

数值纹影 /数值阴影 /数值干涉条纹流场可视化

纹影（schlieren）、阴影（shadowgraph）和干涉条纹（interferogram）是风洞试验中常用的试验技术。有时候，在分析 CFD 计算结果时，为了跟风洞试验结果对比，需要将计算结果进行可视化，其中可能涉及数值纹影、数值阴影和数值干涉条纹等技术。所谓的数值纹影等技术就是采用数值计算的方式模拟风洞纹影成像过程，得到类似的图形图像数据。

1. 数值纹影

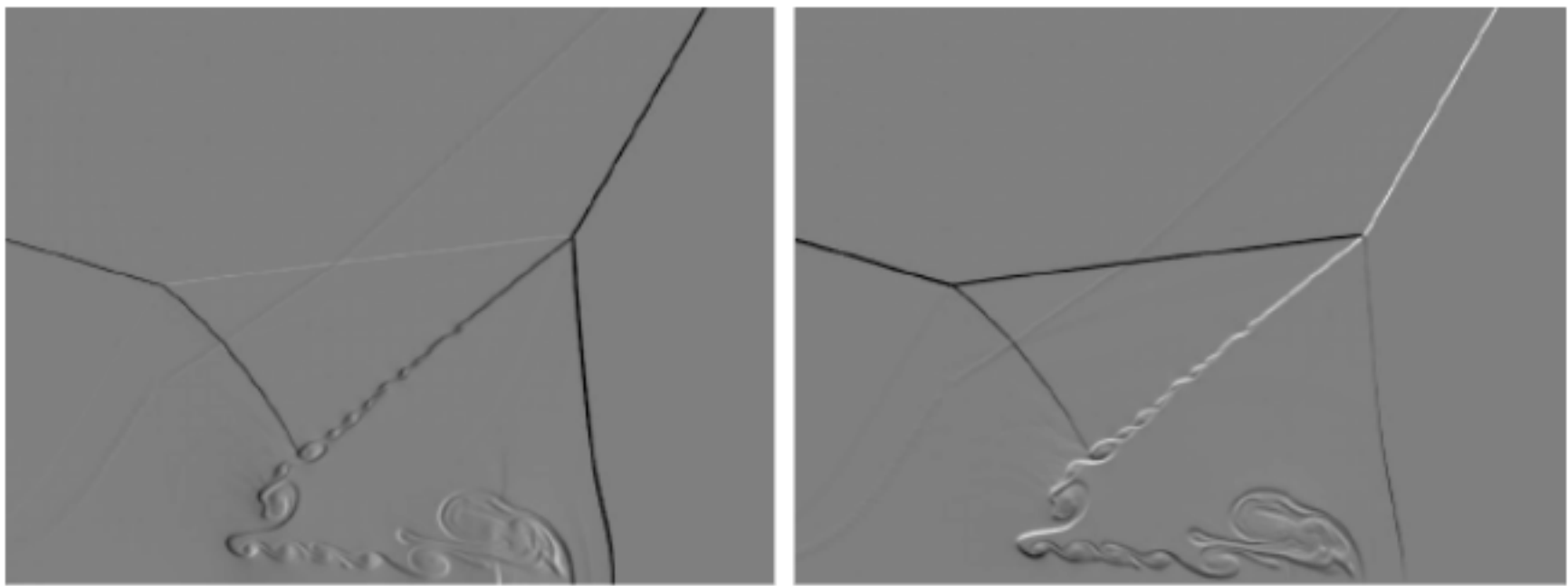
纹影技术是利用光在被测流场中的折射率梯度正比于流场的气流密度的原理进行测量的。它使本来看不见的待测介质的折射率变化情况转换为可以看到的光强（亮暗或彩色）变化的纹影图像。

对于有刀口的纹影仪，其成像点的光照强度与垂直刀口方向的密度梯度成正比。当刀口垂直于 X 轴方向时，

$$I \propto \frac{\partial \rho}{\partial x} \tag{1}$$

当刀口垂直于 Y 轴方向时，

$$I \propto \frac{\partial \rho}{\partial y} \tag{2}$$



(a)

(b)

