

森林火灾的数值仿真

G. D. Richards

加拿大 Brandon 大学数学与计算机科学系

提要 本文评述了截至目前关于森林火灾的数值仿真工作。提出并研究了在不同条件下预计森林火灾蔓延的一般模型。这个模型基于 n 阶燃烧反应理论,它在处理风速变化、森林特性、阻燃带以及消防人员感兴趣的其他现象等方面,具有非常简单、灵活、方便的特点。举例说明了方程中各种参数变化的影响。给出了无风和常风速下的结果,同时给出了突然变化风和阻燃带的影响。

1 引言

林业是年产值数十亿美元的产业,同时,由森林火灾引起的原木、城市、乡镇和野生动物的损失,每年达十多亿美元。森林火灾行为的准确预计,特别是火焰锋面最活跃部分的预计,能给森林消防人员有价值的信息。建立能预计火灾发展的行为的模型及其对不同救火战略的响应,有助于救火人员占据最佳位置,以及较好地作出通知有关城镇疏散的决定。建立准确的模型,还有可能评价防火线的不同位置和形状的效果(这里防火线是一个区域,是为了阻止火势蔓延在其前方铲除掉或烧掉了可燃物的区域)。建立准确的模型,对于给定的天气与燃料条件,还可能将特定地区的火灾平面图用公式予以表示,因此能抢先计算出最佳救火战略。

本文评述了森林火灾蔓延的数学理论与计算机仿真。提出并研究了一个简单的微分模型。这个模型能顺利地、容易地对风速变化、森林特性、阻燃带位置以及森林工作者感兴趣的其他事项进行仿真。此模型已在各种条件下得到了证实。

2 文献述评

森林火灾锋面的形状和蔓延速率受很多因素制约,其中最重要的有^[1]:

- ①燃料类型和含水量。
 - ②风速及其变化。
 - ③相对于火灾的森林地形情况;火焰自下向上蔓延较快,但不能横越天然障碍物。
 - ④火焰蔓延机理:亦即林冠火,火灾通过树顶蔓延;或者竖直火,火灾通过燃料床继续不断蔓延。
 - ⑤燃料的连续性,亦即燃料是密实地均匀地填满空间,或是存在七拼八凑的情况;还有燃料类型是不变的或是变化的。
 - ⑥飞火数量,亦即燃烧着的物质被风传播。
- 对于风速、含水量和地形坡度不变条件下连续均匀型燃料的天然火灾与受控火灾,已经

收集了丰富的数据^[2-8]。数据表明,在这些条件下,单一着火点的火灾保持准定常状态并象“雪茄烟”形状那样扩展,也就是偏向下风方向以常速率蔓延。最常用的近似分析是椭圆近似^[9,10]。已用过的其他近似包括泪滴^[11]、卵形^[4]和双椭圆^[12]近似。实际火灾偏离这些形状,是由于有飞火引燃和风的变化以及偏离其他一些不变条件。记录到的数据已拟合成曲线,制成图表,作成计算尺及其他更复杂的计算仪器^[12-20]。拟合曲线虽然不能在变化的条件下给出精确的预计,但它们作为直观的辅助工具,还是被消防人员在现场广泛使用着。

由于燃料类型的多样性和给定燃料类型之内化学成分的差异,要想不作许多假设,而将建立在燃烧理论基础上的模型写成公式形式是很困难的。这个问题还因为下列因素而进一步复杂化:火灾蔓延的不同机理,对流,辐射,火焰接触和飞火引燃;不同火灾的起主导作用的因素大不相同^[21]。然而,应用能量守恒原理,Fransden^[22]导出了无限长平直火灾锋面的蔓延速率方程。Rothermel^[21]把Fransden的概念同火灾的风洞实验数据及进一步的理论相结合,对于给定的不变燃料类型、地形和天气条件,导出了平直火灾锋面蔓延速率和燃烧反应强度的方程。或许因为问题复杂,Fransden和Rothermel的里程碑性工作,是迄今为止用燃烧理论研究森林火灾的最先进的工作。

最近,根据Huygens原理和元胞自动机(cellular automata)¹⁾,已经得出了能够在变化条件下与火灾的计算机仿真相结合的模型。这些模型虽然不是建立在严格的燃烧理论上,但能给出在变化条件下火灾行为的有用的指南。

