

## 模拟燃气射流场的莫尔偏折显示及定量测试

干雪梅 尤海航 王振东 刘 峰 阎大鹏 贺安之  
(南京理工大学应用物理系, 南京, 210094)

**摘要:** 在实验室条件下, 制作了模拟膛口高速射流的装置。应用莫尔偏折法对双基发射药膛口燃气射流场进行了显示及定量测试研究。整套莫尔显示及测试系统由激光光源、莫尔偏折仪、CCD、监视器、图像存储和处理系统以及 586 计算机等组成。应用莫尔偏折层析技术定量计算并再现了膛口双基发射药燃气射流场的温度分布。

**关键词:** 莫尔偏折法 双基发射药 膛口燃气射流场 层析

## Display and quantitative measurement of simulated exhaust flow field by Moir deflectometry

Gan Xuemei, You Haihang, Wang Zhendong, Liu Feng, Yan Dapeng, He Anzhi  
(Dept. of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, 210094)

**Abstract:** A simulated set up of high-speed simulated exhaust muzzle flow field is made up. Moir deflectometry is used to display and quantitatively measure jet flow field of bi-based power muzzle. The system consists of laser source, Moir deflectometer, CCD, monitor, image store and processor and 586 computer. Using Moir deflectometry and tomography the distribution of temperature of flow field is visualized and calculated quantitatively.

**Key words:** Moir deflectometry bi-based power exhaust flow field muzzle tomography

### 引 言

对于高速射流场的显示及定量测试研究一直是众多研究领域中人关注的问题。例如在火箭设计、火箭燃气动力学研究<sup>[1~3]</sup>、内燃机等的设计研究<sup>[4]</sup>、弹道设计中膛口流场的研究<sup>[5]</sup>等。它涉及到火箭射击精度和射程、内燃机燃烧效率和提高发动机的运行性能以及枪膛、炮膛的设计等一系列重要研究课题。到目前为止, 人们曾利用纹影、阴影、干涉等光学方法显示燃气射流场。结果表明, 由于燃气射流中烟尘浓厚、粒子吸收和散射, 纹影法和阴影法显示的结果很不理想; 而干涉图虽能获得燃气自由射流的近场结构干涉图, 但由于烟雾的干扰, 干涉图内无参考条纹, 无法用于定量计算。我们采用了莫尔偏折法, 利用激光光源、莫尔偏折仪、CCD、监视器、图像存储和处理系统以及 586 计算机等构成一种流场实时显示及测试系统, 不但能够通过监视器实时地观察燃气射流场的流谱结构, 而且可通过流场干涉图定量地计算流场的参量分布。我们在实验室条件下, 制作了模拟膛口高速射流的装置, 利用莫尔显示及定量测试系统获得了清晰的燃气射流场的莫尔偏折图, 并定量计算了其温度分布。

### 1 实验装置和原理

在实验室条件下设计加工喷火管, 如图 1 所示。喷火管总长为 29cm, 喷嘴为拉伐尔喷

管式, 喷火管直径为  $\phi 15\text{mm}$ , 喷嘴喉部直径为  $\phi 8\text{mm}$ , 喷嘴出口处直径为  $\phi 12\text{mm}$ 。在管内放入双基火药条, 点火以后可模拟出膛口的燃气射流场。莫尔显示及测试系统如图 2 所示。探测光源 1 为 He-Ne 激光器, 2 为监视器, 3 为 CCD, 4 为图像存储和处理系统, 5 为 586 计算机。L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 构成一准直系统, 把连续的 He-Ne 激光扩束成一直径为  $\phi 43\text{mm}$  并通过被测燃气射流场的平行光。G<sub>1</sub> 和 G<sub>2</sub> 为一对 20 条/mm 的 Ronchi 光栅, 它们之间的间隔为  $\Delta$ , L<sub>3</sub> 为毛玻璃, 让莫尔偏折图成像于毛玻璃上, CCD 记录莫尔偏折图并在监视器上显示同时存储在存储器中, 图像处理系统用来细化莫尔条纹和判读条纹位移量, 最后用计算机定量计算所需的参数分布。

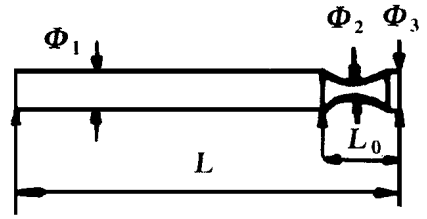


Fig. 1 The model of nozzle  
L<sub>0</sub>—32mm L—290mm

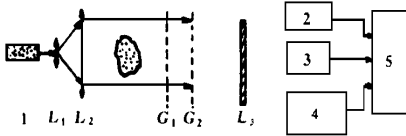


Fig. 2 Moiré display and measurement system

假定燃气射流场为轴对称, 如图 3 所示。光线通过轴对称场后的偏折角为  $\varphi$ , 则该偏折角与光栅常数  $p$ , 莫尔条纹的位移量  $h$ , 莫尔条纹的间距  $p'$ , 以及双光栅间隔  $\Delta$  之间的关系为<sup>[6]</sup>

$$\varphi = p \cdot h / (p' \cdot \Delta) \quad (1)$$

若被测燃气射流场的折射率分布为  $n(x, y)$ , 则

$y$  与  $n$  的关系为 
$$\varphi = \frac{1}{n_0} \int_{x_0}^{x_f} \left( \frac{\partial n}{\partial y} \right) dx \quad (2)$$

