

# 基于电流信号的液压设备状态监测技术研究

马玉,谷立臣

## The Technical Analysis of Condition Monitoring and Measuring for the Hydraulic Devices Based on Current Signal

MA Yu, GU Li-chen

(西安建筑科技大学机电学院,陕西西安 710055)

**摘要:**通过大量理论与试验验证发现:机械工程中液压设备的许多故障信息是以调制的形式存在于所监测的电气信号及振动信号中,借助硬件解调电路及软件希尔伯特变换对这些信号进行解调处理,通过监测调制信号以达到对整个液压系统的状态监测。该文介绍了硬件解调电路、希尔伯特变换的解调原理以及基于电流信号借助 DSP 的电动机功率监测的方法。

**关键词:**液压设备;电流信号;希尔伯特变换;状态监测;DSP

中图分类号:TP77 文献标识码:B 文章编号:1000-4858(2005)07-0025-04

### 1 前言

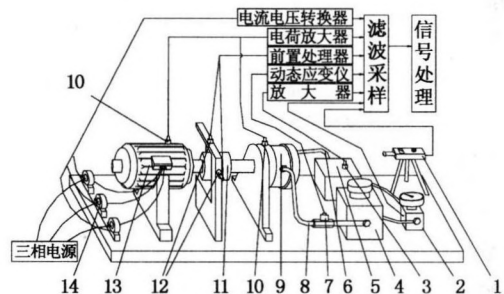
在机械设备中,液压系统是主要传动方式之一。液压系统以其快速响应、大功率、高性能及易于远程操作与控制等特点,被作为一种主要动力装置广泛应用于各种机械设备中。其规模与复杂性日益提高,元件及系统的故障与失效原因也变得更加复杂,由于操作中对液压系统的使用维护水平不高,故障时有发生。所以对液压系统状态监测与故障诊断的研究具有很大的现实意义。目前,液压系统状态监测与故障诊断的信号源主要有:油压、流量、振动、油液温度和磨损等,相对来说,这些信号的获取代价较高,而且容易受到干扰。为此,我们通过理论分析和大量试验发展了一种基于电流分析的液压动力系统运行状态识别方法,对电机及液压系统的功率实现了在线监测,提出了故障识别的可能性,该方法快捷有效适合于各种液压设备,具有较为广阔的应用前景。

### 2 系统总体构成与硬件设计

#### 2.1 试验系统

为了研究液压动力系统中被监测参数之间的动态关系,找到更合适的故障诊断方法,我们设计了如图1所示的试验系统<sup>[1]</sup>。

图1中,三相异步电动机13通过弹性联轴器11带动齿轮泵9转动,加载溢流阀4调整泵的出口压力,通过调整溢流阀的工作压力使液压泵和电动机承受冲击负载,负载的大小与溢流阀工作压力成正比。该实验系统安装了电涡流和压电测振传感器,油液压力、温



1. 声级计 2. 铁谱、流量仪 3. 温度传感器 4. 加载溢流阀
5. 油箱 6. 进油管 7. 压力传感器 8. 出油管 9. 齿轮泵
10. 压电传感器 11. 弹性联轴器 12. 水平、垂直电涡流传感器
13. 三相异步电动机 14. 电流互感器

图1 液压动力系统多源信息获取试验系统

度、流量传感器,声级计,电流互感器等8种获取信息的传感器,该试验系统能够模拟出液压动力系统的常见故障。

通过对液压动力系统的动力学模型及机电液参数耦合机理分析,我们总结出电动机-液压泵转子系统各物理参量动态耦合的过程:当负载增大时,液压泵出口压力升高,通过机电耦合,使电动机定、转子电流增加。若电动机发生故障(如短路,断条等),必使其电感发生变化,再导致电流变化,也会通过扭振系统的耦合,影

收稿日期:2004-12-20

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2003E2\_03)

作者简介:马玉(1978—),女,陕西榆林人,助教,在读硕士研究生,主要从事电力、电子及液压技术方面的科研和教学工作。

响油压和振动参数。如果液压泵发生故障,会使液压泵的压力、效率、流量发生变化,从而引起定子、转子电流的变化。电流信号中隐藏着反映电动机、液压泵以及机械装置运行状态的信息。还可以通过监测电动机定子电流信号来间接监测电机功率以及液压泵的功率。

2.2 电流信号的获取

在图 1 所示的试验系统上通过电流互感器测取电流信号。在电流互感器输出端并上一个电阻  $R$  后构成一个电流传感器,  $R$  两端的电压  $U$  是电流传感器的输出电压,模拟电压  $U$  实质是一经过调制的电压信号,经过解调、滤波后经 A/D 转换后送到数字信号处理系统进行信息处理。由互感器获得的信号一般比较小,还要经过放大、滤波等信号预处理。

