

文章编号: 1000-8055(2002)02-0165-05

对发动机经济性能参数的分析

李世武

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 发动机的性能参数确定了发动机的总体性能和状态。在发动机研制和运行的全寿期内, 其经济性最高的性能参数称作经济性能参数。发动机的热效率是评价其经济性的指标。本文从提高经济性的角度出发对发动机性能参数进行了分析, 发现热效率不适宜作为选择发动机性能参数的经济性决策指标, 而应以发动机全寿期的运行成本为决策指标才更为合理, 因为它兼顾了研制和运行两方面的因素。通过一个等压加热循环的燃气涡轮发动机, 建立了经济优化模型并得出了经济性能参数, 进而说明, 寻求和采用经济性能参数可考虑作为发动机决策的一个方面。

关键词: 发动机; 性能参数; 经济性; 决策

中图分类号: V 231

文献标识码: A

The Analysis of Economic Performance Properties of Engines

LI Shiwu

(Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Performance properties of an engine specify its performance and states. In the full life cycle of research, manufacture and operation of the engine, the performance properties which make the engine be in the state of maximal economic property are referred to as economic performance properties. Economic property of an engine not only incarnates in the develop stage but also in the full period of its develop and operation. From the point of view of improving economic property of engines, the analysis of engine properties is made in this paper. It is found that thermal efficiency is only an index to evaluate its economic property, but is unfitted to regard as a decision index for selecting economic performance properties of engines. For an engine of gas turbine, the economic optimization model is founded with the objective function of its life cycle cost, and the solution of the model is obtained by calculation. Through the comparison with the object function of thermal efficiency, the former can obtain economic performance properties of engines, whereas the latter cannot. It is emphasized in this paper that introducing the economic performance properties for developing engines, researching the methods and modes of determining the economic performance properties, and accumulating and collecting the information about the relationship between performance properties with costs are an important aspect of improving the performance of engines.

Key words: engine; performance properties; economy; decision

收稿日期: 2001- 03- 06; **修订日期:** 2001- 06- 03

作者简介: 李世武(1957-), 男, 西北工业大学航空动力与热力工程系副教授, 博士

1 前言

发动机的性能参数确定了发动机的总体性能和状态。在发动机研制和运行的全寿期内,其经济性最高的性能参数称作经济性能参数,而分析、评价经济性和获取经济性能参数的指标称作经济性决策指标。评价发动机经济性的指标采用的是总效率。总效率虽然可以直观地反映发动机能量利用的经济效果,但却不能全面反映发动机在研制与运行的全寿期内总的经济效果,尤其是难于用来作为选择经济性能参数的决策指标。这是因为发动机的经济性不仅与总效率有关,还与它的研制费用,运行寿命,运行率,燃料价格,维护费用及经济花费的时间动态性有关。例如,总效率高的发动机,它的研制费用也高,若把它放在运行率不高的场合下使用,并非合理。如果将发动机的全寿期运行成本作为选择经济性能参数的决策指标,就比总效率更全面,也就更有实用性。国外一些先进的工业国家,早在上世纪 60、70 年代就在国防的发动机研制与选型决策中,规定了必须采用费用设计与费用性能评估决策,在技术性能与研制费用之间,寻求在运行的全寿期内,达到综合最优,而我国在这方面的研究工作还刚处在起步阶段^[1]。

对提高发动机性能的研究,主要应放在如何提高其技术性能,同时也不应忽视提高其使用的经济性。在发动机的研制和选型中,采用较高的技术性能指标,势必需要付出较高的经济费用。那么对于发动机的研制与选型决策,如何优选其性能参数,才使其在研制与运行过程中获得最佳的经济性,这是一个值得重视和研究的问题。

发动机的总效率反映的是将燃料化学能转变为推动功的效能,而热效率反映的是转变为技术功的效能。这两者在能量转换与利用方面,其本质是等价的。不过总效率还能反映发动机在各种飞行条件下的效能。本文为了更清晰地表述发动机全寿期费用设计的功效,以地面等压加热的燃气涡轮发动机为例,来研讨它的经济性能参数和取得的方法。

