

建筑物火灾室温预测网络模型的算例验证与实验

王厚华, 罗庆, 罗嘉陵, 李惠风

(重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要:论述了室温网络模型及其隐式差分方程,对烟流性状预测软件中的室温预测部分进行了算例验证与实验研究,结果表明:算例计算结果与日本同类软件的计算结果基本相同,软件的计算结果与实验结果吻合得很好,完全符合火灾时室温的发展与变化规律。

关键词:火灾;室温预测;实验研究

中图分类号:X4 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2004)04-0077-06

Example Verification and Experimental Study of Network Model for Room Temperature Prediction during the Fire in Buildings

WANG Hou-hua, LUO Qing, LUO Jia-ling, LI Hui-feng

(College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China)

Abstract: The network model for room temperature and its implicit differential equation are discussed in this paper. The example verification and experimental study were carried out for the prediction of the room temperature in the software of predicting the properties of smoke flow. The results show that the results of example computation are similar to those obtained by similar software in Japan. The results of computation by the software tally with the experimental ones and accord with the law of development and change of room temperature during the fire.

Keywords: fire; room temperature prediction; experimental study

采用计算机对建筑物火灾进行数值模拟研究正成为火灾科学研究的主要方法之一,根据研究对象不同,数值模拟研究使用的数学物理模型主要有场模型、区域模型、网络模型以及上述三种模型相结合构成的混合模型。毫无疑问,场模型是上述模型中最为精细的模型,它可以提供火灾烟气流场中各种物理量分布的详细信息,准确地模拟出真实的火灾场景,但对于边界条件复杂的多层多室建筑,场模型不仅计算工作量大,而且难以满足求解收敛性的要求。由日本学者率先提出的网络模型能够克服场模型的不足之处,特别适用于结构复杂的高层建筑以及多层多室建筑的火灾烟流特性预测,并且可以获得足够准确的计算结果^[1]。目前,日本、美国、英国、加拿大、荷兰等国家都已开发出利用网络模型编制的计算机软件,解决了高层建筑火灾烟气特性的预测问题,使建筑火灾安全设计进入了性能化设计的阶段。

近年来,我国的火灾烟流理论研究及其实验研究均取得了很大的进展,积累了丰富的火灾研究资料及大量的实验数据,为火灾安全问题的深入研究及性能化设计研究奠定了坚实的基础。网络模型的研究方面也取得了不少成果,鹿院卫^[2]等人提出了建筑物火灾网络化模型及网络简化方法,实例编程计算了风道烟流量、阻力及烟气浓度。计算结果表明,其数学模型及其计算方法用于建筑是可行的,但计算结果的正确性未经实验验证,且实例原型过于简化。钟茂华^[3]等人对多层多室的建筑物火灾烟气运动进行了网络模拟计算,确定出受烟气污染的房间和烟气危害范围,并根据计算结果制定了人员应急疏散

* 收稿日期:2004-01-08

基金项目:重庆市科委科技攻关项目(99-5507)

作者简介:王厚华(1952-),男,贵州安顺市人,副教授,主要从事强化传热及建筑防排烟研究。

计划。但钟的模型仅考虑了烟气在建筑物内的流动,没有考虑烟气与维护结构间的传热,也没有计算室内的烟气温度分布及烟气浓度,因此不可能准确地计算出各房间的烟气流量。严治军^[4,5,6]对日本网络模型作出了重大改进,在国内首次建立了比较完整的建筑物火灾烟气流动网络模型,但严的模型没有解决求解收敛性问题。文献[7]在严治军模型的基础上研究了求解方法,对烟流网络模型进行了线性化改造,对室温网络模型进行了差分格式改造,经改造后的模型求解收敛性很好,在此基础上成功地开发出了建筑物烟流性状预测软件。经算例验证与实验验证,软件的计算结果与日本同类软件的计算结果以及实验结果均吻合得很好,完全符合火灾时烟流、室温、烟浓度、CO₂浓度以及壁温的发展变化规律。

