

文章编号:1674-8190(2013)02-150-08

# 涡轴发动机技术参数与发展趋势评估

周新新,陈玉春,樊巍,杨龙龙,沈茂  
(西北工业大学 动力与能源学院,西安 710072)

**摘要:**为了给先进涡轴发动机总体性能设计和尺寸与重量计算提供技术参数选择依据,本文收集10台一至四代国外典型的涡轴发动机技术参数,建立总体性能计算和尺寸与重量联合计算的涡轴发动机技术参数评估模型并开发计算程序,利用计算程序对收集的技术参数进行评估,获得涡轴发动机技术参数的水平和发展趋势,并预测下一代先进涡轴发动机的技术参数;以技术参数发展趋势为基础,研究各部件主要的气动、结构、强度、材料参数变化对涡轴发动机性能的影响。获得的涡轴发动机技术参数发展规律及其对发动机性能参数的影响,为先进涡轴发动机总体设计提供了依据。

**关键词:** 涡轴发动机; 技术参数; 发动机性能计算; 尺寸与重量计算; 发展趋势

中图分类号: V231

文献标识码: A

## Evaluation of Technical Parameters and Developing Trends for Turboshaft Engines

Zhou Xinxin, Chen Yuchun, Fan Wei, Yang Longlong, Shen Mao

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to provide technical parameters choosing reference to performance as well as size and weight computations for turboshaft engines, the technical parameters of ten typical types of foreign turboshaft engines are collected. The models and corresponding programs for performance calculations and evaluations of size and weight of turboshaft engines are set up. The technical parameters are collected for ten foreign typical turboshaft engines from 1 to 4 generations, which are evaluated with the programs mentioned above so that the level and developing trends of these parameters are obtained. Then, the technical parameters are evaluated for the advanced turboshaft engine of next generation. Based on the developing trends of the technical parameters, it is studied that the change of main aerodynamic, structural and strength parameters will affect the turboshaft engine performances. The study can provide references for turboshaft engine integration design.

**Key words:** turboshaft engine; technical parameters; engine performance computation; size and weight computation; developing trend

## 0 引言

迄今为止,国外涡轴发动机历经了一至四代的发展,现役涡轴发动机多为第三代,少数为第四代,下一代(第五代)涡轴发动机将成为世界各先进航空大国的研究热点。

涡轴发动机总体设计涵盖总体性能和总体结构设计。总体性能设计的任务是在确定合理的部件效率后,确定发动机循环参数(总压比和涡轮进口总温)和空气流量以满足所需的单位功率、功率和耗油率;总体结构设计的主要任务之一——尺寸与重量设计,目的是选定合理的部件参数后,计算发动机流路、各部件和整机尺寸(直径和长度)及重量、转子转速、强度参数、功重比等。赵强等<sup>[1]</sup>和童凯生<sup>[2]</sup>研究了与涡轴发动机总体性能设计有关的技术问题,P. L. Hale等<sup>[3-5]</sup>研究了与涡轴发动机

收稿日期:2012-09-20; 修回日期:2013-01-09

通信作者:周新新,zhouxx\_7@163.com

尺寸与重量计算方法有关的技术问题。先进涡轴发动机的总体设计中, 已经将总体性能设计和尺寸、重量设计相互融合, 并进一步向多学科耦合设计方向发展<sup>[5]</sup>。

与总体性能设计相比, 尺寸与重量设计更多地涉及到各部件的气动、结构、强度和材料方面的问题, 因此需足够的数据库支持以确定各部件的气动、结构和强度参数。P. L. Hale<sup>[3]</sup> 给出了较为详细的计算模型, 及大多数部件的气动、结构和强度等方面技术参数的取值范围。但这些参数的范围较大, 在进行总体设计时很难合理、正确地选择, 给设计人员带来不便。吴大观等<sup>[6-9]</sup> 介绍了美国 IHPTET 计划、VAATE 计划及一些基本性能参数的发展趋势, 并介绍了一些发动机技术的发展, 但这些技术参数不足以为总体性能和总体结构设计提供足够的依据。

