



石油技工学校试用教材

输油工艺

华东输油管理局技工学校 邹钥天 主编

石
油

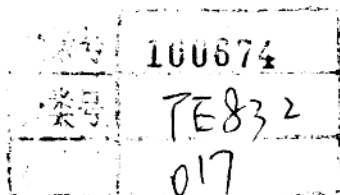
学(北京)

832

217

石油工业出版社

邹钥天



石油技工学校试用教材

输 油 工 艺

华东输油管理局技工学校 卮翎天 主编



石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书系石油技工学校输油专业的专业课教材, 主要包括等温输油管的工艺计算, 易凝、高粘原油的加热与不加热输送、输油站的工艺流程、输油管线的调节及事故处理、油品的计量与蒸发损耗、输油管道的腐蚀与防腐, 以及输油站库的安全知识等。书中对一些专业概念主要以定性解释为主, 避免较难的理论推导。考虑到技工学校学生的学习特点, 在第一章中编入了常见管路及其特性和泵站工作点与泵机组工作点的关系这两部分内容; 在第五章中介绍了过去输油生产中曾发生过的一些重大事故, 以引导学生重视专业课的学习。本书第二章中的非牛顿流体的流变性质可作为选学内容。

本书在编写中考虑了现场技术工人学习的特点, 故还可供输油职工技术培训、职业高中和现场输油工人和技术人员参考。

DP50/28

石油技工学校试用教材

输 油 工 艺

华东输油管理局技工学校 郎朝天 主编

石油工业出版社出版发行

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京海淀吴海印刷厂排版

北京顺义燕华印刷厂印刷

787×1092 毫米 16开本 15¹/₂印张 378千字 印12201—14200

1988年4月北京第1版 1997年1月北京第4次印刷

ISBN 7-5021-0073-3/TE·73

定价: 13.00 元

前 言

本书系根据石油部劳资司 1984 年审定的石油技工学校输油专业《输油工艺》教学大纲编写的。

考虑到技工学校学生的学习特点, 本书主要内容除包括有关输油站和输油管路的工艺理论和设计外, 并结合现场实际讲述了常见管路及其特性和泵站工作点与泵机组工作点的关系, 以及输油站和管路常见事故处理和站库安全技术。如在第五章中介绍了过去输油生产中曾发生过的一些重大事故, 以引导学生重视专业课的学习。第二章第八节中的非牛顿流体的流变性质可视学生的具体情况作为选学内容。书中每章末均附有思考题及习题, 其中第一章和第三章各有一道量比较大的综合计算题和流程练习题, 要求学生分别用 8 学时左右的时间去完成。

在编写过程中考虑了现场技术工人学习的特点, 故亦可作为中级输油技术工人培训的教材, 并可作为职业高中相应专业的教科书。

本书由华东输油管理局技工学校邹钥天任主编, 东北输油管理局技工学校刘彤、曹天文参加编写。具体分工是: 刘彤编写第四、五、七章; 曹天文编写第三、六章; 邹钥天编写绪论、第一、二、八、九章, 并负责全书的统稿工作。

初稿完成后, 于 1986 年 7 月在锦州召开了审定稿会议。参加审稿的除编者外, 还有华东输油管理局技工学校的邓彦, 东北输油管理局技工学校的季余生, 石油工业部管道局技工学校的陈东。

编写本书除参阅了参考文献所列书目外, 还参考了西南石油学院的内部教材《石油与天然气管路输送》、胜利石油学校的内部教材《油气集输储运工程》第二册、东北输油管线指挥部生产处编写的《原油管道输送》以及石油部管道局和大庆设计院的一些内部资料和文献等。对于在教材的编写、审定及出版过程中曾给予支持和帮助的同志, 在此一并表示衷心的感谢!

限于编者的水平, 书中的缺点和错误之处, 恳请读者批评指正。

编 者

1980 年 12 月

目 录

绪 论	1
第一章 等温输油管的工艺计算	5
第一节 输油管路的压能损失	5
第二节 输油泵站的工作特性	18
第三节 输油泵站在管路上的工作	23
第四节 等温输油管的水力计算	29
第五节 泵站布置与站址调整	38
第六节 方案比较和工艺计算步骤	42
第二章 加热输送工艺	47
第一节 加热输送的目的和特点	47
第二节 热油管的温降规律	48
第三节 热油管的总传热系数 K	55
第四节 热油管的水力计算	58
第五节 加热站和泵站的布置	61
第六节 热油管路的特性曲线	63
第七节 热油管的试运投产及运行管理	65
第八节 高凝、高粘原油的不加热输送	71
第三章 输油站的工艺流程	84
第一节 输油站概述	84
第二节 输油站生产单体工艺流程	88
第三节 输油站的工艺流程	94
第四节 输油站辅助系统工艺流程	105
第四章 长距离输油管的输送方式及调节	109
第一节 三种输送方式及其特点	109
第二节 输油管的水击	110
第三节 长距离输油管线的工作情况分析	116
第四节 长距离输油管线在运行中的调节	123
第五节 密闭输油系统的事故保护	129
第五章 输油站的常见事故与处理	135
第一节 泵机组的常见故障与处理	135
第二节 加热炉的常见故障与处理	140
第三节 油罐的常见故障与处理	144
第四节 管线、管件的常见事故与处理	146
第六章 油品的蒸发损耗	150

