

DOI: 10.7652/xjtuxb201703001

对旋风机两级叶轮等功率第二级叶轮 变转速匹配研究

艾子健^{1,2}, 秦国良¹, 林静祥¹, 陈雪飞¹, 和文强¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 三明学院机电工程学院, 365004, 福建三明)

摘要: 为了改善对旋风机在非设计工况时的性能,提出了两级叶轮等功率、第二级叶轮变转速匹配运行方法,即在工况变化时,调整第二级叶轮的转速,使第二级叶轮功率始终与第一级叶轮功率相同。利用理论分析、数值模拟和实验研究的方法,分析了对旋风机在两级叶轮等转速运行和第二级叶轮变转速匹配运行时的特性。研究表明:等转速运行时,第二级叶轮压升与功率受流量变化影响剧烈,导致小流量工况时第二级电机过载烧毁及大流量工况时风机压升与效率迅速下降;第二级叶轮变转速匹配改善了第二级叶轮的功率、效率特性,使对旋风机的压升特性更加平稳,由此减小了小流量工况时第二级叶轮的负荷,增大了大流量工况时第二级叶轮的压升与效率,风机的高效工作范围由33.18%拓宽至37.88%,阻塞工况裕度由36.9%拓宽至48.2%。

关键词: 对旋风机;转速匹配;功率特性;高效工作范围;阻塞工况裕度

中图分类号: TH43 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)03-0001-06

Speed Matching for Second Impeller with Equal Power of Two-Stage Impellers of Counter-Rotating Fan

AI Zijian^{1,2}, QIN Guoliang¹, LIN Jingxiang¹, CHEN Xuefei¹, HE Wenqiang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Sanming University, Sanming, Fujian 365004, China)

Abstract: Speed matching for the second impeller with equal power of two impellers is proposed to improve the performances of counter-rotating fan under off-design conditions, where the speed of second impeller is adjusted until the power of second impeller gets equal to one of first impeller. The fan performances during constant speed operating and during the second impeller speed matching operating are presented and discussed by theoretical analysis, numerical simulation and experimental research. It is revealed that the pressure-rise and power of the second impeller are changed significantly with varying mass flow during constant speed operating, leading to overload of the second motor under low flow rates and rapidly lowering pressure-rise and efficiency of the second impeller under high flow rates. The speed matching of the second impeller operating improves power and efficiency characteristics of the second impeller. Thus, pressure-rise and power characteristics of the fan become flatter. The load of the second impeller under low flow rates is lowered, and the pressure-rise and efficiency of the second impeller under high flow rates are heightened. The efficient working range of the fan is widened from 33.18% to

收稿日期: 2016-07-13。 作者简介: 艾子健(1985—),男,博士生,讲师;秦国良(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2012CB026004);福建省教育厅科技 A 类项目(JA15471)。

网络出版时间: 2016-12-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161207.1601.002.html>

37.88%, and the blocking condition margin is widened from 36.9% to 48.2%.

Keywords: counter-rotating fan; speed matching; power characteristic; efficient working range; blocking condition margin

对旋风机拥有紧凑的结构和良好的性能,广泛应用于隧道、矿井、船舶、航空等领域^[1-2],吸引了学者们在其结构设计^[3-4]、叶栅内部流动特性^[5]及气动声学特性^[6]、性能优化^[7]等方面开展了大量的研究。在设计工况附近,对旋风机具有流量大、压升高、效率高等优点,两级叶轮的功率特性大致相同。偏离设计工况时,第一级叶轮和二级叶轮的功率性能差异极大,小流量工况时二级叶轮的负荷增大过快,电机易烧毁,大流量工况时风机的压升和效率下降过快,使得整机的高效工作范围变窄,工况适应能力变差^[8]。研究表明,通过改变两级叶轮的级间间隙、两级叶轮不等功设计,调整叶片安装角等,能够改善叶轮功率匹配的问题^[9-10]。也有研究利用数值方法证明了改变两级叶轮转速能够改变两级叶轮功率匹配和运行效率^[11],并通过实验在对旋风扇/压机上证明了不同转速匹配能够改变转子的失速特性、叶轮内部流动特性及两级负荷^[12-14]。倘若让对旋风机两级叶轮的转速匹配值始终随着工况变化而变化,有望获得与传统运行完全不同的性能特性。如何随着工况变化而合理地调节叶轮的转速,使两级叶轮工况匹配更加合理,整机更加安全、高效地运行值得深入研究。

