研 究 报 告

计算管内湍动流体摩擦因数的显式新方程

王　勇，阮　奇
（福州大学化学化工学院，福州　350002）

［摘要］ 管内湍动流体摩擦因数是雷诺数和相对粗糙度的二元非线性函数，由 Colebrook 隐式方程计算摩擦因数要用迭代的方法求解，很不方便。为了得到形式简单、精度高的计算摩擦因数的显式方程，提出了二元非线性多项式智能拟合法。该法将二元非线性多项式转化成多元线性多项式并建立线性最小二乘法标准矩阵，用遗传算法结合矩阵法对多项式的项数、项型式项指数及项系数进行搜索得到最优的拟合函数式。用该法拟合了 Colebrook 方程解的数据，得到一个计算管内湍动流体摩擦因数的显式新方程。在雷诺数 $3\,000 \leqslant Re \leqslant 10^8$、相对粗糙度 $0 \leqslant e/d \leqslant 0.05$ 的范围内，该方程计算结果与 Colebrook 方程的平均偏差为 0.5%，最大偏差不超过 1.8%，与实验数据偏差为 2.3%。新方程具有形式简单、精度高、适用范围广的优点，且便于简化成光滑管或阻力平方区等情况下的计算摩擦因数的方程。

［关键词］ 湍动流动；摩擦因数；Colebrook 隐式方程；遗传算法；智能拟合法；显式方程

［中图分类号］ TQ022.1；TQ021　**［文献标识码］** A　**［文章编号］** 1009－1742（2006）06－0083－06

1　引言

在化工过程的管路计算中，通常需要知道摩擦因数并由 Fanning 公式计算流体流动过程中的机械能损失，从而为流体输送机械的选型提供依据。工程上流体在粗糙管内的流动大多数是湍流流动，其摩擦因数 λ 是雷诺数 Re 和相对粗糙度 e/d 的二元非线性函数。Colebrook 方程[1]：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{e/d}{3.71} + \frac{2.52}{Re\sqrt{\lambda}}\right) \tag{1}$$

是得到工程界普遍认可、适用范围广（$Re = 4 \times 10^3 \sim 10^8, e/d = 5 \times 10^{-2} \sim 10^{-6}$）、精度高（与 Murin 等人实验数据的平均相对误差在 5% 以内[2]）的关于 λ 与 Re 及 e/d 之间的函数关系表达式，但该方程是隐式方程，计算摩擦因数要用迭代或试差的方法求解，很不方便。Moody 把 Colebrook 方程绘制成 Moody 摩擦因数图[3]，该图直观明了，使用方便，但查图数据误差大。

随着计算机辅助设计 CAD 技术在化工领域的广泛应用，用方程的形式来表达过程状态变量随状态条件的连续变化显得更为重要。为了克服 Colbrook 方程使用不方便的缺点，许多研究者提出了多种形式的摩擦因数显式方程[2,4~14]。在上述方程中，Altshul 方程[5]：

$$\lambda = 0.11\left(\frac{e}{d} + \frac{68}{Re}\right)^{0.25} \tag{2}$$

形式最简单。对光滑管（相对粗糙度 $e/d = 0$），该方程简化为著名的 Blasius 方程[15]：

$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \tag{3}$$

但 Altshul 方程对 Colebrook 方程的总体平均误差高达 8.2%[13]。文献［15］将 Altshul 方程中的指数 0.25 改为 0.23、系数 0.11 改为 0.1，扩大了该方程的使用范围，并得到了该方程适用于光滑管及阻力平方区（λ 与 Re 无关）的两个简化式。其余方程[2,4,6~14]均保留了 Colebrook 方程中的对数项，形

［收稿日期］　2005－07－18
［基金项目］　福建省教育厅科技基金资助项目（JB03048）
［作者简介］　王　勇（1980－），男，浙江台州市人，福州大学化工学院研究生

