

中国国际海事会展

INTERNATIONAL MARITIME CONFERENCE

高级海事论坛论文集

SENIOR MARITIME FORUM

(海洋工程装备和船舶配套设备技术研究专场)
(Technical Research on Marine and Ocean Engineering Equipment)

30 November 2011

Shanghai China

上海市造船工程学会
UBM/Seatrade

目次

主题报告

1. “蛟龙”号载人潜水器关键技术与自主创新	崔维成 (1)
2. SRI-VC2110DP 动力定位控制系统关键技术与创新	侯馨光, 张 敏, 许安静, 韩 冰, 董胜利 (12)

专题报告

3. 海洋平台电站系统关键技术研究	王硕丰, 陈次祥, 倪凤燕 (19)
4. 多功能机械手功能实现与关键技术研究	何秋生, 姜剑勇, 翟飞飞, 徐浩刚 (24)
5. 船用柴油机应对 IMO Tier III 排放法规的技术措施	平 涛, 王 锋, 陈志忠, 张东明, 李 翔, 张文正 (31)
6. 深水定位锚泊系统关键设备研究	顾 炳 (39)
7. 电力推进与动力定位技术	Paul Bracké, Arie Boer (49)
8. 造船和海洋工程用压缩空气技术	Harm Harders (50)



“蛟龙”号载人潜水器关键技术与自主创新

崔维成

(中国船舶科学研究中心)

摘要: 2011年7-8月“蛟龙”号载人潜水器在东北太平洋中国多金属结核合同区西区成功进行了5000m级海上试验与应用,通过中央电视台的海试直播,在国内外产生了重大的影响。从技术角度介绍“蛟龙”号载人潜水器的研制过程,重点围绕在研制过程中所遇到的关键技术问题以及在解决这些问题过程中的自主创新情况。

1 引言

“可上九天揽月,可下五洋捉鳖”是中华民族五千多年的梦想。就在“嫦娥二”号探月卫星飞天之前月余,我国首台7000m深海载人潜水器“蛟龙”号下潜到了3759m的海底,并完成了海底取样、海底微地形地貌探测等任务^[1]。在“天宫一”号飞天之前月余,“蛟龙”号载人潜水器又在东北太平洋中国多金属结核合同区西区成功进行了5000m级海上试验与应用。“蛟龙”号载人潜水器5000m级海上试验的成功,使中国成为世界上第5个掌握5000m以上载人深潜技术的国家,实现了中华民族“可下五洋捉鳖”的长久梦想。通过中央电视台的海试直播,在国内外产生了重大的影响。这一技术成就也曾入选“2010年中国十大科技进展新闻”,同时,也使全国人民对载人深潜技术的兴趣大为增加。

论文作者从2002年起参加了“蛟龙”号载人潜水器的研制,亲身经历了攻克载人深潜器技术的过程^[2-9]。本文将从技术角度向听众介绍“蛟龙”号载人潜水器的研制过程,重点围绕在研制过程中所遇到的关键技术问题以及在解决这些问题过程中的自主创新情况。期望通过本文的介绍能回答听众的一部分关切并对同行的专业技术人员有一定的参考作用。

2 “蛟龙”号载人潜水器研制概况

“蛟龙”号载人潜水器研制是国家863计划重大专项之一,2002年6月科技部正式批复立项。中国大洋矿产资源研究开发协会(COMRA)被指定为项目的业主,具体组织该重大专项的实施。中国船舶科学研究中心(CSSRC)、中科院沈阳自动化研究所、中科院声学研究所、中国舰船研究设计中心被选定为该重大专项的主要参研单位。

支撑项目:国家863计划重大专项:(2002AA401002);(2009AA093303);(2010AA093201);(2011AA09A101)。

本重大专项的研制目标是：根据中国大洋矿产资源研究开发协会勘查锰结核、富钴结壳、热液硫化物和深海生物等资源的计划目标及要求，完成一台采用多种高新技术、新材料和新工艺集成起来的、拥有自主知识产权的 7000m 载人潜水器，使其总体技术指标达到国际领先水平，满足我国海洋开发及大洋矿产资源调查的需要，使我国深海运载技术进入世界先进行列。

研制任务书中所规定的“蛟龙”号载人潜水器的使命是：

它在水深不超过 7000m 的海域完成以下任务：

(1) 运载科学家和工程技术专家进入深海，在海山、洋脊、盆地和热液喷口等复杂海底地形进行机动、悬停、正确就位和定点坐坡，有效执行海洋地质、海洋地球物理、海洋地球化学、海洋地球环境和海洋生物等科学考察的配套任务；

(2) 实施对钴结壳的勘查，测量钴结壳矿床的覆盖率和厚度，并能利用潜钻进行钻取芯样作业；

(3) 进行热液喷口的温度测量，采集热液喷口周围的水样，并能保真储存样本；

(4) 有效完成上述环境内对沉积物、浮游生物、吸附在岩石上的生物和微生物的定点采样；

(5) 也可执行水下设备定点布放（包括换能器、声信标及采样器等）、海底电缆和管道的检测，完成其它深海探询及打捞等各种高难度作业。

“蛟龙”号载人潜水器必须能够在 4 级海况下进行下水作业，在 5 级海况下进行回收。

中国船舶科学研究中心作为“蛟龙”号载人潜水器本体研制的技术责任单位，在接到任务后首先提出设计的总体思路，细化出需要攻克的关键技术，然后组织国内 50 多家优势科研院所联合攻关，先后完成了方案设计、初步设计、详细设计、加工制造、总装联调、水池功能性试验等研制阶段，于 2008 年初具备了出海试验的技术条件^[2-7]。从 2009 年开始正式进行海上试验，目前已经完成了 5000m 级深度^[1,8,9]，还剩最后的设计深度 7000m 的海上试验，计划在 2012 年的 6-7 月份进行。

“蛟龙”号载人潜水器的主要技术指标如下：

最大工作深度：	7000m
主尺度：	8.3×3.0×3.4m
载人舱内径：	2.1m
空气中重量：	22t
乘员：	1 名驾驶员，2 名科学家
生命支持时间：	12h（正常），72h（应急）
有效载荷：	220kg
水下时间：	12h
动力：	银锌蓄电池，110kWh
速度：	巡航 1kn，最大 2.5kn
控制：	自动定高、定向、定深，悬停，手动
导航：	超短基线声纳，长基线声纳，激光陀螺
作业：	七功能主从式和开关式机械手各 1 只
观通：	6 台摄像机，1 台照相机，17 只水下灯
通信：	高速水声通信，VHF 通信

在国际上，除美国的“阿尔文”号是上世纪 60 年代开发的外，其他 3 个国家（法国、俄罗斯、日本）的大深度载人潜水器均是 80 年代后期的产品。反映当代最先进技术的当数美国目前正在研制的 6500m 级别的“新阿尔文”号。美国在论证时对应用科学家作了一个调研，提出了如下衡量载人潜水器技术先进性的指标^[10]：更大的下潜深度；更大的载人球；更好的舱内人-机-环设计；电池的

功率更大；在工作深度更长的工作时间；更好的观察视野，驾驶员和科学家的观察视野有重叠；更好的内部电子电路；更大的科学有效负载；更好的照明和成像系统；更强的推进功率（更好的操纵性）；更好的数据采集和仪器接口；更好的悬停作业能力。

