

新型 LED 路灯照明二次光学设计

摘要：由于白光LED 具有很多显著的优点，将其应用于公共城市照明设施地替代光源有着许多的优点。然而要真正充分发挥半导体光源的长处，二次光学系统的设计至关重要。本文介绍了一种独特的适用于城市道路照明二次光学系统，他能较好的满足城市道路照明的家路相关标准，并可以灵活地适用于不同的道路情况。

1、引 言

公共城市照明在照明市场上占有庞大的份额，根据统计，城市公共照明在我国照明耗电中占30%的比例，约439 亿 kwh，以平均电价0.65 元/kwh 计算，一年开支285 亿元。目前，广泛应用于城市公共照明的是高压钠灯，特别是在主干道上，高压钠灯可以提供100lm/W 以上的发光效率。但其本身的缺憾也很明显：

光源的光谱成分偏黄，显色指数极低；

灯具的寿命短，更换工作量大；

不便于对于灯的功率进行调节；

随着20 世纪90 年代固体物理学的高速发展和新半导体材料的突破性发现，近10 年来LED 技术取得了突飞猛进的发展。白光LED 的出现，以其特有的低电压驱动、体积小、重量轻、显色性好、调光性能好、寿命长(达2 万小时以上)、耐振动、不易损坏、符合环保要求等优势，使半导体光源将成为城市道路照明理想的节能光源。其显著的优点为：光效高。

目前商业化的白光 LED 光效已达到90-100lm/W 左右，预计2 年内能达到150lm/W 以上，而这并非 LED 光效的上限，各国的专家都把光效地目标定在200lm/W 左右。

寿命长。

理想的目标是10 万小时，而目前商业化的白光 LED 寿命可到5 万小时，比传统光源寿命要长10 一20倍。做成城市道路照明光源，则可以10 年不换光源，大大节省了日常的维护费用。便于对于灯的功率进行智能调节;可以附加二次光学系统，最大限度地利用 LED 的光能，满足各种应用场合特定的照度与光强分布。近年来，常规化石能源日趋紧张，石油、煤等常规能源价格不断攀升,特别国际油价更达到历史高位,造成了能源供应的形势愈加严峻。由于 LED 的这些显著优点和白光 LED 技术的日臻成熟，开发高效、长寿、绿色环保的半导体光源城市道路照明系统，具有十分重要的意义。

2 二次光学系统的设计

道路照明系统不同于一般的照明灯具，其被照明的场是一矩形区域。表1-1和表1-2 为国家路灯标准。根据国家公路照明标准，主干道的平均照度是15lx，均匀性为30%;次干道的平均照度是8lx,均匀性为30% ，其中均匀性为照射路面的最低照度/平均照度。

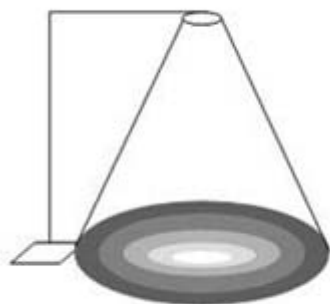
表 1-1 国家路灯标准

级别	道路类型	亮 度		照 度		眩光限制	诱导性
		平均亮度 Lav(Cd/ m ²)	均匀度 Lmin/Lav	平均照度 Eav(Lx)	均匀度 Emin/Eav		
I	快速路	1.5	0.4	20	0.4	严禁采用 非截光型 灯具	很好
II	主干路及 迎宾路	1	0.35	15	0.35	严禁采用 非截光型 灯具	很好
III	次干路	0.5	0.35	8	0.35	不得采用 非截光型 灯具	好
IV	支路	0.3	0.3	5	0.3	不宜采用 非截光型	好

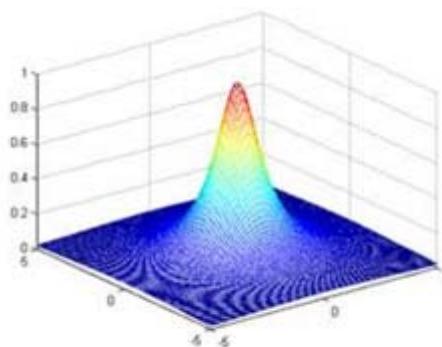
表 1-2 国家路灯标准

道路等级	亮度(cd.m ⁻²)		照度 (lx)		灯具安装高度 (m)		路面宽度 (m)	路面照明长度 (m)		路面照明面积 (m ²)	
	平均亮度	均匀度	平均照度	均匀度	最低高度	最高高度		最小长度	最大长度	最小面积	最大面积
II	1.0	0.35	15	0.35	8	10	10	32	50	320	500
III	0.5	0.35	8	0.35	6	8	10	24	40	240	400

