

文章编号: 1000-8055(2008)10-1903-05

车用跨声速离心压气机设计

郑新前¹, 张扬军¹, 郭宫达¹, 张继忠²

- (1. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084;
2. 北方发动机研究所 柴油机高增压技术国防科技重点实验室, 大同 037036)

摘 要: 随着内燃机功率密度的提高, 需要更高的增压压比. 采用全三维气动设计技术, 设计了最大压比为 4.0 的车用跨声速离心压气机(可应用于微型燃气轮机), 并将此应用于某型增压器的改进. 针对跨声速流动特征, 分析了相应的设计原则和方法. 与某型发动机的配机试验结果表明, 采用新设计的离心压气机后, 在额定功率下, 油耗下降 4.1 g/(kW·h), 涡轮进口温度下降 35 K.

关 键 词: 压气机; 跨声速流动; 高压比; 涡轮增压; 气动设计

中图分类号: TK421.8

文献标识码: A

Design of transonic centrifugal compressor for vehicle

ZHENG Xin-qian¹, ZHANG Yang-jun¹, GUO Gong-da¹, ZHANG Ji-zhong²

- (1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy,
Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. China North Engine Research Institute, National Key Laboratory of
Diesel Engine Turbocharging Technology, Datong 037036, China)

Abstract: As internal-combustion engine power density has increased, turbocharger with high pressure ratio is required. With a Fully three-dimension CFD technology, a transonic centrifugal compressor with pressure ratio 4.0 for vehicle was designed and also applied to micro gas turbine. The design methods and principle of transonic centrifugal compressor were analyzed. The engine-matching test shows that, the performance of the engine improved significantly with the new designed compressor as compared to the prototype compressor. The engine fuel consumption was reduced by 4.1 g/kW·h and the inlet temperature of turbine was decreased by 35 K.

Key words: compressor; transonic flow; high pressure ratio; turbocharging; aerodynamic design

现代先进柴油机的发展趋势是不断提高功率密度,这就要求研制压比高、重量轻的单级高压比涡轮增压器.为了实现单级高压比,离心压气机的内部流动为跨声速流动.激波、激波/附面层干扰等复杂流动现象成为高压比跨声速离心压气机设计的难点.

高压比跨声速离心压气机的研究主要集中在

航空和船舶领域. Higashimori 设计的单级压比达 11 的航空用离心压气机,进口相对马赫数为 1.6^[1]. 瑞士 ABB 公司开发的 TPS 系列船用增压器,致力于高流通能力和高压比,全负荷时压比达到 4.7^[2].

由于车用离心压气机与航空和船用离心压气机相比,尺寸较小,其设计难度更大.尺度效应主

收稿日期: 2007-09-26; 修订日期: 2008-01-01

基金项目: 柴油机高增压技术国防科技重点实验室基金(9140C3301020601); 中国博士后科学基金(20060400088)

作者简介: 郑新前(1976-),男,四川内江人,博士,主要研究方向为叶轮机械非定常流动及优化设计.

要表现为:①附面层所占的比例更大,激波/附面层干扰也更为严重;②间隙所占比例大,泄漏损失加剧。从公开报道的文献来看,车用跨声速离心压气机研究较少,只从文献报道获悉,德国 MTU 公司的 MTU890 系列发动机采用的 ZR125 增压器,单级压比已达到 5。

目前,国内车用增压的研究主要还局限于中、低压比的涡轮增压器,离心压气机内部流动一般为亚声速流动。“柴油机高增压技术国防科技重点实验室”研发的压比 3.5 涡轮增压器,是目前国内车用柴油机领域压比最高的增压器。本文以此增压器为基础,采用全三维气动设计技术,设计了最大压比为 4.0 的车用跨声速离心压气机。

