

基于大数据聚类分析的移动机器人 偏摆力矩控制系统设计

袁 辉¹, 赵瑞林²

(1. 陕西工业职业技术学院 信息工程学院, 陕西 咸阳 712000;

2. 陕西工业职业技术学院 电气工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 移动机器人在不同类型的运动状态具有不同的运动特性, 由于姿态的不断变化, 系统更容易受到偏摆力矩的影响, 出现姿态失衡的问题; 为此, 设计基于大数据聚类分析的移动机器人偏摆力矩控制系统; 在硬件设计方面, 对移动机器人进行了改装, 增加了姿态传感器和力矩传感器, 并引入了大数据聚类分析处理器; 同时, 对力矩控制器的内部组成结构进行了调整, 从电气设计和机械结构两个维度添加了抗干扰元件, 从而实现了硬件系统的优化; 在软件设计方面, 利用大数据聚类分析技术, 通过运动数据采集、特征提取和距离度量等步骤, 准确识别移动机器人的不同运动状态; 根据各状态下的标准运动参数, 确定了偏摆力矩的控制目标; 通过与实际测量的偏摆力矩进行比对, 计算出所需的力矩控制量, 进而实现了系统的偏摆力矩控制功能, 显著提升了控制的稳定性; 通过系统测试得出结论: 与传统控制系统相比, 优化设计系统的偏摆力矩控制误差减小约 $0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$, 在系统控制作用下移动机器人的稳定系数明显提升。

关键词: 大数据聚类分析; 移动机器人; 偏摆力矩; 力矩控制系数; 传感器

Design of Mobile Robot Yaw Moment Control System Based on Big Data Clustering Analysis

YUAN Hui¹, ZHAO Ruilin²

(1. College of Information and Engineering, Shannxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China;

2. College of Electrical Engineering, Shannxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

Abstract: Mobile robots have different motion characteristics in different types of motion states. Due to continuous changes in posture, the system is more susceptible to the influence of yaw moment, resulting in posture imbalance. Therefore, a mobile robot yaw moment control system based on big data clustering analysis is designed. In terms of hardware design, modify the mobile robot, add attitude sensors and torque sensors, introduce a big data clustering analysis processor, adjust the internal composition structure of the torque controller, and increase anti-interference components from both electrical design and mechanical structure dimensions, thus achieving hardware system optimization. In terms of software design, big data clustering analysis technology is used to accurately identify different motion states of mobile robots through steps such as motion data collection, feature extraction, and distance measurement. Based on standard motion parameters in each state, the control objective of the yaw moment is determined. By comparing with actual measured yaw moment, the required torque control amount is calculated, thereby achieving the system's yaw moment control function and significantly improving the stability of control. Through system testing, the results show that compared with traditional control systems, the optimized system reduces the control error of yaw moment by about $0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$, and significantly improves the stability coefficient of the mobile robot under the system control.

Keywords: big data clustering analysis; mobile robot; yaw moment; torque control coefficient; sensor

收稿日期: 2024-12-23; 修回日期: 2025-02-07。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51506032); 2023年度陕西高等职业教育教学改革研究项目(23GY010)。

作者简介: 袁 辉(1977-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 袁 辉, 赵瑞林. 基于大数据聚类分析的移动机器人偏摆力矩控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 145

- 152.

0 引言

移动机器人是一类能够自主或根据预设指令,在特定或开放环境中移动并执行特定任务的机器人系统,目前已在工业制造、农业、林业、户外救援等领域得到广泛应用。移动机器人在移动过程中,由于重心偏移、地面反作用力、机械结构的不完全对称或动力分配不均等因素,会产生围绕某一轴线的旋转力矩,这种力矩对机器人的稳定性、运动精度和整体性能有着重要影响^[1]。为了保证移动机器人的运动稳定,间接地提升移动机器人的任务执行能力,设计并开发了移动机器人偏摆力矩控制系统。

移动机器人偏摆力矩控制是指针对移动机器人在运动过程中产生的偏摆力矩进行的一系列控制策略和技术手段。现阶段发展较为成熟的控制系统中,文献[2]基于分层控制策略的控制系统分析机器人的力学受力状况,构建动力学模型后,设计了一个分层次的动力学控制系统,由两个层级组成:上层采用经过优化的趋近律原理构建的滑模控制器,旨在精确追踪预定的横摆角速度;而下层则是一个以最大化路面附着效率为目标的转矩分配控制器,该控制器旨在确保机器人在行驶过程中的横向稳定性能。然而上述方法仅能实现对机器人横向稳定性的控制,无法同时实现其纵向稳定性的控制。文献[3]基于阻抗和虚拟模型的机器人控制系统在腿部摆动阶段,实施基于力反馈的阻抗控制策略来调节动作;而在支撑阶段,则利用虚拟模型控制方法来维持稳定的支撑状态,实现对机器人机身姿态与轨迹的同步控制。然而上述系统需要协调两种控制策略的运行。如果两种控制策略之间存在冲突或不协调的情况,将会导致机器人运动不稳定或无法达到预期的控制效果。文献[4]用模拟空间操作的机器人控制系统建立自由浮动卫星动力学和卫星到模拟器的运动映射,研究测量延迟和动态响应延迟对接触速度和力的影响,基于自适应卡尔曼滤波器的接触刚度和阻尼实时估计方法,测量延迟由相位超前模型补偿,达到机器人稳定控制的目的。然而上述系统在运行过程中,机器人需要快速响应外部环境的变化,而模拟空间无法实现外部环境的实时更新,以此得出的实际控制结果存在明显的误差问题。文献[5]基于绳驱并联机器人系统刚度的控制系统运用矢量封闭法则进行运动学解析,同时针对动平台实施受力剖析,确立静力学平衡方程式,在操作空间内,利用刚度矩阵构建负载变动与姿态变化间的映射关系,解析出支撑刚度的具体表达式,深入剖析影响支撑刚度的各项要素,实现了对机器人输出力与位置的综合控制。然而绳驱并联机器人系统刚度的影响因素较多,若影响因素分析不完全,则无法保证机器人的控制效果。综上所述,传统

