

高等學校教學用書

航空气輪机原理

B. X. 阿比安茲著



高等教育出版社

高等學校教學用書



航空氣輪機原理

B. X. 阿比安茲著
李 啟 恩 譯

高等教育出版社

本書係根據蘇聯國立國防工業出版社 (Государственное издательство оборонной промышленности) 出版的阿比安茲 (В. Х. Абизанц) 著“航空氣輪機原理” (Теория авиационных газовых турбин) 1953 年版譯出。原書經蘇聯文化部高等教育署審定為航空高等工業學校教學參考書。

本書敘述了航空氣輪機理論的基本概念以及氣輪機底熱計算和氣動力計算的必要資料。全書主要的內容是：氣輪機流程部分中的能量轉換；氣輪機特性曲線的繪製方法以及氣體流過氣輪機流程時所有損失的敘述與分析。

本書除作為教學參考書外，尚可供氣輪機以及氣輪發動機的設計師和研究人員之用。

航 空 氣 輪 機 原 理

B. X. 阿比安茲著

李 啟 鳳 譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版

北京城琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版營業許可證出字第〇五四號)

商務印書館上海廠印刷 新華書店總經售

書號 603 (譯 442) 開本 860×1168 1/32 印張 72/16 字數 176,000

一九五六年一月上海第一版

一九五六年一月上海第一次印刷

印數：1-1,200

定價：(8) ¥1.09

目 錄

序	5
緒論	7
第一章 氣輪機的概念及其分類	10
§ 1. 氣輪機作為空氣噴射式發動機的主要組成部分	10
§ 2. 氣輪機的工作原理與速度三角形的諸要素	14
§ 3. 氣輪機的分類	17
第二章 氣輪發動機的理想熱循環	26
§ 1. 循環的 $p-v$ 及 $T-S$ 圖的表示法	26
§ 2. 能量不滅方程與氣體的膨脹功或壓縮功	28
§ 3. 理想循環的功與效率	35
§ 4. 溫度升高比與壓力升高比對循環的功與效率的影響	37
第三章 氣輪發動機的實際熱循環	43
§ 1. 實際循環中的損失	43
§ 2. 實際循環的功與效率	58
§ 3. 循環底參數對循環的功與效率的影響	55
第四章 氣輪發動機中的回熱與分級燃燒	61
§ 1. 氣輪發動機中的回熱	61
§ 2. 分級燃燒	73
第五章 噴流理論及管嘴環計算	80
§ 1. 氣體在管嘴中的絕熱流動	80
§ 2. 有損失時氣輪機管嘴中的氣體流動	89
§ 3. 在斜切口及軸向餘隙中氣流旋偏差	92
第六章 氣輪機級中的能量轉換	98
§ 1. 問題的所在	98
§ 2. 葉輪前後氣體參數沿徑向的變化	101

§ 3. 氣流方向沿半徑的變化	108
§ 4. 輪緣上的功與輪緣效率	112
§ 5. 氣輪機的動力效率與功率	124
第七章 氣輪機的特性曲線	127
§ 1. 氣輪機特性曲線的計算方法	128
§ 2. 繪製氣輪機近似特性曲線的例子	134
第八章 氣輪機葉棚中的損失與葉棚的實驗研究的結果	141
§ 1. 流體動力葉棚的理論計算方法	141
§ 2. 葉棚中的損失與研究葉棚的實驗方法	144
§ 3. 氣輪機葉棚的實驗研究結果	155
第九章 燃燒室	169
§ 1. 概論	169
§ 2. 近代發動機的燃燒室	172
§ 3. 燃燒室中的總壓力損失	177
§ 4. 工質的物理常數與燃燒方程	180
第十章 氣輪機的熱計算與氣動力計算的方法	188
§ 1. 發動機概算	188
§ 2. 氣輪機底計算	191
§ 3. 氣輪機流程部分尺寸的決定	197
第十一章 近代航空氣輪機	200
§ 1. 數種氣輪機的敘述及其主要參數	200
§ 2. 功率為 11000 馬力的氣輪機的計算實例	209
參考書目	218
人名譯名對照表	219
專用名詞譯名對照表	220
符號對照表	223

