

3D 灯光技术实用指南

[美] Arnold Gallardo 著

孔祥丰 等译

曹 康 审校

● 一本必备的关于3D灯光技术的参考书, 涉及肖像、反射平面的各个方面及室内、室外场景的各种纹理。

● 使用流行3D程序(LightWave、3D Studio Max及trueSpace)的详细教程。



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

3D Lighting: History, Concepts, and Techniques

3D灯光技术实用指南

〔美〕 Arnold Gallardo 著

孔祥丰 等译

曹 康 审校

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 提 要

灯光技术的运用在三维动画作品中起着至关重要的作用,光照、动画和物体细节完美的结合可以产生诱人的3D环境。

本书首先介绍了光的自然属性、交互属性以及视觉系统的工作原理,讲述如何运用3D软件工具设置颜色、光线跟踪、模拟场景。然后讨论特殊的光照场合,展示摄像和电影拍摄时的实际灯光位置,还讨论了灯光在建筑照明等方面的应用。

本书可以帮助电脑平面和动画设计人员掌握灯光在作品中的运用技术。



Copyright©2001 by CHARLES RIVER MEDIA, INC.

Translation copyright©2000 by Publishing House of Electronics Industry and Beijing Media Electronic Information Co., Ltd. All rights reserved.

本书英文版由美国CHARLES RIVER MEDIA公司出版,CHARLES RIVER MEDIA公司已将中文版独家版权授予中国电子工业出版社及北京美迪亚电子信息有限公司。本书的任何部分不允许以任何手段抄袭、传播,这其中包括图片、图表和其他信息。未经授权不得使用或修改书中的有关文字。

图书在版编目(CIP)数据

3D灯光技术实用指南/(美)伽俐多(Gallardo, A.)著;孔祥丰等译.-北京:电子工业出版社,2002.

书名原文:3D Lighting: History, Concepts, and Techniques

ISBN 7-5053-7342-0

I. 3... II. ①伽... ②孔... III. 三维-动画-灯光效果-设计 IV. TP391.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第090417号

书 名: 3D灯光技术实用指南

著 者: [美] Arnold Gallardo

译 者: 孔祥丰 等

审 校: 曹 康

责任编辑: 杨 荟

印 刷 者: 北京天竺颖华印刷厂

装 订 者: 三河金马印装有限公司

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

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036 电话: 68279077

北京市海淀区翠微东里甲2号 邮编: 100036 电话: 68252397

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21.25 字数: 550千字

版 次: 2002年1月第1版 2002年1月第1次印刷

书 号: ISBN 7-5053-7342-0

TP·4230

定 价: 36.00元

版权贸易合同登记号 图字: 01-2000-0337

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系调换。

致 谢

尽管写一本书要牵涉到各种各样的人，写作总是一种非常孤独的工作，本书也不例外。我在写这本书期间得到了许多人的帮助，在此我要向他们表示感谢。

首先我要感谢Charles River Media的Jenifer Niles，是她支持我写这本特殊的书籍。没有她的建议和引导，要想完成这本书几乎是不可能的。因此，我特别感谢她，感谢她的关心、勉励和理解，感谢在这项工作中她给我提出新建议和指明方向。

我还要感谢Charles River Media的每一个人，感谢他们为本书的编辑、排版和发行付出辛勤的劳动。

感谢Darkling Simulations的所有人员，是他们提供的Darktree改变了我在CG中创建纹理的方式。特别要感谢Skyler Swanson在本书的Darktree程序的使用中所给予我的支持、帮助和指导。特别感谢Jane Lin向我介绍Sibiont，并感谢她为本书专门制作了几个Darktree纹理。还要感谢Darkling Simulation为本书的选配光盘提供专业版的Simpoint。

感谢Viewpoint Digital同意为本书提供两部车使用，特别要感谢Jordan Erickson的支持。

还要感谢Motional Realms LLC提供ReelMotion，特别感谢Rick Baltman的合作和支持，该应用程序确实显示出在动画领域的强大功能。

感谢Credo Interactive Inc.提供LifeForms，使得可以在几个应用程序中使用单个的角色动画。特别要感谢Gary Shilling的支持和合作。还要感谢Jennifer DeRoo的长期支持和合作。该应用程序解决了在多个3D程序中导入特征数据的问题，使得角色动画更加容易。特别感谢Jeff Hrytzak的技术支持和在使用LifeForms时的帮助。

