

基于 CAN 总线的水下多腿步履式行走装置 电液控制系统设计

郭勇^{1,2*}, 刘宇迪¹, 刘德顺^{1,2}, 王周洋¹

(1. 湖南科技大学 海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 先进矿山装备教育部工程研究中心, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 水下环境压力、通信、负载控制等影响多腿步履式行走装置水下工作控制的可靠性和复杂性, 甚至制约其水下工作功能的实现。针对多腿步履式行走装置水下环境中的工作控制问题, 根据先定向后行走的控制策略提出控制器局域网 (Controller Area Network, CAN) 设备底层与以太网顶层通信相结合的双层复合组网控制方法。采用补偿器进行水下压力补偿, 利用负载流量独立分配控制避免多腿独立动作干扰, 结合 CAN 总线底层采集行走装置状态信息、以太网顶层遥控操作, 设计基于 CAN 总线的水下多腿步履式行走装置电液控制系统, 并在样机中进行应用。应用表明该系统实现了水下行走装置定位的远程化、实时化和自动化, 对提高控制效率, 增强水下定位装置的可靠性具有重要参考意义。

关键词: 双层复合组网; 补偿器; 多支腿独立控制; CAN 总线

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)02-0063-09

Design of Electro-hydraulic Control System for Underwater Multi-leg Walking Device Based on CAN Bus

GUO Yong^{1,2}, LIU Yudi¹, LIU Deshun^{1,2}, WANG Zhouyan¹

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Engineering Research Center of Advanced Mining Equipment of Ministry of Education,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The pressure, communication, and load control of the underwater environment affect the reliability and complexity of the underwater work control of multi-legged walking devices, and even limit their underwater work functions. Aiming at the problem of working control of multi-legged walking device in underwater environment, based on the control strategy of orientation first and then walking, a two-layer composite networking control method combining the communication between the bottom layer of CAN device and the top layer of Ethernet is proposed. Compensator is adopted to improve the underwater pressure compensation, and load flow independent distribution control is used to avoid multi-leg independent control interference. Combining with the state information of the walking device collected from the bottom of CAN bus and the remote control operation from the top of Ethernet, the electro-hydraulic control system of underwater multi-leg walking device based on CAN bus is designed and applied in the prototype. This control system realizes the remote, real-time and automatic positioning of underwater walking device, which has importantly referential significance to improve the control efficiency and enhance the reliability of underwater positioning device.

Keywords: two-layer composite networking; compensator; independent control of multiple legs; CAN bus

收稿日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (5170514; 51779092)

* 通信作者, Email: hnkjdx_guoy@163.com

水下多腿步履式行走装置因其在水下工作稳定性和通过性强,在海洋资源的勘探开发以及水下作业中发挥着重要的作用^[1-2].为实现多腿步履式行走装置的快速定位控制,需要该装置能解耦对多腿进行独立控制,但负载干扰增加了多腿解耦独立控制的难度.此外,随着应用水深的增加,水下环境压力和远距离无损通信都使多腿步履式行走装置水下工作的控制更加复杂,可靠性降低,甚至制约其水下工作功能的实现^[3].

为实现多腿独立控制,陈杰等^[4]设计双腿同步控制液压系统,通过遗传算法解耦控制,显著提升了双腿同步精度,但未考虑水下环境压力对液压系统的影响.在避免水下环境压力影响研究方面,王永鼎等^[5]以 AUV 为例,总结造成水下机器人不易控制的因素,并针对主要技术展开系统论述;WANG 等^[6]设计了用于水下液压系统的压力补偿器,该补偿器用于维持水下液压系统的油箱压力,使该系统能够在任何水深度工作.这些工作为水下多腿支撑装置处理水下环境压力影响提供了可借鉴的思路.随着应用水深的增加,水下环境中设备的密封性能以及海水压力等问题的干扰,要求布线接头尽可能少.为提高系统可靠性,CAN 总线通信以其数据传输效率高、抗干扰能力强、通信可靠等优点在水下装备通信中得到了应用^[7-8].代普等^[9]设计基于 CAN 总线和大容量数据存储的舰炮远程监控系统,提高了监控效率;杨华伟等^[10]以 CAN 总线作为通信方式构建船舶结构安全监测系统,为数据的采集和传输设计合理的通信方案;亢烨等^[11]采用以太数据透明传输的无限激光通信系统,实现无限激光与以太网在数据链路层上的数据透明传输.然而,这些系统主要应用 CAN 总线实现设备底层控制,水下装备控制还涉及视频数据传输、远距离通信以及地面远程操作等.

