用于高超声速流场测试的电子束荧光技术

林贞彬 朱进生 郭大华 韩道

(中国科学院力学研究所)

[摘要] 本文介绍了一种用于高超声速流场测试的电子束荧光技术的原理和特点，叙述了电子束设备的结构及标定方法，并在JF-4B高超声速炮风洞上，对7度尖锥模型表面，在M=7.8时进行了流场密度测量，得到了平均密度和脉动信号波形，证明了这一新的测试技术是成功的.

一、引 言

深入地研究高超声速流场的结构，对于高速飞行器设计和改进，有着极其重要的意义。在高超声速领域中，湍流边界层的结构更加复杂，在以前的研究手段上，仍然面临着种种困难。在理论研究方面：大型的理论计算是先确定合适的湍流模型，一般总是把低速的湍流模型推广到高超声速领域。根据Morkovin's假设，在马赫数不超过5时，热流率不大的情况下，压缩性不至影响湍流结构，其根本原因是在于密度、温度的脉动可以略去不计[1][2]，而实际上，在高超声速区域，马赫数远大于5时，湍流边界层中各种热力学量的脉动模式都大大加强，密度、温度脉动受到激发，可以超过平均密度的10%[3][4]，不但不能略去，而且远远超过速度脉动，从而改变湍流结构。另外，在实验研究方面，目前国内外的实验研究手段主要是在壁面上测量，难以深入到空间流场中去测量流场参数的空间分布，这给高超声速流场结构的研究带来一定的局限性。测量流场的方法，是利用光在流场中的折射率有关的光学方法（纹影法、阴影法和干涉法）和热线风速仪，但这些方法，对于在高超音速风洞中，直接测量模型边界层中的密度场时，总有些无法克服的困难，不能保证在边界层中测量的空间分辨率和时间分辨率，探头产生对复杂流场测量的干扰等缺点。而电子束荧光技术是充分考虑了上述测量特点而研制的一种新型测试设备，电子束荧光技术虽然比较复杂，但它是非接触测量，有较高的时间分辨率、空间分辨率、不干扰流场及在边界层中实现多点测量的优点。因此，电子束荧光技术是用于高超声速流场测试的一种先进技术，用电子束荧光技术直接测量热力学脉动量，进而探讨合适的湍流模型，这对于进一步了解流动的机理和发展适用于高超声速流的工程计算模型是很有意义的。国际上，仅英国帝国理工学院和美国NASA高超音速研究中心的Calspan实验室有同类设备。我们这一设备的性能已达到国际先进水平。

本文于1992年1月收到.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

二、电子束荧光技术的原理和特点

电子束荧光技术的原理是由电子枪产生的一细束高能量电子穿过实验气体时，一部分电子与气体分子发生非弹性碰撞，把实验气体的分子激发到较高的能级，受激发的分子处于不稳定状态，当其回到低的能态时发射光子，产生荧光．荧光的强度与分子数密度有关．具体地说，我们使用的实验气体是纯氮气，氮气的荧光主要来自 $N_2^+(2+)$和 $N_2^+(-1)$两个谱系．在感兴趣的密度范围内只有 $N_2(2+)$是重要的．其激发过程可以写为:

$$N_2^+(X^1\sum g^+)+e\rightarrow N_2(C^3\prod_u)+e\rightarrow N_2(B^3\prod_g)+h\nu$$

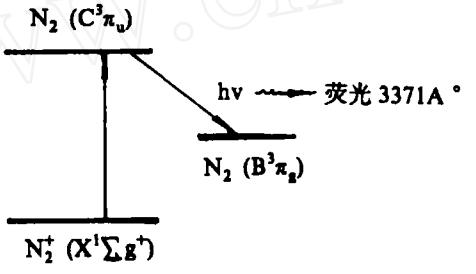

图 1 荧光激发过程

在沿着电子束方向上的一个或更多位置上用适当的光学系统和快速响应的光电检测系统来测量荧光信号的强弱，输出的电信号和被测气流密度之间的关系为:

$$\frac{V_s}{I}=\frac{A\rho+B\rho^2}{1+C\rho Q(T)\ (8/\prod RT)^{1/2}}$$

其中 V_s 是输出的电信号；I 是电子束电流；ρ 是气体密度；Q(T)是总的碰撞截面，与温度 T 有关；A，B，C 是常数．

电子束荧光技术是一项涉及到光学、机械、电子学及高真空系统的一项精密的测试技术，它有非接触测量，高的时间和空间分辨率，电子束不干扰流场，能在沿电子束方向的若干位置上，同时测出多点信号的特点．

