

数值模拟技术 在火灾调查中的应用

徐晓楠 著

SHUZHI MONI
JISHU

ZAI HUOZAI DIAOCHAZHONG
DE YINGYONG



化学工业出版社

数值模拟技术在火灾 调查中的应用

徐晓楠 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

发生火灾后利用技术手段对火灾进行重构,再现火灾场景,认定火灾原因,明确事故责任,对国家安全、社会稳定、相关法律法规的制定和同类灾害的防止均具有重要的意义,是未来火灾调查研究发展的必然趋势。本书介绍了火灾数值重构技术领域的技术发展现状,阐述了火灾数值重构技术的场模拟理论基础,深入全面地介绍了火灾数值重构技术的火灾模型、壁面热蚀痕迹的数值重构、壁面烟熏图痕的数值重构、石膏材料受热脱水痕迹的数值重构以及基于数值重构技术的实际火灾过程再现等。

本书可作为高等学校消防工程、火灾调查及相关专业学生的教学用书,也可作为消防部队从事火灾调查人员的学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

数值模拟技术在火灾调查中的应用 / 徐晓楠著.

北京: 化学工业出版社, 2014.9

ISBN 978-7-122-21289-4

I. ①数… II. ①徐… III. ①数值模拟—应用—火灾—调查 IV. ①TU998.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 153673 号

责任编辑: 杜进祥

文字编辑: 向 东

责任校对: 边 涛

装帧设计: 孙远博

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 15½ 字数 280 千字 2014 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 56.00 元

版权所有 违者必究

前言 FOREWORD

火灾事故是人类社会生活中经常遇到的多种灾害之一。为了有效地防止和减少火灾的发生,就要查清火灾原因,研究火灾发生和发展的规律,制订切实有效的防火措施,提高人们的防火意识。火灾调查工作是消防工作中的一项基础性工作,是探索火灾规律的一项基础研究,是遏制火灾发生的有效手段。火灾案件的多样性和复杂性,以及公民法制意识的不断提高,依法维护自身合法权益不受侵害的意识不断增强,对火灾调查工作提出了越来越高的要求。

本书针对火灾调查工作的实际需求,利用理论分析和数值模拟技术对火灾调查中数值重构技术的应用若干问题进行了研究。主要包括利用层次分析法及量纲分析法研究了影响火灾图痕的影响因素及其影响程度,据此构建了壁面热蚀痕迹、壁面烟熏图痕及石膏材料受热脱水痕迹的数学模型,分别编制了基于 FDS 场模型,能考虑壁面热蚀痕迹、壁面烟熏图痕/及石膏材料受热脱水痕迹的数值模拟软件。通过设计实体试验,分别改变燃烧时间、起火点、燃料种类等多种工况,进行 PVC 装饰板、防火板和石膏板的实体试验。介绍了利用开发的仿真软件对某酒吧火灾事故和某居民楼较大火灾事故进行的数值重构过程,验证了壁面热蚀痕迹和壁面烟熏图痕数值重构技术在实际火灾场景中的有效性及实用价值。

本书是笔者长期从事科学研究工作的积累和结晶,并在本科、研究生教学工作中不断提升和完善,是将火灾理论、火灾调查技术及计算机仿真技术不同学科交叉结合的创新成果。在本书撰写过程中,得到中国人民武装警察部队学院郭子东副教授、李胜利副教授和研究生韩娜、吴迪、施照成、余莹莹等同学的大力协助,在此向他们表示衷心的感谢。

在本书的出版过程中,获得了中国人民武装警察部队学院科研基金对本书的资助,深表感谢。

本书可作为消防相关专业学生的教学用书,也可作为消防部队从事火灾调查人员学习用书。由于水平所限,不妥之处在所难免,敬请读者和有关专家批评指正。

徐晓楠

2014 年 5 月

目录 CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 火灾调查研究的发展	1
1.1.2 火灾重构的研究方法	6
1.2 火灾数值重构技术的国内外研究现状	10
1.3 火灾数值重构研究的目的和意义	11
参考文献	11
第2章 火灾的发生与蔓延	13
2.1 人类对燃烧的认识过程	13
2.2 火灾的发生	14
2.2.1 燃烧的基本条件	15
2.2.2 着火方式	15
2.3 火灾的蔓延	16
2.3.1 热传导	16
2.3.2 热对流	16
2.3.3 热辐射	17
2.3.4 建筑物内火灾蔓延	18
参考文献	20
第3章 火灾的性质和行为	21
3.1 基本燃烧形式	21
3.1.1 有焰燃烧	21
3.1.2 炽热燃烧	22
3.1.3 爆炸式燃烧	23
3.2 火羽	24
3.2.1 羽流现象	24
3.2.2 火焰概念与特征	24

