

基于数据 FCM 聚类的移动机器人关节横摆力矩振动控制系统设计

陈振庭, 陈富强, 许丽娟

(广州华商学院 人工智能学院, 广州 511300)

摘要: 针对实际空间移动机器人关节横摆振动问题开展研究; 由于其运动存在多体动力学耦合关系且关节间有弹性影响, 关节易横摆振动, 传统关节独立力反馈控制效果不佳; 硬件上, 采用力矩传感器检测关节横摆力矩, 设计 CPU + FPGA 结构的关节控制器硬件; 软件上, 经聚合经验模态分解提取关节横摆力矩振动信号特征, 引入模糊 C 均值聚类算法识别振动模式确定控制要求, 结合 PD 控制器和 LQR 控制结构建立联合控制策略, 并考虑关节力矩反馈和电机位置误差实现最终控制; 经测试, 对于移动机器人左前腿关节低频振动, 应用该系统后最大振动减弱到 0.22° , 确保了移动机器人运行稳定性。

关键词: 移动机器人; FCM 聚类; 横摆力矩; 关节振动; 控制器; 聚合经验模态分解

Design of Joint Lateral Torque Vibration Control System for Mobile Robots Based on Data FCM Clustering

CHEN Zhenting, CHEN Fuqiang, XU lijuan

(School of Artificial Intelligence, Guangzhou Huashang College, Guangzhou 511300, China)

Abstract: Research is carried out on the yaw vibration of joints in actual space mobile robots. Due to the multi-body dynamic coupling relationship and elastic influence between joints in its motion, the joints is prone to yaw vibration, and the traditional joint-independent force-feedback control has poor effects. In terms of hardware, a torque sensor is used to detect the joint yaw torque, and a joint controller hardware with a CPU+FPGA structure is designed. In terms of software, the characteristics of the joint yaw torque vibration signal are extracted through ensemble empirical mode decomposition, and the fuzzy C-means (FCM) clustering algorithm is introduced to identify the vibration mode and determine the control requirements. The combined control strategy is established by combining the proportion derivative (PD) controller and the linear quadratic regulator (LQR) control structure, considering joint torque feedback and motor position error to achieve final control. The test results show that for the low-frequency vibration of the left front-leg joint of the mobile robot, after the application of this system, the maximum vibration of the vibrating joint is reduced to 0.22° , ensuring the operation stability of the mobile robot.

Keywords: mobile robots; FCM clustering; lateral moment; joint vibration; controller; aggregate empirical mode decomposition

0 引言

移动机器人在各个领域得到广泛应用后, 其工作环境越来越复杂, 工作难度也不断增长。受到外部环境和

内部因素的综合影响, 移动机器人在运行过程中, 其关节往往会产生横摆力矩振动, 这主要是因为关节高速运动或大传动力导致连杆位置与电机位置出现偏差, 或者机器人关节内部传动部件磨损、变形、松动等现象引起

收稿日期:2024-11-04; 修回日期:2024-12-13。

基金项目:广州华商学院校内导师制科研基金资助项目(2024HSDS12)。

作者简介:陈振庭(1993-),男,硕士,助教。

许丽娟(1979-),女,硕士,副教授。

引用格式:陈振庭,陈富强,许丽娟. 基于数据 FCM 聚类的移动机器人关节横摆力矩振动控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4): 130-138.

的。不仅影响了机器人的稳定性和精度,还可能对其结构和性能造成损害^[1]。因此,如何有效地控制移动机器人关节的横摆力矩振动,成为当前机器人研究领域的重要课题。

文献[2]提出基于模糊整定比例积分(PI, proportion integral)参数的振动控制方法,结合假设模态法、拉格朗日动力学方程,建立面向目标机械关节的动力学模型,以此来体现系统传动特性。考虑关节振动控制要求,设计基于PI控制器和模糊规则的控制策略,达到抑制关节振动的目标。但是,模糊控制规则的设定依赖于设计者的经验和专业知识,导致该控制方法的应用可靠性较差。文献[3]提出基于鲁棒模糊滑模控制的振动控制技术,依托于线性动量守恒、角动量守恒等概念,建立关节动力学方程。通过具有强耦合特点的奇异摄动模型,设计混合型智能控制器,并考虑关节振动模式,与鲁棒模糊滑模控制器、考虑反馈的线性二次型最优控制器进行选择结合,解决关节力矩振动问题。但是,面对外部干扰突然增大或参数变化剧烈的情况,该控制策略响应的实时性较差,无法满足控制要求。文献[4]提出基于干扰观测器的振动抑制策略,采用连续体振动理论与拉格朗日方法,针对机器关节建立动力学方程,并通过干扰观测器获取关节振动信息。在此基础上引入超限补偿控制律,生成基于PI控制器的关节振动控制方案。但是,该策略依赖于精确的动力学模型来描述柔性机械臂的行为,受到不确定参数的影响,控制策略实施后振动幅值依旧较大。文献[5]提出基于大数据分析的关节震颤控制技术,针对运动中的机器人关节进行分析,获取关节振动信号。经过自适应滤波处理、数据挖掘处理,提取关节震颤特征。以平抑振动为目标,应用线性傅里叶拟合方法,求出关节振动优化控制方案。但是,该技术依赖于大量的数据进行分析和处理,对于不同类型的机器人和工作环境,适应性较差。

数据模糊C-均值(FCM, fuzzy C-means)聚类算法的应用,为移动机器人关节横摆力矩振动控制系统的设计提供了新的思路。本文通过对关节振动数据的聚类分析,降低关节振动信号的独立性,强化机器人关节振动模式的识别精度,在此基础上生成对应的控制策略,在线性二次型调节器-比例微分(LQR-PD, linear quadratic regulator-proportion derivative)联合控制器的辅助下实现了对关节振动的有效抑制。