有关软件对烟气流量的预测计算与实验研究在文献[7]中已经述及,本文主要论述室温预测网络模型的差分方法,算例验证与实验研究。

1 房间热平衡方程式^[5]及其有限差分方程

按照网络模型的思想,把建筑物内的每一个房间视为一个单元体(节点),假设任一较短的时间步长范围内,每一个单元体内部的状态参数均匀,火灾过程的发展表现为构成建筑物的各单元体内部参数的变化。根据热力学第一定律,可以建立图1所示着火室(*i*)室的热平衡方程式:

$$I_{ci} = I_{Li} + I_{Ri} + I_{Wi} + I_{Ai} \quad (1)$$

式中: I_{ci} 为单位时间内,着火室可燃物燃烧发热量,W,可采用实测数据拟合的公式进行计算,也可采用中期火灾模型,根据室内的可燃物总量,由文献[5]的方法计算出 I_{ci} ; I_{Li} 为单位时间内,由于烟流运动通过开口所带走的净热量,W; I_{Ri} 为单位时间内,通过开口的净辐射热损失,W; I_{Wi} 为单位时间内,着火室周边壁面的吸热量,W; I_{Ai} 为单位时间内,室内气体的蓄热量,W。

式(1)右边的四项可由下列计算式求得:

$$I_{Li} = \sum_j I_{Lij} = \sum_j (C_{pi} m_{ij} T_i - C_{pj} m_{ji} T_j) \quad (2)$$

式中: I_{Lij} 为*i*,*j*两室间,通过开口由烟流运动所带走的净热量,W; \sum_j 为对所有与*i*室相邻的开口求和; C_p 为烟气的定压比热, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; T_i 、 T_j 为*i*室与*j*室的烟温,K; m_{ij} 、 m_{ji} 为*i*室与*j*室间的正负向质量流量, $kg \cdot s^{-1}$,由烟流解析计算得到。

$$I_{Ri} = \sum_l I_{Ril} = \sum_l A_{il} \tau_{il} \sigma_b (T_i^4 - T_l^4) \quad (3)$$

式中: I_{Ril} 为*i*、*l*两室间,通过开口的辐射换热量,W; A_{il} 、 τ_{il} 为*i*、*l*两室间的开口面积和辐射透过率。辐射透过率按文献[5]给出的经验数据计算。 σ_b 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ 。

采用式(3)进行计算的前提是近似把烟气视为黑体,还应指出:烟流开口数与辐射开口数不一定相等,例如开启的门既是烟流开口又是辐射开口,但玻璃窗在崩坏前只是辐射开口,崩坏后既是辐射开口又是烟流开口。

$$I_{wi \cdot i} = \sum_k I_{wi \cdot k} = \sum_k A_{wi \cdot k} h_{i \cdot k} (T_i - T_{wi \cdot k}) \quad (4)$$

式中: $I_{wi \cdot k}$ 为*i*室第*k*个壁面的吸热量,W; \sum_k 为对*i*室的所有壁面求和; $A_{wi \cdot k}$ 为*i*室第*k*个壁面面积, m^2 ; $h_{i \cdot k}$ 为*i*室第*k*个壁面与烟流间的总换热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$; $T_{wi \cdot k}$ 为*i*室第*k*个壁面的表面温度,K,由文献[6]中的传热方程式求得。

$$I_{Ai} = \rho_i C_{pi} V_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \quad (5)$$

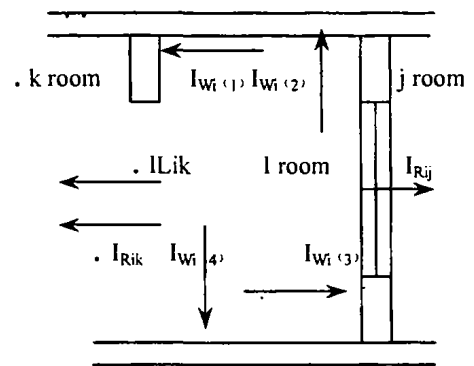


图1 房间热平衡

式中: ρ_i 、 C_{pi} 、 V_i 分别为 i 室烟气的密度、定压比热以及体积, τ 为时间。

将式(2)~式(5)代入式(1)得:

$$I_{ci} = \sum_j (C_{pi} m_{ij} T_i - C_{pj} m_{ji} T_j) + \sum_l A_{il} \tau_{il} \sigma_b (T_i^4 - T_l^4) + \sum_k A_{wi \cdot k} h_{ik} (T_i - T_{wi \cdot k}) + \rho_i C_{pi} V_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \quad (6)$$

