

DOI: 10.3901/JME.2009.06.290

小口径气动元件流量特性测量及合成方法

王涛¹ 彭光正¹ 香川利春²

(1. 北京理工大学自动化学院 北京 100081;
2. 东京工业大学精密工学研究所 横滨 226-8503 日本)

摘要: 针对 ISO6358 规格中小口径气动元件的流量特性的测量方法规定的欠缺, 使用一种口径转换的基准接头连接小口径元件进行流量特性的测量试验。通过和卡钳式测量方法的结果比较, 从试验上确认了基准接头对于小口径元件的流量特性的影响程度。提出了压缩性流体用元件的声速流导和临界压力比的新的合成方法。将电磁阀本体和接头的合成结果与试验结果进行比较, 结果一致, 验证了所提案的合成方法的适用性, 并探讨了利用新的合成方法计算阀本体的流量特性的可行性。

关键词: 流量特性 小口径气动元件 基准接头 合成

中图分类号: TP273

Measurement and Resultant Methods of Flow-rate Characteristics of Small Pneumatic Valves

WANG Tao¹ PENG Guangzheng¹ KAGAWA Toshiharu²

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
2. Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology, Yokohama 226-8503, Japan)

Abstract: In the ISO6358 standard about determination of flow rate characteristics of pneumatic component, there is no prescript to small valves. Using size converting standard fittings, flow rate characteristics experiment of the small valves with the standard fittings were carried out. Compared to the results of caliper-type measurement, the effect of the standard fittings on the flow rate characteristics of small valve is confirmed. A new resultant method of flow rate characteristics is proposed. There is good agreement between the resultant results and the experiment ones. It is proved applicable for the proposed resultant method. The feasibility of calculating the flow rate characteristics of the valve itself is also discussed.

Key words: Flow rate characteristics Small pneumatic valve Standard fitting Resultant

0 前言

作为表示和测量气动元件的流量特性的标准, 国际标准 ISO6358: 1989^[1]正被众多的国家所采用。在我国参照这个标准制定了相应的国家标准 GB/T14513-1993^[2]。在这两个标准中, 使用声速流导 C 和临界压力比 b 来描述气动元件在整个控制压力范围的流量特性并制定了 C 和 b 的测量方法。在 ISO 规格中, 所对应的测量元件的连接口的最小为公制螺纹 M10 mm(或英制管螺纹 G1/8 英寸), 随着元件小型化的发展, 出现了比螺纹口径 G1/8 英寸小的连接螺纹 M5 mm 或快插接头直径 6 mm 以及更小口径的元件, 而这些元件在进行的流量特性测量

中, 如果参照 ISO 规格中所规定的压力测量管进行试验时, 不能真实地反映被测元件流量特性的试验结果多有发生。图 1 是按照 ISO6358 相应制作的螺纹口径为 M5 mm 的压力测量管, 由于测量管内径的细小, 气体在测量过程中在压力测量点可能已经发生成声速流, 使得被测元件上游压力 p_1 不能被设定以致产生测量误差。

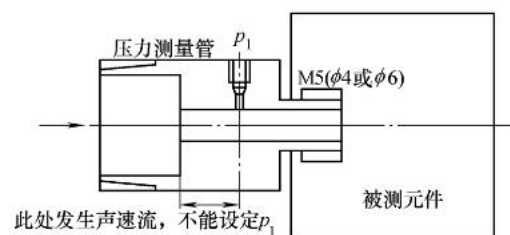


图 1 小口径元件测量不正确的例子

要解决上述问题，虽然可将压力测量管的前部内径扩大到压力测量点，但它的连接部的内径大小有可能严重影响被测元件的流通能力。完全去除压力测量管的影响，只能采取不对被测元件产生影响的大口径的卡钳式接头，而这种测量方式仅限个别元件使用外，对于一般的气动元件测量不具有通用性。

因此，基于传统压力测量管的不适合性和测量通用性的考虑，目前多采用通过制作能够转换成 G1/8 英寸口径的专用基准接头^[3-4]，之后用 G1/8 英寸的连接口径按照 ISO6358 的规定进行元件的流量特性试验。在本文中，通过连接基准接头，以连接口径 M5 mm 的小口径电磁阀为试验对象，包含了连接基准管接头的被测元件作为复合被测元件进行流量特性试验。并且使用卡钳式接头测量电磁阀本体的流量特性。接头对被测元件的流量特性的测量结果会产生影响虽然众所周知，本研究将通过试验明确不同接头形式，安装位置对小口径元件流量特性的影响程度，并探讨考虑气体压缩性的声速流导 C 和临界压力比 b 的合成方法的适用性及利用合成公式计算元件本体流量特性的可行性。

1 流量特性测量试验方法及内容

1.1 基准接头

如图 2 所示，基准接头是一侧为 M5、 $\phi 4$ 或 $\phi 6$ mm 的外螺纹或外径，另一侧为管螺纹的 G1/8 英寸的内螺纹构造的连接接头。通过和被测量元件的连接，复合被测元件的连接口转化成 G1/8 英寸口径。

