

# 基于无线电技术的远程遥控机器人 多电机协同控制系统设计

朱自林

(保山市无线电监测中心, 云南 保山 678000)

**摘要:** 机器人应用范围的扩大, 其内部配置电机数量随之增加, 运动轴数量、关系更加复杂; 为了提高机器人多电机协同控制能力, 设计一种基于无线电技术的远程遥控机器人多电机协同控制系统; 搭建远程遥控机器人多电机协同控制框架, 通过无线电技术硬件设备, 对多个单元进行设计, 完成硬件系统的设计; 基于无线电技术感知周围信号, 对信号的相关信息进行获取, 采用滤波算法和相似度计算方法对数据进行预处理, 剔除冗余数据; 通过模糊控制理论和速度补偿器方法, 实现机器人多电机的协同控制; 实验结果表明, 应用设计系统获得的机器人多电机协同控制时延最小值为 0.45 s, 电机转速与额定转速更接近, 机器人运行轨迹与期望轨迹一致, 充分证实了设计系统应用效果较佳。

**关键词:** 多电机; 远程遥控机器人; 协同控制系统; 无线电技术

## Design of Multi motor Collaborative Control System for Remote Control Robot Based on Radio Technology

ZHU Zilin

(Baoshan Radio Monitoring Center, Baoshan 678000, China)

**Abstract:** Robots are widely used in different fields, with the characteristics of increased internal motors and complex motion axes and relationships. In order to improve the collaborative control ability of multiple motors in robots, a remote control robot multi motor collaborative control system based on wireless technology is designed. Build a multi motor collaborative control framework for remote control robots, design multiple hardware equipment units through wireless technology, and complete the hardware system design. Based on wireless technology to perceive surrounding signals and obtain relevant information about the signals, and the filtering algorithms and similarity calculation methods are used to preprocess the data, and eliminate redundant data. The fuzzy control theory and speed compensation method achieve the collaborative control of multiple motors in robots. Experimental results show that by applying the designed system, the obtained minimum delay of multi motor collaborative control for robots is 0.45 s, the motor speed is closer to the rated speed, and the robot running trajectory is consistent with the expected trajectory, fully verifying that the designed system has a better application effect.

**Keywords:** multi motor; remote control robot; collaborative control system; radio technology

## 0 引言

机器人是一种有效融合电子系统、传感系统、机械系统、控制系统等多种系统的产品, 伴随着智能化技术发展水平的提升, 机器人发展程度愈来愈高, 其在人们生产与生活中出现的频率也随之增多, 受到了社会大众的广泛关注。机器人的应用不但能够极大程度的降低人们的劳动强度, 也可以大幅度提升人们的生产与生活效

率。无线技术可以使得远程遥控机器人能够实现精确的控制, 并在工业生产中扮演重要角色。在无线技术下, 操作员可以远程操控机器人完成危险或难以接近的任务, 通过无线通信与中央控制系统交互, 实现远程操控和监控。随着机器人的不断发展与变革, 内部结构愈加复杂, 电机数量逐渐增加, 为其协同控制带来了极大的困难与挑战。电机数量增加一方面能够为机器人提供更多的动力支撑, 另一方面也可以提升机器人运行的稳定

收稿日期:2023-11-20; 修回日期:2024-01-11。

作者简介:朱自林(1988-),男,大学本科,高级工程师。

引用格式:朱自林. 基于无线电技术的远程遥控机器人多电机协同控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(1): 99-105, 130.

性与安全性。当机器人某个电机发生故障停止运转时,其他电机可以替补上位,为机器人运行提供基础动力,防止机器人中途暂停现象的发生。但是,多电机就表明机器人存在多个运动轴,它们之间存在着紧密的联系,这就为机器人控制造成了极大的阻碍,需要同时协同控制多电机,才能保障机器人的精准运行。

文献 [1] 主要是利用偏差耦合理论构建机器人电机转速误差模型,添加了电机转速检测与反馈模块,与 PID 控制技术进行有效地融合,共同实现机器人多电机转速的补偿与控制。与此同时,该方法还通过模糊控制调节滑模增益的大小,削弱机器人的抖振现象,保障机器人运行的稳定性。文献 [2] 以多目标优化理论为依据,结合机器人的自身特性,基于屏障控制函数设计多目标协同控制系统,以此来减少机器人的机械疲劳,并可以有效地避免机器人的碰撞,实现机器人的协同控制。文献 [3] 深入分析机器人直行与转向运动步态,合理规划机器人的足端轨迹,设计了机器人运动控制系统,从而实现了机器人的有效控制。