Anderson et al^[23]根据Huygens原理提出了一个模型,并且这个概念已为Richards^[24]所推广。该模型假设,在时刻 t ,火灾锋面上的每一点都象一个小椭圆那样地扩展,小椭圆的尺寸和形状依赖于 t 时刻的森林和天气条件。在时刻 $t + \Delta t$,新的火灾锋面由这些小椭圆形成的包络面确定,这种方法的局限性是只给出火灾锋面的位置而未给出火灾燃烧强度;它在处理变化很大的风和飞火时也有困难。然而,它的主要优点在于,与时刻 t 有关的方程的参数,可以从有关条件下的森林数据中直接得到;花费也比较便宜。

Kourtz et al^[26,27]和Green^[11]导出了基于元胞自动机^[26]的模型。在这些方法中,选取规则网格上各点处存在燃料,同时模板上布满可着火的网格点以确定火灾的蔓延。这些模型按火灾蔓延的机理可分为热接触与热聚集两类。热接触模型^[11,26,27]适用于火灾蔓延的主要机理是火焰直接接触的火灾。模板包含的时间是一个着火点将点燃模板内的其他各点。随着安置在模板上的所有点相继着火,就可以确定出从火灾的最初着火时间到任意点的着火时间,因而能求出任何给定时刻着火物质的区域。热聚集模型^[11]适用于辐射和对流是火灾蔓延的主要机理的火灾。在单位时间内模板包含的热量是从一个着火点传递给模板内的各点。当某点吸收的热通量超过某一阈值时,该点即着火并以模板所确定的某一方式开始提供热通量进入周围未着火的各点。迄今为止,模板内支配阈值的形状和规律仍以经验为基础来决定。Green^[11]曾研究过各种各样的模板形状和规律并指出对于足够大的模板可以得到很好的结果。不幸,这些方法没有给出火灾燃烧强度;还有,当模板很大时用这些方法是很昂贵的。然而,这些方法能够容易地处理七拼八凑的燃料并能有助于进行修正。在这些方法的特性方面还有很多工作要做。

1) 以前译为“点格自动机”,参见:代替Navier-Stokes方程的格子气自动机,力学进展,17,1(1987); 76-80。——译者

尽管森林火灾的仿真在实用上很重要,但这一领域已做的工作却相当少。对于不变的条件,经验数据能给出准确的预计,但有必要发展能对变化条件进行仿真的容易计算的模型。

3 数学模型

森林消防人员最感兴趣的是火灾将在何处以多快的速度蔓延,并检验不同的消防战略。这里使用的模型是简单的,计算上是直接了当的,因而也就方便地给出有用的预计,即能预计不同条件下火灾眼前的和今后的状态。

假设燃料是分布在网格点上,每一网格点赋以整数坐标 (x, y) 。一般说来,每一格点上燃料总量多于一颗树。主要的蔓延机理取为直接的火焰接触。模型考虑两个变量: F ,某点上处于燃烧状态的物质总量; M ,同一点上尚未燃烧物质的总量。应用 n 阶反应模型的原理,假设 F 的减少率正比于该点上 F 的某一幂次值。对于孤立点, F 的增长率正比于 F 和 M 的幂次的乘积。然而,正在燃烧的树木影响着周围的树木。假设在 F 到达某个阈值以前,某点处的燃烧不影响另一点,某一点对其相邻点处的 F 增长率的贡献,取为正比于作用点处 F 和被作用点处 M 的幂次的乘积。在任意点处, F 的增长率由 M 的减少率来平衡。此模型的微分形式为:

$$\frac{dF}{dt} = aM^{n-\alpha}(b_1b_2) * F^\alpha - cF^\beta \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dt} = -aM^{n-\alpha}(b_1b_2) * F^\alpha \quad (2)$$

α, β 与 n 为常数,其他所有变量都是 x, y 和时间 t 的函数,阈值的卷积 * 由下式确定:

$$\begin{aligned} & [b_1(x, y, t)b_2(x, y, t)] * F^\alpha(x, y, t) \\ &= \sum_{u=-\infty}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} b_1(u, v, t)b_2(u, v, t)F^\alpha(x-u, y-v, t) \end{aligned} \quad (3)$$

上式服从阈值条件:

$$\left. \begin{aligned} & \text{若 } b_2(u, v, t)F(x-u, y-v, t) < T(x, y, t) \\ & \text{则 } b_1(u, v, t)b_2(u, v, t)F^\alpha(x-u, y-v, t) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

