DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.013

新型大倍率空气放大器性能影响因素的研究

董大腾,李小宁,孙中圣

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘 要:为了提高空气放大器的综合性能,设计一种环状多段射流缝隙的新型间隔射流式空气放大器。通过仿真与试验相结合的方法,研究单元数 n 与闭通比 P 对卷吸比、输出流量以及内部流动的影响规律。研究结果表明:随着 P 的增大,间隔射流式空气放大器的卷吸比增大,而输出流量逐渐减小;n 对卷吸比与输出流量影响不大,但较小的 n 会在扩散 混合区内引发边界层分离,影响流动的稳定性;当供气压力为 0.5 MPa 时,n=16、P=2 的间隔射流式空气放大器卷吸比 为 2.55,与环射式空气放大器相比,其输出流量略高,卷吸比提升了 5.8%。

关键词:空气放大器;间隔射流;卷吸比;结构

中图分类号:TH138 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2024)04-0071-05

Research on Influence Factors of New High-magnification Air Amplifier

DONG Dateng, LI Xiaoning, SUN Zhongsheng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China) **Abstract**: To improve the comprehensive performance of air amplifier, a novel spaced jet air amplifier with annular multisegment jet gap is designed. The influence law of the closed-to-open ratio P and the number of cells n on the entrainment ratio, output flow and internal flow is studied by combination of simulation and experiment. The research results show that with the increase of the closed-to-open ratio P, the entrainment ratio of the air amplifier increases, while the output flow gradually decreases. The number of cells n has little effect on the entrainment ratio and output flow, but smaller cell numbers will cause boundary layer separation in the diffusion mixing zone, affecting the stability of the flow. When air supply pressure is 0.5 MPa, the entrainment ratio is increased by 5.8% compared with the annular jet air amplifier.

Keywords: air amplifier; spaced jet slit; entrainment ratio; structure

0 引言

空气放大器是一种利用空压机产生的高压气 体为动力源来抽吸外界空气,最终从出气口输出 大流量气体的空气增效元件。由于其出色的节能 特性与极低的故障率,已逐渐应用于家用产品与 工业生产中^[1]。空气放大器在工业上主要应用于 零件冷却、车间通风与表面干燥等需要持续吹扫 的场合。在上述工作中,往往要求空气放大器能 稳定输出足够大的输出流量,然而目前高输出流 量空气放大器的卷吸比比较低。针对这一情况, 本文开展了相关研究,期望能设计一种新结构,在 不降低输出流量的前提下,提高其卷吸比。

虽然空气放大器已有较为广泛的工程实际应 用,但关于此类设备吹扫应用方面的文献仍较少。 目前国内外研究的主要对象是环射式空气放大 器,大多数的研究集中于抽吸与气力运输等领域, 如将空气放大器应用于除尘器以及收集粒子以便 于质谱分析等^[2]。提高性能的主要方法为调整射 流缝隙宽度、喉管直径和扩散管角与吸入口直径 等^[3],但效果都不太好。

本文在已有的环射式空气放大器的基础上, 提出一种间隔射流式空气放大器。利用 CFD 仿 真与试验相结合的方法,研究相关结构参数对卷 吸比及内部流场的影响,旨在提高空气放大器的 综合性能。

1 间隔射流式放大器的结构设计

1.1 性能参数及指标

空气放大器主要性能参数为供给流量、输出 流量和卷吸比。供给流量指正常工作时,空压机 通过供气口输入至空气放大器中的气体流量。供 给流量越大,说明空气放大器消耗的能量越高。 输出流量指从空气放大器出气口排出气体的流

第一作者简介:董大腾(1996—),男,浙江温州人,硕士研究生,研究方向为气动控制技术,dongdateng@njust.edu.cn。

量,表征空气放大器的吹扫能力,该值越大,说明 空气放大器吹扫能力越强。卷吸比为输出流量与 供给流量之比,该值越大,说明空气放大器工作效率 越高,节能效果越好。此外,空气放大器内部流动是 否稳定、速度分布是否均匀也是重要的性能指标。 不稳定的流场可能会导致空气放大器无法稳定工 作并产生巨大的气动噪声。

