

浙江大学

硕士学位论文

沙尘暴景象的参数化建模与绘制研究

姓名：宫立山

申请学位级别：硕士

专业：计算机应用技术

指导教师：王章野

201202

摘要



沙尘暴是一种世界范围内多发性的强灾害性天气现象，危害人类的生存环境、影响经济和社会活动。基于物理的沙尘暴景象的参数化建模与绘制可以为沙尘暴灾害的预报、防治以及沙尘暴对环境造成的影响的评估提供帮助，具有重大的社会意义和经济价值。

本文第 1 章介绍了沙尘暴场景的模拟的重要意义，回顾了气象学界和计算机图形学界的相关理论和技术的研究进展，并简要叙述本文的主要研究工作。

本文第 2 章首先阐述沙尘暴形成的气象机制和流体模拟模型，并根据以上机制模型，加以合理简化，采用基于网格的欧拉流体模型，对沙尘暴动态景象的不同机制如：起沙、升流及与环境交互作用等分别进行建模。建立起参数化的沙尘暴场景建模方法，通过界面输入不同的物理气象参数，如气压、气温、沙尘粒主半径、沙尘粒密度、地表干燥度、场景类型等，来生成特定气象条件下的不同的沙尘暴景象。最后阐述沙尘暴模拟模型在 GPU 中的实现，给出模拟的流程。

本文第 3 章提出了一种改进的沙尘暴景象的实时绘制算法。算法首先阐述体绘制和多散射机制，提出并实现了一种半角切片前向多散射的体绘制模型。该模型充分考虑了沙尘粒子与环境光的相互作用，大大简化了整体散射模型的计算量；提出了一种基于气象参数的沙尘暴景象能见度预测模型，并采用 GPU 技术进行加速，实现了不同类型、不同程度沙尘暴景象的实时绘制。

最后的第 4 章，作者对本文的研究工作进行了总结，并提出了本课题有待进一步研究的关键技术及其发展方向。

关键词：沙尘暴，自然景象模拟，参数化建模，气象学，能见度评估

Abstract

A sandstorm is a world-wide disastrous meteorological phenomenon, causing ecological problems, effecting on human health, and impacting the economy and social activities. Physical-based parametric modeling and rendering of sandstorm scene is significant to disaster forecasting and prevention and environmental impact assessment.

In chapter 1, we introduce the importance of the simulation of the sandstorm scene, review the related work in the area of meteorology and computer graphics, and briefly describe the main aspect of the research of this paper.

This Chapter 2, we argue the meteorological mechanism of sandstorm and the basic theories of fluid simulation. With a reasonable simplification of the mechanism, we use grid-based eulerian fluid simulation method to model the different mechanisms of sandstorm such as: sand blowing, up-flow and interaction with environment. We get a Parametric method to modeling sandstorm scene, which can generate different sandstorm scene by different physical parameters, such as pressure, temperature, dust particles radius, dust density, surface dryness, scene type, etc. Finally, we describe the GPU implementation and processes of this simulation model.

Chapter 3 presents an improved real-time rendering algorithm of sandstorm scene. We describe volume rendering and multi-scattering mechanism, and then propose a multi-scattering rendering model using half-angle slice rendering. The model takes into account the interaction between dust particles and light, greatly simplifying the computation. We present a visibility forecast model based on meteorological parameters with GPU technology, and achieve different types of sandstorm scenes in real-time.

Finally, the summary and conclusion of this paper are given, as well as the discussion of the further research work.

Keywords: Sandstorm, Natural scene simulation, Parametric modeling, Meteorology, Visibility evaluation

图目录

图 1.1 沙尘暴席卷美国亚利桑那州凤凰城 1

图 1.2 真实的沙尘暴场景 3

图 2.1 SPH 方法图示 13

图 2.2 基于网格的欧拉方法图示 14

图 2.3 半拉格朗日平流算法图示 17

图 2.4 改进的 MacCormack 方法^[14] 18

图 2.5 上升的烟在球体周围出现旋涡^[15] 20

图 2.6 旋涡状态约束（上）和自适应的旋涡状态约束（下）的比较^[16] 21

图 2.7 沙粒附近的风速（a）不考虑雷诺应力（b）考虑雷诺应力^[20] 23

图 2.8 沙尘暴参数设置界面 32

图 2.9 沙尘暴模拟的流程图 34

图 2.10 沙尘暴运动过程序列 35

图 3.1 体数据 36

图 3.2 体的取样和合成^[21] 37

图 3.3 有两个取样平面的排列观察面切片^[21] 38

图 3.4 含有大量粒子的介质对光的影响 39

图 3.5 吸收截面 39

图 3.6 粒子把光散射到视线方向 41

图 3.7 Henyey / Greenstein 相位函数 46

图 3.8 半角切片图示^[21] 48

图 3.9 半角切片的两遍计算 49

图 3.10 不同程度的城市沙尘暴场景 51

图 3.11 不同程度的沙漠沙尘暴场景 51

图 3.12 不同网格分辨率和切片数的绘制结果 52

表目录

表 3.1 粒子的光学特性表 44

表 3.2 体素的光学特性表 45

表 3.3 不同浓度和粒子分布下的能见度 50

表 3.4 算法性能比较 53

第1章 绪论

1.1 引言

“美国当地时间 2011 年 7 月 5 日晚上，一场严重的沙尘暴袭击了西南部亚利桑那州的首府凤凰城，造成部分地区断电，大部分航班停飞。强风卷起的沙尘暴如同一道巨大的沙墙从凤凰城的上空席卷而过，从南往北扫过了整个凤凰城的市中心地区。某些地区沙尘暴形成的“沙墙”最宽幅度达到约 80 公里，当天，凤凰城约 8000 户居民断电。根据美国全国气象局公布的消息，由于风速高达每小时 96 公里，强风卷起的沙尘从南部的凤凰城一直刮向亚利桑那州的西北部，影响了等多个城市。” 以上是有关沙尘暴的一则报道，之后的 8 月份美国凤凰城又遭受三股大型沙尘暴的吹袭（如图 1.1），成为影响凤凰城的主要灾害之一，给人们的生活和出行带来不便。



图 1.1 沙尘暴席卷美国亚利桑那州凤凰城

本章主要阐述沙尘暴景象的定义及说明对其进行模拟的重要意义，同时分别从气象学和图形学的角度出发，回顾相关领域的研究现状。最后，总结本文的工作以及它的重要性和独特性。

1.2 沙尘暴模拟

本节简单介绍沙尘暴景象的定义及说明对其进行模拟的重要意义。

沙尘暴是沙暴和尘暴的总称，是大风把地表的沙尘扬到空中，造成能见度降低的现象。这种现象在沙漠及其边缘以及地表植被稀疏的地方容易发生，在我国和美国都时有发生。沙尘暴危害严重，主要体现在一下几个方面：（1）沙尘暴天气中的大风往往携带大量的沙尘，使空气浑浊，呛鼻迷眼，增加呼吸道等疾病的发病概率。（2）强沙尘暴天气会造成人民财产的直接损失。1993年5月5日，发生在甘肃省金昌市、武威市、武威市民勤县、白银市等地市的强沙尘暴天气，受灾农田 253.55 万亩，损失树木 4.28 万株，造成直接经济损失达 2.36 亿元，死亡 50 人，重伤 153 人。（3）沙尘暴天气使能见度降低，经常影响交通安全，造成飞机不能正常起飞或降落，使汽车、火车车厢玻璃破损、停运或脱轨。如图 1.2，我们可以看到沙尘暴规模巨大，能见度很低。鉴于沙尘暴的危害，我们有必要对沙尘暴进行研究和模拟，从而降低它的危害，保障人们的生命财产安全。

自然场景的模拟一直是计算机图形学的重要研究方向之一。随着图形显卡计算能力的提高和图形学技术的发展，原来由于计算量过大和物理模型过于复杂而很少受到关注的灾难性的自然现象的模拟在近些年开始受到人们的重视，并成为可能。也给我们图形学研究者带来了新的挑战。

沙尘暴是我国及世界范围内近年来多发的自然灾害，这主要是由于人类活动造成的水土流失、地表植被破坏等原因造成的，是环境给我们的警示。因此，我国格外重视沙尘暴的研究，与多国学者一起对沙尘暴的成因机制、危害和影响进行研究，这从侧面体现了沙尘暴模拟的重要性。模拟沙尘暴可以向人们宣传保护环境的重要性，同时基于物理的沙尘暴景象的真实感模拟还可以在沙尘暴的预测、防治以及对环境造成的影响等方面提供直观的可视化手段。

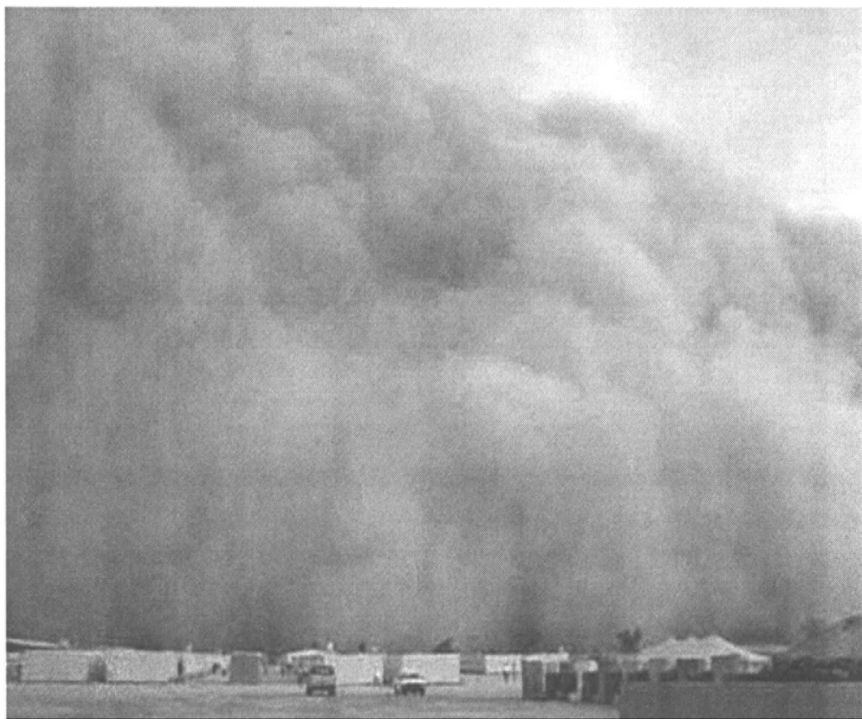


图 1.2 真实的沙尘暴场景

1.3 国内外研究现状

目前，对于沙尘暴的模拟主要从两个方面进行研究：气象学家侧重于从实验数据探讨沙尘暴的成因和机制，主要采用数值模拟的方法对沙尘暴进行建模和分析；图形学工作者主要使用流体的方法来模拟沙尘暴这类的自然现象，重点放在模拟场景的外观和速度上，力图进行实时的真实感的场景模拟。本节阐述这两个方面的研究工作。

1.3.1 气象学方面的研究工作

沙尘暴是在我国及世界范围内多次出现的灾害性天气，它对自然生态环境的破坏和人类健康的影响，使人们愈来愈重视对沙尘暴的研究。大气物理学家和气象学家不断的对沙尘暴进行研究，在沙尘暴的成因和机制、沙尘暴的特性分析以及沙尘暴的分级及危害评估方面取得了不少成果，下面我们对他们的研究工作进行一个概括性的回顾。

一部分学者主要研究沙尘暴的数值模拟, 主要从起沙机制和传输机制两个方面进行研究, 通过建立沙尘暴的数值模型来进行沙尘暴的浓度、沙粒半径等的预测。我国学者对沙尘暴的传输进行了模拟^[1], 使我们可以更深入地理解沙尘暴的传输模式; 澳大利亚新南威尔士大学 (UNSW) 邵亚平发展了具有清晰风蚀物理学概念的起沙数值模式和输送模式^[2], 该研究成果可以很好地预测澳大利亚的沙尘天气, 为以后的研究者提高了很好的基础。孙建华等^[3]将邵亚平等发展的起沙和输送模式与 PSU/NCAR 发展的中尺度模式 MM5V3 耦合, 建立了一个适合于我国北方地区的沙尘天气预测系统。雷航等^[4]在孙建华的基础上, 提出了一个改进的沙尘天气数字预测系统, 取得了更好的预测效果。王丽娟等^[5]使用该改进系统对我国北方的一个强沙尘暴进行模拟和特征分析, 表明系统的预测与实际测量结果基本一致, 同时对沙尘暴过程进行一些特性分析。通过回顾沙尘的数值模拟方面的研究工作, 我们发现现在已经有成熟的系统可以对沙尘暴天气进行预测, 但是在精度和适用性上仍然需要发展和研究。这些系统主要从大尺度来模拟沙尘暴, 由于其模型过于复杂, 无法简单地适用于计算机图形学, 需要采用一定的方法进行简化。

沙尘暴的形成离不开沙尘源, 但在沙尘源具备的情况下, 气象因素成为影响沙尘暴的主要因素, 这些气象因素主要包括气压、温度、风速、蒸发量、相对湿度等。不少学者从沙尘暴的观测数据出发, 研究各个气象因素对沙尘暴的影响方式和强度^[6]。以往的研究倾向于定性的研究各要素对沙尘暴的影响, 李万源等^[7]根据观测数据对各个因素进行了详细分析, 给出了衡量各因素影响公式, 从而可以定量的分析各因素, 并且对各因素的影响方式进行了总结。

鉴于沙尘暴对环境和我们生活的影响, 对沙尘暴进行分级及其危险度进行研究成为一个重要方向。Middleton^[8]提出根据能见度和风力对沙尘暴进行分级, 我国学者^[9]提出根据规定时间内大气中的总悬浮颗粒数的浓度来对沙尘暴的强中弱进行区分。矫梅燕等^[10]对沙尘天气定量分级方法进行了研究, 利用能见度与沙尘浓度之间的统计关系, 来对沙尘天气进行分级。罗敬宁等^[11]引入了沙尘暴的气象危害度的概念, 得出了定量的沙尘暴发生危险程度评价指标, 给灾害预防和灾害

评估提供了重要参考。

1.3.2 计算机图形学领域的研究工作

沙尘暴是一个复杂的天气现象,在对沙尘暴进行模拟时,我们首先采用流体模拟的方法对沙尘暴进行建模,然后把建模得到的体数据通过体绘制技术绘制出来。因此,我们将从流体模拟和体渲染两个方面来讨论计算机图形学领域的研究工作。

1.3.2.1 流体模拟

流体模拟是计算机图形学中模拟自然现象的一个重要方法,它是一种基于物理的方法,可以在符合物理规律的同时,得到比较真实的视觉效果,成为影视特技、电脑游戏等常用的方法。由于流体模拟是一个比较大的课题,而可以采用流体模拟的现象也很多,我们这里主要讨论一下和我们相关的工作。

Foster 等^[12]通过求解 Navier-Stokes 方程来模拟热气的湍流,他采用有限差分法在均匀的网格上求解方程,从而把基于网格的欧拉方法引入到计算机图形学领域。Stam^[13]提出了半拉格朗日方法用于计算 Navier-Stokes 方程的平流项,从而使流体可以无条件的稳定,不再受限于计算步长,大大提高了流体模拟的速度。Selle 等^[14]在提出了一个新的计算平流项的方法,在保持流体稳定的情况下可以模拟出更精细的流体。低黏度的流体运动起来往往会有一些旋流的出现,这丰富了流体的细节,但是由于采用粗网格进行模拟,导致了数值耗散,使流体看起来过于粘稠,减弱了这些有趣的细节。Fedkiw 等^[15]通过把旋涡状态的约束作为外力补偿回流体中,降低由于数值耗散造成的影响,产生精细的流体运动。Fedkiw 的方法通过一个用户指定的参数来调整整个流体的旋涡状态,并未考虑到流体各个部分的不同。Shengfeng He 等^[16]把螺旋度引入到计算旋涡力的公式中,不再采用用户指定的参数,达到了更好的效果,为使用粗网格来模拟精细的流体提供了可能。

采用流体来模拟的自然现象有很多,他们可以采用基于物理的欧拉方法进行模拟,主要是精确而及时的计算出速度场,然后从各现象自身的独特性出发,模拟出比较真实的效果。烟^[15,16]的模拟需要考虑到烟和周围环境温度的差异,因

此需要增加一个浮力项来模拟烟的上升。云^[17]的模拟考虑了浮力的同时,增加了水的蒸发和冷凝的模拟,使结果看起来更真实。Mizuno^[18]把火山云考虑成两种流体来模拟,分别计算固体和气体部分的质量,然后计算出火山云的密度进行渲染,取得了不错的视觉效果。刘世光等^[19]提出采用两相流体来模拟龙卷风,同时提出了龙卷风边界条件的控制,可以很好的模拟龙卷风这种自然现象。在龙卷风的基础上,2007年,刘世光^[20]又提出了采用两相流体来模拟沙尘暴的方法,采用 Reynold-average Navier-Stokes 方程来模拟风场,采用稳定的流体来模拟沙粒,同时提出了沙粒和风场的交互方法。

