

# 基于 STM32 两轴深水观测云台控制系统设计

任福深<sup>1</sup>, 王茜<sup>1</sup>, 刘均<sup>1</sup>, 张园<sup>2</sup>

(1. 东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 陕西安然能源科技有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 随着水下机器人在海洋能源勘探领域研究的深入, 其需要借助云台实时监测水下环境、保证安全高效的作业。因此设计了基于 STM32 主控板的两自由度深水观测云台及其控制系统, 在 FreeRTOS 上设置不同优先级的任务, 实现 CPU 资源的高效利用。采用 RS485 实现云台和上位机通信, 上位机按照 Modbus 双向通信协议向云台下位机发送控制命令。在实现两轴云台电机转动的同时, 上位机实时接收检测到的数据。采用 PID 算法控制云台转动角度, 通过分析实验结果, 该系统可以实现云台两自由度控制和高质量图片视频采集。

**关键词:** 两自由度云台; STM32; 控制系统; ROV; FreeRTOS

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211557

中文引用格式: 任福深, 王茜, 刘均, 等. 基于 STM32 两轴深水观测云台控制系统设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(8): 110-115.

英文引用格式: Ren Fushen, Wang Xi, Liu Jun, et al. Design of PTZ control system based on STM32 two-axis deep water observation[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(8): 110-115.

## Design of PTZ control system based on STM32 two-axis deep water observation

Ren Fushen<sup>1</sup>, Wang Xi<sup>1</sup>, Liu Jun<sup>1</sup>, Zhang Yuan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. Shaanxi Anran Energy Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

**Abstract:** With the deepening of research on underwater robots in the field of marine energy exploration, they need to use the PTZ to monitor the underwater environment in real time to ensure safe and efficient operations. Therefore, a two-degree-of-freedom deep-water observation PTZ and its control system based on the STM32 main control board are designed. FreeRTOS to divide the application into multiple tasks with different priorities and allocate CPU system resources reasonably. RS485 is used to realize the communication between the PTZ and the upper computer. The upper computer sends control commands to the lower computer of the PTZ according to the Modbus two-way communication protocol. While realizing the rotation of the two-axis pan/tilt motor, the upper computer receives the detected data in real time. The PID algorithm is used to control the rotation angle of the PTZ. By analyzing the experimental results, the system can achieve two-degree-of-freedom control of the PTZ and the collection of high-quality pictures and videos.

**Key words:** two degrees of freedom head; STM32; control system; ROV; FreeRTOS

## 0 引言

智能视频监控技术结合图像、视频处理等技术, 是实现运动目标自动检测和跟踪的关键技术<sup>[1-2]</sup>。水下机器人是海洋能源开采的重要装备, 常代替人工在危险环境和人类视觉受阻的环境工作, 需要借助云台实时监测水下环境、保证其安全高效的作业。

国内外云台多为单自由度或固定式, 且常见的云台微控制器多为单核或双核, 数据传输速度和存储量不高<sup>[3]</sup>。2014年, 中国海洋石油总公司设计了一款移动式云台, 只适用于浅海水下场景的实时监控<sup>[4]</sup>。2016年, 殷莉甜针对水下云台结构的密封性和图像检测要求, 设计了一款应用于水下焊接机器人的双目视觉系统, 但其检

测精度不高<sup>[5-6]</sup>。基于上述相关研究, 本文设计了基于 STM32 两轴深水观测云台结构及其控制系统, 不但能实现回转和俯仰两自由度的运动, 而且降低了水下机器人系统的开发成本, 是水下机器人智能化研究的关键技术。

## 1 两自由度云台结构方案设计

图 1 所示为两自由度深水观测云台的整体结构图, 其主要由云台主体、数字摄像头、模拟摄像头以及深水 LED 灯组成。由于水下机器人内部空间狭小, 对云台结构进行了小型化设计, 并采用连接板对摄像头和灯进行固定。

云台电子仓和摄像机与灯分别采用水密电缆进行电气连接。云台结构采用两级 O 形圈进行密封, 整体密



图1 两自由度云台整体结构图

封性好,可以承受 1.5 MPa 的深水压力。如图 2 所示,采用步进电机和角度传感器控制云台回转和俯仰两个自由度的运动,通过搭载数字摄像头、模拟摄像头和两个深水 LED 灯,水下机器人可以对不同环境的深水工况进行实时监控和视频图像采集。

