

65511

0058 中等專業學校教學用書

78.5536

KLJ

燃氣渦輪
噴氣發動機原理

И. И. 庫拉金 著

高等教育出版社

統一書号15010·43

定价 ¥1.74

中等專業學校教學用書



燃 氣 渦 輪 噴 氣 發 動 機 原 理

И·И·庫拉金 著

馮其成 李學伊 蘇文 譯
張廣泰 岳少文

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)1952年出版、技術科學博士庫拉金教授(И. И. Кулагин)所著“燃氣渦輪噴氣發動機原理”(Теория газотурбинных реактивных двигателей)一書譯出。原書經蘇聯航空工業部審定為發動機製造中等技術學校教科書。

本書係根據蘇聯航空中等技術學校“燃氣渦輪噴氣發動機原理”這門課程的教學大綱而編寫，可作為航空中等技術學校及專修科的教科書。

書中闡明了熱力學及氣動力學的基本知識，並研究了渦輪噴氣發動機的工作過程及渦輪噴氣發動機主要各部分——壓縮機、燃燒室、渦輪及尾噴口的工作以及它們的計算方法。書中還列出了渦輪噴氣發動機的特性曲線及發動機的熱力計算。本書還研究了渦輪螺旋槳發動機及內外函渦輪噴氣發動機，並列出了它們的特性曲線及計算方法。

本書不僅可以作為航空中等技術學校的教科書；也可以作為航空學院學生及那些對燃氣渦輪噴氣發動機原理有興趣、但並不具備專門知識的人員用的參考書。

本書由馮其成、李學伊、蘇文、張廣泰、岳少文合譯，最後由馮其成整理，並由王裕平及羅德偉作技術校訂。

燃氣渦輪噴氣發動機原理

И. И. 庫拉金 著

馮其成等譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

京華印書局印刷 新華書店總經售

書號 15010·48 開本 850×1168 1/32 印張 11³/₈ 插頁 2 字數 276,000

一九五五年九月北京第一版

一九五六年五月北京第三次印刷

印數 1,701—1,900 定價(10) 1.74

目 錄

序	7
緒論	9
第一章 噴氣發動機氣動力學基礎	17
1. 連續方程式	17
2. 運動氣體的能​​量方程式	19
3. 靜滯氣流的狀態參數(靜滯參數)	24
4. 靜止氣體的能​​量方程式	25
5. 柏努利方程式	28
6. 動量方程式	31
7. 動量矩方程式	38
第二章 航空燃氣渦輪發動機概論	40
1. 引言	40
2. 渦輪噴氣發動機的簡圖與工作原理	40
3. 複合推力式燃氣渦輪發動機的簡圖與工作原理	42
第三章 燃氣渦輪發動機的循環	45
1. 概論	45
2. 等壓加熱循環	46
3. 燃氣渦輪發動機循環和活塞式發動機循環的比較	56
4. 等壓加熱再生熱循環	58
5. 等壓分段加熱循環	62
第四章 渦輪噴氣發動機的工作過程,推力和效率	64
1. 現有發動機構造簡述	64
2. 渦輪噴氣發動機內基本的工作過程(實際循環)	68

3. 噴氣發動機產生的推力	73
4. 噴氣發動機的效率	77
5. 渦輪噴氣發動機基本相對(單位)參數	80
第五章 渦輪噴氣發動機的進氣部分	84
1. 概論	84
2. 渦輪噴氣發動機進氣部分的計算原理	87
3. 計算例題	93
第六章 壓縮機	95
1. 引言	95
2. 渦輪壓縮機的構造和工作原理	96
3. 渦輪壓縮機工作的熱力學原理	101
4. 壓縮機的效率 and 壓縮機所需的功率	109
5. 離心式壓縮機的理论 and 計算基礎	114
a) 工作輪進口	115
b) 工作輪	118
B) 擴散器	123
6. 離心式壓縮機近似計算的例題	127
7. 軸向式壓縮機的理论 and 計算基礎	131
a) 速度圖和級的總功	133
b) 級的反應度	137
B) 級的絕熱壓及其效率與葉片格子主要參數間的關係	140
r) 壓縮機總絕熱壓的按級分配	147
8. 軸向式壓縮機計算例題	150
9. 離心式和軸向式壓縮機的特性曲線	154
第七章 燃燒室	161
1. 概論	161
2. 燃燒過程的特點及組織概論	164
3. 燃燒室熱力計算原理	168
4. 計算例題	177

