某超大型打桩船的研制[[1]](#footnote-1)

孙 莉，汪 涛，杭爱群

（江苏省船舶设计研究所有限公司，江苏 镇江 212003）

摘 要：为解决日趋急迫的大型海上桩基工程难题，实现在复杂工况下的高效、精准的大型桩的沉桩定位，以某140米级超大型打桩船为研究对象，对其桩架设计、液压电控系统、智能管理系统等关键技术进行研发。结果表明：该船能够克服外海恶劣海况对船舶施工的影响，可满足无限航区调遣，在施工水域内实现短距离移泊驻位，降低了船舶作业时对辅助船舶的使用需求，提高了施工效率。

关键词：超大型打桩船；超大型桩架；液压电控系统；智能管理系统

中图分类号：U662.2 文献标志码：A

0 引言

在国家海洋经济战略的指导下，海洋油气和海洋风电朝着大型化、外海化、深水化方向迅速发展。我国的跨海大桥、深海港码头也在不断地新建。海上风电施工市场领域大型基础桩的打桩工程越来越多。例如浙江华能苍南4号海上风电工程项目中，首个承台支撑钢桩长度达到133.5 m。这些项目的基建都离不开大型打桩船。且海上施工环境受风力、洋流、水深、地质等条件影响，施工环境复杂，对大型打桩船的稳定性、高效性、精准性提出了更高的要求。

随着我国跨海大桥、深海港码头的不断兴建，钢管沉桩向着超长，大直径、超重的方向发展。1999年通车的江阴长江大桥采用桩径2 m的灌注桩，平均桩长85 m。2008年通车的苏通大桥主桥墩基础由直径2.5~2.8 m，长约120 m的群桩组成。2019年“雄程1”号打桩船在克罗地亚佩列沙茨跨海大桥项目一次性打入130.6 m长桩基，创当时世界纪录。

国内桩架式打桩船有近百艘，大多数归属于中交一航局、中交二航局、中交三航局和中交四航局等专门从事港口和航道工程的施工企业。其他如上海雄程海洋工程有限公司、宁波交通工程建设集团公司、中铁大桥局集团有限公司、中国铁建港航局集团有限公司、保利长大工程有限公司、中建港务建设有限公司、中国铁建股份有限公司等企业也有一定数量的打桩船。但桩架长度在100 m及以上的打桩船屈指可数。截止2020年06月，中交三航局研制的133 m打桩船“三航桩20”是世界上最大的打桩船[1]。

目前中小型的传统打桩船受桩架高度、吊桩能力、施打桩径、定位精度等方面的限制，已经无法满足深远海基建工程的需求。为提高基建设备水平，解决日趋急迫的大型海上桩基工程难题，以某140米级打桩为例，从打桩船的超大型桩架设计、液压电控系统、大型桩架加工及安装工艺、智能管理系统4个关键技术进行研发。

1 140 米级打桩船简介

140 米级打桩船“一航津桩”桩架高142 m、最大作业桩重达7000 kN、最大作业桩长达118 m+水深、最大作业桩径达6 m，可施打±18.5°的斜桩，是国内首艘具备全回转舵桨和侧推辅助动力定位系统的超大型打桩船。图1为“一航津桩”实船图片。



图1 “一航津桩”

该船交付后将主要用于大型桩基施工、群桩式基础、风电导管架桩、风电单桩等施工，将进一步适应海洋油气与海上风电能源开发，为开拓海上大型桩基建设提供重要的装备保障。

该船的特点及优势如下：

（1）该船主尺度适用于外海作业，具有强大的打桩及起重能力[2]。

（2）桩架采用高强度合金材料，主弦管采用变径管，在提高桩架强度的前提下，可降低桩架自重[2]。

（3）采用主油缸加辅助缸的桩架倒架/起升方式，降低造价，减少桩架集中受力。

（4）采用恒压、功率控制、中央供油的液压系统。系统简单、可靠、节能、环保。

（5）本船可实现压载水遥控调载，提高船舶作业效率和精度。

（6）网络信息平台管理系统，以友好的界面形式向决策层、项目管理员、操作者提供所需的相应信息展现。确保打桩作业安全高效地进行，同时为该船舶的船务及项目的网络信息化管理奠定基础。

