

现代飞机电传飞控侧杆控制特性分析及验证

胡梦宜¹, 张宏伟², 刘佳森¹, 何 锋¹

(1. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州华烽电器有限公司, 贵州 贵阳 550009)

摘要:为进一步提高飞机侧杆的杆力、位移的控制精度,通过深入研究侧杆的关键技术,结合摩擦和间隙两大非线性因素的影响,对侧杆的静态特性指标和动态特性指标进行设计计算,并在侧杆非线性因素的研究基础上,针对关键环节中影响侧杆控制精度的非线性因素进行了建模,以经典PID控制原理为基础,结合人工神经网络提出了一种单神经元PID控制算法,实现了侧杆杆力-位移的稳定控制,给出了侧杆系统的控制方案,并通过试验对系统动态、静态特性关键指标进行了验证。实验结果表明,所设计的单神经元PID控制算法在保证一定稳定性的同时,比传统PID控制算法具有更小的杆力控制误差、更好的跟随效果,在一定程度上提升了飞行品质,为侧杆的后续研究提供了理论支持。

关键词:飞机侧杆;非线性因素;人工神经网络;PID控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)10-0001-06

Analysis and verification on control characteristics of modern aircraft fly-by-wire side-stick

HU Mengyi¹, ZHANG Hongwei², LIU Jiasen¹, HE Feng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Huafeng Electrics Co., Ltd., Guiyang 550009, China)

Abstract: In order to further improve the control accuracy of the stick force and displacement of the aircraft side stick, taking into account the influence of two major nonlinear factors, friction and clearance, the static and dynamic characteristics of the side stick are designed and calculated by deeply studying the key technologies of the side stick. In this paper, the nonlinear factors affecting the control accuracy of the side stick are modeled. Based on the classical PID control principle and artificial neural network, a single neuron PID control algorithm is proposed in combination with artificial neural networks, achieving stable control of sidestick force-displacement. A control scheme for the sidestick system is also provided, and the key indexes of the dynamic and static characteristics of the system are verified by experiments. The experimental results show that the designed single neuron PID control algorithm has smaller stick force control error and better following effect than the traditional PID control algorithm while ensuring certain stability. To a certain extent, it improves the flight quality, and provides theoretical support for the follow-up research of the side stick.

Keywords: aircraft sidestick; nonlinear factor; artificial neural network; proportional-integral-derivative control

0 引言

侧杆,是对传统中央驾驶杆盘的偏置和改进^[1]。相比于中央驾驶杆,从视觉角度看,侧杆更有利于观察显示器和仪表盘;从空间角度看,原本安装复杂杆系装置的位置就可以重新布置其他装置,同时也方便飞行员进出座位区;从人机工效方面看,侧杆输入量小,在一定程度上减轻了飞行员的操纵负荷,提升了操作舒适性^[2]。随着人们对飞行品质的要求逐渐提高,也需要侧杆系统具有更加准确的杆力-位移控制。

Huang等^[3]提出一种位移-速度-电流三回路PI控制策略,通过阻抗调整参数形成闭环控制,并由此提出一种高精度的位置累积控制措施。为减小摩擦力对控制精度的影响,陈悦等^[4]提出了一种自适应控制方法,提高了侧

杆控制精度;为减小间隙对控制精度的影响,Chen等^[5]提出了不基于模型的补偿方法。王灿等^[6]针对侧杆机构的非线性因素,提出了一种基于鲁棒模糊控制策略的飞机侧杆控制方法,实现了飞机飞行状态的反馈功能。针对侧杆系统杆力控制问题,陈悦^[7]对飞机侧杆多余力的抑制策略展开研究,并利用PID控制算法加以抑制,降低了多余力对系统的影响,提高了杆力加载的精度。

本文通过对侧杆功能原理的深入分析,结合摩擦和间隙两大非线性因素的影响,对侧杆的关键技术指标进行了设计分配,并在侧杆非线性因素的研究基础上,建立了相关数学模型^[8-9],提出一种单神经元PID控制算法,实现了侧杆杆力-位移的稳定控制,在一定程度上提升了飞行品质。

