

兰州大学

硕士学位论文

激光全色显示的色彩复现

姓名：耿建萍

申请学位级别：硕士

专业：光学

指导教师：曾维扬

20040501

Y. 606193

## 摘 要

激光三基色显示与其它显示方式相比, 具有很多优点。用激光显示色彩丰富、饱和度高、对比度强、与各种视频信号都有好的匹配性。大功率红色半导体激光器及全固态绿色、蓝色激光器的相继问世, 使激光显示成为可能, 微电子技术及精密加工技术的发展更使激光显示技术走向实用化。

激光显示以三基色原理为基础, 本文首先对色度学原理, 尤其是三基色原理进行了介绍。为了激光显示设计方案的进一步完善, 对 PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影仪整机光谱透过特性及每个光学零部件的光学特性进行测试、分析, 进行色度计算。

本研究通过对三基色原理在激光全色显示技术中的应用研究, 对于给定的光学系统, 找到了激光光源红、绿、蓝三基色光的功率配比与投影屏物点色度坐标和亮度的关系, 得到了激光显示红、绿、蓝光源的功率配比及满足显示条件的红、绿、蓝光源的功率。

根据三基色原理, 经过推导编程本文得到了激光显示的亮度方程, 确定了激光显示系统  $R_L$ 、 $G_L$ 、 $B_L$  三基色的单位, 并进一步求得激光三基色显示的光谱三刺激值曲线。

针对将彩色电视视频信号直接输入激光显示系统会出现彩色失真的问题, 完成了 PAL 制视频信号色度系统与激光显示  $R_L G_L B_L$  色度系统的转换, 得到了转换矩阵, 提出了在激光显示的驱动电路中加入矩阵电路, 对经解码器还原的三基色信号进行修正的方法, 从而实现激光显示对彩色电视视频信号的复现。

关键词: 激光显示; 色度系统转换; 亮度方程; 三基色

## ABSTRACT

A practically unrestricted depth of focus, excellent color saturation, high contrast ratio and high resolution in combination with various video standards are the major advantages of laser projection systems compared to conventional lamp projectors. The appearance of high power solid-state lasers in all three primary colors has opened up the possibility of new electronic display. The development of microelectronics technology and microfabrication technology accelerates the realization of laser display.

Firstly, this paper introduced the chroma theory especially tricolor theory, which was the basis of laser display technology. In order to optimize the laser display design, the spectra of PLC\_XP45 LCD and RX1311 LCOS and optical characters of every optical component were tested and analyzed, and chroma calculation was carried on.

Based on the study of tricolor theory in the application of laser full color display technology, for the given optical system, the relation between RGB laser power and color calibration of object point and luminance of projection screen was found. The power ratio of RGB lasers and RGB laser power satisfying the display condition were also obtained.

As the theoretical basis of laser projection display, the value equation was obtained by MATLAB, and the unit of laser display system was also obtained. Further more, the curves of tristimulus values of laser display system were obtained.

Since there is great color distortion when the video signal is sent to laser projection display directly, a method of color system transformation was introduced. The transformation between PAL system and  $R_L G_L B_L$  laser display system was done. And the method to correct video signal reverted by demoder of adding matrix circuit in driving circuit was proposed to realize the reappearance of video signal.

**Keywords:** Laser projection display; Color system transformation; Value Equation; Tricolor

# 第一章 绪 论

## 1.1.研究背景

随着多媒体应用技术的广泛开展和家庭消费水平不断提高,对大屏幕显示设备的要求愈来愈迫切,相应各种原理的大屏幕显示技术也日趋成熟。如阴极射线管显示(CRT)、液晶显示(LCD)、发光二极管显示(LED)、等离子显示(PDP)等。它们各有优势,在市场都占有一定份额,但也有各自的缺陷与不足。

CRT 是显示器中历史最悠久的一种显示器。电子枪是 CRT 的核心,用以把阴极发射出来的大量电子经强度控制、聚焦和加速,形成一束很细的电子流,经过偏转线圈的控制作用,高速定点地去轰击荧光屏。荧光屏的荧光粉经电子的轰击而发光,轰击的电子越多,速度越快,荧光屏上发出的光越亮,亮点描绘出各种符号和图像。一般彩色 CRT 有三枪三束式、单枪三束式。它应用三基色空间混色原理将彩色图像再现在荧光屏上。CRT 显示器全彩色,有极纯的黑色,图像分辨率高,对比度好,亮度高,这些特点使它一直占领着主要市场。但它功耗大,辐射大,光输出低,体积大,进一步增大屏幕空间有限。

LCD 即液晶显示器,主要由偏振片、液晶盒、彩色滤光膜、背投光源组成。偏振片包括起偏振片和检偏振片,它们光轴彼此平行。当不加电压时,入射光经液晶盒偏振方向旋转 90 度,光不能通过检偏振片。当加电压后,则偏振方向不改变,光能顺利通过检偏振片,液晶呈透明状态。三基色膜 R、G、B 三组一列逐列做在矩阵液晶显示屏的列电极上。在驱动电路的作用下,各像素分别发出三色光,通过空间混色而实现彩色图像显示。它一般采用高压汞灯、UHE 金属卤化物灯做光源。LCD 电压低,耗电省,体积小,重量轻,无辐射,无闪烁,可拼接成大屏幕液晶显示器。九十年代末,液晶投影技术取得了突破性的进展。液晶不再灌在两块玻璃板之间,而是灌在硅片和玻璃板之间,不再用透射式来调制恒流光源,而是用反射式来调制恒流光源,即出现了 LCOS 反射式液晶投影机。它一般采用 UHP100W 超高性能光源,达到高能量输出。光源产生的白光,被分为红、绿、蓝三基色,分别入射到三片芯片上,经 LCOS 芯片调制的反射三基色光,由同一棱镜组再组合成彩色图像,由投影系统放大,投射到显示屏上。[1][2][3]

九十年代出现的 DLP (Digital Light Processor) 投影是以数字微反射镜器件 DMD (Digital Micromirror Device) 作为光阀成像器件, 采用数字光处理技术(DLP) 调制视频信号, 把视频信号调制成等幅的脉宽调制信号, 驱动 DMD 光路系统, 再通过投影透镜获得大屏幕图像。引入三片 DMD, 通过棱镜将白光分为三基色光, 每一片对应一种基色光, 其结果就是提高了亮度, 增加了色彩。[2][3][4][5]

彩色等离子显示 PDP 是九十年代中期开始进入量产的。它工作过程包括气体放电、荧光粉发光。惰性气体在外加电信号的作用下产生放电, 使原子受激而跃迁, 发射出真空紫外线, 从而激发光致荧光粉发射可见光。它属于主动发光器件, 不用投影和拼接, 可直接做大屏幕显示。它的缺点包括弱的黑电平、色空间。[2][3][6]

LED 显示器利用发光二极管构成点阵模块或像素单元组成大面积显示屏幕。LED 大屏幕彩色显示器的显色原理与 CRT 彩色显示器相似, 是用红、绿、蓝三基色 LED 交错排列, 在一定的距离外观察时, 由于屏幕上三基色点对人眼所张视角小于人眼的空间分辨率, 因而实现加色法混色。LED 在各个方向的发光强度不一样, 一般光强随偏离角的增大而减小。三基色管的光强空间分布特性也彼此不同, 它们混合后的颜色也会随观察角的变化而变化, 从而会引起图像颜色的失真。[2][3][7]

目前 CRT 投影电视是家用大屏幕的主流, LCD 是商务和教育用大屏幕显示的主流。LED 阵列显示是目前唯一能满足体育场馆、广场、室外广告、告示牌等用的大屏幕显示产品。而 PDP 由于能在恶劣的条件下工作, 是军用大屏幕显示的主流。[8][9]

同传统的显示光源相比, 激光具有很好的单色性、方向性, 使用激光三基色作为显示光源所表示的颜色, 包含了人眼所能分辨颜色的 90%。用激光显示色彩丰富、饱和度高、对比度强、与各种视频信号都有好的匹配性。[10]

大功率红色激光器的问世及大功率绿色、蓝色激光器的相继问世, 使激光显示成为可能, 微电子技术及精密加工技术的发展更使激光显示技术走向实用化。

## 1.2. 激光显示的研究历程

20 世纪 60 年代末, 在激光本身出现不久, 许多电视厂家就考虑到用激光做光源进行显示。在接下来的三十年, 激光技术在这一点上并没有得到发展。直到 20

世纪 90 年代中期, 半导体激光器和泵浦固态激光器技术的提高, 及相对价格的降低, 才推动了这一领域的发展。

1964 年 N.G.Basov 和 O.V.Bogdankevich 设计了纵向电子束泵浦半导体激光光子管 (Quantoscope), 用于显示。在此基础上, 1995 年俄罗斯 Vladimir N.Ulasjuk 和 Oleg M.Makienko 等人设计了高功率全彩色激光显示系统。它最大的改进就是取代了磷显示屏, 亮度增大, 显示效果更好。<sup>[11]</sup>

1998 年韩国三星高等技术学院研制成功了 200 英寸大屏幕激光显示系统。它采用主波段在 647nm、515nm、488nm 功率为 4w 的白色激光做光源, 白色激光由气体 Kr-Ar 激光器产生。激光经二色性镜分解为红、绿、蓝光, 再经过声光器件与视频信号调制一致, 重新合成的光再经多边形镜和检流计进行横向与纵向扫描, 在显示屏上成像。该系统可以得到自然全彩色色调, 是传统磷显示的三倍。但它的产业化面临着光源要小型化, 要增大光源功率及光源寿命等问题。<sup>[12][13][14]</sup>

2000 年德国设计研究出了适合于产业化的全固态红、绿、蓝激光器, 同用于大屏幕显示的气体激光器相比, 它用于高亮度显示的功率消耗低于 3kw, 远远小于气体激光器的 100kw 的消耗功率。它产生 628nm、532nm 和 446nm 波段的红绿蓝三基色光, 平均输出功率大于 18w, 是家庭影院、大屏幕显示的理想光源。德国又于 2001 年设计制造出激光输出功率为 19w 高功率激光显示系统, 提出了 35w 更高激光输出功率的构想, 并对其进行了论证与阐述。<sup>[15]</sup>

2001 年美国通过应用 DMD 实现了高功率激光数字投影显示, 其激光光源波段为 628nm、524nm、449nm, D65 白光可达 4000 流明, 色温 6500K, 对比度大于 300:1。可实现很好的大屏幕显示效果。对于较小的屏幕, 可同时为几个投影模块提供光源。这将对电影显示产业的发展有很大的推动作用。<sup>[16][17]</sup>

我国在激光显示领域几乎还是空白, 其研究工作目前还处于原理实验阶段。2002 年, 中科院物理所、长春光机所和光电所合作完成了红、绿、蓝全固态激光器的白光配比, 在国内首次实现了激光全色投影显示原理实验。

### 1.3.本研究的内容和意义

本文首先对色度学原理进行了介绍。完成了 PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影仪整机光谱透过的特性测试、分析, 并对投影仪进行了分解, 对每个光学元件的

光学特性进行了测试、分析，进行色度计算。为激光显示的设计方案提供了参考依据。

各种彩色显示器的显色都以三基色原理为基础。激光显示的三基色光源由红、绿、蓝三个激光器提供。本研究的目的是，通过三基色原理在激光全色显示技术中的应用研究，对于给定的光学系统，找到激光光源红、绿、蓝三基色光的功率配比与投影屏物点色度坐标和亮度的关系，对激光三基色显示中的色差进行校正，优化激光大屏幕显示质量。

此外，由于标准光源和显像三基色不同，亮度方程会不同。本文完成了激光显示  $R_L G_L B_L$  色度系统与 XYZ 色度系统的转换，得到了激光显示色度系统的亮度方程。若将彩色电视视频信号直接输入激光显示系统会出现彩色失真，解决的办法有两种。一种方法是建立激光显示系统的信号系统，但这样做不是很现实；另一种方法是对彩色视频信号进行修正，使激光显示系统能够很好的实现视频信号的色彩复现。本文完成了 PAL 制视频信号色度系统与激光显示  $R_L G_L B_L$  色度系统的转换，得到了转换矩阵，提出了在激光显示的驱动电路中加入矩阵电路，对经解码器还原的三基色信号进行修正的方法，从而实现了激光显示对彩色电视视频信号的复现。

## 第二章 色度学原理

### 2.1. 光与色觉

#### 2.1.1. 概述

在整个电磁波谱中，能引起人眼视觉的只是一小部分。刺激人眼能引起视觉的光辐射称为光辐射，简称可见光。要严格确定可见光的波长范围是很困难的，一般来说，可以取波长 380~780nm 作为可见光的范围。可见光的波长不同，引起人眼的颜色感觉就不同。单色光的波长由长到短，对应的颜色感觉有红到紫。一般认为：

红色 770~620 nm    橙色 620~590    黄色 590~560    黄绿色 560~530  
绿色 530~500 nm    青色 500~470    蓝色 470~430    紫色 430~380

这种划分只是给出大致的范围。实际上单色光的颜色是连续渐变的，不存在严格的界限。并且单色光的颜色感觉随着光的强度变化而变化，实验指出光谱上除了三个点(572nm, 503nm, 478nm)不受光强变化的影响外，其他各波长的颜色都会略有变化。<sup>[18]</sup>

光是人们感觉所有物体形态和颜色的唯一物质。色是由物体的化学结构所决定的一种光学特性，是光作用于人眼引起除形象以外的视觉特性。颜色是光作用于物体后的结果，没有光就没有色彩。但颜色并不是一个单纯的物理量。光线作用于物体后还必须通过一系列的生理活动和心理反应后才能使大脑产生颜色的感觉。所以颜色在物理学上是可见光的特征，在生理学上是可见光对视觉的不同刺激，而在心理学上是可见光刺激大脑的反映。<sup>[1]</sup>

#### 2.1.2. 颜色的分类和颜色的特征

颜色可分为彩色和非彩色两类。非彩色指白色，黑色和各种深浅不同的灰色组成的系列，称为白黑系列。彩色指白黑系列以外的各种颜色。彩色有三种特性：明度、色调、饱和度，亦可用其他类似的三种特性表示。

明度：人眼对物体的明暗感觉。发光物体的亮度越高，则明度越高；非发光

体的反射率越高，明度越高。

色调（色相）：彩色彼此相互区分的特性，即红、黄、绿、蓝、紫等。不同波长的单色光具有不同的色调。发光物体的色调决定于他的光辐射的光谱组成。非发光物体的色调决定于照明光源的光谱组成和物体本身的光谱反射（透射）的特性。

饱和度：是指彩色的纯洁性。可见光谱中的各种单色光是最饱和的彩色。物体色的饱和度决定于物体反射（透射）特性。如果物体反射光的光谱带很窄，它的饱和度就高。<sup>[18]</sup>

颜色的色相，明度，饱和度都是人在观察色彩时的视觉心理量，是人们的主观颜色感觉。他们分别与主波长，光强，光谱能量分布有关，但他们并不是光的物理属性，其表现形式与度量都取决于人类的视觉。这三个数形式相互独立的，但不能单独存在。他们之间的相互变化是相互关联相互影响的。<sup>[1]</sup>

## 2.2. 颜色方程

### 2.2.1. 色光混合

色光混合又称加色混合，是指不同的色光或色料的反射光同时或在极短的时间内刺激视网膜，从而产生另一种新色调的混合形式。

可见光谱中占据面积最大的是蓝紫(B, 420~470nm)，绿(G, 500~570nm)，红(R, 630~700nm)三种颜色的光。由试验发现，红，绿，蓝三种色光以不同比例混合，基本上可以产生自然界中全部的色彩。而这三种光本身各自独立，即其中任何一种色光都不能由其余两种色光混合产生，将其称为色光三原色。<sup>[5]</sup>

1854年德国数学家格拉斯曼将彩色光混合现象总结成颜色混合定律，即格拉斯曼颜色混合定律。

- 1) 人的视觉只能分辨颜色的三种变化即明度、色调和饱和度。
- 2) 亮度相加律：混合色的总亮度等于组成混合色的各种色光亮度的总和。
- 3) 补色律和中间色律

在由两个成分组成的混合色中，如果一个成分连续地变化，混合色的外貌也连续地变化。

补色律是指每一种颜色都有一个相应的补色。如果某一颜色与其补色以

适当的比例混合，便产生白色或灰色。如果两者按其他比例混合，便得到近似比重大的颜色。

中间色律是指任何两个非补色相混合，便产生中间色，其色调取决于两个颜色的相对数量，其饱和度取决于两者在色相顺序上的远近。

4) 代替律：相似色混合后仍相似。只要在视觉上颜色  $A = \text{颜色 } B$ ，颜色  $C = \text{颜色 } D$ ，而不管  $A$  和  $B$ ,  $C$  和  $D$  的光谱成分是否一样，则：

$$A + C = B + D$$

即只要在感觉上颜色是相似的，便可以互相代替，所得的视觉效果是同样的。<sup>[1]</sup>

### 2.2.2. 颜色匹配实验

根据格拉斯曼颜色混合规律，外貌相同的颜色可以相互代替。相互代替的颜色可以通过颜色匹配实验来实现。把两个颜色调节到视觉上相同或相等的方法叫做颜色匹配。<sup>[1]</sup>

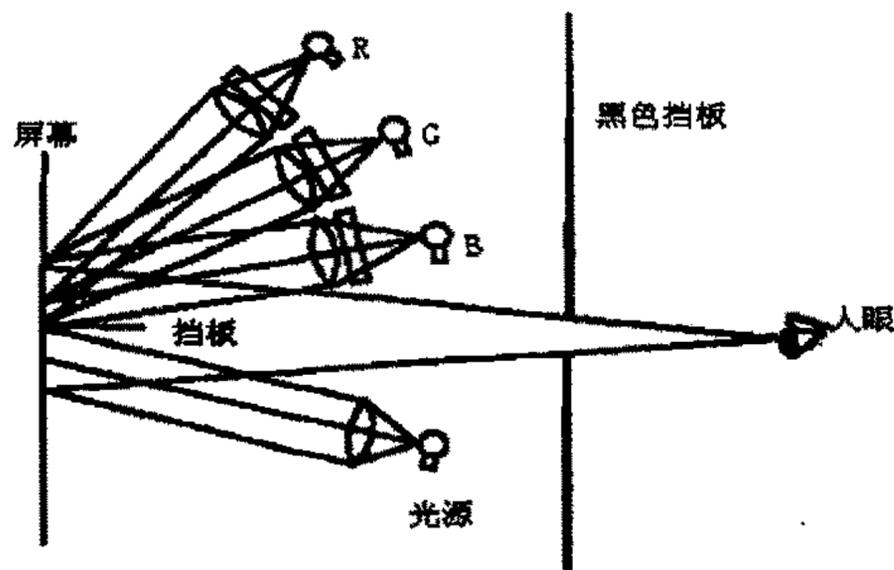


图 2-1 颜色光的匹配实验

如图 2-1 所示，用不同的颜色光照射在白色屏幕的同一位置上，光线经过屏幕的反射而达到混合，混合后的光线作用到视网膜上便产生了一个新的颜色。调节红、绿、蓝三原色灯光的强度比例，便产生看起来与另一侧颜色相同的混合色。为进一步匹配各种颜色，可关掉某一原色光源，只变化另两原色光的比例，就能产生两种原色光混合后的一系列颜色。当三原色灯光取适当比例时，混合光可以达到看不出色调的程度，也就是成为非彩色的白光。

在颜色光的匹配实验中，由三原色形成的颜色的光谱组成与被匹配的颜色

光谱组成可能不一致。例如，由红、绿、蓝三原色光混合的白光与连续光谱的白光在视觉上一样，但他们们的光谱组成却不一样。这一颜色匹配称为“同色异谱”的颜色配对。由三原色混合的颜色只能表达被匹配颜色的外貌，而不能表达它的光谱组成情况。

### 2.2.3. 颜色方程

由匹配实验可知，自然界常见的绝大多数色彩都可以用三原色按照适当的比例混合组成的某个等效色来模拟的，这个等效色与实际色作用于人眼所引起的彩色视觉是相同的。即由三原色混合的颜色只表达被匹配颜色的外貌，而不能表达它的光谱组成情况。其匹配情况可用颜色方程 2-1 表示：

$$C \equiv R(R) + G(G) + B(B) \quad (2-1)$$

式中  $C$  代表被匹配的颜色， $(R)$ 、 $(G)$ 、 $(B)$  分别代表产生混合色的红、绿、蓝三原色， $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别代表红、绿、蓝三原色的数量，“ $\equiv$ ”号代表匹配，即视觉上相等。

