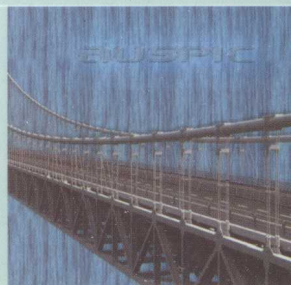


AUSPIC

结构工程虚拟现实 可视化仿真方法及其应用

魏 群 谢晓尧 张国新 著
王 颖 魏鲁双 孙 凯



中国建筑工业出版社

JIEGUGONGCHENG
XUNXIANSI
KESHIHUAFAFANGZHENFANGFA
JIQIYINGYONG

TU3/83D

2009

结构工程虚拟现实可视化 仿真方法及其应用

魏 群 谢晓尧 张国新 著
王 颖 魏鲁双 孙 凯

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

结构工程虚拟现实可视化仿真方法及其应用/魏群等著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2010
ISBN 978-7-112-11876-2

I. 结… II. 魏… III. ①结构工程-虚拟技术②结构工程-可视化
仿真 IV. TU3-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第037546号

责任编辑: 郑淮兵 王 鹏
责任设计: 赵明霞
责任校对: 陈晶晶 赵 颖

**结构工程虚拟现实可视化
仿真方法及其应用**

魏 群 谢晓尧 张国新 著
王 颖 魏鲁双 孙 凯

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京嘉泰利德公司制版
北京方嘉彩色印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20 字数: 488 千字
2009年12月第一版 2009年12月第一次印刷
定价: 98.00元(含光盘)
ISBN 978-7-112-11876-2

(19132)

版权所有 翻印必究
如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

前 言

随着计算机系统硬件的快速发展及软件计算能力和范围的扩大,所得出的丰富的计算结果,必须更直观、更准确和更及时地反映出来,单纯以计算数据,表格和简单曲线的平面表示方法已远远不能适应人们对复杂过程和结果分析的需要,于是三维可视化动态仿真系统便应运而生,尤其在设计、计算与控制方面。在结构工程领域,利用先进的计算机技术、图形技术、网络技术、虚拟现实技术和专业标准规范相结合,开展结构工程的可视化仿真应用。本书就是为了结构工程可视化仿真技术的应用提供理论、手段和方法以及方案的一本书。

可视化仿真(Visual Simulation)是计算机可视化技术和系统仿真技术结合的产物,这一新型的手段,它把复杂工程规划、设计及与施工过程等复杂的空间 n 维数据(几何位置、形状、边界条件、时间、温度、应力、应变材料特性、外部影响)结合起来,计算机输入和计算过程拟人化和形象化,采用直观和客观的计算机图形显示技术实时、准确和形象地表达计算过程中的变化和最终成果,通过灵活的人机交互处理方式,可以驾驭整个分析处理过程,容易发现隐藏于数据中的科学规律,领会复杂数据间的空间关系,实现附加价值(例如工程项目范围的数据综合化,改善对三维图形的理解,可充分进行模拟预演,减少工程重复设计,增加工程的可靠性和各个环节的联合作用)。

全书共分两部分9个章节以及两个附录内容,第一部分主要内容主要介绍可视化仿真的基本理论、手段和方法,包括可视化仿真的概述、可视化仿真的图形与方法、结构工程的建模技术、结构CAD图形转化为虚拟现实文件的方法、CAD图形转化为3DS MAX的方法。第二部分主要介绍作者团队在工程结构可视化仿真的应用与研究成果,包括坝陵河特大钢桁桥梁可视化三维建模技术及工程详图、北盘江特大桥梁仿真分析与虚拟现实模型及施工过程可视化、矮寨特大钢构桥梁的工程动画制作、落脚河水电站仿真分析与虚拟现实模型及施工过程可视化。

本书由魏群、谢晓尧、张国新、王颖、魏鲁双、孙凯编著,研究生王镇岳、王宁波、王亮、赵乙轲、赵贺来、姬广坤参加了研究工作并进行了部分章节的编写,全书由魏群教授统稿。

本书中的资料来源于华北水利水电学院钢结构与工程研究所、河南奥斯派克科技有限公司、中科院研究生院、贵州师范大学、中国水科院结构所的科研成果,在此感谢上述单位的工作人员。

本书得到国家自然科学基金(50749030)、水利部公益性行业科研专项(200801007)、“十一五”国家科技支撑计划(2006BAC14B06)、郑州市科技创新团队(096SYJH210810)、西部交通建设科技项目坝陵河特大桥梁建设关键技术研究子课题、郑州市钢结构工程技术研究中心的资金资助。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥和疏漏之处,热诚欢迎读者批评指正。