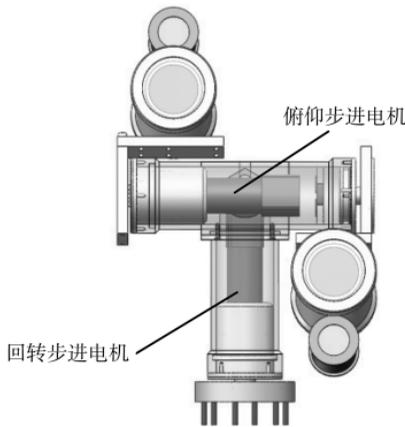


图2 两自由度云台电机布置

## 2 两自由度云台系统总体设计

### 2.1 云台控制系统总体方案设计

两自由度深水观测云台控制系统组成关系如表 1 所示,包括云台机械结构、通信和视频采集、上位机控制

表 1 两自由云台控制系统组成

名称	云台系统
	云台电子仓
云台机械结构系统	固定板和连接板 摄像头密封舱
云台控制系统	行星减速步进电机 角度传感器
云台通信系统	通信电路 RS485 Modbus 数据采集
视频采集系统	水下高清摄像机
上位机控制系统	显控计算机
调光系统	深水照明 LED 灯

等 6 个子系统。深水观测云台通过连接板和固定板,实现了水下高清摄像机和深水 LED 灯随步进电机在俯仰和回转两个方向的同步运动。通信系统实现云台上位机和下位机的数据交换。上位机控制系统是操作员实时获取水下工况和机器人云台运动参数,并即时调控的平台。调光系统通过 PWM 脉宽调制、调节深水 LED 灯的亮度,以适应缺少光源的深水工况,改善拍摄环境,为采集水下高清图像和视频提供保障。

### 2.2 云台控制系统硬件设计

#### 2.2.1 云台测控系统组成

云台控制系统硬件主要由云台通信主控板和云台摄像头与 LED 灯的控制板两部分构成。采用 RS485 主从通信方式,对控制电机转向的控制命令以及大量数据进行解码、存储和调用。主控板控制系统主要由 MCU、A4988 电机驱动模块、IO 接线端子、RS485 通信接口与电源电路等部分组成,如图 3 所示。

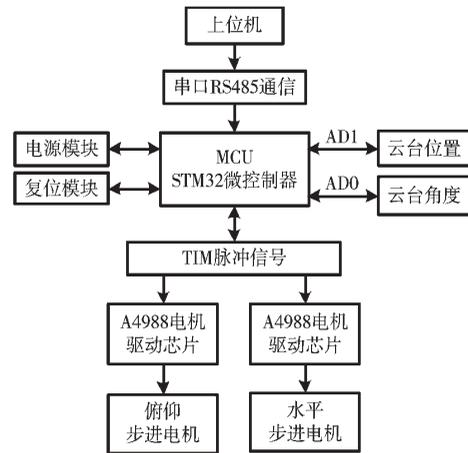


图3 云台测控系统组成图

云台通信主控板采用 STM32F103C8T6 芯片,它是 STM32 系列中具有广泛应用的常见型号,使用了高性能的 ARM Cortex-M3 内核<sup>[7-8]</sup>。

#### 2.2.2 云台电机控制原理

采用 28 行星减速、两相混合式步进电机使二自由度云台能够实现回转 180°、俯仰±50°大范围水下环境的监控。电机的供电电压为 24 V,扭矩为 0.18 Nm。电机控制模块电路如图 4 所示。

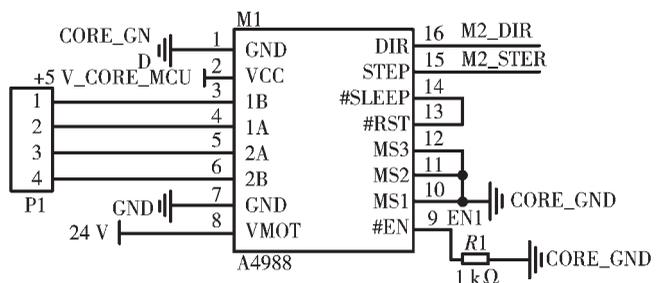


图4 电机控制模块电路图

设定电机转一圈,需要 400 个脉冲。电机转速和脉冲频率成正比。通过控制 1 s 内发送的脉冲个数和脉冲频率,调节电机转速。电机驱动芯片选用 A4988,其模块电路如图 5 所示。

