

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.11.006

飞机液压能源模块负载模拟装置试验研究*

刘 旋¹, 梁 娜², 袁朝辉^{2*}

(1. 航空工业陕西飞机工业(集团)有限公司, 陕西 汉中 723213;
2. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710000)

摘要:针对飞机液压能源模块地面负载模拟系统中,由于系统与泵源等的耦合作用,系统特性较为复杂,难以快速找到合适的 PID 控制器参数值的问题,以某企业飞机铁鸟液压能源系统负载模拟装置为对象,采用直驱比例阀通过节流方式来控制系统流量或压力,进行了负载模拟。设计了液压能源系统负载模拟装置,对负载模拟系统中的系统原理和控制难点进行了论述,建立了负载模拟系统的数学模型;基于系统的特点,提出了基于某神经网络的 PID 控制方法,以实现利用计算机快速寻找合适的 PID 控制器参数值;在 Matlab 中对算法进行了仿真,并进行了试验验证。研究表明:该方法可行,相比人工试凑可以更快地找到合适的 PID 控制器参数。

关键词:负载模拟;压力流量;BP 神经网络;PID 控制;液压能源系统

中图分类号:TH137.9;TH-39;V233.91

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)11-1153-07

Load simulation system about hydraulic energy system for an aircraft

LIU Xuan¹, LIANG Na², YUAN Zhao-hui²

(1. Avic Shaanxi Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Hanzhong 723213, China;
2. College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the system characteristics are complex and it is difficult to quickly find the appropriate parameters of the PID controller, due to the coupling between the system and pump source in the ground load simulation system of aircraft hydraulic energy module, the direct drive proportional valve was used to control the flow or pressure of the system by throttling to simulate the load based on the research of load simulation device of hydraulic energy system for an aircraft Tiebird project. The load simulator of hydraulic energy system was designed, the system principle and control difficulties were discussed and the mathematical model of the system was analyzed and established. Based on the characteristics of the system, the PID control method of a neural network was used to quickly find the appropriate parameters of the PID controller. The algorithm was simulated in Matlab and verified by experiments. The results indicate that this method is feasible and can find the appropriate PID control parameters faster than manual trials.

Key words: load simulation; pressure and flow; BP neural network; PID control; hydraulic energy system

0 引 言

随着对飞机的安全性和可靠性的要求越来越高,为了确保设计的液压能源系统在原理上正确、合理、可靠以及给方案设计提供试验支持,液压能源系统的地

面试验是必要的^[1-2]。

飞机液压能源系统试验时,需要测试起落架、舵面等分系统工作时飞机能源系统的性能。为了更灵活地完成此项试验,可以采用液压负载模拟系统来模拟上述分系统单独工作或复合工作时的状态,通过模拟相

收稿日期:2019-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51505381,51275423);民用飞机专项科研资助项目(MJ-2016-S-54)

作者简介:刘旋(1963-),男,江苏泰州人,高级工程师,主要从事飞控液压系统设计试验方面的研究。E-mail:13992651593@163.com

通信联系人:袁朝辉,男,博士,教授。E-mail:yuanzh@nwpu.edu.cn

应的流量和压力来实现。在压力和流量的控制过程中,负载模拟系统和液压系统能源、管路相互耦合,系统特性较为复杂,控制有一定的难度。该模拟系统本质是一个典型电液伺服控制系统^[3]。系统存在多处非线性:(1)流体节流方程引起的非线性;(2)节流阀的非线性特性;(3)泵源(轴向柱塞泵)流量、压力输出与节流阀之间非线性的耦合过程^[4-7]。而且系统的参数会随着液压油的温度、运行时间等外部环境发生改变,是一个时变系统。因此,该系统是非线性和时变系统,系统模型比较复杂。

近年来,随着非线性控制理论、智能控制理论、鲁棒控制理论的发展,电液伺服控制系统的控制理论研究集中到了非线性、智能控制、鲁棒控制方面^[8-10]。模糊控制、神经网络控制和专家控制是目前智能控制中最为活跃的领域,其与常规 PID 控制相结合,结合成所谓智能 PID 控制。常规 PID 具有结构简单、易于实现等特点,在液压伺服控制系统中有着广泛的应用,并且在实际应用中可以满足工程的精度要求,但寻找合适的 PID 控制参数是常规 PID 控制的难点。

