

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.05.015

马文字, 刘立刚, 王玉甲, 等. 基于重量调节式的浮力调节技术研究 [J]. 机电工程技术, 2024, 53 (05): 64-69.

## 基于重量调节式的浮力调节技术研究\*

马文字<sup>1</sup>, 刘立刚<sup>1\*</sup>, 王玉甲<sup>2</sup>, 刘星<sup>2</sup>, 林田<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 哈尔滨工程大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对部分水下机器人需要搭载浮力调节系统调控重浮力进行姿态调节或是降低功耗等需求, 对浮力调节技术进行研究, 旨在提高系统调节精度。指出影响系统调节精度存在两方面因素: 一为定量充排的准确性, 二为系统在压力作用下的形变大小。通过分析现阶段各调节方式对提高调节精度要求的适用性后, 以重量调节式中的液压泵-压载水舱式为研究对象, 分析系统内部各组成单元对调节精度的影响。构建液压回路, 研制浮力调节装置, 设计模糊PID控制器提升系统的响应速度及抗干扰能力, 进行陆上及水下定量充排实验。结果表明系统的调节误差可控制在给定允许误差范围之内且将平均误差控制在5%以下, 验证了所研究技术的可行性。为后续高精度浮力调节系统的开发提供有益参考。

**关键词:** 重浮力调控; 定量充排; 系统形变; 模糊PID

中图分类号: TH137

文献标志码: A

文章编号: 1009-9492(2024)05-0064-06

## Research on Buoyancy Regulation Technology Based on Weight Adjustment

Ma Wenyu<sup>1</sup>, Liu Ligang<sup>1</sup>, Wang Yujia<sup>2</sup>, Liu Xing<sup>2</sup>, Lin Tian<sup>2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In view of the requirements that some underwater vehicles need to be equipped with buoyancy regulation system to accurately regulate gravity and buoyancy for attitude regulation or reduce power consumption, the buoyancy regulation technology is studied in order to regulate buoyancy with high precision. Two factors affecting the adjustment accuracy of the system are proposed: one is the accuracy of quantitative charging and discharging, and the other is the deformation of the system under pressure. After analyzing the applicability of various adjustment methods to improve the adjustment accuracy, taking the hydraulic pump-ballast tank as the research object, analyzing the influence of various components in the system on the adjustment accuracy. Building the hydraulic circuits, develop a buoyancy control device, design a Fuzzy-PID controller to improve the response speed and anti-interference ability of the system and carry out onshore and underwater experiments. The results show that the adjustment error of the system can be controlled within the given allowable error range and the average error is controlled below 5%, verifying the feasibility of the studied technology. It provides a useful reference for the subsequent development of high-precision buoyancy control system.

**Key words:** gravity and buoyancy regulation; quantitative charging and discharging; system deformation; fuzzy-PID

### 0 引言

随着海洋开发进程的不断加快和液压技术的不断推广, 各类水下机器人的研制也是蓬勃发展<sup>[1-3]</sup>。当水下机器人在工作时, 自身的重浮力会发生动态变化, 如取样或布放设备导致自身重量改变、海水密度变化等情况都会对水下机器人的重浮力产生影响<sup>[4]</sup>, 改变机器人的水下姿态, 影响控制性能和作业能力。针对上述问题, 水下机器人可以选择搭载浮力调节系统来对重浮力进行动态调整。

浮力调节系统能够辅助或主导水下机器人进行水中悬停、定深控制、姿态调节等动作<sup>[5-7]</sup>。浮力调节系统主要分为体积调节式和重量调节式<sup>[8]</sup>。体积调节式通过改变系统自身排水体积来调节浮力, 主要为油囊式和相变式; 重量调节式通过改变系统自身重量来调节重力, 主

要分为抛载式和液压泵-压载水舱式。浮力调节系统的调节精度受定量充排的准确性和压力作用下系统形变量的大小影响。相变式中相变材料的相变过程不易掌控<sup>[8-9]</sup>, 油囊式中油囊的不规则形状和弹性材料导致其在体积变化过程中自身产生的形变量难以计算, 抛载式又不具备连续可调性, 这些都会对系统的调节精度造成影响。而液压泵-压载水舱式在控制系统定量充排的同时, 刚性材料制作的压载水舱可通过计算分析得到体积变化量, 观察在压力作用下的形变量对自身浮力产生的影响。

