

国外海底犁式开沟机技术进展

张园¹, 张树森², 张葆华¹, 顾安¹, 王旭阳³, 赵敏³, 葛彤³

(1. 上海振华重工集团股份有限公司, 上海 200090; 2. 丽水学院工学院, 浙江 丽水 323000; 3. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 总结了国外海底犁式开沟机技术进展, 海底犁式开沟机可分为“V”型开沟犁和矩形开沟犁两种, “V”型开沟犁开沟截面面积较大, 沟槽截面形状为 V 型, 适合与海底管道埋设, 其回填方式有专门回填犁回填和回填模块回填两种。矩形开沟犁开沟面积较小, 截面狭长且为矩形, 多适用于海底电缆埋设。其土壤排出方式有垂向排土和侧向挤压排土两种, 沟槽靠重力自动回填。犁式开沟机开沟速度快, 造价相对较低, 目前正在朝大型化、模块化发展。开沟犁的关键技术包括犁式开沟机的开沟阻力减小方法以及在崎岖海底地形上开沟时的开沟深度稳定性等, 这也是目前研究的重点。对国外犁式开沟机技术的总结, 对开沟犁设计和海上施工作业有一定指导意义。

关键词: 犁式开沟机; 海底管道埋设; 水下工程

中图分类号: U674.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2019)09-0114-08

DOI: 10.11759/hyxx20181107002

海底开沟机是海底管道、电缆埋设的重要设备, 发展到现在已经形成了众多型号, 主要可以分为 3 大类: 冲射式开沟机、犁式开沟机、机械式开沟机。冲射式开沟机是利用高压射流对海底地层进行冲刷从而开凿出沟槽, 犁式开沟机是利用犁刀在拖船的拖动下开出沟槽, 机械式开沟机则是利用链锯或者转盘对海底地层切削形成沟槽^[1]。本文总结了海底犁式开沟机的研究现状, 对新型犁式开沟机设计有一定借鉴意义。

海底管道和电缆直径差别大, 要求埋设的深度也不同, 因此海底管道埋设和电缆埋设对开沟机的要求有较大的差别, 根据其开出的沟槽形状犁式开沟机主要分为“V”形开沟犁和矩形开沟犁两种。

1 “V”形开沟犁

V 形开沟犁主要用于海底管道埋设。海底管道直径较大, 最大达到 1.5 m, 埋设时需要开沟的深度和宽度均较大, 此时沟槽边坡需要有较小的坡角来保证稳定性, 因此针对管道埋设开挖的沟槽大都是“V”型的沟槽, 被称为“V”形开沟犁, 这种开沟犁需要巨大的拖力, 在开沟完成后, 沟槽无法自行回填, 需要回填犁对沟槽进行回填, 以上工程实际要求决定了开沟犁的形式, 目前已有的 V 形开沟犁可以分为以下两种类型: (1)开沟-回填组合犁; (2)多功

能开沟犁。

1.1 开沟-回填组合犁

开沟-回填组合犁是由开沟犁、回填犁两台机器完成埋管作业, 开沟犁主要进行开沟, 开沟完成后母船拖曳回填犁沿管道路由再作业一次, 完成管道的回填工作。因此开沟犁、回填犁成对设计使用, 开沟犁母船同时装备两种设备。目前已经有以下几种型号。

IHC 公司的犁式埋缆系统是典型的开沟-回填组合犁, 也是目前世界上最大的开沟犁系统^[2], 由开沟犁 PL3 和回填犁 BPL3 如组成, 如图 1 所示。通过在母船 Far Samon 上的操作, 它可以在 1000 m 深的海底开凿和回填 2.5 m 深的沟槽, 沟形为“V”型, 坡脚 35°。

PL3 开沟犁长 22 m, 宽 12 m, 高 10 m, 空气中质量 175 t, 水中质量 150 t, 可承受最大拖力 400 t, 设计寿命 10 a, 开沟犁系统包括: 开沟犁本体、开沟

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2019-01-26

基金项目: 大型作业型 ROV 近底作业技术研发(KYH013117006M)