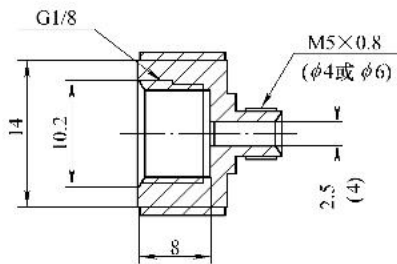


图 2 基准接头

1.2 试验方法

为了比较基准接头对被测元件流量特性的影响，选用了三个不同种类的 M5 mm 口径的电磁阀为试验对象，复合被测元件及基准接头的流量特性按照图 3 所示的 ISO 规格进行测量。在复合被测元件的上游侧设置 G1/8 英寸口径的压力测量管，下游侧设置 G1/8 英寸口径的压力测量管和流量调节用

的可变节流器。根据 ISO 规格测量各流量的压力得到声速流导 C 和临界压力比 b 。

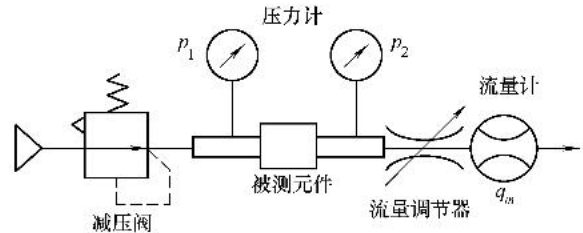


图 3 基于 ISO6358 的试验回路

1.3 试验内容

为了调查基准接头对被测元件的流量特性的影响程度，通过基准接头和卡钳式接头的组合，组成如图 4 所示四种类型的复合被测元件来进行流量特性的测量。图 4a 是被制定的小口径复合元件的试验样式；图 4b 是在上游侧连接基准接头，下游侧连接卡钳接头；图 4c 是在上游侧连接卡钳管接头，下游侧连接基准管接头；图 4d 是在上下游侧连接卡钳式接头，事实上的被测元件本体的试验样式。卡钳接头是内径远大于电磁阀的内径(5 倍以上)，靠端面密封的方法与电磁阀连接的短管接头，由于相对被测元件卡钳接头对流路中流体状态影响很小，它对电磁阀流量特性的影响可以被忽略，即卡钳式测量方式测量的被测电磁阀的结果可以看作为电磁阀本体的流量特性。另外对于快插接头 $\phi 4$ 、 $\phi 6$ mm 的连接口处卡钳管接头不适用，不能直接测量这类电磁阀本体的流量特性，本文仅以进出口均为 M5 mm 口径的电磁阀作为研究对象。

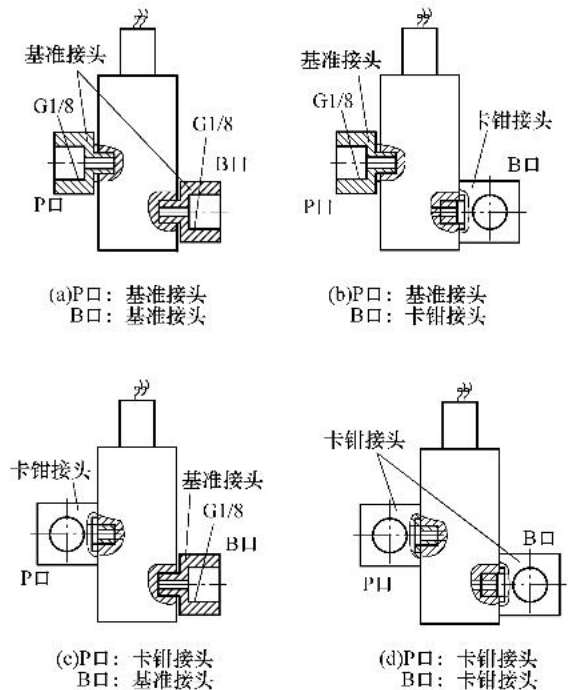


图 4 四种复合测量元件

2 流量特性试验结果及考察

上述四种复合被测元件的流量特性 C 和 b 的试验结果如图 5 所示。图中点划线为基准接头的实际声速流导。对于小口径电磁阀, 可以看到连接管接头对其流量特性有很大的影响。①在上下游两侧均连接基准接头的情况复合被测元件的 C 值最小, 而两侧使用卡钳式街头的被测元件本体的 C 值最大。②单侧带有基准接头的安装的位置不同复合元件的 C 值多少有些不同, 即比起下流侧连接基准接头的复合元件上游侧带有基准接头的复合元件的 C 值稍微要大些。③基准接头的 C 值和被测元件本体的越接近, 复合元件的 C 值所受影响也就越大。④从 b 值的试验结果看, 带有基准接头的被测元件的 b 值要比被测元件本体的 b 值要大, 即复合元件更易产生声速流。具体而言, 声速流导 C 最大减少了 40%, 临界压力比 b 最大增大了 0.2。下面通过流量特性合成的方法来分析接头形式及安装位置对被测元件的影响程度。

