排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2017 年 11 月 Nov. 2017 | 第 35 卷 第 11 期 Vol. 35 No. 11

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0146

基于 MCSA 的离心泵转速测量与试验研究

石洋，袁建平，骆寅，周帮伦，孙慧
（江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）



石洋

摘要：阐述了传统离心泵转速测量方法及其存在的问题，提出了基于电动机电流信号分析（MCSA）测量离心泵转速的方法，应用信号处理理论，对方法的原理进行了数学推导. 应用驱动电动机通电后定子绕组中存在与转子频率相同电流的原理，利用 MCSA 方法，分析电动机定子电流信号成分，从定子电流频谱中检测出转子频率. 根据方法的原理设计了验证试验，试验过程中，变频器产生不同频率的电源为电动机供电，调节离心泵的流量，运用霍尔元件和数据采集卡，采集离心泵驱动电动机在不同流量下的定子电流信号，信号经过解调和快速傅里叶变换（FFT），在限定的转频范围，从电流频谱中得到转频. 为了验证方法的准确性，用动静干涉机理测速法和光学测速法进行了对比试验，试验结果表明：与光学测速以及动静干涉机理测速相比，基于 MCSA 的转速测量方案的误差均在 2% 以内，满足离心泵状态监测的要求，实现了离心泵转速的无传感器测量，精度较高，适用性强. 研究结果具有一定的应用价值.

关键词：离心泵；转速测量；电动机电流信号分析；无传感器测量
中图分类号：S277.9；TH311　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2017)11-0927-06

石洋，袁建平，骆寅，等. 基于 MCSA 的离心泵转速测量与试验研究[J]. 排灌机械工程学报，2017，35(11)：927-932.
SHI Yang，YUAN Jianping，LUO Yin，et al. MCSA-based rotational speed measurement of centrifugal pump and experiment[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2017，35(11)：927-932.(in Chinese)

MCSA-based rotational speed measurement of centrifugal pump and experiment

SHI Yang，*YUAN Jianping*，*LUO Yin*，*ZHOU Banglun*，*SUN Hui*
(National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China)

Abstract：Traditional methods for rotational speed measurement of centrifugal pump and their problems were analyzed. A new method for the rotational speed measurement was proposed based on motor current signal analysis (MCSA)，then its mathematic equation was deduced using data processing theory. According to a principle that the frequency of current in stator windings are equal to the rotating speed frequency of the rotor when a centrifugal pump is driven by an AC motor，the frequency component of motor stator current was acquired by means of MCSA technology. Finally，the rotating speed frequency was detected from the current frequency spectrum. A trail experiment was designed according to this principle. During a test，the motor was fed by a frequency converter which could generate AC power with various frequencies，and the flow rate was adjusted，then the motor stator current was sampled by Hall effect sensors and a data acquisition card. After demodulation and fast Fourier transform (FFT)，the rotating speed frequency was detected in frequency spectrum within a restricted range. To validate this method，a method based on rotor-stator interaction and an optical tachometer method was also used

收稿日期：2016-06-23；**修回日期**：2016-09-21；**网络出版时间**：2017-10-31
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20171031.2350.004.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51409125)；江苏高校优势学科建设工程项目
作者简介：石洋(1989—)，男，湖北黄梅人，硕士研究生(1272228478@qq.com)，主要从事泵状态监测诊断研究.
袁建平(1970—)，男，江苏金坛人，研究员，博士生导师(通信作者，yh@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械及工程研究.

to get the speed. Compared with these two methods, the new method proposed was subject to an error less than 2%, and this accuracy has met the requirement of centrifugal pump monitoring, demonstrating a potential application in centrifugal pumps. Moreover, it is a sensorless method which can be realized in a better accuracy and more flexible applicability. This outcome is subject to application significance in some degree.

