

文章编号 1000 5013(2004) 04 0418 05

盘式电流变传动装置的时间序列模型

俞铁岳 黄宜坚

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要 电流变流体是一种新型的智能软物质. 利用采样实验数据建立自回归时间序列模型, 实现电流变传动器的建模. 对双谱分析的概念进行讨论, 指出双谱对解决非线性时间序列模型的重要作用. 给出 AR 双谱, 分析电流变传动器的非线性问题. 文中采用虚拟仪器构建测试系统, 这是一个通用的并可方便进行多种机电工程实验的平台.

关键词 电流变流体, 盘式传动机构, 时间序列模型, 双谱

中图分类号 TH 137; O 37; TP 215.02⁺ 7 **文献标识码** A

电流变液(Electrorheological Fluid, 简称 ERF) 是一种智能软物质^[1], 它在工程领域具有广阔的应用前景. 近年来, 在国内外掀起了电流变技术研究的新高潮. 香港科技大学物理系温维佳博士、沈平教授等与中科院物理所陆坤权研究员合作^[2,3], 最近在电流变液材料研究方面获重要突破. 他们研究成功具有巨电流变(Giant Electrorheological, 简称 GER) 效应的纳米颗粒电流变液. 电流变传动机构的动态模型和控制方法是电流变技术研究的重要课题. 电流变传动机构的电场与输出力矩通常是成非线性关系的, 所以建立动态模型的难度大, 有关的研究资料很少. 本文开发一种双圆盘式电流变传动机构. 根据负载, 改变外加电场强度, 产生所需要的电流变效应的力矩, 使输出转角跟踪输入转角的变化. Shawar^[4] 研究了稳定转速下, 圆盘电流变传动器的力矩放大、伺服控制性能. 同时, 研究变负荷、随机信号输入下的电流变传动机构的工作原理和结构特点. 利用输入阶跃信号, 对受到干扰下的输出角度的采样信号, 建立系统的自回归(Autoregressive, 简称 AR) 模型, 从而可以分析传动系统的动态性能.

1 双圆盘电流变传动机构的工作原理

如图 1 所示, 由任意波形信号发生器产生的信号经放大后, 驱动步进马达转动, 由左边传给电流变传动器的中间盘的轴. 它是指令的转动信号, 转速为 Ω , 并通过右边的联轴器与负载联接. 指令的转动信号力矩很小. 所以, 在左右两个圆盘与中间圆盘之间分别外加电场, 通过电流变液, 把外部动力根据负载加在中间圆盘上, 实现了信号力矩的放大. 这里左右两个圆盘由同一个调速电机带动, 利用齿轮换向机构, 使它们转速相等、转动方向相反, 左盘和右盘的转速分别为和. 当信号正转时, 电场加在左盘与中间盘之间; 当信号反转时, 电场加在右盘与中间盘之间. 这种的双圆盘电流变传动结构有一定优点. (1) 两个主动圆盘转速相等, 方向相反,

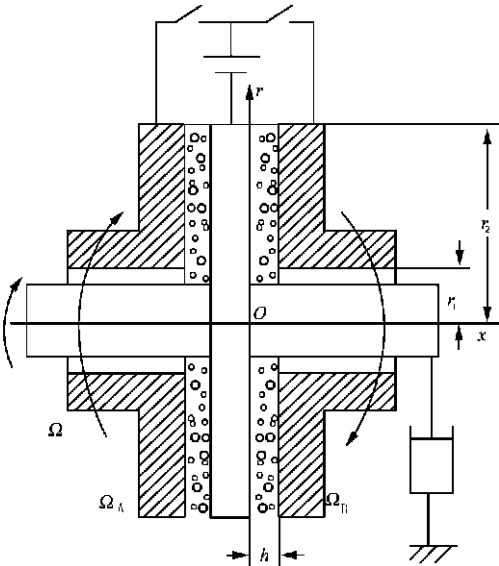


图 1 双圆盘电流变传动原理

使得当输入控制正反转时, 输出转矩快速跟踪输入信号. (2) 电流变传动的力矩是由电流变效应产生的屈服应力和剪切产生的粘性力引起的. 对于任意输入信号, 主动盘的转速 Ω_A 和 Ω_B 一定, 而且它们远比 Ω 快. 所以, A 盘和 B 盘相对于中间盘的转速差 ω ($\omega = \Omega_A - \Omega = \Omega_B - \Omega$) 几乎等于 Ω_A 和 Ω_B . 这就使得剪切引起粘性力不随输入信号变化, 从而便于外加电场对放大器进行控制.

