

激光与光电子学进展

基于贪心算法的综合性体育场馆照明系统优化设计

于瑛^{1*}, 崔梓豪¹, 陈笑¹, 孙晴²¹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 综合性体育场馆的场地照明存在灯具数量多、使用率低、初投资大等问题, 基于此, 对标 V 级照明标准, 以耗电量作为优化目标, 选择贪心算法, 提出针对手球场地的灯具位置和投射角度优化方案。基于现有灯具, 进一步提出针对篮球、排球场地灯具开关数量及投射角度优化调节方案。以“十四运”某场馆为例, 相比于人工布灯, 优化设计后手球场地 LED 灯具数量减少 16 盏, 总功率下降 19416 W, 耗电量减少 26%, 篮球、排球场地灯具耗电量分别下降 31% 和 56%。可见基于贪心算法的照明系统优化设计可以有效减少场地灯具数量, 不同比赛项目间灯具优化调节提高了灯具利用率, 不但节约了前期购置及安装成本, 而且在后期运行阶段节能效果显著。

关键词 光学设计; 场地照明; 综合性体育馆; 贪心算法; 照明标准; 节能

中图分类号 TM923

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1722002

Optimal Design of a Comprehensive Gymnasium Lighting System Based on Greedy Algorithm

Yu Ying^{1*}, Cui Zihao¹, Chen Xiao¹, Sun Qing²

¹*School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;*

²*Institute of Architecture Design, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China*

Abstract In comprehensive gymnasium, the lighting system suffers from disadvantages such as large number of lamps, low utilization rate, and large initial investment. Based on this, according to the class V lighting standard, taking power consumption as the optimization goal, and choosing a greedy algorithm, we propose an optimization scheme for the position and projection angle of lamps for handball courts. Furthermore, based on the existing lamps, an optimal adjustment scheme for the number of switches and projection angles of lamps in basketball and volleyball courts is proposed. Taking the venue of the 14th National Games as an example, compared with artificial lighting, the number of light-emitting diode lamps in the handball venue is reduced by 16, the total power is reduced by 19416 W, and power consumption is reduced by 26%. The power consumption of lamps and lanterns in basketball and volleyball courts is decreased by 31% and 56%, respectively. The optimized lighting system based on the greedy algorithm can effectively reduce the number of field lamps. The optimal adjustment of lamps between different competition events improves the lamp-utilization rate, thereby reducing the early purchase and installation cost as well as considerably saving energy in the later operation stage.

Key words optical design; venue lighting; comprehensive gymnasium; greedy algorithm; lighting standard; energy conservation

1 引言

近年来,随着体育事业发展如火如荼,体育场馆的改造及建设十分迅速,其中综合性体育场馆因其可满足多种使用需求而受到广泛关注。综合性体育

场馆一般可开展多种体育赛事,如篮球馆兼顾羽毛球、摔跤、柔道等比赛项目,有时还会举办一些展览、演唱会等文艺活动,这些需求不尽相同,但在进行体育场馆照明设计时都需考虑^[1],这对场馆照明设计提出了很大挑战。

收稿日期: 2021-11-23; 修回日期: 2021-12-19; 录用日期: 2021-12-28

通信作者: *yuying@xauat.edu.cn

目前,国际照明委员会(CIE)针对体育场馆照明设计颁布的文件只规定了照明设计的最低要求,对照明设计流程并没有予以规范^[2-3],从而导致在设计过程中过度依赖人工经验,造成设计冗余、能耗大的问题。已有研究人员针对体育场馆中灯具布置方式、配光曲线、功率和马道高度等对照度的影响进行了分析,旨在探究体育场馆的节能潜力,为照明节能设计提供参考^[4-7]。但仅依靠人工调节很难达到最佳的节能效果,因此有学者将优化算法与照明设计相结合,采用遗传算法和广义极值算法等优化算法,规划出某一比赛项目场地最优的灯具布局,在满足工作面照明要求的同时消耗功耗最低^[8-10]。然而在使用遗传算法等优化算法时,需要对目标函数、适应度函数等参数进行设计,且其参数设计直接影响着优化算法的结果。贪心算法是一种在不回溯前提下解决问题的方法,相比于其他优化算法,其只需要提供贪心策略,无需进行函数设计,常常被用来解决穷举类问题且具有较好效果^[11-12]。其思想就是在每一步的选择上做出当前情况下看起来最好的选择,逐步逼近给定的目标,其解决问题的策略也最接近人的日常思维^[13]。体育场馆灯具布置问题,本质上是一个需要穷举法才能解决的问题,因此将贪心算法应用于照明系统的优化设计中是可行的。综合性体育场馆场地照明还有其特殊性,设计要兼顾多种体育赛事及其他活动不同等级的照明需求,目前照明设计中各项目灯具自成一体,灯具利用率低,可见仅针对单一项目实现照明优化设计还远远不够。在此基础上提出满足不同照明需求的灯具优化调整算法也是综合性体育场馆场地照明系统优化设计方案中不可忽视的一部分。