由于高压钠灯为全角360 度发光，通常在光源背面加上一个反光装置使发出的光照射到路面上以提高能量利用。但是由于高压钠灯光源庞大，缺乏有效的光学装置，高压钠灯在路面上形成的光斑通常是一个不均匀的圆斑：中心处很亮，而在径向衰减很快。如图1所示。



a 表示传统路灯照射模型



b 路灯在路面照度强度分布

图1：传统路灯照射模型

为了达到国家照明标准的均匀性要求，通常不得不提高输出功率使得周围暗斑的照度主干道不小于5 lx,次干道不小于2.4 lx,然而大量的能量则浪费在路灯的正下方中心处和道路的外侧，从而降低了总的能量利用率。

现有的LED 发光源是光强分布近似朗伯源的点光源，单个的功率都在1 瓦左右，而道路照明往往要求有特定形状的被照光场，如国家规定主干道路灯的照明区域为10x50 平米的矩形区域。因此要组成道路照明系统，就不能简单地将LED 组合一起，这样形成的圆形光场将不利于光能的利用，无法满足国家标准对整个被照区域光照度均匀性的要求。如果能够将LED 芯片发出的光合理的分配道路面上面，在路面上面形成一个均匀照度的长方形区域，则可以在低的发光效率下实现高于高压钠灯的能量利用率。如图2所示。

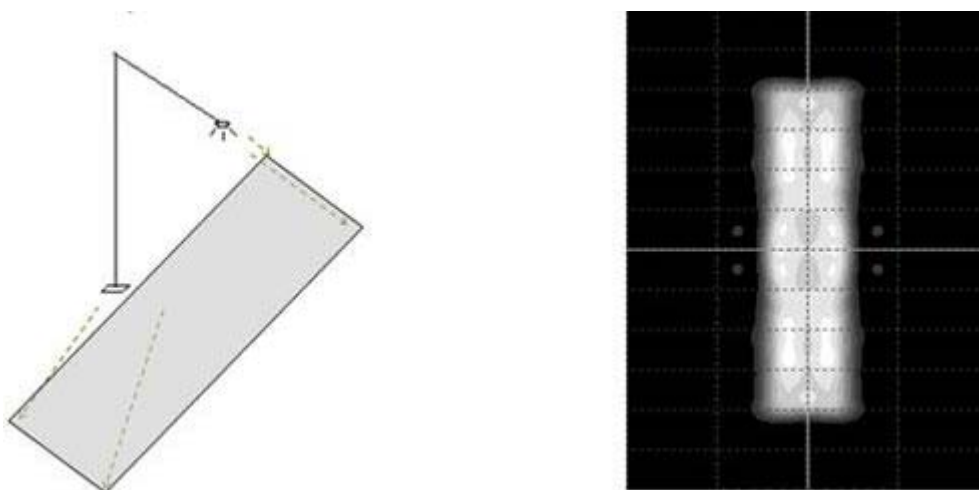


图2：理想 LED 路灯照射模型以及在路面上的照度分布示意图

下面我们从系统效率的角度来估算不同路灯的光效，由表2 可见，LED 光源的系统效率要比传统钠灯的高很多。

高压钠灯(120lm/W)			
道路等级	快速路	主干道	次干道
光源功率(W)	400	250	150
照射面积(m^2)	400	350	300
路面长度(m)	40	35	30
照度(lux)	30	15	10
区域内光通量(lm)	12000	5250	3000
光源总光通量(lm)	48000	30000	18000
系统效率	0.25	0.175	0.167

LED光源(100lm/W)			
道路等级	快速路	主干道	次干道
照射面积(m^2)	400	350	250
区域内光通量(lm)	12000	5250	3000
系统效率	0.7	0.7	0.7
最少需要光通量(lm)	17143	7500	4286
需要LED功率(W)	172	75	43

表2 路灯光源光通量的计算

国内生产各类道路照明灯具的生产厂家也不少。而目前在**大功率LED**道路照明方面,一些工厂开始进行开发尝试,但若是简单地进行多芯片或多器件组合,则在实际的照射面积、有效面积的照度不均匀性等方面都很难达到国家的相关标准。也就无法将LED路灯应用到支路照明、次干道照明进而拓展到主干道照明领域,而如果硬要为达标准而增加功率,则LED高光效的特点就不复存在。

要设计适用于半导体道路照明的高效光学系统,关键在于设计出有效可靠的光学系统使得光源发出的光均匀的分配道路面上面,即解决有序地光能量的传输问题,而这正是非成像光学的一个主要的研究方向,即给定照度分布光学系统的设计。

