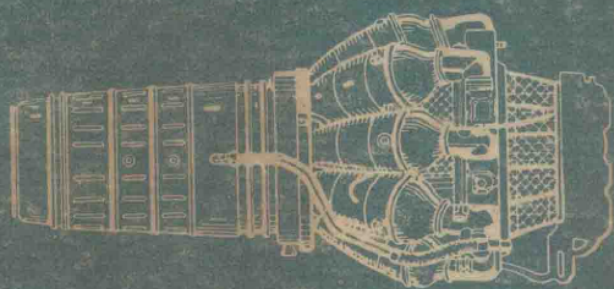


航空燃气涡轮发动机 零件结构与计算

Г. С. 斯庫巴切夫斯基 著



国防工业出版社

航空燃气渦輪發動机

零件結構与計算

Г. С. 斯庫巴切夫斯基 著

馮紹周 等譯



國防工業出版社

前 言

本書是高等航空學校中所講授的兩門課程——航空燃氣渦輪發動機構造與強度計算和燃氣渦輪發動機附件構造與強度計算的教材。編寫本教材的基礎是作者榮膺列寧勳章的、以謝爾古·奧爾忠尼啓則命名的莫斯科航空學院所用的講義以及見于書刊的各種材料。

構造課程的講授法有兩種。一種是詳細的、順次的講解各種發動機中已制成的且根據作者看來，算是最完備和最饒興趣的各種組件。另一種方法也就是莫斯科航空學院和其他高等學校中所確定的和本書所採用的陳述方法，把每一組件都分為任何一種燃氣渦輪發動機所共同必需具有的構件及零件。此時，指出對零件的要求、它的計算法及工作特點。第二種方法的優點是用它可以了解那些不會很快就陳舊的一般構造原則，並可對它進行詳細而較深入的研究。同時，還不致於因為過多的細節而使材料份量過重，從而可以極為全面和廣泛地闡述我國以及世界科學技術的最新成就，並將此種成就推廣到我國的生產中去。

本書介紹了燃氣渦輪發動機各主要組件及附件的構造、強度計算、振動計算、對個別零件的結構和材料的要求以及有關間隙和配合的數據。在某幾章內，對最主要的組件及零件的最突出的製造特點作了簡要的說明。

閱讀本書以前，讀者必須預先學習航空燃氣渦輪發動機的原理及航空葉輪機的原理。

在準備手稿時，作者得到莫斯科航空學院航空發動機構造教研室全體人員所給予的巨大幫助，特別是科學技術博士B.И.波利柯夫斯基教授、科學技術碩士Ю.М.尼基京、А.Ф.古洛夫和М.В.拉茲都林講師的幫助。科學技術博士С.К.杜曼斯基、А.Н.奧古列契尼可夫和И.Ф.佐別茲工程師，以及科學技術碩士А.В.什都特講師都曾提供了寶貴的意見。此外，原稿並經下列審閱者——B.Р.列文教授、B.Я.納丹尙教授、P.С.基納索什維利教授、B.И.季米特里也夫斯基教授、科學技術碩士И.А.比爾格耳、М.С.拉比鮑角特、科學技術博士К.В.赫耳曉夫尼可夫、И.Я.立特維諾夫等審校過，他們也提供了許多寶貴的意見。對於以上人士，作者謹表示衷心的感激和謝忱。

本書為編寫航空燃氣渦輪發動機零件及其附件的構造設計與計算的教科書的初次嘗試，因此無論是在所講述的各問題的內客方面，或是在陳述方面都可能有缺點。作者將感謝並接受讀者的意見。意見請寄莫斯科24彼得洛夫卡 И-51國防工業出版社。

作 者

譯 者 序

随着飞机飞行速度的不断增高，航空噴气发动机的結構也在逐年地改进着。与活塞式航空发动机相比較，噴气发动机自第二次世界大战末期开始被应用到航空中以来，已获得了显著的成就。虽然如此，但噴气发动机的結構和制造工艺仍然是处在發展阶段。

