

PHOENICS 火灾模拟应用方法与有效性验证

智会强¹ 牛坤¹ 路世昌¹ 金颖²

(1 公安部天津消防研究所, 天津, 30038

2 呼和浩特市消防支队, 内蒙古, 呼和浩特, 010050)

摘要: 利用场模型进行火灾模拟是认识火灾特性的重要手段, 是性能化设计的重要基础。PHOENICS 是一款通用场模拟软件, 为对其火灾模拟提供指导, 在分析 PHOENICS 数值模拟基本原理的基础上, 介绍了 PHOENICS 火灾模块的基本特点, 给出了火灾模拟的基本方法及应用技巧, 并利用 Steckler 房间火试验对 PHOENICS 火灾模拟的有效性进行了验证, 模拟结果表明 PHOENICS 可以比较准确的预测火灾流场的温度和速度。

关键词: PHOENICS 火灾模拟 火灾试验 火灾模型

0 引言

近年来, 随着计算机技术的飞速发展, 利用场模型模拟火灾的发展和烟气的流动过程已经成为认识火灾特性和开展有关分析的重要手段, 尤其对建筑物的性能化分析和设计来说尤为重要。相对于其他火灾模型来说, 场模型可以比较准确地得到模拟区域内各个位置的温度、速度、浓度等火灾参量随时间的变化。

目前比较常用的场模拟软件主要有 PHOENICS、FLUENT、CFX 和 STAR-CD 等通用软件^[1,2], 及 FDS、JASMINE、SMARTFIRE 等专用软件^[3]。PHOENICS 软件是英国 CHAM 公司开发的模拟传热、流动、化学反应和燃烧过程的通用计算流体动力学软件, 该软件于 1981 年投放市场, 是世界上第一套计算流体力学与计算传热学商用软件。PHOENICS 软件可用于求解零维、一维、二维和三维空间内可压缩或不可压缩、单相或多相流体的稳态或非稳态流动, 确定流体空间内的质量、动量、热量、浓度的传递与分布, 已广泛应用于航空航天、船舶、汽车、安全、暖通空调、环境、能源动力、化工等各个领域^[1]。

安全分析是 PHOENICS 软件一个十分重要的应用领域, 其可用于可燃、毒性气体的泄漏分析、污染物扩散分析和通风/排烟分析、爆炸分析等。目前, 已有诸多学者将 PHOENICS 用于火灾模拟, 且其在性能化设计中也得到了比较广泛的应用, 但有关其模拟有效性的研究还不多见。本文研究了 PHOENICS 火灾模拟的应用方法, 并用公认的火灾试验对其模拟的有效性进行了分析。

1 PHOENICS 软件基本结构

PHOENICS 软件可分为前处理器、求解器和后处理器三部分。VR-Editor(SATELLITE)为前处理器，其主要功能是以直观的界面完成求解问题的建模和参数设置，包括坐标的选取、计算域的确定、实体模型的建立、网格划分、控制方程和离散格式的选择、边界条件和初始条件的设定等。EARTH.模块为求解器，是软件的核心计算模块。PHOENICS 的后处理器包括 VR-Viewer、PHOTON 和 AUTO PLOT，用于处理计算结果，后处理也可采用其他软件，如 TEC PLOT、MATLAB 等^[4]。

PHOENICS 的主要运行步骤为：通过 VR-Editor 输入所要模拟的物理模型及相关参数，生成 Q1 文件，SATELLITE 接收 Q1 文件并对其进行编译，生成 EARTH 计算所需要的数据文件，即 EARDAT 文件，然后运行 EARTH 开始计算。计算完毕后，生成包含全部计算结果的 PHI 文件和包含 Q1 文件和部分计算结果的 RESULT 文件，最后由 VR-Viewer、PHOTON、AUTO PLOT 完成计算结果的可视化。

针对某些专业领域，PHOENICS 设计了一些专用模块，如：用于暖通建筑行业的 FLAIR 模块；用于电子元件散热的 HOTBOX 模块；用于工业锅炉煤粉燃烧的 COFFUS 模块和用于爆炸燃烧的 EXPLOIT 模块。这些模块针对性强，对所模拟的现象有很强的模拟能力。用于火灾和烟气流动模拟时一般用 FLAIR 模块，当涉及到燃烧模拟时可采用核心模块。