如果把我们的“蛟龙”号载人潜水器与美国的“新阿尔文”号相比，在下潜深度方面，我们比他们还深500m，两个载人球的内径是一样的，配备的电池功率略大于“新阿尔文”号。在水下工作时间均已达到载人潜水器的极限，能够携带的科学有效负载也相当，操纵性能和悬停作业能力相近。

“蛟龙”号改进后的照明和成像系统接近“新阿尔文”号。在基于大量应用经验的基础上，“新阿尔文”号在载人舱观察窗设计、舱内人-机-环设计、数据采集和仪器接口设计方面更加优秀。“蛟龙”号的自动驾驶水平、水声通信功能要略胜一筹，特别是“蛟龙”号水声通信传输图像的能力和微地形地貌的探测能力是“新阿尔文”号所不具备的。

尽管“新阿尔文”号目标艇设计采用的技术在有些方面比目前的“蛟龙”号要高，但他们由于受到经费的制约，要分两个阶段才能全部实现。在第一阶段他们只更新载人球及舱内设计，更新指挥控制系统，更新录像系统，增加有效负载，但其它设备均用老“阿尔文”号的，因此，最大下潜深度仍只有4500m。第一阶段预计到2012年6月底完成。第二阶段再采用锂离子电池，新的推进系统，改进的压载系统以及把其它设备均升级到6500m，第二阶段何时实现现在还是一个未知数。因此，从总体上来说，目前的“蛟龙”号的技术水平高于第一阶段的4500m级的“新阿尔文”号的水平。

3 “蛟龙”号载人潜水器研制过程中需要攻克的关键技术

“蛟龙”号载人潜水器立项之初，我国曾经研制过的最深载人潜水器只有数百米，从数百米一步跨到7000m，是一个非常大的技术跨越。因此，“蛟龙”号载人潜水器研制过程中需要解决的技术难点是相当多的，有些在陆上是相当成熟的技术，如电机、泵、阀之类，到了水下要求体积小、重量轻、耐海水高压和腐蚀，就变得很困难。

从技术角度来说，最为核心的就是总体设计和集成的问题，潜水器究竟配备什么部件，这些部件是什么样子的，所有这些部件怎么布置才能变成一个功能协调的潜水器，潜水器在航行和作业时的性能怎么样等。其次，就是这些设备的加工制造，如载人球、浮力材料、动力源、电机、泵、阀等。下面列出的是与总体设计相关的一些关键技术：

- 大深度载人潜水器的总体优化设计和集成技术；
- 大型复杂系统的安全可靠性技术；
- 高能量密度的深海动力技术；
- 以人为中心的信息与自动化系统技术；
- 高速水声通信技术和高分辨率测深侧扫声纳技术；
- 大深度载人潜水器的生命支持技术。

为了方便设计，我们把该潜水器分解成了12个分系统。另外，为了验证潜水器的设计性能和故障处理功能，我们还开发了一个仿真模拟器。在文献[4]中，我们曾经描述过每个分系统设计中遇到的问题及解决方法。

4 “蛟龙”号载人潜水器自主创新情况

2006年1月9日，全国科学技术大会在北京隆重召开。胡锦涛总书记在大会开幕式上发出动员

令：“坚持走中国特色自主创新道路，为建设创新型国家而奋斗”。从此以后，自主创新成为我国的基本国策。自主创新是相对于技术引进、模仿而言的一种创造活动，是指通过拥有自主知识产权的独特的核心技术以及在此基础上实现新产品的价值的过程。自主创新包括原始创新、集成创新和引进消化吸收再创新。自主创新的成果，一般体现为新的科学发现以及拥有自主知识产权的技术、产品、品牌等。对照这一定义，“蛟龙”号载人潜水器可以看作是一个我国自主创新的技术成果，既有原始创新，也有集成创新和引进消化吸收再创新。本节将简要介绍“蛟龙”号载人潜水器自主创新攻克关键技术的情况。

4.1 采用现代科学理论，攻克大深度载人潜水器的总体设计与集成技术

前面讲过，对于大深度载人潜水器的研制来说，最为核心的技术是总体设计与集成，这是任何一家外国公司都不会出卖的技术。国外载人潜水器的研发团队有时只有几个人，他们的责任就是提出设计方案，然后采购或委托其它专业机构研制部件，他们再负责总装集成，进行海试，然后投入应用。

经过对任务使命和总体技术指标的深化归纳，我们提出“蛟龙”号载人潜水器必须具备 5 个重大关键性能：

- 目前国际上同类载人潜水器最大的工作深度——7000m；
- 针对作业目标的稳定悬停就位能力；
- 实时高速传输图像和语音及探测海底小目标的能力；
- 配备多种高性能作业工具，包括潜钻取芯器、沉积物取样器和具有保压能力的热液取样器；
- 安全可靠性能。

上面前 4 个性能也是“蛟龙”号载人潜水器的 4 个标志性成果，而安全可靠性能是实现标志性成果的基础和保障。

在 5 个重大关键性能细化分析后确定了“蛟龙”号载人潜水器研制过程中需要突破的重点关键技术，主要内容可见本文第 3 节。这些技术的有效突破将为总体技术指标的实现和任务使命完成提供保证。在重点关键技术的基础上，结合总体技术指标，扩展分解为 12 个分系统，并通过四要素^[1]明确了相应的技术指标和关键技术。在潜水器设计过程中始终遵循以下 4 项基本准则，以获得可靠、实用的工程产品。

- 载体性能与作业要求一体化准则——以获得产品实用性；
- 技术先进性和工程实用性统一化准则——以获得产品先进性；
- 技术要素规范化准则——以中国船级社 1996 颁发的“潜水系统和潜水器入级与建造规范”为基本依据，获得产品可靠性；
- 结构分块化、功能模块化准则——以获得产品可维性。

以此为基础，我们开始潜水器的设计工作。

由于我们在研制初期的基础非常薄弱，只能通过反复的计算和模型试验来逐步解决。针对载人潜水器的线型及水动力布局综合优化设计问题，我们系统收集了国内外载人潜水器的相关资料，分析了其外形及水动力性能特点，提出了载人潜水器操纵性评估指标，建立了载人潜水器水动力性能（包括快速性和操纵性）的理论与试验预报方法；明确了载人潜水器水动力性能的主要设计变量，确定了综合水动力性能的主要评判属性，提出了约束条件下载人潜水器水动力性能优化设计方法。在进行复杂非线性深海环境下深海载人潜水器空间运动水动力特性研究时，通过风洞、旋臂水池及拖曳水池模型试验以及深入的研究分析，研究得到了载人潜水器六自由度空间运动水动力特性，建立了载人潜水器六自由度空间运动方程并确定了相应的水动力系数，建立了载人潜水器六自由度空

间运动数学模型, 以此为基础对载人潜水器空间运动操纵性能进行了全面的预报分析^[12]。

功能模块化和结构分块化有机结合是我们提出的总布置优化准则。在建立载人潜水器性能优化的数学模型时, 我们采用了功能模块化的办法, 对于潜水器所涉及的子系统, 确定不同的布置要求, 形成不同的模块; 另外, 针对潜水器的结构特点进行分块, 不同空间位置布置特定的设备和系统。在分析了现有设计方法的特点和缺陷以后, 引入了多学科设计优化的方法, 并对该方法进行了深入的研究, 选择了合适的优化算法应用于载人潜水器的性能优化^[13-17]。建立了较为完整的 7000m 载人潜水器的多学科优化设计数学模型^[18-19]。以有效负载比和作业巡航时间为设计目标, 采用基于 Parato 的多目标遗传算法对载人潜水器的 4 个多学科分析模型进行优化计算, 得到有效负载比和巡航作业时间。Parato 设计前沿逐渐由内向外扩展, 巡航作业时间和有效负载比同时增大, 设计向优化方向发展, 为设计者提供了非常重要的且足够多的设计信息, 设计者可以根据设计对象的实际需要和自己的偏好从中选择。

