

# 压气机效率计算方法的探讨

强艳<sup>1</sup>, 陈云永<sup>2</sup>, 李游<sup>1</sup>, 江和甫<sup>3</sup>

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司设计研发中心, 上海 201108; 2. 中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司, 上海 201108; 3. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

**摘要:** 在航空发动机的各设计和试验环节, 压气机效率的准确定义对正确评价压气机性能和发动机热力学设计有着重要影响。明确了压气机效率的基本定义, 指出了等熵效率和多变效率的评价方法及特点。归纳了目前设计、试验中压气机等熵效率的各类计算公式, 并针对三种温升效率的计算方法开展了有效性和适用范围探讨, 分析了试验中温升效率和扭矩效率测量精度的影响因素。推导了考虑级间引气的效率定义公式, 并利用该公式评估引气对压气机效率计算结果的影响。

**关键词:** 航空发动机; 压气机; 等熵效率; 多变效率; 定比热; 变比热; 级间引气

**中图分类号:** V235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2019) 06-0026-05

## Calculation methodology of compressor efficiency

QIANG Yan<sup>1</sup>, CHEN Yun-yong<sup>2</sup>, LI You<sup>1</sup>, JIANG He-fu<sup>3</sup>

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., R&D Center, Shanghai 201108, China;

2. AECC Shanghai Commercial Aircraft Engine Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201108, China;

3. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** The accurate assessment of compressor performance and engine thermodynamic design is largely affected by the accurate definition of compressor efficiency during compressor design and testing process. The basic definition of compressor efficiency was outlined and the evaluation methods and different features for isentropic efficiency and polytropic efficiency were stated. Several methods for calculating compressor efficiency used in current design and test were summarized. The validity and application range of three temperature rise efficiency methods were analyzed. Factors affecting measurement precision of temperature rise efficiency and torque efficiency were also summarized. In addition, the efficiency correction equation considering inter-stage bleeding was deduced and the equation was applied to evaluate the effects of bleed on compressor efficiency.

**Key words:** aero-engine; compressor; isentropic efficiency; polytropic efficiency; constant specific heat; variable specific heat; inter-stage bleeding

## 1 引言

压气机作为航空发动机的重要部件, 其性能优劣直接关系到发动机的性能。压气机效率是衡量压气机性能水平的关键指标, 对发动机耗油率、推力等关键参数有着较大的影响<sup>[1-3]</sup>。压气机效率有等熵效率和多变效率之分, 目前国内在设计 and 试验过程中常采用等熵效率评价压气机性能, 但各研究所

在发动机总体设计、压气机部件设计、压气机性能试验和发动机整机试验验证中, 每个环节采用的效率计算公式不尽相同。若针对同一压气机, 各环节计算出的效率值存在偏差, 将导致发动机中压气机的实际工作状态与总体匹配出的设计状态不一致。因此, 在发动机总体设计、压气机部件设计和试验验证中, 统一采用准确的压气机效率定义具有重要意义。

在对目前发动机设计流程中压气机相关各环节

收稿日期: 2018-10-22

作者简介: 强艳(1988-), 女, 江苏扬州人, 工程师, 硕士, 主要从事航空发动机压气机气动设计。

效率计算公式归纳总结的基础上,本文分析了等熵效率和多变效率之间的关系,阐述了各自的评价方法和特点。针对等熵效率,分别给出了温升效率和扭矩效率的计算方法,并对比了三种温升效率计算方法的准确性和异同性。同时推导了考虑级间引气的效率定义公式,并利用该公式评估了引气对高负荷压气机不同转速下效率计算结果的影响。

## 2 压气机效率的定义

根据热力学定理,压气机效率为有用功对总耗功的占比,表示压气机中能量转化过程的完善程度。压气机在对气流进行加功压缩的同时,不可避免地存在气流内部黏性摩擦、气流与固壁表面摩擦、掺混、涡动、二次流、泄漏、激波以及对外传热等损失或耗散,因此效率总低于1<sup>[4-5]</sup>。压气机效率有多种表达方式,其反映的实质均相同,常用的有等熵效率和多变效率。

