

# 基于模糊 PID 的悬吊式机械臂重力补偿控制系统设计

李崇智

(陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714099)

**摘要:** 针对悬吊式机械臂在工作过程中受起吊荷载的影响而产生的重心不稳现象, 在模糊 PID 控制算法的支持下, 进行悬吊式机械臂重力补偿控制系统设计研究; 硬件方面, 改装主控制器、传感器和通信模块, 加设重力补偿装置及驱动电机设备; 在此基础上完成软件设计, 根据机械臂的组成结构以及工作原理, 构建悬吊式机械臂数学模型; 在该模型下, 检测悬吊式机械臂实时位姿, 针对不同位姿建立相应的重力平衡方程; 计算机械臂负载力矩, 利用模糊 PID 算法求解机械臂重力补偿控制量, 实现悬吊式机械臂重力补偿控制功能; 实验结果表明: 与传统重力补偿控制系统相比, 优化设计系统的控制误差降低了 0.056 kN, 机械臂的稳定系数提升了 0.14, 即优化设计系统可提高补偿控制效果, 具有一定应用价值。

**关键词:** 模糊 PID; 悬吊式机械臂; 重力补偿; 补偿控制

## Design of Gravity Compensation Control System of Suspended Manipulator Based on Fuzzy PID

LI Chongzhi

(Shaanxi Railway Institute, Weinai 714099, China)

**Abstract:** Aimed at the unstable center of gravity of suspended manipulator under the influence of hoisting load during the working process, with the support of fuzzy PID control algorithm, the design and study on the gravity compensation control system of the suspended manipulator are carried out. In terms of hardware, the main controller, sensors and communication modules are modified, and gravity compensation devices and drive motor equipment are added. On this basis, the software design is completed, and the mathematical model of the suspended manipulator is constructed through the composition and working principle of the manipulator. Under this model, the real-time pose of the suspended manipulator is detected, and the corresponding gravity balance equation is established for different poses. By Calculating the load moment of the manipulator, the fuzzy PID algorithm is used to solve the control amount of the manipulator gravity compensation, and the gravity compensation control function of the suspended manipulator is realized. The experimental results show that compared with the traditional gravity compensation control system, the control error of the optimal system is reduced by 0.056 kN, and the stability coefficient of the manipulator is increased by 0.14, that is, the optimal system can improve the compensation control effect and has certain application value.

**Keyword:** fuzzy PID; suspended manipulator; gravity compensation; compensation control

## 0 引言

机械臂具有点胶速度快、高精度的特点, 可实现重复作业, 因此在诸多领域具有较高的应用价值<sup>[1]</sup>。悬吊式机械臂是常用机械臂的一种, 处于移动状态的机械臂受到重力作用会产生垂直向下的力, 当机械臂执行上下移动动作时, 需要消耗更多电能, 而当机械臂的移动重力高于牵引力时, 机械臂可能出现移动失衡的情况, 不仅会影响其移动效率和工作质量, 严重时还会导致机械臂掉落, 引发重大的安全事故。

为保证悬吊式机械臂的工作安全性, 同时提高机械臂的工作效率, 设计并开发了悬吊式机械臂重力补偿控制系

统。现阶段发展较为成熟的研究成果包括: 基于轨迹规划的补偿控制系统、基于最优激励位姿序列的补偿控制系统以及基于逆动力学的补偿控制系统。然而现有的补偿控制系统在实际应用过程中存在控制效果不佳的问题, 主要体现在机械臂重力补偿不足或过量两个方面, 最终导致机械臂的稳定性下降。基于此, 国内外学者均对此进行研究, 如 Perrusquia A 等人<sup>[2]</sup>提出基于重力补偿控制器的机器人局部放电整定新方法。该方法将局部放电控制与重力补偿相结合, 提出了一种新的方法来调整 PD+G 控制器。利用 La-Salle 定理的全局渐近稳定性结果和机器人动力学特性获得了调谐方法。该方法对于机器人的局部放电控制效果良

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-07-15。

基金项目: 2021 年陕西省科技厅科学研究计划软科学项目(2021KRM200)。

作者简介: 李崇智(1976-), 男, 陕西渭南人, 博士, 副教授, 主要从事农业经济方向的研究。

引用格式: 李崇智. 基于模糊 PID 的悬吊式机械臂重力补偿控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 100-105, 112.

