文章编号:1006-1355(2017)02-0148-04

矿用轴流风机叶片异步振动频率获取方法

陈庆光, 王 超

(山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 对于矿用轴流式主通风机叶片振动在线监测系统,当叶片发生异步振动时,由于叶尖定时测振属于严重欠采样法,同时具有非均匀采样性,导致叶片振动参数识别难度增加。针对该问题,提出轴流风机叶片异步振动频率的获取方法,即通过对轴流风机叶片振动位移序列进行傅里叶变换,求得叶片振动的差频部分,再通过遍历法求得叶片振动的整频部分,取两者之和从而获得叶片的实际一阶振动频率。在对上述方法进行理论推导的基础上,针对一台矿用轴流风机的叶片,通过数值仿真验证该方法的可行性和可靠性,为矿用轴流风机叶片异步振动在线监测系统的工程应用提供了理论分析方法。

关键词: 振动与波;矿用轴流风机;叶尖定时法;叶片异步振动;振动频率;数值仿真

中图分类号: O329;TD441 **文献标识码:** A **DOI编码:** 10.3969/j.issn.1006-1355.2017.02.030

Method for Acquiring Asynchronous Vibration Frequencies of Mining Axial Fan Blades

CHEN Qing-guang, *WANG Chao*

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong China)

Abstract : In the online blade vibration monitoring system of a mining axial main fan, when the blade is in asynchronous vibration, it is hard to identify the blade vibration parameters because the signal of blade tip- timing is seriously under-sampled and non-uniformly sampled. To solve the problem, an identification algorithm is put forward in this paper to obtain the asynchronous vibration parameters of the axial fan blades. In this algorithm, through Fourier Transform of the blade vibration displacement sequence of the axial flow fan, the frequency difference of blade vibration can be obtained. The blade vibration frequency can be got by the sum of both the frequency difference and the integral frequency of blade vibration which can be obtained by traversing method. Based on the above theoretical formulation, the mining axial fan blade is modeled and simulated, and the feasibility and reliability of the identification algorithm for the blade vibration parameters are verified. This research has provided a theoretical approach for the engineering application of the online monitoring system to the asynchronous vibration monitoring of the axial fan blades.

Key words : vibration and wave; mining axial fan; blade tip- timing method; blade asynchronous vibration; vibration frequency; numerical simulation

轴流风机广泛应用于我国煤矿的井下通风,由于矿用主通风机运行时间长、功率大,其运行状况对于矿山的安全生产和经济效益至关重要,而作为轴流风机核心运动部件的叶片,又对风机的安全、高效运行起着极其重要的作用。然而,由于矿用轴流式主通风机叶片通常处于复杂的激振力环境中,容易失效。再加上近年来一些特大型煤矿投产,为了满足井下大通风量的要求,具有小轮毂比、长叶片的轴流风机得到了广泛应用。与短叶片相比,长叶片在工作中受到的气固耦合作用更为显著,也更容易产生疲劳引起的叶片表面裂纹乃至发生断裂,国内已有多家矿井的轴流风机发生过这类事故,对煤矿的安全生产构成了严重威胁。因此,研究开发适用于矿井轴流风机的叶片振动在线监测系统已经迫在眉睫。虽然,目前关于风机轴承温度、轴承振动等方面的监测技术已相对成熟,但关于轴流风机叶片振动

收稿日期: 2016-09-22

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2013EEM017)

作者简介: 陈庆光(1969-),男,博士、教授、博士生导师,主要从事流体机械及工程、噪声与振动控制、流固耦合数值模拟与分析等方面的教学与研究工作。

E-mail: chenqingguang03@tsinghua.org.cn

通信作者: 王超(1990-),男,济南市人,硕士,主要研究方向为流体机械及工程。

在线监测方面的研究还相对较少。为了提高监测系统的可靠性和准确性,一些关键技术问题仍需要深入研究。文中针对轴流风机叶片最容易发生的异步振动,研究叶片振幅、振动频率等振动参数的获取方法,为轴流风机叶片振动在线监测技术的开发和应用奠定基础。