2 控制方程及求解方法

PHOENICS 所求解的控制方程的通用形式如式 (1) 所示^[4,5]：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\nabla\partial t} + \text{div}(\rho\vec{u}\phi - \Gamma_{\phi}\nabla\phi) = S_{\phi}$$

其中： ϕ 为求解变量，可表示温度、速度、压力、焓等， ρ 为密度， t 为时间， \vec{u} 为速度矢量， Γ_{ϕ} 为扩散项， S_{ϕ} 为源项。

Phoenics 采用有限体积法对控制方程进行离散处理，基本离散格式如式 (2) 所示：

$$a_P\phi_P = a_W\phi_W + a_E\phi_E + a_N\phi_N + a_S\phi_S + a_H\phi_H + a_L\phi_L + a_T\phi_T + S_{\phi}$$

其中 a 为控制方程离散后的系数， P 为控制体节点，角标 W, E, N, S, H, L, T 分别代表离散节点周围的八个节点及时间，在 PHOENICS 中，边界条件是按源项

来处理的。离散格式可选择一阶迎风、混合格式、QUICK 格式等，默认情况下采用 QUICK 格式。

PHOENICS 采用交错网格法进行控制方程的离散，进行流场计算采用压力与速度耦合的 SIMPLEST 算法，对两相流纳入了 IPSA 算法（适用于两种介质互相穿透时）及 PSI-CELL（粒子跟踪法）。代数方程组的求解可以采用点迭代（Point by point）、块迭代（Slabwise）或整场求解法（Whole-field）^[1]。PHOENICS，几乎允许使用者在外部方便地替换程序中的任何部分。

3 PHOENICS 火灾模拟基本方法

3.1 应用 PHOENICS 进行火灾模拟的基本步骤

1) 建立实体模型：根据建筑对象的实际情况，利用虚拟现实前处理器 VR-Editor 和 CAD 工具建立模拟对象的实体模型，并根据所确定的火灾场景，设置火源和防排烟系统、喷淋系统等消防设施。

2) 设置控制方程及边界条件：选择相关控制方程、湍流模型、辐射模型和烟气方程，并设置相关的边界条件和初始条件，包括壁面条件、物性参数、环境温度、火源的热释放速率、产烟量、毒性组分产量、排烟和补风条件等等。

3) 区域离散化：划分网格，选择收敛方法和收敛准则，可选择自动收敛准则或设置松弛因子。

4) 模拟计算：运行 EARTH 模块进行计算，计算过程中可通过监测点的参数变化及残差曲线来监测收敛情况，并可通过虚拟现实后处理器 VR-Viewer 查看中间计算结果，以判断计算结果的合理性。若计算不收敛或结果不合理，则需修改计算模型、调整松弛因子，重新进行计算。

5) 结果处理：通过后处理程序对计算结果进行处理。

3.2 火源的设计

PHOENICS 软件提供了两种火源处理方法，即体积热源法和燃烧模拟法。体积热源法不考虑化学反应，而是将火源假设为体积热源和烟气源，用热源释放的热量来代替燃烧所放出的热量，热源周围的气体受浮力作用上升，周围冷空气补充进来，形成卷吸和羽流，利用体积热源法可节省大量计算时间。燃烧模拟法考虑燃烧反应，但模拟实际的燃烧需要耗费大量的计算时间，在工程应用中并不可行，因此，一般采用简化的燃烧模型，比较常用有混合分数模型、漩涡破碎模型、概率密度函数模型等。在 PHOENICS 中，其核心模块提供了多种燃烧模型，

如漩涡破碎模型、涡流耗散模型、预设的概率密度函数模型、双流体模型等，而 FLAIR 模块中采用体积热源法来描述火源。当模拟的重点是研究远离火源区域的烟气流动情况，或是当火源尺度和火区蔓延速度相对于建筑空间的尺度较小时，利用体积热源法是简单有效的。一般情况下，在性能化设计中采用体积热源法是可行的。

3.3 湍流模型的选择

PHOENICS 提供了 20 多种湍流模型，包括涡流粘性系数模型（混合长度模型、单方程模型和双方程模型）、雷诺应力模型、大涡模拟模型等。由于浮力对火灾的流动过程有重要影响，因此，火灾模拟应选择着重考虑浮力的影响的湍流模型，在 PHOENICS 中，一般选择标准双方程模型即可。