本文将以某企业飞机铁鸟液压能源系统负载模拟装置为对象,对控制难点进行系统建模,基于其特点采用基于某神经网络的 PID 控制方法,给出一种快速寻找系统 PID 控制器参数的方法^[11-14]。

1 系统原理及设计要点

1.1 能源试验系统原理

能源试验系统简化原理图如图 1 所示。

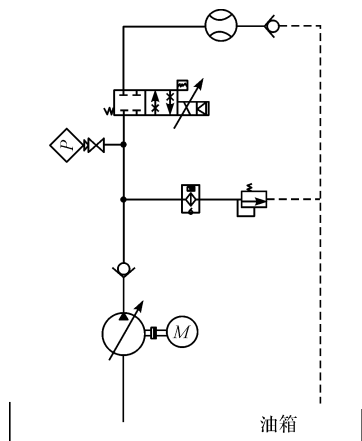


图 1 能源试验系统简化原理图

图 1 中,系统正常工作时,泵源为斜盘式轴向柱塞泵,经过单向阀后输出高压液压油,高压液压油通向负载模拟装置,负载模拟装置采用直驱比例阀通过节流方式来控制流量或压力,流量或压力反馈信号通过流

量和压力传感器获得;当系统出现异常,压力过高,达到安全阀设定压力时,安全阀打开,高压液压油经安全阀回油箱,保证整个系统的安全压力。

1.2 设计要点

根据要求得到设计要点如下:

(1)航空液压泵最大压力为 P_{\max} 的斜盘式轴向恒压柱塞变量泵,在液压泵的自动调压机构的工作区域,泵出口流量在 0 与接近 Q_{\max} 之间变化,而压力只在小范围变化,在该工作区泵源被看做是恒压变量泵;负载模拟时,比例阀阀口的微小变动会导致泵出口压力的变化,泵出口压力的变化会影响泵内部的斜盘角度的变化,从而改变泵输出的流量,使泵输出流量有较大的变化,泵流量压力的输出和比例阀的调节之间是个非线性的耦合过程,因此,在负载模拟系统中,比例阀的响应速度对系统的性能至关重要;本研究采用直驱比例阀通过节流方式来控制流量或压力进行负载流量和压力的模拟,选用的直驱式比例阀为双通道简易节流阀,使用时用堵头封堵 T 口和 B 口,变更为单通道进行单边节流,该直驱阀具有响应快、稳静性好、泄露小、变梯度等特点,为系统的稳定提供了先决条件;

(2)由于管路特性的影响,负载模拟时,泵与比例阀之间进行压力流量耦合作用,而耦合作用是通过泵与比例阀之间的管路来实现的,所以其对系统影响不容忽视,系统建模时必须考虑到泵与比例阀之间的管路压缩性;

(3)该系统具有非线性和时变性的特点,为了达到快速的动态响应和系统跟踪效果,采用常规的 PID 控制器进行控制时,关键是寻找合适的 PID 控制参数;PID 参数值根据经验人工试凑,该方法随机性大,难以快速找到合适的 PID 控制器参数值达到满意的控制效果;设计基于 BP 神经网络的 PID 控制器应用于负载模拟系统中,BP 神经网络具有对任意非线性函数逼近的能力,系统通过对网络系统的学习来实现具有最佳组合的 PID 控制器参数,且结构简单,网络的输出即为 PID 参数值,可实现一种由 BP 神经网络整定的最佳 PID 控制。

2 系统建模

在建立系统模型时,安全阀设定压力远高于系统的工作压力,只有在系统压力偏高时才会打开,正常工作状态下该阀关闭,故不对其和过滤器建模;单向阀在正常试验时,始终开启,故不考虑其动态,其影响对系统只产生一个压降。故重点分析建立轴向柱塞变量泵

和直驱比例阀的数学模型。

2.1 直驱比例阀数学模型

设阀体弹簧的预压缩量为 x_{v01} , 右边电磁铁得电, 阀芯向左移动了距离 x_{v1} 。

比例电磁铁输出电磁力为:

$$F_e = K_e i \quad (1)$$

阀芯受左边弹簧力为:

$$F_1 = K_{v1}(x_{v01} + x_{v1}) \quad (2)$$

阀芯受右边弹簧力为:

$$F_2 = K_{v1}(x_{v01} - x_{v1}) \quad (3)$$

式中: K_e —比例电磁铁力/电流增益系数; K_{v1} —阀芯弹簧刚度系数。

阀芯运动力平衡方程为:

$$F_e - F_1 + F_2 - R_{y1} = m_{v1} \frac{d^2 x_{v1}}{dt^2} + B_{d1} \frac{dx_{v1}}{dt} \quad (4)$$

