

· 电路与控制 ·

眩光效应原理机制解析

张万永

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000)

摘要:从眩光效应的相关定义和现象出发,分析了眩光效应形成的基础,并最终确定了眩光效应形成的作用量时变表达式,建立了眩光效应作用机制模型,为眩光效应的应用提供了一个理论分析方法。

关键词:眩光效应;作用量;光学模型;区分度

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-01-0044-04

Principle Mechanism Analysis of Glare Effect

ZHANG Wan-yong

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China)

Abstract: From the relative definition and phenomena of glare effect, the forming base of glare effect is analyzed, and the action variation express of glare effect is determined. A glare effect action mechanism model is built to provide a theory analysis method for the application of glare effect.

Key words: glare effect; action; optic model; discrimination

人通过人眼感受外界物体的辐射能量,以视觉的形式形成对外界事物的感知,并以此建立人体自身的各种反应和确定外现的行为。正常的视觉形成要求适当的照明条件才能形成正确的视觉,不适当的照明条件给正确的视觉带来干扰和破坏,如眩光可引起系列反应,因此正常照明需要避免。

在特殊应用情况下需要破坏正常视觉的形成,以干扰对向目标的判断和行动,改变其行为方式和具体动作,因此,眩光条件和眩光现象运用成为此类应用的重点研究对象。眩光效应的产生与人类的生理结构与视觉形成密切相关,为使这种特殊应用成为现实,必须首先研究眩光效应的形成原理和作用机制。

1 眩光、眩视的概念

眩光是指视野中由于不适宜亮度分布,或在空

间或时间上存在极端的亮度对比,在视野内产生人眼无法适应的光亮感觉,以致引起视觉不舒适和降低物体可见度的视觉条件^[1]。眩光现象可引起视物不清,厌恶、不舒服,甚至丧失明视觉。

眩视是指正常生理视觉在眩光照明的情况下形成视见不清或误判的障碍性视见结果,包括视见图像分辨不清,视觉感知错位等。眩视的一个显著现象是视见景物亮暗二阶视见结果——亮视见景物群形成明亮的视觉光幕压制了暗视见景物群的视觉分辨率,使暗视觉景物群的细节不可分辨,整体沦为“视见背景”。眩视的另一个显著现象是人的视觉在潜意识下去追踪高亮元素,这些高亮元素会让眼球重新聚焦,但在高亮元素的强光作用下能触发眼睛非自主调整,因此会出现屡屡聚焦失败,容易产生视觉上的不适,视觉的不适又会传达到本体感觉和前庭系统中,使人出现晕车和晕船的感觉^[2]。

眩光眩视现象合起来称为眩光效应。适宜的照明条件是生活、工作和学习必备的条件要求。眩光效应广泛存在于需要用眼采集周围环境信息以进行动作的活动当中,多个领域都对眩光效应存在较为细致的研究,如教室照明^[3]、体育场馆^[4]、汽车驾驶^[5-8]、飞机驾驶^[9]。眩光效应通常由光源引起。自然的眩光光源是太阳或其反射光、闪电、夜间的烟火,以及背景环境光亮度出现大幅跃变的环境。其他的眩光光源多为人造光源,如放电电弧、曳光弹、人造光源及其附具等。

2 眩光效应的物理光学基础

眩光效应生成的物理光学基础与普通视觉产生原理相近,当光线入射人眼,通过瞳孔、晶状体等眼内结构在视网膜上,然后通过视神经传递感光细胞的神经冲动到中枢神经大脑处理。从物理光学视角去看,人眼是一部精密的光学仪器,清晰的视觉由景物在视网膜上成像完成,非清晰的模糊像则形成感光,并影响清晰视觉的形成,触发眩光效应。

人眼的瞳孔相当于一个光学系统中的器件—孔径光阑,可改变曲率的晶状体相当于一个可调焦的成像透镜。到达眼底的光能量可用下式表示

$$E = \iint \Phi(\lambda, t) d\lambda dt \quad (1)$$

一般情况下,光谱辐射能流量 Φ 不但与光谱波长 λ 相关,也与时间 t 相关。在特殊情况下,如稳定的连续光源照射的情况,光谱能量分布是不随时间变化常量,其他情况都是含时量。因此可以把光谱能量写成光谱变量与时间变量分离的形式,即为

$$E = \int f(t) dt \int \Phi(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