式复杂。李春喜和黄大铿方程[13]：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{e/d}{3.7} - \frac{4.52}{Re}\lg\left(0.135\frac{e}{d} + \frac{6.5}{Re}\right)\right) \quad (4)$$

是其中形式相对简单、精度高（与 Colebrook 方程的总平均相对偏差为 0.07%[13]）的一个方程。Romeo 等人的方程[14]：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{e/d}{3.706\,5} - \frac{5.027\,2}{Re}\lg\left(\frac{e/d}{3.827} - \frac{4.567}{Re}\lg\left(\left(\frac{e/d}{7.791\,8}\right)^{0.992\,4} + \left(\frac{5.332\,6}{208.815 + Re}\right)^{0.934\,5}\right)\right)\right) \quad (5)$$

是其中形式最复杂、精度最高（与 Colebrook 方程的平均相对偏差小于 0.05%[14]）。但这些方程均不易于简化成适用于光滑管或阻力平方区的方程。

笔者对先前提出的多元非线性多项式智能拟合法稍加改进[16]，将智能拟合法应用于拟合 Colebrook 方程解的结果，希望得到一个形式简单、精度高，且便于简化成适用于光滑管或阻力平方区的计算管内湍动流体摩擦因数的显式新方程。

2 智能拟合法

理论上，任何复杂的多元非线性函数均可用拟合式来逼近。然而，多元非线性拟合时如何筛选形式简单、精度高的最适宜拟合函数表达式是一项重要但又困难的工作。目前常用的多元非线性多项式拟合方法主要有[17]：高斯－牛顿法、正交多项式回归法、阻尼最小二乘法、最速下降法、共轭梯度法、变尺度法、单纯型法等。这些常用的拟合方法存在以下两个问题：1）它们大部分都是对固定形式的多项式的拟合，多项式的项数及形式均由人工凭经验选定，要找到最适宜的拟合函数表达式是及其困难的；2）它们大多是对 $\sum_{i=1}^{n} x^i (i = 0,1,2,\cdots,n)$ 形常规幂多项式的拟合，采用这种单一形式多项式拟合往往需要很多项才能达到要求的精度，特别对于多元非线性多项式更是如此，项数将会随着方次的升高成几何级数增加。如：二元多项式 $\sum_{i=0}^{n_1}\sum_{j=0}^{n_2} a_{ij}x^i y^j$，如果最高次 n_1，n_2 都取 8，拟合出来的项数就会有 81 个，非常庞大，不便使用。笔者在文献［16］中提出的一种多元非线性多项式新拟合法——智能拟合法，可以较好地解决传统的多元非线性拟合方法存在的问题。

