doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2023.01.006

基于电磁力驱动的海洋调查装备抛载机构设计

任玉刚 1.2, 景春雷 1, 刘延俊 2

(1. 国家深海基地管理中心,山东 青岛 266237; 2. 山东大学机械工程学院,山东 济南 250061)

摘 要:针对目前我国大洋科考活动中急需的科考仪器设备吊装布放需求,结合传统的吊装释 放器特点,本文设计了一种新型的基于电磁驱动法的红外遥控式海洋装备甲板吊放释放机构, 提出了微小电磁力控制重型吊载力的杠杆式设计吊装及抛载设计方法,并针对作业工况和结构 特点,引入了计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助工程 (Computer Aided Engineering, CAE) 技术,进行了机构设计,采用有限元法对承载结构进行了结构力学分 析,对比分析了 3 种材料力学性能,给出了材料选取方案,以期为大洋仪器设备设计提供借鉴 和创新性方案指导。

中图分类号: P71 文献标识码: A 文章编号: 1003-2029 (2023) 01-0053-08

深海大洋是一个连接全球各大陆的巨大空间, 拥有浩瀚的水体气候资源、海底矿产资源和丰富的 生物基因资源。人类一直开展深海大洋科学探索, 而通过海洋仪器是开展科学探索的重要技术载体。 海洋科考仪器可搭载一系列专业化的传感检测器、 物理量探测设备进入深海预定位置现场完成测量、 分析、评估和探测作业¹¹⁻²¹,获得高价值科学样品与 数据,实现突破性科学发现。

目前,海洋科考仪器多搭载于海洋科考船舶, 多为专业仪器设备,通常需要在海上进行现场布 放。由于海上海况条件、船舶条件不同,海上布放 机构是实现科考仪器在现场实现作业的重要仪器设 备,也是海洋科考设备的必备工具^[3-4]。应用于深海 大洋的仪器受探测及作业深度的增加,其重量普遍 较大,人力布放及回收已不现实。海上布放通常采 用船载吊放设备进行作业,而抛载释放机构则较为

简单,大部分采用船载折臂吊机将仪器吊装,仪器 与吊机通过一个机械式安全销轴释放机构连接。布 放时拨出安全销,释放机构处于活动状态,其触发 机构与一根绳子连接,由专人松紧绳子,当吊机回 转至指定海域,人工拉动绳子,在仪器自身重力作 用下, 触发释放器, 从而实现释放。上述释放机构 优点是结构简单,但在整个布放及回收过程中,实 际释放机构始终处于活动状态。考虑到海上涌浪船 舶摇摆等情况,布放极易造成脱钩,形成安全事 故,主要问题包括:①布放过程存在安全隐患,海 上恶劣海况极易造成仪器坠落造成人员及仪器的安 全隐患; ②布放效率低下, 耗费大量海上宝贵时 间,对布放人员经验要求高,存在技术门槛;③触 发机构设计精度高,给制造工艺、材料选择带来困 难,造价高昂,目前考虑到制作工艺水平基本采用 国外进口,无法解决"卡脖子"问题。

收稿日期: 2022-05-18

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QD041);国家重点研发计划资助项目(2021YFC2801605);国家自然科学基金资助项目(52175018)

作者简介:任玉刚(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事深海探测技术装备应用技术研究。 E-mail: ytrenyugang@163.com

通讯作者:刘延俊(1963—),男,博士,教授,主要从事深海探测技术装备应用技术研究。E-mail: lyj111ky@163.com

为解决上述问题,本文基于"蛟龙"号载人潜 水器科学应用航次过程中的现场任务需要,开展了 "一种基于电磁驱动的红外遥控式海洋装备甲板吊 装释放机构"设计研究,进行了机械结构设计,采 用杠杆式机构设计,实现微小电磁力控制重型吊载 力的原理;提出了远程红外光谱遥控触发的控制策 略,从而极大降低了人工触发带来的危险性和失败 率;触发机构采用电磁式吸附设计,相对于以往机 械式释放机构具备触发冗余度高的特点,同时具备 两套独立触发释放能力,保证了成功率,同时良好 应用前景。

