

基于灰预测模糊 PID 的随动系统负载 模拟器力矩控制研究

王力¹, 钱林方¹, 高强¹, 郭旗²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 总装备部工程兵军事代表局 武汉军事代表室, 湖北 武汉 430073)

摘要: 为了抑制多余力矩的幅值, 提高随动系统负载模拟器加载力矩的控制精度, 提出了一种基于灰预测模糊 PID 的力矩控制器。由灰模型根据力矩传感器测量数值序列的变化趋势, 预测加载力矩的未来数值, 并以此预测值作为力矩控制器的运算依据。力矩控制器在大误差时采用 Bang-Bang 控制, 小误差时采用模糊 PID 控制; 同时引入伸缩因子, 根据误差大小动态调整输入变量的论域, 以增强模糊控制器的控制能力。仿真分析和实验结果表明, 与传统的 PID 控制相比, 所提出的控制策略能够将多余力矩的幅值进一步削弱接近 1/2, 可以用于随动系统的动态力矩加载控制。

关键词: 自动控制技术; 随动系统; 灰预测; 模糊 PID 控制; 变论域; 负载模拟器

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2012)11-1379-08

Research on Torque Control of Servo System Load Simulator Based on Grey Prediction Fuzzy-PID Controller

WANG Li¹, QIAN Lin-fang¹, GAO Qiang¹, GUO Qi²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Wuhan Military Representative Office, General Armament Department, Wuhan 430073, Hubei, China)

Abstract: In order to restrain the extra torque and improve the loading precision of servo system load simulator, a fuzzy-PID torque controller based on grey prediction was proposed. According to the variation trend of the data measured by sensors, the grey prediction model predicted the future values of loading torque circularly, and took those prediction values as the operation basis of the torque controller. When the error was large, the controller performed a switch control; while the error was small, the controller performed a fuzzy-PID control. Meanwhile, a flexible factor depending on error was introduced to adjust the universe of the input variable dynamically and enhance the control ability of the fuzzy controller. The simulation and experiment results show that, compared with the traditional PID control, the proposed control strategy can reduce the extra torque by about one half, and therefore, it can be used to control the dynamical loading of servo systems.

Key words: automatic control technology; servo system; grey prediction; fuzzy-PID control; variable universe; load simulator

0 引言

随动系统是武器系统当中的重要组成部分,其作用是根据火控系统的计算诸元将炮管实时调转到发射位置;其性能的好坏直接关系到武器系统的初始发射精度^[1]。为保证随动系统的控制品质,一般通过台架试验来考核控制器的性能;但是传统的台架试验采用静态固定负载加载形式,不能完全模拟武器系统的真实工作环境。近年来,随着电液伺服技术的发展,采用阀控液压马达^[2]或者阀控液压缸^[3-8]构成负载模拟器成为现实。

随动负载模拟器由模拟加载系统和被加载系统两部分组成,由于受到油液的体积模量、压缩性和黏度等非线性因素,以及动态加载时液压缸(或液压马达)跟随被加载系统运动所形成干扰力(或力矩)的影响,使得加载精度受到很大制约。文献[2]采用基于干扰观测器的 PID 控制策略对火炮随动系统进行了研究;文献[3]设计了基于 μ 理论的鲁棒控制器对航空舵机负载模拟器进行了控制研究;文献[4]设计了前馈补偿解耦控制器来消除减摇鳍电液负载仿真台的多余力;文献[5]将非线性自适应补偿技术应用于航空舵机负载模拟器;文献[6]采用自整定步长的灰预测与模糊 PID 一起用于液压缸负载力进行控制;文献[7]和文献[8]分别使用结构补偿和双阀并联的方式对船舶舵机负载模拟器多余力矩进行了研究。尽管这些方法在仿真中都取得了较好的控制效果,但是结构补偿需要增加硬件,改变原有系统的结构,增加成本;算法补偿不仅需要被控对象的数学模型,还要考虑计算复杂性,以适应实时控制的需要;同时,大部分文献基于阀控液压缸进行力控制研究,对阀控液压马达形式的负载模拟器进行力矩控制研究较少。

尽管面对许多新的控制策略, PID 控制器仍然以鲁棒性好、结构简单、计算量小而在工业控制中占有重要地位;但传统 PID(T-PID)控制器的参数整定需要被控对象的数学模型,并且随着模型的变化,固定参数 PID 控制器的控制品质会恶化。将模糊逻辑与 PID 控制器相结合,根据被控对象的变化利用模糊逻辑推理实时调整 PID 参数,这就是模糊 PID(F-PID)控制器^[9]。传统的模糊 PID 控制器输入信号是之前时刻的系统误差以及误差的微分,本质上属于“时延控制”;同时由于测量噪声的存在,导致模

