

## 平视显示器字符亮度与线宽研究

谢建英<sup>1</sup>, 王晓龙<sup>1</sup>, 吕骏<sup>2</sup>, 柴晓蕾<sup>1</sup>, 王灵刚<sup>1</sup>

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471023;

2. 中国航空工业集团公司成都飞机设计研究所, 成都 610041)

**摘要:** 平视显示器字符的亮度、线宽是决定其显示性能优劣的重要参数, 良好的字符显示特性决定了平显在高强度外界光或漆黑深夜等环境下的字符可视性及观察舒适程度, 因此, 对平视显示器字符显示的发光光谱、时间特性、亮度分布、线宽等特性进行了分析与测试。测试表明, 平显为周期 20 ms 的脉冲式发光, 其线亮度分布为高斯分布, 平显字符亮度随眼盒内观察位置不同和视场角度不同而存在一定差异。研究结果为平显字符显示性能的提高及相应指标测试提供了理论基础。

**关键词:** 平视显示器(HUD); 光谱; 线宽; 亮度

**中图分类号:** V271.4; TN141.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)08-0068-05

## On Luminance and Line Width of HUD Symbols

XIE Jian-ying<sup>1</sup>, WANG Xiao-long<sup>1</sup>, LÜ Jun<sup>2</sup>, CHAI Xiao-lei<sup>1</sup>, WANG Ling-gang<sup>1</sup>

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471023, China;

2. Chengdu Aircraft Design Institute, AVIC, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The luminance and line width of HUD symbols are important for the display performance of a HUD. The symbol characteristics determine the visibility and comfort level in observation under all-weather environment, including high intensity light of the outside and dark of the night. The emission spectrum, time characteristics, luminance distribution, line width and other characteristics of the HUD were analyzed and tested. The analysis shows that: 1) The HUD symbol is 20 ms cycle pulsed light, and the luminance presents Gaussian distribution; and 2) The symbol display luminance of a HUD varies with eye box position and field angle. This article provides a theoretical basis for improvement of the symbol characteristics and test of the symbol display luminance and line width.

**Key words:** Head-Up Display(HUD); spectrum; line width; luminance

### 0 引言

平视显示器(简称平显)是飞机座舱内的主显示器,是现代飞机重要的座舱电/光显示器和显示人机界面<sup>[1]</sup>。平显采用阴极射线管(CRT)像源,随机偏转扫描,以电子束高速轰击荧光粉使其发光的方式在CRT显示屏上生成相应字符画面,通过准直光学系统后,形成与CRT上发光位置相对应的平行光束,投射到驾驶员眼中,使驾驶员看到聚焦于无穷远处的字符显示虚像,与座舱外景/目标重叠在一起,驾驶员能同时观看机内各个状态的显示信息和真实外景/目标信息。

平显字符的亮度、线宽等显示特性是决定平显显示性能优劣的关键因素之一,良好的字符显示特性决定了平显在高强度外界光/漆黑深夜等环境下的字符可视性及观察舒适程度<sup>[2]</sup>。近年来,飞机、武器及火控系统 etc 对平显显示性能的要求不断提高,因此,对平显字符亮度和线宽特性的研究就显得尤为迫切和必要。

文献[2]对平显亮度的要求和实现平显高亮度的技术途径进行了分析论述;文献[3-8]对CRT像源的部分显示特性进行了相关研究和论述,但是,目前国内尚未有文献资料对平显字符亮度和线宽特性展开专题研究。

平显亮度和线宽特性主要由CRT像源亮度和线宽特性及准直光学系统成像特性决定,本文在对CRT像源字符亮度和线宽特性分析的基础上,对平显字符显示的发光光谱、时间特性、亮度分布、线宽等特性进行了分析、测试及归纳总结,为平显字符亮度和线宽性

收稿日期:2014-05-19

修回日期:2014-06-09

作者简介:谢建英(1971—),女,浙江绍兴人,硕士,高工,研究方向为机载瞄准显示。

能的提高和相应指标测试提供了理论基础。

### 1 平显字符显示原理

平显字符显示原理如图 1 所示。平显驱动电路部分生成进场、着陆、导航、作战等字符画面的 CRT 驱动电信号。CRT 将电信号转换为 CRT 荧光屏上按空间分布、亮度随电信号强弱而变化的像荧光信号。经光学系统内多个透镜的折射、反射后，准直成像于飞行员正前方无穷远处。

