

基于 PJND 的平视显示器可读性评价方法

王治山^{1,2}, 李洁², 冯朝坤², 郭晓光²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 为了研究环境亮度、背景色度变化以及干扰(镜面反射、漫反射和眩光)对平视显示器可读性的影响,通过对最小可辨差异(PJND)理论的研究,结合平视显示器及应用环境特点,建立了基于 PJND 的平视显示器可读性评价模型。仿真及实验结果表明:可用 PJND 值来评价平视显示器的可读性;为满足可读性,随着环境亮度变大,亮度对比度应该逐渐减小,低亮度环境下对亮度对比度的要求大于高亮度环境;背景色度与目标色度差异越大,可读性对亮度对比度的要求越低;环境亮度不变、干扰值变大时,可通过增大亮度对比度来满足可读性,干扰值超过一定范围,可通过物理遮挡来满足可读性。

关键词: 平视显示器; PJND 理论; 可读性评价模型; 背景变化; 环境干扰

中图分类号: V241.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)02-0069-06

Readability Evaluation of Head-Up Display Based on PJND

WANG Zhi-shan^{1,2}, LI Jie², FENG Chao-kun², GUO Xiao-guang²

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: To study the impacts of environment luminance, chromaticity of background and interferences (including specular reflection, diffuse reflection and glare) on the readability of Head-Up Display (HUD), a readability evaluation model was established based on Perceptible Just Noticeable Difference (PJND) theory by taking the characteristics of HUD and its environment into consideration. Simulations and experiments result shows that: 1) The value of PJND can be used for evaluating the readability of HUD; 2) Low-luminance environment has a higher luminance contrast requirement than high-luminance environment; To satisfy the readability, the HUD needs to lower the luminance contrast when the ambient luminance increases; 3) The bigger the difference between background chromaticity and object chromaticity, the lower the requirement to luminance contrast; and 4) When the environment luminance is constant and the interferences increase, a higher luminance contrast can be used to satisfy the readability; when the interference luminance is beyond the maximum, physical occlusion is a way to satisfy the readability.

Key words: Head-Up Display (HUD); PJND theory; readability evaluation model; background changing; environment inference

0 引言

平视显示器(HUD)简称平显,作为重要的座舱显示设备,可读性是评价其性能最直观的标准^[1]。长期

以来,国内都以亮度对比度作为评价平显可读性的主要标准。工程经验中认为白天环境下,平显显示亮度对比度达到 1.3 即可保证平显良好的可读性。但随着环境亮度的变化,尤其是低亮度环境下(夜间环境下)显示设备的亮度对比度应该如何变化,并未进行过深入研究。国外,英国 BAE 系统公司的科技人员首先应用 PJND(Perceptible Just Noticeable Difference)理论来评价座舱液晶显示器在阳光下的可读性^[2-5]。英国阿伯泰大学的 WOLF D C 博士在宝马汽车显示系统的可

收稿日期:2016-06-27

修回日期:2016-07-12

基金项目:航空科学基金(1551U8008)

作者简介:王治山(1990—),男,河南洛阳人,硕士生,研究方向为座舱显示控制。

可读性评价工作中也采用了 PJND 方法^[6]。英军标 DEF STAN 00-970 明确规定,座舱照明与显示系统应该满足 PJND 的要求^[7];美军标 MIL-PRF22885 也采用类似 PJND 的 IE 标准来定义显示设备在有阳光干扰下的可读性^[8]。

除了 PJND 方法,用来评价可读性的方法还有 VL (Visibility Level) 方法和 TTV (Time to Visibility) 方法。

随着飞行环境的变化,平显的显示性能会受到许多干扰因素的影响。相关因素对平显可读性影响规律如何,可参考的文献不多。因此,如果能建立一种平显可读性评价模型,评价外部因素对平显可读性的影响,进而对可读性设计提供指导性意见,将对提升平显视觉性能具有重要意义。

1 PJND 理论

平显是一种成像于无穷远处的透明显示器,其背景为外界真实视景,且平显在座舱中所处位置特殊,相对其他显示设备更易受到外部因素的干扰。目前,PJND 理论主要用于评价液晶显示设备在有外部干扰情况下的可读性。所以,建立平显可读性评价模型应充分考虑 PJND 理论特点。

