

基于夜视车载平显的亮度感知模型研究

赵晓枫¹, 刘长青¹, 蔡伟^{1,2,3*}, 魏银鹏¹

¹火箭军工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025;

²光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009;

³西安电子科技大学, 陕西 西安 710071

摘要 研究了在夜间暗环境下驾驶员读取夜视车载平显(HUD)信息的亮度感知特点,建立了不同照度环境下驾驶员使用夜视车载 HUD 的亮度调节模型。在环境光仿真系统中,实验设备采用显示亮度可手动调节的夜视车载 HUD,实验对象为 100 名驾驶员,设置多档实验照度,在各档照度条件下研究驾驶员认读夜视车载 HUD 信息的最低亮度、适宜亮度和最高亮度。对实验数据进行统计分析,建立了亮度调节曲线和驾驶员亮度感知模型,同时总结了夜间暗环境下驾驶员认读夜视车载 HUD 的亮度规律。该模型能够为夜视车载 HUD 自动亮度调节的工程设计优化提供定量参考,并提高其人机交互的效能和用户体验。

关键词 机器视觉; 车载平显; 亮度曲线; 感知模型; 人机工效

中图分类号 TN27 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.121501

Research on Brightness Perception Model Based on Night Vision Vehicle Head up Display

Zhao Xiaofeng¹, Liu Changqing¹, Cai Wei^{1,2,3}, Wei Yinpeng¹

¹ State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology,

Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025, China;

² Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang, Henan 471009, China;

³ Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract The brightness perception characteristics of the night vision vehicle head up display (HUD) information which read by the driver in the dark environment at night are studied to build the brightness adjustment model of the night vision vehicle HUD in different illumination conditions. The specific experimental system is set up to simulate different illumination conditions in which 100 drivers are chosen to evaluate the values of the minimum brightness, optimum brightness and the maximum brightness of the HUD information. The experimental data is statistically analyzed, the brightness adjustment curve and the driver brightness perception model are both presented, and the brightness law of the driver's reading the night vision vehicle HUD under the dark environment is subsequently summarized. The experimental results show that the proposed model can be used as the quantitative reference for the engineering design optimization of the night vision vehicle HUD and improve the efficiency and user experience of human-computer interaction.

Key words machine vision; vehicle head up display; brightness curve; perception model; ergonomics

OCIS codes 150.0155; 330.4595; 330.5370

收稿日期: 2017-06-18; **收到修改稿日期:** 2017-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(41404022)、陕西省自然科学基金(2015JM4128)、光电控制技术重点实验室和航空科学基金联合资助(201551U8008)

作者简介: 赵晓枫(1979—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事兵器发射理论与技术方面的研究。

E-mail: xife_zhao@163.com

* 通信联系人。E-mail: 464078834@qq.com

1 引言

平视显示器(HUD)简称平显,是目前普遍运用在航空器上的飞行辅助仪器。基于夜视传感器增强现实的车载 HUD(夜视车载平显)作为驾驶辅助仪器与机载 HUD 工作原理相似,采用准直成像方式,可将行驶路况(红外、微光以及红外微光融合图像)、环境和车况等信息图像准直显示于驾驶员眼前的组合镜上^[1],与外景重合叠加,具有真实感强,信息迭加方便,符合人生理和心理需求等优点,可增强驾驶员夜间驾驶时对环境与路况的感知^[2],提高在特殊条件下驾驶车辆的安全性。目前车载平显的设计和开发已成为国际的发展趋势,并且已在部分高端民用汽车和特种车辆上得到了初步应用。

