

基于迭代学习的电动负载模拟器复合控制

牛国臣^{1,2†}, 王 巍², 宗光华²

(1. 中国民航大学 机器人研究所, 天津 300300; 2. 北京航空航天大学 机器人研究所, 北京 100191)

摘要: 为保证电动负载模拟器力矩精确加载, 设计了基于迭代学习控制和舵机位置前馈补偿结合的复合力矩控制器。引入弹性杆结构以提高系统稳定性及加载精度, 并从系统响应速度、频宽及稳定性等方面对弹性杆刚度约束进行了分析。建立了控制系统模型, 在三闭环结构基础上, 引入了舵机位置前馈补偿。为保证正弦负载模拟效果, 设计了基于指令力矩幅值和相位修正的迭代学习控制器, 并基于P型控制器实现对幅值和相位的迭代学习。最后, 分别进行了力矩加载及多余力矩抑制实验, 结果证明了该方法的可行性和有效性。

关键词: 电动负载模拟器; 迭代学习控制; 力矩控制; 前馈补偿; 弹性杆; 多余力矩

中图分类号: TP271+.4 文献标识码: A

Composite control for electric load simulator based on iterative learning

NIU Guo-chen^{1,2†}, WANG Wei², ZONG Guang-hua²

(1. Robotics Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A composite torque controller combining iterative learning control and the feedforward compensation of a rudder angle was built for an electric load simulator in order to increase loading accuracy. The spring beam was used to improve the system stability and the loading accuracy, and constraints to the stiffness coefficient of the spring beam were analyzed based on system response speed, frequency width and stability. The mathematical models of plants were established, and three close loops were used. The feedforward compensation of the rudder angular displacement was introduced into the torque controller. The iterative learning controller was designed by modifying the magnitude and the phase of the command torque to improve loading effects, and P-type iterative learning controller was used. Finally, experiments of loading torque and testing the extraneous torque were performed, and experiment results proved that this controller is effective in achieving a perfect torque tracking accuracy and restraining the extraneous torque for electric load simulators.

Key words: electric load simulator; iterative learning control; torque control; feedforward compensation; spring beam; extraneous torque

1 引言(Introduction)

飞行器在飞行中, 高速气流对舵机产生振动和温度的冲击, 利用地面半物理测试设备——负载模拟器进行测试是设计的重要参考依据^[1]。负载模拟器能在实验室条件下根据载荷谱模拟飞行器在飞行条件下舵机承受的交变载荷, 是测试飞行器舵系统性能及稳定性的重要设备^[2]。将经典的自破坏性全实物实验转换为实验室条件下的预测性研究, 以达到缩短研制周期, 节省研制费用, 提高可靠性和成功率的目的。

飞行器工作时, 作用于舵机舵面气流, 可能有助于舵机运动, 也可能阻碍舵机运动, 即正操纵或反操纵, 故负载模拟器需具备按一定函数关系向舵机轴施加载荷的功能。因此负载模拟器实际是一种力矩控制系

统, 能向舵机轴施加高精度力矩。在加载过程中, 舵机是承载对象, 其在位置控制指令下工作, 加载电机与舵机固连一起应具有基本相同的运动规律, 由于惯量、摩擦等因素的影响, 不可避免产生运动的不同步, 就产生了多余力矩。多余力矩会严重影响系统的加载精度, 使系统的稳定性变坏、频宽变窄、加载灵敏度降低^[3]。故消除多余力矩是负载模拟器的一个关键问题。当前, 很多国内外学者开展了相关研究。文献[4]采用位置同步补偿的方法克服多余力矩, 系统由位置同步电机和加载电机组成, 位置同步电机作为加载电机的定子部分用来跟踪舵机的位置, 而加载电机仅用来实现力矩加载。但该方法机构复杂、成本高、不易加工和维护。文献[5]综合采用力指令前馈和舵机运动速度

收稿日期: 2014-08-31; 录用日期: 2015-01-04。

†通信作者。E-mail: niu_guochen@139.com; Tel.: +86 13752255179。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175011)。

前馈来提高控制系统的快速性、减小多余力矩, 采用加载力矩变化速度负反馈来增加阻尼。文献[6]基于不变性理论引入舵机的速度前馈来抑制多余力矩。在文献[7-8]中, 电液负载模拟器加载对象与承载对象刚性连接, 将伺服阀电流信号引入加载电机控制中, 以保证加载对象和承载对象的速度同步, 保证不存在多余力矩, 但要求两者需具有相似的运动模型。文献[9]设计了一种基于前馈的小脑模型关节控制器(cerebellar model articulation controller, CMAC)神经网络改进算法, 分析了各个参数对系统的影响, 应用图表法进行了参数寻优。文献[10]提出了非均匀量化的思想, 其CMAC模型根据高斯权重系数来进行误差分配。负载模拟器正弦力矩加载具有周期重复性特点, 故适合采用迭代学习控制来实现。文献[11]将迭代学习控制应用到PID参数的整定中, 构成加载复合控制器, 取得了一定效果, 但存在给定值修正频繁、计算量大的问题。

