

含水率对油水乳化液传输频率特性影响分析*

陈彬, 刘阁

(重庆工商大学废油资源化技术与装备教育部工程研究中心 重庆, 400067)

摘要 为了掌握油水乳化液中含水率对其动态特性的影响, 建立含水率与乳化液传输的频率特性之间的非线性关系。首先, 推导了油水乳化液在管中压力波传播速度公式, 分析了含水率对乳化液传输速度的影响规律; 然后, 利用分布参数理论以及传递矩阵法建立了油水乳化液的传输频率模型, 表明在 PVC 透明钢丝软管中考虑流固耦合作用时含水率增加, 其传播速度呈降低趋势; 反之, 钢管内乳化液的传输速度随着含水率的增加而呈递增趋势; 含水率对系统的谐振频率影响也较为明显, 乳化液中含水率越大, 系统的同阶谐振频率越低, 且随着含水率的增加, 谐振频率的阶次越大, 同阶次的谐振频率之间的差值也相应变大。实验验证所建模型是有效的, 为有效检测油中含水率以及保障系统安全运行提供一定的理论基础。

关键词 含水率; 油水乳化液; 传播速度; 频率特性

中图分类号 TH13

引言

油液在运行过程中会因为种种原因混入水分, 使油液理化性能发生变化^[1], 极易生成稳定的乳化液、加速油的氧化过程和降低油润滑性, 仍然会影响整个系统的正常工作, 且油水乳化液的非恒定流的动力学特性与纯油液有很多不同, 是仅次于固体颗粒物的一种污染。采取合理方法分析含水率不同的油水乳化液的非恒定流的动力学特性, 及时采取合理的治理措施一直是工业用油研究热点之一。

目前, 对油水乳化液的研究主要是液滴粒径及其分布、相界面形状及其变化、相含率和相界面浓度等方面。Kang 等^[2]研究了方形管道内气液两相流型和多孔介质内的侵渗现象。Suga 等^[3]研究了壁面粗糙度和渗透性对湍流的影响, 利用粒子图像测速法 (particle image velocimetry, 简称 PIV) 获得了湍流流场的特性。何利民等^[4-5]采用等动量取样与显微照相相结合的方法研究了水平管中原油一水的液滴粒径和压降梯度与混合流量、含水率等参数及表面活性剂的关系。徐广丽等^[6]对管道中油水系统的特性进行了研究, 建立了水相厚度梯度的计算模型能很好地预测相界面分布。许伟伟等^[7]研究了 U 形管路在内流作用下的振动特性, 认为流体速度

增加, 管道位移增加, 管道最大应力增加, 管道基频减小。

油液作为管路系统的传输介质, 其输出的动力学特征的研究方法有瞬态法和频域法两种。Sun 等^[8]建立了空气弹簧连接管元模型, 用瞬态法分析了模型的动态特征, 验证了所建模型的有效性。文献^[9]利用频域法对光纤光学传感器使用流动引起的管道振动进行了实验研究, 获取了管道的振动信号的振动频率特性。文献^[10-11]采用频域法对可变节流阀-蓄能器子系统建立了数学模型, 得出在最佳吸收效果时可变节流阀的开度与电机转速的关系。柳贡民等^[12]应用传递矩阵方法研究了蒸汽参数对于蒸汽管路系统固有特性的影响, 发现蒸汽压力对于管路系统固有频率的影响程度主要与管截面参数有关, 而流速的影响相对不大。贺尚红等^[13]为解决液压系统中由于压力脉动而引起的振动和噪声问题, 基于管路动态特性, 建立薄板振动式液压脉动衰减器的传递矩阵模型, 对压力脉动的衰减特性进行仿真。母东杰等^[14]针对伺服阀控液压管路系统内部流体振荡问题, 采用一维流体瞬变理论分析了动态过程中油液压缩性对油液动量的改变, 建立了阀控液压管路系统动态数学模型。前期的这些研究都取得了一定的成果, 但是很少涉及到油中水分含量对系统特性的影响, 因而本课题利用分布参数理

* 国家自然科学基金资助项目 (51375516); 重庆基础与前沿研究资助项目 (cstc2016jcyjA0185)
收稿日期: 2015-04-27; 修回日期: 2015-10-15

论建立油水乳化液的传输频率模型,深入分析含水率对油水乳化液传输的动态特性的影响关系,为有效检测油中含水率提供科学依据。

1 油水乳化液的压力波传递速度

油水乳化液传输的动态特性与油水乳化液的压缩性和质量密切相关,这二者的相互关系又与压力波速相关,因而首先分析油水乳化液中含水率与其传输的压力波速大小的关系。

取油水乳化液的一段端面为 A 的管体如图 1 所示,0-0 断面为乳化液静止时所在的位置,当乳化液在压力 P 作用下以速度 V_f 向右运动 dt 时间后到达 1-1 断面。假定管体是弹性体,又由于乳化液可压缩的特性,则乳化液在 dt 时间内由 0-0 断面移动到 1-1 断面的过程中,1-1 断面的右侧乳化液受到压缩,也引起管体膨胀,使管体截面积由 A 增大了 dA ,乳化液的压力增加了 dP ,从而产生了压力波以速度 c_f 向右传播,在 dt 时间内到达 2-2 断面。

