

# 基于 LoRa 无线通信的工业机器人 远程监控系统设计

康 晋

(杨凌职业技术学院 信息工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 目前设计的工业机器人远程监控系统存在抗干扰能力差、功耗过高的问题; 基于 LoRa 无线通信设计了一种新的工业机器人远程监控系统, 系统硬件主要设计了主控芯片、工业机器人接口、电源电路和位移传感器四部分; 主控芯片为 SX1265/7/8 型号射频芯片, 选用 stm32F103C8T6 型号 MCU 主控芯片作为 LoRa 无线通信的组网处理硬件, 根据 MCU 主控芯片性能建立信号链, 采用 SPI 接口使 SX1276 无线收发装置和单片机设备的接口关联, 利用锂电池作为电源电路, 通过 AME8800AEETL 稳压芯片稳定锂电池电源电压, 使用 WXY31 拉线式位移传感器实现传感; 引入 LoRa 无线通信技术, 建立 LoRa 无线通信信号存储时序, 接收采集平台下发监控指令, 更新显示屏上的机器人工作状态, 实现远程监控软件操作; 实验结果表明, 设计的基于 LoRa 无线通信的工业机器人远程监控系统抗干扰能力得到有效加强, 系统消耗的功耗在 0.05~0.07 mA 之间, 位移误差监控准确性达到 99%。

**关键词:** LoRa 无线通信; 远程监控; 监控系统; 工业机器人

## Design of Industrial Robot Remote Monitoring System Based on LoRa Wireless Communication

KANG Jin

(College of Information Engineering, YangLing Vocational & Technical  
College, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The current designed industrial robot remote monitoring system has the problems of poor anti-interference ability and high power consumption. A new industrial robot remote monitoring system is designed based on the LoRa wireless communication. The system hardware mainly includes the main control chip, industrial robot interface, power circuit and displacement sensor. The main control chip is the RF chip of SX1265/7/8, and the main control chip (MCU) of stm32F103C8T6 is selected as the networking processing hardware for the LoRa wireless communication. The signal chain is established by the performance of the MCU, and the SPI interface is used to associate the SX1276 wireless transceiver with the single-chip microcomputer. The interface of the device is related by using the lithium battery as the power supply circuit, the power supply voltage of the lithium battery is stabilized through the AME8800AEETL voltage regulator chip, the sensing is realized by using the WXY31 pull-wire displacement sensor. The LoRa wireless communication signal storage sequence is established by introducing the LoRa wireless communication technology, the monitoring instructions issued by the acquisition platform is received, the working status of the robot on the display screen is updated, and the remote monitoring software operation is realized. The experimental results show that, based on the LoRa wireless communication, the anti-interference ability of the designed industrial robot remote monitoring system is effectively enhanced, the electric current consumption of the system is between 0.05 mA and 0.07 mA, and the displacement error of the monitoring accuracy reaches up to 99%.

**Keywords:** LoRa wireless communication; remote monitoring; monitoring system; industrial robot

## 0 引言

随着工业自动化水平的不断提升, 工业机器人已经成为了企业生产的必需品, 对工业机器人进行远程监测控制也成为高效生产的主要手段。在工业机器人上安装一系列关于生产的软硬件程序虽然能够快速提升生产量, 但是从企业的整体量产控制方面来讲, 不能对工业机器人的实时产量和工作状态进行参数控制, 所以对工业机器人的远程

监控系统的设计成为了当前的研究重点<sup>[1-2]</sup>。

以往有研究人员设计了基于视频监控技术的工业机器人远程监控系统, 该系统的一切硬件设备均在视频监控下运行, 而视频监控所获取的工作参数需要通过互联网进行核心数据的上传, 还要对这些数据进行后期的音频处理。系统中所采集的数据大多以视频的方式体现, 虽然具有良好的可观性, 但是对于系统的基础平台依赖性较高<sup>[3]</sup>。还有学者提出了基于 RTMP 协议的移动直播系统, 该系统通

收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-04-11。

作者简介: 康 晋(1989-), 男, 陕西杨凌人, 硕士, 讲师, 主要从事数字与数据通信技术, 光传输技术和 5G 移动通信技术等方向的研究。

引用格式: 康 晋. 基于 LoRa 无线通信的工业机器人远程监控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 119-124, 132.

过移动智能设备对运动的工业机器人进行数据采集，在采集的过程中同时完成传输方案的制定，具有较高的数据传输速度，但是该系统只能通过 RTMP 协议才能完成数据传输，系统中的监测参数不能在外部端口播放，数据转发性能与交流互通性能不理想<sup>[4]</sup>。

本文基于 LoRa 无线通信设计了一种工业机器人远程监控系统。重点研究了 LoRa 扩频调制方式下的远程通信功能，确定 LoRa 无线通信技术在远程监控系统中的可行性。

### 1 工业机器人远程监控系统硬件设计

工业机器人远程监控系统硬件主要由主控芯片设计、数据接口设计、电源电路设计、位移传感器设计、报警器设计及可编程逻辑设计实现。工业机器人远程监控系统硬件整体结构如图 1 所示。

