

引用格式:张宏飞,王治山,张海军,等.一种复杂视觉环境下直升机平视显示器可读性设计方法[J].电光与控制,2018,25(7):77-81. ZHANG H F, WANG Z S, ZHANG H J, et al. A readability evaluation method of helicopter HUD in complex visual environment[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(7): 77-81.

一种复杂视觉环境下直升机平视显示器可读性设计方法

张宏飞¹, 王治山², 张海军², 郭晓光², 冯朝坤²

(1. 陆航驻洛阳地区军代室, 河南 洛阳 471000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 不同于普通座舱显示器, 直升机平视显示器的背景画面为外界真实视景, 显示画面可读性更易受到外界环境的影响。提出了一种基于最小可辨差异(PJND)理论的复杂视觉环境下直升机平视显示器的可读性评价方法。通过实验探究满足可读性的PJND值与背景因素(亮度、色度)的变化关系, 以此为依据进行可读性设计工作, 设计满足可读性的直升机平视显示器亮度控制曲线。实验结果表明, PJND值可综合反映亮度、色度对可读性的影响, 以PJND值为标准设计出的直升机平视显示器亮度控制曲线能够满足可读性。

关键词: 直升机; 平视显示器; 可读性; 评价模型; 复杂视觉环境; PJND; 亮度控制曲线

中图分类号: V241.8 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.07.016

A Readability Evaluation Method of Helicopter HUD in Complex Visual Environment

ZHANG Hong-fei¹, WANG Zhi-shan², ZHANG Hai-jun², GUO Xiao-guang², FENG Chao-kun²

(1. Military Deputy Office of PLA in No. 613 Institute, Luoyang 471000, China;

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

Abstract: Different from the ordinary cockpit displays, the background of helicopter head-up display is the real outside scene and thus the readability of the displayed picture is easily disturbed by the outside environment. A method was proposed based on Perceived Just-Noticeable Difference (PJND) theory for evaluating the readability of helicopter HUD in complex visual environment. The relationship between the satisfactory PJND value and the environment factors (luminance and chrominance) was studied through experiments. On this basis, a luminance control curve satisfactory for the readability of HUD was designed. Experiment results showed that: 1) The PJND value can synthetically reflect the effect of luminance and chrominance on the readability; and 2) The luminance control curve designed based on PJND value can satisfy the requirement on readability of the helicopter HUD.

Key words: helicopter; head-up display; readability; evaluation model; complex visual environment; PJND; luminance control curve

0 引言

随着航空技术的发展,平视显示器(简称平显或 HUD)的出现使飞行员能同时观察飞行作战信息和外部视景,实现了手不离杆操作,以帮助飞行员快速捕获战机,提高作战效率^[1]。相对传统显示设备,平显的巨大优势使其应用范围由歼击机扩展到直升机、运输机、民航客机

等领域。

与一般的液晶显示器不同,平显的背景画面为外界真实视景,其显示可读性易受到外界环境的干扰。而对于直升机平显,由于直升机飞行高度相对较低,背景画面更容易受到地面环境的影响。复杂视觉环境下直升机平显可读性的评价与设计工作是直升机人机工效学的一个重点研究方向^[1]。

常用于评价平显可读性的方法有以下几种:

1) 工程中用亮度对比度(即字符亮度与背景亮度之间的比值)来衡量平显的可读性,方法简单,但不能有效评价低亮度环境下平显的可读性;

2) TTV (Time to Visibility), 由 SILVERSTEIN于

收稿日期:2017-07-27 修回日期:2018-04-08

基金项目:航空科学基金(201551U8008)

作者简介:张宏飞(1980—),男,山西忻州人,硕士,工程师,研究方向为直升机综合航电系统。

1996 年提出,该方法强调变化的观察场景对显示效果的影响,但只能估算观察背景变化时人眼的适应时间^[1];