1 移动机器人关节横摆力矩振动控制系统整体设计

移动机器人关节横摆力矩振动控制系统旨在实现对机器人关节横摆力矩振动的有效控制,确保关节的稳定运行,进而提升整个移动机器人的运动精度和平衡

能力。

该控制系统主要由硬件和软件两部分构成。硬件部分包含力矩传感器和关节控制器,力矩传感器负责检测关节横摆力矩,关节控制器用于控制关节运动。软件部分涵盖关节动力学模型构建、振动模式识别、联合控制模块以及反馈控制。通过这些部分的协同工作,实现对关节横摆力矩振动的有效控制,确保移动机器人关节的稳定运行。系统整体设计如图1所示。

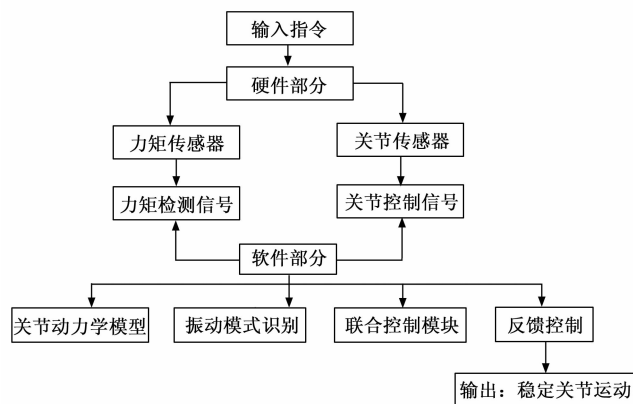


图1 系统整体设计框图

2 系统硬件部分

2.1 基于改进力矩传感器的关节横摆力矩检测

关节横摆力矩的大小和变化情况直接反映了关节的受力状态。如果横摆力矩过大或出现异常波动,会导致关节产生过度振动。这种过度振动不仅会影响关节自身的稳定性,还会进一步影响整个移动机器人的运动精度和平衡。因此,本节通过检测横摆力矩,可及时发现潜在的振动风险,采取相应的控制措施来抑制振动,确保关节在稳定的状态下运行。

本研究采用型号为AH35/CLF-H7的力矩传感器进行关节横摆力矩检测。该传感器的核心在于其内部弹性体结构,基于应力应变测量原理检测连杆间潜在碰撞以获取关节力矩。为提升测量精度,在弹性体优化设计方面采用有限元分析这一关键技术^[6]。通过有限元分析模拟不同载荷下的应力分布,这一技术手段能够精准地指导弹性体形状和尺寸的调整,使其在各种工况下都能更准确地反映力矩变化。

在应变片布置上,针对弹性体线性变形区的特殊要求进行精心设计,这是与本研究关节横摆力矩检测高度相关的设计要点。通过合理布置应变片,能够更有效地捕捉关节横摆过程中的微小应变变化。由应变片组成的惠斯通电桥是将机械变形转换为电信号的关键结构。本研究中惠斯通电桥的设计注重应变片的一致性,以确保能够准确分析电阻变化与应变之间的线性关系,从而为后续的信号处理提供可靠的电信号源。最终组成的惠斯

通电桥如图 2 所示。

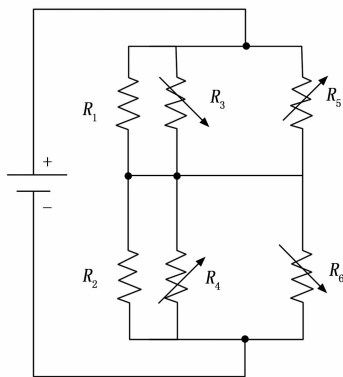


图 2 惠斯通电桥示意图

通过一致性良好的应变片，捕捉移动机器人关节横摆过程中产生的微小的应变变化，借助惠斯通电桥分析电阻变化与应变之间的线性关系，将机械变形转换为电信号。

信号调理电路是力矩传感器的另一个关键部分。本设计的信号调理电路主要包含放大、低通滤波和定值偏置 3 个部分，这是针对本系统需求设计的电路结构。在放大电路中，选用具有轨对轨输入输出特性的仪表放大器作为核心设备，这一选择是基于本系统对较大电压调整范围、高动态范围和高信噪比的要求。低通滤波器采用二阶巴特沃斯滤波器，借助 Sallen-key 结构和多通道模数转换器实现通频带内幅值特性的无反相增益，并设定固定截止频率，这种设计能有效滤除高频噪声，满足本系统对信号纯净度的要求。定值偏置电压电路的加入则是为了将放大后的电压信号规范在适合后续数字信号处理的目标区间。以利用惠斯通电桥提取的稳定电信号为目标，将力矩传感器内信号调理电路如图 3 所示。

通过这些关键设计和技术手段，将惠斯通电桥、信号调理电路与 AH35/CLF—H7 型号力矩传感器整合，形成具有优越检测性能的力矩传感器硬件设备，为关节

横摆力矩的精确检测提供有力保障。

2.2 关节控制器设计

为了确保移动机器人关节横摆力矩振动控制系统控制功能的顺利实施，运用 STM32F469xxCPU+ 现场可编程门阵列（FPGA，field-programmable gate array）结构，设计一个集成了灵活逻辑控制、复杂通信协议支持的关节控制器硬件设备^[7]。

STM32F469xx 是 F4 系列里性能最优的，除开更高的主频，它嵌入的高速存储器中，闪存就高达 2 MB，静态随机存取存储器（SRAM，static random access memory）则高达 384 kB，这还不算上备份 SRAM。F4 本身优异的性能就能胜任关节驱动。为了满足本研究中机器人对功能的可拓展性要求，该 CPU 基础上结合 FPGA 组成异构架构，最终，得到关节控制器的核心模块组成框架如图 4 所示。

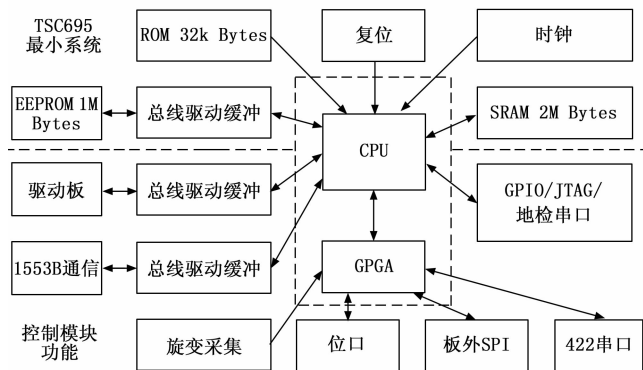


图 4 控制模块组成框图

关节控制器的设计采用了 CPU+反熔丝 FPGA 的架构，CPU 作为系统的主处理器，负责运行复杂的控制算法，实现关节的实时控制，包括位置控制和广义力控制，以及二者之间的平滑转换。这一算法设计是基于关节在不同运动状态下对力和位置精确控制的需求，确保关节运动的准确性和稳定性。同时，CPU 还负责 1553B 总线通信控制，确保与中央控制器及其他系统组件的有效信息交互。