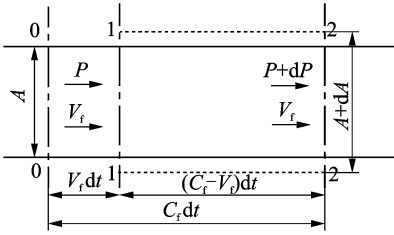


图 1 油水乳化液的一段端面为 A 的管体

Fig. 1 A section of pipe body A in oil-water emulsion

定义油水乳化液中水分含量为 c_w , ρ_o , ρ_w 分别为油液和水分的密度。根据连续性方程可得 1-1 断面和 2-2 断面之间的乳化液质量守恒方程

$$\begin{aligned} \rho_w c_w A V_f dt + \rho_o (1 - c_w) A V_f dt = \\ (d\rho_w A + \rho_w dA) c_w (c_f - V_f) dt + \\ (d\rho_o A + \rho_o dA) (1 - c_w) (c_f - V_f) dt \Rightarrow \\ \rho_w c_w + \rho_o (1 - c_w) = [(d\rho_w A + \rho_w dA) c_w + \\ (d\rho_o A + \rho_o dA) (1 - c_w)] \frac{c_f}{AV_f} \quad (1) \end{aligned}$$

油水乳化液在压力 P 作用下,从 0-0 断面到 2-2 断面内的乳化液在 dt 时间内从静止变为速度 V_f 的运动状态,则有

$$\begin{aligned} AdP = -\frac{\rho_w c_w A c_f dt + \rho_o (1 - c_w) A c_f dt}{dt} (0 - V_f) \Rightarrow \\ [\rho_w c_w + \rho_o (1 - c_w)] c_f V_f = dP \quad (2) \end{aligned}$$

由于流体的弹性模量为 $K_i = -\frac{dP}{dV} V \Rightarrow -\frac{dV}{V} =$

$\frac{dP}{K_i} - \frac{dV}{V} = \frac{d\rho_i}{\rho_i}$, ($i = w, o$), 设管体的直径为 D , δ 为管体壁厚, K_p 为管体的弹性模量,则在压力 dP 作用下,有 $\frac{dA}{A} = \frac{dPD}{K_p \delta}$ 。将式(1)代入式(2)可得

$$\begin{aligned} [(d\rho_w A + \rho_w dA) c_w + (d\rho_o A + \rho_o dA) (1 - c_w)] \frac{c_f}{AV_f} V_f = dP \Rightarrow c_f = \\ \sqrt{\frac{K_o/\rho_o}{K_o/K_w \rho_w/\rho_o c_w + (1 - c_w) + [\rho_w/\rho_o c_w + (1 - c_w)] K_o D/(K_p \delta)}} = \\ \sqrt{\frac{K_o}{C_w \rho_o}} \quad (3) \end{aligned}$$

定义 C_w 为油水乳化液的物性系数

$$C_w = \left[\frac{K_o}{K_w} \frac{\rho_w}{\rho_o} \left(\frac{K_w D}{K_p \delta} + 1 \right) - \left(\frac{K_o D}{K_p \delta} + 1 \right) \right] c_w + \frac{K_o D}{K_p \delta} + 1$$

可见,当油液中含水率 c_w 取不同值时,物性系数 C_w 随之线性变化。如 $c_w = 0$ (或 1)时,即流体为纯油液(或纯水)在弹性管道中压力波水击的波速表达式与 Kortweg 推导的公式一致;当 c_w 取值为 0~1 之间时,即含水率对油水乳化液的压力波波速的影响较大。

2 油水乳化液的传输频率特性模型

为了对油水乳化液进行传输频率特性分析,从乳化液的运动方程、连续性方程通过零初始条件的 Laplace 变换,由时域变换到 s 域,得到油水乳化液传输的频域描述。研究对象为油水真空分离装置的进油管路内非恒定流乳化液,进油管路系统示意图如图 2 所示。图 2 中:①,⑤为聚氯乙烯(polyvinyl chloride,简称 PVC)透明钢丝软管;②,③,④为钢管作为 PVC 透明钢丝软管的连接管件;⑥,⑧为钢管分别与⑦流量传感器相连接,⑨为真空室。油水乳化液在真空室内真空压力的作用下,从系统左端的油箱依次经过各段管件进入真空室,由于乳化液的流速远小于压力波的传播速度,且各段管件半径小于油液流动的波长,因而假定管内乳化液为无旋运动并且不受重力影响,为轴对称流动,压力沿管横断面相等,没有切向速度分量,不考虑乳化液和管壁间的热传导,即管壁是绝热的,管内油液与外界无热交换,温度在径向均匀分布。

