

基于 CAN 总线的自主水下航行器 分布式控制系统设计

董权威, 王奥博, 岳才谦, 王亭亭

(中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

摘要: 提出一种基于 CAN 总线的分布式控制系统设计方案, 该总线主要搭载任务控制系统、导航控制系统、运动控制系统及安保系统共 4 个节点; 将自主水下航行器的功能分布到不同的控制节点, 具有较好的体系结构, 且便于维护与升级; 不同于集中式控制系统, 当系统内需增加其他功能模块时, 无需修改硬件部分可直接接入控制系统, 具有很好的实时性与可扩展性; 最后通过湖试结果显示, 自主水下航行器航行稳定, 分布式控制系统运行良好, 验证了该设计的可靠性与有效性。

关键词: CAN 总线; 自主水下航行器; 分布式控制系统

Design of Distributed Control System of Autonomous Underwater Vehicle Based on CAN—Bus

Dong Quanwei, Wang Aobo, Yue Caiqian, Wang Tingting

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

Abstract: A project design of distributed control system on CAN—bus is proposed. The CAN bus mainly carries four nodes that contain mission control system, navigation control system, motion control system, security guarantee control system. The functions of AUV are distributed to different control node, which has a favorable architecture and a convenience for maintenance and upgrade. Differently from concentrated control system, the distributed control system can be easily connected with other control system without changing its hardware when other function modules need to be added, therefore it has an excellent performance of real—time and extending. Finally, the result of lake trial manifests that the AUV maneuvers steady and the distributed control system runs well, which verifies the reliability and verification of this design.

Keywords: CAN—bus; autonomous underwater vehicle; distributed control system

0 引言

海洋作为资源丰富的能量储备空间, 有着十分重要的意义, 同时伴随着人类认识海洋、开发海洋和保护海洋的进程不断发展, 拓展海洋权益已日益成为各国争先发展的重要目标。作为海洋开发的重要平台, 自主水下航行器(AUV, autonomous underwater vehicle)可以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^[1]。民用领域, 如海图绘制、地形勘察和海底设备维护等; 军用领域, 如海上预警、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^[2-4]。

作为 AUV 的关键技术, 控制系统设计的好坏决定了 AUV 系统运行的可靠性与稳定性等性能是否满足设计要求。传统的 AUV 控制系统多采用集中式, 即 AUV 的航行控制、任务管理与分配等均通过一台主控计算机实现, 当主控计算机遇到故障而无法正常工作, 则 AUV 整个控制系统则面临瘫痪的问题, 因此难以保证系统运行的可靠性。

此外还存在计算量大的问题, 难以同时完成水下复杂的航行任务, 如导航解算、运动控制、航路规划、图像数据采集与处理等。而分布式 CAN 总线串行通信网络通信距离远、通信速率高、连接节点多、通信实时性强等特点, 其可靠性与高性能已得到广泛认同, 在工业自动化、船舶工程与工业设备等领域具有广泛的应用^[5-6]。

由于 CAN 总线可同时搭载多个节点, 理论上没有限制, 受总线上实际电气负载与时延的限制, 随着 CAN 总线上连接的节点增加, 通信速度降低, 连接的节点减少, 则通信速度提高^[7-8]。因此, 对 AUV 的控制系统功能进行划分, 并将其拆分成由多个控制节点组成的分布式控制系统, 各控制节点通过 CAN 总线网络进行数据通信。当 AUV 在水下运行时, 若某一个控制节点发生故障, 通过分布式控制系统内的安全保障单元或应急处理单元接手并控制, 可大大提升 AUV 控制系统的可靠性, 进一步保证 AUV 水下航行安全。此外, 各控制节点通过 CAN 总线直接进行信息交互与数据传输, 无需通过主控计算机, 提高了系统整体的通信效率^[9]。同时, 采用 CAN 总线分布式控制系统便于后续扩展与升级, 当需要增加新的控制节点或设备时, 无需修改硬件, 只需将其接入总线即可实现通信^[10]。

