

基于 PID 技术的液压马达测控加载系统设计

叶健博

(浙江省应急管理数字与技术中心, 杭州 310007)

摘要: 工业自动化和智能化的不断发展, 使得液压系统的应用变得日益频繁, 其中液压马达的性能直接影响整个系统的效率和可靠性; 为此, 研究首先以数学建模的方式对液压马达测控加载系统进行了建模, 其次, 以比例-积分-微分控制技术为基础, 引入了遗传算法和径向基函数进行参数整定优化, 最终提出了一种新型测控系统模型; 实验结果表明, 该新模型在中心值为 0.45, 宽度参数为 0.3 和权值参数为 -0.1 时的性能最佳; 其响应时间最短为 1.2 秒, 平均振幅为 8 mm, 频率与原系统基本一致; 其马达转速最快可达 1 470 转/分钟, 测控误差最小为 0.49 mm, 系统响应时间最快为 0.25 秒, 超调量最低为 2.87%; 由此可知, 该新测控模型能显著提高液压马达的动态性能和稳定性; 研究旨在通过改进现有的控制算法, 以提升液压马达的测控精度和响应速度, 为该领域的技术发展, 提供一种新的方向。

关键词: 比例-积分-微分; 遗传算法; 径向基函数; 液压马达; 测控

Measurement and Control Loading System of Hydraulic Motor Based on PID Technology

YE Jianbo

(Zhejiang Emergency Management Digital and Technology Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: With the continuous development of industrial automation and intelligence, it makes the application of hydraulic system become more and more frequent, in which the performance of a hydraulic motor directly affects the efficiency and reliability of the whole system. For this reason, firstly, the hydraulic motor measurement and control loading system is carried out the mathematical modeling; Secondly, based on proportional-integral-derivative (PID) control technology, the genetic algorithm (GA) and radial basis function (RBF) are introduced to optimize the parameter rectification; Finally, a new measurement and control system model is proposed. Experimental results show that this new model has the best performance, with a center value of 0.45, a width parameter of 0.3 and a weight parameter of -0.1. The shortest response time is 1.2 s, the average amplitude is 8 mm, and the frequency is basically the same as that of the original system. The fastest motor speed of the system reaches up to 1 470 rpm, with a minimum measurement and control error of 0.49 mm, a fastest system response time of 0.25 s, and a minimum overshoot of 2.87%. It can be seen that the new measurement and control model can significantly improve the dynamic performance and stability of the hydraulic motor. The study aims to improve the measurement and control accuracy and response speed of hydraulic motors by improving the existing control algorithms, and to provide a new direction for the technological development in this field.

Keywords: PID; GA; RBF; hydraulic motors; measurement and control

0 引言

在今天, 工业自动化的持续进步使得精确的流体动力控制系统尤为关键, 液压马达作为许多自动化系统的核心部分, 其性能优化一直是研究的重点^[1]。而液压马达的测控精度和响应速度是评估其性能的关键指标。传统的比例-积分-微分控制 (PID, proportional integral derivative) 虽广泛应用于这些系统中, 但在处理高度非线性的动态系统时常常表现不佳, 特别是在精确度和抗干扰能力上存在明显不足^[2]。为了解决这些问题, 现有研究者们提出了各种改进的 PID 技术, 如模糊 PID 和自适应 PID 等, 以期提高系统的整体性能^[3-4]。刘永等人针对教学与科研实验开放性、扩展性的需求问题, 设计、开发了变转速液压测控实验台。

采用了工控机和 LabVIEW 软件开发了实验系统的硬件和软件部分, 并以 PID 控制法设计了液压马达转速闭环系统。实验结果表明, 该系统在目标转速阶跃变化和负载恒定情况下, 能够较好地反映目标值变化^[5]。然而, 该系统在处理非线性负载变化时, 表现出一定的滞后性。郑智剑等人尝试搭建一套大功率液压马达型式试验台, 对其硬件系统、测控系统和测试软件进行了分别设计, 从而达到既定试验压力和流量。实验结果表明, 该新系统有多个低速大扭矩液压马达和摆线液压马达的总效率和最低转速恰好符合行业最低标准要求, 产品质量有待提升^[6]。但在极端工况下, 其控制精度和稳定性有待提升。耿冬妮等人尝试开发了一种通过测功机进行负载控制的液压马达性能测试平台, 该

收稿日期: 2024-05-28; 修回日期: 2024-06-21。

作者简介: 叶健博(1987-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 叶健博. 基于 PID 技术的液压马达测控加载系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 125-131, 139.

测控机接收来自工业计算机的控制信号,以调节发电机的内部电流,从而调节液压马达负载。实验结果表明,该新平台的测试数据结果和趋势与制造商提供的参考数据一致,符合实验设计规范^[7]。尽管测试数据和趋势与参考数据一致,但在负载变化剧烈时,系统的响应速度有所下降。王明锦等人为了研究液压机工作时的动态特性,以其电液伺服比例阀控液压马达速度控制系统为研究对象,结合 LabVIEW 软件和模糊 PID 控制法后设计了一种液压马达驱动的液压机。实验结果表明,模糊 PID 控制法在该液压机的马达转速控制上,响应时间明显比常规 PID 控制策略更短,具有更小的超调量和更好的追踪性能,控制效果明显优于常规的 PID 控制方法^[8]。但该方法对参数调整的依赖性较高,适用范围有限。