设计结果的合理与否再用 1:1 的模型进行检验, 确认布置的合理性和维修保养的方便性, 经过反复的尝试和不断的修改, 最终我们设计制造出了一台性能优良的载人潜水器, 也标志着我们完全掌握了总体优化设计和集成技术。

4.2 解决大型复杂系统的安全可靠性技术

“蛟龙”号载人潜水器既是一个大型的复杂系统, 又是一个实用的产品, 而且要载人进入深海, 因此, 它的安全可靠性最为要紧。我们在借鉴国外载人潜水器的成功经验基础上, 通过采用“冗余设计”的理念, 设计了一套完善的应急自救手段:

(1) 可弃压载抛载机构: 可弃压载的最大重量有 1.3t, 只要它能全部抛弃, 潜水器就肯定变成正浮力而上浮。具有两套独立的电磁铁和一套液压抛弃功能, 只要 3 套抛弃功能有一个完成动作便可实现抛弃, 而且在电源故障时会自动将压载抛弃。

(2) 主蓄电池箱抛弃机构: 主蓄电池箱的重量有 1.2t, 在可弃压载抛不掉的情况下, 如果能把主蓄电池箱抛掉, 潜水器也会变成正浮力而上浮。主蓄电池箱抛弃机构是由电爆螺栓实施的, 为了提高冗余度, 在连接杆上采用两个电爆螺栓串联, 只要两个之中有一个工作就能达到有效抛弃的目的。

(3) 纵倾调节水银的抛弃: 纵倾调节用的水银重量有 480kg, 它可以很方便地被抛弃。只是水银抛弃后会对环境带来污染, 因此, 一般情况下不鼓励使用。但为了紧急逃生, 也可以使用。通过抛弃水银, 可以获得 430kg 的浮力, 很多情况下即使其他东西抛不掉, 只要抛弃水银, 潜水器已可以上浮了。

(4) 机械手抛弃机构: 在机械手被缠绕的情况下实施, 如果只有手爪被缠住, 则只断手爪; 如果整个手臂被缠住, 则可以抛弃整个手臂。

(5) 压载水箱排水: 当潜水器已上浮到离水面只有 10m 的距离时, 应启动压载水箱排水系统, 它可以再提供最大达到 1.8t 的浮力, 确保潜水器在水面有较大的干舷。

(6) 应急浮标: 当潜水器被困于海底无法上浮时, 可以通过电爆螺栓释放应急浮标。应急浮标和潜水器相连的系索长度最长可以达到 9000m, 由浮标上的频闪灯显示浮在水面上的位置, 支持母船可直接抓取浮标, 提升潜水器至水面, 再进行挂钩回收至甲板。

(7) 采样篮抛弃装置: 采样篮的安装采用电爆螺栓, 在采样篮被缠绕的情况下可以实施抛弃。

“蛟龙”号载人潜水器与国外同类型的大深度载人潜水器相比, 别的潜水器有的应急手段我们均配备了, 而且通过 3 个阶段的海上试验, 已经比较充分地证明了应急抛弃系统是可靠的。因此, “蛟龙”号载人潜水器具有充分的安全可靠性, “下得去, 上得来”的设计理念得到了落实。

4.3 掌握了高能量密度的深海动力技术

动力源是潜水器的“心脏”，它为水下照明、仪器设备、推力器及作业工具等提供能源保障。其本身必须具备无水下排放、无水下噪声、不依赖于空气、无重心漂移等特点。经过反复调研和技术论证，在 7000m 载人潜水器上最终决定采用充油式银锌电池作为电源。

银锌蓄电池在国内已有几家单位可以生产，在许多陆上的设备中已经得到应用。国外的部分载人潜水器也用银锌蓄电池，但国内没有应用过。为了减轻潜水器的重量，银锌蓄电池采用充油的方式放在蓄电池箱内，如何解决在高压环境下银锌蓄电池的大容量低析气量技术是一个关键。我们采用了滤膜和气帽等创新技术，为了保险起见，同时选用信息产业部第 18 所和新乡太行电源股份有限公司两家的产品进行试验，把试验结果再返回生产厂家，用于改进单体电池的性能。通过反复的压力筒试验，使银锌蓄电池组的析气量最终小于 0.1ml/Ah，确保了蓄电池组在供电时不会产生大量氢气而导致危险，保证潜水器的安全。

4.4 以人为中心的信息与自动化系统技术

7000m 载人潜水器研制时采用了将人、机与整个客观环境联系在一起考虑的一种新理念，把人、机、环境看作是一个系统的 3 大要素，在深入研究三者各自性能的基础上，强调从全系统的整体性能出发，通过三者间的信息传递、加工和控制，形成一个相互关联的复杂系统，并贯穿于潜水器设计、研制、建造、使用的全过程中，充分体现了“以人为本”的思想。

在 7000m 载人潜水器研制过程中，强调了人的主导作用，这里的“人”是指作为工作主体的人即潜水器的驾驶员和乘员；“机”是指人所控制的设备和部件即潜水器本体及所携带的各类部件、设备；在“机”的设计方面，也强调了信息的综合集成和操作的自动化程度，尽量降低舱内驾驶员和乘员的工作量。“环境”是指人、机共处的特定的工作条件，即载人舱内的温度、湿度、舱压、氧浓度、二氧化碳浓度、噪声、有害气体等，载人舱外的海面、风、浪、流、深水压力、海底等。如何将这些看起来毫不相关的要素分析、权衡、综合、优化，寻找最佳工作状态，使该系统在安全、高效、经济诸方面获得最佳效果，改变以往分散、孤立的研究局面，可把人们对人机环境综合性能研究的实践活动推向一个崭新阶段。从“蛟龙”号载人潜水器的海试操作效果来看，以人为中心的信息与自动化系统技术高于国外的部分载人潜水器。

4.5 高速水声通信技术和高分辨率测深侧扫声纳技术

水声通信机用于在载人潜水器与水面支持母船之间建立实时通信联系。通过它，母船向载人潜水器发出指令，载人潜水器向母船传输各种数据、语音和图像。这是载人潜水器非常重要的功能，如果没有水声通信，潜水器就不敢下潜。通信的速度和质量反映了技术水平。“蛟龙”号载人潜水器在研制时就瞄准了国际上最先进的高速水声通信技术，通过对相干通信和非相干通信算法的研究，制定了处理算法。根据相干通信算法的要求，结合数字信号处理器的性能特点，设计了在多数数字信号处理器系统上的实现方案。采用在混合激励线性预测算法基础上改进的算法，降低了编码后的数据率。研究了一种鲁棒的图像压缩编码算法，对误码的敏感程度低，应用于水声通信。“蛟龙”号载人潜水器能够实时传输彩色电视图像和声学图像的功能是国外其它绝大多数潜水器所没有的。