1 侧杆的工作原理

如图1所示,飞行员在进行前推和后拉操作时,手柄

* 基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2023]一般317)

收稿日期:2023-12-29

T点产生位移,通过位移传感器将位移转换为与之成比例的电信号,为飞行控制系统提供多余度的电压信号,实现飞机的俯仰和滚转的控制。

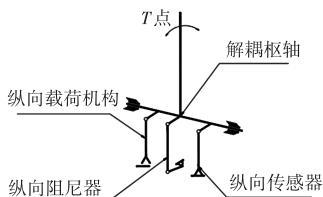


图1 侧杆工作原理图

另外,解耦枢轴受到力的作用绕旋转轴线作顺时针运动或逆时针运动,将机构行程及操纵力传递给纵向载荷机构和纵向传感器,并通过拉杆将行程传递给纵向阻尼器,纵向阻尼器为飞行员提供阻尼力,防止过快操纵。侧杆的

表1 侧杆设计主要技术指标

技术指标	前推启动力	前推6°操纵力	前推18°操纵力	后拉启动力	后拉6°操纵力	后拉18°操纵力
取值/N	5.77	23.1	91.4	4	19.4	87.87

纵向弹簧部件性能参数为:刚度 $K = 24.06 \text{ N/mm}$,力刚度公差为6%;安装载荷(设计) $F_1 = 25.9 \text{ N}$;工作载荷(设计) $F_2 = 319.2 \text{ N}$;弹簧设计精度的技术条件按照 HB3-56-2008,公差按 I 类弹簧计算。

2.2 纵向操纵力设计指标验证

根据手柄行程变化,得到不同状态下侧杆载荷机构的理论要求力矩和理论计算力矩,根据其误差来判断是否满足设计需求。

由图2、图3可得,手柄行程在 $0^\circ \sim 24^\circ$ 之间,其理论要求载荷与理论计算载荷的误差的绝对值始终保持在2.5%以内,满足设计需求。

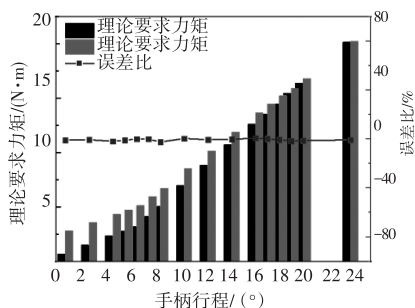


图2 纵向凸轮设计计算表(前推)

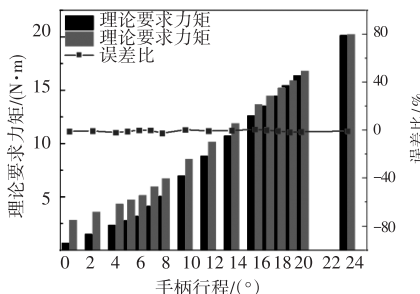


图3 纵向凸轮设计计算表(后拉)

传感器、载荷机构、阻尼器作为人感系统的核心部件,可看作一个质量-弹簧-阻尼二阶系统为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (1)$$

2 静态特性指标设计与分配

2.1 操纵力指标计算与分配

以下关于侧杆静态特性指标的设计与分配,以纵向技术指标为例进行。

侧杆采用凸轮式载荷机构,纵向操纵力指标要求启动力为 $5.1 \text{ N} \pm 2.9 \text{ N}$,前推/后拉 6° 时为 $22 \text{ N} \pm 6 \text{ N}$,前推/后拉 18° 时为 $90 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ 。考虑非线性因素的影响,侧杆设计主要技术指标^[10]如表1所示。