另外，电子束荧光技术以前主要用于稀薄气体．为了把它用于测量达到充分转捩的湍流边界层，分子数密度高达 10^{18}／厘米^3 量级的气流时，气流与电子枪内部的高真空采用了特殊隔离措施，并把一个小型化的电子枪直接安装在模型内部，用一个特殊设计的磁透镜在很短的距离内使电子束聚焦，电子束从模型表面直接射出，进入湍流边界层，电子束的方向与实验模型轴线的夹角为 45 度，其安装示意图如图 2 所示:

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

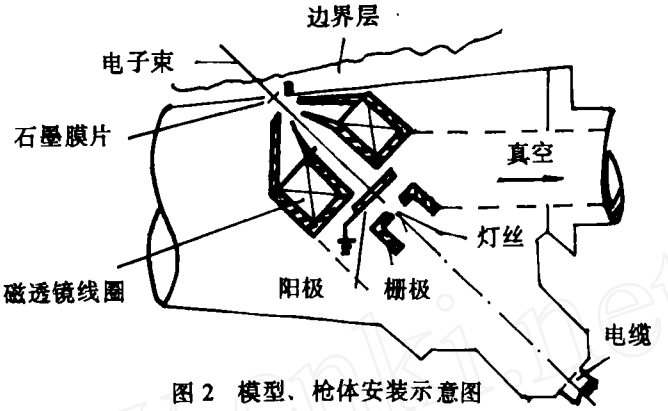

图2　模型、枪体安装示意图

模型表面使用石墨做成的膜片进行真空密封，用已聚焦好的电子束的膜片上加工出小孔，电子束和小孔自然对准，孔直径很小（约0.05mm），小孔的漏气量和扩散泵抽气之间达到动态平衡，使得在被测气流数密度达到10^{18}／厘米^{3}时，电子枪内部仍能保持所需的高真空度。

三、电子束设备结构

电子枪安装在模型内部，由电子枪产生的电束由模型表面进入边界层，电子束穿过边界层时，会产生不同强度的荧光，不同强度的荧光与气体分子数密度有关，荧光的强度由光学接收系统及光电变换装置，输出不同的电压值，再由数据采集存贮系统采集送MS-2100信号分析系统进行各种功能处理，电子束设备的结构框图如图3所示:

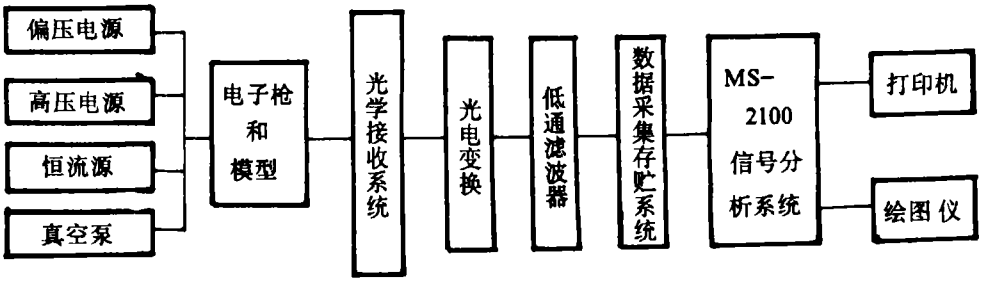

图3　电子束设备的结构框图

实验模型是7度尖锥，由三部分组成，三段之间内螺纹联结为一整体，分别由黄铜、硬铝和无磁不锈钢制造，后部内有相互连通的三个孔，分别用来安装电子枪后座和作为电子束及真空通道，磁透镜也在模型内。有关零件主要用无磁不锈钢，使不致影响磁场，模型支轴同时也是真空管道和磁透镜电线，冷却水的通道。

电子枪由阳极、栅极、阴极（灯丝）三级组成，三级电子枪前用磁透镜线圈聚焦，一起安装在模型第三部分的内部，枪体内由一台扩散泵和它的前置机械泵抽真空，使枪体内的真空度保持在10^{-5}毫米汞柱以上，电子枪的加速电压是5万伏，由高压电源提供，最大输出电流是2毫安，再由其它控制电路提供可调的栅偏压和阴极（灯丝）加热电流，一台稳定性好的恒流源提供稳定的电流给磁透镜线圈的聚焦电流，电气控制原理图如图4所