在信号处理时,通常都会遇到有用信号中混入(叠加)噪声的问题,消除或减弱噪声对信号的干扰,是信号处理中的一种最基本且重要的技术。根据有用信号与噪声不同的特性,抑制不需要的噪声或干扰,提取出有用信号的过程称为滤波。滤波的功能可以通过模拟滤波器或数字滤波器来实现,根据所分析问题的需要,可选用低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器或带阻滤波器等。

例如,在图 1 所示的试验装置上我们获取反映液压系统加载过程的调制信号时,选用巴特沃斯二阶有源低通模拟滤波器,下限频率为 2 Hz 超低频。其原因为液压系统加载过程通常是一缓变过程,且系统受冲击负载的频率也是非常低的。因此,所监测的信号在分析之前,要根据被监测对象选用合适的滤波器。

系统流程框图如图 2 所示

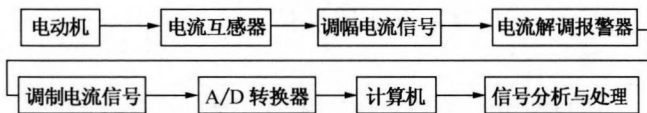


图 2 基于电流信号的系统监测框图

机械工程中我们所监测到的振动信号或电气信号中许多信号是调制形式的,即故障特征信号和固有频率信号之间调制作用而形成的信号。图 3 是在图 1 所示的试验装置上系统加载时测取电动机一相定子电流信号,从图 3a 的时域波形可以看出,系统加载时定子电流信号为幅度调制信号,载波信号的频率为电网频率,而调制信号为一随机信号,其频率与幅度的变化随系统负载的变化而不断变化。图 3b 为经过硬件解调电

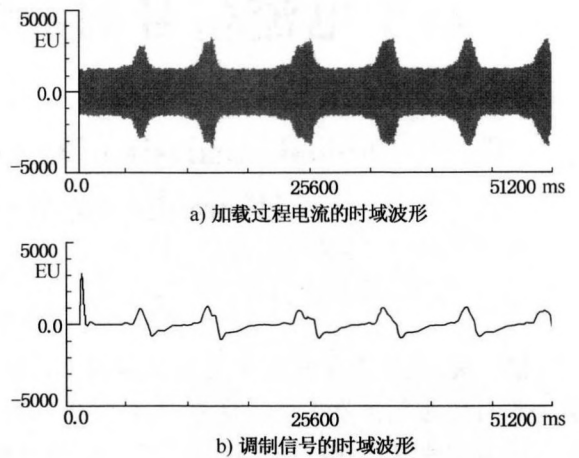


图 3 时域波形图

路后得到的调制信号时域波形,时域波形记录了负载变化过程,电机起动电流较大,电流为正值时表示系统加载,为负值表示系统卸载,可以方便实时地在线监测液压系统运行工况,超载越限时报警。图 4 为电流解调报警装置的硬件电路框图。

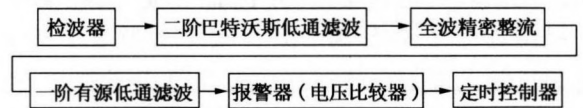


图 4 电流解调器硬件电路框图

当液压系统超载或承受冲击时,电流信号对系统状态及典型故障最敏感,同样调制信号也携带相对应的故障特征信息。我们可以通过对调制信号的功率谱分析来识别液压系统故障(电动机故障、机械故障及液压泵故障)。

3 希尔伯特变换的解调原理与实现

希尔伯特(Hilbert)变换是信号分析的重要工具,是由德国数学家 Hilbert 提出的。给定一连续的时间信号  $X(t)$ ,其希尔伯特变换  $\hat{X}(t)$ 定义为:

$$\text{正变换 } \hat{X}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi t} X(t) \quad (1)$$

$$\text{反变换 } X(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{x}(\tau)}{t - \tau} d\tau = -\frac{1}{\pi t} \hat{X}(t) \quad (2)$$

将式(1)和式(2)结合起来构成一个解析信号:

$$x_a(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (3)$$

上式为一复数信号,实部为给定信号  $x(t)$ ,虚部为其希尔伯特变换  $\hat{x}(t)$ 。

该解析信号的幅值相位表达式为:

$$x_a(t) = A(t)e^{j\phi(t)}$$

$$\text{其中 } A(t) = \sqrt{[x(t)]^2 + [\hat{x}(t)]^2} \quad (4)$$

$$\phi(t) = \arctan\left[\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}\right] \quad (5)$$

