

文章编号: 0253-2239(2007)06-1139-6

用阴极射线管显示器研究辨色阈值 I : 实验数据及人眼颜色视觉特性分析*

汪哲弘 徐海松

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 为了研究人眼在辨色阈值水平上的颜色视觉特性,在阴极射线管(CRT)显示器上显示颜色刺激,采用交叉阶梯法进行心理物理实验,在 CIE1976 $a^* - b^*$ 平面上分别测得 3 名色觉正常的观察者在 5 个 CIE 基本颜色中心区域的辨色阈值。采用性能因子 $PF/3$ 讨论观察者的测试精度,并以色度椭圆表示辨色阈值实验结果。通过对实验数据的详细处理和分析表明,在等明度的 $a^* - b^*$ 平面上各色区及各颜色方向上人眼的辨色特性是各向异性的,即 CIE1976 $a^* - b^*$ 平面为非视觉均匀;人眼在 5 个 CIE 基本颜色中心区域上红-绿方向的视觉色差尺度均小于黄-蓝方向。本文的实验结果可为均匀颜色空间及其色差公式的改进和发展提供原始数据和参考依据。

关键词: 视觉与色彩; 辨色阈值; 交叉阶梯法; 色度椭圆; 色觉特性

中图分类号: TN942.1 文献标识码: A

Study on Color Discrimination Threshold Using CRT Display Part I: Analysis of Experimental Data and Human Color Vision Characteristics

Wang Zhehong Xu Haisong

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: In order to research the human color vision characteristics, the color discrimination threshold experiment at the five basic CIE color centers was carried out by a panel of 3 observers with normal color vision on the CIE1976 $a^* - b^*$ plane using CRT-generated color stimuli based on the psychophysical method of interleaved staircase. The observer test accuracy was estimated using performance factor $PF/3$, and the color discrimination thresholds were represented via chromaticity ellipses. The detailed processing and analysis of the experimental results indicated that the color discrimination characteristics of human eyes were different for individual color regions and color directions in the iso-lightness $a^* - b^*$ plane, and namely the CIE1976 $a^* - b^*$ plane is visually non-uniform. The visual color-difference scale in the red-green direction was generally smaller than that in the yellow-blue one for the five CIE color centers. The experimental data could provide references for the improvement of uniform color space and color-difference formula.

Key words: vision and color; color discrimination threshold; interleaved staircase method; chromaticity ellipse; color vision characteristics

1 引 言

1976 年国际照明委员会(International Commission on Illumination, CIE)提出了均匀颜色

空间 CIELAB,极大地改善了色差的均匀性。小色差尤其是辨色阈值一直是颜色工业研究的主要课题,在工业上具有极大的实用价值。因此,研究人眼

* 国家自然科学基金(60578011)资助课题。

作者简介: 汪哲弘(1981-),男,浙江嘉兴人,博士研究生,主要从事颜色科学、图像技术等方面的研究。

E-mail: wangzhehong1981@126.com

导师简介: 徐海松(1966-),男,江苏吴江人,教授,博士生导师,主要从事颜色科学、光度学、色度学、光辐射测量和图像技术等方面的研究。E-mail: chsxu@zju.edu.cn

收稿日期: 2006-08-09; 收到修改稿日期: 2006-10-17

在辨色阈值水平上的颜色视觉特性,对于建立均匀颜色空间和改善各种色差公式具有重要意义。

由于阴极射线管(Cathode Ray Tube, CRT)显示器在视觉实验中的易用性和稳定性^[1~4],在本文的实验研究中,通过对阴极射线管上显示的颜色刺激进行辨色阈值的心理物理实验,通过对测得的辨色阈值数据进行处理和分析,讨论人眼的颜色视觉特性,为研究人眼的颜色视觉机理和改善色差公式提供原始实验数据。

