

## 城市建筑物红外特性四季变化及其成像研究<sup>\*</sup>

陆艳青<sup>1)</sup> 王章野<sup>1)</sup> 董雁冰<sup>2)</sup> 江照意<sup>1)</sup> 彭群生<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室, 浙江, 杭州, 310027;

<sup>2)</sup>航天工业总公司二院二七所, 北京, 100854)

**摘要** 采用多层有限差分法模型等方法, 考虑气象等外部因素的影响, 在一年四季中对城市建筑物各部分及其周围物体的表面温度进行了逐时计算; 运用计算机图形学方法实现了其造型, 并绘制出该建筑物在一年不同季节及在一天不同时刻的真实感较强的红外图像。

**关键词** 多层有限差分法, 城市建筑物, 计算机图形学, 真实感红外成像。

## STUDY ON INFRARED CHARACTERISTICS OF CITY BUILDINGS WITH SEASON CHANGES AND THEIR IMAGES<sup>\*</sup>

LU Yan-Qing<sup>1)</sup> WANG Zhang-Ye<sup>1)</sup> DONG Yan-Bing<sup>2)</sup> JIANG Zhao-Yi<sup>1)</sup> PENG Qun-Sheng<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

<sup>2)</sup> The Second Academy of Aerospace Mechanical & Electronic Group, 207 Institute, Beijing 100854, China)

**Abstract** Multi-layer finite difference method and other methods were used to calculate the surface temperature changes of different parts of city buildings and their surrounding parts with time in different seasons in a year considering the effect of outer meteorological factors. Using methods of Computer Graphics, modelings and realistic IR images of buildings in different seasons and at different time in a day were realized and drawn.

**Key words** multi-layer finite difference method, city building, computer graphics, realistic infrared image.

### 引言

城市建筑物的红外辐射特性及其红外成像研究在现代战争下的目标识别和红外精确制导、遥感探测、城市规划和建筑物无损检测保护等方面有着重要的意义。建筑物连同其周围的道路、土壤和草木等在一日中随着时刻的不同、一年中随着季节的不同, 其红外辐射特性都有较大的变化。Wollerweber<sup>[1]</sup>考虑到不同天气的影响, 提出了地面背景的红外模型; 张建奇<sup>[2]</sup>也提出了有关的计算模型。Jeanr Pierre<sup>[3]</sup>用有限差分法对机场道路表面温度进行了逐时计算, 并对简易建筑物在一天中不同时刻的红外成像进行了模拟。Nicola<sup>[4]</sup>等利用建筑物热像图及模型

对建筑物的缺陷进行估算, 从而实现无损检测保护。但迄今为止, 国内外尚无对城市建筑物及其周围物体的红外特性逐时、逐季节变化并模拟其红外成像的研究报道。

本文主要分析了外部因素的影响及建筑物各部分之间的相互作用, 利用多层有限差分等方法对建筑物及其周围物体的表面温度逐时、逐季节变化进行了计算, 用计算机图形学方法实现了其红外成像的真实感模拟。

### 1 表面温度计算模型

我们研究的对象是杭州市某建筑物群(见图 1), 跟踪测量时间从 1999 年冬季起至 2000 年冬季

<sup>\*</sup>国家自然科学基金(批准号 69873039)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金(批准号 60021201)和国防科技重点实验室基金(批准号 00JS66. 6. 1.JW0404)资助项目

稿件收到日期 2001-11-26, 修改稿收到日期 2002-05-27

<sup>\*</sup>The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 69873039), Natural Science Foundation for Innovative Research Groups of China (No. 60021201) and National Defense Science and Technology Key Lab. Foundation (No. 00JS66. 6. 1. JW0404)

Received 2001-11-26, revised 2002-05-27

整一年. 图中建筑物是混凝土、砖结构. 顶层为水泥混凝土层, 阁楼前后涂有防漏沥青涂层, 建筑物墙壁外挂有空调, 周围大多为土壤, 种有常青灌木, 东面为沥青马路, 南、西、北面为水泥路. 所在地处于北纬  $30^{\circ}32'$ , 东经  $120^{\circ}10'$ .

