

# 煤矿生产仿真技术及 在安全培训中的应用

黄力波 张顺堂 著

MEIKUANG SHENGCHAN FANGZHEN JISHU JI  
ZAI ANQUAN PEIXUNZHONG DE YINGYONG



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 煤矿生产仿真技术及 在安全培训中的应用

黄力波 张顺堂 著

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2012

## 内 容 提 要

本书采用矿山实际数据,进行场景建模,运用八叉树原理对场景图进行组织管理,借助建模软件构建三维实体模型和人体模型,通过纹理映射、细节等级技术、光照、雾化等渲染方法对模型进行真实感处理,完成了系统三维引擎的设计,实现了场景的加载、实体模型的动态导入、碰撞检测和实时漫游,在此基础上,介绍了根据矿山安全培训的特点,提出“问答板”这一交互手段及其应用。

本书不仅可供高等学校、安全研究院所、矿山及其他危险性行业的计算机仿真教学与安全培训参考使用,还可供本科院校、计算机专业人员和矿山技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

煤矿生产仿真技术及在安全培训中的应用/黄力波,  
张顺堂著. —北京:冶金工业出版社, 2012. 3

ISBN 978-7-5024-5880-5

I. ①煤… II. ①黄… ②张… III. ①煤矿开采—  
仿真 IV. ①TD82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 032628 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5880-5

三河市双峰印刷装订有限公司印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销  
2012 年 3 月第 1 版, 2012 年 3 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 5 印张; 121 千字; 147 页

20.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

近几年来，虚拟现实（VR，Virtual Reality）技术成为一项十分热门的技术，越来越多的人投身到这个研究领域，致力于虚拟现实技术的研究、开发及应用推广。虚拟现实技术（简称VR），又称灵境技术，是以沉浸性、交互性和构想性为基本特征的计算机高级人机界面。它综合利用了计算机图形学、仿真技术、多媒体技术、人工智能技术、计算机网络技术、并行处理技术和多传感器技术，模拟人的视觉、听觉、触觉等感觉器官功能，使人能够沉浸在计算机生成的虚拟境界中，并能够通过语言、手势等自然的方式与之进行实时交互，创建了一种适人化的多维信息空间，具有广阔的应用前景。虚拟现实技术、理论分析和科学实验已成为人类探索客观世界规律的三大手段。据权威人士断言，虚拟现实技术将是21世纪信息技术的代表，由此可见其重要性。

美国是VR技术的发源地。美国VR研究技术的水平基本上就代表国际VR的发展水平。目前美国在该领域的基础研究主要集中在感知、用户界面、后台软件和硬件四个方面。例如，在网游领域，3D技术的发展，动作捕捉和头部追踪技术的结合将会给游戏的交互带来全新的机遇。专家表示，玩家可以在游戏中使用自己的双手创造全新的物体并加以修饰。与此同时游戏中电脑AI的发展将会使游戏角色更具交互性。当游戏中角色不仅可以和玩家进行直接对话，而是更多的展示自己的思想并进行交互影响的时候，游戏体验会比好莱坞电影更耐人寻味。展望未来5年虚拟现实将与人类更加贴近，给予虚拟现实的服务项目日趋多元化。而在虚拟现实的应用领域，基于互联网的

应用将爆发前所未有的爆发力。而虚拟现实融合语音智能将为虚拟现实的网络平台插上飞翔的翅膀。

总之，虚拟现实就是改变了我们的观念，从以前的“以计算机为中心”变为“人是信息技术的主体”；改进了人机交互方式，由过去人机之间枯燥、被动的方式变成了人通过手动和声音等自然的交互方式与机器交流，人机融为一体；改变了人们生活与娱乐的方式。尤其是云计算的出现，更是助推了虚拟现实技术的发展。

