

海底管道开沟犁及其设计分析

张 国 光

(海洋水下工程科学研究院)

在海底管道工程技术领域里, 用海底管道开沟犁(简称海底犁)进行管沟开挖是一项发展迅速、且日趋成熟的施工技术。与传统的冲射滑橇、机械式开沟机等开沟机械相比, 海底犁具有开沟速度快, 经济效益好、适用范围广等优点。因此深受近海管道工程界瞩目, 成为研究开发的焦点之一。

本文评价了海底犁技术的发展与动态, 分析了海底犁的结构类型及特点, 讨论了海底犁总体设计时所应考虑的问题和技术关键, 可为有关设计研究人员参考与借鉴。

一、海底犁技术的发展与动态

近十年来, 海底犁技术取得了很大的成功。据统计, 目前世界各国共研制各种海底犁近 50 台, 利用海底犁开沟埋设的海底管道已达2 000余公里。虽然海底犁技术可以回溯到本世纪的50年代末, 但当时的水下犁只能用于港湾、海底及出海口等较浅水域的小口径管线埋设, 与现代海底犁在概念上有较大区别。

用海底犁开挖管沟的设想始于1975年。直至1977年, 由荷华R·J布朗联合公司(RJBA)和英国土壤机械动力公司(SMD)联合研制的预开沟型海底犁, 见图1。在莫比尔(Mobil)石油公司的Statfjord油田上, 为914mm管道(水深150m)开沟获得成功, 海底犁才令近海工程界刮目相看。尽管用于Statfjord油田的海底犁结构简单, 控制手段不完备, 水下拖动时在海底预定路线上左右窜动量 ± 5 m, 但它毕竟开创了海底管道用犁开沟的新局面, 是海底管道建设史上一个重要的里程碑。

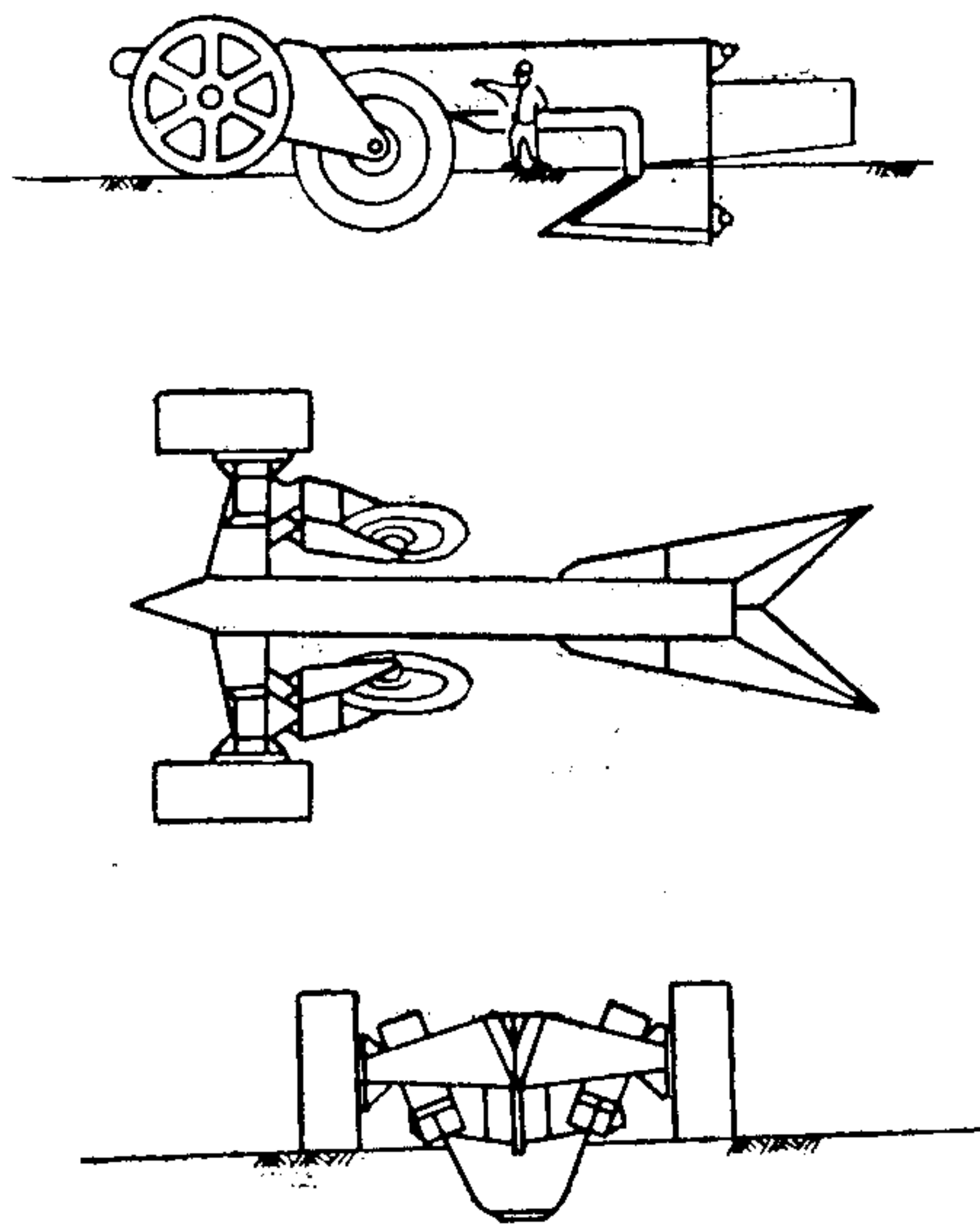


图1 Statfjord工程中应用的预开沟海底犁

1978年为加拿大北极地区管线开沟而设计的轻结构海底犁(图2)投入使用。1979年第一台后开沟型海底犁——Snapper犁,在澳大利亚Bass海峡为埃索公司开挖一条长37km,埋设管径609.6mm的海底管沟,从而证明海底犁不但能在砂、土上开沟,而且还能在石灰岩等海底岩石层上开沟。1980年以后,各种后开沟海底犁开始服务于北海、马来西亚,澳大利亚、日本等海域(见表)。1985年首次投入使用的PBP 3型后开沟铺管海底犁,见图3,最大工作水深达200m,犁头可根据铺管需要进行调整,堪称目前最先进的开海底沟犁。

