

基于不同载荷的大涵道比风扇气动噪声分析

宋圣申,周正贵,曹晖

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:对于齿轮驱动大涵道比涡扇发动机,载荷升高转速减小能够显著降低噪音。探究了载荷系数变化对大涵道比风扇气动噪声的影响。对设计完成的3款不同载荷的大涵道比风扇级进行了系统的声学特性分析。结果表明:无论是对于单转子还是风扇级,随着载荷系数的升高,噪声都逐步降低。超高载荷风扇转子的噪声与常规载荷风扇转子相比,降低了27.36 dB;相应匹配上静子以后,整个风扇级的噪声降低了18.03 dB。

关键词:载荷系数;大涵道比;齿轮驱动风扇;气动设计;声学分析

中图分类号: TB53 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2019)05-0183-04

Aerodynamic Noise Analysis of High Bypass Ratio Fan with Different Load Coefficients

SONG Shengshen, ZHOU Zhenggui, CAO Hui

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The reduction of rotating speed has a significant effect on reducing the noise of the geared turbofan engine. In this paper, the effect of the load coefficient on the fan noise is investigated. The load coefficient is varied with changing the fan rotating speed. Three fan stages with identical total pressure ratio and mass flow rate are designed. The result of the acoustic analysis shows that the noise reduces gradually with the increase of the load coefficient in the single rotor or the fan stage. The noise of the fan rotor with ultra-high load is reduced by 27.36 dB, compared with the normal load. The noise of the fan stage is reduced by 18.03 dB.

Keywords: load coefficient; high bypass ratio; geared turbofan; aerodynamic design; acoustic analysis

0 引言

对于大涵道比涡轮风扇发动机,风扇是其气动噪声的主要来源之一^[1]。风扇噪声分为旋转单音噪声和宽频噪声。宽频噪声是由于叶片尾缘处的脱落涡、叶尖间隙涡、附面层分离所引起的压力脉动而产生的。旋转单音噪声产生的主要原因是叶片稳定周期性旋转引起的压力脉动和叶尖激波区域高压力的压力脉动^[2-3]。噪声功率与风扇叶尖速度的四次方成正比,因此降低风扇转速可有效降低风扇旋转单音噪声^[4]。在风扇气动设计时,降低风扇转速成为降低风扇噪声主要考虑措施。但是在风扇设计压比一定的前提下,降低转速必然导致风扇载荷系数增加,通常会造成功扇叶片表面附面层和尾迹尺寸增大,使宽频自噪声和转子与静子叶片干涉单音噪声增加。此外,叶片表面附面层和尾迹增大,会造成风扇的气动效率和稳定工作裕度降低。

文献[5]以当时典型设计风扇为原型,保持压比、流量等气动性能参数与原型近于相同,将设计转速降低15%后再进行风扇重新设计。试验结果表明,原型高转速风扇在风扇转速高于80%设计转速时产生单音噪声,改进设计后低转速风扇在与此气动性能指标对应的转速下,单音噪声被截止。因而低转速风扇单音噪声降低了5 dB~10 dB;但低转速风扇宽频噪声未下降。

文献[6]通过大涵道比风扇单音、宽频自噪声和转静子干涉单音、宽频噪声详细分析指出,在风扇设计压比一定的前提下,降低风扇转速可有效降低风扇的单音噪声,但由于压比一定,转速降低,风扇载荷系数增加,导致风扇叶片表面附面层和尾迹尺寸增大,造成宽频自噪声和转静子干涉噪声增加。

涡扇发动机涵道比越大喷管排气速度越低,排气噪声越低;涵道比越大,风扇增压比越小,转速越低,风扇噪声越低^[7]。此外,涵道比越大,推进效率越高,耗油率越低。因此民用涡扇发动机涵道比呈持续增大趋势^[8]。

对于齿轮驱动大涵道比风扇,可通过增大齿轮减速比,保持原齿轮驱动风扇结构不变,便于实现风扇转速变化。本文针对齿轮驱动涡轮风扇发动机,保持风扇设计压比、流量近于不变,改变气动负荷进行风扇转静子叶片气动设计,研究其对气动噪声的影响。