式中: m_{v1} —比例阀阀芯质量; B_{d1} —油液的黏性阻尼系数; R_{y1} —液动力,包括稳态和瞬态液动力两部分。

液动力 R_{y1} 为:

$$R_{y1} = C_v W_{r1} x_{v1} (p_s - p_1) \cos\theta + L_1 C_v W_{r1} \sqrt{2\rho(p_s - p_1)} \frac{dx_{v1}}{dt} \quad (5)$$

令:

$$B_{ve1} = B_{d1} + L_1 C_v W_{r1} \sqrt{2\rho(p_s - p_1)} \quad (6)$$

则有:

$$K_{ve1} = C_v W_{r1} (p_s - p_1) \cos\theta + 2K_{v1} \quad (7)$$

式中: C_v —流量系数; W_{r1} —比例阀节流窗口的面积梯度; θ —液体通过节流窗口的射流角; L_1 —比例阀油液进出口之间沿轴向上的距离; p_s —比例阀进口压力; p_1 —比例阀出口压力; B_{ve1} —包括瞬态液动力阻尼系数在内的阀芯的当量阻尼系数; K_{ve1} —包括稳态液动力刚性系数在内的弹簧的当量刚性系数。

将式(1~7)代入式(4),并做 Laplace 变换,并代换,则有:

$$K_e i(s) = (m_{v1} s^2 + B_{ve1} s + K_{ve1}) X_{v1}(s) \quad (8)$$

阀芯的流量方程为:

$$Q_f = C_v W_{r1} x_{v1} \sqrt{\frac{2(p_s - p_1)}{\rho}} \quad (9)$$

比例阀出口与油箱相通,可认为 $p_1 = 0$,则通过比例阀的流量方程可将阀芯流量方程简化为:

$$Q_f = C_v W_{r1} x_{v1} \sqrt{\frac{2p_s}{\rho}} \quad (10)$$

2.2 恒压泵的数学模型

柱塞泵内部流量调控图如图 2 所示。

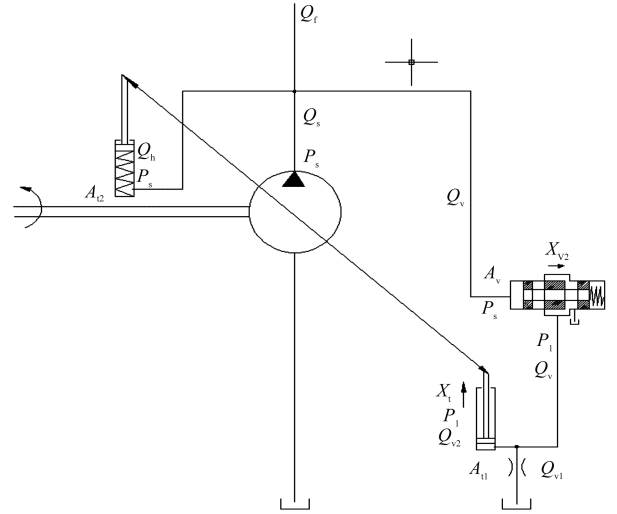


图 2 柱塞泵内部流量调控图

(1) 在图 2 中,以泵口压力调节阀芯为研究对象,建立力平衡方程。设阀芯弹簧的预压缩量为 x_{v20} , 阀芯向左边运动位移为负,向右边运动位移为正,假设阀芯移动了距离 x_{v2} ,则有:

$$A_v p_s - K_{v2}(x_{v20} + x_{v2}) - R_{y2} = m_{v2} \frac{d^2 x_{v2}}{dt^2} + B_{d2} \frac{dx_{v2}}{dt} \quad (11)$$

式中: A_v —压力调节阀左端阀芯面积; K_{v2} —压力调节阀阀芯弹簧刚度系数; m_{v2} —压力调节阀阀芯质量; B_{d2} —油液的黏性阻尼系数; R_{y2} —液动力(液动力的表达式与 2.1 节的直驱比例阀模型类似)。