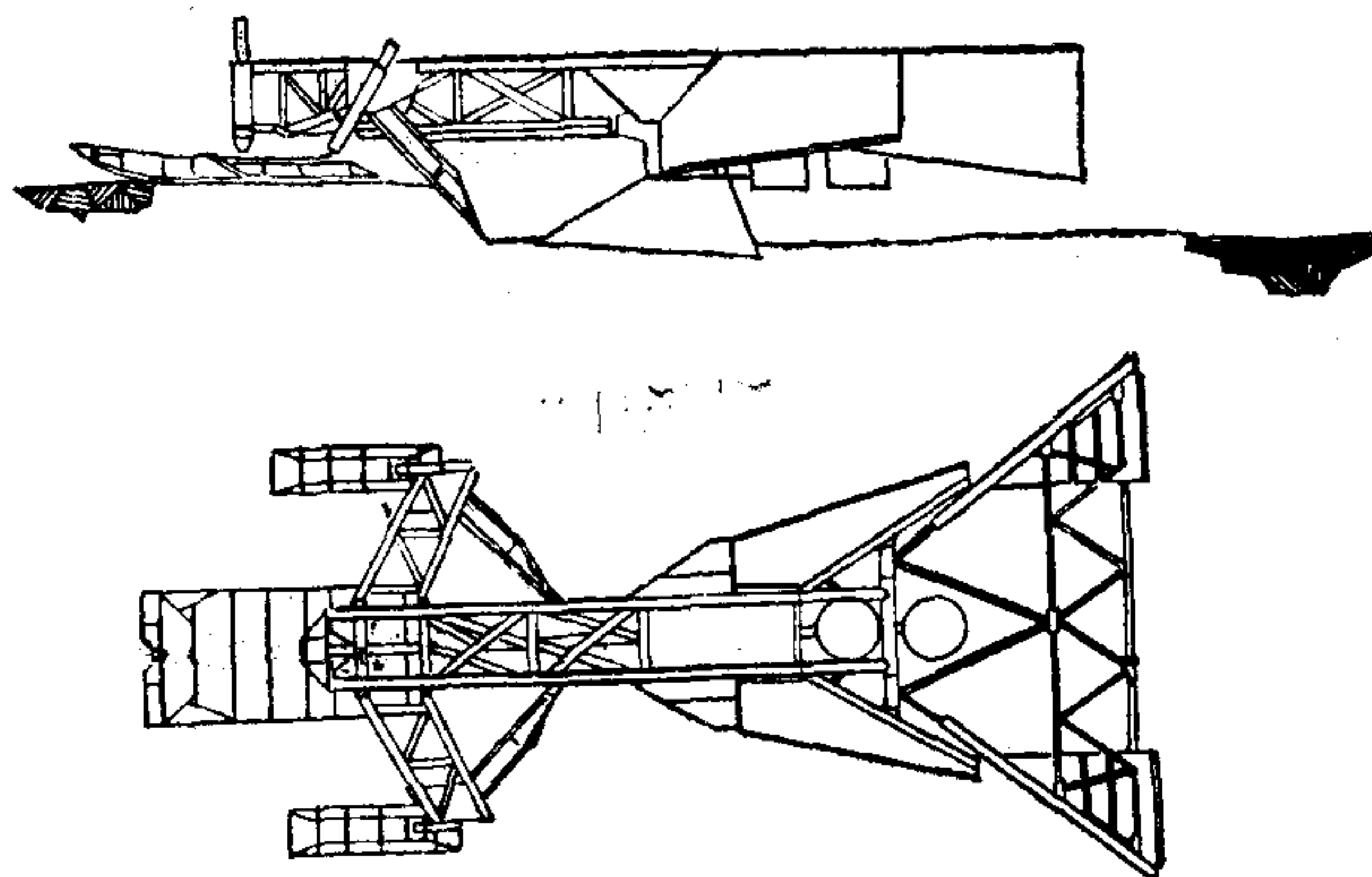


图2 用于北极区的轻结构海底犁

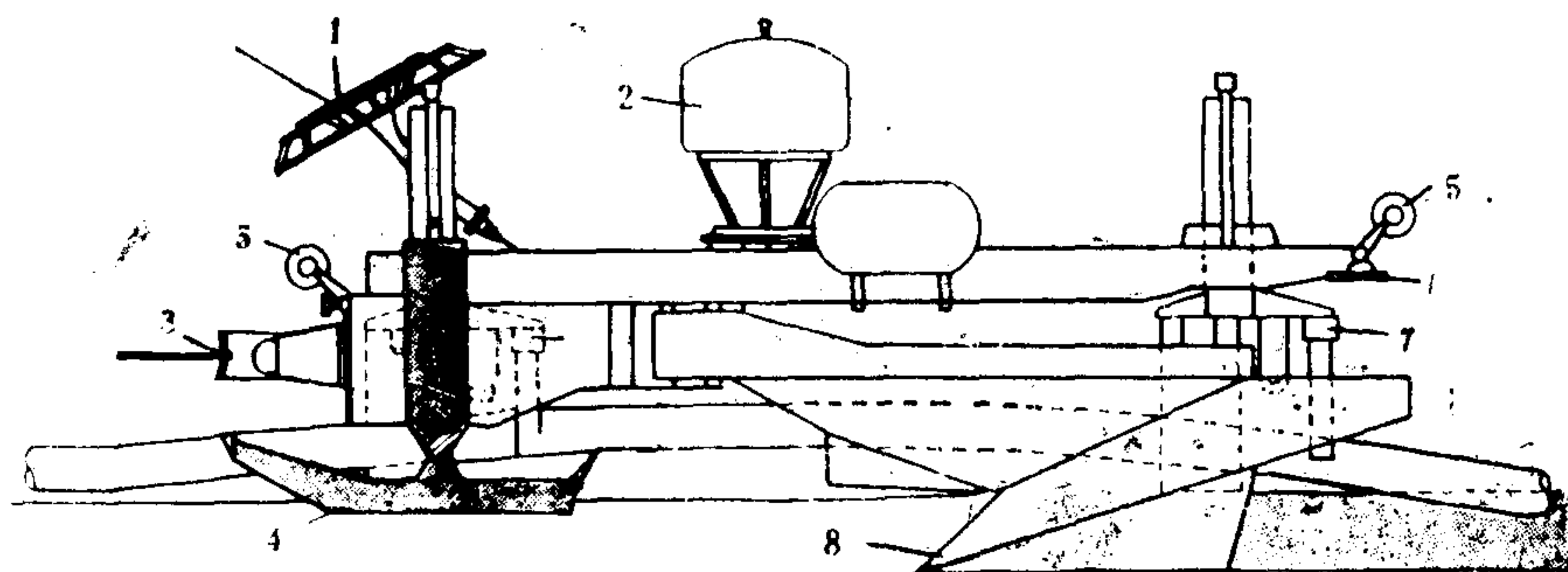


图3 PBP 3型后开沟铺管海底犁

- 1—自动控制装置; 2—下放与回收装置; 3—有效拖点; 4—可调滑梯;
5—推进器; 6—管沟监测器; 7—管子操纵装置; 8—犁头

目前海底犁的最大日犁沟能力已从Snapper工程的 8 km/d , N—Rankin工程的 10 km/d 达到Saranak工程的 13 km/d 。一般工程的平均犁沟能力也从 3.5 km/d 提高到 6 km/d 。并且出现了如下值得注意的动态。

1. 专项工程用犁正向通用型海底犁发展

因不同海域的海底条件、管道尺寸、管沟深度的差异,早期研制的Statfjord犁、北极犁、Woodside犁都是为特定工程铺管而专门设计的。这些犁的利用率低,单位开沟长度资金投入高。近年来研制的海底犁,已注意到这一点。如PBP 3型后开沟犁(图4),最大埋设管径609.6mm,犁头可调,即能开沟,又可作回填用,通用性较好。

海底管道开沟犁及其管道施工参数表

序 号	建 造 年 代	设 计 者	设计开 沟深度 (m)	设计最大 拖拉力 (t)	型 式		管 道 施 工 参 数			
					预 开 沟	后 开 沟	管 道	管径 (mm)	长度 (km)	沟深 (m)
1	1959	L & M	0.9	未 知	×		河底及入海口管线	未知	未知	未知