糊控制系统的实时性和自适应能力变差。

灰色理论^[10]不依赖于对象的精确数学模型,能够从小样本、贫信息的不确定系统中,通过对已知信息的生成和开发,从中提取出有价值的信息,实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。灰预测^[11-13]是从系统已经发生的行为特征当中,寻找系统的发展规律,从而预测系统的未来行为,具有结构简单、计算快速、预测步数可调的特点,可以将灰预测与其他控制策略结合起来,利用灰预测能力提升控制品质^[6,14]。

本文针对某武器随动系统负载模拟加载测试的需要,将灰预测模型与模糊 PID 控制器结合起来,设计了灰预测模糊 PID(GF-PID)控制器。多余力矩的干扰总是表现为加载力矩值的变化,GF-PID 控制器实时预测加载力矩的变化数值,从而采取相应的控制措施。仿真和实验结果表明,所提出的控制策略能够显著削弱多余力矩的幅值,可以用于随动系统的动态力矩加载。

1 系统构成及工作原理

所设计的随动负载模拟器结构原理如图 1 所示。模拟加载系统是力矩伺服控制系统,采用阀控液压马达形式,武器随动系统是角位移伺服控制系统,采用交流永磁同步驱动方式,两个系统通过阻尼弹性环节、力矩传感器和惯性负载联接在一起。其工作原理为:武器随动系统的输出角位移通过阻尼弹性环节传递到模拟加载系统,通过力矩传感器,对液压马达产生负载力矩;模拟加载系统的力矩控制器采集加载力矩输出值,通过液压马达在跟随武器随动系统运动的同时对其施加设定的负载力矩。加载力矩数值中包含两部分:一部分是期望的负载力矩;另一部分是由于随动系统的旋转对液压马达产生流量波动,从而形成的干扰力矩。

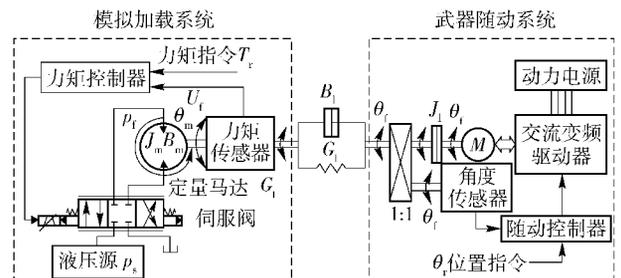


图 1 随动负载模拟器结构框图

Fig. 1 Structure blockdiagram of servo load simulator

2 数学模型

假设: 1) 伺服阀为理想的零开口四通阀, 4 个节流口对称配做, 流量系数相同; 2) 油源压力恒定, 回油压力为零; 所有连接管路短而粗, 忽略管路内的摩擦压力损失, 以及流体质量和管路的动态影响; 3) 液压马达各腔内压力相同, 且与伺服阀联接的管路长度相同; 4) 油液温度、密度和体积弹性模量为非时变常数; 5) 忽略减速器中齿轮的间隙和空回。

2.1 液压部分数学模型

1) 伺服阀负载流量方程:

$$Q_1 = C_v \omega x_v \sqrt{\frac{p_s - p_l}{\rho}}, \quad (1)$$

式中: Q_1 为负载流量; C_v 为阀口流量系数; ω 为阀口面积梯度; x_v 为阀芯位移; p_s 为供油压力; p_l 为负载压力; ρ 为油液密度。

线性化之后可得:

$$Q_1 = K_q x_v - K_c p_l, \quad (2)$$

$$K_q = C_v \omega \sqrt{\frac{p_s - p_l}{\rho}},$$

$$K_c = \frac{C_v \omega x_v \sqrt{\frac{p_s - p_l}{\rho}}}{2(p_s - p_l)},$$

式中: K_q 为流量增益; K_c 为压力-流量系数。

2) 马达流量连续性方程:

$$Q_1 = D_m \frac{d\theta_m}{dt} + \frac{V_l}{4\beta_e} \frac{dp_l}{dt} + C_{lm} p_l, \quad (3)$$

式中: D_m 为马达弧度排量; θ_m 为液压马达转子角位移; V_l 为液压马达两腔及连接管路的总体积; β_e 为等效容积弹性模量; C_{lm} 为液压马达总泄漏系数。

