

文章编号: 1672-9897(2006)02-0063-05

激波管中获得低强度激波的方法

林建民¹, 魏以嘉², 张大友²

(1. 中科院力学所 LHD, 北京 100080; 2. 航天科技集团 102 所, 北京 100076)

摘要:文中探讨了在相对高的驱动压比条件下获得低强度入射激波的变截面驱动方法 ($A_4/A_1 < 1$) 和等截面激波管中插入多孔板的方法。经实验比较等截面激波管获得的压力波形好, 但过低驱动压比时膜片选择困难、实验重复性差。介绍的两种方法可以获得更低强度入射激波, 但压力波形稍差, 有进一步改善的空间。

关键词:激波; 激波管; 膜片

中图分类号: O354.5 **文献标识码:** A

The methods of obtaining lower strength shock wave in shock tube

LIN Jian-min¹, WEI Yi-jia¹, ZHANG Da-you²

(1. LHD, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. The 102nd Institute of CASC, Beijing 100076, China)

Abstract: Two methods of obtaining lower strength shockwave in shock tube were explored: (1) the area change of drive section and driven section ($A_4 < A_1$). (2) adding orifice plates downstream of the diaphragm in shock tube. Comparing the two methods, the pressure curves of the region and in constant-area shock tube were excellent. But repeatability of experiment in the case of lower strength shock wave was not satisfying. The two methods had obtained lower strength shock wave easily, but pressure curves of the region were not so good.

Key words: shockwave; shockwave tube; diaphragm

0 引言

随着航天工业的不断发展,对各种小量程压力传感器的需求不断增加。其中,低压高频响应的压力传感器往往需要在激波管中进行动态性能的校准。这就要求作为标准信号源的激波管能够提供足够低强度激波的运行状态 ($M_s \approx 1.10$)。众所周知,当激波管的入射激波马赫数足够低时破膜压差极小 ($P_4 - P_5$),需用很薄的瞬时破膜性能优良的膜片。通常薄膜片的破膜效果不理想,重复性也差且经常出现掉膜,影响 3a 区气流品质。这些非理想破膜因素对激波的形成影响巨大,因此在较低的入射激波强度下获得理想波形十分困难。在相对高的驱动压比条件

下获得较低强度入射激波成为本文探索的主要目标。

1 变截面驱动方法

R. A. Alpher 和 D. R. white^[1]变截面驱动 ($A_4/A_1 > 1$) 获得强入射激波的工作给出很好的启示。文献[2, 3]探讨了 $A_4/A_1 < 1$ 时 3a 区流动为超声速的情况。为获得低强度激波应有较低的驱动压比,激波管应在以下两种情况下运行:(1) 低驱动压比时 $M_{3a} < 1$ 的情况;(2) 稍高驱动压比时 $M_{3a} = 1$ 的情况,见图 1。

第一种情况时扩张段入口附近的 3a 区至扩张段出口处 3b 区为定常膨胀区,出口处 3b 与 3 区参数偶合,即 $M_{3b} = M_3$,面积比与流动参数间的关系为:

收稿日期: 2005-05-08; 修订日期: 2006-03-02

作者简介: 林建民(1953-),男,湖南醴陵人,高级工程师。研究方向:气体动力学。

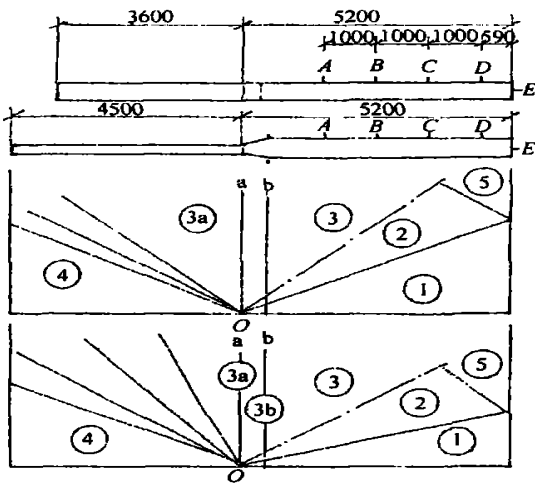


图1 等截面及变截面驱动示意图

Fig.1 Equal cross section drive and variable cross section drive

$$\frac{A_4}{A_1} = \frac{M_3}{M_{3a}} \left[\frac{1 + \frac{-1}{2} M_{3a}^2}{1 + \frac{-1}{2} M_3^2} \right]^{\frac{+1}{2(-1)}} \quad (1)$$