在叶轮机械领域,与传统的接触式测量方法相比,非接触式测量方法具有诸多显著的优势,其中叶尖定时法又以其独特的优势发展最为迅速。图1表示了叶尖定时法的基本原理[1-5],即把多只叶尖定时传感器(S_0至S_3)安装在轴流风机的机壳上,利用传感器感受在它前面通过的旋转叶片所产生的脉冲信号来记录叶片到来的时刻。

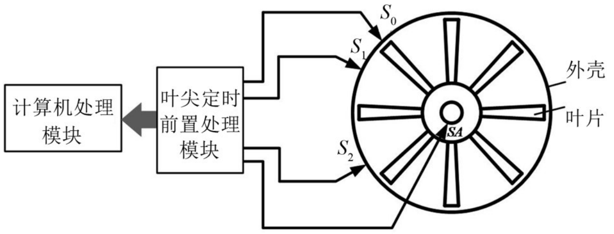

图1 轴流风机叶片测振示意图

由于叶片的振动,传感器所测得的时间与叶片的理论到达时间之间会有时间差 Δt ,经过叶尖定时前处理模块和计算机处理模块,便可得到一系列的叶片振动位移值$\{y_i\}$,轴流风机叶片异步振动频率就是通过这些位移值,经一定的算法获取的。目前,基于叶尖定时法的叶片振动测量方法有速矢端迹法[6]、自回归法[7]、双参数法[8]、差频法[9]、“5+2”分布法[9]等,这些方法中除差频法外,主要应用于航空发动机等旋转机械的叶片同步振动测量上,而针对矿用轴流风机叶片容易发生的异步振动测量方法的研究还很少。

在上述基于叶尖定时测量原理的叶片振动测量方法中,转子每旋转一周,传感器只能测得一个叶片振动信号,而转子的转速频率远远小于叶片的振动频率,这就使得叶尖定时测量原理存在严重欠采样的特点[10]。另外由于叶片的振动,使得传感器的采样频率是不均匀的,因此叶尖定时测量原理又存在非均匀采样的特点[11]。这两大特点也成为获取轴流风机叶片异步振动频率的两大难点,也是文中要解决的问题。

1 叶片异步振动频率获取方法

由叶片振动理论可知,叶片的实际一阶振动频率可由叶片振动的整频部分和差频部分相加得到,即

$$\omega = (m \pm \Delta m)\Omega \tag{1}$$

式中 ω 为叶片的实际振动频率;Ω 为转子的旋转频率;$m\Omega$ 为叶片振动的整频部分,m 为整数;$\Delta m\Omega$ 为叶片振动的差频部分,Δm 取不大于0.5的正值。对于差频的获取可以采用对位移序列进行傅里叶变换的方法,比较容易获得,难点在于整频部分m的获取上。采用计算机遍历的方法对m进行求解。

当叶片发生恒速异步振动时,每只传感器所测得的振动位移可以表示为

$$y_i = A\sin(\omega t_i + \varphi_0) \qquad i = 0, 1, 2, \cdots, n-1 \tag{2}$$

式中A为叶片的振动幅值;φ_0 为叶片振动的初始相位。在轴流风机的机壳上安装n只传感器,并编号S_0至S_{n-1},每只传感器相对于0号传感器的安装角依次为α_0、α_1、α_2、…、α_{n-1}(其中,令α_0=0)。假设叶片到达传感器S_0的时间为t_0,则到达传感器S_i的时间为

$$t_i = \frac{\alpha_i + 2\pi j}{\Omega} \tag{3}$$

式中j为转子转过的圈数。

将式(3)和式(1)代入式(2)可得

$$y_i = A\sin(m\alpha_i + \Delta m\alpha_i + 2\pi\Delta mj + \varphi_0) \tag{4}$$

若令 $\varphi_i = m\alpha_i + \Delta m\alpha_i + \varphi_0$,则每只传感器测得的振动相位相对于0号传感器测得的振动相位的差为

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_0 = m\alpha_i + \Delta m\alpha_i = m\alpha_i + \frac{\Delta\omega}{\Omega}\alpha_i \tag{5}$$

