

## 9.4 大学校园路灯安置的优化分析

### 9.4.1 问题的提出

大学校园往往安置很多路灯,目的自然是为了保证晚上同学们的安全。然而,有时路灯效果并不尽如人意,晚上交通繁忙的某些路段灯光十分幽暗,自行车相撞事件时有发生。

分析其原因,大抵是路灯的安装依靠经验进行设置,同时过于注重路灯的样式和造型美观,并没有从照度的角度进行定量的考虑。为此,本案例提出校园路灯的安置优化问题,用系统工程的方法,以节约能源(即减少路灯数目)为主要目标,以满足照度要求为主要标准,建立以定量计算为依据的路灯安置模型,并在模型的基础上分析某大学校园内的现有路灯的不足,为新校区的路灯规划提供参考。

### 9.4.2 背景知识

#### 1、一些专业词汇的定义

- (1) 光强度: 光源在一定范围内发出可见光辐射强弱的物理量。以光源在某一方向上单位立体角所辐射的能量来量度, 单位为: 坎德拉。
- (2) 立体角: 一个锥面所围成的空间部分, 它以锥顶为心的单位球面被锥面所截的面积来度量。
- (3) 通量: 人眼所能感觉到的光辐射的功率。单位时间光辐射的能量和相对视见率的乘积, 单位: 流明。
- (4) 照度: 单位面积上得到的光通量, 单位: 勒克司 (lux)。

- (5) 照度定律: 点光源  $O$  与预备照明平面的距离为  $h$  时, 平面上  $A$  点的照度为:

$$E = \frac{I}{l^2} \cos \theta = \frac{Ih}{l^3}$$

其中  $I$  为光源的发光强度,  $\theta$  为光线  $OA$  与预备照明平面的法

线的夹角,  $l$  为光源与点  $A$  的距离。

- (6) 常规照明: 灯具安装在高度通常为 15m 以下的灯杆上, 按一定间距有规律地连续设置在道路的一侧、两侧或中间分车带上进行照明的一种方式。采用这种照明方式时, 灯具的纵轴垂直于路轴, 使灯具所发出的大部分光射向道路的纵轴方向。
- (7) 截光型灯具: 灯具的最大光强方向与灯具向下垂直轴夹角在  $0^\circ \sim 65^\circ$  之间,  $90^\circ$  角和  $80^\circ$  角方向上的光强最大允许值分别为  $10\text{cd}/1000\text{lm}$  和  $30\text{cd}/1000\text{lm}$  的灯具。且不管光源光通量的大小, 其在  $90^\circ$  角方向上的光强最大值不得超过  $1000\text{cd}$ 。
- (8) 半截光型灯具: 灯具的最大光强方向与灯具向下垂直轴夹角在  $0^\circ \sim 75^\circ$  之间,  $90^\circ$  角和  $80^\circ$  角方向上的光强最大允许值分别为  $50\text{cd}/1000\text{lm}$  和  $100\text{cd}/1000\text{lm}$  的灯具。且不管光源光通量的大小, 其在  $90^\circ$  角方向上的光强最大值不得超过  $1000\text{cd}$ 。
- (9) 非截光型灯具: 灯具的最大光强方向不受限制,  $90^\circ$  角方向上的光强最大值不得超过  $1000\text{cd}$  的灯具。

2、 道路路灯照明的有关国家标准（CJJ 45-2006）

(1)《中国道路照明设计标准》第 3.5.1 条：主要供行人和非机动车混合使用的商业区、居住区人行道路的照明标准值应符合表 9-21 的规定。

表 9-21 人行道路的照明标准值

夜间行人流量	区域	路面平均照度维持值	路面最小照度维持值	最小垂直照度维持值
流量大的道路	商业区	20	7.5	4
	居住区	10	3	2
流量中的道路	商业区	15	3	2
	居住区	7.5	1.5	1.5
流量小的道路	商业区	10	3	2
	居住区	5	1	1

(2)一般道路采用常规照明方式，并应符合《中国道路照明设计标准》第 5.1.2 条的规定（表 9-22）。

表 9-22 灯具的配光类型、布置方式与灯具的安装高度、间距的关系

配光类型	截 光 型		半 截 光 型		非 截 光 型	
布置方式	安装高度 H(m)	间距 S(m)	安装高度 H(m)	间距 S(m)	安装高度 H(m)	间距 S(m)
单侧布置	$H \geq W_{eff}$	$S \leq 3H$	$H \geq 1.2W_e$	$S \leq 3.5H$	$H \geq 1.4W_{ef}$	$S \leq 4H$
双侧交错布置	$H \geq 0.7W_{eff}$	$S \leq 3H$	$H \geq 0.8W_{eff}$	$S \leq 3.5H$	$H \geq 0.9W_{ef}$	$S \leq 4H$
双侧对称布置	$H \geq 0.5W_{eff}$	$S \leq 3H$	$H \geq 0.6W$	$S \leq 3.5H$	$H \geq 0.7W_{ef}$	$S \leq 4H$

9.4.3 校园路灯设计的定性分析

1、光源类型的选择

校园室外路灯照明系统所采用光源的主要类型有：白炽灯、高压汞灯、高压钠灯、节能灯（紧凑型荧光灯）等。

白炽灯色柔和，显色性好，价格便宜、使用方便；且不需要镇流器与之匹配，具有灯泡瓦数可以随意更换的特点。故在校园部分幽静的地方可考虑选择白炽灯。节能灯发光效率高，在不需调光的地方节能灯在节能方面比白炽灯具有明显的优势。高压钠灯与高压汞灯都具有发光效能高、使用寿命长的特点，室外路灯照明中应用最为普遍。但高压钠灯优点更突出，寿命更长，光效更高，透雾性能强，满足对道路照明节能的要求，也减轻了日常路灯设施的维护量。虽然高压钠灯具有显色性较差的缺点，但对于道路照明其不是主要评价指标。

