

# 自主水下航行器安全抛载系统设计

董权威, 田 锋, 岳才谦, 王奥博

(中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

**摘要:** 自主水下航行器(AUV)在海洋资源勘探与开发中发挥着重要作用, 安全性作为其研究的重要内容与关键技术, 关乎着水下任务能否顺利完成并安全返回; 为进一步加强 AUV 在水下应对故障及危险的处理能力, 依托实体 AUV, 设计一套安全抛载系统; 该系统基于 ARM Cortex-M4 处理器, 搭建抛载电路, 使其不仅能够响应程序预先设定的抛载指令, 还能根据一些突发或紧急情况, 自动触发抛载动作, 如: 系统掉电、死机或漏水等; 最后通过岸上模拟实验与真实水下实验, 测得对 10 kg 抛载块进行抛载测试的准确执行率达 100%, 且抛载系统功耗为 2.8 W; 此外, 对抛载系统进行了耐压测试, 压力测量装置显示, 在 10 MPa 压力范围内, 该系统仍能正常可靠工作, 其耐压性得到有效验证, 符合总体设计要求。

**关键词:** 自主水下航行器; 安全抛载; 可靠性设计

## Design of Safety Jettison System for Autonomous Underwater Vehicle

DONG Quanwei, TIAN Feng, YUE Caiqian, WANG Aobo

(China Academy of Aerospace and Aerodynamics, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Autonomous underwater vehicle (AUV) plays a vitally crucial role in ocean exploration and development, and as one of the key technology, its safety is the important part of research that determines whether the AUV can accomplish the underwater mission and return back safely. In order to further enhance its ability of dealing difficulty and dangerous situation when AUV maneuvers under the water, a renew safety jettison system is designed. In this system, the main controller unit of security guarantee computer utilizes the ARM Cortex-M4 processor, and establish the security jettison circuit of AUV, which can response the jettison command that set previously and trigger the jettison motion automatically according to emergent situation, such as: the control system powered off, system halted, water leakage. Finally, through simulation and trial, the result manifests that the jettison execution efficiency is reach to 100% when the weight of jettison is less than 10 kg, and its energy consumption is 2.8 W. In addition, the pressure resistant property of jettison system is tested. Through measured with the pressure device, the jettison system runs well within 10 MPa, its pressure resistant property is verified and meets the requirement of overall design.

**Keywords:** autonomous underwater vehicle; safety jettison system; reliability design

## 0 引言

自主水下航行器(AUV, autonomous underwater vehicle)作为海洋开发的重要运载平台,能够代替人类进行复杂、艰巨的工作。可在无人控制的状态下全天候、多航时地自主完成水下任务,成为在民用领域和军用领域中重要的海洋开发和安全保障的工具,并且获得广泛应用。在民用方面,可应用于海图绘制、地形勘察和海底设备维护等领域;在军用方面,可应用于海上预警、海底对抗、水下情报搜索、水下目标搜索与打击和战区探测等。AUV因长期工作在复杂的海洋环境中,安全性问题一直受到关注,若在工作中出现事故,轻则造成任务失败,重则造成丢失。因此水下航行安全已经成为水下航行器领域的重要研究内容及智能化水平的重要体现,研究高可靠性的抛载技术,提高 AUV 系统的航行的安全性,对 AUV 的实用化、工程化具有重要的研究价值<sup>[1-4]</sup>。

随着智能化发展与大潜深的需求, AUV 在复杂海洋环境中进行无人无缆作业时,如何确保能够执行抛载实现安全上浮是研究的重点与难点<sup>[5-7]</sup>。当前,对于 AUV 抛载系统的研究,主要采用液压传动抛载、抛掉携带的电池组等部件、爆炸螺栓抛载等方式。但在实际工程应用中,液压传动抛载方式结构复杂,并且需要依靠电来驱动,当 AUV 出现系统死机、漏水、掉电或能源不足等问题时,则无法实现抛载;抛掉随身携带的电池组实现上浮则会带来成本问题;而使用爆炸螺栓抛载存在一定的危险<sup>[8]</sup>。因此必须设计一个安全可靠的抛载系统,保证 AUV 在水下发生任何故障时,都能实现安全有效抛载。目前, AUV 在水下航行过程中只能对预先估计和实时监测的部分故障进行抛载动作,而对一些不可预知的故障则无有效的应对措施,如: AUV 系统发生死机、掉电或漏水等故障<sup>[9-10]</sup>。

针对上述问题,依靠实体 AUV,设计出一套安全抛载系统,该系统主要由主控单元、安保单元、抛载电路及抛

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-01-19。

作者简介: 董权威(1991-),男,河北保定人,硕士,工程师,主要从事自主水下航行器控制系统设计与开发方向的研究。

通讯作者: 田 锋(1981-),男,山西高平人,硕士,高级工程师,主要从事自主水下航行器总体设计方向的研究。

引用格式: 董权威, 田 锋, 岳才谦, 等. 自主水下航行器安全抛载系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 178-181, 189.

