

离心泵负载下的电机定子电流特性研究^{*}

龚 波, 袁寿其, 骆 寅, 韩岳江, 董 健

(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心 镇江, 212013)

摘要 为了探索离心泵运行工况与电机定子电流之间的关系,通过数值模拟分析了不同运行工况下的离心泵水力负载转矩特性,可知水力矩呈周期性变化,均值随着流量的增大而增大,水力矩脉动强度均方根随着运行工况偏离设计工况而增大。通过理论分析可知,转矩特征将以工频调制方式反映在电机定子电流中。通过试验测得了电机定子电流,计算了定子电流均方根,并用奇异值分解法(singular value decomposition,简称 SVD)消去电网工频信号,实现反映离心泵运行状态的电流特征提取。结果表明:定子电流均方根(root mean square,简称 RMS)与水力负载转矩的均方根变化特征一致。根据计算处理后的定子电流总谐波失真(total harmonic distortion,简称 THD)可知,THD 呈现出随离心泵运行工况偏离设计工况而增大的趋势。

关键词 离心泵; 水力矩; 定子电流信号; 奇异值分解; 总谐波失真

中图分类号 TH311

引 言

离心泵被广泛应用于生产和生活中,监测离心泵运行状态,保证离心泵的安全可靠运行一直是众多学者研究的焦点。陈长盛等^[1]研究了利用了振动信号来监测离心泵运行状态。Pavesi 等^[2]利用压力脉动信号来监测离心泵内部不稳定流动。这些方法使用的传感器普遍成本高、安装难度大;使用的数据采集、传输、分析系统一般较复杂,信号采集容易受到干扰,结构可靠性较低^[3]。

基于电机定子电流的监测技术兴起于 20 世纪 70 年代,其原理是将感应电动机作为转矩传感器,通过监测电机定子电流信号来监测电机负载的运行状态。国内多用此技术来诊断电机本体的机械部件的故障,而鲜有将其运用于离心泵状态监测上。

由电机驱动的离心泵在运行过程中,叶轮叶片会受到输送介质的反作用力^[4],形成水力负载转矩。水力负载转矩在轴上传递,最终传递到电机转子轴端,并在电机的定子电流上形成响应,因此监测和分析电机定子电流即可实现离心泵的状态监测。Siegler 等^[5]就将这种监测方法应用于海水淡化泵叶轮腐蚀程度的监测上,其准确率高达 90%。此后,美国橡树岭国家实验室(oak ridge national la-

boratory,简称 ORNL)对此方法进行了深入研究,ORNL 主要是利用电机定子电流监测法诊断泵部件的结构故障。Casada^[6]研究了离心泵各工况下转子不对中时的定子电流和瞬时功率的时频特征。Ahonen 等^[7-8]建立了一种通过变频器来实现离心泵运行工况监测的方法,通过从变频器中读出当前电流值和电机的转速,根据已知的泵特性,计算出当前泵的运行工况。

相比于振动信号监测法^[9]和压力脉动监测法等,利用电机定子电流信号分析(motor current signature analysis,简称 MCSA)方法监测离心泵运行状态具有以下优点:①非接触式测量,无需直接在监测设备上安装传感器;②采集的信息集成度高,电机及其负载的几乎全部信息都通过电机定、转子绕组间的气隙磁场变化反映在定子电流中;③能用于振动噪声分析法等不能应用的场合,如潜水泵等^[10]。

在离心泵与电机组成的系统中,当前关于定子电流的研究工作集中于故障特征频率的提取和故障信号能量变化的计算^[11],却很少有关于离心泵运行在多工况下电机定子电流信号特征的研究。文中以 IS-65-50-160 型单级单吸离心泵和 Y160M-2 B3 型电机组成的系统为对象,研究离心泵不同工况下的电机定子电流特性,从定子电流中提取与离心泵运行相关的信息,为实现用定子电流监测离心泵运行

^{*} 江苏省自然科学基金面上资助项目(BK20171403);江苏大学“青年骨干教师培养工程”资助项目(5521440011)
收稿日期:2018-08-09;修回日期:2018-11-29