本文通过理论、数值模拟和实验的方法分析了双旋风机两级叶轮的运行特性、变工况下两级叶轮性能不匹配及整机性能下降的原因,提出了两级叶轮等功率二级叶轮变转速匹配的运行方法,即在变工况时改变二级叶轮的转速,使二级叶轮的功率始终与一级叶轮的功率相等,同时分析了二级叶轮变转速匹配运行时对旋风机两级叶轮及整机的性能特性,验证了该变转速匹配方法能够提升二级叶轮电机的安全性能,提高大流量工况时的压升和效率,拓宽高效工作范围及阻塞工况裕度。

1 数值模拟与实验方法

对旋风机的基本参数:叶顶直径为 558 mm,轮毂比为 0.65,第一级叶片数为 12,第二级叶片数为 10,设计流量为 4.25 kg/s,设计压力为 2.8 kPa,两级电机型号相同,额定转速为 2 930 r/min,额定功率为 11 kW,额定效率为 0.82。

1.1 数值模拟方法

1.1.1 计算模型 图 1 为对旋风机的数值计算模型,分为入口区域、第一级叶轮区域、级间区域、第二级叶轮区域、出口区域。入口区域为一段充分长的圆筒形进气区域,出口处是锥形扩散筒;第一级和第二级叶轮区域均为旋转区域,二者的旋转方向相反;其余的为静止区域。

1.1.2 网格划分 取单通道流域进行网格划分,然后分别对各区域进行旋转复制,形成对旋风机整机数值计算网格。网格结构采用六面体结构,叶片壁面及前后缘进行了网格加密处理,如图 2 所示。图 3 为网格无关性验证。验证时共设置了 5 组网格进行监测计算,当整机网格数大于 6 296 992 时,出口全压变化小于 0.5%,故取该网格数进行后续的数值计算。

1.1.3 边界条件及计算设置 旋转区域和静止区域采用动静交界面连接,入口给定总温、总压边界,出口给定质量流量边界。定常流动计算时差分格式设定为高阶求解模式,湍流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型,物理时间尺度取 $1/\omega$ (ω 为旋转角速度),残差目标设定为 1×10^{-6} 。

