

温度梯度对温度脉动空间关联的影响*

麻 柏 坤

(中国科学技术大学近代力学系, 1985年2月11日收到)

摘 要

本文给出有温度梯度时, 温度脉动的空间关联函数的实验结果. 同时也给出没有温度梯度时的结果. 这些结果很好地表明了当没有温度梯度时, 温度脉动场是各向同性的; 而当有温度梯度存在时, 温度脉动场具有明显的各向异性. 温度脉动场沿温度梯度 β 方向的空间关联函数明显地大于垂直于 β 方向的关联. 另外实验结果与 D. W. Dunn 和 W. H. Reid⁽¹⁾ 的理论结果一致.

一、引 言

在湍流流场中, 被动标量 (passive scalar, 例如温度、湿度、浓度等等) 脉动的特性对于深入研究和理解湍流场中标量的扩散与输运过程有着重要的意义. 人们对于被动标量脉动的衰变、温度混合层、射流中被动标量脉动的特性和梯度的效应等作了广泛的研究.

D. W. Dunn 和 W. H. Reid⁽¹⁾ 对衰变后期有温度梯度时的温度脉动的空间关联函数 $\rho_{\theta\theta}(\mathbf{r})$ 进行了近似的理论处理, 其结果 (图 5 所示) 显示出沿温度梯度 β 方向的关联函数明显地大于垂直于 β 方向的关联函数. 但是至今我们还没有看到这方面的实验结果. 我们在有温度梯度和没有温度梯度的两种情况下分别测量了相互垂直的两个方向上的温度脉动的空间关联函数 (沿平均速度 \mathbf{U} 方向和沿温度梯度 β 方向). 结果表明没有温度梯度时, 两个方向的关联函数是一样的, 也就是说温度脉动场是各向同性的. 当有温度梯度存在时, 两个方向的温度脉动的关联函数有明显的差别, 说明温度脉动场是非各向同性的.

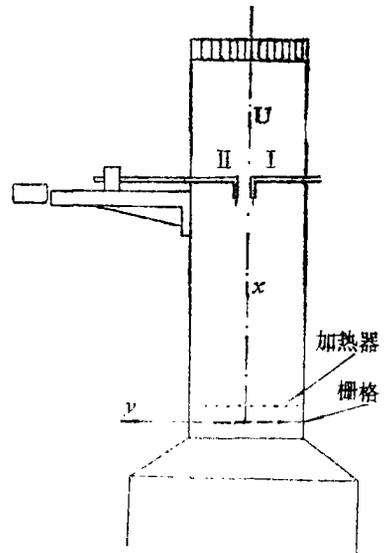


图 1

二、实验装置和仪器

实验是在美国 Cornell 大学的一个垂直低速风洞中进行的. 该风洞的实验段截面为

* 蔡树棠推荐.

40cm×40cm, 长度为480cm. 风洞的平均速度可调范围为3~15m/s. 这次实验的风速为6.7 m/s. 产生湍流的栅格是由双层横截面为0.48cm×0.48cm的方形空心铜管组成, 栅格的间距为 $M=2.5\text{cm}$, 其阻塞度为34%. 风洞实验段流场的一些主要参数如下:

平均速度	$U=6.7\text{m/s}$
空气粘性系数	$\nu=1.65\times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$
空气导热系数	$\kappa=2.24\times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$
纵向湍流强度	$u^2/U^2=0.101(x/M)^{-1.37}$
横向湍流强度	$v^2/U^2=0.0817(x/M)^{-1.36}$
在 $\bar{x}=x/M=100$ 处:	
纵向均方根脉动速度	$u'=\sqrt{u^2}=0.084\text{m/s}$
横向均方根脉动速度	$v'=\sqrt{v^2}=0.077\text{m/s}$
耗散率	$\epsilon=-\frac{3}{2}\frac{du^2}{dt}=3.608\times 10^{-2}\text{m}^2/\text{s}^3$
积分尺度	$l=(\overline{u^2})^{\frac{3}{2}}/\epsilon=1.66\times 10^{-2}\text{m}$
Taylor微尺度	$\lambda_g=(15\nu u^2/\epsilon)^{\frac{1}{2}}=6.98\times 10^{-3}\text{m}$
Kolmogoroff微尺度	$\eta=(\nu^3/\epsilon)^{\frac{1}{4}}=5.94\times 10^{-4}\text{m}$
栅格Reynolds数	$Re_m=UM/\nu=10150$
湍流Reynolds数	$Re_l=u'l/\nu=84.8$
	$Re_\lambda=u'\lambda_g/\nu=32.7$