鉴于涡轴发动机各种技术的水平和发展趋势是循序渐进并且有一定规律的, 其技术参数也具有一定的变化趋势。本文在统计国外 10 台一至四代典型的涡轴发动机的技术数据的基础上, 利用总体性能计算模型和尺寸与重量计算模型相结合的手段, 采取合理的评估方法, 将一至四代典型的涡轴发动机的技术数据进行评估并预测第五代变化趋势, 为先进涡轴发动机总体设计提供切实可行的数据选择依据。在此基础上, 研究多种重要技术参数变化对发动机性能(单位功率、耗油率、发动机长度、发动机重量和功重比等)的影响, 为先进涡轴发动机总体设计提供有益的参考。

## 1 参数评估模型介绍

### 1.1 总体性能计算和尺寸与重量计算模型

在基于部件法的自由涡轮式涡轴发动机设计点总体性能计算模型<sup>[1]</sup>(即将发动机分为若干个单独的部件, 各部件之间通过机械和气动上的联系完成共同工作)的基础上, 利用部件效率与级负荷、压比与级数及燃烧效率与燃烧室载荷等关系图<sup>[10]</sup>, 开发压气机分压比等计算模型, 建立总体性能和尺寸与重量联合计算模型, 并开发相应的计算程序。

对于一台自由涡轮式涡轴发动机, 设计点的已知参数包括飞行条件、大气条件和发动机性能要求

(功率  $P$ 、单位功率  $P_s$ 、耗油率  $sfc$  等), 发动机各部件的效率或损失系数等。通过这些已知条件, 可确定涡轴发动机循环参数(压气机增压比  $\pi_c$ 、涡轮进口总温  $T_{t4}$  等)并完成设计点气动热力计算, 进而获取尺寸与重量计算所需的参数。

依据文献<sup>[3]</sup>的方法建立涡轴发动机尺寸与重量计算模型, 并与涡轴发动机总体性能计算模型相结合, 根据总体性能计算模型的计算结果, 选定基本的部件参数(气动参数、结构参数和材料参数), 进行发动机流路尺寸设计, 同时进行发动机气动负荷、强度负荷和结构限制的校核。在此基础上, 利用改进的(或开发的)叶片、轮盘、级间连接件、轴、燃烧室以及涡轴发动机特殊部件重量计算模型, 进行发动机部件及整机重量计算。

本文所研究的自由涡轮式涡轴发动机主要由进气道(含粒子分离器)、压气机(轴流、轴流+离心、离心+离心)、燃烧室、燃气涡轮、自由涡轮、轴(含轴承和支承系统)、扩张喷管、减速器和控制系统等系统构成。

### 1.2 技术参数评估方法

根据上述计算模型开发的计算程序, 进行涡轴发动机各性能、气动、结构、强度技术参数评估。评估流程如图 1 所示。

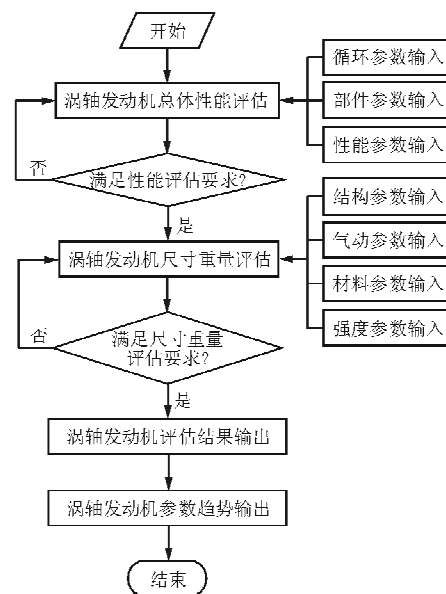


图 1 涡轴发动机技术参数评估流程图

Fig. 1 Evaluation flow chart of technical parameters of turboshaft engines

总体性能参数的评估方法是,对统计的发动机性能参数和循环参数,根据经验选定合理的部件参数,利用总体性能计算程序进行验算。评估性能参数和循环参数是否协调,如果不协调(例如在公布的 $\pi_c$ 和 $T_{t4}$ 下,无法获得公布的 $P_s$ 、 $P_s$ 和 $sfc$ ),则通过分析其结构形式(例如压气机级数)和技术水平(代数),适当调整公布数据中的性能参数或者循环参数,直到数据协调为止。如果性能参数和循环参数协调,则认为公布数据正确。