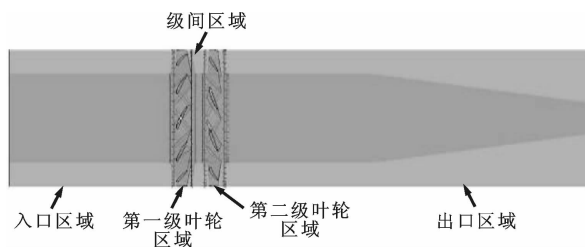


图 1 对旋风机数值计算模型

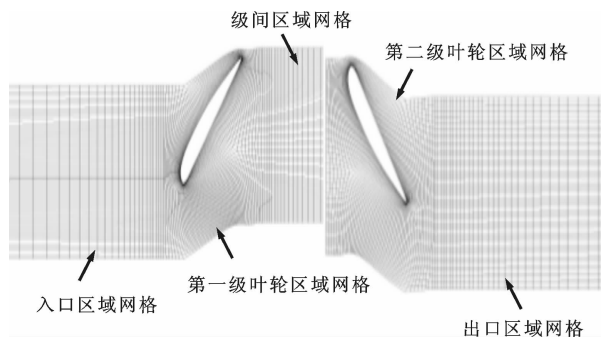


图 2 单通道流域网格

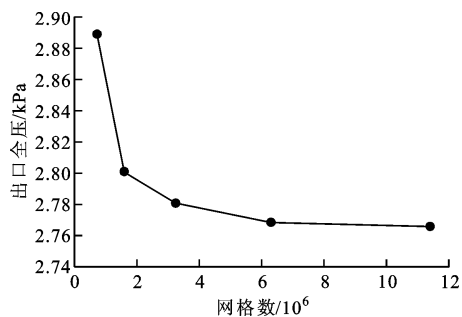


图 3 网格无关性验证

1.2 实验方法

依据中国国家标准 GB1236—2000 C 型(进口)试验方法建立本实验装置,如图 4 所示。实验中需测量进口集流器压差 Δp ,风机的进口静压 p_3 ,两级电机的输入功率 N_{d1} 、 N_{d2} 。实验装置中 $D_1 = D_2 = 560\text{ mm}$, $D_3 = 740\text{ mm}$, $D_4 = 542\text{ mm}$ (见图 4)。利用所测电机输入功率和图 5 中的电机效率曲线换算得出两级叶轮的轴功率。两级电机均与变频器相连,用于改变叶轮的转速,变频器额定功率为 11 kW,额定效率为 96%,当变频器负荷大于 50%时效率基本不变(效率减小幅度小于 2%),这样变频器效率的变化对实验结果不会产生本质性的影响。利用该实验装置测量对旋风机在两级叶轮等转速运行和变速匹配运行时的性能。

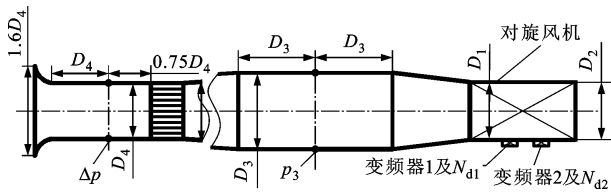


图 4 实验装置简图

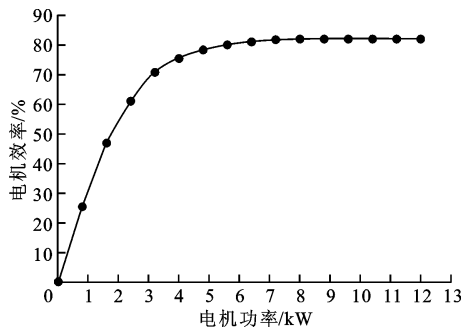


图 5 电机效率曲线

2 两级叶轮等转速运行

2.1 等转速运行性能分析及存在的问题

图 6 为两级叶轮均以额定转速运行时的性能曲线。由图可知:第一级叶轮的轴功率和效率受流量

影响不大,在整个工况范围内保持较平稳的满负荷、高效工作状态;第二级叶轮的轴功率和效率受流量影响很大,小流量工况(下文简称小流量)时轴功率增速较大,严重时会引起电机过载、烧毁的现象,而大流量工况(下文简称大流量)时效率和轴功率迅速降低,甚至出现压升、效率为负的现象,从而导致整机压升和效率迅速降低。因此,第二级叶轮在偏离设计工况时的性能下降原因是两级叶轮功率特性不匹配、对旋风机高效工作范围受限、第二级电机过载。

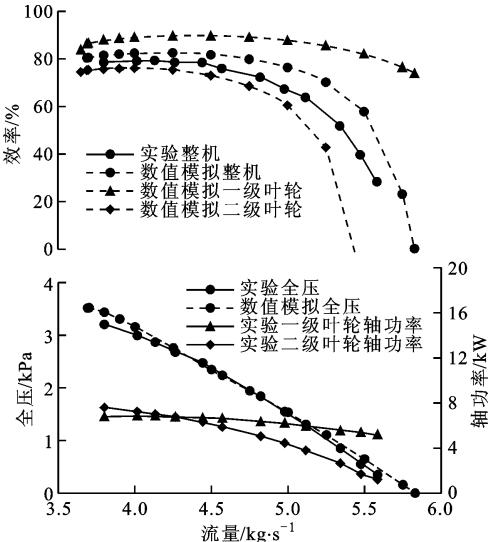


图 6 两级叶轮等转速运行性能曲线

2.2 速度三角形理论分析

对于对旋风机进、出口无导叶,假定设计工况为轴向进气、轴向出气,据此建立两级叶轮的气流速度三角形如图 7 所示。对于第一级叶轮, u_1 为均径圆周速度, c_{11} 、 c_{12} 分别为进、出口气流绝对速度, w_{11} 、 w_{12} 分别为进、出口气流相对速度, β_{11} 、 β_{12} 分别为进、出口气流相对速度气流角, Δc_{1u} 为扭速。以上所有参数符号的第一脚标 1 换成 2 即为第二级叶轮相对应的参数。