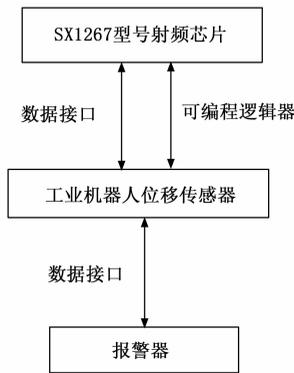


图 1 工业机器人远程监控系统硬件整体结构

#### 1.1 主控芯片设计

基于 LoRa 无线通信的主控芯片在调制功能方面有着突出表现，本文为了进一步突出 LoRa 无线通信的调制功能，选用 Stemtech 公司的 SX1265/7/8 型号射频芯片，分别处理不同场景下的监控数据。SX1265 型号射频芯片频带范围为 138~1 028 MHz，扩频因子为 10 个，可以支持 LoRa 的各种调制模式，还可以与其他的同类芯片进行通信宽带的连接。SX1267 型号射频芯片如图 2 所示。

观察图 2 可知，SX1267 型号射频芯片的频带范围同样为 138~1 028 MHz，扩频因子为 8 个，该芯片可以作为无线通信数据传输的保障元件，与其他的芯片相比，其具有更好的射频信号检测功能<sup>[5]</sup>。SX1268 型号射频芯片的频带范围为 138~596 MHz，扩频因子为 5 个，该芯片的灵敏度较高，在运行的过程中不需要自身电流的消耗，可以根据场景的不同来检测处理外部信号<sup>[6-8]</sup>。

本文还选用 stm32F103C8T6 型号 MCU 主控芯片作为 LoRa 无线通信的组网处理硬件，安装在 64 位的控制器中对数据组网的数据内容进行调节，主控芯片的周边还装置有 6 个设备，分别是 FLASH、RAM、串行通讯口、定时器、计时器和输入输出接口，保证系统数据传输通讯的基本要求，stm32F103C8T6 型号 MCU 主控芯片性能如表 1 所

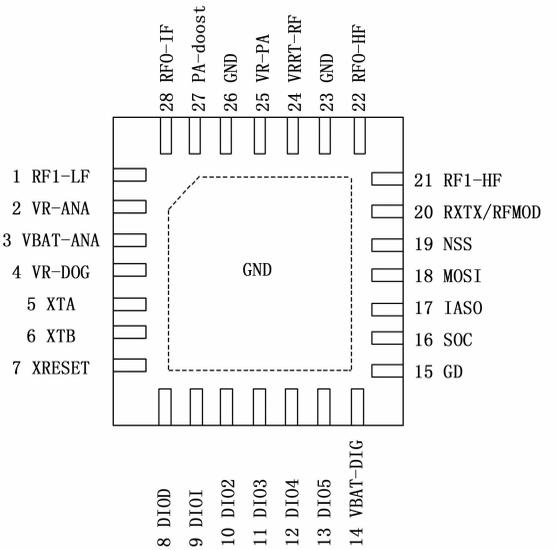


图 2 SX1267 型号射频芯片

示。

表 1 stm32F103C8T6 型号芯片性能

参数	极小值	标准值
Flash	32 k	64 k
RAM	4 k	8 k
SPI 接口	4	4
MCU 引脚	4	4
时钟脉冲	36 MHz	64 MHz

根据表 1 的 stm32F103C8T6 型号 MCU 主控芯片性能建立信号链，如图 3 所示。

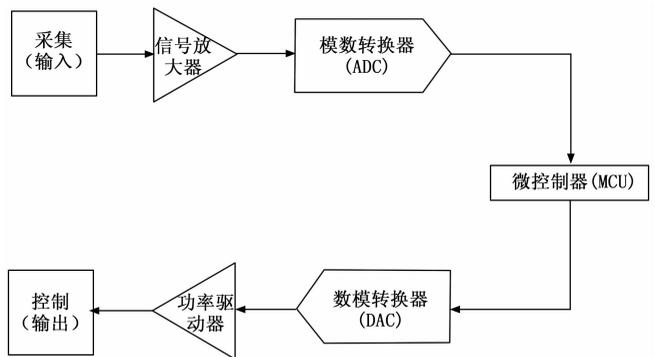


图 3 MCU 信号链

根据图 3 可知，MCU 信号链在采集和控制过程，经过两次信号放大器放大，通过模数转换器和数模转换器来实现信息转换，并引入微控制器实现微控制。

#### 1.2 工业机器人数据接口设计

基于 LoRa 无线通信的工业机器人的无线收发装置、单片机、PC 主机、数据控制器等设备上均有数据接口，本文在这些设备与设备之间的接口具有互通性基础上，引用 SPI 接口，SPI 接口具有同步串行接口技术，内部与 SX1276 无线收发装置和单片机设备连接的同时，外部还可以与 ADC、

