

基于融合深度神经网络的刚柔耦合机械臂优化控制系统设计

王 博^{1,2,3}, 段 竹^{1,3}, 汪德忠^{1,3}, 王文明^{1,3}

(1. 西安交通大学城市学院 计算机学院, 西安 710018;

2. 机器人与智能制造 陕西省高校工程研究中心, 西安 710018;

3. 物联网智能感知交互平台陕西省高校工程研究中心, 西安 710018)

摘要: 针对刚柔耦合机械臂因刚性元件与柔性结构间动态耦合引发的运动扰动及控制精度下降问题, 设计基于融合深度神经网络的优化控制系统; 通过位姿信号高阶导数跟踪捕捉动态变化, 判定机械臂位置偏差; 设计耦合模块扩展状态观测器, 实时估计扰动状态并生成补偿信号; 将补偿信号输入运动扰动补偿器, 基于前馈运算推导准静态过程, 精准抵消耦合关系变化导致的运动偏移; 在三维空间中求解正向运动学方程, 结合耦合观测器能量分布规律定义动力学方程, 实现刚柔耦合特性分析; 构建输入-输出复杂映射关系, 定义多层非线性变换规则, 以运动学-动力学方程为校验标准, 输出满足实际控制条件的控制条件; 实验结果表明, 所设计系统既控制了机械臂末端位姿, 又保障了运动轨迹的收敛性能, 运动扰动补偿器响应曲线也突出了该系统对机械臂关节角控制的有效性。

关键词: 深度神经网络; 刚柔耦合; 机械臂控制; 扰动补偿器; 运动位姿; 能量动态分布

Optimization Control System for Rigid Flexible Coupling Robot Arms Based on Fusion Deep Neural Networks

WANG Bo^{1,2,3}, DUAN Zhu^{1,3}, WANG Dezhong^{1,3}, WANG Wenming^{1,3}

(1. School of Computer Science, Xi'an Jiaotong University City College, Xi'an 710018, China;

2. Engineering Research Center of Robot and Intelligent Manufacturing,

Universities of Shaanxi Province, Xi'an 710018, China;

3. Engineering Research Center of IoT Intelligent Perception and Interaction Platform,

Universities of Shaanxi Province, Xi'an 710018, China)

Abstract: To address the motion disturbance and control accuracy degradation caused by the dynamic coupling between rigid components and flexible structures in rigid flexible coupled robotic arms, an optimization control system based on the fused deep neural network is designed. By tracking and capturing dynamic changes for high-order derivatives of pose signals, the deviation of the robotic arms position is determined; A coupled module extension state observer is designed to estimate disturbance states in real-time and generate compensation signals. The compensation signal is input into a motion disturbance compensator, and a quasi-static process based on the feedforward operation is derived to accurately offset the motion deviation caused by the changes in coupling relationship. By solving the forward kinematics equation in three-dimensional space and combining the energy distribution law of the coupled observer, this system judges the dynamic equation, analyzes the rigid flexible coupling characteristics, constructs a complex input-output mapping relationship, defines multi-layer nonlinear transformation rules, utilizes kinematic dynamic equations as verification criteria, and outputs the control conditions that meet actual needs. Experimental results show that the designed system not only controls the end pose of robotic arms, but

收稿日期:2025-07-21; 修回日期:2025-08-25。

基金项目:西安交通大学城市学院舌肌康复智能机器人系统青年创新团队科研专项项目(2024TD04)。

作者简介:王 博(1986-),男,硕士,讲师。

段 竹(1976-),女,硕士,副教授。

引用格式:王 博,段 竹,汪德忠,等. 基于融合深度神经网络的刚柔耦合机械臂优化控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2026,34(6):114-121,146.

also ensures the convergence performance of motion trajectory. The response curve of the motion disturbance compensator also verifies the effectiveness of the system in controlling the joint angle of robotic arms.

Keywords: deep neural network; rigid flexible coupling; mechanical arm control; disturbance compensator; motion posture; dynamic distribution of energy

0 引言

刚柔耦合机械臂是融合刚性结构与柔性元素的机械应用系统,相较于传统的刚性机械臂元件,该系统的灵活性更强,在运动过程中,柔性结构吸收了大量的冲击作用,大大降低了噪声、振动等外界干扰对末端传感器定位精度的影响。机械臂在工作过程中,刚性臂杆因为受力而表现出大范围的转动状态,与此同时柔性结构进行小幅度的弹性振动,这两种运动行为相互影响,形成了复杂的动力学效应^[1]。由于机械臂系统的动力学方程呈现高度非线性,且刚性运动特性与柔性结构变形表现之间的强耦合关系难以通过数学运算的方式得到准确描述,所以对该系统进行有效建模并实施针对性控制的难度相对较高。