### 2.1 等熵效率

等熵效率的物理意义是将气体从压力  $p_1$  压缩到压力  $p_2$  理想的、无摩擦的、绝热等熵过程所需要的机械功(等熵压缩功)与实际的、有摩擦的、绝热熵增过程所需要的机械功(消耗功)之比。

$$\eta_{\text{ad}} = \frac{h_{\text{ad}}}{h_{\text{tot}}} = \frac{\frac{k}{k-1}R(T_{2s} - T_1)}{\frac{k}{k-1}R(T_2 - T_1)} \quad (1)$$

式中:  $h_{\text{ad}}$  为等熵压缩功,  $h_{\text{tot}}$  为消耗功,  $T_1$  为压气机进口温度(K),  $T_{2s}$  为等熵压缩过程的终点温度(K),  $T_2$  为实际压缩过程的终点温度(K),  $k$  为绝热指数,  $R$  为气体常数。

对于理想气体,等熵温比可简化为与压比的关系:

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2)$$

因此,等熵效率的公式可表示为:

$$\eta_{\text{ad}} = \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) / \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) \quad (3)$$

### 2.2 多变效率

多变效率的物理意义是将气体从  $p_1$  压缩到  $p_2$  所消耗的多变压缩功  $h_{\text{pol}}$  与实际消耗功之比。

$$\eta_{\text{pol}} = \frac{h_{\text{pol}}}{h_{\text{tot}}} = \frac{\frac{m}{m-1}R(T_2 - T_1)}{\frac{k}{k-1}R(T_2 - T_1)} \quad (4)$$

多变过程指数  $m$  的计算公式为:

$$\frac{m}{m-1} = \frac{\ln(p_2/p_1)}{\ln(T_2/T_1)} \quad (5)$$

则多变效率的公式可表示为:

$$\eta_{\text{pol}} = \frac{k-1}{k} \frac{\ln(p_2/p_1)}{\ln(T_2/T_1)} \quad (6)$$

当压气机增压比相同时,多变压缩功大于等熵压缩功,因此多变效率高于等熵效率。随着压气机增压比的提高,这种差异逐渐变大。两者间关系为:

$$\eta_{\text{ad}} = \frac{(p_2/p_1)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{(p_2/p_1)^{\frac{k-1}{\eta_{\text{pol}}k}} - 1} \quad (7)$$

多级压气机设计中,如果各级的等熵效率相同,则对应的压气机总等熵效率低于单级等熵效率;如果各级的多变效率相同,则对应的压气机总多变效率与单级多变效率相同。多变效率一般不直接用于设计点的计算中,其更重要的作用是能够对不同压比的同类型压气机进行比较。具有相同的技术水平、平均级负荷和几何特征尺寸(如轮毂比)的压气机,其多变效率基本一致,与压气机压比无关<sup>[6-8]</sup>;但等熵效率会随压比的升高而降低。目前,设计和试验中基本采用等熵效率作为指标,多变效率可作为压气机气动专业设计水平评估的辅助手段。

发动机实际工作中,带动压气机旋转的轴功率除主流道气流的消耗功之外,还包括克服转子风阻等所需的功率,由于发动机总体热力设计时已将其计入涡轮的机械效率,所以不在本文讨论范围。对于压气机轮盘辐板带鼓风轮的,其消耗功是否计入压气机的消耗功,需由总体和部件另行约定,本文也不讨论。另外,还有部分空气系统的气流流回了压气机流道,如防冰气或封严气,但这部分流量一般较小,工程上往往忽略其对压气机性能的影响。

## 3 设计和试验过程中的效率

目前常采用等熵效率评价压气机性能。根据消耗功计算方法的不同,等熵效率可分为温升效率和扭矩效率。在设计过程中采用温升效率开展计算,而在压气机性能试验中可分别采用温升效率和扭矩效率开展计算。

