

文章编号:1002-2082(2015)02-0321-06

半导体激光船舶号灯颜色属性的设计与仿真

吴同飞¹, 朱金善¹, 孙立成², 何庆华¹

(1. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026; 2. 中国船级社, 北京 100007)

摘要:为了提高现行船舶号灯在复杂光环境中的可识别性,更好地保障船舶夜航安全,运用色度学及半导体激光器的发光原理,设计了一种新型船舶号灯。选取长度大于等于50 m的机动船的右舷灯和桅灯为实验对象,在三维实体建模软件(Lighttools)环境下建立右舷灯和桅灯的实体模型,并对这2种号灯的半导体激光器光谱区波长、光谱权重、功率、光线数量、光线追迹阈值等参数进行设置,模拟了不同接收距离处灯光的颜色属性。模拟结果表明:半导体激光号灯右舷灯颜色刺激纯度为1;半导体激光号灯中桅灯光色的色品坐标与参考白光(色品坐标为(1/3, 1/3))接近,二者均符合《国际海上避碰规则》对号灯颜色属性的要求。

关键词:半导体激光器;船舶号灯;Lighttools;颜色属性;色度学

中图分类号:TN248.4

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201536.0207005

Design and simulation of semiconductor laser ship lights' color properties

Wu Tongfei¹, Zhu Jinshan¹, Sun Licheng², He Qinghua¹

(1. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. China Classification Society, Beijing 100007, China)

Abstract: In order to improve the recognizability of ship lights in the complex light environment to better protect the navigation safety of the ship at night, a new type of ship lights was designed according to the colorimetry and the emitting principle of semiconductor laser. Starboard light and masthead light of power-driven vessel with the length of no less than 50 m were selected as experimental objects. Starboard light and masthead light solid models were established in the three-dimensional solid modeling software (Lighttools) environment. Both of the lights' semiconductor laser spectral region, spectral weight, power, rays to trace, relative ray power threshold and other parameters were set to simulate the color properties at different reception distances. The simulation results show that: the color stimuli purity value of semiconductor laser starboard light is 1; the chromaticity coordinates of the semiconductor laser masthead light are close to the reference white (the chromaticity coordinates is (1/3, 1/3)); both of them meet the requirements of the *International Regulations for Preventing Collisions at Sea* for lights color properties.

Key words: semiconductor lasers; ship lights; Lighttools; color properties; colorimetry

收稿日期:2014-10-11; 修回日期:2014-11-16

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(2014025008)

作者简介:吴同飞(1990—),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要从事交通信息工程及控制的研究工作。

E-mail: 512738675@qq.com

通信作者:朱金善(1971—),男,江西九江人,教授,主要从事航海技术的教学与研究。E-mail: zjinshan888@126.com

引言

目前, 船舶上所使用的号灯主要是电气号灯(以下称“普通号灯”), 外加透明或者有颜色的灯罩获得相应光色的灯光, 其灯光光谱成分较为复杂, 色调差, 有色灯光饱和度不高, 在光污染较严重的水域易与其他背景光色相混色, 从而造成号灯识别上的困难, 影响船舶夜航安全^[1]。激光技术自问世以来在许多领域都已经得到了广泛的应用^[2], 尤其是半导体激光器, 产生的激光具有波长覆盖范围广、亮度高、方向性强、单色性好等优点^[3], 因而利用半导体激光器设计制造的新型船舶号灯, 不仅光束质量高、光弧易于控制, 而且光色具有很好的色调和颜色纯度, 有利于提高复杂光环境下船舶号灯的可识别性。半导体激光器输出激光的波长由其所使用的半导体材料的禁带宽度决定^[4], 因此, 只要选择合适的半导体材料就能获得符合船舶号灯颜色属性要求的激光。

1 半导体激光号灯颜色属性的设计

1.1 《国际海上避碰规则》对号灯颜色属性的要求

船舶号灯的色度符合国际照明委员会的标准, 并且《国际海上避碰规则》(以下简称《规则》)规定每种颜色的区域界限是用折角点的坐标表示的, 这些坐标在 CIE1931 色品图(2°视场)中所代表的区域如图 1 所示, 图中偏马蹄形的曲线为光谱色的色品轨迹, E 点代表参考白光^[5]。