上述研究中, 舵机的速度前馈补偿得到广泛应用, 但舵机速度信号一般通过将位置传感器信号微分得到, 信号波动大且容易引入高频噪声。在进行刚度测

试时, 基于结构不变性理论引入舵机位置前馈^[12], 前馈信号直接来自传感器, 达到了较好的效果, 但将其应用于负载模拟器时, 不能达到期望效果。故针对最复杂的一类负载模拟问题—正弦负载模拟, 提出了幅值和相位修正的迭代学习控制策略, 解决了单一控制参数力矩波动大、相位滞后等问题, 保证了精确加载。

2 电动负载模拟器系统结构 (System structure of electric load simulator)

电动负载模拟器的系统组成如图1所示, 主要由控制柜和测试台组成。控制柜主要包括工控机、可编程多轴控制器(programmable multi-axes controller, PMAC)运动控制器及力矩电机驱动器等部件。基于工控机上的用户界面可实现系统的整体监控, 可进行单元测试和系统测试, 并能监视设备状态、加载动态等信息。PMAC运动控制器是系统的核心部件, 主要有两个功能: 力矩电机力矩控制和舵机的位置控制。其向力矩电机和舵机发送控制指令, 并实时采集舵机和力矩电机的位置及加载力矩信息。力矩电机驱动器接收运动控制器的指令驱动力矩电机工作, 并将电机位置信息反馈到运动控制器。

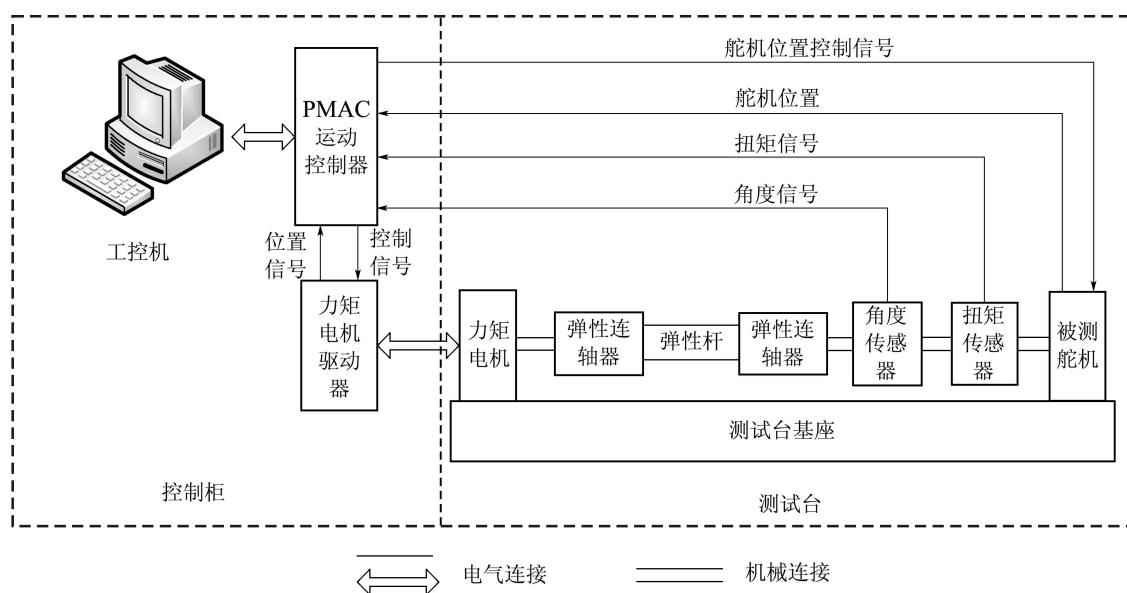


图 1 负载模拟器系统结构图

Fig. 1 System structure of electric load simulator

测试台主要由力矩电机、弹性连轴器、弹性杆、角度传感器、扭矩传感器和舵机组成。因力矩电机具有高启动转矩、高线性、高刚度、小扭矩波动及能长时间处于堵转状态等诸多优点, 采用力矩电机作为力矩控制系统的主要执行机构。PMAC运动控制器、力矩电机驱动器、力矩电机及高精度扭矩传感器是力矩闭环控制系统的主要部件。舵机接收运

动控制器指令, 按期望的位置轨迹运动。

因加载部件—力矩电机和被加载对象—舵机是固连到一起, 故力矩电机的力矩控制系统与舵机位置控制系统不可避免存在耦合。一方面, 舵机的位置运动会对方矩电机的力矩控制产生扰动, 即多余力矩。另一方面, 力矩电机的力矩输出也会对舵机位置控制产生影响。系统中引入了弹性杆元件,

用以减弱相互间耦合,抑制多余力矩,增强控制系统的稳定性.