由于噴气技术对国防及民用航空有着重大的意义，故世界各国都集中了很多力量来研究它的改进和發展。

对我国來說，为了加速社会主义建設，增強国防力量，研究航空噴气发动机的設計与制造技术是更有其特殊意义的。特别是当我国正在向科学大进軍的今天，迅速掌握新式的噴气技术就更显得迫切而重要了。

但由于航空噴气发动机發展的历史較短，且較迅速，所以迄今为止，尚未見到一本完善的、系統介紹其結構与計算的書籍，因而使学习航空噴气发动机技术的人們碰到了不少的困难。1955年下半年苏联国防工業出版社出版了莫斯科航空学院教授T. C. 斯庫巴切夫斯基所著的“航空燃气渦輪发动机零件結構与計算”一書。這本書詳細地論述了航空燃气渦輪噴气发动机的結構，发动机零件強度的計算，振动对零件的影响及其計算，对零件材料的要求等問題。書中还用許多实例闡述了現代噴气发动机的各主要零件的強度和振动。本書是作者根据历年来苏联及其他国家航空噴气发动机構造發展中的經驗作为教材而編著的，不仅是比較完整地対航空燃气渦輪发动机零件結構和計算作了詳尽的闡述，而且还分析了它們的优缺点，因此可以說是一本不可多得的好書。

該書出版后已获得了苏联航空界的好評，同时也得到了我国航空界的贊許，並且对我国国防工業的建設將會起着巨大的作用。

本書譯者以学习本書的心情譯出了全文，在譯述过程中对原文中个别錯誤之处都經請教有关專家后作了必要修正。但由于譯者、校者水平有限，譯文仍难免有錯，希望讀者加以批評指正。来信請寄：北京国防工業出版社。

参加本書翻譯的是：馮紹周、孙怀民、周懋运、吳大觀、刘树声、周庭秋、刘世兴、蘭宝樑、王祖許、蔣福庆、戴志舒、洪亞新、楊墉等同志並經虞光裕、韓玉樑对1~5章进行了校对。最后由馮紹周、吳大觀二同志对全部譯文进行了校对和必要的修改。

在譯述过程中，承苏联專家的热情指导为我們解决了許多疑難問題，特此致謝。譯者也感謝朱行健、陈力、陈業功、顧永安等同志对譯文提出的寶貴意見。

譯 者

一九五六年三月三日

目 录

譯者序

前 言

第一章 概論

1. 燃气渦輪發動机的类型	1
2. 燃气渦輪發動机的基本参数	4
3. 燃气渦輪發動机發展簡史	8

第二章 作用于主要組合件和零件的力以及燃气渦輪發動机的承力系統

1. 作用于發動机主要組合件的力	16
2. 由燃气作用所产生的力	18
3. 降低作用于轉子上軸向力的方法	25
4. 在發動机里产生的慣性力和力矩	28
5. 作用于渦輪螺旋槳發動机的力	30
6. 帶有离心式壓縮机的渦輪噴气發動机的承力系統	30
7. 帶有軸向式壓縮机的渦輪噴气發動机的承力系統	34
8. 渦輪螺旋槳發動机的承力系統	37

第三章 軸向式壓縮机

1. 軸向式壓縮机主要参数及尺寸的選擇	44
2. 軸向式壓縮机的分类	49
3. 軸向式壓縮机的構造	50
轉子	50
轉子的型別	50
輪盤型轉子中輪盤与軸的連接法	51
混合型轉子中輪盤的連接法	53
工作叶片	54
导向叶片	58
壓縮机机匣	62
空气密封裝置	63
4. 軸向式壓縮机零件的强度計算	67
鼓筒型轉子的計算	67
輪盤的計算	69
計算公式	71

