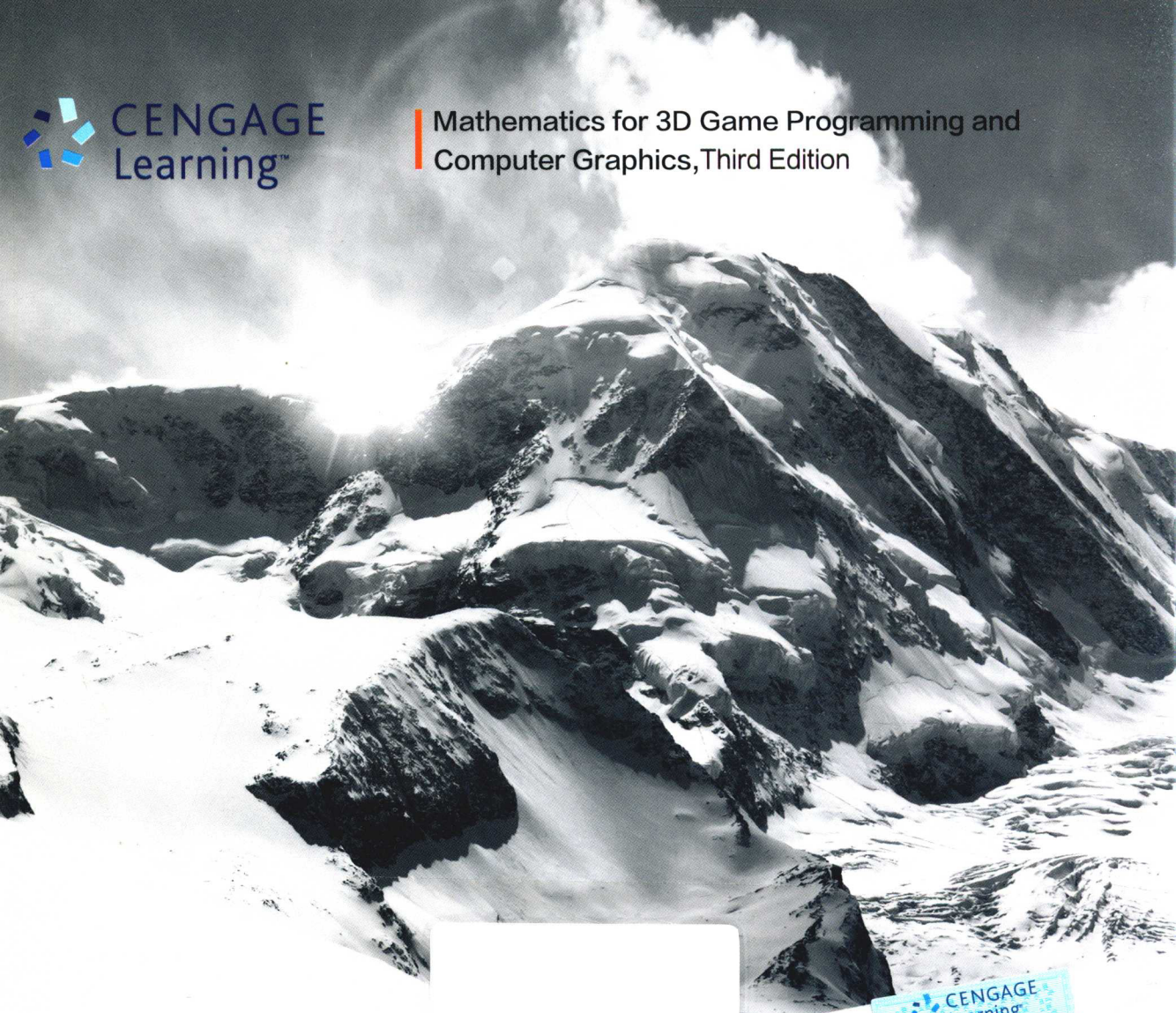




[美] Eric Lengyel◎著 詹海生◎译



3D 游 戏 与 计 算 机 图 形 学 中 的 数 学 方 法

第 3 版

清华大学出版社

内容简介

3D 游戏与计算机图形学中的 数学方法

(第3版)