LCD 等通信设备关联<sup>[9-10]</sup>。工业机器人数据接口如图 4 所示。

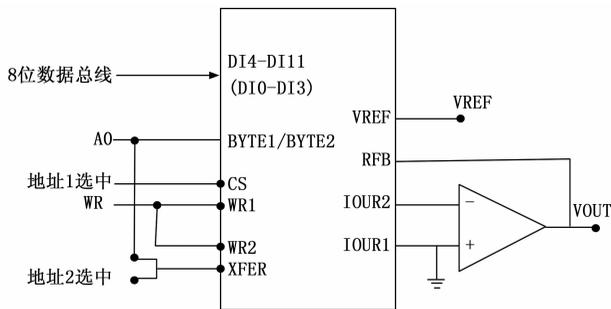


图 4 工业机器人数据接口

由图 4 可知，工业机器人数据接口通过 XFER 接法进行数据连接，数据接口的地址线最低为 A0，在 A0 为 1 时，信号会进入 8 位数据寄存器，当 A0 为 0 时，信号会进入 4 位数据寄存器，其他设备之间的接口应用了 MISO 数据线，数据线相比 SPI 接口具有更好的主动性<sup>[11-12]</sup>。当单片机型号为 STM32 系列时，便需要使用 UART 接口来完成通信任务，因为该型号接口与单片机下端设备具有更好的关联性<sup>[13]</sup>。

### 1.3 工业机器人电源电路设计

本文根据 LoRa 无线通信的基本用电量和工业机器人的数据处理量，设定采用锂电池作为各类芯片的主电源，电压控制在 4.2 V 左右，选用的锂电池还具有防止倒充的功能。锂电池周边的电路控制板上使用 TP4056 型号充电数据管理芯片，该芯片在锂电池中可以调节充电的恒定电流值范围，当锂电池中的电压不稳定时，可以控制锂离子在电池中重新组合。电源电路板采用 SOP8 封装材料。锂电池电源电路图如图 5 所示。

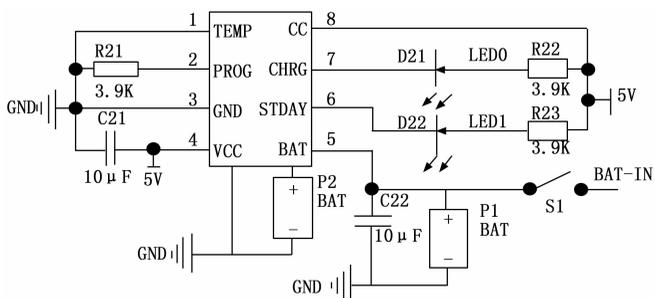


图 5 锂电池电源电路图

根据图 5 可知，TP4056 型号充电数据管理芯片共有 8 个引脚，其中 6、7 引脚与二极管阴极连接，二极管的阳极与电阻连接，可以起到保护和限流的作用，2、4 引脚分别与电阻和电容连接，起到充电时指示灯指示的功能。1、3、5、8 引脚分别在芯片中起到电流传输和串并联的作用<sup>[14-15]</sup>。

在电源电路中还引用了 AME8800AEETL 稳压芯片，帮助锂电池电源电压稳定，该芯片主要在稳压器中起到核心作用，最大的输入电压为 6.4 V，可控稳定电压为 2.4V，还分别在芯片两个引脚处加设两个 4 个电容，起到滤波和

电压稳定的作用。AME8800AEETL 稳压芯片所在电路图如图 6 所示。

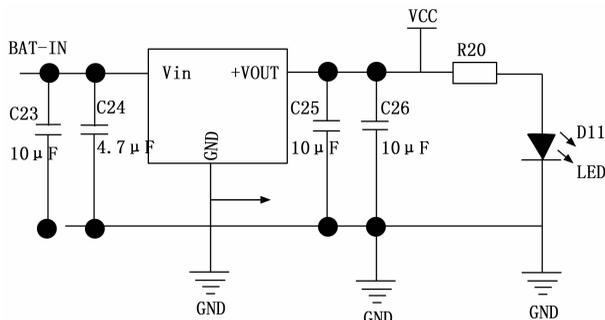


图 6 AME8800AEETL 稳压芯片电路图

根据图 6 可知，本文研究的 AME8800AEETL 稳压芯片共有 4 个电容，通过 1 个电阻连接芯片，共有 3 个电路接地。

### 1.4 工业机器人位移传感器设计

由于基于 LoRa 无线通信的工业机器人的工作环境比较稳定，极少情况下能遇见恶劣环境，所以本文选择 WXY31 拉线式位移传感器，将传感器的拉线安装在工业机器人的内表面中，可以减少不必要的空间制造<sup>[16]</sup>。该位移传感器上的拉线可以 360° 旋转，在拉线的两端均安装了信号传输器和光电编码器，光电编码器在接收到通信信号时，与信号传输器相配合，完成后续的传感数据接收任务。LoRa 无线通信本身具有抗干扰能力强、传输距离远的优势，为此只需要一个 32 位信道、1 MHz 频率的收发器即可完成传感信息的通信地址自行组建，扩大了位移传感器的感知范围。

