45 分内钟吸光度稳定在 0.375 处颜色最深，而后慢慢褪色；用 0.05% 咔唑溶液则时间更长。比色法要求快速、准确，因而选用 0.15% 咔唑的乙醇溶液作显色剂为最佳。

4. 加热时间的选择

当含 12 毫升 95% 硫酸溶液和 2 毫升半乳糖醛酸溶液的试液分别在沸水浴中加热 5、10、20、30、40 分钟，然后冷却到室温，在每一试管中加入 1 毫升 0.15% 咔唑试剂，放置 10～20 分钟，对各试液进行测定。实验证明，中间有色化合物的生成至少加热 5 分钟，而使中间有色化合物稳定则需长一些时间，但为快速而准确，我们选择了加热时间为 10 分钟。加热时间选择的实验摸索得还不够，有待进一步实践。

注：穆立虚反应　取待测液 0.5 毫升注入试管中，加 5% 的萘酚乙醇溶液数滴，混匀，此时溶液稍有混浊，然后将试管稍稍倾斜，用吸管沿管壁加浓硫酸 1 毫升（注意使水层与硫酸不混和），静止后若两液层的界面产生紫红色环，则说明待测液内含有糖分。注意应用咔唑比色法时其样品的提取液必须不含糖分或接近无糖溶液，因糖分的存在对硫酸-半乳糖醛酸混合液的咔唑显色会引起干扰，使测定结果偏高，因此测定中必须用穆立虚反应来检验。

复杂管路的计算

王幼良（天津轻工业学院化学工程系）

复杂管路包括串联管路、并联管路和分支管路，这种管路的计算要比简单管路复杂得多，按文献介绍常用试差求解。本文对复杂管路的不可压缩流体输送的计算问题进行讨论，提出一些新的计算公式和简单的计算方法，可以对复杂管路进行直接计算，不但避免了试差，而且结果也更加准确。

串联管路是指由各段不同直径的管路串联所组成的流体输送管路。这类管路有如下两个特点：

（1）通过各段的流量相等：

$$V_1=V_2=\cdots\cdots=V_i=V \tag{1}$$

（V 为体积流量，米^3/秒）

（2）管路系统的总阻力损失等于各管段的阻力损失之和：

$$Sh_f=\sum_{i=1}^{N}h_{fi}=h_{f1}+h_{f2}+\cdots\cdots+h_{fi} \tag{2}$$

（Sh_f 为复杂管路系统总阻力损失，米；h_f 为各段阻力损失，米）

串联管路的计算问题可以分为以下三个命题来进行讨论：

（1）已知：ρ、μ、N、L_i、V、d_i、e_i
　　求：h_{fi}、Sh_f

（2）已知：ρ、μ、N、L_i、d_i、e_i、Sh_{fi}
　　求：V、U_i

（3）已知：ρ、μ、N、L_i、e_i、Sh_{f1}、HR_i、V_1
　　求：d_i、U_i

（ρ 为流体密度，公斤/米^3；μ 为流体粘度，帕·秒；N 为管段数；L 为直管长度与局部阻力当量长度之和，米；d 为管内径，米；e 为管壁粗糙度，米；Sh_{f1} 为允许总阻力损失，米；U 为流速，米/秒；HR 为总阻力损失在串联各管段的分配系数）

这三类命题所需要解决的问题，就是要根据管路的尺寸、流体的能量和流量之间的关系，由已知量来确定未知量。但是，由于操作方程的非线性，所以对某些问题要试差求解。

管路计算必然涉及摩擦系数的求解。对于层流可以应用理论公式准确地进行计算[1]：

$$\lambda=\frac{64}{Re} \tag{3}$$

(Re 为雷诺数)

对于非层流区，通常应用 Colebrook 公式计算[1]:

$$\lambda=\left[-2\log\left(\frac{e}{3.7d}+\frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}}\right)\right]^{-2} \tag{4}$$

