

安防监控中图像拼接的配光问题研究

桂 辉,徐晓婷,李 博

(浙江工业大学 理学院,浙江 杭州 310023)

摘 要: 随着安防产业的不断发展,人们对摄像机的需求也越来越多,要求也越来越高,对具有较大视场的全景图像的需求也更加迫切,从而各种拼接算法、拼接应用应运而生。虽然现有的软件算法已经能够做到很好的效果,但图像拼接中补光配光问题依旧突出。针对以上情况,对发光二极管(Light Emitting Diode, LED)在补光下存在的照度或光强不一致的问题进行了研究,并且采用全内反射(Total Internal Reflection, TIR)透镜思路进行透镜二次配光设计,使 LED 灯发射出来的光斑拼接后照度或光强均匀,同时进行了仿真。仿真结果表明,该设计能有效避免光斑拼接后出现明显的过亮或过暗的痕迹,使拼接效果更好,满足摄像机全天候工作的需求。

关键词: 补光; 图像拼接; 配光; 发光二极管; 全内反射透镜

中图分类号: O435 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0826003

Research on problems of light distribution of image splicing in security monitoring

Gui Hui, Xu Xiaoting, Li Bo

(College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: With continuous development of the security industry and people's growing demands for cameras, it was urgent to have the panoramic image with a larger field of view. As a result, kinds of splicing algorithms and splicing applications have come into being. Although the existing software algorithms have been able to achieve good results, but the problems of supplement light distribution in image splicing are still outstanding. Considering the situations above, the problems of inconsistency of illumination or light intensity in Light Emitting Diode (LED) were studied. The design idea of the Total Internal Reflection (TIR) lens was used for the secondary light distribution design, which made the illumination or light intensity of the light spot from LED uniform after splicing, and the simulation was done at the same time. The simulation results show that it could avoid too bright or too dim trace after the light spot splicing, and the splicing effect would be better. It could meet the requirement of the camera working around the clock.

Key words: supplement; image splicing; light distribution; LED; TIR lens

收稿日期:2018-03-05; 修订日期:2018-04-03

基金项目:浙江省自然科学基金(LY14F040003)

作者简介:桂辉(1991-),男,硕士生,主要从事光学配光方面的研究。Email:ghxy122@126.com

导师简介:李博(1975-),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事光电检测与光学设计方面的研究。Email:libo@zjut.edu.cn

(通信联系人)

0 引言

随着社会的发展,安防二字已逐渐进入人们的生活范围,安防在维护社会治安等方面起到了显著的作用。安防监控在技术和产品上已由模拟到数字到网络,再到现在已逐渐走向智能化时代。在安防监控领域,具有较大视场的全景图像其重要性变得越来越高。

图像拼接是指将具有重叠区的多幅数字图像或多帧视频通过配准和融合获得单幅宽视场图像或者动态全景图^[1-2]。因此,为了获得全景图像,各种拼接算法、拼接应用应运而生。虽然现有的软件拼接算法已经能够较好地实现图像拼接效果^[3],但是,在多相机图像拼接过程中,要想得到一副质量较好的全景图像,往往还存在以下几个方面的问题:(1) 现有的实时监控都是建立在 24 h 无间断的前提之下,因此必须在光照不足的夜间也能得到清晰可见的图像;(2) 图像拼接建立在多个相机的基础上,即使使用相同型号的相机,由于环境、背景等的影响极易造成被摄物体的照度不均匀,从而导致不同相机所得图像存在差异,而这也影响拼接后的全景图像效果;(3) 全景图像的出现,很大程度上是为了更大范围更全面更真实地反映现实情况,因此,在大多数情况下,都要尽可能全面地获得所有现实信息,即拍摄的全景图像范围要够大且和现实情况的匹配度要足够高。

为了对以上问题进行改进和解决,文中首先利用发光二极管(Light Emitting Diode, LED)进行补光,并将采用全内反射(Total Internal Reflection, TIR)透镜的配光思路来进行二次配光,以解决多相机图像之间光照度不一致的问题。其次,通过在透镜表面增加格栅的形式,来改变光斑长宽比和照度分布,最后给出了两种配光方案,以使在不同情况下,既保证图像的真实度又尽可能多地扩大全景图像的范围。

目前,针对 LED 的二次配光设计在很多光学领域都得到了应用。Anne 等^[4]设计了全反射透镜,对彩色 LED 进行匀色。冯奇斌等^[5]针对选取的 LED 发光特性,采用混合集光方法设计了 LED 准直透镜,这种透镜的光效很高,但光斑均匀性较差。在室内和道路照明领域,芦佳宁等^[6]设计了可以在 3 m 远的接收面上形成直径为 10 m 的圆形均匀光斑的自由曲面透镜。陈继龙等^[7]设计了用于 LED 路灯的能实现特

