

LED 隧道照明技术分析

作者: 陈文成, 陈琦 (欧司朗光电半导体)

LED 隧道照明技术分析

题目	页数
1. 前言	3
2. 隧道照明的特殊要求和评价指标	4
3. LED隧道照明解决方案	7
4. 应用案例分析 - 上海长江隧道	9
5. LED应用于隧道照明的前景与挑战	12
6. 联系资料	14

1. 前言

随着现代经济的快速增长,使各国公路和隧道建设也大大增加。而且在城市化进程不断加快的过程中,越来越多的城市隧道进入规划建设,以上海市为例,根据最新发布的规划方案,黄浦江将再新建 9 条越江通道,为了改变黄浦江上越江通道中间密、南北疏的现状,这些新的隧道更会于世博会后尽快实施,以方便浦江两岸市民通行往来。

全球节能减排的带动,LED 作为要求 24 小时运作的隧道灯便成为不二之选。加上半导体照明技术正在日益进步,目前市场上已经量产的 1 W 大功率白光 LED 的光效已经超过了 100 lm/w,在实验室的研究水平,最高光效更已达到了 160 lm/w。在隧道照明上,LED 已经具备了相当的节能优势。

然而,LED 隧道灯的研发和应用还存在着很多的技术难题。这些挑战主要是光学设计、散热技术、驱动电路几个方面,而且由于隧道照明对于行车安全及行车流量等有着很大的影响,各国都有着严格的照明标准限制,主要评价指标包括路面平均照度、墙面 2m 以下范围均匀度、纵向均匀度、眩光限制、频闪效应及调光控制等参数。

本文主要基于隧道照明的特殊要求和评价指标,分析了 LED 在隧道照明应用中的主要优势,并通过对上海长江隧道的实际应用案例分析,介绍采用 LED 进行隧道照明设计时的注意事项及目前 LED 隧道灯具的技术发展水平,最后探讨了 LED 在隧道照明应用上的前景和技术挑战。

2. 隧道照明的特殊要求和评价指标

隧道照明与普通道路照明不同因为其全天候 24 小时都必须亮灯，白天的照明强度比夜间的照明强度反而要更强，可以相象隧道电力费用成为运营成本的重要一环；加上隧道照明不同于一般的道路照明，有其明显的特殊性，包含把人对明暗的适应能力、明暗过渡的空间与照明等；这些都反映在隧道照明的设计中，更是对使用者的安全有着不可分隔的关系。

隧道照明通常分为入口照明、内部照明和出口照明。其中对入口照明的要求非常严格，要求从与外界相仿的亮度逐渐降低。具体而言，白天隧道入口照明的亮度要根据隧道外的亮度、车速、入口处的视场和隧道的长度来确定。国际照明学会(CIE)将隧道入口照明分为(从隧道口开始)阈值段和过渡段。阈值段是为了消除“黑洞”现象，让驾驶员能在洞口清楚辨认障碍物，隧道过渡段照明是为了避免阈值段照明与内部基本照明之间的强烈变化而设置的，其照明水平进一步逐渐下降。而日本的隧道照明标准中更进一步将隧道入口照明分为引入段、适应段、过渡段。

内部段是隧道内远离外部自然光照明影响的区域，驾驶员的视觉只受隧道内照明的影响。内部段的特点是全段具有均匀的照明水平。因为在该段内照明水平完全不需变化，所以在该段内只需提供合适的亮度水平，具体数值由交通流量和车辆时速决定。隧道内入口段、过渡段、内部段和出口段的分布及亮度如图 1 所示。

