

国外参考资料

大型石油管道顺序输送

商业部基建局

一九七四年五月

前 言

苏联1957—1965年发展国民经济七年计划中指出，要大力发展管道输送。七年内，管道干线总长度将增加三倍。

由于大量发展石油和石油产品的管道输送，以及建设一系列管道输送干线，就有可能利用一条或几条管道，把各种质量的石油，由产地输送到加工地，把石油产品从提炼区运到消费区。这对于苏联国民经济来说，具有很重要的意义。

采用大型管道输送的办法，无需建设输送各种石油和石油产品的平行管道。在很大程度上，可以减轻铁路运输的负担。

在苏联以及在国外，采用管道输送的实践，已经证明顺序输送是可能的。

现在，苏联已拥有多条顺序输送各类石油产品和不同质量的石油的大型管道。例如沿着《伊凡雷帝—劳动管道》管道线，仅仅从1956—1957年的一年中，就建起了70多条顺序输送线。由于缩短铁路运输，一年内节约了1,700万卢布。

由于建设了大量管道，顺序输送也就成了必须解决的问题。因此，向从事于为实现顺序输送的工人同志们、新的顺序输送管道的设计工作者们，提出一系列问题，其中最基本的是：

- 1、确定通过顺序输送，在管道内组成的混油段体积；
- 2、观察分析混油体在管道里的流向；
- 3、管道终端对混油体的接收和使用；
- 4、顺序输送的液压计算；
- 5、选择接收油罐的容量，确定其数量；
- 6、关于采取减少混油段体积的措施。

本小册子，对于在实践基础上进行顺序输送的先进经验，以及这方面所研究的基本问题，都有阐述。

目 录

前 言

第一章 顺序输送时在管道内的混合	(1)
一、混油段组成过程及其实质	(1)
二、关于紊流输送条件下混油的课题及其分析解决	(2)
三、确定管道里组成的混油段体积	(6)
四、确定顺序输送时紊流扩散系数	(7)
五、顺序输送的相似性和模型试验问题	(11)
六、关于对顺序输送时确定混油体积公式的评价	(13)
七、中间泵站、管道断面和顺序输送中止等对混油体积的影响	(14)
八、变径管和支管对混油体积的影响	(17)
第二章 关于在管道终端接收混油体	(19)
一、把全部混油体接收到单独油罐	(19)
二、商品石油产品油罐直接接收混油体的头、尾两部分	(21)
第三章 顺序输送控制方法	(26)
一、顺序输送控制目的和任务	(26)
二、顺序输送控制方法和仪表	(26)
三、关于对顺序输送控制方法、仪表的评价及其实现自动化	(45)
四、确定顺序输送控制仪表的必要准确性	(47)
第四章 顺序输送管道的液压计算及其设计的特点	(50)
第五章 缩小顺序输送时的混油体体积的有关措施	(56)
一、组织措施	(56)
二、顺序输送时所采用的隔离器	(59)
三、隔离器的结构要求及其使用	(61)
第六章 燃料在混合时所起的物理—化学变化	(68)
一、一般规定	(68)
二、从属于加性规则的指标	(70)
参考资料	(78)

第一章 顺序输送时在管道内的混合

一、混油段组成过程及其实质

顺序输送过程是：在向管道里输送石油产品 A 后，经过一段时间 t ，石油产品 B 开始注入。这个时候，就是上边所说的石油产品顺序输送的开始。

石油产品 B，逐渐地把石油产品 A 从管道里顶出去，经过一段时间 t_1 管道全部灌满，这个时候就是顺序输送终止。

在管道内运动着的两种被输送石油产品的接触处，开始部分混合。混油区长度将按其在管道里的进度逐渐加大。因此，在混油段的开始（即它的头部）拥有产品 A，而在它的末尾（即它的尾部）拥有产品 B。

被输送的呈混油状的石油产品浓度，将根据其长度，而较平稳地变化着，如从“头部”的 $K_A=1.0$ ， $K_B=0$ 到尾部的 $K_A=0$ ， $K_B=1.0$ 。

图 1 就是说明混油段浓度随着时间而变化的情况（图 1）。

石油产品一般是易于互相溶解。两种不同石油产品，经管道顺序运动时，由于管子截面上各点的速度不同（按照测定速度场），以及石油产品分子的相互扩散而引起混合。

石油产品分子扩散率很小，即 $10^{-5} \div 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{сек}$ （平方厘米 / 秒）。在较小的流速下，由于速度场所引起的混合比由于分子扩散所引起的混合要占优势。因此，在顺序输送情况下（即层流和紊流）分子扩散无损于精确计算，可不予以注意。（见图 1）

通过紊流方法顺序输送以观察和分析混油段的历程有极大的实际意义。紊流的特点（与层流的不同处）是其速度在大小和方向上剧烈地变化，结果是液体在管子里无秩序地进行混合。

在流体动力学上，分别采用沿流向上各点平均速度（按时间）和有任意流向的紊流脉动研究紊流速度场。因而在紊流中组成的混油段应区分为由点平均速度所组成的混油段和由紊流脉动所组成的混油段。要对这两个对混油段组成引起影响的因素分别进行分析。

采用紊流方法顺序输送的混油历程，可简化成如下形式。

最先的一瞬间 $t=0$ ，相当于顺序输送开始。这时被输送的石油产品 A、B，在垂直于紊流轴的平面上，互相接触（见图 2）。把在管道里的产品和他们每经一秒钟的状态

