



DOI: 10.12086/oe.2019.180607

## 基于透射法的隧道能见度检测系统设计

叶松<sup>1,3</sup>, 白云飞<sup>1,2</sup>, 李志伟<sup>2</sup>, 施海亮<sup>2\*</sup>,  
熊伟<sup>2</sup>, 王新强<sup>1,3</sup>, 汪杰君<sup>1,3</sup>, 张文涛<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>3</sup> 广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

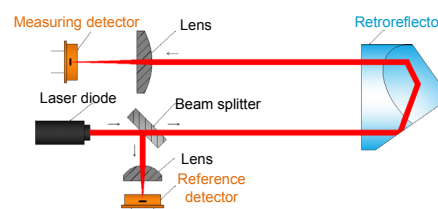
**摘要:** 隧道能见度与行车安全有重要关系, 对隧道能见度进行实时监测可以为隧道通风换气提供有力依据。基于透射法能见度检测原理, 设计并搭建了一套能见度检测系统用于隧道能见度的自动检测。检测系统主要由激光二极管、分束器、硅探测器和信号处理单元等部分构成。采用高响应度硅探测器并设计了跨阻抗放大电路以满足在低能见度下测量需求。两硅探测器分别检测经光学路径衰减前后的光强并输出对应的光电流, 信号处理电路对探测器两路输出进行放大滤波和 A/D 转换后, 反演出消光系数。使用固定透过率滤光片模拟隧道环境, 在实验室环境下对该检测系统性能指标进行测试。实验结果表明: 消光系数测量范围  $3.37 \text{ km}^{-1} \sim 118.82 \text{ km}^{-1}$ , 最大相对测量误差为 8.4%, 稳定性优于  $0.12 \text{ km}^{-1}$ 。

**关键词:** 隧道能见度; 透射法; 消光系数

**中图分类号:** TH765

**文献标志码:** A

**引用格式:** 叶松, 白云飞, 李志伟, 等. 基于透射法的隧道能见度检测系统设计[J]. 光电工程, 2019, 46(10): 180607



## Design of visibility detection system for tunnel based on transmission method

Ye Song<sup>1,3</sup>, Bai Yunfei<sup>1,2</sup>, Li Zhiwei<sup>2</sup>, Shi Hailiang<sup>2\*</sup>, Xiong Wei<sup>2</sup>, Wang Xinqiang<sup>1,3</sup>,  
Wang Jiejun<sup>1,3</sup>, Zhang Wentao<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>2</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>3</sup>Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract:** Tunnel visibility has an important relationship with traffic safety. Real-time monitoring of tunnel visibility can provide a strong basis for ventilation and ventilation of tunnels. Based on the principle of visibility detection by transmission method, a set of visibility detection system is built for automatic detection of tunnel visibility. The detection system is mainly composed of a laser diode, a beam splitter, a silicon detector and a signal processing unit. Two silicon detectors detect the intensity of light before and after attenuation through optical path respectively and output

收稿日期: 2018-09-05; 收到修改稿日期: 2018-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11703061); 国家重点研发计划(2016YFB0500704)

作者简介: 叶松(1979-), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学遥感方面的研究。E-mail: yesongmail@sina.com

通信作者: 施海亮(1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学遥感方面的研究。E-mail: hshi@aiofm.ac.cn

corresponding photocurrent. The signal processing circuit amplifies and filters the output of the detector and converts the output to AD, and then calculates the extinction coefficient. Fixed transmittance filter is used to simulate tunnel environment, and the performance index of the detection system is tested in laboratory environment. The experimental results show that the measurement range of extinction coefficient is  $3.37 \text{ km}^{-1} \sim 118.82 \text{ km}^{-1}$ , the maximum relative measurement error is 8.4%, and the stability is better than  $0.12 \text{ km}^{-1}$ .

**Keywords:** tunnel visibility; transmission method; extinction coefficient

**Citation:** Ye S, Bai Y F, Li Z W, et al. Design of visibility detection system for tunnel based on transmission method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(10): 180607

## 1 引言

随着交通运输业不断发展,中大型隧道在公路建设中发挥越来越大的作用,而隧道作为一个半封闭的柱状空间,具有纵深较长、封闭性强等特点,加之机动车轮胎与地面的摩擦和尾气排放极易造成能见度下降,严重危及人身安全与行车安全<sup>[1]</sup>。因此,对隧道中能见度进行实时监测具有重大意义。能见度检测仪按照检测原理主要分为透射测量仪和散射测量仪<sup>[2]</sup>。