1 不同载荷系数大涵道比风扇气动性能对比

1.1 气动设计方法简述

本文采S1、S2两类流面二维设计方法进行风扇转静子设计。根据给定的通流流道、设计点流量、压比及压比沿叶高分布,进行S2流面通流设计;由通流设计确定的转

静子进出口参数沿叶高分布,进行S1流面二维叶型设计。利用参数化造型软件,由安装角、弦长、前后缘小圆半径、前后缘角、最大挠度、最大厚度及其位置等参数构造叶型;采用回转面二维流场计算方法检验叶型设计合理性;再应用自动优化方法进一步改进叶型。将设计的二维叶型沿型心径向积叠构成三维叶片,应用商业流场计算软件NUMECA对所设计的风扇转子静子进行全三维流场数值模拟计算,检验最终设计结果^[9]。

1.2 气动设计结果比较

该大涵道比风扇设计点参数见表1。表1中风扇进口总温、总压对应于8000m高空的大气条件。

表1 风扇主要设计参数

名称	数值	名称	数值
设计流量/(kg/s)	214.9	设计压比	1.35
进口总温/K	245.8	进口总压/Pa	35 713
转子进口叶尖半径/mm	0.949	转子进口轮毂比	0.306
静子进口叶尖半径/mm	0.992 1	静子进口轮毂比	0.399
转子叶片数	18	静子叶片数	36

由载荷系数表达式(1)可得,给定总压比 π_k^* ,风扇转速下降即轮缘速度(u)下降,使得载荷系数(\bar{H})增加,叶片通道扩压度增加,这通常会造成功率下降、稳定工作裕度下降^[10]。当前风扇/压气机气动设计,载荷系数通常 ≤ 0.4 ^[11-12];进一步增加则需要采用附面层控制技术(如附面层吸附)。

$$\bar{H} = \frac{L_u}{u^2} = \frac{C_p T_1^* (\pi_k^{* \frac{k-1}{k}} - 1) / \eta_k^*}{u^2} \quad (1)$$

本文载荷系数分别取0.3、0.6和0.8。如图1所示:载荷系数为0.3,属常规载荷;载荷系数为0.6,属中间载荷;载荷系数为0.88,属超高载荷。为实现超高载荷设计,尝试应用一种超高载荷大弯度低损失扩压叶型,进行风扇转子叶片气动设计,以大幅度降低风扇转速^[13-14]。该叶型弯度大、做功能力强,可在低转速时实现较高的总压比;叶栅后段呈收敛形,可抑制流动分离,减小流动损失。

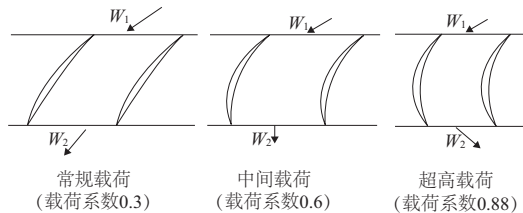


图1 不同载荷风扇转子叶栅特征气流方向

图2所示为已经设计完成的3款不同载荷风扇转子在90%叶高、50%叶高、10%叶高处二维叶型图,设计结果符合上述的理论分析。常规载荷转子全叶高范围内出口气流角均为正;中间载荷转子叶根处出口气流角略微偏过轴向,为负;叶尖处依旧为正,叶中截面几乎轴向,故可以认为平均出口气流角为轴向;超高载荷转子3个叶高处均已偏过轴向,越往叶尖处,偏转弯曲越大。分别将得到