(λ 为摩擦系数)

因为公式(4)两端同时有未知数，求解时需要试差，计算比较复杂。如果用 Moody 图求解，误差较大，而且不便代入计算机进行计算。为准确求值，可以用如下公式计算[1]:

$$\lambda=\left[-2\log\left(\frac{e}{3.8d}+\frac{5.1}{Re^{0.89}}\right)\right]^{-2} \tag{5}$$

此式可以在 $4000\leqslant Re\leqslant10^8$ 范围内应用，一般误差小于 0.5%，当 $e/d>0.02$ 时，最大误差为 2.06%。

对于第一类命题，由于已知各段管径和流量，所以可以很方便地利用公式(5)求解。计算框图如图 1 所示:

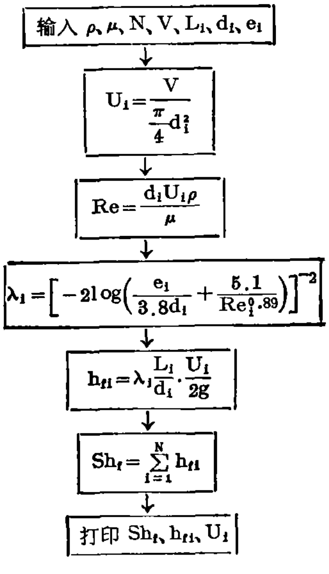

图 1　串联管路阻力损失计算框图

阻力损失求出后，就可以根据其它给定的条件，计算外加能量 he、位差 ΔZ，或者压差 ΔP。

对于第二类命题，因为流量、流速都是未知量，按文献[2]介绍要用试差法求解。因为计算过程复杂，本文未列出具体步骤。试差法计算工作量很大，如果查 Moody 图或用迭代公式(4)求解 λ_i 值，就会使计算更加复杂，用手算很难完成，结果也不准确。下面就对此问题进行讨论。

在第二类命题中，流体流经整个串联管路系统的允许总阻力损失 Sh_{f1} 为已知，Sh_{f1} 在各段管路的分配遵循一定的规律。由 Fanning 公式可知[3]:

$$h_{fi}=\lambda_i\frac{L_i}{d_i}\cdot\frac{U_i^2}{2g} \tag{6}$$

又根据流量计算式:

$$V_i=\frac{\pi}{4}d_i^2U_i \tag{7}$$

将式(7)代入式(6)得:

$$h_{fi}=\lambda_i\frac{L_i}{d_i^5}\cdot\frac{V_i^2}{\left(\frac{\pi}{4}\right)^2 2g} \tag{8}$$

各段阻力损失相加，得:

$$Sh_{f1}=\sum_{i=1}^{N}h_{fi}=\frac{V^2}{\left(\frac{\pi}{4}\right)^2 2g}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\lambda_iL_i}{d_i^5}\right) \tag{9}$$

由于 V 是未知量，联立求解式(8)、式(9)，可以消去 $V^2/(\frac{\pi}{4})^2 2g$ 项，并令:

$$C=\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\lambda_iL_i}{d_i^5}\right) \tag{10}$$

就可以得到:

$$h_{fi}=Sh_{f1}\frac{1}{C}\cdot\frac{\lambda_iL_i}{d_i^5} \tag{11}$$

考虑到实际工程问题中流体输送多在湍流区，故式(11)中的初值 λ_i 可以用 Karman 公式[3]计算:

$$\lambda_i=\left(2\log\frac{d_i}{e_i}+1.14\right)^{-2} \tag{12}$$

分析式(11)可知，影响阻力分配的主要因素是管径，λ_i 值经过求和再约分，故不致引起很大的误差。h_{fi} 解出后，不要代回式(6)求解 U_i，因为此时 λ_i 的值对计算结果影响较大，而式(12)解出的 λ_i 值只是初值，没有考虑 Re_i 的影响。可以先把式(6)改写成如下形式:

$$\lambda_i=\frac{2d_ig}{L_iU_i^2}h_{fi} \tag{6·a}$$

为了避免试差，应设法消去未知量U_i，故方程两端同乘以Re_i^2:

$$\lambda_i Re_i^2 = \frac{2d_i g h_{fi}}{L_i U_i^2} \cdot \frac{d_i^2 U_i^2 \rho^2}{\mu^2} = \frac{2g h_{fi} \rho^2 d_i^3}{L_i \mu^2} \quad (13)$$