基于此,本文以综合性体育场馆为研究对象,建立标准场馆模型,构建场地照度分布数据库,以V级照明为标准,以耗电量为优化目标,针对赛场面积最大的手球场地,基于贪心算法,优化场地灯具位置和投射角度,提出照明设计优化方案。并基于现有灯具,进一步提出针对其他项目,例如篮球、排球场地灯具开关数量及投射角度优化调节方案。最后以“十四运”某体育场馆为例,计算优化控制后的节能率,验证优化方法可行性,该研究为综合性体育场馆场地照明系统节能设计提供了解决方案。

2 场地照度数据库

灯具位置及投光角度影响了场地内各点照度,因此建立标准的场地模型,计算灯具在不同位置、所有可能投射角度时场地的照度数据,并在此基础上构建场地照度分布数据库,是进行场地照明系统优化设计的前提。

2.1 场地模型

为方便在实际工程中验证本文优化方法的可行

性,本文参考某满足V级照明的乙级体育馆相关参数在DIALux软件中对该场馆比赛场地进行了建模。如图1所示,所建场馆模型拥有手球、篮球和排球三种比赛场地,且场地中心均在场馆中央重合。场地采用双马道布灯方式,马道与灯具均为中心对称布置。

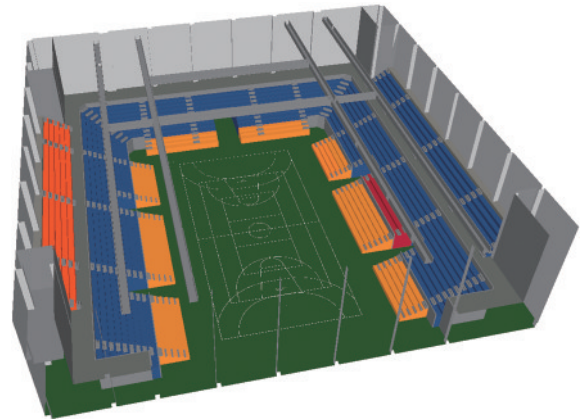


图1 体育场馆模型

Fig. 1 Model of sports venues

2.2 场地照度及计算方法

体育场馆照明标准^[14]规定水平照度(E_h)和主、辅摄像机方向垂直照度($E_{v,mai}$ 、 $E_{v,aux}$)是照明系统设计和照度相关的指标。水平照度取距地面1 m高处水平面上照度,主、辅摄像机方向垂直照度则采用如图2所示四个方向1.5 m高度处的垂直照度等效代替^[15-16],即Y方向垂直照度代替主摄像机方向垂直照度,X方向垂直照度代替辅助摄像机方向垂直照度。

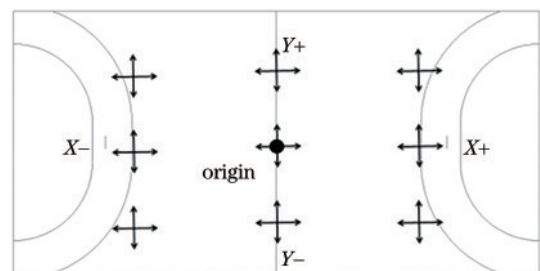


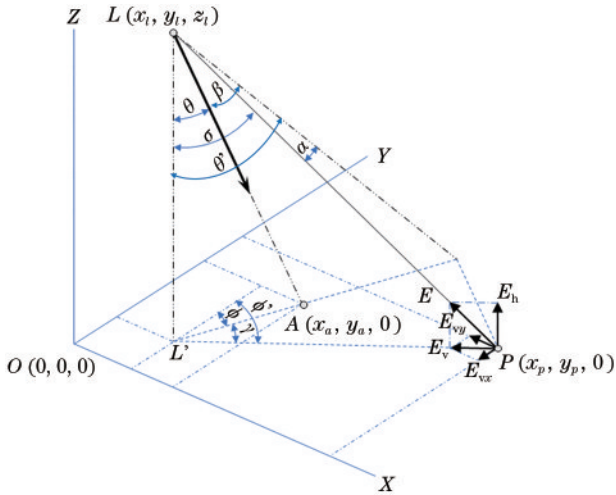
图2 垂直照度方向示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vertical illumination direction

