

Physics for Game Developers



游戏开发物理学



O'REILLY®



電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

David M. Bourg 著
O'Reilly Taiwan公司 译
霍炬 审校

游戏开发物理学

David M. Bourg 著

O'Reilly Taiwan 公司 译

霍炬 审校

O'REILLY®

Beijing • Cambridge • Farnham • Köln • Paris • Sebastopol • Taipei • Tokyo

O'Reilly Media, Inc. 授权电子工业出版社出版

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京•BEIJING

图书在版编目 (CIP) 数据

游戏开发物理学 / (美) 布兰革 (Bourg, D. M.) 著; O'Reilly Taiwan 公司译.
—北京: 电子工业出版社, 2004.10

书名原文: Physics for Game Developers

ISBN 7-121-00208-6

I. 游... II. ①布... ②O... III. 游戏—软件开发—物理学 IV. TP311.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 079170 号

版权贸易合同登记号

图字: 01-2004-1768

©2002 by O'Reilly Media, Inc.

Simplified Chinese Edition, jointly published by O'Reilly Media, Inc. and Publishing House of Electronics Industry, 2004. Authorized translation of the English edition, 2002 O'Reilly Media, Inc., the owner of all rights to publish and sell the same.

All rights reserved including the rights of reproduction in whole or in part in any form.

英文原版由 O'Reilly Media, Inc. 出版 2002。

简体中文版由电子工业出版社出版 2004。英文原版的翻译得到 O'Reilly Media, Inc. 的授权。此简体中文版的出版和销售得到出版权和销售权的所有者——O'Reilly Media, Inc. 的许可。

版权所有, 未得书面许可, 本书的任何部分和全部不得以任何形式重制。

书 名 / 游戏开发物理学

书 号 / ISBN 7-121-00208-6

责任编辑 / 朱沐红 高洪霞

封面设计 / Ellie Volckhausen, 张健

出版发行 / 电子工业出版社 (<http://www.phei.com.cn>)

地 址 / 北京市海淀区万寿路 173 信箱 (邮政编码 100036)

经 销 / 各地新华书店

印 刷 / 北京天竺颖华印刷厂

开 本 / 787 × 980 1/16 印张: 22.25 字数: 410 千字

印 次 / 2004 年 10 月第一次印刷

印 数 / 0001-4000 册

定 价 / 48.00 元 (册)

O'Reilly Media, Inc. 介绍

为了满足读者对网络和软件技术知识的迫切需求,世界著名计算机图书出版机构 O'Reilly Media, Inc. 授权电子工业出版社, 翻译出版一批该公司久负盛名的英文经典技术专著。

O'Reilly Media, Inc. 是世界上在 UNIX、X、Internet 和其他开放系统图书领域具有领导地位的出版公司, 同时是联机出版的先锋。

从最畅销的《The Whole Internet User's Guide & Catalog》(被纽约公共图书馆评为二十世纪最重要的 50 本书之一) 到 GNN (最早的 Internet 门户和商业网站), 再到 WebSite (第一个桌面 PC 的 Web 服务器软件), O'Reilly Media, Inc. 一直处于 Internet 发展的最前沿。

许多书店的反馈表明, O'Reilly Media, Inc. 是最稳定的计算机图书出版商 —— 每一本书都一版再版。与大多数计算机图书出版商相比, O'Reilly Media, Inc. 具有深厚的计算机专业背景, 这使得 O'Reilly Media, Inc. 形成了一个非常不同于其他出版商的出版方针。O'Reilly Media, Inc. 所有的编辑人员以前都是程序员, 或者是顶尖级的技术专家。O'Reilly Media, Inc. 还有许多固定的作者群体 —— 他们本身是相关领域的技术专家、咨询专家, 而现在编写著作, O'Reilly Media, Inc. 依靠他们及时地推出图书。因为 O'Reilly Media, Inc. 紧密地与计算机业界联系着, 所以 O'Reilly Media, Inc. 知道市场上真正需要什么图书。

目录

前言	1
第一章 基本概念	9
牛顿运动定律	9
单位与计量	10
坐标系	12
向量	13
质量、质心与转动惯量	13
牛顿第二运动定律	23
惯性张量	27
第二章 运动学	32
简介	32
速度与加速度	33
定加速度	35
不定加速度	37
2D 粒子运动学	38
3D 粒子运动学	40
粒子爆炸的运动学	50
刚体运动学	55

