华南理工大学学报（自然科学版）
第20卷第1期 Journal of South China University of Technology Vol.20 No.1
1992年3月 (Natural Science) March 1992

流体输送管径优化设计

程 达 芳

（华南理工大学化学工程系）

提 要 本文提出了一种计算工艺配管的最佳法，它是以流体输送的操作动力费与管线设备费之和作为目标函数，关联出使其目标函数为最小的最佳管径的数学模型，并编制了相应微型计算机程序，通过举例对本文提出最佳法与普通计算法进行了㶲分析与对比。显然，最佳法体现出明显经济效益和实用价值。

关键词：流体输送；数学模型；优化设计；/最佳管径；㶲分析

流体输送的管线投资和操作动力费在工厂的生产设备中占有相当大比例，甚至有的工厂其消耗电能的70%都用于流体输送，而过去管道直径的设计通常是根据生产所要求的流体流量，由手册或教材所提供的很宽的速度范围来确定管径，没有进行各种条件下技术经济分析，因此就不能使工艺配管设计最佳化，造成一定的经济损失。特别是随着能源日益紧张，如何考虑流体输送的经济问题日益被人们重视，因此，研究流体输送经济性有很大的价值。本文提出了在给定的操作条件下，以设备费（包括管道投资、安装、维修费、折旧费）和操作动力费之和为最小，来确定最经济管径。通过举例和㶲对比分析，从而体现本文提出的设计法有明显的经济效益和实用价值。

1 最佳管径D_{oi}数学模型的建立

在管道设计中一个实际需要考虑的问题，就是在特定的流量和泵所允许能耗下，确定最佳管径，我们知管径大小对设备费和操作动力费有影响，当管径增大时，设备费增大，而在一定流量下，其相应摩擦阻力损失减小，泵所消耗动力费减小，即操作动力费减小，反之亦然。因此，必有一最佳管径使设备费和操作动力费之和为最小，如图1所示。

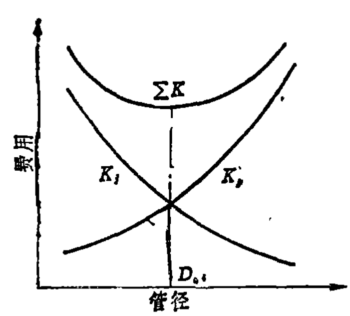

图1 最佳管径

K_p—设备费，K_i—动力费

ΣK—总费用，D_{oi}—最佳管径

就输送管道而言：

此文中国图书资料分类号：N 39

来稿日期：1991第1月26日。

总费用$\sum K$＝管道投资费A＋安装维修折旧费B＋工艺需要能位费C＋操作动力费K_j（由于流体摩擦引起流体阻力损失功耗费），即

$$\text{总费用}\sum K = A + B + C + K_j$$

由于工艺需要能位，如流量、压力、温度等是由工艺所决定的，故要使总费用最小，就应使$A+B+K_j$之值为最小（当令$A+B=K_p$）即使K_p+K_j之值为最小。当管径确定后，K_p之值也就确定，但是管径确定依赖于摩擦损失费与管径内在矛盾。

按成本公式：$A=W\cdot q$；$B=m\cdot W\cdot q$若考虑月利息i，进行动态分析，N个月后本利和为：

$$A+B=(1+m)Wq(1+i)^N=K_p$$

而 $$W=\frac{\pi}{4}(D_0^2-D_i^2)\cdot 1\cdot \rho_0=\frac{\pi}{4}\cdot\rho_0(4D_i\delta+4\delta^2)=\pi\rho_0(D_i\delta+\delta^2)$$