一般来说,体育馆场地照明灯具的尺寸远远小于灯具的投光距离,因此,可将灯具视为点光源。以图3^[17]中灯具 $L(x_l, y_l, z_l)$ 为例,其瞄准点为 $A(x_a, y_a, 0)$,在某计算点 $P(x_p, y_p, 0)$ 产生的照度,可由灯具、场地上计算点、瞄准点三者之间的角度关系和计算点与灯具连线方向上的光强值求出。

灯具 L 在 P 点产生的水平照度 E_h 和垂直照度 E_v 分别为

$$E_h = \frac{I_{(\alpha, \beta)} \cdot \cos \sigma}{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + z^2}, \quad (1)$$

图3 点照度计算示意图^[17]Fig. 3 Schematic diagram of illumination calculation at a certain point^[17]

$$E_v = \frac{I_{(\alpha, \beta)} \cdot \sin \sigma}{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + z^2}, \quad (2)$$

式中： σ 为点光源 L 与 P 点夹角； $I_{(\alpha, \beta)}$ 为灯具射向 P 点光强值。

将垂直照度分解为 X 、 Y 方向垂直照度 E_{vx} 、 E_{vy} ，分别表示为

$$E_{vx} = E_v \cdot \sin \phi', \quad (3)$$

$$E_{vy} = E_v \cdot \cos \phi', \quad (4)$$

式中： ϕ' 为计算点 P 与光源 L 在 XOY 平面上投影 L' 的连线与 Y 轴的夹角。

2.3 场地照度数据库

由于体育场馆场地照度计算点间隔通常为 1 m 或 2 m ，在面积较大的比赛场地中往往有上百个计算点，使用照度公式进行计算工作量大、所需时间长，在计算过程中还要考虑场地反射情况和从灯具配光曲线文件中获取各个计算点与灯具连线方向光强值，计算过程较为繁琐。因此，为提高数据库构建效率并保证计算准确度，本文选用行业中使用多、认可度高的DIALux照明模拟软件在数据库构建过程中进行计算点照度数据计算。

照度数据库中数据主要为灯具在不同位置 and 不同投光角度下场地各点照度值，故需要对灯具可布置位置及灯具水平投光角度(ϕ)、俯仰投光角度(θ)进行设计，灯具布置间隔参考工程案例选择 1.5 m ，马道上可布置灯具位置根据标准^[14]中对灯具布置范围的要求进行确定。随着光学研究的进展^[18]，在照明中对光线进行设计可以有效提高灯具光线利用率^[19]，故各个位置灯具水平及俯仰投光角度范围以灯具最大光强方向指向比赛场地内为依据确定。

照度数据库构建过程如下：基于在DIALux软件中所建立的场地模型，在按键精灵中编写脚本程序操作软件，依据计算出的布灯范围和灯具投光角度范围，

将四盏灯具中心对称布置于马道上，以 1° 为步长调整灯具水平角度和俯仰角度，进行模拟计算，计算网格大小为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，该位置所有角度对应照度数据计算完毕后，调整灯具位置，重复上述计算过程，直至所有灯具位置、所有灯具角度照度数据计算完毕。每次计算结果均保存为PDF文件，而后编写Python程序将PDF里数据提取并按照水平照度、 X 、 Y 方向垂直照度分类，保存成MATLAB软件易于读取的CSV格式文件，用于以后在编写贪心算法程序寻优使用。

经计算，场地照度数据库共130603组数据。每组数据包括计算序列号、马道位置信息、灯具位置信息、灯具投光角度（俯仰投射角度和水平投射角度）、场地中计算点的水平或垂直照度值信息及对应照度值总和、均匀度。

3 基于贪心算法的手球场地照明优化设计

灯具位置及投光角度选择是体育场馆照明设计的重要步骤，其直接影响到场地的照明效果和投入成本，选择所建模型中面积最大的手球场地进行贪心算法灯具优化布置，可在验证贪心算法可行性的同时，为后续场地面积较小的篮球、排球项目照明调节设计提供优化基础。