第八章 渦輪	179
1. 概論	179
2. 渦輪的構造和工作原理	183
3. 氣體自渦輪噴嘴的噴出	187
4. 渦輪工作葉片上能量的轉變	195
5. 渦輪的效率和功率	198
6. 渦輪葉片的計算原理	207
7. 多級渦輪	217
8. 渦輪熱力計算舉例	221
第九章 尾噴口	228
1. 概論	228
2. 計算基礎	230
第十章 渦輪噴氣發動機的推力及經濟性與工作過程中 基本參數的關係	234
1. 渦輪噴氣發動機的單位推力	234
2. 渦輪噴氣發動機的經濟性	241
第十一章 渦輪噴氣發動機的特性曲線	252
1. 渦輪噴氣發動機的速度特性曲線和高度特性曲線	252
2. 渦輪噴氣發動機速度特性曲線和高度特性曲線的近似計算	258
3. 渦輪噴氣發動機的節流特性曲線	267
4. 渦輪噴氣發動機標準條件的引證和節流特性曲線的近似計算	276
5. 渦輪噴氣發動機調整簡述	282
6. 渦輪噴氣發動機推力的加強	289
第十二章 渦輪噴氣發動機的熱力計算	300
1. 概論	300
2. 渦輪噴氣發動機熱力計算例題	303
第十三章 渦輪螺旋槳發動機	308
1. 概論及基本關係式	308

2. 有用能量最有利的分配	315
3. 工作過程的基本參數對渦輪螺旋槳發動機功率、推力及 經濟性的影響	319
4. 渦輪螺旋槳發動機的速度特性曲線及高度特性曲線	327
5. 渦輪螺旋槳發動機速度特性曲線及高度特性曲線的近似計算	332
6. 渦輪螺旋槳發動機的節流特性曲線	335
第十四章 內外函渦輪噴氣發動機	341
1. 概論及基本關係式	341
2. 內外函渦輪噴氣發動機有用能量的最有利分配	345
3. 內外函渦輪噴氣發動機的特性曲線	349
第十五章 渦輪螺旋槳發動機及內外函發動機 的熱力計算	351
1. 引言	351
2. 渦輪螺旋槳發動機熱力計算的例題	352
3. 內外函渦輪噴氣發動機熱力計算的例題	355
參考書目	360

序

本書是陳述航空燃氣渦輪發動機，即渦輪噴氣式，渦輪螺旋槳式和內外函渦輪噴氣發動機理論的一般課程。它是航空中等技術學校發動機製造科學生用的教科書，但也可作為高等航空學校學生的教學參考書。這本書對於在噴氣發動機範圍內工作的技術員來說也是有用的。

本書係供已經熟悉中等技術學校教學大綱內所規定的工程熱力學、熱工學、流體力學、氣動力學和數學的基本原理的讀者之用。根據本書的目的，在書內不僅敘述航空燃氣渦輪發動機本身的原理，並且也敘述燃氣渦輪發動機的主要機件——葉輪機，即離心式和軸向式壓縮機以及燃氣渦輪的原理。

本書前兩章內研究航空燃氣渦輪發動機的氣動力學和熱力學的理論基礎，以及發動機的構造原理和工作原理。以下幾章分析渦輪噴氣發動機一般理論的基本問題，然後較詳細地順次敘述整個發動機主要構件，即進氣裝置、壓縮機、燃燒室、渦輪和尾噴口的計算理論和基礎。以後，再詳細地研究整個渦輪噴氣發動機的理論，並在敘述這個重要問題的各章中，將主要的注意力放在工作過程的基本參數對於發動機推力和經濟性的影響，發動機的性能，推力的加強和調整的原理上。在研究渦輪螺旋槳式和內外函渦輪噴氣發動機的各章內，將敘述整個發動機的理論和計算的一般問題，此時，主要的注意力是放在工作過程的基本參數對於發動機功率，推力和經濟性的影響，發動機性能和內函及外函間有用能量分析的問題上。

書內也敘述發動機及其主要構件的一般熱力計算的方法，並列舉了許多計算例題，這些例題清楚地說明了如何把理論運用到演算實際問題上去。

本書係陳述航空燃氣渦輪發動機理論一般課題的初步嘗試，其中除談到整個燃氣渦輪裝置一般理論的基礎外，還研究了葉輪機（即燃氣渦輪及壓縮機）的理論基礎，其中自然難免會有遺漏和缺點，作者對於批評以及指正將深致謝意。