1 设计参数

本文设计以某型增压器为基础,通过改进离心压气机,实现最大压比由 3.5 提高到 4.0。为了尽可能减小改动,此改进设计受到多方面的约束。

1) 转速 n :为了利用现有的涡轮和现有轴承系统,设计转速定为 $70\,000\text{ r/min}$,与原型压气机相同。

2) 叶轮出口圆周速度 u_2 :改型设计仍然采用原型压气机的材料(锻铝合金 2618A),希望 u_2 能够小于 530 m/s 。综合考虑压比、效率、流量范围、材料强度等因素,本设计圆周速度定为 528 m/s 。

3) 扩压器出口半径 R_5 :为了利用现有的蜗壳,保持增压器的整体外尺寸不变,扩压器的出口直径仍然为 225 mm 。

所以,本设计的主要约束条件有:转速、叶轮出口圆周速度、扩压器出口半径。其它几何参数(前缘机匣半径 R_1 、叶片数 z 等)通过优化设计确定。确定的过程为:

1) 利用损失模型,借助 Concepts NREC 公司的 Compal 一维性能预测软件,优化各个截面的主要几何参数,并进行初步强度校核,确定初步几何参数;

2) 在 1) 的基础上,采用全三维几何造型,优化流道、叶型角度、叶型厚度等几何分布,并进行强度分析校核;

3) 采用全三维粘性流场分析,获取流场信息,得到压比、效率的特性图;

4) 如果性能不能满足要求,重复上述三个步骤。

限于篇幅,一维性能预测过程不再阐述,可参考文献[3]。本文下面将详细介绍全三维几何造型和全三维 CFD 分析结果。

原型和改型压气机的主要参数见表 1。

表 1 原型和改型压气机的主要参数

Table 1 Main parameters of prototype and new designed compressor

参数	原型	改型
进口总温 T_{t1}/K	298	298
进口总压 p_{t1}/kPa	100	100
转速 $n/(\text{r/min})$	70 000	70 000
叶片数 z	8/8	9/9
前缘轮毂半径 R_{1h}/mm	17.15	17.15
前缘机匣半径 R_{1t}/mm	50	52
轴向长度 L/mm	46.2	48.4
叶轮出口半径 R_2/mm	70	72
叶轮出口宽度 B_2/mm	9	9
叶轮出口圆周速度 $u_2/(\text{m/s})$	513	528
叶轮出口后弯角 $\beta_2/^\circ$	-30	-30
扩压器出口半径 R_5/mm	112.5	112.5
扩压器出口宽度 B_5/mm	7.5	7.5

2 全三维叶轮几何设计

详细几何设计包括三部分:流道设计、叶片角度分布、叶片厚度分布。下面分别进行介绍。

2.1 流道设计

对于跨声速压气机,进口叶尖的相对马赫数大小对流动性能的影响非常大。进口叶尖半径的确定原则是使其相对马赫数最小,以减小激波强度。通过全三维 CFD 对流场的分析,最终确定进口叶尖半径为 52 mm (包括 0.5 mm 的间隙),见图 1。由于激波的存在,从叶轮前缘到喉部不能加速过快,叶片须比较直甚至是负弯角。本设计机匣流道斜率从 $0\sim 20\%M$ 均取为 0,在中后部斜率较大。为了减小分离,流道前后缘的曲率尽可能小;对于跨声速压气机,机匣前缘的曲率一般取为 0,以避免或减小激波引起的流动分离。

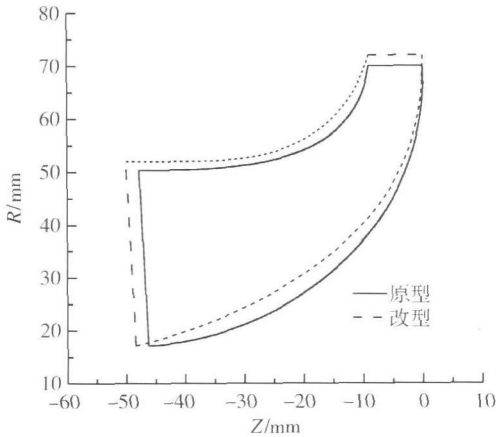


图 1 叶轮子午流道

Fig. 1 Meridional view of impeller

2.2 叶片角度分布

叶片角度 β 的分布需综合考虑最大负荷位置、叶片包角、叶片倾斜角等. 叶片包角和叶片倾斜角是由叶片角度分布衍生而来的, 即叶片角度分布一旦确定, 叶片包角和叶片倾斜角也就确定了.