以工业型机械部件作为研究对象,梁思琪等人^[2]提出了基于有向联合连通的协同控制系统,利用有向图描述机械臂各关节结构之间的信息交互关系,并通过开放的信道组织动态交换感知数据,从而形成统一的协同工作环境,在感知环境变化的同时,实时调整控制策略。该系统虽然支持动态拓扑变换,但机械臂工作环境较为复杂,信息交换容易导致执行指令传输不及时的问题,因此其控制作用效果有待提升。徐建明等人^[3]提出了基于可编程逻辑控制器开发系统(CODESYS, controller development system)平台的控制系统,利用正运动学模型简化机械臂冗余度,再结合计算机数字控制装置(CNC, computer numerical control)设计点到点的运动功能控制块,实现对机械臂操作行为的针对性控制。CODESYS平台的运行必须以大量的输入数据作为支持,所以在运动区域相对较为局限的情况下,该方法的控制效果得不到有效保障。韩团军等人^[4]提出了基于表面肌电信号(sEMG, surface electromyography)和反向传播神经网络算法(BPNN, back propagation neural network)的控制系统,通过对肌电信号的预处理,分类机械臂运动行为,再通过无线反馈的方式,将控制命令传输到机械臂传感器终端,以实现机械臂的控制。由于刚柔耦合机械臂的自由度等级较高,肌电信号在通过反向神经网络的传输时极易发生信息丢失的情况,故该方法的控制效果并不能完全满足实际需求。董泽宇等人^[5]提出了基于混合现实的控制系统,分别从人机交互、机械驱动、虚拟现实三方面发布控制指令,再根据主机元件所接收到的反馈信息,还原机械臂运动行为,实现对设备运行情况的实时监控。分析反馈

信息时,机械臂并不会停止运动,所以该系统所定义的控制指令往往针对上一行为周期的设备运行状态,其控制效果具有一定的滞后性。

现有对比方法存在明显不足。梁思琪等人提出的协同控制系统,因机械臂工作环境复杂,信息交换易致执行指令传输不及时,控制效果欠佳;徐建明等人的控制系统依赖大量输入数据,运动区域局限时控制效果难以保障;韩团军等基于肌电信号和神经网络的控制系统,因刚柔耦合机械臂自由度高,肌电信号传输易丢失信息,无法满足实际应用;董泽宇等人的混合现实控制系统,分析反馈信息时机械臂不停运动,控制指令有滞后性。为解决上述问题,更好地适应刚柔耦合机械臂的时变性运动特性,设计基于融合深度神经网络的刚柔耦合机械臂优化控制系统。在复杂非线性关系处理上,构建融合机械臂控制的深度神经网络模型,以运动控制器各模块输入为输入项,运动学与动力学表达式为运算标准,能准确处理机械臂柔性变形、耦合效应等复杂因素,提升控制精度。在自适应学习能力方面,深度神经网络具有强大自适应学习能力,基于其辨识机械臂控制参数,通过数学运算规划非线性轨迹,持续采集轨迹数据微调神经网络权重,实现对机械臂的动态控制。此外,结合辨识参数优化控制原则,生成与期望轨迹匹配的补偿力矩,避免数据竞争,保障系统对机械臂运动轨迹的控制能力,快速促进轨迹性能收敛,实现刚柔耦合机械臂优化控制。

1 机械臂运动硬件控制器设计

在机械臂运动硬件控制器设计中,硬件架构围绕位姿跟踪微分器、扩展状态观测器与运动扰动补偿器三大核心模块展开,通过模块化硬件电路实现信号处理与控制算法的物理承载。位姿跟踪微分器采用高速ADC芯片实时采集关节编码器与柔性传感器数据,经FPGA实现二阶微分运算,通过并行计算单元快速提取位姿信号及其高阶导数,其2阶响应因子通过DAC动态调节以优化跟踪速度。扩展状态观测器基于DSP构建,通过多通道数据融合处理耦合输入信号与参考信号,利用增益参数自适应算法实时估计扰动状态,其硬件电路集成隔离放大器以抑制刚柔耦合结构间的电磁干扰。运动扰动补偿器采用专用运动控制芯片实现前馈运算,通过PWM模块输出补偿力矩信号至伺服驱动器,同时集成绝对式编码器接口反馈实际偏移量,形成闭环控制链路。三大模块通过高速总线互联,确保信号同步精度达微秒

级, 为刚柔耦合机械臂的准静态控制提供硬件支撑。

1.1 机械臂位姿跟踪微分器设计

在刚柔耦合机械臂优化控制系统中, 位姿跟踪微分器的核心作用是实时估计机械臂位姿输入信号及其导数。二阶微分结构通过跟踪机械臂位姿输入信号的变化来定义其高阶导数, 以使控制系统能够更准确的捕捉位姿信号的变动, 从而提高了系统对位姿扰动的补偿能力, 使其可以实现对机械臂所处位置的有效判定^[6-7]。跟踪微分器的建模结构包含两个部分: 跟踪部分与微分部分。其中, 跟踪部分负责追踪机械臂位姿的输入信号, 微分部分则针对性计算位姿信号的高阶导数。对于机械臂位姿跟踪微分器结构的建模如图 1 所示。

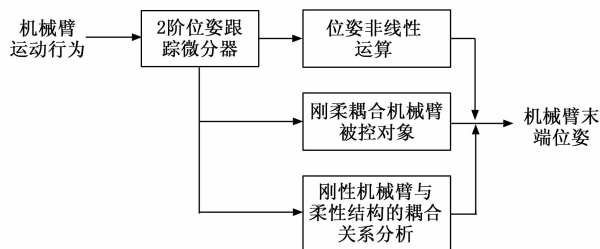


图 1 刚柔耦合机械臂的位姿跟踪微分器结构模型

如果利用数学运算公式描述机械臂位姿跟踪微分器, 则可以将跟踪部分的建模标准 $\hat{m}_1$ 、微分部分的建模标准 $\hat{m}_2$ 表示为:

$$\begin{cases} \hat{m}_1 = m_2 \\ \hat{m}_2 = -\xi \cdot \phi[m_1 - M(\omega)] + \frac{|m_1 m_2|}{2\zeta} \end{cases} \quad (1)$$

m_1 、 m_2 分别表示不同阶段的机械臂位姿输入信号, ξ 表示二阶响应因子 (响应因子的取值直接影响运动控制器跟踪机械臂位姿输入信号的快慢), ϕ 表示机械臂位姿输入信号的近似微分参量, $M(\omega)$ 表示基于跟踪目标 ω 的高阶符号函数, ζ 表示机械臂位姿输入信号的微分步长。根据最优控制原则可知, 控制系统在调节机械臂位姿跟踪微分器时应用极小值原理, 对于运动控制器组件而言, 微分器跟踪机械臂位姿输入信号所需时间更短, 控制系统的运行效率就越高。