尺寸与重量参数的评估方法是,将协调的总体性能计算程序计算的相关参数,输入尺寸与重量计算程序,进行发动机尺寸与重量评估(与公布的尺

寸、重量参数比较),并进行气动负荷、强度负荷与结构限制的校核。调整公布数据中不合理的尺寸与重量参数(参数取值尽可能不超过一至四代总的上、下边界值;每一代参数取值尽可能不超过该代的上、下边界值;尽可能使中值呈现一定的变化规律。),最终得出涡轴发动机重要的性能、气动、结构以及强度参数的数值。

在涡轴发动机尺寸与重量参数评估中,所涉及的部件气动参数、结构、强度(用于校核)和材料参数如表1所示。表中参数下标 $i$ 和 $o$ 分别代表各部件的进口和出口(下同),其他符号下文均有说明。

表1 涡轴发动机尺寸与重量计算的主要参数

Table 1 Main parameters of size and weight evaluation of turboshaft engines

参数部件	气 动					结 构				强 度		材 料
	$W^*$	$Y^*$	$Ma_{i/o}$	$U_t$	$\Omega$	$HTR_{i/o}$	$AR_{i/o}$	$C/S_{i/o}$	$\Phi$	$\epsilon_i$	$AN_0^2$	$\rho$
进气道	—	—	√	—	—	—	—	—	—	—	—	√
轴流压气机	√	—	√	√	—	√	√	√	√	√	—	√
离心压气机	—	—	√	√	√	√	—	—	—	—	—	√
燃烧室	—	—	√	—	—	—	—	—	—	—	—	√
燃气涡轮	—	√	√	—	—	√	√	√	√	—	√	√
自由涡轮	—	√	√	—	—	√	√	√	√	—	√	√
尾喷管	—	—	√	—	—	—	—	—	—	—	—	√

## 2 技术参数水平及发展趋势预测

通过统计文献<sup>[11-13]</sup>相关资料中10台一至四代涡轴发动机的总体性能参数、循环参数、总体结构型式、尺寸(包括发动机总长、最大直径及宽度等)与重量(发动机总重及部分部件重量)参数以及材料参数等,获得相应的数据。在此基础上,利用上述涡轴发动机技术参数评估方法,进行发动机性能和尺寸与重量评估,获得一至四代涡轴发动机详细的性能、气动、结构及强度参数。

以代数为横坐标,各台发动机各参数为纵坐标,绘制了一至四代涡轴发动机技术参数图,如图2~图13所示。根据统计学原理,对图中各参数按代数选取适当的点按照三次方曲线进行最大值和最小值拟合,并对最大值和最小值进行平均,得到各参数的中值,而第五代的数值是通过一至四代的

数据拟合并外推而得。

### 2.1 性能参数与循环参数

根据总体性能参数评估的计算结果,发动机的单位功率 $P_s$ 、耗油率 $sfc$ 、压气机增压比 $\pi_c$ 及涡轮进口总温 $T_{t4}$ 的变化趋势如图2~图5所示。其中,定义第一代中值为100%(下同)。

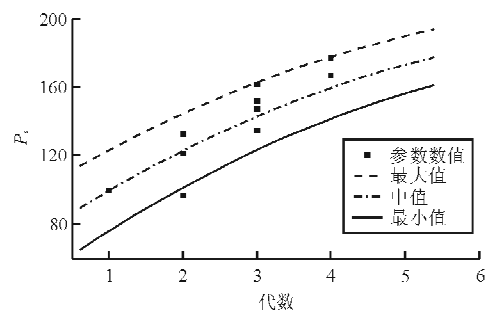


图2  $P_s$ 的发展趋势

Fig.2 Developing trend of  $P_s$ .