一般来讲,作用能量 E 仍是时间的函数。对于确定的气体放电光源,在放电强度变化限定范围内,光谱能流按波长分布稳定,只在幅度上随时间变化,可视作光谱分布不变光源,即发光光谱只与放电气体种类有关,可以满足上述条件。

眼底接收能量即与光源的光谱能量有关,又与眼睛的生理结构对入眼光谱的吸收、响应有关。描述各种光谱能量在人眼中感光响应的物理关系原理就是光度学中的视见函数 $V(\lambda)$ ^[10]。鉴于光线是通过瞳孔进入眼内,所以最终在眼底形成感光的光谱能量可以表示为

$$\Phi(\lambda, t) = E(\lambda) V(\lambda) S_p \cos \theta \quad (3)$$

式中, E 为瞳孔处的谱辐射照度,表示为按光谱分布的谱照度; S_p 为瞳孔的面积,如果以圆描述瞳孔,通光面积由瞳孔直径 D 或半径 r 确定,其变化范围约在 $1.5 \sim 8 \text{ mm}$ ^[11-12]。角度 θ 为瞳孔法线与光线的夹角。

式(3)中假设入瞳光线全部到达眼底形成感光。事实上,大角度入射光在到达视网膜前就被眼组织吸收,不能到达眼底视网膜,但来自相对远处眼聚焦位置附近的光线总是以小角度入射,可以满足上述条件。因此此处的光谱照度专指在眼聚焦处附近经过的光线光谱能量形成的照度。

除了成像光学的能量作用机制,眩光效应还涉及物理光学中的光量子性形成的光电效应,其中包括光伏效应和光热热电效应。现有的研究结果是粗造的,如光伏效应的强度、参与神经传递的方式、影响,都有待于进一步深入研究;光热热电效应以温度度量显然不能满足要求,从人体体温与细胞活动对温度的影响,以及眼底温度变化对于感光神经传递的影响结果,要求对眼底光热效应的温度变化进行更细致的研究。其中,难免纠缠光化作用^[15],限于研究方法和专业要求,这部分研究工作不再进一步展开。

3 眩光效应的视生理基础

人眼作为精密的光学仪器,其调整能力让光学仪器制造者汗颜。晶状体改变曲率快速完成变焦,使人眼成为一个快速调焦的变焦“相机”。人眼对环境照度的适应能力也非常强,可以在从暗夜夜晚 10^{-3} Lx ^[13]的照度条件至夏日晴空条件下 10^4 Lx ^[10]清晰成像,动态范围超过 140 dB 。这些都构成普通光学仪器难以涉及的光学成像能力。

人眼视物是否清晰,不但要求自动调焦正确,而且要求进入眼底的能量合适,即需要保证视网膜上的感光细胞要有合适的感光量。感光量的调整包括两部分,一个是通过调节瞳孔的大小,即如同成像光学的孔径光阑的直径,完成进光量的调整;另一个是调节感光细胞的类型来调整感光敏感度。感光细胞的调整也包括两个方面,一个是感光细胞类型的调整;另一个是感光细胞敏感度的调整。前者已被广泛了解和接受,而后者隐含在两种

类型感光细胞转换的过程中^[12],尚未见到相关研究成果或报到。

眼睑形成一个开关式暂光光阑,约0.2 s完成一次暂光性调整。虹膜形成一个可调光阑,可以以秒级速度^[17]调整通光孔径的大小,而瞳孔的平方调整是一个自然的非线性自动控制系统,调节范围接近30倍。人眼通过柱状感光神经细胞和锥状感光神经细胞的转换(分级调整速度^[14])及其功能的适应性调整去适应自然光线的变化,以保证合适的成像能量形成正常视觉。这些功能共同完成人眼的非凡工作能力。当光线能量突然改变,眼底接受能量暴涨,此时,除了上述眼部动作之外,还有转睛、转体等动作。这些动作的结果是改变瞳孔面法线与光线的夹角,以减少眼底受光量,两者共同影响式(3)中的 θ 值。

即使人眼有如此多的非凡工作能力,但还是难以阻止眩光效应的形成。现代生理物理医学证明:神经对感知的传递过程是以生物电的形式进行的^[12]。视觉感知的产生通过感光细胞完成,因此受光电效应影响更大。光伏效应直接影响神经冲动的强度,而光热效应也为神经冲动的形成产生如同电路噪声式的干扰。目前这方面直接定量研究内容的科学成果很少,相关内容都是外加电场式医学方面的间接研究成果^[15-16]。