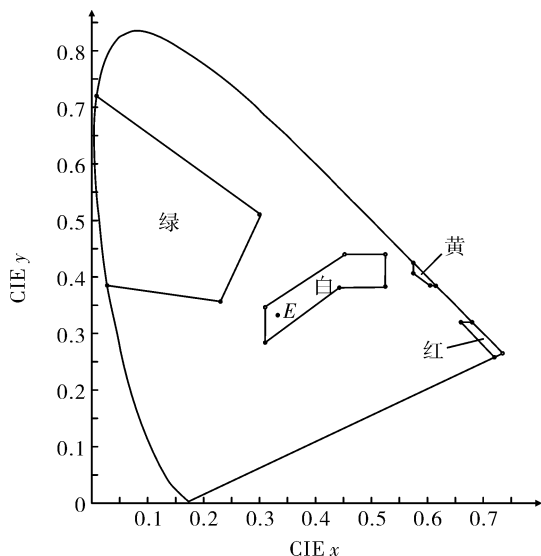


图 1 CIE1931 色品图(2°视场)中《规则》为每种颜色的号灯规定的区域

Fig. 1 Area specified for each color specification of lights in CIE1931 chromaticity diagram (2° FOV) by "COLREGS"

1.2 半导体激光号灯颜色属性的设计方案

1.2.1 左右舷灯及拖带灯颜色属性的设计

考虑到半导体激光器的成本, 本文选取波长为 635 nm(红)、595 nm(黄)和 532 nm(绿)的半导体激光器分别作为船舶左舷灯、拖带灯和右舷灯的光源。其中波长为 635 nm 和波长为 595 nm 的光谱色的色品坐标处在《规则》为号灯的颜色属性规定的区域内; 波长为 532 nm 的光谱色的色品坐标虽然不在《规则》为绿色光规定的颜色属性区域内, 但其与参考白光色品坐标的连线通过该区域, 颜色饱和度比《规则》要求的绿色光更高, 所以本实验选用波长为 532 nm 的半导体激光器作为船舶右舷灯的光源是符合《规则》要求的。

1.2.2 桅灯及尾灯颜色属性的设计

普通的半导体激光器只能激发固定波长的激光, 这种激光的特点是单色性很好, 但是不能得到白色光。人们在实践中发现, 自然界中的各种颜色几乎都可以由 3 种基色按不同比例混合得到。能够匹配所有颜色的 3 种颜色称为三基色, 例如红、绿、蓝即为一组常用的三基色, 利用红、绿、蓝三基色进行混色实验的混色图如图 2 所示, 由该图可知红、绿、蓝三基色以一定比例相加混色可产生白色^[6-7]。

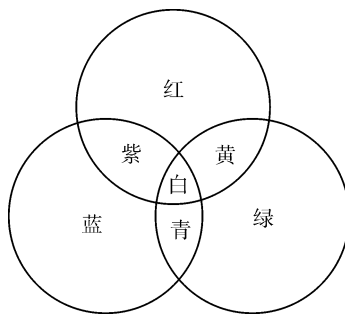


图 2 三基色混色图

Fig. 2 Color mixing figure of three primary colors

如同用红、绿、蓝 3 种颜色可以匹配所有颜色一样, 任何一种光源色都可以用不同波长的光谱色来匹配。由于单个半导体激光器的尺寸很小, 考虑利用空间混色法, 将激光光色分别呈红、绿、蓝三色的 3 种半导体激光器紧密排列作为一个发光单元组, 再将这些发光单元组以阵列的方式集成来设计新型号灯的桅灯和尾灯。类似于观察彩色显像管的荧光屏, 当人眼在一定距离外观察彼此间隔很近的发光单元组内的不同色光时, 由于人眼视觉分辨力的限制(极限分辨角约为 $0.7'$ ~

1^[8])而不能分辨出不同颜色的光点, 感觉到的只能是混合后的颜色效果, 并且这种混色方法能够做到光能量的零损失。将红、绿、蓝三基色的半导体激光器发出的单色光混合成白色光时, 需要考虑 3 种单色激光器的功率配比^[9]。