3 被控对象数学模型(Mathematical model of controlled plants)

3.1 力矩电机模型(Model of torque motor)

直驱式力矩电机可等效为一个线性电阻和一个电感元件串联而成,根据电压平衡方程和转矩平衡方程,可得力矩电机的传递函数,如式(1)所示:

$$\omega_m(s) = \frac{K_T U_m(s) - (L_m s + R_m) T_L(s)}{J_m L_m s^2 + (J_m R_m + B_m L_m) s + (B_m R_m + K_E K_T)}, \quad (1)$$

其中: ω_m 为电机轴角速度; K_T 为电机转矩系数; U_m 为电机电枢电压; L_m 为电机等效电感; R_m 为电机等效电阻; T_L 为输出的加载力矩; J_m 为电机轴转动惯量; B_m 为电机阻尼系数; K_E 为电机反电动势常数.

3.2 弹性杆(Spring beam)

弹性杆安装于力矩电机与被加载舵机之间,能抑制由于舵机位置扰动引起的高频干扰力矩,提高系统稳定性及加载精度.因此,施加于舵机轴的力矩是基于弹性杆形变的方式加载的.忽略其惯量及阻尼系数等因素,弹性杆可看作弹性元件,即加载力矩与弹性杆两端角位移差成正比.弹性杆两端与力矩电机及舵机分别采用弹性连轴器相连接,而弹性连轴器刚度远大于弹性杆刚度,因此弹性杆与力矩电机及舵机可认为是刚性固连.故可认为加载力矩与力矩电机及舵机之间角位移差成正比,如式(2)所示:

$$T_L = K_L(\theta_m - \theta_r), \quad (2)$$

其中: K_L 为弹性杆刚度系数; θ_m 为力矩电机角位移; θ_r 为舵机角位移.

$$T_L(s) = \frac{K_T K_L K_g U_m(s)}{J_m L_m s^3 + (B_m L_m + J_m R_m) s^2 + (B_m R_m + K_L L_m + K_T K_E) s + K_L R_m} - \frac{K_L (J_m L_m s^3 + (B_m L_m + J_m R_m) s^2 + (B_m R_m + K_T K_E) s) \theta_r(s)}{J_m L_m s^3 + (B_m L_m + J_m R_m) s^2 + (B_m R_m + K_L L_m + K_T K_E) s + K_L R_m}. \quad (4)$$

4 控制器设计(Controller design)

控制系统工作时,系统输入为舵机指令角度,承载舵机和加载力矩电机则分别动作.一方面舵机按照指令角度进行位置伺服控制,另一方面基于该指令角度和加载梯度,会给力矩电机一个指令力矩使其工作于力矩伺服控制模式.舵机指令角度 θ_{cmd} 与舵机实际角度 θ_r 之间必然存在一确定关系,因舵机运动控制器、驱动器及传动机构等存在非线性因素,

弹性杆刚度在一定程度上影响控制系统的性能.刚度系数太小,系统的动态响应速度不能满足高频负载模拟要求,甚至使得系统固有频率落到系统频宽以内造成机械谐振,影响稳定性^[13].因此,需提高系统响应速度及谐振频率,从而对弹性杆刚度约束了下限,如式(3)所示:

$$\begin{cases} K_L > \frac{K_g}{\left(\frac{\omega_{max}}{\omega_{r max}} - 1\right)}, \\ K_L > \frac{K_g}{\left(\frac{\alpha_{max}}{\alpha_{r max}} - 1\right)}, \\ \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_L}{J}} > f_H, \end{cases} \quad (3)$$

其中: K_g 为加载梯度; ω_{max} 与 $\omega_{r max}$ 为力矩电机和舵机最大角速度; α_{max} 与 $\alpha_{r max}$ 分别为力矩电机和舵机最大角加速度; J 为电机输出轴等效转动惯量; f_H 为舵机最大工作频率.

很明显,当加载梯度 K_g 取最大值 $K_{g max}$ 时, K_L 存在一最大下界.

而弹性杆作为弹性元件能减小扰动力矩,提高稳定性,故 K_L 数值应适当,不宜过高.根据式(3)和系统运动参数表1,弹性杆刚度系数 K_L 选定为 2091.3 Nm/rad.

表 1 运动参数

Table 1 System parameters

参数	取值	参数	取值
f_H/Hz	12	$K_{g max}/(\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1})$	2864.8
$\omega_{max}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	20.94	$\omega_{r max}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	6.98
$\alpha_{max}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$	1625.81	$\alpha_{r max}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$	398.21

综合式(1)和式(2),可以得到加载转矩的传递函数,如式(4)所示:

构造该传递函数是非常困难的.而舵机实际旋转角度可通过高精度编码器直接观测,故可略过建立舵机传递函数该环节,将 θ_{cmd} 与 θ_r 之间的联系断开,仅将舵机实际旋转角度 θ_r 看作系统的一个扰动输入即可.因此系统转换成具有两输入的系统:一个为舵机指令角度,用来产生指令加载力矩;另一个为舵机实际角度,作为力矩控制系统的扰动输入.如图2所示.

