简化假设后的方程往往是足够正确的，最常用的简化假设如下：

(1) 在许多场合，叶片机流程中任意横断面上的气体参数是当作一样的，也就是等于该截面上气体参数的平均值。但是在某些场合，需要考虑各点上气体参数是变化的，特别是各个半径上气体参数的变化。

(2) 一般略去由于叶片数目有限而引起气流参数的周期性变化，而把气体流动当作是定型的。

气体参数的平均值是可以用的方法求得的，例如，在某一截面上气流的平均速度可以按气体的动量求得：

$$\bar{C}_{CP} = \frac{\int \bar{C} dm}{\int dm} = \frac{\int_F \bar{C} \rho C_n dF}{\int_F \rho C_n dF}$$

式中：dF——截面的微面积；

ρ ——微面积dF处气体的密度；

C_n ——垂直于dF的气流分速度；

\bar{C} ——气流速度的矢量。

平均速度也可按动能求得：

$$C_{cP} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} \int C^2 dm}{\frac{1}{2} \int dm}} = \sqrt{\frac{\int_F C^2 \rho C_n dF}{\int_F \rho C_n dF}}$$

当然，还可以按其他方法求得，应该注意，用不同方法求得的平均值都有它的特殊意义。例如，按动量求得的平均速度，拿来求动量是完全正确的。按动能求得的平均值，则拿来求动能是完全正确的，它们的值在一般情况下并不相等，但是当各点的真实参数偏离平均参数不大时，用不同方法求得的平均值就相差不大。

在下面的讨论中，一般是指定型流动。而且，当没有特殊说明时，叶片机流程截面中气体参数是当作均匀的。

§ 2 連續方程式

假設气体流动是定型的，那么流进截面 1—1 的气体重量流量必定等于流出截面 2—2 的重量流量（参閱图 1）。如果各截面上的参数是均匀的，連續方程式可写成下列形式：

$$\begin{aligned} G &= \gamma_1 F_1 C_{1a} \\ &= \gamma_2 F_2 C_{2a}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中： F_1 ——流程截面 1—1 处的环形面积；

F_2 ——流程截面 2—2 处的环形面积；

c_{1a} ——垂直于截面 1—1 的气流分速度；

c_{2a} ——垂直于截面 2—2 的气流分速度；

γ_1 、 γ_2 ——分别代表截面 1—1 和 2—2 上气体的重量

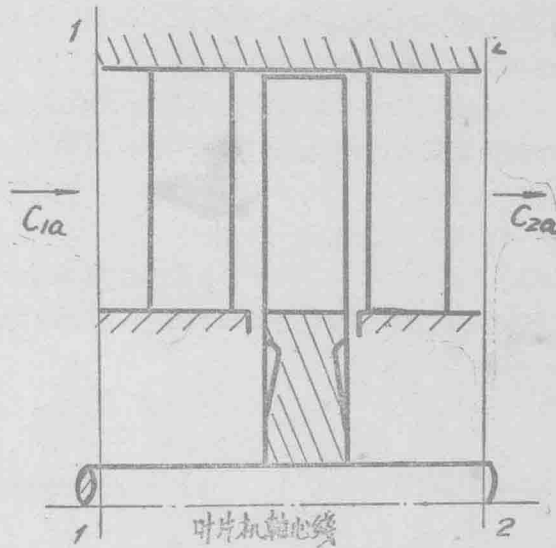


图 1 为了得出連續方程式而作的叶片机流程图

实际上，横截面上气流的法綫分速度和气体的重度往往都是变化的。在这种场合，連續方程应写成：

$$G = \int_{F_1} \gamma_1 C_{1a} dF = \int_{F_2} \gamma_2 C_{2a} dF \quad (2)$$

§ 3 能量守恒方程

根据能量守恒定律，作用在被划分出的气体上所有外力做的功和气体与外界的热交换都用来改变气体的内能和动能（在沒有化学反应的情况下）。当合到每公斤气体时，能量守恒方程可写成：

$$AL_{\text{gh}} \pm Q_{\text{BH}} = C_V (T_2 - T_1) + \frac{A}{2g} (C_2^2 - C_1^2) \quad (3)$$

内能

动能

式中: L_{BH} ——合到 1 公斤气体, 所有外力对气体做的功, 公斤·米/公斤;