然而,沙尘暴是一个复杂的天气现象,必须考虑沙尘暴发生时的气象和环境因素。文献^[20]的方法只考虑了沙粒和风场的交互,并未把影响沙尘暴的各主要因素考虑进去,无法控制沙尘暴的模拟过程。本文提出了一种基于气象条件和环境因素来模拟沙尘暴的参数化沙尘暴建模与绘制的方法,具有很好的扩展性,可以模拟不同场合及不同严重程度的沙尘暴景象。

1.3.2.2 体绘制

当采用基于网格的欧拉方法来模拟烟、云等自然现象时,每一步更新我们得到的是空间网格上的数据,这些数据包括速度、密度等,我们需要把这些数据(通常为密度)显示出来,这需要体绘制的方法。

体绘制算法主要有:基于纹理的算法^[21]、光线投射(ray casting)算法^[22]、错切-变形(shear-warp)算法^[23]、频域体绘制算法^[24]等。基于纹理的方法包括二维纹理和三维纹理的方法:二维纹理方法相对简单,由于硬件的支持,速度很快;三维纹理就是体纹理,CT或者MRI采集的数据以及流体模拟得到的密度等数据都可以采用三维纹理来存储,因此也可以通过基于纹理的方法来进行绘制,这种方法容易和多边形算法相结合,需要较少的渲染批次,绘制的结果也很好。光线投射算法是最简单的方法,从视点发出光线,沿着每道光线采样数据并转换为光学性质进行累积,从而形成图像。这种方法容易被人们理解,在GPU上可以轻松实现,而且绘制出的效果较好。错切-变形算法为了得到相对较快的处理速度牺牲了采样精度,生成的图像比光线投射方法生成的差。频域体绘制算法与光线

投射算法相比具有较低的算法复杂度，能够更快地完成对三维数据场的显示。然而这种方法却不能简捷有效地表示和处理数据场的深度信息，因此其生成的图象缺少深度的遮挡效果，效果自然比光线投射算法差。

烟、云等类似流体场景大多采用体绘制的算法来进行绘制，但使用不同的光学模型，会生成不同的效果。Max^[25]对体绘制中使用的光学模型进行了很好的总结，它逐步考虑了体中的粒子对光线的吸收、发射、反射、单散射和多散射，从而可以不断的提高绘制效果。Dobashi 等^[26]提出了一个硬件加速的各向同性的单散射绘制技术来绘制云，取得了不错的效果。Harris 等^[27]在改进了 Dobashi 的方法，提出了两步模拟的方法，首先采用多次前向散射模型计算云中粒子的光亮度，然后在视线方向采用单向散射计算散射到视点的光亮度，这种方法绘制的云朵更具真实感。刘世光^[20]在绘制沙尘暴时，采用了 Mie 散射来计算多散射，但是采用的是各项同性的散射，并且把相位函数处理为常数，这影响了其场景的真实感。

1.4 本章小结

沙尘暴对环境以及人们的生活和健康造成危害，它越来越受到人们的重视，成为许多领域的研究对象。气象学家采用大气物理学、环境学等对其进行研究，得出了可以预测沙尘暴的数值模型，但是得出的结果并未可视化，无法给人直观的感受；图形学工作者从流体模拟的角度出发对沙尘暴进行模拟，着重在渲染的视觉效果上，但是缺乏对沙尘暴机制及其影响因素的考虑。本文将结合两个领域研究成果的优势，可以使沙尘暴景象的模拟更具真实感，并可量化地生成不同的沙尘暴景象及其对环境的影响。

本文工作是结合气象学和图形学领域的成果，实现沙尘暴的参数化的建模和绘制，主要贡献如下：

- 提出了参数化的沙尘暴建模方法。通过简化气象学中的沙尘暴计算模拟模型，抽取影响沙尘暴的主要因素，把这些因素（气压、温度、沙尘粒主半径、沙尘粒密度、地表干燥度等）应用到对沙尘暴的流体模拟中去。通过简化沙尘暴的起沙机制、输送机制，同时根据气压来初始化沙尘暴

所处的风场；对于流体模拟中考虑了由于温度差异造成的沙粒上升效果，考虑沙粒半径和个数从而简化了沙粒与风场的交互方法。从而可以生成特定成分参数、气象参数条件下的沙尘暴景象。

- 提出了参数化的沙尘暴绘制方法。我们改进 Harris^[27]的多散射的体绘制方法。考虑了沙粒分布和个数对散射造成的影响，采用基于硬件的方法来加速绘制。
- 采用气象计算模型对不同程度沙尘暴景象的能见度进行了定量的评估分析。为预测沙尘暴对环境污染及道路交通的量化影响提供了可能。

在论文的最后，作者总结了全文的研究工作，并对未来的研究方向和任务进行了展望。

第2章 沙尘暴景象的参数化建模

2.1 引言

本章首先介绍沙尘暴的物理机制和影响沙尘暴的主要因素，然后介绍流体模拟的基本方法和物理基础，接着阐述如何生成特定成分参数、气象参数条件下的沙尘暴景象。

2.2 沙尘暴的物理机制

沙尘暴是沙暴和尘暴两者兼有的总称，其英文名为：Sandstorm。是指强风把地面大量沙尘物质吹起并卷入空中，使空气特别混浊，水平能见度小于一千米的严重风沙天气现象。其中沙暴系指大风把大量沙粒吹入近地层所形成的挟沙风暴；尘暴则是大风把大量尘埃及其它细粒物质卷入高空所形成的风暴。这就是沙尘暴的定义。

国内气象工作者对我国的沙尘暴进行了大量的研究，对其形成机理进行了总结和概括。他们认为沙尘暴是一个大尺度缓流系统变化导致的气候现象，要分析沙尘暴的成因，必须从它所处的气象环境和地表植被环境入手。气象工作者通过对沙尘暴发生时的观测数据的研究，总结出了沙尘暴形成的物理机制及其影响因素。下面我们介绍沙尘暴的物理机制，为模拟沙尘暴打下基础。

易于起沙的沙、尘源，有利于形成大风的天气环流系统以及局部不稳定的空气状态是沙尘暴或强沙尘暴形成的主要原因，具体分析如下：

- 沙尘暴经常发生在沙漠、戈壁及其周围的地区，与这些地区降水量偏少、地表较干燥，地面植被稀疏，土壤风蚀严重等有直接的关系。这样的土壤条件可以为沙尘暴的形成提供了源源不断的沙尘，这是形成沙尘暴的物质基础。
- 我国的沙尘暴往往发生在春季和冬季，这与春季和冬季时的天气形势利于形成强风有关。王丽娟等^[5]利用观测资料对2009年4月北方的一次强沙

尘暴过程中的近地面气象因素进行分析时指出：蒙古气旋和冷锋是这次强沙尘暴的主要影响系统。春季沙尘暴的发生往往也是由于冷空气南下造成的。沙尘暴发生时，在高空一般存在几个高压中心和低压中心，由于气压梯度的存在形成了由高压中心流向低压中心的空气流动，从而形成了大风。当冷空气南下时，冷空气侵占了原来热空气的位置，而低空的空气温度还是比较高，因而形成比较大的温度差，温度差的存在导致了上升气流的产生，上升气流携带地表的沙尘进入空中，水平气流则可以把空中的沙尘进行远距离的传输，这样就形成了沙尘暴。沙尘暴在大风的作用下不断地移动，在其移动过程中由于上升气流的作用会不断地把地表的沙粒和尘埃卷入空中，从而形成大规模的沙尘暴景象。从沙尘暴的形成过程中，我们发现高空的天气形势促使冷空气南下，在冷空气南下的过程中，在低空形成了较强的水平气流和上升气流，为沙尘暴的起沙和传输提供了动力。

- 沙漠地区易发生沙尘暴还与其低空的空气状况不稳定有关。沙漠地区地表温度和空气温度变化剧烈，空气极不稳定，容易在局部形成湍流，从而加剧了沙尘暴的发生几率。

从以上的分析，我们得出影响沙尘暴的主要因素包括：地表植被状况、高空气压形势、低空的不稳定的空气状态。为了模拟沙尘暴，我们必须考虑这几个因素，否则沙尘暴的模拟将失去真实性。地表植被状况通过影响起沙过程对沙尘暴最终的效果造成影响，我们可以通过反映地表植被状况的参数来影响这一过程；高空气压形势有利于形成大风，我们可以通过高空气压的分布状况来得出沙尘暴所处的风场，这是形成沙尘暴的至关重要的因素，对沙尘暴的运动有直接影响；不稳定的空气状态需要我们考虑由于温度差异给沙尘暴造成的影响，温度的差异在形成上升气流的同时也会形成湍流的效果，这给沙尘暴带来了更多的细节，从而可以极大地改进沙尘暴的视觉效果。

2.3 流体模拟的基本方法介绍

流体模拟是一种非常有用的技术，它是模拟许多自然现象的基础。沙尘暴作为一种复杂的自然现象，如果要基于物理的模拟它的运动，可以通过流体模拟的方法来实现。本节首先介绍 Navier-Stokes 方程，然后介绍基于物理的流体模拟的两种方法，着重介绍基于网格的欧拉方法及其相关技术。这是本文算法的基础，我们正是通过把欧拉方法和沙尘暴的物理机制相结合，最终实现沙尘暴的参数化模拟。

2.3.1 控制方程

为了进行模拟流体，必须要有一个数学表达式，来表示任意给定时刻流体的状态。其中，流体的速度是最重要的量，因为速度决定了流体如何运动，以及如何传递其中的东西。因此，流体模拟的关键是正确地、及时地求解出当前的速度场。在流体模拟中，这个表达式通常为 Navier-Stokes 方程式，因其 1821 年由 Claude-Louis Navier 和 1845 年由 George Gabriel Stokes 分别导出而得名。流体模拟的过程其实就是在给定的初始条件下，求解 Navier-Stokes 方程。Navier-Stokes 方程见公式 2.1 和公式 2.2:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)u - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + F \quad \text{公式 (2.1)}$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad \text{公式 (2.2)}$$

公式 (2.1) 中， ρ 是流体的密度， u 是矢量，为流体的速度， ν 是动力黏度， F 代表作用于流体的外力。公式 (2.1) 描述了动量守恒，可以从牛顿第二定律推导得出。式子左侧是流体总的加速度，右侧表示了影响加速度的几个因素。右侧第一项为平流项，它表示流体的速度由于流体的流动造成的改变，流体可以平流流体的速度、密度和其他的量；第二项为压力项，流体的分子的运动会对周围的分子进行挤压和碰撞从而产生压力；第三项为扩散项，不同流体具有不同的黏度，蜂蜜和水由于黏度的不同流动速度也差别很大，扩散项可以模拟出这种差别来，通过黏度的不同来体现流体保持本身速度的能力；第四项是外力项，体现由于外

力作用对加速度造成的影响, 可以根据流体及其所处环境的不同来增加不同的外力。

公式 (2.2) 为流体的质量守恒方程, 通过定义速度的散度为 0, 即流入的流体和流出的流体的体积相同, 来保证流体的不可压缩。

2.3.2 流体模拟的两种基本方法

流体模拟的过程就是求解 Navier-Stokes 方程的过程, 对于 Navier-Stokes 方程我们无法进行精确的求解, 只能采用数值解法对其求解, 这就涉及到如何离散化的问题。根据离散方法的不同, 产生了两种主要的方法: 基于粒子的拉格朗日方法和基于网格的欧拉方法。我们首先对这两种方法进行介绍, 然后对它们进行比较, 阐述各自的优缺点, 最后给出我们选择基于网格的欧拉方法进行沙尘暴模拟的原因。

2.3.2.1 基于粒子的拉格朗日方法

拉格朗日方法把流体看成是由一个个的微团组成, 微团的运动代表着流体的运动。微团其实就是粒子, 它包含有位置、速度、质量、密度、压强等参数, 拉格朗日方法就是研究这些粒子中的参数信息如何随时间的变化而改变, 当然这些粒子之间会相互影响。

近年来, SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 方法^[28]逐渐成为基于粒子的拉格朗日方法的主流方法。SPH 方法的基本思想是, 通过周围粒子的属性插值出空间中任意位置 r 处具有连续性的属性 A (如密度、压力、黏度等), 公式如下所示:

$$A(r) = \int_{\Omega} A(r') W(r - r', h) dr' \quad \text{公式 (2.3)}$$

其中, W 为半径为 h 的光滑核函数, h 用来控制流体的光滑程度。

公式 2.3 为积分形式, 我们可以近似地离散成求和的形式:

$$A(r) = \sum_j A_j \frac{m_j}{\rho_j} W(r - r_j, h) \quad \text{公式 (2.4)}$$

其中, j 是 r 周围粒子的个数, A_j 是要累加的某种属性, m_j 和 ρ_j 是周围粒子

的质量和密度, r_j 是周围某个粒子的位置, h 是光滑核半径, 函数 W 是光滑核函数。图 2.1 为 SPH 方法示意图:

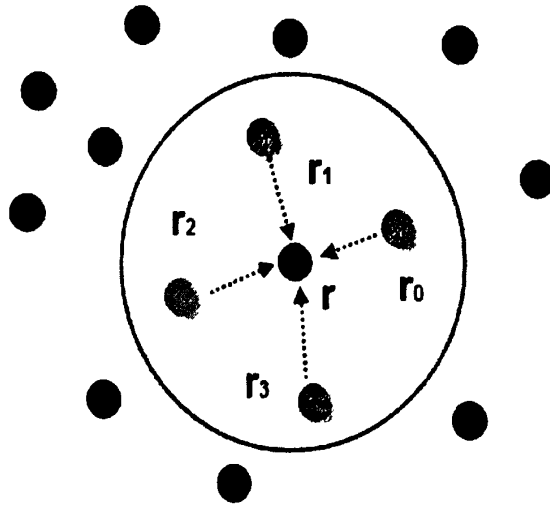


图 2.1 SPH 方法图示

2.3.2.2 基于网格的欧拉方法

与基于粒子的拉格朗日方法不同, 欧拉方法把流体所在的空间进行离散, 研究在空间中的各个固定点处流体的速度、压强、密度等参数随时间的变化, 从而得出整个流体的运动情况。

欧拉方法^[13]为了求解 Navier-Stokes 方程, 通常把空间离散成均匀网格, 每个网格中存储流体的相关状态参数, 计算时只需要计算网格中的状态量, 空间中任一点的状态可以通过周围网格的状态量插值求得。如图 2.2 所示, 求解空间被离散成均匀的网格, 采用交错网格的方式来存储流体的参数, 即标量(压强、密度等)存放在网格的中心, 将速度之类的矢量分布在网格的表面上, 这样做有利于保证守恒条件和有限差分的计算。

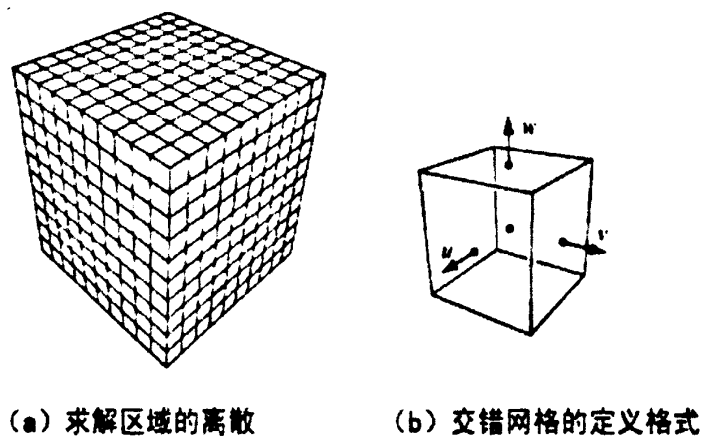


图 2.2 基于网格的欧拉方法图示

2.3.2.3 两种方法的比较

拉格朗日方法的本质其实是粒子系统，这种方法易于表达，容易集成到现有的图形引擎中去；由于采用粒子来表示流体，它不需要对整个空间进行处理，同时流体也不受求解空间的影响，可以任意流动；而且容易保证质量守恒，也易于控制。但拉格朗日法不易表现平滑的流体界面，当粒子数较少时计算速度较快，但其计算量会随着粒子数的增多而不断增大。

欧拉方法采用网格来离散流体所在的空间，能够很好地描述流体的速度、压强等属性，可以很方便的进行差分运算，而且数值精度比拉格朗日方法高；欧拉方法的计算量只与采用的网格分辨率有关，同时可以通过采用多尺度的网格来提高运算速度。但欧拉方法把流体限制在一个固定的空间里，如果需要模拟流体的大规模运动，那么需要的网格数必然增加，计算速度比拉格朗日方法慢一些；欧拉方法模拟水花飞溅等丰富的流体细节时没有拉格朗日方法方便。

以上我们分析了两种方法各自的优缺点，考虑到沙尘暴自身的特点，我们选择了欧拉方法来进行模拟。这是因为沙尘暴是一个大规模的运动，大风携带着大量的沙尘，同时在沙尘暴移动过程中会把地表的沙尘也卷入空中，如果采用基于粒子的拉格朗日方法的话，首先需要大量的粒子，而且在模拟过程中会不断有新的粒子加入，那么系统必然随着粒子数目的增加而越来越慢；如果采用基于网格