下面的初始条件使模型成为完备的:

$$M(x, y, 0) = M_0(x, y), \quad F(x, y, 0) = F_0(x, y) \quad (5)$$

一般说来,函数 a, b_1, b_2, c 与 T 依赖于风速和森林性质。 b_2 和 T 控制阈值 F , 使 F 在发生作用前必须在周围点上达到阈值;乘积 b_1b_2 则制约 F 的作用。 b_1 和 b_2 的偏离主要引起火灾向下风方向移动。

阈值卷积类似于元胞自动机模型中使用的模板。然而,本模型计入了某一点处的燃烧速率对其相邻各点燃烧的影响;它也给出了在给定区域中燃烧着的火灾有多么猛烈的信息。

4 数值方法

在每一网格点应用二阶 Runge-Kutta 法同时解出方程组。风速 $|v|$ 由函数 b_1 和 b_2 决定。对于不同的风速 $|v|$, 在网格点上以风速方向与 x 轴夹角 $\theta = 0$ 定义 b_1 和 b_2 。对于 $|v|$ 的中间值, b_1 和 b_2 用线性插值计算。对于其他角度 θ , 先将函数旋转 θ 角,并在整个网格元胞上假设 b_1 和 b_2 为双线性变化而对格点上的函数赋值。

本来, 因为风速难得是不变的, 所以可用两个概率分布函数 P_1 (风速率) 和 P_2 (风向) 表示随机生成的风速。对每一时间步长生成 0 与 1 之间的随机数 r 和 s , 然后选取 $|v|$ 与 θ 使其满足

$$r = \int_0^{|v|} P_1(w) dw, \quad s = \int_0^{\theta} P_2(w) dw \quad (6)$$

5 结果与讨论

为了得到模型行为的感性认识, 在各种条件下求解。对于某一火灾, 在所有情况下都用方形网格, 同时 T, a, c 都取为常数, 且在所有实验中 $a=1, \beta=1, n=2$ 。在每一网格点上放置一单位质量燃料, 且火灾由单一点的 10% 着火而开始烧起。用不同的 b_1 和 b_2 值模拟无风、不变风和变化风。

5.1 无风 (零风速) 对于均匀的森林条件, 零风速意味着 b_1 和 b_2 对 x 轴和 y 轴对称,

本试验中 $b_1 = 0.5b_2$, 同时 b_2 只在原点处是非零的并且在其周围的 8 个点处的值规定为

$$\begin{array}{ccc} \frac{1}{2\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2\sqrt{2}} \end{array}$$

b_1 和 b_2 的这种选择产生了仅仅由其最邻近的 8 个点所影响着的一个点。因为对于非零的 x, y 而言, b_1 和 b_2 的值与其到原点的距离成反比, 故所得的结果必然是相对于烧起火灾处的点是径向对称的。一般说来, 与连续问题相反, 离散问题中无风火灾不一定是径向对称的。

在所有作过的实验中, 火灾锋面呈环状蔓延。这个锋面有相对不变的横截面及径向速度, 并且在锋面之后燃烧过的物质以圆形扩展。图 1 给出不同时刻 t 沿 x 轴半横截面上的 F 值。这些结果对于 T, a, c 变化的影响是典型的。