水下环境中工作的行走机器人液压系统设计和信号传输更为复杂,不仅要考虑水下设备与水上地面的实时通信问题,还要考虑在水下环境中设备的密封性能以及海水压力等问题的干扰.本文针对多腿步履式行走装置水下环境中工作控制的问题,将基于先定向后行走的控制策略提出 CAN 设备底层与以太网顶层通信相结合的双层复合组网控制方法,并采用补偿器进行水下压力补偿,利用负载流量独立分配控制避免多腿独立动作干扰,结合 CAN 总线底层采集行走装置状态信息、以太网顶层遥控操作,设计基于 CAN 总线的水下多腿步履式行走装置电液控制系统,确保水下行走装置定位的远程化、实时化和自动化的实现.

1 多腿步履式行走装置的移动策略

1.1 步履式行走装置结构组成

作为水下搭载平台,水下多腿步履式行走装置的可靠性和快速性是实现搭载设备准确定位的重要保障.多腿步履式行走装置有支撑和行走两大功能,其结构组成如图 1 所示.装置整体由上平台系统、下平台系统、平移回转系统组成.为避免装置虚腿问题,上下平台均为 3 点支撑方式,3 条支腿以 120° 均布于平台支撑架上.平移机构由 2 根线性导轨、4 个滑块、平移油缸及滑动托架组成,滑动导轨固定安装在下机架上,滑动托架通过回转支撑与上机架连接,从而将上下平台连接.行走装置的回转机构由液压马达和回转支撑组成,能够实现行走装置上下支撑平台系统相对转动,从而完成行走装置的转向运动以改变整个装置的行走方向.

1.2 多腿步履式行走装置先定向后行走移动策略

当装置下放到工作环境中,从点 M 移动到另一点 N ,其三维坐标俯视图如图 2 所示,实线三角形表示上平台,虚线三角形表示下平台,结合先定向后行走移动策略,首先根据 M 点和 N 点的相对角度进行转动定向,再根据 M 点和 N 点的相对距离进行移动靠近.

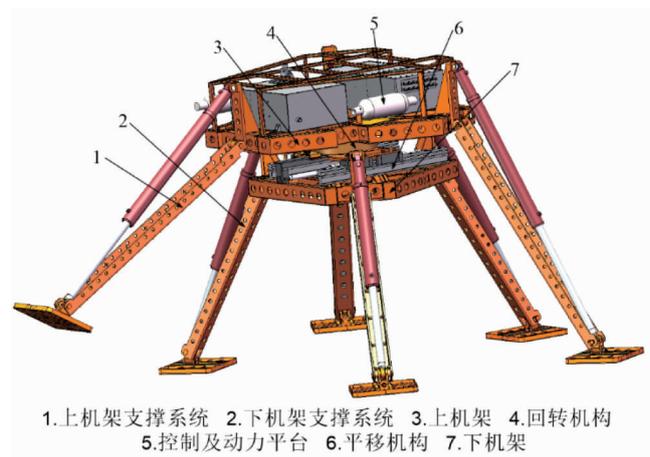


图 1 多腿步履式行走装置

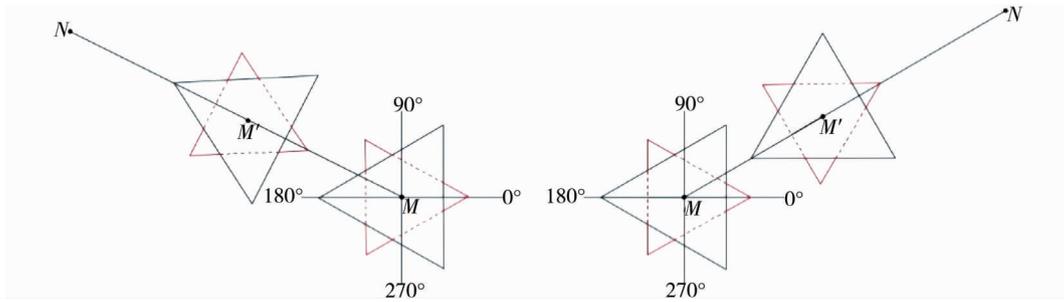


图 2 行走路径分布

行走装置根据先定向后行走移动策略完成移动的具体过程如图 3 所示.初始状态为上支撑腿着地,下支撑腿悬空,首先检测目标点与下平台的相对位置.当目标点与下平台的相对角度处于 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 时,下平台转向,然后下支腿伸出使得下平台系统着地,此时上支腿收缩使得上平台系统抬起,随后上平台进行转向复位,实现系统的转向动作.当目标点与下平台的相对角度处于 $[90^\circ, 270^\circ]$ 时,需要使上平台先进行转向,即下支腿伸出使得下平台系统着地,再使上支腿收缩使得上平台系统抬起,上平台得以进行转向,转过一定角度后,上支撑腿着地,下支撑腿抬起,下平台转向复位,完成系统转向.系统转向完成后,上平台平移,检测装置是否到达目标点,若到达目标点则上支撑腿着地,下支撑腿抬起,下平台移动复位,行走装置完成定位工作;若尚未到达目标点,则上下平台继续进行交替平移运动,即上支撑腿着地,下支撑腿抬起,下平台沿导轨向目标点移动.继续检测行走装置是否到达目标点,若到达目标点,则下支撑腿着地,上支撑腿抬起,上平台进行移动复位,自此行走装置完成一个完整的行程;若尚未到达目标点,则继续重复平移步骤向目标点移动.

