

# 1 + 1/2 对转涡轮对双轴混排涡扇发动机整机特性影响的研究<sup>\*</sup>

贾琳渊, 陈玉春, 黄 兴, 刘 伟

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 为了研究 1 + 1/2 对转涡轮对双轴混排涡扇发动机整机特性的影响, 通过对 1 + 1/2 对转涡轮特点的分析, 提出了 1 + 1/2 对转涡轮的特性描述和在整机特性计算中使用方法, 并将该 1 + 1/2 对转涡轮特性用于双轴混排涡扇发动机性能计算程序中, 计算获得了对转涡扇发动机的节流特性, 并通过与使用传统涡轮的发动机特性进行对比, 获得了 1 + 1/2 对转涡轮对发动机整机匹配机理的影响。结果表明: 计算获得的对转涡扇发动机性能与实验数据对比, 计算精度满足工程应用要求; 该对转涡扇发动机在设计点附近工作良好, 但在核心机节流至 70% 设计转速时, 对转涡轮引起整机性能发生明显恶化。

**关键词:** 对转涡轮; 双轴混排涡扇发动机; 涡轮特性; 整机匹配; 节流特性

中图分类号: V235.13 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2013) 11-1459-07

## Effects of Counter-Rotating Turbine on Performance of Two-Spool Mixed Turbofan Engine

JIA Lin-yuan, CHEN Yu-chun, HUANG Xing, LIU Wei

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

**Abstract:** To evaluate the effects of 1 + 1/2 counter-rotating turbine on performance of two-spool mixed turbofan engine, features of 1 + 1/2 counter rotating turbine were analyzed. The characteristic maps of 1 + 1/2 counter rotating turbine were presented and the interpolation method was discussed. Then the partial throttle characteristics of two-spool mixed turbofan engine were calculated employing these maps. The calculated data are compared with the test data, which validates that the precision of the calculation is enough for engineering use. Also a comparison of the calculated data of two-spool mixed turbofan engine with traditional turbine and 1 + 1/2 counter rotating turbine was conducted. The comparison indicates that, while 1 + 1/2 counter rotating turbine works well near design point, the engine performance is degraded obviously when working at 70% throttle rating.

**Key words:** Counter rotating turbine; Twin-spool mixed turbofan engine; Turbine maps; Engine matching mechanism; Throttle characteristics

## 1 引 言

数十年来, 1 + 1/2 对转涡轮因其在提高涡轮发

动机推重比, 降低耗油率和提升战斗机的作战性能等方面的潜在优势而广受关注。美国的 Louis 首先开展了 1 + 1/2 对转涡轮技术研究<sup>[1]</sup>。其后, Huber 等

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-03-09; 修订日期: 2013-05-03。

作者简介: 贾琳渊 (1989—), 男, 博士生, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。E-mail: jlynpu@mail.nwpu.edu.cn

研制的用于火箭的对转涡轮证明,  $1+1/2$  对转涡轮比  $1+1$  对转涡轮效率高 2%<sup>[2]</sup>。

$1+1/2$  对转涡轮在国内的研究也已有 10 多年的历史, 相关的研究主要集中在中国科学院工程热物理研究所和北京航空航天大学。中科院工程热物理研究所对  $1+1/2$  对转涡轮进行了系统深入的研究。其研究内容涵盖了气动设计<sup>[3~5]</sup>、叶片冷却<sup>[6]</sup>、叶顶间隙<sup>[7]</sup>、导叶调整<sup>[8]</sup>等诸多方面, 研究手段包括数值模拟和试验研究。季路成等指出  $1+1/2$  对转涡轮具有以下优势<sup>[9,10]</sup>: 消除了静叶排, 提高了效率, 从而相应减少了对冷却气的需求; 同时, 涡轮叶排轴向长度缩短, 从而减轻了结构质量, 缩短了涡轮端长度, 使结构更紧凑; 转轴对转还使飞机在做回转机动飞行时, 陀螺力矩大大减小, 从而提高了飞机机动性能、机身结构和飞行可靠性。北京航空航天大学的研究人员设计了  $1+1/2$  对转涡轮的试验件, 试验件与相同条件下的传统涡轮相比, 对转涡轮叶片数目减少了 28%, 轴向尺寸缩短了 25%<sup>[11]</sup>。可见,  $1+1/2$  对转涡轮在减少发动机零件数目、提高发动机推重比方面优势明显。

