

基于虚拟现实的体育场馆光环境视觉舒适研究 ——以篮球场地为例

于 瑛¹, 崔梓豪¹, 王 琛¹, 孙 晴²

(1. 西安建筑科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 建筑设计研究院, 陕西 西安 710055)

摘要:《体育场馆照明设计及检测标准》(JGJ 153—2016)规定的参数主要面向比赛场地电视转播需求,对于现场人员的视觉舒适感受仅通过眩光指数 GR 约束。“明暗对比”也是影响视觉舒适的重要因素,但目前针对体育场馆光环境的明暗对比度尚不明确。基于此,提出以明暗对比度对运动员及观众的视觉舒适感受影响为研究对象,以篮球场地为例,采用虚拟现实技术,通过改变比赛场地与观众席区域的明暗对比,探究不同光环境及观察位置下人的视觉舒适感受变化规律。针对探究结果,提出采用基于 NSGA-II 算法的照明逆设计方法,营造考虑视觉舒适前后的体育场馆光环境,完成了视觉舒适评价实验。结果表明,当观众席与比赛场地主摄像机方向垂直照度比例 0.3~0.5 时,观众及运动员能获得比较舒适的视觉感受,当该比例为 0.4 时,视觉感受最舒适。照明设计加入该条件后,有约 80% 的受试者视觉舒适感受得到了明显提升,验证了在体育场馆照明设计中加入所提舒适条件的合理性,对体育场馆照明设计具有一定借鉴意义。

关键词: 体育场馆照明; 视觉舒适; 虚拟现实(VR); NSGA-II; 照明逆设计

中图分类号: TM923; TU88

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0595-09

Research on visual comfort of stadium light environment based on virtual reality: A case study of basketball court

YU Ying¹, CUI Zihao¹, WANG Chen¹, SUN Qing²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Institute of Architecture Design, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The parameters specified in the lighting design standard for sports venues (JGJ153-2016) are mainly aimed at the television broadcasting needs of the competition venue, and the visual comfort of on-site personnel is only constrained by the glare index GR. The contrast between light and dark is also an important factor affecting visual comfort, but the contrast between light and dark in the lighting environment of sports venues is currently unclear. Therefore, this article proposes to take the impact of light and dark contrast on the visual comfort of athletes and spectators as the research object. Taking basketball mode as an example, virtual reality technology is used to explore the changes in visual comfort of people in different light environments and observation positions by changing the light and dark contrast between the competition venue and the audience area. Based on the exploration results, a lighting inverse design method based on NSGA-II algorithm is proposed to create a lighting environment for sports venues before and after considering visual comfort, and visual comfort evaluation experiments are completed. The results show that when the vertical illumination ratio between the audience seat and the main camera direction of the competition venue is within the range of 0.3-0.5, the audience and athletes can obtain a relatively comfortable visual experience. When the ratio is 0.4, the visual experience is the most comfortable. After adding this condition to the lighting design, about 80% of the participants' visual comfort experience is significantly improved, which verifies the rationality of adding the comfort conditions in sports venue lighting design. The results of this study have certain reference significance for the lighting design of sports venues.

Key words: lighting of sports venues; visual comfort; virtual reality (VR); NSGA-II; lighting inverse design

体育场馆作为体育比赛和体育活动开展的重要场所,是体育事业发展的重要载体^[1]。不少城市为了获得重大赛事的举办权,越来越注重体育场馆的建设,其中场馆照明系统建设是重中之重,直接影响着运动员的竞技状态和观众的观赛体验,因此,体育场馆照明设计一直在追求更好的照明效果。目前,我国体育场馆照明设计主要依据《体育场馆照明设计及检测标准》(JGJ 153—2016)^[2]标准(以下简称“标准”),给出了体育场馆比赛场地的水平照度、摄像机垂直照度、眩光等指标的要求值,照明设计只要满足标准参数要求,即可认为已经满足进行比赛的光环境需求。这些标准更多关注的是比赛场地的明亮程度和电视转播清晰度,关于照明设计的研究也大多集中于此,主要探究比赛场地照明规律^[3-7]和采用优化算法对比赛场地照明进行优化设计使其满足标准要求^[8-13]。

而在体育场馆中,只关注赛场的“明亮”是不够的。近些年关于视觉舒适的研究发现,视觉舒适作为衡量人处在某一空间中眼睛舒适程度的指标,直接影响着人的工作状态及专注度^[14-17]。在办公建筑中,长期处于不舒适的光环境会造成眼睛疲劳,降低工作效率^[18-19]。在教室中,视觉舒适较差的环境会直接影响学生的心理及学习状态^[20]。在体育场馆中,如果光环境不能给人舒适的视觉感受,运动员比赛和观众观赛达一定时间后眼睛也会产生不适感觉^[3],因此,在对体育场馆照明系统进行设计时,在满足照明标准情况下,也要兼顾舒适性。目前,体育场馆照明设计对人的视觉舒适感受关注较少,其中只有眩光指标用于衡量光源对比赛场地内运动员外视觉造成的不舒适感受,而体育场馆中除了运动员外还有大量观众,不仅光源会影响人的视觉感受,目标与背景的明暗对比度也同样会对其造成影响。为此,本研究将对目前体育场馆照明设计中尚未考虑的明暗对比度对运动员及观众的视觉舒适感受影响作为研究对象。

