

开式转子发动机对转桨扇匹配特性研究

周人治*, 祁宏斌

中国燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500

摘 要: 先进开式转子发动机均采用了高推进效率的对转桨扇。虽然对转桨扇不是发动机热力循环参数, 但是其提供了绝大部分的推力, 对开式转子发动机的性能优劣起着关键的制约作用。本文采用对转桨扇性能计算模型, 考虑了输入总功率、前后排桨扇功率分配比例、前后排桨扇直径比例等几个关键因素, 对对转桨扇的匹配特性进行了研究, 为开式转子发动机核心机和对转桨扇的最优化匹配设计提供依据。

关键词: 开式转子; 对转桨扇; 核心机; 匹配分析; 功率分配

中图分类号: V228.5;V232.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2014) 04-0069-05

开式转子发动机(Open Rotor Engine)也称桨扇发动机(Prop-Fan Engine), 又称无涵道风扇(UDF)发动机, 是一种介于涡扇发动机和涡桨发动机之间的发动机形式。开式转子发动机既可看作带先进高速螺旋桨的涡轮螺旋桨发动机, 又可看作除去外涵道的超高涵道比涡扇发动机。开式转子发动机结合了涡桨发动机耗油率低和涡扇发动机飞行速度高的优点, 可用作最大飞行 Ma 为0.8~0.85的民用客机、军用运输机的动力。

国外开式转子发动机的概念研究始于20世纪70年代, 80年代后半期GE公司的开式转子发动机GE36(亦即UDF无涵道风扇发动机)已完成地面和飞行验证试验, 基本达到预期目标, 验证的地面起飞耗油率为 $0.24\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ ^[1]。由于航空公司的综合经济因素和当时技术发展水平限制等原因, 这种发动机至今尚未被广泛采用, 唯一投入生产的是用于乌克兰安-70运输机的D-27发动机。目前, 由于波音公司和空客公司现役主流窄体客机B737和A320均面临着更新换代, 开式转子发动机以其独特的经济性优势获得了波音、空客和各大发动机公司的青睐。两大飞机制造商都已经与发动机制造商展开合作, 对开式转子发动机技术应用的可行性以及可能的适航取证要求进行研究, CFM国际公司、罗罗公司等发动机公司均提出了开式转子发动机的长远规划和发展方案^[2]。

先进开式转子发动机的重要特色是采用了推进效率很高的对转桨扇。虽然对转桨扇参数不是发动机热力循环参数, 但是由于开式转子发动机绝大部分推力(90%以上)是由对转桨扇所提供的。因此, 对转桨扇的性能对开式转子发动机的总体性能优劣起着关键的制约作用。如果桨扇和核心机之间不是最优的匹配关系, 就会造成核心机无法满足桨扇实际的功率需求或者核心机储备功率过大。因此, 对核心机和对转桨扇的之间优化匹配研究是十分必要的。

本文采用对转桨扇性能计算模型, 考虑了输入轴功率、前后排桨扇功率分配比例、前后排桨扇直径比例等关键因素, 对对转桨扇的匹配特性进行了计算分析, 并用国外公开文献中的相关数据进行了验证, 为开式转子发动机核心机和对转桨扇的最优化匹配设计提供了一定依据。

2 对转桨扇设计参数分析

在一定的飞行条件下, 对于选定叶型的桨扇而言, 对转桨扇关键设计参数主要有前排桨扇直径 D_1 、后排桨扇直径 D_2 、前排桨扇转速 n_1 、后排桨扇转速 n_2 等。如图1所示, 桨扇直径和转速的选取不但会对开式转子发动机性能产生较大的影响, 还直接关系到发动机的其他各方面的指标。

收稿日期: 2013-12-19; 录用日期: 2014-01-19

基金项目: 航空科学基金(2010ZB24001)

*通讯作者. Tel.: 028-83017599 E-mail: gte@gte.avic.com

引用格式: ZHOU Renzhi, QI Hongbin. Open rotor engine counter-rotating prop-fan matching characteristics research[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(04): 69-73. 周人治, 祁宏斌. 开式转子发动机对转桨扇匹配特性研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(04): 69-73.

