

多用途超音速飞机用的 空气喷气发动机

国防工业出版社

多用途超音速飞机用的 空气喷气发动机

〔苏〕 B. П. 柯洛道契金 著

毛可久 译

赵元愷 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是一本发动机原理方面的参考书，它是已有原理书籍的进一步发展和补充，全书分两大部分共六章。

第一部分是叙述空气喷气发动机参数变化的一般规律性，着重分析各参数的相互联系和发动机的调节问题。

第二部分是叙述各种类型发动机的节流特性，着重讲述节流特性的求定、分析以及最优化问题。

本书可供从事空气喷气发动机的技术人员以及有关高等院校的师生参考。

ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ
СВЕРХЗВУКОВХ МНОГОРЕЖИМНЫХ САМОЛЕТОВ

В. П. Колодочкин

Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1975

*

多用途超音速飞机用的 空气喷气发动机

〔苏〕В. П. 柯洛道契金 著

毛可久 译

赵元愷 校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 4¹/₄ 89 千字

1979年5月第一版 1979年5月第一次印刷 印数：0,001—5,800册

统一书号：15034·1789 定价：0.45元

出版说明

《多用途超音速飞机用的空气喷气发动机》是一本发动机原理方面的参考书。

随着飞机使用范围的扩大，对发动机的要求越来越高，因此使得参数选择、发动机调节以及特性最优化的问题都变得复杂起来。本书在大量计算工作的基础上，在这方面作了探讨和分析。字数不多，重点突出。

它是已有原理书籍的进一步发展和补充，并且着重分析了各种类型的涡轮风扇发动机的特性和调节，故具有一定的参考价值。

不足之处是联系具体发动机的实际不够，缺乏例证。

由于水平所限，书中难免有错误之处，欢迎批评指正。

目 录

符号.....	1
绪论.....	5

第 一 部 分

空气喷气发动机工作过程 参数变化的一般规律性

第一章 单函道涡轮喷气发动机	9
1.1 工作过程参数的相互联系	9
1.2 发动机调节	18
1.3 加力的涡轮喷气发动机设计参数对输出参数以及对调节有 效性的影响	32
1.4 单轴和双轴方案的压气机的工作特点	40
1.5 从压气机中间级放气	47
第二章 双函道涡轮喷气发动机	52
2.1 工作过程参数的相互联系	52
2.2 双函道发动机的调节	55
2.3 具有分段燃烧的双函道发动机的调节	68
2.4 燃气发生器的压气机调节	70
2.5 双函道涡轮喷气发动机高度-速度特性的某些变化特点以及 它与加力的涡轮喷气发动机特性的比较	71

第 二 部 分

空气喷气发动机的特性

第三章 发动机节流特性的最优化	81
第四章 单函道涡轮喷气发动机各部件共同工作状态的 求定	86
4.1 单轴式涡轮喷气发动机	86
4.2 双轴式涡轮喷气发动机	89
第五章 双函道涡轮喷气发动机各部件共同工作状态的 求定	92
5.1 函道分开的双函道发动机	93
5.2 气流相掺混的双函道发动机	95
5.3 双函道单轴式发动机	99
5.4 双函道多轴式发动机	99
第六章 设计参数和调节规律对空气喷气发动机特性的 影响	101
6.1 试车台条件下的发动机单位参数	102
6.2 加力的涡轮喷气发动机的节流特性	107
6.3 具有混合室和共同加力燃烧室的双函道发动机的节流 特性	112
6.4 函道分开并在外函中加力的双函道发动机的节流特性	123
6.5 涡轮喷气发动机和双函道涡轮喷气发动机在非加力状态下 特性的比较	129
参考资料	132

符 号

p —— 压力;

T —— 温度;

v —— 飞行速度;

M —— 飞行马赫数;

H —— 飞行高度;

w —— 空气或燃气的速度;

R —— 发动机推力; 燃气常数;

R_{yn} —— 单位推力;

C_K —— 单位耗油率;

π —— 增压比或降压比;

λ —— 换算速度;

$q(\lambda); \pi(\lambda); z(\lambda)$ —— 燃气气动函数;

k —— 绝热指数 (对于空气, 没有注脚,
对于燃气, 注脚为 “Г”);

$$\alpha = \frac{k-1}{k}$$

$i = c_p T$ —— 热焐量;

$\bar{n}$ —— 相对转速;

M_a —— 空气质量流量;

M_r —— 燃气质量流量;

$$m_{kp} = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

m —— 函道比;

σ —— 总压恢复系数;

η_k^* —— 压气机效率;