FPGA 则以其高度的灵活性和并行处理能力，成为扩展 CPU 功能的关键。板载 FPGA 主要用于扩展 CPU 的端口功能，实现 CPU 总线桥接，处理来自关节粗精耦合旋转变压器、温度传感器的数据等多种传感器的数据，这一设计能够满足系统对多源数据采集和处理的需求。在通信控制方面，FPGA 控制 422 高速串行数据通信，以及通过串行外设接口（SPI，serial peripheral interface）与关节传感器通信。此外，板载 FPGA 还负责位口控制，通过平滑滤波器采集关节数字霍尔信号、驱动板中断信号及驱动板状态信息，并发送热控

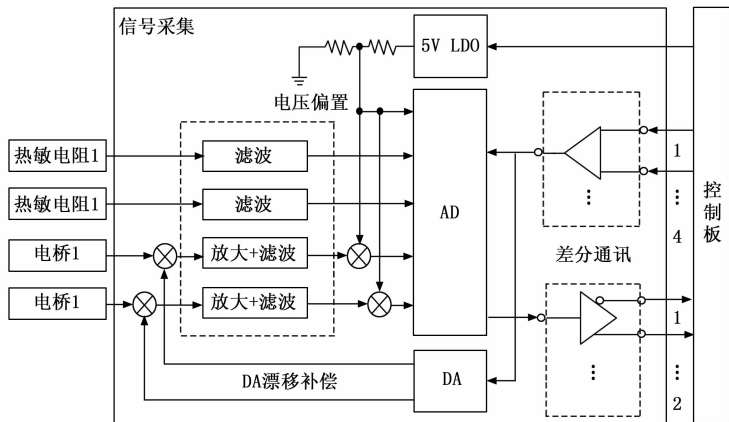


图 3 力矩传感器信号调理框图

使能、驱动使能等控制信号, 这一系列功能的实现有助于全面监控和控制关节的运行状态。

处理器上电复位后, 首先进入初始化模式, 然后根据中央控制器的控制命令, 实现位置控制和广义力控制, 以及二者之间的平滑转换^[8]。当系统检测到电源、驱动、通信或传感器故障时, 能够自动切换到待机模式, 电机电磁抱闸制动, 保持关节位置稳定。这种故障处理机制是本关节控制器设计中的重要安全保障措施, 提高了系统的安全性和可靠性, 确保在各种复杂工况下关节都能稳定运行, 从而为整个移动机器人的正常工作提供有力支持。

3 系统软件部分

力矩传感器和关节控制器两个硬件设备的优化设计, 为移动机器人关节横摆力矩振动控制系统的运行提供了基础条件, 能够实时、精确地测量机器人关节的力矩变化, 为控制系统提供关键的反馈信息, 是实现精确控制和优化的基础。系统的软件部分可以结合控制算法和策略, 对机器人关节进行精确的控制和调整, 以实现预期的振动控制效果, 极大增强了控制系统适应复杂环境和任务的能力。在此基础上, 考虑关节横摆力矩振动控制要求完成一系列功能软件的设计, 有利于得出更加科学的设计成果。移动机器人关节横摆力矩振动控制流程如图 5 所示。

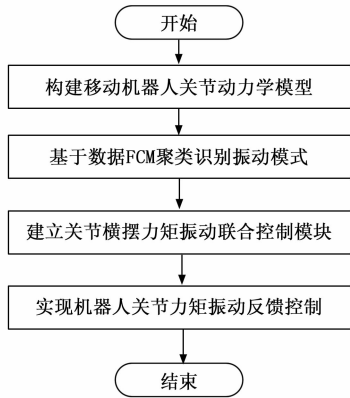


图 5 移动机器人关节横摆力矩振动控制流程

3.1 构建移动机器人关节动力学模型

针对移动机器人关节横摆运动进行观察, 明确其运动原理后, 采用绝对节点坐标方法构建关节动力学模型, 通过节点位移、位移梯度两项参数的变化^[9], 描述关节大范围运动过程中, 有限单元产生的多体变形情况。利用绝对节点坐标方法, 对机器人关节建立对应的单元模型时, 共涉及 24 个广义指标, 如公式 (1) 所示:

$$\boldsymbol{q} = [\boldsymbol{\varepsilon}_o \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{o,X} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{o,Y} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{o,Z} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{i,X} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{i,Y} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{i,Z}]^T \quad (1)$$

式中, $\boldsymbol{q}$ 为广义指标集合矩阵, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为位置矢量矩阵, o, i

为两个固定点, (X, Y, Z) 为固定点在全局坐标系内的三维坐标。

其中:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{q} \times \boldsymbol{S} \quad (2)$$

式中, $\boldsymbol{S}$ 为形函数矩阵。

在 NCF 坐标系下, 将移动机器人运动关节简单看作一个扭簧, 如图 6 所示。在不考虑关节内部传动关系的情况下, 运用上述给出的绝对节点坐标建模方法构建一个线性模型, 描述关节输出力矩、输出运动参数之间的关系^[10]。

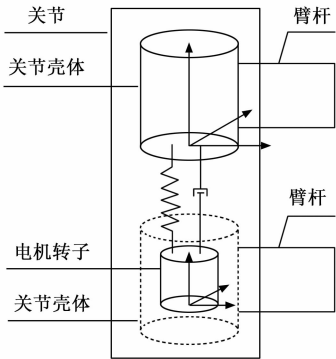


图 6 包含 NCF 坐标的机器人关节简图

如图 6 所示, 移动机器人关节简图中共包含两个 NCF 坐标, 分别是针对电机转子、电机壳体建立的, 由此可以推导出电机转子、关节壳体转角两项参数, 最终计算出机器人关节横摆运动承受的力矩为:

$$\begin{cases} \beta' = \beta - k(\theta' - \theta'') \\ \beta'' = k(\theta' - \theta'') \end{cases} \quad (3)$$

