

文章编号:1006-1355(2017)01-0178-05

# 不同工况下离心风机振动变化规律试验研究

马振来, 李国平, 陈长盛, 王 强

(上海船舶设备研究所, 上海 200031)

**摘要:**针对船用离心风机存在多工况运行特点,为研究工况变化对船用离心风机振动的影响,以某型离心风机为研究对象,搭建满足其工况变化及振动测试要求的试验台架。首先对离心风机主要激励特性的产生机理及对应的特征频率进行分析,然后从试验角度分析工况变化对离心风机振动影响的规律。从分析结果可以看出,风机振动实测值总体变化趋势与经验公式计算值趋势基本一致,验证了转速-振动、流量-振动关系经验公式;流量变化对离心风机振动、噪声影响比较明显,对叶频的影响最为突出;离心风机存在一个振动最佳运行工况,在此工况下风机振动、噪声均为最佳状态。在风机设计过程中,应当考虑将设计工况选择在此振动最佳工况附近,对船用风机设计有一定的参考价值。

**关键词:**振动与波;离心风机;激励特性;转速;流量

**中图分类号:**O422.6

**文献标识码:**A

**DOI编码:**10.3969/j.issn.1006-1355.2017.01.038

## Experimental Study on the Vibration Variation Law of Centrifugal Fans in Variable Operation Conditions

MA Zhen-lai, LI Guo-ping, CHEN Chang-sheng, WANG Qiang

(Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China)

**Abstract:** Influence of change of working conditions on the vibration characteristics of marine centrifugal fans is studied. With a centrifugal fan of a certain type as the object, a test bench which satisfies its working condition change and vibration measurement requirements is established. Firstly, the mechanism of the main excitation generation of the centrifugal fan and its characteristic frequency are analyzed. Then, the law of influence of the working condition change on the vibration characteristics is studied experimentally. It can be seen from the results of the analysis that the general variation tendencies of the measured fan's vibration values and the calculated values according to the empirical formulas are basically consistent. Thus, the relation formulas between the rotating speed and vibration characteristics and between the flow rate and the vibration characteristics are verified. It is noticeable that vibration and noise of the centrifugal fan are significantly affected by the flow-rate changing; especially its influence on the blade frequency is very large. The centrifugal fan has a best operation condition in which the fan's vibration and noise are the best. In the design process of the fan, the design working condition should be chosen near the best working condition. This work has some reference value for the design of marine fans.

**Key words:** vibration and wave; centrifugal fan; excitation character; rotating speed; flow rate

船用离心风机是一种将原动机的机械能转化为被输送气体压力能和动能的流体机械。降低其振动、噪声不仅有利于减小船体结构传递振动,降低船体水下辐射噪声,更重要的是改善了船员的工作环境和生活环境。而船用离心风机存在多工况运行特点,在风机设计及选型时就要明确其在偏离设计工

况运行时振动、噪声的变化情况,因此研究风机工况变化对振动影响的规律显得尤为重要。

风机给定转速下的流量、全压和效率所确定的工况,是风机的重要特性。但是船用离心风机实际使用过程中,流量可能需要发生变化,当工况变化时,会导致气流在蜗壳流道及其宽度方向的均匀性发生变化。如果风机在非工作工况下运行,由于旋转叶轮出口的非均匀气流和蜗壳之间存在强烈的非定常干涉,将导致蜗壳壁面、特别是蜗舌区域成为离心风机的主要噪声源区<sup>[1-3]</sup>,而作用在其上的非定常

收稿日期:2016-10-17

**作者简介:**马振来(1992—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,研究方向为振动与噪声控制。

E-mail: mazhenl@163.com

力是产生离心风机离散噪声的主要原因<sup>[2]</sup>,因此内部压力脉动会发生强烈的振荡,流体激励蜗壳等部件在叶片频率及其谐波处出现振动、噪声,使得风机振动变大。

