

航空涡轮喷气发动机的 特性和使用性能

[苏]尤.阿.李特维诺夫 弗奥.鲍罗维克 著

陈炳慈 译 刘万学 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书比较详细地阐述了在地面和飞行条件下,各种使用因素对燃气涡轮发动机及其各部件的特性和使用性能的影响,以及分析和寻求改善燃气涡轮发动机特性和使用性能的途径。书中所包含的内容对现有的燃气涡轮发动机的理论是个必要的补充,同时,有助于改进燃气涡轮发动机的研制和分析、预防使用中燃气涡轮发动机可能出现的故障。

本书适用于航空工业部门的工程师和设计师阅读,也可供高等航空院校发动机专业的师生参考。

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АВИАЦИОННЫХ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ю. А. ЛИТВИНОВ

В. О. БОРОВИК

Москва «Машиностроение» 1979

*

航空涡轮喷气发动机的特性和使用性能

尤·阿·李特维诺夫

〔苏〕 著

弗·奥·鲍罗维克

陈炳慈 译

刘万学 校

责任编辑 林国方

*

国防工业出版社出版

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11¹/₂ 254千字

1986年3月第一版 1986年3月第一次印刷 印数: 001—670册

统一书号: 15034·2938 定价: 2.35元

前 言

在燃气涡轮发动机发展过程中,为了改善发动机的特性,增大发动机的单位推力和迎面推力,降低燃料消耗率和减轻发动机重量,对发动机的热力、气动和构造参数都进行了不断的改进。同时,发动机的使用性能也有了显著提高,譬如:发动机的工作稳定性和可靠性提高了;发动机的起动时间缩短了;加速时间减少了。但是,无论从飞行高度和速度,或者从使用条件(大气温度、各种降水、阵风、大气紊流等)来说,动力装置的使用范围却在不断地扩大,其结果,发动机的实际特性(节流特性、高度特性、速度特性等)和发动机的使用性能(起动性能、加速性、稳定性等),与标准(理想)条件下所确定的特性和性能相比,就有明显的差别。

要了解燃气涡轮发动机的实际特性和使用性能,必须掌握大量的各种有关资料:动力装置各部件相互间的影响;动力装置各系统对燃气涡轮发动机特性和性能的影响;以及外界大气条件和飞行状态(使用因素)对发动机各部件和整台发动机特性的影响等等。这些资料是需要专门的试验台上进行相当复杂的试验才能获得的。通过这种试验台的试验可以呈现和模拟燃气涡轮发动机的实际使用条件,从而探讨各种使用因素对燃气涡轮发动机特性和使用性能的影响。

目 录

主要符号	1
绪论	4
第一章 燃气涡轮发动机的使用条件	6
1.1 由飞行条件决定的使用因素	7
1.2 由飞机动力装置工作特点决定的使用因素	20
第二章 使用条件对燃气涡轮发动机各部件特性的影响	28
2.1 燃气涡轮发动机各部件特性随使用因素变化的关系	28
2.2 进气道	32
2.3 压气机	42
2.4 主燃烧室	60
2.5 涡轮	65
2.6 加力燃烧室	87
2.7 喷管	90
2.8 高空高速条件下涡轮喷气发动机各部件的共同工作	104
第三章 燃气涡轮发动机的数学模型	106
3.1 发动机数学模型的种类	107
3.2 相似理论和量纲的应用	109
3.3 用电子数字计算机进行涡轮喷气发动机的模拟	118
3.4 燃气涡轮发动机的线性数学模型	129
第四章 燃气涡轮发动机的主要使用特性和工作状态	134
4.1 最大状态	135
4.2 加力状态	139
4.3 巡航状态	143

4.4 慢车状态.....	149
第五章 用试验方法确定燃气涡轮发动机的使用特性	155
5.1 在 $H = 0$ 、 $M_{\pi} = 0$ 条件下求涡轮喷气发动机推力 的特点.....	155
5.2 大气条件对确定燃气涡轮发动机特性准确性的影响.....	164
5.3 飞行条件的模拟方法.....	182
5.4 在高空高速条件下确定燃气涡轮发动机各主要参数.....	187
5.5 在试验台试验燃气涡轮发动机时所确定参数的准确性.....	193
第六章 数学模型与试验数据的一致性	201
6.1 燃气涡轮发动机数学模型与试验结果一致性的基础.....	201
6.2 一致性程序中的模型线性化.....	208
6.3 数学模型与试验结果一致性方法的有效性.....	211
第七章 自转状态	227
7.1 自转随飞行速度和高度变化的关系.....	227
7.2 自转时的最小转速.....	230
7.3 自转状态时的最大换算转速.....	231
7.4 多转子燃气涡轮发动机自转状态的特点.....	238
7.5 发动机自转的内阻力.....	242
7.6 最大容许物理自转转速时的飞行速度.....	345
7.7 发动机进入自转状态.....	247
7.8 燃烧室进口处的参数.....	249
第八章 发动机的起动	252
8.1 冷转动状态.....	255
8.2 燃气涡轮发动机燃烧室的起动特性.....	258
8.3 影响由燃烧室起动特性确定的起动边界的主要因素.....	263
8.4 起动装置的功率.....	273
8.5 发动机涡轮的剩余功率.....	278
8.6 发动机起动时经历的主要过程.....	281
8.7 发动机的起动持续时间.....	282