匹配某种颜色所需三原色的量称为该颜色的三刺激值。在 CIE1931 标准色度学系统中, 颜色的三刺激值是光谱色波长 λ 的函数, 其表达式为^[3]

$$\begin{cases} X = \kappa \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = \kappa \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = \kappa \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 为 CIE 标准色度观察者光谱三刺激值; κ 为调节系数; $\varphi(\lambda)$ 为颜色刺激函数。

对于光源色, 颜色刺激函数等于光源的光谱功率分布 $S(\lambda)$ 。由于 $S(\lambda)$ 、 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 等参数多是以一定波长间隔 $\Delta\lambda$ 的离散值形式给出的, 因此在实际计算时常用求和式代替上面的积分式, 对于光源色, 其三刺激值表达式为

$$\begin{cases} X = \kappa \sum S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = \kappa \sum S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = \kappa \sum S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \quad (2)$$

本文选取波长为 635 nm(红)、532 nm(绿)和 450 nm(蓝)的激光合成参考白光, 根据颜色相加原理, 有参考白光的三刺激值:

$$\begin{cases} X = aX_{635} + bX_{532} + cX_{450} \\ Y = aY_{635} + bY_{532} + cY_{450} \\ Z = aZ_{635} + bZ_{532} + cZ_{450} \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_{635} 、 Y_{635} 、 Z_{635} ; X_{532} 、 Y_{532} 、 Z_{532} ; X_{450} 、 Y_{450} 、 Z_{450} 分别为合成白色光的各单色激光的三刺激值; a 、 b 、 c 为比例系数, 它们的比值等于各单色激光的功率比 P_R 、 P_G 、 P_B 。

在 CIE1931 标准色度系统色品图中, 参考白光的色品坐标^[10]为

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} = \frac{1}{3} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} = \frac{1}{3} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} = \frac{1}{3} \end{cases} \quad (4)$$

联立(2)~(4)式可求得合成参考白光时各单色激光的功率比 $P_R : P_G : P_B = 14.723 : 9.695 : 6.583$ 。

2 半导体激光号灯的仿真过程

2.1 右舷灯的仿真过程

本实验采用美国 Optical Research Associates (ORA) 公司开发的三维实体建模软件 Lighttools 进行仿真模拟。对于左右舷灯和拖带灯, 光色均为单色光, 发光原理大致相同, 本文以长度大于等于 50 m 的机动船的右舷灯为例进行仿真模拟。选用波长为 532 nm 的可见绿光半导体激光器作为新型号灯右舷灯的光源, 为满足《规则》对号灯发光强度的要求, 经计算, 在明视觉环境下, 使用的半导体激光器的总功率至少应为 8.74 mW。控制半导体激光器发散角为 7.5° , 半导体激光器的使用既要保证号灯在要求的水平光弧和垂直光弧范围内光强分布尽量均匀, 又不能使号灯的结构过于复杂, 因此考虑将 18 个单管功率为 0.6 mW 的半导体激光器等间距集成在一个半圆环外表面上, 半圆环外表面半径为 4.58 cm, 内表面半径为 3.58 cm, 厚度为 1 cm, 宽 2 cm, 外表面 112.5° 角对应的弧长为 9 cm。半导体激光器的发射方向以不同角度向 Y-Z 平面倾斜, 并且相对于 Y-Z 平面左右对称, 相对于 X-Z 轴平面上下对称。

由于右舷灯中作为发光单元的半导体激光器的发光波长完全相同, 故在 Lighttools 环境下对它们进行统一设置。设置各激光器光谱区波长为 532 nm, 光谱权重为 1; 设置号灯整体发光光线数量为 3×10^7 条, 光线追迹阈值为 0.01, 以满足实验精度的要求。分别在 0.1 n mile、1 n mile 和 3 n mile 距离处建立平面接收器, 经 Lighttools 仿真模拟后在不同距离处接收到光线的颜色三角形如图 3~图 5 所示, 各模拟实验的错误峰值均在 5% 以内。