第一节	概述	150
第二节	蒸发损耗的机理与类型	151
第三节	蒸发损耗的计算及测定	154
第四节	降低蒸发损耗的措施	157
第七章	油品的计量	161
第一节	油品试样的选取与温度的测定	161
第二节	油品密度和水分的测定	163
第三节	油品液面高度的测定	165
第四节	油罐容积表的编制与应用	166
第八章	腐蚀与防腐	169
第一节	金属腐蚀的基本原理	170
第二节	防腐绝缘层	180
第三节	管路的阴极保护	184
第四节	腐蚀的勘察与测量	198
第九章	站库安全技术	204
第一节	防火防爆与消防技术	204
第二节	防静电	221
第三节	防雷电	225
第四节	防毒	227
附录		231
附录 1	输油站库及其设备、建(构)筑物的防火间距	231
附录 2	输油工艺流程图的常用图例(SYJ3-81)	233
附录 3	不同单位制的单位及相互换算关系	241
参考文献		242

绪 论

一、原油及其运输

原油是一种十分重要的能源,根据其组分不同,一般为黑色、棕褐色或暗绿色的粘稠液体,但也有一些为黄色较稀的液体,密度都小于 1 吨/米^3 。

从化学成分看,原油是由多种碳氢化合物和少量其他物质组成。原油中除液态碳氢化合物外,还有溶解的蜡、沥青质、胶质等高分子化合物。根据原油的成分,可把原油分成蜡基、沥青基和混合基三大类。高含蜡原油称为蜡基原油;原油重质成分含沥青质、胶质较多的称为沥青基原油;介于上述二者之间的称为混合基原油。我国已发现和开发的各油田原油,大部分为蜡基原油。

关于原油的形成,一般认为原油是由远古代水生动植物残骸形成的。在远古代的一定地质时期,地球上的气候湿润,适于动植物的滋生繁殖,在一些浅水区域中生存着大量的水生动植物。它们一代代地生存、死亡,其残骸沉积在水下,形成了厚厚的沉积层。在地壳变迁时,这些沉积物被压到地壳深处,并在一定的温度、压力及某些厌氧细菌的作用下,逐渐转化为原油和天然气。这些能流动的原油、天然气,汇集到适宜储藏它们的地方,就形成了油气藏。

石油的勘探开发就是利用各种方法,找到这些油气藏,并把它们从地层深处采到地面来,然后经过集中、油气分离、脱盐、脱砂、脱水等油田初步处理工艺,再送到用户。

原油的用户如炼油厂、石油化工厂等,多设在油品消费区。这样在原油从地下开发出来送往用户的过程中,就存在着运输和运输工具问题。

在石油被发现的初期,因产量有限,人们曾使用马车等运输石油。随着石油工业的发展,石油产量越来越多,就逐渐发展到利用公路、铁路、水路运输石油。铁路运输石油往往不能满足生产的需要。例如,一列油槽车,一般一次可运送 2000 吨左右原油。如果一个产量达 2000 万吨/年的油田,则每年需由这个油田开出 10000 列装满原油的油槽车,同时还应返回 10000 列空油槽车。即每 26 分钟就得有一列油槽车进入或离开油田。这对铁路无疑是一个极大的负担。

为了满足石油工业不断发展的需要,并考虑运输费用的问题,原油及成品油的管道输送便被提到议事日程上来。在管道工艺方面,我国劳动人民较早地显露了聪明和才智,远在西汉初年,为了煮熬井盐,四川人民敷设了历史上第一条竹制输气管道。比美国第一条输油管道早二千多年。

解放前,我国石油储运事业十分薄弱。1938 年玉门油田被发现后,当时从油井里采出来的原油就直接流入油井附近的土坑里,然后装桶用马车或骆驼运出。1940 年左右,油井逐渐增多,才在地面建造土油沟和木板集油沟,用以将原油输送到附近的土油坑和木制油罐中去。