式中, β 为驱动力矩, β', β'' 为电机和关节在运动过程中受到的力矩, k 为非线性扭转刚度系数, θ' 为电机转动角度, θ'' 为关节转动角度。

利用绝对节点坐标方法, 实现移动机器人关节建模后, 以此来描述关节横摆运动的动力学原理, 作为后续关节横摆力矩振动控制的依据。

3.2 基于数据 FCM 聚类识别振动模式

由于关节的力矩与振动关系复杂, 通过力矩传感器获取连续力矩测量信号并结合动力学建模推导出的关节振动信号包含多种频率成分和复杂的模态信息。应用聚合经验模态分解 (EEMD, ensemble empirical mode decomposition)^[11] 向原始振动信号多次加入白噪声信号并多次分解获取本征模态函数 (IMF, intrinsic mode function) 分量, 这种分解方式有助于将复杂的振动信号分解为不同频率尺度下相对简单的 IMF, 从而能够更清晰地分析振动信号在不同频率段的特性, 例如找出哪些频率成分与关节的特定运动状态或故障相关。

将高斯白噪声加入原始振动信号中, 可以得到:

$$x_j(t) = x(t) + \delta_j(t) \quad (4)$$

式中, j 为白噪声添加次数, x 为振动信号序列, t 为信号采样时刻, δ 为白噪声信号。

在每次加入白噪声后, 运用聚合经验模态分解理念对预处理后的振动信号进行分解, 最终得到 IMF 分量为:

$$c_g(t) = \frac{1}{G} \sum_{g=1}^G c_{jg} \quad (5)$$

式中, c 为 IMF 分量, g 为 IMF 分量编号, G 为振动信号聚合经验模态分解后产生的 IMF 分量总数。

多次循环运算后, 最终呈现出的信号分解结果为:

$$x(t) = \sum_{g=1}^G c_g(t) + r_g(t) \quad (6)$$

式中, r 为残余分量。

针对每个 IMF 分量, 可以求出总能量为:

$$E_g = \int_{-\infty}^{\infty} |c_g(t)|^2 t \quad (7)$$

式中, E 为 IMF 分量能量, ∞ 为正无穷, $-\infty$ 为负无穷。

获取单个 IMF 分量对应能量后, 计算出其能量所占的百分比, 作为信号特征提取结果, 也为后续振动数据 FCM 聚类处理提供基础条件。

在移动机器人关节的研究里, EEMD 分解得到较多且特征不同的 IMF 分量。这些分量使振动信号信息复杂, 给后续分析带来挑战。模糊 C 均值聚类算法 (FCM) 可按 IMF 分量特征分类, 将相似者归为一类^[12], 这能从复杂振动信号数据中提取代表性特征模式以识别关节不同运行状态 (正常、磨损、受特定干扰等), 对关节的状态监测、故障诊断和优化控制意义重大, 是不可或缺的环节。虽然在构建的控制系统中 FCM 聚类只是一部分, 但它在数据处理与特征提取方面极为重要, 是将复杂振动信号数据转化为控制系统决策依据的关键步骤, 能让控制系统更精准把握关节运行状态以实现有效控制。因此, 针对模糊 C 均值聚类定义公式 (8) 所示的目标函数:

$$J = \sum_{d=1}^n \sum_{v=1}^m u_{dv}^\chi \|\varphi_d - \tau_v\|^2 \quad (8)$$

式中, J 为机器人关节振动信号特征模糊 C 均值聚类目标函数, n 为特征样本数量, d 为特征样本编号, φ 为关节振动特征数据, m 为分类标签数量, v 为分类标签编号, τ 为聚类中心, χ 为加权指数, u 为隶属度。

其中, 聚类中心、隶属度更新公式分别为:

$$\tau_v = \frac{\sum_{d=1}^n u_{dv}^\chi \varphi_d}{\sum_{d=1}^n u_{dv}^\chi} \quad (9)$$

$$u_{dv} = \frac{1}{\sum_{v'=1}^m \left(\frac{\varphi_d - \tau_v}{\varphi_d - \tau_{v'}} \right)^{\frac{1}{\chi-1}}} \quad (10)$$

式中, v' 为另一个聚类中心。

以同一类样本之间相似程度最大为目标, 完成对模糊 C 均值聚类目标函数的求解, 实现对移动机器人横摆力矩振动信号的分类, 识别出其属于高频振动和低频振动中的哪一类, 从而确定对应的振动抑制方案。

3.3 建立关节横摆力矩振动联合控制模块

机器人关节横摆力矩振动控制系统中, 除了要最大程度抑制关节振动外, 还需要控制关节预定运动轨迹^[13]。振动模式识别 (如 3.2 节基于数据 FCM 聚类识别振动模式) 为后续的振动抑制提供了基础依据。通过 3.2 节中的方法对振动模式进行识别, 将振动信号分类为高频振动和低频振动等不同类型的振动模式才能更精准地构建控制方法以实现有效的振动抑制。在设计控制系统功能软件模块时, 将图 7 (a) 所示的 PD 控制器和图 7 (b) 所示的 LQR 闭环控制器结合起来, 建立关节振动联合控制器^[14], 如图 7 (c) 所示。