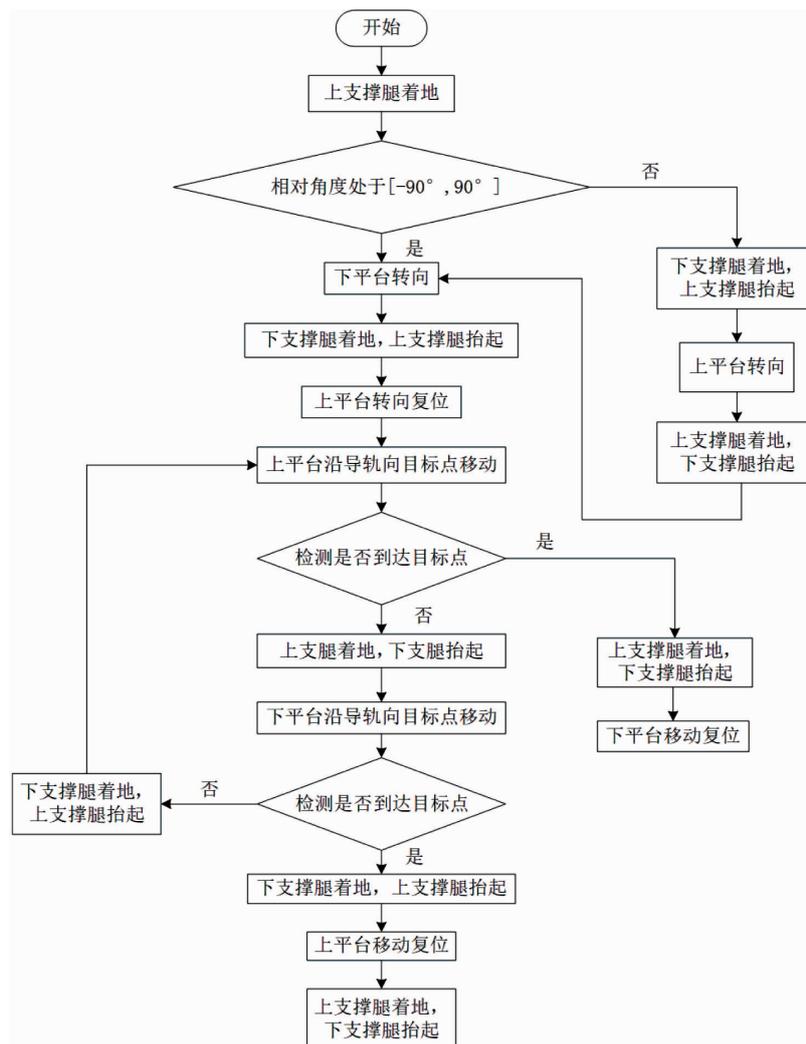


图 3 步履式行走装置工作流程

在多腿步履式行走装置先定向后行走的控制过程中,下平台的旋转角度测量采用电位器式的拉线式位移传感器结合绕线轮,将角度的机械位移转换为直线的电阻输出,根据显示的直线位移计算间接获得,具体如图4所示。

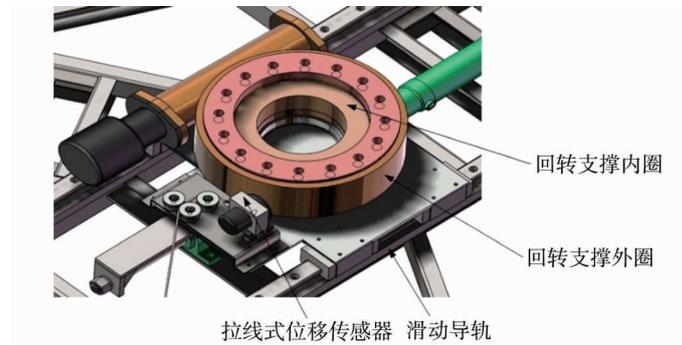


图4 行走装置回转机构

传感器的测量原理可以简化为图5.图5中B点为下平台固定上平台旋转时的起始位置,B'点为旋转过一定角度的终止位置,A点为下平台固定点的位置,O为上平台旋转过一定角度轨迹圆的圆心,R为轨迹圆的半径,r为轨迹圆心至下平台固定点的距离, θ 为起始角度, ε 为上平台旋转角度, d_1, d_2 为传感器的初始长度和最终长度.