3) 马达转子力矩平衡方程:

$$D_m p_l = J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} + T_l, \quad (4)$$

$$T_l = G_l (\theta_m - \theta_l),$$

式中: J_m 为液压马达的转动惯量; B_m 为液压马达的黏性阻尼系数; T_l 为马达的负载力矩; G_l 为力矩传感器的扭转刚度; θ_l 为力矩传感器转子角位移。

4) 负载力矩平衡方程:

$$T_l = J_l \frac{d^2 \theta_l}{dt^2} + B_l \frac{d\theta_l}{dt} + G_l (\theta_l - \theta_f), \quad (5)$$

式中: J_l 为负载的转动惯量; B_l 为负载的黏性阻尼系数; G_l 为负载的扭转刚度; θ_f 为交流电机转子角位移。

2.2 电气部分数学模型

1) 伺服阀传递函数:

由于模拟加载系统的工作频率小于 20 Hz, 而伺服阀的固有频率一般大于 100 Hz, 故此可将伺服阀看作一阶惯性环节。即有:

$$G_{sv}(s) = \frac{x_v}{I_{sv}} = \frac{K_{sv}}{T_{sv} s + 1}, \quad (6)$$

式中: I_{sv} 为输入电流; K_{sv} 为增益系数; T_{sv} 为时间常数。

2) 功率放大器:

$$I_{sv}(s) = K_{v/l} U_c(s), \quad (7)$$

式中: $K_{v/l}$ 为驱动电路放大系数; U_c 为控制器输出电压。

3) 力矩传感器:

$$U_f = K_f T_l, \quad (8)$$

式中 K_f 为力矩传感器转换系数。

2.3 随动负载模拟器构成原理方框图

根据以上分析, 可以得到整个随动负载模拟器的构成原理方框图, 如图 2 所示, 其中 $G_{con}(s)$ 为所设计控制器的传递函数。

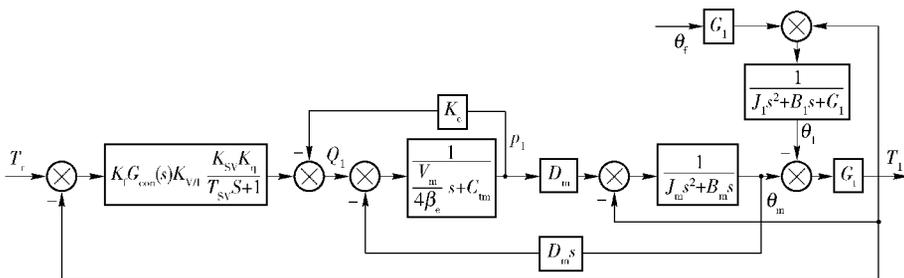


图 2 随动负载模拟器构成原理方框图

Fig. 2 Principal blockdiagram of servo system load simulator

相应的输出负载力矩 $T_1(s)$ 的表达式以及由于负载轴的旋转所产生干扰力矩的传递函数 $G_{V/\theta}(s)$ 分别为

$$T_1(s) = \frac{K_f G_{con}(s) K_{V/1} K_{sv} K_q D_m}{(T_{sv}s + 1) \left[D_m s + (J_m s^2 + B_m s) \left(\frac{V_m}{4\beta_e} s + K_c + C_{tm} \right) \right]} T_r(s) - \frac{G_1}{J_1 s^2 + B_1 s + G_1} \theta_f(s), \quad (9)$$

$$= \frac{(T_{sv}s + 1) \left(\frac{V_m}{4\beta_e} s + K_c + C_{tm} \right) + K_f G_{con}(s) K_{V/1} K_{sv} K_q D_m}{(T_{sv}s + 1) \left[D_m s + (J_m s^2 + B_m s) \left(\frac{V_m}{4\beta_e} s + K_c + C_{tm} \right) \right]} + \frac{1}{J_1 s^2 + B_1 s + G_1} + \frac{1}{G_1}$$

$$G_{V/\theta}(s) = \frac{T_1(s)}{\theta_f(s)} = - \frac{\frac{G_1}{J_1 s^2 + B_1 s + G_1}}{(T_{sv}s + 1) \left(\frac{V_m}{4\beta_e} s + K_c + C_{tm} \right) + K_f G_{con}(s) K_{V/1} K_{sv} K_q D_m} + \frac{1}{J_1 s^2 + B_1 s + G_1} + \frac{1}{G_1}$$

$$= \frac{1}{(T_{sv}s + 1) \left[D_m s + (J_m s^2 + B_m s) \left(\frac{V_m}{4\beta_e} s + K_c + C_{tm} \right) \right]} + \frac{1}{J_1 s^2 + B_1 s + G_1} + \frac{1}{G_1}$$

