

# 透光混凝土基 LED 主动发光交通标线的光纤设置

朱本成, 郭忠印, 宋灿灿

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 为提高交通标线的可视化、智能化与信息化水平, 将透光混凝土引入公路领域, 构建一种透光混凝土基发光二极管(LED)主动发光交通标线。采用方差分析与多重比较法分析了 4 类通用光纤的物理性能、导光性能与经济性, 选定 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)光纤作为导光材料。通过 LED 光强分布曲线与光波在光纤中的传播机理, 确定了光纤直径的理论计算值; 基于直径 1~8 mm 的 PMMA 光纤导光率的实测数据, 采用 S 型曲线拟合 PMMA 光纤导光率与直径之间的函数关系, 符合 0.05 的卡方拟合优度检验, 且实测值与理论分析结果一致, 选定直径 6 mm 的 PMMA 光纤。基于 LED 主动发光交通标线在不同环境照度、光源颜色、光纤掺量条件下的实测静态视认距离, 采用对数回归模型, 计算确定设计速度为 60~120 km·h<sup>-1</sup> 时光纤掺量的合理范围是 2~6 pcs。

**关键词:** 交通工程; 主动发光标线; 透光混凝土; 导光率; 视认距离; 方差分析

**中图分类号:** U491.5

**文献标志码:** A

## Fiber-Optic Parameters of Light Emitting Diode Active-Luminous Traffic Markings Based on Light-Transmitting Concrete

ZHU Bencheng, GUO Zhongyin, SONG Cancan

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** To improve the visualization, intelligence and informatization level of traffic markings, light-transmitting concrete is introduced to highway field, and the light emitting diode (LED) active-luminous traffic marking based on light-transmitting concrete is constructed. The analysis of variance and multiple comparison methods are used to analyze the physical property, light-transmitting rate and economy of the four types of general-purpose fiber-optic. As a result, Polymethyl Methacrylate (PMMA) fiber-optic is selected as

the light-transmitting material. After that, theoretical diameter is determined according to the light-intensity distribution curve and the light-propagation path in fiber-optic. Based on the measured data of 1~8 mm PMMA fiber-optic, the S-shaped curve can effectively fit the change trend of light-transmitting rate with fiber-optic diameter, and it is consistent with the theoretical analysis results. Therefore the PMMA fiber-optic diameter is determined to be 6 mm. Based on the measured visible distance of the LED active-luminous traffic marking under different brightness, color and dosage, using logarithmic regression model, the reasonable fiber-optic dosage is determined to be 2~6 pcs when the design speed is 60~120 km·h<sup>-1</sup>.

**Key words:** traffic engineering; active-luminous traffic markings; light-transmitting concrete; light-transmitting rate; visible distance; analysis of variance

交通标线在维持道路使用秩序、提升交通安全水平、提高车辆通行效率等方面具有十分重要的作用<sup>[1]</sup>。研究表明交通标线的效能取决于其视认性<sup>[2]</sup>。

目前增强标线视认性的主要方式是提高其亮度。根据发光方式, 交通标线可分为被动发光型和主动发光型。被动发光型标线利用光线的逆反射原理实现被动发光。该类标线在我国使用广泛, 占路面标线总量的 99% 以上<sup>[3]</sup>。但该类标线在夜间、雨雪、雾霾等环境条件下的视认性能大幅降低, 显著增加了交通安全风险。主动发光型标线包括蓄光发光型和发光二极管(light emitting diode, LED)自发光型两种。蓄光发光型标线的主要成分是长余辉材料, 它以“吸收光—储存光—发射光”的模式循环工作<sup>[4]</sup>。蓄光发光型标线在农村公路交通安全标识<sup>[5]</sup>、隧道应急逃生系统<sup>[6]</sup>、城市慢行步道装饰<sup>[7]</sup>等方面已有应用。但由于其有效发光时间短、引导效果过度依赖外界

收稿日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(71673201); 山西省交通运输厅科技项目(2017-1-7); 中国建筑股份有限公司科技研发计划(CSCEC-2017-Z-20)

第一作者: 朱本成(1994—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路安全与环境。E-mail: bencheng@tongji.edu.cn

通信作者: 宋灿灿(1988—), 女, 助理研究员, 工学博士, 主要研究方向为道路安全与环境。E-mail: songcancan@tongji.edu.cn

光照强度、亮度和色温不可调控等缺陷,蓄光发光型标线尚未大规模应用。LED自发光型标线起步较晚,主要应用于城市潮汐车道和交叉口。吴铁锋<sup>[8]</sup>和张岳玥<sup>[9]</sup>分别发明了LED潮汐车道标线,其原理是通过改变内置LED灯的颜色实现控制潮汐车流的目的。汪桥<sup>[10]</sup>等发明了用于引导交叉口车辆排队的LED标线,主要由嵌有LED灯珠的基座和覆盖在其上的透明体组成。

2002年,透光混凝土被匈牙利建筑师Losonczy<sup>[11]</sup>发明,通过埋入混凝土中的光纤实现构件侧表面的光线传输。此后,匈牙利、意大利、法国、美国和中国等国家均有所应用,例如2010年上海世博会意大利馆的外墙采用了透光混凝土试块砌筑<sup>[12]</sup>。目前透光混凝土主要用于建筑领域,如博物馆、歌剧院<sup>[13]</sup>及公共建筑地下入口<sup>[14]</sup>等;也被用于户外LOGO展示和广告宣传<sup>[15]</sup>。透光混凝土的制备工艺,目前主要有光纤先植和光纤后植两种<sup>[16]</sup>。透光混凝土的力学性能、透光性能、微观性能受光纤种类和用量的影响,王信刚等<sup>[17]</sup>的研究表明,其抗压和抗折强度分别可达70和7.5MPa以上。