2.1 管件的频率特性模型

根据频域内管路油液的连续性方程、动量方程^[15]进行 Laplace 变换,并设 $P(l_{11}, s)$, $V_f(l_{11}, s)$, $P(l_{12}, s)$ 和 $V_f(l_{12}, s)$ 为某段管体始端和终端对应的乳

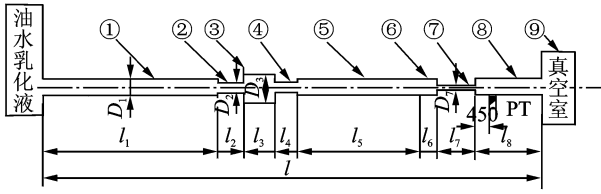


图 2 油水乳化液管路系统示意图

Fig. 2 A diagram of oil-water emulsion pipe system

化液压力、流速(i 为相应管体的标号), $Z_{\alpha}(s), \Gamma_i(s)$ 为第 i 段管体的特征阻抗和传播算子, 其中 $Z_{\alpha}(s) = \rho_l c_{fi} \sqrt{(s + 32\nu/D_i^2)/s}$, $\Gamma_i(s) = \sqrt{s(s + 32\nu/D_i^2)}/c_{fi}$, l_i 为某段管体的长度; $\rho_l = \rho_w c_w + \rho_o(1 - c_w)$ 为乳化液的密度; ν 为乳化液的运动粘度。由于图 2 中 ①, ⑤ 标示的是 PVC 透明钢丝软管, 考虑到管体的变化, 则 c_{fi}^2 取式(3)的表达式, 其余钢管则不考虑弹性形变, $c_{fi}^2 = \frac{K_o/\rho_o}{(K_o\rho_w/K_w\rho_o - 1)c_w + 1}$ 。得到该管路终端的通解为

$$Z_s(j\omega) = \frac{P_z(l, j\omega)}{V_{fc}(l, j\omega)} = \frac{a_{11}P(l_{11}, j\omega) + a_{12}V_f(l_{11}, j\omega)}{a_{21}P(l_{11}, j\omega) + a_{22}V_f(l_{11}, j\omega)} = \frac{a_{12}}{a_{22}} = - \frac{j\rho c_{f2} \left[\frac{\left(\frac{c_{f1} - c_{f2}}{c_{f1} + c_{f2}}\right)^3 SY_1 - \left(\frac{c_{f1} - c_{f2}}{c_{f1} + c_{f2}}\right)^2 (SY_2 - SY_5 + SY_7) - \frac{c_{f1} - c_{f2}}{c_{f1} + c_{f2}} (SY_3 + SY_6 - SY_8) + SY_4}{\left(\frac{c_{f1} - c_{f2}}{c_{f1} + c_{f2}}\right)^3 CY_1 - \left(\frac{c_{f1} - c_{f2}}{c_{f1} + c_{f2}}\right)^2 (CY_2 + CY_5 - CY_7) - \frac{c_{f1} - c_{f2}}{c_{f1} + c_{f2}} (CY_3 - CY_6 + CY_8) + CY_4} \right]}{a_{22}} \quad (5)$$

其中

$$SY_1 = \sin\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 + l_6 + l_7 + l_8}{c_{f2}} - \frac{l_1 + l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$SY_2 = \sin\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 + l_6 + l_7 + l_8}{c_{f2}} + \frac{l_1 - l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$SY_3 = \sin\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 + l_6 + l_7 + l_8}{c_{f2}} - \frac{l_1 - l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$SY_4 = \sin\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 + l_6 + l_7 + l_8}{c_{f2}} + \frac{l_1 + l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$SY_5 = \sin\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 - l_6 - l_7 - l_8}{c_{f2}} - \frac{l_1 + l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$SY_6 = \sin\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 - l_6 - l_7 - l_8}{c_{f2}} + \frac{l_1 - l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$SY_7 = \sin\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 - l_6 - l_7 - l_8}{c_{f2}} - \frac{l_1 - l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$SY_8 = \sin\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 - l_6 - l_7 - l_8}{c_{f2}} + \frac{l_1 + l_5}{c_{f1}} \right).$$

$$CY_1 = \cos\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 + l_6 + l_7 + l_8}{c_{f2}} - \frac{l_1 + l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$CY_2 = \cos\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 + l_6 + l_7 + l_8}{c_{f2}} + \frac{l_1 - l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$CY_3 = \cos\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 + l_6 + l_7 + l_8}{c_{f2}} - \frac{l_1 - l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$\begin{bmatrix} P(l_{i2}, s) \\ V_f(l_{i2}, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\Gamma_i(s) l_i & -Z_{\alpha}(s) \sinh\Gamma_i(s) l_i \\ -\frac{1}{Z_{\alpha}(s)} \sinh\Gamma_i(s) l_i & \cosh\Gamma_i(s) l_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P(l_{i1}, s) \\ V_f(l_{i1}, s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 建立油水乳化液管路系统的频率特性模型