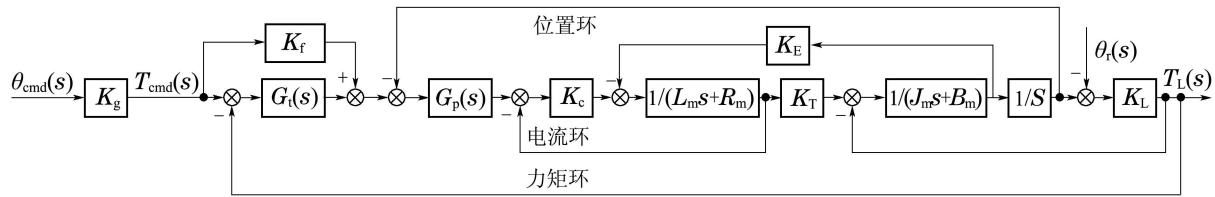


图 2 力矩控制系统结构图

Fig. 2 Torque control system scheme

加载梯度表示加载指令力矩与舵机指令旋转角度之间的关系, 其一般为非线性函数。而加载到舵机轴上的力矩并不会影响舵机的性能, 为方便测试舵机性能特将加载梯度简化为常数, 见图2中 K_g 。

负载模拟器力矩控制系统采用电流反馈、位置反馈和力矩反馈的三闭环结构形式, 见图2。其中电流环和位置环为内环, 力矩环为外环。电流环是保

证电机绕组电流实时、准确地跟踪电流指令信号, 主要目的是保证快速动态响应, 故采用纯比例控制器, 图2中 K_c 为电流控制器; $G_p(s)$ 为位置控制器的传递函数, $G_t(s)$ 为力矩控制器的传递函数。为加快对指令力矩的快速跟踪, 引入了力矩的前馈补偿, K_f 为前馈补偿系数。

由图2可得系统输出的传递函数, 如式(5)所示:

$$T_L(s) = \frac{(K_f + G_t(s))G_p(s)K_cK_TK_LK_g\theta_{cmd}(s)}{Q} - \frac{K_L(J_mL_ms^3 + (B_mL_m + J_mR_m + K_cJ_m)s^2 + (B_mR_m + K_cB_m + K_TK_E)s + K_cK_TG_p(s))\theta_r(s)}{Q}, \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} Q = & J_mL_ms^3 + (B_mL_m + J_mR_m + K_cJ_m)s^2 + \\ & (B_mR_m + K_cB_m + K_LL_m + K_TK_E)s + \\ & K_LR_m + K_cK_TG_p(s) + \\ & K_cK_TG_p(s)K_LG_t(s) + K_LK_c. \end{aligned}$$

由式(5)后半部分可看出: 在加载过程中, 由于舵机的主动运动, 会对施加到舵机轴的力矩产生干扰, 即多余力矩, 其严重影响了力矩加载精度。根据结构不变性原理, 通过引入舵机位置前馈补偿, 能在一定程度上抑制多余力矩, 前馈补偿控制器 $G_F(s)$ 如图3中所示。令 $G_F(s) = 1$, 相当于将舵机位置叠加到位置环给定值上。

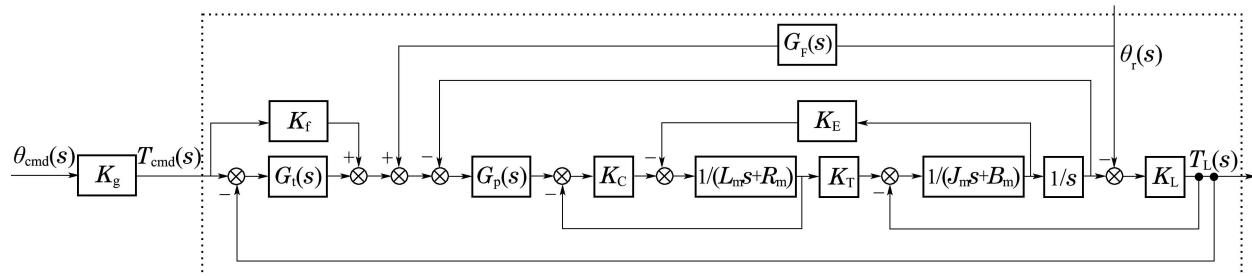


图 3 含舵机位置前馈的力矩控制框图

Fig. 3 Control system scheme with rudder angle compensation

正弦载荷用来模拟气流波动等因素造成的时变铰链力矩, 对负载模拟器来说是一种模拟难度最大的信号。此时, 负载模拟器承载对象的主动运动及加载系统的力矩加载均具有重复性。迭代学习控制适合于某种具有重复运动性质的被控对象, 它通过

对被控系统进行控制尝试, 以系统输出与给定轨迹的偏差信号修正不理想的控制信号, 产生一个新的控制信号, 使得系统跟踪性能提高, 实现有限时间区间上的完全跟踪任务^[11]。当舵机以不同频率和幅值做正弦运动时, 舵机轴上的指令力矩也应是同频