感谢Right Hemisphere Ltd.提供Deep Paint 3D，特别要感谢Mary Alice Krayecki所给予的大力支持和通力合作。Deep Paint 3D改变了纹理贴图的生成方式，如果没有它，本书中的许多渲染都将不可能实现。

衷心地感谢Worley Labs的 Steve Worley所做出的贡献和帮助，通过你的加盟，使得LW成为一个更好的程序。

特别感谢Mr. Casey Langen为trueSpace开发的3D Light Array生成器插件，使得在tS中使用灯光阵列更容易，现在我再也不用手工去制作灯光阵列了。再次感谢Casey！

感谢Windmill Fraser Multimedia Inc.的Simon Windmill为本书所做的贡献和对本书的支持，还要感谢Ribout！

感谢Caligari Corporation公司的支持和合作，特别要感谢Terry Cotant的长期支持和贡献，使得tS4可以在本书的光盘中演示。

还要感谢Lightscape Technologies/Discreet的支持和帮助——感谢Rod Recker、Filippo Tampieri、Cleve Ard和Pierre Félix Breton。

感谢Discreet MAX Web的工作人员在使MAX更通用方面的远见和努力，感谢TSML使tS大众化！感谢在#truespace的所有人员使3D更具吸引力，感谢在LWML的每一个人，他们

使得LW具有多种可能的用途，还要感谢在#lightwavepro/3D和#3dsmax的每一个人。

感谢Steve Anderson为满足我对MAX的要求所提供的建议、指导和帮助，感谢他为我测试MAX教程文件，感谢他教我在所有新的光照中如何使用MAX。

感谢Clifton Cooke为我渲染场景、浏览教程并提供了建议。

感谢为我测试教程中场景文件的所有人，感谢Erwin Zwart帮我测试LW场景以及在LW/plugin设置中查找一些关键的错误。感谢Judith Hinds帮我测试tS场景和浏览文件。还要感谢Matt DeGelleke帮我测试tS场景教程，感谢他将我带进新型建模的舞台。

特别感谢我的朋友Alvin Estilo浏览和注释了本书中的斜体部分。

感谢Alain Bellon提出的建议、评论和关于如何进行技术主题讨论的建议。

感谢Marcos Fajardo同意在颜色部分使用他的一些神奇般的Arnold全局照明程序，真正体现出Monte Carlo在辐射通量领域的强大。感谢Robert Mitchell为颜色章节的图像所做的贡献。

感谢我的朋友Kang Sik Lee，是他让我改变了对计算机的看法，如果不是他，我现在还不会使用它。

最后还要感谢我的家人在我写书过程中对我的支持和理解。我在小时候就很幸运地被允许毁坏各种玩具，只有毁坏之后才会再去创造它。

如果还有谁被忘记了请原谅，我将永远感谢为这本书做出过贡献的每一个人！

简介

在日常生活中，三维光照涉及到许多技术领域和艺术学科。传统的光照采用的是灯光运动和放置技术和原理，使用心理学思想，通过细微的颜色分配和调色来表达情感，并通过光线分层将统一的、相关联的场景结合在一起，就像在戏院将舞台和灯光结合在一起一样。然而，大部分人还是趋向于专门对数字3D处理过程的某一方面进行研究。例如，也许你是一个优秀的建模人员，但不擅长在场景中使用纹理和光照，或虽然你是一个优秀的建模人员和纹理艺术家，在建模上花费几个星期的时间，却在光照上草率行事。在很多场合，似乎光照只是用于显示场景中的物体。毕竟在真实世界中，光照的任务就是：使物体可见和可辨别。

3D计算机图形的技术由建模、纹理和光照三部分组成，这一点并非很多人都知道。在建筑领域，形式取决于功能，无论建模和纹理多么精彩，在3D图形中光照都是起到烘托或破坏场景的作用。据统计，人们要将三分之一的时间用于3D图形的建模和纹理，而将三分之二的时间用在场景的照明上，特别在进行动画制作时更能反映这一点。好的光照场景可以隐藏模型中的不满意之处，减少纹理、着色及定位的工作量。通过光照，你只需要改变主颜色和整体照明程度，就可以改变场景中物体给人的印象和感觉。

