

等面积混合模型与等压混合模型的理论比较*

闫宝珠, 袁圣付, 陆启生

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 利用一维定常流理论, 建立了超声速引射器中从混合段到扩压器出口的冷气流混合模型。经过计算, 得到了在不同的输入条件下, 等面积混合模型和等压混合模型的恢复压力。比较结果, 发现等压混合并不总是优于等面积混合, 并得出了判断等面积混合与等压混合优劣的条件。在更改参考文献中的部分输入参数后, 得出了同样的结论。

关键词: 引射器; 等面积混合; 等压混合; 化学激光

中图分类号: TN248.5; O354 **文献标识码:** A

Theoretical Comparison of Constant-area Mixing Model and Constant-pressure Mixing Model

YAN Bao-zhu, YUAN Sheng-fu, LU Qi-sheng

(College of Opto-electric Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The one-dimension mixing model is established from steady state theory, thus the recovery pressures of constant-area mixing model and constant-pressure mixing model are attained. The result implies that the performance of constant-pressure mixing is not always better than that of constant-area mixing, so a criterion is established to estimate the better one of the two mixing models. The consistent conclusion is attained by altering some of the initial parameters in reference.

Key words: ejector; constant-area mixing; constant-pressure mixing; chemical laser

自 1969 年美国科学家 Spencer 等人首次成功演示连续波化学激光器以来, 连续波化学激光器就以其特有的优势, 如连续出光功率高、工程放大性能好、不需要外加电源、激发介质不存在废热沉积等, 一直备受关注, 在 20 世纪七八十年代得到飞速发展。但是, 由于所需要的激射环境压力很低(一般只有几个 torr), 单靠扩压器只能使压力恢复到一个较低的水平(国外恢复到 200 torr 左右), 因此, 需要加上引射系统, 才能使废气排出。超声速引射器在化学激光器中用于提高恢复压力, 大致有两种实现方式: (1) 引射器设置在亚声速扩压器的后面(如图 1 中的位置 ①), 采用亚-超引射方式; (2) 引射器设置在扩压器的等面积段(如图 1 中的位置 ②), 采用超-超引射方式。

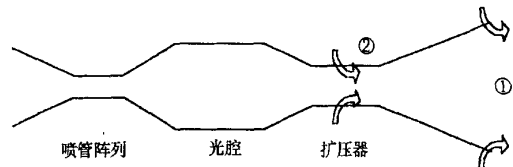


图 1 超声速引射器在化学激光器中的应用方式

Fig. 1 Methods of supersonic ejectors used in chemical lasers

随着高功率化学激光器的出现和迅速发展, 超声速引射器得到了越来越多的关注, 从而也得到了进一步的发展。根据连续方程、动量方程和能量守恒方程, 人们建立了超声速引射器的一维混合模型^[1-4], 对理论模型进行了细致的研究工作, 并通过大量的实验进行验证。文献[1-4]从理论和实验两方面研究了超声速引射器的工作性能及气流参数对恢复压力的影响, 文献[5-6]研究了多级引射系统的理论模型, 重点将理论计算结果和高能激光武器系统中多级引射系统的实验结果做了比较。事实表明, 根据工程经验对理论模型的计算结果做一定的修正之后, 可以利用它来指导实际的超声速引射器设

* 收稿日期: 2007-04-06

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 闫宝珠(1980—), 男, 博士生。

计工作^[1,4-5]。等压混合模型和等面积混合模型,是对一维模型做了一定的简化之后得出的结果,一般认为,等压混合的压力恢复性能要优于等面积混合^[2-4]。本文在某特定的输入参数下得到了相反的结论,由此分析了这种矛盾产生的原因,并提出了一个判断等压混合与等面积混合优劣的判据。

1 一维模型

1.1 混合模型^[1,4]

图2为一维混合模型示意图,引射气流与被引射气流在混合段混合,假设在到达混合段出口平面时已完全混合,通过横截面积不变的超声速扩压器后,在超声速扩压器出口平面处,速度已减小为亚声速,气流在亚声速扩压器中进一步减速升压后,从出口排出,在出口平面处认为气流速度为零。

