

电动负载模拟器的自适应模糊 PI 控制策略

贾东旭, 刘 梁, 徐照平

(南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094)

摘要: 针对电动负载模拟器中存在的多余力矩问题以及不确定性因素对系统性能的影响问题, 设计了一种自适应模糊 PI 控制策略。首先, 通过分析电动负载模拟器的组成及工作原理, 得到了其数学模型, 基于模型分析了多余力矩的产生原因以及系统中存在的不确定因素, 分析了系统特性; 其次, 设计了力矩微分负反馈校正环节和自适应模糊 PI 控制器, 并通过引入前馈补偿法, 实现了对多余力矩进一步的抑制; 然后, 应用 Matlab 软件, 仿真了所设计自适应模糊 PI 控制器的有效性, 仿真结果表明该控制策略可将多余力矩抑制在 99% 以上, 系统在 8 Hz 正弦力矩信号加载下的幅差小于 10%, 相差小于 10°; 最后, 在搭建的实验平台上进行了验证, 结果表明多余力矩抑制率能达到 85% 以上, 且动态加载能满足“双十”指标。因此, 该控制方法可有效抑制多余力矩, 使系统具有良好的动态跟踪性能。

关键词: 电动负载模拟器; 多余力矩; 力矩微分负反馈; 模糊 PI 控制器

中图分类号: TP 273 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.05.018

Adaptive Fuzzy PI Control for Electric Load Simulator

JIA Dongxu, LIU Liang, XU Zhaoping

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: In order to restrain the surplus torque in electric load simulator and reduce the influence of uncertain factors on the system performance, an adaptive fuzzy PI control strategy is designed. First, by analyzing the composition and working principle of electric load simulator, a mathematical model for electric load simulator is obtained. Based on the model, the causes of surplus torque and the uncertain factors in the system are analyzed, and the system characteristics are also analyzed. Second, the torque differential negative feedback correction link and the adaptive fuzzy PI controller are designed, and the feed-forward compensation is introduced to further restrain the surplus torque. Third, Matlab is used to simulate the effectiveness of the designed adaptive fuzzy PI controller. The simulation results show that the control strategy can restrain the surplus torque by more than 99%, the error of amplitude is less than 10%, and the error of phase is less than 10° when system is stimulated by 8 Hz sine signals. Finally, tests are carried out on the built test platform to verify the designed control strategy. The results show that the suppression rate of surplus torque can reach more than 85%, and the dynamic loading can meet the “double ten” index. Therefore, the control strategy can effectively suppress the excess torque and make the system have good dynamic tracking performance.

Key words: electric load simulator; surplus torque; torque differential negative feedback; fuzzy PI controller

0 引言

电动负载模拟器是一种在实验室条件下, 能模拟舵机承受空气铰链力矩的半实物装置^[1]。它的作用

是在实验室条件下, 实时给舵机施加载荷, 模拟舵面受力情况, 测试舵机系统的性能。电动负载模拟器的结构简单, 维护方便, 加载精度高, 所以近年

收稿日期: 2020-08-24; **修回日期:** 2020-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(51975297, 51875290); 上海航天科技创新基金(SAST2018-107)

作者简介: 贾东旭(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机电伺服系统控制。

通信作者: 刘 梁(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源汽车动力系统和运载系统控制技术。

来得到了大量的研究。

目前,抑制多余力矩^[2]与提高系统控制精度是电动负载模拟器研究的主要问题。虽然传统的控制策略对多余力矩有一定抑制能力,但由于电动负载模拟器系统中存在不确定因素,导致对多余力矩的抑制效果不理想,进而影响到系统的控制精度,而智能控制策略则可解决这个问题。

文献[3]在PID反馈控制中引入迭代学习算法,以克制系统中非线性因素的影响,抑制多余力矩,提高系统精度。文献[4]设计了自适应滑膜控制,以消除系统中未知的不确定性对滑膜变结构控制性能的影响,提高系统的动态特性。针对传统PID控制器自适应性差的问题,文献[5-6]提出了模糊PID控制。文献[7]提出了自适应模糊控制,以保证瞬态跟踪性能和最终跟踪精度。文献[8]提出了一种基于半模糊小脑神经网络(Cerebellar Model Articulation Controller, CMAC)的比例-微分(Proportional-Derivative, PD)混合控制方法,解决不确定因素导致常规基于CMAC的PD混合控制方法的不稳定问题,抑制系统的多余力矩。