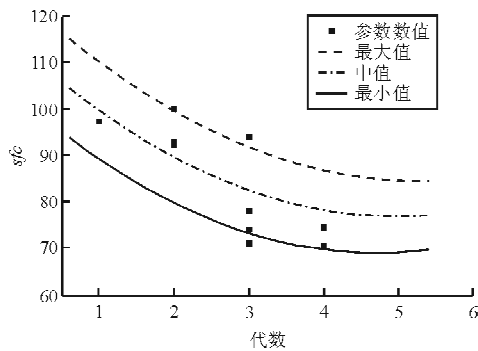


图 3  $sfc$  的发展趋势

Fig. 3 Developing trend of  $sfc$

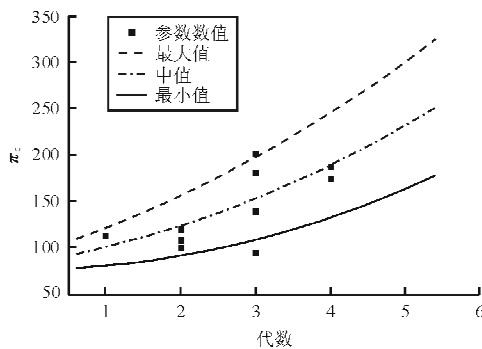


图 4  $\pi_c$  的发展趋势

Fig. 4 Developing trend of  $\pi_c$

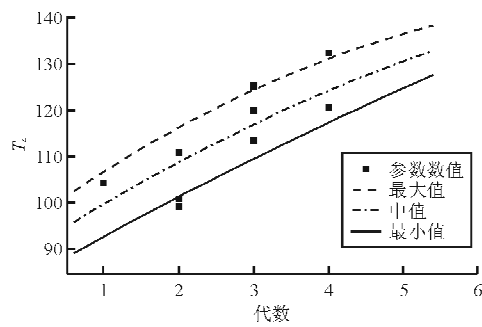


图 5  $T_4$  的发展趋势

Fig. 5 Developing trend of  $T_4$

从图 2~图 5 可以看出,第五代涡轴发动机的  $P_s$ 、 $sfc$ 、 $\pi_c$  及  $T_4$  与第一代和第四代相比,分别变化为: 75%、-23%、127%、31% 和 9%、-2%、20%、5%。

## 2.2 部件气动参数

根据尺寸与重量参数评估的计算结果,发动机主要部件气动参数(压气机进口级叶尖速度  $U_i$ 、压气机平均载荷系数  $W^*$ 、离心压气机反力度  $\Omega$  以及燃气涡轮平均载荷系数  $Y^*-GT$ )的变化趋势如图 6~图 9 所示。

