

气动元件

王孝华 编
陆鑫盛

QIDONGYUANJIAN

机械工业出版社

本书介绍了气动元件的工作介质——空气、湿空气、压缩空气的特性以及压缩空气的净化处理，并较全面地介绍了压力控制阀、流量控制阀、方向控制阀、逻辑元件、气动传感器、气缸等各类气动元件的结构、工作原理、性能和有关的设计计算、使用与维修，对气动元件的流量性能表示法和低功率电磁阀也作了介绍。

本书可供从事气动技术工作的工人、技术人员和使用维修人员阅读，也可供高等院校有关流体传动与控制专业的师生参考。

气 动 元 件

王孝华 陆鑫盛 编

*

责任编辑：范兴国 责任校对：宁秀娥

封面设计：田淑文 版式设计：冉晓华

责任印制：卢子祥

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国铁道出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32·印张 10 3/4·字数 237 千字
1991年 1月北京第一版·1991年 1月北京第一次印刷
印 0,001—12,750·定价：8.00元

*

ISBN 7-111-01632-7/TH·279

前 言

气动技术与其它传动和控制技术相比具有工作可靠、结构简单、使用与维修方便，特别适用在易燃、易爆和易腐蚀的恶劣环境下工作等独特优点，在汽车、机械制造、轻工、纺织、食品、电子仪表等工业部门中的应用日益增多。

气动元件是构成气动系统不可缺少的自动化基础元件之一。随着国内气动元件生产的逐年发展，迫切需要一本较系统地介绍气动元件方面的专业书。作者根据长期从事气动教学和科研的体会，并收集了国内外有关资料，编写成本书，以奉献读者。希望本书能对从事气动技术的科技人员、教师以及本专业的学生有所帮助。

本书由北方工业大学徐文灿副教授主审。在编写过程中，还得到王祖铭工程师以及其他同志的指导和帮助，作者表示衷心的感谢。限于作者水平，缺点与错误之处，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
一、气动元件在气动系统中的作用	1
二、气动元件的特点与分类	2
三、空气的状态变化	4
四、空气的流动	7
五、湿空气	12
六、气动元件的流量性能表示法	17
七、气容及气容充放气时间	26
第二章 气源系统	35
一、气动系统对压缩空气的要求	35
二、空气压缩机及其选用	36
三、压缩空气的性质及析出水分	41
四、压缩空气的净化与干燥	44
五、管道系统	54
六、压缩空气源(站)的设计举例	62
第三章 压力控制阀	70
一、压力控制阀的作用及分类	70
二、减压阀	70
三、安全阀	88
四、顺序阀	92
第四章 流量控制阀	96
一、概述	96
二、节流阀	99

三、其它节流阀	103
四、流量控制阀的使用	107
第五章 方向控制阀	109
一、方向控制阀的分类	109
二、截止式换向阀	124
三、滑柱式换向阀	136
四、电磁阀	150
五、其它方向控制阀	158
六、换向阀的性能参数及选用	167
第六章 气动逻辑元件	178
一、概述	178
二、基本逻辑单元	180
三、截止式逻辑元件	183
四、膜片式逻辑元件	199
五、滑柱式逻辑元件	207
六、逻辑元件的性能	211
第七章 气动执行元件	216
一、概述	216
二、气缸的分类和特性	217
三、几种常用气缸	229
四、普通气缸的计算	247
五、影响冲击气缸性能的因素	256
六、气缸的使用与维修	261
七、气马达	264
第八章 气动位置传感器	271
一、概述	271
二、非接触式气动位置传感器	272
三、气动测量元件	282
四、气动传感器的应用	289

第九章 气动辅件	296
一、空气过滤器	296
二、油雾器	301
三、时间元件	312
四、程序器	320
五、压力继电器	324
六、电气转换阀	326
七、消声器	330
八、管道及管接头	332
参考文献	335