视觉舒适感受研究需要探究大量不同光环境下人的视觉感受变化,通常需要搭建真实的实验环境,但体育场馆照明系统建成之时,灯具的位置、光线的投射方向等已经固定,很难根据科学研究的需要进行改变,因此,在实际的体育场馆中很难开展需要改变照明的视觉舒适实验。针对此类在现实场景中难以开展的实验和研究,有学者就提出使用虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术

建立与现实场景1:1模型以进行相关研究。早在1995年,VR技术就已应用于多个领域,如教育、军事、飞行员和消防员培训等^[21]。近些年,这项技术在照明领域也得到了广泛应用,许多学者利用其对办公建筑、公共场所等室内照明进行了研究与设计^[22-25]。虚拟现实技术能否用于照明研究,关键在于在虚拟场景中是否能获得与物理场景相似的视觉感受,许多学者对此进行探究,结果在相同的照明环境下,两种环境的视觉感知没有显著差异^[26-29]。因此,虚拟现实技术是研究视觉感知的一种很有前景的替代表示媒介,可以应用于现实中照明难以改变的研究场景。

基于此,本研究将采用VR技术,通过改变比赛大厅中比赛场地与观众席区域的明暗对比,探究不同光环境、不同观察位置下人的视觉舒适感受变化,以得出最适宜的观众席区域与比赛场地的照度比,并通过使用优化算法满足结合视觉舒适的体育场馆照明设计,而后借助VR技术营造该设计方案的虚拟光环境,开展视觉舒适对比实验,验证所提出的视觉舒适条件的合理性。研究成果可为体育场馆舒适照明设计提供依据。

1 体育场馆比赛大厅建模

本研究以可容纳3 000~6 000名观众的中型体育场馆为建模对象,参考多座同型体育场馆比赛大厅设计参数,在3DMAX软件中建立一个长90 m,宽62 m,高20 m的比赛大厅模型。该模型主要包括比赛大厅中间位置的比赛场地模型及环绕比赛场地的观众席模型。

比赛场地模型尺寸为55 m(长)×27 m(宽),比赛场地中心与体育场馆比赛大厅地面中心重合,整个比赛场地地板采用与比赛相似的木地板。选取篮球比赛场地为研究对象,篮球场长、宽分别为28和15 m,将标准篮球场放置于比赛场地中,篮球场中心与比赛场地中心重合,篮球场两端放置有标准赛事篮球架,如图1所示。

体育场馆观众席环绕着比赛场地分布,如图2所示,观众席共分为3层。以半侧观众席为例,图中圆圈所示为一层观众席(活动看台),共有7排,每排高均为0.3 m,总宽度为5.7 m,正面、侧面观众席总长度分别为54、24 m。三角形所示为二层观众席,每排高度均为0.4 m,总宽度为6.85 m,正面、侧面观众席总长度分别为74、45 m。星形所示为三层观众席,共有3排,每排高度均为0.5 m,总宽度为2.7 m,总长度为59 m。

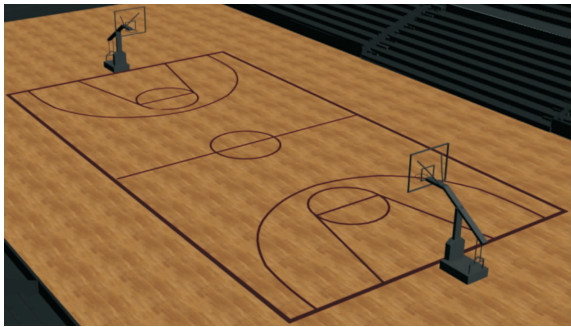


图 1 篮球比赛场地模型
Fig. 1 Basketball match field model

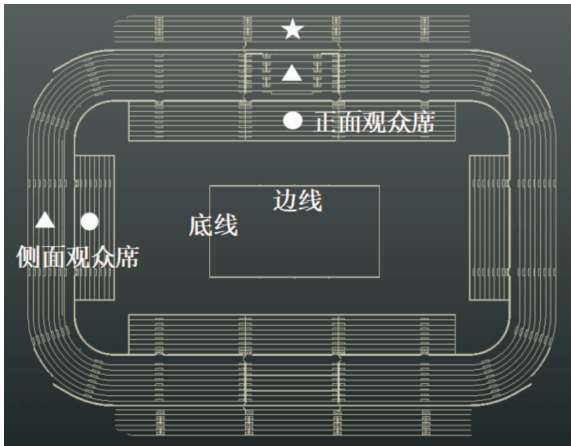


图 2 比赛大厅平面图
Fig. 2 Plan of the competition hall

所建立体育场馆模型中采用双马道, 马道高度皆为 16 m, 长度为 75 m, 近、远马道分别距离比赛场地中心 13 m 和 20.5 m. 并且为尽可能还原体育场馆的特点, 在比赛大厅顶部增加了支撑结构模型, 综合之前所构建的比赛场地和观众席模型, 体育场馆比赛大厅模型如图 3 所示.

