

基于图像处理及模式聚类的二次仿真方法 及其在回转窑温度监控中的应用

李 劫, 张红亮, 陈湘涛, 刘代飞, 邹 忠

(中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 提出一种基于图像处理和模式聚类的二次仿真方法。应用 Fluent 商业软件对回转窑内粉煤在 27 类设定工况的燃烧进行温度场的三维数值模拟, 将仿真结果构建仿真结果数据库; 采用模式聚类的方法判断实际工况属于哪一类标准工况, 调用仿真结果数据库建立温度与该类标准工况的数学模型, 求解模型并计算实际工况下的温度场; 利用图像处理中的伪彩色变换得到二次仿真结果, 用 VC++6.0 来实现。结果表明: 该方法能够较准确地给出仿真结果, 极大缩短计算时间, 为回转窑内温度监测提供一种新思路, 具有较大的现场应用价值, 并很容易推广到其他领域中。

关键词: 二次仿真; 模式聚类; 图像处理; Fluent 数值模拟; 回转窑

中图分类号: TP 311; TF 811.522

文献标识码: A

Secondary simulation based on pattern cluster and image process and application in rotary kiln temperature inspection

LI Jie, ZHANG Hong-liang, CHEN Xiang-tao, LIU Dai-fei, ZOU Zhong

(School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A secondary simulation method based on pattern recognition and image process was proposed. First, 3 dimensional numerical simulation of the powered coal combustion in rotary kiln was made under the 27 setting states by Fluent software, and the simulation results were constructed into a database; then, decide which class the actual state belongs to through pattern recognitions, get the simulation result of this class from database and build the mathematical model between the simulation result and input parameter, resolve the model and calculate the actual simulation result; at last, achieve the graphical simulation result by image process. The interface is realized using VC++6.0 program language. The experiments show that this method can get satisfactory simulation result in very short time, which provides a new way for the temperature inspection of rotary kiln and can be easily expanded to other field.

key words: secondary simulation; pattern recognition; image process; Fluent numerical simulation; rotary kiln

随着计算机软硬件技术的飞速发展, 计算机数值仿真开始越来越广泛地应用于各领域, 为产品的设计和优化提供数据基础, 并为各种工业诊断和分析提供依据。但是, 由于仿真建模及求解时间周期长, 在实际工业监测中应用较少。近年来, 已有学者开始尝试解决这方面的问题, 周乃君等^[1-2]提出了一种二次仿真

的技术, 仿真计算四角粉煤炉在一个标准工况下的温度场, 再建立温度场和工况的数学模型, 动态计算温度场, 但在实际应用中无法归纳出仅有一个标准工况, 故据此来仿真可能存在较大误差。此外, 周怀春等^[3-4]还提出了基于辐射图像的炉膛温度分布重建技术, 该方法采用多个数字摄像头获取信息, 采用线形重构方

法重建温度场, 该方法在电站锅炉炉膛的温度场重构上能够快速较好地得到结果, 但对于有的对象内部无法使用摄像头获取信息该方法则无法使用。

本文作者提出一种新的二次仿真方法: 即以回转窑为对象, 应用商业软件 Fluent 计算出各种标准工况下的回转窑粉煤燃烧的温度场, 建立仿真结果数据库, 采用模式聚类的方法判断实际工况属于设定工况中的那种类别(目前标准设定工况数设为 27), 然后读取相应数据库中该类别的仿真温度结果, 并利用这些仿真温度与实际工况间的数学关系模型, 计算出实际工况下的温度场, 最后利用图像处理中的伪彩色技术输出二次仿真结果。本文中的二次仿真系统应用 VC++6.0 编程语言实现。

1 二次仿真原理

1.1 回转窑仿真模型

建立了一个 $d4\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的回转窑简化模型, 如图 1 所示。粉煤随一次风(Air1)由喷射孔 A 喷入窑内, 二次风(Air2)由喷射孔 B 进入窑内。在窑内粉煤开始燃烧, 尾气从窑尾 C 排出, 考虑底部有物料层, 取其简化的平面。