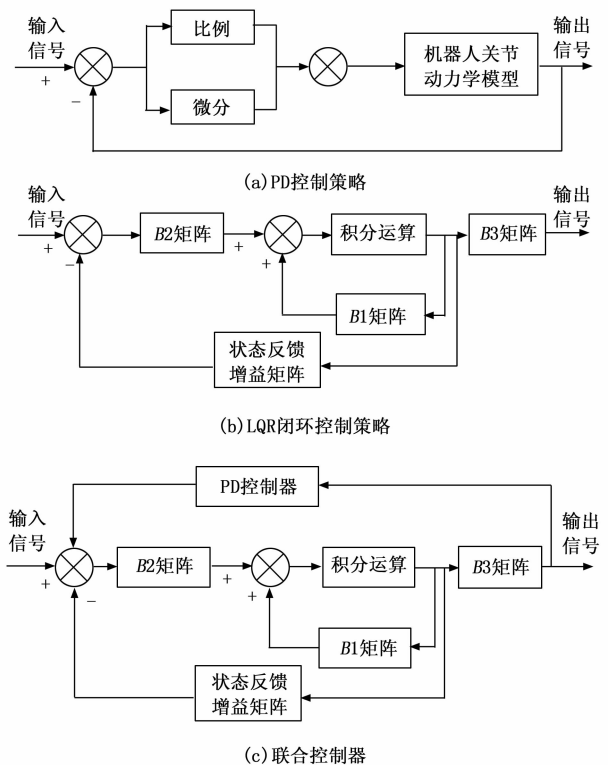


图 7 PD 控制和 LQR 闭环控制模块

在图 7 (b) 和 (c) 中的 B_1 、 B_2 、 B_3 矩阵是与系统状态空间模型相关的系数矩阵。在 LQR 闭环控制策略中, 系统的动态特性可以用状态空间方程来描述, 这里的 B_1 、 B_2 、 B_3 矩阵是在特定的系统结构下, 针对不同的控制环节或者子系统定义的输入矩阵。图 7 (a) 中的 PD 控制器是一种简单直接的反馈控制方式, 它主要基于当前的误差 (预定运动角度与实际运动角度之差) 来产生控制信号。而图 7 (b) 中的 LQR 闭环控制器是一种基于系统状态空间模型的最优控制策略。在整

体的控制系统结构中, PD 控制器主要用于对关节振动进行一阶控制, 快速处理较为明显的振动问题。而 LQR 闭环控制器则是在 PD 控制器处理之后, 对残余振动进行更精细的控制, 以达到最优的振动控制效果。它们之间是一种互补的关系。从结构上看, PD 控制器相对简单, 直接作用于误差信号, 而 LQR 闭环控制器则需要考虑系统的状态空间模型, 通过定义合适的状态变量、输入矩阵等进行控制。

首先, 通过 PD 控制器完成对关节振动的一阶控制, 解决主要的振动问题, PD 控制器的输出并不是直接加到误差信号里, 而是根据误差信号计算得到控制律, 然后这个控制律被用于调整系统的输入 (例如关节的驱动力), 从而减小误差信号。其控制律形式如公式 (11) 所示:

$$\lambda(t) = \mathbf{K}_1(\vartheta - \vartheta') + \mathbf{K}_2(\dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}') \quad (11)$$

式中, λ 为 PD 控制器的控制律, $\mathbf{K}_1$ 为比例增益矩阵, $\mathbf{K}_2$ 为微分增益矩阵, $\vartheta, \dot{\vartheta}$ 为控制处理前后关节预定运动角度, $\vartheta', \dot{\vartheta}'$ 为控制前后关节实际运动角度。

依靠 PD 控制策略解决明显的移动机器人关节横摆力矩振动问题后, 采用基于线性系数的 LQR 闭环控制策略^[15], 处理残余振动, 以达到最优的关节横摆力矩振动控制效果。这一过程中, 定义 LQR 闭环控制方程为:

$$\eta(t) = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{y}(t) = -\mathbf{K}_3\mathbf{y}(t) \quad (12)$$

式中, η 为 LQR 闭环控制量, $\mathbf{R}$ 为正定的对称常数矩阵, $\mathbf{B}$ 为关节线性定常系统状态空间, $\mathbf{P}$ 为常数矩阵, $\mathbf{K}_3$ 为状态反馈增益矩阵, $\mathbf{y}$ 为 LQR 控制输入信号。

LQR 闭环控制策略实施过程中, 需要满足公式 (13) 给出的约束条件方程:

$$\mathbf{P}(\bar{\mathbf{B}}) + (\bar{\mathbf{B}})^T\mathbf{P} - \mathbf{P}(\hat{\mathbf{B}})\mathbf{R}^{-1}(\hat{\mathbf{B}})^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (13)$$

式中, $\bar{\mathbf{B}}, \hat{\mathbf{B}}$ 为两个节点状态空间系数矩阵, $\mathbf{Q}$ 为加权矩阵。

将上述联合控制模块, 与关节控制器相连接, 实现对关节力矩振动的两阶段控制, 最终达到抑制关节横摆力矩振动的目的。这种控制方法是基于振动模式识别的结果而构建的, 振动模式识别确定了振动的类型和特性, 从而为控制方法中的参数选择 (如 PD 控制器和 LQR 闭环控制器中的增益矩阵等参数) 提供了依据, 使得控制方法能够更有针对性地抑制关节横摆力矩振动。

3.4 实现机器人关节力矩振动反馈控制

考虑到连续时刻机器人关节横摆力矩会不断发生变化, 在系统软件设计的最后环节, 引入关节力矩振动反馈优化机制和电机误差补偿机制, 对实时振动控制参数进行有效调整。

根据力矩反馈优化控制参数时, 从机器人关节动力

学建模结果入手, 分析关节横摆力矩振动特性, 再将关节力矩传感器实时采集关节力矩数据看作反馈信号^[16], 与比例微分反馈参数相结合, 输入关节振动控制系统中。对比实际关节力矩与期望力矩之间的偏差^[17], 确定当前振动控制参数的修正方向, 动态调整控制系统联合控制模块中的各项参数, 使得电机输出力矩满足预期要求, 达到抑制关节振动的目的。

而关节控制系统中, 电机稳态误差的计算需要考虑重力项力矩、摩擦力矩等多项影响参数^[18], 具体呈现出的误差信号和稳态误差分别为:

$$e(\psi) = \frac{-M^2\omega^2\psi\left[\left(\frac{1}{M} + \mathbf{F}(\psi)\right)\right]}{\sigma_2(\psi) + \sigma_3(\psi)} \quad (14)$$

$$e'(\infty) = \lim_{\psi \rightarrow 0} \psi e(\psi) \quad (15)$$

式中, ψ 为目标关节, e 为误差信号, e' 为电机位置稳态误差, M 为减速比, ω 为反共振频率, $\mathbf{F}$ 为关节力矩反馈矩阵, σ_2, σ_3 为增益传递函数, $\lim$ 为极限函数。