η_T^* —— 涡轮效率;

τ_r —— 相对耗油量;

α —— 余气系数;

L_0 —— 燃烧每公斤燃料所需的理论空气量;

H_u —— 燃油热值;

η_s —— 燃烧完全系数;

φ —— 速度系数;

F —— 横截面积;

δ —— 抽气系数。

注 脚

B —— 空气; 风扇;

Γ —— 燃气;

I 和 II —— 对应第一和第二函道的参数;

K —— 压气机;

T —— 涡轮;

0 —— 试车台条件;

$*$ —— 滞止气流参数;

$K.C$ —— 燃烧室;

$\phi . \kappa$ ——加力燃烧室;

$c . a$ ——导向器;

ϕ ——加力;

пр ——换算的;

н ——未扰动气流。

燃气空气通道的主要截面

1 ——压气机进口;

x ——高压压气机进口;

2 ——压气机出口;

3 ——涡轮进口;

y ——高压涡轮（燃气发生器）出口;

4 ——涡轮出口;

см ——混合室出口;

4' ——加力燃烧室进口;

кр ——尾喷管临界截面;

c ——尾喷管出口。

绪 论

在空气喷气发动机的气动力方面,是用它的设计参数值、燃气空气通道上的部件特性以及发动机的调节规律来表征。

发动机在最大工作状态时的主要工作过程参数,亦即换算的空气流量、压气机增压比、函道比、涡轮前燃气温度、燃气空气通道的特征截面上的气流速度或这些截面的面积、以及在发动机进口空气温度为 $T_1^* = 288\text{ K}$ 时的其它参数,都可作为设计参数。

各种发动机方案(图1)的燃气空气通道上的主要部件为。压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管。

压气机特性(压气机级的)(图2)可用压气机转子在各种换算转速值的条件下增压比与气流相对密度 $q(\lambda_1)$ 或换算空气流量 M_{np} 的关系曲线,及效率与压气机增压比的关系曲线来表示

$$\left. \begin{aligned} \pi_{\text{к}}^* &= \pi_{\text{к}}^*[q(\lambda_1); \bar{n}_{np}]; \\ \eta_{\text{к}}^* &= \eta_{\text{к}}^*(\pi_{\text{к}}^*; \bar{n}_{np}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

发动机在各个稳定工作状态下其部件的共同工作条件所确定的工作点的连线就组成了工作状态线 $\pi_{\text{к}}^* = f[q(\lambda_1)]$ 。压气机在工作状态线各点上的稳定裕度是发动机重要的使用特性,它由下式求定

$$\Delta K_y = \frac{[\pi_{\text{к}}^*/q(\lambda_1)]_{rp}}{\pi_{\text{к}}^*/q(\lambda_1)} - 1. \quad (2)$$