在颜色匹配实验中，把为匹配相等能量光谱色所需的红、绿、蓝三原色数量叫做光谱三刺激值，用  $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{B}$  表示。匹配波长  $\lambda$  的的等能光谱色  $C_\lambda$  的颜色方程为：

$$C_\lambda \equiv \bar{R}(R) + \bar{G}(G) + \bar{B}(B) \quad (2-2)$$

### 2.2.4. 色度坐标

在色度学里，三刺激值的单位  $(R)$ 、 $(G)$ 、 $(B)$  不是用物理量为单位，而是选用色度学单位。它的确定方法是选定一特定白光 ( $W$ ) 作为标准，在颜色匹配实验中选择定的三原色光相加混合与白光 ( $W$ ) 相匹配，达到匹配时，如测得所需的三原色的光通量值  $(R)$  为  $I_R$  流明； $(G)$  为  $I_G$  流明； $(B)$  为  $I_B$  流明。则将比值  $I_R : I_G : I_B$  定为三刺激值的相对亮度单位，即色度学单位。<sup>[18]</sup>

一般不直接用三原色数量（即  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三刺激值）来表示颜色，而用三原色各自在  $R+G+B$  总量中的相对比例表示颜色。三原色各自在  $R+G+B$  总量中的相对比例叫做色度坐标。某一特定颜色的色度坐标  $r$ 、 $g$ 、 $b$  为：<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R+G+B} \\ g &= \frac{G}{R+G+B} \\ b &= \frac{B}{R+G+B} \end{aligned} \quad (2-3)$$

由于  $r+g+b=1$ ，只用  $r$  和  $g$  即可表示一个颜色。某一特定颜色的坐标可写为：

$$C = (r, g, b)$$

在颜色匹配实验中，为了匹配标准白光，三原色的数量  $R$ 、 $G$ 、 $B$ （三刺激值）相等即  $R = G = B = 1$  将标准白光的三刺激值代入色度坐标公式，可得：

$$r = 0.3333, g = 0.3333, b = 0.3333$$

则： $W = (0.3333, 0.3333, 0.3333)$

### 2.3. CIE 标准色度系统

现代色度学采用 CIE 所规定的一套颜色测量原理、数据和计算方法，称为 CIE 标准色度学系统。

国际照明委员会 CIE 标准色度观察者光谱三刺激值，是根据很多观察者的颜色视觉试验，确定的一组为匹配等能光谱色所需的三原色数据，即“标准色度观察者光谱三刺激值”，以此代表人眼的平均颜色视觉特性，用于色度学计算和标定颜色。<sup>[1]</sup>

#### 2.3.1. 1931CIE—RGB 标准色度学系统

用三刺激值来定量描述颜色量是一种可行的方法。CIE(国际照明委员会)选择 700nm(红)、546.1nm(绿)和 435.8nm(蓝)三单色光为三原色光匹配等能光谱的各种颜色，并以相等数量的三原色刺激值匹配出等能白光，匹配等能白光的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三原色单位的亮度比为 1.0000: 4.5967: 0.0601。这一系统叫做 1931CIE—RGB 色度系统。用该三原色匹配等能光谱色的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三刺激值用  $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{B}$  表示，光谱三刺激值曲线如图 2-2 所示。这一组函数叫做“1931CIE—RGB 系统标准色度观察者光谱三刺激值”，简称“1931CIE—RGB 系统标准观察者”。<sup>[1]</sup>

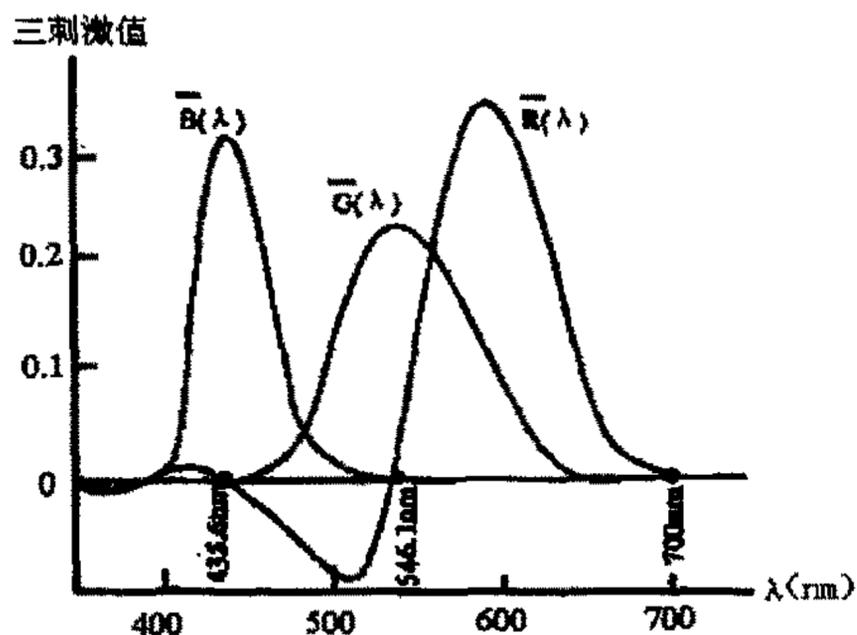


图 2-2 1931CIE-rgb 系统标准色度观察者光谱三刺激值

光谱三刺激值与光谱色色度坐标的关系为

$$\begin{aligned}
 r &= \frac{\bar{R}}{\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}} \\
 g &= \frac{\bar{G}}{\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}} \\
 b &= \frac{\bar{B}}{\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}}
 \end{aligned}
 \tag{2-4}$$

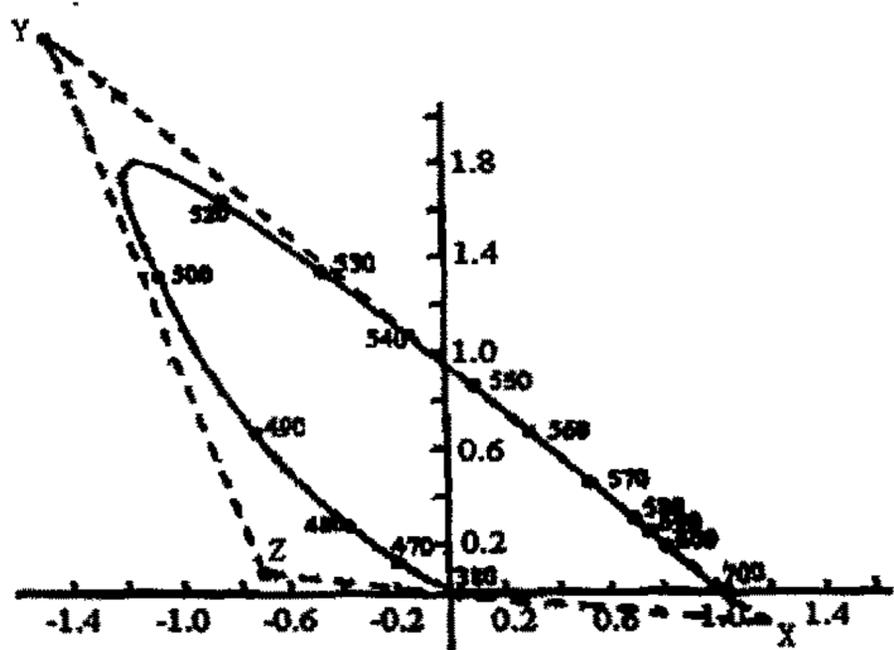


图 2-3 1931 CIE-rgb 系统色度图

图 2-3 是根据 1931CIE-rgb 系统标准色度观察者光谱三刺激值所绘制的色度图。图 2-2 和图 2-3 中可看到  $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{B}$  三刺激值和光谱轨迹的色度坐标有很大一部分出现负值。负值出现的物理意义可以从颜色匹配实验的过程中来理解它。当投射到半视场的某些光谱色，用另一半视场的三原色来匹配时，不管三原色如何调节都不能使两半视场颜色达到匹配，只有在光谱色的半视场内加入适量

的三原色之一才能达到颜色匹配，加在光谱色半视场的原色就用负值来表示，这就出现了负的色度坐标值。<sup>[21]</sup>

1931CIE- $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{B}$  三刺激值是从实验得出的，可以用于色度学计算，但计算中会出现负值，用起来不方便，又不易理解，所以 1931 年 CIE 推荐了一个新的国际通用的色度系统，1931CIE-XYZ 系统。

### 2.3.2. 1931CIE-XYZ 标准色度系统

1931CIE- $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{B}$  标准色度系统采用物理三原色， $R$ 、 $G$ 、 $B$  的比例关系决定所配彩色光的色度，数值则决定所配彩色光的光通量。1931CIE-XYZ 标准色度系统是改用三个假想的原色  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  建立起来的一个新的色度系统。XYZ 制的三原色单位，满足以下三个条件克服 RGB 制的缺点：<sup>[19]</sup>

1. 当用他们配出实际色彩时，三个色系数  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  均为正值。
2. 为了便于计算，使合成彩色光的亮度仅由  $Y$  一项确定，另两个原色不构成混合色光的亮度，但合成色光的色度仍由  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的比值确定。
3. 当  $X=Y=Z$  时，仍能表等能白光  $E_{\text{白}}$ 。

在 1931CIE-XYZ 系统中，用于匹配等能光谱刺激的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三原色数量叫做“CIE1931 系统标准色度观察者光谱三刺激值”，也叫做“CIE1931 标准色度观察者颜色匹配函数”，简称“CIE1931 系统标准观察者”，其曲线如图 2-4，根据 1931CIE-XYZ 系统绘制的 CIE1931 色度图如图 2-5。

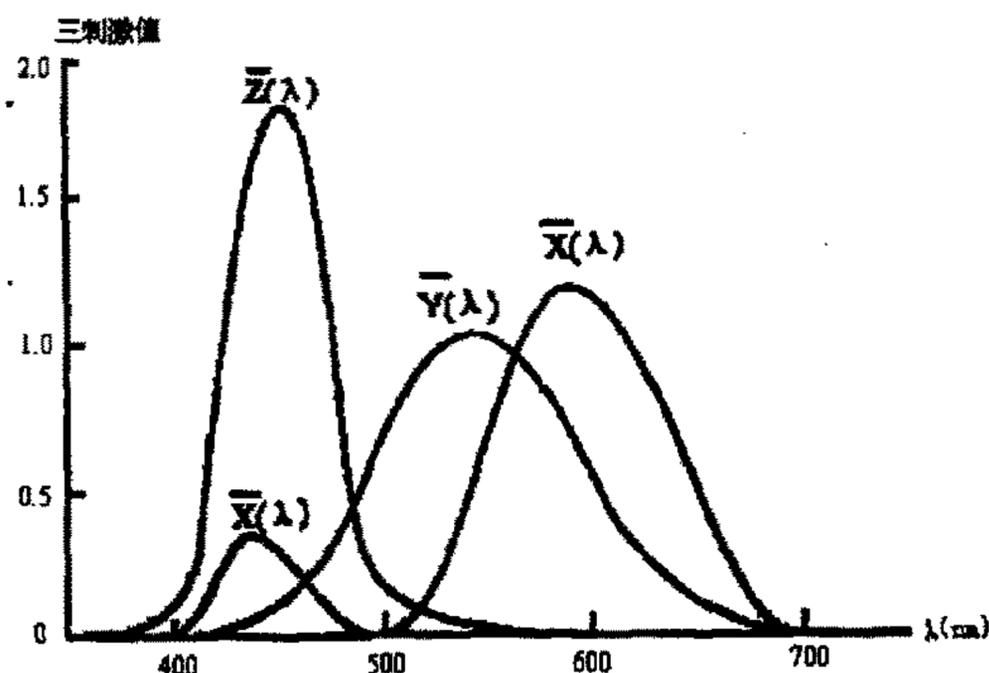


图 2-4 CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值

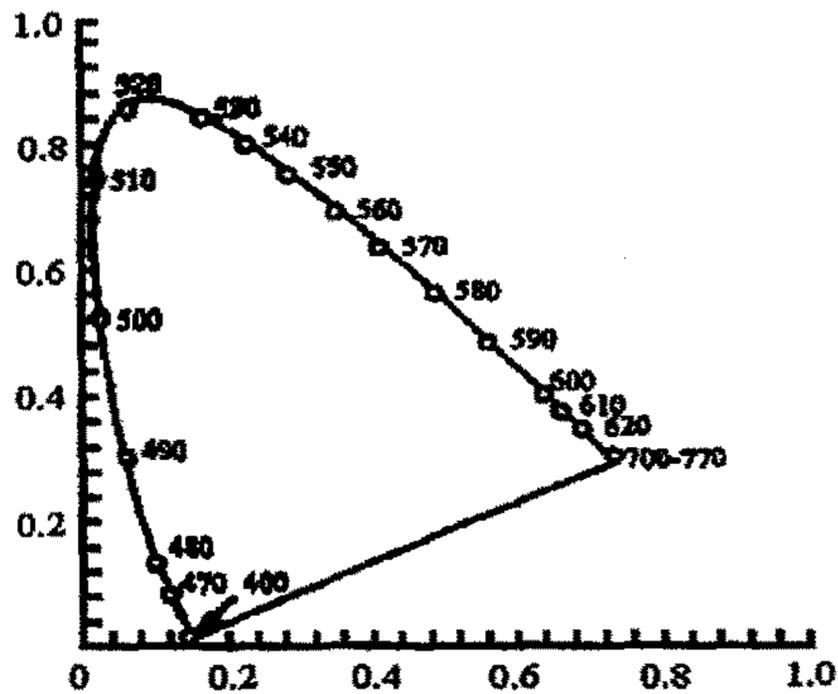


图 2-5 CIE1931 色度图

XYZ 系统与 RGB 系统的三刺激值之间的转换关系式为

$$\begin{aligned}
 X &= 2.7689R + 1.7517G + 1.1302B \\
 Y &= 1.0000R + 4.5907G + 0.0601B \\
 Z &= 0R + 0.0565G + 5.5943B
 \end{aligned}
 \tag{2-5}$$

用矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}
 \tag{2-6}$$

$$\text{系数矩阵 } A = \begin{bmatrix} 2.7689 & 1.7517 & 1.1302 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix}$$

### 2.3.3. 不同色度系统之间的转换

由于三原色选择不同，以及规定三刺激值单位的方法不同会出现许多不同的色度系统。由 RGB 系统到 XYZ 系统就遇到了系统的转换问题。令 (X)、(Y)、(Z) 代表新系统的三原色，(R)、(G)、(B) 代表旧系统的三原色。根据格拉斯曼定律可知，每单位新的原色可以由旧的三原色混合得到。从而可以得到旧系统的三刺激值与新系统的三刺激值之间的关系，用矩阵表示为<sup>[18]</sup>

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

或用逆矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

欲求得新旧色度坐标之间的转化关系则可根据

$$r = \frac{R}{R+G+B}$$

$$g = \frac{G}{R+G+B} \quad (2-9)$$

$$b = \frac{B}{R+G+B}$$

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2-10)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

由式 2-8, 2-9, 2-10 可得

$$x = \frac{b_{11}r + b_{12}g + b_{13}b}{(b_{11} + b_{21} + b_{31})r + (b_{12} + b_{22} + b_{32})g + (b_{13} + b_{23} + b_{33})b}$$

$$y = \frac{b_{21}r + b_{22}g + b_{23}b}{(b_{11} + b_{21} + b_{31})r + (b_{12} + b_{22} + b_{32})g + (b_{13} + b_{23} + b_{33})b} \quad (2-11)$$

$$z = \frac{b_{31}r + b_{32}g + b_{33}b}{(b_{11} + b_{21} + b_{31})r + (b_{12} + b_{22} + b_{32})g + (b_{13} + b_{23} + b_{33})b}$$

其逆变换即为  $r, g, b$  的表达式。

由 2-8 式和 2-11 式可知, 要求得它们的关系, 就必须确定  $b_{11}, b_{12}, \dots, b_{33}$  九个系数。通常情况是知道新系统三原色以及参照白光在旧系统内的色度坐标,  $r_x, g_x, b_x; r_y, g_y, b_y; r_z, g_z, b_z; r_0, g_0, b_0$ 。而新系统三原色和参照白光在新系统内的色度坐标为

$$X: x=1, y=0, z=0$$

$$Y: x=0, y=1, z=0$$

$$Z: x=0, y=0, z=1$$

$$W: x=x_0, y=y_0, z=z_0$$

将四点的八个相应坐标代入  $x$ 、 $y$ 、 $z$  和  $r$ 、 $g$ 、 $b$  的表达式，又由于  $r+g+b=1$ ， $x+y+z=1$ ，可得八个独立的方程。九个系数中八个是独立的，计算时可以指定九个系数中任意一个系数为某一常量，其余八个系数随此常量大小同时扩大或缩小相同倍数，不影响颜色的色调。计算出了  $b_{11}$ 、 $b_{12}$ 、……、 $b_{33}$  九个系数，就可以完成从 RGB 系统到 XYZ 系统三刺激值的转换与色度坐标的转换。

## 第三章 色度计算与测量

### 3.1. CIE 色度计算方法

#### 3.1.1. CIE 标准照明体

同一物体在不同的光源或不同时相的日光照射下，其表面颜色是不同的。因此测量物体表面的颜色，必须在一定的光源下进行。为了统一颜色测量的标准，CIE 规定了色度学的标准照明体和标准光源。

标准照明体是指特定的光谱功率分布。这一光谱功率分布不是必须由一个光源直接提供，也不一定只能用一个光源来实现。标准光源是实现标准照明体的相对光谱功率分布的光源。CIE 推荐了四种标准照明体 A、B、C、D 和三种标准光源 A、B、C。 [20] [21]

#### 3.1.2. 色度坐标的计算

计算光源色或物体色的色度坐标，首先须对光源的光谱功率分布或物体的光谱反射率因数进行测定，然后计算颜色的三刺激值，最后再由颜色的三刺激值转换为色度坐标。颜色三刺激值的计算方法是用颜色刺激函数  $\phi(\lambda)$  分别乘以 CIE 光谱三刺激，并在整个可见光谱范围内分别对这些乘积进行积分。三刺激值标准方程为： [1]

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{X}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{Y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{Z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3-1)$$

在实际计算中，用求和来近似积分，表达式如下：

$$\begin{aligned}
 X &= k \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{X}(\lambda) \Delta \lambda \\
 Y &= k \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{Y}(\lambda) \Delta \lambda \\
 Z &= k \sum_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{Z}(\lambda) \Delta \lambda \\
 k &= 100 / \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{Y}(\lambda) \Delta \lambda
 \end{aligned}
 \tag{3-2}$$

式中  $X, Y, Z$  是 CIE1931 标准色度学系统的三刺激值,  $\phi(\lambda)$  为颜色刺激函数,  $S(\lambda)$  为光源的相对光谱功率。对于照明体和光源  $\phi(\lambda)$  为它们的相对光谱功率分布, 即  $\phi(\lambda) = S(\lambda)$ ; 对于物体色而言,  $\phi(\lambda)$  是照明体或光源的相对光谱功率分布  $S(\lambda)$  与物体光谱透过率  $\tau(\lambda)$  或物体的辐亮度因数  $\beta(\lambda)$  或物体的光谱反射率  $\rho(\lambda)$  之乘积。常数  $k$  叫做调整因子, 是将照明体 (或光源) 的  $Y$  值调整为 100 时得出的。在计算物体色的三刺激值时, 要采用 CIE 标准照明体 A、B、C、D。

计算物体的三刺激值后, 再转换为色度坐标, 即:

$$\begin{aligned}
 x &= X / (X + Y + Z) \\
 y &= Y / (X + Y + Z)
 \end{aligned}
 \tag{3-3}$$

## 3.2. PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影仪的测量与色度计算

为了能够进行合理的方案设计, 给激光三基色显示提出合理的技术要求, 更好地完成激光三基色显示的彩色再现, 购买了几台国际上有名的商用投影仪, 对其整机光谱透过特性进行了测试、分析, 并对投影仪进行了分解, 对每个光学元件的光学特性进行了测试、分析, 进行色度计算。为方案设计提供了参考依据, 为完成方案设计奠定了基础。

### 3.2.1. PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影仪的系统介绍

PLC\_XP45LCD 投影仪为三片液晶透射式投影仪, 采用电寻址的液晶片 TFT-LCD, 每一个液晶单元代表一个像素。液晶单元在外加电压的控制下开启、闭合, 从而控制光路的通断。所加电压不同, 可以使像素呈现不同的灰度级。信号源的图像经过模数转换和处理电路, 分解成 R、G、B 的灰度级图像, 分别显示在三块单色的液晶片上。利用外光源, 通过分光镜形成 RGB 三束光, 分别投射到液

晶片上。从液晶片上投射出的光携带图像信息，经合色棱镜合色，再由光学镜头放大，投影在大屏幕上。

液晶投影系统主要包括电源电路、系统控制电路、液晶片驱动电路和光学引擎几部分。液晶驱动电路对输入的视频信号进行三路 D/A 转换，再分别进行处理，经采样保持后分别显示在三块液晶片上。光学引擎系统见图 3-1 所示，光源发出