速度脉动的时间尺度 $\tau_u=3u^2/\epsilon=0.59\text{ s}$

我们采用 Z. Warhaft 在文献[4]中使用的方法产生温度脉动场和建立起均匀的横向温度梯度. 这方法使用一个由很细的平行布置的镍铬丝组成的称为“mandoline”的电阻丝加热器, 将加热器放置于距湍流栅格一定距离的位置 x_0 上. 当加热器均匀加热时产生均匀的温度脉动场, 改变加热器位置 x_0 , 可以改变温度的湍流尺度与速度的湍流尺度的比例. 这次实验用的加热器的电阻丝的间距为 $1M$ (等于栅格间距), 均匀加热时每根电阻丝通过的电流是2安培. 当各电阻丝通过不同的电流时, 我们可以得到有横向温度梯度的温度场, 仔细地调节每一根电阻丝的电流, 可以获得线性的温度分布, 即得到一个均匀的温度梯度. 这里我们用了两个不同的温度梯度 β 值, 它们分别为 $\beta=3.88^\circ\text{C/m}$ 和 1.63°C/m , 其温度分布见图2.

整个实验装置如图1所示, 我们使用 Z. Warhaft 在文献[4]中所用的仪器进行测量, 平均温度用热电偶测量. 测量温度脉动的仪器由温度探头和快速反应交流温度电桥组成, 温度探头的敏感元件是直径 $D=1.27\mu\text{m}$, 长 $L=0.5\text{mm}$ 的铂丝, 其长径比 $L/D\approx 400$. 测量横向(即沿温度梯度方向)温度脉动的关联函数时, 我们用两个温度探头 I 和 II 同时处于流场中, 它们的横向距离为 y 的两个点, 同时记录这两个探头所感受到的温度脉动讯号. 然后在计算机上用专门的程序进行处理得到所测的量. 实验过程中, 探头 I 固定不动, 探头 II 置于一个精密的移动支架上, 可以沿 y 方向移动, 并能精确地读出移动的距离, 这样我们就能确定和改变两个探头间的横向距离.

所有测量到的讯号都经过高通和低通两个滤波器, 滤去直流与高频干扰讯号, 经过放大后输入PDP-11/34小型计算机, 通过A-D转换器数字化后记录在计算机磁带上. 实验做完以后, 再把这些数字讯号从磁带上读入计算机, 在计算机上用专门的程序STAT计算处理得到