3) 可见度即人眼看物体的清楚程度,此方法考虑视角、眩光和年龄对可读性的影响,但只能定性对可读性做出评价^[1],日光眩光概率(DGP)则考虑眩光这种极端环境对可读性的影响^[1];

4) 最小可辨差异(PJND)方法由英国 BAE 系统公司的工程师 SHARPE 首次提出,并应用于座舱照明显示系统,可综合评价背景和字符的亮度、色度对可读性的影响,同时考虑人眼感知外界刺激的非线性特性以及眩光对可读性的影响,可对平显可读性做出定量评价^[1-2]。

本文以 PJND 为理论基础,从亮度、色度两方面研究复杂视觉环境下直升机平显的可读性问题。

1 基于 PJND 的直升机平显可读性评价模型

1.1 PJND 理论的基本公式

式(1)~(3)为 PJND 理论^[3-7]的基本公式。

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

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

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

式中: P_{PJND} 是目标与背景的差异值; L_{LCR} 是目标与背景的亮度比值; C_{CS} 是目标与背景的色度差异; R_{RCS} 是相对对比度敏感度函数; a 是 L_{LJND} 的权重系数; b' 是 C_{CJND} 的权重系数。

1.2 影响直升机平显可读性的因素

图 1 是直升机座舱环境模拟图。

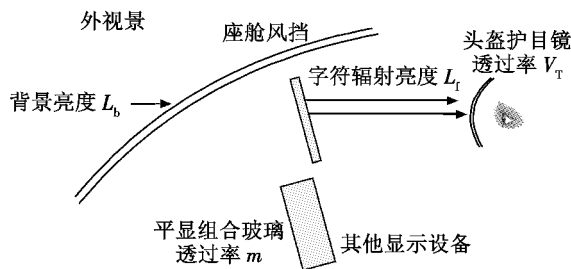


图 1 直升机座舱环境模拟图

Fig. 1 Diagram of helicopter cockpit environment

影响直升机平显可读性的主要因素有以下几类:

1) 背景信息,主要包含背景亮度、背景色度;2) 目标信息,主要包含目标亮度、目标色度;3) 干扰信息,主要包含镜面反射、漫反射、眩光等亮度信息;4) 其他,平显组合玻璃的透过率 m ,风挡的透过率 n ,头盔护目镜的透过率 V_T 。

1.3 直升机飞行员面临视觉环境的复杂性

直升机飞行员透过透明的平显组合玻璃观看外景和飞行作战信息,所以直升机平显的背景画面随着背景环境的变化而变化。从背景亮度和色度两方面考虑,直升机飞行员面临的视觉环境复杂性主要体现在以下 2 点。

1) 背景画面亮度变化范围大。从漆黑无星光的夜间到有阳光直射的中午,直升机平显背景亮度变化范围远大于普通显示器,有时还会受到眩光等极端亮度环境的影响。

2) 背景画面色度多变。湛蓝的天空、洁白的云层、灰暗的大地都可能是直升机平显面临的背景画面,而且这些背景会因时间和空间的不同产生差异。

以上 2 点使直升机平显相对于普通的机载液晶或机械式显示设备更加复杂,也对直升机平显的显示可读性提出了更高的要求。

1.4 建立基于 PJND 的直升机平显可读性评价模型

建立基于 PJND 的可读性评价模型,主要是根据直升机平显的成像特点、应用环境特点,确定 PJND 理论公式中的 L_{LCR} , C_{CS} , R_{RCS} 以及权重系数 a 和 b' 。