鉴于上述各种光源的特点，综合比较衡量，在校园主干道路照明中宜优先选用高压钠灯，在校园幽静支路上可以采用白炽灯或节能灯。目前实际情况是校园主干道上普遍采用了节能灯或紧凑型荧光灯，亮度较低，在大的交叉路口加装高压钠灯，亮度较高。

2、灯具类型的选择

道路照明灯具按光强分布可分成三类：截光型灯具，半截光型灯具，非截光型灯具。

截光型灯具的眩光较轻，但道路周围地区较暗，主要用于快速路常规道路照明。半截光型灯具可以获得较高的路面亮度与亮度均匀度，对水平光线有一定程度的限制，同时横向光线也有一定程度的延伸，有眩光但不太严重，主要用于城市的主干路、次干路和支路常规道路照明。非截光型灯具眩光严重，但看上去有一种明亮感，用于车速较低的街道、公园、景区道路照明。

工程设计中对于对眩光有较高要求的校园主干道采用截光型或半截光型灯具，以减少眩光危害，保证车辆行驶安全；对于眩光要求比较宽松，对照明效果较高的支干道和辅助道路可采用非截光型灯具，以达到明亮的照明效果。

### 3、路灯基础

路灯基础应根据具体的人文地理环境、灯杆设计高度、灯杆承受荷载、风载来进行科学设计。目前校园路灯基础螺栓一般采用正四方形分布，结合路灯供应商的灯杆法兰盘，可计算出预埋件螺栓的深度及开孔位置，同时在基础内预埋电缆套管、固定接地极，以方便混凝土浇筑及路灯安装。

### 4、路灯接地

室外灯具覆盖范围大、灯具基础小，通常不具备作等电位联结的有利条件，故一般不做等电位联结。由于路灯的灯杆均为金属灯杆，灯杆的接地非常重要。但因没有专门针对路灯接地的规范和规程要求，实际工程设计和施工中路灯接地的做法五花八门，总体来说适用于室外路灯照明系统是 TN-S 及 TT 系统，一般推荐使用 TN-S 系统，其安全性好、做法规范，同时也是一种安全可靠、便于使用、经济的接地形式。

TN-S 系统是把工作零线 N 和专用保护线 PE 严格分开的供电系统，即 N 线与灯杆绝缘，灯杆与接地极连接，回路供电开关采用漏电开关。系统正常运行时，专用保护线上不带电流，只是工作零线上有不平衡电流。PE 线对地没有电压，所以电气设备金属外壳接零保护是接在专用的保护线 PE 上，安全可靠。

### 5、路灯控制

室外路灯照明系统的路灯控制方式很多，传统的控制方式有光控和时控，两者都具有设备简单、安装维护方便、价格便宜的优点，但缺点也较明显：光控系统控制的准确性较差，在天气条件不好的情况下容易误动作；时控系统开启和熄灭时间固定，不能适应不同季节开关时间变化的要求。

基于校区特殊的分区特点，室外路灯照明应能在深夜自动或手动关闭部分非重要灯光，以节约能源。现在我校主要道路采用正常照明方式，即设置固定时间照明的时控系统，校园辅助通道采用隔盏换相照明方式，以节约电能。

## 9.4.4 模型的准备

### 1、模型假设

- (1) 以食堂到校医院路段为参考路段，模型建立过程中用到的相关数据以此路段实际数据为依据。
- (2) 不同路段所需的照度要求不同，我们以《中国道路照明设计标准》第 3.5.1 条中流量大的居住区人行道路标准中的路面最小照度标准值作为我们的标准(不考虑路面平均照度和路面最小垂直照度)；

- (3) 参考路段路灯没有反射罩，故本模型中不考虑的灯具的反射率；
- (3) 建立模型时，认为灯具是新的，维护系数取 1，不考虑路面的反射系数；
- (4) 照明强度直接影响可见度，只有照明强度不低于某定值时，才能认为物体可见；
- (5) 在同一路段上，所安装的路灯是一样的，且路灯均匀分布；
- (6) 认为路灯发光部分为点光源。

## 2、符号约定

$p$ : 路灯功率，取 120W

$h$ : 为路灯的高度 (路灯的发光点到地面的垂直距离)

$l$ : 为两路灯之间的距离

$d$ : 为研究路段的路面宽度, 取 8m

$C_0$ : 路面最小照度，根据《中国道路照明设计标准》第 3.5.1 条为 3 lux

$\eta$ : 路灯的发光效率，根据常用光源的发光效率，取 60 (lm/w)

## 9.4.5 模型的建立与求解

### 1、一盏路灯的数学模型

由物理学知识可知，被光线照射的物体的亮度依赖于它与光源之间的距离平方的倒数和光线的投射角度。路面上A点的光照度为

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{I \sin \alpha}{R^2} \\
 &= \frac{Ih}{(r^2 + h^2)^{3/2}} \\
 &= \frac{\eta p h}{4\pi (r^2 + h^2)^{3/2}}
 \end{aligned}$$

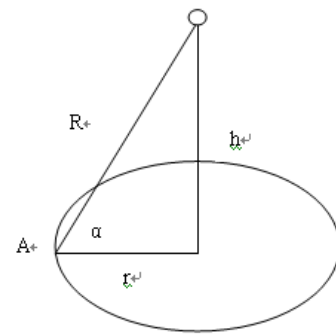


图 9-14 一盏路灯照明示

如图 9-14 所示, 其中  $h$  为路灯的高度,  $I$  为路灯的发光强度,  $p$  为路灯的功率,  $\eta$  是路灯的发光效率,  $O$  是路灯杆子与水平地面的交界点, 地面点  $A$  点到路灯的水平距离为  $r$ .