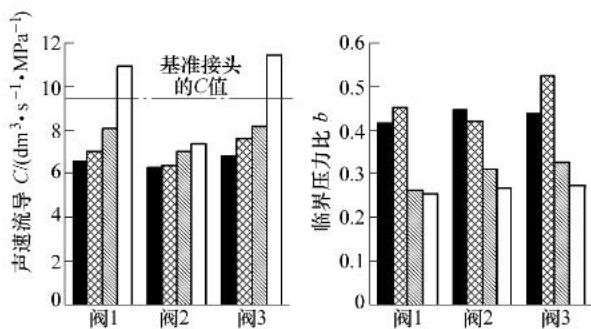


图 5 被测元件试验结果

■ P口: 基准接头, B口: 基准接头
 ▨ P口: 卡钳接头, B口: 基准接头
 ▩ P口: 基准接头, B口: 卡钳接头
 □ P口: 卡钳接头, B口: 卡钳接头

3 流量特性的合成

由上述试验结果可知, 连接接头对被测元件的流量特性有相当大的影响, 同时对流量特性的影响程度也因电磁阀的大小和安装位置的不同而产生差异。可以通过多个器件串联使用时流量特性的合成手法具体分析这一差异^[5-6]。

如图 6 所示, 被测复合元件实际上是由电磁阀本体和两侧的基准接头构成的三段串联式节流器构造。因为基准接头的流量特性能够单独测量, 三段节流器的声速流导 C 和临界压力比 b 的合成方法如果能够确认有良好的精度的话, 电磁阀本体的声速流导 C 和临界压力比 b 也能够通过反算求出来。

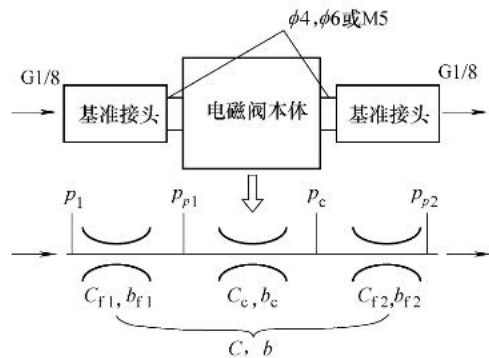


图 6 串联型气动元件的合成模型

传统的合成法是忽略空气的压缩性, 从非压缩性流体用元件的合成方法移植过来, 而且没有临界压力比 b 的合成方法^[7]。因此, 对于压缩性流体用元件的流量特性的合成效果不能正确地评价, 适用性不好。通过考虑流经节流口的声速和亚声速流动状态, 重新探讨适用于压缩性流体用复合元件的流量特性的合成方法是必要的。

3.1 两段串联式节流器

首先推导两段串联式节流器的合成方法。其模型如图 7 所示, 由 A 和 B 两个节流器串联构成。

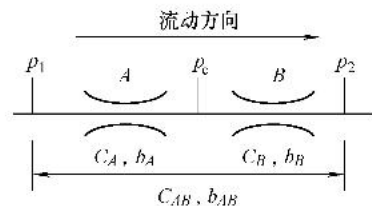


图 7 两段串联式节流器模型

3.1.1 声速流导的合成

在两段串联式节流器中任何一个节流器处如果发生声速流状态的话, 两段式节流器整体就会呈声速流状态。这时有如下三种情况可能发生。

(1) A 处发生声速流, B 处不发生声速流。由于通过节流器 A , B 的流量相同, 在此状态时通过两个节流器的质量流量可以由下式来表示。

$$q_m = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_A P_1 = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_B P_c \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_B - b_B}{1 - b_B} \right)^2} = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_{AB} P_1 \quad (1)$$

式中 $\xi_B = P_2 / P_c$

q_m ——通过气动元件的质量流量

ρ_0 ——标准状况下气体密度

T_0, T_1 ——标准状况和实际状况下的气体温度

P_1, P_c, P_2 ——两段串联式节流器的上游、中间和下游压力

C_A, C_B, C_{AB} —— 节流器 A 、 B 和复合节流器的声速流导

b_A, b_B, b_{AB} —— 节流器 A 、 B 和复合节流器的临界压力比

声速流导的合成

$$C_{AB} = C_A = \frac{p_c}{p_1} \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_B - b_B}{1 - b_A} \right)^2} C_B = b_A \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_B - b_B}{1 - b_A} \right)^2} C_B < b_A C_B \quad (2)$$

当 A 处发生声速流， B 处没有发生声速流时， $C_A/C_B < b_A$ 这个不等式成立。

(2) A 、 B 处同时发生声速流。通过两个节流器的质量流量

$$q_m = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_A p_1 = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_B p_c = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_{AB} p_1 \quad (3)$$