风机工况变化对其性能及振动影响方面,有学者已经开展了相关研究。文献[4]通过CFD仿真方法研究离心风机不同工况下内部流场的三维数值变化,发现了叶轮入口正预旋受到蜗壳结构影响和不均匀性,小流量情况下空气流动受蜗舌影响显著。文献[5]以对旋风机为模型,使用Fluent软件对模型风机内部流场进行数值模拟,探讨偏离设计转速时对旋风机性能及其内流规律的变化。文献[6]从试验和数值仿真两个方面对对旋轴流风机在非工作工况下的风机内部流场及气动噪声特性变化进行研究,得出风机在小流量工况下会发生宽频范围的振动,即由不稳定气动引起的多种成分的谐振,最后出现旋转失速、气流激振现象,气动噪声呈现以涡流噪声为主的宽频特性。

本文以某型离心风机为研究对象,针对船用离心风机多工况运行特性,搭建满足其工况变化及振动测试要求的试验台架,首先对离心风机的主要激励特性产生的机理及对应的特征频率进行分析,然后从试验角度出发,通过调整离心风机流量、压力、转速等参数,测试各个性能参数下的风机振动及噪声,研究离心风机工况变化对振动影响规律。

## 1 离心风机主要激励频率分析

本文试验搭建的离心风机振动解耦试验台架如图1所示。

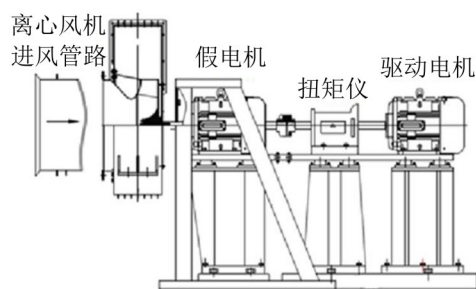


图1 离心风机试验台架

主要由进气管、离心风机、风机支座、假电机、扭矩仪、驱动电机等组成,其中蜗壳由支座单独支撑,使叶轮-轴-电机模块与蜗壳物理分析,假电机不通电分离电机电磁激励,仅作为轴承支撑,由此将不同测点振动特征频率有效分离。通过本试验台可完成离心风机空气动力性能试验,测试风机流量从小到大包括额定工况点在内的多个工况点的功率、效率、

流量、全压等数据,同时可完成离心风机的机脚振动、空气噪声等测试。图2为测得离心风机相关位置的振动加速度频谱。

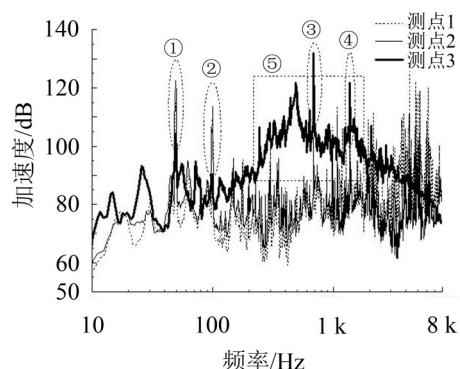


图2 离心风机振动加速度频谱

图2中测点1为电机机脚、测点2为假电机机脚,测点3为蜗壳蜗舌处,离心风机在一定工况下运转时,其产生的主要激励频率有轴频:①及其谐频率②叶轮旋转频率③及其谐频率④涡流频率⑤电机电磁频率等,驱动电机引起的高频段电磁频率不在本文讨论范围之内。可以看出由于试验装置振动解耦,蜗壳蜗舌处的频谱存在明显的宽频涡流激励。