然而, 以往的研究内容大多集中在  $1+1/2$  对转涡轮气动性能分析以及设计方法的研究方面, 对于对转涡轮特性在发动机总体性能计算中的应用及其对整机匹配机理的影响研究尚没有文献可供参考。GE 公司虽然已经在 F120 变循环发动机中成功地采用了  $1+1/2$  对转涡轮<sup>[9]</sup>, 但对转涡轮特性对发动机整机特性的影响方面的技术资料并未公布。为此, 本文针对对转涡轮特性在总体性能模拟中的使用方法以及对转涡轮特性对发动机整机匹配的影响开展了研究, 获得了一些远离设计点工况下的  $1+1/2$  对转涡轮发动机的特性变化特点, 可为  $1+1/2$  对转涡轮的设计和工程应用提供参考。

## 2 $1+1/2$ 对转涡轮特性描述与使用方法

在研究对转涡轮发动机匹配机理时, 本文采用基于部件法的发动机总体性能计算程序, 因而首先要研究总体性能计算程序中如何描述和使用  $1+1/2$  对转涡轮部件特性。

### 2.1 $1+1/2$ 对转涡轮特性描述方法

显然, 对转涡轮的高压涡轮特性描述和使用方法与传统涡轮完全相同, 因此, 这里着重讨论低压涡轮特性的影响因素和使用方法。

图 1 展示了  $1+1/2$  对转涡轮基元级速度三角

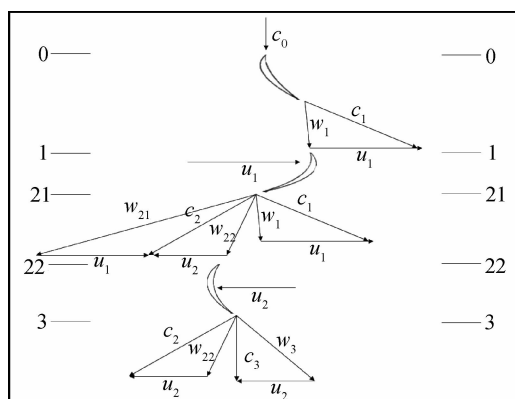


Fig. 1 Velocity triangle for  $1+1/2$  counter-rotating turbine

形。由该图可见, 在  $1+1/2$  对转涡轮中, 高压涡轮转子直接为低压涡轮转子提供预旋, 这使得高低压级发生了强烈的气动耦合。低压涡轮的性能主要取决于一定的进口条件 (来流总温、总压、速度、流量) 和自身工作条件 (转速), 那么影响低压涡轮特性的因素实际上也就是影响其进口条件的因素, 而低压涡轮进口 (高压涡轮出口) 的条件又决定于高压涡轮的工作条件。因此, 高压涡轮工况也会对低压涡轮的特性产生影响。基于上述分析, 可以将  $1+1/2$  对转涡轮的特性描述如下。

高压涡轮<sup>[12]</sup>

$$W_{hp,cor} = f_3(N_{h,cor}, \pi_{t,hp}) \quad (1)$$

$$\eta_{hp} = f_4(N_{h,cor}, \pi_{t,hp}) \quad (2)$$

低压涡轮

$$W_{lp,cor} = f_5(N_{h,cor}, \pi_{t,hp}, N_{l,cor}, \pi_{t,lp}) \quad (3)$$

$$\eta_{lp} = f_6(N_{h,cor}, \pi_{t,hp}, N_{l,cor}, \pi_{t,lp}) \quad (4)$$

式中  $W_{hp,cor}$  和  $W_{lp,cor}$  分别为高低压涡轮的换算流量;  $N_{h,cor}$  和  $N_{l,cor}$  分别为高低压涡轮的换算转速;  $\pi_{t,hp}$  和  $\pi_{t,lp}$  分别为高低压涡轮的落压比;  $\eta_{hp}$  和  $\eta_{lp}$  分别为高低压涡轮的效率。

### 2.2 $1+1/2$ 对转涡轮特性使用方法

由 (1)、(2) 式可见, 高压涡轮特性描述与传统涡轮相同。而 (3)、(4) 式所描述的低压涡轮特性则是高低压换算转速和高低压涡轮落压比的四元函数。在给定高压涡轮换算转速和高压涡轮落压比的情况下, 低压涡轮特性将与传统涡轮特性一致。