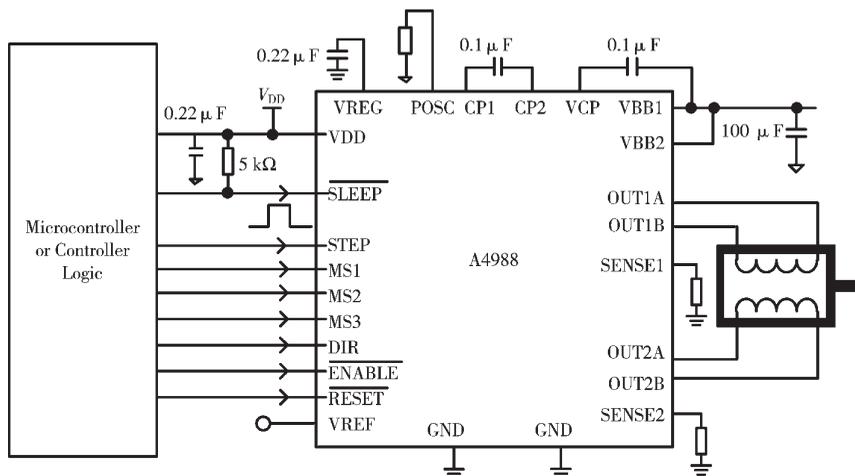


图 5 A4988 模块电路图

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件。步进电机的脉冲数和脉冲频率分别决定了其转动的速度和总角度位移,所有形式的运动方式改变均可以在很少的脉冲数量下完成。云台电机控制如图 6 所示,通过改变相应 IO 口电平即可控制电机的转向。使用角度传感器记录电机转的圈数,计数随角度传感器的转向而增加或减少。随着电机轴的旋转给出一个精准的角度信号。电位器测一圈,确定云台的当前位置。

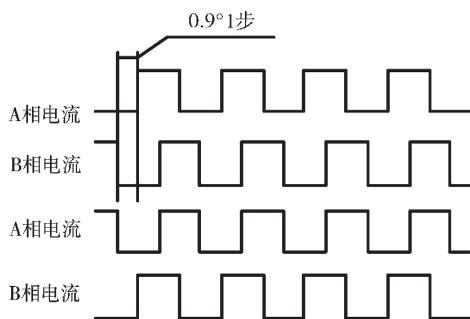


图 6 云台电机控制图

2.2.3 云台通信方案设计

水下装置对通信系统的可靠性、实时性以及稳定性具有很高的要求<sup>[9]</sup>。云台通信方案如图 7 所示,采用电力载波(电缆)的方式实现上位机控制命令和下位机的控制模块进行通信。通过 RS485 通信电路控制云台、摄像头和灯等外部设备。下位机接收到上位机指令后,获取并实时调控云台当前姿态位置和转动速度。