与工作状态线上某一点具有同一 $\bar{n}_{np}$ 值时的稳定工作的边界参数就对应注脚《rp》。

用燃烧完全系数 $\eta_{\text{с}}$ 和总压恢复系数 $\sigma_{\text{с.с}}$ 来表征燃烧室。

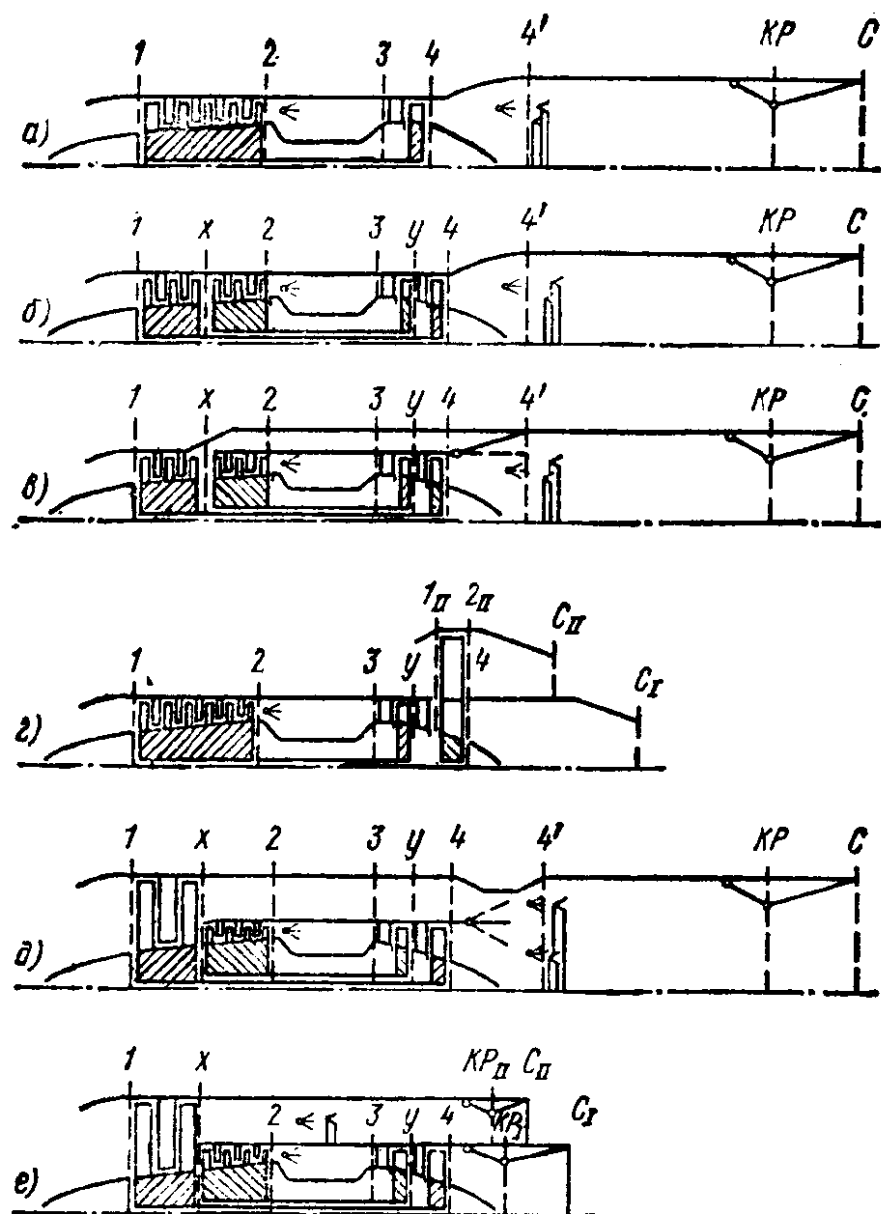


图 1 空气喷气发动机的方案图

a—单轴式涡轮喷气发动机；б—双轴式涡轮喷气发动机；
 в—能从压气机中间级放气到加力燃烧室去的涡轮喷气发动机；
 г—具有后风扇的双涵道发动机；д—气流相掺混并具有共同加力燃烧室的双涵道发动机；
 е—涵道分开并在外涵中加力的双涵道发动机。

燃烧室中燃气总压的下降是由于存在流体损失（以系数 σ_r 表示）和传热引起的损失。后一损失用系数 σ_t 表示。总

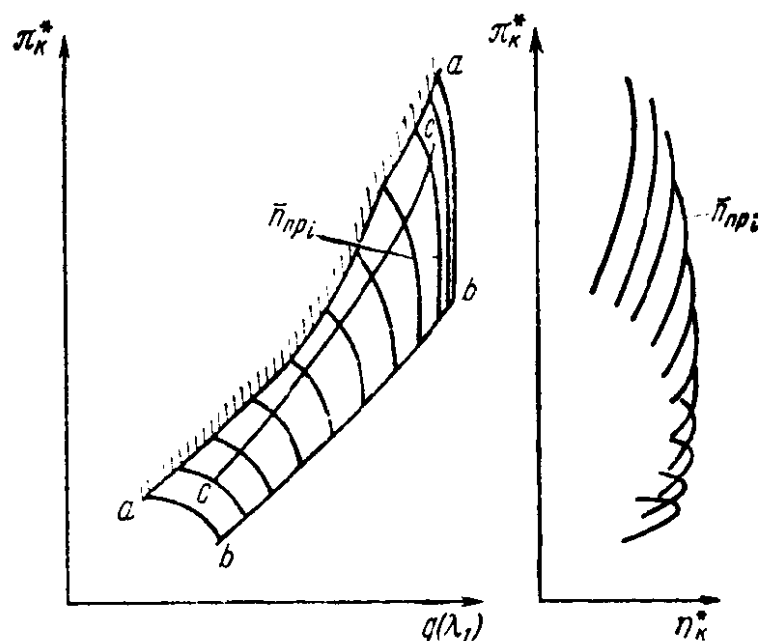


图 2 压气机特性

a-a—稳定边界；b-b—压气机出口堵塞线；
c-c—工作状态线。

的总压损失由下述乘积来求定

$$\sigma_{K,c} = \sigma_r \sigma_{\tau o} \quad (3)$$

在提高燃烧室进口气流速度的情况下，无论是流体损失，或是传热引起的损失都要增大。传热引起的总压损失还随着由燃烧室出口与其进口气流温度比值所确定的加热量的增高而增大。