散射型测量仪根据其测量原理分为前向散射法与后向散射法。前向散射法取样空间较小,测量结果的代表性较差<sup>[3]</sup>,后向散射法取样空间大,但要求采样空间内无障碍物,因此无法适用于隧道狭窄空间。透射类测量仪器因其测量直接、计算简单、易于实现且更加适用于对低能见度检测要求较高但对仪器体积要求不高的场所<sup>[4]</sup>,因而更适合隧道特殊环境。

对于隧道能见度检测仪器,美国、英国、日本和芬兰等国都已进行了研制和应用<sup>[5]</sup>。我国对隧道检测类仪器的研制起步较晚,长期以来以人工观测为主,近年来能见度测量的方法也在快速发展。程绍荣等<sup>[6]</sup>研制了国产化大气透射仪样机,实测误差为10%~20%。王宗俐等<sup>[7]</sup>利用位移调节器提出了差分测量消光系数的方法。宫纯文等<sup>[8]</sup>利用镀膜玻璃管测量出了大气气溶胶消光系数。庄子波等<sup>[9]</sup>利用高精度滑轨实现了变基线长度的能见度测量。以上测量装置虽然能够对能见度进行测量,但针对隧道特殊环境并不适用。目前国内隧道用检测仪多为进口产品,最具代表性的透射式能见度检测仪是美国 REGAL 公司生产的 COVI740 系列和英国 CODEL 公司生产的 AQM 系列空气质量检测仪。

REGAL 研制生产的 COVI740 检测仪为单端透射式隧道能见度检测仪,采样路径 6 m,消光系数检测范围为  $1.5 \text{ km}^{-1} \sim 15 \text{ km}^{-1}$ (对应能见度范围 200 m~2000 m),检测精度为  $\pm 0.1 \text{ km}^{-1}$ 。CODEL 公司研制的 AQM

能见度检测仪器采用单端透射式原理测量能见度,采样路径 6 m,消光系数测量范围为  $0 \sim 15 \text{ km}^{-1}$ (对应能见度范围 200 m 以上),检测精度为  $\pm 0.2 \text{ km}^{-1}$ 。

我国于 2014 年颁布实施《公路隧道通风照明设计规范》<sup>[10]</sup>,对隧道能见度检测设备有了明确的技术要求,即能见度测量范围优于 25 m~1000 m(对应消光系数  $3 \text{ km}^{-1} \sim 116 \text{ km}^{-1}$ ),精度优于示值的  $\pm 10\%$ ,消光系数参考报警阈值为  $7.5 \text{ km}^{-1}$ ,每一通风分段不少于两台能见度检测仪器。

由于进口能见度测量仪器成本高,维护费用昂贵,且测量范围不满足我国隧道环境低能见度检测的实际要求。文中基于透射法能见度检测原理,研制了一套隧道能见度检测系统,并在实验室环境下进行了模拟测试实验。对今后此类仪器的产品化奠定了基础。

## 2 能见度检测原理

气象学中,能见度被定义为在一定的天气透明度下,人眼能发现的以水平天空为背景的黑色目标物的最大距离。水平大气能见度 Koschmieder 定律<sup>[11]</sup>:

$$V = -\frac{\ln \varepsilon}{\sigma} \quad (1)$$

式中: $V$ 为以水平天空为背景的黑色目标物能见度, $\sigma$ 为观测方向大气水平消光系数, $\varepsilon$ 为视觉反应阈值,取推荐值 0.05。能见度测量的关键即为如何准确测量大气消光系数 $\sigma$ 。

设光源初始光强为  $I_0$ ,在光学路径  $L$  处探测器接收到的光强为  $I$ 。假设在光的传输路径上大气均匀分布,则光辐射在大气中的衰减遵循比尔朗博定律<sup>[12]</sup>,即:

$$\tau = \frac{I}{I_0} = e^{-\sigma L} \quad (2)$$

联立式(1)~式(2)两式即可推导出能见度  $V$ 、光学路径长度  $L$ 、透过率  $\tau$  三者之间关系:

$$V = -\frac{2.99 \times L}{\ln \tau} \quad (3)$$

由式(3)可知, 能见度距离只与大气透过率相关, 而大气透过率由  $I_0$  和  $I$  计算得到。因此, 准确测得光源发光的始末光强值, 即可计算得到能见度。由于不同人群在不同环境下的视觉反应阈值不同, 由此计算得到的能见度计算结果并不准确, 因此本文计算以消光系数为标准。

### 3 系统整体构成

能见度检测系统主要由光学部分和信号处理电路部分构成。光学部分包括激光二极管、透镜、分束器和角锥棱镜。信号处理电路包括硅探测器、稳压模块、信号处理模块、A/D 转换模块、主控制器和信号输出模块几部分构成。如图 1 所示, 光束经分束器后, 由两光电探测器分别检测衰减前后的光强值并转换成电信号。该信号经信号处理模块进行放大滤波并由 A/D 转换成数字信号后, 由主控制器接收并进行反演计算, 根据计算结果控制继电器动作并通过多种方式输出。