图 2 和图 3 展示了某  $1+1/2$  对转涡轮的低压涡轮特性 (图中参数均为除以设计点参数得到的相对值), 每组图对应于一定的高压涡轮换算转速, 而每一个换算转速下又对应两组高压涡轮落压比。由于篇幅限制, 仅给出  $N_{h,cor} = 1.0$  和  $N_{h,cor} = 0.8$  时对应的

低压涡轮特性。

由(3)式和(4)式描述的 1 + 1/2 对转涡轮的低压涡轮特性在涡轮发动机总体性能计算程序中使用时,需要采用四元插值方法。四元插值方法包括的两个过程简述如下:

(1)逐层确定插值使用的特性数组下标,其各层使用到的变量依次为高压涡轮换算转速、高压涡轮落压比、低压涡轮换算转速和低压涡轮落压比,此过程伴随着维数的降低;

(2)根据上一过程所确定的下标逐层向上进行插值。由于数据点有限,采用高次插值反而可能使得误差增大,因而使用了线性插值方法。

3 1 + 1/2 对转涡轮对发动机特性的影响

3.1 研究对象与研究工具

本文所研究的对象为一使用 1 + 1/2 对转涡轮的双轴混排涡扇发动机,其结构示意图和截面定义如图 4 所示。

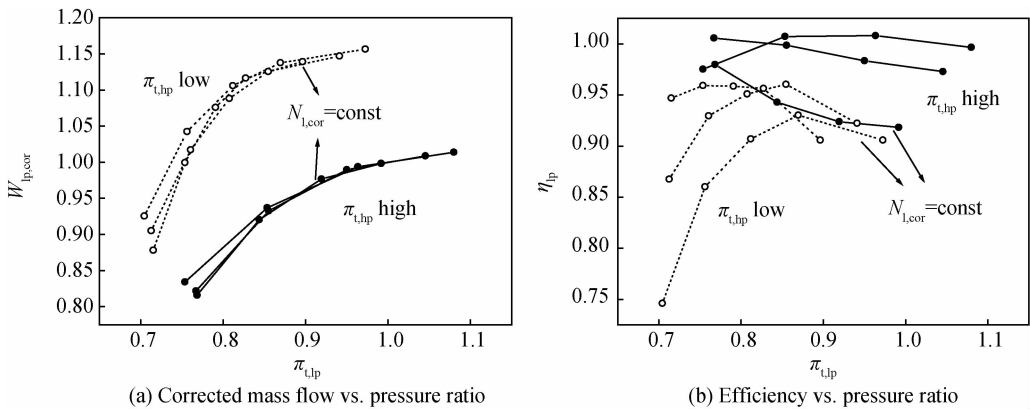


Fig. 2 Low pressure turbine map ( $N_{h,cor} = 1.0$ )

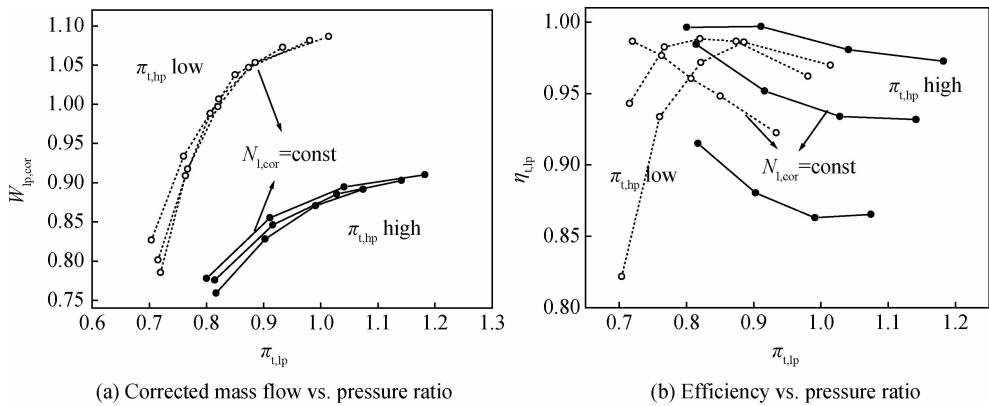


Fig. 3 Low pressure turbine map ( $N_{h,cor} = 0.8$ )