从 (9) 式和 (10) 式中可以看到, 被测试武器随动系统中电机转子的旋转引起液压马达的流量波动, 对加载力矩产生强烈干扰, 称此干扰力矩为“多余力矩”, 在设计力矩控制器时需要采取适当措施予以抑制或者消除才能保证随动负载模拟器的力矩加载精度。

3 力矩控制器设计

所设计的力矩控制系统如图 3 所示。整个系统

由灰模型根据当前力矩传感器的测量数值序列实时预测随后的力矩变化数值, 并与设定力矩数值进行比较, 以此作为控制器的运算依据。当误差较大时, 采用 Bang-Bang 控制以加快系统响应, 缩短调节时间; 当误差较小时, 采用基于变论域的自适应模糊 PID 控制器, 利用变论域的模糊推理机制动态整定控制器的参数, 以消除静态误差, 提高力矩加载精度。

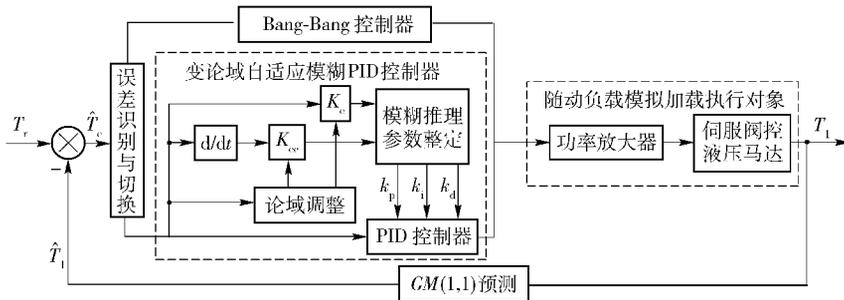


图 3 随动负载模拟器力矩控制系统框图

Fig. 3 Torque control blockdiagram of servo system load simulator

3.1 灰预测模型

与一般预测采用的统计方法不同, 灰预测采用累加生成算法来削弱原始数据序列中的随机性, 以从中发现系统的发展规律。常用的灰预测模型是 $GM(i, j)$, 其中 i 是差分方程的阶数, j 是灰变量的个数。一般来说, 计算量随着 i 和 j 的增大而成指数增长; 但是预测精度并不一定提高^[11]。因此, 本文采用 $GM(1, 1)$ 预测模型。其计算步骤如下。

3.1.1 累加生成

将从力矩传感器采集获得的原始数据序列 $Y^{(0)} = (y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), \dots, y^{(0)}(n))$ 通过一阶累加

生成操作处理, 削弱传感器数据的噪声干扰, 得到新的数据序列 $Y^{(1)} = (y^{(1)}(1), y^{(1)}(2), \dots, y^{(1)}(n))$,

$$y^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k y^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

式中 n 为预测序列的数据长度。

3.1.2 模型建立

对 $Y^{(1)}$ 进行紧邻均值生成操作, 得到新的数据序列 $Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n))$,

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2} [y^{(1)}(k) + y^{(1)}(k-1)], k=2, 3, \dots, n. \quad (12)$$

则灰模型 $GM(1, 1)$ 由灰差分方程定义^[13]:

$$y^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b, \quad (13)$$

式中 a 和 b 为估计参数。

令

$$\begin{cases} \mathbf{Y} = [y^{(0)}(2), y^{(0)}(3), \dots, y^{(0)}(n)]^T, \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & -z^{(1)}(3) & \dots & -z^{(1)}(n) \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T, \\ \mathbf{M} = [a \quad b]^T. \end{cases} \quad (14)$$

根据最小二乘法,可得

$$\mathbf{M} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}. \quad (15)$$

将得到的估计参数 $[a \quad b]$ 代入 (13) 式,可得

$$(1 + 0.5a)y^{(0)}(k) + ay^{(1)}(k-1) = b, \quad (16)$$

即有

$$y^{(0)}(k) = \frac{b - ay^{(1)}(k-1)}{1 + 0.5a} = \left(\frac{1 - 0.5a}{1 + 0.5a} \right) y^{(0)}(k-1), \quad k > 2. \quad (17)$$

因此,灰模型 $GM(1, 1)$ 的输出值可用下式表示

$$\hat{y}(p) = \left(\frac{1 - 0.5a}{1 + 0.5a} \right)^{(n+p-2)} \frac{b - ay^{(0)}(1)}{1 + 0.5a}, \quad (18)$$