定形状照明光斑的自由曲面透镜。

但是,以上研究并未对道路监控图像拼接所遇到的一些具体问题提出相应的解决方案,例如:对于同一车道及不同车道存在的配光问题。为此,文中针对这两种不同的实际情况,提出了相应的解决方案。

1 光学配光

在实际应用中,需要对路口相机前后左右图像进行拼接,并能实现 24 h 实时监控。当夜晚降临时,由于外界环境变暗,无法看清路面情况,此时需要通过 LED 灯进行补光。在道路照明中,补光通常使用大功率白光 LED 灯,但对于未经过二次配光的 LED 光源来说,射出的光斑在目标表面上只能形成一个照度分布不均匀的圆形光斑,在拼接中若补光的光斑照度不均匀,则会在拼接中存在明显的明暗差异,从而无法满足要求。所以在用 LED 灯进行补光时,需对 LED 灯的透镜进行设计,使其发出的光斑在所照射的范围内满足照度均匀性的要求,才能使拼接出来的图像效果更好。

对透镜设计,其实就是对 LED 光线进行重新分配来提高光能利用率,在实际应用中就是满足照度一致性的要求,光的照度是指单位面积上所接收的可见光的光通量^[8-11]。其照度公式为:

$$E = d\Phi/dS \quad (1)$$

在光通量一定时,面积越大,其照度越小。在未经过配光前 LED 灯发出的光强在空间中遵循朗伯分布,其分布曲线如图 1 所示。

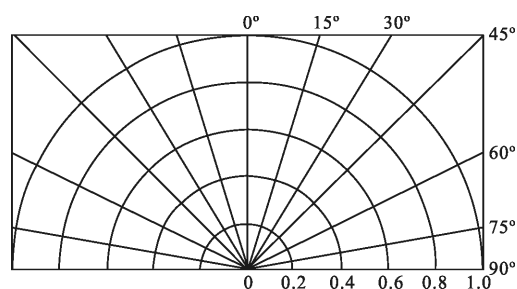


图 1 朗伯分布图

Fig.1 Diagram of Lambertian distribution

在光度学中,朗伯光源在某一方向上的发光强度 I 等于该光源发光面垂直方向上发光强度 I_0 乘以方向角的余弦,其公式如下:

$$I = I_0 \times \cos\theta \quad (2)$$

由此可知其成像表面照度呈不均匀状态^[12]。因此在二次配光设计时,文中主要运用了 TIR 透镜,该透镜可以实现很高的输出光效率、蝙蝠翼型的配光曲线分布以及较均匀的长方形光斑。为了方便设计,此次研究范例中使用的接收屏距离补光灯为 1 m,实际要模拟的补光距离 6 m,所以以下例子中都按 1:6 的尺寸计算。

1.1 自由曲面算法

如图 2 所示,文中采用的是下开口结构的 TIR 透镜,其中 Curve 1、Curve 2 分别是全反射自由曲面及透射自由曲面的母线。光源位于下开口中心处,其发出的光经过 TIR 透镜分成透射光路和全反射光路两个部分。因此,文中首先计算出 Curve 1 和 Curve 2 上各点的坐标,然后绘制出相应的透镜剖面轮廓,最后利用建模软件将其绕中心轴做旋转 360°处理,即可得 TIR 透镜的立体模型。

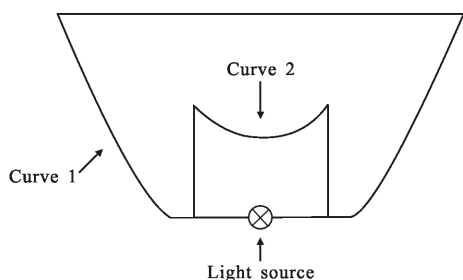


图 2 自由曲面 TIR 透镜剖面图
Fig.2 Profile of free-form TIR lens

1.1.1 全反射自由曲面母线的设计

首先以光源为坐标原点建立坐标系,TIR 透镜的中心轴为 y 轴,如图 3 所示。设光源为理想点光源,光

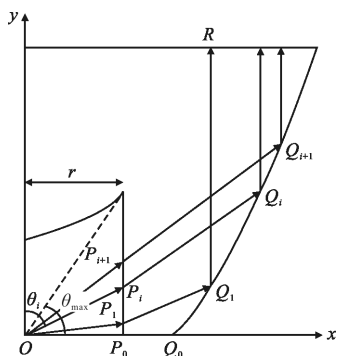


图 3 全反射自由曲面的光路图
Fig.3 Beam path diagram of total reflective free-form surface

线从原点出发,平面折射进入 TIR 透镜,经过全反射自由曲面时发生全反射后,以平行光的形式出射。

图 3 中, θ_{max} 为光线入射 TIR 透镜的全反射自由曲面的最大入射角,并平均分为 N 份。 θ_i 是光线与 y 轴的夹角,即光源入射 TIR 透镜的透射自由曲面时的入射角,则可得:

$$\theta_i = 90^\circ - i \times \frac{\theta_{max}}{N} \quad (i=1, 2, \dots) \quad (3)$$