高分辨率测深侧扫声纳安装载人潜水器的两侧，可以用于测量海底的微地形地貌和海底、水中的目标，实时绘制出现场的三维地图。它能在复杂的海底上工作，给出目标的高度，因此十分适合在钻结壳区域勘察工作和在大洋热液场测量热液喷口“烟囱”的几何尺寸。这一功能也是其它国外载人潜水器所没有的。我们在开发这一功能时，对一系列相关技术问题进行了研究，如发射线形调频信号的信号处理方法的研究，用于提高声纳的垂直与航迹的分辨率；海底自动检测技术的研究，使声纳能够自动判别目标数和判别海底；多子阵高分辨率波束形成技术的研究，用于提高声纳的估

计精度。通过这些研究,形成了一整套针对于高分辨率测深侧扫声纳的信号处理方法:多子阵海底自动检测——信号子空间的信号参数估计技术。

4.6 大深度载人潜水器的生命支持技术

载人潜水器的生命支持系统通过控制载人耐压舱中的氧气浓度,吸收二氧化碳,创造一个适合于乘员工作的生存环境。它包括正常工作生命支持、应急状态开放式生命支持、应急状态口鼻面罩式生命支持、生命支持系统监控面板四个方面。

正常工作和应急状态开放式生命支持所需的氧气可储存在相应的高压氧气瓶中,氧气通过氧气瓶阀、减压阀、流量调节阀、电磁供氧阀、流量计及管路释放到载人耐压球壳空间里,供乘员呼吸之用。控氧仪根据氧浓度计的实测数据来控制电磁供氧阀的开关。当载人耐压舱内氧浓度低于 17.5% 时,供氧阀自动打开,当氧浓度高于 22.5% 时,供氧阀自动关闭。为了提高可靠性,在电磁供氧阀的两端并接一套手动阀,也可通过手动调节流量调节阀和手动阀来改变氧气流量,达到控制载人耐压舱内氧浓度的目的。

二氧化碳吸收装置采用箱体结构,由风机、内筒、内盖、机箱体和机箱盖等组成。二氧化碳吸收剂选用氢氧化锂,它按照一定的要求装在一个不锈钢罐中。平时不用时,装有氢氧化锂的不锈钢罐外面有塑料密封袋,并装在一个密封箱中。需要使用时,取出氢氧化锂罐,去掉密封袋,将罐装入吸收装置的内筒中,启动风机,就能清除载人耐压舱里的二氧化碳。

当载人耐压舱内出现异常气体,不适合再用开放式呼吸时,乘员可戴上口鼻面罩式呼吸器。这是一种封闭式呼吸系统,氧气贮存在一只 7L 的高压氧气瓶中,通过氧气瓶阀、减压阀、流量调节阀、流量计跟空气混合后经管路送至口鼻面罩供呼吸,呼出的二氧化碳也经管路送至吸收装置,去除了二氧化碳后的空气在该封闭式系统中反复循环使用。二氧化碳吸收装置为单独配置,且该装置跟载人球壳空间的空气隔绝,它只和口鼻面罩封闭式系统相连。

生命支持系统的全部监测仪表都集中安装在一块监控面板上,包括:数字式和模拟式氧浓度表各一个。其中数字式表的实测数据送给控氧仪和声、光报警器,一方面作控制用,另一方面若氧浓度超标会发出报警信号。同时它带有数据接口,能实时地将氧浓度数据传送给综合显控计算机。

生命支持系统研制需要攻克的关键技术主要有载人耐压舱内大气环境控制技术研究,重量轻、体积小、吸收率高的二氧化碳吸收剂的研制,以及特种供氧系统设计研究,这些关键技术主要由上海打捞局研究所攻克。

4.7 大深度载人潜水器部件的国产化问题

在解决了与设计 and 集成相关的总体问题之后,接下来就是部件设备的加工制造,如载人球、浮力材料、动力源、电机、泵、阀等。为了控制整个项目的研制进度,“蛟龙”号上大约有 40% 的部件是委托国外加工或研制的,但为了确保今后的使用不受制于人,我们在研制过程中也同步安排重要设备的国产化研究。

结构系统按承载方式可分为耐压结构和非耐压结构。耐压结构提供密闭常压腔体,其关键部件是为乘员和仪器设备提供常压空间载人球。此外,耐压结构还包括 5 只小直径耐压罐、1 只可调压载水舱和 1 只高压气罐等。非耐压结构由框架结构和外部结构组成。框架结构,可分为主框架和辅助框架。它既为潜水器内部各类耐压结构和仪器设备等提供安装基础,又为外部结构中的浮力块、轻外壳、稳定翼和外部设备提供支撑,而且还是潜水器吊放、回收、母船系固和坐底时的主要承载结构,是各类设备总装集成的载体。外部结构主要有浮力块、轻外壳、稳定翼、压载水箱等。浮力块一方面为潜水器提供水下浮力,同时也形成潜水器的外部线型。轻外壳提供部分流线型的外形,保护内部设备免受外物碰撞;稳定翼用于提高潜水器的稳定性和水动力性能。压载水箱主要用于潜

水器浮出水面时提供浮力,以保证潜水器的干舷高度。

载人球的设计和建造均是难点。从设计来说,尽管很多船级社均有设计标准,但互相之间差别很大^[20]。对于载人球极限承载能力的预报方法,船级社之间也没有统一^[21],我们在大量有限元分析的基础上给出了一组新的载人球极限承载能力的预报公式^[22],它能很好地与有限元分析结果吻合。以此为基础,提出了一套新的设计标准,已经提供给中国船级社作为设计标准更新的依据^[23]。在载人球设计过程中,观察窗的变形协调^[24-26]、疲劳载荷谱的确定^[27]、疲劳寿命可靠性分析^[28]、多目标的优化设计^[29]等,均是需要解决的技术问题。在满足安全性的前提下,载人球设计优劣的评价主要就是观察窗的数量和它们之间视野的覆盖程度。最先进的载人球设计当数美国的“新阿尔文”号^[10]。它由 5 个观察窗,科学家和主驾驶员有较多的视野覆盖面,有利于科学家指挥主驾驶员进行作业。

载人球的制造有 3 种思路:无焊接、半球焊接和瓜瓣焊接。无焊接工艺:采用铸造制成两个半球,然后机加工成型,再采用螺栓连接。俄罗斯的“和平”号两个载人潜水器就采用这种工艺,主要是担心焊接质量不过关^[30]。半球成型工艺:采用大规格厚板直接冲压成型半球,再采用电子束焊接 2 个半球赤道环缝。如日本的“深海 6500”号^[31]和美国制造的钛合金球壳均采用该工艺^[10]。分瓣成型工艺:将每个半球分为 7 瓣,每个球瓣分别成型后,采用窄间隙焊接将 7 个瓣组焊成半球,再焊接 2 个半球的赤道环缝。如俄罗斯制造的钛合金球壳就采用该工艺,包括“俄罗斯”号、“领事”号和“蛟龙”号^[4]。第三种工艺对于大规格钛合金厚板轧制能力、冲压能力的要求较低,但对焊接的要求较高。目前我国也只能采用第三种工艺,能够制造潜深 4500m 左右的载人球。如果焊接质量过关,则载人球的安全性是一样的。

框架,又可分为主框架和辅助框架。它既为潜水器内部各类耐压结构和仪器设备等提供安装基础,又为外部结构中的浮力块、轻外壳、稳定翼和外部设备提供支撑,而且还是潜水器吊放、回收、母船系固和坐底时的主要承载结构,是各类设备总装集成的载体。无论从设计还是加工角度,框架结构没有难度,但设计得好,对潜水器的可维性以及使用安全性均有十分重要的作用。在“蛟龙”号载人潜水器研制过程中,我们也对框架结构进行了优化设计^[32],并且进行了 2 倍自重载荷下的应变测量试验,用于评估框架结构的安全性^[33]。