因此, 本文以液压泵-压载水舱式调节方式为研究对象, 对基于重量调节式的浮力调节技术进行研究。分析系统内部各组成部分对调节精度的影响, 对舱体变形抑制及介质充排过程的控制算法进行研究, 研制浮力调节装

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52201357)

收稿日期: 2023-12-07

置, 进行陆上及水下实验, 验证所研究技术的可行性。

### 1 系统分析

针对液压泵-压载水舱式调节方式, 其系统组成如图1所示。系统主要由动力单元、执行单元和其余元件组成: 动力单元主要为液压泵及其驱动电机、驱动器、过滤器和安全阀; 执行单元为阀组和驱动器; 规划器、控制器和传感器构成系统的控制回路, 规划器通常为浮力调节系统搭载的机器人上位机, 规划器下发充排量指令, 对指令的分析和指导系统动作的计算都在控制器中进行。通过分析系统组成可知, 动力单元、执行单元、控制器和传感器会对系统定量充排的准确性造成影响, 系统舱体包括压载水舱则是压力作用下自身的形变量会对浮力造成影响。

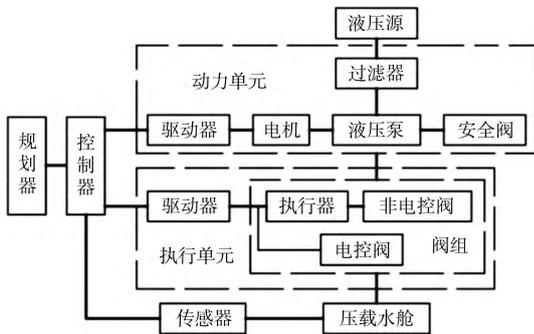


图1 系统组成

## 2 调节精度影响因素研究

### 2.1 动力单元

#### (1) 电机

电机作为系统的驱动元件, 其控制精度的高低对系统有着至关重要的影响, 表1所示为各类型驱动电机对比分析。

表1 各类型驱动电机对比分析

电机类型	步进电机	直流无刷电机	交流永磁同步电机
控制精度	较高	高	高
负载能力	弱	高	高
速度响应	差	好	好
供电电压	低	低	高
使用成本	低	较高	高

步进电机的控制精度受步距角影响, 通过细分驱动技术减小步距角来提高电机控制精度<sup>[10]</sup>。相比于伺服电机, 步进电机的控制精度较低, 且最大转速较小, 高转速时易出现啸叫现象, 使用步进电机难以提高系统调节精度。伺服电机是液压系统控制中常用的驱动元件, 主要分为交流永磁同步电机和直流无刷电机, 交流永磁同步电机的供电电压高, 适合在大功率(一般超过500W)浮力调节系统中使用<sup>[11]</sup>; 直流无刷电机精度高, 响应快, 对小功率的浮力调节系统控制有利。

### (2) 液压泵

液压泵是此类浮力调节方式的核心元件, 泵的选择决定系统性能, 要求泵具有良好的密封性、耐腐蚀性, 避免泄露和气穴现象。表2所示为各类型液压泵对比分析。

表2 各类型液压泵对比分析

液压泵类型	叶片泵	齿轮泵	柱塞泵	液压泵类型	叶片泵	齿轮泵	柱塞泵
总效率	高	较低	高	可靠性	较低	高	较高
对污染敏感程度	高	低	高	工作压力	较高	较低	高
密封性能	较高	较低	高	使用成本	较高	低	较高
使用寿命	长	短	长				