### 1.5 报警器设计

为方便用户使用，本文设计的报警器以文本的形式存在于单片机数据组中。分析远程监控系统内部的信息是否超过安全范围，如果已经超出安全范围，需要连接上位机，将超出的内容通过以太网传给报警电路，在传输过程中要遵照 Modbus 协议，PLC 所接收的数据要与单片机的数据保持一致，在保存之前，需要进行验证，判断 AT 指令是否能够将文本形式的内容传递给 DTU，通过 DTU 向指定的联系人发送信息。

报警器内部设置了 DTU 模块，用户可以通过设置参数，完成无线传输。电脑同时设置了超级终端能够完成波特率计算，配备短信唤醒功能。在发送短信时，DTU 无线模块能够发送信号，通过 GPRS 无线传输发送数据，并提供报警短信。通讯接口极为丰富，用户在日后使用中也可以二次开发，完成系统集成工作，用户可以通过报警器的接口实现扩展。无限期能够支持语言和状态选择功能，系统在通讯和运行过程的上传费用都能得以降低，系统的通讯模块更加方便。

### 1.6 可编程逻辑设计

通过 PLC 配合集成器完成更加复杂的远程监控，在确

保系统能够满足监控要求的同时,提高系统的性能,使系统维护更加方便。利用汇编语言执行各项要求,提高可编程逻辑的通用性,同时使系统具备可移植性。

本文选用的 PLC 为德国西门子公司生产的 PLC,本文选用的西门子为 S7 系列,具有紧凑的结构,能够在内部存储执行逻辑运算的指令,在短时间内实现通讯,实现自动监控。由于 S7 系列具备大、中、小 3 种系统,所以需要分析 3 种小型可编程控制器,本文选用小型可编程控制器,通过设置丰富的指令集提高系统的可靠性,增强逻辑能力,降低价格。S7-200 PLC 通过主机、扩展模块和通讯接口完成信息接触。PLC 内部结构如图 7 所示。

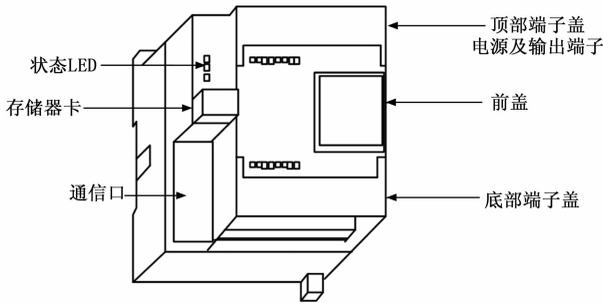


图 7 PLC 内部结构

根据图 7 可知,PLC 主要通过状态 LED、存储器卡、通信口、顶部端子盖、前盖和底部端子盖组成。通过分析监控环境,设计 I/O 点数,实现通讯,降低价格成本。将西门子 200 系列型号作为 CPU 能够取代传统的监控方式,通过智能的方式完成参数控制。PLC 能够配合多种协议,如 PPI 通讯协议、MPI 通讯协议以及自定义协议,通过外扩的方式实现通讯。在 PLC 上设置丰富的 I/O 口,完成数字信息的输入,支持模拟量输入和输出,如果控制的任务较为复杂,可以通过扩展不同的模块,完成多数字量的输入和输出工作。内部的 RS-485 通讯/编程口实现触屏通讯。

## 2 基于 LoRa 无线通信的工业机器人远程监控系统

### 2.1 基于 LoRa 无线通信技术的工业机器人远程监控数据采集

数据采集是 LoRa 无线通信技术实现的基础,尤其是在工业机器人的远程监控操作流程中,需要将实时采集的数据上传到 LoRa 主控节点上,经过主控节点对数据的处理和通信,从而实现了远程监控的数据入网流程<sup>[17]</sup>。

LoRa 无线通讯利用远距离无线电完成通信,与其它的通信方式相比,在相同功耗下,传播的距离更远。LoRa 无线通讯采用的工作频率为 ISM 频段,内部的一个网管就能够同时连接上万个 LoRa 节点,确保通信能力。通信速率的加长,使传输速率随之变快,在速率变低的情况下,能够传输更远的距离。扩频技术的引用,使 LoRa 无线通讯模式具备纠错能力。

本文研究的 LoRa 无线通讯模式能够同时支持 FSK 和

GFSK 等调试方式,在软件通讯过程中,本文结合了频谱拓宽技术,有效增加工作频段,通过内嵌自组网透明传输协议,完成一键组网。系统内核资源呈现开放模式,能够通过大容量 FLASH 完成二次开发,适用于物联网通信中。