本文将透光混凝土引入公路建设领域,以LED作为光源创造一种新型交通标线——透光混凝土基LED主动发光交通标线。光纤是透光混凝土基LED主动发光交通标线的核心材料,具有光线传输的关键作用,其导光性能、使用特性及掺量是影响标线视认性、经济性和使用效能的重要因素,故确定所用光纤的材质、直径和掺量等参数是设置透光混凝土基LED主动发光交通标线的首要环节。通过国内外文献调研,未见有关透光混凝土基LED主动发光交通标线光纤参数设置方面的研究。

基于上述分析,本文通过室内实验和室外场地实验,研究确定透光混凝土基LED主动发光交通标线的光纤类型、直径及掺量等相关参数。

## 1 基于物理/导光/经济性的光纤选型

### 1.1 物理特性

透光混凝土基LED主动发光交通标线结构特殊、制备工艺复杂、应用条件严苛,因此,要求光纤应有与之匹配的物理性能。第一,透光混凝土块体成型需经过插捣、振实等工艺,骨料难免与光纤碰撞;标线设置路段难免出现车辆换道与压线行驶,因此光纤需要承受车辆碾压作用,这就要求光纤韧性好、不易破损。第二,光纤有一定的光谱范围,根据发光标

线的使用要求,光纤必须能够传导红黄绿等可见光,即光谱范围约为490~700nm。第三,研究表明光纤性能受温度影响显著,我国大部分地区的道路路面温度范围约为-20℃~65℃<sup>[18]</sup>,故光纤适用温度需要包含路面温度场的阈值范围。从上述三个方面对比市场上光纤的物理性能,见表1。

表1 不同种类光纤的物理性能

光纤种类	使用特性	光谱范围/nm	适用温度/℃
玻璃光纤	韧性差,易破损;	380~1300	-40~120
塑料光纤	韧性好,不易破损;	420~700	-20~70
石英光纤	韧性一般,不易破碎;	200~2100	-50~150
液芯光纤	韧性好,易破损;	300~800	-10~40

由表1,4种光纤光谱范围均满足要求。但玻璃光纤韧性差、易破损,液芯光纤易破损且适用温度不满足要求,故从物理性能看,塑料光纤和石英光纤可用于透光混凝土基LED主动发光交通标线。

### 1.2 导光性能

针对塑料和石英光纤,进一步开展导光性能实验,比较不同种类光纤的导光能力。

#### 1.2.1 实验方案

##### (1) 实验材料

根据光纤外包材质的差异,选择PMMA(Polymethyl Methacrylate)塑料光纤、硬树脂包层石英光纤(CS-H)、硅橡胶包层石英光纤(PCS)、双包层石英光纤(HCS),规格见表2。

表2 实验光纤样本规格

光纤种类	芯层直径/mm	包层外径/mm	测试长度/cm
PMMA	1.0	1.02	15
CS-H	1.0	1.035	15
PCS	1.0	1.4	15
HCS	1.0	1.1	15

基于道路用户对常用交通颜色所示含义的固有理解,如红色表示禁止、绿色表示通行、黄色表示警告,选择直径5mm的红黄绿三色LED灯珠作为光源。

##### (2) 实验仪器

实验采用TASI-8731型分体式数字照度计。该照度计的测量范围是0~20000Lux,精度为0.01Lux,可以在Lux和Fc两种照度单位之间转换,取样速度为2次·S<sup>-1</sup>,具有峰值锁定和读值锁定、数据自动记录功能。

##### (3) 实验流程

实验在暗室内进行,具体流程如下:①点亮LED灯珠,将其垂直至于照度计感光面中心,记录

照度计读数  $L_1$  作为光源初始照度值;② 光纤其中一端垂直紧贴 LED 灯珠,另一端即出光端垂直至于照度计感光面中心,记录照度计读数  $L_2$  作为光纤出光端照度值;③ 每个组合工况下均重复步骤①~②三次,结果取其平均值。