[Foundation: The Research of Work Class ROV's Technology of Working near the Sea Bed, No.KYH013117006M]

作者简介: 张园(1982-), 男, 湖北利川人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 海工装备设计与研发, 动力定位与推进系统, 水下机器人等, E-mail: zhangyuan@zpmc.com; 张树森(1985-), 通信作者, 男, 山东临沂人, 博士, 讲师, 研究方向: 水下工程, 海洋资源开发等, E-mail: zhangshusen119@126.com

犁刀(倾角 35°)、推土犁刀(倾角 20°)、首部滑撬、首部抱管机构、尾部抱管机构。该开沟犁最大埋管直径 1.55 m, 在首、尾各抱管系统垂向抱管能力 100 t。

开沟犁主体结构由高强度钢材组成的底盘, 易磨损部件为可更换, 由耐磨钢材制造。其他配件和外壳由不锈钢制造。作业时状态如图 2 所示。



a PL3 开沟犁



b BPL3 回填犁

图 1 PL3 开沟犁和 BPL3 回填犁

Fig. 1 PL3 & BPL3 ploughs



图 2 PL3 开沟犁作业示意图

Fig. 2 Jet sled

VMP 系列开沟犁是 SMD 公司(Soil Machine Dynamics Ltd.)研制的可变深度多回次开沟犁^[3-4], 它同样由开沟-回填两套系统组成, 其主要特点是可以进行多次开沟, 以达到更大的开沟深度。

VMP 开沟犁主要由开沟犁本体、首部滑撬、首部抱管机构、尾部抱管机构、预开沟辅犁、主开沟

犁、推土犁组成, 如图 3 所示。以 VPM 250 为例, 开沟犁长 18.5 m, 宽 9.8 m, 高 8.5 m, 空气中质量 120 t, 水中质量 100 t, 设计最大拖力 250 t, 单次开沟深度 1.5 m, 两次开沟深度 2.0 m, 最大开沟速度 1 400 m/h, 最大埋管直径 1 460 mm, 软土适应能力大于 5 kPa, 最大工作水深 1 000 m。开沟犁如图 4 所示。该犁可进行 $\pm 8^\circ$ 的左右转向, 开沟犁后每侧安装有 25° 的推土犁。

主要辅助系统有辅助射流系统, 功率 150 kW; 还装备有用于调节浮力的浮箱两只, 每只浮箱空气中质量 6 t, 可提供浮力 50 t; 首部、尾部都安装有抱管机构, 最大抱管力 75 t; 其他辅助系统有: 水下摄像机(HDTV)8 只、250 W 水下灯 12 只、操作分析声纳、以及回声定位传感器等。甲板回收系统 5 级海况下的安全载荷为 200 t。控制系统安装在 20 英尺的 ISO A60 集装箱内。与之配套的还有回填犁^[5], 如图 4 所示。



a VPM250 开沟犁



b VPM350 开沟犁

图 3 VPM 系列开沟犁

Fig. 3 VPM ploughs



图4 与VPM开沟犁配套的回填犁

Fig. 4 Backfill plough

各种V形开沟犁的详细参数如表1所示。

1.2 多功能开沟犁

多功能开沟犁采用模块化设计,开沟犁由一个

本体和多个作业模块,每个模块具有不同的功能,通过在本体上安装不同的作业模块即可以完成清障、开沟、回填等多种任务。开沟犁上的犁刀可以更换,在完成开沟作业后,更换回填模块,即可以进行回填作业。

PLP (pre-lay plough)开沟犁是SMD公司针对复杂海底地质状况下电缆埋设研制的新一代V形开沟犁^[6-8]。在以往的电缆埋设工程中发现,海底地层的多变性和大量的冰川漂砾会增加电缆埋设的时间和破坏的风险,这些海底障碍物还会使得开沟深度不能达到要求。针对这样的工程实际,SMD公司研制了PLP开沟犁,在电缆铺设之前,先对设计的路径进行清障,以方便后续开沟作业。

