基于DFT的水射流红外热像频域时空分析

宫伟力 赵海燕 安里千 毛灵涛

(中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 基于二维离散傅里叶变换及空间频谱分析,对水射流湍流脉动的空间尺度进行了研究,得到了由红外辐射温度表征的被动标量湍流场在对流区、耗散区、惯性子区的特征空间尺度及其时间演化规律.对射流不同区域的关心点重新采样,得到湍流场中关心点的时间序列,利用一维离散傅里叶变换,分析了对流区大尺度涡中心、惯性子区小尺度涡中心、耗散区及射流轴心线上各关心点的湍流波动特征.计算了时间序列频谱的分形维数,研究了自由湍流不同尺度区间上述各关心点湍流脉动的分形特征.

关 键 词: 湍流; 离散傅里叶变换; 频谱分析; 分形

中图分类号: TD 921.5

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)06-0690-05

Temporal and spatial analysis of infrared images from water jet in frequency domain based on DFT

Gong Weili Zhao Haiyan An Liqian Mao Lingtao

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on 2-D discrete Fourier transforms (DFT) of infrared images from water jet and the analyses of its 2-D spatial spectrum, investigations were made on the spatial scales of passive scalars turbulent flow in high pressure water jet fields, which are represented by infrared images. The characteristic length scales and the law of their temporal evolution process were obtained in the energy (or convection) range, the dissipation range and the inertial range in between. Based on 1-D DFT, the turbulent temporal fluctuation characteristics were obtained for the interest points at large scale eddy center in convection range, sub-scale eddy center in inertial range, dissipation range, as well as in the axis of the jetting flow. In addition, the fractal dimensions were also calculated upon the 1-D spectrum, which was then used for fractal characterization of temporal fluctuations of the interest points in different scale regions of the scalars turbulent flow.

Key words: turbulent flow; discrete Fourier transforms; spectrum analysis; fractals

流场红外热探测是利用红外辐射原理,通过测取流体表面的红外辐射能,将被测表面的温度分布转换为形象直观的红外热图[1].红外热图采样序列表达了被动标量湍流能量输运的时空演化过程.根据流体运动的力热耦合与能量转化机制,可对湍流的结构及其演化过程进行分析.文献[2]利用红外热成像技术对流体边界层的分离、边界层转捩进行研究;文献[3]利用红外热像仪显示大截面的空气流动;文献[4]利用红外探测观测了流动混合层界面失稳后出现的复杂漩涡现象;文献[5]利用红外频谱仪探测与识别果汁中不同种类的细菌;文献[6]利用红外显微频谱仪探测电解传质过程的毛管电泳现象.本文利用红外热成像仪对高压水射流进行探测,利用离散傅里叶变换(DFT,Discrete Fourier Transforms)、频谱分析与分形理论,研究由红外热图表征的被动标量湍

收稿日期: 2007-05-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2002CB412700)

作者简介: 宫伟力(1955—),男,辽宁本溪人,副教授, gwl@cumtb.edu.cn.

流场在频域空间的多尺度结构特征及其时间演化规律,以期深入认识自由剪切湍流流动规律.

1　水射流红外热辐射特征

1.1　红外探测试验

红外探测装置采用 TVS-8000MK Ⅱ 型红外热像仪,它是一种二维平面成像系统,测取射流流束内的红外辐射温度分布并将其投影到二维平面上,其温度灵敏度为 0.025℃,图像分辨率为 120×160.红外探测实验系统如图 1 所示,红外摄像仪镜头到射流的距离为 1 225 mm,为减小周围环境对水射流红外辐射的影响,喷嘴放置在一个封闭的暗箱内.喷嘴直径为 1 mm,加压范围 0～40 MPa,高压水从圆柱形喷嘴直接喷入空气,试验过程连续增加射流压力.红外热像仪拍摄频率设置为 1 帧/s,连续拍摄即可得到红外热图的时间采样序列.