式中 p 为预测步长。一般来说,系统的惯性或者滞后越大,预测步长越大。在本文中,取建模数据序列长度 $n = 5$, 预测步长 $p = 8$ 。

3.1.3 滚动优化

在每一次控制循环当中维持相同长度的预测数据序列,采用“新陈代谢”的方式,将从力矩传感器采集的最新数据 $y^{(0)}(k+1)$ 加入预测数据序列中,并舍弃原数据序列当中的最旧数值 $y^{(0)}(1)$,各数据依次前移。

重复执行步骤 1) 和步骤 2),如此以来,预测模型始终紧跟系统的运动变化,不断更新模型参数,预测输出数值才能够反映系统的实际情况。

3.2 误差切换及 Bang-Bang 控制

当加载系统突然启动或者改变设定力矩时,误差数值比较大。为了缩短响应时间,引入如下的 Bang-Bang 控制,

$$U = \frac{\hat{T}_e}{|\hat{T}_e|} U_{\max}, \quad |\hat{T}_e| \geq \varepsilon, \quad \hat{T}_e = T_r - \hat{T}_1, \quad (19)$$

式中: U_{\max} 为功率放大器所允许的最大电压值; ε 为设定的切换误差,取 $\varepsilon = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$; T_r 为设定力矩值; \hat{T}_1 为灰预测模型的输出值。

3.3 基于变论域模糊整定的 PID 控制器

通常的模糊推理是采用固定论域的方式对 PID 控制器的 3 个参数增益进行整定。此时,对输入变

量进行模糊化的量化因子 K_e 和 K_{ec} 全都采用固定数值,当系统误差数值逐渐较小并接近零值时,最初给定输入论域的模糊划分显得较为粗糙,对小的误差不能够有效区分,使得控制精度不高。尽管可以通过增加模糊划分的数目来提高控制精度,但会带来规则数和计算量的大大增加,导致实时性变差。为此,采用变论域的思想,引入伸缩因子来动态改变输入变量的论域;对零值附近区域进一步细分,增强模糊控制器对小误差的控制作用。

设输入论域为 $X_i = [-E_i, E_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 变论域是指在规则形式不变的前提下,论域随着变量的变化而自行地收缩或扩展。伸缩因子的选择必须满足对偶、保零和单调等特性,为此定义伸缩因子为

$$\alpha_i(x_i) = 1 - \lambda \exp(-kx_i^2), \quad \lambda \in (0, 1), k > 0, \quad (20)$$

则输入论域变为 $X_i = [-\alpha_i(x_i)E_i, \alpha_i(x_i)E_i]$ 。 k 取值越大, $\alpha_i(x_i)$ 越大; λ 取值越大, $\alpha_i(x_i)$ 越小论域压缩越明显,系统响应速度越快^[15]。本文取 $\lambda = 0.99$, $k = 0.5$ 。

取输入论域 \hat{T}_e 和 \hat{T}_{ec} 基本论域范围均为 $E = 10$, 模糊子集为: $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ 。其调整原则为: 1) 当误差 $|\hat{T}_e|$ 较大时,为使系统具有快速跟踪能力,不论误差的变化趋势如何,都要取较大的 k_p 和较小的 k_d 。同时为了避免出现超调,对积分作用加以限制,取较小的 k_i 。 2) 当误差 $|\hat{T}_e|$ 中等大小时,为使系统超调较小,取小的 k_p 。同时为了保证相应的速度, k_i 和 k_d 大小要适中。 3) 当误差 $|\hat{T}_e|$ 较小时,为保证系统的稳定性, k_p 和 k_i 应取的大些。同时为了避免系统在设定值附近出现振荡,并考虑系统的抗干扰能力,当 $|\hat{T}_{ec}|$ 较小时, k_d 可取大些;当 $|\hat{T}_{ec}|$ 较大时, k_d 可取小些。表 1 ~ 表 3 分别为 k_p 、 k_i 和 k_d 的控制规则表。

表 1 k_p 的模糊控制规则表
Tab. 1 Fuzzy control rule table of k_p

\hat{T}_{ec}	\hat{T}_e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 k_i 的模糊控制规则表
Tab.2 Fuzzy control rule table of k_i

\hat{T}_{ec}	\hat{T}_e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 k_d 的模糊控制规则表
Tab.3 Fuzzy control rule table of k_d