好，但是其对于重力补偿的研究不足。又如 Lin H 等人<sup>[3]</sup>提出了一个通用和系统的框架，以解决 dVRK 机器人手臂的 MTM 重力补偿问题。该方法为避免残余误差在质量分布不均匀的 MTM 链路之间传递，依次对每个链路的重力和干扰力参数进行识别，最终完成重力补偿控制器的设计，来补偿机械臂的重力和干扰力。该方法具有一定有效性，但是其对机械臂的重力及干扰力参数分析仍然不足，其重力补偿效果未有较大改进。为此，本次研究在现有控制系统的基础上，引入模糊 PID 算法。

模糊 PID 算法融合了模糊控制理论和 PID 算法，其中模糊理论是利用模糊集的基础概念或者是连续从属函数来实现的，将其与 PID 算法的融合，可规避两种算法在单独使用时的弊端，实现目标的最优控制。将模糊 PID 算法应用到悬吊式机械臂重力补偿控制系统的优化设计工作中，以期能够提高机械臂的重力补偿控制效果。

## 1 悬吊式机械臂重力补偿控制硬件系统设计

要想实现悬吊式机械臂重力补偿，先根据悬吊式机械臂当前工作状态，确定重力补偿量，进而确定补偿装置移动的物理量，保证悬吊式机械臂处于平衡状态。

### 1.1 主控制器

系统应用了模糊 PID 算法，该控制器所处理的数据较为复杂，所以主控制器选用了型号为 STM32F103VET6 的控制设备，该设备内置了 512 kB Flash 芯片，可实现模糊 PID 控制，同时还能存储所需数据<sup>[2]</sup>。主控制器结构如图 1 所示。

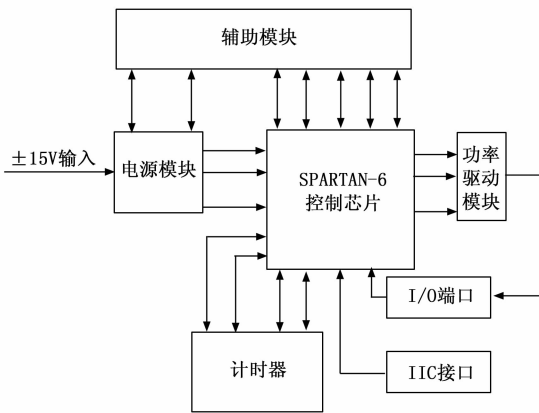


图 1 系统主控制器结构图

主控制器内置的多个 16 位计时器协同中断，生成一定占空因数的 PWM 波，其通用 I/O 端口和 IIC 接口可与外部设备相连，满足机械臂重力补偿控制程序的运行要求。主控制器中的 CAN 端口由 TJA1050CAN 控制器接口模块 TJA1050 完成，每台控制器的通讯速度可达 1 Mbps，利用 Ethernet 总线与 PC 机进行通讯时其最高速率可达到 100 Mbps。

### 1.2 传感器

系统采用模糊 PID 控制，属于一种闭环控制器，它要

求对运动角进行测量和反馈，以便于计算运动所需要的角度偏差。系统中安装的传感器设备分为拉力传感器和机械臂工作角度传感器两个部分，拉力传感器的检测精度不得低于悬吊式机械臂最大拉力的千分之一，保证吊丝拉力变化的检测质量，根据拉力变化值来实现重力补偿控制，为满足上述要求选择 RSS01 型号的拉力传感器设备<sup>[4]</sup>。选择 MPU6050 型传感器实现机械臂各个关节的动态角实时检测。MPU6050 是一种集成式六轴移动处理装置，它包括陀螺仪、加速度计以及数字处理器，可通过 I<sup>2</sup>C 接口与传感器相连接。角度传感器的测量范围是可控的，陀螺仪的测量范围能够达到每秒 ±2 000°，可准确追踪机械手臂关节的运动角度。

### 1.3 重力补偿装置

根据机械手的工作要求，采用力矩机构来实现对机械臂的重力进行补偿，当悬吊式机械臂向上运动时，重力补偿装置会产生与其力度大小相同、方向相反的力矩，通过该装置带动钢丝绳，使之达到平衡状态<sup>[5]</sup>。所设计重力补偿装置结构如图 2 所示。