3.1 灯具位置优化方法

由于灯具投射到场地上会产生水平照度、 Y 和 X 方向垂直照度，并能计算出对应均匀度，且满足照度叠加原理。因此，本文提出一种灯具布置贪心策略，其要求是在满足V级照明标准的同时，所使用的灯具数量最少，具体贪心策略如下：寻找此时场地照度最小的位置，并在数据库中寻找该位置的照度最大值，快速提高场地照度均匀度，产生该最大值的灯具即是添加的下一盏灯具，记录该灯具的位置和投射角度，并在数据库中找到该灯的照度数据与场地上原有数据叠加，并计算均匀度。循环以上过程，直至满足标准要求。

本节选择面积最大的手球场地为研究对象，根据贪心策略，在MATLAB软件中编写手球项目灯具布置贪心算法，因需要同时考虑水平照度 E_h 和 Y 、 X 方向垂直照度 E_{vy} 、 E_{vx} 三个指标，按功能将主程序分为初始化子程序、判断子程序和加灯子程序，如图4所示。

1) 初始化子程序

初始化子程序主要用于确定场地中前两盏灯具位置。由于贪心算法是根据第一盏灯具布置后的场地照度情况，执行贪心策略，优化灯具布置，因此在算法执行前必须给出第一盏灯具位置，且该位置选取十分重要，其会影响下一盏灯具的选取进而影响整体结果。经验证，当以 Y 方向垂直照度平均值最大为条件选取第一盏灯具时，贪心算法布灯方案最优，故以此作为第一盏灯具位置选择依据。