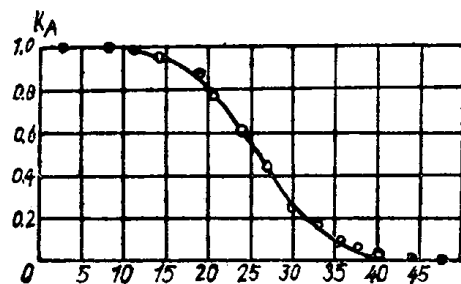


图 1 随着时间而变化的浓度

均给记录下来。在头一秒钟（即 $t=1$ ），石油产品 B，按各点平均速度所成断面插入石油产品 A。而石油产品原始平面分界线就移动。其距离等于紊流的平均速度 U_{cp} 。（见图 2 B）。在这同一时间里，紊流轴纵横方向的紊流脉动，将把摇动着的部分石油产品 A 和 B 搅合在一起。当头一秒钟终了时，在管道内形成一定体积，在这个体积中，含有相等数量的石油产品 A 和 B。这一区域的混油段长度 L_{CM} 大体接近于紊流轴上的速度 U_0 （见图 2 B）。

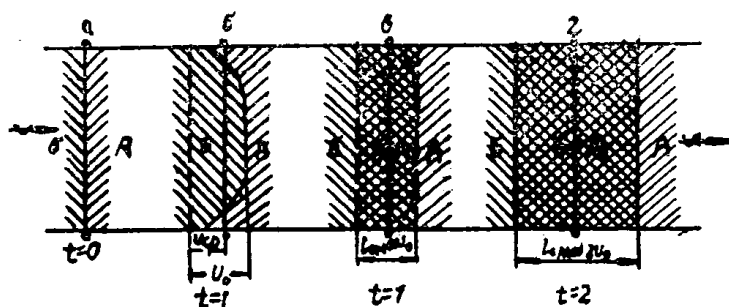


图 2 顺序输送时的混油历程

第二秒钟（ $t=2$ ），这个混油段的一部分挤入纯产品 A，同时由紊流脉动搅拌着。在混油段“头部”B + A，将和纯石油产品 A 掺合在一起，而在“尾部”——和纯石油产品 B 掺合在一起。石油产品最先部分的平面又拥有新的形态，并以紊流平均流速运动着。这一区域的混油段长度 $L_{CM} = 2 U_0$ （见图 2 i）。于是，管道里的混油段体积将随着它的运输进度而增大。在浓度几乎一样的石油产品最初分界线右边，将提高石油产品 A 的浓度，而在其左边，浓度降低。但由于浓度梯度降低（每单位长度的含量降低值），混合强度也有所减弱。这种现象又解译为，在直径不变的情况下，随着管道输送长度的增加，混油段的相对体积将减少（指与管道体积之比）。

现对由紊流脉动搅拌的混油过程，做进一步较为详细的观察和分析。比如在紊流里有浓度降低现象，那么顺序输送时就有的地方，会出现与平均浓度梯度 $\frac{\partial K}{\partial X}$ 成比例的有规则的石油产品流动。

这种流动是在无视其毫无秩序地特点情况下，由紊流脉动传送的。紊流脉动传移的物质（在此指石油产品）类似通过气体分子扩散所传移的物质〔2〕：由于浓度梯度的存在，会导致使气体分子无秩序的运动，向浓度降低方向作有规则的运动。

同样地，紊流浓度梯度的存在，也会导致石油产品向浓度降低方向作有规则的转移。

二、关于紊流输送条件下混油的课题及其分析解决

被输送的石油产品——混油段的浓度既随着时间，也随着混油区长度的变化而变化。混油的课题在于找到能以表现出这种浓度变化的函数。

通过紊流所组成的混油段可以叫着紊流扩散（在技术文献里广泛应用这一术语）。

当紊流脉动用类似分子扩散的方法所组成的混油段用紊流扩散率 DT 来表示较好。

一般情况下,被输送的石油产品——混油段的浓度是时间和所观察点的坐标的含数。

$$K=f(x \cdot y \cdot z \cdot t), \quad (1.1)$$

以浓度对时间和纵标 X (沿着管子轴向的 OX 轴) 的关系为限, $K=f(x, t)$ 可以得出表达在这种情况下浓度变化的微分方程式 (见图 3)。

为了简化计算,我们使顺序输送的石油产品都有同样的密度与粘度,而紊流扩散率不依赖于浓度。除此,还使顺序输送着的两种液体具有同等的横断面速度,于是,从分析研究中排除以一种液体挤入另一液体为形式的辅助搅合。我们还在管道里的混油区,两个相距 dx 长的断面之间划分出单元体积。该体积在管道里以紊流平均流速 U 进行流动 (见图 3 a), 并且假定,在我们观察的瞬间,石油产品 A 的浓度随着混油区长度以曲线 mn 变化着。

写下在划分出的体积里石油产品 A 的平衡方程式很明显,流进单元体积 $a\delta$ 的石油产品 A 的数量,由于紊流的搅合与在这一体积中石油产品 A 的浓度变化相等。

在 dt 这段时间里从划分出体积的断面 I 通过的不变浓度 K_A , 由于紊流扩散将得出石油产品 A 的数量为:

$$Q_{A'} = D_T \frac{\partial K_A}{\partial X} F dt, \quad (1.2)$$

F ——管道横断面面积。

在同一时间里,以浓度 $K_A + \frac{\partial K_A}{\partial X} dx$ 通过平面 II, 流进所划分出的体积的石油产品 A 的数量为:

$$Q_{A''} = D_T \frac{\partial}{\partial X} \left(K_A + \frac{\partial K_A}{\partial X} dx \right) F dt, \quad (1.2a)$$

从方程式 (1.2a) 减去方程式 (1.2) 得到的是石油产品 A 在单元体积中的数量变化:

$$dQ_A = Q_{A''} - Q_{A'} = D_T \frac{\partial^2 K_A}{\partial X^2} F dt dx, \quad (1.3)$$

由于石油产品 A 大量流入划分出的体积中,其浓度变化量为 $\frac{\partial K_A}{\partial t} dt$, 石油产品 A 数量的总变化是 $dQ_A = \frac{dK_A}{dt} F dt dx$,

方程式 (1.4) 的右边代表单位时间内浓度的导函数,按照数学上计算等于:

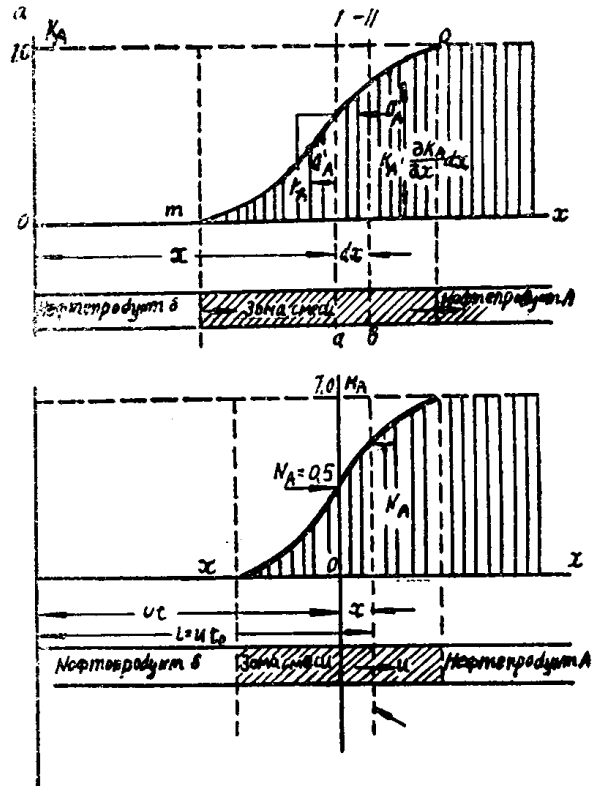


图 3 顺序输送时混油段组成方程式的图解

a、方程式 (1.6) 的推论图表

б、管道里坐标轴布置图

$$\frac{dK_A}{dt} = \frac{\partial K_A}{\partial t} + U \frac{\partial K_A}{\partial x}$$

$$\text{这里 } U = \frac{dx}{dt}$$

由此，公式 (1.4) 的形式成为：

$$dQ_A = \left(\frac{\partial K_A}{\partial t} + U \frac{\partial K_A}{\partial x} \right) F dt dx, \quad (1.5)$$

公式 (1.3) 和 (1.5) 里的左边部分是相等的，因此，右边部分亦相等。

在使它们相等，并约去公因数，就将得到所求的微分方程式

$$\frac{\partial K_A}{\partial t} + U \frac{\partial K_A}{\partial x} = D_T \frac{\partial^2 K_A}{\partial x^2}, \quad (1.6)$$

方程式 (1.6) 是在下列界限条件下表现顺序输送时混油段组成过程：

$$\begin{aligned} 1、\text{在 } t=0 \text{ 时 } \quad x > 0 \quad K_A &= 1.0 \\ \quad \quad \quad x < 0 \quad K_A &= 0, \end{aligned} \quad (1.7)$$

(最初一瞬间管道完全被石油产品 A 所灌满)；

2、在 $x = L$ (L —管道长度) 和

$$t \rightarrow \infty \quad K_A \rightarrow 0$$

(经过相当长的时间以后，管道将全被石油产品 B 所灌满)。

但在上述界限条件下计算方程式 (1.6) 是比较费力的，为了简化计算，我们将采用以下人为措施。

我们把坐标开端从管道的起点移向带有浓度 $K_A = K_B = 0.5$ 的混油区的中心 (石油产品最先接触的地方)，坐标系移动的开端将以平均流速 U 在管道里进行混合 (见图 3, 6)。这时，石油产品的流速相对于坐标系的移动将等于零，而方程式 (1.6) 的形式将是：

$$\frac{\partial K_A}{\partial t} = D_T \frac{\partial^2 K_A}{\partial x^2}, \quad (1.8)$$

方程式 (1.8) 的解见 [3.4] 著作。并在 (1.7) 的界限条件下

$$K_A = \frac{1}{2} \left[1 + \phi \left(\frac{x}{2\sqrt{D_T t}} \right) \right], \quad (1.9)$$

这里的 $\phi(Z)$ —概率积分函数，

$$\phi(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-Z^2} dZ, \quad \text{而 } Z = \frac{x}{2\sqrt{D_T t}},$$

为在公式 (1.9) 的基础上解方程式 (1.6)，我们再把坐标开端移回到管道的不动的起点。在一段 t 时间里，坐标系将移动一段距离 Ut 。让混油段中心在 t_0 即 $L = Ut_0$ ，这段时间内，从头到尾通过管道全部路程。这时公式 (1.9) 里的坐标值可以写为：

$$x = Ut_0 - Ut = Ut_0 (1 - \tau), \quad (1.10)$$

这里 τ —相对时间

$$\text{其中 } \tau = \frac{t}{t_0} = \frac{Qt}{UFt_0} = \frac{Qt}{LF} = \frac{Qt}{V_{TP}}, \quad (1.10a)$$

V_{TP} —管道体积

t —从顺序输送开始到观察之前的这一段时间。

将公式 (1.10) 代入公式 (1.9) 里的概率积分函数的自变数, 经简化将等于

$$Z = \frac{X}{2\sqrt{D_1 t}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{UL}{D_1 \tau}} \frac{1-\tau}{\sqrt{\tau}} = \frac{1}{2} P_{ed}^{0.5} (1-\tau), \quad (1.11)$$

P_{ed} ——别氏扩散变数 (Педле) ①

在 (1.11) 公式里, $P_{ed} = \frac{UL}{D_1 \tau}$, 而 $\frac{1-\tau}{\sqrt{\tau}} \approx 1-\tau$, 是因为混油区经过管道最后的截面时的 t 与 t_0 很少有区别, 因此, 在实际计算中使 $\sqrt{\nu} \approx 1$, 是足够准确的。