声速流导的合成

$$C_{AB} = C_A = \frac{p_c}{p_1} C_B = b_A C_B \quad (4)$$

当 A 、 B 处同时发生声速流时， $C_A/C_B = b_A$ 成立。

(3) A 处没有发生声速流， B 处发生声速流。此状态时的质量流量

$$q_m = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_A p_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_A - b_A}{1 - b_A} \right)^2} = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_B p_c = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_{AB} p_1 \quad (5)$$

式中 $\xi_A = p_c/p_1$

声速流导的合成如下

$$C_{AB} = \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_A - b_A}{1 - b_A} \right)^2} C_A = \xi_A C_B \quad (6)$$

$$\frac{C_A}{C_B} = \frac{\xi_A}{\sqrt{1 - \left(\frac{\xi_A - b_A}{1 - b_A} \right)^2}} > b_A \quad (7)$$

当 A 处没有发生声速流， B 处发生声速流时， $C_A/C_B > b_A$ 成立。

由上述的分析可知，两段串联式节流器处于声速流状态时，通过 C_A/C_B 和 b_A 的关系也可以确定 A 和 B 处的状态。

(1) $C_A/C_B < b_A$ 。首先假定 A 处没有发生声速流，即 $1 > p_c/p_1 = \xi_A > b_A$ 成立。由于此时 B 处发生

声速流，可得到

$$q_m = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_A p_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_A - b_A}{1 - b_A} \right)^2} = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_B p_c < \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_A p_1 \quad (8)$$

由式(8)能够得到 $C_A/C_B > p_c/p_1 > b_A$ 的不等式成立。这与作为前提的 $C_A/C_B < b_A$ 相矛盾，故 A 处没有发生声速流的假设不成立。也就是说，在 A 处必然发生声速流。

然后当 A 处发生声速流的时候，考察 B 处是怎样的状态。在 B 处不管是亚声速流或声速流，通过它的质量流量为

$$q_m = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_A p_1 = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_B p_c \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_B - b_B}{1 - b_B} \right)^2} \quad (9)$$

或者

$$q_m = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_A p_1 = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_B p_c \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可以分别得到下面的关系

$$\frac{C_A}{C_B} = \xi_A \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_B - b_B}{1 - b_B} \right)^2} \quad (11)$$

或者

$$\frac{C_A}{C_B} = \xi_A \quad (12)$$

由于有 $C_A/C_B < b_A$ 的前提，假定 B 处发生声速流，则式(12)成立，那么可以得到下面的不等式

$$\frac{C_A}{C_B} = \xi_A < b_A \quad (13)$$

对上述分析讨论如下所述。①如果 A 处声速流发生在临界点，即 $\xi_A = b_A$ 成立。这与式(13)矛盾，即 B 处发生声速流的假定不成立。因此 B 处不会发生声速流。②如果 A 处声速流是发生在临界点以外，即 $\xi_A < b_A$ 成立，虽然有 $C_A/C_B < b_A$ 的前提， $C_A/C_B = \xi_A$ 有可能成立，即 B 处有可能发生声速流。

(2) $C_A/C_B = b_A$ 。首先假定 A 处为亚声速流状态，则式(8)成立，这与作为前提的 $C_A/C_B = b_A$ 相矛盾，因此 A 处为亚声速流的假设不成立，也就是说， A 处必然发生声速流。然后当 A 处发生声速流的时候，考察 B 处是怎样的状态。前述的式(11)和式(12)同样能够得到。

对上述分析讨论如下所述。①如果 A 处声速流是发生在临界点，即 $\xi_A = b_A$ 成立。由作为前提的 $C_A/C_B = b_A$ 可以判断式(12)的 $C_A/C_B = \xi_A$ 成立，因此 B 处也发生声速流。②如果 A 处声速流是发生在临界点以外，即 $\xi_A < b_A$ 成立。因为有 $C_A/C_B = b_A$ 的

前提,可以得到 $C_A/C_B > \xi_A$, 但这和式(11)、(12)矛盾,因此 A 处声速流发生在临界点以外的情况不可能发生。

综上所述,如果 $C_A/C_B = b_A$, 则 A 、 B 处会同时在临界点发生声速流。

(3) $C_A/C_B > b_A$ 。假设 A 处发生声速流, 前述的式(11)和式(12)同样能够得到, 将作为前提的 $C_A/C_B > b_A$ 代入式(11)、(12)中可得

$$\xi_A \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_B - b_B}{1 - b_B} \right)^2} > b_A \quad (14)$$

或者

$$\xi_A > b_A \quad (15)$$

成立。这与 A 处发生声速流的假设相矛盾, 因此能够判定 A 处不发生声速流。即, 如果两段串联式节流器是声速流状态的话, 只能 B 处发生声速流。

3.1.2 临界压力比的合成

(1) A 处在临界点发生声速流时, 可得

$$q_m = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_A P_1 = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_B P_c \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_B^* - b_B}{1 - b_B} \right)^2} \quad (16)$$

$$\xi_B^* \geq b_B$$

由式(16)可得到参数 ξ_B^* 的表达式

$$\xi_B^* = (1 - b_B) \sqrt{1 - \left(\frac{C_A}{C_B b_A} \right)^2} + b_B \quad (17)$$