由图 7a 可知,小流量时两级叶轮的扭速(负荷)增大(Δc_{1u} 变为 $\Delta c'_{1u}$, Δc_{2u} 变为 $\Delta c'_{2u}$,上标“'”表示等转速运行非设计工况参数),而二级叶轮的扭速增幅更大,从而导致第二级叶轮负荷大幅提高,甚至过载。由图 7b 可知,大流量时两级叶轮的扭速(负荷)减小,而二级叶轮的扭速降幅更大,从而导致了第二级叶轮的压升能力大幅下降,出现“大马拉小车”的现象。倘若工况变化时适当调整第二级叶轮转速(u_2),小流量时使之减小,大流量时使之增大,能够改变二级叶轮的扭速($\Delta c'_{1u}$ 变为 $\Delta c''_{2u}$,上标“''”表示变速运行非设计工况参数),这样小流量时二级叶

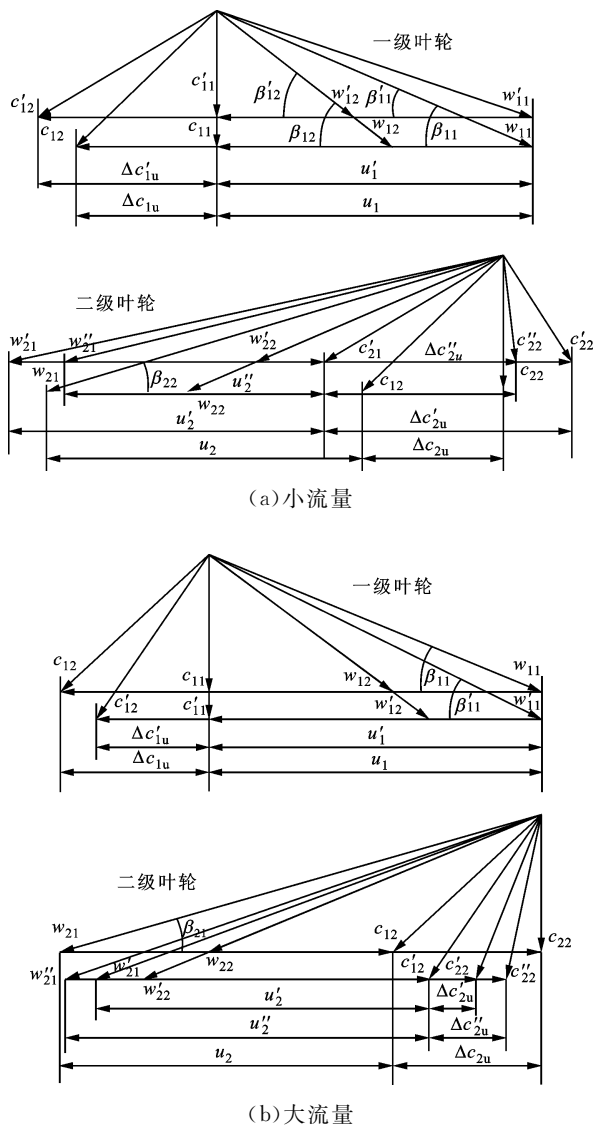


图7 对旋风机速度三角形示意图

轮的扭速降低,大流量时二级叶轮的扭速提高,从而有效避免了等转速运行时第二级叶轮性能下降。

鉴于第一级叶轮的功率和效率特性较为平稳,提出两级叶轮等功率、第二级叶轮变转速匹配的运行方法,即在变工况时,以第一级叶轮功率为基准,调整第二级叶轮的转速,使第二级叶轮的功率始终与第一级叶轮的功率相同。

3 第二级叶轮变转速匹配运行性能

3.1 第二级叶轮变转速匹配运行的性能曲线

工况变化时,通过改变第二级叶轮的转速使第二级叶轮的功率始终与第一级叶轮的功率保持相等,可以使对旋风机获得不同的性能特性。图8为变转速运行时由计算流体动力学(CFD)模拟所得的两级叶轮的转速随流量变化的规律。由图可知,第