2	1977	SMD/RJBA	1.2	300	×		Statfjord A°	914.1	2.2	1.2
3	1977	SMD/RJBA	1.5	50	×		Drake F-76	609.6	0.3	1.5
4	1978	RJBA	0.8	100		×	Whyalla	304.8	2.4	0.5
5	1978	RJBA	1	100		×	West Sole	未知	未知	未知
6	1979	SMD	0.6	30		×	Magnus	152.4	35	0.5
							North Leg	152.4	11	0.6
							Highlander	355.6	60	未知
7	1979	RJBA	1.2	220		×	Snapper	609.6	37	0.7
8	1980	SMD/RJBA	1.2	200		×	West Sole	508	80	1
9	1982	RJBA	1.8	200		×	Central Luconia	914.1	70	1.8
10	1982	RJBA	2	400		×	North Rankin	1016.0	120	2
11	1982	RJBA	1.85	300		×	Iwaki	304.8	40	1.85
12	1984	RJBA	1.2	200		×	Gullfaks	355.6	22	1.2
13	1984	SMD	1	200		×	Statfjord C	304.8	11	1
14	1984	RJBA	1.5	300		×	Heimdal—Brae	203.2	116	0.9
15	1984	L & M	1	110		×	Ula—Cod	254.0	26	0.7