作者對卡扎恩讓（П. К. Казанджан）副教授和丘秋諾夫（В. А. Тютюнов）工程師給本書作仔細的校閱及給予一系列寶貴的指正表示感謝。

緒 論

噴氣發動機在近代航空中獲得了愈來愈廣泛的使用。這種發動機的日漸推廣是因裝有活塞式螺旋槳發動機的飛機的飛行速度在實際上已顯得不可能再繼續增加了。

這個主要的原因是在於活塞式螺旋槳動力組所產生的推力隨着飛行速度的增加而很快下降。推力的下降是根據下列衆所週知的關係所得出的：

$$P_B = 75 \frac{N_e}{V} \eta_B,$$

式中 P_B —螺旋槳產生的推力，單位公斤；

N_e —活塞式發動機的有效功率，單位馬力，在實際上它與飛行速度無關；

η_B —螺旋槳效率；它在高速飛行中減低；

V —飛行速度，單位公尺/秒。

與螺旋槳發動機產生的推力下降的同時，飛機飛行所需的推力却很快增加了，因為空氣的阻力是隨着飛行速度的增大而激烈增加的。

所以，在飛行速度顯著增加時，爲了保證所需的推力，就得將活塞式發動機的功率大大增加，可是這樣一來飛機上動力裝置的重量和尺寸就要大到不能容許的程度。

例如，若使單座驅逐機的速度由 650 公里/小時提高到 1000 公里/小時，就要求發動機的功率大約增加到六倍。這就是說，具有飛行重量 4000—5000 公斤的近代飛機，若使飛行速度達到 1000 公里/小時，就需要重量約為 5000—6000 公斤(包括螺旋槳在內)、功率不少於 8000—10000 匹馬力的活塞式發動機。很顯然的，光拿重量來看，在上述飛行重量的飛機上採用這樣笨重的發動機是完全不現實的。

即使用空氣動力學上的方法來減少飛機的阻力，實際上也不足以縮減所需功率，於是活塞式螺旋槳動力裝置的重量及尺寸也不能減少。這樣一來，這種動力裝置就嚴重地阻礙了飛機飛行速度的顯著增加。

改用噴氣發動機後，以上困難都可以消除，這種發動機能產生高速飛行時所足夠需要的推力。它的重量和尺寸是完全可以適用的，比起相應的活塞式螺旋槳動力裝置來要小很多。

無論哪一種形式和構造的噴氣發動機，其基本特徵是：發動機所產生的推力是一種在發動機內獲得加速度(速度增加)並且以大於飛行的速度排向大氣的氣流(燃燒產物)的反作用力(反座力)。這種力直接加於發動機上，由於發動機固定在飛機上，因此，力也就傳到飛機上，並用為使比空氣重的飛行器飛行時所必需的推力。

噴氣發動機內氣流的加速度是由於它受到預先壓縮，並在燃料燃燒過程中加入了熱量以及在最後膨脹過程中它的位能(壓力能)轉變為動能所形成的。

這樣，在噴氣發動機內轉變為燃燒產物動能的燃料化學(內部的)能是直接用來獲得推力的，它並不需要像空氣螺旋槳及使其轉動的機構等那樣的中介推進器。

因此，噴氣發動機是與螺旋槳推進發動機不同的，它稱為直接反作用發動機。

一切噴氣發動機可以分爲以下三大類：

1) 空氣噴氣發動機 (BPA) 利用大氣中的氧氣使液體燃料燃燒；

2) 液體噴氣發動機 (LPA) 利用某種液體氧化劑，如液體氧、硝酸、過氧化氫等幫助液體燃料燃燒；

3) 火藥噴氣發動機 (火藥火箭—IIP)，即用含有燃燒所需的氧的火藥來工作的固體燃料發動機。

空氣噴氣發動機，根據進入燃燒室的空氣預先壓縮的方法又分爲無壓縮機式 (空氣的壓縮僅僅依靠氣流的衝激增壓) 和壓縮機式 (空氣由壓縮機壓縮達到) 兩種。

無壓縮機式噴氣發動機，根據其燃料燃燒過程的特徵又分爲衝壓式 (在等壓下連續燃燒) 和脈動式 (在等容或半封閉容積內週期性燃燒) 兩種。

壓縮機式空氣噴氣發動機，根據其壓縮機的傳動類型，又分爲燃氣渦輪噴氣發動機 (壓縮機由燃氣渦輪傳動) 和活塞壓縮機式噴氣發動機 (壓縮機用活塞式發動機傳動)。

除了上述完全因氣流直接產生反作用推力的各型噴氣發動機外，還有複合推力發動機。這種發動機所產生的推力是由發動機噴出的燃燒產物氣流的反作用力和普通的或特種的空氣螺旋槳所產生的推力所組成的。