2 实验方案

2.1 实验设备与颜色刺激

在距观察者 500 mm 的彩色阴极射线管显示器 Neso FD570A 上显示颜色刺激。根据假设色度坐标恒定的线性分段插值(Piecewise Linear interpolation assuming constant chromaticity coordinates, PLCC)模型^[5]对阴极射线管显示器进行颜色特性化^[6],产生相应的颜色刺激。3 位观察

者均为浙江大学在读硕士研究生,色觉正常且基本上没有类似观察实验的经验。实验在暗室中进行,采用心理物理实验的交叉阶梯法^[7,8],这种方法主要用于颜色辨别阈值实验,具有对观察者的操作要求较低、测试精度高等优点。

颜色刺激为 4 个位于阴极射线管显示器中央的 $1^\circ \times 1^\circ$ 视角的正方形色块,组成了相互间有一个像素黑线分割的正方形阵列。刺激色样为选定的颜色中心在 CIE1976 $a^* - b^*$ 平面上每隔 30° 共 12 个方向上等间隔分布的颜色。颜色中心为 CIE 推荐的 5 个基本颜色^[9],其 CIELAB 参量如表 1 所示。背景为 $6^\circ \times 6^\circ$ 的方形色块,其颜色与选定的颜色中心相同,如图 1 所示。背景外侧为 $8^\circ \times 8^\circ$ 的白色边框,其亮度值为 100 cd/m^2 ,色品坐标采用 D65 的对应参量。白框用于确定匹配时的白点,使阴极射线管显示器产生的颜色为相关色而非孤立色。颜色刺激色样的视角大小为 2° 左右,因此计算中采用了 CIE1931 标准色度系统。屏幕其余部分显示为黑色。

表 1 5 个测试颜色中心的 CIELAB 色度参量

Table 1 CIELAB chromaticity parameters of the five test color centers

Color centers	Target CIELAB values			Measured CIELAB values			ΔE^*
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	
Gray	61.65	0.11	0.04	61.31	0.26	0.31	0.46
Red	44.38	36.91	23.33	44.09	36.40	22.65	0.89
Yellow	86.65	-6.92	47.15	86.60	-6.99	47.04	0.14
Green	56.09	-32.13	0.44	55.99	-31.36	0.19	0.82
Blue	35.60	4.83	-30.18	35.46	5.50	-30.22	0.69
Mean							0.60

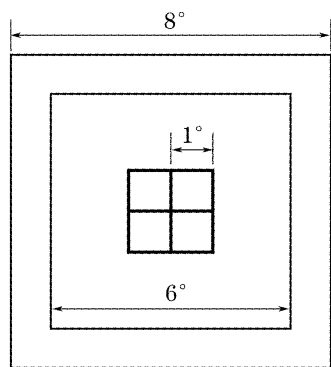


图 1 颜色阈值辨别实验中的测试刺激图样

Fig. 1 Test stimulus arrangement used in the color discrimination threshold experiment

2.2 阴极射线管显示器特性化

在显示器特性化标定前,对显示器的亮度和衬比度进行调节,使显示器白点的相关色温为 6500 K,同时实测白点亮度值为 113.86 cd/m^2 ,黑点亮度值为 0.083 cd/m^2 。为保证阴极射线管显示器的颜色仿

真精度,每天在阴极射线管显示器预热 2 h 后,分上、下午两次对显示器进行特性化标定,并使用 Photo Research 公司的光谱辐射度计 PR-650 对 5 个颜色中心的刺激色样进行测量,测得的 CIELAB 平均参量见表 1。

将实际值与目标值比较,得到相应的 CIELAB 色差(ΔE^*),表征了阴极射线管特性化精度及显示器与测色系统的稳定性,如表 1 所示,可见色差最小值为 0.14 CIELAB 单位,最大为 0.89 CIELAB 单位,平均为 0.60 CIELAB 单位。与国际上发表的相关文献^[1,2,4]比较可知,本文研究的标定结果是可接受和稳定的,可用于辨色阈值实验。