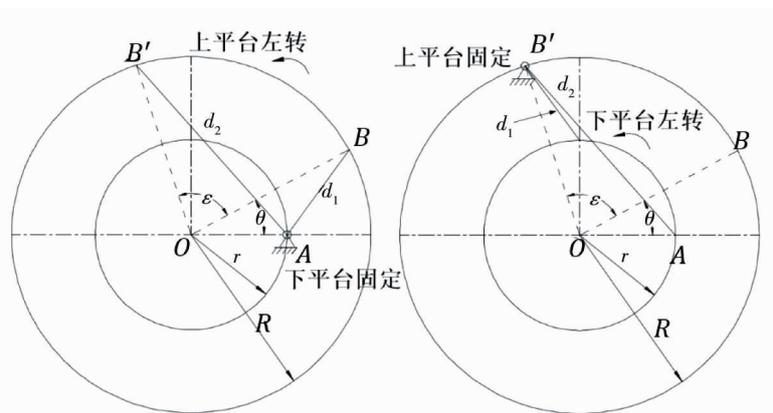


图5 传感器的直线测量原理

由图5可以得到传感器的初始长度和传感器的最终长度,并转化为旋转角度,如式(1)~式(3).

$$d_1 = \sqrt{R^2 + r^2 - 2rR\cos\theta}; \quad (1)$$

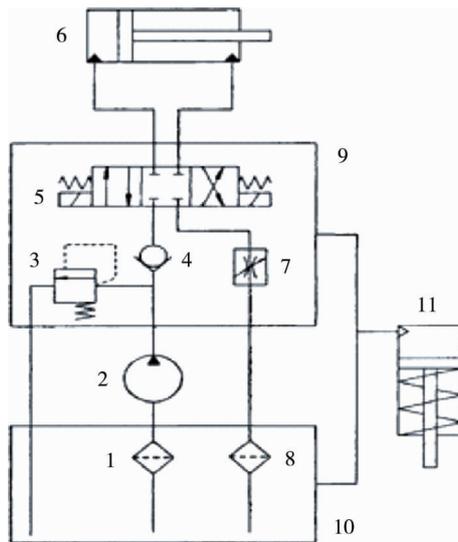
$$d_2 = \sqrt{R^2 + r^2 - 2rR\cos(\theta + \varepsilon)}; \quad (2)$$

$$\varepsilon = \arccos\left(\frac{R^2 + r^2 - d_2^2}{2Rr}\right) - \arccos\left(\frac{R^2 + r^2 - d_1^2}{2Rr}\right). \quad (3)$$

2 多腿步履式行走装置液压系统控制方案

2.1 水下压力环境下液压系统方案概述

行走装置在水下环境中的液压系统需要考虑密封问题.但液压密封元件均属于单向密封元件,即只能防止液压油向壳体外的泄露,直接应用于海水高压环境中时,液压密封元件承受着内外双向压力的作用,对于那些壳体压力较低或接近零压的元件,海水就会很容易侵入整个系统,从而影响整个系统的工作^[12].目前,消除水下环境压力对液压系统的影响,通用的解决办法是水下环境压力补偿^[13-14].采用平衡式的液压系统,通过补偿器对系统压力进行补偿以消除环境压力,原理如图6所示.由于多腿步履式行走装置液压系统工作环境为海平面下3 000 m左右,采用平衡式的液压系统,可以大大减少系统重量及体积,从而适应海水深度的变化,避免系统受水下环境压力影响.



1.滤油器 2.液压泵 3.溢流阀 4.方向阀 5.三位四通换向阀 6.液压缸 7.调速阀 8.滤油器 9.密封装置 10.储油器 11.补偿器

图6 平衡式液压系统

多腿步履式行走装置液压系统采用膜片式压力补偿方式,由图6中的储油器10和补偿器11组成.补偿器11采用的是滚动膜片式压力补偿器,它通过海水与弹簧的共同作用使液压油腔产生补偿压力,具体由壳体、滚动膜片、弹簧及标尺等组成,如图7所示.储油器10既是液压源系统的油箱装置,又是液压元件的密封和安装容腔,起着封装和隔离海水的作用,其体积较大,采用压力补偿的方法使其适应海水压力环境,也就是将储油器设计为薄壁壳体,在补偿器的作用下,储油器对海水压力变化具有实时自动补偿的功能,达到壳体内外压力相等和油箱压力自平衡的目的,补偿原理如图8所示.