显示亮度是平显系统人机工效评价的一项重要指标^[3],其直接影响驾驶员对显示信息的观察读取^[4]。机载 HUD 必须能够提供所有可预测的周围背景条件下的可用显示,包括亮度为 34000 cd/m^2 的太阳光照以及灯光稀少的夜间跑道下的显示。目前,对机载座舱显示环境的研究表明,在外界环境光的影响下,飞行员调节显示器字符亮度时存在规律性,在一定程度上符合韦伯-费希纳对数定律^[5]。由于夜视车载 HUD 主要是在夜间暗环境下使用,需要较高的调光敏感性,还会遇到对面车辆灯光照射等明暗环境变化的情况,与机载 HUD 的使用环境在亮度上存在较大区别。因此,研究夜视车载 HUD 在夜间暗环境下的适宜显示亮度,建立夜视车载 HUD 亮度感知模型,可减小驾驶员使用夜视车载 HUD 的生理、心理负荷^[6],显著提高驾驶员夜间驾驶时的人机工效^[7]。

在夜视车载 HUD 驾驶员亮度感知模型的研究中,根据史蒂文斯亮度定律,考虑驾驶员的人眼光适应规律和 HUD 显示亮度的环境自适应变化,需要开展人机工效实验。本文以特种车辆驾驶员为测试对象,针对夜视车载 HUD 亮度显示特性,建立 HUD 亮度调节模型。探讨了驾驶员群体在夜间暗环境下对夜视车载 HUD 显示亮度的适应规律,开展了夜视车载 HUD 驾驶员调光实验,根据实验数据建立夜间暗环境下驾驶员-HUD 亮度曲线模型,为夜视车载 HUD 的人机工效优化设计提供依据。

2 夜视车载 HUD 亮度感知实验

2.1 实验环境搭建

夜视车载 HUD 亮度感知实验对光照环境的要求较高,需要封闭的室内测试环境来评估夜视车载 HUD 在不同光照环境下的可读性和易辨性。目前国内开展光照环境仿真研究的单位较少,比较有代表性的是浙江大学和一些军工单位。但大多数单位都是使用新闻灯或放映灯来搭建简易的测试环境。

本实验依托光电控制技术重点实验室的环境光仿真系统进行,该系统由散射穹顶、天空环境光投射系统、直射光投射系统、测量系统、控制系统、环控系统和转台组成,能够模拟从黑夜到白天的各种典型光照环境(如云层反射光、天空漫射光、直射阳光和月光)。通过转台的配合,控制不同数量、不同位置的投射灯来模拟不同强度、不同角度的阳光和月光光照。

使用环境光仿真系统模拟从黄昏到夜间的环境光变化。黑夜的照度值为 $0.02 \sim 0.30 \text{ lx}$,阴天室内照度值为 $5 \sim 50 \text{ lx}$ 。同时考虑夜间驾驶可能出现的其他车辆灯光照射(一般车辆使用的前照灯光源为 3200 lm 的氙灯),模拟环境光照射到 HUD 组合镜的照度变化范围控制在 $0.1 \sim 3200 \text{ lx}$ 。考虑人眼对环境照度变化的视觉感受存在可辨别的最小阈值^[8],设定实验照度调节差值为 2 倍,在实验照度 $0.1 \sim 3200 \text{ lx}$ 的区间内设置 16 个实验档位。

实验设备采用显示亮度可手动调节的夜视车载 HUD。根据 GJB302-1987 标准规定显示图像和字符,如图 1 所示,图像字符的格式为黑体或 bank gothic,字符大小为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,红外微光融合伪彩图像。由于平显具有很宽的背景亮度适应范围,其工作背景可以是月光下的昏暗地面,也可以是阳光下的眩目白云,其亮度范围为 $1 \sim 34000 \text{ cd/m}^2$ ^[9]。可用亮度旋钮手动调节 HUD 的显示亮度,调节范围为 $0 \sim 30000 \text{ cd/m}^2$ 。

实验过程中,夜视车载 HUD 置于环境光仿真系统中央,驾驶员座位置于实验台正前方,如图 2 所示。

使用照度计(CL-500A, Konica Minolta, 日本)检测实验环境照度。照度计检测口置于 HUD 表面,用于检测 HUD 表面的环境光照度。车载 HUD 表面积约为 300 cm^2 ,面积较小,在实验前的预测量中,HUD 各点间的照度差也较小(小于 1.5 倍),根据人眼对环境照度变化的视觉感受特性^[8],可将 HUD 表面视为均匀