根据电机位置稳态误差分析结果为依据, 推导出一个补偿参数^[19], 添加到关节横摆力矩振动控制过程中, 实现移动机器人关节力矩振动的最优反馈控制^[20]。

4 系统测试

对本文设计系统功能验证的核心目的在于全面验证和优化该控制系统的性能与可靠性。具体而言, 测试目的可细化为以下几个方面:

1) 通过系统测试验证基于 FCM 聚类的控制策略是否能够有效识别并区分移动机器人关节在不同工况下的振动模式, 这是确保控制系统能够精准响应并抑制横摆力矩振动的关键前提。

2) 测试将进一步评估该控制系统在实时环境下的稳定性, 确保其在复杂多变的动态环境中仍能保持高效且稳定的控制效果, 从而提升移动机器人的整体运动性能 and 安全性。

3) 通过系统测试, 还可以发现和识别潜在的控制误差或系统缺陷, 为后续的优化设计和改进提供宝贵的实验数据和反馈, 从而推动移动机器人关节横摆力矩振动控制系统的持续完善和发展。

4.1 测试环境

由于基于数据 FCM 聚类的振动控制系统, 是针对移动机器人设计的, 在设置系统测试环境时, 选用具有一定承载能力的四足机器人作为实验对象。该机器人的行动模式类似四足哺乳动物, 且能够发挥良好的人机交互能力, 能够根据用户指令迅速完成倒退、转向等动作。参与系统测试工作的移动机器人尺寸为 $600 \times 400 \times 400$ mm, 其自身重量和最大承载重量分别为 16 kg 和 48 kg。

选取四足移动机器人四条腿部中间区域关节作为目标，测试关节振动控制系统工作性能。通过现场测试可知，该机器人腿部结构主要参数如表 1 所示。

表 1 移动机器人腿部主要结构参数

部件	参数项目	数值
髋部	质量/kg	0.6
	长度/mm	80
	高度/mm	350
	极限摆角/(°)	55
大腿	质量/kg	0.8
	长度/mm	200
	高度/mm	350
	极限摆角/(°)	75
小腿	质量/kg	0.8
	长度/mm	200
	高度/mm	350
	极限摆角/(°)	60

确定实验测试过程中系统控制对象后，为了确保基于数据 FCM 聚类的控制系统顺利运行，在实验室内连接计算机、示波器、可调直流电源等设备。将新研究控制系统运行到计算机上，对运动中的四足机器人腿部关节横摆力矩振动进行抑制，以达到保证机器人稳定运行的目的。

在基于数据 FCM 聚类的振动控制系统实验中，数据聚类方法涉及的参数设置如下：对于 EEMD，白噪声加入次数为 100 次，每次加入白噪声的幅度为原始振动信号标准差的 0.2 倍，且当 IMF 分量的标准差小于原始振动信号标准差的 0.05 倍时停止分解；对于模糊 C 均值聚类，聚类数目确定为 3，这是基于对四足机器人腿部关节振动信号的前期分析，将振动信号分为低频稳定振动、高频小幅振动和高频大幅振动 3 种类型，模糊加权指数设置为 2，初始聚类中心采用随机选择方式，为避免局部最优解，进行 10 次随机选择并取平均结果。这些参数设置确保了数据聚类方法在实验中的有效性和合理性，使控制系统的运行过程更具透明性和可重复性。

4.2 系统控制输出结果

系统测试过程中，为了实现对移动机器人关节横摆力矩振动的有效控制，通过力矩传感器先确定机器人在正常受力环境下每个关节的力矩变化曲线如图 8 所示。

从图 8 可以看出，四足机器人行走过程中，腿部关节力矩在 $-4 \sim 2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 范围内是不断变化的，这导致关节振动情况明显，一旦遇到复杂的行走环境，移动机器人非常容易运行不稳定。

根据关节力矩数据采集时间，将其划分为多个周期，以机器人左前腿关节为例，获取任意一个参考周期

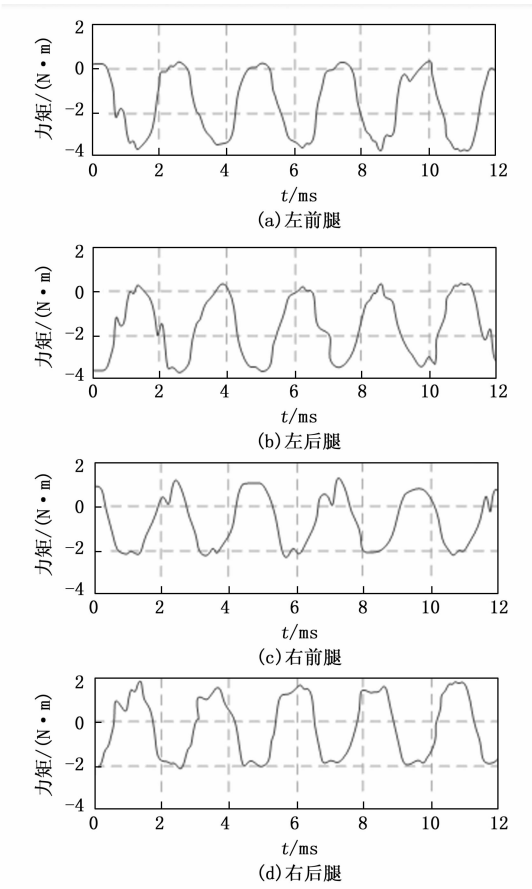


图 8 移动机器人关节力矩曲线

的关节横摆力矩振动脉冲时序信号，其上位机呈现出的仿真结果如图 9 所示。

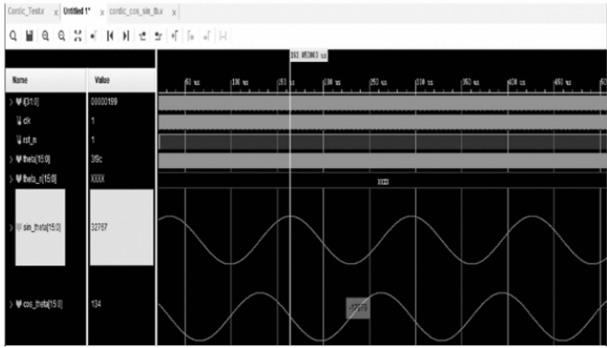


图 9 机器人左前腿关节振动信号脉冲时序

将每个周期的振动脉冲信号看作一个样本，依靠数据 FCM 聚类识别关节振动模式之前，需要对所有样本进行信号分解、特征提取、归一化处理，以部分样本为例，振动信号特征值最终归一化处理结果如表 2 所示。