1.4.1 亮度对比度函数 L_{LCR}

亮度对比度函数 L_{LCR} 表示进入观察者眼中的目标与背景的各种亮度信息的比值,其中目标信息由像源产生后,经过光学系统的准直放大、组合镜的反射最终进入观察者眼中^[1]。背景信息进入观察者眼中要经过座舱风挡和平显组合玻璃的衰减。干扰信息进入人眼有 2 种方式:1) 经过座舱风挡和平显组合玻璃的衰减;2) 经平显组合玻璃表面反射进入观察者眼中^[1,8]。由于实验室环境不能对干扰信息进行量化模拟,为了简化可读性评价模型,本文只考虑无干扰情况下的平显可读性问题。所以,亮度对比度函数 L_{LCR} 可表示为

$$L_{LCR}(L_f, L_b, m, n, V_T) = \frac{V_T \cdot (L_f + L_b \cdot m \cdot n)}{V_T \cdot (L_b \cdot m \cdot n)} = \frac{L_f}{L_b \cdot m \cdot n} + 1 \quad (4)$$

式中: L_f 为字符辐射亮度; L_b 为背景亮度; m 为平显组合玻璃透过率(m 的典型值为 0.8); n 为风挡透过率(n 的典型值为 0.95)。

1.4.2 色度差异函数 C_{CS}

由于直升机飞行多数情况下为低空飞行,所以直升机平显的背景画面多为复杂多变的地面环境,不同背景下的色度差异巨大,对可读性的影响不可忽略,色度差异函数 C_{CS} 可表征目标与背景的差异程度,从色度方面描述可读性。在 CIE1976 色度空间中,用坐标 (u', v') 来代表不同颜色。所以色度差异函数 C_{CS} 可表示^[3-4,9] 为

$$C_{CS}(u'_F, u'_B, v'_F, v'_B) = \sqrt{(u'_F - u'_B)^2 + (v'_F - v'_B)^2} \quad (5)$$

式中：下标 F 表示前景；下标 B 表示背景。需要注意的是字符色度坐标并不是固定不变的，随着背景亮度的变化，字符色度也会相应发生变化。

1.4.3 相对对比度敏感度 R_{RCS}

相对对比度敏感度函数是指人眼辨别目标与背景差异的能力与环境亮度之间的关系，与目标大小、观察视角和观察者年龄有关。BLACKWEL 经过大量实验，拟合出 RCS 与环境亮度 $L(b)$ 之间的公式^[10]，即

$$\left\{ R_{RCS}(S, T, L_B) = \left[\left(\frac{S}{10000T} \right)^{0.4} + 1 \right]^{-2.5} \cdot \left[\left(\frac{S}{L_B T} \right)^{0.4} + 1 \right]^{-2.5} \right. \quad (6)$$

式中： S 为常量，由目标大小、平显视场和观察视角决定； T 为常量，与观察者年龄相关。

当观察者处在观察眼位时，只要位于画面边沿的字符的可读性满足要求，则画面内所有字符的可读性均能得到保证。本文实验中用到的某直升机平显的视场为俯仰 $15^\circ (+7^\circ, -8^\circ)$ ，方位 $11^\circ (+5^\circ, -6^\circ)$ ，其最小字符线宽为 1.0 mrad 。根据文献[6]中实验结果， S 应取 0.2532 。

飞行员年龄分布范围主要在 $25 \sim 45$ 岁，根据文献[10] T 应取 1 。

1.4.4 权重系数 a 和 b'

a 和 b' 分别表示 L_{LND} 和 C_{CJND} 在 P_{PJND} 中的权重系数，分别代表亮度信息和色度信息对可读性的影响程度。英国 BAE 系统公司的工程师们经过大量实验取 $a = 0.0051$ ， $b' = 0.0042$ ^[3-5,9]，本文沿用其实验结果。

综上所述，直升机平显的可读性评价模型为

$$L_{LND} = 196.11 \lg \left(\frac{L_f}{0.76L_B} + 1 \right) \quad (7)$$

$$C_{CJND} = 238.1 \sqrt{(u'_F - u'_B)^2 + (v'_F - v'_B)^2} \quad (8)$$

$$R_{RCS} = 1.0372 \left[\left(\frac{0.2532}{L_B} \right)^{0.4} + 1 \right]^{-2.5} \quad (9)$$