加热量和燃烧室进口气流速度的增大又会带来燃烧室末端燃气速度的增大，并能引起气流的气动堵塞。

涡轮特性可表示为在各种换算的涡轮转速和导向器临界截面积值的情况下，第一级导向器临界截面处的气流相对密度（或换算燃气流量）和涡轮效率随膨胀比变化的关系曲线形式

$$\left. \begin{aligned} q(\lambda_{c,a}) &= f(\pi_T^*; \bar{n}_{np}; F_{c,a}); \\ \eta_T^* &= f(\pi_T^*; \bar{n}_{np}; F_{c,a}). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

用临界截面积 F_{sp} 和出口截面积 F_c 的变化范围以及速度系数 φ_c 来表征尾喷管。

换算的涡轮前燃气温度随发动机进口空气总温和发动机油门杆位置的变化规律，以及能确定发动机工作的参数（任一级的转速或涡轮膨胀比）和发动机调节元件的位置（尾喷管临界截面积等等）随换算的燃气温度的函数关系，都可作为发动机的调节规律。

一般情况下，当发动机进口空气温度改变时，决定发动机在最大状态下的工作过程参数变化的调节规律和涡轮前燃气温度改变时，决定发动机在非加力节流状态下的工作过程参数变化的调节规律是不同的。

在用未扰动气流的温度和压力 (T_n 和 p_n) 及飞行速度（或 M 数）来表征的具体飞行状态下的，以及用 H 和 v 值（或 H 和 M ）表征的标准大气状态下的工作过程参数，单值地确定了发动机的输出参数：

- 推力 R ，牛顿；
- 单位推力 R_{yn} ，米/秒；
- 单位耗油率 C_R ，公斤/牛顿·小时。

给定设计参数、各部件特性和调节规律后，就完全确定了空气喷气发动机的气动特点和它的输出特性。

本书中的输出特性是用节流特性来表示，其形式为单位耗油率在不同飞行状态下随推力的变化关系

$$C_R = C_R(R; H; M). \quad (5)$$

第一部分

空气喷气发动机工作过程 参数变化的一般规律性

第一章 单函道涡轮喷气发动机

1.1 工作过程参数的相互联系

压气机进口空气流量和涡轮导向器临界截面燃气流量的平衡方程（见图 1, a、б）如下式

$$\begin{aligned} (1 - \delta_{охл})(1 + \tau_r)m_{кр.в} \frac{p_1^*}{\sqrt{T_1^*}} - q(\lambda_1)F_1 \\ = m_{кр.г} \frac{\sigma_{к.с} p_2^*}{\sqrt{T_3^*}} - q(\lambda_{с.а})F_{с.а}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\delta_{охл} = \frac{M_{в.охл}}{M_{в1}}$ ——冷却涡轮的相对空气流量;

$\tau_r = \frac{M_r}{M_{в} - M_{в.охл}}$ ——相对燃油消耗量。

由于 $(p_2^*/p_1^*) = \pi_k^*$, 故 (6) 式可写为下式:

$$\begin{aligned} \frac{\pi_k^*}{q(\lambda_1)} = (1 - \delta_{охл})(1 + \tau_r) \\ \frac{m_{кр.в} F_1}{m_{кр.г} q(\lambda_{с.а}) F_{с.а} \sigma_{к.с}} \sqrt{\frac{T_3^*}{T_1^*}} \end{aligned} \quad (7)$$

或换算到它们在设计条件下数值的相对值

$$\frac{\bar{\pi}}{\bar{q}} = \frac{\bar{A}}{\bar{F}_{c,a} \sqrt{\bar{T}}}, \quad (8)$$

式中

$$\bar{\pi} = \frac{\pi_{\kappa}^*}{\pi_{\kappa_0}^*}; \quad \bar{q} = \frac{q(\lambda_1)}{q(\lambda_{10})};$$

$$A = (1 - \delta_{oxn})(1 + \tau_r) \frac{m_{\kappa p, a} F_1}{m_{\kappa p, r} \sigma_{\kappa, c}};$$

$$\bar{F}_{c,a} = \frac{F_{c,a} q(\lambda_{c,a})}{[F_{c,a} q(\lambda_{c,a})]_0};$$

$$\bar{T} = \frac{T_1^*/T_{10}^*}{T_3^*/T_{30}^*} \text{——相对温度（反比于相对的换算涡轮前}$$

燃气温度值）。

当 $\bar{F}_{c,a} = 1$ 、 $\bar{A} = 1$ 时， $\bar{\pi}/\bar{q}$ 比值就只由 $\bar{T}$ 值来确定(图 3)。这样，可得到空气流量的平衡方程，即与 $\pi_{\kappa_0}^*$ 和 T_{30}^* 设计值无关的一定 $\bar{T}$ 值相对应的完全确定的 $\bar{\pi}/\bar{q}$ 比值。

