

基于机器视觉和改进PID的压电柔性机械臂振动控制

马天兵, 周青, 杜菲, 刘健

引用本文:

马天兵, 周青, 杜菲, 等. 基于机器视觉和改进PID的压电柔性机械臂振动控制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(1): 141–150.
MA Tian-bing, ZHOU Qing, DU Fei, et al. Piezoelectric flexible manipulator vibration control based on machine vision and improved PID[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 141–150.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202801.0141>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

线结构光视觉系统标定新法及其振动测控应用

New calibration method of line structured light vision system and application for vibration measurement and control
光学精密工程. 2019, 27(1): 230–240 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192701.0230>

PILCO框架对飞行姿态模拟器系统的参数设计与优化

Parameter design and optimization of a flight attitude simulator system based on PILCO framework
光学精密工程. 2019, 27(11): 2365–2373 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192711.2365>

非共振式压电直线电机精密驱动及定位控制

Precision drive and position control of non-resonance piezoelectric stack linear motor
光学精密工程. 2017, 25(8): 2139–2148 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172508.2139>

神经网络分数阶 $PI\mu D\lambda$ 在压电叠堆控制中的应用

Application of neural network fractional order $PI\mu D\lambda$ to piezoelectric stack control
光学精密工程. 2015, 23(12): 3439–3445 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152312.3439>

大口径非球面光学研抛压力控制系统

Polishing pressure control system for large caliber aspherical optics
光学精密工程. 2015, 23(4): 1019–1026 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152304.1019>

文章编号 1004-924X(2020)01-0141-10

基于机器视觉和改进 PID 的压电柔性 机械臂振动控制

马天兵^{1,2,3}, 周青², 杜菲^{1,2*}, 刘健²

1. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽淮南 232001;
2. 安徽理工大学机械工程学院, 安徽淮南 232001;
3. 安徽理工大学矿山智能装备与技术安徽省重点实验室, 安徽淮南 232001)

摘要:为解决振动主动控制系统中接触式测量影响结构特性以及 PID 控制参数整定不理想的问题, 提出利用机器视觉技术测量结构振动, 并结合人工鱼群算法优化的 PID 进行振动控制。首先, 选择刚柔双关节机械臂作为研究对象, 搭建实验平台并设计正交试验, 探究刚柔耦合机械臂振动情况, 并确定振动控制中电机参数的设置; 其次, 利用 CCD 相机采集机械臂末端标记点振动图像, 并处理得到振动位移, 将其作为控制系统输入; 最后, 选择人工鱼群算法对 PID 控制器参数进行优化, 控制器输出信号经输出卡转化为控制电压, 再经功率放大器放大, 驱动压电作动片实现振动控制。实验结果表明, 相较于传统参数整定 PID 平均 44.06% 的控制效果, 优化后的 PID 算法平均控制效果可达到 57.54%, 验证了基于视觉测振的优化 PID 控制系统的可行性和优越性。

关键词: 柔性机械臂; 机器视觉; PID 控制; 人工鱼群算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202801.0141

Piezoelectric flexible manipulator vibration control based on machine vision and improved PID

MA Tian-bing^{1,2,3}, ZHOU Qing², DU Fei^{1,2*}, LIU Jian²

1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
 2. Department of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
 3. Anhui Key Laboratory of Mine Intelligent Equipment and Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)
- * Corresponding author, E-mail: 453589872@qq.com

Abstract: Considering the problem that the contact measurement influenced structure characteristics and the PID control parameter setting were not ideal in the vibration active control system, the machine vision technology was used to measure the vibration of the structure, and the vibration control

收稿日期: 2019-08-13; **修订日期:** 2019-10-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51305003); 安徽省博士后基金资助项目(No. 2017B172); 安徽理工大学
国家自然科学基金预研项目(No. 2016yz004); 安徽省高校自然科学研究重大项目(No. KJ2015ZD19)

was carried out with the PID optimized by artificial fish swarm algorithm. Rigid and flexible double-joint mechanical arm was selected as the research object. Firstly, the experimental platform was set up and the orthogonal test was designed to explore the vibration situation of rigid-flexible coupling mechanical arm and determine the motor setting parameters for subsequent vibration control; Secondly, CCD camera was used to capture the vibration image of the marker at the end of the mechanical arm, and the vibration displacement was obtained by processing and was used as the input of the control system. Finally, the artificial fish swarm algorithm was selected to optimize the PID parameters. The output signal of the controller was converted into control voltage by the output card. The control voltage was amplified by the power amplifier and driven the piezoelectric actuator to realize vibration control. The experimental results show that the average control effect of the optimized PID algorithm can reach 57.54% compared with the traditional PID control effect of 44.06%, which verifies the feasibility and superiority of the optimized PID control system based on visual vibration measurement.

Key words: flexible manipulator; machine vision; PID control; artificial fish swarm algorithm

1 引言

柔性机械臂在自动装配、精密加工以及航空航天等诸多行业发挥着重要作用,但由于其尺寸大、质量低的结构特点,在工作中会产生较为复杂的颤振,影响其运转精度及使用寿命^[1-2]。因此,需要对其振动进行测量与控制。

振动测量常采用压电式的测量方法,Tian^[3]根据电缆振动特性,设计了一款基于压电效应的传感器对电缆的振动加速度进行了测量;曹丽曼^[4]选择压路机作为振动测量对象,利用压电式加速度传感器对其振动进行了测量。压电测量方法具有一定的精度,但其接触式的测量方式会改变被测结构的动力学特性,且换算过程存在一定的误差。近年来,非接触的机器视觉技术被引入振动测量之中。陈若珠^[5]为测量振动台的振动情况,选择视觉法作为测量方案,完成了振动台振动的准确测量;徐超^[6]等将视觉测量法运用于大柔性结构的振动测量之中,也取得了较好的测量效果。相关的测振研究对机械臂的振动测量提供了一定的参考。