的叶型通过型心径向积叠形成的三维叶片及风扇转子,如图3所示(以中间载荷0.6风扇为例)。

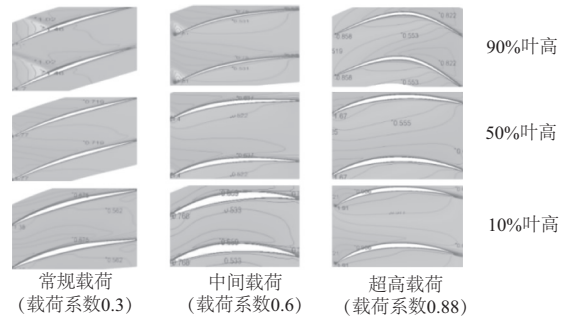


图2 3款不同载荷风扇转子在90%、50%、10%叶高处的二维叶型型面示意图

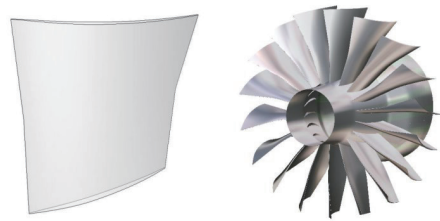


图3 中间载荷(载荷系数0.6)风扇三维叶型及转子示意图

将静子置于转子下游进行转子匹配静子气动设计,风扇级子午面投影见图4。表2为三维流场计算设计点参数,表明载荷系数由0.3提高到0.88,转速由2790 r/min降至1623 r/min(0.58倍)。3种载荷下对应的风扇级设计压比与设计值1.35略有偏差,但相差不大;随着载荷系数的增加,设计点效率反而越来越高。另外,载荷系数越高端点流量越小,即越不容易发生喘振,这是由于超高载荷叶片弯度大,后段呈收敛状,可有效抑制吸力面后段附面层发展,因而流动不易分离,喘振裕度大。

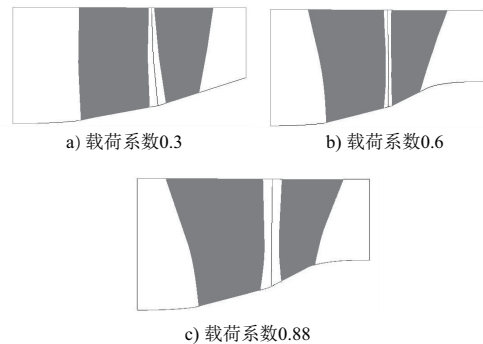


图4 3种载荷风扇级子午面图

表2 不同载荷风扇级设计点参数

载荷系数	转速/(r/min)	叶尖轮缘速度/(m/s)	压比	压比与目标相对差/(%)	效率	喘振裕度
0.3	2 790	277.3	1.386	0.36	0.888	17.7
0.6	1 965	181.4	1.341	0.09	0.896	21.8
0.88	1 623	161.3	1.349	0.01	0.900	46.2

2 不同转速风扇气动噪声对比

2.1 风扇单转子噪声对比分析

本文中非定常流场数值模拟采用 ANSYS CFX 软件;声包场数值模拟采用 LMS.Virtual.Lab 软件^[15]。在 CFX 三维非定常计算中,采用雷诺平均 Navier-Stokes 方程和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。

首先对不同载荷系数的风扇单转子进行声场计算的对比分析,以考察单独风扇转子的气动噪声,再进行由转静子构成的风扇级声场计算的对比分析。

定义以风扇转子轴的中心点为圆心的球面场点网格作为响应声场,用于测定大涵道比风扇辐射出的总声功率级,如图 5 所示。提取球面声场接受到的声源辐射总声功率级,采用 A 记权方法,结果如图 6 所示。图 6 表明,对于单风扇转子,随着载荷系数增加、转速降低,风扇辐射噪声的声功率级逐渐下降。

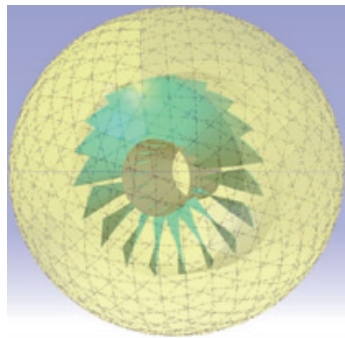


图 5 声学响应模型

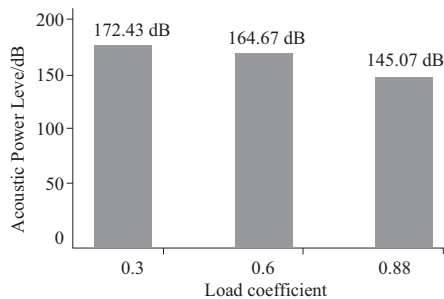


图 6 风扇转子声功率柱状图

图 7 为风扇转子声功率频谱图(本刊黑白印刷,有疑问咨询作者),图中 1BPF、2BPF、3BPF 为叶片通过频率的 1 倍、2 倍和 3 倍谐波,即基频和 2、3 阶谐波频率。图 7 表明:对于风扇转子,旋转单音噪声形成的基频谐波频率声功率远大于宽频噪声。单音噪声主要由转子叶片表面定常旋转压力和叶尖处激波外伸产生的压力梯度形成。随着转速下降,叶尖区激波强度下降。因此随载荷系数增加由激波产生的单音噪声下降。