### 2、多路灯安装方案

常规路灯照明的布置可分为单侧布置、双侧交错布置、双侧对称布置、中心对称布置和横向悬索布置五种基本方式 (图9-15) :

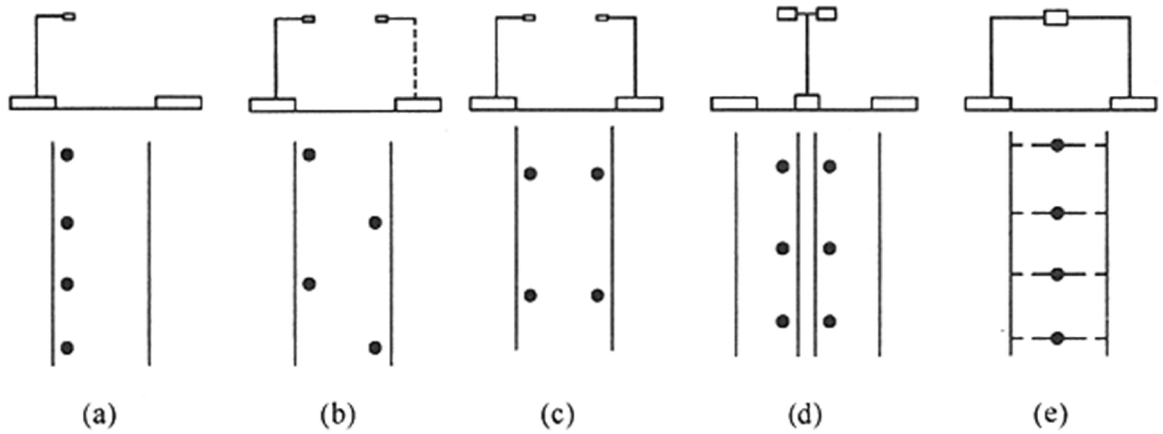


图9-15 常规照明灯具布置的五种基本方式

针对选定路段的实际情况，我们考察三种布置方案：单侧布置、双侧交错布置、双侧对称布置。主要目的是确定路灯高度 $h$ 和路灯之间的距离 $l$ ，在满足照度要求的情况下使得路灯之间的距离最大，从而达到节能的目的。

### (1) 单侧布置

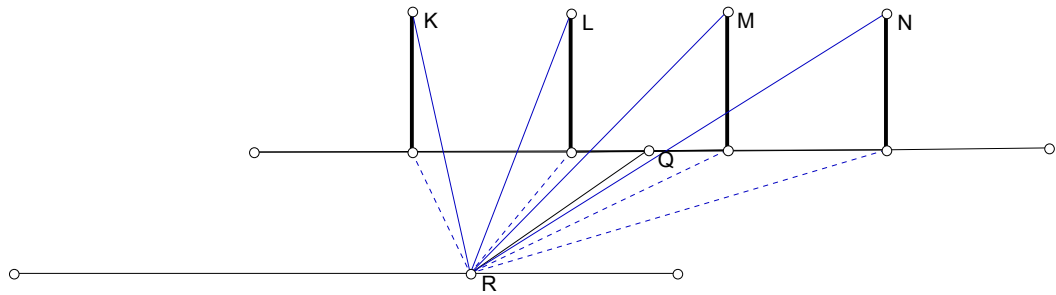


图 9-16 单侧布置示意图

由图 9-16 易知,路灯 L 和 M 之间的路段,与中点 Q 相对的 R 点的照明强度最小,并且计算该点照明强度时,只需考虑路灯 K,L,M,N 对其的影响,其他较远的路灯对其的影响可忽略。

$$R \text{ 点的照明强度为 } c = \frac{\eta ph}{2\pi \left( \frac{1}{4}l^2 + d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\eta ph}{2\pi \left( \frac{9}{4}l^2 + d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (9-1)$$

为满足路面最小照度的要求,有  $c \geq c_0$ ;

同时根据《中国道路照明设计标准》第 5.1.2 条,有:  $h \geq d \quad l \leq 3h$

所以其优化模型为:

$$\max l$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{\eta p h}{2\pi \left( \frac{1}{4} l^2 + d^2 + h^2 \right)^{3/2}} + \frac{\eta p h}{2\pi \left( \frac{9}{4} l^2 + d^2 + h^2 \right)^{3/2}} \geq c_0 \quad (9-2)$$

$$h \geq d$$

$$0 \leq l \leq 3h$$

若  $p=120\text{w}$ ,  $d=8\text{m}$ ,  $\eta=60\text{ (lm/w)}$ ,  $c_0=3\text{lux}$ , 用 matlab 画出照度  $c$  与路灯高度  $h$ 、路灯间距  $l$  的三维关系, 如图 9-17 所示, 然后画出满足 (9-2) 约束条件的  $h$  和  $l$  组成的区域, 如图 9-18。