煤粉在窑内的燃烧是一个很复杂的物理、化学过程, 它包括挥发份的释放、粉煤的燃烧、辐射传热、颗粒运动和相流动及湍流燃烧, 涉及到多相流动、传热传质和燃烧等多个领域。本文作者采用了适用范围广的 Standard $k-\epsilon$ 紊流模型模拟气相湍流运输, 用混合分数-概率密度函数(mixture-fraction/PDF)^[5-7] 模型模拟气相湍流燃烧, 用 P-1 辐射模型(P-1 radiation model)计算辐射传热。

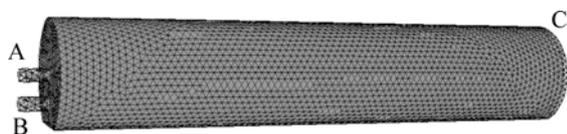


图 1 回转窑的网格划分

Fig.1 Meshed plot of rotary kiln

回转窑中粉煤燃烧的主要影像参数及其取值范围如表 1 所示, 其中一次风温度为常温 300 K, 边界条件设定如表 2 所示。

本文中回转窑内的温度场只考虑窑内粉煤的燃烧过程, 作为二次仿真的一个简单应用实例, 并

表 1 输入参数的取值范围

Table 1 Values of input parameters

Primary air velocity, $V_{air1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Secondary air velocity, $V_{air2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Primary air temperature, T_{air2}/K
[80, 120]	[5, 20]	[800, 1200]

表 2 边界条件的设定

Table 2 Setting of boundary condition

Primary air	Secondary air	Exhaust gas outlet
Velocity inlet	Velocity inlet	Pressure outlet

通过与离线仿真结果对比, 检验二次仿真的精确度。

1.2 模式聚类

设有 c 类已知类别的模式, 从每一类中找出一个标准样本或者样本均值: m_1, m_2, \dots, m_c , 对于待聚类样本 x , 则可定义聚类的判别函数为待聚类样本和已知类别样本的欧式距离^[8-9]:

$$d_j(x) = \|x - m_j\|^2, j=1, 2, \dots, c \quad (1)$$

按最小距离模式聚类原理, 决策规则为: 如果

$$d_k(x) < d_j(x), j=1, 2, \dots, c; j \neq k \quad (2)$$

即样本 x 与已知的 k 类距离最近, 则判别 x 属于第 k 类。

1.3 图像伪彩色处理

设仿真得到的温度值范围为 $[T_{min}, T_{max}]$, 则对任意仿真结果 T 可应用下述公式将其映射到 $[0, 255]$ 的灰度空间:

$$T_{gray} = 255 \frac{(T - T_{min})}{(T_{max} - T_{min})} \quad (3)$$

式中 T_{gray} 为 T 在图像灰度空间 p 中的对应值。

此时得到的图像还是灰度图, 为了更直观地显示, 需要进行伪彩色变换。根据色度学的原理, 将原图像的灰度分段经过红、绿、蓝 3 种不同变换, 如图 2 所示, 变成三基色分量, 然后用它们分别去控制彩色显示器的红、绿、蓝电子枪, 便可以在彩色显示器的屏幕上合成一幅彩色图像。本文中所选用变换函数如图 3 所示, 其中(a)、(b)、(c)分别为红、绿、蓝 3 种变换

函数,图(d)是把3种变换函数画在同一张图上以便看清相互间的关系^[10-15]。L为灰度值。

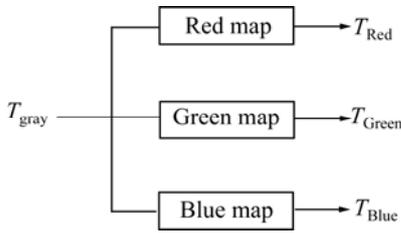


图2 伪彩色变换

Fig.2 Transformation of pseudo-color

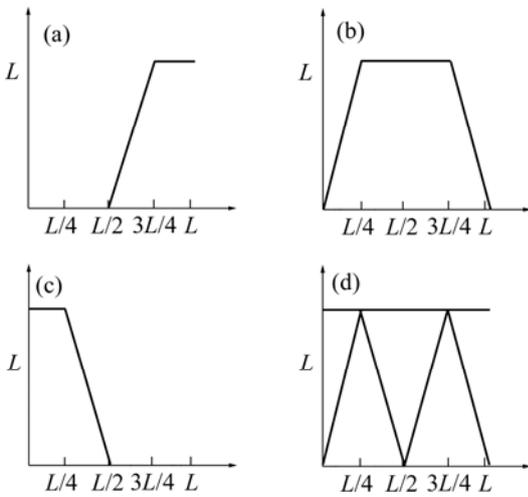


图3 伪彩色变换函数

Fig.3 Transformation function of pseudo-color: (a) Red; (b) Green; (c) Blue; (d) Integrated