[美] Eric Lengyel 著
詹海生 译

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书从专业角度讲解了一名游戏开发人员必须掌握的 3D 计算机图形学和游戏引擎中的数学概念。在讲解的过程中先从一些基础知识入手,比如向量几何和线性代数,然后循序渐进,逐渐引入 3D 游戏编程中的深层概念,例如光照和可见性检测。本书给出了一些重要结论的推导过程,便于不具备相关理论知识的读者理解相关内容。相对于第 2 版而言,本书第 3 版在内容上做了一些扩充,引入了投影、阴影、物理、布料模拟和数值方法方面的知识。所有章节都重新做了修订,并按照最新的高级着色语言规范对着色器代码做了修改。

本书要求读者具备一定的三角学和微积分知识,不过,本书仍然会在一些章节中帮助读者回顾一些重要的数学工具,比如三角恒等式、微分方程和泰勒级数。本书对于游戏设计者及相应的编程人员来说,是一本不可多得的参考资料。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2015-0649

Mathematics for 3D Game Programming and Computer Graphics, Third Edition

Eric Lengyel 著 詹海生 译

Copyright © 2012 by Course Technology PTR, a part of Cengage Learning.

Original edition published by Cengage Learning. All Rights reserved.

本书原版由圣智学习出版公司出版。版权所有,盗印必究。

Tsinghua University Press is authorized by Cengage Learning to publish and distribute exclusively this simplified Chinese edition. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体字翻译版由圣智学习出版公司授权清华大学出版社独家出版发行。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾)销售。未经授权的本书出口将被视为违反版权法的行为。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

978-7-302-40622-8

Cengage Learning Asia Pte. Ltd.

5 Shenton Way, # 01-01 UIC Building, Singapore 068808

本书封面贴有 Cengage Learning 防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

3D 游戏与计算机图形学中的数学方法/(美)伦吉尔(Lengyel, E.)著;詹海生译.—3 版.—北京:清华大学出版社,2016

书名原文:Mathematics for 3D Game Programming and Computer Graphics

ISBN 978-7-302-40622-8

I. ①3… II. ①伦… ②詹… III. ①数学方法—应用—游戏程序—程序设计 IV. ①TP311.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 152336 号

责任编辑:苏明芳

封面设计:刘超

版式设计:刘洪利

责任校对:赵丽杰

责任印制:何芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市漂源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:22.5

字 数:553 千字

版 次:2016 年 6 月第 1 版

印 次:2016 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:89.00 元

产品编号:056150-01

前 言

本书介绍了专业 3D 图形引擎开发所需的数学方法，尤其对主要的定理和结论进行了推导证明，较全面地解释了相关的数学问题。通过对本书的学习，游戏开发程序员可以对数学工具的基本原理有深入的理解。

本书中的大部分内容都与图像渲染的底层 3D 图形系统无关。本书读者应熟悉 3D 图形库的基本原理，并且了解从顶点和多边形构造几何模型的方法。本书开始简要介绍了图形渲染管线及其在 OpenGL 图形库中的实现，由于 OpenGL 图形库的跨平台特性，书中有关 3D 图形库的内容均以其为例。

书中每章结尾对该章出现的重要方程和公式进行了总结，读者可以将其作为一个参考工具直接使用，而不必花大量时间去掌握一个简单结论的复杂证明过程。除此之外，每章结尾还有一些练习题，其中计算题的答案在附录 E 中。

最新内容

本书修改和补充的内容主要包括：

1. 第 5 章增加了视锥相关的斜近平面裁剪问题的论述；
 2. 第 10 章在介绍阴影生成技术前，增加了对阴影集判断算法的论述，此外，除了模板阴影算法，还增加了阴影映射技术；
 3. 第 14 章扩展了对惯性张量的论述；
 4. 第 15 章在流体表面仿真的介绍中，增加了织物仿真的介绍；
 5. 第 16 章中在数值计算方法的前面，增加了正弦函数和余弦函数的快速计算方法。
- 除了以上内容，本书对许多细节进行了补充和完善，并且更新了全部插图。