1985年PBP3犁就在3项管道工程中使用,成功地开沟埋管115km。

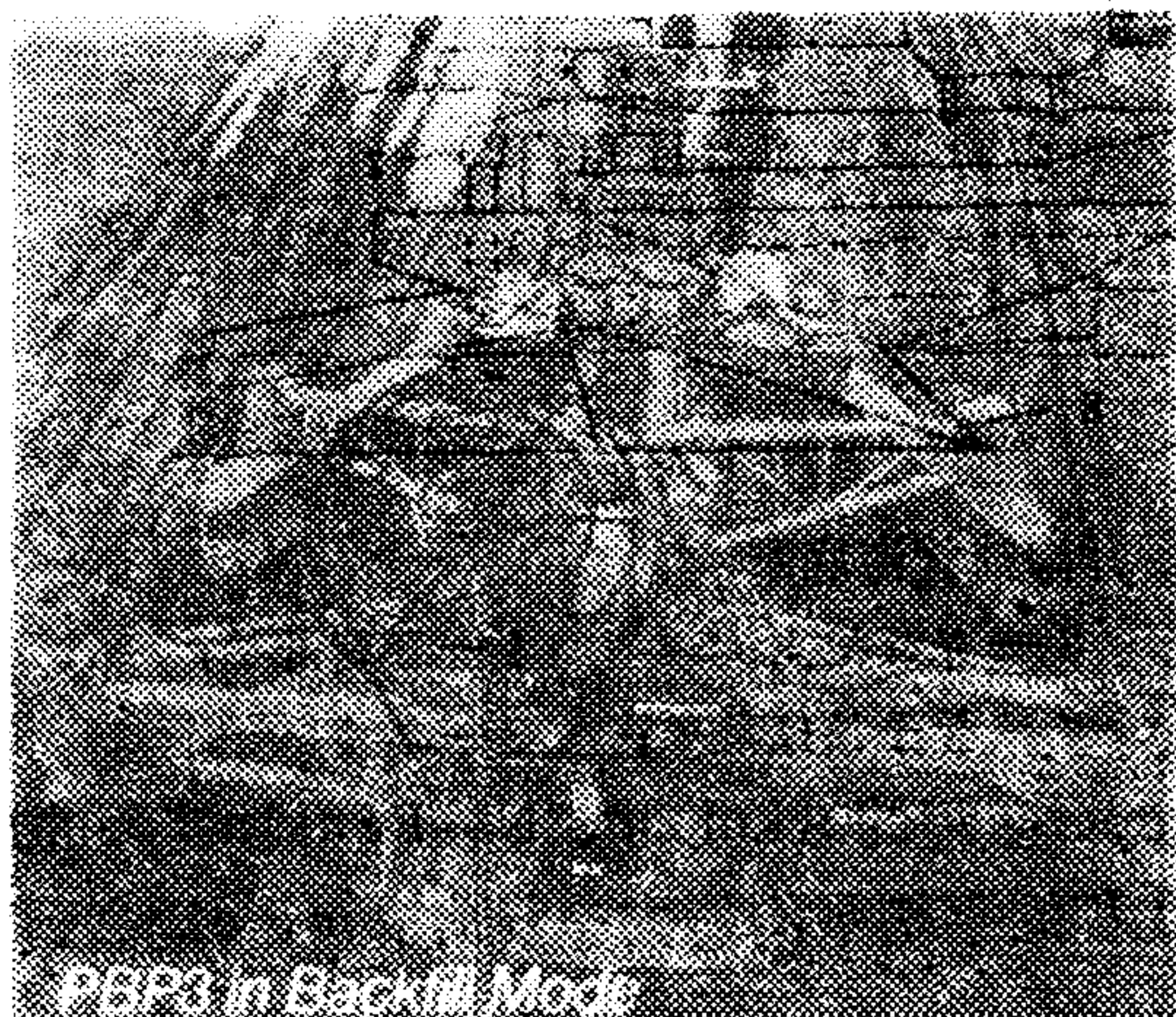


图4 回填型PBP3海底犁

从而在施工时无需专用支持船,仅利用一般的潜水支持船也能满足海底犁牵引要求。这样可进一步降低施工费用。

3. 海底犁施工时,对潜水员的依赖程度逐步降低。

由于海底犁的自动化程度不断提高, Magnus犁、PBP3型犁在深水开沟铺管时,

2. 限制最大牵引力,减少对重型水面支持船的依赖

现有海底犁的最大不足是开沟时必须要有强大的牵引动力。目前投入工程应用的海底犁中,85%的犁需7355kW以上的拖轮牵引。而且随开沟深度的变化,所需牵引力也急剧增加。如果施工时能用多次开挖来达到规定的深度,就可以大大减少犁的结构重量和牵引力。1984年7月,R·J布朗联合公司在北海投入使用的Gullfaks犁,就是一台多程Multi—Pass海底犁。

多程犁的研制,使海底犁有可能小型化,

无需潜水员参与水下施工，大大减少了对潜水员的依赖，这样不仅安全而且又经济，也是今后其他形式的水下开沟机械的发展趋势。

二、海底犁的结构组成与特点

海底犁主要由金属结构、控制操纵、安全监测三大系统组成。其金属结构组成又可分为：前支承系统、主梁和犁头三大部分。

1. 前支承系统

海底犁的前支承系统包括拱架和导向装置。导向装置又有滑橇式、履带式和车轮式三种类型，可根据海底土壤的剪切强度和承载能力来选择。滑橇式导向装置一般用于松软、承载能力差的海底，对承载能力较强的海底则可选用履带式或车轮式。对预开沟海底犁，沉重的前轮不但可为整台犁提供支承点，而且可将两侧土壤压实，使开沟时管沟壁不易塌落。

2. 主 梁

主梁用来连接前支承和犁头，从而构成完整的海底犁。海底犁的主梁形式有单梁（图1、图2）和双梁（图5）二种。单梁又可分为：T型、Y型。主梁的结构可采用桁架结构（开放式）或箱型结构（封闭式）两种不同结构形式。桁架结构自重轻、受载小。箱型结构强度高、自重较大。