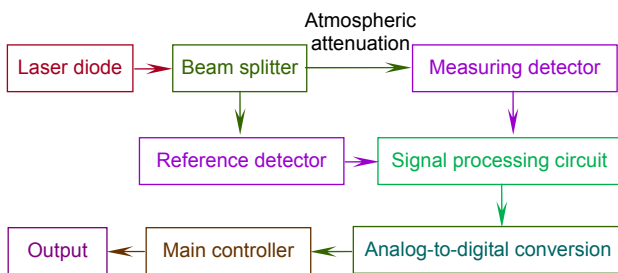


图 1 系统整体组成框图

Fig. 1 Block diagram of the detection system

#### 3.1 光学结构设计

为避免长期工作时光源功率不稳造成探测器输出波动对测量结果造成影响, 光学系统部分引入了分束

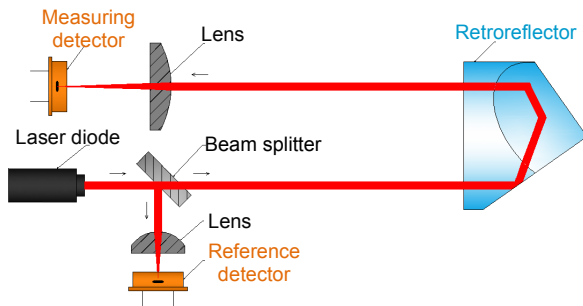


图 2 光学结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the optical structure

器和参考探测器对光源发光强度进行监测。使用角锥棱镜替代平面反射镜, 大大降低了光路校准的难度。由光源发出的 650 nm 红光经分束器分成两路, 一路经透镜汇聚后由参考探测器直接接收, 另一路经大气衰减后, 由角锥棱镜反射, 经透镜聚焦后, 由测量探测器接收。两探测器分别检测未衰减和衰减后的光强值, 经标定后, 可计算得到消光系数。光学结构示意图和所设计收发部分夹具模型如图 2、图 3 所示。

检测原理推导过程如下:

光源原始光强为  $I_0$ , 设参考探测器和测量探测器接收到的光强分别为  $I_1$ 、 $I_2$ , 分束器透射率为  $N$ , 被检测空气柱透过率为  $\tau$ , 两透镜透过率分别为  $K_1$ 、 $K_2$ , 由此可得到:

$$I_1 = I_0 \cdot (1 - N) \cdot K_1, \quad (4)$$

$$I_2 = I_0 \cdot N \cdot \tau \cdot K_2. \quad (5)$$

光电流  $I_1$  和  $I_2$  分别经 I/V 转换、低通滤波电路后由双通道 A/D 转换芯片采集, 对应的电压值记作  $D_1$  和  $D_2$ , 则有:

$$D_1 = A_1 \cdot I_1, \quad (6)$$

$$D_2 = A_2 \cdot I_2, \quad (7)$$

其中  $A_1$ 、 $A_2$  为各自对应电路的放大倍数。根据式(4)~式(7)可推导出透过率:

$$\tau = \frac{(1 - N)K_1A_1D_2}{NK_2A_2D_1}. \quad (8)$$

再令:

$$m = \frac{(1 - N)K_1A_1}{NK_2A_2}.$$

将上式带入式(2)计算得到消光系数:

$$\sigma = -\frac{1}{L} \cdot \ln \left( m \frac{D_2}{D_1} \right). \quad (9)$$

检测系统确定后  $m$  为常数, 由式(9)可知, 消光系数的计算只与两路电压测得值有关, 因此准确测得探

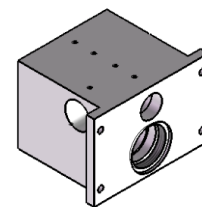


图 3 发射与接收夹具模型

Fig. 3 Launch and receiving part fixture model

测器输出电压,对消光系数计算结果至关重要。为提高系统检测分辨率,理论分析可知:设计采样路径越长,则单位消光系数变化量所引起的光强变化量越大,检测灵敏度越高,但实际采样路径长度与光源发散角和接收透镜尺寸有关,距离过大时受到光源发散角影响光斑较大,能量利用率降低。按照所选光源发散角  $\theta = 4.2 \text{ mrad}$ 、透镜半径  $R = 12.7 \text{ mm}$ ,计算采样路径  $L$  为

$$L = \frac{R}{\tan(\theta/2)} \quad (10)$$

计算得到采样路径最大值  $L = 6047 \text{ mm}$ ,实际取值为  $6 \text{ m}$ 。后续实验测试验证了这一采样路径长度满足设计要求。