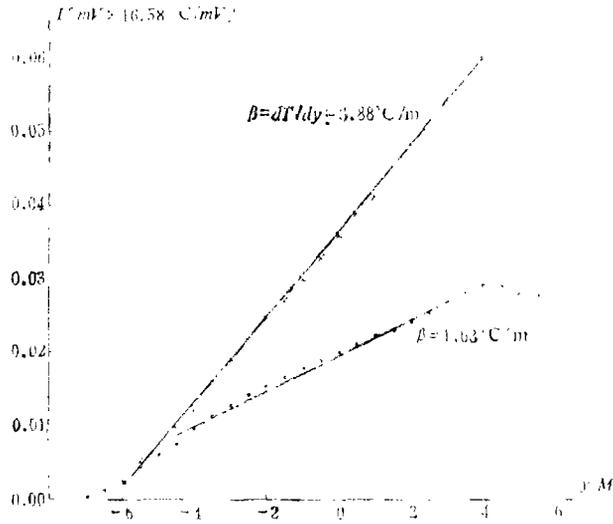


图 2

所需要测量的量，如均方根值、关联函数、频谱等等。测量时每个测量点的采样数目是 5×10^4 。测量纵向（即沿平均速度方向）温度脉动的关联时，我们利用一个探头（固定的探头 I）的温度脉动讯号，采用 Taylor 假设，通过自关联经 $r = Ut$ 转换得到温度脉动的纵向关联函数。

三、实验结果

为了检验测量方法的可靠性和进行比较，我们首先测量没有温度梯度，即各向同性条件下的横向与纵向温度关联函数。我们在两个不同的位置 $\bar{x} = 62$ 和 92 上分别测量了两种不同温度脉动强度 θ' 和尺度 λ_θ 下的纵向温度关联函数 $\rho_{\theta\theta}(x) = \theta(x_1)\theta(x_1+x)/\theta^2$ 和横向温度关联函数 $\rho_{\theta\theta}(y) = \theta(y_1)\theta(y_1+y)/\theta^2$ 。测量结果如图3所示，横坐标是无量纲化的纵向距离 x/λ_θ 和横向距离 y/λ_θ 。其中 λ_θ 是温度脉动的纵向积分尺度 $\int_0^\infty \rho(\theta, x) dx$ 。四个实验情况的温度脉动强度，积分尺度等参数如下：

加热器位置 \bar{x}_0	2	2	15	15
测量位置 \bar{x}	62	92	62	92
温度脉动强度 $\theta' \times 10^2$ (°C)	2.17	1.65	13.8	7.4
温度纵向尺度 λ_θ (cm)	1.86	1.92	0.95	1.19

从图 3 中的结果可以看到，四种情况下的测量结果重叠的非常好，即以各自的积分尺度为长度单位，它们的湍流结构是一样的。第二，其纵向关联函数和横向关联函数相同，说明没有温度梯度时温度脉动场是各向同性的。同时也说明了用 Taylor 假设通过自关联来确定纵向关联的方法是可靠的。这些实验结果是理所当然的，也可以说明我们的测量方法和数据是可以信赖的。

在有温度梯度的非各向同性温度脉动场的实验中，我们在两个不同的温度梯度，即 $\beta =$

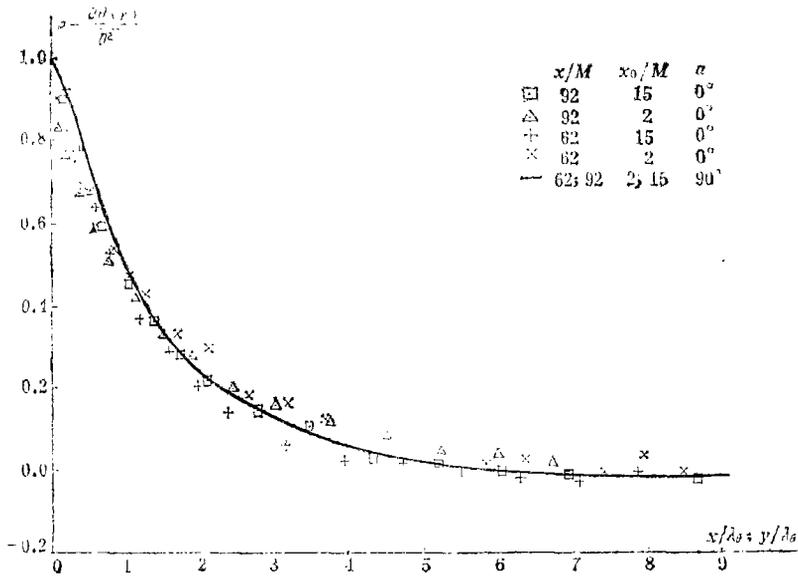


图 3

3.88 °C/m 和 1.63 °C/m 的条件下，分别在两个流向位置 ($\bar{x}=62$ 和 92) 测量了温度脉动的纵向关联函数与横向关联函数。其结果如图 4 所示，和图 3 一样，纵坐标是空间关联函数