第一章 绪 论

一、气动元件在气动系统中的作用

气动元件是组成气动系统的基本部件。图 1-1 所示为气动系统的组成图，它包括：

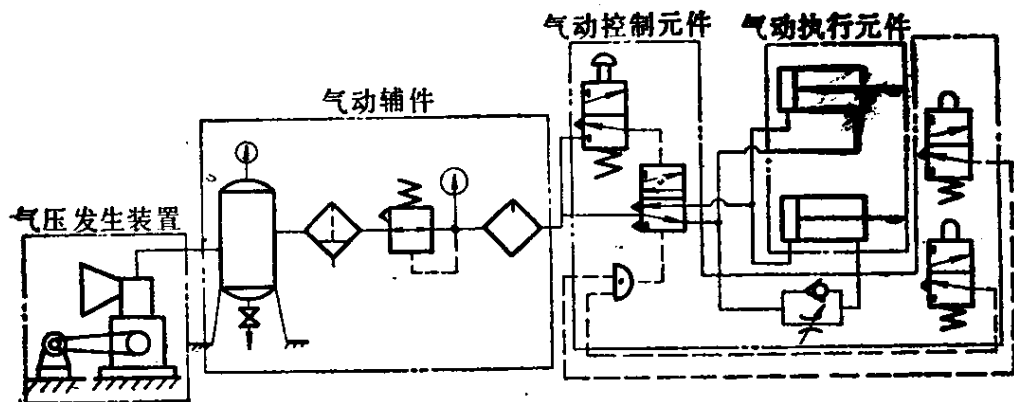


图 1-1 气动系统的组成图

1. 气压发生装置——产生压缩空气的装置（一般为空气压缩机）。
2. 气动执行元件——以压缩空气为动力产生机械运动的装置（如气缸、气马达）。
3. 气动控制元件——控制系统中压缩空气的压力、流量和流动方向（如压力控制阀、流量控制阀和方向控制阀）的装置。
4. 气动辅件——用于净化压缩空气、向压缩空气供给

润滑剂及元件间的连接、消声等各种辅助装置（如过滤器、油雾器、消声器、管接头）。

二、气动元件的特点与分类

（一）气动元件的特点

1. 气动元件采用低压（一般压力范围为 $0.3\sim 0.8\text{MPa}$ ）压缩空气为工作介质。使用后的空气，在一般情况下即可排向大气，处理方便，不必设置回气管道，污染少。但在食品和仪表工业中，需注意排气对工作环境的污染问题。

2. 由于气动元件采用空气介质，因而由各种气动元件组成的气动系统，对工作环境的适应性好。在易燃、易爆、多尘埃、强磁场、辐射等恶劣环境中工作比液压、电子、电器系统安全可靠。

