

# 爬游无人潜水器导航控制系统设计

俞 键, 高立斌, 魏 超, 刘卫东, 李 乐

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

**摘要:** 深海爬游无人潜水器是一种既可在深海巡游, 又可在海底爬行的新型深海无人潜水器; 针对爬游潜水器水中巡游和海底爬行作业的任务需求, 以及控制系统通信量大、管理设备多、数据处理量大、工况复杂等问题, 提出了“上层导航控制+下层运动控制”两层控制结构的思想, 设计了以 PC104 嵌入式计算机为硬件平台, 以实时多任务操作系统 VxWorks 为软件平台的爬游无人潜水器嵌入式导航控制系统; 在实现多任务调度、通信管理、数据采集存储等功能的基础上, 完成了导航障碍决策仿真实验, 验证了潜水器导航控制系统的控制效果。

**关键词:** 爬游无人潜水器; 嵌入式系统; 控制系统; PC104; VxWorks

## Navigation and Control System Design of Deep-Sea Crawling and Sailing Hexapod Robot

Yu Jian, Gao Lie, Wei Chao, Liu Weidong, Li Le

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The deep-sea crawling and sailing hexapod robot is a new type of deep-sea unmanned submersible that can patrol in the deep sea and crawl on the sea bottom. In view of the task demand of water cruising and seabed crawling, as well as the problems of large communication capacity, many management equipment, large amount of data processing and complex working conditions, the idea of "upper navigation control + lower motion control" control structure is proposed, and the PC104 embedded computer is designed as the hardware flat. The embedded navigation and control system of crawl unmanned submersible based on real-time multi-task operation system VxWorks. On the basis of multi task scheduling, communication management and data acquisition and storage, the simulation experiment of navigation obstacle avoidance decision is completed, and the control effect of the navigation and control system of the submersible is verified.

**Keywords:** deep-sea crawling and sailing hexapod robot; embedded systems; control system; PC104; VxWorks

## 0 引言

目前, 大部分自主水下航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 实现的是水中巡游, 定点作业能力差而且不能沉底作业, 而遥控潜水器 (Remote Operated Vehicle, ROV) 虽然有沉底作业能力但是作业面小并且更换作业位置费时费力<sup>[1-3]</sup>。因此需要一种同时具有机动性高、海底作业面广的新型水下航行器。深海爬游无人潜水器就是一种既可在深海巡游, 又可在海底爬行的新型深海无人潜水器 (Unmanned underwater vehicle, UUV)。它在游动时既具有水下自主航行器高效、大范围的机动能力, 同时在海底爬行时又具有遥控机器人的精确移动定位能力。如图 1 所示, 布置在潜水器两侧的六条机械腿用于海底爬行; 尾部为两台水平推进器, 可在游动状态下提供推力, 通过 2 个推进器差动推进实现水平转向; 中轴线上首尾各有一台导管桨垂向推进器, 可提供垂向推力, 实现俯仰和深度控制。

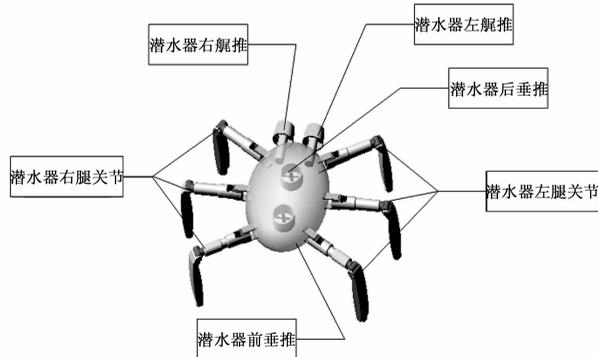


图 1 爬游无人潜水器结构示意图

潜水器控制系统由“上层导航控制+下层运动控制”两层控制结构组成。与传统水下航行器单控制核心的控制系统<sup>[4-5]</sup>相比, 它实现了合理的任务分配和设备管理, 提高了数据处理速度和决策规划效率。图 2 是爬游无人潜水器控制系统的总体结构设计框图, 其中上层导航控制系统主要用于完成导航、通信管理、决策规划、环境感知、电源管理等任务; 下层运动控制系统主要用于作业机械手管理、巡游推进器管理、爬行腿足关节管理等任务。