百家赞等人为了提升参数不确定的连续搅拌釜式反应器使用性能,研究团队在结合自耦 PID 技术后,提出了一种受控误差系统。实验结果表明,该系统中自耦 PID 控制具有一定的有效性,但在动态负载变化下,控制效果不确定^[9]。陈红红等人发现现有的电机滑模变结构同步控制存在超调量较大、调节耗时长、导致滑模变结构脉动过大的问题。因此,研究团队在结合 PID 技术后,提出了一种抗积分饱和算法。实验结果表明,该算法的超调量较小,调节耗时短,滑模变结构的脉动较小,响应速度得到提高,可以较好控制电机的滑模变结构波动^[10]。在智能化液压系统领域,PID 技术也得到了相应的应用。聂世雄为了提升电磁发射系统的推力精确度,该学者在结合 PID 技术和滑模控制后对液压平衡水下发射系统的非线性动力模型进行了推导,最终提出了一种新型控制算法。实验结果表明,该算法的反馈线性化与 PID 的复合控制最适合水下电磁发射,精度得到了极大程度提升^[11]。赵慧等人发现双叶片液压被动柔顺回转关节在外界干扰下,容易发生碰撞回弹现象。为了实现对关节的主被动联合柔顺控制,研究团队结合模糊 PID 技术后,提出了一种新控制器。实验结果表明,该控制器能够减小回转关节输出转角恢复后的稳态误差,提高关节与外界接触时的安全性^[12]。但在复杂干扰条件下,控制精度有待提升。

现有文献中的研究集中于利用 PID 技术及其变种技术,如模糊 PID 和自耦 PID 来改进液压系统的动态控制性能,实现更快的响应时间、更低的超调量和更优的追踪性能。虽然这些方法能够提高控制的灵活性和适应性,但往往依赖于精确的系统模型和复杂的参数调整,使得在实际工业环境中的应用受到限制。而智能化优化算法的崛起,使得诸多领域受益颇多径向基函数(RBF, radial basis function)作为一种强大的非线性函数逼近方法,能够有效建模复杂系统的动态特性,提供精确的预测和控制。然而,RBF 网络在优化过程中容易陷入局部最优解,且对初始参数敏感,限制了其应用效果。为了解决这些问题,可以引入遗传算法(GA, genetic algorithm)进行全局优化。GA 通过模拟自然选择和遗传机制,能够在广阔的搜索空间中找到最优的 RBF 网络参数组合,从而显著提高液压系统 PID 控制的

性能和稳定性,减少对精确系统模型的依赖,简化参数调整过程,适应复杂多变的工业环境,提高系统的响应速度和稳定性,减少能耗,并提高生产效率。

1 马达试验台测控加载系统数学模型搭建

1.1 变量泵阀控缸加载系统

马达试验台测控加载系统是一种高度自动化的系统,用于评估和测试各种电机和马达的性能^[13]。这种系统整合了先进的控制技术、智能化软件以及精密的机械装置,能够在模拟实际工作条件下对马达进行全面测试。其中变量泵阀控缸加载系统是一种高度自动化的液压控制系统,广泛应用于各种机械和工程设备的测试与模拟中。该系统通过调节可变排量泵的输出,精确控制液压缸的行动,从而实现负载的精确控制^[14]。变量泵变量机构的控制原理图如图 1 所示。

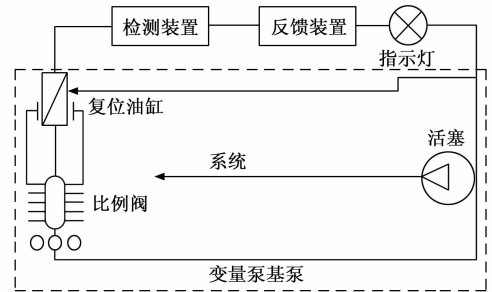


图 1 变量泵变量机构的控制原理图

由图 1 可知,当比例阀接收到外部信号时,阀芯移动改变阀口大小,从而调节变量泵中变量缸活塞的位移。随后,通过反馈装置检测到的位移信号被反馈回系统,并将反馈信号与给定信号的偏差作为新的输入信号送至比例阀。这个过程将持续进行,直到两个信号之间的偏差为零。活塞将被调整到指定的角度,从而实现对排量的精确控制。其中比例阀是驱动整个变量泵的核心,其组成部分包括了控制器、比例放大器、比例伺服阀、液压缸、液压源、反馈装置和负载组成^[15-16]。首先输入给定信号,按顺序由控制器、比例放大器和比例伺服阀进行信号读取和定位。期间,引入液压源进行调控,同时报告位置反馈结果至初始控制器,若无误后,传递至负载。过程中负载压力和负载流量的相关数学计算式如式(1)所示:

$$\begin{cases} n = \frac{A_2}{A_1} = \frac{q_2}{q_1} \\ q_L = \frac{q_1 + q_2}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, n 表示有无杆腔的面积比值; A_1 和 A_2 分别表示无或有杆腔的面积; q_1 和 q_2 分别表示无或有杆腔的流量; q_L 表示负载流量值。液压缸和比例阀的输出功率如式(2)所示:

$$\begin{cases} N_1 = p_1 q_1 - p_2 q_2 \\ N_2 = p_L q_L \end{cases} \quad (2)$$

式中, N_1 和 N_2 分别表示液压缸输出功率和比例阀的输出功率; p_1 和 p_2 分别表示无或有杆腔的压力值; p_L 表示负载压

力。滑阀的流量方式可根据活塞的伸缩程度进行调控，指导比例阀的线性流量系数更改，此时滑阀的流量方程如式 (3) 所示：

$$q_L = K_q x_v - K_c p_L \quad (3)$$

式中， K_q 和 K_c 分别表示流量增益和流量压力系数； x_v 表示阀芯位移距离。当活塞杆伸出时，此时为无杆模式，其腔流量为 q_1 ；有杆腔流量为 q_2 。二者的计算公式如式 (4) 所示：

$$\begin{cases} q_1 = C_{ip}(p_1 - p_2) + C_{ep}p_1 + A_1 \frac{dx_p}{dt} + \frac{V_1}{\beta_c} \times \frac{dp_1}{dt} \\ q_2 = C_{ip}(p_1 - p_2) + C_{ep}p_2 + A_2 \frac{dx_p}{dt} + \frac{V_2}{\beta_c} \times \frac{dp_2}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式中， C_{ip} 和 C_{ep} 分别表示内泄露和外泄露的系数值； V_1 和 V_2 分别表示无或有杆腔的容积； x_p 表示活塞的位移距离； β_c 表示有效提及弹性模量大小。此外，液压缸的力均相同，因此无论活塞杆是做正向或是反向运动，此时力平衡方程都可表示如式 (5) 所示：

$$A_p p_L = m_l \frac{d^2 x_p}{dt^2} + B_p \frac{dx_p}{dt} + K x_p + F_L \quad (5)$$

式中， m_l 表示负载质量； B_p 表示粘性阻尼系数； K 表示负载弹簧刚度； F_L 表示外负载力。结合以上 5 个公式，研究组合后进行拉氏变换，此时得到的阀控非对称缸传递函数的计算公式如式 (6) 所示：

$$X_p = \frac{K_q X_v - \frac{K_{ce}}{A_p^2} \left(1 + \frac{\epsilon V_0}{\beta_c L} s\right) F_L}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (6)$$

式中， ω_h 表示液压的既定频率； ζ_h 表示液压的总阻尼比； V_0 表示总压缩体积； X_v 表示假设的输入量； A_p 表示活塞的有效作用面积； ϵ 表示系数； K_{ce} 表示总流量和总压力的系数； L 表示活塞杆的最大行程距离。通过该式可对现有的大多数阀控系统进行全面考虑，包括其粘度、弹性和惯性等负载因素，或是发生泄漏以及膨胀压缩等客观因素等。

1.2 效能传递框架

然而实际的液压控制测量过程中，这些因素会单一或成双出现，并不会全部显露^[17]。此次考虑到惯性负载的影响较大，因此在忽略弹性负载后，研究以式 (6) 的方式，代入液压固有频率值和阻尼比进行运算，便可计算出最佳的变量泵阀控的性能值。研究选择市面上较为热门的丹佛斯型号为 PVG32 的比例阀，设置其频宽和固有频率后，此时阀控缸中比例阀的数学模型如式 (7) 所示：

$$K_{sv} = \frac{Q_0}{I} \quad (7)$$

式中， Q_0 表示比例阀的空载流量大小； I 表示比例阀的额定电流值； K_{sv} 表示比例阀流量的增益值。此外，信号采集装置接收来自位移传感器的电压信号，该传感器将位移信号转换为电压信号，是构成闭环控制系统的关键反馈装置。此时的位移传感器数据模型公式如式 (8) 所示：

$$K_{f2} = \frac{U_f}{X_p} \quad (8)$$

式中， K_{f2} 表示位移传感器的增益值； U_f 表示传感器输出电压值； X_p 表示活塞的位移值。另外，比例放大器好比一个比例环节，它作为一个将阻抗转换为高输出的模型。其计算公式如式 (9) 所示：

$$K_{a2} = \frac{I}{U} \quad (9)$$

式中， K_{a2} 表示放大系数； U 表示比例放大器的输入电压。由以上各环节的数学模型，研究总结得出了液压马达测控加载系统中变量泵阀控缸系统的效能传递框架，如图 2 所示。

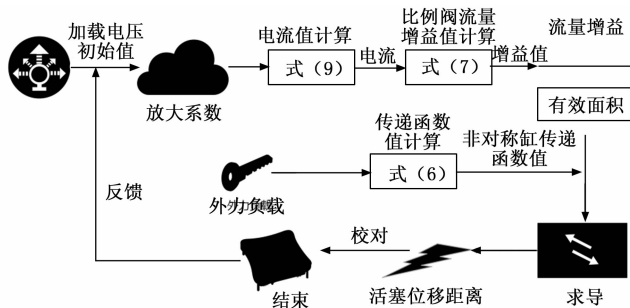


图 2 变量泵阀控缸系统的效能传递框架图

由图 2 所示，首先输入加载电压的初始值，根据预设的放大系数，利用公式 (9) 计算出相应的电流值。然后，将此电流值代入式 (7) 中，以计算出比例阀流量的增益值。完成这一步骤后，接下来需要将得到的流量增益值与活塞的有效作用面积进行比较。同时，外部负载力通过公式 (6) 来计算阀控非对称缸的传递函数值。将比较所得的比例值和阀控非对称缸的传递函数值结合起来，并对其进行求导处理，从而可以计算出活塞的位移距离。此外，计算出的位移距离将与位移传感器的增益值进行匹配校对，确保数据的精准性。之后，将校对后的结果反馈到系统初始设置中，以便进行进一步的调整和优化。这一闭环传递形式的应用，使得在多变因素的影响下，能够对液压马达测控加载系统进行更为精确的定位与测试，从而显著提升测试的精度和有效性。这种方法不仅提高了系统的响应速度，而且增强了系统对复杂环境变化的适应能力，是实现高效率 and 高质量测试的关键技术之一。