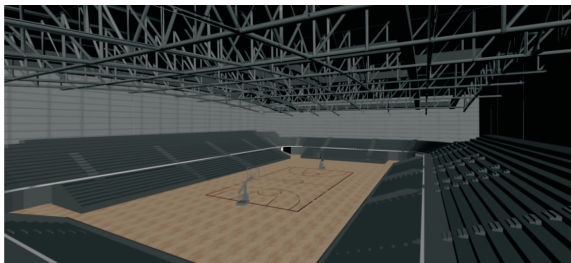


图 3 体育场馆比赛大厅模型
Fig. 3 Model of sports venue competition hall

2 基于 VR 的体育场馆光环境视觉舒适研究

2.1 实验光环境设计

体育场馆比赛大厅照明可分为比赛场地和观众席照明两部分.

2.1.1 场地照明设计

本研究所说场地照明设计指针对篮球比赛场地范围内及其周围区域进行的照明设计, 设计区域如图 4 红线范围所示. 照明设计在 3DMAX 所建立的体育场馆比赛大厅中进行, 使用 V-Ray 渲染器中的照明分析工具“VRay 照明分析”进行照度测量设计.

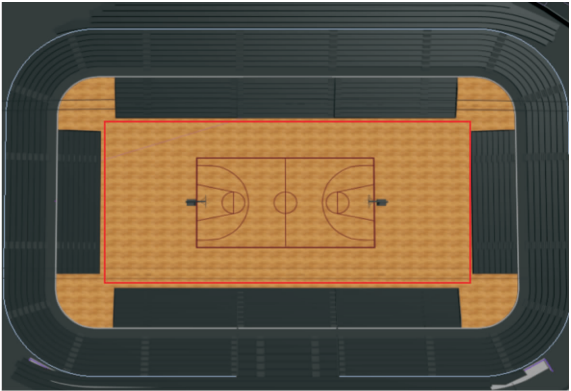


图 4 比赛大厅场地区域示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the venue area of the competition hall

研究对象选取为具有电视转播要求的比赛场馆, 并且考虑到观众坐于观众席中观看比赛, 其视看特点与主摄像机相似, 因此, 场地照度设计范围取《体育场馆照明设计及检测标准》(JGJ 153—2016)所规定的 IV-VI 级照明主摄像机方向垂直照度范围, 即 1 000~2 000 lx, 如表 1 所示. 在此范围内进一步将照度值分为五个等级, 即共设计 1 000、1 250、1 500、1 750、2 000 lx 五种场地光环境.

表 1 体育场馆篮球比赛场地主摄像机照度值

Tab. 1 Illumination values of main cameras in sports venues and basketball matches

运动项目	等级	主摄像机照度/lx	主摄像机照度均匀度	
			U_1	U_2
篮球	IV	1 000	0.4	0.6
	V	1 400	0.5	0.7
	VI	2 000	0.6	0.7

注: U_1 为最小照度与最大照度之比、 U_2 为最小照度与平均照度之比.

为保证场地照度的均匀性, 在场地照明设计中采用了平面灯, 平面灯覆盖整个图 4 所示场地区域, 其平行于地面. 通过改变光源输出功率, 可使主摄像机所拍摄画面中场地区域的平均垂直照度达到五个等级所分别对应照度值. 经模拟各照明环境下场地均匀度均较好, U_1 约为 0.4、 U_2 约为 0.6, 与照明设计 VI 级标准相当.

2.1.2 观众席照明设计

观众席照明设计指针对比赛大厅内观众席及墙壁进行的照明设计,设计区域为场地外所有区域。具体表示为如图5所示八部分,1表示正面一层观众席、2表示正面二层观众席、3表示正面三层观众席、4表示为转角观众席、5表示侧面一层观众席、6表示侧面二层观众席、7表示正面墙壁、8表示侧面墙壁。