∴ $$K_p=(1+m)\pi\rho_0(D_i\delta+\delta^2)q(1+i)^N \tag{1}$$

而操作动力费，取决于操作时间Y，流体输送泵所消耗的功耗N(kw)，单位能量的价格C_e元/kw·小时即：

$$K_j=YNC_e \tag{2}$$

从流体力学可知：

$$N=\frac{HQ\rho g}{1\,000\eta}\ (\mathrm{kw}) \tag{3}$$

∵ $$W_m=Q\rho;\quad Q=\frac{W_m}{\rho};\quad H=\frac{\Delta p}{\rho g}$$

将Q和H代入（3）式得：

$$K_j=\frac{W_m\Delta pYC_e}{1\,000\rho\eta} \tag{4}$$

$$\frac{\Delta p}{\gamma}=\lambda\frac{L}{D_i}\frac{u^2}{2g}$$

取$L=1$（以单位管长的压降计算）

∴ $$\Delta p=\frac{8\lambda W_m^2}{\pi^2D_i^5\rho} \tag{5}$$

对于雷诺数$R_e=4\,000\sim2\times10^7$的范围内$\lambda$可按下式计算③

$$\lambda=\frac{0.16}{R_e^{0.16}} \tag{6}$$

$$R_e=\frac{D_iu\rho}{\mu}=\frac{D_iG}{\mu} \tag{7}$$

$$G=\frac{W_m}{\frac{\pi}{4}D_i^2}=\frac{4W_m}{\pi D_i^2}$$

$$R_e=\frac{4W_m}{\pi\mu D_i} \tag{8}$$

$$\lambda=0.154\left(\frac{D_i\mu}{W_m}\right)^{0.16} \tag{9}$$

将（9）式代入（5）式再代入（4）得：

$$K_j=0.125\frac{W_m^{2.84}\mu^{0.16}YC_e}{D_i^{4.84}\rho^2\eta 1\,000} \tag{10}$$

总费用$\sum K=K_p+K_j$ 即：

$$\sum K=(1+m)\pi\rho_0(D_i\delta+\delta^2)q(1+N)^N+0.125\frac{W_m^{2.84}\mu^{0.16}YC_e}{D_i^{4.84}\rho^2\eta 1\,000} \tag{11}$$

要求最佳管径D_{0i}，必使$\sum K$极小，就是$\sum K$对D_i求导为零，除D_i外将其它变量视为常量，对D_i求导为0得：

$$(1+m)q(1+i)^N\pi\rho_0\delta=\frac{0.605W_m^{2.84}\mu^{0.16}YC_e}{D_i^{5.84}\rho^2\eta 1\,000}$$

$$D_{0i}^{5.84}=\frac{0.605W_m^{2.84}\mu^{0.16}YC_e}{1\,000\pi(1+m)q(1+i)^N\pi\rho_0\delta\rho^2\eta}$$

$$D_{0i}=0.231\left(\frac{YC_e}{(1+m)q(1+i)^N\rho_0\delta\eta}\right)^{0.17}\frac{\mu^{0.027}W_m^{0.48}}{\rho^{0.34}} \tag{12}$$

对于一般被输送流体其粘度范围是从0.02Cp（空气）至30Cp（油），而$\mu^{0.027}$变化很小，则上式可令

$$K_1=0.231\left(\frac{YC_e}{(1+m)q(1+i)^N\rho_0\delta\eta}\right)^{0.17}\mu^{0.027}=\text{constant}$$

则最佳管径D_{0i}可写为最简单形式：

$$D_{0i}=K_1\frac{W_m^{0.486}}{\rho^{0.34}} \tag{13}$$

上式适用被输送流体在管内处于湍流状态下，且被输送管道保温良好，忽略热损失影响。如果流体处于滞流状态可用同样方法推导

对于滞流：

$$\lambda=\frac{64}{R_e}=\frac{16\pi\mu D_i}{W_m}$$

将λ代入（5）式再代入（4）式得：

$$K_j=\frac{128W_m^2YC_e\mu}{\pi\rho^2D_i^4\eta 1\,000}$$

$$\sum K=K_p+K_j=(1+m)\pi\rho_0(D_0\delta+\delta^2)q(1+i)^N+\frac{128W_m^2YC_e\mu}{\pi\rho^2D_i^4\eta 1\,000}$$

$$\frac{d\sum K}{d\sum D_i}=(1+m)\pi\rho_0\delta q(1+i)^N-\frac{512W_m^2YC_e\mu}{\pi\rho^2D_i^5\eta 1\,000}=0$$

$$D_{0i}=0.553\left(\frac{YC_e}{(1+m)\rho_0\delta q(1+i)^N\eta}\right)^{0.2}\left(\frac{W_m^2\mu}{\rho^2}\right)^{0.2} \qquad (14)$$

令 $$K_2=0.553\left(\frac{YC_e}{(1+m)(1+i)^N\rho_0\rho\delta\eta}\right)^{0.2}$$

$$D_{0i}=K_2\left(\frac{W_m^2\mu}{\rho^2}\right)^{0.2} \qquad (15)$$

在管道设计中，管径大小是未知，则雷诺数未知，无法判断采用（12）式还是采用（14）式来计算D_{0i}，可采用如下方法判断：

对于湍流，我们可知 $R_e=\dfrac{D_iu\rho}{\mu}<2100$

即 $R_e=\dfrac{D_iG}{\mu}<2\,100$，而 $G=\dfrac{4W_m}{\pi D_i^2}$ 代入上式得：

$$R_e=\frac{4W_mD_i}{\pi D_i^2\mu}=\frac{4W_m}{\pi D_i\mu}\leqslant 2\,100 \qquad (16)$$