Key words: centrifugal pumps; rotation speed measurement; motor current signal analysis; sensorless measurement

目前对离心泵转速的测量,有接触式和非接触式2类方法. 接触式是一类常见方法,主要是运用一些测速齿轮或光学辅助元件,将转速信号转换为数字信号后送入单片机得到转速,但是该方法需要电动机或者离心泵轴可见,并且机器上要预留安装齿轮或者贴反光元件的机械结构,安装调试比较烦琐[1-3],因此该方法不适用于一些叶轮和电动机直联的泵. 非接触式方法是不直接接触电动机或者水泵,根据它们本身的电磁特性获取转速. 常用的感应线圈法,就是利用电动机漏磁,根据电磁感应原理得到电动机转速[4],该方法在潜水电泵中应用比较广泛,但是随着技术进步,电动机的漏磁越来越难于检测,同时这种方法需要一定的外电路和电磁感应元件,成本相对较高,而且在变频工况下,由于高次谐波的影响,感应线圈法并不能准确测量. 上述的接触式和非接触式方法,都需要外部电路和传感器,在实际应用中不能满足不同环境条件和不同机械结构下的测量要求.

近年来出现了运用离心泵内部的动静干涉机理测量泵转速的方法,该方法通过分析离心泵出口压力脉动得到转速[5]. 这种方法测量精度高,在一套成熟的测试系统中,不需要额外的硬件投资,但是离心泵在小流量工况下会产生不稳定流动,压力脉动主要集中于低频区,叶频难于检测甚至出现叶频幅值较小的情况,这种方法就不能准确测量转速.

电动机电流信号分析(MCSA)技术是一种无传感器方法,通过分析电动机信号得到电动机负载转矩变化,进而了解离心泵的运行状态[6-8],包括信号采集、解调、傅里叶变换等过程. 目前该方法主要应用于电动机的故障监测和诊断,在泵上的应用并不多. 与传统方法相比,该方法不用接近运行设备,在配电室或者动力柜即可获取电流信号,安装方便灵活. 信号中同时包含泵的各种动态信息,信息集成度高,可以用来做故障诊断,这样就节省了其他的诸如振动等传感器的采购费用,性价比高.

文中根据MCSA技术对离心泵的转速进行测量,并将结果与动静干涉机理测量离心泵转速方法以及光学测速方法进行对比展开研究.

1 测量原理

异步电动机定子接通三相交流电后,定子以同步转速产生一个旋转磁场. 由于定子与转子"异步",使得转子中总是存在一定的感应电流. 在转动过程中,转子感应电流在定子中产生一个有效的旋转磁场,这个磁场能够在定子绕组中感应出一个电流,该电流随转子转动而发生周期性变化,它的频率和转子频率相等. 基于此原理,运用MCSA技术,在电动机侧采集电动机电流信号,将采集的信号进行解调和频谱分析,从定子电流信号频谱中检测出转子频率,根据转频和转速的关系,就可计算出转速[9-10]. 但是,此处涉及的频谱分析重点在于得到信号的频率成分,而不是信号强度. MCSA技术的原理如图1所示.

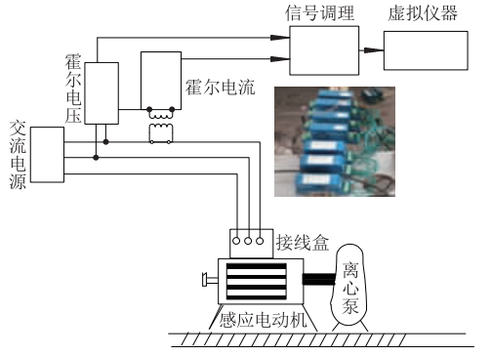


图1 试验原理

Fig. 1 Measurement principle of MCSA

电动机的定子电流信号可以表示为

$$i(t) = \left[k_1 + \sum_{m=2}^{n} k_m \cos(2\pi f_m t)\right] \cos(2\pi f_1 t), \tag{1}$$

式中:$i(t)$为t时刻的电流;k_m和f_m分别为m次谐波常量和谐波频率;f_1为交流电源频率. 式(1)可

以改写为

$$i(t)=m(t)\cos(2\pi f_1 t), \tag{2}$$

$$m(t)=k_1+k_2\cos(2\pi f_2 t)+\cdots+k_n\cos(2\pi f_n t), \tag{3}$$

其中 $m(t)$ 为定子电流的幅值.