1.1 PJND 理论的基本公式

PJND 理论的基本公式为

$$L_{LJND} = \frac{\lg R_{LCR}}{a} \quad (1)$$

$$C_{CJND} = \frac{C_{CS}}{b} \quad (2)$$

$$P_{PJND} = S_{RCS} \sqrt{L_{LJND}^2 + C_{CJND}^2} \quad (3)$$

式中: R_{LCR} 为目标与背景的亮度比值; C_{CS} 为目标与背景的色度差异; S_{RCS} 为相对对比度敏感度函数; a 为 LJND 的权重系数,LJND 为最小可辨高度差异; b 为 CJND 的权重系数,CJND 为最小可辨色度差异。

1.2 PJND 理论的评价标准

在 PJND 理论中,PJND 值的大小表征目标与背景的差异程度,PJND 值越大,说明目标与背景的差异越大,可读性越好;反之,可读性越差。

VASSIE C K 等人在文献[2]中将显示信息分为 Warning(警告)、Emphasis(重点)、Complex(复杂)、Status(状态)和 Informative(背景)。信息类型不同,对其 PJND 值的要求也不同。

英国 BAE 系统公司的 SHARPE R 等人在文献[3]中对信息类型进行了更详细的划分,对满足可读性的 PJND 最小值进行了规定,如表 1 所示。

表 1 欧洲战斗机对 PJND 值的要求^[4]

Table 1 Eurofighter's demand for PJND value

分类	PJND 最小值	描述
Attention Getter 重点关注信息	120	重点关注和必须要处理的信息
Warning and Caution 警告信息	90	警告信息和需注意的信息
Dynamic Complex 动态复杂信息	70	包含复杂的字母、数字、图形,且在显示器上位置不固定
Static Complex 静态复杂信息	60	同动态复杂信息类似,只是在显示器上位置固定
Status 状态信息	50	只有两种状态且位置固定
Informative 背景信息	40	显示画面的背景,只有一种状态

由表 1 可知,不同类型的信息对 PJND 的最小值有不同要求。按照英国 BAE 系统公司 SHARPE R 等人对显示信息类型的划分,结合平显的特点,其显示信息应划分为“Dynamic Complex”类型,对 PJND 值的最低要求为 70。

PJND 方法可以对显示设备的可读性进行定量的评价;VL 方法只对可读性进行定性分析($V_{VL} > 1$,可见; $V_{VL} < 1$,不可见; $V_{VL} = 1$,临界值);TTV 方法也可用来评价可读性,但这种方法只关注反应时间对可读性的影响。

2 基于 PJND 的平显可读性评价方法

2.1 建立平显 PJND 模型

建立关于平显可读性的 PJND 模型,首先需根据平显显示特点及其所处环境确定平显的 LCR,CS 和 RCS 函数及权重系数 a 和 b 。

2.1.1 亮度比值函数(R_{LCR})确定

传统的亮度对比度仅考虑了目标与背景本身的辐射亮度值,而实际上进入人眼的亮度信息是目标与亮度本身辐射亮度值和环境,其定义为

$$C = \frac{L(f) + m \times L(b)}{L(b)} \quad (4)$$

平显在真实环境中可能遇到来自环境中无关光源的反射(镜面反射、漫反射)和强烈眩光的干扰,如图 1 所示。

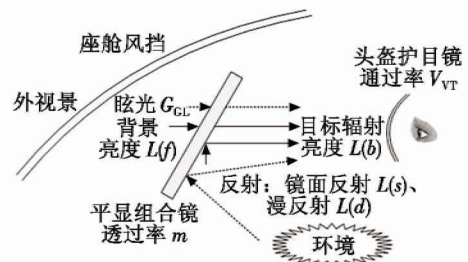


图 1 外界环境干扰下平显光路图

Fig. 1 Optical path diagram of HUD under outside interference

来自座舱外的亮度信息(外视景、干扰)在进入座舱前会受到座舱风挡的衰减。LCR函数只考虑衰减后的亮度信息。

飞行员观察外景要通过头盔护目镜及平显组合玻璃。具体情况是:背景亮度、眩光进入飞行员眼睛前要经过平显组合玻璃及头盔护目镜;反射(镜面反射、漫反射)以及目标亮度进入飞行员眼睛要经过头盔护目镜。