1.2.2 导光率分析

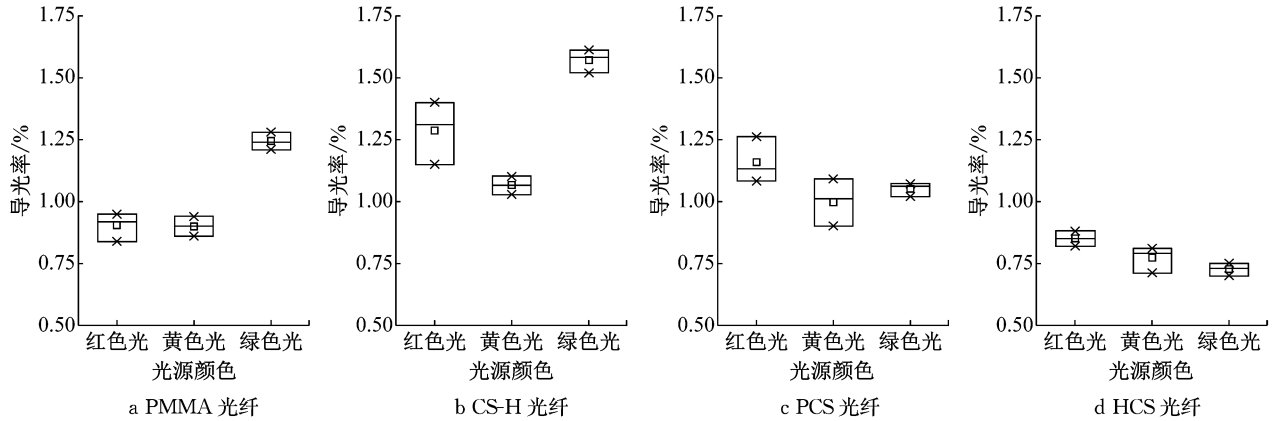


图 1 不同种类光纤的导光率

Fig.1 Light-transmitting rate of different optical fibers

由光纤的传光原理可知,导光率与光纤直径的大小有关<sup>[19]</sup>,因本次实验用光纤直径远小于灯珠直径,故导光率整体较低.由图 1,对于红色光和黄色光,光纤导光率的大小顺序为:CS-H、PCS、PMMA、HCS;对于绿色光,其导光率的大小顺序为:CS-H、PMMA、PCS、HCS.可以看出,HCS 对于三种色光的导光率均最小,CS-H 的导光率最大.为进一步比较其导光率的差异性,采用 SPSS 软件比较不同种类光纤对三种色光的导光率影响的显著性,结果见表 3.表中,  $\bar{f}_a$ 、 $\bar{f}_b$  分别为光纤 a 和 b 的导光率均值。

由表 3,在  $\alpha=0.05$  的显著性水平下,PMMA 与 HCS,CS-H 与 PCS 对红色光的导光率无显著性差异;PMMA 与 PCS,CS-H 与 PCS 对黄色光的导光率无显著性差异,其余条件下均有显著性差异。

综上,HCS 光纤对红黄绿色光的导光率均比其他三种小,且差异性显著,故不采用 HCS 光纤.CS-H 与 PCS 的红、黄色光导光率无明显差异,CS-H 的绿色光导光率优于 PCS;CS-H 的三色光导光率均优于 PMMA.PCS 与 PMMA 的导光率各有优劣.故需在 CS-H、PCS 与 PMMA 中选择合适的光纤。

1.3 经济性

通过性价比指标进一步比较 PMMA、CS-H 和 PCS 光纤.本文定义光纤性价比计算公式为

$$R = S/C \quad (2)$$

式中: $R$  为光纤性价比; $S$  为红黄绿三种色光的导光率之和,%; $C$  为光纤价格,元  $\cdot$  m<sup>-1</sup>.

通过光纤导光率比较不同光纤的导光性能,其计算公式定义为

$$f = L_2/L_1 \quad (1)$$

式中: $f$  为光纤导光率,%; $L_1$  为光源初始照度均值,Lux; $L_2$  为光纤出光端照度均值,Lux.

实验结果如图 1 所示。

表 3 多重比较结果

Tab.3 Multiple comparison results

光源颜色	光纤种类		导光率均值差( $\bar{f}_a - \bar{f}_b$ )	标准误差	显著性	95%置信区间	
	a	b				下限	上限
红	PMMA	CS-H	-0.38	0.07	0.001	-0.54	-0.22
		PCS	-0.25	0.07	0.006	-0.41	-0.09
		HCS	0.05	0.07	0.464	-0.11	0.21
	CS-H	PCS	0.13	0.07	0.097	-0.03	0.29
		HCS	0.44	0.07	0	0.27	0.59
		PCS	HCS	0.31	0.07	0.002	0.15
黄	PMMA	CS-H	-0.17	0.05	0.010	-0.28	-0.05
		PCS	-0.10	0.05	0.078	-0.21	0.01
		HCS	0.13	0.05	0.030	0.01	0.24
	CS-H	PCS	0.07	0.05	0.215	-0.05	0.18
		HCS	0.30	0.05	0	0.18	0.41
		PCS	HCS	0.23	0.05	0.002	0.12
绿	PMMA	CS-H	-0.33	0.03	0	-0.39	-0.26
		PCS	0.19	0.03	0	0.13	0.26
		HCS	0.52	0.03	0	0.45	0.58
	CS-H	PCS	0.52	0.03	0	0.46	0.58
		HCS	0.84	0.03	0	0.78	0.91
		PCS	HCS	0.32	0.03	0	0.26

PMMA、CS-H 和 PCS 光纤的  $R$  值见表 4。

表 4 光纤性价比计算值

Tab.4 Fiber-optic value for money

光纤种类	S 值	C 值	R 值
PMMA	3.05	15	0.203
CS-H	3.92	180	0.022
PCS	3.21	120	0.027

由表 4,PMMA 的性价比最高,PCS 次之,CS-H 最低,通过方差分析,PCS 与 CS-H 的性价比没有显著差异。

基于本节分析,综合考虑光纤的物理性能、导光性能以及经济性,透光混凝土基 LED 主动发光交通标线选用 PMMA 光纤.

## 2 基于导光率的光纤直径分析

### 2.1 理论分析

透光混凝土基 LED 主动发光交通标线的发光源是灯珠,光纤是光波传输通道,两者所构成的发光-导光体系如图 2 所示. 图中,  $\theta$  为光强空间分布角.