2.2.4 云台摄像头和灯的控制原理

两自由度深水观测云台搭载的水下摄像头与深水 LED 灯组成了水下机器人视觉系统,深水 LED 灯辅助

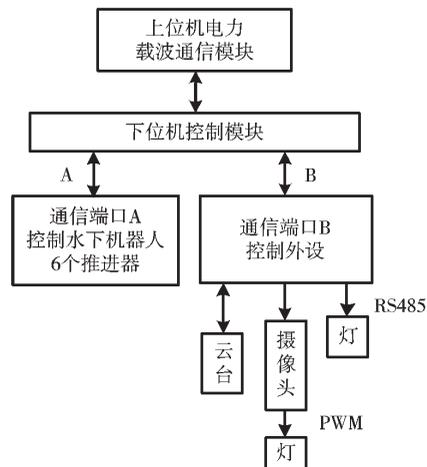


图 7 云台通信方案示意图

摄像头拍摄、对深海光线不足的环境进行补光,是水下机器人进行深海环境图像观测与采集的重要依据。云台选用两个高清模拟摄像头和数字摄像头。

模拟摄像头固定安装在机械臂正下方,是导航和发现目标的依据。

摄像头和灯的控制原理如图 8 所示。镜头通过电荷耦合器件(CCD)将深水图像传递给数据处理器(DSP),之后再发送给摄像头和灯的主控制器(MCU),通过以太网传递到地面上上位机,上位机的视频采集卡对传输过来的视频进行储存。数字摄像头采集画面清晰度高;模拟摄像头通过两根视频线将模拟信号直接传输到地面模拟显示器上,数据传输速度快,便于对深水工况进行实时监控,获取高质量水下图像。

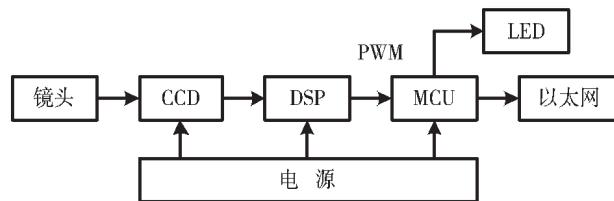


图 8 云台摄像头和灯的控制原理图

2.3 云台位置 PID 控制算法

云台的运动特性<sup>[10]</sup>对拍摄图像的清晰度有关键影响,在选取云台的控制方式之前,需要对云台的位置、回转速度  $v_1$ 、俯仰速度  $v_2$  以及云台俯仰方向的最大倾角  $\alpha_{max}$  等参数进行标定。

PID 控制<sup>[11]</sup>是一种线性控制方法,其控制原理框图如图 9 所示。

PID 控制结合了比例控制、积分控制和微分控制,其表达式如式(1)所示:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

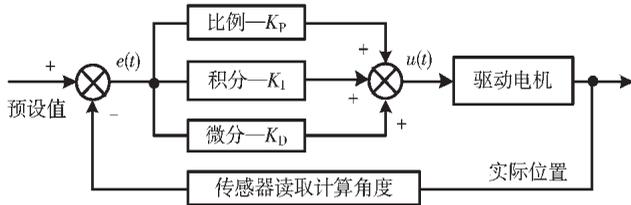


图9 PID控制原理图

其基本控制思路为：当设定位置和目标实际位置差值较大时，采用合适的比例系数，使云台快速移动到指定位置，对目标进行跟踪和图像视频采集，以达到良好的监控效果。

位置式PID算法和增量式PID算法应用广泛，适用于不同的控制场景<sup>[12]</sup>。位置式PID算法，计算时对 $e(t)$ 进行累加。本文选用增量式PID控制每次输出较上次输出的增量，不会出现误差累积，其动态方程如式(2)和式(3)所示：

$$\Delta u(t) = \Delta P(t) + \Delta I(t) + \Delta D(t) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta P(t) = K_P(e(t) - e(t-1)) \\ \Delta I(t) = K_I e(t) \\ \Delta D(t) = K_D(e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)) \end{cases} \quad (3)$$

式中， $e(k)$ 为本次偏差， $e(k-1)$ 为上一次的偏差， $e(k-2)$ 为上上次的偏差； $K_P$ 为比例系数； $T_I$ 为积分时间常数； $T_D$ 为微分时间常数。

操作员通过地面上位机发送运动控制指令，设置云台期望的运动目标位置。根据当前位置和期望位置的误差，由运动控制中断程序进行步进电机运动控制脉冲的计算和产生，采用角度传感器对云台转动的角位移进行计数，并转换为闭环坐标值，保存在寄存器中。在运动控制中断程序内调用增量PID控制算法模块，通过改变定时器中速度系数，从而控制发步进电机运动控制脉冲的快慢。当目标位置 and 实际位置相距较远时电机快速运动，相距较近时运动慢一些。云台增量式PID控制流程图如图10所示。