平显组合玻璃由平凹和平凸镜片组成,全息膜层位于中间球面上,并被密封在组合镜中。全息膜层只反射来自像源的绿光(540 nm左右),同时通过外景光线(外景光线中540 nm左右的绿光被滤除)。由于组合镜外表面平行,所以观察外景不存在光学畸变。通过组合镜观察外景呈现微弱的粉红色,是由于外景中绿光(540 nm左右)几乎不能通过组合镜。平显透过率 m 的取值与全息膜层的镀膜工艺及平凸、平凹镜面的通过率有关,某平显组合玻璃的透过率可达80%以上,本文取 m 为0.8。另外,由于平显是透明显示器,所以其目标字符亮度是字符本身辐射亮度与环境透射亮度值之和^[1]。

综上,目标与亮度信息的比值函数(R_{LCR})可表示为

$$R_{LCR}(L(f), L(b), L(d), L(s), m, V_{VT}, G_{GL}) = \frac{V_{VT}[L(f) + L(b) \times m + L(d) + L(s) + G_{GL}]}{V_{VT}[L(b) \times m + L(d) + L(s) + G_{GL}]} \quad (5)$$

式中, $L(f), L(b), L(d), L(s), G_{GL}$ 和 m 的相关含义见图1。记

$$X = L(d) + L(s) + G_{GL}$$

则

$$R_{LCR} = \frac{L(f) + 0.8L(b) + X}{L(b) + X} \quad (6)$$

2.1.2 色度差异函数(C_{CS})确定

平显背景信息为外界真实视景,随着飞机的快速移动,背景环境在不断地变化,背景的色度信息也相应变化。 C_{CS} 表示目标与背景在颜色上的差异。根据CIE1976色度空间图可知,可用色度坐标(u', v')来表征不同颜色。

目标与背景的色度差异大小 C_{CS} 可用目标与背景的色度坐标差表示,即

$$C_{CS}(u'_F, u'_B, v'_F, v'_B) = \sqrt{(u'_F - u'_B)^2 + (v'_F - v'_B)^2} \quad (7)$$

式中, (u'_F, v'_F) 和 (u'_B, v'_B) 分别表示目标和背景的色度坐标。

目前平显的像源发出的绿光波长为544 nm^[1],对应字符的色度坐标为(0.313, 0.581)。

综上,可确定色度差异函数为

$$C_{CS}(u'_B, v'_B) = \sqrt{(0.095 - u'_B)^2 + (0.214 - v'_B)^2} \quad (8)$$

2.1.3 相对对比度函数(S_{RCS})确定

随着环境亮度的变化,人眼辨别目标与背景差异的能力即对比度敏感度并不是固定不变的。BLACKWELL H R 经过大量实验,拟合出 S_{RCS} 与环境亮度 $L(f)$ 之间的算式^[9-10],即

$$\begin{cases} S_{RCS}(S, T, L(f)) = mn \\ m = \left[\left(\frac{S}{10000T} \right)^{0.4} + 1 \right]^{2.5} \\ n = \left[\left(\frac{S}{L(f)T} \right)^{0.4} + 1 \right]^{-2.5} \end{cases} \quad (9)$$

式中: S 由目标大小以及目标字符与显示器光轴的角度决定; T 为与观察者年龄有关的物理量^[9]。

平显显示画面中字符的尺寸大小由字符线宽决定。目前平显字符的线宽有两种:未加宽字符(1.0 mrad)和加宽字符(3.0 mrad)^[1]。要保证最小字符可见,即要保证未加宽字符1.0 mrad可见。

平显显示画面中处在左右两侧的“迎角刻度”、“垂直速度刻度”两种字符是所有字符中与平显显示器光轴的偏离角度最大的。以某平显为例,其瞬时视场为:俯仰11.5°(+3.2°, -8.3°),方位18.4°(+9.2°, -9.2°)^[1],要保证偏离角度最大的字符可见,即要保证偏离角度为9.2°的字符可见。