我国虚拟现实技术的水平离人们心目中追求的目标尚有较大的距离，与国外虚拟现实技术也存在较大的差距，因此该项技术需要我们进一步研究、开发及完善。

我国 VR 技术研究起步较晚，与工业发达国家还有一定的差距，但现在已引起国家有关部门和科学家们的高度重视，并根据我国的国情，制定了开展 VR 技术的研究计划。九五规划、国家自然科学基金委、国家高技术研究发展计划等都把 VR 列入研究项目。

国内的一些重点院校，已积极投入到了这一领域的研究工作。北京航空航天大学计算机系是国内最早进行 VR 研究、最有权威的单位之一，着重研究了虚拟环境中物体物理特性的表示与处理，实现了分布式虚拟环境网络设计，虚拟现实应用系统的开发平台等。浙江大学开发出了一套桌面型虚拟建筑环境实时漫游系统，在虚拟环境中还研制出了一种新的快速漫游算法和一种递进网格的快速生成算法。哈尔滨工业大学已经成功虚拟出了人的高级行为中特定人脸图像的合成、表情的合成和唇动合成等技术问题。

虚拟现实技术在我国近些年发展极为迅速，被广泛地应用在城市规划、教育培训、文物保护、医疗、房地产、互联网、勘探测绘、生产制造、军事航天等数十个重要的行业，全世界

的目光都聚焦于虚拟现实技术在中国的蓬勃发展。流行一时的网络游戏，实质上也是虚拟现实技术的一种简单应用。最近，中国首款虚拟现实游戏射日精英也已经横空出世。

基于以上几个原因，我们觉得有必要在高等教育中增加有关虚拟现实技术的教学内容，吸引更多的人去了解它、关注它、研究它、应用它，以推动我国虚拟现实技术的发展。目前虚拟现实技术的应用面较广，涉及军事、航空、教育、建筑、医学、工业、文化、艺术与娱乐等领域。本书在编写中主要侧重于虚拟现实技术的应用，在书中介绍虚拟现实技术的基本概念、虚拟现实系统的硬件设备、虚拟现实中的相关技术，还介绍了基于实用的几个桌面虚拟现实工具软件，而有关虚拟现实技术的理论如建模方法、优化、压缩算法及程序等内容可参阅其他有关资料。

全书共分7章，主要内容为：

第1章 主要介绍虚拟现实技术在各领域中的应用及国内外虚拟现实在矿山安全中的研究动态，以及主要内容及结论。

第2章 主要对虚拟现实技术的关键技术及其构成，对虚拟现实的生成设备、虚拟世界的感知设备等方面做了简要介绍，并对虚拟现实的关键性技术做了比较详细的分析，对本项研究的核心内容做了进一步引述。

第3章 简单扼要地介绍了冒顶事故、透水事故、粉尘和瓦斯事故产生的原理、预防措施及注意事项，其中还对粉尘的分类、特性，以及粉尘灾害的形式作了介绍。为构建虚拟现实，提供原型。

第4章 从发生结构学结构主义、复杂适应系统理论和人工智能理论角度论述了虚拟矿井生产系统演化建模研究的理论基础；提出虚拟矿井生产系统演化模型的内涵、研究目的与目标；研究了虚拟矿井生产系统仿真原理与建模过程、虚拟矿井

生产系统的演化建模方法,提出了基于主体的虚拟矿井生产系统演化建模方法;设计了虚拟矿井生产系统演化模型体系结构,总结了虚拟矿井生产系统模型的组合层次,给出了虚拟矿井生产系统模型间的信息控制关系。

第5章 主要内容为确定系统设计要实现的目标,选择合理的系统开发环境,并根据虚拟现实系统自身的特点,对系统进行功能模块划分,包括内存管理模块、资源管理模块、数学基础模块、场景管理模块、输入控制模块、图形渲染模块、物理模块、声音处理模块、人工智能模块等,在此基础上做出总体设计。

第6章 主要内容为矿山安全培训系统模型的构建,从场景建模和实体建模两个方面做了详细的分析,重点介绍环境建模技术、实时三维图形绘制技术、三维虚拟声音的显示技术、面向自然的交互与传感技术,模型真实感处理技术,虚拟人物的运动控制方法等,是基于虚拟现实安全培训系统的主体构件。