将 $D_{0i}=K_2\left(\dfrac{W_m^2\mu}{\rho^2}\right)^{0.2}$代入（16）式得：

$$W_m\leqslant 2.3\times10^5(K_2)^{1.67}\frac{\mu^2}{\rho^{0.67}}=W_{mcT}$$

如果$W_m>W_{mcT}$说明流体处于湍流，可采用（12）式计算D_{0i}

2　数学模拟计算举例

以下例题均按：

（1）安装及维修费为管材料费10%；

（2）年折旧费为管材费10%；

（3）无缝钢管单价 4元/kg；不锈钢管单价40元/kg；

（4）月利息 0.42%

（5）电能有效能单价 12.25×10^{-7} 元/$kg_f\cdot m$（每度电是0.45元单价计）；蒸汽有效能单价为5.23×10^{-7}元/$kg_f\cdot m$。

例1，某厂某车间要求工业供水量为 80000kg/h，泵的效率为70%，试选配适合流量之无缝钢管的管径。

解　已知量：

$\rho_0=7\,900kg/m^3$；$\rho=1\,000kg/m^3$；

$m=0.2$；$\delta=0.006m$；$C_e=0.45$元/度；

$W_m=80000kg/h$；$\eta=0.7$；$q=4$元/kg；

$\mu=0.001\,02$；$I=0.42\%=0.004\,2$；

其计算框图如下：

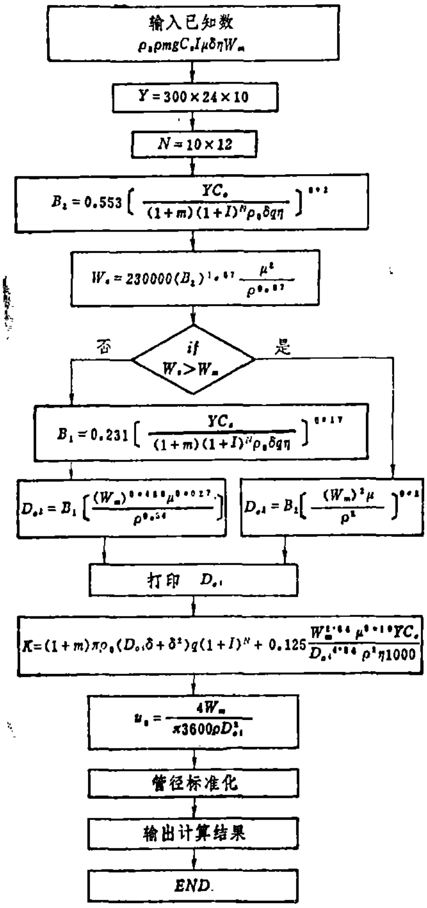

图2 计算框图

输出结果如表所示

输入的速度（M/S）	0.6	1	2	3				
计算的管径（M）	0.271	0.168	0.119	0.097				
输入的标准管径(M)	0.207	0.182	0.168	0.156	0.147	0.140	0.115	0.09
从标准管径计算的速度（M/S）	0.660	0.854	1.002	1.163	1.309	1.444	2.139	3.349
相应的总费用 元/米	260.353	238.238	229.277	225.284	225.912	229.646	290.922	597.898
与最小总费用的差值	35.069	12.954	3.993	0	0.629	4.362	65.637	372.614
最佳的管径（内径，M）				0.156				
最佳的速度（M/S）				1.163				
标准管径 ID/OD				.156/.168				
最佳管径下的最小费用 元/米				225.284				

从表可知最佳管径 $d_{oi}=0.156\text{m}$（标准管规格为 $\phi168\times6\text{mm}$，其相应最佳速度为 1.16m/s，最小总费用 225.3元/米。

如果我们按一般资料介绍的速度范围（1～3.5m/s）如果取管内流动速度为3.5m/s，得出管径为0.09m，选用标准管规格 $\phi102\times6\text{mm}$，其相应的总费用 597.9元/米与最佳管径下的总费用相差 372.6 元/米，若管线愈长，相差能耗费更多，从而可知在能源紧张情况下，以最优法进行配管设计是十分重要的。

例 2．求表压 $7\text{kg}_f/\text{cm}^2$，流量 2000kg/h 的饱和蒸汽的管径

解：已知量 $\rho=4.11\text{kg/m}^3$；

$\mu=16.2\times10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{S}$　　$W_m=2\,000\text{kg/h}$