轉子輪盤的緊固螺栓的計算	80
葉片的計算	83
在葉片中所產生的各種應力	83
由離心力所產生的拉伸應力	85
由氣體力而產生的彎曲力矩	89
由離心力而產生的彎曲力矩	92
葉片截面的面積、重心座標、慣性矩以及彎曲截面系數的決定	94
葉片的彎曲應力	102
葉片彎曲應力的近似計算方法	102
葉片的扭轉	103
葉片樁頭的計算	104
作用在葉根及樁頭部分上的力	104
“燕尾形”樁頭的計算	106
圓柱形樁頭的計算	108
銷釘配合的樁頭的計算	111
5. 葉片和輪盤的振動	115
葉片振動的形狀	117
等截面葉片的自然振動	118
變截面葉片的自然振動	122
葉片轉動對振動頻率的影响	124
用計算方法和實驗方法所求出的頻率的比較	130
將葉片固定到輪盤中時的緊固力的影响	131
葉片溫度变化的影响	132
發動機的共振轉速	133
葉片的扭轉振動和複雜振動	134
輪盤振動的概念	137
6. 密封擋圈的計算	138
7. 軸向式壓縮機中的防冰裝置	141
8. 所用的材料	143

第 四 章 離心式壓縮機

1. 離心式壓縮機主要尺寸的選擇	148
2. 離心式壓縮機的分類	151
3. 離心式壓縮機各組成部分的結構	151
機輪和機輪與軸的联接方法	151
進氣導氣圈	155
導風葉輪葉片的制型	156
若干幾何关系	157

导風叶輪型面的計算方法	159
叶片式扩散器及其几何結構	162
压缩机匣	163
4. 离心式压缩机零件的强度計算	165
用安装边联接机輪与軸的計算	165
机輪的計算	167
5. 机輪盤上溫度的分佈情况	171
6. 离心式压缩机机輪叶片的振动	177
叶片振动的形状	179
叶片自然振动頻率的計算方法	182
7. 使用的材料	186
第五章 燃气渦輪	
1. 渦輪主要尺寸和渦輪級数的选择	187
2. 燃气渦輪的分类	188
3. 燃气渦輪各部件的結構	191
导向器	191
工作叶片	200
叶片榫头	200
叶片的工作部分	208
渦輪盤与軸的联接	212
渦輪轉子外环	217
渦輪受热零件的定中心	218
渦輪軸与压缩机或减速器的联接	218
燃气渦輪的密封裝置	223
4. 渦輪零件的溫度	223
工作叶片的溫度分佈情况	224
渦輪盤溫度的分佈	225
5. 渦輪零件的强度計算	228
叶片的計算	228
“樅树形”榫头的計算	230
叶冠的計算	234
渦輪盤的計算	235
渦輪軸的計算	237
6. 渦輪零件的冷却	240
冷却燃气渦輪發动机所必需的空气量	240
空气冷却渦輪叶片的特点	240

渦輪零件的冷却系統	241
7. 渦輪葉片的製造方法	243
8. 燃气渦輪零件所使用的材料	245
渦輪的工作葉片	245
導向葉片和導向環	249
渦輪盤	251
渦輪軸	251
第 六 章 燃气渦輪發動機轉子的平衡	
1. 總論	253
2. 設計新發動機時發動機不平衡性的判定及零件平衡精確度的選擇	258
第 七 章 高速旋轉軸的臨界轉速	
1. 帶單圓盤而本身不計重量的旋轉軸的臨界轉速	261
2. 剛軸與軟軸	264
3. 有重量的旋轉軸的臨界轉速	266
4. 帶單圓盤但不轉動的軸的自由彎曲振動頻率	269
5. 軸不旋轉但計算圓盤撓動能量時的自由彎曲振動頻率	270
6. 進動時作用於旋轉軸的力	276
7. 單圓盤旋轉軸的自由彎曲振動頻率	279
不計算陀螺力矩時	279
計算陀螺力矩時	280
8. 燃气渦輪發動機旋轉軸振動的原因	286
9. 表示進動運動的試驗裝置	287
10. 轉盤慣性矩的計算方法	291
11. 單盤轉子臨界轉數的一般計算方法	293
12. 雙轉盤轉子的臨界轉數的求法	297
13. 不計陀螺力矩的多轉盤轉子臨界轉數的求法	298
14. 用圖解法求轉軸的撓度	300
15. 計入陀螺力矩的多轉盤轉子的臨界轉數的計算	303
第 八 章 燃燒室	
1. 對燃燒室的要求	311
2. 燃燒室的型別	312
3. 燃燒室工作過程的特徵	313
4. 燃燒室的結構	314
帶離心式壓縮機的渦輪噴氣發動機的分管式燃燒室	314
帶軸向式壓縮機的渦輪噴氣發動機的分管式燃燒室	321
環形燃燒室	325
迴流式(逆流式)燃燒室	328