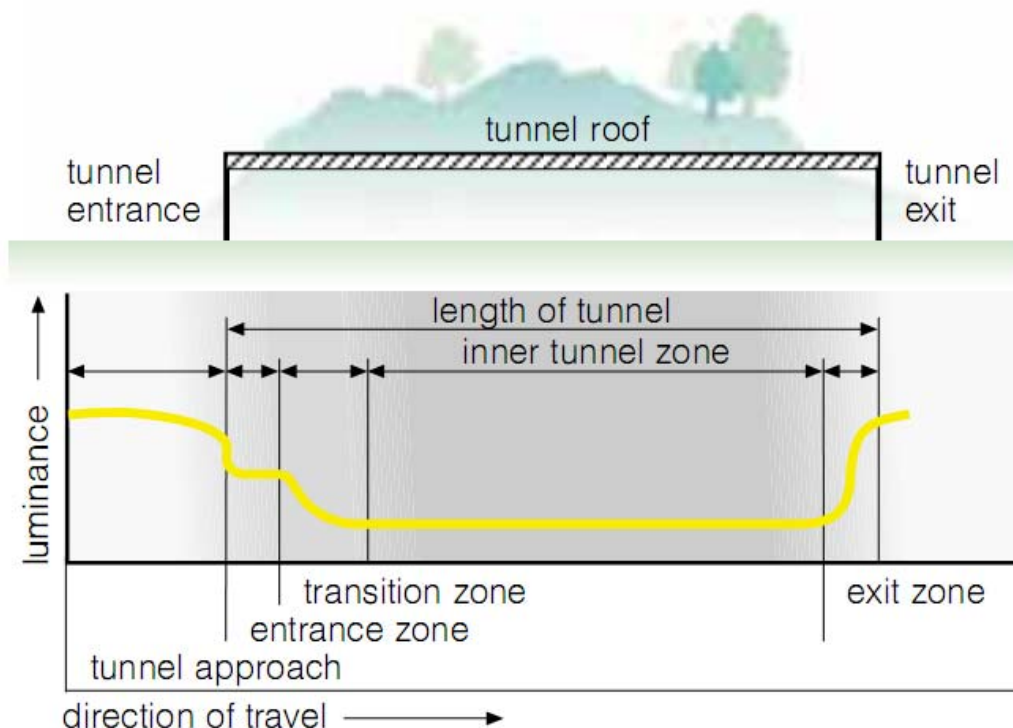


图 1 隧道中入口段、过渡段、内部段和出口段的亮度要求示意图

公路隧道照明有其特性,它与普通道路照明不尽相同。在设计上需要考虑留意以下各点:

- 路面应具有一定的亮度水平
- 隧道墙壁应有一定的亮度水平
- 设计车速、交通量、路线线形等诸多影响因素
- 从行车安全性和舒适性等方面综合确定照明水平
- 人的视觉适应性,特别是隧道入口段、出口段等处
- 隧道白天也需要照明,而且白天照明问题比夜晚更复杂。

要在隧道照明实现节约能源、提高照明效果并保证行车的安全性和舒适性,通常可以从以下几个方面来考虑:

(1) 亮度

由于白天隧道外的亮度相对于隧道内的高很多,故此当驾驶员驾车进入隧道时,视觉需要有一定的适应时间,然后才能看清隧道内部的情况,这种现象称为“适应的滞后现象”,如果没有适当的过渡,则会产生黑洞现象,令驾驶员暂时失去正常的视觉功能,这将会带来一定的安全隐患。黑洞现象是进入隧道前所发生的视觉问题,也是隧道照明中最重要的问题。

为此隧道照明通常分为入口照明、内部照明和出口照明。其中白天隧道入口照明的亮度要根据隧道外的亮度、车速、入口处的视场和隧道的长度来确定的。阈值段是为了消除“黑洞”现象,过渡段的照明水平进一步逐渐下降,从而为驾驶员提供视觉暗适应的时间。

(2) 亮度均匀度

良好的视觉功能不但要求有一个较好的平均亮度,还要求路面上的平均亮度与最小亮度之间不能相差太大。如果视场中的亮度差太大的话,亮的部分会形成一个眩光源,而且亮暗的变化会带来一定的频闪效应,继而影响视觉,人眼的视觉效果会明显变差,而视觉疲劳也会加重。

总体亮度均匀度 U_0 是指隧道内部段路面上最小亮度和平均亮度的比值,纵向均匀度 U_1 是指在车道轴线上最小路面亮度和最大路面亮度的比值。如果路面上连续、反复的出现亮带和暗带,即“斑马效应”,对于在这个车道上行进的道路使用者而言,会感到很烦躁。这个问题涉及到人的心理,但也会危及到道路安全,纵向均匀度主要是用来评价“斑马效应”的大小。

(3) 眩光

眩光的形成是由于视场中有极高的亮度或亮度对比存在,而使视功能下降或使眼睛感到不舒适。在隧道照明中的眩光可以来自迎面驶来的车辆前灯、隧道照明灯具、隧道出口时外面的高亮度等。眩光会使人对障碍物的辨认能力下降,危及行车安全。隧道照明灯具应采用截光型,采取消去直射和反射眩光的特殊技术措施,形成漫反射,使光线十分柔和的进入人眼。