由于定子电流信号中存在高频分量,同时受温度、定子槽、转子槽以及振动等的影响,可以用低通滤波器过滤掉高频分量和噪声,滤波器的截止频率设置为 $2f_1$.

$$i(t)i(t)=m^2(t)\cos^2(2\pi f_1 t), \tag{4}$$

整理式(4)得

$$i^2(t)=\frac{1}{2}m^2(t)+\frac{1}{2}\cos^2(2\times 2\pi f_1 t)m^2(t). \tag{5}$$

运用快速傅里叶变换(FFT)分析式(5)的电流数据,找到最大频谱幅值对应的频率分量. 这个分量必须位于上限频率(f_{syn})和下限频率(f_{low})之间,其中 f_{syn} 和 f_{low} 可分别表示为

$$f_{syn}=\frac{2f_1}{p}, \tag{6}$$

$$f_{low}=\frac{n_{low}}{60}, \tag{7}$$

式中:p 为磁极数;n_{low} 为下限频率下的转速,下限频率可以设置为最大转矩的转速或者旋转磁场同步转速的 90%.

利用谐波电流分量的点可以获取转子频率(f_n),转频是频谱幅值最大值(D_{max})点对应的频率分量,则转速为

$$n=60f_n. \tag{8}$$

2　试　验

为了验证 MCSA 技术测量离心泵的转速,搭建了闭式试验回路,其装置简图如图 2 所示.

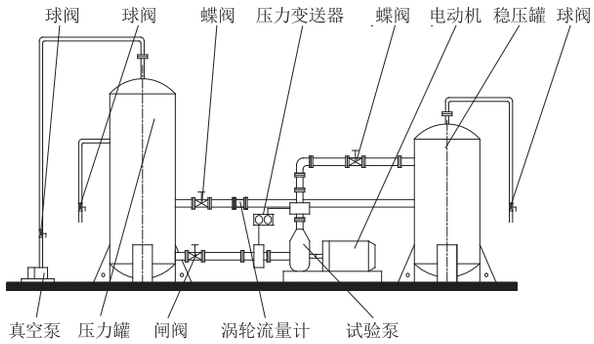


图 2　试验装置示意图
Fig. 2　Experimental set-up

离心泵性能参数分别为流量 $Q_d=50\ m^3/h$,扬程 $H=20.2\ m$,转速 $n=2\ 910\ r/min$,比转数 $n_s=132.2$,轴功率 $P=4\ kW$. 由于试验用离心泵与电动机固联在一起,电动机采用变频器供电,感应线圈法不适用,因此采用 MCSA 技术进行测量. 同时也进行了动静干涉法测量转速试验,分析泵出口压力得到 f_{BPS}(叶片通过频率),由关系式 $f_{BPS}=Zf_n$(Z 为叶片数,f_n 为转轮的转频)[11-13] 可以得到离心泵轴频.

试验台现场布置如图 3 所示. 试验中用动压传感器采集泵出口的压力信号,电流信号用霍尔电流传感器进行采集. 霍尔传感器的响应时间为 3 μs,输入范围为 AC 0~30 A,输出范围为 DC 4~20 mA,精度 0.2%. 压力和电流信号用 NI 公司的 USB-6343 信号采集卡采集并输入计算机,采集卡的采样频率为 10 000 Hz. 电动机转速用 MTSUBISHI F700 型变频器调节,其调节精度为 0.01 Hz. 试验过程中,由于驱动电动机并非变频电动机,没有使电动机在较低转速运行,调节变频器的频率分别为 40,45,48,50 Hz. 在同一电源频率下,通过离心泵的出口阀门调节泵的流量依次为 10,20,30,40,50,60 m^3/h,同时采集不同频率不同流量下电动机的电流信号以及泵出口的压力信号. 为了对上述 2 种方法提供参照比较,试验中,同时采用高精度手持式光学测速计实时测量泵的转速.