(1) 噪声水平

开式转子发动机最大的噪声来源就是暴露在空气中的桨扇叶片,由声学理论可知桨扇噪声的分贝等级与桨扇的叶尖切向速度 V_{tip} 有着直接关联。 V_{tip} 越大,噪声也越大。由桨扇的叶尖切向速度计算公式:

$$V_{tip} = \frac{n\pi D}{60} \quad (1)$$

可以看出, n 和 D 直接决定了桨扇的叶尖切向速度。

(2) 发动机重量

桨扇的重量占了开式转子发动机总重量很大一部分。例如,乌克兰的D27发动机总干重为2300kg,对转桨扇重量为650kg^[3],约占了发动机总重量的30%。桨扇的重量主要取决于桨扇叶片的数目和直径。现代先进桨扇的叶片数一般为6~8片。因此,桨扇直径越大,桨扇重量越大。

开式转子发动机重量的另外一个重要组成部分是减速齿轮箱。某功率等级为20000马力(14914kW)的减速齿轮箱重量为821.7kg^[4]。在整个开式转子发动机的重量组成中,与桨扇的重量等级相当。在开式转子发动机的设计中,为确保动力涡轮较高的做功能力,其设计转速通常较高。因此,如果桨扇的设计转速过低,则要求齿轮箱的减速比较高,使得齿轮箱的重量增大。

(3) 结构强度

桨扇的直径或转速过大,会给桨扇叶片以及支承件的结构强度设计造成困难,同时还会影响发动机的振动水平。

(4) 飞机安装形式

桨扇的直径还会制约开式转子发动机在飞机上的安装形式。如果采用翼吊式安装,桨扇直径过大,则要求飞机的起落架更大,同时对飞机机翼的结构强度要求更高;如果采用尾吊式安装,桨扇直径会直接影响机身后部支承件的结构尺寸和重量。

3 对转桨扇匹配工作原理

根据机械和能量平衡的关系,对转桨扇和发动机之间遵循以下的匹配约束关系:

(1) 转速平衡

$$n_L = k n_G \quad (2)$$

式中, n_L 为低压涡轮(动力涡轮)转速, n_G 为减速齿轮箱输出转速(即对转桨扇工作转速), k 为齿轮箱减速比,对于直接驱动式的开式转子发动机, k 即为1。

(2) 功率平衡

动力涡轮发出的功率和对转桨扇吸收的功率关系:

$$P_{WPF} = \eta_{mL} \eta_{mG} P_{WPT} \quad (3)$$

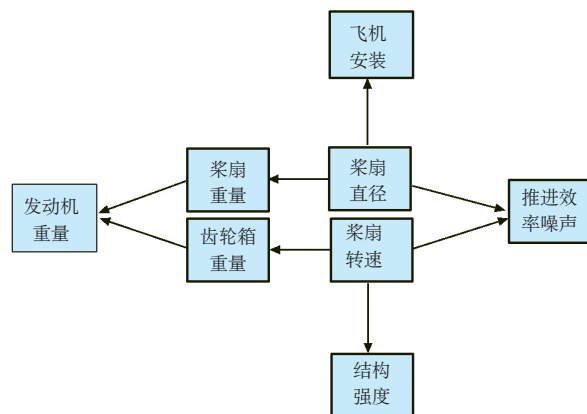


图1 桨扇直径和转速对开式转子发动机的影响

Fig.1 Effect of prop-fan diameter and rotational speed on open rotor engine

对转桨扇前后排功分配:

$$P_{WPF} = P_{WPT1} + P_{WPT2} \quad (4)$$

式中, P_{WPT} 为动力涡轮发出的总功率, P_{WPF} 为对转桨扇需用的总功率, P_{WPT1} 为前排桨扇吸收功率, P_{WPT2} 为后排桨扇吸收功率, η_{mL} 为低压轴机械效率, η_{mG} 为减速齿轮箱机械效率。如图2所示,行星齿轮箱的机械效率 η_{mG} 并不是一个固定值,而是恒星轴输入功率 $P_{w, sun}$ 和转速 n_{sun} 的函数^[5]。如果采用动力涡轮直接驱动对转桨扇,式中 η_{mG} 取为1即可。

