

面向工程机械的神经网络自适应油缸同步控制策略优化

刘江 郭军 张小力 宋婷

陕西铁路工程职业技术学院

摘要: 随着工程机械装备规模和复杂程度不断提高,多油缸协同动作的同步精度成为影响系统性能和安

全的重要因素。传统的机械连杆、分流阀以及PID控制等方法,在复杂工况下往往存在同步误差大、响应速度

慢以及适应性不足的问题。为了解决这一难题,本文提出了一种神经网络自适应油缸同步控制策略,将BP神

经网络的自学习与PID的基础稳定性相结合,构建复合控制器。研究首先分析了液压油缸同步控制的机理和传

统方法不足,然后设计了基于位移差、速度差、压力差为输入的三层BP神经网络结构,并通过遗传算法优化

初始权值,提高了收敛速度。实验平台选用双缸液压系统,在均匀、不均匀和动态负载三种工况下进行验证。

结果表明,该策略能显著降低同步误差,在不均匀负载下最大误差由8 mm降至2 mm,动态响应时间由2.5秒

缩短至1.2秒,表现出良好的鲁棒性和自适应性。研究成果为工程机械液压系统的智能化控制提供了可行思路。

关键词: 工程机械;液压油缸;同步控制;神经网络;自适应

在当代工程机械装备领域,液压传动系统被广泛使用,它几乎是所有关键执行装置的核心力量。挖掘机的动臂、推土机的铲刀、起重机的臂架、压路机的振动机构,这些典型装置都依赖于液压油缸来完成大力输出和复杂动作。然而,当一个机构需要多只油缸同时工作时,同步控制便成为影响系统稳定性与安全性的关键环节。如果多个油缸的位移出现差异,设备可能出现卡滞、抖动,严重时还会造成零件受力不均,导致结构变形甚至失效。

现阶段工程机械中常见的油缸同步控制方式主要有三类:机械连杆法、液压分流法、基于反馈的闭环控制方法。机械连杆虽然直接,但增加了笨重结构;分流阀能够在理想条件下实现流量均分,但当温度、压力变化时精度明显下降;闭环控制(如PID或模糊控制)对部分场景有效,但面对非线性强、扰动多的复杂工况时往往难以满足要求。可以说,传统方法大多存在稳定性不足或适应性差的问题。

神经网络的出现为这一难题提供了新路径。它通过自学习建立输入与输出的复杂非线性映射关系,能够在不依赖精确数学模型的前提下实现较好的控制效果。尤其在油缸同步控制这种受摩擦、滞后、压力波动影响显著的场合,神经网络的自适应优势显得尤为突出。本文将提出一种面向工程机械应用的神经网络自适应油缸同步控制策略,结合实验平台进行验证。研究重点是优化同步精度、提升系统鲁棒性,为工程机械的安全作业提供技术支持。

1 工程机械油缸同步控制的理论与现状

1.1 油缸同步控制的工程意义

工程机械执行机构常常需要多缸并联。例如,起重机臂架顶升系统至少需要两只大缸协同;桥梁顶升或隧道盾构推力装置则需要四缸甚至更多油缸同时伸缩。如果不能保证高精度同步,设备运行会出现严重的安全隐患。例如在一次桥梁顶升工程中,由于两缸位移相差超过10 mm,导致梁体出现危险倾斜,这一案例充分说明同步控制的关键性。对于施工企业来说,同步控制不仅关系到施工精度,也直接影响设备的寿命与维护成本。