### 1.1 外部影响因素

对建筑物红外辐射特性影响较大的外部因素有气温、环境湿度、太阳辐射、大气长波辐射和风速等, 下面依次介绍.

#### 1.1.1 气温

室外气温的变化具有近似简谐波的形状, 一天中第  $t$  小时的气温  $T_a(t)$  可用两阶傅立叶级数形式的表达式来模拟, 即

$$T_a(t) = T_{\text{aver}} + a_1 \cdot \cos \frac{(t - b_1)}{12} + a_2 \cdot \cos \frac{(t - b_2)}{6} \quad (1)$$

其中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为常数, 我们采用最小二乘法可求出这些常数的值.  $T_{\text{aver}} = T_{\text{max}} - 0.522(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})$  为日平均气温,  $T_{\text{max}}$  和  $T_{\text{min}}$  分别为当地气象台预报该测量日的最高和最低气温. 气温模拟值与实测值的最大误差值小于  $2^{\circ}\text{C}$ .

#### 1.1.2 相对湿度

环境相对湿度 RH 与气温有关, 在正常温度范围内, 饱和气压  $e_s(T)$  与气温  $T$  的关系<sup>[5]</sup>为

$$e_s(T) = e^{21.382 - 5347.5/T} \times 100 \quad [\text{Pa}]. \quad (2)$$

一天中实际水蒸气压强的变化很小, 但随着气温的上升,  $e_s(T)$  亦升高, RH 下降. 可由干湿温度计测算出 RH, 再算得实际水蒸气压强.

#### 1.1.3 太阳辐射

太阳是最重要的外部热源. 场景中某一物体接收到的太阳辐射量与其朝向有关. 对于一给定位置



图 1 建筑物可见光效果图造型

Fig. 1 Visible light modeling of the buildings

的城市, 在给定观测日的某一时刻  $t$ , 若考察物体所在面的朝向已知, 则此时的太阳高度角  $h$  和壁面太阳方位角  $\theta$  就可计算出<sup>[6]</sup>. 若平面与地平面的夹角为  $\beta$ , 则此时平面对应的太阳入射角  $i$  由下式确定

$$\cos i = \cos \beta \cdot \sin h + \sin \beta \cdot \cos h \cdot \cos \theta. \quad (3)$$

则太阳直射的强度为

$$I_d = [1.0 + 0.034 \cos(2\pi n/365)] \cdot I_0 \cdot P^m \cdot \cos i, \quad (4)$$

其中  $n$  是观测日在一年中的日期顺序号,  $I_0$  是太阳常数,  $P$  是当地大气透明度,  $m$  是大气质量. 太阳的散射强度为

$$I_{\text{scatter}} = \frac{1}{2} I_0 \sin h \cdot \frac{1 - P^m}{1 - 1.4 \ln P} \cos^2 \theta. \quad (5)$$

当天空有云时, 接收到的太阳辐射量将减少, 这可用云遮系数 CCF 来表示, 其值在  $0 \sim 1$  之间, 对于晴朗天空,  $CCF = 1$ ; 对于阴雨天,  $CCF = 0$ . 实际太阳辐射量为

$$W_{\text{sun}} = CCF \cdot I_d + I_{\text{scatter}} \quad [\text{W}/\text{m}^2]. \quad (6)$$

#### 1.1.4 大气辐射

大气长波辐射可表示为

$$W_{\text{sky}} = T_a^4 \cdot (0.51 + 0.208 e_a) \cdot F \quad [\text{W}/\text{m}^2]. \quad (7)$$

其中  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $T_a$  是气温 [K],  $e_a$  是水蒸气压强 [kPa],  $F$  是平面角系数.

