

公路隧道 LED 智能化无级调光照明节能分析

合肥源辉光电子有限公司 吕晓峰 230041

关键词：过度照明 投资经济性 养护系数 车流量 洞外亮度

摘要：本文论述了公路隧道照明系统电能浪费之所在，介绍了 LED 智能化无级调光照明系统的节能原理和 LED 隧道灯的选择方法，分析了 LED 无级调光照明系统与传统分级调光照明系统的安全性及其综合投资对比。

引言

目前公路隧道约有 80% 的照明能耗被浪费掉了。长期以来，隧道照明节能主要是从提高光源光效、优化系统设计、加强能耗管理等方面入手，这在一定程度上起到了较好地节能效果；但如果要在这传统的节能基础上再节能 50%，传统的照明方式是无法实现的。本文将从理论和实践两方面论述这部分电能是怎样浪费的？我们如何通过 LED 智能化的无级调光照明系统将大部分电能节省下来。

传统照明与智能化无级调光照明两者节能方式不同，因此节能效果也大相径庭。前者由于灯具亮度不可控，因此几乎完全依靠灯具光效的提高来实现节能，这种简单的节能方式现在已没有太大的节能空间；如果想节能 10 个百分点，就需要用户付出更多地代价。而后者通过智能化无级调光，实现按需照明，为隧道照明节能打开了一片广阔的空间；与钠灯相比节能 60~70% 是较为容易的；去年我们在夏蓉高速贵州格龙隧道实施了 LED 无级调光与 LED 分级调光进行对比的科研项目，经权威机构国家交通安全设施质量监督检验中心检测，LED 无级调光照明系统比 LED 分级调光照明系统还要节能 34.7%。

一、公路隧道传统照明系统电能浪费所在

1、养护系数形成的浪费

a、养护系数与灯具寿命的关系

养护系数是指隧道灯在使用一定周期后，在规定表面上的平均照度或平均亮度与该灯在相同条件下新装时所得到的平均照度或平均亮度之比。它与光源的使用年限息息相关。

图 1-1 是养护系数取值与 LED 隧道灯使用年限的关系图。从图中可以看出，取值越低，使用年限就越长；取值越高，使用年限就越短。标准中规定养护系数取 0.7，这就意味着照明系统的使用年限可达 30000h。现在许多人为了让用户使用自己的灯，在联合设计时将维护系数取 0.9，致使 LED 照明系统实际使用不足 10000h 就已面临报废，如继续使用，又会面临长期的事故隐患；这一做法虽然降低了初期的建设投资，但更换灯具的周期缩短，增加了后续灯具投资，给用户造成极大地损失。这种做法显然是不可取的。

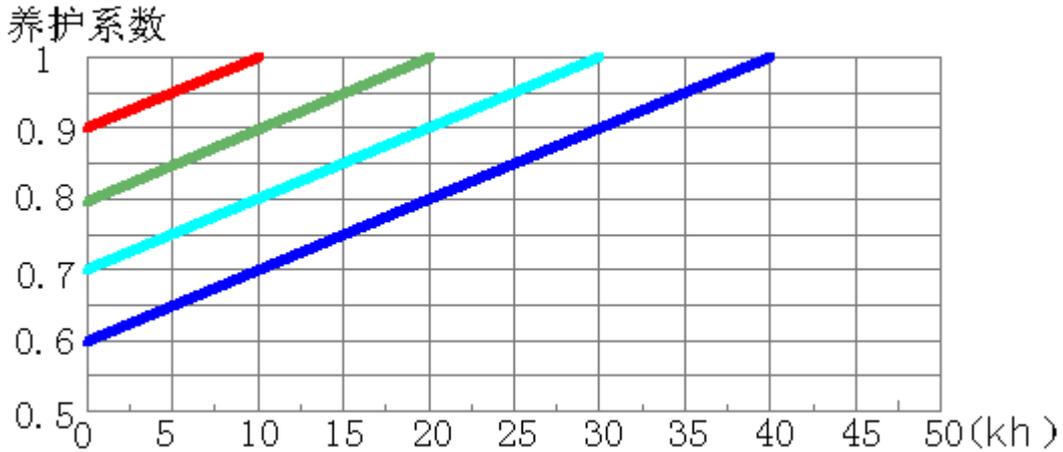


图 1-1 是养护系数取值与 LED 隧道灯使用年限的关系图

b、养护系数形成的电能浪费

图 1-2 为养护系数取值与初期过度照明百分比关系曲线。从图中可以看出，养护系数越低，初期的过度照明就越高。当取 0.7 时，其初期的过度照明高达 43%。

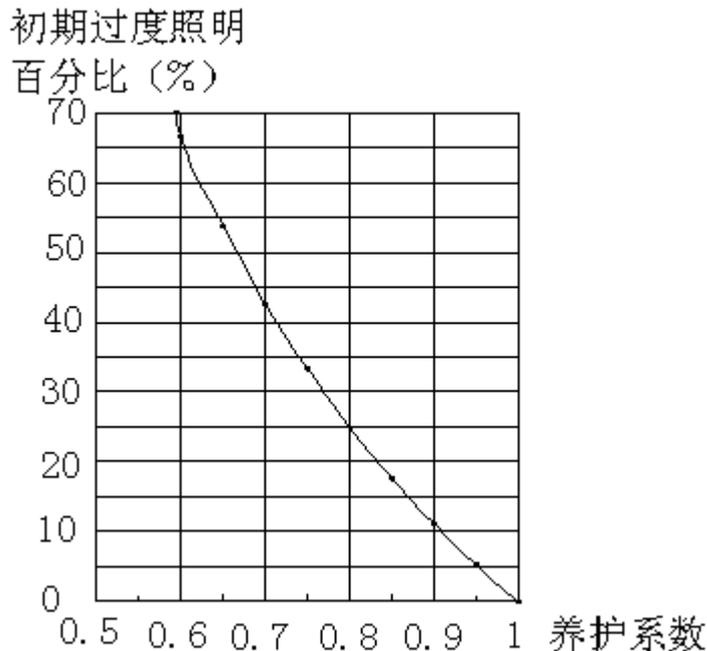


图 1-2 养护系数取值与初期过度照明百分比关系曲线

c、养护系数与照明设备投资的关系

从投资角度讲，养护系数取值越高，建设投资费用就越低。从使用年限角度来讲，养护系数取值越低，使用年限就越长。图 1-3 示出了养护系数与 LED 灯具投资的关系。蓝线是 LED 灯初期的投资增幅，它随养护系数的降低而渐渐增大。红线是 LED 灯三年累积的投资增幅。养护系数取得越高，在满足标准要求照度的前提下更换灯具的次数就越多。从图中可以看出养护系数取 0.7 时综合投资最低。如果取 0.9，则意味着每年需更换一次灯具，三年内的投资费用会