3.3 烟气的产生和蔓延	25
3.3.1 烟气的产生	25
3.3.2 烟气的蔓延	26
参考文献	30
第4章 基于场模拟的火灾数值重构方法的数学模型和数值方法	31
4.1 湍流模型	32
4.1.1 基本的守恒方程组	32
4.1.2 低马赫数假设	33
4.1.3 扩散项	34
4.1.4 动量方程的处理	34
4.1.5 泊松方程	35
4.1.6 大涡模拟	36
4.2 燃烧模型	36
4.3 辐射换热模型	38
4.4 固相模型	40
4.4.1 组分平均热属性	41
4.4.2 源项	41
4.4.3 边界条件	43
参考文献	44
第5章 壁面热蚀痕迹的预测模型	45
5.1 火灾图痕	45
5.1.1 概念	45
5.1.2 火灾痕迹的产生	45
5.1.3 火灾痕迹的作用	46
5.1.4 研究进展	47
5.1.5 壁面热蚀痕迹概述	48
5.2 壁面热蚀痕迹形成的理论分析	48
5.2.1 层次分析法概述	49
5.2.2 壁面热蚀痕迹形成的主要影响因素的确定	51
5.3 壁面热蚀痕迹预测模型的建立	53
5.3.1 量纲分析法	53
5.3.2 模型的建立	53
5.3.3 模型的实现	55

5.3.4 场景文件的编写	55
参考文献	58
第6章 PVC 塑料板壁面热蚀痕迹试验研究	59
6.1 PVC 塑料板热解特性研究	59
6.1.1 热重分析技术	59
6.1.2 试验目的	59
6.2 PVC 塑料板壁面热蚀痕迹试验	61
6.2.1 试验材料	61
6.2.2 试验方法	62
6.2.3 试验工况设定	62
参考文献	80
第7章 PVC 塑料板热蚀痕迹的数值重构	81
7.1 参数设置	81
7.2 热蚀痕迹重构结果分析	82
7.2.1 工况一重构结果分析	83
7.2.2 工况二重构结果分析	85
7.2.3 工况三重构结果分析	86
参考文献	89
第8章 壁面烟熏图痕的预测模型	90
8.1 壁面烟熏图痕概述	90
8.1.1 烟熏图痕的形成机理	92
8.1.2 “V”字形烟熏图痕	93
8.2 壁面烟熏图痕形成的理论分析	95
8.3 壁面烟熏图痕预测模型	95
8.3.1 量纲分析法	95
8.3.2 模型的建立	95
8.3.3 模型的实现	96
8.3.4 场景文件的编写	97
参考文献	100
第9章 防火板烟熏图痕的实体试验研究	101
9.1 试验装置设置	101
9.2 试验工况设定	102

9.2.1 工况一: 燃烧时间不同	102
9.2.2 工况二: 起火点不同	116
9.2.3 工况三: 燃料种类不同	123
参考文献	127
第 10 章 防火板烟熏图痕的数值重构	128
10.1 参数设置	128
10.2 烟熏图痕重构结果分析	130
10.2.1 工况一重构结果分析	130
10.2.2 工况二重构结果分析	132
10.2.3 工况三重构结果分析	134
参考文献	135
第 11 章 石膏材料受热痕迹的预测模型	136
11.1 火灾痕迹概述	136
11.2 石膏材料受热痕迹概述	137
11.3 纸面石膏板受热反应特性研究	137
11.3.1 石膏材料的热失重分析	137
11.3.2 石膏材料的锥形量热仪试验研究	140
11.4 石膏材料受热痕迹形成的理论分析	145
11.5 石膏材料受热痕迹预测的数学模型	148
11.5.1 模型的建立	148
11.5.2 痕迹边界阈值的确定	148
11.5.3 模型的实现	149
11.6 石膏材料受热痕迹重构的数值方法	150
11.6.1 时间离散	150
11.6.2 空间离散	151
11.6.3 方程离散	151
参考文献	154
第 12 章 石膏材料受热痕迹的实体试验研究	155
12.1 试验条件的设定	155
12.1.1 试验材料	155
12.1.2 试验装置	155
12.1.3 试验方法	155