由流动径向平衡可知,沿叶高静压增加,因此稳态旋转静压产生的单音噪声沿叶高增加。由于叶尖部分旋转静压最高,因此取 3 种载荷系数 95%叶高处叶片表面压力

分布(图 8)进行比较。该图表明:随着载荷系数增加,总体上叶片吸力面和压力面稳态旋转静压下降。因此稳态旋转静压产生的单音噪声随载荷系数增加而下降。

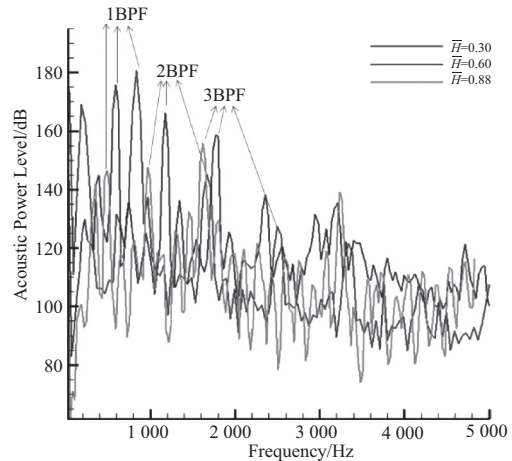


图 7 风扇转子声功率级频谱

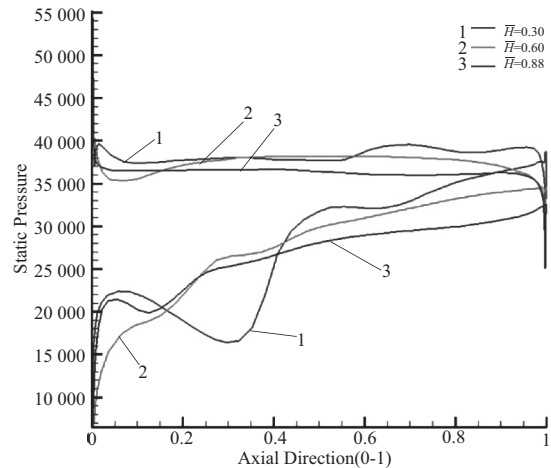


图 8 3 种载荷系数 95%叶高处叶片表面压力分布

2.2 风扇级的噪声对比

由叶轮机械气动噪声理论可知,当匹配上静子以后,风扇转静子之间的干涉作用将成为气动噪声产生的主要原因,干涉作用将以旋转单音干涉和宽频干涉 2 种形式呈现在声功率频谱上。

如图 9 所示,计算结果和预期相一致,在风扇级中,转静子干涉噪声的影响是非常大的。3 个载荷系数下的风扇级噪声在原先单转子的基础上均有一个十分显著的提升。

横向对比可以发现,风扇级载荷系数由常规的 0.3 升高至 0.6,风扇级的噪声由 197.97 dB 降至 186.51 dB,下降了 11.46 dB;而当载荷系数继续升高至 0.88 时,噪声继续下降至 179.94 dB,总体声功率级的变化趋势与单转子情况相类似。

风扇级总的声功率频谱如图 10 所示,其 1BPF~3BPF 处的声功率级幅值均明显大于转子,这表明级环境下转静子干涉现象对旋转单音影响显著。在 3 个载荷系数下,基