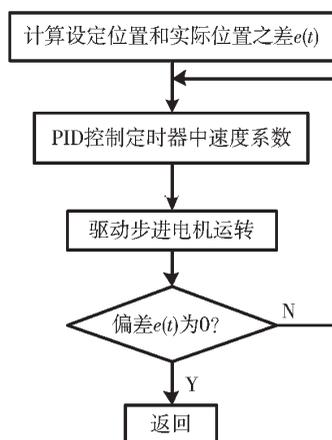


图10 云台PID控制流程图

### 3 云台控制系统软件设计

在Windows操作系统上使用Visual Studio软件，选用面向对象的C#语言对上位机控制界面进行开发<sup>[13]</sup>。云台上位机控制界面主要有串口通信、云台姿态控制、视频监控、深水LED灯调光等功能。云台下位机调试软件Keil5的主要作用是：对控制器的通信端口进行初始化、配置定时器，对控制命令和数据进行解析、数模转换，使用Modbus实现数据的双向传输，实现各个子系统功能。

#### 3.1 控制系统和DMA数据采集

FreeRTOS是源码公开、可在ARM等多款处理器上移植的实时操作系统<sup>[14]</sup>。本文的云台控制系统选用STM32F103控制芯片。在FreeRTOS操作系统上设置不同优先级的多任务，优先级高的任务先运行。在实现高效利用CPU资源的同时，保证了系统的实时性和可靠性<sup>[15]</sup>。

DMA(Direct Memory Access)技术用来提供在外设和存储器之间、存储器与存储器之间的高速数据传输。在这种方式下，不需要用到CPU，可以直接读写系统存储器<sup>[16]</sup>。

云台控制系统对云台实际回转和俯仰电机位置进行采集，根据设定值和实际值之差，执行运动控制中断程序内调用的增量PID控制算法，控制发送步进电机运动控制脉冲的快慢。通过步进电机控制程序，输出修正后的步进电机驱动信号，调整云台位置，实现云台位置的精确调控。云台与上位机采用RS485通信、DMA中断进行数据采集，收到的数据存入缓冲区，主程序按照标志位处理。根据标志位控制电机位置主线程如图11所示。

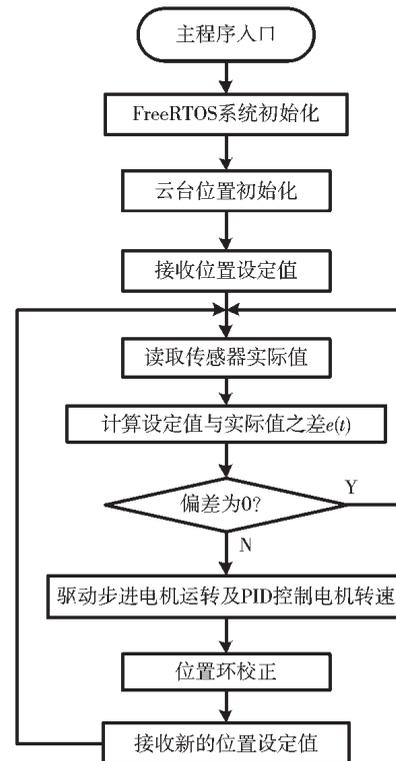


图11 根据标志位控制电机位置主线程

示,定时器中断流程图如图12所示。

### 3.2 Modbus 通信协议

Modbus 是一种串行通信协议<sup>[17]</sup>,现在是工业电子设备之间常用的连接方式,支持 RS232 和 RS485 电气接口。常用的 Modbus 串行传输模式有 ASCII 和 RTU 两种<sup>[18]</sup>。根据云台和上位机的通信数据量,云台控制系统采用 Modbus RTU 模式,采用二进制表示数据,数据以帧的方式进行传输。串口通信参数设置为:1 位起始位、8 位数据位、1 位停止位,无校验,数据传输的波特率为 38 400。

当云台下位机控制板收到上位机发送的控制命令时,先判断发送的数据地址是否对应下位机地址,若地址一致则读取信息并对收到的数据进行 CRC 校验。若 CRC 校验正确,则执行相应的任务。拷贝地址和命令、功能码,并将执行后的数据和 CRC 校验码一起回送给上位机。若发送的数据地址与下位机地址不一致则返回错误。如果 CRC 校验出错,则不返回任何信息。发送与接收数据都进行 CRC 校验,确保了发送数据的准确性<sup>[19]</sup>。