2.3 摩擦力与间隙的计算与分配

如图4所示,纵向摩擦力主要是由A点、B点、C点和D点的轴承的摩擦力与成品的摩擦力之和。

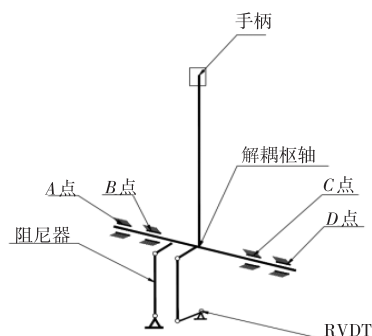


图4 纵向摩擦力计算原理图

纵向操纵中A、D两处选用牌号为7000101-GJB269-87/5的轴承各一个,其摩擦系数为0.001,内径为12mm, B、C两处选用牌号为26-GJB269-87/5的轴承各一个,摩擦系数为0.001,内径为6mm,各个轴承负载均为53.3N。

由公式 $M = \mu pd/2$ 可得各个轴承的摩擦力矩,即 $M_A = M_D = 0.3198$, $M_B = M_C = 0.1599$,2个RVDT角位移传感器的摩擦力矩均为 $50 \text{ N} \cdot \text{mm}$,纵向阻尼器的摩擦力矩为 $80 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。则轴承受到的总摩擦力矩为

$$M_{\text{总}} = M_A + M_B + M_C + M_D + M_{\text{RVDT}} + M_{\text{阻尼器}} \quad (2)$$

代入数据得总摩擦力矩为 $180.9594 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。手柄握杆处轴承的摩擦力为

$$F_{\text{摩擦}} = \frac{M_{\text{总}}}{R} = \frac{180.9594 \text{ N} \cdot \text{mm}}{160 \text{ mm}} = 1.13 \text{ N} \quad (3)$$

即产品纵向摩擦力为1.13N,满足设计要求。

该机构的纵向间隙主要存在于万向节内部的两个

900808-GJB269-87/5 轴承上,其纵向间隙分别存在于轴承室、轴承以及轴 3 个环节,最大配合间隙分别为 0.009 mm、0.08 mm 和 0.002 mm,将轴承游隙、零件之间的配合间隙折算至侧杆的手柄握点,则侧杆的空行程为 0.3°。

3 动态特性指标设计与分配技术

动态特性包括有阻尼特性和无阻尼特性。其中,有阻尼特性主要是解决如何满足系统要求的阻尼比的问题,无阻尼特性主要是解决如何避免侧杆与飞机共振的问题。结合实际应用需求,设定以下研究指标:

- 1) 侧杆应提供动态阻尼力防止回中振荡。
- 2) 侧杆在极限位自由回中时,回中时间应小于 0.7 s,超调幅值应小于 0.15°,不超过 2 个振荡周期。

3.1 无阻尼自然振荡

当系统处于无阻尼的情况,根据牛顿运动定律,系统的运动方程可表示为

$$ma = -kx \quad (4)$$

式中, k 为系统刚度, m 为系统的计算质量。由此可知,本系统无阻尼自然振荡是典型的谐振动,可得

$$m \frac{d^2 t}{dt^2} = -kx \quad (5)$$

$$m \frac{d^2 t}{dt^2} + kx = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d^2 t}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (7)$$

其中,

$$k = \frac{F_{\max} - F_{\text{启动}}}{x} = \frac{90 - 5.1}{49.443 \times 10^{-3}} = 1717.13 \text{ N/m} \quad (8)$$

相对于侧杆纵向回转中心的转动惯量为 0.034 kg,单侧换算到手握点的簧上质量为 $m = 1.25 \text{ kg}$ 。代入数据得

$$p = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{1717.13}{1.25}} = 37.06 \text{ rad/s} \quad (9)$$

$$f = \frac{p}{2\pi} = \frac{37.06}{2\pi} = 5.9 \text{ Hz} \quad (10)$$

3.2 有阻尼振荡

有阻尼振荡情况下,根据牛顿运动定律可知,系统的运动方程可表示为

$$F_{\text{总}} = F - F_n - F_{\text{载荷}} \quad (11)$$

$$m \frac{d^2 t}{dt^2} = F - c \frac{dx}{dt} - kx \quad (12)$$

其中, c 为系统阻尼系数,即

$$m \frac{d^2 t}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx - F = 0 \quad (13)$$