序

本書係根據作者在莫斯科巴烏曼高等工業學校和航空工業學院所講授的航空氣輪機原理這門課程而編寫的。

隨着航空氣輪發動機的發展，有必要設立有關課程，闡明這種發動機及其構件的原理，特別是航空氣輪機。蘇聯的學者們：烏伐洛夫（В. В. Уваров）、斯解契金（Б. С. Стечкин）、基里洛夫（И. И. Кириллов）以及索基科夫（Г. И. Зотиков）等人在氣輪機原理上作出了巨大的貢獻，並出版了許多關於這方面的書籍和論文；但是本書對從事於航空氣輪機原理研究的及在這一技術部門工作的人員來說，仍有補充性的幫助。

在氣輪機課程中，通常分氣輪機為兩類：衝擊式氣輪機和反應式氣輪機。這種分法是與發生在氣輪機流程中的現象底本質不符合的。作者在本書中摒棄這種分類法，僅採用反應式氣輪機的觀念，並在第六章內對輪緣效率給以新的說明。在同一章內指出：葉輪前後氣體的軸向速度之比等於在葉輪平均直徑處氣體密度的反比。

在第七章內給出繪製氣輪機特性曲線的近似方法以及按這個方法計算某一航空氣輪機特性曲線的結果。

在第八章內作者力求有系統地敘述氣輪機葉棚與輪級的最新研究結果，這些結果使我們可以比以前更為正確地估計氣輪機中的損失。

這三章（第六、七及八）是本書的主要篇章。

功勳科技工作者技術科學博士依諾席姆采夫（Н. В. Иноземцев）教授、技術科學博士特米德里耶夫斯基（В. И. Дмитриевский）教授和技術科學候補博士契爾卡索夫（Б. А. Черкасов）副教授細心地校閱

了作者的手稿並提出了許多寶貴的意見;技術科學博士喀三湛(П. К. Казанджан)副教授仔細地完成了頗為繁重的對本書的校訂工作;作者謹向他們致謝。

在完成本書的許多計算和插圖時,莎文高娃(К. А. Савенкова)給與我巨大的幫助,作者也對她表示深切的謝意。

作 者

結 論

氣輪機的誕生地是俄國。1897年俄國的工程師古士明斯基(П. Д. Кузнецкий)第一次在世界上建造了一架定壓燃燒式氣輪機，但由於1900年他的逝世，他沒有能完成對該氣輪機的試驗。1908年，俄國工程師卡拉伏琴(В. В. Караводин)發明了所謂脈動式氣輪機。

將氣輪機應用於航空也是首先在俄國提出的。1914年，海軍中尉尼喀爾斯基(М. Никольский)研究出一種氣輪螺槳式發動機，用一具三級氣輪機來轉動螺旋槳。1923年，巴扎洛夫(В. И. Базаров)創議一具航空氣輪發動機的方案，包括有氣輪機、離心式壓氣機、燃燒室及螺旋槳等，即：具備了現代氣輪螺槳式發動機所有的構件。

蘇聯學者馬科夫斯基(В. М. Маковский)教授、烏伐洛夫教授以及索基科夫等人在氣輪機的理論和實際上作出了巨大的貢獻。

蘇聯學者最主要的功績之一是在於他們論證了定壓燃燒式氣輪機的優越性及其發展遠景，而那時外國的(特別是德國的)氣輪機專家却還在定容燃燒式氣輪機的領域裏工作着。所有以後的氣輪機底發展，包括航空氣輪機在內，極有力地證實了蘇聯學者們的預言，因為製造定壓燃燒式氣輪機的途徑顯示為發展氣輪機的大道。

蘇聯氣輪機製造業中最初的最偉大的工作者之一，馬科夫斯基教授，在1925年發表了“定壓式內燃氣輪機的實驗研究”一文。馬科夫斯基在以地下煤層氣化產物作為工質的氣輪機的理論和製造方面，作了特別多的研究。

關於地下煤層氣化的概念，早在六十年以前，就被俄國偉大的學者

孟德雷耶夫 (Д. И. Менделеев) 提出,但只有在蘇維埃政權下才得到實現。馬科夫斯基教授設計了並在 1939 年製造了一架用頓巴斯某礦井的地下煤層氣化產物來工作的氣輪機。當時由於戰爭爆發,沒有能完成這項工作。