4 眩光效应的视见光学基础

视见光学中关于近视眼的解释^[17]为晶状体调节失效,或眼轴过长,景物成像于视网膜之前。关于远视眼的解释为晶状体调节失效,或眼轴过短,景物成像于视网膜之后。两者同为眼聚焦失败,不能在视网膜上形成清晰的像,即视见不清。尽管不能形成清晰的视觉,但光线的直线传播都指向光线到达视网膜,同视焦点之外的光线共同形成眼底光感。当视界内存在眩光光源时,由于眩光光源一般情况下都是高光能流辐射体,如果在眼聚焦处,在眼底成像,则会形成高能量接收点,形成烧灼性的眩光作用;如果不在眼聚焦处,则不能在眼底成清晰像,那么是一个模糊、放大的感光区,形成眩光的高亮光感。

视见光学中还有一个视见景物区分度的概念,其定义为

$$D_v = |L_1 - L_2| / (L_{\max} - L_{\min}) \quad (4)$$

式中, L 表示视见景物的亮度,决定入射眼中的光能量,可通过它计算来自景物上的光线在瞳孔处形成的照度;数字角标中1、2表示待区分景物的编号;角标中 \max 、 \min 分别表示视界内存在的最大亮度和最小亮度值。

式(4)定义的区分度说明,当视界内存在远高于背景亮度的光亮体时,亮度差小的景物难于区分;当景物与背景亮度接近时,且远小于最大亮度时,景物与背景不可区分。区分度解释了高亮光源成为眩光光源、使景物视见不清的必然。当视界内存在多个高亮眩光源点,这些眩光源构成等效光幕^[1],屏蔽了其他景物,使之全部沦为构成复杂、视见区分度很低的背景。

5 眩光效应形成光学系统模型建立

眩光光源的存在使视网膜上接收的光能大于适当的眼底感光量,触发眼部和机体动作,向正常视觉形成需要方向调整入眼进光量。而且进光量偏离越大,调整越剧烈。这种调整包括眼睑闭合和瞳孔收缩,减少通光面积;应急性的肢体弯转使视轴偏离眩光光线,改变受光角度;调整感光细胞感光敏感度、甚至调整工作感光细胞类型。

直视情况下,眼睑等效于瞳孔闸门式斩光光阑,在眨眼动作时,眼睑对瞳孔通光面积的影响可以表示如下

$$S = \begin{cases} \pi r^2 & d > r \\ \pi r^2 - 2r^2 \arccos\left(\frac{d}{r}\right) - 2d\sqrt{r^2 - d^2} & 0 \leq d < r \end{cases} \quad (5)$$

式中, r 为瞳孔半径; d 为眼睑边缘到瞳孔中心的距离。

在眼调整过程中, r 和 d 都是时间的函数,即有 $r=r(t)$, $d=d(t)$ 。 d 值由眼睑的运动速度和相对瞳孔的位置决定。一般有如下表达式

$$d = \begin{cases} r & \text{眼睑在瞳孔之外} \\ r - \int v(t) dt & \text{眼睑运动遮蔽瞳孔} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $v(t)$ 为眼睑在遮蔽瞳孔运动的速度函数,在眨眼或应激反应的情况下,具有明确单调性。

眼睑的开关动作较快,一般情况下为亚秒级,存在一个标志性的特征参数。神经生理学一般认为,人的神经反应速度约在0.1 s,即眼睑的动作启动时间是0.1 s。动作速度与入瞳光刺激强度相

关,一次动作时间通常认为约0.2 s完成一次斩光性调整。

式(5)和式(6)只是作为简单的数学模型近似地描述了眼睑对瞳孔通光面积的影响。实际情况因关注焦点、光源与人面部的相对位置关系、人的年龄等因素而具有复杂的变化。 r 值与背景照明环境有关,并根据入瞳光量动态调整^[18]。

瞳孔动态变化特性是一个不受主观意愿影响的客观生理参数。瞳孔大小的个体差异较大,对不同光源反应的程度也不相同,但存在一个共同的特性,即随着进光量的增加,瞳孔近似按照一种负指数的规律运动。现有研究成果中存在一种瞳孔随背景光照的变化关系式为^[19]

$$S_p = a + b \frac{L_b}{c} \quad (7)$$

式中, S_p 表示瞳孔的面积; a, b, c 为特征常数; L_b 为背景亮度,变化范围0.1~3.5 nt。式(6)中瞳孔面积的变化直接影响到瞳孔直径,进而影响到眼睑动作时的通光面积。