## 4 系统通信测试与实验分析

### 4.1 通信测试和结果

云台实物调试如图13所示。通过 Keil5 软件对程序编译无误后,采用 ST LINK 仿真器将程序下载到云台控制板中。采用 RS485 一端连接电脑上位机,另一端连接云台,使用 MODBUS POLL 软件调试电机转向。当上位机发送控制命令给云台控制板时,观察到云台在回转和俯仰两自由度上,能够根据相应指令,做出对应的运动。



图13 云台调试实物图

Modbus 数据帧包含的内容有:地址域+功能码+数据+差错校验。

当通过上位机给下位机发送(0x03)读寄存器指令(30 03 00 12 00 02 60 2F)后,下位机(云台)返回数据为(30 03 02 F1 37 C1 C6)。其中 F1 37 为返回数据,转换为二进制,表示水平转速为 241 r/min。通过测速仪测得水平电机的转速为 239 r/min,结果表明云台监控系统通信正常。

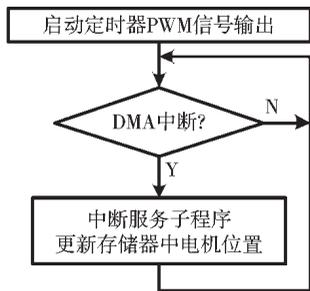


图12 定时器中断流程图

### 4.2 海洋实验结果

图14所示为云台搭载在水下机器人上。在水下机器人进行作业时,地面工控机通过电缆将控制命令发送到机器人电子仓内控制板,再转发到云台控制板。图15所示云台控制系统完全满足水下机器人对云台性能的要求,实现水下工况的实时监测和图片采集。



图14 水下机器人装置



图15 工控机上云台摄像头拍摄的画面

## 5 结论

本文研制了一种两自由度深水观测云台结构及其控制系统,通过集摄像头和深水 LED 灯于一体,为机器人在 100 m 水深作业提供实时性的监控平台。

设计了基于 FreeRTOS 的云台控制系统,采用 DMA 中断和 USART 通信,实现实时多任务操作的同时,便于代码模块化编写,系统响应快。采用 STM32 控制板结合 PID 算法,应用 RS485 通信和 Modbus 通信协议,实现回转和俯仰步进电机的位置控制。通过通信测试和海洋实验,证明了本文所设计的基于 STM32 两轴深水观测云台控制系统运行平稳,能够实现对深水高质量图片和视频的实时采集。

相比国内外高昂的云台装置,本文所设计的云台结构和控制系统均为自主研发,开发成本低,具有很强的实用价值和广阔的市场。

### 参考文献

[1] 黄凯奇,陈晓棠,康运锋,等.智能视频监控技术综述[J].计算机学报,2015,38(6):1093-1118.  
 [2] 张建仓,杨哲辉,孙启富.基于二自由度云台的目标跟踪系统设计[J].计算机测量与控制,2013,21(9):2579-2581.  
 [3] EKLUNDH J O.Machine vision research at CVAP:an

- introduction[J].International Journal of Computer Vision, 1996, 17(2): 107-112.
- [4] 苏锋.带有浮台的移动式水下监控装置: 103501414[P]. 2014-01-08.
- [5] 殷莉甜.水下双目视觉定位系统开发与应用研究[D].广州: 华南理工大学, 2016.
- [6] 殷莉甜, 谢小鹏, 彭泽林.水下双目视觉系统的设计与密封技术研究[J].润滑与密封, 2016, 41(11): 94-99.
- [7] 王新梅, 肖国镇.纠错码——原理与方法(修订版)[M].西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 276-291.
- [8] MORELOS-ZARAGOZA R H. The art of error correcting coding[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2006: 143-150.
- [9] 赵登路.水下机器人通信系统的设计与实现[D].哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [10] 张美琪, 胡国文, 仇荣鑫, 等.基于 P89V51RD 的通用云台控制器设计与实现[M].现代电子技术, 2008, 31(18): 168-170, 173.
- [11] 凌好, 刘荣忠, 郭锐, 等.基于 ARM7 的太阳自动跟踪简易控制系统设计[J].计算机测量与控制, 2011, 19(8): 1889-1891.
- [12] 王祎晨.增量式 PID 和位置式 PID 算法的整定比较与研究[J].工业控制计算机, 2018(5): 123-124.
- [13] 王开宇.基于 C# 的数据与视频监控上位机软件设计[J].现代电子技术, 2017, 40(10): 62-64.
- [14] MISTRY J, NAYLOR M, WOODCOCK J. Adapting Free-RTOS for multicores: an experience report[J]. Softw. Pract. Exper, 2014, 44(9): 1129-1154.
- [15] BARRY R. Using the FreeRTOS: real time kernel[M]. Washington: Amazo, 2010: 10-50.
- [16] 牛洪海, 臧峰, 周绪贵.基于 DMA 的高速 UART 串口通信设计与实现[J].自动化仪表, 2018, 39(9): 45-48.
- [17] 吴学文, 王新光, 周金陵.基于 Modbus 通信协议的水闸计算机监控系统[J].计算机工程, 2005, 31(13): 195-197.
- [18] 程雪婷, 王海峰.解析 Modbus-RTU 协议关键内容及其在智能电器中的应用[J].电器与能效管理技术, 2010(1): 23-25.
- [19] 方少雷, 李鹏, 苏跃龙. STM32 系列单片机多串口通讯系统简述[J].山西电子技术, 2016(3): 55-57.