的欧拉方法，我们采用密度来表示空中沙粒的多少，需要计算的数据量与网格分辨率有关，不会因为需要新的沙粒的加入而对性能产生显著的影响。沙尘暴跟烟雾比较相近，Fedkiw 等^[15]采用欧拉方法模拟烟雾时取得了不错的效果，而且近年来针对改进烟雾等模拟的效果做了一些研究工作，这也是我们选择欧拉方法考虑的因素。

2.3.3 欧拉方法相关技术

上一节我们讨论了流体模拟的两种基本方法，分析了它们的优缺点，并给出选择基于网格的欧拉方法的理由。本节我们首先讲解欧拉方法中 Navier-Stokes 方程的求解过程，然后介绍在欧拉方法中经常使用到的技术，首先介绍两种计算平流项的算法，然后介绍旋涡状态约束和自适应的旋涡状态约束，这也是我们算法中需要用到的。

2.3.3.1 解 Navier-Stokes 方程

Stam 在 1999 年发表了一篇名为《Stable Fluids》的论文^[13]，他描述的稳定流体技术成为采用欧拉方法模拟流体的基础；Bridson 在 2009 出版了《Fluid Simulation For Computer Graphics》一书^[29]，成为学习流体模拟，特别是欧拉方法的重要资料。本节我们参考他们的研究成果，讲解欧拉方法中求解 Navier-Stokes 的过程。

Navier-Stokes 方程是一个复杂的偏微分方程，由于我们关注的是流体随时间的变化，所以可以通过递增数值法进行求解；同时必须对 Navier-Stokes 方程进行分解，这里我们不考虑扩散项，我们得到以下几个简单的方程：

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)u \quad \text{公式 (2.5)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F \quad \text{公式 (2.6)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla p = 0$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad \text{公式 (2.7)}$$

公式 (2.5) 是平流 (advect)，其中 q 可以是速度 u 、密度 ρ 等需要平流的状态量，下一节我们详细讲解平流算法；公式 (2.6) 是计算外力的影响，我们可以使用前向欧拉方法： $u \leftarrow u + \Delta t F$ 进行求解， Δt 为时间步长；公式 (2.7) 是确保流体不可压缩，一般采用投影(project)方法来计算压力场从而可以保证无散度的速度场和满足边界条件，实际中采用公式 (2.8) 来计算：

$$\begin{aligned}\nabla^2 p &= \nabla \cdot w \\ u &= w - \nabla p\end{aligned}\quad \text{公式 (2.8)}$$

公式 (2.8) 中， w 是计算公式 (2.5) 和公式 (2.6) 之后得到的一个有散度的速度场，通过求解公式 (2.8) 中的第一个方程我们可以得出压力场，这其实是一个泊松方程，然后通过第二个方程求出一个无散度的速度场 u 。

最终，在给定一个初始的无散度的速度场之后，每步我们按照平流、外力、投影的顺序来计算流体的状态量，从而完成流体的模拟。

2.3.3.2 平流算法

公式 (2.5) 的目的是计算平流项，平流是流体传送流体中的速度、密度等状态量。采用基于网格的欧拉方法时，我们需要知道每个网格中的状态量在下一时刻会是多少。这里我们可以把网格想象成一个粒子，它跟随流体的速度进行运动， r^n 处的粒子在一个时间步长 Δt 后会运动一段距离，到达 r^{n+1} 处，公式如下：

$$r^{n+1} = r^n + u \Delta t \quad \text{公式 (2.9)}$$

公式 (2.9) 中， n 表示流体模拟的更新次数，那么 $t + \Delta t$ 时刻 r^{n+1} 处的状态量就等于 t 时刻 r^n 处的状态量。这是前向欧拉方法，它是通过计算粒子经过一个时间步长后移动到哪里来得到流体的状态量。这种方法有两个问题：第一就是时间步长的问题。采用这种方法后，为了使流体不至于丢失细节，必须保证每个粒子的移动不会跨越网格，即粒子只能从一个网格移动到与它临近的网格。这样做会使时间步长不稳定，同时时间步长过小导致要计算多次后才进行一次绘制，严重影响模拟的速度。第二就是无法在现有的 GPU 上实现。由于 GPU 的并行计算能力比 CPU 高很多，所以现在的图形学程序一般都采用 GPU 进行加速。而这种方法由于受现有 GPU 架构的限制无法在 GPU 中实现，如果在 CPU 中实现也必然影

响计算的速度。

鉴于前向欧拉方法的缺点，Stam^[13]提出了半拉格朗日的方法（Semi-Lagrangian advection）来计算平流，从而也引出了稳定流体的技术。Selle 等^[14]提出了一种无条件稳定的 MacCormack 方法来计算平流，这种方法精度更高。下面我们分别阐述这两种方法。

2.3.3.2.1 半拉格朗日方法

与前向欧拉方法相同，半拉格朗日平流算法^[13]也把网格想象成粒子，通过追踪粒子的运动来求得流体的状态量。但是与前向欧拉方法不同的是它从每个网格单元逆时追踪粒子的运动，得出粒子之前的位置，复制根据这个位置插值出状态量，从而完成流体状态的更新，公式如下：

$$q(x,t+\Delta t)=q(x-u(x,t)\Delta t,t)$$

公式（2.10）

公式（2.10）中， x 表示网格单元的位置， q 是要平流的状态量，可以是速度、密度、温度等可被流体携带的量。从图 2.3 中可以看出，半拉格朗日的平流算法是通过速度场向后追踪，与前向欧拉方法正好相反。

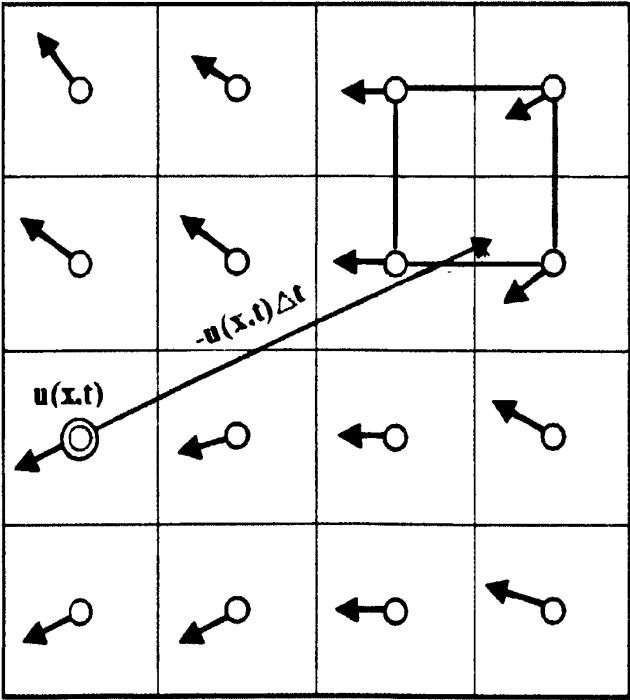


图 2.3 半拉格朗日平流算法图示

半拉格朗日的平流算法可以很容易的在 GPU 中实现，同时由于状态量是从上一时刻的状态量平流得到的，流体的模拟是稳定的，可以选取任意的时间步长，从而减少了每次绘制需要的流体更新次数，也就间接的降低了流体模拟耗费的时间。

2.3.3.2.2 MacCormack 方法

半拉格朗日平流方法可以使流体无条件稳定，时间步长也可以任意，但是这种方法会引入不必要的数值平滑，这会使水看起来更粘稠，烟雾则会丢失一些有趣的细节。MacCormack 方法可以较好的解决这个问题，它通过采用半拉格朗日方法和误差补偿的方法来达到更高的精度，具体公式如下^[14]：

$$\begin{aligned}\hat{\phi}^{n+1} &= A(\phi^n) \\ \hat{\phi}^n &= A^R(\hat{\phi}^{n+1}) \\ \phi^{n+1} &= \hat{\phi}^{n+1} + \frac{1}{2}(\phi^n - \hat{\phi}^n)\end{aligned}\tag{2.11}$$

其中， ϕ 是要平流的量， $\hat{\phi}^{n+1}$ 和 $\hat{\phi}^n$ 是中间变量， ϕ^{n+1} 是最终要求的结果。图 2.4 很好的阐述了算法思想：

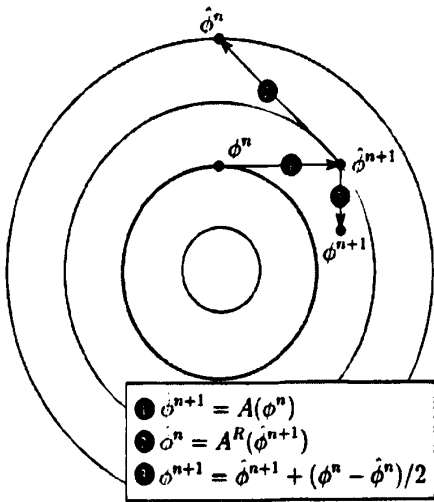


图 2.4 改进的 MacCormack 方法^[14]

2.3.3.3 旋涡状态约束

烟、空气等低黏度的流体运动过程中往往会产生旋流，但是采用粗网格进行模拟会减弱这些有趣的特性。这可以通过采用精细的网格来获得丰富的流体细节，但这也需要更多的时间。为了能采用粗网格模拟的时候获得旋流这样的小尺度的细节，Fedkiw 等^[15]通过引入旋涡状态的约束来实现，在每一步的模拟过程中把旋涡状态的约束作为一种外力应用到公式 (2.6) 中。

首先我们使用公式 (2.11) 计算出旋涡 ω ，它其实就是速度的旋度：

$$\omega = \nabla \times u \quad \text{公式 (2.11)}$$

然后通过公式 (2.12) 计算规划化的旋涡位置向量 N ，它从低的旋涡浓度指向高的旋涡浓度：

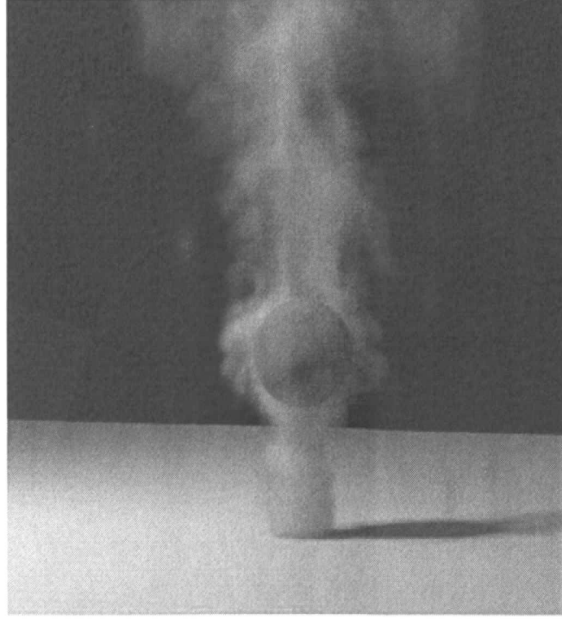
$$N = \frac{\nabla |\omega|}{\|\nabla |\omega|\|} \quad \text{公式 (2.12)}$$

最后旋涡的约束力通过公式 (2.13) 计算得到：

$$f_{\text{conf}} = \varepsilon h (N \times \omega) \quad \text{公式 (2.13)}$$

公式 (2.13) 中， ε 是作用于整个流体的用户自定义的参数，用于控制旋涡状态限制的强度， h 是网格的尺寸。

旋涡状态约束的方法可以很好的恢复由于数值耗散导致的旋流等细节的丢失，图 2.5 是 Fedkiw 论文中采用这种方法绘制烟的效果图，我们可以发现球体附近及以上的烟具有明显的旋涡，效果较以前方法有极大的改进。

图 2.5 上升的烟在球体周围出现旋涡^[15]

2.3.3.4 空间自适应的旋涡状态约束

旋涡状态约束可以恢复湍流等的流体细节，但是它使用一个作用于整个流体的系数来控制旋涡约束的强度，当系数过大时会造成失真，这主要是由于它没有考虑到流体内部各旋涡约束强度的差异。Shengfeng He 等^[16]把螺旋度引入到计算旋涡力的公式中，从而克服了原有方法的缺点。

螺旋度（helicity）是描述流体绕平行于流体运动方向的轴进行旋转和运动强弱的物理参数，定义如下：

$$H = \int u \cdot \omega dV \quad \text{公式 (2.14)}$$

我们可以把螺旋度引入到计算旋涡状态约束的公式中，新的公式如下：

$$f_{conf} = \varepsilon_h h |u \cdot \omega| \left(N \times \frac{\omega}{|\omega|} \right) \quad \text{公式 (2.15)}$$

公式 (2.15) 中， ε_h 是一个无量纲的量，旋涡约束的强弱取决于网格的尺寸 h 和螺旋度。采用这个公式后，可以根据流体局部螺旋度的不同施加不同强度的旋涡状态约束，从而可以取得更真实的效果。自适应的旋涡状态约束和原有的旋涡状态约束的效果比较见图 2.6。

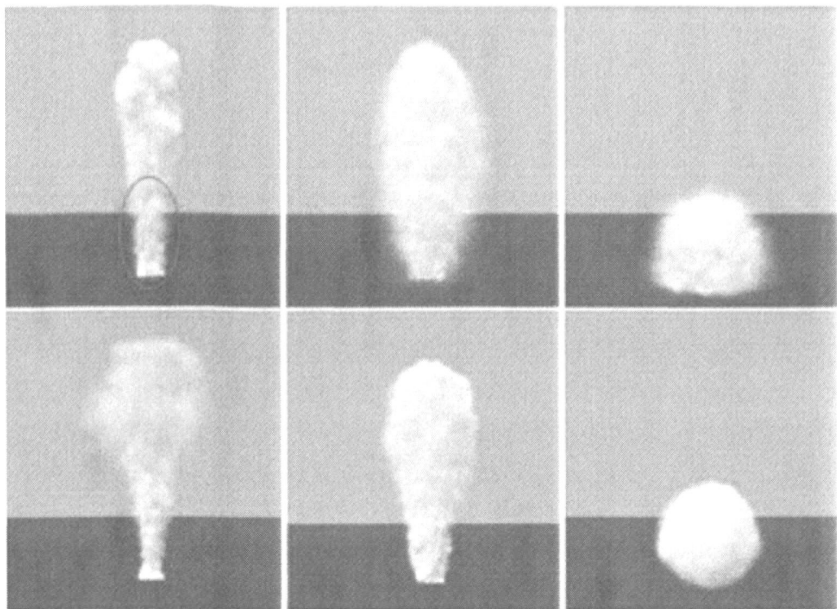


图 2.6 旋涡状态约束（上）和自适应的旋涡状态约束（下）的比较^[16]

2.4 沙尘暴景象的参数化建模

这节我们阐述沙尘暴的参数化模型。之前的两节我们分别介绍了沙尘暴的物理机制和流体模拟的基本方法，沙尘暴的参数化模型是以基于网格的欧拉方法为基础，根据沙尘暴的物理机制和特点，增加一些具体的实现方法，从而达到参数化地模拟沙尘暴。

沙尘暴是一个复杂的天气现象，风场决定了沙尘暴的运动方式，地表植被情况和风速决定了沙尘暴的起沙量，地表空气温度的差异造成了上升气流。为了模拟沙尘暴的这些特点，我们提出了本文的方法。首先，我们用两相流体模拟沙尘暴，作为沙尘暴动力的风场需要单独模拟，然后把沙粒等作为另一种流体来进行模拟。然后，我们根据高空的天气形势等气象条件得出风场的初始分布，从而可以控制沙尘暴的移动方向。对于沙粒的模拟，我们考虑到沙尘暴中沙粒数量巨大的特点，我们对一个单元格内的沙粒质量和沙粒的半径进行平流，计算时把沙粒的半径分布考虑为对数正态分布。把沙粒和风作为两相流体模拟时，需要考虑沙粒和风之间的相互作用和影响，我们提出了衡量两者相互作用的方法。对于沙尘

暴的起沙机制，我们通过反应地表植被状况的临界摩擦速度来决定地面附近的单元格是否起沙以及起沙量的大小。对于上升气流的模拟，我们通过根据流体的温度差异计算得到的浮力项来进行模拟。

这些方法充分考虑了沙尘暴的特点，把沙尘暴所处的气象条件和成分条件等集成到了流体模拟中去，从而可以模拟出沙尘暴的特点。下面我们分别介绍这些方法的实现细节。

2.4.1 风场的建模

沙尘暴多发生在沙漠及其边缘地区，这些地区的地表温度较高，空气极不稳定，空气流动存在不稳定性。传统的 Navier-Stokes 方程可以模拟稳定的风场，但是不适用于模拟不稳定的风场。对于风场的建模，我们采用文献^[20]的方法，使用 Reynold-average Navier-Stokes 方程来模拟不稳定风场，具体公式如下：

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} &= -\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0\end{aligned}\quad \text{公式 (2.16)}$$

其中， $\mathbf{u}$ 是风的速度， ρ 是密度， p 是压强， ν 是空气的黏度， $\boldsymbol{\tau}$ 表示雷诺应力 (Reynold shear stress)，它反映了空气的不稳定性， $\mathbf{f}$ 表示作用于空气的外力，这些外力来自于旋涡状态约束力和沙粒对风的作用力。雷诺应力可以表示为如下形式：

$$\tau = \rho \left| \frac{du}{dy} \right| \frac{y^2}{c_k^2} \quad \text{公式 (2.17)}$$