1 国内外研究现状

海洋装备抛载机构主要分为水下和水面两种^[5-6], 其中水下抛载机构主要用于运载器的上浮下潜调 节、深海探测工具的抛载等,水面抛载机构主要用 于海洋科考仪器在甲板的吊装抛载释放,即为水面 的抛载作业,将调查设备布放至海底。

1.1 水下抛载机构

1.1.1 美国 Alvin 载人潜水器

美国 Alvin 载人潜水器是目前世界使用效率最高、应用效果最为显著的载人潜水器,其水下抛载 机构采用了机械式抛载形式^[7]。如图 1 所示,抛载 机构主要由销轴、挂钩、凸轮、弹簧等部件组成, 主要工作原理为潜航员通过舱内操作,驱动机构带 动销轴动作,销轴连带驱动凸轮转动,当凸轮转动 达到 90°时,搭钩机构闭合,随机实现挂钩的脱开。



1. 释放轴; 2. 载人球; 3. 后端壳体。

图 1 Alvin 抛载机构

1.1.2 日本 Shinkai 6500 载人潜水器

日本 Shinkai 6500 载人潜水器采用电磁液压驱 动形式,其控制端由一个电磁式三位阀组实现抛载 动作[®],如图 2 所示。当三位电磁阀左得电时,液压 系统驱动使重块与潜水器本体保持连接;当三位电 磁阀右得电时,液压系统驱动使重块脱离潜水器本 体;当电磁阀失电时,阀处于中位,压载重块在自 重作用下自行脱离潜水器,该装置可实现三重保 险,具有高可靠性能。



1.1.3 法国"鹦鹉螺"号载人潜水器

"鹦鹉螺"号抛载机构采用了电磁力吸附原理 实现抛载¹⁸,如图3所示。抛载箱采用漏斗形结构 形式,内缠绕有通电线圈,当线圈通电时,随即产 生强力磁场,在磁力吸附下,抛载箱内的磁性铁丸 被吸附住;当需要抛载时,潜航员操作使线圈断 电,磁场消失,铁丸在自身重力作用下抛载。



图 3 "鹦鹉螺"号抛载机构

1.1.4 中国"蛟龙"号载人潜水器

我国"蛟龙"号载人潜水器可弃压载抛弃装置

主要用于装载压载重块,并通过吊挂机构、重块导向机构挂于潜水器中,通过潜水器抛载电磁阀释放 压载重块从而改变潜水器自身重力及浮力,以保证 潜水器在下潜、上浮过程中的正常运行。

载人潜水器的可弃压载配重装置由吊挂和释放 机构、压载重块等机构组成,如图4所示,下潜压载 (297 mm×197 mm×318 mm),上浮压载(298 mm× 298 mm×650mm),其中下潜压载铁重量为135~ 145 kg,上浮压载铁重量为225~235 kg,根据潜航 员情况每次进行配重调整。

1.2 水面抛载机构

目前水面抛载机构主要采用机械式释放钩,如 图 5 所示。该类型释放钩目前已完全市场化,多采 用优质高强度合金钢(316L)为承载主体,配有热 处理加强技术,具有结构简单、重量轻便、承载能 力强等优点,已广泛应用于深海调查潜标及海床基 等设备的释放,已成为海洋科考的必备工具之一。 然而该设备也存在一定缺点:①在作业过程中需拔 掉安全销,抛载机构存在受船舶涌浪摇摆抛载释放 安全隐患;②对表面工艺处理要求极高,普遍采用 国外进口产品;③对作业人员要求较高。