设从动盘(中间盘)的电流变效应的有效面积的内径为 r_2 , 外径为 r_1 , 两盘的间隙是 h . ERF 为 Bingham 流体, 其本构方程为

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma}.$$

(1)

在式(1)中, τ 为剪切应力, τ_y 为屈服应力, η 为动力粘度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率.

设主从动盘的转速差 ω 沿轴线性分布, 就可以得到电流变装置产生的转矩 M 为^[5]

$$M = \frac{2\pi\tau_y}{3}[r_1^3 - r_2^3] + \frac{2\pi\eta\omega}{2h}[r_1^4 - r_2^4].$$

(2)

电流变效应引起的屈服应力为

$$\tau_y = k_U \frac{U^2}{h^2}.$$

(3)

这里, U 为外加电压, k_U 为屈服应力-电场系数.

设输出力矩为 M_0 , 输入力矩为 M_i , 于是

$$M_0 = M_i + M.$$

(4)

这样得到装置的力矩放大系数 k_a 为

$$k_a = \frac{M_0}{M_i} = 1 + \frac{1}{M_i} \left[\frac{2\pi k_U U^2}{3h^2} (r_1^3 - r_2^3) + \frac{\pi\eta\omega}{2h} (r_1^4 - r_2^4) \right].$$

(5)

从式(5)知道, 放大器的结构尺寸 r_1, r_2, h 一定, ERF 的性能参数 η, k_U 已知, 两圆盘的转速 ω 差几乎等于主动盘的转速 Ω_A 或 Ω_B . 所以, 以输出力矩与控制信号力矩之比定义力矩放大系数 k_a . 显然, k_a 由输入力矩 M_i 和控制电压 U 决定. 根据检测到的输入力矩和负载, 改变控制电压 U 就可以使输出力矩 M_0 跟踪输入信号, 适应负载的变化, 这就是双圆盘电流变传动器的工作原理.

2 测试装置与实验结果

图 2 所示的为研究电流变传动机构动态性能采用的实验装置, 并用传感器检测压力和温度. 检测、

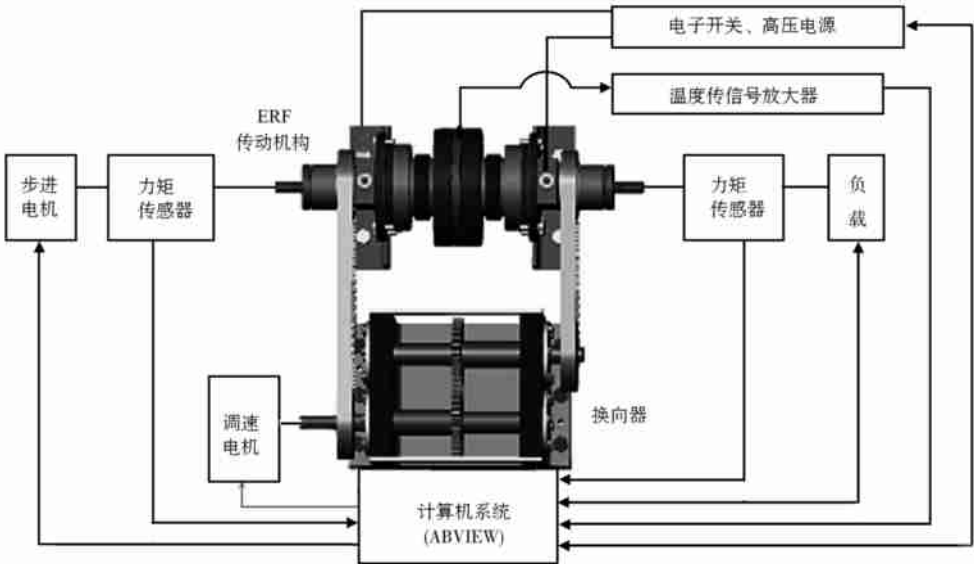


图 2 电流变传动与检测装置

分析和控制采用 NI 虚拟仪器系统, 全部实验由计算机自动进行. 实验中采用多功能数据采集板、SCXI 信号调理系统、温度及电压测量仪和动态信号分析仪对数据采集和分析, 用软件开发平台 LabVIEW 开发的程序进行管理.