针对电动负载模拟器系统中的多余力矩抑制问题,文献[9]提出了径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络和重复控制PID相结合的复合控制方法,以提高系统的抗干扰、自适应能力和跟踪性能。

本文在分析电动负载模拟器系统和建立其数学模型的基础上,设计了力矩微分负反馈校正环节和自适应模糊PI控制器,以提高系统的动态加载性

能,最后进行了实验验证。

1 电动负载模拟器系统与分析

1.1 电动负载模拟器的工作原理及其数学模型

电动负载模拟器主要由加载电机、传感器、驱动器和控制器组成,结构简图如图1所示。系统工作时,控制计算机下达控制指令,力矩传感器和角度传感器分别将采集到的力矩信号、角度信号反馈到加载电机控制器,加载电机驱动器驱动加载电机工作输出力矩对舵机进行加载,弹簧杆连接于加载电机与舵机间,起到力矩缓冲的作用。

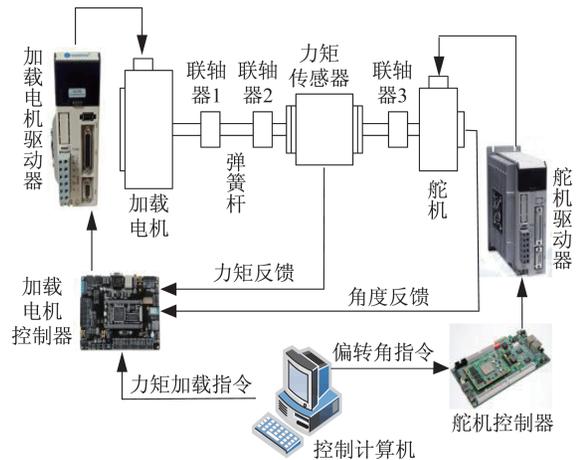


图1 电动负载模拟器结构简图

Fig.1 Structure diagram of electric load simulator

由以上对电动负载模拟器的组成和工作原理的分析,得到其数学模型如图2所示。

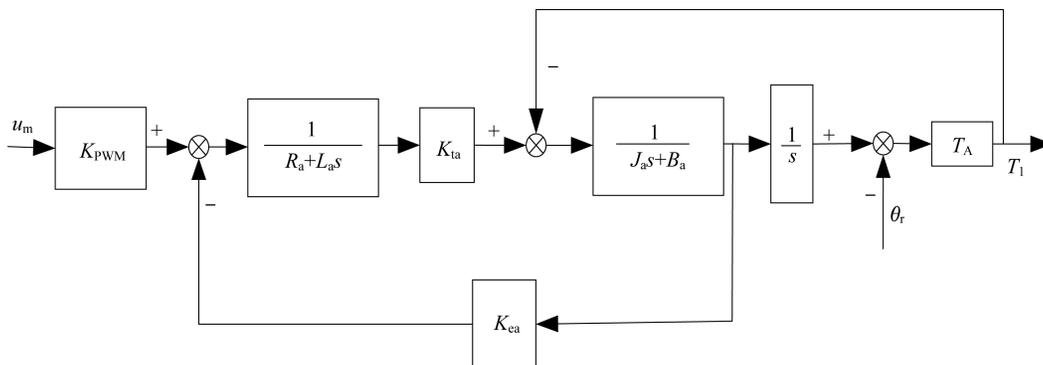


图2 电动负载模拟器数学模型

Fig.2 Mathematical model of electric load simulator

图2中: u_m 为加载电机驱动器的输入电压; T_1 为系统输出力矩; θ_r 为舵机端输出转角; L_a 、 R_a 、 J_a 和 B_a

分别为加载电机绕组电感、绕组电阻、转动惯量和阻尼系数; K_{PWM} 、 K_{ca} 和 K_{ta} 分别为加载电机驱动器功

率放大系数、加载电机反电动势系数和加载电机转矩系数; T_A 为弹簧杆连接刚度系数; s 为拉普拉斯变换的复变量。

由图 2 可得出系统的传递函数为

$$T_1(s) = U_m(s)G_1(s) - \theta_r(s)G_2(s) \quad (1)$$

式中:

$$G_1(s) = K_{\text{PWM}}K_{\text{ta}}T_A / [L_a J_a s^3 + (R_a J_a + L_a B_a)s^2 + (R_a B_a + K_{\text{ta}}K_{\text{ea}} + L_a T_A)s + R_a T_A] \quad (2)$$

$$G_2(s) = T_A s [L_a J_a s^2 + (R_a J_a + L_a B_a)s + R_a B_a + K_{\text{ta}}K_{\text{ea}}] / [L_a J_a s^3 + (R_a J_a + L_a B_a)s^2 + (R_a B_a + K_{\text{ta}}K_{\text{ea}} + L_a T_A)s + R_a T_A] \quad (3)$$

式中: $U_m(s)$ 、 $\theta_r(s)$ 和 $T_1(s)$ 分别由 u_m 、 θ_r 和 T_1 经拉普拉斯变换所得。

数学模型建立之后,在此给出舵机和加载电机的主要性能参数如下:舵机的额定转矩 $0.32 \text{ N}\cdot\text{m}$,额定转速 $3\,000 \text{ r/min}$;加载电机额定转矩 $0.44 \text{ N}\cdot\text{m}$,额定转速 $3\,000 \text{ r/min}$ 。

1.2 系统多余力矩与不确定因素分析

多余力矩是当加载系统的力矩输入指令为零时,加载系统跟随舵机系统运动输出的力矩。由式(1)可知,系统的输出力矩由两部分组成,其中,第 2 部分“ $-\theta_r(s)G_2(s)$ ”是由舵机的运动产生的力矩,该部分即为多余力矩。

电动负载模拟器系统中的多余力矩主要由两部分组成^[10-12]:一部分是加载电机随动产生的电磁转矩;另一部分是加载电机的多余惯量引起的惯量多余力矩。电动负载模拟器系统工作时,舵机在偏转角指令下做主动转动,加载电机在力矩加载指令下与舵机同轴,被动跟随舵机运动,这种被迫运动会引起加载指令力矩之外的电磁转矩;加载电机在转动过程中,电机转子和连接轴的转动会产生惯量,这个惯量就是多余惯量,由于多余惯量的存在,即使很小的角速度也会产生多余力矩。系统中由于多余力矩的存在,加载电机加载到舵机的力矩势必会受到影响,不会完全按照力矩加载指令进行加载,从而影响到系统的动态特性和加载精度。

电动负载模拟器系统中存在一些不确定非线性因素^[13-14],包括驱动器的影响、电机参数的摄动、

摩擦非线性和间隙非线性,都会影响多余力矩的抑制,增大抑制多余力矩的困难性,影响系统性能。

1.3 系统特性分析

由 1.1 节建立的数学模型可知,影响系统性能的主要是系统连接刚度和转动惯量 2 个参数。系统连接刚度对系统谐振频率和多余力矩的影响的频率特性 Bode 图分别如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可知,当其他条件不变,连接刚度 T_A 分别为 10 、 50 、 $100 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 时,对应的谐振频率分别为 135 、 242 、 343 Hz ,对应的扰动通道多余力矩谐振峰值分别为 24.8 、 45.5 、 54.8 dB ,即随着连接刚度增大,系统的谐振频率随之增加,系统在无扰情况下的加载带宽也增大;多余力矩的谐振峰值随之增大,系统的多余力矩增大。

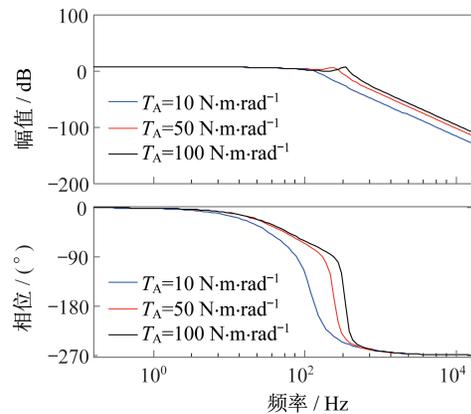


图 3 不同连接刚度的系统无扰开环频率特性 Bode 图

Fig.3 Bode diagram of system undisturbed open-loop frequency characteristics at different connection stiffness