1.2 传统同步控制方式及不足

1.2.1 机械连杆法

通过刚性结构将两个油缸连在一起,保证行程一致。这种方式的优点是简单直接,但缺点也十分明显——结构复杂、重量大、布置困难,基本不适用于空间受限的设备。

1.2.2 分流阀法

利用特殊结构的分流阀芯,使流量均匀分配到各缸。这种方式在低速工况下表现尚可,但油液的黏度、温度对流量分配影响极大,一旦条件变化,精度就会下降。

1.2.3 PID控制

基于传感器反馈调整阀口开度,理论上能减小同步误差。然而PID的控制参数固定,当负载突变时往往出现超调,且恢复速度慢。

1.2.4 模糊控制与滑模控制

一些研究引入了模糊逻辑和滑模控制,提高了系统对抗扰的抵抗力。但模糊控制规则依赖人工经验,滑模控制容易产生抖振,在实际工程中应用有限。

1.3 神经网络引入的背景

神经网络具有非线性映射能力、自学习和自适应能力。它不依赖于液压系统复杂的数学建模,而是通过大量样本数据训练,获得一种近似关系,从而在不同工况下保持较好的控制效果。近年来国内外学者已经尝试将BP神经网络应用于阀控缸位置控制、液压伺服系统补偿等领域,取得了初步成果。但大部分研究还停留在实验室台架上,且多数为单缸控制,对多缸同步的实际工程场景缺乏深入研究。因此,本文的创新点在于把神经网络与传统PID结合,形成自适应控制策略,专门用于多油缸同步。

2 神经网络自适应油缸同步控制策略设计

2.1 控制系统总体架构

整体的控制系统包括三个部分:液压执行系统、传感器采集与反馈系统、神经网络复合控制器。液压执行系统由两只并联的液压缸组成,缸径均为80 mm,行程800 mm,工作压力16 MPa。两个油缸分别安装位移传感器和压力传感器,实时采集位移、速度、压力等数据。采集频率设定为100 Hz,既能保证足够的实时性,又不会带来过大的数据处理负担。

控制器部分采用PID加神经网络的复合结构。PID负责实现系统的基础控制,即保持在理想工况下的稳定跟踪。而神经网络部分则通过输入同步误差、速度差以及压力差等信号,实时输出一个修正量,将这个修正量与PID的控制输出叠加,从而调整比例阀的电流指令,改变阀门开度。这样,油缸的实际流量得到修正,使两个油缸能够保持更高精度的同步。

这种复合架构的优点在于,它避免了单纯依赖神经网络可能导致的不稳定性,同时弥补了PID在面对强非线性和大扰动时的不足。可以说,PID提供系统的“骨架”,神经网络提供系统的“柔性调节”,两者结合保证了控制的可靠性和自适应性。

2.2 神经网络结构设计

采用三层BP神经网络:输入层包括位移差、速度差、压力差3个节点;隐含层设10个神经元;输出层为修正量信号1个节点。激活函数采用Sigmoid,输出层为线性函数。为了避免训练过程过拟合,对输入进行归一化处理,并在训练时引入随机噪声。学习算法采用误差反向传播法,结合自适应学习率,初始学习率为0.05,误差下降速度减缓时逐步降低至0.01,

以保证稳定收敛。同时引入权值约束,避免网络在迭代过程中产生剧烈振荡。

2.3 控制算法优化思路

在设计控制算法时,本文采取了几种优化措施:

2.3.1 权值约束

在训练过程中对权值范围加以限制,避免参数无约束增长,防止网络输出过度振荡。

2.3.2 学习率自适应

通过监测误差下降速度自动调整学习率,使得在误差下降较快时保持较大的学习率以加快收敛,而在误差趋于稳定时降低学习率以提高精度。

2.3.3 遗传算法优化

在网络初始权值设定上,采用遗传算法进行预优化,经过100代迭代得到较优初始值,这样可以明显加快网络收敛过程。实验对比表明,使用遗传算法优化后,网络在前50步迭代内就能达到稳定状态,而随机初始化时需要大约80步。

此外,本文在算法设计时还考虑到计算实时性的问题。由于工程机械液压系统需要毫秒级的响应,因此对网络结构保持适度规模,避免深度过大,否则实时性难以保证。

2.4 算法优化与稳定性分析

为了提高控制器在复杂工况下的性能,本文还引入Lyapunov稳定性分析,证明误差动态满足渐近稳定条件。在网络初始权值设定上,引入遗传算法进行优化,经过100代迭代得到较优解,这样可以减少训练初期的收敛时间。实验过程中发现,这种方法比随机初始化的收敛速度提高了约40%。