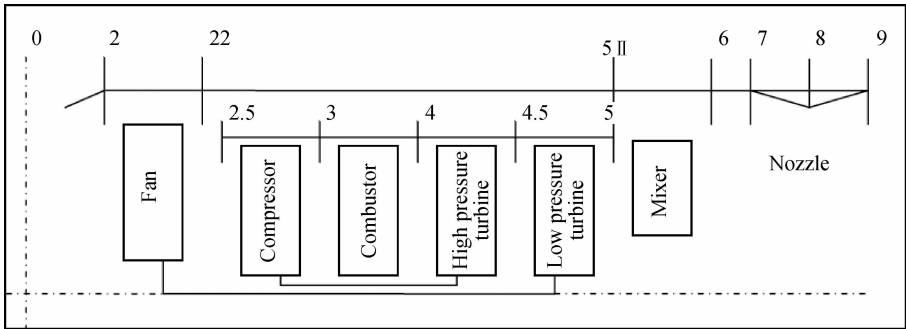


Fig. 4 Sketch of twin-spool mixed turbofan engine

本文所采用的发动机性能计算模型为基于部件法的涡轮发动机性能计算模型<sup>[13~17]</sup>。相应的计算程序以气动热力过程的变比热计算和部件特性插值为基础。2.2 节中已经指出,对转的低压涡轮特性使用时需要采用四元插值方法,其四个变量分别为  $N_{h,cor}$ ,  $\pi_{t,hp}$ ,  $N_{l,cor}$  和  $\pi_{t,lp}$ 。其中,  $N_{h,cor}$  可由  $N_h$  和高压涡轮进口总温求得,  $N_{l,cor}$  可由  $N_l$  和低压涡轮进口总温求得,  $\pi_{t,hp}$  和  $\pi_{t,lp}$  均为平衡方程的自变量。可见,在给定高压转子转速  $N_h$  的控制规律下,还需要给定三个变量的初值,即  $N_l$ ,  $\pi_{t,hp}$  和  $\pi_{t,lp}$ , 这与采用传统涡轮特性的发动机计算模型完全相同。因此,在本文推荐的对转涡轮特性描述和使用方法的情况下,采用 1 + 1/2 对转涡轮和传统涡轮的发动机性能计算模型的差别,仅在于前者在进行低压涡轮特性插值时使用了四元插值方法,而两种模型的自由变量和残差方程组则完全相同。

综上所述,对转双轴混排涡扇发动机的共同工作条件如表 1 所示。表中,  $W_{hp,cor}$  和  $W_{lp,cor}$  分别为猜测的高低压涡轮进口换算流量;  $W'_{hp,cor}$  和  $W'_{lp,cor}$  分别为计算的低压涡轮进口换算流量;  $L_{hpt}$  为高压涡轮功;  $L_{lpt}$  为低压涡轮功;  $L_{hpc}$  为压气机功;  $L_{fan}$  为风扇功;  $p_{s5}$  为混合室内涵进口静压;  $p_{s5\parallel}$  为混合室外涵进口静压;  $p_7$  为尾喷管进口总压;  $p_{7r}$  为假设进口流量通过时计算的尾喷管进口压力;  $ERR_1 \sim ERR_6$  为发动机残差方程组。

**Table 1 Matching equations of twin-spool mixed turbofan engine**

| Variables         | $\pi_f, \pi_c, T_{t4}, N_l, \pi_{t,hp}, \pi_{t,lp}$ |
|-------------------|-----------------------------------------------------|
| Equations         | $ERR_1 = (W_{hp,cor} - W'_{hp,cor}) / W_{hp,cor}$   |
|                   | $ERR_2 = (W_{lp,cor} - W'_{lp,cor}) / W_{lp,cor}$   |
|                   | $ERR_3 = (L_{hpt} - L_{hpc}) / L_{hpt}$             |
|                   | $ERR_4 = (L_{lpt} - L_{fan}) / L_{lpt}$             |
|                   | $ERR_5 = (p_{s5} - p_{s5\parallel}) / p_{s5}$       |
|                   | $ERR_6 = (p_7 - p_{7r}) / p_7$                      |
| Control parameter | $N_h$                                               |