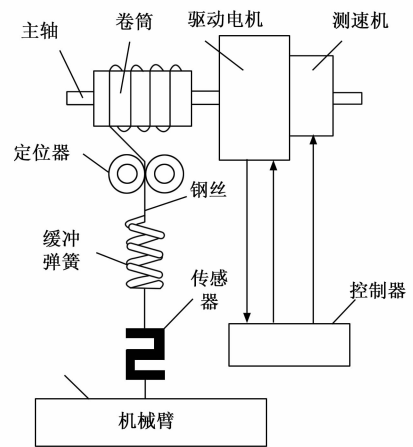


图 2 重力补偿装置组成结构图

图 2 中，恒拉力装置由力矩电机、卷筒和吊丝等部分组成。吊丝定位装置是将悬丝横向固定在水平位置，以减少因卷轴旋转而引起的横向偏移<sup>[6]</sup>。保护机构是用一段钢丝绳绳组成，绳索一端与地面相连，另一端与试验件下端相连。其作用是防止试验品在高速垂直移动时不小心碰撞到电机，避免重力补偿器的损伤。

### 1.4 驱动电机

驱动电机的选型受到机械臂的体积和重量的限制，通常要求结构尺寸较小，系统采用 MaxonEC-4pole 直流无刷电机，可为系统提供 60 V 的输入电压、20 A 的连续电流输出<sup>[7]</sup>。所安装的驱动电机支持递进型编码器，通过编码器接口将悬吊式机械臂各个关节的动作信息反馈给主控制器，并能支持闭环转速控制和位置控制，利用驱动器内部的电流回馈，实现闭环电流控制<sup>[8]</sup>。同时，该驱动电机支持串口通信和 CANOpen 总线通信，接口电路可为驱动器通信及供电提供便利。

### 1.5 通信模块设计

根据图 3 结构可将系统通信链路分为三部分，分别为上位机和主控制器通信链路、主控制器和节点控制器之间的通信链路及节点控制器和驱动器、传感器之间的通信链路。

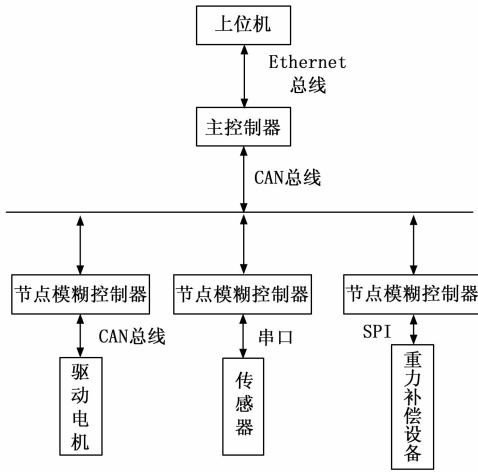


图 3 控制系统通信链路框图

采用以太网接口连接的方式实现上位机与主控制器之间的通信<sup>[9]</sup>。节点控制器指的是机器人的各个关节控制节点，它们之间的通信链路由 CAN 总线进行，通讯波特率为 500 kHz，而节点控制器和传感器终端之间的通信采用的是无线通信方式。

## 2 悬吊式机械臂重力补偿控制系统软件功能设计

### 2.1 构建悬吊式机械臂数学模型

如图 4 所示为悬吊式机械臂的结构模型，其主要由 4 个转动关节、两段长臂杆和一个末端执行器组成。

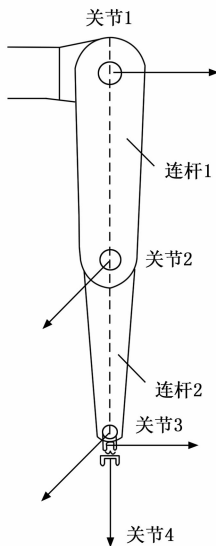


图 4 悬吊式机械臂结构模型

如图 4 所示，模型中手臂关节决定手臂末端的空间位置，而肘关节、腕关节和指间关节决定手臂末端的空间姿态<sup>[10]</sup>。根据机械臂上各关节之间的空间关系，得出机械臂的坐标转换矩阵为：