由此可得出系统为一自由度线性阻尼系统。根据一自由度线性阻尼系统的关系有

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (14)$$

其中, ξ 为系统阻尼比, c 为手柄手握点的阻尼系数, d 为阻尼器输出摇臂的阻尼系数,则可得到 $c = d$ 。当侧杆纵向运动系统阻尼比 ξ 为 1 时,由此可推出阻尼器输出摇臂的阻尼系数为

$$d = C \times \frac{R_1^2}{R_2^2} = 2\xi \sqrt{mk} \times \frac{R_1^2}{R_2^2} = 1717.9 \text{ N} \cdot \text{s/m} \quad (15)$$

3.3 运动阻尼模型建立与仿真

使用 MATLAB 建立了纵向运动阻尼的数学模型,设置参数见表 2。纵向阻尼仿真 Simulink 模型如图 5 所示。

表 2 运动阻尼数学模型主要参数

参数	取值
最大操纵力	90 N
启动力	5.1 N
操纵行程	18°
旋转半径	160 mm
系统纵向刚度	1717.13 N/mm
当量质量	0.9375 kg
摩擦力	1.13 N
系统临界阻尼系数	92.66 N·s/m

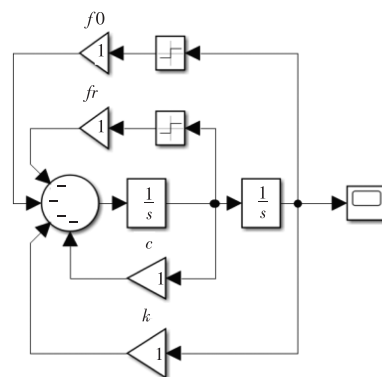


图 5 纵向阻尼仿真 Simulink 模型

其简化模型如下:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \text{sgn}(x) \cdot fri + \text{sgn}(x) \cdot f(0) = F \quad (16)$$

惯性力
阻尼力
弹性力
摩擦力
预紧力
杆力

根据上述结论,当阻尼比为 0.9~1.3 时,满足侧杆在极限位自由回中时,回中时间应小于 0.7 s,超调幅值应小于 0.15°,不超过 2 个振荡周期需求,即纵向阻尼器系数应为 1060.1~1531 N·s/m。

分配给纵向阻尼器技术指标如下:

- 1) 阻尼系数为 1060.1~1531 N·s/m。
- 2) 行程 $\leq 15 \text{ mm}$ 。
- 3) 摩擦力 $\leq 2 \text{ N}$ 。

4 杆力控制方案设计

4.1 非线性因素建模

工程实践中铰链及连杆传动机构受到非线性因素的影响,如摩擦和间隙的影响,加上机构受到外力引起的刚度变形,故无法做到输入与输出完全是线性的。因此,要提高机构控制精度,必须考虑摩擦和间隙的影响。

摩擦几乎存在于所有的伺服机构系统中,对于大多数

机械系统而言,非线性摩擦难以分析和描述,会降低系统的运动精度,如机械伺服系统进行位置调节时,摩擦的存在会给系统带来稳态误差,严重影响机构的控制品质。为了减小和消除摩擦的影响,目前主要存在3种方法:

- 1) 改变系统设计,减少结构中的摩擦环节。
- 2) 选择合适的润滑油,减小系统构件之间的摩擦力。
- 3) 采取适当的控制补偿策略,对摩擦做必要的处理。

前两类方法均是从硬件层面降低摩擦的影响,有一定的局限性,第3种是从摩擦模型的建立和摩擦补偿的角度入手。研究非线性摩擦的控制方法,对于提高系统的精度有重大意义。

各类摩擦力模型建立公式^[11]为

$$F_1 = c_1 \tanh(c_2 w) \quad (17)$$

$$F_2 = c_3 w \quad (18)$$

$$F_3 = c_4 [\tanh(c_5 w) - \tanh(c_6 w)] \quad (19)$$

式中, $F_1 \sim F_3$ 分别为库伦摩擦力、黏性摩擦力和静摩擦力, $c_1 \sim c_6$ 为各摩擦项的未知衰减系数,则总摩擦力为各类摩擦力之和为