国际照明委员会采用了相对阈值增量(TI)来说明因眩光而造成的视功能的下降,即失能眩光的衡量。欧盟标准委员会的隧道照明标准中(CR 14380: 2003E),对失能眩光的

规定如下：在白天时隧道阈值段和内部段以及夜间的整个隧道，其相对阈值增量（TI）必须小于 15%。

(4) 频闪效应

频闪是指在较长的隧道中，由于照明器排列的不连续，使司机不断地受到明暗变化的刺激而产生烦乱。它与明暗的亮度变化、明暗变化的频率、频闪的总时间有关系。这三者与所使用灯具的光学特性、车辆的行进速度、照明器安装间距、隧道长度有关。一般而言，频闪的频率小于 2.5 和大于 15Hz 时所带来的频闪现象是可以接受。

如果车辆的时速为 60km/h 即 16.6m/s，灯具安装间距是 4，这样频闪的频率就约为 4.2Hz。进行设计时，应当加以考虑，选择适当的照明器安装间距。如果频闪的频率位于 4Hz 和 11Hz 之间，并且持续的时间超过 20s，将会给司机带来明显的不舒适。

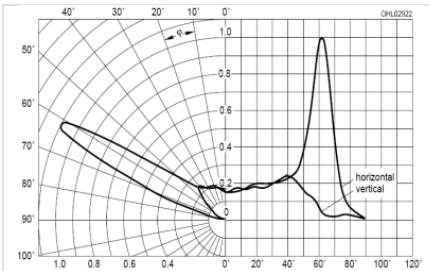
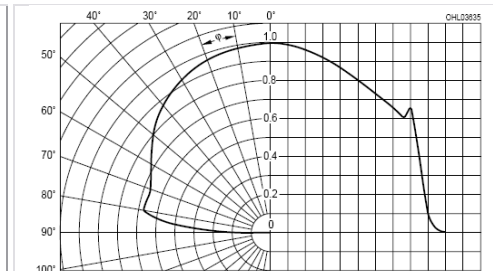
(5) 照明控制

先进的照明控制方式是在保证视觉条件，满足隧道照明要求的情况下，合理节能的重要技巧。照明控制的目的是可以随时改变隧道的照明水平。由于阴天、雨天或黄昏时分，隧道口外的亮度比平时要小很多，因此要有适当的措施来减小入口段照明的水平，以减少不必要的能源浪费。在隧道照明中可以根据白天、夜晚以及车流量大小等因素，通过各种调光设备或控制器件来对隧道照明环境的照度或灯的开启、关闭进行调整和控制。目前，国外大多采用感光器件、可调光电子整流器等构成智能照明系统，使隧道内灯具整体亮度减弱，能耗降低；同时，保证隧道亮度均匀度不变。而国内的部分隧道只是简单地采用了人工关闭部分照明回路的方法，这样将带来亮度均匀度的下降，而且有时为了节约电费而故意减小照明，对驾驶者而言确实存在一定的隐患。

3. LED隧道照明解决方案

下文以两款欧司朗光电半导体的 Golden DRAGON Plus LED (LxW W5PM 和 LxW W5AM) 来分析 LED 如可为隧道照明提供优质的效能。LUW W5PM 是自带一次光学透镜的 LED，能为路面提供高均匀度；而 LUW W5AM 是一颗光效高的 LED，单颗 1W LED 的光通输出可达 112-130 lm，并拥有较宽的光束度（半宽度角 170 度），适合于透镜或者反光杯的设计（表一）。

表 1 LxW W5PM 和 LxW W5AM 的相关参数对比

名称	LxW W5PM	LxW W5AM
配光曲线		
Lumen	97 至 112 lm	112 至 130 lm + 二次透镜影响效率
热阻	典型值 7 K/W, 最大值 11K/W	典型值 6.5 K/W, 最大值 11K/W
驱动电流	典型 350mA, 最大 1000mA	典型 350mA, 最大 1000mA
焊接方式	回流焊	回流焊
配光特点	峰值光强 120°x80°, 无需光学设计, 即可得到绝佳的路面均匀度。	较宽的光束度 (半宽度角 170°), 具有最佳的光效, 适合配合反光杯或二次光学透镜使用。