取时间步长为 $\Delta\tau$, 采用隐式差分格式, 式(6)可以改写为如下有限差分方程:

$$I_{ci} = \sum_j (C_{pi}^n m_{ij}^n T_i^{n+1} - C_{pj}^n m_{ji}^n T_j^{n+1}) + \sum_l A_{il} \tau_{il}^n \sigma_b (T_i^n T_i^{n+1} - T_l^n T_l^{n+1}) + \sum_k A_{wi \cdot k} h_{ik}^n (T_i^{n+1} - T_{wi \cdot k}^n) + \rho_i^n C_{pi}^n V_i \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta\tau} \quad (7)$$

式中: T_n 表示 $\tau = n\Delta\tau$ 时刻的温度, 称为现实温度, 为已知量。 T^{n+1} 表示 $\tau = (n+1)\Delta\tau$ 时刻的温度, 称为未来温度, 为待求量。物性参数 ρ^n 、 C_p^n 等按现实温度确定, m_{ij}^n 和 m_{ji}^n 由烟流解析获得^[7], $T_{wi \cdot k}^n$ 由传热解析求得, h_{ik}^n 根据现实温度, 由文献[5]的计算方法确定。

式(7)中, 辐射项作了如下的线性化处理:

$$T_i^4 = T_i^n T_i^{n+1} \quad (8)$$

辐射透过率 τ_{il} 随着火灾过程的进行会发生变化, 当室温达到轰燃温度时, 门窗崩裂, $\tau_{il}^n = 1$, 此时开口既是烟流开口又是辐射开口, 这一问题在计算程序中已作了处理。

对于每一个节点, 可按式(7)建立一个差分方程式, 如节点数为 m 个, 可得出 m 个差分方程式组成的线性代数方程组, 联立求解可解出各节点的未来温度 $T_i^{n+1} (i=1, 2, \dots, m)$ 。

2 求解步骤

由于烟气质量流量、物性参数、室温以及壁温之间互有依赖关系, 属于耦合问题, 因此求解建筑物内各室的室温必须与烟流计算方程以及壁体传热计算方程联立进行。求解步骤如下:

- 1) 初始化。输入外气温度、密度、风速、风向和各枝风压系数、流量系数、节点温度和壁温。
- 2) 建立建筑物换气树, 构成换气回路接续矩阵 $[I]$ 和闭环矩阵 $[L]$, 计算各枝压力源 p_i ^[7]。
- 3) 初始时刻, $n=0$, 假定各节点间 $m_{ij}=0$, 压差 $p=0$, 由式[7]求出各节点温度 T_i 。
- 4) 由维护结构传热解析^[6]求出各壁面的温度 $T_{w \cdot i}$ 。
- 5) 由拟合的 $\rho_i = f(T_i)$ 、 $C_{pi} = \varphi(T_i)$ ^[7] 求出 ρ_i 和 C_{pi} ; 由理想气体状态方程式求出各节点压差 p_i 。
- 6) 由烟流解析式^[7] 求出 p_i^{n+1} 、 m_{ij}^{n+1} 和 m_{ji}^{n+1} 。
- 7) 由式(7)求出下一时间步长各节点温度 T_i^{n+1} 。
- 8) 重复步骤 5), 直至计算结果满足所设

定的时间为止。

上述计算方法已编制成烟流性状预测应用软件。软件建立了可视化界面系统, 计算结果能以图形化方式输出, 壁面温度分布能以三维曲面图形展示。

3 算例验证

算例验证的资料来源于文献[1], 建筑结构及门窗的编号如图 2 所示。开口的基本情况为:(1)2 室的窗火灾过程中一直开启;(2)3 室的窗一直关闭;(3)1 室与 2 室间的门火灾过程中关闭, 第 9 min 完全烧毁;(4)1 室与 3 室间的门火灾过程中一直关闭;(5)出口门一直

