

海上油气集输系统参考资料

海底管线设计与施工

全国石油钻采机械行业技术情报网

海洋石油研究所

北京)

32

毛主席语录

有句古语，“纲举目张”。拿起纲，目才能张，纲就是主题。社会主义和资本主义的矛盾，并且逐步解决这个矛盾，这就是主题，就是纲。

工业学大庆。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

前 言

遵照伟大领袖毛主席的指示：“自然科学方面，我们比较落后，特别要努力向外国学习。”为了加速我国海洋石油的勘探与开发，学习外国的先进工业技术，全国石油钻采机械行业情报网组织第一机械工业部石油机械研究所、华东石油学院、大连工学院、天津大学和海洋石油勘探指挥部海洋石油研究所等五个单位，共同编译了《海上油气集输系统参考资料》，供科研、设计、教学等有关部门参考。

《海上油气集输系统资料》下分若干分册，《海底管线设计与施工》是其中之一，重点介绍了近几年来国外海底管线的设计、施工、防腐及维修等的技术发展，同时结合国内发展情况，作了较详细介绍。《海上油气集输系统资料》的其他分册，则各个介绍海上油气集输系统类型、海底储油装置、输油码头、海上油田含油废水的处理、天然气处理、平台动力、平台自动化和平台安全防火等方面的情况，将陆续出版。

对于外国的东西，应本着“洋为中用”的原则，“排泄其糟粕，吸收其精华”，结合我们的实际需要，批判地接受有益的东西，不可盲目照抄照搬。

《海底管线设计与施工》由于编译者的政治、业务水平有限，时间仓促，缺点错误在所难免，敬请读者批评指正。

海洋石油勘探指挥部海洋石油研究所

一九七七年五月

目 录

前 言

第一章 海底输油管线概述和勘察设计程序

§ 1—1 海底输油管线概述	(1)
§ 1—2 海底管线工程勘察设计程序	(2)
§ 1—3 调查研究和资料收集	(2)

第二章 海底管线设计

§ 2—1 海底管线设计的内容和组成	(5)
§ 2—2 海底管线的轴线位置	(6)
§ 2—3 海底管线的工艺设计	(7)
§ 2—4 管线的结构设计和强度计算	(48)
§ 2—5 海底管线的稳定设计与计算	(74)
§ 2—6 海底管线的重量调节	(102)
§ 2—7 试压试验荷载及某些特殊荷载作用下管壁强度核算	(107)
§ 2—8 海底管线的立管	(116)
§ 2—9 海底输气管线设计特点	(120)
§ 2—10 海底管线设计举例	(121)

第三章 海底管线施工

§ 3—1 海底管线施工概述	(148)
§ 3—2 漂浮敷设法敷管	(157)
§ 3—3 海底牵引法敷管	(178)
§ 3—4 敷管船敷设法敷管	(191)
§ 3—5 管线防腐绝缘层、隔热保温层和混凝土防护层施工	(204)
§ 3—6 海底管线沟槽开挖和回填	(224)

第四章 海底管线的防腐

§ 4—1 海底金属管道的腐蚀	(239)
§ 4—2 电化学阴极保护	(243)
§ 4—3 海底金属管道的防腐	(253)

第五章 海底管线施工技术要求和维修保养

§ 5—1 海底管线施工技术要求	(264)
§ 5—2 海底管线的维修保养	(271)

参考书目及文献	(273)
---------	---------

附 录	(285)
-----	---------

第一章 海底输油管线概述

和勘察设计程序

§ 1—1 海底输油管线概述

管道输送是石油工业企业中应用最多的一种运输方式。对于海洋油田的油（气）集输管线、通往转运油库（陆上罐区等）或炼厂的转输管线以及联结海中（包括海面）贮油设施（油罐、贮油浮筒或临时贮油船等）和海中石油装卸码头等的装油管线，多数是采用海底管线的。

海底输油管线是海洋油田生产系统中的一个重要组成部分。通过海底管线把海洋油田的整个油（气）集输、贮运系统联系起来；也使海洋油田与整个石油工业系统联系起来。随着我国海洋油田相继开发，海底管线需要量就会大大增加。再是由于油轮的迅速大型化；以往的港口设施对大型油轮的系泊、装卸变为不可能，目前多数采用油轮在较深水域停泊而用管线从岸上油库（贮油设施）往油轮装油（或相反方向卸油），即建造离岸系泊码头（Offshore terminal）。如岛式码头（Dolphin type）、单点浮筒式系泊设施（Single Buoy Mooring type）、多点浮筒式系泊设施（Multi Buoy Mooring type）等，建造这些离岸系泊码头多数是比较迅速、可靠和经济的。这种与陆地联结的管线，除有些离岸距离较短可能架设栈桥架空敷设外，多数是敷设海底管线。

