

工程技术

流阻定律

一个定义流体阻力的简化系统

经多年研究，Lee 公司提出了用流阻（Lohm）系统来定义和度量流体流动阻力的方法。正如在电路中用“欧姆”来定义阻力一样，我们用流阻或（流体欧姆）来作为流体阻力的度量。

流阻定义为，在 80°F（27°C）、压差 25psi、流体为水的情况下，1Lohm 的流阻允许的流量为 100 加仑/分钟。由于阻力与流量成反比，根据定义：

Lohms=100/流量（加仑/分钟，水，25psi 压差）

1,000Lohms 允许的流量为 0.1 加仑/分钟（378.5mL/min）。

3785,500 Lohms 允许的流量为 1 mL/min。

通过使用Lohms，我们在定义系统的性能时就不用考虑流体的流量系数(C_d)、通道几何形状、物理尺寸或容差。任何流动结构的阻力都可以用流阻来表示，并通过实际的流量试验来确认。

通过流阻定律，系统设计人员可以为具有合适压力和流量的流体确定流阻要求。图 50 “流阻与单孔节流器孔径间的关系” 有助于将流阻与孔径和流量系数联系起来。

液流流阻定律

在液流流阻定律中，必须把几个变量关联起来。

I=流量

H=压差

V=黏度修正系数。该系数补偿了黏度和设备几何形状的相互作用，并且对每类设备都是唯一的。典型的节流孔和“V”的关系见图 49 “单个节流孔的粘度系数修正系数 V”。

S=比重

K=考虑度量单位后的常数，见表格“单位常数 K”

液流流阻定律如下：

$$Lohms = \frac{KV}{I} \sqrt{\frac{H}{S}}$$

$$I = \frac{KV}{Lohms} \sqrt{\frac{H}{S}}$$

$$H = \frac{Lohms^2 I^2 S}{K^2 V^2}$$

当在 25psi 的压差，温度为 80°F 的情况下用水进行试验，并且流量单位为加仑/分钟时，有如下关系：

$$Lohms=100/I \quad I=100/Lohms$$

注：1 对温度为 80°F 的水，V 和 S 都等于 1。

$$2 \text{ Lohms} = \frac{20}{C_v} = \frac{.67}{C_d d^2} C_v = 30 C_d d^2$$

式中:

d=节流孔直径 (英寸)

C_d=流量系数

C_v=流速系数

液流流阻定律----实例

例 1 问题: 一个节流器需要在 45°F 和 6psi 的压差下每分钟流过 0.1 加仑的流量, 流体为 50/50 乙烯/甘油/水的混合物 (比重为 1.07), 需要多大的流阻 (Lohms) 才能满足要求?

解:

1. 从图 61 查出运动黏度 $\nu = 5.0\text{cs}$
2. 根据 ν 和压差值从图 49 上查出黏度修正系数 $V = 0.87$
3. 从表 35 中选择单位常数 K
4. 计算所需的流阻值。

例 2. 问题: 在 45°F 的温度下, 50/50 乙烯/甘油/水的混合物 (比重为 1.07) 以每分钟 57mL 的流速流过流阻值为 1000Lohm 的节流器时, 产生的压降是多少?

解:

1. 从图 61 上查出运动黏度 $\nu = 5.0\text{cs}$
2. 根据经验确定初始值 $H = 4\text{psid}$ 。
3. 根据假定的 H 值从图 49 上的曲线上查出黏度修正系数 $V = 0.75$
4. 从表 35 中选择单位常数 K
5. 计算 ΔP 值。