第7章 主要内容为开发介绍矿山安全培训系统的实现方法,对系统的初始化、场景加载、模型动态导入以及碰撞检测进行了具体的说明,然后,针对该VR系统人机交互问题进行论述,提出了实时漫游和多通道化的实现方法,并针对矿山培训的特性提出并实现了“问答板”这一交互手段。

本书在编写过程中注重实用性,在内容方面力求做到全面而系统,使读者能通过此书了解VR技术的实现方法与现实应用。

高德华、张代芹为本书的出版做了大量辅助工作,在此表示诚挚的感谢!

由于当前虚拟现实技术发展迅速,加之作者水平有限,时间仓促,书中错漏之处,恳请读者批评指正。

黄力波 张顺堂

2011年12月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 矿山生产安全与虚拟现实技术 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	5
1.2.1 国外虚拟现实技术在矿山安全研究的 应用现状 .....	5
1.2.2 国内虚拟现实技术在矿山安全研究的 应用现状 .....	7
1.3 本书的主要内容 .....	8
<b>2 虚拟现实技术</b> .....	11
2.1 虚拟现实技术概述 .....	12
2.2 虚拟现实的构成 .....	14
2.2.1 沉浸性 .....	17
2.2.2 交互性 .....	18
2.2.3 想象性 .....	19
2.2.4 实物虚化 .....	21
2.2.5 虚物实化 .....	23
2.2.6 高性能计算处理技术 .....	24
2.2.7 分布式虚拟现实 .....	25
2.3 虚拟现实技术的分类 .....	25
2.3.1 沉浸式 VR 系统 .....	26
2.3.2 桌面式 VR 系统 .....	27



2.3.3	增强式 VR 系统	28
2.3.4	分布式 VR 系统	29
2.3.5	虚拟现实技术的应用	32
2.4	虚拟现实的关键技术	32
2.4.1	实物虚化	32
2.4.2	虚物实化	34
2.4.3	高性能计算处理	36
2.5	虚拟现实系统的构成和分类	37
<b>3</b>	<b>煤矿系统四种灾情的介绍</b>	<b>40</b>
3.1	冒顶事故	40
3.1.1	冒顶事故发生的原因	40
3.1.2	防止冒顶事故产生的措施	41
3.2	透水事故	41
3.2.1	透水事故原理	41
3.2.2	透水事故发生时的注意事项及自救措施	42
3.3	煤矿粉尘(矿尘)事故	44
3.3.1	基本概念和理论概述	44
3.3.2	矿尘分类	44
3.3.3	矿尘的特性	45
3.3.4	矿尘灾害的形式	46
3.4	瓦斯爆炸事故	47
<b>4</b>	<b>虚拟矿井生产系统建模研究</b>	<b>50</b>
4.1	研究的理论基础	50
4.1.1	发生学结构主义	51
4.1.2	复杂适应系统(CAS)理论	56

4.1.3 人工智能 (AI) 理论 .....	60
4.2 模型的内涵、研究目的与目标 .....	64
4.2.1 内涵 .....	64
4.2.2 研究目的 .....	64
4.2.3 研究目标 .....	65
4.3 建模的方法 .....	65
4.3.1 仿真原理与建模过程 .....	66
4.3.2 演化建模方法 .....	69
4.4 演化模型的体系设计 .....	73
4.4.1 模型的体系结构 .....	73
4.4.2 模型的组合层次 .....	75
4.4.3 模型间的信息控制关系 .....	76
<b>5 基于虚拟现实的矿山安全培训系统总体设计 .....</b>	<b>78</b>
5.1 系统定位 .....	78
5.2 系统设计原则 .....	79
5.3 系统使用平台 .....	80
5.3.1 软件平台 .....	80
5.3.2 硬件平台 .....	81
5.4 系统模块设计 .....	81
<b>6 矿山安全培训系统模型的构建 .....</b>	<b>84</b>
6.1 三维建模基础知识 .....	84
6.1.1 视景生成过程 .....	84
6.1.2 视景的决定条件 .....	85
6.1.3 三维建模的内容 .....	86
6.2 场景模型的构建 .....	89

