

④  
18-22

# 真实环境下色彩 CAD 系统研究

——一种用于高光本色漆的光照模型

TQ630.7  
TP391.72

张湘伟<sup>①</sup> 熊汉伟<sup>②</sup> 何俊<sup>②</sup>

(<sup>①</sup> 汕头大学, 汕头, 510063; <sup>②</sup> 重庆大学, 第一作者 48 岁, 男, 教授)

**摘要** 对高光本色油漆的膜层结构提出简化假定, 通过物理、光学分析, 导出其双向光谱反射率函数, 得到了一种新的光照模型; 这种模型用分布式光线跟踪算法实现, 可用于漆饰品的色彩设计。

**关键词** 计算机图形学; 光照模型; 双向反射率; 色彩设计; 油漆  
中国图书资料分类法分类号 O433; TP391.41

CAD 高光本色漆

## 0 引 言

产品设计不仅是几何造型设计, 还包括外观形式设计, 其中色彩设计是外观形式设计的重要方面。例如轿车, 人们的直接评价就是其外观。与环境相协调, 给人以视觉上强烈美感的车型无疑是用户所希望的, 而色彩又往往左右着人的直观视觉感受, 所以世界上大的汽车公司都有专门的色彩设计部门。与已现代化的几何设计相比, 色彩设计多采用传统的手工方式, 效率低下, 成本高, 设计质量好坏直接依赖于设计师的经验, 难以满足不断变化着的市场需求, 寻求新的色彩设计方法势在必行。

近十年来, 计算机图形技术突飞猛进; 硬件上, CPU 速度显著提高, 内存扩大, 显示的色彩数可达 1 600 万种; 在算法上, 光线跟踪及辐射度法日趋完善, 可生成照片般真实的图象。这就为计算机辅助色彩设计的实现提供了可能性。原始的光线跟踪法假设物体表面是理想的镜面, 辐射度法则假定物体表面是理想漫射面, 这两种极端情形, 与真实世界有较大的差异。为了描述起初世界的颜色现象, 必须建立较精确的光照模型。Lambert 漫反射模型<sup>[1]</sup>是最简单的光照模型; Phong 模型<sup>[1]</sup>近似描述了表面高光, 能较好模拟塑料之类的材质, 目前最为通用; Blinn<sup>[1]</sup>用物体表面的微面元的概率分布来刻画表面粗糙度, 建立了一种基于物理分析的模型; Cook-Torrance<sup>[1]</sup>模型在 Blinn 基础上还考虑了光谱依赖性, 能描述金属这样的均匀介质表面的光反射。Kajiya<sup>[2]</sup>对各向异性材质、Krueger<sup>[3]</sup>对荧光的材质分别建立了光照模型。对油漆的描述, 一般都使用 Phong 模型, 该模型对普通的油漆来讲已足够; 但对外观、色彩要求极高的装饰漆, 比如说汽车高光本色漆, Phong 模型却很难描述色彩的微妙变化。光照在漆面上, 发生面上、面内作用, 二者共同构成了复杂的色彩现象。现有的光照模型都集中

· 收文日期 1998-06-01  
国家自然科学基金资助项目 (59675039)

研究面上反射, 对面内反射大都假定为均匀的漫反射, 而对高光装饰漆, 面内光与漆膜的作用对色彩影响较大, 均匀的漫反射已难以精确描述, 有必要建立专门的光照模型。

笔者对高光本色漆的膜层结构作了简化的假设, 利用基本的物理、光学定律, 较详尽地分析了光与漆层的相互作用, 导出了解析的双向光谱反射率函数, 建立了一个新的光照模型, 并给出计算实例。我们在色彩CAD系统中用分布式光线跟踪法实现了这种模型。

## 1 漆膜结构简化假定

高光本色漆大多用于汽车面漆, 成膜后一般分两层: 上面为无色透明的罩光层, 底部是颜料层; 现代汽车行业采用了“湿碰湿”、“再流平”等抛光技术, 可使漆膜表面达到几乎镜面光滑, 因而我们假设光在漆膜表面发生镜面反射, 光学路径遵循反射定律和折射定律:

$$\theta_i = \theta_{\text{spec}} \quad (1)$$

$$n \sin \theta_i = \sin \theta_t \quad (2)$$

其中,  $\theta_i$ 、 $\theta_{\text{spec}}$ 、 $\theta_t$  分别表示入射角、镜面反射角和折射角;  $n$  表示折射率, 为光谱波长的函数。