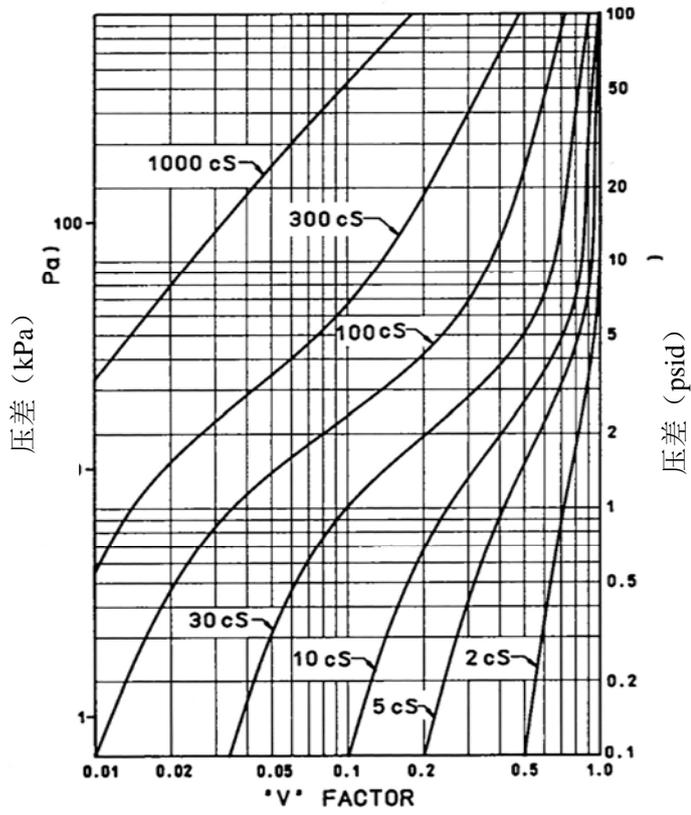
$$H = S \frac{I^2 L^2}{K^2 V^2} = 1.07 \cdot \left(\frac{57 \cdot 1000}{75700 \cdot .75} \right)^2 = 1.08 \text{ psid}$$

6. 如果需要, 进行实际试验找出正确的答案。

$$H = 2\text{psid} \quad V = 0.55$$

表 35 单位常数 K

流量 单位	psi	bar	压 力 kPa	单 位 N/m ²	单 位 Kg/cm ²	Ft.H ₂ O	mm/Hg
Gpm	20	76.2	7.62	0.24	75.4	13.2	2.78
L/min	75.7	288	28.8	0.91	285	50	10.5
mL/min	75700	288000	28800	911	285000	50000	10500
In ³ /min	4620	17600	1760	55.6	17400	3040	642
ft ³ /min	2.67	10.2	1.02	0.032	10	1.76	0.372

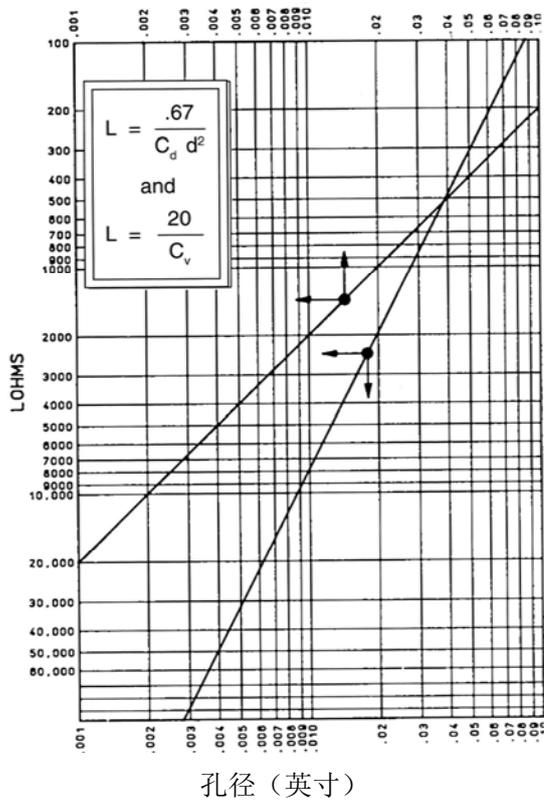


粘度系数修正系数 V

图 49 单个节流孔的粘度系数修正系数 V

流阻与单孔节流器孔径间的关系

流量系数 C_v



0.5" 孔径=3Lohms 0.25" 孔径=12Lohms
0.025" 孔径=1200Lohms

图 50 流阻与单孔节流器孔径间的关系

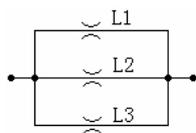
液流流阻-多个节流孔组合的两个方程

对并联的情况，总流阻值如下：

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_N}$$

请注意，以上关系与电路方程完全一致。

例子



$L_1=2000Lhoms$ $L_2=3000Lohms$ $L_3=5000Lohms$

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{2000} + \frac{1}{3000} + \frac{1}{5000} = .00103$$