根据 AUV 控制系统的设计要求, 本文提出了基于

收稿日期: 2020-05-07; 修回日期: 2020-05-28。

作者简介: 董权威(1991—), 男, 北京人, 硕士, 工程师, 主要从事自主水下航行器导航控制与电子系统方向的开发和研究。

CAN 总线的 AUV 分布式控制系统, 包括地面监控站、任务控制节点、导航控制节点、运动控制节点、执行节点、安保节点。其中, 地面监控站是 AUV 平台的地面指挥控制端, 其余节点置于航行器内部。通过对 AUV 的分布式控制系统的结构、硬件架构、硬件电路与软件程序进行设计, 系统开发工作完成后, 进行了多次水下试验, 最终验证了该设计方案的稳定性与可靠性。

1 控制系统设计要求

研发的该 AUV 平台, 尾部装一个轴向推进器为航行器提供航行动力, AUV 后段和后段各装有垂直推进器和侧向推进器, 通过不同推进器间的配合, 实现航行器的 3 维运动控制。AUV 的导航传感器主要包括: 惯导系统、超短基线、多普勒速度仪、GPS、深度计与高度计等。

对 AUV 控制系统的设计要求: 1) 对平台内部所有传感器数据信息实时采集; 2) 试验平台具有较高精度的自主导航能力与运动控制性能; 3) 能够记录所有的航行参数、导航控制参数与总线控制信息; 4) 具备故障诊断与紧急处理能力, 保障试验平台安全^[11]。

2 硬件系统设计

2.1 分布式控制系统结构设计

根据上述设计要求, AUV 控制系统采用分层式结构, 主要包含任务层、控制层与执行层, 各层由相应控制节点构成。其中, 任务层负责完成与地面设备的信息交互、任务模式设定与传感器信息存储等; 控制层负责完成航行器的导航、运动控制等; 执行层负责完成对各推进器、抛载机构的控制。当 AUV 在航行过程中, 任务层与控制层的任务分别由任务控制节点、导航与运动控制节点完成, 执行层则由推进器和抛载共同完成。同时, 在平台的分布式控制系统中还包括数据记录节点与故障诊断与应急节点, 分别用来记录试验平台的航行参数与各传感器信息, 并根据各传感器信息判断 AUV 航行是否正常, 并作出对应的应急处理措施。在实现时, 由上层将任务分发给下层, 下层在执行前需等待上层控制指令, 上层在下发新的控制指令前需确认下层任务是否完成。各个指令的发送与完成都需要上层与下层的“握手”确认。这种分层式体系结构使得系统功能层次清晰, 系统间通信可靠。试验平台的分布式控制系统结构如图 1 所示。

其中, 地面监控站主要由控制单元与显示单元组成, 用以进行指令传输、远程控制与 AUV 状态监控等。任务控制单元主要搭载任务载荷进行水底搜探与水中识别等工作, 如侧扫声呐与避障声呐等, 并负责完成 AUV 在水下航行过程中的任务分配、任务管理与控制等。同时搭载数传电台与水声通信装置实现水面与水下通信。在水面, 利用数传电台与地面监控站通信, 并接收上层地面监控端的任务指令, 完成对 AUV 预设的航行任务, 反馈 AUV 自身状态。在水下, 通过水声通信设备搭建水下通信链路, 完成水下与水面端的数据交互。

