

# 电液负载模拟器多余力抑制技术研究

田 军, 郑学银, 李祥春, 曹建林  
(湖北三江航天红峰控制有限公司, 湖北 孝感 432000)

**摘要:** 针对电液负载模拟器上多余力的问题, 通过建立数学模型, 分析影响多余力的因素, 从而提出了抑制多余力的措施, 并完成了仿真和实验。结果表明该方法在一定条件下可以对多余力进行抑制。

**关键词:** 电液负载模拟器; 多余力; 因素

**中图分类号:** TH137      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2095-8110 (2014) 02-0050-04

## Study on Elimination Superfluous Force of Electro-hydraulic Simulator

TIAN Jun, ZHENG Xue-yin, LI Xiang-chun, CAO Jian-lin  
(Hubei Sanjiang Space Red Peak Control Co. Ltd., Xiaogan 432000, China)

**Abstract:** Aiming at the superfluous force of Electro-hydraulic Simulator, it is necessary to establish the mathematic model which we can analyze the complication of superfluous force in the system. In the end, it puts forward the measure of eliminating extra force basing the work of simulation and experimentation. And the outcome indicated that the technique can eliminate superfluous force under some conditions.

**Key words:** Electro-hydraulic simulator; Superfluous force; Complication

### 0 引言

电液负载模拟器的作用是模拟舵机实际负载力矩, 实现舵机动态加载, 实现真实地考核舵机性能的目的。电液负载模拟器是被动式加载系统, 其加载过程受加载对象影响较大, 两者间耦合会产生很强的附加铰链力矩, 此即为多余力<sup>[1]</sup>。多余力的存在严重影响电液负载模拟器加载力矩精度, 严重时电液负载模拟器甚至不能正常工作。因此, 最大可能地抑制多余力是电液负载模拟器的关键技术。本文结合电液负载模拟器的研制情况, 对影响多余力的因素及抑制技术进行探讨。

### 1 电液负载模拟器工作原理

电液负载模拟器原理框图如图1所示。系统工作原理为:

1) 计算机根据加载对象工作需要生成不同类型、不同大小的力矩信号  $U_{k2}$ ;

2) 加载对象控制信号  $U_{k1}$  经多余力补偿环节处理后与力矩控制信号  $U_{k2}$  综合形成力矩控制信号  $U_{o2}$ ; 同时, 加载对象按舵机位置控制信号  $U_{k1}$  工作, 其执行机构输出位移并推动加载台摇臂 II 偏转角度  $\theta_2$ ;

3) 力矩控制信号  $U_{o2}$  与力矩反馈信号  $U_{f2}$  经加载机构比较器、放大器综合放大后输出伺服阀控制电流  $i$ , 该电流控制伺服阀阀门开度, 以控制高压液压油的流向和流量, 高压液压油推动加载油缸输出一定的位移进而推动加载台摇臂 I 偏转角度  $\theta_1$ ;

4) 力矩传感器、扭力杆安装在摇臂 I 和摇臂 II 之间, 当摇臂 I 和摇臂 II 两者间相对位置变化角度  $\Delta\theta$  时, 扭力杆因形变产生与变形大小成比例的力矩;