2.1 二元非线性多项式线性化处理及参数求解

摩擦因数 λ 是雷诺数 Re 和相对粗糙度 e/d 的二元非线性函数，在拟合前这种函数的适宜表达式（包括项数、项形式、项系数和指数）是未知的。为了拟合得到这种非线性函数的最适宜表达式，首先必须构造非线性多项式的形式。为此，令 $x = e/d, y = Re$。考虑的常数项及具有整型次方的项的形式主要有：b_0，$\sum_{i=1}^{n_1}\sum_{j=1}^{n_2} a_{ij}x^i y^j$，$\sum_{i=1}^{n_3} a_i x^i$，$\sum_{i=1}^{n_4} a_i y^i$，$\sum_{i=1}^{n_5}\sum_{j=1}^{n_6} a_{ij}[\lg(x)]^i[\lg(y)]^j, \cdots, \sum_{i=1}^{n_{24}} a_i y^{-i}$ 等，共有 16 种形式的项（其余未列出的项形式详见文献［16］）。笔者另外考虑了具有实型次方的项如 x^{d_1}，y^{d_2}，$x^{d_3}y^{d_4}$，$(x + d_5/y)^{d_6}$ 等共 4 种形式。上述两大类型项共有 20 种项形式，各项中 x，y 为待拟合函数的自变量，b_0 是常数项，$n_k (k = 1,2,3,\cdots,24)$ 为各种形式项的整型最高次方，$d_l (l = 1,2,\cdots,6)$ 为实型参数。其次，在给定项数、项形式、项指数时须求出项系数。矩阵法是拟合多元线性多项式的常用算法[17]，它用最小二乘法推导得出具有最小误差的多项式拟合标准矩阵，通过解矩阵直接求出误差最小的多项式各项系数，没有其他一些方法的复杂递推或迭代过程，算法简单高效。由于构造的项形式是二元非线性多项式，为求出项系数，将二元非线形多项式作线性化处理后亦可用矩阵法求解二元非线性多项式拟合问题[16]。把前述的二元非线性项看成一个变量和一个常数的乘积，即可转化成多元线型多项式。如对于二元高次多项式 $\sum_{i=1}^{n_1}\sum_{j=1}^{n_2} a_{ij}x^i y^j$，令 $b_{(i-1)\times n_2+j} = a_{ij}$ 和 $X_{(i-1)\times n_2+j} = x^i y^j$，即将其转化为线性项，对其它形式的非线性项亦可作类似的处理将它们转化为线性项。再令 $Y = \lambda$，则摩擦因数 λ 的二元非线性方程可写成如下的 n 元线性方程：

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \cdots + b_j X_j + \cdots + b_n X_n \quad (6)$$

用最小二乘法可求得方程（6）的标准矩阵[16,17]为

$$\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_j \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \sum X_{i0}X_{i0} & \sum X_{i0}X_{i1} & \cdots & \sum X_{i0}X_{ij} & \cdots & \sum X_{i0}X_{in} \\ \sum X_{i1}X_{i0} & \sum X_{i1}X_{i1} & \cdots & \sum X_{i1}X_{ij} & \cdots & \sum X_{i1}X_{in} \\ \sum X_{i2}X_{i0} & \sum X_{i2}X_{i1} & \cdots & \sum X_{i2}X_{ij} & \cdots & \sum X_{i2}X_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \sum X_{ij}X_{i0} & \sum X_{ij}X_{i1} & \cdots & \sum X_{ij}X_{ij} & \cdots & \sum X_{ij}X_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \sum X_{in}X_{i0} & \sum X_{in}X_{i1} & \cdots & \sum X_{in}X_{ij} & \cdots & \sum X_{in}X_{in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum X_{i0}Y_i \\ \sum X_{i1}Y_i \\ \sum X_{i2}Y_i \\ \vdots \\ \sum X_{ij}Y_i \\ \vdots \\ \sum X_{in}Y_i \end{pmatrix} \tag{7}$$

将解 Colebrook 方程得到的 λ，Re，e/d 之间的数据处理成 m 组数据 X_{ij} 和 Y_i（$j=1$，2，…，n，代表自变量代号；$i=0$，1，2，…，m，代表数据组号）代人标准矩阵方程（7）并解之，即可得到要拟合的项系数 $b_j(j=0,1,2,\cdots,n)$。

上述方法只能求出二元非线性多项式在给定项数、项形式、项指数时与待拟合数据之间“误差最小”的项系数，此“误差最小”只是局部最优，并非全局最优。要得到全局最优，即得到与待拟合数据之间误差最小的最适宜拟合函数表达式（包括项数、项形式、项指数和系数），必须用下面介绍的遗传算法实现。