对于最小字符线宽为1.0 mrad、最大偏离角度为9.2°的显示画面,根据文献[9], S 应取0.2636。

飞行员年龄分布范围主要在25~45岁,根据文献[9], T 应取1。

综上,RCS模型可确定为

$$S_{RCS} = 1.0372 \times \left[\left(\frac{0.2636}{L(f)} \right)^{0.4} + 1 \right]^{-2.5} \quad (10)$$

2.1.4 权重系数 a, b 的选择

a 和 b 分别表示LJND和CJND在PJND中的权重系数。英国BAE系统公司的工程师经过大量实验取 $a = 0.0051, b = 0.0042$ 。

综上,可确定平显的 P_{PJND} 算式为

$$L_{LJND} = 196.11 \lg \left(\frac{L(f)}{0.8L(b) + X} + 1 \right) \quad (11)$$

$$C_{CJND} = 238.1 \sqrt{(0.095 - u'_B)^2 + (0.214 - v'_B)^2} \quad (12)$$

$$S_{RCS} = 1.0372 \left[\left(\frac{0.2636}{L(f)} \right)^{0.4} + 1 \right]^{-2.5} \quad (13)$$

$$P_{PJND} = S_{RCS} \sqrt{L_{LJND}^2 + C_{CJND}^2} \quad (14)$$

2.2 影响平显可读性的因素

根据式(11)~式(14),可将影响平显可读性的因素分为以下两类。

1) 背景变化,包括亮度信息和色度信息,影响PJND评价模型中的LJND和CJND值。

2) 干扰,主要指镜面反射、漫反射、眩光等因素,

影响 PJND 评价模型中的 LJND 值。

2.3 基于 PJND 的平显可读性评价方法

2.1 节中已确定了评价平显可读性的 PJND 模型。通过该评价模型计算而得的 PJND 值,综合考虑了亮度信息和色度信息对平显可读性的影响。用 PJND 值可定量地描述背景变化、干扰(镜面反射、漫反射、眩光)变化对平显可读性的影响,并根据平显显示对 PJND 值的最小要求,对平显可读性做出“接受”或者“拒绝”的判断,如图 2 所示。

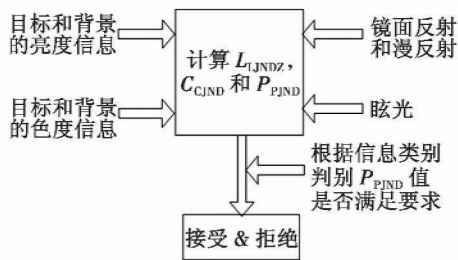


图 2 基于 PJND 的平显可读性评价方法示意图

Fig. 2 Evaluation method of HUD readability based on PJND

3 仿真及实验验证

通过仿真,分析 PJND 值、亮度对比度 C 、环境亮度值 $L(b)$ 、干扰 X 以及背景变化之间的关系,结合实验数据对仿真结果进行分析,并对平显抗干扰设计提出了指导性意见。

根据文献[4],满足平显可读性的 PJND 最小值为 70。仿真中以 P_{PJND} 达到 70 为满足可读性的条件。分别进行以下 3 种实验或仿真:

- 1) 无干扰情况下,为满足平显可读性、亮度对比度与环境亮度之间的关系(仿真及实验验证);
- 2) 背景色度变化情况下,为满足平显可读性、亮度对比度与环境亮度之间的关系(仿真及实验验证);
- 3) 有干扰情况下,为使 $P_{PJND} = 70$,亮度对比度、环境亮度、干扰值之间的关系(仿真)。

具体仿真及实验条件如下所述。

1) 实验 1:无干扰。

- ① 干扰值 $X = 0$ 。
- ② 背景为暖白色,色度坐标(0.340,0.363)。
- ③ 环境亮度从 0 ~ 5000 cd/m^2 变化,其中,0 ~ 400 cd/m^2 模拟夜间亮度环境,400 ~ 5000 cd/m^2 模拟白天亮度环境。

2) 实验 2:背景色度变化。

- ① 干扰值 $X = 0$ 。
- ② 背景 1 为暖白色,对应色度坐标为(0.340,0.363)。
- ③ 背景 2 为天蓝色,对应色度坐标为(0.308,