增加 2 倍。

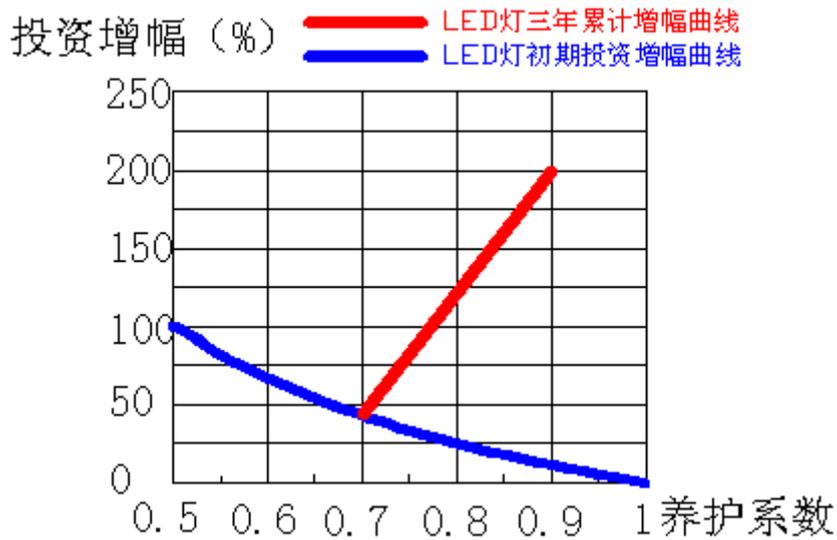


图 1-3 养护系数与 LED 灯具投资的关系图

这里需要注意的是，对钠灯而言，可以换灯泡；养护系数越高，换灯泡的频度就越高。而对 LED 灯而言，养护系数越高，则需换灯的时间就越短，因此后续的投资反而成倍增加。

d. 维护系数与灯具寿命关系

灯具在使用时亮度会不断地衰减，因此在隧道和道路照明设计时必须将亮度先提高约 50%（即是用标准要求的亮度值除以 0.65 左右的养护系数），以便灯具具有足够的使用寿命，并确保灯具寿命期内的路面亮度在标准之上。图 1-4 示出了不同养护系数时相对照度与灯具寿命的关系。从图中可以看出，在满足标准要求这条红线的前提下，灯具在开灯过程中和报废之前均处在过度照明状态，电能浪费严重。养护系数越低，相对照度就越高，电能浪费越大，但灯具使用年限就越长。提高养护系数虽可节能，但灯具寿命大大缩短，越接近 1，寿命就越短。图 1-5 示出了普通 LED 灯与调光 LED 灯的养护系数与使用寿命对比关系，从图中可以看出，养护系数越低，灯具使用年限就越长；养护系数越高，灯具使用年限就越短；而无级调光灯具较恒定亮度的 LED 灯具有着更长的使用寿命。