由于油水乳化液管路系统的动力是真空室与油箱之间的压差, 因而将系统左端的油箱看作负载端, 且是开端管路, 系统右端的真空室 ⑨ 看作是系统的源元件, 设 P_z, V_{fc} 分别为真空室 ⑨ 容腔的压力、流速。则根据流体传输耦合理论, $P(l_{(i+1)1}, s) = P(l_{i2}, s), V_{f(l_{(i+1)1}, s)} = V_f(l_{i2}, s)$, 可得油水乳化液管路系统的频率特性模型^[16]。将 $s = j\omega$ 代入油水乳化液管路系统的频率特性模型, 则油水乳化液管路系统的源阻抗频率方程为

$$CY_4 = \cos\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 + l_6 + l_7 + l_8}{c_{f2}} + \frac{l_1 + l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$CY_5 = \cos\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 - l_6 - l_7 - l_8}{c_{f2}} - \frac{l_1 + l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$CY_6 = \cos\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 - l_6 - l_7 - l_8}{c_{f2}} + \frac{l_1 - l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$CY_7 = \cos\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 - l_6 - l_7 - l_8}{c_{f2}} - \frac{l_1 - l_5}{c_{f1}} \right),$$

$$CY_8 = \cos\omega \left(\frac{l_2 + l_3 + l_4 - l_6 - l_7 - l_8}{c_{f2}} + \frac{l_1 + l_5}{c_{f1}} \right).$$

3 油水乳化液传输的动态特性分析

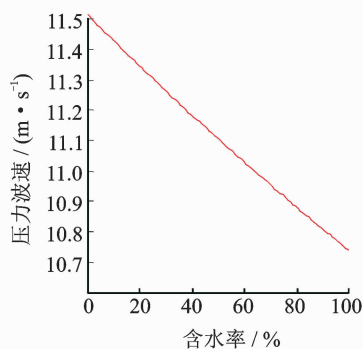
以油水真空分离装置的进油管路内非恒定流乳化液为例, 系统的结构示意图如图 2 所示。系统的相关参数如下: ①, ⑤ PVC 透明钢丝软管的弹性模量为 $K_p = 1.5 \times 10^6$ Pa, 二者的管内径和壁厚一致, 分别为 $D_1 = D_5 = 0.026$ m, $\delta_1 = \delta_5 = 0.003$ m, 二者的管长分别为 $l_1 = 4$ m, $l_5 = 3.1$ m; ②, ③, ④, ⑥, ⑦, ⑧ 钢管的弹性模量 $K_c = 1.9 \times 10^{11}$ Pa, 其管路内径分别为 $D_2 = D_4 = 0.02$ m, $D_3 = 0.15$ m, $D_6 = D_8 = 0.028$ m, $D_7 = 0.006$ m, 各段管长分别为 $l_2 =$

0.2 m, $l_3 = 0.75$ m, $l_4 = 0.15$ m, $l_6 = 0.4$ m, $l_7 = 0.2$ m, $l_8 = 2.05$ m; 油液密度 $\rho_o = 870$ kg/m³, 油液的体积弹性模量 $K_o = 1.2 \times 10^9$ Pa, 运动粘度 $\nu_o = 4.6 \times 10^{-5}$ m²/s, 水的密度 $\rho_w = 1\ 000$ kg/m³, 水的体积弹性模量 $K_w = 2.2 \times 10^9$ Pa, 水的运动粘度 $\nu_w = 1.01 \times 10^{-6}$ m²/s。

3.1 水分含量对其压力波传播速度的影响

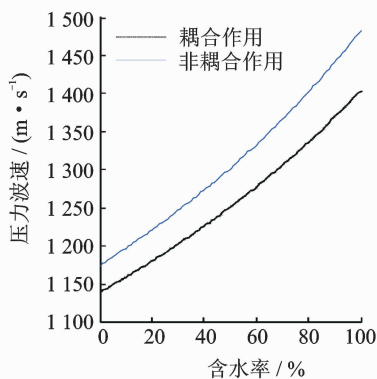
将相关参数代入式(3)中,并考虑流固(油水乳化液与管体)耦合作用与非流固耦合作用下,乳化液中含水率对其传播速度的影响如图3所示。