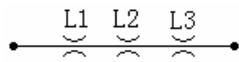
对串联的情况，

$$L_T = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 + \dots + L_N^2}$$

请注意，以上关系与电路方程不完全一致。差别是由于以下非线性引起的：

$$H = \frac{I^2 L^2}{K^2 V^2}$$

例子



$$L_T = \sqrt{2,000^2 + 3,000^2 + 5,000^2} = 6,164 \text{ Lohms}$$

当 $L_1=L_2=L_3$ 时， $L_T = L\sqrt{N}$

N=串联的节流孔的数量

通过：
$$D_T = \frac{D}{N^{1/4}}$$

D=实际节流孔的直径，相应的流阻= L_1

D_T =单个等效节流孔的直径，流阻为 L_T

气体和液体标定

无论是用于气体还是液体，大部分 EFS 产品都是按气体来标定的。如果要按气体标定的元件用于液体或将按液体标定的元件用于气体，那么以下因素需要加以考虑：

最多要留有±15%的余量，因为不同流体对节流孔的几何形状的反应是不同的。

对单个节流孔的情况，直接应用±15%的修正就行了。

对多个节流孔的情况，只有当气动压力比很小时 ($P_1/P_2 < 1.2$)，才能将气体应用和液体应用直接关联起来。当压力比较大时，气体流量会比按液体标定的结果最高高 30%。这是因为气体的可压缩性导致气体通过节流孔时压降分布不均匀。

注意：在没有考虑应用情况和修正精度的情况下，不要把按液体标定的节流孔用于气体，反之亦然。

流阻定律（气体）

正如欧姆用于电气工业一样，我们可以使用流体欧姆或“流阻（Lohm）”来量化液压或气动元件的节流效果。

当将流阻系统用于气动元件时，计算流阻值时要对流体在亚音速区域的效应以及气体的可压缩性进行修正。任何元件对流体的阻力都可以用流阻值来表示。

对气体，流阻定义为，在 59°F、上游压力为 90psia、排放到大气中，流体为氮气的情况下，100Lohm 的流阻允许的流量为 250 标准升/分钟。

标准条件

压力.....14.70psia(29.92 英寸汞柱)

温度.....59°F

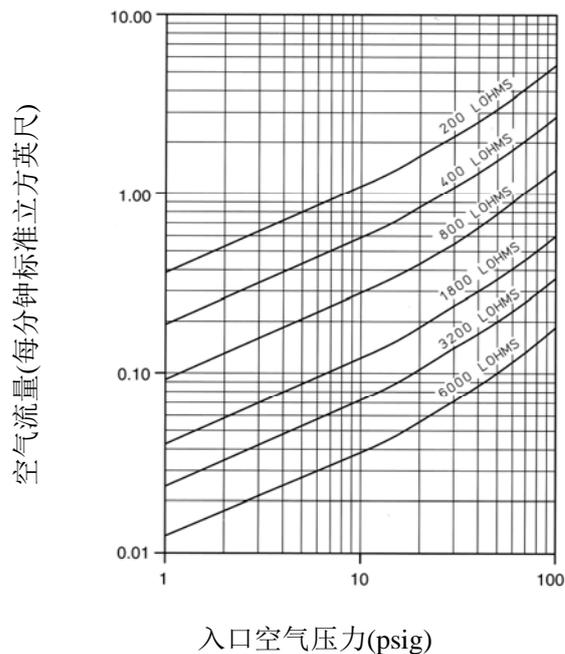


图 51 常温气体在不同流阻下的流量

流阻定律---气体

气体流阻定律将气体的流阻定义扩展到任何压力、任何温度和任何气体。流阻定律的方程之所以能适应于所有气体，是因为这些方程对不同气体、不同的流动区域和低压气体的不可压缩性进行了修正。