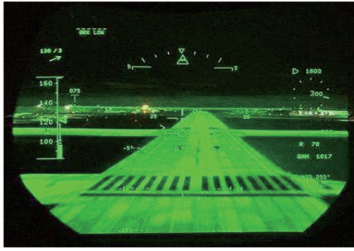


图1 夜视车载 HUD 亮度测试示意图
Fig. 1 Brightness test diagram of night vision vehicle HUD

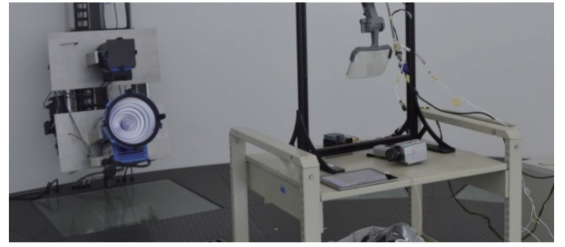


图2 夜视车载 HUD 实验示意图
Fig. 2 Experimental diagram of night vision vehicle HUD

照度表面。

采用亮度计(CS-100A)检测夜视车载 HUD 的显示亮度。亮度计检测口置于 HUD 前方,用于检测 HUD 字符图像的显示亮度。为保证亮度测量值真实有效,每次测量结果取 HUD 字符 3 个随机测量点显示亮度的算术平均值,若各测量点的测量误差过大,则重新测量直到误差在允许范围之内。

2.2 测试对象

根据实验需求,挑选出 100 名驾驶员作为测试对象,测试对象满足以下条件:裸眼视力正常且不低于 1.5,拥有正常的色觉和光照变化适应明暗功能,年龄在 25~40 岁,具有 5~15 年丰富驾驶经验。

2.3 实验流程

在上述照度可控的环境光仿真系统中进行实验。在此之前,由工作人员向驾驶员介绍实验流程及注意事项,并进行两次预实验使驾驶员熟悉实验目的和具体流程。

先对 16 档模拟环境光照度进行检测,检测无误后开始实验。由工作人员逐级改变环境光照度,让驾驶员以最快速度调节夜视车载 HUD 的显示亮度,使 HUD 中的字符图像清晰可见,测出最低显示亮度、适宜显示亮度以及耐受的最高显示亮度,并在各亮度条件下认读工作人员随机指定的字符。工作人员对各档照度下驾驶员的认读结果和 HUD 显示亮度进行记录,若字符图像认读错误则视为失败。

3 结果分析

使用 SPSS 软件对实验数据进行统计分析,包括各照度条件下,驾驶员调节的最低显示亮度、适宜显示亮度和最高显示亮度,分析了驾驶员亮度调节的分布规律及个性化差异,讨论了照度对驾驶员亮度调节的影响,并建立了环境光照度与 P10、P50、P90 百分位(P5、P50、P95 分别代表统计后的第 5 百分位、第 50 百分位、第 95 百分位的实验数据)驾驶员亮度调节的关系曲线和调光模型。

3.1 HUD 亮度适应曲线

通过对 100 名驾驶员的实验,得到 16 档照度条件下共 4800 个亮度调节数据。对实验结果进行统计,得出照度与亮度调节的关系,如表 1 所示,并建立驾驶员 3 类调节亮度与环境照度关系曲线,如图 3 所示。

对 100 名驾驶员的实验数据进行一维方差分析,结果表明:

1) 100 名驾驶员的调光数据, $F(99,4700)=2.358, P>0.05$ (F 代表 F 检验中显著性差异水平, P 代表检验水平, P 越小说明差异越显著),由于每名驾驶员的生理需求不同,其亮度调节数据存在一定的个性化差异,但是差异不特别显著。