图3(a)表示油水乳化液与PVC透明钢丝软管相互耦合作用下压力波速随含水率的变化规律。图3(b)表示钢管与油水乳化液在耦合作用下(虚线)和非耦合作用下(实线)压力波速随含水率的变化情况。由图3可以看出,随着乳化液中含水率的增大,PVC透明钢丝软管内乳化液的传播速度逐渐降低,当 $c_w = 0$ 时,即纯油状态下,其传播速度为 11.52 m/s,则当 $c_w = 1$ 时,即纯水状态下,其传播速度为 10.75 m/s,二者相差 0.77 m/s。由于 PVC 透



(a) 油水乳化液与PVC软管

(a) Oil/water emulsion and PVC wired hose



(b) 油水乳化液与钢管

(b) Oil/water emulsion and steel tube

图3 乳化液中含水率对其传播速度的影响

Fig. 3 Effect of the rate of water content of emulsion on velocity

明钢丝软管的弹性模量远小于油和水的弹性模量,因而可将式(3)变换为

$$c_f = \begin{cases} \sqrt{\frac{K_o/\rho_o}{K_o D/(K_p \delta)} + 1} \approx \sqrt{\frac{K_o/\rho_o}{K_o D/(K_p \delta)}} & (c_w = 0) \\ \sqrt{\frac{K_o/\rho_o}{\left[\frac{K_o \rho_w}{K_w \rho_o} \left(\frac{K_w D}{K_p \delta} + 1\right) - \left(\frac{K_o D}{K_p \delta} + 1\right)\right] c_w + \frac{K_o D}{K_p \delta} + 1}} \approx \sqrt{\frac{K_o/\rho_o}{\left(\frac{\rho_w}{\rho_o} - 1\right) \frac{K_o D}{K_p \delta} c_w + \frac{K_o D}{K_p \delta}}} & (0 < c_w < 1) \\ \sqrt{\frac{K_w/\rho_w}{K_w D/(K_p \delta)} + 1} \approx \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_w} \frac{K_o/\rho_o}{K_o D/(K_p \delta)}} & (c_w = 1) \end{cases} \quad (6)$$

由于油的密度小于水的密度,所以考虑流固耦合作用的油水乳化液的传播速度随着含水率的增加而呈下降趋势,如表1所示。这与不考虑流固耦合所得到的乳化液压力波速(如图3(b))相比,差距很大,因而对PVC透明钢丝软管内乳化液的传播速度的计算不能忽略流固耦合作用的影响。

表1 乳化液中含水率与压力波速的关系

Tab. 1 The relation of water content and pressure wave velocity in emulsion

压力波速/ (m · s ⁻¹)	含水率/%					
	0	20	40	60	80	100
PVC透明钢丝 软管(耦合)	11.52	11.35	11.19	11.03	10.88	10.75
钢管(耦合)	1 139	1 180	1 226	1 278	1 336	1 404
非耦合作用	1 174	1 221	1 273	1 333	1 402	1 483

由图3(b)可以看出,对于钢管内油水乳化液的传播速度考虑耦合作用与非耦合作用下,都随含水率的增加而增加,这是由于钢管的弹性模量远大于油和水的弹性模量,则式(3)可变换为

$$c_f = \begin{cases} \sqrt{\frac{K_o/\rho_o}{K_o D/(K_p \delta)} + 1} \approx \sqrt{K_o/\rho_o} & (c_w = 0) \\ \sqrt{\frac{K_o/\rho_o}{\left[\frac{K_o \rho_w}{K_w \rho_o} \left(\frac{K_w D}{K_p \delta} + 1\right) - \left(\frac{K_o D}{K_p \delta} + 1\right)\right] c_w + \frac{K_o D}{K_p \delta} + 1}} \approx \sqrt{\frac{K_o/\rho_o}{\left(\frac{K_o \rho_w}{K_w \rho_o} - 1\right) c_w + 1}} & (0 < c_w < 1) \\ \sqrt{\frac{K_w/\rho_w}{K_w D/(K_p \delta)} + 1} \approx \sqrt{\frac{K_w \rho_o}{K_o \rho_w} K_o/\rho_o} & (c_w = 1) \end{cases} \quad (7)$$

当 $c_w = 0$ 时,即纯油状态下,其传播速度考虑耦

合作用时为 1 139 m/s,非耦合作用为 1 174 m/s,则当 $c_w=1$ 时,即纯水状态下,其传播速度考虑耦合作用时为 1 483 m/s,非耦合作用为 1 404 m/s。可见含水率对钢管内乳化液的传播速度的影响很大,考虑耦合作用下二者相差 265 m/s,不考虑耦合作用下二者相差 309 m/s;而对于考虑耦合作用与不考虑耦合作用时,纯油状态下二者相差 35 m/s,纯水状态下二者相差 79 m/s。对于钢管内油水乳化液的速度计算,考虑含水率的影响是非常必要的。