(2) 通过调压阀的流量方程

当 $x_{v2} > 0$, 泵出口的高压油通过调压滑阀进入泵斜盘底部的随动活塞腔,使斜盘偏转,改变泵出口的流量,则有:

$$Q_v = C_v W_{r2} x_{v2} \sqrt{\frac{2(p_s - p_1)}{\rho}} \quad (12)$$

式中: Q_v —流向调压滑阀的流量; W_{r2} —调压阀节流窗口的面积梯度; p_s —为泵的出口压力; p_1 —通过调压滑阀流向斜盘随动活塞底部的压力。

当 $x_{v2} < 0$, 随动活塞腔与油箱相连通,斜盘偏转到最大角度,泵输出流量最大,则有:

$$Q_v = C_v W_{r2} x_{v2} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{\rho}} \quad (13)$$

(3) 调压机构随动活塞流量连续方程为:

$$Q_v = Q_{v1} + Q_{v2} \quad (14)$$

$$Q_{v1} = C_{s11} P_1 \quad (15)$$

$$Q_{v2} = A_{v1} \frac{dx_{v1}}{dt} + \frac{V_{e1}}{E_{y1}} \frac{dP_1}{dt} \quad (16)$$

式中: Q_{v1} —通过压力调节阀后泄漏流量; Q_{v2} —流向随

动活塞底部的流量; A_{i1} — 随动活塞端面积; x_t — 随动活塞位移; V_{e1} — 随动活塞腔体积; E_{y1} — 等效的活塞腔体积弹性模量; P_1 — 进入随动活塞腔的压力; C_{s1} — 随动活塞前端节流阀泄露系数。

(4) 斜盘运动学方程

以液压能源系统压力腔为研究对象, 其流量连续方程为:

① 当 $x_{v2} > 0$, 泵出口的高压油通过调压滑阀进入泵斜盘底部的随动活塞腔, 使斜盘偏转, 改变泵出口的流量, 则有:

$$Q_f = Q_s - Q_v + Q_h - \frac{V_{e2}}{E_{y2}} \frac{dP_s}{dt} \quad (17)$$

式中: Q_f — 液压系统负载所需的流量; Q_s — 变量泵的理论输出流量; Q_v — 通向泵口调压机构的流量; Q_h — 随斜盘偏转左侧随动活塞流向泵的流量; V_{e2} — 变量泵与比例阀之间的管道容积; E_{y2} — 变量泵与比例阀管道油液弹性模量。

② 当 $x_{v2} \leq 0$, 随动活塞腔与油箱相通, 斜盘偏转到最大角度, 泵输出流量最大, 则有:

$$Q_f = Q_s - Q_h - \frac{V_{e2}}{E_{y2}} \frac{dP_s}{dt} \quad (18)$$

(5) 变量泵理论流量方程

变量泵的理论流量 Q_s 为:

$$Q_s = \frac{\pi d_3^2}{2} Z R \tan\left(\frac{x_{tmax} - x_t}{L_t}\right) * n \quad (19)$$

式中: d_3 — 柱塞泵柱塞的直径; Z — 柱塞的个数; R — 柱塞分度圆半径; x_{tmax} — 随动活塞移动的最大位移; x_t — 随动活塞移动的位移; L_t — 随动活塞距泵中心轴的距离; n — 泵的转速。

将以上各式联立, 并进行拉普拉斯变化, 可得系统的传递函数, 并在 Simulink 中搭建仿真模型。

3 基于 BP 神经网络的 PID 控制

3.1 BP 神经网络 PID 控制基本原理

BP 网络算法实质上是把一组样本输入、输出问题转化为一个非线性优化问题, 并通过迭代运算求解权值问题的一种学习算法。PID 控制器一般含有比例、积分和微分, 在液压试验系统调试中, PID 控制器一旦含有微分项, 易引起液压系统振动。其原因在于采集回来的信号含有噪声, 微分控制会对噪声信号进行放大, 且放大的效果远大于对有用信号的微分控制, 将放大的噪声信号引入控制系统易引起液压系统发生振动, 所以笔者仅用两个输出节点来调整 K_p 和 K_i , 最终采用基于 BP 神经网络的 PI 控制。