式中 $\Delta\omega$ 为叶片振动的差频。

在式(5)中,传感器的分布角 α_i 、转速频率 Ω 是已知的,叶片振动相位 φ_i 、差频 $\Delta\omega$ 和整频中的m值是未知的。通过对各传感器测得的叶片振动信号截取($2n$-1)个数据进行ap FFT变换(全相位傅里叶变换)[12-14],频谱中峰值谱线对应的频率点即是叶片的差频 $\Delta\omega$,此峰值线所对应的相位值即是每只传感器测得的 φ_i ,也就是振动数据中心采样点的振动相位值。由此可以得到传感器测得的振动相位差 $\Delta\varphi_i$ 。另外,在已知 α_i 、Ω 、$\Delta\omega$ 的情况下,给定有限的m值范围,逐一代入式(5)即可得到理论计算的振动相位差值 $\Delta\varphi_{ki}$ 。

把 $\Delta\varphi_i$ 和 $\Delta\varphi_{ki}$ 全部规整到[0º, 360º),设振动相位差的测量值 $\Delta\varphi_i$ 与每一个m值对应的理论计算值的残差为 e_{ki} ,即

$$e_{ki} = \Delta\varphi_i - \Delta\varphi_{ki} \tag{6}$$

用残差的均方根值来表示叶片振动相位差中计算值偏离测量值的大小,即

$$S_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} e_{ki}^2}{n}} \tag{7}$$

最小值 S_k 所对应的 m 值即为叶片振动的实际 m 值，记为 m^*。于是，叶片恒速异步振动的实际频率为 $\omega = m^*\Omega + \Delta\omega$ 或者 $\omega = m^*\Omega - \Delta\omega$。这里需要注意的是，以上推导是按式(1)中取“+”号的情况推导的，但在对 m 进行遍历时，“+”号和“-”号两种情况都需要遍历，两者之中的最小值 S_k 所对应的 m 值才是叶片实际振动的 m^* 值。

2 数值仿真与验证

为了验证上述叶片异步振动频率获取方法的可行性和可靠性，针对一台ANN-2884/1400N型矿用轴流风机叶片进行仿真实验。该型轴流风机的基本参数为如下：叶片数为22个，外径为2.884 m，转速为960 r/min，叶片高度为0.725 m。选取0号叶片作为研究对象，初始设定其实际1阶振动频率为96.5 Hz。4只传感器 S_0 至 S_3 的安装角分别是0 º、20 º、40 º、60 º。

将每只传感器所测得的振动位移序列进行apFFT变换，可以得到其幅度谱和相位谱。对于同一支叶片，其振动幅值是一定的，因此每只传感器得到的幅度谱也是基本相同的，如图2所示。

将相位谱规整到360 º，得到规整后的相位谱，如图3所示。

由图2可以看出，叶片峰值谱线所对应的频率，也即叶片振动的差频 $\Delta\omega$ =3.157 9 Hz。再根据图2中的峰值谱线，在图3中可以得到每只传感器测得的相位值 φ_i，并以此求得每只传感器相对于0号传感器的相位差 $\Delta\varphi_i$。另外，由式(5)可以求得 m=9时，每只传感器相对于0号传感器的相位差 $\Delta\varphi_{9i}$。结果如表1所示。

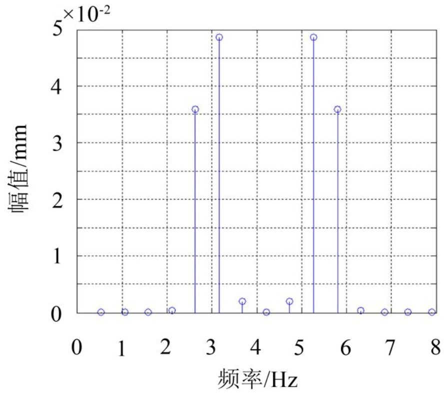

图2 叶片异步振动幅度谱

取 m 的范围为1～20，求得不同 m 值时的残差均方根，如图4所示。

表1 各传感器测得的相位差

传感器	S_0	S_1	S_2	S_3
φ_i /(º)	108.41	275.35	82.40	249.35
$\Delta\varphi_i$ /(º)	0	166.93	−26.01	140.93
$\Delta\varphi_{9i}$ /(º)	0	186.32	12.63	198.95