内容简介

第 1 章：渲染管线。该章以 OpenGL 图形库为基础，概要介绍了图形渲染管线。该章没有对涉及的理论进行详细的数学论述，这些理论的详细分析请参考本书的其他章节。

第 2 章：向量。该章通过对向量及其性质的全面回顾开始本书中数学知识的介绍。向量是 3D 计算机图形学的重要基础，全书大量应用了向量内积和外积一类的向量运算。

第 3 章：矩阵。掌握矩阵的相关理论是 3D 游戏编程的必要基础。该章不仅讨论了线性方程组的矩阵，而且对矩阵的特征向量和对角化等高级论题也进行了分析，以帮助理解后续章节内容。为了保证本书内容的全面性，该章对矩阵的各种性质进行了证明，当然这对使用者来说不是必须掌握的，因此读者可以略过这些证明过程。

第 4 章：坐标变换。该章介绍了矩阵在变换中的应用方法，变换包括平移、旋转和缩放等操作。该章介绍了四维齐次坐标概念，四维齐次坐标广泛应用于 3D 图形系统坐标空间之间的变换。除此之外，还分析了四元法的性质及其作为变换工具的用途。

第 5 章：3D 引擎中的几何学。从该章开始介绍第 2 章至第 4 章中的数学知识如何应用于 3D 游戏编程和计算机图形学。该章首先分析了 3D 空间中的直线和平面，然后介绍了视锥的概念及其与虚拟相机之间的关系。除此之外，该章还包含了透视校正插值和投影矩阵等内容。

第 6 章：光线跟踪。在游戏编程的很多领域都会用到光线跟踪方法，如光照图的生成、视线计算和碰撞检测等。该章首先介绍数值解析求根方法，然后给出了光线与常见几何对象的求交方法，最后论述了反射向量与折射向量的计算。

第 7 章：光照与着色。该章介绍了与光照和着色相关的内容。首先列举了各种类型的光源和简单的反射模型，接着分析了纹理贴图、光泽贴图和凹凸贴图等增加表面渲染细节的方法，最后对 Cook-Torrance 物理光照模型进行了详细解释。

第 8 章：可见性判断。3D 图形引擎的性能主要由其判断一个场景中的可见部分的能力决定。该章给出了构造不同类型包围盒的方法及其相对视锥的可见性测试方法，介绍了通过空间分割和门系统应用实现的大规模可视性判断方法。

第 9 章：多边形技术。该章给出了多种多边形模型的处理技术，首先介绍了任意表面的贴面技术及其使用的顶点深度偏移方法，然后介绍了各类特效应用的公告牌技术、多边形化简技术、T 形节点清除技术以及多边形的三角化技术。

第 10 章：阴影。该章讨论了定影集概念和两个著名的实时阴影构造方法，即阴影映射和模板阴影方法，尤其详细介绍了模板阴影算法，该算法使用了多个不常见的几何技术。

第 11 章：曲线与曲面。该章分析了多种类型的三次曲线，包括 Bezier 曲线、B 样条曲线。此外，还论述了将二维曲线理论扩展到三维曲面的方法。

第 12 章：碰撞检测。在游戏世界中，碰撞检测是两个对象之间交互的基础。该章给出了判断运动对象之间和运动对象与静止环境之间碰撞的一般方法。

第 13 章：线性物理运动。从该章开始，用两章的篇幅回顾经典物理学中的内容，这些内容与 3D 游戏中呈现的物体运动相关。该章首先讨论了可作为二阶微分方程解的位置函数，然后分析了真空和电阻介质中的抛物运动，最后简单介绍了摩擦力。

第 14 章：旋转物理运动。该章继续介绍物体旋转中的物理学原理，首先分析了旋转环境中物体的受力情况，接着介绍刚性物体的运动并通过惯性张量导出了角速度和角动量的关系。另外，该章还介绍了弹簧和钟摆的振荡运动原理。