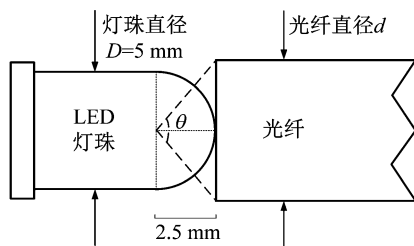


图 2 发光-导光体系示意图

Fig.2 Luminescence and light-transmitting system

LED 灯珠的发光强度在空间中呈不均匀分布形态,如图 3 所示.

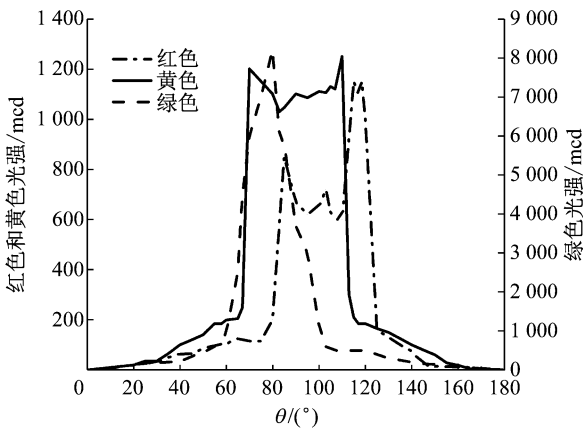


图 3 LED 光强空间分布曲线

Fig.3 LED light intensity spatial distribution curve

由图 3,LED 灯珠的光强主要分布在  $40^{\circ}\sim 140^{\circ}$  的空间范围内,故图 2 中虚线所示  $\theta$  为  $40^{\circ}\sim 140^{\circ}$  空间锥体内集中了 LED 光源的大部分光强. 根据图 2 灯珠与光纤的几何特征分布,计算得到最优光纤直径  $d=5.96$  mm. 当光纤直径大于 5.96 mm 时,随着直径的增大导光率仍会增加,但增幅较小. 而光线在 PMMA 光纤中发生全反射的最大入射角为  $60^{\circ}$ ,故由于光线的折射损失,即使光纤直径无穷大其导光率也不会达到 100%. 因此,为保证透光混凝土具有较高的导光率,同时又不致使直径过大而浪费,光

纤直径应该选用 6 mm.

### 2.2 实验验证

为检验 2.1 节推论的可靠性,采用与第 1 节相同的光源、实验仪器及实验流程,探究导光率随直径的变化规律. 本次实验采用的光纤样本是直径分别为 8、6、5、3、2.5、2、1.5、1 mm 的 PMMA 光纤,长度均为 15 cm,如图 4 所示.

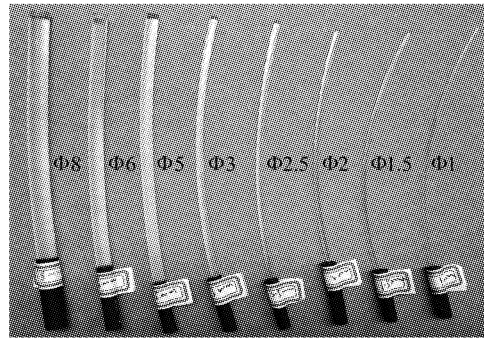


图 4 实验光纤样本

Fig.4 Experimental fiber-optic sample

实测导光率随直径的变化规律如图 5 所示.

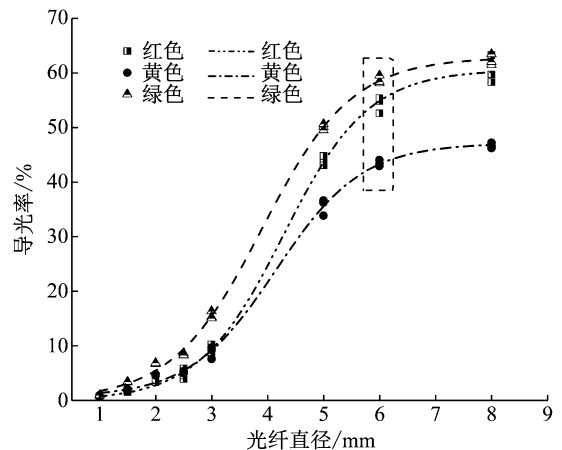


图 5 导光率随直径的变化

Fig.5 Light-transmitting rate as a function of diameter

图 5 显示,随着光纤直径的增大,导光率的增长先快后慢. 为定量表征其变化规律,采用 S 型曲线对不同光源颜色条件下导光率  $f$  与光纤直径  $d$  的关系进行拟合,结果见表 5.

拟合结果显示,S 型曲线方程的  $R^2$  接近 1, $P$  值满足  $\alpha=0.05$  的显著性水平,拟合度非常好. 根据拟合公式,红黄绿色光的实测导光率上限值分别为 60.49%、47.06%、62.74%. 当光纤直径为 6 mm 时,红黄绿色光的导光率可分别达到上限值的 90.56%、91.81%、92.97%;当光纤直径大于 6 mm 时,导光率增速明显下降且随后的增长幅度较小,这与理论分析结果相吻合. 而整体上看实测导光率低

表 5 导光率与光纤直径回归关系结果

Tab.5 Regression relationship between light-transmitting rate and fiber-optic diameter

序号	光源颜色	回归方程	R <sup>2</sup>	F 值	P 值	拟合度
1	红	$f=60.49-\frac{60.56}{1+e^{(d-4.28)/0.76}}$	0.997	4 791.276	0	符合
2	黄	$f=47.06-\frac{46.48}{1+e^{(d-4.15)/0.77}}$	0.997	5 054.209	0	符合
3	绿	$f=62.74-\frac{62.65}{1+e^{(d-3.91)/0.81}}$	0.998	9 990.485	0	符合