由上述分析内容可知,3 种文献方法虽然能够实现机器人控制功能,但是存在考虑因素不充分、应用手段有缺陷等问题,致使机器人控制效果差强人意,无法满足机器人的后续发展与应用需求。为此,提出基于无线电技术的远程遥控机器人多电机协同控制系统设计研究。搭建远程遥控机器人多电机协同控制框架,计算误差值,利用协同控制器对机器人运行误差进行补偿控制。设置无线电技术硬件设备多个单元,完成硬件系统的设计,为此提供稳定的通信环境。以无线电技术硬件设备为工具,对无线电信号进行感知,为机器人多电机协同控制的实现提供依据。通过数据预处理,减少了冗余数据,降低机器人运行过程中的相对误差,提高机器人多电机协同控制能力,完成对无线电技术的远程遥控机器人多电机协同控制系统设计。

## 1 远程遥控机器人多电机协同控制系统硬件设计

以最大误差动态补偿控制原理为依据,搭建远程遥控机器人多电机协同控制框架,具体如图 1 所示。

如图 1 所示,搭建框架展示的远程遥控机器人多电机协同控制原理为:在电机自身闭环控制前提下,应用协同控制器对误差等级最大的电机进行判定,其对机器人稳定运行影响最大。计算误差等级最大电机与其他电机的同步误差数值,以此为基础,对该电机进行对应的补偿,降低电机之间的同步误差,提升多电机的性能,保障机器人运行的安全性与可靠性。通过上述描述可知,协同控制器能够对机器人内部电机运行状况进行实时的判定,并对误差等级最大的电机进行补偿与调制,

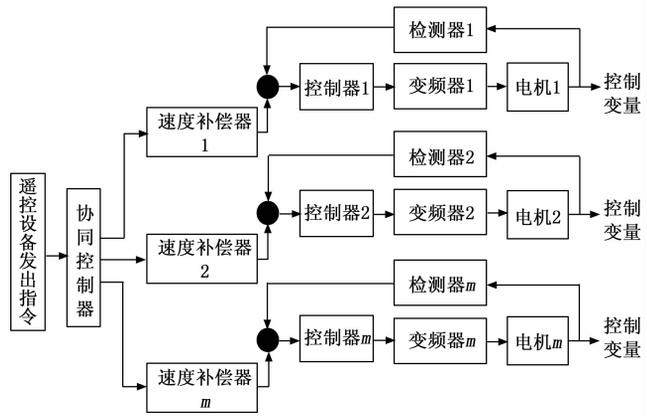


图 1 远程遥控机器人多电机协同控制框架示意图

相对于固定电机补偿模式来说,此种模式更加灵活,补偿效果更佳。搭建远程遥控机器人多电机协同控制框架主要是利用协同控制器对机器人运行误差进行补偿控制,电机之间呈现动态耦合状态,整体结构较为简单,能够为后续研究的顺利进行奠定坚实的基础。

### 1.1 无线电技术硬件设备设计单元

无线电技术主要承担着远程遥控机器人多电机协同控制信号传输与控制结果反馈信号接收的任务,功能实现需要硬件设备与软件程序的共同出力<sup>[4]</sup>。其中,硬件设备主要包括发射器、接收器、使能状态设备及其频率合成设备,具体设计过程如下所示。

发射器是无线电技术实现的关键硬件设备之一,其内部发射通道主要承担着完整数模混合信号处理任务,即将数字基带信号转换为模拟射频信号。为了满足远程遥控机器人多电机协同控制的需求,设计发射通道内部硬件为数字滤波器、数模转换器、低通滤波器与程控衰减器<sup>[5]</sup>。其中,数字滤波器主要是对数字基带信号进行内插调理,保障数字基带信号的准确性;数模转换器垂直分辨率为 12 bit,采样速率可调节,每个发射通道配置 2 个数模转换器,承担着数字基带信号转换的任务,输出结果即为模拟基带信号;低通滤波器配置了两个不同等级的,对模拟基带信号进行两级滤波处理,以此来消除冗余信号、噪声信号等干扰信号,对模拟基带信号进行重新组合与调制,生成模拟射频信号;程控衰减器主要配置在发射通道末端,其可调整步进为 0.25 dB,具有较宽的衰减调整范围,可以最大限度的优化模拟射频信号,为发射器的稳定运行提供支撑<sup>[6]</sup>。发射通道路径如图 2 所示。