随后，获取移动机器人关节高频、低频振动模式下的标准振动信号，针对这一模板信号进行分解分析和特征提取，最终设置 FCM 聚类中心如表 3 所示。

表 2 振动信号特征值归一化结果

样本	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5
1	0.78	0.34	0.23	0.26	0.01
2	0.79	0.34	0.23	0.25	0.01
3	0.78	0.33	0.22	0.26	0.01
4	0.77	0.36	0.21	0.26	0.01
5	0.76	0.35	0.21	0.26	0.01
6	0.76	0.35	0.23	0.25	0.01
7	0.76	0.33	0.22	0.24	0.01
8	0.78	0.33	0.21	0.24	0.01
9	0.78	0.34	0.21	0.26	0.01
10	0.76	0.34	0.23	0.26	0.01
11	0.78	0.33	0.22	0.26	0.01
12	0.78	0.36	0.21	0.25	0.01
13	0.76	0.35	0.21	0.26	0.01
14	0.77	0.35	0.23	0.26	0.01
15	0.76	0.33	0.22	0.24	0.01
16	0.76	0.34	0.21	0.26	0.01
17	0.78	0.34	0.21	0.26	0.01
18	0.78	0.33	0.23	0.26	0.01
19	0.76	0.36	0.21	0.25	0.01
20	0.77	0.36	0.23	0.24	0.01
21	0.76	0.34	0.22	0.25	0.01

表 3 聚类中心设置

IMF 分量	聚类中心特征值	
	低频振动模式	高频振动模式
IMF1	0.79	0.94
IMF2	0.36	0.20
IMF3	0.22	0.26
IMF4	0.25	0.16
IMF5	0.01	0.02

对照表 3 给出的聚类中心设置结果和表 2 给出的振动信号特征值归一化结果，最终确定左前腿关节始终处于低频振动模式，基于此确定具体的振动控制要求和振动控制方案。

通过系统的联合控制模块，求出移动机器人关节振动联合控制参数，得到：

$$\begin{cases} \mathbf{K}_1 = \mu(1\ 000, 1\ 200) \\ \mathbf{K}_2 = \mu(35, 30) \\ \mathbf{Q} = \mu(2\ 500, 1, 1, 100) \end{cases} \quad (16)$$

式中， μ 为状态空间为函数。

基于这一控制参数设置结果，组中确定机器人左前腿关节振动控制输出量如图 10（a）所示。按照同样的方式进行运算，得到系统关于左后腿、右前腿、右后腿关节横摆力矩振动控制的输出量，如图 10（b）（c）（d）所示。

从图 11 可以看出，基于数据 FCM 聚类的振动控制系统应用后，针对不同的机器人关节，可以参考力矩振

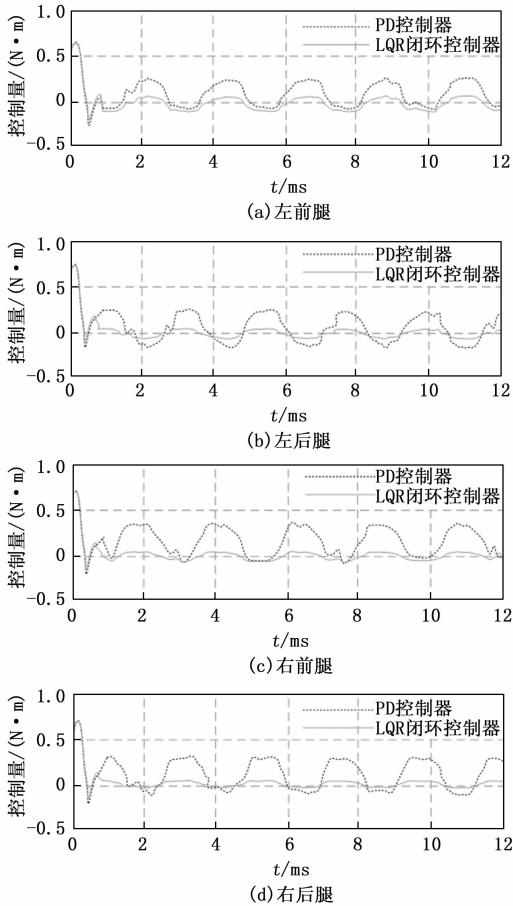


图 10 机器人关节横摆力矩振动控制输出量

动变化给出合理的控制输出量，以便发挥更优的振动控制作用。

4.3 系统控制性能分析

在系统测试工作初步完成后，为了进一步分析系统控制性能，将系统给出的不同时刻振动控制输出量，应用到机器人目标关节上，并观察系统控制后关节振动幅值变化，并与控制前关节振动幅值进行对比，如图 11 所示。

从图 11 可以看出，未应用控制系统前移动机器人 4 个腿部关节的横摆力矩振动最大幅值分别为 1.90、1.85、1.59、1.38°。而在接入基于数据 FCM 聚类的控制系统后，关节横摆力矩振动幅值出现了明显减弱，4 个关节的振动最大幅值均保持在 0.22°，相比控制前分别减少了 88.42%、88.11%、86.16% 和 84.06%。这一测试分析结果，说明了新设计关节振动控制系统能够在不影响关节运行轨迹的同时，最大程度抑制关节横摆力矩振动，将其推广到移动机器人领域，实现机器人运行稳定性的大幅提升。

