

# 单棵树红外辐射特征的三维模型

宣益民 张 海 韩玉阁

(南京理工大学动力学院, 江苏, 南京, 210094)

**摘要** 综合考虑自然气象条件和背景环境及树木自身结构的影响, 运用传热学原理, 建立了单棵树三维瞬态温度场计算模型, 采用有限差分法进行了数值求解, 得到了单棵树的温度分布和红外特征。

**关键词** 单棵树, 坐标变换, 红外特征。

## A 3-D MODEL OF INFRARED RADIATION FEATURE FOR SINGLE TREES

XUAN Yi-Min ZHANG Hai HAN Yu-Ge

(School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** By considering the effects of weather and background as well as the structure of trees, a 3-D model for calculating the transient temperature field of single trees was established by using the principle of heat transfer. The temperature distribution and IR feature of single trees were obtained by resolving the model with the finite difference method.

**Key words** single trees, coordinates transform, infrared feature.

### 引言

目标红外辐射特性的研究是目标与环境特性研究领域中的重要课题, 它可为目标的探测、定位、识别、跟踪等研究提供必需的图像和特征参数。植物表面的温度分布是相当复杂的, 受植物的几何参数、物性参数、天气和生理特征等众多因素的影响。本文针对单棵树建立三维温度模型, 分析树的热特征。

### 1 建模

#### 1.1 树的几何构型

以常见的水杉、白杨为参考模型, 树冠总体形状为伞状。对于其它树种, 只需作适当处理, 仍可以采用本模型。树几何结构模型中包括树干、树枝、树叶。树干、树枝被假设为圆柱, 将树枝周围的树叶区假设为圆柱状套筒套在树枝圆柱周围。

#### 1.2 能量传递

树的能量传递主要有太阳辐射、环境辐射换热、空气对流换热以及自身新陈代谢所产生的热量。对于太阳辐射, 落在叶面上的太阳能量, 并不是全部被叶子吸收, 其中被叶子吸收的太阳能量中, 部分增高

叶片温度, 部分被光合作用利用, 进入树的新陈代谢系统。

#### 1.3 方程模型

用圆柱坐标  $(r, \varphi, z)$  建模, 圆柱半径为  $R$ , 圆柱高为  $L$ , 圆周角范围为  $(0, 2\pi)$ ,  $k$  为树的导热系数,  $a$  是热扩散率,  $\dot{q}$  代表内热源,  $t$  是时间, 圆柱内温度表示为  $T(r, \varphi, z, t)$ , 则控制微分方程为

$$\begin{aligned} (\partial T / \partial t) + (1/r) \times (\partial T / \partial r) + \\ (1/r^2) \times (\partial T / \partial \varphi^2) + \\ (\partial T / \partial z^2) - \dot{q} / k = (\partial T / \partial t) / a, \end{aligned} \quad (1)$$

$$(0 \leq r \leq R, 0 \leq \varphi < 2\pi, 0 \leq z \leq L, t \geq 0)$$

$$\text{初始条件为 } T(r, \varphi, z, 0) = T_0(t), \quad (2)$$

边界条件为

$$\begin{aligned} A \partial T / \partial r|_{r=R} = Ah_c(T_\infty(t) - T) + \\ aA\sigma_0(T_\infty(t)^4 - T^4), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A \partial T / \partial z|_{z=0, L} = Ah_c(T_\infty(t) - T) + \\ aA\sigma_0(T_\infty(t)^4 - T^4). \end{aligned} \quad (4)$$