#### 1.1.5 风速

风速对表面和空气之间的热交换影响极大, 其交换热量值为

$$W_{\text{cv}} = h(T_s - T_a) \quad [\text{W}/\text{m}^2]. \quad (8)$$

其中  $T_s$  和  $T_a$  分别为物体表面温度和气温,  $h$  为换热系数. 风速随高度而变, 若在参考高度  $z_0$  处的风速为  $V_{z_0}$ , 则在高度为  $z$  处的风速可表示为<sup>[7]</sup>

$$V_z = \left(\frac{z}{z_0}\right)^a \cdot V_{z_0} \quad [\text{m}/\text{s}]. \quad (9)$$

其中  $a$  为常指数, 对于城市区域取  $a = 1/2 \sim 1/3$ .

### 1.2 多层有限差分法模型

城市建筑物及其周围主要由墙体、玻璃窗、房顶层、道路(水泥路、沥青路)、土壤、草木及一些人工热源如空调等组成. 为求得物体表面的温度, 对表面薄层, 在观测时间间隔  $t \sim t + dt$  内, 我们提出了如下能量方程:

$$dW = a_1 W_{\text{sun}} + a_2 W_{\text{sky}} - W_s + W_{\text{cv}} + W_{\text{cd}} + W_{\text{LE}} + W_{\text{inter}}. \quad (10)$$

式中  $dW$  为表面薄层(设厚为  $\Delta x$ ) 平均吸收功率; 等式右边第一、二、四项前文已介绍过;  $a_1$  和  $a_2$  分

别为表面对太阳辐射和大气长波辐射的吸收系数,  $W_s = \epsilon_s T_s^4$  为表面自身辐射, 其中  $\epsilon_s$  为表面发射率,  $T_s$  为表面温度,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数;  $W_{cd} = -\frac{\partial T}{\partial X}$  为热传导项, 其中  $\lambda$  为表面材料热传导率,  $\frac{\partial T}{\partial X}$  为温度梯度;  $W_{LE} = \rho \cdot C_p \cdot \frac{e_a(T) - e_s(T)}{R}$  为潜热交换项, 其中  $\rho$  为材料的密度,  $C_p$  为空气定压比热,  $\rho$  为湿常数,  $e_a(T)$  和  $e_s(T)$  分别是气温为  $T$  时的实际气压和饱和气压,  $R$  为总阻抗, 其具体形式将在下面讨论。

$W_{inter}$  为场景中物体之间的相互作用项, 比如对于墙体, 地面的热辐射和对太阳辐射的反射将作用到墙体, 在这种情形下其值为

$$W_{inter} = \epsilon_{gh} \cdot T_g^4 \cdot F_{g-wall} + \epsilon_g \cdot W_{sun} \cdot (1 - \cos^2 \theta) \quad (11)$$

其中右式第一项为地面对墙体的热辐射,  $\epsilon_{gh}$  为地面黑度,  $T_g$  为地表温度,  $F_{g-wall}$  为墙面对地面的角系数; 第二项为地面对墙体反射的太阳辐射,  $\epsilon_g$  为地面反射率,  $W_{sun}$  为地面所接收的太阳总辐射强度,  $\theta$  为墙体面与地面之间的倾斜角。

对于建筑物墙体、路面和窗玻璃的不稳定传热可用一维热处理。若观察日为晴天, 则潜热项  $W_{LE}$  可忽略。其内部温度分布的导热微分方程为

$$\frac{\partial T(t, x)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(t, x)}{\partial x^2} \quad (12)$$

式中  $T(t, x)$  为  $t$  时刻、中心深度为  $x$  处薄层的温度,  $a = \lambda / C \cdot \rho$  为材料的热扩散系数,  $\lambda$  为材料导热系数,  $C$  为材料比热,  $\rho$  为其密度。

