

机动式 200 米饱和潜水系统研制

陆伟

(交通运输部上海打捞局 应急救援与抢险打捞交通运输行业研发中心 上海水下救捞工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要: 饱和潜水技术是支持潜水员开展水下 60 米以深水下作业最高效、最安全的潜水技术。饱和潜水系统是饱和潜水作业的必要关键设备。为满足我国内陆水域应急救援需求,以实际行动落实总体国家安全观,在交通运输部的支持下,交通运输部上海打捞局设计建造了一种适用于内陆水域 200 米以浅水深作业的机动式饱和潜水系统。该系统具备小型化、轻量化、模块化等特点,在国内实数首套。本文简要介绍了机动式 200 米饱和潜水系统的研制目标、设计思路、主要问题难点等。

关键词: 饱和潜水系统; 内陆应急救援先进设备; 200 米水下压力; 模块化设计

中图分类号: U698 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2025) 05—0006—04

1 研制背景

随着社会经济发展,我国内陆水域的经济活动不断增多,水上安全事故的发生范围也由海上逐步向内陆经济、旅游密集水域延伸。近年来,我国内陆水域多次发生安全事故,如“皖神舟 67”轮在长江福姜沙北水道试航沉没、长江“东方之星”客运船沉没、四川广元白龙湖游船沉没、重庆万州公交车坠江事故等一系列事故,多次向我国内陆深水应急保障能力建设鸣响了警钟。

发展是安全的基础,安全是发展的条件。交通运输部党组多次召开专题会议,要求救生系统开展应对内陆水域应急救援打捞能力的研究工作,并加快推进适用于内陆水域的饱和潜水装备建设。交通运输部领导还多次强调“要牢牢守住交通运输安全底线,提升长江干线和内陆库区应急救援打捞能力。”

纵观我国内陆水域,最大水深超过 60 米的湖泊将近 20 个,其中长白山天池达到 373 米、喀纳斯湖达到 188.5 米;最大水深超过 60 米的库区超过 10 个,三峡库区达到 180 米、丹江口库区达到 170 米。这些水域多是旅游、经济活动频繁的名胜景区或重要水利设施,存在发生重大沉船、沉物等事故的风险和概率。

如作业水深在 60 米以浅,使用常规潜水就能完成所需水下作业任务;如作业水深超过 60 米,目前内陆水域还没有配备专用饱和潜水系统,只能使用潜水领域公认的高风险、低效率的氮氧混合气潜水方式开展应急处置,这种潜水方式可在 60 米至 120 米水深开展作业,但因受减压时间限制、有效作业时间短、安全风险大,容易发生作业人员次生风险,且无法在 120 米以深水域开展作业。此外,还有一种能在深水水域开展检测、切割等简单作业的常压潜水系统(ADS),但由于灵巧性和感知性较差而无法从事更为复杂的水下作业。因此,

针对内陆 60 米以深水域开展应急打捞作业,更为实用和高效的打捞装备是饱和潜水系统;由于绝大多数内陆水域最大水深在 200 米以浅,配置 200 米饱和潜水系统是合适的。同时,根据内陆水域应急救援打捞的快速性、高效性需求,200 米饱和潜水系统必须是机动式,以便于及时调遣使用。

2019 年 8 月,在交通运输部的支持下,上海打捞局正式启动机动式 200 米饱和潜水系统的研制工作。

2 研制目标

通过河南小浪底库区 6.22 沉船事故、四川广元“6.4”危险抢险救助、重庆万州“10.28”公交车坠江应急救援等一系列处置过程所积累的经验与教训,得出适用于内陆深水水域饱和潜水设备必须满足以下需求。

一是设备系统应当是机动化的,在接到任务命令后能够快速通过公路、铁路、民航等现有交通方式直接运输到事发地点,减少大型部件分拆和组装过程,这也就意味着必须将设备压缩至标准集装箱尺寸才能实现快速转运。

二是设备系统应当是模块化的,既便于分拆运输,也便于快速组装投入使用,但模块过多或接口过复杂,将在现场耗费大量组装对接和调试的工作时间,这就要求系统必须在保留必要功能的基础上,尽量减少设备配置模块,以减少设备卸载后所需的对接次数,并配备快速接头。

