

# 隧道 LED 照明节能新突破

## 摘 要

目前，隧道照明几乎都是采用高压钠灯作为光源。但是高压钠灯在辐射形式、显色性、视觉敏感特性、功率规格、亮度控制等方面均存在许多不足，而新兴的 LED 隧道照明灯具以其优异的性能，克服了高压钠灯的诸多不足，正在成为当今世界隧道照明的主流灯具。本文介绍的隧道 LED 亮度智能无级控制系统节能方法是在完全满足隧道照明规范的前提下实现的，克服了亮度不可控光源过度照明所造成的电能浪费现象，实现了真正的按需照明。

### 一、洞外亮度对隧道照明能耗的影响

洞外亮度 $L_{20}(S)$ 是指在接近段起点S处，距地面 1.5m高正对洞口方向  $20^\circ$ 视场实测得到的平均亮度。它是隧道照明系统的设计基准之一，一般是在夏季（7、8 月份）晴天中午测得。由于洞外亮度随季节、气象和每日早晚等因素影响，通常洞外的实际亮度均远低于夏季晴天中午的亮度，而隧道内加强照明的标准值又都是根据隧道洞外的亮度 $L_{20}(S)$  乘以一个系数得来的，因此在一年的大多数时间里，加强照明强度远高于洞内的实际需求，形成过度照明，电能浪费相当巨大。

以 80km/h 的双车道单向交通为例，若设计交通量大于等于 2400 辆/h 时，其入口段的亮度折减系数为 0.035。

下表是不同洞外亮度与洞内亮度的关系 ( $cd/m^2$ )

洞外亮度	入口段	过度段 I	过度段 II	能耗百分比 (%)	备注
5500	192.5	57	19.25	137.5	以洞外亮度 4000 $cd/m^2$ 时为基准。
4000	140	42	14	100	
3000	105	31.5	10.5	75	
2000	70	21	7	50	
1000	35	10.5	/	25	

从上表可以看出，洞外亮度对隧道能耗影响相当大。洞外亮度越高，洞内照明强度也要越高。洞外亮度越低，洞内照明强度也随之降低。由于一年中绝大部分时间洞外亮度远低于设计基准洞外亮度 $L_{20}$  (S)，因此若能采用隧道LED亮度智能无级控制系统，根据隧道洞外实际亮度对洞内加强照明进行跟踪控制，就能有效地避免过度照明，在完全满足规范的前提下最大限度地节约电能。

## 二、洞外天气对隧道照明能耗的影响与节能对策

洞外亮度对加强照明能耗的影响很大，而天气、季节和时辰的不同，其洞外亮度更是也大不相同。以一个洞外亮度为  $3000\text{cd}/\text{m}^2$  的隧道为例，其夏天洞外中午的亮度为  $3000\text{cd}/\text{m}^2$ ，秋分时洞外中午的亮度约为  $1860\text{cd}/\text{m}^2$ ，冬至时洞外中午的亮度约为  $842\text{cd}/\text{m}^2$ ，早、晚和阴天的洞外亮度可低至  $200\text{cd}/\text{m}^2$  以下。目前我国隧道照明白天大多按照四级调光方式，即晴天、多云、阴天和重阴天四个亮度等级。这四个亮度等级大多不分季节以及上午、中午和下午，因此能耗的浪费仍旧相当巨大。图 1 为高压钠灯晴天洞内加强照明功率线和实际功率需求曲线。图 2 为LED灯洞内加强照明功率线。图 3 为隧道LED亮度智能无级控制系统跟踪晴天洞外亮度的洞内加强照明功率曲线，它也是实际LED灯具功率需求曲线。每条线下部的面积即为该种灯具当日加强照明的总能耗。图中最上面一条均是高压钠灯的晴天照明功率线，所标的能耗百分比均是指与钠灯晴天照明能