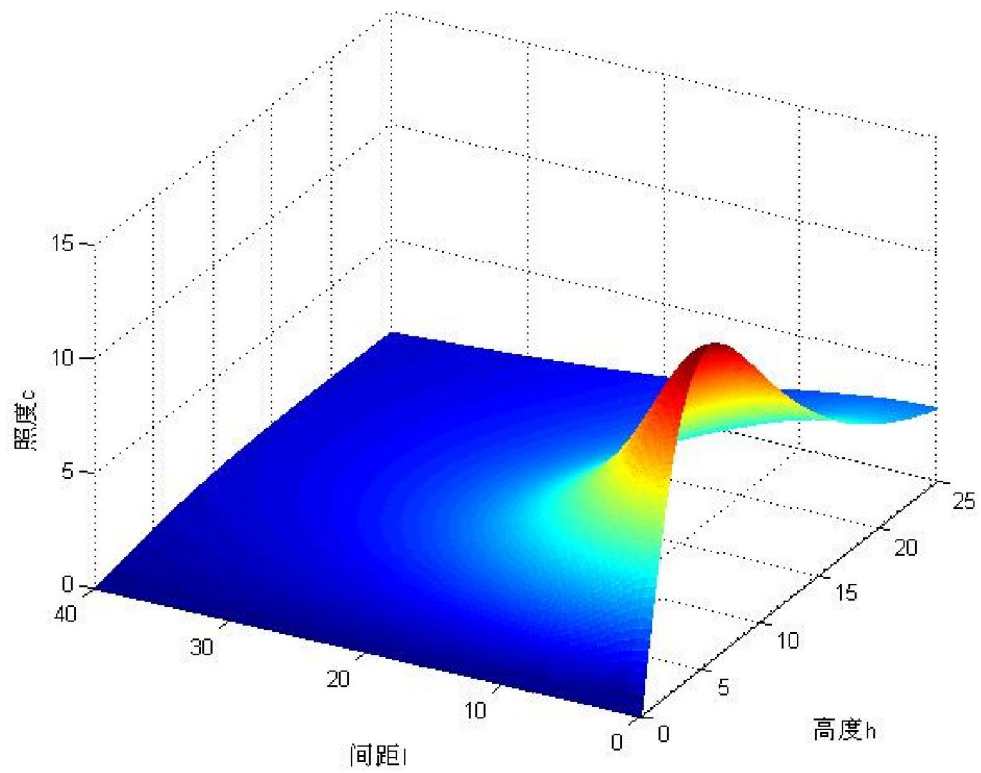


图 9-17 照度  $c$  与路灯高度  $h$ 、路灯间距  $l$  的三维关系

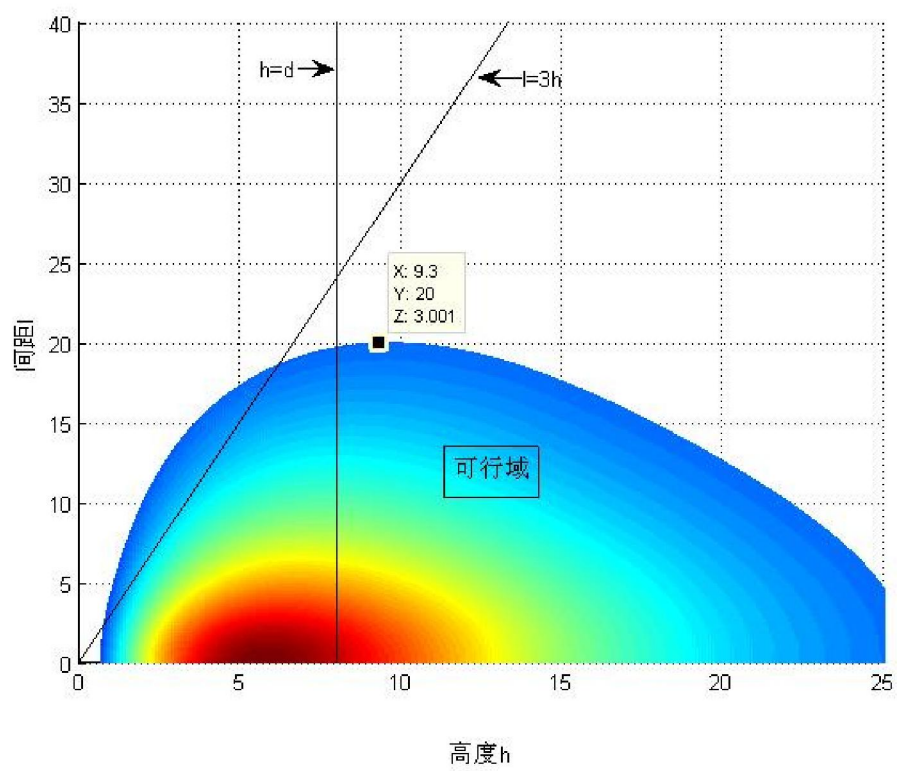


图 9-18 满足约束条件的  $h$  和  $l$

由图 9-18 可知，单侧安置时当路灯高度  $h=9.3\text{m}$  时，路灯间距最大为  $l=20\text{m}$ 。

## (2) 双侧交错布置

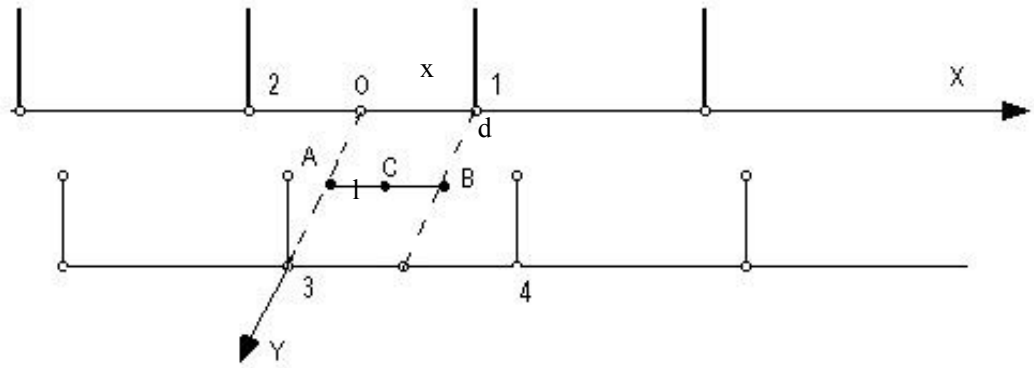


图 9-19 双侧交错布置示意图

由图 9-19 可知，照明强度最低的点一定出现在路的中线上，且对图中 AB 段呈周期性变化，所以先仅对 AB 进行考察，求取路面上照度最小的点的位置。同样，计算 AB 段任意点照明强度时，只需考虑路灯 1, 2, 3, 4 对其的影响，其他较远的路灯对其的影响可忽略。

以 O 为坐标原点，建立如图 9-19 所示 X-Y 坐标系，则路面上任意一点 P 到路灯 1, 2, 3, 4 的距离为

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{h^2 + (l/2 - x)^2 + y^2} \\ l_2 = \sqrt{h^2 + (l/2 + x)^2 + y^2} \\ l_3 = \sqrt{h^2 + x^2 + (d - y)^2} \\ l_4 = \sqrt{h^2 + (l - x)^2 + (d - y)^2} \end{cases} \quad (9-3)$$

那么，P 点光照度为：