载机构组成, 通过对设计的安全抛载系统进行岸上模拟测试与水下测试, 验证了该系统运行的可靠性与稳定性, 从而提升了 AUV 在水下作业时应对各种故障及危险下的抛载执行能力, 扩展了 AUV 的工作范围, 进一步保证 AUV 水下的航行安全。

## 1 系统结构及原理

为适应复杂的水下环境, 并能够根据不同的作业要求完成相应的水下任务, 对 AUV 的功能进行划分, 将其分为主控单元与安保单元两部分, 主控单元包括任务控制计算机、导航控制计算机、运动控制计算机, 用以接收并处理 AUV 搭载的各类传感器的数据信息, 实时监控 AUV 在水下运行的状态, 接收并发送控制指令, 并负责 AUV 的任务规划、水面/水下通信、导航控制与航行运动控制。安保单元包括安保计算机、相关的驱动电路及抛载机构, 主要负责 AUV 水下的航行安全, 确保当其遇到突发状况, 如电量不足、系统掉电、超时、超深与系统死机等, 能够安全出水。主控单元与安保单元通过 CAN 总线进行指令与数据交互。AUV 系统划分原理如图 1 所示。

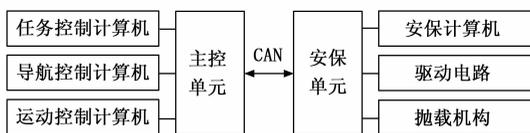


图 1 AUV 硬件结构框图

其中, AUV 的安全抛载系统所采用的电磁抛载方式是一种比较成熟的技术, 具有结构简单、低功耗、运行可靠的特点, 其工作原理主要是将电磁能转换为机械能, 当电源接通, 内部线圈通电, 产生电磁场, 从而吸合压载; 当断开电源, 内部线圈不通电, 电磁场消失, 从而释放压载。抛载后 AUV 浮力远大于重力, 从而实现上浮出水。该方式能够进行实时触发且性能可靠, 系统结构紧凑、工作稳定、可控性强, 能够快速响应, 因此适用于水下航行器, 通过在特定条件下执行抛载, 可大大保障水下航行安全, 提升环境适应性。

AUV 搭载的安全抛载系统能够使其在水下发生故障后, 以抛载的形式进行紧急出水, 设计原理简单, 抛载正确执行率成功高。因此对其安全抛载技术展开相关研究, 以进一步提高 AUV 的抛载执行准确率, 提升其水下生存能力。同时, 为降低安全抛载系统长时间运行对 AUV 水下续航能力的影响, 对其控制电路、驱动电路等进行完善, 进一步降低工作能耗, 以满足总体设计指标。

AUV 安全抛载系统主要由安保计算机、驱动电路、光耦隔离电路、继电器与抛载执行机构组成。其中, 抛载控制信号由安保计算机发出, 并经过继电器控制电路控制电磁抛载机构的通电与断电, 实现抛载块的吸合与释放。为满足水下不同的任务需求, 将抛载控制电路分为两路, 一路作为正常抛载使用, 当执行抛载指令时, 可触发安全抛载, 适用于在紧急情况下执行抛载, 保证 AUV 能够随时上

浮出水。另一路作为重物压载使用, 同时也可作为二级抛载, 适用于大潜深下 AUV 无动力下潜。当需要 AUV 进行紧急快速上浮时, 可同时触发两路抛载, 如图 2 所示。

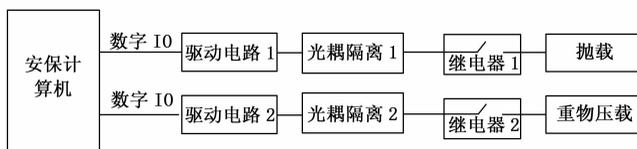


图 2 抛载系统组成框图

安全抛载系统只在 AUV 水下航行阶段发挥作用, 通过预设指令, 保证 AUV 遇到问题或故障后能够执行抛载动作而上浮出水, 因此需要对 AUV 整个航行过程中可能遇到的问题进行梳理, 并将其加入控制流程, 所涉及的故障及危险主要包括:

- 1) 系统超时: AUV 在水面执行下潜指令后, 在水下的航行时间超过程序设定的最大航行时间。
- 2) 系统超深: AUV 水下航行深度超过程序设定的最大深度。
- 3) 电量不足: AUV 电池电量低于程序设定的最低电量。
- 4) 设备故障: AUV 内部某路设备或载荷在航行过程中工作异常或停止工作。
- 5) 不可预知故障: 如系统掉电、死机、舱体漏水等不同于上述的故障或危险。

## 2 抛载系统硬件设计

抛载系统的主要工作是实时采集并监控 AUV 的各种状态信息, 如深度信息、电量信息、设备状态信息等, 若检测到 AUV 出现超时、超深、电量不足、设备异常等故障, 安保计算机则发送抛载指令, 通过复位相应引脚的 IO 口, 最终使抛载机构执行抛载动作。其中, 抛载机构采用电磁锁控制方式, 即抛载机构的工作方式方式为通电上锁, 断电解锁, 因此可保证当出现系统掉电、安保计算机死机、AUV 舱内进水等不可预知故障时, 安保计算机的 IO 口不能正常输出持续的高电平信号, 因此可自动触发抛载。

抛载系统的安保计算机采用基于 ARM 的 STM32F407ZGT6 芯片作为 MCU, 该芯片的资源丰富, 集成 FPU 和 DSP 指令, 具有 192 KB SRAM, 1 024 KB FLASH, 内部通信可满足各节点设备接口的使用要求。光耦隔离电路采用 TLP250, 其为可控的光电耦合器件, 可实现电路之间的信号传输, 能够使前端与负载完全隔离, 安全性得到进一步加强, 并能减小电路干扰, 减化电路设计。驱动电路采用 ULN2003, 该芯片由 7 路高耐压与大电流的复合晶体管构成, 最大灌电流可达 500 mA, 可在高负载电流下并行运行。两路抛载分别通过各自的控制继电器控制, 继电器型号为 G2R-2A4, 该继电器线圈电压 24 V, 由一路线圈输入和两路开关组成, 并将继电器的两路输出共同驱动一路抛载, 可进一步提高驱动能力与可靠性。安保计算机控制

抛载的两路信号正常状态下为高电平，即抛载系统上电后，抛载机构保持吸合状态。当需要执行抛载动作时，安保计算机接收到抛载指令，并通过 IO 口发送抛载指令，IO 口输出低电平，此时抛载继电器断电，抛载机构断电抛载，其工作原理为：

1) 驱动电路接收到来自控制计算机的 IO 信号为高电平信号时，驱动电路会将电平转换成低电平并输出给下一级。

2) 光耦隔离电路的地端 (GND) 与驱动电路的输出连接，正极与电源连接，当接收到来自驱动电路输出的低电平信号时，此时光耦隔离电路导通，触发发光二极管，使得光耦隔离电路的输出端正负导通，继电器闭合 (常开触点)，抛载机构上电吸合。

3) 当系统遇到故障需要执行抛载指令时，安保计算机的数字 IO 口输出低电平，导致驱动电路的电平与上述情况相反，最终使继电器断电，执行抛载。抛载系统的电路原理如图 3 所示。