若假定变截面驱动与等截面驱动获得相同的入射激波强度,并沿用文献[1]中压力增益系数符号

$$G = (P_4)_{\text{变}} / (P_4)_{\text{等}} \quad (2)$$

则有:

$$G = \left\{ \left[\frac{1 + \frac{-1}{2} M_{3a}^2}{1 + \frac{-1}{2} M_3^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{2}{-1}} \quad (3)$$

由等熵关系有:

$$(a_4)_{\text{变}} / (a_4)_{\text{等}} = [(P_4)_{\text{变}} / (P_4)_{\text{等}}]^{\frac{-1}{2}} = G^{\frac{-1}{2}} \quad (4)$$

由激波管关系式可以写出:

$$M_3 = \left[\frac{(+1) M_s a_{41}}{2(M_s^2 - 1) G^{\frac{-1}{2}}} - \frac{-1}{2} \right]^{-1} \quad (5)$$

驱动压比公式为:

$$P_{41} = G \left[1 + \frac{2}{+1} (M_s^2 - 1) \right] \times \left[1 - \frac{-1}{+1} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) a_{14} G^{\frac{-1}{2}} \right]^{\frac{-2}{-1}} \quad (6)$$

在给定的激波管中 A_4, A_1 为已知,若再给定要求的 M_s 可由(1)、(3)、(5)式分别迭代出 M_3 ,并由(6)式确定预计的驱动压比。

第二种情形实质上是第一种情形的极端情况,这时 $M_{3a} = 1$ 。 M_3 可以由膨胀比(1)唯一确定,其余各

式也相应简化。以上迭代过程中等截面激波管的 M_3 可作为初始值代入计算。

2 在等截面激波管中插入多孔板

在已有的等截面激波管中,可以在膜片下游附近插入多孔板,利用孔板绝热节流的特性降低孔板下游区压强,从而降低入射激波强度。当然多孔板孔位布置的对称性和各孔的形状应有严格要求。为进一步降低入射激波强度还可以采用插入多重孔板的方法。插入孔板后激波管流动状态的预计可以通过实验确定孔板的损失系数后得到。值得指出的是若孔板流通面积过小,孔板后流动的三维效应显著,对波形的影响将是明显的。

3 实验及结果

3.1 实验设备及仪器

等截面激波管和变截面激波管及流动波图见图1。等截面激波管($A_4 = A_1$)内径 $\phi 100\text{mm}$ 。变截面激波管驱动段内径 $\phi 50\text{mm}$ ($A_4/A_1 = 0.25$)膜片下游用扩张段(锥度 1:4)将驱动段与被驱动段对接。等截面激波管增加孔板的实验中孔板安置在距膜片 160mm 处,两种孔板流通面积与被驱动段面积之比分别为 $A_i/A_1 = 60\%$ 和 40% 。被驱动段沿管壁同母线上开有 4 个测孔,测孔 A 距膜片 161mm,各测孔间距示于图 1。端壁中心位置设测孔 E。管壁测孔处安装 XT-190 量程为 0.7MPa 的压阻传感器用于测量激波速度。端壁用 Kistler 7001A 或 Endevco 8510B 传感器,测量信号分别经 DH-3846 或 5001、YE5850 放大器放大后送至 Nicolet 公司生产的 ODS-200 多通道数据采集系统。

3.2 实验状态

实验中被驱动段压力 $P_1 = 0.1\text{MPa}$,驱动段压力 $P_4 = 0.1102 \sim 1.986\text{MPa}$ 。实验获得的激波马赫数 $M_s = 1.017 \sim 1.825$,端壁 P_5 压力阶跃值在 $0.00814 \sim 1\text{MPa}$ 范围。

3.3 破膜试验

首先开展的膜片破膜实验结果列于表 1。膜片采用纯铝板和纯铝箔,几种厚度的膜片破膜时所需要的 P_4 压力及试验中膜片的开启程度、脱落情况一并列入表中。膜片开启程度用破膜后形成的流通面积