近年来，大涡模拟在火灾模拟中也得到了比较广泛的应用，PHOENICS 在其核心模块中内置了大涡模拟模型，但在 FLAIR 模块中没有固化该模型，需要人工添加语句才能实现。

3.4 辐射模型的选择

PHOENICS 内置了多种辐射模型，如面源模型，六通量模型和 IMMERSOL 模型等。IMMERSOL 模型由 Spalding 教授于 1995 年提出，该模型是基于斯蒂芬-波尔兹曼定律得到的，用于计算处于流体中的固体表面之间和流体间的辐射换热。该模型假设固体都是灰体，且忽略波长的影响。利用该模型可以计算固体表面辐射温度及流体中辐射温度。经实践检验，该模型具有较高的准确性和经济性。火灾模拟时，一般选择 IMMERSOL 模型。

4 PHOENICS 火灾模拟的特点及应用技巧

4.1 FLAIR 模块中和火灾相关的模型

PHOENICS2008 版进一步完善了火灾模型，当激活烟气方程后，可对火源的燃烧材料、热值、CO 产量、产烟量、能见度等参数进行设置，这在其他通用 CFD 软件中是没有的。另外 FLAIR 中还具有和火灾模拟相关的多种模型：

1) Fire: 火源模型，用于建立一个面积或体积热源，可以设置火灾功率、质量源和烟气源等。可设置的火灾类型有：稳态火、t 平方火、随时间变化的线性火源、和质量损失速率或温度相关的火源、池火模型等；

2) Fan: 风机，仅向计算区域提供动量，可用于模拟机械排烟口；

3) JETFAN: 射流风机，可模拟实际工程中的射流风机；

- 4) INLET: 入口边界条件, 可用于模拟排烟口、送风口等;
- 5) OPEN: 固定压力边界条件, 可用于模拟自然排烟口等;
- 6) Spray-head: 喷淋模型, 可用于模拟水喷淋系统。

4.2 模型建立

工程中需要模拟各类建筑中的火灾, 这就需要软件有很强的建模能力。PHOENICS 的虚拟现实前处理器提供了丰富的建模功能, 其不但内置了常用的几何模型, 而且还可利用其中的 shapemaker 工具建立各种形状的实体。另外可导入 AUOTCAD、PRO/E 等大多数 CAD 工具所建立模型。建模时应注意以下几点:

- 1) PHOENICS 对导入的各种 CAD 图形都有一定的要求, 如在导入 AUOTCAD 图形时, 所建立的立体图形必须是实体模型, 并需要将图形转化为 STL 格式, 实体模型转化为 STL 格式时, 一定要注意实体必须位于第一象限。

- 2) 模拟建筑火灾时, 一般模型都比较复杂, 因此, 建模时最好从最简单的模型开始, 一步一步添加物体, 每添加一定数量的物体, 就简单试算一下, 看结果是否合理, 这样可以保证及时发现建模中出现的错误。

4.3 网格划分

PHOENICS 提供了直角坐标、柱坐标和适体坐标, 另外提供了精细网格功能和部分物体处理功能。网格划分是影响计算结果的重要因素, 应注意以下几点:

- 1) 状态参数变化梯度较大的区域应采用比较细密的网格, 以准确解析各参数的变化, 其他区域可采用相对稀疏的网格。这样既可以保证求解精度, 又可以缩短计算时间。如在火源、排烟口、射流风机、喷头等周围区域应采用加密网格。

- 2) 对需要局部加密的区域可通过设置 NULL (虚物体) 来实现, 设置 NULL 进行局部加密比使用精细网格功能更易于收敛。

- 3) PHOENICS 采用的是结果化网格, 比较规则的网格是高质量网格, 如在直角坐标系下, 正六面体是最好的网格。划分网格时应尽量避免出现细长比较大的网格, 这样的网格不但会降低计算精度, 且易使计算结果发散。

- 4) 在某一方向上, 网格尺寸变化率不宜过大, 一般控制在 3 倍以下。

- 5) 在实际模拟计算中, 通常可以先用稀疏的网格来进行初步估算, 不但可以确定模拟大致所需的时间和解析解的范围, 而且有助于在模拟过程中发现问题, 随时调整网格, 减少无用功。