$$F_{\text{总}} = F_{\text{库伦摩擦}} + F_{\text{黏性摩擦}} + F_{\text{静摩擦}} \quad (20)$$

飞机侧杆的间隙特性,可以用“死区”特性来描述,在该范围内位移为0,可以表示为

$$\tau = K\delta \quad (21)$$

$$\delta = \theta_1 - \theta_2 \quad (22)$$

斜率 K 表示齿轮啮合后的刚度。设电机的控制输入 u 是力矩,则驱动级的电机和负载的方程为

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 = u - r \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + d_2 \dot{\theta}_2 = \tau \end{cases} \quad (23)$$

其中, J_1 为转动惯量, J_2 为负载的转动惯量, d_2 为阻尼系数。

4.2 侧杆控制结构设计

永磁同步电机利用矢量控制方法结合其他先进算法,可以将其转化为直流电机进行控制,使得其在效率、动态性能以及鲁棒性等方面性能得到优化,有利于提高侧杆系统的伺服性能。因此,所设计的系统采用永磁同步电机作为杆力加载机构。

为保证杆力控制的精确性和实时性,杆力伺服采用杆力-电流双闭环控制方案及矢量控制技术。以电流环作为内环,然后再以电流环作为杆力环的一个环节,进而设计杆力环控制器,各环节都有相应的控制器调节误差,从而保证侧杆杆力的加载精度。

控制方案中,经过电流环输出后的永磁同步电机输出经过积分环节的作用,可以调节控制器输出的变化速率,提高电流动态跟随性能,提高系统响应速度。而在杆力环内,通过两个增益系数与积分环节共同作用、相辅相成,进一步控制杆力误差,从而输出误差更小的杆力,提供更加精确的杆力反馈。控制原理如图6所示,其中 i 环为电流环, $F_q(k)$ 环为杆力环, K_{PWM} 为永磁同步电机的放大系数。

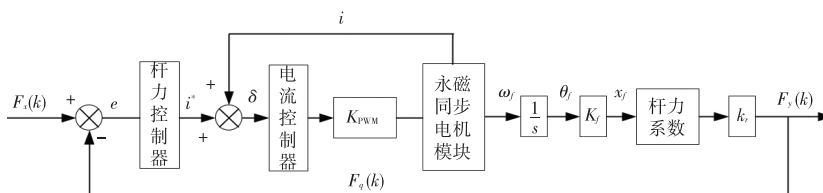


图6 侧杆杆力控制原理图

4.3 PID 算法控制原理分析

永磁同步电机控制方法主要是PID控制算法,主要由比例、积分、微分三部分组成^[12]。传统的PID控制算法,依赖系统的数学模型,且系统参数针对系统的控制需求作出调整,在时变系统中不能达到良好的控制效果。本文在经典PID控制算法的基础上,结合神经网络设计侧杆杆力控制算法,通过神经的自适应能力提高PID算法的动态性能。PID控制器的输入输出关系为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (24)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (25)$$

其中, $e(t)$ 为控制误差, K_p 、 K_i 、 K_d 分别是比例系数、积分系数、微分系数, $K_i = K_p/T_i$, $K_d = K_p \cdot T_d$, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数。PID控制算法由各部分求和得到闭环控制量,分别通过调节 K_p 、 K_i 、 K_d 来调节系统性能。在比例环节, K_p 将 $e(t)$ 进行比例计算后进行反馈,使控制误差减小; K_i 用于调节积分环节,消除系统的稳态误差; K_d 可控制

微分环节,反映系统偏差信号的变化率,具有预见性,能预见偏差变化的趋势,产生超前控制作用,改善系统的动态性能。但是,在传统PID控制过程的3个关键参数中,比例、积分、微分比较依赖经验以及试凑,故对于有较多非线性因素影响的系统,传统的PID控制并不适用^[13-14]。