光照和好的动画、物体细节相结合可以产生令人信服和诱人的3D环境。光照作为一门学科，在我看来是教不会的，只能不断地进行实践才能掌握它。因为光照需要观察和灵敏的感觉，需要知道什么是重要的，而且需要知道怎样才能产生可信和切实的效果。就像骑自行车一样，谁也不能真正教你如何去平衡自行车、如何按正确的顺序去踩自行车以及如何正确地操纵把手。更贴切的例子是教你如何着色或画画，老师只能通过不同的形状教你绘图的规则，或教你如何确定形状，却不能教你如何真正地绘画。

光照也是如此，没有人能教你如何真实地照明场景，主要依靠的是理解。记住，光照就是突出场景中的重要部位，忽略次要部位，为一个场景、主题或故事产生某种感觉，从而强化和提升场景的效果并使之具有深度感。从实际角度看，光照十分重要。

本书面向的对象

本书面向的是那些熟悉3D应用的初级、中级和高级用户，旨在通过学习更多的光照技术和光照知识来充实自己的风格和作品。

本书的第一部分介绍了光的自然属性，光的交互属性和光的历史，还介绍了对光的技术领域的各种见解，讨论了我们用来观察周围世界的基本的视觉系统。视觉系统不是一个被动的接受运动和静止图像的系统，而是一个主动的信息处理器。另外，这一部分还讨论了照像和摄像的基本知识。你很有必要理解这些知识，因为计算机图形学总是使用静止或运动的图像作为其显示图像的参照。计算机图形，也叫CG，总是存在与传统照片相比较和融合的问题。掌握了照相过程的特性和术语就可以很容易地理解它在CG中的应用和局限性。由于

光作为我们周围物体的反射，是有颜色的，就必须知道其颜色属性，所以本书还讨论了颜色理论和颜色应用，以及其对人们生理和心理的影响。在这一部分的最后还研究了CG本身，它的设置和工作机理，重点讨论着色算法以及光线跟踪和辐射时光的建模。理解光线跟踪如何生成图像的原理，对于用计算机模拟场景中光的传输是非常重要的。

本书的第二部分讨论了特殊的光照场合。介绍了按照第一部分讨论的原理在造型、建筑和CG角色场景中灯光的位置。对于造型设置，这部分展示了摄像和电影拍摄时的实际灯光位置，还说明了在这两种应用中的差别。这部分还讨论了在建筑照明方面的应用，主要包括控制色调、阴影的生成和已有灯光的复制。因为现在大多数建筑物可视化处理需要用到辐射能量，所以通过使用光线跟踪技术显示的第一幅场景来说明这一议题。这种比较展示出每一种渲染引擎的功能。最后，介绍了特殊的光照场合如运动的汽车和CG角色。本书通过将传统光照应用到计算机图形学中，有机地将传统光照与CG结合起来。

如何使用本书

本书按功能模块的方式编写，前五章介绍的是一些实用信息，这些信息对于提高在照明领域的工作能力是非常重要的。因为光照在不同的场合要进行不同的设置，没有快捷而又硬性的规则，但还是有一些需要遵守的规定。这些规定只有在阅读完本书并一步一步地练习后才能完全掌握。然后，如果你认为你对前四章有了较深的理解，则可以直接进入练习。而当你需要更好地掌握一些概念的话，可以再回到前面的章节。

尽管本书按功能模块的方式编写，有一些章节也会涉及到下一章节的内容。第6章和第7章是关键章节，它一步一步地介绍光照原理，这两章也是第8章的基础。在这些章节中，每个3D程序都有同样的练习，并且使用的几何体也是相似的。如果不一样的话，就不能保持一致性和可移植性。

本书的练习中使用的场景都比较简单，其目的仅仅是光照的应用，而不是那些和复杂场景有关的其他东西。也没有使用复杂的纹理，对于Darktree程序，取消了纹理贴图 and UV贴图，这样就可以使该纹理能应用到多个平台，从而可以交叉使用3D应用程序进行渲染测试。因此，在使用该教程以前，关键要装有Darktree/Simbiont内置程序。对于一些应用程序，如果没有装Darktree/Simbiont的话，教程中的场景就不可用。但是，由于这是一本关于照明方面的书，如果你只是对场景中的对象使用一些简单的matte、Gouraud和Phong着色的话，场景不会有什么问题，灯光的位置和其对物体产生的效果还是一样的。但是，Darktree对场景的效果更逼真。由于除了.DST文件外没有使用其他单个的纹理，因此使用Darktree来处理纹理更容易。每一教程都一步一步地介绍了光照设置，也可参考本书的选配光盘。这样你可以比较你做的和书中介绍的是否一致。

