

基于工作电流信号的设备摩擦状态监测研究

王仁德, 李国富*, 姜益蓓

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对机床类设备运行过程中摩擦状态的变化, 提出基于设备工作电流信号的小波分析, 利用小波系数重构各高频带信号, 计算各信号的能量值, 构造出能量特征向量. 通过分析不同时刻各频带的能量值, 提取包含摩擦信息的特征能量值, 以此作为分析与监测设备摩擦状态的特征量. 结果表明, 分析来源于设备工作电流信号的摩擦特征量变化曲线, 可以获得设备工作过程的摩擦状态, 对于实现设备摩擦状态的在线监测具有重要意义.

关键词: 电流信号; 小波分析; 特征能量值; 摩擦特征; 摩擦状态监测

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 05-0036-04

摩擦状态对设备运动部件及其性能有着重要的影响^[1-2]. 为及时发现并改善由摩擦引起的负面作用, 需对设备工作过程中的摩擦状态进行监测与分析, 而摩擦产生机理、影响因素及摩擦检测方法和手段是摩擦研究的重要内容. 谷运龙等^[3]为实现对轴系摩擦力矩的测量, 基于平衡力矩法, 设计了由伺服驱动部件-弹性扭杆-扭矩传感器部件-轴系部件构成的摩擦力矩测试系统. 张涛等^[4]在研究交流伺服工作台摩擦力时, 通过设计一种改进的应变式扭矩传感器, 间接测取了摩擦力信号. 张有强等^[5]基于对两自由度干摩擦振动系统力学模型的数值模拟, 研究了由干摩擦导致的复杂粘滑振动行为. Atlati 等^[6]通过引入一个随时间变化的摩擦系数, 研究了加工时刀具与工件表面的摩擦情况. 张飞霞等^[7]基于摩擦实验, 分析了所研制的重载汽车刹车片摩擦材料的性能. Meziane 等^[8]通过建立数值有限元模型, 研究了梁接触时产生的摩擦振动现象.

由于设备运行时产生的摩擦比较复杂, 直接测量存在较大难度, 若可以利用设备工作电流包含的摩擦状态信息来间接反映设备工作过程摩擦状态的变化, 则无疑可以有效降低摩擦测量的复

杂性. 电流信号分析法的实质是利用负载力矩与电流的对应关系, 实现对设备的监测^[9], 具有传感器安装及信号测量方便, 对工作环境要求不高等特点, 对于传感器安装困难、封闭系统等工作场合的设备参数测量尤其具有实际意义. 基于工作电流信号监测设备摩擦状态的基本思路是通过小波分析、重构设备工作电流小波分解系数、计算各频带能量, 并利用某些频带内电流信号能量随摩擦状态改变产生相应变化的特点, 提取摩擦特征量, 用以分析和监测设备的摩擦状态.

1 原理分析

1.1 小波变换

小波变换是一种时频局部化方法, 在时域和频域内都有很好的局部化性质, 具有对信号的自适应性, 因而在工程技术和信号处理方面获得广泛应用.

经过多次实验分析, 选择了 db4 小波函数对采集的电流信号进行 4 层小波分解, 分别提取 1~4 层的高频系数. 本文以 2 层小波分解为例, 图 1 是其分解树结构, 图中各节点均代表一定的信号特征, s 为原始信号, A_i 为小波分解的第 i 层低频系数, D_i 为

收稿日期: 2016-02-23.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY12E09001); 宁波市自然科学基金 (2015A610150); 宁波市重点学科项目 (XK115D223); 浙江省新苗人才计划 (2015R405072).

第一作者: 王仁德 (1979-), 男, 安徽滁州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机电测控及信号分析. E-mail: wrd_kezhen@sina.com

*通信作者: 李国富 (1966-), 男, 浙江温州人, 教授, 主要研究方向: 机电测控及现代制造系统. E-mail: liguofu@nbu.edu.cn