目 录

第一部分 可视化仿真的基本理论、手段和方法

第 1 章 可视化仿真的概述	2
1.1 可视化仿真的基本概念	2
1.2 可视化仿真的基本手段和方法	4
1.3 可视化仿真的数据库与网络技术	8
1.4 基于物理模型的计算机动画技术	10
1.5 结构工程可视化仿真技术发展及现状	12
第 2 章 可视化仿真的图形与方法	16
2.1 面向对象技术的概念与方法	16
2.2 面向对象的图形方法	21
2.3 AutoCAD 图形单元的基本分类与数据结构	25
2.4 AutoCAD 开发环境与应用	30
2.5 3D 引擎介绍	36
第 3 章 结构工程的建模技术	42
3.1 常用结构材料图形数据库	42
3.2 三维空间建模技术	54
3.3 结构构件制作加工的图形拓扑技术	58
3.4 构件图形的数据存取方法	63
第 4 章 结构 CAD 图形转化为虚拟现实文件的方法	72
4.1 虚拟现实文件 VRML 的格式与语法	72
4.2 虚拟现实文件 VRML 功能与特点	79
4.3 CAD 图形转化为 VRML 的一般方法	82
4.4 虚拟现实文件的逆向读取数据与图形域	90
第 5 章 CAD 图形转化为 3DS MAX 的方法	92
5.1 CAD 图形与 3DS MAX 图形的一般转换	92
5.2 3DS MAX 中 MAXScript 脚本语言的语法基础	95

5.3	MAXScript 操作场景对象	110
5.4	MAXScript 语言在模拟结构工程中的编程应用	134

第二部分 可视化仿真的应用实例

第 6 章	应用实例一——坝陵河特大钢桁桥梁可视化三维建模技术及工程详图	138
6.1	坝陵河特大桥工程概况	138
6.2	钢桁桥梁结构建模技术细节	139
6.3	钢桁架桥梁的结构设计与图形处理技术	144
6.4	三维结构图形转化为二维工程图的处理技术	150
6.5	三维模型与有限元结构计算的结合与成果分析	157
6.6	三维模型的信息存贮与数据库的连结技术	179
6.7	坝陵河特大大桥桥梁的仿真可视化分析	185
第 7 章	应用实例二——北盘江特大桥梁仿真分析与 虚拟现实模型及施工过程可视化	191
7.1	北盘江特大钢桁架桥梁工程概述	191
7.2	北盘江大桥的虚拟现实模型介绍	195
7.3	钢构桥梁运输吊装过程中安全检测的图形分析	209
第 8 章	应用实例三——矮寨特大钢构桥梁的工程动画制作	214
8.1	矮寨特大钢桁桥梁概况	214
8.2	矮寨特大钢桁桥梁的 CAD 模型制作	216
8.3	矮寨特大钢桁梁悬索桥 3DSMAX 模型制作	220
8.4	矮寨特大钢构桥梁施工过程的动画制作方案	236
8.5	矮寨特大钢桁桥梁工程动画合成过程	261
8.6	工程动画的应用效果	264
第 9 章	应用实例四——落脚河水电站仿真分析与 虚拟现实模型及施工过程可视化	267
9.1	落脚河水电站工程概况	267
9.2	落脚河水电站的虚拟现实模型介绍	268
9.3	落脚河水电站施工过程的可视化仿真分析	279
附录		286

第一部分

可视化仿真的基本理论、手段和方法

第 1 章 可视化仿真的概述

1.1 可视化仿真的基本概念

可视化仿真 (Visual Simulation, VS) 是计算机可视化技术和系统建模技术相结合后形成的一种新型仿真技术,其实质是采用图形或图像的方式对仿真计算过程进行跟踪、驾驭和对结果的后处理,同时实现仿真软件界面的可视化,具有迅速、高效、直观、形象的建模特点。在使用可视化技术后,系统的子模块便采用形象的图形来表示,并可通过鼠标在屏幕上直观形象的操作,就可以完成整个仿真任务。

可视化仿真中“可视化”的含义主要由两项技术构成:

科学计算可视化——将科学计算(仿真计算)中产生的数据及结果转换为图形或图象的技术。

图形用户界面——采用图形方式显示的计算机操作用户接口技术。

可视化仿真技术发展到今天已经不局限于当初那种仅能处理单调的二维空间图形,新的计算机技术如信息高速公路、多媒体技术、虚拟现实技术、地理信息系统已经融合其中成为现代可视化仿真技术的应用基础。需要特别提出的是虚拟现实技术已经成为可视化仿真一个热门发展方向。

1.1.1 科学计算可视化

1986 年 10 月,美国国家科学基金会主办了一次名为“图形学、图像处理及工作站专题讨论”的会议,旨在针对那些开展高级科学计算工作研究结构,提出关于图形硬件和软件采购方面的建议。图形学和影像学技术方法在科学计算方面的应用,当时乃是一项新的领域,上述专题组成员将该领域称为“科学计算之中的可视化”(Visualization in Scientific Computing, ViSC)。