### 1.2.1 单层材料的有限差分法模型

若材料是由同一均匀物质构成, 则可用一维有限差分法来求解其不稳定传热, 即将研究对象(设厚度为  $X_{max}$ ) 均匀剖分成多层厚度为  $\Delta X$  的薄层, 对每一薄层, 式(12)的显式离散式为

$$T(t + \Delta t, x) = T(t, x) + a \left( \frac{\Delta t}{\Delta X^2} \right)^2 [T(t, x + \Delta X) - 2T(t, x) + T(t, x - \Delta X)] \quad (13)$$

其中  $T(t, x)$  为这一薄层(中心位置为  $x$ ) 在时刻  $t$  时的温度;  $T(t + \Delta t, x)$  为这薄层在下一时刻(时间步长为  $\Delta t$ ) 时的温度。两个边界条件为: (1) 对内(下)表面,  $T(t, X_{max}) = \text{常数}$  及  $W_{cd} = 0$ ; (2) 对外(上)表面, 由式(11)决定。

在开始  $t = 0$  时, 先对各层温度赋值, 再由式(13)计算下一时刻各层中心的温度, 然后由式(10)

求出下一时刻外表面的温度(与前一时刻本层及相邻层温度有关)  $T(t, 0)$ , 如此递归计算, 可算得此后任一时刻外表面的温度  $T(t, 0)$ 。为保证迭代的收敛稳定性, 傅立叶数  $F = a \cdot \Delta t / (\Delta X)^2$  的值必须小于  $1/2$ 。

### 1.2.2 多层材料的有限差分法模型

更一般的情形是材料是由多层不同的均匀物质构成。比如道路由水泥(或沥青)层和土壤层构成、房顶加一层防漏的沥青层等。其交界层不能用上面的均质材料传热来计算, 而要用多层材料的一维有限差分方程来求解, 即

$$T(m+1, k) = T(m, k) + \Delta t / K$$

$$[ \alpha_1 \cdot T(m, k+1) + \alpha_2 \cdot T(m, k-1) - 2T(m, k) ] \quad (14)$$

这里  $K$ 、 $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为与两种材料热参数有关的常数, 其值可推算为

$$K = (\alpha_1 C_1 \Delta X_1 + \alpha_2 C_2 \Delta X_2) \cdot (\alpha_1 \Delta X_2 + \alpha_2 \Delta X_1) \cdot \Delta X_1 \cdot \Delta X_2 \quad (15)$$

$$\alpha_2 = \frac{2 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta X_2}{\alpha_1 \cdot \Delta X_2 + \alpha_2 \cdot \Delta X_1} \quad (16)$$

$$\alpha_1 = \frac{2 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta X_1}{\alpha_1 \cdot \Delta X_2 + \alpha_2 \cdot \Delta X_1} \quad (17)$$

一般两种材料的深度步长  $\Delta X_1$  和  $\Delta X_2$  的取法必须满足下面条件, 以保证其收敛

$$\left( \frac{\Delta X_1}{\Delta X_2} \right)^2 = \frac{a_1}{a_2} \quad (18)$$

式中  $a_1$  和  $a_2$  分别为两种材料的热扩散系数, 在非交界层, 式(13)仍然适用。

### 1.3 草地的土壤表面温度计算

对于草地和土壤, 可令式(10)左边值为零, 其潜热项按文献[2]模式来计算。即

$$W_{LE} = \rho \cdot C_p \cdot \frac{e_a - e_s}{R_{ac} + R_0} \quad (19)$$

式中  $R_{ac}$  为空气动力学阻抗;  $R_0$  为表面蒸发阻抗; 其它各项如前文。在中性层结的情况,  $R_{ac}$  可表示为

$$R_{ac} = \frac{\ln^2 \left( \frac{z_a - d}{z_0} \right)}{k_0^2 u_a} + \frac{1.5 \ln \left( \frac{z_a - d}{z_a} \right)}{k_0^2 u_a} \quad (20)$$

式中  $d$  和  $z_0$  分别为草地的零平面位移和粗糙度系数,  $k_0$  为 Karman 常数,  $u_a$  是在参考高度为  $z_a$  处的风速。  $R_0$  表示为

$$R_0 = \frac{1000 \left( 1 + \frac{1}{230.8} \right)^{5.51}}{0.986 \cdot LAI + 0.025 \cdot R_{net}} \quad (21)$$

式中  $\psi$  为叶子水势;  $LAI$  为叶面指数,  $R_{net}$  为净辐

射,其值为式(10)右边前 3 项之和.