针对新型水下航行器水中巡游和海底爬行作业的任务

收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2018-07-16。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0301700); 国家自然科学基金(61473224)。

作者简介: 俞 键(1993-), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要从事计算机控制, 水下导航方向的研究。

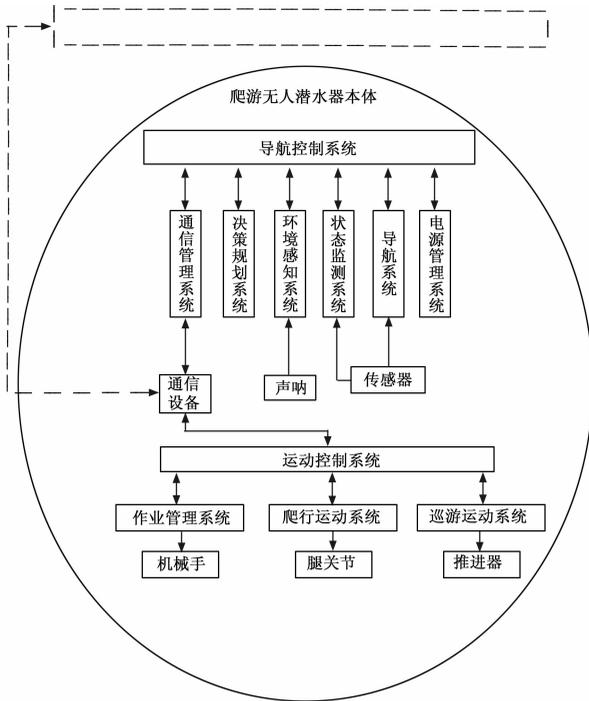


图 2 爬游无人潜水器控制系统结构框图

需求，控制系统实时性强、控制精度高、可靠性好的要求，本文提出了一种以 PC104 和 VxWorks 为嵌入式平台设计的导航控制系统。

### 1 导航控制系统硬件设计

导航控制系统主要由导航控制计算机、状态监测计算机、环境感知计算机三部分组成。其中，导航控制计算机是导航控制系统的核心部分；状态监测计算机用于监测系统状态和抛载上浮自救；环境感知计算机用于探测周围障碍和海底坡度等环境信息。图 3 是潜水器导航控制系统硬件结构图。

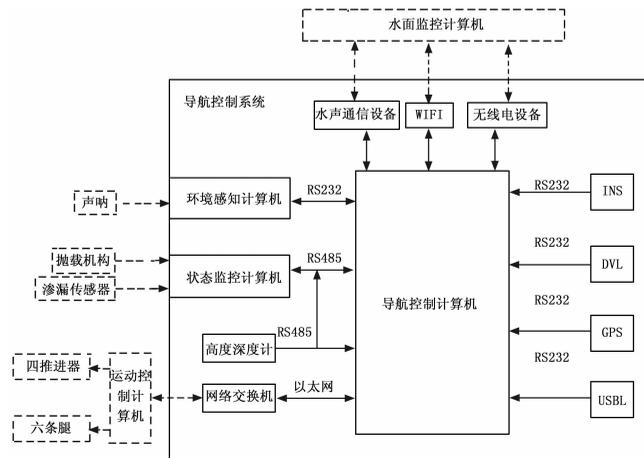


图 3 潜水器导航控制系统硬件结构图

#### (1) 导航控制计算机。

它是潜水器控制系统上层导航控制的核心，主要用于潜水器导航控制、工作模式管理、路径规划、设备管理、

供电管理和应急处理等任务。配置有惯性导航设备 (Inertial Navigation System, INS)、高度深度计、多普勒测速仪 (Doppler Velocity Log, DVL)、全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)、超短基线定位系统 (Ultra Short Base Line, USBL) 5 种导航传感器，同时安装有水声通讯设备、铱星设备、无线局域网 (Wireless Fidelity, WIFI)、网络交换机等通信设备。