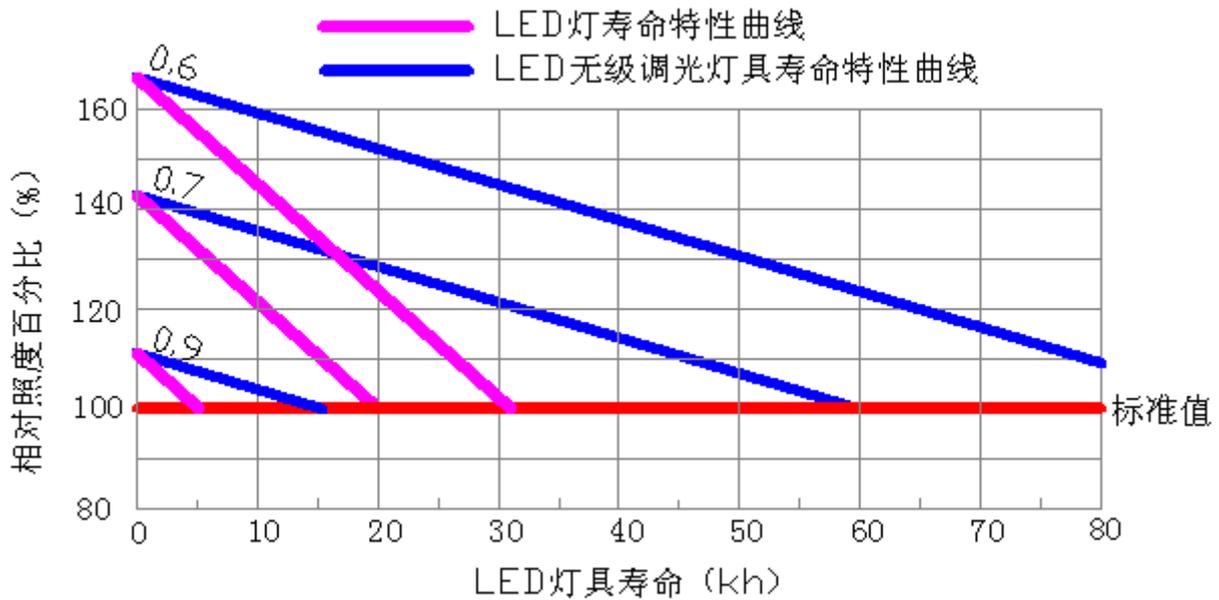


图 1-4 不同养护系数下相对照度与灯具寿命关系

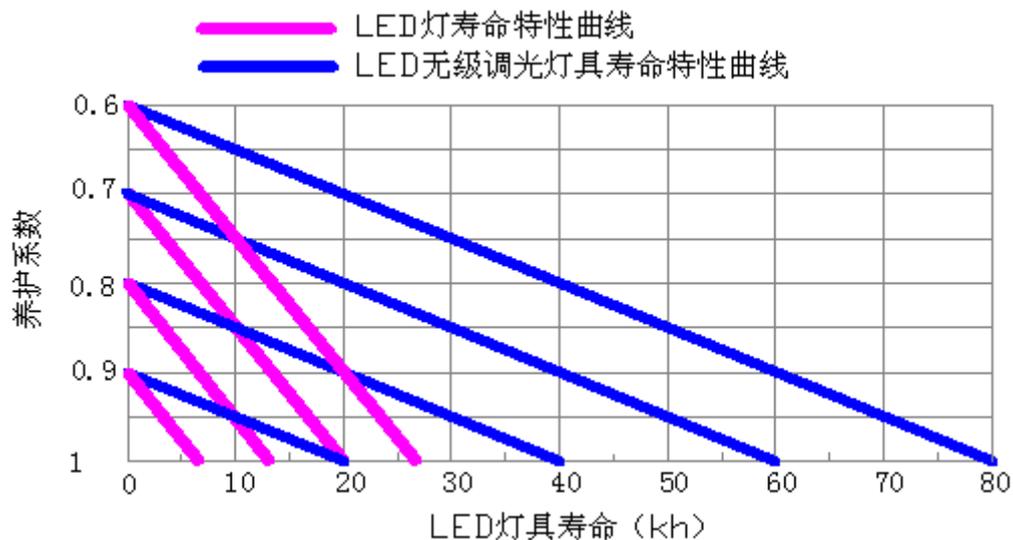


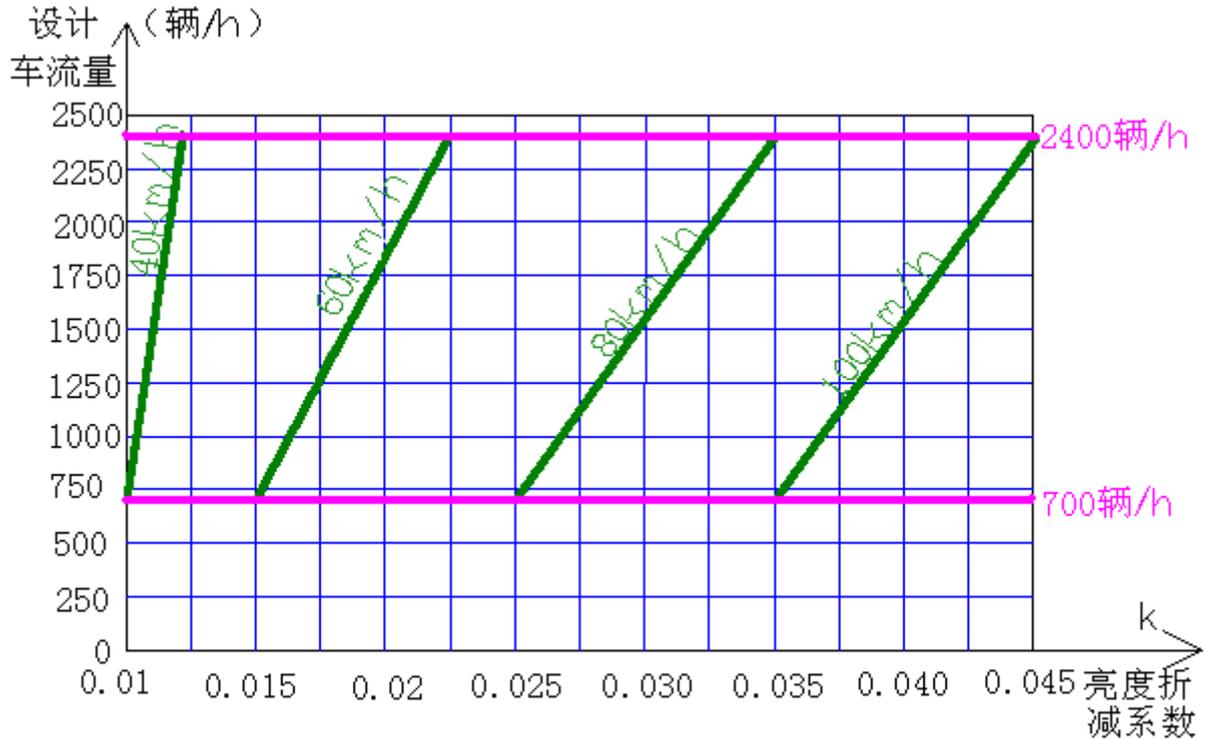
图 1-5 恒亮与调光 LED 灯具的养护系数与使用寿命对比关系

e、怎样消除养护系数形成的电能浪费

对于恒定亮度的灯具而言，通常采用增加电源回路，通过开闭不同的照明回路，以调节照明强度，实现节能目的。但这种方式无形之中增加了系统的电缆和开关设备投资。由于回路数量有限，故依旧存在较大地过度照明。对于亮度可控型 LED 等而言，情况则大不相同。它可通过公路隧道 LED 智能化照明控制装置，对照明灯具进行精细的亮度调节，隧道内需要多亮，系统就调至多亮，不低于标准，也不超出太多，从而消除过度照明所形成的电能浪费。

2、车流量不足形成的电能浪费

公路隧道加强照明的亮度折减系数 k 是随着车流量变化而变化的，但在设计时，均是以远期最大交通量来取值。这就使得交通量不足时，过度照明严重，电能浪费巨大。图 1-6 示出了车流量与入口段亮度折减系数对应关系曲线。从图中不难看出，车流量的不同，其照明能耗相差在 30%左右。如果能对照明系统进行精细的亮度控制，这部分电能是可以省下来的。



车流量与入口段亮度折减系数对应关系曲线图

图 1-6

图 1-7 是车流量与基本照明亮度关系曲线图。从图中可以看出，设计时速为 80km，车流量在 700 至 2400 辆时，其亮度变化在 2~4.5cd/m²之间，其变化幅度高达 55%。在运营近期由此产生的过度照明也是相当大的。而传统的分级调光照明系统是无法消除这种过度照明的。

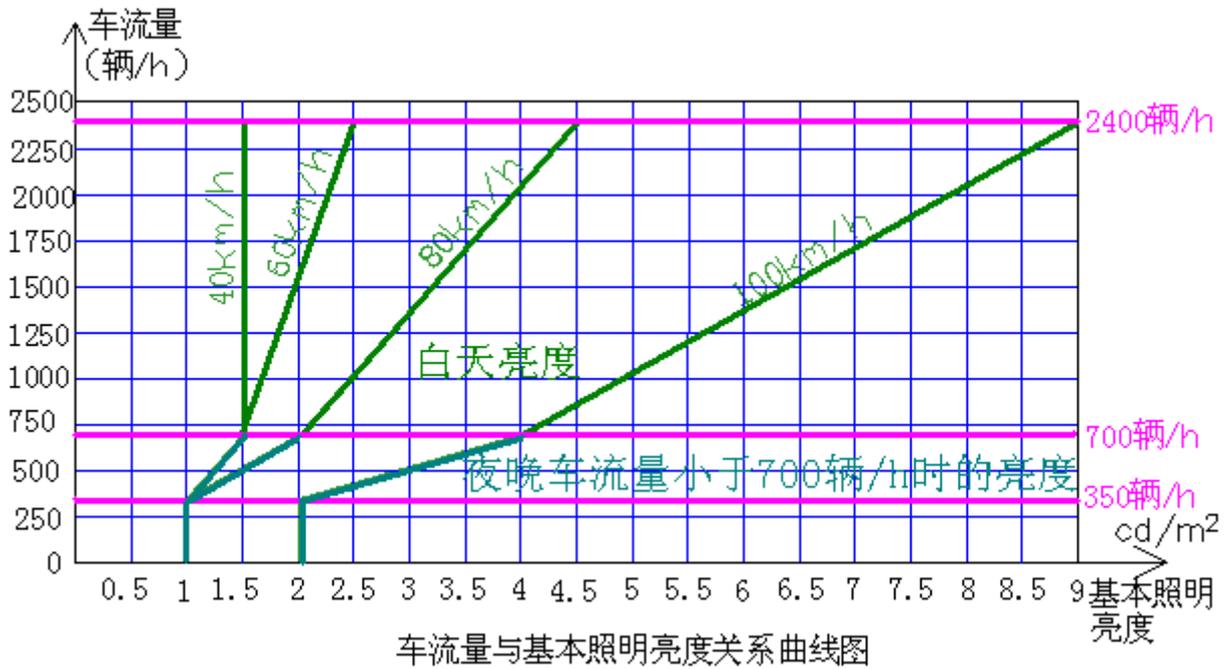


图 1-7

现在我们来查看一下一条设计时速 80km，设计车流量 2400 辆/h 的隧道运营初期的基本照明能耗，它可按下式计算：

$$P_j = P_{\max} \cdot M \cdot r \quad (1-1)$$

式中， P_j 为基本照明调光功率； P_{\max} 为基本照明最大功率（即设计功率）； M 为养护系数，取 0.7； r 为基本照明在不同交通量时的亮度增减系数，按下式计算：

$$r = \frac{\text{交通量对应的亮度}}{\text{设计交通量对应的亮度}} \quad (1-2)$$

从图 1-7 中查得初期 700 辆/h 及以下的车流量对应的亮度为 2cd/m^2 ，则 $r = 2/4.5 = 0.44$ 。将各参数带入式 (1-1) 中得：

$$P_j = P_{\max} \cdot M \cdot r = P_{\max} \cdot 0.7 \cdot 0.44 = P_{\max} \cdot 0.31 = P_{\max} \cdot 31\%$$

而夜晚功率计算如下：

$$P_{j1} = P_{\max} \cdot M \cdot r_1 = P_{\max} \cdot 0.7 \cdot 0.22 = P_{\max} \cdot 0.16 = P_{\max} \cdot 16\%$$