2) 16 档照度条件下, $F(15,4784)=58.34, P<0.001$,驾驶员调节出的亮度数据之间存在显著差异,说明驾驶员的调光数据受不同环境照度的影响较大。

3) 驾驶员调节出的最低亮度、适宜亮度和最高亮度之间存在显著性差异, $F(2,4797)=60.58, P<0.001$ 。

表 1 驾驶员调光实验记录

Table 1 Experimental record of driver adjusted the light

Order number	Illumination condition /lx	Minimum brightness $\bar{x} /(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	Optimum brightness $\bar{x} /(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	Maximum brightness $\bar{x} /(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$
1	0.1	7.35	22.68	165.42
2	0.2	9.47	27.24	184.56
3	0.4	12.63	32.02	191.88
4	0.8	15.45	38.25	215.19
5	1.5	19.64	46.56	239.91
6	3	23.79	54.33	258.67
7	6	25.96	63.83	296.76
8	12	30.25	78.01	354.58
9	25	39.19	100.72	429.93
10	50	57.78	141.07	544.20
11	100	108.53	221.33	735.72
12	200	198.42	408.15	1089.56
13	400	328.60	699.51	1597.14
14	800	614.25	1231.09	2563.47
15	1600	1192.71	2161.74	4053.31
16	3200	1993.36	3297.20	5318.16

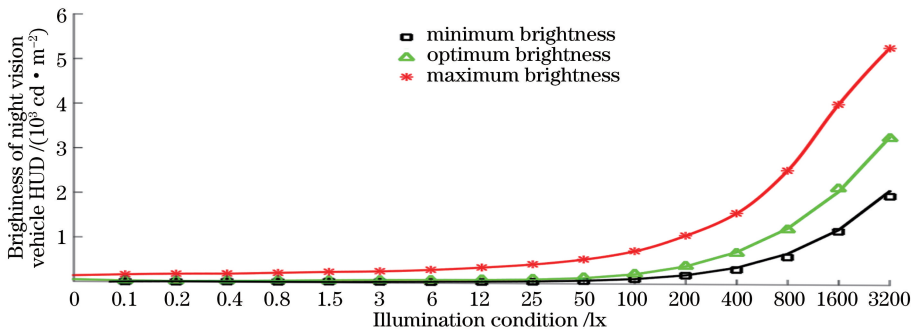


图 3 驾驶员调节的亮度与环境照度关系图

Fig. 3 Relationship between the driver adjusted the brightness and illumination condition

3.2 驾驶员调光分布曲线

在不同的照度条件下,研究驾驶员最低、适宜、最亮 3 类调光亮度的分布特点。取同一照度条件下的调光数据,以 HUD 亮度区间为横坐标,区间分布人数为纵坐标,分别构建 48 组柱形统计图。图 4 为 50 lx 照度条件下适宜亮度分布柱形图。

分析各组柱形统计图可知,各照度条件下驾驶员的最低、适宜和最亮调光数据大致服从正态分布,因此 HUD 的适宜显示亮度在一个区间范围而非单个数值。为满足大部分驾驶员的适应需求,建立最低、适宜和最亮 3 类调光数据的 P5、P50、P95 百分位数据曲线(适宜度达到 90%),如图 5 所示。

4 车载 HUD 亮度感知模型

由重复测量的实验数据组内和组间方差可知,环境照度对驾驶员使用夜视车载 HUD 的调节亮度存在显著性影响。在传统心理物理学中,韦伯-费希纳采用对数函数来表示人类感受量和外界刺激物理量的关系。但是在现代心理物理学中,史蒂文斯通过使用数量估计法得到了大量的实验数据并据此来研究刺激强度与感觉量的关系,实验表明,心理量随刺激量的幂函数的上升而上升。Rudd 等^[10]研究指出,孤立表面的亮度与表面照度的关系可用史蒂文斯幂定律表示,幂指数约为 1/3。陈硕等^[11]对界面亮度设置的优化应用