海底管线的优点是可以连续输送，一旦敷设投产几乎不受水深、地形等条件的限制，输油效率高、能力也大，敷设工期短、投产快，这对海洋油田的集输系统是必不可少的。它的缺点是管线处于海底，多数又是埋置在海底土中一定深度，检查、维修保养困难，有时甚至是不可能或不经济。此外，某些处于潮差段或波浪破碎带区段的管线（特别是立管等），受风浪、潮流、冰凌等影响较大，有时可能被海中漂浮物或船舶等撞击易遭损坏。

关于我国海底输水管线，以及穿越江河等输油、输气水下管线，解放以来（特别是无产阶级文化大革命以来）建设是较多的。不论在东海、南海和北海，还是穿越长江、黄河等大小江河，在各方面也取得了不少建设海底、水下管线的直接经验。在“十大”精神鼓舞下，我国工人阶级“自力更生”“奋发图强”，经过四个半月的努力，于1973年12月8日在黄海之滨，成功地敷设了我国第一组（三根）500余米长的海底输油管线，经投产使用证明，运转性能良好。

据国外资料（不完全的统计资料）介绍，世界上主要海底管线建设情况：1970年—2350公里；1971年—1874公里；1972年—2339公里；1973年—3040公里；1974年—3437公里，以上共计为13,040公里，建设速度较迅速。属于海上油田的海底输油管线的直径大致是：油井的出油管线（Flow line）4吋～10吋（100毫米～250毫米）；集油管

线 (Gathering line) 8吋—16吋 (200毫米~400毫米), 集油管线一般汇集7—12口油井的喷油量; 转输管线 (Transmission line) 16吋—40吋 (400毫米—1000毫米); 装油管线 (Loading line) 30吋—56吋 (760毫米—1400毫米)。

总之, 海底管线可以有: (1) 海上油田的油 (气) 集输管线; (2) 海中码头 (Sea Berth) 用的海底管线; (3) 因其它原因 (如国与国之间等) 或因缩短输送距离的海底管线; (4) 岛屿与岛屿或与岸联结的海底管线; 以及 (5) 穿越江河、湖泊的水下管线等。

§ 1—2 海底管线工程勘察设计程序

基于海底管线在海上油田中所占的地位, 以及其本身的特点, 海底管线是属重要工程项目, 往往工程规模大、投资大, 耗用钢材和使用船舶机具、设备很多。海底管线的整个规划、布置, 完全依赖于整个海上油田的开发方案和规划布置。而海底管线的规划布置合理与否, 也影响到海上油田开发方案和规划布置的整体。这就成为海底管线工程勘察设计中应解决的重要问题之一。

正确的设计来源于对客观事物的正确认识, 正确的认识又依赖于实践。因此, 整个工程的勘察设计过程, 就是对客观事物的反复认识、不断深化、不断实践的过程。调查研究, 尊重客观实际, 依靠和相信群众, 集中群众的实践经验和智慧。只有这样, 才能取得比较正确的合乎实际的勘察成果和作出正确的设计。

工程勘察设计, 要在党的一元化领导下, 依靠工人阶级, 组织有领导干部、工人和技术人员“三结合”的勘察设计小组, 高举“鞍钢宪法”的旗帜, 开展“工业学大庆”的群众运动, 切实做好这项工作。工程勘察, 一般分为踏勘、初测和定测三个阶段, 工程设计相应地也可分为初步设计 (或调查报告)、技术设计和施工图设计三个设计阶段。勘察设计两者是相互配合的, 则可组成: (1) 踏勘和初步设计; (2) 初测和技术设计; (3) 定测和施工图设计。目前, 对于一般工程, 为了适应“大干快上”的大好形势, 多数是采用二阶段进行, 即初测和扩大初步设计; 定测和施工图设计。而有关踏勘和调查报告的内容, 基本上包含在工程调查和资料收集过程中。多数情况在扩大初步设计批准以后, 只要工程有足够准备, 即可动工兴建。

§ 1—3 调查研究和资料收集

调查研究, 不只是个技术问题, 更主要是反映贯彻什么样的思想政治路线问题。有关调查研究的态度、方法等, 必须认真学习毛主席有关“调查研究”的论述——《反对本本主义》等。这里只是为了拟定调查提纲, 结合海底管线工程提供参考。调查研究和资料收集的主要内容有:

(一) 工程目的和内容

1. 明确拟建海底管线工程的目的性、必要性, 可以根据国务院有关部 (委) 的批文和下达的计划任务书, 或上级有关单位的决定。要认真讨论, 充分研究, 正确理解。
2. 明确拟建海底管线工程的主要内容, 诸如工程建设地点、范围, 工程规模, 建

设期限, 投资、材料、设备来源等。

(二) 海底管线的资料调查与收集

海底管线的建设, 必须对建设地点周围的水文气象、海洋条件、环境条件、海底地形地质等都要弄清楚, 这样才比较能合乎实际地进行海底管线的设计, 拟定施工方案。再者, 海底管线建成以后的运用和维修管理等也需要这方面的资料。