科学计算,又称为计算机仿真,是指计算机程序或计算机网络试图对于特定系统模型的模拟。对于许许多多系统的数学建模来说,计算机模拟都已经成为有效实用的组成部分。比如,这些系统包括物理学、计算物理学、化学以及生物学领域的天然系统;经济学、心理学以及社会科学领域的人类系统。在工程设计过程以及新技术当中,计算机模拟旨在深入认识和理解这些系统的运行情况或者观察它们的行为表现。对某一系统同时进行可视化与模拟的过程,称为科学计算可视化(图 1-1)。

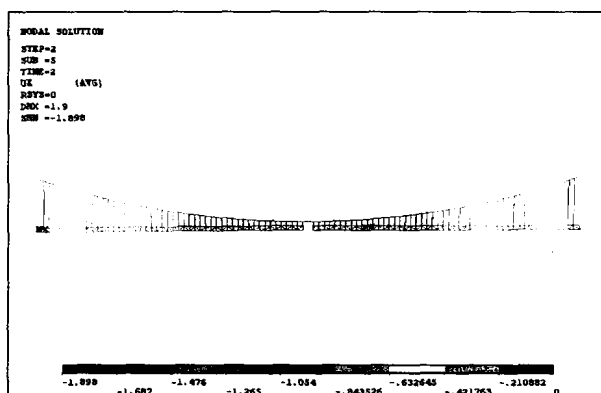


图 1-1 结构工程应力应变的可视化图形

1.1.2 图形用户界面

图形用户界面（Graphical User Interface，简称 GUI，又称图形用户接口）是指采用图形方式显示的计算机操作用户接口。与早期计算机使用的命令行界面相比，图形界面对于用户来说在视觉上更易于接受。在图形用户界面中，计算机画面上显示窗口、图标、按钮等图形，这些图形表示不同目的的动作，用户通过鼠标等指针设备进行选换、交互。

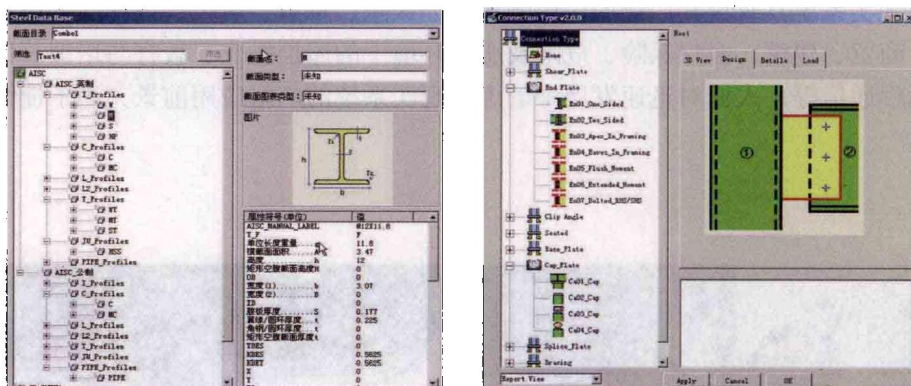


图 1-2 可视化交互系统图形用户界面

1.1.3 虚拟现实

虚拟现实，或虚拟实境（Virtual Reality），简称 VR 技术，也称灵境技术或人工环境，是利用电脑模拟产生一个三维空间的虚拟世界，提供给使用者关于视觉、听觉、触觉等感官的模拟，让使用者如同身临其境一般，可以及时、无限制地观察三维空间内的事物。使用者进行位置移动时，电脑可以立即进行复杂的运算，将精确的 3D 世界影像传回产生临场感。该技术集成了计算机图形（CG）技术、计算机仿真技术、人工智能、传感技术、显示技术、网络并行处理技术等的发展成果，是一种由计算机技术辅助生成的高技术模拟系统。

从技术的角度来说，虚拟现实系统具有下面三个基本特征：即三个“*I*” immersion—interaction—imagination（沉浸—交互—构想），它强调了在虚拟系统中的人的主导作用。从过去人只能从计算机系统的外部去观测处理的结果，到人能够沉浸到计算机系统所创建的环境中，从过去人只能通过键盘、鼠标与计算环境中的单维数字信息发生作用，到人能够用多种传感器与多维信息的环境发生交互作用；从过去的人只能以定量计算为主的结果中启发从而加深对事物的认识，到人有可能从定性和定量综合集成的环境中得到感知和理性的认识从而深化概念和萌发新意。

现在的大部分虚拟现实技术都是视觉体验，一般是通过电脑屏幕、特殊显示设备或立体显示设备获得的，不过一些仿真中还包含了其他的感觉得处理，比如从音响和耳机中获得声音效果。在一些高级的触觉系统中还包含了触觉信息，也叫做力反馈，在医学和游戏领