1958 年冬,我国第一条长距离输油管,克拉玛依—独山子输油管线正式投产,从此结束了我国没有长距离输油管的历史。随着大庆、华北、胜利等地一批油田的发现与开发,又陆续建成了一批原油长输管道。目前全国已有原油管道四十多条,承担了全国大部分原油的输

送任务，对缓和一些地区铁路运输的紧张状态，对促进国民经济的发展，起了重要作用。

在石油运输工具中，管道输送是一种比较经济、安全可靠的方式。管道输送具有连续、平稳的特点，能很好地协调油田和炼油厂、石油化工厂的生产。与公路、铁路、水路运输方式相比，管道输送有如下优点：

(1) 建设费用低，建设速度快。我国的大庆至秦皇岛输油管线全长一千多公里，从施工到投产只用了 23 个月时间，而且一次投产成功，达到设计能力。如要修建一条这样长的运油铁路，一般需三年以上。铁路交付使用后，还需 2~3 年的调整完善，才能达到设计能力。根据有关资料介绍，建设管道与建设铁路相比，在运输量相同的情况下，管道建设费用一般可节约百分之六十左右。

(2) 输送费用低。与公路和铁路运输相比，管径越大，输送量越大，输送距离越远，油品粘度越小，运输成本越低。随着管道运输自动化水平的提高及运行经验的不断积累，运输费用将会进一步减少。目前，国外同类型的某些输油管道的输油费用是铁路运费的十分之一到三分之一。和水路运费大致相等。

(3) 管道建设占地少。管道建设只是在施工期间占用一部分土地，每公里管道占地约为 10000 米² (14.7 亩)。工程竣工后，其中 90% 以上仍可耕种。而铁路每公里需长期占用土地 20000 米² 左右。

(4) 管道输油安全可靠，事故率低。

(5) 管道一般都敷设在地下，比铁路、公路、水路运输等隐蔽安全，利于备战。

(6) 管道输油连续平稳，基本上不受气候、季节等外界因素的干扰。而铁路、水运不同程度上受风雪、雾、洪水、冰冻的影响。

(7) 管道输送油品损失少。当管路采用“从泵到泵”密闭输油方式时，可基本上杜绝油品在输送过程中的蒸发损耗。

鉴于管道输送的上述优点，国外已普遍采用长距离输油管输送原油及原油产品。对于大量的原油及成品油的输送，我国也正在以管道输送逐步代替铁路和公路运输。

二、长距离原油输送管道的组成

长距离原油输送管道的线路起点，一般是油田或码头，终点是炼油厂、石油化工厂的油库或转运油库。例如，我国大庆至秦皇岛输油管线，油源来自大庆油田，向南运至抚顺炼油厂，并在抚顺进行铁路装车转运。向西南输至沿线的有关炼油厂和秦皇岛转运油库，进行铁路和水路运输。

长距离输油管道主要由输油站和管线两大部分组成。管线的起点站称为首站。其主要任务是收集油田来油或港口卸油，经过计量后，再输送出去。为了满足计量以及调节原油产、运、销之间的不平衡的需要，首站还设有较大容量的储油罐。随着原油沿管线不断向前流动，压力不断下降；同时，也不断被周围介质所冷却，油温下降，粘度上升，摩阻增加。为了使原油顺利地向前输送，则需要沿途设置若干个中间热泵站或加热站、加压站。中间输油站的任务是对所输原油进行加压、升温。输油管线的终点站称为末站，它接收输油管送来的全部油品，供给用油的企业或以其他运输方式转运。和首站一样，要设置一定容量的油罐。

输油管道的线路部分，包括管道本身，沿线的阀室，江河、铁路、公路、山谷等穿(跨)越设施和管道电法保护设施等。

为了保证长距离输油管的正常运行,输油管道还设有供电和通讯系统。

三、我国原油输送管道的现状与发展方向

我国长输管道技术经过了二十多年的努力,取得了很大的进步,但与国外相比,还有一定的差距,主要表现在:

(1) 管材方面。国外多用可焊性好的低合金高强度钢材,如美国阿拉斯加管线,直径为 1220 毫米,所用钢号为 APIx-60、x-65 和 x-70 号钢,输送压力达 84.5 公斤/厘米²,壁厚为 11~14 毫米。我国目前使用的 10 锰钢,约相当于 APIx-52 号钢。在制管方面,我国以螺旋焊接管为主,由于制管工艺还不够先进,钢管的工作压力较低,因而泵站间距较短,耗钢量也较多。

(2) 输油工艺方面。国外原油大都是低凝固点的,一般都是常温输送。对易凝原油,国外多用加热输送,有加热炉直接加热,换热器间接加热和高流速摩擦加热等方式。国外的输油工艺流程多采用泵到泵密闭输油。油品计量则采用容积式流量计,用 U 形体积管精确标定,并配合计算机工作。