式(13)右端的无因次数群全部是已知量，可以很方便地求解。将式(13)两端开方得:

$$Re_i \sqrt{\lambda_i} = \frac{d_i \rho}{\mu} \cdot \sqrt{\frac{2g h_{fi} d_i}{L_i}} \quad (13 \cdot a)$$

将式(13.a)代入 Colebrook 公式(4)中就可以准确地求解出λ_i，然后就可以解出U_i:

$$U_i = \sqrt{\frac{2g h_{fi} d_i}{\lambda_i L_i}} \quad (14)$$

所以第二类命题就可以直接求解了。计算框图如图2所示:

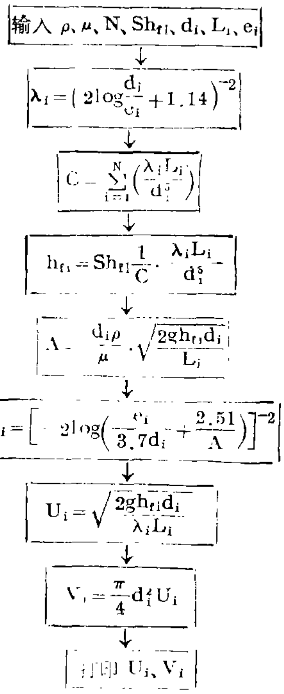

图2 直接计算串联管路流量框图

以上计算过程都经过严格的推导，不会引起误差，唯一引起误差的原因是设λ_i的初值计算各管段的阻力分配h_{fi}，所以λ_i初值的计算对计算结果影响较大，但在湍流区用这种方法计算一般误差很小，为精确计算，可以用得出的U_i计算出Re_i，然后代入式(5)重新计算一次λ_i。这样最多经过一次迭代，就可以得到准确的结果，误差可以减小到0.2%以下。

对于求解管径的第三类命题，按文献[2]介绍也需要用试差法求解。为了直接求解管径d_i，关键是找出不含管径d_i和流速U_i的数群。但此时流量V必为已知量。所以可以把Re_i表示为流量V的函数，由流量计算式(7)可得:

$$d_i U_i = \frac{4V}{\pi d_i} \quad (7 \cdot a)$$

$$Re_i = \frac{4V}{\pi d_i} \cdot \frac{\rho}{\mu} \quad (15)$$

将式(15)代入式(13)，消去管径d_i并整理可得:

$$\lambda_i Re_i^5 = \frac{4.13 g h_{fi} V^3 \rho^5}{L_i \mu^5} \quad (16)$$

考虑到λ_i值的变化范围不大，可以对式(16)做近似计算，将 Colbum 式[4]代入式(16):

$$\lambda_i = \frac{0.184}{Re_i^{0.2}} \quad (17)$$

整理可得:

$$Re_i = \left(\frac{22.4 g h_{fi} V^3 \rho^5}{L_i \mu^5}\right)^{0.208} \quad (18)$$

由于式(17)中忽略了e_i/d_i的影响，所以用式(18)求出的Re_i值有一定的误差，不可直接用来求解流速U_i或管径d_i。这里的Re_i值只是用来代入式(5)求解λ_i值。因为在Re_i值较小时，式(17)的误差较小，代入式(18)和式(15)引起的误差也较小。当Re_i值较大时，虽然式(17)的误差较大，但此时λ_i值受Re_i值的影响很小，微小的Re_i误差不会引起λ_i值的很大误差。在用式(5)计算λ_i时，因为d_i是未知量，只好假设$e_i/d_i = 0.001$代入式(5)，由此求出λ_i值，然后将式(8)整理可得:

$$d = \left(\frac{8\lambda_i L_i V^2}{\pi^2 h_f g}\right)^{0.2} \quad (8 \cdot a)$$