域有这样的应用。人们与虚拟环境相互要么通过使用标准装置，例如一套键盘与鼠标，要么通过仿真装置，例如一只有线手套，要么通过情景手臂和 / 或全方位踏车。虚拟环境是可以和现实世界类似的，例如，飞行仿真和作战训练，也可以和现实世界有明显差异，如虚拟现实游戏等。就目前的实际情况来说，它还很难形成一个高逼真的虚拟现实环境，这主要是技术上的限制造成的，这些限制来自计算机处理能力，图像分辨率和通信带宽。然而，随着时间的推移，处理器、图像和数据通信技术变得更加强大，并具有本效益，这些限制将最终被克服。

虚拟现实系统具有极其广泛的应用领域，如娱乐、军事、航天、设计、生产制造、信息管理、商贸、建筑、医疗保险、危险及恶劣环境下的遥控操作、教育与培训、信息可视化以及远程通信等，人们对迅速发展中的虚拟现实系统的广阔应用前景充满了憧憬与兴趣（图 1-3）。

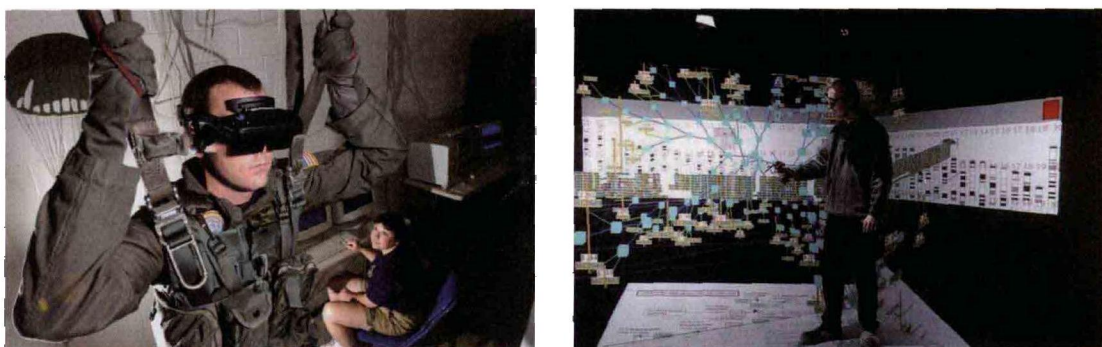


图 1-3 虚拟现实系统用户体验（摘自科技网）

1.2 可视化仿真的基本手段和方法

可视化仿真通常是基于可视化仿真开发平台之上，通过建模、渲染、交互设计等步骤来实现。目前常用的可视化仿真平台有以下几种：

1.2.1 基于 GIS 平台的可视化仿真

人们的生产和生活中 80% 以上的信息和地理空间位置有关。地理信息系统（Geographic Information System，简称 GIS）作为获取、整理、分析和管理地理空间数据的重要工具、技术和学科，近年来得到了广泛关注和迅猛发展。由于信息技术的发展，数字时代的来临，理论上来说，GIS 可以运用于现阶段任何行业。

地理信息系统由硬件、软件、数据、人员和方法五部分组成。硬件和软件为地理信息系统建设提供环境；数据是 GIS 的重要内容；方法为 GIS 建设提供解决方案；人员是系统建设中的关键和能动性因素，直接影响和协调其他几个组成部分。

GIS 与系统仿真的结合可发生在原始数据采集及仿真计算数据的可视化表达这两个阶段。一般两者的结合有两种方式：一种称为融合式（MeltingPot），这种集成方式尽管两者间数据传递方便高效，操作简便，但开发费用高，开发周期长；另一种集成方式是通过建立两者的扩展模块来实现彼此间数据相互交换和信息共享，此方式开发简便、费用低廉，而且由于两者的相对独立性及可扩散性，便于系统的维护及进一步开发。文中采用后一种方式，图 1-4 表示的是以 GIS 为核心的可视化仿真系统（VVS）开发模式。其中，图形库及其管理系统（GDBMS）和属性数据库及其管理系统（ADBMS）是由 GIS 软件系统开发的，模型库及其管理系统（MBMS）由 GIS 软件系统和其他软件系统共同开发及管理，方法库系统（MBS）主要由其他软件系统独立开发。不同平台间可通过 Windows 的 DDE 技术和调用动态链接库，或数据文件扩展接口，使应用模型与 GIS 系统之间实现彼此数据的交换和共享。