#### (2) 状态监测计算机。

它配置有渗漏传感器和高度深度计，主要用于监测整个潜水器状态，并且及时在潜水器超深、海水渗漏、控制系统故障等情况发生时抛载上浮自救。

#### (3) 环境感知计算机。

它配置有声呐作为环境感知传感器。本文采用单独的环境感知计算机做声呐信息处理和障碍识别，以此来降低导航控制计算机负担，提高控制系统的处理速度和实时性。

## 2 导航控制系统软件设计

### 2.1 控制系统软件总体结构

爬游无人潜水器导航控制系统软件采用模块化设计，将系统的不同功能通过模块的形式实现<sup>[6]</sup>。图 4 为潜水器导航控制系统软件结构图，主要由初始化模块、设备管理模块、通信管理模块 (主要有以太网通信模块、水声通信模块、无线电通信模块组成)、数据采集模块、导航决策模块 (主要有 INS、DVL、GPS、USBL、高度深度计等传感器设备)、避障决策模块、作业管理模块、数据存储模块、应急处理模块等组成。

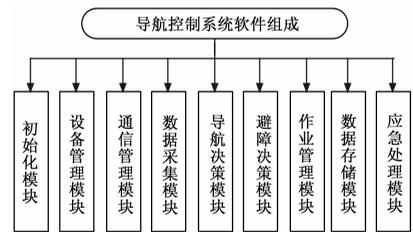


图 4 潜水器导航控制系统软件结构图

### 2.2 导航控制系统多任务划分

VxWorks 是基于优先级的抢占式和轮转式多任务调度的嵌入式实时操作系统，导航控制系统在 VxWorks 下的实现就体现为多个任务的调度。控制系统运行时，所执行的任务主要分为以下几类：

(1) 初始化任务：实现程序初始化，包括初始化主板和扩展串口模块的串行通信接口，初始化 I/O 输出，初始化网络接口，调用任务创建函数来建立多任务处理，初始化看门狗监测任务等。

(2) 设备管理任务：包括潜水器各设备开关量的输出，设备的参数设置、电源管理，低能耗管理与规划，传感器设备紧急故障重启等。

(3) 数据采集任务：导航控制系统通过串口获取各传

传感器采集的数据, 包括姿态角、速度、角速度、经纬度、深度、高度等状态信息。

(4) 数据存储任务: 主要是用来保存传感器采集数据和设备状态信息。同时为保证存盘数据的完整性, 设计了共享数据区保护机制。

(5) 通信管理任务: 主要负责和水面、运动控制系统之间的通信。其中, 导航控制系统和水面之间的通信分为三部分: 在母船上采用 WIFI 通信<sup>[7]</sup>部分; 在水面上采用无线电通信部分; 在水下时采用水声通信部分。而导航控制系统和运动控制系统都在潜水器电子舱内, 采用以太网交换机进行网络通信。

(6) 导航决策任务: 包括潜水器的导航定位、运动决策和模态切换等功能的实现。

(7) 避障决策任务: 主要用于潜水器在巡游和爬行状态下的障碍识别决策和路径规划。海底爬行避障的指令发出过程如图 5 所示, 由传感器和环境感知系统获取的数据辅助导航控制系统的海底爬行任务发出爬行指令来避障, 这些指令将会发送给运动控制系统, 解算出腿足关节角度, 以实现潜水器在海底的避障爬行。