第九章 燃气涡轮发动机的加速性	293
9.1 对发动机加速性的一般要求	294
9.2 近似估计燃气涡轮发动机加速性的方法和标准	295
9.3 发动机的动力特性	307
9.4 燃气涡轮发动机在加速状态的供油和调节程序	312
9.5 结构形式不同的各种发动机加速性的特点	318
9.6 过渡过程中加力式涡轮风扇喷气发动机风扇和压 气机稳定工作裕度的变化	326
9.7 加力加速性	341
第十章 燃气涡轮发动机的稳定性	345
参考文献	361

主要符号

- a, a_{kp} ——当地音速和临界音速, 米/秒;
 C ——气流的绝对速度, 米/秒;
 C_p ——比热, 焦耳/(公斤·K);
 F ——面积, 米²;
 $f(\lambda)$ ——无因次气流冲量;
 G ——发动机进口空气流量, 公斤/秒;
 G_r ——燃料消耗量, 公斤/秒;
 g ——重力加速度, 米/秒²;
 $g_i = \frac{\Delta G_i}{G}$ ——第 i 截面处流量的相对变化;
 H ——飞行高度, 公里;
 H_u ——燃料低热值, 焦耳/公斤;
 J_z ——转动惯量, 公斤·米²;
 k ——绝热指数;
 k_y ——压气机稳定裕度系数;
 L ——单位压缩(膨胀)功, 焦耳/公斤;
 L_o ——燃烧 1 公斤燃料的理论空气量(公斤);
 l ——无因次单位压缩(膨胀)功;
 M_n ——飞行 M 数;
 M ——质量, 公斤; 扭矩, 牛顿·米;
 m ——函道比;
 N ——功率, 瓦;

n ——转速, 秒⁻¹;

p, p^* ——静压和总压, 帕;

$P_{H0} = 101.3$ 千帕——标准大气压;

Q ——热流, 瓦;

$q_{\tau}, q_{\tau, \Phi}$ ——主燃烧室和加力燃烧室内的燃料消耗量
与空气流量之比;

$q(\lambda)$ ——无因次密流;

R ——发动机推力, 牛顿;

R_0 ——气体常数, 焦耳/(公斤·K)

S ——转子转差率;

T, T^* ——静温和滞止温度, K;

$T_{H0} = 288$ K——标准大气温度;

U ——圆周速度, 米/秒;

V ——容积, 米³;

V_n ——飞行速度, 米/秒;

V_{np} ——飞行表速, 公里/小时;

W ——相对速度, 米/秒;

α ——余气系数;

$\delta^* = p_i^*/p_{H0}$ ——第 i 截面处的相对总压;

η ——叶片机效率;

η_{τ}, η_{Φ} ——主燃烧室和加力燃烧室内的燃料完全燃
烧系数;

η_{κ} ——机械效率;

$\theta^* = T_i^*/T_{H0}$ ——第 i 截面处的相对滞止温度;

λ ——速度换算系数; 导热系数;

π ——增(降)压比;

ρ ——密度, 公斤/米³;

- σ —— 总压恢复系数；表面张力系数；
 τ —— 时间，秒；增（减）温比；
 ω —— 角速度；
 φ —— 导向器旋转角；速度系数；进口流量系数；相对湿度；
 K_d —— 动力系数，秒。

下 注 角

- 0 —— 标准大气条件下的参数值；截面号码；
 $пр0$ —— 按一般相似公式换算为标准大气条件下的参数值；
 H —— 与飞行高度相应的空气参数；
 $пр$ —— 加速性；
 $н. д$ —— 低压；
 $в. д$ —— 高压。