2 关键技术研发

2.1 超大型桩架设计研发

2.1.1 结构形式

桩架由主桩架、龙口、副桩架、吊桩平台（大平台）、吊锤平台（小平台）、主油缸上铰换铰滑轨和铰座等组成。桩架形式采用三角形变截面，钢管桁架结构，根据桩架的受力特点，三根主弦管， 采用锥形钢管形式，通过有限元建模对各种工况进行分析，根据桩架受力应力分布情况，管壁厚从下到上逐步减薄。同时为了减轻桩架自身重量，减小变幅油缸受力，桩架的主要材料采用高强度合金钢DH/E550和Q550。

桩架主弦杆采用直缝钢管，其它管材采用直缝钢管或无缝钢管。平台和吊锤小平台均采用箱型结构，其中大平台为了增加左右吊钩的间距，采用前大后小的梯形结构。小平台上的吊锤滑轮有前后二个安装孔，距离500 mm。后安装孔，锤中心距龙口滑轨面板2 500 mm，可以植5000 mm桩径的桩。前安装孔，锤中心距龙口滑轨面板3 000 mm，可以植6 000 mm 桩径的桩。龙口的结构，根据其受力的特点，采用上轻下重的结构形式。

2.1.2 主钩系统

主钩系统最大起升重量为7 000 kN（桩架前倾9.5°）。在大平台的左右二侧各设置一个主钩，每个主钩均采用单根绳双绞车起升，主钩绞车拉力70 t，绳速25/50 m/min。主钩采用7并滑轮组，扣除滑轮效率，最大起升重量7 000 kN。根据作业需求，可双钩联动吊重，或单钩吊重。

2.1.3 副钩系统

副钩系统最大起升重量为4 000 kN，在大平台的右边，距主钩的外侧1.75 m，采用单根绳双滚筒绞车起升，副钩绞车拉力2×500 kN，绳速25/50 m/min，采用6并滑轮组，扣除滑轮效率，最大起升重量4 000 kN。

2.1.4 吊锤系统

吊锤系统最大起升重量为5 000 kN，吊锤系统定滑轮设置在小平台上，采用单根绳双滚筒绞车起升，吊锤绞车拉力2×830 kN，绳速10/20 m/min，在锤的两侧各设置2并滑轮组，扣除滑轮效率，最大起升重量5 000 kN。如锤重（加附件）小于2 910 kN时，在锤的两侧各设置1并滑轮组即可，扣除滑轮效率，最大起升重量2 910 kN。

2.1.5 变幅系统

桩架总重量约13 000 kN，为减少变幅油缸缸径，降低桩架单点受力，本船采用一只主油缸和两只辅助油缸联动的设计方式。桩架斜桩作业时，采用主油缸单独作业；桩架倒桩和起升作业时，采用主油缸和两只辅油缸联合作业。

研发了油铰一体式插拔系统，基于内置式拔销油缸设计的主油缸销轴一体式结构，通过插拔定位套的方式，进行销轴插拔方式的优化，实现了插拔系统的轻量化，简化操作流程同时改善了桩架可靠性。