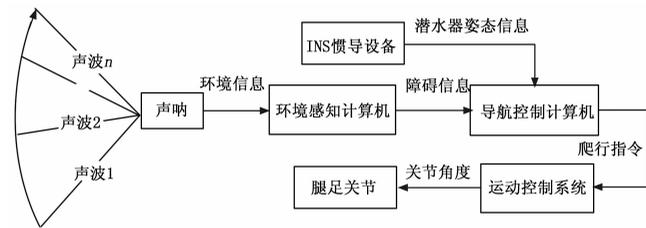


图 5 避障爬行指令发出过程图

(8) 作业管理任务: 主要用于按系统预设作业流程, 发出作业指令给运动控制系统来驱动机械手实现抓取海底样本等作业任务。

(9) 应急处理任务: 主要用于在潜水器超深、海水渗漏、控制系统故障等情况发生时及时抛载上浮自救。它与状态监测计算机互为备份, 相互监督, 确保潜水器在水下出现紧急情况时及时抛载上浮。

### 3 软件功能模块实现

以多任务调度机制、通信管理功能、数据采集存储功能的实现为例, 介绍导航控制系统软件实现和结构。

#### 3.1 多任务调度机制

潜水器导航控制系统所有任务, 不仅要根据各任务相互关系基于优先级进行调度, 还需要借助信号量进行任务之间的同步和互斥<sup>[8]</sup>。优先级设置和任务间通讯方式如表 1 所示。通信管理任务接收水面指令, 并通过消息队列向下级任务发送。数据存储和开关量输出采用基于优先级的抢占式调度方式, 通过优先级的高低先后执行。传感器数据采集任务的优先级都较高, 它们从响应的中断得到相应的二进制信号量后, 从串口读取数据, 然后请求互斥信号量, 写数据区, 任务之间采用基于时间片的轮询调度。导航控

制任务设置了最高的优先级, 以保证潜水器在水下姿态控制的优先。

表 1 任务优先级和调度表

任务名	优先级	调度方式	通信方式
主任务	100	抢占式	
高度深度计数据采集	103	轮转式	互斥信号量
INS 数据采集	103	轮转式	互斥信号量
DVL 数据采集	103	轮转式	互斥信号量
GPS 数据采集	103	轮转式	互斥信号量
通信管理	102	抢占式	互斥信号量
数据储存	104	抢占式	互斥信号量
开关量输出	105	抢占式	消息队列
导航控制	101	抢占式	消息队列

#### 3.2 通信管理功能实现

以导航控制系统和水面的通信为例, 导航控制系统接收到水面命令时, 需要以相对应的格式进行应答, 应答通信格式中以“@”为帧头, 0x+命令代码+(参数)结束。

如果水面发送的命令中的数据无效时, 则表明导航控制系统需要向水面上上传相应的数据; 当数据有效时, 表明导航控制系统应执行该命令, 并回传相应的数据。

以导航控制系统收到水面的命令“定位爬行命令”(0x24)为例, 它带 2 个双精度浮点型数据, 依次为经度、纬度。

```
struct command {
    char ' '; (帧头, 为 unsigned char=' ')
    unsigned char 0x24; (当前发送命令)
    double longitude; (潜水器 INS 经度命令)
    double latitude; (潜水器 INS 纬度命令);
```

当经纬度数据 longitude 和 latitude 有效时, 导航控制系统将该数据作为潜水器爬行目标地址来控制潜水器爬行, 并上传“@0x24”, 并附带潜水器 INS 当前的经、纬度数据; 若经纬度数据无效时, 则不进行任何处理, 仅上传“@0x24”, 并附带潜水器 INS 当前的经、纬度数据。

#### 3.3 数据采集存储功能实现

(1) 数据采集。

潜水器所携带的导航传感器设备都是采用的 RS232 和 RS485 串口, VxWorks 串口初始化过程<sup>[9]</sup>如下所示:

①打开串口

```
fd=open("/tyCo/0", O_RDWR, 0);
```

②设置串口 raw 模式, 清空输入输出的缓冲区

```
ioctl(fd, FIOSETOPTIONS, OPT_RAW);
```

```
ioctl(fd, FIOFLUSH, 0);
```