第 15 章：流体与织物仿真。该章继续介绍物理仿真主题，二维波动方程给出了流体运动的物理模型，弹簧阻尼系统理论给出了织物运动的物理模型。

第 16 章：数值方法。该章介绍了计算三角函数的数值方法和三个特定问题的计算方法。首先讨论了任意维线性方程组的快速求解方法，接着给出了确定一个 3×3 矩阵的特征值和特征向量的迭代方法，最后分析了常微分方程近似解的方法。

附录 A：复数。本书中虽然没有广泛应用复数，但在几个地方也用到了这一概念。附录 A 回顾了复数理论，并讨论了本书中应用到的复数性质。

附录 B：三角函数的引用。附录 B 回顾了三角函数，推导了本书中使用的三角等式和恒等式。

附录 C：坐标系。附录 C 简要概述了笛卡儿坐标系、柱面坐标系和球面坐标系的概念，这些坐标系出现在本书中的很多地方，尤其是第 14 章大量用到这些坐标系。

附录 D：泰勒级数。本书很多地方应用到了各类函数的泰勒级数。附录 D 给出了一些常用函数的泰勒级数和幂级数表示方法。

附录 E：习题答案。该附录包含本书中全部有数学表达式解的习题答案。

本书网站与代码

本书的官方网站地址为 <http://www.mathfor3dgameprogramming.com/>，读者可从该网站下载书中出现的代码。一些代码中使用了类似 Triangle 和 Edge 的结构以及 Vector3D 和 Matrix3D 一类数学类，它们的源代码在该网站中都能找到。

所有在 CPU 中可运行的代码使用的是标准 C++ 语言开发，在 GPU 中运行的顶点着色器和片元着色器用 OpenGL 的着色语言（GLSL）编写。

符号约定

本书统一了数学符号与术语。标量全部用斜体的罗马或者希腊字母表示。向量、矩阵和四元数统一表示成粗体字母，它们的分量是标量，表示成斜体字母，例如，向量 $\mathbf{v}$ 的 x 分量表示为 v_x 。下表列出了本书中用到的符号及其约定标准。

变量/操作	符号/举例
标量	斜体字母，如： x 、 t 、 A 、 α 、 ω
角度	斜体希腊字母，如： θ 、 φ 、 α
向量	粗体字母，如： $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{x}$ 、 $\boldsymbol{\omega}$
四元数	粗体字母，如： $\mathbf{q}$ 、 $\mathbf{q}_1$ 、 $\mathbf{q}_2$
矩阵	粗体字母，如： $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{P}$
RGB 颜色	手写体字母，如： $\mathcal{A}$ 、 $\mathcal{B}$ 、 $\mathcal{C}$ 、 $\mathcal{e}$
向量的绝对值	双杠，如： $\ \mathbf{P}\ $
复数 z 或者四元数 $\mathbf{q}$ 的共轭	上横线，如： $\bar{z}$ 、 $\bar{\mathbf{q}}$
矩阵的转置	上标 T，如： $\mathbf{M}^T$
矩阵的行列式	$\det \mathbf{M}$ 或者单杠： $ \mathbf{M} $
时间导数	用点表示： $\frac{d}{dt}\mathbf{x}(t) = \dot{\mathbf{x}}(t)$
二项式系数	$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k! (n-k)!}$

续表

变量/操作	符号/举例
x 的下限	$\lfloor x \rfloor$
x 的上限	$\lceil x \rceil$
x 的小数部分	$\text{frac}(x)$
x 的符号	$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } x > 0 \\ 0, & \text{如果 } x = 0 \\ -1, & \text{如果 } x < 0 \end{cases}$
闭区间	$[a, b] = \{x a \leq x \leq b\}$
开区间	$(a, b) = \{x a < x < b\}$
半开半闭区间	$[a, b) = \{a \leq x < b\}$ $(a, b] = \{a < x \leq b\}$
实数集合	$\mathbb{R}$
复数集合	$\mathbb{C}$
四元数集合	$\mathbb{H}$