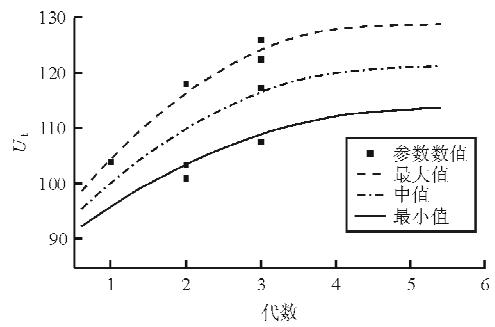


图 6  $U_i$  的发展趋势

Fig. 6 Developing trend of  $U_i$

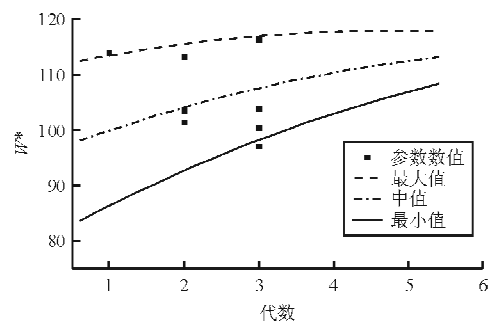


图 7  $W^*$  的发展趋势

Fig. 7 Developing trend of  $W^*$

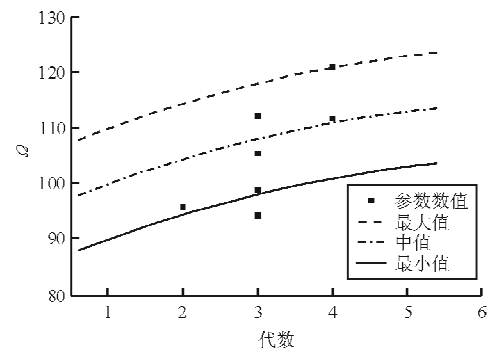


图 8  $\Omega$  的发展趋势

Fig. 8 Developing trend of  $\Omega$

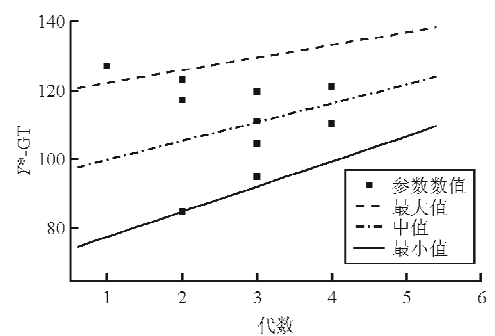


图 9  $Y^*-GT$  的发展趋势

Fig. 9 Developing trend of  $Y^*-GT$

从图6~图9可以看出,第五代涡轴发动机的 $U_c$ 、 $W^*$ 、 $\Omega$ 及 $Y^*$ 与第一代和第四代相比,分别变化为24%、13%、13%、22%和3%、2%、2%、5%。其中,因为现役国外第四代涡轴发动机压气机型式均为双离心型,所以, $W^*$ 的预测不十分准确。

### 2.3 部件结构参数

压气机进口轮毂比 $HTR$ 及展弦比 $AR$ 的变化趋势如图10和图11所示。

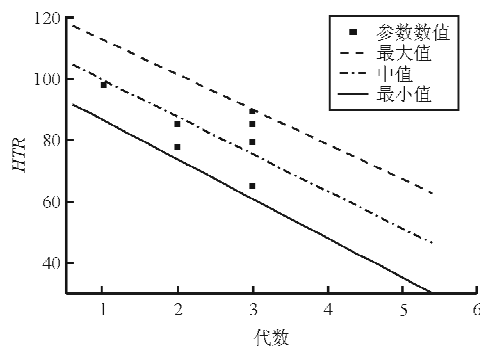


图10  $HTR$ 的发展趋势

Fig. 10 Developing trend of  $HTR$

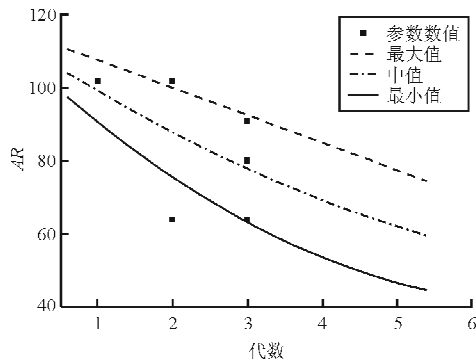


图11  $AR$ 的发展趋势

Fig. 11 Developing trend of  $AR$

从图10和图11可以看出,第五代涡轴发动机的 $HTR$ 、 $AR$ 与第一代和第四代相比,分别变化为-31%、-37%和-6%、-11%。

### 2.4 部件强度参数

压气机进口叶根应力参数 $\epsilon$ 和燃气涡轮出口叶根应力参数 $AN^2-GT$ 的变化趋势如图12和图13所示。

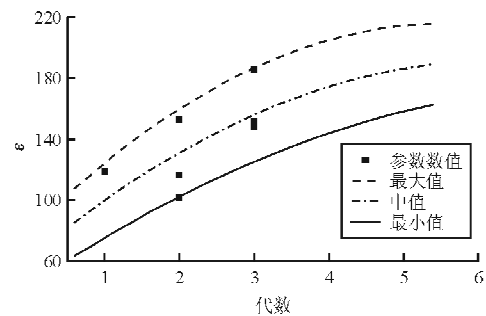


图12  $\epsilon$ 的发展趋势

Fig. 12 Developing trend of  $\epsilon$

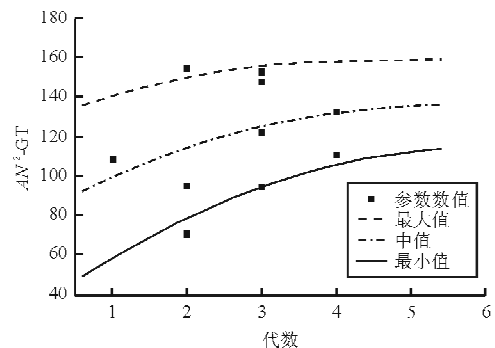


图13  $AN^2-GT$ 的发展趋势

Fig. 13 Developing trend of  $AN^2-GT$

从图12和图13可以看出,第五代涡轴发动机的 $\epsilon$ 、 $AN^2$ 与第一代和第四代相比分别变化为87%、37%和7%、3%。

## 3 技术参数发展对性能的影响分析

以现役国外某型涡轴发动机(其水平介于第三代和第四代之间)为基线发动机(原型机),根据涡轴发动机各部件主要的气动、结构、强度技术参数及材料参数发展趋势,研究他们对该型涡轴发动机性能的影响,并预测第五代涡轴发动机的主要性能参数。