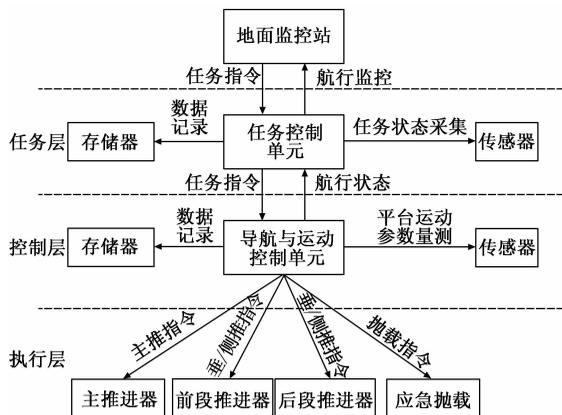


图 1 AUV 分布式控制系统结构框图

控制层为导航与运动控制单元, 分为导航控制系统与运动控制系统, 导航控制系统主要负责 AUV 在水下航行过程中的导航任务, 记录航行器水下的航行状态, 并实时采集 AUV 在航行过程中产生的导航信息, 并进行解算, 最后通过 CAN 总线发送至运动控制系统。运动控制系统主要接收来自导航控制系统采集的 AUV 在航行过程中产生的航行状态信息, 如姿态、速度、位置、高度和深度等信息, 并进行解算, 计算推力, 然后将计算结果转换成推进器的转速控制信号, 并将转换结果发送给执行层, 驱动各执行机构完成相应的动作, 进而实现 AUV 的航向控制、定深航行、定高控制与航迹跟踪等。

2.2 分布式控制系统硬件架构设计

AUV 控制系统复杂度的增加, 会使得系统内部连线与接口更加复杂, 同时会带来设计成本高、装配难度大、数据信息量大与可靠性差等问题。此时, 若系统采用现场总线的方式, 则可有效解决该问题, 并能实现多点对多点的通信。而 CAN 总线作为一种有效支持分布式控制和实时控制的串行现场总线, 可工作在多主模式。在系统通讯网络中, 各节点都可根据总线访问优先权, 在数据传输方面具有显著的优势, 其协议的充分性与完整性, 使得由它构建的通信系统具有较好的稳定性与可靠性, 也使 CAN 总线在 AUV 通讯系统应用领域更加广泛。

本文提出的 AUV 分布式控制系统采用基于 CAN 总线的总线式网络结构, 由任务控制系统、导航控制系统、运动控制系统及安保系统 4 个控制节点构成。其中, 任务控制控制搭载超短基线、数传电台、侧扫声呐与避障声呐, 导航控制系统搭载惯导、多普勒速度仪、高度计、深度计与 GPS 模块, 运动控制系统主要搭载各类推进器, 安保系统则主要保障 AUV 水下航行安全, 集成了电源管理单元、应急频闪灯与抛载机构等, 以实现 AUV 内部各节点、设备及相关组件的供电, 并对供电进行分配和管理, 当 AUV 出现电量不足或检测到某个设备工作异常等情况, 则进行节能模式或设备断电等操作。

通过采用分布式 CAN 总线通信网络, 对 AUV 内硬件系统的功能进行划分与设计, 根据实际需求, 可将其划分为多

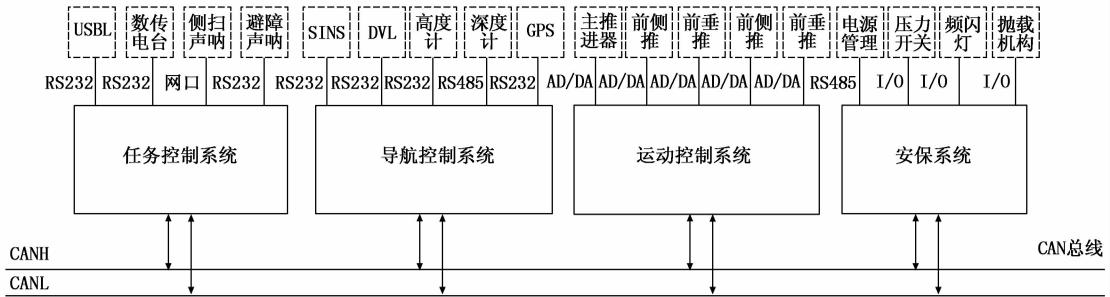


图 2 基于 CAN 总线的分布式控制系统架构

各控制节点，以便能更好地对 AUV 的控制系统进行任务管理与规划，提升 AUV 控制系统工作效率的同时，可大大提高 AUV 在水下航行的生存能力。在划分的各控制节点内，根据所搭载设备的接口要求进行设计，以实现节点与设备的通信。同时，各控制节点间采用 CAN 总线进行通信。对该系统而言，CAN 总线共搭载 4 个控制节点，控制节点间为 CAN 总线通信，节点内与设备间通信采用串口、网口等方式。即在整个分布式控制系统中，采用 CAN 总线通信方式为主，其他通信方式为辅，极大节省了各控制节点的接口资源，提高 AUV 内搭载的各类传感器的处理效率。