0.378)。

④ 环境亮度从 0 ~ 5000 cd/m^2 变化。

3) 实验 3:有干扰。

- ① 环境亮度 $L(b)$ 为 5000 cd/m^2 保持不变。
- ② 背景为暖白色,色坐标(0.340,0.363)。
- ③ 镜面反射亮度值 $L(s)$ 在 0 ~ 7000 cd/m^2 范围变化。

3.1 无干扰

以 $P_{PJND} = 70$ 不变为前提,仿真亮度对比度与环境亮度的变化关系,结果见图 3 中的蓝色实线。

借助天空环境光仿真实验室,在背景为白色且不施加外界干扰情况下,测试满足平显可读性的最小显示亮度与环境亮度之间的关系,见图 3 中红色星线。实验选取 10 位年龄在 25 ~ 40 岁之间,男女各半,视力色觉均正常的受试者,进行平显显示亮度主观评价实验。实验中记录不同环境亮度下满足平显可读性的最小显示亮度,测试数据取 10 人的平均值。

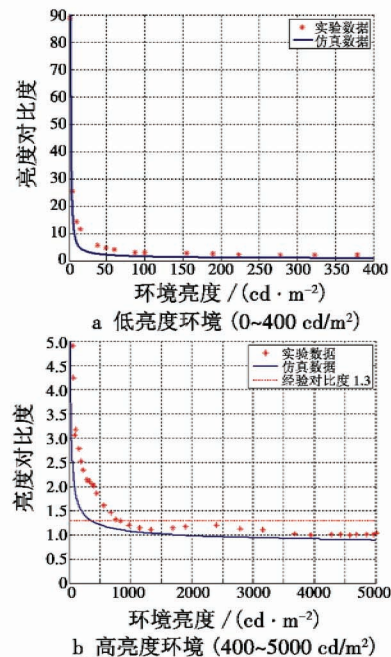


图 3 无干扰情况下,亮度对比度与环境亮度关系图(P_{PJND} 为 70)

Fig. 3 Luminance contrast vs environment luminance (no inference, $P_{PJND} = 70$)

由图 3 中仿真数据可知,若要保持 P_{PJND} 恒定在 70 不变,随着环境亮度的增加,亮度对比度应逐渐减小,即低环境亮度下对亮度对比度的要求大于高亮度环境。

图 3 中,满足 $P_{PJND} = 70$ 时,亮度对比度与环境亮度之间的变化关系(仿真数据)与实验数据变化趋势一致,同时,在白天亮度环境下(见图 3b)经验亮度对比度 1.3 与实验数据、仿真数据变化趋势一致(数值上略有差异),说明可用 PJND 值来评价平显可读性。维

持 PJND 值恒定不变可保证平显可读性相对稳定。实际应用中可通过调节亮度对比度来保持平显 PJND 值恒定不变,即满足平显可读性要求。

图 3 中,仿真数据中的亮度对比度总是低于实验数据的亮度对比度,且低于经验亮度对比度 1.3,说明 P_{PJND} 为 70 不能满足平显可读性。满足平显可读性的 PJND 最小值应该大于 70,具体值还需进一步实验验证。

3.2 背景色度变化

背景变化包括亮度信息和色度信息,背景色度信息变化主要影响 C_{CS} 值。图 4 所示为不同背景亮度对比度与环境亮度之间的关系。图中:实线为 $P_{PJND} = 70$ 不变时的仿真数据;三角和圆圈为实验数据(实验方法同 3.1 节)。

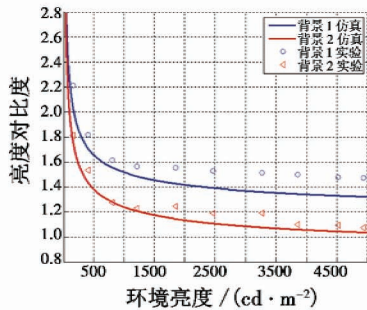


图 4 不同背景下亮度对比度与环境亮度的关系图 (P_{PJND} 为 70)

Fig.4 Luminance contrast vs environment luminance (different background, $P_{PJND} = 70$)