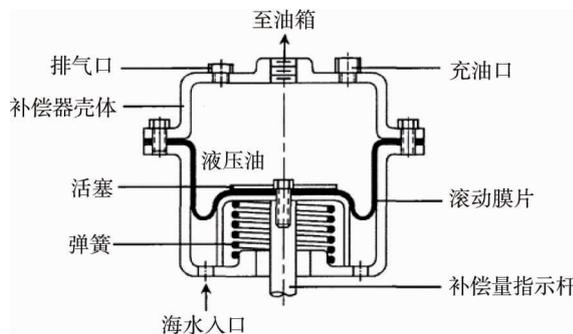


图7 滚动膜片式压力补偿器

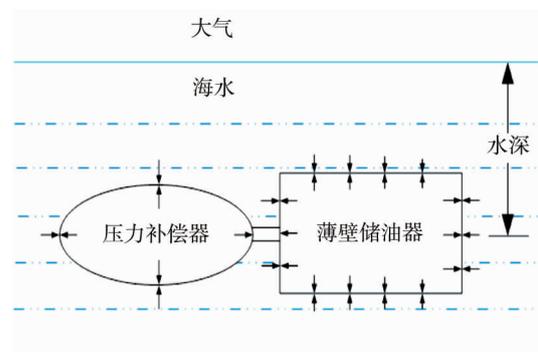


图8 液压源储油器的压力补偿原理

2.2 液压系统工作原理

在装置行走过程中要求上平台和下平台不能同时动作,必须互锁.且为提高工作装置的工作效率,实现快速自动行走和自动调平过程,需要多腿独立动作互不干扰,不受负载影响以实现支腿速度和位置的准确控制.采用定进出口压差控制方式避免多腿负载干扰实现独立控制,具体采用比例换向阀连接定差减压阀使用的两通压力补偿器实现.当几条支腿同时执行动作时,每个执行器均产生一个对应于其负荷大小的PLS压力,液压系统就需要一个至少满足最大载荷所需的压力,因此需要将几个执行器中压力最大的一路作为系统调压的控制油路.应用梭阀将几个不同大小的PSL油压进行比较,最后取最大的PSL油压,从而提高液压系统的效率,减少发热,减少能量消耗,达到对整个行走装置进行热量控制的目的.

液压系统具体设计方案如图9所示,为使进出油口的压力差保持恒定不变,比例换向阀带有两通压力补偿器,负载敏感的比例换向阀实现多支路动作的同时,还可以改善液压系统调速性能.在连接块部分设有三通减压阀,用于向下游阀组供应内部控油,流量调节阀具有阻尼减振作用,可以提高系统的稳定性.系统压力由电磁溢流阀调定,由于存在电器部分,因此电磁溢流阀被集成在阀箱里.

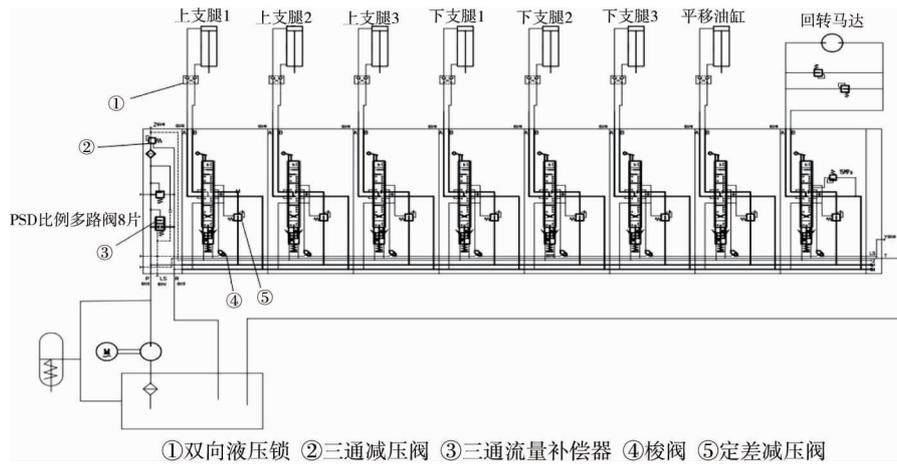


图9 液压系统原理

系统包括 7 路液压控制回路及 1 路马达控制回路.上下支撑装置采用外伸展形式,每个支腿都由独立的液压缸驱动,3 个液压缸的尺寸完全一样,分别布置在支撑架的正上方,形成曲柄摇杆机构.由于下支腿在支撑过程中,每条支撑腿所承受的负载、油缸的伸长变化量都不一样,为了能够与其变化的负载无关地控制执行元件的流量,该流量应当保持恒定,或是按照一个任意比例控制信号以最小的滞后进行变化,这就需要使用负载敏感型比例换向阀,使流量在工作期间与变化的负载持续地匹配,达到系统的控制要求.当负载力或油源压力变化时,通过设置定差减压阀,使节流阀两端压差和流量基本保持不变,从而得到很高的调速刚性.而为了实现执行元件的静态锁止,达到保压和锁定油缸位置的效果,在每条支腿油缸上都设置双向液压锁.