2.2 桅灯的仿真过程

由前述号灯设计原理可知, 对于桅灯和尾灯, 二者的发光原理相同。这里以桅灯为例说明其颜色属性的仿真过程。在 Lighttools 环境下建立的桅灯模型与右舷灯类似, 不同的是用圆心角为 225° 的扇形圆环代替半圆环, 并将 12 个发光单元组在桅灯模型上单排等间距集成。桅灯发光单元组由波长为 635 nm、532 nm 和 450 nm 的半导体激光器

组成,3种半导体激光器发出的激光经空间混色后呈现出白色,因此应分别设置这3种激光器。在Lighttools环境下设置3种激光器的光谱区波长分别为635 nm、532 nm和450 nm,光谱权重均为1;根据前文计算的结果,设置3种半导体激光器的功率分别为14.723 mW、9.695 mW和6.583 mW;设置每组发光单元光线数量为 2×10^5 条,光线追迹阈值为0.01。分别在0.1 n mile、3 n mile和6 n mile距离处建立平面接收器,经Lighttools仿真模拟后在不同距离处接收到光线的颜色三角形如图6~图8所示,各模拟实验的错误峰值均在5%以内。

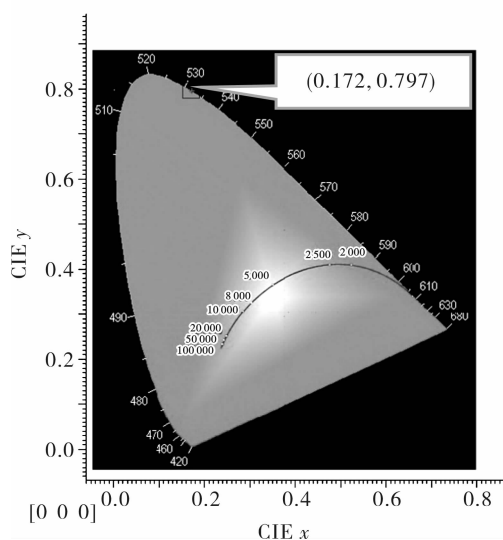


图3 右舷灯灯光颜色三角形(0.1 n mile)

Fig. 3 Light color triangles of starboard light (0.1 n mile)

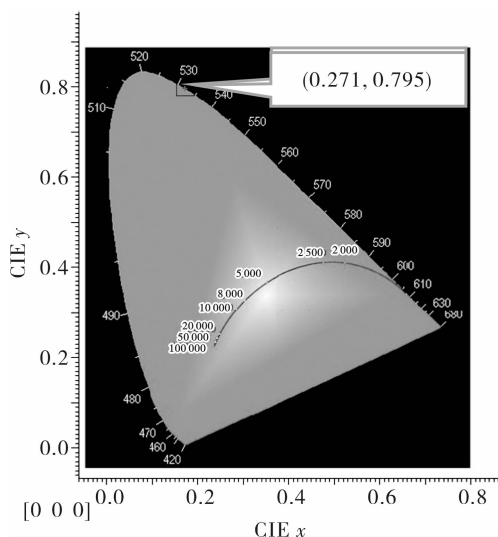


图4 右舷灯灯光颜色三角形(1 n mile)

Fig. 4 Light color triangles of starboard light (1 n mile)

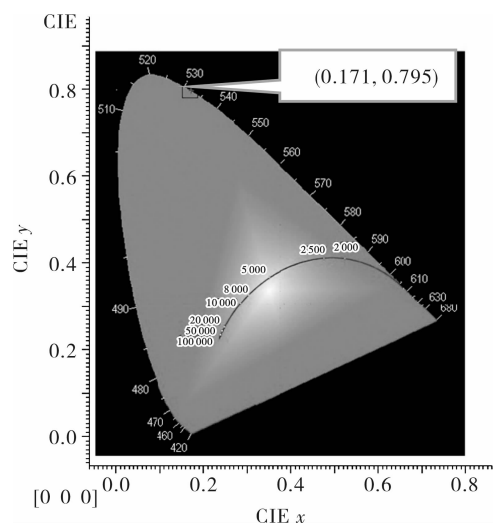


图5 右舷灯颜色三角形(3 n mile)