控制系统均存在控制效果不佳的问题,为此引入大数据聚类分析技术。

大数据聚类分析是将物理或抽象对象的集合分组为由类似的对象组成的多个类的过程。其目的是在相似性的基础上收集数据并进行分类,从而揭示数据中隐藏的结构和模式。通过大数据聚类分析技术的应用,对移动机器人偏摆力矩控制系统进行优化设计,以期能够提升对偏摆力矩的控制效果,间接提升移动机器人的运动稳定性。由此,设计一种基于大数据聚类分析的移动机器人偏摆力矩控制系统。改装后的机器人姿态传感器(由三轴陀螺仪、三轴加速度计和三轴磁力计组成)提供高精度的姿态信息,优化设计偏摆力矩控制器,包括主控制器和驱动控制器,确保了控制指令的准确执行。加设大数据聚类分析处理器高效处理大规模数据集,提高了机器人运动状态识别的精度和效率。利用大数据聚类分析技术识别移动机器人的运动状态,包括采集运动数据、提取运动特征、识别运动状态类型。通过力矩传感器测量移动机器人的实际偏摆力矩,作为系统控制的初始数据。对比控制目标与实际测量结果,计算偏摆力矩控制量,并生成控制指令。将控制指令输入到硬件系统的控制器中,通过控制机器人的关节运动来间接影响偏摆力矩,能够灵活适应不同速度下的平稳移动需求。

1 移动机器人偏摆力矩控制硬件系统设计

优化设计的移动机器人偏摆力矩控制系统分为硬件和软件两个部分,软件算法的实现依赖于硬件平台,包括处理器、传感器、控制器等,硬件的性能和精度直接影响到软件算法的执行效果和机器人的控制精度。为了给系统的软件功能提供支持,优化设计移动机器人偏摆力矩控制硬件系统,并要求优化设计硬件系统与软件之间具有高效的通信和数据处理能力,以确保控制指令的及时性和准确性。硬件系统的设计框架如图1所示。

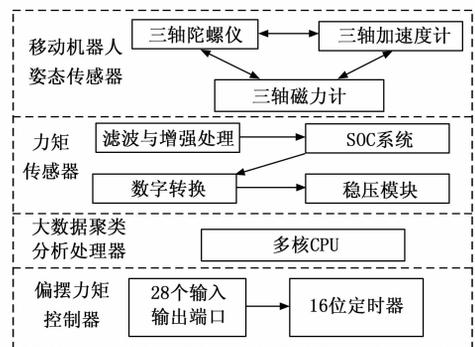


图1 硬件系统的设计框架图

优化前的移动机器人偏摆力矩控制系统采用的是单一的传感器,且传感器在抗干扰方面的性能较差,不能精准传输采集的数据信息。同时,力矩传感器的性能有

限, 缺乏大数据处理能力, 控制器功能有限。通过优化设计, 这些问题得到了显著改善和提升, 优化后的系统使用改装后的机器人姿态传感器, 该传感器由三轴陀螺仪、三轴加速度计和三轴磁力计组成, 形成了模块化的高精度姿态检测系统。优化后的力矩传感器采用了高精度应变片、优化的布局和电路设计, 以及稳定的电压输入和稳压模块, 以提高测量精度和抗干扰能力。移动机器人偏摆力矩控制硬件系统中传感器用来检测移动机器人的实时运动状态, 由此实现对移动机器人姿态和偏摆力矩的检测, 为控制功能的运行提供初始数据来源。

1.1 移动机器人姿态传感器

姿态传感器主要用于检测并跟踪移动机器人的姿态信息, 能够帮助机器人理解其在空间中的朝向和位置, 进而对偏摆力矩进行控制。综合考虑移动机器人结构类型以及对姿态检测的精度需求, 对优化设计硬件系统中的姿态传感器进行改装, 改装的机器人姿态传感器由三轴陀螺仪、三轴加速度计和三轴磁力计组成, 并使用 ARM 处理器作为传感器的数据处理元件^[2]。姿态传感器中三轴陀螺仪用来测量机器人的角速度, 感知机器人旋转的动态变化, 加速度计用来测量线性加速度, 磁力计用来检测地磁场来确定绝对方向。传感器组成元件均能够从 x 、 y 和 z 三个维度上实现机器人姿态的精准感知, 上述组成元件采用模块化结构进行连接, 即各个组成元件均为独立模块, 每个模块之间通过 I2C 接口连接, 在运行过程中, 三轴传感元件将感知的数据传输给 ARM 处理器, 通过取指、译码、执行、访存、写回等多个阶段的并行处理, 输出移动机器人姿态的感知结果。