在左或右盘与中间圆盘之间, 我们分别给予外加阶跃(E) 电压. 从而, 通过电流变液, 把旋转的左或右盘的电流变效应产生的外部动力加在中间圆盘上, 使中间盘旋转. 图 3 表示正和负阶跃电场作用下, 中间盘输出的角度 φ_m .

3 时间序列模型

这里认为中间盘输出的角度中所含的随机信号, 是电流变系统运行中受到白噪音的干扰. 所以输出的随机信号中含有系统的动态信息. 为此, 要将输出角度信号中的倾向性信号滤掉. 采用式(6)可以获得倾向性信号的变化率 θ 为

$$\theta = \frac{1}{2\Delta Tm^2} [\sum_{i=N-m}^N \varphi_i - \sum_{i=1}^m \varphi_i]. \tag{6}$$

这里, ΔT 为采样时间间隔, m 为采样数据总数的 $1/3$. 于是, 滤去确定性信号的有色噪音 $\varphi_{m,i}$ 为

$$\varphi_{m,i} = \varphi_i - \theta i \Delta T, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N. \tag{7}$$

图 4 表示采样信号滤掉确定性信号后得到的有色噪音. 输出角度中的干扰的随机信号包含有系统动态性能的信息, 可以利用它来获得系统的动力学特性.

假设系统受到白噪音 $IND(0, \sigma_a)$ 的干扰, 可以建立 AR 模型为

$$\varphi_{m,i} - \sum_{j=1}^u \alpha_j \varphi_{m,i-j} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \tag{8}$$

这里, α 为自回归系数, u 为自回模型的阶数.

对实验得到的采样数据用最小二乘法进行识别, 得到模型为

$$\varphi_{m,i} - 0.999\,0 \varphi_{m,i-1} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{9}$$

是一阶游动模型(图 5). 这说明系统的输出具有倾向性, 即大惯性系统, 系统稳定性高.