我国原油大都是高凝固点、高含蜡、高粘度的“三高”原油,目前多采用加热炉直接加热,旁接油罐输油工艺。并联泵的泵到泵密闭输油工艺已试验成功,正在部分泵站上试用。东一黄管线复线工程从加拿大引进了先进的泵到泵密闭输油工艺。

(3) 机、泵和阀门等方面。国外的大型输油泵大都是离心泵互相串联工作。每级的扬程较高的为 500~600 米,效率为 70~80%。其发展方向为单级、高扬程、大排量和高效率,借助于高转速来达到上述目的。

泵的原动机除了电动机外,在缺电的地区也有用柴油机、双燃料发动机和燃气轮机的。当用电动机为动力时,某些泵站还设有调速装置。

国外长输管线上的截断阀普遍采用球阀或平行滑板闸阀,最大口径为 1200 毫米,工作压力为 20~100 公斤/厘米²,阀门的执行机构大部分为电动或电液联动。压力调节阀则大都为球形,全关时不泄漏,全开时压降小,调节性能好。安全泄压阀则多采用橡胶挠性管式结构,反应迅速。我国目前的截断阀仍以楔形闸板阀为主,球形截断阀的密封装置还有待于改进。

(4) 自动化方面。国外新建的输油管线均按全线集中控制设计,旧管线也在逐渐改造中。集中控制的泵站上都设有小型电子计算机或远动装置。泵站实现自动程序控制,可独立处理本站的操作,也可根据中央控制室的指令进行操作。中央控制室一般设有两台计算机,一台用于收集各泵站的主要操作参数,并进行检查、运算,发出指令使各站操作均衡。另一台“离线”计算机则负责制定输油计划,统计各站消耗指标,编制输油成本和各项报表,及进行某些专题计算等。

我国虽在部分泵站试验自动程序控制并试用,但距离以计算机为中心的全线自动化,尚有一定的差距。东一黄复线建成后,将实现全线自动化,由计算机集中控制。

(5) 防腐技术方面。国内外普遍采用阴极保护和管道涂层相结合的管道防腐技术。国外近年来开始大量采用现场机械化包扎的聚乙烯胶粘带和工厂预制的高密度聚乙烯涂层。我国目前仍以沥青玻璃布涂层为主,正在试用聚乙烯胶粘带和环氧煤焦油沥青涂层。

随着原油开采量的增加,今后油、气管道的建设将日益增多。为了节约钢材,减少动力消耗和投资,输油管道建设的特点已朝着大口径、高强度、高压力和薄壁管的方向发展。并

将进一步引用先进技术,包括高度自动化和遥控技术,微波通讯,电子计算机在管道调度上的应用以及采用通讯卫星系统作为管道通讯的辅助系统等。与此同时,管道建设所用的材料、设备、仪器和施工机具也必将逐步走向专业化,形成庞大的管道工业。为了适应这种形势,每个输油工作者必须认真学习和掌握有关输油工艺方面的专业知识,为适应管道工业的发展奠定必要的理论基础。

四、认真学习本课程

如前所述,管道作为一种原油及成品油的运输工具,比起其他运输工具来有很多突出的优点,多年来的实践已证明,输油管道在促进国民经济发展方面起到了重要作用。本课程作为一门专业课,旨在于向学生介绍输油工艺方面的基本知识,为适应在输油管道第一线工作打下必要的理论基础。本课程的理论性比较强,并且要求学生具备一些必要的专业基础课知识,如流体力学、热力学、输油设备等。为了便于学生学好本课程,特提出如下要求:

- (1) 学习过程中要经常复习巩固。涉及到专业基础知识时,要从基本原理出发,抓住专业概念的具体特点,进行分析、比较、综合、归纳,以致理解其实质。
- (2) 注意上下节内容上的逻辑联系,从知识的体系上、理论框架上去掌握知识。
- (3) 充分利用教具挂图、模拟实验室等直观实物,来帮助消化一些抽象的概念。
- (4) 认真上好习题课。

除此之外,学生还可结合各自的特点,选择适合于自己的学习方法,最后把知识真正学到手。

第一章 等温输油管的工艺计算

长距离输油管线是由输油站和管路两大部分组成的，管路与输油站的关系就好比人身上的动脉与心脏之间的关系。大型输油管长达数百公里，从首站到末站，沿途还有若干个中间站。油在管路中向前流动，需要消耗和损失一定的能量（包括压力能和热能），输油站的任务就是供给一定的能量，将油品保质、保量、安全、经济地输送到终点。