确定第一盏灯具位置后，开始执行贪心策略，即找

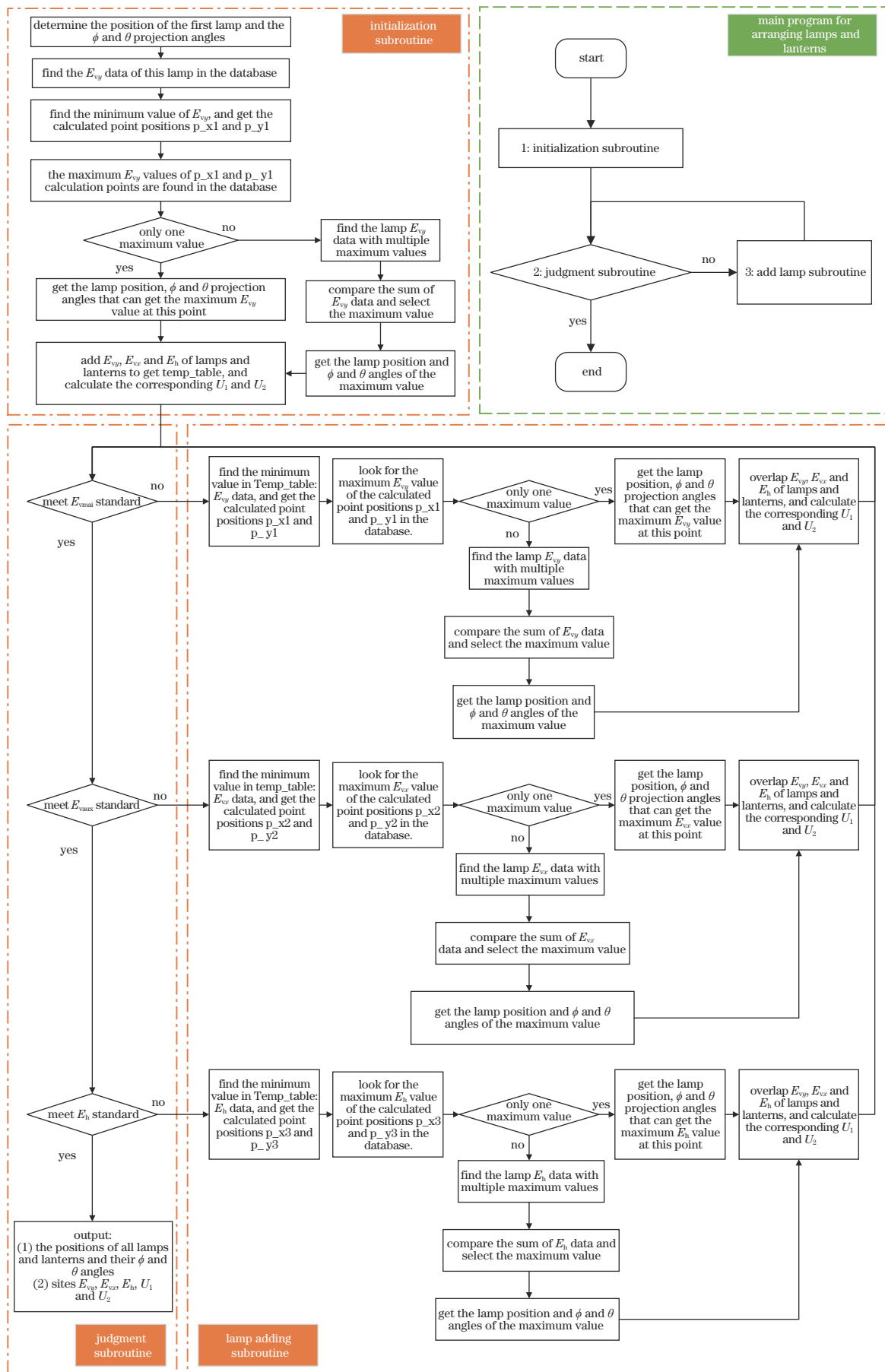


图 4 灯具布置贪心算法流程图

Fig. 4 Greedy algorithm flow chart of lamp layout

到场地中 E_{vy} 最小的计算点,以对该点 E_{vy} 贡献最大为第一选择依据,对整体场地照度贡献最大为第二选择依据,在手球照度数据库中搜索最合适的灯具布置位置及投光角度,据此布置灯具,并将该位置灯具照度数据与之前确定的灯具照度数据叠加,记录于场地照度记录表 temp_table 中。

2) 判断子程序

判断子程序主要用于判断此时场地照度及均匀度是否符合照明设计要求。根据标准^[14]可知,Ⅳ级及以上等级照明场馆对主摄像机方向的垂直照度要求最高,对辅助摄像机方向的垂直照度要求次之,对水平照度的要求最低。贪心算法在优化灯具布置过程中,按照照度要求由高到低进行优化设计,即先满足 E_{vmai} ,再满足 E_{vaux} ,最后满足 E_h 。初始化子程序中依据 E_{vy} 寻找第二盏灯具位置正是基于此。

3) 加灯子程序

加灯子程序主要用于在初始化子程序后,基于贪心策略,完成场地灯具布置。其整体思路与初始化子程序布置第二盏灯具相似。

3.2 结果与验证

依据贪心算法对手球场地进行灯具优化布置,可得到场地灯具布置数量、位置、投光角度参数和各照度及均匀度数据,据此布置灯具后手球场地照明如图 5 所示,照度指标如表 1 所示。

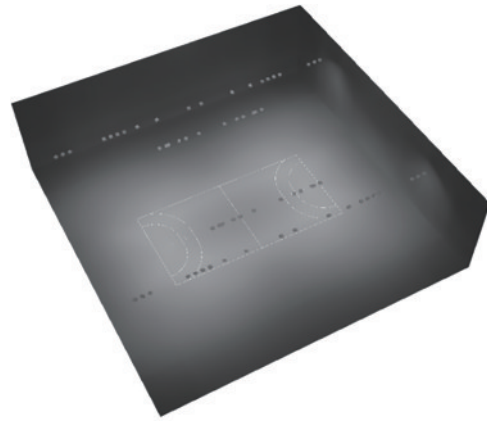


图 5 手球场地照明渲染图

Fig. 5 Lighting rendering of handball field

为对灯具布置方法进行验证,探究经程序计算的最终场地照度结果是否准确且其是否相对于工程实际中人工布置灯具具有优势,在由 DIALux 建立的体育场模型中,将灯具布置在经贪心算法计算得到的马道位置,并依据算法结果调整投光角度,可得到 DIALux 照度模拟值如表 1 所示。为方便对比,工程实际场地照度情况也总结在表 1 中。表 1 中,1 为手球贪心算法结果,2 为 DIALux 计算结果,3 为某体育馆手球照明设计案例相关指标值, 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。

表 1 手球场地照明设计结果及对比

Table 1 Handball court lighting design results and comparison

Number	E_h /lx	E_h		E_{vy} /lx	E_{vy}		E_{vx} /lx	E_{vx}		Lamp power /W	Number of lamps
		U_1	U_2		U_1	U_2		U_1	U_2		
1	2572	0.77	0.86	1464	0.81	0.89	1089	0.52	0.72	939	56
2	2570	0.76	0.85	1463	0.81	0.89	1089	0.52	0.72	939	56
3	2869	0.83	0.88	1478	0.63	0.76	1084	0.73	0.62	1000	72