1.2 力矩传感器

力矩传感器主要用来检测移动机器人是否存在偏摆力矩, 以传感器输出结果作为系统控制程序的启动条件^[3]。优化设计力矩传感器的工作过程如图 2 所示。

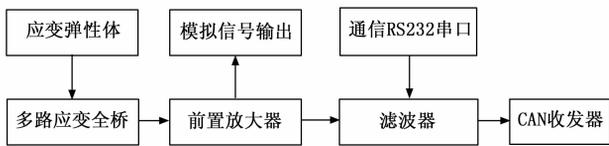


图 2 力矩传感器工作过程

优化设计力矩传感器的工作原理为: 当外部力量或力矩施加于传感器上时, 弹性组件发生形变, 这一形变随即引起全桥电路内应变片的电阻值变动, 进而触发桥路输出电压的相应调整。该电压变化随后历经前置滤波与增强处理, 被送入 SOC 系统^[4]。在此, 采用高精度 12 位模数转换器实现模拟到数字的转换, 所得数字信号则可选择通过 CAN 总线或 RS232 通信协议传送至主控制器进行进一步处理。为了优化力矩传感器的性能,

其输入电压被精心设定为经过 $2\ 200\ \mu\text{F}/25\ \text{V}$ 电解电容器过滤后的稳定 $7.5\ \text{V}$ 直流电压。此设计中还集成了稳压模块, 以确保为模数转换过程提供稳定可靠的基准电压^[5]。为满足优化设计系统的精度需求, 使用高精度应变片替换传统力矩传感器中的应变片, 同时, 优化应变片的布局和电路设计, 减少温度漂移和电磁干扰对测量结果的影响。另外, 为了适应移动机器人内部运行环境, 采用高强度、轻质材料制作传感器外壳和支撑结构, 以提高传感器的抗冲击能力和耐用性。

1.3 大数据聚类分析处理器

为了满足优化设计移动机器人偏摆力矩控制系统中大数据聚类分析技术的运行要求, 在传统硬件系统基础上加设一个大数据聚类分析处理器, 加设处理器的组成结构如图 3 所示。

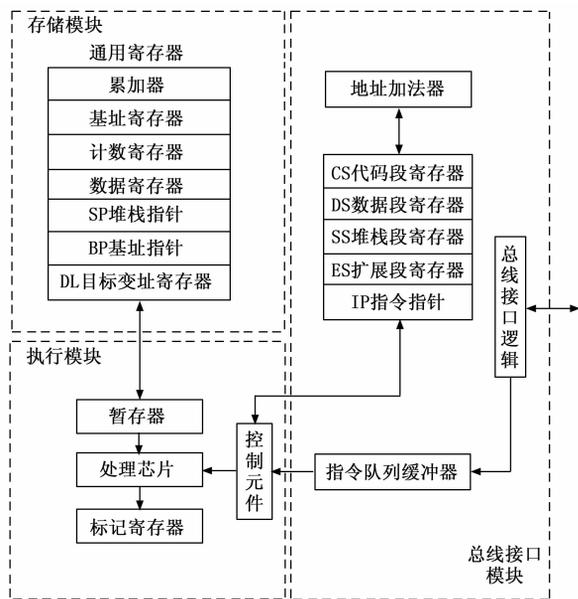


图 3 大数据聚类分析处理器组成结构图

从图 3 中可以看出, 优化设计的大数据聚类分析处理器由数据存储、聚类处理执行和总线接口 3 个部分组成, 数据存储部分用于存储原始数据集、中间处理结果以及最终的聚类模型, 在存储模块的支持下, 能够实现数据的高效访问和缓存, 以加速数据读写速度, 减少聚类过程中的 I/O 延迟^[6]。聚类处理执行模块包含多核 CPU 或 GPU 加速单元, 通过并行处理和数据优化技术, 加速大规模数据集的聚类过程。通过总线接口的布设, 实现处理器内各个组件的连接, 同时提供与外部设备的通信接口^[7]。为保证加设大数据聚类分析处理器与硬件系统中其他元件的适配度, 设定处理器中的所有的外部接口均为 Ethernet 形式。