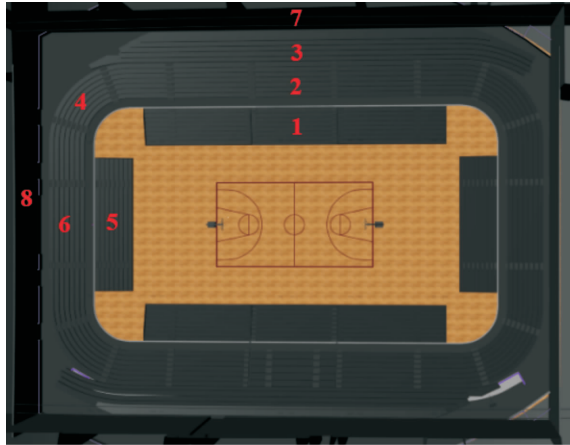


图5 比赛大厅观众席区域示意图

Fig.5 Schematic diagram of the audience area in the competition hall

根据标准要求,有电视转播要求时的观众席平均垂直照度主摄像机照度不得低于比赛场地主摄像机方向平均垂直照度的10%。由于比赛场地主摄像机方向照度选取了1 000、1 250、1 500、1 750、2 000 lx五种光环境,考虑标准规定,实际设计中观众席照度一般不大于场地照度及预实验情况,比赛大厅观众席照度值按与场地照度的比例从0.1~0.7,共设计7个等级,如表2所示。为保证观众席照度均匀性,在照明设计中同样采用平面灯。经测量观众席均匀度同样较好, U_1 约为0.4、 U_2 约为0.6。

表2 体育场馆比赛大厅观众席照度值

Tab.2 Illumination values for audience seats in sports venues and competition halls

比赛场地 照度/lx	观众席照度/lx						
1 000	100	200	300	400	500	600	700
1 250	125	250	375	500	625	750	875
1 500	150	300	450	600	750	900	1 050
1 750	175	350	525	700	875	1 050	1 225
2 000	200	400	600	800	1 000	1 200	1 400
背景/场 地照度比	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7

注:表中照度为主摄像机方向垂直照度。

2.2 实验观察点选取

由于体育场馆中观众可坐于观众席的任意位置,运动员可在比赛场地内任意位置自由运动,因此实验观察点的选取需要包含各种视看位置。据此,考虑所建立体育场馆为对称模型,故本实验在场馆一侧共选取了6个观察点,如图6所示。其中5个观察点位于观众席区域,用于模拟观众观看视角,高度为距该层观众席1.2 m;比赛场地内有一个观察点,用以模拟运动员视角,高度为距地面1.5 m。

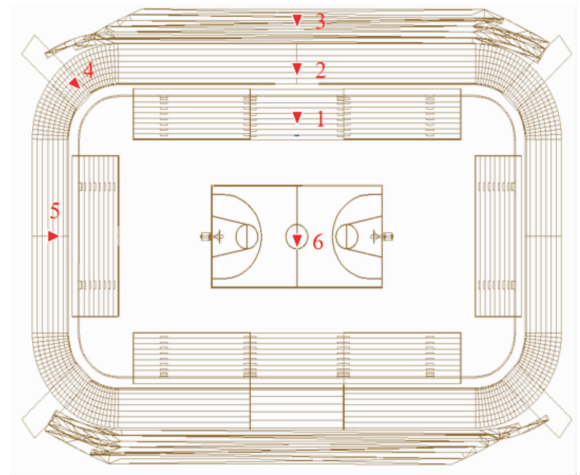


图6 观察点位置(▼为观察点)

Fig.6 Location of observation points (▼ for observation points)

2.3 实验全景图制作

体育场馆光环境视觉舒适感受实验主要是通过佩戴VR设备观察体育场馆比赛大厅的光环境,因此需要将每种光环境制作作为全景图导入VR设备中。本研究使用3DMAX软件进行全景图制作,并且为了确保全景图能真实反映所设计光环境,使用V-Ray渲染器中可以准确计算并显示照度值的照明分析工具“V-Ray照明分析”,通过该工具可对场景照明进行准确设计。本研究共需要制作6个观察位置的5种场地光环境和7种观众席光环境排列组合而成的不同位置、不同光环境的体育场馆比赛大厅全景图,即每个位置需要制作如表2所示的35种光环境,故共需制作210张全景图。全景图制作流程如图7所示,首先在已建模好的3DMAX实验场景中设置观察位置(即摄像机位置);之后在V-Ray渲染设置中设置摄像机视角,后使用云渲染平台进行渲染;渲染完毕后即可得到场景的全景图。所得全景图样式如图8所示。



图7 全景图制作流程

Fig.7 Panorama production process



图8 场地照度 1 500 lx, 观众席 900 lx 时观察点 2 全景图
Fig. 8 Panorama of observation point 2 at 1 500 lx site illumination and 900 lx audience

将全景图按位置分为 6 个文件夹, 命名为: 观察点 1~观察点 6; 每个文件夹下按场地内照度值分为 5 个子文件夹, 命名为: 场地照度 1 000、1 250、1 500、2 000 lx; 每个子文件夹下有 7 张场地内照度相同、观众席照度不同的全景图。将所有文件夹导入 VR 设备中, 供后续实验使用。

2.4 光环境视觉舒适感受评价实验内容与结果

2.4.1 实验内容及流程

本次实验所选用 VR 设备为小鸟看看公司开发的 Pico Neo3 VR 一体机, 实验主要内容为: 受试者佩戴 VR 设备, 进入体育场馆比赛大厅全景图模式, 以比赛大厅中央比赛场地为主要视看目标, 对整体环境进行观察, 随后对光环境视觉舒适感受进行评分。评分采用 7 分制的语义差别评价量表, 1~7 分分别代表极不舒适、不舒适、稍不舒适、一般、比较舒适、舒适、非常舒适。