对于一些大型隧道，灯具安装高度较高，则隧道的配光相对较为容易，可以采用 LxW W5AM 再加反光杯的形式，同时兼顾到墙面的照度和路面的照度，当然，也可以直接采用自带一次透镜的 LxW W5PM，效果会更好。而对于一些城市隧道，通常灯具安装高度有限，而因出于频闪的考虑其灯具的间隔不能太大，此时采用自带一次透镜的 LxW W5PM，其 120°x80°的配光可以在不需要任何二次光学设计的情况下，得到绝佳的路面和墙面均匀度。

对典型的单向三车道隧道而言，隧道内宽为 13.5m，灯具安装高度约 5.5m，灯具安装

间距为 5.6m，如图 2 所示。则采用 Golden DRAGON Plus 系列 LED，再配合 80 度的反光杯，在 Dialux 软件中模拟设计时可以达到所规定的各项技术指标，其结果如表 2 所示。其总体均匀度模拟值为 0.8，路面照度的分布示意图如图 3 所示。而在实际的工程项目中，由于隧道灯本身有一定长度存在，其均匀度往往会更好一些。

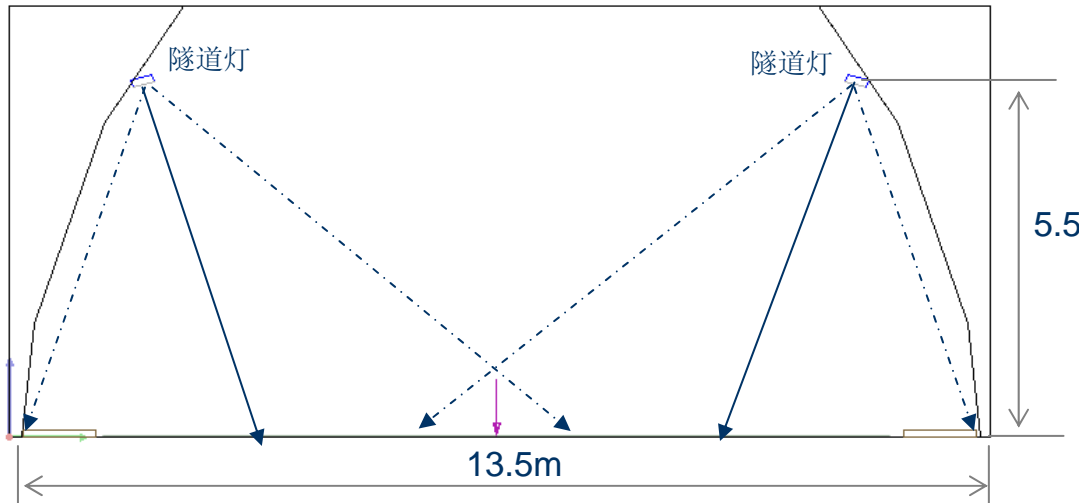


图 2 常见单向 3 车道大型隧道的示意图

表 2 采用 Golden DRAGON Plus LED 配合 80 度反光杯进行隧道照明的模拟结果

	维持平均照度	初始平均照度	总体均匀度	纵向均匀度	每车道纵向均匀度	2 米墙面平均照度
要求值	99 lx	152 lx	≥ 0.7	≥ 0.8	≥ 0.8	少小于路面照度的一半
模拟设计值	105 lx	161 lx	0.8	0.98	车道 1: 0.94 车道 2: 0.98 车道 3: 0.94	56lx
是否达标	是	是	是	是	是	是