$$\begin{aligned} c &= \frac{Ih}{l_1^3} + \frac{Ih}{l_2^3} + \frac{Ih}{l_3^3} + \frac{Ih}{l_4^3} \\ &= \frac{\eta ph}{4\pi(h^2 + (l/2 - x)^2 + y^2)^{3/2}} + \frac{\eta ph}{4\pi(h^2 + (l/2 + x)^2 + y^2)^{3/2}} + \frac{\eta ph}{4\pi(\sqrt{h^2 + x^2 + (d - y)^2})^{3/2}} \\ &\quad + \frac{\eta ph}{4\pi(h^2 + (l - x)^2 + (d - y)^2)^{3/2}} \quad (0 \leq x \leq \frac{1}{2}l, \quad 0 \leq y \leq d) \end{aligned} \quad (9-4)$$

取  $l=30\text{m}$ ,  $h=10\text{m}$ ,  $p=120\text{w}$ ,  $d=8\text{m}$ ,  $\eta=60 \text{ (lm/w)}$ ，且在上式中令  $y=0.5d$ ；用 matlab 画出路面中线上 AB 段上点光照度随  $x$  的分布  $c(x, 0.5d)$  如图 9-20。



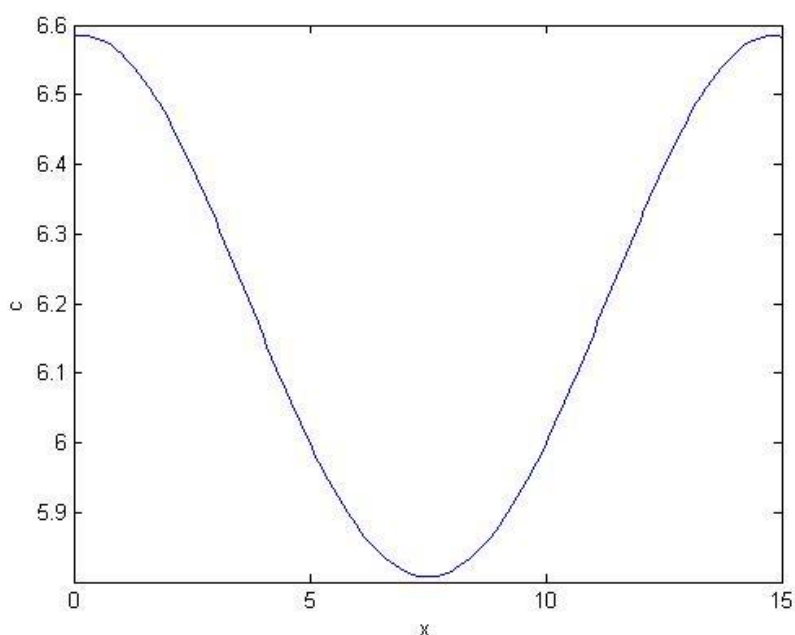


图 9-20 AB 段光照度分布

由图可见，在线段 AB 的中点 C 处照度最小，所以只需使 AB 的中点 C 照明强度大于等于  $c_0$  即可。C 点的照明强度为

$$c = \frac{\eta p h}{2\pi \left( \frac{9}{16} l^2 + \frac{1}{4} d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\eta p h}{2\pi \left( \frac{1}{16} l^2 + \frac{1}{4} d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (9-5)$$