率的正弦信号。而随着频率变化,实际力矩输出会存在不同程度的幅值波动和相位迟后。故设计一个学习控制器,添加到图3控制框图中,每隔一个正弦周期修正指令力矩的幅值和相位,使得实际力矩输出快速跟踪指令力矩,为简化框图结构,将图3虚线框内环节用图4“力矩前馈反馈控制系统”代替,控制框图如图4所示。

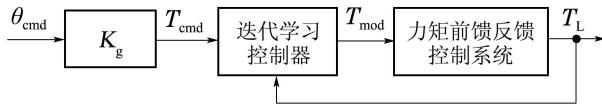


图4 基于迭代学习控制的力矩控制系统结构

Fig. 4 Control system scheme based on iterative learning control

图4中: T_{cmd} 为指令力矩信号, T_{mod} 为修正指令力矩信号, T_L 为实际加载力矩信号, 若 T_{cmd} 为正弦信号, 则 T_{mod} 和 T_L 为同频正弦信号, 如式(6)所示:

$$\begin{cases} T_{\text{cmd}}(t) = A_{\text{tc}} \sin(2\pi ft + \phi_{\text{tc}}), \\ T_{\text{mod}}(t) = A_{\text{tm}} \sin(2\pi ft + \phi_{\text{tm}}), \\ T_L(t) = A_{\text{tl}} \sin(2\pi ft + \phi_{\text{tl}}), \end{cases} \quad (6)$$

其中: A_{tc} , A_{tm} , A_{tl} 分别为信号 $T_{\text{cmd}}(t)$, $T_{\text{mod}}(t)$, $T_L(t)$ 的幅值; ϕ_{tc} , ϕ_{tm} , ϕ_{tl} 分别为信号 $T_{\text{cmd}}(t)$, $T_{\text{mod}}(t)$, $T_L(t)$ 的初相位。

图3中虚线框内控制器经参数整定后为稳定的线性定常系统, 故 $T_{\text{mod}}(t)$ 与 $T_L(t)$ 之间应满足式(7)所示的关系:

$$\begin{cases} A_{\text{tl}} = C(f)A_{\text{tm}}, \\ \phi_{\text{tl}} = \phi_{\text{tm}} + \phi(f). \end{cases} \quad (7)$$

一般情况下, 系统迭代工作时, 基于系统当前实际输出和期望输出的偏差, 通过学习控制率计算出新的输入信号, 再次作用于系统, 如此重复, 直到实际输出可完全跟踪期望输出信号。本文没有采用这种方式, 而是利用正弦信号的幅值和相位特征进行修正。

每经过一个正弦周期, 系统存储该周期内的系统输出采样信号, 迭代学习控制器根据该周期修正指令力矩与实际加载力矩信号的幅值相位关系, 利用P型迭代控制器修正指令力矩的幅值和初相位参数, 如式(8)所示:

$$\begin{cases} A_{\text{tm}}(k+1) = A_{\text{tm}}(k) + \alpha_1(A_{\text{tc}}(k) - A_{\text{tl}}(k)), \\ \phi_{\text{tm}}(k+1) = \phi_{\text{tm}}(k) + \alpha_2(\phi_{\text{tc}}(k) - \phi_{\text{tl}}(k)), \end{cases} \quad (8)$$

其中: α_1 和 α_2 为学习率, k 及 $k+1$ 表示第 k 及 $k+1$ 个正弦周期。

由式(7)和(8)可得

$$\begin{cases} A_{\text{tm}}(k+1) = \\ (1 - \alpha_1 C(f))A_{\text{tm}}(k) + \alpha_1 A_{\text{tc}}(k), \\ \phi_{\text{tm}}(k+1) = \\ (1 - \alpha_2)\phi_{\text{tm}}(k) + \alpha_2(\phi_{\text{tc}}(k) - \phi(f)). \end{cases}$$

根据谱半径条件法^[14], 只要 $\rho(1 - \alpha_1 C(f)) < 1$ 及 $\rho(1 - \alpha_2) < 1$, 则该迭代学习控制器收敛, 最终两学习率均取为0.5。

根据相关法理论可知, 两信号的幅度及相位差可由延时 $\tau = 0$ 时的自相关函数及互相关函数获得^[15], 即式(9):

$$\begin{cases} A_{\text{tc}} = \sqrt{2R_{A_{\text{tc}}}(0)} \\ A_{\text{tl}} = \sqrt{2R_{A_{\text{tl}}}(0)} \\ \phi_{\text{tc}} - \phi_{\text{tl}} = \arccos\left(\frac{2R_{A_{\text{tc}}}A_{\text{tl}}(0)}{A_{\text{tc}}A_{\text{tl}}}\right). \end{cases} \quad (9)$$