图 1 (a) 与 (b) 表明增大阈值 T 将

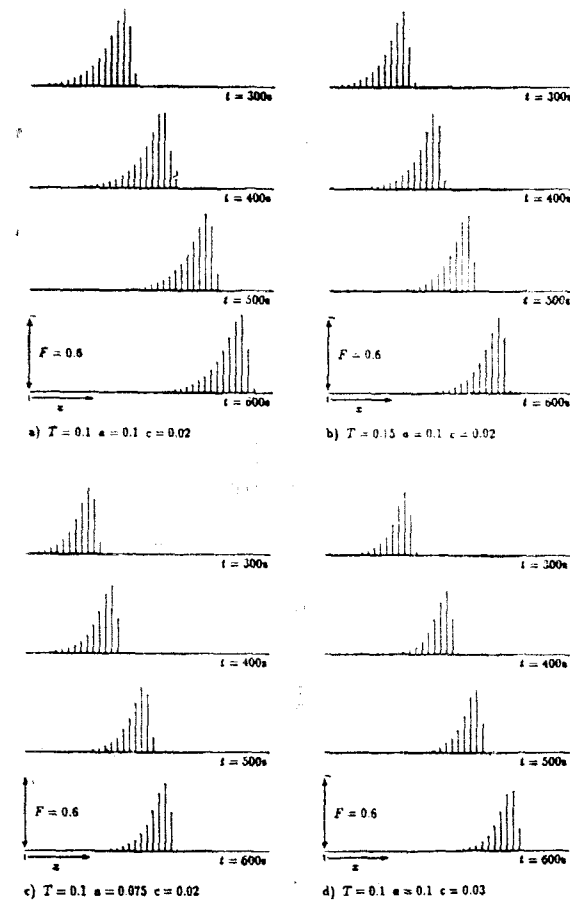


图 1 在无风条件下森林火灾蔓延的半横截面图。每条竖线表示一颗树, 其高度给出正在燃烧的物质质量 (F)。 x 是火场到原点的距离

减慢火灾锋面的蔓延速度, 因为在下一个点被点燃以前, 前沿处的 F 必须达到较大的值。 T 似乎对锋面横截面形状的影响较小。 a 和 c 的相对值主要控制 F 在某点达到最大值, 并控制点燃后达到最大值的时间。图 1(a) (c) (d) 表明 a 减小或 c 增大将使火灾锋面移动变慢,

高度减小, 宽度变窄。

5.2 有风 (非零风速) 对于受风影响的火灾, 正在燃烧的对下风处各点的影响比对上风处的要大。对这种情况仿真, 必须将函数 b_1 和 b_2 向上风方向偏置。这里给出的结果是 $b_1 = 0.5b_2$, 同时只有原点处的 b_2 为非零, 原点邻近 8 个点的 b_2 规定为