12.1.4 燃料热释放速率计算	156
12.2 试验结果	157
12.2.1 工况一：油盘面积不同	157
12.2.2 工况二：受热时间不同	172
12.2.3 工况三：油盘与壁面相对位置不同	173
12.3 结果分析	174
12.3.1 油盘面积的影响	174
12.3.2 受热时间的影响	177
12.3.3 相对位置的影响	181
参考文献	183
第 13 章 石膏材料受热痕迹的数值重构	184
13.1 参数设置	184
13.2 石膏板受热痕迹数值重构结果分析	186
13.2.1 痕迹图片比对算法	186
13.2.2 工况一重构结果分析	187
13.2.3 工况二重构结果分析	193
13.2.4 工况三重构结果分析	198
参考文献	202
第 14 章 基于数值重构技术的火灾过程再现	203
14.1 某酒吧特大火灾场景的数值重构	203
14.1.1 火灾基本情况	203
14.1.2 火灾场景设置	205
14.1.3 数值重构结果及分析	206
14.2 某居民楼火灾重构	218
14.2.1 居民楼火灾危险性	218
14.2.2 某居民楼火灾重构	221
参考文献	235

第 1 章 绪 论

本章从火灾调查法律法规的发展和技术的两个方面介绍了火灾调查工作的进展，重点介绍了火灾重构的研究方法和国内外研究现状，指出了火灾数值重构研究的目的和意义。

1.1 研究背景

1.1.1 火灾调查研究的发展

火灾事故是人类社会生活中经常遇到的多种灾害之一。如同水灾、风灾、旱灾、地震一样，火灾事故危害面广，发生频率居各种灾害的前列，给人类造成生命和财产的直接损失约为地震的 5 倍，是人类社会安全环境的主要威胁。

为了有效地防止和减少火灾的发生，就要查清火灾原因，研究火灾发生和发展的规律，制订切实有效的防火措施，提高人们的防火意识。火灾调查是新兴的边缘交叉科学，主要包括火灾起火原因调查、火灾调查询问与讯问技术、火灾现场勘验理论与实践、火灾痕迹物证技术鉴定、火场图像记录、火灾损失核定、火灾责任认定与处理、专项火灾调查、火灾成因调查、勘验仪器研发、火灾调查处理法规、火灾刑事案件办理等内容。火灾调查工作是消防工作中的一项基础性工作，是探索火灾规律的一项基础研究，是遏制火灾发生的有效手段。火灾调查兼具政策性、法律性、技术性和时效性，而其技术性也是整个消防工作中要求最高的。火灾调查的目的就是要调查、认定火灾原因，核定火灾损失，查明火灾事故责任，依法处理责任者，并总结消防工作中的经验教训，提出预防对策，减少或避免同类火灾事故重复发生。火灾案件的多样性和复杂性，以及公民法制意识的不断提高，依法维护自身合法权益不受侵害的意识不断增强，对火灾调查工作提出了越来越高的要求。

1.1.1.1 火灾调查法律法规的发展

新中国成立以来火灾事故调查工作可分成两个阶段。第一个阶段是从新中国成立到 1998 年，其标志为两部不同时期的“消防条例”。经第一届全国人民代表大会常务委员会第八十六次会议批准，国务院总理周恩来于 1957 年 11 月 30