偉大的氣輪機專家索基科夫發表了一系列的論著,其中有一篇是“內燃氣輪機問題”(1935 年)。

除了論證了定壓燃燒式氣輪機的優越性外,索基科夫首先提出並研究出在氣輪機理論上的一系列原則。例如,他提出了分級燃燒的氣輪機循環,在氣輪機各級之間裝置中間燃燒室來補充加熱,因而增加了氣輪機的功率(這一循環在第四章裏討論)。

他也是第一個建議在氣輪機工作過程中應用過度膨脹,使氣輪機後方的氣體壓力比周圍大氣的壓力低,在這種場合下,必須在氣輪機後面使用擴散器。引用這個方法,首先可使葉片的高度略為小些(因為氣流速度的增加勝過了氣體密度的減小,結果氣輪機所需的流路截面可以減小);其次,也提高了氣輪機的功率,這在氣輪螺槳式發動機中尤為重要。

在氣輪機和航空氣輪機領域內另一個偉大的學者是烏伐洛夫教授。他發表了許多關於氣輪機原理的有價值的創造性的著作。1935 年,他發表了專論“氣輪機”,書中包含了許多作者獨創的理論探討,因此成為當時在世界文獻中論述氣輪機的巨著。

過了十年,烏伐洛夫又發表了一部傑出的著作,書中根據了偉大的俄國學者茹科夫斯基 (Н. Е. Жуковский) 關於螺旋推進器的渦流原理的天才著作,研究出氣輪機以及汽輪機的空間葉型設計方法,在許多工廠中得到了廣泛的應用。

近年來,蘇聯學者基里洛夫教授與喀三湛等人在氣輪機的原理方面作了巨大的貢獻。其中喀三湛發表了一篇偉大的專論,解釋氣輪機在非計算狀態下工作的研究結果及繪製氣輪機特性曲線的方法。

關於氣輪增壓器的氣輪機底理論與設計製造方面的發展,巨大的功績應屬於特米德里耶夫斯基教授。

第一章 氣輪機的概念及其分類

§ 1. 氣輪機作為空氣噴射式發動機 的主要組成部分

航空氣輪機是空氣噴射式氣輪發動機的一個主要組成部分。空氣噴射式發動機的基本類型是：

1. 氣輪噴氣式發動機，無螺旋槳，飛機的推力——反作用力係由進入氣流與排出氣流兩者的動量差產生的。

2. 氣輪螺旋槳式發動機，有螺旋槳，其動力傳遞於螺旋槳上（和應用活塞式發動機的螺旋推進機相似）。在這種發動機裏，由於排出氣流的作用，也能產生少許推力，但是在這個場合下，主要的推力得之於螺旋槳。

為了明瞭氣輪機所起的作用，我們來研究一下空氣噴射式氣輪發動機底基本類型的圖樣。

圖 1 示氣輪噴氣式發動機的簡圖。空氣以等於飛行的速度 w_0 進入進氣裝置（Входное устройство）У，在其中氣流發生滯止作用，因而壓力由 p_0 升至 p_1 。氣流的滯止（Торможение потока）係在發動機的入口開始，故進氣裝置的作用在於滯止發動機外面的空氣流，並使之在其內部達成調勻的滯止狀態（有時我們使用擴散器 Θ 來完成）。空氣由進氣裝置進入壓氣機 К，經壓縮後其壓力由 p_1 升至 p_2 ；之後空氣再進入燃燒室 КС，燃燒室裝有噴油器（Форсунка） Φ 以噴射燃油（通常為航空煤