屬於這類發動機的有壓縮機式空氣噴氣發動機，其燃氣渦輪 (或活塞式發動機) 除傳動壓縮機外，還傳動普通的或特種構造的空氣螺旋槳。

上述各種發動機不論在現代航空上或者其他反作用技術範圍內都獲得了廣泛的應用。

燃氣渦輪噴氣發動機 (其中也包括複合推力式的) 已成爲目前高速飛機 (速度超過 800 公里/小時) 上的主要發動機了。

無壓縮機式空氣噴氣發動機用為飛機上裝有其他各型主要發動機時的輔助加速器，同時，也作為某些特種飛行器上的主要發動機。

液體噴氣發動機適用於在較小續航時間內（續航時間由飛機上的液體燃料和液體氧化劑的貯藏量決定）需要很大的飛行速度和爬高速度的飛機上。這種發動機與上面講的一樣，可用為起動裝置，使飛機較易起飛（縮短起飛滑行距離），或者在裝有其他主要發動機的飛機上作為輔助加速器，以便在短時間內增大飛機速度。最後，液體噴氣發動機還安裝在具有各種用途的火箭上，由於它的推力與飛行速度無關，同時差不多與飛行高度也無關，所以火箭可以產生其他任何一種飛行器所不能達到的很高的飛行速度，並上昇到很大的高度。

火藥噴氣發動機可用為起動裝置（起動火箭）使各種飛機較易起飛。火藥火箭在砲兵中（火箭炮、反作用水雷）應用得最廣泛並且很有效。

由於採用了噴氣發動機，飛機的最高速度，僅僅在幾年內就已經增加到 900—950 公里/小時（代替了裝螺旋槳動力裝置飛機的 700 公里/小時），而特種快速飛機的速度已超過了 1000 公里/小時。噴氣發動機的應用獲得了進一步大大的增加飛行速度的廣泛的可能性。

噴氣發動機也具有一些缺點（如，在中等的飛行速度時經濟性比活塞式發動機來得低），但是，雖然如此，噴氣發動機的應用畢竟是近代航空發展中本質上的躍進，為近代航空開闢了嶄新的不可限量的前途。

噴氣發動機的理論，計算和構造方案是經過了好幾十年的研究的。俄國科學家和發明家的著作是噴氣發動機理論和構造的基礎。這些著作在噴氣發動機和一般火箭技術的發展方面一直佔有

主導的地位。

火箭技術的工作，於1680年時，就已經在俄國開始了，在那一年建立了製造火藥火箭的專門機構，彼得大帝也曾積極地參與了這項工作。1717年型的火藥火箭，在當時說來，質量是很高的，因此，差不多在100年內一直應用着它而沒有改變。

在1845—1867年，當時俄國科學砲兵學校的卓越代表者和火藥技術上的革新家之一康士坦丁諾夫（К. И. Константинов）對火藥火箭作了本質上的改進。

俄羅斯也是航空噴氣發動機的祖國。還在1849年，軍事工程師特立捷斯基（И. М. Третесский）創議利用壓縮氣體的氣流的反作用力以推動氣球。

在1866年，海軍軍人薩柯夫寧（Н. М. Соковнин）製定了壓縮機式空氣噴氣發動機的圖案和設計，以用在他所發明的飛艇上面。

特立捷斯基的和薩柯夫寧的發動機的圖案無疑地是活塞壓縮機式空氣噴氣發動機的原型。

在1867年，上尉參謀捷立邵夫（Н. Телешов）發明的“熱力氣動器”發動機，其圖案中包括了空氣噴氣發動機的主要機件。

1881年，參與謀刺亞歷山大第二而被沙皇政府判處死刑的俄國革命家基巴勒契赤（Н. И. Кибальчич）首次作出了重於空氣的噴氣發動機飛行器的設計圖樣。基巴勒契赤死後，他的設計被埋沒在沙皇警察署檔案室裏達三十六年之久，一直到偉大的十月革命後才被發表。