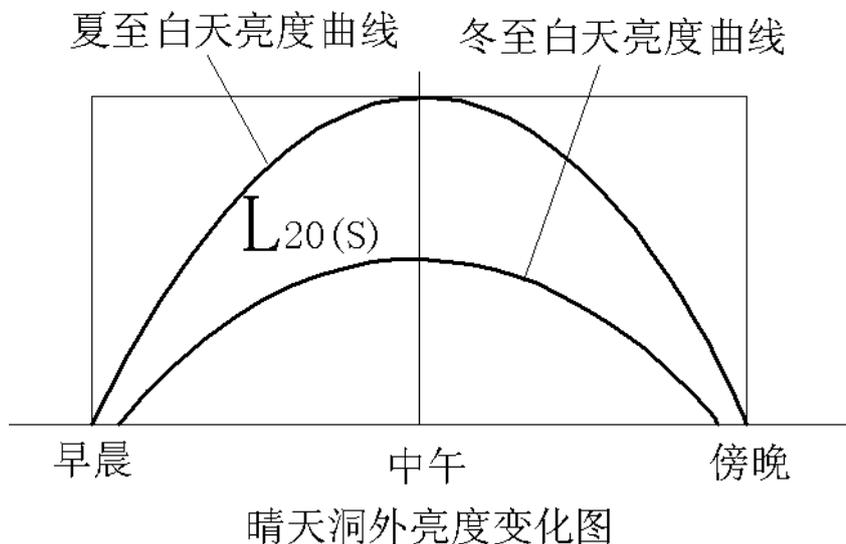
通过计算可以得知，运营初期白天模式仅需 31% 的功率，夜晚模式仅需 16% 的功率。由此看出初期的冗余是相当大的，但这一富余量会随着车流量和使用年限的增加而逐渐减小。要跟随这种变化，传统的分级调光照明系统是无法实现的，因而造成的电能浪费也就可想而知了。隧道采用 LED 智能化无级调光照明系统后，即可消除因养护系数和车流量不足形成的过度照明；它让养护系数仅仅是延长灯具使用寿命的手段，而不是消耗电能的老虎。

3、洞内亮度相对固化形成的浪费

根据规范，隧道入口段亮度可按下式计算：

$$L_{th}=k \cdot L_{20}(S) \quad (1-3)$$

式中， L_{th} 为入口段亮度， k 为入口段亮度折减系数， $L_{20}(S)$ 为洞外亮度。图(1-8)示出了晴天隧道洞外亮度的变化情况。从图中可以看出，洞外亮度即使



图(1-8)

在晴天，它每时每刻也都在变化。根据规范要求，洞外亮度变化了，洞内也应相应地变化。而传统的四级调光系统却不能跟踪这一变化，晴天即是满功率开启，造成巨大地电能浪费。由于设计隧道照明时洞外亮度是以夏天晴天中午的最大值来取值的，因此每年实际达到这一亮度值的时间不足 5%。仅这种浪费，通常就高达 30%~70%。

如图(1-9)所示是长沙市的年嘉湖隧道，从图片中可以看出，由于调光方式不合理，造成阴雨天时洞内比洞外还要亮许多。

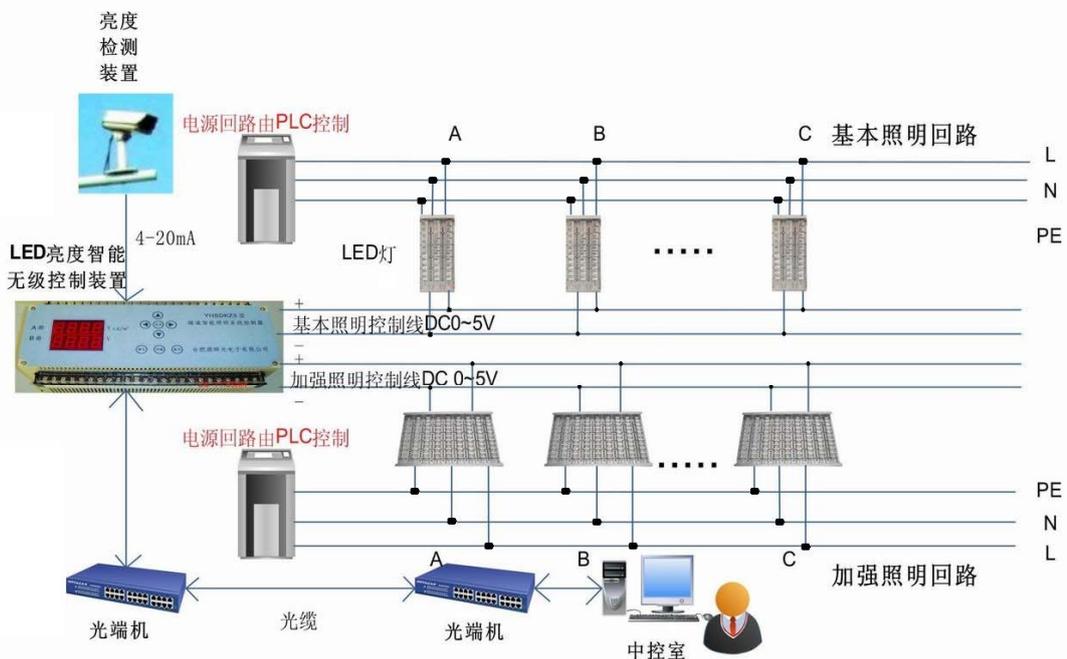


图(1-9)

二、智能化照明系统简介

前面介绍了公路隧道分级调光照明系统电能浪费之所在，下面就介绍如何消除上述的过度照明。

为了消除过度照明，我们需要让调光越精细越好；为了实现调光，规范中根据当时灯具的技术水平以及投资和运营的经济性，选择了较为经济的 6 级调光照明系统，即白天四级，夜晚二级。显然，这种粗犷的调光方式距按需照明要求还差距甚远。随着 LED 灯具的出现，已在公路隧道照明领域产生了可喜的节能效果。如用于隧道基本和应急照明，通常可节能 30~50%，但用于加强照明，其节能幅度仅有约 25%。随着科技的发展，一种新兴的亮度可控型 LED 无级调光隧道灯应运而生。它的问世，为智能化的无级调光照明奠定了基础。2008 年以来，合肥源辉光电子有限公司已在数条隧道实施了 LED 智能化无级调光照明，均取得了满意的节能效果。其中安景高速前家山隧道 LED 智能化无级调光照明，比采用钠灯的对比隧道节能 80%。2010 年，贵州省交通运输厅批复了贵州高速公路开发总公司与合肥源辉共同申报的科研项目《基于管理需求的 LED 灯调光控制系统研究与应用》。项目已于 2011 年 7 月全部完成。项目将 1km 的格龙隧道采用两种照明控制方式作对比；左线采用 LED 智能化无级调光照明系统，右线采用传统的 LED 分级调光照明系统。经国家交通安全设施质量监督检验中心现场 48h 测试，左线 LED 无级调光照明系统较右线 LED 分级调光照明系统综合节能 34.7%。



注：控制线为RVV2×1.5mm²铜线，10Km无需中继

隧道LED照明亮度智能无级控制系统网络图

图 2-1 夏蓉高速格龙隧道无级调光照明系统原理图

图 2-1 为夏蓉高速格龙隧道无级调光照明系统原理图。系统主要由洞外亮度检测仪、LED 亮度智能无级控制装置和亮度可控型 LED 隧道灯等组成，有的还

包括车检器、通讯系统和上位机监控管理软件等。系统的洞外亮度监测装置将检测到的隧道洞外亮度信号转换为 4~20mA 标准信号传送至 LED 亮度智能无级控制装置上，再由其后转为 DC0~5V 的直流模拟信号输出，去控制 LED 灯上的电压控制电流源。电压控制电流源的控制端电压的变化会使其输出电流随之变化，而输出电流的变化，又会引起 LED 输出功率和输出光通量发生变化，从而达到控制被照场所亮度的目的。设于中控室的上位机通过以太网光端机与现场的 LED 亮度智能无级控制装置实现通讯。上位机利用无级调光监控管理软件，实现相关参数的设定、指令下达、实时信号读取和储存。