在振动控制系统中,控制策略是控制的关键^[7-8]。PID控制凭借自身原理简单、适应性强等特点,成为目前被广泛应用的基本控制算法,吴金华^[9]利用PID算法对半导体的温度进行了控制;郭咏雪^[10]将PID控制方法应用于双轴串联的旋转机械的振动问题。相关算法研究均表明了PID

控制的普遍适用性和有效性。但PID控制效果的好坏依赖于不同环节参数的选择,PID参数选择方法包括离线参数整定和在线自整定,其中,自整定方法有模糊PID、神经网络PID等。朱瑛^[11]将模糊自适应PID运用于飞行器的稳定控制中。龚兰芳^[12]利用自适应PID设计了机器人的位姿控制器。自适应PID虽具有较高的适应性,但在控制中易造成控制器超调,且进入稳定状态的时间较久^[13-14]。离线整定参数可利用Ziegler-Nichol响应法、Hang提出改进的Z-N临界震荡法以及Cohen-Coon响应曲线方法等,但是参数选取过程较为繁琐,且参数精度不高,控制效果一般。

针对上述问题,本文选择刚柔双关节机械臂作为被控对象,设计基于机器视觉与优化PID的振动控制系统。利用机器视觉技术与图像处理方法对振动位移进行测量,并将测量结果作为系统控制器输入,选择人工鱼群算法对PID参数进行优化选取,控制器输出信号经输出卡转化为控制电压,再由功率放大器放大,控制压电作动片实现振动抑制,最后利用实验验证控制效果。

2 整体方案

基于机器视觉测量与优化PID的柔性机械臂控制系统的具体控制过程及设备连接如图1所示,控制对象为步进电机驱动下的刚柔双关节机械臂,相机采集振动图像传输至PC机,经处理得

到振动位移,将位移作为优化 PID 控制器的输入,并由输出卡输出控制电压,经功率放大器放大,控制柔性臂杆上的压电作动片,实现振动的主动控制。

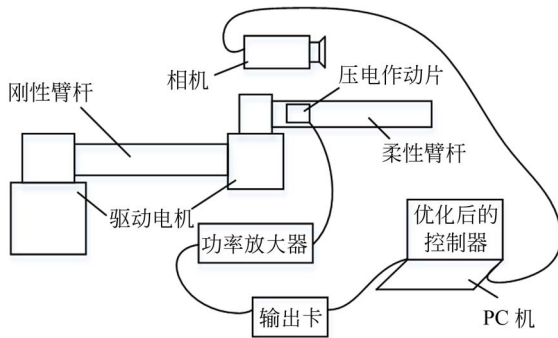


图 1 主动控制系统装置示意图

Fig. 1 Diagram of active control system device

为实现上述方案,需要首先设计并搭建柔性机械臂振动控制平台;其次设计视觉测振系统并验证其准确性;然后获取机械臂的模态参数,利用人工鱼群算法对 PID 控制参数进行寻优得到优化后的 PID 控制器,并仿真验证控制有效性;最后综合利用视觉测振与优化 PID 进行振动控制实验。

3 控制系统实验平台搭建

双关节刚柔机械臂的柔性臂杆选择 $300 \times 15 \times 1$ mm 的不锈钢材料,柔性臂杆末端设置垂直臂杆的标记平面,材料为轻质泡沫片,重量可忽略不计,其上标记点为半径 2 mm 的黑色实心圆;刚性臂杆选择 $200 \times 15 \times 6$ mm 的碳钢材料,设计并加工相关连接关节等部件;根据转矩等信息选择柔性、刚性臂杆驱动电机分别为 J-4218HB2403、J-5718HB3401 步进电机(下文分别记为大电机、小电机),并配置相应驱动器和控制器;根据振动特性,选择最高帧速率 120 帧/s,30 万像素,Imaging Source 公司生产的 DMK 33G618 CCD 相机,相机布置于柔性臂杆驱动电机处,并使其视野方向平行于柔性臂杆;压电作动片选择 22×19.5 mm 的压电陶瓷单晶片,极板面积为 18×18 mm,压电常数 $d_{31} = 220 \times 10^{-12}$ C/N,其两表面极板间距离 $d = 0.2$ mm,粘贴位置为臂杆根部;功率放

大器选择南京佛能科技有限公司的 HVD-300D 功率放大器;数据输出卡选择 NI 公司的 USB-6003,其同时具有数据采集和输出功能;根据上文控制系统方案及控制过程进行实验平台的搭建,整体实物如图 2 所示。

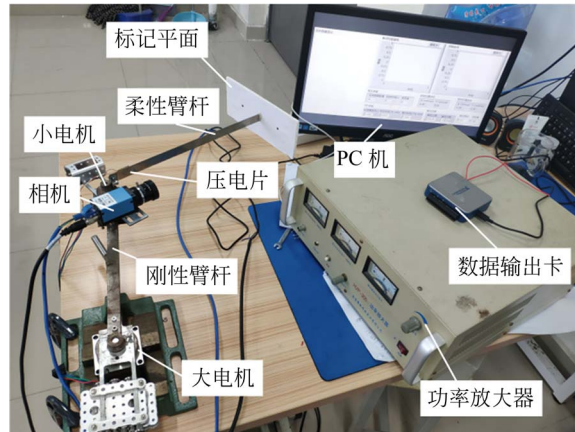


图 2 实验平台实物

Fig. 2 Physical objects of experimental platform

4 刚柔耦合下的机械臂振动特性分析

柔性机械臂在驱动电机激励下会产生非线性振动,而刚柔臂杆耦合下的振动更为复杂。为探究电机不同转速、细分和频率等设置对其振动的影响,并确定后续控制设置情况,本文选择实验法对其振动特性进行探究。实验中,对系统作出如下前提条件^[8]:

(1)仅考虑柔性机械臂转动方向处的振动位移,不考虑其轴向及剪切变形;

(2)忽略重力及阻力等因素对系统的影响。

被研究机械臂的驱动电机为步进电机,其转速由细分、驱动脉冲频率以及步距角共同决定,具体关系为: $\omega = f_q \theta_b / n_s$, 其中, ω 为转动角速度,单位为 $(^\circ)/s$; f_q 为电机驱动脉冲频率,即每秒输出的脉冲数; θ_b 为电机步距角, n_s 为电机细分数。上述参数量及其可选值较多,导致组合的参数设置组量过大,逐一试验耗时巨大。针对上述情况,拟采用正交试验的方法设计试验方案。

从变量中选择大、小电机的细分数,以及小电机角速度作为待定参数。根据工程实际选取 32, 64, 128 作为电机细分的 3 个水平;选取 $5(^\circ)/s$, $10(^\circ)/s$, $15(^\circ)/s$ 作为小电机角速度的 3 个水平,

并且设定末端总速度为 $20(^{\circ})/s$, 选择 L9 正交试验表进行试验方案设计, 具体如表 1 所示。其中, ω_1, ω_2 为大、小电机的角速度, 单位为 $(^{\circ})/s$; n_{s1}, n_{s2} 为大小电机的细分数; f_{q1}, f_{q2} 为大小电机驱动脉冲速率, 单位为 pulse/s。

表 1 正交试验表

Tab. 1 Orthogonal test table

实验组号	自变量因素			因变量因素		
	ω	n_{s2}	n_{s1}	ω	f_{q2}	f_{q1}
1	5	32	32	15	88	266
2	5	64	64	15	177	533
3	5	128	128	15	355	1 066
4	10	32	64	10	177	355
5	10	64	128	10	355	711
6	10	128	32	10	711	177
7	15	32	128	5	266	355
8	15	64	32	5	533	88
9	15	128	64	5	1 066	177

利用实验平台的压电片、采集卡以及 PC 进行测量, 将柔性臂杆转动至刚性臂杆的直线延长线位置, 作为初始位置。设定两步进电机转动方向一致; 同时启动大小电机, 采样时间设为 10 s, 采样率设为 1 k。按照表 1 参数分别设置并进行 9 组实验, 得到 9 组原始时域信号。由于电机电源的干扰, 需要对原始信号进行去噪, 利用 Matlab 进行低通滤波处理, 截止频率选择 45 Hz, 得到最终结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 9 组情况下的柔性机械臂振动, 均呈现出先大幅值振动然后逐渐衰减至稳定的小幅值振动的趋势。对各组信号进行小波变化和归类分析得, 电机转速对进入平稳阶段的时间有一定影响, 并且小电机的转速越大、或者大电机的转速越小, 振动进入平稳阶段的时间越早。电机细分越小, 引起的振动强度就越大, 并且大电机细分的影响较大。相比于转速的影响, 电机细分对振动强度的影响较大。为体现测量与控制效果, 从上述 9 组实验中选择总体振动幅值最大的 3 组进行后续研究, 即第 1、2 和 4 组。

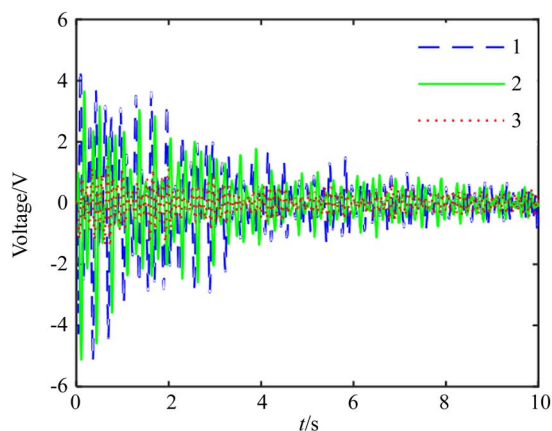
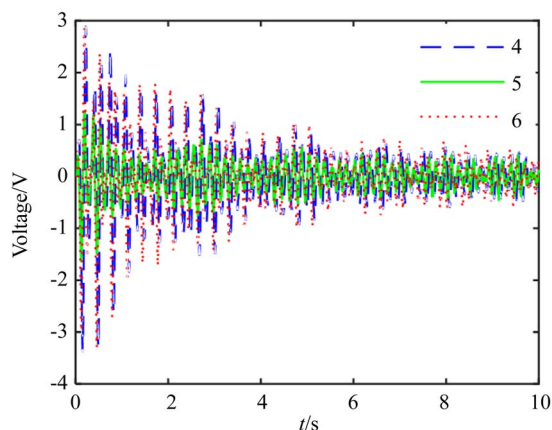
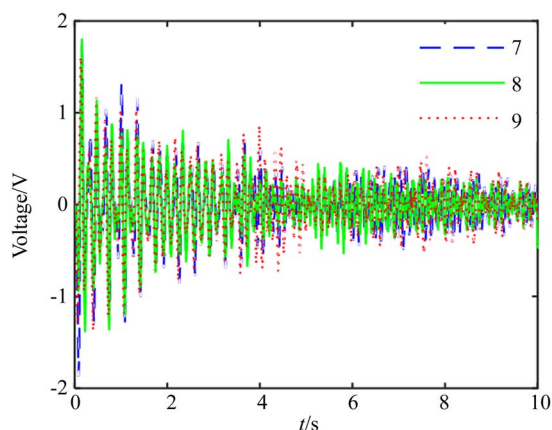
(a) 第 1~3 组结果
(a) Results in groups 1-3(b) 第 4~6 组结果
(b) Results in groups 4-6(c) 第 7~9 组结果
(c) Results in groups 7-9

