

矩形喷流的相似性 及流场积分计算方法研究

西北工业大学 张正科 姜正行

矩形喷流的红外隐身效果明显地优于轴对称喷流。矩形喷管的壁板可调, 推力矢量可调的特点也已引起广泛的注意。国外早期矩形喷流的研究多限于实验, 近年来在数值计算方法上取得进展^[1]。国内这方面的工作未充分开展。本文在总结现有各类实验数据的基础上, 给出计算等压可压矩形喷流的积分计算方法。

一、矩形喷流的流场结构及相似性

矩形喷流的发展按其轴心参数(速度、温度等)的衰减可划分为三个阶段。剪切层还未扩展到整个流场, 从而存在一个等速核心区的核心段。发生于矩形喷口上下两长边的剪切层相会于轴心, 轴心速度、温度开始衰减的特征衰减段。发生于左右两短边的剪切层相会于轴心, 速度、温度以更快方式衰减的扩张衰减段(图 1)。

从特征段开始, 矩形喷流的速度、温度剖面显示出相似性。在特征段, 短轴中平面(即 x, z 中平面)存在相似性, 而长轴中平面(x, y 中平面)及其平行平面, 则出现马鞍形剖面, 即峰值不在轴心及 x, z 中平面。但到了扩张段, x, y 中平面的峰值已发展到轴心, 同时剖面显示出相似性, 且与 x, z 中平面相似剖面很吻合。

通过对实验数据的进一步整理还发现, 在喷流的每一横截面, 平行于 x, y 中平面的速度剖面具有相似性, 温度剖面也应具有类似的相似性, 但不同横截面的相似剖面不同。另外, 特征段的 x, y 中平面的马鞍形剖面从速度峰值处($y = y^M$)和温度峰值处($y = y^{MT}$)分开后两侧分别处理, 则峰值两侧都显示出相似性, 且外侧的相似剖面与峰值已到轴心后(即扩张段)的 x, y 中平面相似剖面很吻合^[2]。这些相似性规律可由实验数据拟合。

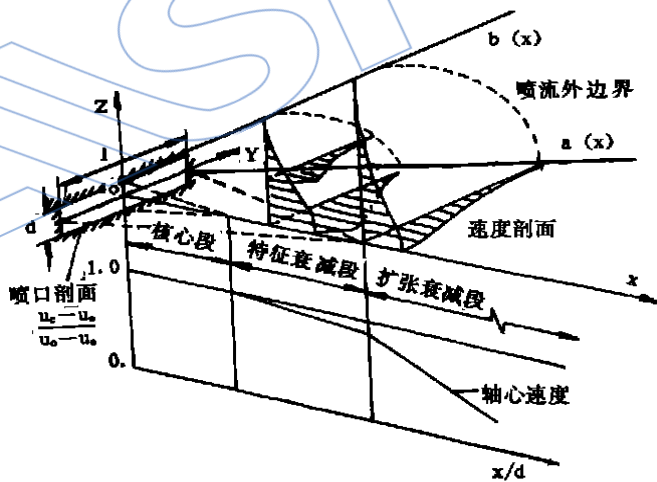


图 1 矩形喷流流场结构示意图

矩形喷流的半速度边界和半温度边界可进行相似化处理, 即以特征长度 l 无量纲化后几乎不与 AR 有关而只是 X/l 的函数 (l, d 为喷口宽和高, AR 为宽高比)。两个中平面的外边界可由半速度边界和半温度边界换算得出^[2]。

矩形喷流的横截面等值线和外边界是椭圆形^[3]或近似椭圆形^[4], 其长轴和短轴随着喷流往下游发展而呈准周期性交替变换^[2,3]。

二、矩形喷流的积分方法

考虑外流速度 u_e , 热焓 h_e 为常数的等压矩形喷流。对其 x 向动量方程和能量方程^[1,2]沿喷流横截面积分, 可得动量差和热焓差二积分守恒关系式。按矩形喷流横截面外边界为椭圆, 可将沿横截面的二重积分化为先对 y 后对 z 的二次积分。然后利用相似性规律将内层积分 (对 y 的积分) 转移到 x, y 中平面上。至此, 在每一横截面上的待求量 $\Delta \bar{u}_c(\bar{x}), \Delta \bar{h}_c(\bar{x})$ 不仅包含在每个守恒式中, 而且包含在守恒式的被积函数中。所以, 对二守恒式的求解归结为用迭代逼近方法求下列联立方程组的根 $\Delta \bar{u}_c$ 和 $\Delta \bar{h}_c$:

$$G_1(\Delta \bar{u}_c, \Delta \bar{h}_c) = \frac{(1 - 1/n)^\beta \Delta \bar{h}_c^\beta}{4(1 - m) \Delta \bar{u}_c^2 (b/d)} - \left\{ \frac{\gamma_M}{l} I_{11}(\bar{x}) + \frac{a - \frac{\gamma_M}{u_e} \frac{u_M - u_e}{u_e - u_e} I_{12}(\bar{x})}{l} \right\} = 0 \quad (1)$$

$$G_2(\Delta \bar{u}_c, \Delta \bar{h}_c) = \frac{(1 - 1/n)^\beta}{4(1 - m) \Delta \bar{u}_c \Delta \bar{h}_c^{(1-\beta)} (b_T/d)} - \left\{ \frac{\gamma_{MT}}{l} I_{21}(\bar{x}) + \frac{a_T - \frac{\gamma_{MT}}{h_e} \frac{h_M - h_e}{h_e - h_e} I_{22}(\bar{x})}{l} \right\} = 0 \quad (2)$$

式中, $\Delta \bar{u}_c = (u_c - u_e) / (u_o - u_e)$, $\Delta \bar{h}_c = (h_c - h_e) / (h_o - h_e)$; u, h 代表速度、热焓, c, o, e, M 分别表示在轴心线、喷口截面、外流和 x, y 中平面峰值处, a (a_T) 与 b (b_T) 分别表示 x, y 中平面与 x, z 中平面的速度 (温度) 外边界。 $\bar{x} = x/d$, $m = u_e/u_o$, $n = T_o/T_e$; $I_{11}, I_{12}, I_{21}, I_{22}$ 是被积函数中含有 $\Delta \bar{u}_c$ 和 $\Delta \bar{h}_c$ 的四个二重积分。 β 为气体状态方程中的指数^[2]。

本文采用梯度法求解 (1)、(2)。对于不可压矩形喷流, 问题简化为一个关于 $\Delta \bar{u}_c$ 的一元二次方程, 可直接求解。

三、算 例

为验证方法的可用程度, 计算了不可压矩形喷流 $m = 0$, AR 分别为 1、10、20、40 和 5.5、8.3、12.5、16.7 等状态。 $AR = 1, 10, 20$ 的计算与实验符合较好, 其它状态总趋势正确,

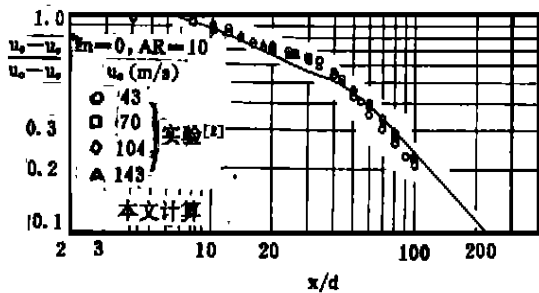


图2 不可压缩矩形喷流轴心速度衰减

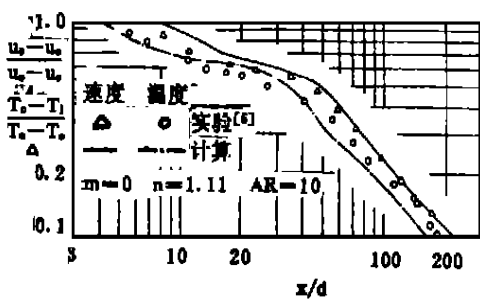


图3 可压缩矩形喷流轴心速度和温度衰减

但与实验数据有一定偏差^[2] (典型结果见图 2)。这是由于实验数据分布带比较宽, 实验条件

不清楚,相似性在大范围内不能成立所致。如果在每一较小范围内分别确立相似函数表达式,则计算结果应能改善。计算的可压缩矩形喷流 $m=0$, $n=1.11$, AR 分别为 10、20、30 的状态,与实验吻合较好(典型结果见图 3)。

算例说明文中对矩形喷流相似规律的描述比较合理,所给积分方法可以用于预估可压或不可压的等压矩形喷流的衰减规律。对于非等压流场,则应寻求更好的求解方法。

四、矩形喷流红外隐身特性初探

从图 4 和图 5 可以看出,所有矩形喷流的轴心速度、温度都比具有相同出口截面积的轴对称喷流的轴心速度、温度衰减得快,开始衰减的位置也早(A 为喷口截面积)。而对出口截面积相同的矩形喷流来说, AR 越大,其轴心速度、温度开始衰减越早,衰减得也越快。