由表 1 可见,双轴混排涡扇发动机共存在 6 个共同工作方程(误差方程)  $ERR_1 \sim ERR_6$ , 分别是:高压涡轮进口流量平衡、低压涡轮进口流量平衡、高压转子功率平衡、低压转子功率平衡、混合器进口静压平衡和尾喷管处流量平衡。在进行发动机性能计算时,给定发动机核心机转速( $N_h$ )的控制规律下,还需要猜测 6 个变量,即风扇增压比  $\pi_f$ 、压气机增压比  $\pi_c$ 、燃烧室出口总温  $T_{t4}$ 、风扇转速  $N_l$ 、高压涡轮落压比

$\pi_{t,hp}$  和低压涡轮落压比  $\pi_{t,lp}$ 。这样,发动机的共同工作条件恰好组成了一个 6 元非线性方程组。采用 Newton-Raphson 方法进行迭代求解误差方程,进而获得发动机非设计点的性能参数。

### 3.2 对转涡扇发动机节流特性

为了研究 1 + 1/2 对转涡轮对发动机整机匹配的影响,需要对使用 1 + 1/2 对转涡轮的发动机性能和使用传统涡轮的发动机性能进行对比。本文选取的参考标准是使用传统涡轮的“基准发动机”,将其特性与使用 1 + 1/2 对转低压涡轮特性的发动机进行对比。该“基准发动机”采用的传统涡轮的设计点参数,包括高低压转子的落压比、换算流量和效率,均与 1 + 1/2 对转涡轮相同。而二者的区别体现为,前者采用了高压涡轮处于设计点时所对应的 1 + 1/2 对转低压涡轮特性(传统涡轮特性),并且认为此特性不随高压涡轮工况改变。两种发动机节流特性的对比结果如图 5 所示(图中参数均为除以设计点参数得到的相对值)。

为了验证本文提出的对转涡轮特性使用方法,显示本程序计算的精度,图 5 中还给出了该型对转涡扇发动机的部分试验结果。

观察图 5 可得出以下结论:

(1) 计算结果与试验数据的对比,发动机的推力( $F_N$ )误差  $\leq 6\%$ , 流量( $W_a$ )的误差  $\leq 4\%$ , 单位推力( $F_s$ )的误差  $\leq 3.5\%$ , 且误差明显小于通用涡轮特性的计算结果,从而说明本文提出的对转涡轮特性描述和使用方法合理,计算结果能够正确的反映 1 + 1/2 对转涡轮对发动机匹配的影响趋势。

(2) 在高转速时,二者的推力、空气流量和耗油率( $sfc$ )基本相同,并且对转涡扇发动机的推力优于采用传统涡轮的发动机。

(3) 在深度节流( $N_h \leq 80\%$ )时,对转涡轮的使用使得发动机的推力和单位推力均下降,耗油率上升;  $N_h = 70\%$  时,对转涡扇发动机推力下降 13%, 空气流量下降 4%, 耗油率上升 4.5%。

值得注意的是,在实际应用中发动机的状态往往是根据发动机推力确定的,因而有必要研究,在节流过程中耗油率随推力的变化关系。

图 6 展示了对转涡扇发动机节流过程中单位燃油消耗率随发动机推力的变化关系,出于保密的考虑均采用了相对值。由该图可见,在相同推力的条件下,使用 1 + 1/2 对转涡轮的发动机耗油率稍高于传统涡轮发动机,但其影响小于 1%。在开展本研究之