可以看出,贪心算法照明设计结果与 DIALux 模拟结果几乎一致,说明本文编写的照明设计程序可靠。当照明设计达到 V 级照明要求时,贪心算法所提供的灯具布置方案仅使用了 56 盏功率为 939 W 的 LED 灯具,总功率为 52584 W,而工程实际案例中使用了 72 盏功率为 1 kW 的 LED 灯具,总功率为 72 kW。因此,相比于人工布灯,采用本文设计的贪心算法可以节约功率 19416 W,降低能耗约 26%,同时减少 16 盏灯具的购置费用。

实验结果表明,基于贪心算法的单一项目灯具布置方法可以减少灯具使用数量,降低灯具使用功率,具有较好的节能效果。

4 其他项目的灯具优化调节

不同比赛项目间灯具的利用率是影响综合性体育馆照明设计的重要因素,其决定了照明系统建造成本和照明能耗,因此在手球场地灯具布置基础上,通过

优化调节灯具角度、开启数量以满足篮球、排球项目使用需求,是提高节能设计的关键一环。

4.1 基于贪心算法的灯具调节优化方法

篮球比赛场地面积小于手球场地,因此,在相同等级照明下,篮球项目相比于手球项目所使用灯具数量应该更少。故以手球场地灯具布置方案为基础,通过对灯具开启数量和投光角度的调节,来满足篮球项目的照明要求,排球场地照明优化设计思路与篮球场地相同。希望以此实现不同项目间灯具的调节,满足综合性体育馆多种比赛使用需要。

灯具调节贪心策略与第 3 节中灯具布置贪心策略大致相同,仅需对贪心算法程序中的数据库进行修改,以篮球项目为例,由于要在手球场地灯具布置方案基础上调整灯具,有必要进一步对所建立的数据库进行修改,根据手球场地灯具布置位置,考虑篮球比赛中灯具投射角范围,将照度数据库中对对应位置的所需投射角度的灯具数据提取出来,形成一个新的数据库。然

后在此数据库中进行灯具调节设计,由于修改后数据库规模小于原来数据库,程序运算速度也得到了提高。修改后的主程序框图如图 6 所示,即在之前主程序中加入数据库修改子程序,其余子程序保持不变。

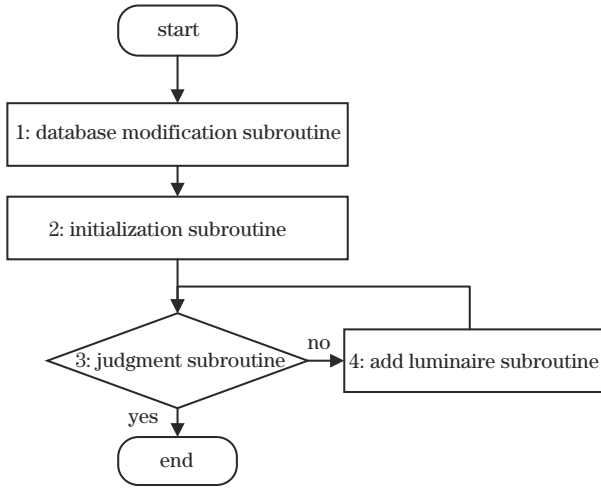


图 6 不同项目间贪心算法主程序框图

Fig. 6 Main program block diagram of greedy algorithm between different projects

4.2 结果与验证

依据灯具调节优化方法进行不同比赛项目间使用灯具调节,调整灯具后篮球、排球场地照明分别如图 7、8 所示。为对基于贪心算法的灯具调节方法程序的正确性和其相对于人工布置灯具的优越性进行验证,分别在篮球和排球场地中对比了贪心算法设计结果、DIALux 软件模拟结果和实际工程照明设计案例,对比结果如表 2、3 所示。

可以看出,贪心算法照明设计结果与 DIALux 模拟结果几乎一致,说明本文编写的照明调节程序可靠。在篮球场地中,当照明设计达到 V 级照明要求时,贪心算法所设计的灯具布置方案仅使用了 44 盏功率为 939 W 的 LED 灯具,而工程实际案例中使用了 60 盏功