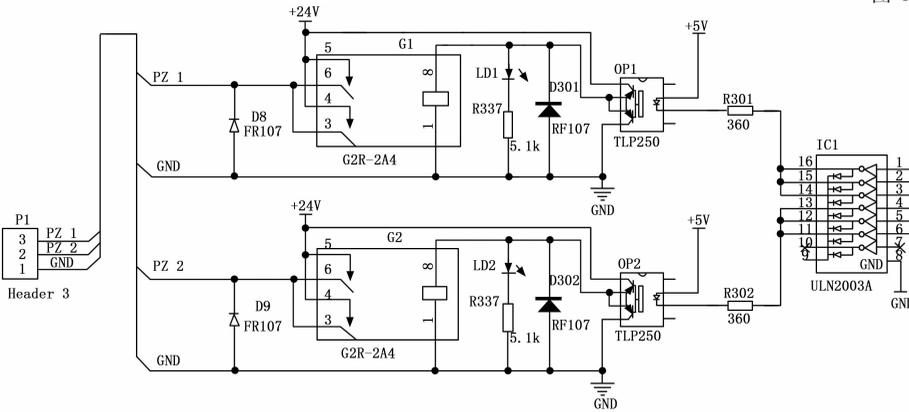


图 3 抛载系统电路设计原理图

### 3 抛载系统软件设计

抛载系统的抛载指令下发与反馈通过 CAN 总线实现，AUV 运行过程中，主控单元的任务控制计算机实时监测搭载在 CAN 总线上的各路系统及设备，包括导航控制计算机、运动控制计算机及相关载荷设备等。当监测到某路出现故障危及 AUV 正常航行时，则通过 CAN 总线向安保计算机发送抛载指令，安保计算机接收到该指令，则对抛载的相关接口进行复位，此时抛载机构断电抛载。同时当出现非预知故障，如 AUV 突然掉电、系统关机等情况，导致抛载系统无法工作而断电抛载。因此为确保 AUV 在水下遇到任何紧急情况都能安全出水，需要对抛载的控制策略及控制流程进行设计，以保障 AUV 水下的航行安全。

AUV 安全抛载系统的工作流程如下：

- 1) AUV 下水前，装载抛载块，并进行水面自检，确保抛载系统工作状态运行正常。
- 2) 下潜任务装订并成功下发后，AUV 执行下潜，安

保计算机内置计数器开始计数，同时实时采集 AUV 内部深度传感器的深度信息，当 AUV 在水下航行时间超过程序设定的水下最大工作时间，计数器溢出，触发抛载；当系统在达到程序设定的最大工作时间前，AUV 已出水，则清空计数器计数，并停止计数，直至收到下一次水下航行指令，超时抛载工作流程如图 4 所示。

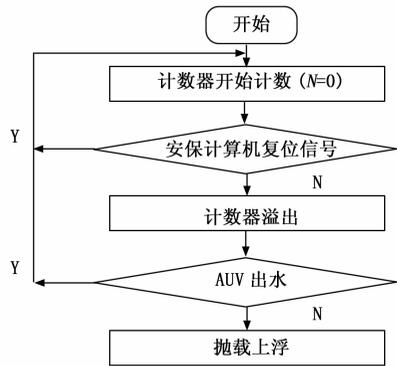


图 4 系统超时抛载工作流程

3) AUV 在水下航行过程中，安保计算机实时采集深度传感器的深度信息，当检测到 AUV 航行的深度大于程序设定的最大航行深度，则触发抛载指令，启动应急抛载，超深抛载工作流程如图 5 所示。

4) AUV 在水下航行过程中，安保计算机实时采集电池电量信息，若检测到 AUV 的剩余电量低于安全阈值，则结束水下任务，上浮出水，若电量低于程序设定的最低值仍未出水，则启动抛载上浮，低电量抛载工作流程如图 6 所示。

5) AUV 在水下航行过程中，安保计算机实时接收来自其他控制系统或设备的状态信息，正常情况下，相应的控制系统或设备会向外发送自身状态信息，若出现异常，如系统死机、程序跑飞、掉电等，此时安保计算机检测到该系统或设备的异常，并发送断电重启指令，从而触发继

续

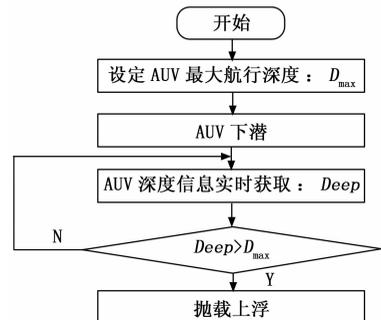


图 5 系统超深抛载工作流程

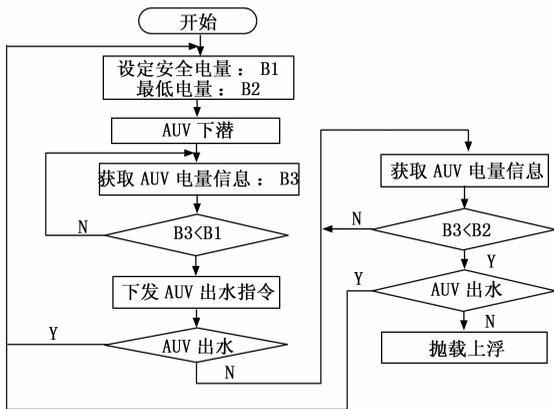


图 6 AUV 电量不足情况下工作流程

电器关断并再次上电, 以重启相关分系统或设备, 若仍异常, 则执行抛载指令, AUV 上浮出水。

6) 当 AUV 在水下航行时, 若发生不可预知的故障, 如舱体漏水、系统突然掉电等, 会导致内部电路短路、断电等现象, 此时均会导致抛载继电器断电触发抛载。或由于安全抛载系统本身出现问题, 如安保计算机故障、驱动电路或光耦电路芯片损毁等, 亦会使抛载机构掉电触发抛载。