3.2 水分含量对其传输频率特性的影响

将油水真空分离装置的进油管路的真空室作为源端,油箱为开端管路,设置油水乳化液的含水率分别为 0%,20%,40%,60%,80%,100%,将其余相关参数代入式(5)中,利用 Matlab 编写求解程序,从而绘出系统源阻抗频率特性曲线如图 4 所示。

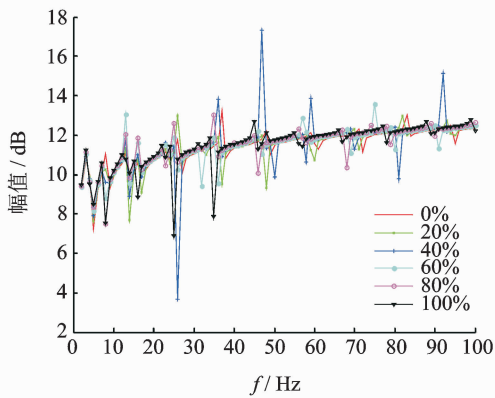


图 4 系统源阻抗频率特性动态曲线

Fig. 4 The dynamic curve of system source impedance frequency characteristic

由图 4 可知,油水乳化液管路系统的同阶谐振频率随着含水率的增加而呈递减趋势,且阶次越大,这种差异性就越明显。从表 2 可以看到,在含水率为 40%时所建模型获取了油水乳化液管路系统的基频为 0.98 Hz,在含水率为 0%,20%,60%,80%时获取系统的频率接近系统基频 3 倍频为 2.93 Hz,100%时获取系统的频率接近系统基频 2 倍频为 1.95 Hz;不同含水率的乳化液在前 6 阶谐振频率中有相互交叉,不易分辨的特点,而高于 6 阶后其谐振频率明显相差 1 Hz,这是由于本项研究对象的管路系统总长为 10.85 m,而两段 PVC 透明钢丝软管共长 7.1 m,钢管共长 3.75 m,油水乳化液在本系统中的传播速度主要受到 PVC 透明钢丝软管的耦合作用影响,而纯油与纯水在该管路中的传播速度差别不大,但含水率越大其传播速度越小,因而从

总体上看系统的谐振频率会随含水率增加而减低。

表 2 不同含水率对应的各阶谐振频率

Tab. 2 The resonance frequency of different water content corresponding

各阶频率/ Hz	含水率/%					
	0	20	40	60	80	100
1	2.93	2.93	0.98	2.93	2.93	1.95
2	11.72	11.72	10.74			
3		22.46	22.46	22.46	22.46	
4		47.85			45.90	
5	70.31	61.52	57.61	59.57		
6		79.10	71.46		66.40	
7		97.66	89.84			
8	117.19	115.23	114.26		110.35	91.79
9	278.32	274.41	180.66	146.48	144.53	
10			218.75			
11	373.05	346.68				238.28
12	443.36					

3.3 实验验证与分析

分别配置不同的油液含水浓度的 46# 汽轮机油样,搅拌 30 min 后,根据不同的实验条件(如表 3 所示)进行实验,开启真空泵进入一个工作循环。该实验系统的测试部分由进液管的流量传感器、温度传感器、真空滤油机内真空传感器以及配套的多路传感器,带数据采集卡的 PXI 测试机(America, NI)等一系列硬件及与测试功能相匹配的软件共同构成。其中,在图 2 中 PT 为高精度压力传感器,将采集的实时乳化液的传输动态信号输出给 NI-PCI 6221 采集卡的一体机,经过数据分析模块(数据滤波、Hilbert 变换分析和数据计算等)获取了不同含水率的乳化液的压力波动态信号如图 5 所示。

表 3 实验参数取值范围

Tab. 3 Arrange of test parameters

实验参数	初始含水率/%	真空压力/kPa	初始温度/°C	运行时间/s
取值范围	0.01~0.5	1~10	20~25	5~60

含水油液的谐振信号是一种典型的调制信号,而含水油液的谐振信号的载波频率(如压力传感器动态响应及测试系统固有频率)通常不易获取,因而采用希尔伯特(Hilbert)变换方法进行包络解调。Hilbert 变换主要由 2 个部分组成:经验模态分解(empirical mode decomposition,简称 EMD)和 Hil-

bert 谱分析。EMD 是一种自适应的、高效的数据分解方法,是以局部时间尺度为基础,将任何复杂的数据集被分解为个数有限的几个固有模函数(intrinsic mode functions,简称 IMF)的线性叠加。在此基础上,对各个 IMF 进行 Hilbert 变换,取模后得到的即为含水油液的调制信号,就可以有效地将压力传感器动态响应及测试系统固有频率即载波频率去除。