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

示:

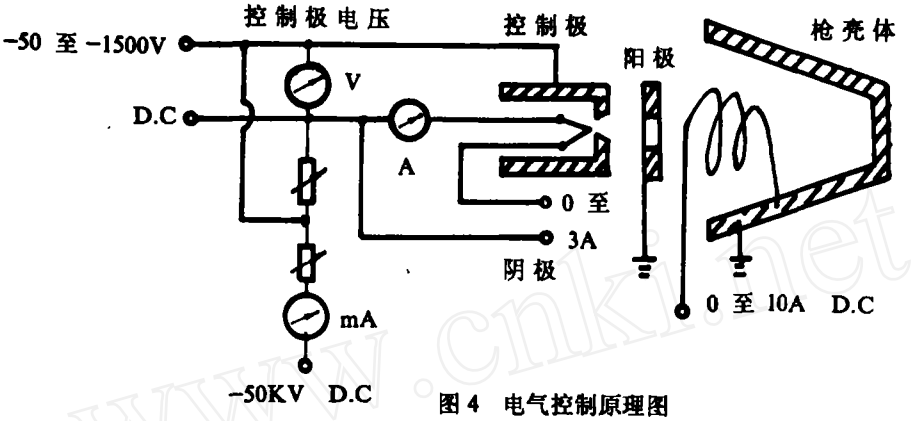

图4 电气控制原理图

光学接收系统必须保证对紫外光有尽可能高的透射率。它是由一个60毫米直径，焦距为150毫米的石英透镜，一个前表面镀反射膜的平面全反射镜，一根约60厘米长的石英光导纤维，一个波长为3371A°的干涉滤光片和带石英窗口的快速响应的光电倍增管组成。其原理图如图5所示:

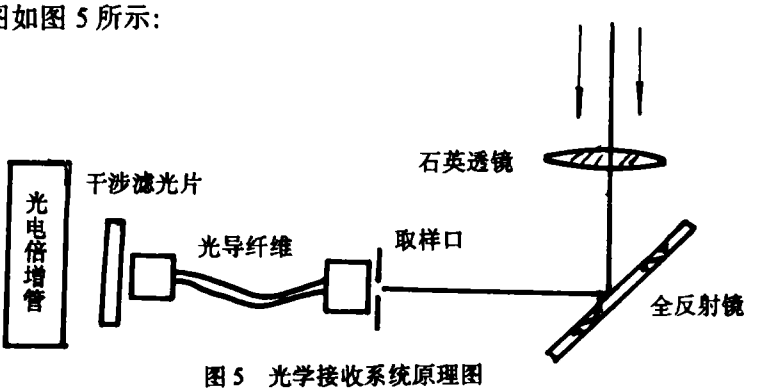

图5 光学接收系统原理图

两套光学接收系统安置在风洞试验段内，电子枪出口处模型的下方，互相倾斜一定的角度，以保证能同时接收两路荧光信号，聚焦透镜把电子束成象在光导纤维上，光导纤维上的取样口与电子束象垂直，改变光导纤维在电子束象上的位置，就可以取出电子束方向不同位置的荧光信号，并引出风洞外部，经滤光片送入光电倍增管。光学元件安装在一消光系统内，不用弹性固定以避免被观测点沿着电子束方向作小的振动。

由光电倍增管负载上输出的电压信号，再经截止频率为100KC的低通滤波器滤波，然后由数据采集存贮器采集、存贮，再送MS-2100信号分析系统进行各种功能处理，其结果由打印机打印，绘图仪绘图。

四、标 定

电子束荧光技术需要通过标定给出两个关系：(1) 输出电压和气体密度的关系。(2) 电子束强度沿着电子束方向衰减的影响。静态标定在标定装置内或风洞试验段内进行，直径为10毫米的石墨杯置于电子束的出口，测量电子束电流I，每次向风洞实验段或标定