#### 4 实验结果与分析

AUV 安全抛载系统的测试项目分为两项内容: 耐压测试与性能测试。首先对该系统的耐压防水性进行测试, 将安全抛载系统的抛载机构与 10 kg 的抛载块置于充满水的密闭高压罐, 抛载机构的接口与控制电路引出罐体, 通过打压装置对其进行逐级打压, 直至罐体内压力升高至 10 MPa。在打压过程中, 安全抛载系统运行良好, 抛载指令收发正常, 并能够正确执行抛载动作, 抛载准确率为 100%, 验证了在 10 MPa 压力范围内, 抛载系统仍能稳定工作, 无漏水渗水现象, 且抛载系统的功耗为 2.8 W, 均满足设计要求。

抛载系统的耐压测试完成后, 对其进行性能测试, 性能测试分为岸上模拟测试与水下测试。岸上模拟测试主要测试整个系统的控制流程, 验证抛载系统设计的可行性与有效性。水下测试则是对 AUV 进行全流程测试, 通过设置相关的参数, 以满足设定的抛载条件, 从而触发抛载。

其中, 抛载的岸上模拟测试主要包括: 主控单元中任务控制系统故障或通信异常、导航控制系统故障或通信异常、运动控制系统故障或通信异常、系统超时、超深、电量不足、意外掉电等, 测试效果体现在故障发生后是否触发抛载机构的磁力锁失锁导致抛载块掉落。岸上模拟的测试流程按照上述情况进行相关测试, 每种工况各测试 5 次, 如表 1 所示。下表列出的意外掉电的模拟测试是通过在系统运行过程中人为断开安全抛载系统的供电电源或 AUV 的总电源实现。电池电量不足的模拟测试则是通过降低 AUV 的供电电源实现。最终测试结果显示, 所设定的故障触发

的抛载执行准确率为 100%。

表 1 安全抛载系统岸上模拟测试内容

故障类型	岸上故障实际触发方式	抛载正确执行率/%
任务控制系统故障或通信异常	任务计算机关机或停止数据传输;	100
导航控制系统故障或通信异常	导航计算机关机或导航计算机停止发数;	100
运动控制系统故障或通信异常	运动计算机关机或运动计算机停止发数;	100
AUV 超时	设置 AUV 开始任务超过 30 s 后即超时	100
AUV 超深	设定 AUV 深度超过 5 m 后即超时, 并利用打压装置对深度传感器进行打压测试	100
电池电量不足	监测到 AUV 电池电量即将不足时, 进行测试	100
意外掉电	在 AUV 程序运行过程中, 人为进行断电	100

为进一步全面验证安全抛载系统的性能, 将其集成到实体 AUV 内进行实际的水池测试, 并按照上述故障测试流程进行测试, 最大程度的还原 AUV 在水下运行时所面临的真实环境与实际工况。最终通过水池试验证明, AUV 在水下测试过程中, 通过触发相关故障使其抛载系统执行抛载动作时, 无未抛和误抛现象发生, 且均能正确执行程序设定的抛载指令, 可靠性得到有效验证。不过, 其在复杂水况及长时间运行条件下抛载执行的稳定性与可靠性仍需进行进一步测试及验证。

#### 5 结束语

AUV 航行的安全性是其水下任务能否顺利完成的关键技术, 也是保证其安全返回的重要保障。基于此, 本文设计了一套适用于 AUV 的安全抛载系统, 不同于传统的设计方案, 该系统设计原理简单、工作可靠、功耗低, 针对 AUV 水下发生的各类故障均能触发安全抛载, 且抛载执行效率达到 100%, 各项指标满足总体设计要求, 并最终通过了耐压测试与性能测试, 实用性与可靠性得到有效验证, 进一步提升了 AUV 自主解决故障或危险的能力, 为 AUV 水下作业提供了安全保证, 因此大大提升了 AUV 的水下生存能力与环境适应性。未来, 还需对其在复杂水况及长时间运行条件下的稳定性及可靠性做进一步测试。

#### 参考文献:

[1] 朱大奇, 胡震. 深海潜水器研究现状与展望 [J]. 安徽师范大学学报 (自然科学版), 2018, 41 (3): 205-216.

(下转第 189 页)