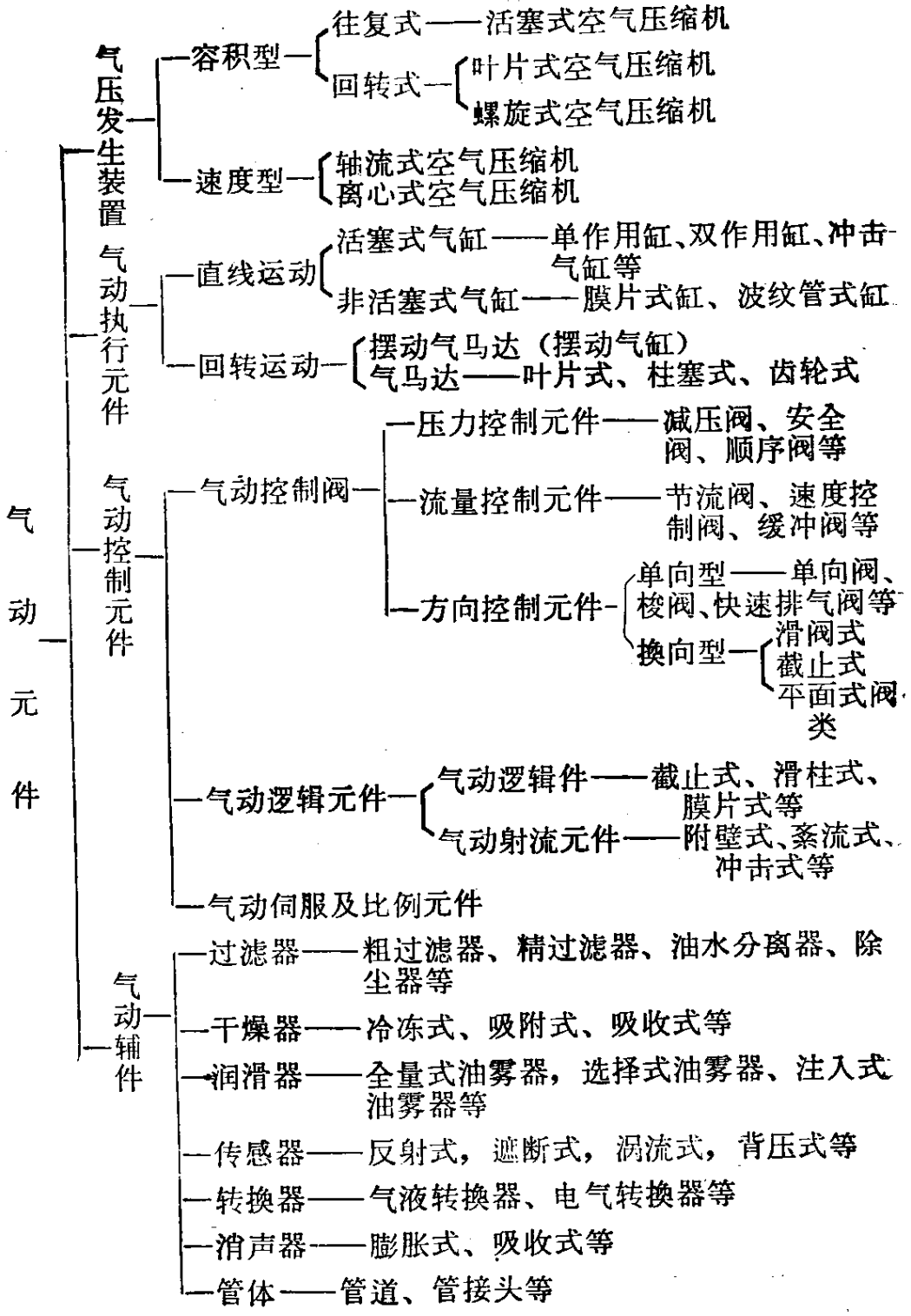
3. 空气介质粘度小，在管内流动时的阻力损失较小（一般损失仅为油路的千分之一）。因此，若干气动元件在不同地点同时工作时，可由一个压缩空气源（站）集中供气，远距离输送。

4. 空气介质有压缩性，因此单纯由气动元件组成的气动系统控制机械运动工作速度时稳定性较差，对负载变化敏感。液压系统比气动系统对外负载的变化敏感度（指外负载的单位变化所引起的输出位置的变化量）要小得多，液压系统的刚度约为相当的气动系统的400倍。

5. 气动元件在承受小负载时比液压元件动作速度快，但气动系统和液压系统相比，在工作压力和负载大小相同时，液压系统的响应速度约为气动系统的50倍。

（二）气动元件的分类

按气动元件的功能分有以下几类：



三、空气的状态变化

(一) 理想气体状态方程式

对于单相纯物质[⊖]所构成的简单热力系统[⊖]，若系统中工质质量 m 为一常数，则称为常质量系统。系统中工质状态参数压力 p 、温度 T 、比容 v 之间的关系可用状态方程表示为

$$f(p, v, T) = 0 \quad (1-1)$$

通常空气可近似地看作理想气体（即热力学中的完全气体），式（1-1）对理想气体具有最简单的形式。

对质量为1kg的空气，有

$$pv = RT \quad (1-2)$$

对质量为 m kg的空气，有

$$pV = mRT \quad (1-3)$$

式中 p —— 空气的绝对压力 (Pa)；

v —— 空气的比容 ($v = \frac{1}{\rho}$) (m^3/kg)；

R —— 空气的气体常数 [$R = 287.1 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]；

T —— 空气的绝对温度 ($T = 273 + t^\circ\text{C}$) (K)；

m —— 空气的质量 (kg)；

V —— 空气的容积 (m^3)。

式（1-2）和式（1-3）称为理想气体状态方程式。

(二) 空气状态变化过程的特例

1. 等容变化过程

对一定质量的空气，若其状态发生变化时，保持其容积不变即 $V = \text{常数}$ （或 $v = \text{常数}$ ）的过程称为等容变化过程。

⊖ 指物质的组成是同一的，其化学结构是处处一致的。

⊖ 指系统与外界只交换热量和一种形式的功的系统。

如气动系统贮气罐中有一定质量的压缩空气，随着外界环境温度的变化，空气的状态参数亦将产生变化，但贮气罐容积（即空气容积）保持不变。根据式（1-2）两种状态下空气的状态参数之间有下列关系：