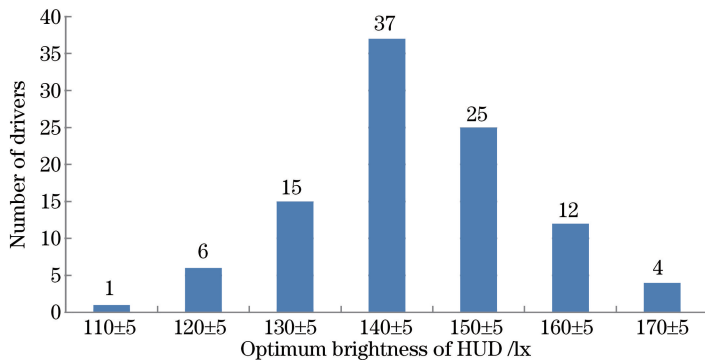


图 4 50 lx 照度条件下适宜亮度分布柱形图

Fig. 4 Optimum brightness distribution column chart under the illumination condition of 50 lx

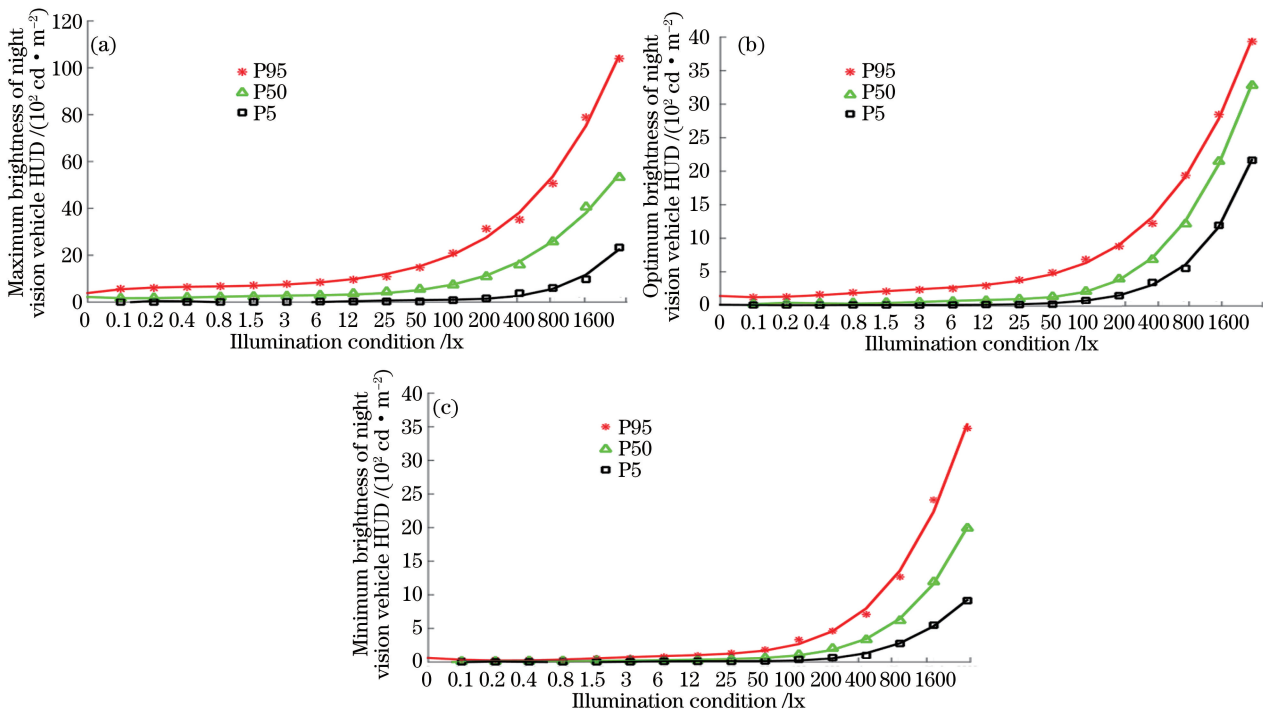


图 5 不同调光数据曲线。(a)最高亮度；(b)适宜亮度；(c)最低亮度

Fig. 5 Curves of different dimming data. (a) Maximum brightness; (b) optimum brightness; (c) minimum brightness