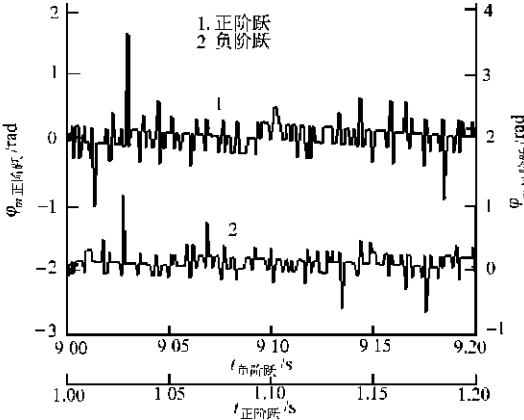


图 4 阶跃电场的有色输出角度

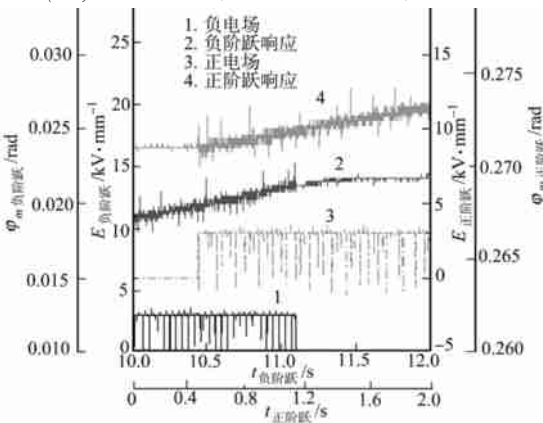


图 3 阶跃电场作用的输出

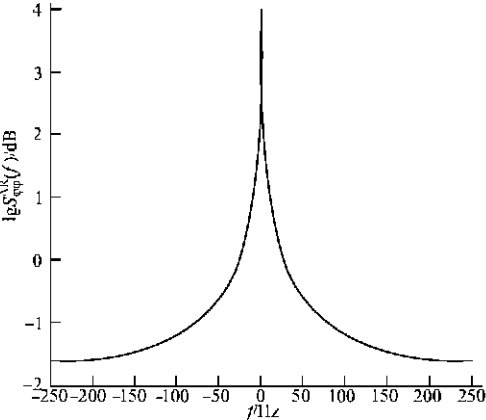


图 5 AR 自回归功率谱

为了检验数学模型式(9)的适应性, 应该计算出残差的相关系数. 以下所示公式是残差的一阶自相关系数 $\rho_{a,1}$, 即

$$\rho_{a,1} = \frac{\sum_{i=2}^N a_i a_{i-1}}{\sum_{i=2}^N a_i^2}. \tag{10}$$

式(11)是残差与输出角度信号的二阶互相关系数 $\rho_{a\varphi,2}$, 有

$$\rho_{a\varphi,2} = \frac{\sum_{i=3}^N a_i \varphi_{i-2}}{\sqrt{(\sum_{i=3}^N a_i^2) (\sum_{i=3}^N \varphi_{i-2}^2)}}. \tag{11}$$

在负阶跃电压输入下, AR 模型的自回归系数为 $\alpha_1 = 0.999\,0$, 残差的一阶自相关系数 $\rho_{a,1} = 0.029\,82$, 残差与输出角度的二阶互相关系数 $\rho_{a\varphi,2} = -0.090\,77$; 在正阶跃电压输入下, AR 模型的自回归系数为

$\alpha_1 = 0.9993$, 残差的一阶自相关系数 $\rho_{a,1} = -0.08102$, 残差与输出角度的二阶互相关系数 $\rho_{a\varphi,2} = -0.01573$. 从上看出, 残差的一阶自相关系数 $\rho_{a,1}$, 残差与输出角度的二阶互相关系数 $\rho_{a\varphi,2}$ 的数值都较小, 可以认为残差就是白噪音. 即系统的模型式(9)是正确的.

4 AR 功率谱

功率谱密度(Power Spectrum Density, 简称 PSD) 是数字信号处理中的一种常用技术. 在功率谱估计中, 所考虑的随机过程用统计互不相关的谐波分量的叠加来构成, 然后估计这些频率分量上功率分布. 功率谱密度的估计有参数法和非参数法两种. 这里用已建立的 AR 模型, 估计了自回归功率谱 $S_{\varphi\varphi}^{AR}(f)$, 图5绘制了模型式(9)的 AR, 它描写了双圆盘传动系统的能量随频率的分布. 有

$$S_{\varphi\varphi}^{AR}(f) = \frac{\sigma_a^2}{|1 - \alpha_1 e^{-j2\pi f \Delta T}|^2}. \tag{12}$$

从图 5 又可看出, 系统具有单实极点, 是一阶惯性系统.

5 AR 双谱

图 6 为 AR 双谱示意图. 对于具有零均值的随机变量, 它的三阶累积量(三阶自相关)为^[6],

$$R_3[\varphi_{mt} \varphi_{mt+\tau_1} \varphi_{mt+\tau_2}] = E\{\varphi_{mt} \varphi_{mt+\tau_1} \varphi_{mt+\tau_2}\}. \tag{13}$$

显然, 若 φ_{mt} 不稳定, 三阶累积量依赖于 t, τ_1, τ_2 ; 若 φ_{mt} 稳定, 那么三阶累积量仅依赖于 τ_1, τ_2 . 这时, 式(13)可改写为

$$R_3[\tau_1, \tau_2] = E\{\varphi_{mt} \varphi_{mt+\tau_1} \varphi_{mt+\tau_2}\}.$$

根据定义, 随机量的双谱为三阶矩的二维 Fourier 变换, 即

$$R_3(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} R_3(\tau_1, \tau_2) e^{-j\omega_1 \tau_1 - j\omega_2 \tau_2},$$