把公式 (1.11) 代入 (1.9) 的等式, 最终将得到

$$\begin{aligned} K_A &= \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left\{ \frac{1}{2} P_{ed}^{0.5} (1-\tau) \right\} \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left\{ \frac{1}{2} P_{ed}^{0.5} (\tau-1) \right\} \right], \end{aligned} \quad (1.12)$$

因为管道的任何一个截面永远保持平衡

$$K_A + K_B = 1.0, \quad (1.13)$$

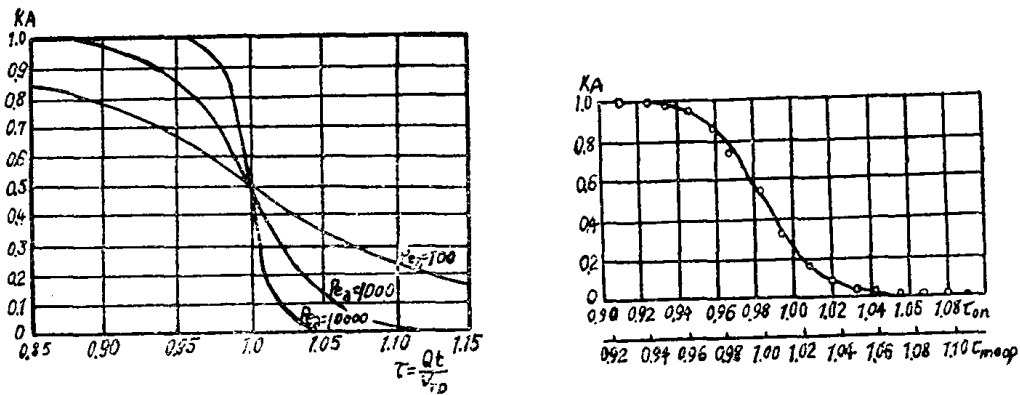
这样, 从公式 (1.12) 和 (1.13) 可以得到石油产品 B 的浓度的公式

$$K_B = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left\{ \frac{1}{2} P_{ed}^{0.5} (\tau-1) \right\} \right], \quad (1.14)$$

公式 (1.12) 和 (1.14) 是说明石油产品在距管道起点 L 长度那段时间混合时的浓度瞬间变化。

公式 (1.12) 的函数图表展示在图 4 a.

用公式 (1.12) 和 (1.14) 可以事先划出管道任何地方的石油产品浓度在时间上变化曲线 (见图 4 δ), 这条曲线已由经验所肯定的了。



a

图 4 混油段浓度的变化图表

6

a— $K_A = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left\{ \frac{1}{2} P_{ed}^{0.5} (\tau-1) \right\} \right]$ 函数表;

δ—浓度的理论 (实线) 和实际 (圈) 上的变化。

经验的和理论上的 τ 值, 他们相对时间上的差别只有 2—3%, 因此, 这点差别对混油体积的精确计算以及对浓度在时间上变化的特性 $K = f(t)$ 并不发生影响, 因为在界限内只有混油段向管道终点接近的时间在变化。这一点在泵站中间观察得比较准确。

上述差别应解释为带有浓度 $K_A = K_B = 0.5$ 的混油中间区段的运动速度与紊流的平

均速度之间有所区别而已。

概率积分的函数值在表〔5〕可以找到，而相对时间的值要按照公式（1.10^a）进行计算。

三、确定管道里形成的混油段体积

公式（1.12）和（1.14）是表现混油段的瞬间浓度对时间的关系。而他们对在管道里以任何浓度下所形成的混油段体积的确定也提供以公式。

在从 t_1 到 t_2 的一段时间里，经由管道截面的混油体积等于

$$V_{CM} = Q (t_2 - t_1), \quad (1.15)$$

Q —输送生产率

混油体的相对体积可由下列公式确定，即

$$\frac{V_{CM}}{V_{TP}} = \frac{Q}{V_{TP}} (t_2 - t_1) = \frac{1}{t_0} (t_2 - t_1) = \tau_2 - \tau_1, \quad (1.16)$$

所以，为了确定浓度 K_A ，和 K_{A_2} （或 K_B ，和 K_{B_2} ）范围内的混油体的体积，必需按下列公式确定在那些含量下的概率积分函数值 $\varphi(Z)$

$$\varphi(Z) = 1 - 2K_A$$

$$\text{或 } \varphi(Z) = 2K_B - 1, \quad (1.17)$$

这两个公式是从公式（1.12）和（1.14）所得。这里的 $Z = \frac{1}{2} P_{eH}^{0.5} (\tau - 1)$ 。

其次，对已得到的函数值再按照概率积分表〔5〕去找自变数 Z_1 和 Z_2 的值。

既然从公式（1.12）和（1.14）得出

$$\tau = \frac{2Z}{P_{eH}^{0.5}} + 1, \quad (1.18)$$

那么，把公式（1.18）里的 τ 的值代入（1.16）的等式，就会得到计算任何浓度的混油体积，

自 变 数 值					
$K_A, \%$	$K_A, \%$	Z	$K_A, \%$	$K_A, \%$	Z
99	1	1.645	90	10	0.906
98	2	1.452	85	15	0.733
97	3	1.330	80	20	0.595
96	4	1.238	75	25	0.477
95	5	1.163	70	30	0.371
94	6	1.099	65	35	0.272
93	7	1.044	60	40	0.180
92	8	0.994	55	45	0.089
91	9	0.948	50	50	0

$$\frac{V_{cM}}{V_{TP}} = 2 P_{e\pi}^{-0.5} (Z_2 - Z_1), \quad (1.19)$$

对应一些浓度值的自变数 Z 值，引在表 1 里，而对其它所有浓度来说，自变数 Z 值则按照公式 (1.17) 和概率积分表〔5〕计算之。

按公式 (1.19) 计算混油体积时，必需注意到，对所有 $K_A < 50\%$ 和 $K_B > 50\%$ ， Z 值是正的，而对所有 $K_A > 50\%$ 和 $K_B < 50\%$ ， Z 值是负的。