幅值  $A(t)$  是给定信号  $x(t)$  的包络线, 即调制信号。

图 5 为利用希尔伯特变换进行幅值解调的过程。从工业现场采集大量的数据, 通过编程实现解调, 是我们分析处理数据进而进行故障诊断的有效方法。

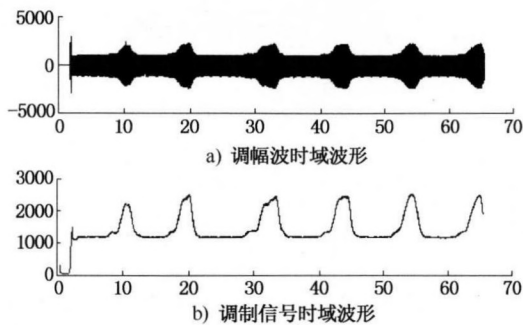


图 5 幅值解调过程

图 3 与图 5 相比解调的效果更理想, 硬件解调相对于软件解调的优点在于: 实时性强、精度高、速度快、可靠性高。

#### 4 电动机-液压泵功率数学模型

根据电机学理论, 忽略谐波影响, 忽略磁饱和, 忽略铁损及定子电阻时, 异步电机定子电流<sup>[3]</sup>

$$I_1 = \frac{U_1 \sqrt{L_2^2 \Delta\omega^2 + R_2'^2}}{\omega_1 L_1 \sqrt{\sigma^2 L_2^2 \Delta\omega^2 + R_2'^2}} \quad (6)$$

式中  $L_1 = L_m + L_{11}$ ;  $L_2 = L_m + L_{12}'$ ;  $\Delta\omega$  为转差角频率;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}$  为漏感系数;  $R_2'$  为折算到定子侧的转子每相电阻;  $L_{11}$  为定子每相漏感;  $L_{12}'$  为折算到定子侧的转子每相漏感;  $L_m$  为励磁电感;  $U_1, \omega_1$  为定子相电压和供电角频率。

按电动机的功率关系求得电动机的转矩为:

$$T = 3n_p \left(\frac{U_1}{\omega_1}\right)^2 \frac{L_m^2 R_2'}{L_1^2} \frac{\Delta\omega}{\sigma^2 L_2^2 \Delta\omega^2 + R_2'^2} \quad (7)$$

其中  $n_p$  为极对数。在忽略定子损耗时, 异步电动机电磁功率  $P_m$  与输入功率  $P_1$  有如下关系:

$$P_1 = P_m = T\omega_1 \quad (8)$$

按功率因数定义, 异步电动机功率因数为:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{s} = \frac{T\omega_1}{3U_1 I_1} \quad (9)$$

式中  $s$  为转差率。

把式(6)、(7)代入式(9)得:

$$\cos\varphi = \frac{n_p L_m^2 R_2' \Delta\omega}{L_1 \sqrt{(\sigma^2 L_2^2 \Delta\omega^2 + R_2'^2)(L_2^2 \Delta\omega^2 + R_2'^2)}} \quad (10)$$

对于一个确定的电动机, 除了  $\Delta\omega$  外其他物理量是不变的, 所以电动机的功率因数取决于转差角频率, 由式(7)和式(10)可知转差角频率又与电动机转矩相关, 所以功率因数与转矩有关。

电机从电网吸收的功率:

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi \quad (11)$$

电机输出功率:

$$P_2 = P_1 \eta_d \quad (12)$$

式中  $\eta_d$  为电动机效率。

液压泵的输入功率:

$$P_i = P_2 \eta_l \quad (13)$$

式中  $\eta_l$  为弹性联轴器传递效率。

将式(11)、(12)代入式(13)可得:

$$P_i = 3U_1 I_1 \cos\varphi \eta_d \eta_l \quad (14)$$

液压泵的输出功率:

$$P_o = P_i \eta_p \quad (15)$$

式中  $\eta_p$  为液压泵的效率。

将式(14)代入式(15)得:

$$P_o = 3U_1 I_1 \cos\varphi \eta_d \eta_l \eta_p \quad (16)$$

式(6)~(16)构成了电动机-液压泵功率数学模型。

#### 5 基于电流信号的功率监测方法研究

测量电动机的输入功率一般是在线测量。在线监测不能直接测相电压、相电流, 电机的功率因数也很难直接测得。传统上多采用二瓦表法。方法如图 6 所示。

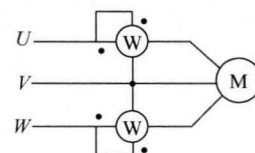


图 6 二瓦表法

两功率表的电流线圈串入任意两端线中(图 6 中

为U、W线),电压线圈的末端共同接到第3条端线上(V线)上,这时两功率表读数的代数和等于电机的总功率。即:

$$P = P_1 + P_2 = U_{UV} I_U \cos(\widehat{U_{UV} I_U}) + U_{WV} I_W \cos(\widehat{U_{WV} I_W})$$