1.4 偏摆力矩控制器

偏摆力矩控制器为移动机器人偏摆力矩控制系统控

制功能的执行元件,优化设计偏摆力矩控制器的工作逻辑如图 4 所示。

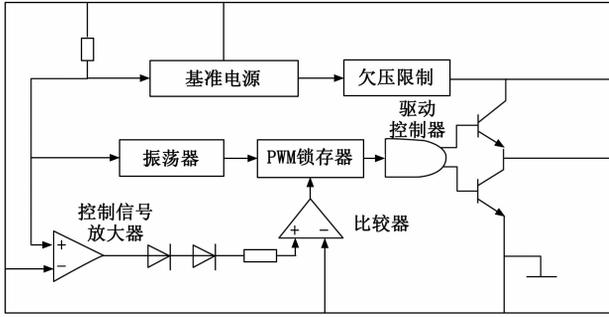


图 4 偏摆力矩控制器工作逻辑图

优化设计的偏摆力矩控制器由主控制器和驱动控制器两个部分组成,主控制器配备了 28 个输入输出端口,用于综合管理和协调来自驱动控制器及传感器的信息交换^[8]。此外,它内置了两个 16 位定时器,旨在确保机器人在动态移动与静态保持时维持稳定的姿态。其核心采用 STM32F 系列控制芯片,该芯片具有强大的并行处理能力,能够同时执行多项任务,并内置丰富的元件,低功耗设计,同时支持 USB 扩展接口,便于系统的未来升级与维护。STM32F 还集成了 512 字节的闪存空间及临时存储功能,并提供 20 个双向按键接口,以及一个 32 位紧急制动系统,和 4 个 IC 接口^[9]。驱动控制器用来增强机器人移动的平稳性,利用直流电机的高扭矩特性,驱动控制器采用双电机布局,左右两侧各配置一台,各自独立负责转矩与力矩的精确控制。驱动控制器的电路设计为桥式,不仅实时监测并调控电机的工作状态,还通过三极管技术实现电机的正反控制。面对电机励磁故障,系统能自动调整 PWM 脉冲,确保电机速度的平稳调节^[10]。配备 DBH 03 型双路驱动装置,机器人能够灵活适应不同速度下的平稳移动需求。该装置内置的光耦合器有效降低了环境中障碍物对机器人运行的干扰,并能在短距离内实现高效制动。系统支持 8~18 V 的固定电压输入,同时设有 22 V 的极限电压保护机制。

为了降低移动机器人移动环境以及硬件系统中各个硬件设备之间的干扰,从电气设计和机械结构两个方面,对硬件系统进行抗干扰设计。在电气设计层面,采用屏蔽技术和滤波电路来减少电磁辐射和传导干扰。所有关键信号线均包裹在屏蔽层内,以减少电磁波的泄露和耦合^[11]。同时,在电源输入端和信号接口处安装高性能滤波器,滤除高频噪声和杂波。机械结构方面,通过优化设计和材料选择来增强系统的抗振能力。采用高强度、低阻尼的材料制作关键部件,同时,合理布局和加固机械结构,提高整体刚性和稳定性。

2 移动机器人偏摆力矩控制系统软件功能设计

移动机器人偏摆力矩控制系统软件功能设计采用模块化架构,主要包括数据采集、数据处理、运动状态识别、偏摆力矩计算、控制指令生成及执行控制六大功能模块。数据采集模块负责实时获取机器人运动数据;数据处理模块提升数据质量;运动状态识别模块基于大数据聚类分析技术确定机器人运动状态;偏摆力矩计算模块计算理论偏摆力矩;控制指令生成模块根据理论与实际测量值的对比生成控制指令;执行控制模块则通过调整机器人关节运动实现偏摆力矩控制,确保机器人稳定运行。

移动机器人偏摆力矩控制系统的核心控制目标是确保机器人在各种运动状态下都能保持稳定的姿态,即减小或消除由外部干扰或内部动力学特性引起的偏摆力矩。为了实现上述控制目标,移动机器人偏摆力矩控制系统采用了基于 PID(比例-积分-微分)控制律的设计。PID 控制律是一种经典且广泛应用的控制策略,它通过对系统误差的比例、积分和微分进行加权求和,生成控制指令,以调整系统的输出,使其尽可能地接近期望值。

2.1 利用大数据聚类分析技术识别移动机器人运动状态

2.1.1 采集移动机器人运动数据

在大数据聚类技术支持下,采用大数据采集的方式获取移动机器人的实时运动数据,采集的移动机器人运动数据主要包括姿态角数据以及位置数据等,以姿态角数据为例,采集过程可以量化表示为:

$$x_z(t+1) = x_z(t) \otimes \left[\cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), u \right] \quad (1)$$

其中: $Z(t)$ 和 $Z(t+1)$ 分别为 t 和 $t+1$ 时刻姿态角的四元数表示形式, θ 为机器人的旋转角度, u 为旋转单位向量, \otimes 表示的是四元数乘法符号。在实际运行过程中,利用硬件系统中的姿态传感器可以确定变量 θ 的具体取值,由此得出任意时刻姿态角数据的采集结果^[12]。按照上述方式,可以得出其他移动机器人运动数据的采集结果,为了保证移动机器人运动状态的识别精度,采用大数据中的清洗技术对初始采集数据进行处理,具体处理环节包括数据滤波和冗余过滤两个部分,数据滤波用来删除初始采集数据中的噪声部分,处理过程如下:

$$x_{\text{filtering}}(t) = \kappa_{\text{filtering}} \cdot x(t) + (1 - \kappa_{\text{filtering}}) \cdot x(t-1) \quad (2)$$

式中, $\kappa_{\text{filtering}}$ 为滤波系数。另外,数据的冗余过滤需要对初始采集数据中任意两个数据样本之间的冗余度进行度量,针对冗余度高于 0.9 数据组中的任意一个数据进行剔除处理,直至所有数据之间的冗余度均低于剔除处理阈值^[13]。按照上述方式得出满足质量要求的移动机

器人运动数据采集结果。

2.1.2 提取移动机器人运动特征

以采集的移动机器人运动数据为处理对象, 从时域层面提取移动机器人的运动特征, 运动特征主要包括直线运动和曲线运动等, 其中直线、曲线运动特征向量的提取结果为:

$$\begin{cases} \tau_v(t) = \frac{\sqrt{[x_l(t_2) - x_l(t_1)]^2 - [x_h(t_2) - x_h(t_1)]^2}}{t_2 - t_1} \\ \tau_a(t) = \tau_v(t) - \tau_v(t-1) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $[x_l(t_1), x_h(t_1)]$ 和 $[x_l(t_2), x_h(t_2)]$ 分别为 t_1 和 t_2 时刻移动机器人直线、曲线运动位置数据的采集结果^[14]。由此可以得出移动机器人不同运动方位特征的提取结果, 在实际的机器人运动状态识别过程中, 还需要提取机器人的重心位置, 并提取重心与各个接地终端之间的角度, 并将上述特征提取结果进行融合输出。

