

山区管道抢修设备缆索运输技术

石蕾¹ 郝建斌¹ 孙盛¹ 杨义勇² 冯春艳³ 贾永海⁴ 李广良⁴ 廖华扬⁴

(1. 中国石油管道科技研究中心; 2. 中国地质大学(北京); 3. 中国石油管道学院;

4. 中国石油管道公司兰成渝输油分公司)

石蕾等. 山区管道抢修设备缆索运输技术. 油气储运, 2010, 29(10): 759 - 763.

摘要:针对山区地段传统管道抢修设备运输方式效率较低的问题,借鉴架空索道技术,通过对架空索道线路原理、运输工艺以及设备组成等进行分析,提出将缆索运输作为大型抢修设备短距离快速运输的一种方式。依托某成品油管道山区陡坡地段的维抢修作业,研究了一种快拆装模块化缆索运输技术,基于相关技术指标,通过对不同方案进行技术比选和适应性研究,确定以单索往复滑轮张紧方案(PRT-I型)作为缆索运输系统选用方案,同时通过对不同支架锚固方案进行比选,确定以卧式地垄方案为基础进行锚固方案的设计和优化,并建议在特别复杂的地段准备固定基础或为锚固方案作前期准备。

关键词:管道; 山区地段; 抢修; 缆索运输; 单索往复滑轮张紧; 卧式地垄; 锚固

油气管道穿越山区地段的敷设方式主要有翻越型、隧道型、跨越型和山坡地台型。山区地段管道沿线通常地势险峻,道路崎岖狭窄,山体坡度很大,一旦发生突发事故,抢修设备特别是备用管道很难运送到事故现场,错过最佳抢修时机,造成不必要的损失。对于管道沿线陡坡翻越地段或者跨越地段,当发生突发事故需要应急抢修时,将抢修设备安全快速地运送到抢修地点尤为重要。

在管道建设过程中,通常采用较为简单的索道方法来解决运布管问题^[1-3]。管道应急抢修不同于施工建设,它具有应急性和快速性2个特点。借鉴架空索道技术,基于对架空索道线路原理、运输工艺以及设备组成^[4]等的详细分析,认为缆索运输作为一种短距离的抢修设备运输方式可以满足应急抢修的要求。

1 缆索运输

1.1 技术指标

依托于某成品油管道沿线一陡坡地形,提出了相关技术指标:设备最大长度为500 m,单次运送重量为2 000 kg(实际方案以2 100 kg计),运行速度为0.2~0.6 m/s(最大为1 m/s),运载车启动运行

时的加速度为0.5~0.75 m/s²。

1.2 系统设计方案

根据索道原理,经过对索道侧形和工作索等关键参数和技术进行精确计算和分析,提出了4种缆索运输系统优选方案,并分别进行适应性研究。

1.2.1 单索往复重力张紧方案

单索往复重力张紧方案支架结构(图1)较为简单,而且便于取得稳定可靠的张紧力,可以有效提高运输的稳定性。但是这种方式需采用重锤张紧,易增加运载车辆的负担,在山区道路条件下难于实现,适应性受到限制。

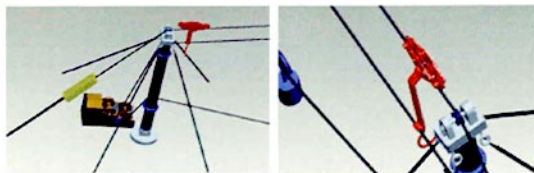


图1 单索往复重力张紧方案支架示意图

1.2.2 双线带中间支承方案

双线带中间支承方案(图2)的优点是可以有效解决中挠和地形限制问题,对于降低上下支架的高度和重量具有重要意义。但是中间支架增加了设备数量,增大了安装工作量,延长了安装时间,同时对中段地形条件要求较高,故其适应性受到一定限制。