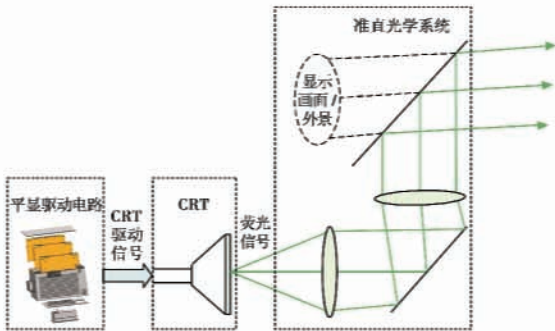


图 1 平显字符显示原理  
Fig. 1 Display principle of HUD symbol

### 2 CRT 字符显示特性

#### 2.1 CRT 发光光谱

用 OL770-NVG 分光光谱仪分别对国内平显常用的 P1 粉 CRT、P53 粉 CRT 的发光光谱进行了测试，得到图 2 所示 P1 粉 CRT 发光光谱，其峰值波长为 524.7 nm，主波长为 534.0 nm，色纯度为 0.823，色温 7236 K。P53 粉 CRT 发光光谱如图 3 所示。

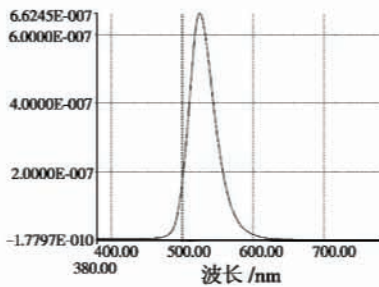


图 2 CRT(P1 粉) 发光光谱  
Fig. 2 CRT(P1) spectrum

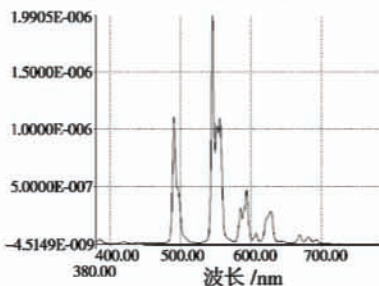


图 3 CRT(P53 粉) 发光光谱  
Fig. 3 CRT(P53) spectrum

图 3 中，峰值波长为 545.3 nm，主波长为 558.8 nm，色纯度为 0.733，色温 5121 K，除主峰外存在多个次峰。

#### 2.2 CRT 发光的时间特性

CRT 每 20 ms 完成一帧字符画面显示，字符画面刷新率为 50 Hz。CRT 荧光粉具有余辉特性，即电子束轰击荧光粉时，荧光粉的分子受激而发光，而当电子束的轰击停止后，荧光粉的发光并非立即消失，而是按指数规律衰减。余辉时间指电子束停止轰击后，亮度下降到其初始值的 10% 时经历的时间<sup>[3-5]</sup>。国内平显 CRT 常采用的荧光粉中，P1 粉 CRT 余辉时间为 19 ms；P53 粉 CRT 余辉时间为 12~15 ms，综上所述可得出如图 4 所示的 CRT 发光的时间特性曲线<sup>[6]</sup>。

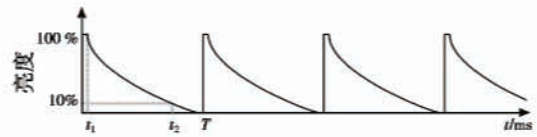


图 4 CRT 发光的时间特性曲线

Fig. 4 The CRT glowing characteristic curve

从图 4 中可看出，CRT 发光为周期性光脉冲，重复周期 T 为 20 ms，余辉时间为 t<sub>2</sub> - t<sub>1</sub>。

#### 2.3 CRT 显示线亮度分布及线宽特性

CRT 电子束截面的电流密度分布近似为高斯分布，当 CRT 电子束在荧光屏上扫描出一条光迹，形成一条显示线，显示线横截方向的亮度分布也近似为图 5 所示的高斯分布<sup>[7]</sup>

$$L(r) = L_0 \exp(-r^2/2\sigma^2) \quad (1)$$

式中：L<sub>0</sub> 为显示线中心亮度；r 为距显示线中心距离；σ 为标准差；L(r) 为距显示线中心 r 处的显示亮度。CRT 的线宽指 50% 峰值亮度处亮度分布的宽度。参考国内平显常用 CRT 的规格参数表可得出，国内常用平显 CRT 的最大峰值亮度不小于 34000 cd/m<sup>2</sup>，在最亮状态下线宽一般不超过 0.15 mm<sup>[8-9]</sup>。