为满足路面最小照度的要求，有：  $c \geq c_0$ ；同时根据《中国道路照明设计标准》第 5.1.2

条，有：  $h \geq 0.7d$ ， $l \leq 3h$ 。所以其优化模型为：

$$\begin{aligned} & \max \quad l \\ & \text{s.t.} \quad \frac{\eta p h}{2\pi \left( \frac{9}{16} l^2 + \frac{1}{4} d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\eta p h}{2\pi \left( \frac{1}{16} l^2 + \frac{1}{4} d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \geq c_0 \quad (9-6) \\ & \quad h \geq 0.7d \\ & \quad 0 \leq l \leq 3h \end{aligned}$$

若  $p=120\text{w}$ ， $d=8\text{m}$ ， $\eta=60$  (lm/w)， $c_0=3\text{lux}$ ，用 matlab 画出 (9-5) 式中照度  $c$  与路灯高度  $h$ 、路灯间距  $l$  的三维关系，如图 9-21。

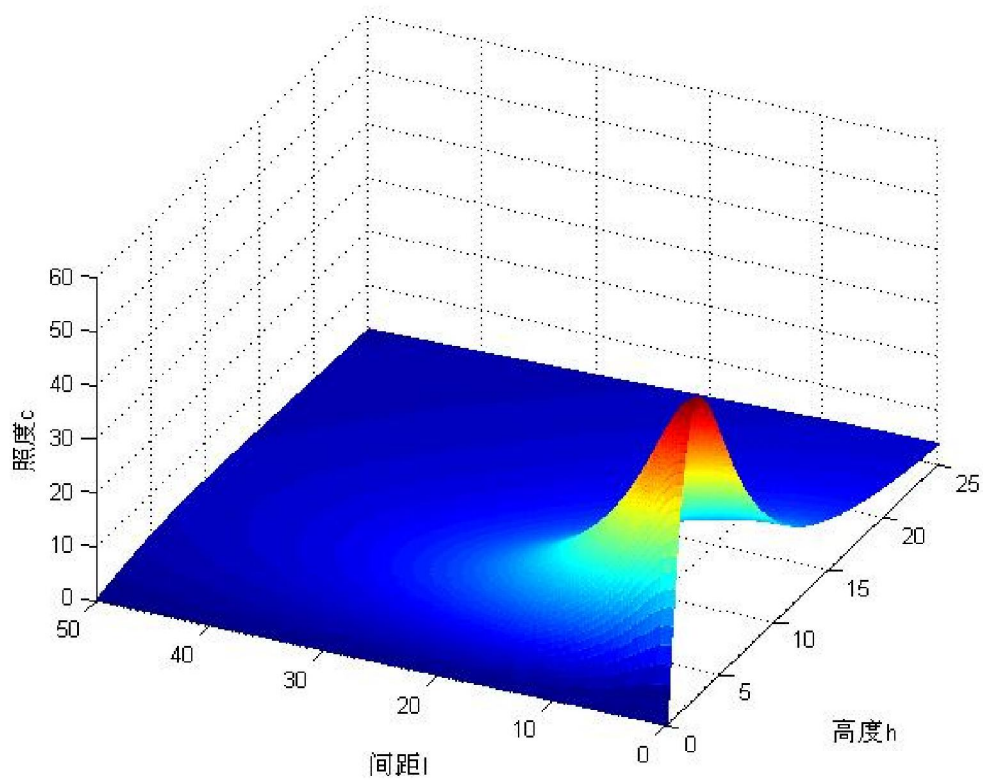


图 9-21 AB 中点 C 的照度

然后画出满足约束条件 (9-6) 的  $h$  和  $l$  组成的区域, 如图 9-22。可以看出, 双侧交错安置时, 当路灯高度  $h=14.4\text{m}$  时, 路灯间距最大为  $l=43.2\text{m}$ 。