图 1 双马赫流场显示效果

然而， $I = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial y}\right)^2}$ 和 $I = \beta \exp\left(-\frac{\kappa |\nabla \rho|}{|\nabla \rho|_{\max}}\right)$ 显示的图像对于激波结构的分布方向十分敏感。因此，Quirk 提出用密度梯度的绝对值来改进显示效果。（Quirk, J.J., 1994, A contribution to the great Riemann solver debate. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 18, 555-574）

$$I = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial y}\right)^2} \tag{3}$$

Quirk 进一步提出对 $I = \beta \exp\left(-\frac{\kappa |\nabla \rho|}{|\nabla \rho|_{\max}}\right)$ 进行非线性变换，以突出显示密度梯度较小的流动结构。

$$I = \beta \exp\left(-\frac{\kappa |\nabla \rho|}{|\nabla \rho|_{\max}}\right) \tag{4}$$

其中， β 和 κ 是可调节参数， $|\nabla \rho|_{\max}$ 是密度梯度的最大值。

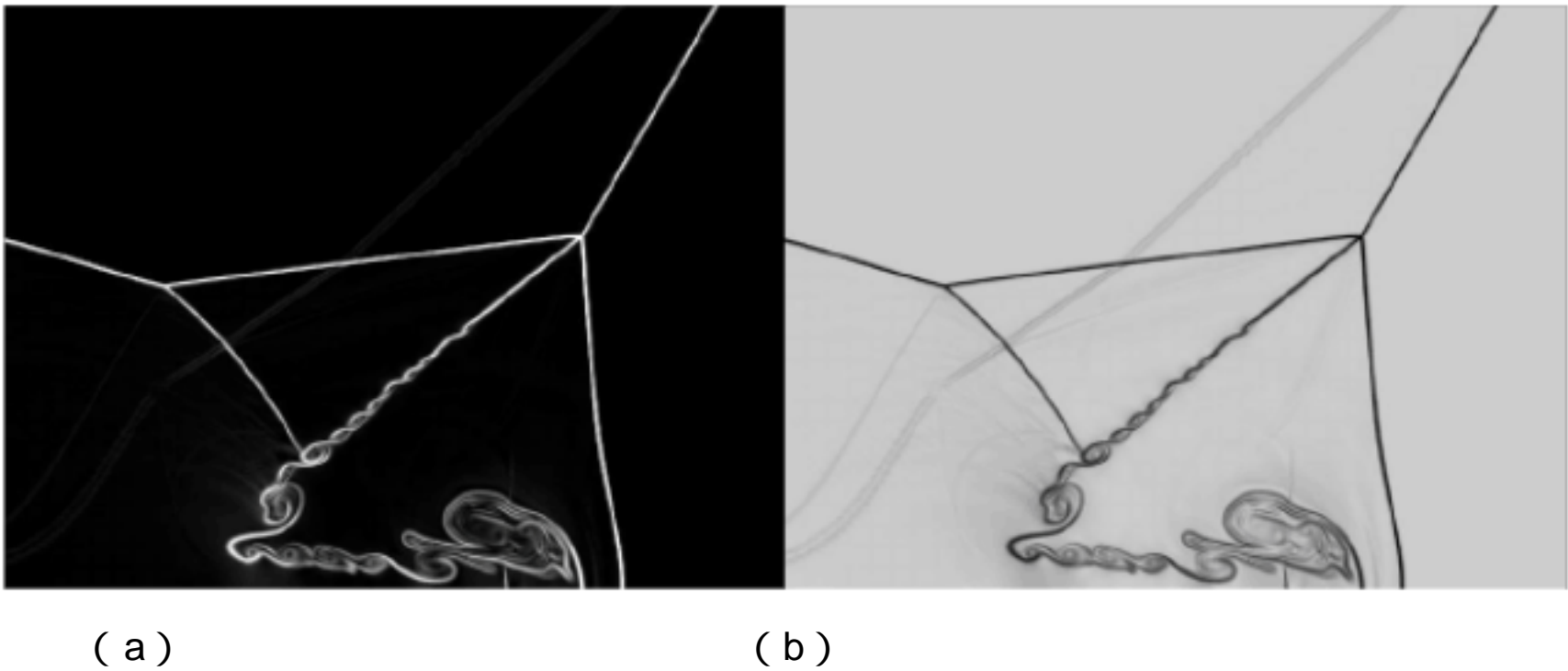
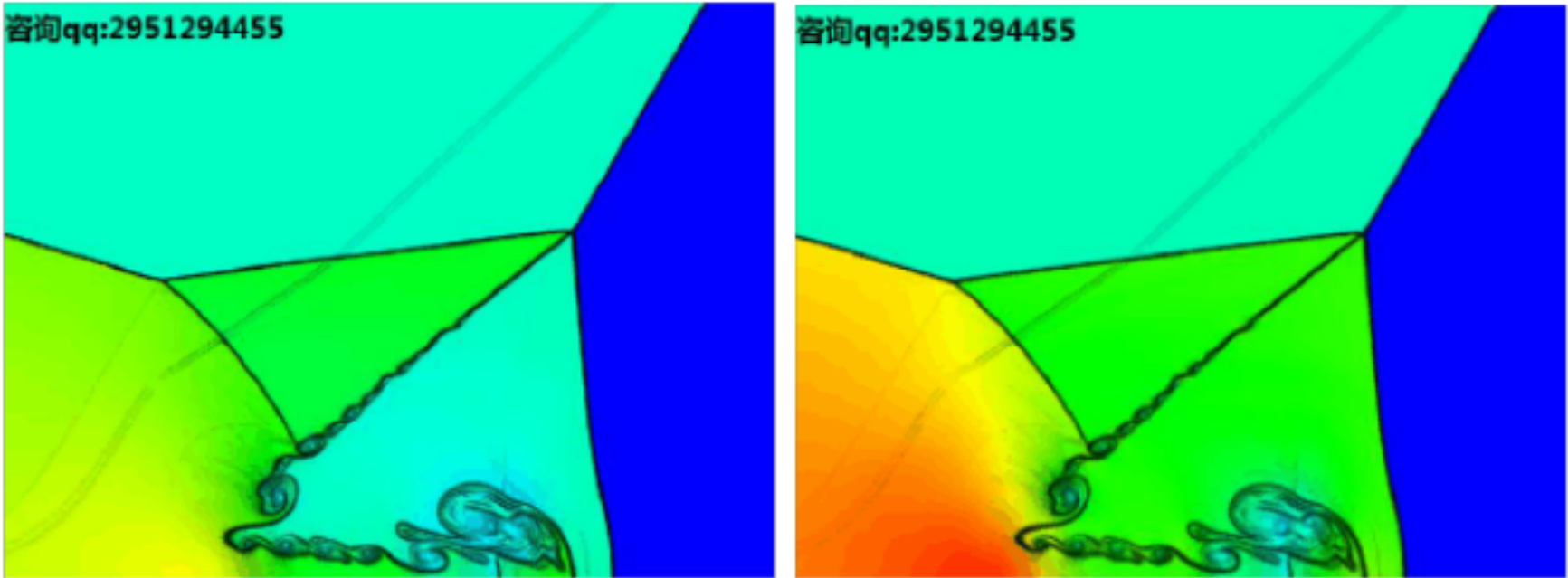