齿轮泵的耐腐蚀性好, 可靠性高, 造价低, 但其密封性能较差, 齿轮啮合时轮轴受到很大的不平衡径向力, 使用寿命短, 容易引起流量和压力脉动<sup>[12]</sup>; 叶片泵对污染敏感, 对转速有着严格要求, 以保证其具有足够的离心力, 否则易产生气穴现象, 使其性能下降甚至损坏<sup>[12]</sup>; 柱塞泵内部的关键摩擦多为面摩擦, 应具备更好的密封性能。在泵选型时, 其密封性能是重点考虑因素, 若泵发生泄漏, 会对系统调节精度影响很大。因此对于调节精度要求高的浮力调节系统, 应首先考虑使用柱塞泵。在目前水下机器人的浮力调节系统中, 大部分使用的都是柱塞泵, 柱塞泵是目前商业化最好的海水泵<sup>[13]</sup>。

### 2.2 执行单元

执行单元中的阀组对系统调节精度有着重要影响, 阀组要具备良好的密封性, 不会出现泄露等现象, 同时要具备足够的耐腐蚀性与耐压性, 保证系统能够正常工作。

执行单元中的阀组主要承担液压回路中的通路切换功能。阀组换向时, 可选用高精度换向阀如电磁换向阀、液动换向阀或电液换向阀等, 但此类阀门对工作介质的清洁度要求都比较高且使用时液压回路构建也比较繁琐。目前在液压回路中多使用4个两位两通的电磁开关阀两两组合工作进行代替来实现通路的切换, 如“蛟龙号”浮力调节系统<sup>[6]</sup>。但是使用电磁阀需要考虑随着工作的开展, 系统电压不稳或下降时磁性受到影响, 影响电磁开关阀使用性能的问题。同时, 电磁阀大部分都是使用在陆地上的低压设备中, 而高压电磁阀大都是单向进出不能颠倒使用<sup>[14]</sup>。

针对此问题, 本文提出一种改造手动换向不锈钢L型三通球阀的自动换向方案, 如图2所示为球阀驱动模型。球阀与同为316L材质的三通面板安装在阀门安装架上, L型三通球阀有通路关断的中位状态, 手柄旋转90°即可实现换向。通过旋紧外部螺帽挤压内部的前、后两个卡套, 使管路产生局部凹陷变形, 形成锥面密封防止泄露。将球阀手柄拆掉, 通过转接盘及机械连接将球阀阀芯与舵机回转轴连接, 由舵机驱动球阀换向。舵机安装在舵机安装架上, 两个安装架具有良好的垂直度, 避免舵机

回转中线与阀芯中线不重合时导致舵机的无效扭矩变大,增加舵机使用时的的工作扭矩。

利用两个L型三通球阀代替4个两位两通的电磁开关阀进行通路切换,球阀能够满足双向需求,工作压力能达到几十MPa甚至上百MPa。改造后的方案能够降低系统的使用成本,提升系统空间利用率,进一步提高系统的耐腐蚀性,有利于提高系统的调节精度。

球阀在换向过程中的开闭角度会影响流量大小从而影响系统的工作效率,因此本文对球阀开闭过程的角度误差进行了检测,实验结果如图3所示。在20次的实验中,阀门的开闭角度平均误差为 $2.3^\circ$ ,角度误差很小,对阀门的工作状态影响可忽略不计。



图2 球阀驱动模型

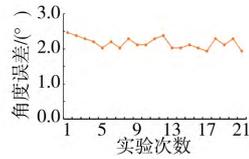


图3 角度误差变化曲线

### 2.3 传感器与控制器

传感器与控制器构成系统内部的闭环控制,决定了系统定量充排的准确性。传感器可选择流量计、液位计和压力传感器。流量计的测量属于相对测量,会有累计误差的产生,对系统提高调节精度有着不利影响;液位计测量属于绝对测量,能够避免累计误差产生,但是考虑当系统在水中姿态发生变化且舱内水量较多时,液面晃动可能导致液位计反馈的数值不能代表真实情况;压力传感器与液位计一样属于绝对测量,置于水舱内部测量内部压力变化,可忽略液位的变化,压力与水量的对应关系可根据气体理想状态方程得到,同时为降低温度的影响合理设置水舱容积,避免气体剧烈压缩或膨胀导致温度变化过大。控制器是提高系统调节精度的核心部件,控制算法的选择直接影响系统定量充排的准确性。