可以看出,在给定的飞行条件下,对于参数确定的对转桨扇,影响其性能变化的主要因素是发动机输出的轴功率大小以及前后排桨扇功率分配比例,前者由发动机热力循环水平决定,后者取决于行星齿轮箱的设计。

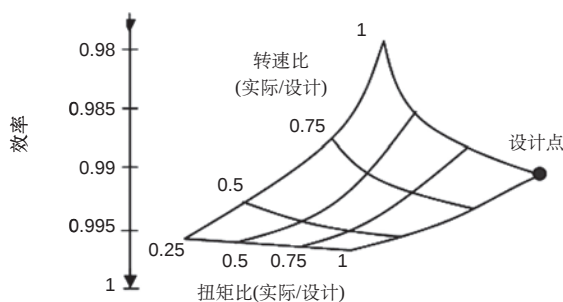


图2 行星齿轮箱典型效率特性

Fig.2 Typical efficiency characteristics of planetary gearbox

4 对转桨扇匹配特性分析

本文对对转桨扇匹配特性的分析通过以下两个方面展开:

(1) 当对转桨扇设计参数保持不变时,不同发动机的输出功率等级对对转桨扇效率和推力的影响;

(2) 当发动机热力循环状态保持不变(亦即输出到对转

表1 对转桨扇主要设计参数
Table 1 Main design parameters of CRP

参数名称	单位	数值
飞行高度	m	10668
飞行马赫数		0.8
前后排叶片数		8+8
前排桨扇转速	r/min	1277
后排桨扇转速	r/min	1277
前排桨扇直径	m	3.65
后排桨扇直径	m	3.65
轮毂比		0.425

桨扇模块的轴功率保持不变)时,不同的对转桨扇设计(不同功率分配比和前后直径比)对其匹配特性的影响。

对转桨扇主要参数如表1所示(除后排直径以外基本与GE36验证机采用的F7-A7对转桨扇参数一致)。本文计算采用参考文献[6]中的对转桨扇(CRP)性能计算模型,前后排桨扇特性均采用NASA的SR-7A桨扇风洞试验特性^[7]。

4.1轴功率的影响

图3和图4分别给出了当对转桨扇功率分配比例等参数保持不变,对转桨扇效率和推力随总轴功率 P_{WPT} 的变化趋势。

可以看出,随着对转桨扇输入总轴功率 P_{WPT} 的增加,前排桨扇获取的功率 P_{w1} 也逐渐增加,由于来流条件不变,前排桨扇前进比 J_1 保持不变,功率系数 C_{P1} 逐渐增大,前排桨扇工作点由低效率区向高效率区移动,再逐渐移回低效率区。因此,前排桨扇推进效率 η_1 先增加后减小;随着对转桨扇输入总轴功率 P_{WPT} 的增加,后排桨扇进口感受气流速度(亦即前排桨扇出口气流速度)逐渐增加,后排桨扇虚拟转速 n_{2x} 逐渐减小,虚拟前进比 J_{2x} 逐渐增加,与此同时,虚拟功率系数 PQA_{2x} 也随着后排桨扇获取功率 P_{w2} 的增大而增大,后排桨扇

工作点逐渐向低效率区移动。因此,其推进效率 η_2 持续减小。后排桨扇虚拟转速等虚拟参数并不是其真实工作参数,而是为了在后排桨扇计算过程中能够应用桨扇特性而构造的一种等效参数,详见参考文献[6]。

因此,对转桨扇的总推进效率 η 是先增加后减小,在 $P_{WPT}=4500\text{kW}$ 左右时达到最大值;对转桨扇前排推力 F_{n1} 、后排推力 F_{n2} 以及总推力 F_n 均随着总轴功率 P_{WPT} 的增加而增加,但受推进效率的影响,在 P_{WPT} 大于 4500kW 后 F_{n2} 增长幅度略有减小,因此对转桨扇总推力 F_n 增长幅度亦有减小。

当总功率为 4500kW 时,对转桨扇推进效率 η 达到峰值,此时对转桨扇桨盘负载为 442kW/m^2 。由参考文献[8]可知,GE36发动机采用的F7-A7对转桨扇的设计桨盘负载为 445kW/m^2 ,与本文的分析结果相符。