一级叶轮转速始终保持不变,第二级叶轮在小流量时低于设计转速,在大流量时高于设计转速。图9为第二级叶轮变转速匹配运行和等转速运行的整机性能曲线对比。图中数值模拟及实验结果表明:采用第二级叶轮变转速匹配后,对旋风机的全压在小流量时有所降低,在大流量时得到明显提升,整机压升曲线变得更为平缓;整机效率在小流量及设计流量附近基本不变,但在大流量得到显著提高。

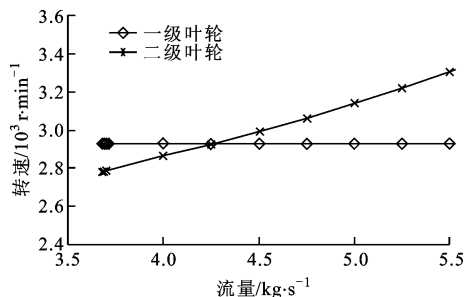


图8 变转速匹配运行时两级叶轮转速变化

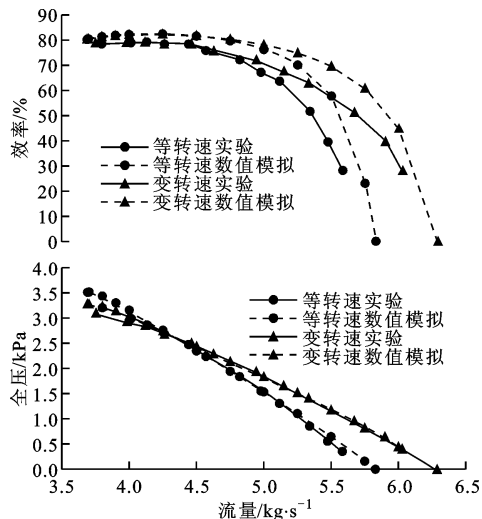


图9 对旋风机整机性能曲线对比

大流量时效率和压升的提高能够拓宽对旋风机定义的高效工作区域,即运行效率大于等于设计效率90%的流量区域,此时对旋风机的高效工作范围为

$$\frac{q_{\geq 90\% \eta_{des}}}{q_{des}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $q_{\geq 90\% \eta_{des}}$ 为高效工作流量,kg/s; q_{des} 为设计流量,kg/s。

依据数值模拟计算得出,采用第二级叶轮变转速匹配后对旋风机的高效工作范围由33.18%拓宽至37.88%。

定义对旋风机的阻塞工况裕度为

$$\frac{q_{blo} - q_{des}}{q_{des}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: q_{blo} 为阻塞工况流量,kg/s。

依据数值模拟计算得出,采用第二级叶轮变转速匹配后对旋风机的阻塞工况裕度由 36.9% 拓宽至 48.2%。阻塞工况裕度得以提高的原因是,采用第二级叶轮变转速匹配后,第二级叶轮在大流量时气流的做功能力及通流能力增大,从而提高了整机的压升能力和通流能力,使对旋风机阻塞工况点向右移动,阻塞工况流量增大,阻塞裕度增大。

图 10 为数值模拟得出的等转速运行及第二级叶轮变转速匹配运行时第二级叶轮的性能曲线对比。由图可知:采用第二级叶轮变转速匹配减小了小流量时第二级叶轮的压升(负荷),避免了过载风险,增加了大流量时第二级叶轮的压升和效率,使得第二级叶轮的性能更加平稳、高效。第二级叶轮性能的改善使整机的高效工作范围和阻塞工况裕度得以拓宽,由此改善了整机运行的安全性能。

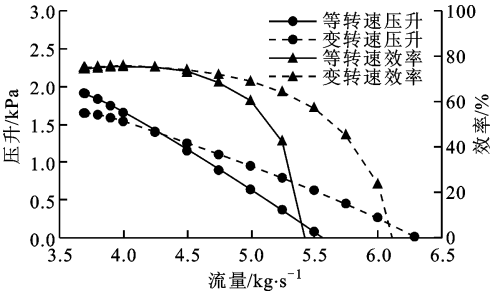


图 10 2 种转速下第二级叶轮性能曲线对比

3.2 二级叶轮变转速匹配运行时内流特性分析

图 11 为小流量(87% q_{des})时第二级叶轮叶片表面静压分布云图对比,叶片压力面与吸力面的静压差体现了叶轮负荷的大小。由图可知,小流量时采用第二级叶轮变转速匹配后,二级叶片压力面的静压明显降低,吸力面静压有所提升,即第二级叶轮的负荷降低,负荷过载的风险降低。