和分析离心泵内部流动状态提供参考。

1 数值模拟与理论分析

在水泵中,转子轴系上的叶轮叶片会受到输送流体介质的反作用力,产生反向扭转力矩。泵在不同工况、流态下运行会产生不同的扭转力矩^[12-14]。扭转力矩经过转子轴系传递后会在电机转子上产生扭转响应,电机的转子与定子之间存在磁耦合现象,可以通过提取、分析电机定子电流来分析离心泵运行工况。如图 1 所示,若能获得不同流态下水力负载转矩特征及其经过泵转子轴系传递后的在电机定子电流中响应特性,就可依据电机输出信号实现流态诊断。因此基于计算流体动力学(computational fluid dynamics,简称 CFD)技术模拟了不同工况下的离心泵水力负载转矩特征,通过理论分析电机定子电流与离心泵负载转矩的关系,并用试验提取了离心泵不同运行状态下电机定子电流的特征。



图 1 基于电机电信号监测泵状态原理

Fig.1 Condition monitoring principle of pump based on MCSA

1.1 离心泵非定常水力负载矩分析

文中选用 IS-65-50-160 型单级单吸离心泵的设计参数为:设计流量 Q_d 为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 37 m ,转速为 $2\ 900 \text{ r}/\text{min}$,比转速为 81.5 ,叶片数为 6 。对离心泵进行 3 维建模,对过流部件进行网格划分,所有网格均为 6 面体网格,网格质量均满足非定常计算要求,并对网格无关性进行了验证,最终确定全流场网格总数为 $2\ 926\ 876$ 。图 2 为离心泵流道网格划分图。对全流场进行模拟计算,可获得离心泵在各个工况点下的水力矩特征。图 3 为不同工况下的水力矩时域图。可见,在不同工况下水力矩均成周期性变化,且水力矩整体值随流量 Q 增大而增大。



图 2 离心泵流道网格划分图

Fig.2 Mesh of model pump flow field

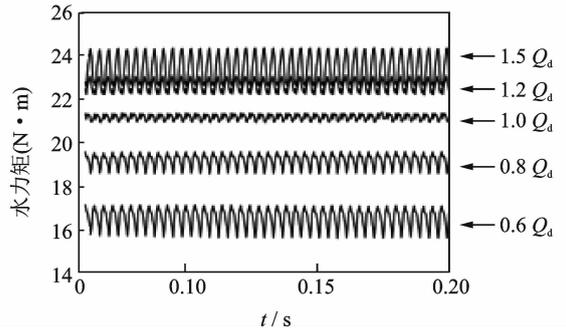


图 3 不同工况下的水力矩时域图

Fig.3 Time domain of hydraulic moment fluctuation under different operating conditions

水力矩的脉动分量强度随运行工况点偏离设计点的距离增大而增大,水力矩脉动分量强度的 RMS 值如图 4 所示。

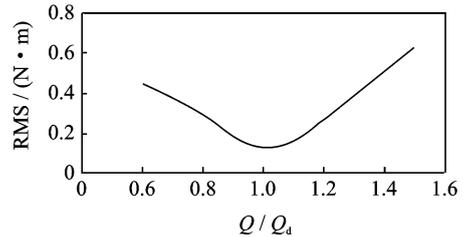


图 4 不同工况下的离心泵水力矩脉动的 RMS 值

Fig.4 RMS of hydraulic moment under different operating conditions

对水力矩时域信号进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform,简称 FFT)得到水力矩脉动分量的频谱图。在水力矩频谱图中,叶频分量 f_2 在水力矩脉动强度变化中居于主导地位,如图 5 所示,其中: f_2 为叶频; f 为频率变量。

水力矩经过转子轴系传递后会在离心泵轴端产生对应的扭矩响应,并最终作为负载施加到电机上。通过水-机-电的联合仿真,即通过 Fluent 进行水力矩非定常计算,通过 Workbench 进行轴系扭矩的提

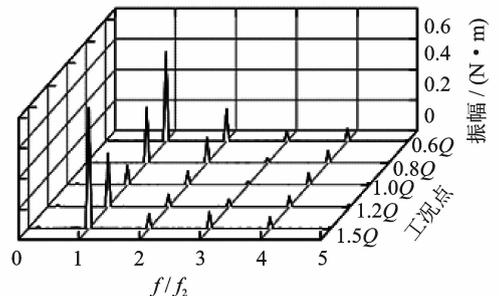


图 5 不同工况下离心泵水力矩脉动分量频谱图

Fig.5 Frequency domain of hydraulic moment fluctuation under different operating conditions