绪 论

航空发动机在使用过程中会遇到大量各种不同因素的影响。这些因素既包括表示大气状态的外界影响的因素，也包括飞机动力系统内表征发动机使用特点的因素。所有这些都可以概括为使用因素。这里，首先是空气的一些参数，如压力、温度、湿度、含水量；还有进入发动机的气流参数，如压力场和温度场的不均匀度、不稳定性和紊流度等，这些都是决定飞行条件（迎角、侧滑角、速度等）和动力装置每一部件前、后工作情况的前提。此外，对发动机在飞机动力系统内工作时，在功率消耗、抽出空气以及利用燃料冷却部件（这样会使燃料温度升高）等方面都提出了补充要求。

尽管每个使用因素单个地对燃气涡轮发动机特性和使用性能的影响，在大多数情况下是不大的，但是当一些不利因素凑合在一起时，就势必使发动机的性能显著降低，从而导致飞机的飞行技术性能变坏。

在一定的使用条件下，使用因素的影响常常表现得很明显，所以对设计发动机时在热力循环参数的选择、发动机操纵机构和供油机构调节程序的选择等方面都提出了严格的要求。实践证明，在发动机设计阶段，如果缺少有关使用因素对发动机及其各部件特性影响的必需资料，就会明显地影响发动机的设计效果和使用性能。

国内外发动机制造的经验表明，要扩大以燃气涡轮发动机为动力的飞行器的飞行高度和速度范围，提高对动力装置

使用特性和可靠性的要求，就要在近似使用条件下最大限度地研究燃气涡轮发动机及其各部件工作的适应范围。

当然，试验数据是否准确和可靠，主要取决于研究方法的选择。因此，无论在地面试验台还是在高空试验台，应特别注意研究燃气涡轮喷气发动机及其动力系统整机和各部件特性的试验方法。为了提高燃气涡轮发动机特性的稳定性，从而提高飞行器特性的稳定性，下列一些问题具有重要的意义，即：对燃气涡轮发动机成批生产中特性估计的准确性问题；大气条件变化对燃气涡轮发动机特性的影响问题；以及地面试验台内部的气体动力学问题等。

在燃气涡轮发动机实际研究中，采用自动测量计算数学模型能大大提高试验效果。因为数学模型能相当全面地考虑发动机各参数之间的所有已知的关系，并采用与各部件实际特性较接近的特性。数学模型同试验结果的一致，是有助于提高信息量和试验准确性的决定性因素之一。建立燃气涡轮发动机数学模型要求进行专门的试验和计算。这种数学模型能高度准确地描述发动机所有可能使用的工作状态的性能。这些研究的目的是要更准确地阐明在高空高速条件下发动机及其各部件特性变化的规律性。

本书主要反映以下一些成果：研究使用因素（空气压力、空气温度和湿度、发动机前温度场和压力场的不均匀性等）对燃气涡轮发动机及其各部件的特性和使用性能的影响；以及分析和寻求改善燃气涡轮发动机特性和使用性能的途径。

第一章 燃气涡轮发动机的使用条件

以燃气涡轮发动机为动力的飞机具有十分宽广的飞行高度和速度范围 (图 1-1)。飞行器在飞行中要作各种不同的运

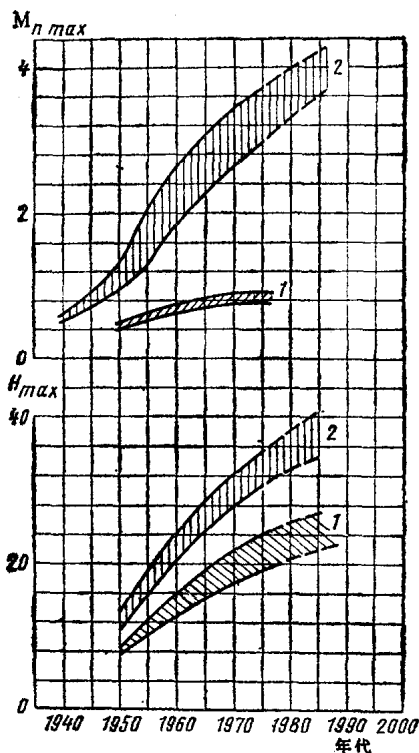


图1-1 飞机最大高度和最大 M_n 数随年代变化的关系曲线^[83]

1— $M_n < 1$ 的飞机, 2— $M_n > 1$ 的飞机。

动：爬高、平飞、加速和减速、下滑、盘旋、俯冲等。这时，飞行器在气流中的方位是变化的，从动力装置的角度来说，飞行器的方位可由迎角 α 和侧滑角 β 来确定（图 1-2）。