图 5(a),(c)是含水率分别为 20%,40%的乳化液经过 Hilbert 包络处理后的信号,图 5(b),(d)是对含水率分别为 20%,40%乳化液的柏拉图经过傅里叶变换后的频谱,含水率为 20%,40%乳化液各阶谐振频率实测值与理论值对比如表 4 所示。

表 4 不同含水率的各阶谐振频率对比

Tab. 4 The contrast of resonance frequency of different water content

各阶频率/ Hz	含水率/%			
	20 (理论)	20 (实测)	40 (理论)	40 (实测)
1	2.93	1.95	0.98	0.97
2	11.72	12.67	10.74	7.80
3	22.46	24.36	22.46	21.44
4	47.85	49.71		49.70
5	61.52	64.32	57.61	55.55
6	79.10	77.97	71.46	70.17
7	97.66	100.38	89.84	87.81
8	115.23	115.00	114.26	116.21
9	274.41		180.66	184.57
10			218.75	221.68
11	346.68			

可见与 20%,40%含水率的油水乳化液各阶谐振频率理论值和实测值很接近,因而所建立的油水乳化液传输频率模型能够反映出含水率对其动态特性的影响,为进一步根据管体的频率特性获取乳化液中含水率的大小提供了一种新的途径。

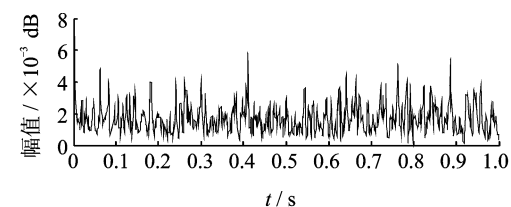
4 结论

1) 推导了油水乳化液在管体中压力波传播速度公式,分析了含水率对乳化液传输速度的影响规律。表明在 PVC 透明钢丝软管中的乳化液有必要考虑流固耦合作用,含水率增加,其传播速度呈降低趋势;反之,含水率对于钢管内乳化液的传输速度的影响较考虑耦合作用与不考虑耦合作用的影响大,且随着含水率的增加,其传播速度呈递增趋势。

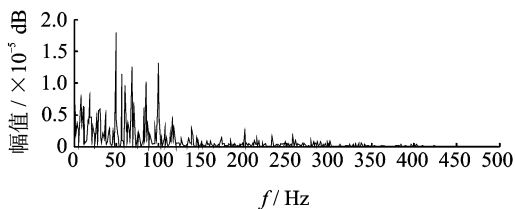
2) 以油水真空分离装置的进油管路内非恒定流乳化液为例,考虑了 PVC 透明钢丝软管的耦合作用,利用分布参数原理以及传递矩阵法建立了乳化液传输的频率特性方程,获得了乳化液中含水率与系统动态特性之间的非线性关系。

3) 结合实际工程,设置了乳化液系统的相关物理参数,对含水率与乳化液传输系统的动态特性之间的关系进行了仿真,获得了含水率越大,系统的同阶谐振频率越低,且随着含水率增加,谐振频率的阶次越大,同阶的谐振频率之间的差值也相应变大。

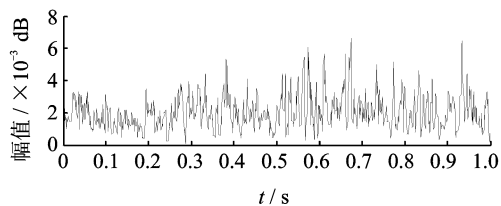
4) 为了验证所建模型的有效性,对油水乳化液的管路系统进行了验证,通过采集含水率为 20%,40%的乳化液的压力波实测信号,经过滤波/Hilbert 包络分解等处理,得到的谐振频率与仿真的数据较为吻合,为进一步根据管体的频率特性获取乳化液中含水率的大小提供了一种新的途径。



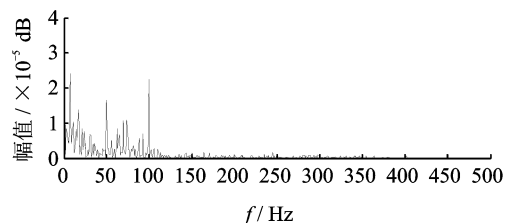
(a) 20%乳化液的Hilbert信号
(a) Hilbert signal of 20% emulsion