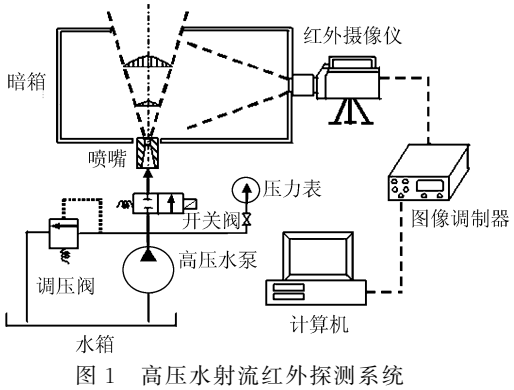


图 1　高压水射流红外探测系统

由环境温度、光线、仪器设备等静止辐射体产生的静态噪声,红外图像采用了静态去除背景噪声的方法;对测试过程中的随机噪声,利用二维小波多分辨分析算法[7],调用 Matlab 工具箱中的求取全局阈值函数 ddencmp 和去噪函数 wdencmp 实现对大尺度高频小波系数的滤波,以达到去噪目的,去噪后的图像用于下面的分析.

1.2　红外热像表征的被动湍流场

红外热图可以直观地显示湍动能输运的"串级过程".根据湍动能串级理论[8]:不可压缩各向同性湍流场中,根据涡量的大小,可分为积分尺度 L、惯性子区尺度 l 以及 Kolmogorov 尺度 η 区域.L 区是大结构涡旋存在的区域,l 区中存在较小尺度的涡,把大尺度涡的能量传递给 η 区中更小尺度的涡.水射流红外热图表达了水射流温度的输运,可以看作是一种标量湍流.

2　二维空间波谱分析

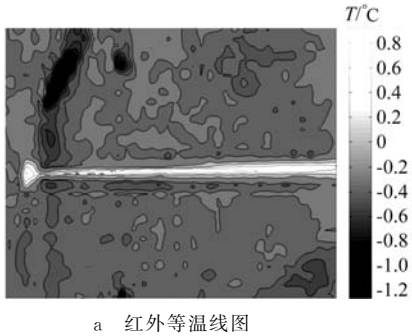
对于任一采样时刻 t_0,红外图像 $f(x,y)=f(x,y,t_0)$ 是射流流场的红外辐射温度在特定时刻的平面分布.$f(x,y)$ 的离散傅里叶变换定义为[7]

$$F(u,v)=\mathrm{DFT}[f(x,y)]=\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)\exp\left[-2\pi\mathrm{i}\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)\right] \quad (1)$$

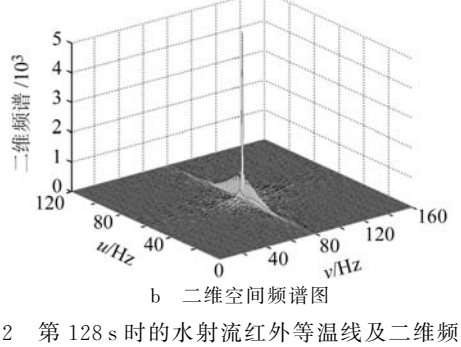
式中,$F(u,v)$ 为 $f(x,y)$ 空间频谱或波谱;u,v 分别为沿 x 轴与 y 轴两个方向的空间频率(或波数),u,v 取离散值;k($k=\sqrt{u^2+v^2}$)为沿任意方向的空间波动频率(或波数),k 与波长 λ 之间存在关系:$\lambda\propto 1/k$.对红外热图进行二维离散傅里叶变换,可以对标量湍流场在空间尺度上的波动特征、波动尺度以及其时间演化过程进行分析.

射流在第 128 s 转变为湍流,此时射流压力 $p=6$ MPa,流速 $V=109.5$ m/s,转捩雷诺数 $Re=8.36\times10^4$.