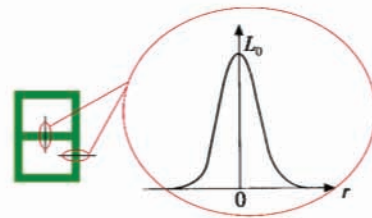


图 5 CRT 显示线横截方向的亮度分布

Fig. 5 The brightness distribution of the CRT display line cross section

### 3 平显字符显示特性

#### 3.1 平显发光光谱

用 OL770-NVG 分光光谱仪分别对某常光平显(采

用 P1 粉 CRT)、某衍射平显(采用 P53 粉 CRT)的发光光谱进行了测试,得到图 6 所示某常光平显发光光谱,其峰值波长为 526.8 nm,主波长为 536.9 nm,色纯度为 0.840,色温 7015 K。常光平显光学系统设计光谱带宽为可见光范围,其发光光谱与 CRT 像源发光光谱基本相同。

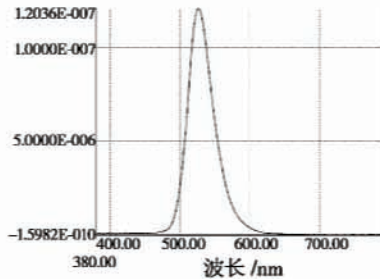


图 6 某常光平显(P1 粉)发光光谱  
Fig. 6 Spectrum of an ordinary HUD (P1)

某衍射平显发光光谱如图 7 所示,其峰值波长为 546.0 nm,主波长为 544.8 nm,色纯度为 0.961,色温 6406 K。由于衍射平显采用的全息膜仅对中心波长  $\pm 10$  nm 内光线具有高反射率,P53 粉 CRT 发光光谱中主峰外的多个次峰光线基本不被反射进入人眼观察范围。

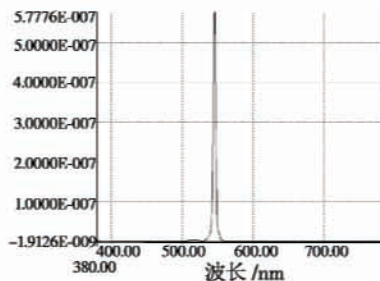


图 7 某衍射平显(P53 粉)发光光谱  
Fig. 7 Spectrum of a diffraction HUD (P53)

### 3.2 平显字符显示的时间特性

在不超过 3 mrad 的字符线横截方向发光范围内,平显光学系统的光程可近似为一个常数,由此可得出经光学系统后平显所成字符虚像的时间特性与 CRT 字符显示发光的时间特性基本相同,如图 4 所示,为周期性光脉冲,重复周期  $T$  为 20 ms,余辉时间为  $t_2 - t_1$ 。

### 3.3 平显字符亮度分布特性

CRT 上的显示线经过光学系统后形成一组与 CRT 上发光位置相对应的平行光束,假定与  $r_i = 0$  对应的显示线平行光束的空间角为  $\theta_0$ ,与  $r_i$  对应的显示线平行光束的空间角为  $(\theta_0 + \theta_i)$ ,由于光学系统因反射、吸收、散射、渐晕等而造成一定的光能损失,存在以下亮度对应关系

$$\begin{cases} L'(\theta_0) = \tau L(0) \\ L'(\theta_0 + \theta_i) = \tau L_0 \exp \frac{-r_i^2}{2\sigma^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $L'(\theta_0)$  为字符虚像显示线中心光束的亮度; $L'(\theta_0 + \theta_i)$  为与字符虚像显示线中心光束成  $\theta_i$  夹角的光束亮度; $\tau$  为光学系统透过率,其取值范围约在 20% ~ 35% 之间,在不超过 3 mrad 的字符线横截方向发光范围内,光学系统透过率  $\tau$  可近似视为一个常数。