1.2 耦合模块扩展状态观测器设计

扩展状态观测器是用于估计刚柔耦合机械臂刚性元件与柔性结构之间耦合关系的关键组件, 其功能主要在于通过比较耦合输入信号与机械臂运动控制器中的参考信号, 生成新的补偿调节信号, 以抵消控制系统受到的扰动影响。简单来说, 就是耦合模块扩展状态观测器将机械臂扰动状态和控制系统运行状态看作两个独立的变量, 通过定义观测模型估计刚性元件与柔性结构之间的扰动差异, 其结构如图 2 所示。在分析刚柔耦合机械臂的运动学与动力学特性时, 耦合模块扩展状态观测器无

需预先了解机械臂末端位姿与传感器表面的能量动态分布, 就可以通过算法估计扰动状态^[8]。这就使得控制系统更加灵活, 能够适用多种不同类型的控制问题。

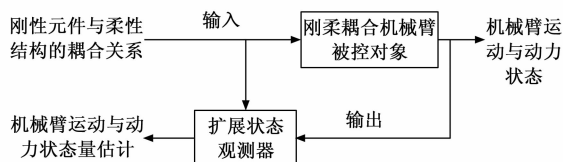


图 2 机械臂耦合模块扩展状态观测器建模结构

通过数学表达式描述耦合模块扩展状态观测器, 设 $\hat{v}$ 表示机械臂刚性元件与柔性结构之间的耦合调试参数, b 表示基于刚性元件与柔性结构耦合关系所扩展的机械臂状态变量 ($\hat{v}$ 、 b 统称为耦合模块扩展状态观测器的增益参数), v 表示扰动因素, 联立上述物理量, 推导数学表达式为:

$$B = \frac{\hat{v}}{b^{1-v}}, \quad |\hat{v}| \leq b \quad (2)$$

描述耦合模块扩展状态观测器时, 没有使用特别的函数表达式, 表示系统在控制刚柔耦合机械臂时, 该模块不需要依赖精准的系统数学模型就可以适当的调试模块参数, 并对刚性元件与柔性结构之间的耦合关系做出反应。

1.3 运动扰动补偿器设计

在刚柔耦合机械臂优化控制系统中设计运动扰动补偿器, 意在消除机械臂运动带来的干扰, 从而为位姿轨迹的运动学分析提供精确的数据支持。设计运动扰动补偿器时, 需要估计机械臂运动偏移量所造成的控制补偿问题, 并根据补偿项参数的取值进行前馈运算, 达到提高控制系统鲁棒性与稳定性的目的^[9]。由于机械臂在出现运动趋势之前, 整个臂体结构及末端位姿节点通常会保持静止状态, 只有在运动过程中, 才会出现明显移动。因此, 可以将运动扰动补偿器对刚柔耦合机械臂的控制效果近似视为准静态过程^[10]。定义静止状态下的控制补偿项为 0 值, 运动过程中的控制补偿项为非 0 值, 非 0 值相对于 0 值的数学赋值符号表示机械臂运动方向, “+”表示运动方向为正, “-”表示运动方向为负, 基于上述原则推导运动扰动补偿器准静态过程的定义式如下:

$$C = \frac{1}{\tau} \sum_{c=1}^{+\infty} V_c \zeta_c \quad (3)$$

式中, τ 为补偿系数, v 为机械臂运动偏移量, V_c 为偏移量 v 所对应的控制补偿项, ζ_c 为前馈调节参数。通过框图连接, 描述运动扰动补偿器在刚柔耦合机械臂优化控制系统中的建模结构, 如图 3 所示。

补偿运动扰动行为, 可以避免刚性元件、柔性结构之间耦合关系的变化对机械臂运动偏移量造成影响, 既

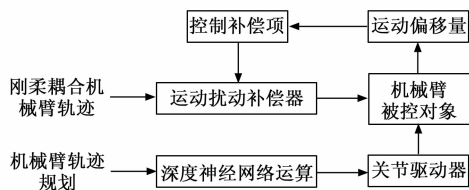


图 3 运动扰动补偿器

保障了运动控制器模块对机械臂的控制能力,也能够避免运动学与动力学分析中出现明显数值误差。

2 刚柔耦合机械臂的运动学与动力学分析

在刚柔耦合机械臂的运动学与动力学分析中,本研究通过正向运动学方程求解机械臂在三维空间中的位姿,明确刚性元件与柔性结构间的空间几何约束关系,为揭示复杂耦合运动规律提供基础;结合耦合观测器能量动态分布规律定义动力学方程,量化分析柔性变形与刚性运动间的能量传递特性,精准刻画动态扰动产生机理。所提融合深度神经网络的建模方法以运动学—动力学方程为校验标准,通过多层非线性变换构建输入—输出映射关系,将物理方程约束嵌入神经网络训练过程,确保模型输出既符合实际物理规律,又具备复杂扰动环境下的自适应补偿能力。