教程中有一些内容主要介绍规则而不是功能，这样做的目的是使你可以通过了解光照的内容和光照的原因而更好地了解光照的过程。现实生活中的光照设置一般都依赖于对场景的要求，只要能达到所希望的效果，而不必关心如何去实现。在CG中也是一样，由于我们直接将灯光放置在摄像机的前面，不会对场景的渲染带来影响，因此也具有较大的灵活性。在CG中照明场景的方式有很多，使得照明既容易又困难，因为我们要掌握的是有目的的照

明，而不是一步一步的设置照明。总之，在学习本书的过程中重要的是要掌握方法而不是学习其中的步骤。

在本书的教程中使用的是Lightwave 5.6、3D Studio MAX 3.1和trueSpace 4.2，也可以使用其他的3D应用程序，使用同样的渲染类型，同样的灯光类型（泛光灯、面光灯、聚光灯等等）。书中还有一个使用Lightscape的实例。总之，照明是一个创造性的过程，可以无限地深入。在使用各种规则之前必须首先掌握这些规则，使用它们的目的并不在于工作本身，而是要让自己得到摆脱，可以自由地创建。本书中介绍的教程和光照说明可以作为你进行研究的起点，记住这也是惟一解决光照问题的途径。

有光照的场景很漂亮：尽管使用的场合很相似甚至是同样的，但采取的方法和最后的解决方案总是变化的，但道理都一样，这也是学习照明最重要的事情。要使光照过程更简单，重要的是要知道环境的情况，因为按照过去的经验，你应该明白在现实场景或CG场景中什么时候要做什么事。最后，光照就是要获取环境的效果，无论是虚拟的还是真实的，它总是要符合物理规律，总要具有一定的经验。

译者序

参加本书翻译工作的主要人员有：孔祥丰、邱凤廷、许书明、王维、袁建华、曹木军、王军、胡辰浩、李万红、翟志强、张传辉、王斌、于涛、李清艳、牛志刚、纪伟、张广庆、麻瑞潮、韩伟峰、徐艳华、徐艳平。由于时间仓促，本书难免有疏漏之处，恳请广大读者指正。

目 录

第1章 光的自然属性	1
1.1 了解光	1
1.2 光的自然属性	1
1.3 电磁光谱	4
1.4 光的属性	5
1.5 光的作用	7
1.6 小结	12
第2章 生理上的观察和感知	13
2.1 解剖眼睛	13
2.2 眼睛中的光路	14
2.3 视觉信息的处理	16
2.4 感觉运动	19
2.5 眼睛的七种运动	20
2.6 前庭系统	20
2.7 单眼信息	21
2.8 小结	25
第3章 摄影和电影摄影的基本原理	26
3.1 胶片	26
3.2 曝光表和“百分之十八灰度”	30
3.3 对比度和密度	36
3.4 ZONE系统	38
3.5 摄影机	40
3.6 小结	46
第4章 颜色和材质	47
4.1 颜色的历史	48
4.2 色彩原理	48
4.3 颜色的特性	52
4.4 颜色混合	55
4.5 颜色模式	56
4.6 颜色的重量	60

4.7 颜色的不变性	61
4.8 有色的阴影	62
4.9 材质	62
4.10 小结	68
第5章 计算机图形	69
5.1 基础	69
5.2 显示生成	70
5.3 曲面建模与实体建模的比较	72
5.4 照明模型	73
5.5 阴影模型	75
5.6 辐射度	80
5.7 模型考虑	84
5.8 小结	88
第6章 基本光照技术	89
6.1 灯光类型	89
6.2 CG灯光实例	90
6.3 三维灯光阵列教程	90
6.4 3D灯光类型	108
6.5 主灯光	112
6.6 主要的光线类型	113
6.7 关于阳光的教程	113
6.8 天空光	128
6.9 关于天空光的教程	129
6.10 月光	147
6.11 关于月光的教程	147
6.12 艺术灯光	162
6.13 关于艺术灯光的教程	164
6.14 烛光和火光	181
6.15 烛光教程	183
6.16 主灯光属性	203
6.17 小结	210
第7章 实用光照技术	211
7.1 主灯光模式	211
7.2 填充灯光	222
7.3 辅助灯光	223