2.2　用遗传算法实现智能拟合

由上述模型可知，决定拟合函数表达式的项数、项形式和项指数的是 24 个整型变量（$n_1,n_2,\cdots,n_{24}$）和 6 个实型变量（$d_1,d_2,\cdots,d_6$），共 30 个变量，称之为控制变量。若能用一种最优化方法搜索这 30 个控制变量的值并结合矩阵法求项系数，根据拟合式与待拟合数据之间的误差大小决定项的取舍，最终就能搜索得到全局最优的最适宜拟合函数表达式，实现智能拟合。然而，面对如此庞大的变量阵容，用普通的优化算法是很难实现智能拟合的。遗传算法是一种新兴的仿生算法，具有快速寻优和全局优化的特点，笔者在文献［16］中用杰出者选择遗传算法实现了具有整数方次的二元非线性多项式的智能拟合（该拟合问题的控制变量是前述的 24 个整型变量），效果很好，故作者在整数次方项的搜索和取舍问题以及选择、交叉、变异、整型二进制编码等策略方面均沿用文献［16］中的方法，下面着重说明具有实数方次项的搜索、取舍及实型变量的编码等问题。

对具有实数次方的项，一方面要搜索项内参数，另一方面要控制项的取舍问题，不能像文献［16］中控制整数次方项那样处理，对于每一个实参项类型都要有一个对应的整型变量来专门控制项的取舍。项的取舍须考虑取舍概率问题。舍弃率太大会导致算法不稳定，收敛困难；舍弃率太小会使得该项成为整个模型的累赘，容易陷入局部最优。整数次方的项的取舍变量是整型参数（最高方次 n_k）本身，用 3 位二进制表示，值取 0 时舍弃该项，舍弃率为 1/8。为与整型项协调统一和方便控制，具有实参的项的舍弃率也取 1/8 较好，实参项的控制变量取［0，7］范围的整数（用 3 位二进制编码），值取 0 时舍弃该项。4 个具有实型次方的项形式，得加 4 个整型控制变量（v_1,v_2,v_3,v_4）来控制实参项的取舍问题。

实型变量和整型变量的编码有所不同，也采用二进制编码的方法，每个变量用 20 位二进制表示，用 6×20 的二维数组表示这 6 个实型变量的代码。变量与代码的对应关系可用式（8）表示。

$$d_i = a_i + \left(\frac{b_i - a_i}{2^{20}-1}\right)\sum_{j=1}^{20} S_{i,j}2^{j-1} \tag{8}$$

式中，d_i 为实型变量；$S_{i,j}$ 是二进制代码，0 或 1；i 为变量序号，$k_i=1,2,\cdots,6$；j 是代码位号，$j=1,2,\cdots,20$。a_i、b_i 为变量的取值范围，其中 $a_i<d_i<b_i$。

初始种群一般随机产生，但产生的概率可根据变量特征人为选定。根据变量特征，取 1 和 0 的产生概率为 1∶3。根据经验，种群规模取 80 个，其中每代新产生 79 个个体，1 个是上一代保留下来的最佳个体。文献［16］中采用均匀交叉法，均匀交叉法易于保持个体的多样性，对于大量短代码变量的寻优，处理简单、效果好。单点交叉每对变量的交叉点只有一个，易于保留父个体的优秀模式，有利于长代码的交叉。采用 2 种交叉法相结合的方法，整型变量对应的代码采用随机交叉，交叉率取 1/3；实型变量对应的代码采用单点交叉法，交叉概率取 3/4。变异概率是控制进化历程的重要参数，

太小会使算法过早收敛而出现早熟现象，太大则降低算法效率，收敛慢，根据经验取 0.02。

3 管内湍动流体摩擦因数的显式方程

从 Colebrook 方程适用范围内（$Re = 4 \times 10^3 \sim 10^8, e/d = 5 \times 10^{-2} \sim 10^{-6}$）均匀选取 400 个点用 Colebrook 方程算得摩擦因数值，应用上述智能拟合法进行拟合，得到摩擦因数计算的显式新方程：

$$\lambda = 0.117\,6\left(\frac{e}{d} + \frac{73.89}{Re}\right)^{0.306} + 0.403\,4\,\frac{e}{d} + 0.005 \qquad (9)$$