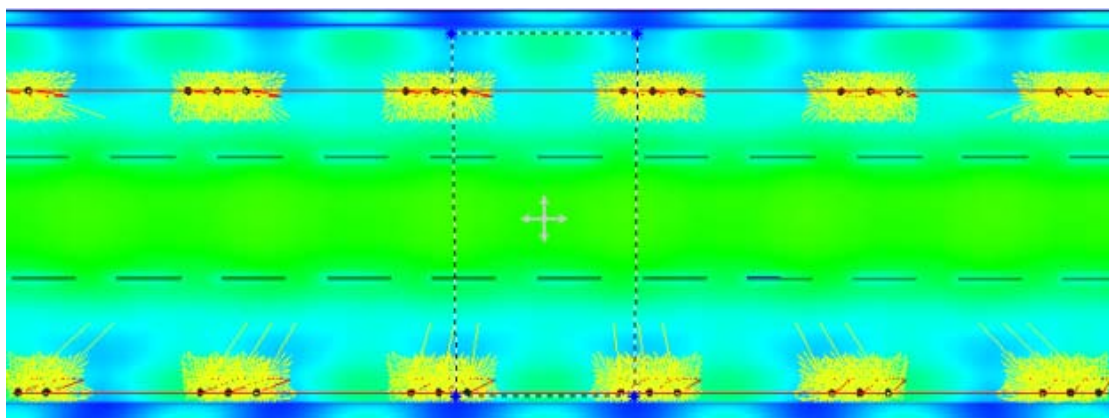


图 3 隧道路面照度的分布示意图

4. 应用案例分析 - 上海长江隧道

随着 LED 的功能渐为人所认识，全球各地的隧道项目越来越多以 LED 作照明光源，其中一项就是上海长江隧道照明项目。隧道内的灯具供应商广东中龙交通科技有限公司采用了欧司朗光电半导体的 Golden DRAGON Plus LED，应用于上海长江隧道照明项目。该隧道内径为 12.7 米，单洞长 8.9 公里，采用双管道结构，每一管道均为单向 3 车道设计，共安装有 5,886 套隧道灯，使用的欧司朗 Golden DRAGON Plus LED 超过 41 万多个，是目前全球最长的采用 LED 作为照明光源的隧道,如图 4 所示。

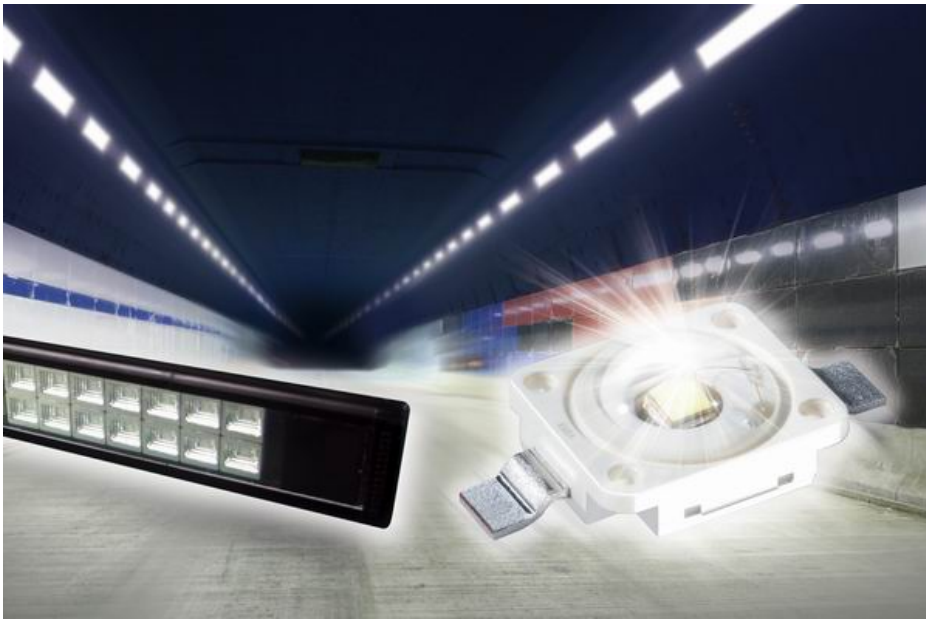


图 4 应用欧司朗 LED 的上海长江隧道效果图

上海长江隧桥工程是中国长江口沿海一项特大型交通建设项目。工程南起浦东五号沟，穿越长江南港后经长兴岛，再跨越长江北港向北止于崇明岛东端陈海公路，全长 25.5km，道路设计为双向 6 车道。工程以长兴岛为界采用南隧道北桥梁的过江方案，其地理位置如图 5 所示。

位于南港的上海长江隧道工程全长 8955.26m，包括浦东岸边段、江中圆隧道段和长兴岛岸边段三部分。其中浦东段长 657.83m，长兴岛段长 826.93m，江中圆隧道段东线长 7471.654m，西线长 7469.363m。圆隧道内设计



图 5 上海长江隧道位置示意图

车速 80km/h，道路为黑色沥青路面，每车道宽度为 3.750m，隧道净宽为 12.750m，通行净高 5.0m，灯具安装高度约 6.0m。

隧道推进施工所采用的是 2 台直径达到 15.43m 的超大型泥水平衡盾构机，这两台盾构机不但代表了当今世界盾构机技术的最高水平，而且更是凭借其超大的直径和超长的一次性推进距离成为世界之最。上海长江隧道入口处的结构及效果如图 6 所示。

