

文章编号:1005-9865(2023)03-0157-11

自主水下机器人水下接驳插拔传输与 无线感应传输研究现状及对比分析

刘菲菲^{1, 2}, 郑 荣^{1, 2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要:水下对接传输技术作为自主水下机器人(autonomous underwater vehicle, 简称 AUV)水下能源补给及数据传输的重要方式,受到国内外的重点关注,目前采用的水下对接传输方式主要分为接驳插拔传输及无线感应传输。在探究国内外 AUV 水下对接研究概况的基础上,归纳、总结以上两种传输方式的研究现状,分析对比其在对接传输效率、发展限制因素、对接控制技术等方面的区别。通过分析发现,接驳插拔传输在传输效率及功率方面具备优势,无线感应传输则具有更高的简易性、经济性。此发现为不同作业需求下传输方式的选择提供了基础。通过技术发展限制因素对比得出,在未来技术发展方向上,接驳插拔传输技术需提升系统稳定性、灵活性及费效比,无线感应传输需解决能量损耗、系统鲁棒性及涡旋损耗等问题。对两种传输技术未来发展前景及方向的预测,能够为 AUV 水下传输的发展提供重要参考。

关键词:自主水下机器人;水下对接;接驳插拔传输;无线感应传输

中图分类号:P754;TP242 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2023.03.015

Research status and comparative analysis of underwater wired transmission and wireless inductive transmission of autonomous underwater robot

LIU Feifei^{1, 2}, ZHENG Rong^{1, 2}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Institute for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: As an important way of underwater energy supply and data transmission for autonomous underwater robots, underwater docking transmission technology has received much attention both at home and abroad, and the currently adopted underwater docking transmission methods are mainly divided into docking and plugging transmission and wireless induction transmission. Based on the overview of AUV underwater docking research at home and abroad, we summarize the research status of the above two transmission methods, and analyze and compare their differences in docking transmission efficiency, development constraints, and docking control technology. Through the analysis, it is found that docking and plugging transmission has advantages in transmission efficiency and power, while wireless induction transmission has higher simplicity and economy, and this finding provides a basis for the selection of transmission methods under different operational requirements. The comparison of the technical development constraints shows that the future development direction of the technology is to improve the system stability, flexibility and cost-efficiency ratio, while the wireless induction transmission needs to solve the problems of energy loss, system robustness and vortex loss, etc. The prediction of the future development prospects and directions of the two transmission technologies can provide an important reference for the development of AUV underwater transmission.

Keywords: autonomous underwater robots; underwater docking; connecting and plugging transmission; wireless inductive transmission

收稿日期:2022-07-04

基金项目:国家国防科技工业局基础科研项目(E01Z091601)

作者简介:刘菲菲(1988—),女,辽宁沈阳人,硕士研究生,主要从事水下机器人研究。E-mail:liufeifei@sia.cn

通信作者:郑 荣。E-mail:zhengr@sia.cn

自主水下机器人(autonomous underwater vehicle,简称 AUV)以其良好的机动性及巡航能力成为海洋作业的重要工具^[1-2],但 AUV 自身携带能源的有限性制约着其在水下长时间作业、超远程航行的能力。采用水下对接方式既能实现水下能源补给及数据传输,又能降低频繁布放、回收在人力、物力及财力方面的投入,为 AUV 作业能力提升提供了解决方案。水下对接技术主要包括接驳插拔传输及无线感应传输两种,两种方式在不同的需求背景、要求下各具优势,研究进展水平也有所不同。目前国内外学者大多关注其中某一传输方式,对二者进行综合考量的研究凤毛麟角。这里详细阐述了两者之间的区别和联系,分析其研究现状,比较其对接性能,为不同作业需求对接方式的选择提供了依据,对相关领域的研究和应用具有重要的参考价值和现实意义。

1 研究现状

1.1 无线感应传输技术

20 世纪以来,电磁波的发现和应用开启了无线感应传输技术的发展篇章。无线感应传输技术包括磁感应式无线能量传输技术(inductive coupling wireless power transfer,简称 ICWPT)、微波式无线能量传输技术(radioactive wireless power transfer,简称 RWPT)以及磁耦合谐振式无线电能传输技术(magnetically-coupled resonant wireless power transfer,简称 MRC-WPT)。RWPT 技术微波因无法穿越屏障及电磁波在海洋中衰减过大等原因,几乎不应用于水下^[3]。

表 1 国内外水下无线感应传输研究情况
Tab. 1 Research on underwater wireless induction transmission at home and abroad