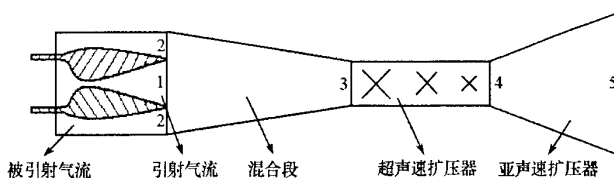


图2 一维混合模型示意图

Fig.2 Schematic of one-dimension mixing model

由于超声速引射器的混合过程十分复杂,所以在建立一维模型中,引入了很多必要的简化,如不考虑气流粘性、不考虑气流横截面上的不均匀性、忽略气流与壁面的摩擦和热交换、认为引射气流和被引射气流是比热恒定的理想气体(即量热完全气体)、认为两股气流完全混合等。根据以上的假设,得出以下四个方程:

$$\text{连续方程} \quad m_1 + m_2 = m_3 \quad (1)$$

$$\text{动量方程} \quad P_1 A_1 + P_2 A_2 + \int_{1+2}^3 P dA - P_3 A_3 = m_3 u_3 - m_1 u_1 - m_2 u_2 \quad (2)$$

$$\text{能量守恒方程} \quad m_1 C_{p1} T_1 + m_2 C_{p2} T_2 + (1/2) m_1 u_1^2 + (1/2) m_2 u_2^2 = m_3 C_{p3} T_3 + (1/2) m_3 u_3^2 \quad (3)$$

$$\text{状态方程} \quad P_3 V_3 = (m_3 / w_3) R T_3 \quad (4)$$

其中, R 为普适气体常数, $V_3 = u_3 A_3$, 下标 1 为引射气流参数, 2 为被引射气流参数, 3~5 为图 2 中各位置气流状态参数。如果给定面积 A_3 、以上四个方程及四个未知数 (P_3 、 u_3 、 m_3 、 T_3), 理论上可以求得状态 3 的各个参数值。但是, 动量方程中的积分给计算带来了很大的麻烦。于是, 需要引入等面积混合和等压混合两种简化形式。

等面积混合模型假设混合段为一个横截面积不变的直管道, 即

$$A_3 = A_1 + A_2 \quad (5)$$

于是动量方程中的积分等于零, 即

$$P_1 A_1 + P_2 A_2 - P_3 A_3 = m_3 u_3 - m_1 u_1 - m_2 u_2 \quad (6)$$

这样, 由方程(1)、(3)~(6)即可解得 P_3 、 u_3 、 m_3 、 T_3 、 A_3 。

等压混合模型假设在混合段壁面上静压保持不变, 于是

$$P_3 = P_2 \quad (7)$$

$$\int_{1+2}^3 P dA = P_2 (A_3 - A_1 - A_2) \quad (8)$$

因此动量方程变为

$$(P_1 - P_2) A_1 = m_3 u_3 - m_1 u_1 - m_2 u_2 \quad (9)$$

这样, 由方程(1)、(3)、(4)、(7)、(9)即可解得 P_3 、 u_3 、 m_3 、 T_3 、 A_3 。

上述方程中, 等面积混合模型通常有两个解, 一个是超声速解, 一个是亚声速解。超声速解经过一道正激波作用后, 就得到了亚声速解, 在这里, 我们取超声速解(取亚声速解也可以, 但要注意后面的扩压模型中就没有激波损失了)。等压混合模型只有一个解, 可能是超声速解, 也可能是亚声速解。得到的解要经过热力学第二定律的检验, 不满足热力学第二定律的解是伪解, 不予采纳。对于量热完全气体

(C_p 、 C_v 不变), 熵增为 $\Delta S = mC_p \cdot \ln(T'/T) - m(R/w) \cdot \ln(P'/P)$ 。于是, 对于混合过程, 热力学第二定律应表示为:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = m_1 C_{p1} \cdot \ln \left[\frac{T_3}{T_1} / \left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{k_1-1}{k_1}} \right] + m_2 C_{p2} \cdot \ln \left[\frac{T_3}{T_2} / \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{k_2-1}{k_2}} \right] \geq 0 \quad (10)$$

1.2 扩压模型

超声速扩压器中复杂的拟正激波串对气流的作用, 通常可用一道正激波来近似代替^[3,7]。正激波关系式为^[8]:

$$\frac{P_{04}}{P_{03}} = \left[\frac{(k_3 + 1) Ma_3^2}{2 + (k_3 - 1) Ma_3^2} \right]^{\frac{k_3}{k_3 - 1}} / \left(\frac{2k_3}{k_3 + 1} Ma_3^2 - \frac{k_3 - 1}{k_3 + 1} \right)^{\frac{1}{k_3 - 1}} \quad (11)$$