三是设备系统应当是轻型化的,从内陆水域的现场作业条件来看,一般情况下无法提供大型载重工作母船,有时甚至只能在特殊展开平台上作业,因此整套系统必须在保证性能的前提下,尽可能压缩部件组成以减轻整体重量和作业面积。

3 设计思路

3.1 作业能力

机动式 200 米饱和潜水系统应当具备提供潜水员 200 米以浅出入水操作、居住舱加减压、环境控制及生命支持和紧急情况下潜水员逃生等基本作业能力，使潜水员能够在内陆水域 200 米以浅水深环境下进行探摸、搜寻、清障、除泥、封舱、分段解体、穿引缆等各种水下作业。同时，整个系统应采用模块集成化设计，模块外形尺寸应满足公路、铁路、水路、航运等多种运输方式标准、结构简单易组装，满足快速连接组装和重量轻便易搭载的野外适应能力。

3.2 作业方式

机动式 200 米饱和潜水系统经过运输到达事发现场后，对各模块化组件进行快速组装、安装和调试。达到使用要求后，潜水员在居住舱饱和系统、环境控制系统、设备控制系统的支持下，通过居住舱控制室监控，达到体内惰性气体完全饱和状态；潜水员进入潜水钟，通过潜水钟吊放系统（LARS）的绞车模块、平移模块、滑车支架模块等部件实施吊放操作到达作业水深；通过在潜水控制室的监控完成指定水深的作业，然后再通过潜水钟吊放系统回到居住舱休息。在项目施工结束后，所有潜水员在居住舱实施减压恢复，直至出舱。在系统本身出现危急情况下，潜水员进入逃生舱并脱离系统，在潜水员救援船帮助下减压恢复。

3.3 主要性能指标

表 1 性能指标及参数

序号	性能指标	具体参数
1	作业深度	200 米
2	额定人数	居住舱 4~6 人 潜水钟 2~3 人
3	作业环境	露天甲板非燃爆环境
4	作业水域工况	波高 $\leq 1.5\text{m}$
5	作业温度	大气 $-18^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ 水 $2^{\circ}\text{C}\sim+45^{\circ}\text{C}$
6	湿度	相对湿度 100%，无冷凝
7	水流	$\leq 0.5\text{m/s}$
8	风级	蒲氏 ≤ 5 级
9	入级	CCS 船级社

性能指标及参数见表 1，除表中可量化的指标外，从应用实际角度出发，整个系统展开工作占地面积在 80m^2 以下，适合内陆水域船型或相应支撑条件潜水钟吊放系统；潜水钟吊放系统应为舷边释放方式；水钟与转接舱应采用侧接式。

3.4 模块化系统主要构成

机动式 200 米饱和潜水系统的设备配置应比常规饱和潜水系更少、更小、更集成，在提高系统机动化、模

块化、轻量化水平的同时，减少系统的维护成本。经研究设计，主系统由潜水钟吊放系统、饱和及潜水系统、辅助系统 3 大系统共计 14 个设备模块构成，主系统模块构成见图 1。