公式 (2.17) 中， y 表示离表面的距离， c_k 是 Von Karman 常数，我们可以取 0.4。采用这些公式后，我们可以很好的模拟沙粒附近的湍流，如图 2.7 所示。

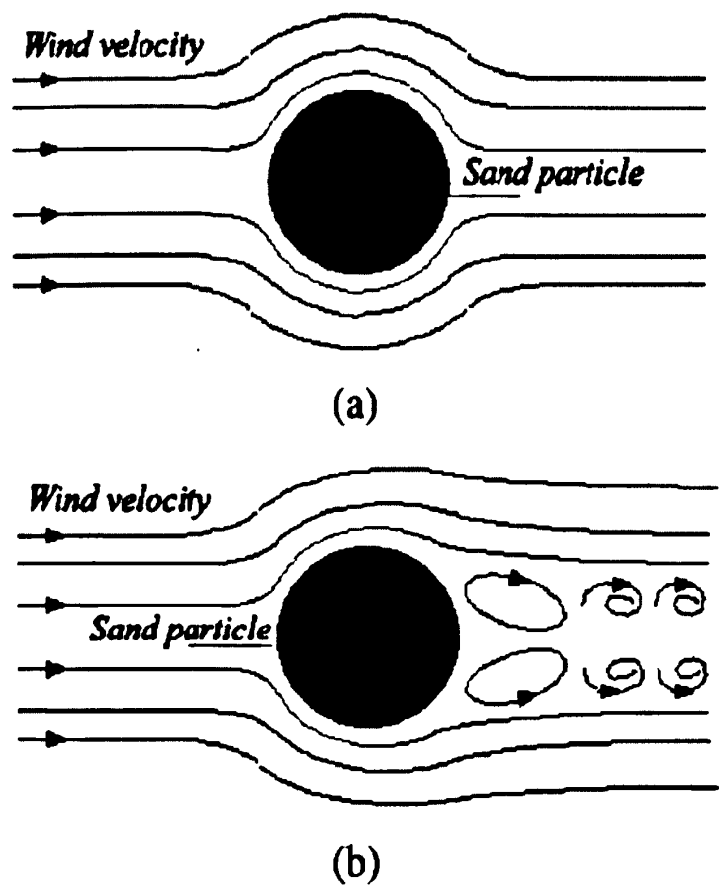


图 2.7 沙粒附近的风速 (a) 不考虑雷诺应力 (b) 考虑雷诺应力^[20]

2.4.1.1 风场的初始化

对于 Navier-Stokes 方程等流体的方程，都是在假定流体的初始条件已知的情 况下，即流体的速度、压力等状态量在起始时间 $t=0$ 已知，研究流体的状态如何 随时间的变化而变化。对于通常的初始条件一般假定速度、压力等为 0，然后通 过增加外力或者源速度等来驱动流体的运动。流体的初始化条件对流体的运动影 响很大，流体在采用同样的 Navier-Stokes 控制下展现出不同的外观，这跟初始 化条件有直接的关系。因此，初始化条件很大程度上影响着流体的流动，风场的初 始化条件对于风场的模拟至关重要。

之前我们给出了如何对风场进行建模的方法，但是并未给出风场的初始化方 法。模拟沙尘暴很重要的一步就是模拟出逼真的风场来，我们可以通过给定风场

的初始状态来控制风的变化。沙尘暴是一个天气现象，沙尘暴的发生受它所处的气象条件的影响，如果可以根据气象条件来初始化风场，那么不但可以逼真的模拟沙尘暴的风场，而且提供了一种沙尘暴的参数化方法，从而达到控制沙尘暴的运动的目的。

在讨论沙尘暴的物理机制的时候，我们指出沙尘暴的形成与高空存在高压中心和低压中心有密切关系，高压中心和低压中心的存在容易形成气压梯度风，这是沙尘暴运动的主要动力。因此，我们需要给出空间中的气压分布情况，然后通过气压就可以计算出风场的初始速度。下面我们先讨论如何设置初始的气压分布，然后讲解如何通过公式求解。

根据气象学的原理，我们可以把气压的分布写成波动的形式，具体的公式如下：

$$p = p_0 \sin(k_x x + k_y y - \sigma) \quad \text{公式 (2.18)}$$

公式 (2.18) 中， p_0 表示不同高度上的气压的幅度值， k_x 和 k_y 分别是 x 和 y 方向上的波数，这里的 x 和 y 方向是指水平面上的两个方向，注意和计算机图形学中的区别， σ 是时间相位值。具体的实现中，如果垂直方向的网格数为 n ，那么我们需要给出 n 个不同的 p_0 值，然后通过公式 (2.18) 就可以计算出处于不同高度的所有网格的气压值，从而给出了沙尘暴所处空间的气压分布。我们可以通过给出不同的 k_x 和 k_y 以及 σ 来调整气压的变化， n 个 p_0 值我们可以通过一位纹理来实现。

在知道气压分布之后，我们需要通过气压分布计算出初始化的速度场，考虑到初始状况下可以把空气看做非粘滞的不可压缩的稳定流体，因此我们可以通过伯努利定律来计算速度，具体公式如下：

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh + p = \text{常数} \quad \text{公式 (2.19)}$$

公式 (2.19) 中， ρ 是空气密度， g 为重力加速度， h 为流体处于的高度， p 为气压， v 为要求解的速度，等式右侧的常数可以根据实际情况进行设置。通过公式 (2.19) 我们求解出的结果为速度的大小，并未给出速度的方向，因此我们

需要别的公式来求解出速度的方向。

风场的速度是由于气压梯度造成的，其方向由高压指向低压，因此我们可以根据气压的梯度来求解出速度的方向 N ，公式如下：

$$N = -\frac{\nabla p}{|\nabla p|} \quad \text{公式 (2.20)}$$

通过公式 (2.19) 我们可以计算出速度的大小，公式 (2.20) 可以计算出速度的方向，两个结果相乘就可以求出初始化的速度。得到的速度场作为初始条件用于公式 (2.16) 的求解。

2.4.2 沙尘的建模

沙尘暴中含有大量的沙粒和尘埃，模拟沙尘暴必须模拟这些粒子。但是由于这些粒子的数量过大，我们无法采用粒子系统的方法来对每一个粒子进行精确地模拟。沙尘暴的运动主要是靠风场来驱动，对于数量巨大的沙粒之间的相互作用我们可以不用考虑。因此，我们采用基于网格的欧拉方法来模拟沙尘暴中沙尘的运动，我们把沙尘的运动近似为无黏度的、不可压缩流体，具体的公式如下：

$$\frac{\partial u_d}{\partial t} = -(u_d \cdot \nabla) u_d - \nabla p_d + f_d \quad \text{公式 (2.21)}$$

$$\nabla \cdot u_d = 0 \quad \text{公式 (2.22)}$$

其中， u_d 为沙粒的速度， p_d 为压力， f_d 是沙粒受到的外力，这外力主要包括重力和风场对沙粒的作用力，以及由于温度差异造成的浮力。这里我们只讨论重力的计算，对于风场的作用力和浮力在其它节阐述。

对于网格中的每一个沙粒，它所受到的重力 G_d 可以通过如下的公式进行计算 [30]。

$$G_d = \frac{1}{6} \pi D_d^3 (\rho_d - \rho) g \quad \text{公式 (2.23)}$$

公式 (2.23) 中， D_d 为沙粒的直径， ρ_d 为沙粒的密度， ρ 为空气的密度， ρ_d 和 ρ 的值可以设置为一个定值， g 为重力的加速度，一般取值为 9.8。

公式 (2.21) 和公式 (2.22) 给出了计算沙粒速度场的方法, 下面我们讨论沙尘暴模拟中其他量的计算方法。前面已经提到无法精确模拟每个粒子的运动, 但是我们可以以一个网格为单位来考虑沙尘暴的运动, 把网格内的沙尘看成一个整体, 我们采用沙尘的个数和温度来表征不同网格中沙粒的不同。沙尘的个数 (n) 和温度 (T) 这些量都随着沙尘暴的运动而运动的, 因此我们采用速度场来平流这些量, 具体公式如下:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -(u_d \cdot \nabla)n \quad \text{公式 (2.24)}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(u_d \cdot \nabla)T \quad \text{公式 (2.25)}$$

一些分散性和凝聚性气溶胶都服从对数正态分布, 通过从固体微粒破裂过程特征的假设出发, 也可以得到这些微粒大小的分布渐近地趋向对数正态分布的结论^[31], 因此我们可以认为沙尘暴中的沙粒大小的分布服从对数正态分布, 具体公式如下:

$$P(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\eta D} \exp\left(-\frac{(\ln D - \delta)^2}{2\eta^2}\right) \quad \text{公式 (2.26)}$$

公式 (2.26) 中, D 为沙粒的直径, δ 和 η 是 $\ln D$ 的平均值和标准方差。对于公式 (2.26), 通过给定不同的 δ 值和 η 值, 我们可以模拟出不同沙尘暴的沙粒分布。

对于每个网格, 我们有一个量 n 记录网格中沙粒的个数, 于是我们可以通过如下公式得到网格中各尺寸沙粒的个数:

$$N(D) = nP(D) \quad \text{公式 (2.27)}$$

通过上式, 我们得到一个网格内的各尺寸沙粒的个数, 结合公式 (2.23) 和网格中的沙粒个数 n , 我们可以计算出一个网格中的所有沙粒的重力的和, 从而可以作为一个外力项应用到公式 (2.21) 中。考虑到这种计算比较耗时, 而且各个网格都需要计算, 我们采用预计算的方法, 构建一张以沙粒个数 n 和直径 D 为索引的查找表, 从而加快计算。

2.4.3 沙粒与风场交互作用的建模

在烟雾的模拟中，我们一般采用单项流体，并不考虑粒子和风场的交互。但是，对于沙尘暴来说，其粒子含量很大，空气和沙粒有不同的速度和温度，不能忽略沙粒和风之间的相互作用；同时采用两相流体模拟沙尘暴时也需要通过沙粒和风场的交互把两种流体联系起来。我们采用与文献^[20]类似的方法，接下来我们首先讨论单个粒子在风场中受到的力，然后阐述如何计算一个网格中所有沙粒受到的风的作用力，由于沙粒和风场的作用是相互的，因此也就得到了一个网格中所有沙粒对风的作用力。

对于单个颗粒来说，如果颗粒的速度 u_d 与风的速度 u 不同，那么风作用在颗粒的阻力取决于他们的相对速度 $u - u_d$ ，具体公式如下：

$$F_d = C_D \pi \nu D_d (u - u_d) \quad \text{公式 (2.28)}$$

公式 (2.28) 中， F_d 是风对粒子的作用力， ν 是空气的黏度， C_D 是阻力系数。对于 C_D 我们通过如下公式进行计算：

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{6}{(1 + \text{Re})^{1/2}} + 0.4 \quad \text{公式 (2.29)}$$

其中， Re 是颗粒的雷诺数，可以通过如下公式 (2.30) 进行计算，实际中可以设置 Re 为不同的常数，在体现不同流体差异的同时可以减少计算量，从而节省每步模拟的时间。

$$\text{Re} = \frac{|u_d - u| D_d}{\nu} \quad \text{公式 (2.30)}$$

以上我们讨论了单个沙粒受到的风对它的作用力。上节我们讨论了沙尘暴中的粒子服从对数正态分布，得出公式 (2.26)，通过公式 (2.27) 我们可以得出一个网格中的各尺寸的沙粒个数，进而得出公式 (2.31) 用于计算一个网格中所有粒子受到的风的作用力的总和。

$$F_{dp} = \int N(D) \cdot C_D \pi \nu D (u - u_d) dD \quad \text{公式 (2.31)}$$

公式 (2.31) 是一个积分式，在具体的计算过程我们转换为分段求和函数进

行计算。

风对沙粒的作用力可以通过公式(2.31)求解,风对沙粒的作用一般是一个加速的作用,而沙粒对风的作用表现为降低风的速度,它们互为作用力,因此也可以通过公式(2.31)进行计算,只是作用力的方向需要翻转一下。

本节主要讨论了风和沙粒之间的相互作用力,给出了计算风对单元网格的沙粒的作用力的公式和网格对风的作用力的公式,从而可以模拟沙粒和风之间的交互。

2.4.4 起沙的模拟

沙尘暴多发生在沙漠及其边缘地区,这些地区气候干旱,地表植被较少,土壤沙化,作为沙源地给沙尘暴提供了大量的沙尘。在沙尘暴运动的过程中,上升气流会把地表的大量沙尘卷入到空中,因此我们需要一种方法来模拟这个过程,即如何计算起沙量的大小。由于我们采用基于网格的欧拉方法来模拟沙尘暴,我们需要知道位于地面附近的一层或者几层网格的每个网格中的起沙量大小,即新增的沙粒的个数,为了简单起见我们考虑各个网格的沙粒直径都服从相同的对数正态分布。

孙建华等^[3]采用具有清晰风蚀物理学概念的起沙模式来进行起沙率的计算,他们认为是否起沙是由摩擦速度和临界摩擦速度的大小决定的。当摩擦速度大于临界摩擦速度时可以起沙,当摩擦速度小于临界摩擦速度时不能起沙。他们认为临界摩擦速度是一个表示土壤表面基本性质的物理量,与土壤粒子的尺寸、地表的性质和土壤的含水率等因素有关,并给出了复杂的公式。但是这种计算方法过于复杂,对于沙尘暴的模拟来说,并不需要像气象预测中的那样准确,因此我们对他们的公式进行简化,具体公式如下:

$$u^* = RHM u_0 \quad \text{公式(2.32)}$$

公式(2.32)中, u^* 表示临界摩擦速度, R 、 H 和 M 分别代表地表粗糙程度、土壤的含水量和土壤紧密度对 u_0 的影响, u_0 是单个粒子的临界摩擦速度。我们可以把反映土壤状况的三个参数合并为土壤干燥度,与临界摩擦速度一起影响临界

摩擦速度的值。

在给出计算临界摩擦速度后，我们需要知道在现有的速度下起沙量的大小。张宏升等^[32]在分析近地面风速、摩擦速度与沙地地表起沙的关系时指出，当地表摩擦速度超过临界摩擦速度时，沙尘通量与摩擦速度（风速）的 n 次方成正比，其中 n 的变化范围是 2 到 5；同时他们给出了浑善达克沙地地区沙尘通量 F 的绝对值与摩擦速度 u 的拟合关系式：

$$F = Cu^3 \tag{公式 (2.33)}$$

我们采用他们的拟合公式，同时考虑临界摩擦速度，给出最终的计算起沙量的公式：

$$F = \begin{cases} Cu^3, & u > u^* \\ 0, & u < u^* \end{cases} \tag{公式 (2.34)}$$

公式 (2.34) 中， C 是比例系数， u 是地表的风速， u^* 表示临界摩擦速度，由公式 (2.32) 计算得到。在每步的模拟沙尘暴的过程中，我们把公式 (2.34) 应用到地表的几层网格上，根据网格中的速度以及临界摩擦速度计算出是否起沙以及起沙量的大小。

2.4.5 升流的模拟

沙尘暴经常发生的沙漠及其边缘等地区，地表和空气温度存在极大差异，空气极不稳定，由于温度梯度的存在很容易产生上升气流。沙尘暴中的上升气流是把地面的沙尘携带到空中的主要动力源，因此，要逼真地模拟沙尘暴必须模拟沙尘暴中的上升气流。

为了模拟上升气流，我们首先需要温度场来衡量空间的温度分布。传统的方法很少涉及温度场的初始化问题，但是温度场的初始条件对上升气流的模拟有很大影响，所以我们给出了初始化温度场的方法，然后阐述如何通过温度场求解出其对速度的影响。

类似于风场的初始化，根据气象学原理，我们也采用波动的形式来模拟温度的分布，具体公式如下：

$$T = T_0 \sin(k_x x + k_y y - \sigma + \sigma_0) \quad \text{公式 (2.35)}$$

公式 (2.35) 中, T_0 表示不同高度上的温度的幅度值, k_x 和 k_y 分别是 x 和 y 方向上的波数, σ 是时间相位值, σ_0 是气压槽和温度槽之间的相位差。公式 (2.35) 与公式 (2.18) 基本类似, 其中多出的参数 σ_0 用来控制气压槽和温度槽之间的相位差, 因为气压槽和温度槽在高度上的倾斜性是沙尘暴形成的重要条件。具体的实现与气压的初始化的方法类似, 对于参数 σ_0 可以根据情况来设置, T_0 的数据可以参考沙尘暴发生时的气象数据进行设置。

在得出温度的初始条件之后, 每一步模拟过程中采用公式 (2.25) 根据速度对温度场进行平流, 这是温度场模拟的整个过程, 我们引入温度场的主要目的是计算由于温度差异对沙粒流动造成的影响, 因此下面我们讨论如何通过温度场来计算出上升气流的速度。

Fedkiw 等^[15]在模拟烟时, 为了模拟烟的上升, 把浮力作为外力作用于流体上, 具体的计算公式如下:

$$f_{\text{buoy}} = -\alpha \rho z + \beta(T - T_{\text{amb}})z \quad \text{公式 (2.36)}$$