2.1 机械臂运动学分析

2.1.1 三维空间中的机械臂运动位姿表示

在三维空间中描述机械臂位姿输入信号,首先需要建立三维空间直角坐标系,然后假设该空间中有一点相对于 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的坐标分量不同时为零,最后确定该点与机械臂目标运动位姿点之间的数学关系,实现其在三维空间中的表示^[11-12]。建立三维空间直角坐标系 $\{L\}$,在 $\{L\}$ 所在空间内选择一点 k ,则其定义式为:

$${}^L k = \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

k_x 、 k_y 、 k_z 分别为点 k 在坐标系 $\{L\}$ 中的 X 轴、 Y 轴、 Z 轴坐标分量,且其取值 k_x 、 k_y 、 k_z 的取值不同时为零。

构建臂位姿跟踪微分器建模标准与 k 定义式之间的数学表达关系,定义三维空间中的机械臂运动位姿表示式,联立公式 (1)、(4),推导其运算式为:

$$K = \frac{1}{2} \zeta (\hat{m}_1 + \hat{m}_2)^2 + \frac{1}{2} k \int_0^\sigma |\Delta J| \cdot (x, y, z) d\Delta J \quad (5)$$

(x, y, z) 表示点 k 在坐标系 $\{L\}$ 中的真实坐标, ζ 表示界限参数, σ 表示坐标区域限定系数, ΔJ 表示点 k 所对应坐标分量连线所组成区域的面积。如果根据机械臂位姿所定义的 ΔJ 取值超过了其额定范围,则表示该位姿

点超出了三维空间的建模范围,系统对于该点的控制效果可能受到影响,出于对控制效果的保障,可以通过对称投影的方式,将位姿点对应到三维空间建模范围内。

2.1.2 机械臂正向运动学方程求解

机械臂正向运动学方程分别从刚柔关节耦合角度和各个关节连杆参数的角度求得机械臂末端的姿态,从而为实现机械臂优化控制提供理论依据。在三维空间中,机械臂末端相对于基座坐标系的位姿,可以通过旋转求解 2.1 节中的运动位姿表达式得到^[13-14]。对于机械臂运动位姿表示式的旋转运算如公式 (6) 所示:

$$G = (\partial K - \hat{g}) K^2 \quad (6)$$

∂ 为齐次变换参数, $\hat{g}$ 表示基于运动位姿表示式所定义的运动学补偿参量。

根据拉格朗日方程法,定义拉格朗日函数 F ,则有如下方程:

$$F = D - S \quad (7)$$

D 为系统的动能, S 为机械臂的总势能。

基于公式 (6)、(7),推导刚柔耦合机械臂的正向运动学方程表达式为:

$$A = \lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{1}{F} \sum_{s=1}^{+\infty} (-1)^s a_{\theta}^2 \quad (8)$$

θ 表示机械臂运动系统内的内力作用消除参数, a_{θ} 表示基于参数 θ 的机械臂非线性运动标定参量, s 表示拉格朗日函数下的机械臂正向运动行为标记常数。拉格朗日方程法将刚柔耦合机械臂的关节部分离散化为多个单元结构,通过数学运算描述其在正向运动中的变形情况,适用于各种复杂的机械臂运动环境。

2.2 机械臂动力学分析

2.2.1 耦合观测器的能量动态分布规律定义

设计刚柔耦合机械臂优化控制系统时,耦合模块扩展状态观测器通过对系统总扰动的实时估计,对能量的动态分布进行闭环补偿控制。其核心规律表现为控制系统鲁棒性增强与动力学扰动能量抑制之间的数学关系^[15]。耦合模块扩展状态观测器将控制系统外界干扰、未建模动态以及机械臂柔性变形引起的弹性势能波动统一视为总扰动,并在该模块的数学定义式中引入扩张状态变量实时估计能量的动力学分布规律。在柔性机械臂运动过程中,刚性元件与柔性结构之间的弹性势能变化会被耦合模块扩展状态观测器捕捉为扰动能量,并通过反馈控制标准生成具有补偿作用的信号序列,以抵消其对控制系统能力的干扰^[16]。对于扩展状态观测器而言,机械臂刚性元件与柔性结构之间的弹性势能存在强耦合关系。观测器通过对强耦合表现所引起能量波动的估算,动态调整机械臂的驱动扭矩分配,从而使系统能量更集中于末端位姿跟踪微分器的运动控制。设 ω 表示扩张状态变量,且 $\omega \neq 0$ 的不等式取值条件恒成立,联立

公式 (2), 可将耦合观测器能量动态分布规律定义式表示为:

$$l = \omega B + (dq)^n + f(\mu) \quad (9)$$

$f(\mu)$ 为耦合模块扩展状态观测器估计的总扰动, μ 为能量动态干扰, d 为扰动能量序列的补偿值, q 为机械臂驱动扭矩的分配参数。基于反馈控制标准可以实现对耦合观测器能量动态分布的解耦运算, 使机械臂动力能量分配更高效。