输油管的工艺计算就是为了妥善地解决管路沿线的能量消耗和能量供应这个主要矛盾，以达到安全、经济地完成输送任务的目的。所谓等温输油管，是指输油管线的油温接近于地温，即假设油的温度仅受地温变化的影响。相应的工艺计算主要包括分析管路的能量损失、泵站的工作特性、泵站数的确定及泵站布置过程中遇到的工程实践问题。本章除了介绍以上内容以外，考虑到专业基础知识对工艺计算的影响，故在某些地方还将适当强调水力学等有关方面的应用问题。

第一节 输油管路的压能损失

管路输油过程中压力能的消耗主要包括两部分，一是克服地形高差所需的位能，对某一具体管路来说，它仅决定于管路沿线地形的起伏情况，不随流量的变化而变化；二是克服油品沿管路流动过程中的摩擦及撞击阻力，通常称为摩阻损失。

一、摩阻损失的两种形式

油品在管路中流动时，由于外部条件不同，其流动阻力与能量损失，通常分为如下两种形式。

（一）沿程阻力与沿程摩阻损失

油品在管路中流动时，与壁面以及油流之间存在摩擦力，所以流动过程中总是受到摩擦力的阻碍。这种沿流程的摩擦阻力，就叫做沿程阻力。油流克服沿程阻力而损失的能量，就叫做沿程摩阻损失。也就是说，沿程摩阻损失是发生在流体运动的一段路程上，其数值大小与流动路程成正比例。长输管线运行时，油流通过直管段所产生的摩阻损失 h_f （简称沿程摩阻）就属于这一类。造成沿程摩阻的物理原因，是由于油品的粘性，以及管内壁面有一定的粗糙度，使油流运动过程产生摩擦的结果。

（二）局部阻力与局部摩阻损失

1. 产生局部阻力的条件

- （1）管道断面发生变化，例如断面突然扩大，如图 1-1a；
- （2）流动方向有改变，例如弯管，如图 1-1b；
- （3）管路中有局部装置，例如装有阀门，如图 1-1c。

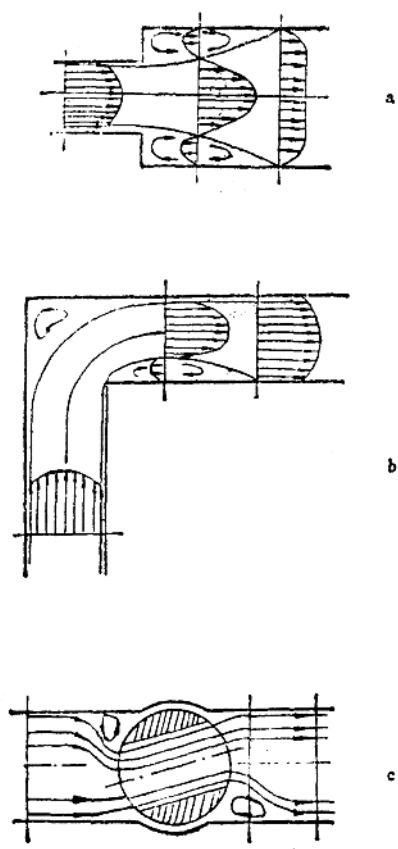


图 1-1 局部阻力产生原因示意图

在上述流动断面改变、流动方向改变以及流经局部装置时，流体的流动就受到阻碍和影响。这种由于管路中局部变化所引起的、并且集中在这一局部区域内的阻碍和影响，就叫做局部阻力。流体克服局部阻力所损失的能量，就叫局部摩阻损失。长输管线中，油流通过各种阀件、管件所产生的摩阻损失 h_i ，属于局部摩阻损失，简称局部摩阻。

2. 产生局部摩阻的物理原因

尽管局部变化和局部装置是有各式各样的，但是产生局部损失的物理原因，归纳起来不外乎以下三点：

(1) 任何断面形状的改变，都必将引起流速的重新分布，因而附加了流体间的相对运动和流体质点的急剧变形，结果导致质点间附加摩擦和相互撞击，使流体能量受到损失；

(2) 流速的重新分布，总是伴随有流动分离和旋涡的形成，在旋涡区由于粘性的存在，便有摩擦的能量损失；

(3) 在旋涡区中，又有质点被主流所带走，即有动量交换，因而消耗运动流体的能量。

以上三点就是产生局部摩阻的物理本质。但应该注意到，沿程摩阻与局部摩阻，从外部条件看来虽然不同，但是产生能量损失的物理实质都是相同的，即两者都是由流体的粘性所引起的。