### 3.2 信号处理模块设计

信号处理模块主要由跨阻抗放大电路<sup>[13]</sup>和A/D转换电路组成。由于测量光程较长,在低能见度状态下,光强衰减严重。考虑到隧道检测仪器对低能见度条件下的测量需求,探测器采用LXD公司生产的硅探测器LXD66MQ,其感光面为  $33 \text{ mm}^2$ ,  $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim +50 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内暗电流小于  $10 \text{ nA}$ ,短路输出电流与输入光照度在  $5000 \text{ lx}$  以内时有良好的线性度,其光谱响应曲线如图4所示。

采用跨阻式放大电路将硅探测器受光照产生的光电流转换成电压信号并进行放大,此时硅探测器工作在光伏模式下,相比于光导模式拥有更高的线性度和更低的暗电流<sup>[14]</sup>,因此更加适用于低能见度条件下微弱光强值的精密测量。图5为所设计跨阻抗放大电路。

由于运算放大器的开环增益很大,忽略导线电阻影响,可认为硅探测器工作于零偏压短路状态,短路

电流与输入光照度在最大范围内成线性关系,以保证检测装置满足在高、低能见度下的测量要求。输出电压  $D$  与光电流  $i$  的关系:

$$D = i \cdot R_f \quad (11)$$

反馈电阻  $R_f$  的选用极为重要,阻值过小则转换灵敏度低,阻值过大则会引起反馈回路自行激励产生振荡。根据初期搭建的实验平台测量,功率为  $5 \text{ mW}$  激光二极管在采样路径为  $6 \text{ m}$  时,硅探测器在测量范围内输出的短路电流约为百微安级,考虑到转换灵敏度和装置检测范围要求,反馈电阻采用阻值为  $8.2 \text{ k}\Omega$  的金属膜电阻,其温度系数优于  $10 \text{ ppm}$ 。为防止反馈回路产生振荡,改善电路稳定性,引入反馈电容  $C_f$ 。 $C_f$  值越大,阶跃过冲和噪声增益现象越少,但会导致较小的增益带宽和较长的输出响应时间,经电路调试后,设计中反馈电容取值为  $0.1 \text{ }\mu\text{F}$ 。

为进一步改善信噪比,选用低偏置电流、高增益、高共模抑制比的FET型运算放大器MCP6002,且在运放输出端与后级电路之间加入RC低通滤波,截止频率  $16 \text{ Hz}$ ,极大地滤除了探测器白噪声和运放本身噪声以保证直流信号的完整性,提高了信噪比与电路稳定性。

为了将得到的电压模拟信号准确地转换为数字信号进行运算。文中采用AD7705模数转换芯片对两路电压值进行A/D转换。该芯片利用  $\Sigma - \Delta$  转换技术实现了16位无丢失代码性能并具有双通道全差分模拟输入,适用于低频、高精度、高分辨率的场合。本文设计AD7705参考电压为  $5 \text{ V}$ ,采用外部  $4.9152 \text{ MHz}$  晶振提供时钟频率,采用三线制SPI接口标准与单片机通信,输出更新频率设定为  $25 \text{ Hz}$ 。对两路电压进