设 P_0, P_1, \dots, P_i 是入射角分别为 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_i$ 时与直线 $x=r$ 的交点, $Q_0(x_0, y_0), Q_1(x_1, y_1), \dots, Q_i(x_i, y_i)$ 分别为光线入射至 TIR 透镜的全反射面母线上的点。

首先求 x_1 与 x_0 之间的关系,设 $P_0(r, 0), Q_0(x_0, y_0)$, θ_0 为 $\overrightarrow{OP_0}$ 与 y 轴夹角,可得 $P_0(r, r \cot \theta_0)$,令 $Q_1(x_1, y_1)$, 设 $\overrightarrow{OP_1}$ 单位矢量为 \vec{p}_1 , $\overrightarrow{P_1Q_1}$ 的单位方向向量为 \vec{q}_1 ,则由光的折射定律可知:

$$n\vec{q}_1 - \vec{p}_1 = k\vec{N}_1 \quad (4)$$

式中:k 为常量; \vec{N}_1 为单位法向量。

$$\vec{p}_1 = \frac{\overrightarrow{OP_1}}{|\overrightarrow{OP_1}|} = (\sin \theta_1, \cos \theta_1) \quad (5)$$

由公式(4)、(5)可得:

$$\vec{q}_1 = \frac{\overrightarrow{P_1Q_1}}{|\overrightarrow{P_1Q_1}|} = \left(\frac{K_1 + \sin \theta_1}{n}, \frac{\cos \theta_1}{n} \right) \quad (6)$$

$\overrightarrow{Q_1R}$ 平行于 y 轴,则 $\overrightarrow{Q_1R}$ 单位法向量为 $(0, 1)$, 设反射面上 Q_1 处法线矢量为 $\vec{N}_1(N_x, N_y)$,根据光的折射定律,同理可得,对于光线 P_1Q_1 和 Q_1R_1 :

$$\vec{N}_1 = n(0, 1) - \vec{q}_1 = [- (K_1 + \sin \theta_1), n - \cos \theta_1] \quad (7)$$

式中: \vec{q}_1 是 $\overrightarrow{P_1Q_1}$ 的单位方向向量,则

$$\overrightarrow{P_1Q_1} = k' \vec{q}_1 \quad (k' \text{ 为非零常数}) \quad (8)$$

而

$$\overrightarrow{P_1Q_1} = [x_1 - r, y_1 - r \cot \theta_1] \quad (9)$$

由此可得:

$$\frac{x_1 - r}{K_1 + \sin \theta_1} = \frac{y_1 - r \cot \theta_1}{\cos \theta_1} \quad (10)$$

而 $\overrightarrow{Q_0Q_1}$ 与 \vec{N}_1 垂直,则有:

$$\overrightarrow{Q_0Q_1} \cdot \vec{N}_1 = 0 \quad (11)$$

即:

$$(x_1 - x_0)N_{x1} + (y_1 - y_0)N_{y1} = 0 \quad (12)$$

由光的折射定律可知:

$$K_1 = \sqrt{n^2 - \cos^2 \theta_1} - \sin \theta_1 \quad (13)$$

由公式(7)、(10)、(12)、(13)可知 x_1 与 x_0 的关系式,代入 (x_0, y_0) 可求出 (x_1, y_1) ,以此类推,可以得出 (x_i, y_i) 与 (x_{i+1}, y_{i+1}) 的递推关系式,即有:

$$\begin{cases} (x_{i+1} - y_{i+1})N_{xi} + (y_{i+1} - y_i)N_{yi} = 0 \\ \frac{x_i - r}{K_i + \sin \theta_i} = \frac{y_i - r \cot \theta_i}{\cos \theta_i} \\ N_{xi} = -(K_i + \sin \theta_i) \\ N_{yi} = n - \cos \theta_i \\ P_i = \sqrt{n^2 - \cos^2 \theta_i} - \sin \theta_i \end{cases} \quad (14)$$