$$\frac{p}{T} = \frac{p_1}{T_1} = \text{常数} \quad (1-4)$$

2. 等压变化过程

对一定质量的空气，若其状态变化时保持压力不变即 $p = \text{常数}$ 的变化过程称为等压变化过程。根据式（1-2）两种状态下空气的状态参数之间有下列关系：

$$\frac{v}{T} = \frac{v_1}{T_1} = \text{常数} \quad (1-5)$$

3. 等温变化过程

对一定质量的空气，若其状态变化时保持温度不变即 $T = \text{常数}$ 的变化过程称为等温变化过程。如在一个较大贮气罐上有一小孔向外界缓慢泄漏空气，此时贮气罐内空气的状态变化过程可以近似的认为是等温变化过程。根据式（1-3）两种状态下空气的状态参数之间有下列关系：

$$pv = p_1v_1 = \text{常数} \quad (1-6)$$

4. 绝热变化过程

对一定质量的空气，在与外界完全没有热交换的情况下发生状态变化的过程称为绝热变化过程。如贮气罐上阀门突然打开快速放气，则在贮气罐中空气的状态变化过程可近似的认为是绝热变化过程。两种状态下空气的状态参数之间有下列关系

$$pv^\kappa = p_1v_1^\kappa = \text{常数} \quad (1-7)$$

或由式（1-2）和式（1-6），得

$$\frac{T_1}{T} = \left(\frac{p_1}{p}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{v}{v_1}\right)^{k-1} \quad (1-8)$$

式中 k —— 比热比 ($k = \frac{c_p}{c_v}$; 对空气 $k=1.4$);

c_p —— 定压比热容 [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$];

c_v —— 定容比热容 [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$].

5. 多变变化过程

上述四种典型的状态变化过程, 其特点是过程中某个状态参数保持不变 (如 $T = \text{常数}$ 、 $p = \text{常数}$ 等), 或过程中空气工质与外界无热量交换 (绝热变化过程)。一般情况下, 实际过程中所有的状态参数都可能变化, 而且也不能绝热, 既不能将它们简化为上述四种典型的变化过程, 又不便于直接分析, 将这类过程称为多变变化过程。可用下列过程方程式表示, 即

$$pv^n = p_1v_1^n = \text{常数} \quad (1-9)$$

n 称为多变指数。在一定的多变变化过程中, 多变指数 n 保持不变; 对于不同的多变过程, n 有不同的值。可见, 前述四种典型的状态变化过程均为多变过程的特例。

当 $n=0$ 时, $pv^0 = p = \text{常数}$, 为等压变化过程;

当 $n=1$ 时, $pv = \text{常数}$, 为等温变化过程;

当 $n = \pm\infty$ 时, $p^{\frac{1}{n}}v = p^0v = v = \text{常数}$, 为等容变化过程;

当 $n=k$ 时, $pv^k = \text{常数}$, 为绝热变化过程。

(三) 变质量系统过程方程式的一般表达式

变质量系统是指系统中工质的状态变化的同时, 工质的数量也在变化 (即工质质量 $m \neq \text{常数}$)。工质数量的变化将对热力过程的特性产生影响, 但是这种影响在上述常质量系