6.2.1	场景建模方法	89
6.2.2	场景管理	92
6.2.3	巷道建模	94
6.3	实体模型的构建	100
6.3.1	实体建模软件	100
6.3.2	模型构建实例	101
6.4	模型真实感处理	104
6.4.1	纹理映射	104
6.4.2	细节等级技术	104
6.4.3	光照和着色	105
6.4.4	雾化效果	106
6.5	虚拟人物的运动控制方法的实现	108
6.5.1	虚拟人物特点与模型的建立	109
6.5.2	虚拟人物运动控制实现的基本原理和方法	112
6.5.3	虚拟人物仿真软件 DIGUY 的应用	113
6.5.4	虚拟矿工动作库的建立过程	117
7	矿山安全培训系统的实现和人机交互	120
7.1	矿山安全培训系统的实现	120
7.1.1	三维引擎的设计	120
7.1.2	场景数据的载入	121
7.1.3	实体模型的动态导入	122
7.1.4	碰撞检测	124
7.2	矿山安全培训系统的人机交互	125
7.2.1	巷道实时漫游	125
7.2.2	多通道的实现	126
7.2.3	问答板的提出与实现	126

7.3 矿井漫游功能分析与实现 .....	130
7.3.1 矿井漫游流程图 .....	130
7.3.2 矿井漫游用例图 .....	132
7.3.3 大巷漫游功能实现 .....	136
7.3.4 工作面漫游功能实现 .....	137
<b>参考文献</b> .....	<b>139</b>

# 1 绪 论

## 1.1 矿山生产安全与虚拟现实技术

安全生产是我国矿业持续、稳定、健康发展的重要保证。随着社会经济的发展,安全生产越来越突显其重要地位和作用。根据《国家安全生产科技发展规划》(煤矿及非煤矿领域研究报告)<sup>[1]</sup>,我国矿业安全形势依然严峻,事故呈上升趋势。

我国“十五”时期全国平均每年煤矿百万吨煤死亡 3.93 人,2004 年为 3.08 人,2005 年为 2.836 人,2010 年为 0.749 人。就 2005 年而言,我国煤炭产量约占全球的 37%,事故死亡人数则占近 80%,煤矿百万吨死亡率约为美国的 70 倍、南非的 17 倍、波兰的 10 倍、俄罗斯和印度的 7 倍。严峻的安全生产状况不仅严重威胁着人民群众生命安全和健康,也影响到社会和谐及国际形象。我国是世界上煤矿伤亡事故发生最频繁的国家。就安全事故而言,“十五”时期全国煤矿共发生一次死亡 3~9 人,重大事故 1398 起,平均每年发生 280 起,占全国各类重大事故起数的 11%;发生一次死亡 10~29 人特大事故 214 起,平均每年发生 43 起,占全国各类特大事故起数的 36%;发生一次死亡 30 人以上特别重大事故 42 起,平均每年发生 8 起,占全国各类特别重大事故起数的 58%。“2004 年全国煤矿事故死亡人数总共为 6027 人,2005 年全国煤矿事故死亡人数总数为 5986 人。这些惊人的数字,真实地反映了我国目前煤炭企业严峻的安全状况,敲响了安全警钟。”国家安监总局公布的统计数据显

示, 2010 年全国各类生产事故死亡 79552 人, 同比减少 3648 人, 下降 4.4%。而照此计算, 平均每天事故死亡 218 人, 伤亡数字依然庞大。2010 年与 2005 年相比, 煤矿事故死亡人数由 5986 人减少到 2433 人, 下降 59%。见图 1-1。