1.2 间隔射流式空气放大器总体结构

现有的环射式空气放大器结构如图 1 所示, 其关键结构参数主要为射流缝隙宽度 h,喉管直 径 d、吸入口直径 D、射流角 θ、扩散角 α。其工作 原理为:高压气体(也称初次流)通过射流缝隙射 入,将压力能转化为动能,并依靠附壁效应和两流 体间的黏性摩擦来卷吸流体(也称二次流),最终 一同从出口排出,以达到放大空气流量的目的。



图 1 环射式空气放大器的结构示意图

环射式空气放大器存在结构局限。在传统的 环射式空气放大器中,射流缝隙宽度 h 是由吸入 口端盖、主筒体和扩散管 3 个零件装配得到的参 数,不能直接由加工获得。因此在设计与加工中 需要进行复杂的尺寸链和公差计算来保证 h 的精 度,这不仅增加了加工难度,也不利于加工后对 h 的测量。现有的环射式空气放大器还存在性能局 限。以某环射式空气放大器为例(结构参数如 表 1所示),在 0.5 MPa 的供气压力下,其供给流量 为 270 L/min,输出流量为 920 L/min,卷吸比为 2.41。通过调节关键结构参数虽然能提高卷吸 比,但同时也会使输出流量降低,故其性能无法得 到真正提升。因此,为在不降低输出流量的前提 下提高其卷吸比,本文提出了一种将环形射流结 构改为间隔射流结构的思路。

表1 环射式空气放大器结构参数

h∕ mm	d∕ mm	D∕mm	<i>θ</i> ∕(°)	α∕(°)
0.05	12	27	30	3

间隔射流式空气放大器在环射式的基础上重 新设计了射流缝隙结构,如图2所示。与环射式 空气放大器相比,间隔射流式空气放大器在吸入 口前盖上增加了若干沿锥面等距分布的凸台 (图3)。间隔射流缝隙形成机理为:间隔射流式 空气放大器完成装配后,扩散管仅能与吸入口前 盖上的凸台接触并形成一条接触线,该位置处的 缝隙宽度为0(该区域不能通气);凸台以外的位 置则因未与扩散管接触而形成若干个射流缝隙 (该区域能通气)。从整体来看,前盖上的凸台将 原先的环形射流缝隙转变成了圆周上的多个间隔 射流缝隙,此时凸台的高度就等于射流缝隙宽度 h。



图 2 间隔射流式空气放大器总体结构示意图



图 3 吸入口前盖上的凸台示意图

这种设计除了将环形射流转换为多股射流以 增加初次流与二次流接触面积,从而加快能量交 换,有望突破环射式空气放大器的性能局限外,还 将射流缝隙宽度 h 由控制吸入口前盖、主筒体和 扩散管尺寸及公差改为控制斜面上的凸台高度。 这不仅简化设计,降低制造难度,还解决了环射式 空气放大器的结构局限。

1.3 关键结构参数定义

与环射式空气放大器类似,间隔射流式空气 放大器同样具有射流缝隙宽度 h、喉管直径 d、吸 入口直径 D、射流角 θ、扩散角 α(图 2)。除此之 外,其引入了两个新结构参数:单元数 n 与闭通比 P,如图 4 所示,具体定义如下。

1)单元数 n:相邻的凸台(闭气部分)与射流 缝隙(通气部分)构成的结构称为一个单元,其在 空气放大器上重复出现的次数称为单元数 n。从 结构上来看,一个单元实际代表一个出气口(射流 缝隙),因此单元数 n 等于间隔射流式空气放大器 的射流缝隙数。

2)闭通比*P*:闭气角 σ_e指单个凸台在圆周上 所占的角度,通气角 σ_a指单个射流缝隙在圆周上 所占的角度。闭通比 *P*等于闭气角 σ_e与通气角 σ_a 之比,其值表征一个单元内射流缝隙所占的比例。



2 关键结构参数对性能影响的仿真分析

2.1 数值计算模型及方法

空气放大器的工作不涉及外部流场,所以可 以取间隔射流式空气放大器的内流道作为计算 域。由于 h、d、D 等结构参数已在环射式空气放 大器中有过较多研究,故本文仅对单元数 n 与闭 通比 P 进行仿真分析。