4.4 单神经元PID控制器设计

人工神经网络,简称神经网络,是基于生物学中神经网络的基本管理,以网络拓扑知识为理论基础,模拟人脑对复杂信息的处理机制的运算模型。单神经元是人工神经网络中最简单的、最基本的非线性单元,具有多个输入,经过加权求和后得到单个输出,如图7所示。

x_i 为第 i 个神经元接收到的信息,经过连接强度 a_i 后采用某种激活函数 f 后得到输出净输入 N_i ,净输入通常采用线性加权求和的表示形式为

$$N_i = \sum_{j=1}^n (a_j x_j - \theta_j) \quad (26)$$

其中, θ_j 为第 j 个神经元的阈值,而神经元的输出 y 可以

用该神经元当前状态的函数表示为

$$y = g(N_i) \quad (27)$$

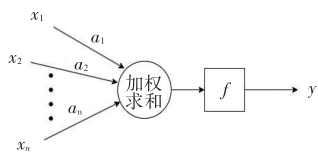


图7 单神经元结构图

当侧杆处于工作状态时,电机根据所期望的杆力产生指令信号,并将当前状态下的加载力反馈给杆力控制器,计算出杆力误差 Δx ,同时保存前两个时刻的杆力误差值,三者同时构成控制器自学习时的状态量。可得 PID 算法的增量型表达式为

$$U(k) = K_I x_1(k) + K_P x_2(k) + K_D x_3(k) \quad (28)$$

其中: $x_1(k) = \Delta x(k)$, 比例系数 K_I 为其加权系数,故 $K_I x_1(k)$ 相当于 PID 控制系统中的积分项,反映系统的控制误差。

$x_2(k) = \Delta x(k) - \Delta x(k-1)$, 比例系数 K_P 为其对应的加权系数,故 $K_P x_2(k)$ 相当于 PID 控制系统中的比例项,反映系统误差的变化趋势。

$x_3(k) = \Delta x(k) - 2\Delta x(k-1) + \Delta x(k-2)$, 微分系数 K_D 为其对应的加权系数,故 $K_D x_3(k)$ 相当于 PID 控制系统中的微分项,反映系统误差的调节速度。

4.5 学习规则

神经网络自主学习的特征主要源于学习规则,学习规则主要通过修改加权值来实现。根据侧杆杆力-位移的

控制特点,本文采用如式(29)所示的有监督的 hebb 学习规则对控制器中的权值系数进行调整。

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + \eta_I \Delta x \cdot \mu(k) \cdot c_1(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + \eta_P \Delta x \cdot \mu(k) \cdot c_2(k) \\ v_3(k+1) = v_3(k) + \eta_D \Delta x \cdot \mu(k) \cdot c_3(k) \end{cases} \quad (29)$$

其中, η_I , η_P , η_D 分别是积分、比例、微分的学习速率。侧杆杆力控制模块输出的控制规律为

$$u(k) = u(k-1) + Ke \sum_{i=1}^3 a_i(k) x_i(k) \quad (30)$$

同时,为保证 PID 算法的收敛性以及控制的鲁棒性,对权值系数进行规范化处理,可将 PID 算法的增量型公式改写为

$$\begin{cases} U(k) = K \left(\sum_{i=1}^3 a_i'(k) x_i(k) \right) \\ a_i'(k) = \frac{a_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |a_i(k)|} \end{cases} \quad (31)$$

其中, K 为神经元的比例系数,始终为正值且应保持在一定范围内,否则过大的 K 值容易导致系统不稳定及超调量增加,系统的调节速度随的 K 增大而加快。

经过设计改进的飞机侧杆杆力控制器模型如图 8 所示, $F_x(k)$ 为期望杆力, $F_q(k)$ 为反馈杆力, Δx 为两者的差值,经过转换可以得到系统所需要的量 $c_i(k)$, $v_i(k)$ 为该控制器输入的权值系数, $F_y(k)$ 为侧杆手柄上的实际杆力, K 为神经网络的比例系数。 I 和 M 分别为电流环和电机模型该控制系统具有神经网络的自适应能力,相比于经典 PID 控制算法,对于侧杆杆力的控制精度进一步提高。

