

6 万方深远海养殖装备压载沉浮系统设计

熊威¹, 严俊², 张三丰¹, 黄静林¹, 程鹏¹

(1. 湖北海洋工程装备研究院有限公司, 湖北 武汉 430206; 2. 南方海洋科学工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524013)

摘要: 本文以某 6 万方深远海养殖装备压载沉浮系统设计为例进行分析论证。为满足 6 万方深远海养殖装备检修、抗台和避台工况的沉浮需要, 需要设置压载系统。压载系统的注入和排出方式主要有三种方式: 重力自流、压载泵注入和压缩空气注入。通过三种方式的比较计算分析, 设计出了压载水泵+重力自流+压缩空气复合压载系统方案。复合压载方案有更高效快速调拨的能力, 可快速进行压载水进、排和调载工作。不同的方案相结合不仅可以提升压载水调拨的可靠性, 增加其安全性, 使得渔场处于安全的浮态, 大幅减少压载时间, 还能提高压载精度, 能够明显节约功耗和制造维护成本。

关键词: 压载系统; 压缩空气; 重力自流; 潜水泵

中图分类号: TE951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 05—0118—04

随着养殖业的不断发展, 我国沿海近水养殖已基本上饱和, 未来的发展方向是往深远海进行开发, 充分利用深远海资源。同时, 大力推广大型深远海养殖装备, 将有效拓展海洋养殖空间, 提升我国海洋渔业经济的产能, 降低宝贵的土地资源开发压力。因此, 研究大型深远海养殖装备具有重要的经济与社会效益。为满足大型深远海养殖装备抗台和避台的沉浮需要, 需要设置压载系统。在压载系统中, 压载水可以看作是“不可压缩”的流体, 通过能量的转化, 改变这些流体的位置, 从而达到压载目的。改变流体位置的过程中, 有些手段消耗的能量多, 有些消耗的能量少, 因此, 设计出合理的压载沉浮方式, 不仅可以满足规范要求, 加快速度, 也具有节能的优点。

1 国内外研究现状

黄海水产研究所针对网箱下沉临界水深时易发生箱体侧倾的问题, 设计了一种泵压式网箱遥控沉浮控制装置, 如图 1 所示。原理是利用潜水泵向网箱压载舱注水, 将舱内的空气排出, 使网箱下沉, 反之上浮; 武昌船舶重工集团湖北海洋工程装备研究院研发的世界最大的深远海全潜式网箱“深蓝一号”, 有效养殖水深 30 米, 整个养殖水体约 5 万立方, 如图 2 所示。其压载系统采用外接气源的压缩空气排压载水, 采用重力自流方式进压载水。

韩国国立全南大学研制了一种基于气动控制的自动沉浮网箱系统 ASFCS (Automatic Submersible Fish Cage System)。该网箱是多边形立柱结构, 由一个刚性

框架组件与 8 个可变压载舱、8 个固定压载舱和 12 个浮力筒构成^[2-3]。每个压载舱均接有一路压缩空气管, 打开压缩空气系统主阀, 压缩空气通过各支管注入压载舱, 利用压缩空气进行排水, 改变网箱浮力特性, 使网箱上浮, 如图 3 所示; 2017 年, 由挪威萨玛尔 (SALMAR) 集团投资, 中船重工武船集团建造的“Ocean Farm 1”在青岛完工, 如图 4 所示, 该养殖平台总高 69 米, 直 110 米, 养殖水体 25 万方^[4-5]。其压载系统使用潜水泵进排压载水。



图 1 方形升降式深水网箱



图 2 深远海全潜式网箱



图 3 自动沉浮网箱系统



图 4 OceanFarm 1

2 压排载方式及特点分析

深远海养殖装备压载系统压载水的注入和排出主要有以下几种方式: 重力自流、泵和压缩空气。

2.1 压载注入方式分析

压载注入方式主要有重力自流、泵注入和压缩空气

注入三种。

重力自流注入是指在没有外界压力的情况下,依靠海水自身的重力,以及液位差,从舷外流入压载舱,或从高位压载舱流入低位压载舱,完成压载水的注入或调拨。该方法的优点是简单易行,可以省去动力输送设备,初始进水速度较快,通常用于一般运输船舶中,尤其适用于双层底压载水舱。但是该方式也有一定的局限性。首先,自流注入方式受压载舱的布置位置和船舶吃水情况的影响较大,当水位不能产生正压时,就不能完成注入或调拨操作。其次,自流注入方式主要基于能量守恒原理,将重力势能转变为动能。根据能量平衡原理如下式所示:

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \text{ 即: } d_v = \frac{\sqrt{2g}}{2\sqrt{h}}d_h \quad (1)$$

式中: v : 流速。 h : 舷外水与舱内水的液位差。 g : 重力加速度。由此可见,当往舱内注水时,舷外水与舱内水的液位差逐渐变小,导致进水速度逐渐变小;往舷外排水时,同样排水速度也逐渐变小,因此重力自流方式会导致流速不恒定。这就增加了压载水系统的操作控制的难度。

泵注入是压载注入的第二种方式。该方式采用大排量的离心泵将舷外海水通过海水总管泵入压载舱或将某一压载舱的海水调拨至另一压载舱,实现压载注入和调拨功能。泵注入方式对压载舱的位置和船舶吃水没有要求而且技术成熟,可靠性好,可以随时调节浮态,所以是压载注入最常用的一种方式。通过计算选取泵的排量压头,可保证压载时间和调拨高度,且系统流速恒定,在操作简易性上,压载泵注入要优于重力自流注入。当然因为设有压载泵,该方式的能耗和成本均较高。

压缩空气注入是压载注入的第三种方式。该方法注入压载水时,压载舱必须位于水线以下,利用空压机降低舱内空气压力,当舱外气压大于舱内气压时,舷外的海水即可注入压载舱。压缩空气注入方式仅需配备空压机和空气瓶,对于养殖网箱可使用工作船上的设备,成本和能耗较低,且进水速度较快,工作可靠性较好,但也存在不少明显的不足之处,如:系统设计较常规系统复杂得多,对船体结构的要求很高,由于空气具有可压

缩性,可溶于水,是弹性变化量,具有控制延迟性,对压载控制系统提高了要求,增加了设计和建造成本,同时也受制于压载舱布置位置和船舶吃水的限制。

2.2 压载排出方式分析

压载排出方式主要有重力自流排出、泵排出和压缩空气排出三种。

重力自流排出方式原理和自流注入类似,只是方向相反。在一般运输船舶上这种方式应用广泛,于顶边压载水舱特别适合应用。此种排出方式同样受平台吃水情况和压载舱的布置位置的影响,若压载舱位置不能高于水线,压载水则无法排出。

泵排出是压载排出的第二种方式,该方式原理和泵注入类似。同样泵排出方式对压载舱的位置和船舶吃水没有要求而且技术成熟,应用广泛。同时由于这些泵的排量很大,要将舱内的水吸干比较困难,往往还需要配备扫舱泵。扫舱泵可以是活塞泵,也可以是喷射泵。两者比较,后者简单得多,施工方便,节约费用,所以目前被广泛采用。

压载排出的第三种方式是压缩空气排水。该方式的原理是通过管路向压载舱注入空气,在压载舱内液面上方形形成空气垫,当空气垫压力大于压载水管路排出阻力时,排出压载水。在工程应用中,通常将这种方式与重力自流注水方式相结合,可节省压载泵配置数量及相关管系,但需要增大压载舱的结构强度,以及压缩空气系统的压力分配控制会给系统设计、建造和管理带来难度,并且该方式在调拨能力方面较差,目前只在某些特种船舶如潜水艇、起重船上有所应用,但在深远海养殖装备的设计中还不多见。

3 压缩空气+重力自流+潜水泵方案

根据前述方案,本系统设计选取复合压载系统方案,即压载水泵-重力自流-压缩空气复合压载系统。该复合压载方案通过分别利用重力自流、压缩空气的优势,再采用压载水泵对以上压载能力的不足进行补充。压缩空气的优势在于排水过程。