研究表明,史蒂文斯幂函数能拟合人眼亮度对比的实验模型,符合人眼的视觉认知特点。经过研究验证发现,在驾驶员使用夜视车载 HUD 时,环境照度(外界刺激强度)与 HUD 调光亮度也符合史蒂文斯幂函数关系,即:

$$L = aI^b, \tag{1}$$

式中 I 为夜视车载 HUD 表面环境照度,单位为 lx; L 为夜视车载 HUD 的显示亮度,单位为 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$; a 、 b 分别为幂函数的拟合参数。

使用 16 档照度环境下驾驶员的 3 类调光亮度数据(取 P50 百分位值)对幂函数模型进行参数拟合,并进一步挑选 3 名驾驶员对建立的感知模型进行验证,拟合与验证结果如表 2、3 和图 6 所示。实验数据拟合度均高于 99%,3 名驾驶员的验证拟合度均高于 95%。根据史蒂文斯亮度定律所构建的幂函数模型 $L = aI^b$ 可以对驾驶员的 3 类调光亮度数据进行高精度拟合。

表 2 亮度调节模型参数估计值与拟合度

Table 2 Estimation and fitting degree of parameters of brightness adjustment model

Brightness adjustment type	Parameter estimation		Fitting degree of model	
	a	b	R square	Adjusted R square
Minimum brightness	2.515	0.8283	0.9985	0.9984
Optimum brightness	9.928	0.7214	0.9975	0.9973
Maximum brightness	70.57	0.5383	0.9909	0.9903

表 3 亮度调节模型拟合度验证

Table 3 Fitting test of brightness adjustment model

Item	Group	Minimum brightness	Optimum brightness	Maximum brightness
		$a = 2.515, b = 0.8283$	$a = 9.928, b = 0.7214$	$a = 70.57, b = 0.5383$
R square	1	0.9725	0.9877	0.9964
	2	0.9875	0.9941	0.9980
	3	0.9962	0.9819	0.9905
Adjusted R square	1	0.9561	0.9630	0.9682
	2	0.9637	0.9826	0.9945
	3	0.9824	0.9682	0.9776

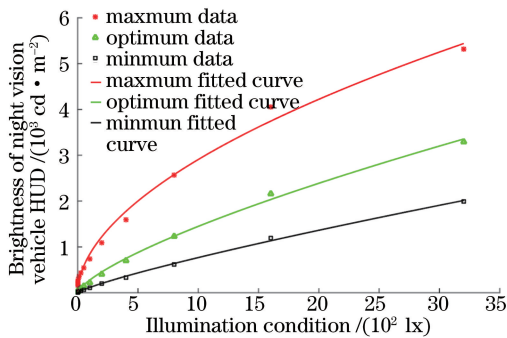


图 6 夜视车载 HUD 亮度感知模型曲线

Fig. 6 Model curves of brightness perception of night vision vehicle HUD

分析图 6 中的拟合曲线可知:1) 人眼对于 HUD 亮度的可接受域随着环境照度的升高逐渐增大,但是增大趋势会逐渐变缓;2) 环境照度较低时,HUD 亮度调节的增加趋势差异较大,随着环境照度的升高,HUD 亮度的增加趋势逐渐放缓并趋于一致,有利于保护人眼。

5 结 论

平显和红外、微光夜视技术在汽车上的设计与开发已成为国际发展的一种趋势,并且在部分高端民用汽车和特种车辆上已得到初步应用。夜视车载 HUD 的亮度自适应调节是指在外界环境照度变化时,自主调节 HUD 的显示亮度,以适应驾驶员对 HUD 信息的视觉感知要求,降低驾驶员夜间驾驶的生理和心理负荷,提高驾驶的安全性。

