[电动机]

一种用于电动机故障诊断频谱分辨率提升的级联FFT算法

文/杭旭文　过伟　汪鑫
北京北斗银河科技有限公司

电动机故障诊断算法中故障频谱识别，需要根据采集的电流信号，通过FFT算法计算得到电流信号频谱数据，依据特征频谱数据完成电动机故障类型的诊断。实际计算中，由于嵌入式硬件资源上的不足，无法完成所有采集点数的FFT计算，影响频谱分辨率，降低电动机故障诊断识别的准确度。提出级联FFT在电动机故障诊断中的应用，避免在计算大数据量的FFT时，硬件资源不足的问题，提升了计算的效率和准确度。

异步电动机在发生故障时带来的影响是不容忽视的，轻则生产停工，重则人员伤亡，因此电动机故障诊断技术成为保障石化设备安全生产以及提高生产效率的重要方法。基于电动机定子电流信号分析（Motor Current Signal Analysis，MCSA）的轴承故障诊断算法通常由三步组成：①采集稳定运行状态下电动机定子电流时域信号；②通过快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform，FFT）得到定子电流信号频域中的特征信号；③对特征信号进行分析，分析电动机是否存在故障以及确定故障类型。在电动机故障诊断识别技术当中，FFT算法作为基本的时域频域信号处理的手段，往往占用大量硬件资源，而当前CMSIS-DSP库当中最高仅支持4096点浮点FFT运算，这使得在设计和开发嵌入式系统时，必须仔细权衡性能与成本，以确保系统能够在有限的资源条件下高效运行。级联FFT将长序列时域信号分段成若干短序列进行FFT计算，避免了计算大序列FFT时硬件资源不足的问题，并且有效提升频谱分辨率，从而提升电动机故障诊断的识别准确率。

级联FFT算法原理

级联FFT算法原理是将时域长序列进行分段，组成一个新的二维数组，然后对新的二维序列，先进行列方向的正常的FFT运算，再对变换后的每个元素乘以一个补偿因子，再对之后的元素进行行方向的FFT运算，再按照原序列排列，即可得到输出结果。

具体实现过程为，对于一个总序列长度为$M\times N$的时域序列信号$x(p+qN)$，$p=0,1,2,\cdots,N-1$；$q=0,1,2,\cdots,M-1$，依据级联FFT的处理方法，可以将原长序列表现为二维$M\times N$矩阵，由此排布得到新的序列，对新得到的二维序列进行行方向N点FFT运算，再进行列方向M点FFT运算，运算结果为

$$X(p+qM)=FFT_m\{FFT_n[x(n+mN)]\}=\sum_{m=0}^{M-1}e^{-\frac{j2\pi mp}{M}}\left(\sum_{n=0}^{N-1}x(n+mN)\cdot e^{-\frac{j2\pi mq}{N}}\right)\quad(1)$$

式中，$q=0,1,2,\cdots,N-1$；$p=0,1,2,\cdots,M-1$

式（1）结果为基本级联FFT算法的结果。

对于一个长度为$M\times N$的长时域序列信号$x(p+qN)$，$p=0,1,2,\cdots,N-1$；$q=0,1,2,\cdots,M-1$，直接进行离散傅里叶变换，可以得到频谱为

$$X(p+qM)=\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}x(n+mN)e^{-j2\pi(p+qM)(n+mN)/MN}\quad(2)$$

式中，q=0,1,2,⋯,N−1；p=0,1,2,⋯,M−1

因此，在仅进行行和列FFT后的结果与完整序列的FFT变换的结果，即是$\exp(-j2\pi np/MN)=1$的情况下，仅进行行和列FFT后的结果与完整序列FFT变换的结果一致。因此，假定因子$\exp(-j2\pi np/MN)=1$，但实际过程中，该因子是一个关于n和p的变量，在$p\neq0$时，该因子不为1。因此如果不对行序列FFT计算的结果进行修正的话，将产生较大误差，对最终结果产生影响。

由于傅里叶变换具有线性特性，因此行和列的变换顺序并不会影响级联FFT的最终结果，所以，将级联FFT变换的过程更换行和列变换顺序，先进行列变换，再进行行变换，可以得到

$$\begin{aligned} X(p+qM) &= \mathrm{FFT}_n\{\mathrm{FFT}_m[x(n+mN)]\} \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} e^{-\frac{j2\pi mq}{N}} \left(\sum_{n=0}^{N-1} x(n+mN)\cdot e^{-\frac{j2\pi mp}{M}} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