2 对热效率作为经济性决策指标的分析

对于等压加热燃气涡轮发动机的实际循环,由于流体流经压气机、燃烧室和涡轮等部件时,存

在着粘性摩擦、分离、涡漩等流动阻力及加热热阻等不可逆因素的影响,致使在相同温度范围内,其热效率明显低于理想循环的热效率。为了反映实际循环接近理想循环的程度,引进了压气机效率 η_c 、气流进出燃烧室的总压恢复系数 σ 和涡轮效率 η_t ,即:

$$\eta_c = \frac{c_p(T_{2s} - T_1)}{c_p(T_2 - T_1)} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$\sigma = p_3/p_2$$

$$\eta_t = \frac{c_p(T_3 - T_4)}{c_p(T_3 - T_{4s})} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}}$$

上式中, T 为温度, p 为压力, c_p 为等压比热,下标 1, 2, 3 和 4 分别为压气机入口、压气机出口、燃烧室出口和涡轮出口的状态,下标 s 为历经等熵过程后的状态。

等压加热燃气涡轮理想循环的热效率仅是增压比 π_k ($\pi_k = p_2/p_1$)的单值函数,随增压比的增大而增大。当考虑到 η_c 、 σ 和 η_t 的影响后,等压加热循环的热效率 η 变成了与 π_k 、 η_c 、 σ 和 η_t 有关的函数^[2],即:

$$\eta = \frac{c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = \frac{\eta_t T_3 \left[1 - \frac{1}{(\sigma \pi_k)^{(k-1)/k}} \right] - \frac{1}{\eta_c} \left(\pi_k^{(k-1)/k} - 1 \right)}{\frac{T_3}{T_1} - 1 - \frac{\pi_k^{(k-1)/k} - 1}{\eta_c}} \quad (1)$$

由(1)式可知,当循环的最低温度 T_1 与压力 p_1 、最高温度 T_3 、空气等压比热 c_p 与绝热指数 k 、性能参数 η_c 和 η_t 给定后,此时循环热效率 η 才仅是增压比 π_k 的单值函数。图 1 给出了在 T_1 为 290 K, p_1 为 0.101325 MPa, c_p 为 1.0174 kJ/(kg·K), k 为 1.4, η_c 为 0.85, σ 为 0.95, η_t 为 0.90 以及不同的 T_3 下 η 随 π_k 的变化。

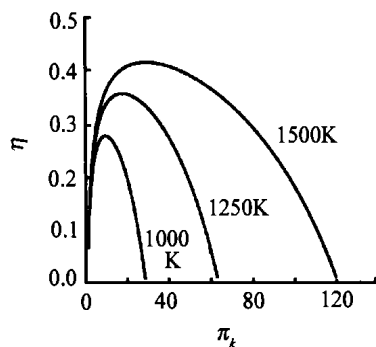


图 1 不同 T_3 下 η 随 π_k 的变化规律

Fig. 1 η varies with π_k under different T_3

图 1 揭示了这样的规律, 即: 随着 T_3 的增大, η 的最大值 $\eta_{\max}$ 也增大; 同时 $\eta_{\max}$ 所对应的 π_k 也增大。

为了更直观地说明式 (1) 和图 1 所具有的含义, 即 $\eta_{\max}$ 与 η_k , σ 和 η 的函数关系, 这里作出了 3 条性能曲线。第一条性能曲线是在仅考虑 η_k 的影响下 (即 $\sigma = 1$, $\eta = 1$), $\eta_{\max}$ 随 η_k 的变化; 第二条性能曲线是在仅考虑 σ 的影响下 (即 $\eta_k = 1$, $\eta = 1$), $\eta_{\max}$ 随 σ 的变化; 第三条性能曲线是在仅考虑 η 的影响下 (即 $\eta_k = 1$, $\sigma = 1$), $\eta_{\max}$ 随 η 的变化。在 T_3 为 1300 K 和与图 1 相同的 T_1 , p_1 , c_p , k 下, 图 2 中曲线 1 给出了 $\eta_{\max}$ 随 η_k 的变化规律; 曲线 2 给出了 $\eta_{\max}$ 随 σ 的变化规律; 曲线 3 给出了 $\eta_{\max}$ 随 η 的变化规律。

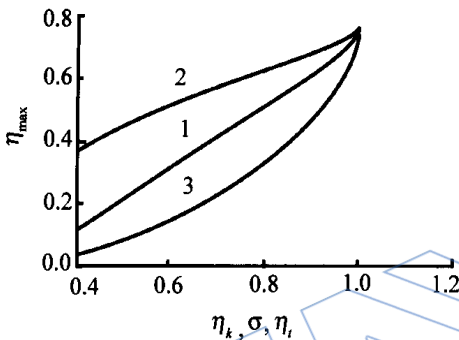


图 2 $\eta_{\max}$ 随 η_k , σ 和 η 的变化规律
Fig. 2 $\eta_{\max}$ varies with η_k , σ and η