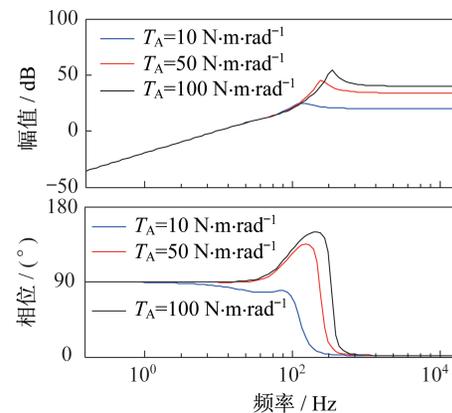


图 4 不同连接刚度时系统扰动通道频率特性 Bode 图

Fig.4 Bode diagram of system disturbance channel frequency characteristics at different connection stiffness

系统转动惯量对系统谐振频率和多余力矩影响的频率特性 Bode 图分别如图 5 和图 6 所示。由图 5 可知,当其他条件不变,转动惯量 J_a 分别为 0.01、0.10、1.00 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 时,对应的谐振频率分别是 6.300、2.360、0.739 Hz,即转动惯量越大,谐振频率越小,系统无扰情况下的加载带宽也就越小;由图 6 可知,在低中频段,系统的多余力矩的幅值随着转动惯量的增大而增大,相位也更加超前,影响系统的加载性能。

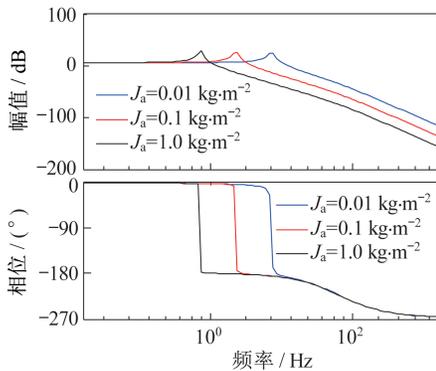


图 5 不同转动惯量的系统无扰开环频率特性 Bode 图
Fig.5 Bode diagram of system undisturbed open-loop frequency characteristics at different moments of inertia

2 控制器的设计

2.1 力矩微分负反馈环节设计

反馈校正能减小被包围环节时间常数、非线性

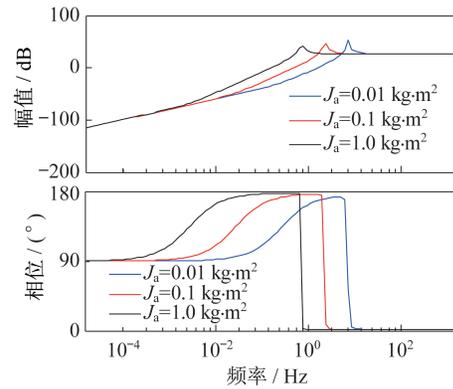


图 6 不同转动惯量时系统扰动通道频率特性 Bode 图
Fig.6 Bode diagram of system disturbance channel frequency characteristics at different moments of inertia

特性的影响和对参数变化的敏感性,尤其是微分负反馈校正^[15]。本文将微分负反馈校正引入系统中,对电动负载模拟器的输出力矩进行微分形成力矩变化速度,将此变化速度作为反馈信号,最终形成反馈环节。考虑到纯微分环节较难实现,加入 1 个惯性环节 $1/(1+\tau s)$ 作为低通滤波器,形成最终的力矩微分负反馈校正环节 $K_{fd}s/(1+\tau s)$,其中, K_{fd} 为微分反馈环节的时间常数, τ 为低通滤波器的时间常数。

该微分环节与常规 PID 控制器微分环节相比,噪声干扰作用更低,使系统的抗干扰能力更强,稳定性更好。加入力矩微分负反馈环节的电动负载模拟器系统的结构框图如图 7 所示。图中, T_m 为输入指令力矩。