5) 力矩传感器敏感力矩, 按比例输出相应大小的电压信号, 经处理器输入到加载机构比较器反

收稿日期: 2014-03-17; 修订日期: 2014-08-20。

作者简介: 田军 (1976-), 男, 高级工程师, 主要从事电液伺服控制方面的研究。

馈端，使加载机构成为闭环控制系统；

6) 对加载机构来说，摇臂 II 偏转角度  $\theta_2$  为干扰信号，为了消除干扰信号对加载力矩的影响，

在计算机中引入数字信号补偿环节，利用结构不变性原理消除干扰信号引起的多余力。

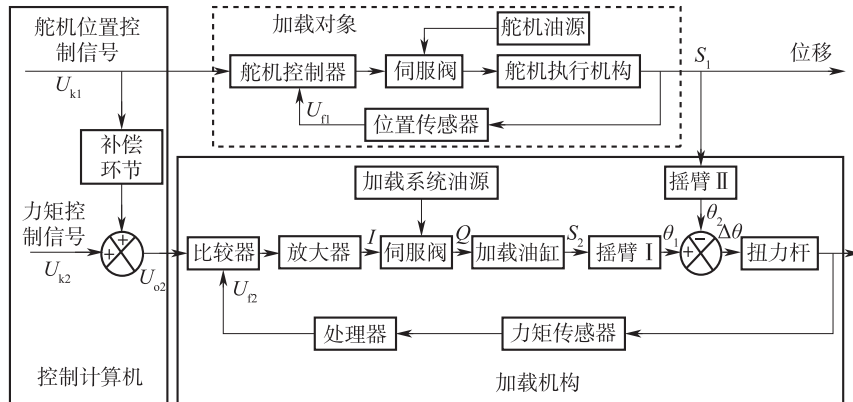


图 1 电液负载模拟器原理图

Fig. 1 Principle diagram of electro-hydraulic simulator

## 2 影响多余力的因素

根据电液负载模拟器原理框图，画出传递函数方块图，如图 2 所示（不含虚框部分）。

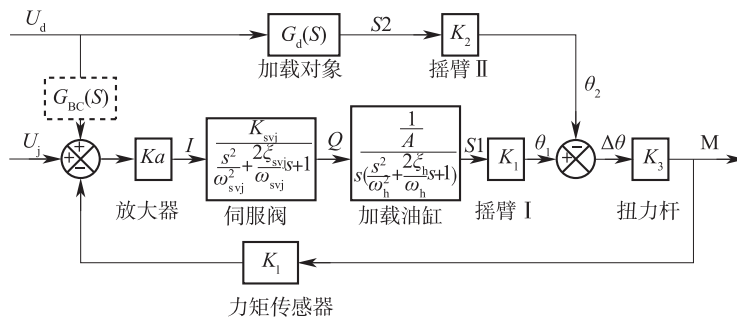


图 2 传递函数方块图

Fig. 2 Block diagram of system

在传递函数方块图中，将加载对象位移引起的偏转角度  $\theta_2$  视为干扰信号，可推导出在力矩控制信号  $U_j$  作用下的加载力矩为：

$$M = \frac{U_j \cdot Ka \cdot K_1 \cdot \frac{K_{svj}}{\omega_{svj}^2 + 2\xi_{svj}s + 1} \cdot \frac{1}{A} \cdot s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h s + 1) - U_d \cdot G_D(s) \cdot K_2}{\frac{1}{K_3} + K_1 \cdot Ka \cdot K_1 \cdot \frac{K_{svj}}{\omega_{svj}^2 + 2\xi_{svj}s + 1} \cdot \frac{1}{A} \cdot s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h s + 1)} \quad (1)$$

其中， $M$  为加载力矩， $U_j$  为力矩控制信号， $Ka$  为放大器增益， $K_{svj}$  为伺服阀流量增益， $A$  为加载油缸活塞有效面积， $U_d$  为加载对象位置控制信号， $G_D(s)$  为加载对象传递函数， $\omega_{svj}$  为伺服阀幅频

宽， $\omega_h$  为加载油缸固有频率， $\xi_{svj}$  为伺服阀阻尼系数， $\xi_h$  为加载油缸阻尼系数， $K_1$  为摇臂 I 系数（摇臂 I 长度的倒数）， $K_2$  为摇臂 II 系数（摇臂 II 长度的倒数）， $K_3$  为扭力杆刚度系数。

根据多余力的定义，令  $U_j = 0$ ，则由加载对象运动导致的多余力为：

$$M_d = \frac{U_d \cdot G_D(s) \cdot K_2}{\frac{1}{K_3} + K_1 \cdot Ka \cdot K_1 \cdot \frac{K_{svj}}{\omega_{svj}^2 + 2\xi_{svj}s + 1} \cdot \frac{1}{A} \cdot s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h s + 1)} \quad (2)$$

从式 (2) 可看出，多余力的大小与加载对象控制信号、加载对象自身特性、传递机构力臂的大小、扭力杆刚度、力矩传感器传递系数、控制

器放大系数、伺服阀特性以及加载油缸面积等均有关。

### 3 抑制多余力的措施

工程上,抑制多余力常从硬件结构和控制策略两个方面采取措施。从多余力传递函数可看出,在硬件方面通过缩短摇臂 I、选择较长的摇臂 II、减小扭力杆刚度、减小加载油缸活塞面积、增大放大器增益等措施均能减小多余力。由于受结构、加载力矩需求、油源压力等诸多因素的影响,摇臂 I、摇臂 II、油缸活塞面积、控制器放大系数、伺服阀等都只能在一定范围内进行优化选择。同时,扭力杆刚度对多余力的影响比较大,选择小的刚度系数抑制多余力的效果较明显,但若刚度太小,将造成加载系统失稳并使加载油缸行程增大,给油缸设计带来比较大的困难并影响加载系统频率特性。因此在进行扭力杆刚度选择时需要通过仿真分析选择合适的刚度。

当硬件结构确定后,在控制策略上常用的方法有基于结构不变性原理的控制法<sup>[2]</sup>、复合控制法<sup>[3]</sup>以及神经网络控制法<sup>[4]</sup>等。电液负载模拟器采用的控制策略为基于结构不变性原理的前馈控制法。