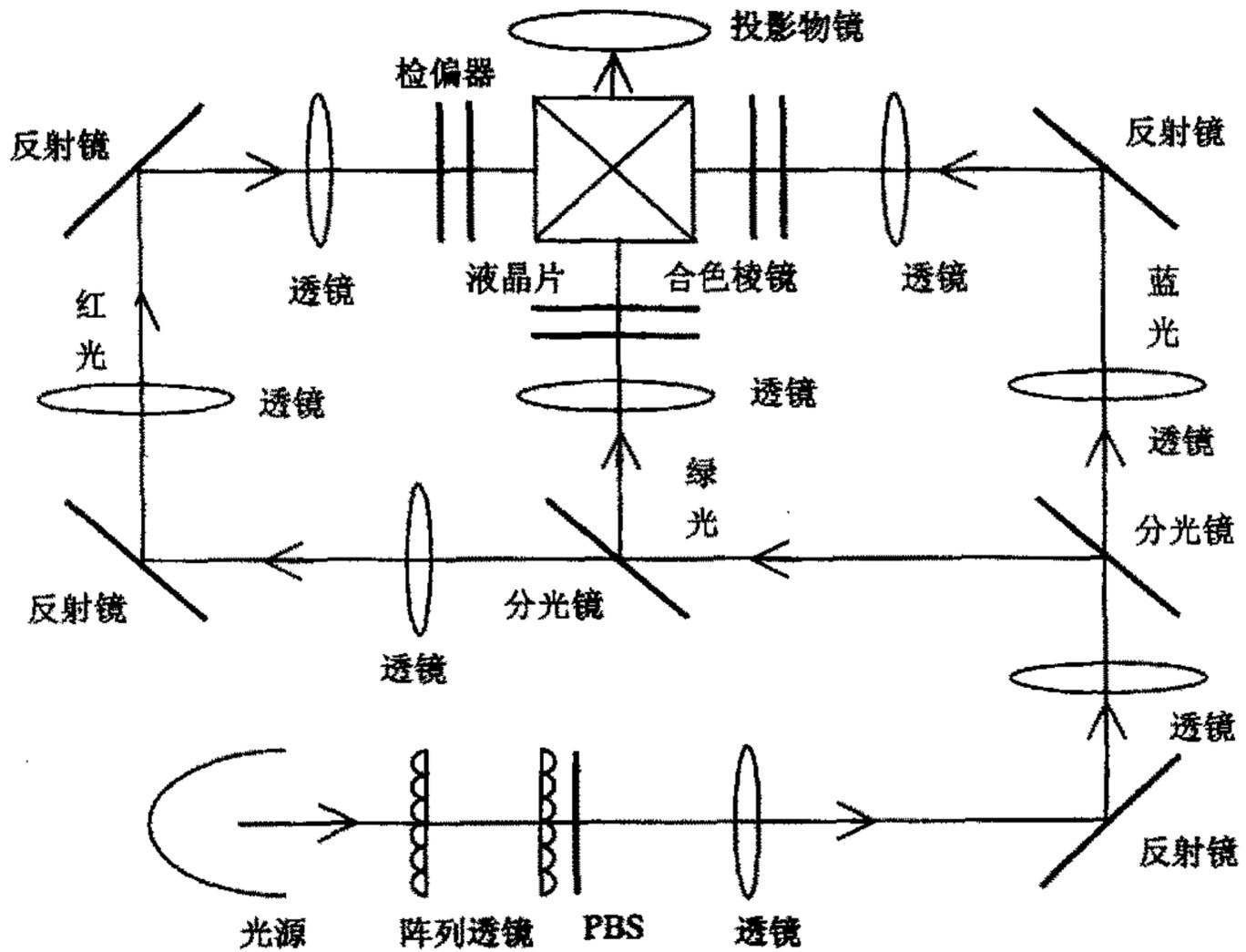


图 3-1 PLC\_XP45LCD 投影机光学系统简图

的光经阵列透镜和 PBS 后形成均匀的偏振光，偏振光再经二向色分光镜分光后形成红、绿、蓝三束光，经检偏器检偏后分别投射到三片液晶片上。由三片液晶片透射出来的光经合色棱镜合为一束光，这束光经投影物镜放大后投影到屏幕上，就形成了彩色的图像。

RX1311LCOS 投影机为三片反射式液晶投影机，它采用 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 集成电路芯片，作为反射式液晶投影机的基片。LCOS 投影显示的控制电路在象素的背面，开口率高，同时由于是表面反射，大大提高了光线的利用率，从而提高了投影机图像的亮度和色彩饱和度。但反射式投影机的光学引擎部分光路较为复杂，RX1311LCOS 投影机光学引擎为离轴光学引擎，图 3-2 为其某一路光路示意图。

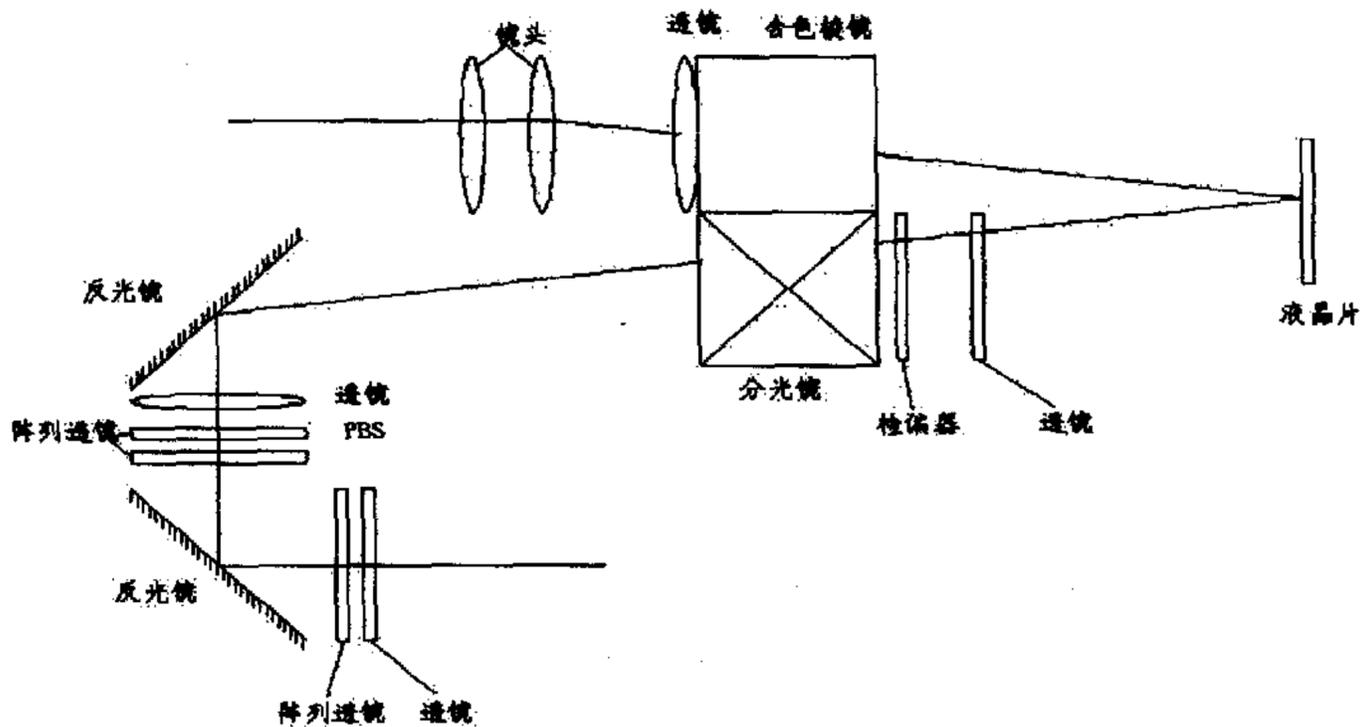


图 3-2 RX1311LCOS 投影机光学系统简图

### 3.2.2. PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影机光学系统透过率

分离了 PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影仪的光学系统，对每一个光学元件进行了光谱透过率及反射率的测试，并对测试结果进行整理分析得到两个投影仪光学系统公共光路部分、红光光路部分、绿光光路部分和蓝光光路部分的光谱透过率。如图 3-3 至 3-10 所示

根据光学元件如透镜、反射镜、分光镜和棱镜的光谱透过率及反射率曲线，可以看到其对总光路光谱透过率的影响，从而在满足设计要求的基础上对每一光学元件提出要求。

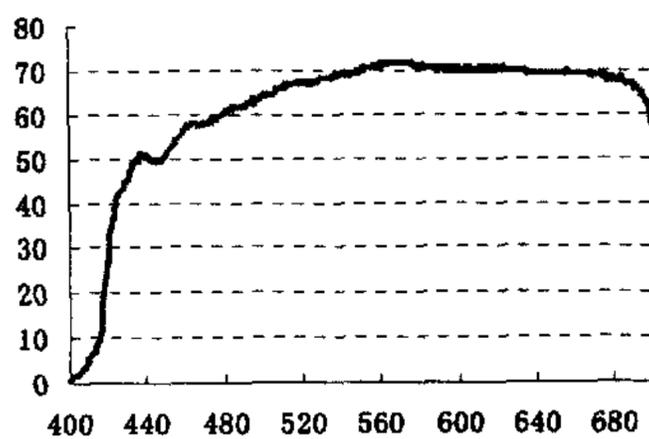


图 3-3 RX1311LCOS 投影机光学系统公共光路光谱透过率

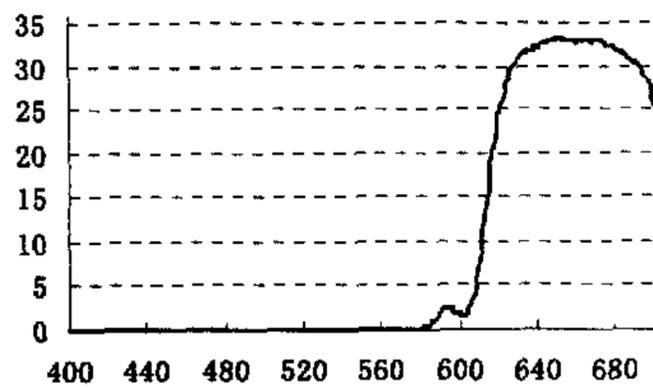


图 3-4 RX1311LCOS 投影机光学系统红光光路光谱透过率

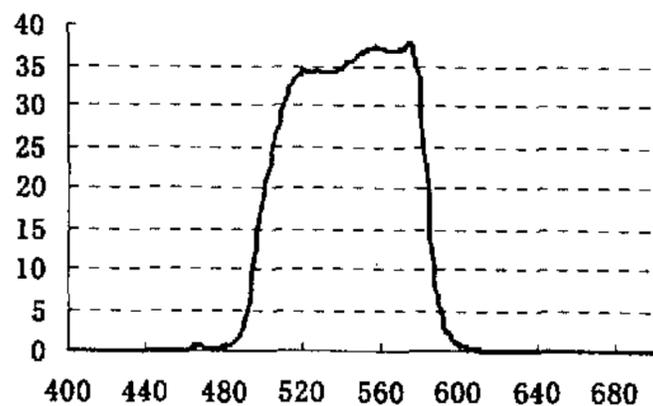


图 3-5 RX1311LCOS 投影机  
光学系统绿光光路光谱透过率

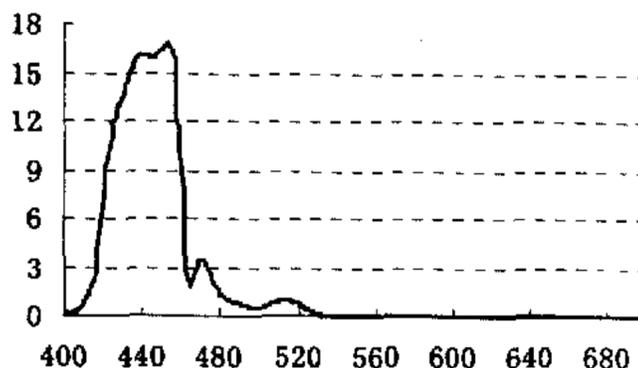


图 3-6 RX1311LCOS 投影机  
光学系统蓝光光路光谱透过率

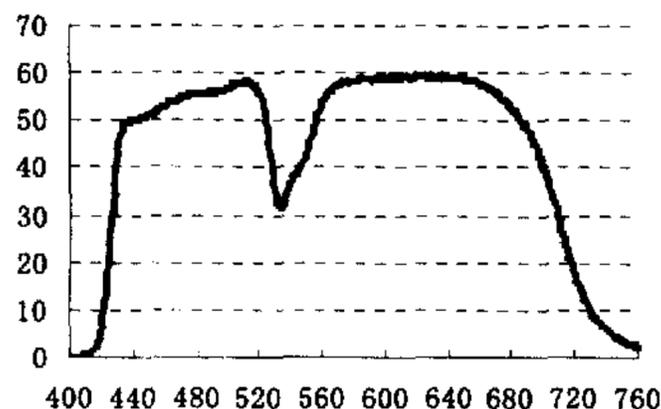


图 3-7 PLC\_XP45LCD 投影机  
光学系统公共光路光谱透过率

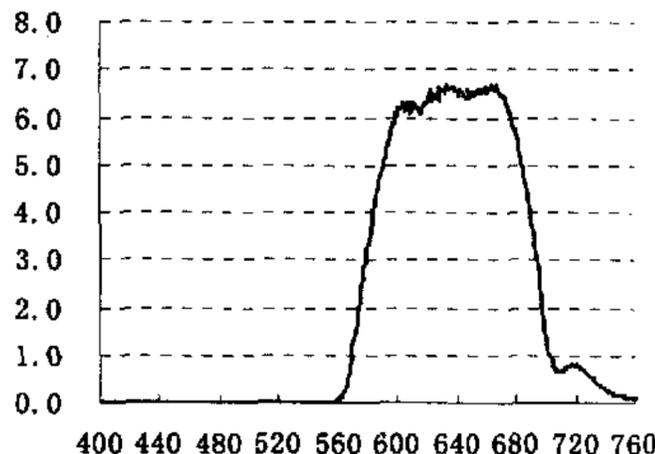


图 3-8 PLC\_XP45LCD 投影机  
光学系统红光光路光谱透过率

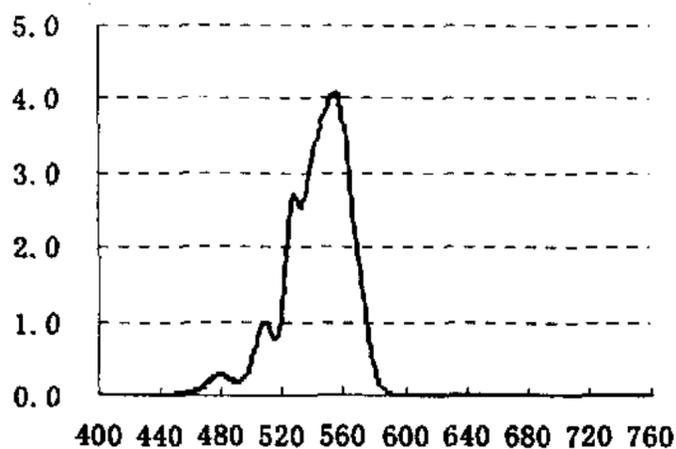


图 3-9 PLC\_XP45LCD 投影机  
光学系统绿光光路光谱透过率

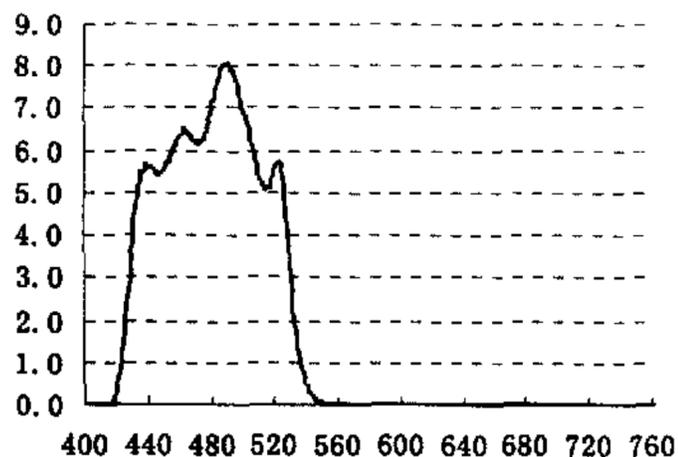


图 3-10 PLC\_XP45LCD 投影机  
光学系统蓝光光路光谱透过率

### 3.2.3. PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影仪的测量结果与色度计算

对 PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影仪的整机光谱透过特性进行了测试。将投影仪与计算机相连，分别给出红场、绿场、蓝场和白场信号，对屏幕的红场、绿场、蓝场和白场信号图像分别进行光谱功率的测量。所采集数据见附录 1 和附录 2。对所采集的数据处理，得到 PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影仪各色光相对功率分布见图 3-3 和 3-4 所示。蓝场的波长范围在 400~490nm，绿场波长范围

在 490~590nm, 红场波长范围在 590~750nm, 白场的相对功率分布曲线与红场、绿场、蓝场相对功率分布曲线基本重合。

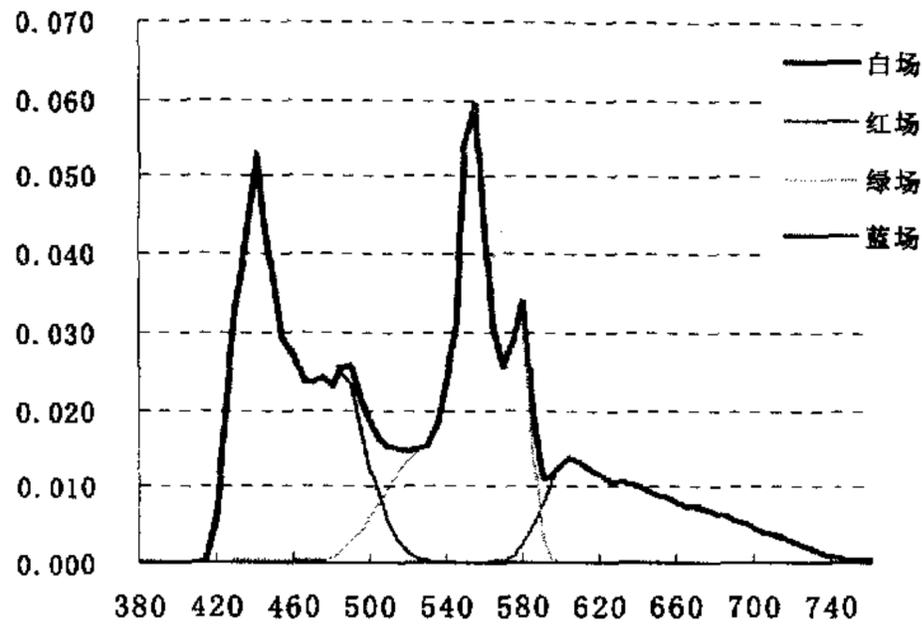


图 3-11 PLC\_XP45 投影机各色光相对功率分布

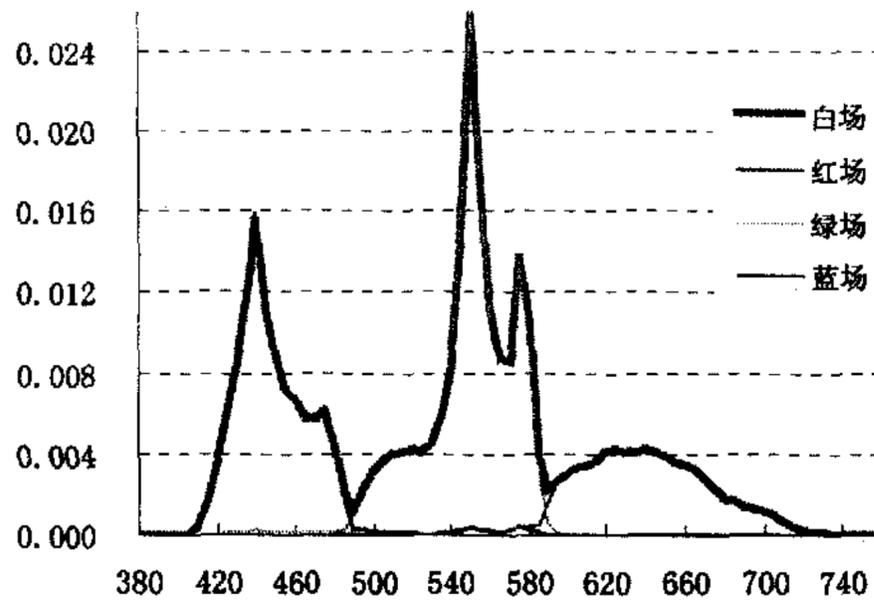


图 3-12 RX1311 投影机各色光相对功率分

在测得 PLC\_XP45 投影机 and RX1311 投影机红场、绿场、蓝场和白场相对光谱功率的基础上, 根据 3-2 式和 3-3 式编程计算各场的色度坐标。其计算结果与测量结果比较如下 (见表 3-1, 3-2)

表 3-1 PLC\_XP45LCD 投影机各场色度坐标

	PLC_XP45LCD			
	白场	红场	绿场	蓝场
x(测量)	0.2844	0.6473	0.3433	0.1433
y(测量)	0.3205	0.3472	0.6260	0.0584
x(计算)	0.2844	0.6473	0.3433	0.1433
y(计算)	0.3205	0.3472	0.6260	0.0584