5 结束语

针对空间移动机器人运动时因多体动力学耦合与关

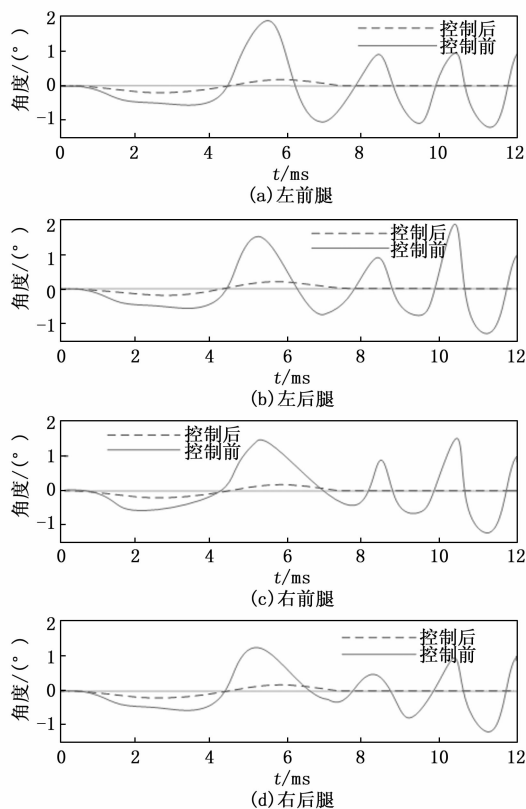


图 11 系统控制前后关节振动幅值对比

节间弹性影响而极易出现横摆振动,且传统关节独立力反馈控制在关节横摆力矩变化范围大、振动信号波动频率高尤其是不稳定移动状态下效果不佳的问题,设计了基于模糊 C 均值聚类算法聚类的关节横摆力矩振动控制系统。在硬件上采用力矩传感器检测力矩并设计了 CPU + FPGA 结构的关节控制器硬件,软件上通过聚合经验模态分解提取振动信号特征,利用 FCM 聚类算法识别振动模式以确定控制要求,结合 PD 和 LQR 控制结构建立联合控制策略,考虑关节力矩反馈和电机位置误差实现最终控制。实验结果显示,该系统有效提升机器人在复杂环境中的稳定性和运动精度,体现 FCM 算法价值,为机器人技术发展奠定基础并推动其向智能化、高效化发展。

参考文献:

- [1] 刘佳琪,李小彭,尹 猛,等. 变长度柔性机械臂的双柔性伺服驱动系统振动抑制策略 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2024, 45 (4): 530-539.
- [2] 李小彭,周赛男,刘佳琪,等. 模糊整定 PI 参数的双柔性机械臂振动抑制 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2024, 45 (2): 217-225.
- [3] XIE L, YU X, CHEN L. Robust fuzzy sliding mode control and vibration suppression of free-floating flexible-link and flexible-joints space manipulator with external interference and uncertain parameter [J]. Robotica, 2021, 40

(4): 997-1019.

- [4] 尚东阳,李小彭,尹 猛,等. 基于干扰观测器的含有柔性关节的柔性机械臂抑振策略 [J]. 振动与冲击, 2022, 41 (24): 125-133.
- [5] 宋秦中,胡华亮. 基于大数据分析的大扭矩机器人悬臂关节震颤控制技术 [J]. 机床与液压, 2024, 52 (5): 114-118.
- [6] 张 帆,周 伟. 动力参数下乒乓球发球机器人振动控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2023 (1): 282-286.
- [7] 宋传明,杜钦君,李存贺,等. 仿人柔性关节耦合建模及变负载振动抑制 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 57 (5): 601-612.
- [8] 丁文政,贺文权,陈浩文,等. 螺旋桨铣磨机器人动态特性及振动抑制研究 [J]. 机械设计与制造, 2022 (11): 102-105.
- [9] 赵 倩,陈杨军,胡珍妮. 基于参数自适应 PID 控制器的轨道车辆振动控制 [J]. 电子设计工程, 2022, 30 (14): 185-189.
- [10] 刘铠源,杨 明. 基于改进有源阻尼的柔性关节机械臂伺服系统振动抑制策略 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26 (7): 20-28.
- [11] 李 琳,古智超,张 铁. 结合机器人柔体动力学和关节力矩反馈的振动控制 [J]. 振动与冲击, 2022, 41 (11): 235-244.
- [12] 谭加林,肖正明,伍 星,等. 柔性关节机械臂轨迹规划及振动抑制研究 [J]. 机械科学与技术, 2023, 42 (4): 504-511.
- [13] 肖正明,康振辉,伍 星,等. 空间并联机器人动力学分析与驱动参数匹配 [J]. 昆明理工大学学报 (自然科学版), 2024, 49 (3): 127-136.
- [14] 侯 珊,岳凤英,曹凤才. 巡检机器人传动结构机电耦合振动自动化抑制 [J]. 机械设计与研究, 2023, 39 (6): 235-239.
- [15] 赖泽浪,王 之海,柳小勤,等. 面向电流信息与模态分析的工业机器人关节振动求解研究 [J]. 机械科学与技术, 2024, 43 (1): 23-30.
- [16] 邵继升,李团结,宁宇铭,等. 基于 MACSF 的移动机械臂振动抑制轨迹规划方法 [J]. 振动·测试与诊断, 2023, 43 (4): 787-792.
- [17] 王 恒,蒋科坚. 基于分段速度规划的机器人臂运动平滑减振方法 [J]. 包装工程, 2023, 44 (7): 222-229.
- [18] 宋传明,杜钦君,李存贺,等. 仿人柔性关节耦合建模及变负载振动抑制 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 57 (5): 601-612.
- [19] 赖泽浪,王 之海,柳小勤,等. 面向电流信息与模态分析的工业机器人关节振动求解研究 [J]. 机械科学与技术, 2024, 43 (1): 23-30.
- [20] 陈卫彬,王丽丽,孙宏伟,等. 锻造机器人金属橡胶关节阻尼设计及振动抑制 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (11): 46-52.