日签署国务院令 第 78 号, 公布并实施我国第一个《消防监督条例》, 明确规定消防监督工作由各级公安机关实施, 在城市专职的消防队伍由市人民委员会负责建立, 列入公安机关编制, 所需经费由市人民委员会预算开支。因此, 火灾事故调查工作是在各级公安机关的统一组织下实施的。十一届三中全会以后, 经第六届全国人民代表大会常务委员会第五次会议批准, 1984 年 5 月 13 日国务院公布的《中华人民共和国消防条例》第三条明确规定: “消防工作由公安机关实施监督”。在第二十六条第(九)款明确规定: 消防监督机构有“组织调查火灾原因”的职权, 而将“掌握火灾情况, 进行火灾统计”作为该条第(六)款单独列出。也就是说, 在 20 世纪后期的近五十年中, 我国火灾事故调查主要是立足于调查火灾事故原因, 其工作是在公安机关统一领导下实施的, 消防机构作为主要的调查力量, 与公安机关其他警种协同作战, 较好地承担了火灾事故调查工作, 出现的矛盾和问题不是太突出。(第二阶段)从 1998 年开始, 其标志为第九届全国人民代表大会常务委员会第二次会议通过并于 1998 年 9 月 1 日起施行的《中华人民共和国消防法》(以下简称《消防法》)。《消防法》的实施把 1984 年 5 月 13 日国务院公布的《中华人民共和国消防条例》提高到法律的层面, 第三条规定: “国务院公安部门对全国的消防工作实施监督管理, 县级以上地方各级人民政府公安机关对本行政区域内的消防工作实施监督管理, 并由本级人民政府公安机关消防机构负责实施。”第三十九条规定: “火灾扑灭后, 公安消防机构有权根据需要封闭火灾现场, 负责调查、认定火灾原因, 核定火灾损失, 查明火灾事故责任。”相应地, 1999 年 3 月 15 日实施的《火灾事故调查规定》(中华人民共和国公安部令第 37 号, 以下简称《37 号令》)以部门规章的形式对火灾事故调查工作设计的火灾原因认定、财产损失核定、火灾事故责任认定等内容作了进一步细化。第三条明确规定: “火灾事故调查的主要任务是调查、认定火灾原因, 核定火灾损失, 查明火灾事故责任。”据此, 我国火灾事故调查就由原来的主要围绕火灾事故原因调查, 变成目前包括认定火灾原因、核定火灾损失、查明火灾责任事故的三大任务, 而且只能由公安机关消防机构实施(法律另有规定除外)。这样, 《消防法》和《37 号令》分别从法律和部门规章的角度配套规范了火灾事故调查行为, 使我国火灾事故调查工作初步纳入了法制化的轨道, 使全国统一了火灾事故调查分工管辖, 统一了火灾事故调查工作内容, 统一了火灾事故调查方法, 从根本上改变了新中国成立以来我国事故调查仅靠文件指导工作的局面。

中华人民共和国第十一届全国人民代表大会常务委员会第五次会议于 2008 年 10 月 28 日修订通过的《中华人民共和国消防法》, 自 2009 年 5 月 1 日起施行, 其中第五十一条规定: “公安机关消防机构有权根据需要封闭火灾现场, 负责调查火灾原因, 统计火灾损失。火灾扑灭后, 发生火灾的单位和相关人员应当按照

公安机关消防机构的要求保护现场,接受事故调查,如实提供与火灾有关的情况。公安机关消防机构根据火灾现场勘验、调查情况和有关的检验、鉴定意见,及时制作火灾事故认定书,作为处理火灾事故的证据。”据此,《火灾事故调查规定》(公安部108号令)进行了修订,并于2009年5月1日起施行。其中第三条“火灾事故调查的任务是调查火灾原因,统计火灾损失,依法对火灾事故作出处理,总结火灾教训。”

《火灾事故调查规定》(简称《规定》)于2009年4月30日以中华人民共和国公安部令第108号令公布,该《规定》分总则、管辖、简易程序、一般程序、火灾事故调查处理、附则6章48条,自2009年5月1日起施行。根据2012年7月17日中华人民共和国公安部令第121号公布的《公安部关于修改〈火灾事故调查规定〉的决定》(简称《121号令》)修订,1999年3月15日发布施行的《火灾事故调查规定》(公安部令第37号)和2008年3月18日发布施行的《火灾事故调查规定修正案》(公安部令第100号)予以废止。