通过对两端脉冲信号的实际位移量审核就可以判断出实际的机器人位移量。位移量误差计算公式如公式(1)所示:

$$W_{ppm} = \frac{|F_T - F_C|}{10^6} \quad (1)$$

其中:  $W_{ppm}$  表示位移量误差,单位为 m;  $F_T$  表示实际距离,单位为 m;  $F_C$  表示设置距离,单位为 m。

得到工业机器人的实际位移量后,LoRa 无线通信中的数据储存程序开始运作,将整个机器人的位移信号划分为初始信号、中间信号、停止信号和呼应信号。LoRa 无线通信的总线接口也根据高电平和低电平设定 SCL 时钟线和 SDA 时钟线,SCL 时钟线代表高电平状态,SDA 时钟线代表低电平状态,进入 LoRa 无线通信总接口后的信号在高、低电平状态的相互配合下进入到 ACK 等待区域,等待高、低电平同频时,即完成了信号的储存<sup>[18]</sup>。采用透明传输模式实现透明信息协议传输,在不同的 UART 之间建立无形的传输线,用户在使用过程中,不需要了解复杂的无线传输协议,也能够完成网络搭建,从而降低施工难度。电路电流存储公式为:

$$I_{BAT} = \frac{V_{PROG}}{R_{PROG}} \cdot 1200 \quad (2)$$

其中:  $I_{BAT}$  表示存储的电流,单位为电流;  $V_{PROG}$  表示信号电压,单位为电压;  $R_{PROG}$  表示接地电阻,单位为电阻<sup>[19]</sup>。

采用定点发射的模式,从目标地址和目标信道中提取数据,在核心地址通道中实现处理,输出给多个地址通道中,不同的地址通道,输出模式不同。LoRa 无线通讯支持广播发射,设置的配置模式为 M1=1、M0=1,能够同时支持指令和上位机完成配置,上位机采用的进制显示方式为十进制显示。在同样的信道内部,系统配备同一密钥,系统能够完成读写操作。不同的 LoRa 模块能够区分不同的模块,自己传输模式,完成 M1 或 M0 配备,实现信息传输。

根据电路存储电流计算滤波器元件的分电流,计算公式如公式(3)所示:

$$I = I_{BAT} - I_i \quad (3)$$

其中:  $I$  为滤波器元件的分电流;  $I_i$  为其他部位电流。

### 2.2 工业机器人远程监控系统软件实现

工业机器人远程监控系统软件的功能主要包括远程监控、历史查询、超预警等。采用 C++ 编程技术,在 VisualStudio 中使用视窗表单进行人机对话,远程监控系统采用 SQL 语句与云端服务器 MySQL 数据库进行数据操作(增、删、改、查),使工作人员可以通过远程 PC 端登陆,并将上文中计算的位移量误差、电路电流及分电流计算结果传输到 LoRa 主控节点上,经过主控节点对数据的处理和通

信，从而实现了远程监控的数据入网流程，而数据终端的接收采集平台下发的监控指令，实时更新显示屏上的机器人工作状态<sup>[20-22]</sup>。通过选择时间可以对机器人的历史资料进行检索，并根据现场的具体条件设置相应的机器人移动参数的临界点，实现工业机器人工作状态远程监控。如发生突发情况或其他原因，则远程监控系统的警报窗口将会发出红色警告，以通知工作人员进行处理。

综上所述，基于 LoRa 无线通信的工业机器人远程监控系统软件设计流程图如图 8 所示。

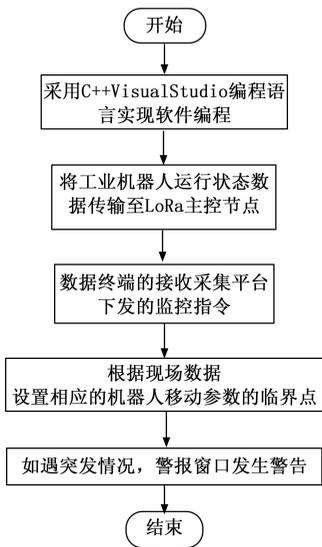


图 8 工业机器人远程监控系统软件设计流程图

### 3 实验研究

为了验证本文设计的基于 LoRa 无线通信的工业机器人远程监控系统的有效性，分别检测抗干扰性能和功耗。选用本文研究的监控系统以及传统监控系统对工业机器人进行监控。

#### 3.1 抗干扰性能

为了检测工业机器人远程监测系统的抗电磁干扰能力，测试示意图如图 9 所示。

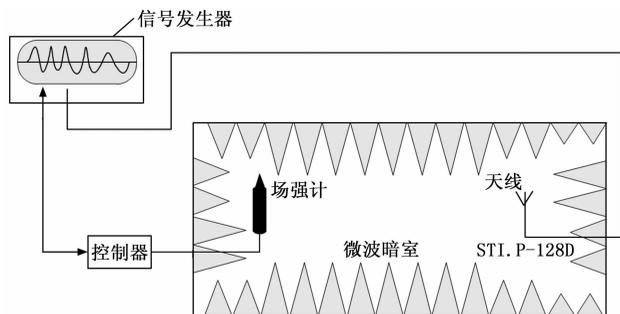


图 9 电磁干扰示意图

根据图 9 可知，设置的测试环境为微波暗室，采用一个封闭的环境，通过信号发生器、功率放大器、天线、控制器设置。同时进行室内场强校正和测试，并进行调节。

设置极化频率范围为 100 M~2 000 MHz，由机电产生电磁能量干扰，人工干预每个频点，在每个频点输入电磁干扰能量，停留 3 s，得到的人工场强干预下的测试图如图 10 所示。