于理论分析值,一方面是由于光波在光纤介质中传播存在一定的衰减;另一方面,实验操作过程中 LED 和光纤的中心线未能完全重合,造成一定的偏差。

基于理论推导和实验验证,透光混凝土基 LED 主动发光交通标线选用的光纤直径是 6 mm。

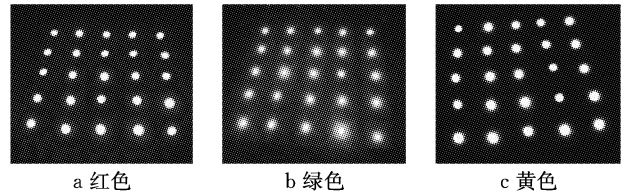


图 7 不同颜色的发光面效果图

Fig.7 Different color luminous surface

### 3 基于视认性实验的光纤掺量设定

采用直径 6 mm 的 PMMA 光纤制作透光混凝土,以视认距离为评价指标,通过现场实验研究透光混凝土块体的视认性,确定透光混凝土基 LED 主动发光交通标线中的光纤掺量。

#### 3.1 实验方案

##### 3.1.1 实验变量

根据研究目的,设置外界环境照度、光源颜色、光纤掺量三个自变量,因变量是视认距离。

(1) 外界环境照度:中午(13:00,光照度大于 20 000 Lux)、黄昏(17:30,光照度约为 3 000 Lux)、夜晚(20:00,光照度约为 0.08 Lux)。

(2) 光源颜色:红色、黄色、绿色。

(3) 光纤掺量:本文定义光纤掺量为每个发光块体所包含的光纤根数(pcs),本次实验拟设置光纤掺量范围为 1~25 pcs(非零整数)。

##### 3.1.2 发光实物

采用直径 5 mm 的红黄绿三色 LED 灯珠和直径 6 mm 的 PMMA 光纤,基于现有混凝土试模,制作了边长为 15 cm 的发光立方体。光纤的两端分别是集光面和发光面,立方体其余 4 个面不参与集光和发光。结构实物及发光效果分别如图 6 和图 7 所示。

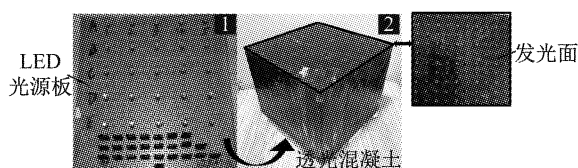


图 6 透光混凝土基 LED 主动发光立方体实物图

Fig.6 LED active-luminous cube

##### 3.1.3 实验驾驶员

参与实验的驾驶员共 10 人,均拥有 C1 驾照,其中女性 3 人,男性 7 人。年龄 22~28 岁(平均年龄 24.1 岁,标准差 1.6 岁),矫正视力均在 1.0 以上。

##### 3.1.4 实验流程

实验在同济大学实验场地进行,具体流程为:①将发光块体安放在原有标线位置,调控光源颜色与灯珠点亮数量;②被试驾驶员驾驶小汽车从远处以不超过 5 km·h<sup>-1</sup> 的速度缓缓向发光块体驶近,直至被试驾驶员能明显观察到块体所发出的光并能正确辨认其颜色处停车;③测量发光块体和车辆之间的直线距离,即作为其视认距离。

实验过程中,中午和黄昏环境下不开车灯,夜晚环境下开启远光灯。实验流程示意图及不同时段的测试场地环境分别如图 8 和图 9 所示。

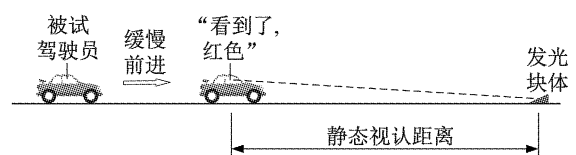


图 8 实验流程示意图

Fig.8 Experiment process

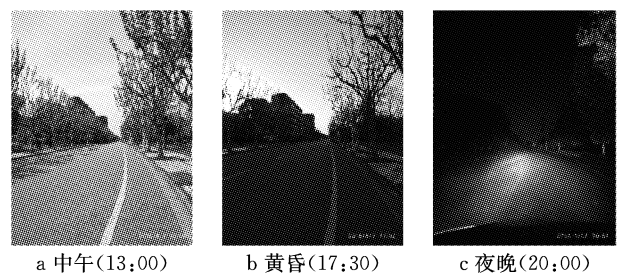


图 9 不同时段的测试场地环境

Fig.9 Test field environment at different times

### 3.2 数据汇总

实验发现,光纤掺量达到 5 pcs 时,视认距离已经较大,故实测光纤掺量范围为 1~5 pcs. 夜晚红色光的视认性能好,限于场地范围,实验仅测量了 1

pcs 时的视认距离. 依据拉依达准则检验,每种工况下 10 名测试者的实验数据中均无异常值. 实验结果如图 10 所示.