表1 海底V形开沟犁参数表

Tab. 1 Parameters of 'V' plough

型号	生产商	尺寸/m			质量/t	T/t	P/kW	H/m	C/kPa	V/(m/h)	W/m	D/mm
		长	宽	高								
PL3	IHC	22	12	10	175	150	-	2.5	400	-	1 000	75~1 550
BPL3	IHC	-	-	-	-	-	-	-	250	-	1 000	-
PRE-LAY PLOUGH	SMD	21.5	8.5	-	110	200	75~150	1.7	-	-	300	-
VMP250	SMD	18.5	9.8	8.5	120	250	150	2	-	1 400	1 000	1 420
VMP350	SMD	21.4	11.8	9.7	180	350	151	2.5	-	1 400	1 000	1 460
BP	SMD	19.7	11.3	9.3	120	200	-	-	-	-	-	-

注: T 为工作拖力; P 为功率, 功率指开沟机液压系统的功率; H 为开沟深度; C 为破土强度; V 为开沟速度; W 为工作水深; D 为埋管直径; “-”表示相关数据不明。

PLP开沟犁长21.5 m, 宽8.5 m, 高6 m, 质量110 t, 可承受最大拖力200 t。开沟犁由本体、前滑撬、后滑撬、清障犁(选装)、开沟犁、回填犁(选装)、推土铲刀组成。它具有3种工作模式, 分别是: 清障模式(boulder), 如图5a所示, 开沟模式(trenching), 如图5c所示, 回填模式(backfill), 如图5e所示。工作时清障犁、开沟犁、回填犁三者选择一种安装。清障犁安装于前滑撬之前, 用于清理海底障碍, 如冰川漂砾、渔网等, 以保护滑撬。清理宽度可以根据实际工程需要进行调节, 这种开沟犁工作步骤如下:

(1) 管线铺设路线清障及预开沟。这项工作需要在管线布放和开沟作业之前进行, 开沟犁安装清障犁, 通过清障作业将旧电缆、渔网、冰川漂砾等障碍从管线经过的路线清理, 清理后的管线路由如图5b所示; 此开沟犁的开沟作业是通过两次开沟完成, 预开沟是在管线布放之前, 在清理好的路线上, 开出矩形截面沟槽, 使得布放时, 管线能准确落在沟

槽中。沟槽尺寸为0.8 m×0.8 m, 开沟后的管线路由如图5b所示。

(2) 二次开沟。为防止犁刀破坏管线, 在第一次开沟的基础上采用进行开沟, 开出的沟槽为上部为V型, 底部为矩形, 此时沟槽深度达到1.7 m, 开沟后的管线路由如图5d所示。

(3) 进行管线布放; 在电缆布放时采用射流辅助, 以确保电缆布放到指定深度。

(4) 利用回填犁对沟槽进行回填, 完成管道埋设。

PLP开沟犁针对不同的海底地质状况还可以进行多次开沟, 尤其是在硬土区域, 拖动犁刀的拖力很大, 通过多次开沟可加快工程完成速度, 并降低开沟风险。不同地质状况下的开沟犁拖力和开沟深度如表2所示。