AUV 内搭载各种传感器，任一传感器在使用过程中通信链路出现故障都可能会连锁反应，导致其他传感器无法正常使用或影响控制系统正常运行。通过设计的该分布式控制系统，可有效保障 AUV 内控制节点与设备、控制节点间通信链路的实时性与可靠性，基于 CAN 总线的分布式控制系统硬件架构如图 2 所示。

2.3 硬件电路设计

AUV 的控制系统对于硬件的要求较高，在满足高可靠与高性能的基础上，应具备比较稳定可靠的通信链路，并能便于扩展，当根据任务需求，需要增加或减少控制节点时，可在不改变硬件条件的基础上，对控制节点进行增减，并且不会对其他控制节点造成影响。基于此，对各控制节点的主控单元及通信接口等进行设计。

任务层内控制节点的主控器基于 PC104 结构，采用主控电路与通讯扩展的方式进行相关设计，具有多路串口、网口与 CAN 总线接口，可实现任务层中多路任务传感器的数据采集及与其他控制节点间的 CAN 通信。其中主控电路板采用 SCM9602，内部采用 Intel 的超低功耗 E3800 型嵌入式 CPU，主频包括单核 1.46 G 到 1.91 G，板载内存 4 GB，具有 6 路串口，2 路网口。通信扩展板采用 M-CSD，该板具有 4 个光电隔离异步串口及两路 CAN 总线接口，可扩展任务控制节点的接口能力。

此外，其它控制节点采基于 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，1024 KB FLASH，内部集成了 6 路串口与 2 路 CAN 口，可满足各节点设备接口的使用要求。MCU 内部增强型 bx-CAN 控制器支持标准的 CAN2.0A 和 CAN2.0B 协议及远距离传输。正常通信时，

总线传输速率可高达 1 Mbps，CAN 通信接口模块设计是保持正常通信、数据可靠收发的关键。在此选用高集成度和高可靠性的 CAN 隔离收发器 TJA1050 模块，该模块通用性较强，支持任何一种 CAN 通信协议控制器，外围接口电路较为简单，在电路设计时，可直接将其引脚与 MCU 对应的引脚连接即可，不需增加其他调理电路，同时在 CANH 与 CANL 之间接入一个 120 Ω 终端电阻，主要用于进行阻抗匹配，CAN 总线接口电路如图 3 所示。

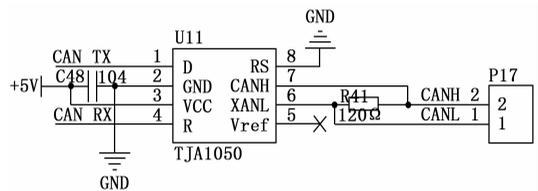


图 3 CAN 总线接口电路

3 控制系统软件设计

AUV 的控制结构主要包括任务层、控制层与执行层。内部划分有 4 个控制微机，分别为任务控制系统、导航控制系统、运动控制系统与安保系统，任务控制系统负责 AUV 的任务规划与管理，用于完成水下避碰、避障与航点规划。导航控制系统负责完成导航信息获取、处理与解算。运动控制系统负责 AUV 的运动控制，进行转速控制与推力控制，为执行层。安保系统负责 AUV 的水下航行安全，在航行过程中，若接收到来自其它控制节点的紧急抛载指令，如系统超时、超深、设备故障等，则触发应急抛载。