由以上两式, 两段串联式复合节流器的临界压力比可表示为

$$b_{AB} = b_A \xi_B^* = (1 - b_B) \sqrt{b_A^2 - \left(\frac{C_A}{C_B} \right)^2} + b_A b_B \quad (18)$$

(2) 当 B 处临界点发生声速流时, 可得

$$q_m = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_A P_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_A^* - b_A}{1 - b_A} \right)^2} = \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} C_B P_c \quad (19)$$

$$\left[1 + (1 - b_A)^2 \left(\frac{C_B}{C_A} \right)^2 \right] \xi_A^{*2} - 2b_A \xi_A^* + 2b_A - 1 = 0 \quad (20)$$

$$\xi_A^* = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \quad (21)$$

式中 $\alpha = 1 + (1 - b_A)^2 (C_B/C_A)^2$

$$\beta = -2b_A \quad \gamma = 2b_A - 1$$

由此, 两段串联式复合节流器的临界压力比的合成可由下式得到

$$b_{AB} = \xi_A^* b_B \quad (22)$$

3.2 三段串联式节流器

由第 3.1 节中两段串联式节流器流量特性的合

成方法可以推导如图 6 所示的三段节流器为对象的流量特性的合成公式。

在三段节流器发生声速流的时候, 实际上由于上游设定压力的限制两个节流器同时发生声速流的可能性极小, 因此分别从下面三种情况可以导出声速流和临界压力比的合成公式: ①基准接头 1 处发生声速流; ②被测元件本体处发生声速流; ③基准接头两处发生声速流。详细推导过程限于篇幅忽略。

3.3 串联式气动元件流量特性合成方法总结

根据上述在已知各个元件的流量特性 C 和 b 的情况下推导的复合元件的特性合成公式总结为下面的表 1 和表 2。

表 1 两段串联式节流器的流量特性合成

判断条件	流动状态	声速流 C 的合成式	临界压力比 b 的合成式
$C_A/C_B > b_A$	B 处发生声速流	$C_{AB} = \xi_A^* C_B$	$b_{AB} = \xi_A^* b_B$
$C_A/C_B \leq b_A$	A 处发生声速流, B 处某些情况也可能发生声速流	$C_{AB} = C_A$	$b_{AB} = b_A \xi_B^*$

注: ξ_A^* 和 ξ_B^* 的值可由式(21)和式(17)算出。

表 2 三段串联式节流器的流量特性合成

判断条件	流动状态	声速流 C 的合成式	临界压力比 b 的合成式
$C_{f1}/C_c \leq b_{f1}$	上游接头处发生声速流	$C = C_{f1}$	$b = \xi_{p21}^* \xi_{cl}^* b_{p1}$
$C_{f1}/C_c > b_{f1}$ $C_c/C_{f2} \leq b_c$	元件本体处发生声速流	$C = \xi_{p12}^* C_c$	$b = \xi_{p22}^* b_c \xi_{p12}^*$
$C_c/C_{f2} > b_c$	下游接头处发生声速流	$C = \xi_{c3}^* \xi_{p13}^* C_{f2}$	$b = b_{f2} \xi_{c3}^* \xi_{p13}^*$

表 2 中各参数的数值可由下面的公式来计算

$$\xi_{cl}^* = (1 - b_{f1}) \sqrt{1 - \left(\frac{C_{f1}}{C_c b_{f1}} \right)^2} + b_c \quad (23)$$

$$\xi_{p21}^* = (1 - b_{f2}) \sqrt{1 - \left(\frac{C_c}{C_{f2} \xi_{cl}^*} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{\xi_{cl}^* - b_c}{1 - b_c} \right)^2 \right]} + b_{f2} \quad (24)$$

ξ_{p12}^* 由下式解出

$$\left[1 + (1 - b_{f1})^2 \left(\frac{C_c}{C_{f1}} \right)^2 \right] \xi_{p12}^{*2} - 2b_{f1} \xi_{p12}^* + 2b_{f1} - 1 = 0 \quad (25)$$

$$\xi_{p22}^* = (1 - b_{f2}) \sqrt{1 - \left(\frac{C_c}{C_{f2} b_c} \right)^2} + b_{f2} \quad (26)$$

ξ_{c3}^* 由下面的一元二次方程式(27)解出

$$\left[1 + (1 - b_c)^2 \left(\frac{C_{f2}}{C_c} \right)^2 \right] \xi_{c3}^{*2} - 2b_c \xi_{c3}^* + 2b_c - 1 = 0 \quad (27)$$

ξ_{pl3}^* 由下面的一元二次方程式(28)解出

$$\left[1 + (1 - b_{f1})^2 \left(\frac{C_{f2}}{C_{f1}} \xi_{c3}^* \right)^2 \right] \xi_{pl3}^{*2} - 2b_{f1} \xi_{pl3}^* + 2b_{f1} - 1 = 0 \quad (28)$$