为了使载人潜水器在海水中实现均衡,需要使用浮力材料。浮力材料的先进性是用给定承压能力的条件下它的密度和吸水率来表示的,密度和吸水率越低越好。目前在潜水器上使用的浮力材料有 2 种类型,一种是玻璃微珠掺杂环氧树脂制成的可机加工型浮力材料,这种能承受 7000m 高压的浮力材料的最先进水平的密度为 481kg/m^3 ,但美国允许出口我国的浮力材料的密度是 561kg/m^3 。另一种是陶瓷球^[34-35],这种浮力材料的比重更轻,全海深的密度只有 340kg/m^3 ,但它只在无人潜水器上使用过。为了减轻“蛟龙”号载人潜水器的重量,浮力块一方面为潜水器提供水下浮力,同时也形成潜水器的外部线型。这样,对浮力块的设计和加工提出了很高的要求,这些技术难点在我国已经解决^[36]。轻外壳提供部分流线型的外形,保护内部设备免受外物碰撞^[37];稳定翼用于提高潜水器的稳定性和水动力性能。压载水箱主要用于潜水器浮出水面时提供浮力。为了节省能源,载人潜水器一般采用无动力上浮下潜的方式,与国外的螺旋形轨迹不同,“蛟龙”号载人潜水器是直上直下的稳定运动^[38]。如何分析潜水器在坐底时的受力状况,设计出合适的坐底支架是一个实用性的问题,文献^[39]对此问题也有研究。

动力源对载人潜水器来说是十分重要的,早期用铅酸电池,后来改用能量密度更高的银锌电池,未来的发展趋势是锂离子电池^[40],我国也已在 4500m 载人潜水器研制项目中安排研究。

水下电机、高压海水泵、一体化推力器是几个重要的设备,这些设备在陆上是相当成熟的技术,到了水下要求体积小、重量轻、耐海水高压和腐蚀,就变得比较困难。目前这 3 个设备的国产化基

本实现,对于水下电机来说,发展方向是提高功率;对于高压海水泵的主要发展方向是提高流量,如果有大流量的高压海水泵,则可以把纵倾调节用的水银取消,甚至也不需要固定压载,载人潜水器可以在任何深度实现均衡。对于一体化推力器来说,发展方向是降低噪声,目前我国自行研制的一体化推力器的噪声水平已经明显地低于美国 Technadyne 公司的产品。

潜水器的水动力特性和自动控制相结合就构成了载人潜水器的控制系统,在“蛟龙”号载人潜水器上,马岭等人^[41-45]探索了多种不同的控制方法。对于载人潜水器的导航与定位能力来说,比较先进的是同时具备超短基线和长基线两种功能,对于水声通信来说,最先进的是能同时传输语音、文字、图像,目前我国的“蛟龙”号载人潜水器在水声通信和定位能力方面已处于国际先进水平。

应急抛载和生命支持系统从技术上来说,没有特别的困难,但必须要求非常可靠。从应用角度来说,观察、照明和摄像的质量非常关键,也是衡量一个载人潜水器作业能力的重要方面,目前美国的“新阿尔文”号和俄罗斯的“和平”号处于比较领先的水平,“蛟龙”号载人潜水器也在努力朝这个方向改进。

从目前的现状来说,只要国家再有一定的国产化投入,即使国外不再卖给我们任何引进的部件,我们的“蛟龙”号载人潜水器完全可以用国内的产品替代,没有任何“卡勃子”的设备会影响到它的今后应用。

5 总结和体会

本文从技术角度介绍了“蛟龙”号载人潜水器的研制情况,重点介绍了在研制过程中所遇到的关键技术问题以及在解决这些问题过程中的自主创新情况。期望通过本文的介绍能回答听众的一部分关切并对同行的专业技术人员有一定的参考作用。通过参加本项目的研制,作者有如下一些体会:

(1) 技术上的跨越式发展从实践上来说是可以实现的;

(2) 实现的途径是虚心学习的态度和严谨求实的作风。在蛟龙号研制过程中,监理和技术咨询专家组的作用十分显著;

(3) 领导的支持至关重要,因此,改革科研管理体制大有潜力;

(4) 在良好的科研管理体制下,中国的科研人员能够站到国际前沿。

参 考 文 献

- [1] 刘 峰,崔维成,李向阳.中国首台深海载人潜水器——“蛟龙”号[J].中国科学:地球科学,2010,40(12): 1617-1620.
- [2] Cui Weicheng, Xu Qinan, Liu Tao, Hu Zhen, Yang Youning, Hu Yong, Ma Ling. Introduction to the Development of a 7000m Manned Submersible[A]. Presented at the Post-Symposium Workshop of Underwater Technology 2007, April 23-24, 2007, hosted by Shanghai Jiao Tong University and China Ship Scientific Research Center.
- [3] 崔维成,徐芑南,刘 涛,胡 震,杨有宁,胡 勇,马 岭.7000m载人潜水器研发简介[J].上海造船,2008,总第73期,14-17.
- [4] 崔维成,徐芑南,刘 涛,胡 震,杨有宁,胡 勇,马 岭.“和谐”号载人深潜器的研制[J].舰船科学技术,2008,30(1): 17-25.
- [5] Liu Feng, Cui Weicheng and Li Xiangyang. Introduction to Design and Construction of Deep Manned Submersible Harmony[A]. Paper presented in International Conference of INMARTECH2008, All Seasons Hotel, Toulon, France, 8-10 October, 2008.