2.2.2 机械臂动力学方程求解

求解机械臂动力学方程, 意在根据能量动态分布规律, 分析耦合模块扩展状态观测器总动能与位姿跟踪微分器运动速度之间的关系。动力学方程的求解可以基于纽马克法, 通过引入纽马克参数 ν 和控制数值阻尼 σ , 抑制机械臂高频振动能量对动力学方程求解稳定性的影响^[17]。对于刚柔耦合机械臂而言, 纽马克法可以有效处理扩展状态观测器在控制关节角时所表现出的振动耦合问题, 这也是所设计系统对机械臂的控制作用效果能够得到保障的主要原因。纽马克法的参数 ν 和参数 σ 对时间步长内的加速度进行近似运算, 从而在不影响运算结果的前提下, 将动态平衡方程转化为等效的静力方程, 实现对目标问题的逐步递推求解^[18]。基于纽马克法求解机械臂动力学方程, 就是将耦合模块扩展状态观测器相关的动态平衡方程转化为与能量分布规律相关的静力方程, 从而推导出与机械臂动力学表现相关的控制标准。在公式 (9) 的基础上, 推导动力学方程运算式为:

$$Q = \nu^2 + \sigma \omega^2 + \omega^2 \quad (10)$$

式中, ω 为机械臂质心速度, ν 为耦合模块扩展状态观测器对机械臂关节的转动惯量, ω 表示位姿跟踪微分器角速度。纽马克法有效处理了扩展状态观测器与机械臂运动的耦合效应, 通过引入速度与角速度描述参量, 修正动力学方程中的非线性项, 实现对机械臂运动的高精度控制。

3 基于深度神经网络的机械臂优化控制

深度神经网络通过多层非线性变换构建了机械臂控制的创新框架, 其核心在于实现从原始输入到精准输出的渐进式特征抽象与任务解耦。底层隐藏层采用 ReLU 激活函数, 将关节角度、角速度等线性不可分数据映射至高维空间, 自动提取角度变化率与负载的隐含关联, 突破传统 PID 控制需手动设计微分项的局限, 降低轨迹跟踪误差; 中层通过 Sigmoid 函数构建非线性组合特征, 实现惯性矩阵与科里奥利力的自动解耦, 将复杂动力学方程转化为局部线性模型, 在负载突变场景下压缩关节力矩调整时间; 顶层隐藏层集成 LSTM 单元处理时序依赖, 同步学习目标位姿预测与碰撞规避任务, 利用历史轨迹数据提前预测基座扰动并生成补偿轨迹, 提

升空间机械臂抓取成功率; 输出层采用 Tanh 函数将网络输出映射至 $[-1, 1]$ 区间, 直接生成关节力矩指令, 避免传统分步控制中的误差累积, 在 UR5 机械臂实验中降低轨迹跟踪均方误差。该分层架构实现了传感器信号处理、动力学建模与运动策略生成的全链条自动化, 在微重力等强非线性环境中提升控制鲁棒性, 为高精度机械臂控制提供了端到端解决方案。

3.1 融合机械臂控制的深度神经网络模型构建

深度神经网络通过构建输入与输出之间的复杂映射关系, 定义多层非线性变换原则, 其模型函数通常表示为具有多层嵌套关系的复合函数。对应到刚柔耦合机械臂优化控制系统中, 深度神经网络模型应以机械臂运动控制器各模块的输入作为模型输入项, 以运动学与动力学表达式作为方程运算标准, 再基于完整的神经函数校验输入项的运算值, 并输出满足实际应用需求的机械臂控制条件^[19]。对控制系统深度神经网络的建模如图 4 所示。

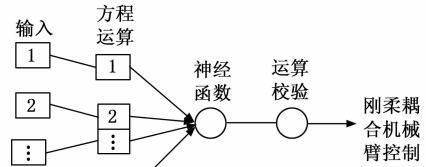


图 4 融合机械臂控制的深度神经网络模型

在本文提出的刚柔耦合机械臂控制框架中, 深度学习模型同时承担控制指令生成与系统参数辨识的双重功能。在控制层面, 基于深度神经网络的非线性映射能力, 模型以传感器实时数据 (关节角度、柔性应变、位姿误差等) 为输入, 直接输出关节力矩补偿值与轨迹修正量, 通过端到端学习替代传统 PID 控制器的参数整定过程, 实现复杂扰动环境下的自适应控制。在辨识层面, 模型通过离线训练阶段融入运动学—动力学方程约束, 利用仿真数据学习刚性元件与柔性结构的耦合特性参数, 并在在线运行中通过增量式学习持续修正模型参数, 使系统具备对未知扰动的动态辨识能力。这种控制—辨识一体化设计显著提升了机械臂在准静态过程中的轨迹跟踪精度。规定 $E(x)$ 表示深度神经网络模型的原函数, 将原函数中的输入项等效替换为机械臂运动控制器各模块的输入值, 就可以求得融合机械臂控制的深度神经网络模型表达式^[20]。设 $Vx = (\hat{m}_1 + \hat{m}_2) + B + C$, κ 表示运算校验系数, 在方程运算满足机械臂运动学与动力学方程表达式的情况下, 可将融合机械臂控制的深度神经网络模型定义式表示为:

$$W = \kappa \frac{E[(\hat{m}_1 + \hat{m}_2) + B + C]}{AQ} \quad (11)$$

深度神经网络模型的运算规模较大, 将其原函数的

输入项等效替换为机械臂运动控制器各模块的输入值, 可以提高参数映射能力, 以保证系统对刚柔耦合机械臂的控制能力。

3.2 深度神经网络下的机械臂控制参数辨识

基于深度神经网络辨识机械臂控制参数, 可以通过数学运算的方式, 规划出完整的非线性轨迹, 以确保充分激发控制系统的动态特性。辨识过程中, 深度神经网络将位姿跟踪微分器、耦合模块扩展状态观测器、运动扰动补偿器模块的输入值作为输入项, 在非线性轨迹中的节点矩阵满秩后, 求解最小参数集, 进而约束机械臂运动行为^[21]。规定 r_1 、 r_2 、 $\cdots$ 、 r_n 表示非线性轨迹中 n 个不重合的机械臂运动节点, 其取值属于 $[1, +\infty)$ 的区间, 联立公式 (11), 推导节点矩阵满秩的定义式如下:

$$R = \exp\left(-\frac{\lambda \cdot \|r_1^2 + r_2^2 + \cdots + r_n^2\|}{2W^2}\right) \quad (12)$$