### 3.1 温升效率

温升效率  $\eta_{\text{ad,T}}$  表示等熵压缩功与实际温升计算的消耗功之比,已知条件为压气机总压比和进、出口总温。早期的压气机设计中,绝热指数取定值1.4。这对进口温度较低、总压比不高的压气机适

用,但随着压气机进口温度和总压比的不断提高,绝热指数仍作为常数处理会引起较大误差。为使压气机气动计算更精确,需采用变比热计算。常用的计算方法有以下三种。

### (1) 定比热

将工质的比热和绝热指数视为与温度无关的常数。

$$\eta_{ad,T1} = (\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1) / (\frac{T_2}{T_1} - 1) \quad (8)$$

式中:  $\pi_c$  为压气机总压比,  $k$  取定值 1.4。

### (2) 等效平均比热

根据压气机进、出口总温求得一个等效平均绝热指数,然后按公式(9)进行计算。

$$\eta_{ad,T2} = (\pi_c^{\frac{k_{av}-1}{k_{av}}} - 1) / (\frac{T_2}{T_1} - 1) \quad (9)$$

式中:  $k_{av}$  为等效平均绝热指数,为压气机进、出口总温的积分函数。将文献[9]推荐的一种算法简化为:

$$k_{av} = \frac{C_T}{C_T - \frac{R}{J} \ln \frac{T_2}{T_1}} \quad (10)$$

$C_T$  为定压比热与温度的函数

$$C_T = C_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} + b_1(T_2 - T_1) + \frac{b_2}{2}(T_2^2 - T_1^2) + \frac{b_3}{3}(T_2^3 - T_1^3) + \frac{b_4}{4}(T_2^4 - T_1^4) + \frac{b_5}{5}(T_2^5 - T_1^5) + \frac{b_6}{6}(T_2^6 - T_1^6) \quad (11)$$

其中:  $C_{p0} = 0.239\ 111\ 645$ ,  $b_1 = -1.387\ 794\ 3 \times 10^{-5}$ ,  $b_2 = 1.305\ 071\ 516 \times 10^{-7}$ ,  $b_3 = -5.499\ 968\ 112 \times 10^{-10}$ ,  $b_4 = 1.390\ 879\ 692 \times 10^{-12}$ ,  $b_5 = -1.453\ 257\ 48 \times 10^{-15}$ ,  $b_6 = 5.290\ 596\ 006 \times 10^{-19}$ ,  $J = 426.935$ (适用温度 223.1 ~ 1 000.0 K)。

### (3) 焓熵表

在考虑变比热的前提下,可以省略求绝热指数的过程,在已知压比情况下,直接利用压气机进、出口温度,通过等熵焓降计算得出等熵压缩过程终点的焓值,然后求出压气机等熵效率。计算过程如下:

$$S(T_{2s}) = \ln(\pi_c) + S(T_1) \quad (12)$$

式中:  $S(T_1)$  为压气机进口的熵函数,  $S(T_{2s})$  为等熵压缩过程终点的熵函数。通过  $S(T_{2s})$  查焓熵表可得出终点的焓值  $h_{2s}$ , 然后带入公式(13)进行压气机等熵效率计算。

$$\eta_{ad,T3} = \frac{h_{ad}}{h_{tot}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (13)$$

式中:  $h_1$  为压气机进口焓值,  $h_2$  为压气机出口焓值,二者可由压气机进、出口温度求得。

针对三种温升效率的计算方法开展对比分析。以一设计压比为 20.0 的高压压气机为例,该压气机的进口为大气进气条件,共同工作线上各换算转速的总压比和进出口温度如表 1 所示。三种温升效率的计算结果如表 1 所示:高压压气机在低转速、压比低于 3.0 时,定比热与变比热计算的效率差值低于 0.005,可并用;但在中高转速、压比高于 3.0 时,定比热的效率计算值偏高,且偏差随压比的增加而增加,此时定比热计算出的效率值准确性大大降低。等效平均比热和焓熵表方法在各压比状态下的差值均很小,两种方法可以互换通用。