(收稿日期: 2021-03-24)

## 作者简介:

任福深(1976-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 智能装备及其控制理论。

王茜(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 水下机器人智能控制。

刘均(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 嵌入式系统、智能仪器、井下装置等。



扫码下载电子文档

(上接第 109 页)

模型和目标, 进而逐步达到通过有效代码审查提升代码质量的目的。

## 参考文献

- [1] 张亦含, 沈敏. CMM4 中量化管理的解决方案[J]. 计算机工程与设计, 2016, 27(5): 742-743.
- [2] 郑人杰, 王纬, 王方德, 等. 基于软件能力成熟度模型(CMM)的软件过程改进——方法与实施[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] 井涛. 代码审查在软件工程实施中的重要性[J]. 电子技术与软件工程, 2017(12): 43-44.
- [4] 袁政江. 浅谈软件静态测试中的代码审查[J]. 计算机光盘软件与应用, 2012(3): 202-204.
- [5] 方晓宁, 孙纪敏. 代码审查——实施软件工程化不可忽视的环节[J]. 无线电通信技术, 2003(1): 36-38.
- [6] 张如云. 代码审查在软件开发中的应用研究[J]. 电脑开发与应用, 2014(6): 50-56.
- [7] 丁岳伟, 刘玉敬. 软件项目量化管理的实践[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(6): 254-257.
- [8] Capability Maturity Model Integration(CMMISM), Version 1.3 for Software Engineering(CMMI-SW, V1.3)[Z]. Staged Representation, 2010.
- [9] SUNETNANTA T, NOBPRAPI N, GOTAL QUANTITATIVE O. CMMI assessment for offshoring through the analysis of project

- management repositories[C]//3rd International Conference on Software Engineering Approaches for Offshore and Outsourced Development(SEAFOOD), Zurich, Switzerland, 2009: 32-44.
- [10] 张栋, 任爱华. 实施量化管理和持续性改进过程的研究[J]. 计算机科学与算法, 2008, 29(19): 4887-4889, 4913.
- [11] TARHAN A, DEMIRORS O. Apply quantitative management now[J]. IEEE Software, 2012, 29(3): 77-85.
- [12] BILL C, SESHAGIRI G V, DONALD R, et al. The Case for quantitative process management[J]. Software, IEEE, 2008, 25(3): 24-28.
- [13] 张旭, 刘浩驰. 基于 CMMI 的量化管理在项目中的应用与研究[J]. 电脑与电信, 2016(4): 62-65.
- [14] 孙晶. 基于 CMMI 的软件质量度量模型及工具原型[D]. 大连: 大连海事大学, 2006.
- [15] 杜庆峰, 马慧珺. SPC 在软件过程度量中的应用及改进[J]. 计算机工程, 2009, 35(24): 103-104.
- [16] 徐俊, 李军. 软件研发过程性能基线和模型建立方法及应用分析[J]. 现代计算机, 2013(7): 14-17.

(收稿日期: 2020-09-18)

## 作者简介:

鸦文(1980-), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 大型信息系统工程项目管理。

杨沁梅(1978-), 女, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 大型信息系统工程项目管理。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所