频处的声功率级均最高,且随着载荷系数的升高依次下降,这与总噪声变化规律一致。再次说明在风扇级的旋转噪声中,基频分量仍旧占据着最主要的位置。

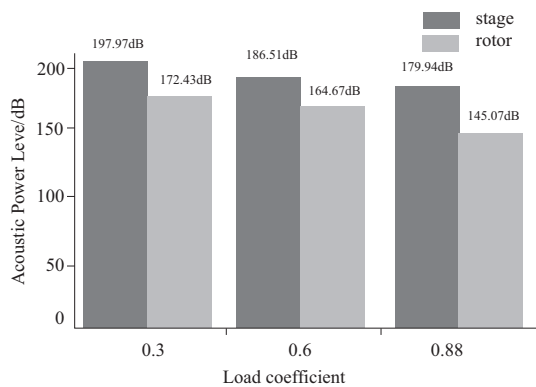


图9 风扇级总声功率级柱状图

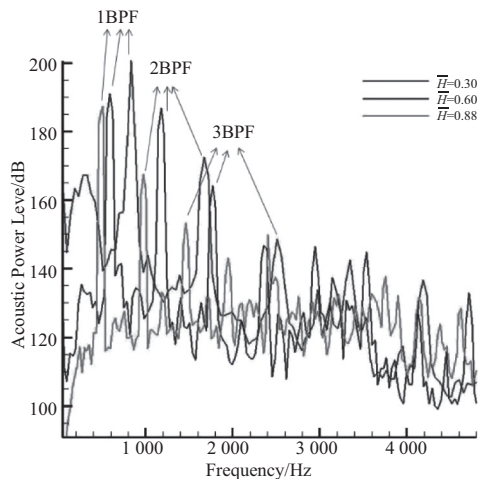


图10 不同载荷风扇级的声功率级曲线

3 结语

本文对载荷系数为0.3、0.6和0.88的3个大涵道比风扇进行了气动性能和声学特性的比较:

1) 高载荷、低转速的大涵道比风扇的设计,降噪效果十分明显。载荷系数为0.88的超高载荷风扇转子相比于载荷系数0.3的常规载荷转子,声功率级降低了27.36dB;分别匹配上静子后,声功率级降低了18.03dB。

2) 通过大涵道比风扇转子噪声分析发现,旋转单音噪声占据着主要地位,而在旋转单音噪声方面,基频的影响尤为突出;风扇级的噪声在原先转子噪声的基础上加上干涉部分,并且依旧以旋转单音干涉为主。

3) 超高载荷、超低转速的风扇设计思路通过降低转速,大幅降低了旋转单音噪声,并且有效抑制了可能激发宽频噪声的非稳态流动。

4) 综合而言,超高载荷大涵道比风扇无论是在气动性能还是声学特性上都具备明显的优越性。

参考文献:

- [1] 朱剑英. 研发航空制造的先进理念与创新技术[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(2):1-4.
- [2] Moreau A, Guérin S. The impact of low-speed fan design on noise: An exploratory study [J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 138(8):1-13.
- [3] 王良锋, 乔渭阳, 纪良, 等. 基于流场/声场混合模型的叶轮机械单音噪声研究[J]. 航空学报, 2014, 35(9):2481-2490.
- [4] 陈懋章, 刘宝杰. 大涵道比涡扇发动机风扇/压气机气动设计技术分析[J]. 航空学报, 2008, 29(3):513-526.
- [5] Bewick, C., Adams, M., Schwaller, P., et al. Noise and aerodynamic design and the test of a low tip speed fan [C]. 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Maastricht, Netherlands, 2001, 361-374.
- [6] Benoit, D, Roger, M, Cailleau, J. Prediction of fan broadband noise [C]. AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Toulouse, France, 1998.
- [7] 李杰. 齿轮传动涡轮风扇(GTF)发动机先进技术综述[J]. 航空发动机, 2009, 35(4):55-58.
- [8] Riegler, C, Bichmaier, C. The geared turbofan technology opportunities, challenges and readiness status [C]. 1st CEAS European air and space conference, Bold, 2007: 10-13.
- [9] 邓真瑜. 超高载荷低转速大涵道比齿轮驱动风扇气动设计方法 [C]. [S.I.]: 全国流体力学学术会议, 2016.
- [10] Dickens, T, Day, I. The design of highly loaded axial compressors [J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 133(3):57-67.
- [11] 周旭. 民用大涵道比风扇叶片气动设计研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [12] 王松涛, 胡应交, 王仲奇. 低反动度高负荷超声速轴流压气机气动设计方法 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(6):1322-1332.
- [13] 周正贵, 张金环, 崔翠. 超高负荷超低转速大涵道比风扇转子气动设计方法: 中国, 201510450214.3 [P]. 2015-07-29.
- [14] Zhang Jin Huan, Zhou Zheng Gui. Aerodynamic design of an ultra-low rotating speed geared fan [J]. Aerospace Science & Technology, 2017, 63:73-81.
- [15] 詹福良, 徐俊伟. Virtual.Lab Acoustics 声学仿真计算从入门到精通 [M]. 西安, 西北工业大学出版社, 2013.

收稿日期:2018-04-25