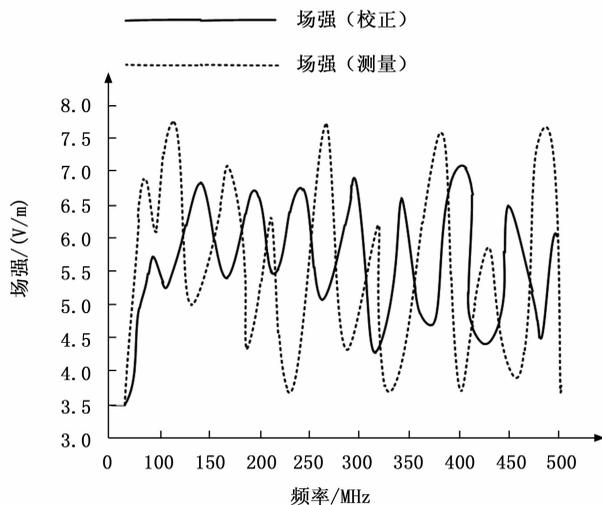


图 10 人工场强干预下的测试图

在校正场强过程中，通过各向同性场传感器校准场强测量偏差，确定该误差，输出 X 轴，Y 轴和 Z 轴的频率响应校正因子。根据图 10 可知，在 500 MHz 之中，校正场强和测量场强出现了多次波动。本文研究的监控方法能够精准地检测出校正结果和测量结果，校正场强和测量场强频率起始点一致，未校正前场强出现多次峰谷，校正后场强峰谷数值降低。

#### 3.2 功耗测试实验结果

在实验检测之前得到储存时序图，LoRa 无线通信信号储存时序图如图 11 所示。

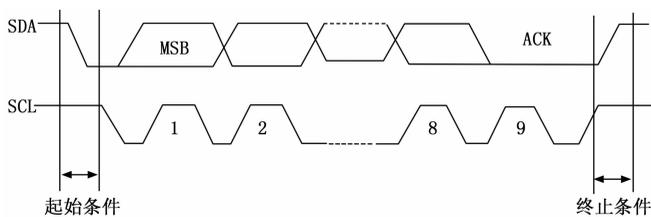


图 11 LoRa 无线通信信号储存时序图

观察图 11 可知，基于 LoRa 无线通信的工业机器人远程监控系统最后实现监控功能的为 LoRa 模块控制流程。LoRa 模块只有配置状态和通信状态，在工业机器人监控系统处于启动状态下，LoRa 模块则处于通信状态，此时工业机器人的所有动作参数都准备在 LoRa 模块中对外输出，这时 LoRa 模块中的串口函数开始对输入数据计算，并在检测抗干扰性能后，得到功耗测试结果，选用本文系统和传统基于视频监控技术的工业机器人远程监控系统、基于 RTMP 协议的移动直播系统进行对比，得到的实验结果如表 2 所示。

表 2 功耗测试实验结果

实验次数/次	功耗/mA		
	本文系统	视频监控技术系统	RTMP 协议系统
1	0.56	2.22	3.21
2	0.58	2.25	3.33
3	0.59	2.36	3.24
4	0.67	2.45	3.45
5	0.62	2.47	3.69
6	0.64	2.58	3.44
7	0.63	2.69	3.47
8	0.61	2.66	3.52
9	0.59	2.75	3.53
10	0.54	2.89	3.57

根据表 2 可知, 本文研究的系统功耗明显低于传统系统功耗。在 10 次实验中, 本文提出的远程监控系统对工业机器人监控功耗始终低于 0.07 mA, 系统消耗的功耗在 0.05~0.07 mA 之间, 整体消耗功率较低, 满足用户提出的要求, 符合节能化配置。传统的基于视频监控技术的工业机器人远程监控系统消耗的功率始终在 2~3 mA 之间, 是本文设计系统的 4 倍, 消耗功率过高。基于 RTMP 协议的移动直播系统消耗功率在 10 次实验中, 甚至可以达到 3 mA 以上, 巨大的能量消耗难以适用于实际工作中。

造成这种现象的原因是本文提出的系统在进行数据采集的过程中, 直接将数据采集节点上的传输端口与 LoRa 无线通信节点相关联, 并按照 LoRa 无线通信的主控节点入网配置来设定无线通信的地址。LoRa 无线通信的信号接收端口也要及时采集工业机器人控制端口的监控指令, 唤醒 MCU 解析位移传感器数据程序。LoRa 无线通信对工业机器人的远程信号输出方式为脉冲输出形式, 当传感器在工业机器人内部线性旋转时, 脉冲也随之发送出去, 与 LoRa 无线通信的信号相互呼应, 因此功耗较低。