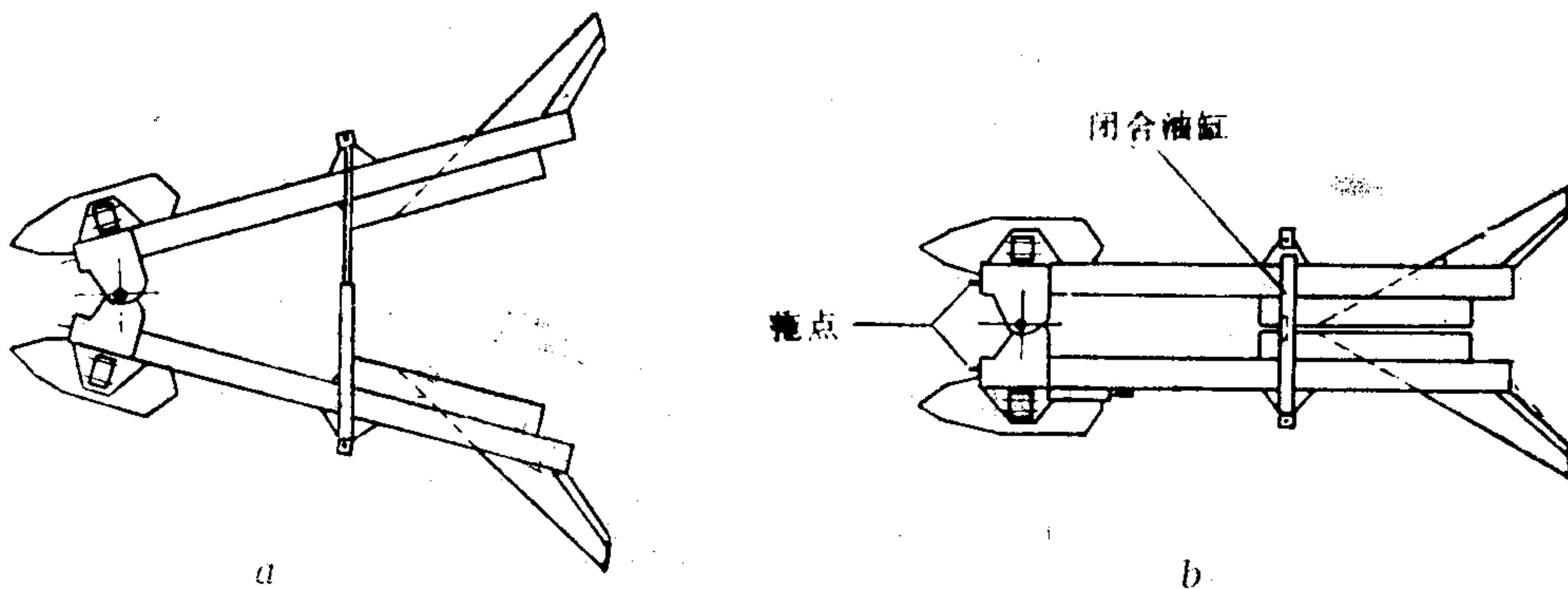


图5 Smit 型后开沟型海底犁（剪式）

3. 犁 头

犁头是海底犁的主要工作部件，也是影响海底犁挖掘性能好坏的关键。预开沟和同步开沟海底犁的犁头几何形状较简单，与农用犁区别不大。后开沟型海底犁的犁头结构形式较多，但总的设计原则是犁头结构必须能将海底犁安置在管道上，且当海底犁沿管道运动时不会损坏管道或管道涂层，并能在施工结束时将犁回收收到作业船上。

目前投入工程应用的后开沟型海底犁犁头结构形式有以下三种：

（1）剪式 剪式犁头结构的首次应用是Smit型后开沟海底犁（图5）。该犁的犁头由二个分别安装在两根主梁上的半犁头构成，主梁的首端被铰接在一个拱架上。工作前犁头在液压油缸的作用下张开，分成两半，横跨在已铺设的海底管道上。犁向前拖动

时,半犁头靠自重向下挖掘,同时在土壤力作用下向内移动,分离的犁头合拢,形成整体犁头(图5b),在海床上犁出一道沟槽来。海底管道则以犁头上方 的开口处通过去(图6),在其自重的作用下弯斜,直至达到沟底为止。在沟的终点,两个半犁头被顶起分开,离开管子然后犁被吊出水面。PBP1型和PBP3型后开沟犁的犁头也用剪式结构。