2.2 液压电控系统关键技术研发

液压电控系统是打桩船的动力核心。本船设2个液压系统，一个为绞车液压系统，一个为变幅液压系统。

（1）本船绞车液压系统为电动机驱动液压泵组，设有16台250 kW双联变量泵。

绞车液压系统服务于全船绞车设备，包括8台移船绞车，2台杂用绞车，2台属具绞车、2台牵牛绞车、4台主吊桩绞车，2台副吊桩绞车和2台吊锤绞车。

液压系统充分考虑节能要求，满足以下设计工况：

工况1：满足4台移船绞车满负荷收缆，4台移船绞车主动全速放缆，4台主吊轻载（每台50%负荷）全速起升，以及变幅油缸（按160 kW）同时工作。

工况2：满足4台移船绞车满负荷收缆，4 台移船绞车主动全速放缆，4 台主吊空载全速下降，以及吊锤绞车满负荷全速上升和变幅油缸（按160 kW）同时工作。

为了适应多台绞车同时工作工况要求，系统采用恒压恒功率加电比例回路，能适应多台设备同时运转以及各设备负荷不等的情况。

（2）变幅液压系统为电机驱动液压泵组，该液压系统设有4台160 kW双联电比例变量控制泵。主副油缸同时工作时，2台泵供主油缸，1台泵供副油缸，1台备用。

本船采用主液压油缸驱动桩架变幅，实现打桩、起重，主液压油缸加两个副油缸驱动实现倒架/起升作业。变幅液压系统为主副变幅油缸提供动力。

利用双联电比例变量控制泵的比例特性可以实现比例线性调速。两主泵同时工作实现全排量供油以最大速度工作，单泵工作速度减半，并能满足插拔销时油缸的微动。

电控系统分操纵室遥控和机旁控制。操纵室布置有1个打桩控制台和1个移船控制台。位于驾驶室，操纵控制台手柄，即可遥控船舶移位和打桩作业。打桩控制台的液晶显示器，可直接显示吊锤高度位置、速度、液压泵站工作状态等。移船控制台的液晶显示器，可显示移船绞车绳长、拉力、每组绞车操作方向、相关传感器实时参数及报警等。

机旁控制箱采用316不锈钢材质，带保护盖，布置在每台绞车的操作位置。箱内配有弹簧型无极变速控制电手柄(牵牛绞车和索具绞车除外)，刹车离合器切换按钮及状态指示灯，快慢档切换按钮及指示灯，可就地对绞车进行操作。

3.3 大型桩架加工及安装工艺研发

桩架加工安装是打桩船生产制造的关键。针对超大超重的桩架生产需求，采用车间分段制作，龙门吊在船坞内合拢，3 000吨级浮吊整体吊装的安装工艺。研究过程中，按照加工、合拢、安装的流程，对各个环节的相关工艺进行研发。

（1）桩架管件相贯线与一般桁架相比更复杂，5根管子相交一点，管子交错叠加。本船桩架管件相贯线均为空间相交，主管为变截面管，进一步增加了管子相贯线的安装和处理难度。为此研发了变截面相贯线制作技术，解决多线相交时施工顺序及焊接质量保证问题。采用此技术使桩架结构制作及焊接一次合格率达到99%，结构焊接控制精度±3 mm以内，实现结构制作及安装精度。

（2）考虑桩架建造成本及运输费用，结合船厂船坞及设备资源，决定采用横跨船坞总体拼桩合拢工艺[3]。本船桩架在合拢过程中，采用单面焊接双面成型技术控制变形量。龙口拼装时，根据龙口结构，采用龙口结构嵌入桩架结构的装配工艺。实现了车间无余量制作，船坞无余量合拢，对大型桩架的建造提供了一种思路。

（3）主油缸是桩架的关键驱动部件，其安装精度要求高，难度大。采用优化安装顺序、预留安装角度、4个主钩联合安装等工艺，实现了主油缸一次安装成功。

3.4 船岸一体智能管理系统研发

随着计算机信息网络的发展，船舶监控和管理系统也往智能化方向发展。根据客户对船舶有效安全网络的使用需求，本船研发了通过网络、数据库、现代通信及多媒体技术实现全船的信息资源整合及共享的智能化系统，能够实现与打桩作业相关设备与数据信息的实时监控，并实现项目管理图形化及报表的生成。该系统主要含有以下几方面内容：

（1）1套远程通讯设备，配备双4G+5G通讯及微波信号放大设备，使用户享受安全和可控的船岸通信服务，实现岸上指挥中心的网络数据交换；

（2）1套高清视频网络会议系统，满足客户在船上多地的组网视频会议，视频会议的图像和摄像信息高清地显示在办公室、会议室等处的液晶屏幕上。

（3）1套数据采集系统，实现对全船电力及各种辅助机械设备的数据采集。如船舶电站、PMS 管理系统、变频控制系统、船舶浮态测量与阀门遥控液位监测系统、液压控制系统、船舶纵横倾、桩架角度定位数据、音视频数据等等。数据服务器负责所有数据的自动巡回读取、处理、整理入库，可实时用于监控终端设备。