### 3.1 循环参数对性能的影响

根据图4和图5预测可知,第五代涡轴发动机循环参数如 $\pi_c$ 、 $T_4$ 较原型机的变化幅度(与基线发动机相比,下同),如表2所示,同时表中列出了性能参数 $sfc$ 和 $P_s$ 的变化情况。可见,随着循环参数的进一步发展,耗油率缓慢降低,而单位功率显著提高,这也与图2和图3的统计结果相一致。

表 2 循环参数对发动机性能的影响

Table 2 Influences of cycle parameters on engine performance

参 数	参数符号	变化百分比/%
循环参数	$\pi_c$	19.7
	$T_1$	11.5
性能参数	$sf_c$	-3.3
	$P_s$	20.3

### 3.2 部件参数对性能的影响

由图 6~图 13 得到第五代涡轴发动机部件气动、结构参数较原型机的变化幅度,如表 3 所示。表中, $\pi_{c,i}$  为轴流压气机第一级压比。

表 3 部件参数变化百分数

Table 3 Variations of component parameters

参 数	参数符号	变化百分比/%
气动参数	$\pi_{c,i}$	6.1
	$U_i$	3.2
	$\Omega$	1.9
	$Y^*$	5.0
结构参数	$HTR$	-6.3
	$AR$	-10.3

气动参数  $W^*$  和所有的强度参数都用于校核(校核准则参见文献[3]),在此基础上,利用尺寸与重量计算程序进行涡轴发动机流路尺寸计算,得出性能参数如总长  $L$ 、最大直径  $D$  及高压转速  $N$  的变化情况,如表 4 所示。表中,预测方案是本文对第五代发动机的一种预测。

表 4 原型机与预测方案尺寸对比

Table 4 Comparisons of size between baseline and the fifth generation engine

参 数	原型机	预测方案	变化百分比/%
$L/m$	1.262	1.258	-0.3
$D/m$	0.470	0.422	-10.2
$N/(r \cdot \min^{-1})$	36 300	44 520	22.6

从表 4 可以看出,涡轴发动机性能方面,总长增加,而最大直径减小。

原型机与预测方案发动机各气动、强度负荷校核以及结构限制对比如表 5 所示。表中下标 AC 和 GT 分别代表轴流压气机和燃气涡轮。

表 5 原型机与预测方案负荷校核结果对比

Table 5 Comparisons of loads checking results between baseline and the fifth generation engine

类 别	气动负荷		强度负荷		结构限制	
	$U_i/(m \cdot s^{-1})$	$W^*$	$\epsilon \times 10^3$	$AN^2 \times 10^6$	$HTR_{o,AC}$	$HTR_{i,GT}$
原型机	486.4	0.308	35.6	31.6	0.776	0.846
预测方案	497.7	0.409	47.0	32.3	0.684	0.840

从表 5 可以看出:气动负荷方面,压气机载荷系数  $W^*$  将大幅度增加,而进口叶尖线速度略微增加;强度负荷方面,压气机进口级叶根应力增加较多,涡轮出口叶根应力参数  $AN^2$  已接近镍基高温合金叶片的强度极限;结构限制方面,压气机出口以及涡轮进口轮毂比均减小。

以上部件参数对性能的影响分析如下:

(1) 由 2.2 节可知,压气机总压比增加,且增幅较大,导致轴流压气机的分压比也相应增加,这就要求做功大幅度增加;涡轮出口应力参数  $AN^2$  接近强度极限,限制了转速的增加,进一步限制了压气机进口叶尖速度  $U_i$  的增加,因此  $U_i$  略微增加;由几何关系可知,随着压气机进口轮毂比  $HTR$  减小,叶片中径处的线速度  $U_m$  减小;最终,根据  $W^*$  的定义式<sup>[3]</sup>可知,轴流压气机气动负荷将显著增加。