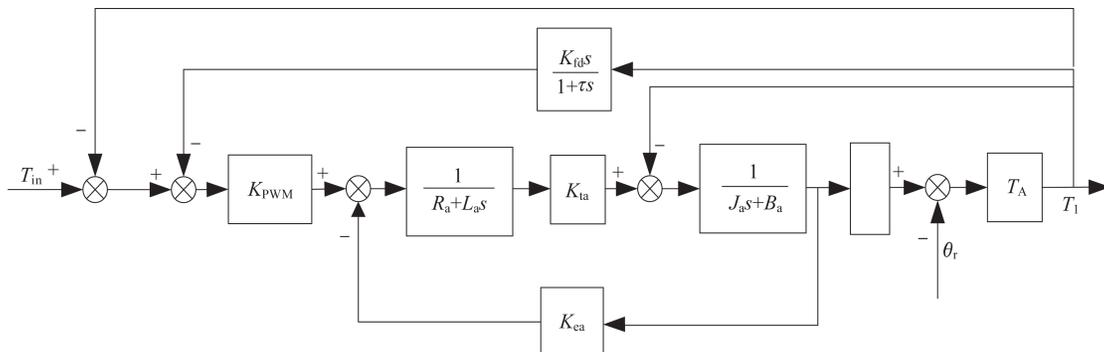


图 7 引入力矩微分负反馈的电动负载模拟器系统结构框图
Fig.7 Block diagram of electric load simulator system with torque differential negative feedback

2.2 自适应模糊 PI 控制器设计

自适应模糊 PI 控制器作为 PI 控制器与模糊控

制器的复合形式,既具有 PI 控制器结构简单的优点,又具有模糊控制器自适应性高的特点,可在线

自整定PI控制器的参数,弱化系统非线性因素的干扰,使整个控制系统具有良好的动静态加载特性。

自适应模糊PI控制器将系统的误差 e 和误差变化率 ec 作为输入,在控制器内部,根据制定的模糊规则对PI控制器的 K_p (比例系数)、 K_i (积分系数) 2 个参数进行自整定,基本控制算法为

$$K_p = \Delta K_p + K_{p0} \quad (4)$$

$$K_i = \Delta K_i + K_{i0} \quad (5)$$

式中: ΔK_p 、 ΔK_i 是PI控制器的修正参数,是模糊控制器的输出; K_{p0} 、 K_{i0} 是PI控制器的初始值。

自适应模糊PI控制器的控制结构框如图8所示。图中, r 和 y 是电动负载模拟器系统的输入和输出, u 为自适应模糊PI控制器的输出。

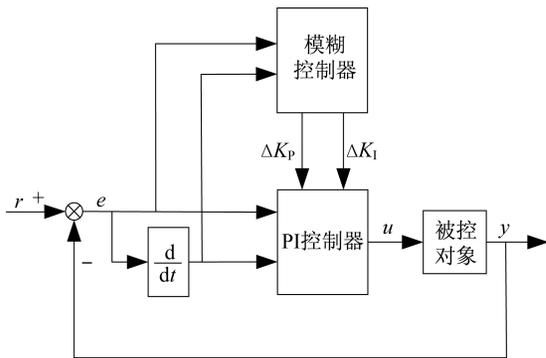


图8 自适应模糊PI控制器结构框图

Fig.8 Block diagram of the adaptive fuzzy PI controller

根据以上分析可知,所设计模糊控制器为双输入双输出结构。取输入 e 、 ec 和输出 ΔK_p 的模糊集为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 输出 ΔK_i 的模糊集为 {ZO, PS, PM, PB}, 隶属度函数均取为易实现的均匀三角形函数。根据PI控制器的参数整定原则和实际操作经验,可列出 ΔK_p 、 ΔK_i 的模糊规则表,见表1和表2。

表1 ΔK_p 的模糊规则表

Tab.1 Fuzzy rule table of ΔK_p

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NM	NS	NS	ZO	PS	PM	PM
ZO	NB	NM	NS	NS	PS	PM	PB
PS	NM	NS	NS	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB

表2 ΔK_i 的模糊规则表

Tab.2 Fuzzy rule table of ΔK_i

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PM	PS
NM	PB	PB	PB	PM	PM	PS	PM
NS	PB	PM	PM	PS	PM	PB	PB
ZO	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB
PS	PB	PM	PM	PM	PM	PB	PB
PM	PM	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PB	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PB

最后采用 Mamdani 推理算法模糊推理,得出 1 个模糊输出量,再经重心法对模糊输出量反模糊化,完成自适应模糊PI控制器的设计。

考虑到系统中产生的多余力矩是无延迟地对系统产生干扰,需对多余力矩进行无延迟抑制。凡经控制器控制的方法都有延迟,不能对多余力矩进行及时抑制,因此,引入前馈补偿法进一步对多余力矩进行抑制。

3 仿真验证与分析

为验证所设计自适应模糊PI控制器的有效性,在 Matlab 中进行了仿真验证。

仿真给定系统的力矩输入指令为 $0 \text{ N}\cdot\text{m}$,舵机的位置干扰信号为幅值 10° ,频率分别是 6、10 Hz 的正弦曲线。仿真时,分别对比了系统不加任何控制和补偿时,开环控制的多余力矩与自适应模糊PI控制时的多余力矩,舵机位置信号频率为 6、10 Hz 时的多余力矩曲线如图9和图10所示。

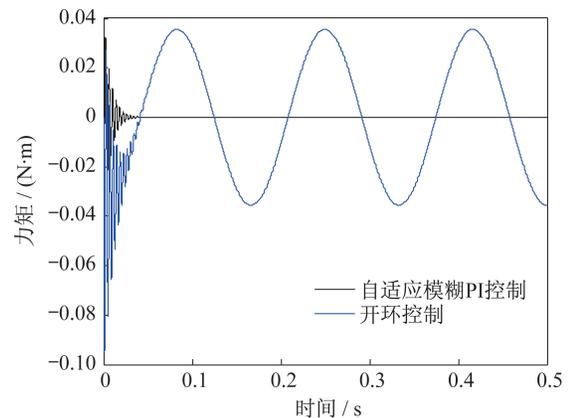


图9 舵机位置信号频率为 6 Hz 时系统多余力矩

Fig.9 System surplus torque when the servo position signal frequency is 6 Hz

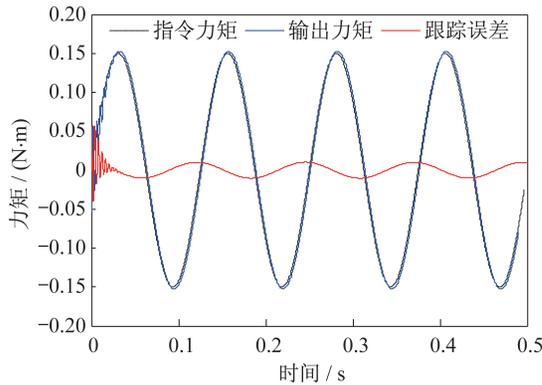


图 10 舵机位置信号频率为 10 Hz 时系统多余力矩

Fig.10 System surplus torque when the servo position signal frequency is 10 Hz

由图 9 可知,舵机位置信号频率为 6 Hz 时,系统多余力矩由自适应模糊 PI 控制前的 $3.553 \times 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{m}$ 降为了控制后的 $1.894 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}$; 由图 10 可知,舵机位置信号频率为 10 Hz 时,系统多余力矩由自适应模糊 PI 控制前的 $5.888 \times 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{m}$ 降为了控制后的 $8.932 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}$ 。控制后的多余力矩被抑制了 99% 以上,满足了系统的性能要求,从而证明了所设计的控制方法对多余力矩的抑制效果是良好的。

给定系统的力矩输入指令为幅值 $0.15 \text{ N}\cdot\text{m}$, 频率 8 Hz 的正弦信号,舵机的位置干扰信号为幅值 10° , 频率 10 Hz 的正弦曲线,得到了自适应模糊 PI 控制时的力矩跟踪曲线如图 11 所示。