局部坐标轴	56
角速度及加速度	57
第三章 作用力	63
简介	63
力场	64
摩擦力	65
流体动阻力	66
压强	68
浮力	68
弹簧和阻尼	70
力与力矩	71
第四章 动力学	75
2D 的粒子动力学	76
3D 粒子动力学	81
刚体动力学	88
第五章 碰撞	93
冲量 / 动量定律	94
撞击	95
线性及角冲量	100
摩擦力	103
第六章 抛体	106
基本的抛体轨道	107
阻力	111
马格纳斯效应	118
变动质量	123

第七章 飞机	125
几何形状	127
升力与阻力	128
其他的作用力	133
控制	134
飞行模拟	135
 第八章 船舰	 149
漂浮	150
体积	152
阻力	162
虚质量	164
 第九章 气垫船	 166
运作原理	166
阻力	168
 第十章 汽车运动	 171
阻力	171
功率	172
刹车距离	173
道路边坡	174
 第十一章 实时模拟	 176
运动方程的积分	177
欧拉法	178
其他的方法	184

第十二章 2D 刚体模拟器	188
模型	189
积分函数	195
飞行控制	198
绘图	202
 第十三章 碰撞反应实现	 209
线性碰撞反应	210
角运动	215
 第十四章 刚体的转动	 227
旋转矩阵法	228
四元数法	231
 第十五章 3D 刚体模拟器	 233
模型	234
积分函数	238
飞行控制	241
绘图	245
 第十六章 3D 多重物体模拟	 252
模型	253
积分函数	267
碰撞反应	269
参数调整	272
 第十七章 粒子系统	 274
模型	274
积分函数	284

碰撞反应	285
参数调整	286
 附录一 向量的运算.....	 289
 附录二 矩阵的运算.....	 299
 附录三 四元数的运算	 308
 参考文献.....	 319
 索引	 325

前言

谁来读“我”

简单地说，本书是专为没有扎实的力学和物理背景，却要在游戏中负责加入物理模拟的电脑游戏设计师而设计的。

身为游戏设计师或者电脑玩家，你也许曾经见过号称“超真实”或“写实”的产品。同时，你或公司的营销部门，也许正在考虑如何在产品中添加物理的真实度。或许你想要做些全新的尝试，去探索真实的物理学。但问题是你早在期末考试之后就将物理的教材抛入湖中，而且之后从未再接触此领域。也许你买了一套相当酷的物理引擎，但是却不了解其中运作的原理或执行模拟时此引擎的影响。或者也许你要负责调整其他人所写的物理学程序代码，但是你却不清楚其运作的原理。这表明你该阅读本书了。

当然你可以搜寻网络、专业期刊和杂志获得相关资料与指引，让游戏能加入物理的真实性。你也可以由旧物理教材中重新开始。然而你也许会发现，这些资料或者由于太过广泛而不适于直接应用，或者由于难度太大而需要搜寻其他资料以先打好基础。本书将搜集所有需要的资料，作为你（游戏设计师）加入物理真实性以丰富游戏内容的出发点。

本书并不只是针对各式各样的问题提供不同的范例程序而已。网络中已经充斥太多这类的范例程序（当然也包括一些非常好的程序）。除了对某些问题提供解答之外，本书的目的是要让读者对于相关领域能有彻底而基础性的了解，进而对于其他的问题开发出自己的解决方案。本书将详细地解说运用在游戏开发领域的物理学原理，除了范例程序外，还将用手写的计算范例进行补充说明。

读者应有的基础

虽然读者并不一定都要是物理专家,不过非物理或工程学系的读者至少要有大专程度的基础物理学知识。你不必将物理学背景谨记在心,因为本书前几章会讲解与游戏物理相关的主题。

读者必须精通三角函数、向量和矩阵数学,在附录中也会提供这些领域的参考资料。此外读者需要有大专程度的基本微积分知识,包括对显函数 (explicit function) 的积分与微分。数值积分与微分又是另一个领域,在本书的稍后几章将会详细地介绍这些技巧。

力学

当我构思本书的概念时,与人交谈当中若提及“真实物理学”或“实时模拟”这些名词,这些人通常立刻会想到飞行模拟程序。顶尖的飞行模拟当然与本书的内容有关;然而许多不同类型的游戏和特定游戏的元素,也能从物理拟真增加几分可玩性。