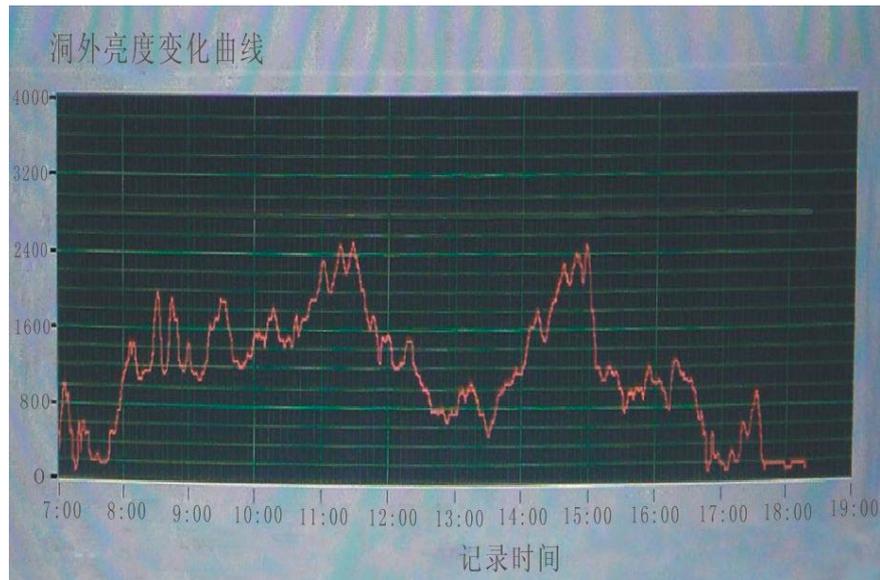
从图 2-1 中不难看出，系统电源回路只有加强照明回路和基本照明回路。加强照明没有晴天和阴天之分，布设时只有隧道的左侧和右侧之分。基本照明也没有白天和下半夜之分，对于中长隧道，一侧为基本照明，另一侧为应急照明；当市电断电时，应急照明的功率全部降至额定功率的 20%；它较传统的应急照明亮度更为均匀。由于灯具控制端所需电流非常微小，约 1uA，因此在实际应用中，控制线均采用 2×1.5 平方信号线，这可确保入口和出口处的信号电压基本相同。整个隧道不论多长，只需一台控制器进行调光控制。

图 2-2 是隧道 LED 照明系统上位机监控管理软件。监控管理人员可以通过该界面设定当前调光功率百分比，实现需要多亮就调至多亮的目的。



图 2-2 隧道 LED 照明系统上位机监控管理软件

三、传统分级调光与无级调光照明的安全性对比



图（3-1）某天洞外亮度变化曲线

讲到照明安全，我们首先来看一幅智能化调光照明系统记录下的某天的洞外亮度变化曲线。如图（3-1）所示。在这一天中，洞外亮度跨越了重阴天、阴天、云天和晴天四个亮度等级，并且在这些亮度等级之间随机地反复变化。在这种情况下，如果分级调光系统要不断地通过回路开闭来调节其亮度变化，熟悉机电的人士都知道，交流接触器的寿命会大幅折减，如不能及时更换，甚至会引发电气火灾。因此，实际开灯时均不作频繁调节，这使洞内亮度要么不够，要么超过许多。当亮度不够时，行车的危险因素就加大了。那么如何消除这种事故隐患呢？有两种方式：一种是按晴天模式开灯，另一种就是采用 LED 智能化无级调光照明，让洞内亮度跟随洞外亮度变化。前者电能浪费巨大，但现在大多数单位都无可奈何地这么使用；后者电能浪费很少，国内已有一些隧道采用了这一照明方式，并取得了良好地节能效果。夏蓉高速贵州格龙隧道就是采用这一照明方式的经典工程。欢迎各为有空前去参观。

四、LED 隧道灯的选择

LED 隧道灯的发展可分为一代、二代和三代。表 4-1 列出了这三代隧道灯的特点和寿命。早期的隧道灯由于 LED 工艺尚未成熟以及灯具散热极差，其寿命通常不足 5000h，距人们希望的 50000h 相距甚远。到了中期的第二代隧道灯，其芯片封装工艺已有了较大的改观，但灯具依旧沿袭了传统灯具的外形模式，因此散热效果依旧较差；其功率通常仅能做到 150W 以下。而第三代隧道灯一改传统灯具大灯罩的模式，采用了分离式灯罩，并在灯罩之间开设上下通透的通风孔，利用热气流上升原理形成上下对流，从而起到了良好地散热作用。

表 4-1

所属代	研发所属时期	特点	寿命 (h)
第一代	早期 (07 年以前)	使用钠灯灯壳改制的 LED 灯, 其内部散热片温升可高达 60℃ 以上(如图 4-1 所示)。	<5000
第二代	中期 (08 到 10 年)	采用了 LED 专用散热片, 其散热片温升通常在 40℃ 以上 (如图 4-2 所示)。	5000~20000
第三代	成熟期 (10 年至今)	将大面积的灯罩改成了条形, 在条与条之间开有通风孔, 利用烟囱效应散热, 其散热片温升在 25℃ 且不受功率限制 (如图 4-3 所示)。这种灯具再加上无级调光, 平均工作温升可进一步降至 15℃, 因此灯具寿命会更长。	40000~60000