年份	研究者	水下无线传输方式及验证条件	传输性能
2001	美国 Feezor 与 Bradley 团队	基于 ICWPT 的无线充电技术为 UUV 进行水下充电	充电效率为 79%,传输功率为 200W
2001	德国梅莎公司	基于 ICWPT 的 INPUD DON100HE30 型水下无线充电装置,在恶劣的深海环境进行作业	收发线圈的距离范围为 0.5~0.9 mm,传输功率 100 W
2004	日本研究团队	ICWPT、特殊形状铁氧体磁芯和锥形线圈	充电效率为 90% 以上,传输功率为 500 W
2007	美国 McGinnis 与其团队	在水下检测系统的基础上应用 ICWPT	电磁耦合器之间的距离为 2 mm,功率可以达到 250 W,效率可以达到 70% 以上
2011	美国研究团队	进行了大量的实验验证,并完成了水下能量传输实验与信传输实验	功率可以达到 450 W,最大的充电能力可以达到 1.5 kW·h
2012	美国研究团队	UUV 无线充电	充电功率为 450 W,设计最大充电能力为 15 kW·h
2012	中国研究团队	ICWPT 水下无线充电系统	工作间隙 8 mm,充电效率 75%,传输功率为 500 W
2014	中国浙江大学团队	ICWPT,海底观测网供电、通信	系统的电磁耦合器的间隙为 5 mm,其传输功率可以达到 300 W,而传输效率可达到 85%
2016	葡萄牙学者	WPT、改进式谐振线圈结构	传输效率 80%,实现对水下 4 cm 的传输距离且阻值在 1~5 之间的负载进行能量传输
2017	中国天津大学团队	感应耦合式传输技术、具备浮标水下传感器供电和信息传输功能的浮标系统	传输功率为 20 W,传输效率 50% 以上,系统通讯稳定可靠
2017	中国天津理工大学团队	WPT、超声波定位技术	收发线圈 8.5 cm 时,系统的传输效率在 85%~95%
2019	日本学者	用于 AUV 的 WPT 系统的线圈布局方案,供电站中采用双层多线圈结构,AUV 使用两个接收线圈	AUV 可以在供电站的任何着陆位置获得可靠的能量,传输效率为 74%
2020	中国华南理工大学团队	改进线圈结构的 AUV 无线充电系统,采用 S-S 补偿拓扑方式	传输效率 70%,实现在 AUV 偏转时输出电压稳定性控制
2021	中国重庆大学团队	磁耦合谐振式无线电能传输	工作频率 85 ~150 kHz,2 000 m 湖试,传输功率 2.4 kW,传输效率 80%

国内外大量的ICWPT、MRC-WPT水下无线传输技术研究及试验^[3-20]表明,ICWPT方式传输效率较高,传输距离短,通常是厘米级,对充电装置的对接距离精度要求高,对接精度对充电效率会产生较大的影响;MRC-WPT采用电能传输电磁感应加电磁谐振方式,能量传输距离远,理论上可达几十厘米至几米,且对接距离精度要求较低。国内外典型无线感应传输技术研究情况如表1所示。

1.2 接驳插拔传输技术

接驳插拔传输技术既可实现高传输功率,又可实现高传输效率,为水下大功率能量补充提供可能,其传输过程能量损失在工程上可忽略不计。接驳插拔传输技术要求AUV与接驳装置(坞)在水下实现精准、牢固对接,因而在对接路径规划上对水面控制终端、水下控制系统等的控制能力要求更高,在水密接插件对接过程中对接插件的湿插拔对准度、AUV姿态控制精度提出了更高的要求。

目前,国内外对接驳插拔传输技术的研究较少,国外对接驳传输技术的典型装置为2006年美国伍兹霍尔海洋研究所海洋系统实验室的REMUS AUV对接系统,该系统在佛罗里达州进行了试验,在试验过程中成功克服了潮汐及海浪的影响,REMUS AUV对接装置如图1所示^[21]。

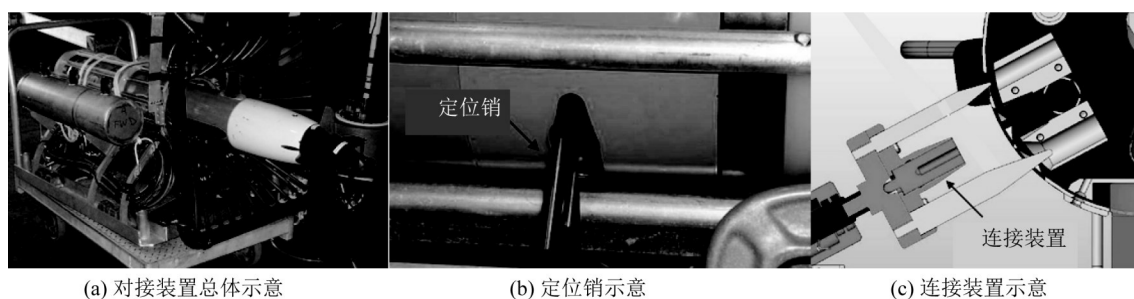


图1 REMUS AUV对接系统

Fig. 1 Dock system of REMUS AUV

国内,主要有中国船舶重工集团公司第七一五研究所^[22]以及中国科学院沈阳自动化研究所^[23]对水下接驳插拔传输展开研究,两家研究所的定位装置分别如图2、图3所示。

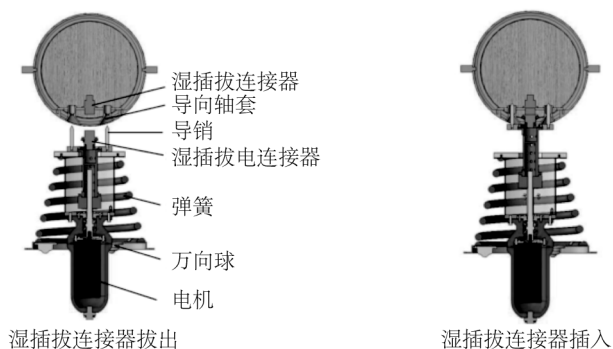


图2 中国船舶重工集团公司第七一五研究所插拔机构
Fig. 2 Plug in-out construction of China State Shipbuilding Corporation 715th Institute