(2) 轴流压气机进口轮毂比  $HTR$  降低,导致进口外径降低,从而高压转速  $N$  升高,且发动机整机外廓尺寸降低;压气机气动负荷大幅增加,在  $U_i$  略微增加的情况下,则要求气流在叶栅中的折转大幅增加;通过大幅降低展弦比  $AR$ ,即引入宽弦叶片实现加功增压,因此,轴流压气机长度大幅增加;同理,涡轮载荷系数  $Y^*$  的增加也导致涡轮长度增加;由离心压气机反力度  $\Omega$  的定义式可知, $\Omega$  增加,离心压气机出口叶尖速度增加,但增加幅度远小于转速增加的幅度,因此离心压气机出口外径降低,进而导致发动机最大直径降低,离心压气机长度减小;此外,随着发动机整机外廓尺寸的减小,进气道及尾喷管长度相应减小,最终,发动机总长减小。

(3) 压气机出口及涡轮进口  $HTR$  均降低,叶片高度比较高,不容易受到最小叶片高度的限制,对叶片的结构设计是有利的。

### 3.3 材料参数对性能的影响

新材料技术是实现 IHPTET 计划的关键,因此,新材料技术的应用对发动机性能的提升至关重要。本节在统计并预测的材料参数值(材料应力  $\sigma$  及密度  $\rho$ ) 基础上,研究其变化对发动机性能的影响。

第五代涡轴发动机各部件材料使用预测如下:对于压气机,研究应用金属基复合材料及耐高温钛铝化钛材料等,预测密度  $\rho$  为  $3.3 \sim 4.0 \text{ g/cm}^3$ ;对于燃烧室,研究应用耐高温的陶瓷材料等,预测密度  $\rho$  为  $2.0 \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$ ;对于涡轮,研究应用高温合金等,预测密度  $\rho$  为  $8.19 \sim 8.22 \text{ g/cm}^3$ ;对于其他部件(进气道、尾喷管等),则研究与应用耐高温的有机复合材料、碳-碳结构复合材料等,预测密度  $\rho$  为  $1.8 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$  [14]。

另外,轮盘材料应力增强,从而轮盘厚度减小,部件主要材料参数密度减小,这些均导致发动机重量减轻。新材料使用前各部件的重量及变化量如表 6 所示。

表 6 新材料使用前各部件重量对比

Table 6 Comparisons of components' weights before and after the use of new materials

部 件	使用前 重量/kg	使用后 重量/kg	变化百 分数/%
轴流压气机	11.8	11.5	-2.5
离心压气机	14.4	13.9	-3.5
燃烧室	22.4	16.7	-25.4
燃气涡轮	10.6	10.3	-2.8
自由涡轮	24.1	23.3	-3.3
其 他	112.7	101.0	-10.4

从表 6 可以看出:燃烧室及其他综合部件(包括进气道、尾喷管、轴及附件等)重量减轻较多,对发动机性能提升贡献明显;离心压气机和自由涡轮重量的减轻对发动机性能提升也有一定的贡献;由于涡轮进口总温  $T_4$  的提高,燃气涡轮盘及叶片将承受更高的温度,限制了轮盘厚度的减小,因此重量减轻不多。

### 3.4 参数对性能的综合影响

综合 3.1~3.3 节,在保证功率相等的基础上,预测的第五代涡轴发动机总重为  $176.7 \text{ kg}$ ,比原

型机  $249.5 \text{ kg}$  降低了  $29.2\%$ ,功重比为  $11.8$ ,比原型机  $8.4$  提高了  $40.5\%$ 。各参数对涡轴发动机功重比提升的贡献如表 7 所示。

表 7 各参数对性能提升的贡献

Table 7 Contribution comparisons of performance advance of different parameters

参 数	贡献率/%
循环参数	29.7
部件参数	43.8
材料参数	26.5

从表 7 可以看出,所有参数中,部件参数对功重比的贡献最大,材料参数的贡献次之,循环参数的贡献最小。

参数对第五代涡轴发动机性能提升的影响分析如下:

(1) 循环参数的提高使得单位功率大幅度提高,在相同的功率下,流量明显减小,功重比提高,耗油率降低。

(2) 在满足一定的气动负荷、强度负荷及结构限制的基础上,部件参数的贡献主要在于改进发动机结构设计,使得发动机整机外廓尺寸明显减小(体积减小),导致发动机重量大幅减轻,功重比显著提高。

(3) 材料参数发展的主要贡献在于高温合金材料的应用涡轮前温度提高,性能提升;而复合材料的应用使得部件材料密度减小,重量减轻,功重比提高。

### 3.5 其他方面的分析

随着涡轴发动机的发展,简化结构设计、提高可靠性、安全性和维修性等应优先考虑;同时简化结构,采用单元体结构,可以减小附件重量占总重的比例,减轻发动机整机重量。而安全性的提高则要求增加粒子分离器和红外隐身等装置,这额外增加了发动机整机重量,因此第五代的先进涡轴发动机未必把追求高功重比作为主要目的。

## 4 结束语

(1) 通过对现役 10 台一至四代国外典型涡轴发动机技术参数的评估表明,本文建立的总体性能计算程序和尺寸与重量计算程序联合评估的方法,

对涡轴发动机技术参数的评估和发展趋势预测是合理可行的,技术参数的评估精度满足方案设计的要求。

(2) 获取的涡轴发动机性能参数、循环参数、各部件主要的气动、结构、强度、材料参数的发展趋势,可为先进涡轴发动机总体设计提供有益的参考。

(3) 在预测技术参数的发展趋势下,第五代涡轴发动机功重比可以达到 11.8,部件参数改进对功重比贡献最大,循环参数次之,材料参数最小。

### 参考文献

- [1] 赵强, 陈玉春, 王永文, 等. 基于部件法的涡轴发动机性能计算模型研究[J]. 航空工程进展, 2011, 2(3): 2-3.  
Zhao Qiang, Chen Yuchun, Wang Yongwen, et al. Study of mathematical model on steady-characteristics of turbo-shaft engine based on component modeling[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(3): 2-3. (in Chinese)
- [2] 童凯生. 航空涡轮发动机性能变比热计算方法[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.  
Tong Kaisheng. The calculational way of mutative specific volume to aeronautic gas turbine engine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [3] Hale P L. A method to estimate weight and dimensions of small aircraft propulsion gas turbine engines[J]. AIAA-82-23037, 1982.
- [4] Tong M T. A computer code for gas turbine engine weight and disk life estimation[J]. ASME GT-2002-30500, 2002.
- [5] Mattingly J D, Heiser W H. Aircraft engine design[M]. U. S. A: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.
- [6] 吴大观. 关于新版综合高性能涡轮发动机技术计划——兼谈航空发动机研制中“基础技术”和“验证机”的重要作用[J]. 航空发动机, 2003, 29(2): 1-4.  
Wu Dagan. Recent progress of IIPTET: the role of pervasive technology and demonstrator in aircraft engine development[J]. Aeroengine, 2003, 29(2): 1-4. (in Chinese)
- [7] 王如根, 高坤华. 航空发动机新技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.  
Wang Rugen, Gao Kunhua. New technology of aeronautical engine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [8] Viars P R. The impact of IIPTET on the engine/aircraft system[J]. AIAA-89-2137, 1989.
- [9] Dilip R B. Progress in aeroengine technology(1939-2003)[J]. AIAA-2003-4412-433, 2003.
- [10] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.  
Lian Xiaochun, Wu Hu. Principles of aeroengine [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. (in Chinese)
- [11] Walsh P P, Paul F P. Gas turbine performance(second edition)[M]. USA: American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- [12] 方昌德. 世界航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.  
Fang Changde. World aviation engine manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [13] 胡晓煜. 世界中小型航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.  
Hu Xiaoyu. The world's small and medium-sized aviation engine manual [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [14] 李成功, 傅恒志, 于翹. 航空航天材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
Li Chenggong, Fu Hengzhi, Yu Qiao. Aerospace materials [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)

### 作者简介:

周新新(1988—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空宇航推进理论与工程。

陈玉春(1967—),男,教授,博导。主要研究方向:航空宇航推进理论与工程。

樊巍(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空宇航推进理论与工程。

杨龙龙(1988—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空宇航推进理论与工程。

沈茂(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:人机环境理论与工程。

(编辑:张杰)