表 3-2 RX1311LCOS 投影仪各场色度坐标

	RX1311LCOS			
	白场	红场	绿场	蓝场
$x$ (测量)	0.3035	0.6315	0.3332	0.1582
$y$ (测量)	0.3549	0.3312	0.6301	0.0381
$x$ (计算)	0.3035	0.6315	0.3332	0.1582
$y$ (计算)	0.3549	0.3312	0.6301	0.0381

### 3.3. 小结

本章对 PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影仪进行了整机测试,进行了测度计算,计算结果与测量结果相符合,这为激光显示研究中的色度测量与计算打下基础。并进一步分离了 PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影仪,完成了每一个光学元件的光谱透过率与反射率的测量,整理分析得到了投影仪公共光路部分、红光光路部分、绿光光路部分和蓝光光路部分的光谱透过率。为更好的完成激光显示的设计提供依据。

## 第四章 激光三基色光源功率及 声光调制函数的计算

激光显示，即以激光为光源，激光强度经光调制器件调制与图像信号一致后，再通过光学系统进行各种处理，在银幕上成像。激光显示有多种形式，本章将主要介绍两种，并以声光调制激光扫描显示为例，计算激光三基色光源的功率比及满足一定视觉效果的光源功率值。声光调制器的主要作用是对红、绿、蓝激光进行强度的调制，使其与信号相匹配，本章将推导声光调制函数计算公式，并以计算机信号为例求解其调制函数的曲线。

### 4.1. 激光显示系统

#### 4.1.1. 液晶调制激光显示

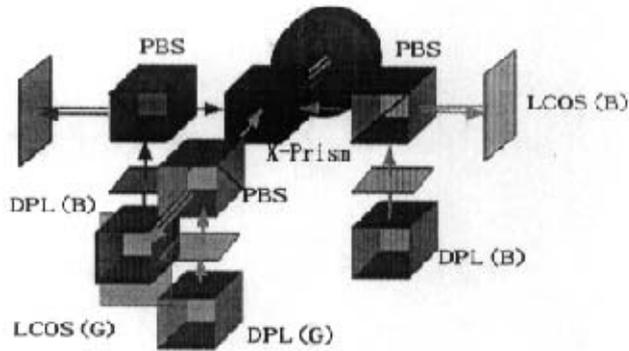


图 4-1 液晶调制激光显示光学系统原理图

如图 4-1 所示，这是利用 LCOS 液晶器件进行调制的激光显示系统。该光学系统包括红、绿、蓝三基色激光光源，透镜，PBS 偏振器，X 棱镜，投影物镜几个主要部分。激光分别由红、绿、蓝三个大功率激光器 DPL 产生，激光经透镜后由 PBS 偏振器起偏，再经 LCOS 液晶片进行调制，与视频信号取得一致，最后由 X 棱镜对红、绿、蓝三基色光进行合色，经投影物镜在屏上成像。

### 4.1.2. 声光调制激光投影显示

激光投影显示系统基本原理如图 4-2 所示。其光学系统包括大功率红、绿、蓝激光器，调制解调器，激光合色棱镜或激光耦合器，光偏转器（扫描转镜、扫描摆镜），投影物镜。其信号调制转换系统主要由解码器，矩阵修正电路，AOM 驱动电路，信号分离电路几部分组成。<sup>[6]</sup>

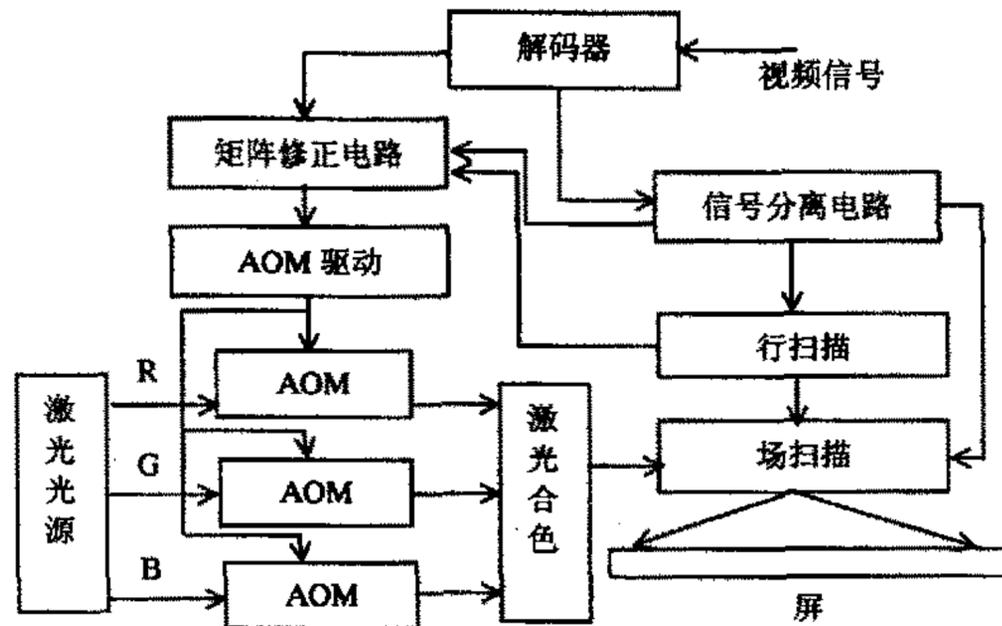


图 4-2 激光显示的原理图

红、绿、蓝三色激光分别由声光调制器 AOM 进行调制。视频信号经解码器被分解为红、绿、蓝信号，红、绿、蓝信号由信号放大器放大后，用于 AOM 分别对激光进行调制，使其与视频信号同步。通过 AOM 驱动信号的振幅变化，使通过的光的振幅发生相应的变化，这样就实现了声光调制器 AOM 对红、绿、蓝三色激光的调制。红、绿、蓝激光经声光调制器 AOM 进行调制后，可使用二向色镜、X 棱镜和光纤耦合进行合色。在该系统中采用点扫描的显示方式，由扫描转镜来完成行扫描，扫描摆镜来完成场扫描。视频信号由分离电路分解为行、场同步信号。扫描转镜和扫描摆镜分别与行扫描信号和场扫描信号同步。

该类系统主要特点是显示亮度高、分辨率高、色彩丰富而逼真，擅长显示大尺寸、质量好的图像。

## 4.2. 激光三基色光源的功率比

各种彩色显示器的显色都以三基色原理为基础。所谓三基色原理，是指自然界常见的绝大多数色彩都可以用三基色按照适当的比例混合组成的某个等效色来

模拟的, 这个等效色与实际色作用于人眼所引起的彩色视觉是相同的。对于激光投影显示, 需要确定其显示三基色和参照白光, 计算激光三基色光源的功率比, 在此基础上建立激光三基色配色系统, 实现激光三基色显示。

#### 4.2.1. 激光三基色光源的功率比求解

可以根据红、绿、蓝三色激光光源的波长来确定激光显示的三基色波长, 选择标准照明体  $D_{65}$  为参照白光, 其三刺激值为  $(X_{D65} Y_{D65} Z_{D65})$ 。对 CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值进行插值拟合, 可求得红、绿、蓝激光光源对应波长的 CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值

$$(\bar{X}_R \bar{Y}_R \bar{Z}_R) \quad (\bar{X}_G \bar{Y}_G \bar{Z}_G) \quad (\bar{X}_B \bar{Y}_B \bar{Z}_B).$$

由 3-2 式可知, 激光显示屏幕上任意一点的三刺激值为

$$\begin{aligned} X &= k \sum_{\lambda} \tau(\lambda) S(\lambda) \bar{X}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= k \sum_{\lambda} \tau(\lambda) S(\lambda) \bar{Y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z &= k \sum_{\lambda} \tau(\lambda) S(\lambda) \bar{Z}(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (4-1)$$

其中  $S(\lambda)$  为激光光源的光谱功率,  $t(\lambda) = t_1(\lambda)t_2(\lambda)$ ,  $t_1(\lambda)$  为光学系统的透过率,  $t_2(\lambda)$  为光调制器的调制函数。

将激光三基色及标准光源  $D_{65}$  的三刺激值代入 4-1 式可得线性方程为:

$$\begin{aligned} X_{D65} &= k[\bar{X}_R(\lambda)\tau_R(\lambda)S_R(\lambda) + \bar{X}_G(\lambda)\tau_G(\lambda)S_G(\lambda) + \bar{X}_B(\lambda)\tau_B(\lambda)S_B(\lambda)] \\ Y_{D65} &= k[\bar{Y}_R(\lambda)\tau_R(\lambda)S_R(\lambda) + \bar{Y}_G(\lambda)\tau_G(\lambda)S_G(\lambda) + \bar{Y}_B(\lambda)\tau_B(\lambda)S_B(\lambda)] \\ Z_{D65} &= k[\bar{Z}_R(\lambda)\tau_R(\lambda)S_R(\lambda) + \bar{Z}_G(\lambda)\tau_G(\lambda)S_G(\lambda) + \bar{Z}_B(\lambda)\tau_B(\lambda)S_B(\lambda)] \end{aligned} \quad (4-2)$$

可用矩阵表示为:

$$\begin{pmatrix} X_{D65} \\ Y_{D65} \\ Z_{D65} \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} \bar{X}_R & \bar{X}_G & \bar{X}_B \\ \bar{Y}_R & \bar{Y}_G & \bar{Y}_B \\ \bar{Z}_R & \bar{Z}_G & \bar{Z}_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_R S(\lambda)_R \\ \tau_G S(\lambda)_G \\ \tau_B S(\lambda)_B \end{pmatrix} \quad (4-3)$$

从而进一步求得从光源发出的激光经过光学系统后的比值即  $k\tau_R(\lambda)S_R(\lambda) : k\tau_G(\lambda)S_G(\lambda) : k\tau_B(\lambda)S_B(\lambda) = C_r : C_g : C_b$ , 在已知光学系统的透过率  $t_{1R}(\lambda)$ ,  $t_{1G}(\lambda)$ ,  $t_{1B}(\lambda)$ , 调制函数  $t_{2R}(\lambda)$ ,  $t_{2G}(\lambda)$ ,  $t_{2B}(\lambda)$  为最大时可得到红、绿、蓝光源的功率比, 即  $S_R(\lambda) : S_G(\lambda) : S_B(\lambda) = C_R : C_G : C_B$ 。

## 4.2.2. 计算结果

按照上述原理用 MATLAB 编程, 取几组三基色光波长计算结果如表 4-1 所示

表 4-1 激光三基色光源功率比 ( $D_{65}$  白光, 有效利用率  $\tau_R = \tau_G = \tau_B = 0.3$ )

三基色光 (nm)			光源功率比		
红	绿	蓝	红	绿	蓝
671	532	473	1	0.0934	0.1162
671	532	460	1	0.1125	0.0854
660	532	460	1	0.2256	0.1718
650	532	460	1	0.3845	0.2949

## 4.3. 激光三基色光源的功率

### 4.3.1. 辐射度学与光度学原理

光源所辐射的能量称为辐射能。光源在单位时间内通过某一面积发射、传递或接受的辐射能量称为辐射通量, 用  $\Phi_e(\lambda)$  表示。但是辐射通量只表示光源元面积在单位时间内传送出的客观能量的多少, 并不反映这些能量所能引起的人们的主观视觉强度。光源在单位时间内在给出表面上流出可见光能的大小称为光通量, 用  $\Phi_v(\lambda)$  表示。光通量与辐通量的关系可表示为

$$\Phi_v(\lambda) = KV(\lambda)\Phi_e(\lambda)$$

式中  $K$  为辐射能光当量,  $V(\lambda)$  为光谱光效率函数, 即辐射能转换为人眼可见光的程度。光谱光效率曲线如图 4-3 所示, 明视觉与暗视觉对于光的感受性不是在光谱的同一部位上, 明视觉对光谱的黄绿光部位即 555nm 最敏感, 而暗视觉对光谱的蓝绿光部位即 510nm 最敏感。两曲线都经过了归一化处理, 最大值为 1。CIE 明视觉与暗视觉光谱光效率函数是色度学计算的重要依据。[18][21]

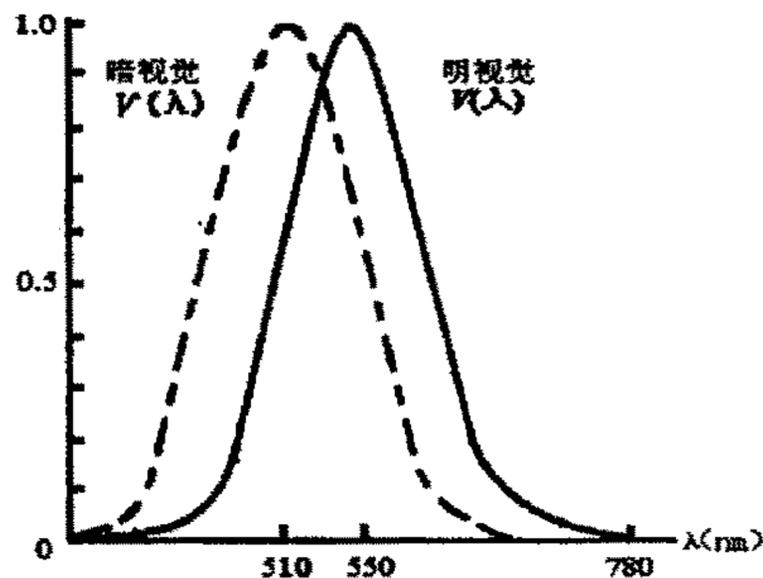


图 4-3 光谱光效率函数

光通量可以理解为光谱不同波长辐射能对人眼产生光亮感觉作用的数量特征的度量。按照 CIE 光谱光效率函数  $V(\lambda)$  来评价辐射通量, 在整个可见光谱区可由

下式计算

$$\text{明视觉: } \Phi_v(\lambda) = K \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (4-4)$$

$$\text{暗视觉: } \Phi_v'(\lambda) = K' \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V'(\lambda) d\lambda \quad (4-5)$$

式中  $\Phi_v(\lambda), \Phi_v'(\lambda)$  是光通量, 单位为流明;  $\Phi_e(\lambda)$  是以波长为自变量的辐通量, 单位为瓦;  $K = 683 \text{lm/W}$ ,  $K' = 1725 \text{lm/W}$

### 4.3.2. 激光光源功率的计算

激光显示要有好的显示效果, 其亮度必需达到一定的标准。尤其是大屏幕显示, 对屏幕的亮度要求更高。因此只确定红、绿、蓝激光光源的功率比是不够的, 必须根据屏幕的尺寸要求及亮度标准, 计算激光光源功率, 并对激光显示系统的光学系统提出一定的要求。

对于激光显示系统, 显示屏的光通量  $\Phi$  可按朗伯余弦平面计算。

由  $d\phi_i = B \cos i dS d\omega$  积分可得

$$\begin{aligned} \phi &= BdS \int \cos i d\omega \\ &= BdS \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos i \sin i di d\varphi \\ &= \pi BdS \end{aligned} \quad (4-6)$$

可得光通量为

$$\Phi = \int \phi dS = \pi BS \text{ (lm)} \quad (4-7)$$

其中  $B$  为屏幕的亮度, 单位为 nt,  $S$  为屏幕的面积尺寸

对于激光显示系统, 光源功率与光通量的关系见下图 4-4 所示

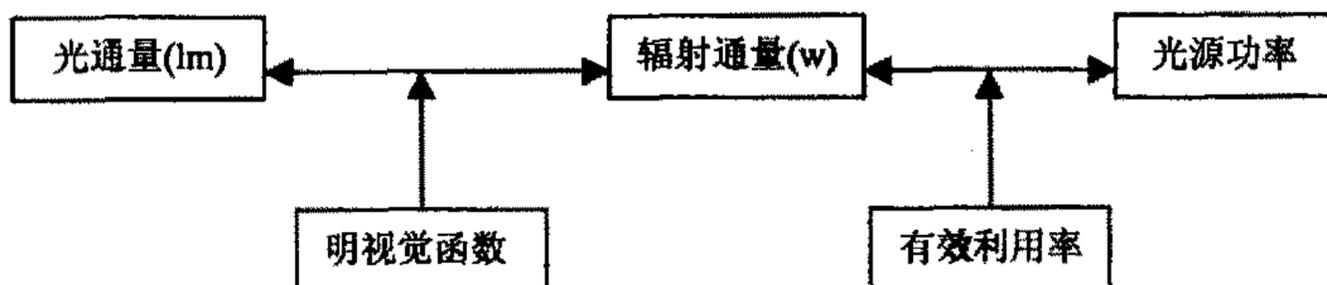


图 4-4 光源功率与光通量的关系

则激光显示的屏幕光通量可进一步表示为

$$\Phi = 683(\Phi_R V_R + \Phi_G V_G + \Phi_B V_B) \tag{4-8}$$

$$\text{即 } \pi BS = 683(\Phi_R V_R + \Phi_G V_G + \Phi_B V_B) \tag{4-9}$$

其中  $\Phi_R : \Phi_G : \Phi_B = C_r : C_g : C_b$

由 4-9 式, 在屏幕亮度和屏幕尺寸已知情况下, 可求得辐射通量  $\Phi_R$ 、 $\Phi_G$ 、 $\Phi_B$  ; 在已知激光显示系统有效利用率的情况下, 由下式可进一步求得光源功率  $S_R(\lambda)$ 、 $S_G(\lambda)$ 、 $S_B(\lambda)$ 。

$$\Phi_R = t_{1R} t_{2R \max} S_R(\lambda)$$

$$\Phi_G = t_{1G} t_{2G \max} S_G(\lambda)$$

$$\Phi_B = t_{1B} t_{2G \max} S_B(\lambda)$$

可写为

$$S_R(\lambda) = \Phi_R / t_{1R} t_{2R \max}$$

$$S_G(\lambda) = \Phi_G / t_{1G} t_{2G \max}$$

$$S_B(\lambda) = \Phi_B / t_{1B} t_{2G \max}$$

(4-10)

### 4.3.3. 激光三基色光源功率计算结果

根据 4-9 式和 4-10 式编程计算激光三基色光源功率。计算结果见表 4-2, 4-3, 4-4:

表 4-2 不同三基色光源功率  
(D<sub>65</sub> 白光, 有效利用率 0.3, 50 寸, 亮度 100nt)

三基色光(nm)			光源功率(W)		
红	绿	蓝	红	绿	蓝
671	532	473	9.5014	0.8873	1.1043
671	532	460	8.794	0.9896	0.7508
660	532	460	4.3716	0.9861	0.7510
650	532	460	2.5471	0.9795	0.7511

表 4-3 不同三基色光源功率  
(D<sub>65</sub> 白光, 有效利用率 0.3, 50 寸, 亮度 80nt)

三基色光(nm)			光源功率(W)		
红	绿	蓝	红	绿	蓝
671	532	473	7.6011	0.7099	0.8834
671	532	460	7.0352	0.7917	0.6006
660	532	460	3.4973	0.7889	0.6008
650	532	460	2.0376	0.7836	0.6009

表 4-4 不同三基色光源功率及屏幕亮度  
(D<sub>65</sub>白光, 有效利用率 0.3, 50 寸, 蓝光光源功率 3.3W)

三基色光(nm)			光源功率(W)		屏幕亮度(nt)
红	绿	蓝	红	绿	
671	532	473	28.3940	2.6517	298.839
671	532	460	38.6532	4.3496	439.5387
660	532	460	19.2100	4.3332	439.4280
650	532	460	11.1903	4.3032	439.3426

表 4-5 激光光源波长对应光谱光效率值

三基色光 (nm)			光谱光效率值		
红	绿	蓝	红	绿	蓝
671	532	473	0.0300	0.8848	0.1035
671	532	460	0.0300	0.8848	0.0600
660	532	460	0.0610	0.8848	0.0600
650	532	460	0.1070	0.8848	0.0600

#### 4.3.4. 小结

只有激光三基色光源的功率比是不够的, 为了使激光显示达到一定的收看效果, 必须满足一定的设计要求。本小节找到了屏幕尺寸、显示亮度与激光光源功率的关系, 编程完成了一系列条件下的计算, 为激光显示的研究提供一定的理论基础和判据。

从表中的计算结果可以看到, 对绿光光源功率的要求要相对低的多, 这是由于绿光波长所对应的光谱光效率值要高的多。红、绿、蓝波长对应光谱光效率值见表 4-5。为此, 我们可以根据现实条件中的光源功率, 对光学系统进行合理的设计, 使其透过率达到一定的要求, 从而实现好的显示效果。

### 4.4. 声光调制函数的计算

#### 4.4.1. 彩色全电视信号

以三基色原理为基础的彩色电视制式, 其主要区分标志是三个信号(三个基色信号或由其组成的亮度信号和色差信号)的处理方式。从传送信号的时间关系方面来看, 彩色电视制式可分为: 顺序制; 同时制; 顺序—同时制。按使用目的不同, 彩色电视制式可分为兼容制和非兼容制两大类。自五六十年代开始, 实际