全流程的总摩阻 h_w 应是所有沿程摩阻和局部摩阻的叠加。即

$$h_w = \sum h_f + \sum h_i \quad (1-1)$$

长输管线中，站间管路的摩阻损失主要是沿程摩阻，而输油站的站内摩阻则主要是局部摩阻。

二、摩阻损失的计算

1. 沿程摩阻的计算

管路的沿程摩阻损失 h_f 可用下式来求得：

$$h_1 = \lambda \frac{Lv^3}{d \cdot 2g} \quad (1-2)$$

式中 L ——管路长度, m;
 d ——管内径, m;
 v ——平均流速, m/s;
 g ——重力加速度, m/s²;
 λ ——水力摩阻系数。

水力摩阻系数 λ 随流态而不同, 理论和实践都表明水力摩阻系数是雷诺数 Re 和管壁相对粗糙度 ε 的函数。

其中

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d \nu} \quad (1-3)$$

式中 ν ——油品的运动粘度, m²/s;
 Q ——油品在管路中的体积流量, m³/s。

雷诺数标志着油品流动过程中, 粘滞阻力与惯性阻力在总阻力损失中所起的作用。雷诺数小时, 粘滞阻力起主要作用, 雷诺数大时, 惯性损失起主要作用。

其中

$$\varepsilon = \frac{2e}{d} \quad (1-4)$$

式中 e ——管壁的绝对当量粗糙度, m。

管壁的绝对粗糙度系指管路内壁突起高度的统计平均值。由于制管及焊接、安装过程中的种种原因, 管内壁难免是凹凸不平的。使用多年后, 更会由于腐蚀、结蜡等因素而增大其凹凸程度。故管路内壁的绝对粗糙度不仅各处程度不同, 且大小不等。计算中所用的多是绝对粗糙度的当量平均值, 其数值随管材、管径、制管方法、使用年限、腐蚀程度等多种因素而不同。表 1-1 列出了过去计算中采用的各种管路的绝对粗糙度的当量值。进行有关计算时常取新无缝钢管的 $e=0.05$ 毫米。

表 1-1 各种管路的绝对当量粗糙度

管 路 种 类	绝对粗糙度, mm	管 路 种 类	绝对粗糙度, mm
新无缝钢管	0.05~0.15	石棉水泥管	0.3~0.8
轻度腐蚀的旧无缝钢管	0.1~0.3	新的铜管、铅管	0.01
腐蚀较重的旧无缝钢管	0.5~2.0	橡胶软管	0.01~0.03
新铸铁管	0.3		

对于螺旋焊接管, 其管壁粗糙度要比上表所列的数值高, e 值应取大些。

流体在管路中的流态按雷诺数来划分,在不同的流态区,水力摩阻系数与雷诺数及管壁粗糙度的关系不同,如表 1-2 所示。

表 1-2 不同流态的 λ 值

流 态	划 分 范 围	$\lambda = f(Re, \varepsilon)$
层 流	$Re < 2000$	$\lambda = \frac{64}{Re}$
紊 流	水力光滑区 $3000 < Re < Re_1 = \frac{59.5}{\varepsilon^{0.25}}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{Re \sqrt{\lambda}}{2.5}$ 当 $Re < 10^5$ $\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$
	混合摩擦区 $\frac{59.5}{\varepsilon^{0.25}} < Re < Re_2 = \frac{665 - 765 \lg \varepsilon}{\varepsilon}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1.8 \lg \left(\frac{6.8}{Re} + \left(\frac{\varepsilon}{7.4} \right)^{1.11} \right)$
	粗 糙 区 $Re > Re_2 = \frac{665 - 765 \lg \varepsilon}{\varepsilon}$	$\lambda = \frac{1}{(1.74 - 2 \lg \varepsilon)^2}$

当雷诺数在 2000 以内,流态为层流,液态的质点作平行于管路中心轴线的运动,水力摩阻系数 λ 仅与雷诺数 Re 有关, $\lambda = f(Re)$ 。

流态由层流转变为紊流,是一种突变,但其发生突变时的雷诺数值,却因各种影响流动的具体因素,如局部阻力的形成、油流温差而引起的自然对流等的影响而不同,突变的雷诺数值一般在 2000 至 3000 之间,即 $2000 < Re < 3000$ 。但对于热重油管路,也有在 $Re < 2000$ 时已进入紊流的现象。在该范围内流动状态不稳,通常应尽量避免在该区域内工作。在该区内, λ 值尚无成熟的计算公式,暂按紊流光滑区计算。

当雷诺数 $Re > 3000$ 时,流态是紊流,液流的质点作紊乱运动,不但有随液流整体的向前运动,还有沿管子径向的运动。只是贴近管壁的一部分液流仍为层流,即所谓层流边层。随着 Re 的增大,层流边层的厚度逐渐减薄,粗糙突起,从全部被层流边层掩盖到几乎全部暴露于层流边层之外,管壁粗糙度 ε 对水力摩阻系数 λ 的影响逐渐增大,紊流的三个区域也就逐步过渡。