如果以正圆作为瞳孔的近似模型,可以得到下式

$$r = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(a + b \frac{L_b}{c} \right)} \quad (8)$$

瞳孔的大小可以作为特征状态的特征参数,瞳孔变化区别作为个体生理结构的差异性存在。文献[19]中给出的是暗视觉向明视觉转换的背景亮度区间,在约1.2 nt附近,瞳孔直径的变化出现了一个波动区,对应明暗视觉的转换,但转换后仍然按照原变化趋势变化,理论上可以理解为这一趋势可以在整个明视觉区保持不变,但是鉴于整个明视觉区需要接收直达 10^4 nt背景高亮度,而文献[19]中只覆盖了从 10^{-2} ~ 10^0 ,仍有近四个量级的空间需要填补。另一方面,背景亮度总是以照度为表现形式,不论是光度量,还是辐射量,都存在一个对应量。对于通常情况,采用照度值表示在应用中更为简洁、方便。人眼瞳孔随背景照度变化的实际情况仍值得进一步研究。

瞳孔变化的调整时间较长,相关文献^[22]指出这是一个秒级参量,量值可达 10^1 量级。在这一长一短两个调整时间参数之间存在另一个介值的调整时间参量角 θ 。参量角 θ 由转睛与转体等身体完成,表示如下

$$\theta(t) = (\omega_y + \omega_b)t \quad (9)$$

式中, ω 表示转动角速度;角标 y 表示转睛引起; b 表示转体引起。

转睛动作可以在0.25 s^[13]完成一次眼睛转动性调整(文献[13]中称为闪光反射时间),而转身动作一般秒级速度。两者都是有意识的自主神经反应,填补了眼睑与瞳孔调整速度的中间空白。

在完成上述工作之后,容易得到光谱与时间的分离作用量表示形式,表示如下

$$E = \int S \cdot \cos \theta dt \int E(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

前述内容已提及人眼根据瞳孔的进光量进行有意识或无意识并存的调整,显而易见,当入瞳光能出现能量 ΔE 眼睛进入调整状态。按控制理论,眼睛瞳孔的调节方式属于自适应调整类型,而文献[18]中给出图示更指向这种调节过程是一个高阶的自动控制过程,在调节过程中,入瞳能量仍然是一个含时变量。如果眩光光源与人的相对位置是固定不变,经过一段时间后,调节作用量将在人眼功能允许范围内趋向于零,此时,式(4)在视见结果中起主导作用。

正常视觉的形成存在自主的神经性参与调节,当遇到因待观察细节的亮度过低而视见不清的情况时会主动性驱动增大瞳孔直径,以增加进光量。而调整进光量以形成适当的视觉条件由非自主的神经在条件反射下完成,同时,人的视见存在潜意识引导下追踪亮点特性,驱动眼睛聚焦指向高亮度眩光源。在眩光光源存在的情况下,恰好与遇强光收缩瞳孔、躲避强发光点等条件反射式非自主反应相悖,无疑会增加眼底曝光量,两者形成振荡是非病理性眩光引起眩晕的原因所在。而下意识的追逐高光点,更加重了这一效应。如若追求光致眩晕的效果,必然需要对人眼两类神经调节机制和人眼结构、功能进行更加深入的研究。

6 结束语

其他文献[18, 21]给出瞳孔直径的变化会受到生理和心理等因素的影响,表明瞳孔的变化是复杂的。视觉形成所涉及的内在因素,如视网膜的感光灵敏度和神经中枢兴奋度,也会影响瞳孔直径,但另外的文献[20, 22]也指出,当背景光照条件剧烈变化时,瞳孔变化显著。同时,生理与心理变化的影响在时间尺度上也要比光照变化时间持续性更

(下转第53页)

京:清华大学出版社,2005:120-200.

- [8] 付梦印,邓志红,闫丽萍, Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 2版. 北京:科学出版社,2010.
- [9] 李强,裘正定,孙冬梅,等. 指横纹:一种新的生物身份

特征[J]. 自动化学报,2007,33(6):596-601.

- [10] Peter A Blume. The LabVIEW Style Book[M]. 北京:电子工业出版社,2009.