用于电视广播的只有属于同时制的 NTSC 制和 PAL 制, 以及属于同时—顺序制的 SEC-AM 制。他们都是兼容制式。NTSC 制是 1953 年美国研制成功的一种兼容彩色电视制式。NTSC 是 National Television Systems Committee (国家电视制式委员会) 的缩写词。按色度信号的构成特点, 这一制式又称为正交平衡调幅制。为了克服 NTSC 制的相位敏感性, 1962 年德国研究出一种 PAL 制。PAL 是 Phase Alternation Line (相位逐行交变) 的缩写词。按色度信号的构成特点, PAL 制又称逐行倒相正交平衡调幅制。<sup>[19][22][23]</sup>

电视信号的传送是选用一个亮度信号  $Y$  和两个色差信号 ( $R-Y$ 、 $B-Y$ ) 来传送, 这样可以避免传输过程中的亮度干扰。因为亮度信号是由  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三个基色信号按比例关系组成, 所以亮度信号和三个基色信号之间的关系可用下式表示, 称为亮度方程, 表明三基色量合成彩色光亮度的关系。

$$Y = rR + gG + bB \quad (4-11)$$

这样通过传送  $Y$ 、 $R-Y$ 、 $B-Y$  三个信号代替传送  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三个基色信号, 达到传送图像的亮度、色调、饱和度的目的。<sup>[1]</sup>

标准白光和显像三基色不同, 亮度方程会有差异。选定显像三基色的色度坐标和标准光源, 显像三基色彩色电视系统三刺激值与计算三基色 CIE-XYZ 色度系统三刺激值的转换关系即可确定。对于 NTSC 制式  $C_{65}$  光为标准光源, 转换关系为<sup>[19][22][23]</sup>

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.607 & 0.174 & 0.200 \\ 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.000 & 0.066 & 1.116 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

可知亮度方程为

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (4-13)$$

导出此公式的依据是用 NTSC 显像三基色相混配出光通量为 1lm 的白光  $C_{65}$ 。

以  $D_{65}$  光为标准光源的 NTSC 制彩色电视制式, 亮度方程为

$$Y = 0.2989R + 0.605G + 0.104B \quad (4-14)$$

以  $D_{65}$  光为标准光源的 PAL 制彩色电视制式, 亮度方程为

$$Y = 0.222R + 0.707G + 0.071B \quad (4-15)$$

彩色全电视信号由亮度信号、色度信号、色同步信号、复合消隐信号和复合同步信号组成。视频检波后得到的彩色全电视信号, 经一系列复杂的信号处理后,

变成 R、G、B 三基色信号，供激励显像管或显像器件之用。此过程即彩色全电视信号的解码。解码器的信号处理与变换过程可归纳为五步：

1. 亮度信号与色度信号分离（频率分离）
2. 色同步信号与色度信号分离（时间分离）
3. 红、蓝色度信号的分离（频率分离）
4. 同步检波将色度信号变换成色差信号
5. 解码矩阵将亮度信号、色差信号变换成三个基色信号

传统 CRT 彩色电视是通过电子束扫描的方式来实现彩色图像再现的。电子束由电子枪产生，受三基色信号和行、场同步信号控制的三束电子束轰击荧光屏的荧光粉，通过空间混色原理重现彩色图像。

#### 4.4.2. 声光调制函数

激光显示系统主要由激光器、调制器、光偏转器及屏幕等组成。同普通的 CRT 电视系统相似，三基色信号加到调制器上控制激光束的强弱，行、场同步信号加到光偏转器（扫描转镜、扫描摆镜）上，使激光束按一定规律在屏幕上扫描形成彩色图像。

对于激光显示系统，可根据激光三基色和参照白光  $D_{65}$  确定激光显示系统三刺激值与计算三基色 CIE-XYZ 色度系统三刺激值之间的转换关系，见 4-16 式。具体求解过程见 5.2 节所述。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

声光调制器的主要作用是对红绿蓝激光强度进行调制，使其与三基色信号一致，使屏幕上能够真实地再现信号图像。根据 4-16 式可得到屏幕任意一点的三刺激值与激光光源功率的关系：

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} \bar{X}_R & \bar{X}_G & \bar{X}_B \\ \bar{Y}_R & \bar{Y}_G & \bar{Y}_B \\ \bar{Z}_R & \bar{Z}_G & \bar{Z}_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{1R}t_{2R}S(\lambda)_R \\ t_{1G}t_{2G}S(\lambda)_G \\ t_{1B}t_{2B}S(\lambda)_B \end{pmatrix} \quad (4-17)$$

则声光调制器的调制函数可表示为式 4-18

$$\begin{pmatrix} t_{2R} \\ t_{2G} \\ t_{2B} \end{pmatrix} = 1/k \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{X}_R & \bar{X}_G & \bar{X}_B \\ \bar{Y}_R & \bar{Y}_G & \bar{Y}_B \\ \bar{Z}_R & \bar{Z}_G & \bar{Z}_B \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} t_{1R}S_R & 0 & 0 \\ 0 & t_{1G}S_G & 0 \\ 0 & 0 & t_{1B}S_B \end{pmatrix}^{-1} \quad (4-18)$$

由 4-16 和 4-18 式可得到三基色信号与声光调制器调制函数的关系。

$$\begin{pmatrix} t_{2R} \\ t_{2G} \\ t_{2B} \end{pmatrix} = 1/k \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \bar{X}_R & \bar{X}_G & \bar{X}_B \\ \bar{Y}_R & \bar{Y}_G & \bar{Y}_B \\ \bar{Z}_R & \bar{Z}_G & \bar{Z}_B \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} t_{1R}S_R & 0 & 0 \\ 0 & t_{1G}S_G & 0 \\ 0 & 0 & t_{1B}S_B \end{pmatrix}^{-1} \quad (4-19)$$

在计算机图像处理系统、图形处理的 RGB 颜色空间中，每一种颜色都用二进制的字节表示，即用  $2^8$  来表示单一颜色的变化级别，其取值范围为 0~255，数值越大，颜色越明亮。当把三种原色以各自的 256 种值结合起来，就可得到  $2^{24}$  种颜色。如图 4-5 所示，RGB 颜色立方体三个轴向分别表示 R、G、B 三原色，通过对红、绿、蓝的各种值进行组合可改变像素的颜色。以不同值的等量混合产生各种不同明暗的灰色，在立方体中表现为从原点到 R、G、B 都为 255 对应顶点的一根灰色直线。<sup>[1]</sup>

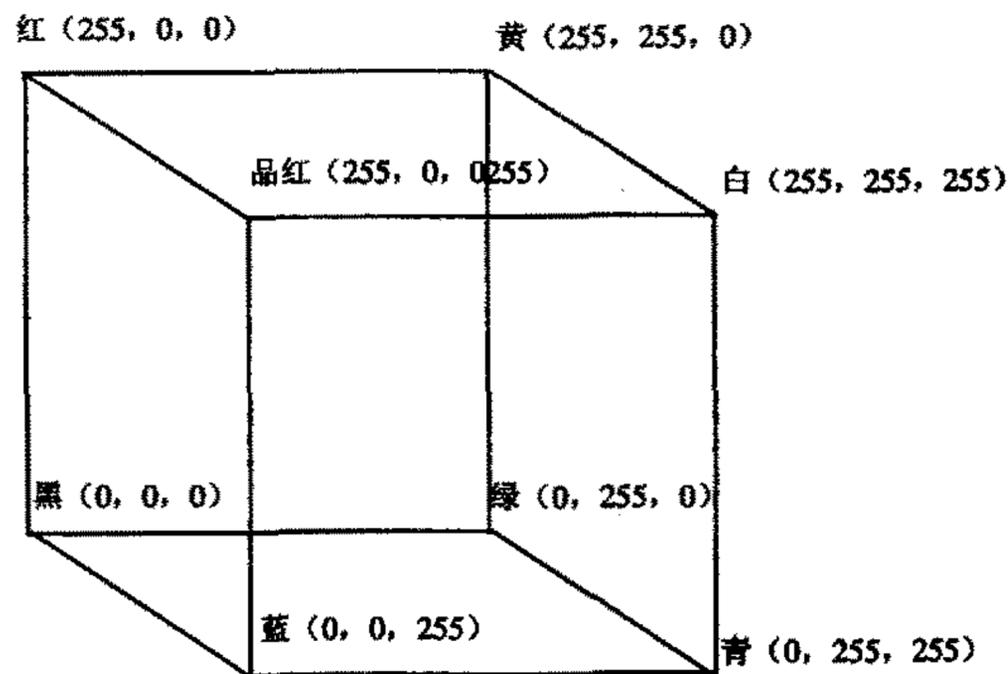


图 4-5 RGB 颜色立方体模型

若将计算机信号输入激光显示系统，则 4-19 式中的 R、G、B 三刺激值的取值范围为 0~255。通常计算机显示器中使用的三原色呈色范围小于理想三原色光的呈色范围，在色温为 6500K 时，计算机 RGB 三原色色度坐标为

红  $x=0.610, y=0.350;$

绿  $x=0.268, y=0.595;$

蓝  $x=0.140, y=0.066;$

由 2.3.3 所述可求得计算机三刺激值与计算三基色 CIE-XYZ 色度系统三刺激值之间的转换关系。由 4-19 式编程可计算得到调制函数  $t_{2R}, t_{2G}, t_{2B}$

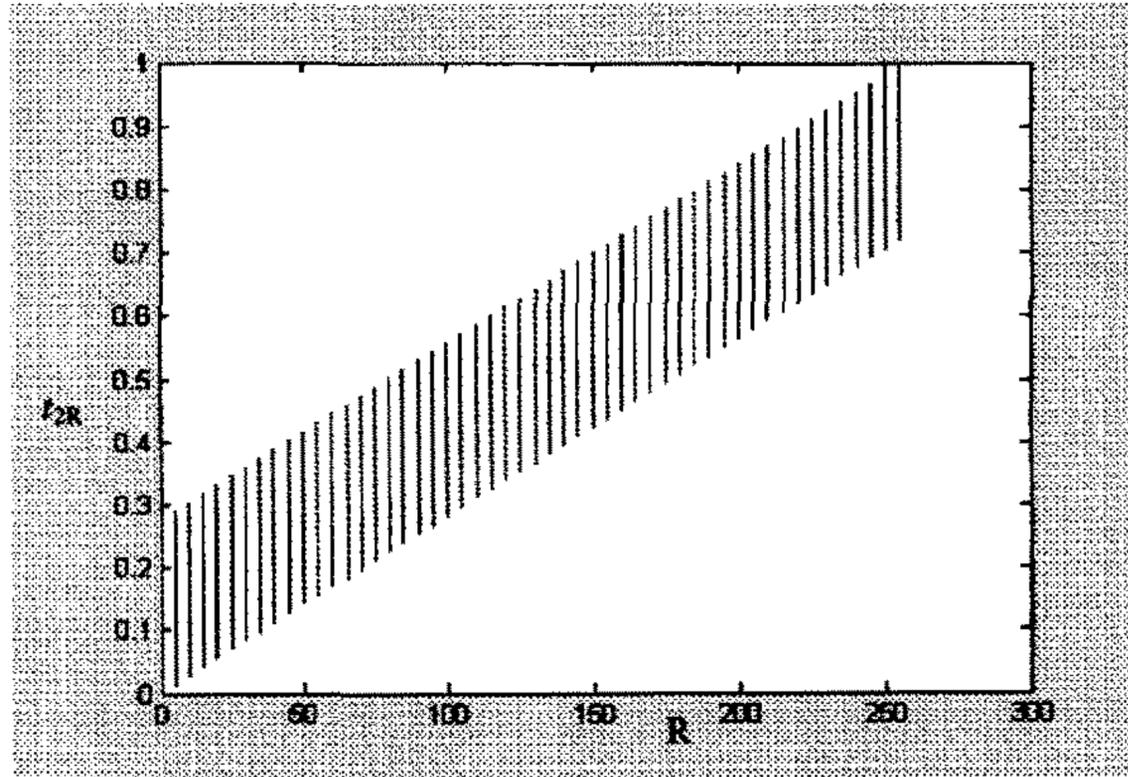


图 4-6 红光调制函数  $t_{2R}$

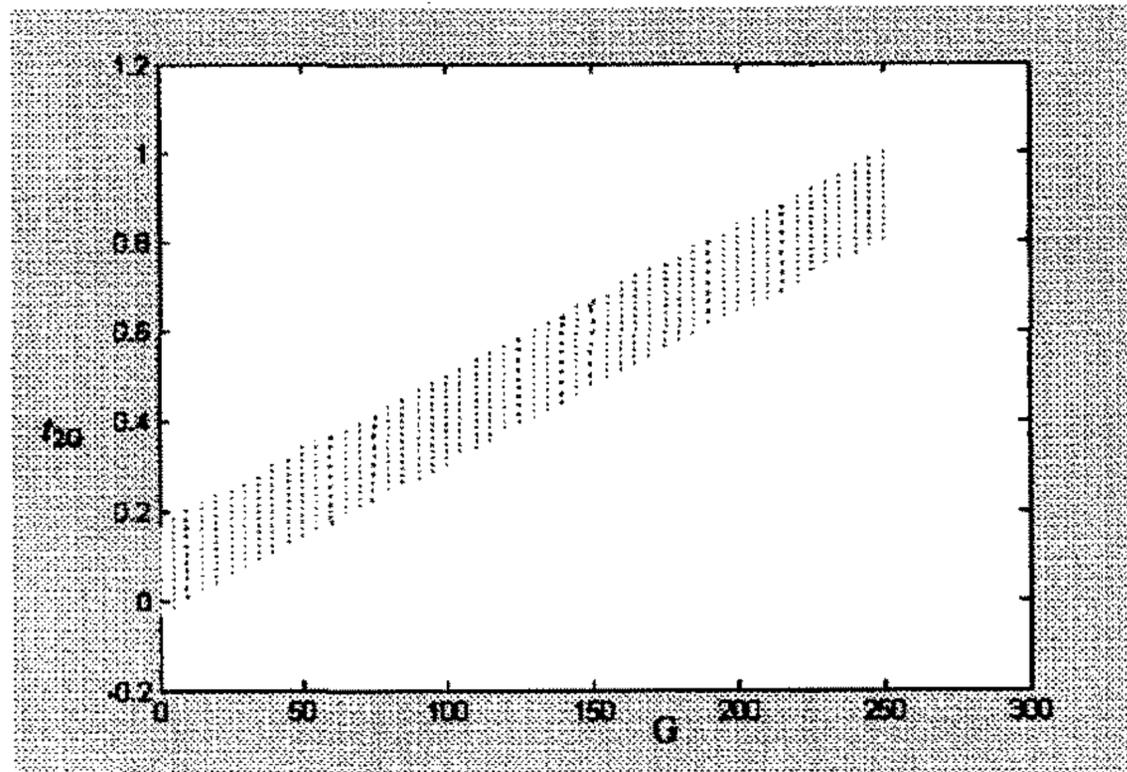
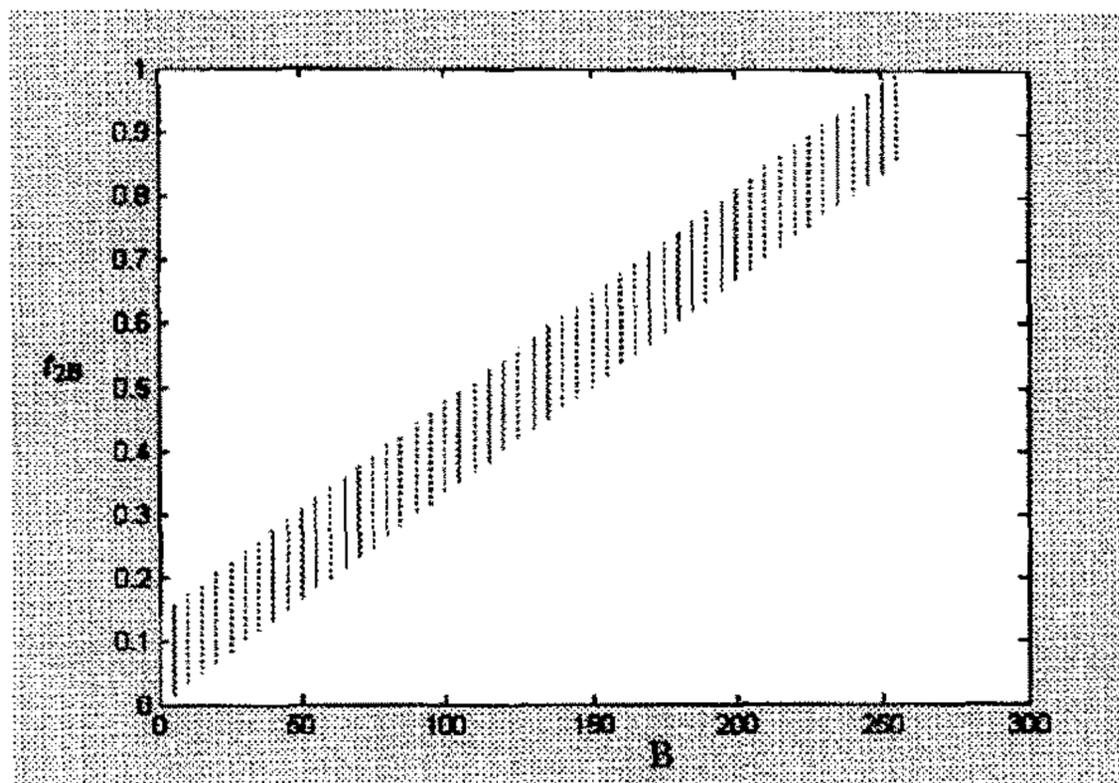


图 4-7 绿光调制函数  $t_{2G}$

图 4-8 蓝光调制函数  $t_{2B}$ 

从图 4-6 可以看出, 三刺激值  $R$  与调制函数  $t_{2R}$  基本呈线性关系, 在纵坐标轴方向随着三刺激值  $G$  值与  $B$  值的增加, 调制函数  $t_{2R}$  值增大, 数值点向上抬升, 最后呈现规律曲线。与其类似, 可得到图 4-7, 4-8 调制函数  $t_{2G}$ ,  $t_{2B}$  的曲线。

#### 4.5. 小结

本章首次通过色度学原理在激光显示系统中的运用, 计算了几组不同激光三基色的光源功率比值, 并进一步计算得到了满足不同观看条件的激光光源功率值。找到了激光显示系统的调制函数与三基色信号的关系, 并以计算机信号为例得到了调制函数曲线。为激光显示研究的进一步开展, 声光调制器件的数据采集及数据库的建立提供依据。

# 第五章 激光三基色显示的 亮度方程与色彩复现

激光显示同各种显示相同，都是根据三基色原理实现色彩复现的。本章将针对激光显示的色彩复现问题，计算激光显示色度系统的亮度方程，光谱三刺激值曲线。并为实现求解激光显示对电视视频信号的复现，求解转换矩阵。

## 5.1.彩色电视的色彩复现

为了解决激光显示的色彩复现，首先来看一下彩色电视的色彩复现。

### 5.1.1.彩色电视系统简述

彩色电视的整个工作过程可分为彩色分解、信号传输和彩色合成三个阶段。如图 5-1 所示

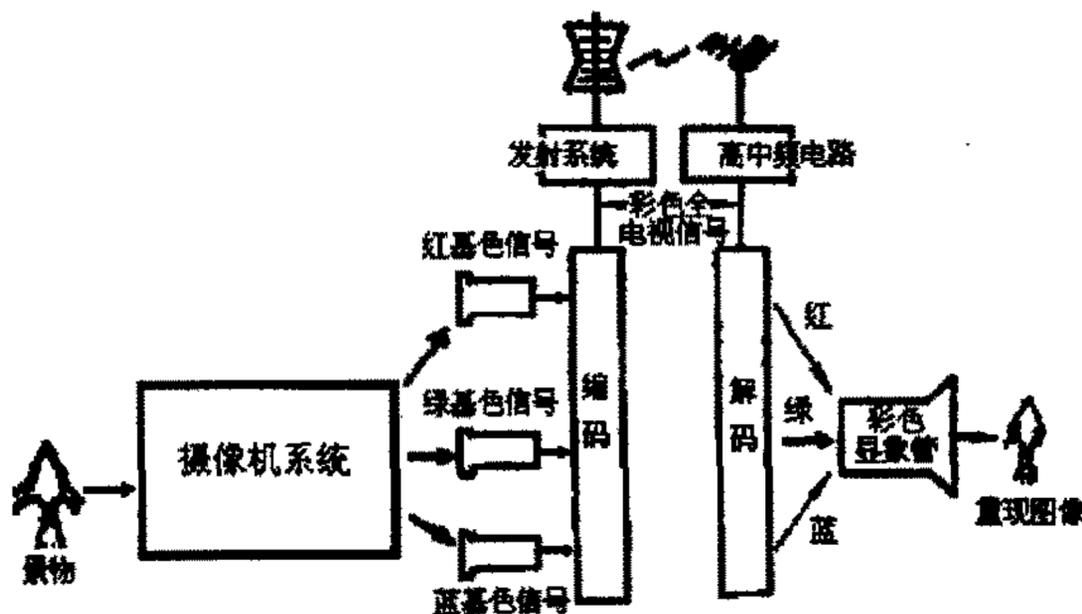


图 5-1 彩色电视工作过程简图

彩色电视景物的彩色分解，是由摄像系统完成的。被摄景物通过摄像机的镜头及分色棱镜被分解为红、绿、蓝三个影像，并通过光电转换形成红、绿、蓝三个电信号。

信号传输中的电视信号并不是三基色信号，而是将三基色信号进行重新编码，

形成一个亮度信号与两个色差信号，通过编码器利用频谱编织术编码后，采用一个通道，轮流地传出去。这样可以避免传输过程中的亮度干扰。因为亮度信号是由 R、G、B 三个基色信号按比例关系组成，所以亮度信号和三个基色信号之间的关系可用下式表示，称为亮度方程，表明三基色量合成彩色光亮度的关系。

$$Y = rR + gG + bB$$

这样通过传送 Y、R—Y、B—Y 三个信号代替传送 R、G、B 三个基色信号，达到传送图像的亮度、色调、饱和度的目的。由于采用不同的频谱编织方式，形成了不同的电视制式。