本实验共有 20 名受试者参与, 包括 15 名男性, 5 名女性, 受试者的年龄在 20~30 岁之间, 所有实验参与人员的裸眼视力(或矫正视力)均在 5.0 以上, 且不存在眼科方面疾病。具体实验流程为:

(1)实验开始前, 受试者坐在指定位置上, 操作人员记录受试者信息(年龄、性别, 是否佩戴眼镜), 之后向参与者介绍实验流程及评价标准;

(2)受试者佩戴 VR 设备, 适应虚拟环境 30 s, 并熟悉相关操作;

(3)开始实验, 受试者调节 VR 设备, 进入观察点 1, 选择场地照度为 1 000 lx 的文件夹;

(4)受试者对文件夹内 7 张全景图依次浏览观察, 每张全景图观察时间不少于 30 s;

(5)实验操作人员提示受试者对视觉舒适感受

进行评分, 实验操作人员记录受试者评分;

(6)退出场地照度为 1 000 lx 的文件夹, 进入观察点 1 文件夹下其余子文件夹;

(7)重复(4)~(6)步骤, 直至该观察点所有光环境全部评价完成;

(8)退出观察点 1 文件夹, 进入其余观察点文件夹;

(9)重复(4)~(8)步骤, 直至所有观察点所有光环境全部评价完成。

部分实验过程如图 9 所示。



图9 视觉舒适感受实验

Fig. 9 Visual comfort experiment

2.4.2 实验结果

本次实验共收集 20 份数据, 对数据进行整理分析, 得到每个观察点位置的舒适感受评分与背景/场地比例的关系, 如图 10 所示。

由图可以看出, 所有观察点的视觉舒适感受评分皆呈现先上升再下降趋势, 表明观众席与场地照度对比过大或过小都会产生不舒适的视觉感受, 其最大值出现在观众席与场地的主摄像机方向垂直照度比例 0.3~0.5 的范围内。观众席不同位置曲线趋势相近, 说明不同观众席位置对光环境感受的影响不大; 观众席与场地内曲线有明显差异, 说明场地内运动员和观众席上观众对光环境的舒适感受有一定差异。

对不同位置、不同光环境下最大舒适感受出现的情况进行统计, 最大舒适感受出现在观众席/场地照度比为 0.3 时 9 次, 出现在观众席/场地照度比为 0.4 时 19 次, 出现在观众席/场地照度比为 0.5 时 2 次。由该数据可以看出, 相比于其他观众席/场地照度比例, 当比例为 0.4 时, 最容易让人产生舒适的感受。同时由图 10 可知, 比例为 0.3、0.5 时舒适感受评分与比例为 0.4 时差异不大。因此, 在照明设计中考虑视觉舒适感受时, 可依据观众席与场地主摄像机方向垂直照度值之比为 0.4 进行设计。

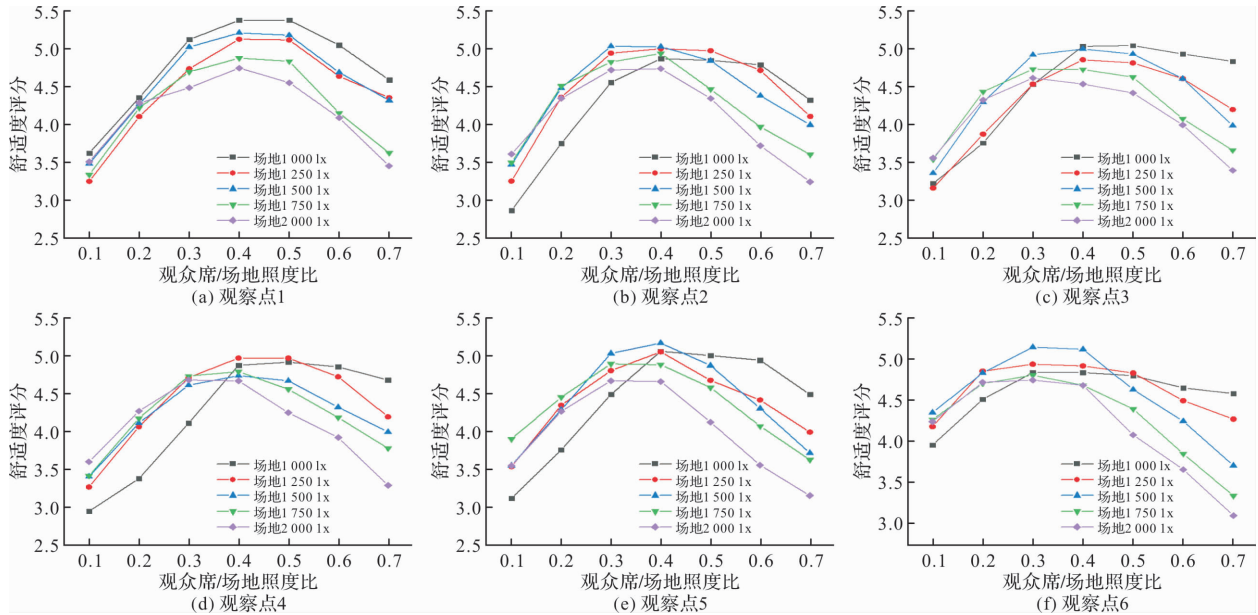


图10 不同观察点的舒适感受评分与观众席/场地比例关系

Fig. 10 Relationship between comfort scores at different observation points and audience/venue ratio