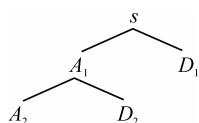


图1 小波分解树结构

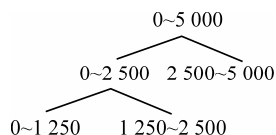


图2 小波分解频率分布

小波分解的第 i 层高频系数。假设信号最高频率为 5 000 Hz, 则小波分解频率分布如图 2 所示。

通过小波分解系数重构, 可以提取各频带信号。在进行 i 层小波分解后, 原始信号 s 为:

$$s = s_{D_1} + s_{D_2} + \cdots + s_{D_i} + s_{A_i}, \quad (1)$$

其中, s_{D_i} 表示高频系数 D_i 的重构信号; s_{A_i} 表示低频系数 A_i 的重构信号。

1.2 能量特征向量

由于电流信号包含摩擦信号, 当存在摩擦变化时, 在某些频带内电流信号的能量就会产生变化, 而这些频带内能量就包含了相应的摩擦信息。

(1)各高频频带信号总能量计算。若 E_{D_i} 为第 i 层高频系数重构信号 s_{D_i} 对应的能量, 则

$$E_{D_i} = \int |s_{D_i}|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{ik}|^2, \quad (2)$$

其中, x_{ik} (i 表示各层层数; $k=1, 2, \dots, n$) 表示重构信号 s_{D_i} 离散点的幅值。

(2)构造特征向量。由于摩擦的存在会影响信号能量, 因此以能量为元素构造特征向量 T :

$$T = [E_{D_1}, E_{D_2}, \dots, E_{D_i}, \dots]. \quad (3)$$

1.3 摩擦状态变化的分析依据

润滑目的是在摩擦副相对运动表面之间加入润滑剂, 以降低摩擦阻力和运动表面磨损, 保证设备正常运转, 延长设备使用寿命, 减少能源消耗。当组成摩擦副的构件之间产生相对运动时, 若接触表面间没有润滑剂, 则构件处于干摩擦状态; 在添加润滑剂后, 随着运动构件表面间润滑剂油膜的逐渐形成, 构件间的润滑状态也逐渐改善; 而随着润滑剂的逐渐消耗, 运动构件间的润滑状态也相应地出现由好变差的趋势。

传统摩擦学认为, 摩擦接触表面间的润滑状态与其润滑剂油膜厚度直接相关, Stribeck 摩擦曲

线表示的摩擦模型就是摩擦表面相对滑动速度与油膜厚度的关系。在摩擦表面相对滑动速度比较恒定时, 接触表面间的油膜厚度与润滑剂消耗量直接相关。文献[10]研究了正常滑动摩擦磨损状态下摩擦力矩的变化趋势, 并通过实验测得如图 3 所示的摩擦状态变化的“浴盆”曲线。

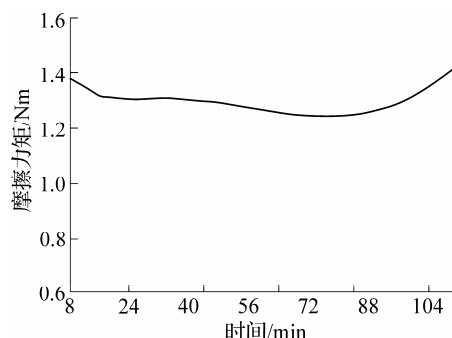


图3 正常滑动摩擦磨损摩擦力矩的变化

图 3 中, 摩擦状态变化的“浴盆”曲线大致可以分为 3 个阶段: (1)在初始磨合阶段, 摩擦力矩相对较大, 且呈递减趋势; (2)正常工作阶段, 经过磨合, 该阶段接触表面润滑状态良好, 摩擦力矩相对较小且比较平稳; (3)快速磨损期, 摩擦力矩快速增加。若在设备工作过程中, 其电流信号某特征量的变化趋势与图 3 中的曲线相符, 则表明可以通过分析设备工作电流信号的特征值, 实现对设备摩擦状态的监测。

2 摩擦特征的提取

2.1 工作电流信号的采集

工作电流信号采集原理如图 4 所示, 电机功率 370 W, 转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; 轴的一端由轴承支撑, 以在较长时间内保持摩擦状态基本稳定, 轴的另一端在铜轴套内转动, 且开始工作时在铜轴套内加润滑油。利用霍尔传感器采集、数字存储示波器记录设备工作过程的电流信号, 作为分析摩擦状态的原始数据。工作电流信号采样频率为 10 kHz,

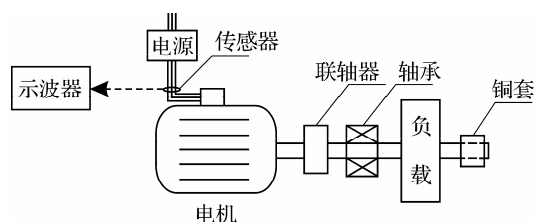


图4 工作电流信号采集原理

采集长度点数为 100 k, 分析长度点数为 10 000.