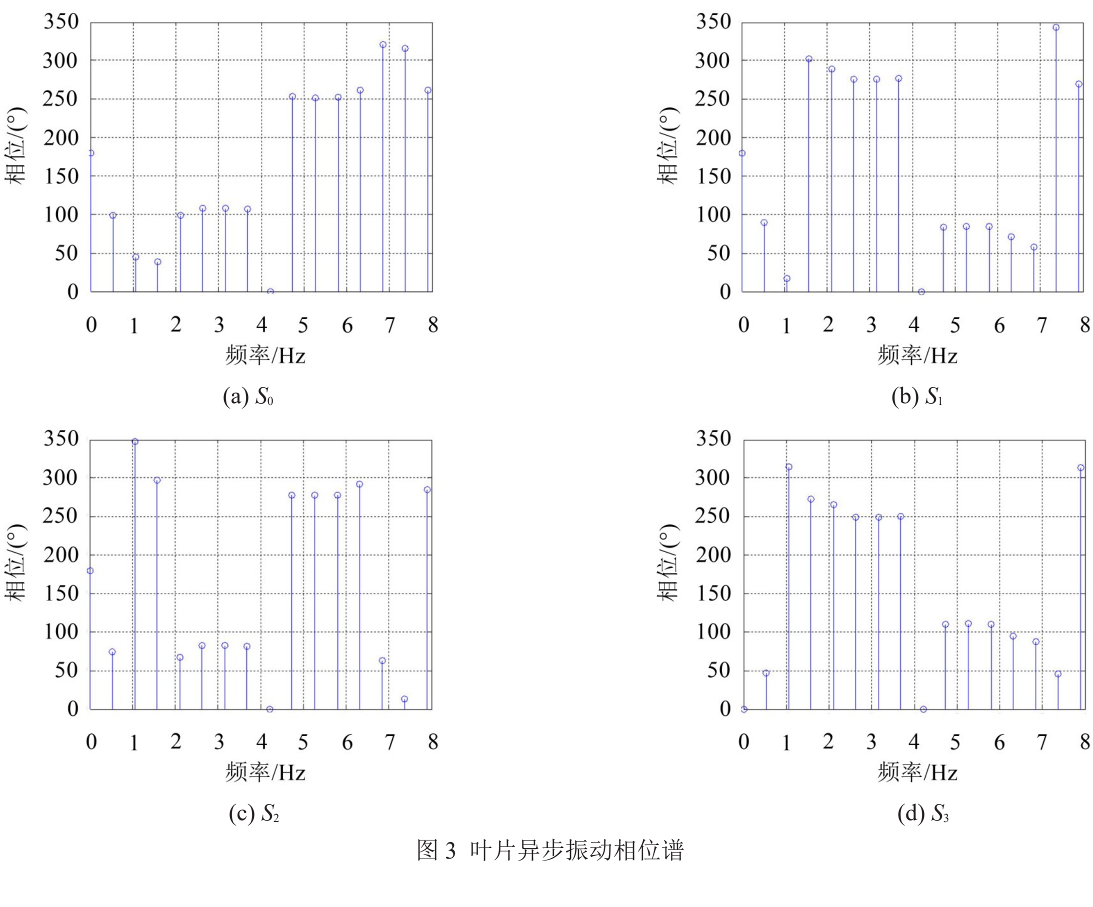

图3 叶片异步振动相位谱

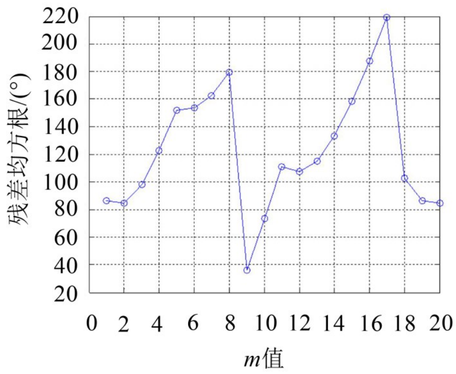

图4 叶片异步振动m值遍历

由此可以得到，当 m=9 时，S_k 为最小。由式（1）可以得出叶片实际振动频率 $\omega = 10 \times 9 + 3.157\,9 = 93.157\,9$ Hz，与0号叶片的初始设定的实际1阶振动频率96.5 Hz的误差小于3.5 %，可满足实际工程需要，证明提出的轴流风机叶片异步振动频率的获取方法是可行的，用该方法获得的结果也是准确可靠的。