2.3 实验过程

实验开始前,阴极射线管显示器需预热 2 h。实验开始后,首先在全黑屏的情况下经过 3 min 的暗适应,接着在阴极射线管显示器上显示如图 1 的刺激图样并进入 1 min 的亮适应过程,之后正式开

始颜色阈值辨别实验。实验中,每个颜色刺激的观察时间为 2 s,其中包括分别在刺激色样显示之前和之后的两个各 200 ms 的背景色和黑色间隔(black gap)显示过程,故刺激色样的实际显示时间为 1200 ms。在黑色间隔显示期间,背景色和四个方形色块均以黑色覆盖,而白框保持可见,使观察者能对白点完全适应而同时消除对被测颜色刺激的色适应。

每个观察过程中,刺激色样随机显示在其中一个色块上,其他三个色块保持背景色。刺激色样的颜色根据交叉阶梯法的规则确定,所采用的步长由先验性实验测得,使之产生有效的阶梯变化。

观察者的任务是判断与背景色颜色不同的色块的显示位置,并按下键盘上相应的应答按键,观察者的应答将保存当前色样的测试结果并启动下一色样的观察和应答周期。当全部 12 个方向均到达 12 次折返后,此次测试过程结束。每位观察者每天测试不超过 2 次,每次测试过程的时间不超过 30 min,以避免长时间观察产生视觉疲劳。3 名观察者分别对每个颜色中心观察 6 次,这样共有 $3 \times 5 \times 6 = 90$ 组数据,整个实验时间的跨度约 6 个月(包括阴极射线管显示器标定和先验性实验)。

3 实验结果与讨论

3.1 观察者精度

在心理物理实验中,为了评价测试数据的有效性,首先需要分析观察者的测试重复性和准确度。Luo 和 Rigg 采用性能因子 PF 值(Performance Factor)来对两个数据集的一致性进行定量比较,之后 Guan 和 Luo 又将其改进为 $PF/3$ 值^[10],其表达式为

表 2 5 个颜色中心的观察者测试重复性($PF/3$ 表示)

Table 2 Observer repeatability in terms of $PF/3$ for the five color centers

Color centers	Gray	Red	Yellow	Green	Blue	Mean
Observer 1 (CLY)	34	19	26	32	32	28
Observer 2 (HJF)	36	17	18	39	39	29
Observer 3 (ZWH)	31	25	18	32	33	27
Mean	33	20	20	34	31	28

表 3 5 个颜色中心的观察者测试准确度($PF/3$ 表示)

Table 3 Observer accuracy in terms of $PF/3$ for the five color centers

Color centers	Gray	Red	Yellow	Green	Blue	Mean
Observer 1 (CLY)	66	26	41	38	48	43
Observer 2 (HJF)	46	30	33	46	56	42
Observer 3 (ZWH)	36	33	28	47	48	38
Mean	49	29	34	43	50	40

3.2 色度椭圆

辨色阈值实验结果用色度椭圆来表示,是合适

$PF/3 = 100[(\gamma - 1) + V_{AB} + CV/100]/3$, (1)
式中

$$\begin{cases} CV = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_i - fY_i)^2} / \bar{X}, \\ f = \sum X_i Y_i / (\sum Y_i^2), \end{cases} \quad (2)$$

$$\lg \gamma = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\lg \left(\frac{X_i}{Y_i} \right) - \lg \left(\frac{X_i}{Y_i} \right) \right]^2}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} V_{AB} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \frac{(X_i - FY_i)^2}{X_i FY_i}}, \\ F = \sqrt{\sum \frac{X_i}{Y_i} / \left(\sum \frac{Y_i}{X_i} \right)}, \end{cases} \quad (4)$$

其中 CV 为变化量的系数, γ 和 V_{AB} 则给出两个数据集之间的不一致性程度, N 是被比较的色样数据对数, X_i 和 Y_i 分别是第 i 对被比较的两个对应数据。较高的 $PF/3$ 值表示被比较的数据集之间具有较差的一致性,如 $PF/3$ 值为 30 代表被比较的两个数据集之间的一致性为 30%。