图 3　试验台现场布置图
Fig. 3　Photo of test rig

运用上述 MCSA 法和叶频法对试验采集到的信号进行处理,不同电源频率下,电流信号处理结果如图 4 所示,泵出口的压力脉动如图 5 所示,图中纵坐标 δ 为快速傅里叶变换因子. 需要说明的是,分析泵出口的压力脉动频谱,一般情况下主频应当是叶频 f_{BPS},或者是叶频的倍频,但是为了直观地得到轴频,数据处理时运用 $f_{BPS}=Zf_n$ 关系式,将叶频换算成轴频,所以图 5 中的频谱有别于一般压力脉动频谱. 从图 4 和图 5 中读取频谱中的主频,其频率值大小对应于轴频.

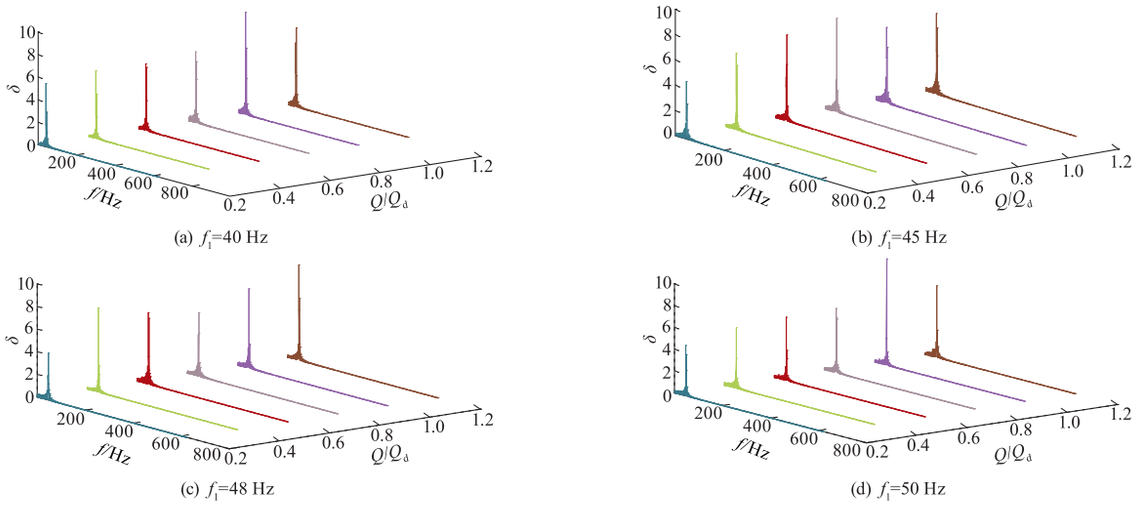


图4 电动机定子电流信号频域图

Fig. 4 Frequency spectrum of motor stator current

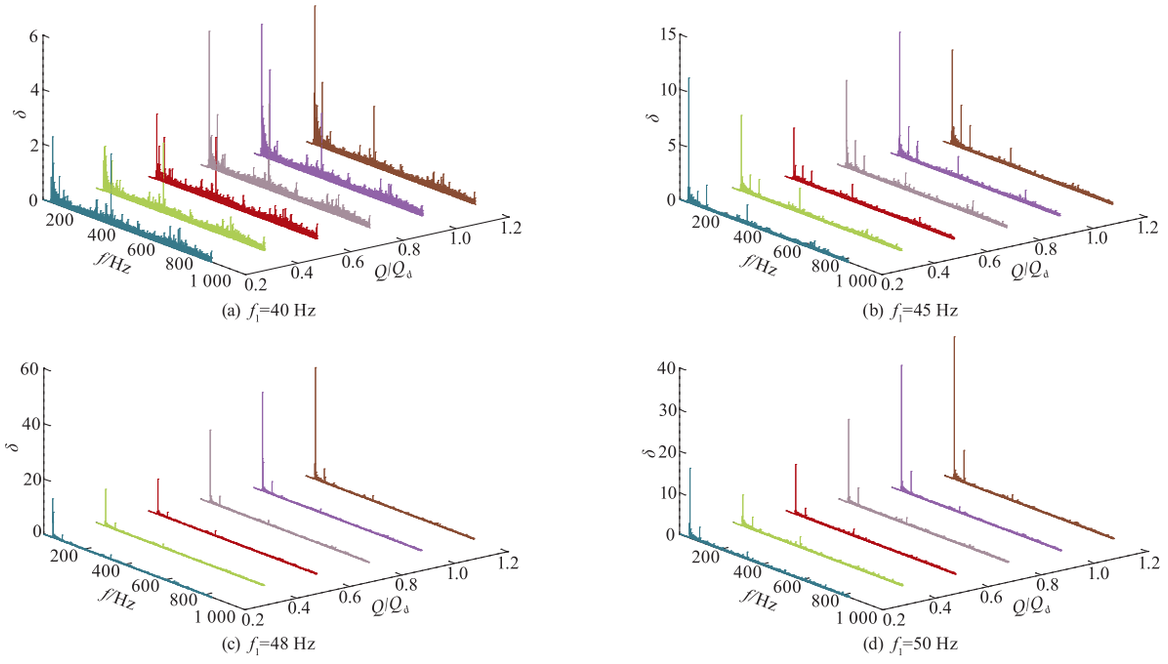


图5 泵出口压力频域图

Fig. 5 Frequency spectrum of outlet pressure of pump

将试验中光学测速计的测量结果换算成对应 的频率,3种方法的测量结果如表1所示.

表1 泵转速测量结果

Tab. 1 Summary of measure mental results on pump rotational speed

$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	f/Hz											
	$f_1=40$ Hz			$f_1=45$ Hz			$f_1=48$ Hz			$f_1=50$ Hz		
	MCSA法	叶频法	测速计	MCSA法	叶频法	测速计	MCSA法	叶频法	测速计	MCSA法	叶频法	测速计
10	39.37	39.23	39.37	44.40	44.36	44.39	47.30	47.45	47.39	49.29	49.29	49.38