其中, α 和 β 是两个正的系数, ρ 为烟的密度, $z = (0, 0, 1)$ 表示向上的方向, T_{amb} 是环境的温度。我们可以看到浮力主要受密度和网格中的温度与环境温度差异的影响。这种方法考虑的是网格温度与环境温度的差异, 并未考虑相邻网格间温度的差异, 也未考虑空气的热传导。因此, 我们不采用这种方法来计算浮力。

根据 Waldmann & Schmitt 分子运动论, 我们可以通过如下公式计算由于温度梯度产生的速度^[33]:

$$C = -\frac{2\kappa\sigma}{2\kappa + \kappa_p} \frac{\kappa}{p} \nabla T \quad \text{公式 (2.37)}$$

公式 (2.37) 中, C 为上升气流的速度, κ 是气体的热导率, κ_p 是粒子的热导率, σ 是调节系数, 本文取值为 0.2, p 是气压, T 是温度。通过这个公式, 我们可以得出上升气流的大小和方向。不同于原来的浮力人为设置为向上的方向,

上升气流的方向是根据温度梯度来计算的，由温度高的区域指向温度低的区域；同时大小跟温度梯度有关，也考虑了气体和沙粒的热导率以及压强对其的影响，考虑的更全面。

2.4.6 参数的提取

我们已经完成了沙尘暴景象的建模，本节我们讨论该模型中用到的参数。

首先，在对风场的模拟时，我们提出了风场的初始化方法，根据气压的分布通过伯努利定律来计算风场速度的初始值。我们通过设置不同高度上的气压值实现的。

其次，在进行沙粒流场的模拟时，我们需要考虑沙尘的成分参数：沙尘粒的密度、沙尘粒主半径以及反映沙尘粒径分布的标准差。为了模拟起沙，我们采用地表干燥度来反映不同土壤的起沙能力的不同；为了模拟升流，我们需要环境的温度分布。

最后，由于沙尘暴发生地点的不同，我们提供了一个场景类型的参数。沙漠中的沙尘暴主要表现为沙暴，我们需要首先进行沙尘暴景象的模拟，然后进行绘制；而对于城市中的沙尘暴，其沙粒在空中分布较均匀，而且沙粒总量较少，以尘暴为主，因此我们不对其进行建模，着重于根据沙尘暴的成分参数进行绘制，从而评价其对能见度的影响。

经过以上讨论，我们得到了影响沙尘暴景象的参数：气压、气温、地表干燥度、沙尘粒主半径、标准差、沙尘粒密度和场景类型。我们提供了输入界面来对这些参数进行设置，如图 2.8 所示。



图 2.8 沙尘暴参数设置界面

2.5 基于 GPU 的沙尘暴模拟实现

本节首先简要介绍 GPGPU 技术的基础，然后阐述沙尘暴模拟的流程以及其在 GPU 上的实现。

2.5.1 GPGPU 技术基础

随着 GPU（Graphic Processing Unit）技术的发展和 GPU 计算单元数目的不断增加，GPU 在用于传统的图形渲染之余，更多地被用于单指令多数据流的并行计算。

使用 GPU 进行通用计算，即 GPGPU，需要对 GPU 上的计算概念有所了解。下面我们将对 GPU 和 CPU 的计算概念进行比较，从而可以更好地理解和编写 GPU 程序：

- GPU 纹理。纹理是 GPU 中存储数据的地方，它类似于 CPU 中的数组。
我们可以把输入给 GPU 的数据以及在 GPU 中计算得到的结果存储到纹理中。
- GPU 片段程序。片段程序是在 GPU 上执行计算的代码，我们通过 CPU

程序给片段程序输入参数和纹理等，计算的结果一般存在 `FrameBuffer` 或者纹理中。它类似于 CPU 循环的内部代码，因为片段程序会在每个片段并行执行。

- 渲染到纹理。GPGPU 使用 GPU 主要是进行计算，因此一般采用渲染到纹理的技术，它把计算结果存到纹理中而不是 `FrameBuffer` 中，从而可以作为其它计算的输入。
- 几何体光栅化。当进行“绘制几何体”的操作后，CPU 会调用 GPU 进行计算，即相应的片段程序会运行。

上面我们总结了 GPU 相关的计算概念。在采用 GPU 进行通用计算时，首先需要创建用于输入和存储结果的纹理，然后编写并调用不同的片段程序来完成计算，最后根据计算的结果（一般是密度）进行显示。

2.5.2 GPU 中的实现

前面我们阐述了用两相流体来模拟沙尘暴的细节，本节首先介绍沙尘暴模拟的整个流程，然后简要地介绍在 GPU 中的实现。

我们采用两相流体来模拟沙尘暴，即分别对风场和沙粒流场进行模拟。风场需要计算的状态量是风的速度，沙粒流场需要计算的状态量主要包括沙粒的速度、密度和温度。程序开始时我们根据气压的分布进行风场的初始化，然后进行温度场的初始化，之后开始沙尘暴的模拟。在每一步模拟的过程中，我们分别对风场和沙粒流场进行计算。对于风场的模拟，我们经过平流、粒子对风的作用力、扩散、自适应旋涡约束力和投影等几个步骤；对于沙粒流场的模拟我们经过平流、风对粒子的作用力、重力、热浮力、起沙模拟和投影等几个步骤。其中，进行平流计算时我们采用精度更高的 MacCormack 方法，投影计算时采用 Jacobi 迭代方法，迭代次数一般设置为 40，这样可以在计算的速度和精度之间取得平衡。在每一步模拟的最后，根据沙粒的密度信息进行渲染。图 2.9 给出了沙尘暴模拟的流程图。

上面我们介绍了沙尘暴模拟的流程，现在我们介绍它们在 GPU 中的实现。

我们使用 OpenGL 编写图形相关的代码,采用 GLUT 处理和图形界面相关的操作,使用 GLSL 编写在 GPU 上运行的程序。由于我们采用基于网格的欧拉方法进行模拟,空间被划分成均匀的网格,每个网格中存储流体的状态量,这类似于 GPU 中的 3D 纹理,因此我们通过 3D 纹理来存储速度、密度、温度等状态量。由于我们采用的是 GPGPU 技术,因此采用 FBO 技术,通过把 3D 纹理绑定到 FBO 来实现渲染到纹理。通过 OpenGL 相关的绘图指令完成对片段程序的调用。对于图 2.9 中模拟的每个步骤都有一个对应的片段程序,因此大部分的计算操作都是在 GPU 中完成的,CPU 只负责处理片段程序的参数的设置、程序的主逻辑的控制以及和用户的交互。

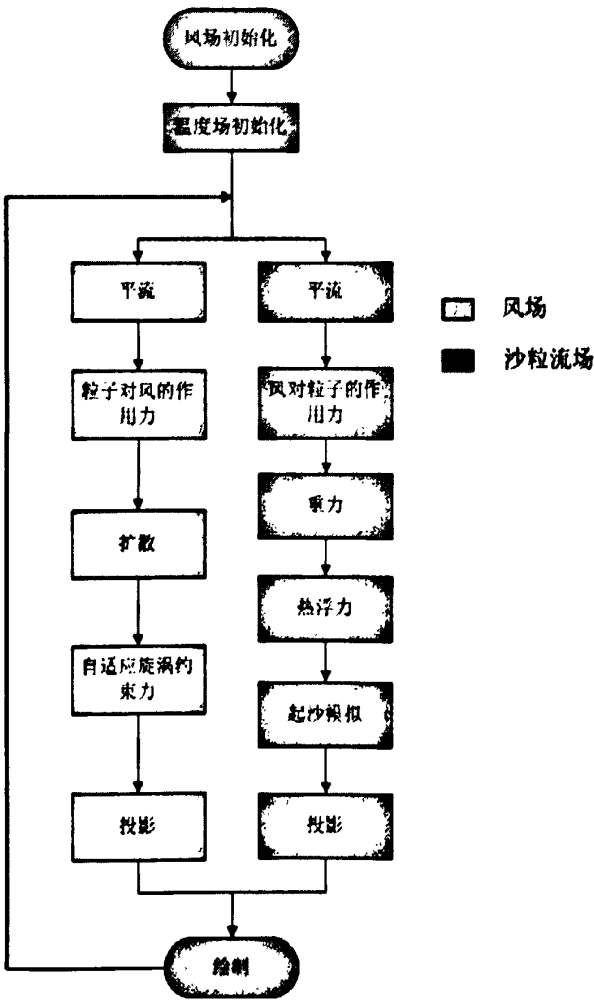


图 2.9 沙尘暴模拟的流程图

2.5.3 绘制结果

基于上述模型,我们设计了一个沙漠的沙尘暴场景,并进行了真实感的绘制。图 2.10 展示了沙尘暴由远到近的运动过程。(a)是没有沙尘暴的沙漠场景,(b)是沙尘暴刚刚形成,(c)是沙尘暴朝视点运动,(d)是沙尘暴到达眼前的景象。

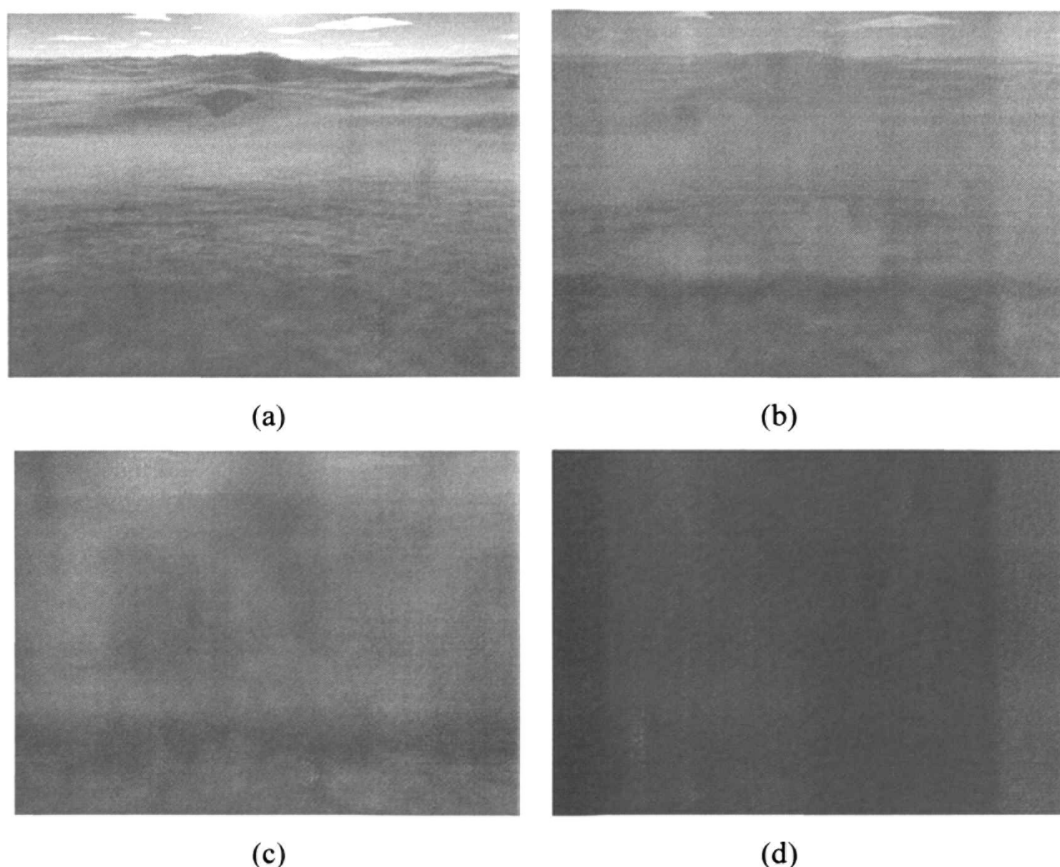


图 2.10 沙尘暴运动过程序列

2.6 本章小结

本章基于沙尘暴的物理机制,提出了一个参数化的沙尘暴建模方法。该方法采用两相流模型来分别模拟风场和沙粒流场,给出了风场和沙粒流场的建模方法,同时给出了风场和沙粒的相互作用模型,最重要的是给出了风场初始化、沙尘暴景象中的升流和起沙的模拟方法以及用于参数设置的界面。在本章的最后,介绍了沙尘暴模拟的整个流程以及采用 GPGPU 技术加速计算的具体实现方法。

第3章 沙尘暴场景的实时绘制

3.1 引言

本章讨论沙尘暴的绘制。首先，我们介绍体绘制中的基于纹理的算法以及光学模型，这是我们进行沙尘暴绘制的基础。接着我们介绍沙尘暴的绘制方法的实现细节，考虑了沙粒分布和个数对散射造成的影响。最后讨论沙尘暴对能见度造成的影响，给出了定量评估的方法。

3.2 体绘制

自然界很多的视觉效果是不规则的体，如液体、云、火焰、烟等，我们很难使用基本几何元素对它们进行建模，而采用体绘制的技术则可以得到很好的模拟效果。我们通过流体的方法对沙尘暴进行建模，在每一步模拟后得到了用于渲染的体数据（密度），这也很适合采用体绘制的技术来渲染沙尘暴。

体绘制中的三维数据集一般是三维规则数据场，如 CT 或者 MRI 采集的一组二维切片图像、流体模拟的密度场等。三维规则数据场是指由均匀网格组成的结构化数据，如图 3.1 所示，其中的每个网格通常称为体元或者体素（Voxel）。体绘制的目的就是将离散分布的三维数据场，按照一定的规则转换为图像。

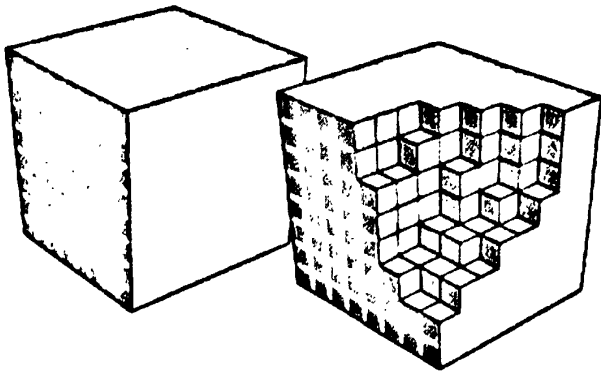


图 3.1 体数据

对于三维空间中的规则数据场, 通常采用直接体绘制算法。直接体绘制算法不需要从数据中提取几何表面, 就可以产生体数据集的图像^[34]。直接体绘制算法的实质为取样和合成, 如图 3.2 所示, 创建图像的过程就是沿着所有的视线对体数据进行采样, 然后使用转换函数把数据值转换为光学性质, 并进行累积。本节我们首先介绍体绘制中的基于纹理的算法, 然后介绍体绘制中的光学模型, 通过光学模型我们可以描述体数据对光的影响。

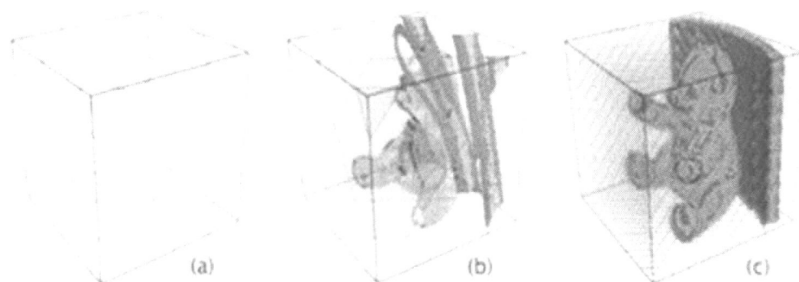


图 3.2 体的取样和合成^[21]

3.2.1 基于纹理的算法

由于我们采用 3D 纹理来存储沙尘暴的密度信息, 同时为了考虑多散射的影响, 我们采用基于纹理的体绘制方法。这种方法容易与多边形算法相结合, 对三维数据集的可视化有很好的效果。对于这种方法的具体实现细节, 可参照 Ikits 等的文章^[21], 下面我们只阐述和我们研究工作相关的部分。

当我们对三维数据场进行渲染时, 需要从视点出发对体数据进行取样, 然后把转换后的数据合成, 生成最终的图像。当体数据采用 3D 纹理来存储时, 首先需要用排列的观察平面把包围盒切片, 从而产生多组多边形, 完成对体的采样, 如图 3.3 所示; 然后在视点方向上按照从前到后的顺序对于每个观察平面进行处理。对于每个平面采用公式 (3.1)^[21]进行处理。

$$\begin{aligned}\hat{C}_i &= \left(1 - \hat{A}_{i-1}\right) C_i + \hat{C}_{i-1} \\ \hat{A}_i &= \left(1 - \hat{A}_{i-1}\right) A_i + \hat{A}_{i-1}\end{aligned}\tag{公式 (3.1)}$$