2 基于改进 PID 的液压马达测控加载系统设计

2.1 改进 PID

在构建完成液压马达测控加载系统中变量泵阀控缸系统的效能传递框架后，考虑到实际测控过程中不仅有粘性阻尼、弹性负载等客观因素，还存在噪音、信号干扰等非线性影响因素^[18]。因此，研究引入了 PID 技术进行动态优化，以加强系统的稳定性。PID 首先将输入的期望值与实际输出值进行误差对比，将误差数值作为真实输入，经比例、积分和微分三渠道进行分别运算。完成后，分别经控制单元进行数据集中，并输出集中控制量。然后将该集中控制量传输至被控对象，得出最终的系统输出值。最后，再将最终输出值与真实输入值进行误差对比，若此时误差为 0，则结束控制。若此时的误差非 0，则继续进行以上 PID 控制

操作,直到误差为 0 为止。PID 技术的数学表达式如式 (10) 所示:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

式中, K_p 表示比例系数,表示控制器根据当前偏差大小调整输出的幅度; K_i 表示积分系数,表示控制器对偏差随时间的累积进行调整; K_d 表示微分技术,表示控制器根据偏差的变化率进行调整。 $e(t)$ 表示当前时刻的偏差; $u(t)$ 表示当前时刻的控制输出; τ 表示积分变量; $\frac{de(t)}{dt}$ 表示偏差 $e(t)$ 对时间的导数。由该式可知,式中 K_p 、 K_i 和 K_d 三类系数值得选取,直接关乎 PID 控制器的控制性能。因此,选取合适的系数整定方法尤为重要。同时考虑到液压马达测控加载系统是一个动态且复杂的系统,因此,研究着手于智能控制算法中的 RBF。RBF 是一种用于函数逼近和分类的前馈神经网络,通过径向基函数作为激活函数来实现非线性映射。相比于其他方法,其强大的非线性建模能力,可以更精确地逼近复杂系统的动态特性,从而提高 PID 控制的性能和响应速度。RBF 的一阶和二阶学习计算式如式 (11) 所示:

$$\begin{cases} \Delta w_{ij} = \eta \cdot h_j \cdot (t_i - y_i) \\ \Delta v_j = \eta \cdot (t_i - y_i) \cdot \varphi(net_j) \end{cases} \quad (11)$$

式中, Δw_{ij} 表示输入层与隐藏层之间权重 w_{ij} 的更新量; η 表示学习率; h_j 表示隐藏神经元 j 的输出值; t_i 表示训练样本 i 的输出值; y_i 表示神经网络对训练样本 i 的输出。 Δv_j 表示隐藏层与输出层之间权重 v_j 的更新量; $\varphi(net_j)$ 表示隐藏神经元 j 的激活函数导数,其中 φ 表示激活函数; net_j 表示神经元的输入。虽然 RBF 能够对 PID 的系数进行有效的整定,但不能实时进行调整。复杂的噪声和信号干扰使得工况波动,导致选定参数不是最优。因此,研究引入了 GA 对 RBF 进行改进。此时 RBF 网络用于处理输入输出映射,而 GA 则用于寻找使 RBF 网络性能最优的参数组合。针对 RBF 隐藏层中的中心值、宽度和权值。GA 参数的选取中种群大小设置为 50,以保证足够的解搜索空间;交叉概率设置为 80,从而有助于保持种群的多样性;变异概率设置为 0.01,从而避免算法陷入局部最优解;最大迭代次数设置为 100,方便算法快速收敛。确定 GA 参数后,首先将 GA 生成的个体作为 RBF 神经网络的输入,初始化一组 RBF 网络的参数。其次,使用 GA 选择和交叉这些参数,以优化 RBF 网络的性能。然后通过适应度函数评估 RBF 网络的性能,并选择性能较好的参数,重复上述过程,直到达到预定的优化标准或迭代次数。优化后的中心值计算如式 (12) 所示:

$$c_i^{new} = c_i + \eta_c \cdot (x_i - c_i) \quad (12)$$

式中, η_c 为学习率; x_i 为输入数据。利用 GA 确定初始宽度后,通过 RBF 的训练过程优化宽度参数,使网络能够更好地适应数据分布,优化后的宽度计算式如式 (13) 所示:

$$\sigma_i^{new} = \sigma_i + \eta_\sigma \cdot \frac{(x_i - c_i)^2}{\sigma_i} \quad (13)$$

优化后的权值权值相关计算式如式 (14) 所示:

$$\omega_i^{new} = \omega_i + \eta_\omega \cdot (y_i - \hat{y}_i) \cdot h_i \quad (14)$$

式中, y_i 和 \hat{y}_i 分别表示目标和网络的输出; h_i 表示隐藏节点的输出。

2.2 液压马达测控加载系统设计

此时结合 GA-RBF 的系数整定法后, PID 的三大系数更新式如式 (15) 所示:

$$\begin{cases} K_p(k) = K_p(k-1) + \Delta K_p = K_p(k-1) + \lambda e(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} x_c(1) \\ K_i(k) = K_i(k-1) + \Delta K_i = K_i(k-1) + \lambda e(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} x_c(2) \\ K_d(k) = K_d(k-1) + \Delta K_d = K_i(k-1) + \lambda e(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} x_c(3) \end{cases} \quad (15)$$