由此热动态平衡方程来计算不同时刻草地和土壤的表面温度.

### 1.4 计算结果

由上述模型计算得的建筑物四季房顶表面温度的计算值和测量值见图 2,图中的春、夏、秋、冬四季的观测日分别为:4 月 16 日、7 月 21 日、9 月 23 日和 12 月 24 日,天气都为多云到晴.图 3 为同一季节(秋季)建筑物场景不同表面温度的计算值和测量值比较.从图中可看出,四季诸日中,各表面温度约在下午 14:00 至 15:00 左右达最高,在早晨 5:00 至 6:00 左右达最低;人造马路的表面温度明显高于草地和泥地这些自然路面;另外,一日中东墙表面温度在上午 10:00 左右达最高,西墙在 16:00 左右达最高,南墙温度明显比北墙高.我们用 Raytek 公司的 Raynger ST 红外测温仪来测量,实测结果与计算值相比较,最大误差小于 3.5 ,平均误差小于 2.5 ,误差的主要原因有:(1)模型中我们假设每一小时观测时间内的风速是一恒值,而事实上,风的大小和方向是变化不定的;(2)云遮系数 CCF 的观测有误差;(3)建筑材料热物理参数的估算误差.

## 2 红外成像绘制

由上述模型计算得到建筑物各表面在不同时刻的表面温度 T,再由 Plank 公式计算得到探测波段为  $\lambda_1$  至  $\lambda_2$  的红外探测仪探测到的辐射强度为

$$E = \epsilon_0 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \cdot d\lambda \quad (22)$$

式中  $\epsilon_0$  为表面发射率;  $C_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$

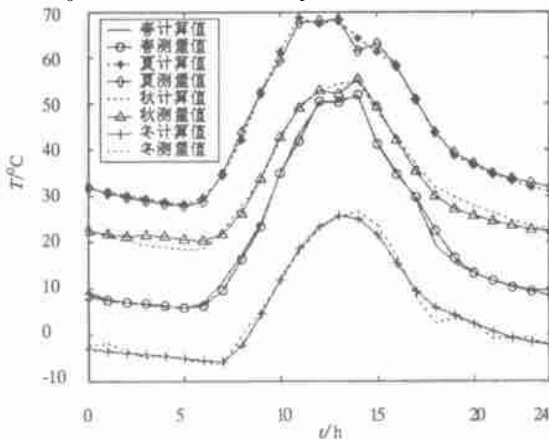


图 2 建筑物四季房顶表面温度计算值和测量值随时间的变化

Fig.2 Calculated and measured values of the surface temperature of the building roof in the four seasons changing with time

为第一辐射常数;  $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$  为第二辐射常数.若一幅红外图像中对应的最高和最低辐射温度分别为  $T_{\text{max}}$ 和  $T_{\text{min}}$ ,由式(22)算得的相应的辐射强度分别为  $E_{\text{max}}$ 和  $E_{\text{min}}$ ( $\epsilon_0$  的值为 1).对于辐射强度为  $E_i$  的表面,其对应的灰度值为

$$G_i = \frac{E - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}} \times 255. \quad (23)$$

用计算机图形学的 Gouraud Shading 明暗处理方法<sup>[8]</sup>绘制而成.本文例子中热像仪的接收波长假定为  $8 \sim 14\mu\text{m}$ .图 1 为建筑物可见光域的效果图造型.图 4 各图为四季各观察日在同一时刻(20:00)的红外成像图.树木的温度计算模型较复杂,图中暂以草地模型近似代替.从图中可看到:(1)同一时刻夏季的辐射强度最高,冬季最低;春、秋季介于两者之间.(2)人工热源空调及顶层沥青涂层在此情形下已成为建筑物较明显的红外特征.(3)马路的红外辐射明显强于草地,但在冬季这一时刻正好相反.