取每个观察者对每个颜色中心的 6 次测试数据的平均值作为参照值,可以计算出每个观察者以 $PF/3$ 值表示的测试重复性,如表 2 所示。

以全部观察者对每个颜色中心的测试数据拟合得到相应的色度椭圆^[11],并以各测试颜色方向上的数据作为参照值,可以计算出每个观察者的测试准确度,并用 $PF/3$ 值来表示,如表 3 所示。

从表 2 可知,观察者的测试重复性 $PF/3$ 值最小为 17,最大为 39,平均为 28;由表 3 可见,观察者的测试准确度 $PF/3$ 值最小为 26,最大为 66,平均为 40。与经典实验数据比较^[3,6,12],均在可接受的范围内,因此可以认为此次实验数据是有效的。

和有效的^[1,2,7,10]。色度椭圆表示了对应颜色中心区域的阈值轮廓线,其参量包括长半轴 A 、长短半轴之

比 A/B 、轴向角 θ 以及面积平方根 $\sqrt{\pi AB}$, 实验数据列于表 4 的第 1 组, 对应的色度椭圆如图 2(a)~

图 2(e) 所示, 其中横坐标表示 CIELAB 色晶坐标 a^* 的变化量, 而纵坐标则为 b^* 的变化量。

表 4 辨色阈值色度椭圆参量及与经典实验数据集的比较 ($PF/3$ 表示)

Table 4 Chromaticity ellipse parameters and their comparison with classical datasets in terms of $PF/3$

Data set	Scaling factor	Color centers	A	A/B	θ	$\sqrt{\pi AB}$	$PF/3$
This study	1	Gray	2.25	3.17	114	2.24	
		Red	1.74	1.91	81	2.23	
		Yellow	2.24	2.57	93	2.47	
		Green	1.70	2.15	129	2.05	
		Blue	1.78	3.71	118	1.64	
RIT-Dupont $\overline{\Delta E_{ab}^*} \approx 1.0$	0.68	Gray	1.33	1.53	102	1.90	29.2
		Red	2.39	1.71	37	3.25	30.9
		Yellow	2.13	1.71	78	2.88	20.6
		Green	2.44	1.86	169	3.17	33.9
		Blue	3.43	3.29	119	3.35	4.7
		Mean					
Xu and Yaguchi thresholds	0.72	Gray	2.53	2.98	115	2.60	2.2
		Red	3.19	2.84	76	3.36	13.4
		Yellow	2.80	2.04	92	3.47	8.5
		Green	3.26	3.42	136	3.12	16.4
		Blue	2.11	2.67	110	2.29	19.6
Cui and Luo $\overline{\Delta E_{ab}^*} \approx 1.0$	0.65	Gray	1.12	1.69	109	1.53	23.5
		Red	2.99	2.01	35	3.74	36.4
		Yellow	2.28	1.81	85	3.01	15.0
		Green	2.83	2.17	172	3.41	40.0
		Blue	2.98	3.01	124	3.05	12.2
Mean						25.4	