固定结构参数如表 2 所示。在此基础上,先 对 n=4、6、8、10、12、14、16 的模型进行仿真,根据 性能确定较优的单元数,再对不同的闭通比(P= 0.3、0.5、1.0、1.5、2.0)进行仿真,最终确定一组性 能优于环射式空气放大器的结构参数。

农业 回足出刊多数						
h∕ mm	d∕ mm	D∕ mm	<i>θ</i> ∕(°)	α ∕(°)		
0.13	12	27	30	3		

表 2 固定结构参数

利用 SolidWorks 软件建立三维模型,为使出 入口的流动充分发展,适当延长了吸入口和出气 口的长度,将模型导入 Ansys Mesh 中划分网格。由 于初次流在射流缝隙处压力和速度变化剧烈,故需 要进行相应的加密,划分网格模型如图 5 所示。



图 5 间隔射流式空气放大器网格模型

仿真采用稳态计算,默认绝热,工况温度为 298 K,参考压力为一个标准大气压,工质为理想 气体,采用 *k*-ω SST 湍流模型计算,入(出)口边 界均采用压力入(出)口,工作压力为 0.5 MPa,壁 面绝对光滑。

2.2 单元数 n 对性能的影响

1) 单元数 n 对卷吸比及流量的影响规律

在 0.5 MPa 的工作压力下, P=0.3 的间隔射 流式空气放大器的卷吸比、输入流量与输出流量随 n 的变化情况如图 6 所示。由图可知,在 n=4~16 时,单元数 n 对供气、输出流量与卷吸比影响不大。



图 6 单元数 n 对卷吸比及流量的影响

2) 单元数 n 对内流场的影响规律

图 7 为不同单元数 n 下包含射流缝隙轴面上 的马赫数云图。由图可知,当 n=4 与 n=16 时,空 气放大器在喉部附近出现了初次流的二次加速现 象。这是由于初次流与二次流在喉部附近相互挤 压并形成斜激波,斜激波打在壁面上,使壁面与中 心二次流之间形成了一个喉道,初次流通过喉道 后在扩散混合区中继续膨胀加速,随后这些斜激 波在扩散混合区内不断反射,使初次流平均马赫 数和总压逐渐下降^[4]。此外,还注意到 n=4 时, 二次加速区域的面积更大,马赫数更高,且由于强 激波而在扩散混合区壁面上引发了边界层分离现 象(壁面附近的蓝色区域)(本刊黑白印刷,相关 疑问咨询作者)。



图 7 不同单元数下含射流缝隙轴面上的马赫数云图

图8显示了n=4、n=16时附壁混合区的流动 情况。在射流缝隙出口附近,单股初次流在圆周 上呈现出不同的长度。随着流动沿着附壁曲面进 行,从缝隙中射出的多股初次流开始膨胀扩散,并 与周围的二次流进行剧烈的能量与动量的交换。 与n=4相比,n=16时各股初次流的边界在流动 过程中出现了融合,这使得初次流与二次流能够 充分混合,内部速度分布也更加均匀。



图 8 不同单元数 n 下轴向法面上的马赫数云图

综上所述,不同单元数 n 的空气放大器虽然 在卷吸比与输出流量上没有太大区别,但是在内 部流动上存在较大差距。当单元数较小时,空气 放大器内部存在速度剧烈变化的区域,甚至在扩 散室内出现了边界层分离,这些现象不仅会破坏 流动的稳定性,还会辐射出较强的气动噪声。与 之相比,单元数 n=16 的空气放大器内部速度分 布更加均匀,流动更加稳定。因此,固定单元数 n=16并进行后续仿真研究。

2.3 闭通比 P 对性能的影响

1)闭通比 P 对卷吸比及流量的影响规律 当单元数 n = 16 时,不同闭通比下间隔射流 空气放大器的卷吸比和流量变化情况如图 9 所示。由图可知闭通比 P 对卷吸比有较大的影响。 当 P 处于 0.3~2.0 区间内时,卷吸比随着闭通比 的增大而增大,而供气流量与输出流量随着 P 的 增大而减小;当 P=2 时,供给流量为 250 L/min,输 出流量为 1 033 L/min,卷吸比达到最大值 3.13。