取,运用神经网络进行水力矩到电机负载转矩的辨识,通过 Simulink 进行电机建模,并用 Fluent 中的自定义函数功能(user defined function,简称 UDF)与 Matlab 脚本文件的编写实现 Fluent 与 Simulink 的数据传递,水力矩与轴端矩在稳态时相等,在瞬态时相关性也极高,总体上可视为相等^[15]。湍流、边界层旋涡脱落等不稳定流动现象及不平衡的旋转质量等机械因素也会一定程度上造成轴端扭矩的波动,但这些比水力矩脉动作用要小很多。

1.2 交流感应电动机数学模型

交流感应电动机系统数学模型^[16]可以表示为

$$\begin{cases} T_e = T_L + \frac{J}{p_n} \frac{d\omega}{dt} \\ u = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{dL}{d\theta} \omega i \\ \omega = d\theta/dt \end{cases} \quad (1)$$

其中:第1个式子是传动系统的转矩平衡方程式, T_e, T_L, J, p_n, ω 分别为电磁转矩、离心泵负载引起的轴端扭矩、机组的转动惯量、电机极对数及旋转角速度。

由第1个式子可见, T_L 存在扰动时会引起 ω 发生变化。第2个式子为电机电压平衡方程。式中 u, R, i, L 分别为电机定子电压、电阻、电流和电感参数, θ 为机械扭转角。式中的第2项和第3项为电磁感应电动势, $L di/dt$ 是由于电流变化引起的感应电动势, $\omega i dL/d\theta$ 为转子和定子之间的相对位置变化引起的感应电动势。

由于电网容量较大, u 可视为不随负荷变化。结合转矩平衡方程可知,当轴端扭矩 T_L 存在扰动时会导致 ω 变化,会导致 i 发生变化, i 的改变最终会改变 T_e ,从而形成新的转矩平衡。

可以看出,电流、磁通、扭矩之间的关系较复杂,不能直接由电流的变化情况反映扭矩波动情况。在此采用 M-T 坐标变换^[17]法将问题简化得到各向电流与产生 T_e 的电流分量 i_{sT} 和产生恒定的有效磁通的励磁电流分量 i_{sM} 的关系。

$$\begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin 2\pi f t & \cos 2\pi f t \\ \sin(2\pi f t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(2\pi f t - \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(2\pi f t + \frac{2}{3}\pi) & \cos(2\pi f t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sM} & i_{sT} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

简化后的电磁扭矩、磁场、电流的关系可用下式表示

$$T_e = \frac{3}{4} P \lambda_s i_{sT} \quad (3)$$

其中: P 为电机的结构常数; λ_s 为定子磁通,与电机输入电压、电机结构和负载相关,在泵与电机组成的系统中离心泵可视为稳定负载,扰动转矩对电流的影响很小,所以 λ_s 可视为常数。

因此,可认为 T_e 与其电流分量 i_{sT} 线性相关。由此可见,虽然 i_{sT} 不能直接测量,但通过坐标变换, i_{sM}, i_{sT} 与相电流之间有着定量关系,因此电磁转矩可以间接反映在定子电流中。

假设转轴扭矩的扰动频率是 f_0 ,则感应电动机的气隙扭矩 T 包括平均转矩 T_0 和轴转矩波动 T_1 之和

$$T = T_0 + T_1 \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (4)$$

其中: φ 为电机转轴可能产生的扭振相位。

定子电流由 i_{sM} 和 i_{sT} 组成。 i_{sM} 和 i_{sT} 可分解为平均部分和波动部分

$$i_{sM} = I_{sM_0} + A_{sM} \sin(2\pi f_0 t + \varphi_M) \quad (5)$$

$$i_{sT} = I_{sT_0} + A_{sT} \sin(2\pi f_0 t + \varphi_T) \quad (6)$$

因此,各相电流可分解成 i_{sM} 和 i_{sT} 的组成形式,如A相

$$i_{sa} = I_{sM} \sin(2\pi f_e t) + I_{sT} \cos(2\pi f_e t) \quad (7)$$

化简可得

$$\begin{aligned} i_{sa} = & I_0 \sin(2\pi f_e t + \varphi_0) + \\ & \frac{1}{2} \{ A_{sM} \cos[2\pi(f_0 - f_e)t - \varphi_M] + \\ & A_{sT} \cos[2\pi(f_0 - f_e)t - \varphi_T] \} - \\ & \frac{1}{2} \{ A_{sM} \cos[2\pi(f_0 + f_e)t + \varphi_M] - \\ & A_{sT} \cos[2\pi(f_0 + f_e)t + \varphi_T] \} \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $I_{sM_0} = I_0 \cos \varphi_0$; $I_{sT_0} = I_0 \sin \varphi_0$; $\varphi_0 = \tan^{-1}(I_{sT_0}/I_{sM_0})$