$A$  是与环境存在换热的表面积,  $h_c$  是表面的对流换热系数,  $T_\infty(t)$  表示空气温度 (环境温度),  $a$  是表面

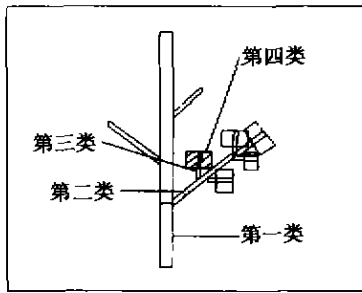


图1 树类别划分图  
Fig.1 Schema of class division for a single tree

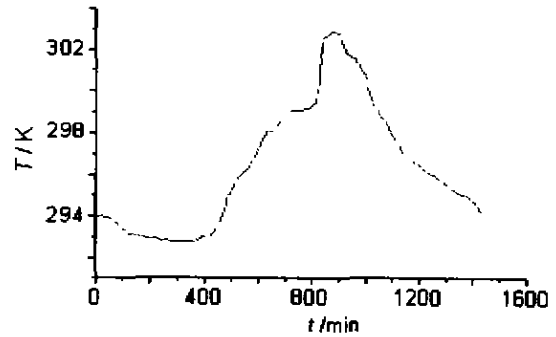


图2 空气温度随时间变化图  
Fig.2 Air temperature vs time

的吸收率,  $\sigma_0$  是黑体辐射常数。

### 1.4 坐标变换

树的整体结构复杂,因此需对树的结构进行划分:树干为第一类,与树干直接相连的树枝为第二类,分布在第二类树枝上为第三类,分布在第三类树枝周围的树叶区为第四类,具体可参见图1。作网格化分时均在每个类的当地坐标系,划分完毕后,将网格点坐标转换到统一的坐标系中。

## 2 太阳辐射计算

树的几何结构复杂,各微元在空间位置不同,某些微元表面太阳直射不到或被部分遮挡。取微元  $i$ , 作用于其上的太阳辐射具体计算过程如下: 在微元迎光线方向的上方(有足够的距离)沿与光线垂直方向作截面,取一足够大的面积,假设光线是均匀分布在该面积上的直线,所以将该面积网格化,每个网格点经过一条直线(光线)。判断微元  $i$  属类别 1、2、3, 还是类别 4, 因为类别 1、2、3 为树枝与树干区,其对光线是完全遮挡,而类别 4 是树叶区,光线可以部分透过。假设类别 1、2、3、4 对光线的平均吸收率为  $\alpha_{aver}$ , 类别 4 光线透过率为  $\tau$  ( $0 < \tau \leq 1$ )。运用光线跟踪法原理,确定任一微元吸收太阳辐射能的份额,如果微元属类别 1、2、3,判断某光线是否经过微元,若不经,则微元对这条光线的吸收率为零;若经过,则需再判断是否有其它微元在其沿光线方向的上方;若无其它微元,则微元  $i$  对这光线吸收率为  $\alpha_{aver}$ ;若有,则需检测在其上方的微元中是否有类别 1、2、3 中的微元,因为类别 1、2、3 种的微元对光线是完全遮挡,使得微元  $i$  对光线的吸收率为零。如果在其上方的微元均是类别 4 中的,假设共有  $M$  个微元,则落到微元  $A$  上的太阳能仅剩  $\tau^M$ ,微元对这条光线的吸收率为  $\alpha_{aver} * \tau^M$ 。如果  $i$  是类别 4 中的微元,则要去掉光线透过的部分,需将上面分析的吸收

率再乘以  $(1-\tau)$ 。经上述分析得到微元对某一光线的最后吸收率  $\alpha_{aver}$ 。

若上所取得足够大面积为  $S$ ,通过的太阳光能量  $q$ ,集中于  $N$  条光线,每条光线代表一个能量单位  $(q_s/N)$ 。取其中某条光线记为  $n$ ,  $\alpha_{in,n}$  为该微元对这条光线的最终吸收率,则微元吸收的太阳能为

$$q_{i, sun} = \sum_{n=1}^N \alpha_{in,n} * (q_s/N), \quad (5)$$

至此,已经建立了树木三维瞬态温度场的数学模型。

## 3 计算结果及分析

首先依据一组实测的大气温度(1997年5月4日,纬度数 23)作为环境温度,得到一天内(1440min)气温变化数据关系,可参见图2。在图2中,时间坐标以凌晨 1:00 为时间轴( $t$ 轴)的计时起点,时间步长为 5min,纵轴代表温度轴  $T$ ,单位为 K。

所取的算例是树干高为 9.0m、直径为 0.3m 的水杉。为了清楚地显示同一高度处由于太阳辐射被遮挡而使树的不同几何位置在相同时间段(一整

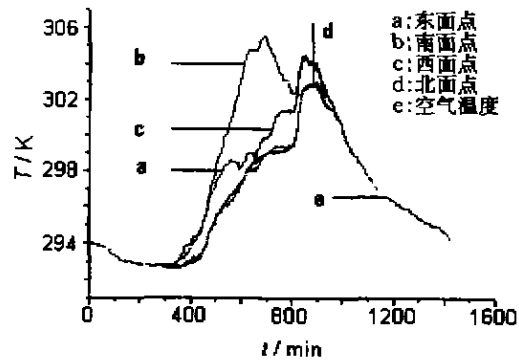


图3 风速 0.0m/s 时树木温度随时间变化  
Fig.3 Tree temperature vs time  
(wind velocity 0.0 m/s)