想想这个例子:你正在做一个即将轰动的射击游戏,游戏中有第一人称的 3D 画面、华丽的贴图和令人震撼的音效,但是却缺少某个元素。这个元素就是真实度。具体地说,你希望通过挑战玩家的射击技术让游戏感觉更真实,要实现这个目标,就要加入某些考量,如与目标之间的距离、风速和方向,枪口速度,等等。你不必虚构这些元素,可以根据物理原理来模拟这些元素的物理特性。任职于 MathEngine Plc 的 Gary Powell 这么说:“虚拟世界的图像和令人沉迷的体验、以精密的多边形精心建立的模型、复杂的贴图和先进的光源投影,当物体开始移动和互动时通常是令人震惊的。”(注1)“这完全是互动性和吸引力”,Havok.com 的 CEO Steven Collins 博士这么说(注2)。我认为这些人都找对了方向。为什么在增加游戏世界的真实性上耗费这么多时间和精力,而不再多走几步让游戏中的动作更真实呢?

以下是可利用物理学增加真实度的游戏元素的例子:

- 火箭和导弹的飞行轨迹,包含燃料消耗的影响。
- 物体(例如撞球)之间的碰撞。

注 1: Gary Powell 任职于 MathEngine Plc。其产品包括 Dynamics Toolkit 2 和 Collision Toolkit 1,可以处理单一或多重物体的动力学。如果读者对于他们的产品有兴趣可以去逛逛网站 www.mathengine.com。

注 2: Collins 博士是 Havok.com 的 CEO。这家公司的技术可以处理刚体、柔体、布料、流体和粒子的动力学。你可以在 www.havok.com 找到相关资料。

- 大型物体（例如星球和太空堡垒）之间的万有引力作用。
- 赛车急转弯时的稳定性。
- 船或浮于水面的交通工具的动力学。
- 棒球被球棒击打出去的飞行路径。
- 被丢进帽子的纸牌的飞行路径。

这绝不是一个完整的清单，而仅仅是一些提供正确概念的例子。游戏中有许多弹跳、飞行、翻滚、滑翔或非静止的物体，可被真实地模拟，以创造吸引人的、可信的游戏内容。

如何实现这样的真实性呢？当然，说到物理学原理，就要回到本节的标题：力学。物理学是一门领域极广的科学，包含许多不同却相关的领域。在真实游戏内容中最常使用的主题是力学，这也就是“真实的物理学”所代表的意义。

从定义上讲，力学研究的是在静止或运动时的物体，以及作用在物体上的力的影响。因此力学可分为静力学与动力学，前者特别注重对物体处于静止状态的研究，而后者则研究物体的运动状态。物理学中最古老且最常被研究的领域——力学的起源，可追溯到两千年前亚里斯多德的时代。此领域另一个更早的论述为“Problem of Mechanics（力学的问题）”，但是这个作品的起源无法考证。虽然某些早期的研究让物理现象变成魔术领域，但是伟大的物理学家如伽利略、开普勒、欧拉、拉格朗日、达朗贝尔、牛顿、爱因斯坦等的不懈努力，使人们对物理学的了解能发展到今天这种程度，让我们目前所见技术先进到惊人程度。

为了使游戏能生动活泼并栩栩如生，我将把重点放在运动中的物体上，并钻研此领域的力学。在力学的领域中，还有许多特定的领域需要研究。例如，运动学将重点放在物体的运动而不是作用在物体上的力上。而动力学同时注重物体的运动和作用在物体上并影响物体运动的力。本书中将详细探讨这两个主题。

章节编排

物理拟真在游戏界中并不是个新事物，事实上，正在销售中的许多游戏都宣称具有物理引擎。许多3D模型和动画软件也有内建的物理引擎，能写实地模拟出特定的动作。自然而然地，杂志上的文章时常出现对各种物理式游戏的讨论。同样，在另一个层次，对于即时刚体（注3）模拟的研究已经有好几年了，而技术期刊也满是关于这一主题不同

注3：刚体正式的定义为粒子系统组成的物体，其粒子能彼此保持固定的距离而不会有相对的缩放或旋转。尽管力学的范畴也包括处理柔体甚至是像水一样的流体，但这里只讨论刚体。