③设置波特率, 数据位, 停止位, 校验方式 `ioctl (fd, FIOBAUDRATE, 9600);`

```
ioctl(fd, SIO_HW_OPTS_SET, (CLOCAL|CREAD|CS8));
```

④通过设备描述符 fd, 对串口 read 和 write 操作。

(2) 数据存储。

数据存储主要是将各种数据通过文件系统存储到 Vx-

Works 的 SATA 接口外接硬盘，以便进行事后分析。本文采用的是 dosFs 文件系统<sup>[10]</sup>，磁盘初始化步骤如下：

①使用 ataDevCreate()函数在 BLK\_DEV API 设备驱动子层上创建一个指向块存取设备的指针 pAta。

BLK\_DEV \* ataDevCreate(int ctrl,intdrive,int nBlocks,int blkOffset);

②调用 dcacheDevCreate()函数为一个块设备创建磁盘高速缓冲并在 CBIO to CBIO 设备(dcacheCbio)子层上生成 CBIO 句柄。

CBIO\_DEV\_ID dcacheDevCreate(CBIO\_DEV\_ID subDev,char \* pRamAddr,int memSize,char \* pDesc)

③调用函数 dosFsDevCreate()来在指定分区上创建 dosFs 文件系统。

STATUS dosFsDevCreate(char \* pDevName,CBIO\_DEV\_ID cbio,u\_int maxFiles,u\_int autoChkLevel)

④通过 CBIO 句柄对磁盘进行 write 和 read 操作。

### 4 导航决策仿真实验与结果分析

在实验室内，实现数据采集、多任务调度、通信管理等功能模块的基础上，用声呐、导航控制计算机、环境感知计算机来构成导航决策仿真系统。由声呐采集障碍数据，环境感知计算机处理障碍信息，最后由导航控制计算机做出避障决策。将导航控制系统输出的爬行指令通过 Matlab 软件绘图，验证导航控制系统决策的控制效果是否达到预期。

#### 4.1 声呐数据采集

声呐采集数据以十六进制形式通过 RS232 串口发给环境感知计算机，由环境感知计算机解算出障碍的方向和距离。图 6 为环境感知计算机收到声呐数据的解算过程，首先提取接收缓冲区的数据，分离得到每帧扫描扇区的数据。然后从中提取出每帧数据障碍角度和距离，将数据按照方向和位置排列成障碍信息矩阵。最后，运用滤波算法，得到如图 7 所示的障碍物左边界、右边界角度和与潜水器距离信息。