7.4 形态的修正	225
7.5 灯光比率教程	227
7.6 组合	236
7.7 CG角色动画照明教程	241
7.8 光照设置和摄像机位置	253
7.9 小结	254
第8章 光照场合	255
8.1 情景照明：特殊场合	255
8.2 建筑物照明	256
8.3 建筑物可视化教程	271
8.4 商业照明	284
8.5 产品摄影	284
8.6 小结	306
附录A 眼睛	307
A.1 纤维层	307
A.2 脉管层/眼色素层	307
A.3 内膜/视网膜	308
A.4 折射的形成	310
A.5 高级视觉功能	311
附录B 摄影术的主要历史	313
B.1 摄影的早期尝试	313
B.2 凝胶乳化剂/胶卷基础知识	315
附录C 关于CD-ROM	317
C.1 系统要求	317
C.2 各章教程文件夹	318
C.3 特定的用户介绍	318
C.4 软件演示文件夹	319
C.5 本书图像文件夹	321
附录D 术语表	322

第1章 光的自然属性

1.1 了解光

光无处不在，我们一进入该世界，首先碰到的就是光，它的存在与否直接控制着我们的各种行为，我们的日常生活也是围绕着光来进行的。醒来第一眼看到的是光，工作的场所充满着光，在有光的房间里学习，光线强弱的变化改变着我们的日常工作和安排。光使我们可以辨识路、看清仪表和地图，从而引导我们在黑暗中安全地旅行。创建人造灯光照亮行进的道路和街道加快了技术的发展，从而使得电影的出现成为可能。特别是晚上的比赛和音乐会更需要灯光。如果在工厂和学校没有严格的时间安排，我们的计划就可以随着光线的利用而开展。

光线以及其在环境中效果的变化导致了季节的改变。我们可以按时间觉察到太阳、月亮和星体的运动，所有的这些都涉及到光。假期也围绕着夏季的阳光和温度进行安排，光线在情绪低落时还影响着我们的心理效果以及在临床治疗方面治疗季节性的功能失调和直接使用激光进行外科治疗。我们将外面的光线引入到内部使用。我们每天都在同光打交道，而在日常生活中我们并没有过多地关注过它。

不需费力似乎就可以看到光，我们移动眼睛和头扫视周围的环境，通过感知从而对环境有一个更深的理解。当感知到的是虚幻信息时，表情就更丰富了。例如，使用烛光，就会发现它发出的是淡黄色光，伴随有轻烟冒出，产生一定的热量。我们感觉到蜡烛在燃烧，并散发出一些能看得见和感觉得到的东西。现在我们可以通过视频和电影来经历这种感受。在电影和电子图像出现以前，我们将木炭和红赭石于Lascaux（为法国Dordogne区的一洞穴，里面发现有洞画）上。银尖笔画法、红粉笔画法以及Renaissance作品的壁画和乳化法的作品如Duntch的油画和蛋彩画。今天，许多人都通过操作计算机图形模拟现实生活中的灯光的方法将这些艺术工具应用到World Wide Web中。

但是，观察光和看看光是两个不同的概念。一个是调节光的模型，改变可以真正看到的表面。另一个不需要一直看着它，在看到它以前，我们必须理解到底要看什么以及如何去看——不仅仅是知道它的出现。所以，我们除了需要理解光作为一个可计量和可检测的实体外，还要理解如何去感受光。正如Marcus Aurelius曾经说到：“光的自然属性是什么”。在这里，光的自然属性可以沿用古罗马人的解释：“光是永恒不变的”，在使用方面的解释是：“固有属性或安排好了的事物”。人们必须了解光的自然属性，以便能使用它和利用它。

1.2 光的自然属性

如果不首先描绘出光的历史和它的可检测特性是很难对光进行定义的。光的自然属性

一直争论了很久。今天，光被定义为一个照明源，提供干净的、可观察的、可感受的照明的物质，以及人们选择的应用程序或标准。光实际上是所有的这些东西，但是在CG光照技术中真正使用的还是最后一个定义。

光也被认为是电磁辐射中的可见部分，具有恒定的速度。要讨论光，就要讨论光的可观察性和光的可检测性，如图1.1所示。但是，在理解它的自然属性前，首先必须理解光的历史。