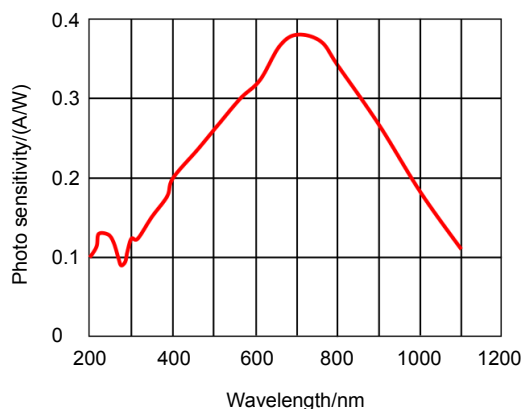


图4 光谱响应曲线  
Fig. 4 Spectral response curve

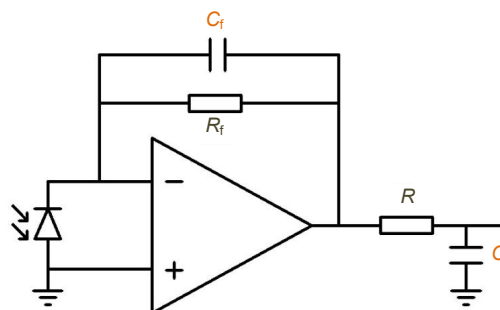


图5 跨阻式放大电路  
Fig. 5 Transimpedance amplifier circuit



行差分输入,电压转换精度优于 0.1 mV,非线性优于 0.003%。所设计电路板如图 6 所示。

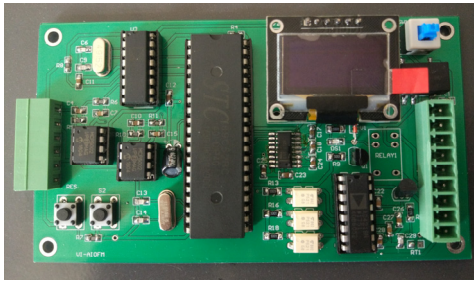


图 6 信号处理电路实物图  
Fig. 6 Signal processing circuit

### 3.3 软件模块设计

能见度检测仪的软件设计整体采用 C 语言的结构化思想进行开发。软件部分主要包括对数据的采集、定标与反演和多路输出。数据的采集主要是实时获取探测器输出,进行必要的修正经 A/D 转换后送入主控芯片。定标反演部分则是将采集到的电压值进行定标计算,并根据测量原理及数学推导进行反演计算得到测试结果。多路输出包括显示屏输出、继电器输出、串口输出、4 mA~20 mA 电流环输出。检测仪主程序流程图如图 7 所示。

检测仪上电后首先进行系统初始化,包括显示屏初始化、串口初始化,随后进入工作状态。首次开机时需要按下按键定标,并将计算得到的最后一次定标系数存储于单片机中供后续测量计算使用。经 A/D 转

换得到的两路电压值根据式(9)计算反演得到消光系数。计算结果通过多种方式进行输出,并与消光系数设定值进行对比,当超过设定阈值时控制继电器导通,否则继电器断开,然后重复此测量过程。

## 4 定标与测试实验

在实验室环境下进行模拟测试,将发射接收部分和角锥棱镜固定在同一水平面上,相距 3 m,调整棱镜位置,使反射光斑照射在聚焦透镜中心位置。使用多片固定透过率滤光片模拟不同能见度下隧道环境,未加滤光片时认为透过率为 100%进行定标,随后将滤光片固定在旋转平台上加入光路,微调旋转台至消光系数出现极小值处,此时认为入射光与滤光片平面垂直并开始记录测量结果。为降低背景光对测量造成的影响,在发射接收部分和反射部分都增加了 50 cm 长的遮光镜筒并在镜筒盖上开有直径 4 cm 的通光孔,实验测试示意图如图 8 所示。

在测量范围内选择透过率分别为 98.0%、84.7%、67.2%和 49.0%的滤光片模拟不同环境能见度条件进行测试,连续测量 12 h 并每隔半小时对消光系数测量结果进行记录,测试结果如图 9 示。

仪器稳定性  $s$  和最大测量相对误差  $\Delta h$  计算方法如下<sup>[15]</sup>:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (12)$$