2.1.3 识别移动机器人运动状态类型

根据移动机器人的移动方向和移动路线, 可以将其运动状态分为直线运动、曲线运动、圆弧运动、反向运动等类型, 根据不同类型移动机器人运动状态类型设置标准特征, 并利用大数据聚类分析技术确定机器人的运行状态类型^[15]。

在移动机器人运动状态类型聚类过程中, 以设定的运动状态标准特征作为聚类中心, 对提取运动特征与运动状态标准特征之间的距离进行度量, 度量结果如下:

$$d = \sqrt{[\tau_{\text{extract}} - \tau_b(i)]^2} \quad (4)$$

式中, τ_{extract} 为识别的移动机器人运动状态类型, $\tau_b(i)$ 为 i 类型运动状态的标准特征, 若度量距离低于阈值, 证明当前移动机器人运动特征与对应的聚类中心属于同一类型, 即当前移动机器人的运动状态类型为 i , 否则进行下一聚类中心的距离度量, 直至得到满足阈值要求的距离度量结果, 由此实现移动机器人运动状态类型的识别。

2.2 实现移动机器人偏摆力矩控制

综合考虑移动机器人的运动状态识别结果以及机器人的运动学原理, 对移动机器人偏摆力矩的理论值进行计算, 以此作为系统的偏摆力矩控制目标。移动机器人发生偏摆时, 重心位置的运动学方程可以表示为:

$$\begin{pmatrix} x_{\text{center}} \\ y_{\text{center}} \\ \vartheta_{\text{center}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\cos\theta}{2} & \frac{\cos\theta}{2} \\ \frac{\sin\theta}{2} & \frac{\sin\theta}{2} \\ -\frac{1}{h} & \frac{1}{h} \end{pmatrix} v \quad (5)$$

式中, θ 为移动机器人的姿态角, h 为左右两轮之间的距离, v 为移动机器人的瞬时移动速度, 根据识别的运动

状态类型结果, 可以得出 θ 和 v 的具体取值^[16]。根据欧拉第二定律, 确定偏摆角与偏摆力矩之间的关系, 进而得出偏摆力矩目标值的求解结果, 即:

$$T_{\text{optimal}} = G \cdot \vartheta_{\text{center}} \quad (6)$$

其中: G 为移动机器人刚体绕旋转轴的转动惯量。按照上述方式, 根据移动机器人运动状态的识别结果, 计算对应的偏摆角, 进而确定偏摆力矩控制目标的具体取值。

通过移动机器人在不同运动状态下的受力分析, 确定硬件系统中力矩传感器的具体安装位置, 通过传感器设备的运行, 测量任意时刻移动机器人的实际偏摆力矩^[17]。在实际的测量过程中, 根据力矩传感器的输出信号和传感器的标定系数, 得出偏摆力矩的测量结果为:

$$T(t) = \kappa_{\text{calibration}} U_{\text{out}} \quad (7)$$

式中, $\kappa_{\text{calibration}}$ 为力矩传感器的标定系数, U_{out} 为力矩传感器的输出电压值^[18]。在实际的测量过程中, 力矩传感器输出的感知信号除了反映偏摆力矩, 还包含负载力矩以及线性转动力矩, 因此需要在传感器输出的感知信号中对偏摆力矩进行分割, 按照上述方式得出移动机器人偏摆力矩实际值的实时测量结果, 以此作为系统控制的初始数据。通过移动机器人偏摆力矩控制目标与实际测量结果的对比, 计算移动机器人偏摆力矩控制量, 计算公式如下:

$$K(t) = T_m - T(t) \quad (8)$$

将相关数据的测量与确定结果代入公式 (8) 中, 即可得出偏摆力矩控制量的计算结果。综合考虑移动机器人的工作原理, 以顺时针方向作为正向、逆时针方向为负方向, 若公式 (8) 的计算结果取值高于 0, 则说明当前偏摆力矩未达到目标力矩, 此时的力矩控制方向为正向, 也就是顺时针方向, 否则按照负方向执行偏摆力矩控制任务。以计算的偏摆力矩控制量作为内容, 生成作用到移动机器人上的偏摆力矩控制指令, 即:

$$\gamma(t) = \lambda_p K(t) + \lambda_I \int_0^t K(t) dt + \lambda_d \frac{dK(t)}{dt} \quad (9)$$

式中, 参数 λ_p 、 λ_I 和 λ_d 分别为比例、积分和微分增益。将公式 (9) 表示的控制指令输入到硬件系统的控制器中, 设计移动机器人偏摆力矩控制工作逻辑如图 5 所示。

在实际的偏摆力矩控制过程中, 通过控制机器人的关节运动来间接影响偏摆力矩, 即机器人关节作为力矩的控制对象, 关节力矩通过驱动关节的电机或执行器产生, 进而改变机器人的姿态和动力学特性, 从而减小或消除偏摆力矩^[19]。在系统启动状态下, 重复上述操作, 当公式 (8) 计算得出偏摆力矩控制量为 0 时, 退出系统控制程序。