3 结 语

通过研究得到以下主要结论：

（1）通过采用对轴流风机叶片整频部分 m 值遍历的方法，可以准确地获取叶片的实际1阶振动频率，克服了现有的叶尖定时测振法因存在严重欠采样和非均匀采样性所带来的困难。

（2）针对一台ANN-2884/1400N型矿用轴流风机中的一个叶片进行数值仿真，验证了文中提出的轴流风机叶片异步振动频率的获取方法，其在实际工程应用所允许的误差范围内是可行的，用该方法获得的结果也是准确可靠的。

（3）研究结论为矿用轴流式主通风机叶片异步振动在线监测系统的工程应用奠定了基础。

参考文献：

[1] 陈庆光，王超. 基于叶尖定时法的旋转叶片振动监测技术研究与应用进展[J]. **噪声与振动控制**，2016，36(1)：1-4+37.

[2] GUM SIDDHARTHA S, SHYLAJA S, KUMAR SUNIL, et al. Pre- emptive rotor blade damage identification by blade tip timing method[J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines & Power**, 2014, 136(7): 1-4.

[3] LIU C, JIANG D. Improved blade tip timing in blade vibration monitoring with torsional vibration of the rotor [C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2012: 12136-12143.

[4] KASZYNSKI A A, BROWN J M. Accurate blade tip timing limits through geometry mistuning modeling[C]. ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2015.

[5] GURU SS, SHYLAJA S, KUMAR S, et al. Pre- emptive rotor blade damage identification by blade tip timing method[J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 2013, 136(7): V001T06A009.

[6] 张玉贵，段发阶，方志强，等. 速矢端迹法分析叶片同步振动幅值的方法研究[J]. **传感技术学报**，2007，20(9)：2044-2048.

[7] DIMITRIADIS G, CARRINGTON I B, WRIGHT J R, et al. Blade- tip timing measurement of synchronous vibrations of rotating bladed assemblies[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2002, 16(4): 599-622.

[8] HEATH S. A new technique for identifying synchronous resonances using tip- timing[J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 2000, 122(2): 219-225.

[9] 张玉贵，段发阶，方志强，等. 基于叶尖定时的非接触式旋转叶片异步振动分析[J]. **机械工程学报**，2008，44(7)：147-150.

[10] GALLEGOGARRIDO J, DIMITRIADIS G. Validating blade vibration amplitudes from blade tip- timing data analysis[C]. Professional Engineering Publishing, 2004: 205-214.

[11] 张玉贵. 烟气轮机叶片振动的非接触式在线监测关键技术研究[D]. 天津：天津大学，2008.

[12] 王兆华，黄翔东，杨尉. 全相位FFT相位测量法[J]. **世界科技研究与发展**，2007，29(4)：28-32.

[13] LIN H W, ZHANG Q S, YANG D K, et al. Phase coding identification of Loran- C signal based on apFFT[J]. **Journal of Tianjin University**, 2011, 44(3): 257-260.

[14] 王超. 轴流式通风机叶片振动参数辨识算法研究[D]. 青岛：山东科技大学，2016.

（上接第130页）

[14] 彭祖赠，孙韫玉. 模糊(Fuzzy)数学及其应用[M]. 武汉：武汉大学出版社，2002.

[15] 郑秋露，廖景平. 基于层次分析法的园林景观评价—以华南植物园龙洞琪林为例[J]. **西北林学院学报**，2013，28 (6)：210-216.

[16] 洪昕晨，张薇，朱里莹，等. 城市公园声景观危险度评价研究[J]. **应用声学**，2016，35(6)：539-546.

[17] BALESTRA G, KNAFLITZ M, MASSA R, et al. AHP for the acquisition of biomedical in strumentation[C]// Conference: International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society IEEE Engineering in Medicine & Biology Society Conference. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2007: 3581-3584.