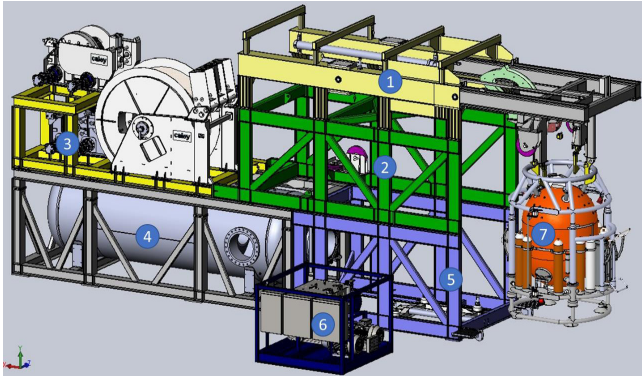


图 1 主系统模块构成

3.4.1 潜水钟吊放系统

3.4.1.1 平移模块

组成：套叠机构、液压油缸、控制管路。

功能：通过套叠机构，利用液压油缸将潜水钟平移至船舷外或回收至系统内。

3.4.1.2 支撑模块

组成：框架结构。

功能：支撑平移模块。

3.4.1.3 绞车模块

组成：潜水钟绞车、导向配重绞车、脐带绞车、钢丝绳、脐带、控制管路、框架平台。

功能：潜水钟绞车负责收放潜水钟、导向配重绞车负责收放配重块，脐带绞车负责收放脐带，配备恒张力模式。

3.4.1.4 滑车支架模块

组成：框架结构、滑车、控制管路。

功能：支撑支撑模块、配重块、潜水钟滑行。

3.4.1.5 配重块

组成：配重组件。

功能：稳定潜水钟在水下的姿态，防扭转。

3.4.1.6 液压泵站

组成：电动机、油箱、控制管路。

功能：为吊放液压系统提供稳定的液压源。

3.4.2 饱和及潜水系统

3.4.2.1 潜水钟

组成：潜水钟本体、防护框架、潜水员脐带、氮回收潜水头盔、应急气瓶挂架构架和压载及其他 SDC 配件包（含水下泛光灯、应急电源的电池包、定位应答器、频闪灯；气体回收水分离器；钟人脐带快速释放机构；二氧化碳吸收机，应急药筒；肺动力二氧化碳吸收器以及钟内照明、定位、通讯设备）。脐带和潜水钟采用快

速接头连接方式,脐带和潜水钟所有接头均按照设计图纸,进行编号,设备到达现场后,可以快速的按照图纸,将脐带和潜水钟编号一一对应连接。

功能:潜水钟能在高压状态下与过渡舱对接和分离。潜水钟能容纳2至3名潜水员,满足1至2名潜水员同时出钟进行巡回潜水作业和1名钟人出钟支持。

3.4.2.2 居住舱(DDC)

组成:舱本体、舱门、舱窗、舱递物筒、底座和支撑框架以及1套居住舱配件包(含螺旋启闭阀;床铺;吸氧用BIBS;背压调节器;TESCOM减压器;声力电话;呼叫信号发生器;主通讯盒;二氧化碳吸收机;脸盆;淋浴笼头和承压马桶;高压喷水灭火系统;环境压力表;温湿度计;高压氧分压分析仪;被子,床单,枕头,毯子;舱顶灯、床头灯;三台HCU环控室内机组等)。

突出亮点:首次在国内饱和居住舱体结构方面,创新采用双相不锈钢新材料进行设计建造,具有强度高、耐腐蚀、轻量化等特点。

功能:系统配置1个潜水员居住舱(可容纳6人、2组或4人、2组潜水员),居住舱与潜水钟对接,加压到潜水员出潜水深压力后,释放潜水钟至作业地点,由潜水员出潜作业。换班时,再回收潜水钟与居住舱对接,实现人员交换。

3.4.2.3 饱和及潜水控制箱(集装箱)

组成:潜水控制系统、饱和控制系统。

功能:采取集装箱框架形式内置了潜水控制系统、饱和控制系统,用于控制潜水钟和居住舱。潜水控制系统对应控制潜水钟,控制钟加减压、潜水员呼吸气体浓度(氧气浓度)、通讯设备、氦气回收控制等。饱和控制系统对应控制居住舱,控制居住舱加减压,根据舱内各类分析仪分析出的环境指标,通过环境控制单元控制舱内气体浓度,温湿度等环境指标。同时也具备控制通讯设备的功能。

3.4.2.4 设备控制箱(集装箱)

组成:环境控制单元、热水机、生活水单元。

功能:热水机向潜水钟提供热水;生活水单元向居住舱提供卫生用水,环境控制单元控制舱内温度、湿度等。

3.4.2.5 氦气回收控制箱(集装箱)

