

隧道 LED 照明节能 80%原因分析

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，特别是亮度的可控性，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。笔者在隧道照明节能方面做了一些工作。本文针对影响隧道照明能耗的因素，介绍了相应地节能措施，并对 LED 照明节能方案作了相应地分析。

一、洞外亮度对隧道照明能耗的影响与节能对策

隧道内加强照明的标准值都是根据隧道洞外的亮度乘以一个系数得来的。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。洞外亮度高，洞内照明强度也要相应提高，洞内的电气设备投资也会相应地增大。因此，在设计隧道洞内照明时，设计人员应先对隧道洞外亮度进行实测，再根依据实测结果设计洞内照明，这样不仅可避免照

明设计冗余量过高造成电气设备投资上的浪费，还可在运营过程中节省大量的电能。在建设安徽省黄塔桃高速公路时，初步设计是按 $4000\text{cd}/\text{m}^2$ 的洞外亮度设计洞内照明。在正式设计阶段，设计人员奔赴现场对各隧道的洞外亮度进行了实测，并测得隧道洞外亮度大多在 $3000\text{cd}/\text{m}^2$ 左右。因此设计人员按照实测的洞外亮度对洞内照明系统进行设计，结果照明灯具的总功率比原先减少了23%，设备投资约减少了19%。由此可以看出，精确测量隧道洞外亮度，对于合理设计洞内照明，减少照明能耗和电气设备投资，是非常必要的。

这个事例表明，洞外亮度对洞内照明及设备投资的影响极大。因此，如何降低洞外亮度，也是隧道设计人员应当考虑的问题。通常可采取下列措施在隧道洞口接近段进行减光：其一是在路基两侧种植常青树；其二是将洞口采用暗色调装修；其三是在洞外的山体坡面上进行大面积栽种常青植被等等。这些措施均可起到较好的降低洞外亮度的作用。

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，其夏至时洞外中午的最大亮度为 $3000\text{cd}/\text{m}^2$ ，秋分时洞外的最大亮度约为 $1860\text{cd}/\text{m}^2$ ，冬至时洞外的最大亮度约为 $842\text{cd}/\text{m}^2$ ，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耗进行的比较。

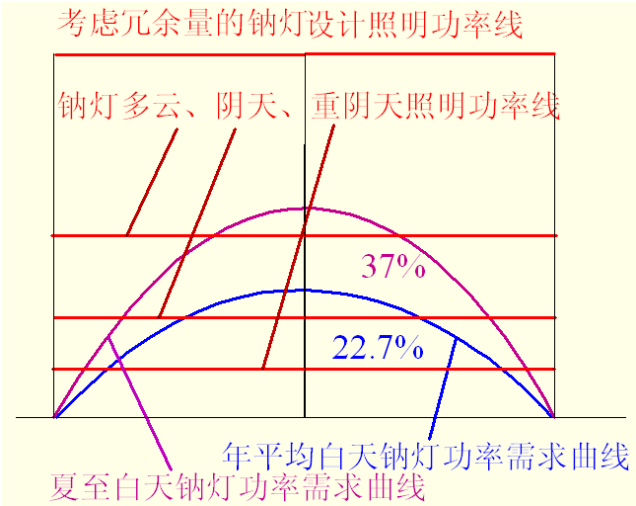


图 1

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。就对于高压钠灯而言，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较好地节能效果。

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。现阶段可大批量供货的 LED 光效已达 90lm/W，且亮度还在不断地提高，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，它的推广应用，必将对公路隧道照明节能产生重大影响。