6万方深远海养殖装备结构一共有17个压载舱。其中RC3、RC5、RC9、RC11舱容为45.8 m³; RC1、RC7舱容为67.7 m³; WBP1/S1、WBP5/S5舱容约为153.9

m³; WBP2/S2、WBP3/S3、WBP4/S4 舱容为 170.1m³; WB13C 舱容为 869m³。

外圆 6 座立柱 RC1、RC3、RC5、RC7、RC9、RC11、底部船形浮箱 WBP1/S1、WBP2/S2、WBP3/S3、WBP4/S4、WBP5/S5，一共 16 个压载舱使用压缩空气。中央立柱 WB13C 采用潜水泵进排压载水，实现流量微调和精确控制。

网箱上浮工况，例如从避台工况到工作工况，先用压缩空气驱除外圆 6 座立柱压载舱压载水，再用中央立柱潜水泵精确调节，以达到设计吃水线。

3.1 压缩空气

根据完整稳性计算，网箱从避台状态到工作工况需要用压缩空气排出外圆 6 座立柱 RC1、RC3、RC5、RC7、RC9、RC11 压载水，一共 $V_1=85\text{m}^3$ 压载海水。

这部分压载水用压缩空气排出，所需压缩空气量为：

网箱避台状态下，压载水排出口离海平面约 36m，排水压力 P_1 取 0.36Mpa，那么所需压缩空气量如下式所示：

$$q_1 = V_1 \left(\frac{P_1}{0.098} - 1 \right) = 85 \times \left(\frac{0.36}{0.098} - 1 \right) = 226\text{m}^3 \quad (2)$$

如果使用每个 3 立方 3MPa 空气瓶储存这些压缩空气，需要 10 个空气瓶，为满足安全余量要求，可以设置 12 个空气瓶，在外圆 6 座立柱 RC1、RC3、RC5、RC7、RC9、RC11 的上部空间分别布置两个空气瓶。

根据完整稳性计算，网箱从工作工况到检修工况需要用压缩空气排出底部船形浮箱 WBP1、WBP2、WBP3、WBP4、WBP5、WBS1、WBS2、WBS3、WBS4、WBS5 的压载水，一共 $V_2=1636\text{m}^3$ 压载海水。正常养殖工况下网箱吃水 20m，此处排水压力 P_2 取 0.2Mpa，那么所需压缩空气量如下式所示：

$$q_2 = V_2 \left(\frac{P_2}{0.098} - 1 \right) = 1636 \times \left(\frac{0.2}{0.098} - 1 \right) = 1703\text{m}^3 \quad (3)$$

如果使用每个 3 立方 3MPa 空气瓶储存这些压缩空气，则需要 38 个空气瓶，有限的渔场存储空间满足不了空间要求。而当渔场需要从工作工况上浮到检修工况时，渔场附近有工作船，此时如果使用工作船上的空气源，不仅可以满足空气量，也将大大节省渔场的设备成本和布置空间。

3.2 潜水泵

中央立柱压载舱 WB13C 依靠潜水泵进排水，中央立柱压载舱容为 869m³。当渔场从工作工况下潜到避台工况，需要打入压载水 635m³；当渔场从工作工况上浮到避台工况，需要打出压载水 142m³。为满足规范要求，选用两台流量 180m³/h，扬程 30m，功率 30kW 的潜水泵。

当打入压载水 635m³，可同时启用两台潜水泵，用时约 1.8h；当打出压载水 142m³，使用一台潜水泵，用时约 0.8h。

两台潜水泵设置在中央立柱 WB13C 底部，如下图所示：

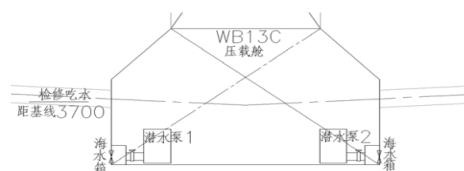


图 5 潜水泵布置位置示意图

3.3 压载舱进出海口水

压载水舱 WBP1~5、WBS1~5、RC1、RC3、RC5、RC7、RC9、RC11 均采用遥控阀门系统，在检修吃水线之上设置通海管路和滤器阀件，如下图所示。利用中央立柱潜水泵调节渔场吃水，当各压载舱 WBP1~5、WBS1~5、RC1、RC3、RC5、RC7、RC9、RC11 通海管路没入海水中，配合各舱透气系统，可以在开启通海阀后，利用重力自流进水，自然浸水下沉。其中 WBP1~5、WBS1~5 均处于平台最低处，在抗台吃水 18m、工作吃水 20m、避台吃水 36m 时，开启通海阀重力自流自然浸水必然浸满，且其他压载舱的装载可根据具体的压载方案装载。