A ——机械功的热当量 $\left(\frac{1}{427} \text{千卡/公斤米}\right)$;

Q_{BH} ——合到 1 公斤气体的外界传热, 千卡/公斤, 正号表示外界向气体传热, 负号表示气体向外界传热;

C_V ——气体的等容比热, 千卡/公斤 $^{\circ}C$;

T_1, T_2 ——分别代表 1-1 和 2-2 上气体的温度, $^{\circ}C$ 绝对;

C_1, C_2 ——分别代表 1-1 和 2-2 上气体的流速, 米/秒;

g ——重力加速度, 9.81 米/秒 2 。

作用在被划分出的气体上所有外界做的功包括 (1) 重力所做的功; (2) 由工作轮轴传给气体的功; 和 (3) 在进口截面 1-1 和出口截面 2-2 上气体压力所做功的差值, 有时把它称为流动功。把上述各项都合到每公斤气体, 并参阅图 2 可作:

$$L_{BH} = \pm L_{\Omega} + (p_1 v_1 - p_2 v_2) + (H_1 - H_2) \quad (4)$$

式中: L_{Ω} ——由工作轮轴传给气体的机械功 (正号表示轴对气体做功, 如在压气机中; 负号表示气体传给工作轮轴的功, 如在气轮机中);

$p_1 v_1$ ——截面 1-1 处外界气体对被划出的气体所做的流动功;

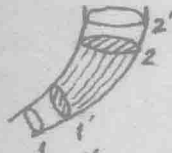
$p_2 v_2$ ——截面 2-2 处被划分出的气体对外界气体所做的流动功; p ——压力, 公斤/米 2 ;

v ——比容, 米 3 /公斤;

H_1, H_2 ——分别代表截面 1-1 和 2-2 处气体重心距离某选定基准面的高度, 米;

(H_1, H_2) ——每公斤气体的重力所做的功, 在叶片机中这功量很小, 一般把它略去。

流动功的引入:



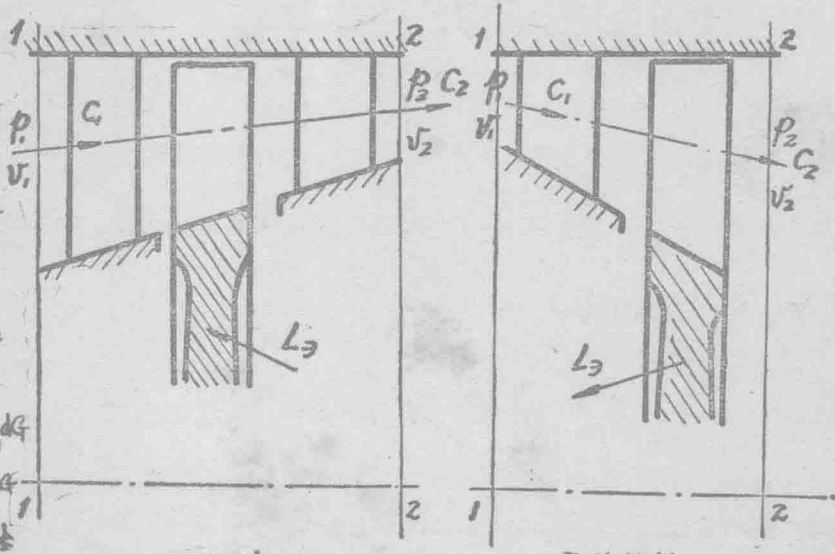
由截面 1 到 2 截面, 看做是面积 F_1 的活塞所造成, 活塞上的压力是 p_1 , 则对面积 F_1 所做的功:

$$p_1 F_1 v_1 dt = p_1 v_1 dG = \frac{p_1}{\gamma_1} dG$$

② 同理, 活塞 F_2 , 气体活塞移到 2', 是气体对活塞做功, 故为负功:

$$-p_2 F_2 v_2 dt = -p_2 v_2 dG = -\frac{p_2}{\gamma_2} dG$$

③ 作用在活塞侧面积上 r_2 的压力 p_2 对气体所做的功:



a. 压气机

b. 汽轮机

图 2 为了得出能量守恒方程而作的叶片机流程图

④ 流动功

$$dL = (p_1 v_1 - p_2 v_2) dG = \left(\frac{p_1}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_2}\right) dG$$