帶蒸發裝置的燃燒室	330
5. 燃燒室諸尺寸的計算	330
6. 燃燒室零件強度的計算	333
7. 燃燒室壳体振動的計算	334
壳体自然振動頻率的確定	335
強迫振動頻率	336
8. 燃燒室的故障	337
9. 燃燒室制造簡單介紹	339
10. 使用的材料	339
第九章 尾噴筒	
1. 尾噴筒的型別	342
2. 不可調節的尾噴筒	343
3. 可調節的尾噴筒	349
4. 尾噴筒零件的強度計算	352
5. 在尾噴筒后燃氣的溫度和速度	353
6. 使用的材料	355
第十章 加力燃燒室	
1. 加力燃燒室	356
2. 可調節噴口的加力燃燒室	358
第十一章 燃氣渦輪發動機的軸承及其潤滑	
1. 燃氣渦輪發動機所用的軸承	361
2. 燃氣渦輪發動機滾動軸承支承座的構造	365
3. 滾動軸承的選擇	372
4. 滾動軸承與機匣和軸的配合	376
5. 發動機的潤滑。循環消耗量。在燃氣渦輪發動機中所使用的滑油	377
6. 發動機的潤滑系統	379
7. 發動機滑油系統結構的各組成部分	382
滑油導管	382
噴咀	382
油氣分離器	383
油濾	383
滑油的封嚴裝置	387
漲圈式接觸封嚴裝置	387
墊圈式的接觸封嚴裝置	390
非接觸式螺紋封嚴裝置	391
導入空氣的非接觸式封嚴裝置	392
流体動力式封嚴裝置	393

8. 制造滑油封严装置零件所用的材料	393
--------------------	-----

第十二章 渦輪螺旋槳發動机的減速器

1. 一般概念	394
2. 減速器傳動比的選擇	395
3. 減速器的型別及其傳動系統圖	395
4. 齒數的選擇	402
5. 輪齒的計算	405
輪齒彎曲的計算	409
輪齒接觸應力的計算	414
齒輪阻滯的計算	416
6. 減速器齒輪的加工精度和檢驗	418
7. 輪齒的各種損傷和損壞	419
輪齒的折斷	419
輪齒工作表面的剝落和脫皮	423
阻滯	423
磨損	424
8. 齒輪齒型的修正	424
改變齒高	424
改變嚙合角	425
借改變切齒刀具的位置以進行修正	425
齒緣的修正	426
9. 減速器軸的計算	427
10. 減速器各部分的構造	432
齒輪的齒圈	432
齒輪與軸的連接	432
固定游星齒輪的游星齒輪座	433
游星齒輪	436
在簡單傳動裝置中齒輪的連接	436
軸端的封嚴裝置	437
軸承的位置	438
滑油的供給	439
11. 使用的材料	441

第十三章 燃气渦輪發動机的附件

1. 燃气渦輪發動机附件的傳動裝置及安裝位置	444
渦輪噴氣式發動机附件的傳動裝置及安裝位置	444
渦輪螺旋槳式發動机附件的傳動裝置及安裝位置	446
2. 滑油泵	446

3. 供油及調節附件.....	454
燃气渦輪發動機的工作狀態和調節任務.....	454
渦輪噴氣式發動機需要調節的參數.....	454
燃油泵.....	455
發動機轉速調節器.....	462
油門開關.....	465
油濾.....	466
噴咀.....	467
導管和管路聯結件.....	470
4. 渦輪噴氣式發動機的調節系統.....	470
PД-10 發動機的調節系統.....	471
裝有離心式壓縮機和非調節式尾噴筒的渦輪噴氣式發動機的調節系統.....	472
5. 渦輪螺旋槳式發動機的調節系統.....	473
渦輪螺旋槳式發動機調節的一般概念.....	473
渦輪螺旋槳式發動機供油調節器系統.....	474
6. 燃气渦輪發動機的起動附件.....	477
燃气渦輪發動機起動的特點.....	477
起動裝置的功率.....	478
起動裝置的分類.....	481