图 5 机械式释放钩

2 技术需求分析及结构设计

2.1 工况分析与技术指标

大洋科考过程中,受极端海况影响,船舶在涌 浪影响下经常出现较大的升沉幅度,同时伴随横纵 摇运动,这对海上工作带来一定挑战。海上吊装布 放的科考仪器普遍在 200~600 kg,采用船载折臂吊 开展吊装作业,利用释放器完成布放工作。主要工 作流程包括:①布放前将顶部吊钩与折臂吊的吊钩 用U型环连接,手动旋出触发保险螺钉;②通过无 线控制器启动电源,电磁吸附装置产生不低于 50 N 的吸附力;③将设备吊至水面以上 1~2 m 处(视海 况情况),触发无线控制器按钮,打开杠杆限位, 完成释放动作。

基于工况分析,抛载释放机构的技术指标包括:最大负载能力2000kg;控制方式采用远红外控制方式,具备无接触的优势;电磁耦合驱动吸附力不小于50N;动力源采用自容式设计,锂电池供电;整机重量小于10kg。

2.2 总体结构设计及工作原理

针对复杂多变、高温、高盐、高湿等海上作业 的特点及海上仪器设备布放需求,基于"蛟龙"号 载人潜水器可弃抛载机构设计基础,提出了一种基 于电磁驱动的红外遥控式海洋装备甲板吊装释放机 构设计,该机构主要采用杠杆基本原理,通过机构 限位的方式实现小力控制大力的效果,机构由电磁 吸附机构、承载及机械释放机构和执行机构组成。 左右两侧发块互为备用,可独立使用;中部为 吊装承载及机械释放模块;每个模块由结构复杂的 机构组合而成,各个子模块均可实现海上组装与更换,总体结构如图6所示。



图 6 总体结构

基于电磁驱动的红外遥控式海洋装备甲板吊装 释放机构工作原理如图 7 所示,主要执行结构由电 磁吸附机构、杠杆(触发连接杆)、吊钩组成,在工 作前或处于吊装状态时,左右吊钩处于闭合状态, 从而承担吊装工作,当需要释放时手动触发红外遥 控器,无线控制器收到命令信号后触发电源开启, 电磁铁上电并产生不低于 50 N 的吸附力,电磁力向 内挤压杠杆,在杠杆作用下,另一端向外侧产生移 动,杠杆发生转动,与此同时转动转轴在吊装力作 用下,产生位移,当转动超过一定幅度后,销轴脱 离,对吊钩限位作用消失,从而最终实现了抛载。

2.3 电磁吸附动力机构

电磁吸附动力机构如图 8 所示,左右两侧电磁 吸附、电源及无线控制模块主要包括一个电磁铁、 吸铁、触发拉杆、一套独立供电电源、一套无线控 制器,外部罩有聚四氟乙烯的透明保护罩。工作过 程中红外无线控制器收到命令信号,给独立电源一 个模拟量信号,控制电源开启与关闭,电源开启 时,电磁铁上电,从而产生不低于 50 N 的吸附力, 电磁吸附联动块产生动作,触发连接杆与电磁吸附 联动块连接在一起,同时也产生动作,从而完成触 发随动挡销转动限位及触发杠杆限位。

2.4 承载及机械释放机构

承载及机械释放机构是整套抛弃装置的核心部 分,其外形如图9所示。顶部吊钩、左支撑板、右 支撑板及中部支撑销轴,承担了主要的承重作用, 同时中部右支撑臂及左支撑臂由中部支撑销轴串联 组成,共同组成了吊装钩,具备被动的承重作用; 顶部吊钩、左支撑板、右支撑板及中部支撑销轴



图 7 电磁驱动的红外遥控式海洋装备甲板吊装释放机构工作原理



图 9 吊装承载及机械释放机构

采用 316L 加工而成,通过调整钢材厚度满足 500~5 000 kg 吊装的需求。

2.5 执行机构

左触发杠杆、右触发杠杆、触发随动挡销、压 缩弹簧等组成了执行机构,如图 10 所示。工作时 压缩弹簧由于触发连接杆的动作处于被压缩状态, 使得触发杠杆被触发随动挡销限位,当触发时,由 于压缩弹簧的回复力使得触发随动挡销转动限位打 开,随之触发杠杆限位打开,由于底部吊钩的重力 使触发随动挡销转动产生转动,从而触发杠杆动 作,完成了释放动作。