修订的《消防法》、《121号令》出台后,对火灾调查工作任务带来的主要变化包括三个方面。一是变火灾损失核定为火灾损失统计。火灾损失核定具有确认性质,应当看作是一种行政确认行为,尽管我们过去并不认同这个观点,但火灾损失的数额的确是由消防部门经过计算得出并由当事人签字确认的,无论从形式上还是实质上都具有法律效力。事实上在过去多数涉及火灾的民事赔偿案件中都是以消防部门核定的火灾损失结果作为赔偿依据的,这就使得消防部门的这种核定存在着较大的诉讼风险,而这种风险要由消防部门独自承担,从目前的现实来看显然是不合理的。火灾损失统计的含义则是对火灾损失结果的数字收集行为,不具有任何的民事诉讼效力,从而避免了因火灾损失数额的多少而引发的不必要的纠纷。二是取消了过去责任划分方式。原《消防法》明确规定要查明火灾事故责任,公安部《37号令》将火灾事故责任划分为四种即直接责任、间接责任、直接领导责任和领导责任,这种责任划分方式原本是为处理火灾事故责任者做出的定性,而在实践中往往成了人民法院审理火灾民事赔偿案件的前提和主要依据。有的法院常常因为消防部门没有做出火灾事故责任认定而拒绝受理,即使在受理的案件中,因为直接和间接的概念与民法中的表述不一致,经常围绕着间接责任应当承担多大的民事赔偿责任而产生纠葛,实际操作起来比较困难。三是对消防部门做出的火灾事故认定书的法律地位进行了定性,仅作为处理火灾的证据使用。这一规定明确了火灾事故认定书具有行政不可诉性,也就是当事人对消防部门做出的火灾事故认定书不服的,不能向人民法院提起行政诉讼,从而解决了长期困扰各级消防部门的一大难题。

1.1.1.2 火灾调查技术的发展

目前,火灾调查基本上使用经验、半经验的方法,主要包括调查询问、现场勘验、技术鉴定和模拟试验四个方面。调查询问是一项涉及面广、时间性强、要求严格的工作,其目的是为现场勘验提供线索,为分析判断案情提供证据。现场勘验是指火灾调查人员依法使用科学的手段和调查研究的方法对火灾现场、痕迹、物品、尸体等进行的挖掘、搜索、观察、检验、记录等方面的专门工作,可以查明火灾的发生过程,核查火灾的损失,发现和提取火灾的痕迹物证。技术鉴定是指针对某些疑难问题请相关专业人士做出科学判断的鉴定结论。在火灾调查中,技术鉴定的证明力高于其他一般书证、视听资料和证人证言,对认定结果起着重要乃至决定性的影响。模拟试验是火灾调查的手段之一,根据火灾事故调查规定,公安消防机构对复杂疑难的火灾事故可以进行模拟试验。模拟试验是仿照实际情况用试验的方法对实际情况进行描述。火灾调查中的模拟试验,是在现场或实验室内用试验方法来描述事故的激发条件,以验证或核实起火点及事故原因,以及研究事故蔓延扩大的情况。也就是说,为了证明在一定条件下能否发生某一事件,按照调查火灾原因时推断的一种或几种情况进行模拟试验。模拟试验必须与火场条件相一致,如果多次试验的结果相差较大,应反复试验;对于一些特殊的情况需要在现场进行模拟试验时,要注意必须在现场勘查完成且确认现场无保存必要后进行。

近年来,随着火灾形势的日益严峻,火灾原因的复杂和多样,特别是公民法制意识的提高,依法维护自身合法权益的意识不断增强,因火灾事故诱发的申请重新认定和上访案件逐年增多。火灾事故原因、责任认定和损失核定,成为火灾事故纠纷、诉讼的依据和争执的焦点,已经是摆在各级公安消防机构面前的难题。因此对火灾调查工作的要求在不断地提高^[1],火灾调查工作也正处于由经验认定向技术认定转变的时期。现代火灾调查中常用的技术侦察手段有火灾物证化学分析法、热分析法、气相色谱分析法、原子光谱分析法、分子光谱法、核磁共振法、质谱法、金相分析法等。

美国国家标准和技术协会(NIST)在2001年曾指出:“火灾调查是社会发展中急需解决的问题,建立严格的科学体系的需求已十分迫切^[2]。”美国检验与材料协会(ASTM)自1990年以来,先后制定了火灾痕迹物质分析的系列指导性技术文件(ASTM E)和标准(E1387、E1618),对需要采样的物质、采样方法、采样仪器等进行了规定^[3]。美国国家火灾调查协会(NAFI)采用录像的方法,对十种典型室内火灾过程进行了全尺度试验,研究分析天花板、墙壁以及地板上火灾发生后的痕迹,以确定火源位置和火灾类型^[4]。美国烟酒和火器局(BATF)、火灾行政管理局(FA)、NIST以及一些私企曾发起火灾调查者培训计划,利用影像