式中, λ 表示学习速率; $e(k)$ 表示控制误差; $x_c(1)$ 、 $x_c(2)$ 和 $x_c(3)$ 分别表示 PID 的三项输入值; $\partial \Delta u$ 和 ∂y 分别表示 PID 控制器的输出信号和输入信号; k 表示迭代次数。综上所述,最终的 GA-RBF-PID 液压马达测控加载系统框架如图 3 所示。

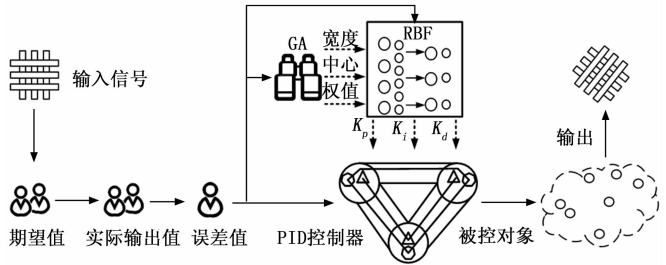


图 3 GA-RBF-PID 测控系统框架图

由图 3 可知,在该系统中,首先利用 GA 算法对 RBF 的参数进行优化。这一过程包括对 RBF 算法的宽度、中心值和权值等关键参数进行寻优,以确定最佳配置。参数优化完成后,系统会使用优化后的 RBF 神经网络对 PID 控制器的系数进行实时调整。通过这种方式, PID 控制器可以根据实时反馈动态调整其控制参数,从而显著提高液压马达测控加载系统的响应速度和控制精度。在此测控系统框架上,研究为了构建最终的液压马达测控加载系统,首先确定了三点设计要求。第一,液压马达测控加载系统需要通过数字仪表实时显示所测量的马达压力、转速等关键数据。第二,能够实时转换出被测试马达的效率曲线和排量曲线等主要特征数据变化结果。第三,存储记录的数据,若发现有异常的数据,则过载保护并自动报警。按照此要求,研究提出了最终的液压马达测控加载系统测控流程。如图 4 所示。

由图 4 可知,在启动试验前,应确认试验台系统的各个部件均处于正常工作状态。启动系统后,选定欲进行的试验项目并选择相应的预设参数;如有必要增加试验项目,可以手动在控制系统中输入参数。设置完成后,开始进行试验。试验中,数据采集系统将实时收集和数据处理数据,并

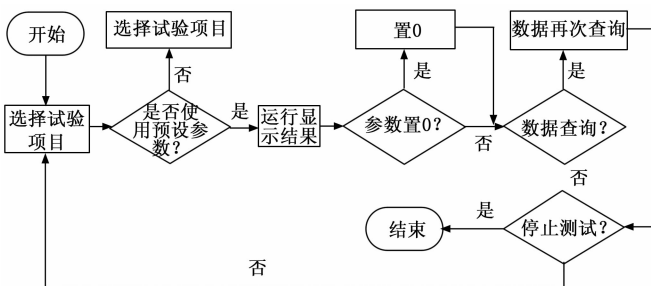


图 4 液压马达测控加载系统流程图

把处理结果发送到数字控制面板，以便操作员进行监控。记录必要的试验数据并制作出测试报告。根据需要，操作员可选择是否重置参数或查看数据。完成这些步骤后，可选择继续执行循环操作以进行下一项试验，或者退出试验系统。针对该液压马达测控加载系统的元件选择，研究以性能精度为主要考虑对象。选择上海力量科技 XLD-500 系列动力测量仪。该设备的测量范围最小值为 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，最高可达 $2500 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，准确度保持在 $\pm 0.5\%$ 。这样的配置不仅能够应对高扭矩的测试需求，也可以针对不同的测试电机选择适合的量程，从而优化测试精度。此外，该设备便于安装，并能持续测量正逆向扭矩，具备多项实用性能。压力传感器选择选用德国巴斯夫公司的 ZL58 系列压力传感器，其测量范围可调整从 -1 至 800 bar ，精度达到 $\pm 0.25\% \text{ F.S.}$ 。这款传感器具备优良的稳定性和高灵敏度，同时还具有重量轻、结构简洁的特点。流量传感器选择选用哈斯特公司的 TXR200 系列液体流量计，不同仪表口径对应不同的流量范围。以 DN30mm 口径为例，其流量范围在 $1 \sim 18 \text{ m}^3/\text{h}$ 。这种流量计适用于测量被测试马达的出口流量、进口流量以及泄漏流量。此外，它具备轻便、高复现性和反应迅速的特点。温度传感器采用贝尔科技生产的 HTS300 系列集成温度传感器，其测量温度范围为 -250 至 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ ，精度达到 $0.15\% \text{ F.S.}$ 。这款传感器拥有紧凑的结构设计，出色的电磁兼容性，以及高度的安全性和可靠性，非常适合对试验台温度进行实时监测。数据采集卡采用欧姆龙 PCI-1820 型数据采集卡，该卡使用 PCI 总线接口，采样频率为 $0 \sim 150 \text{ ks/s}$ ，分辨率提升至 14 位。该设备支持持续数据采集，并具备隔离保护功能，操作简便且性能稳定，能够充分满足液压马达试验台的技术需求。