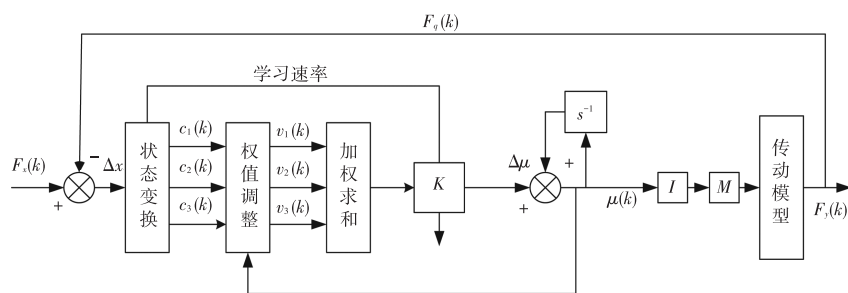


图8 单神经元 PID 杆力控制系统结构图

5 侧杆关键技术的应用与验证

5.1 动态特性指标设计与分配技术的验证

进行动态特性扫频验,对侧杆机构进行试验验证,结果如图 9 所示。在功能性能试验中,系统的阻尼比为 1.21,而要求值为 $\xi = 0.9 \sim 1.3$,表明侧杆动态特性指标均满足设计要求。

5.2 控制稳定性测试

设定的杆力与杆位行程的关系^[15]为

$$F = K \cdot \theta \quad (32)$$

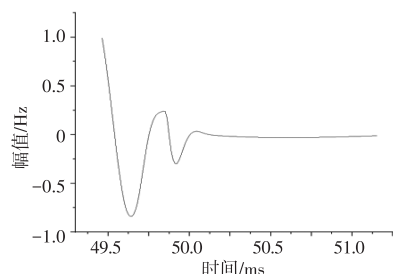


图9 动态特性振动扫频试验

其中, K 为杆力系数,设定 K 为 5,由上述关系得到理论杆力, θ 为侧杆行程, $\theta \in (-24^\circ, 24^\circ)$ 。通过反复前推和后

拉侧杆,得到实际杆力。侧杆位移与实际杆力的数据如图10所示。

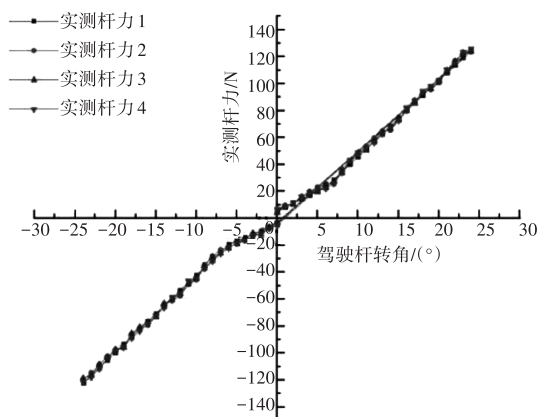


图10 静态特性力-位移曲线

可以看出,所提出的单神经元PID控制算法,能够降低非线性因素对于侧杆的影响,提高了侧杆杆力-位移的控制精度,且具有一定的稳定性,表明所设计的各个特性指标(输出电压、启动力、摩擦力、空行程、最大操纵力、最大操纵行程等)均满足设计要求。

5.3 控制精度测试

由中立位为起始点,以驾驶杆转角的 1° 为单位,分别在由经典PID算法控制和改进后的单神经元PID算法控制的实验平台上进行杆力-位移控制效果横向对比测试^[16],得到两种控制算法下侧杆在 $(-24^\circ, 24^\circ)$ 内的实际杆力,图11为实际杆力与理想杆力的误差图。