### 2.4 系统舱体

系统舱体的形变会导致系统自身的排水体积发生变化,从而影响系统所提供的浮力大小。为提高浮力调节系统的调节精度,要尽可能的抑制舱体形变,降低形变对调节精度的影响。

通常为减轻重量和节约资源,在舱体设计时允许有一定的形变量存在,但是要控制形变量在允许范围内,不会对自身浮力变化产生严重影响。浮力调节系统舱体通常设计为圆柱形舱体,因为圆柱形舱体水下耐压性更好,少数设计也因空间、重量限制设计为方形舱体。本文针对圆柱形舱体和方形舱体两种类型,对舱体设计时的形变抑制方法进行研究。

#### (1) 圆柱形舱体

圆柱形舱体是浮力调节系统常用的外壳形式,为节省材料,降低成本,提高耐压能力,一般圆柱形舱体为

薄壁短圆筒形式来使舱体满足耐压使用要求,即设计压力小于临界压力<sup>[15-16]</sup>:

$$P_{cr} = 2.59E \frac{(t/D)^{2.5}}{L/D} \quad (1)$$

$$P_c \leq \frac{P_{cr}}{m} \quad (2)$$

式中: $P_{cr}$ 为临界压力,MPa; $P_c$ 为设计压力,MPa; $E$ 为弹性模量,MPa; $t$ 、 $D$ 、 $L$ 分别为舱体壁厚、直径与长度,mm; $m$ 为安全系数,根据国家标准对于 $D/t > 20$ 的薄壁圆筒取安全系数 $m$ 值为3.0<sup>[15]</sup>,所以可得到圆柱形舱体的许用稳定压力为:

$$[P] = \frac{P_{cr}}{m} = 0.863E \frac{(t/D)^{2.5}}{L/D} \quad (3)$$

对式(3)进行推导可以得到在压力 $P$ 的作用下,舱体对应的最小壁厚 $t_{min}$ 的值,如式(4)所示:

$$t_{min} = 1.06D \left( \frac{PL}{DE} \right)^{0.4} \quad (4)$$

通过计算得到圆柱形舱体的最小壁厚后,在设计舱体时会在此基础上适当放大壁厚值,但若舱体均采用放大的壁厚值,一些受力较小的位置并不需要较大的壁厚,会造成材料浪费和系统重量增加。所以,在计算出最小壁厚的基础上,对仿真软件下的系统薄弱地方再进行局部加强,增加加强圈。进行加强圈操作时,注意:加强圈要有足够的截面积和惯性矩确保加强圈能够与舱体一起承受外压作用;受加工成本等因素制约时,为节省材料,避免资源浪费,可选择采取焊接工艺直接在舱体外围增加加强圈,当焊接加强圈存在尺寸干涉需要进行间断时,要保证总焊接长度大于舱体外围周长的1/2。

#### (2) 方形舱体

方形舱体耐压性能相比于同尺寸的圆舱来讲相对较弱,但是有些设计受到空间与重量的限制要求,方形舱体在同等条件下的体积更小,重量更轻,更具有使用优势。为降低加工成本和节约资源,方形舱体可采用矩形薄板焊接而成。因此,对方形舱体变形量的分析可转换为对其组成单元矩形薄板最大挠度的分析。焊接后的矩形薄板可看做四边固支的矩形板,通过分析挠度函数及最小势能原理,可以知道对于四边固支的矩形板,在板中心位置产生的压应力最大,会发生最大的挠度变化,可按式(5)计算<sup>[17]</sup>。

$$w_{max} = k \frac{Pb^4}{Et^3} \quad (5)$$

式中: $b$ 为矩形薄板的宽度,mm; $E$ 为薄板弹性模量,MPa; $P$ 为薄板所受外压,MPa。 $k$ 是一个无因次参数,其值只与矩形薄板的长宽比 $a/b$ 有关, $k$ 的取值可按表3选取。