### 3.3 工业机器人远程监控系统监控准确性测试

测试 3 种系统的工业机器人位移误差监控准确性, 对比结果如图 12 所示。

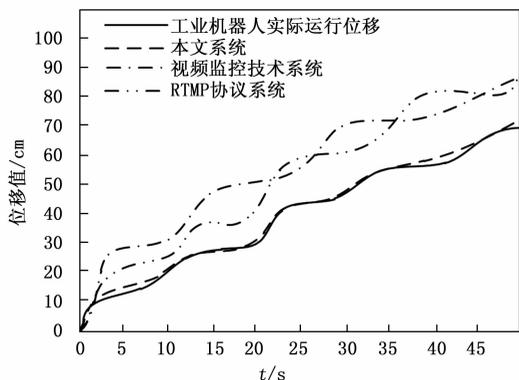


图 12 工业机器人位移误差监控准确性

人位移误差与实际工业机器人位移误差值较为接近, 位移误差监控准确性达到 99%, 远高于其他两种方法。实验结果表明, 本文系统的监控准确性较好。

综上所述, 本文设计的基于 LoRa 无线通信的工业机器人远程监控系统在对工业机器人进行监控的过程中, 体现出极好的监控能力, 能够在外界干扰较强的状态下实现监控, 系统运行过程中消耗功率较低, 工作能力更强, 适用于实际的工业机器人操作中。

## 4 结束语

LoRa 无线通信技术结合监测系统的各个硬件平台会拥有更强的表达能力, 本文研究基于 LoRa 无线通信的监控硬件设备和电路, 实现 LoRa 无线通信在工业机器人平台上的网络拓扑结构设计。本文还重点研究了 LoRa 无线通信模块在工业机器人平台上的具体功能实现, 从射频角度、信号传输环境方面以及 LoRaLoRa 无线通信的自身特点, 解决了传统系统的过度依赖平台和信号互通性能不理想的缺陷。但是对于时序研究不够充分, 未来需要进一步深入分析。

### 参考文献:

- [1] 傅贵武, 田英, 王兴波. 基于 SDK 通信接口的工业机器人远程监控系统设计 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (17): 29-33.
- [2] 张慧敏, 郭兴召, 薛琛. 基于工业机器人的线束包覆系统设计 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (11): 27-30, 52.
- [3] 段剑, 王新朝, 何晓阳. 基于嵌入式视频监控技术的电网可视化建设 [J]. 信息技术, 2019, 43 (11): 169-172, 176.
- [4] 崔营营, 刘洋, 刘志强. 基于 RTMP 协议的桥梁视频监控关键技术研究 [J]. 物联网技术, 2020, 10 (11): 12-14, 17.
- [5] 徐建明, 甘万正, 张文安, 等. 基于 QT 的工业机器人人机交互系统的设计 [J]. 高技术通讯, 2019, 29 (6): 576-284.
- [6] 张继尧, 韩建海, 刘赛赛, 等. 工业机器人抛光作业的主动柔顺控制系统 [J]. 机械科学与技术, 2019, 38 (6): 909-914.
- [7] 吕鑫平, 彭晋民, 戴福全, 等. 基于 RSI 的工业机器人开放式控制系统设计 [J]. 机械制造与自动化, 2020, 49 (1): 130-133.
- [8] 杨军莉. 基于工业机器人视觉伺服控制系统研究 [J]. 自动化技术与应用, 2020, 39 (8): 66-69, 73.
- [9] 成楚楚, 傅高升, 陈鸿玲, 等. 基于 HMI 工业机器人砂抛单元砂带磨损补偿管理系统的开发 [J]. 制造业自动化, 2021, 43 (8): 29-31, 73.
- [10] 宋庭新, 李轲. 基于 OPC UA 的智能制造车间数据通信技术及应用 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (14): 1693-1699.
- [11] 刘春, 张鑫桥, 韩先国. 自动制孔机器人控制系统设计与开发 [J]. 航空精密制造技术, 2020, 56 (2): 14-18.
- [12] 汤伟, 高涵, 刘思洋. 基于树莓派的小型水域智能垃圾清理机器人系统设计与实现 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (34): 239-247.
- [13] 刘李明, 杨会芳, 吕瑞强, 等. 基于机器人的导管生产线集成控制系统研究 [J]. 航空精密制造技术, 2020, 56 (5): 10-14.

分析图 12 实验结果可知, 本文系统监测到的工业机器人

(下转第 132 页)