1. 海底管线输送流体、输送条件和要求。拟建管线输送流体种类、特性, 如原油、天然气、含油污水的特性, 含水含沙、含污的性质等; 对于被输送流体的性质, 诸如粘性、凝固点、腐蚀性、温度、流体各组分的含量等; 输送条件和要求, 如输送量(近期、远景)、压力、温度、粘度、输送时间等。

2. 工程资料调查与收集

(1) 海上测量 海底管线设计的初步设计阶段, 要对敷设管线区域的海岸与海底地形、水深、海底坡度、底质等有关设计施工的基本资料的收集。对于有海底变迁的区域要摸清其情况, 了解其规律性, 如季节性、风浪影响等。对于海中建筑物、结构物也应标明位置, 弄清其结构型式, 以及这些建筑物使用的频繁程度、使用时的要求等。

海上测量, 对于浅水区段波浪破碎带的水深测量更为重要, 最好用小距离的测深杆来测量, 管线敷设沟槽范围, 同样要有较高精度的测量资料。

通过海上测量调查, 要对海底管线近岸段的稳定性、埋设条件和深度等决定提供资料, 并对施工方案的选择提出看法。

在有必要和可能时, 海上测量同时设立验潮站, 积累必需的潮汐资料, 建立潮位过程线, 确定基准面并与附近标准零点相联结。

(2) 海流调查 海流对海底管线的设计、施工和敷设以后的管线稳定性等, 都有着重要影响。

近岸的海流有沿海岸流、潮流和与海岸平行的海岸流等。在波浪破碎带和波浪作用下产生的波浪流。但其中主要的是潮流。

对于海流(主要对潮流)的测量, 要选择有代表性的时间、季节、点位, 测定海流的流速、流向, 并需测定沿垂直分布的流速、流向和随时间的变化过程, 必要时要进行“流路”测量。对有建筑物附近对潮流可能引起的影响也应调查清楚。

(3) 波浪调查 为了海上建筑物的设计与施工, 最好对于建设区域范围内具有长期的波浪观测资料。在某些观测资料不足时, 可以利用附近地区的长期资料与当地的短期资料加以相关地应用。

波浪对海底管线的设计、施工(特别是管线敷设时)和管线的稳定性影响极大。所以, 对设计波浪诸要素的选定和管线敷设时的波浪要素的选择, 必须慎重对待。

(4) 气象调查 目前来说, 研究波浪与其密切相关的风是主要因素。有关风的资料, 如风向、风速、风时、频率以及分布规律等资料的收集与整理极为重要。还有台风的资料收集也不能忽视。这方面资料在附近气象台(站)是有长期资料可致应用的。但根据我国目前气象台(站)的分布, 对海上气象资料的长期积累尚属不足, 因而对海上油田建设过程中, 注意这方面资料的积累亦很重要。为了适应目前的应用, 亦可利用

沿岸气象台(站)的长期资料,与海上某些短期的相应资料加以相关地应用。

对于管线敷设时的气象预报,要有充分的根据和准确性,以免遭受不应有的损失和耽误工期。

温度资料,诸如,大气温度、海水温度、海底温度等,对管线的热力计算影响极大。

雨的资料,每年降水量,降雨日数及其分布等,主要是作为施工计划安排的考虑依据之一。

雾的资料,每年雾日天数及其分布,能见度等。

冰凌情况,冰封期、日数,冰层厚度,流冰季节,流冰冰层的厚度、大小,以及冰本身的资料如海冰强度、含盐量等。并对遭受冰凌危害的事例进行调查分析。

(5) 海底地质调查 海底管线与海底地质关系极为密切,特别是对埋设在海底土中管线更为重要。再有在管线敷设时船机设备的锚泊条件与海底土质的关系也很大。

对海底土质的调查,多数是通过潜水员在海底直接观察和取表层土样及用海上钻探取样求得土壤的剪切强度、土壤容重、液塑性界限、含水量和土壤电阻率、腐蚀性等。海底土质的了解,如表层土质、底层土层的土壤类别,如:淤泥、砂质淤泥、粉砂、砂质粘土、粘土、砂砾石和各种风化岩层或基岩等,以及各土层厚度等。

对于管线沟槽部位,要根据土层性质、海底地形变化情况,布置必要数量的钻孔以取得足够的土样试验资料。

(6) 环境调查 对拟敷设海底管线的海域或港区要进行调查,如对水产养殖、捕捞渔场、航道水深和尺度,以及涉及管线敷设有关的环境条件进行调查。

海底管线的埋设深度、防护要求等,与所处的环境条件很密切。对于管线穿越航道或渔场等,要了解过往船只的种类、频繁程度及其作业性质,船舶抛锚、走锚对海底管线的安全威胁很大,要给予充分重视。

(7) 其它调查 例如水质调查,了解海水的组分、海水密度、含盐浓度、海水电导率、PH值、含氧量等资料,对管线防腐措施等有关。对有海生物孳生严重的海域,也应对海生物进行调查。