公式 (3.1) 中, $\hat{C}_i$ 和 $\hat{A}_i$ 分别是从前到背面累加的颜色和不同明度, i 表示第 i 个观察平面。

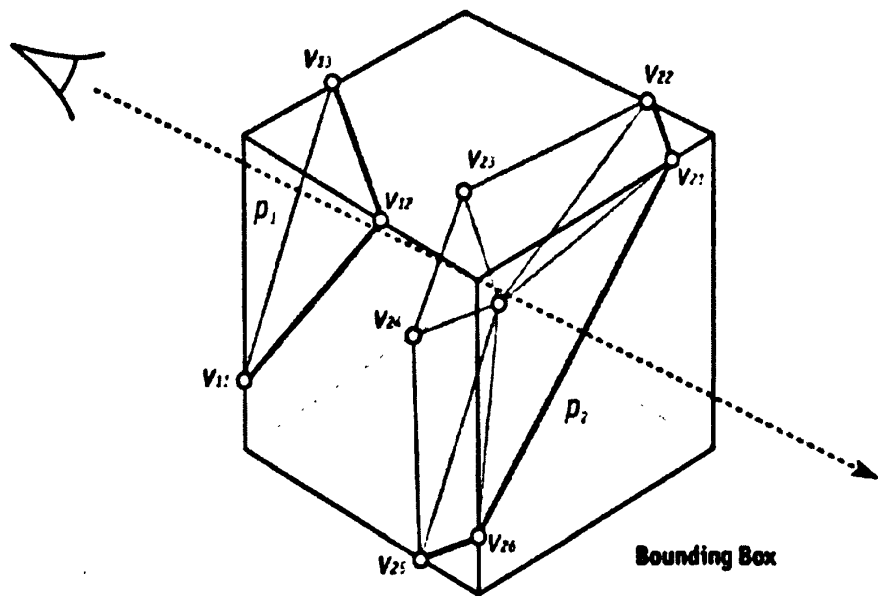


图 3.3 有两个取样平面的排列观察面切片^[21]

3.2.2 光学模型

像烟、雾、云等类似的介质中含有大量的微粒（如分子、尘埃、水蒸汽等），这些微粒会对光的传播产生影响，为了真实地模拟它们必须考虑这些粒子对光的作用。这正是体绘制中的光学模型的工作，它描述了体中的粒子如何与光相互作用。

当光穿过含有大量粒子的介质时，介质中的粒子与光发生交互，如图 3.4 所示。粒子可以吸收一部分的光，可以把一部分光散射到视线外，可以把一部分光散射到视线方向，甚至有的粒子还可能发出光。通常只需要考虑粒子对光的吸收和散射，并不需要模拟粒子的发光。下面我们分别讨论粒子对光线的吸收和散射。

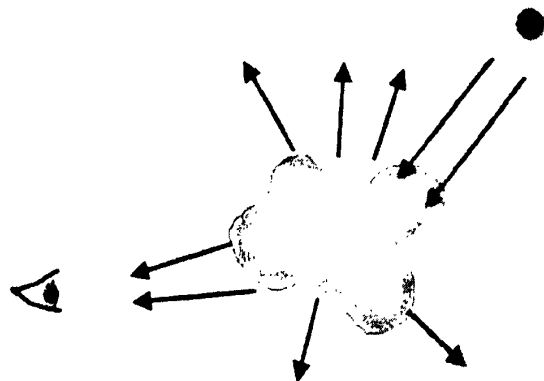


图 3.4 含有大量粒子的介质对光的影响

3.2.2.1 吸收

当光照射到单个粒子上时，粒子上接受光的表面（即吸收截面）会对光进行吸收。因此，我们通过粒子的吸收截面 $\sigma_{ab}^{(\lambda)}$ 来衡量它对光的吸收，如图 3.5 所示。 $\sigma_{ab}^{(\lambda)}$ 的单位为 m^2 ，它和光的波长有关，因为粒子对不同波长的光的吸收是不同的。

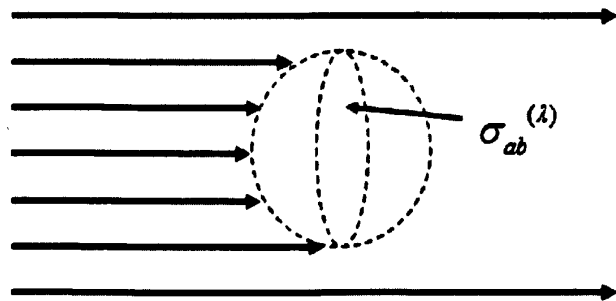


图 3.5 吸收截面

我们关心的并不是单个粒子对光的作用，而是介质对光的吸收。可以假设介质的密度为 ρ (m^{-3})，表示单位体积的粒子个数。我们可以定义吸收系数： $\beta_{ab}^{(\lambda)} = \rho \sigma_{ab}^{(\lambda)}$ ， $\beta_{ab}^{(\lambda)}$ 表示单位体积的吸收截面。当一条亮度为 $L^{(\lambda)}$ 的光线在该介质中移动 dx 距离后，根据吸收系数的定义，将有 $\beta_{ab}^{(\lambda)} dx$ 比例的光亮度被吸收。

于是我们得到如下公式：

$$-\frac{dL^{(\lambda)}}{L^{(\lambda)}} = \beta_{ab}^{(\lambda)} dx \quad \text{公式 (3.2)}$$

由公式 (3.2) 我们可以得到如下公式：

$$L^{(\lambda)}(x) = L_0^{(\lambda)} e^{-\beta_{ab}^{(\lambda)} x} \quad \text{公式 (3.3)}$$

公式 (3.3) 中，0 表示光线穿过介质的起始点位置， x 表示光线在介质中传播的距离， $L_0^{(\lambda)}$ 表示光线在起始点 0 处的光亮度。使用公式 (3.3) 可以计算光线经过介质之后的光亮度。

公式 (3.3) 中，假定介质中 $\beta_{ab}^{(\lambda)}$ 为常数，如果考虑吸收系数的变化，我们可以沿光线传播路径进行离散采样，同时假设 $\beta_{ab}^{(\lambda)}$ 也是离散变化的，那么我们可以采用如下公式进行计算：

$$L^{(\lambda)}(x) = L_0^{(\lambda)} \cdot \prod_{i=1}^n e^{\beta_{ab(i)}^{(\lambda)} \Delta x} \quad \text{公式 (3.4)}$$

公式 (3.4) 中， n 表示采样的总次数， Δx 表示采样的间隔距离。

3.2.2.2 散射

与吸收类似，对于单个粒子的散射，我们可以通过散射截面 $\sigma_{sc}^{(\lambda)}$ 衡量。那么我们可以定义散射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)} = \rho \sigma_{sc}^{(\lambda)}$ ， $\beta_{sc}^{(\lambda)}$ 表示单位体积的散射截面。同理，我们可以得到散射对光亮度的影响，公式如下：

$$L^{(\lambda)}(x) = L_0^{(\lambda)} e^{-\beta_{sc}^{(\lambda)} x} \quad \text{公式 (3.5)}$$

公式 (3.5) 与公式 (3.3) 类似，只是把吸收系数变成散射系数。

考虑粒子对光的吸收和散射都对光亮度造成衰减，我们可以使用衰减系数 $\beta_{ex}^{(\lambda)}$ 来表示两者：

$$\beta_{ex}^{(\lambda)} = \beta_{ab}^{(\lambda)} + \beta_{sc}^{(\lambda)} \quad \text{公式 (3.6)}$$

当粒子对光进行散射时，会发生两种情况：一部分光线会偏离原来的方向，

光亮度降低；其它的光线会被粒子散射到光线的方向上（如图 3.6 所示），光亮度增加。前面我们只考虑了粒子散射对光亮度的衰减，并未考虑别的光线会被散射到视线方向从而增加光亮度的问题。接下来我们讨论如何计算第二种情况。

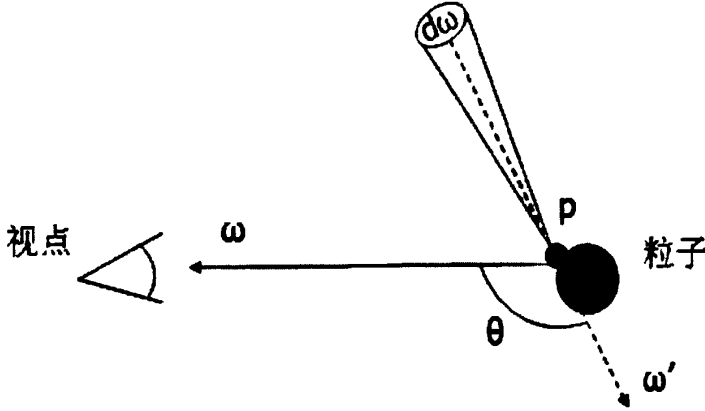


图 3.6 粒子把光散射到视线方向

散射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)}$ 只给出了多少光亮度会被散射，并没有给出每个方向上的散射情况。因此，我们定义相位函数来反映把光线散射到不同方向上的概率。一般介质中的粒子为球形的，当把粒子考虑为球体时，相位函数只与原方向和散射方向的夹角有关，因此可以把相位函数定义为 $\Phi(\theta)$ 。

考虑到相位函数 $\Phi(\theta)$ ，我们定义角散射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)}(\theta) = \beta_{sc}^{(\lambda)} \Phi(\theta)$ ，于是我们可以得到：

$$\int_{\Omega} \beta_{sc}^{(\lambda)}(\theta) d\omega = \beta_{sc}^{(\lambda)} \quad \text{公式 (3.7)}$$

图 3.6 中， $d\omega$ 立体角内的入射光线会有 $\Phi(\theta)d\omega$ 的概率被散射到视线方向。我们需要计算 p 点沿 ω 方向上的光亮度 $L^{(\lambda)}(p, \omega)$ ，那么我们可以在球体上进行积分，计算沿其它方向 ω' 到达 p 点并散射到 ω 方向上的光亮度，公式如下：

$$L^{(\lambda)}(p, \omega) = \int_{4\pi} L^{(\lambda)}(p, \omega') \Phi(\theta) d\omega' \quad \text{公式 (3.8)}$$

考虑一条光线在介质中沿方向 ω 传播，起始光亮度为 $L_0^{(\lambda)}(\omega)$ ，经过一段距离

x 后的光亮度为 $L^{(\lambda)}(x, \omega)$ 。那么光在传播的过程中由于介质中的粒子的吸收和散射会发生衰减, 同时会有别的光线不断的散射到这条光线中, 考虑到这两种情况, 结合之前的公式, 我们得到下面的公式:

$$g(x, \omega) = \int_{4\pi} L^{(\lambda)}(x, \omega') \beta_{sc}^{(\lambda)}(\theta) d\omega' \quad \text{公式 (3.9)}$$

$$L^{(\lambda)}(x, \omega) = L_0^{(\lambda)} e^{-\int_0^x \beta_{\alpha}^{(\lambda)}(x') dx'} + \int_0^x g(x', \omega) e^{-\int_{x'}^x \beta_{\alpha}^{(\lambda)}(x'') dx''} dx' \quad \text{公式 (3.10)}$$

公式 (3.9) 中, θ 为方向 ω 和 ω' 之间的夹角, $g(x, \omega)$ 表示空间中所有方向 ω' 上的光线在点 x 处散射到方向 ω 的光亮度。公式 (3.10) 是一个非常复杂的公式, 它同时考虑吸收和散射对光亮度的影响, 对于散射考虑为复杂的各向异性的多散射, 因此它包含多重积分。它具有理论上的意义, 但由于多重积分的计算非常耗时, 在实际中并不会采用这个公式进行计算。Harris^[27] 对多散射模型进行简化, 只考虑在一个很小空间角范围内的前向多散射, 从而可以把积分公式化为一个只包含简单的求和与连乘运算的公式, 从而达到实时的要求, 具体的实现我们后面会讨论。

3.3 沙尘暴的光学特性

前一节讨论了考虑吸收和多散射的光学模型, 本节阐述沙尘暴的光学特性。首先, 我们讨论了沙粒的散射效率因子和消光效率因子的计算方法, 然后介绍体素中的散射和吸收系数的计算, 最后是 Mie 散射的相位函数。

3.3.1 沙粒光学特性

在阐述体绘制的光学模型时, 我们给出了含有吸收截面 $\sigma_{ab}^{(\lambda)}$ 和散射截面 $\sigma_{sc}^{(\lambda)}$ 的公式, 但并未说明这两个量的计算方法。本节给出沙粒的吸收截面和散射截面的计算方法。

沙尘暴中的沙粒或者尘埃一般为球形的, 粒径一般大于 $1 \mu m$, 而可见光的波

长范围为：390nm~780nm。可以看出沙粒粒径大于可见光的波长，因此可以应用 Mie 理论对沙粒进行分析。

首先我们定义与沙粒相关的三个参数： Q_{ex} 、 Q_{ab} 和 Q_{sc} ，分别为消光效率因子、吸收效率因子和散射效率因子。于是我们有如下公式：

$$Q_{ab} = \sigma_{ab}^{(\lambda)} / 2\pi r^2 \quad \text{公式 (3.11)}$$

$$Q_{sc} = \sigma_{sc}^{(\lambda)} / 2\pi r^2 \quad \text{公式 (3.12)}$$

$$Q_{ex}(x, n) = Q_{ab}(x, n) + Q_{sc}(x, n) \quad \text{公式 (3.13)}$$

公式 (3.13) 中， $x = 2\pi r / \lambda$ ，为尺度参数； $n = n_r + n_i i$ ，为粒子的复折射率，其中实部 n_r 表示粒子散射能力大小，虚部 n_i 表示粒子吸收能力大小。

在给出这些参数的定义后，我们可以使用 Mie 理论精确求出这些参数，但是精确求解计算量过大，我们采用 Van de Hulst^[35]的方法来近似计算，近似公式如下：

$$Q_{ex}(x, n) = 2 - 4 \exp(-\alpha \tan \beta) \frac{\cos \beta}{\alpha} \sin(\alpha - \beta) + 4 \cos^2(\beta / \alpha) [\cos(2\beta) - \cos(\alpha - 2\beta) \exp(-\alpha \tan \beta)] \quad \text{公式 (3.14)}$$

$$Q_{ab}(x, n) = 1 + \frac{\exp(-4x n_i)}{2x n_i} + \frac{\exp(-4x n_i) - 1}{8x^2 n_i^2} \quad \text{公式 (3.15)}$$

其中， $x = 2\pi r / \lambda$ ， $\alpha = 2x(n_r - 1)$ ， $\beta = \tan^{-1}(n_i / n_r - 1)$ ， n_r 和 n_i 分别为粒子复折射率的实部和虚部， r 为粒子半径， λ 为波长。

通过公式 (3.14) 和公式 (3.15) 可以求出 Q_{ex} 、 Q_{ab} 。表 3.1 给出了复折射率 $n = 1.332 - 1.96 \times 10^{-5} i$ 下，不同半径的粒子在红绿蓝三种波长下的消光效率因子 Q_{ex} 和吸收效率因子 Q_{ab} 。从表 3.1 中我们可以发现，粒子对可见光的消光效率因子随着粒子半径的增大而在波动中增加，吸收效率因子随粒子半径的增大而增大，但值很小，基本上可以忽略；同一粒子对于三种波长的可见光的消光效率因子不同，没有明显规律。

表 3.1 粒子的光学特性表

粒子半径(μm)	消光效率因子 Q_{α}			吸收效率因子 Q_{ab}		
	红光 (0.77 μm)	绿光 (0.58 μm)	蓝光 (0.49 μm)	红光 (0.77 μm)	绿光 (0.58 μm)	蓝光 (0.49 μm)
1	3.97	3.11	8.08	0.00042	0.00056	0.00066
7	2.08	2.00	9.98	0.0030	0.0040	0.0047
16	4.87	7.61	7.70	0.0067	0.0090	0.011
30	3.27	8.24	8.31	0.013	0.017	0.020
60	6.26	7.50	7.39	0.025	0.033	0.039
90	9.11	2.04	2.07	0.038	0.050	0.059

根据公式 (3.13) 可求出 Q_{sc} ，最终根据公式 (3.11) 和公式 (3.12) 可以求出吸收截面 $\sigma_{ab}^{(\lambda)}$ 和散射截面 $\sigma_{sc}^{(\lambda)}$ 。

在实现中，我们根据粒子半径和波长预先计算这些量，存储为查找表供其它部分使用，从而可以提高计算的速度。

3.3.2 体素光学特性

我们采用基于网格的欧拉方法来模拟沙粒流场，我们得到的是网格中的体素的密度信息，因此为了绘制沙尘暴，我们必须以体素为单位考虑沙尘暴对光的吸收和散射。

在对沙粒流场进行建模时，我们假设沙粒粒径服从对数正态分布 $N(D)$ ，因此我们可以通过如下公式计算体素内的消光系数 $\beta_{\alpha}^{(\lambda)}$ 和散射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)}$ ：

$$\beta_{\alpha}^{(\lambda)} = \int_0^{\infty} \frac{\pi D^2}{4} \sigma_{\alpha} N(D) dD$$

公式 (3.16)

$$\beta_{sc}^{(\lambda)} = \int_0^{\infty} \frac{\pi D^2}{4} \sigma_{sc} N(D) dD$$

公式 (3.17)