3 多腿步履式行走装置控制系统设计

3.1 远程控制方法和组网方案

对于多腿步履式行走装置来说,在水下环境中,如果仍然采用常规的点对点布线方式,即电线一端与开关相接,另一端与行走装置上的用电设备相通,将会导致整个装置上电线数目急剧增加,从而带来线束的冗余及成本的提高.尤其当行走装置在水下进行作业时,布线数目的增多,会涉及接头处的密封问题且不易于故障原因的寻找与排除,此时如何在大幅减少单点通信线束条件下获取设备的运行数据成为一个需要解决的关键问题^[15-16].控制器局域网(Controller Area Network, CAN)是一种能够实现分布式实时控制的串行通信网络,CAN 的数据总线有 2 条,一条是 CANH,一条是 CANL,采用 CAN 总线网络结构,可以达到信息共享、减少布线、降低成本以及提高总体可靠性的目标^[17].基于 IP 的以太网是一种标准的开放式网络,由其组成的系统兼容性和互操作性好,资源共享能力强,可以很容易实现将控制现场的数据与信息系统上的资源共享.通过采用 CAN 总线底层采集行走装置的状态信息与以太网顶层遥控操作相结合的双层复合组网控制方法,从而实现水下设备同水上操作的远程通信.

行走装置水下定位控制方法如图 10 所示,远程控制部在水面上负责向水下机器人下达作业任务,主要由上位机和遥控器组成;任务控制部采用 CAN 总线技术,仅用一条总线就可以使各个节点接收指令信号,在接收到远程控制部下发的作业任务后,发出行走定位命令控制装置进行水下作业,综合方向信号与设备的位移信号可生成移动路径反馈至远控终端,同时主机可实时根据预规划路径进行自动转向和行进;水下作业部即行走装置实体,由远程控制部通过任务控制部间接完成对行走装置的

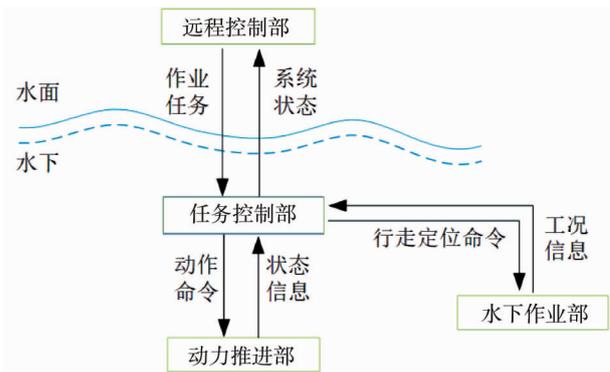


图10 步履式行走装置水下定位控制方法

平移转向、支腿伸缩动作,装置每条支腿与平台的连接架附近都安装有单轴角度传感器,可以通过传感器的反馈快速实现平台调平,从而保证行走装置可以适应较为复杂的海底环境.为便于对水下工作环境的实时监测,在行走装置平台上配备水下 360 度旋转高清云平台监控系统,从而将水下路况及行走装置的工作情况实时反馈至地面,实现对行走装置的远程监控.多腿步履式行走装置在水下环境中由远程无线控制系统、远程视频检测及传输系统组合完成对装置的自动调平、方向定位、路径跟踪及规划的定位工作.

作为无线通信系统的重要组成部分,行走装置组网方式如图 11 所示,利用遥控器和上位机借助路由器构成以太网顶层遥控操作系统,基于 CAN 总线技术在底层采集行走装置状态信息,而要实现顶层 IP 网络和底层 CAN 网络的互相连通,则需要借助 CAN 转 WiFi 设备,从而实现对行走装置的远程无线控制;检测装置主要利用在装置平台上安装的高清防水摄像头,将行走装置在水下环境中的工况视频进行远程传输,实现对行走装置的实时远程监控;要实现行走装置的定位工作还需要动力的推进,将带有动力缆的绞车同样下放到水下环境中,电力通过置于脐带缆内部的电缆从海面传输到海底,为行走装置提供动力.根据上述组网方式,控制系统集成 433 MHz 远程无线遥控系统,可在 100 m 范围内任何方向进行操作.