$$\Delta h = \frac{\max |Y_i - Y_0|}{Y_0} \times 100\% \quad (13)$$

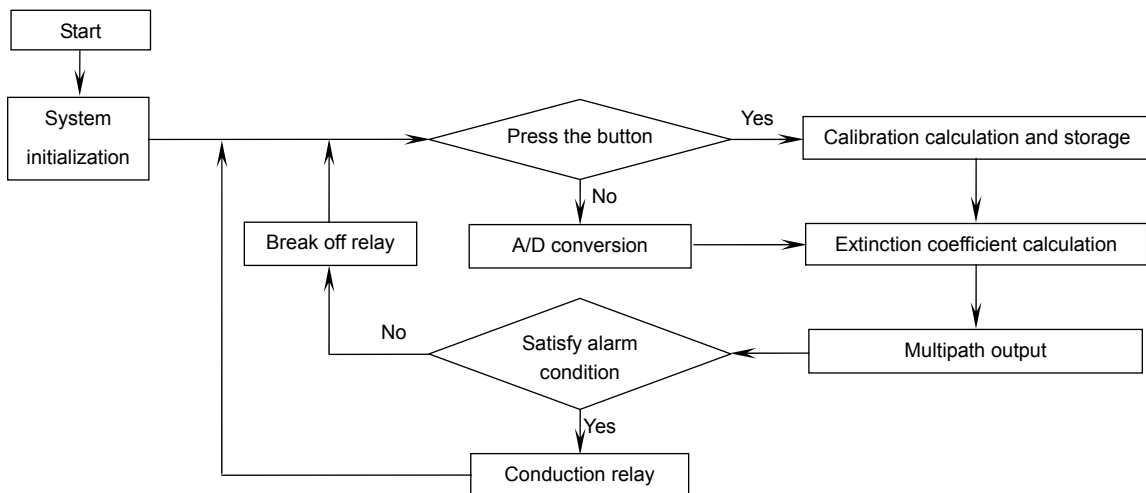


图 7 主程序流程图

Fig. 7 Main program flow chart

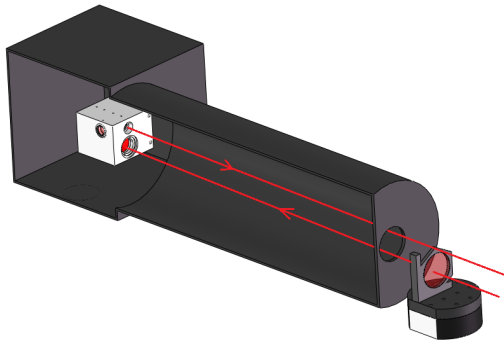


图 8 能见度测试实验示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the visibility test

其中： $Y_i$ 为每次测量值， $\bar{Y}$ 为  $n$  次测量的平均值， $Y_0$  为每组测得值对应的真值， $n$  为测量次数。

根据图 9 测试结果计算检测装置各项性能指标如下表 1 所示。

由表 1 可看出在检测装置测量范围内，最大测量相对误差为 8.4%，在《公路隧道设计规范》中规定隧道能见度测量设备最大允许误差不得超过示值的  $\pm 10\%$ ，模拟测量结果表明，本设计满足隧道能见度测量仪器要求。设置仪器报警消光系数阈值为  $7.5 \text{ km}^{-1}$ ，当测量消光系数高于这一设计值时，控制继电器导通，启动隧道风机通风换气。

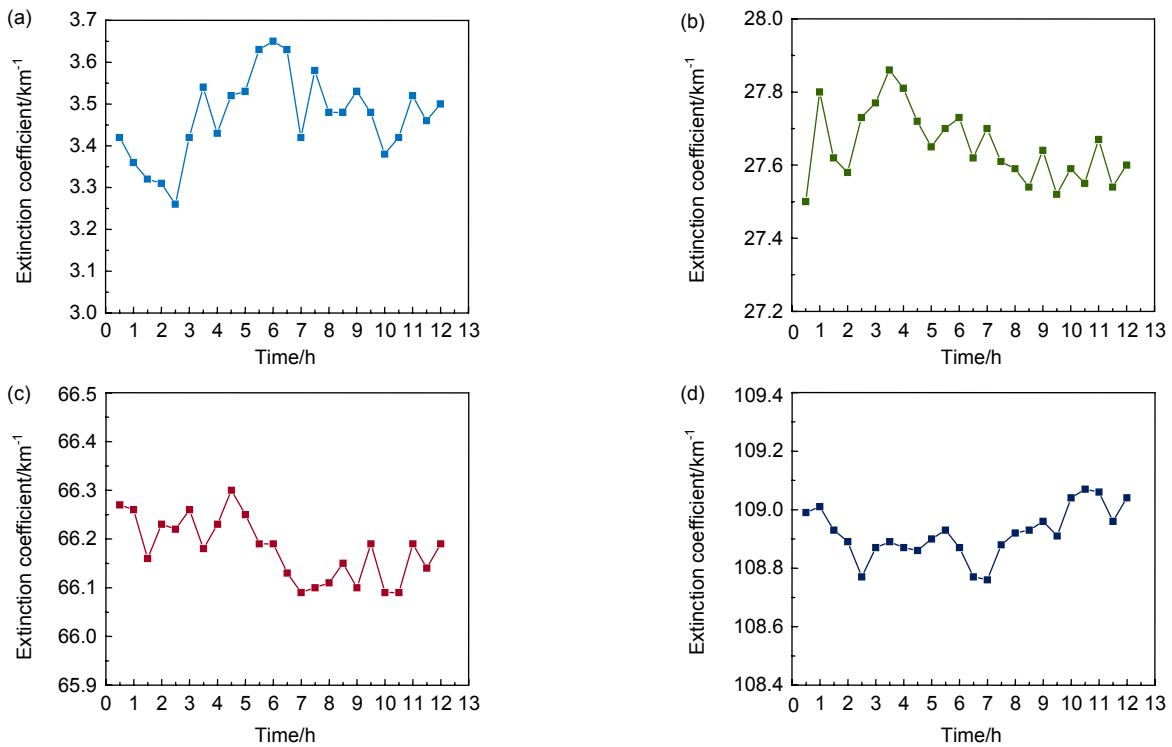


图 9 不同透过率滤光片 12 h 消光系数测量折线图。(a) 透过率 98.0%；(b) 透过率 84.7%；(c) 透过率 67.2%；(d) 透过率 49.0%