图 3 第 1~9 组测量结果

Fig. 3 Measurement results of group 1-9

5 基于机器视觉的测振系统设计

5.1 系统原理及设计过程

视觉测振系统利用相机采集振动图像,并提取图像特征,在不接触被测结构的前提下,完成对柔性机械臂末端振动位移的测量。由于标记点图像特征提取过程较为简单,且精度较高,采集标记点振动图像的测量方式理论上可达到像素级精度,保证测量精度的同时,减少了运算复杂度,避免了后续控制时滞。根据设计方案及采样定理可知,振动测量的最高频率为相机图像采集速率的一半,所以 120 帧速率的 CCD 相机最高可完成 60 Hz 振动信号的采集。

系统软件程序包括采集卡控制和数据处理及图像处理,均在 PC 端 LabVIEW 平台上运行,其中,采集卡控制及采集设置利用 DAQ 助手模块实现;图像处理部分利用 Vision 模块中的视觉助手程序实现,具体处理过程包括相机的标定、图像滤波、阈值分割以及质心位置确定;编写 LabVIEW 程序控制两者同时采集、记录数据,并对采集信号进行处理得到振动位移结果。

5.2 测振实验与结果对比

为验证系统测振准确性,并使实验结果具有可对比性。视觉测振的同时,利用粘贴于柔性臂杆根部的压电片进行压电式测量,利用数据输出卡的采集功能,采集并记录测量信号。

设置 CCD 相机帧速率为 90 帧/s,采集卡的采样频率同样设置 90 Hz,按照表 1 中 1,2 和 4 组参数进行设置,同样采用上节的初始位置,同时启动大小电机,转动 10 s 后停止,同时采集并记录 10 s 数据,如图 4 所示,其中,压电法、视觉法分别表示压电式测量及视觉测量结果。对测量结果进行频谱分析,得到结果如图 5 所示(考虑篇幅问题,仅展示第 1 组的结果)。

为更具体地对两者测量结果进行对比,定义两者测量差异:

$$E_c = 2 | f_y - f_s | / (f_y + f_s), \quad (1)$$

其中: f_y , f_s 分别为压电测量方法、视觉测量方法测量结果频域最大峰值的振幅。根据此定义得到 3 组实验的测量差异分别为 1.87%, 0.84% 和 1.93%, 平均差异为 1.54%。从测量信号特

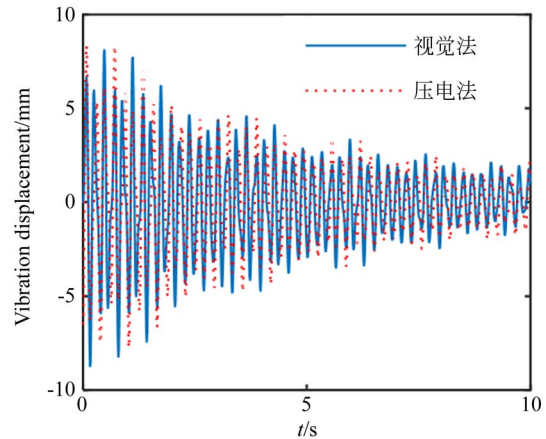


图 4 时域结果对比

Fig. 4 Comparison of time domain measurement results

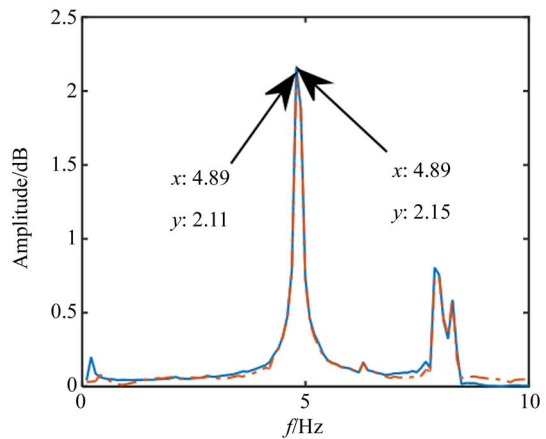


图 5 频域结果对比

Fig. 5 Comparison of frequency domain measurement results

征角度,两种测量方法在误差范围内结果相同,又由于常用压电测量法的可行性,说明了机器视觉方法能实现其振动位移测量,具有一定的可行性。

6 基于人工鱼群优化的 PID 控制

6.1 算法原理及优化方案

PID 是在工业控制中,将被控对象的实时响应与设定目标的误差的比例、积分、微分进行的反馈控制器,控制系统输入 $e(t)$ 与输出 $u(t)$ 的关系为:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p \tau_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (2)$$

式中: K_p 表示比例参数, T_i 表示积分时间参数, τ_d 表示微分时间参数, 均为系统的可调节量。

人工鱼群算法 (Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA) 是李晓磊博士在 2002 年提出的智能优化算法。鱼往往能自行或尾随其他鱼找到营养物质多的地方, 因而鱼生存数目最多的地方一般就是本水域中营养物质最多的地方, 人工鱼群算法就是根据这一特点, 通过构造人工鱼来模仿鱼群的觅食、聚群及追尾行为, 从而实现寻优^[15]。