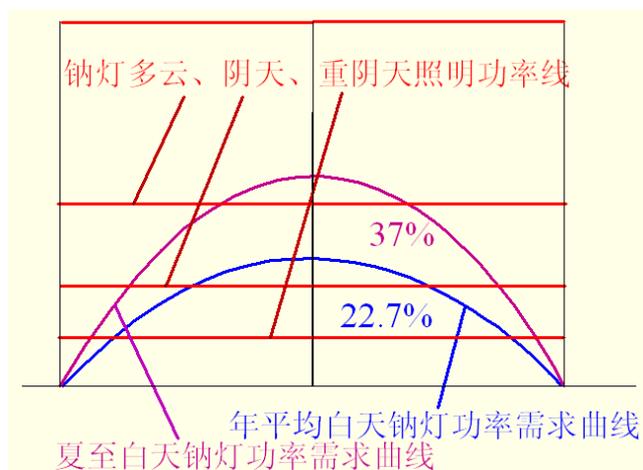


图 1

耗进行的比较。

从图 1 中看出，夏至白天钠灯加强照明功率需求曲线下部的面积（即能耗，下同）只占设计照明功率线下部面积的 37%，而年平均白天钠灯功率需求曲线下部的面积只占设计照明功率线下部面积的 22.7%。如果钠灯的输出功率在大范围内是可控，那么仅按每日的照明功率线进行跟踪控制，对于加强照明而言，每年即可节能 77.3%。实现隧道照明洞内亮度跟踪洞外亮度实时变化的目标，人类已追求了一个多世纪。但由于传统光源的局限性，人类一直未能如愿以偿。白炽灯虽可进行无级调光，但由于其低下的光效使得其调光变得毫无意义。气体放电灯（如高压钠灯）目前只能在很小的范围内实现调光。这种调光，白天对隧道照明能耗影响并不大。就高压钠灯而言，比较好的节能方法是采用多回路分级控制方式，根据检测到的洞外亮度，对洞内回路进行调整。这种分级控制洞内亮度的方式可产生一定的节能效果。但随着科学技术的发展，LED 以其优异的性能正在成为照明领域的主流光源，其控制方式也越发先进。

图 2 为 LED 灯洞内加强照明功率线。从图中可以看出，LED 晴天照明的功率线仅有高压钠灯的 50%，这主要是因为 LED 隧道灯具有较高的灯具效率、维护系数、显色指数、有效照度以及可任意设置的



图 2

功率规格等特点，使得其在满足规范要求的前提下能耗大幅下降。因此，用 LED 隧道灯简单替代高压钠灯，可实现 50%的节能目标。

LED 光源与其他光源不同，它的工作电流在额定范围内可大可小。这一特性为 LED 灯具实现亮度无级控制奠定了基础。目前，隧道 LED 亮度智能无级控制系统已经研发成功，并在安（庆）景（德镇）高速前家山隧道得到应用。该技术的推广应用，必将对公路隧道照明节能产生重大影响。

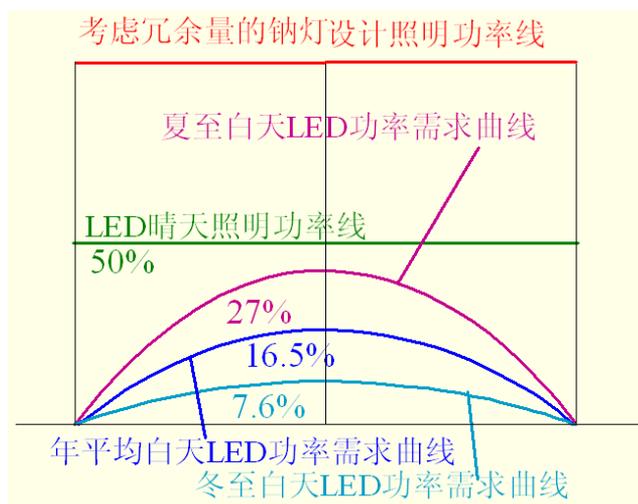


图 3

### 三、隧道 LED 照明亮度智能无级控制系统节能分析

图 3 绘出了采用隧道 LED 照明亮度智能无级控制系统跟踪的加强照明功率曲线。从图中可以看出，年平均照明功率需求比夏至时要小，冬至功率最低。采用隧道 LED 照明亮度智能无级控制系统后，不论是一年中的哪一天，它都会按照实际的功率需求去照明，而无须多付出照明能耗。通过计算可得，其年平均白天照明能耗比钠灯光源的隧道照明和恒定亮度的 LED 隧道照明要低得多，约为钠灯的 16.5%，LED 灯的 33%，实现了真正意义上的按需照明。该系统用于隧道照明，不论是何种天气，其相对节能百分比并无太大差异。用它替代高压钠灯的加强照明，可实现 83.5%的节能目标，比亮度不可

