光导照明在隧道中应用的可行性分析

从多个方面进行分析光导照明在城市隧道中应用的可行性，确定光导照明目前需要慎用。

雷明海/武汉市政工程设计研究院有限责任公司

雷明海/工程师

天然光是一种取之不竭，用之不尽的绿色能源，同时也是人类长期进化过程中最为适应的光源，但在很长的一段时间内曾被人忽视。伴随着近年来能源危机、环境恶化等问题的不断出现，才日益引起了人们的关注。而导光管技术的出现无疑为人们合理利用天然光资源开辟出新的途径，特别是近十几年伴随着导光管技术的快速发展，大量具有可推广性的导光管产品不断涌现，使得导光管在居室、商店、学校、运动场所和厂房等不同场所得到广泛应用。

光导照明系统的介绍

光导照明系统的工作原理如图1所示。

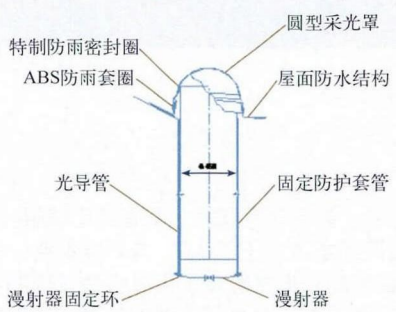

图1 光导照明系统工作原理

光导照明系统由以下几部分构成。

1）采光装置。包括采光帽、密封圈、防雨板和保温隔热套等，主要用来收集太阳光线同时保证系统与屋面连接的可靠，确保气密性、水密性，避免灰尘、雨水的进入。

2）导光装置。包括光导管及其连接配件，是系统的核心部件，主要用来传输光线。由于光线经管道进入隧道空间内前，将经过无数次反射、折射，管道越长，反射次数越多。

3）漫射装置。包括漫射器、装饰环，主要用来将光线散布在空间内。

通过采光装置聚集室外的自然光线，并将其导入系统内部，然后经过光导装置强化并高效传输后，由漫反射器将自然光均匀导入隧道空间内需要光线的任何地方。

光导照明系统属于绿色照明光源。国外的许多研究表明，电光源照明可产生严重的光污染，电光源发出的多为单色光，且易出现频闪、光照度不均匀的现象。而光导照明系统采用自然光照明，不会产生光污染。光导照明系统的导光部件利用了光学全反射原理进行设计。光导照明系统不需要用电，完全采用自然光，可以节省电能的消耗。光导照明系统采用自然光照明，不会有电器故障隐患，十分安全。

光导照明在隧道中的应用可行性分析

1. 光导照明在隧道中的亮度分析

根据JTJ 026.1—1999《公路隧道通风照明设计规范》的要求，假设隧道为三车道单相交通，交通流量大于2 400辆/h，隧道宽度为13 m，以隧道的设计车速为60 km/h，洞外亮度为3 500 cd/m^{2}为例，隧道各段的亮度要求如表1所示。

采用光导照明之后，以普通段为

关键词/Keywords
光导照明·
城市隧道·

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1　隧道各段的亮度要求

功能区域	设计亮度/（cd/m²）	沥青路面/lx	混凝土路面/lx
入口段	77	1463	924
过渡段1	23.1	438.9	277.2
过渡段2	7.7	146.3	92.4
普通段	2.5	47.5	30
出口段	12.5	237.5	150