基于 GIS 开发的水利工程三维可视化辅助设计系统的效果如图 1-5 所示。

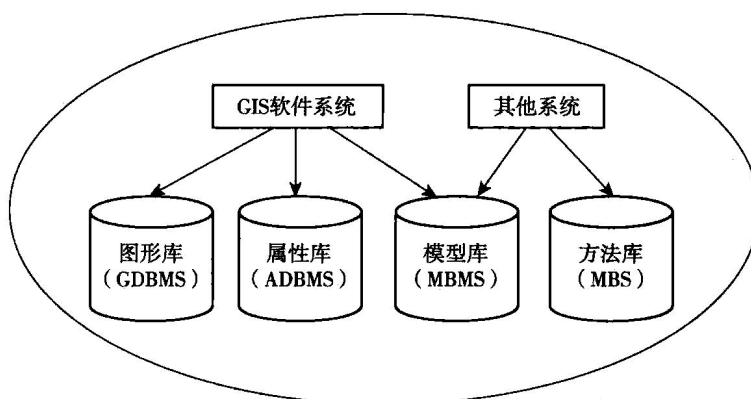


图 1-4 以 GIS 为核心的可视化仿真系统（VVS）开发模式

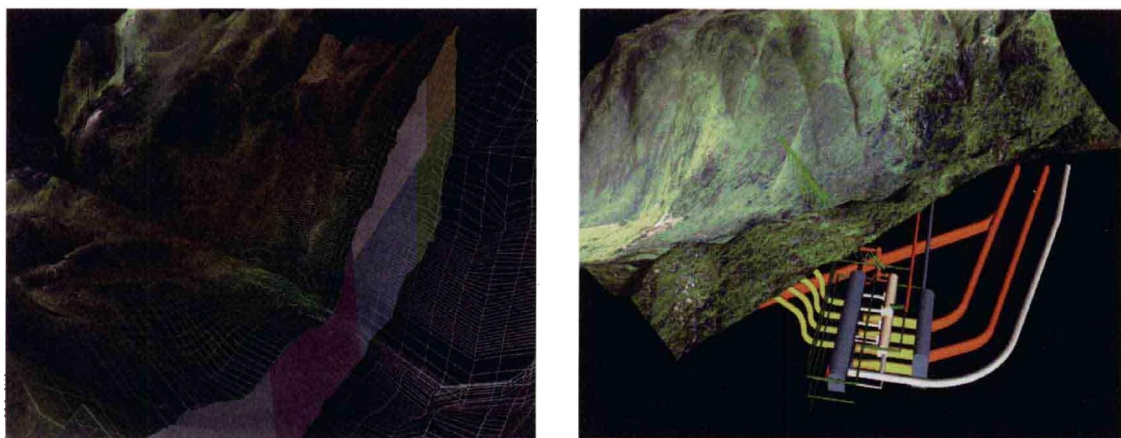


图 1-5 基于 GIS 开发的水利工程三维可视化辅助设计系统的效果图

1.2.2 基于 OpenGL 平台的可视化仿真

OpenGL (Open Graphics Library) 是个定义了一个跨编程语言、跨平台的编程接口的规格, 它用于生成二维、三维图像。这个接口由近 350 个不同的函数调用组成, 用来从简单的图元绘制负责的三维景象。而另一种编程接口系统是仅用于 Microsoft Windows 上的 Direct3D。OpenGL 应用领域十分广泛, 如军事、电视广播、CAD/CAM/CAE、娱乐、艺术造型、医疗影像、虚拟现实等。

OpenGL 自 1992 年出现以来, 逐渐发展完善, 已成为一个惟一开放的, 独立于应用平台的图形标准。OpenGL 具有可靠度高、可扩展、可伸缩、灵活、容易使用的特点。OpenGL 具有一套渲染、纹理贴图、特效和其他功能强大的显示函数, 从而促进了创新并加速了应用程序的开发。功能强大的 OpenGL 可以在所有流行的个人计算机和工作站平台上开发和使用, 确保了程序的广泛应用。

OpenGL 支持诸如点、线、多边形及图像等多种基本图元, 以及图形变换、光照计算等基本绘制操作, 也支持纹理映射、反走样等高级绘制功能。OpenGL 作为一个开放的三维图形软件包, 它独立于窗口系统和操作系统, 以它为基础开发的应用程序可以十分方便地在各种平台间移植, 并有使用简便、效率高的优点。OpenGL 的基本工作流程见图 1-6。

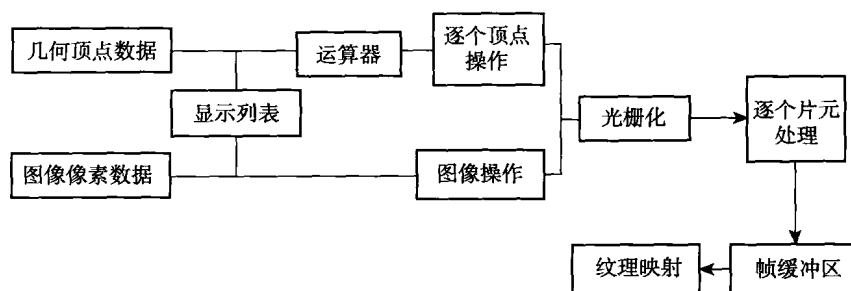


图 1-6 OpenGL 的基本工作流程

1.2.3 基于 Vega 平台的可视化仿真

Vega 是一种用于实时仿真与虚拟现实应用的高性能软件环境和开发平台。它将先进的模拟功能和易用工具相结合, 对于复杂的应用, 能够提供便捷的创建、编辑和驱动工具。Vega 能显著地提高工作效率, 同时大幅度减少源代码开发时间。