适用于 Moody 摩擦系数图（该图是根据 Colebrook 方程绘制的[3]）$4 \times 10^3 \leqslant Re \leqslant 1 \times 10^8$ 的整个范围，包括湍流区、完全湍流区、光滑管（$e/d = 0$）；适用的相对粗糙度范围为：$0 \leqslant e/d \leqslant 0.05$。式（9）对 Moody 图的上述范围的平均误差为 0.5%，最大误差小于 2%。对于光滑管（$e/d = 0$），式（9）可简化为式（10）；对于完全湍流区（Re 对 λ 影响可以忽略），式（9）可简化为式（11）。

$$\lambda = \frac{0.438\,6}{Re^{0.306}} + 0.005 \qquad (10)$$

$$\lambda = 0.117\,6\left(\frac{e}{d}\right)^{0.306} + 0.403\,4\left(\frac{e}{d}\right) + 0.005 \qquad (11)$$

将文献［2］摩擦系数 λ 的实验值与各公式计算的 λ 值对照得表 1，对其进行误差分析见表 2。由表 2 可知，λ 的计算值对实验值的偏差，式（2）

表 1　有关公式 λ 的计算值与实验值对照表

Table 1　Comparison between the experimental data and the results calculated by formulas for λ

e/d	Re	λ（实验值）	λ（计算值）				
			式（1）	式（2）	式（4）	式（5）	式（9）
0.01	4 000	0.046 2	0.049 07	0.043 57	0.049 17	0.049 11	0.048 61
0.001	4 000	0.040 8	0.040 94	0.039 69	0.040 96	0.040 96	0.040 64
0.000 1	4 000	0.040 8	0.040 04	0.039 23	0.040 05	0.040 07	0.039 77
0.000 01	4 000	0.040 8	0.039 95	0.039 18	0.039 96	0.039 98	0.039 68
0.000 001	4 000	0.040 8	0.039 94	0.039 18	0.039 95	0.039 97	0.039 67
0.01	10 000	0.041 5	0.043 10	0.039 07	0.043 18	0.043 13	0.043 07
0.001	10 000	0.031 5	0.032 40	0.032 75	0.032 44	0.032 42	0.032 63
0.000 1	10 000	0.031 5	0.031 06	0.031 84	0.031 11	0.031 08	0.031 34
0.000 01	10 000	0.031 5	0.030 92	0.031 74	0.030 98	0.030 94	0.031 21
0.000 001	10 000	0.031 5	0.030 91	0.031 73	0.030 97	0.030 93	0.031 20
0.01	100 000	0.037 8	0.038 45	0.035 20	0.038 51	0.038 49	0.038 40
0.001	100 000	0.021 1	0.022 17	0.023 00	0.022 16	0.022 18	0.022 23
0.000 1	100 000	0.018 5	0.018 52	0.019 28	0.018 54	0.018 53	0.018 50
0.000 01	100 000	0.018	0.018 05	0.018 75	0.018 09	0.018 06	0.018 01
0.000 001	100 000	0.017 6	0.018 01	0.018 69	0.018 04	0.018 01	0.017 95
0.01	1 000 000	0.037 8	0.037 91	0.034 73	0.037 97	0.037 94	0.037 83
0.001	1 000 000	0.019 7	0.019 93	0.020 73	0.019 94	0.019 94	0.019 92
0.000 1	1 000 000	0.013	0.013 44	0.013 55	0.013 42	0.013 44	0.013 36
0.000 01	1 000 000	0.012 1	0.011 87	0.011 35	0.011 87	0.011 88	0.011 66
0.01	10 000 000	0.037 8	0.037 86	0.034 68	0.037 91	0.037 89	0.037 78
0.001	10 000 000	0.019 7	0.019 65	0.020 45	0.019 67	0.019 66	0.019 64
0.000 1	10 000 000	0.012	0.012 16	0.012 21	0.012 16	0.012 16	0.012 22
0.000 01	10 000 000	0.010 9	0.008 99	0.007 98	0.008 98	0.009 00	0.009 11
0.01	100 000 000	0.037 8	0.037 85	0.034 67	0.037 90	0.037 88	0.037 77
0.001	100 000 000	0.019 7	0.019 62	0.020 42	0.019 64	0.019 63	0.019 61
0.000 1	100 000 000	0.012	0.011 99	0.012 04	0.012 00	0.012 00	0.012 08