第一章 概 論

1. 燃气渦輪發動机的类型

在偉大衛國戰爭的末期，在航空中开始采用了新型發動机——航空燃气渦輪發動机。經過了这一段甚短的时期，活塞式發動机在高速航空中便完全被淘汰了，而為这一新型的發動机所代替。航空中之所以这样迅速地采用了燃气渦輪發動机，是因为它在許多方面都比活塞式發動机来得完善。燃气渦輪發動机重量小，但能产生很大的推力。而且，發動机的橫向外廓尺寸也比最优良的活塞式發動机要小得多。在飞机上安裝燃气渦輪發動机后，可以大大提高飞行速度。第一批裝有燃气渦輪發動机的飞机就差不多有960公里/小时的速度，而同一时期裝有活塞式發動机的飞机的最大速度却只有750公里/小时。

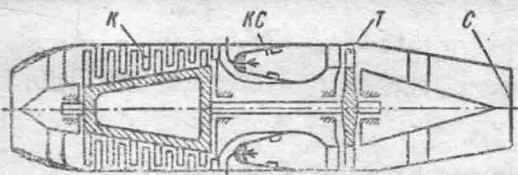


图 1 裝有軸向式壓縮机的渦輪噴气發動机簡图

在燃气渦輪發動机發展过程的5~7年中，出現了各种类型的燃气渦輪發動机——渦輪噴气式、渦輪螺旋槳式和内外函式發動机。

在渦輪噴气發動机內全部推力是作为發動机內流出的燃气的反作用力而获得的。此

种發動机(图1)有四个主要部分：壓縮机K、燃燒室KC、燃气渦輪T和尾噴口C。

渦輪中产生的热降，必須这样来选定，使得燃气渦輪的全部功率都被壓縮机用来压缩工作过程所需的空气。其余的热降則在尾噴口中被用来产生推力。

在渦輪螺旋槳式發動机內(图2)推力主要(約90%)是由一个或旋轉方向相反的二个螺旋槳B产生的。螺旋槳由燃气渦輪T通过減速器P帶动旋轉。發動机尾噴口C內噴出的燃气反作用力产生附加推力。燃气渦輪的功率消耗在帶动螺旋槳(一个或数个)和壓縮机上。

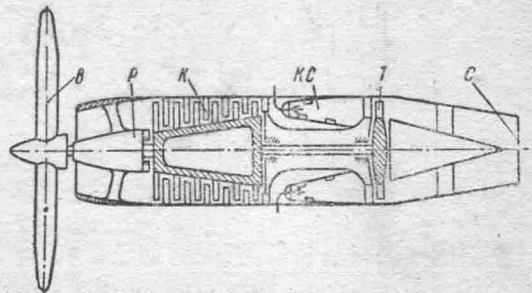


图 2 裝有軸向式壓縮机的渦輪螺旋槳發動机的簡图

在内外函式發動机(图3)的内函中有普通渦輪噴气發動机的部件——壓縮机、燃燒室、渦輪、尾噴口。外函是一个环形截面的腔道，它圍繞着內函，其中有低压壓縮机或鼓風机 B_1 。此种低压壓縮机或鼓風机可以視作是由渦輪帶动的小直徑多叶高速螺旋槳。有时，第二