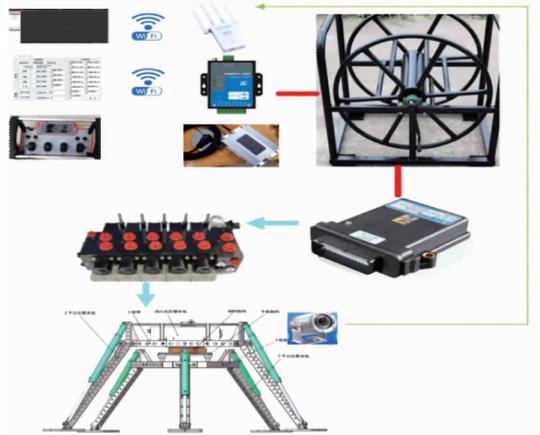


图 11 控制系统网络架构

3.2 CAN 总线接口电路

控制系统 CAN 控制器采用 SPC-STW-1612CMS 移动控制器,控制器输出的串行信号通过 CAN 接口电路和外部的 CAN 总线相连,该控制器具备 3 路 CAN 总线,1 路 RS232 串口通信,26 路 IO 资源,输入端口可采集高低电平、电压、电流、脉冲等信号,同时端口还复用输出资源,可直接驱动电磁阀.CAN 总线底层接口电路如图 12 所示,输出的 CANH 和 CANL 信号,通过双绞线连接于 CAN 转 WiFi 设备,实现 CAN 网络和 IP 网络之间的互联互通,从而将 CAN 设备发送的数据传输给所有链接成功的节点.当控制系统位于控制总线末端时,为实现信号源和传输线的阻抗匹配,减少总线信号的传输反射,提高系统通讯可靠性,控制系统 CAN 接口电路需要配置 120 Ω 的终端电阻.

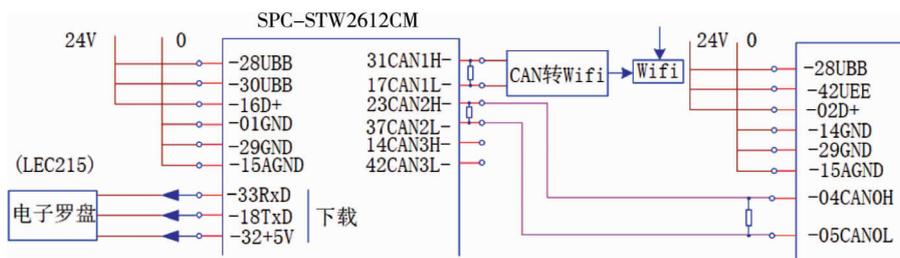


图 12 CAN 通信电路

通信系统接线图如图 13 所示,主要包括远程遥控的工业遥控接收器、用于降低输入电压的 NDK-200 变压器、用于连接 CAN 网络和 IP 网络的高性能两通道 CAN 与 WiFi 转换器 and 供电系统.

3.3 远程控制系统界面设计

Visual Basic 是一种通用的基于对象的程序设计语言,拥有图形用户界面和快速应用程序开发系统,应用 Visual Basic 提供的组件可以快速地为水下多腿步履式行走装置的监控系统建立一个应用程序.远程监控操作系统包括手动控制和自动控制部分,首先进行通讯联机,当选择手动控制时,行走装置上平台和下平台的动作是互锁的,选择上平台或下平台动作之后,行



图 13 通信系统接线

走装置的平移和回转运动互锁.在手动控制条件下,支腿的伸出和缩回也是互锁的,支腿在动作时同时显示通过 CAN 总线传输的支腿的运动速度数据.行走装置自动控制包括自动调平和自动行走控制,行走方向和位移同样由 CAN 总线反馈的数据进行显示,整个操作的手动控制和自动控制互锁.系统的监控数据主要包括整个装置的系统压力、平台的平转压力、各个支腿收到的压力和支腿伸缩位移、平台平移位移、平台回转角度、平台沿坐标轴的倾角,监控系统界面如图 14 所示.