其中 $\omega = 2\pi f$, 而且 $|\omega_1| \leq \pi, |\omega_2| \leq \pi, |\omega_1 + \omega_2| \leq \pi$ 从而, 双谱可以写为

$$R_3(\omega_1, \omega_2) = F(\omega_1)F(\omega_2)F^*(\omega_1 + \omega_2). \tag{14}$$

在式(14)中, $F(\omega)$ 是 $\varphi(t)$ 的 Fourier 变换, $F^*(\omega)$ 是 $F(\omega)$ 的共轭复数. 双谱 $B_3(\omega_1, \omega_2)$ 是复函数, 它提供了幅值 $|B_3(\omega_1, \omega_2)|$ 与相位 $\Psi_3(\omega_1, \omega_2)$ 的信息, 其周期为 2π . 即为 $B_3(\omega_1, \omega_2) = |B_3(\omega_1, \omega_2)| \cdot \exp[j\Psi_3(\omega_1, \omega_2)]$, $j = \sqrt{-1}$. 采样获得的电流变动传动器输出轴的角度, 滤去趋向性部分, 得到稳定的时间序列 φ_{mt} , 已经建立了线性的 AR 模型. 尚若系统是非线性的, 其残差 a_t 是非高斯分布的非白噪声序列, 那么其三阶矩不为零.

双谱估计也分为参数法和非参数法, 非参数法有直接法(FFT 法)和间接法(相关法). 用时间序列 AR 模型估计 φ_{mt} 的双谱, 属于参数法. 设非线性电流变动传动系统的残差 a_t 的三阶矩为 $D(a_t^3) = \beta$. 那么, 参数法表示电流变动传动器的双自谱可以表达为^[7,8] $S_{\varphi\varphi\varphi}(f_1, f_2) = \Re H(f_1)H(f_2)H^*(f_1 + f_2)$, 其中 $H^*(\omega_1 + \omega_2)$ 为 $H(\omega_1 + \omega_2)$ 的共轭复数. 它的复数模为

$$|S_{\varphi\varphi\varphi}(f_1, f_2)| = \frac{\beta}{|1 - \alpha_1 e^{-j2\pi f_1 \Delta T}| |1 - \alpha_1 e^{-j2\pi f_2 \Delta T}| |1 - \alpha_1 e^{-j2\pi(f_1+f_2) \Delta T}|}, \tag{15}$$

复角为

$$\angle S_{\varphi\varphi\varphi}(f_1, f_2) = \arctan \left[\frac{S_{\varphi\varphi\varphi,j}}{S_{\varphi\varphi\varphi,r}} \right]. \tag{16}$$

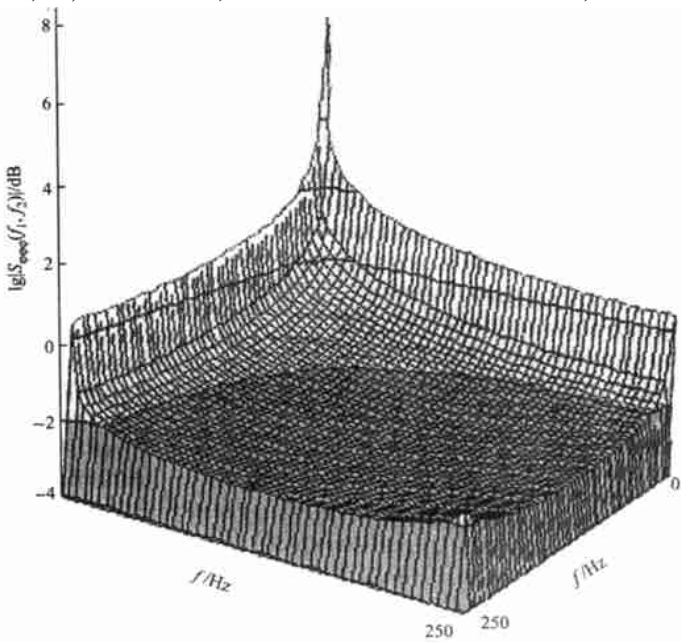


图 6 AR 双谱图

在式(15), (16)中, $S_{\varphi\varphi,j}$ 和 $S_{\varphi\varphi,r}$ 分别代表 $S_{\varphi\varphi}(f_1, f_2)$ 的虚部和实部.