其中, 下标 0 为气流滞止参数, 假设气流在到达平面 5 时, 速度已经滞止为零, 则

$$P_5 = P_{04} \quad (12)$$

2 计算结果与分析

2.1 问题的提出

初始入口参数如表 1 所示。根据上述数学模型, 计算得出恢复压力分别为: 等压混合 1.87atm, 等面积混合 2.44atm, 两个结果对应的熵增分别为 125.0J/K 和 116.7J/K, 都大于零, 表明它们都是真实解。从这个结果中可以看出, 等面积混合的压力恢复性能好于等压混合, 而文献[2-4]都得出等压混合优于等面积混合的结论, 两者显然相互矛盾。

表 1 计算采用的初始入口参数

Tab.1 Initial parameters in the computation

	Ma 数	出口面积(mm ²)	总压(atm)	总温(K)	等压热容(J/kg/K)	分子量(g/mol)
引射气流	4	300	12.9	300	5198	4
被引射气流	2	100	1	300	1031	28

2.2 分析原因

等压混合的性能是否优于等面积混合, 关键在于混合段出口速度的大小, 混合段出口速度越大, 正激波引起的总压损失越大, 最终导致恢复压力的下降。而混合段出口速度的大小取决于混合段出口与入口面积比, 假设两个模型的入口参数相同(混合段入口面积也相等), 对于等压混合, 如果其混合段出口面积大于入口面积, 即大于等面积混合的混合段出口面积, 意味着等压混合的混合段出口速度大于等面积混合, 所以其性能将比等面积混合差。

由方程(1)、(3)、(4)、(7)、(9)可解得等压混合时对应的混合段出口面积 $A_{3\varphi}$, 为了简化计算, 这里令两气流在混合段入口处静压相等^[2-4], 即

$$P_1 = P_2 = P_3 = P \quad (13)$$

于是, 由式(9)得出速度

$$u_{3\varphi} = (m_1 u_1 + m_2 u_2) / m_3 = (m_1 u_1 + m_2 u_2) / (m_1 + m_2) \quad (14)$$

由式(3)得出温度

$$T_{3\varphi} = [m_1 C_{p1} T_1 + m_2 C_{p2} T_2 + (1/2) m_1 u_1^2 + (1/2) m_2 u_2^2 - (1/2) m_3 u_{3\varphi}^2] / (m_3 C_{p3}) \quad (15)$$

因此, 由式(4)即可得出面积

$$A_{3\varphi} = m_3 RT_{3\varphi} / (P u_{3\varphi} w_3) \quad (16)$$

将混合段出口面积与入口面积相比, 并作简化得:

$$\frac{A_{3\varphi}}{A_1 + A_2} = \frac{2P(m_1 + m_2)(w_1 C_{p1} u_1 A_1 + w_2 C_{p2} u_2 A_2) + R m_1 m_2 (u_1 - u_2)^2}{2P(A_1 + A_2)(m_1 C_{p1} + m_2 C_{p2})(m_1 u_1 + m_2 u_2)} \left(\frac{m_1}{w_1} + \frac{m_2}{w_2} \right) \quad (17)$$

当此式大于1时,等压混合对应的混合段是扩张的,其压力恢复性能将比等面积混合差;当此式小于1时,等压混合对应的混合段是收缩的,其压力恢复性能将优于等面积混合。当然,如果等压混合模型中的混合段出口速度为亚声速,则式(17)不能作为判断等压混合与等面积混合性能优劣的条件。

2.3 验证式(17)的有效性

2.1 节中算例的入口参数对应的等压混合模型混合段出口马赫数为 3.1,属超声速气流,所以可以用式(17)来判断等面积混合与等压混合的优劣,经计算,对应式(17)的值为 1.3335 > 1,所以,等面积混合的性能好于等压混合。