非成像光学是近几十年来逐渐发展起来的专门研究光能量传输问题的新的光学分支,主要通过设计折射和反射表面“有序”控制光线的光学系统,从而提高能量的传输效率。

在点光源的近似条件下,上述给定照度分布问题的解可以抽象成一个数学模型。然而当在三维空间中考虑该问题时,该问题变成一个非常复杂的二阶非线性蒙特安培偏微分方程,人们进行了各种各样的方法研究这个方程的解法[6][7]。由于求解过程非常复杂,在特定的边界条件下得到的解并不具有实用价值,无法得出实用的光学系统。

我们的研究为解决非成像光学中给定照度问题提供一个新的解决方法和理论依据,能够更方便地将非成像光学应用到半导体照明领域的光学系统设计,能更好地收集和利用光源发出的大角度光线,能更好地发掘LED的潜力,据此设计出全新的LED道路照明系统,提高系统的光效,形成自主知识产权。新的理论与方法也将适用于其它半导体照明应用领域的非成像光学系统设计,如采用LED作为光源的新型汽车车灯、投影仪光源、背光源照明设计等方面。

因此通过改进道路照明的结构来提高传输效率，具有很大的提升空间。一种较实用的方法是采用非成像光学的原理设计特殊的光学系统，更合理地分配LED发出的光能，可以在满足国家标准对光照度和均匀性要求的前提下，来提高道路照明系统的性能，尽量提高能量的利用率。

3，新型路灯的设计

在理论研究方面，主要解决半导体光源二次光学设计中三维非成像光学设计的难点，填补国内外在这方面的空白，并能据此研发了具有自主知识产权的城市道路照明应用产品。具有很多其他同类产品无法比拟的优越性：

照度分布形状合理：

根据单颗LED设计二次光学系统，其照度分布如图3所示，由于照射形状是一个长方形，可以方便的拼接起一条没有盲区的明亮道路，也就是可以在满足国家道路照明标准的前提下，合理的将能量分配道路面上，有效地减少了浪费的能量。

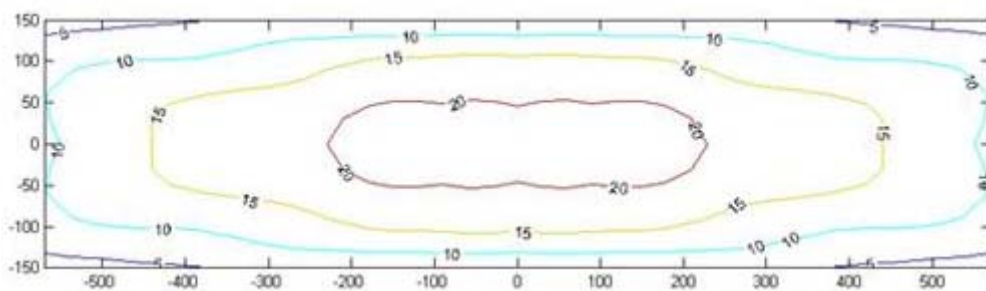


图3：新型路灯实际照度分布示意图

高均匀性，高效率：

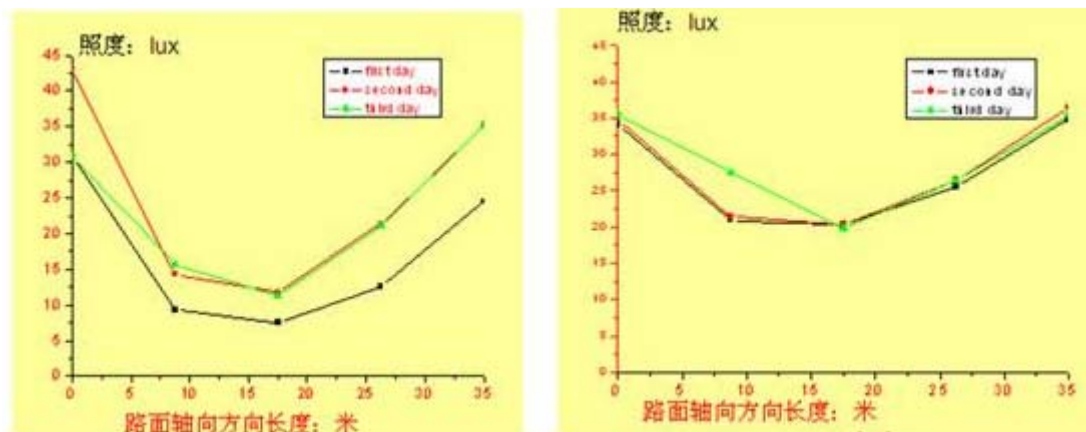
新型路灯的另一个优势就是在照明区域内具有很高的照明均匀性，均匀性优于国家规定的路灯照明标准的要求，这样就可以在达到同样人眼对亮度的感觉情况下，减少对路面照度的要求，进一步节约能源。