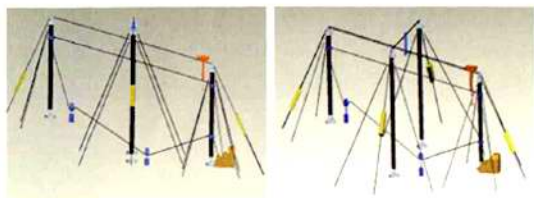


图2 双线带中间支撑支架示意图

1.2.3 缆索起重方案

由使用条件所限,单轨单端牵引、双线往复式缆索起重方案(图3)比较适合山区爬坡地段抢修设备的快速运输。其结构是设置一根承载索,牵引索的一端固定在运行小车上,另一端固定在牵引绞车上。当运行小车沿承载索向上运行时,由绞车牵引运行;当运行小车沿承载索向下运行时,主要靠小车的重力自动下滑运行。

该系统要求承载索的最小倾角不得小于 20° 。当承载索的最小倾角小于 20° 时,牵引索必须采用无机绳的双端牵引形式进行牵引。当最大起重质量为 $2\,000\text{ kg}$ 时,起重索的最大牵引力约为 13 kN ,牵引索和起重索导向轮以及起重滑轮吊具采用起重用的滑轮来代替。但对于起重索最大牵引力为 13 kN

的情况,基础施工工期和基础造价是实施缆索起重方案的主要制约因素。

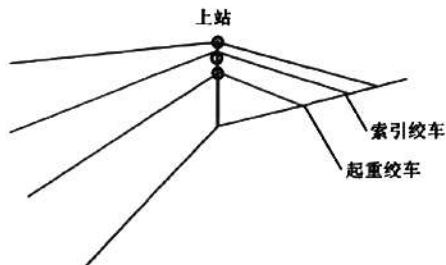


图3 缆索起重方案示意图

1.2.4 单索往复滑轮张紧方案(PRT-I型)

与上述3种方案相比,单索往复滑轮张紧方案(图4)具有缆索跨度大、运输速度快、效率高、总体结构简洁、造价低廉、操作便捷、施工周期短等优点,但对于初始张力和支架力学设计要求相对较高。对不同方案的系统结构、安全性、操作性等进行综合对比分析,表明在管道抢修过程中采用PRT-I缆索运输方式具有很大的优越性,与专家评判结论相吻合,因此基于本方案对快拆装模块化缆索运输系统进行设计和优化。

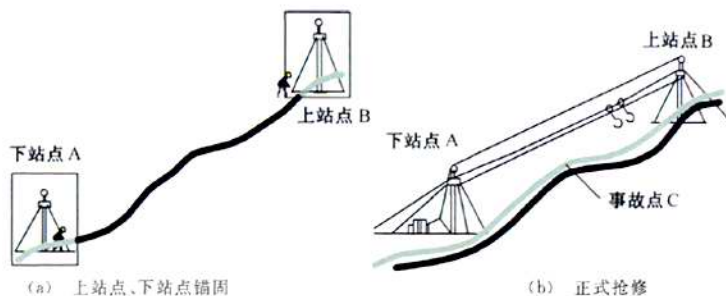


图4 单索往复滑轮张紧方案(PRT-I)示意图

2 支架锚固

通常索道建设必须进行地形选择、侧形设计、浇注固定基础等前期准备工作,但是管道应急抢修具有不确定性和突发性,需要针对不同工况进行系统分析,设计多种可行方案并进行优化研究。

2.1 混凝土基座锚固方案

采用混凝土基座锚固,适当使用木桩,以防止支架的水平方向的移动。为了便于调整承载索的拉紧度,在埋设于混凝土里的螺栓上端安装拉紧用的滑轮,并固定承载索。为了调整张紧度,需大幅度调整承载索的长度,通常采用固定卡子、带螺栓的套筒或万方数据

松紧螺栓扣(图5)。

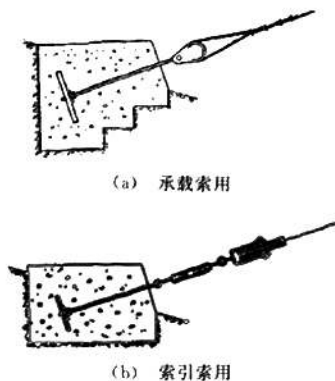


图5 混凝土锚固

2.2 卧式地垄锚固方案

卧式地垄方案(图6)设计一种锚碇装置。水平埋入挖好坑中的圆木或方木称为地垄木。将需要锚碇的缆索固定于地垄木上,然后将地垄坑回填夯实。根据承载能力的大小,可分为无挡卧式地垄和有挡卧式地垄2种。