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， $n, s, a$  和  $p$  分别对应的是法向量、滑动向量、接近向量、末端位置坐标，角标  $x, y$  和  $z$  对应的是机械臂在空间环境中的三维分量<sup>[11]</sup>。通过公式 (1) 的变换，得出悬吊式机械臂执行不同动作时的运动学方程，将运动学方程与机械臂结构模型相结合，得出悬吊式机械臂数学模型的构建结果。

### 2.2 检测悬吊式机械臂实时位姿

在构建的悬吊式机械臂数学模型下，根据机械臂不同姿态的运动学特征，将机械臂的位姿描述为：

$$\{B\} = \{R_B P_B\} \quad (2)$$

式中， $R_B$  和  $P_B$  分别表示机械臂的旋转矩阵和位置矩阵<sup>[12]</sup>。利用硬件系统中的传感器设备，获取当前机械臂任意关节的横向绕度为：

$$y_i(x, t) = \sum_{k=1}^n q_{ik}(t) \varphi_{ik}(x) \quad (3)$$

其中： $q_{ik}(t)$  和  $\varphi_{ik}(x)$  分别表示机械臂关节  $i$  的  $k$  阶模态坐标和模态坐标的振型函数， $\varphi_{ik}(x)$  的函数表达式如下：

$$\varphi_{ik}(x) = \sin \frac{k\pi\theta}{L_i} \quad (4)$$

式中， $\theta$  表示传感器采集到的机械臂关节的旋转角度， $L_i$  表示当前关节与其相邻关节之间的长度值。按照上述方式可得出机械臂任意关节的纵向绕度求解结果，即可确定机械臂所有关节的位置坐标<sup>[13]</sup>。将求解出的机械臂关节位置坐标与传感器采集的角度信息代入到公式 (2) 中，即可得出当前机械臂的位姿检测结果。

### 2.3 建立悬吊式机械臂重力平衡方程

根据能量守恒定理，悬吊式机械臂在不同工作状态下其势能与动能之和始终处于恒定状态，在已知悬吊式机械臂位姿的前提下，可得出机械臂的动力势能为：

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n T_r \left[ \sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i U_{ip} I_i U_{ir}^T a_p a_r \right] \quad (5)$$

公式 (5) 中变量  $T_r$  为动能， $U_{ip}$  和  $U_{ir}$  均为常数，其计算公式如下：

$$U_{ij} = \frac{\partial A_i}{\partial a_j} \quad (6)$$

其中： $A_i$  表示关联第  $i$  个坐标系和基坐标系间的齐次坐标变换式， $a_j$  以及公式 (5) 中的  $a_p$  和  $a_r$  分别表示不同机械臂关节的加速度， $I_i$  表示惯性张量<sup>[14]</sup>。机械臂势能可表示为：

$$P = \sum_{i=1}^n -m_i g (A_i \vec{r}) \quad (7)$$

式中,  $m_i$  表示机械臂上第  $i$  个长臂杆的质量,  $g$  表示重力加速度,  $\bar{r}$  表示固定在长臂杆上其次坐标均值。在能量守恒定理的支持下, 得出机械臂的重力平衡方程为:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial (K-P)}{\partial \nu_i} \right) - \frac{\partial (K-P)}{\partial \nu_i} \quad (8)$$

式中,  $\nu_i$  和  $\tau_i$  分别表示悬吊式机械臂关节  $i$  的速度矢量和驱动力矩。在实际重力补偿与控制过程中, 忽略机械臂工作环境中的磁场势能、电势能和分子势能, 只考虑重力势能<sup>[16]</sup>。若悬吊式机械臂执行的移动任务涉及关节旋转, 则需要在动能计算过程中考虑关节角位置和角速度。

### 2.4 计算机械臂负载力矩

假设悬吊式机械臂在当前位姿状态下所承受的牵引力为  $F$ , 牵引力的作用点为  $Q(x_F, y_F, z_F)$ , 则牵引力作用在机械臂上的负载距离表达式:

$$\begin{cases} M_x(F) = y_F F_z - z_F F_y \\ M_y(F) = z_F F_x - x_F F_z \\ M_z(F) = x_F F_y - y_F F_x \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $x_F, y_F$  和  $z_F$  对应的是牵引力在 3 个方向上的分量, 设力作用点  $Q$  的矢径为  $R$ , 则牵引力对机械臂重心点的力矩可表示为:

$$M_o(F) = R \times F \quad (10)$$

公式 (10) 中力矩矢量  $M_o(F)$  的大小和方向都与机械臂重心的位置有关<sup>[16]</sup>。机械臂上各个关节的力矩可被看作是额外的弯矩和反向力矩之和<sup>[17]</sup>。