3 马达试验台测控系统实验测试

3.1 测控系统性能测试

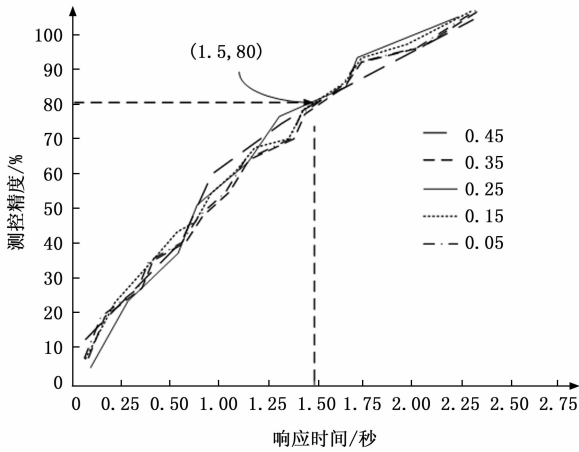
研究选择使用配备 Windows 10 操作系统和 8 GB 内存的计算机，并搭载了 Intel Core i5-6300 (2.30 GHz) CPU。采用耦合电机速度控制数据集 (CMS-CD, coupled motor speed control dataset) 和多变量工业过程模拟数据集 (MIP-SD, multivariable industrial process simulation dataset) 作为测试数据来源。其中 CMS-CD 包括多组电机在不同负载和环境条件下的速度控制响应数据，用于测试和验证 PID 控制器的调节性能。而 MIP-SD 通过模拟一个多输

入多输出的工业控制过程，提供了丰富的控制系统测试场景，适用于测试改进后的 PID 控制算法在复杂环境下的性能。最终这些采集到的数据都优先经过滤波处理，确保其准确性与可用性。究首以 RBF 神经网络的节点隶属函数中心值、宽度和网络权值三项参数为测试对象，以测控精度为指标绘制了 PSO-RBF 的阶跃响应曲线，测试结果如图 5 所示。图 5 (a) 为 RBF 神经网络隶属函数中心值参数的最优值响应结果，图 5 (b) 为 RBF 神经网络宽度参数的最优值响应结果，图 5 (c) 为 RBF 神经网络权值参数的最优值响应结果。由图 5 (a) 可知，RBF 在 0.45 中心值时最先达到共存点，时间为 1.5 秒，测控精度最高为 80%。在宽度参数测试中，仅当宽度参数为 0.3 时，RBF 的性能最佳，此时的响应时间为 1.27 秒，测控精度为 69%。由以上结果说明，较小的宽度使隶属函数更尖锐，只对接近中心值的输入产生非零输出，可能导致过拟合。较大的宽度使隶属函数范围更广，对于离中心值更远的输入也会产生非零输出，从而导致欠拟合。类似于宽度参数的特征表现，权值在 -0.1 时的性能最佳，此时的响应时间为 1.2 秒，测控精度为 75%。研究以位移量为指标，对最终测控算法模型进行消融测试。其中，PID 控制器的比例、积分和微分系数分别设置为 1.2、0.5 和 0.05；GA 算法的种群大小为 50，交叉概率为 0.8，变异概率为 0.01，最大迭代次数为 100；GA-RBF 的中心值初始范围为 $[0, 1]$ ，宽度初始范围为 $[0.1, 0.5]$ ，权值初始范围为 $[-1, 1]$ ；GA-RBF-PID 的参数同以上模型一致。测试结果如图 6 所示。

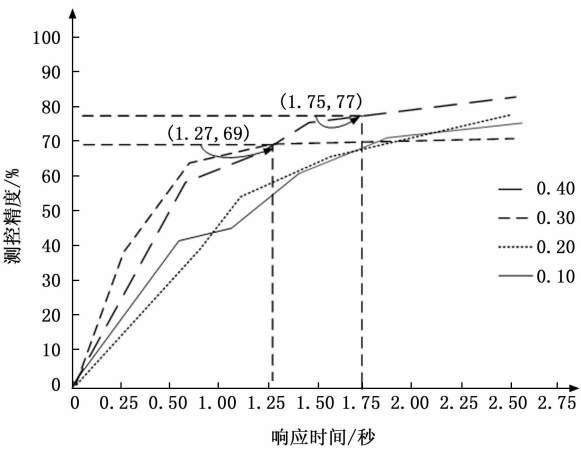
图 6 (a) 为 CMS-CD 数据集下的 4 种模块位移量测试结果，图 6 (b) 为 MIP-SD 数据集下的 4 种模块位移量测试结果。由图 6 可知，在 CMS-CD 数据集中，GA-RBF 的测试模块精度更优于其他两类控制模块，而研究所提的最终模型达到最大位移量的测试时间最短为 2.4 秒，相较于 GA 模块的时间缩短了近 50%。在 MIP-SD 数据集中，研究所提方法对测控加载系统进行了优化，其优化时间最快为 2.3 秒，相较于 GA 控制算法减少了 1.1 秒。由此可知，GA-RBF-PID 控制算法在马达试验数据的控制效果对比中，展现了更优的控制性能和较为稳定的控制结果。说明了研究所提方法对液压马达测控加载系统的效率提升具有显著的正向作用，可直接提升该系统的测控结果有效性和可靠性。