式中 C, C_{f1}, C_c, C_{f2} ——复合元件、上游接头、元件本体和下游接头的声速流导
 b, b_{f1}, b_c, b_{f2} ——复合元件、上游接头、元件本体和下游接头的临界压力比

4 合成结果及试验验证

由第 3.3 节的流量特性合成公式，在串联式节流器中发生声速流状态的场所可以通过两个节流器的声速流导 C 的比和前端的节流器的临界压力比 b 的比值来判断，并且发生声速流状态的场所不同合成公式也不相同。

利用第 2 节的四种复合被测元件的试验结果，通过所提案的合成方法得到的结果和试验结果进行比较如图 8~10 所示。基准接头的流量特性从试验结果可知上游侧的基准接头和下游侧的基准接头基本上一致。图 4b 和 4c 所示类型的复合被测元件是两段节流器的连接方式；图 4a 所示类型可以看作是三段节流器的连接方式。从合成结果可知，由于基准接头和被测电磁阀的声速流导的值比较接近，声速流状态通常容易发生在下游元件处。另外，合成值与试验值比较，声速流导的最大误差约为 8%，临界压力比的最大误差约为 0.08。这说明所提出的合成方法是适用的。

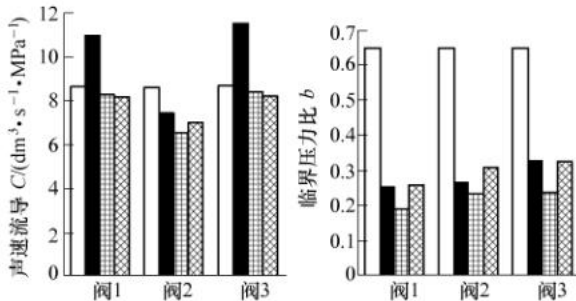


图 8 带上游侧接头的复合元件的试验及合成结果

□ 上游侧接头
 ■ 电磁阀本体
 ▨ 合成结果
 ▩ 试验结果

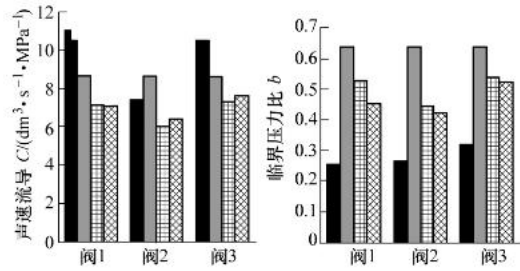


图 9 带下游接头的复合元件的试验及合成结果

■ 电磁阀本体
 ▨ 合成结果
 ▩ 试验结果

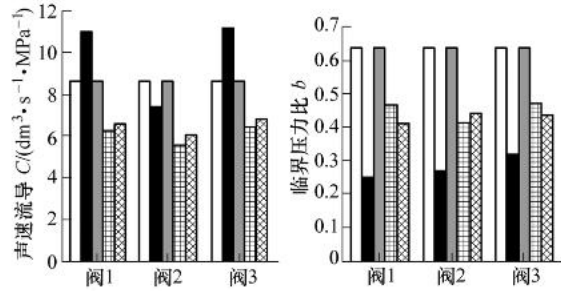


图 10 带上下游接头的复合元件的试验及合成结果

□ 上游侧接头
 ■ 电磁阀本体
 ▨ 合成结果
 ▩ 试验结果

5 小口径元件本体流量特性的计算

从第 4 节可以看到所提出的流量特性合成方法有良好的精度，如果两侧基准接头 $C_{f1}, b_{f1}, C_{f2}, b_{f2}$ 的和复合元件的 C 和 b 能够被测量的话，小口径元件本体的流量特性 C_c 和 b_c 是否能够计算出来的可行性进行探讨。

(1) 如果 $C=C_{f1}$ ，上游侧基准接头 1 处发生声速流，即不管复合被测元件呈何种流动状态时，被测元件处始终为亚声速流状态。被测元件本体的 C_c 和复合元件的 C 没有关系，因此被测元件只有流量—压力特性曲线上亚声速流区域中的 1 点的信息能够获得。从表 2 的计算公式中可知，元件本体的流量特性 C_c 和 b_c 在理论上是不能计算出来的。

(2) 如果 $C_{f1}/C_c > b_{f1}$ 且 $C_c/C_{f2} \leq b_c$ ，被测元件本体处发生声速流。由表 2 的合成公式，元件本体的流量特性 C_c 和 b_c 可由下面的联立方程式计算

$$\begin{cases} C = \xi_{p12}^* C_c \\ b = \xi_{p22}^* b_c \xi_{p12}^* \\ C_{f1} \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_{p12}^* - b_{p1}}{1 - b_{p1}} \right)^2} = C_c \xi_{p12}^* \\ C_c \sqrt{1 - \left(\frac{\xi_{p22}^* - b_c}{1 - b_c} \right)^2} = C_{f2} b_c \end{cases} \quad (29)$$