轴频及其谐频率主要由风机转子不平衡及不对中引起,式(1)为计算公式

$$f_n = \frac{n}{60} i \text{ (Hz)} \quad (1)$$

式中  $n$  为转速,单位为  $\text{r/min}$ ;  $i$ ——1, 2, 3……谐波序号。

叶轮旋转频率及其谐频率是由于旋转的叶片周期性打击空气质点,引起空气压力脉动而产生的,式(2)为计算公式<sup>[7]</sup>

$$f_z = \frac{nz}{60} i \text{ (Hz)} \quad (2)$$

式中  $n$  为转速,单位  $\text{r/min}$ ;  $z$  为风机叶轮叶片数;  $i$ ——1, 2, 3……谐波序号。

涡流频率是由于气流流经风机叶片时,产生紊流附面及旋涡与旋涡分裂脱体,而引起叶片上压力的脉动所造成的,式(3)为计算公式<sup>[8]</sup>。由于涡流频率与相对速度有关,而相对速度是从叶片圆心到最大圆周连续变化,所以涡流频率是一种宽频带的连续谱。

$$f_i = S_r \frac{w}{L} i \text{ (Hz)} \quad (3)$$

式中  $S_r$  为斯特劳哈尔系数,取值区间为0.14~0.2,一般取0.185;  $w$  为气流与叶片的相对速度,  $\text{m/s}$ ;  $L$  为叶片正表面的宽度在垂直于速度平面的投影,  $\text{m}$ ;  $i$ ——1, 2, 3……谐波序号。

## 2 转速变化对离心风机振动影响

对于离心风机在某些工况下出现的振动过大的现象,比如升速加载过程等,均是由于风机运转时其旋转部件引起的振动噪声所表现出的特征和转子的转速密切相关,因此通过对离心风机进行变转速试验,分析不同转速下风机的振动,确定转速变化对离心风机振动的影响。

根据俄罗斯克雷诺夫研究院提供的经验公式,离心风机转速与加速度有如下关系

$$\Delta L_n = 10 \lg \left( \frac{n}{n_0} \right)^\gamma \quad (4)$$

式中  $\Delta L_n$  为  $n$  与  $n_0$  在蜗壳处振动加速度的差值,  $n_0$  为设计转速;  $n$  为工作转速;  $\gamma$  为修正系数。上式中的  $\gamma$  系数对于不同的频率范围是变化的。在由机械和流体动力不稳定所引起振动的  $f=10 \text{ Hz} \sim 315 \text{ Hz}$  范围内,  $\gamma=4$ 。在由流体动力源引起振动的  $f=315 \text{ Hz} \sim 8\,000 \text{ Hz}$  范围内,  $\gamma=6$ 。

试验测点图如图3所示,分别选取低频段(10 Hz~315 Hz)、中高频段(315 Hz~8 000 Hz)的试验值和公式计算值进行比较,验证经验公式的有效性,若有差别,寻找适合国内制造工艺水平的估算系数。

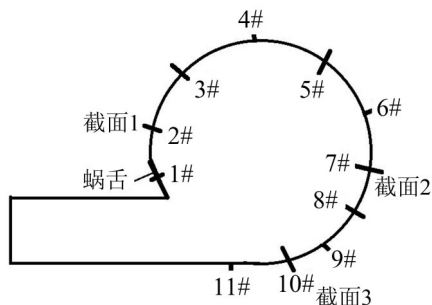


图3 风机1/2蜗壳宽度处振动加速度测点图

从图4、图5中可看出,风机振动实测值总体变化趋势与理论计算值趋势基本一致,误差小于1.3 dB,只有低频段在900 r/min~1 900 r/min时实测值与理论计算值有一定差别,这是由于在此转速区间风机系统存在较低的固有频率造成一定共振引起的,承载系统耦合频率仿真计算结果如表1所示,在19.8 Hz附近会因共振而导致振动增大,与图4的曲线规律相符。

表1 承载系统耦合频率计算 Hz

阶数	固有频率
1	12.9
2	13.4
3	19.8
4	28

## 3 性能变化对离心风机振动影响

船用离心风机性能都是按额定值设计的,涉及额定流量、全压和功率,这些数值与效率相对应。本文通过节流器来调整流量、全压、效率、功率等性能参数,然后测试风机的振动、空气噪声等数据,研究性能变化对离心风机振动的影响规律。

离心风机性能对振动影响研究分为两个层次:

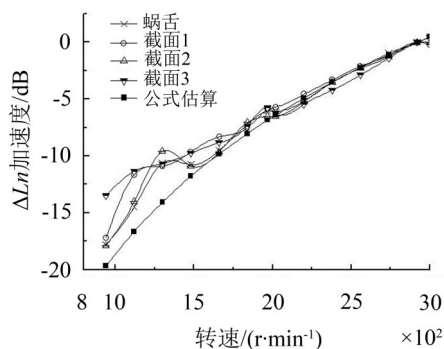


图4 低频段振动加速度实测值与计算值对比图

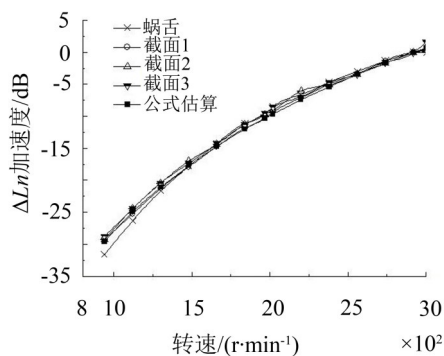


图5 中高频段振动加速度实测值与计算值对比图

(1) 离心风机性能对其振动、空气噪声的总值影响研究;

(2) 离心风机性能对其振动、空气噪声的叶频影响研究。

测试按照 GJB4058-2000《舰船设备噪声、振动测量方法》进行,计算不同振动、噪声测点的加速度(10 Hz~8 kHz)、A 声压级(10 Hz~20 kHz)的 RMS 总值并按相应公式计算平均值。图6和图7所示为离心风机全性能参数变化及离心风机振动和空气噪声总值随流量变化曲线,横坐标将流量做归一化处理,为实际流量与额定流量之比。

从图6和图7可以看出:

(1) 全压随着流量的增加而减小,功率随着流量的增加而增加;

(2) 效率在  $0.75 Q_0 \sim 1.15 Q_0$  之间变化不大,在小于  $0.75 Q_0$  和大于  $1.15 Q_0$  后逐渐减小;

(3) 在  $Q_0$  附近,风机性能和振动、噪声均为最佳状态;

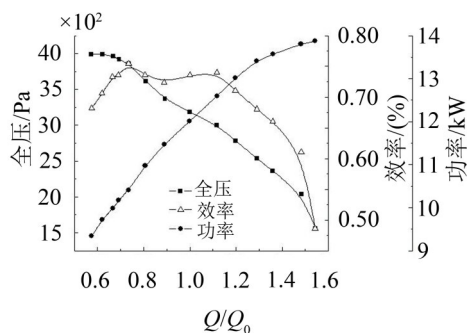


图6 离心风机全性能参数变化曲线

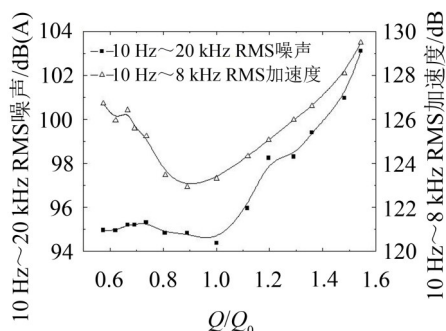


图7 离心风机振动噪声总值随性能变化曲线

(4) 在  $Q_0$  以上随着流量增大,振动和噪声增大幅度相近,每增加0.1振动增加1 dB左右,噪声增加1.5 dB左右;

(5) 在  $Q_0$  以下随着流量减小,振动增大的幅度很大,噪声增大幅度很小;

图8所示为离心风机叶频处振动和空气噪声值随流量变化曲线。

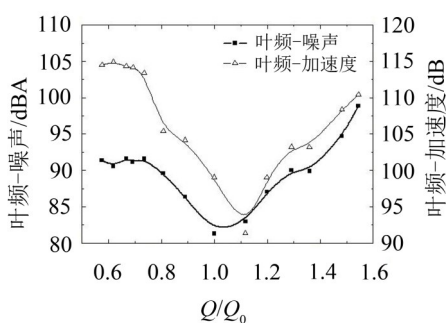


图8 离心风机叶频处振动噪声值随性能变化曲线

从图8中可以看出:

(1) 在  $Q_0$  以上随着流量增大,叶频处振动和噪声增大幅度相近;

(2) 在  $Q_0$  以下随着流量减小,振动增大的幅度很大,噪声增大幅度很小;

(3) 流量对叶频影响大于对总值影响幅度,这是因为在偏离设计工况情况下运行时离心风机内的气流流动要比设计工况下大为恶化,在特征频率叶频处表现得最为突出。

由图6—图8可以看出,离心风机存在一个最佳

运行工况,在  $Q_0$  流量附近,在此工况下风机振动、噪声均为最佳状态,效率、全压和功率也处于综合的最优状态。

根据经验公式,离心风机流量与加速度变化有如下关系

$$\Delta L_Q = 10 \lg \left[ 1 + \left| \frac{\Delta Q}{Q_0} \right|^\delta \right] \quad (5)$$

式中  $\Delta L_Q$  为在蜗壳处实际运行与  $Q_0$  下运行时振动加速度的差值,  $Q_0$  为风机额定工况流量;  $\Delta Q$  为风机实际运行流量与额定工况流量差;当风机实际运行流量比额定工况  $Q_0$  小时,  $\delta = 0.8 \sim 1.5$ ;当风机实际运行流量比额定工况  $Q_0$  大时,  $\delta = 2.2 \sim 3$ 。

选取风机全频段的振动加速度试验总值和公式计算值进行比较验证,如图9所示。从图中可看出,风机振动实测值总体变化趋势与理论计算值趋势基本一致,并且得到的规律与图7相符。

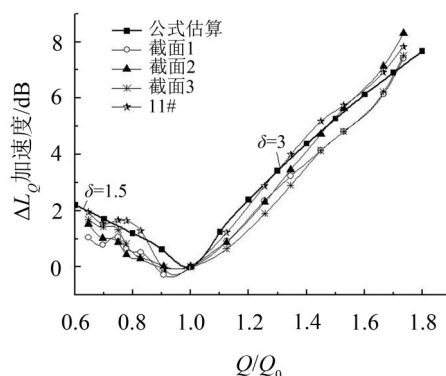


图9 风机全频段振动加速度实测值与公式计算值对比

## 4 结 语

通过搭建离心风机试验台架,从试验角度出发,对离心风机不同运行工况进行振动试验,并对结果进行分析,研究离心风机工况变化对振动影响规律,得出一些有益的结论:

(1) 风机振动加速度、空气噪声的实测值随转速、流量变化的总体趋势与理论计算值趋势基本一致,说明转速和流量变化与振动关系的经验公式有一定的参考价值。

(2) 离心风机存在一个最佳运行工况,在  $Q_0$  流量附近,在此工况下风机振动、噪声均为最佳状态,效率、全压和功率也处于综合的最优状态。随着风机实际工况偏离此最佳运行工况,风机振动、噪声均出现不同程度的增大,因此在风机设计时,应该考虑将设计工况选择在此最佳工况左右,更利于降低其振动、噪声。

(3) 离心风机在最佳运行工况下,风机内的压力场和气流流动都比较均匀;但在偏离最佳运行工况

情况下风机内的气流流动要比最佳运行工况下大为恶化,对风机的振动和空气噪声影响特别明显,特别是特征频率叶频处影响最为突出。

(4) 在需要小流量工况运行时,应尽量避免使用节流器调节,而采用变速调节的办法,降低风机的转速,这样既可以保证风机的性能,又可以使风机内的气流流动更为稳定,同时,由于转速降低,风机的振动和噪声也会随之降低。