再有,对海底管线涉及陆地有关的条件,如陆地制管组装场地、管线下水发送道(下水滑道)、运输条件、大宗材料(砂、石、土料等)供应条件等在有必要时应作专门调查。

此外,对已经遭遇过台风危害程度,要通过当地老渔民、老船工调查了解,以补充从气象站获得台风资料。对拟建海底管线区域属于地震区(七度以上)时,应对有关地震资料充分研究,在管线设计时要加以考虑。

关于工程资料调查与收集,在有条件时可以利用海上综合考察船。根据海上综合考察船性能,上述有关调查内容和收集的海洋自然资料,几乎全都可以通过考察船(调查船)来完成。但即使利用了考察船收集有关资料,对于深入群众、深入现场,对每个从事该项工作人员来说仍然是必须和首要的。

第二章 海底管线设计

§ 2—1 海底管线设计的内容和组成

海底管线设计涉及的内容很多，其范围也比较广泛。必须遵循毛主席“精心设计，精心施工”的教导，在党的一元化领导下组成以领导干部、工人和技术人员“三结合”的设计组，结合现场条件开展设计工作。

(一) 设计的主要内容

1. 设计资料的收集、分析整理和汇总，就是根据实际需要按前章§1—3部分有关内容，进行调查研究，将收集的资料进行“去粗取精、去伪存真”分析整理和汇总。
2. 海底管线的轴线位置和海底管线的总体设计，即选线和规划。
3. 管线的工艺设计，根据确定的工艺流程，对管线进行必需的水力计算和热力计算等。
4. 管线结构设计和强度计算（包括热应力计算），从而确定管线的纵横断面和管线材料、管线保温方式、温度补偿方式和管线防腐方式等有关内容。
5. 作用于海底管线的外力及管线稳定性的设计计算，并按照实际需要采取积极有效的工程措施。
6. 关于上下固定钻采平台或其它设施的“立管”设计，包括某些海底管线登陆部分的结构设计。
7. 管线设计过程中，对海底管线施工方案的考虑，以及进行相应和必要的管线施工应力的核算。并根据具体情况，提出明确的施工技术要求和工程措施的实施方案。
8. 对于某些橡胶软管的应力及其有关计算，以确保整个管线系统安全、正常地运转。

上述内容，对于某一海底管线要根据具体情况，进行其中几个部分或更多部分的设计内容。必须指出，对海底管线的施工设计特别是管线下水和敷设方案的确定，要仔细分析和讨论，要反复征求施工部门的意见，共同商定具体施工方案。

(二) 海底管线设计文件

海底管线设计文件的组成，与一般工程设计文件相同。即应包含：指导思想、设计依据、设计参数的确定、管线设计方案和施工方案的确定、设计图纸和施工技术要求、设计说明书，以及对某些必须专题说明的设计计算书等；对于管线下水和敷设应有详细说明，并附以必要的计算；提出所需的各种材料、设备明细表和管线施工时必需的机具、船舶、设备等；以及工期、投资概（预）算等。并将有关管线工程上级的文件、决议、指示等作为附件列入设计文件中，以备查考。

有关海底管线设计文件的编制，可根据具体企业部门的规定，进行简化或增补。

§ 2—2 海底管线的轴线位置

海底管线的轴线位置（即选线），要根据生产工艺要求和调查来确定。对于某些海底的输油管线和装油管线，可能是整个区域总体设计中的基本构筑物。确定海底管线的轴线位置一般原则，有：

1. 海底管线的轴线位置，要根据生产工艺要求和总体规划来确定；
2. 海底管线要选择起点至终点的距离最短或确实认为最合理的距离；
3. 线路力求平直，避免曲线段和跨越深沟。这样可以减少海底管线长度，再就是避免海底管线曲线段和跨越深沟带来的施工困难。

海底管线直线段施工，比较方便容易。对于小直径的管线（例如16吋以下），其柔性比较大，曲率半径可以较小，在平面上允许有较大的弧度（弯曲）。而对于直径稍大的管线（例如大于20吋），其相对刚度较大，平面上则不宜设有曲线段。

从施工角度出发，无论是小直径还是大直径的管线，曲线段都会在施工上带来更多的困难，如沟槽开挖、管线敷设等都有一定困难。所以，原则上应尽量避免选定曲线段。但也不是说曲线段施工不可能，如果工程上确实必需具有一定的曲线段，经过比较也认为是合理方案，只要控制在管线相应的允许弯曲半径范围内，选定所需的曲线段也是允许的，这样的例子也有不少。

4. 管线轴线应处于海底地形平坦且稳定（例如，无泥沙迁移）地段，也应避免在起伏较大的礁石区定线；

5. 定线时必须考虑到施工的难易程度和工程量的大小。如海底为砂性土类或软粘土类则较易埋设，而在风化岩层或基岩地段就不易埋设；

6. 尽量避开正常航道和渔业捕捞频繁区域，当无法避让时，要求穿越航道或捕捞区的管线最短，而且管线埋设深度按照需要予以加大，防止由于航行船舶或渔船抛锚、走锚而损伤海底管线；