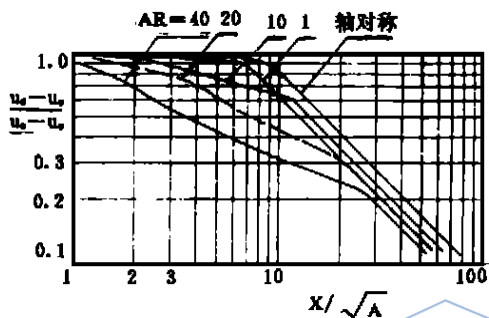


图 4 不可压缩矩形喷流及轴对称喷流轴心速度衰减的比较

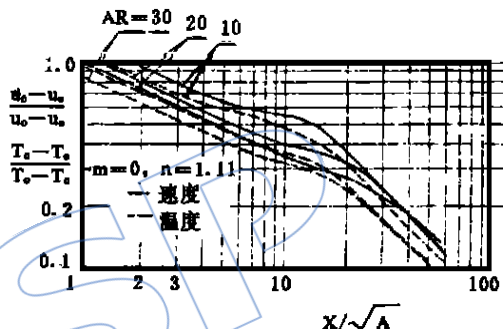


图 5 可压缩矩形喷流不同 AR 下轴心参数衰减的比较

喷流作为一个热源,是红外探测系统的主要目标。喷流流动参数(速度、温度等)扩散、衰减得越快,则与周围流体的差别就越小,被探测到的可能性也就越小,也就是红外隐身效果越好。故可得初步结论:矩形喷流比出口面积相同(当出口速度相同时,出口流量、出口动量也相同)的轴对称喷流的红外隐身效果好;具有相同出口面积的矩形喷流,出口越细长(即 AR 越大),则红外隐身效果越好。

参 考 文 献

- [1] Dash, S. M., Wolf, D. E., "Sinha, N., "Parabolized Navier-Stokes Analysis of Three-Dimensional Supersonic and Subsonic Jet Mixing Problems", AIAA Paper 84-1525.
- [2] 张正科: "矩形喷流的相似性及流场计算" 硕士论文 1989 年 3 月。
- [3] Trentacoste, N., "Sforza, M. P., "Further Experimental Results for Three-Dimensional Free Jets", AIAA J. 5, pp. 885-891.
- [4] Master, G. F., "Spanwise Velocity Distributions in Jets from Rectangular Slots", AIAA J. 19, 148-152.

A SIMILARITY AND INTEGRATION METHOD OF A RECTANGULAR JET

Zhang Zhengke and Jiang Zhengxing
(*Northwestern Polytechnical University*)

ABSTRACT

The similarity laws of a rectangular jet are summarized on the basis of the experimental data in literature. An integration method is also presented for calculating a constant-pressure, compressible rectangular jet to examine the stealth performance of the rectangular jet. The integration method gives a good prediction of the constant-pressure rectangular jet, and the calculated results agree well with the experimental data. A brief analysis of the stealth performance of the rectangular jet is described in the paper as well.

COMBUSTION CHARACTERISTICS OF A DOUBLE SWIRLER COMBUSTOR

Zhang Qingfan and Zhou Biao
(*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT

The combustion characteristics at atmospheric pressure for a co-axial double swirler combustor have been investigated. The results show that its combustion performances can be significantly improved by increasing properly swirl number for inner swirler, as outer and inner flows are counter-rotating; the annular recirculation zone is a good source for flame stabilization, which is a important factor for extending the weak extinction limit; The temperature distribution at the exit section of the combustor can be controlled by varying fuel-air ratio of outer and inner swirling flows.

DEVELOPMENT OF A INTELLIGENT FORCE METER BY AUTOMATIC ELECTRO-MAGNETIC BALANCING

Jiang Zhi, Gao Ge, Ning Huang
(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

In wind tunnel measurement of surface drag a force meter with high sensitivity and accuracy is urgently needed. This paper reports the development of the automatically balancing force meter which is a new device not yet seen before. The design principle, software and hardware, and the application of this meter are presented in this paper. Its accuracy is 0.5%, repetition 0.1%, response time 5ms, sampling period 100 μ s.