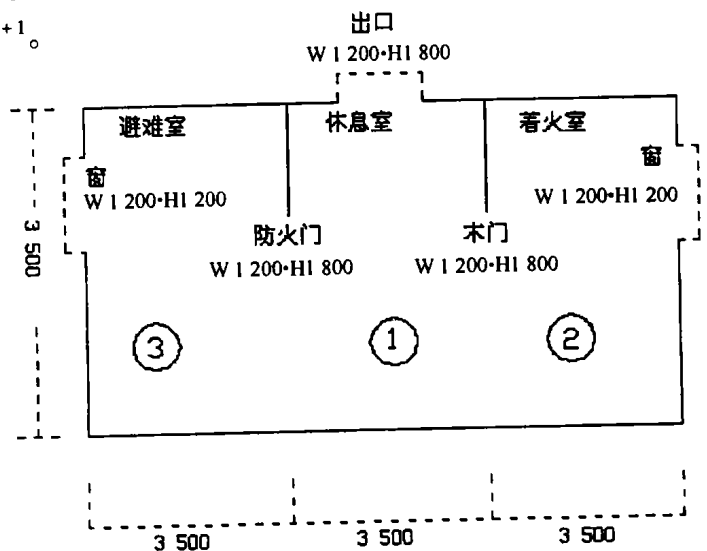


图 2 算例建筑平面图

敞开。火源条件、人员停留情况以及各计算用初始参数详见文献[1]。为便利比较,在输入同一组初始数据后,将日本软件的计算结果(扫描得到)与本软件的计算结果描绘在图3上。计算过程中,取时间步长 $\Delta\tau = 5\text{ s}$ 。为节省篇幅,本文仅绘出2室(着火室)的温度数据比较图。

从图3中可以看出,根据本文模型开发出的计算软件与日本同类软件的计算结果非常接近,两者间的最大误差发生在 $\tau = 3\ 600\text{ s}$ 的时刻,该时刻本软件的计算室温为 $968\text{ }^\circ\text{C}$,日本软件为 $940\text{ }^\circ\text{C}$,绝对误差 $28\text{ }^\circ\text{C}$,相对误差 $<3\%$ 。从而证实了本软件的计算结果与日本软件是一致的。由于日本软件的计算结果与其实验数据吻合得相当好^[1],因此可进一步证实本文的数学模型可靠,算法正确,软件的开发是成功的。

图3中曲线的转折点发生在 $\tau = 540\text{ s}$ 时。540 s前,1、2室间的门关闭,随着燃烧过程的进行,室温迅速上升。540 s时,门被烧毁,高温烟气流入1室,而卷吸作用使得低温空气进入2室,发生了室温突降的现象。540 s后,燃烧进入稳态阶段,室温平稳上升。

4 实验研究

4.1 实验模型与测量系统

为了进一步深入地评价本软件的预测效果,本文采用了实尺寸实体实验研究验证的方法。实验地点选定在公安部四川消防科研所。实验模型为一真实的实体建筑,高 3 m ,其平面尺寸及测点的布置如图4所示。

图4中,○表示热电偶测试柱,△表示烟气-流速及烟浓度、 CO_2 浓度采集测试柱,开口及已标注的壁面基本情况如表1。

未标注的壁面均为砖砌结构,两面抹灰。壁面3为玻璃壁面,3室为观测室,3室内设有探照灯及摄像系统,可观察到实验中的烟流运动情况。2室中心有一排烟口,实验中当风机开启时可通过该排烟口将烟气排出室外。测温系统为竖向布置的7根测试柱组成,1室和2室的测试柱上各设置有9个测温热电偶,位置最高的测点距离顶棚 0.1 m ,往下每两个测点间距为 0.2 m 。3室的两根测试柱上各设置了4个测温热电偶,其高度距顶棚分别为 0.1 m 、 0.3 m 、 1.3 m 、 2.55 m 。测试系统的布置充分考虑到对称性和代表性。测量数据由数据采集系统自动巡检采集,巡检周期 5 s ,采集的数据输入计算机后,由打印机实时打印。整个测量装置均为先进的火灾实验专用装置,所有的热电偶均经过严格校验。

按照网络模型的思想,假设各房间内的空气(烟气)是均匀的,即各房间内的空气(烟气)在某一时刻具有各自同一的温度及其他物性参数,因此测量值必须整理成平均值。本文中,平均温度按体积加权平均的方法计算,即:

$$t_m = \frac{\sum_i \rho_i c_{pi} V_i}{\rho c_p V} \quad (9)$$

式中: t_i 为第 i 个热电偶的实测温度; V_i 为以 i 节点为中心所划分的体积, m^3 ; ρ_i 、 C_{pi} 为温度为 t_i 时烟气的密度和比热;