4.2 功率分配比例的影响

对于单排桨扇,只要桨扇叶型以及设计参数确定,在同样的工作条件下,输入桨扇的轴功率相同,推力也是不变的。但是对于对转桨扇,即使桨扇叶型和设计参数确定,输入桨扇的总功率相同,总推力也不一定相同。这是因为:在同样的工作条件下,如果对转桨扇的几何参数和叶型参数给定,那么 J_1 就确定了,但是 C_{P1} 、 n_{2x} 、 J_{2x} 和 PQA_{2x} 等都是功率分配比例的函数,随着功率分配比例的变化而呈现不同的变化趋势,但是总存在一个最佳的功率分配比例,使得对转桨扇总推进效率 η 和总推力 F_n 最大。

前后排桨扇功率分配的比例对开式转子发动机性能的影响很大,带来的发动机推力变化量可达到5%以上。对于齿轮驱动式的开式转子发动机,行星齿轮箱的设计决定了对转桨扇前后排桨扇功率分配的比例;对于直接驱动式的开式转子发动机,功率分配比则是由对转涡轮的设计决定的。

图5和图6分别给出了当发动机输入到对转桨扇的轴功率一定时,对转桨扇推力和对转桨扇效率随对转桨扇前后排

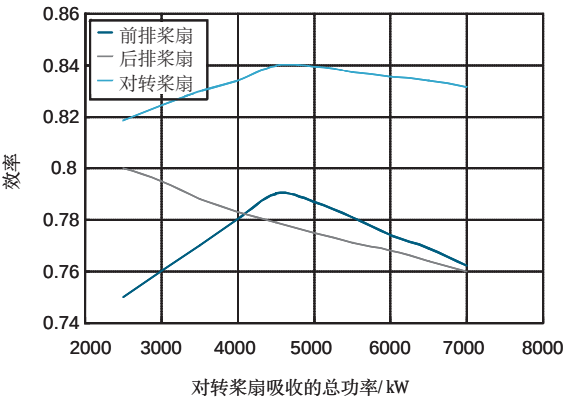


图3 对转桨扇效率随总功率的变化趋势
Fig.3 CRP efficiency vs. total power

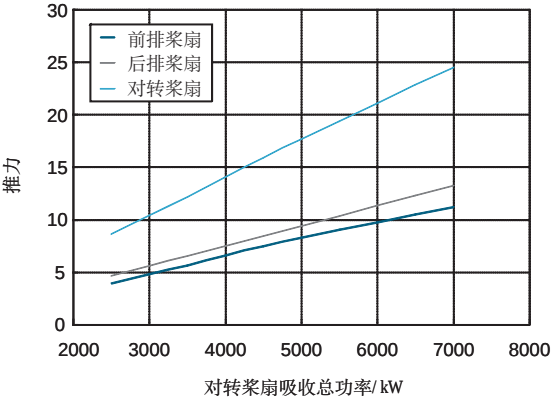


图4 对转桨扇推力随总功率的变化趋势
Fig.4 CRP thrust vs. total power

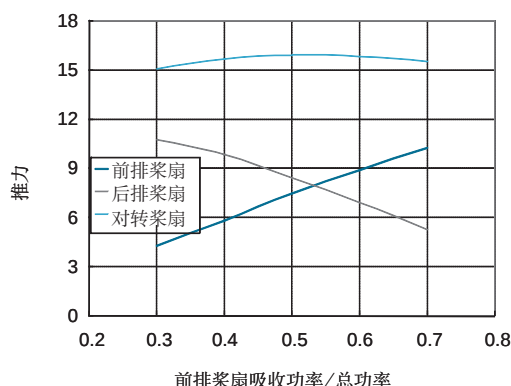


图5 对转桨扇推力随功率分配比的变化趋势

Fig.5 CRP thrust vs. power distribution ratio

功率分配比例的变化趋势。

随着前排桨扇吸收功率 P_{w1} 的逐渐增大,前排桨扇和后排桨扇的效率逐渐增大,因此前排桨扇的推力 F_{n1} 增大,但是由于输入后排桨扇的功率 P_{w2} 逐渐减小,后排桨扇的推力 F_{n2} 逐渐减少,不过对转桨扇总推进效率 η 和总推力 F_n 仍保持增大的趋势。当 P_{w1} 超过总功率的50%时,前排桨扇的效率 η_1 逐渐下降,后排桨扇效率 η_2 的增长幅度也变小,对转桨扇总推进效率 η 降低,对转桨扇总推力 F_n 减小。