(3) 如果 $C_c/C_{f2} > b_c$, 上游侧基准接头 1 处发生声速流。和上述的(1)同样, 被测元件处始终为亚声速流状态。其本体的流量特性 C_c 和 b_c 在理论上是不能计算出来的。

根据上述的分析, 针对第 1 节的图 4 a~4c 所示三种类型的复合被测元件, 在基准接头和复合被测元件的流量特性已知的前提下, 通过按照上述分析的方法计算可以得知在图 4a 和 4c 所示类型的复合状况下声速流发生在下游侧的基准接头处, 故电磁阀本体的流量特性不能计算出来, 在图 4b 所示类型的状况下由于复合元件的 C_{AB} 小于上游侧基准接头的 C_A , 故声速流发生在被测电磁阀本体处, 利用表 1 所示合成公式可以计算出计算电磁阀本体的流量特性 C_B 和 b_B , 并与能够表征元件本体流量特性的卡钳式测量方式的试验结果进行比较, 结果见表 3。

表 3 小口径电磁阀本体流量特性的计算

流量特性参数	阀 1	阀 2	阀 3
A 处声速流导			
$C_A/(\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$	8.62	8.62	8.62
复合元件的声速流导			
$C_{AB}/(\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$	8.12	7.04	8.21
A 处临界压力比 b_A	0.641	0.641	0.641
复合元件的临界压力比 b_{AB}	0.339	0.308	0.436
发生声速流的位置	电磁阀	电磁阀	电磁阀
B 处声速流导(计算值)			
$C_B/(\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$	10.67	8.30	10.94
B 处声速流导(试验值)			
$C_{B0}/(\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$	11.01	7.69	11.50
误差 = $\frac{C_B - C_{B0}}{C_{B0}} / \%$	-3.1	7.9	4.8
B 处临界压力比(计算值) b_B	0.445	0.363	0.581
B 处临界压力比(试验值) b_{B0}	0.253	0.265	0.322
误差 $b_B - b_{B0}$	0.192	0.098	0.259

在表 3 中, 声速流导的误差采用百分比表示。临界压力比为 0~1, 是一个有限的参数。如果直接按照百分比的方法来表示误差的话, 根据文献[6]中对 b 值的误差计算公式, 即使采用等级 A 的测量仪器 b 值的测量系统误差也有可能达到 100%, 尤其是对小临界压力比的元件的测量时其误差会更大。另外, 不管 b 值是较大的或者较小的, 根据流量计算公式在同等绝对误差的情况下, 其对流量的计算影响的百分比误差远没有 b 值本身的百分比误差大。故从实际应用考虑, 本文中 b 值的误差不用百分比的方式表示, 而直接用绝对值的方式来表示。

由表 3 的结果可以看出, 当含有基准接头的复合被测元件中声速流发生在被测电磁阀处时, 可以通过基准接头和复合元件的流量特性计算出电磁阀本体的流量特性。 C 值的误差在 8% 以内, b 值的误差除阀 3 略微偏大外, 阀 1、2 均在 0.2 以内说明计算结果与试验值基本一致。

6 结论

(1) 带有基准接头的小口径被测元件的试验样式中, 连接接头对元件的流量特性的影响被确认。

(2) 推导出针对压缩性流体用元件的流量特性的合成方法。合成结果与试验结果一致。

(3) 当声速流发生在被测元件本体时, 利用所提的合成方法, 通过复合元件和已知相连元件的流量特性可以计算出其中未知元件的流量特性, 计算结果与试验结果基本一致。

参 考 文 献

- [1] ISO/TC[3]. ISO/TC 131. ISO6358:1989. Pneumatic fluid power - Components using compressible fluid - Determination of flow-rate characteristics[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.
- [2] 国家技术监督局. GB/T 14513-1993: 气动元件流量特性的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994. State Quality Supervision Bureau. GB/T 14513-1993 Pneumatic fluid power - Determination of flowrate characteristics of pneumatic components[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [3] ONEYAMA Naotake, ZHANG Huping, SENOO Mitsuru, et al. Study and suggestions on flow-rate characteristics of pneumatic components[C]// ISFP' 2003 Proceedings of the Fourth International Symposium on Power Transmission and Control, April 8-10, 2003, Wuhan, China. International Academic Publishers Word Publishing Corporation, 2003: 326-331.
- [4] KAGAWA Toshiharu, WANG Tao, ISHII Yukio, et al. Determination of flow rate characteristics of small pneumatic valves using isothermal chamber by pressure response[C/CD]//the Seventh Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization Proceeding, August 25-28, 2003, Sorrento, Italy. Optimage Ltd., Edinburgh, UK, 2003.
- [5] 藤燕, 孟国香, 张护平, 等. 气动元件合成流量特性的相关研究[J]. 液压与气动, 2004, 12: 28-30.