为得到针对柔性臂振动的控制系统中最优的 PID 控制器, 利用上述智能算法对 PID 控制算法的参数进行最优选取。

具体的优化过程为:

(1) 设计 PID 控制器的柔性机械臂振动仿真系统, 其中, PID 参数为 k_p, k_i, k_d ;

(2) 将鱼群个体状态以三维向量 $\mathbf{X} = [k_p, k_i, k_d]$ 表示, 并初始化每条鱼的状态, 设置鱼群数量、认知范围、迭代次数等参数;

(3) 将初始鱼群中的个体状态参数作为 PID 控制参数, 并分别进行控制仿真, 将控制误差的绝对值之和作为适应度, 取最优状态及此状态下的适应度纪录于公告板;

(4) 对每条鱼个体进行评估, 选择具体行为, 包括觅食、聚群、追尾和随机行为;

(5) 执行各行为, 并更新鱼群中每个鱼个体的状态, 形成新状态的鱼群;

(6) 将新鱼群中的个体状态参数作为 PID 控制参数, 再次进行控制仿真, 利用最优状态及最优适应度更新公告板;

(7) 若公告板信息符合要求, 或者迭代代数超过设置的最大迭代次数, 算法结束, 否则再次执行步骤 4~7。

6.2 模态参数获取

为了完成 PID 参数的优化, 需要构建柔性双关节机械臂的振动控制仿真系统, 系统包括 PID 控制器、目标函数、状态方程及激励响应, 在电机驱动下, 柔性臂杆产生振动响应, 响应与目标函数的差值作为控制器输入, 控制器输出控制柔性臂杆。其中, 电机激励下的柔性臂杆响应模型, 参考相关文献^[16], 利用拉格朗日方程及假定模态法进行建立, 并考虑关节柔性进行模型修正, 模型中参数采用实验平台参数进行设置, 得到模型的电机激励响应结果如图 6 所示。

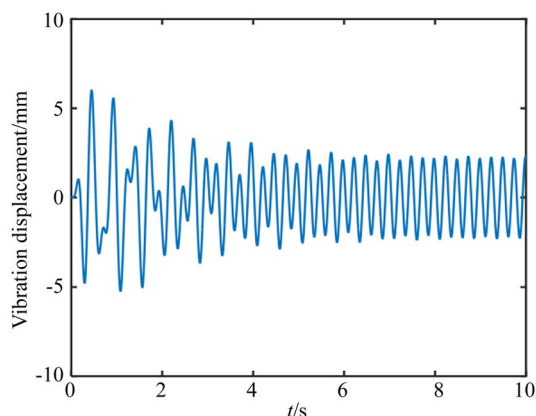


图 6 电机激励响应

Fig. 6 Response of motors to excitation

而系统中的柔性臂杆状态方程需要通过实验进行确定, 其空间状态方程为:

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\mathbf{KM}^{-1} & -\mathbf{CM}^{-1} \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\delta \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix} \mathbf{u}, \quad (3)$$

其中: \mathbf{X} 表示振动位移矩阵, \mathbf{u} 表示输入矩阵, \mathbf{K} , \mathbf{M} , \mathbf{C} 分别表示柔性悬臂梁的模态刚度、模态质量和模态阻尼, δ 为力因子。

振动控制目标为一阶模态, 设一阶模态的刚度、质量、阻尼为 k, m, c , 查阅相关资料可知, 参数满足如下方程:

$$2\xi\omega_n = \frac{c}{m}, \quad \omega_n^2 = \frac{k}{m}, \quad (4)$$

其中: ξ 为阻尼比, ω_n 为固有频率。

根据上述公式可知, 柔性臂杆的状态方程, 可通过结构阻尼比以及固有频率进行求解, 而阻尼比以及固有频率, 可利用扫频激励实验进行获取。利用上节测振系统, 输出 0.1~10 Hz 的 10 s 扫频输出信号驱动柔性臂杆上的压电片作动, 设置 90 Hz 的采样率测量其末端位移, 结果如图 7 所示。对结果进行频谱分析, 结果如图 8 所示。

根据响应曲线频谱结果可知, 其峰值频率为 $f = 4.395$ Hz, 故固有频率 $\omega_n = 2\pi f = 27.615$ Hz。根据半功率带宽法对频谱结果进行处理, 频谱曲线峰值 $1/\sqrt{2}$ 高度, 即 0.023 7 高度的两半功率点频率为 $f_1 = 4.255$ Hz, $f_2 = 4.634$ Hz, 可得阻尼比的估计值为:

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f} = 0.0431. \quad (5)$$

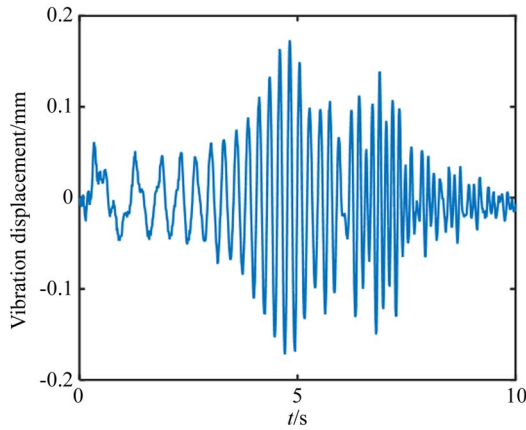


图 7 扫频激励响应
Fig. 7 Sweep response

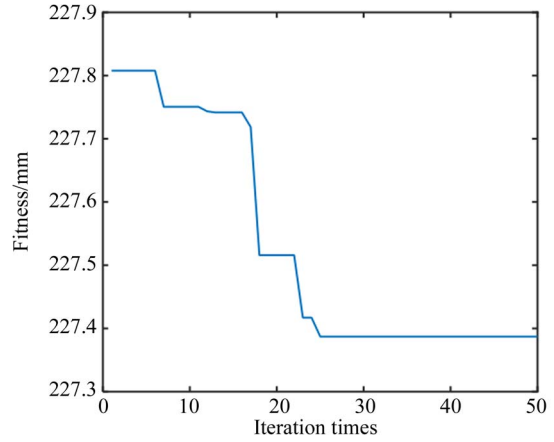


图 9 迭代结果
Fig. 9 Iterative results

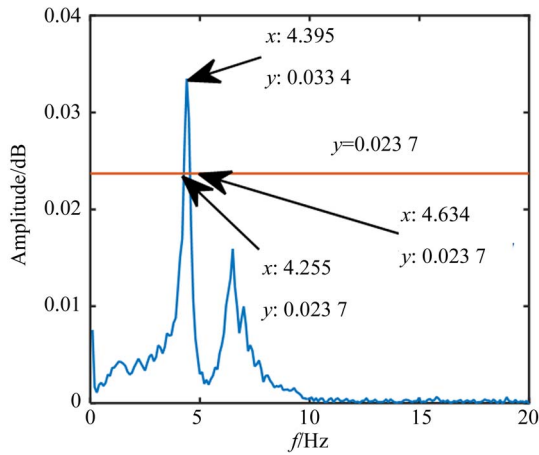


图 8 响应曲线频谱结果
Fig. 8 Spectrum results of response curve

状态方程中的 $\delta \mathbf{M}^{-1}$ 中的 δ 为力因子,此值影响输出比例大小,通过调节输出大小并对比实际响应与仿真结果得到 $\delta \mathbf{M}^{-1} = 0.27$ 。综合上述实验结果及公式(3),最终得到其空间状态方程为:

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -762.59 & -2.3804 \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.27 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (6)$$

6.3 仿真控制结果对比

根据优化方案进行参数优化及控制仿真,设置人工鱼的感应范围 Visual 为 3,可移动的最大的单位距离 Step 为 0.3,人工鱼数量 $N=10$,迭代最大次数为 50,鱼群状态 $[k_p, k_i, k_d]$ 范围分别为: $[(-20, 20), (-10, 10), (-10, 10)]$ 。运行优化算法,得到结果如 9 所示。

从优化曲线中可以看到,经过 50 代演算,适应度达到了最优结果 71.09,此时,鱼群最优状态为 $[14.71, 7.45, 9.56]$,利用此 PID 参数进行振动控制仿真,得到控制效果如图 10 所示。

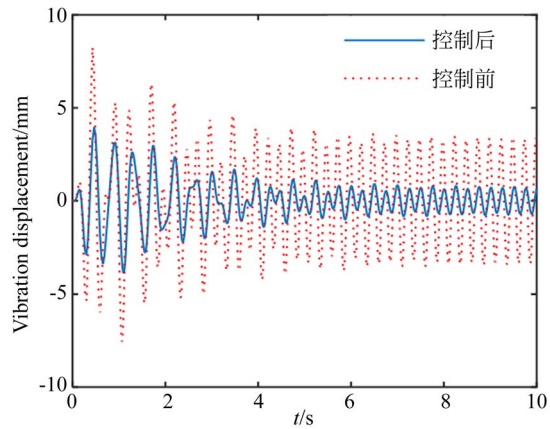


图 10 优化参数的仿真实验结果
Fig. 10 Simulation experiment results of optimizing parameters

为进一步说明人工鱼群参数优化法的优越性,选择 Ziegler-Nichol 响应曲线法(Z-N 法)进行参数选取以对比控制效果。

Z-N 法是根据阶跃响应曲线信息结合经验公式来整定参数的,经验公式为:

$$K_p = \frac{1.2T}{K\tau}, K_i = 2\tau, K_d = 0.5\tau, \quad (7)$$

其中,比例系数 K 表示阶跃响应稳定后的幅值;滞后时间 τ 表示震荡前曲线拐点的切线与 x 轴的交点的横坐标;时间常数 T 为震荡前曲线拐点的

切线纵坐标为 K 时的横坐标减去纯滞后时间。

仿真系统中得到系统的阶跃响应信号,如图 11 所示。对其进行处理可知 $K=0.00354$, $\tau=1.00$, $T=0.059$ 。根据公式 6 可得到 PID 参数 $K_p=19.99$, $K_i=2$, $K_d=0.5$,将 Z-N 法得到的参数结果作为振动控制参数,仿真结果如图 12 所示。