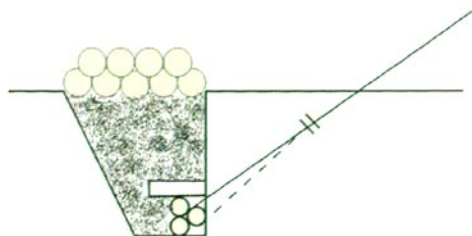


图6 卧式地垄锚固系统

无挡卧式地垄方案,其地垄木采用直径为240 mm、长为1.5~2 m的圆木,将3根该规格的圆木捆成一束,直接埋于土坑中,使地锚的可承受拉力范围为3~5 t。

当载荷较大时,可采用有挡卧式地垄。由于加大了地垄尺寸并增设1层密铺水平压木,故可承受拉力范围为7.5~10 t。水平压木一般采用直径为100 mm的圆木,沿地垄基坑的长度方向密铺于地垄木上。当载荷超过10 t时,采用有挡卧式地垄。此时,除有水平压木外,还有竖直的柱木,并在柱木前加设1排挡木以分散载荷。受力缆索在地垄木上有2个捆扎点,以改善地垄木的受力状态。

2.3 林木锚固方案

如果现场有林木,亦可直接利用林木进行锚固(图7)。

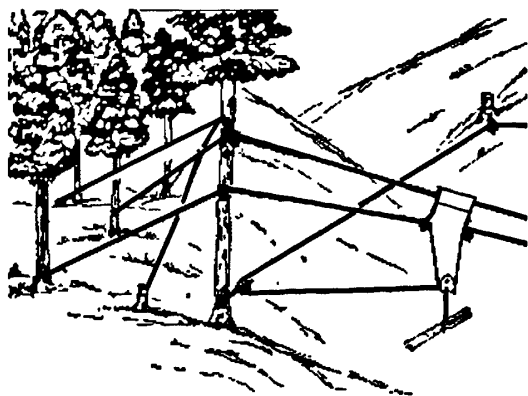


图7 林木锚固

2.4 锚杆锚固方案

锚杆由锚头、杆体和锚根3部分组成,材料通常

为钢棒、钢筋或股线,按使用环境条件可分为3类:土中锚杆、岩石锚杆和海洋锚杆。

2.4.1 在坚硬岩石中的锚固深度

抵抗锚杆锚固体被拔出的抗力取决于岩层的抗剪强度,而坚硬岩层的抗剪强度约等于抗压强度的1/12。在均质岩石中,锚杆的影响区扩展为顶角呈90°且轴线与锚杆中心线相重合的圆锥形,单根锚杆所需的埋设深度可通过式(1)计算:

$$h = \frac{mp}{\sqrt{2}\pi\tau} \quad (1)$$

对于1行锚杆,其影响区扩展为顶角呈90°的三角形棱柱体截面,锚杆的埋设深度通过式(2)计算:

$$h = \frac{mp}{\sqrt{8}L\tau} \quad (2)$$

假定在使用荷载并施加应力的条件下,锚杆被连根拔出仅遭受锚杆影响区岩层重量的抵抗,则锚固所需的深度可通过式(3)计算:

$$h = \frac{mp}{\gamma L^2} \quad (3)$$

式中: p 为锚固力设计值,kN; m 为锚杆连根拔除的安全系数; τ 为岩石的抗剪强度,kPa; L 为锚杆间距,m; γ 为岩石重力密度,kN/m³。

用以计算锚固深度,式(2)和式(3)中的 L 值应不大于式(1)计算所得 h 与内摩擦角 φ 正切的乘积:

$$L \leq h \tan \varphi \quad (4)$$

2.4.2 在破碎或软质岩石中的锚固深度

岩石的抗剪强度常因不连续面的存在而降低,并取决于这些不连续面的产状及其与作用力方向间的组合关系。抵抗锚杆被拔出的力是由沿这些不连续面的摩擦力、角变位的抗力和固结岩石的抗剪强度按不同比例组成的合力。岩层走向与锚杆轴线垂直对锚杆的固定最为有利,这是因为剪切应力可造成如同均质岩层中的圆锥形的破坏形态。当锚杆轴线平行于岩石的若干不连续面时,其抵抗锚杆被拔出的力最小。