20	39.83	39.24	39.16	44.86	44.29	44.20	47.91	47.06	47.21	49.59	49.12	49.18
30	39.37	39.10	38.96	44.71	44.06	44.02	47.76	47.00	47.02	49.59	48.89	49.00
40	39.52	38.81	38.81	44.40	43.75	43.86	47.45	46.81	46.86	49.44	48.84	48.84
50	39.22	38.82	38.73	44.25	43.63	43.74	47.45	46.72	46.74	49.29	48.51	48.71
60	39.37	38.68	38.70	44.25	43.74	43.67	47.30	46.68	46.65	49.13	48.47	48.63

3　试验结果分析

MCSA 法测量离心泵转速，从图 4 可以看出，电动机虽然以变频器供电，电流信号中也存在谐波，但仍然以驱动电动机转子做功为主，当电动机在一个确定工况下运转，电动机电流稳定，从频域看就是以某个频率为主. 反映到图 4 中，就是以转频信号为主，各个流量工况下，电流信号频谱中有明显的主频以及峰值，其代表的转频信号比较容易提取，不会出现其他谐波成分的干扰，这种方法的优越性比较明显. 在图 5 中，不同转速下均存在一个约 330 Hz 的频率分量，随着转速的增大，其幅值逐渐减小，这在小流量工况下，存在被当作转频误读的可能性. 随着流量减小，泵内不稳定流动的存在，低频区信号分量增多[11-12]. 当电源频率为 40 Hz，流量为 $0.2Q_d$ 和 $0.4Q_d$ 时，转频信号是次主频，甚至完全被低频信号覆盖，转频幅值比次主频还要低，此时按照一般方法提取转频信号就会发生错误. 这也是叶频法在低转速小流量下的缺点，而 MCSA 法是根据电信号提取转频信号，当泵在确定工况下稳定运行，其电信号是相对稳定的，不会受制于泵的机械结构，可以很快得到泵的转速.