此次上海长江隧桥 LED 隧道灯应用项目，客观的分析了 LED 隧道灯具目前的技术发展水平，在基本照明中全部采用了 LED 隧道灯具，灯具数量为 5786 套。同时根据 LED 隧道灯具的技术特点，在满足规范要求照明效果的同时，还实现了灯具的无极调光，灯具的自动故障检测以及灯具的自动光衰检测三大功能，这三大功能的实现，充分的发挥了 LED 隧道照明灯具的技术特点，进一步提高了 LED 隧道灯具的节能效果，同时也大大的降低了隧道的维护成本，为今后的特长隧道照明的智能化应用提供了新的发展思路。

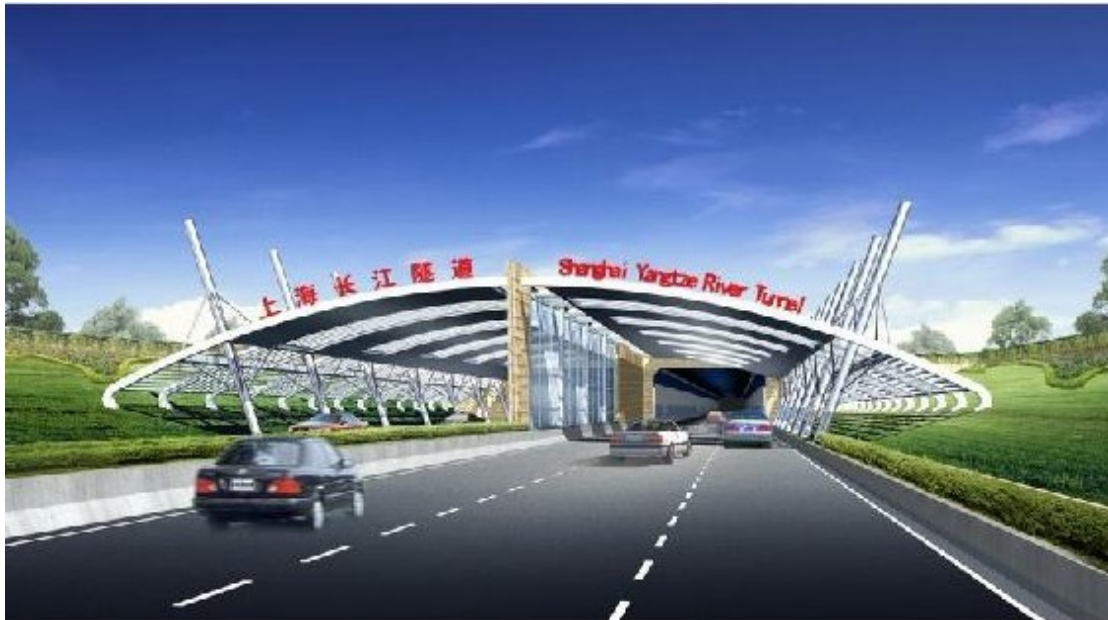


图 6 上海长江隧道入口处效果图

上海长江隧道于 2009 年 10 月 31 日正式通车，当车辆进入下行线隧道，有一段非常亮的过渡段，再往前则是均匀柔和的内部段照明，地面的白色车道标线在 LED 隧道灯的照亮下，异常清晰，两侧侧墙采用了白色的搪瓷钢板材料，使隧道在视觉上显得更宽大一些，侧墙中间则有一条绿色的腰带，如图 7 所示。绿色腰带在进入隧道约 4 公里处，也就是整个隧道的中间位置，两侧有大幅的地图壁画，用抽象的手法标出了长江隧桥的地理位置及上海的主要路网。绿色腰带在壁画中部与蓝色腰带交会，如图 8 所示。整个隧道的照明完全达到了设计实期的各项指标，不仅照度达标，而且均匀度绝佳，没有什么眩光，同时较好的显色性让隧道侧墙的蓝色和绿色腰带色彩逼真，并配合线性的灯具设计，视觉导向性非常好。

由于长江隧道长约 9 公里，且需要 24 小时不间断照明，照明负荷在隧道运营时占整个能耗比例的 40%至 50%，成为“能耗大户”，而采用 LED 照明能降低三成能耗。长江隧道如