当 $3000 < Re \leq \frac{59.5}{\varepsilon^{0.25}}$ 时,层流边层的厚度能盖住管内壁上的全部粗糙突起,此范围内 λ 仅与 Re 有关,称为水力光滑区。

当 $\frac{59.5}{\varepsilon^{0.25}} < Re \leq \frac{665 - 765 \lg \varepsilon}{\varepsilon}$ 时,部分粗糙突起露在层流边层之外,油流撞着这些突起,形成旋涡,增加阻力,粗糙度对水力摩阻系数发生影响, λ 成为 Re 、 ε 二者的函数, $\lambda = f(Re, \varepsilon)$ 。该区称为混合摩擦区。

混合摩擦区的水力摩阻系数, $\lambda = f(Re, \varepsilon)$ 还可表示为

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{68}{Re} + \varepsilon \right)^{0.25} \quad (1-5)$$

在水力光滑区内, $\lambda = f(Re)$ 的关系也不是一成不变的,其趋势是随着 Re 的增加,与 λ 值成反比的 Re 的幂次数值减小,反映了粘滞阻力的影响逐渐减小。

当 $Re > \frac{665 - 765 \lg \varepsilon}{\varepsilon}$ 时,层流边层的厚度非常小,粗糙突起几乎全部露在层流边层之

外，惯性损失愈占主导地位，水力摩阻系数只决定于粗糙度，该区域称为粗糙区或阻力平方区。

由于临界雷诺数的数值决定于管壁粗糙度，故在某些轻油管的设计工作中，由于粗糙度的数值选择不同，可能出现流态不同，摩阻值差异较大的情况。为确保管线的输送能力，通常有两种处理方法：按轻度腐蚀的旧管线取粗糙度值，如取 $\varepsilon=0.2$ 毫米；或按新管线取粗糙度值，在摩阻计算中乘以一定的污垢系数。实际上在轻油管线的工作过程中，常会由于液流的冲刷或某些轻度的腐蚀作用，使管壁粗糙度逐渐增大，因而使摩阻逐渐增大，输量逐渐减小，因此必须及时清管。

上述各流态区的计算式可综合如下式

$$\lambda = \frac{A}{Re^m} \quad (1-3)$$

将上式及 $V = \frac{4Q}{\pi d^2}$ 、 $Re = \frac{4Q}{\pi d \nu}$ 代入 (1-2) 式，可得

$$h_L = \beta \frac{Q^{2-m} \nu^m}{d^{5-m}} L \quad (1-7)$$

其中

$$\beta = \frac{8A}{4^m \pi^2 \nu^m g}$$

表 1-5 不同流态时的 A 、 m 、 β 值

流 态	A	m	$\beta, s^2/m$	$h_L, m \text{ 油柱}$
层 流	64	1	$\frac{128}{\pi g} = 4.15$	$h_L = 4.15 \frac{Q \nu}{d^4} L$
紊 流	水力光滑区	0.25	$\frac{8A}{4^m \pi^2 \nu^m g} = 0.0246$	$h_L = 0.0246 \frac{Q^{1.75} \nu^{0.25}}{d^{4.75}} L$
	混合摩擦区	0.123	$\frac{8A}{4^m \pi^2 \nu^m g} = 0.0802A$	$h_L = 0.0802A \frac{Q^{1.877} \nu^{0.123}}{d^{4.877}} L$ $A = 10^{0.1271 \lg \varepsilon - 0.627}$
	粗糙区	0	$\frac{8\lambda}{\pi^2 g} = 0.0826\lambda$	$h_L = 0.0826\lambda \frac{Q^2}{d^5} L$ $\lambda = \frac{1}{(1.74 - 2 \lg \varepsilon)^2}$

①②③ A 、 m 、 β 均为随不同流态而变化的系数，其值见表 1-5。

各流态区的 A 、 m 、 β 值及沿程摩阻计算式见表 1-3。

表中所列的各流态区的摩阻计算式，反映了沿程摩阻与流量 Q 、粘度 ν 、管内径 d 、管长 L 间的相互关系。它们的共同特点是：随着流量、粘度和管长的增大，或管径的减小，沿程摩阻随之增大。但在各流态区，它们的影响程度是不相同的。

在一定的管路内，输送量越大，摩阻损失也越大。层流区，流量对摩阻损失的影响最小， $h \propto Q$ ；紊流光滑区， $h \propto Q^{1.75}$ ，混合摩擦区， $h \propto Q^{1.877}$ ，在紊流粗糙区， $h \propto Q^2$ ，摩阻损失因流量的增大而急剧增大。例如，若流量增加 1 倍，层流区摩阻损失增加到原来的 2 倍，光滑区则为原来的 3.36 倍，混合摩擦区为原来的 3.66 倍，粗糙区为原来的 4 倍。

