

火灾数值模型的验证和确认

智会强, 牛坤, 姜明理, 黄益良

(公安部天津消防研究所, 天津, 300381)

摘要: 火灾数值模型的可信度评价是火灾数值模拟研究的重要内容, 而数值模型的验证和确认则是评价数值解可信度的主要手段, 在总结数值模型验证和确认的研究现状的基础上, 介绍了火灾数值模型验证和确认的基本内容和方法, 并以 FLUNENT 软件为例, 利用 Steckler 房间火试验, 对该软件进行了试验确认研究, 最后对火灾数值模型的验证和确认及相关应用提出了建议。

关键词: 火灾数值模型, 验证, 确认, 可信度

Verification and Validation of Fire numerical Model

ZHI Hui-qiang NIU Kun JIANG Ming-li HUANG Yi-liang

(Tianjin Fire Research Institute of Ministry of Public Security, Tianjin, 300381)

Abstract: Credibility evaluation is the important research content of fire numerical simulation. The verification and the validation are the main method of credibility evaluation. In this paper, research status about the verification and the validation of numerical model is summarized, and then the primary processes of verification and validation. are introduced., include basic content and method. Take example of FLUENT, Validation research on this soft in the fire simulation is presented. Finally, some comments were made with respect to the development of V&V of fire numerical model.

Key words: Fire numerical model, Verification, Validation, Credibility

1 引言

近年来, 随着计算机技术的飞速发展, 火灾的数值模拟也得到了快速发展。目前, 火灾模拟已在火灾科学研究、性能化防火设计、火灾调查、消防指挥决策系统等领域内得到了广泛应用, 其在火灾科学研究和工程应用领域扮演着越来越重要的角色。

火灾数值模型能否真实的反映现实火灾、模拟精度如何,是需要解决的现实问题。尤其是在性能化设计中,火灾模拟的可信度直接关系到设计结果的可信度。目前,验证(verification)与确认(validation)是评价数值模型求可信度的主要手段。

数值模型的验证和确认,简称 V&V,是数值模拟的一个重要组成部分,其目的是为了评估模拟程序和物理模型的可靠性,并量化数值模拟程序计算结果的置信度^[1,2]。

本文重点介绍数值模型验证和确认的研究现状及验证和确认的基本内容和方法,最后举例说明火灾模型确认过程。火灾数值模型中,场模型也即 CFD 模型应用最为广泛,因此,本文主要针对火灾场模型展开论述。

2 国内外研究现状

2.1 确认和验证的定义

美国计算机模拟协会最早给出了验证和确认的定义,其认为验证是在给定的精度范围内,计算模型表述概念模型的证实过程,确认是在一定的应用范围内,与应用目的相容的、计算模型所具有的精度满意域的确立过程^[2~4]。对于火灾模型来说,ASTM E1355《确定性火灾模型预测能力评估指南》和国际标准 ISO16730《消防安全工程—计算方法的评估、验证、确认》所给出的定义为:验证是确定计算方法反映概念性模型的准确程度及求解精确程度的过程;确认是确定计算方法反映真实场景的真实程度的过程^[5]。

2.2 CFD 模型的验证和确认研究

CFD 模型的验证和确认研究在国外一直受到高度重视,如 1992 年美国国家航空航天局(NASA)对 CFD 的投资范围包括 CFD 算法、应用、网格生成、可视化、转捩、湍流模型、验证和确认,总投资 1399.8 万美元,而 CFD 验证确认一项就投资 713.5 万美元,占对 CFD 总投资的 50.97%^[2],可见 CFD 验证和确认在 CFD 技术中的重要地位。CFD 可信度评价研究在国外大多集中于航空航天领域。1998 年,美国航空航天学会(AIAA)发布了《计算流体动力学模型验证和确认技术指南》,这是世界上第一个 CFD 验证和确认、可信度评价的指南。国外的 CFD 的研究和应用机构、航空航天飞行器发展计划等组织进行了较多的 CFD 验证和确认工作,如波音公司的全机 CFD 验证、确认,美国高速民用运输机计划(HSCT 计划)中的 CFD 阻力专题验证等。在国内,关于 CFD 可信度的研究