与被驱动段面积之比的百分数表达。由表中数据可以看出,当膜片厚度小于 0.05mm 以后,膜片的开启程度仅为 40%~20%,而且掉膜现象严重,这对入射激波的形成影响很大。由于膜片撕裂的状况极不规则且无规律,故不可以做为大口径孔板看待和使用。

表 1 膜片情况

Table 1 Diaphragm situation

膜片厚度(mm)	破膜压力(MPa)	膜片开度(%)	掉膜情况
0.5	1.1	100	不掉
0.3	0.75	95	不掉
0.2	0.465	90	不掉
0.12	0.265	80	少量
0.05	0.095	80	少量
0.02	0.02	40	大量
0.013	0.01	20	严重
0.0065	0.006	20	全部

3.4 入射激波形成距离

入射激波的形成主要依据压力波形前沿起跳陡峭程度来判断。限于目前设备测孔位置,仅给出大致结果。等截面激波管时, $M_s > 1.04$ 时在 A 点即距离膜片 $L/d = 16$ 时已经形成。 $M_s = 1.02$ 时在 B 点 ($L/d = 26$) 时已经形成。增设孔板 ($A_i/A_1 = 40%$, $A_i/A_1 = 60%$) 后的激波形成距离与等截面激波管时相当。变截面驱动条件下 ($A_4/A_1 = 0.25$), 在 $1.05 < M_s < 1.1$ 时与等截面激波管相同, $M_s < 1.04$ 后在 B 点激波已经形成。

3.5 激波衰减

入射激波最大沿程衰减率由下式计算并列于表 2。

$$\max = \frac{M_s}{L/d} \quad (7)$$

表 2 几种情况下激波最大衰减率

Table 2 The largest shockwave decay rate in different situation

P_5	$A_4/A_1 = 1$	$A_i/A_1 = 40\%, 60\%$	$A_4/A_1 = 0.25$
0.02MPa	2×10^{-4}	2×10^{-4}	3×10^{-4}
0.055MPa	2×10^{-4}	2×10^{-4}	3×10^{-4}
1MPa	6×10^{-4}	6×10^{-4}	

由表中数据可以看出,增设孔板后的最大激波沿程衰减率与等截面时相同。变截面驱动时,激波最大沿程衰减率稍大。

3.6 驱动压比与激波马赫数

以上实验条件下获得的驱动压比与入射激波马赫数关系曲线绘于图 2。图中同时绘出理想激波管和变截面驱动的计算曲线。等截面实验点曲线与理想激波管曲线在 $M_s < 1.2$ 时符合较好; $M_s > 1.2$ 后出现偏差,这主要由流动中粘性效应引起。

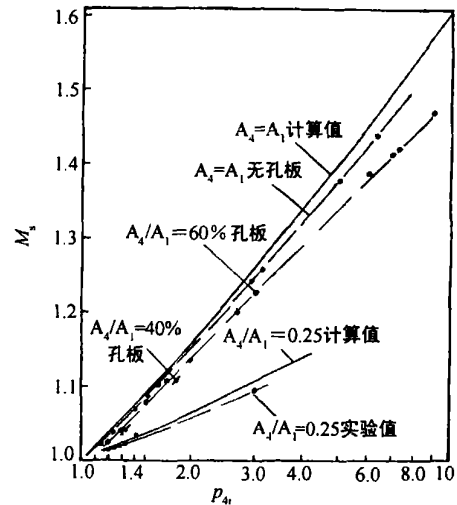


图 2 入射激波马赫数与驱动压比曲线

Fig.2 The Mach number of drive shock and the curve of drive pressure ratio

增设孔板后 ($A_i/A_1 = 60%$), 实验点曲线呈线性规律, $M_s > 1.1$ 后与无孔板曲线间距逐渐扩大, 这恰恰是大驱动压比下增设孔板以获得较低的入射激波的目的所在。例如在 $M_s = 1.38$ 附近时无孔板条件下需 $P_4 = 0.48\text{MPa}$, 而增设孔板后 ($A_i/A_1 = 60%$) $P_4 = 0.6\text{MPa}$, P_4 增加了 25%。当 $M_s < 1.1$ 且进一步减小时, 所需的驱动压力等差减少。若要在更高的驱动压力下获得低 M_s 可以进一步减小孔板的流通面积。由图 2 中 $A_i/A_1 = 40%$ 的实验点可以看出 $M_s = 1.1$ 和 $M_s = 1.04$ 时的驱动压比比无孔板所需驱动压比要高出许多, 比 $A_i/A_1 = 60%$ 情况也明显增大。