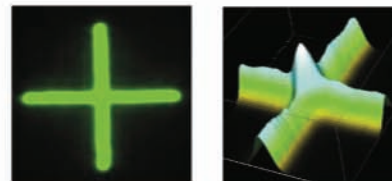
假定在不超过 3 mrad 的字符线横截方向发光范围内,光学系统焦距为  $f$ ,则有: $\theta_i \approx \tan \theta_i = r_i/f$ ,则  $r_i \approx f\theta_i$ 。将其代入式(2)得到  $L'(\theta_0 + \theta_i) = \tau L_0 \exp \frac{-r_i^2}{2\sigma^2} = \tau L_0 \cdot \exp \frac{-(f\theta_i)^2}{2\sigma^2} = \tau L_0 \exp \frac{-\theta_i^2}{2(\sigma/f)^2}$ 。设  $L'_0 = \tau L_0$ ,  $\sigma' = \sigma/f$ ,则有

$$L'(\theta_0 + \theta_i) = L'_0 \exp \frac{-\theta_i^2}{2\sigma'^2} \quad (3)$$

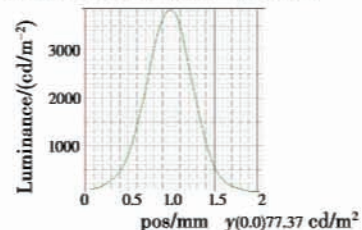
式中: $L'_0$  为字符虚像显示线中心光束亮度; $\theta_i$  为距显示线中心夹角; $\sigma'$  为标准差; $L'(\theta_0 + \theta_i)$  为与显示线中心光束成  $\theta_i$  夹角的光束亮度。

由式(3)可知,平显字符线虚像横截方向的亮度也近似为高斯分布。

用 CCD 式亮度计对平显十字线发光亮度进行了实测,测试结果如图 8 所示。测试结果验证了上述平显字符线亮度为高斯分布的推论。



a 被测十字线及其亮度三维分布图



b 十字线上横截面上亮度分布图

图 8 平显十字线发光亮度分布示意图

Fig. 8 The HUD glowing characteristic curve

### 3.4 平显字符显示亮度特性衡量指标

对平显字符显示亮度特性进行衡量的基本指标为:字符亮度和字符线宽。

文献[10]规定:宜在 50% 的峰值点上规定并测量线宽,因为这是共同遵守的惯例并最容易测量。文献[11]中对平显的字符线宽要求为:在字符亮度为

3400 cd/m<sup>2</sup> 条件下,通过组合镜在 50% 峰值亮度点上测得的字符线宽度为 1 ± 0.3 mrad。国内军用标准中对平显字符线宽定义为 50% 峰值亮度处的亮度分布的夹角,如图 9 所示,  $L'(\theta_1) = L'(\theta_2) = 50\% \cdot L'_0$ , 线宽 =  $\theta_2 - \theta_1$ 。

文献[12]中对平显字符亮度测量的相关规定为: HUD 的光度测量通常使用点光度计,点光度计的测量张角应覆盖 60% 的平显字符线宽。1980A 光谱光度计即为符合上述要求的光度计,其可测斑点张角为 2' (0.6 mrad)。进行亮度均匀性测试时,光度计的入射孔径应减小到大约 6 mm。即平显的字符亮度是指 60% 字符线宽范围内的亮度平均值,并非字符显示线的峰值亮度  $L_0$ ,如图 9 所示。

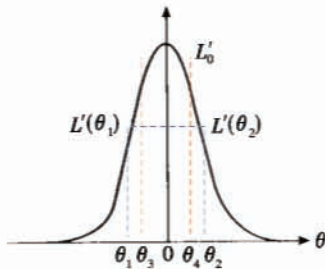


图 9 平显字符线宽及亮度定义

Fig. 9 The definition of HUD linewidth and luminance

$$L' = \frac{1}{\theta_4 - \theta_3} \int_{\theta_3}^{\theta_4} L'(\theta) d\theta \quad (4)$$