使用灵活，安装方便：

目前，大功率LED的发光效率已经达到90lm/w,但是单颗LED不能满足道路照明的需求，因此需要多颗LED拼装成一盏实用的路灯。由于每一个LED都可以在整个矩形照明区域内形成均匀的照度分布，因此可以根据实际路面的照明要求及灯杆的高度，简单地改变LED的数量，而不用改动光学系统，具有很高的使用灵活性。

*稳定可靠

图4 是对高压钠灯LED 路灯在三天时间内测量的光源照度均匀度的变化，可以清楚地看出，LED 路灯不但在空间上，在时间上也同样比高压钠灯要均匀稳定得多。



高压钠灯

LED 路灯

图4：不同光源照度均匀度随时间变化的差异明显

*使用寿命长

从目前的光衰试验结论来看，连续点亮5000 小时，基本无光衰，因此 LED 路灯做到3-5 万小时的使用寿命已经是完全可以实现目标。

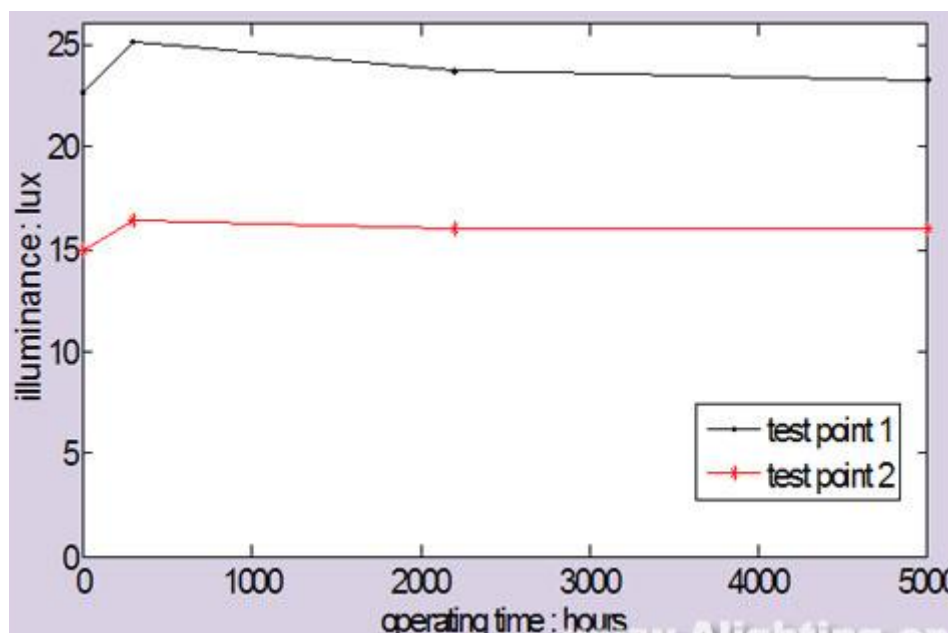


图5：LED 路灯光衰测试曲线

4, 结论

多年来进行LED 路灯的研发并转换成产品, 碰到和解决了很多问题, 学校和企业注册了五十项发明与实用新型**专利**。在此基础上建起了全中国唯一大规模量产LED 路灯的厂家, 拥有较多的应用**案例**, 实际安装已超过200 公里。LED 路灯产品在路面上应用了一年多, 并做了六次重大产品改良, 产品日趋成熟。在解决问题中积累的产品开发和工程应用的经验, 可有助于用户了解半导体照明产品的真实特性, 增加选用信心, 减少政治和技术的风险。

半导体光源城市道路照明系统作为一个新的技术, 在应用上还有许多难题, 其中最关键的是要在满足国家标准要求的前提下, 保证系统的高效率。随着常规化石能源日趋紧张, 石油、煤等常规能源价格不断攀升, 特别国际油价更达到历史高位, 造成了能源供应的形势愈加严峻。由于 LED 光源的显著优点和白光 LED 技术的日臻成熟, 节能、长寿、光照均匀、灵活方便、绿色环保的半导体光源城市道路照明系统的应用, 对节省建设资金, 缓减用电矛盾, 构建节约型社会具有重大意义。