3 体育场馆视觉舒适感受与节能评价

3.1 结合视觉舒适的体育场馆光环境营造

为了验证在体育场馆照明设计中应用研究所得视觉舒适指标的合理性,需要分别营造考虑该指标前后的体育场馆光环境,以在此基础上开展评价实验。

体育场馆照明设计目标首先应满足照明的需求,其次是节能。目前照明设计更多地关注照明指标,对节能只是要求达标即可,谈不上最优。针对该问题,本研究在营造光环境时提出了一种逆设计的方法,在照明和节能之间寻找最佳的灯具组合方式。本研究使用适用于多目标优化问题的 NSGA-II 算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II)进行考虑视觉舒适指标前后的照明优化设计,相比于粒子群优化算法、遗传算法、模拟退火算法等,该算法计算快、鲁棒性强、更易接近全局最优解,在此类问题中具有较强优势,并且该算法会给出符合条件的多个解而非一个,可供场馆照明设计人员根据实际使用需求进行选择或灵活组合。算法中设计了如公式(1)、(2)所示的照明质量和照明能耗两个适应度函数,照明质量适应度函数包括比赛场地、观众席的照度及其均匀度,照明能耗适应度函数为灯具数量,具体如下。

(1)照明质量适应度函数为

$$f_1 = -f(E_{vmai})f(E_{vauux})f(E_h)f(E_g) \quad (1)$$

式中: $f(E_{vmai})$ 、 $f(E_{vauux})$ 、 $f(E_h)$ 和 $f(E_g)$ 分别表示比赛场地的主摄像机垂直照度及其均匀度、辅助摄像机垂直照度及其均匀度、水平照度均匀度

和观众席照度及其均匀度。

(2)照明能耗适应度函数为

$$f_2 = N \quad (2)$$

式中: N 为灯具数量,灯具采用非对称型 935W LED 灯。

体育场馆照明设计中两场景比赛场地区域照明皆依据标准中 V 级照明要求进行设计,观众席照度则分别为 560 和 140 lx,照度均匀度均为 $U_1 = 0.4$ 、 $U_2 = 0.6$,即同时考虑研究所提观众席照度应为场地照度 0.4 倍的结论和标准中不低于 0.1 倍进行设计的要求。根据设计结果,在 3DMAX 中进行灯具布置并进行渲染,两个场景光环境如图 11 所示。

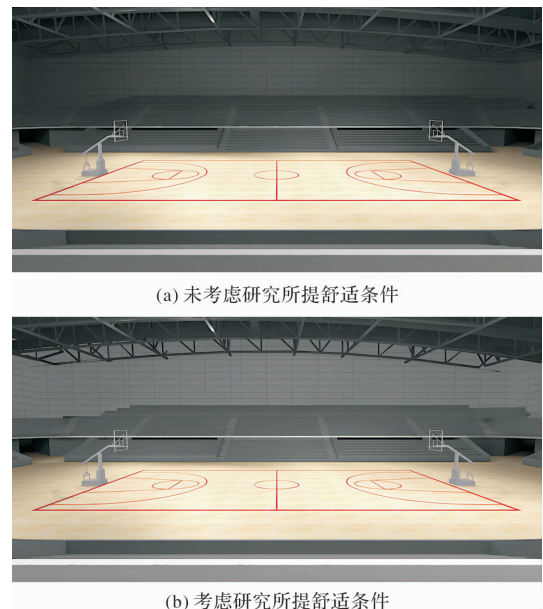


图11 体育场馆照明优化设计渲染图

Fig. 11 Rendering of optimized lighting design for sports venues

3.2 视觉舒适感受评价实验

3.2.1 实验内容

选择图 6 中 2、5、6 位置作为观察点, 制作两场景全景图并导入 VR 设备中用于实验. 本实验共有 20 名受试者参与, 共设置两个问题:

(1)照明设计加入舒适条件后, 视觉舒适感受是否有明显改善?

(2)请对该场景视觉舒适感受进行评分, 评分为 7 分制, 1 分为极不舒适, 4 分为一般, 7 分为非常舒适.

3.2.2 实验结果

本实验共收集 20 份数据, 对数据进行整理如表 3 所示. 由表可知, 在照明设计中加入本研究所提的视觉舒适条件后, 参与实验的 20 人中有 16 人觉得视觉舒适感受得到了明显的提高, 并且平均舒适感受评分也有显著上升, 在 7 分制下平均上涨 0.9 分. 综上, 加入所提视觉舒适条件后人的视觉舒适感受得到了明显改善, 光环境更加舒适.