气体流阻定律如下：

$$Lohms = \frac{K f_T P_1}{Q} \quad (\text{超音速区域, 即 } P_1/P_2 \geq 1.9)$$

$$Lohms = \frac{2K f_T \sqrt{P_1 P_2}}{Q} \quad (\text{亚音速区域, 即 } P_1/P_2 < 1.9)$$

式中：

K=气体单位常数(见表 36)

f_T=温度修正系数(见图 52)

P₁=上游绝对压力 (psia)

P₂=下游绝对压力 (psia)

Q=气体流量（标准升/分钟）

$\Delta P=P_1-P_2$ （psid）

我们所要做的事如下：

计算 P_1/P_2 压力比；

根据压力比选择合适的方程；

查表得气体单位常数 K；

查图得温度修正系数 f_T ；

利用方程解未知数。

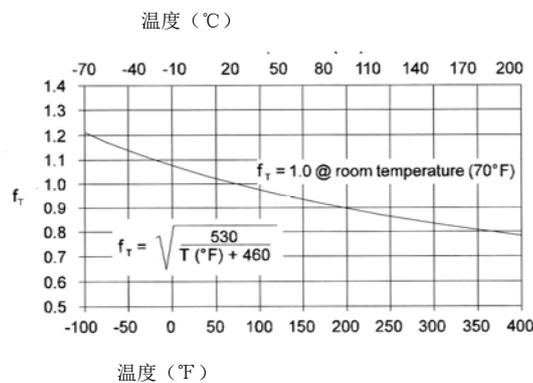
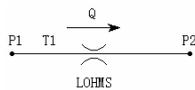


图 52 温度系数曲线

气体流阻定律例子



问题:入口压力为 5psig,出口接到大气,温度为 90°F,气体为氮气,流量为 1.00 标准升/分钟的情况下,节流口的流阻是多大?

解:

$K=276$ (见表 36)

$T_1=90$, $f_T=0.98$ (见图 52)

$P_1=5.0+14.7=19.7$ psia, $P_2=14.7$ psia

$P_1/P_2=19.7/14.7=1.34$ (亚音速)

$\Delta P=5.0$ psid

$Q=1.00$ 标准升/分钟

$$L = \frac{2 \times 276 \times 0.98 \times \sqrt{5.0 \times 14.7}}{1.00} = 4,640 \text{ LOhms}$$

时间常数“K” ----体积流量

为了省去将压力和流量单位转化成“psia”和“标准升/分钟”的麻烦，下表列出了气体以下流阻定律公式中的单位常数 K。

$$Lohms = \frac{K f_T P_2}{Q} \quad (\text{超音速})$$

表 36 体积流量单位

绝对压力	psia			Bar		Kpa	mm.Hg
气体	SLPM	SCFM	in ³ /min	SLPM	SCFM	SLPM	mL/min
氢气	1030	36.3	62700	14900	526	149	19900
氦气	771	27.2	47100	11200	395	112	14900
氟气	343	12.1	20900	4980	176	49.8	6640
乙醇乙醚	319	11.3	19400	4620	163	46.2	6160
氮气	276	9.73	16800	4000	141	40.0	5330
一氧化碳	274	9.69	16700	3980	141	39.8	5300
空气	271	9.56	16500	3930	139	39.3	5230
乙烷	251	8.86	15300	3640	129	36.4	4850
氧气	257	9.08	15700	3730	132	37.3	4970
氙气	245	8.65	14900	3550	125	35.5	4730
二氧化碳	213	7.52	13000	3090	109	30.9	4110
二氧化氮	214	7.56	13100	3100	110	31.0	4140
二氧化硫	176	6.21	10700	2550	90.1	25.5	3400
氟 12	123	4.34	7510	1780	63.0	17.8	2380