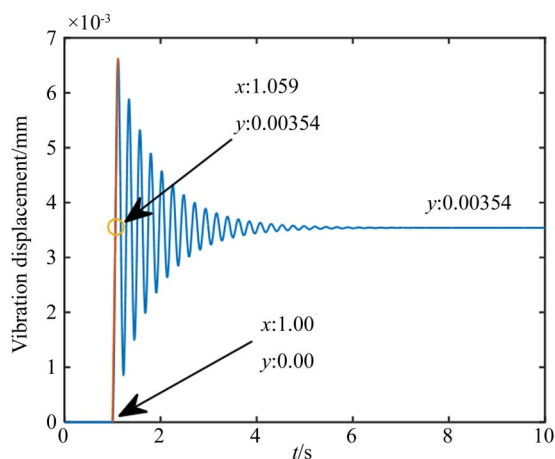


图 11 阶跃响应曲线

Fig. 11 Curve of step response

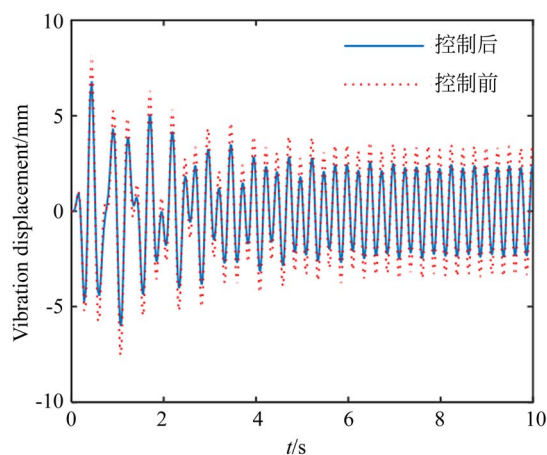


图 12 整定参数的仿真实验结果

Fig. 12 Simulation experiment results of setting parameters

根据上述仿真实验结果可知,经过智能算法优化的 PID 控制方法能够实现振动抑制,并且,相较于 Z-N 法整定参数,优化参数的控制器仿真控制效果更好,且无需进行繁琐的处理,具有一定的优越性。

7 基于视觉测振及优化 PID 的振动控制实验

控制程序在上文测振程序上进行扩展,增加输出卡设置以及 PID 控制模块。按照表 1 中 1,2 和 4 组参数进行电机设置,测振系统采样率设置为 90 Hz;数据输出卡为连续输出模式;设定输出范围为 $-10\sim 10$ V。启动电机运行程序,调节功率放大器输出幅值比例大小,运行 10 s 并纪录相关信号。

为验证控制效果,在无控制、优化参数以及整定参数情况下分别进行实验,并对各实验结果进行频谱分析,结果如图 13、14 所示(考虑篇幅问

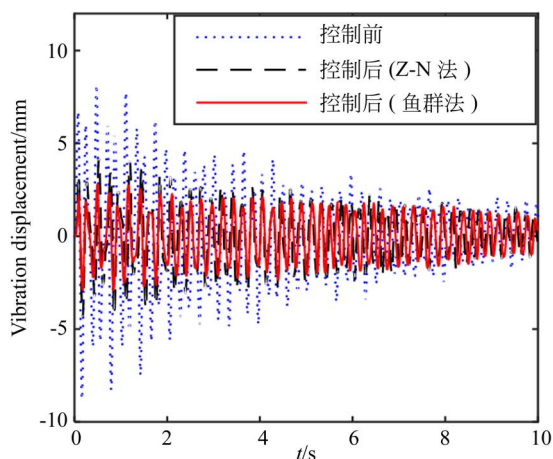


图 13 控制前后振动位移对比结果

Fig. 13 Contrast results of vibration displacement before and after control

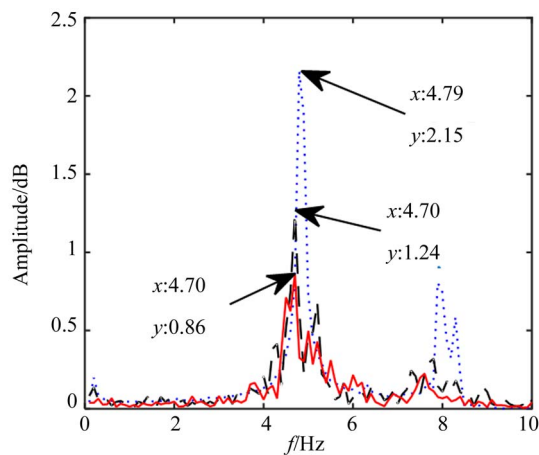


图 14 控制前后频谱对比结果

Fig. 14 Contrast results of spectrum before and after control

题,仅展示第 1 组的结果)。

为进一步说明控制效果,取频谱图中的峰值作为信号强度,控制前后强度变化率作为控制效果,第 1、2 和 4 组参数下实验的控制效果及平均值如表 2 所示。

表 2 控制效果
Tab. 2 Control effect (%)

	Z-N 法	鱼群法
第 1 组	33.77	55.26
第 2 组	42.32	60.00
第 4 组	56.11	57.38
平均值	44.06	57.54

综合上述结果可知,两种方法得到的参数均能实现振动位移的控制,从控制时域结果可以看出,两种方法对前几秒起步阶段的振动起到了较好的抑制效果。从频谱分析结果可以看出,Z-N 法与鱼群法的平均控制效果分别为 44.06%,

57.54%,且每组实验中鱼群法的控制效果均有相应的提升。实验结果验证了优化参数后的算法具有较好的振动抑制效果。

8 结 论

文中提出的一种基于机器视觉测振并结合人工鱼群优化 PID 的柔性机械臂振动控制方法,在振动测量部分,设计机器视觉测振与压电片压电式测振两种方法的比较,并通过测量实验结果的对比,验证了利用机器视觉技术与图像处理方法设计的振动测量系统的可行性与准确性。在振动控制部分,通过控制实验结果可以看出,利用视觉测量方法以及人工鱼群优化的 PID 算法实现了刚柔双关节机械臂的振动位移控制,并达到了平均 57.54%的控制效果,相较于传统整定参数控制器平均 44.06%的控制效果,具有一定的优越性。因此,基于人工鱼群优化 PID 振动控制方法能够很好地实现对柔性机械臂的振动控制,且控制效果可观。

参考文献:

- [1] QIU Z C. Adaptive nonlinear vibration control of a Cartesian flexible manipulator driven by a ballscrew mechanism[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 30(6): 248-266.
- [2] 刘宏,蒋再男,刘业超. 空间机械臂技术发展综述[J]. *载人航天*, 2015, 21(5): 435-443.
LIU H, JIANG Z N, LIU Y CH. Review on the development of space manipulator technology [J]. *Manned Spaceflight*, 2015, 21(5): 435-443. (in Chinese)
- [3] TIAN B, LIU H Y, YANG N, *et al.*. Design of a piezoelectric accelerometer with high sensitivity and low transverse effect [J]. *Sensors*, 2016, 16(10): 1587.
- [4] 曹丽曼. 压电式加速度传感器振动测量应用研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2015, (7): 164-166.
CAO L M. Research on vibration measurement application of piezoelectric acceleration sensor [J]. *Automation & instrumentation*, 2015, (7): 164-166. (in Chinese)
- [5] 陈若珠,赵珊. 基于机器视觉技术的振动台试验变形位移测量方法研究[J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24(6):56-59.
CHEN R ZH, ZHAO SH. Measuring method re-
- search of deformation displacement in shaking table test based on machine vision technology [J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, 24(6):56-59. (in Chinese)
- [6] 徐超,张一凡,韩晓明,等. 基于机器视觉的大柔性结构振动位移测量[J]. *振动. 测试与诊断*, 2017, 37(4): 781-786+846.
XU CH, ZHANG Y F, HAN X M, *et al.*. Vibration displacement measurement of large flexible structures based on machine vision [J]. *Vibration Testing and Diagnosis*, 2017, 37(4): 781-786 + 846. (in Chinese)
- [7] 邱志成,肖骏. 线结构光视觉系统标定新法及其振动测控应用[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1):235-245.
QIU ZH CH, XIAO J. New calibration method of linear structured light vision system and its application in vibration measurement and control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 235-245. (in Chinese)
- [8] 卢明明,陈建中,周家康,等. 改进人工蜂群在三维椭圆振动切削颤振抑制中的应用[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(4):879-888.
LU M M, CHEN J ZH, ZHOU J K, *et al.*. Application of improved artificial bee colony in chatter suppression of three-dimensional elliptical vibration

- cutting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 879-888. (in Chinese)
- [9] 吴金华. 基于 PID 算法的半导体温度控制系统的设计[J]. *机电技术*, 2016(6):9-13.
WU J H. Design of semiconductor temperature control system based on PID algorithm [J]. *Electromechanical Technology*, 2016(6):9-13. (in Chinese)
- [10] 郭咏雪, 何立东, 王铜. 基于磁流变阻尼器的双跨轴系 PID 振动控制研究[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(3): 67-71.
GUO Y X, HE L D, WANG K. Research on PID vibration control based on magnetorheological damper with dual cross-axis system [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 45(3): 67-71. (in Chinese)
- [11] 马驰骋, 罗亚军, 张希农, 等. 基于模糊 PID 控制器的变质量-柔性梁结构振动主动控制[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(23): 197-203+240.
MA CH CH, LUO Y J, ZHANG X N, *et al.*. Active vibration control of variable mass flexible beam structure based on fuzzy PID controller [J]. *Vibration and Impact*, 2018, 37(23): 197-203+240. (in Chinese)
- [12] 龚兰芳, 许伦辉. 四旋翼机器人运动控制与自适应 PID 控制算法设计[J]. *机械设计与制造*, 2018(12):254-256.
GONG L F, XU L H. Four-rotor robot motion control and adaptive PID control algorithm design [J]. *Mechanical design and manufacturing*, 2018(12):254-256. (in Chinese)
- [13] 熊蕊, 刘向东. 含 PID 控制器的迟滞非线性控制系统的主共振及奇异性[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(8): 72-77.
XIONG R, LIU X D. Main resonance and singularity of hysteresis nonlinear control system with PID controller [J]. *Vibration and Impact*, 2014, 33(8):72-77. (in Chinese)
- [14] 穆叶, 胡天立, 陈晨, 等. 采用模拟 PID 控制的 DFB 激光器温度控制系统研制[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 55-61.
MU Y, HU T L, CHEN Ch, *et al.*. Development of temperature control system for DFB laser using simulated PID control [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 55-61. (in Chinese)
- [15] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法-人工鱼群算法[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
LI X L. A New Intelligent Optimization Method - Artificial Fish Swarm Algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese)
- [16] 王斌锐, 方水光, 金英连. 综合关节和杆件柔性的机械臂刚柔耦合建模与仿真[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(2): 211-215, 225.
WANG B R, FANG SH G, JIN Y L. Rigid-flexible coupling modeling and simulation of mechanical arm with joint and bar flexibility [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2012, 43(2): 211-215, 225. (in Chinese)

作者简介:

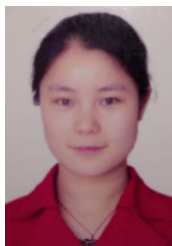


马天兵(1981—),男,安徽庐江人,博士,教授,2002年于安徽理工大学获得学士学位,2005年于安徽理工大学获得硕士学位,2014年于南京航空航天大学获得博士学位,现为安徽理工大学机电控制工程系主任,主要从事压电能量回收、振动主动控制方面研究。
E-mail:dfmtb@163.com



周青(1993—),女,安徽铜陵人,硕士研究生,2017年于安徽理工大学获得学士学位,主要从事振动主动控制方面的研究。E-mail:2311355319@qq.com

通讯作者:



杜菲(1981—),女,安徽舒城人,硕士,副教授,2002年于安徽理工大学获得学士学位,2008年于贵州大学获得硕士学位,主要从事微能量回收及振动控制方面研究。E-mail:453589872@qq.com