函（外函）内还有燃烧室。在这种发动机中，推力由尾喷口C内和与它同心安装的旁腔气道O内流出的气流的反作用力所产生。通常，外函产生的推力超过内函产生的推力。

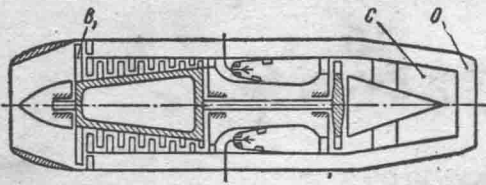


图 3 装有轴向式压缩机的内外函式发动机简图

燃气涡轮发动机的各部件——压缩机、燃烧室、涡轮等的构造特点可以作为它们分类的特征。

譬如，根据压缩机的型别，燃气涡轮发动机可以分为装有轴向式压缩机的（见图1、2、3）、离心式压缩机的（图4）和混合式或轴向离心式压缩机的（图5）。

离心式压缩机曾被广泛地用在最初的燃气涡轮发动机上，它们的推力和空气消耗量较小。目前，在推力约3000公斤的涡轮喷气发动机和功率为1500~2000马力的涡轮螺旋桨发动机上多采用离心式压缩机。离心式压缩机的优点是它比具有许多工作叶片和导流叶片的轴向式压缩机简单，且制造所用的工时也较少。此外离心式压缩机的叶片较厚，不怕被压缩机所吸入的硬颗粒打伤。

轴向式压缩机被用在推力、功率以及每秒空气消耗量较大的涡轮喷气发动机和涡轮螺旋桨发动机中。轴向式压缩机所产生的空气压缩比和效率比离心式压缩机的来得大。这样便能提高装有轴向式压缩机的燃气涡轮发动机的性能——即此种发动机具有较大的推力，较小的横截面尺寸和单位燃料消耗量。

轴向式压缩机、离心式压缩机和混合式压缩机的特点将在下面各章分别介绍。

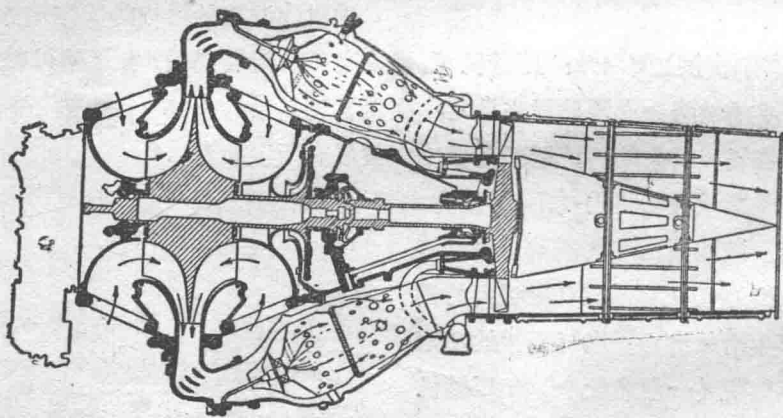


图 4 装有离心式压缩机的涡轮喷气式发动机简图

根据燃气涡轮发动机的部件，如压缩机、燃烧室和涡轮的分布位置的不同，可以将发动机的气体通路分为两类：直流式气道，即气体运动时，保持与发动机轴线平行的方向（见图1~4）；迴流式气道，空气在其中两次变换自己的运动方向，作反向运动（图6和7）。目前，直流式气道获得了广泛的采用。迴流式气道曾用在最初的燃气涡轮发动机中。它的缺点是空气和燃