资料和计算机模拟结果对从事火灾调查的人员进行培训^[5]。Mc Curdy 等人利用气相紫外线光谱鉴定事故现场是否有速燃助燃物质成分——石油产品中的芳香类碳氢物质或二甲苯同分异构体组分,从而判断是否为人为纵火^[6]。法国 Touron 等人使用毛细气相色谱 CPG、GC-MS 和 HNU 光化学电离分析仪,探测现场可能存在的 $C_1 \sim C_{40}$ 碳氢组分,借助分析策略使火灾痕迹物质的分析半自动化,判断火灾是否为人为事故^[7]。中国台湾 Chen 等人通过研究金属熔化部位的离子质谱仪 SIMS 测定曲线,分析电气短路火灾行为^[8]。日本学者 Eui -Pyeong Lee 等人采用 X 射线色散分析和电子扫描显微镜,对火灾发生后电气线路上的碳化残余物质结构进行分析,研究证明了短路引起的火灾其碳化物结构为石墨化碳和非晶碳,而非火源电线上的碳化物仅包含非晶碳^[9]。中国人民武装警察部队学院的刘义祥等人模拟火场条件将 3 mm 和 5 mm 厚的窗玻璃在不同温度下加热 10 min 和 30 min,分别用直流水和喷雾水射水冷却,研究了普通高温玻璃遇水炸裂痕迹的形成机理和特征^[10]。北京消防局的王荣辉等人运用 GC-MS 对 90#和 93#两种普通汽油进行检测,并应用 KNN 方法对其进行分类,结果表明,将模式识别方法正确地运用到助燃剂鉴定和分类工作中有助于火灾调查^[11]。中国科学技术大学的姜蓬采用和改进了人际交互式图像分割算法 (Live-wire),对电气火灾中的典型火烧金相图和一次短路金相图进行处理,结合数字形态学操作,有效地区分了两类晶格结构,并采用聚类分析和 Fisher 判别法,实现了对两类金相图的自动分类^[12]。支有冉等人将贝叶斯网络引用到火灾调查领域,以助燃剂纵火案的火灾调查分析案例为例,分析了纵火案件中的原因事件和结果事件以及各个因素之间的相互影响关系,根据火灾发生过程建立了贝叶斯网络模型,同时通过贝叶斯算法对火灾调查贝叶斯网络的计算方法进行了研究分析,分析了贝叶斯结构图中涉及的火灾发生因素概率值的数据来源^[13]。火灾科学国家重点实验室的蒋勇等人根据目前火灾科学研究的现状,提出了建立火灾调查理论框架的构想,详细讨论了建立火灾调查理论框架的科学根据,同时探讨了火灾调查理论研究中包含的关键科学问题^[14]。

由以上国内外研究现状可以看出,各国已对火灾调查研究给予了充分的重视,火灾调查水平不断发展,科技含量大幅提高,在火灾原因认定中大量使用红外光谱仪、顶空装置和气相色谱仪等各种设备。但火灾调查尚未形成较为完整的、严格的理论体系,由于火灾过程的极度复杂性、多变性和不确定性,使得火灾调查研究的开展极为困难,有限的研究仍是分散的,局限性较强;火灾现场勘验对痕迹物证的采信仍主要停留在原始的“眼看、手摸、鼻闻”的经验阶段,缺少科学的数据和技术鉴定手段,往往难以让人信服,而且不同的火灾调查人员可能对同一火灾现场做出不尽相同的结论;火灾调查人员“轻证据、重口供”,有可能使火灾调查工作陷入僵局,因此将实践与理论结合,在实践的基础上,从理论

的角度入手，建立科学高效的火灾调查平台，灾后利用技术手段对火灾进行重构，完善火灾调查体系，具有极重要的意义^[15]。

1.1.2 火灾重构的研究方法

火灾重构是依据科学方法重现火灾场景，确定火灾最真实的发生发展过程，重构火灾从点燃到熄灭的过程，研究火焰和烟气的蔓延过程、燃料在火灾中的作用、通风情况的影响因素、熄灭状况、建筑结构性能、人员伤亡等火灾现象^[16]。