⊖ 原文為 Конфузор，此處按氣流須予以滯止的意義來說，應是用 Диффузор，茲按後一個字譯為擴散器——譯者註。

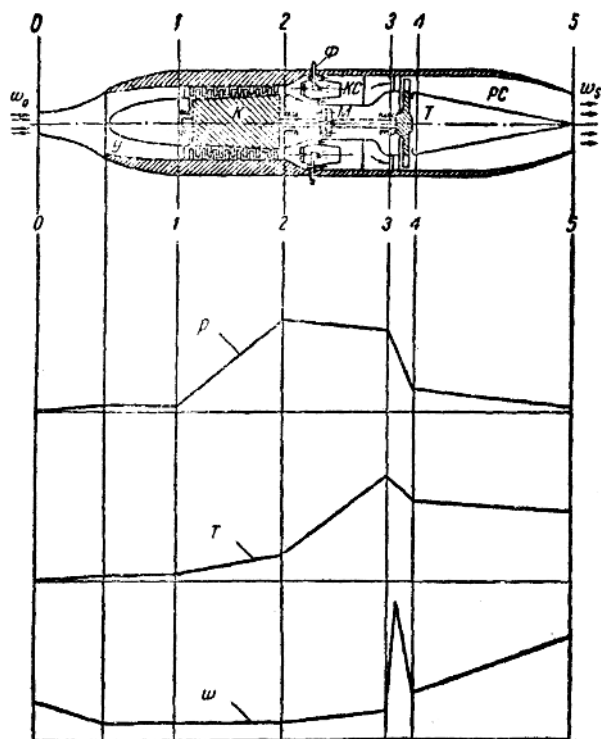


圖 1. 氣輪噴氣式發動機簡圖及沿發動機通路空氣與氣體參數的變化。

油)。燃油的點燃在發動機起動時由電花插頭司其職，嗣後便藉燃燒區內的高溫氣體來保持。因為燃燒區的溫度要維持在 $2000-2200^{\circ}\text{C}$ 左右，這對燃油的良好燃燒是必要的；所以大部分的空氣通常並不參與燃燒，還由機殼與燃燒室火管（Жаровая труба）間的環形餘隙中流過。這部分空氣在燃燒室末端與燃成氣體相混合，使其溫度降為 $800-850^{\circ}\text{C}$ ，這是近代氣輪發動機的葉片所能承受的溫度。此外，燃燒室的此種構造保證了火管的冷卻，並且熱量不致從發動機外傳。

氣體自燃燒室進入氣輪機 T ，這裏一部分能量轉變為轉動壓氣機（壓氣機藉剛性聯軸節與氣輪機接合）所需的機械功。另一部分的氣體能量在反應管嘴（Реактивное сопло） PC 中變為動能，產生發動機的推力。

圖 1 下部表示沿發動機通路空氣與氣體的主要參數：壓力 p 、溫度 T 和速度 w 的變化。

今後我們研究氣輪發動機的循環時，將採取對應於圖 1 各截面上所註的指數，作為氣體參數的標記，即由 0 至 5：

指數“0”——大氣中的空氣參數；

指數“1”——壓氣機前方的空氣參數；

指數“2”——壓氣機後方的空氣參數；

指數“3”——氣輪機前方的氣體參數；

指數“4”——氣輪機後方的氣體參數；

指數“5”——反應管嘴口上的氣體參數。

由於燃燒室的兩端是開敞的，且供熱過程係在並非密閉的容積中進行，故在供熱過程中，氣輪機前方的氣體壓力 p_3 保持不變，且等於壓氣機後方的空氣壓力 p_2 [嚴格地講，由於燃燒室中氣流阻力（Гидравлическое сопротивление）及熱阻（Тепловое сопротивление）的影響， p_3 略低於 p_2]。氣輪機運行時，燃燒室中壓力保持不變者稱為定壓燃燒式氣輪機（Турбина постоянного давления сгорания），或簡稱為定壓式氣輪機。近代的氣輪發動機只採用定壓式氣輪機，故本書僅討論定壓式氣輪機的原理。至於其他型式的氣輪機將於討論其分類時附帶提到。

圖 2 示氣輪螺旋式發動機的圖樣。這裏，不同於氣輪噴氣式發動機，氣輪機的功率並不等於壓氣機的功率，而是超過了壓氣機的。氣輪機的裕量功率經由減速器傳給螺旋槳。剩下的一部分可用焓差（Располагаемый теплоперепад）在反應管嘴中再被利用。至於焓差應如何在氣輪機及管嘴之間作最有利的分配，使能獲得最大的總推力，應該

在空氣噴射式發動機理論的課程中詳細討論。這裏只須注意到，在大多數情況下，將全部可用壓力落差（*Располагаемый перепад давлений*）耗用於氣輪機中是比較有利的。至於反作用力，僅由利用氣體自氣輪機排出時所持的速度來得到。