TENG Yan, MENG Guoxiang, ZHANG Huping. Study on composition flow-rate characteristics of pneumatic components[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004, 12: 28-30.

[6] 徐文灿, 谢富春. 串接声速排气法测定气动元件的流量特性[J]. 北京工业大学学报, 1988, 4(1): 23-31.

XU Wencan, XIE Fuchun. Measuring mass flow-rate characteristics of pneumatic components in series-mounting using sonic velocity exhaust method[J]. Journal of North China University of Technology, 1988, 4(1): 23-31.

[7] 成大先. 机械设计手册[M]. 4版. 北京: 化学工业出版社, 2002.

CHENG Daxian. Handbook of mechanical design[M]. 4th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.

作者简介: 王涛, 男, 1971年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为检测技术与自动化装置、流体传动及控制。

E-mail: wangtaobit@bit.edu.cn

彭光正, 男, 1964年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为检测技术与自动化装置、机器人技术。

香川利春, 男, 1950年出生, 教授。主要研究方向为流体系统的测量与控制。

湖南大学机械与运载工程学院简介

湖南大学机械与运载工程学院的前身为1908年兴办的机械科, 以及由此发展的机械工程系, 是湖南大学历史最悠久的院系之一, 原名为机械与汽车工程学院, 于2008年7月正式更名为机械与运载工程学院。

学院现设有车辆与运载工程系和机械工程系2个系, 建有国家高效磨削工程技术研究中心、汽车车身先进设计制造国家重点实验室、汽车电子与控制技术教育部工程技术研究中心、中国汽车技术与发展研究中心、湖南省汽车车身工程技术研究中心等多个国家级、部省级科研机构。

全院现有教职工180人, 其中中国工程院院士2人, 中国工程院双聘院士2人, “长江学者奖励计划”特聘、讲座教授2人, 国家“863”领域专家1人, 国家杰出青年基金获得者3人, “芙蓉学者”特聘教授2人, 部级有突出贡献中青年专家3人, 教育部优秀青年教师资助计划3人, 博士生导师37人, 教授47人, 副教授48人, 师资力量雄厚, 学术梯队稳定。

学院拥有机械工程博士后科研流动站和机械工程一级学科博士学位授予权, 拥有机械制造及其自动化、车辆工程、机械设计及理论、机械电子工程4个二级学科博士点; 拥有机械制造及其自动化、车辆工程、机械设计及理论、机械电子工程、动力机械与工程、热能工程6个二级学科硕士点; 拥有机械工程、工业工程2个专业硕士学位授权点。学院设有车辆工程、机械制造及其自动化、热能与动力工程、电子信息科学与技术、工业工程等5个本科专业。学院现有在籍学生2500余人, 其中研究生800余人, 本科生1700余人。

机械工程学科为一级学科国家重点学科, 机械制造及其自动化、车辆工程、机械设计及理论、机械电子工程四个学科为二级学科国家重点学科。在汽车设计与制造工程领域具有鲜明的特色, “汽车碰撞仿真及安全性设计技术”、“车身覆盖件冲压成型工艺与模具CAD/CAE/CAM一体化技术”、“汽车车身现代设计技术”、“高速高效精密磨削技术”等方面具有国内领先水平。“汽车覆盖件冲压工艺与模具设计理论、计算方法和关键技术”获国家科技进步一等奖, “汽车碰撞安全性设计与改进理论、方法及关键技术”获国家科技进步二等奖, “高速精密磨削加工关键技术与系列高档磨削数控装备”获国家科技进步二等奖, 在新概念汽车及电动汽车技术研究方面获得教育部发明一等奖。机械设计制造及自动化学科在“数控高速高效特种磨削技术与装备”、“数控群钻刃磨技术”、“激光加工”等方面有突出的优势。机械设计及理论学科在机构动力学、智能CAD、计算机图形学等方面成果累累。其他几个硕士学位授予权的学科与国内同行相比具有自己的特色和优势, 并已形成了稳定的学术方向和学术梯队。

国家高效磨削工程技术研究中心、汽车车身先进设计制造国家重点实验室、汽车电子与控制教育部工程研究中心、教育部特种装备先进设计技术与仿真国防重点实验室、湖南省汽车车身工程技术研究中心等, 具有国内先进的现代化设备和一支以“长江学者”和年轻的博士生导师为带头人的学术队伍, 是学院产、学、研相结合的重要教学、科研基地。

近几年来, 学院根据现代机械工业的发展趋势, 大力加强专业改造和人才培养模式改革, 取得了突出的成绩: 按机械大类制定了“机械+自动控制+信息技术”的复合型人才培养模式和培养方案, 大幅度地调整了学生的基础知识结构, 同时加强学生实践能力、创新能力的培养, 形成了以设计、制造、控制一体化为特色的实践能力培养体系。学院的教育教学改革成果曾获国家教学成果特等奖和湖南省教学成果一等奖等奖励。