3.2 测控系统应用测试

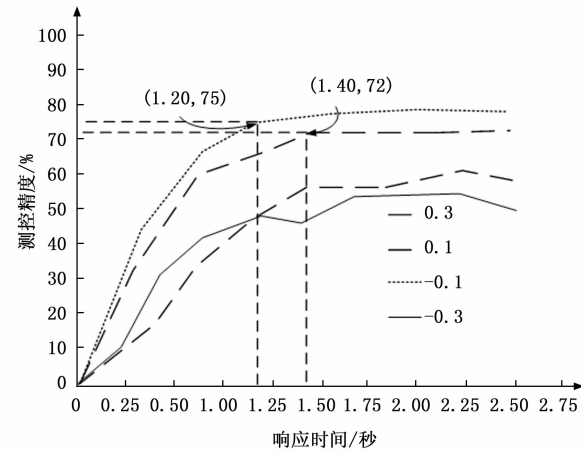
研究在该新型液压马达测控系统中输入了正弦信号，通过正弦信号的增速和减速不断重复变化，使得加速度，即斜率不断变化，因而可以更好地检测研究所提新系统的实际性能效果。设置正弦信号的频率为 0.2 Hz，幅值为 20 mm。引入同类型较为先进流行的几类控制算法进行对比。例如滑模变结构控制 (SMVSC, sliding mode variable structure control)、增益调度控制 (GSC, gain scheduling control) 和模糊逻辑控制 (FLC, fuzzy logic control)。其中 SMVSC 是一种非线性控制策略，通过设计滑模面和切换控



(a) 节点隶属函数中心值参数



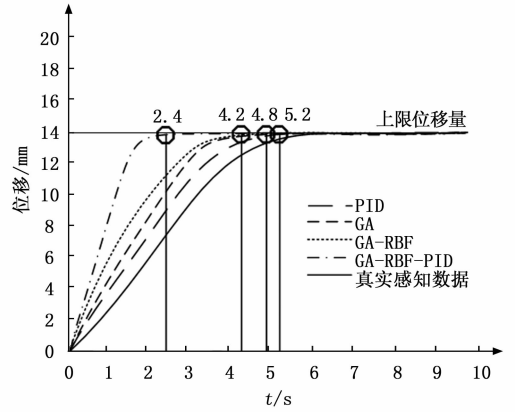
(b) 宽度参数



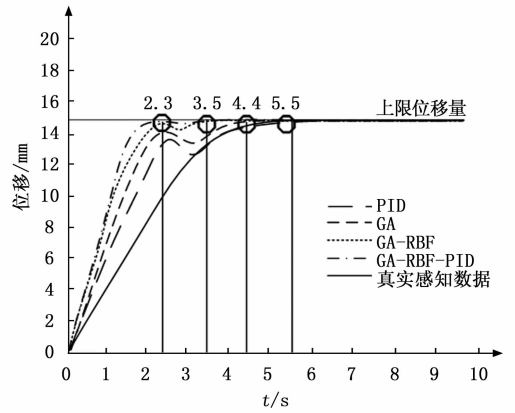
(c) 权值参数

图 5 RBF 函数的 3 种关键参数最优值响应测试

制律来实现系统的鲁棒控制。其滑模面斜率设置为 0.5，增益设置为 10。GSC 通过预先设计的增益调度策略，根据系统状态或外部条件的变化来调整控制增益。此次测试设置其初始增益为 3，最大增益为 8。FLC 通过模糊规则和模糊推理实现控制目标，具有处理非线性和不确定性强的系统



(a) CMS-CD 数据集测试结果



(b) MIP-SD 数据集测试结果

图 6 不同模块的位移量测试结果

的优势。其输入变量的隶属范围设置为 $[-1, 1]$ ，输出变量的隶属范围为 $[-10, 10]$ 。测试结果如图 7 所示。

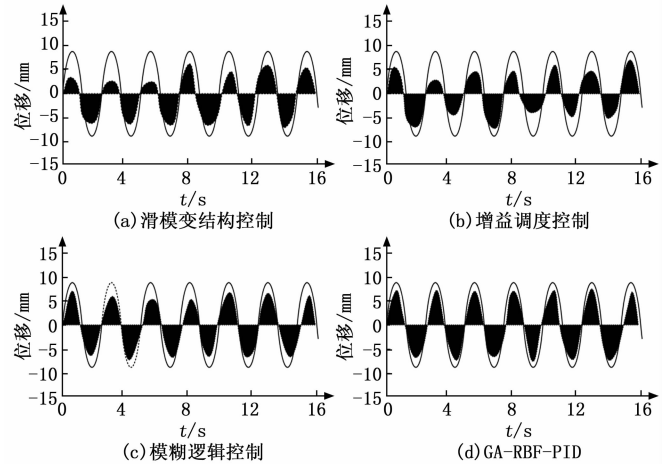


图 7 不同测控算法的正弦响应曲线对比图

图 7 (a) 为 SMVSC 测控算法的正弦曲线响应结果，图 7 (b) 为 GSC 测控算法的正弦曲线响应结果，图 7 (c) 为 FLC 测控算法的正弦曲线响应结果，图 7 (d) 为 GA-RBF-PID 测控算法的正弦曲线响应结果。由图 7 可知，当原系统的信号达到波峰时，此时 SMVSC 算法、GSC 算法

表 1 不同测控算法的指标测试结果

数据集	算法	马达转速 /rpm	测控误差 /mm	系统响应 时间/s	超调量 /%	正弦信号追踪 误差/mm	方波信号追踪 误差/mm	三角波信号 追踪误差/mm
CMS-CD	SMVSC	1420	0.82	0.31	5.42	0.70	0.95	0.85
	GSC	1390	1.13	0.32	6.33	1.10	1.25	1.20
	FLC	1380	1.17	0.34	6.58	1.15	1.30	1.25
	GA-RBF-PID	1450	0.55	0.25	3.81	0.50	0.65	0.60
MIP-SD	SMVSC	1440	0.98	0.30	4.81	0.85	1.10	1.00
	GSC	1410	1.24	0.31	6.38	1.20	1.35	1.30
	FLC	1380	1.12	0.33	5.42	1.05	1.25	1.15
	GA-RBF-PID	1470	0.49	0.26	2.87	0.60	0.70	0.65