合肥源辉光电子有限公司

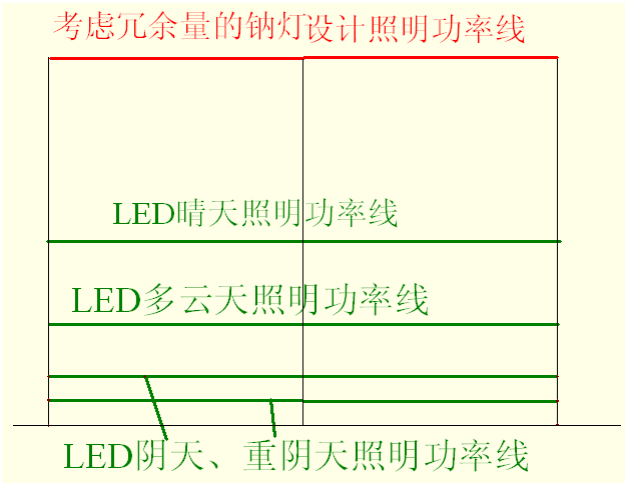


图 2

合肥源辉光电子有限公司

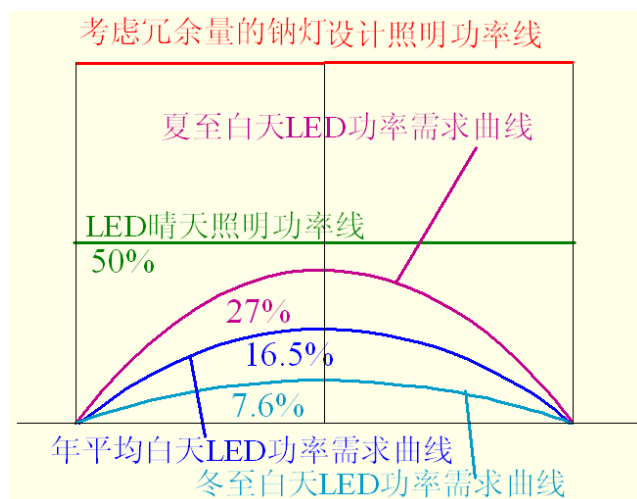


图 3

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、路面及墙壁材料对隧道照明能耗的影响。

沥青路面的反射率比水泥路面低，在照明设计时沥青路面的光照度必须高出水泥混凝土路面 30%方能使两者的路面亮度基本相同。因此，从降低能耗以及电气设备投资角度考虑，设计阶段应尽可能采用

水泥混凝土路面。在《公路隧道通风照明设计规范》中，要求路面左、右两侧墙面 2m 高范围内的平均亮度不应低于路面平均亮度。因此，在墙面上涂反射率较高的白色涂料，也可节能 1~3 个百分点。

五、灯具功率规格对隧道照明能耗的影响。

隧道照明的标准值在行业标准中是有具体规定的。若照度大幅度超出行业标准，则能耗也将过高。由于高压钠灯光源的功率规格通常只有 75W、100W、150W、250W 和 400W 几种，因此当道路需要 110W 或 180W 照明时，由于没有相应功率的光源，故只有采用 150W 和 250W 的规格。这种选择不可避免地增加了照明能耗。

对于 LED 光源而言，它的功率可根据隧道实际需要进行设计，实际需要多少功率就配备多大功率，从而消除了由于超标照明所造成的电能浪费现象。例如基本段每盏 LED 灯用 60W 就够了，因此设计 LED 灯具时就按 60W 设计，避免了超标照明所带来的电能浪费。

五、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下降一半，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 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。

六、谐波及功率因素对电源能耗的影响

LED 光源的供电方式为直流恒流供电方式。因此 LED 灯具均要配有恒流驱动电源。目前 LED 照明灯具上使用的恒流源均为开关电源即开关式 LED 恒流驱动电源。由于开关电源为整流性负载，大量使用时会对电网造成严重谐波污染。

在隧道照明系统中，谐波危害主要有以下几个方面：1. 造成电网电压的波形畸变；2. 电缆线过热，绝缘老化加速，易损坏并导致线间短路和接地故障引起电气火灾和人身触电事故，特别是中性线过负荷、发热，甚至于着火燃烧；3. 变压器过热、损坏甚至于烧毁；4. 补偿功率因数的电容器过热，易损坏，寿命大幅缩短；5. 系统的功率因数降低使得供电系统损耗增加；6. 断路器及漏电保护装置、接触器、热继电器等电气保护元件过热，失灵，误动作，接地保护装置功能失常；7. 浪费系统容量，降低保护装置作用。

解决隧道照明谐波危害可采用以下两种方式：1. 提高变压器容量和质量，增大电缆截面积，特别是加大中性线电缆截面，增大其他电气设备的容量。但这种方式不能从根本上消除谐波，反而会使电气设备投资增加，保护特性与功能下降。2. 提高 LED 隧道灯驱动电源的功率因数。在选用 LED 隧道照明灯具时应对功率因数提出要求。一般要求功率因数要达到 0.8 以上，这就要求 LED 恒流驱动电源必须带有功率因数校正电路。性能良好的 LED 驱动电源，其功率因数可达到 0.95 以上。若选用这样的电源，将是目前消除谐波危害的最佳方案。

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。一条长度为 400m 的单向交通隧道，若使用高压钠灯按标准要求点灯，其每年隧道内的照明用电量约为 60 多万元。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，不得不降低照明标准，以降低运营成本。而这一做法又会给隧道运营埋下频发性事故隐患。因此，如何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超过 1 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CO₂排放提供较为可行的方法。

合肥源辉光电子有限公司