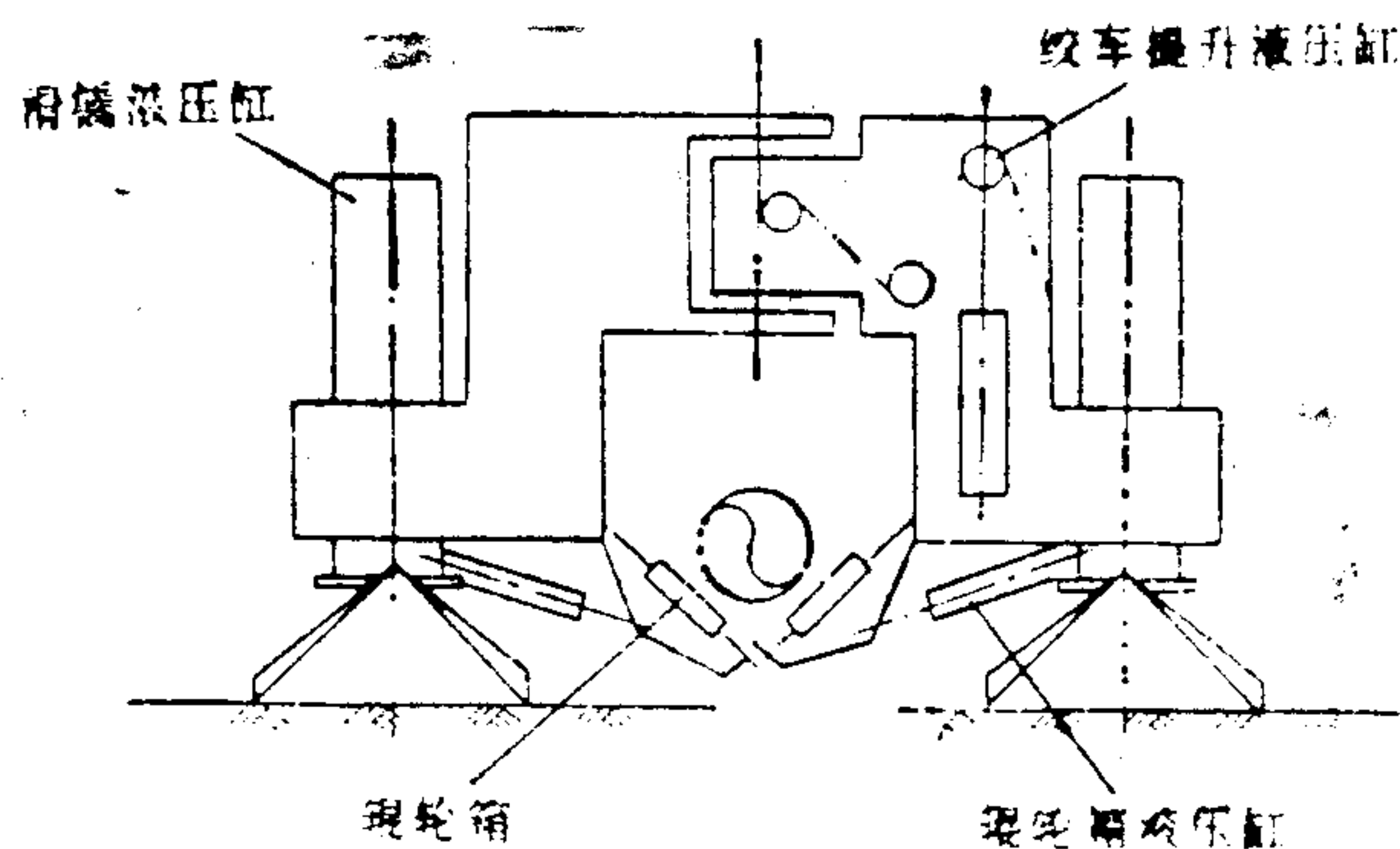


图6 Smit型后开沟海底犁的前视图

(2) 蝶式 蝶式犁头也由两个半犁头构成,但其铰结方式不同。蝶式犁只有一根主梁,两个半犁头铰结在梁的尾端,能相对梁转动。开挖前,海底犁从上往下吊至海底管道上方。两个半犁头因吊缆的作用,在与管道保持一定距离的位置上向外旋转。海底犁向前拖动时,两个半犁头就会向内转,并在管道下面合拢。在管道的终点,吊缆起吊底犁时,半犁头自动向外旋转并分开,见图7。

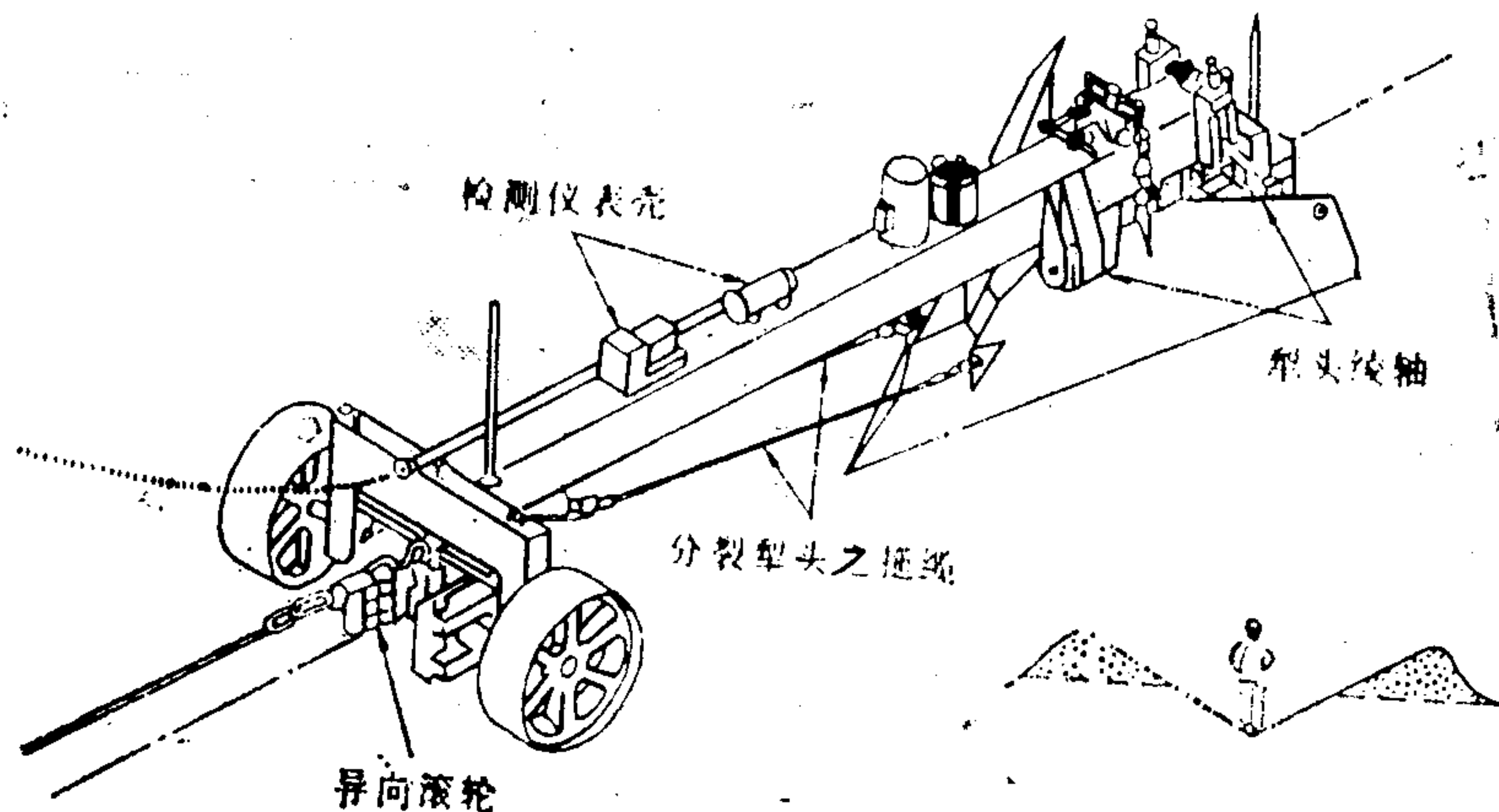


图7 Snapper工程中应用的后开沟海底犁(蝶式)