由图 4 可知,无论是仿真数据还是实验数据,不同背景下对亮度对比度的要求差别较大。背景 2 下对亮度对比度的要求更低,更容易满足可读性要求。可用 PJND 理论解释:背景 1 的 CJND 值为 57.9,背景 2 的 CJND 值为 61.8。CJND 值越大,PJND 值就越大,对亮度对比度的要求越小,越容易满足可读性要求。

由于背景色度变化属不可控因素,为保证在不同背景环境下平显的可读性,平显亮度控制方式在设计前期要充分考虑到这种变化,应该适当地提高对 PJND 值的要求,以保证不同背景下平显都能达到良好的可读性。

3.3 有干扰

由于干扰值在实际环境中难以测量,所以仅对于干扰影响平显可读性的情况进行仿真,并对平显抗干扰提供了设计意见。

根据式(11)可知,干扰中,无论是镜面反射、漫反射还是眩光,对 PJND 值的影响规律类似,以下仿真以镜面反射为例,其他干扰(漫反射、眩光)的仿真方法及规律类似。

图 5 所示为环境亮度一定(5000 cd/m^2)时,PJND 值与镜面反射亮度值、亮度对比度之间的三维关系图。

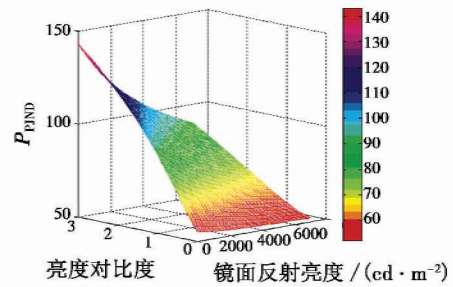


图 5 P_{PJND} 与干扰、亮度对比度的三维关系图 (环境亮度为 5000 cd/m^2)

Fig.5 P_{PJND} , luminance contrast and specular reflection luminance ($L(f) = 5000 \text{ cd/m}^2$)

由图 5 可知,环境亮度一定时,干扰值与亮度对比度的变化都会影响 P_{PJND} 。其中环境干扰不变时: P_{PJND} 随着亮度对比度增大而变大; P_{PJND} 随着干扰值的增大而减小(见图 6)。

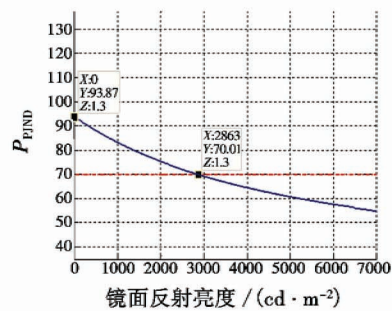


图 6 PJND 值与干扰值的关系图

(环境亮度为 5000 cd/m^2 , 亮度对比度为 1.3)

Fig.6 P_{PJND} vs specular reflection luminance ($L(f) = 5000 \text{ cd/m}^2, C = 1.3$)

工程经验认为,白天环境下,平显显示亮度对比度达到 1.3,即可保证平显达到良好的可读性。

图 5 中,当亮度对比度为 1.3 不变时,可得到图 6。图 6 表明,随着镜面反射亮度值从 0 到 2863 cd/m^2 增大,PJND 值由 93.87 减小到 70.01。镜面反射亮度值超过 2863 cd/m^2 时,PJND 值会小于 70,可读性将不再满足要求。图 7 表明,环境亮度为 5000 cd/m^2 时,如果不增加亮度对比度,为满足平显可读性,镜面反射亮度值应不超过 2863 cd/m^2 。

图 7 是环境亮度为 5000 cd/m^2 时,为保持 PJND 值不变(可读性不变),环境干扰值变大时,亮度对比度与镜面反射亮度值之间的关系。

图 7 表明,当环境镜面反射亮度值增大时,适当地增大平显亮度对比度可以满足可读性不变。但实际环境中,光源的强度比较强,干扰亮度值会很大。这时,通过增加亮度对比度(受技术限制,显示亮度不可能无限制地增大)已不能满足可读性,可采用物理遮挡(如加装遮光罩)来减小干扰的影响。

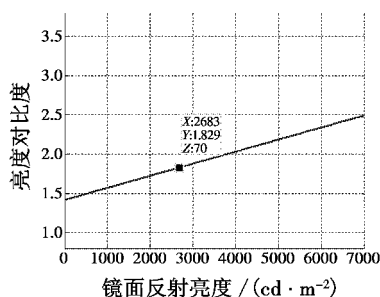


图 7 亮度对比度与镜面反射亮度值的关系图
(P_{PJND} 为 70, 环境亮度为 5000 cd/m^2)