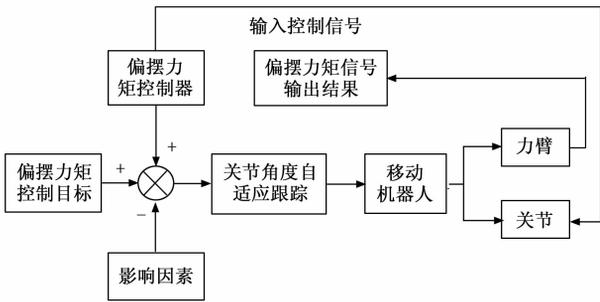


图 5 移动机器人偏摆力矩控制工作逻辑图

3 系统测试

为了测试优化设计基于大数据聚类分析的移动机器人偏摆力矩控制系统的控制功能与作用性能，设计系统测试实验，此次实验共包含两个部分，第一部分主要测试优化设计系统在移动机器人样机中的偏摆力矩控制误差，即实际控制结果与预期偏摆力矩之间的偏差，由此反映优化设计系统控制功能的测试结果。第二部分则是测试移动机器人在优化设计系统控制作用下，是否能够维持机器人的移动平衡与稳定。优化设计系统测试实验采用对比测试的方式，即设置多个传统力矩控制系统作为实验对比，从功能和性能两个方面，体现出优化设计系统的运行优势。实验过程如下：

1) 采集移动机器人运动数据 $x_z(t+1)$ ，并对初始采集数据中任意两个数据样本之间的冗余度进行度量，根据滤波参数 $\kappa_{\text{filtering}}$ 剔除冗余度高于 0.9 数据组中的任意一个数据；

2) 以采集的移动机器人运动数据为对象，提取机器人的运动特征 $[x_l(t_1), x_h(t_1)]$ 和 $[x_l(t_2), x_h(t_2)]$ ；

3) 对提取运动特征与运动状态标准特征之间的距离进行度量 d ，识别移动机器人运动状态类型；

4) 计算移动机器人发生偏摆时重心位置的瞬时速度 v ，生成作用到移动机器人上的偏摆力矩控制指令 $\gamma(t)$ ，实现移动机器人偏摆力矩控制。

3.1 准备移动机器人控制对象

为保证优化设计偏摆力矩控制系统能够实现对多种不同类型移动机器人的有效控制，分别选择 GR-1 型双足机器人和 Go2 型四足机器人作为控制样机。GR-1 型双足机器人集电机、驱动器、减速器及编码器于一体，凭借自研的 FSA 执行器和高度仿生的躯干构型，GR-1 能够实现快速行走和敏捷避障^[20]。GR-1 型双足机器人具备足够的稳定性和负载能力，空载质量约为 55 kg，站立尺寸为 1 650×515×320 mm，供电电压为 46.2 V，工作最大功率约为 550 W，步行速度可达到 5 km/h，负重能力达 50 kg，全身自由度多达 44 个，最大关节模组峰值扭矩可达 300 N·m。Go2 型四足机器人机身安

装有机载电动液压动力系统，为 HDU 提供高压油源，Go2 装备了 12 个铝合金精密关节电机，最大扭矩可达 45 N·m，该型移动机器人载荷能力约为 7 kg，运动速度可达 4.0 m/s，最大攀爬斜坡角度为 40°，最大攀爬落差高度约为 16 cm。将准备的移动机器人样机放置到空旷的移动环境中，移动环境中包含平地 and 坡路，并全面覆盖通信网络，保证移动机器人能够传输和收集传感与控制信号。

3.2 设定移动机器人运动任务与状态

通过对移动机器人运动轨迹的规划，确定机器人的运动任务，在此基础上，通过对移动机器人移动速度的设定，明确机器人的运动状态。移动机器人运动任务的设定情况如图 6 所示。

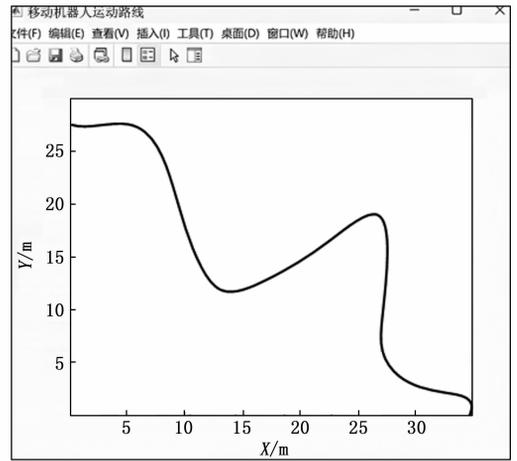


图 6 移动机器人运动任务设定图

系统测试实验设置多组运动任务，每组运动任务的移动路线不同，根据移动路线划分实验组别并对其进行编号处理。移动机器人的初始移动速度为 5 m/s，根据实时路况对移动速度进行调整，保证移动速度始终在区间 [5 m/s, 20 m/s] 内。

3.3 生成移动机器人偏摆力矩控制任务

根据移动机器人运动任务与状态的设定结果，结合机器人的实际移动环境，确定其偏摆力矩的控制值，由此生成多组偏摆力矩控制任务，部分控制任务的生成情况如表 1 所示。

表 1 移动机器人偏摆力矩控制任务表

控制任务编号	双足移动机器人偏摆力矩控制目标值/(N·m)	四足移动机器人偏摆力矩控制目标值/(N·m)
1	5.6	4.4
2	3.2	1.3
3	7.4	5.2
4	5.0	3.7
5	2.2	1.4
6	1.5	0.6
7	4.4	2.6
8	2.0	1.7

由于双足和四足移动机器人在运动状态下的受力情况不同, 因此偏摆力矩的控制目标存在差异。按照上述方式生成实验中的其他控制任务, 记录控制目标数据, 以此作为验证系统控制功能的比对标准。