### 2.5 利用模糊 PID 算法求解机械臂重力补偿控制量

模糊 PID 控制算法的控制性能取决于它的控制规则, 控制规则的数量与控制器输入数量之间存在指数关系。在系统运行过程中, 输入量为误差和误差变化率。模糊 PID 算法控制原理如图 5 所示。

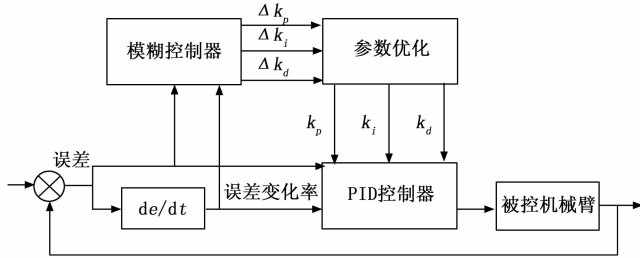


图 5 模糊 PID 算法控制原理图

在机械臂重力补偿控制过程中, 模糊语言变量中必须选取适当的隶属度函数<sup>[18]</sup>。要注意功能曲线的形状和分布对控制性能产生的影响。将模糊处理后的变量代入到公式 (11) 中, 计算控制器的输入值。

$$\begin{cases} e(t) = i(t) - o(t) \\ e_c(t) = \frac{e(t) - e(t-1)}{t} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $i(t)$  和  $o(t)$  分别表示设定值和实际输出值, 计算结果  $e(t)$  和  $e_c(t)$  分别表示误差和误差率,  $t$  表示时间。将偏差的比例系数  $\kappa_p$ 、积分系数  $\kappa_i$  和微分系数  $\kappa_d$  进行调整, 组合构成控

制量。 $\kappa_p$  反映了控制器的输出和输入偏差之间的比例关系, 增加比例系数可降低系统的稳定误差, 从而改善系统的稳定状态<sup>[19]</sup>。积分系数主要是为了消除稳态误差, 随着时间的推移, 稳态误差会逐渐降低, 最后达到 0。微分系数的功能是提高控制器的运行稳定性。通过对模糊 PID 控制器工作参数的设置与调整, 可以得出控制器的离散控制规律为:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \sum_{j=1}^{t-1} e(t) + k_d e_c(t-1) \quad (12)$$

将公式 (11) 的计算结果代入到公式 (12) 中, 即可得出 PID 控制器的输出结果  $u(t)$ 。受到悬吊式机械臂工作状态以及位姿的影响, 输入控制器中的数据呈现出动态变化规律, 要求控制器的工作参数随之发生变化, 因此需要创建模糊规则, 并调整 PID 控制器的运行参数, PID 控制器运行参数的调整规则如下: 若输入的误差值  $e$  较大, 向上提高比例系数  $\kappa_p$  的值, 同时降低积分系数  $\kappa_i$  和微分系数  $\kappa_d$  的具体取值, 改善了系统的响应速度并避免超调, 并有效地抑制了由误差改变率引起的微分过饱和; 如果输入的  $e$  较大, 不调整  $\kappa_p$  和  $\kappa_i$  的值,  $\kappa_d$  参数小幅度降低, 同时兼顾了控制的精确度与稳定性, 并确保了响应速度<sup>[20]</sup>。当输入的误差值过小时, 降低  $\kappa_p$  值的同时增大  $\kappa_i$  参数, 在减少振荡的同时消除系统的静态误差, 在考虑误差变化率的情况下确定参数  $\kappa_d$  的调整方向。将调整后的参数代入到公式 (12) 中, 得出模糊 PID 控制器的输出结果。最终把模糊 PID 控制器输出的数值转换成可以控制执行元件的精确量, 去模糊化处理过程可表示为:

$$u_{con} = \frac{\sum_{i=1}^7 u_i \delta_i}{\sum_{j=1}^7 u_j} \quad (13)$$

其中:  $u_i$  表示模糊 PID 控制器的输出结果,  $\delta_i$  表示模糊变量值, 在悬吊式机械臂重力补偿量的求解过程中, 将机械臂的负载力矩计算结果作为输入量导入到控制器中, 在考虑机械臂工作稳定性的情况下, 得出重力补偿控制量为:

$$u_{con} = \frac{\sum_{i=1}^7 (k_p M_o(F) + k_i \sum_{j=1}^{t-1} M_o(F) + k_d M_o(F)) \delta_i}{\sum_{i=1}^7 (k_p M_o(F) + k_i \sum_{j=1}^{t-1} M_o(F) + k_d M_o(F))} \quad (14)$$