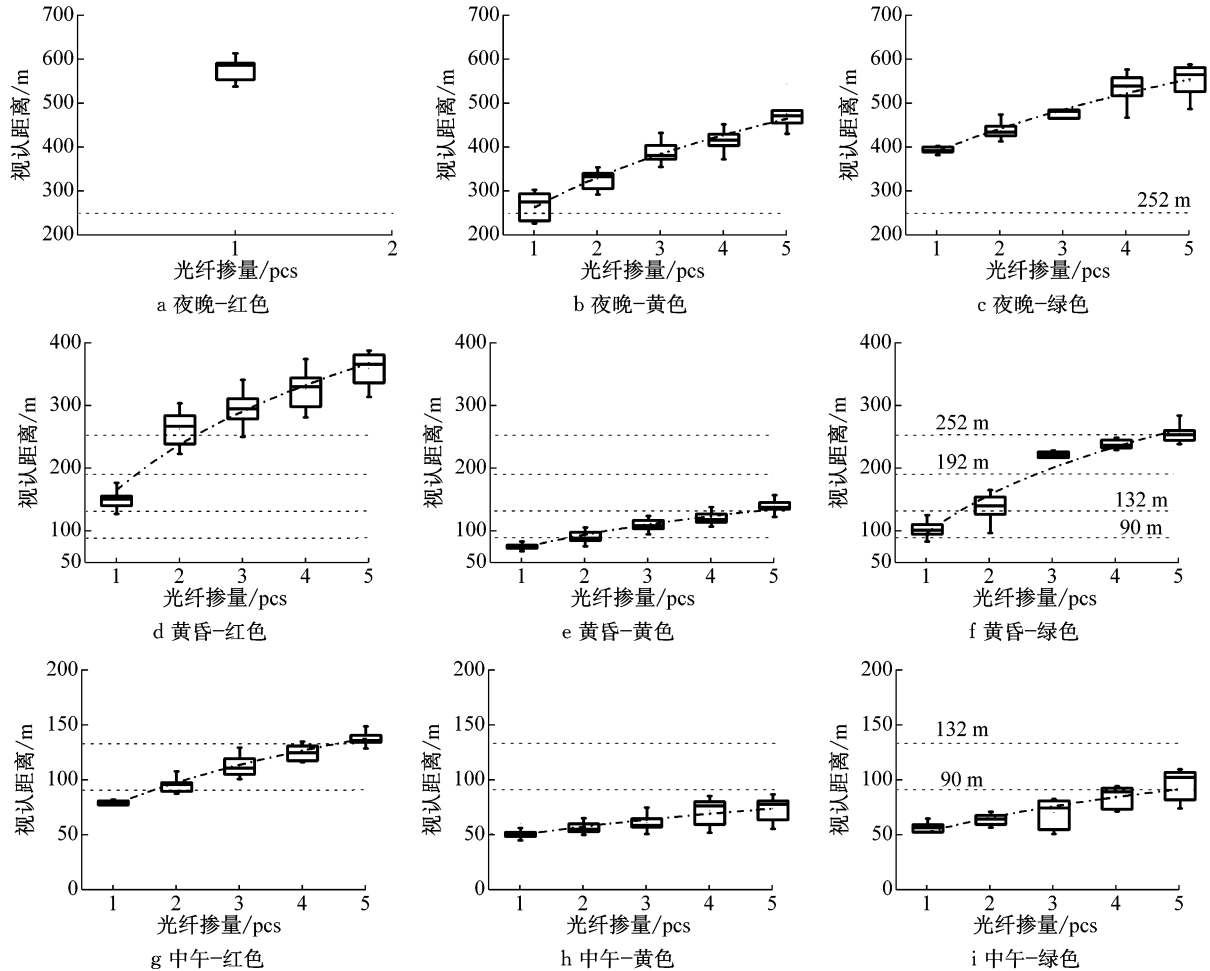


图 10 视认距离与光纤掺量的关系

Fig. 10 Visible distance change with fiber-optic dosage

### 3.3 光纤掺量的确定

研究表明,一般人的动视力比静视力降低约 20%<sup>[20]</sup>,故本文采用《公路工程技术标准》(JTGB01—2014)<sup>[21]</sup>规定的停车视距提高 20%后的距离作为控制指标. 图 10 中 252、192、132、90 m 分别是设计速度为 120、100、80、60 km · h<sup>-1</sup>时的控制指标计算值.

图 10 显示,发光标线的视认距离随光纤掺量的增加而增大,且增幅逐渐趋缓. 中午照度条件下三种颜色标线的视认距离均小于 252 m; 夜晚照度条件下三种颜色标线的视认距离均大于 252 m; 黄昏照度条件下黄色标线的视认距离小于 252 m,而红色和绿色标线的视认距离均大于 252 m. 在外界光照度较强的中午,现有逆反射型标线具有良好的视认

性能,可以满足驾驶员的视认需求,故中午照度条件下不采用主动发光交通标线进行诱导. 黄昏照度条件下,太阳光的色温较低,外界环境中黄色光的成分较多,导致黄色发光标线的视认距离较小,且随光纤掺量的增多其视认距离的增长缓慢,故使用黄色光进行诱导是不经济的;而从实际功能需求的角度分析,发光标线应能够指示通行、警告、禁止三种交通流状态,即需要三种颜色来实现三级控制;基于人眼视认特性,红、橙、黄三种色光的醒目性和视认性连续变化<sup>[22]</sup>,通过控制波长可使橙色标线的视认距离介于红色和绿色之间,故根据行车风险程度的高低,透光混凝土基 LED 主动发光交通标线采用绿色表示通行、橙色表示警告、红色表示禁止. 由于夜晚照度条件下的视认距离大于黄昏照度条件,故满足黄