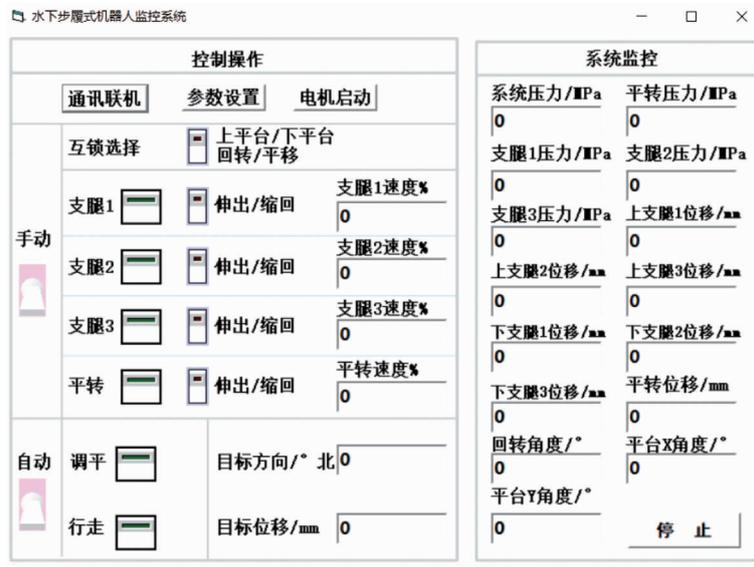


图 14 行走装置监控系统界面

4 装置行走测试试验

为测试控制系统的有效性及其稳定性,在多腿步履式行走装置的样机上进行行走测试试验,同时为装置添加适当压力以模拟水下环境.初始状态将装置下放到地面,测试上平台系统着地,即上支腿伸出,下支腿缩回,下支撑系统可以绕轴心左右转动,从而改变行走装置的前进方向.在多变的水下环境下,有时还需要对装置进行调平工作,待装置平台达到水平状态后,下平台支撑系统沿导轨平移前进,行走一个行程后下支腿伸出,上支腿缩回,上支撑系统抬起,完成下一个循环.在行走装置上平台的动力及控制平台上伸出的脐带缆与绞车连接,从而为行走装置提供动力.



图 15 行走测试试验

5 结论

1) 液压系统采用带有补偿器的负载敏感型比例多路换向阀实现多支腿独立动作不相干扰,利用CAN设备底层与以太网顶层通信相结合的双层复合组网控制方法完成对水下行走装置的远程监测和控制。

2) 控制系统通过CAN总线技术减少水下布线的冗杂及发热等带来的成本增加问题,同时可以实时采集行走装置的在线状态信息。

3) 该电液控制系统对于水下定位装置的状态检测和远程控制系统具有重要的意义,通过该系统可实现行走装置的远程、实时、在线的状态检测和定位控制,提高了行走装置的定位精度和工作效率。

参考文献:

- [1] SAHOO A, DWIVEDY S K, ROBI P S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2019, 181: 145-160.
- [2] 何彦霖,董明利,孙广开,等.复合式驱动小型两栖机器人水下运动控制研究[J].仪器仪表学报,2019,40(1):219-226.
- [3] 高清泽,包吉明,彭飞.一种低频远程水下遥控平台的设计[J].电子测量技术,2019,42(14):137-141.
- [4] 陈杰,泮进明.基于误差反馈的双缸液压系统同步模糊PID控制系统设计[J].锻压技术,2022,47(3):142-145.
- [5] 王永鼎,王鹏,孙鹏飞.自主式水下机器人控制技术研究综述[J].世界科技研究与发展,2021,43(6):636-648.
- [6] WANG F, CHEN Y. Dynamic characteristics of pressure compensator in underwater hydraulic system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 19(2): 777-787.
- [7] BOZDAL M, SAMIE M, ASLAM S, et al. Evaluation of CAN bus security challenges[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2364.
- [8] HAFEEZ A, MALIK H, AVATEFIPOUR O, et al. Comparative study of can-bus and flexray protocols for in-vehicle communication[C]. SAE Technical Paper, 2017.
- [9] 代普,李永锋,韩建刚,等.基于CAN总线和大容量数据存储的舰炮远程监控系统设计[J].兵工学报,2022,4(6):1-8.
- [10] 杨华伟,万正权.CAN总线在船舶结构安全监测系统中的应用[J].电子测量与仪器学报,2014,28(5):553-559.
- [11] 亢焯,柯熙政,邱昌佩.基于以太数据的无线激光通信系统透明传输设计[J].电子测量与仪器学报,2017,31(5):700-707.
- [12] WU J B, LI L. Influence of ambient pressure on sealing performance of O-ring in deep-sea hydraulic system[J]. Ocean Engineering, 2022, 245: 110440.
- [13] LI Y, WANG Q. Research on the pressure compensation for the underwater hydraulic motor[J]. Underwater Technology, 2005, 26(3): 89-96.
- [14] 刘银水,吴德发,李东林,等.深海液压技术应用与研究进展[J].机械工程学报,2018,54(20):14-23.
- [15] 陈健瑞,王景璟,侯向往,等.挺进深蓝:从单体仿生到群体智能[J].电子学报,2021,49(12):2458-2467.
- [16] 续丹,余雷,胡桥,等.水下机器人集群通信系统设计及实验分析[J/OL].西安交通大学学报,2022:1-10 [2022-04-06].
- [17] DOMINGO M C. An overview of the internet of underwater things[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(6): 1879-1890.