$$\rho_{\theta\theta}(x) = \frac{\overline{\theta(\bar{x}_1)\theta(\bar{x}_1+x)}}{\theta'^2} \quad \text{和} \quad \rho_{\theta\theta}(y) = \frac{\overline{\theta(y_1)\theta(y_1+y)}}{\theta'^2},$$

横坐标是以纵向积分尺度 λ_θ 为尺度的无量纲化距离，即 x/λ_θ 和 y/λ_θ 。其实验条件如下：

加热器位置	\bar{x}_0	2	2	2	2
温度梯度	β (°C/m)	3.88	3.88	1.63	1.63
测量位置	\bar{x}	62	92	62	92
温度脉动强度	θ' (°C)	0.058	0.060	0.018	0.024
温度纵向积分长度	λ_θ (cm)	1.33	1.75	1.43	1.78

从图 4 的结果我们可以看出在有温度梯度的情况下，温度脉动场的非各向同性是明显的。在距离相同时横向关联系数大于纵向关联系数，这说明横向（沿梯度 β 方向）尺度大于纵向尺度。这个结果很有意思，好像沿速度方向有速度梯度的速度湍流场（如由收缩加速）中速度脉动的涡被沿速度梯度方向拉长了一样，这里在温度梯度的作用下，温度脉动的“涡”也被温度梯度拉长了一些。另外尽管四组实验的 β 值， θ' 值和 λ_θ 值是不相同的，但以 λ_θ 为尺度无量纲化距离后，这四组数据仍然重叠的很好，说明它们的温度脉动场的结构是相同的。

四、结 论

在栅格产生的近似均匀各向同性湍流中，用均匀加热电阻丝加热器所形成的温度脉动场也是各向同性的。由于加热电流的不同或加热器位置不同所形成的不同强度和不同尺度的温度脉动场之间的结构具有相似性，只要它们用各自的温度脉动积分长度为尺度，其结构可以认为是·一样的。