由式(8)可看出,扭矩的波动频率 f_0 会对电网工频形成调制;定子电流主要由平均电流分量和波动电流分量组成,平均电流对应的频率为 f_e ,波动电流在 $f_0 - f_e$ 和 $f_0 + f_e$ 处会有对应的分量,且 $f_0 - f_e$ 处的幅值要大于 $f_0 + f_e$ 处。由前面分析知水力矩与轴端扭矩可认为近似相等,水力矩脉动是造成轴端扭矩波动的最主要原因,因此水力矩脉动的频率对应的为轴端扭矩的波动频率 f_0 ,以调制的方式反应在定子电流信号中。

其他因素,如湍流、边界层旋涡脱落等不稳定流动现象以及不平衡的旋转质量等机械因素,也会一定程度上导致扭矩的波动,但是其影响会远远小于水力矩的影响,并最终也反映在定子电流谐波中。

2 试验与数据采集

在江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心实验室的闭式试验台上对离心泵进行测试。试验装置由储水罐、真空泵、进水管阀、电机、测试泵、涡轮流量计、压力传感器、扭矩仪、轴编码器、直流稳压电源等组成。试验装置示意图如图 6 所示,装置现场布置图如图 7 所示。试验采集的数据有流量、进、出口压力等,采集频率为 10 kHz。其中涡轮流量计安装在排出管路上,基本误差限为;进口阀门为手动式蝶阀,出口阀门为电动阀门,阀门控制器的精度可达 0.1%;进出口压力传感器均为 WIKA S-10 型,精度为 0.25%,安装在进口法兰上游和出口法兰下游 2 倍的管径处;采集的数据通过采集板卡 NI-USB6343 传输到计算机,由计算机完成数据的处理和运行的控制;通过霍尔传感器测得电机定子电流。

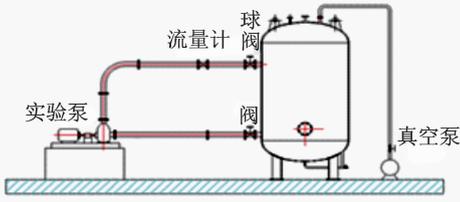


图 6 试验装置示意图

Fig. 6 Schematic of experimental rig



图 7 试验台

Fig. 7 The test platform

整个测试系统是基于 NI 公司的虚拟仪器技术,结合了 PXI 系统和多功能动态数据采集卡组成的硬件测试系统与由 LabVIEW 开发的软件系统,最终形成的一套自动采集数据的系统。其测试原理如图 8 所示。

通过调节出口电动阀门来改变离心泵运行工况,调节阀门后静待 2 min 至工况稳定,开始记录采集到的数据,采样频率为 10 kHz,连续采集 10 s 并

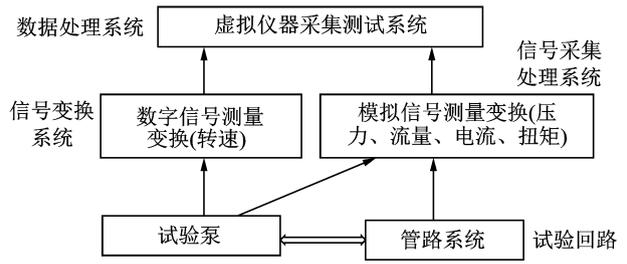


图 8 测试原理

Fig. 8 The principle of test system

保存。再次调节阀门,重复上述操作。直至采集到 $0.1Q_d$, $0.2Q_d$, $0.3Q_d$, $0.4Q_d$, $0.5Q_d$, $0.6Q_d$, $0.7Q_d$, $0.8Q_d$, $0.9Q_d$, $1.0Q_d$, $1.1Q_d$, $1.2Q_d$ 和 $1.3Q_d$ 工况下的试验数据,结束试验。