2 满足可读性的 PJND 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 值在一定范围内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 等提出，应当根据信息类型不同，对 PJND 值提出不同要求，以满足可读性^[3,9]。

文献[10]中对信息类型进行了更详细的划分，将显示信息分为 warning(警告)，emphasis(重点)，complex(复杂)，status(状态)，informative(背景)^[4-5]。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^[4-5]

Table 1 Eurofighter's demand for PJND value

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

为了进一步研究直升机平显满足可读性的 PJND 值，以某直升机平显为研究对象，借助天空环境光仿真实验室，对 45 人(视力良好，男 35 人，女 10 人)进行可读性主观评价实验。实验设置两个环境变量：背景亮度和背景色度，其中，背景亮度变化范围从 $0 \sim 27000 \text{ cd/m}^2$ (模拟正常人眼能够承受的亮度范围)。背景色度分别设置为深绿色、浅绿色、天蓝色、黄色、灰色、深蓝色、红色和白色共 8 种，模拟自然界可能出现的 8 种特殊色度环境^[10-12]。自然环境中实际色度情况可能更为复杂，本实验对此问题不做深入研究。

实验中，当背景亮度和色度发生改变时，观察者通过旋钮从小到大调节平显亮度旋钮，使显示效果恰好满足其可读性。

通过对 45 人的实验数据分析，得到以下两个结论。

1) 满足可读性的最小 PJND 值随着背景亮度的增加而减小。

图 2 是满足 45 名观察者可读性的 PJND 值与背景亮度之间的变化关系。满足可读性时，对 PJND 值的要求随着背景亮度的增加而减小。

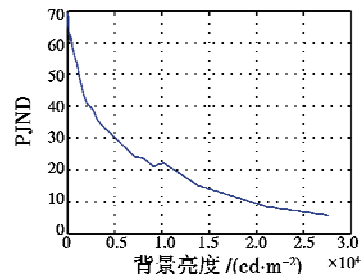


图 2 满足所有观察者可读性的最小 PJND 值的平均值与背景亮度之间的关系

Fig. 2 The minimum mean value of observer's desirable PJND value vs background luminance

在低亮度环境下，观察者对 PJND 值的要求较大，

即观察者需要更大的差异值(PJND 值越大代表目标信息与背景的差异越大)才能辨认清信息。对 PJND 值的要求随背景亮度增加而快速减小。

在高亮度环境下,观察者对 PJND 值的要求较小:当背景亮度大于 $15\,000\text{ cd/m}^2$ 时,满足观察者可读性的 PJND 值普遍在 20 以下。对 PJND 值的要求随背景亮度增加而缓慢减小。

2) 满足可读性的最小 PJND 值不随背景色度的变化而改变。

图 3 是以某观察者的实验数据为例,背景亮度相同,色度发生变化时,满足观察者可读性的 PJND 值相应变化关系。其他观察者有类似规律。

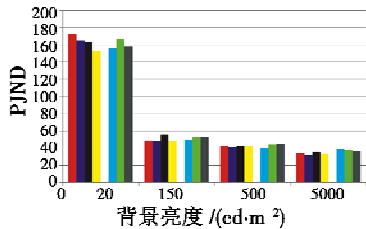


图 3 在不同色度背景下满足观察者 H 可读性的 PJND 值

Fig. 3 The desirable PJND value of obsever H in different chrominance environment

背景亮度保持不变,随着背景色度的变化,为满足可读性,观察者对字符亮度有不同的要求。其中,深绿色背景下需要的字符亮度最大,依次是浅绿色、天蓝色、黄色、灰色、深蓝色和红色。

从 PJND 值上看,在背景亮度保持不变时,8 种色度背景下,满足观察者可读性的 PJND 值差别都不大。这说明,无论背景色度如何变化,只要 PJND 值达到一定要求,可读性就能得到保证。