图 4-1 第一代 LED 隧道灯



图 4-2 第二代 LED 隧道灯

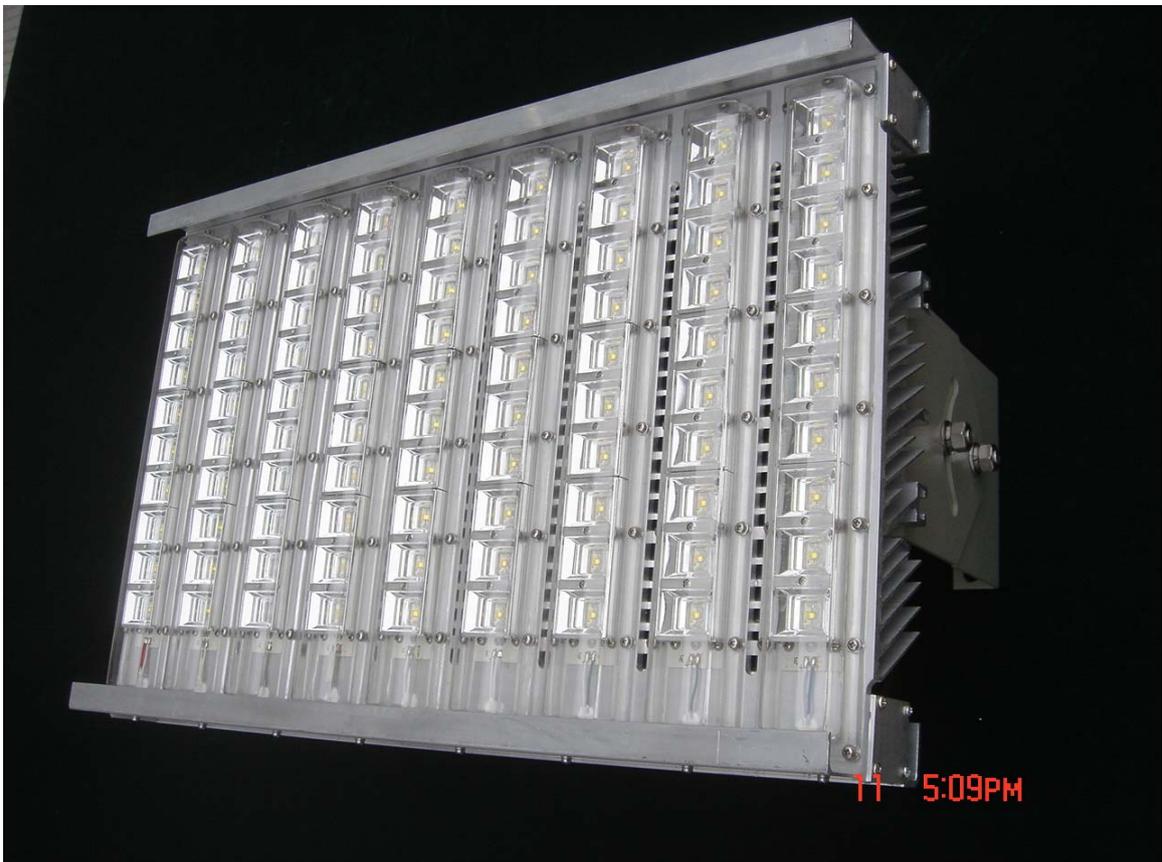


图 4-3 第三代 LED 隧道灯

图 4-3 是一款 200W 的第三代 LED 隧道灯。在它的光条中间开了许多通风孔。这使得其工作温度大幅降低。在 25℃ 环境中满功率工作时，散热片温度为 50℃，芯片与散热片的温差为 25℃，则芯片温度为 75℃ 以下。其寿命可根据图

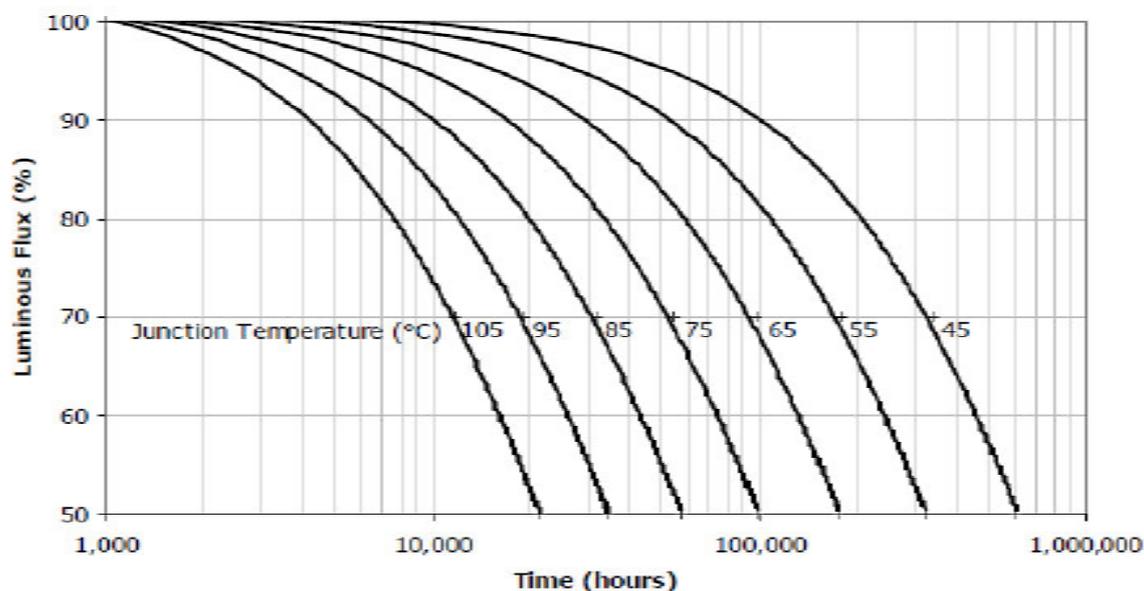


图 4-4 LED 不同结温下流明维持率与时间的关系曲线

4-4 推算。图 4-4 为国际知名 LED 品牌提供的 LED 在不同结温下的流明维持率与时间关系曲线。按此曲线可查得 75℃ 时灯具流明维持率在 70% 时的工作时间为 5.2 万小时。该灯具在 25℃ 环境中调光使用时，散热片平均温度为 40℃，芯片与散热片的温差为 18℃，则芯片温度约 58℃；根据图 4-4 推算，流明维持率在 70% 时的工作时间为 8 万小时。在公路隧道内，一年的绝大部分时间温度都会低于 25℃，平均约为 15℃ 以下，因此寿命还会有一定的延长。

如果将上述灯具的通风孔封堵，使之上下气流不能形成对流，且不调光使用，散热片温度可升至 70℃ 以上，芯片温度可达 95℃，寿命约为 2 万小时；而采用不良封装的 LED 和设计差的灯具，其芯片温度甚至接近 115℃，几乎处在损坏的边缘。

解决 LED 灯具的散热问题，最好的方法就是减少开灯时间或者降低其使用的功率。显然前者不在本文讨论的范围，而后者却是一种行之有效地方法。采用 LED 智能化无级调光照明系统，即可很好实现这一目标。

五、综合投资分析

要精确统计一个隧道照明系统的投资通常较为困难，因为在公路隧道照明系统中许多设备都是共用的，因此这里仅就灯具和电缆的投资作一对比。由于 2011 年以来，LED 灯具价格有所下降，再按以前的价格来统计已无意义，所以分析均是按照现在的市场价计算。

1、三种照明调光方式的电缆用量分析

传统的调光方式是采用开闭不同的回路，需要分七个回路，即两个晴天加强照明回路，两个阴天加强照明回路，两个基本照明回路和一个应急照明回路。图 5-1 为公路隧道入口段局部灯具接线图。从图中可以看出，分级调光照明系统既有主供电回路电缆，又有多重的回路分支电缆；大量的电缆在隧道中迂回，造成很大地浪费。因此这种依靠回路进行调光的照明系统，其电缆用量之大也就不言而喻了。