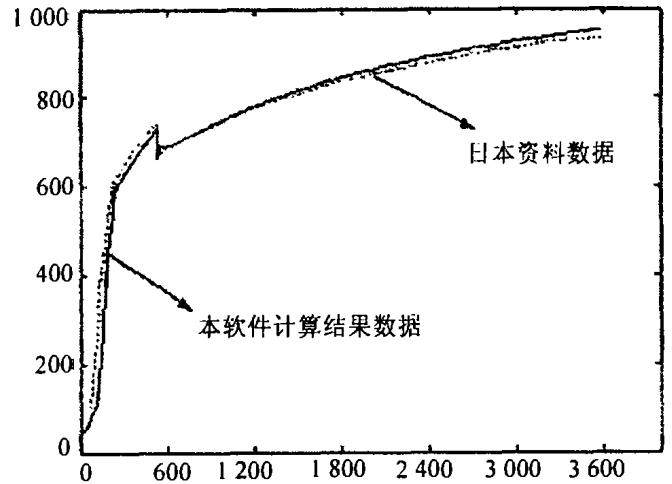


图3 着火室(2室)温度数据对比图

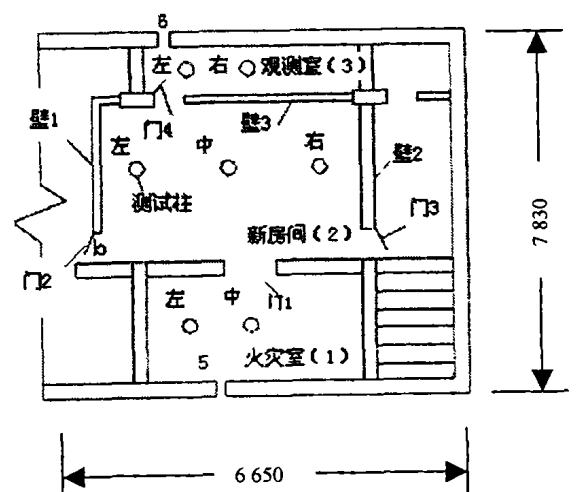


图4 实验模型平面及测点布置图

V 为房间的体积, m^3 ; ρ 、 C_p 为温度为 t_m 时烟气的密度和比热,由逐渐逼近法计算。

表1 开口及壁面基本情况表

名称	宽×高	结构材料	实验中的开启情况
开口1	1.5 m×2 m	半开时红砖分隔	全开/半开
开口2	0.8 m×2 m	木制,厚 $\delta=3$ mm	全闭
开口3	0.8 m×2m	木制,厚 $\delta=3$ mm	全开
开口4	0.9 m×2 m	玻璃	全开
开口5	0.5 m×0.4 m	木制	全开
开口6	0.5 m×0.4 m	木制	全开
壁1	3.2 m×3 m	木制,厚 $\delta=3$ mm	
壁2	3.2 m×3 m	木制,厚 $\delta=3$ mm	
壁3	6.1 m×3 m	玻璃	

4.2 实验方案

由于经费的限制,在影响火灾烟流特性的众多因素中,实验方案仅考虑了三个主要因素,即火源的变化、烟流开口的变化及排烟系统的开启或关闭情况。火源采用含水率为8%~10%的长条型松木,其质量分别为10 kg、50 kg、100 kg,构成了三种不同的火荷,其燃烧发热量采用失重测量法测定^[8]。1室(着火室)与2室之间的开口分为全开和半开两种情况。半开时用红砖封闭一半开口面积。为验证机械排烟系统启动时,软件对烟流特性预测计算的正确性,本次实验中考虑了排烟系统启动和关闭的两种情况。当排烟系统启动时,排烟量由实测确定。

将上述三个因素进行优化组合,构成了表2所示的五个实验方案。

表2 实验方案

实验方案	实验时间	火荷/kg	室内温度/°C	室外温度/°C	排烟量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	开口宽度/m
1	2002.3.20	10	16	15.3	0.833	1.5
2	2002.3.22	50	15.3	14.9	无	1.5
3	2002.3.25	100	11.5	10	0.833	1.5
4	2002.3.26	10	15.6	14.8	无	0.75
5	2002.3.27	50	16	17.5	0.833	0.75

4.3 实验结果分析比较

将实测的燃烧发热量、排烟量以及其他初始数据输入计算机,采用烟流性状预测软件进行计算。计算结果与实验结果描绘在同一坐标图上,由于篇幅限制,本文中仅给出有代表性的三个不同方案下的温度数据比较图。更详细的资料可参阅文献^[8]。