7. 对于某些需要登陆的管线，其登陆上岸地点的选择极为重要。登陆地点位置选择不当会导致工程量的增加、工程进度的推延、投资加大等。因此，在确定管线登陆地点时必须考虑：

（1）海底管线的下水或敷设方案，并应根据实际的施工条件出发，如牵引管线下水的船机设备和管线敷设的条件等；

（2）要选择不受台风、波浪等袭击严重的位置，该处岸滩又是比较稳定的区段；

（3）要选择合适坡度的岸滩登陆，应从管线受力和施工难易这二方面考虑。对于太陡的岩质岸滩，往往对使用海底牵引法施工不利，同时岩质岸滩在潮差段或水下段挖掘管线沟槽困难。特别处在波浪破碎带，施工作业条件差，在波浪和潮流作用下（有时还有冰凌的作用）管线的稳定性和工作条件也差（环境条件恶劣），为了维护管线在波浪破碎带区段的稳定，使用压块或锚固管线，都会增加工程量和投资。根据经验，从工程角度考虑，处于该区段的管线以埋设在管线沟槽内为好。或用管线登陆的管架结构（这

时可能引起管线敷设方法的重大变更)。同样,对于平坦连绵的浅滩区管线登陆也是不适宜的,由于岸滩自然坡度平缓,感潮岸滩长达数公里,对管线施工极为不利。目前对处于这种区段的管线,采用开挖“管线运河”(即为了敷设管线专门沿管线轴线开挖的运河,当运河很长时,每隔一定长度应设置船舶调头回转区)的施工方案。显然,为了敷设管线,管线运河的工程量亦相当大;

(4) 要尽量减少陆上用地,特别是要贯彻少占或不占农田的原则。

8. 新敷设的管线,要离开原有的海底管线足够的水平距离,一般应在30~50米以上。要离海底电缆和各种海中构筑物等必要的距离,这个距离主要考虑管线施工时不危及原有构筑物的安全,又能使管线敷设方便。

对于某一海底管线应根据上述有关各项的要求,具体确定管线的合理轴线位置。在设计过程中,有必要作出二个以上的轴线方案进行对比,经过充分调查、反复讨论酝酿,选定比较合理的轴线位置。

§ 2—3 海底管线的工艺设计

海底管线的工艺设计,涉及的内容比较多。这里着重对管线的水力计算和热力计算进行讨论,其目的在于选定管线的直径、输油温度,同时为选择泵机组和加热设备提供必要的技术参数,并为管线结构设计提供基础。

(一) 等温输油管线的水力计算

对于低粘度的原油管线和沿线温降很小的热油管线(或是短管线),都被认为是工程中的等温输油管线。等温输油管线的水力计算,是某些输油管线工艺计算的基础。某一输油管线需要多大的泵机组,要由输油过程中的能量消耗来定。等温输送时,输油过程中的能量消耗主要有以下二部分:一是克服地形高差所需的能量,它是直接与当地地形高差有关,是不随输油过程其它环节而变化的某一固定值,二是克服油流沿管路流动的摩擦阻力所消耗的能量,这部分能量的消耗,是随着油流的性质和输送情况、管线的特性、输送条件等变化的。油流在管路内流动的各种摩擦阻力的计算,可以利用水力学的基本公式进行计算。

1. 水力计算的基本公式

如果用 E_m 表示给予单位重量油流的能量, h 表示单位重量油流流经管路的摩擦损失,则可用能量守恒的规律列出输油管线起点和终点的能量关系式:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma_0} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + E_m = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma_0} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h \quad \dots\dots (2-1)$$

式中: Z_1 、 Z_2 ——管线起点和终点中心线标高;

P_1 、 P_2 ——管线起点和终点的油流压力;

γ_0 ——管线内油品的容重;

V_1 、 V_2 ——油流在起点和终点的流速;

α_1 、 α_2 ——管线起点和终点的流速修正系数。

如果输油管线的起点和终点都与常压油罐相连接,则式(2-1)中 $\frac{P_1}{\gamma_0} = \frac{P_2}{\gamma_0}$, 又管路中 $\frac{\alpha V^2}{2g}$ 与 h 相比, 小到可以忽略时。因此, 式(2-1)可简化为:

$$E_m = h + (Z_e - Z_s) \quad \dots\dots (2-2)$$

式(2-2)即表示, 泵给予单位油流的能量 E_m , 等于单位重量油流流经管路的摩擦阻力(摩擦水头损失)与位置水头变化值(高差)之和。 Z_s 和 Z_e 可以直接从勘察资料中得到, 显然是比较简单的。