提高发动机的经济性, 首先应提高它的热效率。图 1 说明, 当给出 η_k , σ 和 η 的确定值时, 存在着热效率的最大值。然而由图 2 说明, 随着 η_k , σ 和 η 的增大, 热效率的最大值 $\eta_{\max}$ 呈单调的增大趋势。这意味着只要设法朝提高 η_k , σ 和 η 的方向上努力, 经济性就可提高, 并不能反映与发动机运行率、研制费用之间的关系。对于在一定的发动机研制与生产的技术经济水平下, 在满足给定的输出功率下, 选用较高的 η_k , σ 和 η , 就会使发动机的研制与生产的费用增大, 热效率也增高。所以, 提高 η_k , σ 和 η 从而提高发动机的能量利用的经济性, 与降低发动机研制与生产的费用之间存在着矛盾关系, 这理应反映或体现在性能参数的经济性决策指标上, 但发动机的热效率参数却不能体现这一关系。既然热效率不宜作为经济性决策指标, 那么怎样选择合适的性能匹配参数, 从而获得最佳的经济性呢?

3 经济性能参数的确定

发动机的经济性不仅与热效率有关, 而且还

与它的研制费用、运行寿命、利用率、维护费用、燃料价格密切相关。由于费用的经济动态性, 所以评价它的经济性就应以它的全寿期内运行成本或等效年运行成本来表征, 这样就把发动机的研制问题与运行问题结合起来了。显然, 在规定的输出功率或推力下, 运行成本越低, 则表示它在研制和使用过程中的经济性越高。只求热效率最高, 并不等于它的经济性最好。对发动机来说, 当输出功率给定后, 一组独立的性能参数就确定了循环的状态和热效率。通过对发动机的热力分析、研制费用的经济计算和经济规律的统计, 可总结出它的研制费用与性能参数之间的函数关系; 再结合发动机的运行寿命及经济费用随时间的增长率, 就可建立发动机费用与性能参数的估价方程^[3~5]。在已知燃料价格、发动机利用率和维护费用, 就可确定发动机的运行成本, 从而也就建立了经济优化目标, 在与一些热力关系的约束下就构成了经济优化模型, 经优化计算便可得出经济性最优的性能参数, 即经济性能参数。这里以 1 个等压加热燃气涡轮发动机的等效年运行成本为经济优化目标, 在满足规定的输出功率条件下, 建立了如下的经济优化模型^[6], 即:

$$\begin{aligned} \min Y = & 0.975 \times 3600 \pi_c H_f + \frac{C M_a \ln(\pi_k)}{K_k - \eta_k} \\ & + \frac{C M_a}{K_b - \sigma} \left[1 + 0.5 \exp \left(\frac{T_3 - T_{\max}}{100} \right) \right] + \\ & \frac{C M_a}{K_t - \eta} \left[1 + 0.5 \exp \left(\frac{T_3 - T_{\max}}{50} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$S. T. \quad W_k = M_a c_{p1} (T_2 - T_1) \quad (3)$$

$$\pi_k = p_2 / p_1 \quad (4)$$

$$T_{2s} = T_1 \pi_k^{(k_1 - 1)/k_1} \quad (5)$$

$$\eta_k = \frac{c_{p2} (T_{2s} - T_1)}{c_{p1} (T_2 - T_1)} \quad (6)$$

$$H_f = M_a c_{p3} (T_3 - T_2) \quad (7)$$

$$\sigma = p_3 / p_2 \quad (8)$$

$$W = M_a c_{p4} (T_3 - T_4) - W_k \quad (9)$$

$$T_{4s} = T_3 \left(\frac{p_1}{p_3} \right)^{(k_2 - 1)/k_2} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{c_{p4} (T_3 - T_4)}{c_{p5} (T_3 - T_{4s})} \quad (11)$$