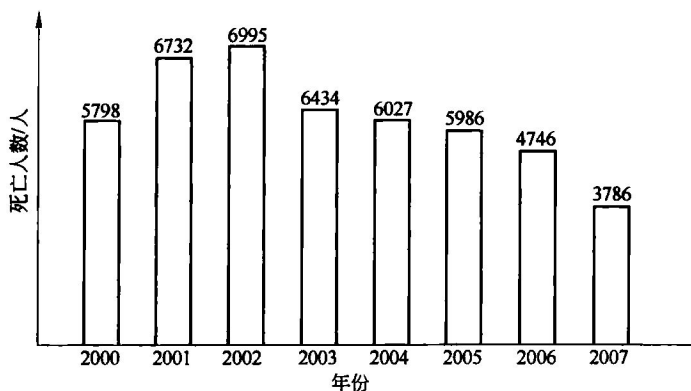


图 1-1 2000 ~ 2007 年死亡人数分布图

2010 年相比 2005 年重特大事故起数由 58 起减少到 24 起, 下降 58.6%; 煤矿百万吨死亡率由 2.836 下降到 0.749, 下降 73%。见图 1-2。

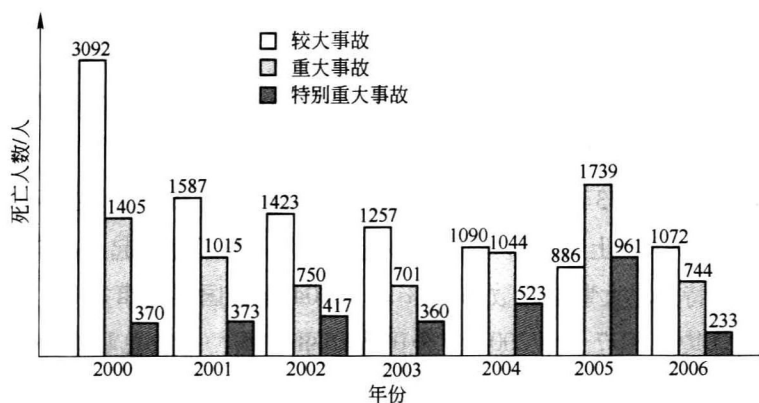


图 1-2 2000 ~ 2006 年重特大事故死亡人数分布图

2010 年统计显示, 尽管我国年度煤矿事故死亡人数呈逐年下降趋势, 但事故死亡人数却占全世界煤矿死亡总人数的 70% 左右。2010 年全国煤矿百万吨死亡率 0.749 人, 与世界主要产煤国仍然有较大差距, 美国、波兰、南非等主要产煤国的煤炭百万吨死亡率都已经下降到 0.1% 以下。变化趋势见图 1-3。

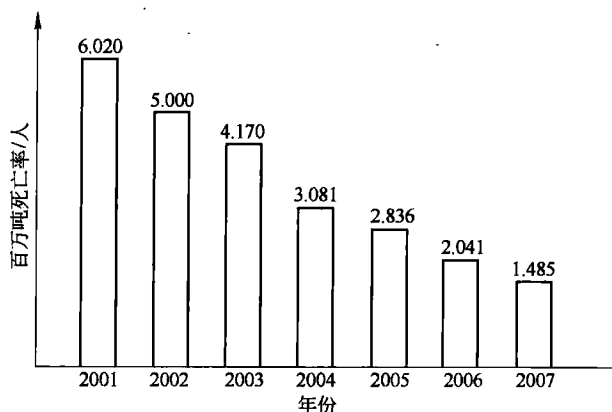


图 1-3 2001 ~ 2007 年煤矿百万吨死亡率分布图

安全生产成为社会广泛关注的焦点, 职工的安全培训每年都列入矿山的重要议事日程, 且都下达详尽的培训计划及有关考核办法。矿山投入了大量的人力、物力、财力, 一是提高安全生产的硬件保证水平, 靠新技术、新装备提高安全保证程度; 二是加强职工的安全培训, 人是矿山安全生产的核心要素。