综合结论 1) 和 2), PJND 值能反映背景亮度和色度变化情况下直升机平显显示画面的可读性。本文选取 45 名观察者对(满足可读性的)最小 PJND 值的平均值作为后续亮度控制曲线的设计依据(即图 3)。

3 直升机平显亮度控制曲线设计及效果验证

3.1 亮度控制曲线设计

由第 2 章可知,只要 PJND 值满足一定要求,平显的可读性就能得到保证。由于目前直升机平显均为单色显示器,最终只能通过控制平显亮度来使可读性满足要求,所以亮度控制曲线是可读性设计的最终输出结果。

亮度控制曲线设计要遵循以下设计原则:

1) 保证在不同色度环境下的控制效果都能满足可读性;

2) 保证不同亮度环境下,控制效果都能满足可

读性;

3) 保证控制效果满足观察者视觉的主观差异性。

白色背景是飞行过程中最常见的背景颜色,也是天空环境光仿真实验室中最容易模拟的颜色,本文以白色背景为例,进行亮度控制曲线设计,主要分为以下 4 个步骤。

1) 确定满足观察者可读性的 PJND 值与背景亮度的变化关系;满足观察者可读性的 PJND 值与背景亮度之间的变化关系是设计亮度控制曲线的基本依据,本文采用图 3 中满足 45 名观察者可读性的最小 PJND 值的平均值作为亮度控制曲线的设计依据;

2) 计算字符相对背景的 CJND 值与背景亮度的变化关系;根据实验测得字符色度与背景亮度的变化关系,结合 CJND 算式(8),可以计算出背景亮度增加时,字符相对背景(白色)的 CJND 值变化关系见图 4。

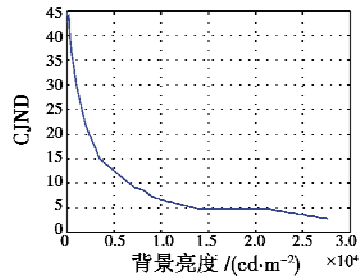


图 4 字符相对背景的 CJND 值(白色背景)

Fig 4 The CJND value of characters against white background

3) 计算相对对比度敏感度函数 RCS 与背景亮度的变化关系;相对对比度敏感度也会随着背景亮度的变化而变化,根据 RCS 算式(9),可得图 5 所示的 RCS 与背景亮度的变化关系。

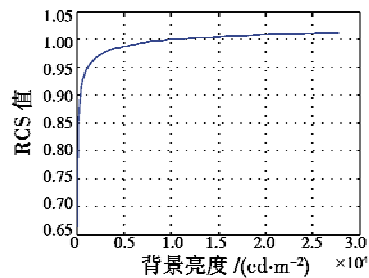


图 5 相对对比度敏感度 RCS 与背景亮度变化关系(白色背景下)

Fig. 5 The relation between relative contrast sensitivity and luminance of white background

4) 根据 PJND 公式计算字符亮度。已知 PJND, CJND 和 RCS 与背景亮度 $L(b)$ 的变化关系,根据 PJND 计算式(7)和式(10)可以计算出字符亮度 L_t 相对背景亮度 L_b 的变化关系,即平显亮度控制曲线,见图 6 中红色实线。

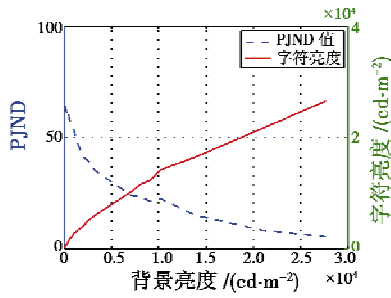


图6 满足PJND要求的平显亮度控制曲线

Fig.6 The desirable PJND value of observer and the luminance control curve

3.2 亮度控制曲线效果验证

借助天空环境光仿真实验室,改变背景亮度和色度,根据图6相应地调整平显亮度,从45名观察者中随机选择10名(编号1~10),对控制效果进行主观评价,评价标准参考依据见表2,评价结果见表3。