1.4 温度和工况的数学模型

假设窑内部温度分布为

$$T = T(x, y, z, C)$$

其中 $C = [C_1, C_2, \dots, C_n]$ 表示实际生产中 n 个可变输入参数组成的参数矩阵,本文中 $n=3$ 。

根据参数矩阵的模式识别可得到该实际工况所属的设定工况类别 i ,本文中,对于这些设定工况都进行了 n 组邻近的工况的仿真计算,并存入了仿真结果数据库,故可根据 i 读取相应的 n 组仿真数据,则对于每一空间点 (x, y, z) ,可以得到 n 组温度和参数的对应关系,如下式所示:

$$\begin{cases} c_{11}k_1 + c_{12}k_2 + \dots + c_{1n}k_n = T_1 \\ c_{21}k_1 + c_{22}k_2 + \dots + c_{2n}k_n = T_2 \\ \dots \\ c_{n1}k_1 + c_{n2}k_2 + \dots + c_{nn}k_n = T_n \end{cases} \quad (4)$$

式中 c_{ij} 表示第 i 组设定工况中第 j 个可变输入参数, k_i 表示第 i 个对应系数, T_i 表示对应仿真结果。

通过求解线性方程组,可得系数矩阵 $K = [k_1, k_2, \dots, k_n]^T$, 则该点上的温度和工况的数学模型为

$$T_{real} = c_1k_1 + c_2k_2 + \dots + c_nk_n \quad (5)$$

1.5 系统集成

本文有3个输入参数,假定每个参数设定 p 个工况段,则共有 $(c=3p)$ 种设定工况,将这些设定工况的仿真计算结果构造一个仿真结果数据库,通过对实际工况进行模式聚类判别,得到它所属的设定工况类别;调取数据库中相应的数据,建立实际工况与识别出的标准工况数据间的数学模型,并利用该模型计算实际工况下的温度分布;最后,可以利用图像处理方法以图形方式直观地显示仿真结果,实现二次仿真。系统的工作原理如图4所示。

2 结果与讨论

由表1中可变输入参数的取值范围,人为地设定3个标准工况点(工业应用中,可根据实际操作获得参数取值范围和设定工况点),一次风速度(m/s): 90, 100, 110; 二次风速度(m/s): 7, 10, 15; 二次风温度(K): 900, 1000, 1100。再对其进行排列组合成27类设定工况类,每一类再对3个参数做3次微小改变取得3组工况,并进行仿真计算,则总共进行 $27 \times 3 = 51$ 组仿真计算。将这51组工况的仿真计算结果与其对应的输入参数值构造成一个后台数据库。

利用 VC++6.0 编程语言实现图1所示的系统,选取模型的纵向剖面作为观察面,如图5所示。为验证二次仿真的准确性,分别采用该系统和 Fluent 计算2组任意工况: a[98, 9, 990]、b[98, 8, 980],结果如图6~7所示。

从图可以看出,二次仿真结果的图形不如 Fluent 的界限明显,并且不如 Fluent 易于操作,这是由于数值结果图像化显示与本文中采用的伪彩色输出方法和 Fluent 所采用的算法和模型存在不一致。尽管如此,二次仿真结果和 Fluent 仿真结果的温度变化趋势基本一致,二者具体的误差数据如表3所示。