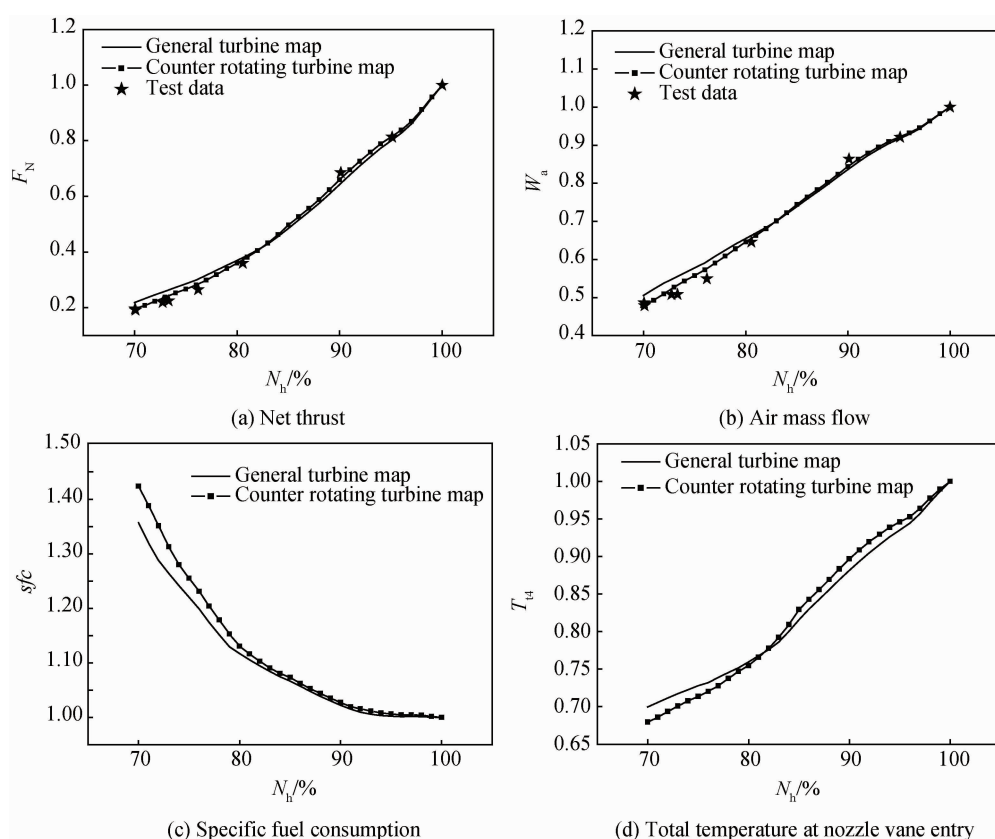


Fig. 5 Throttle characteristics of twin-spool mixed turbofan engine with 1 + 1/2 counter-rotating turbine

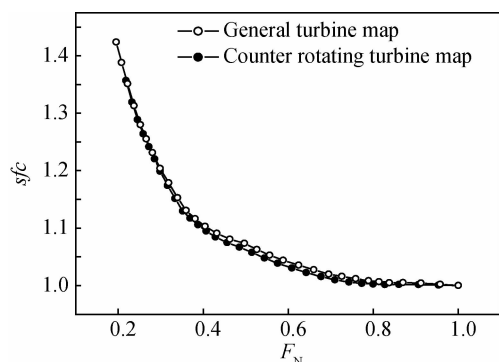


Fig. 6 Throttle characteristics (thrust vs. specific fuel consumption)

前,预期由于 1 + 1/2 对转涡轮的特殊性,会对发动机的整机性能产生明显影响,但从计算结果看来,影响的程度小于预期。

图 7 展示了发动机节流过程中低压涡轮性能(相对值)的变化情况。图 8 则展示了对转涡扇发动机在节流过程中低压转子转速和高低压涡轮出功比的变化情况。通过对这两组数据的讨论可以得出图 5 中发动机性能变化趋势的机理。

(1) 在节流的起始阶段,对转涡轮获得了更大的落压比,而在 80% 转速以下,传统涡轮的落压比更高。核心机 70% 转速时,1 + 1/2 对转涡轮的落压比降低约 3%。

(2) 当低压涡轮落压比下降时,对转涡轮效率下降速度更快,而传统涡轮的效率变化则较为平缓。核心机 70% 转速时,1 + 1/2 对转涡轮的效率降低约 2%。

(3) 对于使用 1 + 1/2 对转涡轮的发动机来说,深度节流时,一方面,低压涡轮效率下降更快(见图 7);另一方面,低压涡轮进口温度下降更快,这两个方面共同导致了低压涡轮功的下降,并最终导致了发动机风扇转速下降更快。于是,通过发动机的空气流量也更低。

(4) 单位推力下降加速是因为,对于使用 1 + 1/2 对转涡轮的发动机来说:一方面,深度节流时,发动机风扇转速和压比下降更快,导致核心机流量下降更快。此时,高压压气机将会更轻。另一方面,在非设计点的偏转将导致气流在高压转子中的膨胀加剧,高压涡轮反力度增加,出功能力增强。以上两点最终导