在补偿信号源的选择上,常用的方法是通过测量加载对象的运动状态,如位移、速度、加速度等进行前馈控制。考虑到加载对象位移、速度、加速度等的采集存在较大的误差,而且信号处理比较复杂,而加载对象控制信号作为已知信号是容易处理的,因此舵机电液负载模拟器直接采用加载对象控制信号作为补偿信号源<sup>[5]</sup>。在加载对象控制信号与力矩控制信号间增加补偿环节(如图2中虚框所示)。加载对象控制信号通过补偿环节产生的力矩为:

$$M_b = \frac{U_d G_{BC}(s) K_1 K_a \cdot \frac{K_{sj}}{\frac{s^2}{\omega_{sj}^2} + \frac{2\xi_{sj}}{\omega_{sj}}s + 1} \cdot \frac{1}{A} s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1)}{\frac{1}{K_3} + K_l \cdot K_a \cdot K_1 \cdot \frac{K_{sj}}{\frac{s^2}{\omega_{sj}^2} + \frac{2\xi_{sj}}{\omega_{sj}}s + 1} \cdot \frac{1}{A} s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1)} \quad (3)$$

为了抑制多余力矩,令  $M_b = M_d$ , 可推导出补偿环节传递函数为

$$G_{BC}(s) = \frac{G_D(s) K_2}{K_1 K_a \cdot \frac{K_{sj}}{\frac{s^2}{\omega_{sj}^2} + \frac{2\xi_{sj}}{\omega_{sj}}s + 1} \cdot \frac{1}{A} s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1)} \quad (4)$$

引入补偿环节后,加载系统加载力矩传递函数可写为:

$$M = \frac{U_j \cdot K_a \cdot K_1 \cdot \frac{K_{sj}}{\frac{s^2}{\omega_{sj}^2} + \frac{2\xi_{sj}}{\omega_{sj}}s + 1} \cdot \frac{1}{A} s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1)}{\frac{1}{K_3} + K_l \cdot K_a \cdot K_1 \cdot \frac{K_{sj}}{\frac{s^2}{\omega_{sj}^2} + \frac{2\xi_{sj}}{\omega_{sj}}s + 1} \cdot \frac{1}{A} s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h}s + 1)} \quad (5)$$

从式(5)可看出,在加载系统动态性能优于加载对象动态性能的前提下,通过建立能够比较真实地描述加载系统和加载对象的数学模型,利于基于结构不变原理的前馈控制法能够较好的抑制多余力。

### 4 仿真分析

为进一步验证基于结构不变原理的前馈控制法的合理性,采用 SIMULINK 软件工具进行仿真分析。其中,加载对象为某液压舵机,加载对象控制信号为幅值  $1^\circ$ 、频率  $8\text{Hz}$ , 加载力矩为  $80\text{N} \cdot \text{m}$ , 建立 SIMULINK 模型如图3。最后得到该控制信号下的加载力矩仿真结果见图4, 多余力仿真结果见图5。