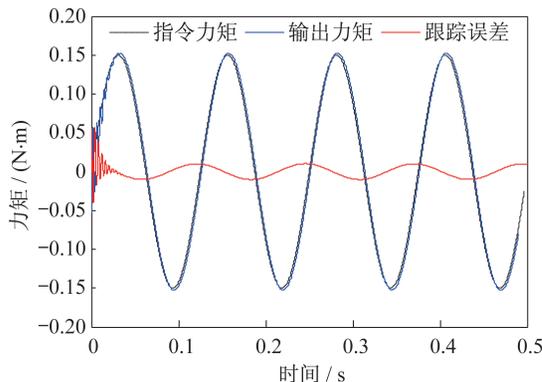


图 11 自适应模糊 PI 控制力矩跟踪曲线

Fig.11 Torque tracking curve obtained by the adaptive fuzzy PI controller

由图 11 可知,输出力矩曲线几乎与指令力矩曲线重合,相位滞后 4.03° ,跟踪误差峰值为 $1.023 \times 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{m}$,跟踪误差控制在了 10% 内。说明设计的自适应模糊 PI 控制器满足“双十”指标要求(“双十”

指标,是指在系统的最高工作频率下输出力矩相比于力矩加载指令幅值变化不大于 10% 和相角变化不大于 10°),具有良好的控制性能。

4 实验验证

4.1 实验结果

为验证所设计控制器有效性,进行了实验验证,实验平台如图 12 所示。

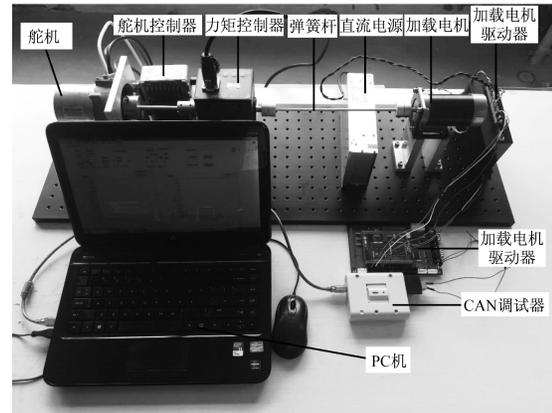


图 12 加载系统实验平台

Fig.12 Loading system test platform

首先对多余力矩的抑制效果进行实验,此时令指令力矩为 $0 \text{ N}\cdot\text{m}$,舵机运动指令为幅值 10° ,频率 10 Hz 的正弦曲线,所得多余力矩的抑制实验结果如图 13 所示。