统的过程方程式中未能得到反映。气动元件或气动系统中空气的状态变化过程有很大部分是属于变质量系统的热力过程，如气容充气 and 放气、气缸工作过程等。

对于单相纯物质构成的简单热力系统，若系统中工质质量不为常数即变质量系统，系统中工质的状态参数压力 p 、温度 T 、容积 V 、质量 m 、熵 S 之间的关系可用状态方程式表示为

$$f(p, V, T, m) = 0$$

或
$$f(p, V, S, m) = 0 \quad (1-10)$$

对于理想气体，用状态方程和能量方程可导出适用于变质量系统过程方程式的一般表达式，即

$$\frac{pV^k}{m^k} e^{\frac{-s}{c_v}} = \text{常数}$$

或
$$\frac{p_1 V_1^k}{m_1^k} e^{\frac{-s_1}{c_v}} = \frac{p_2 V_2^k}{m_2^k} e^{\frac{-s_2}{c_v}} \quad (1-11)$$

对常质量系统的可逆绝热过程有 $m_1 = m_2$, $s_1 = s_2$, 代入式 (1-11), 得

$$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k$$

或
$$pV^k = \text{常数} \quad (1-12)$$

可见，式 (1-12) 与式 (1-7) 相同。

四、空气的流动

(一) 连续性方程式

根据质量守恒定律，单位时间内空气流过管道任意截面时的质量流量 Q_m 可表示为

$$Q_m = \rho A c \quad (\text{kg/s}) \quad (1-13)$$

式中 ρ —— 空气密度 (kg/m^3) ;
 A —— 管道任意截面面积 (m^2) ;
 c —— 管截面内空气的平均速度 (m/s) 。

(二) 能量方程式 (伯努利方程式)

在空气流通过的管道任意截面上, 根据能量守恒定律, 单位质量稳定的空气流在忽略摩擦阻力的情况下, 可以导出下列关系式, 称为能量方程式 (又称伯努利方程式)。
 即

$$gz + \frac{c^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} = \text{常数} \quad (1-14)$$

当空气沿管道流动的速度较低时 (一般认为 $c \leq 70 \text{m}/\text{s}$) ; 可近似看作是不可压缩流体即 $\rho = \text{常数}$, 因而式 (1-14) 中第三项与压力无关, 所以

$$gz + \frac{c^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{常数} \quad (1-15)$$

式中 gz —— 单位质量空气流具有的位置能, 称为比位能;
 $\frac{c^2}{2}$ —— 单位质量空气流具有的动能, 称为比动能;
 $\frac{p}{\rho}$ —— 单位质量空气流具有的压能, 称为比压能。

当空气沿管道高速流动时, 应考虑空气的压缩性即 $\rho \neq \text{常数}$ 。对于可压缩的空气, 根据式 (1-7) 和式 (1-14) 可以导出下列关系式, 即

$$gz + \frac{c^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} = \text{常数} \quad (1-16)$$

式 (1-16) 与式 (1-15) 相比, 压能增大 $\frac{k}{k-1}$ 倍。对

于空气 $k = 1.4$, 则 $\frac{k}{k-1} = 3.5$ 倍。

(三) 空气通过喷嘴或节流孔口的流量

1. 通过喷嘴的流量

如图 1-2 所示的喷嘴, 将能量方程式 (1-16) 用于喷嘴前后任意两截面 A_1 和 A_2 时 (设 $z_1 = z_2$), 可得

$$\frac{c_1^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{c_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2}$$

将式 (1-7) 和式 (1-13) 代入上式, 得空气通过喷嘴的质量流量 Q_m 为

$$Q_m = \rho_2 A_2 c_2 = A_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \times \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \quad (\text{kg/s}) \quad (1-17)$$

式中 p_1 —— 喷嘴上游入口总压力 (Pa);

p_2 —— 喷嘴下游出口静压力 (Pa);

ρ_1 —— 喷嘴上游入口空气密度 (kg/m^3);

ρ_2 —— 喷嘴下游出口空气密度 (kg/m^3);

T_1 —— 喷嘴上游温度 (K);

R —— 气体常数 [对空气 $R = 287.1 \text{ J}(\text{kg} \cdot \text{K})$].