通过公式 (3.16) 和公式 (3.17) 我们可以求出体素中的消光系数 $\beta_{\alpha}^{(\lambda)}$ 和散

射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)}$ 。在具体实现中，我们提出公式中的体素的单位体积粒子个数 (ρ)，它可以视作和体素相关的常数，对其他部分采用预计算的方法存储不同波长和粒子分布下的体素的光学特性值，然后在运行中通过把查表得到的值乘以 ρ 得出消光系数 $\beta_{\alpha}^{(\lambda)}$ 和散射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)}$ 的值。

表 3.2 给出了不同粒子分布下的体素光学特性的值，注意这里并未乘以单位体积粒子个数 (ρ)，所以值较小。从表中我们可以发现，随着粒子半径的增大消光系数 $\beta_{\alpha}^{(\lambda)} / \rho$ 和散射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)} / \rho$ 的值也不断增大；对于同一粒子半径，标准差越大，消光系数 $\beta_{\alpha}^{(\lambda)} / \rho$ 和散射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)} / \rho$ 的值也越大；对于红绿蓝三种波长的可见光，消光系数 $\beta_{\alpha}^{(\lambda)} / \rho$ 和散射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)} / \rho$ 的值差别不大，这间接反映出沙尘暴的颜色很大程度上是由沙粒的颜色所决定的。

表 3.2 体素的光学特性表

平均半径 (μm)	标准差	消光系数 $\beta_{\alpha}^{(\lambda)} / \rho (10^{-6})$			散射系数 $\beta_{sc}^{(\lambda)} / \rho (10^{-6})$		
		红光 ($0.77 \mu m$)	绿光 ($0.58 \mu m$)	蓝光 ($0.49 \mu m$)	红光 ($0.77 \mu m$)	绿光 ($0.58 \mu m$)	蓝光 ($0.49 \mu m$)
1	0.5	2.74e-10	2.65e-10	2.22e-10	2.74e-10	2.65e-10	2.21e-10
1	0.8	5.03e-9	5.01e-9	4.95e-9	5.02e-9	5.00e-9	4.93e-9
6	0.5	2.82e-7	2.83e-7	2.84e-7	2.82e-7	2.82e-7	2.83e-7
6	0.8	5.66e-6	5.66e-6	5.66e-6	5.63e-6	5.62e-6	5.61e-6
21	0.5	4.23e-5	4.23e-5	4.23e-5	4.21e-5	4.20e-5	4.20e-5
21	0.8	3.40e-4	3.39e-4	3.38e-4	3.37e-4	3.35e-4	3.33e-4
46	0.5	8.12e-4	8.10e-4	8.09e-4	8.05e-4	8.02e-4	8.00e-4
46	0.8	1.94e-3	1.92e-3	1.92e-3	1.92e-3	1.90e-3	1.89e-3
81	0.5	4.03e-3	4.00e-3	4.00e-3	3.99e-3	3.95e-3	3.93e-3
81	0.8	4.16e-3	4.12e-3	4.11e-3	4.12e-3	4.06e-3	4.04e-3

3.3.3 相位函数

相位函数决定了粒子散射光的方向。由于沙粒多为球形，且沙粒粒径比可见光的波长长，因此我们采用 Mie 散射来模拟粒子的散射。

由于 Mie 散射过于复杂，我们并不需要那么精确的计算，因此采用近似的 Henyey / Greenstein 相位函数^[36]，具体公式如下：

$$\Phi(\theta) = \frac{(1-g)^2}{4\pi(1+g^2-2g\cos(\theta))^{3/2}}$$

公式 (3.18)

其中， θ 是入射光线和散射光线的夹角， g 是一个控制参数，可以控制相位函数的形状（如图 3.7）。当 $g=0$ 时，相位函数值为常数 $1/4\pi$ ，即各向同性的散射；当 g 为负值时，大部分光线沿前向的方向散射；当 g 为正值时，大部分光线沿后向的方向散射。在沙尘暴的模拟中，我们采用 g 为负值，即倾向于把光线沿前向散射。

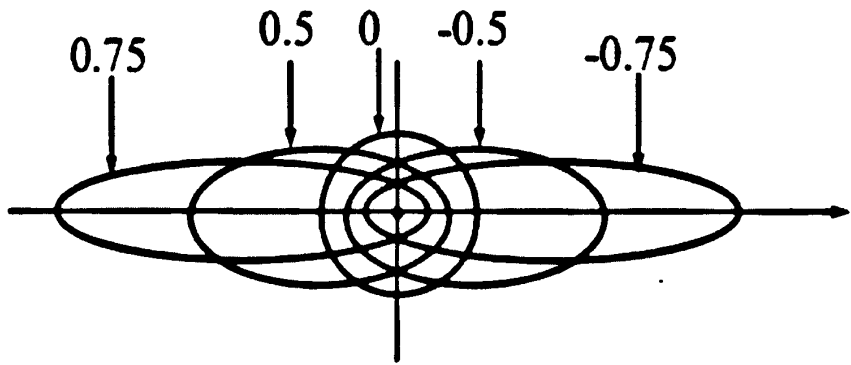


图 3.7 Henyey / Greenstein 相位函数

3.4 沙尘暴场景绘制

通过沙尘暴的光学特性一节，我们已经计算出了公式 (3.10) 中需要使用到的变量，但是在实践中我们无法直接使用公式 (3.10)，必须对它进行简化。本节我们参照 Harris^[27]的方法，阐述多散射的简化模型，然后介绍半角切片的绘制方法，最后是能见度的评估方法。

3.4.1 多散射简化模型

Nishita 等^[37]在进行云的绘制时,指出对于多散射来说,散射对光亮度的贡献主要来自于第一次和第二次少数方向上的散射,因此他们在计算散射时只采样贡献较大的方向。Harris^[27]进行更进一步的简化,在光源入射方向上,只考虑在一个很小空间角范围内的前向多散射;在视线方向上,只考虑各项异性的单散射。

Harris^[27]方法是针对云中的粒子进行计算的,而我们的数据是存储在空间的均匀网格中,因此需要对原有方法进行适当的改变。

首先,在光源方向上,按离光源由近到远的顺序,计算各个体素的光亮度。对于每个体素 V ,我们只计算已计算过的并且与该体素相邻的体素对它的散射的影响。因此,我们可以得到如下公式:

$$g_k^{(\lambda)} = \sum_{i=1}^M L_i^{(\lambda)} \beta_{sc}^{(\lambda)}(\theta) \quad \text{公式 (3.19)}$$

$$L_V^{(\lambda)} = L_0^{(\lambda)} \prod_{j=1}^N e^{-\beta_{\alpha}^{(\lambda)} \cdot \Delta x} + \sum_{j=1}^N g_k^{(\lambda)} \prod_{k=j+1}^N e^{-\beta_{\alpha}^{(\lambda)} \cdot \Delta x} \quad \text{公式 (3.20)}$$

公式 (3.19) 是对公式 (3.9) 的简化。其中, M 表示与当前体素相邻并且已被计算过的体素的个数,这个公式用来计算周围体素对当前体素的散射。

公式 (3.20) 是对公式 (3.10) 的简化。其中, Δx 为采样的间距, N 表示从起始点到达当前体素的采样次数,这个公式给出了体素光亮度的公式,由经过衰减的光源的入射光亮度 and 从其它体素多散射并经过衰减的光亮度组成。

在实际计算中,可以把公式 (3.20) 转化为递归公式:

$$L_k^{(\lambda)} = \begin{cases} g_{k-1}^{(\lambda)} + T_{k-1} \cdot L_{k-1}^{(\lambda)}, & 2 \leq k \leq N \\ L_0^{(\lambda)}, & k = 1 \end{cases} \quad \text{公式 (3.21)}$$

其中, $T_k = e^{-\beta_{\alpha}^{(\lambda)} \cdot \Delta x}$ 可认为是体素的透过率。通过公式 (3.21) 可以按离光源由近到远的顺序,计算出各个体素的光亮度。

然后,在视线方向上,根据视点的不同,我们可以采用从近到远或者从远到近的方式来累积沿视线方向上的光亮度,公式如下:

$$E_k^{(\lambda)} = L_k^{(\lambda)} \beta_{sc}^{(\lambda)}(\theta) + T_k \cdot E_{k-1}^{(\lambda)}$$

公式 (3.22)

其中， θ 为视线方向与入射光方向的夹角。可以看出，在视线方向上，我们只考虑单散射的影响。与公式 (3.21) 类似，这也是一个递归公式，具体的解法我们在下节阐述。

3.4.2 半角切片绘制

Ikits 等^[21]在介绍基于纹理的体绘制技术时，提出了针对 3D 纹理进行可视化的半角切片绘制方法。我们采用他们的方法，但是对原有方法进行改进，从而实现简化的多散射的体绘制，即公式 (3.21) 和公式 (3.22) 的计算。

我们通过切片的方法来对体数据进行采样。传统方法对于光源和视点分别需要不同的切片，而且数据的存取也比较复杂。如果采用半角切片的方法，当分别以光源和视点两个观点进行光亮度累积时，可以使用相同的切片。半角切片是指以视线和光线的中间为切片轴来进行切片，如图 3.8 所示。对于切片，从光源方向，我们总是按它离光源从近到远的方式进行计算；而从视点方向，图 3.8 中 (a) 按离视点从近到远的方式进行计算，图 3.7 中 (b) 按离视点从远到近的方法进行计算。

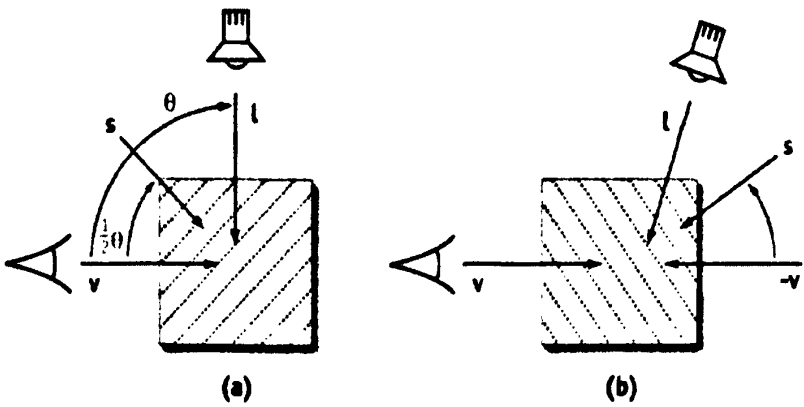


图 3.8 半角切片图示^[21]

对于每一个切片，需要进行两遍计算：首先从视点方向计算公式 (3.22)，采样光源缓存得出介质对光源的衰减，累积衰减后的光亮度到视点缓存，如图 3.9

中 (a) 所示；然后从视点方向计算公式 (3.21)，通过采样介质的密度信息，累积密度对光亮度的衰减到光源缓冲，如图 3.9 中 (b) 所示。当计算完所有的切片后，也就完成了公式 (3.21) 和公式 (3.22) 的递归运算，得到了最终的图像。

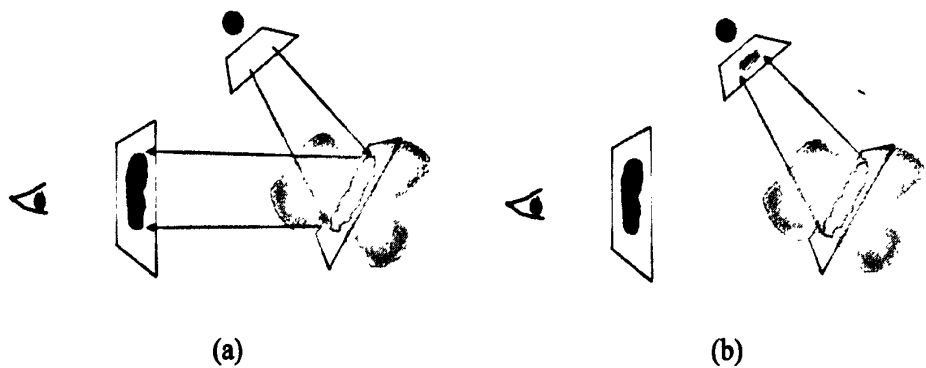


图 3.9 半角切片的两遍计算

3.4.3 能见度评估

沙尘暴中含有大量的沙尘粒子，它们对可见光的吸收和散射会引起能见度的变化。

能见度是一个复杂的物理量，它主要取决于空气中的悬浮粒子引起的消光系数。根据 Koschmieder 定律^[38]，能见度公式如下：

$$V = -\ln \varepsilon / \sigma \tag{3.23}$$

其中， V 是能见距离， ε 是视觉对比阈值，一般可取为 0.05， σ 为消光系数，它其实就是 β_{α} ，前面我们已经给出了 β_{α} 的计算方法。由公式 (3.23) 知，能见度主要受 β_{α} 的影响。

我们在沙尘暴的光学特性一节，分别阐述了沙粒和体素的光学特性。对于单个沙粒，它的吸收截面和散射截面与入射光波长、粒子的粒径有关；对于体素，它的消光系数与其中的粒子的分布以及粒子的密度有关。通过以上两步我们可以得到消光系数 β_{α} ，可以看出消光系数 β_{α} 受沙粒密度和沙粒粒径分布的影响。因此，当给定沙尘暴的沙尘密度和沙粒粒径分布后，我们可以计算出 β_{α} ，从而可以评估出沙尘暴对能见度的影响。对于沙粒光学特性和体素光学特性，我们可以

采用预计算的方法来实现，从而提高程序的运行速度。

表 3.3 不同浓度和粒子分布下的能见度

浓度(kg/m^3)	平均半径(μm)	标准差	能见度(m)
5.0×10^{-3}	6	0.5	1807
5.0×10^{-3}	6	0.8	1782
1.2×10^{-2}	6	0.5	461
5.0×10^{-3}	50	0.5	721
5.0×10^{-3}	50	0.8	689
1.2×10^{-2}	50	0.5	262
5.0×10^{-3}	80	0.5	652
5.0×10^{-3}	80	0.8	531
1.2×10^{-2}	80	0.5	220

表 3.3 给出了在不同浓度和粒子分布下的能见度。我们可以发现能见度主要受沙尘暴浓度的影响，平均半径对能见度的影响次之，标准差对能见度也有一定的影响。

3.5 结果与分析

本节我们首先讨论城市中的沙尘暴场景的绘制结果，然后讨论沙漠沙尘暴场景的绘制结果和性能分析。

3.5.1 城市沙尘暴场景

尘暴是城市中沙尘暴的主要部分，由于其运动比较复杂，如果模拟其运动计算量太大，且效果不佳，因此我们通过指定沙尘暴的成分参数（沙尘粒半径、标准差、密度），采用本章的方法对其进行绘制。

图 3.10 给出了不同程度的城市沙尘暴场景的绘制结果。(a)是没有沙尘暴的城市场景；(b)是浓度为 $5.8\times 10^{-3} kg/m^3$ 的沙尘暴，能见度大约为 600m；(c)是浓度

为 $7.5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ 的沙尘暴，能见度大约为 450m；(d) 是浓度为 $1.5 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ 的沙尘暴，能见度大约为 200m。