图 10 执行机构

3 力学分析

3.1 释放器材料选择

由于释放器主要在海上开展吊放工作,应充分 兼顾到海上高盐、高温、高湿等极端情况,同时受 海况影响还应考虑高冲击载荷等因素¹⁰⁻¹⁰,拟采用尼 龙(PA66)、铝合金(AL6061)、钛合金(TC4)作 为备选材料,根据《机械设计手册》查询其力学参 数如表1所示¹¹¹。

表1 3种材料力学参数对比

_				
	材料	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	泊松比
	PA66	3.3	58.5	0.35
	AL6061	67.21	278.84	0.33
	TC4	105	450	0.33

在计算中采用的材料属性: PA 66 的弹性模量为 3.3 GPa, 泊松比为 0.35, 屈服极限为 58.5 MPa^[12]。 根据采用多项式拟合法^[13], 测算出 AL6061 弹性模 量为 67.21 GPa、泊松比为 0.33。综合上述材料的 力学性能,可满足结构设计要求,考虑耐腐蚀性的 要求,拟采用 PA66 作为保护外罩的结构材料;考 虑到经济性,拟采用 AL6061 作为执行部件(包括 左触发杠杆、右触发杠杆、触发随动挡销、压缩弹 簧)的结构材料;考虑到高冲击性及高负载能力, 拟采用 TC4 作为受力构件(包括顶部吊钩、左支撑 板、右支撑板及中部支撑销轴)的结构材料,现通 过有限元方式对 3 种材料进行力学分析^[14-15]。

3.2 释放器吊载静力学有限元仿真分析

利用 ANSYS workbench15.1 的 Mechanical 模 块进行结构力学有限元分析,材料温度均默认为 30 ℃的常规温度,模型为 solid 实体,进行 3D 几 何划分,考虑到网格的质量及处理速度,拟采用 Tetrahedrons 四面体网格划分中的 Patch Independent 法进行网格划分,生成体网格并映射到表面产生表 面网格,该方法能够容许质量较差的 CAD 几何模 型导入,并能较好地实现网格划分。全局网格精细 调整 Relevance 值为 65,同时对 Sizing 全局单元尺 寸参数进行设置,以优化网格质量,采用作用于边 和面的 curvature 模式,设置 min size 为 0.002 mm, max face size 为 2 mm,同时对左右支撑板采用 inflation 逐层划分网格,划分 10 层网格。最后利用 statistics 中的 skewness 进行统计,整个模型共计 96 万个单元,162 万个节点,其中 Average 为 0.24, 处于比较优良的网格质量区间,如图 11 所示。



图 11 网格划分

考虑到顶部吊钩的力学性能,增加了高级网格 划分中的影响球体划分,如图 12 所示。



图 12 重点分析区域精细网格划分

验证零件在给定的载荷下静强度是否满足要求;分析其安全系数,并采用线性加载方式加载集 中载荷,加载力为20000N。

释放器吊装部分材料为 TC4,质量为 2.3 kg, 所受最大载荷为 14 100 N,支撑板部分为AL6061, 质量为 3.5 kg,所受最大载荷为 8 500 N。如图 13 所示,释放器吊装部分及支撑板变形导致的最大静 位移为 0.003 mm,总体最大静位移为 0.76 mm,形 变量极小,满足设计要求。







图 13 计算结果

4 结 论

本文针对现有海洋调查设备甲板布放的需求, 基于海上作业的实际经验,开展了基于电磁驱动法 的一种红外遥控式海洋装备甲板吊装释放机构设计 工作,该机构能有效解决海上吊装问题,目前国内 外尚未见类似研究。

针对作业工况和技术难点,开展了电磁吸附动

力机构、吊装承载及机械释放机构和执行机构的设计,采用有限元分析理论对 PA66、AL6061 和 TC4 3 种材料进行了力学分析,经分析研判顶部吊钩、 左支撑板、右支撑板及中部支撑销轴等主承载结构 部件采用 TC4 材料,其他部件采用 AL6061 材料, 可实现经济性与结构性的融合。