6) 当网格数量过多时, 可考虑采用并行计算。

4.4 收敛判定

当计算达到以下三个条件时, 可认为计算收敛:

- 1) 监测点处的值不再随计算步数的增加而变化;
- 2) 各参数的残差随计算步数的增加而降低, 最后趋于平缓;
- 3) 满足质量守恒与能量守恒。

对于前两个判据, 可以通过 GRAPHIC 显示的监测点处的值及残差曲线来判断, 对于第三个判据, 则可以通过检查 RESULT 文件中的 Nett source 信息来判断。进行火灾模拟时, 监测点一般放置在火羽流区域, 以便随时监测火区模拟是否合理。在计算过程中可以随时调整松弛因子。

5 PHOENICS 火灾模拟的有效性验证

本文用 PHOENICS 模拟 Steckler 房间火试验, 以验证模拟的准确性。Steckler 等人^[6]在 1982 年开展了一系列单室火灾实验来研究燃烧导致的流动, 对温度、速度场分布进行测量实验, 所得到的实验数据已被多种区域模型或场模型用于模型验证。

5.1 试验介绍

如图 2 所示, 试验房间长 2.8m、宽 2.8m、高 2.18m, 房门尺寸、火源位置和热释放速率在各试验中有一系列变化, 在门处安放二维双向速度探针和裸线热电偶阵列来测量速度和温度, 速度测量的误差约为 10%, 热电偶和速度探针的垂直间距均为 0.114m。在房间的角落处安放了一排吸气式热电偶来测量气体的温度, 角落处测试点距离近处两侧墙壁各 0.305m。本次模拟的基本实验条件如下: 火源布置在房间的中间位置, 面积为 $(0.45 \times 0.45)\text{m}^2$ 、热释放率为 62.9 kW, 主要模拟两种工况: 1) 房门宽 0.74m、高 1.83m, 室外温度为 28°C 2) 房门宽 0.36m、高 1.83m, 室外温度 24.6°C。

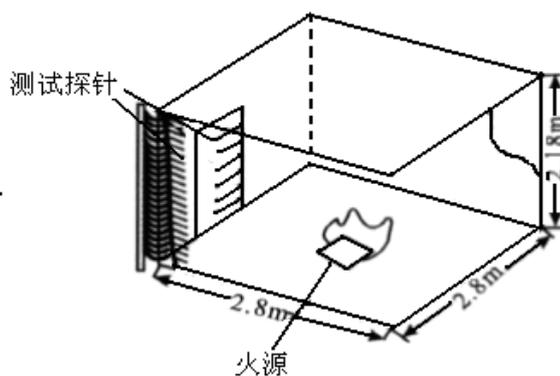


图 1 模拟房间示意图

5.2 模拟结果

湍流模型采用标准双方程模型，辐射模型采用 IMMESOL 模型，火源为体积热源，但可以向周围空间释放烟气和燃烧产物。网格尺寸为 $40 \times 40 \times 30$ 。