力矩控制器基于PMAC运动控制卡实现, 故相关函数计算采用离散时间计算公式, 如式(10)所示:

$$\begin{cases} R_{A_{\text{tc}}}A_{\text{tl}}(0) = \frac{1}{m} \sum_{n=0}^{m-1} T_{\text{cmd}}[n]T_l[n], \\ R_{A_{\text{tl}}}(0) = \frac{1}{m} \sum_{n=0}^{m-1} T_l^2[n], \end{cases} \quad (10)$$

其中 m 为采样点个数。

5 验证实验(Experiment verification)

5.1 力矩加载实验(Torque loading experiment)

为验证所提算法, 在自行研制的实验平台上进行了负载模拟实验, 如图5所示。舵机按照正弦规律工作, 其幅值为1°, 选择1Hz, 5Hz及10Hz3种频率作为工作频率, 加载梯度 $K_g = 50 \text{ Nm}/(^{\circ})$ 。当采用迭代学习控制器时, 力矩输出幅值及相位均较平稳。如在10Hz频率下, 在前5个周期, 力矩幅值分别为50.72 Nm, 49.93 Nm, 49.12 Nm, 50.36 Nm, 49.98 Nm, 相位差分别为6.31°, 5.31°, 4.32°, 2.63°, 2.36°。

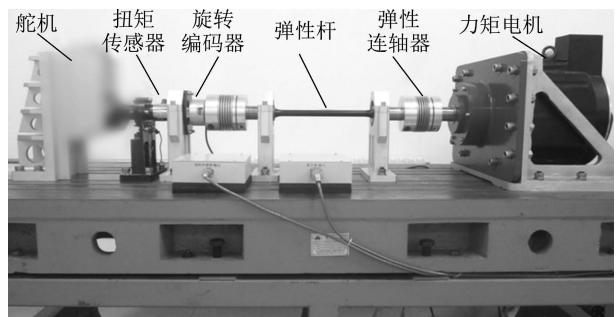


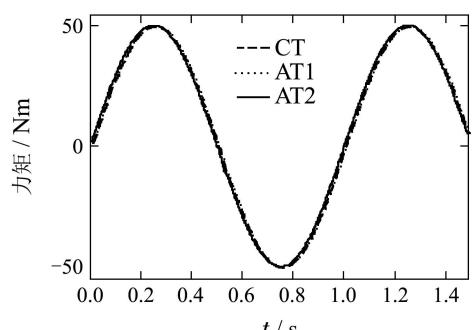
图5 电动负载模拟器测试台

Fig. 5 Electric load simulator test workbench

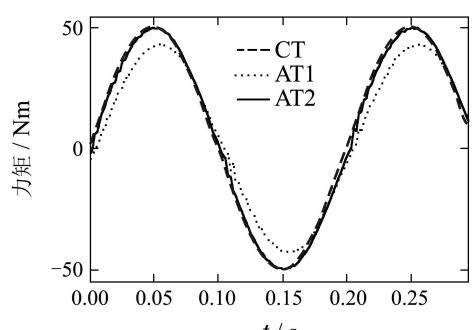
分别采用图2和图4所示的控制器进行了负载模

拟对比实验, 实验曲线如图6所示。图6(a)–(c)分别为在1 Hz、5 Hz及10 Hz条件下区间[3.5T, 5T]加载曲线。CT为振幅为50 Nm的指令力矩曲线, AT1为基于图2三闭环控制器得到的加载曲线, AT2为图4基于舵机位置前馈结合迭代学习控制器得到的加载曲线。

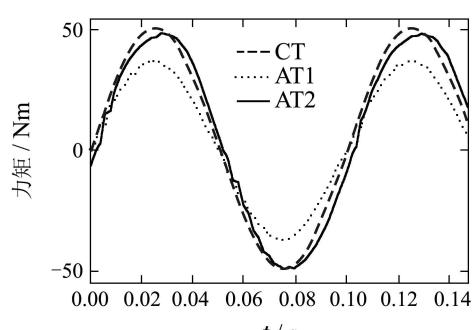
一般用指令力矩和实际力矩间的幅值差和相位差来评价力矩跟踪性能^[16]。对应图6(a)–(c)3种频率下的跟踪性能数据如表2所示, 很明显在相同频率下AT2比AT1力矩跟踪效果要好。比如在10 Hz条件下, 仅采用三闭环结构控制器时, 幅值差为26%, 相位差为3.14°, 远远不能满足“双十”指标, 而采用迭代学习并结合舵机位置前馈时, 幅值差为0.58%, 相位差为2.36, 较轻松满足“双五”指标, 跟踪效果得到了很大提升。