昏照度条件下的视认距离需求即可同时满足夜晚照度条件下的视认距离需求。

综上,本文以黄昏照度条件下绿色标线的视认距离作为光纤掺量的控制依据,可实现透光混凝土

基 LED 主动发光交通标线的三级调控。

选择对数模型,对黄昏照度条件下绿色标线视认距离与光纤掺量之间的关系进行回归,相关参数见表 6。

表 6 黄昏条件下绿色标线视认距离与光纤掺量回归分析

Tab.6 Regression analysis of green marking visible distance and fiber-optic dosage at dusk

模型	未标准化系数		标准化系数	$t$	显著性	$R^2$	F 值	P 值
	B	标准误差	$\beta$					
$\ln x$	102.021	4.688	0.953	21.761	0.000	0.906	473.525	0
(常量)	92.423	5.220		17.704	0.000			

表 6 显示,回归参数和回归方程的  $P$  值均满足  $\alpha=0.05$  的显著性水平,黄昏照度条件下绿色标线视认距离与光纤掺量之间的回归方程是:

$$y = 92.423 + 102.021 \ln x \quad (3)$$

式中: $y$  为视认距离,  $m$ ;  $x$  为光纤掺量,  $pcs$ 。

将  $y=252 m$  代入式(3),求得  $x=4.77$ ,即倾斜角度为  $90^\circ$  的 5 pcs 光纤就可以满足设计速度为  $120 km \cdot h^{-1}$  时的停车视距要求。

此外,考虑 1.2 的安全系数,设计速度为  $120 km \cdot h^{-1}$  时透光混凝土基 LED 主动发光交通标线的光纤掺量设置为  $5 \times 1.2 = 6 pcs$ 。

考虑经济性,不同设计速度的高速公路和一级公路路段的停车视距需求不同,对应的合理光纤掺量也应不同。因此,针对不同设计速度路段,其光纤掺量应实行差异化设置。采用与设计速度为  $120 km \cdot h^{-1}$  时同样的计算方法,得到不同设计速度对应的合理光纤掺量见表 7。

表 7 不同设计速度对应的合理光纤掺量

Tab.7 Reasonable fiber-optic dosage corresponding to different design speeds

设计速度/ $(km \cdot h^{-1})$	120	100	80	60
光纤掺量/ $pcs$	6	4	3	2

### 3.4 应用分析

透光混凝土基 LED 主动发光交通标线的视认性能良好,可用于小半径、长大纵坡、桥梁隧道、交织区等不良道路条件和雨雾、冰雪、风沙等复杂气象条件引起的高风险路段,通过增强驾驶员视线诱导能力的方式提供一种新型交通安全保障方案。同时,依托智慧型主动发光交通标线搭建救援管理平台,可以控制与减少由于高风险路段突发气象、突发事件等信息发布不及时带来的二次事故。

一方面,透光混凝土基 LED 主动发光交通标线可进行前向道路线形诱导和车辆尾迹显示,根据实时检测的气象条件、车型、车速及事件等交通参数,划分行车风险等级,确定交通管控策略,将一定长度

范围内的交通标线对应设置为不同的颜色,如采用绿色表示通行、橙色表示警告、红色表示禁止,起到视觉诱导、信息发布、安全保障的作用。通过设置一定的闪频,并切换不同的颜色方案,对预防疲劳驾驶也会产生良好的效果。

另一方面,透光混凝土基 LED 主动发光交通标线与压电路面、太阳能光伏路面等新型路面结构紧密结合,采用压电、太阳能综合供电方式,是绿色公路、平安公路、智慧公路理念的融合实践。

此外,交通标线的全天候识别是自动驾驶车辆面临的一项技术难题,基于本文开发的透光混凝土基 LED 主动发光交通标线,嵌入电子通讯元件,提高了交通标线的数字化、智能化与信息化水平,为自动驾驶车辆对道路交通标线的全天候识别提供一种新的解决方案。

## 4 结语

本文研究确定了透光混凝土基 LED 主动发光交通标线的光纤种类、直径、掺量。综合考虑光纤的物理性能、导光性能和经济性,PMMA 光纤是透光混凝土基 LED 主动发光交通标线的最佳选择。通过光纤导光率的理论计算与实验验证,确定传导红、黄、绿三色光的 PMMA 光纤的直径采用  $6 mm$ 。视认距离随外界环境照度的降低而增大、随光纤掺量的增加而增大,同一外界环境照度和光纤掺量下标线的视认距离红色最大、绿色次之、黄色最小。基于不同颜色光源视认距离与光纤掺量的对数回归模型,综合考虑车辆前进过程中驾驶员视觉的连续性和均匀性,设计速度为  $120, 100, 80, 60 km \cdot h^{-1}$  的高速公路和一级公路对应的光纤掺量合理值分别为  $6, 4, 3, 2 pcs$ 。