- [6] 胡 震, 王晓辉, 朱 敏, 等. “和谐”号载人潜水器水池试验[A]. 中国上海第三届亚太地区潜水和水下技术会议论文集, 2008 年 6 月 14-15 日.
- [7] Cui Weicheng, Xu Qinan, Liu Feng, Hu Zhen, Wang Xiaohui and Zhu Min. Design, Construction and Open Water Tank Test of the Deep Manned Submersible *Harmony*[A]. Keynote paper presented in the Sixth International Symposium on Underwater Technology UT2009, Wuxi, China, April 2009.
- [8] Cui W C, Hu Z, Ye C, Xu Q N. First two phases of sea trials of deep manned submersible *Jiaolong*[A]. Ocean Innovation Conference (OI2010), October 17-20, 2010, St. John's, Canada.
- [9] 崔维成, 刘 峰, 胡 震, 朱 敏, 郭 威, 王春生. “蛟龙”号载人潜水器的 5000m 级海上试验[J]. 中国造船, 2011, 52 (3): 1-14.
- [10] Van Dover C. (Eds.) 6500m HOV Project: A-4500 HOV Project Execution Plan[R]. November 10, 2009.
- [11] 崔维成, 刘正元, 徐芑南. 大型复杂工程系统设计四要素法[J]. 中国造船, 2008, 49(2): 1-12.
- [12] 崔维成, 马 岭. 潜水器设计中所要解决的水动力学问题[A]. 第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会文集, 吴有生, 刘桦, 许唯临, 周连第, 杨显成主编, 海洋出版社, 2009, 北京, 9-29.
- [13] Liu Wei and Cui Weicheng. Multidisciplinary Design Optimization (MDO): A promising tool for the design of HOV[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2004, 8(6): 95-112.
- [14] 操安喜, 崔维成. 潜水器多学科设计中的多目标协同优化方法[J]. 船舶力学, 2008, 12(2): 294-304.
- [15] 赵 敏, 崔维成. BLISCO方法在载人潜水器设计中的应用[J]. 船舶力学, 2009, 13(2): 259-268.
- [16] 赵 敏, 崔维成. 载人潜水器概念设计中的系统集成模型[J]. 船舶力学, 2009, 13(3): 426-443.
- [17] Gou P and Cui W C. Application of collaborative optimization in the structural system design of underwater vehicles[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2010, 5(2): 115-123.
- [18] 刘 蔚, 操安喜, 苟 鹏, 崔维成. 基于 BLH 框架的大深度载人潜水器总体性能的多学科设计优化[J]. 船舶力学, 2008, 12(1): 110-117.
- [19] Cao Anxi and Cui Weicheng. Multidisciplinary Design Optimization Method Applied to a HOV Design[A]. Paper presented in International Conference of INMARTech2008, All Seasons Hotel, Toulon, France, 8-10 October, 2008.
- [20] Pan B B, Cui W C. A Comparison of Different Rules for the Spherical Pressure Hull of Deep Manned Submersibles[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2011, 15(3): 276-285.
- [21] Pan Binbin and Cui Weicheng. An overview of buckling and ultimate strength of spherical pressure hull under external pressure[J]. *Marine Structures*, 2010, 23: 227-240.
- [22] Pan B B, Cui W C, Shen Y S, Liu T. Further study on the ultimate strength analysis of spherical pressure hulls[J]. *Marine Structures*, 2010, 23(6): 1-18.
- [23] Pan Binbin and Cui Weicheng. On an Appropriate Design and Test Standard for Spherical Pressure Hull in a Deep Manned Submersible[A]. presented at Advanced Underwater Technology for the Ocean Symposium on Underwater Technology 2011 and workshop on Scientific Use of Submarine Cables & Related Technologies 2011, IIS Conference Hall, Haricot, Tokyo, Japan, April 5-8, 2011.
- [24] Li Xiangyang and Cui Weicheng. Contact finite element analysis of a spherical hull in the deep manned submersible[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2004, 8(6): 85-94.
- [25] 刘道启, 胡 勇, 田常录, 崔维成. 深海耐压结构观察窗应力分析[J]. 船舶力学, 2010, 14(1-2): 121-125.
- [26] 刘道启, 胡 勇, 王 芳, 田常录, 崔维成. 载人深潜器观察窗的力学性能[J]. 船舶力学, 2010, 14(7): 782-788.
- [27] 李向阳, 刘 涛, 黄小平, 崔维成. 大深度载人潜水器载人耐压球壳的疲劳载荷谱分析[J]. 船舶力学, 2004, 8(1): 59-70.

- [28] 李向阳, 崔维成, 张文明. 钛合金载人球壳的疲劳寿命可靠性分析[J]. 船舶力学, 2006, 10(2): 82-86.
- [29] 操安喜, 刘蔚, 崔维成. 载人潜水器耐压球壳的多目标优化设计[J]. 中国造船, 2007, 48(3): 107-114.
- [30] Sagalevitch A M. From the Bathyscaph Trieste to the Submersibles Mir[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2009, 43(5): 79-86.
- [31] Nanba N, Morihana H, Nakamura E, et al. Development of deep submergence research vehicle *SHINKAI 6500*[J]. *Techn Rev Mitsubishi Heavy Industr Ltd*, 1990, 27: 157—168.
- [32] 洪林, 刘涛, 崔维成, 谢锡南, 祁恩荣. 基于参数化有限元的深潜器主框架优化设计[J]. 船舶力学, 2004, 8(2): 71-78.
- [33] 胡勇, 崔维成, 刘涛. 大深度载人潜水器钛合金框架实验研究[J]. 船舶力学, 2006, 10(2): 73-81.
- [34] Pausch S, Below D and Hardy K. Under High Pressure: Spherical Glass Flotation and Instrument Housings in Deep Ocean Research[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2009, 43(5): 105-109.
- [35] Weston S, Olsson M, Merewether R and Sanderson J. Flotation in Ocean Trenches Using Hollow Ceramic Spheres[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2009, 43(5): 110-114.
- [36] 赵俊海, 马利斌, 刘涛, 崔维成. 大深度载人潜水器浮力块的结构设计[J]. 中国造船, 2008, 49(4): 99-108.
- [37] 胡勇, 赵俊海, 刘涛, 崔维成. 大深度载人潜水器上的复合材料轻外壳结构设计研究[J]. 中国造船, 2007, 48(1): 51-57.
- [38] Shen Mingxue, Liu Zhengyuan, Cui Weicheng. Simulation of the decent/ascent motion of a deep manned submersible[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2008, 12(6): 886-893.
- [39] 胡勇, 沈允生, 谢俊元, 崔维成. 深海载人潜水器的坐底分析[J]. 船舶力学, 2008, 第12卷第4期, 642-648.
- [40] White D A. Modular Design of Li-Ion and Li-Polymer Batteries for Undersea Environments[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2009, 43(5): 115-122.
- [41] Ma Lin, Cui Weicheng. Simulation of dive motion of a deep manned submersible[J]. *Journal of Ship mechanics*, 2004, 8(3): 31-38.
- [42] Ma Ling, Cui Weicheng. Path following control of a deep-sea manned submersible based upon NTSM[J]. *China Ocean Engineering*, 2005, 19(4): 625-636.
- [43] 马岭, 崔维成. 大深度载人潜水器的低速大漂角模糊滑模航向控制研究[J]. 海洋工程, 2006, 24(3): 74-78.
- [44] 马岭, 崔维成. 潜水器水平面动力学模型系统辨识[J]. 中国造船, 2006, 47(2): 76-81.
- [45] Xie Junyuan, Xu Wenbo, Zhang Hua, Xu Pengfei, Cui Weicheng. Dynamic Modeling and Investigation of Maneuver Characteristics of a Deep Sea Manned Submarine Vehicle[J]. *China Ocean Engineering*, 2009, 23(3): 505-516.

作者简介

崔维成, 男, 1963年生, 江苏省海门市人, 研究员, 博士生导师, 从事载人潜水器的多学科设计优化研究。E-mail: wccui@sjtu.edu.cn。



SRI-VC2110DP 动力定位控制 系统关键技术与创新

侯馨光, 张 敏, 许安静, 韩 冰, 董胜利

(上海船舶运输科学研究所)

摘要: 动力定位系统是海洋工程领域的关键技术之一, 我国在该领域的研究尚处于起步阶段。简要介绍了我国自主研发的 SRI-VC2110DP 型动力定位控制系统及其关键技术, 如系统网络结构、系统主要功能、控制策略及推力分配设计等。文章还对 SRI-VC2110DP 动力定位控制系统的特点进行了分析。

1 引言

进入 21 世纪后, 由于陆地油气资源的日益枯竭, 海上油气资源的开发蓬勃发展, 海洋工程装备的建造也被推向了一个新的高潮。在国际金融危机的影响下, 三大主力船型(散货船、集装箱船、油船)市场骤冷, 海洋工程装备又成了主要造船国家规避金融危机风险的一种选择。海洋工程装备制造已被我国列为战略性新兴产业。遗憾的是海洋工程装备的配套设备基本上被国外的一些大公司垄断, 如海洋工程必不可少的动力定位控制系统, 基本上都是外国公司的产品。为了改变这一局面, 我所在研制成功 SRI-VC2110 船舶机舱自动化系列产品的基础上, 在政府有关部门支持下, 于 2009 年开始研制 SRI-VC2110DP 系列动力定位控制系统。经过近 3 年的努力, 现已研制成功了 SRI-VC2110DP 系列动力定位控制系统, 首台产品将用于我所自主设计的 2000t 起重船。