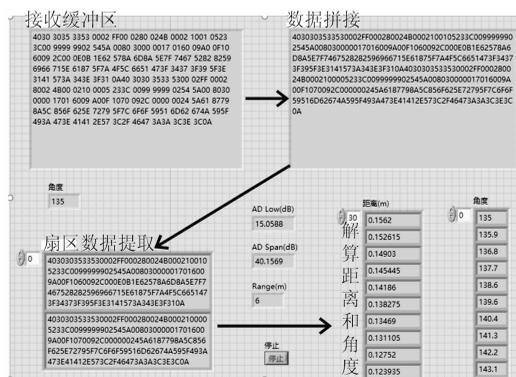


图 6 障碍数据处理

#### 4.2 导航决策

潜水器在爬行作业中遇到障碍，采用左优先策略进行避障。

声呐扫描波束划分如图 8 所示，在前进时，设置其前向扫描波束为 (fn1, fn2, fn3, fn4)，其中波束 (fn2,



图 7 障碍结算结果

fn3) 为潜水器安全前进所需波束区域。

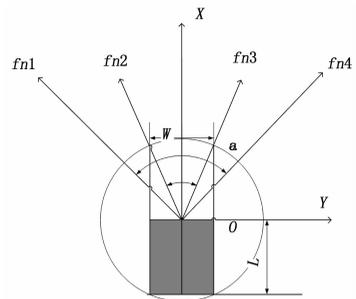


图 8 安全区域俯视示意图

导航控制系统避障决策逻辑为：当且仅当在安全区域 (fn2, fn3) 内没有检测到有障碍时保持原方向前行；当避障声呐检测到安全区域 (fn2, fn3) 内有障碍时，潜水器原地左转 5°，再次检测前方障碍情况，直到检测到安全区域 (fn2, fn3) 内无障碍，区域 (fn3, fn4) 内有障碍时，保持这个方向前进；当避障声呐检测到区域 (fn2, fn4) 内无障碍时，原地右转 5°，再次检测前方障碍情况，并观察指向终点的方向，直到安全区域 (fn2, fn3) 内无障碍，且潜水器前进方向基本与其指向终点的方向重合时，令前进方向为指向终点的方向，保持这个方向前进。

#### 4.3 仿真结果

潜水器在爬行前进过程中，输入起点 O 与终点 P 的坐标，最终仿真结果输出一条路径，能够实现自主避障并走到终点附近。认定当某一位置到终点 P 的距离 d<0.2 m 时即为走到终点。

潜水器及其腿部活动空间的宽度为 W=2.259 m，前方安全距离为 6 m。在进行仿真时设置潜水器每次转向为 5°，前进步长为 0.3 m。仿真结果如下：

- (1) 设置障碍物为有一定曲率的矩形，起点为 (5, 15)，目标点为 (35, 15)，仿真结果如图 9 所示。
- (2) 设置障碍物为不规则五边形，起点为 (5, 10)，目标点为 (35, 15)，仿真结果如图 10 所示。
- (3) 设置障碍物为不规则五边形，起点为 (5, 15)，终点为 (35, 15)，仿真结果如图 11 所示。

观察图 9 到图 11 的仿真结果，粗线的路径为潜水器避障的路径点，两条细曲线组成的路径即为宽度为 W 的能够为潜水器提供足够活动空间的路径。每一次仿真结果均显示三条曲线组成的路径与障碍物无重合区域，能够令潜水器及其腿部有足够的空间执行相应的运动指令。

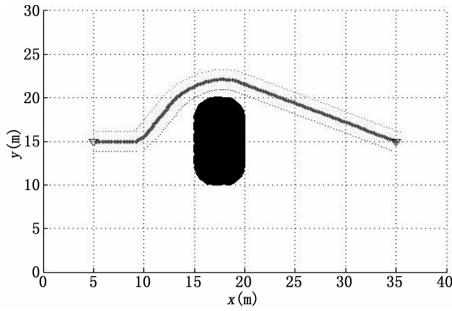


图 9 左优先避障规则仿真结果 1

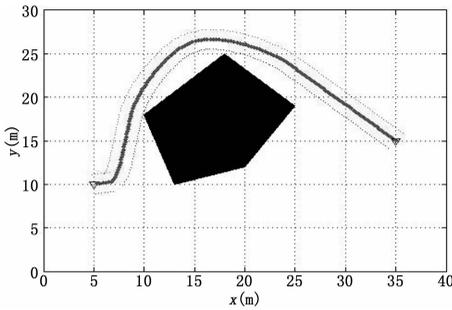


图 10 左优先避障规则仿真结果 2

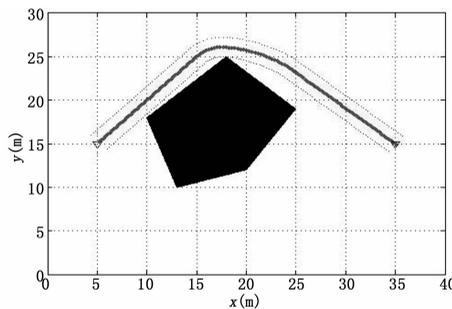


图 11 左优先避障规则仿真结果 3

图 9 与图 11 相比, 起点相同, 障碍物不同; 图 10 与图 11 相比, 障碍物相同, 起点不同。对左优先避障规则的仿真我们分别从不同起点, 不同障碍物角度出发, 综合验证了左优先避障规则的正确性。自主避障规则的正确性体现在 2 个方面: 第一是能够给出一条路径绕过障碍物走到终点附近; 第二是根据这一条路径计算出的宽度为  $W$  的爬行路径不能够与障碍物有重合的区域。

.....  
(上接第 96 页)

[8] Song Z, Hofmann H, Li J, et al. Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system [J]. Applied Energy, 2014, 134: 321-331.