基于 BP 神经网络的 PID 控制器结构如图 3 所示。

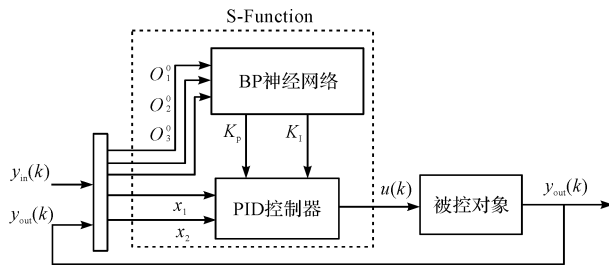


图 3 基于 BP 神经网络的 PID 控制器结构

图 3 中, BP 神经网络 PID 控制程序通过 S-Function 函数与 Simulink 相连接; 该控制器输入层采用 3 个输入节点 O_1^0, O_2^0, O_3^0 , 5 个隐含节点, 2 个输出节点的三层神经网络, 根据系统的运行状态, 加权调整 PID 控制器的参数 K_p 和 K_i 。

3.2 BP 神经网络 PID 控制的算法

在变量的右上角标 0, 1, 2 分别代表输入层、隐含层和输出层, 各层的变量个数分别用 i, j, l 表示, 即 $i = 3, j = 5, l = 2$ 。

该算法中 PID 控制器的输入变量为:

$$e(k) = y_{in}(k) - y_{out}(k) \quad (20)$$

$$\begin{cases} x_1 = e(k) - e(k-1) \\ x_2 = e(k) \end{cases} \quad (21)$$

PID 控制器的输出为:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) = u(k-1) + \sum_{i=1}^2 x_i(k) O_i^0(k) \quad (22)$$

BP 神经网络的输入层变量 O_i^0 为:

$$\begin{cases} O_1^0 = y_{in}(k) \\ O_2^0 = y_{out}(k) \\ O_3^0 = y_{in}(k) - y_{out}(k) \end{cases} \quad (23)$$

BP 神经网络的前向算法:

神经网络输入层到隐含层的诱导局部域, 和隐含层的输出分别为 u_j^1 和 O_j^1 :

$$\begin{cases} u_j^1(k) = \sum_{i=0}^2 w_{ji}^1(k) O_i^0(k) \\ O_j^1(k) = \varphi(u_j^1(k)) \quad j = 1, 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (24)$$

取 $\varphi(k) = \tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (25)$

神经网络隐含层到输出层的诱导局部域, 和输出层的输出分别为 u_i^2 和 O_i^2 :

$$\begin{cases} u_i^2(k) = \sum_{j=0}^5 w_{ij}^2(k) O_j^1(k) \\ O_i^2(k) = f(u_i^2(k)) \end{cases} \quad (26)$$

令 $O_1^2(k) = K_p, O_2^2(k) = K_i$, 即输出节点对应 PI 的可调参数。由于这两个参数不能为负值, 则输出层的激活函数取非负的 sigmoid 函数, 即:

$$f(k) = \frac{1}{2}(1 + \tanh x) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (27)$$

神经网络反传算法的定义代价函数为:

$$\varepsilon(k) = \frac{1}{2}e(k)^2 = \frac{1}{2}(y_{in}(k) - y_{out}(k))^2 \quad (28)$$

$$\omega_{ji}(k+1) = \omega_{ji}(k) + \Delta\omega_{ji}(k) \quad (29)$$

$$\Delta\omega_{ji}(k) = -\eta \frac{\partial \varepsilon(k)}{\partial w_{ji}(k)} + \alpha \Delta\omega_{ji}(k-1) =$$

$$\eta \left(-\frac{\partial \varepsilon(k)}{\partial u_j(k)} \right) \frac{\partial u_j(k)}{\partial w_{ji}(k)} + \alpha \Delta\omega_{ji}(k-1) =$$

$$\eta \delta_j(k) \frac{\partial u_j(k)}{\partial w_{ji}(k)} + \alpha \Delta\omega_{ji}(k-1) \quad (30)$$

式中: η - 学习效率; α - 算法改进引入的动量因子。

通过对 δ_j 使用链式规格可得出:

(1) 误差反向传播时在输出层与隐含层之间权值调整为:

$$\begin{cases} \delta_i^2(k) = e(k) \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial y_{out}(k)}{\partial \Delta u(k)} \right) x_i(k) f'(u_i^2(k)) \\ \Delta\omega_{ij}^2(k) = \eta \delta_i^2(k) O_j^1(k) + \alpha \Delta\omega_{ij}^2(k-1) \end{cases} \quad (31)$$