3 试验结果与信号预处理

为了使得试验数据更加可靠,对每个工况点的试验数据持续采集 10 s,取 10 s 内的平均值,计算得到相关的扬程功率等。根据 3 次外特性试验中采集到的数据绘制该泵的外特性曲线,如图 9 所示。

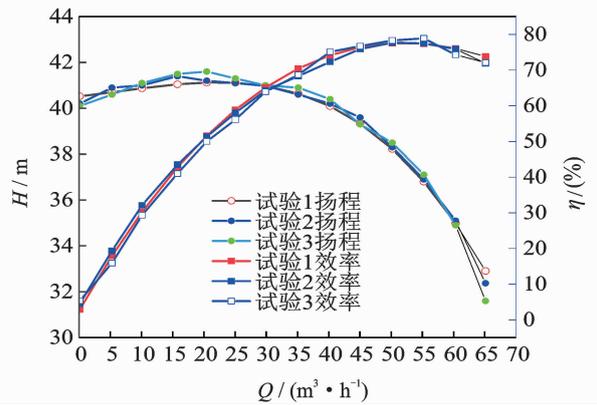


图 9 测试泵外特性曲线

Fig. 9 Performance characteristics of the test pump

从图 9 中可以看出,3 次试验曲线基本一致,可见试验数据可靠性较高。由扬程特性曲线看出,该泵的扬程性能曲线存在着驼峰现象,当流量在 $0 \sim 20 m^3/h$ 时,扬程随流量的增加呈小幅增加趋势,当流量大于 $20 m^3/h$ 时扬程随流量增加呈下降趋势。小流量 ($0 \sim 20 m^3/h$) 下离心泵内部流动不稳定,流动损失较大,此时离心泵内部流体的流动不稳定可能会使得泵产生较大振动,也会造成泵轴上扭矩的波动,产生更多的谐波。由效率曲线可以看出,当离心泵运行在设计工况附近时效率较高,因为当离心泵运行在设计工况附近时流动更稳定,水力损失较小;当离心泵运行偏离设计工况时,因为离心泵偏离

设计工况运行时水力损失较大,导致效率降低。

3.1 定子电流信号时域分析

定子电流的时域图如图 10 所示。由图 10 可知,定子电流总体上符合正弦交流信号特征,频率为与电网工频相同的 50 Hz,可见电网工频信号在定子电流中占据着主导地位,而离心泵负载转矩波动导致的定子电流波动则较弱。对比标准工况下的电机定子电流信号与电源电流发现,其与电源电流正弦交流信号波形有些许偏差,这种偏差可能与离心泵负载有关。定子电流信号的平均大小随着离心泵运行工况而改变,可采用 RMS 来衡量定子电流的平均大小。定子电流的均方根随流量的变化趋势如图 11 所示。

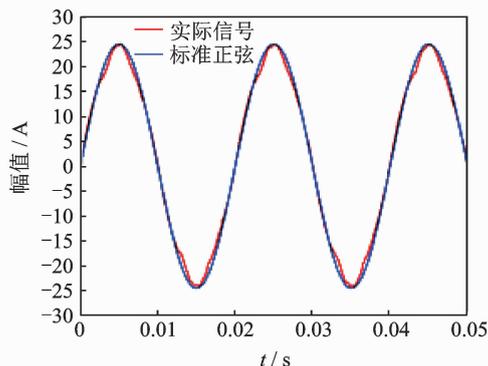


图 10 设计工况下的定子电流时域信号

Fig. 10 Stator current time domain signal at the design point

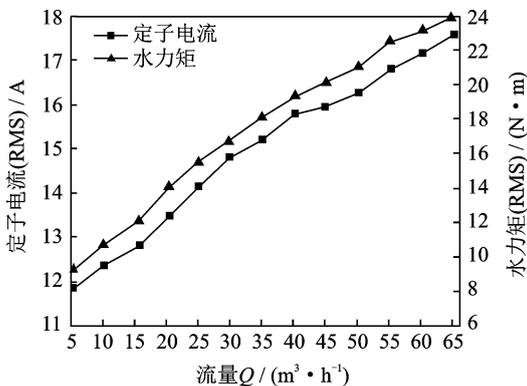


图 11 定子电流和水力矩随流量变化图

Fig. 11 Stator current value and hydraulic torque versus operation point

从图 11 中可见,定子电流与离心泵水力矩随运行工况变化的规律相似,这主要是因为流量的增大流体对叶片的反作用增大导致水力矩增大,水力矩增大使得轴端扭矩增大,电机的输出功率增大,反应在定子电流中为定子电流的增大。因此,定子电流在一定程度上可作为运行工况监测的参考指标。