公式 (14) 的求解结果为机械臂重心点的重力补偿控制量, 按照上述方式可求解出机械臂上各个关节的重力补偿控制量。

### 2.6 实现悬吊式机械臂重力补偿控制

在悬吊式机械臂设备上设置多个重力补偿点, 将重力补偿设备安装在各个测点位置上, 根据机械臂实时力矩以及补偿控制量的计算结果, 按照图 6 流程, 完成系统的重力补偿控制功能。

利用缓冲弹簧设备减小重力补偿控制过程中可能存在的干扰力, 进一步提高系统重力补偿机构的平衡控制精度。

## 3 系统测试

以测试基于模糊 PID 的悬吊式机械臂重力补偿控制系

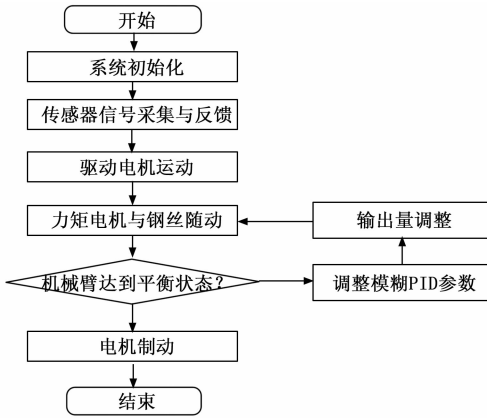


图 6 悬吊式机械臂重力补偿控制流程图

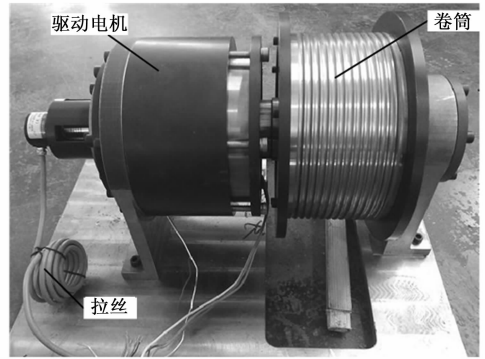


图 8 重力补偿装置连接实物图

统的补偿控制功能为目的，采用黑盒与白盒相结合的测试方式，设计系统测试实验。

### 3.1 准备悬吊式机械臂实验对象

此次实验选择的悬吊式机械臂研究对象的型号为 HBC-200，该设备自重约 500 kg，其最大负载能够达到 200 kg，最高提升高度为 1.9 m，其半径的最大值和最小值分别为 2.2 m 和 0.5 m。采用地面螺栓固定的方式将其安装到地面上，具体的安装情况如图 7 所示。

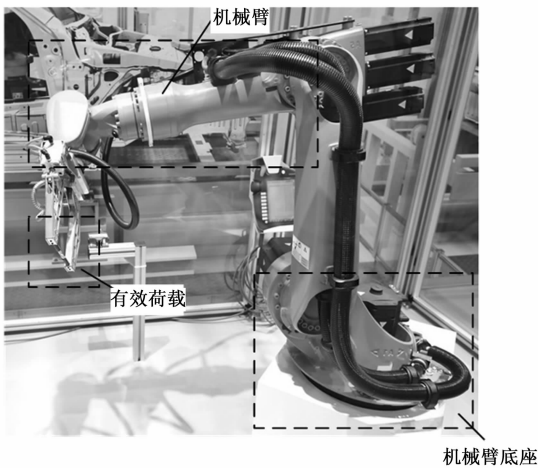


图 7 悬吊式机械臂实验对象配置实景

悬吊机械臂所用的固定设备，包含悬架轨道，该悬架轨道内侧可移动地连接一个安装板，其前侧设有一凹槽，在安装板顶部与凹槽两侧安装  $u$  型板，起到固定作用。 $u$  板顶部安装活动插杆，且安装板的顶部固定连接有着支撑架。将准备的悬吊式机械臂与供电电源相连，通过调试保证准备的悬吊式机械臂处于正常工作状态。除此之外，还需要准备不同重量的物体作为机械臂的作用荷载。