从表中可见,与 Fluent 离线仿真结果相比,二次仿真的相对误差在4%以内,绝对误差小于 41 °C。虽然从精度上来说,两者存在一定的差距;但从性能上

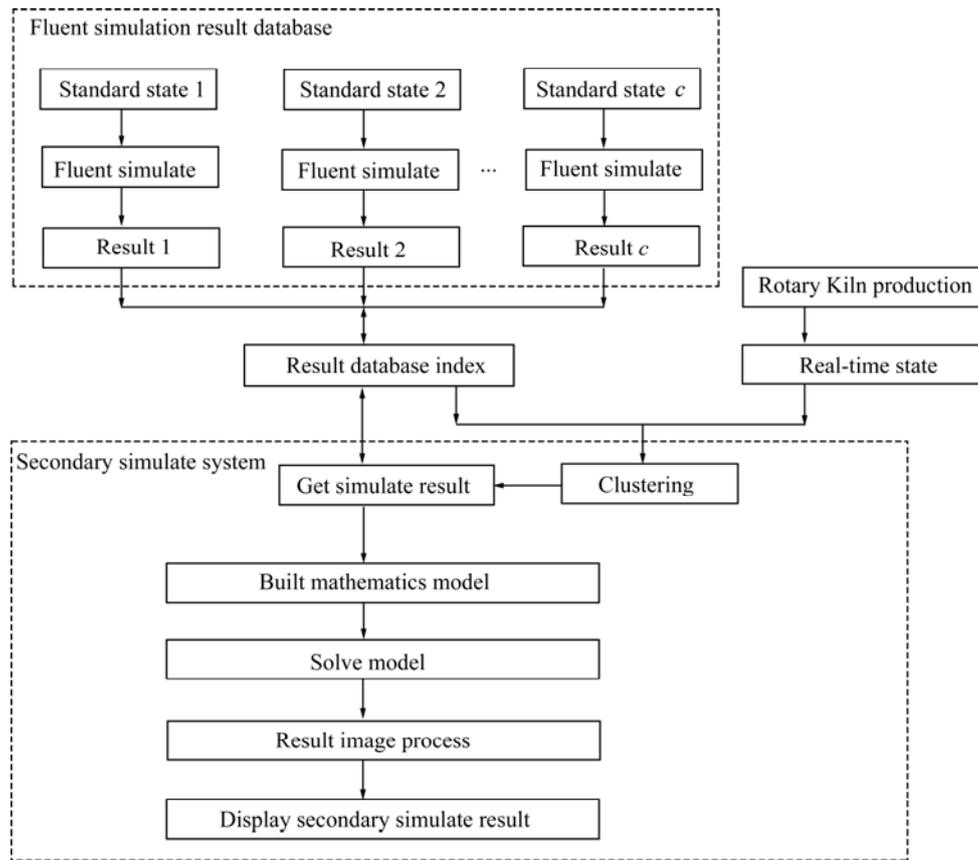


图 4 基于图像处理及模式聚类的二次仿真原理

Fig.4 Secondary simulation theory based on image process and pattern clustering

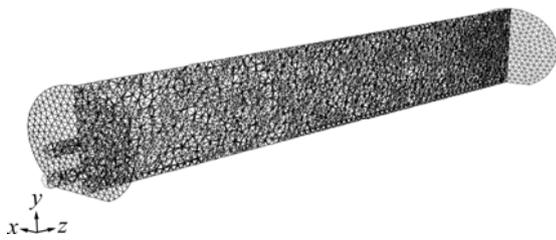


图 5 二次仿真平面

Fig.5 Secondary simulation face

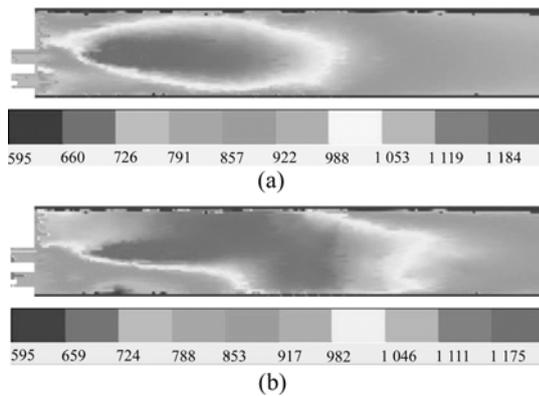


图 6 二次仿真的结果

Fig.6 Secondary simulation result: (a) Condition of [98, 9, 990]; (b) Condition of [98, 8, 980]