对于压比较低的亚声速压气机, 最大负荷一般分布在子午流道中部. 对于跨声速压气机, 叶片最大负荷在 60 %~80 %子午流道处, 这就意味着最大 β 角在 70 %~80 %子午流道处, 最大 β 角和出口 β 角之差在 10°~20°, 见图 2. 从图中还可以看出, 原型压气机是基于亚声速理念设计的, 所以导致进口马赫数较高(见图 5).

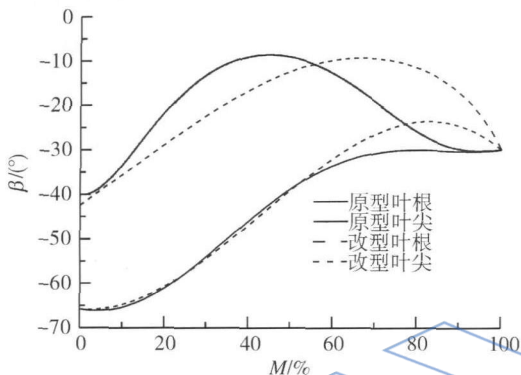


图 2 叶片角度分布

Fig.2 Blade angle distributions

2.3 叶片厚度分布

厚度分布主要影响到叶片的强度, 对气动性能的影响相对较小, 尤其是对于亚声速压气机. 对于跨声速压气机, 前缘要尽可能的薄, 以减小气流在前缘加速. 叶片前缘厚度(叶尖)通常取为 0.3~0.4 mm. 本设计的压气机使用环境相对较苛刻, 为了抵抗空气中颗粒灰尘等杂质, 叶片前缘厚度(叶尖)取为 0.8 mm, 见图 3.

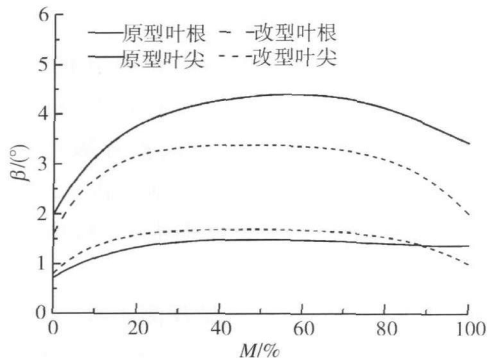


图 3 叶片厚度分布

Fig.3 Blade thickness distributions

2.4 强度校核

基于模型的循环对称性, 本计算采用一个扇区作为计算对象, 单元类型为 ANSYS 软件中常用有中节点的 solid95 单元, 共划分 25 376 单元, 42 222 节点. 边界条件为前端面轴向约束, 盘-轴装配面周向约束.

图 4 给出了叶轮的等效力分布. 最大等效力为 386 MPa, 位于轮盘中心(靠近尾缘). 叶轮的材料为锻铝合金 2618A, 其屈服强度 370 MPa, 强度极限 410 MPa. 虽然最大应力略微超过屈服强度, 但只是局部产生塑性变形, 因此满足强度设计要求.