2 系统简介

2.1 SRI-VC2110DP 系统组成

SRI-VC2110DP 系列按我国 CCS 规范与德国劳氏船级社 GL 规范设计。整个系列由满足规范 3 种附加标志要求的产品组成, 即 DP-1、DP-2 及 DP-3 附加标志产品。

SRI-VC2110DP-1 是基本型的动力定位控制系统; SRI-VC2110DP1 系统组成框图如图 1 所示。

SRI-VC2110DP-2 除了由 2 套独立的 DP-1 控制系统组成外, 还增设了一些安全保障功能。如: 当出现单个故障时, 在规定的条件下、规定的作业范围内仍能自动保持船舶的位置和首向。又如: 控制系统具有“结果分析”功能, 当出现严重故障时, 控制系统能自动平稳切换等。SRI-VC2110DP2 系统组成框图如图 2 所示。

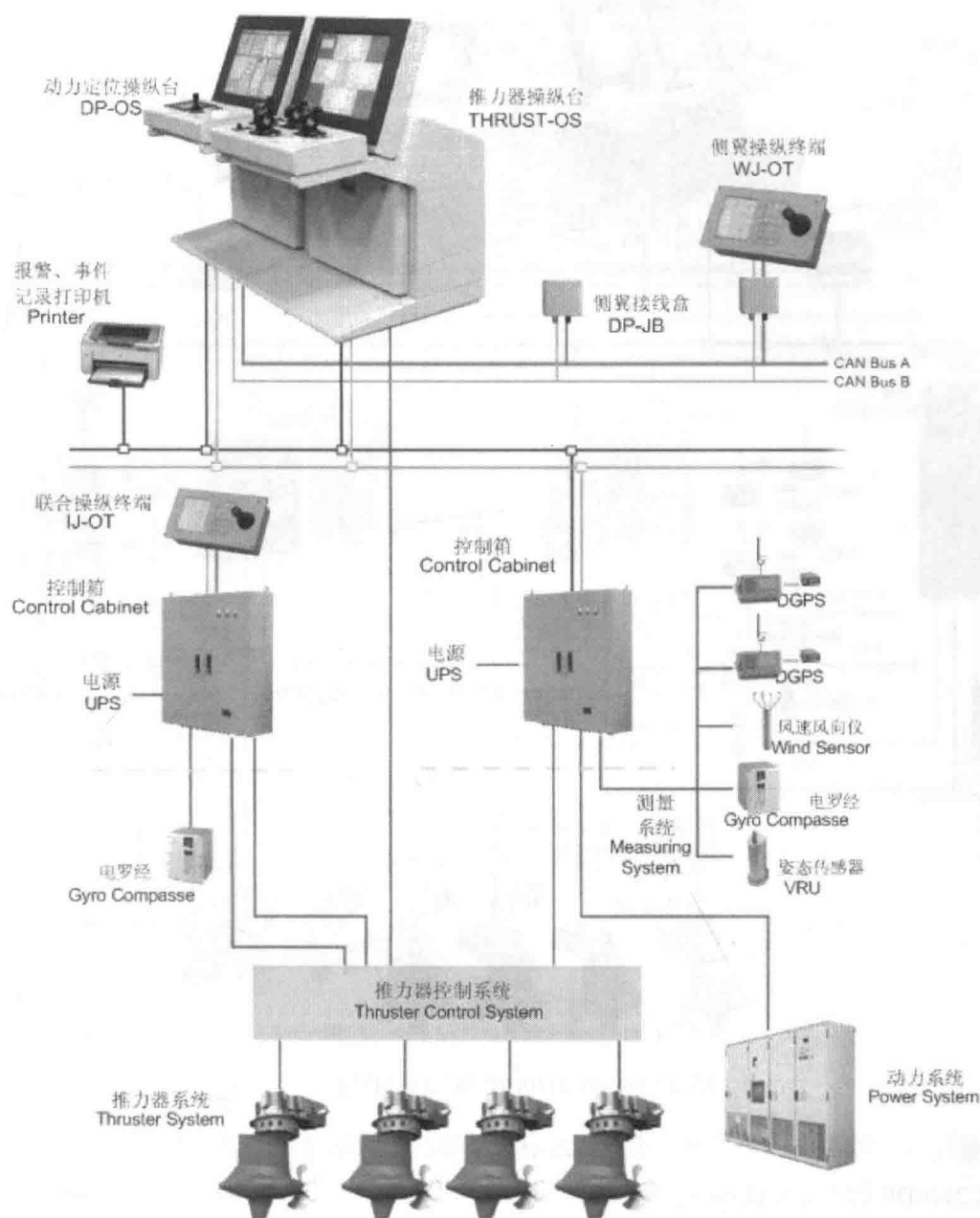


图1 SRI-VC2110DP1 系统组成框图

SRI-VC2110DP-3 是 DP-1 与 DP-2 的组合，除了能实现 DP-1 及 DP-2 的所有功能外，还要求将 DP-2 与 DP-1 安放在不同的舱室内，当某一舱室失火或进水时，仍能保证有 1 个 DP 系统在工作。SRI-VC2110DP3 系统组成框图如图 3 所示。

DP 系统的基本组成如下：动力定位操纵台、推力器遥控操作台、侧翼操作板、侧翼接线盒、联合操纵终端、控制箱、测量系统传感器、UPS 不间断电源以及报警事件记录打印机等。数量的多少根据规范附加标志 DP-1、DP-2 及 DP-3 的要求选用。