0.15	0.2	0.15
0.5	1.0	0.5
0.5	0.8	0.5

这是仿真 +y 方向的风。T, a, c 分别取为 0.1, 0.1, 0.01。

风影响下森林火灾的蔓延见图 2—4; 这些结果用灰白度表示: 在给定的时刻, 白色表示没有燃烧, 深黑色表示原来的树在 100% 地燃烧。

为了得到灰白度和空间尺度的概念, 图 4 中的阻火带是 27 个格点的长度并用深黑色表示。

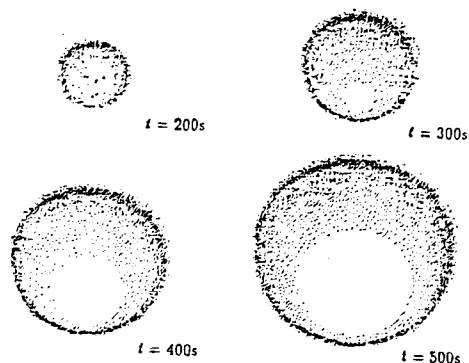


图 2 常速风影响下森林火灾中正在燃烧的物质 (F) 的灰白度图, 所用的模型常数为 $T=0.1, a=0.1, c=0.01$

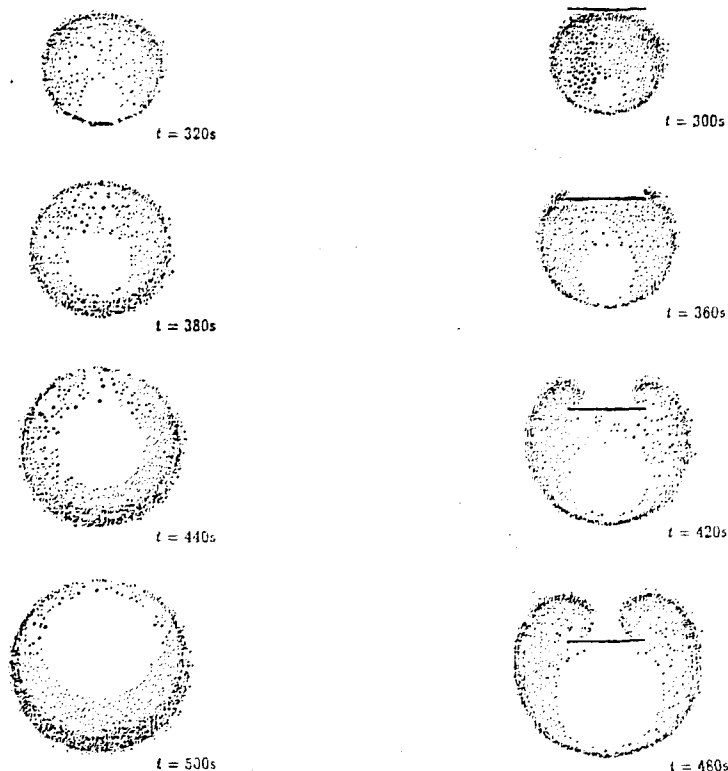


图 3 与图 2 相同条件下正在燃烧物质 (F) 的灰白度图, 在 $t=320$ 秒时风向倒转

图 4 与图 2 相同条件下正在燃烧物质 (F) 的灰白度图, 同时有阻火带

图 2 表示风速不变时火灾的蔓延。一个封闭的带状火灾锋面已形成, 并且在火灾起源处的下风方向燃烧更猛, 蔓延更快, 留在火场后面燃烧过的物质的面积不断扩大。

图3表示与图2相同的火灾,但在 $t = 320$ 秒时风向突然倒转,亦即 b_1 与 b_2 相对于 x 轴反射。火灾的主要地区被吹回到燃烧过物质的区域,在现在的上风方向,正在燃烧物质的带状宽度相对地减小。在火灾起源处的现在的下风方向,火灾区域被吹向完全未燃烧物质的区域。这个火灾锋面变得燃烧更猛并被加速,最终,这个火灾很象常风速火灾倒了个儿。

图4表示常风速下阻火带对火灾蔓延的影响;阻火带用黑线表示。仿真阻火带时,沿它的网格点带取 $M_0(x, y)$ 为零,而且这个带足够宽以致火灾不能越过它。阻火带暂时阻挡住上风方向火灾的蔓延,但是最终火灾还是卷绕过阻火带的两端继续蔓延。

这里给出的结果表明所用数值模型的适用性与灵活性。然而问题来了:给定某种树木类型的森林、干燥程度和地形,对不同的风速风向条件,怎么能确定 T, a, c, b_1 和 b_2 ?来自实际原野的森林火灾和受控的森林火灾的数据,对于给定森林条件下匹配模型参数的进一步工作应当是有用的。

6 结 论

根据经验数据,人们对不变条件下森林火灾的行为已有很好的了解;然而,有必要去发展能够仿真变化条件下森林火灾的方法。由于问题的复杂性,基于严格的燃烧理论的模型还没有建立起来,而且对于一般的森林火灾也许永远不能建立起来。出于必要,迄今研究出的模型包括本文提出的,实质上都是简单的,但给出了有关森林火灾行为的有用信息。

虽然本文提出的模型概念简单,但它在处理森林和天气条件变化时却相当全面与灵活,而且是直截了当地计算求解。这里给出的结果表明,这个模型所作的仿真在消防中是有用的。这项工作初步的;为了匹配实际火灾条件下模型中的各种参数,分析来自火灾现场和林场记录资料是必要的,然后针对变化条件下的火灾数据检验其性能。

尽管森林火灾实际上很重要,但对变化条件下计算机仿真方面完成的工作却相当少。希望通过本文能促使更多的研究人员在这一有意义的领域进行研究。

参 考 文 献 (27篇,略)

张德华译自: *Int. J. Numer. Methods Eng.*, **25**, 2 (Special Issue)
(1988): 625—633. (董务民校)

《编辑学报》创刊

中国科学技术期刊编辑学会主办的《编辑学报》已经正式出版。它是有关编辑学的综合性学术期刊,报道国内外有关编辑学,主要是科技期刊编辑理论研究成果,交流编辑实践经验,为培养编辑人才,提高期刊质量,促进科技交流服务。内容有理论研究、专题报告、编辑工程、期刊管理、出版知识、科技文章写作、海外信息、书刊评介等。读者对象主要是科技编辑人员,撰写各类科技文章的科技人员,大专院校编辑专业的师生等。《编辑学报》为季刊,国内定价每本2.00元,全年4期共8.00元,编辑学会团体和个人会员9折优惠。订阅者请邮局汇款至“100081北京海淀区学院南路86号716室中国科学技术期刊编辑学会发行组”。

《编辑学报》编辑部供稿