1.1.2 透射自由曲面母线的设计

首先计算 $P_1(x_1, y_1)$,如图 4 所示,设 OP_0 和 P_0Q_0 分别为入射及出射光线,则有:

$$y_1 = x_1 \cot \theta_1 \quad (15)$$

$\overrightarrow{OP_0}$ 的单位方向矢量为:

$$\vec{p}_0 = (\sin \theta_0, \cos \theta_0) \quad (16)$$

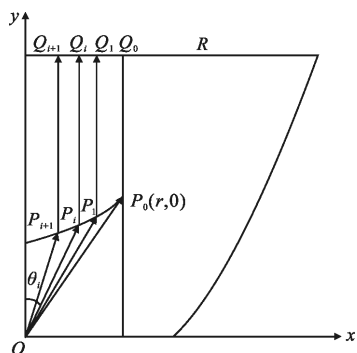


图 4 透射自由曲面的光路图

Fig.4 Beam path diagram of transmitting free-form surface

由于 $\overrightarrow{P_0Q_0}$ 平行于 y 轴,故 $\overrightarrow{P_0Q_0}$ 的单位方向矢量为 $\vec{q}(0, 1)$,由光的折射定律可得:

$$n\vec{q} - \vec{p}_0 = \vec{N}_0 \quad (17)$$

式中: \vec{N}_0 为 P_0 点法向量,则

$$\vec{N}_0 = (-\sin \theta_0, n - \cos \theta_0) \quad (18)$$

P_1 为过点 P_0 切线上的一点,则有:

$$\overrightarrow{P_0P_1} \cdot \vec{N}_0 = 0 \quad (19)$$

可得:

$$-\sin \theta_0(x_1 - x_0) + (n - \cos \theta_0)(y_1 - y_0) = 0 \quad (20)$$

且

$$\sin \theta_0 = \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}$$

$$\cos \theta_0 = \frac{y_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \quad (21)$$

由公式(20)、(21)及 (x_0, y_0) 的坐标,可以推导出 P_1 点坐标 (x_1, y_1) 。同理还可求得 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 与 $P_i(x_i, y_i)$ 的关系:

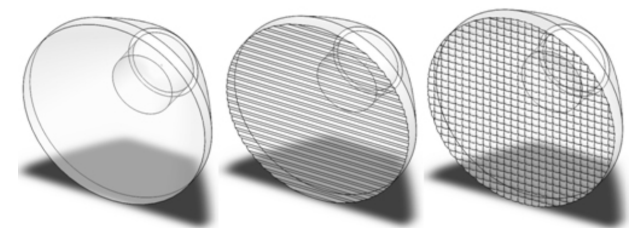
$$\begin{cases} -\sin \theta_i(x_{i+1} - x_i) + (n - \cos \theta_i)(y_{i+1} - y_i) = 0 \\ y_i = x_i \cot \theta_i \end{cases} \quad (22)$$

1.2 TIR 透镜配光方案

TIR 透镜是采用全反射原理,来实现 LED 的光束整形目的,它利用透镜中全内反射尽可能收集和控制光线走向,实现最终照明要求。

TIR 透镜在照明领域运用非常广泛,其优越的小角度配光性能,使得在重点照明领域广泛运用。TIR 透镜对设计偏差和装配偏差非常敏感,所以设计一款性能优良的 TIR 透镜非常困难。透镜光学面分为两部分,LED 发射出的较大角度的光通过透镜外反射面全反射聚光,LED 发出的较小角度的光,通过其内折射面聚光。照明领域中对配光要求并不是很高,评估配光的方法也相当粗糙,大多只关注其配光的半高全宽和中心照度值。

标准 TIR 透镜配光曲线是旋转对称的,若在加上柱状自由曲线格栅,将打破配光曲线的对称性,使光斑变成椭圆形或长方形。通过控制栅格曲面,如图 5 所示,可以改变光斑长宽比和照度分布。在文中之后所有的方式都已默认在透镜表面增加二维格栅。



(a) 表面未处理 (b) 表面加一维格栅 (c) 表面加二维格栅
(a) Surface untreated (b) 1D grille on the surface (c) 2D grille on the surface