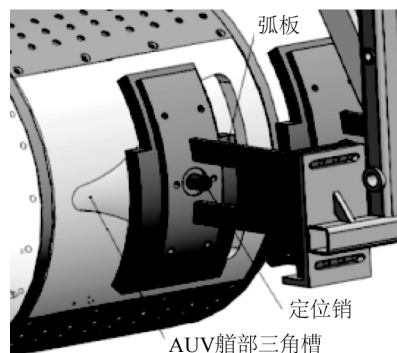


图3 中国科学院沈阳自动化研究所水下对接定位装置
Fig. 3 Underwater docking positioning device of Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences

相比于无线感应对接传输方式,接驳插拔传输技术的技术难点体现在AUV进坞后如何确保AUV实现6个自由度方向的精准控制,确保AUV姿态和位置能够实现与对接装置的插拔机构相对应,实现插拔装置的成功对接。国内外典型接驳插拔装置研究及湖海试验验证情况如表2所示。

2 对接传输性能对比

通过对比表1、2国内外水下对接传输的研究现状,可以看出:水下无线感应传输的充电效率在75%~90%之间,最大传输功率为2.4 kW左右,对接过程所采用的收发线圈距离为厘米级别;一般认为接驳插拔传输方式采用的充电效率可达92%~98%,传输功率为40 kW以上,对接过程插拔装置的精度为毫米级。

中国科学院沈阳自动化研究所技术团队在多次水池试验、湖试及海试过程中发现,接驳插拔传输对接

方式在水池试验中能够收到良好的对接效果,电能传输、数据传输均呈现稳定可靠状态。首次海试中插拔装置成功对接及能量传输后,数据传输曾出现间断(误码),首次试验时间中断频率达 1/3,其原因可能包括 AUV 悬浮状态下的仰艏姿态对插拔装置稳定性的影响、限位夹紧机构的机械精度有所欠缺等,试验团队经过相关调整后再次进行了海试,间断频率降低为 1/12,实现了高量级数据传输。由此可见,接驳插拔传输在数据传输方面与无线感应对接方式相比在机构上需具备更高的稳定性。

表 2 国内外接驳插拔机构研究情况
Tab. 2 Research on plug in-out mechanisms at home and abroad

年份	研究者	接驳插拔机构	插拔传输装置	验证情况
2006	美国伍兹霍尔海洋研究所海洋系统实验室	REMUS AUV 对接系统	导针和水下连接器	在 29 次试验中成功完成 17 次对接,成功率为 58.6%,其 AUV 与 DOCK 之间能够实现 100% 的电气通讯,并在每次对接成功完成短暂充电、任务数据上传和新任务目标下载
2015—2017	中国船舶重工集团公司第七一五研究所	深海 AUV 水下接驳站	电连接器两侧的导销与 AUV 上的导向轴套配合实现周向固定;通过俯仰机构实现坞站俯仰角度调节。	千岛湖湖试,试验水深 4~5 m,湖底 10° 倾角插拔试验成功;大连海试,试验水深 30~40 m,接驳系统试验数十次,单次对接成功率达 90% 以上
2018—2021	中国科学院沈阳自动化研究所	深海 AUV 水下接驳装置	通过 AUV 艏部三角槽与定位销配合固定 AUV 的周向旋转及轴向运动	千岛湖湖试,试验水深 7 m,成功对接;大连海试,试验水深 26 m,成功对接

AUV 水下作业需求往往不尽相同,对对接传输装置传输效率、传输功率、方便性及经济性要求也有所不同。用户使用时的方便性和经济性决定了传输装置的复杂程度;传输效率的区别关乎着能量供应装置所需承载能源总额,传输过程中能量损失亦会带来发热等问题;传输功率直接影响 AUV 能量补给及数据传输时间。基于以上因素的考量,不同需求下水下对接传输方式的选择推荐如表 3 所示。

表 3 不同传输需求下水下传输方式的选择
Tab. 3 Selection of underwater transmission modes with different transmission requirements

作业需求			水下传输方式选择
传输效率	传输功率	方便性、经济性要求	
90% 以上	—	低	接驳插拔传输
—	大于 5 kW	低	接驳插拔传输
—	—	高	无线感应传输
70% 以上	小于 3 kW	—	接驳插拔传输、无线感应传输

3 技术发展限制因素

3.1 无线感应传输限制因素

无线感应传输在应用过程中仍存在一些关键技术问题待解决:

- 1)水下环境磁耦合。海水压力、流速会使耦合器的磁芯轴产生偏移,偏移后无线电传输系统耦合性会产生明显下降,对系统鲁棒性产生不利影响。
- 2)海水介质中传输损耗。海水具有较高的电导率,高频交变磁场在海水中会产生涡旋电场,高频电流在无线传输过程会引发涡流损耗,目前研究中获得的间隙涡流损耗大小与感应强度的二次方成正比,但尚无法实现定量分析,因此其效能的提升目前仍亟待解决^[5,24-33]。

3)微生物的附着。我国近海常见的附着海生物主要有牡蛎、藤壶、苔鲜虫、贴贝及海葵等,因气温、光照、氧气和水质的不同,不同海区海生物附着情况存在差异,具体情况如表4所示。由表可见,浅海水域较深海水域更易发生生物附着,海生物更益于在硬质结构装置表面附着产生生物腐蚀^[34]。目前能够采取的防海生物附着常用方法为涂防污漆,其时效可达1年,易于实施,成本较低^[35-40]。

表 4 不同情况下海生物附着生长情况
Tab. 4 The growth of marine creature under different conditions