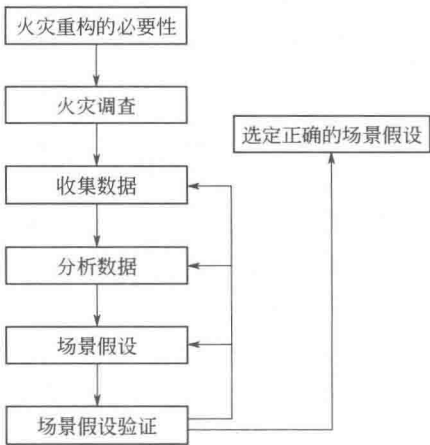


图 1-1 火灾重构流程

火灾重构流程如图 1-1 所示。

火灾科学的模拟研究是探索火灾确定性规律的重要手段。目前，模拟火灾发生发展过程的方法主要有三种，即计算机模拟、试验模拟以及VR 模拟。试验模拟是指在几何、物理或化学条件等方面引入近似的一类试验，通过部分或完整的再现演化火灾现象过程，依靠先进的测量手段测定火灾典型可燃物和参数分布及其随时间的变化。近几十年来，

随着火灾科学研究的逐步深入以及计算机科学的飞速发展，计算机模拟成为火灾科学研究中的重要手段之一。火灾试验研究往往耗费资源巨大，试验周期长。而计算机研究能够很好地解决这一问题。通过对燃烧和流动等过程进行计算机模拟来研究火灾，大大降低了研究成本，缩短了研究周期。计算机模拟还能进行一些试验难以实现的研究内容。火灾过程计算机模拟具有众多优点，在火灾研究中发挥着重要作用。VR 模拟是利用计算机数据库和图像学的各种编写软件，设计和建立各种火灾场景和模拟模块，生成各种不同火灾现场的二维、三维图像。

1.1.2.1 数值模拟方法的发展

计算机模拟的核心是火灾模型，火灾模型是由火灾各分过程子模型在特定的模拟平台上融合而成的。运用数学模型计算火灾的发展过程是认识火灾特点和开展有关消防安全水平分析的重要手段。20 世纪 60 年代，日本东京理科大学的川越邦雄（Kawagoe）教授等人对单个房间火灾过程进行了系统研究，提出了一种简化的室内火灾单层区域模型，自此开创了对火灾发生发展过程进行数值模拟的先河^[17]。此后随着计算机的快速发展，火灾数值模拟得到了迅速发展。美国哈佛大学的埃蒙斯（Emonse）教授等人在发展火灾数值模拟方面做出了突出贡献。自 80 年代初起，他领导的研究组发展了一系列的火灾模型，通称 HARVARD 系列模型，其中有的模型可描述单个房间的火灾发展，有的可描述多个房间的随时间

变化的火灾。此后,其他科研人员也陆续开发出若干独具特色的火灾模型。近几十年来,火灾过程的数值模拟一直是火灾科学基础研究的前沿,并逐渐成为定量分析建筑物火灾发展特征的重要工具。

鉴于实际火灾过程的复杂性,目前的数值模拟是多层次、多种类的,根据所模拟的现象、研究层次和应用的火灾模型的不同,可将火灾过程的数值模拟分为以下五个类型。

(1) 专家系统 (expert system) 专家系统又称经验模拟,其主要思想是将试验研究的一些经验性模型或是将一些经过简化处理的半经验模型加上重要的热物性数据编制成软件,以供一些从事消防事业的非研究人员使用。多年来人们与火灾作斗争的过程中,收集了很多实际火场的资料,也开展过大量的火灾试验,测得了很多数据,通过分析,整理出了不少关于火灾分过程的经验公式。经验模型是指以试验测定的数据和经验为基础,通过将试验研究的一些经验性模型或是将一些经过简化处理的半经验模型加上重要的热物性数据编制的数学模型。经验模拟是对火灾过程的较浅层次的数值模拟,可以对火灾的主要分过程有比较清楚的了解。经验模型不同于其他理论模型能够对火源空间以及关联空间的火灾发展过程进行估计,现有的经验模型通常局限于描述火源空间的一些特征物理参数,如烟气温、度、浓度、热流密度等随时间的变化,因此经常被称为“局部模型”。常用的经验模型有 NIST (美国标准与技术研究院) 开发的 FPETOOL 模型、计算烟羽流温度的 Alpert 模型 和计算火焰长度的 Hasemi 模型^[18]。