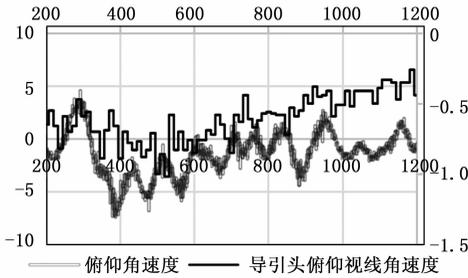


图 20 导引头俯仰视线角速度与俯仰角速度图

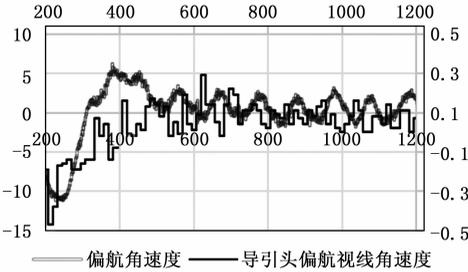


图 21 导引头偏航视线角速度与俯仰角速度图

度影响较小,具有良好的隔离效果。

### 6 结束语

近年来,平台式激光导引头成为激光导引头的主流。在激光制导武器中,导引头的跟踪精度直接影响着制导武器的制导精度。导引头跟踪精度与导引头去耦能力、跟踪速度有直接关系。激光平台型导引头采用框架本文通过分析导引头工作机理和原理,设计建立了导引头仿真模型、隔离度模型、频带模型,并进行了仿真测试,初步分析了隔离度产生的原因,提出提高频带和改善导引头隔离度的措施,通过仿真和测试验证了通过提高导引头隔离度达到降低导引头视线角速度噪声的目的。经过某野战火箭弹实际飞行试验验证,导引头输出精度满足火箭控制系统的要求,具有一定的工程应用的意义。

#### 参考文献:

[1] 李慧,吴军辉,胡欣,等. 动力陀螺式激光导引头的动力学建模与仿真 [J]. 激光与红外, 2011, 41 (7): 758-762.

[2] 匡冬权. 基于激光导引头的四象限光电探测器检测电路研究 [J]. 装备制导技术, 2012, 2: 220-224.

[14] 王志江,薛坤喜,吴定勇,等. 基于视觉传感的机器人焊缝纠偏控制系统 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (17): 48-55.

[15] 李舒沁,王灏晨,汪寿阳. 人工智能背景下工业机器人发展水平综合动态评价研究——以制造业为例 [J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40 (11): 2958-2967.

[16] 宋亚儒,孙运强. LoRa 自组网的列车制动远程监测系统设计与实现 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20 (3): 81-83.

[17] 李权接,赵延明,张泽瑞,等. 基于 LoRa 无线通信的分布式桥梁监测系统设计与实现 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40 (1): 104-106, 109.

[3] 刘京郊. 光电对抗技术与系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[4] 王伟,吴口,徐平,等. 激光平台型导引头角速度噪声特性及其影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41 (9): 2371-2374.

[5] 王冬,刘琳,陈韵. 基于半实物仿真的视线角速度估计参数设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42 (2): 32-36.

[6] 张永亮,卢焕章. 基于图像局部熵的红外图像分割方法 [J]. 红外技术, 2006, 28 (11): 656-660.

[7] 牟宇,林德福,祁载康. 激光末制导炮弹比例导引律性能研究 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38 (2): 250-255.

[8] 王鹏辉,张云强,游牧. 框架式激光比例导引头隔离度对弹体姿态的影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39 (增): 180-183.

[9] 陈坚. 导弹控制原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2016.

[10] 李慧,梁巍巍,殷瑞光,等. 干扰和噪声对激光制导性能及精度的影响 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46 (2): 0206005-1~0206005-8.

[11] 胡欧磊. 导引头隔离度影响分析及在线辨识与抑制技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

[12] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男. 导弹飞行力学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.

[13] 李福巍,张运强,潘国庆. 激光半主动比例导引头光学系统分析与设计 [J]. 应用光学, 2014, 35 (6): 938-942.

[14] 黄义,汪德虎,张明虎,等. 激光半主动寻的制导在舰炮反导中的应用研究 [J]. 激光与红外, 2010, 40 (7): 690-693.

[15] 赵超. 导引头稳定系统隔离度研究 [J]. 电光与控制, 2008, 15 (7): 78-82.

[16] 于英杰,刘藻珍. 某型激光导引头建模与仿真研究 [J]. 系统仿真实验, 2003, 15 (2): 158-160.

[17] 陈宏,雷鸣. 激光寻的制导导引头技术 [J]. 光电子技术, 2002, 22 (1): 53-57.

[18] 袁雷,胡冰新,魏克银,等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.

[19] 侯明善,张金鹏,长青. 视线角速度测量噪声对变结构制导鲁棒性的影响研究 [J]. 西北工业大学学报, 2000, 18 (1): 134-137.

[20] 王秀君,唐勇,陈源. 导引头隔离度对角速度精度评价的影响分析 [J]. 电子信息对抗技术, 2021, 36 (2): 31-35.

[18] 刘传领,陈明,池涛. 基于 LoRa 无线通信的水产养殖监测系统设计及应用 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41 (6): 158-164.

[19] 李伟杰,戴亚文. 基于 LoRa 的工业温度无线采集系统设计 [J]. 自动化与仪表, 2019, 34 (1): 37-40, 49.

[20] 李亚军,吴振强,杨鹏,等. 基于 MOTOMAN 工业机器人系统的结构化程序设计与分析 [J]. 制造业自动化, 2019, 41 (11): 5.

[21] 李俊. 基于 ANSYS 的工业机器人 PMSM 转矩波动抑制技术 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (12): 104-108.

[22] 华丹. 基于区块链技术的工业机器人视觉检测及避障系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 69-73.