2 矩形开沟犁

矩形开沟犁开出的沟槽截面为狭窄的矩形, 深

度远大于宽度,故被称为矩形开沟犁。它主要用于海底电缆埋设。海底电缆(光缆)的直径较小,为减小开挖土方量,在埋设过程中多开挖矩形沟槽,沟型狭

窄,侧壁直立,当电缆放入沟槽后,一般不需要进行回填,在海流、重力等作用下实现自动掩埋。矩形开沟机正是针对电缆埋设专门设计的开沟机。

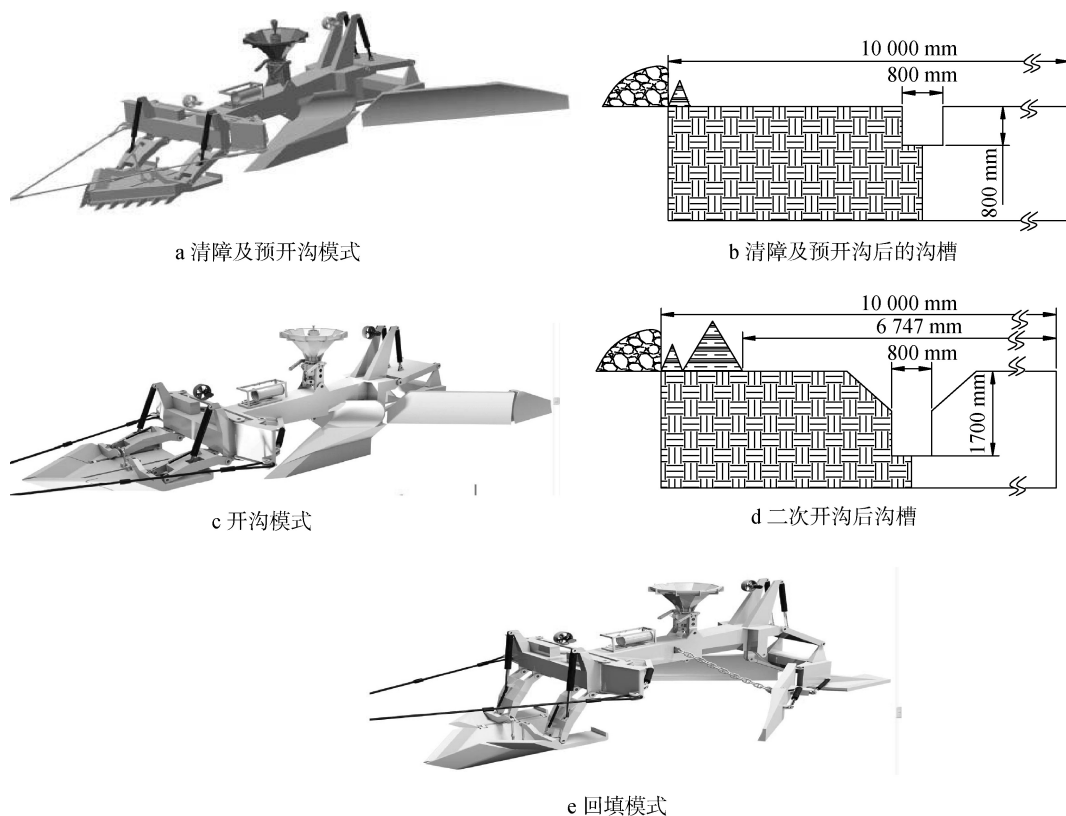


图 5 PLP 开沟犁
Fig. 5 Pre-lay ploughs

表 2 不同地质条件作业参数表

Tab. 2 Parameters of pre-lay ploughs in different geotechnical conditions

地质条件	土层剪切强度/kPa	拖力/t	开沟深度/m		开沟速度/(m/h)	
			第 1 次	第 2 次	第 1 次	第 2 次
软土	50	80	1.7	-	500	-
次硬土	100	120	1.7	-	500	-
硬土	150	240	1.7	-	400	-
特硬土、坚土	250	250	1.4	-	300	-
特硬土、坚土	350	140~200	0.8	1.4	400	400
特硬土、坚土	400	160~210	0.8	1.4	400	300
特硬土、坚土	600	200~250	0.8	1.4	350	250

注:“-”表示相关数据不明。

和 V 形开沟犁相比,矩形开沟犁开挖土方量少,对土体的扰动小,消耗的能量少,因此需要的拖力也较小。根据其开沟时土壤的排出方向矩形开沟犁可以分为垂向排土式开沟犁和侧向挤土式开沟犁两种。

2.1 垂向排土式开沟犁

垂向排土式开沟犁土壤排出方向为前方和上方,不向两侧排出土壤,为达到这种开沟效果,采用多个犁刀进行开沟,一般安装 3 个分别是上部犁刀、中部犁刀和底部犁刀。犁刀安装在主犁上,安装面与地

面夹角约 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$, 如图 6 所示, 每个犁刀完成开沟深度范围内的部分开沟, 上部犁刀在最前方, 最先完成开沟排土, 从而使得土壤及时排出, 降低中部犁刀和底部犁刀的排土压力。垂向排土开沟犁主要有以下几种。