组成:潜水员的气体回收装置、钟内呼吸气体回收装置、水面呼吸气体再生系统(去除水分、二氧化碳、补充氧气等)、气体增压系统、回收气体控制面板。

功能:用于潜水作业时的潜水呼吸气体的回收、过滤、再利用。该气体的回收系统包括气体回收、去除水汽、杂质和二氧化碳以及补氧,增压后并进行循环使用。

3.4.3 辅助系统

3.4.3.1 移动电源箱(集装箱)

组成:柴油机、发电机、配电柜。

功能:为整套系统提供备用动力。

3.4.3.2 气源箱

组成:集装箱式框架、气瓶、管路系统。

功能:为整套系统提供氮氧混合气工作气源。

3.4.3.3 自航式逃生艇 SPHL

组成:逃生舱系统、逃生舱控制箱、逃生艇、释放架、钢丝绳、液压泵站,控制管路。

功能:紧急情况下,转移潜水员至逃生艇中的逃生舱内,通过释放架,释放逃生艇,逃生艇自航至救援区域。

3.4.4 整体概念图

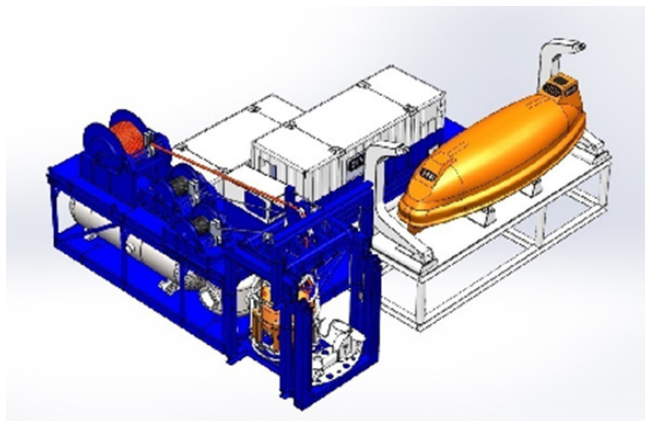


图2 常规饱和潜水系统

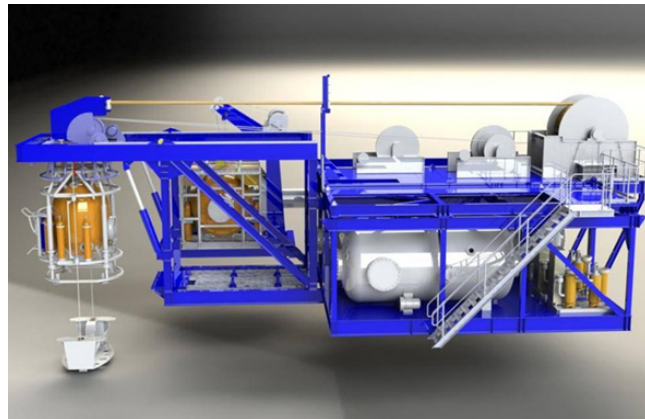


图3 机动式200米饱和潜水系统

对比常规饱和潜水系统(见图2)和机动式200米饱和潜水系统(见图3),可以看出两种系统在体积、重量、结构复杂程度方面存在的差别,机动式饱和潜水系统具有高度机动性、模块化、轻量化等优点。

4 关键技术难点

一是为满足运输要求的模块化轻量化设计。为满足公路、铁路、航空运输,各模块尺寸必须在常规饱和潜水系统的基础上进行轻量化模块化设计。经研究,14个系统模块规格见表2:

表 2 系统模块规格

序号	模块名称	重量 (t)	尺寸 (m)
1	平移模块	13.5	7.50 × 2.99 × 2.78
2	支撑模块	4.7	7.18 × 2.99 × 2.46
3	绞车模块	24.2	5.83 × 2.99 × 3.20
4	居住舱模块	30.2	8.15 × 3.35 × 2.80
5	滑车支架模块	3.8	4.87 × 2.99 × 2.75
6	液压泵站	4	2.57 × 2.45 × 2.00
7	潜水钟	12	3.24 × 2.66 × 3.44
8	饱和及潜水控制箱	10	6.06 × 2.44 × 2.59
9	设备控制箱 (图中未显示)	8	6.06 × 2.44 × 2.59
10	氦气回收控制箱 (图中未显示)	8	6.06 × 2.44 × 2.59
11	气源箱 (图中未显示)	8	6.06 × 2.44 × 2.59
12	移动电源箱 (图中未显示)	10	6.06 × 2.44 × 2.59
13	配重块 (图中未显示)	3.0	2.63 × 1.69 × 1.06
14	自航式逃生艇 (图中未显示)	18.0	9.50 × 3.35 × 3.75