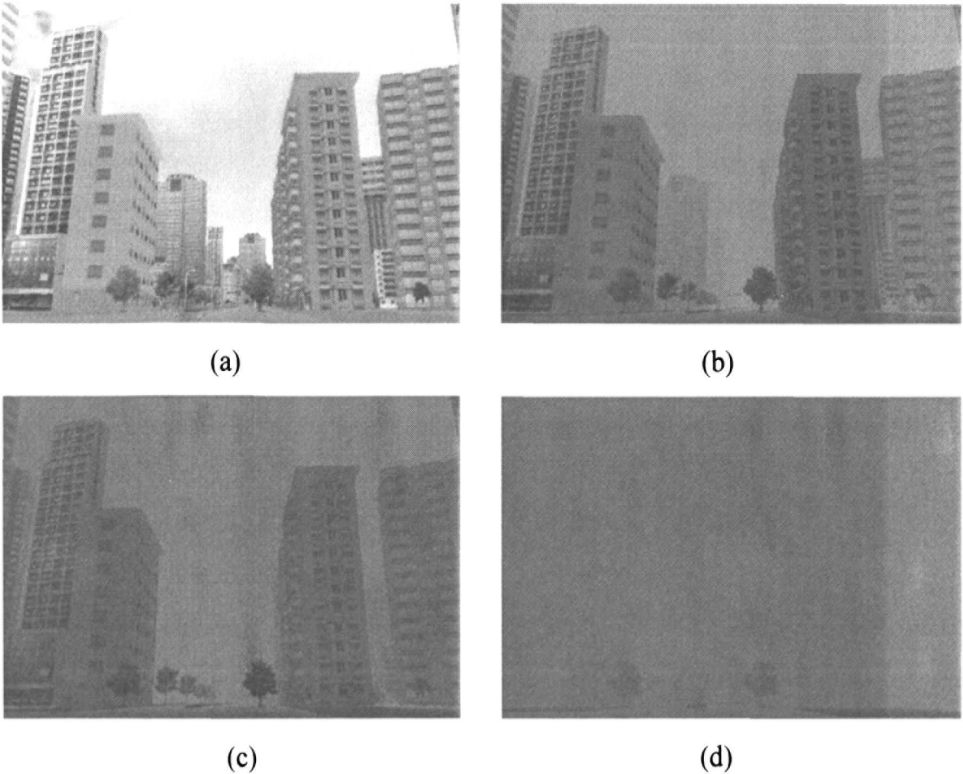


图 3.10 不同程度的城市沙尘暴场景

3.5.2 沙漠沙尘暴场景

对于沙漠沙尘暴场景，我们先采用基于物理的欧拉流体模拟方法计算出沙尘暴的密度分布，然后采用基于半角切片的简化多散射模型进行绘制。

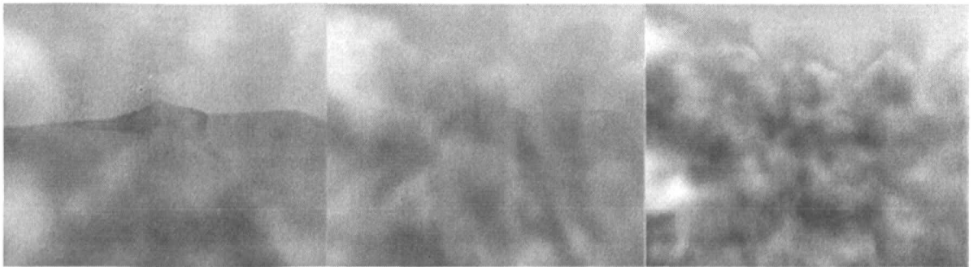


图 3.11 不同程度的沙漠沙尘暴场景

图 3.11 给出了不同程度的沙漠沙尘暴场景。从绘制结果中，我们可以看出

绘制的结果包含阴影和透明的效果，同时也模拟了多散射的效果。

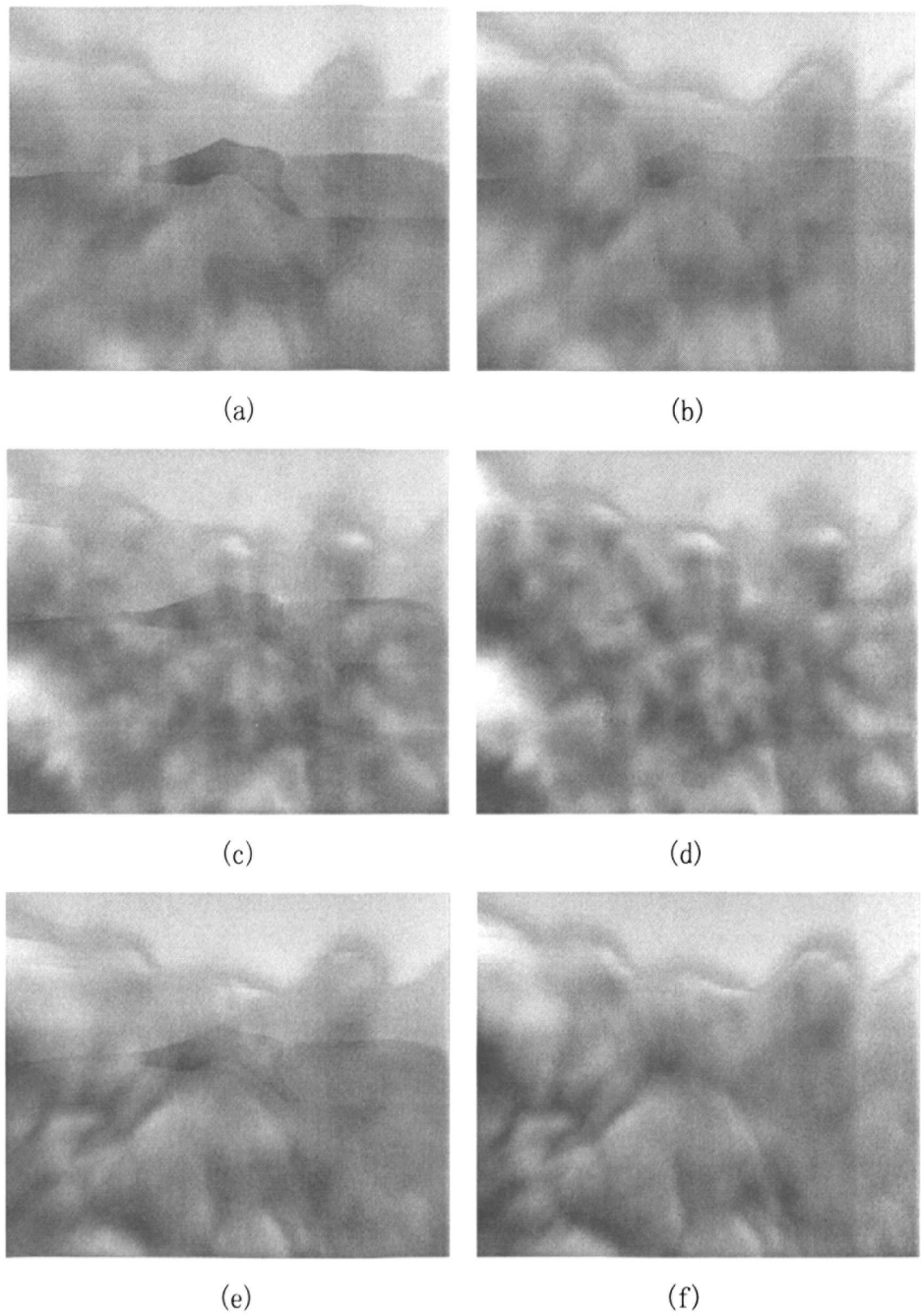


图 3.12 不同网格分辨率和切片数的绘制结果

对于沙尘暴场景的绘制，我们可以采用不同的网格分辨率和切片数。图 3.12 给出了不同网格分辨率和切片数下的场景效果。其中，(a)和(b)的网格分辨率为

64×64×64，切片数分别为 64 和 128；(c)和(d)分别与(a)和(b)类似，只是增加了通过噪声来扰动纹理坐标的方法；(e)和(f)的网格分辨率为128×128×128，切片数分别为 64 和 128。我们可以发现：(a)、(c)和(e)的效果不佳，这是由于切片数太低造成的；(e)和(f)采用了较高的网格分辨率，因此细节较丰富，效果逼真，同时切片数目对绘制结果影响不大，但很难达到实时；(c)和(d)采用噪声扰动纹理坐标来增加细节，但是没有(f)的效果逼真。我们可以采用(d)的方案，在实时的前提下，通过增加切片和扰动纹理坐标的方法来增强绘制的效果。

表 3.4 算法性能比较

网格分辨率	模拟的帧率	模拟和绘制的帧率	
		切片数 64	切片数 128
64×64×64	30.4	18.6	13.3
128×128×128	4.6	4.2	3.9

本文的程序是在 Intel Core Quad CPU，2.33GHz，3.25GB 内存，NVIDIA GeForce GTX 280 显卡的配置上运行的。表 3.4 给出沙漠场景中沙尘暴模拟算法的性能分析。我们可以看出在网格分辨率为64×64×64时，算法可以达到实时，绘制时切片的数量对帧率有一定影响；当网格分辨率为128×128×128时，帧率在 5 帧左右，算法大部分时间花费在沙尘暴模拟上，绘制部分对帧率基本不影响。

3.6 本章小结

本章实现了沙尘暴动态场景的绘制。首先，我们介绍了基于纹理的体绘制技术和体绘制中的光学模型。然后，我们针对沙尘暴的特点，给出了单个沙粒和体素中的消光系数和散射系数的计算方法，着重阐述了简化的多散射模型和半角切片的绘制方法，给出了沙尘暴对能见度影响的评估方法。最后，我们分城市场景和沙漠场景对结果进行了讨论，在沙漠场景中讨论了网格分辨率和切片数对绘制结果和程序帧率的影响。

第4章 总结与展望

4.1 本文的工作总结

沙尘暴是世界范围内多发的灾难性天气现象，近年来对我国的影响日趋严重，其对于生态环境、人民生命财产和健康及道路交通等方面造成重大的危害。因此，基于气象学原理的沙尘暴量化模拟有着重要的意义，其在数字娱乐产业、沙尘暴预报、灾难救援和评估等领域有着广泛的应用价值。

本文围绕沙尘暴景象的参数化建模和绘制这一主题展开研究，其主要研究成果总结如下：

- 提出了参数化的沙尘暴景象真实感量化建模方法。基于气象学原理及相关计算模型并加以合理简化，采用基于网格的欧拉流体模型，对沙尘暴动态景象的不同阶段如：起沙、升流、扬尘及与环境交互作用分别进行建模，在该模型中，通过界面输入不同的物理气象参数（气压、气温、沙尘粒主半径、沙尘粒密度、地表干燥度、场景类型等），就可生成特定气象条件下的不同的沙尘暴景象。
- 提出了一种改进的沙尘暴景象实时绘制算法。该算法提出并实现了一种半角切片前向多散射的体绘制模型，充分考虑了沙尘粒子与环境光的相互作用，大大简化了整体散射模型的计算量；并采用 GPU 技术进行加速，实现了不同类型、不同程度沙尘暴景象的实时绘制。
- 采用气象计算模型对沙尘暴景象所产生的能见度进行定量评估，这就为沙尘暴景象对环境的影响特别是对道路交通的影响做出了定量的评估。
- 模块集成系统化，易于移植；并设置了参数化的输入界面，界面友好，易于操作。

4.2 未来工作的展望

在本文工作的基础上，作者希望将来的研究工作中，在以下几个方面有进一步的突破与改进：

- 完善沙尘暴的两相流体模型，采用粒子系统加入近地面沙暴场景的固体沙粒的数量，以增强场景的沉浸感；并增加沙漠背景因沙尘暴而产生的沙丘流动的效果，进而可为影视制作时沙漠场景的沙尘暴特效制作提供技术支持。
- 通过对沙尘暴模型中部分模块采用预计算的方法进一步简化计算量，并通过最新的 GPU 等技术加速绘制过程，从而为本方法在虚拟现实及游戏娱乐等互动方面的应用打好基础。
- 将沙尘暴景象能见度预测模型与实际沙尘暴测量数据进行比较，并加以修正完善，以接近实际应用。
- 研究沙尘暴的分级方法，通过本方法的计算模拟分析结果，直观地展示不同沙尘暴对城市和野外场景积尘厚度效果，并对沙尘暴对人体的危害给出评级，为决策者提供预防性的建议。

参考文献

- [1] Li Xingsheng, Zhou Jianqiang, Li Zhe et al. A numerical simulation of “5.5” super-duststorm in northern China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1998, 15(1): 63~73
- [2] H. Lu, Y. P. Shao. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications. *Environmental Modeling & Software*, 2001, 16:233~249
- [3] 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及应用试验. *气候与环境研究*, 2003, 8(2):125~143
- [4] 雷航, 林朝晖, 孙建华. 一个改进的沙尘天气数值预测系统及其模拟试验[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(3):699~683
- [5] 王丽娟, 赵琳娜, 寿绍文等. 2009 年 4 月北方一次强沙尘暴过程的特性分析和数值模拟[J]. *气象*, 2011, 37(3):309~317
- [6] F Huang, Q Gao. Climate controls on dust storm occurrence in Maowusu Desert, Inner Mongolia, North China[J]. *Environ Sci*, 2001, 13(1):12~21
- [7] 李万源, 吕世华, 余晔等. 各气象要素影响沙尘暴的方式和强度研究[J]. *高原气象*, 2010, 29(4):1058~1066
- [8] N J Middleton. A geography of dust storms in south west Asia[J]. *Climatol*. 1986, 6: 183~196
- [9] 万本太, 康晓风, 张建辉等. 基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准研究. *中国环境监测*, 2004, 20(3):9~11
- [10] 矫梅燕, 赵琳娜, 卢晶晶, 王超. 沙尘天气定量分级方法研究与应用[J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(3):350~357
- [11] 罗敬宁, 郑新江, 朱福康, 咸迪, 杨维西, 屠志方, 李梦先. 中国沙尘暴发生的气象危险度研究[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(1):185~190

- [12] N. FOSTER, D. METAXAS. Modeling the motion of a hot, turbulent gas. In Proceedings of SIGGRAPH, 1997:181~188
- [13] J. STAM. Stable fluids. In Proceedings of ACM SIGGRAPH, 1999:121~128
- [14] A Selle, R Fedkiw, B Kim, L Liu, J Rossignac. An unconditionally stable maccormack method. Journal of Scientific Computing 2008, 35: 350~371
- [15] R. FEDKIW, J. STAM, H. W. JENSEN. Visual simulation of smoke. In Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2001:15~22
- [16] S. He, H. C. Wong, W. M. Pang, U. H. Wong. Realtime smoke simulation with improved turbulence by spatial adaptive vorticity confinement. Computer Animation and Virtual Worlds (CASA2011 Special Issue), 22:107~114, 201
- [17] M. J. Harris, W. V. Baxter, T. Scheuermann, A. Lastra. Simulation of cloud dynamics on graphics hardware. Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware, July 26-27, 2003, San Diego, California
- [18] R Mizuno, Y Dobashi, B Y Chen, et al. Physics motivated modeling of volcanic clouds as a Two Fluids model. In Proceedings of Pacific Graphics, 2003:440~444
- [19] S G Liu, Z Y Wang, F F Chen, Z Gong, Q S Peng. Physically based modeling and animation of tornado. Journal of Zhejiang University Science 2006, 7(7):1099~1106
- [20] S. Liu, Z. Wang, Z. Gong, L. Huang and Q. Peng. Physically based animation of sandstorm. Computer Animation and Virtual Worlds, 18, 4-5 (2007):259~269
- [21] M Ikits, J Kniss, A Lefohn, C Hansen. Volume Rendering Techniques. GPU Gems, 2004:667~692
- [22] James T. Kajiya, Brian P Von Herzen. Ray tracing volume densities. Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques:165~174, January 1984
- [23] Philippe Lacroute, Marc Levoy. Fast Volume Rendering Using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transformation. Proc. SIGGRAPH 94, Orlando, Florida, July, 1994:451~458

- [24] Takashi Totsuka, Marc Levoy. Frequency domain volume rendering. Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques:271~278, September 1993
- [25] N. Max. Optical models for direct volume rendering. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1(2):99~108, 1995
- [26] Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, and T. Nishita. A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds. SIGGRAPH 2000:19~28
- [27] M. J. Harris, A. Lastra. Real-Time Cloud Rendering. Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics 2001), Blackwell Publishers:76~84, 2001
- [28] M. Muller, D. Charypar, M. Gross. Particle-based fluid simulation for interactive applications. Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, July 26-27, 2003:154~159
- [29] R BRIDSON. Fluid Simulation For Computer Graphics. A.K Peters, 2009
- [30] F E Marble. Dynamics of dusty gases. Annual Review of Fluid Mechanics 1970, 2: 397~446
- [31] H.A.Fouks 著. 气溶胶力学. 北京:科学出版社, 1960
- [32] 张宏升, 朱好, 彭艳等. 沙尘天气过程沙地下垫面沙尘通量的获取与分析研究[J]. 气象学报, 2007, 65(5):744~752
- [33] S K Friendlander. Smoke, Dust and Haze(Fundamentals of Aerosol Dynamics), John. Wiley & Sons, 1977
- [34] M Levoy. Display of Surfaces from Volume Data. IEEE Computer Graphics & Applications 1988, 8(2):29~37.
- [35] H. C. Van de Hulst. Light Scattering by Small Particles[M]. New York:Wiley, 1957
- [36] L. G. Henyey, J. L. Greenstein. Diffuse Reflection in the Galaxy. Astrophys. J. 93, 70, 1941
- [37] T. Nishita, Y. Dobashi, E. Nakamae. Display of Clouds Taking into Account Multiple Anisotropic Scattering and Sky Light. SIGGRAPH 1996:379~386
- [38] 李春亮, 曲来世, 张勇等. 能见度测量技术 100 问[M]. 北京:气象出版社, 2009

致谢

研究生学习阶段即将完成，回首这两年来学习和生活中的点点滴滴，我要从内心感谢这几年来帮助我的师长朋友们，正是他们在研究上的指导和帮助，生活上的关心和照顾，才使我能顺利完成研究生阶段的学习和研究任务。

首先，我要感谢导师王章野副教授，他严谨的治学态度、深厚的学术功底、敏锐的学术洞察力、求实的工作作风、对学生的关切和严格要求，使我受益匪浅。在教授我学问的同时，也教给了我许多做人做事的道理。我很荣幸能够师从王章野教授，藉此论文完成之际，谨向我的导师致以深深的敬意和衷心的感谢！

其次，感谢课题组成员，特别是单宇翔同学的帮助。正是有了他们的加盟和密切协作，才使得本文的工作能顺利完成。

我也要感谢张鑫博士、邢冠宇博士、杨中雷硕士、林乃养硕士、王帅硕士、张昆硕士、袁霞硕士、张婷硕士、廖继源硕士、张海涛硕士、王丰金硕士、周霞娟硕士等同学的帮助，在这个充满友谊和快乐的集体中，我得以顺利完成学业。

我还要感谢浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室，她提供了良好宽松的学术研究环境，轻松自由的讨论氛围和优越的软硬件条件，使我在这里不断地成长。

特别感谢我的女友和我的父母对我生活上无微不至的关怀，精神上自始至终的爱和支持，使我没有后顾之忧。

最后谨以此文献给所有关心、支持和帮助过我的人！

宫立山 敬上

二零一二年一月于浙大玉泉