3.2 定子电流信号的频域分析

为了得到定子电流的频域特性,对采集到的定子电流数据进行 FFT,得到定子电流频域信号如图 12 所示。由图可知,定子电流包括 50 Hz 的绝对主分量及其边带和其谐波分量。由理论分析可知,定子电流在 $f_0 - f_c$ 和 $f_0 + f_c$ 处会有对应的分量,且 $f_0 - f_c$ 处的幅值要大于 $f_0 + f_c$ 处。在试验测得的定子电流频谱中,定子电流在 250 和 350 Hz 处的分量较为明显,其原因是因为脉动频率为 300 Hz 的水力矩经过转子轴系传递到轴端扭矩上形成 300 Hz 的扰动频率,然后扰动频率为 300 Hz 的转子在定子中产生响应,与 50 Hz 的电网频率形成调制现象,最终在定子电流频谱中 250 与 350 Hz 处形成两个分量,且 250 Hz 处的电流分量幅值高于 350 Hz 处,与理论分析相符。可见,定子电流能够在一定程度上包含离心泵水力矩的特征,即离心泵运行工况的特征在一定程度上能通过定子电流体现出来。电网工频处电流的幅值远远大于其他处,可能使得能反映离心泵运行状态的电流很多特征被淹没在强大的电网工频信号中,因此需采取一定方法提取能反映离心泵运行状态的弱信号。

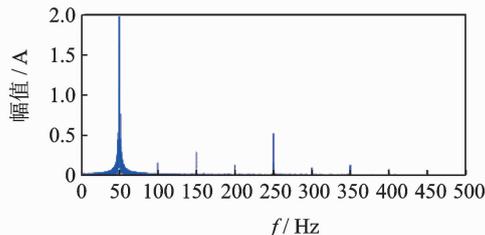


图 12 设计工况下定子电流频谱图

Fig. 12 Frequency characteristic component of the stator current at the design point

3.2.1 定子电流信号的预处理

为了更好地比较不同工况下的定子电流特征,将定子电流按照式(9)作归一化处理,以便在相同的幅值区间内比较不同工况下的定子电流特征。

$$I_1 = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (9)$$

奇异值分解法(singular value decomposition, 简称 SVD)^[18]是一种消除电网工频干扰获得弱信号的有效方法。SVD 是一种起源于线性代数的矩阵分解法,其基本原理在于通过 SVD 处理后信号中的特征成分被分解到不同的正交子空间,在定子电流中,电网工频在定子电流信号中占据着主分量地位,因此电网工频会被分解到第 1 主分量对应的相空间中,这样就可以剔除电网工频对应的电流分量。

奇异值分解法首先需将一组离散的定子电流信号重构成一个 $N \times M$ 的矩阵 \mathbf{A} ,其中 M 为一个周期

的信号长度^[19]。

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_M \\ x_{M+1} & x_{M+2} & \cdots & x_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(N-1)M+1} & x_{(N-1)M+2} & \cdots & x_{NM} \end{bmatrix} \quad (10)$$

然后,将矩阵 A 分解成 U, Δ, V 相乘的形式^[10]

$$A = U \Delta V^T = (u_1 \ u_2 \ \cdots \ u_n) \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \sigma_n & \end{bmatrix} \cdot (\nu_1 \ \nu_2 \ \cdots \ \nu_n)^T \quad (11)$$

取 U 中第 1 列 u_1 , Δ 中第 1 个元素 σ_1 , V 的第 1 列 ν_1 转置相乘构成矩阵,即为基频对应的奇异矩阵

$$\bar{A} = u_1 \cdot \sigma_1 \cdot \nu_1^T \quad (12)$$

$A - \bar{A}$ 即为除去基频后的信号矩阵,将其重构为一个行矩阵,即从原定子电流中消除了基频信号。对 SVD 分解法消除工频分量后的信号进行 FFT,得到如图 13 所示的电流频谱图。