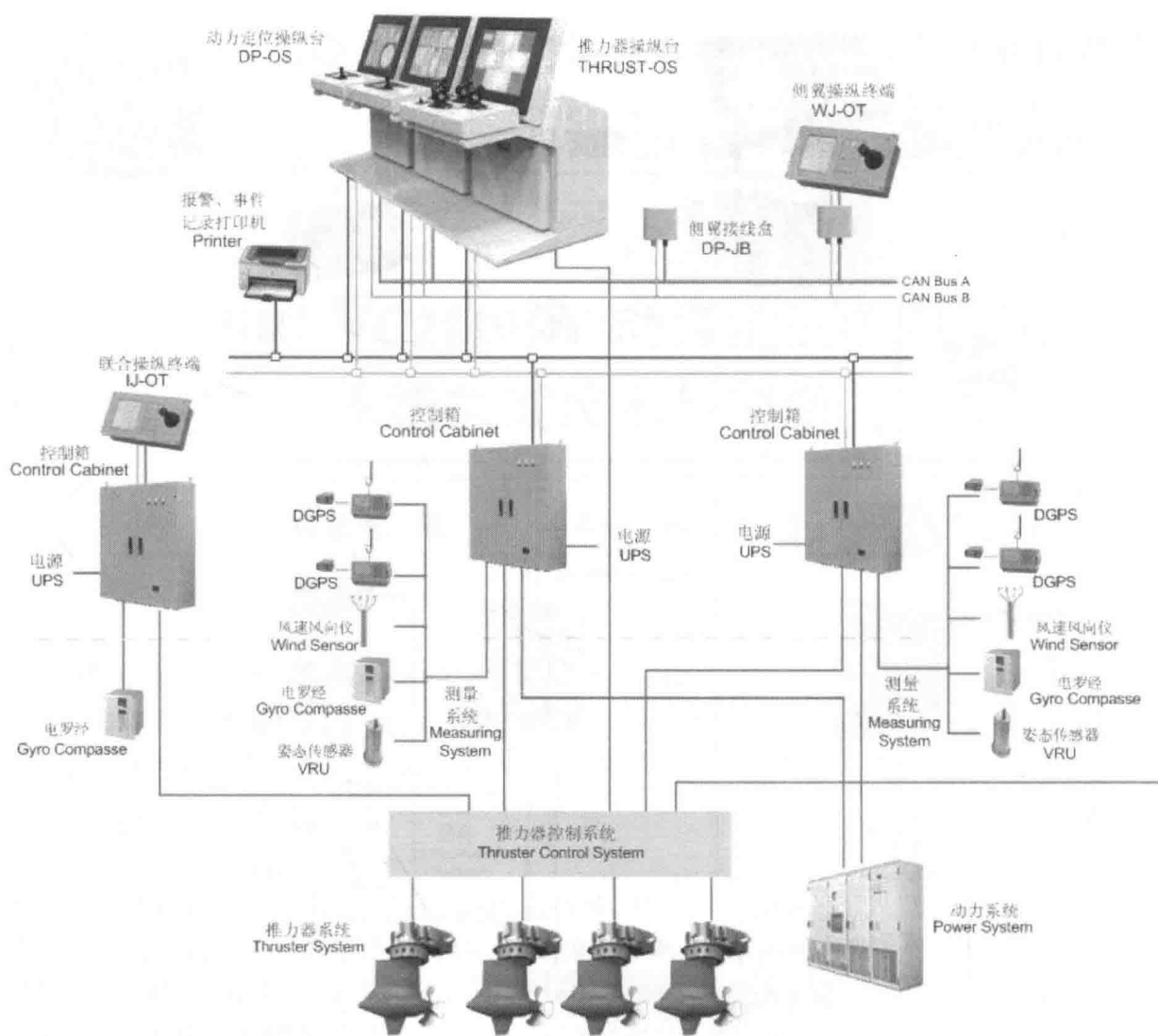


图 2 SRI-VC2110DP2 系统组成框图

2.2 主要功能

SRI-VC2110DP 的主要功能如下：

(1) 手动控制杆遥控功能

通过操纵三轴摇杆可联合控制多个推进器，满足起重船在回转、横向、纵向 3 个方向上的运动控制需求。也可通过联合操作杆对船舶回转、横向、纵向 3 个方向中的任意 1 个或 2 个变量进行运动控制。

(2) 自动位置控制功能

自动位置控制功能可使船舶保持当前位置和首向，也可使船舶在控制下达到要求位置和首向状态。

(3) 自动驾驶功能

在自动驾驶模式下，船舶可按预定要求控制自动航行。

(4) 航迹跟踪功能

在航迹跟踪模式下，船舶可按预定的航迹进行自动跟踪行驶。

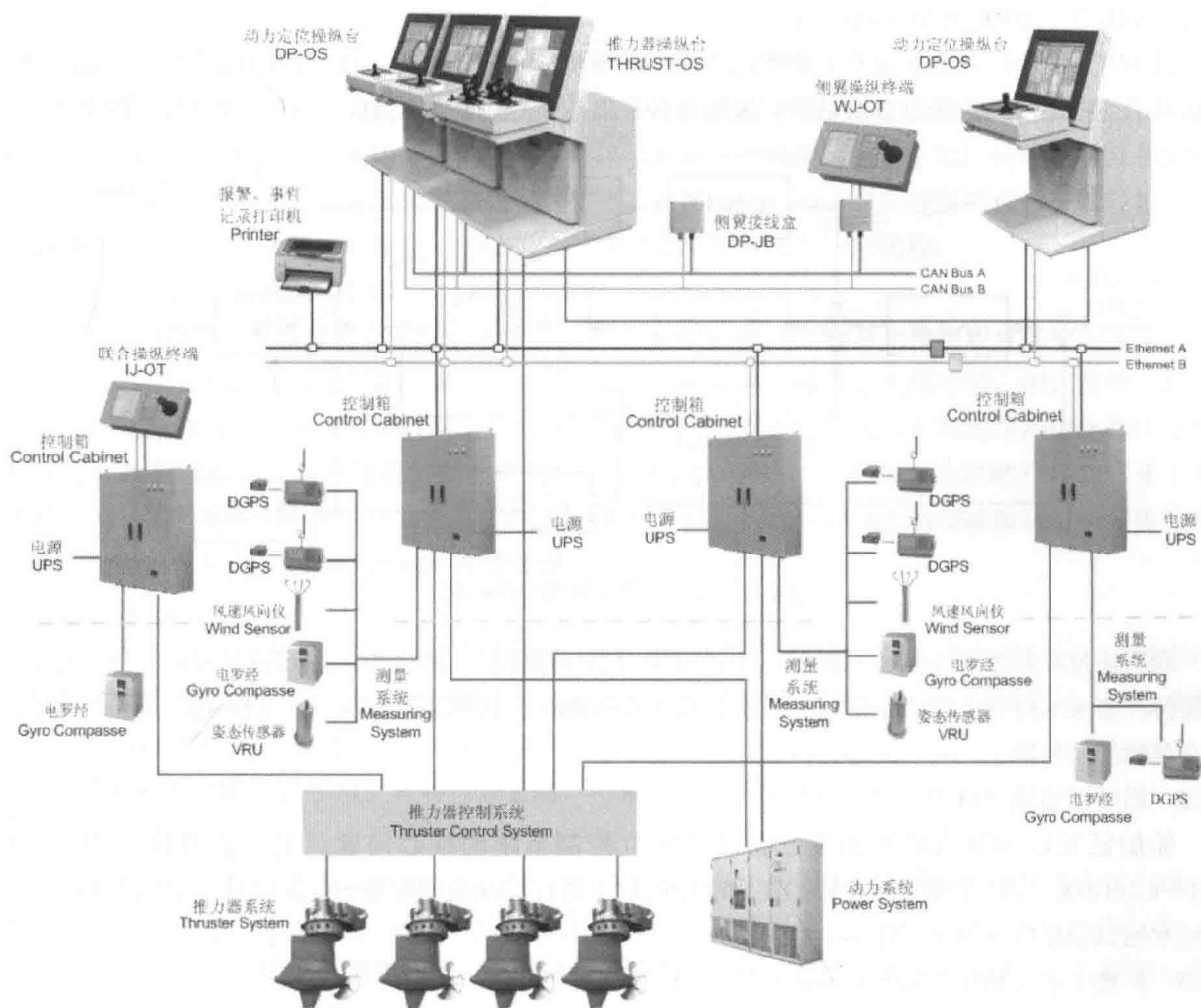


图 3 SRI-VC2110DP3 系统组成框图

(5) 目标自动跟随功能

在控制系统作用下，船舶可自动控制与移动目标之间的距离和方位，控制精度受目标速度影响。

(6) 控制模式选择功能

控制模式有 3 种：一是高精度控制，二是节能控制，三是松弛控制。

(7) 实船训练功能

控制系统提供实船模拟训练功能，用于操作人员操作培训。

(8) 推力器独立手动操作功能

系统有一个独立的推力器操纵台，可对每一个推力器实现手动操纵。

3 SRI-VC2110DP控制系统关键技术

3.1 SRI-VC2110DP 系统控制策略

动力定位控制系统的主要任务是根据当前船舶状态与目标状态的偏差对位置与首向进行控制，并保持船舶运动状态。