也正逐步受到重视，相关单位安排组织了若干气动外形的数值计算和试验对比研究，空气动力学预研基金也设立专题开展 CFD 可信度研究^[6,7]。

2.3 火灾模型的验证和确认研究

关于火灾模型的验证和确认，国外也已开展了一系列相关研究，而国内研究则处于起步阶段。1997 年，美国材料试验协会（ASTM）的标准 ASTM E1355 《确定性火灾模型预测能力评估指南》，对于火灾模型的验证和确认进行了概念性的规定；2003 年美国核能管理研究所、电力研究院和美国国家标准和技术研究院对核电站的火灾风险评估进行了研究，并发布了《用于核电站的可选火灾模型的验证和确认》，在该报告中，对 FDS、CFAST 等火灾模型应用于核电厂的情形进行了验证和确认研究；美国国家标准和技术研究院（NIST）在 ASTM E1355 的基础上，对其开发的 FDS 软件进行了较多的验证和确认工作，并出版了专门的技术文件《FDS 技术指南 第二卷 验证》和《FDS 技术指南 第三卷 确认》^[8-9]。国际标准 ISO16730 《火灾安全工程—计算方法的评估、验证、确认》中给出了计算方法（包括火灾模型）验证和确认的一般程序。但国内外对通用 CFD 模型 PHOENICS、FLUENT 等用于火灾模拟时的可信度研究则较少。

3 火灾模型验证和确认的方法

ISO16730 中规定了验证和确认的一般程序，见图 1 所示。

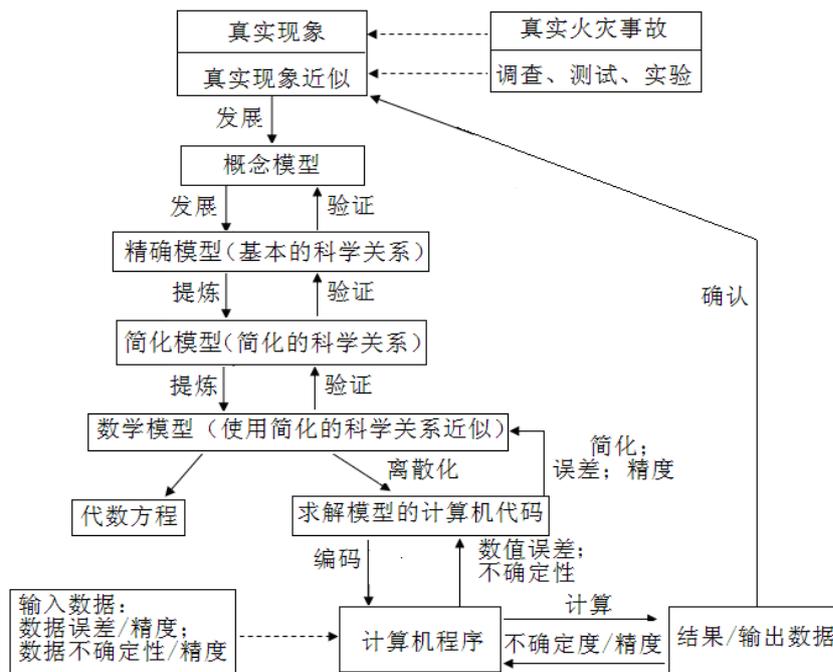


图 1 火灾模型验证和确认流程图

对于火灾模拟来说，在编制计算机软件之前，首先要将真实的火灾过程转化为相应的概念模型，结合火灾过程的特性分析，再将概念模型转化为数学模型，主要为描述火灾过程的微分方程组，进而就可以编制程序，利用数值方法进行求解。编制的程序能否真实的反应火灾过程的概念模型，就需要对其进行验证，验证过程的目的旨在检验代码是否能正确求解数学模型所描述的方程组，主要包括：1) 代码检验：检验程序代码是否正确，能否正确地求解描述火灾的微分方程。可以利用方程的精确解或构造解来判断程序代码是否正确。2) 时间和空间离散化：离散方法、离散格式能否满足求解要求。3) 迭代收敛性和相容性检验：检查所用的求解方法能否满足数值稳定性，能否使方程快速收敛到正确的解，收敛准则是否合适。在验证中，求解精度一般是由简单模型问题的精确解来确定，它是计算机代码正确求解概念模型的证实过程，强调求解过程是否正确，重点考察计算模型的误差，而不是建立概念模型与真实世界之间的关系。

图中 1 所描述的确证过程主要是将程序的计算结果和真实的火灾试验数据进行对比，以验证计算程序是否能真实的反映现实火灾。确证过程中，求解精度一般是由实验数据来确定，它是确定计算模型模拟真实世界的精确度，强调求解问题是否正确，考察的是模拟模型的误差。对比试验的选取应该有代表性，应对各类不同的试验进行对比研究，如烟气流动试验、火灾蔓延试验等，以确认火灾模型对各种不同火灾过程的适用性。确证过程还应选择不同的火灾参数进行研究，如温度、速度、浓度、热释放速率、辐射热通量等，以确定其对不同参数的预测能力。