表 3 视觉舒适对比实验数据

Tab. 3 Comparative experimental data of visual comfort

观察点	实验人数	加入舒适条件后, 视觉舒适感受是否有明显改善		舒适感受评分 (平均分)	
		是	否	加入视觉舒适条件后场景	未加入视觉舒适条件场景
1	20 人	16 人	4 人	5.41	4.45
2		16 人	4 人	5.36	4.37
3		16 人	4 人	5.25	4.50

注: 主观评价实验为 7 分制.

4 结论

(1)人的视觉舒适感受随着观众席与比赛场地主摄像机方向垂直照度比例的增大呈现先上升后下降的趋势, 表明过大或过小的光环境对比都会对人造成不舒适的视觉感受;

(2)当观众席与比赛场地主摄像机方向垂直照度比例在 0.3~0.5 范围内时, 观众及运动员能获得比较舒适的视觉感受, 当该比例为 0.4 时, 光环境能给人以最舒适的视觉感受;

(3)在照明设计中加入比赛场地及观众席区域照度比为 0.4 的条件后, 有约 80% 的受试者感觉视觉舒适感受得到了明显提升. 验证了在体育场

馆照明设计中加入所提舒适条件的合理性.

参考文献 References

[1] 李正鑫,高羽,刘经纬,等. 机遇与挑战:我国体育场馆智慧化转型发展策略[J]. 体育科技文献通报,2022,30(12):225-228.
LI Zhengxin, GAO Yu, LIU Jingwei, et al. Opportunities and challenges: strategy for the smart transformation and development of sports stadiums in China [J]. Bulletin of Sport Science & Technology, 2022, 30(12):225-228.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 体育场馆照明设计及检测标准:JGJ 153—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for lighting design and test of sports venues:JGJ 153—2016[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2016.

[3] 陈超泉,吴逢铁. 低眩光篮球场节能照明光学设计与优化[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(11):407-412.
CHEN Chaoquan, WU Fengtie. Optical design and optimization of energy-saving lighting for low-glare basketball courts [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022,59(11):407-412.

[4] 黄显雯,白荣,薛仁雨,等. 基于 DIALux 的室内篮球场照明设计与模拟[J]. 智能建筑电气技术,2018,12(4):39-42.
HUANG Xianwen, BAI Rong, XUE Renyu, et al. Lightin design and simulation of basketball infields based on DIALux[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2018, 12(4):39-42.

[5] 朱悦,林若慈. 体育场馆照明灯具位置和配光照明指标的影响[J]. 照明工程学报, 2015(3):68-75.
ZHU Yue, LIN Ruoci. Impact on lighting effects of luminaire position and it's light distribution in venues lighting[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2015(3): 68-75.

[6] 于瑛,崔梓豪,陈笑,等. “十四运”场馆场地照度分布研究及照明方案设计[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(5):781-789.
YU Ying, CUI Zihao, CHEN Xiao, et al. Research on illumination distribution and lighting scheme design of the venues of the 14th National Games[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021,53(5): 781-789.