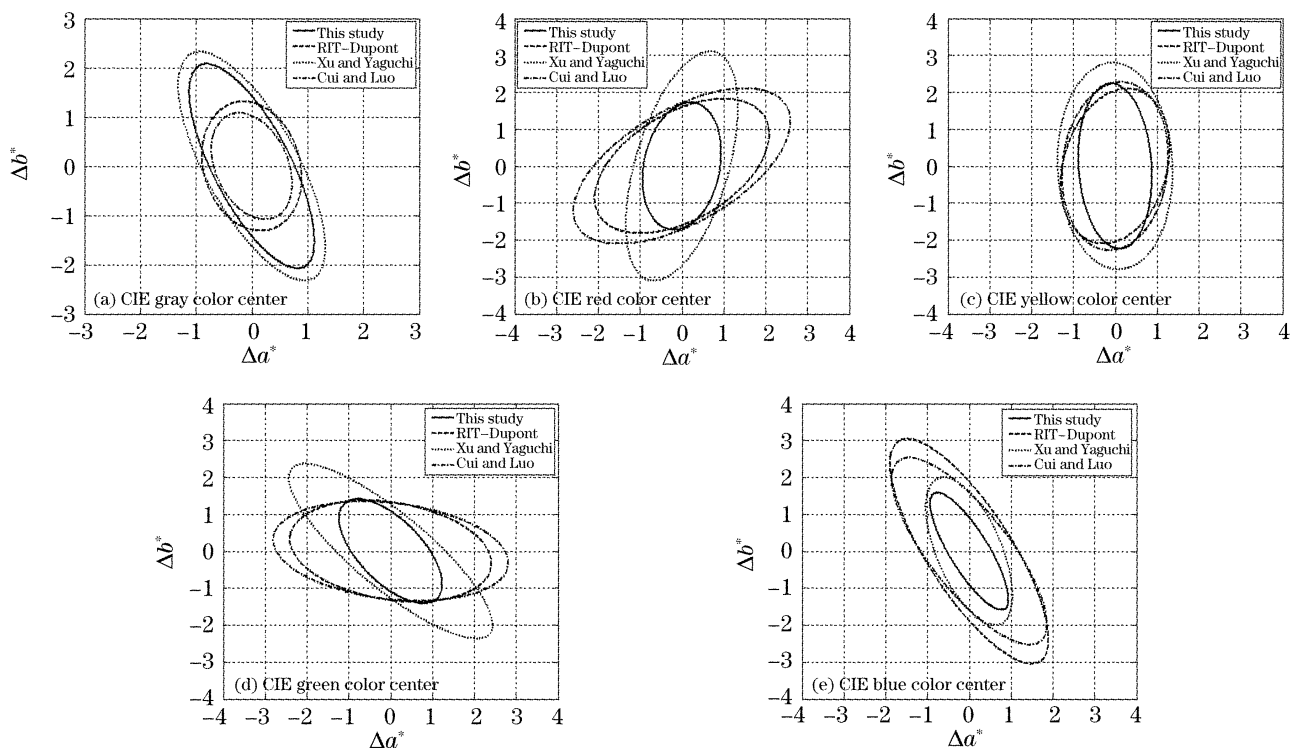


图 2 四个实验数据集的色度椭圆

Fig. 2 Chromaticity ellipses of four datasets

3.3 人眼颜色视觉特性

由图 2 可知,不同观察者对同一颜色中心的色度椭圆参量存在差异,但形状和轴向角大致相同,这是由观察者的颜色视觉特性所决定的。

由表 4 可知,人眼对 5 个颜色中心区域的辨色阈值色度椭圆的形状、大小和朝向均不同,表明 CIE1976 $a^* - b^*$ 平面上各色区之间在整体上并非视觉均匀。除蓝色中心区域的色度椭圆外,其余 4 个颜色中心的色度椭圆长轴都基本指向 $a^* - b^*$ 平面的坐标原点,表明人眼对于蓝色区域的视觉特性与其余 4 个色区存在明显的不一致性。对于每个色区,各颜色方向上的辨色阈值轮廓线均为椭圆而非理想的圆形,说明 CIELAB 颜色空间的等明度 $a^* - b^*$ 平面上各色区内的局部视觉均匀性也不理想。

表 5 5 个颜色中心红-绿方向和黄-蓝方向视觉色差尺度之比较

Table 5 Comparison of visual color-difference scale in red-green and yellow-blue directions for the five color centers

Color centers	Gray	Red	Yellow	Green	Blue
Ratio of $\Delta a^* / \Delta b^*$	0.54	0.54	0.39	0.88	0.59