变截面驱动 ($A_4/A_1 = 0.25$) 的计算曲线与实验结果亦绘于图 2。由图可见 $M_s = 1.1$ 时实验点与计算值有明显偏差, 但 $M_s < 1.04$ 后两者十分接近。这说明在极低 M_s 下, 以上计算方法可以准确预计激波管流动状态。与等截面激波管及增设孔板后的曲线相比, 获得低强度入射激波变截面驱动需要高得多的驱动压力 (例如 $M_s = 1.1$ 时, $P_{4\text{变}}/P_{4\text{等}} = 1.8$)。驱动压

比降低后变截面驱动可以容易地获得比等截面驱动时更低强度的入射激波。

3.7 压力波形的比较

图3绘出等截面激波管和加孔板($A_i/A_1 = 0.6$)后在 $M_s = 1.42$ 时 P_2 、 P_5 曲线,其中 P_2 测点位于膜片下游3.61m处。经比较可以看出两组曲线的前沿及压力平台形状相同。图4绘出更低 M_s 时的等截

面激波管、增设孔板($A_i/A_1 = 0.6, 0.4$)和变截面驱动获得的 P_2 及 P_5 曲线。图中诸曲线显示除变截面驱动时 P_5 传感器不同引起的些许差异外,4组曲线形状相近,说明该运行状态下增设孔板或变截面驱动均可获得较好的压力波形。仔细观察还可以发现 $A_i/A_1 = 0.6$ 时的 P_5 曲线压力平台部分的脉动最小,甚至优于等截面激波管情况。图5、图6分别给出等截面

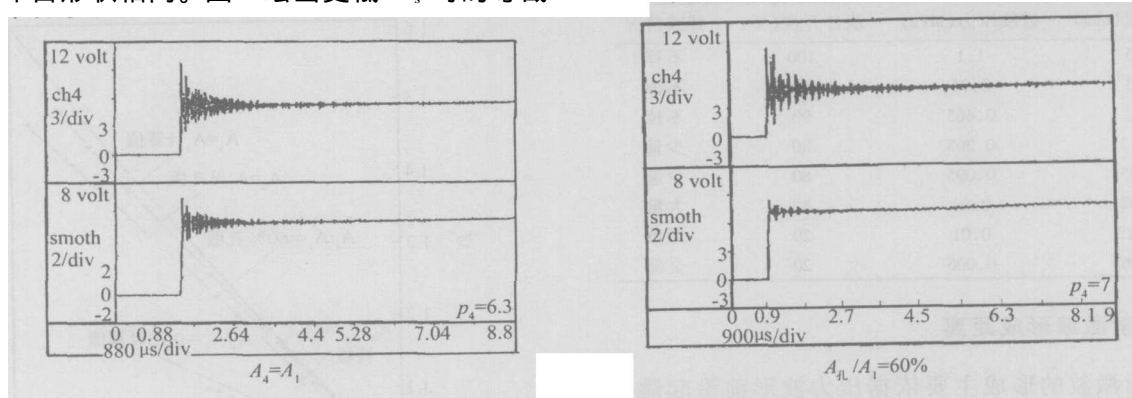


图3 $A_4 = A_1$ 和 $A_i/A_1 = 0.6$ 在 $M_s = 1.42$ 时压力曲线

Fig.3 Pressure curve ($A_4 = A_1, A_i/A_1 = 0.6, M_s = 1.42$)