二瓦表法是传统的仪表式测量功率法,需用的电压电流互感器数量多,占用的A/D口多且需要两套相位检测电路。考虑到以上不便利之处,提出了基于电流信号借助DSP的电机功率监测方法。

功率的监测可以通过以下方法实现:通过电流互感器和电压互感器测取电机任意一相的线电流 $I_L$ 和另外两相的线电压 $U_L$ ,通过硬件电路整形成对称方波,并对这两路方波的上升沿进行比较后形成相位差脉冲。设相位差脉冲的宽度为 $\tau$ ,它的占空比与被测相位成正比,即:

$$\varphi_L = (\tau/T) \times 360^\circ \quad (17)$$

其中 $T$ 为被检测信号的周期。 $\varphi_L$ 经过换算后得到 $\varphi$ ,用DSP测出方波的脉宽 $\tau$ ,则可求出相应的功率因数角。线电流 $I_L$ 和线电压 $U_L$ 经过DSP内置A/D转换后进行功率计算 $P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$ 。

用DSP监测的优点在于:①减少电压互感器和电流互感器,降低了成本。②简化了硬件、软件及接口电路,方便在线监测。

电机功率曲线中蕴含大量液压系统运行状态信息及故障信息,功率随负载变化,系统加载时电机功率增加,卸载时功率下降,系统发生故障时功率曲线有明显的波动,我们可根据实时监测得到的功率曲线,对液压系统运行状态及故障做出定量分析和定性判断。

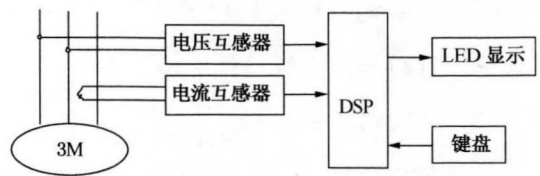
监测功率DSP主流程图(见图7)。

## 6 结论

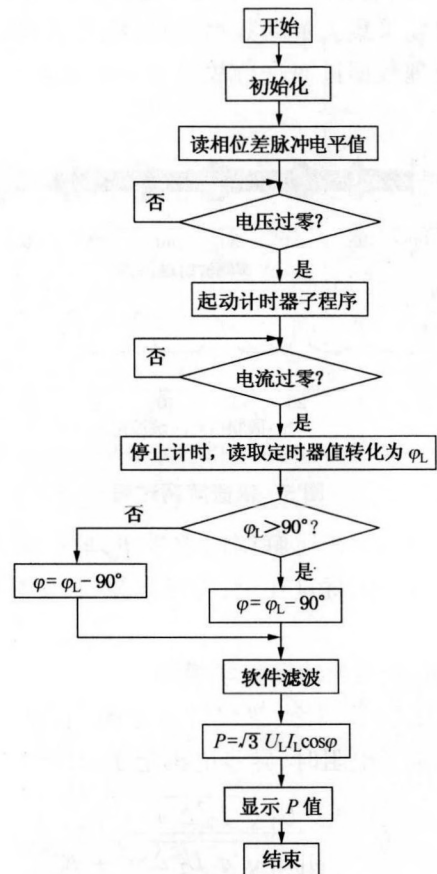
(1) 理论分析和试验表明:液压动力系统状态监测参数中电流信号是最有效的监测参数之一。与振动、油压、流量等动态信号相比,电流信号的优点在于对液压动力系统运行状态(负载变化)响应快速灵敏、平稳、容易获取等优点,适合在线监测。

(2) 电流信号能对液压系统各种复杂的工况如:正常运行、超载、冲击、卡死等现象产生不同的响应,可根据电流信号不同的曲线形状对液压系统做出故障判断,如需对每一类故障作精密诊断还需融入其他信息。

(3) 负载的波动导致电机-液压泵有功功率发生



a) 硬件结构



b) 软件框图

图7 DSP主流程

变化,功率信号也是液压系统状态监测的重要参数之一,基于电流信号借助DSP对液压系统实现功率监测具有比较现实的意义,更快捷有效的监测功率方法还在进一步的研究中。

## 参考文献:

- [1] 谷立臣,等. 液压动力系统运行状态识别技术研究[J]. 机械工程学报,2001,37(6):61-65.
- [2] 李彦峰,等. 解调方法在齿轮故障诊断中的应用[J]. 重型机械,1990(6).
- [3] 张庆新,王凤翔. 异步电机的功率因数检测及其控制[J]. 电工技术,2001(10).
- [4] 邱关源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社,1989.
- [5] 王正茂,等. 电机学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.