控的 LED 隧道灯节能 67%。因此，这一系统的节能效果相当显著，将是当今乃至今后相当长一段时间内隧道照明节能的理想方案。

#### 四、电源电压对照明能耗的影响。

气体放电灯对电源电压的稳定度要求较高，一般变化在 6% 以内，否则能耗将大幅增加，光源寿命大幅减小。

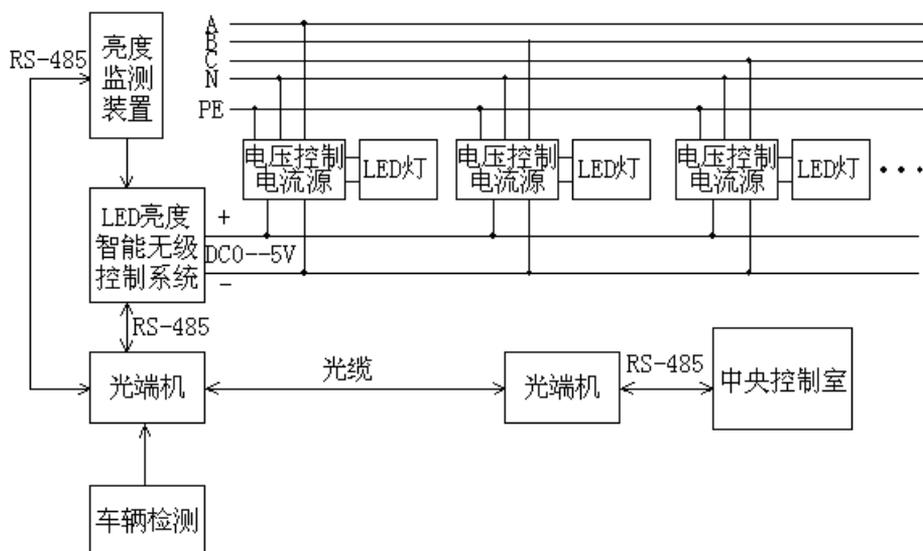
在晚上，荧光灯、金卤灯和高压钠灯通常会越点越亮。为什么会出现这种情况呢？这主要有如下两方面原因：首先是因为上半夜的电源电压通常在 220V~230V 左右；而在下半夜电源电压会达到额定值的 15%，高达 250V 以上，使得功率加大，亮度增加。其次是气体放电灯光源具有负阻特性，当市电电压升高时，光源两端的电压不仅不会升高，反而下降，而此时光源的工作电流却会急剧增加；这使得光源和镇流器的功耗均大幅增加。如一盏 150W 的高压钠灯，在 250V 电压下工作时包括镇流器功率在内会增至 300W。在这种电压下，钠灯的寿命会大幅折减，几乎不足额定寿命的 30%。这就是钠灯用于路灯时实际功耗远远超出额定功耗的主要原因，也是其越点越亮的原因。

LED 灯具对电源电压的要求并不高，一般在 170~250V 之间。好的 LED 灯具大多采用恒流供电，既流过 LED 的电流不受电源电压变化的影响，而只取决于出厂时的设定值，因此它的输出功率几乎是不变的；带有亮度控制功能的 LED 灯具的工作电流还取决于控制信号，它可根据实际应用场所的照明需求实时调整照明强度，以达到理想的节能效果。在基本照明方面，若采用 LED 光源，通过先进的调光技术，可以使下半夜照明能耗同步一半，这样可在原有节能的基础上再在减少 25% 的能耗，使得 LED 光源总节能率高达 75%；由于功率同步减半，工作温度降低，使得 LED 光源的寿命进一步延长，可谓一举多得。

由于 LED 灯具的工作电压范围很宽，因此在设计线路时允许采用线径较细的电缆而不会出现熄灯或无法启动之现象。因此采用 LED 光源可节省大量的电缆费用，在综合投资与钠灯相当的情况下每年综合节能率在 80%以上。

## 五、隧道 LED 亮度智能无级控制系统简介

实现隧道照明亮度的无级控制是一个系统工程，它涉及到光源特性、电源功率的可控性、控制信号传输、数据采集、数据处理、与中控室通讯等诸多技术，并涉及相应地控制程序和上位机软件。图 4 是隧道 LED 亮度智能无级控制系统的系统原理图。洞外亮度监测装置对隧道洞外亮度进行实时监测，再将监测的结果实时地传送到 LED 亮度智能无级控制系统中。控制系统根据洞外实际亮度及中控室提供的车流量等参数，对输入数据进行相应地折减后，转换成 0—5V 的标准信号，去控制 LED 隧道灯的亮度。解决 LED 隧道灯亮度可控的关键环节是研制一种高效地、电流可控的恒流驱动电源。为了让控制系统能够同时长距离控制数千盏 LED 隧道灯，其控制输入端采用了高阻形式，以确保控制信号的长距离传输。由于高阻抗的控制输入端所产生的干扰使得灯具出现闪烁而无法消除，因此我们采用了特殊的干扰抵消式电路设计，从而确保了电源的高抗干扰性和灯具亮度的稳定性以及亮度变化的同步性。系统在同时控制 5000 盏 LED 隧道灯的情况下，用  $1.5\text{mm}^2$  导线作为控制线，其传输距离可达 15km，实现了最初的设计目标。由于高速公路新开通一段时间车流量较小，中午和夜晚长时间没有车辆通行，因此，我们在安景高速前家山隧道的照明系统中增设了车辆监测系统。当没有车辆时，系统将使洞内维持最低亮度；当有车辆到来时，系统瞬间将洞内亮度增至需要的亮度，从而避免了隧道长时间的无车照明。



## 合肥源辉光电子有限公司

图 4

### 结束语

隧道照明电费是高速公路运营成本的重要组成部分。在隧道照明中，隧道出、入口处的照明更是隧道基本照明的几十倍。由于存在高额的运营费用，使得许多运营商不堪重负，不得不采用关灯节电，牺牲安全的老办法，以降低运营成本。因此，如何在满足规范的前提下降低隧道照明的能耗，特别是入口的能耗，已是所有拥有隧道的高速公路运营商迫切需要解决的问题。目前我国公路隧道总里程已接近 2 千公里，总的照明能耗相当巨大。本文旨在介绍一些隧道照明的节能方法，以帮助同行最大限度地降低隧道照明能耗，节约巨额的运营费用，为实现国民经济的可持续发展，保护环境，减少CO<sub>2</sub>排放提供较为可行的方法。

## 合肥源辉光电子有限公司