研究以夜视车载 HUD 亮度显示特性为对象,通过建立人机工效实验,探讨驾驶员群体在夜间暗环境下对于夜视车载 HUD 显示亮度的适应规律,根据实验数据分析建立了夜间暗环境下驾驶员-HUD 亮度曲线和亮度感知模型。研究表明,驾驶员调节的最高、适宜和最低 3 类显示亮度都随环境照度的增高而增加,符合幂指数小于 1 的幂函数模型。此模型可作为夜视车载 HUD 自动亮度调节优化设计的定量参考,使夜视车载 HUD 更好地适应驾驶员夜间驾驶的视觉需求,降低驾驶员的心理和生理负荷,从而提高夜视车载 HUD 的人机工效。

参 考 文 献

- [1] Wang Li, Shang Xiaoxing, Wang Ying. Development of low-light level night vision [J]. Laser & Optoelectronics

- Progress, 2008, 45(3): 56-60.
- 王丽, 尚晓星, 王瑛. 微光夜视仪的发展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(3): 56-60.
- [2] Liu Lei, Qian Yunsheng, Qiu Yafeng, *et al.* Field experiment on the performance of LLL night vision instrument for drive with laser illuminator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 361-364.
- 刘磊, 钱芸生, 邱亚峰, 等. 激光助视/微光夜间驾驶仪设计及野外试验[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 361-364.
- [3] Zhang Yong, Jin Weiqi. Subjective assessment method of night vision fusion image quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 528-532.
- 张勇, 金伟其. 夜视融合图像质量主观评价方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 528-532.
- [4] Li Shanshan, Wang Qi, Feng Xingle. A novel quality metric based on luminance and contrast model for image fusion [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(6): 061001.
- 李珊珊, 王琦, 冯兴乐. 基于亮度和对比度模型的图像融合质量评估标准[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(6): 061001.
- [5] Lü An, Li Feng. Research on adaptive adjustment algorithm of airborne display brightness[J]. Avionics Technology, 2016, 47(2): 5-10.
- 吕岸, 李峰. 机载显示器亮度自适应调节算法研究[J]. 航空电子技术, 2016, 47(2): 5-10.
- [6] Zhu Xiangbing, Cui Haitian, Qian Liyong, *et al.* Study on night vision compatible backlight module of LED liquid crystal display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 091203.
- 朱向冰, 崔海田, 钱立勇, 等. 夜视兼容的LED液晶显示器背光模组的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091203.
- [7] Liu Hongman, Guo Tao. Helmet-mounted display with night vision capability[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s2): 583-588.
- 刘红漫, 郭涛. 具有夜视功能的头盔显示器[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(s2): 583-588.
- [8] Yang Zhiliang. Experimental psychology[M]. Zhejiang Education Publishing House, 2009: 285-297.
- 杨治良. 实验心理学[M]. 浙江教育出版社, 2009: 285-297.
- [9] Xie Jianying, Wang Xiaolong, Lü Jun, *et al.* On luminance and line width of HUD symbols[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(8): 68-72.
- 谢建英, 王晓龙, 吕骏, 等. 平视显示器字符亮度与线宽研究[J]. 光电与控制, 2014, 21(8): 68-72.
- [10] Rudd M E, Popa D. Stevens' s brightness law, contrast gain control, and edge integration in achromatic color perception: a unified model[J]. Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Visio, 2007, 24(9): 2766-2782.
- [11] Chen Shuo, Zhang Feng, Shen Mowei. Brightness perceptive user model based on simultaneous brightness contrast phenomena[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(5): 822-826.
- 陈硕, 张锋, 沈模卫. 基于同时亮度对比现象的亮度感知用户模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(5): 822-826.