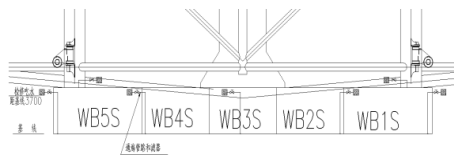


图 6 压载舱进出海口水

压载水泵 - 重力自流 - 压缩空气复合压载系统中设计了两台潜水泵，该系统总功率为 60kW，满足电力设计要求。在外圆立柱中设置压缩空气瓶，增加了渔场压

载系统可靠性。在检修工况，充分利用外部条件，使用外部工作船的空气源排压载，大大降低了渔场的压缩空气瓶数量，满足工况要求的同时，简化了压载系统，降低了成本。

相比单独的压载水泵和单独的压缩空气方案，复合压载方案有更高效快速调拨的能力，可快速进行压载水进、排和调载工作。当外圆立柱压载舱海水进口高于船舶吃水时，此时用中央立柱压载水舱潜水泵打压载，利用重力自流使外圆立节省功耗。不同的方案相结合不仅可以提升压载水调拨的可靠性，增加其安全性，使得渔场处于安全的浮态，大幅减少压载时间，还能提高压载精度，能够明显节约功率和制造维护成本。

4 结语

综上所述，泵、压缩空气和重力自流三种压载方式的对比分析，如表 1 所示。

表 1 三种压载方案对比

对比项目	泵	压缩空气	重力自流
能耗	较大	较小	非常小
进排水速度	一般	进排水速度都快	进水速度较快
工作可靠性	较好	较好	很好
施工	安装工作量大	安装工作量不大	安装工作量小
控制进出水难度	简单	困难	简单

当前规模化、集约化是深远海养殖装备的重要发展方向，在某一海域形成产业区域集群，通过精细化管理可大幅度降低深远海养殖装备成本。压载水进排水系统作为养殖装备中的一部分，也需要依靠规模化进一步精细化设计以节约成本。养殖装备大部分是大吃水深度的柱稳式结构，它的甲板面积和舱体体积有限并且夹板到压载水舱的距离较长，这对其管线及阀门布置设计形成一定的制约，需要对其进行单独的精益化设计，以前面临这一情况，设计者往往将管线及阀门简单的按照平行或对称关系布置。但显然深远海养殖装备中不同的压载水舱管路及阀门是在不

同的海况和吃水深度进行进排水工作，因此需要对其进行单独的精益化设计。

参考文献：

[1] 黄滨,关长涛,崔勇,等. 方形升降式网箱下沉过程防倾覆装置与技术的研究 [J]. 工程力学 .2013,30(6):313-326.

[2]TH Kim, K U Yang, K S Hwang, et al. Automatic Submerging and Surfacing Performances of Model Submersible Fish Cages System Operated by Air Control [J].Aquacult. Eng. 2011, 45(3):74 - 86.

[3] TH Kim, K U Yang, D J Jang, et al. The Submerging Characteristics of a Submersible Fish CagesSystem Operated by Compressed Air [J]. Mar. Technol. Soc. J. 2010, 44 (1):57 - 68.

[4] 刘晃,徐皓,徐琰斐. 深蓝渔业的内涵与特征 [J]. 渔业现代化 , 2018, 45(5): 1-6.

[5] 何磊磊,张海文. “深海渔场”的应用前景 [J]. 船舶, 2018,29(2): 1-6.

基金项目支持: 南方海洋科学工程广东省实验室(湛江) 科研项目 (ZJW-2019-01)