运用叶频法时，小流量低转速下主频幅值并不明显. 统计不同转速及不同流量下离心泵出口压力脉动转频幅值，结果如图 6 所示.

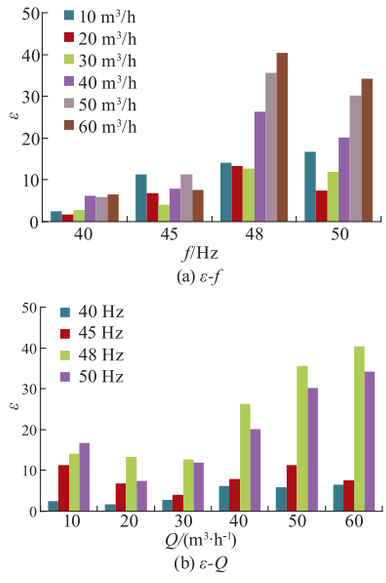


图 6　不同转速和不同流量下的频谱幅值

Fig. 6　Frequency values at different shaft speeds and flow rates

由图 6 可以看出，转频信号的幅值基本随转速的增大而增大，这说明转速越高，该方法越容易识别转频信号，在额定转速附近效果最好.

对表 1 中的数据进行误差分析，此处定义

$$\delta_1 = \frac{|f_n - f|}{f} \times 100\% , \tag{9}$$

$$\delta_2 = \frac{|f_p - f|}{f} \times 100\% , \tag{10}$$

式中：f_n 为 MCSA 法得到的转频；f_p 为叶频法得到的转频；f 为测速计得到的转频.

MCSA 法和叶频法的误差分布如图 7 所示，可以看出：MCSA 法的整体误差小于 2%，叶频法的整体误差小于 0.5%；当离心泵的流量小于 20 m^3/h 时，随着流量的变大，电动机的负荷也逐渐增大，根据电动机的特性可知，此时转差也逐步变大，这导致实际转速越来越偏离同步转速；当流量小于 10 m^3/h 时，电动机负载越来越接近于空载状态，电动机转速也越来越接近同步转速，电动机速转差较小，所以 MCSA 法得到的转速和测速计得到的转速相差不大；当流量大于 20 m^3/h，电动机端的负载转矩接近额定转矩，电动机转速差趋于相对稳定，表现为泵的转速误差在 1.0% ~ 1.5% 波动；当流量大于 $0.4Q_d$ 后转频特征更加明显，这说明泵内流特性和电动机的负载状态是相互联系的.

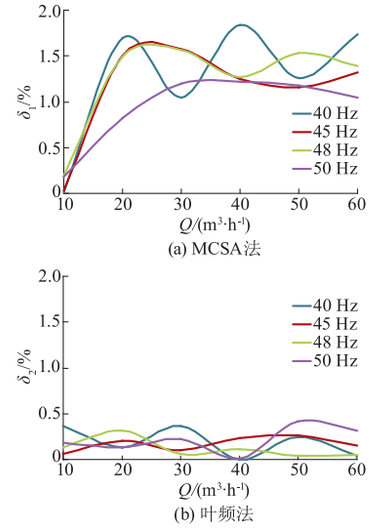


图 7　MCSA 法和叶频法的误差

Fig. 7　Errors of both MCSA and BPS methods

试验结果表明，当流量为 10 ~ 60 m^3/h 时，MCSA 法得到的转速和叶频法得到的转速结果吻合，而且 MCSA 技术更简单，精度也比较高，可以满足离心泵状态监测的要求. 值得注意的是，由于测得的转子频率在旋转磁场频率附近波动，它对频率分辨率

(F_R)要求较高,不能用于快速响应的系统,所以采样速率(F_s)应当尽可能地小,采样时间尽量延长.

4 结 论

1) 运用MCSA技术对离心泵转速进行测量,对比叶频法和光学测速计测得的转速表明,该方法比较可靠,精度可满足测量要求.

2) 相比叶频法,MCSA法可以对离心泵低转速小流量工况进行有效测量,可以作为一种工业大范围在线监测方案.

3) 后期结合硬件电路和微处理器,可以较经济的方式实现该方法的实际应用.