图 2 为第 128 s 时的红外等温线图及二维频谱图,由图 2a 可见,射流出口的上下两侧出现了不完全对称的大尺度涡结构.图 2b 中,中央凸起部分为低频区域,在凸起部分与高频区域的小振幅随机波动部分之间出现明显的过渡带,表现出了湍流能量输运过程的多尺度结构特征.



a　红外等温线图

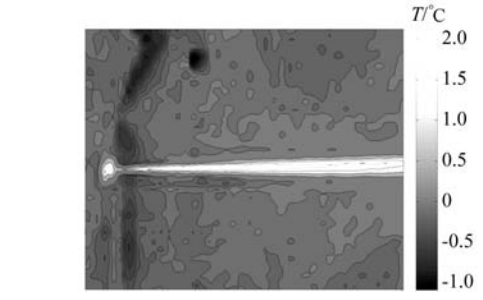


b　二维空间频谱图

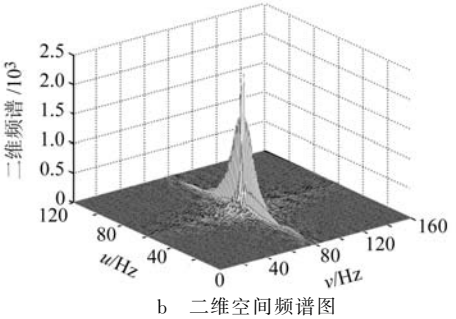
图 2　第 128 s 时的水射流红外等温线及二维频谱图

图 3 为第 400 s($p=20$ MPa,$V=200$ m/s,$Re=1.52\times10^5$)时的红外等温线图及二维频谱图.

图3a中，喷嘴出口上下两侧存在相互配对的大尺度涡旋，大尺度涡旋随着射流流向的发展逐步破碎为较小尺度的涡旋，最后形成小尺度的较为均匀的湍流区. 图3b可以直观地考察射流的标量湍流场在空间频域的振幅强度分布：中心凸出部分为直流部分(低频部份)，是射流能量的主要部分；高频部分的小振幅波动表达了各向同性随机湍流的涨落；中心凸出部分与随机波动的高频部分之间的过渡带代表了 l 区. 与图2相对比可知，随着 Re 的增大，标量湍流的 L 区与 η 区几乎完全分离($L\gg\eta$)，在两者之间由频谱的高低过渡带组成的 l 区明显可见.



a 红外等温线图



b 二维空间频谱图

图3 第400 s时水射流红外等温线及二维频谱图

对应图3b作如下定义：中心凸起部分的低频区域为标量湍流场的 L 区，凸起邻近由高至低的过渡部分为 l 区，过渡区之后小振幅随机波动的高频区域对应于 η 区. 利用滤波器设计理论，定义通带内允许最大衰减系数 α_p 与阻带内允许最大衰减系数 α_s 为[8]

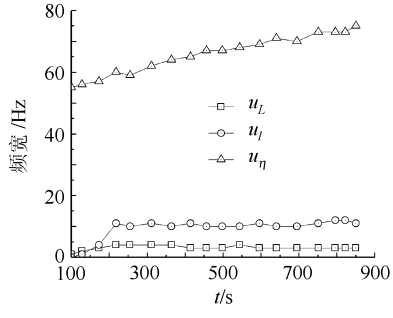
$$\left.\begin{aligned}\alpha_p &= 20\lg\frac{|H(k)|}{|H(k_L)|}\\ \alpha_s &= 20\lg\frac{|H(k)|}{|H(k_\eta)|}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中，k_L 与 k_η 分别为 L 和 η 的截止频率. 取 $\alpha_p=3$ dB，$\alpha_s=30$ dB 为阈值，对二维空间波谱进行统计计算，得到 L，l 和 η 尺度的频宽，如表1所示. 可见，在 L 区，流向(x 向)频宽大于垂向(y 向)频宽；在 l 区，流向频宽小于垂向频宽；在 η 区，流向频宽要远大于垂向频宽. L 区、l 区、η 区的频宽依次增大，其相应的波动的空间尺度依次减小，反映了湍流脉动的多尺度特征.

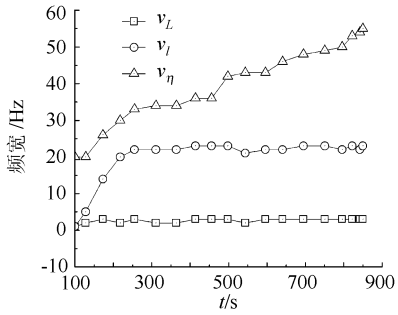
表1 第400 s时射流红外温度场的空间尺度特征

尺度	k	u	v
L	5	4	3
l	24.17	10	22
η	74.17	66	35

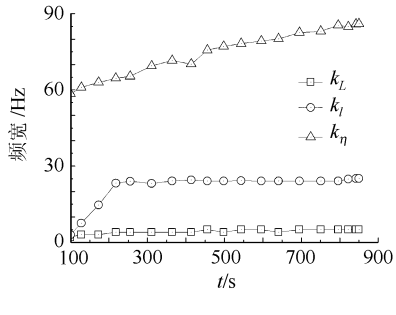
对射流红外图像时间序列，计算其二维频谱各区域的频宽，得到空间波动特征尺度随时间 t 的演化曲线如图4所示.