图 2 双马赫流场显示效果

在此基础上，将密度或压力云图与数值纹影结合，提出了彩色激波显示方法。（详见）



(a) 彩色激波 (密度云图)

(b) 彩色激波 (压力云图)

图 3 双马赫流场显示效果

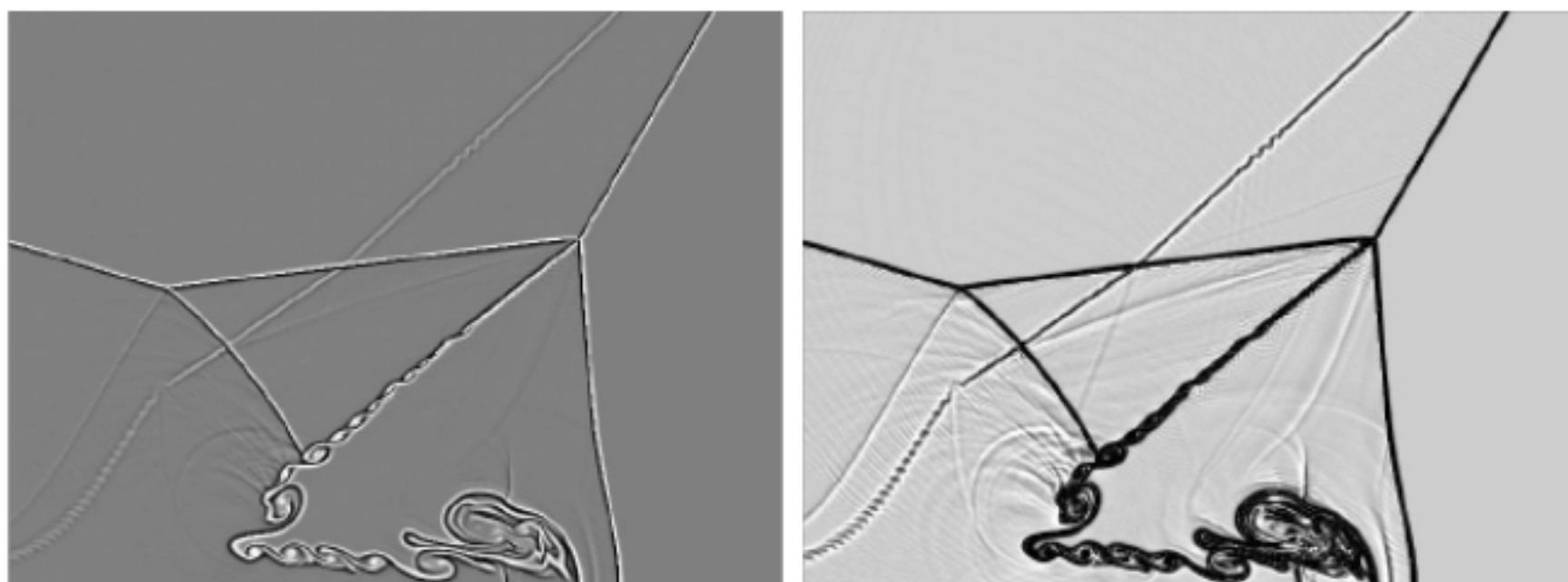
2. 数值阴影

对于没有刀口的纹影仪输出的是阴影图像，其成像点的光照强度与密度梯度的二阶导数成正比。

$$I \propto \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} \quad (5)$$

为了突出显示密度变化较小的流动结构，HADJADJ 建议采用类似纹影的非线性变换以改进显示效果。

$$I = \beta \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\kappa \nabla^2 \rho}{|\nabla^2 \rho|_{\max}} \right) \right] \quad (6)$$



(a)

(b)

图 4 双马赫流场显示效果

3. 数值干涉条纹

数值干涉条纹的计算公式为：

$$I = \beta \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{\rho - \rho_0}{\Delta \rho} \right) \right] \quad (6)$$

其中， ρ_0 为自由来流密度。

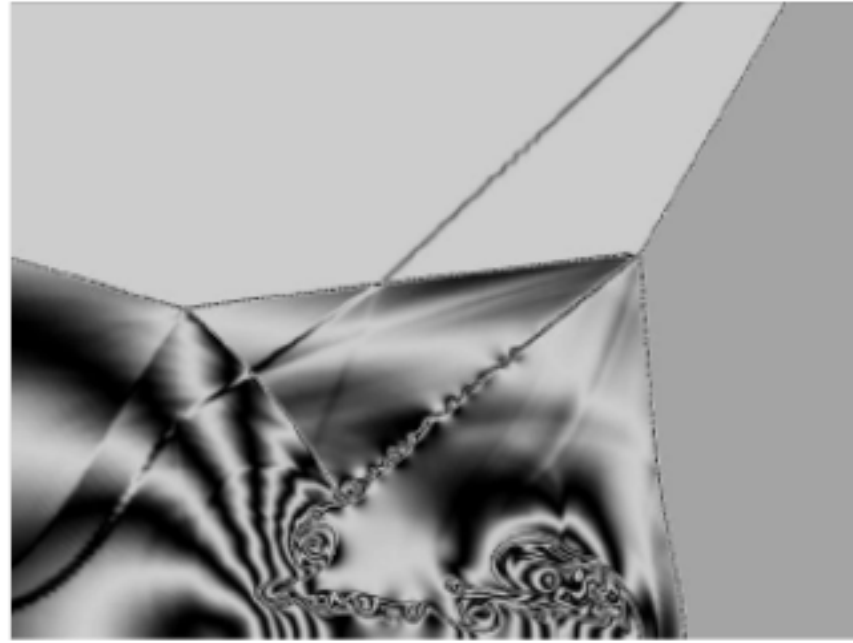


图 5 双马赫流场数值干涉条纹显示效果，