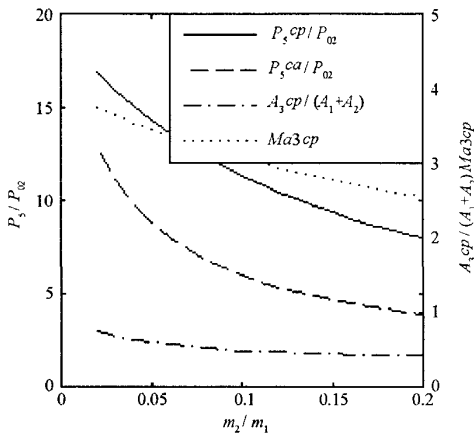


图3 文献[4]中图 2.11(a)
Fig.3 Fig.2.11(a) in ref. [4]

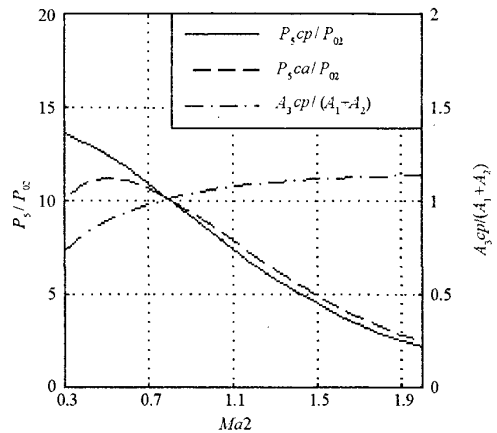


图4 修改文献[4]中部分参数后的结果
Fig.4 The result attained by altering some of parameters in ref. [4]

图3所示为文献[4]中的计算结果(文献[4]中的图 2.11(a)),同时画出了对应的等压混合的混合段出口马赫数(图中点线)和式(17)的值(图中点划线),由图可见,在计算所采用的入口参数范围内,等压混合模型混合段出口均为超声速气流,所以可以用式(17)来判断等面积混合与等压混合的优劣,对应式(17)的值都小于1,所以,等压混合好于等面积混合。将文献[4]输入参数中的被引射气流与引射气流分子量比改为 29/4,被引射气流与引射气流的质量比改为 0.1,以被引射气流的 Ma 数作为变量,得到图 4。图 5 为图 4 中各情况对应的熵增和等压混合模型中混合段出口马赫数,它表明图 4 中各解都是真实解,且可以用式(17)来判断等面积混合与等压混合的优劣。由图 4 可以看出,当 Ma2 = 0.766 时,式(17)的值为 1,对应于等面积混合与等压混合的性能相同;当 Ma2 < 0.766 时,式(17)的值小于 1,对应于等压混合的性能比等面积混合的性能好;当 Ma2 > 0.766 时,式(17)的值大于 1,对应于等面积混合的性能比等压混合的性能好。

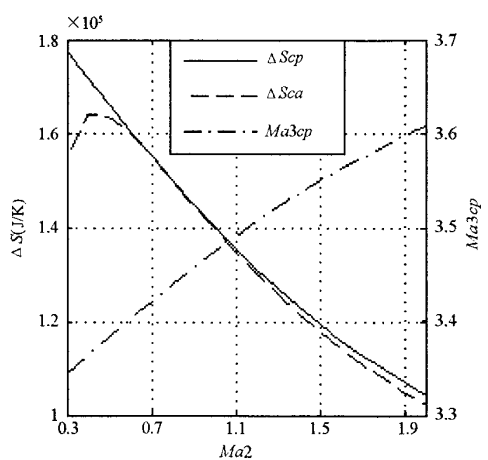


图5 图4中的熵增和等压混合模型混合段出口马赫数
Fig.5 The increment of entropy and Mach number at state 3 of constant pressure mixing in fig.4

3 结论

由上述一维数学模型的计算结果可见,判断等压混合与等面积混合的优劣,不能绝对地说哪一个好,而是由式(17)作为判断依据,即:在保证等压混合模型中混合段出口气流为超声速的前提下,如果式(17)的值大于1,则等面积混合的性能好于等压混合;反之,如果式(17)的值小于1,则等压混合的性能好于等面积混合。这一结果对超声速引射器的设计工作,特别是混合段的设计,有着重要的指导意义。

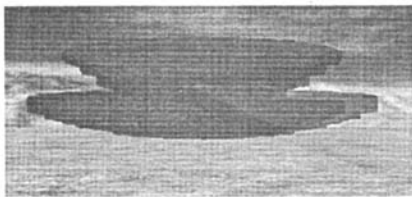


图2 分辨率为 $36 \times 100 \times 100$ 平地时的实验结果
Fig.2 Result on plane terrain, resolution = $36 \times 100 \times 100$