图 5 TIR 透镜表面

Fig.5 Surface of TIR lens

其对应的光斑图如图 6 所示。

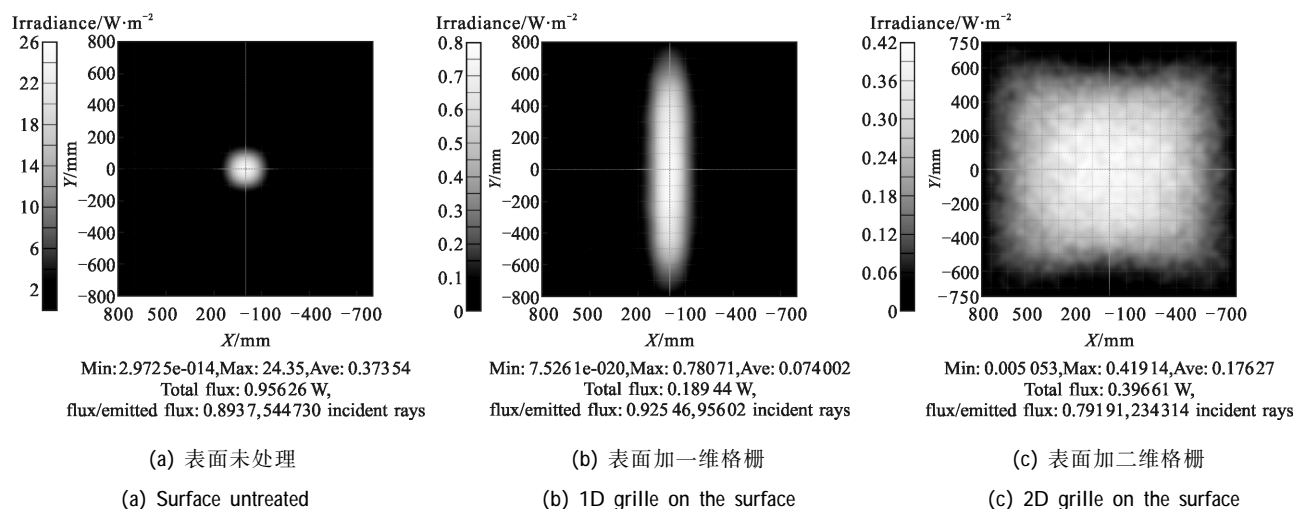


图 6 TIR 透镜光斑图

Fig.6 Light spot image of TIR lens

1.3 图像拼接补光实例

现实生活中，道路监控是安防监控中十分重要的一环。但是，在道路监控图像拼接过程中，不同车道的全景图像拼接，同一车道前后区域的全景图像拼接仍旧存在一些问题。由于不同车道的广阔区域和同一车道的前后区域存在两种不同的视角，而单颗补光灯的补光角度很难做到大于 100° ，因此文中选择采用两颗补光灯协同工作的模式，以获得更加宽阔的视野、更优质的图像质量。

但是，要满足两台广角摄像机图像拼接，那么补光灯的照明区域要扩大，而且观察面的照度均匀性不能太差，所以需要两台摄像机上的补光灯进行优化设计，使两台补灯光斑拼接，使观测面照度均匀。文中采用 TIR 透镜的思路，针对不同车道和同一车道两种不同的视角设计了两种图像拼接方式。如图 7 所示，A 补光拼接方式为两个补灯光轴方向平行，则叠加后配光曲线不改变，令两摄像机相距一

定距离，以增加补光区域，此方案适用于不同车道上的监控补光拼接，协同工作。B 补光拼接方式，摄像机可以放得很近，但两个补灯光轴有一定夹角，叠加后配光曲线会改变，叠加方向光束角加大，可以用于实现同一车道监控杆前方与后方的图像拼接过程中的补光。

首先，对于传统 TIR 方案，设计了一款补光灯透镜，使用 LED 芯片，将光源文件和透镜的 3D 模型导入到光学仿真软件 Tracepro 中进行仿真，补光灯的光斑和照度曲线图如图 8 所示。

图 8(a) 中的实线实框区域为有效补光区域，该区域外的那部分光是无效的，将造成能量的浪费。补光不变，若扩大摄像机视场角，如图中虚线方框区域，那么摄像机画面上的四个角落处补光不足，将产生暗区，这是旋转对称配光的缺陷。

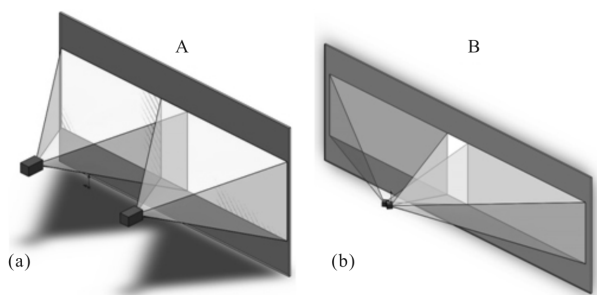
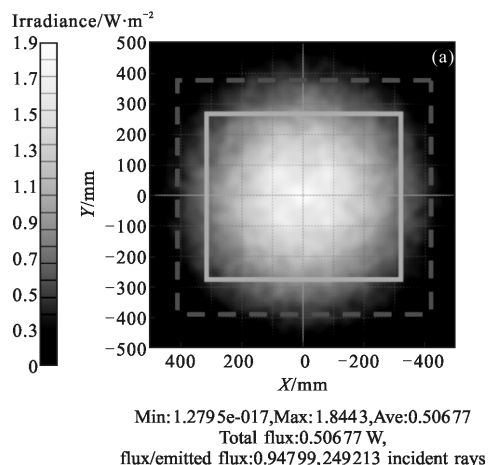


图 7 两种补光拼接方案

Fig.7 Two supplement light splicing schemes



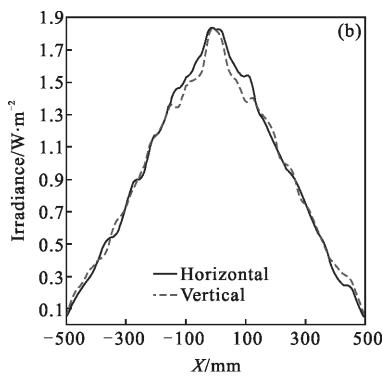


图 8 单颗补光灯 1 m 处的光斑(a)和照度曲线图(b)