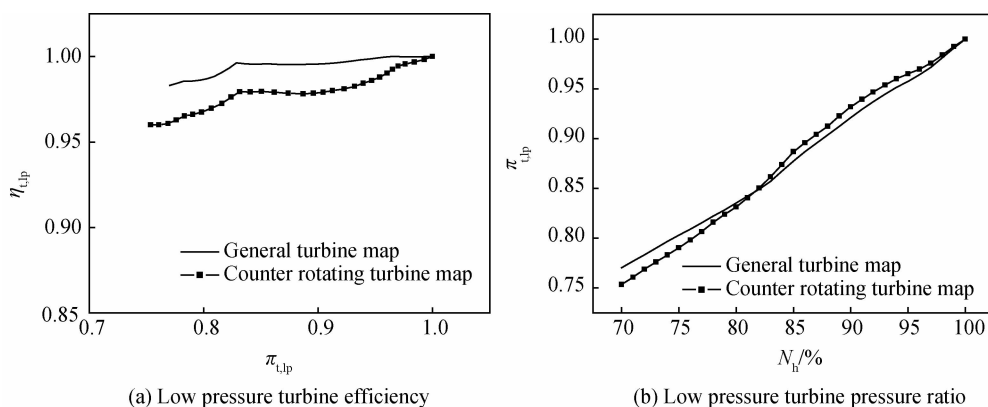


Fig. 7 Low pressure turbine performance in throttle rating

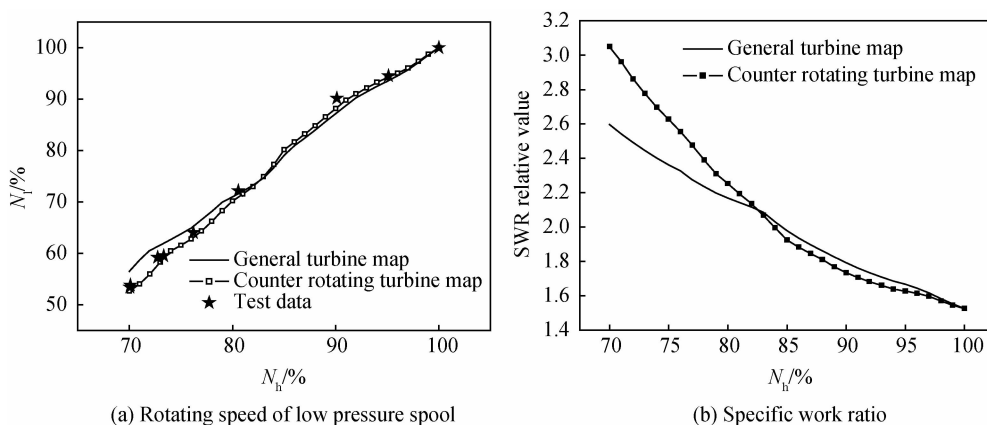


Fig. 8 Rotating speed and specific work ratio vs. throttle setting

致,在采用  $N_h = \text{const}$  的控制规律下,  $T_{t4}$  (见图 5(d)) 下降更快。并最终导致了发动机单位推力减小。

(5) 节流时高低压涡轮功均减小,而使用  $1+1/2$  对转涡轮的发动机低压涡轮功减小更快,高压涡轮则由于反力度的增高而保持较高的出功能力,从而导致高低压涡轮出功比 (SWR) 在深度节流时增加。高压涡轮功受到  $N_{h,cor}$  和  $\pi_{t,lp}$  的影响,节流时  $N_h$  和  $W_{21}$  (高压涡轮出口相对速度) 的减小导致其轮缘功减小。而低压涡轮功除受  $N_{h,cor}$  和  $\pi_{t,lp}$  的影响外,还受  $N_{l,cor}$  的影响。 $W_{21}$  的减小使得  $W_{22}$  (低压涡轮进口气流相对速度) 预旋不足,绝对值也减小。因而低压涡轮功比高压涡轮下降更快。

(6) 由于  $1+1/2$  对转涡轮的使用使得发动机在非设计点时推力下降更快,因而对转涡轮发动机的慢车转速相应提高。

## 4 结 论

本文对  $1+1/2$  对转涡轮特性的描述和使用方法

进行了探讨,并将获得的  $1+1/2$  对转涡轮特性用于双轴混排涡扇发动机总体性能计算程序,通过与使用传统涡轮的发动机性能进行对比,获得了  $1+1/2$  对转涡轮对双轴混排涡扇发动机性能的影响机理。