Fig. 9 Line chart of extinction coefficient of filter with different transmittance measured in 12 h. (a) The transmittance is 98.0%; (b) The transmittance is 84.7%; (c) The transmittance is 67.2%; (d) The transmittance is 49.0%

表 1 不同透过率下检测装置各项性能指标

Table 1 The performance of detection device at different transmission

Reference transmission/%	Reference extinction coefficient/ $\text{km}^{-1}$	Average value/ $\text{km}^{-1}$	$\Delta h/\%$	$s/\text{km}^{-1}$
98.0	3.37	3.47	8.3	0.12
85.4	26.30	27.65	5.9	0.11
68.62	62.76	66.18	5.6	0.07
49.02	118.82	108.92	8.4	0.08

## 5 结论

本文基于单端透射法能见度测量原理设计了针对隧道特殊能见度条件下的检测装置。设计了基于分束器的光学结构部分,对光源进行监测消除了功率波动对测量结果造成的影响,提高了检测装置长期工作稳定性。采用高响应度硅探测器并设计了对应的信号处理电路,以满足低能见度条件下测量要求。本文通过使用不同透过率滤光片进行模拟实验,验证了该检测装置可以实时检测出采样路径中的透过率并反演出消光系数,测试结果表明:检测装置测量范围  $3.37 \text{ km}^{-1} \sim 118.82 \text{ km}^{-1}$ (对应能见度范围  $25 \text{ m} \sim 900 \text{ m}$ ),最大测量相对误差为  $8.4\%$ ,系统稳定性优于  $0.12 \text{ km}^{-1}$ 。相较于国外进口隧道检测仪器,本检测装置性价比高,测量范围更加符合我国隧道能见度检测实际需求,对今后检测仪器产品化奠定了基础。

## 参考文献

- [1] Dong L L, Shi N, Zhang L D, et al. Influence of tunnel lighting brightness on visibility under low transmittance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(2): 0222002.  
董丽丽, 石娜, 张利东, 等. 低透过率下隧道照明亮度对能见度的影响[J]. *光子学报*, 2017, **46**(2): 0222002.
- [2] Ju L. Hardware design of transmission visibility measurement based on WSN[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2011: 5–7.  
鞠琳. 基于 WSN 的透射式能见度检测系统的硬件设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011: 5–7.
- [3] Gao Q. Development of the infrared forward scattering visibility meter[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015: 1–3.  
高强. 基于红外前向散射能见度仪的研制[D]. 天津: 天津大学, 2015: 1–3.
- [4] Wang J A, Kang S, Wu R H, et al. Method for calculating visibility utilizing optic ways[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 283–289.  
王江安, 康圣, 吴荣华, 等. 能见度光学测量方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 283–289.
- [5] Cai Q. Analysis of performance for transmission type and forward scatter type apparatus[J]. *Journal of Chengdu Technological University*, 2014, **17**(4): 40–42, 59.  
蔡琴. 透射式和前散射式能见度仪性能的分析[J]. *成都工业学院学报*, 2014, **17**(4): 40–42, 59.
- [6] Cheng S R, Wei Q Z, Lv J. The development of a new atmosphere transmittance meter[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(2): 144–150.  
程绍荣, 魏全忠, 吕军. 一种实用型大气透射式能见度仪的研制[J]. *光电工程*, 2011, **38**(2): 144–150.
- [7] Wang Z L, Cao N F, Wang C L. New design of laser instrument for detecting the visibility[J]. *Laser & Infrared*, 2012, **42**(6): 629–632.  
王宗俐, 曹乃锋, 王春录. 一种激光能见度仪设计的新方法[J]. *激光与红外*, 2012, **42**(6): 629–632.
- [8] Gong C W, Li X B, Li J Y, et al. New method of aerosol extinction coefficient measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(1): 0101001.  
官纯文, 李学彬, 李建玉, 等. 大气气溶胶消光系数测量新方法[J]. *光学学报*, 2014, **34**(1): 0101001.
- [9] Zhuang Z B, Tai H D, Jiang L H. Changing baseline lengths method of visibility measurement and evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(2): 0201001.  
庄子波, 台宏达, 蒋立辉. 一种基线长度改变的能见度测量和评价方法[J]. *光学学报*, 2016, **36**(2): 0201001.
- [10] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway tunnels section 2 traffic engineering and affiliated facilities: JTG D70/2–2014[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.  
中华人民共和国交通运输部. 公路隧道设计规范 第二册 交通工程与附属设施: JTG D70/2–2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [11] Bendix J. Determination of fog horizontal visibility by means of NOAA – AVHR[C]//1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications, Firenze, Italy, 1995, 3: 1847–1849.
- [12] Wu J, Yang C P, Liu J B. *Optical Transmission Theory in the Atmosphere*[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 1–57.  
吴健, 杨春平, 刘建斌. 大气中的光传输理论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005: 1–57.
- [13] Du D Z, Liu T T, Liao W H, et al. Design of monitoring system of melt pool light intensity in selective laser melting[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(12): 1206002.  
杜道中, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化熔池光强监测系统的设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(12): 1206002.
- [14] Zhu Z. Design and stability analysis of pre-amplification circuit for photodiode monitoring[J]. *Modern Electronics Technique*, 2014, **37**(17): 137–139.  
朱珠. 光电检测前置放大电路设计及稳定性分析[J]. *现代电子技术*, 2014, **37**(17): 137–139.
- [15] Gao L M. Measurement of CO concentration and visibility[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 55–56.  
高丽梅. CO 浓度和能见度检测系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 55–56.