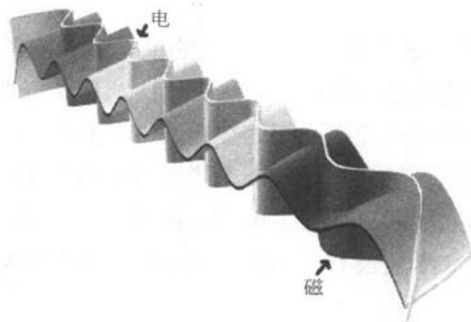


图1.1 光的属性

Samos的Pythagoras（公元前582年~500年）认为光是由眼睛辐射出来的，照在物体上我们才能看见。他说光是触角，伸到所看见的物体上，这也就是所谓的可视射线理论。**Democritus**（公元前460年~370年），伟大的原子论者，认为物体本身辐射出可见的粒子，他还认为世界充满着粒子和空白点。他称这种微小的粒子为不能再分的原子。

然而，**Epicurus**（公元前341年~270年）认为光是来自某个照射物体的照射源，我们所看到的是由物体反射得到的。**Epicurus**还认为，对物体产生的图像感觉是从一个物体到另一个物体的对比，并且认为这一点可以明显感觉得到。**Epicurus**在很大程度上受到**Democritus**的物体辐射原子观点的影响，那就是眼睛捕获物体再传至心灵。

Plato（公元前428年~327年）认为光的形成来自于眼睛的光线辐射和物体的光线辐射。他的同伴**Aristotle**（公元前384年~322年）反对可视射线理论，但他又同意视线取决于眼睛和物体间的运动的观点，但最后他提出：“如果光是由眼睛和物体形成的，为什么在黑暗中看不见物体？”。**Aristotle**提出的问题使得可视射线理论和粒子辐射理论不成立，但也不能回答所提出的问题。**Aristotle**也接受四种基本元素的观点——地球、水、空气和火——这四种元素构成了地球上的任何物体，而认为天体是由“以太”组成的。

从解剖学和生理学上来看，光线是连续的。**Galen**（公元129年~199年），著名的物理学家，认为视觉神经是来自大脑的心灵感应发射器，通过它从眼睛中发射至空中再形成我们所看见的物体。**Leonardo da Vinci**（公元1452年~1519年）认为眼睛的功能就像个摄像机，来自眼睛的图像直接反映到大脑，可惜的是，**Leonardo**并没有做进一步的推断。**Johannes Kepler**（公元1571年~1630年）后来意识到眼睛其实是生成反转图像，最后聚集在视网膜上，该理论最终终止了可视射线理论。

然而，光本身由波和粒子组成的观点一直存在。关于光的自然属性的两种观点的争论在Isaac Newton（公元1642年~1727年）和Christiaan Huygens（公元1629年~1695年）的两种对立的理论间达到了顶点。Newton宣称光是由以直线方式运动和振动的粒子组成的，如果不是由物体周围的波组成，就不会形成阴影，他还认为光粒子从最大的红色变化到最小的紫色。

Huygens认为光和尘埃一样以波的方式运行，但是由于光无处不在，则必定存在着某种载体，就像空气和水运载尘埃一样。他认为该载体为“以太”，并认为光沿着它运行和振动及冲击。这种理论有点儿类似于Aristotle的看和被看的对象在空中相互作用产生视觉的观点。但是，由于Newton的声望和影响，使得他的光辐射理论比Huygens的波运动理论被更广泛地接受，Newton也相信“以太”的存在。

Newton的观点一直使用到19世纪，直到Thomas Young（公元1773年~1829年）进行了干涉和衍射实验才使得Huygens的观点得到支持。Thomas Young认为眼睛的透镜随着形状发生变化以达到聚焦的目的，也就是我们通常所说的自适应现象。该观点导致产生了著名的“双缝”试验。在该试验中让一单个光源通过两个小的垂直的缝隙透进一个黑暗的房间，双缝改变了光的形态，这些改变了的光带称为干涉条纹。光线重叠的区域形成一条亮线，光线彼此干涉的地方形成一条黑线。Young认为粒子间的彼此破坏是不可思议的，即使能，也应释放能量，所以惟一合理的解释是从一个缝隙中的光线加强或减弱了从另一缝隙中穿过的光线，这就是Huygens的光波理论。

光波理论被广泛地接受了，Clerk Maxwell（公元1831年~1879年）在1860年发明了电磁学方程也称为场理论。场是空间的一个影响区域，周围充满着力和能量，它也被认为是物体周围的一个扰动区域。Maxwell认为光只是光线集中的一小部分，称为光谱。光是一个狭窄的电磁谱带，属可见光，电磁谱是从X射线到无线电波的范围。Maxwell还证明光是相互垂直的电场和磁场沿着某一路径共同作用的结果。简单地说，如果电场上下垂直振动，则磁场左右振动。