式中,  $n_0$  为空气折射率, (2) 式经 Abel 变换<sup>[7]</sup>, 有

$$n - n_0 = - \frac{n_0}{\pi} \int_r^{r_f} \frac{\varphi}{\sqrt{2 - r^2}} dy \quad (3)$$

把 (1) 式代入 (2) 式有:

$$n - n_0 = - \frac{n_0 p}{p' \Delta \pi} \int_r^{r_f} \frac{h}{\sqrt{2 - r^2}} dy \quad (4)$$

气体折射率与压力  $P$  (mPa)、温度  $T$  (K) 和波长  $\lambda$  (0.1nm) 有如下关系<sup>[8]</sup>:

$$n = 1 + 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^2) (P/T) \times 10^{-6} \quad (5)$$

由 (4) 式所得到的折射率分布代入 (5) 式, 可得到温度分布

$$T = 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^2) P \times 10^{-6} / [n_0 - 1 - \frac{n_0}{\pi} \int_r^{r_f} \frac{\varphi}{\sqrt{2 - r^2}} dy] \quad (6)$$

## 2 实验结果和分析

我们采用如图 1 所示的喷火管, 在管内装入双基发射药, 点燃后模拟出膛口燃气射流场。利用如图 2 所示的莫尔显示及测试系统, 我们通过监视器可以清楚地观察到喷火管点火后燃气射流场全过程流谱的莫尔偏折图, 通过图像存储器存储, 可以任意提取其中每一瞬间的流场结构进行观察, 图 4 给出了 CCD 记录下来的喷火管点火后燃气射流场的莫尔偏折条纹图。实验中双光栅的间隔  $\Delta = 3.99\text{cm}$ , 参



Fig. 4 The fringe pattern of exhaust flow field

考温度  $T = 285.5\text{K}$ , CCD 曝光时间为  $1/1000\text{s}$ 。我们用自编的图像处理软件包<sup>[9]</sup>对采得的莫尔偏折条纹图进行处理, 经过条纹细化、二值化、数据读取, 然后由 (6) 式的数值计算, 得到一个截面的温度分布如图 5 所示, 图 6 给出了相对等温线图。

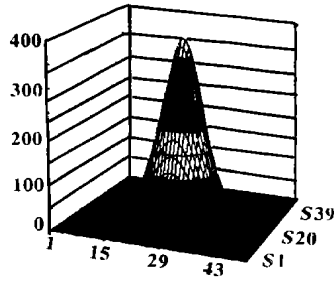


Fig. 5 The temperature distribution of one section

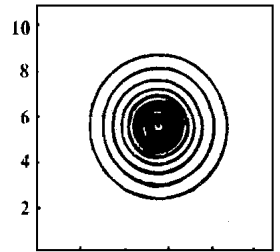


Fig. 6 The isothermal graph of relative temperature

### 3 结 论

我们所提出的模拟燃气射流场的莫尔偏折显示及定量的方法, 能够在实验室条件下实现对燃气射流场的定量及定性研究。特别是图像处理软件包给数据处理带来了巨大的方便。

#### 参 考 文 献

- 1 Harsbger F. AD-44088, 1964
- 2 Lian W Y, Zhang F X. The Structure and Properties of underexpanded Exhaust Jets. International Symposium on Defiend Flow Modelling and Turbulence Measurement, Iowa City, U S A. 1985; A12: 16~ 18
- 3 He A Zh, Yan D P. Opt Engng, 1988; 10(27): 941~ 945
- 4 阎大鹏, 王振东, 刘峰 *et al.* 柴油内燃机流场的莫尔偏折显示及计算, 第五届全国实验流体力学学术会议论文集, 1996: 314~ 318
- 5 Liu F, Wang Zh D, Yan D P *et al.* Visualization and analysis of gun muzzle temperature field by moire deflectometry. Heat Transfer Science and Technology, 1996: 224~ 228
- 6 Keren E, Bar-Zir E *et al.* Appl Opt, 1981; 20(12): 4263~ 4266
- 7 Bar-Zir E, Sgnlion S, Kafri O. Appl Opt, 1983; 22(5): 698~ 725
- 8 Roggemann M C, Welsh B M, Gardner P J *et al.* Opt Engng, 1995; 34(5): 1374~ 1384
- 9 王振东. 三维流场层析研究. 南京理工大学学位论文, N960203, 1996

作者简介: 干雪梅, 女, 1970年3月出生。博士生。现从事激光瞬态测试技术。

收稿日期: 1997-01-22 收到修改稿日期: 1997-11-28

• 简 讯 •

## 人眼安全 $1.57\mu\text{m}$ OPO 激光测距取得重大进展

西南技术物理研究所新激光技术实验室研制的人眼安全  $1.57\mu\text{m}$  OPO 激光测距机最近取得重大进展, 于 1999 年 1 月国内首次成功实现高重频  $1.57\mu\text{m}$  OPO 激光测距, 在能见度为 5km 情况下, 测程达 5.650km, 能见度为 10km 时, 测程达 7.050km, 重复频率 20Hz。  $1.57\mu\text{m}$  OPO 激光测距机的研制成功将促进我国高重频人眼安全激光测距技术的开发和应用。

(本刊通讯员 供稿)