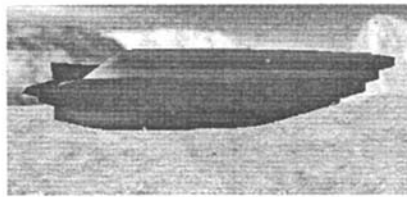


图3 分辨率为 $180 \times 100 \times 100$ 随机地形的实验结果
Fig.3 Result on random terrain, resolution = $180 \times 100 \times 100$

4 结论与展望

本文提出了一种基于硬件加速的数字战场环境中三维雷达作用范围表现方法,充分利用 APM 模型计算平面内雷达波传播因子在精度和效率方面的优势,联合多个平面的传播衰减构造出环境影响下相对精确的三维衰减数据场,将传统基于四面体网格的等值面提取算法移到 GPU 上去执行,通过等值面提取得到最终的三维雷达作用范围。该方法不仅保证了雷达作用范围的精度,而且充分利用了当前图形硬件在通用计算方面的能力,从而降低了 CPU 负荷,保证了表现的速度,适合于数字化战争中三维虚拟战场环境中多维信息的实时交互表现。

本文仅仅针对地形大气等自然环境的影响进行了讨论,没有涉及电磁环境等其他干扰的情况,由于实际电磁环境是复杂多变的,要想得到完全精确的雷达作用范围,必须进一步考虑这些干扰情况。另外,由于显卡内存毕竟有限,所以对于超过显卡内存容量的体数据,如何利用硬件进行加速提取和绘制仍然有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Patterson W L, Barrios A E. Advanced Propagation Model (APM) Ver. 1.3.1 Computer Software Configuration Item (CSCI) Documents[R]. 2002, SPACE and Naval Warfare Systems Center San Diego CA, Report Number: A125804.
- [2] Lorensen W E, Cline H E. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surfaces Construction Algorithm[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4):163 - 169.
- [3] Matsumura M, Anjyo K. Accelerated Isosurface Polygonization for Dynamic Volume Data Using Programmable Graphics Hardware[C]//Visualization and Data Analysis 2003, Santa Clara, CA Proceedings of SPIE, 2003: 145 - 152.
- [4] Thomas K, Simon S, Thomas E. Hardware-accelerated Reconstruction of Polygonal Isosurface Representations on Unstructured Grids [C]// Proceedings of the Computer Graphics and Applications, IEEE Computer Society, 2004:186 - 195.
- [5] Blake V, Radar L. Range-performance Analysis[M]. Norwood, MA, Artech House, Inc., 1986:467.
- [6] Craig K H, Levy M F. Parabolic Equation Modelling of the Effects of Multipath and Ducting on Radar Systems[J]. IEEE Proc. F, 1991, 38(2): 153 - 162.
- [7] Giertsen C. Volume Visualization of Sparse Irregular Meshes[J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 1992, 12(2):40 - 48.

(上接第 33 页)

参考文献:

- [1] Dutton J C, Mikkelsen C D, Addy A L. A Theoretical and Experimental Investigation of the Constant Area, Supersonic-supersonic Ejector[J]. AIAA Journal, 1981, 20(10):1392 - 1400.
- [2] Keenan J H, Neumann E P, Lustwerk F. An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment[J]. Journal of Applied Mechanics, 1950, 17: 299 - 309.
- [3] Emanuel G. Optimum Performance for a Single-stage Caseous Ejector[J]. AIAA Journal, 1976, 14(9):1292 - 1296.
- [4] 徐万武. 高性能、大压缩比化学激光器压力恢复系统研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2003.
- [5] Acebal R. Multi-stage Steam Ejector Methodology: Model Development and Application to High Energy Lasers[R]. AIAA - 85 - 1601, 1985.
- [6] Schreiber H, Acebal R. Multi-stage Ejector Methodology: Model Enhancement and Comparison to High Energy Laser Experiments[R]. AIAA - 88 - 2753, 1988.
- [7] Walter R F, O'Leary R A. Pressure Recovery in COIL Devices[R]. AIAA - 1994 - 2456, 1994.
- [8] 潘锦珊, 方人淞, 申振华, 等. 气体动力学基础(修订版)[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1995.