Vega 包含有一个图形化的用户界面 LynX, 和一系列基于 C 语言的函数库及 API。

LynX 用来定义和预览 Vega 应用程序, 最后生成用于 Vega 程序的 ADF (应用定义文件)。在 LynX 图形用户界面下, 可以容易地修改系统基本参数和特征, 使整个定义过程直观方便, 减少了大量代码的编写。函数库及 API 用于基于用户需求的进一步开发和控制, 实现复杂的人机交互。利用 Vega 类函数, 在 LynX 中建立漫游所必需的对象, 包括场景、窗口、通道、运动方式、观察者、碰撞方式等, 建立对象之间的相互联系。

使用 LynX 可以快速、容易、显著地改变应用性能、视频通道、多 CPU 分配、视点、观察者、特殊效果、一天中不同的时间、系统配置、模型、数据库及其他，而不用编写源代码。

当建模过程完成后，就可以导入到 Vega 中进行实时漫游的系统开发。建立 Vega 应用的 3 个必需的步骤是：

- (1) 初始化。初始化 Vega 系统并创建共享内存区以及信号量等。
- (2) 定义。通过 HKN 应用定义文件创建三维模型或是通过显式的函数调用来创建三维模型。
- (3) 配置。通过调用配置函数来完成配置，设置完 Vega 系统后，就开始了 Vega 应用的主循环，主循环的作用是对三维场景进行渲染驱动。对于给定的帧速进行帧同步，对当前的显示帧进行必要的处理。

1.2.4 基于 VRP 平台的可视化仿真

VR-Platform 三维互动仿真平台是由中视典数字科技独立开发的具有完全自主知识产权的一款三维虚拟现实平台软件，可广泛地应用于视景仿真、城市规划、室内设计、工业仿真、古迹复原、桥梁道路设计、军事模拟等行业。该软件适用性强、操作简单、功能强大、高度可视化、所见即所得，它的出现将给正在发展的 VR 产业注入新的活力。

基于 VRP 平台的系统开发的步骤基本有软硬件配置、原始资料采集、三维建模、光照渲染、实体烘焙、交互设计直至成品等几步。

需要强调的是其中三维建模常选择 3D 建模软件平台，如 AutoCAD、3DS MAX 等。采用这些软件可直接做出逼真的三维模型，特别是对于不规则体如路灯、楼房、道路、人体等，效果非常好（图 1-7）。



图 1-7 基于 VRP 平台开发的桥梁施工信息可视化系统

1.3 可视化仿真的数据库与网络技术

1.3.1 可视化仿真的数据库

数据库是一种存储数据并对数据进行操作的工具，是有结构的数据集合，其作用在于组织和表达信息，数据库就是信息的集合。例如，设计单位或施工单位常常会把某项工程的基本情况（标段、施工材料、施工人员、监理人员、施工进度等）存放在表中，这张表就可以看成是一个数据库。有了这个“数据仓库”我们就可以根据需要随时查询某段工程的基本情况，也可以查询各标段的施工人数等等。这些工作如果都能在计算机上自动进行，可有效避免资源的浪费，提高数据检索的效率，缩短信息传播时间。那我们的工程管理就可以达到极高的水平。

Access 是世界上最流行的桌面数据库管理系统，是 Office 系列应用软件之一。它不但提供了表、查询、窗体、报表、页、宏、模块 7 种用来建立数据库系统的对象，而且提供了多种向导、生成器、模板，把数据存储、数据查询、界面设计、报表生成等操作规范化，为建立功能完善的数据库管理系统提供了方便，也使得普通用户不必编写代码，就可以完成大部分数据管理的任务。

数据采集是实现结构工程的可视化仿真一项重要的任务。把有关结构工程的所有相关数据输入到数据库中，并将其属性数据与空间位置数据连接。数据的存储和管理主要通过数据库管理系统来完成。

空间数据库是客观世界的表达模型，它是将表示结构工程中专题数据统一的空间定位载体的地形等基础空间信息，以结构文件形式组成的集合。可以认为，本系统数据库是分布的、专用的数据库系统中数据的中央仓库，数据库中的数据采用统一的模式进行集成，它包含多种数据类型和数据组织方式。