接收器与发射器具有同等的重要性,其与发射器具有一定的相似性,内部接收通道也承担着完整数模混合信号处理任务。但是信号处理方向与发射器正好相反,即将模拟射频信号转换为数字基带信号。为了满足远程遥控机器人多电机协同控制的需求,设计接收通道内部

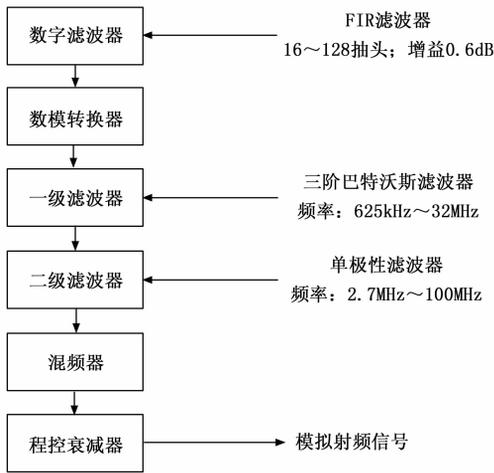


图 2 发射通道路径示意图

硬件为低噪声放大器、混频器、跨阻放大器、低通滤波器、数模转换器与数字滤波器<sup>[7]</sup>。其中，低噪声放大器与混频器相连接，通过共同作用将模拟射频信号转换为模拟基带信号，并将其传输给下一硬件设备——跨阻放大器；跨阻放大器与低通滤波器（两级）互相匹配连接，主要承担着谐波干扰信号滤除的任务；数模转换器主要承担着模拟基带信号数字化处理的任务；数字滤波器主要承担着模拟基带信号转化为数字基带信号的任务。与此同时，数字滤波器能够通过改变抽取系数来调整设备的采样率，以此来控制数据的输出速率，并将其传输至设计系统处理器中<sup>[8]</sup>。接收通道路径如图 3 所示。

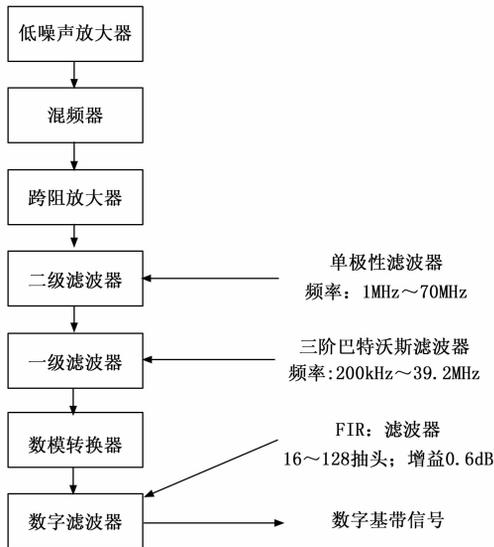


图 3 接收通道路径示意图

使能状态设备主要是对无线电系统状态进行控制与调试。设计系统主要采用时分复用模式，即发射器与接收器工作在同一载波频率信道上，但是对应时隙不同，通过时间差异来保障发射通道与接收通道的顺畅运行<sup>[9]</sup>。

使能状态设备具体控制规则如表 1 所示。

表 1 使能状态设备控制规则表

无线电状态	代码	具体控制内容
发射状态	TX	发射通道使能
接收状态	RX	接收通道使能
刷新状态	TX/RX/FDD FLUSH	数字链路与数字滤波器刷新
警示状态	ALERT	频率合成器使能
全双工收发状态	FDD	发射通道与接收通道同时使能
待机状态	WAIT	频率合成器禁用
休眠状态	SLEEP	全部时钟与频率合成器禁用

频率合成设备具有显著的独立编程控制性能，其编程频率范围为 6~12 GHz，主要承担着发射通道路径与接收通道路径生成频率信号的合成任务<sup>[10]</sup>。与此同时，设计系统无线电子模块中还嵌入了一个基带频率合成器，其编程频率范围为 715~1 430 MHz，承担着采样时钟信号的合成任务。需要注意的是，频率合成设备能够依据用户的特定需求配置相应的信号传输速率，为设计系统开发提供一定的便利。为了简化系统的设计过程，实现频率的高精确度，在无线电技术硬件设备中添加一个时钟源，其频率为 40 MHz，利用其对有源时钟进行晶振温补，以此来保障无线电功能的正常发挥。由于研究篇幅的有限性，不对频率合成设备具体结构进行赘述与展示。