图 5 为同一季节(秋季)一日中不同时刻的建筑物红外成像图.从图可以看出,同季节一日中在下午 14:00 左右时红外辐射强度达最强,其后及入夜,温度下降,红外辐射逐渐减弱,至日出之前,即约 6:00 左右,虽然天色已明,但红外辐射却降到最低(见秋 6:00 图),日出后红外辐射明显增强.

## 3 结语

本文提出了用多层有限差发等方法对建筑物各部分及其周围物体的表面温度在一年四季某日各时刻的计算模型,模型充分考虑了气象等外部因素的影响及建筑物各部分之间的相互作用及其遮挡关

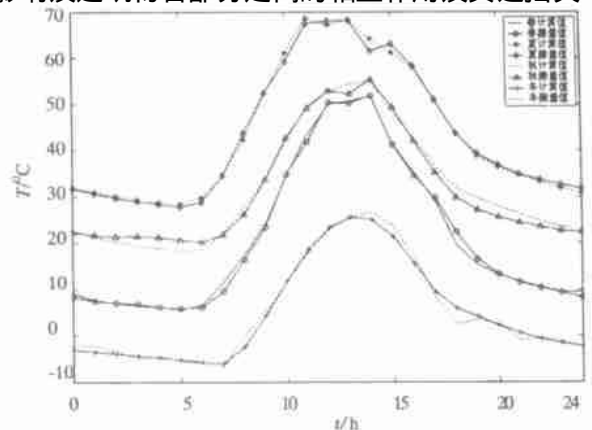


图 3 同一季节(秋季)建筑物场景不同表面温度的计算值和测量值随时间的变化

Fig.3 Calculated and measured values of the various surface temperature of the building scene in the same season(Autumn) changing with time

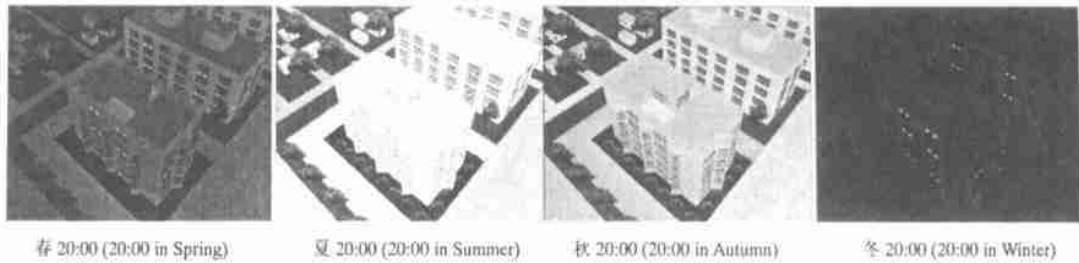


图4 四季同一时刻建筑物的红外成像图(图中黑白等效温度范围为 $-3.6 \sim 45$ )  
 Fig.4 Infrared Images of the buildings at the same time at different seasons(the temperature differences between black and white are approximate  $-3.6 \sim 45$ )