电视信号经彩色电视机中的解码器矩阵电路处理后恢复成三基色信号。当具有一定电压的三基色信号传入显像管地时候，被信号分别激励的呈品字排列的三个电子枪便向荧光屏发出三条电子束。荧光屏上布满了三色荧光点，这些荧光点以

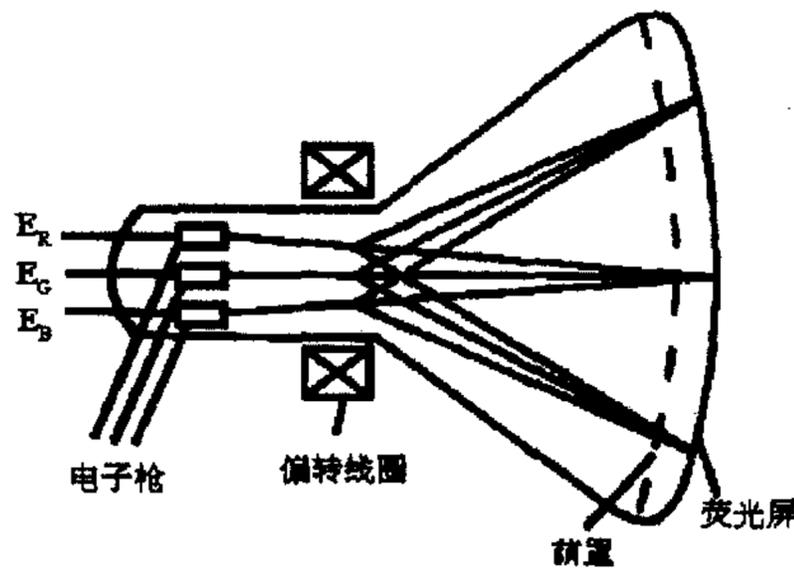


图 5-2 彩色显像管示意图

红、绿、蓝三点组成一个组，并以每点作为定点排成等边三角形。在荧光屏后面有一金属荫罩板，上面布满了小孔，每个小孔都对应一组三色点。三条电子束会聚在荫罩板的小孔内，穿过小孔又分别轰击到对应的红、绿、蓝三个荧光点上。由于三个点的距离很近，人眼的分辨率有限，每组发出的彩色光给人

以三点混合色的感觉，即空间混色。这混合色的色调和饱和度取决于三基色的强弱，即取决于三个电子束所携带能量的大小，也就是三基色电压的大小。三色荧光点的亮度分别与拍摄景物相应象素的三基色信号成比例，于是在荧光屏上重现了景物色彩。如图 5-2 和 5-3 所示为彩色显像管和荫罩板简图。显像管类型有很多种，但基本合成原理相似。[1][18][19]

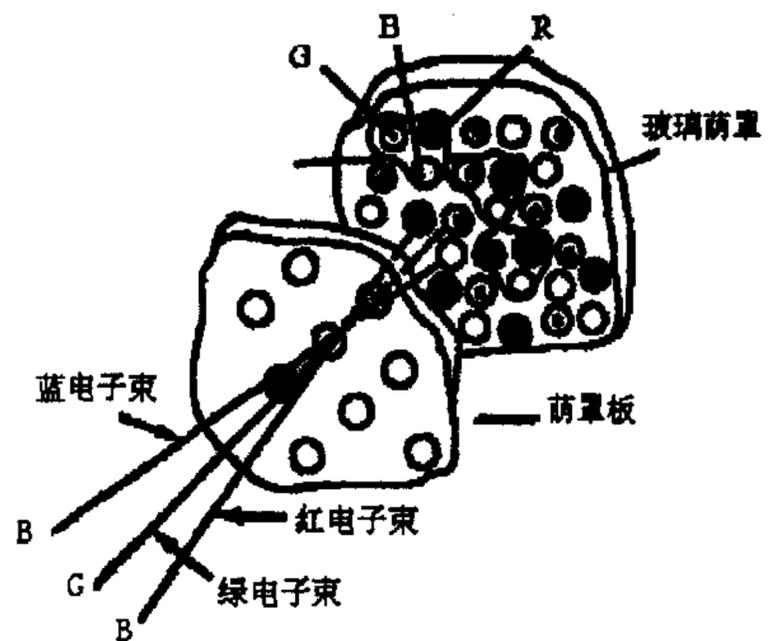


图 5-3 荫罩板示意图

### 5.1.2.彩色电视的显示三基色与亮度方程

彩色电视是利用红、绿、蓝三种基色按照不同比例进行相加混合得到各种彩色的，当红、绿、蓝三基色的电信号相等时，在荧光屏上出现白色，称为白场。荧光粉的三基色和白场色称为四个参照刺激，是整个彩色电视信号系统设计和色度计算的基础。三基色的选择原则上是任意的，但出于色彩亮度和丰富程度的综合考虑，必须选择合适的荧光粉三基色。彩色电视系统中，NTSC制采用C光源为标准白光，PAL制采用D<sub>65</sub>光源为标准白光，其荧光粉三基色和标准白光色度坐标见表5-1。<sup>[1]</sup>

表 5-1 两种制式显像三基色和标准白光的色度坐标

	NSCL 制三基色荧光粉和标准白光				PAL 制三基色荧光粉和标准白光			
	R <sub>N</sub>	G <sub>N</sub>	B <sub>N</sub>	C <sub>白</sub>	R <sub>P</sub>	G <sub>P</sub>	B <sub>P</sub>	D <sub>65</sub>
x	0.67	0.21	0.14	0.310	0.64	0.29	0.15	0.313
y	0.33	0.71	0.18	0.316	0.33	0.60	0.06	0.329

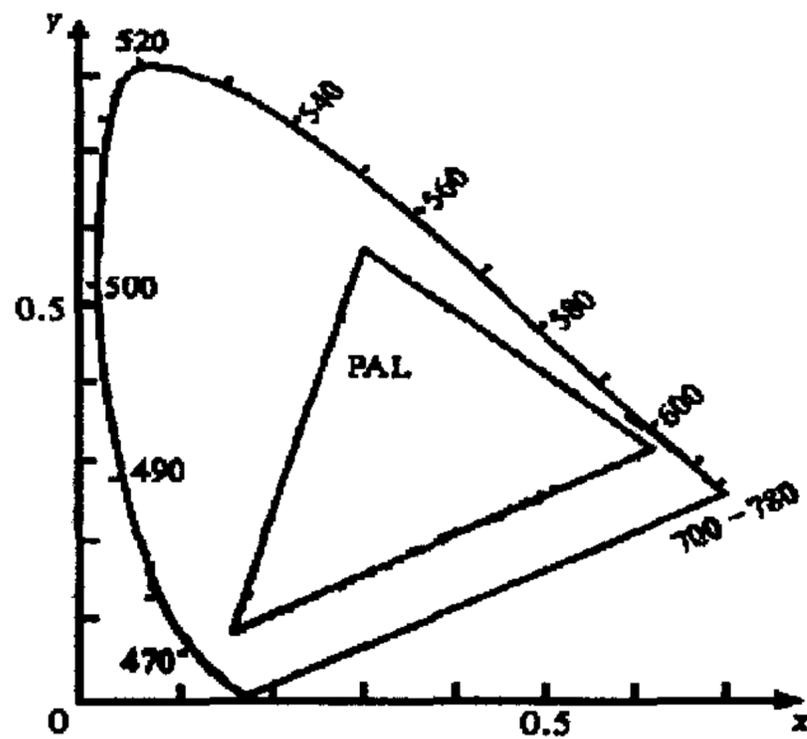


图 5-4 彩色电视重现的色度范围

将 PAL 制荧光粉三基色色度坐标标入色度图如图 5-4 所示，由三基色点构成的三角形表示能复现的色度范围，色度三角形内任意一种色调都能用三基色混合产生。越靠近光谱轨迹表示颜色的饱和度越高，而实际上除了自然界不常见的纯度很高的色彩之外，彩色电视几乎都能再现。

彩色电视中 PAL 制荧光粉三基色为 (R<sub>PAL</sub>)、(G<sub>PAL</sub>)、(B<sub>PAL</sub>)，即 PAL 制采用

的是  $R_{PAL}$   $G_{PAL}$   $B_{PAL}$  色度系统。 $R_{PAL}$   $G_{PAL}$   $B_{PAL}$  色度系统的四个参照刺激色在 XYZ 色度系统中的色度坐标为

$$R_{PAL}: \quad x_{Pr} = 0.64, \quad y_{Pr} = 0.33, \quad z_{Pr} = 0.03$$

$$G_{PAL}: \quad x_{Pg} = 0.29, \quad y_{Pg} = 0.60, \quad z_{Pg} = 0.11$$

$$B_{PAL}: \quad x_{Pb} = 0.15, \quad y_{Pb} = 0.06, \quad z_{Pb} = 0.79$$

$$W: \quad x_{P0} = 0.313, \quad y_{P0} = 0.329, \quad z_{P0} = 0.358$$

在  $R_{PAL}$   $G_{PAL}$   $B_{PAL}$  色度系统中的色度坐标为

$$R_{PAL}: \quad r_P = 1, \quad g_P = 0, \quad b_P = 0$$

$$G_{PAL}: \quad r_P = 0, \quad g_P = 1, \quad b_P = 0$$

$$B_{PAL}: \quad r_P = 0, \quad g_P = 0, \quad b_P = 1$$

$$W: \quad r_P = 0.33, \quad g_P = 0.33, \quad b_P = 0.33$$

已知四个点的八个相应色度坐标值, 根据第二章 2.3.3 所介绍的色度系统转换方法可求得两个系统间的色度坐标转换公式及三刺激值转换公式。

三刺激值转换公式为<sup>[18]</sup>

$$\begin{bmatrix} R_p \\ G_p \\ B_p \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

$$\text{其中 } C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.0627 & -1.3928 & -0.4759 \\ -0.9689 & 1.8756 & 0.0417 \\ 0.0677 & -0.2286 & 1.0690 \end{bmatrix}$$

求其逆矩阵可以得到 PAL 制亮度方程为

$$Y = 0.222R + 0.707G + 0.071B \quad (5-2)$$

即 PAL 制三基色荧光粉的相对发光亮度比为 0.222: 0.707: 0.071, 近似为 0.22: 0.70: 0.07。在不同的彩色电视制式中由于所选的标准白光和显像三基色不同, 亮度方程会有差异。由于 NTSC 制式彩色电视广播发展较早, 大量电视设备都是按它设计的, PAL 制中没有采用自己的亮度方程, 而是沿用了 NTSC 制的亮度方程, 并近似的写为

$$Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (5-3)$$

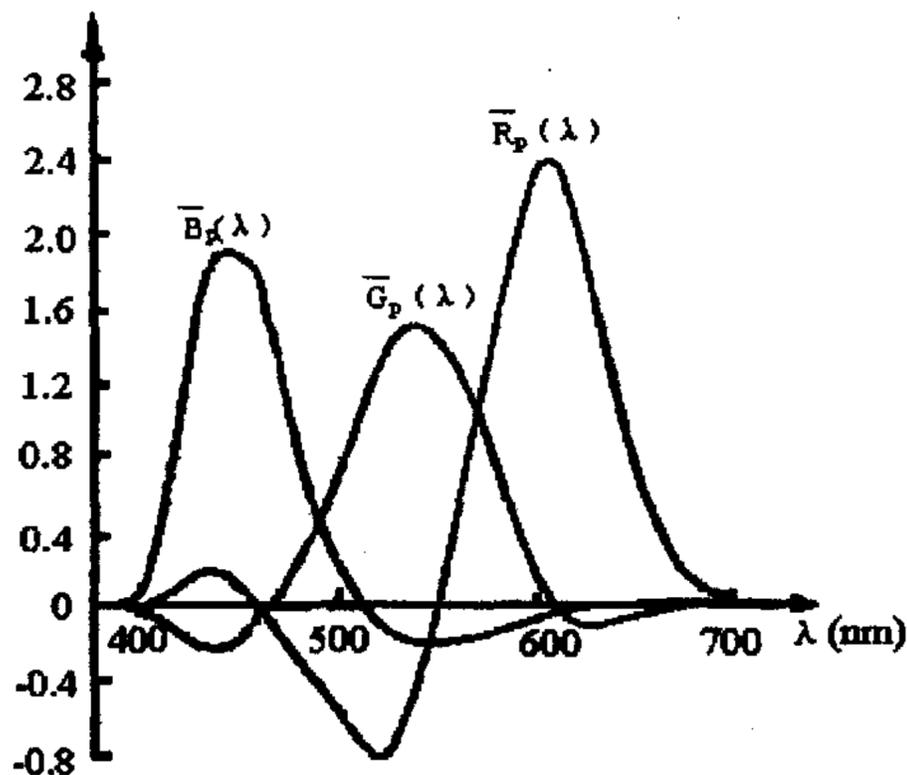
实践证明, 用 5-3 式进行亮度计算, 所引起的亮度误差很小, 能满足视觉对亮度的要求。<sup>[1]</sup>

### 5.1.3.彩色电视的理想光谱特性

由式 5-1 可求得标准色度观察者光谱三刺激值  $\bar{X}(\lambda)$ 、 $\bar{Y}(\lambda)$ 、 $\bar{Z}(\lambda)$  与以彩色电视三基色为原色的光谱三刺激值  $\bar{R}_p(\lambda)$ 、 $\bar{G}_p(\lambda)$ 、 $\bar{B}_p(\lambda)$  之间的关系

$$\begin{aligned}\bar{R}_p(\lambda) &= 3.0627\bar{X}(\lambda) - 1.3928\bar{Y}(\lambda) - 0.4759\bar{Z}(\lambda) \\ \bar{G}_p(\lambda) &= -0.9689\bar{X}(\lambda) + 1.8756\bar{Y}(\lambda) + 0.0417\bar{Z}(\lambda) \\ \bar{B}_p(\lambda) &= 0.677\bar{X}(\lambda) - 0.2286\bar{Y}(\lambda) + 1.069\bar{Z}(\lambda)\end{aligned}\quad (5-4)$$

将已知的  $\bar{X}(\lambda)$ 、 $\bar{Y}(\lambda)$ 、 $\bar{Z}(\lambda)$  数据代入式 5-4 中, 所得数据可绘制得到 PAL 制彩色电视系统的光谱三刺激值曲线, 如图 5-5 所示<sup>[18][19]</sup>



5-5 彩色电视系统的光谱三刺激值曲线

图 5-5 所示的三条曲线就是彩色摄像机系统中的红、绿、蓝三个摄像管系统的理想光谱特性曲线。在可见光范围内对景物的刺激函数进行积分, 可得到景物颜色的三刺激值

$$\begin{aligned}R_p &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{R}_p(\lambda) d\lambda \\ G_p &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{G}_p(\lambda) d\lambda \\ B_p &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{B}_p(\lambda) d\lambda\end{aligned}\quad (5-5)$$

若信号传输系统和接受系统是线性系统, 则彩色显象管为复现被摄景物的颜色所要求的相对信号强弱即电压与光谱三刺激值  $R_p$ 、 $G_p$ 、 $B_p$  有一致的比例关系。例

如当  $R_P=G_P=B_P=1$  时, 应呈现白光  $D_{65}$ , 因而当送至显像管的三基色电压满足  $E_R=E_G=E_B=1$  时, 屏幕将重现白光  $D_{65}$ 。

图中曲线有负值存在, 表明要配出显像三基色三角形以外的颜色时需有负值的刺激值, 即彩色电视系统无法复现该颜色, 所重现的颜色只能保持原色调, 而饱和度将降低。由图中可以看到光谱三刺激值中至少有一个为负值, 这表明 PAL 制彩色电视系统无法复现光谱色。

实际上, 彩色电视系统中的摄像管系统的光谱特性曲线只能近似取  $\bar{R}_p(\lambda)$ 、 $\bar{G}_p(\lambda)$ 、 $\bar{B}_p(\lambda)$  三刺激值曲线的正值部分, 并对其进行一定的修正。同时在摄像系统中加入线性矩阵电路弥补负值部分引起的效果, 使彩色复现得到明显的改进。

## 5.2. 激光显示的色彩复现

### 5.2.1. 激光显示的显示三基色与亮度方程

激光显示的彩色合成原理与彩色电视机相似。三基色光由红、绿、蓝激光器提供, 红、绿、蓝激光经声光调制器 AOM 进行调制, 由 X 棱镜或光纤耦合合色后, 采用点扫描的显示方式得到图像。

激光显示以激光器提供的红、绿、蓝三色激光为显像三基色, 标准光源  $D_{65}$  为参照白光建立  $R_L G_L B_L$  激光显示系统。同彩色电视系统相似, 当  $R_P=G_P=B_P=1$  时,  $E_R=E_G=E_B=1$  屏幕应重现白光  $D_{65}$ 。为确定  $R_L G_L B_L$  系统三个参照刺激的三基色单位, 要完成  $R_L G_L B_L$  色度系统与 XYZ 色度系统的转换, 求得亮度方程, 从而进一步求得匹配参照白光时三个激光器的功率比。

首先为完成  $R_L G_L B_L$  色度系统与 XYZ 色度系统的转换, 我们必须知道激光显示系统的四个参照刺激在 XYZ 色度系统中的色度坐标。对 CIE1931 色度图光谱轨迹色度坐标进行拟和, 可求得显像三基色的色度坐标  $x_r, y_r; x_g, y_g; x_b, y_b$ 。标准白光的色度坐标  $x_0=x_{D65}, y_0=y_{D65}$ 。

在  $R_L G_L B_L$  色度系统中激光显示三基色和标准白光的色度坐标为

$$R_L: r_L=1, \quad g_L=0, \quad b_L=0$$

$$G_L: r_L=0, \quad g_L=1, \quad b_L=0$$

$$B_L: r_L=0, \quad g_L=0, \quad b_L=1$$

$$W: r_L=0.33, g_L=0.33, b_L=0.33$$

根据格拉斯曼定律可知, 每单位新的原色可以由旧的原色混合得到。从而可以得到两系统三刺激值之间的关系, 可用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} R_L \\ G_L \\ B_L \end{bmatrix}, \quad (5-6)$$

$$\text{其中 } B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$$

又两系统色度坐标为

$$r_L = \frac{R}{R+G+B}$$

$$g_L = \frac{G}{R+G+B} \quad (5-7)$$

$$b_L = \frac{B}{R+G+B}$$

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (5-8)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

$$(r_L + g_L + b_L = 1, x + y + z = 1)$$

则有  $R_L G_L B_L$  色度系统与 CIE-XYZ 色度系统的色度坐标转换关系为

$$x = \frac{b_{11}r_L + b_{12}g_L + b_{13}b_L}{(b_{11} + b_{21} + b_{31})r_L + (b_{12} + b_{22} + b_{32})g_L + (b_{13} + b_{23} + b_{33})b_L}$$

$$y = \frac{b_{21}r_L + b_{22}g_L + b_{23}b_L}{(b_{11} + b_{21} + b_{31})r_L + (b_{12} + b_{22} + b_{32})g_L + (b_{13} + b_{23} + b_{33})b_L} \quad (5-9)$$

$$z = \frac{b_{31}r_L + b_{32}g_L + b_{33}b_L}{(b_{11} + b_{21} + b_{31})r_L + (b_{12} + b_{22} + b_{32})g_L + (b_{13} + b_{23} + b_{33})b_L}$$

将四个参照刺激在  $R_L G_L B_L$  系统及 CIE-XYZ 系统中的色度坐标代入上式, 可得到八个独立的方程。九个系数中八个是独立的, 计算时可以指定九个系数中任意一个系数为某一常量, 其余八个系数随此常量大小同时扩大或缩小相同倍数, 不影响颜色的色调。