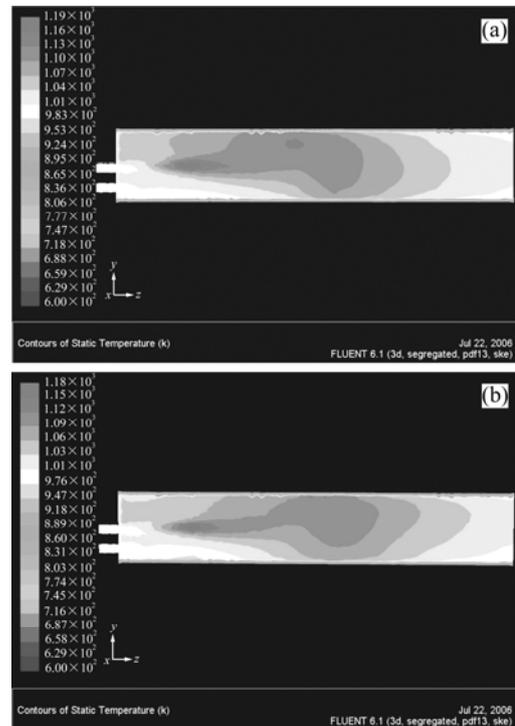


图 7 Fluent 仿真结果

Fig.7 Fluent simulation result: (a) Condition of [98, 9, 990] (b) Condition of [98, 8, 980]

表3 误差结果

Table 3 Error result

Condition	Relevant error/%	Absolute error/°C	Time consumed by fluent/s	Time consume/s
a	3.74	40.1	3 600	1.78
b	3.81	40.5	3 600	1.58

Relevant error is average error between result of secondary simulation and fluent.

来说, 本系统计算时间不到 2 s, 而 Fluent 需要 1 h, 因此从实用的角度来说, 本系统基本上能达到工业现场实时仿真应用的要求。

产生误差的主要原因是用数学模型求解系数矩阵的过程中, 模型使用的是线性模型, 只有在实际工况很接近设定工况类别时线性求解才比较准确; 当相差较大时, 线性系统会产生一定的误差, 因此从理论上说, 将输入参数的等级设定得更加详细并计算出更多的设定工况是可以将误差控制在一定的范围内。另外, 由于各参数数值变化幅度不均, 在模式识别时会存在一定的误判, 最终影响建模, 这需要采用更精确的模式识别算法来解决。

3 结论

1) 提出一种基于图像处理和模式聚类的实时二次仿真方法的整体构架: 通过应用 Fluent 商业软件对回转窑内粉煤燃烧在各种标准工况下进行温度场的三维数值模拟, 将仿真结果构建一个仿真结果数据库, 采用模式聚类的方法判断实际工况属于哪一种标准工况, 根据仿真数据库的结果建立温度与工况的数学模型, 再计算实际工况下的温度场, 最后利用图像处理中的伪彩色技术实现二次仿真结果的输出。

2) 利用 VC++6.0 开发环境完成了整个实时二次仿真系统的开发。

3) 二次仿真结果表明, 该方法能够在很短时间内较准确地输出实时仿真结果, 相对误差在 4% 以内。这种实时仿真技术具有较大的现场应用价值, 容易推广到其他仿真应用领域(如 ANSYS 等), 为实时仿真在工业领域的应用提供有益的探索。

REFERENCES

[1] 周乃君. 基于风粉监测的煤粉锅炉燃烧工况动态仿真与操作

优化专家系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.

ZHOU Nai-jun. Study on dynamic simulation of combustion temperature in boiler and expert system for optimizing-operation based on on-line monitoring to flux of air and coal[D]. Changsha: Central South University, 2003.

[2] 王 强, 周乃君. 130 t/h 煤粉锅炉风-粉在线监测系统的应用和研究[J]. 热能动力工程, 2001, 16(6): 625-627.

WANG Qiang, ZHOU Nai-jun. The research and application of an air/pulverized coal on-line monitoring system for a 130 t/h pulverized coal-fired boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 16(6): 625-627.