4 验证和确认实例

在火灾模拟研究中，主要应用成熟的商业软件或专用的火灾模拟软件，这些软件的验证一般在软件编制和测试过程中会有较多研究，而其确认过程显得更为重要。因此，所举实例为通用软件 Fluent 的一个确认研究。主要用 Fluent 的模拟值和 Steckler 房间火试验进行对比，以考察软件对该类火灾过程模拟的准确性。Steckler 等人在 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确认研究。

4.1 试验条件

如图 2 所示, Steckler 房间火试验是在稳态火情况下完成的, 试验房间长 2.8m、宽 2.8m、高 2.18m, 房间开口(可以为门或窗户)尺寸、火源位置和热释放速率在各试验中有一系列变化, 本次试验房间开口为窗户。在窗户处设有速度探头和热电偶各 12 只, 热电偶的垂直间距和速度探头的垂直间距均为 0.114m。在房间的角落处设置了 18 只热电偶, 热电偶垂直间距 0.114m, 角落处测试点距离附近两侧墙壁各 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, 火源直径 30cm, 燃烧物质为甲烷, 热释放率为 62.9kW, 窗户宽 0.74m, 窗户高 1.38m, 窗檐高 1.83m, 见图 2, 室外温度为 26℃。

4.2 模拟参数设置

湍流模型采用大涡模拟模型, 辐射模型采用离散坐标 (Discrete Ordinates, DO) 辐射模型, 燃烧模拟采用体积热源法, 网格大小为: 0.05m×0.05m×0.05m, 环境初始温度为 26℃。

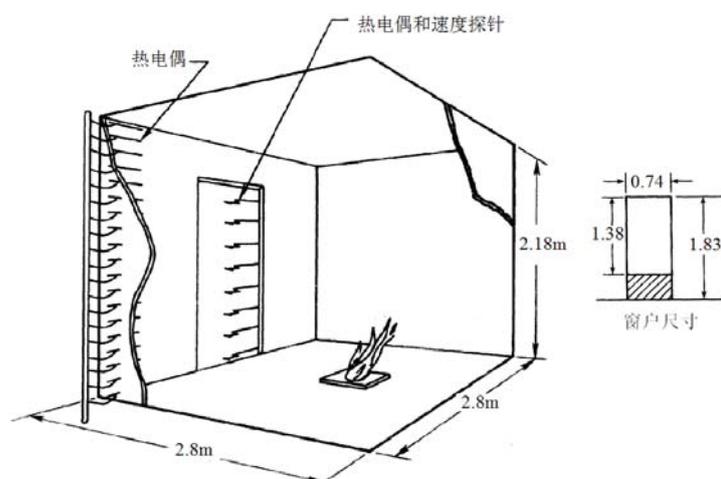


图 2 试验房间示意图

4.3 结果分析

试验结果及模拟结果见图 3~图 5 所示。从速度曲线来看, 两个曲线比较吻合, 窗口处速度为零的位置即为中性面的位置, 从图 3 可以看到, 试验测得的中性面高度为 1.045m, 模拟所得的中性面高度为 1.00m, 可见, 模拟结果是比较精确的。图 4 和图 5 为温度实验值和模拟值的对比图, 可以看到在高度低于 1.0m 时, 模拟结果和实验值比较吻合, 相对误差在 6%以内, 当高度大于 1m 时, 模拟值偏离试验值较大, 但最大相对误差不超过 14%。从温度值可以看出, FLUENT 对于高温烟气的温度模拟值高于试验值, 模拟结果比较保守, 对于温度值来说,

模拟结果高于实验值，在工程分析中有利于保证结果的安全性。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。本例仅对较小空间内的温度、速度和中性面高度等参数进行了对比分析，只能说明该软件在同类场景下能够基本反映现实火灾的发展情况。对于其他的不同场景，还需进行更广泛的确认研究。