若使用公路运输,整套系统设计能够使用 6 辆车辆 (2 辆集装箱卡车、4 辆平板拖车) 参与运输,其中 2 辆 17.5 米平板车,一辆用于装载居住舱与平移模块,另一辆用于装载中部结构支撑模块与潜水钟; 2 辆 13.5 米平板车,一辆用于装载滑车支架模块、绞车滑块与配重块,另一辆用于装载液压泵站、气源箱和其他辅助设备; 2 辆集装箱卡车用于装载饱和及潜水控制箱、设备控制箱、氦气回收控制箱、移动电源箱模块等四个集装箱模块。

可采用特定飞行载具进行空运,能够满足要求,理论上可行。

二是在满足最少潜水员施工作业需求的同时,对生活舱、潜水钟、逃生系统等舱室内部空间设计。根据规范要求,单钟至少足矣容纳 2 名潜水员。潜水钟如何同时满足小型化轻量化设计要求,同时最好能够单钟容纳 3 名潜水员,生活舱和逃生系统能够同时容纳 6 名潜水员,需要深入研究设计。如整套系统可采取单生活舱设计,可研究尽可能缩小舱室内部空间,生活舱内部只保留床铺、卫生间等生活基本设施,其他非必要空间如用餐桌椅等均可进行可折叠设计,节约空间。还可降低舱内环控系统、生命支持系统等子系统的功率,保证可实现 200 米深度作业即可。预计整套系统重量比大型饱和潜水系统减少了 50%,作业面积需求减少了 40%,模块数量减少了 4 至 5 个。

5 研制进展

机动式 200 米饱和潜水系统 (见图 4) 已于 2024 年上半年建造完毕,并完成陆地联调。12 月完成了水域试验,通过了中国船级社 CCS 的检验,取得了入级证书。



图 4 系统集成

6 应用前景

(1) 内陆援潜救生。内陆水域应急救助打捞任务多为突发性紧急任务,时间效率是考量任务成败的关键因素。然而我国内河应急救助队、长航系统等没有 60 米以上抢险救捞能力。该系统若完成建造并投入使用,将解决上述问题,填补内陆深水水域救捞能力建设空白。

(2) 生态环境保护。近年来,长江经济带作为国家战略正在稳步实施,习近平总书记提出的“生态优先、绿色发展”是长江经济带发展的核心理念,在如此被关注的区域一旦发生重大水体污染事故又不能及时有效处置,必然会造成恶劣的政治影响和社会影响。以三峡库区为例,若在库区发生危化品船舶沉没污染水体的险情,将直接关系到水库两岸 20 多个区县的水源地和 3000 多万人口的饮用水安全,会对库区乃至长江中下游地区的社会、生态、生活等公共安全造成严重的危害。在此类事故发生时,如能运用饱和潜水技术,在水下对危化品船进行液体危化品回收、沉船打捞等任务,即能及时有效的规避水体污染,保障水域生态环境安全。

参考文献:

- [1] 国际海事承包商协会 .IMCA D052 Guidance on Hyperbaric Evacuation Systems[S].2013.
- [2] 中国船级社 .潜水系统与潜水器入级与建造规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [3] 王海涛, 姜圣俊 .模块化救援装备技术特点及装船技术要求初探 [J]. 船舶, 2019, (05):124-132.
- [4] 陆庆莉, 张生, 曾勇 .小型饱和潜水装备与配套技术研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2023, (03):155-157.
- [5] 许胜华, 肖晓凌, 王振兴, 殷释然, 韩杰 .300m 饱和潜水逃生舱的设计与研制 [J]. 现代制造技术与装备, 2020, (08):54-61.