透光混凝土基 LED 主动发光交通标线在保障交通安全、提升车路协同技术等方面具有广阔的应用前景,符合“四个交通”的总体要求,对行业发展具有一定的引领作用。

本文也存在不足之处,如对LED主动发光标线的视认性能研究中,仅考虑了外界环境、光源颜色、光纤掺量的影响,未考虑道路线形、交通流特征等因素。此外,对于该新型标线的设置间距、光源闪频等参数还有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家标准. 道路交通标志和标线:GB 5768—2009[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2009.  
National Standards of People's Republic of China. Road traffic signs and markings: GB 5768—2009 [S]. Beijing: China National Standardization Administration, 2009.
- [2] 戚华庭,叶蓉. 雨夜反光标线和雨夜反光珠应用研究[J]. 交通标准化,2011(19): 80.  
QI Huating, YE Rong. Analysis on application of dirty-night light-reflective road mark and dirty-night reflection pearl [J]. Transportation Standardization, 2011(19): 80.
- [3] 李大茂,张国辉,冯志秀,等. 道路交通标线雨夜可视性测试方法国内外研究进展[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(2):241.  
LI Damao, ZHANG Guohui, FENG Zhixiu, *et al.* Research progress on rainy night visibility test method for road traffic markings at home and abroad [J]. Journal of highway and transportation research and development (Technology), 2017, 13(2):241.
- [4] 吕兴栋,盖国胜,余泉茂,等. 蓄光型发光材料的应用改性研究进展[J]. 现代化工,2007(10): 16.  
LÜ Xingdong, GAI Guosheng, YU Quanmao, *et al.* Progress in modification research for application of persistent phosphors [J]. Modern Chemical Industry, 2007(10): 16.
- [5] 吕宁生. 农村公路自发光交通安全标识研究[C]//中国公路学会 2013 年学术年会论文集. 北京:《中国公路》杂志社, 2013,7:237-243.  
Lǚ Ningsheng. Research on self-illuminated traffic safety signs of rural roads [C]// Proceedings of the 2013 annual meeting of China highway society. Beijing: China Highway Magazine, 2013,7: 237-243.
- [6] 梁冰,李寿伟. 隧道蓄能自发光应急逃生系统[J]. 交通标准化,2014,42(15):189.  
LIANG Bing, LI Shouwei. Self-storage and auto-luminous emergency escape system in tunnel [J]. Transportation Standardization, 2014,42(15):189.
- [7] 徐建晖,陈诚,万宏,等. 长余辉路面自发光涂料研究及应用[J]. 公路交通技术,2017,33(6):14.  
XU Jianhui, CHEN Cheng, WAN Hong, *et al.* Research and application of afterglow pavement self-luminescent coatings [J]. Technology of Highway and Transport, 2017,33(6):14.
- [8] 吴铁锋. 智能可变式道路交通标线:CN101538834 A[P]. 2009-03-11.  
WU Tiefeng. Intelligent variable road traffic marking: CN101538834 A [P]. 2009-03-11.
- [9] 张岳玥. 位置可调的马路双黄线:CN102635078 A[P]. 2012-04-24.  
ZHANG Yueyue. Position adjustable road double yellow line: CN102635078 A [P]. 2012-04-24.
- [10] 汪桥,朱建华,台德进. 一种具有交通信号灯功能的交通标线及可变更的车道指示线:CN107012805 A [P]. 2017-08-04.  
WANG Qiao, ZHU Jianhua, TAI Dejin. Traffic marking with traffic signal function and changeable lane indicator line: CN107012805 A [P]. 2017-08-04.
- [11] LOSONCZI A. Building block comprising light transmitting fibers and a method for producing the same: WO03097954A1 [P]. 2003-11-27.
- [12] 李悦,郭慧. 透光混凝土的研究进展[J]. 混凝土,2013(6):5.  
LI Yue, GUO Hui. Research progress of the light transmitting concrete [J]. Concrete, 2013(6):5.
- [13] 丁泓力,郭杨,林荣辉. 光对博物馆建筑艺术及陈列艺术的影响[J]. 山东工业技术,2015(8): 267.  
DING Hongli, GUO Yang, LIN Ronghui. The influence of light on museum architecture and exhibition art [J]. Shandong Industrial Technology, 2015(8): 267.
- [14] 王松涛. 透光混凝土在公共建筑地下入口空间的应用[D]. 大连:大连工业大学,2015.  
WANG Songtao. Application of the light transmitting concrete in public entrance space of underground [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2015.
- [15] 郭奇,贾剑,庄从国,等. 光纤透光混凝土显示装置: CN204833933U [P]. 2015-08-25.  
GUO Qi, JIA Jian, ZHUANG Congguo, *et al.* Fiber optic transmission concrete display device: CN204833933U [P]. 2015-08-25.
- [16] LI Y, XU Z Y, GU Z W. Preparation of light transmitting cement-based material with optical fiber embedded by the means of parallel arrange [J]. Advanced Materials Research, 2012(391-392):677.
- [17] 王信刚,陈皓,翟胜田,等. 光纤导光混凝土的透光性能与抗侵蚀性能[J]. 硅酸盐通报,2016,35(11):3622.  
WANG Xingang, CHEN Hao, ZHAI Shengtian, *et al.* Transparent property and corrosion resistance of optical fiber light conductive concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016,35(11):3622.
- [18] 孙立军. 铺面工程学[M]. 上海:同济大学出版社,2012.  
SUN Lijun. Pavement engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2012.
- [19] 廖延彪. 光纤光学—原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2010.  
LIAO Yanbiao. Fiber optics: principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [20] 周娟英,王鑫. 驾驶员的视觉特征对驾驶适宜性的影响[J]. 汽车零部件,2012(4):82.  
ZHOU Juanying, WANG Xin. Effect of visual characteristics of pilot to driving suitability [J]. Automobile Parts, 2012(4):82.
- [21] 中华人民共和国行业标准. 公路工程技术标准:JTG B01—2014[S]. 北京:中华人民共和国交通运输部,2014.  
Industry Standards of People's Republic of China. Technical standard of highway engineering: JTG B01—2014 [S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2014.
- [22] 苏华. 色彩设计基础[M]. 北京:清华大学出版社,2003.  
SU Hua. Color design foundation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.