和 FLC 算法的信号存在较大的延迟，没有达到波峰。且信号传递存在延迟，表明这些测控算法下的正弦信号没有得到更好地跟踪。相较于前三者算法，研究所提的 GA-RBF-PID 测控算法具有更优越的信号测控效果，其平均振幅为 8 mm，频率与原系统基本一致。说明了研究所提方法对液压马达测控加载系统的实际使用性能具有正向作用，且效果明显，稳定性较好。最后，研究以马达转速、测控误差、系统响应时间、超调量，以及正弦信号追踪误差、方波信号追踪误差和三角波信号追踪误差为指标，继续对以上 4 类算法进行了对比测试，测试结果如表 1 所示。

由表 1 可知，在马达转速指标中，GA-RBF-PID 算法分别在 CMS-CD 和 MIP-SD 数据集上达到了 1 450 rpm 和 1 470 rpm，相较于其他算法，平均提升了约 50 rpm。在测控误差指标中，GA-RBF-PID 算法在两个数据集中的误差仅为 0.55 mm 和 0.49 mm，远低于其他算法的误差水平，说明了其在保持测控精度方面的卓越性能。在系统响应时间指标中，研究所提算法比其他算法快 20 至 30 ms，这表明该算法能更迅速地对系统状态变化做出反应。在超调量指标上，GA-RBF-PID 算法最低可达 3.81% 和 2.87% 的超调量，能够有效减少系统在达到稳态前的波动性，使其稳定性增加。在正弦信号、方波信号和三角波信号的测试中，GA-RBF-PID 算法的误差最小分别为 0.6 mm、0.7 mm 和 0.65 mm，该数值均低于其他 3 类方法，说明了研究所提方法的鲁棒性更强。

4 结束语

液压马达的性能直接决定了整个液压系统的效率、精确性和可靠性。针对液压马达控制系统中存在的控制精度不足和响应速度慢的问题，研究在结合 PID 控制技术和 GA 算法、RBF 算法后，提出了一种新的测控系统模型。实验结果表明，当中心值为 0.45，宽度参数为 0.3，权值参数为 -0.1 时的 RBF 性能最佳，此时的响应时间最短为 1.2 秒。在 CMS-CD 数据集中，研究所提的最终模型达到最大位移量的测试时间最短为 2.4 秒，相较于 GA 模块的时间缩短了近 50%。在 MIP-SD 数据集中，研究所提方法对测控加载系统进行了优化，其优化时间最快为 2.3 秒，相较于 GA 控制算法减少了 1.1 秒。仿真结果表明，相较于其他 3 类较为

先进的算法，研究所提 GA-RBF-PID 测控算法具有更优越的信号测控效果，其平均振幅为 8 mm，频率与原系统基本一致。在多指标测试结果中，GA-RBF-PID 算法的马达转速最快可达 1 470 转/分钟，测控误差最小为 0.49 毫米，系统响应时间最快为 0.25 秒，超调量最低为 2.87%。综上所述，与其他先进控制算法相比，该新算法在马达转速、测控误差、系统响应时间及超调量方面均有显著改善。然而，该新系统模型的计算复杂性较高，需要进一步优化以适应更广泛的工业环境。未来的研究将集中在简化算法的同时保持其高性能，以及探索其在更多实际应用场景中的潜力和实用性。

参考文献：

- [1] 刘永, 谷立臣, 邹春龙. 平稳工况下液压马达瞬时转速波动与液压系统效率关联性实验研究 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (14): 51-54.
- [2] 田延豹. 轧钢冲压生产线模拟装置液压系统的设计 [J]. 自动化应用, 2023, 64 (19): 170-172.
- [3] 姚芳, 陈建钊, 丘冠新, 等. AVC 技术支持下的智能电网调控一体自动化建设 [J]. 微型电脑应用, 2023, 39 (12): 49-52.
- [4] WU W, GONG G, CHEN Y, et al. Performance analysis of electro-hydraulic thrust system of TBM based on fuzzy PID controller [J]. Energies, 2022, 15 (3): 959-960.
- [5] 刘永, 谷立臣. 变转速液压测控实验台的设计与开发 [J]. 机电工程, 2021, 38 (4): 507-510.
- [6] 郑剑智, 王洋定, 沈婵. 大功率液压马达型式试验台的设计和试验研究 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (20): 87-92.
- [7] 耿冬妮, 奚博, 王昕. 基于测功机加载的液压马达性能测试实验台设计 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (22): 115-116.
- [8] 王明锦, 孙春耕, 董湘湘. 模糊 PID 控制 10 MN 液压机阀控马达转速研究 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2023, 37 (1): 330-336.
- [9] 白家赞, 曾喆昭. 连续搅拌釜式反应器的自耦比例-积分-微分控制 [J]. 控制理论与应用, 2022, 39 (6): 1065-1070.
- [10] 陈红红, 任立胜. 基于比例积分微分的电机滑模变结构同步控制 [J]. 计算机仿真, 2021, 38 (2): 160-312.

(下转第 139 页)