可令  $b_{11}=h$  ( $h$  为一任意非零常量), 解方程有:

$$b_{21} = \frac{y_r}{x_r} h, \quad b_{31} = \frac{1-x_r-y_r}{x_r} h, \quad b_{22} = \frac{dm-bn}{ad-bc}, \quad b_{23} = \frac{cm-an}{bc-ad}$$

$$b_{12} = \frac{x_g}{y_g} b_{22}, \quad b_{32} = \frac{1-x_g-y_g}{y_g} b_{22}, \quad b_{13} = \frac{x_b}{y_b} b_{23}, \quad b_{33} = \frac{1-x_b-y_b}{y_b} b_{23} \quad (5-10)$$

其中  $a = \frac{x_g-x_0}{y_g}, \quad b = \frac{x_b-x_0}{y_b}, \quad c = \frac{y_g-y_0}{y_g}, \quad d = \frac{y_b-y_0}{y_b}$

$$m = \frac{x_0-x_r}{x_r} h, \quad n = \frac{y_0-y_r}{x_r} h$$

可知激光显示的亮度方程为

$$Y = b_{21}R_L + b_{22}G_L + b_{23}B_L \quad (5-11)$$

即激光器红、绿、蓝激光的亮度比为  $b_{21}: b_{22}: b_{23}$ 。若已知三基色光对应的光谱光效率函数  $V_r, V_g, V_b$ , 及激光显示系统红、绿、蓝三基色光的透过率  $\tau_r, \tau_g, \tau_b$ ,

可求得红、绿、蓝激光源的功率比为  $\frac{b_{21}}{\tau_r V_r} : \frac{b_{22}}{\tau_g V_g} : \frac{b_{23}}{\tau_b V_b}$ 。

### 5.2.2. 激光显示的光谱三刺激值曲线

由 5-9, 5-10 式  $R_L G_L B_L$  色度系统与 CIE-XYZ 色度系统三刺激值的关系还可表示为

$$\begin{bmatrix} R_L \\ G_L \\ B_L \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

$$\text{其中 } E = B^{-1} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix}$$

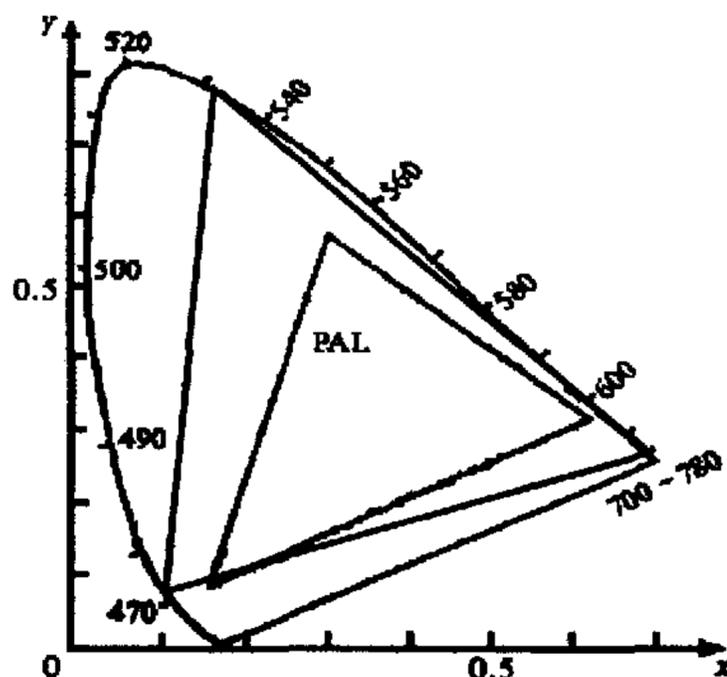
由上式可求得标准色度观察者光谱三刺激值  $\bar{X}(\lambda), \bar{Y}(\lambda), \bar{Z}(\lambda)$  与以激光三基色为原色的光谱三刺激值  $\bar{R}_L(\lambda), \bar{G}_L(\lambda), \bar{B}_L(\lambda)$  之间的关系

$$\begin{aligned} \bar{R}_L(\lambda) &= e_{11}\bar{X}(\lambda) + e_{12}\bar{Y}(\lambda) + e_{13}\bar{Z}(\lambda) \\ \bar{G}_L(\lambda) &= e_{21}\bar{X}(\lambda) + e_{22}\bar{Y}(\lambda) + e_{23}\bar{Z}(\lambda) \\ \bar{B}_L(\lambda) &= e_{31}\bar{X}(\lambda) + e_{32}\bar{Y}(\lambda) + e_{33}\bar{Z}(\lambda) \end{aligned} \quad (5-13)$$

将已知的  $\bar{X}(\lambda)$ 、 $\bar{Y}(\lambda)$ 、 $\bar{Z}(\lambda)$  数据代入式 5-13 中，所得数据可绘制得到激光显示系统的光谱三刺激值曲线，具体可见下面实例所述。

### 5.2.3.应用实例

以激光三基色波长 671nm, 532nm, 473nm 为例。绘制  $R_L G_L B_L$  色度系统的色度图如图 5-6 所示。由图可知激光显示系统远远大于彩色电视系统所能复现的色彩范围，其复现色彩更丰富。并且复现的色彩更接近光谱色，色彩更逼真，饱和度更高。



5-6 激光显示重现的色度范围

按 5.2.1.中所述编程进行拟合计算可得三基色色度坐标为

$$x_r = 0.7322, y_r = 0.2679;$$

$$x_g = 0.1703, y_g = 0.7987;$$

$$x_b = 0.1158, y_b = 0.0735;$$

将求得的色度坐标代入 5-9 式，可得转换系数：

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6571 & 0.1414 & 0.1519 \\ 0.2404 & 0.6632 & 0.0964 \\ 0 & 0.0257 & 1.6034 \end{bmatrix} \quad (5-14)$$

则由 5-14 式激光显示的亮度方程可近似写为

$$Y = 0.2404R_L + 0.6632G_L + 0.0964B_L \quad (5-15)$$

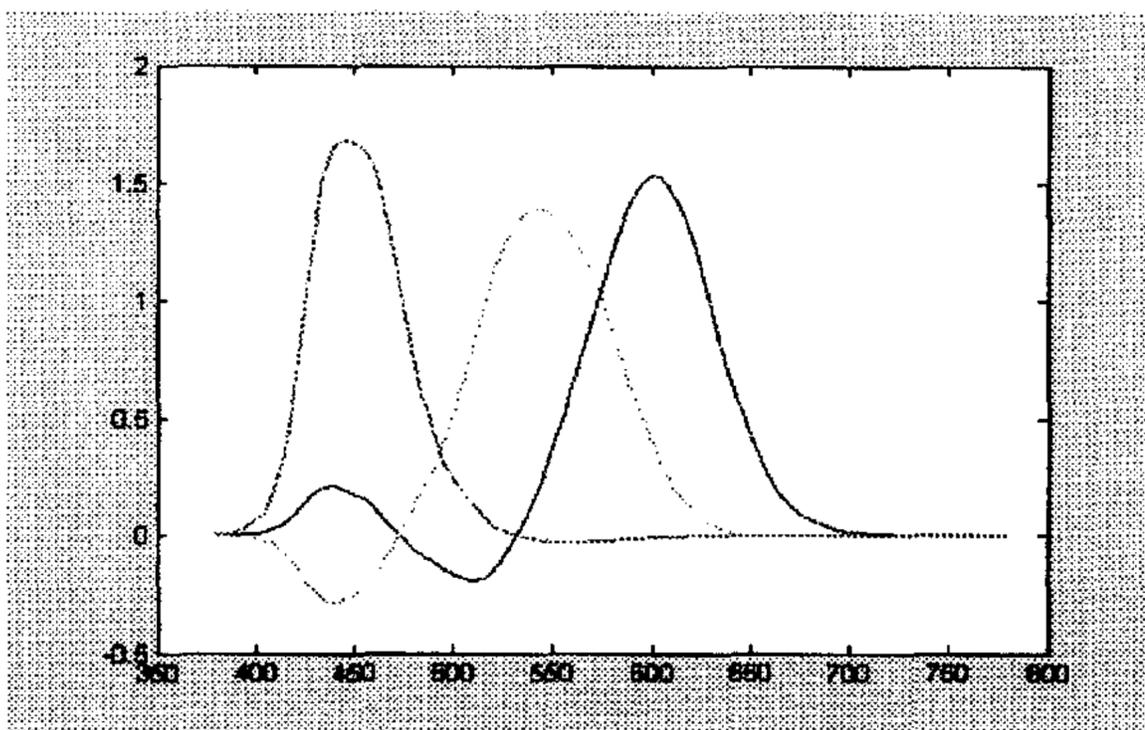
即红、绿、蓝激光的亮度比为 0.2404: 0.6632: 0.0964。若光学系统对红绿蓝三种

激光的透过率相等, 即  $\tau_r = \tau_g = \tau_b$ , 可进一步求得红、绿、蓝激光源的功率比为 1.0000: 0.0934: 0.1161。

根据亮度方程可以确定激光显示系统  $R_L$ 、 $G_L$ 、 $B_L$  三基色的单位, 即用三基色按亮度方程匹配出标准白光  $D_{65}$ , 这时把三基色定为 1: 1: 1 的等量关系。

由 5-13 式可得标准色度观察者光谱三刺激值  $\bar{X}(\lambda)$ 、 $\bar{Y}(\lambda)$ 、 $\bar{Z}(\lambda)$  与以激光三基色为原色的光谱三刺激值  $\bar{R}_L(\lambda)$ 、 $\bar{G}_L(\lambda)$ 、 $\bar{B}_L(\lambda)$  之间的关系为

$$\begin{aligned} \bar{R}_L(\lambda) &= 1.6474\bar{X}(\lambda) - 0.3434\bar{Y}(\lambda) - 0.2042\bar{Z}(\lambda) \\ \bar{G}_L(\lambda) &= -0.5993\bar{X}(\lambda) + 1.6382\bar{Y}(\lambda) - 0.0630\bar{Z}(\lambda) \\ \bar{B}_L(\lambda) &= 0.0145\bar{X}(\lambda) - 0.0396\bar{Y}(\lambda) + 0.9419\bar{Z}(\lambda) \end{aligned} \tag{5-16}$$



5-7 激光显示光谱三刺激值曲线

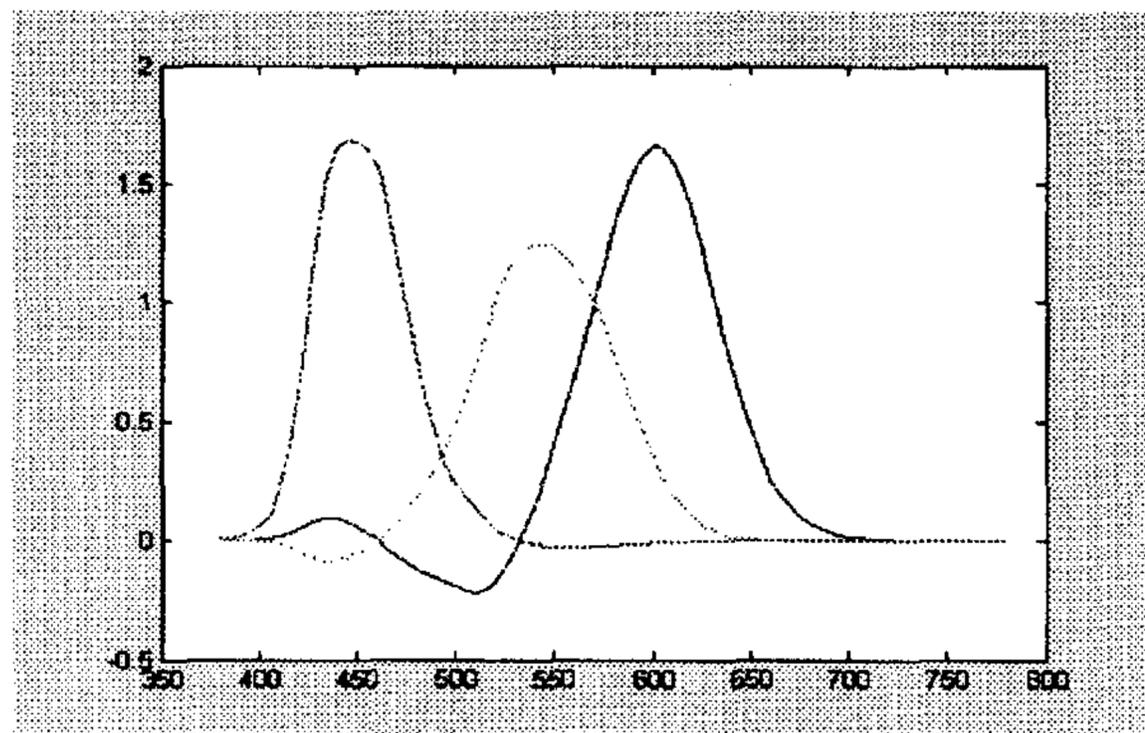


图 5-8 671nm 532nm 460nm 三基色光谱三刺激值曲线

将已知的  $\bar{X}(\lambda)$ 、 $\bar{Y}(\lambda)$ 、 $\bar{Z}(\lambda)$  数据代入上式中, 所得数据可绘制得到激光显示系统的光谱三刺激值曲线, 见图 5-7。对其它几组红、绿、蓝三基色如 671nm, 532nm, 460nm; 660nm, 532nm, 460nm; 650nm, 532nm, 460nm 同样可得到光谱三刺激值曲线如图 5-8, 5-9, 5-10 所示

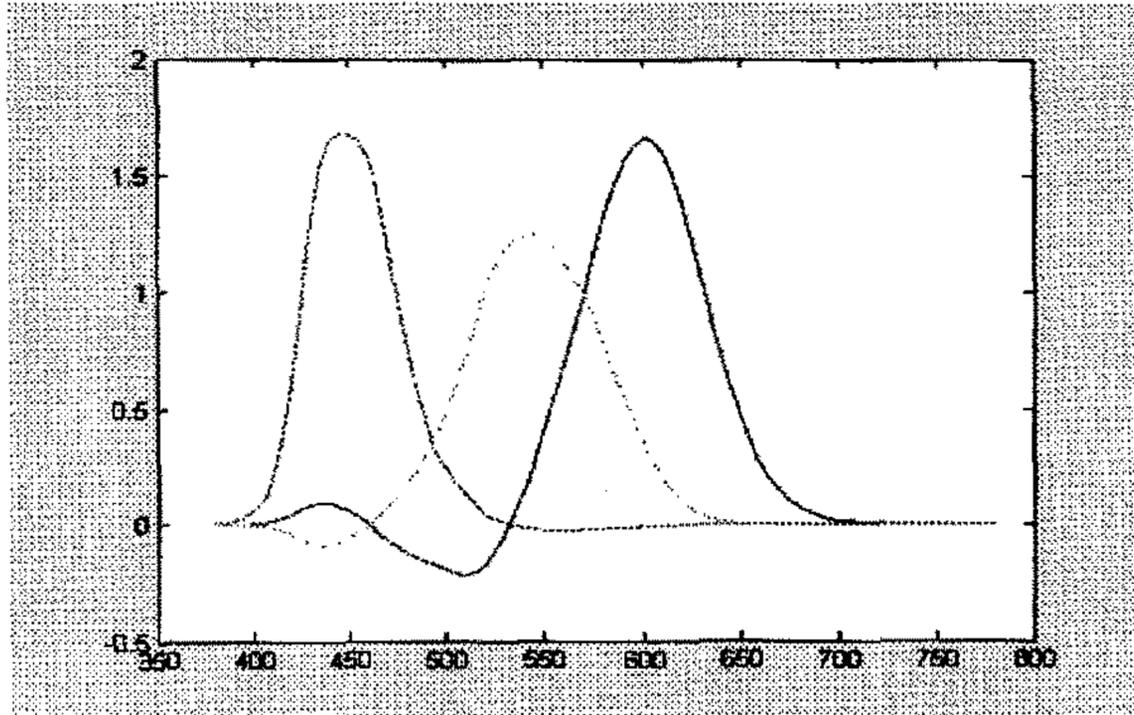


图 5-9 660nm 532nm 460nm 三基色光谱三刺激值曲线

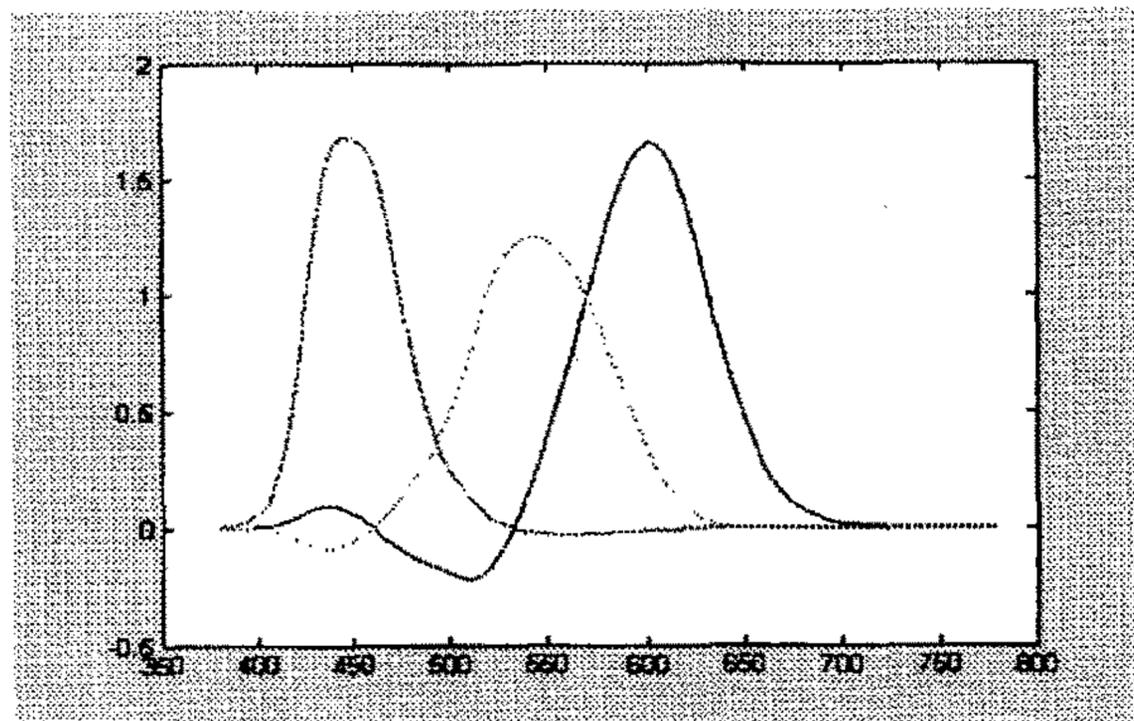


图 5-10 650nm 532nm 460nm 三基色光谱三刺激值曲线

#### 5.2.4. 小结

为了实现激光三基色显示的色彩复现, 本节建立了激光三基色显示的  $R_L G_L B_L$  色度系统, 完成了  $R_L G_L B_L$  色度系统与 CIE-XYZ 色度系统的色度坐标和三刺激值

的转换, 求得了激光三基色显示的亮度方程, 确定了激光显示系统  $R_L$ 、 $G_L$ 、 $B_L$  三基色的单位, 并进一步求得了激光显示的三基色光谱三刺激值曲线。

### 5.2.5. 激光显示对视频信号的复现

视频信号尽管制式各种各样, 但都是针对彩色电视显示系统而建立的。若直接将视频信号输入激光显示系统, 会出现颜色的失真。解决的办法之一就是建立适合激光显示系统的信号系统, 但这不是很现实。最简单的办法就是对视频信号进行修正, 实现激光显示对彩色电视视频信号的色彩复现。

要用激光显示对彩色电视视频信号实现色彩复现, 要进行 PAL 制色度系统与  $R_L G_L B_L$  色度系统的转换。按照 5.2.1 介绍的相同的方法, 可得到 PAL 制  $R_P G_P B_P$  色度系统与 CIE-XYZ 系统的转换关系为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_P \\ G_P \\ B_P \end{bmatrix} \quad (5-17)$$

求其逆矩阵为

$$\begin{bmatrix} R_P \\ G_P \\ B_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5-18)$$

可求得

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.0627 & -1.3928 & -0.4759 \\ -0.9689 & 1.8756 & 0.0417 \\ 0.0677 & -0.2286 & 1.0690 \end{bmatrix}$$

由 5-17 式和 5-18 式可得 PAL 制色度系统与  $R_L G_L B_L$  色度系统的转换关系

$$\begin{bmatrix} R_P \\ G_P \\ B_P \end{bmatrix} = C \times B \begin{bmatrix} R_L \\ G_L \\ B_L \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} R_L \\ G_L \\ B_L \end{bmatrix} \quad (5-19)$$

或表示为

$$\begin{bmatrix} R_L \\ G_L \\ B_L \end{bmatrix} = D^{-1} \begin{bmatrix} R_P \\ G_P \\ B_P \end{bmatrix} \quad (5-20)$$