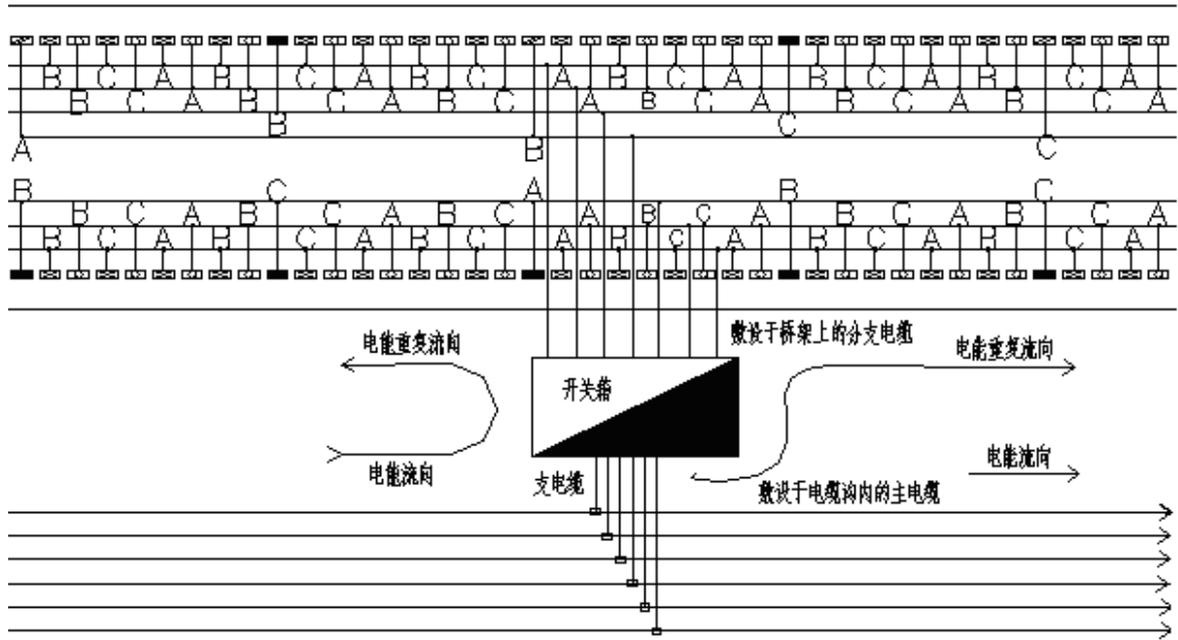


图 5-1 分级调光照明系统局部接线图

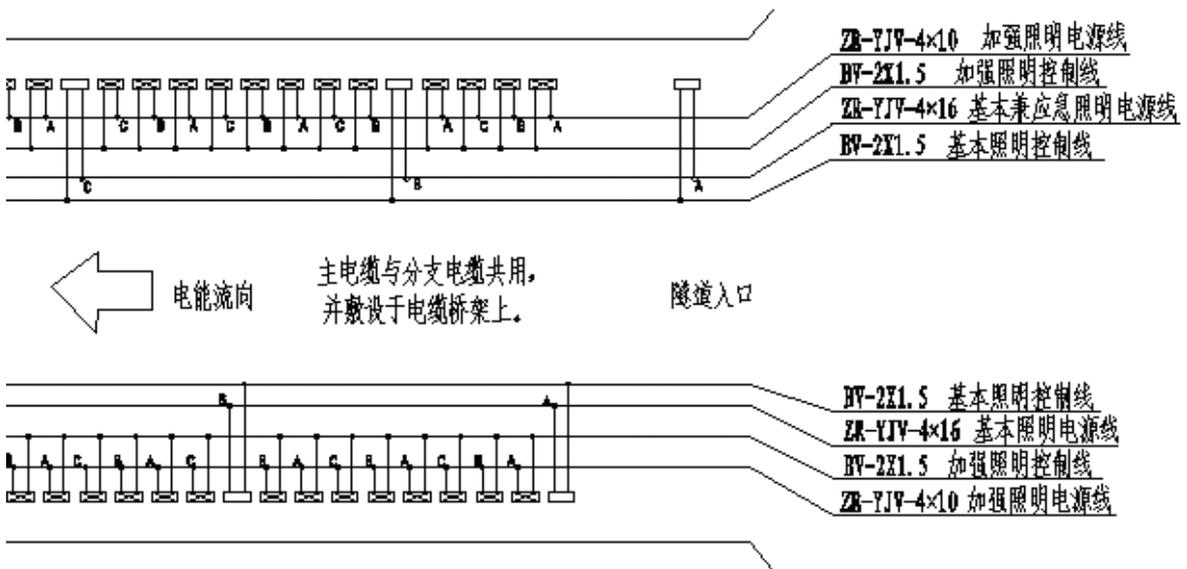


图 5-2 无级调光照明系统灯具接线图

图 5-2 为无级调光照明系统灯具局部接线图。图中隧道两侧各仅有一路加强照明回路和基本照明回路。其中一侧的基本照明又兼应急照明。它们的主电缆和分支电缆是共用的，因此没有迂回输送现象。控制线仅用 $2 \times 1.5\text{mm}^2\text{BV}$ 线即可。经计算，1km 隧道三种照明调光方式的单洞电缆用量如图 5-3 所示。计算可得 LED 无级调光较 LED 分级调光节省 60% 的电缆费用，较高压钠灯节省 70% 的电缆费用。

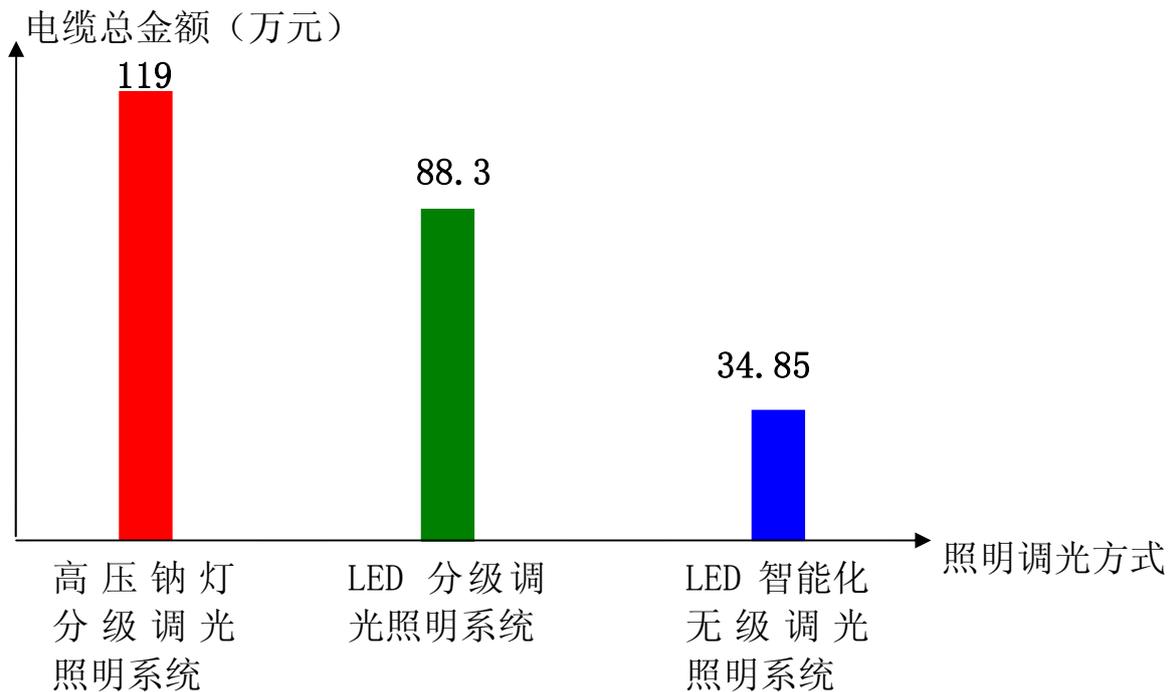


图 5-3 1km 隧道单洞电缆用量直方图

2、三种照明方式灯具用量及能耗分析

格龙隧道照明左线为 LED 无级调光照明系统，右线为 LED 分级调光照明系统。由于格龙隧道没有高压钠灯，因此在进行对比时我们选择了一条设计条件与之相同，但采用高压钠灯分级调光照明系统的隧道。表 5-1 是《三种照明方式功率、能耗统计分析表》。

从表中数据可以算出，用亮度可控型 LED 隧道灯替代高压钠灯，其加强照明节能 70%，基本和其他照明可至少节能 49.2%，年节约电费 29.7 万元，年综合节能 60.2%。三年可节省电费 89.1 万元。

2011 年 5 月 17 至 19 日，权威机构国家交通安全设施质量监督检验中心对

夏蓉高速贵州格龙隧道的能耗情况进行了 48h 现场跟踪测试。其结果是左洞 LED 无级调光照明系统 48h 能耗为 1124kWh,右洞 LED 分级调光照明系统为 1722kWh。左洞与右洞相比,左洞合计节能幅度为 34.7%;其中,左洞加强照明比右洞节能 43.9%,左洞基本照明比右洞节能 17.6%;这是 LED 无级调光与 LED 分级调光相比较的权威数据。

表 5-1 三种照明方式功率、能耗统计分析表

光源	照明类别	数量(盏)	含电源总功率(kW)	年加权总能耗(MWh)	年合计能耗(MWh)	年运营电费(万元)	10年电费(万元)
钠灯	加强照明	208	82	253.27	493	44.4	444
	基本照明	164	28.9	234.2			
	其他照明	6	0.54	5.1			
恒定亮度LED	加强照明	304	54.9	169.57	304	27.4	274
	基本照明	219	17.42	133.5			
	其他照明	4	0.32	1.3			
无级调光LED	加强照明	293	52.8	76.5	195.5	17.6	176
	基本照明	228	18.14	119			
	其他照明	24	1.4				