目 录

第 1 章 渲染管线	1
1.1 图形处理器	1
1.2 顶点变换	3
1.3 光栅化与段操作	4
第 2 章 向量	7
2.1 向量性质	7
2.2 内积	9
2.3 外积	12
2.4 向量空间	15
本章小结	17
习题	18
第 3 章 矩阵	19
3.1 矩阵性质	19
3.2 线性方程组	21
3.3 逆矩阵	25
3.4 行列式	29
3.5 特征值和特征向量	33
3.6 矩阵对角化	35
本章小结	38
习题	39
第 4 章 坐标变换	41
4.1 线性变换	41
4.1.1 正交矩阵	42
4.1.2 偏手性	43
4.2 比例变换	43
4.3 旋转变换	44
4.4 齐次坐标	46
4.4.1 四维变换矩阵	46
4.4.2 点与方向	47
4.4.3 坐标 w 的几何意义	47
4.5 法向量变换	48
4.6 四元数	49

4.6.1	四元数数学	49
4.6.2	四元数旋转	50
4.6.3	球型线性插值	52
本章小结		55
习题		56
第 5 章 3D 引擎中的几何学		57
5.1	三维空间中的直线	57
5.1.1	点与直线间的距离	57
5.1.2	直线间的距离	58
5.2	三维空间中的平面	59
5.2.1	直线和平面的交点	60
5.2.2	三个平面斜交	61
5.2.3	平面变换	62
5.3	视锥	63
5.3.1	视场	64
5.3.2	锥平面	65
5.4	透视校正插值	66
5.4.1	深度插值	66
5.4.2	顶点属性插值	68
5.5	投影	68
5.5.1	透视投影	69
5.5.2	正投影	72
5.5.3	提取锥平面	73
5.6	镜像与倾斜裁剪	74
本章小结		79
习题		80
第 6 章 光线跟踪		81
6.1	多项式的根	81
6.1.1	二次多项式	81
6.1.2	三次多项式	82
6.1.3	四次多项式	84
6.1.4	牛顿方法	84
6.1.5	倒数与平方根的精细化	86
6.2	表面求交	87
6.2.1	光线与三角形的交点	87
6.2.2	光线与立方体盒相交	88
6.2.3	光线与球面相交	89
6.2.4	光线与圆柱面相交	90

6.2.5	光线与圆环相交	91
6.3	计算法向量	92
6.4	反射与折射向量	93
6.4.1	反射向量计算	93
6.4.2	折射向量计算	94
	本章小结	95
	习题	96
第 7 章	光照与着色	97
7.1	RGB 颜色	97
7.2	光源	98
7.2.1	环境光源	98
7.2.2	平行光源	98
7.2.3	点光源	98
7.2.4	聚光灯光源	99
7.3	漫反射	99
7.4	镜面反射	100
7.5	纹理映射	102
7.5.1	标准纹理图	103
7.5.2	投影纹理图	103
7.5.3	立方纹理图	105
7.5.4	滤波与多级纹理	106
7.6	发射映射	108
7.7	着色模型	109
7.7.1	计算法向量	109
7.7.2	Gouraud 着色	110
7.7.3	Blinn-Phong 着色	110
7.8	凹凸映射	111
7.8.1	构造凹凸图	111
7.8.2	切向量空间	112
7.8.3	计算切向量	113
7.8.4	实现凹凸映射	116
7.9	物理反射模型	117
7.9.1	双向反射分布函数	117
7.9.2	Cook-Torrance 光照	120
7.9.3	Fresnel 因子	121
7.9.4	微平面分布函数	123
7.9.5	几何衰减系数	124
7.9.6	物理光照模型实现	126