表 2　有关 λ 公式计算值对实验值及 Colebrook 方程计算值的误差分析表

Table 2　Deviation of the formulas for λ to the experimental data and the Colebrook equation

常用公式	式 (1)	式 (2)	式 (4)	式 (5)	式 (9)
对实验值的平均相对偏差/%	2.33	5.0	2.36	2.34	2.30
对实验值的最大相对偏差/%	17.48	35.39	17.65	17.45	16.36
对 Colebrook 公式的平均相对偏差/%	0	4.7	0.11	0.06	0.5
对 Colebrook 公式的最大相对偏差/%	0	21.7	0.2	0.09	1.8

最大，式 (1)，式 (4) 和式 (5) 居中，新方程式 (9) 最小。由表 2 还可知，对 Colebrook 方程的偏差，式 (2) 最大，但其形式最简单；式 (5) 最小，但其形式最复杂；式 (4) 也很小，其形式亦很复杂；式 (9) 较小，其形式亦较简单。由于 Colebrook 方程是个半经验式，对实验数据存在较大偏差，所以式 (4)，式 (5) 对其偏差虽然极小意义却不大，且式 (4)，式 (5) 形式复杂，使用不便，不能简化为完全湍流区及光滑管的计算公式。式 (2) 虽然形式简单，但其对实验数据及 Colebrook 方程的偏差很大，精度低，不能满足工程计算的要求。式 (9) 对实验数据及 Colebrook 方程的偏差均很小，精度高，能满足工程计算的要求，且其形式简单、使用方便、易于简化成光滑管的式 (10) 及完全湍流区的式 (11)，故式 (9) 是一个精度高、形式简单的计算管内湍动流体摩擦因数的显式新方程。

4　结论

1) 智能拟合法是一种新的非线性拟合法，具有可以自动搜索最适宜拟合函数表达式、拟合精度高、拟合速度快等优点，可以广泛应用于解决科学与工程领域的众多二元非线性拟合问题；

2) 与前人获得计算摩擦因数显式方程的途径不同，笔者应用智能拟合法拟合 Colebrook 隐式方程得到形式简单、精度高、适用范围广的计算管内湍动流体摩擦因数的显式新方程，使用方便；

3) 新方程对实验数据的相对偏差为 2.3%，可与 Colebrook 方程相媲美，完全满足工程设计计算需要，对 Colebrook 方程的偏差为 0.5%，完全可以作为 Colebrook 方程代替公式；

参考文献

[1] Colebrook C F. Turbulent flow in pipe with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws[J]. J Inst Civil Engrs, 1938 ~ 1939, 11: 133 ~ 156

[2] Shacham M. Comments on 'An explicit equation for friction factor in pipe'[J]. IEC Fundam, 1980, 19: 228 ~ 229

[3] Moody L F. Friction factors for pipe flow [J]. Trans ASME, 1944, 66(8): 671 ~ 684

[4] Churchill S W. Empirical expressions for the shear stress in turbulent flow in commercial pipe[J]. AIChE J, 1973, 19(2): 375 ~ 376

[5] Altshul A D, Kiselev P G. Hydraulics and Aerodynamics [M]. 2nd ed. Moscow: Strojizdat, 1975: 166 ~ 196

[6] Churchill S W. Friction factor equations spans all fluid-flow regimes [J]. Chem Eng, 1977, 84(24): 91 ~ 92

[7] Chen N H. An explicit equation for friction factor in pipe [J]. IEC Foundam, 1979, 18(3): 296 ~ 297