上述过程完成了无线电技术硬件设备的设计与说明，为设计系统信号发送与接收提供稳定的通信环境。

### 1.2 位置传感器设计单元

位置传感器是机器人定位的关键硬件设备<sup>[11]</sup>。依据设计系统需求，选取增量式光电编码器作为位置传感器，主要是通过数字形式测量机器人运动轴相对基准位置的变化量，以此来表征机器人的位置变化情况。增量式光电编码器运行过程中，输出一个脉冲信号就会获得一个机器人位移增量，但是需要注意的是，这个位移增量是相对数值，并不能够直接展示出机器人的实际位置。增量式光电编码器输出脉冲信号呈现明显的正交特点，很容易判断出运动轴的旋转方向<sup>[12]</sup>。增量式光电编码器结构如图 4 所示。

如图 4 所示，增量式光电编码器主要由输出电路、光敏装置、码盘、光源与外壳共同组成，通过正弦波与方波形式输出脉冲信号，获取机器人的位移增量，从而实现机器人位置的测量与定位。

### 1.3 速度与加速度传感器设计单元

机器人速度与加速度检测是对其进行协同控制的关键环节，因此必须保障速度与加速度测量的精准性。常规情况下，机器人速度、加速度与位置之间具有紧密的联系，通过位置信息的基本运算即可获得机器人的速度

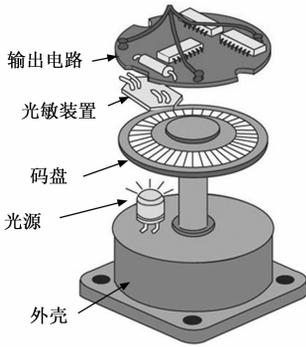


图 4 增量式光电编码器结构示意图

信息，而速度信息微分运算后就可以获得机器人的加速度信息。

依据 1.2 节设计的增量式光电编码器获取机器人位移增量，以此为基础，计算机器人的速度信息，原理为： $(\text{单位时间内增量式光电编码器输出脉冲数量} \times \text{分辨率}) \div \text{单位时间} = \text{速度}$ 。一般情况下，单位时间越短，依据上述原理获得的机器人速度与实际速度更加接近；反之，单位时间越长，机器人速度计算结果<sup>[13]</sup>与实际结果相差越远。

通过上述描述可知，设计系统无需另外的速度与加速度传感器，只需要利用 1.2 节设计增量式光电编码器结合处理器即可完成机器人速度及其加速度的测量，为设计系统目标实现提供依据支撑。

### 1.4 处理器设计单元

处理器是设计系统的核心处理设备，其需要具备较强的数据处理性能。为了方便设计系统的集成开发，降低设计系统整体开发成本，选取 STM32F407ZET 高性能芯片作为设计系统的处理器设备，其主频最大值能达到 168 MHz，能够对机器人控制指令进行快速反应<sup>[14]</sup>。除此之外，STM32F407ZET 芯片还具备非常丰富的外设接口，例如 CAN、SPI、I2C 等，可以满足机器人外部设备的控制需求。STM32F407ZET 芯片内部还配置了 RAM 和 Flash，能够最大限度的满足控制程度的运算与存储需求。STM32F407ZET 芯片部分原理如图 5 所示。

如图 5 所示，STM32F407ZET 芯片采用串行线进行调试，与其他模式相比较，此种模式更加便利，操作更加简单。在设计系统最小化运行时，非常容易出现固件无法刷新、程序卡死、调试异常等问题，而 STM32F407ZET 芯片的设计可以有效改善上述问题，为设计系统的稳定运行提供更有效的支撑。

### 1.5 协同控制器设计单元

协同控制器是设计系统的关键硬件设备，决定着研究目标能否实现。设计系统选取 STM32F407ZGT6 芯片作为协同控制器的核心芯片，联合核心板与 PCB 底板共同实现协同控制器的设计。其中，PCB 底板上配置了多