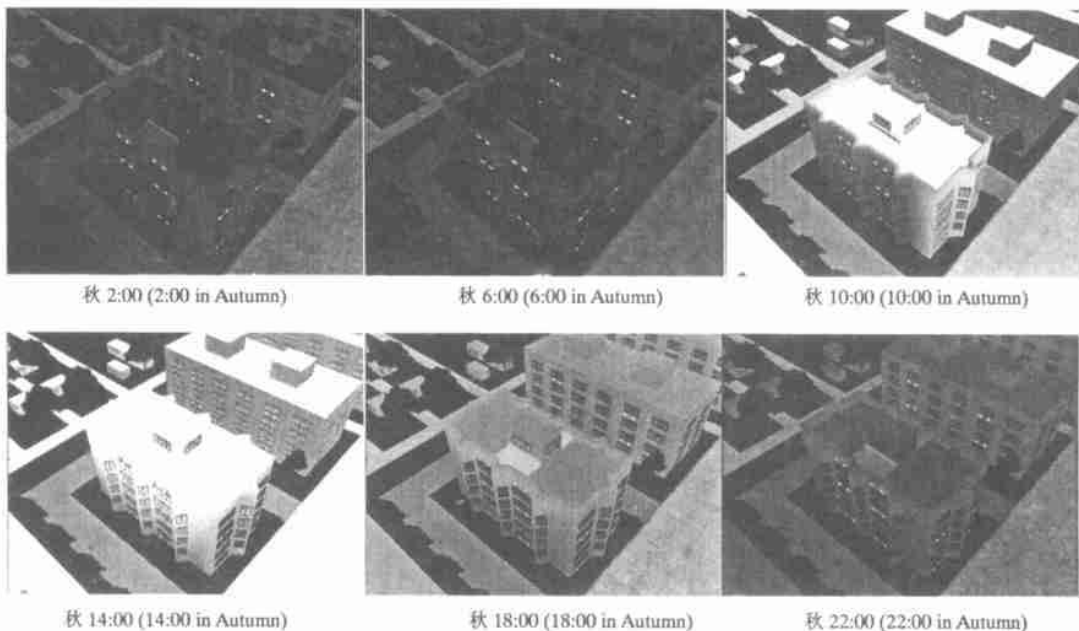


图5 一季节(秋季)一日中不同时刻建筑物的红外成像图(图中黑白等效温度范围为 $16 \sim 45$ )  
 Fig.5 Infrared images of the buildings at different time intervals in a day in Autumn (the temperature differences between black and white are approximate  $16 \sim 45$ )

系, 实测结果表明它能够较准确地反映城市建筑物的热辐射特性. 用计算机图形学方法实现了其红外场景的可视化, 绘制出建筑物在一年不同季节及在某一不同时刻的真实感较强的红外图像, 为目标与背景的红外辐射特性研究提供了一种新的直观的方法.

#### REFERENCES

- [1] Firtz G Wollenwebe. Weather impact on background temperatures as predicted by an IR background model. SPIE, 1990, 1311:119—128
- [2] ZHANG Jiarr-Qi, ZHANG Hai-Xiang, BAI Chang-Cheng, et al. Thermal background model studies. Infrared Physics & Technology, 36(2), 1995:577—583
- [3] Jean-Pierre Gambotto, Vincent Leroy. IR scene generation under various conditions from segmented real scenes. SPIE, 1993, 1967:27—38
- [4] Nicola Ludwigs, Elisabetta. Moisture detection through thermographic measurements of transpiration. SPIE, 1997, 3056:78—85
- [5] Richard Lee. Forest microclimatology. New York: Columbia University Press, 1978
- [6] YAN GQi-Sheng, ZHAO Qing-Zhu. Heat process of buildings. Beijing: Chinese Architecture Press(彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程. 北京: 中国建筑工业出版社), 1998. 12
- [7] CHEN Pei-Ling, CHAO Shu-Wei, GUO Jiarr-Xiong. Theory and method of air-condition load calculation. Shanghai: Tongji University Press(陈沛霖, 曹叔维, 郭建雄. 空气调节负荷计算理论与方法. 上海: 同济大学出版社), 1987. 6
- [8] PENG Qurr-She ng, BAO Huir-Jun, JIN Xiaor-Gang. Procedural Elements for Realistic Image Synthesis. Beijing: Science Press(彭群生, 鲍虎军, 金小刚. 计算机真实感图形的算法基础. 北京: 科学出版社), 1996. 6