参考文献(References)

[1] 张一文,高宏力,毛润,等. 水环真空泵临界转速的计算和有限元分析[J]. 流体机械, 2016,44(1):34-37.
ZHANG Yiwen,GAO Hongli,Mao Run,et al. Structure design and analysis of an impeller for water ring vacuum-pump[J]. Fluid machinery,2016,44(1):34-37. (in Chinese)

[2] 余光伟,刘江山,范四辈,等. 基于虚拟仪器技术的速度测量系统[J]. 仪表技术与传感器,2013(10):28-30.
YU Guangwei,LIU Jiangshan,FAN Sibei,et al. Design of velocity measurement system based on virtual instrument technology[J]. Instrument technique and sensor,2013(10):28-30. (in Chinese)

[3] 李茂亮,高敬贝,贾仁松,等. 基于虚拟仪器技术的电动机转速测控系统设计[J]. 电机与控制应用,2010,37(7):20-23.
LI Maoliang,GAO Jingbei,JIA Rensong,et al. Design of motor speed measurement and control system based on virtual instrument technology[J]. Electric machines & control application,2010,37(7):20-23. (in Chinese)

[4] 仲汝新. 智能化异步电动机转速测量系统研制[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.

[5] 潘中永,倪永燕,袁寿其,等. 基于动静干涉的离心泵转速测量机理与实验[J]. 农业机械学报,2010,41(3):81-85.
PAN Zhongyong,NI Yongyan,YUAN Shouqi,et al. Experiment and mechanism of centrifugal pumps rotation speed measurement based on rotor-stator interaction[J]. Transactions of the CSAM,2010,41(3):81-85. (in Chinese)

[6] 骆寅,孙慧,卢加兴,等. 无传感器监测技术在离心泵中的应用研究综述[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(6):547-552.
LUO Yin,SUN Hui,LU Jiaxing,et al. Review for sensorless detection technology applied in centrifugal pumps[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering,2015,33(6):547-552. (in Chinese)

[7] NIASAR A H,VAHEDI A,MOGHBELLI H. Low-cost sensorless control of four-switch, brushless DC motor drive with direct back-EMF detection[J]. Journal of Zhejiang University (science A),2009,10(2):201-208.

[8] 时献江. 异步电动机及其驱动设备的无传感器故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.

[9] 周锋,王明渝,杜彦巍. 基于MCSA的异步电动机状态监测与故障诊断综述[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2005,28(1):49-52.
ZHOU Feng,WANG Mingyu,DU Yanwei. Summary of on-line monitoring and fault diagnosis for induction motor based on MCSA[J]. Journal of Chongqing University (natural science edition),2005,28(1):49-52. (in Chinese)

[10] STOPA M M,FILHO B J C,LAGE B L O. An evaluation of the MCSA method when applied to detect faults in motor driven loads[C]//Proceedings of the 36th IECON Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society,2010:760-765.

[11] 陈颖,李国平,张宁,等. 蜗壳喉部面积对离心泵非定常特性的影响[J]. 流体机械,2017,45(2):38-42.
CHEN Ying,LI Guoping,ZHANG Ning,et al. Research on the influence of volute throat area on unsteady characteristics in a centrifugal pump[J]. Fluid machinery,2017,45(2):38-42. (in Chinese)

[12] 杨敏官,孙鑫恺,高波,等. 离心泵内部非定常空化流动特征的数值分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2012,33(4):408-413.
YANG Minguan,SUN Xinkai,GAO Bo,et al. Numerical analysis of unsteady cavitating flow characteristic in centrifugal pump[J]. Journal of Jiangsu University(natural science edition),2012,33(4):408-413. (in Chinese)

[13] 刘厚林,吕云,王勇,等. 不等间距叶片对离心泵性能及压力脉动影响分析[J]. 农业工程学报,2015,31(23):60-66.
LIU Houlin,LYU Yun,WANG Yong,et al. Analysis about effect of unequal spacing blade on performance and pressure pulsation of centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(23):60-66. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)