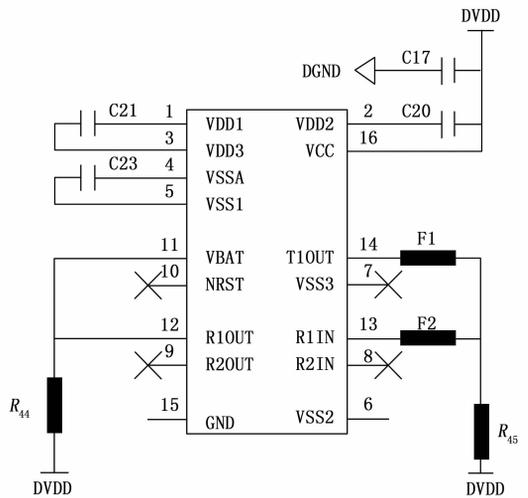


图 5 STM32F407ZET 芯片部分原理示意图

个接口，方便其他硬件设备的连接。除此之外，控制器的供电环节至关重要<sup>[15]</sup>。稳定的电力能源供给是保障协同控制器安全运行的关键所在。设计系统采用双电源对协同控制器进行独立供电，电源类型为锂电池，其容量规模为 1 500 mah，放电系数为 20 C，并具备重量轻、电流稳定的优势。协同控制器供电电压为 3.3 V，而电源输出电压为 12 V，需要利用两级降压装置对其进行降低处理，以此来满足协同控制器的运行需求。另外，在控制器底板电源输出位置设计自恢复保险丝，其容量为 750 mah，以此来保障协同控制器的运行安全。

协同控制器核心芯片——STM32F407ZGT6 具备多个引脚，并可以根据用户需求对其进行自定义，具体如表 2 所示。

表 2 STM32F407ZGT6 芯片引脚自定义表

引脚名称	引脚序号	引脚定义
GND	1	接地
IN1	2	逻辑输入 1
IN2	3	逻辑输入 2
IN3	4	逻辑输入 3
VREF	5	基准电压输入
VM	6	电源正极
VN	7	电源负极
OUT1	8	H 桥输出 1
OUT2	9	H 桥输出 2
ISEN	10	H 桥接地

依据表 2 所示引脚定义结果对协同控制器核心芯片进行配置与调试，保障协同控制器功能的正常发挥<sup>[16]</sup>，为设计系统研究目的实现提供助力。

上述过程完成了系统硬件的设计，但是仅靠硬件设备无法实现远程遥控机器人的多电机协同控制，故继续对系统软件进行开发与研究。

## 2 远程遥控机器人多电机协同控制系统软件设计

### 2.1 无线电信号感知及预处理

以设计无线电技术硬件设备为工具,对无线电信号进行感知,为多电机协同控制信号传输提供一定的支撑。无线电技术应用过程中,信号感知主要表示为一个一阶两状态,分别为协同控制信号发送与协同控制结果接收,两种状态交替出现,并且具备着相互独立的特性。协同控制信号发送状态与协同控制结果接收状态占用频段概率计算公式为:

$$\begin{cases} P(\alpha_1) = \frac{E(\beta_1)}{E(\beta_1) + E(\beta_2)} = \frac{\chi_2}{\chi_1 + \chi_2} \\ P(\alpha_2) = \frac{E(\beta_2)}{E(\beta_1) + E(\beta_2)} = \frac{\chi_1}{\chi_1 + \chi_2} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P(\alpha_1)$  与  $P(\alpha_2)$  表示的是协同控制信号发送状态  $\alpha_1$  与协同控制结果接收状态  $\alpha_2$  占用频段的概率数值;  $E(\cdot)$  表示的是期望算子;  $\beta_1$  与  $\beta_2$  表示的是协同控制信号发送状态  $\alpha_1$  与协同控制结果接收状态  $\alpha_2$  在目标频段上的持续时间;  $\chi_1$  与  $\chi_2$  表示的是持续时间  $\beta_1$  与  $\beta_2$  服从指数分布的均值数值。

为了方便研究的进行,设定每个感知周期内无线电状态保持不变,结合式(1)获得无线电信号感知模型,表达式为:

$$r_i(t) = \begin{cases} P(\alpha_1) + \delta_i(t) & \alpha_1 \\ P(\alpha_2) + h_i(t)s_i(t) + \delta_i(t) & \alpha_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $r_i(t)$  表示的是无线电系统中第  $i$  个节点时刻  $t$  对应的信号;  $\delta_i(t)$  表示的是背景噪声,假定为循环对称复高斯噪声;  $h_i(t)$  表示的是感知信道的衰落因子;  $s_i(t)$  表示的是无线电初始发射信号。

常规情况下,无线电系统中的节点处于相互独立的状态,由于节点本身具有运动性,使得感知信道采样点之间存在着明显的时间相关性,采用感知信道增益相关系数来对其进行展示,其计算公式为:

$$\gamma[r_i(t), r_j(t+k)] = \begin{cases} J(2\pi f_d \lambda, k) & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\gamma[r_i(t), r_j(t+k)]$  表示的是第  $i$  个节点时刻  $t$  对应信号与第  $j$  个节点时刻  $t+k$  对应信号的相关系数;  $J(\cdot)$  表示的是相关系数计算函数;  $f_d$  表示的是信号收发器件相对运行造成的最大多普勒频移;  $\lambda$  表示的是多普勒频移归一化参数,其取值范围为  $[0,1]$ ;  $k$  表示的是时刻变量。