时间常数“K” ----质量流量

下表列出了气体以下流阻定律公式中的单位常数 K。

$$Lohms = \frac{K f_T P_2}{W} \quad (\text{超音速})$$

表 37 质量流量单位

绝对压力	psia			Bar		Kpa	mm.Hg
气体	PPH	Lb _m /s	kg/min	PPH	kg/min	kg/min	mg/min
氢气	11.6	0.00322	0.0876	168	1.27	0.0127	1.27
氦气	17.3	0.00479	0.131	250	1.89	0.0189	2.52
氟气	38.7	0.0108	0.293	561	4.25	0.0425	5.66
乙醇乙醚	34.8	0.00966	0.263	505	3.82	0.0382	5.09
氮气	43.2	0.0120	0.326	626	4.73	0.0473	6.31
一氧化碳	43.0	0.0119	0.325	623	4.71	0.0471	6.28
空气	43.8	0.0122	0.331	636	4.81	0.0481	6.41
乙烷	42.2	0.0117	0.319	611	4.62	0.0462	6.16
氧气	46.0	0.0128	0.348	667	5.04	0.0504	6.72
氙气	54.6	0.0152	0.413	792	5.99	0.0599	7.99
二氧化碳	52.4	0.0145	0.396	759	5.74	0.0574	7.65
二氧化氮	52.7	0.0146	0.398	764	5.77	0.0577	7.70
二氧化硫	63.0	0.0175	0.476	914	6.91	0.0691	9.21
氟 12	83.2	0.0231	0.629	1210	9.12	0.0912	12.2

例子:

问题: 入口压力为 1500kPa,出口接到大气,温度为 70°F,气体为氦气, 流量为 8.20 标准升/分钟的情况下,节流口的流阻是多大?

解:

K=112(见表 36)

T₁=70, f_T=1.00(见图 52)

$P_1=1500\text{kPa}$, $P_2=101\text{kPa}$

$P_1/P_2=14.9$ (超音速)

$Q=8.20$ 标准升/分钟

$$L = \frac{112 \times 1500 \times 100}{8.20} = 20.500\text{Lohms}$$

例子:

问题: 入口压力为 1200psia, 出口压力为 850psia, 温度为 70°F, 气体为氧气, 流量为 0.0015lb_m/s 的情况下, 节流口的流阻是多大?

解:

$K=0.0128$ (见表 37)

$T_1=70$, $f_T=1.00$ (见图 49)

$P_1=1200\text{psia}$, $P_2=850\text{psia}$

$P_1/P_2=1.41$ (亚音速)

$\Delta P=350\text{psid}$

$W=0.0015\text{lb}_m/\text{s}$

$$L = \frac{2 \times 0.0128 \times 1.00 \times \sqrt{350 \times 850}}{0.0015} = 9.300\text{Lohms}$$

绝对压力测量

气体流量是上游绝对压力和上下游压力比的函数。在 Lee 公司进行流阻试验时, 上游压力足够大以使下游压力对流速没什么影响。为精确确定上游绝对压力, 有必要使用合适的压力计来测量大气压力。气压计的测量结果通常用英寸汞柱的单位来表示, 而表压读数是用 psig 的单位来表示的。因此, 要将气压计读数转换成 psia, 再加上表压的读数, 得到用 psia 来表示的压力值。

压力 (psia) = 压力 (psig) + 0.4912 × 压力 (英寸汞柱, 温度 32°F)

例子

问题: 入口压力为 10psig, 出口为大气 (压力为 29.5 英寸汞柱), 温度为 70°F, 气体为氮气, 流量为 2.00 标准升/分钟的情况下, 节流口的流阻是多大?

解:

$K=276$ (见表 36)

$T_1=70$, $f_T=1.00$ (见图 52)

$P_2=0.4912 \times 29.5=14.5\text{psia}$

$P_1=10.0+14.5=24.5\text{psia}$,

$P_1/P_2=24.5/14.5=1.69$ (亚音速)

$\Delta P=24.5-14.5=10.0\text{psid}$

$Q=2.00$ 标准升/分钟

$$L = \frac{2 \times 276 \times 1.0 \times \sqrt{10.0 \times 14.5}}{1.00} = 3.320\text{Lohms}$$

气体特性

当选用气体系统所用的部件时, 必须考虑某些由于气体介质的可压缩性引起的因素。气体的可压缩性用一下两个定律来定义:

波义耳定律	在温度恒定的情况下，气体的压力和比容互为反比
查尔斯定律	在体积恒定的情况下，气体的压力和温度成正比。 在压力恒定的情况下，气体的体积和温度成正比。

因此，气体将膨胀以充满任何容器，压力和温度随之调整到与以上定律相一致的值。当气体流过阀门和节流孔时，由于阀门和节流孔前后有压差，因此气体的体积会增大，而温度变化则由焦耳-汤姆森（Joule-Thomson）效应来确定。

以上定律的组合形成了理想气体的“状态方程”的基础。即：

$$pV = mRT \quad (\text{气体常数 } R \text{ 见表 } 38)$$

在已知其他两个变量的情况下，通过状态方程可计算出另一个未知数。

通常，以下说法适用于气体流量。

1. 在高压比 ($P_1/P_2 > 1.9$) 的情况下，气体流量直接与上游绝对压力成正比。
2. 在中等压力比 ($1.1 < P_1/P_2 < 1.9$) 的情况下，气体流量与下游绝对压力成正比，也与压差成正比。
3. 在低压比 ($P_1/P_2 < 1.1$) 的情况下，气体流量与压差成正比。这点与液压系统类似。
4. 当节流孔以串联的形式出现时，最下游的节流孔对流速起主导作用。
5. 当一个节流孔前后的绝对压力比大于 1.9 时，在节流孔的“咽喉”部位气体的速度会达到音速（超音速流）。当节流孔串联在一起时，总压力比应该更高。
6. 当相同的节流孔串联在一起时，只会在最下游的节流孔处出现超音速流。

“禁止信号”法则（冯·卡门）

“当一个物体以大于音速的速度运动时，其所产生的压力变化效应不会到达该物体前端的点。”

本法则适用于气动流体节流孔。节流孔虽然不运动，但相对于节流孔，流体的速度可能达到或超过音速。只要下游压力足够低（低到在节流孔的“咽喉”部位的马赫数为 1），那么下游压力变化的任何效应都不会影响节流孔“咽喉”的上游部分。因此，**流速与下游压力无关**。该结论适用于单孔节流、流通空气且总压力比超过 1.89/1 的情况。

气动功率消耗

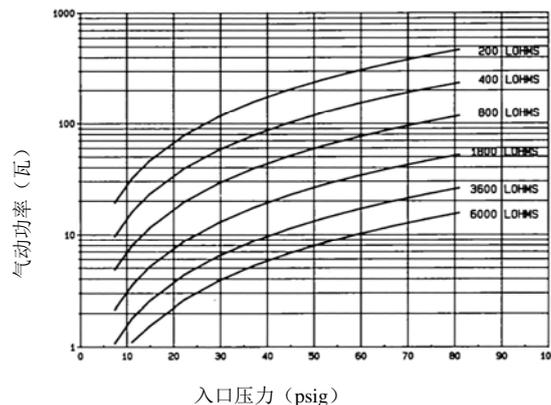


图 53 气动功率消耗

对更精确的计算，或要扩展气动功率消耗的范围，对空气，可使用以下公式：

$$\text{Watts} = \frac{1.641 P_1}{L} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{3/4} - 1 \right]$$

式中：

P_1 =入口压力 (psia)

P_2 =出口压力 (psia)

L =流阻

注意，由于压缩效率低，当空气流过一个节流孔时，压缩比膨胀需要更多的能量。

表 38 气体属性

气体	k	R		密度		cdP* Btu/ lb ⁰ R	cdV* Btu/ lb ⁰ R
		ft lb/lb ⁰ R	lb _m /ft ³	lb _m /std L			
氢气	1.40	766.6	0.00532	0.000188		3.420	2.435
氦气	1.66	386.1	0.01056	0.000373		1.250	0.754
氟气	1.66	76.6	0.0533	0.00188		0.248	0.150
乙醇乙醚	1.22	79.2	0.0516	0.00182		0.560	0.458
氮气	1.40	55.2	0.0739	0.00261		0.247	0.176
一氧化碳	1.41	55.2	0.00739	0.00261		0.243	0.172
空气	1.40	53.3	0.0764	0.00270		0.241	0.173
乙烷	1.21	51.4	0.0793	0.00280		0.386	0.320
氧气	1.40	48.3	0.0845	0.00298		0.217	0.155
氩气	1.67	38.7	0.1053	0.00372		0.124	0.074
二氧化碳	1.28	35.1	0.1162	0.00410		0.205	0.160
二氧化氮	1.26	35.1	0.1162	0.00410		0.221	0.176
二氧化硫	1.25	24.1	0.1691	0.00597		0.154	0.123
氟 12	1.13	12.8	0.319	0.01127		0.145	0.129