例，导光筒的布置如图2所示，各个点的照度分布如图3所示。

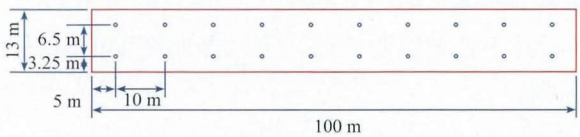

图2　导光筒的布置

隧道纵向长度/m

隧道横向宽度/m	5.0	15.0	25.0	35.0	45.0	55.0	65.0	75.0	85.0	95.0
12.4	45.8	50.8	51.3	51.4	51.4	51.4	51.4	51.3	50.8	45.8
11.1	52.7	58.7	59.2	59.3	59.3	59.3	59.3	59.2	58.7	52.7
9.8	56.5	63.5	64.0	64.1	64.1	64.1	64.1	64.0	63.5	56.5
8.5	68.0	75.2	75.7	75.8	75.8	75.8	75.8	75.7	75.2	68.0
7.2	69.7	77.1	77.7	77.7	77.8	77.8	77.7	77.7	77.1	69.7
5.9	66.6	74.1	74.7	74.7	74.8	74.8	74.7	74.7	74.1	66.6
4.6	62.1	69.5	70.1	70.2	70.2	70.2	70.2	70.1	69.5	62.1
3.3	56.1	63.2	63.8	63.9	63.9	63.9	63.9	63.8	63.2	56.1
2.0	59.3	65.5	66.1	66.1	66.2	66.2	66.1	66.1	65.5	59.3
0.65	49.3	54.6	55.1	55.2	55.2	55.2	55.2	55.1	54.6	49.3

图3　各个点的照度分布

根据图3可以看出，安装了光导照明后，其照度指标及照度均匀度是满足要求的，但是根据JTJ 026.1—1999《公路隧道通风照明设计规范》第4.1.5的要求，路面左、右两侧墙壁2 m高范围内的平均亮度，应不低于路面平均亮度。当导光筒安装在中间时，其亮度无法满足规范的要求。

2. 光导照明的采光罩分析比较

光导照明系统的前端采集捕捉技术主要有两种方式：主动式和被动式。主动式是主动定位太阳位置，然后采集阳光，这种定位一般通过光敏传感器或依靠各地区年平均的太阳轨迹路径来定义太阳的行走路径。光敏传感器虽然相对比较准确，但却增加了运行及设备成本，依靠将平均行走路径预先设置的方法，虽然可能会与实际太阳运行的轨迹有一定的出入，但却减少了设备及运行开支；而被动式，则是被动地将阳光通过固定的路径引入，即当有光线照射到采光罩部分时，采光部分即开始将光线进行反射及折射到传输部分。被动式的采集部分，如何采光，如何采集捕捉低角度非太阳直射的光是一个难题。通过在迎光面装载一些较强的折光面将光线进行折弯的技术是一种行之有效的方法，这样很容易地把早晨和傍晚的光线导入室内。

在成本方面，主动式造价及后期维护成本相对较大，主动式的采集部分增加了更多的跟随太阳转动的机械结构，机械结构的引入，无形中增加了成本，也造成了日后可能出现故障及维护的几率。当光照度不强时，主动式的采集部分不能准确搜索太阳位置，在早晨、傍晚、多云或阴天时，可能无法正常使用。

对于被动式，可通过引入如光线折弯技术或者其他捕捉低角度阳光的技术即可在照度不大的早上或者傍晚等阳光不充足情况下使用。其原理如图4所示。

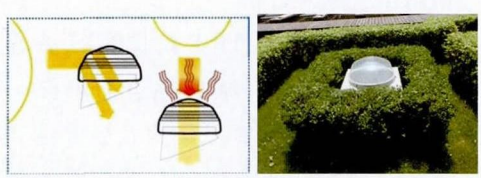

图4　被动式光导照明系统原理

由图4可知，如果光导照明系统的采光罩附近有灌木遮挡的话，其效果会大打折扣。如果气候变化，在晴天转阴天或雨天的时候，被动式的光导照明将会使隧道内的光通量不停变化。虽然可以通过隧道内的照明来进行补光，但是当隧道外的光照度仪未达到其阈值或城市短隧道未设置光照度仪时，此时对于隧道内的车辆来说，其行车环境是非常不利的。

3. 光导照明系统在安装时的问题

1）对于隧道内的光导照明系统，在结构浇筑成型前，需要预留光导管的孔洞。采光罩安装于地面层，需要采取防雨的措施，在光导管进入隧道顶板时，同样需要采取防水措施。在地下水较丰富的地质条件下，隧道顶板上的防水需要特别慎重。光导照明设置的点位较多，且管径较大，加大了渗水的风险。