3.4 与其他研究结果比较

以本文实验数据的色度椭圆为基准,分别与 RIT-Dupont 实验数据(物体色、阈上值、恒常刺激法)^[1]、Xu 等^[7]实验数据(阴极射线管自发光色、阈值、交叉阶梯法)以及 Cui 等^[4]实验数据(阴极射线管自发光色、阈上值、灰标法)进行比较,相应的色度椭圆如图 2(a)~图 2(e)所示。根据各颜色测试方向上的数据,对 5 个 CIE 颜色中心的色度椭圆利用最小二乘法进行整体缩放(Scaling Factor),并用 $PF/3$ 值表示的比较结果列于表 4。

由图 2 和表 4 可知,本研究与 RIT-Dupont 的物体色实验数据比较,绿色中心的 $PF/3$ 最大(33.9),依次为红色(30.9)、灰色(29.2)和黄色(20.6),蓝色中心最小(4.7),平均 $PF/3$ 值为 23.9,表明阴极射线管颜色与物体色实验数据之间具有较好的一致性,可用阴极射线管颜色刺激代替物体色进行视觉实验,增加简便性,降低成本,提高效率。通过与 Xu 等的阴极射线管实验数据比较,蓝色中心的 $PF/3$ 最大(19.6),依次为绿色(16.4)、红色(13.4)和黄色(8.5),灰色中心最小(2.2),平均 $PF/3$ 值为 12.0,可见采用不同特性化方法和不同观察者的阴极射线管辨色阈值实验数据之间具有相当好的重复性,并进一步验证了实验数据的可靠性。通过与 Cui 等的阴极射线管实验数据比较,绿色中心的 $PF/3$ 最大(40.0),依次为红色(36.4)、灰色(23.5)、黄色(15.0),蓝色中心最小(12.2),平均 $PF/3$ 值为

如果用视觉色差尺度来表示具有相同视觉色差值的色样对在 CIELAB 颜色空间中所对应的欧几里得距离,那么对于色度椭圆其短轴方向上的视觉色差尺度小于长轴方向。因此,根据色度椭圆在 a^* 轴(红-绿方向)和 b^* 轴(黄-蓝方向)上的截距之比($\Delta a^* / \Delta b^*$),可知相应红-绿方向和黄-蓝方向的视觉色差尺度之差异,具体的比较结果见表 5。绿色中心的比例最大(0.88),依次为蓝色(0.59)、灰色(0.54)和红色(0.54),最小为黄色中心(0.39),表明在该 5 个颜色区域中 $-a^* \sim +a^*$ 轴上的视觉色差尺度均小于 $-b^* \sim +b^*$ 轴上的相应尺度,并且不同色区的差异也不同,这正是 CIELAB 颜色空间中 a^* 轴与 b^* 轴的欧几里德刻度与人眼视觉辨色特性之间存在非均匀性的具体表现。

25.4,表明阴极射线管阈上值与阈值实验数据之间存在一定差异。

4 结 论

设计并实施了采用交叉阶梯法对 5 个 CIE 基本颜色中心进行辨色阈值测试的心理物理实验,以研究人眼在辨色阈值水平上的颜色视觉特性。实验结果表明,观察者的测试重复性和准确度达到了相关实验的精度,数据可靠有效。通过色度椭圆对辨色阈值数据的表征和分析可知,CIELAB 颜色空间的等明度 $a^* - b^*$ 平面对人眼辨色特性的欧几里德描述,无论是各色区之间的整体上还是每个色区内各颜色方向之间的局部上都是非视觉均匀的;具体而言,人眼在 5 个颜色中心的红-绿方向(a^* 轴)上的视觉色差尺度均小于黄-蓝方向(b^* 轴)。因此,在均匀颜色空间及其色差公式的研究中,必须充分测试和分析人眼的颜色视觉特性,使之真正达到视觉均匀的描述和表征。