将λ_i值代入式(8.a)可以解出d_i。

这样，求解管径复杂的试差问题，就可以直接求解了。这种方法十分简便，手算也可以方便地求解，而且结果也比较准确。引起

误差的原因主要是用式（5）计算 λ_i 时假设 $e_i/d_i=0.001$ 所致，这与实际情况可能不一致，并且在湍流区 e_i/d_i 比 Re_i 对 λ_i 的值会有更大的影响。考虑到这一点，可以对 e_i/d_i 值进行一次修正，即在解出 d_i 值之后，再代入式(5)重新计算一次 λ_i 值。计算框图如图 3 所示：

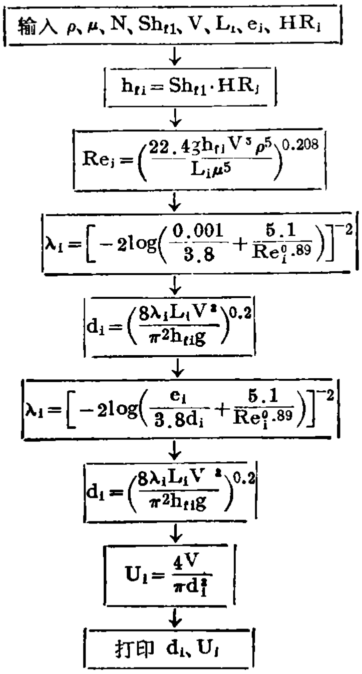

图 3　直接计算串联管路直径框图

虽然这样多了两步运算，但误差可以减小到 0.1% 以下。

可以看出，用上述方法可以很方便地解决串联管路中需要试差求解的问题，步骤简单，使用方便，并且误差极小，可以满足工程计算的要求。用新的计算方法对串联管路的各种问题进行计算，均获得了满意的结果。显然，如果当管段数 N＝1 时，这种方法也同样适用于简单管路。同理，并联管路的计算也可以用这种方法处理。

并联管路是在主管某处分为几支，然后汇合为一主管的复杂管路。此类管路有如下两个特点：

（1）并联的各个管段的压力降相等，即：

$$h_{f1}=h_{f2}=\cdots\cdots=h_{fi}=Sh_f \qquad (19)$$

（2）主管中的流量等于并联的各管段流量之和，即：

$$V=V_1+V_2+\cdots\cdots+V_i=\sum_{i=1}^{N}V_i \qquad (20)$$

在工程计算中经常遇到的并联管路计算问题可以分为以下两类：

（1）已知：ρ、μ、N、V、L_i、e_i、d_i
　　求：V_i、h_{fi}

（2）已知：ρ、μ、N、V、L_i、e_i、Sh_{f1}、VR_i
　　求：d_i、U_i

（VR_i为总流量在各支管段的分配系数）

在第一类命题中，并联的各管段中的流量是按照式(19)的关系进行分配的。因为各管段中的流量 v_i 和阻力 h_{fi} 同时为未知，所以按文献[5]介绍，一般用试差法求解。为了简化计算，用解决串联管路的方法对计算重新进行讨论。

为求解出总流量在各并联管路中的流量分配，由式(8)可得：

$$V_i=\sqrt{\frac{gh_{fi}\pi^2d_i^5}{8\lambda_iL_i}} \qquad (21)$$

由式(20)可知：

$$V=\sum_{i=1}^{N}V_i \qquad (20)$$

则有：

$$V^2=\left(\sum_{i=1}^{N}V_i\right)^2 \qquad (20\cdot a)$$

将式(21)代入式(20.a)，并根据式(19)得：

$$V^2=\left(\sum_{i=1}^{N}V_i\right)^2=\left(\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\frac{gh_{fi}\pi^2d_i^5}{8\lambda_iL_i}}\right)^2=Sh_f\left(\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\frac{g\pi^2d_i^5}{8\lambda_iL_i}}\right)^2 \qquad (22)$$