以公式(3)计算结果  $\gamma[r_i(t), r_j(t+k)]$  为依据,判定无线电感知信道的状态,具体判定规则如下所示:

- 1) 当  $\gamma[r_i(t), r_j(t+k)]$  小于 0.001 时,认定无线电感知信道状态为准静态;
- 2) 当  $\gamma[r_i(t), r_j(t+k)]$  大于等于 0.001 且小于等

于 0.03 时,认定无线电感知信道状态为时间相关状态;

- 3) 当  $\gamma[r_i(t), r_j(t+k)]$  大于 0.03 时,认定无线电感知信道状态为准动态。

上述过程完成了无线电信号的感知,为设计系统信号传输<sup>[17]</sup>提供有效的支撑。

以设定的位置传感器、速度与加速度传感器为依据,获取机器人运行数据,但是由于传感器自身振动以及采集周围环境的影响,致使机器人运行数据中存在大量的噪声数据与冗余数据。若是直接对采集数据进行应用,会降低机器人控制效果。因此,确定该模块任务为机器人运行数据处理<sup>[18-19]</sup>。设定原始机器人运行数据集为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ ,其中,  $n$  表示的是运行数据的总数量。采用滤波算法对其噪声数据进行去除处理,表达式为:

$$x'_i = \gamma[r_i(t), r_j(t+k)] \frac{\zeta(x_i)}{\varphi_0} \pm \varepsilon_i \quad (4)$$

式中,  $x'_i$  表示的是噪声数据去除后的机器人运行数据;  $\zeta(\cdot)$  表示的是滤波函数;  $\varphi_0$  表示的是噪声数据检测因子;  $\varepsilon_i$  表示的是误差调整项。

计算机器人运行数据之间的相似程度,以此为基础,对冗余数据进行判定与删除,具体如式(5)所示:

$$\begin{cases} \eta(x'_i, x'_j) = \frac{\text{cov}(x'_i, x'_j)}{\sigma(x'_i)\sigma(x'_j)} \\ \eta(x'_i, x'_j) \geq \eta^* & \text{冗余数据} \\ \eta(x'_i, x'_j) < \eta^* & \text{正常数据} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\eta(x'_i, x'_j)$  表示的是机器人运行数据  $x'_i$  与  $x'_j$  之间的相似程度;  $\text{cov}(x'_i, x'_j)$  表示的是机器人运行数据  $x'_i$  与  $x'_j$  的协方差数据;  $\sigma(x'_i)$  与  $\sigma(x'_j)$  表示的是机器人运行数据  $x'_i$  与  $x'_j$  的方差;  $\eta^*$  表示的是冗余数据判定阈值。

依据公式(5)对冗余数据进行判定与删除,获取最终的机器人运行数据,记为  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_m\}$ ,为后续机器人多电机协同控制的实现提供依据。

### 2.2 机器人多电机协同控制

无线电信号感知方法为机器人运行数据预处理提供了必要的输入数据,通过数据预处理有效减少了冗余数据,有效降低了机器人运行过程中的相对误差,提高机器人多电机协同控制能力。以上述处理后的机器人运行数据  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_m\}$  为依据,计算机器人运行相对误差,以此为基础,基于模糊理论判定电机误差等级,利用速度补偿器获取机器人多电机协同控制变量,将其输入至协同控制器中,实现远程遥控机器人多电机的协同控制。机器人运行相对误差计算公式为:

$$e_i = \eta(x'_i, x'_j) \frac{\mu_i - y_i}{\mu_i} \quad (6)$$

式中,  $e_i$  表示的是第  $i$  个电机转速对应的相对误差数值;  $\mu_i$  表示的是第  $i$  个电机的额定转速;  $y_i$  表示的是第  $i$  个电

机的实际速度。

以式 (6) 计算结果为基础, 计算速度误差变化率, 表达式为:

$$\lambda_i = \frac{de_i}{dt} \quad (7)$$

式中,  $\lambda_i$  表示的是第  $i$  个电机转速误差变化率数值。

将公式 (6) 与公式 (7) 计算结果作为模糊理论的输入量, 其输出量就是电机误差等级判定结果, 具体如下所示:

$$R = \cup (e_i \times \lambda_i) \times \kappa_i \quad (8)$$

式中,  $R$  表示的是电机误差等级判定结果, 等级级别为  $0 \sim 7$ ;  $\kappa_i$  表示的是速度相对误差  $e_i$  与速度误差变化率  $\lambda_i$  之间的模糊关系数值。