（4）1套网络信息化平台管理系统，建立了统一的门户网站，使用户根据不同的岗位与权限完成所需的电子化办公。如项目管理、施工设计管理、作业监控、起重力矩监控、主要设备监控、视频监控、系统广播、邮件服务等。主要设备的展现还可以通过图形化的方式直观展示，让用户一目了然。

（5）配备无线AP设备，实现全船的无线网络覆盖。

本研发系统，尽量选用集成设备，所占空间小。数据库服务器操作系统采用Windows Server 2016 系统，同时配置双路冗余电源，确保数据不丢失。通信及网络控制软件界面友好，操作简单。整个智能化系统方便、经济、节能，可实现远程操控，把各种信息传送到网络供用户查询，确保船舶管理的高效与安全。

3 结语

“一航津桩”由江苏省船舶设计有限公司负责具体设计，上海振华重工启东海洋工程股份有限公司建造。结合“雄程”系列打桩船成功研制经验，在两年多的时间里，就船舶主尺度优化、大型桩架设计、耐波性分析、DP快速定位技术、液压电控系统、功率管理系统、桩架主辅油缸协同联调技术、船岸一体智能管理系统、抱桩器设计、升降梯系统设计、大型桩架加工安装工艺等方面进行了研发。获得了“一种打桩船用隐藏式桩架拔销装置”、“一种液压抱桩器应急锁固装置”、“一种应用在打桩船上的升降梯系统”等9项专利。本文限于篇幅，仅就以下四个关键技术的研发进行了阐述：

（1）超大型桩架设计研发。介绍了桩架结构形式、主钩系统、副钩系统、吊锤系统、变幅系统的设计内容及研发要点。“一航津桩”的桩架是目前世界上最高的打桩船桩架。在研发的过程中，以“高强度、低重量”为目标，以“多方案、详计算”为手段，成功研发出满足用户需求的142m桩架。

（2）液压电控系统关键技术研发。液压电控系统是打桩船的核心，本文分别介绍了本船液压系统和电控系统的设置，此种设置能适应多台设备同时运转以及各设备负荷不等的情况。 在此系统的基础上，采用PLC 逻辑电路和电液比例压力阀实现负载敏感性控制，实现了全电力“一键启动”便捷操作，真正实现了智能、数字、绿色沉桩作业。

（3）大型桩架加工及安装工艺研发。桩架加工、安装是打桩船生产制造的关键。上海振华重工启东海洋工程股份有限公司组织技术骨干，就大型桩架的加工、合拢、安装等制造工艺进行研发，提高了建造质量，保障了建造进度。

（4）船岸一体智能管理系统研发。本船研发了通过网络、数据库、现代通信及多媒体技术实现全船的信息资源整合及共享的智能化系统，实现打桩作业设备与数据信息的实时监控。用户可以远程操控，确保船舶管理的高效与安全。

“一航津桩”是国内自主研发和建造的超大型打桩船，目前已成功交付，并投身到我国海洋基建建设。“一航津桩”的研制成功，为我国水工建设领域再添一座“大国重器”。

参考文献：

[1] 沈火群，孙钦杨，胡灵斌，等. 133m超大型打桩船“三航桩20”的研制[J]. 中国港湾建设, 2022，42（03）: 71-76.

[2] 杨辉，孙莉. 140米级打桩船关键技术的研究[J]. 江苏船舶 , 2023，40（1）: 1-2.

[3] 高峰，刘胜峰. 大型桩架建造与整体吊装工艺研究及其应用[J]. 起重运输机械 , 2022（07）: 75-79.

1. 作者简介：孙莉（1977—），女，高级工程师，从事船舶设计工作。 [↑](#footnote-ref-1)