对于油井的出油管线, 其起点压力有可能大于常压很多, 这时 $\frac{P_1}{\gamma_0} \neq \frac{P_2}{\gamma_0}$, 对于某些装油管线, 管路内流速可能较大(例如3~6米/秒左右), 这时 $\frac{\alpha V^2}{2g}$ 与 h 相比也不一定很小, 就不能忽略, 这时就不能直接用式(2-2), 而仍应按式(2-1)进行计算。

2. 关于管路内油流输送过程中的摩擦阻力 h

摩擦阻力 h , 可分为管路沿程摩擦损失 h_L 和局部摩擦损失 h_ξ 两部分, 即 $h = h_L + h_\xi$ 。管路沿程摩擦损失 h_L , 是由于油流与管壁及油流内部的摩擦、油流内部质点的碰撞而引起的能量损失。 h_L 可按下面通用的公式计算:

$$h_L = \lambda \frac{L}{D_i} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (\text{米}) \quad \dots\dots (2-3)$$

式中: L ——管线长度, 米;

D_i ——管线内径, 米;

V ——油流的平均流速, 米/秒;

g ——重力加速度, 9.81米/秒²;

λ ——水力摩擦系数。

其中水力摩擦系数 λ 与管路中油流的流动状态、管内壁的粗糙度、管径等因素有关, 下面着重说明这个问题。

油流在管路中的流动状态, 通常以雷诺数 R 判别。可以分为三种流动状态, 即:

$R_e \leq 2000$ 时的层流状态;

$R_e \geq 3000$ 时的紊流状态;

$R_e = 2000 \sim 3000$ 之间是处于层流、紊流状态之间的过渡状态。

$$(R_e = \frac{V D_i}{\nu}, \nu \text{ 为流体的运动粘度, 米}^2/\text{秒})$$

(1) 当 $R_e \leq 2000$ 时的层流状态:

$$\lambda = \frac{64}{R} \quad \dots\dots (2-4)$$

(2) $R_e \geq 3000$ 时的紊流状态:

因为 $R \geq 3000$ 这个范围非常大, 在水力学中又根据其流动特性和紊流时边缘层厚度不同, 凡具有工程粗糙度的管路, 分为水力光滑管和水力粗糙管。

对于管路中油流彼此平行地流动, 平稳地迂回流过管路内表面所有高低不平 and 凸凹部分, 这时管壁的粗糙度并不影响油流的流态, 则称为水力光滑管。水力光滑管的水力

摩阻系数 λ 取决于雷诺数 R_e ，而与管壁粗糙度无关。

随着紊流程度的加剧，油流边缘层厚度逐渐减小，乃至小于管子的绝对粗糙度 e （对于输油管的管子绝对粗糙度 e 值常取为 0.10~0.15 毫米），油流和管壁接触，管壁内表面凸出部分就能使油流产生涡旋，其结果是使 λ 增大。在这种情况下，摩阻系数还与管壁粗糙度有关，称为水力粗糙管。

因此，在紊流状态时，根据 R_e 的不同在计算 λ 时分别选用下列公式：

$$\lambda = \frac{0.3164}{R_e^{0.25}} \quad (a)$$

$$\lambda = A - B \cdot R_e \quad \dots\dots (2-5) \quad (b)$$

$$\lambda = C + \frac{1.7}{R_e^{0.26}} \quad (c)$$

式 (5) (a)、(b)、(c) 三式的适用范围以及 A、B、C 的系数值，见表 2-1。

式 (2-5) 各式的适用范围及 A、B、C 的系数值

表 2-1

公称直径 (毫米)	各式雷诺数 R_e 的极限值			A、B、C 系数值		
	(a)	(b)	(c)	A	B	C
50	3,500	12,000	200,000	0.0433	0.626×10^{-6}	0.0203
100	6,000	16,000	400,000	0.0387	0.451×10^{-6}	0.0180
150	10,000	20,000	700,000	0.0348	0.322×10^{-6}	0.0164
200	13,000	21,000	1,000,000	0.0332	0.275×10^{-6}	0.0157
250	16,000	22,000	1,200,000	0.0323	0.263×10^{-6}	0.0151
300	18,000	—	1,600,000	—	—	0.0147
350	28,000	—	1,800,000	—	—	0.0143
400	56,000	—	2,500,000	—	—	0.0134
450	65,000	—	2,900,000	—	—	0.0132
500	73,000	—	3,200,000	—	—	0.0130
600	90,000	—	3,900,000	—	—	0.0125
700	100,000	—	4,500,000	—	—	0.0124

(3) 雷诺数 R_e 在 2000~3000 范围内的过渡状态：

雷诺数在上述范围内，管路内油流流动性质是处于层流与紊流过渡状态。这时其水力摩阻系数与管径无关，可由下式求得：

$$\lambda = (0.16R_e - 13) \times 10^4 \quad \dots\dots (2-6)$$

关于摩擦阻力中的另一部分，即油流的局部阻力损失 h_{ξ} 。它是由于油流流经管路中的弯头、三通、阀门、过滤器、管径扩大或缩小等处，油流流态发生变化和涡旋等造成的能量损失。局部阻力损失 h_{ξ} ，可以用下式表示：

$$h_{\xi} = \sum \xi \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots (2-7)$$