表2 控制效果验证实验评分依据

Table 2 The evaluation standard of the luminance control curve's effect

显示效果评分	质量级别	直观感受
1	非常差	完全看不清;或者非常刺眼
2	差	基本看不清;或者比较刺眼
3	一般	能看清,但比较吃力
4	好	比较清晰,但感觉稍偏亮/暗
5	非常好	非常清晰舒适

表3 亮度控制曲线效果验证实验结果

Table 3 The result of luminance control curve's effect

观察者编号	背景亮度变化	背景色度变化	观察者编号	背景亮度变化	背景色度变化
1	5	4	6	4	5
2	5	4	7	4	5
3	5	5	8	5	4
4	4	5	9	4	4
5	5	5	10	5	5

实验结果表明,以PJND标准设计出的亮度控制曲线基本满足可读性要求;同时表明本文建立的PJND可读性评价模型能够较为有效地评价复杂视觉环境下直升机平视显示器的可读性。

4 结束语

本文以PJND为理论基础,结合直升机平显成像特点及其应用环境特点,建立了基于PJND的直升机平显可读性评价模型,借助天空环境光仿真实验室对复杂视觉环境下满足可读性的PJND值与背景亮度和背景色度的变化规律展开研究,并以此为基础进行平显亮度控制曲线设计,最后通过实验对亮度控制曲线的控制效果进行了主观评价。实验结果表明,PJND值能有效评价复杂视觉环境下的直升机平显的可读性,

以PJND值为标准进行亮度控制曲线设计能满足观察者可读性。

参考文献

- [1] DON N J. 座舱工程[M]. 孔渊,曲卡尔,译.北京:航空工业出版社,2015.
- [2] UK Ministry of Defence. DEF STAN 00-970 part 1 section 4;crew stations-general requirements guidelines for the design of crewstation lighting and displays[S]. London:UK Ministry of Defence Directorate of Standardisation, 1999.
- [3] VASSIE K. Specification and assessment of the visual aspects of cockpit displays[J]. Sid Symposium Digest of Technical Papers, 1998, 29(1):1199-1203.
- [4] KELLEY E F. Sensitivity of display reflection measurements to apparatus geometry[J]. Sid Symposium Digest of Technical Papers, 2012, 33(1):140-143.
- [5] DOROTHEE C W. Modelling image quality for automotive display technologies[D]. Dundee: Abertay University, 2014.
- [6] KELLEY E F. Display daylight ambient contrast measurement methods and daylight readability[J]. Journal of the Society for Information Display, 2006, 14(11):1019-1030.
- [7] 何荣,杨春宇. CIE 天空亮度分布新标准[J]. 照明工程学报,2007,18(2):1-4.
- [8] DOD. MIL-PRF-22885/108E Switches, pushbutton, illuminated, 4-lamp replaceable incandescent or non-replaceable light emitting diode(LED), 0.750 square, SPDT, DPDT, 4 PDT silver contacts-2 circuit (5 Amperes) or SPDT (7.5 Amperes); gold contacts-low level to 1 Ampere, sunlight readable display (dripproof, watertight, splashproof, EMI/RFI shielding, high impact shock resistant, common termination system, night vision goggle compatible)[S]. Washington: Departments and Agencies of the Department of Defense, 2014.
- [9] NAZZAL A. A new daylight glare evaluation method: introduction of the monitoring protocol and calculation method[J]. Energy and Buildings, 2001, 33(3):257-265.
- [10] 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.
- [11] 李慧,张炜,马智. 飞机驾驶舱视觉舒适性研究[J]. 航空工程进展,2013,4(4):414-421.
- [12] 喻莉,郭姗,徐士麟,等. 基于人眼感知特性的亮度系数压缩方法[J]. 中国图形图象学报,2009,14(3):452-457.