表 1 温升效率计算结果对比

Table 1 Comparison of calculation results for temperature rise efficiency

转速	输入参数			输出参数-等熵效率		
	$\pi_c$	$T_1$ /K	$T_2$ /K	定比热	等效平均比热	焓熵表
0.20	1.1	288.15	310.00	0.364 1	0.364 1	0.363 7
0.30	1.2	288.15	325.00	0.418 1	0.417 9	0.417 3
0.40	1.4	288.15	350.00	0.470 1	0.469 5	0.468 9
0.50	1.6	288.15	380.00	0.450 9	0.449 7	0.449 6
0.60	2.0	288.15	425.00	0.461 2	0.458 9	0.458 7
0.70	3.0	288.15	475.00	0.568 6	0.564 0	0.563 9
0.75	4.0	288.15	505.00	0.645 8	0.639 1	0.639 2
0.80	5.0	288.15	535.00	0.681 5	0.672 7	0.672 3
0.85	7.5	288.15	570.00	0.795 7	0.782 6	0.782 3
0.90	12.0	288.15	650.00	0.823 3	0.802 7	0.802 5
0.95	16.0	288.15	695.00	0.855 7	0.829 5	0.829 9
1.00	20.0	288.15	740.00	0.863 2	0.831 8	0.831 9

试验中影响温升效率精度的主要因素包括:温度测量误差、测量方法中的近似和假设以及测试布局等<sup>[10-11]</sup>。温度测量误差主要来源于状态稳定时间、偶丝和电阻精度、复温系数,以及转速升降历程中测试系统的灵敏度和重复性不一致。测量方法中的近似和假设带来的误差,来源于盘腔温度平衡、探针堵塞影响、工质变化及雷诺数变化等。探针堵塞比、轴向安装位置、周向安装位置及探针支杆结构形状等测试布局因素均影响压气机效率精度。

### 3.2 扭矩效率

扭矩效率  $\eta_{ad,tor}$  表示等熵压缩功与实测轴扭矩计算的消耗功之比,见式(14)。使用该公式时,与温升效率一样,可采用定比热或变比热。

$$\eta_{ad,tor} = 9.549 \frac{k-1}{k} R \frac{W_{in} T_1 (\pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1)}{M n_{tor}} \quad (14)$$

式中:  $W_{in}$  为压气机进口物理流量(kg/s),  $M$  为扭矩测量值(N·m),  $n_{tor}$  为物理转速(r/min)。

影响试验中扭矩效率精度的主要因素包括:前置齿轮箱传动效率、测扭器的测量精度及其在标定过程中的零点漂移、转轴热效应和盘腔鼓风效应等<sup>[12]</sup>。压气机试验中,转轴受热变形,与轴承之间的摩擦程度改变,引起轴功率变化,进一步引起扭矩效率变化。此外,压气机盘高速运转中与空气摩擦并带动盘腔空气形成涡流,会导致功率损失。

### 3.3 考虑级间引气的效率

航空发动机空气系统需要从压气机中引出一定流量的已增压到一定程度的压缩气体,其主要用途是发动机热端部件冷却,如燃烧室、涡轮冷却,同时也有有机翼防冰、发动机进口防冰等。军用发动机空气系统从高压压气机中引出的气体流量约为主流流量的3%~5%,民用发动机引气流量则可高达10%以上。因此,压气机的进、出口空气流量并不相等,随着压气机中间级引气量的不断增加,必须考虑引气对压气机效率定义的影响<sup>[13-14]</sup>。在使用扭矩效率公式时,若直接以进口物理流量代入进行计算会产生一定误差,且随着引气流量的增加(扭矩随之减少)误差会进一步增大。同样,当采用温升效率公式进行计算时,虽然未用到流量和扭矩这两个参数,但其结果仍然会存在一定误差,因为从整台压气机做功角度分析,仍需要考虑级间引出气体的消耗功。