工况 1 试验结果及模拟结果见图 2~图 4 所示。

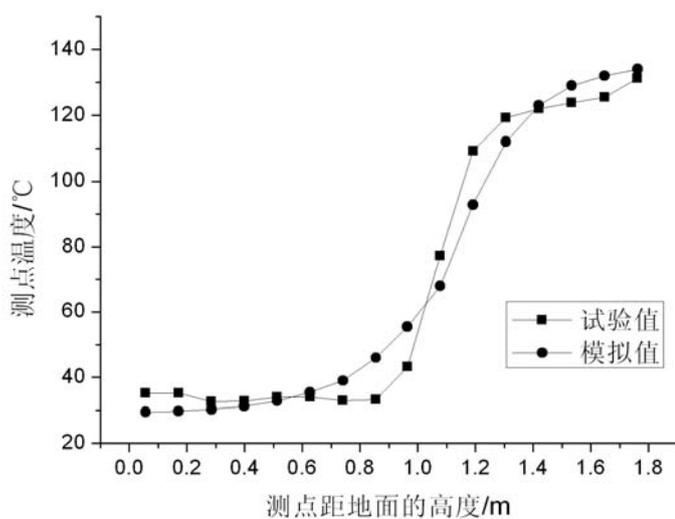


图 2 房门中间位置的温度分布

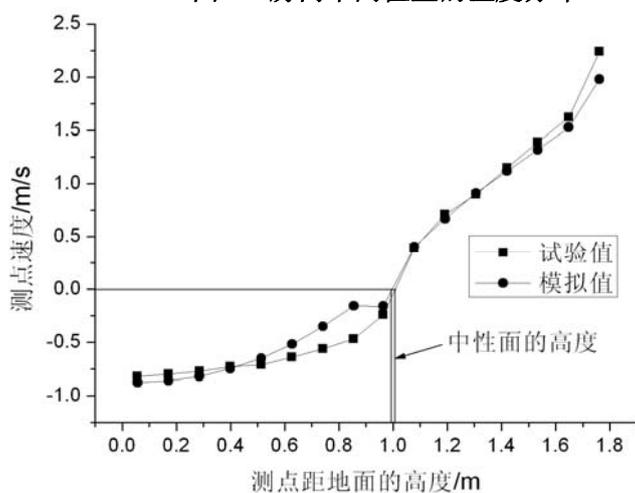


图 3 房门中间位置的速度分布

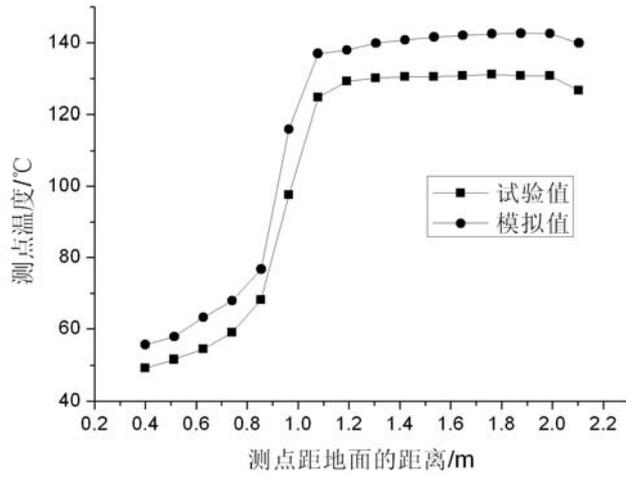


图4 房间角落处的温度分布

工况2 试验结果及模拟结果见图5~图7所示:

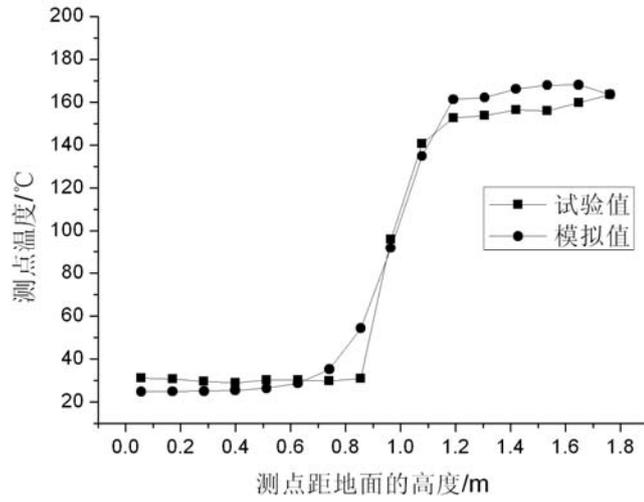


图5 房门中间位置的温度分布

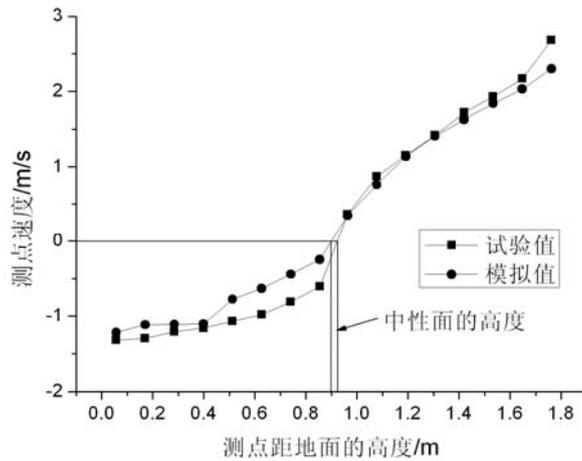


图6 房门中间位置的速度分布

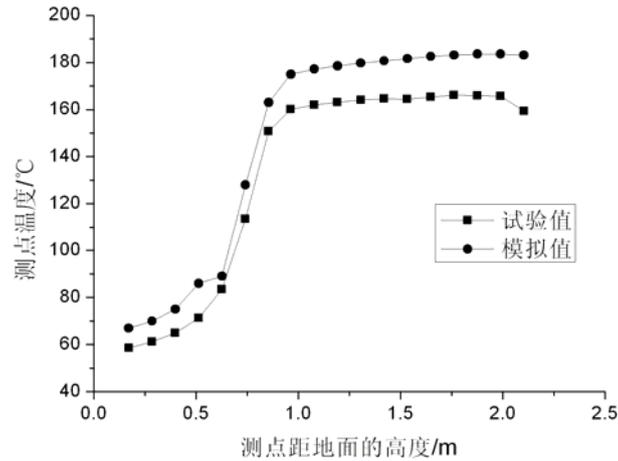


图 7 房间角落处的温度分布

从模拟结果可以看到，门中间的速度和温度的模拟结果和实验结果吻合较好；墙角处的模拟结果在高度大于 1m 时偏离试验值较大，但变化趋势是一致的，相对于试验结果来说要保守。本文所采用的火灾模型为体积热源模型，当采用燃烧模型时，误差应该会相对较小。另外试验测量也是产生误差的主要来源。从速度曲线来看，房门处速度为零的位置即为中性面的位置，从图 3 可以看到，工况 1 试验测得的中性面高度为 1.026m，模拟所得的中性面高度为 0.985m，从图 7 可以看到，工况 2 试验测得的中性面高度为 0.940m，模拟所得的中性面高度为 0.900m，可见，模拟结果是比较精确的。

6 结语

作为一款通用计算流体动力学软件，PHOENICS 在各个领域均得到了广泛应用，对于火灾模拟，近年来，PHOENICS 在 FLAIR 模块中固化了一些火灾模型，增加了软件的易用性。本文分析了 PHOENICS 数值模拟的基本原理及求解方法，介绍了 PHOENICS 中与火灾相关的模型，给出了火灾模拟的基本方法及应用技巧，以期对使用者提供指导。同时，利用 PHOENICS 对 Steckler 房间火灾试验进行了数值模拟，通过和实验数据比较可知，PHOENICS 可以比较准确的预测火灾流场中的速度和温度。

火灾模拟是性能化防火设计的重要组成部分，是性能化防火设计得以实现的手段和基础，火灾模拟的准确性将直接影响设计的可靠性。影响火灾模拟准确性的因素很多，如网格划分方法、网格形状和数量、湍流模型和燃烧模型的选择、边界条件的设置等等，同时，由于各 CFD 软件所采用的算法和计算假设不尽相同，这就导致了对同一问题，各软件的模拟能力不同，对复杂问题进行模拟时，

仅采用一种软件，难免会出现偏差。因此，对比较复杂的问题，建议选择两种不同的软件进行模拟，以相互校验，保证计算结果的合理性。

参考文献

- [1] 陶文铨。数值传热学[M]。西安：西安交通大学出版社，2001
- [2] 姚 征，陈康民 CFD 通用软件综述[J]。上海理工大学学报， Vol.24(2), 2002,139-144。
- [3] Stephen M O, Douglqs J. C. An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke[J]. Journal of FIRE PROTECTION ENGINEERING, Vol.13.May 2003,87-109.
- [4] Ludwing J C, MalinM R, Spalding D B.PHOENICS Documentation[R]. Concentration,Heat and Momentum Limited,2005.
- [4] WU J Z, Ludwing J C.FIAIR User's Guide[R]. Concentration Heat and Momentum Limited,2005.
- [5] Patankar S V 著，张政译。传热与流体流动的数值计算[M]。北京：科学出版社，1992。
- [6]. Steckler K D, Quintiere J G, Rinkinen W J. Flow induced by fire in a compartment[R].NBSIR B2-2520,National Bureau of Standards,1982.

——本文发表于《消防科学与技术》（2009年第12期）