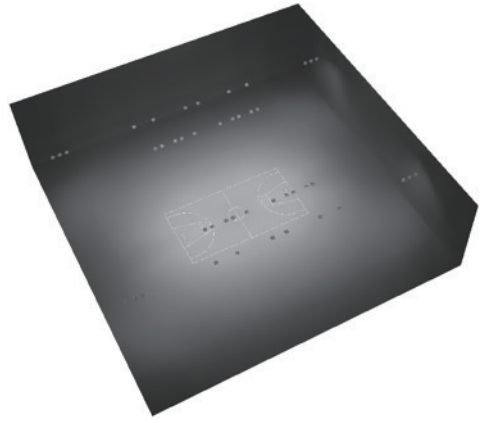


图 7 篮球场地照明渲染图

Fig. 7 Lighting rendering of basketball court

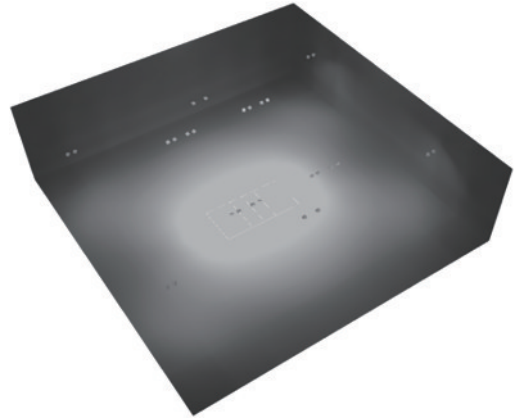


图 8 排球场地照明渲染图

Fig. 8 Lighting rendering of volleyball court

率为 1 kW 的 LED 灯具,总功率为 60 kW,因此,相比于人工布灯,采用贪心算法所设计方案可节约电能 18 kW·h,降低能耗约 31%,并减少 16 盏灯具购置费用。对于排球项目,仔细对比工程案例中篮球和排球的灯具设计数量、位置和安装角度可以发现,排球场地照明仍使用篮球场地照明方案,而排球场地比篮球场

表 2 篮球场地照明设计结果及对比

Table 2 Basketball court lighting design results and comparison

Number	E_h / lx	E_h		E_{vy} / lx	E_{vy}		E_{vx} / lx	E_{vx}		Lamp power / W	Number of lamps
		U_1	U_2		U_1	U_2		U_1	U_2		
1	3162	0.82	0.89	1821	0.68	0.81	1079	0.63	0.79	939	44
2	3161	0.85	0.92	1806	0.72	0.83	1086	0.66	0.81	939	44
3	2791	0.88	0.91	1489	0.64	0.76	1095	0.74	0.84	1000	60

表 3 排球场地照明设计结果及对比

Table 3 Volleyball court lighting design results and comparison

Number	E_h / lx	E_h		E_{vy} / lx	E_{vy}		E_{vx} / lx	E_{vx}		Lamp power / W	Number of lamps
		U_1	U_2		U_1	U_2		U_1	U_2		
1	3347	0.72	0.84	1869	0.86	0.72	1130	0.64	0.75	939	28
2	3243	0.80	0.88	1809	0.78	0.87	1076	0.65	0.79	939	28
3	2855	0.88	0.92	1577	0.86	0.77	1117	0.88	0.80	1000	60

地面积要小,如此设计存在设计过量问题,而依据贪心算法所设计的灯具布置方案,仅使用了 28 盏 LED 灯具即达到 V 级照明要求,减少了 32 盏灯具的购置费用,可节约电能 33 kW·h,降低能耗约 56%。

篮球和排球比赛场地照明都是在前一较大面积场地灯具布置基础上,通过调节灯具开启数量和投光角度来满足照明要求的,没有增加新的灯具,节省了照明系统的建设成本,同时也减少了能耗。结果表明,采用贪心算法进行不同比赛项目间灯具优化调节相对于人工设计的调解方法具有优越性。

5 结 论

基于所构建的“十四运”某综合性体育场馆模型和场地照度数据库,以手球项目为对象,以耗电量为优化目标,提出了一种基于贪心算法的灯具优化布置方法。该方法可从场地照度数据库中逐步搜索出最合适的灯具布置位置及投光角度,进而得出相对最优解。与工程实例相比,使用本文方法进行手球场地照明设计,可节省灯具 16 盏,节约功率 19416 W,降低能耗约 26%,具有良好的节能效果。同时为了满足综合性体育场馆的多种使用需求,进一步提出了一种基于贪心算法的灯具调节优化方法。通过调节手球场地灯具的开启数量和投射角度,即可满足篮球、排球项目的照明需求,耗电量分别下降 31% 和 56%。由此可见,基于贪心算法的体育场馆照明优化设计方法既能实现单一项目灯具最优布置,又能实现多种项目灯具的最优调节,最大程度地提高了灯具利用率,节能效果显著。