3.4 安装硬件系统设备

根据基于大数据聚类分析的移动机器人偏摆力矩控制硬件系统的设计结果, 将组成的硬件元件安装到移动机器人样机中。

将力矩传感器安装到移动机器人的力臂位置上, 保证能够准确反映机器人的运动或受力情况, 采用螺栓固定的方式将力矩传感器牢固地安装在机器人上。将力矩传感器的电缆与机器人的供电电源相连, 确保电缆连接牢固, 避免松动或接触不良。将硬件系统中的力矩控制器安装到移动机器人的关节位置上, 将其分别与机器人电源、传感器等设备正确连接。按照上述方式完成硬件系统中所有设备元件的安装, 并保证安装设备均处于正常运行状态。

3.5 描述系统测试实验过程

利用 Visual Studio Code 作为控制系统软件部分的开发工具, 将控制程序导入到准备的移动机器人控制样机中, 通过大数据聚类分析技术以及偏摆力矩控制程序的运行, 得出系统的运行结果, 如图 7 所示。

重复上述操作, 可以得出双足和四足移动机器人在不同运动状态下的偏摆力矩控制任务执行结果。系统测试实验设置的对比项为: 基于分层控制策略的控制系统(文献 [2] 系统)和基于阻抗和虚拟模型的机器人控制系统(文献 [3] 系统), 利用相同的开发工具实现对比系统的开发, 并作用到相同的移动机器人样机中, 记录系统执行结果数据。

3.6 设置系统测试指标

从系统控制功能和运行性能两个方面设置测试指标, 控制功能的测试指标为控制偏差, 测试结果为:

$$\epsilon = |T_{\text{control}} - T_{\text{expect}}| \quad (10)$$

式中, T_{control} 和 T_{expect} 分别为移动机器人偏摆力矩的实际控制值和预期控制目标值, 控制偏差取值越大, 说明对应系统控制功能越优。另外, 运行性能的测试指标为移动机器人的移动稳定系数, 该指标的测试结果如下:

$$\zeta = n_{\text{foot}} \cdot \beta \quad (11)$$

式中, 变量 n_{foot} 和 β 分别为移动机器人工作腿数量和占空比。计算得出移动稳定系数越高, 说明对应系统的运行性能越优。

3.7 系统测试实验结果与分析

3.7.1 系统控制功能测试结果

在不同偏摆力矩控制系统作用下, 移动机器人实际偏摆力矩数据的测试结果, 如表 2 所示。

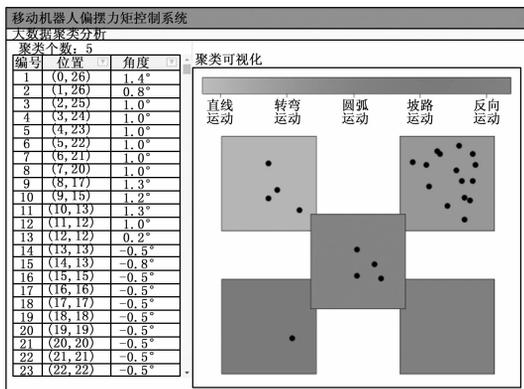
表 2 系统偏摆力矩控制功能测试数据表

控制任务编号	基于分层控制策略的控制系统		基于阻抗和虚拟模型的机器人控制系统		基于大数据聚类分析的移动机器人偏摆力矩控制系统	
	双足移动机器人实际偏摆力矩/(N·m)	四足移动机器人实际偏摆力矩/(N·m)	双足移动机器人实际偏摆力矩/(N·m)	四足移动机器人实际偏摆力矩/(N·m)	双足移动机器人实际偏摆力矩/(N·m)	四足移动机器人实际偏摆力矩/(N·m)
1	5.0	4.9	5.3	4.0	5.5	4.2
2	3.4	1.6	3.0	1.5	3.2	1.2
3	7.9	5.7	7.1	5.6	7.5	5.0
4	5.8	3.1	5.4	3.4	5.0	3.5
5	1.7	1.9	2.0	1.3	2.2	1.4
6	2.2	1.1	1.7	0.8	1.5	0.5
7	4.8	3.2	4.6	2.9	4.5	2.5
8	2.6	1.9	2.3	1.4	2.1	1.7

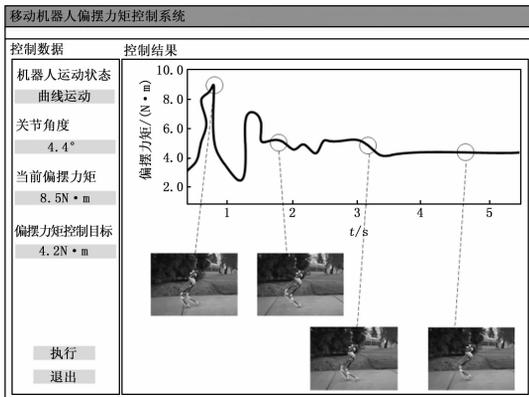
将表 2 中的数据代入公式 (10) 中, 计算得出 3 种控制系统作用下双足移动机器人的平均控制误差分别为 0.54、0.26 和 0.05 N·m, 四足移动机器人控制误差的平均值分别为 0.46、0.28 和 0.11 N·m。