\hat{T}_{ec}	\hat{T}_e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NM	NM	PS
NM	PS	NS	NM	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NS	NS	ZO	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

最后采用 Mamdani 模糊运算、平均最大隶属度法进行解模糊化,将得到的 PID 参数用下式进行控制量计算:

$$U_{PID}(k) = k_p \hat{T}_e(k) + k_i \sum_{j=0}^k \hat{T}_e(j) + k_d \frac{\hat{T}_e(k) - \hat{T}_e(k-1)}{T}, \quad (21)$$

式中 T 为控制间隔。

4 仿真分析与实验

根据某武器系统的设计方案可知,满载全速调转时折合到随动系统电机端的负载扭矩约为 $40 \text{ N}\cdot\text{m}$;在考核所设计随动系统的动态性能时,需要其以角频率 1.67 rad/s 做正弦运动。为了比较 GF-PID 控制器与 T-PID 控制器对随动系统力矩模拟加载的控制效果,在被加载随动系统静止和正弦运动两种情况下,分别进行了 $40 \text{ N}\cdot\text{m}$ 力矩模拟加载的仿真实验,如图 4 和图 5 所示,以及随动系统以幅值 50° 做正弦运动时多余力矩抑制情况的仿真与

实验,如图 6 和图 7(a) 所示;为进一步考核 GF-PID 控制器的适应性,对随动系统以幅值 30° 做正弦运动时的多余力矩抑制情况也进行了实验,如图 7(b) 所示。其中 T-PID 控制器采用 Z-N 方法进行优化整定,控制参数分别为: $K_p = 5$ 、 $K_i = 0.28$ 和 $K_d = 2$ 。

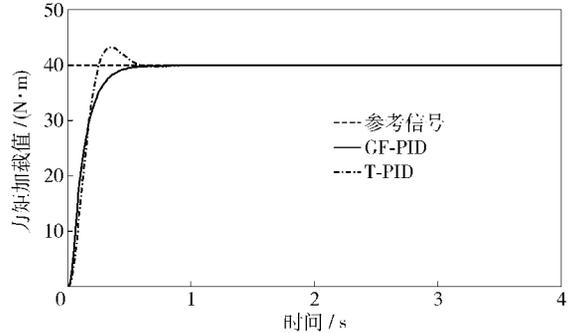


图 4 随动系统静止时的仿真曲线
Fig.4 Simulation curve of servo system in static state

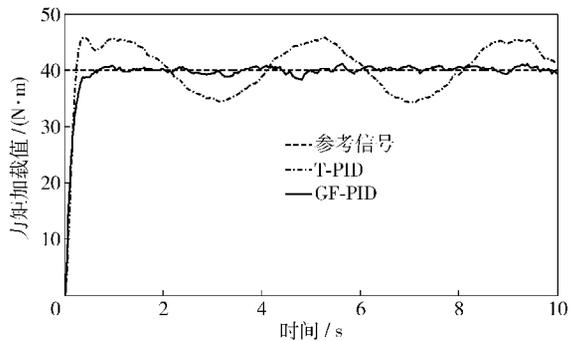


图 5 随动系统运动时的仿真曲线
Fig.5 Simulation curve of servo system in dynamic state

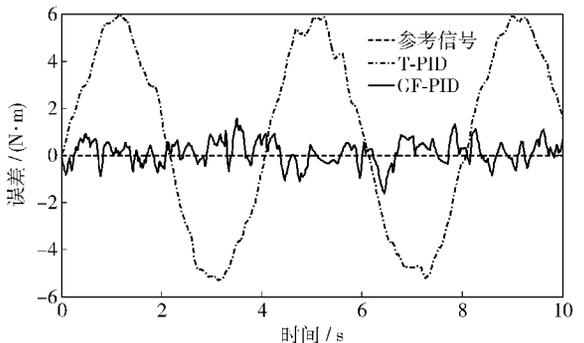


图 6 多余力矩抑制仿真曲线
Fig.6 Simulation curve of additional torque restriction

随动负载模拟器的主要参数如表 4 所示。

4.1 $40 \text{ N}\cdot\text{m}$ 加载时的阶跃响应仿真

从图 4 和图 5 中可以看出:当被加载随动系统静止时,采用两种控制器进行 $40 \text{ N}\cdot\text{m}$ 静态加载的阶跃响应,调整时间基本相同;但是 GF-PID 控制曲线