经反射、折射后, 光能分布遵循 Fresnel 定理:

$$R(\theta_i) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right] \quad (3)$$

$$T(\theta_i) = 1 - R(\theta_i) \quad (4)$$

$R$ 、 $T$  分别称为反射系数和折射系数, 是入射角、光谱波长的函数。

假定光在罩光层内只被吸收, 不发生散射, 光在透明介质里按以下指数形式衰减<sup>[5]</sup>:

$$L = L_0 e^{-kx/\cos(\theta_a)} \quad (5)$$

$L_0$  是光线的初始亮度,  $L$  是光在介质中穿过  $x$  长距离后的亮度,  $k$  是吸收系数。若膜层厚度为  $h$ , 光线传播角为  $\theta_a$ , 则有:

$$L = L_0 e^{-kx} \quad (6)$$

颜料层由极其细小的颜料颗粒组成, 散射性好。假定光在此发生漫散射, 反射函数采用计算机图形学中的常见形式<sup>[1]</sup>:

$$\rho_r = \rho/\pi \quad (7)$$

其中  $\rho$  为颜料的漫射系数, 是光谱波长的函数, 与角度无关。

从颜料层射向空气界面的光分两种情况: 当入射角  $\theta_a$  大于临界角  $\theta_m$  时, 将发生全反射; 当入射角  $\theta_a$  小于临界角  $\theta_m$  时, 部分光透射出去, 部分光又反射回颜料层。临界角  $\theta_m$  由下式表示:

$$\theta_m = \arcsin(1/n) \quad (8)$$

下面将根据以上假设导出油漆的双向反射率函数。

## 2 双向光谱反射率函数

有一束亮度为  $L_0$ , 入射角为  $\theta_i$  的单色光照在漆膜上, 现要求任一  $\theta_r$  方向的反射光亮度  $L_r$ 。  $L_r$  与入射照度  $E_0$  之比即为双向反射率函数。 $\theta_r$  在球面坐标系中用  $\theta$ 、 $\varphi$  描述。

入射光首先在膜面上发生镜面反射, 反射光亮度为  $L_s$ :

$$L_s = \delta(\theta_r - \theta_{\text{spec}}) L_0 R(\theta_i) \quad (9)$$

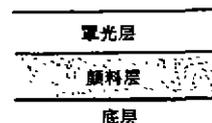


图1 漆膜结构

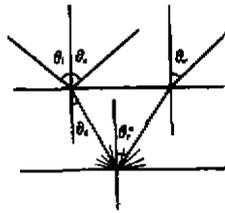


图2 光线路径

亮度为<sup>[6]</sup>:

$\theta_i$  和  $\theta_r$  是按折射定律确定的一对角。

未折射出去的光将再次被反射回颜料层,第二次到达颜料层的总照度为:

$$E_2 = \int_{\theta_d < \theta_m} R(\theta_d) L_{d1} \cos(\theta_d) e^{-kx/\cos(\theta_d)} d\theta_d + \int_{\theta_d > \theta_m} L_{d1} \cos(\theta_d) e^{-kx/\cos(\theta_d)} d\theta_d \quad (13)$$

其中后一项由全反射引起; $R(\theta)$  是光线由膜内射向空气时的 Fresnel 反射系数。令:

$$C = \int_{\theta_d < \theta_m} R(\theta_d) \cos(\theta_d) e^{-kx/\cos(\theta_d)} d\theta_d + \int_{\theta_d > \theta_m} \cos(\theta_d) e^{-kx/\cos(\theta_d)} d\theta_d \quad (14)$$