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

装置内充氮气，用真空压力表测量腔内的压力，再用DM-7100数据采集存贮器采集相应的输出电压信号 V_s 和电子束电流I，测得的标定曲线如图6所示：

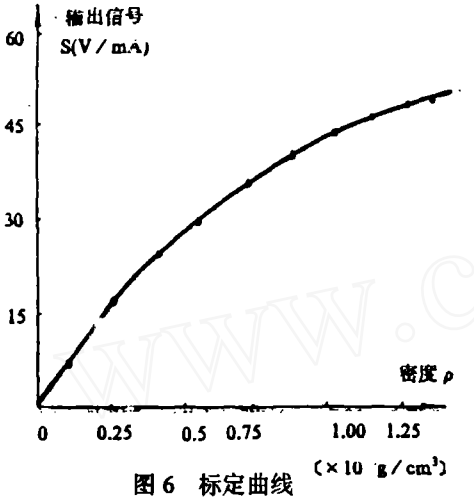

图6　标定曲线

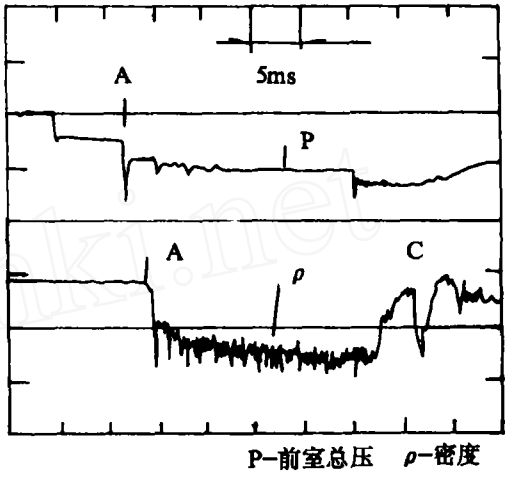

图7　平均密度和脉动信号波形

五、实验结果

实验是在JF-4B高超声速炮风洞上进行的，风洞的驱动段和被驱动段均为10米长，内径为100毫米，驱动气体和被驱动气体都是氮气，由高超声速喷管加速了的实验气体，经喷管出口射入实验段，在驱动段和被驱动段之间用双膜机构隔开，在 $M=7.8$，$Re/L \approx 3.4\times10^7$/米的条件下，测得了高超音速流场的平均密度和脉动信号波形．如图7所示：

图7分别描述了风洞驻室压力P5的变化曲线和风洞实验段中被测气流密度变化的曲线，从这里可以看到这两条曲线变化跟随性非常好．其中A点处代表风洞喉道破膜，气流向实验段冲出时间，B区域是实验气流工作区域，在密度曲线上的脉动表示气流湍流脉动．C区域是表示气流耗损区域．以上说明这一技术能在复杂的高超声速流场中精确有效地测量密度变化的历史．

参 考 文 献

〔1〕P.Bradshow, D.H. Ferris., J.Fluid Mech, 46.P83-110, 1971.

〔2〕H.H.Fernholz, P.J. Firley, AGARD-AG-253 (1980).

〔3〕Lin Zhen Bin and J.K.Harvey, IC Aero Report 82-02, 1982.

〔4〕Z.B.Lin and J.K.Harvey., Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 3, 2, P105, 1989.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Electron beam fluorescence technique used in
hypersonic flow field measurement

Lin Zhenbin, Zhu Jinsheng, Guo Dahua, Han Dao, Wang Yibing
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

The principle and the character of electronic beam fluorescence technique used in the the hypersonic flow field measurement are introduced in this paper. The structure of electron beam device and the method of calibration are also described. Using the new technique, the flow field density in boundary layer is measured for a sharp 7 degree cone at M = 7.8 in the JF-4B hypersonic gun tunnel. The average density and its fluctuating variation are presented. It is proved that the new technique can be successfully used in hypersonic flow measurement.

The Development of the Intelligent Flatness Tester

Quan Rong (Hua Zhong University of Science and Tecnology)
Yang Tai Lai (National Defence University of Science and Tecnology)
Weng Lin (Hu Nan Light Industry Collegy)

This paper introduced the test principle of the intelligent flatness tester, and proposed the mathematic model of measuring the flatness with single trensducer. The hardware and software is given. We analysed and discussed the performance and result.

Research on Automatic Measurement
System of Noise Performance

Luo Tao (Southeast University)
Dai Yi-song (Jilin University of Technology)
Han Qin-quan
(Chang Chun University of Posts and Telecommanications)

In this paper, an antomatic measurement system of noise performence is introducced. It can give: a)The noise power spectrum of En and In. b) Noise figure overall low frequency range. c)NF contows. d)Optimal working parameters. Compare with another measurements, this measurement system have plentiful functions, high speed, high accuracy and reliable results. Finaly, the measuring results of system are compared with the theory.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net