图 6 多犁刀布置方式

Fig. 6 Multi-plough of plough trencher

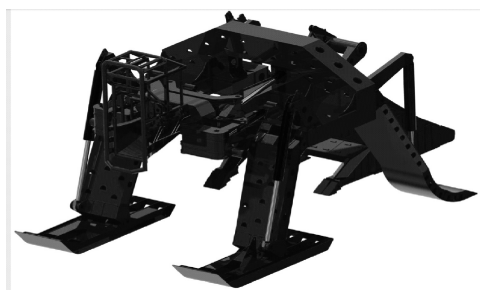
IHC 公司的 Sea Stallion 矩形开沟犁系列代表着矩形开沟犁的新高度, 结合其控制系统可以在 2000 m 水深条件进行电缆埋设作业^[9-10], 从 Sea Stallion 1 到 Sea Stallion 4 它已经发展了 4 代, 它主要由开沟犁本体、首部滑撬、尾部滑撬、犁刀、电缆导向装置组成如图 7 所示。犁刀具有特殊的形状, 由 3 个水平向

楔状犁刀组成, 电缆导向装置在犁刀后方。如图 7b 所示。首部和尾部滑撬上都安装有液压缸, 通过液压缸调节开沟犁的状态。以 Sea Stallion 4 为例, 长 13.4 m 宽 5.2 m, 高 5.1 m, 设计最大拖力 180 t, 最大埋缆直径 280 mm, 电缆弯曲半径 3.6 m, 开沟深度 0~3.3 m, 作业水深 400 m。

2.2 侧向挤土式开沟犁

侧向挤土式开沟犁主要特点是开沟过程中犁刀不向上排出土壤, 而是通过向两侧挤压土壤形成埋设电缆所需要的沟槽。其犁刀由底部的刺入犁刀和垂直挤土犁刀组成, 如图 8 所示。刺入犁刀的作用是在开沟初始和结束阶段控制犁刀刺入和退出土壤, 挤土犁刀的作用是将土壤向左右两侧挤压, 以形成沟槽。侧向挤土式开沟犁目前主要有以下几种。

MD 系列开沟犁是 SMD 公司生产的侧向挤土式开沟犁^[11]。以 MD3 160 为例, 开沟犁长 9.1 m, 宽 5.1 m, 高 4.4 m, 空气中质量 22 t, 水中质量 19 t, 如图 8 所示, 设计最大拖力 80 t, 开沟深度 0~3 m, 埋缆直径 20~160 mm, 电缆最小弯曲半径 1.5 m, 转向角 $\pm 15^{\circ}$, 开沟犁配有可选装的射流辅助系统, 功率 250 kW, 压力 1.5 MPa, 流量 400 m³/h, 水下传感器配有单色摄像机 1 只, 单色低照度灯 2 只, 彩色低照度灯 1 只, 水下 LED 灯 6 只, 操作声纳 1 台。该开沟机的犁头为单犁头, 挤土式, 犁头上部有较长的犁刃, 将土挤压到两边, 从而完成开沟埋缆作业。



a Sea Stallion 3 开沟犁



b Sea Stallion 4 开沟犁

图 7 Sea Stallion 3&4 开沟犁

Fig. 7 Sea stallion 3&4 ploughs

HD 系列开沟机是 SMD 公司生产的矩形开沟犁^[12-13], 具体型号包括 HD3-200、HD3-300 等, 如图 9 所示。其中 HD200 开沟犁长 13.5 m, 宽 6.3 m, 高 6.6 m, 空气中质量 35 t, 水中质量 30 t, 可承受最大拖力 150 t, 开沟深度 0~3 m, 作业深度 1500 m, 埋缆直径 30~200 mm, 电缆弯曲半径 3.5 m, 转向角 $\pm 12^{\circ}$,

此外开沟犁还可以选装射流辅助系统, 射流与开沟犁刀平行, 功率 200~500 kW, 压力 0.6 MPa, 流量 800~1 600 m³/h, 此外开沟犁还装有 Kongsberg OE15- 100 摄像头 2 个, Bowtech 3200 水下灯 4 只, 操作声纳 1 只。