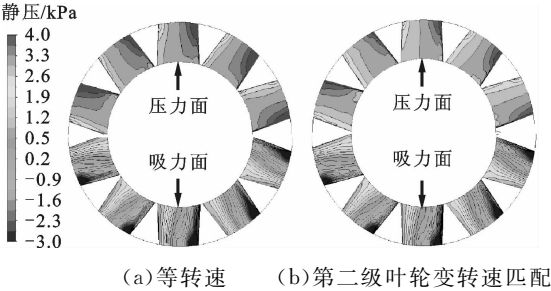


图 11 87% q_{des} 工况时第二级叶片表面静压分布

图 12 为大流量(130% q_{des})时沿旋转轴方向的截面平均静压与效率曲线。图 13 为大流量(130% q_{des})时第二级叶轮叶片表面静压分布云图。由图

12、13 可知:大流量、等转速运行时第二级叶轮产生的静压升很小,压升能力差,效率下降明显;第二级叶轮变转速匹配运行时入口段、一级叶轮和级间区域的流动性能基本不变,但第二级叶轮产生的静压升大幅提高,使得第二级叶轮区域及出口段的流动效率提高了 10% 左右,既提高了风机的做功能力,又提高了运行效率。

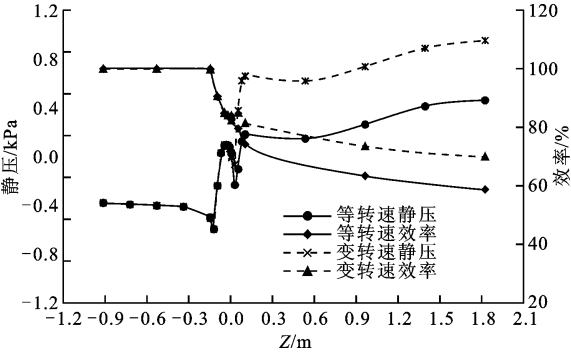
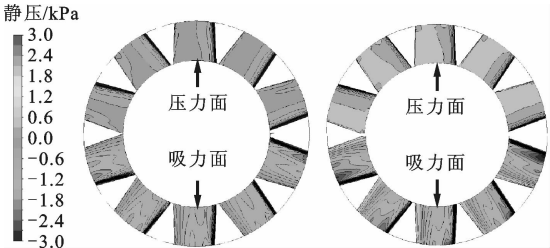


图 12 130% q_{des} 工况时静压和效率沿轴向的分布



(a)等转速 (b)第二级叶轮变转速匹配

图 13 130% q_{des} 工况时第二级叶轮叶片表面静压分布

4 结 论

(1)利用数值模拟和实验的方法分析了对旋风机在两级叶轮等转速运行时的特性。等转速运行时第一级叶轮的功率和效率随工况变化不大,始终保持高效、平稳的状态。第二级叶轮在小流量时的负荷迅速提高,在大流量时的压升和效率迅速下降。第二级叶轮的性能随工况变化剧烈,这是导致对旋风机出现第二级电机过载烧毁、高效工作范围和阻塞工况裕度受限的根本原因。

(2)利用速度三角形方法证明了通过减小小流量时的第二级叶轮转速能够降低第二级叶轮的负荷,通过增大大流量时第二级叶轮转速能够提高第二级叶轮的压升。由此,提出了两级叶轮等功率、第二级叶轮变转速匹配的运行方法,即在工况变化时以第一级叶轮为基准,调整第二级叶轮的转速,使第二级叶轮功率始终与第一级叶轮功率相同。

(3)利用数值模拟和实验的方法分析了对旋风

机在两级叶轮等功率、第二级叶轮变转速匹配时的特性。结果表明:第二级叶轮变转速匹配对第一级叶轮的功率、效率特性影响不大,但改变了第二级叶轮的功率、效率特性;第二级叶轮变转速匹配减小了小流量时第二级叶轮的负荷,避免了第二级电机负荷过载而烧毁的风险,增大了大流量时第二级叶轮的压升与效率,使得整机的高效工作范围由33.18%拓宽至37.88%,阻塞工况裕度由36.9%拓宽至48.2%。第二级叶轮变转速匹配能使对旋风机的压升特性更加平稳,这不仅提高了整机的安全性和运行效率,还拓宽了应用范围。