果按照普通的荧光灯照明，功率为 989 千瓦，一天光照明用电就要 2 万多度，而采用 LED 照明，耗电量相当于打七折。



图 7: 上海长江隧道通车后的实景照片



图 8: 上海长江隧道 LED 照明效果实景照片

5. LED应用于隧道照明的前景与挑战

目前，在隧道照明应用所采的光源中，高压钠灯因为其较高的明视觉光效（可达120lm/w）而得到了大规模的应用，但高压钠灯在隧道照明中还是存在些难以克服的问题，主要是显色性较差和光源功率选择范围有限（通常只能选择250W和400W），尤其在内部段照明中，高压钠灯一方面没有较小功率，另一方面，点状的强光源所造成的眩光和频闪比较严重。

在一些长隧道中，直管型荧光灯因其较高的显色性和线性照明具有较好视觉诱导性也得到了一些应用，但由于荧光灯的寿命短，通常只有8,000小时左右，因而经常需要更换，大大增加了隧道的维护成本。另外，荧光灯的功率较小，在入口段、过渡段和出口段等需要较高照度的区域没法达到要求。

近几年随着无极灯技术的成熟，由于消除了电极因素的影响，无极荧光灯相比于传统荧光灯具有更长的寿命，也可以做到更大的功率，这使得无极灯在隧道照明场合体现了优势。但无极灯的发光面较大，在进行光学设计时整个灯具的光学效率较低。

而LED光源可以说是集成了高压钠灯、直管荧光灯和无极灯的各个优势，是目前隧道照明应用中最理想的光源，其优势主要体现在以下几个方面：

- 1) **高光效：**目前量产单芯片1W的LED光效最高可以达到100lm/w以上，而且由于是单面出光，在整个灯具光学系统的设计过程中，可以做到很高的灯具效率。
- 2) **长寿命：**LED在合理的散热设计和电源驱动条件下，可以有长达5万至7万小时的寿命，对于24小时点灯的隧道照明应用，可以大大减低维护费用，并且可以缩短投资回收期。
- 3) **易配光：**LED光源由于发光尺寸很小，单面出光，光线的方向性很强，因而可以很方便地配合透镜或反光杯，来达到较理想的配光，不仅提高整个灯具的利用效率，更可以保证良好的均匀度。
- 4) **灯具设计灵活：**LED隧道灯不仅在功率设计上灵活，采用1W左右的LED器件，可以根据实际照度要求来改变LED光源的数目，达到最佳的节能效果，而且由于尺寸很小，灯具外形的设计上也非常灵活，既可以做成线性的灯具以达到较好的视觉透导性，也可以设计成矩形的灯具适合较高照度要求的入口段、过渡段和出口段。
- 5) **智能调光控制：**采用LED可以实现灯具的无极调光，可以结合洞口的亮度来动态改变隧道照明的亮度，充分发挥LED隧道照明灯具的技术特点，进一步提高LED隧道灯具的节能效果，实现智能化的隧道照明。

虽然目前大规模应用 LED 隧道灯还存在着很多难点和挑战，如 LED 照明产品标准的不完善，一些劣质产品对市场推广产生的消极影响，LED 隧道灯的初次购入成本较高等。这些都给 LED 隧道照明产品的大规模市场应用带来压力，但这些压力是任何一项新技术新产品在推广应用初期不可避免会遇到的。但是，随着大功率白光 LED 技术的进一步发展，LED 隧道灯光热电整体系统技术的不断成熟，人们节能和环保意识的进一步增强，LED 技术必将在隧道照明应用领域缔造半导体照明行业的新未来。

6. 联系资料

如欲进一步了解欧司朗光电半导体的产品信息，请登上www.osram-os.cn。
或以电邮联络：prasia@osram-os.com。

香港 – 亚洲区总部

欧司朗光电半导体亚洲有限公司
地址: 香港湾仔港湾道 26 号华润大厦 30 楼 3006-10 室
电话: +852-3652 5522

上海

欧司朗（中国）照明有限公司 (光电半导体)
地址: 上海市西藏中路 18 号港陆广场 29 楼
邮编: 200001
电话: +86 (21) 5385-2681

北京

欧司朗（中国）照明有限公司 (光电半导体)
地址: 北京市朝阳区望京中环南路 9 号望京大厦 B 座 9 层
邮编: 100102
电话: +86 (10) 8478 5101

深圳

欧司朗（中国）照明有限公司 (光电半导体)
地址: 深圳市南山区华侨城汉唐大厦 5 楼 F 室
邮编: 518053
电话: +86 (755) 3322 4946