λ 为激励参数。对满秩矩阵中的数据进行归一化运算, 以加速深度神经网络的训练收敛。训练过程中, 收敛性更强的数据代替前一个运动节点, 获得深度神经网络输出时, 所得到的控制参数必然为最优运算结果, 即完成对机械臂控制参数的辨识^[22]。在公式 (12) 的基础上, 可将机械臂控制参数辨识表达式定义为:

$$T = \gamma u_t + \frac{1}{4R} u_0^2 \quad (13)$$

t 为深度神经网络的输出周期, u_t 为 t 周期所对应的神经网络输出参数, γ 为满秩矩阵中输入数据的收敛性常数, u_0 为轨迹样点在神经网络中所对应的原训练参数。在机械臂运行过程中, 持续采集轨迹数据并基于对控制参数的辨识运算, 微调神经网络权重, 以确保系统对机械臂的有效控制。

3.3 结合辨识参数的机械臂控制原则优化

结合辨识参数优化机械臂控制原则, 旨在进一步提升系统对机械臂运动行为的控制能力。关于优化可以理解为生成与期望轨迹匹配的补偿力矩, 将参数辨识原则代入系统原控制函数中, 以获得更为理想的控制作用效果^[23]。优化运算过程中, 针对参数辨识所允许的误差值范围, 调整运动扰动补偿器的控制增益标准, 并进行非线性运算。辨识参数通过隔离增益参量, 避免相邻轨迹样点之间发生数据竞争, 这也是优化运算后系统控制效果更为理想的主要原因^[24-25]。设 i 表示运动扰动补偿器的控制增益, $\varphi(i)$ 表示基于控制增益的系统原控制函数, O_i 表示增益隔离, $\hat{I}$ 表示基于参数辨识所定义的控制误差值域参量, φ 表示等效控制项, 联立公式 (13), 推导机械臂控制原则优化运算式为:

$$P = (\varphi - 1) \cdot \frac{\omega(i) \hat{I}}{T} O_i^2 \quad (14)$$

基于融合深度神经网络的刚柔耦合机械臂优化控制系统针对运动控制器进行运动学与动力学分析, 又结合

深度神经网络算法进行了针对性优化运算, 不但保障了系统对机械臂运动轨迹的控制能力, 也通过满秩标准对轨迹样点进行了激励性约束, 从而促进轨迹性能使其快速收敛。

4 实验结果与分析

针对刚柔耦合机械臂的控制实验, 意在有效抑制运动轨迹的时变性特征, 通过动力学模型的约束作用, 保障其运动性能。将有向联合连通系统 (文献 [2] 系统)、可编程逻辑控制器系统作为对比系统 (文献 [3] 系统), 这两种系统分别采用有向图、CODESYS 平台实现机械臂控制。利用正运动学模型简化机械臂冗余度, 结合计算机数字控制装置设计点到点的运动功能控制块; 通过有向联合连通的方式, 能够实时感知环境变化并调整控制策略, 具有更强的适应性。利用位姿跟踪微分器、扩展状态观测器与运动扰动补偿器等实验设备设计实验, 对其运动学、动力学及相关电力参数的设置如表 1 所示。

表 1 机械臂运动学、动力学及相关电力参数设置

分类	参数	数值/类型
1	补偿器额定转速	3 000 rpm
2	补偿器最高转速	6 000 rpm
3	微分器额定扭矩	1.27 N·m
4	微分器峰值扭矩	3.80 N·m
5	观测器转动惯量	0.32 kg·cm ²
6	惯量类型	小惯量
7	机械臂额定电压	220 V
8	机械臂额定电流	2.8 A
9	机械臂额定功率	0.4 kW

机械臂采用六自由度串联结构, 刚性基座与柔性关节模块化设计, 最大负载能力为 2 kg, 工作半径达 0.8 m, 重复定位精度 ± 0.05 mm, 柔性关节弯曲角度范围 $\pm 90^\circ$, 可适配喉部、胃部等狭窄空间操作需求。该机械臂集成电流驱动柔性关节与六维力/力矩传感器, 支持力位混合控制, 动力系统采用 PMSM 永磁同步电机, 配合矢量控制算法实现低能耗高精度运动。

实验场地面积 50 m², 配备独立恒温恒湿系统, 实验期间温度稳定在 22 ± 1 °C、湿度控制在 $50 \pm 5\%$ RH, 有效避免热胀冷缩对机械臂关节刚度的影响。实验室采用双层隔音玻璃与低频吸音材料, 环境噪音低于 45 dB, 减少声波对传感器信号的干扰。场地远离强电磁场源, 实验台配备电磁屏蔽罩, 确保电机驱动电流与力传感器信号传输稳定性。此外, 实验区设置独立通风系统, 换气次数达 15 次/h, 配合 HEPA 高效过滤器, 维持空气洁净度 ISO 5 级标准, 避免粉尘对机械臂传动部件的磨损。

在刚柔耦合机械臂的深度神经网络控制模型中, 输

入涵盖多维传感器数据：包括机械臂各关节实时角度、角速度及柔性部件应变传感器反馈的变形量（捕捉柔性结构动态），末端执行器位姿误差与高阶导数（反映运动偏差趋势），以及耦合观测器估计的扰动状态量（量化内外干扰）。输出为关节力矩补偿值与运动轨迹修正量，直接作用于底层控制器实现闭环调节。