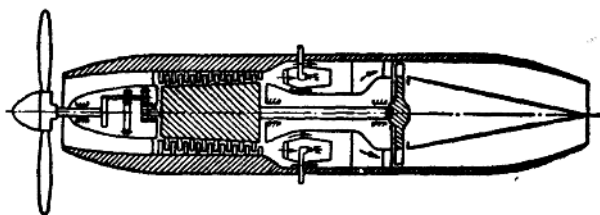


圖 2. 氣輪螺旋式發動機簡圖。

由此可見，不僅在氣輪噴氣式發動機裏，而且尤其在氣輪螺旋式發動機裏，氣輪機所起的作用很大。由於氣輪機各部構件必須在高溫下承擔較大的機械應力，故氣輪機為發動機中受力最大的部分。保證氣輪機的可靠運行以及達到容許效率的困難是阻礙氣輪機發展的主要原因。

在航空氣輪機的製造上，這些困難尤為加甚；航空氣輪機主要有以下的要求。

- (1) 運行時的可靠性（考慮到發生事故時的嚴重後果）；
- (2) 在額定狀態（*Номинальные режимы*）下以及巡航狀態（*Крейсерские режимы*）下的高度經濟性（否則飛機飛行重量過分增加）；
- (3) 小的重量與體積。

後面的那個要求使我們必須在氣輪機的一個級中利用較大的焓差，要達到這個要求，又必須使氣體在葉輪入口處有較大的圓周速度，較大的氣流轉折角（*Угол поворота струи*）以及較高的 M 數等，這些情況使我們要滿足為首兩項要求更加困難。

僅在近十年來，由於冶金學及葉輪機原理上的進步，加上人們在定

式汽輪機上以及在活塞式航空發動機的氣輪增壓機 (Турбокомпрессор) 上的累積經驗, 才使氣輪機特別是航空氣輪機的製造獲得巨大的成就。

§ 2. 氣輪機的工作原理與速度三角形的諸要素

氣輪機是一種葉輪機; 氣輪機的理論以氣體的熱力學和葉柵 (Лопаточные решетки) 的流體動力學為基礎 (葉柵係無數形狀相同距離相等的葉片的組合)。

氣輪機中氣體能量的轉變主要地發生在帶有導向葉片 (Сопловые лопатки) 2 (圖 3) 的固定的管嘴裝置 (Сопловой аппарат) 1 以及帶有工作葉片 (Рабочие лопатки) 4 的轉輪 3。

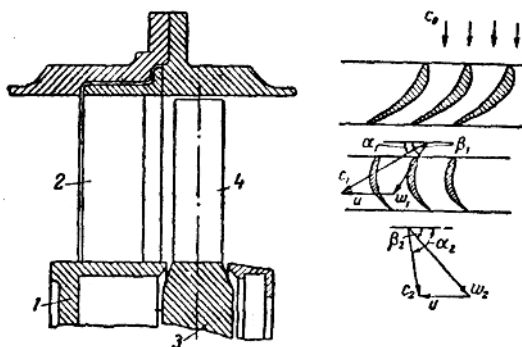


圖 3. 軸流式氣輪機的流程部分。

氣輪機中氣體的通路從管嘴入口開始至工作輪出口為止稱為氣輪機的流程 (Проточная часть)。

在研究氣輪機的工作過程時, 我們引用氣輪機學中所規定的——些指數來表示氣體的參數, 即: “0”——管嘴前, “1”——管嘴與葉輪之間的餘隙, 以及 “2”——葉輪後。

氣輪機的工作過程如下：業經壓縮和加熱的氣體以速度 c_0 進入導向葉片間的槽道（槽道的形狀多半是漸縮式的），這裏一部分壓力轉變為氣流排出時的動能，因此氣體的速度由 c_0 增至 c_1 。此時氣體的壓力和溫度降落。