图6为电流变传动器输出角度噪声的双谱. 根据随机分析理论, 零时延二阶矩是信号的方差, 零时延三阶矩描写了随机过程偏离高斯过程的程度, 是信号的歪斜. 所以, 功率谱相当于信号方差在频域的分解. 双谱可看成信号的歪斜在频域的分解. 可以认为, 对于多输入的电流变传动系统, 双谱提供了不同的输入信号的耦合对系统动态性能影响的特点. 根据双谱的定义, 对照图5与图6, 可以得出两点意见. (1) 功率谱和双谱都有一个很高的尖峰, 这可能是系统机械装置惯性引起, 不过双谱的高峰远远超过功率谱的峰值. 这说明采用双谱表征的灵敏度远高于功率谱. (2) 双谱具有对称性. 当三角区域 $2\pi f_2 \geq 0$, $2\pi f_1 \geq 2\pi f_2$, $2\pi(f_1 + f_2) \leq \pi$ 的双谱确定后, 就完全可以表达整个双谱.

6 结 束 语

本文所开发的双圆盘电流变传动机构及动态实验研究, 取得了可喜的成果. (1) 所开发的双圆盘电流变传动装置, 具有主动盘转速对输出无影响. 即这种装置克服了电流变传动装置的传递力矩, 受到剪切速率和外加电场的双重控制的缺点. 这使系统的输出角度或角速度只受控于外加电场, 因而控制更加方便、可靠. (2) 我们认为, 输出信号中的随机信号是受到白噪声干扰的. 所以, 利用输出角度信号中的有色噪声, 建立了一阶AR模型式(9). 经过模型适应性检验是正确的. 由此可见, 建立时间序列模型是研究电流变系统的一种有效方法. (3) 文中绘制的AR自功率谱函数, 它描写了系统的频率特性, 因而是一个大惯性机构. 所建立的双谱函数, 对研究非线性的电流变传动系统具有特别意义. 它既给出能量与频率分布的关系, 又提供其相位信息. (4) 我们采用的虚拟仪器构建的电流变传动实验, 这是研究流体传动与控制问题的通用实验平台.

参 考 文 献

- 1 魏宸官. 电流变技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000. 1~ 24
- 2 温维佳, 黄先祥, 杨世和等. 巨电流变效应及其机理[J]. 物理, 2003, 32(12): 777~ 779
- 3 Wen Weijia, Huang Xianxiang, Yang Shihe, et al. The giant electrorheological effect in suspensions of nanoparticles[J]. Nature Materials, 2003, 2(11): 727~ 730
- 4 Schwarz S. Elektronheologische fluide charakterisierung und anwendungen[M]. Duesseldorf: VDF Verlag, 1997. 1~ 13
- 5 黄宜坚, 朱石沙, 李之达等. 电流变学[M]. 长沙: 湖南师范大学出版社, 1996. 235~ 236
- 6 张贤达. 时间序列分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 11~ 13
- 7 杨叔子, 吴 雅. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994. 181~ 187
- 8 刘福声, 罗鹏飞. 统计信号处理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999. 225~ 230

Time Series Model of a Disk Type Actuator of Electrorheological Fluid

Yu Tieyue Huang Yijian

(College of Electromech. Eng. & Auto., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

Abstract Electrorheological fluid (ERF) is a new type soft matter of intelligence. For modeling actuator of ERF, an autoregressive (AR) time series model is established by adopting sampled experimental data. The authors discuss the importance of bispectrum for settling nonlinear time series model; and give autoregressive bispectrum and analyse problem of nonlinearity. The test system in the paper is set up by adopting virtual instrument, this is a versatile platform on which diversified experiments of electromechanical engineering can be conveniently carried out.

Keywords electrorheological fluid, disk type actuator, time series model, bispectrum