为保证 AUV 内部分布式通信系统的可靠性与准确性，对 CAN 总线通信协议进行设计，一个 CAN 节点可控制多路设备，且只需要一个中断号，在简化硬件设计与电气接线的同时，可进一步简化软件设计。AUV 的 CAN 总线通信网络采用 CAN2.0B 标准帧数据格式，总线上搭载的各分系统节点收发的数据为扩展帧和数据帧，并根据各对各节点设置相应的 ID 号。同时为保证数据传输的快速性，CAN 总线只发送控制指令帧、查询帧与 AUV 的状态反馈帧，各系统节点通过 CAN 总线实现指令的收发与状态反馈。通信子程序主要由引脚配置、CAN 总线初始化、指令收发与执行等部分组成。各节点在进行指令接收前，根据设定的 CAN 通信协议进行数据校验，校验通过后则触发中断并接收，数据接收后通过指令报文判断数据指令类型，并执行

软件设计的任务流程。

此外, CAN 总线具有错误检测、错误通知与错误恢复的功能。系统运行时, 检测到错误节点后, 会通知其他节点, 若正在发生信息的节点检测出错误后会进行强制结束, 并不断反复重新发送直至成功。在错误处理过程中, CAN 总线会判断相应的标志位, 对于一般节点, 可对 CAN 控制器进行重新初始化来恢复通信, CAN 总线的软件控制流程如图 4 所示。

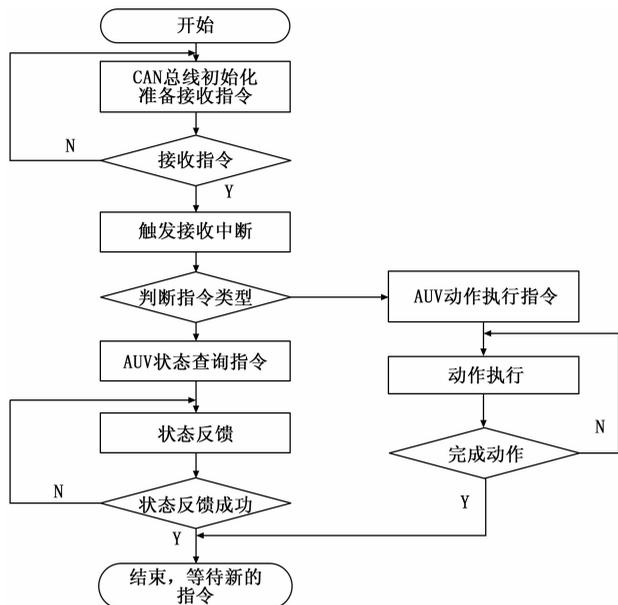


图 4 CAN 总线软件控制流程图

4 实验结果与分析

对 AUV 的 CAN 总线通信网络设计完成后, 进行硬件系统搭建及软件程序设计, 并进行调试、测试与系统集成, 最终对 AUV 进行了湖态试验与验证。本次试验主要的任务是验证该分布式控制系统运行的稳定性与可靠性。试验流程如下: 首先利用地面监控站对 AUV 进行状态检测, 若监测到反馈的 AUV 各项数据信息正常, 则具备水下航行条件。在水面, 通过地面站对 AUV 进行任务装订, AUV 接收指令并执行, 此时 AUV 的水下航行任务为航点跟踪模式。首先 AUV 由起点航行至下潜点, AUV 下潜后, 根据设定的任务流程, 依次按照航点 1、航点 2、航点 3、航点 4 依次进行定深寻点。在航行过程中, AUV 通过前段和后段两个垂直推进器差动进行深度调节, 通过前后两个侧向推进器差动进行航行调节, 以此保证 AUV 在深度和航向上航行的稳定性。