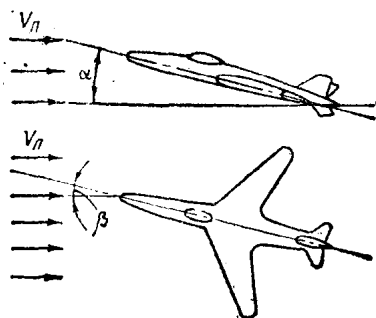


图1-2 飞行器在气流中的方位
 α —迎角； β —侧滑角。

1.1 由飞行条件决定的使用因素

以燃气涡轮发动机为动力的飞行器多半在低层大气中飞行，低层大气的空气是燃气涡轮发动机的工质。飞行器的阻力、升力、动力装置的推力及其各部件的效率等，在很大程度上都取决于空气的性质。如同各种气体一样，组成大气的空气，其物理性质也用压力、温度、密度、湿度、粘度、导热系数，以及其他参数来表示。

1.1.1 大气条件

大气低层（高度 $H=11$ 公里以下）形成所谓对流层。在对流层内，空气在垂直和水平方向上都进行着剧烈的运动。空气对流以风速表示，而风向和风力都随时间变化。对流层内以各种形式集聚着从地表面蒸发的水分，形成云、降水，空气的压力、密度、温度、湿度以及其他特性也随时在变化。

地表面的辐射热（或吸热）对它也有显著影响，离地表面越远，空气温度越低。

在高度 $H = 11 \sim 25$ 公里范围内是平流层，空气的平均温度变化不大。通常，平流层中的风向是不变的，即与地球旋转方向相反，由东向西运动。随着高度的增加，空气的压力和温度则不断降低。

大气状态的特点是随空间和时间而变化的。除高度对大气状态有影响外，季节、昼夜、地球表面的纬度、各种不同的气象等对大气状态都有影响。譬如，在地面上，因地理位置和季节的不同，空气温度可能在 -60°C 至 $+60^{\circ}\text{C}$ 范围内变动。空气压力也在 92 至 104 千帕范围内变化。

大气中总是含有湿气，主要以水蒸气的形式出现。由于气候区、季节、气象、高度以及其他因素的不同，水蒸气含量的变化范围是相当大的。降水或有雾、有云时，空气中除了含有水蒸气外，还含有湿气的悬浮粒子。这些悬浮粒子在合适的条件下（譬如，随空气沿发动机通道运动时）蒸发，提高了工质的蒸气含量。但是，分析降水的强度、云和雾含水的程度表明，在这些大气条件下，特别是空气的湿度较高时，空气中的含水量增加得并不多。

空气中含的水珠用含水量，即 1米^3 空气中水的重量表示。下雨时的含水量通常为 $0.5 \sim 2.0$ 克/米³。含水量达 10 克/米³ 以上的雨在地球上极少见的。其他一些大气现象（细雨、雾等）的特征是水珠较小，含水量也较小。

表 1-1 中列出了各种不同的大气现象时水珠大小和空气的含水量。

在地面条件下，空气含水量最大。随着高度的增加，空气含水量减少。对流层中湿度的平均分布一般用甘恩公式表

表 1-1

大气现象	水珠直径, 毫米	空气含水量, 克/米 ³
雾	0.002~0.02	0.01~1
云	0.004~0.14	0.1~1.5
细雨	0.05~0.5	0.2~2
雨	0.5~3	0.5~3
阵雨	1~6	3~10

示, 对水蒸气气压来说, 这公式可写为:

$$p_n = p_{n0} \times 10^{-\frac{H}{\gamma}}$$

式中, p_{n0} ——地面水蒸气的分压, 帕; H ——高度, 公里;
 γ ——实验系数。

图 1-3 示出了莫斯科地区上空各种不同高度上空气年平均含水量的变化曲线和平均纬度上空气湿度的分布情况。从图 1-3 的曲线 2 可以看出, 平流层水蒸气的含量是随着高度增加而不断减少的。

空气湿度就是空气中所含水蒸气的数量, 并用下列值表示: d —含水量 (绝对湿度), 表示一公斤干空气中所含水蒸气的重量, φ —相对湿度, 表示空气中含水蒸气的饱和程度,

$$d = \frac{G_n}{G_s} = 0.622 \frac{p_n}{B_0 - p_n}; \quad \varphi = \frac{p_n}{p_{n, \text{нac}}} \leq 1 \quad (1-1)$$