### 3.2 安装与配置机械臂重力补偿装置

为了给系统的运行提供硬件支持，从卷筒、弹簧、拉丝等方面安装重力补偿装置，具体的安装情况如图 8 所示。

在重力补偿装置安装过程中，不可避免会出现安装误差，影响控制系统的运行效果，因此需要对相关的硬件设

备进行安装标定。以吊索滑轮设备安装为例，在吊索自由状态下，定义吊索与滑轮的切点是原点，吊索垂线是  $Z$  轴， $Y$  轴是平行于滑轮轴的，与  $Y$ 、 $Z$  轴垂直即为  $X$  轴，由此组成标定的右直角坐标系。按照上述方式完成对系统所有硬件设备的标定。

### 3.3 输入模糊 PID 算法工作参数

由于优化设计的悬吊式机械臂重力补偿控制系统应用了模糊 PID 控制算法，为保证该算法的顺利运行，需要设置相关的工作参数。设置比例系数、积分系数和微分系数的初始值均为 0，分别将负大、负中、负小、零、正小、正中、正大设置为模糊控制算法的模糊子集，进而得出模糊规则，以此作为模糊推导环节的数据支持。

### 3.4 描述系统测试过程

在实验开始之前，设置悬吊式机械臂的工作任务，具体的设置情况如表 1 所示。

表 1 悬吊式机械臂实验工作任务数据表

机械臂工作任务编号	工况	任务内容
1	静态	机械臂底座向前移动
2	静态	机械臂底座向后移动
3	静态	机械臂底座向左移动
4	静态	机械臂底座向右移动
5	动态	机械臂抓取 1 kg 物体
6	动态	机械臂抓取 2 kg 物体
7	动态	机械臂抓取 3 kg 物体
8	动态	机械臂抓取 5 kg 物体
9	动态	机械臂抓取 10 kg 物体

表 1 中机械臂工况的划分依据是机械臂及其关节是否存在移动或旋转。在安装并调试成功的硬件环境中，导入悬吊式机械臂重力补偿控制系统的软件程序，为保证系统测试实验的执行安全，设定紧急停止程序，在程序发现张力偏差太大的情况下，两台电动机会同时抱死。输入模糊 PID 算法工作参数以及悬吊式机械臂实时工作数据，通过软件系统的运行输出运行结果，如图 9 所示。

实验中设置传统的基于轨迹规划的悬吊式机械臂重力补偿控制系统作为实验的对比系统，按照上述流程可以得

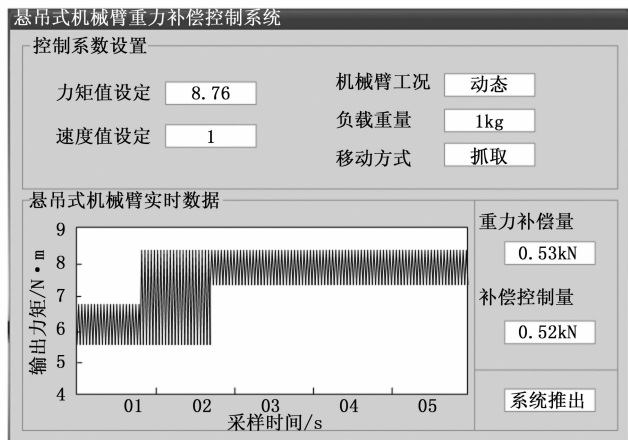


图 9 悬吊式机械臂重力补偿控制系统运行界面

出对比系统重力补偿控制结果。

### 3.5 设置系统测试指标

设置控制误差与机械臂稳定系数作为系统重力补偿控制功能的量化测试指标。控制误差指标的数值结果为：

$$\epsilon = |u_{\text{theory}} - u_{\text{con}}| \quad (15)$$

式中， $u_{\text{theory}}$  和  $u_{\text{con}}$  分别为重力补偿控制的理论值和实际值，根据设置的悬吊式机械臂实验工作任务，可以确定机械臂重力补偿控制理论值的具体取值，利用机械臂上的传感器设备可以得出  $u_{\text{con}}$  的取值。另外机械臂稳定系数的测试结果可以表示为：

$$\gamma_{\text{stable}} = \frac{G \cdot \gamma_c - \left[ \frac{Qv^2 sh_1}{900 - v^2 h_0} + (Qh_1 + Gh_0) \sin\alpha \right]}{Q(s - 0.5l)} \quad (16)$$