在所有的射线间惟一的不同就是它们各自的波长。无线电波的波长长，X射线的波长短，可见光的波长介于两者之间。在Maxwell前，电和磁被认为是两个不同的相互之间无任何联系的现象，Maxwell的发现揭示出能量可在各个层上辐射，从非常热的X射线到很冷的无线电波，这些波为可辐射波。辐射意味着光发射波长，Maxwell的发现也暗示出热只是辐射的一种形式，所有的物体都会进行辐射。在电磁谱中，可见辐射是一个更热的范围，也就是说热物体将发出连续的能量，而且随着频率的增加，辐射的数量也会增加。能量是无穷的，是看不见的，所以Maxwell的射线辐射模型并不符合实际情况。

在1888年，Heinrich Hertz（公元1857年~1894年）认为金属从其表面发出的亮光发射电子。这就是所谓的光电效应，通过在一块或两块连接电池的板上发光产生电流。当金属位于亮光中时就发射粒子，构成电路。Hertz打算测量出电子的能量，他发现光的固有频率不会导致电子的辐射，而且辐射电子的数量随着光的强度变化，但电子的能量并不依赖于光的强度。最后，Hertz发现由表面发射的电子处于光中。这些发现并不能和光波理论相吻合，因为它揭示的是电子能量应依赖于光的强度，而且在发射中会存在延迟。

然而光波理论在二十世纪前还是被广泛地接受的，直到Albert Einstein（公元1879年~1955年）解释出支持光的粒子属性的光电效应。光电效应是通过灯光的照射使电子从原子中分离出来，电子的能量取决于光的强度和频率。光波理论说明当光照射到金属面板上时，它开始慢慢地振动金属板直到辐射电子。也就是说，随着光的强度的增加，建立起能量。相反随着光的强度的减小，能量也减小。

然而，这一点并未在实验中得到证实，减小光的强度并不会降低电子的能量，只会减少电子的辐射数量。另外，改变光的颜色（频率）也可以改变辐射的电子的能量，即光的每一种颜色都和能量有关，能量本身也随着辐射。该发现支持量子理论，把光作为波或粒子。

1.3 电磁光谱

光有双重属性，上面已经证明它可作为波或粒子。在这一节，我们首先讨论光波属性，但是，在讨论光波属性前还要定义波的概念以及如何认识光波。

波就是扰动量。在波动范围中的相同的位移量被定义为波长，波长是两个波峰之间的距离，通常用希腊字母 λ 表示。波峰的高度称为波幅，作字母A表示。如果我们以空间的某点为基准来测量每一个波的运动速度，就可以确定波的频率，该频率为以一固定参考点为基准的每秒循环的次数，以希腊字母 γ 表示，见图1.2所示。每秒循环一次称为一个赫兹（Hz），计算机用户相当熟悉的另一个术语是兆赫（MHz），相当于每秒循环一百万次。

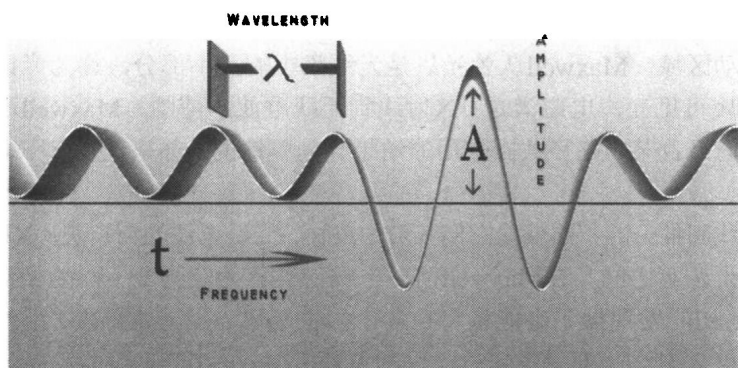


图1.2 电磁光谱

可见光波长很小，为400毫微米到700毫微米。两端分别是红外线和远紫外线，为可见光的两个分界线。红外线位于可见光谱的远红外端，远紫外线位于另一端，它们对我们的皮肤和眼睛有伤害。无线电波位于光谱的更远端，有很长的波长。X射线和 γ 射线位于短波的那一边。我们对可见光的敏感度与对太阳辐射的适应性有关，太阳辐射的大部分能量都在可见光谱的区域，地球上的大气层并不能完全过滤所有的可见光谱。