则：

$$Sh_f=\frac{V^2}{\left(\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\frac{g\pi^2d_i^5}{8\lambda_iL_i}}\right)^2} \qquad (22\cdot a)$$

根据式(19)并联管路的 h_{fi} 相等，将式(22.a)和式(8)联立得：

$$\frac{8\lambda_iL_iV_i^2}{g\pi^2d_i^5}=\frac{V^2}{\left(\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\frac{g\pi^2d_i^5}{8\lambda_iL_i}}\right)^2} \qquad (23)$$

整理可得:

$$V_i=\frac{V}{D}\sqrt{\frac{d_i^5}{\lambda_i L_i}} \tag{24}$$

式中:

$$D=\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\frac{d_i^5}{\lambda_i L_i}} \tag{25}$$

根据式(24)就可以求解出总流量在各管段中的流量分配，但此时 λ_i 值为未知，与串联管路同理，用式(12)作近似计算，求出 λ_i 值。具体步骤如图 4 所示:

输入 ρ、μ、N、V、L_i e_i、d_i

↓

$$\lambda_i=\left(2\log\frac{d_i}{e_i}+1.14\right)^{-2}$$

↓

$$D=\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\frac{d_i^5}{\lambda_i L_i}}$$

↓

$$V_i=\frac{V}{D}\sqrt{\frac{d_i^5}{\lambda_i L_i}}$$

↓

$$Re_i=\frac{4V_i}{\pi d_i}\cdot\frac{\rho}{\mu}$$

↓

$$\lambda_i=\left[-2\log\left(\frac{e_i}{3.8d_i}+\frac{5.1}{Re_i^{0.89}}\right)\right]^{-2}$$

↓

$$h_{fi}=\frac{8\lambda_i L_i V_i^2}{g\pi^2 d_i^5}$$

↓

打印 V_i、h_{fi}

图 4　直接计算并联管路流量框图

这样，并联管路复杂的试差问题就可以直接求解了。与串联管路的情况类似，误差是由于近似计算 λ_i 引起，在雷诺数较低时 ($Re<10^5$)会出现误差。为准确计算，只要将用式(5)求出的 λ_i 值代回式(25)中重新运算一次，最多经过一次迭代，误差可以减少到 0.2%以下。

在第二类命题中，因为各段管路的流量不同，又要计算适当的管径保证各段的阻力损失 h_{fi} 相等，所以并联管路的管径计算就更加复杂　为简化计算，可以用串联管路的同样方法进行处理。计算框图如图 5 所示:

输入 ρ、μ、N、V、Sh_{f1}、L_i、e_i、VR_i

↓

$$V_i=V\cdot VR_i$$

↓

$$Re_i=\left(\frac{22.4Sh_{f1}gV_i^3\rho^5}{L_i\mu^5}\right)^{0.208}$$

↓

$$\lambda_i=\left[-2\log\left(\frac{0.001}{3.8}+\frac{5.1}{Re_i^{0.89}}\right)\right]^{-2}$$

↓

$$d_i=\left(\frac{8\lambda_i L_i V_i^2}{\pi^2 Sh_{f1}g}\right)^{0.2}$$

↓

$$\lambda_i=\left[-2\log\left(\frac{e_i}{3.8d_i}+\frac{5.1}{Re_i^{0.89}}\right)\right]^{-2}$$