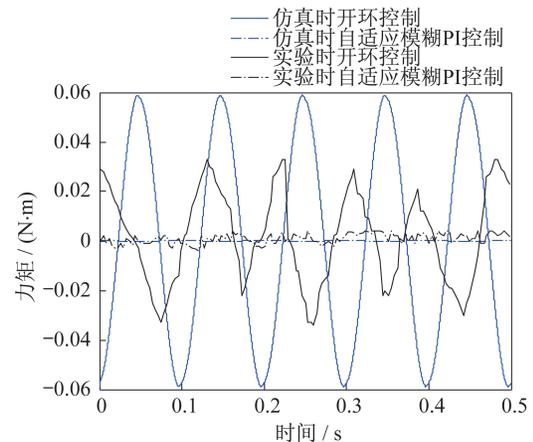


图 13 多余力矩曲线

Fig.13 Surplus torque curve

动态加载实验结果如图 14 所示。此时给定指令力矩为幅值 $0.15 \text{ N}\cdot\text{m}$,频率 8 Hz 的正弦信号,舵

机运动指令为幅值 10° , 频率 10 Hz 的正弦曲线。

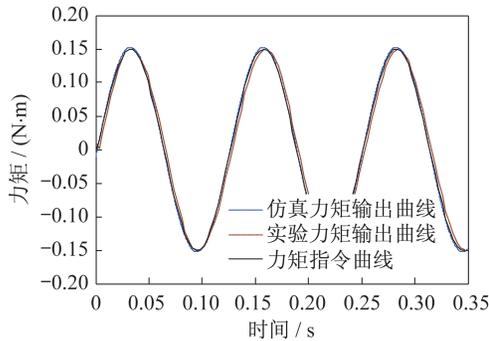


图 14 动态加载曲线

Fig.14 Dynamic loading curve

4.2 实验结果分析

由图 13 可得:实验时开环控制多余力矩的幅值为 $0.033 \text{ N}\cdot\text{m}$, 自适应模糊 PI 控制时的多余力矩幅值为 $0.004 \text{ N}\cdot\text{m}$, 多余力矩抑制率为 87.9%; 与仿真结果相比, 实验所得多余力矩抑制效果虽然没有那么理想, 但同样达到了一般工程上要求的 85% 以上, 从而证明多余力矩的抑制效果是良好的。

由图 14 可得:实验时系统达到稳态时的最大误差为 $0.0127 \text{ N}\cdot\text{m}$, 占加载指令幅值的 8.47%, 相位滞后 8.64° , 满足了“双十”指标要求; 仿真时系统达到稳态时的最大误差为 $0.01135 \text{ N}\cdot\text{m}$, 占加载指令幅值的 7.57%, 相位滞后 5.4° ; 实验结果与仿真结果相比, 最大误差较大且相位较滞后。

由以上结果分析可知, 实验时的结果可满足系统性能指标要求, 但与仿真结果相比, 结果并不理想, 原因是实验台架中存在的未被消除掉的不确定因素及非线性因素的干扰, 且仿真时建立的数学模型不准确, 需进一步改进和完善。

5 结束语

本文设计了电动负载模拟器的系统方案, 介绍了系统的工作原理, 并分析了系统多余力矩的产生原理及系统中存在的不确定因素。针对系统存在的多余力矩及不确定因素, 设计了力矩微分负反馈校正环节, 在此基础上设计了自适应模糊 PI 控制器, 并结合前馈补偿对多余力矩进行抑制, 以提高系统动态加载性能。仿真结果表明, 所设计方法可将多余力矩抑制 99% 以上, 抑制效果明显, 且力矩

动态跟踪满足“双十”指标, 使电动负载模拟器系统具有较好的动态加载精度。最后进行了实验验证, 结果表明, 多余力矩抑制效果虽不如仿真所得结果理想, 但可达到一般工程要求的 85% 以上, 抑制效果良好, 动态加载实验也能够满足“双十”指标, 验证了所设计控制器的有效性。

参考文献

- [1] 潘卫东. 电动直线负载模拟器加载性能分析及控制策略研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [2] SHMISA A, KIANI Z. Robust fault-tolerant controller design for aerodynamic load simulator [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 78:332-341.
- [3] 王明彦, 郭奔. 基于迭代学习控制的电动伺服负载模拟器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 123-126.
- [4] 张博文. 被动式力矩伺服鲁棒控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [5] 赵莎. 伺服电机负载模拟系统控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [6] 于振中, 周枫. 粒子群优化模糊 PID 的电动负载模拟器研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(10): 16-21.
- [7] WANG X J, WANG S P, ZHAO P. Adaptive fuzzy torque control of passive torque servo systems based on small gain theorem and input-to-state stability [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(6): 906-916.
- [8] YANG B, GU N H. Semi-fuzzy CMAC and PD hybrid controller with compressed memory and semi-regularization for electric load simulator [J]. IET Control Theory & Applications, 2019, 13(18): 3065-3074.
- [9] 王修岩, 刘艳敏, 李宗帅. 基于 RBF 神经网络和重复控制 PID 的电动负载模拟器复合控制[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 84-89.
- [10] 田巨, 张科. 电动负载模拟器的发展与现状[J]. 微特电机, 2014, 42(5): 70-74.
- [11] 王超. 电动舵机负载模拟器设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [12] 李瑞. 电动负载模拟器的控制系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [13] 付梦瑶, 杨瑞峰, 郭晨霞, 等. 电动负载模拟器的非线性因素分析及补偿[J]. 中国测试, 2016, 42(1): 96-101.
- [14] 李江. 电动负载模拟器的先进 PID 控制策略研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [15] 杨叔子, 杨克冲, 吴波, 等. 机械工程控制基础[M]. 6 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.