$E_2$  可写成:

$$E_2 = CL_{d2} = C \frac{\rho}{\pi} E_1 \quad (15)$$

接着  $E_2$  再次被颜料层均匀漫射,一部分光被折射出去,一部分又被反射回颜料层,类似上面分析有:

$$L_{d2} = \frac{\rho}{\pi} E_2 \quad (16)$$

$$L_{r2} = \frac{1}{\pi^2} T(\theta_r) e^{-kx/\cos(\theta_r')} L_{d2} \quad (17)$$

$$E_3 = C \frac{\rho}{\pi} E_2 \quad (18)$$

这样光在膜内反复作用,每次从颜料层漫射的光亮度为  $L_{di}$ , 从  $\theta_r$  方向透射出的光亮度为  $L_{ri}$ , 下次反射回颜料层的光照度为  $E_{i+1}$ , 它们满足以下关系式:

$$L_{di} = \frac{\rho}{\pi} E_i \quad (19)$$

$$L_{ri} = \frac{T(\theta_r)}{\pi^2} e^{-kx/\cos(\theta_r')} L_{di} \quad (20)$$

$$E_{i+1} = C \frac{\rho}{\pi} E_i \quad (21)$$

最终从  $\theta_r$  方向的漫射光亮  $L_{rd}$  为:

$$\begin{aligned} L_{rd} &= L_{r1} + L_{r2} + L_{r3} + L_{r4} + \dots = \\ &= \frac{T(\theta_r)}{\pi^2} e^{-kx/\cos(\theta_r')} (L_{d1} + L_{d2} + L_{d3} + L_{d4} + \dots) = \\ &= \frac{\rho}{\pi} \frac{T(\theta_r)}{\pi^2} e^{-kx/\cos(\theta_r')} (E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + \dots) \end{aligned} \quad (22)$$

{ $E_i$ } 是一个收敛的等比级数,可求得其无穷项之和,故有:

$\theta_{max}$  为镜面反射方向,相应的双向反射率也是一个  $\delta$  函数<sup>[4]</sup>。

余下的光能将折射入罩光层内,并发生衰减,到达颜料层的光照度为:

$$E_1 = T(\theta_i) e^{-kx/\cos(\theta_i)} E_0 \quad (10)$$

$E_1$  将在颜料层被均匀漫射,任一  $\theta_d$  方向上的光

亮度为:  $L_{d1} = \frac{\rho}{\pi} E_1$  (11)

其中  $\theta_r$  方向的光将以  $\theta_r$  的出射角折射出去,出射光

$$L_{r1} = \frac{T(\theta_r)}{\pi^2} e^{-kx/\cos(\theta_r')} L_{d1} \quad (12)$$

$$L_d = \frac{\rho T(\theta_r) e^{-kh/\cos(\theta_r)} E_i}{n^2(\pi - \rho C)} \quad (23)$$

再加上镜面反射量,从  $\theta_r$  方向反射的光亮度为:  $L_r = L_s + L_d$  (24)

因而双向反射率函数  $f_r$  为:

$$f_r = L_r/E_0 = \delta(\theta_r - \theta_{spec})R(\theta) + \frac{\rho T(\theta_r) e^{-kh/\cos(\theta_r)} E_i}{n^2(\pi - \rho C)} T(\theta_r) e^{-kh/\cos(\theta_r)} \quad (25)$$

这是一个光谱量,亦可称作双向光谱反射率函数。实际的膜面很难达到镜面光滑,我们可借用 Phong 模型中的余弦因子来调整镜面反射量的分布:

$$f_r = \left\{ \cos \left[ \frac{1}{2} [|\theta_r - \theta_{spec}| + |\varphi_r - \varphi_{spec}|] \right] \right\}^{m(g)} R(\theta) + \frac{\rho T(\theta_r) e^{-kh/\cos(\theta_r)} E_i}{n^2(\pi - \rho C)} T(\theta_r) e^{-kh/\cos(\theta_r)} \quad (25')$$

其中  $m(g)$  是光泽度  $g$  的某种函数。

### 3 实 例

笔者对一种红色的汽车面漆按以上模型进行计算,结果如图所示。图 3、图 5 是新模型的反射率分布图,图 4、图 6 是 Phong 模型的反射率分布图。从中可看出新模型与 Phong 模型的区别:1)新模型的镜面反射率随入射角增大而增大,而 Phong 模型则保持为常值;2)新模型的漫反射率不仅随入射角变化而变化,还与观察角有关,而 Phong 模型仅与入射角有关。新模型的特点均可从物理上加以解释:一是源于 Fresnel 反射系数与入射角有关,二是由于不同的观察角引起不同的光程距离,从而可起光亮度变化;这两个特点早已在有关的涂料文