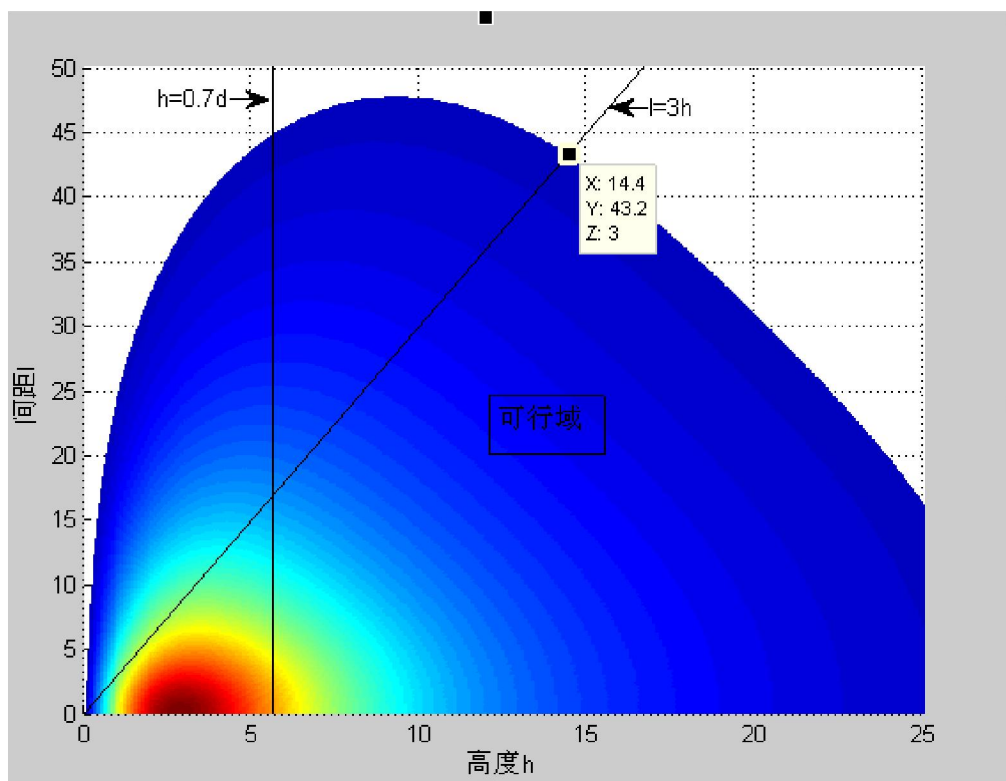


图 9-22 满足约束 (9-6) 的  $h$  和  $l$  的关系

### (3) 双侧对称布置

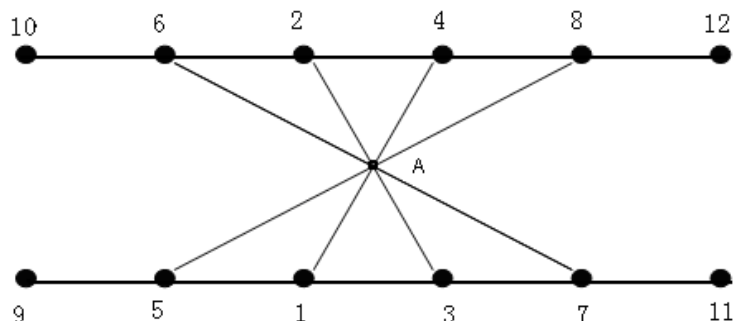


图 9-23 路灯双侧对称布置示意图(俯视图)

由图9-23分析可知，路灯1、2、3 和4 之间，它们中心A 的照明强度最小，并且计算该点照明强度时，只需考虑路灯1、2、3、4、5、6、7、8 对其影响，其它较远的路灯对其影响可忽略。于是，A点照明强度为：

$$c = \frac{\eta p h}{\pi \left( \frac{1}{4} l^2 + \frac{1}{4} d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\eta p h}{\pi \left( \frac{9}{4} l^2 + \frac{1}{4} d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (9-7)$$

为满足路面最小照度的要求，有： $c \geq c_0$ 。同时根据《中国道路照明设计标准》第 5.1.2

条，有： $h \geq 0.5d$ ， $l \leq 3h$ 。所以，其优化模型为：

$$\begin{aligned} & \max \quad l \\ & \text{s.t.} \quad c = \frac{\eta p h}{\pi \left( \frac{1}{4} l^2 + \frac{1}{4} d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\eta p h}{\pi \left( \frac{9}{4} l^2 + \frac{1}{4} d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \geq c_0 \quad (9-8) \\ & \quad h \geq 0.5d \\ & \quad 0 \leq l \leq 3h \end{aligned}$$

若  $p=120\text{w}$ ,  $d=8\text{m}$ ,  $\eta=60 \text{ (lm/w)}$ ,  $c_0=3\text{lux}$ , 用 matlab 画出 (9-7) 式中照度  $c$  与路灯高度  $h$ 、路灯间距  $l$  的三维关系,如图 9-24。然后,画出满足约束条件(9-8) 的  $h$  和  $l$  组成的区域,如图 9-25。因此,双侧对称安置时当路灯高度  $h=12.8\text{m}$  时,路灯间距最大为  $l=34.5\text{m}$ 。