[8] Round G F. An explicit approximation for the friction factor Reynolds number relation for rough and smooth pipe [J]. Can J Chem Eng, 1980, 58(1): 122 ~ 123

[9] Barr D I H. Solutions of the Colebrook-White Function for Resistance to Uniform Turbulent Flow [M]. Proc Inst Civil Engrs, Part 2, 1981, 71

[10] Zigrang D J, Sylvester N D. Explicit approximations to the Colebrook's friction factor [J]. AICHE J, 1982, 28(3): 514 ~ 515

[11] Haaland S E. Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow [J]. Trans ASME JFE, 1983, 105: 89

[12] Manadili G. Replace implicit equations with signomial functions [J]. Chem Eng, 1997, 104(8): 129 ~ 132

[13] 李春喜, 黄大铿. 圆形直管内湍动流体的摩擦因数计算[J]. 北京化工大学学报, 2000, 27(24): 19 ~ 21

[14] Romeo E, Royo C, Monzon A. Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes [J]. Chem Eng J, 2002, 86: 369 ~ 374

[15] 谭天恩, 麦本熙, 丁惠华. 化工原理[M], 上册. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 1999

[16] 王　勇, 阮　奇. 多元非线性多项式智能拟合法及其应用研究[J]. 计算机与应用化学, 2004, 21(1): 157 ~ 162

[17] 角仕云, 刘丽亚. 实用科学与工程计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 178 ~ 204

A New Explicit Equation for Calculating the Friction Factor for the Turbulent Flow in Pipes

Wang Yong, Ruan Qi

(*Department of Chemical Engineering*, *Fuzhou University*, *Fuzhou* 350002, *China*)

[**Abstract**] The friction factor for the turbulent flow in pipes is the binary nonlinear function of Reynolds number and relative roughness. Calculating friction factor by implicit Colebrook equation have to use iterative algorithm, which is discommodious. The intelligent fitting method for binary nonlinear polynomials was presented in order to obtain a high precise and simple form explicit equation for calculating the friction factor. The binary nonlinear polynomial was firstly transformed into multivariate linear polynomials, and the least squares standard matrix was established. Then the number, the form, the index and the coefficient of polynomials term were searched to obtain the optimum function by genetic algorithms combined with matrix method. Fitting the data calculated by Colebrook equation with the above method, a new explicit equation for calculating the friction factor for the turbulent flow in pipes was obtained. The new equation can reproduce the Colebrook equation with average deviation of 0.5% and the maximum deviation of 1.8% in the range of Reynolds number being $3\ 000 \leqslant Re \leqslant 10^8$ and relative roughness being $0 \leqslant e/d \leqslant 0.05$, and it has an average deviation of 2.3% to the experimental data. The new equation has the advantages such as simple form, high precise, wide range of application, and can be simplified to the equation for calculating the friction factor in the range of smooth pipe and the rough region easily.

[**Key words**] turbulent flow; friction factor; implicit Colebrook equation; genetic algorithms; intelligent fitting method; explicit equation

---

(上接第 77 页)

[**Abstract**] To solve the problem of slope caused by blasting vibration damage at a certain iron mine, YBJ-1 blasting vibration seismometer and CD-1 velocity-meter were used to observe the velocity of particle caused by blasting according to the rock properties and the scale of blasting. The spreading law of blasting wave in the iron mine were acquired to propose an effective method of controlling the maximum blasting vibration velocity, which will keep slope close to blasting area safe from blasting vibration damage. The vibration velocity was proved to be relevant to explosive quantity and the location of testing spot. The magnifying effect of velocity along the height of slope was proved to decline with the relative height increasing. In terms of control of the maximum explosive quantity at the same time and the millisecond delay interval, blasting vibration has been reduced at the ratio of 23.6%. 15 ms delay interval was proved to be rational through the experiments in an open pit.

[**Key words**] open pit; blasting vibration; height effects, maximum explosive quantity at the same time; millisecond delay interval interference