方面的论文。这些论文讲述范围从多重、相连刚体的模拟到布料的模拟。然而，正如之前所述，虽然这些都是吸引人的主题和有价值的资源，对于游戏开发人员而言要直接使用却是有限制的。因为游戏开发人员必须对这些领域的力学有完整的认知，对于有些资源，还要从基础学起。况且，其中大多的重点主要放在解运动方程的数学上，并未真正处理作用在模拟中的物体或系统上的力。我问过在 Animats 工作的 John Nagle，在开发以物理为基础的模拟游戏时，对他而言哪个部分是最困难的。他的回答是开发数值稳定且健全的程序代码（注4）。Gary Powell 对此发表回应，他告诉我说：最小化对产品稳定度与真实行为的参数调整所需的成本是最困难的挑战之一。我同意关于处理物体动作的数学，要使其速度和稳定兼具是模拟器最困难的部分。保持模拟程序在初始及进行中作用力的完整性和正确性也是如此。稍后在本书中就可以看到，作用力会控制模拟程序中物体的行为。如果想让物体有真实的行为，就要正确地将物体建模。

对于力学，以及作用于特定物体或系统上的作用力的实质的必要认知，都会影响本书的编排方式。

第一章至第五章基本上是力学的基础课程，并且由复习基本概念开始，再慢慢地建立刚体力学更具挑战性的概念。这几章的目的是提供充足的力学复习课程，让你可以阅读更多进阶的文章。如果你对于力学已经相当熟悉，可以略过这些章节直接阅读第六章。

第一章：基本概念

本章是热身的章节，内容包含一些最基础的定理，可作为本书其他章节的参考。将会提到的主题包括质量、质心、牛顿运动定律、惯性、单位与度量，以及向量。

第二章：运动学

本章的主题有线性速度与角速度、加速度、动量，以及 2D 及 3D 环境中粒子与刚体的一般性运动。

第三章：作用力

本章包括力与力矩的原理，可以作为由运动学跨入动力学的桥梁，会讨论一般种类的作用力，包括阻力、力场和压力。

第四章：动力学

本章结合第二章与第三章的元素，介绍运动学的主题，解释动力学与运动学之间的差异。关于粒子与刚体的动力学，在 2D 及 3D 环境中将进行更进一步的讨论。

注4： John Nagle 是 Falling Bodies 的开发人员，这是在 Softimage 3D 软件上的一种动力学嵌入模块。你可以在 www.animats.com 上找到他的专利技术。

第五章：碰撞

本章包含粒子与刚体的碰撞反应，也就是两物体在相互碰撞后会发生什么事情。

第六章至第十章开始介绍真实世界中的一些问题。这些章节的重点在于模型化某些实体系统、尤其是其中涉及的作用力，并给你健全的知识，因此系统能正确地在实时模拟器中模型化。这个部分的范例并没有完全包括所有可能在游戏中会模拟的系统。选择这些系统是来解释某些和广泛的问题有关的物理现象和概念。

第六章：抛体

由第六章开始的一系列章节，介绍可能在游戏模拟时遇到的问题，并提供实际上可行的内容。本章的主题是抛体，讨论在抛体飞行中所受的力，以及影响速度与轨迹的因素。

第七章：飞机

本章的重点是飞行的要素，包括推进力、阻力、几何形状、质量以及最重要的升力。本章同时也是实现3D实时模拟器的起点，这个模拟器的实现将在第十五章进行介绍。

第八章：船舰

本章讨论排水型船舰的基本元素，包括浮力、稳定度、体积、阻力和速度。

第九章：气垫船

气垫船同时有飞机和船的特性。本章讨论独特的交通工具——气垫船——的特性。包含的主题有盘旋飞行、空气静升力和方向控制。

第十章：汽车

本章将讨论汽车某些方面的性能，包括空气阻力、滚转阻力、滑行距离和道路边坡等。

第十一章至第十七章和3个附录，将介绍实时模拟程序。这些章节会介绍实时模拟器，并讨论在这个领域中可以应用在电脑游戏上的不同方面。实时模拟器的主题是非常广泛的，必须用一本书的篇幅才可能介绍，所以本书只介绍其中的基础。我将带领你实现一个有两艘气垫船的2D模拟器、3D的飞行模拟器、有碰撞反应的3D多重物体模拟器，以及使用粒子和弹簧的柔体模拟器。