*温度为 68°F，压力为 14.7psia 时的值。

C_p=恒定压力下的比热

C_v=恒定体积下的比热

k=比热的比率，C_p/C_v

R=气体常数，R/分子量。

管路中的流体阻力

前面章节描述的流阻定律，把单个元件的流量、压降和流阻精确地联系起来。然而，对管路而言，这些变量之间的关系最好以图形的形式来体现。以下图形示出了 Lee 公司四种不同标准尺寸的管路的压降和流量的关系。如果你的系统管路更长，那么压降应相应按比例地提高。

例子：流量为 100mL/min 时，水流过内径为 0.032 英寸、长度为 30cm 的 Lee 标准管路时，产生的压降是多少？

查“管路流量曲线-水流”可知，当流量为 100 mL/min 时，压降为 4psia。根据长度调整以后的压降为： $(30\text{cm}/10\text{cm}) \times 4\text{psid} = 12\text{psid}$ 。

由于管子内径多少都会有一些误差，这些针对管路的流量计算不是很精确，但对设计会有帮助。

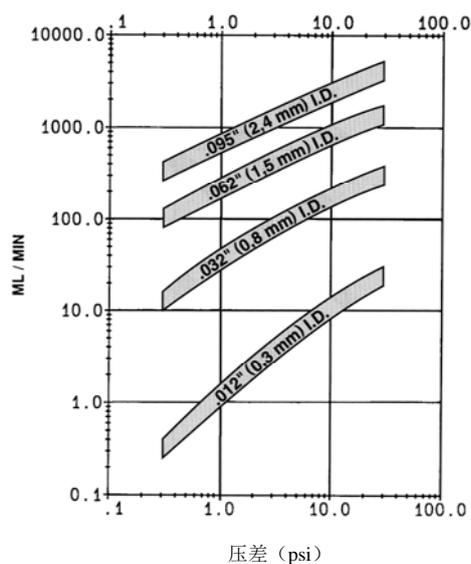


图 54 管路流量曲线-水流(管路长度 10cm)

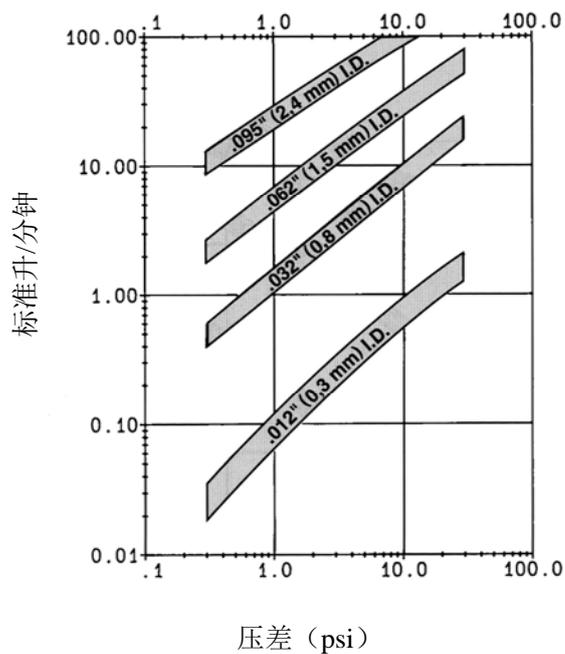


图 55 管路流量曲线-气流 (管路长度 10cm)

流阻的快速计算方法

流阻可通过 Lee 公司的计算尺或从网站上下载相关的软件来进行快速计算。登陆www.TheLeeCo.Com 点击“Engineering”，如果流体为液体，点击“Lohm Calculator for Liquid”。如果流体为气体，点击“Lohm Calculator for Gas”。按提示点击LINK下载相关软件即可。安装完后运行“LeeCalc.exe”。