计算说明:

- 1、加强照明按晴天 250 天 11h, 100%功率; 云天 50 天 9h50%功率; 阴天 50 天 8h25%功率; 重阴天 15 天 7h13%功率计算。
- 2、基本照明按 18h100%, 夜晚照明 6h50%功率, 钠灯夜晚 9h 内还需乘以 1.2 倍的因电压上升而增加的功率。
- 3、其他照明, 路灯按每天 11h 计算, 连接通道和应急停车带按 24h 计算。
- 4、LED 无级调光加强照明按 LED 分级调光照明能耗的 57.3% (理论值, 实测值为 56.1%) 计算。无级调光基本照明按实测值 17.6% 节能幅度计算。
- 5、钠灯基本照明每日夜晚增加 20% 因电压上升产生的功率增量。
- 6、电费按商业用电价 0.9 元/kWh 计算。

3、三种照明系统综合投资对比

在分析综合投资费用时,以往许多人以为 LED 灯具寿命为 5 万小时而未将灯具更换的费用计算在内,致使其计算费用较低而实际费用则高出许多。在此,我们根据三部委招标要求 3 万小时的灯具寿命进行计算,而无级调光灯具的寿命按前面分析的 10 万小时计算。表 5-2 示出了三种照明系统综合投资对比分析。

表 5-2

三种照明系统综合投资对比分析表

光源	数量 (盏)	年运营 电费 (万元)	平均年维 护费用 (万元)	平均年运 营费用 (万元)	10 年运营 费用 (万元)	10 年综合 投资支出 (万元)	两年平均综合 投资费用 (万元)
钠灯	378	44.4	3.8	48.2	482	632	246.4
恒定亮度LED灯	527	27.4	31.1	58.5	585	823	355
无级调光LED灯	545	17.6	2.7	20.3	203	404	241.6

计算说明:

1、钠灯维护费用按每 2 年更换一次光源，每盏 200 元/次，10 年共计 378 盏×200 元×5 次=37.8 万元；每年的维护费用为 3.8 万元。

2、恒定亮度 LED 灯按 10 年更换 3 次，减去初期建设一次，后续需更换 2 次。每次更换劳务费 100 元，则每年维护费均摊=（初期灯具投资×后续换灯次数+灯具数量×换灯劳务费×后续换灯次数）÷10 年=[1500000×（3-1）+527×100×（3-1）]÷10≈31.1 万元。

3、无级调光 LED 灯一次投资可使用 10 年，但其间也会存在少量故障灯具，故按每盏每年 50 元的维护费用计算，每年的维护费用=灯具总数×50 元=545×50≈2.7 万元。

4、10 年综合投资支出=10 年运营费用+初期建设投资。

5、两年平均综合投资费用=2 年电费+维护费+初期建设投资。这是 LED 无级调光照明系统与高压钠灯分级调光照明系统综合投资的时间平衡点。低于 2 年，钠灯费用低，高于 2 年，LED 无级调光费用低。而 LED 分级调光照明系统目前仍旧处在省电不省钱的阶段。

根据表 5-1 和表 5-2 的数据，我们绘出了三种照明系统综合投资运营费用对比直方图。从图中可以看出，LED 无级调光与高压钠灯分级调光综合投资的时间平衡点为两年。低于 2 年，钠灯费用低，高于 2 年，LED 无级调光费用低。而 LED 分级调光照明系统目前仍旧处在省电不省钱的历史阶段。从初期投资来看，LED 无级调光照明系统仅高出钠灯分级调光照明系统 34%，而每年确省下了 60% 的电费。

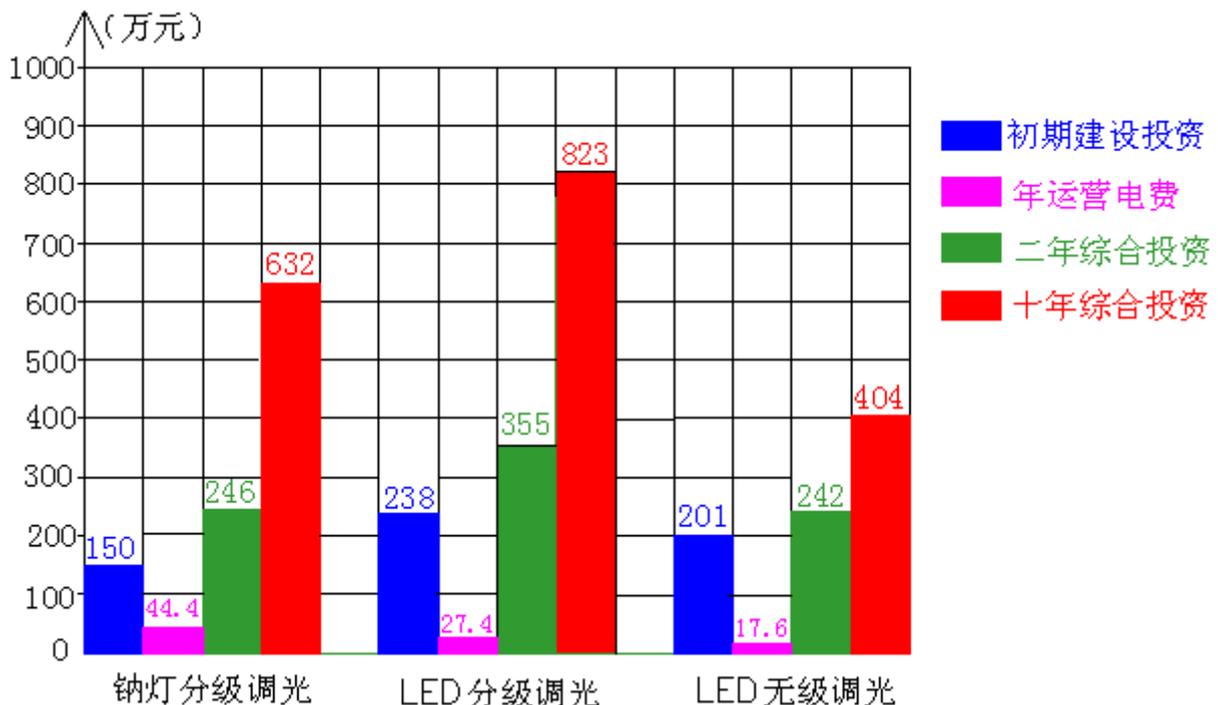


图 5-4 三种照明系统综合投资运营费用对比直方图

综上所述，公路隧道照明采用 LED 智能化无级调光照明系统，通过两年的运营即可收回全部增加的投资，与公路建设 6~11 年的投资回收期相比，实现了节能与省钱的完美结合。

参考文献：

- [1] JTJ026.1-1999, 公路隧道通风照明设计规范[S].
- [2] 周正兵. 隧道 LED 照明节能 80%原因分析[J]. 交通建设与管理, 2008 (4). 79-82.
- [3] 吕晓峰. LED照明亮度智能无级控制系统在隧道中的应用[J]. 中国照明, 2008 (10). 96-97.
- [4] 韩直. 公路隧道 LED 照明调光控制技术研究[J]. 中国交通信息产业, 2009(10) 99~102.
- [5] 王霞. LED 照明亮度智能无级控制系统在城市隧道中的应用[J]. 交通科技, 2009 (1) 92-94.
- [6] 边艳妮. 隧道 LED 照明智能控制系统研究[J]. 中国交通信息化, 2010(12) 123~124.