假如岩石的不连续面只有1组,如层状岩石,且岩层厚度与锚杆锚固段的横截面相等,则锚杆的抗拔力只取决于岩板的抗剪强度。在这种情况下,不连续面上的粘结力和摩擦力可忽略不计,则岩板中心起着承受单一荷载层的作用。所需的锚固深度可通过式(5)计算:

$$h = \frac{mp}{2\sqrt{2}\tau d} \quad (5)$$

式中: d 为锚杆锚固体直径,m。

锚杆应与层面尽量呈现最大的角度,以便将荷载扩展到最多的层数。

对具有密集而不规则节理的岩体和强度较低的岩石,锚固深度可用L Hobst公式计算。式中假定锚杆抗拔力是岩块侧面的摩擦力,锚杆上的应力通过圆筒形或圆锥形的岩块传递,几何岩体的顶角为摩擦角 φ 的2倍。摩擦力的大小取决于由锚杆锚固体上举力所产生的侧向应力。该应力在地面附近为0,逐渐增加到锚杆锚固体(根部)前端水平面的最终值 σ_h ,其可通过式(6)计算:

$$\begin{aligned}\sigma_h &= \sigma_v \cdot k_0 & (6) \\ \sigma_v &= p_{kr} / F \\ k_0 &= \nu / (1 - \nu)\end{aligned}$$

式中: F 为锚杆锚固体前端面积, m^2 ; p_{kr} 为岩石破坏时,锚杆锚固体前端的压力,kN; ν 为岩石的泊松比。

在岩石中单根锚杆所需的埋设深度通过式(7)计算:

$$h = \sqrt{\frac{3mp}{\pi\sigma_h \operatorname{tg}^2\varphi}} \quad (7)$$

式(7)适用于同一行锚杆轴线间距范围为 $L \geq [12p/(\pi\sigma_h)]^{1/2}$ 的情况,当 $L < [12p/(\pi\sigma_h)]^{1/2}$ 时,岩石中单根锚杆的埋设深度可通过式(8)计算:

$$\begin{aligned}h &= \frac{L}{2 \operatorname{tg}\varphi} + \frac{B + \sqrt{B^2 - \frac{l^4 \sigma_h^2}{\operatorname{tg}^2\varphi}}}{2 L \sigma_h} & (8) \\ B &= \frac{l^2 \sigma_h}{2 \operatorname{tg}\varphi} + 2(m p - \frac{l^2 \pi \sigma_h}{12}) \cos\varphi\end{aligned}$$

2.4.3 在非粘性土中的锚固深度

2.4.3.1 在干燥非粘性土层中锚固

锚固在干燥的非粘性土层中的锚杆,应确保其杆身长度的设定条件与应用于软岩的条件相同。在锚固设计前,应通过土的承载力试验,确定集中压力作用下土层的最大允许应力,由此确定在所需锚杆荷载下,阻止周围土层产生塑性变形的锚杆锚固体最小截面积,推导出受锚固体压力影响的作用于土体侧面的初始应力,抵抗锚杆被拔出的摩擦力就发生在这一表面上。

假定临界荷载极限 σ_{kr} 取决于承压锚固体表面上部1m处锚杆的单位压力,则在这一高度以上出现的变形与深度表现出近似的线性关系:

$$\sigma_r = \sigma_{kr} \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (9)$$

假定摩擦作用只局限于受锚固力作用的这一部

分土体,则锚杆杆身长度可通过式(10)计算:

对于单根锚杆或轴间距 $L \geq [12p/(\pi\sigma_h)]^{1/2}$ 的一行锚杆:

$$h = \sqrt{\frac{3mp}{\pi\sigma_r \operatorname{tg}^2\varphi}} + 1 \quad (10)$$

对于轴间距 $L < [12p/(\pi\sigma_h)]^{1/2}$ 的一行锚杆:

$$\begin{aligned}h &= \frac{L}{2 \operatorname{tg}\varphi} + \frac{B + \sqrt{B^2 - \frac{l^4 \sigma_r^2}{\operatorname{tg}^2\varphi}}}{2 L \sigma_r} + 1 & (11) \\ B &= \frac{l^2 \sigma_r}{2 \operatorname{tg}\varphi} + 2(m p - \frac{l^2 \pi \sigma_r}{12}) \cos\varphi\end{aligned}$$

式中: p 为锚固力,kN; σ_r 为作用在锚固体以上受影响土体侧面的应力,kPa; L 为锚杆轴线间距离,m; m 为锚杆被拔出的安全系数。

2.4.3.2 在饱和非粘性土中锚固

在无其他荷载作用时,土体中的应力完全由土体自重减去上浮力所产生,这种应力的增加与深度呈线性关系,深度 h 处垂直方向上的应力为 $\sigma_v = (\gamma - 1)h$,深度 h 处水平方向上的应力为 $\sigma_h = \sigma_v k_0$ 。

假定在锚杆的各个位置上,土体应力径向地作用于整个锚固体周围,则饱和非粘性土在垂直方向的抗剪强度 τ_c 可通过式(12)计算:

$$\tau_c = \sigma_v \cos\psi \operatorname{tg}\varphi + \sigma_v \sin\psi = \sigma_v (\operatorname{tg}\varphi + \operatorname{tg}\psi) \cos\psi \quad (12)$$

式中: ψ 为滑动面倾角。

在计算土体对锚杆锚固体拔出的抗力时,假定剪力作用于与锚固体同一轴心的圆柱体的侧面。该圆柱体的直径为 d ,等于锚固体的最大直径;长度为 h ,等于锚固体中心到地表的距离,可通过式(13)~式(15)表示。

垂直锚杆的埋设深度:

$$h_v = \sqrt{\frac{mp}{\pi d(\gamma - 1)k_0 \operatorname{tg}\varphi}} \quad (13)$$

水平锚杆的埋设深度:

$$h_h = \frac{mp}{\pi d(\gamma - 1)h_v \operatorname{tg}\varphi} \quad (14)$$

倾斜锚杆的埋设深度:

$$h_s = \frac{mp}{\pi d(\gamma - 1)h_v (\operatorname{tg}\psi + \operatorname{tg}\varphi) \cos\psi} \quad (15)$$

2.4.4 在粘性土中的锚固深度

与非粘性土相比,粘性土抵抗锚杆连根拔出的能力较小,单根锚杆的锚固深度可通过式(16)计算:

$$h_z = \sqrt{\frac{3mp \cos\varphi}{\pi f(3C + f\sigma_r \cos\varphi)}} \quad (16)$$

土层特征取下列范围内的值: $C = (1 \sim 10)$ kPa;

$\varphi=(1\sim 25)^\circ; f=\operatorname{tg}\varphi; \sigma_r=(200\sim 500)\text{kPa}$ 。

当对一系列锚杆进行锚固时,必要的锚固深度 h_z' 可通过式(17)计算:

$$h_z' = \frac{m p c \cos \varphi}{L(2 C + f \sigma_r)} \quad (17)$$

2.5 其他锚桩锚固方案

根据特定的地质条件,还可以灵活地采用一些较为简便的锚固方案。

基于上述分析,以卧式地堑方案为基础进行锚固方案的设计和优化,并建议在特别复杂的地段准备固定基础或为锚固方案作前期准备。

3 关键技术

由于使用缆索运输系统的环境地形较为复杂,无固定基础,跨距和载重等要求不确定,加上安装时间和部件自重等限制条件,技术实现难度很大,难以套用现有架空索道的设计计算方法、运输工艺和设备组成等,因此提出了山区管道抢修设备缆索运输系列关键技术。

(1)工作索设计计算理论体系的建立。针对大跨度缆索起重、非中间支架循环缆索运输系统,深入开展承载索计算理论研究、耐久性检查、安装拉力计算、挠度计算、水平分力计算、承载索安装拉力与张紧度的测定等,建立计算分析模型,开发管道抢修设备缆索运输系统专用软件。