$$T_3 \leq T_{\max} \quad (12)$$

$$0 < \eta_k < K_k \quad (13)$$

$$0 < \sigma < K_b \tag{14}$$

$$0 < \eta < K_t \tag{15}$$

在以上的优化模型的目标函数中, (2) 式等号右边第一项是在发动机使用期内年平均运行 τ 小时下燃料的消耗费用, 其中: C_f 为燃料的火用单价, 0.975 为燃料的能质系数, H_f 为燃料量的能量值, $0.975H_f$ 为单位时间内进入发动机的燃料火用; 第二项是压气机的等效年费用, 其中: C_k 为等效年系数, M_a 为空气流量, π_k 为压气机的增压比, η 为压气机效率, K_k 为在当前技术水平下的最高压气机效率值; 第三项为燃烧室的等效年费用, 其中: C_b 为等效年系数, T_3 为气流在燃烧室出口处的温度或在燃气涡轮入口处的温度, $T_{\max}$ 为燃烧室及燃气涡轮材料所允许的最高温度, σ 为燃烧室的总压恢复系数, K_b 为在当前技术水平下的最高总压恢复系数值; 第四项为燃气涡轮的等效年费用, 其中: C_t 为等效年系数, η 为涡轮效率, K_t 为在当前技术水平下的最高涡轮效率值。其中 C_k, C_b 和 C_t 由发动机的服役年限和资本利率的变化来确定, 即为设备的年折旧费用。

在以上的优化模型的等式约束条件中, (3) 式~ (6) 式表示压气机的热力关系约束, (7) 式和 (8) 式表示燃烧室的热力关系约束, (9) 式~ (11) 式表示燃气涡轮的热力关系约束。

在以上的优化模型的不等式约束条件中, (12) 式表述对燃烧室及燃气涡轮材料所允许的最高温度的约束; (13) 式~ (15) 式分别表示在当前技术水平下, 压气机效率、总压恢复系数和涡轮效率的高限约束。

考虑到空气的等压比热 c_p 和绝热指数 k 是温度的函数, 引入了各温度区间的平均等压比热及平均绝热指数。

上述优化模型中, 含有 14 个变量, 即:

$$\{H_f, M_a, \pi_k, \eta, \sigma, \eta, W_k, p_2, p_3, T_{2s}, T_2, T_3, T_{4s}, T_4\}$$

以及 9 个等式约束、4 个不等式约束和一些平均等压比热和绝热指数的关联式^[7]。在求解该优化模型的过程中, 究竟那些变量作为独立变量(或称决策变量、自变量), 对于优化结果是没有任何影响的, 只要所选定的独立变量不与约束条件相矛盾即可。为了方便优化计算即消去等式约束以及易于检查计算过程, 选择了 $\{T_3, \pi_k, \eta, \sigma, \eta\}$ 这 5 个作为独立变量, 其余的 9 个为相关变量。考虑到不等式约束是区域约束, 在求平均等压比热和平

均绝热指数需与确定相关变量同时经迭代计算确定, 故选用不用导数的 Powell 优化计算方法, 以不等式约束作为罚函数条件。

现给出经济性优化模型中的初始已知条件为: $W = 2500 \text{ kW}$, $\tau = 7000 \text{ h/a}$, $C_f = 4.425 \times 10^{-5} \text{ ¥/kJ}$, $C_k = 275.132 \text{ ¥} \cdot \text{s}/(\text{kg} \cdot \text{a})$, $C_b = 18.5185 \text{ ¥} \cdot \text{s}/(\text{kg} \cdot \text{a})$, $C_t = 185.185 \text{ ¥} \cdot \text{s}/(\text{kg} \cdot \text{a})$, $K_k = 0.9$, $K_b = 0.995$, $K_t = 0.92$, $T_{\max} = 1556 \text{ K}$, $T_1 = 290 \text{ K}$, $p_1 = 0.101325 \text{ MPa}$ 。经优化计算得出了经济性优化结果, 见表 1。

表 1 经济优化与热效率优化的结果比较

优 化 方 法	经济优化	热效率优化
涡轮入口温度 T_3/K	1556	1556
增压比 π_k	39.96	55.88
压气机效率 η	0.8695	0.891
总压恢复系数 σ	0.9867	0.98505
涡轮效率 η	0.9016	0.9108
空气流量 $M_a/(\text{kg/s})$	6.8770	7.2804
热效率 η	0.4544	0.4836
等效年运行成本 $Y/(\text{k¥/a})$	6754.41	7560.79