↓

$$d_i=\left(\frac{8\lambda_i L_i V_i^2}{\pi^2 Sh_{f1}g}\right)^{0.2}$$

↓

$$U_i=\frac{4V_i}{\pi d_i^2}$$

↓

打　印 d_i、U_i

图 5　直接计算并联管路各支管段管径框图

经过计算表明，最大误差不超过 0.1%，可以满足工程计算的要求。

同理，这种方法对于分支管路的计算也同样适用。例如，在实际工程问题中，常常是先用总管输送，然后再用各个支管把物料输送到不同的地点，如果要使整个系统的输送功率为最小，那么当各支管段的阻力损失相等时，各支管径的选择最为经济，这类问题也可以用上述方法进行计算。

综上所述，本文对复杂管路的各种计算问题进行了讨论，提出了一些新的简单计算方法和公式，按照本文介绍的方法可以不用试差，对管路输送的各类问题进行直接计算，运算简便，结果准确。用这种方法对各种管路输送问题进行计算均获得了满意的结果。相信这种方法会给管路的设计计算带来方便。

参 考 文 献

[1] 王幼良,化学工程(2),71(1987)。
[2] 上海化工学院等编,《化学工程》下册,化学工业出版社,339(1980)。
[3] 谭天恩、麦本熙、丁惠华编,《化工原理》上册,化学工业出版社,49(1984)。
[4] 天津大学合编,《化工传递过程》,化学工业出版社,193(1980)。
[5] 上海化工学院等编,《化学工程》上册,化学工业出版社,51(1980)。

化工过程设计(五)化工项目的经济评价及其计算机化

秦永贵　何芳儒(上海化工研究院)

化工项目从研究开发到形成一定的生产能力,一般要经历多个阶段,最终能否达到工业生产规模,要看它的技术经济指标如何。为了使更多的化工科研项目成为技术上先进,经济上合理,且又易于转化为生产力的科研成果,就有必要在开发过程的各阶段进行多次技术经济评价工作,而评价的可靠性又取决于评价方法。

由于资本主义经济的激烈竞争性,西方各国早在第二次世界大战前就较为重视技术经济评价方法的研究,至六十年代已有了较为系统的评价方法。为了配合技术政策的制订和工程项目的开发,他们还成立了专业研究咨询机构,如美国的斯坦福国际咨询研究所,日本的UNICO国际株式会社,法国的奥利公司等。随着电子工业的发展,他们还开发了技术经济评价软件。目前,国外已将评价方法和相应的软件成功地应用于各种工艺过程的比较、投资预算、制订技术政策、核算工程项目、承包商报价等。

在国内,这几年上海化工研究院对常用各类化工设备及一些特殊设备价格作了大量的调查、收集及整理工作,搞出了一套较为系统的、结合我国国情的化工设备价格估算式,建立了一套公用工程系统的价格估算式,还根据国内工资福利、银行利率、国内目前工程建设中常用数据和推荐数据等特点,建立了一套投资、成本及经济分析的计算方法,且编制了计算机程序。

一、评价方法

1. 投资估算

采用因子估算法(或系数估算法)。这种方法是以装置费用或工艺设备费用为基础的估算方法。投资构成:

- 总投资
  - 固定投资
    - 工程费用
      - 工艺装置费
        - 设备费用
        - 安装费等
      - 公用工程费
        - 冷却水
        - 工艺水
        - 供　电
        - 供　汽
        - 制　冷
        - 惰性气
        - 三废处理
        - 总图运输
    - 其他费用
    - 不可预见费
    - 建设期物价指数
  - 贷款利息
  - 流动资金
    - 储备资金
    - 生产资金
    - 成品资金

(1) 设备价格(RMB)估算　根据调查收集到的设备价格数据,选择影响设备费用的主要关联因子,求出其估算关联式,并将材质、压力、型式等作为校正系数,以简化计算式,通式为:

$$RMB = C_1 x^{(C_2 + C_3 \lg x + C_4 \lg^2 x)}$$

或　$$RMB = C_{11} x^{(C_{21} + C_{31} \lg x + \cdots)} \cdot y^{(C_{12} + C_{13} \lg y + \cdots)}$$