水下条件	适应情况	生物附着生长情况
水温	15~30℃	生长较快
	低水温	生长较慢
食物供应	营养碎屑多、水中微生物数量多	生长较快
	营养碎屑少、水中微生物数量少	生长较慢
盐度	1.5%~4.0%	生长较快
	小于1.5%、大于4.0%	生长较慢
氧气和光线条件	富氧、光线良好	深度0~35 m,生长较快
	氧气含量少、光线弱	深度大于35 m,生长较慢

4)电磁隐身性能。无线感应传输方式在作业时会产生电磁波辐射及电磁干扰,电磁波可通过技术手段被外界发现,对军用装备隐身功能的实现造成影响。目前,国内外实现电磁隐身采用的主要方式为应用复合型吸波材料,但尚无法实现电磁波辐射的完全屏蔽。

3.2 接驳插拔传输限制因素

与空气相比,水下环境更加复杂,影响接驳插拔传输方式水下作业时间的关键因素包括接驳对接的距离精度控制方法,湿插拔接触耦在水下维持传输性能的时间以及海水腐蚀、生物腐蚀^[41-42]。

1)接驳插拔能否实现,主要决定因素为对接精度控制,要求AUV与坞站间相对位置得到保证,使接插件能够精准的完成插拔并固定。机械设计、系统控制上的误差均会对插拔过程的实现、电能补给、数据传输产生影响,甚至导致传输失败。AUV在进入坞站后,需要对其6个自由度的姿态加以控制,尤其是对AUV的仰艏、横滚姿态的控制,很大程度上增加了装置的复杂性及控制的难度。

2)湿插拔在水下接驳插拔传输中具有重要的作用,国外对于湿插拔的研究已相对成熟,多款产品已具备良好的性能及深海适应性。国内起步较晚,近年来取得了一定的突破性进展。国内外在湿插拔领域的研究情况如表5所示,由表可知,目前湿插拔能够实现7 000 m深海环境下上千次的插拔。

表 5 国内外湿插拔连接器性能表
Tab. 5 Performance of wet plug in-out at home and abroad

产品型号		适应深度/m	插拔寿命/次	适应温度/℃
国外	ODI	7 000	1 000	-10~50
	CM2000	5 200	至少 100	0~65
	SeaConnect	4 000	1 000	0~60
国内	中杭电子	7 000	500	-5~65
	中杭光电	400	500	-55~120
	蓝梭科技	大潜深至全深海	300	-45~85

3)水下接驳插拔传输技术在应用的过程中需要配置定位夹紧机构来实现成功插拔,与无线感应传输机构相同,定位夹紧机构及插拔水密接插件在水下亦会受到生物腐蚀的影响,腐蚀后直接影响水下接驳插拔装置的使用。

3.3 传输限制因素对比

1)无线感应传输优势

无论是接驳插拔传输还是无线感应传输,都需作业AUV经过航路规划精准控制到达对接区域,与对接

装置保持传输所需的相对位置关系。接驳插拔传输要求在 AUV 入坞后,精准控制 6 个方向自由度实现水密接插件的插拔,而无线感应传输则要求在对接装置附近为厘米级即可,典型对接装置如图 4 所示^[41],典型 AUV 无线感应装置如图 5 所示^[13]。无线感应传输不需要采用湿插拔,水下作业时间不受限于湿插拔接插件的发展水平,且长期使用过程中不需定期进行维护,维护频率、成本相比于接驳插拔传输均低出很多。无线感应距离精度要求低,在数据和能量传输功能上更易实现,适用于维护条件差、水下工作时间长、传输功率不大的场合。