将方形舱体的强度分析转换为其焊接单元矩形薄板的强度分析,找到矩形薄板产生最大挠度的位置,通过控制矩形薄板最大挠度的变化来控制舱体变形量。结合

表3 k值与a/b值关系对照表<sup>[17]</sup>

a/b	k	a/b	k	a/b	k
1	0.013 8	1.5	0.024	2	0.027 7
1.1	0.016 4	1.6	0.025 1	3	0.027 9
1.2	0.018 8	1.7	0.026	4	0.028 2
1.3	0.020 9	1.8	0.026 8	5	0.028 4
1.4	0.022 6	1.9	0.027 2	∞	0.028 4

多次设计及加工的经验, 初始设计矩形板时应将最大挠度控制在0.5 mm以下。因判断矩形板变形是否会导致方形舱体的体积发生较大变化时, 以其最大挠度为衡量标准, 因此可对式(5)进行推导, 得到满足最大挠度控制要求下的最小板厚, 如式(6)所示:

$$t_{\min} = \sqrt[3]{\frac{2kPb^4}{E}} \quad (6)$$

在最小板厚的基础上, 结合仿真软件, 在薄弱环节局部增加厚度, 形成肋板式。进行加肋操作时: 加肋刚度小于其临界刚度, 否则会使得肋与板一起受压弯曲, 未起到提升矩形薄板刚度作用<sup>[18]</sup>; 加肋位置应尽量靠近受力集中区域, 肋距受力集中位置越远, 提升结构刚度的效果越小; 多次加肋进行仿真操作后发现, 相比于加肋的数量和宽度, 肋的高度对结构刚度的影响更大, 加肋的高度应为板厚的2倍以上。

本节考虑了受压状态下舱体变形对系统自身排水体积即对浮力的影响, 对圆柱形和方形两种舱体设计时抑制变形的研究方法进行了研究, 可以减少多次仿真校验形变量大小和反复试算结构尺寸的过程。

### 3 总体方案研究

在对系统内影响调节精度的各部分进行分析研究后, 搭建液压系统, 研制浮力调节装置, 验证所研究技术的可行性。

#### 3.1 液压原理

搭建液压系统, 液压原理如图4所示, 系统工作状态分为初始状态、充水状态以及排水状态。

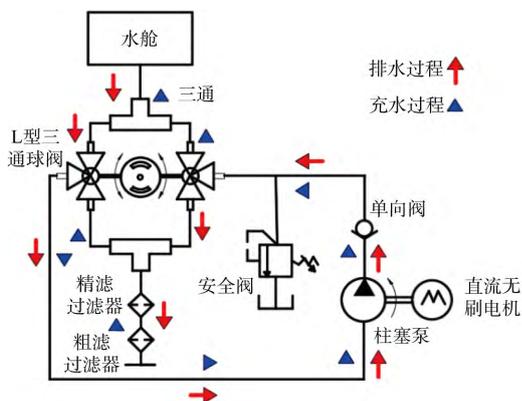
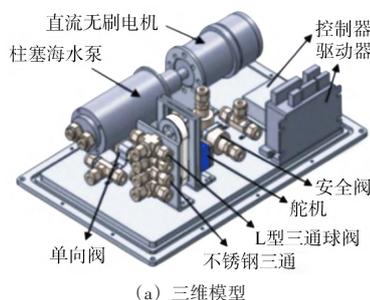


图4 液压原理

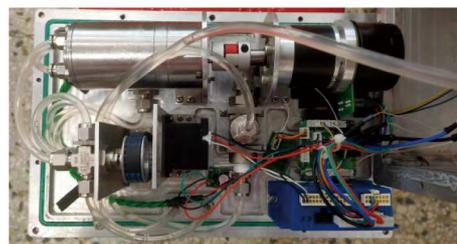
初始状态为系统下水状态, 即初始液面为0浮力液面, 球阀设置中位即球阀处于关断状态, 液压回路关断; 充水时球阀在舵机带动下, 阀门打开, 介质经粗滤、精滤两个过滤器后进入泵中, 泵向水舱内充水, 系统提供负浮力, 压力传感器监测水舱内压力值, 反馈当前水舱内实际水量值。充水完毕后, 电机停转, 泵停止工作, 舵机带动球阀返回中位, 保压; 排水状态时, 阀门反向打开, 泵向外界排水, 系统提供正浮力, 排水过程中对过滤器进行反吹, 防止堵塞, 压力传感器反馈实际水量值。排水完毕后, 电机停转, 泵停止工作, 舵机带动球阀返回中位, 保压。