气在运动时流体损失很大。采用迴流式气道时,不仅是降低了经济性,而且也大大增加了發動机迎風面积。

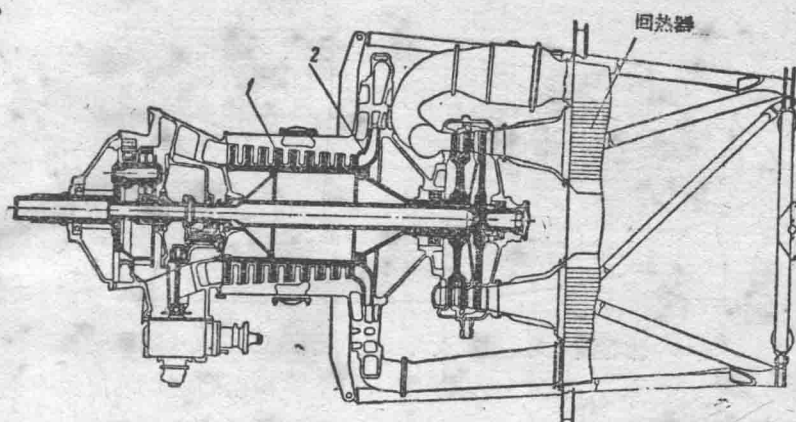


图 5 裝有軸向离心式压縮机的渦輪螺旋槳發動机簡图
1—軸向式压縮机; 2—离心式压縮机。

各种燃燒室的構造差異甚大,但仍能將它們分为三种主要型別——分管或管狀燃燒室、环狀燃燒室和分管环狀燃燒室。上述各种燃燒室的特点將在下面“燃燒室”一章內介紹。

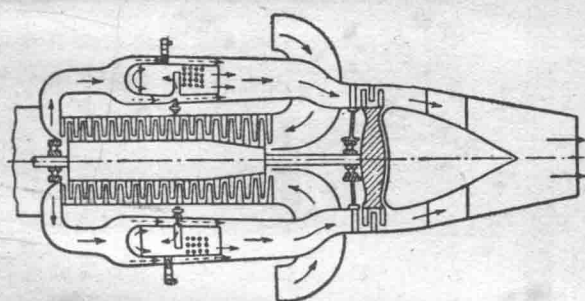


图 6 空气迴流运动的渦輪噴气發動机簡图,其分管式燃燒室裝置在压縮机的周圍

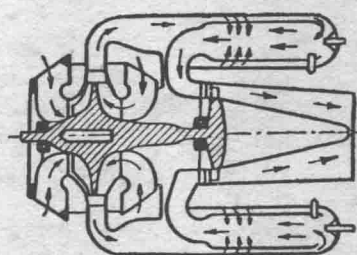


图 7 裝有逆流分管式燃燒室的燃氣渦輪發動机簡图

根据渦輪中所产生的热降值的大小,在燃气渦輪發動机中采用了單級渦輪(图1~4、7)和多級渦輪(图5和6)。多級渦輪有單軸和双軸之分。在渦輪噴气發動机中,双軸渦輪的每一級都能帶动安裝在單个轉子上的軸向式压縮机的一組叶輪。在渦輪螺旋槳發動机中,双軸渦輪的第一級可用來帶动压縮机,第二級通过減速器傳动螺旋槳。图8所示为裝有四級單軸渦輪的渦輪螺旋槳發動机。图9是裝有三級渦輪的渦輪螺旋槳發動机的簡图。渦輪的前兩級1帶动由五級軸向式压縮机2和一級离心式压縮机3組成的混合式压縮机。渦輪的第三級4,通过連接軸5和減速器6帶动螺旋槳。在下面“燃气渦輪”一章中,將介紹不大顯著的其他構造特点,以便將渦輪及燃气渦輪發動机作另一种分类。

上述各点,無論对渦輪噴气發動机,或渦輪螺旋槳發動机都是適用的。另外还存在着若干單獨屬於渦輪噴气發動机和渦輪螺旋槳發動机各部件的構造特点。譬如,渦輪噴气發動机可以根据尾噴口的構造(可調節尾噴口和非調節尾噴口)再加区分;而渦輪螺旋槳發動机則