(3) 单犁 单犁即整体犁头。施工前先将海底犁放在靠近管道,且与管道平行的海底上,由潜水员在水下用海底犁上的液压起重臂提起管子,将其放在犁背上。使管子可在犁的上面移动,而不是穿在犁中移动,此时管子是安放在两个用来隔振的弹性支撑托辊上。单犁的优点是能适应任何直径的管子,而且施工中如管线在海底遇有凹地,海底犁

能自如地向下移动,不会碰伤管子。图8是Brown及Root公司的轻结构后开沟海底犁。

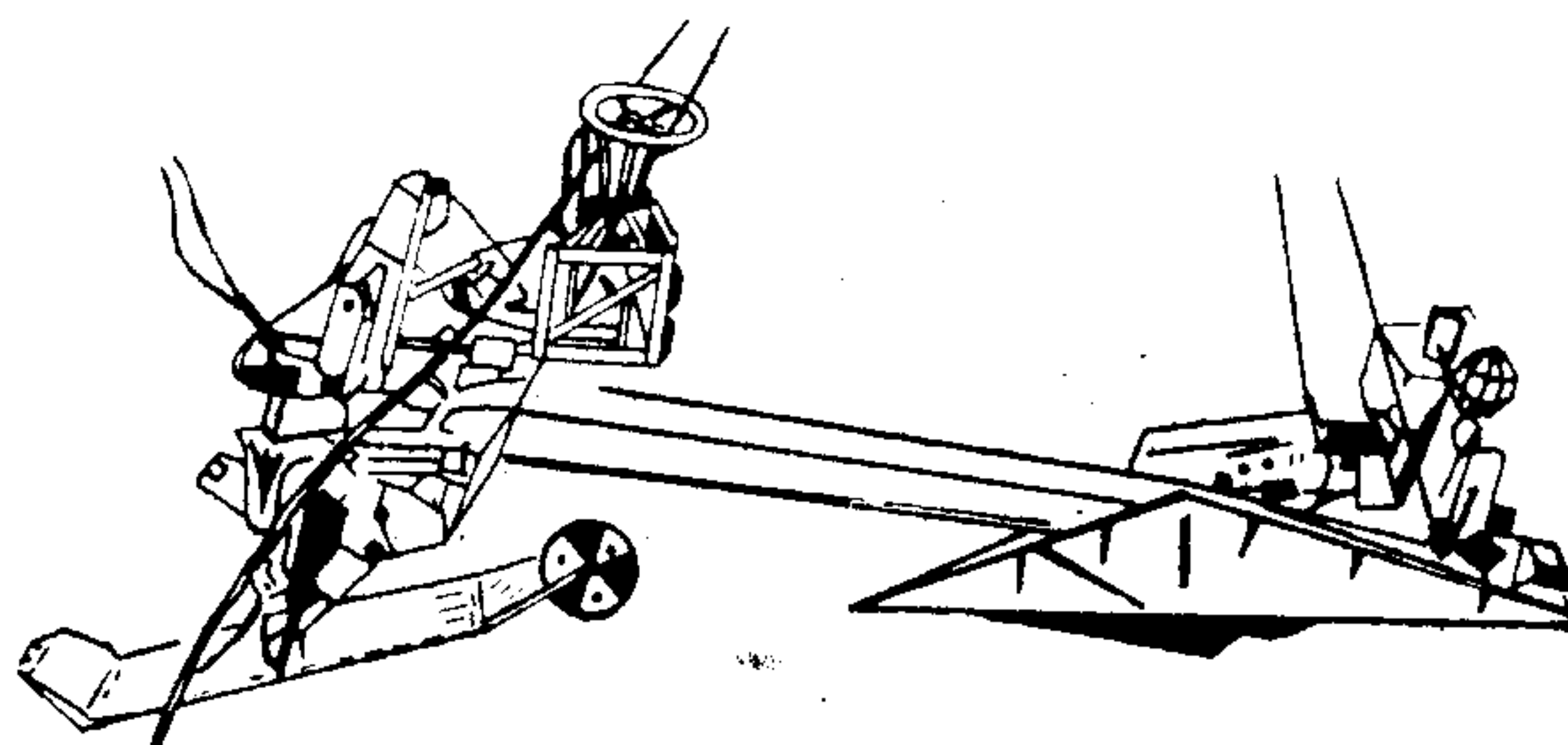


图8 轻结构后开沟海底犁（单犁式）

三、海底犁的设计问题分析

海底犁设计由选型、主参数确定、结构与系统设计、模型及样机试验等若干阶段构成。其中选型、主参数确定和样机试验是总体设计时首先应该考虑的。

1. 选型

海底犁的选型是根据管道铺设施工海域的土壤地质条件及开沟埋管要求,优化选取最合适海底犁机型结构的过程。海底犁的选型包括结构形式和监控手段的选择。

海底犁开沟是一项完整、而又复杂的技术,它与海底管道的铺管施工工艺有着极其密切的联系。在选型时应统筹考虑,对不同的铺管施工工艺,选取相适应的海底犁结构形式和监控手段。