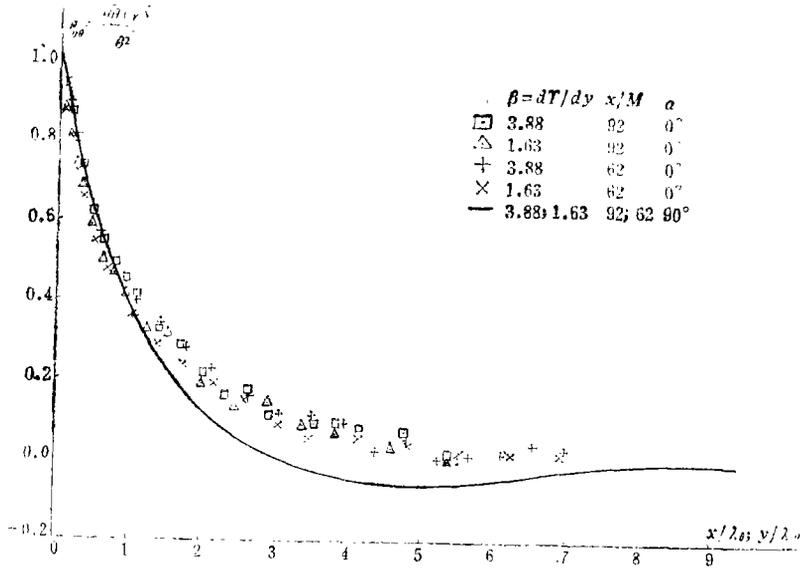


图 4

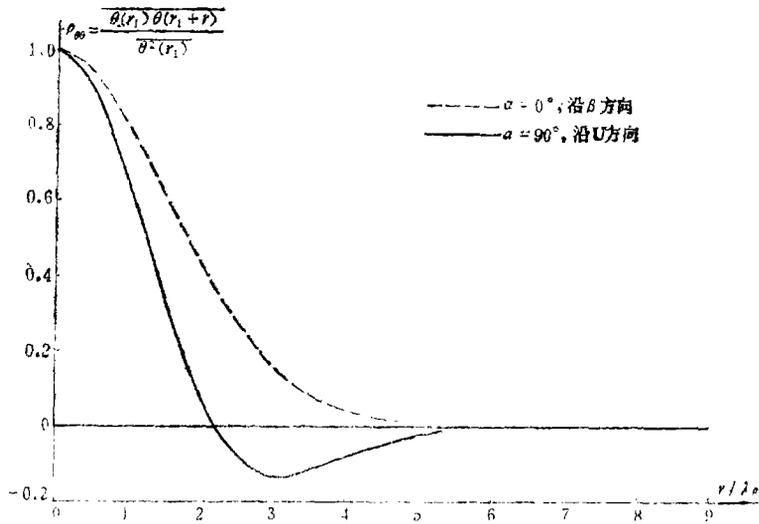


图 5

当有温度梯度时，温度脉动场具有明显的非各向同性，两点间的关联函数 $\rho(\theta, \mathbf{r})$ 值与 \mathbf{r} 和 β 之间的夹角 α 有关，当 \mathbf{r} 与 β 同向($\alpha=0^\circ$)时其关联值明显地比 \mathbf{r} 与 β 垂直($\alpha=90^\circ$)时大。与速度脉动涡被纵向速度梯度拉长一样，这里好像温度脉动“涡”也被温度梯度拉长了一些。

D. W. Dunn和W. H. Reid在文献[1]中给出了在衰后期有温度梯度时，沿梯度方向和垂直于梯度方向上的温度关联函数 $\rho_\theta(\theta, \mathbf{r}) = \overline{\theta\theta(\mathbf{r})} / \overline{\theta^2}$ 的理论结果，见图5。虽然我们的实验不是在衰变后期做的，但比较图4和图5，可以发现两个结果基本上是一致的。另外与没有温度梯度时同样，有温度梯度时其温度脉动场的结构也具有相似性，只要以其积分长度为尺度就行。

作者对Z. Warhaft教授在工作中给予的帮助和好的建议表示衷心地感谢。

参 考 文 献

- [1] Dunn, D. W. and W. H. Reid, Heat transfer in isotropic turbulence during the final period of decay, NACA TN-4186 (1958).
- [2] LaRue, John C. and R. A. Libby, Thermal mixing layer downstream of half-heated turbulent grid, *Phys. Fluids*, **24**, 4 (1981) 597-603.
- [3] Sirivat, A. and Z. Warhaft, The effect of a passive cross-stream temperature gradient on the evolution of temperature variance and heat flux in grid turbulence, *J. Fluid Mech.*, **128** (1983) 323-346.
- [4] Warhaft, Z., An experiment study of effect of uniform strain on thermal fluctuation in grid-generated turbulence, *J. Fluid Mech.*, **99**, 3 (1980) 545-573.

The Effect of Temperature Gradient on the Correlation of Temperature Fluctuations

Ma Bai-kun

(Department of Modern Mechanics, University
of Science and Technology of China, Hefei)

Abstract

In this paper we present the experiment results of the space correlations of temperature fluctuations when there is and is not temperature gradient. From those results we can see clearly that the temperature fluctuation field is isotropic without temperature gradient, and it is obviously anisotropic with temperature gradient. The temperature correlation along the gradient direction β is obviously larger than the vertical to β direction. Our experiment results agree with the theory results of D. W. Dunn and W. H. Reid^[1].