1) 空间数据库的数据类型

(1) 基础地形数据。基础地形数据是地形的三维数字形式，采用多要素数字化图，按内容对图形要素进行分层。

(2) 基础图形数据。利用开放式通用剖面数据图形库产生的各种结构模型，例如永久建筑物、临时建筑物、钢结构等。

(3) 基础属性数据。包括所有与图形相关的属性信息，如大坝某浇筑块的高程、浇筑时间、当前浇筑强度、结构应力情况等。

2) 数据的组织方式

(1) 数据的物理分层。库中实体采取分层存储，空间实体数据按空间实体的几何特征和属性特征进行分层，以便使同一物理层中存储的空间实体数具有相同的数据文件格式，如水面和溢洪道由于其几何特征不同（分别为面对象和体对象）而存储于不同的数据层中。这种分层存储的数据库结构不仅有利于数据的存储和应用，还有利于数据的共享和更新。

(2) 数据文件组织。数据库中的数据文件以图号为依据进行组织，图号既是文件名，也是文件的逻辑目录，元数据文件、数据体文件以及其他相关数据文件逻辑上全

部置于同一个文件逻辑目录下。这样，三维图与平面图的对比分析就变得方便了，如厂房的三维图和平面图可根据部分相同（一张三维图可对应多幅平面图）的图号方便地同时打开。

1.3.2 可视化仿真的网络技术

可视化仿真网络化，可使其具有快捷的查询与浏览能力，可实时显示信息、模拟实际状态、提供决策分析工具、完善统计和用户及权限管理等。特别适合当今世界的飞速发展，然而当前的一些交互式可视化仿真软件工具，不能直接用于分布式的网络仿真环境。必须另外编制网络接口程序，而且也不提供真实感的三维渲染，图形较粗糙。随着计算机图形技术和互联网技术的发展，基于网络的可视化技术（Web3D）已日趋成熟。

VRML（Virtual Reality Modeling Language）是最早制定的网络三维可视化技术国际标准，它是一种用于描述三维造型与交互环境的简单文本语言，是一种解释执行、实时建模着色的文本程序。它有两个要点：①节点：构成虚拟世界的基本要素；②路由：节点间传送信息的途径。具有与平台无关、基于 Web、快速建模等优点。

VRML 已成为在 Internet 上建立 3D 多媒体和共享虚拟世界的一个开放标准。具备基于 Web 的超真实感三维图形渲染能力，并提供进行三维交互操作和信息获取的技术支持，使得建立分布式的三维可视化仿真系统成为可能。

所有的 VRML 文件都是以扩展名 WRL 结尾的文本文件或以 WRZ（压缩格式）结尾的二进制文件，它一般包含如下 4 个部分：

- （1）文件头，位于 VRML。文件的首行，给浏览器提供文件的版本信息。
- （2）注释，以 # 号开始的一段文字。
- （3）节点，场景信息的单位。用它来描述场景中的造型、灯光及声音等。
- （4）域值，用于描述及改变节点的属性，它反应了域的大小。

VRML 最吸引人的地方就是其互动的场景。场景和用户的这种交互接触的实现需要两个基本因素：一是行为（一种描述将要发生什么，什么必须改变，以何种方式改变的方法）；二是执行模式（一种来回传送场景实体的方法）。

在 VRML 中，基本机制是由行为组成的，而行为是通过执行模式改变场景中的 VRML 对象的状态。执行模式把事件作为改变工具并作用于保持状态的字段，可分为静态行为和动态行为两种。所谓静态行为指的是行为发生在一个地点，事件源（EventOut Field）和宿（EventIn Field）被连在一起以改变场景图。动态行为与静态行为的不同在于，它能够做比原来定义的路径更多的路径事件。动态行为具有询问状态的能力，再基于这些状态作出决定，在这些决定基础上改变场景的状态。

如今，在国内外 VRML 已经广泛应用于生活、生产、科研教学、商务甚至军事等各种领域，并取得了巨大的经济效益。VRML 给我们带来了一个全新的三维世界，让我们的可视化不再仅仅停留在单机电脑上，它使我们创造虚拟的世界互动了起来，而且也是随着我们的意愿动了起来。

1.4 基于物理模型的计算机动画技术

1.4.1 计算机动画

计算机动画 (Computer Animation), 又称电脑绘图技术, 它是基于自然界物体运动的基本准则和运动规律的描述方程, 是通过使用计算机制作动画的技术。它是计算机图形学和动画的子领域, 这类图形可真实反映物体的运动过程和轨迹。

计算机动画采用图形与图像的处理技术, 借助于编程或动画制作软件生成一系列的景物画面, 其中当前帧是前一帧的部分修改, 并采用连续播放静止图像的方法产生物体运动的效果。

如今电脑动画的应用十分广泛, 既有让应用程序更加生动, 增强感官效果的多媒体技术; 还有应用于游戏开发, 电视动画制作, 创作吸引人的广告、电影特技制作、生产过程及科研的模拟等等。