1.4 光的属性

光以各种方式和我们打交道。光可以在真空和许多载体中运行，可以观察到它如何和事物联系在一起。按照其行为可以将其分为几类，光的可观察属性显示出它具有波动粒子属性，下面列出的是按光的行为所进行的分类，如图1.3到图1.12所示。

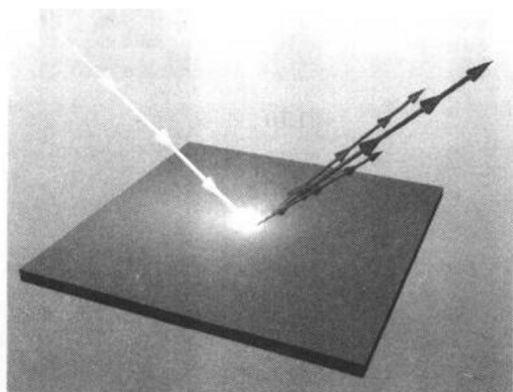


图1.3 反射

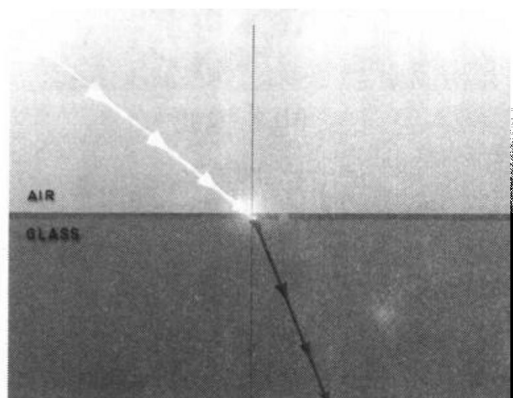


图1.4 折射

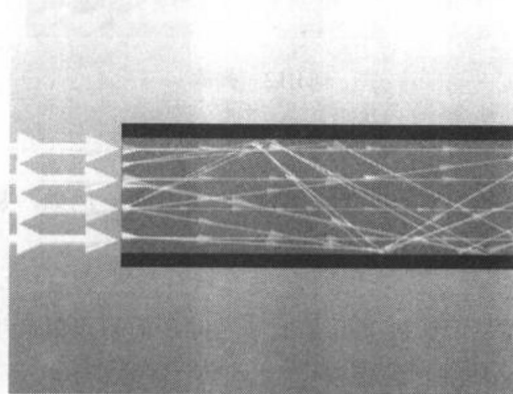


图1.5 传输

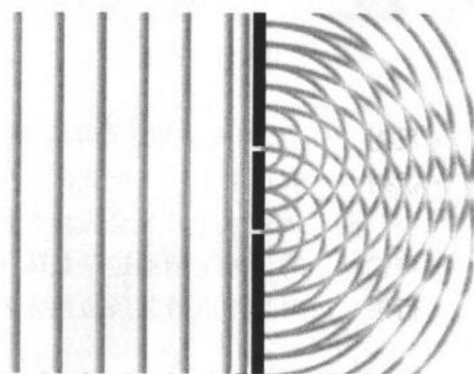


图1.6 衍射

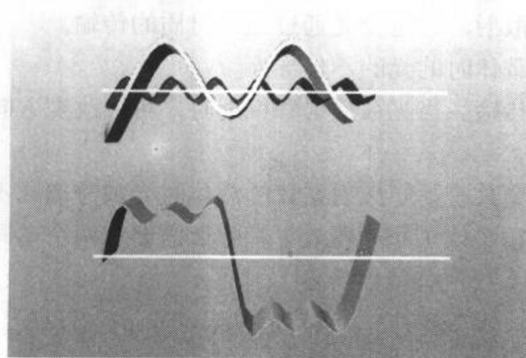


图1.7 干涉

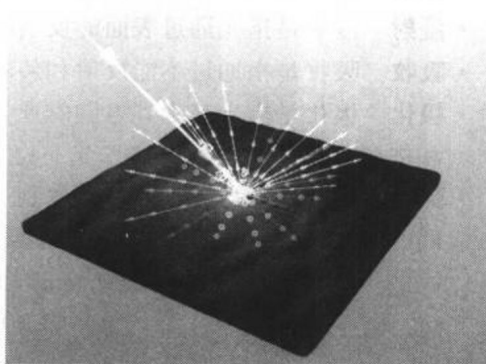


图1.8 散射