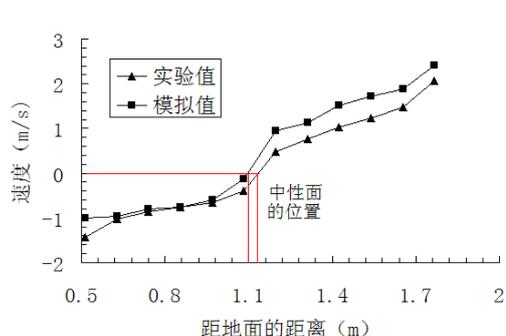


图3 窗户中间位置的速度分布

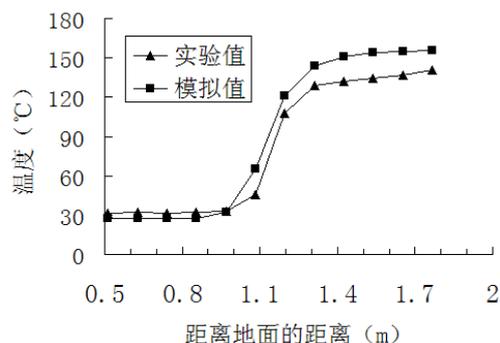


图4 窗户中间位置的温度分布

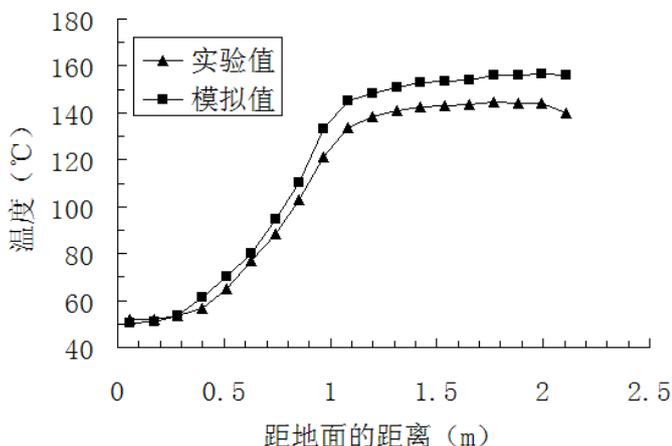


图5 房间角落处的温度分布

5 结语

随着火灾数值模型在消防工程中的广泛应用，火灾模型可信度研究愈显重要，采用数值模拟解决工程问题时，只有选择合适的火灾模型，才能得到合理、可信的结果。对于火灾数值模型的确认和验证及应用选择提出如下建议：

1) 利用火灾模型进行数值分析前，应着重考虑该模型对所模拟问题的适用性及预测能力，一般情况下，需要事先利用相关试验（已有其他人员进行的试验或自己进行相关试验）对模型进行确认研究。

2) 火灾模型的验证和确认应包含其对各类火灾参数的预测能力研究，如火场温度、热辐射通量、反应产物的浓度变化（着重研究 CO、CO₂、烟密度等）、火场能见度等。

3) 对于通用的 CFD 软件, 如 PHOENICS、FLUENT、CFX 等, 由于其发展比较成熟, 其程序一般能够比较准确的反应其所确立的概念模型, 因此, 对这类模型可以着重于确认研究; 对于专用火灾模拟软件, 如 FDS 等, 已经进行了较多的确认和验证工作, 对于比较常见的火灾场景, 如建筑室内火灾等, 可以直接用来模拟分析, 而对一些特殊的场景, 如火灾在狭长双层玻璃幕墙内的蔓延模拟, 还需进行进一步确认研究; 对于自行编制的火灾模型, 模型的验证工作是至关重要的, 应确保程序能够准确反映概念模型。

4) 火灾发展具有确定性和随机性的特点, 火灾试验的影响因素较多, 在选择确认试验时, 应尽量选择可重复性强的试验, 并应注重采用不同火灾场景下的火灾试验对其进行确认研究, 以便于更好的检验模型的可信度。

参考文献

- [1].李万平.计算流体力学[M].武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [2].邓小刚, 宗文刚, 张来平等.计算流体力学中的验证与确认[J].力学进展, 2007, 37(2): 279-288.
- [3]. 晋文, 齐静, 张伟捷.基于建筑热环境数值模拟的优化设计[J].河北工程大学学报, 2008, 25(4): 61-64.
- [4].王瑞利, 林忠, 袁国兴.科学计算程序的验证和确认[J].北京理工大学学报, 2010, 30(3): 353-356.
- [5].ISO 16730. Fire Safety Engineering — Assessment, verification and validation of calculation methods[S], 2006.
- [6].高智.壁判据用于计算流体力学(CFD)可信度评估[J].空气动力学报, 2008, 26(3): 378-393.
- [7].杨振虎.CFD程序验证的虚构解方法及其边界精度匹配问题[J].航空计算技术, 2007, 37(6): 6-9.
- [8].Randall McDermott, Kevin McGrattan, Simo Hostikka. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification[R]. 2009
- [9].Randall McDermott, Kevin McGrattan, Simo Hostikka. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: validation [R]. 2009.

——本文发表于2013年第1期《河北工程大学学报》