#### 3.2 系统组成

系统三维建模及实物如图5所示。液压动力源为单向柱塞泵, 驱动电机为直流无刷电机, 充排水过程的切换由舵机驱动L型三通球阀内部换向来实现。单向阀防止倒灌, 安全阀保证整个系统的安全性, 具有紧急泄压的作用。舱内部置有漏水检测线, 监测系统内部的密封情况, 水舱内压力传感器监测水舱内部的绝对压力。以单片机STM32F405RGT6作为下位机主控核心, 系统模块化处理, 只需载体24 V供电和发送充排量指令, 系统便可对指令解码进行动作, 并将舱内实时水量及漏水检测信号通过RS232串口通信反馈到上位机。



(a) 三维模型



(b) 实物

图5 系统模型及实物

#### 3.3 控制技术

如图6所示为系统控制框图, 上位机向控制器发送充排量指令后, 控制器分析指令判断提供浮力类型以后, 驱动器驱动电机带动泵进行工作, 压力传感器时刻读取压力值返回给主控器, 经过数据转换后向上位机传输实时水量值。

控制算法的设计直接影响系统定量充排的准确性,

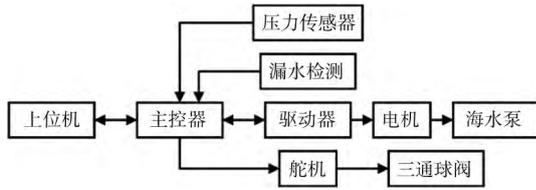


图6 系统控制框图

PID控制算法是工程上应用成熟及广泛的控制算法，但结合浮力调节系统工作时环境变化复杂的情况，使用PID控制器得到的结果也是忽略一些不确定因素得到的理想结果<sup>[19-20]</sup>。因此，对PID控制算法再进行优化，引入模糊控制方法，利用水量偏差 $e$ 及偏差变化率 $e_c$ 设计二维模糊PID控制器，并与PID的控制结果进行对比分析，如图7所示为模糊PID控制器控制框图，利用MATLAB搭建Simulink模型如图8所示。

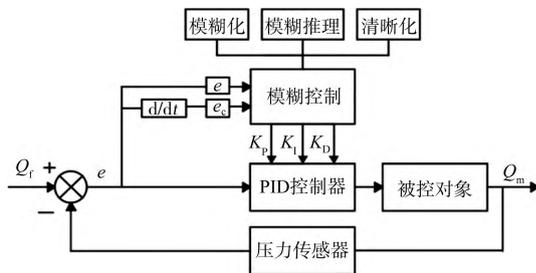


图7 模糊PID控制器控制框图

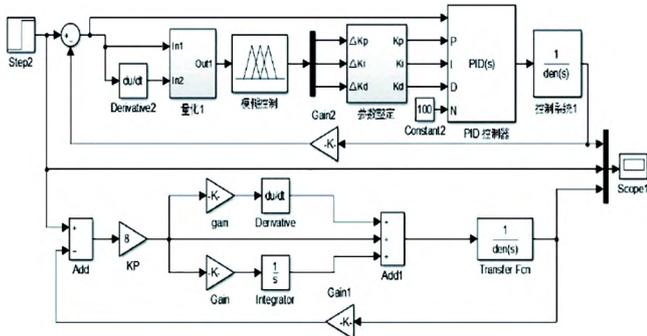


图8 Simulink模型

对系统在无控制算法、PID控制器下以及模糊PID控制器下分别进行阶跃响应实验及抗干扰实验，仿真实验结果如表4所示。由表可看出，与PID控制算法相比，在本文设计的模糊PID控制器作用下，系统响应速度加快，响应时间提升1.3 s，干扰下幅值变化减少了1.24%，干扰后回稳时间减小了40%，进一步提高了系统的控制性能，有利于提高系统的调节精度。