Fig. 5 Light color triangles of starboard light (3 n mile)

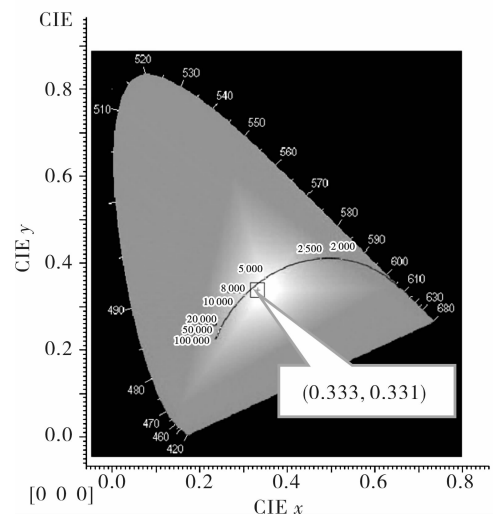


图6 桅灯颜色三角形(0.1 n mile)

Fig. 6 Light color triangles of masthead's light

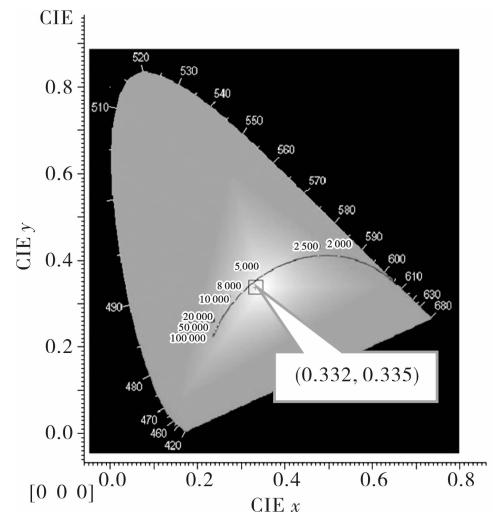


图7 桅灯灯光颜色三角形(3 n mile)

Fig. 7 Light color triangles of masthead light (3 n mile)

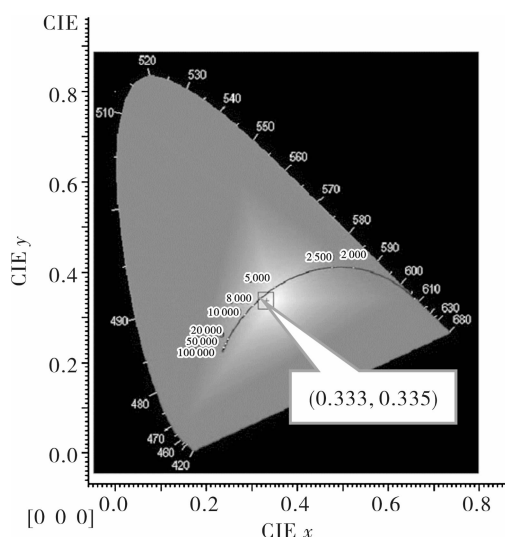


图8 桅灯灯光颜色三角形(6 n mile)

Fig. 8 Light color triangles of masthead light (6 n mile)

3 仿真结果分析

颜色纯度表示某种颜色接近主波长光谱色的程度,可以用刺激纯度来表示,即把颜色看作光谱色与参考白光以一定比例混合后的混合色,将光谱色的三刺激值总和与混合色三刺激值总和的比值定义为颜色的刺激纯度。颜色刺激纯度 P_e 的表达式为

$$P_e = \frac{X_\lambda + Y_\lambda + Z_\lambda}{X + Y + Z} \quad (5)$$

式中: X_λ 、 Y_λ 和 Z_λ 为颜色所包含的主波长光谱色三刺激值; X 、 Y 、 Z 为颜色的三刺激值。

由图3~图5可知,半导体激光号灯右舷灯光色的色品坐标(图中矩形的中心)并不处在《规则》为绿色光规定的颜色属性区域内,而是处于光谱色色品轨迹上,其与参考白光点的连线通过该区域。根据(5)式计算得此新型号灯的颜色刺激纯度为1,这样高的颜色刺激纯度是普通号灯所难以达到的。