传统的安全培训方法一般为由教师系统讲授煤矿安全技术知识, 采用的手段主要为录像、实验、幻灯片等现代化教学方法。这些方法在使职工了解、掌握煤矿安全技术基础知识起了很大的作用, 但是录像与幻灯只能使学员有一个很抽象的印象, 由于煤矿事故, 如顶板事故, 瓦斯、煤尘爆炸, 火灾等不可能用实验来实现, 只能看一些录像, 学员无法获得在事故现场经历事故的感觉, 而且没有交互能力, 学员只能被动地接受, 教学

手段单一，多是填鸭式的教学。

矿山师资力量匮乏，教学手段单一，多是填鸭式的教学；外聘教员对煤矿的具体生产流程缺乏了解，使得安全培训与实践脱节；另外，矿山职工的总体受教育水平偏低，文化水平的差异和岗位责任的差异往往使得现场经验丰富而文化水平低的职工考试不及格，相反，有一些职工考试成绩好，但现场工作经验不足，造成安全隐患。受到这诸多条件的制约，使得矿山的安全培训常处于职工厌学，老师厌教，死记硬背，应付过关，最终使得培训流于形式，达不到培训的目的。由此可见，传统的安全培训形式已经落后于现在安全生产的需要。为此，需要一种生产与实践结合，寓教于乐，并能够使职工身临其境的安全生产培训系统，便可收到事半功倍的效果。

要提高矿山安全系统设计水平、安全管理水平，提高矿山工作人员的安全意识，最大可能地减少事故、最大限度地缩小事故危害，建立完善的矿山安全培训系统是重要措施之一。

煤矿安全培训不仅要保证煤矿工人通过培训了解煤矿生产安全规程，熟悉井下工作环境，而且更要注重培养煤矿工人在遇到紧急的危险情况时，能采取正确的自救措施，并果断而准确地选择逃生路线。而这些都必须在安全培训时不断地反复训练。但煤矿工作环境不允许在培训时现场再现一些危险场景。因此要做到现场逃生反应训练，在传统煤矿安全培训中是绝对不可能的。因此现有的煤矿安全培训只能进行一些安全教育，不是常规意义上的安全培训，很难收到应有的效果。

寻找切实有效的安全培训方法，一直是矿山安全培训科研工作者及煤矿管理者追求的目标。虚拟现实技术恰好为矿山安全培训和矿山安全科研提供了理想的辅助平台。虚拟现实的仿真系统创造出的矿山生产环境，尤其是综采面具有逼真、交互



作用的特点，非常适合于矿工的技术培训和安全教育。仿真系统不仅可以模拟矿山常规作业环境，而且可以模拟矿山的突发事件环境。矿工们可以在模拟的常规作业环境中接受技术培训，这种培训可以使受训者能够迅速理解和掌握那些在书面资料上很难理解的内容，操作方法的学习、工作技巧的掌握等也变得非常简单和容易。另外矿工们还可以在模拟的突发事件场景中寻找解决方法，并作为安全经验积累下来，这将有助于矿山的安全生产，既可以降低培训费用，又可缩短教学时间。综上所述，开发一套基于虚拟现实的矿山安全培训系统是十分必要的。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外虚拟现实技术在矿山安全研究的应用现状

目前，虚拟现实技术在国外安全领域已有大量研究和应用，用以加强安全系统设计、安全教育培训，进行事故调查、诊断和研究、安全评价，应急预案演练等，以达到减少安全事故的目的。

美国矿业通过采用计算机仿真模拟、虚拟现实技术，预测采矿过程中由于操作失误、控制系统故障或设备故障等非正常原因导致的危险事故，以及故障在流程中传播的不利后果，并将采矿工艺和安全控制融合在一起，发挥各自的长处，这样就增强了对安全隐患的预见性，大幅度减少煤矿挖掘中的意外险情，同时还可以设定干扰，以确定最佳的安全控制方案和救援预案。通过将符号定向图法（SDG）引入危险与可操作性分析（HAZOP），美国在计算机辅助安全评价方面做出了积极的探索，实现了计算机辅助安全评价技术的飞跃。例如，普渡大学智能过程系统实验室开发完成了 HAZOP Expert 软件，经过在多项石