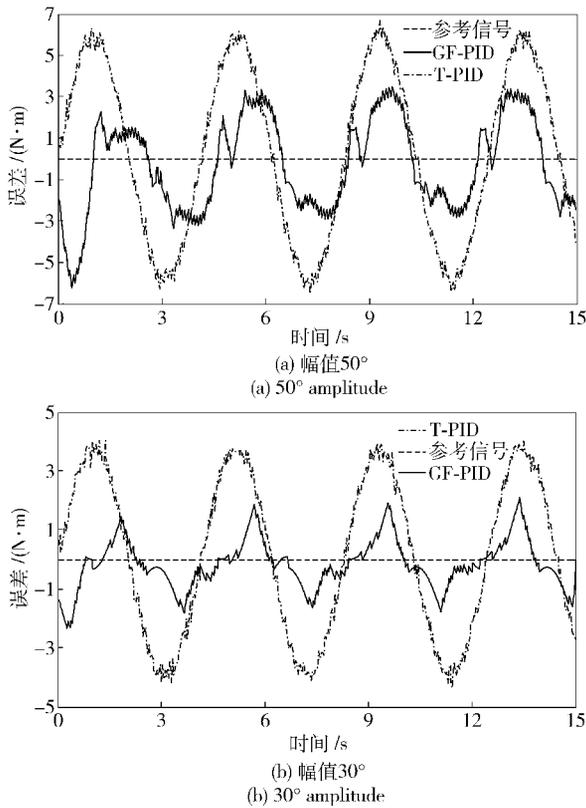


图 7 多余力矩抑制实验曲线

Fig. 7 Experiment curve of additional torque restriction

没有超调,并且相比 T-PID 控制器上升曲线也略微陡些。当被加载随动系统运动时,T-PID 控制器不能很好的抑制干扰力矩的影响,仍然有幅值约为 6 N·m 的正弦干扰力矩;GF-PID 控制器可以将正弦干扰力矩的幅值抑制在 1.8 N·m 以内。

4.2 多余力矩抑制的仿真和实验

从图 6 和图 7 可以看到,由被加载随动系统运

表 4 随动负载模拟器主要参数

Tab. 4 Parameters of servo loadsimulator

参数	数值
$\beta_e / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	745×10^6
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	848
$D_m / (\text{m}^3 \cdot \text{rad}^{-1})$	8.0×10^{-5}
V_l / m^3	6.82×10^{-4}
$C_{tm} / (\text{m}^5 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	1.59×10^{-11}
$K_t / (\text{V} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	1/110
$K_{V1} / (\text{A} \cdot \text{V}^{-1})$	4×10^{-3}
p_s / MPa	25
$K_{sv} / (\text{m}^3 \cdot \text{A}^{-1})$	10^{-3}
T_{sv} / s	1.59×10^{-3}
$K_q / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	25
$J_m / (\text{kg} \cdot \text{m})$	0.01
$B_m / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	10
$G_l / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	1.92×10^5
$J_l / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.129
$G_l / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	4.88×10^4

动所引起的多余力矩,在 GF-PID 控制器的作用下,幅值得到了很大抑制;与 T-PID 控制器相比,多余力矩的幅值削弱了接近 1/2. 从图 7 中的两幅曲线进一步可以看到,多余力矩与被加载随动系统的运动状况有关,幅值越大引起的多余力矩也越大。

表 5 为两种控制器对于多余力矩抑制情况的效果对比。由表 5 可见,无论是仿真曲线还是实验曲线,对于干扰力矩的抑制作用,GF-PID 都要优于 T-PID.

表 5 干扰力矩抑制效果对比表

Tab. 5 Effect contrast of additional torque restriction

干扰力矩/(N·m)	幅值 50° 仿真		幅值 50° 实验		幅值 30° 实验	
	T-PID	GF-PID	T-PID	GF-PID	T-PID	GF-PID
最大值	5.946 2	1.583 2	6.674 3	3.491 3	4.060 3	2.115 0
最小值	-5.471 8	-1.645 0	-6.487 1	-6.213 2 *	-4.335 6	-2.310 0
平均值	0.364 2	-0.192 6	0.488 5	-0.271 7	0.218 8	-0.139 4
均方差	3.763 9	1.308 4	4.126 8	2.247 6	2.875 0	1.071 6

注:初始的最小峰值,随后基本维持在 -3.2 N·m 左右。

5 结论

多余力矩的耦合干扰是负载模拟器研制当中必须要面对的特殊情况,也是影响加载力矩控制精度

的关键因素。本文对随动系统负载模拟器的数学模型进行了理论推导,并设计了灰预测模糊 PID 控制器用于对多余力矩的抑制,得到以下结论:

- 1) 多余力矩是由被加载随动系统的主动运动

所引起的“附加流量”产生的,其方向与被加载随动系统的运动方向相反,幅值与其运动幅度成正比。

2) 灰预测模型直接从力矩传感器的测量数据中提取补偿信息,避免了其他算法补偿对系统精确数学模型的依赖。与传统 PID 的仿真分析和实验结果对比进一步验证了控制器的有效性。

参考文献 (References)

- [1] 张彦斌,张宁. 火炮控制系统及原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009.
ZHANG Yan-bin, ZHANG Ning. The principle of cannon control system[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [2] 王红平,曹国华,王振宏,等. 一种泵、马达双用火炮随动系统负载仿真策略研究[J]. 中国机械工程,2010,21(9):1040-1045.
WANG Hong-ping, CAO Guo-hua, WANG Zhen-hong, et al. A strategy study of gun servo system load simulation based on dual-uses of pump and motor[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(9):1040-1045. (in Chinese)
- [3] 李阁强,赵克定,袁锐波,等. μ 理论在电液负载模拟器中的应用[J]. 航空学报,2007,28(1):228-233.
LI Ge-qiang, ZHAO Ke-ding, YUAN Rui-bo, et al. Application of μ theory in electrohydraulic load simulator[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, 28(1):228-233. (in Chinese)
- [4] 梁利华,刘强,赵琳琳. 减摇鳍电液负载仿真台前馈补偿解耦控制研究[J]. 中国机械工程,2007,18(4):439-441.
LIANG Li-hua, LIU Qiang, ZHAO Lin-lin. Research on feed-forward compensation decoupling control for the electro-hydraulic load simulator of fin stabilizer[J]. China Mechanical Engineering, 2007,18(4):439-441. (in Chinese)
- [5] Yao J Y, Jiao Z X, Shang Y X, et al. Adaptive nonlinear optimal compensation control for electro-hydraulic load simulator[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(6):720-733.
- [6] Dinh Q T, Kyoung K A. Force control for hydraulic load simulator using self-tuning grey predictor-fuzzy PID[J]. Mechatronics, 2009, 19(2):233-246.
- [7] 王经甫,叶正茂,李洪人. 双阀并联控制在船舶舵机电液负载模拟器多余力抑制中的研究[J]. 机械工程学报,2005,41(4):229-233.
WANG Jing-fu, YE Zheng-mao, LI Hong-ren. Study on eliminating the superfluous force of marine electro-hydraulic load simulator applied with dual-valve parallel connected control[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(4):229-233. (in Chinese)
- [8] 邵俊鹏,李建英,王仲文,等. 电液负载模拟器多余力抑制的结构补偿控制[J]. 电机与控制学报,2009,13(4):586-591.
SHAO Jun-peng, LI Jian-ying, WANG Zhong-wen, et al. Structure compensation control of eliminating superfluous force of electro-hydraulic load simulator[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(4):586-591. (in Chinese)
- [9] Carvajal J, Chen G R, Ogmen H. Fuzzy-PID controller: design, performance evaluation, and stability analysis[J]. Information Sciences, 2000, 123:249-270.
- [10] Deng J L. Introduction to grey system theory[J]. The Journal of Grey System, 1989, 1(1):1-24.
- [11] 王军平,王安,敬忠良,等. Fuzzy-Gray 预测控制算法及应用[J]. 系统工程理论与实践,2002,8(2):132-135.
WANG Jun-ping, WANG An, JING Zhong-liang, et al. Research on the Fuzzy-Gray predicative control of large time delay system[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2002, 8(2):132-135. (in Chinese)
- [12] Lian R J, Lin B F, Huang J H. A grey prediction fuzzy controller for constant cutting force in turning[J]. Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(2):1047-1056.
- [13] Wei L S, Fei M R, Hu H S. Modeling and stability analysis of Grey-Fuzzy predictive control[J]. Neurocomputing, 2008, 72(2):197-202.
- [14] Erdal K, Okyay K. An adaptive grey PID-type fuzzy controller design for a non-linear liquid level system[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2009, 31(1):33-49.
- [15] 曹建秋,徐凯. 遗传算法优化的模糊+变论域自适应模糊 PID 复合控制策略[J]. 信息与控制,2011,40(1):44-49,60.
CAO Jian-qi, XU Kai. Compound control strategy of fuzzy + variable universe self-adaptive fuzzy-PID based on genetic algorithm optimization[J]. Information and Control, 2011, 40(1):44-49,60. (in Chinese)