以公式 (8) 计算结果为基础, 对误差等级最大的电机进行误差补偿, 通过速度补偿器获取机器人多电机的协同控制变量, 表达式为:

$$\phi_i = R(\sum e_i) \times p_i \times q_i \quad (9)$$

式中,  $\phi_i$  表示的是第  $i$  个电机的速度补偿量, 即协同控制变量;  $p_i$  表示的是协同控制器输出的权值;  $q_i$  表示的是电机转速补偿强度。

将式 (9) 计算结果  $\phi_i$  利用无线电技术输入至协同控制器中, 即可完成远程遥控机器人多电机的协同控制, 实现设计系统的开发与运行, 为机器人的后续发展与应用提供助力。

### 3 实验与结果分析

为了验证设计的基于无线电技术的远程遥控机器人多电机协同控制系统的有效性, 在 Simulink 中搭建无线电信号感知模型对其进行研究。选取水下机器人多电机协同模糊滑模控制研究 (文献 [1] 系统)、基于屏障控制函数的轮式机器人系统多目标分布式协同控制 (文献 [2] 系统) 与关节电机驱动六足机器人仿生结构设计及柔顺运动控制 (文献 [3] 系统) 作为对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3, 联合设计系统共同进行远程遥控机器人多电机协同控制对比实验, 以此来验证设计系统的应用性能。

#### 3.1 实验环境搭建

依据实验需求, 搭建实验环境, 具体如图 6 所示。

如图 6 所示, 搭建实验环境主要布置于实验室内, 有利于环境参数的控制, 避免环境因素的不利影响, 提升最终实验结论的准确性。实验室中配置远程遥控机器人、电源设备、无线电设备、位置传感器、速度传感器及其远程遥控设备, 为远程遥控机器人多电机协同控制实验提供设备基础。

#### 3.2 远程遥控机器人多电机协同控制时延分析

远程遥控机器人多电机协同控制时延是验证设计系

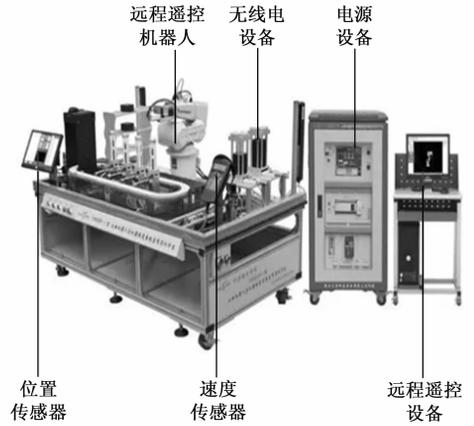


图 6 实验环境示意图

统应用效率的关键指标之一。一般情况下, 远程遥控机器人多电机协同控制时延越短, 表明远程遥控机器人多电机协同控制效率更高; 反之, 远程遥控机器人多电机协同控制时延越长, 表明远程遥控机器人多电机协同控制效率更低。

远程遥控机器人多电机协同控制时延计算公式为:

$$T = T_2 - T_1 \quad (10)$$

式中,  $T_2$  表示的是远程遥控机器人多电机协同控制结束时间;  $T_1$  表示的是远程遥控机器人多电机协同控制开始时间。

通过实验获得远程遥控机器人多电机协同控制时延如表 3 所示。

表 3 远程遥控机器人多电机协同控制时延数据表 s

实验工况	设计系统	对比系统 1	对比系统 2	对比系统 3
1	0.56	2.56	3.56	5.46
2	1.23	3.45	4.12	5.10
3	1.00	2.15	4.55	6.02
4	0.89	3.02	4.78	6.32
5	1.42	3.66	5.98	4.23
6	1.20	4.15	4.01	4.12
7	1.13	2.10	2.31	4.56
8	0.45	2.58	3.56	5.01
9	0.78	2.99	3.99	5.78
10	0.95	3.45	4.15	4.89

如表 3 数据所示, 在不同实验工况条件下, 应用设计系统获得的远程遥控机器人多电机协同控制时延均低于对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3, 在第 8 种实验工况下获得远程遥控机器人多电机协同控制时延最小值为 0.45 s, 表明设计系统远程遥控机器人多电机协同控制效率更高。

#### 3.3 远程遥控机器人控制效果分析

远程遥控机器人多电机协同控制效果主要通过多电机转速与远程遥控机器人运行轨迹来表征。其中, 实验

选取的远程遥控机器人内部配置了 3 个电机，其额定转速分别为 500 rpm、1 000 rpm 与 1 500 rpm。通过设计系统、对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3 应用后获得电机转速如表 4 所示。