3.7.2 系统运行性能测试结果

综合曲线和直线两种不同运动状态的移动机器人, 统计偏摆力矩控制系统作用下, 移动机器人的实际运动



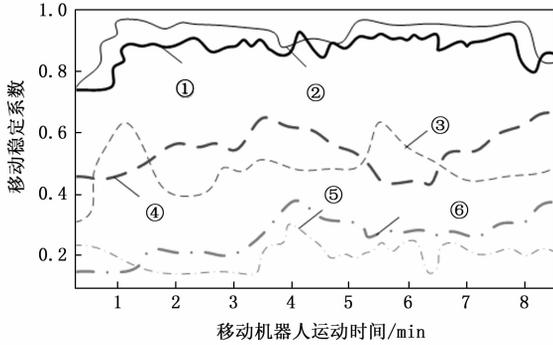
(a) 大数据聚类分析



(b) 移动机器人偏摆力矩控制

图 7 移动机器人偏摆力矩控制系统运行界面

数据,通过公式(11)的计算,得出反映控制系统运行性能的测试结果,如图8所示。



- ①基于大数据聚类分析的偏摆力矩控制系统下机器人直线运动状态;
②基于大数据聚类分析的偏摆力矩控制系统下机器人曲线运动状态;
③基于分层控制策略的控制系统下机器人直线运动状态;
④基于分层控制策略的控制系统下机器人曲线运动状态;
⑤基于阻抗和虚拟模型的控制下机器人曲线运动状态;
⑥基于阻抗和虚拟模型的控制下机器人直线运动状态。

图8 偏摆力矩控制系统运行性能测试对比曲线

从图8中可以直观看出,与两种传统控制系统相比,优化设计控制系统能够有效提升不同运动状态下移动机器人的移动稳定系数,即具有更优的运行性能。

4 结束语

移动机器人偏摆力矩控制的目的在于提高机器人的稳定性和运动性能,减少能耗,对于提升任务执行能力、增强安全性、推动技术进步以及拓展应用领域具有积极意义。在此次研究中,通过大数据聚类分析技术的应用,实现对移动机器人偏摆力矩控制系统的优化设计,不仅实现了对机器人运动过程中复杂多变偏摆力矩模式的精准识别与分类,还据此优化了控制策略,显著增强了机器人应对不同地形与环境变化的能力。尽管本研究在移动机器人偏摆力矩控制方面取得了显著成果,但仍存在一些有待进一步探索和改进的问题。例如,如何进一步提高系统对复杂环境的适应能力,以实现更加智能化的自主控制等。这些问题的解决将有助于推动移动机器人偏摆力矩控制技术的进一步发展,为机器人在更多领域的应用提供有力支持。

参考文献:

- [1] 柳秀山,张琴,程骏,等. 仿生双足机器人步态轨迹自适应控制方法研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(3): 298-302.
- [2] 于力率,苏晓杰,孙少欣,等. 基于分层控制策略的六轮滑移机器人横向稳定性控制[J]. 自动化学报, 2023, 49(7): 1421-1432.
- [3] 宫赤坤,吴浔炜,袁立鹏. 基于阻抗和虚拟模型的四足机器人控制方法[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(10): 2152-2161.
- [4] HE J, SHEN M, GAO F, et al. Active compliance control of a position-controlled industrial robot for simulating space operations [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1): 149.
- [5] 陈科举,张尚盈,张继磊,等. 基于绳驱并联机器人系统刚度的力/位混合控制[J]. 机械传动, 2023, 47(8): 130-134.
- [6] 罗刚,何涛,许博,等. 爬杆机器人动力学仿真及其驱动转矩控制研究[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(5): 781-789.
- [7] 从永正,程盈盈,胡正. 基于三阶超螺旋滑模观测器算法的机器人力矩估计方法[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(7): 1208-1215.
- [8] 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.
- [9] 刘鑫,陈昌忠,罗淇. 移动机器人神经网络补偿计算力矩控制[J]. 机床与液压, 2023, 51(11): 52-58.
- [10] 董伯麟,杨瑞伟. 串联弹性驱动器的设计及力矩控制研究[J]. 机械设计与制造, 2022(6): 167-171.
- [11] 罗刚,何涛,许博,等. 爬杆机器人动力学仿真及其驱动转矩控制研究[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(5): 781-789.
- [12] 胡河宇,曹建福,曹晔,等. 建筑幕墙安装机器人的位置/力混合控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(1): 51-60.
- [13] 蒙奎全,秦远田,蒋祺,等. 机器人末端复杂环境下力自适应控制[J]. 机床与液压, 2022, 50(17): 12-18.
- [14] 刘树博,李智,赖招宇,等. 非线性不确定机器人复合滑模非脆弱 H_{∞} 位/力控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(11): 100-106.
- [15] 周帅,刘晓鸣. 基于神经网络的工业机器人力控制研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(17): 21-25.
- [16] 雷源,李聪,宋延奎,等. 输入受限下机器人关节神经网络自适应控制[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(6): 101-111.
- [17] 陈钢,黄泽远,江涛,等. 多臂空间机器人稳定抓取力分配和柔顺控制策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 112-120.
- [18] 张智豪,于潇雁. 存在关节死区的空间机器人无扰快速终端滑模控制[J]. 力学学报, 2022, 54(3): 777-785.
- [19] 何伟严,马吉恩,王宏涛,等. 机器人关节电机转矩动态特性研究[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(12): 12-20.
- [20] 杨邳贤,张军辉,纵怀志,等. 基于自抗扰控制方法的双叶片式摆动缸转矩控制[J]. 液压与气动, 2023, 47(12): 147-153.