参 考 文 献

- [1] 王春燕, 吴旭辉, 陈华. 体育场馆电气设计[J]. 现代建筑电气, 2010, 1(5): 53-56.
Wang C Y, Wu X H, Chen H. Discussion about electric design of stadium[J]. Modern Architecture Electric, 2010, 1(5): 53-56.
- [2] CIE. CIE 083: 2019 guide for the lighting of sports events for colour television and film systems, 3rd edition [R]. Vienna: International Commission on Illumination (CIE), 2019.
- [3] 何鹏林, 孙岳, 种粟. 室外运动场地和区域照明的眩光评价系统(CIE 技术报告 No.112—1994)[J]. 中国标准导报, 2008(4): 13-16.
He P L, Sun Y, Chong L. Glare evaluation system for use within outdoor sports and area lighting(CIE report No. 112—1994) [J]. China Standards Review, 2008(4): 13-16.
- [4] 赵凯, 林若慈. 体育场馆照明节能模拟计算分析[J]. 照明工程学报, 2015, 26(1): 37-44.
Zhao K, Lin R C. Simulation calculation of the energy-saving analysis in venues lighting[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2015, 26(1): 37-44.
- [5] 韩本慧. 体育建筑环境下的照明设计研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [6] Han B H. The research on illumination design under the environment of sports architecture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [7] 田紫娟. 基于照明节能的综合体育馆人工光环境对比模拟研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
Tian Z J. Comparative simulation of artificial light environment in comprehensive gymnasium based on lighting energy saving[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [8] 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 Y, Cui Z H, Chen X, et al. Research on illumination distribution and lighting scheme design of the venues of the 14th National Games[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(5): 781-789.
- [9] Petranovic D. Football stadium floodlight aiming by using a genetic algorithm with multi-step approach[J]. Polytechnic and Design, 2015, 3(2): 135-143.
- [10] Cassol F, Schneider P S, Franca F H R, et al. Multi-objective optimization as a new approach to illumination design of interior spaces[J]. Building and Environment, 2011, 46(2): 331-338.
- [11] Xiao H, Fang J, Zhu P, et al. Application of genetic algorithms in football field lighting for energy-saving[C]// The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC), May 31-June 2, 2014, Changsha, China. New York: IEEE Press, 2014: 664-669.
- [12] 陆国锋. 基于多约束多目标的旅游路线推荐及关键算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
Lu G F. Research on key algorithm of trip recommendation based on multi-constrain and multi-objective[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [13] 雷鹏, 张志红. 篮球场灯光照明问题的算法设计[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2007, 23(1): 39-41.
Lei P, Zhang Z H. Algorithm design for the problem of illuminating a basketball field[J]. Ludong University Journal (Natural Science Edition), 2007, 23(1): 39-41.
- [14] 柴荣. 基于贪心算法的物流配送系统设计与实现[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
Chai R. The design and realization of the logistics distribution system based on the greedy algorithm[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014.
- [15] 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, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for lighting design and of sports venues: JGJ 153—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [16] 赵建平. 体育场馆照明标准及工程检测[J]. 演艺科技, 2019(1): 7-11.
Zhao J P. Lighting standards and engineering inspection of stadiums[J]. Entertainment Technology, 2019(1): 7-11.
- [17] 潘宁, 王可, 臧旭玲. 对我国现行体育场馆照明检测标准与方法的理解与操作[J]. 运动, 2011(9): 136-

- 138, 145.
- Pan N, Wang K, Zang X L. Understanding and operation of current lighting inspection standards and methods for sports venues in China[J]. Sport, 2011(9): 136-138, 145.
- [17] 孙晴, 王德炜. 第十四届全国运动会游泳馆竞赛场地照明指标研究[J]. 照明工程学报, 2020, 31(1): 164-171.
Sun Q, Wang D W. Lighting indexes of swimming ground in the 14th national games natatorium[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020, 31(1): 164-171.
- [18] Dudley J M. Light, lasers, and the Nobel prize[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(5): 050501.
- [19] 朱民, 楼俊, 潘玉珏, 等. 基于新型LED准直系统的自由曲面均匀照明设计[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0422002.
Zhu M, Lou J, Pan Y J, et al. Design of freeform surface with uniform illumination based on new LED collimation system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0422002.