当管路和流量一定时，粘度愈大，则摩阻损失愈大。层流区内，粘度对摩阻的影响最为显著， $h \propto \nu$ ，紊流光滑区次之， $h \propto \nu^{0.25}$ ，而在紊流粗糙区， $h \propto \nu^0$ ，表明粘度对摩阻损失无影响。

管路长度对摩阻损失的影响，在各流态区是一样的， $h \propto L$ ，即摩阻损失随管长 L 的增长成正比增大。

不同直径的管路，输送同样数量的同一种油品时，管径大的，摩阻损失小。层流区影响最小， $h \propto \frac{1}{d^4}$ ；紊流光滑区， $h \propto \frac{1}{d^{4.75}}$ ；混合摩擦区， $h \propto \frac{1}{d^{4.877}}$ ；而粗糙区， $h \propto \frac{1}{d^5}$ ，

影响最大，摩阻损失随管径增大而减少得最多。管径 d 对摩阻损失的影响，比其它参数的影响更为显著。例如，管径增加 1 倍，摩阻损失在层流区只有原来的 $1/16$ ；紊流光滑区为原来的 $1/27$ ；混合摩擦区为 $1/29$ ；紊流粗糙区只有 $1/32$ 。可见，增大管径是减少摩阻的最有效措施。

热原油管线上最常见的流态是水力光滑区，轻油管线大都是混合摩擦区，热重油管线的流态则以层流居多。

公式 (1-7) 叫做列宾宗公式，与其他公式配合可解决管路的设计和计算中常遇到的三类问题：

(1) 已知管径、管长和地形（即管线起点和终点的标高），当一定流量的某种液体通过时，可确定管路中的压力降或从而确定起点所需的压头，或计算水力坡降。

进行这种计算时，常要求算出几种不同油品或几种不同输量时的压力降或水头损失，绘成管路特性曲线，为选泵作准备。其计算程序是：

- 1) 根据给定的流量、管径、液体性质，算出 Re ，确定流态；
- 2) 根据流态确定 β 、 m 值，按式 (1-7) 算出水头损失；
- 3) 考虑所克服的位差及局部摩阻后，算出压降或起点压头，或由沿程摩阻和管长确定水力坡降。

(2) 已知管径、管长和地形，在一定的压力限制下，确定某种油通过时的最大输送能力，即输送量的大小。

这是作管线设计或核时常遇到的。由于流量是未知数，无法确定流态，可用试算法。即先设定流态，选好 β 及 m 值，由式 (1-7) 求出

100674

$$Q = \sqrt[n]{\frac{h_i d^{5-n}}{\beta v^n L}} \quad (1-3)$$

再用求出的流量计算雷诺数校核流态，看是否与原假设流态相符。如不符，再重新假设流态试算。

(3) 已知管长、地形及输送某液体的流量，要求选管径。

这是在进行初步设计时遇到的问题，在设备、管材未订货前都要从经济上先进行核算。这时，管径和压降都是未知的，在一定流量下，管径大小直接影响流速大小和流态变化，因而水头损失不同，压降也不同。

管径的选择必须全面考虑各方面的利弊，既要保持一定的流速，又要符合经济要求，在初步计算时，可选用经济流速，根据经验，一般油田内部管道流速以 1~2 米/秒为宜，外输管道流速可取 1~3 米/秒。

2. 局部摩阻的计算

局部摩阻 h_i 可按式计算

$$h_i = \xi \frac{V^2}{2g}$$

或者

$$h_i = \lambda \frac{L_D}{d} \frac{V^2}{2g}$$

由上二式可得

$$L_D = \xi \frac{d}{\lambda}$$

式中 ξ ——局部摩阻系数，

L_D ——管件或阀件的当量长度。

管件或阀件的当量长度系指与流体通过该管中所产生的摩阻损失相当的直管段长。各种管件和阀件的 ξ 和 L_D 值通常都是在紊流状态下测得的。这时，局部摩阻系数 ξ 与液流的雷诺数 Re 无关。而层流时，局部摩阻系数 ξ 是随着雷诺数变化的，因此若将实测的局部摩阻系数用于层流，需依下式换算

$$\xi = \varphi \xi_w$$

辅助系数 φ 随雷诺数 Re 而不同，可由表 1-4 查得。

表 1-4 辅助系数 φ

Re	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800
φ	4.4	4.0	3.53	3.35	3.21	3.10	3.02	2.95	2.88	2.83	2.48	2.30	2.12	1.99

部分常用的管件和阀件在紊流状态下测得的 $\frac{L_D}{d}$ 值列于表 1-5。