同理, 可得隐含层与输入层之间权值调整为:

$$\begin{cases} \delta_j^1(k) = \varphi'(u_j^1(k)) \sum_{i=1}^2 \delta_i^2(k) w_{ij}^2(k) \\ \Delta\omega_{ji}^1(k) = \eta \delta_j^1(k) O_i^0(k) + \alpha \Delta\omega_{ji}^1(k-1) \end{cases} \quad (32)$$

代入前向算法中, 修正输出 K_p 和 K_i 。

(2) 编写 S-Function 函数时, 需注意激活函数 $\varphi(k)$ 和 $f(k)$, 变量取值范围在 $[-1 \ 1]$ 时函数的线性度较好, 但本研究的神经网络系统输入值均较小 (由于单位换算均在 10^{-3} 数量级), 所以需采取归一化, 在程序中对神经网络的输入进行归一化处理。另外, 取激活函数 $f(k)$ 的输出值范围在 $[0 \ 1]$ 之间, 所以需同时对输出的 K_p 和 K_i 进行反归一化处理。

4 仿真与试验研究

负载模拟装置可以实现对流量或压力的控制。本文主要论述的是流量控制过程, 恒压变量泵工作区域, 该阶段泵出口的压力变化很小, 但流量变化很大。

4.1 仿真研究

考虑到非线性系统的时变性和干扰性, 本研究对系统流量控制进行多组试验, 分别以阶跃和正弦信号为输入, 记录动态响应。分别用 Matlab 基于 BP 神经网络

的 PID 控制系统进行阶跃信号仿真, 快速寻找到合适的 K_p 和 K_i 参数值; 然后将得到的 K_p 和 K_i 参数值设定到常规 PID 控制中, 对阶跃和正弦信号进行验证。采用控制带宽为 1 Hz 的正弦谱进行测试, 鉴于系统最大流量为 105 L/min, 正弦流量指令曲线为: $Q(t) = 52.5 \times [\sin(2\pi t) + 1.5\pi] + 52.5$ 。

仿真主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真主要参数

符号	单位	数值	符号	单位	数值
A_1	m^2	1.13×10^{-4}	K_A	A/V	0.1
A_{11}	m^2	3.8×10^{-4}	K_e	N/A	393.68
A_{12}	m^2	2×10^{-4}	K_{i3}	N/m	1.67×10^5
A_v	m^2	2.82×10^{-5}	K_{v1}	N/m	5.5×10^4
B_{11}	$N \cdot m/s$	2×10^{-5}	K_{i2}	N/m	1.97×10^5
B_{12}	$N \cdot m/s$	2×10^{-5}	n	r/min	4 500
B_{13}	$N \cdot m/s$	60	P_s	P_a	2.10×10^7
C_{st1}	$m^5/(N \cdot s)$	5×10^{-12}	V_{e1}	m^3	5.65×10^{-6}
C_v	—	0.62	V_{e2}	m^3	3.92×10^{-4}
d_3	m	0.012	X_{v20}	m	0.003
E_{y1}	N/m	1.2×10^9	X_{tmax}	m	0.017 2
E_{y2}	N/m	1.2×10^9	Z	—	9
J_i	$kg \cdot m^2$	2.4×10^{-3}	R	m	0.035