Fig. 7 Luminance contrast vs specular luminance
($P_{\text{PJND}} = 70, L(f) = 5000 \text{ cd}/\text{m}^2$)

4 结束语

本文以 PJND 理论为基础,结合平显应用环境和显示特点,建立了基于 PJND 的平显可读性评价模型。通过仿真研究了干扰以及背景色度变化对平显可读性的影响规律。借助天空环境光实验室对 PJND 评价方法进行了实验验证。

3.1 节中实验数据表明:用 PJND 值能够评价平显可读性质量;实际应用中可通过调节亮度对比度来保持平显 PJND 值恒定不变,进而满足平显可读性要求。但满足平显可读性的 PJND 最小值为多少,不同环境亮度下亮度对比度应该达到多少,还需进一步实验验证。

3.2 节中实验数据表明:不同背景色度、同样环境亮度下,对亮度对比度要求不同。背景色度差异越大(CJND 值越大),对亮度对比度要求越小。

由于干扰数值不易测量,3.3 节中只根据平显的 PJND 模型仿真了干扰变化对可读性的影响规律。仿真结果表明:当干扰值较小时,可通过增大亮度对比度来满足平显可读性;干扰值超过一定范围,只能通过物理遮挡来保证平显的可读性。

现有关于 PJND 的研究成果中都以液晶显示设备作为研究对象,国内外,关于 PJND 应用于平显的资料较少,平显应用环境及其显示特点有其特殊性,所以 PJND 理论在平显领域的应用还需进一步深入研究。同时应

进行大量工程试验来完善基于 PJND 的平显可读性评价方法。

参考文献

- [1] 丁全心. 机载瞄准显示系统[M]. 北京:航空工业出版社,2015:33.
- [2] VASSIE C K. Specification and assessment of the visual aspects of cockpit displays [C]//SID Symposium Digest of Technical Papers, 1998, 29(1):1199-1203.
- [3] CARTWRIGHT S R, GILLESPIE C M, ALLAN G W, et al. Sunlight readability of displays: a numerical scale [C]//The 4th Oxford Conference on Spectroscopy, 2003, 4826: 176-180.
- [4] VASSIE C K, CHRISTOPHER W C. Just acceptable and desirable luminance levels for fast jet cockpit displays [C]//Proceedings of SPIE 4022, Cockpit Displays VII: Displays for Defense Applications, 2000. doi: 10.1117/12.397737.
- [5] JARRETT D N. 座舱工程[M]. 孔渊,曲卡尔,译. 北京:航空工业出版社,2015:142-143.
- [6] WOLF D C. Modeling image quality for automotive display technologies[D]. Dundee: Abertay University, 2014.
- [7] British Defence Standards. DEF STAN 00-970 crew stations-general requirements guidelines for the design of crewstation lighting and displays[S]. UK, 1999.
- [8] MIL-PRF-22885/108F. Sunlight readable display (dripproof, waterlight, splashproof, EMI/RFI shielding, high impact shock resistant, common termination system, night vision goggle compatible) [S]. USA, 2014.
- [9] BLACKWEL H R. Description of a comprehensive family of Relative Contrast Sensitivity (RCS) functions of luminance to reflect differences in size of task detail, task eccentricity and observer age[J]. Journal of the Illuminating Engineering, 2013, 11(1):52-63.
- [10] KELLY E F. Sensitivity of display reflection measurements to apparatus geometry [C]//SID Symposium Digest of Technical Papers, 2002. doi:10.1889/1.1830211.

(上接第 63 页)

- [13] LEVITIN G. Optimal structure of fault-tolerant software systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2005, 89(3):286-295.

- [14] 陈光宇,黄锡滋,唐小我. 故障树模块化分析系统可靠性[J]. 电子科技大学学报,2006, 35(6):989-992.
- [15] LEVITIN G. Optimal structure of fault-tolerant software systems[R]. Tel Aviv: Israel Electric Corporation Ltd, 2003.