[3] 韩曙东, 周怀春, 盛 锋, 黄勇理, 孙学信. 基于具有明显测量误差的辐射图象的二维炉膛温度分布重建和快速特征识别研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 67-71.

HAN Shu-dong, ZHOU Huai-chun, SHENG Feng, HUANG Yong-li, SUN Xue-xin. Study on reconstruction and fast characteristic recognition of temperature distributions in a 2-D furnace via radiant energy images with sensitive measurement errors[J]. Proceeding of the CSEE, 2000, 20(9): 67-71.

[4] 盛 锋, 周怀春, 韩曙东, 李 军, 郑楚光. 基于图像处理及辐射传热逆问题求解的二维炉膛温度场重建[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 1-5.

SHENG Feng, ZHOU Huai-chun, HAN Shu-dong, LI Jun, ZHENG Chu-guang. Reconstruction of temperature profiles in two-dimensional furnaces radiation image by solving inverse radioactive heat transfer problem[J]. Proceeding of the CSEE, 1999, 19(10): 1-5.

[5] 郭永红, 孙保民, 康志忠. 超细煤粉再燃低 NO_x 燃烧技术的数值模拟[J]. 动力工程, 2005, 23(3): 422-426.

GUO Yong-hong, SUN Bao-min, KANG Zhi-zhong. Numerical simulation of low NO_x recombustion technique with micro-pulverized coal[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 23(3): 422-426.

[6] 马爱纯, 周子民, 李旺兴. 氧化铝熟料窑喷射干燥段参数的仿真优化[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 138-141.

MA Ai-chun, ZHOU Jie-min, LI Wang-xing. Parameters optimization of spray drier zone in alumina clinker rotary kiln[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 138-141.

[7] Sivathanu Y R, Faeth G M. Generalized state relationships for scalar properties in non-premixed hydrocarbon/air flames[J]. Combust Flame, 1990, 82(2): 211-230.

[8] 黄凤岗, 宋克欧. 模式识别[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1998: 33.

HUANG Feng-gang, SONG Ke-ou. Pattern recognition[M]. Haerbing: Haerbing Engineering University Press, 1998: 33.

[9] 李宏东, 姚天翔. 模式分类[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 153.

LI Hong-dong, YAO Tian-xiang. Pattern classification[M].

- Beijing: China Machine Press, 2003: 153.
- [10] 曹茂永, 郁道银. 基于感知颜色空间的灰度图像伪彩色编码[J]. 光学技术, 2002, 28(4): 367-368.
- CAO Mao-yong, YU Dao-yin. Pseudocolor coding of gray image based on perceptual color space[J]. Optical Technique, 2002, 28(4): 367-368.
- [11] 汤海纓, 庄天戈. 计算机彩色模型在图像显示与分割中的应用[J]. 计算机学报, 1999, 22(4): 375-382.
- TANG Hai-ying, ZHUANG Tian-ge. Color models used in image representation and segmentation[J]. Chinese Journal of Computer, 1999, 22(4): 375-382.
- [12] Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理 [M]. 第二版. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 240.
- Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing [M]. 2nd ed. RUAN Qiu-qi, RUAN Yu-zhi, transl. Beijing: Electronics Industry Press, 2003: 240.
- [13] 田玉敏, 梁若莹. 计算机彩色输入输出设备常用颜色空间及其转换[J]. 计算机工程, 2002(9): 192-200.
- TIAN Yu-min, LIANG Ruo-ying. Common color space and its conversions in computer I/O equipments[J]. Computer Engineering, 2002(9): 192-200.
- [14] 李步洪, 谢树森, 陆祖康. 肺癌荧光图像的伪彩色增强处理[J]. 光子学报, 2001, 30(8): 938-941.
- LI Bu-hong, XIE Shu-sen, LU Zu-kang. Fluorescence image enhancement of lung cancer by pseudocolor processing[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(8): 938-941.
- [15] 曹茂永, 郁道银. 高灰度分辨率图像的伪彩色编码[J]. 光学技术, 2002, 28(2): 115-117.
- CAO Mao-yong, YU Dao-yin. Pseudo-color coding of high gray-resolution image[J]. Optical Technique, 2002, 28(2): 115-117.

(编辑 李向群)