[7] SUN Wenshing, TIEN Chuenlin, TSUE Chihsuan, et

- al. Simulation and comparison of the illuminance, uniformity, and efficiency of different forms of lighting used in basketball court illumination[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(29):186-194.
- [8] 于瑛,崔梓豪,陈笑,等.基于贪心算法的综合性体育场馆照明系统优化设计[J].*激光与光电子学进展*,2022,59(17):343-350.
- YU Ying, CUI Zihao, CHEN Xiao, et al. Optimal Design of a comprehensive gymnasium lighting system based on greedy algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(17):343-350.
- [9] PETRANOVIĆ Davor. Football stadium floodlight aiming by using a genetic algorithm with multi-step approach[J]. *Polytechnic and Design*, 2015, 3(2):135-143.
- [10] NATH Dipayan, SASWATI Mazumdar. Weighted sum based outdoor sports lighting designing using meta-heuristic algorithms[C]//2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020). Kerala, India: IEEE, 2020.
- [11] XIAO Hui, FANG Jing, ZHU Ping, et al. Energy-saving optimization of football field lighting via genetic algorithm[J]. *Sensor Letters*, 2014, 12(2):264-269.
- [12] 范文英. 基于神经网络算法的体育馆照明设计方法研究与应用[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.
- FAN Wenying. Research and Application of gymnasium lighting design method based on neural network algorithm[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2020.
- [13] 李炳华,常昊,王成,等.基于 PSO-SVM 的体育场馆照明计算与优化[J].*照明工程学报*,2020,31(4):33-39.
- LI Binghua, CHANG Hao, WANG Cheng, et al. The calculation and optimization of stadium lighting based on PSO-SVM[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2020, 31(4):33-39.
- [14] HAMEDANI Zahra, SOLGI Ebrahim, HINE, et al. Revealing the relationships between luminous environment characteristics and physiological, ocular and performance measures: An experimental study[J]. *Building and Environment*, 2020, 172:106702.
- [15] WANG Kun, HO Chunheng, ZONG Yan. Analysis of brightness and color temperature of liquid crystal display on visual comfort based on eye health monitoring of humans[J]. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 2020, 10(6):1359-1364.
- [16] 庞璐,韩卫然,严少飞.晋陕传统合院民居光环境研究——以两处民居室内采光为例[J].*西安建筑科技大学学报(自然科学版)*,2022,54(5):701-709.
- PANG Lu, HAN Weiran, YAN Shaofei. Study on the light environment of traditional courtyard dwellings in Shanxi and Shaanxi[J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2022, 54(5):701-709.
- [17] SHI Ligang, ZHANG Yuanxue, WANG Zhuoli, et al. Luminance parameter thresholds for user visual comfort under daylight conditions from subjective responses and physiological measurements in a gymnasium[J]. *Building and Environment*, 2021, 205:108187.
- [18] KEVIN V W, MEHLIKA I. Evaluating a new suite of luminance-based design metrics for predicting human visual comfort in offices with daylight[J]. *Leukos*, 2016, 12(3):113-138.
- [19] 陈燕达. 办公室环境 LED 照明舒适性研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- CHEN Yanda. The study of comfort in office lighting with LEDs[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [20] LIU Yilin, ZHANG Shanshan, WU Yue, et al. Studies on visual health features of luminous environment in college classrooms[J]. *Building and Environment*, 2021, 205:108184.
- [21] MARTIN M, JELLA P, THIES P, et al. Combining virtual reality and mobile eye tracking to provide a naturalistic experimental environment for shopper research[J]. *Journal of Business Research*, 2019, 100:445-458.
- [22] 刘雨霏. 虚拟光环境下导视亮度对比对行人注视行为影响的研究[D]. 泉州:华侨大学,2021.
- LIU Yufei. The influence of luminance contrast of signs on pedestrians' gaze behavior in virtual lighting environment[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2021.
- [23] GIOVANN C, ENRICO R, DANIEL N. Way-finding lighting systems for rail tunnel evacuation: A virtual reality experiment with Oculus Rift [J]. *Journal of Transportation Safety & Security*, 2016, 8(s1):101-117.
- [24] HEGAZY Muhammad, YASUFUKU Kensuke, ABE Hirokazu. An interactive approach to investigate brightness perception of daylighting in immersive virtual environments: Comparing subjective responses and quantitative metrics [C]//Building Simulation. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2022.
- [25] NATEEPHRA Worawan, MOTAMEDI Ali, FUKUD Tomohir, et al. Integrating building information modeling and virtual reality development engines for build-

- ing indoor lighting design[J]. Visualization in Engineering, 2017, 5: 1-21
- [26] CHEN Yaodong, CUI Zhe, HAO Luoxi. Virtual reality in lighting research: Comparing physical and virtual lighting environments[J]. Lighting Research & Technology, 2019, 51(6): 820-837.
- [27] ABD-ALHAMID Fedaa, KENT Michael, BENNETT Christopher, et al. Developing an innovative method for visual perception evaluation in a physical-based virtual environment [J]. Building and Environment, 2019, 162: 106278.
- [28] ROCKCASTLE Siobhan, CALABRESE Evon. Comparing perceptions of a dimmable LED lighting system between a real space and a virtual reality display[J]. Lighting Research & Technology, 2021, 53 (8): 701-725.
- [29] MA J H, LEE J K, CHA S H. Effects of lighting CCT and illuminance on visual perception and task performance in immersive virtual environments[J]. Building and Environment, 2022, 209: 108678.
- (编辑 李睿奇)
-
- (上接第 585 页)
- [12] 赵文雁, 马滔, 罗斌, 等. 大开口车辐式索承网格结构预应力施工技术研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(5): 23-33.
- ZHAO Wenyan, MA Tao, LUO Bin, et al. Research on prestressed construction technology of large-opening spoke cable-bearing grid structure[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5): 23-33.
- [13] 于敬海, 冷明, 闫明婷, 等. 基于位移补偿法的某椭圆形弦支穹顶施工模拟及监测研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(5): 91-98.
- YU Jinghai, LENG Ming, YAN Mingting, et al. Research on construction simulation and monitoring of an elliptical chord-supported dome based on displacement compensation method[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 91-98.
- [14] 王小盾, 方至炜, 刘红波, 等. 北方学院体育馆弦支穹顶施工过程温度效应研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(11): 1-6.
- WANG Xiaodun, FANG Zhiwei, LIU Hongbo, et al. Research on temperature effect during construction of string-supported dome of North College Gymnasium [J]. Industrial Architecture, 2016, 46(11): 1-6.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Steel structure design standard: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构工程施工规范:GB 50755—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for construction of steel structures: GB 50755—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- (编辑 李睿奇)