求得了两系统的转换关系, 可根据转换系数在激光显示的驱动电路中加入矩阵电

路, 对经解码器还原的三基色信号进行修正, 这样就实现了激光显示对 PAL 制视频信号的色彩复现。

以激光三基色波长 671nm, 532nm, 473nm 为例可求得

$$D = C \times B = \begin{bmatrix} 3.0627 & -1.3928 & -0.4759 \\ -0.9689 & 1.8756 & 0.0417 \\ 0.0677 & -0.2286 & 1.0690 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.6571 & 0.1414 & 0.1519 \\ 0.2404 & 0.6632 & 0.0964 \\ 0 & 0.0257 & 1.6034 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0.0163 & 0.1998 & -0.0587 \\ 0.0445 & 0.0035 & 0.6684 \\ 1.3730 & -1.1889 & -0.0522 \end{bmatrix}$$

$$D^{-1} = \begin{bmatrix} 4.5586 & 0.4606 & 0.7674 \\ 5.2789 & 0.4677 & 0.0474 \\ -0.3308 & 1.4630 & -0.0513 \end{bmatrix}$$

可以看到  $D^{-1}$  矩阵中有负值出现, 这是由于激光三基色显示与 PAL 制彩色电视所使用的三原色不同, 因而各自确定的色度三角形不同。对于某些在 PAL 制色度三角形内而在激光三基色显示色度三角形外的颜色, 激光三基色显示无法准确匹配这些颜色, 只能复现这些颜色的同主波长的色调, 而不能复现其饱和度。其色度三角形如图 5-6 所示。相同的道理,  $D$  矩阵中的负值表明激光三基色显示色度三角形的很多颜色 PAL 制彩色电视也都无法复现, 不能复现其饱和度而只能复现这些颜色的同主波长的色调。

### 5.3. 小结

本章首先对彩色电视系统的色彩复现进行了介绍。激光显示系统与彩色电视显示系统相似, 也是采用三基色原理实现色彩复现的。本章提出建立  $R_L G_L B_L$  色度系统, 完成了  $R_L G_L B_L$  色度系统与 CIE-XYZ 系统的转换关系, 得到了激光显示系统的亮度方程及光谱三刺激值曲线。针对激光显示对彩色电视视频信号实现色彩复现会出现彩色失真的问题, 在得到了 PAL 制视频信号色度系统与激光显示  $R_L G_L B_L$  色度系统的转换矩阵的基础上, 提出了在驱动电路中加入矩阵电路对三基色显示信号进行修正的方法, 实现激光显示对彩色电视视频信号的复现。

## 第六章 结论与展望

激光显示与其它显示方式相比, 具有很多优点。同传统的显示光源相比, 激光具有很好的单色性、方向性, 使用激光三基色作为显示光源所表示的颜色, 包含了人眼所能分辨的绝大多数颜色。用激光显示色彩丰富、饱和度高、对比度强、与各种视频信号都有好的匹配性。大功率红色半导体激光器及全固态绿色、蓝色激光器的相继问世, 使激光显示成为可能, 微电子技术及精密加工技术的发展更使激光显示技术走向实用化。

本论文的主要工作如下:

1. 激光显示与其它显示相同, 都以三基色原理为基础, 本文首先在第一章中对色度学原理, 尤其是三基色原理进行了介绍。

2. 为了激光显示的设计方案的进一步完善, 对 PLC\_XP45 投影仪和 RX1311 投影仪整机光谱透过的特性进行了测试、分析, 并对投影仪进行了分解, 对每个光学零部件的光学特性进行测试、分析, 进行色度计算。

3. 本研究通过对三基色原理在激光全色显示技术中的应用研究, 对于给定的光学系统, 找到了激光光源红、绿、蓝三基色光的功率配比与投影屏物点色度坐标和亮度的关系, 得到了激光显示红、绿、蓝光源的功率配比及满足显示条件的红、绿、蓝光源的功率, 从而对激光三基色显示中的色差进行校正, 优化激光大屏幕显示质量。

4. 根据三基色原理, 经过推导编程本文得到了激光显示的亮度方程, 确定了激光显示系统  $R_L$ 、 $G_L$ 、 $B_L$  三基色的单位。以波长分别为 671nm、532nm、473nm 红、绿、蓝激光为例, 得到其亮度方程为  $Y = 0.2404R_L + 0.6632G_L + 0.0964B_L$ 。并进一步求得激光三基色显示的光谱三刺激值曲线。

5. 针对将彩色电视视频信号直接输入激光显示系统会出现彩色失真的问题, 完成了 PAL 制视频信号色度系统与激光显示  $R_L G_L B_L$  色度系统的转换, 得到了转换矩阵, 提出了在激光显示的驱动电路中加入矩阵电路, 对经解码器还原的三基色信号进行修正的方法, 从而实现激光显示对彩色电视视频信号的复现。

本文主要完成的是理论计算与仿真, 为激光三基色显示的研究提供一定的依据。在实验中将对计算与仿真结果进一步验证, 并针对实验中出现的更

具体的要求，从而进一步进行修正。

国外在激光显示研究方面已取得一定成果，我国还刚刚起步，中科院物理所、长春光机所和中科院光电所合作承担的激光显示课题填补了国内的空白，目前取得了初步成效。但激光显示在技术方面还有很多问题需要解决，如液晶调制激光投影显示存在较严重的干涉问题，而声光调制激光扫描显示虽然可以较好解决干涉问题，但需解决扫描转镜与摆镜的稳定问题。只有完全解决这些技术细节才能将激光显示推向实用化。

## 参考文献

- [1] 色彩学编写组, 色彩学, 科学出版社, 2001
- [2] 谷 千束, 伊贺健一, 池上彻彦, 荒川泰彦, 先进显示器技术, 科学出版社, 2002
- [3] 西田信夫, 小林骏介, 内池平树, 谷 千束, 大屏幕显示, 科学出版社, 2003
- [4] Larry J. Hornbeck, Digital Processing for High-Brightness, High-Resolution Applications, Proc.SPIE Vol.3013(1997), 27-40
- [5] James M. Florence, Lars A. Yoder, Display System Architectures for Digital Micromirror Device (DMD) Based Projectors, Proc.SPIE Vol.2650 (1996) , 193-208
- [6] Heiju Uchiike, Recent Advances of Color Plasma Displays, Proc.SPIE Vol.4079(2000),
- [7] 关积珍, LED 显示屏的技术及其产业发展, 2002 中国国际大屏幕显示技术研讨会论文集, 77-83
- [8] Sweta Dash, Market Trends in the Projection Display Industry, Proc.SPIE Vol.3634 (1999), 2-9
- [9] Joseph A. Castellano, Market Trends in the Projection Display Industry, Proc.SPIE Vol.4294 (2001), 1-12
- [10] Günter Hollemanna, Bernd Brauna, Friedhelm Dorschb, Petra Hennigb, Peter Heista, Ulf Krausea, Uwe Kutschkia, Herrmann Voelckelb, RGB Laser for Laser Projection Display, Proc.SPIE Vol.3954(2000)
- [11] Vladimir N. Ulasjuk, Oleg M. Makienko, Alexander V. Koshevoy, Quantoscope based high-power full-color laser projection display system, SPIE Vol.2407, 270
- [12] Youngmo Hwang, Jinho Lee, Youngjun Park, Jungho Park, 200 Inches Full Color Laser Projection Display, SPIE Vol.3296 (1998), 116-125
- [13] Yong Hoon Kim, Hang Woo Lee, Seung Nam Cha, Jin Ho Lee, Young Jun Park, Jung Ho Park, Sung Soo Hong, Young Mo Hwang, Full Color Laser Projection Display Using Kr-Ar Laser(White Laser) Beam Scanning Technology,

- Proc.SPIE Vol.3131(1997), 2-9
- [14] Christhard Deter ,Juergen Kraenert , High Resolution Scanning Laser Projection Display with Diode Pumped Solid State Laser, Projection Displays 2000:Sixth in a Series , January 2000 San Jose, California, 24-25
- [15] Günter Hollemann, Bernd Braun, Peter Heist, Jan Symanowski, Ulf Krause, Jürgen Kränert, Christhard Deter, High-Power Laser Projection Display, Proc.SPIE Vol.4294 (2001), 36-46
- [16] Eric Takeuchi, Graham Flint, Robert Bergstedt, Paul Solone, Photera Technologies, Inc., 12777High Bluff Dr., San Diego, CA 92130, Dicky Lee, Peter Moulton, Q-Peak, Inc., 135 South Road, Bedford, MA 01370, Laser Digital Cinema, Proc.SPIE Vol.4294(2001), 28-35
- [17] Billings Michale , Tisdale Glenn , Development of An Advanced Multifunction Head-Up Display Using Digital Micromirror Device And Laser Technologies, Proc.SPIE Vol.4362, 194-192
- [18] 汤顺青, 色度学, 北京理工大学出版社, 1990
- [19] 俞斯乐 侯正信 冯启明 李文元, 电视机原理, 国防工业出版社, 2001
- [20] 荆其诚 焦书兰 喻柏林 胡维生, 色度学, 科学出版社, 1979
- [21] 车念曾 闫达远, 辐射度学和光度学, 北京理工大学出版社, 1990
- [22] 黄仕机, 科学出版社, 彩色电视接收机原理与实践, 1980
- [23] 王明臣, 人民邮电出版社, 彩色电视接收机原理, 1983

## 致 谢

在我的毕业论文完成之际，我要衷心感谢我的导师曾维扬教授。短短的几年期间，不仅得到了曾老师在学业上的谆谆教诲、生活上的细心照顾，而且还从他为人师表、高风亮节的为人态度、严谨治学的学者风范、勇于奉献的敬业精神中学到了许多做人的道理，这将是受益终身的宝贵财富。

同时对中科院光电所的邢廷文研究员表示我最真诚的感谢！本论文在中科院光电所完成，感谢邢老师在几年中给予我悉心指导。邢老师渊博的知识、严谨的治学作风和开明的思想给我留下了深刻的印象。

非常感谢张福甲教授、姚汉民研究员在工作和生活中给予的关心和帮助！

感谢林妩媚、周金梅、廖志远、马燕春和赵新亮等人在工作和生活中给予的帮助、支持和鼓励。

衷心感谢参加本论文评审和答辩的各位专家和学者！

## 在读期间发表文章

- 1、耿建萍，曾维扬，邢廷文，激光投影显示，2003 年第 12 届十一省（市）光学学术年会论文集
- 2、耿建萍，邢廷文，林妩媚，曾维扬，激光显示的亮度方程求解和色彩复现，光电工程（审稿中）

## 附录

附录1 PLC\_XP45 投影仪光谱功率测量数据

单位:  $W/sr \cdot m^2 \cdot nm$

波长 (nm)	白场	红场	绿场	蓝场
380	1.400E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
385	8.652E-05	0.000E+00	0.000E+00	8.835E-05
390	5.570E-05	0.000E+00	0.000E+00	5.688E-05
395	4.060E-05	0.000E+00	0.000E+00	4.145E-05
400	6.368E-05	0.000E+00	0.000E+00	6.503E-05
405	7.956E-05	0.000E+00	0.000E+00	8.124E-05
410	1.390E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.420E-04
415	3.702E-04	0.000E+00	0.000E+00	4.621E-04
420	5.468E-03	0.000E+00	3.861E-05	7.076E-03
425	2.141E-02	5.430E-05	1.080E-04	2.367E-02
430	3.264E-02	8.544E-05	1.529E-04	3.390E-02
435	4.112E-02	8.145E-05	2.105E-04	4.198E-02
440	5.217E-02	9.356E-05	3.100E-04	5.326E-02
445	4.444E-02	7.391E-05	2.939E-04	4.464E-02
450	3.584E-02	5.951E-05	2.514E-04	3.557E-02
455	2.936E-02	3.338E-05	2.157E-04	2.916E-02
460	2.731E-02	3.759E-05	2.616E-04	2.706E-02
465	2.391E-02	2.088E-05	2.699E-04	2.366E-02
470	2.345E-02	2.198E-05	3.496E-04	2.350E-02
475	2.421E-02	2.146E-05	4.266E-04	2.429E-02
480	2.316E-02	3.961E-05	6.103E-04	2.299E-02
485	2.545E-02	3.612E-05	1.293E-03	2.481E-02
490	2.566E-02	3.297E-05	2.605E-03	2.324E-02
495	2.118E-02	3.060E-05	4.077E-03	1.702E-02
500	1.864E-02	2.887E-05	6.027E-03	1.262E-02
505	1.634E-02	2.774E-05	7.847E-03	8.489E-03
510	1.525E-02	2.689E-05	9.825E-03	5.289E-03
515	1.489E-02	2.636E-05	1.197E-02	2.868E-03
520	1.479E-02	2.606E-05	1.343E-02	1.327E-03
525	1.487E-02	1.300E-05	1.435E-02	5.451E-04
530	1.530E-02	1.308E-05	1.518E-02	2.090E-04
535	1.835E-02	2.630E-05	1.826E-02	1.050E-04
540	2.352E-02	3.975E-05	2.310E-02	6.614E-05
545	3.085E-02	5.366E-05	3.059E-02	6.697E-05
550	5.372E-02	8.155E-05	5.215E-02	9.499E-05
555	5.931E-02	1.103E-04	5.961E-02	8.261E-05
560	4.292E-02	1.260E-04	4.336E-02	5.590E-05

565	3.088E-02	1.565E-04	3.111E-02	4.261E-05
570	2.577E-02	3.040E-04	2.576E-02	4.336E-05
575	2.911E-02	8.118E-04	2.864E-02	4.421E-05
580	3.379E-02	2.415E-03	3.171E-02	4.521E-05
585	1.959E-02	4.893E-03	1.445E-02	1.541E-05
590	1.113E-02	7.845E-03	3.138E-03	1.576E-05
595	1.133E-02	1.062E-02	6.409E-04	0.000E+00
600	1.295E-02	1.300E-02	1.477E-04	1.649E-05
605	1.362E-02	1.371E-02	5.047E-05	1.689E-05
610	1.312E-02	1.323E-02	3.457E-05	1.736E-05
615	1.237E-02	1.235E-02	1.776E-05	1.784E-05
620	1.153E-02	1.141E-02	1.832E-05	1.840E-05
625	1.084E-02	1.081E-02	1.891E-05	1.899E-05
630	1.058E-02	1.069E-02	0.000E+00	1.965E-05
635	1.040E-02	1.030E-02	2.023E-05	0.000E+00
640	1.010E-02	1.018E-02	2.096E-05	0.000E+00
645	9.628E-03	9.693E-03	0.000E+00	2.180E-05
650	8.989E-03	9.013E-03	2.251E-05	2.261E-05
655	8.408E-03	8.412E-03	2.336E-05	2.346E-05
660	7.975E-03	7.815E-03	4.856E-05	2.438E-05
665	7.475E-03	7.443E-03	5.050E-05	5.072E-05
670	7.268E-03	7.118E-03	7.862E-05	7.896E-05
675	6.955E-03	6.729E-03	8.191E-05	8.226E-05
680	6.491E-03	6.324E-03	1.138E-04	8.570E-05
685	6.114E-03	5.956E-03	1.480E-04	1.189E-04
690	5.636E-03	5.424E-03	1.232E-04	1.238E-04
695	5.046E-03	5.032E-03	1.283E-04	1.288E-04
700	4.563E-03	4.532E-03	1.335E-04	1.341E-04
705	4.105E-03	4.024E-03	1.391E-04	1.048E-04
710	3.535E-03	3.469E-03	1.089E-04	1.094E-04
715	3.313E-03	3.008E-03	1.136E-04	1.140E-04
720	2.722E-03	2.545E-03	1.186E-04	7.941E-05
725	2.235E-03	2.078E-03	8.262E-05	8.297E-05
730	1.826E-03	1.607E-03	8.638E-05	8.674E-05
735	1.373E-03	1.133E-03	4.505E-05	4.524E-05
740	9.695E-04	7.555E-04	4.694E-05	4.714E-05
745	6.276E-04	5.432E-04	4.909E-05	4.930E-05
750	4.526E-04	3.086E-04	0.000E+00	0.000E+00
755	3.149E-04	1.616E-04	0.000E+00	0.000E+00
760	2.193E-04	1.121E-04	0.000E+00	0.000E+00

## 附录 2 RX\_1311 投影仪光谱功率测量数据

单位:  $W/sr \cdot m^2 \cdot nm$

波长(nm)	白场	红场	绿场	蓝场
380	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
385	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
390	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
395	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
400	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
405	5.169E-05	0.000E+00	0.000E+00	5.301E-05
410	4.290E-04	0.000E+00	0.000E+00	4.863E-04
415	1.604E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.768E-03
420	3.793E-03	5.612E-05	5.647E-05	4.004E-03
425	5.760E-03	8.718E-05	8.772E-05	5.960E-03
430	8.401E-03	1.152E-04	1.159E-04	8.682E-03
435	1.186E-02	1.726E-04	1.579E-04	1.230E-02
440	1.550E-02	2.403E-04	2.418E-04	1.592E-02
445	1.113E-02	1.424E-04	1.433E-04	1.098E-02
450	8.534E-03	1.290E-04	1.298E-04	8.548E-03
455	7.236E-03	9.647E-05	9.707E-05	7.209E-03
460	6.698E-03	9.053E-05	1.093E-04	6.612E-03
465	5.811E-03	8.047E-05	1.012E-04	5.877E-03
470	5.718E-03	8.470E-05	1.065E-04	5.692E-03
475	6.093E-03	1.240E-04	1.456E-04	6.017E-03
480	4.472E-03	9.539E-05	1.536E-04	4.335E-03
485	1.996E-03	3.480E-05	2.976E-04	1.712E-03
490	1.209E-03	0.000E+00	9.426E-04	3.060E-04
495	2.260E-03	0.000E+00	2.165E-03	1.944E-04
500	3.191E-03	1.391E-05	3.134E-03	1.411E-04
505	3.555E-03	1.336E-05	3.603E-03	8.133E-05
510	3.920E-03	1.295E-05	3.884E-03	6.569E-05
515	4.081E-03	2.539E-05	4.062E-03	7.726E-05
520	4.234E-03	2.511E-05	4.029E-03	7.640E-05
525	4.100E-03	2.505E-05	3.944E-03	6.351E-05
530	4.425E-03	2.520E-05	4.362E-03	5.113E-05
535	5.990E-03	5.067E-05	6.042E-03	6.425E-05
540	8.206E-03	6.382E-05	8.206E-03	7.768E-05
545	1.471E-02	1.809E-04	1.515E-02	2.097E-04
550	2.571E-02	3.404E-04	2.594E-02	3.984E-04
555	1.829E-02	2.391E-04	1.821E-02	2.830E-04
560	1.124E-02	1.618E-04	1.104E-02	2.052E-04
565	8.648E-03	1.645E-04	8.522E-03	1.807E-04
570	8.566E-03	1.952E-04	8.574E-03	1.980E-04
575	1.376E-02	3.270E-04	1.349E-02	3.462E-04
580	1.070E-02	3.344E-04	9.378E-03	2.655E-04

585	3.765E-03	5.204E-04	2.723E-03	9.049E-05
590	2.226E-03	1.597E-03	6.273E-04	1.542E-05
595	2.703E-03	2.717E-03	1.562E-04	1.575E-05
600	3.100E-03	3.166E-03	4.802E-05	0.000E+00
605	3.338E-03	3.260E-03	1.640E-05	0.000E+00
610	3.512E-03	3.450E-03	1.685E-05	0.000E+00
615	3.745E-03	3.769E-03	1.732E-05	0.000E+00
620	4.126E-03	4.100E-03	1.786E-05	1.801E-05
625	4.242E-03	4.179E-03	1.844E-05	1.859E-05
630	4.126E-03	4.114E-03	1.908E-05	1.923E-05
635	4.149E-03	4.097E-03	1.972E-05	1.988E-05
640	4.219E-03	4.265E-03	2.044E-05	2.060E-05
645	4.161E-03	4.186E-03	2.116E-05	4.267E-05
650	3.884E-03	3.796E-03	4.390E-05	2.213E-05
655	3.582E-03	3.554E-03	2.278E-05	2.296E-05
660	3.421E-03	3.341E-03	4.734E-05	4.773E-05
665	3.195E-03	3.108E-03	4.924E-05	4.964E-05
670	2.838E-03	2.793E-03	5.111E-05	5.152E-05
675	2.303E-03	2.170E-03	2.662E-05	2.684E-05
680	1.827E-03	1.737E-03	2.774E-05	2.796E-05
685	1.617E-03	1.520E-03	2.887E-05	2.910E-05
690	1.447E-03	1.403E-03	6.008E-05	3.028E-05
695	1.291E-03	1.305E-03	3.127E-05	3.152E-05
700	1.184E-03	1.132E-03	3.254E-05	3.281E-05
705	1.000E-03	8.764E-04	3.392E-05	3.419E-05
710	6.959E-04	5.629E-04	0.000E+00	0.000E+00
715	4.354E-04	3.668E-04	0.000E+00	0.000E+00
720	3.032E-04	2.682E-04	0.000E+00	0.000E+00
725	1.584E-04	1.201E-04	0.000E+00	0.000E+00
730	8.279E-05	4.185E-05	0.000E+00	0.000E+00
735	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
740	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
745	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
750	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
755	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
760	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00