模型训练采用监督学习+强化学习混合策略：以运动学-动力学方程生成的仿真数据为初始训练集，通过梯度下降优化网络权重；进一步在实物系统中引入强化学习，以轨迹跟踪精度与扰动抑制效果为奖励函数，持续迭代优化控制策略，最终实现复杂工况下的高精度自适应控制。

挠度可以用来描述机械臂承受载荷时其中性面偏离原始位置的变形量，是衡量结构刚度的重要参数。图 5 为 LH2500-7 型机械臂的挠度曲线。

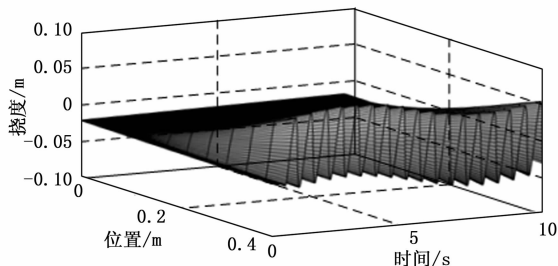


图 5 LH2500-7 型机械臂挠度曲线

根据图 5 可知，LH2500-7 型机械臂挠度的变化范围保持在 $-0.10 \sim 0.10$ m 之间，在交变电流、应力负载等外力作用下，该挠度范围表示机械臂刚性元件、柔性结构之间的耦合关系较为突出。在强耦合保障下，运动扰动补偿器对于关节角参数的捕捉也更为准确。

开始实验前，对位姿跟踪微分器、扩展状态观测器与运动扰动补偿器进行集中调试，以确保获得更准确的实验结果，详情如图 6 所示。

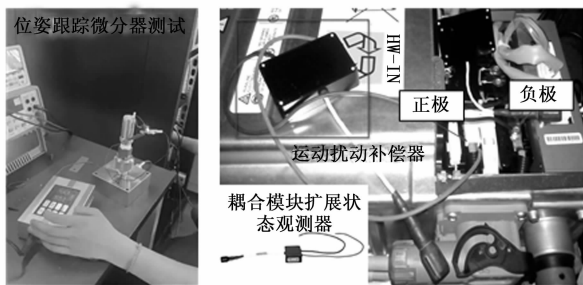


图 6 机械臂运动控制器调试

末端位姿反映了位姿跟踪微分器对机械臂的控制能力，在运动学、动力学负载不超限的情况下，实际位姿曲线越接近理论轨迹，就表示所研究方法对机械臂的控制作用越突出。不同实验组机械臂末端位姿的轨迹曲线如图 7 所示。

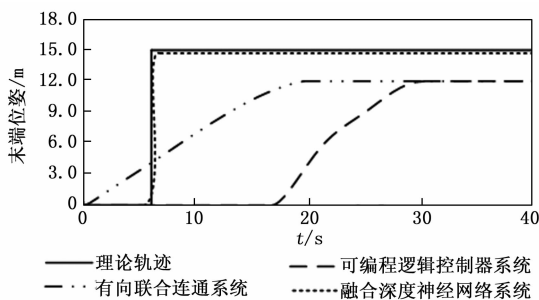


图 7 机械臂末端位姿控制

分析图 7 可知，机械臂轨迹跃升发生在第 6 s，其前、后的位姿轨迹均呈现直线状态，且跃升后的位姿数值达到了 15.0 m；融合深度神经网络系统控制机械臂时，轨迹跃升发生在 5.7 s，其前、后的位姿轨迹也呈现直线状态，跃升后的位姿数值为 14.8 m，无论是时间特性还是数值特性都与理论轨迹较为接近。有向联合连通系统、可编程逻辑控制器系统在机械臂末端位姿控制方面的性能则明显不及融合深度神经网络的控制系统。这是因为融合深度神经网络系统设计了位姿跟踪微分器，实时估计机械臂位姿输入信号及其导数，提高系统对位姿扰动的补偿能力，为准确判定机械臂位置提供基础。有助于在后续控制中更精准地获取机械臂位姿信息，从而影响末端位姿控制的准确性。

运动轨迹收敛性能可以用来描述耦合模块扩展状态观测器对机械臂的控制能力，以 X 轴、Y 轴方向上的实时轨迹坐标作为研究对象，则有实际坐标与理论运动曲线偏离度越小收敛性能越优的结论。针对机械臂运动轨迹收敛性能的研究如图 8 所示。

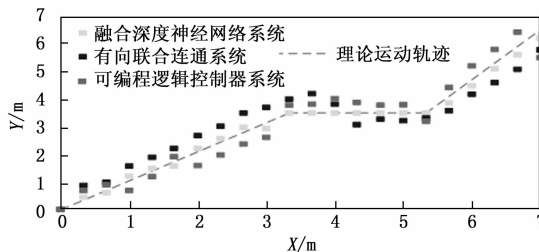


图 8 运动轨迹收敛性能

分析图 8 可知，当机械臂保持直线运动时（理论运动轨迹为水平直线），融合深度神经网络系统进行实验所得到的 X 轴、Y 轴坐标均与理论轨迹保持高度拟合关系；当机械臂保持变速运动时（理论运动轨迹为倾斜的直线），融合深度神经网络系统进行控制实验，得到 X 轴、Y 轴坐标与理论轨迹的拟合程度虽然略有下降，但整体偏离情况并不突出。基于有向联合连通系统、可编程逻辑控制器系统进行实验，X 轴、Y 轴坐标与理论轨迹之间的拟合关系始终不及融合深度神经网络的控制能力，故其在运动轨迹收敛性能方面的控制能力也相对较弱。因为设计的融合深度神经网络系统准确估