12	本章小结	129
88	习题	131
8	第 8 章 可见性判断	133
80	8.1 构造边界体	133
10	8.1.1 主分量分析	134
29	8.1.2 构造边界盒	136
69	8.1.3 构造边界球	136
72	8.1.4 构造边界椭球	138
70	8.1.5 构造边界圆柱	138
88	8.2 边界体测试	139
20	8.2.1 边界球测试	139
88	8.2.2 边界椭球测试	140
88	8.2.3 边界圆柱测试	142
82	8.2.4 边界盒测试	143
89	8.3 空间分割	145
001	8.3.1 八叉树	145
801	8.3.2 二叉空间分割树	146
801	8.4 门系统	148
801	8.4.1 门裁剪	149
701	8.4.2 视锥收缩	150
801	本章小结	151
801	习题	154
8	第 9 章 多边形技术	155
801	9.1 深度值偏移	155
012	9.1.1 投影矩阵调整	155
011	9.1.2 偏移值选择	156
130	9.1.3 程序实现	157
141	9.2 贴片应用	158
511	9.2.1 贴片网格构造	158
210	9.2.2 多边形裁剪	160
811	9.3 公告牌	161
311	9.3.1 无约束四边形	161
311	9.3.2 约束四边形	163
092	9.3.3 多段面	164
191	9.4 多边形化简	165
851	9.5 T 形连接消除	168
191	9.6 三角化	169
831	本章小结	176

习题	177
第 10 章 阴影	178
10.1 定影集	178
10.2 阴影映射	179
10.2.1 渲染阴影图	179
10.2.2 渲染主场景	181
10.2.3 自阴影	181
10.3 模板阴影	183
10.3.1 算法概述	183
10.3.2 无限视锥	186
10.3.3 轮廓计算	188
10.3.4 构造阴影体	192
10.3.5 确定阴影体的必要帽子	195
10.3.6 渲染阴影体	197
10.3.7 剪式矩形优化	199
本章小结	202
习题	203
第 11 章 曲线与曲面	204
11.1 三次曲线	204
11.2 Hermite 曲线	205
11.3 Bézier 曲线	207
11.3.1 三次 Bézier 曲线	208
11.3.2 Bézier 曲线截断	210
11.3.3 de Casteljau 算法	211
11.4 Catmull-Rom 样条	212
11.5 三次样条	214
11.6 B 样条	216
11.6.1 均匀 B 样条	216
11.6.2 B 样条全局化	219
11.6.3 非均匀 B 样条	220
11.6.4 非均匀有理 B 样条(NURBS)	223
11.7 双三次曲面	224
11.8 曲率与挠率	226
本章小结	229
习题	230
第 12 章 碰撞检测	232
12.1 平面碰撞	232
12.1.1 球体与平面碰撞	232

12.1.2	长方体盒与平面碰撞	233
12.1.3	空间分割	235
12.2	普通球体碰撞	235
12.3	表面滑行	238
12.4	两个球体之间的碰撞	239
	本章小结	241
	习题	243
第 13 章	线性物理运动	244
13.1	位置函数	244
13.2	二阶微分方程	245
13.2.1	齐次方程	245
13.2.2	非齐次方程	248
13.2.3	初始条件	249
13.3	抛物运动	250
13.4	阻尼运动	253
13.5	摩擦力	254
	本章小结	256
	习题	257
第 14 章	旋转物理运动	259
14.1	旋转环境	259
14.1.1	角速度	259
14.1.2	离心力	260
14.1.3	Coriolis 力	261
14.2	刚体运动	262
14.2.1	质心	262
14.2.2	角动量和扭矩	264
14.2.3	惯性张量	265
14.2.4	主惯性轴	270
14.2.5	惯性张量的转化	273
14.3	振动	275
14.3.1	弹性运动	276
14.3.2	钟摆运动	278
	本章小结	279
	习题	281
第 15 章	流体与织物仿真	283
15.1	流体仿真	283
15.1.1	波动方程	283
15.1.2	近似导数	285