(上接第47页)

强^[18]。因此,在考虑光冲击情况下的瞳孔变化时,可以采取忽略这些变化的影响,或把它们作为一个随时间独立演化的叠加乘数因子去考虑。

破坏正常视觉的形成存在法律和道德方面的风险,对生成眩光的光源能量或作用距离有限制,以保证应用的安全性。在这方面有深入的研究^[15,16,23],应用者可适当参考。

式(10)建立了眩光效应下的光学作用量模型,是最基本的光学机制;式(4)解释了眩光效应的形成原理;两者共同建立完整的眩光效应原理机制模型,为眩光效应的应用提供了一个理论分析方法。眩光效应形成的光学系统模型虽然已经建立,但还是较为初级的模型,还有许多地方需要完善。其中不但瞳孔变化规律有待进一步研究,就其表现形式来看,也是一个分立表示的自相关隐函数,仍很复杂。不论如何,眩光效应光学模型的建立为其在反恐防暴应用提供了一个可供分析的模型,从而打开了走向实用的空间。

参考文献

- [1] 于连栋,刘巧云,丁苏红,等. 失能眩光形成机理的研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2005(8):866-868.
- [2] 刘琳,戴立玲,卢章平. 基于无眩光效应的教室照明优化设计[J]. 照明工程学报,2008(6):37-41.
- [3] 杨宇,郭远航,沈紫华. 3D电视节目的防眩晕拍摄技术研究[J]. 电视技术,2011,35(8):54-57.
- [4] 罗涛,姚梦明,姚萌. 室内体育馆照明的眩光评价系统研究[J]. 智能建筑电气技术,2008,2(1):19-23.
- [5] 杨勇,朱传征,李伟. 公路照明眩光指标研究[J]. 交通标准化,2009,12(210):178-181.
- [6] 邓海斌,刘卓. 基于眩光纵距的高速公路凹曲线防眩高度研究[J]. 公路工程,2013,2(38):86-89.
- [7] 杨春宇,刘锡成. 失能眩光对道路照明安全影响的研究[J]. 照明工程学报,2007(12):1-5.
- [8] 晁灿,方守恩,王俊骅. 眩光对交通标志视认性影响研究[J]. 交通工程,2010(1):53-55.
- [9] 邓金萍,李闻,俞金海,等. 基于视觉仿真的飞机座舱风挡眩光分布影响研究[J]. 航空工程进展,2012(8):284-288.
- [10] 周太明. 光源原理与设计[M]. 上海:复旦大学出版社,1993:1-53.
- [11] 赵凯华. 光学[M]. 北京:高等教育出版社,2004:22-61.
- [12] 阮迪云,寿天德. 神经生理学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1992:213-216.
- [13] 中华人民共和国国家标准[S]. 灯和灯系统的光生物安全性. GB/T20145-2006/CIE S 009/E:2002.
- [14] 季卓莺,邵红,林燕丹. 暗适应时间、背景亮度和眩光对人眼对比度阈值影响的探讨[J]. 照明工程学报,2006(12):1-5.
- [15] 胥杰,赵尚弘,占生宝,等. 高能激光视网膜损伤及致盲应用研究[J]. 激光杂志,2006(6):13-14.
- [16] 肖瑞,康宏向,梁洁,等. 激光闪光致眩生物效应实验研究[J]. 激光与红外,2010(11):1182-1185.
- [17] 刘颂豪,李淳飞. 光子学技术与应用[M]. 广东:广东科技出版社,2006:231-235.
- [18] 熊兴良,张琰,陈萌梦,等. 利用自发瞳孔波动下的瞳孔直径变异性客观评价驾驶疲劳[J]. 生物医学工程学报,2010(4):239-244.
- [19] 胡英奎,翁季,李毅,等. 道路照明条件下驾驶员瞳孔大小变化规律[J]. 重庆大学学报,2010(8):85-90.
- [20] 杜志刚,黄发明,严新平,等. 基于瞳孔面积变动的公路隧道明暗适应时间[J]. 公路交通科技,2013(5):98-102.
- [21] 康卫勇,袁修干,柳忠起,等. 瞳孔的变化与脑力负荷关系的试验分析[J]. 航天医学与医学工程,2007(10):364-366.
- [22] 淮贤,甘平,陈龙聪,等. 光刺激下瞳孔图像动态采集系统的研发[J]. 激光杂志,2011(5):22-24.
- [23] 王红玲. 自适应激光眩目干扰系统[J]. 四川兵工学报,2009(7):34-37.