2)闭通比 P 对内流场的影响规律

图 10 为 P=0.3 与 P=2.0 时间隔射流式空气 放大器在轴面上马赫数云图,可知 P=0.3 与 P= 2.0 时流场都比较稳定。但与 P=0.3 相比,P=2.0 时未出现二次加速现象,并且喉部与出口处速度 分布更均匀。



图 10 不同闭通比 P 下含射流缝隙轴面上的马赫数云图

图 11 为 P=0.3 与 P=2.0 时轴向法面上的马 赫数云图。随着初次流向喉部流动,其横截面积 由于射流的扩散作用而逐渐增加。与 P=0.3 相 比,P=2.0 时初次流沿径向的扩散倾向更明显,且 与二次流混合更加均匀。





3 间隔射流式空气放大器的试验

3.1 试验平台的搭建

为测试间隔射流式空气放大器样机的实际工 作性能,搭建测试平台,其气动回路如图 12 所示。



1-空气压缩机;2-后冷却器;3-气罐;4-气源调节装置;
5-截止阀;6-减压阀;7-流量表1;8-压力表;
9-空气放大器;10-活接头;11-流量表2。
图 12 间隔射流式空气放大器流量测试气动回路图

3.2 关键结构参数影响规律的试验

1) 单元数 n 的试验结果

加工 n=4、8、16 的样件(P=0.3、h=0.13 mm、 d=12 mm、D=27 mm、 $\theta=30^{\circ}$ 、 $\alpha=3^{\circ}$),在 0.5 MPa 的压力下,测试试件性能。根据试验结果绘制性 能曲线并与仿真结果对比,如图 13 所示。由图可 知试验值虽低于仿真值,但总体变化趋势是相符 合的。



图 13 不同单元数 n 下仿真与试验对比图

2)闭通比*P*的试验结果

加工 P=0.3、0.5、1.0、1.5、2.0的样件(n=16、 h=0.13 mm、d=12 mm、D=27 mm、 $\theta=30^{\circ}$ 、 $\alpha=3^{\circ}$), 在 0.5 MPa 的压力下测试样件性能。根据试验结 果绘制性能曲线并与仿真结果对比,如图 14 所 示。由图可知试验所得规律与仿真符合较好。根 据试验结果可得,当 P 处于 $0.3 \sim 2.0$ 区间内时,随 着 P 的增大,空气放大器的输出流量逐渐减小,卷 吸比逐渐增大。当 P=2.0 时,间隔射流式空气放 大器的卷吸比可达到 2.55,比环射式空气放大器 提升5.8%,而此时其输出流量为923 L/min,略高 于环射式空气放大器(920 L/min)。



图 14 不同闭通比 P 下仿真与试验对比图

4 结语

本文提出了一种间隔射流式空气放大器,通过 仿真与试验相结合的方法研究了闭通比 P 与单元数 n 对性能以及内部流动的影响,得到了以下结论。

1)单元数 n 对卷吸比与供气、输出流量影响 较小,但对内部流场有较大的影响。n 较小时会 在扩散混合区内引发边界层分离现象,影响放大 器内部流场的稳定,因此应选择较大的 n。

2)闭通比 P 与卷吸比呈正相关。供气流量 与输出流量随着闭通比 P 的增加而减小。P 会影 响射流扩散,较小的 P 会使多股初次流出现碰撞 和边界融合现象。

3) 经试验测定,当供气压力为 0.5 MPa 时, n=16、P=2.0 的间隔射流式空气放大器输出流量 为 923 L/min,卷吸比为 2.55,与环射式空气放大 器相比,输出流量相当,而卷吸比提升了 5.8%。

参考文献:

- [1] LI A, ZENG Z, SHARMA A. Aeroacoustic analysis of an air amplifier [C]// AIAA SCITECH2022 Forum. San Diego, CA & Virtual: AIAA, 2022:1-10.
- [2] 胡安鹏. 空气放大器式除尘风机的研究与应用[D]. 西安:西安科技大学,2015.
- [3] LEE J M, JO Y S, KIM S M, et al. Effect of aspect ratios on the performance characteristics of air amplifier[C]// Proceedings of ASME/JSME/KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference, Seoul, South Korea: [s. n.], 2016.
- [4] 徐万武, 王振国. 环型超声速空气引射器零二次流流 场数值研究[J]. 推进技术, 2003, 24(1): 36-39.

收稿日期:2023-01-13