表4 仿真实验结果对比分析表

项目	无控制算法	PID控制器	模糊PID控制器
响应时间 /s	12	2	0.7
幅值变化 /%	20.03	3.53	2.29
稳定时间 /s	9	1	0.6

### 4 实验研究

为验证系统的调节精度，对研制的浮力调节装置分别进行陆上及水下充排实验，允许最大调节误差为 $\pm 0.1$  L，水下实验环境为10 m深水池。

在对系统进行定量充排实验前，考虑舱体变形对自身浮力的影响，根据上文对舱体变形抑制的研究，分别设计相应的圆形舱体及方形舱体。通过式(4)及式(6)的计算以及仿真分析后。圆柱形舱体变形带来的排水体积变化近似为16.07 g；方形舱体最大挠度变化0.45 mm，舱体变形带来的排水体积变化近似为11.3 g。两舱变形带来的排水体积变化都很小，综合考虑实验载体的体积与重量限制后，本文选用方形舱体进行后续实验，如图9所示为方形舱体实物。



(a) 方形舱体外观 (b) 方形舱体内部

图9 方形舱体实物

研制的浮力调节装置采取集成设计，将方形舱体内部划分为两部分，上层为水舱，下层为放置各元件的元件舱，中间用焊接的倾斜肋板进行分隔，隔板上装有快插接头，供介质在水舱和泵之间流通。舱体材料为航空用铝合金，并进行阳极氧化处理提高耐腐蚀性，舱壁安装定制水密头进行数据传输及供电。

在对系统舱体按照舱体变形抑制方法进行设计降低排水体积变化对调节精度的影响后，对系统的定量充排特性进行陆上及水下实验。

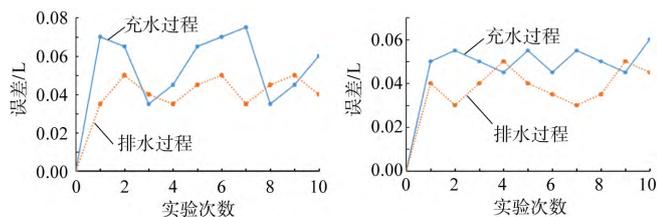
#### (1) 陆上实验

将浮力调节装置搭载在实验平台上，如图10所示。



图10 陆上实验

分别进行无负载定量1.5 L充排实验和利用安全阀模拟水下200 m深的2 MPa负载定量3 L充排实验，实验结果如图11所示。系统在无负载定量1.5 L的充排实验中，充水过程平均误差0.057 L，排水过程平均误差0.043 L；在2 MPa负载定量3 L实验中，充水过程平均误差0.051 L，排水过程平均误差0.039 L，均能满足系统最大调节误差不超过0.1 L的要求。



(a) 无负载定量 1.5 L 充排实验数据曲线 (b) 2 MPa 负载定量 3 L 充排实验数据曲线  
图 11 陆上实验数据曲线

(2) 水下实验

将浮力调节装置搭载于水下机动平台上在 10 m 深水池中进行充排实验, 如图 12 所示。浮力调节装置位于载体正中间位置, 用吊秤将载体吊住, 通过吊秤示数变化判断浮力变化是否准确。给予充排量 ±1.5 L 的指令, 实验结果如表 5 所示。根据表格可以看出, 充水过程的平均误差为 0.07 L, 排水的平均误差为 0.06 L, 满足误差允许要求。



图 12 水下实验

表 5 实验数据

项目	起始值 /L	停止值 /L	充排量 /L	平均误差 /L	
充水 1.5 L	1	9.00	10.45	1.45	
	2	7.55	8.95	1.40	
	3	8.95	10.40	1.45	0.07
	4	7.50	8.95	1.45	
	5	8.95	10.35	1.40	
排水 1.5 L	1	10.45	9.05	1.40	
	2	9.05	7.55	1.50	
	3	10.40	8.95	1.45	0.06
	4	8.95	7.50	1.45	
	5	10.35	8.95	1.40	