式中:  $L'$  为平显的字符亮度;  $L'(\theta)$  为亮度的角度函数;  $\theta_4 - \theta_3 = 0.6 \cdot$  线宽。

根据人眼的视觉特性和塔尔博特 - 普拉赛定律 (Talbot-Plateau Law): 对于重复频率在临界闪烁频率以上的光脉冲,人眼不再感觉到闪烁,此时人眼主观亮度感觉<sup>[4-5]</sup>为

$$L = \frac{1}{T} \int_0^T L(t) dt \quad (5)$$

式中:  $L$  为人眼主观亮度感觉;  $L(t)$  为光脉冲亮度的时间函数;  $T$  为重复周期。即人眼对平显字符线发光的主观亮度感觉应为重复周期 20 ms 内的亮度均值。

综上所述,平显字符亮度宜规定为至少 1 个重复周期内、字符线峰值亮度两侧 ± 0.3 mrad (2') 范围内的字符线亮度均值,作为业内共同遵守约定,以使该值具有相同的定义和较好的测量重复性。

### 3.5 平显字符亮度、线宽测量

#### 3.5.1 字符线宽测量

利用平显字符亮度线宽测量系统,对某平显字符线宽进行了测试。测试时先将平显字符亮度调节至 3400 cd/m<sup>2</sup> 左右,表 1 为某台平显在设计眼位处测得的字符亮度、线宽测试数据,为对该产品亮度均匀性进行评估,选取视场内多个点进行了测试。

表 1 某平显线宽测试结果

Table 1 The linewidth test result of HUD

序号	测试点/(°)		线宽/ mrad	亮度/ (cd · m <sup>-2</sup> )	线宽测试 有效性判定
	X	Y			
1	0	0	0.87	4089.63	
2	4	0	0.87	4146.97	
3	8	0	0.91	3230.33	有效
4	0	-2	0.81	4006.76	
5	0	2	0.92	3804.48	
6	0	-4	0.84	3718.33	
7	0	4	0.87	4115.17	
8	0	-6	0.84	3200.95	
9	0	6	0.89	3074.48	
10	0	-8	0.82	2511.97	
11	0	8	0.90	3522.41	有效
12	7	5	0.93	3102.98	
13	7	-5	0.91	3016.75	
14	4	-8	0.90	2510.00	

测试时很难将待测字符亮度正好调节到 3400 cd/m<sup>2</sup>, 从多次测试经验来看,可将字符亮度控制在 (3400 ± 170) cd/m<sup>2</sup> 内,对线宽测试结果基本无影响。表 1 中的测试数据剔除掉超出上述范围的数据,可得到 2 组有效字符线宽测试数据。从最终判为有效的 2 组测试数据可看出,该平显字符线宽在 0.90 ~ 0.91 mrad 之间。

#### 3.5.2 字符亮度测试

利用 PR-1980B 光度计/光谱辐射度计,对某平显的最大字符亮度进行了测试。测试时亮度计置于设计眼位处,选用 2' 的测量孔径,测量时通过转动手轮带动光度计的 2' 测量孔径扫过被测线横截面,目视观察所测数据,找出移动过程中的最大值即得到被测线亮度值。表 2 为某平显在设计眼位处测得的字符亮度测试数据。

表 2 某平显设计眼位处亮度测试结果

Table 2 Luminance test result of a HUD on DEP

序号	测试点/(°)		测量亮度/ (cd · m <sup>-2</sup> )
	X	Y	
1	-2	0	7100
2	-4	0	8020
3	-6	0	6920
4	-8	0	6700
5	0	0	5400
6	0	-2	6780
7	0	-6	5300

利用平显字符亮度线宽测量系统,在眼盒内不同位置处对某平显亮度进行了测试。测试时以眼盒中心为 (0,0,0) 点, Z 向以机头方向为正,测量系统亮度计分别置于设计眼位及其左、右、上、下、前、后相应距离处,对视场内 (0°, 0°)、(2°, 0°)、(0°, -2°) 点进行亮度测试。表 3 为某平显在眼盒内不同位置处测得的字符亮度测试数据。

表 3 某平显眼盒内不同位置处亮度测试结果  
Table 3 Luminance test result of a HUD at different points in eye box