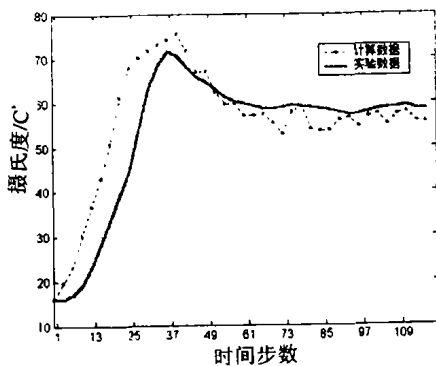


图5 10 kg、有排烟,1室温度数据比较图

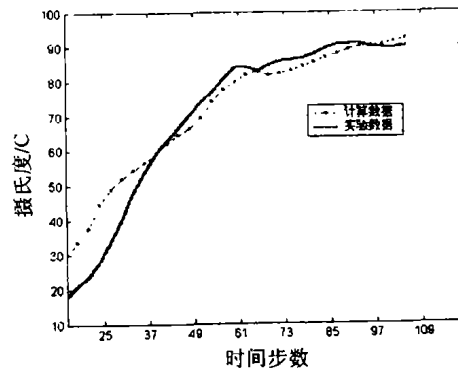


图6 50 kg、无排烟,2室温度数据比较图

从图5和图6中可以看出:火荷较小的情况下(燃烧质量分别为10 kg和50 kg),火灾初期,软件计算结果略高于实测结果。随着火灾过程的进行,两者的误差减小。当火荷增加至100 kg的时候,计算结果与实验数据吻合得相当好,所有的比较结果都充分证实了这一点。从网络模型把每一个受限空间作为一个节点,假设任一时刻该节点具有均匀温度、密度等物性参数的特征来看,当室内可燃物数量较

大时,采用网络模型开发出的预测软件具有足够的准确性。即使火荷仅为 10 kg, 软件的计算结果也能够准确地描述建筑物火灾的发展及变化趋势。

5 结论

本文在文献[5]的基础上对室温预测网络模型进行了差分格式改造,并对所开发出的建筑物烟流性状软件中的室温预测部分进行了算例验证和实尺寸实体实验研究。经算例验证证实,本文软件与日本同类软件的室温计算结果基本相同,在计算时间内的最大相对误差 < 3%。经实尺寸实体实验研究,软件的计算结果与实验结果吻合得很好,特别是在大火荷的情况下,完全符合火灾时室温的发展与变化规律。两种方法的验证充分表明:软件的数学模型及采用的计算方法正确、可靠,软件的开发是成功的。运用本软件可以对火灾发生时的烟气流动情况和烟气状态作出正确可信的量化描述,实现建筑物火灾烟流性状的动态模拟。

参考文献:

- [1] 日本建筑研究协会. 火灾时的烟流控制以及逃难方法研究报告书[R]. 日本建筑研究协会, 平成5年4月.
- [2] 鹿院卫. 网络模化在高层建筑火灾通风中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(1): 25-28.
- [3] 钟茂华. 多层多室建筑火灾烟气运动的网络模拟[J]. 火灾科学, 2002, 11(2): 103-107.
- [4] 严治军. 火灾建筑的室温预测法[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, 18(3): 1-7.
- [5] 严治军. 建筑物火灾烟气流动性状解析[J]. 重庆建筑大学学报, 1995, 17(2): 23-30.
- [6] 严治军. 火灾建筑的热传导解析[J]. 重庆建筑大学学报, 1997, 19(5): 107-111.
- [7] 王厚华. 建筑物火灾烟气流动网络模型的线性化求解方法[J]. 暖通空调, 2003, 33(5): 101-103.
- [8] 罗庆. 建筑物烟气流动性状实验研究及其预测软件的完善[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.

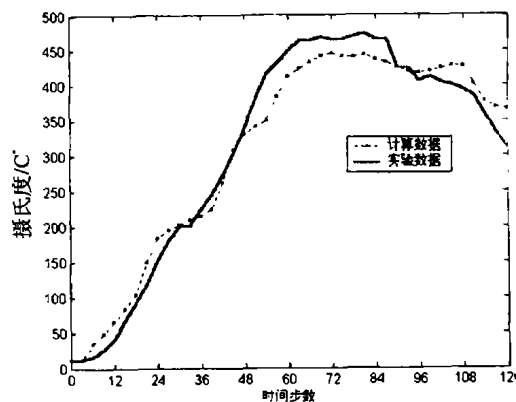


图7 100 kg、有排烟,1室温度数据比较图