a 流向



b 垂直方向



c 任意方向

图4 射流红外温度场各尺度波动频宽的时间演化规律

由图4可得如下规律：

1) 在形成湍流后，L 区的大尺度涡的波长几乎不变；

2) η 区在不断地扩大，其涡旋尺度远远小于 L 区中的大涡，同时 η 区随射流速度增加不断地与 L 区分离；

3) l 区在射流速度较小时(Re 较小时)可以忽略，随着 Re 增加，L 区与 η 区的不断远离，l 区的尺度在不断地加大，增加到一定尺度后趋于恒

定.

3　红外热图时间序列频谱分析

3.1　时间序列的频谱特征

对红外图像上的关心点(x_0,y_0)按等时间间隔进行采样,可得一维时间序列:

$$f(t)=f(x_0,y_0,t)$$

其一维离散傅里叶变换为[8]

$$F(\omega)=\mathrm{DFT}[f(t)]=\sum_{t=0}^{n-1}f(t)\exp\left[-2\pi\mathrm{i}\left(\frac{\omega t}{n}\right)\right] \tag{3}$$

式中,$F(\omega)$为 $f(t)$的时间频谱,ω 为截止频率;n 为时间样本点的总个数.

射流红外热像上设置关心点 $a\sim i$ 如图 5 所示.时间序列的离散傅里叶变换的主值区间为$[-\pi,\pi]$,由对称性,只分析$[0,\pi]$间的频谱,由 $\omega=2\pi f$ 可知频率 f 的区间为$[0,0.5]$.

图 6 为各关心点的一维频谱曲线.其中 a,b,c 3点的低频大振幅波动均集中在小于0.04 Hz的频带上.在大于 0.04 Hz 的高频区间,a 点为窄带宽小振幅、趋向于一较低水平均值的随机波动,体现了 L 区具有稳定的大涡结构的特点;b 点为由高渐低、窄带宽波动,体现 l 区较小尺度涡能量传递的特点;c 点为窄带宽较大振幅、趋向于一较低水平均值的随机波动,并包含了所有的频率成分,说明 c 点位于完全发展而脉动程度较弱的湍流区.由于点 g,h,i 与 a,b,c 具有对称性,因此其频谱与 a,b,c 点的频谱特征相似.