基于上述分析,为准确评估压气机引气条件下的效率,以及向发动机总体设计提供准确的压气机消耗功,提出以引气截面为状态边界,采用主气流和引出气流的质量加权平均对压气机效率计算公式进行修正<sup>[15]</sup>。其物理含义如下所示:

$$\text{等熵效率} = \frac{\text{主流等熵压缩功} + \text{引气等熵压缩功}}{\text{主流实际消耗功} + \text{引气实际消耗功}}$$

以温升效率为例,对压缩主流,其所需要的等熵压缩功可表示为:

$$h_{ad,m} = \left( W_{in} - \sum W_{b,i} \right) \frac{k}{k-1} R T_1 \left( \pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (15)$$

式中:  $W_{b,i}$  为各引气口  $i$  的引气量(kg/s)。

压缩主流所需要的实际消耗功为:

$$h_{tot,m} = \left( W_{in} - \sum W_{b,i} \right) \frac{k}{k-1} R (T_2 - T_1) \quad (16)$$

对于级间引出气流,其所需要的等熵压缩功可表示为:

$$h_{ad,b} = \sum \left[ W_{b,i} \frac{k}{k-1} R T_1 \left( \pi_{b,i}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \quad (17)$$

式中:  $\pi_{b,i}$  为各引气口的总压与进口总压之比。

级间引出气流所需要的实际消耗功为:

$$h_{tot,b} = \sum \left[ W_{b,i} \frac{k}{k-1} R (T_{b,i} - T_1) \right] \quad (18)$$

式中:  $T_{b,i}$  为各引气口  $i$  的总温(K)。

考虑引气的压气机效率表达式为:

$$\eta_b = \frac{h_{ad,m} + h_{ad,b}}{h_{tot,m} + h_{tot,b}} = \frac{\left( W_{in} - \sum W_{b,i} \right) T_1 \left( \pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) + \sum \left[ W_{b,i} T_1 \left( \pi_{b,i}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right]}{\left( W_{in} - \sum W_{b,i} \right) (T_2 - T_1) + \sum \left[ W_{b,i} (T_{b,i} - T_1) \right]} \quad (19)$$

在采用等效平均比热方法计算时,应该对主流气体、各路引气分别计算其  $k$  值。

同理,考虑引气的扭矩效率计算公式可表示为:

$$\eta_{b,tor} = \frac{9.549 \frac{k-1}{k} R \times \left( W_{in} - \sum W_{b,i} \right) T_1 \left( \pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) + \sum \left[ W_{b,i} T_1 \left( \pi_{b,i}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right]}{M n_{tor}} \quad (20)$$

仍然以一设计压比为20.0的高压压气机为例,评估典型压比下考虑引气对定比热温升效率( $k=1.4$ )和等效平均比热温升效率计算结果的影响。该压气机的进口为大气进气条件,各典型换算转速的总压比、进出口温度、引气口温度  $T_b$  和引气口压力  $p_b$  如表2、表3所示。由表可知,考虑引气对两种效率计算结果均有一定影响,且随着总压比的升高影响逐渐变大。与不考虑引气的效率相比,考虑引气的效率实际上可能会偏大或偏小,主要与引气前后段压气机效率大小相关。

处理压气机试验数据时,如果在计算等熵压缩功和消耗功时都不考虑引气,所导致的效率误差并不大,可以采用;如果在计算等熵压缩功和消耗功时其中一个考虑引气而另一个不考虑引气,所导致的效率误差会很大,应该避免采用。特别需要注意的是,在采用轴扭矩计算压气机消耗功时,在计算等熵压缩功时必须考虑引气的影响。

## 4 结论

系统总结了压气机效率的基本定义及其计算方法,给出了相关的计算公式,并通过示例分析了其有效性和适用范围。研究得出以下结论:

表2 考虑引气对定比热温升效率的影响( $k=1.4$ )