如果混油体积是在对称浓度条件下（一个单位的数，例如 $0.8 + 0.2$ ； $0.9 + 0.1$ ）来确定，则公式 (1.19) 简化为

$$\frac{V_{cM}}{V_{TP}} = 4 Z P_{e\pi}^{-0.5}, \quad (1.20)$$

在公式 (1.20) 里，自变数 Z 值可以不去计算，因为这个数值对用来确定混油体积范围的两种对称浓度 K_{A1} 或 K_{A2} 中的任何一种都适用。

实际上，混油体积大多是在对称浓度范围内来确定的，因此，为了简化公式 (1.20) 的计算，在图 5 给以列线图，使之有可能尽快地确定与管道体积相比的混油相对体积和绝对的立方米体积。

四、确定顺序输送时紊流扩散系数

按公式 (1.12) 和 (1.14) 计算混油段的瞬间浓度按公式 (1.19) 和 (1.20) 或 (图 5) 的列线图计算混油体积时，还必须按顺序输送的具体条件确定紊流扩散系数值。

既然紊流扩散系数是用来说明由紊流脉动速度（在紊流里真速度也带有脉动性质）所实现的混合，显然，它将依赖于紊流参数和被顺序输送的石油产品的物理特性（密度和粘性），同时也依赖于浓度梯度（与分子扩散相类似）。

在推出顺序输送时紊流扩散的基本方程式 (1.6) 时，为了简化计算，没有去考虑石油产品的各种物理性质和浓度梯度对混油段的影响，打算在研究扩散系数时对这些因素给予注意。

正如所指出的那样，随着管道长度增加，浓度梯度和混合强度也都在减少。因此，关于浓度梯度对混油段形成的影响，可以间接地借助于无因次参数—管道长度和它的直径之比进行考虑。

也可分别采用类似的方法，即通过对较重的石油产品和较轻的石油产品的密度比例关系 $\frac{Q_T}{Q_H}$ ，来考虑被顺序输送的石油产品密度的影响。

可以近似地认为紊流扩散系数就是下列的函数形式：

$$D = f \left(Re_{cp}, \frac{L}{d}, \frac{Q_T}{Q_H}, V_{cp} \right), \quad (1.21)$$

这里 $Re_{cp} = \frac{Re_A + Re_B}{2}$ 和 $V_{cp} = \frac{V_A + V_B}{2}$ 即两种被输送油品的雷诺数和运动粘度的算术平均值。

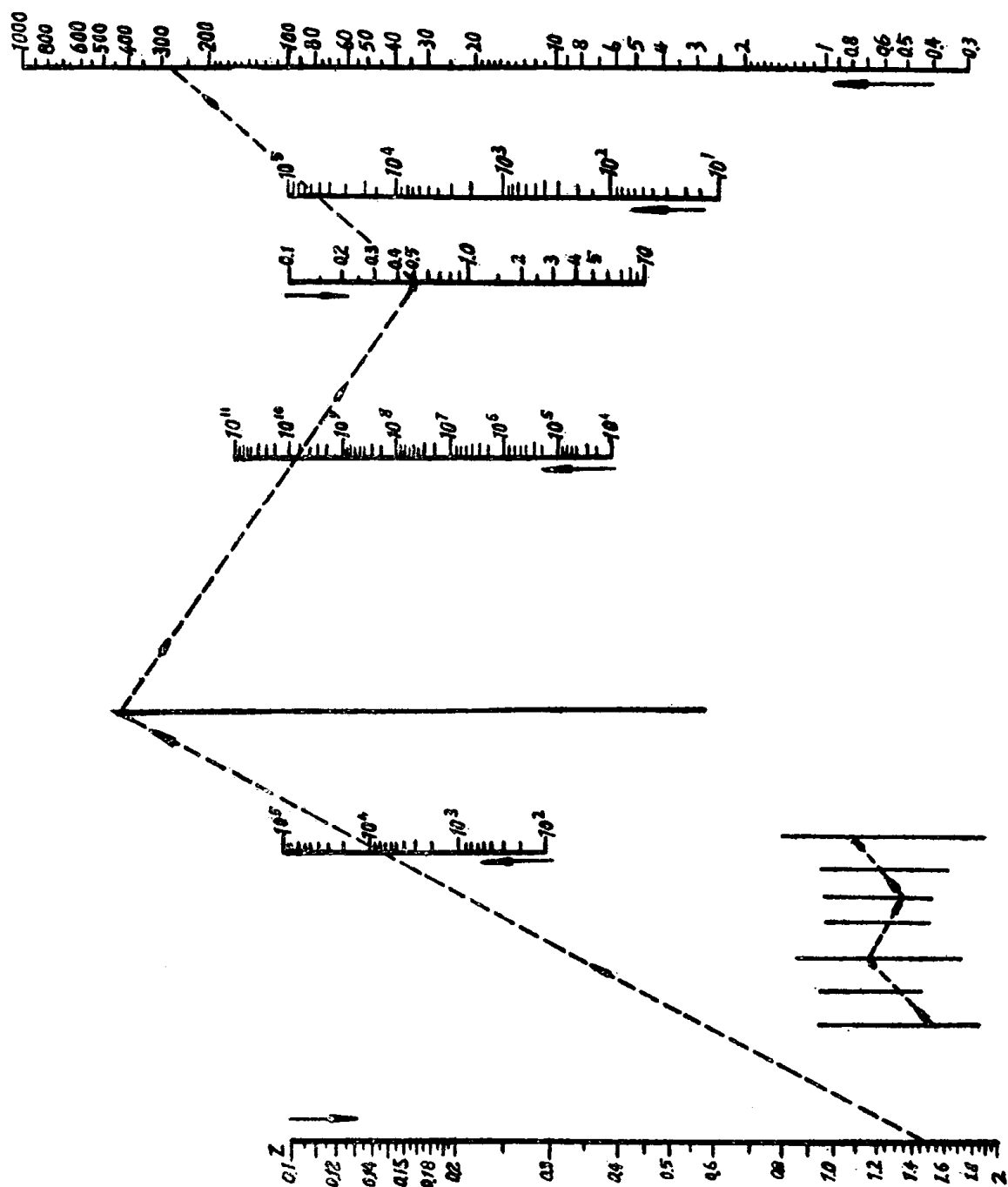


图5 为确定顺序输送的混油段体积用的尺解

① 计算方程式:

$$\frac{V_{CM}}{V_{TP}} = 4 Z \sqrt{\frac{D_T}{UL}} 100\%$$

② 1、给予Z

2、给予 D_T , $CM^2/秒$

3、无因次

4、给予 $ULCM^2/秒$

5、解答 $V_{CM}/V_{TP}100\%$

6、给予 V_{TP} , M^3

7、解答 V_{CM} , M^3

在现代的紊流扩散历程知识水平条件下，要想通过分析途径来确定公式(1.21)的相互依存性，仅对个别情况是可能的。

如果不考虑紊流扩散系数对石油产品不同密度和梯度的依存性，Тейлор〔6〕①得到公式

$$D_{\tau} = 5,05d\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}, \quad (1.22)$$

τ_0 —管道壁上的切线磨擦力

ρ —产品的密度(平均的)

对于液压光面管(在Блазиуса②地带)，公式(1.22)采取的形式是

$$D_{\tau} = 3.56dU\sqrt{\lambda}, \quad (1.23)$$

λ —液压阻力系数

由于大多数石油产品是在临时的和两次的条件下顺序输送，所以，液压磨阻不仅取决于雷诺数，同时还与管子的粗糙性有关，因而公式(1.23)的应用范围很窄。而公式(1.22)，又由于其对实际条件中管道壁上的切线磨擦力值难以确定，很少利用于实际计算。

关于对湍流扩散系数的计算问题，维·阿·尤芬〔7〕提供了经验公式：

$$D_{\tau} = V_{cp} (1400 + 227 \cdot 10^{-6} Re_{cp}^{1.445}) \times \left(\frac{Q_{\tau}}{Q_{\pi}}\right)^{8.4} \left(\frac{L}{d}\right)^{0.2}, \quad (1.24)$$

公式(1.24)是对顺序输送实际经验中的大量数字加工整理的基础上取得的，为便于按公式(1.24)进行算计，在图6引有列线图。

对管道来说，如果事先通过管道输送已知道混油段的体积，则湍流扩散系数亦可根据这一混油段体积予以确定。

从公式(1.19)和(1.20)得出的结论是：

在任何一个浓度条件下

$$D_{\tau} = \frac{V^2 c_M U L}{4 V_{\tau} P^2 (Z_2 - Z_1)^2}, \quad (1.25)$$

在对称浓度条件下

$$D_{\tau} = \frac{V^2 c_M U L}{16 Z^2 V^2 P^2}, \quad (1.26)$$

例1：计算在长900K_M的管道里顺序输送汽油($Q=750K_2/M^3$ ， $V=0.009C_M^2/秒$)和拖拉机用柴油($Q=800K_1/M^3$ ， $V=0.025C_M^2/秒$)的混油体积。

管道由以下各种直径的管所组成：

$d_1=250MM$ 距离为 $L_1=400K_M$ ，

$d_2=300MM$ 距离为 $L_2=500K_M$ 。

管道与直径之比

$$\frac{L}{d_{cp}} = \frac{900 \cdot 103}{0.28} = 3,2 \cdot 10^6;$$

注：① 系原文。

② 系原文。

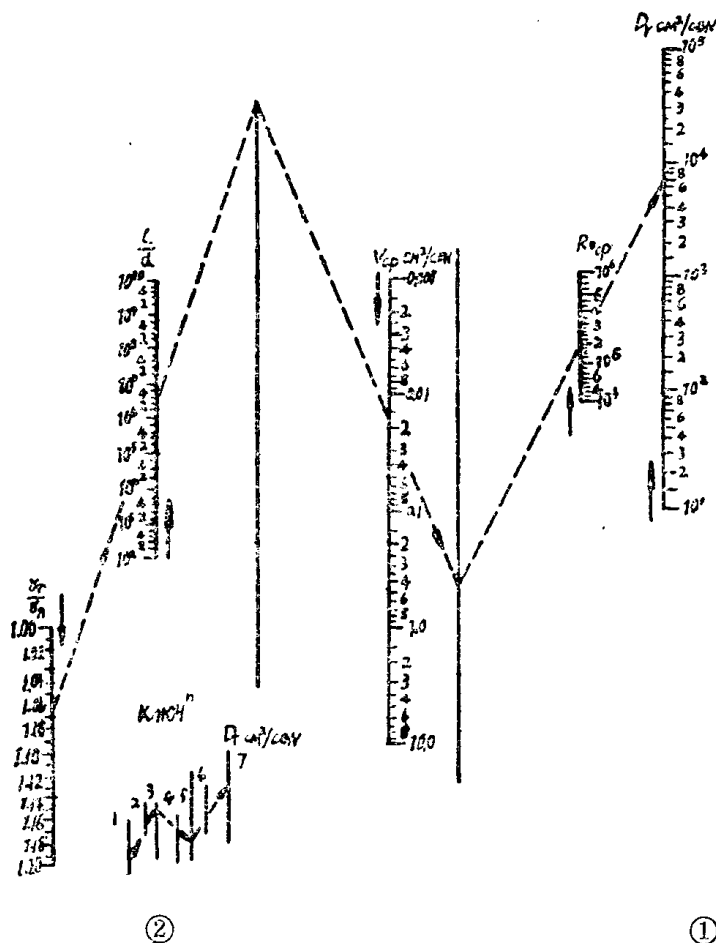


图6 确定顺序输送时的紊流扩散系数的列线图

① 计算方程式:

$$Pr = V_{cp} (1400 + 22710^{-6} Re_{cp}^{1.445}) \left(\frac{Q_T}{Q_n} \right)^{8.4} \left(\frac{L}{d} \right)^{0.2}$$