Fig.8 Light spot image (a) and illumination curve diagram (a) in 1 m with one supplement light

将旋转对称光斑进行拼接, 拼接方向补光范围增大, 观察面照度均匀性较好, 但是若两台摄像机距离未控制很准确, 光斑上将出现明显的月牙形暗区, 如图 9(a)中点线所示。

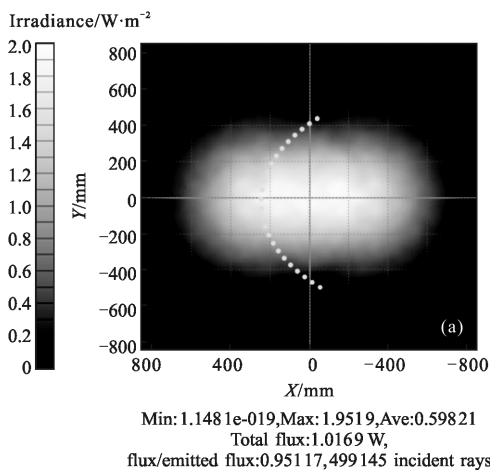
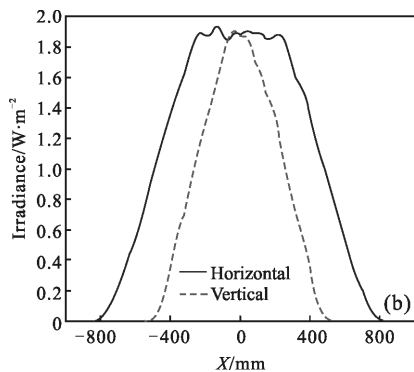


图 9 采用 A 拼接方式, 相距 0.5 m 的两颗补光灯 1 m 处的光斑 (a)和照度曲线图(b)

Fig.9 Light spot image (a) and illumination curve diagram(b) in 1 m using two supplement lights with 0.5 m apart adopted A splicing scheme



为了改善补光效率, 文中利用自由曲面算法设计了方形光斑补光灯透镜, 补光灯光斑和配光曲线如图 10 所示, 该补光灯透镜可以有效地利用 LED 光能, 避免不必要的损失。只要与摄像头视场角匹配得当, 该种补光灯不会出现暗角问题。而且使用算法优化后的照度均匀性也较好, 由于该光斑在边界处照度较暗, 呈递减趋势, 能更好地符合拼接条件, 当两颗补光灯拼接时, 使其照度均匀, 不会呈现过亮或过暗的交替变换, 两颗补光灯协同工作光线追迹图如图 11 所示。

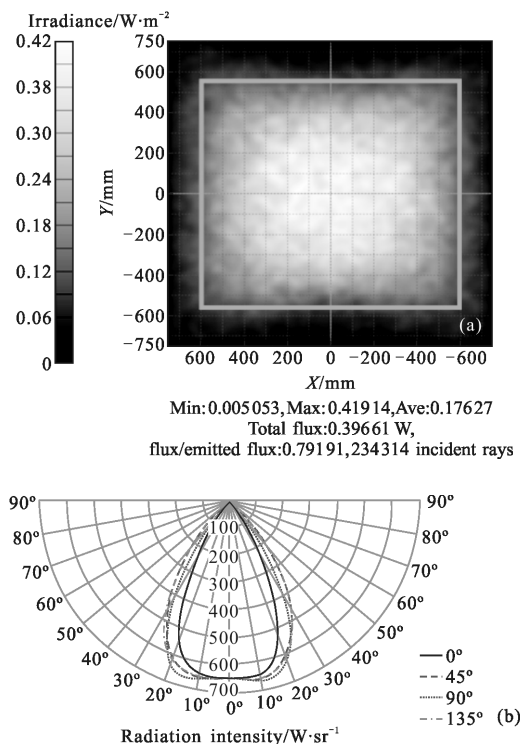


图 10 单颗补光灯 1 m 处光斑(a)和配光曲线(b)

Fig.10 Light spot image (a) and light distribution curves (b) in 1 m with one supplement light

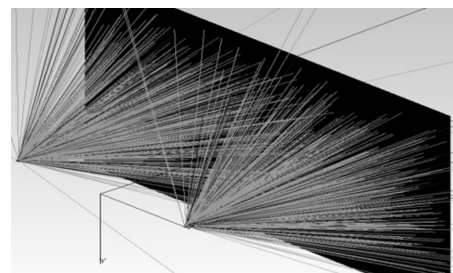


图 11 两颗补光灯协同工作光线追迹图

Fig.11 Ray tracing image with two supplement lights working together

将两颗方形光斑补光灯的光斑进行拼接, 拼接后的光斑和照度曲线如图 12 所示, 可见拼接后, 区域照度均匀性较好, 光线能够很好地集中在有效补光区域内, 提高光能利用率。