4.3 前后排直径比的影响

对转桨扇后排桨扇处于前排桨扇的滑流收缩区中^[9](图7),工作状态受到前排桨扇的影响较大。因此对转桨扇后排桨扇直径 D_2 一般设计得比前排桨扇直径 D_1 略小。

由图8可以看出,当对转桨扇获取的总功率 P_{wPT} 和 D_1 保持不变,随着 D_2 的逐渐增加,对转桨扇总推力 F_n 先增大后减小,当 $D_2/D_1 \approx 0.915$ 时,对转桨扇总推力最大。这是因为:当 D_1 保持不变,前排桨扇的工作状态确定,推进效率不变,出口的流场分布基本不变,随着 D_2 的增大,后排桨扇感受到的气流速度发生改变,后排桨扇的工作状态随之发生变化,虚拟转速 n_{2x} 发生变化,工作点由低效率区向高效率区移动,再由高效率区移向低效率区,使得对转桨扇总推进效率 η 先增后减,因此对转桨扇推力 F_n 先增大后减小。参考文献[8]给出美国通用公司GE36发动机的采用的F7-A7对转桨扇 $D_2/D_1=0.924$,说明本文计算分析结果处于合理的区间。

5 结论

通过对开式转子发动机对转桨扇部件与动力涡轮轴功率的匹配特性分析,在飞行条件和桨扇叶型一定的前提下,可得出如下结论:

(1) 当对转桨扇基本参数一定时,对转桨扇的推力随着

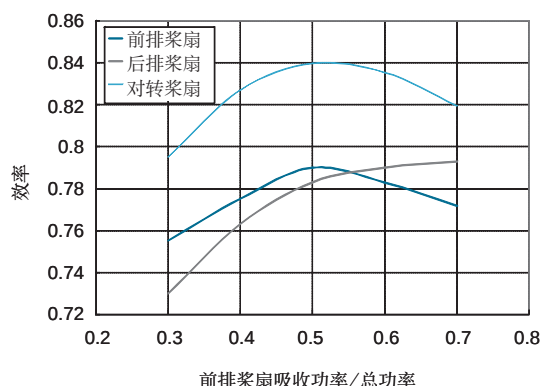


图6 对转桨扇效率随功率分配比的变化趋势

Fig.6 CRP efficiency vs. power distribution ratio

输入总轴功率的增加而增加,输入总轴功率存在一个最佳值,使得对转桨扇效率最大;