② 解答 1、给予 $\frac{V_T}{V_n}$; 2、给予 $\frac{L}{d}$; 3、无因次; 4、给予 V_{cp} $CM^2/秒$; 5、无因次; 6、给予 Re_{cp} ; 7、解答 D_T $CM^2/秒$

输送速度与管道长度之乘积

$$UL = 100 \cdot 900 \cdot 10^5 = 9 \cdot 10^9 CM^2/秒;$$

被顺序输送的石油产品的密度比例关系

$$\frac{Q_T}{Q_n} = \frac{800}{750} = 1.065$$

平均运动粘度

$$V_{cp} = \frac{1}{2} (0.009 + 0.025) = 0.017 CM^2/秒;$$

雷诺数的平均数

$$Re_{cp} = \frac{1}{2} (Re_A + Re_B) = \frac{100 \cdot 28}{2} \left(\frac{1}{0.009} + \frac{1}{0.025} \right) = 211500;$$

管道体积

$$V_{TP} = \frac{\pi}{4} (d_1^2 L_1 + d_2^2 L_2) = 3.14 (0.25^2 \cdot 400 \cdot 10^3 + 0.3^2 \cdot 500 \cdot 10^3) = 54950 \text{ m}^3$$

按表格 1，对浓度 $K_{A1} \div K_{A2} = 98 \div 2\%$ ，找到 $Z = 1,452$ 。按照图 6 的列线图，紊

流扩散系数 $D_T = 7200 \text{ cm}^2/\text{秒}$ （由虚线表示），按图 5 的列线图求出混油体积 $\frac{V_{CM}}{V_{TP}} = 0.5\%$ ，即 $V_{CM} = 274.5 \text{ m}^3$ （由虚线表示）

五、顺序输送的相似性和模型试验问题

为了弄清把在一条大型管道顺序输送的石油产品的混油结果应用于另一条在输送参数（或变数、数据）和方法上都与之有区别的管道的可能性，以及为了对在模型管道内混合油问题进行实验性研究，必须懂得顺序输送相似性法则，并正确加以运用。

根据相似性的一般理论〔8〕，在相同紊流机制的类似点上的液体运动，应从属于一个或与之相似的微分方程式，其区别仅在于方程式内所有各项都相等的常数。

如果在一条管道里混油段组成（我们叫它为自然的）从属于微分方程式

$$\frac{\partial K_H}{\partial t_H} + U_H \frac{\partial K_H}{\partial X_H} = D_{TH} \frac{\partial^2 K_H}{\partial X_H^2}, \quad (1.27)$$

而与之相似的在另一条管道（我们叫它是模型的）组成的混油段则从属于微分方程式

$$\frac{\partial K_M}{\partial t_M} + U_M \frac{\partial K_M}{\partial X_M} = D_{TM} \frac{\partial^2 K_M}{\partial X_M^2}, \quad (1.28)$$

假如，对所研究的模型的和自然的混合过程几何地和运动地相似，CL 是模型的比例。自然和模型紊流的相同点上的座标对比关系将是

$$X_H = CL X_M$$

所有相同点上的紊流速度的关系显然是：

$$U_H = \frac{CL}{C_t} U_M = C_u U_M,$$

在这里 C_t ——时间比例，等于 $\frac{t_H}{t_M}$

除外，让 $\frac{D_{TH}}{D_{TM}} = C_D$ ， $\frac{K_H}{K_M} = C_K$

通过模型紊流的比例和相互关系以表示自然紊流方程式（1.27）各项时，代替方程式（1.27）的是

$$\frac{C_K}{C_t} \frac{\partial K_M}{\partial t_M} + C_u U_M \frac{\partial K_M}{\partial X_M} = C_D \frac{C_K}{CL^2} D_{TM} \frac{\partial^2 K_M}{\partial X_M^2}, \quad (1.29)$$

方程式（1.28）和（1.29）的区别只在于系数

根据相似性的一般理论，方程式（1.28）和（1.29）只有在方程式（1.29）各项的

系数各自相等的情况下,才能相吻合。因此在模型和自然管道里组成混油段过程的相似条件将是

$$\frac{CK}{Ct} = C_u \frac{CK}{CL} = C_D \frac{CK}{CL^2}, \quad (1.30)$$

用第二项除 (1.30) 的等式所有项,得到

$$\frac{CL}{Ct C_u} = 1 = \frac{CD}{C_u CL}$$

$$\text{由此 } \frac{C_u CL}{CL} = 1, \quad \frac{C_u CL}{CD} = 1, \quad (1.31)$$

把时间、速度和扩散的比例值代入 (1.31) 的等式我们将得到:

$$\begin{aligned} \frac{U_H t_H}{L_H} &= \frac{U_M t_M}{L_M}, \\ \frac{U_H L_H}{D_{TH}} &= \frac{U_M L_M}{D_{TM}}, \end{aligned} \quad (1.32)$$

由此,我们所求的从属于方程式 (1.27) 的在管道里混油过程的相似性规律,将以两组无因次值形式表现

$$1、Ho = \frac{U t}{L} \text{—等时性数值。代表时间间隔,其间彼此混油过程相同。}$$

$$2、Pe_d = \frac{UL}{D_T} \text{—别氏扩散数值}$$

等时性数值 Ho 确定相同的时间,在这个时间里模型和自然管道里的混油段的瞬间浓度是相同的,而它只是在试验研究时才是必须的。

较为重要的是 Pe_d 数值,这是由于它确定两条管道里的混油体积的等式。

如果沿着二条不同管道顺序输送的 Pe_d 数值相同,则相应的混油体积将是一样 (在同样浓度条件下)