对 AUV 在水下的航行数据进行保存, 并根据航行数据绘制 AUV 在水下的航行轨迹, 如图 5 所示。由图 5 可知, AUV 按照预定航线依次到达航路点 1 至航路点 4, 到达最后一个航路点后上浮, 出水后由地面监控站接管, 并通过数传电台监测 AUV 反馈的状态信息。可以看出, AUV 准确、完整的完成了预设的水下航行任务, 在整个水下航行过程中各控制节点运行稳定, 控制节点间 CAN 总线通信可靠, 具有广阔的工程应用价值。

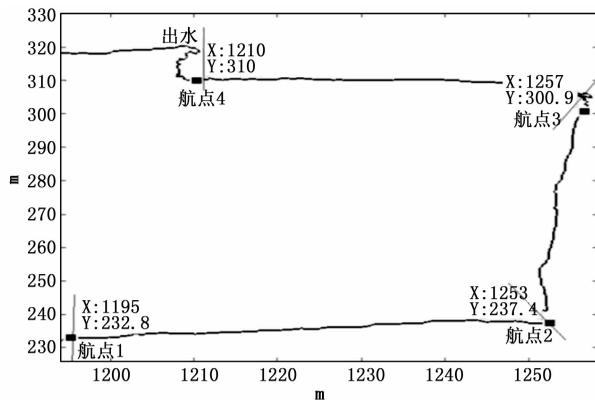


图 5 AUV 航行轨迹

5 结束语

本文提出一种基于 CAN 总线的分布式控制系统设计方案, 并将其集成并应用到实体 AUV 平台, 通过岸上联调测试, 验证该设计方案的可行性与实用性, 并通过一系列的湖试与海试, 该设计方案最终得到有效验证。试验结果表明, 设计的分布式控制系统运行性能良好, 各分控制节点间通信稳定, 在保证 AUV 正常工作的情况下, 亦满足实时性、可靠性与可扩展性的要求, 具有较大的工程应用价值。为进一步满足 CAN 总线通信的高可靠性, 在后续工作中, 需要对 CAN 总线的冗余性与总线切换问题做相关研究, 保证 CAN 总线出现问题后, 通过软硬件的冗余, 进行自动切换, 从而进一步提升分布式控制系统中各控制节点通信的可靠性。

参考文献:

- [1] 王童豪, 彭星光, 潘光, 等. 无人水下航行器的发展现状与关键技术 [J]. 宇航总体技术, 2017, 1 (4): 52-64.
- [2] 马驰飞, 严伟, 胡松. 基于 CAN 总线的运动控制通讯系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (6): 2120-2022, 2025.
- [3] 高剑, 吴普国, 张福斌. 便携式 AUV 分布式控制系统开发与试验 [J]. 控制工程, 2017, 24 (2): 315-320.
- [4] 贺安超, 刘卫国, 马珊. 基于 CAN 总线的多电机嵌入式监控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (7): 1605-1607, 1638.
- [5] 王姜博, 李文新, 幕德俊, 等. CAN 节点通讯及处理的强度测试设计 [J]. 计算机技术与发展, 2011, 21 (6): 189-191.
- [6] 赵永刚, 刘晓霁, 张国义, 等. 基于 CAN 总线的分布式测量系统设计 [J]. 信息化技术, 2013, 4 (2): 62-66.
- [7] 高剑, 严卫生, 赵宁宁, 等. 基于 CAN 总线的水下机器人分布式控制系统 [J]. 中国造船, 2007, 48 (3): 128-133.
- [8] 王力, 王世强. 基于 CAN 总线的 AUV 分布式控制系统 [J]. 水雷战与舰艇防护, 2011, 19 (2): 22-25.
- [9] 吕志刚. 基于 CAN 总线的水下航行器分布式控制系统的研究与设计 [J]. 舰船电子工程, 2015, 4: 147-149.
- [10] 黄时伦, 刘健, 王国权. AUV 内部通讯总线设计 [J]. 机器人, 2004, 26 (4): 342-345.
- [11] 孙韬, 刘宗行, 吴斌. 基于 CAN 总线构成的分布式通信网络的应用 [J]. 重庆大学学报, 2003 (1): 69-72.