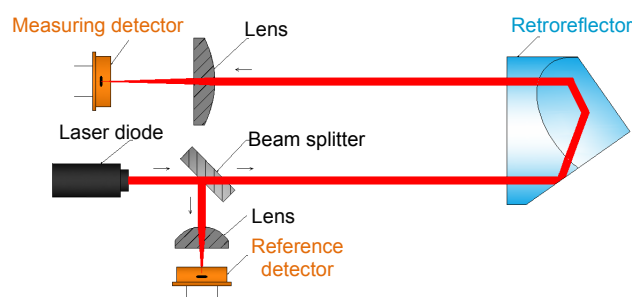
# Design of visibility detection system for tunnel based on transmission method

Ye Song<sup>1,3</sup>, Bai Yunfei<sup>1,2</sup>, Li Zhiwei<sup>2</sup>, Shi Hailiang<sup>2\*</sup>, Xiong Wei<sup>2</sup>,  
Wang Xinqiang<sup>1,3</sup>, Wang Jiejun<sup>1,3</sup>, Zhang Wentao<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>2</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>3</sup>Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin, Guangxi 541004, China



Schematic diagram of optical structure

**Overview:** With the development of the transportation industry, the number of medium and long road tunnels has been always increasing. Since the tunnel structure has a semi-closed cylindrical configuration, it is difficult to exchange with the outside air, and the exhaust of the vehicle is likely to cause the accumulation of pollutants and to cause a decrease in visibility in the tunnel. Tunnel visibility has an important relationship with driving safety. Real-time monitoring of tunnel visibility can provide a strong basis for tunnel ventilation and ventilation, reduce the probability of accidents under low visibility conditions and improve the tunnel environment. Based on the principle of visibility detection of transmission method, a set of visibility detection system is built for the automatic detection of tunnel visibility. The detection system is mainly composed of a laser diode, a beam splitter, a silicon detector, and a signal processing unit. An LED laser diode with the power of 5 mW and wavelength of 650 nm is used as a detection light source, and two high-reactivity silicon detectors respectively detect the light intensity before and after attenuation by the optical path and output a corresponding photocurrent. A transimpedance amplifier circuit is designed to perform amplification and I/V conversion of the photocurrent signal to meet the detection requirements under low visibility conditions. The signal processing circuit performs amplification filtering and analog-to-digital conversion on the two outputs of the detector, and is collected by the single-chip microcomputer. The extinction coefficient is inverted by the single-chip microcomputer by writing software. According to the calculated extinction coefficient and design threshold, the relay is controlled to be turned on or off to control the motor running in the tunnel. The prototype of the inspection system is designed and fabricated, and the main design parameters including measurement range, maximum measurement error and stability are experimentally analyzed. In order to avoid the influence of background light on the detection system, a 50 cm long shading cylinder and a 4 cm diameter aperture are designed. The tunnels under different visibility conditions are simulated using filters with fixed transmittances of 98.0%, 84.7%, 67.2% and 49.0%, respectively, and the performance indicators of the test system are tested in a laboratory. The experimental results show that the measurement range of the extinction coefficient of the detection system is  $3.37 \text{ km}^{-1} \sim 18.82 \text{ km}^{-1}$ , the maximum relative measurement error is 8.4%, and the stability within 12 hours is better than  $0.12 \text{ km}^{-1}$ . The design indicators meet the requirements for the indicators of tunnel visibility detection instruments in the “Specifications for Design of Highway Tunnels”. It laid the foundation for the future commercialization of tunnel visibility testing instruments.

**Citation:** Ye S, Bai Y F, Li Z W, *et al.* Design of visibility detection system for tunnel based on transmission method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(10): 180607

Supported by National Natural Science Foundation of China (11703061) and National Key R&D Program of China (2016YFB0500704)

\* E-mail: hlshi@aiofm.ac.cn