(2) 当对转桨扇获取的总功率一定时,前后排桨扇功率

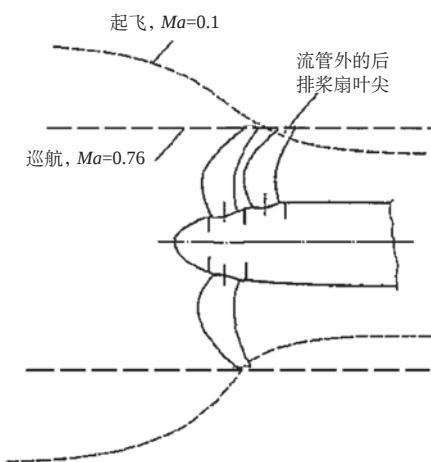


图7 单排和对转桨扇流线分布对比示意图

Fig.7 Comparison diagram of SRP and CRP streamline distribution

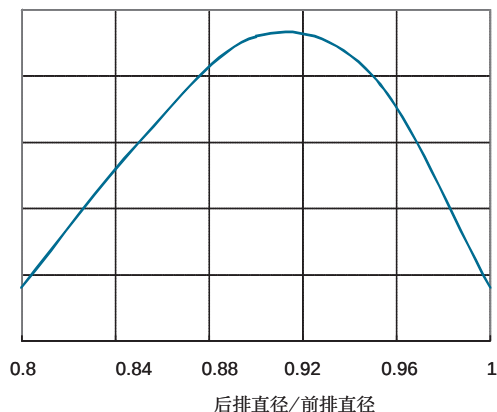


图8 对转桨扇总推力随直径比变化

Fig.8 CRP total thrust vs. diameter ratio

分配比和桨扇直径存在一个最佳值,使得对转桨扇效率和推力最大。

AST

参考文献

- [1] 郭允良. NB0116160桨扇和超扇航空发动机的发展前景[R]. 中国燃气涡轮研究院, 1998.
Guo Yunliang, NB0116160 Prospective Development of Prop-fan Engine and Ultra-fan Engine[R]. China Gas Turbine Establishment, 1998. (in Chinese)
- [2] 胡晓煜. A320/B737客机2020年后换代, 开式转子发动机显露希望[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2009, 22 (3): 60-62.
HU Xiaoyu. A320/B737 aircraft's replacement in 2020, open rotor engine's new promise[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(3): 60-62. (in Chinese)
- [3] Mark Daly, Bill Guntson, FRAes. Jane's Aero Engines 2012/2013[M]. Coudsen, U.K.: Jane's Information Group Limited, 2002.
- [4] R. D. Anderson. Advanced Propfan Engine Technology (APET) Definition Study, Single and counter-rotation Gearbox/Pitch Change Mechanism Design[R]. NASA-CR-168115, 2004.
- [5] J. Dominy. Transmission Efficiency in Advanced Aerospace Powerplant[C]. 23rd Joint Propulsion Conference, Cincinnati, Ohio, AIAA-87-2043, 1987.
- [6] 祁宏斌, 周人治, 黄红超, 等. 开式转子发动机对转桨扇性能建

模研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012, 25(1): 20-24.

QI Hongbin, ZHOU Renzhi, HUANG Hongchao, et al. Modeling of Counter-Rotating Prop-Fan Performance of Open Rotor Engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2012, 25(1): 20-24. (in Chinese)

- [7] George L. Stefko, et al.. Wind Tunnel Performance Results of an Aeroelastically Scaled 2/9 Model of the PTA Flight Test Prop-Fan[C]. AIAA/SAE /ASME /ASEE 23rd Joint Propulsion Conference, AIAA-87-1893, 1987.
- [8] NASA. Full Scale Technology Demonstration of a Modern Counterrotating Unducted Fan Engine Concept (Design Report) [R]. NASA CR-180867, 1987.
- [9] H. Grieb and D. Eckardt, Turbofan and Propfan as Basis for Future Economic Propulsion Concepts[C]. AIAA/ASME /SAE /ASEE 22nd Joint Propulsion Conference, Huntsville, Alabama, AIAA-86-1474, 1986.

作者简介

周人治(1968—) 男, 硕士, 研究员, 副总师。主要研究方向: 航空发动机型号、预研总体性能设计与研究。

Tel: 028-83017599 E-mail: gte@gte.avic.com

祁宏斌(1985—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 航空发动机总体性能设计与研究。

Tel: 028-83017442 E-mail: gte@gte.avic.com

Open Rotor Engine Counter-rotating Prop-fan Matching Characteristics Research

ZHOU Renzhi*, QI Hongbin

China Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China

Abstract: PCounter-rotating prop-fan (CRP) with high propulsive efficiency is typically adopted by advanced open rotor engine. Although CRP is not an engine cycle parameter, it produces the vast majority of total engine thrust and is extremely critical to open rotor engine performance. In this paper, based on a developed CRP performance model, the matching characteristics of CRP was studied with consideration of several crucial factors including total input power, front-rear power distribution and front-rear diameter ratio, which is expected to provide proof for optimum matching design between open rotor engine core and CRP.

Key Words: open rotor; counter-rotating prop-fan; core engine; matching analysis; power distribution

Received: 2013-12-19; Accepted: 2014-01-19

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2010ZB24001)

* Corresponding author. Tel.: 028-83017599 E-mail: gte@gte.avic.com