利用 Matlab 进行仿真, 基于 BP 神经网络的 PID 控制 K_p 变化值如图 4 所示。

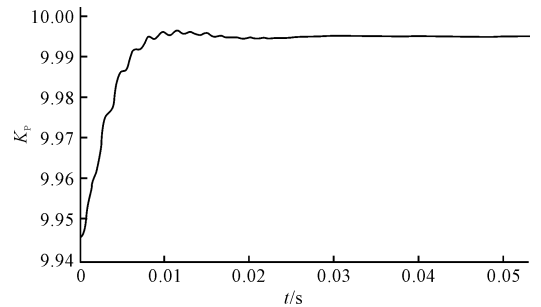


图 4 基于 BP 神经网络的 PID 控制 K_p 变化值

图 4 中, 初始阶段系统由静到动, K_p 值快速随系统调整, 在 0.02 s 内值稳定, 可得到 K_p 值稳定在 10 附近。

利用 Matlab 进行仿真, 基于 BP 神经网络的 PID 控制 K_i 变化值如图 5 所示。

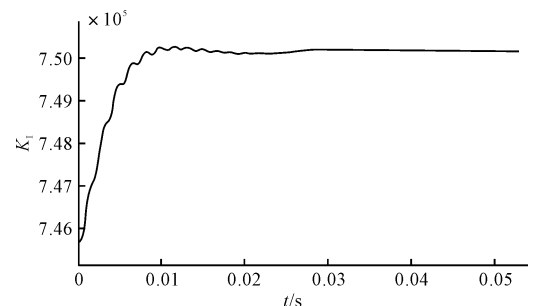


图 5 基于 BP 神经网络的 PID 控制 K_i 变化值

图 5 中, K_I 值的变化趋势与 K_p 类似, K_I 值稳定在 7.5×10^5 附近。

将仿真得到的 K_p 和 K_I 值代入常规 PID 控制系统, 并利用 Matlab 进行流量控制仿真, 基于 PI 的阶跃信号流量控制仿真如图 6 所示。

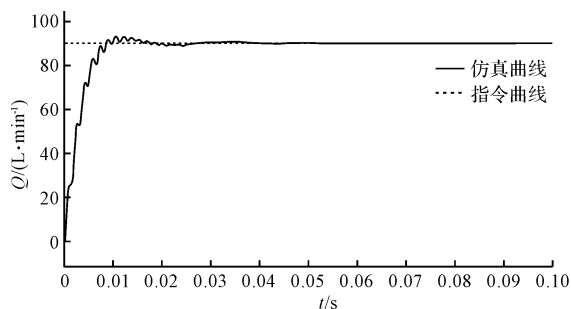


图 6 基于 PI 的阶跃信号流量控制仿真

图 6 中, 阶跃控制曲线在 0.02 s 达到稳态值, 响应速度快, 超调小。

基于 PI 的正弦信号流量控制仿真如图 7 所示。

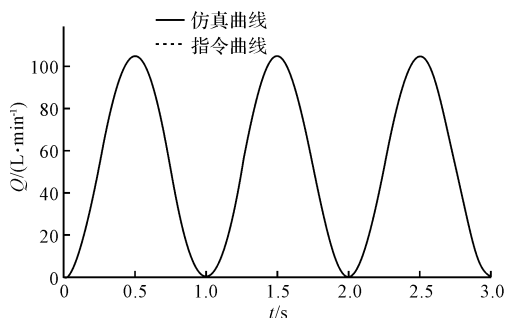


图 7 基于 PI 的正弦信号流量控制仿真

图 7 中, 小流量附近跟踪曲线不光滑, 因为在小流量处泵出口压力很大, 直驱比例阀节流前后压差大, 流量压力的非线性关系明显, 造成曲线不光滑, 但流量的波动范围很小, 满足工程中控制精度的要求。可见, 基于 BP 神经网络的 PID 流量控制方法有效地寻找到了 PID 的控制器参数 K_p 和 K_I 。

4.2 试验及结果分析

本文根据能源试验系统及仿真模拟的设计思路, 搭建试验平台进行测试, 即利用基于 BP 神经网络的 PID 控制系统快速寻找到 K_p 和 K_I 参数值, 然后用常规 PID 控制系统进行验证。

试验测得 K_p 值稳定在 25 附近, K_I 值稳定在 10×10^5 附近。通过测试发现, 控制系统对 K_p 的参数值变化不是很敏感, 而对 K_I 的参数值变化比较敏感。试验测得 K_I 值与仿真测得值存在差异, 原因在于实际试验