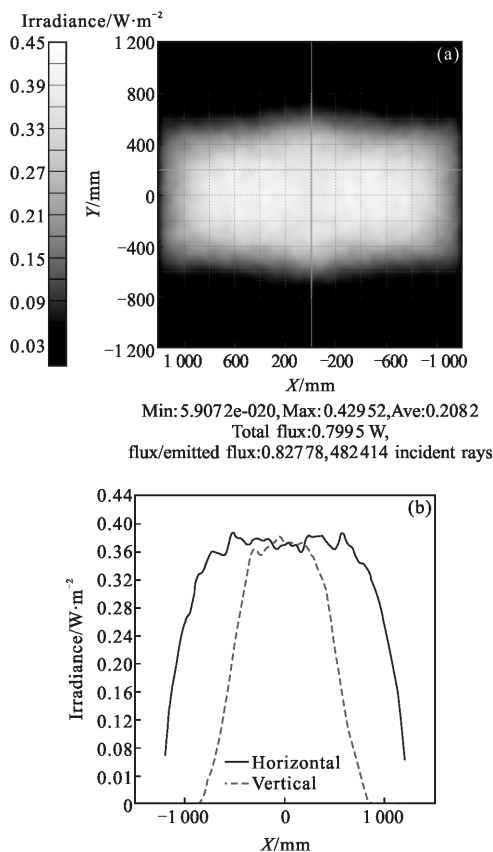


图 12 采用 A 拼接方式, 相距 1.1 m 两颗补光灯 1 m 处光斑拼接效果(a)和照度曲线图(b)
Fig.12 Light spot splicing effect (a) and illumination curve diagram (b) in 1 m using two supplement lights with 1.1 m apart adopted A splicing scheme

B 补光拼接方式是为同一车道前后的图像拼接所设计的, 配光目标为配光范围内的等光强分布, 而不采用等照度分布, 这是由于 TIR 透镜对装配很敏感, 0.1 mm 的装配偏差将导致光形的明显变化, 而一般结构件之间的装配间隙会预留 0.2 mm 左右, 等照度容易导致配光中心出现暗区, 也就是说视野中会出现盲区, 在这种情况下, 等照度的意义并不大, 此外, 对于同一车道前后的图像拼接进行补光, 由于其光轴呈一定的夹角, 图像输出较远, 在实际运用中基本上也很难实现等照度分布, 其光斑可能成为锥形, 但若削弱中间亮度, 则无实际意义。然后, 中央照度偏高则是普遍可以接受的, 同时只要照度的过

渡良好, 对后续的图像拼接的影响也较小。因此, 这一情况下, 将采用等光强配光方案, 改变透镜自由曲线, 以获得等光强透镜, 采用此透镜的单个补光灯纵向光束角为 60°, 其光强分布图如图 13 所示。

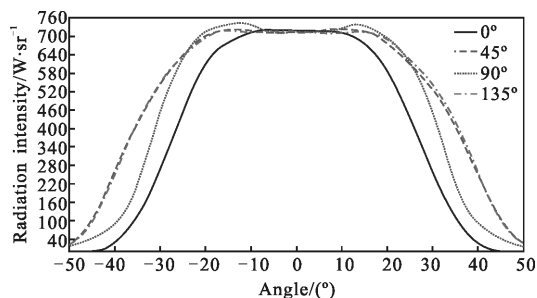


图 13 单个补光灯配光曲线, 纵向光束角 60°

Fig.13 Light distribution curves with one supplement light, longitudinal beam angle is 60°

该补光灯采用 B 拼接方式后, 纵向光束角可达 130°, 仿真结果如图 14 所示。

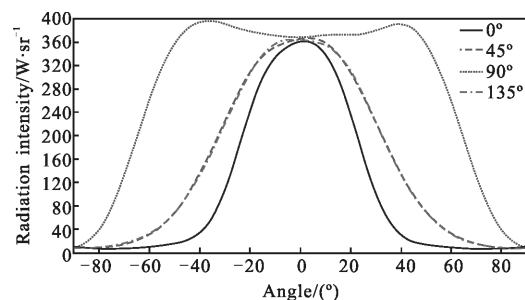
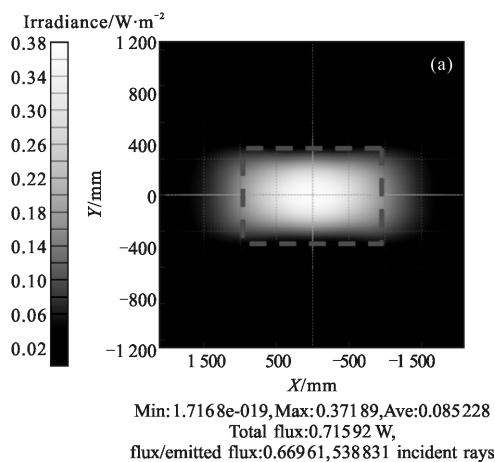