各种垂直犁式开沟机的参数如表 3 所示。

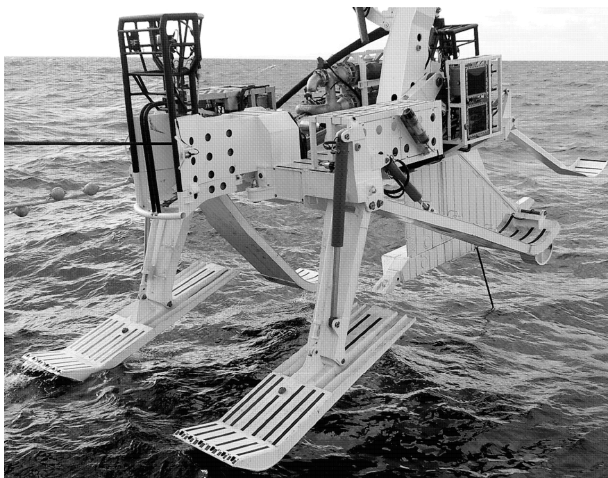


图8 MD3 160 垂直式开沟犁
Fig. 8 MD3 160 vertical plough

3 犁式开沟机发展方向与关键技术

3.1 技术特点

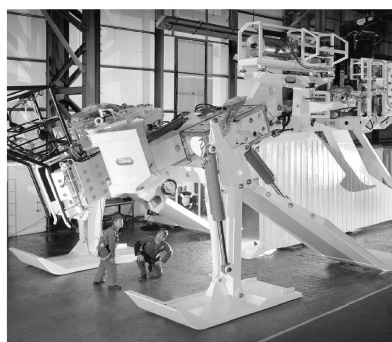
犁式开沟机的开沟动力主要来自母船拖动,其

作业方式不同与其他开沟机,主要作业过程可总结如下:(1)在距离作业目标点距离约当地水深的一半时,母船停止并开始布放开沟犁,在开沟犁缓慢下沉时,母船也朝目标点移动,当母船在目标点正上方时,开沟犁恰好落在目标点上;(2)母船停止前进,开始检查开沟犁作业系统,抱管机构将海底管线抱起,管线起着引导开沟犁前进的作用;(3)前滑撬油缸收缩,使得犁刀有一定的刺入角,在母船拖动下,犁刀刺入海底土壤,犁刀将土壤切割翻转到沟外,形成沟槽,开沟作业开始;(4)开沟作业结束时,母船停止,然后缓慢后退,当位于开沟犁正上方时,并将开沟犁收回甲板。

犁式开沟机地质条件适应性广,V型开沟犁能够在 600 kPa 及以下的黏土、砂土条件下进行破土开沟,矩形开沟犁能够在 350 kPa 及以下的黏土、砂土条件下进行破土开沟。因此犁式开沟机几乎可以在除基岩之外的所有地质条件下作业。海底黏土的承载力是限制犁式开沟机作业因素之一,一般要求软土剪切强度 5 kPa 以上,防止开沟犁沉陷,造成倾覆。



a HD3 200开沟犁



b HD3 300开沟犁

图9 HD 系列开沟犁

Fig. 9 HD ploughs

表3 海底矩形开沟犁参数表

Tab. 3 Parameters of slot plough

型号	生产商	尺寸/m			质量/t	T/t	P/kW	H/m	C/kPa	W/m	D/mm	R/m
		长	宽	高								
MD3-160	SMD	9.5	5.5	5.1	22	80	15	0~3.3	-	2 000	380	1.5~2
UD-400	SMD	20	8	9.5	120	250	15	0~4	-	-	-	5~6
HD3-200	SMD	13.3	6	6	36	150	25	0~2.4	-	500	30~300	2~3.5
HD3-300	SMD	16.0	6.5	7	45	150	15	0~3.3	-	500	30~300	2.5~5
Sea Stallion 3	IHC	12.7	5.4	5.3	28	100	-	0~3	5~350	2 000	15~150	1.5
Sea Stallion 4	IHC	13.4	5.1	5.2	23~33	180	-	0~3.3	5~350	400	400	3.6
STANDARD PLOUGH	SMD	9	4.6	4	15	50	-	0~1.5	-	2 000	90	1.5