关于这一点,从解微分方程式 (1.6) 的基础上所得出的计算混油体积的公式 (1.19) 和 (1.20) 中也可以证实。

如果管道顺序输送的混油体积是已知数,则 Pe_d 值是比较容易确定的。

从公式 (1.19) 和 (1.00) 得出结论是:

在任何浓度条件下

$$Pe_d = \frac{4V^2_{TP} (Z_2 - Z_1)^2}{V^2_{CM}}, \quad (1.33)$$

在对称浓度条件下

$$Pe_d = \frac{16Z^2 V^2_{TP}}{V^2_{CM}}, \quad (1.34)$$

通过其它管道 (及其他油品) 顺序输送时象这样的相应的体积也可以得到,如果他们的 Pe_d 数相同或者非常接近该管道的 Pe_d 数。

在计算 Pe_d 数时,紊流扩散系数 D_T 应按公式 (1.24) 或图 6 的列线图来确定。如果混油体积是已知数,系数 D_T 也可以按公式 (1.25) 或 (1.26) 确定之。

六、关于对顺序输送时确定混油体积公式的评价

除了上述计算混油体积的公式 (1.19) 和 (1.20) 外 (而这个计算又是基于对混合的方程式 (1.6) 的解), 还有各种作者的一系列经验和半经验公式。

一九四三年, 伐奥列尔和布朗恩 [9] 提出了关于计算混油体积的公式

$$I_g V_{CM} = I_g V_{TP} - 0.4 I_g \left(\frac{L}{d} \right) + C', \quad (1.35)$$

这里的 C' —雷诺数和浓度界限的函数 (表 2)

一九四五年, 维·斯·雅布朗斯基教授 [10], 在他自己所著关于顺序输送时混油的近似液压理论的基础上, 提出的公式:

$$\frac{V_{CM}}{V_{TP}} = \frac{1}{C} (K_{A_2}^{-1/8} - K_{A_1}^{-1/8}), \quad (1.36)$$

对公式 (1.36) 里的系数 C , 雅布朗斯基在有关经验数据的基础上给予以公式:

伐奥列尔、布朗恩公式中系数 C 值

表 2

Re 数	浓 度 界 限 $KA_1 \div KA_2 \%$					
	60—40	70—30	80—20	90—10	95—5	98—2
2300	-0.02	0.31	0.55	0.77	0.94	1.07
2500	-0.13	0.20	0.44	0.66	0.83	0.96
3000	-0.25	0.08	0.32	0.54	0.71	0.84
5000	-0.44	-0.11	0.13	0.35	0.52	0.65
10000	-0.61	-0.28	-0.04	0.18	0.35	0.48
20000	-0.74	-0.41	-0.17	0.05	0.22	0.35
50000	-0.87	-0.54	-0.30	-0.08	0.09	0.22
100000	-0.93	-0.60	-0.36	-0.14	0.03	0.16
500000	-1.01	-0.68	-0.44	-0.22	-0.05	0.08
1000000	-1.02	-0.69	-0.45	-0.23	-0.06	0.07

$$\frac{1}{C} = \left(1.97 + \frac{26340}{Re_{cp}} \right) \left(\frac{L}{d} \right)^{-0.4} \frac{Q_T}{Q_{\Pi}}, \quad (1.37)$$

一九五四年, 阿·雅·柯辛可夫 [11] 基于管道模型经验, 得到的公式

$$\frac{V_{CM}}{V_{TP}} = A' \left(\frac{L}{d} \right)^{-0.4}, \quad (1.38)$$

在这儿,

$$A' = 51 [0.011 + 0.075 (K_{A_2}^{-1/3} - K_{A_1}^{-1/3}) \left(\frac{2300}{Re_{cp}} \right)^{0.765}$$

$$+ \beta \left(\frac{Q_T}{Q_{\Pi}} - 1 \right)], \quad (1.38a)$$

公式 (1.38) 里的 β 按表 3 确定之

柯辛可夫公式中系数 β 值

表 3

浓 度 界 限 $KA_1 \div KA_2 \%$	β
99— 1	0.49
98— 2	0.38
95— 5	0.28
90—10	0.13

一九四七年, 贝尔杰〔12〕根据对美国《Плантешник》公司的管道顺序输送所进行的观察, 得到关于计算混油区长度的经验公式:

对汽油蒸气—汽油

$$l_{CM} = 0,9945L^{0.482}, \quad (1.39)$$

对汽油蒸气—煤油

$$l_{CM} = 1,103L^{0.529}, \quad (1.40)$$

l_{CM} —混油区延伸度 米

L —管道长度 米

由于贝尔杰的公式与浓度界限及输送方式无关, 因此在实践中很少应用。

一九四八年, 史密图与叔里茨〔13〕提出了公式即

$$l_{CM} = (1.075Re_{cp}^{-0.87} + 0.55) L^{0.62}, \quad (1.41)$$

在这里 l 和 L 以呎表示①

史密图与叔里茨的公式, 同样地由于其本身的不完善性, 未能得到广泛地应用。

为了评价上述公式的有用性, 在表 4 里, 我们对依上述公式进行的计算和通过工业管道顺序输送时混油的实际结果相比较的结果, 给予引示

从表 4 得出的结论是, 比较与实际情况相吻合的是, 利用公式 (1.20) 并按维·阿·尤芬的公式 (1.24) 和阿·雅·柯夫辛可的公式 (1.38), 以计算紊流扩散系数。所以在实际应用上应当推荐这些公式。

七、中间泵站、管道断面和顺序输送 中止等对混油体积的影响

计算混油体积的公式是在勿视泵站, 管道断面和顺序输送中止等因素对混油体积发生影响的情况下得出的。因此, 关于上述诸因素对混油体积的影响, 要求我们予以专门考核。

遗憾的是直到目前为止, 我们尚未对上述诸因素对混油体积的影响做出足够的数据库评价, 而所能做到的也只是在问题的质的方面提供一些意见。

① 1 呎 = 0.3048 米