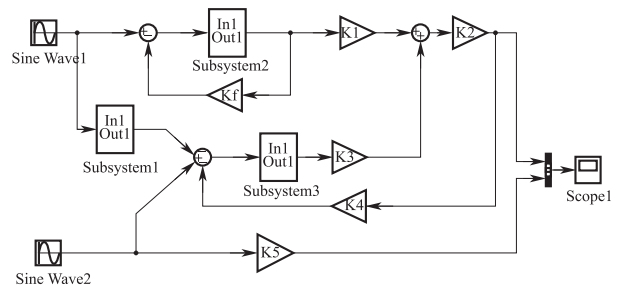


图3 仿真模型

Fig.3 Simulink model

从仿真结果可看出,在该电液舵机常见工况下,根据结构不变原理的前馈控制法设计的电液负载模拟器在多余力的抑制上是有效果的。

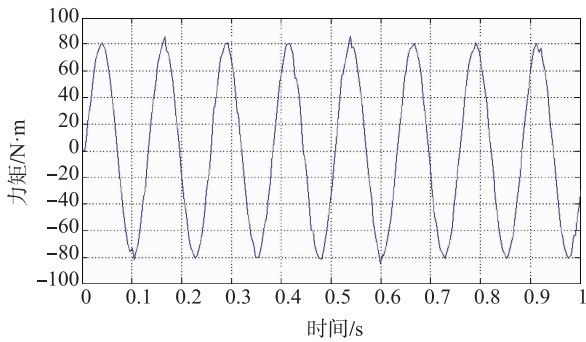


图 4 力矩仿真结果

Fig. 4 Simulink result of force

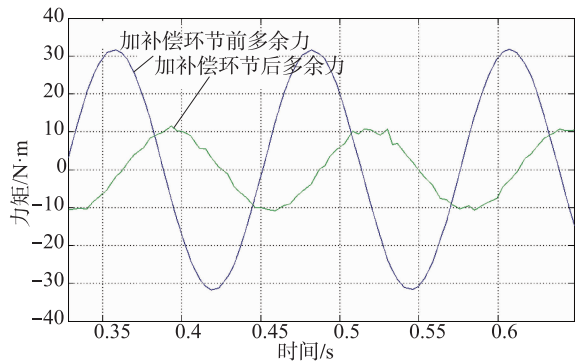


图 5 多余力仿真结果

Fig. 5 Simulink result of superfluous force

### 5 试验情况

用电液负载模拟器对某液压舵机进行加载，验证电液负载模拟器多余力。液压舵机工况为幅值  $1^\circ$ 、频率 8Hz，加载力矩为  $80\text{ N}\cdot\text{m}$ ，图 6 为引入前馈补偿前的多余力试验结果，图 7 为引入前馈补偿后的多余力试验结果。

从试验曲线可看出，在该工况及加载力矩下，加载系统能够较好地抑制多余力。同时，由于受油源、电液伺服阀额定流量、管路及执行机构惯量等影响，电液负载模拟器执行机构的运动速度、加速度具有一定的限值。通过试验验证，当执行机构的运动速度、加速度小于该限值时，电液负载模拟器能够较好地抑制多余力矩。

### 6 总结

电液负载模拟器多余力的大小与加载系统硬件设计、控制策略选择及加载对象工作特性等均有关。通过分析、仿真及试验可看出，选择合适的加载机构、扭力杆刚度，同时根据结构不变性原理引

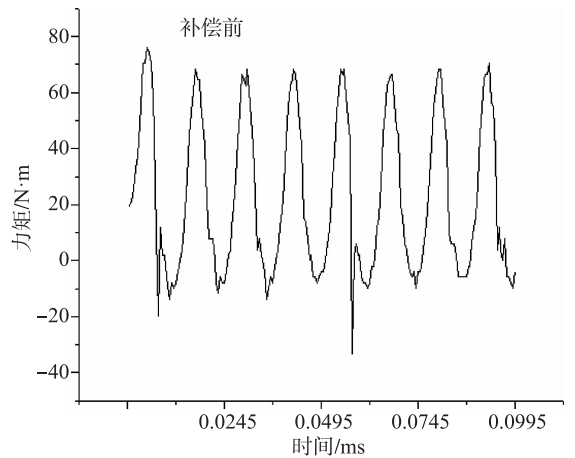


图 6 引入前馈补偿前多余力试验结果

Fig. 6 Experimental result of superfluous force without feed – forward compensation

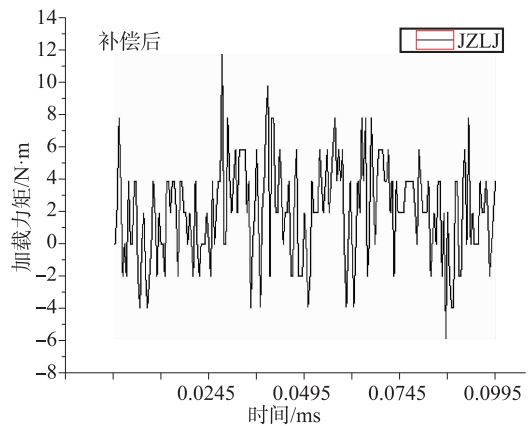


图 7 引入前馈补偿后多余力试验结果

Fig. 7 Experimental result of superfluous force with feed – forward compensation

入数字补偿环节，并将加载对象位置控制信号作为补偿信号源，在一定条件下和一定应用场合，电液负载模拟器多余力可得到较好的抑制。

### 参考文献

[1] 邓大志, 李锻能. 舵机被动式加载系统多余力矩分析 [J]. 机电工程技术, 2009, 38 (07): 125 – 126.  
 [2] 冯宇晨, 刘乔, 吴新跃. 结构不变性补偿原理在电液伺服舵机控制中的应用 [J]. 船海工程, 2008, 38 (1): 29 – 31.  
 [3] 焦宗夏, 华清, 王晓东, 等. 电液负载模拟器的复合控制 [J]. 机械工程学报, 2002, 38 (12): 34 – 38.  
 [4] 华清, 焦宗夏. 负载模拟器的 DRNN 神经网络控制 [J]. 机械工程学报, 2003, 39 (1): 15 – 19.  
 [5] 王新民, 张举中, 刘卫国, 等. 伺服加载的一种新反馈控制方法 [J]. 计算机仿真, 2007, 24 (06): 330 – 333.