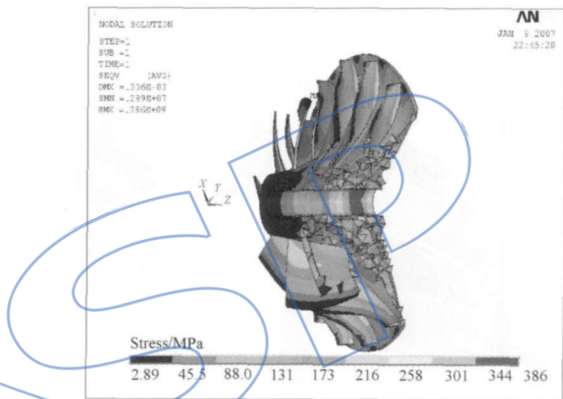


图 4 叶轮等效力分布

Fig.4 Stress of impeller

3 全三维粘性流动分析

前面分别介绍了本设计跨声速压气机的几何特征及其设计原则, 并分别给出了子午流道、叶片角度分布和叶片厚度分布. 压气机几何(如子午流道、叶片角度分布等)对性能的影响不是孤立的, 而是相互影响的; 对于跨声速压气机, 气动性能对几何更为敏感. 所以, 必须采用全三维 CFD 为设计分析工具, 对几何进行优化分析. 实际上, 在前面给出的压气机几何, 正是基于全三维 CFD 为核心分析工具, 优化设计的结果.

采用的控制方程为相对圆柱坐标系下三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程, 湍流模型为 Spalart-Allmaras 方程模型. 时间离散采用了 Jameson 四步 Runge-Kutta 法, 空间离散采取 Jameson 中心差分格式. 为了加速收敛, 采用了当地时间步、隐式残差平均和多重网格等加速措施. 对网格进行独立性分析后, 网格数取为 100 万.

边界条件取法为: 进口给定总温(298 K)、总压(100 kPa)、两个方向的进气角(均为 0°); 出口

边界在堵塞工况附近给定静压,在喘振工况附近给定流量;叶片表面、轮毂等固壁为无滑移、无穿透、绝热边界;转子通道的前后区域为周期性边界。

详细的设计优化过程在此不再赘述,只给出改型压气机最终的优化设计结果和原型结果的对比。图5给出了设计转速近堵塞工况点的等马赫数流场结构对比。从图中可以看出,改型压气机的激波强度大大削弱了,尤其是分流叶片前缘的激波基本上被消除了。图6给出了原型与改型的数值模拟结果对比。横坐标为实际流量与参考流量的比值(图7相同)。结果表明:改型压比提高10%~15%,效率提高2~3个百分点,失速边界基本上在同一条斜率线上。

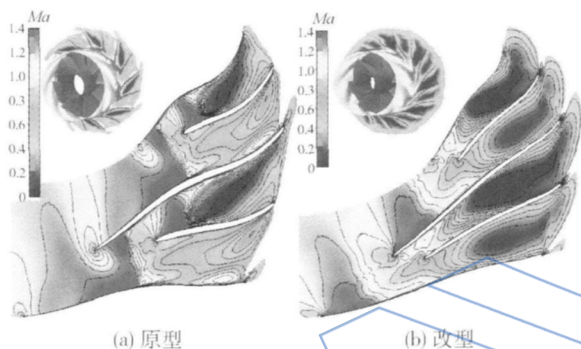


图5 原型和改型流场结构对比(马赫数)
Fig. 5 Comparison of Mach number distribution in prototype and new compressor

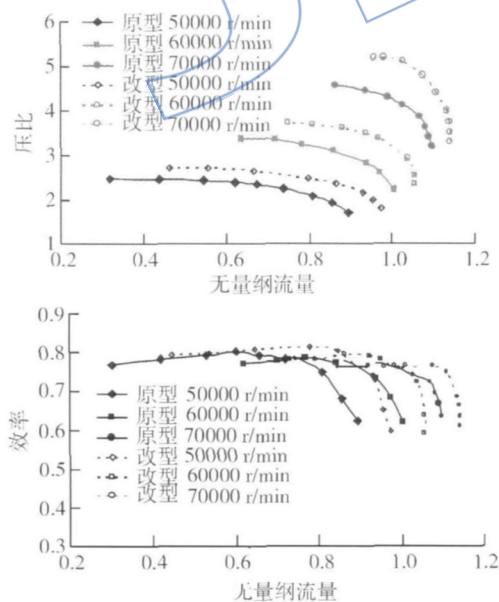


图6 原型和改型的性能对比(数值模拟结果)
Fig. 6 Simulation performance of prototype and new compressor