2）根据GB 50016—2006《建筑设计防火

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

规范》第12.1.4条，隧道内装修材料除嵌缝材料外，应采用不燃材料。对于光导照明系统，目前很多厂家均采用的是菲涅尔透镜漫射器，其制作材料是PC或PMMA，均不满足规范的防火要求。

3）光导照明系统的采光罩安装于室外，需要满足两个条件：第一是地面层为绿化带或空旷的地带，与隧道层能对应，且不应出现不连续的地段；第二是周围的景观能与采光罩协调，否则将会显得杂乱无章。对于城市隧道来说，第一个条件很难满足，即使能满足也是局部满足，毕竟整个隧道全部建立在绿化带下的可能性很小。

4）对于室外的采光罩，其表面很容易沾灰，从而影响进入隧道的光通量，而人工清洁则需要浪费大量的人力物力。

光导照明的经济性分析

1. 初始投资额的分析

以前述隧道为例，100 m长的隧道普通段需设置20套光导照明。城市隧道的埋深一般为2～7 m，取中间值4.5 m，安装光导照明系统必须给系统预留孔洞和防水墩座，为保证暴雨积水不影响光导照明系统，混凝土墩座需要高出地面0.25～0.5 m，因此光导照明系统的总长度按5 m计算。根据某厂家的报价，每套光导照明的价格为11 060元，含安装费按每套800元。

隧道内不设置光导照明时，采用荧光灯照明，光源功率为2×28 W，布置间距为3 m，则100 m长隧道内需要设置66套灯具。按某厂家的报价，隧道荧光灯的单价为1 000元。对于两套系统的初始投资额如表2所示。

表2 两套系统的初始投资额

方案	单价/（元/套）	数量/套	初始投资额/元
光导照明系统	11 060	20	221 200
普通照明	1 000	66	66 000

2. 直接节电分析

对于光导照明系统，其不需要消耗电能，按每年3 600 h计，则光导照明系统每年节省的用电量为：66套×2×28 W×3 600 h＝13 306 kW·h，电费按1元/kW·h计，则光导照明每年可以节省13 306元。

3. 节省耗材分析

以荧光灯的使用寿命为10 000 h计，荧光灯管的价格为30元/支，则每年的维护耗材费用为：66套×2×30元/支×3 600 h/10 000 h＝1 568元。

考虑到光导照明和荧光灯照明，两种方式均需要维护，故不单独计列维护费用。

4. 光导照明系统的动态评价

以上计算数据可以得出，使用光导照明系统一次性投入费用为22.12万元，使用光导照明系统后每年节省费用为：13 306元＋1 568元＝14 874元。

对于光导照明系统，可以参照净现值指标进行评价

$$\begin{aligned}\mathrm{NPV} &= -P + A(P/A,i,n)\\ &= -(22.12-6.6)+1.487\,4(P/A,10\%,25)\\ &= -(22.12-6.6)+1.487\,4\times 9.077\\ &= -2.02\end{aligned}$$

式中，NPV为净现值，万元，将两种投资的差额作为前期的投入；A为资金的等年值，表示连续每期的等额收入，万元，对于本系统，可将每年节省的费用作为现金流入；P为资金的现值，万元，可将初始投资额作为现值；I为每一期的利率，取值10%作为年利率；n为计息周期数，取值为25年，即光导照明系统的寿命期。

由以上计算结果可知，光导照明系统的净现值为负值，不建议投资。

结束语

由于光导照明系统有节省电能的功能，在国家节能减排的政策下，大量的论文和研究均偏向于光导照明的使用。不可否认的是，光导照明系统在民用建筑中也确实取得了可喜的成就，但是对于城市隧道，笔者认为还是需要慎用。另外，光导照明系统与照明的智能化可以综合考虑，可以在室外光线偏弱时进行填补，而不影响使用环境，这点可以在将来进一步研究深化。不可否认的是，随着技术的不断提高，产品的质量也在提升，产品的价格随之下降，在不久的将来，光导照明还是有很广阔的应用前景的。

（收稿日期：2015－02－10）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net