[9] 赵国柱, 黄 相, 孙琼琼. 模糊控制的电动车复合电源能量管理研究 [J]. 传感器与微系统, 2017, 35 (1): 48-55.

[10] 何正伟, 付主木. 纯电动汽车复合电源能量管理模糊控制策略 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 12: 54-58.

[11] 武小兰, 白志峰, 石小辉, 等. PHEV 模糊能量管理策略优化设计 [J]. 系统仿真学报, 2018, 21 (12): 3256-3259.

[12] Yang XS, Deb S. Cuckoo search visa Lévy flights [A]. Na-

经过上述三组实验验证, 实际的仿真结果和设计的导航决策逻辑吻合, 从而验证了导航控制系统的控制决策达到了预期的效果。

## 5 结束语

本文以 PC104 嵌入式计算机为硬件平台, 实时多任务操作系统 VxWorks 为软件平台, 为新型水下航行器——爬游无人潜水器设计了高效、稳定的嵌入式导航控制系统。设计过程中给出了系统导航控制计算机、状态监测计算机、环境感知计算机的硬件设计方案; 同时实现了多任务调度、通信管理、数据采集等软件功能模块, 最后通过实验验证了导航控制系统导航决策的正确性, 为爬游无人潜水器实现深海巡游和海底爬行的任务目标提供了可靠的导航控制系统, 同时对其它嵌入式控制系统的开发具有重要参考价值。

## 参考文献:

[1] 李翔宇, 刘卫东, 岳丽娜. PC104 与 VxWorks 在深海 ROV 控制系统的应用 [A]. 2013 中国西部声学学术交流会议论文集 (下) [C]. 2013.

[2] Jun, Bong-Huan, Hyungwon Shim. First field-test of seabed walking robot CR200 [J]. IEEE Oceans. San Diego, 2013.

[3] Kang, Hangoon, Hyungwon Shim. Design of the underwater link-joint system for the multi-legged underwater robot "CR200" [J]. Oceans, 2012-Yeosu.

[4] 甘 永, 王丽荣, 刘建成, 等. 水下机器人嵌入式基础运动控制系统 [J]. 机器人, 2004, 26 (3): 246-249.

[5] 孙玉山, 王建国, 万 磊, 等. 基于 VxWorks 的水下机器人嵌入式导航系统的研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 6 (6): 899-909.

[6] 黄 宇. 基于 Vxworks 的 AUV 软件模块化设计方法 [J]. 水雷战与舰船防护, 2017, 25 (2).

[7] 朱世宇, 刘春雷, 甘 科, 等. TCP/IP 协议在 VxWorks 嵌入式平台上的实现 [J]. 自动化与仪器仪表, 2011 (5): 115-116.

[8] 李方敏. VxWorks 高级程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[9] 李 慧. Vx Works 中串口通信的实现 [J]. 金陵科技学院学报, 2007, 23 (2): 37-40.

[10] 吴 云. 基于 VxWorks 下 dosFS 的块设备开发研究 [J]. 信息通信, 2017 (11): 136-137.

.....  
[13] 张晓琳, 张 冲, 杨 涛. 基于改进布谷鸟算法的火焰图像阈值分割算法 [J]. 微电子学与计算机, 2017, 34 (1): 66-72.

[14] 李 煜, 马 良. 新型元启发式布谷鸟搜索算法 [J]. 系统工程, 2012, 30 (8): 64-69.

[15] Valia E, Mohanna S, Tavakoli S. Improved cuckoo search algorithm for global optimization [J]. International Journal of Communications and Information Technology, 2011, 1 (1): 31-44.

[16] 张 聪. 纯电动汽车用复合电源匹配与控制理论研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2017.