参考文献:

- [1] WEN J, HE H. Numerical simulation and performance analysis of a mining counter-rotating fan [C]// IEEE International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1027-1030.
- [2] MINATO R, OTA T, FUKUTOMI K, et al. Development of counter rotating axial fan turbojet engine for supersonic unmanned plane: AIAA 2007-5023 [R]. Reston, VA, USA: AIAA, 2007.
- [3] JACK L, ALAN H, ALI A, et al. Design and test of an aspirated counter-rotating fan [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2008, 130(2): 020004.
- [4] NOURI H, RAVELET F, BAKIR F, et al. Design and experimental validation of a ducted counter-rotating axial-flow fans system [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(10): 104504.
- [5] YANG Xiaohu, SHAN Peng. Design of two counter-rotating fan types and CFD investigation of their aerodynamic characteristics [C]// ASME Turbo Expo 2011. New York, USA: ASME, 2011: 89-99.
- [6] SHARMA P B, PUNDHIR D S, CHAUDHRY K K. A study of aeroacoustic performance of a contra-rotating axial flow compressor stage [J]. Defence Science Journal, 2013, 41(2): 165-180.
- [7] JOLY M, VERSTRAETE T, PANIAGUA G. Full design of a highly loaded and compact contra-rotating fan using multidisciplinary evolutionary optimization [C]// ASME Turbo Expo 2013. New York, USA: ASME, 2013: V06BT43A009.
- [8] 陈燎原, 潘地林, 黄家友. 对旋式风机Ⅱ级动叶理论特性的研究 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(5): 55-58.
CHEN Liaoyuan, PAN Dilin, HUANG Jiayou. Study

on theoretical characteristics of two stage traveling vane in counter rotating fan [J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(5): 55-58.

- [9] 王军, 肖朋. 两级对转叶轮性能匹配的数值研究 [J]. 流体机械, 2007, 35(2): 18-21.
WANG Jun, XIAO Peng. Numerical investigation of the match of two stage for counter-rotating axial fan [J]. Fluid Machinery, 2007, 35(2): 18-21.
- [10] 刘红蕊, 耿少娟, 聂超群, 等. 对旋式轴流风机变环量流型的改进设计 [J]. 风机技术, 2011(3): 34-38.
LIU Hongrui, GENG Shaojuan, NIE Chaoqun, et al. The improved design of a contra-rotating axial flow fan with variable circulation flow pattern [J]. Compressor Blower & Fan Technology, 2011(3): 34-38.
- [11] 刘红蕊, 耿少娟, 方杭安, 等. 对旋式轴流风机变转速匹配性能研究 [J]. 机械设计与制造, 2012(3): 116-118.
LIU Hongrui, GENG Shaojuan, FANG Hang'an, et al. Numerical study on matching performance of contra-rotating axial flow fan under variable speed [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(3): 116-118.
- [12] 王卓奇, 陆利蓬, 袁巍, 等. 对旋风扇不同转速匹配对失速关键级影响实验 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(6): 797-802.
WANG Zhuoqi, LU Lipeng, YUAN Wei, et al. Experimental investigation on critical stall stage of counter-rotating fan at different speed ratio [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(6): 797-802.
- [13] 侯为民, 刘波, 赵旭民, 等. 对转压气机转子间不同转差下非定常流动的 PIV 测量 [J]. 航空工程进展, 2011, 2(2): 220-225.
HOU Weimin, LIU Bo, ZHAO Xumin, et al. PIV investigation of the internal flow between two rotors in a dual-stage counter-rotating compressor under rotating-speed differences [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(2): 220-225.
- [14] 刘波, 杨艳, 王掩刚, 等. 设计压比和转速变化对对转压气机性能的影响研究 [J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(4): 576-580.
LIU Bo, YANG Yan, WANG Yangang, et al. Investigation of influence of rotational speed and pressure ratio on performance of two-stage counter-rotating compressor [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(4): 576-580.

(编辑 苗凌)