(1) 本文提出的  $1+1/2$  对转涡轮特性描述和使用方法合理,对转涡轮发动机性能计算结果能够正确反映对转涡轮发动机性能变化趋势,满足工程应用的要求。

(2)  $1+1/2$  对转涡轮高效率的优势主要体现在设计点。由于其低压涡轮转子依靠高压涡轮转子提供预旋,在偏离设计状态时低压涡轮效率明显恶化,其高效率的优点未得以体现。

(3) 虽然发动机节流时,在同样的核心机转速下,采用  $1+1/2$  对转涡轮的发动机耗油率明显偏高,但是在相同的推力下,耗油率参数变化小于 1%。

## 参考文献:

- [1] Louis J F. Axial Flow Counter-Rotating Turbines [R].

- ASME 85-GT-218.
- [ 2 ] Huber F W. Design and Test of a Small Two Stage Counter-Rotating Turbine for Rocket Engine Application[ R ]. AIAA 93-2136.
- [ 3 ] 季路成,钟文涛,徐建中. 关于 1 + 1/2 对转涡轮的基本分析和初步设计[ J ]. 工程热物理学报,2001, 22 (02): 167-170.
- [ 4 ] 乔加飞,赵庆军,徐建中. 某 1 + 1/2 对转涡轮的气动设计及分析[ J ]. 工程热物理学报,2011, 32 (09): 1469-1472.
- [ 5 ] 赵庆军,王会社,赵晓路,等. 无导叶对转涡轮三维流场数值分析[ J ]. 推进技术,2006, 27 (02): 114-118. (ZHAO Qing-jun, WANG Hui-she, ZHAO Xiao-lu, et al. Three-Dimensional Numerical Investigation of Vaneless Counter-Rotating Turbine[ J ]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27 (02): 114-118. )
- [ 6 ] 张 惠,王会社,徐建中,等. 1 + 1/2 对转涡轮高压动叶气膜冷却数值研究[ J ]. 工程热物理学报,2008 (03): 571-573.
- [ 7 ] 王会社,张 惠,赵庆军,等. 1 + 1/2 对转涡轮高压动叶顶部间隙流场数值研究[ J ]. 工程热物理学报, 2007, 28 (05): 751-754.
- [ 8 ] 雒伟伟,张 磊,王会社,等. 可调高压导叶对 1 + 1/2 对转涡轮性能影响的数值研究[ J ]. 航空动力学报, 2011, 26 (12): 2741-2748.
- [ 9 ] 季路成. 对转涡轮研究的回顾与展望[ J ]. 航空发动机. 2006, 32 (4): 49-53.
- [ 10 ] JI Lu-cheng. Analysis of Technical Challenges in Vaneless Counter-Rotating Turbomachinery [ R ]. ASME 2007-GT-27617.
- [ 11 ] 刘思永,王 屏,方祥军,等. 无导叶对转涡轮新技术气动设计探讨[ J ]. 燃气涡轮试验与研究. 2002, 15 (1): 20-24.
- [ 12 ] Kurzke J. How to Get Component Maps for Aircraft Gas Turbine Performance Calculation[ R ]. ASME 96-GT-164.
- [ 13 ] McKinney J S. Simulation of Turbofan Engine, Part I-Description of Method and Balancing Technique [ R ]. AD-825197, 1967.
- [ 14 ] Koenig R W, Fishbach L H. GENENG—A Program for Calculating Design and Off-Design Performance for Turbojet and Turbofan Engines[ R ]. NASA TND-6552, 1972.
- [ 15 ] Fishbach L H, Koenig R W. GENENG II—A Program for Calculating Design and Off-Design Performance of Two and Three-Spool Turbofans with as Many as Three Nozzle [ R ]. NASA TND-6553, 1972.
- [ 16 ] Sellers J F, Daniel C J. DYNGEN—A Program for Calculating Steady-State and Transient Performance of Turbojet and TurboFan Engines[ R ]. NASA TND-7901, 1975.
- [ 17 ] 陈玉春,徐思远,杨云铠,等. 改善航空发动机特性计算收敛性的方法[ J ]. 航空动力学报,2008, 23 (12): 2242-2248.

(编辑:史亚红)