(2) 区域模拟 (zone model) 区域模拟源于受限空间火灾发展过程中呈现内部物理特征(温度、浓度)相对均匀的烟气层分布现象,它将所研究的受限空间划分为不同的区域,并假设每个区域内的状态参数是均匀一致的,而质量、能量的交换只发生在区域与区域之间、区域与边界之间以及它们与火源之间^[19]。从这一思想出发,根据各物理量之间的相互关系及质量、能量守恒原理导出一组常微分控制方程,从而预测火灾状态参数(如压力、温度、体积等)随时间的变化情况。1983年,Quintere 基于区域模型的论点,采用合理的数学、物理假设,建立起描述室内火灾发展过程数学模型。此后,区域模拟获得了极大发展,以 CFAST、ASET、BR12、CCFM-VENTS、CFIRE-X、COMPBRN、HARVARD MARD4 和中国科学技术大学的 FAC3 等为典型代表。目前,区域模型在模拟建筑室内火灾中具有重要地位。如果无需了解各种物理量在空间上的详细分布以及随时间的演化过程,模型中的假设十分趋近于火灾过程的实际情况,可以满足工程需要。但是区域模拟忽略了区域内部的运动过程,不能反映湍流等输送过程以及流场参数的变化,只抓住了火灾的宏观特征,因而其近似结果也是比较粗糙的^[20],对于几何形状复杂、强火源或强通风的房间,其误差较大,以至于失去真实性^[21]。

(3) 网络模拟 (network model) 网络模拟是把整个建筑物作为一个系统, 而其中每个受限空间视为一个单元体 (或称网络节点), 各个单元体通过各种开口空气流通路径连接, 利用质量、能量等守恒方程对系统内的空气流动、压力分布和烟气传播情况进行研究^[19]。美国、英国、加拿大、日本、荷兰等国家对网络模型的研究和开发起步较早, 且已发展到较为成熟的阶段。目前常用的网络模型主要有日本的 BRI、加拿大的 IRC、英国的 BRE、美国的 ASCOS 以及荷兰的 TNO。网络模型主要应用于受限空间数目较多、边界条件复杂 (如高层建筑、井巷网络) 的火灾研究, 由于假设了烟气与空气的流动特性相似, 空气与烟气混合均匀, 因此仅适用于远离火场的区域^[20]。

✓(4) 场模拟 (field model) 随着计算流体力学 (CFD-Computational Fluid Dynamics) 技术的成熟以及计算机性能的提升, 场模拟被逐渐应用到火灾研究领域。火灾的场模拟研究是利用计算机求解火灾过程中各参数 (如速度、温度、组分浓度等) 的空间分布及其随时间的变化, 是一种物理模拟。场是多种状态参数 (如速度、温度与组分浓度) 的空间分布, 是通过计算这些状态参数的空间分布随着时间的变化来描述火灾发展过程的数学方程集合。场模型本质上是一种复杂的湍流力学模型, 其理论基础是质量守恒定律 (连续性方程)、动量守恒定律 (Navier-Stokes 方程)、能量守恒定律 (能量方程) 以及 化学反应定律 等。利用数值计算方法将计算区域划分为大量的、互相关联的小单元, 根据上述定律在每个单元中构造各个单元内部及单元之间相互关联的方程组, 求解质量方程、动量方程和能量方程, 包括热浮升力、热辐射和扰动等。

自从 1983 年 Kumar 首先建立火灾场模拟以来, 出现了很多场模拟的大型通用商业软件和火灾专用软件。通用商业软件以 PHOENICS、FLUENT、CFX、STAR-CD 等为代表, 都具有非常友好的用户界面形式和方便的前后处理系统。用于火灾数值模拟的专用软件有瑞典 Lund 大学的 SOFIE、美国 NIST 开发的 FDS 和英国的 JASMINE 等。

场模拟的特点是针对性强, 可以得到比较详细的物理量的时空分布, 能精确地体现火灾现象。但由于场模拟是通过把一个房间划分为几千甚至上万个控制体, 计算得出室内各局部空间的有关参数的变化。计算时通常所使用的场模拟方法有有限差分法、有限元法、边界元法等, 导致这种模型的计算量很大, 当用三维不定常方式计算多室火灾时, 需要占用很长的机时, 一般只在需要了解某些参数的详细分布时才使用这种模型。

(5) 混合模拟 (hybrid model) 所谓混合模拟, 即将场、区、网模拟理论结合, 对强火源或强通风的区域采用场模拟, 对其邻近的区域采用区域模拟, 而对相隔较远的区域采用网络模拟。这种思想率先由中国科学技术大学火灾科学国