湿空气温度不同时, 含水量随相对湿度变化的关系曲线 (图 1-4) 由下列关系式求出:

$$d = 0.622 \frac{\varphi p_{n, \text{нac}}}{B_0 - \varphi p_{n, \text{нac}}} \quad (1-2)$$

式中, $B_0 = p_{n0}$, 而 $p_{n, \text{нac}} = f(t_n)$ (t_n ——温度, $^{\circ}\text{C}$)。

从图 1-4 可以看出, $\varphi = \text{常数}$ 时, 如空气温度增加, 大

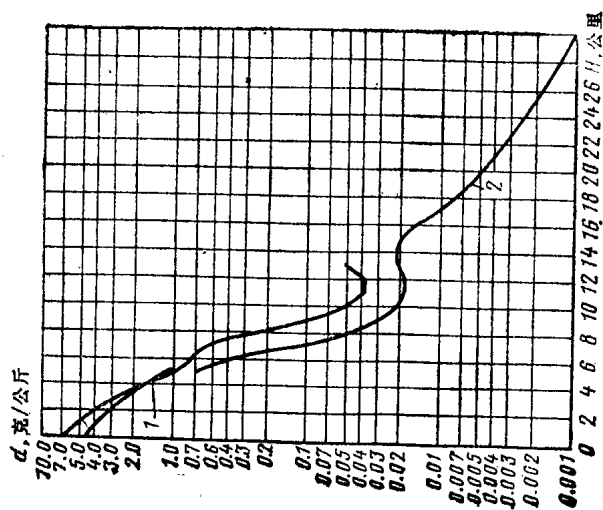


图1-3 空气含水量随高度的变化
1—莫斯科地区(年平均值), 2—平均纬度。

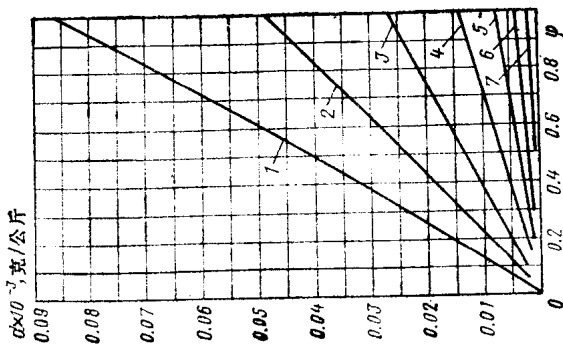


图1-4 温度不同时大气含水量随相对湿度变化的关系曲线

1— $t_n = 50^\circ\text{C}$; 2— $t_n = 40^\circ\text{C}$; 3— $t_n = 30^\circ\text{C}$; 4— $t_n = 20^\circ\text{C}$;
5— $t_n = 10^\circ\text{C}$; 6— $t_n = 0^\circ\text{C}$; 7— $t_n = -10^\circ\text{C}$ 。

气含水量也增加,当 φ 值较大时,这种现象更为突出。在地面上,当温度接近最大值,即 $t_n \approx 50^\circ\text{C}$ 时,如 $\varphi = 1$,则含水量为 $d \approx 0.09 \times 10^3$ 克/公斤。

表 1-2 列出了三个城市的地面空气含水量变化的数据,可作为地面不同地区大气含水量可能变化范围的例子^[18]。

表 1-2

参 数	各 城 市 的 参 数 值		
	莫 斯 科	巴 统 ●	加 尔 各 答
温度, $^\circ\text{C}$	-42 ~ +35	-8 ~ +36	+6.7 ~ +43.9
含水量, $d \times 10^{-3}$ 克/公斤	0.00016 ~ 0.0151	0.0009 ~ 0.0236	0.0047 ~ 0.0291

在空间任意点上,空气速度是随时间不断变化的。一般情况下,这种变化不是周期性的,而且也没有一定的规律,这就是说,空气的运动具有紊流运动的性质^[22]。

由于速度有脉动,从而对紊流运动的研究更加复杂了。实践中,往往分析研究随时间变化的相应平均值来代替实际速度、压力等:

$$\bar{W}_i = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} W_i dt \quad (1-3)$$

式中, $i = x, y, z$ ——空间坐标,

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p dt \quad (1-4)$$

这样,就把研究不稳定运动变成了研究稳定运动。应用平均速度和压力的概念,可以将相应的实际值写成: $W_i = \bar{W}_i + W'_i$, $p = \bar{p} + p'$, 式中, W'_i 和 p' ——按时间取平均

● 巴统为苏联阿扎里共和国的首都。——译者