5 结束语

本文对基于重量调节式的浮力调节技术进行研究, 旨在提高系统调节精度, 指出系统在精准控制过程中存在两大影响因素: 定量充排的准确性和舱体的形变大小。

通过分析各种调节方式对调节精度的影响, 选择以液压泵-压载水舱式调节方式为研究对象, 分析了系统内部各组成部分对调节精度的影响, 设计了一种手动换向三通球阀由舵机驱动的自动换向方案。在对调节精度影响因素分析研究后, 搭建液压回路, 设计模糊 PID 控制器提高系统的响应速度及抗干扰能力, 根据实验环境及载体需求, 按变形抑制方法设计加工了方形舱体。最后对研制的浮力调节装置进行陆上及水下实验。实验结果表明, 装置的调节误差均在给定的误差允许范围之内,

且将平均误差控制在 5% 以下, 验证了所研究技术的可行性, 为后续高精度浮力调节技术的研究提供了有益参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 朱宝星, 于复生, 梁为, 等. 水下机器人结构形式及其发展趋势分析[J]. 船舶工程, 2020, 42(2): 1-7, 84.
- [3] Anonymous. Marine Resources[J]. Military Review, 2021, 62(6): 38-39.
- [4] 殷宝吉, 朱华伦, 唐文献. 双向变体积式浮力调节装置及其控制技术[J]. 机床与液压, 2022, 50(8): 37-42.
- [5] 孙庆刚, 郑荣, 杨斌, 等. 基于浮力调节系统的 AUV 水底着陆策略研究[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 134-139.
- [6] 王得成. AUV 浮力调节与安全抛载系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [7] 孙英哲, 张巍, 张奇峰, 等. 基于 AMESim 的深海潜水器增压缸式浮力调节系统研究及仿真[J]. 机床与液压, 2018, 46(1): 40-44.
- [8] 杨友胜, 任荷. 潜水器浮力调节技术发展现状与展望[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(增 I): 110-119.
- [9] 杨海, 刘雁集. 水下滑翔机浮力调节系统研制[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 128-133, 165.
- [10] 盛军, 刘铜泽, 张仰成, 等. 可靠性步进电机细分驱动技术研究[J]. 中国新技术新品, 2018(22): 69-70.
- [11] Muhammad R. Active and reactive power control of hybrid off-shore AC and DC grids[J]. Automatika, 2019, 60(4): 432-444.
- [12] 商丽, 王娜, 邢智慧. 液压泵损坏原因分析[J]. 中国设备工程, 2021(9): 178-179.
- [13] 聂松林, 尹方龙. 水液压柱塞泵的研究进展及展望[J]. 液压与气动, 2015(1): 1-7.
- [14] 赵旭峰, 张文忠, 刘银水, 等. 海水液压电磁阀失效分析[J]. 液压与气动, 2013(6): 110-113.
- [15] 常永波. 外压圆筒设计图算法与公式法[J]. 化学工程与装备, 2020(6): 3-4.
- [16] 刘小宁, 张红卫, 韩春鸣. 基于模糊可靠度的薄壁外压力容器稳定性设计[J]. 机械强度, 2011, 33(2): 217-224.
- [17] 陆锁芳, 刘俊, 陈伟杰. 局部载荷作用下四边固支矩形板弹性解答及其应用[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(13): 40-44.
- [18] 王韬. J 型加劲肋受力性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [19] Verma N, Ch R, Chourasia R, et al. Speed Control of DC Motor using PID Controller[J]. Global Journal of Technology and Optimization, 2022, 13(1): 1-4.
- [20] 吴汉梅. 基于模糊 PID 的 AUV 自适应潜浮控制系统设计[J]. 电子世界, 2016(14): 173, 176.

第一作者简介: 马文字 (1996—), 男, 硕士, 研究实习员, 研究领域为液压系统及光机结构设计。

※通讯作者简介: 刘立刚 (1987—), 男, 硕士, 副研究员, 研究领域为嵌入式系统设计。