#### 参考文献:

- [1] LIU QIUHONG, QI DATONG, MAO YIJUN. Numerical calculation of centrifugal fan noise[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers : Journal of Mechanical Engineering Science**, 2006, 220(8): 1167-1178.
- [2] 刘秋洪. 离心通风机气动噪声数值分析方法的研究及工程应用[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2007.
- [3] 毛义军, 祁大同, 刘秋洪. 基于非定常流场的离心风机气动噪声分析[J]. **西安交通大学学报**, 2005, 39(9): 123-127.
- [4] 李文华, 范兴文. 离心风机变工况流场分析[J]. **科技创新导报**, 2008(28): 50-51.
- [5] 王军, 肖朋. 变工况下对旋风机的数值模拟实验[J]. **华中科技大学学报(自然科学版)**, 2006, 34(9): 81-84.
- [6] 贺卫晋. 非稳定工况下对旋风机噪声数值模拟及实验研究[D]. 中国矿业大学, 2014.
- [7] 沈阳鼓风机研究所等编. 离心式通风机[M]. 北京:机械工业出版社, 1984.
- [8] 赵庆志. 阻性及抗性消声器对离心式通风机噪声影响的声电类比理论和试验研究[J]. **风机技术**, 1996(1): 8-11.
- [2] BRAHAMI M, GOURBI A, TILMATINE A. Numerical and analysis of the induced corona vibrations on high-voltage transmission lines affected by rainfall[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2011, 26(2): 617-624.
- [3] 王少华, 蒋兴良, 孙才新. 输电线路导线舞动国内外研究现状[J]. **高电压技术**, 2005, 31(10): 11-14.
- [4] 李宏男, 白海峰. 高压输电塔-线体系抗灾研究现状与发展趋势[J]. **土木工程学报**, 2007, 40(2): 39-45.
- [5] SUMNER D. Two circular cylinders in cross-flow: A review[J]. **Journal of Fluids and Structures**, 2010, 26: 849-899.
- [6] 马文勇, 尉耀元, 马祥旺. 静风荷载作用下覆冰导线的动力特性[J]. **噪声与振动控制**, 2012, 32(4): 37-41.
- [7] KIKUCHI N, MATSUZAKI Y, YUKINO T, et al. Aerodynamic drag of new-design electric power wire in a heavy rainfall and wind[J]. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2003, 91(1-2): 41-51.
- [8] 李宏男, 任月明, 白海峰. 输电塔体系风雨激励的动力分析模型[J]. **中国电机工程学报**, 2007, 27(30): 43-47.
- [9] 白海峰, 李宏男. 架空输电线路风雨致振响应研究[J]. **电网技术**, 2009, 33(2): 43-47.
- [10] BRAHAMI M, GOURBI A, TILMATINE A. Numerical and analysis of the induced corona vibrations on high-voltage transmission lines affected by rainfall [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2011, 26(2): 617-624.
- [11] ZHOU C, LIU Y B, RUI X M. Mechanism and characteristic of rain-induced vibration on high-voltage transmission line[J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2012, 26(8): 2505-2510.
- [12] ZHOU C, LIU Y P. Numerical analysis of rain-wind induced vibration on conductor by finite element method [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2012, 105: 151-154.
- [13] RAWLINS C B, HARD A R, LKEGAMI R, etc al. Transmission line Reference Book: Wind-induced conductor motion[M]. Electric power research institute, Palo Alto, California, 1979.
- [14] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effects on structures: An introduction to wind engineering[M]. New York, Wiley, 1978.
- [15] 陈元坤. 分裂导线的微风振动与次档距振荡研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- [16] ZHOU C, LIU Y B, MA Z Y. Investigation on aerodynamic instability of high-voltage transmission lines under rain-wind condition[J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2015, 29(1): 131-139.
- [17] VECCHIARELLI J, CURRIE G I, HAVARD G D. Computation analysis of Aeolian conductor vibration with stockbridge-type damper[J]. **Journal of Fluids and Structures**, 2000, 14: 489-509.
- [18] 唐善然, 陈文礼, 李惠. 斜拉索风雨激振的数值模拟研究[J]. **工程力学**, 2012, 29(3): 124-132.

(上接第52页)