可以发现，因子$\exp(-j2\pi np/MN)$并不会对列FFT结果产生影响，因此，只要在行FFT计算前对其进行补偿消除即可

$$\begin{aligned} X(p+qM) &= \sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1} x(n+mN)e^{-j2\pi n(q+p/M)/N} \times e^{-j2\pi mp/M} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi n(q+p/M)/N \sum_{m=0}^{M-1} x(n+mN)e^{-j2\pi mp/M}} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} e^{-\frac{j2\pi nq}{N}} e^{-\frac{j2\pi np}{mn}} X(p,n) \end{aligned} \tag{4}$$

$X(p,n)$表示行向量FFT计算结果，因此需要增加的补偿因子为$e^{-\frac{j2\pi nq}{N}}$。到此，实现了长序列FFT分解成为二维数组FFT运算的过程，该算法提高故障诊断频谱的分辨率，对电动机故障频谱中的细微信号的显现提供了帮助。

算法仿真验证

图1的实验数据实例来自电动机仿真实验故障中的电动机轴承故障，实验仿真模拟在61 Hz、66.5 Hz、72 Hz、75 Hz当中存在故障特征信号，时域采样频率为12.8 kHz，采样时间为10.24 s，总采样点数为131 072。图1当中表现的电流频谱波形为时域数据下采样后，满足硬件FFT计算条件后进行硬件FFT后得出的频谱数据，图2为采用级联FFT，分段方式为M=4 096，N=32后FFT运算结果，图3为上位机进行的全序列FFT运算结果。

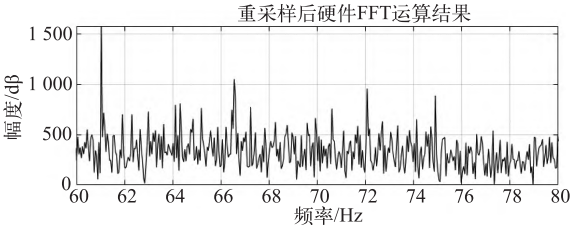


图1　重采样后硬件FFT运算结果

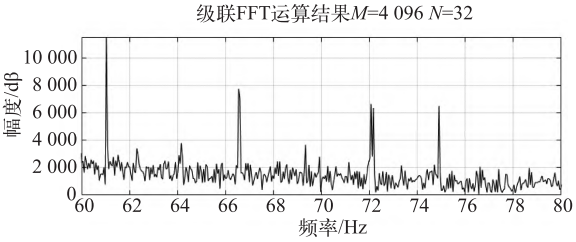


图2　级联FFT运算结果 M=4096 N=32

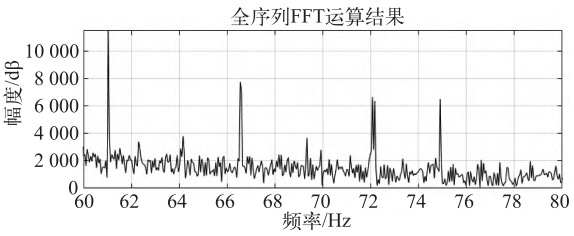


图3　全序列FFT运算结果

从运算结果可以看出，通过补偿因子进行计算后的级联FFT，实现上位机中全序列FFT运算结果。其特征频谱信号幅度均优于重采样后硬件FFT运算结果，轴承故障特征信号更为清晰，有效地抑制噪声对特征信号的干扰，减少FFT计算的时间长度，对电动机故障诊断识别准确率有一定提升。

结束语

本文在电动机故障诊断当中，提出一种基于硬件计算的级联FFT算法。该方法对时域电流波形进行二维重整，根据FFT运算的特性，首先进行列方向FFT运算，然后对每一组数据进行补偿因子补偿，再对补偿后的数据进行行方向FFT运算，最终得到运算结果，并且实现了全序列FFT运算的效果。该方法能够避免受到硬件FFT运算资源不足的限制，实现通过短序列FFT运算达成全序列FFT的目的，提升了信噪比，使得电流频谱特征信号更为明显，提升电动机故障诊断的准确性。EA

(收稿日期：2024-09-29)