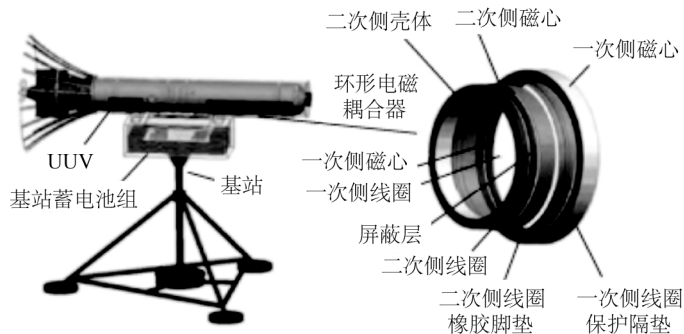


图 4 典型 AUV 无线传输对接装置
Fig. 4 Two kinds of AUV wireless transmission

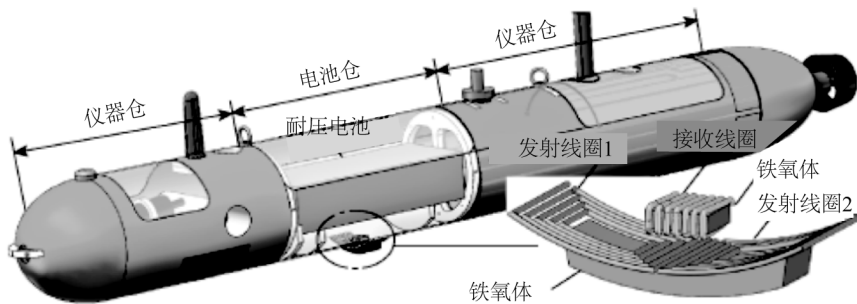


图 5 AUV 无线感应装置示意
Fig. 5 Schematic diagram of AUV wireless induction transmission

2) 接驳插拔传输优势

接驳插拔传输与无线感应传输机构上存在不同。无线感应传输需在 AUV 上安装磁耦合机构,耦合机构本身的重量加上线圈的重量对 AUV 整体配平、姿态控制提出了更高的要求,耦合机构的重量又增加了 AUV 作业时的能量消耗。同时,发射线圈的圈数直接影响传输功率,当需要增大传输功率时势必会同倍数甚至更大倍数地增大线圈的重量,对 AUV 的整体性能产生更大影响。接驳插拔传输,对 AUV 的改造则小很多,以中国科学院沈阳自动化研究所机构为例,只需在 AUV 的艏部两侧各设计一个三角槽,在 AUV 合适部位配置湿插拔插座即可,在重量上对 AUV 整体几乎没有产生影响。无线感应传输模式随着传输距离的加大,线圈的半径也会随之增大,进而占用水下设备的宝贵空间。对于 AUV 而言,在同等作业功能实现的条件下,实现体积小、重量轻是 AUV 设计上的永恒追求^[43]。因此,在 AUV 总体重量配置、体积空间配置、传输功率方面,接驳插拔传输具有明显优势。

4 水下对接控制技术对比

接驳插拔传输与无线感应传输实现的前提均为 AUV 在声光引导下通过合理路径规划接近坞口。AUV 到达坞口后,由于对接方式的不同,对 AUV 入坞后导航策略及控制算法上也会有所不同^[44-48]。浙江大学研发的一型无线感应接驳传输式对接装置^[33]以及中国科学院沈阳自动化研究所研发的一型接驳插拔传输式对接装置是 AUV 接近坞口后的对接控制技术的典型代表。

1) 无线感应控制策略

浙江大学团队设计的接驳站及试验入坞情况如图 6 所示,在接驳站上安装两个水下灯作为 AUV 视线追踪的信标,采用视线追踪方式进行路径规划,首先将 TMS320DM642 型 DSP 摄像头捕捉到的光源画面,通过对灰度矩阵进行二值化处理,得到所需像素点坐标平均值进而确定水下对接装置中灯的位置,在此基础上应用水下灯中心点成像坐标信息反馈控制 AUV 与目标位置的距离。采用 PID 算法控制 AUV 舵角转动,使水下灯的中心维持在成像平面原点附近,通过控制俯仰舵的动作,实现定深航行时竖直平面位置误差的弥补,进而减小 AUV 入坞时的横向偏差。此方法已通过实验室试验及水池验证实现了 AUV 精准入坞,精度控制偏差最终控制在了 0.25 m 以内,实现 244.4 W 的电能传输,3.3 Mb/s 的信号传输。

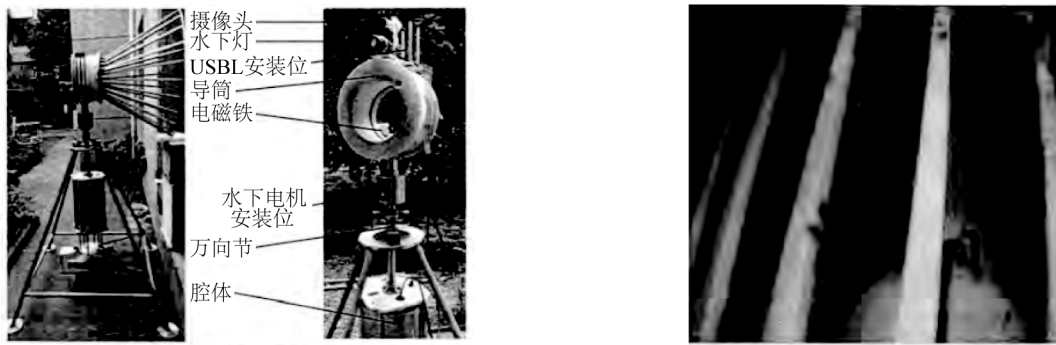


图 6 接驳站样机及试验入坞图
Fig. 6 Prototype of docking station and docking picture

2)接驳插拔控制方式

中国科学院沈阳自动化研究所接驳控制方式采用良好的机械结构设计配合控制系统检测方式加以实现,其对接装置如图 7 所示。

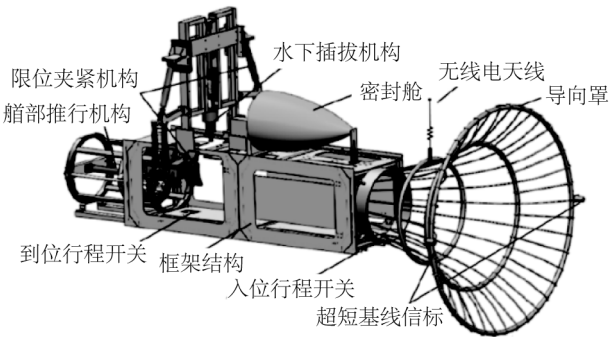


图 7 水下对接装置结构示意图
Fig. 7 Schematic diagram of underwater docking system

当 AUV 入坞后,入位行程开关动作,AUV 在推进器推力下以 0.257 m/s 速度进入坞框架^[23],到达限位位置后,水下插拔机构通过液压传动系统驱动弧板,当弧板上的定位销到达 AUV 三角槽表面时停止驱动,随后驱动舱部推行机构,推动 AUV 向其入坞反方向运动,使得定位销在三角槽内滑动直至达到三角槽的角端,通过以上方式实现 AUV 在 6 个自由度姿态的控制,AUV 水下插拔接口设计漏斗状弧度已确保水下插拔机构中的插头成功进入 AUV 插口内。此装置已分别在千岛湖、大连进行了湖、海试试验,并成功完成对接及数据的传输,充电与数据通信的画面如图 8 所示。