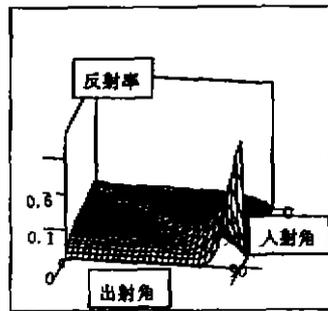


图 3 新模型的反射率分布

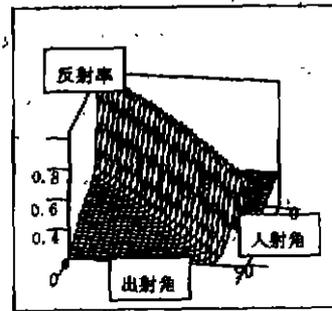


图 4 Phong 模型的反射率分布

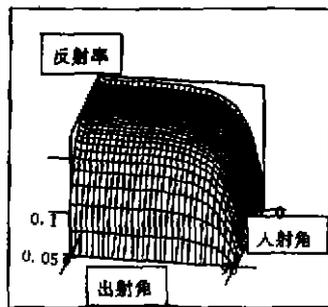


图 5 新模型的漫反射分布

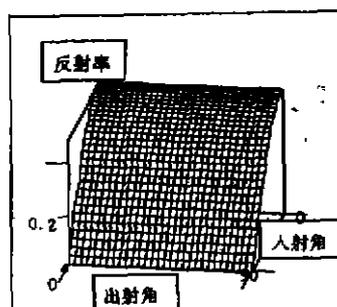


图 6 Phong 模型的漫反射分布

献得到定性描述。笔者在色彩 CAD 系统中用分布式光线跟踪算法实现了这种模型,可以仿

真高光本色漆的视觉效果。

#### 4 结 语

从物理、光学分析导出了一种用于油漆的光照模型,它有以下特点:

1) 精确计算了面内反射光,综合考虑了光在漆膜内发生的多种物理现象:吸收、漫射、折射、反射及全反射。

2) 可解释高光本色漆的光亮度变化。

3) 模型中所有参数都有严格的物理含义,不是根据经验人为确定的。只有这样,才能用于现实意义上的色彩设计,预测人的感官效果<sup>[7]</sup>。

本文内容是笔者正在开发的真实环境下色彩CAD系统的一部分,随着课题的深入,将不断拓展和完善所提出的模型及相关技术,以期在计算机辅助设计色彩设计方面有所进展。在此要感谢国家自然科学基金的资助。

#### 参 考 文 献

- 1 Foley J D, Van Dam A, Feiner S K, Hughes J F. Computer Graphics; Principles and Practice. Reading Ma: Addison-Wesley, 1996, 722~815
- 2 Kajiyu J T. Anisotropic Reflection Models. Computer Graphics, 1985, 19(3): 15~21
- 3 Krueger W. Intensity Fluctuations and Natural Texturing. Computer Graphics, 1988, 22(4): 213~220
- 4 Brain C, Nelson M. Bidirectional Reflection Functions from Surface Maps. Computer Graphics, 1987, 21(4): 273~281
- 5 吴继宗,叶关荣. 光辐射测量. 北京:机械工业出版社,1992. 78~79
- 6 徐家骅. 计量工程光学. 北京:机械工业出版社,1981. 355~357
- 7 服部宽. 自动車の塗装にばける深み感の形成因子. 自動車技术会论文集, 1994, 25(1): 124~128

## Study on Color-CAD System in Real Environment — An Illumination Model for Gloss Solid Paints

Zhang Xianguei Xiong Hanuei He Jun

(Shantou University)

**ABSTRACT** Based on simplified assumptions on solid paint's film structure, a new bidirectional reflectivity function is obtained through physics and optical analysis; the new illumination model implemented in ray tracing algorithm can be used in a color CAD system.

**KEYWORDS** computer graphics; illumination model; bidirectional reflectivity; color CAD; metallic paint

(责任编辑 钟学恒)