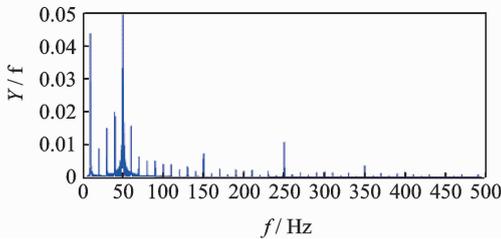


图 13 消除电网工频后设计流量下定子电流频谱图
Fig. 13 Current spectrum after elimination of power frequency at the design point

对比图 12, 13 可知,经过 SVD 处理后,50 Hz 轴频是主要频率,之前被淹没在电网电流信息中的与离心泵运行状况相关的弱信号开始显现出来,信噪比得以提升。

3.2.2 谐波分析

轴端扭矩的波动会以谐波的形式反映在电机定子电流中^[20]。总谐波失真(total harmonic distortion, 简称 THD)是指所有高次谐波幅值均方根与基频幅值之比。THD 反映的是谐波成分的大小,高的谐波失真值意味着高次谐波成分越多,扭矩波动愈强烈,因此计算定子电流的总谐波失真值可用来判断扭矩波动情况,进而反映泵内的流动状态的稳定性。

运用 LabVIEW 程序测得 SVD 处理后的定子电流,得到处理后的定子电流的总谐波失真。各工况下的总谐波失真值如图 14 所示。

结合图 4、图 9 及图 14 分析可知,当离心泵运行在小流量(0~20 m³/h)时,离心泵运行效率低,扬程随着流量的增加而增加,此时对应的定子电流的 THD 较大。小流量时离心泵内部流动的不稳定

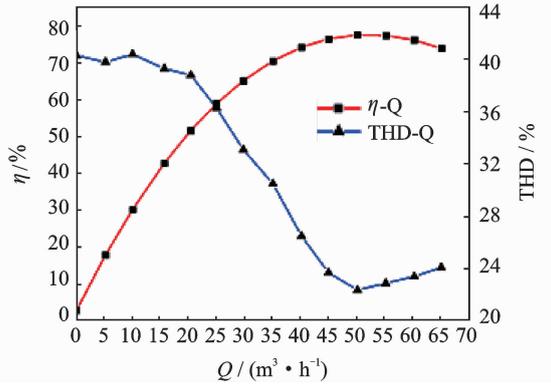


图 14 消除电网工频后不同工况下定子电流 THD 值
Fig. 14 THD of the current at the operation point after elimination of power frequency

性较强,水力矩脉动也较大,导致了轴端扭矩的波动较为强烈,反映在定子电流中为 THD 较大,但是小流量时 THD 随流量变化不敏感。随着流量从 20 m³/h 增加到设计流量附近时,定子电流的 THD 减小,因为随着流量的增加水力矩脉动减弱,泵内部流动趋于稳定。当离心泵运行在高效区(45~55 m³/h),水力矩脉动较弱,泵内部流动较为稳定,定子电流 THD 较低。可见,定子电流的总谐波失真在一定程度上可以反映离心泵内部流动的稳定性。

4 结束语

基于 CFD 数值模拟和理论分析了不同工况下离心泵的水力负载转矩特征及其在电机定子电流上的响应。搭建了试验台,借助于霍尔电流传感器及虚拟仪器技术,测得离心泵在不同运行工况下电机定子电流并对其特征进行了分析。离心泵运行状态改变会引起水力负载转矩的变化,最终通过转子轴系传递到电机定子电流中。分析定子电流特征可实现离心泵运行工况的监测。定子电流均方根与离心泵水力矩随着流量的变化有着相似的变化趋势,可用定子电流均方根实现工况监测。水力矩脉动的频率和强度会以信号调制的方式反映在定子电流中。通过 SVD 分解可实现消除电网工频提取弱信号的目的。消除电网工频后的定子电流 THD 值可为离心泵运行工况和内部流动状态识别提供参考依据。

参 考 文 献

[1] 陈长盛, 马俊, 柳瑞锋, 等. 运行工况对离心泵振动影响的试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(6): 199-202.
CHEN Changsheng, MA Jun, LIU Ruifeng, et al.