2.2 摩擦特征的提取

利用工作电流信号监测设备摩擦状态的核心工作是提取能反映设备摩擦状态的特征信息. 文献[9]表明, 在采用电流信号分析法的设备故障诊断中, 故障特征频率在电流信号中是以与电网频率调制的表现形式出现, 且满足 $f = |f_m + f_c|$ 的调制规律. 式中, 调制频率为 f , 故障特征频率为 f_m , 电网自身频率为 f_c . 若 f_m 高于电网频率, 在工作电流频谱图中反映的是折叠调制方式; 若 f_m 低于电网频率, 则在频谱图中对称调制于电网频率的两侧. 文献[11-12]的研究表明, 摩擦系统是非线性系统, 并没有固定的时频特征. 摩擦信号中包含许多边频, 设备的摩擦状态特征与其磨损机制有关, 磨损机制不同, 摩擦状态的特征信息也不相同^[13-14]. 基于上述原因, 考虑通过对实验数据的对比分析, 提取设备工作电流中的摩擦状态特征信息.

3 实验结果及其分析

实验时, 待电机稳定运行后, 每隔 5 min 采集 1 次电流信号, 连续采集 45 组, 具体数据参见文献[15], 再利用 Matlab 8.0 对采集的电流信号进行分析.

由于摩擦信号相对微弱, 为了减少电网频率、主轴频率以及其他谐波的干扰, 对采集的电流信号采用 4 层小波变换, 每隔 15 组抽取 1 组, 计算其小波高频系数重构信号的能量, 相关数据见表 1.

表 1 小波重构的高频系数能量 E_{D_4}

组数	E_{D_4}	E_{D_3}	E_{D_2}	E_{D_1}
1	0.318 9	0.079 8	0.074 5	0.111 2
15	0.310 8	0.081 2	0.083 8	0.123 2
30	0.299 0	0.076 2	0.079 8	0.116 2
45	0.347 7	0.080 2	0.080 8	0.120 1

表 1 中, 第 4 层高频系数重构信号的能量值 E_{D_4} 相对较高, 且变化相对较大, 而其他高频系数重构的能量值基本不变.

图 5 是任选一组采集的数据进行 4 层小波分解的系数重构图. 图形表明, 在高频系数重构信号中, 第 4 层的高频系数 D_4 重构的信号幅值较大.

表 1 和图 5 表明, 第 4 层高频系数 D_4 对应的频带由于摩擦信息的存在, 其重构信号 s_{D_4} 幅值和

能量值较大, 所以第 4 层小波高频系数可以作为重

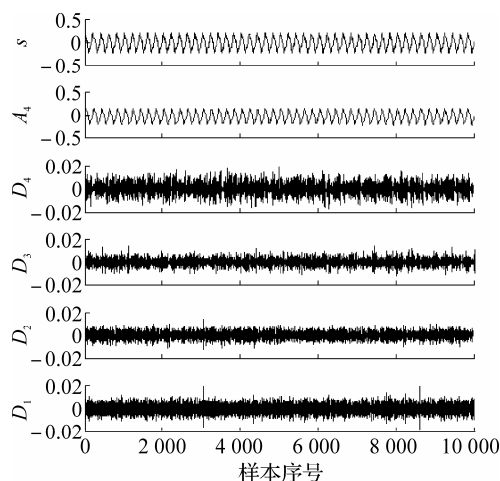


图 5 小波系数重构

构信号的分析对象.

对所测数据分别进行小波分解和小波系数重构, 并对小波系数 D_4 的重构信号 s_{D_4} 计算其能量值 E_{D_4} , 其离散点图和用最小二乘法对数据进行 6 阶多项式拟合的曲线如图 6 所示.

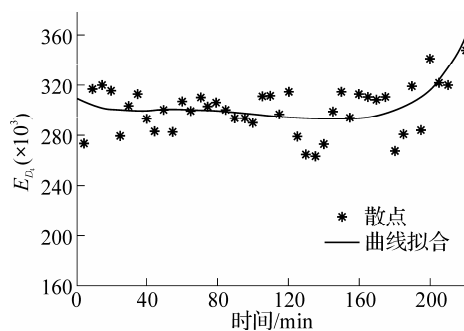


图 6 E_{D_4} 随时间的变化曲线

从图 6 可以看出, E_{D_4} 的变化过程大致可分为 3 个阶段: (1) 在 0~30 min, E_{D_4} 较大, 且有明显的减小趋势, 与磨合阶段摩擦力矩变化趋势相似; (2) 在 30~160 min, 轴与轴套间接触表面润滑状态良好, E_{D_4} 相对较小且比较平稳, 与正常工作阶段摩擦力矩变化趋势一致; (3) 在 160 min 后, E_{D_4} 增速明显加快, 与快速磨损阶段摩擦力矩变化趋势一致.