(b) 20%乳化液的频谱
(b) Frequency spectrum of 20% emulsion



(c) 40%乳化液的Hilbert信号
(c) Hilbert signal of 40% emulsion



(d) 40%乳化液的频谱
(d) Frequency spectrum of 40% emulsion

图 5 不同含水率的乳化液的压力波动态信号

Fig. 5 The pressure wave dynamic signal of different water content of emulsion

参 考 文 献

- [1] Alinezhad K, Hosseini M, Movagarnejad K, et al. Experimental and modeling approach to study separation of water in crude oil emulsion under non-uniform electrical field[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2010, 27(1): 198-205.
- [2] Kang J H, Lee K J, Nam J H, et al. Visualization of invasion percolation drainage process in porous media using density-matched immiscible fluids and refractive index matched solid structures[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(9): 2608-2612.
- [3] Suga K Y, Matsumura A, Shitaka Y, et al. Effects of wall permeability on turbulence[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, 31(6): 974-984.
- [4] 吕宇玲,何利民,丁慎圆,等.原油-水分散流中液滴粒径及压降规律研究[J].工程热物理学报,2013,34(3): 472-475.
Lv Yuling, He Limin, Ding Shenyuan, et al. Investigation of droplet size and pressure drop in crude oil-water dispersed flows [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(3): 472-475. (in Chinese)
- [5] 吕宇玲,何利民,程浩,等.油水两相分散液液滴粒径预测模型[J].化工学报,2012,63(7): 2059-2063.
Lǚ Yuling, He Limin, Cheng Hao, et al. Oil and water two-phase flow droplet size dispersion prediction model [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2012, 63(7): 2059-2063. (in Chinese)
- [6] 徐广丽,张国忠, Brauner N, 等.管道油流携水系统的界面分布[J].中国石油大学学报:自然科学版,2011, 35(1): 124-129.
Xu Guangli, Zhang Guozhong, Brauner N, et al. Pipeline carrying oil flow water distribution system interface [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2011, 35(1): 124-129. (in Chinese)
- [7] Xu Weiwei, Wu Bo, Wu Turn, et al. Unsteady fluid and the U-shaped pipe coupling vibration characteristics [J]. Journal of Chemical Engineering, 2012, 26(5): 770-774.
- [8] Sun Liqing, Li Zhongxing, Shen Xufeng, et al. Simulation and test study on dynamic characteristic of air spring with auxiliary chamber[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 341-342(341-342): 391-394.
- [9] Tang Xiaochun, Zhong Wei, Zhuang Dachang, et al. Study of optical fiber fluid flow monitoring system using pipe vibration frequency characteristic [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295(2): 2054-2057.
- [10] 廖健,何琳,祁晓野,等.一种变频率流量脉动吸收方法[J].舰船科学技术,2013,35(2): 39-42.
Liao Jian, He Lin, Qi Xiaoye, et al. A variable flow pulsation frequency absorption method [J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(2): 39-42. (in Chinese)
- [11] 蒋祺,张方,姜金辉,等.动态载荷位置识别当量载荷误差判别法[J].振动、测试与诊断,2015,35(4): 620-625.
Jiang Qi, Zhang Fang, Jiang Jinhui, et al. Identification of equivalent load error for dynamic load position identification [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(4): 620-625. (in Chinese)
- [12] Liu Gongmin, Chen Hao, Li Shuaijun. Steam piping system parameters on the dynamic characteristics of research[J]. Journal of Solid Mechanics, 2012, 33(2): 168-175.
- [13] 贺尚红,王雪芝,何志勇,等.薄板振动式液压脉动衰减器滤波特性[J].机械工程学报,2013,49(4): 148-153.
He Shanghong, Wang Xuezhi, He Zhiyong, et al. Vibrating plate type hydraulic damper filtering characteristics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(4): 148-153. (in Chinese)
- [14] 母东杰,李长春,延皓,等.基于特征线理论的阀控液管瞬变过渡流数值分析[J].兵工学报,2012, 33(12): 1455-1460.
Mu Dongjie, Li Changchun, Yan Hao, et al. SUN meng feature-based line theory transitional flow valve hydraulic line transients numerical analysis [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(12): 1455-1460. (in Chinese)
- [15] Chen Bin, Yi Menglin. A mathematics model investigation of ideal fluids in a pipeline of moving ending[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 14(1): 259-262.
- [16] 陈彬,刘阁,张贤明.基于动边界的阀控缸系统水击振动传输特性分析[J].机械科学与技术,2010,29(1): 123-128.
Chen Bin, Liu Ge, Zhang Xianming. Based on dynamic boundary valve cylinder system vibration transmission characteristics of water hammer [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(1): 123-128. (in Chinese)



第一作者简介:陈彬,男,1972年9月生,博士、教授。主要研究方向为油污污染控制技术。曾发表《基于HHT包络谱的油中水分含量检测研究》(《仪器仪表学报》2014年第35卷第2期)等论文。
E-mail: hustchb@163.com