图 8 海试试验充电与数据通信的画面
Fig. 8 Real image of underwater charging and data communication

通过以上对比分析能够明显看出,在 AUV 从远端接近坞口的过程中,2 种方式在路径规划上的总体思路大致相同,所采用的算法亦可相互借鉴;但从坞口至最终位置设定点的控制方式则存在明显差异,无线感应传输主要基于视觉光源追踪法及 PID 等控制算法实现路径控制,而接驳插拔传输则主要应用机械结构设计原理及指令控制方法实现姿态控制,相比之下前者对控制的算法要求更高,后者对机械结构设计的合理性要求更高。机械结构能够实现更高精度控制,但其设计、加工过程亦会带来更高的经济成本,在保证任务完成的基础上应根据需求进行效费比分析,选择效费比更高的方式。

5 结 语

通过对近年来水下接驳传输技术、无线感应传输技术的发展情况进行分析总结后,得到以下结论:

1) 传输效率方面。水下无线感应传输充电效率通常在 80% 左右,最高可达 90%,最大传输功率为千瓦级,对接距离精度为厘米级,传输装置简易灵活,具有良好的经济性;接驳插拔传输方式充电效率可达 92%~98%,传输功率为十千瓦级以上,对接过程插拔装置的精度为毫米级,能够实现大功率、高效率传输。在实际应用的过程中,可从传输功率、传输效率、方便性及经济性 4 个方面对两种技术进行对比选择。

2) 技术限制方面。无线感应传输功率的高低在根本上受限于线圈大小,线圈重量引发一系列的配平、能量损失等问题尚待解决;由于磁耦合原因受海水压力影响较大,系统鲁棒性尚待提高;涡旋损耗问题尚需理论水平发展来解决;电磁辐射波所带来的军事装备隐身问题亦需解决。接驳插拔技术在海水中机械系统的持续稳定性仍需提高,灵活性差、效费比低问题尚需国内技术水平的提升来弥补。无线感应传输技术与接驳插拔传输技术均会受到海底生物附着的影响,在浅海的微生物腐蚀影响最大,随着海水深度的增加微生物腐蚀影响呈递减趋势。两种技术在未来发展中可在优势上相互借鉴,在劣势上取长补短,实现各自领域的技术突破。

无线感应传输灵活、便捷,具有良好的环境适应性且维护成本低,在 AUV 水下能源及数据传输中将起到重要作用,具有良好的发展前景;而水下接驳插拔传输则会以其大功率、高效率的优势应用在对传输性能具有高要求的 AUV 上。目前,两种传输技术齐头并进,在各自的优势领域上发挥着重要作用。接驳插拔传输未来若实现对接装置简化,关键技术突破,制造及维护成本降低,可实现更多作业场景的应用。装置简易、经济性高、鲁棒性好是无线感应传输系统的优势所在,若其涡旋损耗问题,电磁辐射波隐身问题得以解决,充电线圈“减重”“增能”技术取得突破,具有高灵活性、经济性的无线感应传输必能推动水下传输技术的发展,得到更加普及的应用。两种技术相互融合、促进,将带领水下机器人向着更快、更深、更远的方向前行。

参考文献:

- [1] 无人潜航器水下自动对接充电系统研制成功[J]. 军民两用技术与产品, 2020(12):63. (Development of underwater automatic docking charging system for unmanned underwater vehicle[J]. Dual Use Technologies & Products, 2020(12):63. (in Chinese))
- [2] 郑文轩, 谢鸥, 丁杨, 等. 自主水下机器人非接触电能传输系统研究[J]. 装备制造技术, 2019, 292(4):85-87. (ZHENG W X, XIE O, DING Y, et al. Research on contactless power transmission system of autonomous underwater vehicle [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019, 292(4):85-87. (in Chinese))
- [3] 李俊桥. 水下磁耦合谐振式无线电能传输系统多路输出调压研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021. (LI J Q. Research on multi-output voltage regulation of underwater magnetic coupling resonance wireless power transfer system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese))
- [4] 刘佳伟, 高天德, 刘培洲, 等. 水下无线供电数据传输系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9):238-244. (LIU J W, GAO T D, LIU P Z, et al. Design of data communication system for underwater wireless energy transmission[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(9):238-244. (in Chinese))
- [5] 赵柳权. 水下无线电能传输系统的关键技术研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021. (ZHAO L Q. Research on key technologies of underwater radio energy transmission system [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology,