可根据螺旋桨的位置、减速器型别和有無回热器而区分。

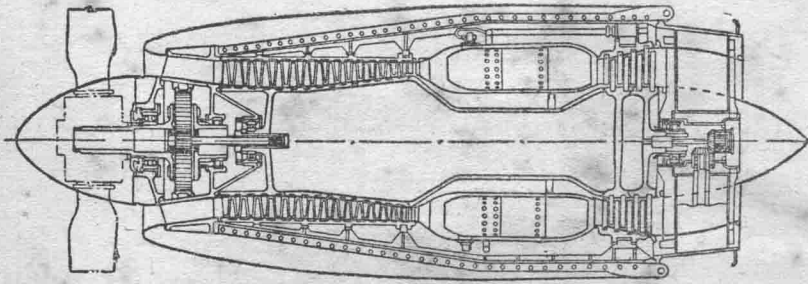


图 8 裝有軸向式壓縮機及四級燃气渦輪的渦輪噴氣發動機簡圖

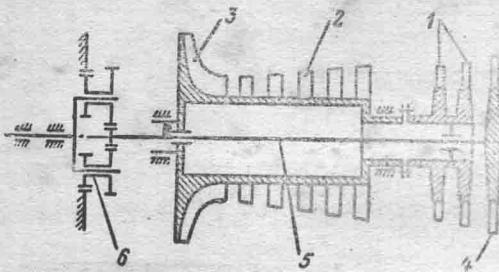


图 9 裝有三級渦輪的渦輪螺旋槳發動機的傳動系統圖

1—傳動壓縮機的渦輪；2—軸向式壓縮機；3—離心式壓縮機；4—傳動螺旋槳的渦輪；5—連接軸；6—減速器。

根据螺旋桨的位置，渦輪螺旋槳發動機可以分为裝有拉力螺旋槳的和推力螺旋槳的。按照減速器的型別，渦輪螺旋槳發動機可以分为單螺旋槳式的和旋轉方向相反的双螺旋槳式的。利用特种構造的減速器，可以將兩台或兩台以上（三台、四台）發動機联合起来以获得大功率的动力裝置。图10所示为由兩台發動機組合成的渦輪螺旋槳發動機。它有兩根加長軸和將旋轉傳給兩個同心螺旋槳的減速器。

回热器的功用是收回排出的燃气的热，以改善發動機的經濟性。图5所示的渦輪螺旋槳發動機裝有回热器，空气在进入燃燒室前先在回热器中得到預热。燃燒产物經過三級渦輪后，通到回热器中，將其壁加热，並傳热給空气。从回热器中流出的燃气产生不大的推力。在航程不大时，安裝回热器后得到的利益並不能补偿飞机上所裝的發動機的重量和外廓尺寸的增大。不过，对于远航飞机來說，安裝回热器是有利的。

图11内列出了航空燃气渦輪發動機按照各种不同構造特征的分类系統圖。

2. 燃气渦輪發動機的基本参数

燃气渦輪發動機的基本参数有：推力、單位燃料消耗量、重量、外廓尺寸和使用寿命。

随着燃气渦輪發動機的發展和改善，这些参数的变化情况是这样的：推力增加着，經濟性不断提高，每一公斤推力的發動機重量在減少着。图12表示裝有离心式壓縮機和軸向式壓縮機的渦輪噴氣式發動機的比重^①历年来的变化情况。由图上可以看出，从1944年到1952年

① 此处比重系專指發動機重量与推力的比值。——譯註

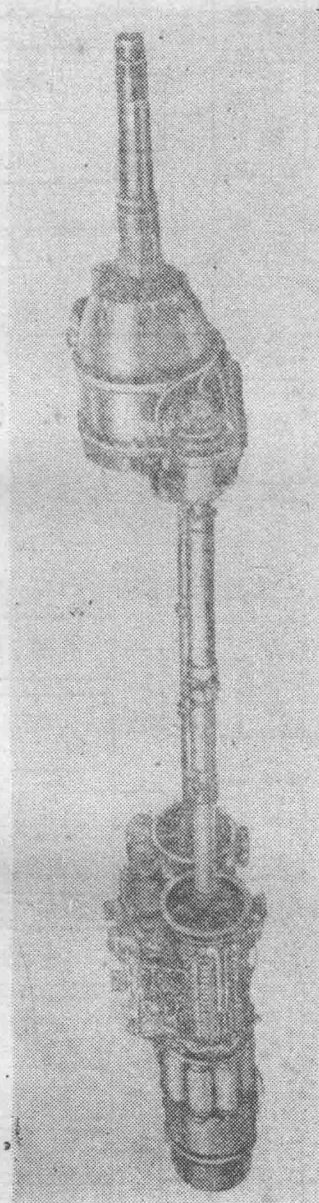


图 10 裝有外伸式減速器（傳動兩個同心螺旋槳）的複式渦輪螺旋槳發動機