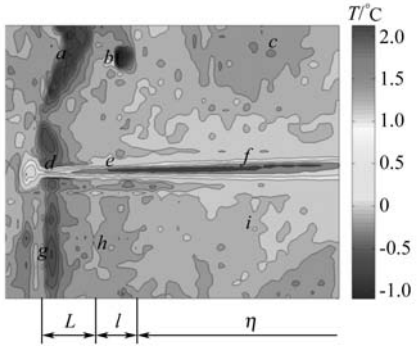


图 5　水射流关心点布置图

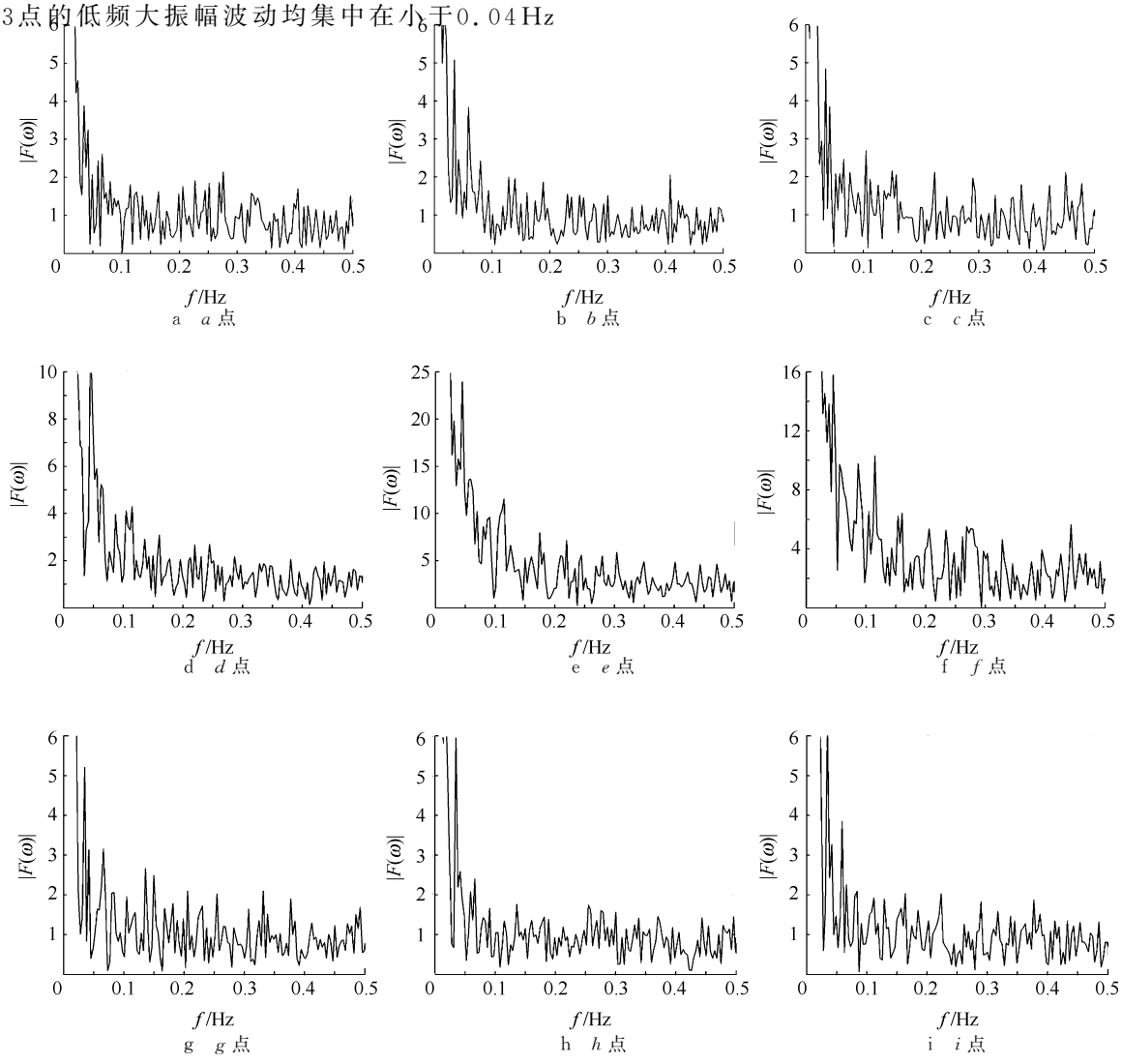


图 6　水射流轴线上关心点时间序列频谱

在大于0.04 Hz的频率区间，d点趋向于一较低水平均值的小振幅波动，反映了等速核势流流动的特点；e点具有统计意义上在较宽频带上的连续、由高至低的波动，体现了l区能量逐级传递的特点；f点具有较高振幅、宽频带扰动、趋向于一低水平均值统计意义上的连续谱分布，呈现出完全发展湍流随机波动与耗散的特点.

3.2 时间序列的频域分形特征

从频谱观点来看，测定分形维数的尺度就是ω，它是把比ω更低的振动成分舍去的界限频率. 频谱与截止频率之间有如下的幂律关系式[9]：

$$F(\omega)=\frac{1}{|\omega|^{5-2D}} \tag{4}$$

设定一组截至频率$\omega_1,\omega_2,\cdots$，运用傅里叶变换计算出相应的频谱$F(\omega_i)$，在双对数坐标上对$\lg F(\omega)$和$\lg\omega$进行线性回归，回归直线的斜率为α，则随机序列的分形维数$D=2.5-\alpha$. 频谱维数可以做为湍流紊动程度的度量指标.