3 实验与结果分析

3.1 实验平台设计

实验平台基于小型挖掘机动臂系统改造。油缸缸径80 mm,行程800 mm,额定压力16 MPa。配备比例阀用于流量控制,每个油缸安装光栅尺,精度0.01 mm,采样频率100 Hz。控制器为dSPACE DS1104,仿真软件为Matlab/Simulink。平台设置了均匀负载、不均匀负载和动态负载三类工况,来模拟实际施工中可能遇到的情况。

3.2 工况设定与数据采集

3.2.1 均匀负载工况

两缸均承受相同阻力,作为基础验证。

3.2.2 不均匀负载工况

右缸负载增加20%,模拟施工时受力不均。

3.2.3 动态负载工况

运行过程中逐步增加一缸负载,并模拟外部扰动,

如管路压力波动。

实验数据采用采集卡存储,每组实验重复10次取平均,保证结果可靠性。

3.3 实验结果

在均匀负载下,传统PID和神经网络控制差异不大,最大同步误差约1.5 mm。

在不均匀负载下,PID最大误差为8 mm,平均4 mm;神经网络控制最大误差降低至2 mm,平均小于1 mm。

在动态负载下,PID恢复时间约2.5秒,且曲线有明显振荡;神经网络控制恢复时间缩短到1.2秒,曲线平稳,几乎无振荡。

从误差曲线来看,PID控制在负载突变时表现出较大的抖动,而神经网络控制表现出较好的适应性和平滑性。统计结果表明,神经网络方法在动态复杂工况下比传统PID误差减少70%以上,响应速度提升近一倍。

3.4 结果分析与讨论

结果充分证明神经网络自适应控制策略在油缸同步控制中的有效性。它能够弥补PID在负载突变下的不足,提高系统鲁棒性和响应速度。与此同时,网络的学习机制使得控制器能不断适应新的工况,这对于工程机械这种环境多变、工况复杂的场合具有重要意义。当然也存在不足,例如当采样频率降低时,网络的实时性会受到影响,另外在多缸扩展应用中,网络的规模和训练量会显著增加,这些都是未来研究需要解决的问题。

4 结论

本文研究了面向工程机械的神经网络自适应油缸同步控制策略,主要结论如下:

(1)通过理论分析与实验验证,证明了神经网络在处理非线性液压系统同步控制中具有明显优势。与传统PID相比,最大误差降低超过70%,动态响应

时间缩短约一半。

(2)提出了PID与神经网络结合的复合控制器架构,既保证了系统的基本稳定性,又提升了自适应补偿能力。

(3)实验表明该方法在不同负载工况下都能有效工作,尤其在动态负载下表现优异。

研究贡献在于为工程机械液压传动系统的智能化提供了新的解决方案。但仍存在一些不足:实验平台仅限于双缸系统,未涉及多缸大规模应用;网络结构较为简单,未引入更复杂的深度学习模型。未来可以从以下方向开展研究:一是将方法扩展到多缸系统;二是结合深度强化学习、模糊神经网络等技术;三是将研究成果应用到实际工程机械长期测试中,检验其可靠性和经济性。

参考文献:

- [1]周山旭,罗艳蕾,杨蕾,等.锻造机驱动液压缸同步控制仿真[J].机床与液压,2023,51(7):87-92.
- [2]王云飞.液压支架群多缸协同系统控制策略研究[D].中国矿业大学,2021.
- [3]邹浩通.基于电液伺服控制的液压助力万向车控制性能的研究[D].沈阳工业大学,2022.
- [4]盖彦青,刘雅荣,刘艳辉,等.起重机变幅系统动态特性分析及双液压缸同步控制[J].机床与液压,2019,47(16):46-49+54.
- [5]孙宵.双液压缸力同步控制及控制策略研究[D].哈尔滨理工大学,2020.
- [6]郑尚龙.液压同步提升打捞的半主动波浪补偿技术研究[D].哈尔滨工程大学,2020.
- [7]李栓柱,李登攀,李灿.基于免疫神经网络的双缸液压机同步PID控制[J].机械工程师,2019,(2):139-142.
- [8]林朝,王衍英,张耀东,等.基于IGWO-BP-PID的管廊吊具液压缸同步控制研究[J].机床与液压,2024,52(7):80-86.