在1887年俄國工程師格絲溫德（Гешвенд）研究了一種嶄新的噴氣發動機，它的特點是應用排氣系統，吸入外界的大氣，以增加排氣量（質量）；這種裝置提高了發動機的效率 and 推力。經過三十年後，這種構造才在國外應用，並毫無任何根據地，以所謂“米洛”的名字攫為己有。

在1882—1886年偉大俄國學者，俄羅斯航空之父尼古拉·葉古羅維赤·儒可夫斯基(Н. Е. Жуковский)在他的著作“論液體流入和流出的反作用”和“利用噴水反作用力行船的理論”(1908年)中詳細地研究了液體的反作用，並首次得出了自運動體中噴出的液體的反作用力公式與計算這種流體效率的公式。

這樣，第一個研究反作用運動的基本原理的儒可夫斯基，被稱為反作用運動理論的創始者是理所當然的。

在1895年菲達洛夫(Федоров)在自己的著作“不用大氣作為承托介質的飛行新原理”中首次論證了火箭能在真空中飛行。

在1897年俄國著名的力學教授米塞爾斯基(И. В. Мещерский)第一個研究了可變質量的物體運動的理論關係。這些研究的結果已成爲火箭和噴氣式飛機飛行計算的基礎。

噴氣技術進一步發展的全部歷史是與優秀的俄國發明家和學者一革新家康士坦丁·愛杜阿爾達維赤·齊奧爾科夫斯基(К. Э. Циолковский)的名字緊密聯系着的。

在1903的“科學評論”雜誌上發表了一篇齊奧爾科夫斯基的經典著作“用噴氣飛行儀探測宇宙空間”，在這篇文章中齊奧爾科夫斯基首創了世界上火箭飛行科學理論的基礎並敘述了他發明的第一個液體噴氣發動機的設計。

像下面這些重要的發明和理論的探討也應首先歸功於齊奧爾科夫斯基的，譬如具有複合推力的空氣噴氣發動機(用活塞式發動機來傳動壓縮機和螺旋槳的內外函發動機—1932年)，組合遠程火箭，藉火箭起飛的飛行器(有彈射裝置的)(1927—1929年)，用燃料中的某種成分冷卻液體噴氣發動機，用泵將液體燃料和氧化劑輸入液體噴氣發動機燃燒室中等等。

齊奧爾科夫斯基的經典著作和發明奠定了新科學的基礎，並使他不僅在俄國，而且在國外獲得了火箭技術和噴氣技術創始者

的盛名和威望。這些著作打下了各種近代噴氣飛行器的發展基礎，並享有世界性的榮譽。

其他俄國革新家在發展噴氣發動機的事業中也有過很多新的和有價值的貢獻。

在1909年，發明家安東諾維赤(Антонович)首次提出了脈動式空氣噴氣發動機的概念和圖案，而工程師格拉西莫夫(Герасимов)則發明了渦輪壓縮機式噴氣發動機。

在1911年工程師格洛郝夫(Горохов)作出了等容燃燒的活塞壓縮機式空氣噴氣發動機的設計圖樣。

在1914年海軍中尉尼古勒斯基(М. Никольский)研究了一種發動機的圖案，其螺旋槳由三級燃氣渦輪帶動，而自渦輪流出的氣流當作附加的反作用推力來利用。這樣尼古勒斯基的提議就成為創造複合推力燃氣渦輪發動機(渦輪螺旋槳發動機)的第一個提議。

在1923年工程師巴扎洛夫(В. И. Базаров)提出了裝有離心式壓縮機的，以及等壓燃燒的燃氣渦輪發動機的圖案。渦輪用來傳動壓縮機和螺旋槳。利用自渦輪排出的燃氣的反作用力，作為附加推力。巴扎洛夫所研究的發動機圖案，與近代此型燃氣渦輪發動機非常近似。13年以後，在英國得到專利的惠脫式噴氣發動機是抄襲了這個類似的方案的。

斯杰契金(Б. С. Стечкин)教授即現在的斯大林獎金獲得者，蘇聯科學院通訊院士，在1929年首次研究了空氣噴氣發動機的基本原理。他在同年發表的“空氣噴氣發動機理論”一書是進一步發展這類噴氣發動機熱力計算的理論和方法的基礎。斯杰契金有權被稱為是無壓縮機式(ПВРД)及壓縮機式空氣噴氣發動機近代理論的創始者。

柳里加(А. М. Люлька)工程師是現在著名的航空設計家，他在1937年第一個研究並設計了軸向式壓縮機及複合推力的燃氣