2021. (in Chinese))
- [6] 魏雪冰. 水下磁耦合式无线电能传输关键技术研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2021. (WEI X B. Research on key technology of underwater magnetic coupling radio energy transmission [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Electrical Engineering, 2021. (in Chinese))
- [7] 倪志超. 水下无线能量与信息同步传输系统设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. (NI Z C. Design and research of underwater wireless energy and information synchronous transmission system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese))
- [8] 徐炜钰. 水下磁感应无线电能传输特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020. (XU W Y. Research on characteristics of underwater inductive power transfer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese))
- [9] 余世科, 王锋, 李皓, 等. 基于水下无线充电的UUV电能源补给研究[C]//中国造船工程学会. 第四届水下无人系统技术高峰论坛——有人/无人协同技术论文集. 2021:151-155. (YU S K, WANG F, LI H, et al. Research on UUV electric energy supply based on underwater wireless charging [C]// The Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers. Proceedings of the Fourth Underwater Unmanned Systems Technology Summit Forum——Proceedings of Manned/unmanned Collaborative Technology. 2021:151-155. (in Chinese))
- [10] 薛明, 杨庆新, 章鹏程, 等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8):1547-1568. (XUE M, YANG Q X, ZHANG P C, et al. Application status and key issues of wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8):1547-1568. (in Chinese))
- [11] 丰利军, 朱春波, 张剑韬, 等. 水下无人航行器水下无线充电关键技术研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(23):159-162. (FENG L J, ZHU C B, ZHANG J T, et al. Research on key technology based on wireless charging technology for unmanned underwater vehicle [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(23):159-162. (in Chinese))
- [12] 刘润鹏, 杨金明. 一种改进线圈结构的AUV无线充电系统[J]. 水下无人系统学报, 2020, 28(3):323-329. (LIU R P, YANG J M. AUV wireless charging system with improved coil structure [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2020, 28(3):323-329. (in Chinese))
- [13] 蔡春伟, 武帅, 张言语, 等. 基于弧形线圈结构的无线充电系统能量传输与控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(14):2959-2968. (CAI C W, WU S, ZHANG Y Y, et al. Power transfer and control of wireless charging system based on an arc coil structure [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14):2959-2968. (in Chinese))
- [14] 宋超, 邓珊, 杨森. 基于磁场耦合式的水下无线传能技术的研究[J]. 集成电路应用, 2019, 36(2):38-40. (SONG C, DENG S, YANG M. Study on underwater wireless energy transfer technology based on magnetic field coupling [J]. Application of Integrated Circuits, 2019, 36(2):38-40. (in Chinese))
- [15] 李争, 高世豪, 张岩, 等. 基于电场感应的水下无线电力传输[J]. 河北科技大学学报, 2018, 39(6):552-558. (LI Z, GAO S H, ZHANG Y, et al. Underwater radio power transmission based on electric field induction [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(6):552-558. (in Chinese))
- [16] 吴垣甫, 孙梦云, 雷宇. 无线电能传输技术在水下的应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2018(12):195-197. (WU Y F, SUN M Y, LEI Y. Research on application of wireless power transmission technology in underwater [J]. Automation & Instrumentation, 2018(12):195-197. (in Chinese))
- [17] 曹朝阳, 赵新灿. 水下机器人的无线充电[J]. 电子技术与软件工程, 2018, 138(16):89. (CAO Z Y, ZHAO X C. Wireless charging for underwater robots [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018, 138(16):89. (in Chinese))
- [18] 牛玉洁, 冷建伟. 应用于智能机器人的无线充电技术研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(11):348-352. (NIU Y J, LENG J W. Research on wireless charging technology for intelligent robots [J]. Computer Simulation, 2017, 34(11):348-352. (in Chinese))
- [19] 陈晓. 美国海军研发无人潜航器水下无线充电技术[J]. 军民两用技术与产品, 2017(21):30. (CHEN X. The US Navy develops underwater wireless charging technology for unmanned aerial vehicle [J]. Dual Use Technologies & Products, 2017(21):30. (in Chinese))
- [20] 霍兆镜, 樊绍胜. 基于机器鱼的水下无线输电装置的研究[J]. 电子技术应用, 2013, 39(6):60-62. (HUO Z J, FAN S S. The study of underwater wireless power transmission device based on robot fish [J]. Application of Electronic Technique,