通过对 E_{D_4} 变化趋势的多次实验分析, 都符合图 3 的“浴盆”摩擦曲线, 表明从设备工作过程负荷电流中提取的能量值 E_{D_4} 与摩擦状态有较为一致的变化趋势, 所以可采用基于工作电流信号的小波系数构造能量值提取设备摩擦状态特征信号的方式, 以实现了对设备工作过程摩擦状态的监测.

4 结论

(1)设备摩擦状态的变化导致电机提供的输出力矩产生变化,从而使驱动设备工作的电机电流产生相应变化;与之对应,包含摩擦信息的电流信号的频带幅值(即能量值)也会产生相应变化。

(2)用小波分析方法对设备工作电流信号各高频系数进行重构,可以获得高频带信号包含的摩擦信息。

(3)设备工作电流特定高频带信号能量值可以作为摩擦状态监测的特征量,其随时间变化曲线的3个阶段与“浴盆”曲线基本一致,可用于设备工作过程摩擦状态的监测。

参考文献:

- [1] 李国宾, 黄业华, 魏海军. 基于 Nyquist 稳定判据的磨合过程稳定性研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(4):325-331.
- [2] Hoomberg K, Siilasto R, Laitinen T, et al. Global energy consumption due to friction in paper machines[J]. Tribology International, 2013, 62(62):58-77.
- [3] 谷运龙, 姜万生, 秦现生, 等. 轴系摩擦力矩测试系统的设计与实现[J]. 机械制造, 2014, 52(2):59-61.
- [4] 张涛, 路长厚, 裘著燕. XY 交流伺服工作台摩擦实验方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6):479-481.
- [5] 张有强, 丁旺才. 两自由度干摩擦振动系统粘滑运动分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(7):184-187.
- [6] Atlati S, Haddag B, Nouari M, et al. Effect of the local friction and contact nature on the built-up edge formation process in machining ductile metals[J]. Tribology International, 2015, 90:217-227.
- [7] 张飞霞, 李长生, 陈贝贝, 等. 重载汽车用刹车片摩擦材料研制与性能试验[J]. 热加工工艺, 2015, 44(20):55-58.
- [8] Meziane A, Baillet L. Non-linear analysis of vibrations generated by a contact with friction[J]. European Journal of Computational Mechanics, 2010, 19(1/3):305-316.
- [9] 张克南, 陈一军, 谢里阳, 等. 电机电流分析法在机床类设备诊断中的应用研究[J]. 机床与液压, 2007, 35(3):196-198.
- [10] 张菊, 包春江, 杨志伊. 润滑滑动摩擦磨损实验及其铁谱监测技术研究[J]. 农机化研究, 2006(4):161-163.
- [11] 吴兆宏, 朱华, 李刚. 摩擦信号分形维数与载荷和速度的关系研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(2):161-165.
- [12] 朱华, 葛世荣. 摩擦力和摩擦振动的分形研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(5):433-437.
- [13] 孙迪, 李国宾, 魏海军, 等. 磨合磨损过程中摩擦振动变化规律研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(2):166-170.
- [14] 李国宾, 任宗英, 王宏伟, 等. 摩擦振动信号谐波小波包特征提取[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(5):452-456.
- [15] 王仁德. 基于工作电流信号的设备摩擦状态监测方法研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2016.

Study on the friction condition monitoring of devices based on operating current signal

WANG Ren-de, LI Guo-fu*, LOU Yi-bei

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In view of the device's friction condition variation during operating, the wavelet analysis technique for current signal is applied to the friction condition testing and analysis. Firstly, the different high frequency band signals are reconstructed using the wavelet transforms. Energy eigenvector is constructed by computing the energy of these signals. Then, the friction feature energy value is computed by comparing the different frequency bands, which can be used to monitor friction condition. Experiments show that the analysis on the curves of the friction feature energy value originated from operating current signals helps to identify the fiction condition of the device, and it may contribute to implementing the on-line friction condition monitoring.

Key words: current signal; wavelet analysis; feature energy value; friction feature; friction condition monitoring

(责任编辑 章践立)