式中： ξ ——局部摩擦系数，它随管件的类型、尺寸、油流的流态以及油品的粘度等不同而变化。 ξ 值可由图(2-1)、(2-2)和(2-3)查得。

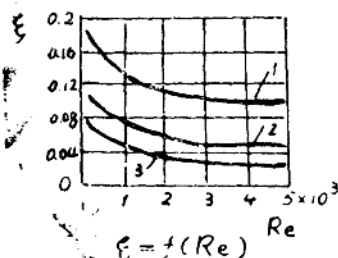


图 2-1

- 1—90°支管
- 2—45°支管
- 3—22.5°支管

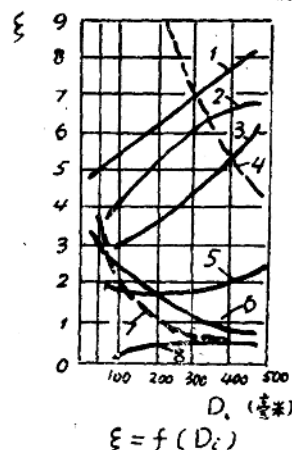


图 2-2

- 1—标准直通球心阀
- 2—直角球心阀
- 3—三通管
- 4—100米长管
- 5—波纹式伸缩器
- 6—考斯尖式球心阀
- 7—90°支管
- 8—闸门

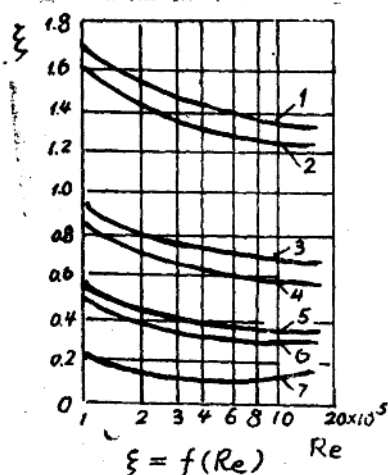


图 2-3

- 1—Ω型波纹伸缩器
- 2—Π型波纹伸缩器
- 3—带有二个弯头的金属软管
- 4—平滑的Ω型伸缩器
- 5—波纹式90°支管 (R=3.5D)
- 6—90°弯头 (R=4D)
- 7—90°平滑支管 (R=4D)

在实际计算时，对管路中所有的局部阻力损失，也可以用管路直线段的当量长度来替代，这时式(2-7)可改写为：

$$h_{\xi} = \lambda \frac{L_{\eta}}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots (2-8)$$

式中: $L\eta$ ——管路的当量长度。 $L\eta = \sum l\eta$, $l\eta$ 为每一管件、阀件等所产生的局部阻力所替代的当量长度。

由式(2-7)、(2-8)得知:

$$\xi = \lambda l\eta / D_i$$

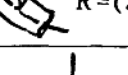
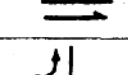
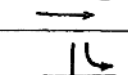
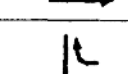
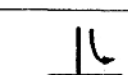
$$\text{或 } l\eta = \xi \frac{D_i}{\lambda}$$

在紊流状态时, ξ 和 $l\eta$ 接近于常数, 且不受 R_e 的影响($\xi = \xi_s$)。在层流状态时, ξ 和 $l\eta$ 是 R_e 的函数, 即 $\xi = \varphi \xi_s$ 。有关 $l\eta/D_i$ 和 ξ_s 可参照表2-2选取, φ 值可按表2-3查得。

根据求得的当量长度 $L\eta$ (即 $\sum l\eta$), 加在管路直线段的计算长度 L 内, 再按式(2-3)计算, 即得整个管路的摩擦阻力损失 h 。

各局部阻力损失的 $l\eta/D_i$ 和 ξ_s 值

表 2-2

序号	局部阻力名称	图 示	$l\eta/D_i$	ξ_s	序号	局部阻力名称	图 示	$l\eta/D_i$	ξ_s
1	油罐出口		23	0.5	12	转弯三通		45	1.0
2	45° 焊接弯头		14	0.3	13	" "		23	0.5
3	90° 单折焊接弯头		60	1.3	14	" "		136	3.0
4	90° 双折焊接弯头		30	0.65	15	止回阀		75	1.5
5	弯管弯头 $R=d$		20	0.5	16	Π 型补偿器		90	2
6	弯管弯头 $R=(2-8)d$		10	0.25	17	闸 门 阀 3/4 开度		800-1100	
					18	闸 门 阀 1/2 开度		190-290	
					19	闸 门 阀 1/4 开度		39-56	
					20	闸 门 阀 全 开		7-10	0.5
					21	轻 油 滤 器		77	1.7
7	通过三通		2	0.04	22	重 油 滤 器		100	2.2
8	" "		4.5	0.1	23	球 心 阀 $Dg=15$		740	16
9	" "		18	0.4	24	球 心 阀 $Dg=20$		460	10
10	转弯三通		60	1.3	25	球 心 阀 $Dg=25-40$		410	9
11	" "		40	0.9	26	球 心 阀 $Dg=50$		320	7