- 2013, 39(6):60-62. (in Chinese))
- [21] ALLEN B, AUSTIN T, FORRESTER N, et al. Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology[J]. OCEANS, 2006:18-21.
- [22] 吴哲, 羊云石, 程烨, 等. 一种 AUV 水下接驳系统的设计与研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(17):130-132. (WU Z, YANG Y S, CHENG Y, et al. The development of an AUV docking system[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(17):130-132. (in Chinese))
- [23] 李默竹, 郑荣, 魏奥博, 等. AUV 水下对接装置控制系统设计[J]. 海洋工程, 2019, 37(2):127-137. (LI M Z, ZHENG R, WEI A B, et al. Design of a control system for AUV underwater docking device[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(2):127-137. (in Chinese))
- [24] 胡子祥. 磁耦合谐振式水下无线能量传输结构设计及其特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. (HU Z X. The structural design and properties study of magnetic resonance coupling underwater wireless power transmission[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese))
- [25] 羊云石, 顾海东. AUV 水下对接技术发展现状[J]. 声学与电子工程, 2013, 110(2):43-46. (YANG Y S, GU H D. AUV underwater docking technology development status[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2013, 110(2):43-46. (in Chinese))
- [26] 魏洋滨. 水下非接触电能传输和数据传输系统[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2017. (WEI Y B. Underwater non-contact energy transmission and data transmission system[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2017. (in Chinese))
- [27] 杨磊. 适用于海底观测网络的水下非接触式数据传输技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (YANG L. The research on the underwater contactless information transmission technology for deep seafloor observatory network[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [28] 林麟. 水下非接触电能传输装置的设计、试验与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (LIN L. Design, experiment and research on an underwater contactless power transmission system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [29] 项杨震. 水下 MC-WPT 系统调谐控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020. (XIANG Y Z. Research on tuning control strategy of underwater MC-WPT system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese))
- [30] 苏玉刚, 钱林俊, 刘哲, 等. 水下具有旋转耦合机构的电场耦合无线电能传输系统及参数优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10):2399-2410. (SU Y G, QIAN L J, LIU Z, et al. Underwater electric-field coupled wireless power transfer system with rotary coupler and parameter optimization method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10):2399-2410. (in Chinese))
- [31] 景妍妍. 基于可调增益恒流/恒压式补偿网络的无线电能传输系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2018. (JING Y Y. Research on wireless power transmission based on adjustable gain constant current or voltage compensation networks[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese))
- [32] 吴旭升, 孙盼, 杨深钦, 等. 水下无线电能传输技术及应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8):1559-1568. (WU X S, SUN P, YANG S Q, et al. Review on underwater wireless power transfer technology and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8):1559-1568. (in Chinese))
- [33] 史剑光. 基于海底观测网络的 AUV 非接触接驳技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (SHI J G. Research on non-contact docking system for autonomous underwater vehicles on cabled ocean observatory networks[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [34] 罗松, 宋坚, 刘宝军, 等. 水声换能器防海生物附着方法及工艺研究[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(3):333-337. (LUO S, SONG J, LIU B J, et al. Study on the methods and technics of preventing biological attachment of underwater acoustic transducer[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(3):333-337. (in Chinese))
- [35] 刘征. 船舶清洗水下机器人的设计及水动力分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2020. (LIU Z. Design and hydrodynamic analysis of underwater robot for ship cleaning[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [36] 武建国, 刘冬, 王晓鸣, 等. 船壁清洗水下机器人水动力分析与试验研究[J]. 船舶工程, 2018, 40(3):91-97. (WU J G, LIU D, WANG X M, et al. Hydrodynamic analysis and experimental study of underwater robot for ship wall cleaning hull[J]. Ship Engineering, 2018, 40(3):91-97. (in Chinese))
- [37] 段继周, 刘超, 刘会莲, 等. 海洋水下设施生物污损及其控制技术研究进展[J]. 海洋科学, 2020, 44(8):162-177.

- (DUAN J Z, LIU C, LIU H L, et al. Research progress of biofouling and its control technology in marine underwater facilities [J]. Marine Sciences, 2020, 44(8):162-177. (in Chinese))
- [38] 刘广利. 船壳海生物附着问题及应对[J]. 中国远洋航务, 2013(7):66-68. (LIU G L. Hull sea life attachment problem and response[J]. Maritime China, 2013(7):66-68. (in Chinese))
- [39] 郭寿安, 毕春伟, 董国海. 海洋生物附着状态下圆柱水动力特性数值模拟研究[C]//中国力学学会. 第十一届全国流体力学学术会议论文摘要集. 2020: 329. (GUO S A, BI C W, DONG G H. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of cylinder under the attachment of marine organisms [C]//Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. Proceedings of the 11th National Conference on Fluid Mechanics. 2020: 329. (in Chinese))
- [40] 王瑞刚. 非光滑表面纹理与海洋污损生物附着关系研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014. (WANG R G. Research of non-smooth surface texture's effect on marine fouling organisms [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [41] 应义星. 面向移动观测的小型AUV“玄武-1”的设计和制作[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. (YING Y X. Design and implementation of a compact AUV "Xuanwu-1" for mobile observatory network [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese))
- [42] 郑荣, 吕厚权, 于闯, 等. AUV与自主移动坞站对接的技术研究及系统设计实现[J]. 机器人, 2019, 41(6):713-721. (ZHENG R, LYU H Q, YU C, et al. Technical research, system design and implementation of docking between AUV and autonomous mobile dock station [J]. Robot, 2019, 41(6):713-721. (in Chinese))
- [43] 孟令帅, 林扬, 谷海涛, 等. 回转形AUV水下通用对接装置的设计与实现[J]. 工程设计学报, 2017, 24(4): 387-394. (MENG L S, LIN Y, GU H T. et al. Design and implementation of a general docking device for revolving AUV [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017, 24(4):387-394. (in Chinese))
- [44] 邱威. 水下对接系统样机设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016. (QIU W. The design and implementation of the prototype of underwater docking system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese))
- [45] 孙叶义, 武皓微, 李晔, 等. 智能无人水下航行器水下回收对接技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(1):1-11. (SUN Y Y, WU H W, LI Y, et al. Summary of AUV underwater recycle docking technology [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(1):1-11. (in Chinese))
- [46] 燕奎臣, 吴利红. AUV水下对接关键技术研究[J]. 机器人, 2007, 29(3): 267-273. (YAN K C, WU L H. A survey on the key technologies for underwater AUV docking [J]. Robot, 2007, 29(3):267-273. (in Chinese))
- [47] 辛传龙, 郑荣, 杨博. AUV水下对接系统设计与接驳控制方案研究[J]. 工程设计学报, 2021, 28(5):633-645. (XIN C L, ZHENG R, YANG B. Research on the design and connection control scheme of AUV underwater docking system [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2021, 28(5):633-645. (in Chinese))
- [48] 国婧倩, 郑荣, 吕厚权, 等. AUV水下对接装置的实现及试验[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(5):78-82. (GUO J Q, ZHENG R, LYU H Q, et al. Implementation and experiment of AUV underwater docking device [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(5):78-82. (in Chinese))