系统与仿真模型存在差异, 仿真模型中含有未建模的动态; 且仿真参数为理论数值, 与试验参数有区别, 如环境温度变化对油液的影响等。

将找到的 K_p 和 K_I 值代入常规 PID 控制系统中, 进行流量控制测试, 基于 PI 的阶跃信号流量控制如图 8 所示。

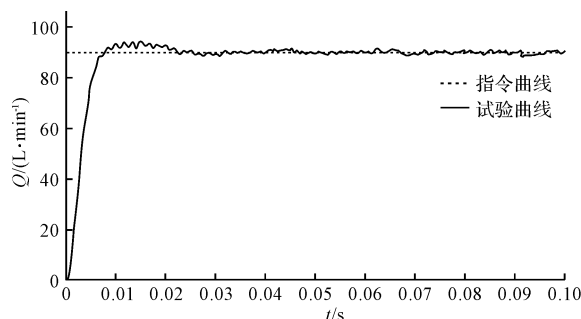


图 8 基于 PI 的阶跃信号流量控制图

基于 PI 的正弦信号流量控制如图 9 所示。

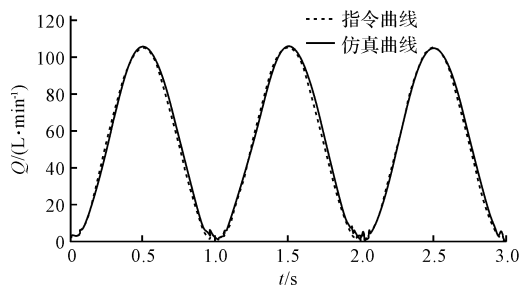


图 9 基于 PI 的正弦信号流量控制图

对比试验测试图与仿真图可知: (1) 由于环境中噪声的影响, 试验曲线有小幅波动曲线不光滑; 阀门内部元件间有摩擦和间歇性; 阀门存在死区, 试验曲线在稳定值附近有漂移; (2) 试验的阶跃响应曲线在 0.02 s 达到稳态, 响应速度快, 正弦曲线有小量的相移, 但相移很小, 满足工程中控制精度的要求。

5 结束语

本文设计了液压能源系统负载模拟装置, 结合神经网络控制, 给出了基于 BP 神经网络的 PID 控制方法; 利用计算机快速寻找合适的 PID 控制器参数值, 并通过 Matlab 仿真与试验验证了该方法; 推导了液压能源系统负载模拟装置的数学模型, 在系统中采用直驱比例阀通过节流方式, 来控制系统流量或压力进行负载模拟。

该系统设计方案与模型推导过程, 对飞机液压能

源系统地面负载模拟半物理试验具有参考价值;系统控制中,在小流量附近曲线不是很光滑,主要是由于系统的非线性和时变性造成的。后续研究将采用自适应控制和智能控制,对传统的 PID 控制进行改进,以在一定程度上提高系统的动态性能。

参考文献 (References):

- [1] 欧阳小平,杨华勇,郭生荣. 现代飞机液压技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2016.
- [2] 江辉军,安玉娇,袁朝辉. 飞机液压系统流量压力负载模拟[J]. 航空学报,2011,32(7):1357-1370.
- [3] LEONID A I, VLADIMIR S M. On the effect of correcting the electro-hydraulic servo drive on the dynamic characteristics of the “servo rive-mass” system of an airplane[J]. **IF-AC-PapersOnLine**,2015,48(11):640-644.
- [4] 李运华. 近代电液伺服系统中某些非线性控制问题的研究[D]. 西安:西安交通大学机电工程学院,1994.
- [5] 符江锋. 航空柱塞泵性能仿真研究[D]. 西安:西北工业大学自动化学院,2010.
- [6] KUMAR S, BERGADA J M. The effect of piston grooves performance in an axial piston pumps via CFD analysis[J].

International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 1(66):168-179.

- [7] 罗文俊. 飞机液压能源模拟系统压力脉动分析[D]. 西安:西北工业大学自动化学院,2012.
- [8] 江辉军. 某型飞机液压能源模块原理验证试验系统研究[D]. 西安:西北工业大学自动化学院,2010
- [9] 陈 刚. 不确定非线性系统的鲁棒自适应控制研究[D]. 杭州:浙江大学工业控制技术国家重点实验室先进控制研究所,2006.
- [10] KUDINOV Y I, KOLESNIKOV V A, PASHCHENKO F F, et al. Optimization of fuzzy PID controller's parameters[J]. **Procedia Computer Science**, 2017(103):618-622.
- [11] 张泽旭. 神经网络控制与 Matlab 仿真[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.
- [12] 邱红岗. 基于 BP 神经网络的电动舵机动态加载控制方法研究[D]. 西安:西北工业大学自动化学院,2007.
- [13] 欧阳小平,赵天菲,李 锋. 飞机液压系统流量负载模拟器的变速积分 PI 控制[J]. 浙江大学学报,2017,51(6):1111-1117.
- [14] 杨 平,邓 亮. PID 控制器参数整定方法及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2016.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

刘 旋,梁 娜,袁朝辉. 飞机液压能源模块负载模拟装置试验研究[J]. 机电工程,2019,36(11):1153-1159.

LIU Xuan, LIANG Na, YUAN Zhao-hui. Load simulation system about hydraulic energy system for an aircraft[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(11):1153-1159.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>