(a) 1 Hz力矩加载曲线



(b) 5 Hz力矩加载曲线



(c) 10 Hz力矩加载曲线

图6 力矩输出曲线

Fig. 6 Torque output curve

表2 力矩加载数据

Table 2 Torque loading data

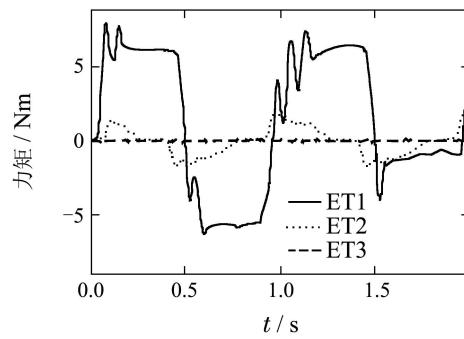
频率/ Hz	加载曲线	实际幅值/ Nm	幅值差/ %	相位差/ (°)
1	AT1	49.68	0.64	2.25
	AT2	49.91	0.18	2.09
5	AT1	43.11	13.78	8.26
	AT2	50.08	0.16	2.87
10	AT1	37.00	26.00	3.14
	AT2	49.71	0.58	2.36

5.2 抑制多余力矩实验(Restraining extraneous torque experiment)

对于负载模拟器而言, 抑制多余力矩的能力是一重要指标。为测量多余力矩一般令指令力矩为零, 而舵机按照指定的正弦轨迹运动相当于干扰输入^[11]。故将加载梯度设定为零, 即 $K_g = 0 \text{ Nm}/(\text{°})$, 以保证指令力矩为零。舵机分别运行于1 Hz, 5 Hz 10 Hz 3种频率下, 正弦幅值为1°。

为比较不同控制器下的加载效果, 进行了开环、三闭环、迭代学习控制结合舵机位置补偿下的多余力矩抑制实验, 如图7所示。ET1表示开环状态下的多余力矩, ET2为采用图2中力矩环、位置环、电流环三闭环控制器结构时的多余力矩, ET3为采用图4中引入了舵机位置前馈及迭代学习控制策略的多余力矩。从图7(a)–(c)容易看出, ET3代表了最好的抑制多余力矩效果。

表3中为对应图7(a)–(c)中多余力矩的最大值, ET1_M, ET2_M和ET3_M分别表示采用3种控制策略时多余力矩的最大值。从表3可看出, 若采用三闭环控制策略, 当舵机在1 Hz, 5 Hz及10 Hz下运行时, 分别消除约74.8%, 50.8%, 73.7%的多余力矩; 若采用舵机位置前馈结合迭代学习控制时, 则分别消除约97.2%, 96.2%, 94.3%的多余力矩。故基于迭代学习控制结合舵机位置前馈补偿控制器时, 抑制多余力矩效果显著。



(a) 1 Hz多余力矩

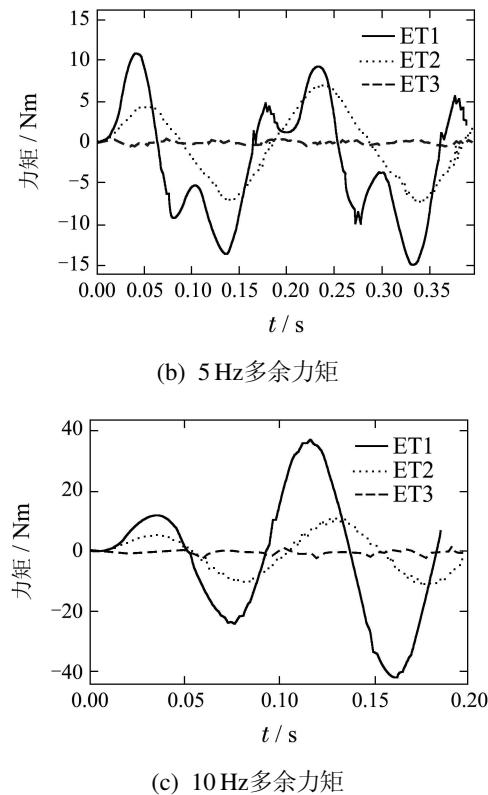


图7 抑制多余力矩效果对比

Fig. 7 Extraneous torque comparison

表3 多余力矩最大值

Table 3 Extraneous torque maximum values

频率/Hz	ET1 _M /Nm	ET2 _M /Nm	ET3 _M /Nm
1	7.98	2.01	0.22
5	15.03	7.39	0.57
10	43.27	11.37	2.45

6 结论(Conclusions)

1) 设计了测试飞行器舵机性能的电动负载模拟器,为提高力矩加载精度及系统稳定性,引入了弹性杆元件,并从系统动态响应速度、频宽及稳定性角度推导出弹性杆刚度系数的约束。

2) 负载模拟器力矩控制系统在采用电流反馈、位置反馈和力矩反馈的三闭环结构形式基础上,基于结构不变性理论将舵机位置前馈到位置环输入端,又在力矩环引入了迭代学习控制器,在每个正弦周期基于相关法分析出实际力矩幅值及相位,并修正指令力矩信号的幅值和相位。最后,进行了力矩加载和多余力矩对比实验,证明所提算法能有效提高力矩加载精度和抑制多余力矩。

参考文献(References):

- [1] 吴洪冲,宗光华.机械式反操纵负载模拟器设计方法[J].天津大学学报,2014,47(9): 803–810.