表 4 远程遥控机器人电机转速示意图

(1) 编号为 1 的电机转速 rpm

实验工况	设计系统	对比系统 1	对比系统 2	对比系统 3
1	500	450	312	265
2	499	365	345	210
3	498	410	451	412
4	500	402	420	325
5	500	487	417	300
6	486	410	458	325
7	500	369	459	378
8	496	358	420	451
9	490	310	410	462
10	500	352	352	410

(2) 编号为 2 的电机转速 rpm

实验工况	设计系统	对比系统 1	对比系统 2	对比系统 3
1	989	785	789	458
2	1000	695	745	865
3	1000	785	714	645
4	990	850	725	725
5	999	941	601	701
6	1000	784	645	635
7	985	652	521	645
8	990	620	539	611
9	1000	630	584	648
10	1000	645	451	620

(3) 编号为 3 的电机转速 rpm

实验工况	设计系统	对比系统 1	对比系统 2	对比系统 3
1	1500	1002	1145	1097
2	1489	1245	1025	1025
3	1490	1101	1256	1011
4	1500	1245	1230	1203
5	1500	1478	1145	1145
6	1500	1032	1100	1230
7	1500	1065	1356	1145
8	1499	1059	1025	1046
9	1485	987	987	1025
10	1490	1245	1047	1149

如表 4 数据所示，在不同实验工况下，应用设计系统获得的电机转速与额定转速更接近，而应用对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3 获得的电机转速与额定转速存在着较大的差距，表明设计系统的控制效果更好。

### 3.4 远程遥控机器人控制能力分析

进一步验证远程遥控机器人控制能力，通过实验获

得远程遥控机器人运行轨迹如图 7 所示。

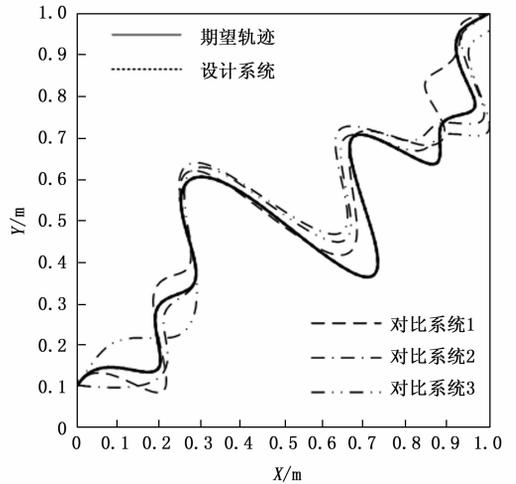


图 7 远程遥控机器人运行轨迹示意图

如图 7 所示，应用设计系统获得的远程遥控机器人运行轨迹与期望轨迹一致，而应用对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3 获得的远程遥控机器人运行轨迹与期望轨迹存在着一定的偏差，表明设计系统的控制能力更佳。

### 4 结束语

随着智能技术的不断发展，机器人得到了有利的发展空间，被广泛应用于多个领域，例如生产领域、巡检领域、探索领域等，极大地减少了劳动人员的工作量。而电机是机器人中的关键设备之一，具有着不可或缺的地位。伴随着机器人应用范围的扩大，其动力需求也随之越来越大，单一单机无法支撑机器人的稳定运行，多电机机器人兴起并应用。多电机的应用虽然能够加强机器人的动力来源，但也增加了机器人的控制难度，因此提出基于无线电技术的远程遥控机器人多电机协同控制系统设计研究。实验数据显示：设计系统大幅度缩短了机器人多电机协同控制时延，其应用后获得电机转速与额定转速更接近，机器人运行轨迹与期望轨迹一致，能够为机器人远程协同控制提供更有效的系统支撑。

#### 参考文献：

[1] 吴伟, 曾庆军, 王阳, 等. 水下机器人多电机协同模糊滑模控制研究 [J]. 中国测试, 2021, 47 (11): 101 - 106.

[2] 娜茜泰, 赵国亮, 翁智, 等. 基于屏障控制函数的轮式机器人系统多目标分布式协同控制 [J]. 控制与决策, 2022, 37 (9): 2235 - 2244.

[3] 丁杨, 张明路, 焦鑫, 等. 关节电机驱动六足机器人仿生结构与柔顺运动控制 [J]. 工程设计学报, 2023, 30 (2): 154 - 163.

(下转第 130 页)