- Experimental study on centrifugal pump vibration in different operation conditions[J]. *Noise and Vibration Control*, 2012, 32(6):199-202. (in Chinese)
- [2] PAVESI G, CAVAZZINI G, ARDIZZON G. Time - frequency characterization of the unsteady phenomena in a centrifugal pump [J]. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 2008, 29(5):1527-1540.
- [3] 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 Jiaying, 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)
- [4] 张炎, 李双喜, 蔡纪宁, 等. 多级离心泵平衡装置的性能研究及结构优化[J]. *流体机械*, 2015, 43(10):16-20, 78.
- ZHANG Yan, LI Shuangxi, CAI Jining, et al. Study on performance and structure optimization for thrust equalizing mechanism in multistage pumps [J]. *Fluid Machinery*, 2015, 43(10):16-20, 78. (in Chinese)
- [5] SIEGLER J A, SARKADY A A, NEMARICH C. Motor current signal analysis for diagnosis of fault conditions in shipboard equipment [J]. *Naval Engineers Journal*, 1995, 107(1):77-98.
- [6] CASADA D. Screening pumping systems for energy savings opportunities[J]. *Journal of the Association of Energy Engineering*, 2000, 97(2):43-63.
- [7] AHONEN T, TAMMINEN J, AHOLA J, et al. Sensorless pump operation estimation [C] // *Proceedings of 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*. Piscataway: IEEE, 2009:1-10.
- [8] AHONEN T. Monitoring of centrifugal pump operation by a frequency converter[D]. Lappeenranta: Institute of Energy Technology, Lappeenranta University of Technology, 2011.
- [9] 张克南. MCSA 在异步电机拖动设备故障诊断中的应用[D]. 沈阳:东北大学, 2006.
- [10] LIANG B, PAYNE B S, BALL A D, et al. Simulation and fault detection of three-phase induction motors [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, 61(1):1-15.
- [11] 时献江. 异步电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.
- [12] 祝磊. 离心泵动静干涉作用大涡模拟和压力脉动试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2011.
- [13] 郭义航, 袁寿其, 骆寅, 等. 基于 CFD 的离心泵叶片水力矩非正常特性[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(6):470-476.
- GUO Yihang, YUAN Shouqi, LUO Yin, et al. Unsteady characteristics of blade hydraulic moment in centrifugal pumps with CFD[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(6):470-476. (in Chinese)
- [14] IMAICHI K, IMAICHI K, YOSHIDA Y. An analysis of unsteady torque on a two-dimensional radial impeller[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1992, 114(4):632-637.
- [15] 郭义航. 离心泵扭矩和转速的非正常特性研究[D]. 镇江:江苏大学, 2017.
- [16] YACAMINI R, SMITH K S, RAN L. Monitoring torsional vibrations of electro-mechanical systems using stator currents[J]. *Journal of Vibration & Acoustics*, 1998, 120(1):72-79.
- [17] 苏恒, 洪迈生, 熊诗波. 通过监测电机的定子电流实现齿轮的故障诊断[J]. *上海交通大学学报*, 2000, 34(10):1413-1416.
- SU Heng, HONG Maisheng, XIONG Shibo. Gears fault diagnosis by monitoring stator current [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(10):1413-1416. (in Chinese)
- [18] LI R X, WANG D F, HAN P, et al. On the applications of SVD in fault diagnosis [C] // *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Washington DC: IEEE, 2003, 14(5):3763-3768.
- [19] 刘红星, 姜澄宇, 左洪福. 基于矩阵奇异值分解的信号非周期性程度指标[J]. *南京航空航天大学学报*, 2000, 32(1):114-118.
- LIU Hongxing, JIANG Chengyu, ZUO Hongfu. A signal index aperiodicity degree based on matrix singular value decomposition [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2000, 32(1):114-118. (in Chinese)
- [20] LUO Y, YUAN S Q, YUAN J P, et al. Induction motor current signature for centrifugal pump load [J]. *Archive Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2015(203/210):1989-1996.



第一作者简介: 龚波, 男, 1992年12月生, 硕士生。主要研究方向为离心泵运行状态监测和故障诊断。曾发表《叶轮空蚀状态下离心泵振动特性分析》(《振动与冲击》2020年第39卷第2期)等论文。
E-mail: 18851400759@163.com

通信作者简介: 骆寅, 男, 1986年10月生, 博士、副研究员、硕士生导师。主要研究方向为流体系统监测、诊断及测试分析等。
E-mail: luoyin@ujs.edu.cn