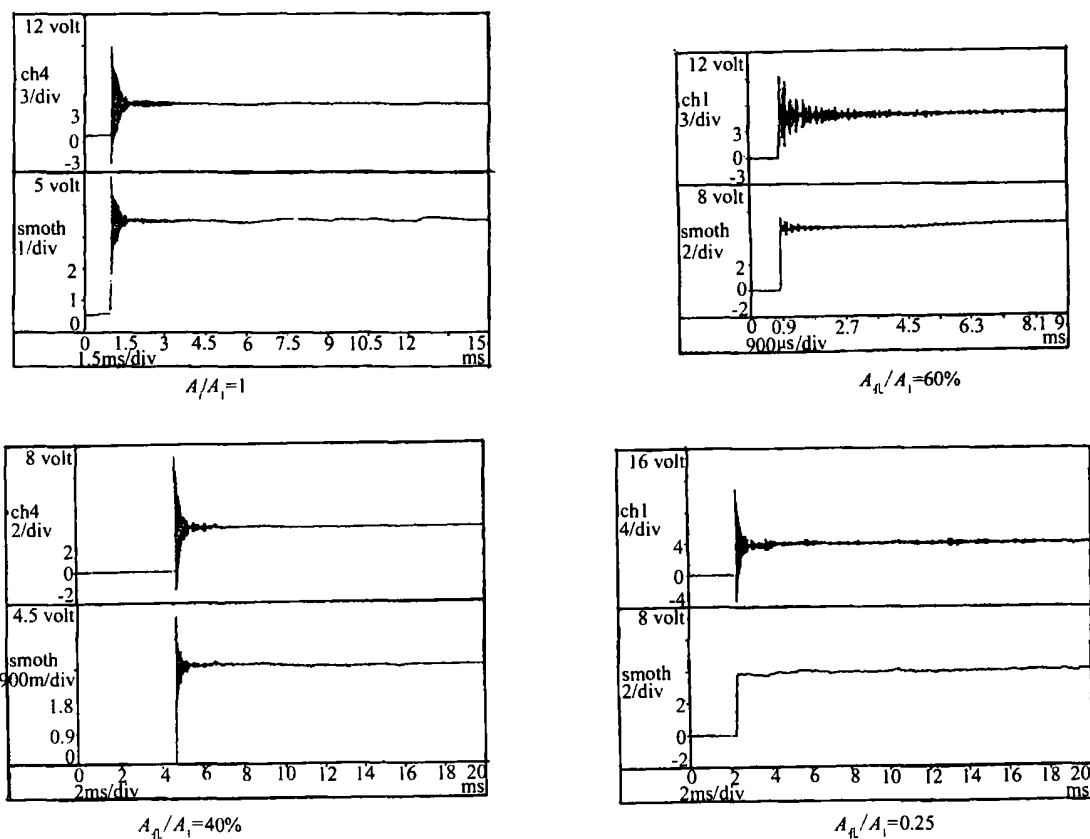


图4 $A_4 = A_1$ 和 $A_i/A_1 = 0.6$ 在 $M_s = 1.1$ 时压力曲线

Fig.4 Pressure curve ($A_4 = A_1, A_i/A_1 = 0.6, 0.4, 0.25, M_s = 1.1$)

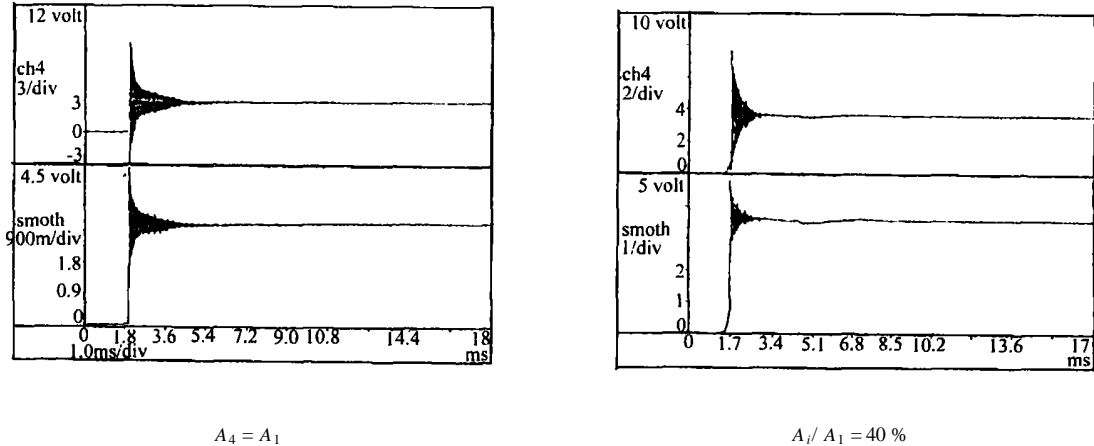


图 5 $A_4 = A_1$ 和 $A_i/A_1 = 0.4$ 在 $M_s = 1.04$ 时压力曲线

Fig.5 Pressure curve($A_4 = A_1, A_i/A_1 = 0.4, M_s = 1.04$)