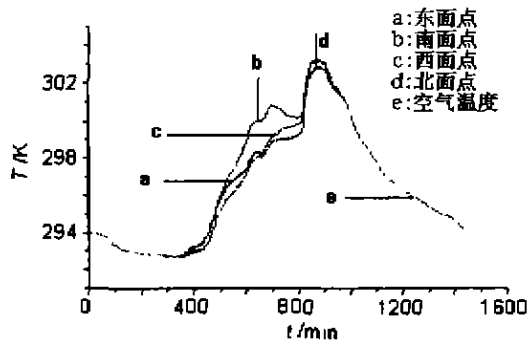


图4 风速 0.5m/s 时树木温度随时间变化  
Fig. 4 Tree temperature vs time  
(wind velocity 0.5m/s)

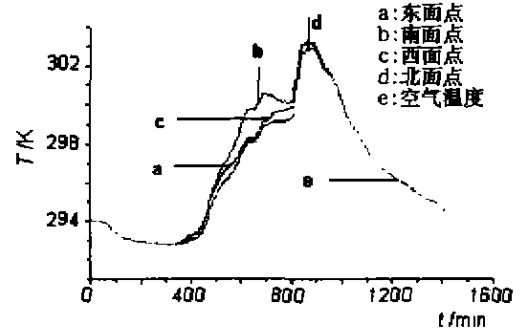


图5 风速 0.7m/s 时树木温度随时间变化  
Fig. 5 Tree temperature vs time  
(wind velocity 0.7m/s)

天内温度值的差异,选取靠近树梢(纵向高度为 8.75m)的树叶区的表面点,考虑到环境的影响,计算时取风速值为 0.0m/s、0.5m/s 和 1.0m/s 的 3 种情况来分析,分别对应图 3、4 和 5,坐标与图 2 相同,同样以凌晨 1:00 为时间轴起点,图中共有 a、b、c、d、e 5 条曲线,曲线 e 是空气温度值曲线,a、b、c、d 分别对应树表面的东南西北 4 个点。从第 265min (5:25)~1055min (18:35)这段时间有太阳辐射,在 0~265min 内树与空气温差是由树自身新陈代谢作用导致的,在这段时间内,a、b、c、d 4 条温度曲线重合,与环境温度(空气温度)曲线 e 相差不大。在 265min~1055min 内由于多了太阳辐射的直接升温,a、b、c、d 4 条曲线开始攀升,且与曲线 e 的距离拉大。在攀升过程中由于光照方向的改变,a、b、c、d 曲线的变化情况也不同。在早晨时段内东面点温度最高,随着时间的推移南面点温度逐渐超过东面点温度,在这过程中北面点与西面点因太阳辐射被遮挡所以温度值较低,在第 660min (12:00)南面点的温度依然最高,而西面点温度值超过东面点温度值,在第 970min (17:10)时西面点温度超过南面点温度达到最高,且持续到日落,在日落前一段时间内,由于辐射已经很薄,曲线 a、b、c、d 与曲线 e 在 1055min (18:35)后又恢复到只有新陈代谢作用的情况,曲线 a、b、c、d 与曲线 e 又较接近。

从图 3~5 还可以看到不同环境风速的影响:在相同辐射条件下,同一几何位置,风速小时,对流换热系数小(当风速为 0.0m/s 时,只存在自然对流)、对流换热带走的热量少,这样风速值小时的树温大于风速值大时的树温(从图中对应曲线与空气温度曲线的距离可以分析得到)。

#### 4 结语

树木的温度分布随太阳辐射、环境热交换和自身的生理作用等因素而变化。本文建立了树木的温度模型,得到单棵树的三维温度场,所得的温度分布可以用于模拟真实场景和目标红外热像仿真。

#### REFERENCES

- [1] WEI Xi-Zhang, LI Xiang, ZHUANG Zhao-Wen, et al. Computation of the temperature field of IR target and background. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (魏玺章,黎湘,庄钊文,等.红外目标背景及温度场的计算. *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(2): 139—141
- [2] Kimes D S, Smith J A. Simulation of solar radiation absorption in vegetation canopies. *Applied Optics*, 1980, **19**(16): 2801—2811
- [3] Kimes D S, Kirchner J A. Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes. *Applied Optics*, 1982, **21**(22): 4119—4129
- [4] Balick L K. A forest canopy height surface model for scenes simulation. *Simulation*, 1987, **49**(1): 5—12