计了刚性元件与柔性结构之间的耦合关系，生成补偿调节信号抵消扰动影响。其无需精准系统数学模型的特点，使控制系统更灵活，适用于多种控制问题，对运动轨迹收敛性能和运动扰动补偿器响应有重要影响。

运动扰动补偿器响应曲线表现为机械臂关节角与实验时间的关系，反映了耦合模块扩展状态观测器对机械臂的控制作用，良好的补偿器响应曲线斜率一般小于1。图9为运动扰动补偿器响应曲线的具体实验情况。

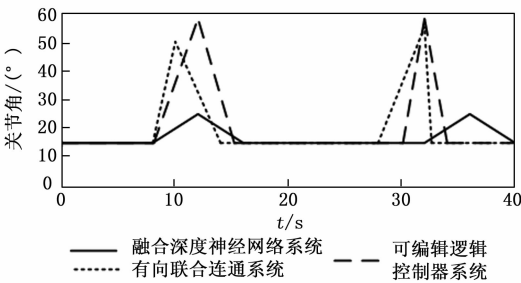


图9 运动扰动补偿器响应曲线控制

分析图9可知，基于融合深度神经网络系统控制机械臂，补偿器响应曲线斜率始终小于1，表示关节角在实验过程中能够得到有效控制。基于有向联合连通系统、可编程逻辑控制器系统控制机械臂，补偿器响应曲线斜率只能在部分情况下小于0，表示实验过程中关节角的受控相对有限，即这两组系统的应用不足以保障耦合模块扩展状态观测器对机械臂的有效控制。因为设计的融合深度神经网络系统通过三维空间中的机械臂运动位姿表示和正向运动学方程求解，深入剖析机械臂在三维空间中的运动规律，包括位姿变化、速度、加速度等运动学参数。这为机械臂的控制提供了理论依据，提高末端位姿控制和运动轨迹收敛性能的准确性。

以姿态误差为测试指标，对比3种系统在控制精度方面的性能差异，结果如表2所示。

表2 不同系统的控制标准差测试

实验次数	不同方法的控制误差		
	有向联合连通系统	可编程逻辑控制器系统	融合深度神经网络系统
1	0.12	0.25	0.05
2	0.10	0.23	0.09
3	0.11	0.19	0.03
4	0.19	0.22	0.08
5	0.16	0.20	0.06
平均值	0.136	0.218	0.062
标准差	0.034	0.024	0.023

由表2可知，融合深度神经网络系统的姿态误差平均值和标准差最低，分别为0.062和0.023，低于对比系统，验证了深度学习在复杂控制系统中的优势，更适用于机械臂控制中。

5 结束语

上述研究结合深度神经网络的非线性映射能力与刚柔耦合机械臂的动力学特性，旨在突破传统控制方法在柔性变形、不确定性等多个方面所面临的局限性问题，以实现机械臂的高效、稳定与精准控制。研究过程中，联合位姿跟踪微分器、扩展状态观测器以及运动扰动补偿器，对刚柔耦合机械臂的运动学与动力学模型进行了详细分析，通过对机械臂运动位姿的三维表达，可以保障末端传感器与其他元件之间的耦合关系，这也是该系统能够保障机械臂运动轨迹收敛性能的主要原因。在实际应用中，刚柔耦合机械臂所面对的工作环境较为复杂，可能受到噪声、振动等外界因素的干扰，而这也对控制系统的适应性与鲁棒性提出了更高的要求。未来，深度学习将向着提高样本训练效率、增强网络适应性等方向发展，在持续进行技术创新的同时，为推动工业的智能化发展做出贡献。

参考文献：

[1] 林红刚,袁锐波,罗 威,等. 一种小型码垛机械臂刚柔耦合动态特性分析 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37 (2): 324-330.

[2] 梁思琪,穆文鑫,刘 梅,等. 基于有向联合连通的多机械臂协同控制系统 [J]. 中国科学: 信息科学, 2025, 55 (5): 1239-1250.

[3] 徐建明,陈显汉. 基于 CODESYS 平台的移动机械臂运动控制系统设计 [J]. 浙江工业大学学报, 2024, 52 (3): 237-247.

[4] 韩团军,张 晶,黄朝军,等. 基于 sEMG 信号和 BPNN 算法的机械臂控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (19): 106-111.

[5] 董泽宇,刘 政,李 勇,等. 基于混合现实的可移动机械臂操作控制系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61 (4): 281-289.

[6] 刘 阳,李 貌,冯 浩. 基于多模态深度神经网络的无线传感网络 DDoS 攻击防御算法 [J]. 传感技术学报, 2025, 38 (6): 1097-1101.

[7] 陈华秋,杨建中,向单奇,等. 基于改进跟踪微分器前馈的 PMSM 复合控制 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52 (6): 164-170.

[8] 郭晓临,刘 洋,林 娜,等. 基于扩展状态观测器的量化无模型自适应迭代学习控制 [J]. 控制理论与应用, 2025, 42 (2): 253-262.

[9] 李相科,董朝宇,赵 鑫,等. 便携式车载高增益 DC-DC 变换器大信号稳定控制策略: 基于扰动观测器的反步技术 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (7): 2790-2802.

[10] 张泽宇,宫萍萍,郭华杰,等. 基于扰动观测器-Lyapunov 理论的稳压控制策略 [J]. 电力电子技术, 2024, 58 (5): 40-43.

(下转第 146 页)