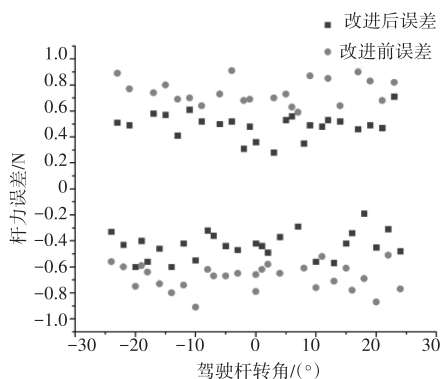


图11 实际杆力与理想杆力误差图

由静态杆力测试结果可知,传统PID控制将杆力误差控制在 0.9 N 以内,而单神经元PID能够将误差控制在 0.6 N 以内,且最小误差接近 0.2 N 。可见,单神经元PID控制具有更小的杆力控制误差,控制精度更高,跟随效果更好。

6 结束语

为提高飞机侧杆的杆力-位移控制精度,本文对飞机侧杆的关键技术指标进行设计计算和验证,针对控制过程中存在非线性因素,建立了数学模型,并提出一种单神经元PID控制算法。动态特性扫频实验结果显示系统阻尼比为

1.21,表明系统无阻尼特性和有阻尼特性均满足设计要求。静态杆力测试中,侧杆能够实现稳定且精确的杆力-位移控制,表明飞机侧杆关键技术指标满足设计需求,所提出的单神经元PID控制算法能够降低非线性因素的影响,杆力-位移控制精度明显优于传统PID控制算法。

参考文献

- [1] 史国荣,李凯,郭韶华,等. 浅析飞机侧杆驾驶装置设计[J]. 电子世界, 2021(15): 180-181.
- [2] 熊端琴,郭小朝,陆惠良,等. 飞机侧杆驾驶装置的优缺点及其改进设计探讨[J]. 人类工效学, 2006, 12(1): 36-38.
- [3] HUANG Zilinu, LU Zhengren. On active sidestick force control strategy technology [C]//2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference. Xiamen: IEEE, 2018: 15.
- [4] 陈悦,孙永荣,王欢,等. 飞机主动侧杆摩擦补偿研究[J]. 机械与电子, 2018, 36(12): 29-34.
- [5] CHEN Wenhua, BALLANCE D J. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2000, 47(4): 932-938.
- [6] 王灿,杨忠,陈旭,等. 飞机主动侧杆非线性系统的建模与控制[J]. 应用科技, 2023, 50(5): 157-162.
- [7] 陈悦. 飞机主动侧杆高精度杆力控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
- [8] 赵坤. 考虑球铰间隙的并联机构动态特性和球铰磨损分析[D]. 重庆:重庆大学, 2021.
- [9] SHI Bing, JIN Ye. A framework of virtual prototyping environment for the design and analysis of mechanical mechanism with clearance [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2007, 2(1): 21-28.
- [10] 黄子林,卢正人,李立,等. 民用飞机侧杆人机功效和操纵品质评估研究[C]//2022年中国航空工业技术装备工程协会年会论文集. 西安:中国航空工业技术装备工程协会, 2022: 5.
- [11] 倪佳龙. 基于电动式主动侧杆的永磁同步电机伺服控制系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2023.
- [12] 孟小宝,邹泉,何欢欢,等. 安装主动侧杆的飞机的人机交互控制系统研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(8): 57-67.
- [13] 李莎. 一种联合整地机的伺服传动系统优化研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(5): 98-102.
- [14] 赵岩,周秦源,邵念锋,等. 基于RBF神经网络模糊PID控制的电液伺服系统[J]. 机电工程, 2022, 39(2): 244-249.
- [15] 张裕栋. 基于改进单神经元PID控制的航检设备稳定性研究[J]. 控制工程, 2025, 32(3): 394-399.
- [16] 王欢,孙永荣,孙旭东,等. 飞机主动侧杆系统的杆力控制方法研究[J]. 测控技术, 2016, 35(12): 79-82.

作者简介:胡梦宜(1997—),男,硕士研究生,研究方向:机械工程。
通信作者:何锋(1963—),男,教授,研究方向:汽车系统动力学与控制。