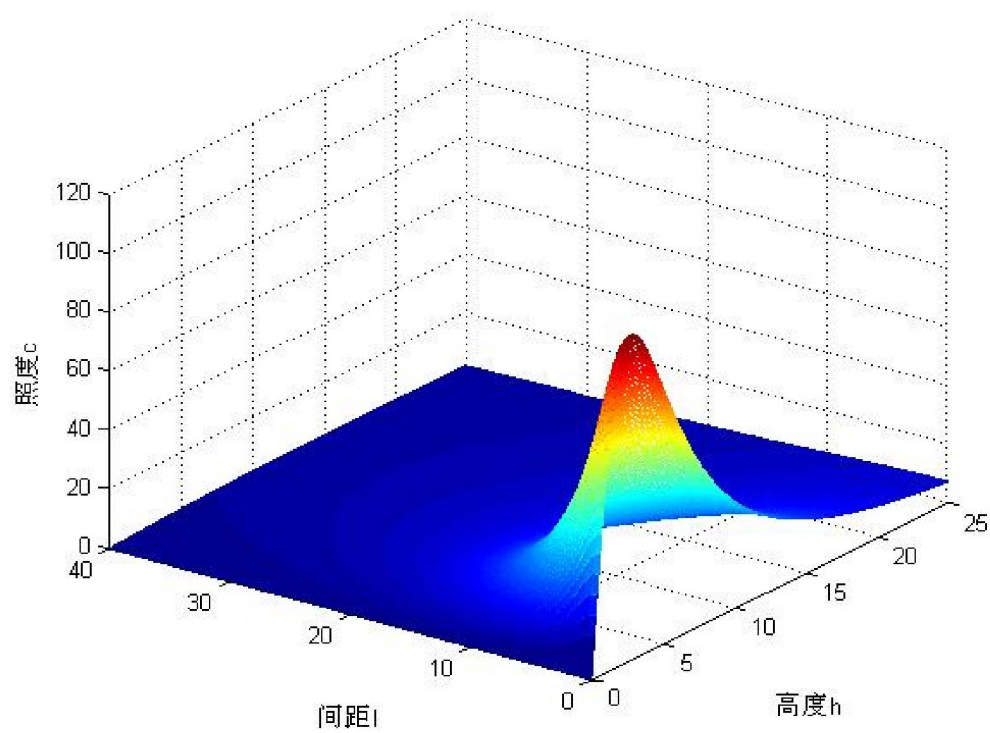


图 9-24 双侧对称布置的光照度  $c$

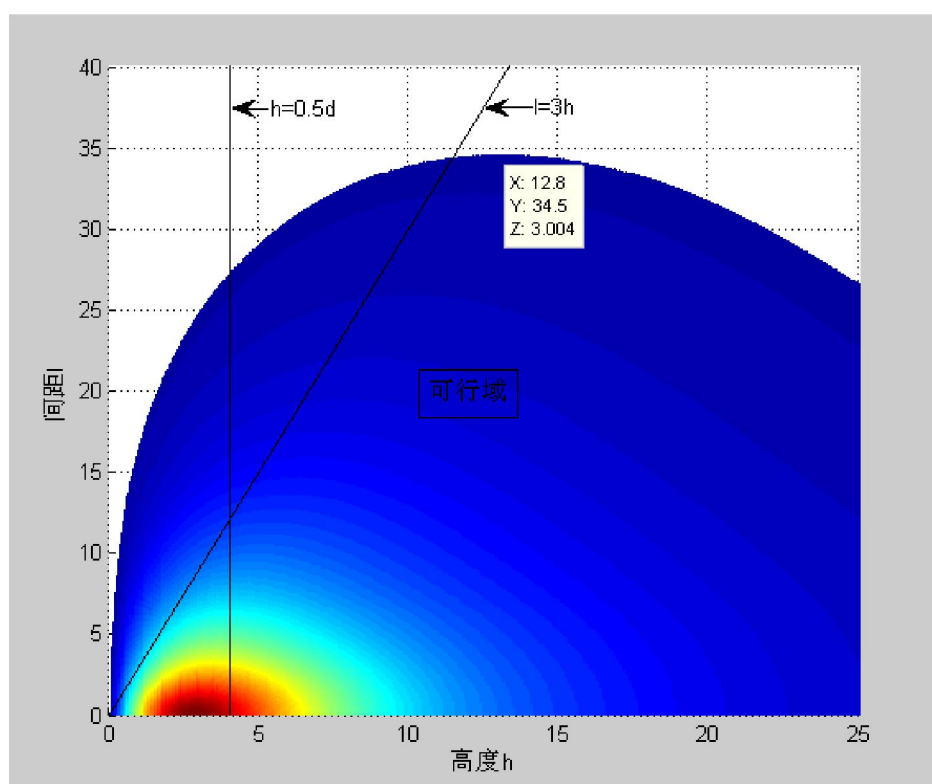


图 9-25 满足约束(9-8)的  $h$  和  $l$  的关系

#### (4) 三种方案的比较

根据上面三种方案的计算,在满足照度要求的前提下,单侧布置的最大安装间距是 20m; 双侧交错布置的最大安装间距是 43.2m、双侧对称布置的最大安装间距是 34.5m。

从节能(灯的数量最少)的角度出发,我们认为双侧交错布置方案最优,因为在同样长度的道路上,在达到照度要求的前提下,这种安装方案所需的路灯盏数最少。

9.4.6 现有路灯排布的评价与改进方案

经实地调查,食堂至校医院路段路宽 d=8m,路灯间距 l=26m,路灯高度 h=4m,每盏路灯有 8 个节能灯管,总功率 p=120W,发光效率 η=60(流明/瓦);考虑到路灯罩子不透明同时长时间没有清洗和路灯旁树枝的遮挡,取维护系数 K=0.5。

因路灯采用双侧对称式排布,根据(9-7)式

$$c = \frac{\eta p h}{\pi \left( \frac{1}{4} l^2 + \frac{1}{4} d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\eta p h}{\pi \left( \frac{9}{4} l^2 + \frac{1}{4} d^2 + h^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \tag{9-8}$$

计算路面最低照度为

$$C_{\min} = 1.68 \text{ lux} < C_0,$$

所以照明强度过低,建议作出调整。

为此,我们提出如下几个改进方案:①按照本文中得出的路灯高度、间距对校园路灯进行重新安装;②更换功率较大的满足照度要求的灯泡;③更换成透光性较好的灯罩;④对路灯旁的遮挡性树枝进行适当的修剪;⑤对现有的灯罩进行清洗。对这几种方案进行评价可得表 9-23。

表 9-23 方案评价表

方案	投资	长远性	难度	可行性
1	高	长	难	不可行
2	一般	较长	一般	可行
3	一般	长	一般	可行
4	低	短	易	可行
5	低	短	易	可行

方案一投入大、难度大,可行性不高;方案二、三难度不高且能基本解决问题,是较好的方案;方案四、五操作简单、投入少,可在短时间内解决一部分问题,可以作为二、三的辅助。

9.4.7 结束语

大范围、复杂环境的路灯设计需考虑的因素非常多。实际当中路段的弯曲、斜坡、车流量、当地的气候,路段的繁忙程度等因素都会对路灯的安装造成很大的影响,这些情况要比文中所讨论的情形复杂得多,需要认真调查,认真思考,综合考虑,并要根据实际发生的情况解决具体施工问题。本案例在此方面并未进行深入的研究。

再者，校园不同的区域有不同的功能，同时环境也比较复杂，在设计室外照明时需要考虑的方面非常多，各个方面的侧重点也会不同。比如校园中一些支路上，需要营造比较幽静的气氛，照度要求不很高，这就与入流量较大的主干道路要求不同。