注:表中量符号含义与表1同;“-”表示相关数据不明

犁式开沟机开沟速度与土壤剪切强度负相关,与开沟深度负相关,与母船拖力正相关。母船拖力和开沟深度一定时,土壤剪切强度越小,开沟速度越大。土壤剪切强度一定时,母船拖力越大,开沟速度越大。开沟犁开沟速度远大于冲射式开沟机等其他开沟机,PL3 开沟犁在土壤剪切强度 100 kPa、开沟深度 1.1 m 时,开沟速度可以达到 14 km/h,远大于冲射式开沟机 50~100 m/h 的开沟速度。

3.2 发展方向

犁式开沟机作为海底开沟埋缆的重要设备,近些年在国外得到快速发展,犁式开沟机与其他开沟机最大区别是本身不带有动力依靠拖船拖力进行作业,因此它具有其他开沟机没有的优势,结构简单,所需要的传感器数量和种类比其他类型开沟机少很多,所以造价较低。犁式开沟机主要靠水面拖船拖动,水下仅有控制其姿态的液压油缸和必要的传感器,功率很小。此外,犁式开沟机速度受拖船控制,开沟速度快,因此犁式开沟机具有非常广阔的应用前景。犁式开沟机发展呈现出以下几个发展趋势。

(1) 大型化。海洋石油工程中需要埋设的管道直径越来越大,需要开挖的沟槽尺寸也越来越大,使得开沟犁超大型化方向发展,例如 PL3 开沟犁重量已经达到 170 t,单次开沟即可以完成开沟作业。

(2) 模块化与多功能化。在开沟犁设计时针对其功能设计出功能模块,在需要进行某项功能作业时直接安装相应的功能模块,从而实现一台机器完成多种功能。例如 PLP 开沟犁具有清障、开沟、回填等模块,通过安装这些功能模块就能够完成清障、开沟、回填等作业。

3.3 关键技术

以下几个方面是犁式开沟机的关键技术,仍需要继续研究。

1) 减小开沟阻力与提高开沟速度。开沟犁的阻力与土壤强度、开沟速度、开沟深度正相关。当开沟速度增加或者土壤强度增加时,都会引起开沟阻力的迅速增加。目前拖船能够提供的最大拖力在 250 t 左右^[16],因此已有的开沟犁设计开沟阻力都小于这一极限拖力。当最大拖力一定时,通过降低开沟阻力,可以提高开沟速度,从而提高工程的经济性。因此如何降低犁式开沟机作业时的拖曳力已经是犁式开沟机研究的重要课题,目前已经有射流辅助降阻等措施^[17]。

2) 开沟犁开沟深度稳定性。由于海底地面起伏不平,在开沟作业过程中会遇到较大的地面坡度,同时海底地层的力学性质也多变,这使得开沟过程中开沟深度起伏不定,会出现开沟深度突然变浅,开沟机犁刀飞出地面,可能造成电缆损坏,或者开沟深度突然增大,开沟犁的拖曳力急剧增大,给开沟作业带来困难^[18],因此对犁式开沟机开沟过程稳定性进行研究,有着重要的工程意义。

参考文献:

- [1] 张树森,汪淳,葛彤. 海底冲射式开沟机技术进展[J]. 船海工程, 2014, 43(3): 176-182.
Zhang Shusen, Wang Chun, Ge Tong. Recent developments of submarine jet trenchers[J]. Ship Ocean Engineering, 2014, 43(3): 176-182.
- [2] Anon. Pipeline ploughs [EB/OL]. [2018-11-1]. <https://www.royalihc.com/en/products/offshore/subsea-equipment/pipeline-ploughs>.
- [3] Anon. Latest in multi-pass technology variable multi-pass plough [EB/OL]. [2018-11-1]. <http://dehiuwwqagjyo.cloudfront.net/prod/2017/01/VMP250.pdf>.
- [4] Anon. Latest in multi-pass technology variable multi-pass plough [EB/OL]. [2018-11-1]. <http://dehiuwwqagjyo.cloudfront.net/prod/2017/02/VMP350.pdf>.
- [5] Anon. Pipeline backfill plough [EB/OL]. [2018-11-1]. <https://www.smd.co.uk/product/pipeline-backfill-plough/>.
- [6] Anon. Sea plough [EB/OL]. [2018-11-1]. http://www.emarine.ae/en/?page_id=172.
- [7] Gerwick B C Jr. Construction of Marine and Offshore Structures[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007: 617-619.
- [8] Anon. Sea stallion 4 plough [EB/OL]. [2018-11-1]. <https://www.royalihc.com/en/products/offshore/subsea-equipment/subsea-cable-ploughs>.
- [9] Anon. Low risk power cable installation and trenching 200 tone multi-function pre-lay plough [EB/OL]. [2018-11-1]. <http://dehiuwwqagjyo.cloudfront.net/prod/2017/01/200te-PRE-LAY-PLOUGH.pdf>.
- [10] Miedema S A. Calculations on forces and velocities of a submarine narrow trench plough in sandy soil[J]. Mechanical Maritime & Materials Engineering, 2012, 126(1): 13-24.
- [11] Anon. Assured telecoms cable burial plough [EB/OL]. [2018-11-1]. <https://www.smd.co.uk/product/md3/>.
- [12] Anon. Heavy duty plough HD3-200 [EB/OL]. [2018-11-1]. <http://dehiuwwqagjyo.cloudfront.net/prod/2017/01/HD3-200.pdf>.
- [13] Anon. Heavy duty plough HD3-300 [EB/OL]. [2018-11-1]. <http://dehiuwwqagjyo.cloudfront.net/prod/2017/01/HD3-300.pdf>.

- 01/HD3-300.pdf_0.pdf_
- [14] Bransby F B F, Brown M B, Hatherley A H, et al. Pipeline plough performance in sand waves. Part1: Model testing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(1): 49-64.
- [15] Lluçà R P. Monitoring ploughing activities during Submarine Pipeline Construction on different seabed substrata[J]. Optoelectronics IEEE Proceedings Journal, 2013, 132(1): 1-22.
- [16] Anon. Pre-lay plough the next generation of cable installation [EB/OL]. [2018, 11-1]. <http://www.smd.co.uk/product-category/ploughs/>.
- [17] Anon. Low risk power cable installation and trenching 150 tone multi-function pre-lay plough [EB/OL]. [2018-11-1]. <https://www.smd.co.uk/product/150te-pre-lay-plough/>.
- [18] Bransby M F, Brown M J, Lauder K, et al. Pipeline plough performance in sand waves. Part2: Kinematic calculation method[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(1): 65-77.

Recent global developments in submarine mechanical trenchers

ZHANG Yuan¹, ZHANG Shu-sen², ZHANG Bao-hua¹, GU An¹, WANG Xu-yang³, ZHAO Min³, GE Tong³

(1. Shanghai Zhenhua Heavy Industries Co., Ltd., Shanghai 200090, China; 2. Faculty of Engineering, Lishui University, Lishui 323000, China; 3. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Received: Nov. 7, 2018

Key words: sea plough trencher; subsea pipeline burying; underwater engineering

Abstract: This paper summarizes the development of subsea plough. Two types of subsea ploughs are available namely V plough and slot plough. Trenches excavated by the V plough have “V” shape and very large cross section, which makes it suitable for burying the pipe. However, the cross section excavated by the slot plough is rectangular in shape and deeper and narrower than the V trench, making it suitable for burying the cable. The plough trencher works much faster than other types of trenchers and is less expensive. It is larger and modular in design. Reducing the resistance of the plough and maintaining the stability of the trencher in uneven terrain are the key issues in the technology of plough design, requiring more research. This summary of the technology of submarine plough trenchers will be useful in future design aspects of plough trenchers and also in the study of trenching operation.

(本文编辑: 刘珊珊)