其它的数与例一相同，通过计算机算出最佳管径为 $d_{oi}=0.207\text{m}$，标准管规格 $\phi219\times6\text{mm}$，其最小总费用 310.1元/米，如果按手册所提供适宜速度为 20～40m/s，如果取速度为 29m/s，得出其管径 $d_{内}=0.077$，标准管规格 $\phi89\times6\text{mm}$，其相应总费用 7 088.6 元/米，与最小费用相差 6 778.5元/米。假如某车间其管长为 400米，由于用此配管引起摩擦阻力损失（忽略局部阻力损失，此处只计算沿程阻力损失）其压降为 $2.79\text{kg}_f/\text{cm}^2$，致使车间蒸汽压降为 $5.21\text{kg}_f/\text{cm}^2$，其有效能损失 $\Delta\beta'$

$$\Delta\beta'=(\Delta H_1-T_0\,\Delta S_1)-(\Delta H_2-T_0\,\Delta S_2)$$
$$=(662.0-298\times1.593)-(657.6-298\times1.639)=18.11\text{kcal/kg}$$

按 $W_m=2000\text{kg}/$小时计，则10年损失有效能 $W_m\times\Delta\beta'\cdot Y=18.11\times2\times10^3\times24\times3000\times10=260.76\times10^7\text{kcal}$，通过计算估计蒸汽有效能单价 $\theta=4.12\times10^{-7}$元/kg·m，其价经值（经济损失）为 $W_m\cdot\Delta\beta\cdot\theta\cdot Y=260\cdot76\times10^7\times4.12\times10^{-7}\times427\approx46$万元。而按济配管，其压降计算为 $\Delta p=0.0\,192\text{kg}_f/\text{cm}^2$，其蒸汽压降只降为 $7.98\text{kg}_f/\text{cm}^2$（绝对压），其效能　$\Delta\beta''=(\Delta H_1-T_0\,\Delta S_1)-(\Delta H_2-T_0\,\Delta S_2)=(662.0-298\times1.593)-(661.8-298\times1.594)=0.2+0.2=0.4\text{kcal/kg}$

$$W_m\cdot\Delta\beta''\cdot Y=0.4\times2\times10^3\times24\times300\times10=5.76\times10^7\text{kcal}$$

其价值 $=5.76\times10^7\times4.12\times10^7\times427=10\,133.2$元

从上述计算可以看到按普通法配管设计为优法配管设计，其有效能损失价值的45.5倍，这样惊人的浪费，在工业上却没有被人们重视，十分令人遗憾！

3　结　　论

通过 D_{oi} 公式数学模型建立及上述例子剖析，可以看出采用优法设计管径，不仅可以进行各种条件下的经济分析，而且还定量地论述了各个因素内在矛盾关系，给人们以量的概念，从而完成了从量到质变的飞跃。特别是在国内外能源日益紧张情况下，研究流体输送经济性是十分重要的。本文提出的配管设计最佳化实用方便，并体现明显经济效益和实用价值。

公式符号说明：

K_p——设备费用　元／m

K_i——操作费用元／m

ΣK——总费用　元

δ——管壁厚度　m

L——管长度　m

u——流速　m/s

A——管道投资费 元
B——安装、维修费 元
$\Delta\beta$——流体输送有效能损失能费 元
D_0、D_i——分别管道的外、内径 m
D_{0i}——最佳管径的内径 m
ρ——被输送流体的密度 kg/m³
ρ_0——输送管材密度 kg/m³
Y——运转时间 小时
N——运转月数
u_0——最佳流速 m/s
η——泵的效率
i——月利息率
m——安装、维修占管材投资比率
q——单位管材重量价格 元/kg
W——单位长度管重 kg/m
ΔS——系统的熵变 kcal/kg·k
ΔH——系统的焓变 kcal/kg
T——环境温度 K

参考文献

〔1〕 Cheesman,a. p. "How To Optimize Gas pipiline Design by Computer" J. oil and Gas, 1971, 51, 69—75

〔2〕 T. F. Edgar and D. M. Himmelblau "Optimization of Chemical Processes" 1988

〔3〕 David S. Azbel Nicholas "Fluid Mechanics and Unit Operation" 1985

〔4〕 Happel, J. and D. G. Jordan, "Chemical process Economics" Second Edition 1976

OPTIMAL DESIGN OF PIPE DIAMETER FOR FLUID TRANSPORT

Cheng Dafang

(Dept. of Chem. Eng., South China Univ. of Tech.)

Abstract A design method for computing the optimal pipe diameter has been presented in this paper. Having defined the total cost of both equipment and operation power as objective function, the mathematical model of determining optimal pipe diameter has been established by minimizing the objective function. The corresponding computer pragram, at the same time, has been developed. An exergy analysis and comparative calculation between the optimal design and conventional method have been carried out through some examples.

It is obvious that the proposed optimization method can gain significant economic benefits and is of pratical value.

Key words: fluid transportation; mathematical model; optimal designs; /optimal pipe diameter; exergy analysis