可见, 当喷嘴上游压力 p_1 和上游温度 T_1 一定时, 通过喷嘴的质量流量 Q_m 仅取决于下游压力 p_2 。

当 $0.528 < \frac{p_2}{p_1} \leq 1$ 时, 通过喷嘴下游出口截面 A_2 的空气作亚音速流动, 此时通过喷嘴的质量流量按式 (1-17) 计算。

当 $\frac{p_2}{p_1} \leq 0.528$ 时, 通过喷嘴下游出口截面 A_2 的空气作音速流动, 此时通过喷嘴的质量流量达最大值或称临界流量,

用符号 Q_m^* 表示。式 (1-17) 可简化为

$$Q_m^* = A_2 \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}}} \quad (\text{kg/s}) \quad (1-18)$$

式 (1-17) 与式 (1-18) 之比为

$$\frac{Q_m}{Q_m^*} = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (1-19)$$

图1-3 所示为 $\frac{Q_m}{Q_m^*}$ 与 $\frac{p_2}{p_1}$ 的关系曲线。

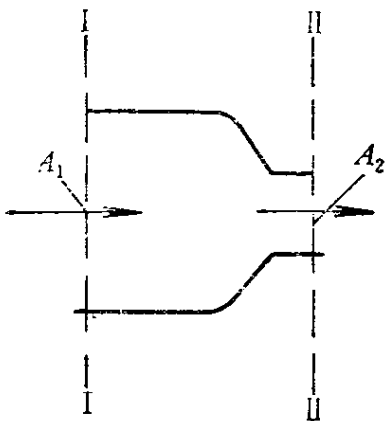


图 1-2 喷嘴

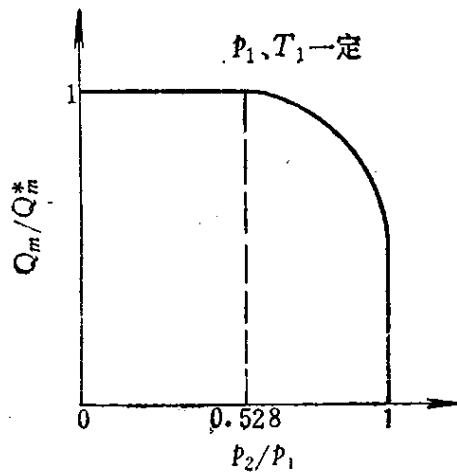


图 1-3 $\frac{Q_m}{Q_m^*}$ 与 $\frac{p_2}{p_1}$ 的关系曲线

2. 通过节流孔口的流量

气动元件通常由多个节流孔口和通道所组成，它与上述空气通过喷嘴的流动有很大差别。如果将气动元件整体作为一个节流孔口分析，实验发现，当 p_1 、 T_1 一定时，流量 Q_m 也是下游压力 p_2 的函数。所不同的是，当降低 p_2 而流量 Q_m 不

再增加时的压力比 $\frac{p_2}{p_1} = b$ 小于 0.528。 b 称作气动元件的临界压力比。不同的气动元件 b 值不同，一般在 0.2~0.5 之间。国际标准化组织提出 ISO/6358 标准作为气动元件流量特性的国际标准，它假定在 $\frac{p_2}{p_1} = b \sim 1$ 范围内流量曲线可用椭圆曲线代替，即

$$\left(\frac{Q_m}{Q_m^*}\right)^2 + \left(\frac{\frac{p_2}{p_1} - b}{1 - b}\right)^2 = 1 \quad (1-20)$$

当 $b = 0.528$ 时，式 (1-20) 的曲线与式 (1-19) 的曲线几乎吻合，最大偏差仅为 0.31%。故可建议用下列两组完全等值的公式之一计算通过节流孔口或气动元件的流量。

a) 第一组公式

当 $\frac{p_2}{p_1} \leq b$ 时，元件内处于临界流：

$$Q_m^* = c p_1^* \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T^*}} \quad (\text{kg/s}) \quad (1-21)$$

当 $\frac{p_2}{p_1} > b$ 时，元件内处于亚音速流：

$$Q_m = Q_m^* \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{p_2}{p_1} - b}{1 - b}\right)^2} \quad (\text{kg/s}) \quad (1-22)$$

b) 第二组公式

当 $\frac{p_2}{p_1} \geq \frac{1}{s}$ 时，元件内处于临界流：

$$Q_m^* = A \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \frac{1}{\sqrt{s}} \quad (\text{kg/s}) \quad (1-23)$$

当 $\frac{p_2}{p_1} < \frac{1}{s}$ 时，元件内处于亚音速流：