公式 (16) 中变量  $G$  为机械臂自重， $Q$  表示起吊荷载， $s$  和  $v$  分别表示的是幅度值和起升速度， $\gamma_c$  为机械臂自身稳定系数， $h_0$  和  $h_1$  分别为起吊物距离地面和机械臂端的高度值， $\alpha$  为机械臂支撑面的倾斜角度。测试得出控制误差越大、机械臂稳定系数越小，说明对应系统的控制功能越差。

## 4 系统测试结果与分析

在系统中输入相关参数，得出软件系统的运行结果，统计数据得出两种系统重力补偿控制误差结果，如表 2 所示。

表 2 系统重力补偿控制误差测试结果

实验组别	重力补偿控制理论值/kN	基于轨迹规划的悬吊式机械臂重力补偿控制系统实际补偿控制量/kN	基于模糊 PID 的悬吊式机械臂重力补偿控制系统实际补偿控制量/kN
1	0.53	0.49	0.52
2	0.44	0.48	0.42
3	0.28	0.36	0.27
4	0.27	0.24	0.27
5	1.39	1.45	1.38
6	3.04	3.17	3.02
7	3.89	3.96	3.88
8	6.82	6.74	6.81
9	12.07	12.16	12.05

表 2 中实验组别的划分依据是悬吊式机械臂的工作任务，将表 2 中的数据代入到公式 (15) 中，计算得出对比系统的平均控制误差为 0.068 kN，而设计系统的控制误差为 0.012 kN。由此可知，设计系统的平均控制误差更小，控制性能更佳。另外，通过公式 (16) 的计算可以得出两种系统控制下，悬吊式机械臂稳定系数的测试结果，如表 3 所示。

表 3 机械臂稳定系数测试对比结果

实验组别	基于轨迹规划的悬吊式机械臂重力补偿控制系统控制下的机械臂稳定系数	基于模糊 PID 的悬吊式机械臂重力补偿控制系统控制下的机械臂稳定系数
1	0.84	0.94
2	0.82	0.89
3	0.88	0.96
4	0.83	0.92
5	0.79	0.97
6	0.74	0.99
7	0.82	0.98
8	0.75	0.98
9	0.85	0.96

通过平均值计算分别得出两种系统控制下，悬吊式机械臂研究对象的平均稳定系数分别为 0.81 和 0.95。由此可知，设计系统控制的稳定系数更高，稳定性能更佳。

综上所述，与传统重力补偿控制系统相比，优化设计系统的控制误差更小、稳定系数更高，即系统的控制功能更优。

## 5 结束语

机械臂是工业生产中的重要设备之一，有效的降低了工业生产的工作难度、提高工作效率。在模糊 PID 控制算法的支持下，优化设计悬吊式机械臂重力补偿控制系统，系统测试结果证明优化控制系统可以满足机械臂的稳定性和精确性要求。然而从实验结果中可以看出，优化设计的系统依旧存在少量控制误差，可以通过适当增大钢丝直径、调整重力补偿装置与主动分离装置之间的布局方式，进一步降低系统的控制误差。此外系统测试未对系统的运行性能进行测试，因此将其应用到实际应用工作中可能会存在控制速度慢的情况，在未来的研究工作中需要对系统运行性能的测试数据作进一步补充。

### 参考文献：

[1] 徐永利, 李潇男, 刘勇, 等. 空间机械臂地面竖直方向重力补偿控制系统设计 [J]. 机器人, 2020, 42 (2): 191 - 198.  
 [2] PERRUSQUIA A, FLORES-CAMPOS J A, TORRES-SANMIGUEL C R. A Novel Tuning Method of PD With Gravity Compensation Controller for Robot Manipulators [J]. IEEE Access, 2020, 8: 114773 - 114783.

(下转第 112 页)