(2)支架结构设计、强度校核及支架锚固力的现场测试与控制技术。遵循安全、快速拆装的原则,对支架进行可快速拆装的模块化研究,分析了支架强度、支架自重、运载索作用在支架上的总压力(包括运载工具自重、运载索及通讯信号线的自重)以及作用在运载索和线路设备上的风载荷,对支架头部进行强度校核与仿真。

(3)速度控制与制动系统设计。缆索运输需要一套完整的控制系统,系统工作时,操作人员应实时掌握系统状态,并根据实际情况采取必要控制。控制系统选用通讯模块、模拟量输入模块,借助编程控

制语言,实现人机对话。制动系统包括制动器和测试装置,选择测速方式和装置,通过测速信号反馈给电气系统实现监控和安全保护。制动器的主要任务是应对紧急停车、工作停车时,使输送机具保持相对静止状态,以及在一些特殊情况下调节运行速度,从而使缆索实现平稳运动,特别是加减速过程中的平稳运动。

(4)预紧和张紧控制。根据设备重量确定所需钢丝绳的张紧力,快速完成缆索的预紧。预紧系统是对承载索进行预紧,设备安装好后,控制器开始驱动电机进行预紧,达到设定值后,测力信息反馈给控制器,电机停止。张紧系统是对牵引索进行张紧,目的是使缆索在各种状态下保证牵引索的稳定张力。

(5)缆索动态性能设计。针对承载索、牵引索承受的各种载荷,分析计算在极限条件下动力学的安全性能和安全系数,考虑在受到冲击载荷或意外停车的情况下系统振动的安全性。

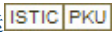
山区地段管道抢修过程中,将设备在短时间、低成本的前提下运送到事故现场,对整个抢修工作的顺利开展至关重要。快拆装式缆索运输系统具有操作简便、安全可靠、适应性强、可快速拆装、劳动强度低等优点。采用缆索运输技术解决山区陡坡地段快速运管等问题,与起重机、钢管轨道车、运管爬车等几种运管技术相比,具有较大的优越性和良好的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 庞伯贤. 长输管道施工中斜缆索物料运送技术[J]. 中国科技信息, 2007(6): 52-53.
- [2] 陈晓霞, 肖胜军. 长输管道悬索跨越空中发送施工方法[J]. 油气储运, 2002, 21(1): 52-54.
- [3] 王召民. 山区长输管道陡坡地段施工技术[J]. 石油工程建设, 2005(4): 45-47.
- [4] 王红敏. 新型货运索道研究与设计[J]. 中国索道, 2002, 2(1): 27-29.

(收稿日期: 2010-01-29)

山区管道抢修设备缆索运输技术

作者: [石蕾](#), [郝建斌](#), [孙盛](#), [杨义勇](#), [冯春艳](#), [贾永海](#), [李广良](#), [廖华扬](#)
作者单位: [石蕾,郝建斌,孙盛\(中国石油管道科技研究中心\)](#), [杨义勇\(中国地质大学\(北京\)\)](#), [冯春艳\(中国石油管道学院\)](#), [贾永海,李广良,廖华扬\(中国石油管道公司兰成渝输油分公司\)](#)
刊名: [油气储运](#) 
英文刊名: [OIL & GAS STORAGE AND TRANSPORTATION](#)
年, 卷(期): 2010, 29(10)

参考文献(4条)

1. [庞伯贤](#) [长输管道施工中斜缆索物料运送技术](#)[期刊论文]-[中国科技信息](#) 2007(06)
2. [王召民](#) [山区长输管道陡坡地段施工技术](#)[期刊论文]-[石油工程建设](#) 2005(04)
3. [陈晓霞](#); [肖胜军](#) [长输管道悬索跨越空中发送施工方法](#)[期刊论文]-[油气储运](#) 2002(01)
4. [王红敏](#) [新型货运索道研究与设计](#)[期刊论文]-[中国索道](#) 2002(01)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_yqcy201010010.aspx