图 14 采用 B 拼接方式后的配光曲线, 纵向光束角 130°

Fig.14 Light distribution curves adopted B splicing scheme, longitudinal beam angle is 130°

如图 15 所示, 采用等光强配光方案以后, 光斑照度虽不均匀, 照度曲线接近高斯分布, 但被照面照



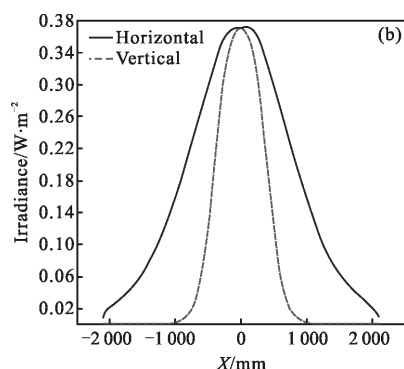


图 15 采用 B 拼接方式,光轴夹角为 68°两颗补光灯 1 m 处光斑拼接效果(a)和照度曲线图(b)

Fig.15 Light spot splicing effect (a) and illumination curve diagram (b) in 1 m using two supplement lights with optical axis angle is 68° adopted B splicing scheme

度过渡均匀,±45°以内的区域照度补光效果较好,也已经充分满足夜间照明需求。

2 结 论

为了满足 24 h 实时监控的需求,在夜晚需对摄像机进行补光,对于传统 LED 透镜,其光强遵循朗伯分布,需对透镜进行二次设计,使发射出来的光照满足拼接需求^[13],为了达到照度一致,文中详述了采用 TIR 透镜的方法得到照度均匀的光斑,同时使用 TIR 透镜对比了普通 TIR 透镜和加过二维格栅后的光斑效果图,并且对于两种补光方式,补光灯光轴平行和光轴存在一定夹角分别采用了等照度和等光强处理,使有效区域在夜晚能够清晰呈现。

在安防监控中,随着时代的发展,安防产业已由模拟时代走向了数字化、网络化,并向智能化方向逐步发展。对于前端监控产品更趋向于视场角越大越好,像现在的鱼眼相机和多目相机,其视场角可达到 180°,正因为如此,其成像也带来了很大的畸变,而在交通监控下不适用于此类相机,所以对多相机的图像拼接技术还是有很大的市场需求。从当前社会市场来看,网络监控摄像机已占据了很大的市场份额,随着高清网络监控摄像机迅速发展和互联网的普及,网络摄像机智能化必将在未来成为监控市场的绝对主流。

参考文献:

[1] Yu Hongsheng, Jin Weiqi. Evolvement of research on digital

image mosaics methof[J]. Infrared Technology, 2009, 31(6): 348-353. (in Chinese)

[2] Yang Lei, Cao Jianzhong, Tang Linan, et al. Optimized design of automatic panoramic images mosaic [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 985-990. (in Chinese)

[3] Di Yingchen, Chen Yunping, Chen Yingying, et al. Survey on image mosaic algorithm of unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(1): 170-174. (in Chinese)

[4] Anne T, Yang G L, Jing C L, et al. Color uniformity in spotlights optimized with reflectors and TIR lenses[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 118-123.

[5] Feng Qibin, Yang Guanglei, Jing Changlong, et al. LED -based projection light source for solid-state volumetric true-3D display [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(5): 1113-1119. (in Chinese)

[6] Lu Jianing, Yu Jie, Tong Yuzhen, et al. Secongary optical design for light emitting diodes lens with wide range and high uniformity illumination [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(3): 334-337. (in Chinese)

[7] Chen Jilong, Shi Zhiwei, Tan Jizhi. Optical design for uniform illumination with LED extended source in road lighting application [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(5): 857-863. (in Chinese)

[8] Yang Kai, Li Xiaoyan, Chen Liang, et al. Light distribution optimization design of LED street light basd on freeform surface lens [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7): 0722001. (in Chinese)

[9] Ding Yi, Zheng Zhenrong, Gu Peifu. The design of free-form lens for LED lighting[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1486-1490. (in Chinese)

[10] Ge Aiming, Wang Wei, Du Zhengqing, et al. Design of an LED -based compound optical system for a driving beam system[J]. Applied Optics, 2013, 52(12): 2688-2693.

[11] Yang Bo, Liu Yichao, Wang Yongtian. The computer aided design and optimization of segmented reflectors [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(8): 970-973. (in Chinese)

[12] Wang Hua, Du Lei. The research on design of free-form lens for LED lighting [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014, 21: 34. (in Chinese)

[13] Hou Yu. Design of lens to realize small angle lighting for LED [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 0518004. (in Chinese)