分析图6~图8可知,半导体激光号灯桅灯的颜色品坐标处于《规则》为白色光颜色属性规定的区域内。由于在航海实践中,普通号灯大多使用白炽灯作为桅灯的光源,人眼观察此类船舶号灯时其光色多呈弱黄色,但本文模拟的新型号灯色品坐标(图中标示的坐标值)与参考白光的色品坐标(1/3, 1/3)相接近,因此本新型号灯比普通号灯的光色更加接近标准白色。

分析图3~图8可知,新型号灯无论是右舷

灯还是桅灯,灯光光色的色品坐标在色品图中几乎维持不变,这表明本新型号灯的颜色属性几乎不会随接收距离的增加而发生改变。

综上所述,本新型号灯满足《规则》对船舶号灯颜色属性的要求。

4 结论

本文设计的新型船舶号灯选取波长为635 nm、595 nm和532 nm的半导体激光器分别作为船舶左舷灯、拖带灯和右舷灯的光源;选取由波长为635 nm、532 nm和450 nm的单元组而组成的半导体激光器作为桅灯和尾灯的光源,实现了《规则》所要求的船舶号灯颜色属性。以右舷灯与桅灯为例,在Lighttools环境下的仿真结果表明:新型号灯右舷灯的颜色刺激纯度为1,新型号灯桅灯的光色比普通号灯更加接近标准白色;新型号灯的颜色属性几乎不会随接收距离的增加而发生改变;两组仿真实验的错误峰值均在5%以内。

参考文献:

- [1] Zhu Jinshan, Sun Licheng, Dai Ran, et al. Sea light pollution and some amending proposals for the current international regulation for preventing collisions at sea[J]. Navigation of China, 2006(2):29-33.
朱金善, 孙立成, 戴冉, 等. 海上光污染及对现行《国际海上避碰规则》的修改意见[J]. 中国航海, 2006(2):29-33.
- [2] Zhang Biao, Gao Wei, Yang Zhaojin, et al. Miniaturization of laser pumped by high-power LD array[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(4):703-706.
张彪, 高玮, 杨照金, 等. 高功率LD阵列泵浦激光器小型化研究[J]. 应用光学, 2009, 30(4):703-706.
- [3] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] Yang Ye. The disquisitions of high-brightness high-power laser diode[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2011.
杨晔. 高亮度大功率半导体激光器研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [5] Wu Zhaolin, Zhao Yuelin. Collision avoidance and watchkeeping[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2008.

- 吴兆麟,赵月林. 船舶避碰与值班[M]. 大连:大连海事大学出版社,2008.
- [6] Zheng Zhihua. Research on the technique of the information process of large screen laser display system [D]. Taiyuan:North University of China, 2006.
- 郑志华. 大屏幕激光显示系统信息处理技术研究[D]. 太原:中北大学,200.
- [7] Zhang Jie, Yu Min, Zhang Tao, et al. Circuit controlled light source system of RGB LED[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6):1047-1052.
- 张杰,余敏,张涛,等. 全色彩 RGB 灯电控光源设计研究[J]. 应用光学,2012,33(6):1047-1052.
- [8] Zhou Liwei, Liu Yuyan. Target detection and recognition[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002.
- 周立伟,刘玉岩. 目标探测与识别[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.
- [9] Tian Zhihui, Liu Weiqi, Wei Zhonglun, et al. The colorimetry in laser display[J]. Microcomputer Information, 2008,24(3):241-243.
- 田志辉,刘伟奇,魏忠伦,等. 激光显示中的色度学研究[J]. 微计算机信息,2008,24(3):241-243.
- [10] Zhang Hao, Xu Haisong. Comparative study of correlated color temperature algorithm for lighting sources [J]. Optical Instruments, 2006, 28(1): 98-102.
- 张浩,徐海松. 光源相关色温算法的比较研究[J]. 光学仪器,2006,28(1):98-102.