1.4.2 基于物理模型的计算机动画技术

基于物理模型的动画技术是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一种新的计算机动画技术。经过近几年的发展, 它已在图形学中成为一种具有潜在优势的三维造型和运动模拟技术。尽管该技术比传统动画技术的计算复杂度要高得多, 但它能逼真地模拟各种自然物理现象, 这是基于几何的传统动画生成技术所无法比拟的。目前的动画软件在基于动力学的动画功能方面已相当成熟, 它能处理诸如重力、风、碰撞检测等在内的复杂动力学模型。

基于物理模型的动画技术考虑物体在真实世界中的属性, 如它具有质量、转动惯矩、弹性、摩擦力等, 并采用动力学原理自动产生物体的运动。当场景中的物体受到外力作用时, 牛顿力学中的标准动力学方程可用来自动生成物体在各个时间点的位置、方向及其形状。此时, 计算机动画设计者不必关心物体运动过程中的细节, 而只需确定物体运动所需的一些物理属性及一些约束关系, 如质量、外力等。

最近几年, 已有许多研究者对动力学方程在计算机动画中的应用进行了深入广泛的研究, 提出了许多有效的运动生成方法。总体上来说, 这些方法大致可分为四类, 即刚体运动模拟、塑性物体变形运动、流体运动模拟以及破裂爆炸模拟。

1) 刚体运动模拟

在刚体运动模拟方面, 其研究重点集中在采用牛顿动力学的各种方程来模拟刚体系统的运动。由于在真实的刚体运动中任意两个刚体不会相互贯穿, 因而在运动过程模拟时, 必须进行碰撞检测, 并对碰撞后的物体运动响应再进行处理。图 1-8 为一小球由高处顺斜坡滚下掉在翘板左端, 将右端木块翘飞击中大球的过程的模拟。

2) 塑性物体变形运动

在真实物理世界中, 许多物体并非完全是刚体, 它们在运动过程中会产生一定的形变, 即所谓柔性物体。物体的变形一直是计算机图形学的研究热点, 这在前面已详细介绍过。由于传统的表面变形均是基于几何的, 其形变状态完全人为给定, 因而变形过程

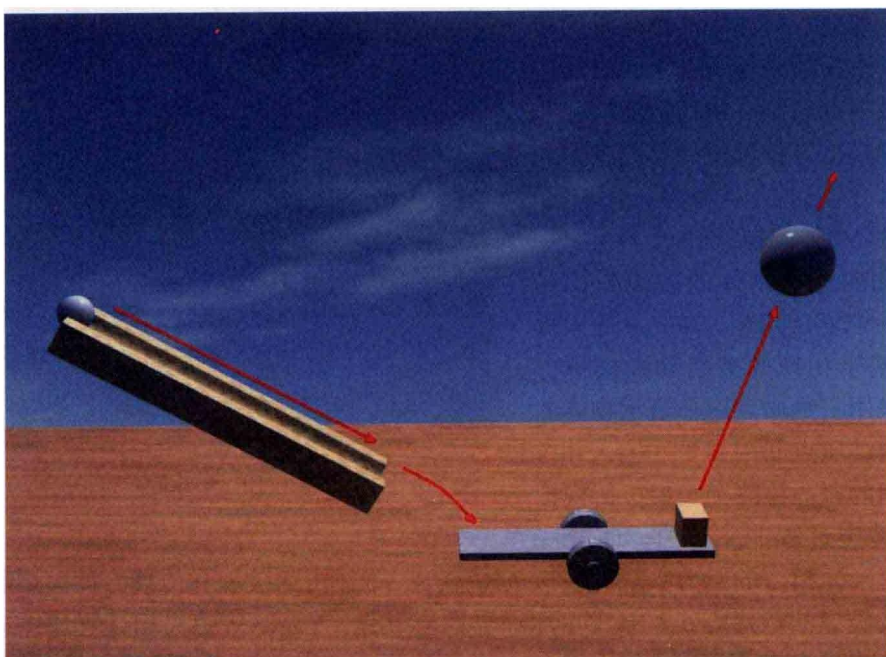


图 1-8 刚体运动模拟



图 1-9 塑性物体变形运动

缺乏真实性。

1986 年，Weil 首次讨论了基于物理模型的柔性物体的变形问题，当时仅仅是用来模拟布料悬挂在钉子上的形态。之后，Feynman 则提出了一个更完善的布料悬挂模型。后来，许多研究者相继开始采用各种物理模型来对非刚性物体进行运动变形模拟。

目前一般采用连续弹性理论来模拟物体的形变和运动，通过考虑物体的分布式物理属性，如质量、弹性等，非常成功地模拟了柔性物体对外力的动力学响应。图 1-9 所示为两塑性物体相撞的模拟图。

3) 流体运动模拟

一般从流体力学中选取适当的流体运动的偏微分方程，然后进行适当的简化，之后，通过数值求解获得各个时刻流体的形状和位置。现在已有许多模拟水流、波浪、瀑布、喷