氣體自管嘴排出時與氣輪機的轉動平面（Плоскость вращения）成夾角 α_1 ，此時氣體以相對速度 w_1 以及 β_1 角進入工作輪（Рабочее колесо），由於氣流的作用工作輪以輪緣速度（Обружная скорость） u 迴轉。在工作葉片的槽道中間，氣體復行膨脹，因此壓力和溫度下降。氣體在管嘴和工作輪中所獲得的一部分動能轉變為轉動壓氣機的機械功，結果速度由 c_1 降至 c_2 ，氣體即以速度 c_2 自工作輪排出，同時其方向急劇改變；此時氣體的相對速度為 w_2 ，並與轉動平面成夾角 β_2 。氣輪機軸上所得到的功係氣體流過工作輪時其動量變化的結果，故本質上葉柵的功用在於導引氣流至我們需要的方向。

和飛機機翼的情況一樣，作用在葉片凹面上的壓力常較作用在凸面上的壓力為大，這由圖 4 可以明顯地看到，圖上表示沿氣輪機葉片外形壓力分佈的例子。這個壓力差產生了轉動葉片及與之相連的葉輪的舉力（Подъемная сила）。應該指出，葉片由凸面向凹面有一個正的壓力梯度（Градиент давления），決定於葉片槽道的曲線形狀。氣體質點沿槽道流過時，是在離心力的作用下，這力傾向於將此質點投向葉緣，即投向葉片的凹面，這樣也就使槽道中間出現了壓力梯度。

氣體流經槽道時以速度 w 作相對運動（相對於假定為停止的葉片），同時並隨同葉片以速度 u 作牽連（迴轉）運動。據動力學可知，相對速度和牽連速度的矢量和等於絕對速度矢量，即

$$\vec{c} = \vec{w} + \vec{u}.$$



圖 4. 沿氣輪機葉片外形壓力分佈的例子。

氣體在工作輸入口與出口的速度矢量圖表於圖 3。通常將兩個速度三角形畫在一起，如圖 5 所示。沿槽道的寬度氣體的絕對速度 c_1 與

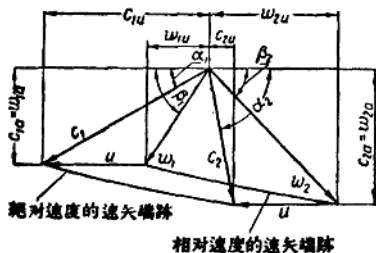


圖 5. 速度三角形。

c_2 ，以及相對速度 w_1 與 w_2 並不相等。這是因為壓力梯度的存在與繞流葉棚的實際氣流與理想不可壓且無粘性的勢流（Потенциальное обтекание）有別，致造成分離渦區（Срывные вихревые зоны）、邊界層（Пограничный слой）的摩擦以及激波（Скачок уплотнения）等；此外，氣輪機通流截面為葉片邊緣所阻塞，在其後方形成渦區，也促使速度場（Скоростное поле）的不均勻。因此速度 c_1 與 w_1 以及 c_2 與 w_2 應理解為在葉輪遠前方與遠後方的沒有干擾的氣流速度。實際上速度 c_1 與 w_1 應該認為導向葉片和工作葉片之間的軸向餘隙（Осевой зазор）當其環狀截面為氣體所充滿時氣體的平均絕對速度與相對速度。速度 c_2 與 w_2 的意義同前，唯此時係指氣輪機後方的截面。

氣流在氣輪機轉動平面上的分速度稱為圓周分速，用符號 u 表示。豎直分速稱為軸向分速（因為它與機軸平行），用符號 a 表示。圓周分速表徵出氣體對氣輪機機軸所作的功，而軸向分速——氣體流過氣輪機時的體積流量（Объемный расход）。

氣體通過槽道時，其絕對速度之值自 $\bar{c}_1$ 變為 $\bar{c}_2$ ，而相對速度自 $\bar{w}_1$ 變為 $\bar{w}_2$ 。如作矢量 $\bar{c}$ 及 $\bar{w}$ 的頂端的連線（相當於絕對速度及相對速度的中間值），即得速度 $\bar{c}$ 及 $\bar{w}$ 的所謂速矢端跡（Голограф）。

角 α_1 、 β_1 和 β_2 應該理解為氣流自管嘴流出、進入工作輪及自工作輪排出的角度（亦為平均值）。氣流角度通常並不與葉片的構造角（Конструктивные углы）一致（詳細說明見第 156 頁）。因此葉片的構造