15.1.3	计算表面位移	287
15.1.4	程序实现	288
15.2	织物仿真	292
15.2.1	弹簧系统	292
15.2.2	外力	293
15.2.3	实现织物仿真	294
	本章小结	295
	习题	296
第 16 章	数值方法	297
16.1	三角函数	297
16.2	线性方程组	298
16.2.1	三角线性方程组	299
16.2.2	高斯消去法	300
16.2.3	LU 分解	302
16.2.4	消减误差	308
16.2.5	三对角线方程组	309
16.3	特征值和特征向量	312
16.4	常微分方程	317
16.4.1	Euler 方法	317
16.4.2	Taylor 级数方法	318
16.4.3	Runge-Kutta 方法	319
16.4.4	高阶微分方程	320
	本章小结	321
	习题	322
附录 A	复数	323
A.1	定义	323
A.2	加法和乘法	323
A.3	共轭复数和复数的逆	323
A.4	欧拉公式	324
附录 B	三角函数的引用	326
B.1	函数定义	326
B.2	对称和移相	326
B.3	三角恒等式(毕达哥拉斯恒等式)	327
B.4	指数恒等式	327
B.5	反三角函数	328
B.6	正弦和余弦定理	329
附录 C	坐标系	331
C.1	直角坐标系(笛卡儿坐标系)	331

C.2 柱面坐标系	331
C.3 球面坐标	333
C.4 广义坐标	335
附录 D 泰勒级数	338
D.1 导数	338
D.2 幂级数	339
D.3 欧拉公式	340
附录 E 习题答案	341
第 2 章	341
第 3 章	341
第 4 章	341
第 5 章	342
第 6 章	342
第 7 章	342
第 8 章	343
第 9 章	343
第 10 章	343
第 11 章	343
第 12 章	344
第 13 章	344
第 14 章	344
第 15 章	345
第 16 章	345

第 1 章 渲染管线

本章简要介绍图形渲染管线的相关知识，包括顶点变换和基本图元光栅化等现代 3D 图形硬件常用功能。对此熟悉的读者可略过这些内容。本章没有对图形渲染管线中的原理进行数学论述，但指出了渲染管线的各部分在本书进行介绍的章节。

1.1 图形处理器

一个渲染成 3D 图形的典型场景通常由许多独立物体组成，物体的几何形状都被表示成顶点集合和表示顶点连接关系的特定图形元素。图 1.1 列出了 OpenGL 库中定义的 10 种基本图形元素，数字表示每个基本元素中的顶点排列顺序。图形硬件可以渲染单个顶点集合、连串的线段和一组填充多边形。在多数情况下，3D 模型的表面表示成三角形列表，其中的每个三角形引用顶点列表中的 3 个顶点。