序号	测试位置/mm			亮度/( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )		
	X	Y	Z	( $0^\circ, 0^\circ$ )	( $2^\circ, 0^\circ$ )	( $0^\circ, -2^\circ$ )
1	0	0	0	8668	8426	6334
2	31	0	0	9088	8878	6528
3	-14	0	0	8924	8685	6445
4	0	20	0	6797	6625	6003
5	0	-20	0	6184	7264	7288
6	0	0	50	7921	7650	6271
7	0	0	-25	8812	8512	6648

从上述测试数据可看出,平显亮度因眼盒内观察位置和视场角度而异,具有不均匀性:在同一观察位置处观察时,平显内不同视场处字符亮度有一定变化;在眼盒内不同位置观察视场内同一字符时,字符亮度也有一定变化。

从平显字符显示原理分析可知:平显亮度不均匀性是由 CRT 发光不均匀性、光学系统存在拦光、渐晕、部分镀膜角度选择性反射等现象造成,后续将对此现象开展更进一步的分析研究。

#### 4 结论

本文在 CRT 字符显示特性分析的基础上,对平显字符的显示特性进行了研究和测试,测试结果与理论推导的基本一致,并对二者的差异性进行了分析,不仅为平显字符显示性能的提高和相应指标测试提供理论基础,而且指出了下一步的研究方向。

#### 参考文献

- [1] 王立伟,汪健甄. 国外军用飞机平视显示器的发展[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(9): 578-582.  
WANG L W, WANG J Z. Development of HUDs on military aircraft in advanced countries[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(9): 578-582.
- [2] 李春亮. 平视显示器字符的亮度研究[J]. 电光与控制, 1997, 4(3): 39-46.  
LI C L. The research on the luminances of HUD Symbols [J]. Electronics Optics & Control, 1997, 4(3): 39-46.
- [3] 邹家祥. 荧光屏的余辉特性[J]. 真空电子技术, 1986(2): 59-61.  
ZOU J X. Afterglow characteristics of the phosphor screen [J]. Vacuum Electronics, 1986(2): 59-61.
- [4] 李文峰,顾洁,赵亚辉,等. 光电显示技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.

- LI W F, GU J, ZHAO Y H, et al. Optoelectronic display technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [5] 俞斯乐. 电视原理[M]. 5 版. 北京:国防工业出版社, 2000:12-18.  
YU S L. TV principles[M]. 5th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2000:12-18.
- [6] 何健. 解析显示器的 CRT 技术[J]. 黑龙江科技信息, 2007(13): 65.  
HE J. Parsing CRT technology of display [J]. Heilongjiang Science & Technology Information, 2007(13): 65.
- [7] 李军建,成建波,蒋泉. CRT 投影管分辨率测试仪[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(2): 198-200.  
LI J J, CHENG J B, JIANG Q. A resolution measurement instrument for CRT projection tube [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(2): 198-200.
- [8] 张本余. 平视显示器用的阴极射线管[J]. 电光与控制, 1983(1): 44-47.  
ZHANG B Y. The cathode ray tube of HUD [J]. Electronics Optics & Control, 1983(1): 44-47.
- [9] 国防科学技术工业委员会. GJB 3578-1999. 机载阴极射线管显示器光度和色度测量方法[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 1999.  
COSTIND. GJB 3578-1999. Photometric and colorimetric measurement procedures for airborne cathode ray tube displays [S]. Beijing: Military Standard Publishing Department of COSTIND, 1999.
- [10] 国防科学技术工业委员会. GJB/Z 1016-2004. 机载电/光显示器设计指南[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 2004.  
COSTIND. GJB/Z 1016-2004. Design guidelines for electronically/optically generated airborne displays [S]. Beijing: Military Standard Publishing Department of COSTIND, 2004.
- [11] 国防科学技术工业委员会. GJB 189A-2003. 飞机平视显示/武器瞄准系统通用规范[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 2003.  
COSTIND. GJB 189A-2003. General specification for the head-up display/weapons aiming system of aircraft [S]. Beijing: Military Standard Publishing Department of COSTIND, 2003.
- [12] SAE. ARP5287, Optical measurement procedures for airborne Head Up Display (HUD) [S]. The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space, 1999.