现在来研究涡轮喷气发动机的压气机和涡轮功的平衡方程。此方程将压气机增压比 π_{κ}^* 与涡轮膨胀比 π_{τ}^* 联系起来

$$T_1^* \frac{\pi_{\kappa}^{*\chi} - 1}{\eta_{\kappa}^*} = B T_3^* \left(1 - \frac{1}{\pi_{\tau}^{*\chi_{\Gamma}}} \right) \eta_{\tau}^*, \quad (9)$$

式中 $B = (1 - \delta_{oxn})(1 + \tau_r) \frac{\kappa R_{\Gamma}}{\kappa_r R_b}。$

涡轮和压气机功的平衡方程可具有相对值的形式

$$\bar{T} \bar{l}_{\kappa} = \bar{B} \bar{l}_{\tau}, \quad (10)$$

式中 $l_{\kappa} = \frac{\pi_{\kappa}^{*\chi} - 1}{\eta_{\kappa}^*}; \quad l_{\tau} = \left(1 - \frac{1}{\pi_{\tau}^{*\chi_{\Gamma}}} \right) \eta_{\tau}^*。$

在 $\pi_{\tau}^* = \text{常数}$ ， $\eta_{\tau}^* = \text{常数}$ 和 $B = \text{常数}$ 的情况下，(10) 式

可得下述形式

$$\bar{T}\bar{l}_\kappa = 1。 \tag{11}$$

(11) 式也如同 (8) 式一样, 在压气机设计增压比为任何值的情况下都是正确的 (见图 3)。但当 $\pi_{\kappa 0}^*$ 值不同时, 不同的 π_κ^* 变化将对应同样的 $\bar{l}_\kappa$ 变化, 它由非线性关系 $l_\kappa = f(\pi_\kappa^*)$ 所确定 (图 4)。研究一下在 $\eta_\kappa^* = 0.85$ 时作出的图 4 曲线, 由此例可得, l_κ 减小一半会使得 $\pi_{\kappa 0}^* = 16$ 时的 π_κ^* 减小 70%, 而使得 $\pi_{\kappa 0}^* = 4$ 时的 π_κ^* 减小 40%。因此, 当 $\bar{T}$ 升高时, $\pi_{\kappa 0}^*$ 越高, 增压比 π_κ^* 就下降得越多。

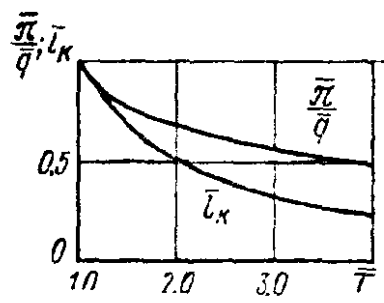


图 3 $\bar{\pi}/\bar{q} = f(\bar{T})$ 和 $l_\kappa = f(\bar{T})$ 的关系曲线

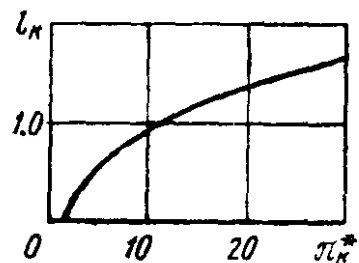


图 4 $\eta_\kappa^* = 0.85$ 时 $l_\kappa = f(\pi_\kappa^*)$ 的关系曲线

图 5 表示 $\bar{\eta}_\kappa = 1$ 时根据 (11) 式对不同的 $\pi_{\kappa 0}^*$ 值建立的 $\bar{\pi} = f(\bar{T})$ 函数变化曲线。考虑到图 3 中的曲线, 就可建立 $\bar{q} = f(\bar{T})$ 函数的相应变化曲线, 示于图 6 中。

根据图 5 和 6 中的曲线, 可建立压气机设计增压比为不同数值时 $\bar{\pi} = f(\bar{q})$ 关系曲线 (图 7)。此曲线是按照 (11) 式的条件调节发动机时, 具有不同 $\pi_{\kappa 0}^*$ 值的发动机工作状态线。在方程 (8) 和 (11) 联立求解的基础上可得到工作状态线的数学表达式