Table 2 Effects of bleeding on temperature rise efficiency with constant specific heat

转速	$\pi_c$	$T_1/K$	$T_2/K$	$T_b/K$	$p_b/kPa$	引气率	不考虑引气效率	考虑引气效率
0.70	3.0	288.15	475.00	410	220	15%	0.568 6	0.570 5
0.80	5.0	288.15	535.00	450	325	15%	0.681 5	0.683 8
0.90	12.0	288.15	650.00	520	660	15%	0.823 3	0.829 1
1.00	20.0	288.15	740.00	585	1 050	15%	0.863 2	0.869 3

表3 考虑引气对变比热温升效率的影响

Table 3 Effects of bleeding on temperature rise efficiency with varying specific heat

转速	$\pi_c$	$T_1/K$	$T_2/K$	$T_b/K$	$p_b/kPa$	引气率	不考虑引气效率	考虑引气效率
0.70	3.0	288.15	475.00	410	220	15%	0.564 0	0.566 1
0.80	5.0	288.15	535.00	450	325	15%	0.672 7	0.675 4
0.90	12.0	288.15	650.00	520	660	15%	0.802 7	0.809 4
1.00	20.0	288.15	740.00	585	1 050	15%	0.831 8	0.839 5

(1) 在发动机总体设计、压气机部件设计和试验测试中应统一使用等熵效率,且在计算中需采用变比热效率,推荐在试验测试中采用等效平均比热的计算方法。

(2) 多变效率可以作为压气机气动专业设计水平评估的辅助手段。

(3) 建议在发动机总体设计和压气机部件设计环节计算压气机效率时考虑引气的影响,效率定义应统一写成含引气的表达式。在尚不知设计细节的发动机概念设计初期,可采用不考虑引气的常规表述公式。在试验测试中,如引气导致的温升效率误差不大,也可采用不考虑引气的常规表述公式。

## 参考文献:

- [1] Johnsen I A, Bullock R O. 轴流压气机气动设计[M]. 秦 鹏,译. 北京:国防工业出版社,1975.
- [2] Broichhausen K D, Ziegler K U. Supersonic and transonic compressors: past, status and technology trends[R]. ASME GT2005-69067,2005.
- [3] Koff B L. Gas turbine technology evolution: a designers perspective[R]. AIAA 2003-2722,2003.
- [4] Dixon S L. Fluid mechanics thermodynamics of turbomachinery[M]. Oxford:Pergamon Press Ltd.,1998.
- [5] 张克危. 流体机械原理[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [6] Walsh P P, Fletcher P. Gas turbine performance[M]. 2th ed. Oxford:Blackwell Science Ltd.,2004.
- [7] Cumpsty N A. Compressor aerodynamics[M]. Florida: Krieger Publishing Company,2004.
- [8] Schobeiri M. Turbomachinery flow physics and dynamic performance[M]. New York: Springer Berlin Herdelberg New York,2005.
- [9] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册:第8册——压气机[K]. 北京:航空工业出版社,2001.
- [10] Bettocchi R, Pinelli M. A multi-stage compressor test facility: uncertainty analysis and preliminary test results [R]. ASME GT2003-38397,2003.
- [11] 王振华,王 亮. 航空发动机试验测试技术发展探讨[J]. 航空发动机,2014,40(6):47—51.
- [12] Brun K, Kurz R. Measurement uncertainties encountered during gas turbine driven compressor field testing [R]. ASME 98-GT-1,1998.
- [13] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册:第16册——空气系统及传热分析[K]. 北京:航空工业出版社,2001.
- [14] Leishman B A, Cumpsty N A, Denton J D. Effects of bleed rate and endwall location on the aerodynamic behaviour of a circular hole bleed off-take[R]. ASME GT2004-54179,2004.
- [15] 任铭林,向宏辉. 有关轴流压气机效率问题的探讨[J]. 燃气涡轮试验与研究,2009,22(4):9—14.