参 考 文 献

- 1 Roy S. Berns. Color tolerance feasibility study comparing CRT-generated stimuli with an acrylic-lacquer coating[J]. *Color Res. Appl.*, 1991, **16**(4): 232~242
- 2 Ethan D. Montag, Roy S. Berns. Visual determination of hue suprathreshold color-difference tolerances using CRT-generated stimuli[J]. *Color Res. Appl.*, 1999, **24**(3): 164~176
- 3 Wang Zhehong, Xu Haisong. Lightness threshold evaluation in visual color matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):

1274~1278 (in Chinese)

汪哲弘,徐海松. 颜色视觉匹配中明度阈值的评价[J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1274~1278

4 Guihua Cui, M. Ronnier Luo, B. Rigg et al.. Colour-difference evaluation using CRT colours. Part I: Data gathering and testing colour difference formulae[J]. *Color Res. Appl.*, 2001, 26(5): 394~402

5 David L. Post, Christopher S. Calhoun. An evaluation of methods for producing desired colors on CRT monitors[J]. *Color Res. Appl.*, 1989, 14(4): 172~186

6 Liao Ningfang, Shi Junsheng, Zeng Hua et al.. Analysis of interactive errors in conventional CRT colorimetric prediction model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(1): 133~138 (in Chinese)

廖宁放,石俊生,曾 华 等. 传统阴极射线管色度预测模型的相干误差分析[J]. 光学学报, 2000, 20(1): 133~138

7 Haisong Xu, Hirohisa Yaguchi, Satoshi Shioiri. Correlation between

visual and colorimetric scales ranging from threshold to large color difference[J]. *Color Res. Appl.*, 2002, 27(5): 349~359

8 Haisong Xu, Hirohisa Yaguchi, Satoshi Shioiri. Estimation of colour-difference formulae at color discrimination threshold using CRT-generated stimuli[J]. *Opt. Rev.*, 2001, 8(2): 142~147

9 A. R. Robertson. CIE guidelines for coordinated research on colour-difference evaluation[J]. *Color Res. Appl.*, 1978, 3(3): 149~151

10 S. S. Guan, M. R. Luo. Investigation of parametric effects using small colour-differences [J]. *Color Res. Appl.*, 1999, 24(5): 331~343

11 M. R. Luo, B. Rigg. Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours[J]. *Color Res. Appl.*, 1986, 11(1): 25~42

12 J. H. Xin, C. C. Lam, M. R. Luo. Evaluation of the crispening effect using CRT-displayed colour samples[J]. *Color Res. Appl.*, 2004, 29(5): 374~380



· 广 告 ·

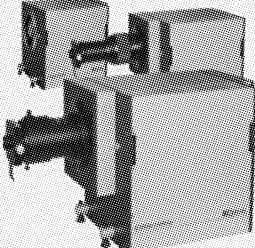


海汇丰实业有限公司
HRT Corporation

www.HRTLaser.com

专业的激光全息解决方案提供商和系统集成商

条纹相机



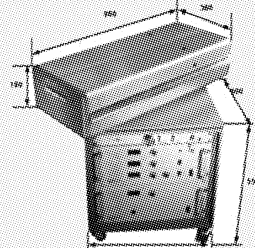
可至2ps的时间分辨率
8-35mm的光阴极
高至4MHz的触发扫描
高至250MHz的同步扫描

全息干板



单色和全色全息材料可选
分辨率大于3000线对/毫米
45%-75%的衍射效率
乳胶颗粒大小8-40纳米

激光器



可同时输出多段波长
TEM00基模辐射
低至20ps的脉冲宽度
最大输出能量120毫焦

主要提供:条纹相机、全息干板、科研级皮秒激光器、超高速CCD相机、光电子设备、全息3D打印机等



HRT — 卓越创新 高效规范

Tel:+86-755-83460 457/597
Fax:+86-755-83460 401
E-mail:sales@hrtlaser.com
www.hrtlaser.com