层流状态辅助系数 φ 值

表 2—3

Re	φ	Re	φ
200	4.20	1600	2.95
400	3.81	1800	2.90
600	3.53	2000	2.84
800	3.37	2200	2.48
1000	3.22	2400	2.26
1200	3.12	2600	2.12
1400	3.01	2800	1.98

某些输油管线系统中,局部使用橡胶软管。对软管部分的摩阻损失,必要时可以分别计算。同样,软管部分的摩阻损失包括油流与管壁摩擦产生的摩阻损失 h 和克服局部阻力产生的局部摩阻损失 h_s ,局部阻力是由软管全长中油流经过的截面缩小和扩大所引起的,见图2—4。软管的摩阻损失 h_s ,可由下式求得:

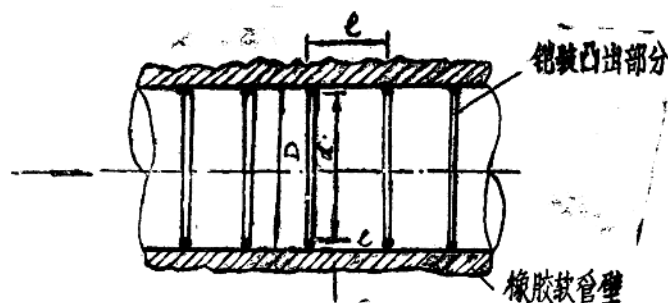


图 2—4

$$h_s = h_r + h_{s1}$$

$$= \left(\lambda_R + \frac{16e^2}{D^3} \right) \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \dots\dots (2-9)$$

式中: e ——软管内部突出部分的平均高度, $e = \frac{D-d}{2}$,

d ——软管的最小内直径;

D ——软管的最大内直径;

l ——软管内部突出部分(沿长度方向的)之间的距离;

L ——软管计算长度;

V ——油流在软管中的平均流速。

对于内侧光滑的橡胶软管,和式(2—9)中的摩阻系数 λ 可由下式求得:

$$\lambda_R = 0.01113 + 0.917 Re^{-0.41} \quad \dots\dots (2-10)$$

就内侧光滑的橡胶软管, $h = 0$, 则式(2—9)简化为: $h_s = \lambda_R \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$ 。

输油管线工艺计算,进行水力计算时,建议用这样的计算程序。在新建管线时,通

常是根据要求的输送量规定其流量，由已知的流量和大致选定的流速（例如采用一般的经济流速或极限流速），初步决定（初选）管线的直径。这样有了流量 Q 、流速 V 、管线直径 D ，根据输送油品的特性，即可进行水力计算。

一般在管路中油流的经济流速，可参照表2—4进行预选。至于管路中的极限流速，将根据特定条件决定。

管路中油流的经济流速

表 2—4

运 动 粘 度 厘泊(毫米 ² /秒)	平 均 流 速 V (米/秒)	
	吸 入 管 路	排 出 管 路
1~12	1.5	2.5~3.5
12~28	1.3	2.0
28~72	1.2	1.5
72~146	1.1	1.2
146~438	1.0	1.1
438~977	0.8	1.0
压 缩 性 气 体	8~20 (米/秒)	
饱 和 蒸 汽	30~40 (米/秒)	

根据流速、管径和油流粘度等，可以计算雷诺数 R ，并按 R 的范围判别油流在管路中的流动状态。根据各种流动状态，即可用上述的方法和公式计算水力摩阻系数 λ 以及管路的总摩阻损失。

(二) 热油管线的工艺计算

1. 热油管线的特点

在输送粘性大或凝固点高的原油，目前多数是采用预先加热的方法。对原油加热的目的有二：一是保证油流温度在输送系统中总是处于比凝固点高的温度，以防止原油在管路内凝固，这对海底管线是极为重要的问题；二是降低油流在输送时的粘度，以减少管路的摩阻损失和便于输送。

热油沿管路输送时，由于油流温度高于周围介质的温度，它所携带的热量就不断散失到周围的土壤、海水或大气中。这就造成了热油管道输送不同于等温输送的主要特点，即在其输送过程中的能量损失有热能损失和压力能损失两方面。这两方面的能量损失二者是有相互影响，对热油管线的工艺计算来说，其中热能损失是起着主导作用的。因为管路摩阻损失（即压力能损失）的大小，油流粘度是其影响的因素之一，而油流的粘度大小又随油流本身的温度在变化。油流的温度则决定于起点的加热温度及沿线散热后的温降情况。

因此，热油管线输送的工艺设计与计算，要抓住解决热能的供给和消耗之间的平衡问题，即解决散热与加热这一对矛盾。往往是通过起点（必要时还需在管路中间一次或