4 试验结果

性能试验在“柴油机高增压技术国防科技重点实验室”的全自动涡轮增压器试验台上进行。性能数据均处理为标准进气条件(进口总温 298 K, 进口总压 100 kPa)时的流量(即折合流量)和转速(即折合转速),以使其具有通用性。

图7给出了原型和改型的试验性能对比。从图中可以看出,改型压气机的压比提高了约10%~15%,最大压比为4.0;效率总体上提高了2~3个百分点,最大效率为80.6%;稳定工作范围基本相当,失速边界基本为同一条斜率线。但由于压比提高了,所以在压比4.0时稳定工作范围较窄,下一步研究需要解决跨声速设计的扩稳机理。

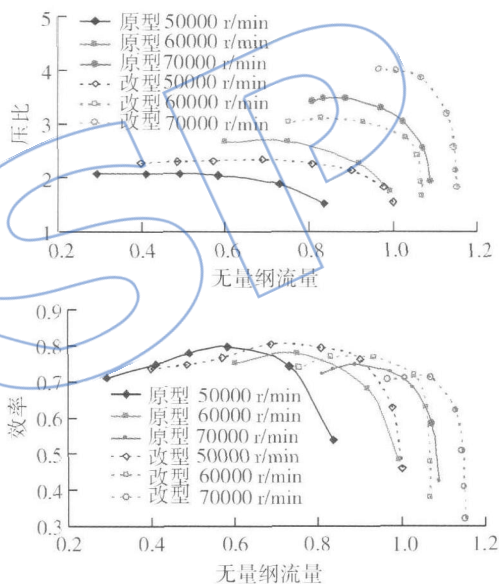


图7 原型和改型的性能对比(试验结果)
Fig. 7 Experimental performance of prototype and new compressor

通过图6与图7可进行数值模拟和试验结果对比,可以看出:

1) 数值模拟的压力比试验得到的压比高20%~30%,效率高2~3个百分点。其原因有:①数值模拟结果没有包括蜗壳(试验有蜗壳),所以蜗壳的压力和效率损失没有包括在内;②数值模拟没有包括叶轮轮背的摩擦损失;③数值模拟现有水平的限制。

2) 数值模拟对堵塞流量预测很准,对喘振边界预测也较准。这对于指定流量范围的预测设计非常重要。

3) 尽管数值模拟在压比和效率预测的绝对值上与试验结果存在差别,但预测趋势上是比较

准确的.也就是说,通过全三维数值模拟结果之间的相对比较,即建立数值模拟结果与试验结果之间的联系,进行优化设计,能够完成满足要求的设计任务.所以,全三维数值仿真是预测设计的主要手段和核心工具.

在完成性能试验的基础上,对改型压气机进行了配机试验.该发动机是某型大功率柴油机.采用改型压气机后,在额定功率下,油耗降低了 4.1 g/(kW·h),涡轮前进口温度下降了 35 K.

5 结 论

基于某型车用高压比涡轮增压器(压比 3.5),针对离心压气机高压比时出现跨声速流动现象的特点,采用全三维 CFD 分析为核心工具,对其离心压气机进行了改型设计.设计结果表明,压气机最大压比达到 4.0,最高效率为 80.6%,满

足设计要求.与某型发动机的配机试验结果表明,采用新设计的压气机增压后,在额定功率下,油耗降低 4.1 g/(kW·h),涡轮前进口温度下降了 35 K.

参考文献:

[1] Hiroataka H, Kiyoshi H, Kunio S,et al. Detailed flow study of Mach number 1.6 high transonic flow with a shock wave in a pressure ratio 11 centrifugal compressor impeller[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2004, 126(4): 473-481.

[2] Hunziker R, Jacoby P, Meier A. A new series off small turbochargers for high flow rates and high pressure ratios [J]. MTZ. Motortechnische Zeitschrift, 2002, 63(6): 10-13.

[3] Japikse D. Centrifugal compressor design and performance [M]. Vermont:Concepts E.T.H. Wilder, 1996.