2. 主参数的确定

(1) 最大开沟深度 开沟深度是根据海底管线的保护要求确定的,在不同海域有不同的要求。为了提高海底犁的通用性,一般可在海底犁尾部设计一套挖掘深度调整机构,以适应不同的开沟深度要求。开沟深度对牵引力影响很大(图9),故设计时应兼顾管道安全性和投资经济性。

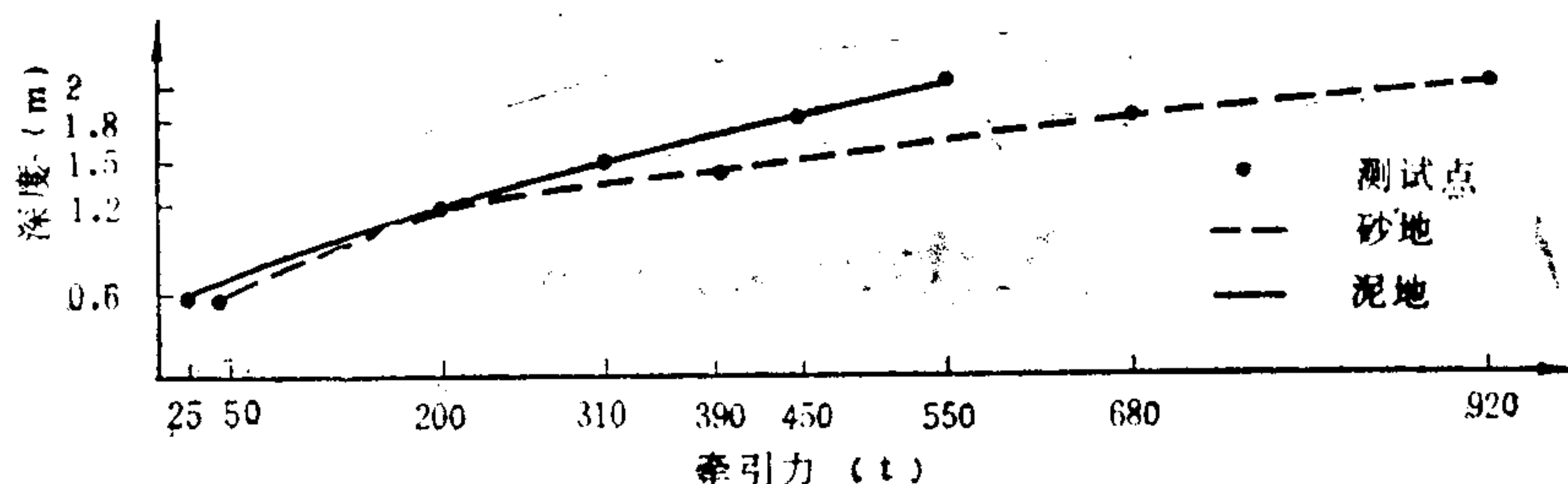


图9 开沟深度与设计系统缆桩牵引力的关系

(2) 开沟坡度角 开沟坡度角由海底犁的犁头尾角决定,而犁头尾角主要根据海底土壤特性选取。设计时应保证犁头尾角接近但不大于土壤自然静止角(又称休止角)。一般对砂或松软土壤可取 30° 。

(3) 牵引力与最大设计系统缆桩拉力 最大设计系统缆桩拉力涉及到牵引方式、牵引

设备的选择。海底犁的牵引力不但和沟深有关,也与海底土质条件有关,通常通过实验推算测定。总体设计时,应注意最大设计系统缆桩拉力必须大于海底犁开沟所需要的最大牵引力。

(4) 海底犁的拖曳速度 拖曳速度与牵引方式、牵引船舶、海底犁自身的性能有关。同时,还受管道安全性、铺管工艺和开沟精度等条件的约束。一般拖轮在航速达到两节以上时,才能将位置保持在预定的航线范围内。而动力定位作业船,则可不受此航速要求的限制。

(5) 海底犁的重量与几何尺寸 海底犁的几何尺寸和水中重量受管道强度、管径及海底犁水下工作稳定性等诸因素的影响,还与土壤的承载能力及牵引力的大小有关。

除上述内容之外,海底犁的动态、静态控制问题,水动力特性分析、牵引方式等也都是总体设计应该予以考虑的问题。

3. 模型试验问题

模型试验是海底犁设计研制中必不可少的重要环节。在设计的不同阶段,根据需要选取不同比例的模型进行试验。通常模型试验所要解决的问题包括:新型犁结构的工作原理验证;作业牵引与回收方式的确定;不同沟深时海底犁所需牵引力大小、结构载荷与承受应力测算;控制系统与控制程序检验等。

四、结 语

海底犁技术是现代科技中一大成就。它的研究不能仅看成是犁自身的设计制造,而且应该视为海底管道的建造工艺、施工技术的一大改进。尽管海底犁开沟是一项日趋成熟的管道施工技术,但在海底犁研制之前,对相关的技术进行透彻的研究与技术储备是十分必要的。就我国现有的科研水平及制造加工能力,笔者认为我们完全可以进行这方面的开发研制工作。本文对海底犁总体设计中的若干问题进行概要分析,以期对我国海底开沟机系列的开发研究有所裨益。

(收稿日期:1988年5月16日)

封 面 说 明

封面彩色图面是目前国内最大的2座浮顶油罐($10 \times 10^4 \text{m}^3$)鸟瞰图。油罐座落在秦京输油管道的首站库区内。油罐直径80m,罐体高21.8m。这是我国首次从日本引进的大型浮顶油罐(包括设计、材料、图纸和施工技术)。该工程于1985年底动工,1987年底建成并投入使用。施工单位为中国石油天然气总公司管道局第三工程公司。该彩色底片是管道局工程部高级工程师储明礼同志提供的。