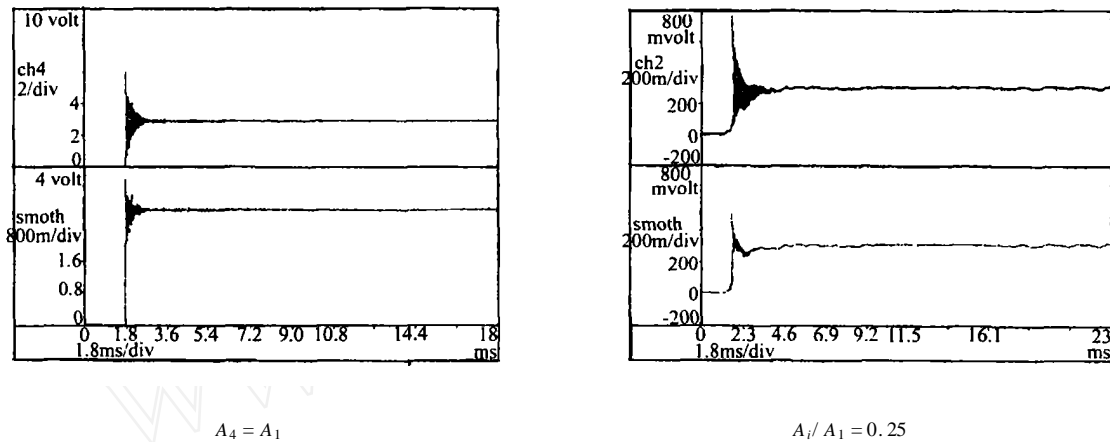


图 6 $A_4 = A_1$ 在 $M_s = 1.02$ 及 $A_i/A_1 = 0.25$ 在 $M_s = 1.017$ 时压力曲线

Fig.6 Pressure curve($A_4 = A_1, M_s = 1.02$ and $A_i/A_1 = 0.25, M_s = 1.017$)

激波管与 $A_i/A_1 = 0.4$ 和 $A_4/A_1 = 0.25$ 时的压力曲线。经比较可以看出等截面激波管获得的波形最优。 $M_s = 1.04$ 时增设孔板的 P_5 曲线及变截面驱动 $M_s = 1.017$ 时 P_5 曲线的前沿及压力平台脉动均不甚理想。但是值得指出的是,等截面激波管获得如此低的入射激波 M_s 数是十分偶然的难于重复,而另外两种方法的驱动压力较高实验重复性亦好。经过对孔板孔形的调整或改变变截面驱动段的膨胀比,有望进一步获得波形好、重复性优的实验结果。

4 结 论

在目前情况下,进一步发掘激波管在低压条件下开展小量程压力传感器的动态性能校准的潜能是十分必要的。以上探讨的变截面驱动方法($A_4/A_1 < 1$)和等截面激波管中插入多孔板的方法均可在较高的驱动压比下获得低强度入射激波。实验结果显示,增设孔板后入射激波形成距离和最大沿程衰减率与等截面激波管相当,变截面驱动时仅在极低 M_s 时出现

稍许差异。初步实验结果表明,等截面激波管在低驱动压比下获得的压力波形最优,但实验重复性差。变截面驱动及加入多孔板的方法可以获得更低强度的入射激波,但波形不甚理想,距作为传感器标定源的要求尚有差距。应当看到这里介绍的两种方法有很大的改善空间,继续开展工作有可能获得满意的结果。

限于篇幅,文中对非理想破膜,粘性边界层等因素引起的激波形成及衰减未做探讨。

参考文献:

- [1] ALPHER R A, WHITE D R. Flow in shock tubes with area change at the diaphragm section [J]. J. Fluid Mech. 1958, (13): 457 ~ 470.
- [2] 俞鸿儒,林建民,李仲发,等. 扩张激波管流动波图观察 [J]. 空气动力学学报, 1984, 2(3): 88 ~ 91.
- [3] 林建民,李仲发,俞鸿儒,等. 大口径激波管中降低雷诺数的方法 [J]. 气动实验与测量控制, 1992, 6(2): 20 ~ 24.