第十一章：实时模拟

本章介绍的主题是实时模拟，包含一些用来解运动微分方程的数值积分法。

第十二章：2D刚体模拟器

本章介绍实现简单的2D粒子和刚体的模拟器的实用面。本章还将实现有两艘气垫船的简单实时模拟器。

第十三章：实现碰撞反应

本章将示范如何在实时模拟器中实现第五章所讨论的碰撞反应。具体地说，就是在第十二章开发的气垫船模拟程序中加入碰撞反应。

第十四章：刚体旋转

在进入3D模拟器之前，要先介绍在3D环境中表现刚体旋转方位会遇到的问题。这里会考虑欧拉角、旋转矩阵和四元数。

第十五章：3D 刚体模拟器

本章结合了第十一章至第十四章中所讨论的内容，并介绍在实现简单的3D刚体模拟器时的实用面。这里将介绍如何根据第七章介绍的空气动力模型来开发简单的飞行模拟器。

第十六章：3D 多重物体模拟

本章拓展在第十五章所介绍的范例程序，并处理在3D环境中多重物体在碰撞侦测和反应方面的能力。这里介绍的范例由一辆汽车和一对测试碰撞方块组成。

第十七章：粒子系统

本章示范可以用简单的粒子模拟系统来做什么。具体而言，本章介绍使用系统化的粒子和弹簧组成仿真的布质。这个模拟程序模拟一个旗子挂在旗杆上时迎风飘扬的样子。

附录一：向量运算

本附录介绍如何实现 C++ 的类，此类包含所有在 2D 和 3D 模拟程序中会用到的向量运算。

附录二：矩阵运算

本附录实现一个类，包含所有需要用来处理 3×3 矩阵的运算。

附录三：四元数运算

本附录实现一个类，此类包含所有在 3D 模拟程序中处理四元数时会用到的运算。

除了与实时模拟有关的资源外，在书后的参考文献中也提供关于力学、数学，以及其他某些技术主题（例如空气动力学的书籍）有关的资料。

排版约定

以下是本书使用的排版体裁：

等宽字体 (Constant width)

用来表示命令模式的电脑输出、范例程序代码。

等宽斜体 (*Constant width italic*)

用来表示在范例程序代码中的变量。

斜体字 (*italic*)

用来介绍新名词和表示 URL、变量、文件名和目录、命令，以及扩展文件名。

粗斜体字 (***Bold italic***)

用来表示向量、矩阵等。

建议与评论

本书的内容都经过测试，尽管我们做了最大的努力，但错误和疏忽仍然是在所难免的。如果你发现有什么错误，或者是对将来的版本有什么建议，请通过下面的地址告诉我们：

美国：

O'Reilly Media, Inc.
1005 Gravenstein Highway North
Sebastopol, CA 95472

中国：

100080 北京市海淀区知春路 49 号希格玛公寓 B 座 809 室
奥莱理软件（北京）有限公司

O'Reilly 的每一本书都有专属网页，你可以在此找到关于该本书籍的相关信息，包括范例程序的下载、勘误表与相关资源的链接。

<http://www.oreilly.com/catalog/physicsgame/>

要评价本书或询问有关技术问题，请发电子邮件到：

bookquestions@oreilly.com
info@mail.oreilly.com.cn

要了解更多有关书籍、会议、资源中心和 O'Reilly Network 的信息，请参见 O'Reilly 的 Web 站点：

<http://www.oreilly.com>
<http://www.oreilly.com.cn>

致谢

我要感谢本书编辑 Robert Denn，因为他对我的著作做了技术检查，并给予了有深刻见解的评析和建议，更不用提他的耐心了。我也要感谢 O'Reilly 同意我这个计划，给我机会能实行这个长久以来的点子。此外还要特别感谢所有 O'Reilly 的产品与技术人员。还要感谢 MathEngine Plc 的 Gary Powell、Havok.com 的 Steven Collins 博士和 Animats 的 John Nagle。因为他们专业的评论和我许多对于游戏物理和实时模拟器的的问题。我不能忘记技术审校 Sam Kalat、Mike Keith 和 Michelle McDonald，以及他们完整的回答卓越的评析和建议。同样要特别感谢我的商业伙伴兼长久的朋友 Glenn Seemann，他带领我开始电脑游戏的研发。最后我想要感谢我亲爱的妻子，也是最好的朋友 Helena，因为她无尽的支持和鼓励，以及我们的小女儿 Natalia，谢谢她让我的每一天都特别。