以热效率为经济性优化目标其计算结果又如何呢? 如果欲与以等效年运行成本为经济性优化目标的计算结果作比较, 可采用相同的初始已知条件及 (3)~ (15) 式约束建立对应优化模型。由图 2 的分析结论可知, 优化计算的结果必是使 η , σ 和 η 趋于对应的高限约束值 K_k, K_b 和 K_t , 如此, 所得出的最优性能参数会造成发动机的研制费用及运行成本过大。为了避免出现这种情况, 同时又反映这种趋势, 令 η 为 $0.99K_k$, σ 为 $0.99K_b$, η 为 $0.99K_t$ 。这样以热效率为目标的优化模型中就只有 2 个决策变量, 即 T_3 和 π_k , 经优化计算后将所得出的 M_a 和 π_k 代入 (2) 式, 便是热效率优化结果, 见表 1。

由表 1 的 2 种优化结果比较可知, 后者虽然在热效率选择上高于前者 6.32%, 然而却使等效年运行成本增大了 11.94%。这说明在相同的技术规定条件下以热效率为经济性决策指标是不完善的。当然, 可以取不同的 η, σ 和 η 来进行以热效率为优化目标的优化计算, 但究竟取多大呢? 并无依据, 或只能靠经验。由此可以推断, 若以热效率为经济性优化目标, 不断调整规定的 η, σ 和 η , 经优化计算得出其它的性能参数, 进而通过技术经济分析与评价, 是难于得到总体最佳的经济

表 2 发动机年运行率与经济匹配参数的动态关系

$\tau/(h/a)$	$Y_w/(\text{¥}/\text{kW} \cdot h)$	η	T_3	π_k	η_k	σ	η
7000	0.38596	0.45438	1556	36.961	0.86946	0.98674	0.90158
6000	0.39161	0.45095	1556	35.893	0.86745	0.98643	0.90027
5000	0.39888	0.44643	1556	34.411	0.86589	0.98562	0.89828
4000	0.40873	0.44014	1556	32.181	0.86191	0.98473	0.89637

性能参数。

由(2)~ (15)式的经济优化模型, 取相同的输出功率, 当发动机的年利用率不同时, 所得出的比功运行成本 Y_w 以及经济匹配参数也不同, 见表 2。随着年运行时数 τ 的减小, Y_w 将增大, 而各主要经济匹配参数将减小。

在以发动机运行成本为经济性优化目标的经济性优化模型中, 还可以加上一些其它条件作为约束, 例如比推力、推进效率等, 使经济性优化更能满足各种不同和实际的要求。

4 结束语

本文从提高经济性的角度出发对发动机性能参数进行了分析, 发现热效率不适宜作为选择发动机性能参数的经济性决策指标, 而应以发动机全寿期的运行成本为决策指标才更为合理, 因为它兼顾了研制和运行两方面的因素。通过一个等压加热循环的燃气涡轮发动机, 建立了经济优化模型并得出了经济性能参数, 进而说明, 寻求和采用经济性能参数可考虑作为发动机决策的一个方面。本文指出: 为了提高发动机总体性能, 采用经济性能参数, 研究确定经济性能参数的方法与模

型、和积累与收集性能参数与研制费用之间的关系资料, 是一个不可忽视的方面。

参考文献

[1] 中国航空系统工程研究所 航空发动机技术经济分析研究报告[R] 北京: 中国航空系统工程研究所, 1996

[2] 王丰 发动机热力学[M] 北京: 国防工业出版社, 1982

[3] Robert M G, William J W. Thermoeconomic optimization of a rankine cycle cogeneration system [A] in: American Chemical Society, Efficiency and Costing [C] ACS Symposium Series, Vol 235, Washington DC 20036, 1983: 263

[4] 张娜, 蔡睿贤, 林汝谋等 燃气轮机估价方程[A] 见: 第六届全国热力学分析与节能学术会议学术委员会编, 热力学分析与节能论文集[C] 北京: 科学出版社, 1993

[5] 景小清 燃气轮机评估方程[J] 节能, 1998, 5: 7

[6] El-Sayed Y M, Tribus M. Strategic Use of Thermoeconomics for Process Design and Synthesis[A] in: American Chemical Society, Efficiency and Costing[C] ACS Symposium Series, Vol 235, Washington DC 20036, 1983: 239

[7] 欧阳鞭, 董耀德 工程热力学[M] 北京: 国防工业出版社, 1989

(责任编辑 杨再荣)