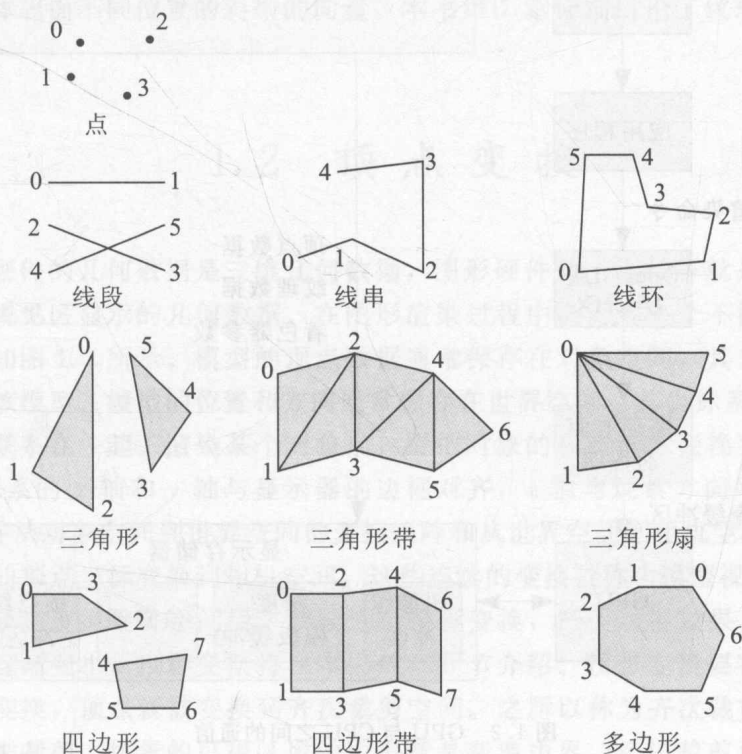


图 1.1 OpenGL 库中定义了 10 种类型的基本图形元素。数字表示每个基本元素中顶点的排列顺序

一般的 3D 图形卡上都有图形处理单元（Graphics Processing Unit, GPU），GPU 的指令独立于中央处理器（Central Processing Unit, CPU）执行。GPU 接收 CPU 的命令执行渲染操作，CPU 则继续执行其他任务，这被称为异步操作。当几何信息提交到 OpenGL 一类的渲染库时，从请求渲染操作的函数调用开始，到 GPU 完成图形渲染之间通常会有大量时间，该时间为滞后时间，也就是提交渲染命令到完成渲染操作之间的时间。滞后时间的存在通常不会导致问题，但当需要知道渲染完成时间时会出现问题。现在的 OpenGL 扩展库允许 CPU 上执行的程序确定一组渲染命令在 GPU 上完成的时间，该同步操作很可能降低 3D 图形应用的效率，因此对于效率要求高的应用应避免该操作。

应用程序通过向渲染库（如 OpenGL）发送命令实现与 GPU 的通信，渲染库将接收到的命令转发给驱动程序，驱动程序用 GPU 专用指令与 GPU 交互。由于 OpenGL 包含渲染场景的函数集，并且这些函数适用于任意支持 OpenGL 架构的图形硬件，所以 OpenGL 接口被称为硬件抽象层。

驱动程序负责将 OpenGL 函数调用转变成 GPU 可识别的代码。3D 图形驱动程序通常直接实现 OpenGL 函数以降低渲染命令的负载。图 1.2 所示的框图说明了 CPU 和 GPU 之间的通信情况。

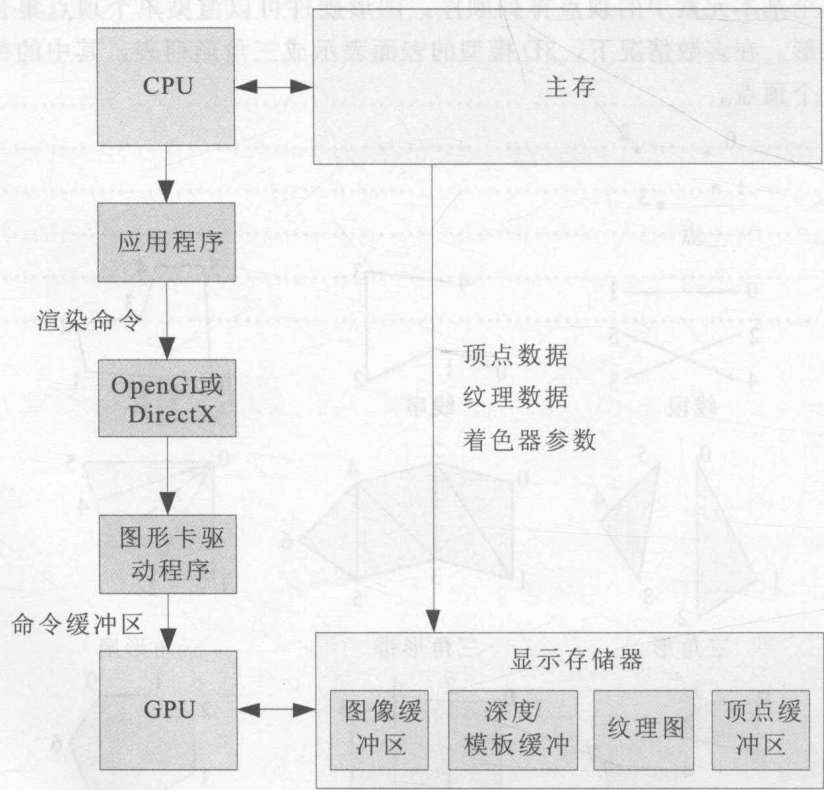


图 1.2 GPU 与 CPU 之间的通信

3D 图形卡上都有自己的核心内存，通常被称为显示随机存取存储器（Video Random Access Memory, VRAM），简称显存。GPU 可以在显存中存储任意信息，当一个 3D 图形应用运行时，显存中几乎总是出现多种类型的数据，其中最重要的是前后两个图像缓冲区。前图像