本文为解决海上吊装问题提供了相应的技术方 案,下一步还需要制作工程样机并开展负载及功能 测试试验,从而实现量产。

参考文献:

- [1] 徐芑南,张海燕.蛟龙号载人潜水器的研制及应用[J].科学,2014,66(2):11-13.
- [2] 刘峰. 深海载人潜水器的现状与展望[J]. 工程研究: 跨学科视野中的工程, 2016, 8(2): 7-12.
- [3] WILLIAM K. Review of deep ocean manned submersible activity in 2013[J]. Marine Technology Society Journal, 2013, 23(11): 56-68.
- [4] SCHNEIDER W E. ALVIN's oil/seawater hydraulics overcomes 6000-psi backpressure [J]. Hydraulics&Pneumatics, 1975, 12 (2): 56–59.
- [5] LIU F. Jiaolong manned submersible: A decade's retrospect from 2002 to 2012[J]. Marine Technology Society Journal, 2014, 5

(48): 7-16

- [6] JUNG J Y, LEE H S, KIM H J, et al. Thermoeconomic analysis of an ocean thermal energy conversion plant[J]. Renewable Energy, 2016, 86(2): 1086–1094.
- [7] 邱中梁,冷建兴,陈建平,等.深海载人潜水器可调压载系统研究[J].液压与气动,2003,11(4):9-11.
- [8] 高波,汤国伟.深海载人潜水器可弃压载与应急抛载系统研究[J].中国制造业信息化,2006,35(23):82-84.
- KOHNEN W. MTS overview of manned submersible activity in 2011[J]. Marine Technology Society Manned Submersible Program, 2012, 12(5): 378-385.
- [10] 王博,丁勤卫,李春,等.普通海况下驳船式平台漂浮式风电场平台动态响应研究[J].机械工程学报,2021,57(6):13-19.
- [11] 张洪彬, 徐会希, 刘健, 等. 4 500 m 级 AUV 框架共振特性分析[J]. 机械工程与自动化, 2018, 12(2): 91-95.
- [12] 范白涛,王名春,王彬,等.水下采油树下部导向框架结构与强度分析[J].石油矿场机械, 2022, 51(1): 22-26.
- [13] LI B, ZUO X J, GAO X. Research on strain transfer of beam sensor based on ANSYS Workbench[J]. Advances in Science and Technology, 2021, 105(12): 211-220.
- [14] PRUDHOMME G, ZWOLINSKI P, BRISSAUD D. Integrating into the design process the needs of those involved in the product life-cycle[J]. Journal of Engineering Design, 2003, 14(3): 333–353.
- [15] WEIWH, LIYL, PENGFX, et al. Optimization design of extrusion roller of RP1814 roller press based on ANSYS Workbench[J]. Applied Sciences, 2021, 11(20): 9584–9599.

Design on Infrared Remote Control Marine Equipment Deck Hoisting Release Mechanism Based on Electromagnetic Driving Method

REN Yugang^{1,2}, JING Chunlei¹, LIU Yanjun²

(1. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In view of the urgent needs for the hoisting and placement of scientific research instruments and equipment in China's ocean scientific research activities, combined with the characteristics of the traditional hoisting releaser, a new infrared remote control marine equipment deck hoisting and releasing mechanism based on electromagnetic driving method is designed, the principle of electromagnetic force driving and lever mechanism is proposed, and the strategy of small electromagnetic force controlling heavy hoisting force is realized. According to the working conditions and structural characteristics, the Computer Aided Design(CAD)/Computer Aided Engineering (CAE) technology is introduced to carry out the mechanism design, the finite element mechanical analysis of the bearing structure is carried out by using workbench, the mechanical properties of three materials are compared and analyzed, and the material selection scheme is given, in order to provide reference and innovative scheme guidance for the design of ocean instruments and equipment. **Key words:** magnetic drive; release mechanism; marine survey equipment