图7为关心点$a\sim i$频谱的分形维数曲线，在射流轴线上方，a点分维数最大，说明稳定的大涡结构具有最复杂的空间几何构造；b点分维数居于中间值，说明处于l区的较小尺度涡，其分形尺度也较小；c点分维数最小，说明了此区的湍流具有各向同性的特点. 由对称性，在射流轴线下方的g,h,i点的分维数分布与上述三点相似. 在射流轴线上，关心点d,e,f的分维数大大低于其他点，其中处于等速核上的d点最小，说明势流的流动结构最简单，处于η区的f点分维数较大，说明其具有较复杂的湍流结构.

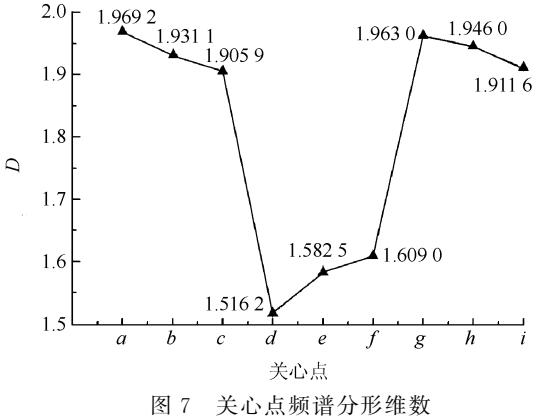


图7 关心点频谱分形维数

4 结 论

红外热图的二维空间频谱给出了标量湍流的多尺度特征，标量湍流的对流尺度和耗散尺度的分离程度随雷诺数增大而增大，其间为惯性子区. 各尺度涡中心及射流轴线上点采样序列的频谱在小于0.04 Hz的低通频带上具有相同的振幅分布，大于0.04 Hz的高频区间反映了各自不同的湍流脉动特点. 时间序列频谱分形维数表征了各尺度区特定点湍流脉动的分形特征.

参考文献（References）

[1] 李国华，吴立新，吴淼，等. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. 红外与激光工程，2004，33(3)：227－230
Li Guohua, Wu Lixin, Wu Miao, et al. Current status and applications of infrared thermo graphy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(3): 227－230(in Chinese)

[2] Bouchardy A M. Processing of infrared thermal image for aerodynamic research [J]. Applications of Digital Image Processing, 1983, 397: 304－309

[3] Cehlin M, Moshfegh B, Sandberg M. Measurements of air temperatures close to a low-velocity diffuser in displacement ventilation using an infrared camera [J]. Energy and Buildings, 2002, 34: 687－698

[4] Turner J S. Turbulent entrainment: the development of the entrainment assumption and its application to geophysical flows [J]. Fluid Mechanics, 1986, 373:431－471

[5] Hamzah M A, Lin Mengshi, Anna G C. Fourier transform infrared spectroscopy, detection and identification of Escherichia coli O157: H7 and Alicyclobacillus strains in apple juice [J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 111: 73－80

[6] Patterson B M, Danielson N D, Sommer A J. Polymer mediated capillary electrophoresis with attenuated total reflectance infrared microspectroscopy detection [J]. Analytica Chimica Acts, 2007, 583: 231－238

[7] William K P. 数字图像处理[M]. 邓鲁华，张延恒，译. 北京：机械工业出版社，2005
William K P. Digital image processing [M]. Translated by Deng Luhua, Zhang Yanheng. Beijing: China Machine Press, 2005(in Chinese)

[8] 张兆顺，崔桂香，许春晓. 湍流理论与模拟[M]. 北京：清华大学出版社，2005
Zhang Zhaoshun, Cui Guixiang, Xu Chunxiao. Theory and modeling of turbulence [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese)

[9] 肯尼思·法尔科内. 分形几何——数学基础及其应用[M]. 曾文曲，译. 沈阳：东北大学出版社，2001：57－58
Falconer K J. Mathematical foundations and applications [M]. Translated by Zeng Wenqu. Shenyang: Northeast University Press, 2001:57－58 (in Chinese)

（责任编辑：赵海容）