- (WU Hongchong, ZONG Guanghua. Design method of mechanical reverse operation simulator [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2014, 47(9): 803–810.)
- [2] NAM Y, SUNG K H. Force control system design for aerodynamic load simulator [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(5): 549–558.
- [3] 李成功,靳红涛,焦宗夏.电动负载模拟器多余力矩产生机理及抑制[J].北京航空航天大学学报,2006,32(2): 204–208.
(LI Chenggong, JIN Hongtao, JIAO Zongxia. Mechanism and suppression of extraneous torque of motor driver load simulator [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(2): 204–208.)
- [4] 张立勋,孟庆鑫,刘庆和.位置同步补偿克服负载模拟器干扰力矩及提高系统频宽的理论与实验研究[J].宇航学报,1997,18(1): 120–123.
(ZHANG Lixun, MENG Qingxin, LIU Qinghe. Experimental and theoretic study on eliminating the disturbance torque and widening the frequency band width of the load simulator using position synchro compensation [J]. *Journal of Astronautics*, 1997, 18(1): 120–123.)
- [5] 符文星,孙力,于云峰.大力矩电动负载模拟器设计与建模[J].系统仿真学报,2009,21(12): 3596–3602.
(FU Wenxing, SUN Li, YU Yunfeng. Design and model-building of motor-driven load simulator with large torque outputs [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(12): 3596–3602.)
- [6] WANG X, FENG D Z. A study on dynamics of electric load simulator using spring beam and feedforward control technique [C]//CCDC 2009: Chinese Control and Decision Conference. Guilin, China: IEEE Computer Society, 2009: 301–306.
- [7] JIAO Z X, GAO J X, HUA Q. The velocity synchronizing control on the electro-hydraulic load simulator [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2004, 17(1): 39–46.
- [8] 汪成文,焦宗夏,罗才瑾.基于改进的速度同步控制的电液负载模拟器[J].航空学报,2012,33(9): 1717–1725.
(WANG Chengwen, JIAO Zhongxia, LUO Caijin. An improved velocity synchronization control on electro-hydraulic load simulator [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(9): 1717–1725.)
- [9] 王刚,李建府,朱荣刚.CMAC改进算法在电动负载模拟器的应用[J].电光与控制,2011,18(4): 72–76.
(WANG Gang, LI Jianfu, ZHU Ronggang. Application of an improved arithmetic based on CMAC in electrical load simulator [J]. *Electronics Optics and Control*, 2011, 18(4): 72–76.)
- [10] 杨波,王哲.新型小脑模型关联控制器复合控制在电动加载系统中的结构及算法[J].控制理论与应用,2011,28(6): 827–833.
(YANG Bo, WANG Zhe. Structure and algorithm of hybrid control in cerebellum model articulation controller for electric loading system [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(6): 827–833.)
- [11] 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.
(WANG Mingyan, GUO Ben. Electric servo load simulator based on iterative learning control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(12): 123–126.)
- [12] 牛国臣,王巍,魏志强,等.基于力矩前馈和舵机角度补偿的力矩控制[J].北京航空航天大学学报,2013,39(3): 300–304.
(NIU Guochen, WANG Wei, WEI Zhiqiang, et al. Torque control based on torque feedforward and rudder angle compensation [J].)

- Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(3): 300 – 304.)
- [13] 符文星, 朱苏朋, 孙力. 弹簧杆刚度对电动负载模拟器的性能影响研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(2): 286 – 288.
(FU Wenxing, ZHU Supeng, SUN Li. Research of spring bar stiffness effect on performance of electric load simulator [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(2): 286 – 288.)
- [14] 李仁俊, 韩正之. 迭代学习控制综述 [J]. 控制与决策, 2005, 20(9): 961 – 966.
(LI Renjun, HAN Zhengzhi. Survey of iterative learning control [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(9): 961 – 966.)
- [15] 谢三毛. 虚拟相关法测量相位差仪的设计 [J]. 华东交通大学学报, 2006, 23(5): 119 – 121.
(XIE SM. The design of the virtual phasemeter based on cross correlation [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2006, 23(5): 119 – 121.)
- [16] 焦宗夏, 华清, 王晓东. 负载模拟器的评价指标体系 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(11): 26 – 30.
(JIAO Zhongxia, HUA Qing, WANG Xiaodong. Estimation for performance of load simulator [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(11): 26 – 30.)

作者简介:

牛国臣 (1981–), 男, 副教授, 博士研究生, 目前研究方向为负载模拟器控制, E-mail: niu_guochen@139.com;

王 巍 (1973–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为移动机器人、爬壁机器人及机电一体化技术, E-mail: wangweilab@buaa.edu.cn;

宗光华 (1943–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为移动机器人、机器人柔顺控制及负载模拟器系统, E-mail: ghzong@buaa.edu.cn.