

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.010

聚合物光纤结冰传感器设计与路面冰层厚度检测方法

谢清忠¹,王玲²,葛敬勇³,石宁⁴,张久鹏²

(1.中交第四公路工程局有限公司,北京市 100022;2.长安大学公路学院,陕西 西安 710064;3.河南省城乡规划设计研究总院股份有限公司,河南 郑州 450000;4.广西交科集团有限公司,广西 南宁 530007)

摘要:为定点检测极端天气状况下沥青路面结冰状况与结冰厚度,该文首先通过比较聚合物光纤与石英光纤的各项性能指标,选用聚合物光纤作为光传输介质,选择同轴式传感器探头分布模式,并且设计微弱信号检测电路,最终完成聚合物光纤道路结冰传感器的设计;其次,验证了温度对结冰检测结果的影响可忽略不计,在模拟光照下进行不同光照强度下的结冰试验,得到结冰特性曲线;最后在自然光照下对结冰特性曲线进行验证试验,得到传感器输出电压-结冰厚度曲线函数关系式,可为道路养护和管理部门以及出行者提供实时的路面安全信息,降低交通事故的发生。

关键词:道路工程;聚合物光纤;光纤传感器;路面结冰检测

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

0 引言

在冰雪天气下,路面摩擦系数会严重降低,由此易引发交通事故。英国研究人员通过分析交通事故起因,发现道路结冰条件下交通事故的伤亡率将增加25%^[1]。瑞典国家道路交通研究所研究了不同路面条件下交通事故率,其中冬季路面结冰条件下事故发生率高达0.53^[2];美国研究者认为冰雪天气下每百万公里的事故发生数为5.9起,但同一区域在正常天气条件下每百万公里的交通事故发生数仅为0.4起,将近15倍的差距^[3]。综上所述,虽然在不同的国家和地区路面结冰导致交通事故的发生频率存在差异,但是由此引发的交通安全问题已经非常严峻。因此,通过研究路面结冰监测方法,检测结冰程度,及时反馈路面灾害信息,对预防交通事故的发生,降低财产损失,促进经济的发展和社会的稳定具有非常深远的意义。

路面结冰检测是利用各种结冰传感器在结冰前后产生的一系列物理变化,实时地判断冰的存在与否以及冰层厚度等信息。目前,结冰传感器主要

应用于飞机机翼结冰检测^[4]、机场路面结冰检测^[5]、河道结冰监测^[6]以及海冰监测^[7]等应用领域。光纤式结冰传感器由于其体积小、重量轻、抗电磁干扰、可远距离传输以及可识别冰型等特点,深受研究者青睐^[8-12]。光纤式结冰传感器是在20世纪70年代发展起来的,研究较早的国家有美国、日本、英国、德国等。2003年,英国研究人员首次成功研制出光纤式结冰传感器,其探测头直径为25 mm,最小检测冰厚为0.1 mm。2004年,Ikiades等^[13]在冰风洞中做了一些初步的试验,用光纤作为传感器研究冰生长时的光学特性,取得了一些研究成果。虽然有许多专利利用全反射技术检测冰的厚度,但忽略了结冰冰型的影响,这些技术只适用于明冰的检测;Ikiades等^[14-15]于2007年对光在冰层的扩散做了相关试验,通过分析不同类型冰中光分布的特点,识别出不同的冰型,获得了第一手资料。之后,通过测量光强以及背向散射、反射光的偏振特性,实时地识别冰型、测量冰厚;李薇等^[16]研究同轴式光纤结冰传感器在不同的结冰类型下均有较好的输出特性,冰厚的测量范围为0.2~3 mm。但从试验结果得知,其冰型研究不充分,检测范围较小;2013

收稿日期:2022-04-20

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(编号:2017M620434),中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:310821173501),中交四公局科技研发项目(编号:JYXM-JSHT-2019-30)

作者简介:谢清忠,男,大学本科,高级工程师.E-mail:xieqingzhongcccc@aliyun.com

年,邹建红^[17]分别对3种不同结冰传感器探头模式上的冰层内部光路进行分析及推导结冰特性曲线,并通过试验证明传感器的有效重复性,提高了传感器的检测范围,取得了很大的进步;2014年,但汉成等^[18]采用同轴式光纤传感器进行路面结冰条件探测,通过建立结冰时间与路面温度、降雨温度之间的关系,探究沥青路面的结冰机理;2015年,谭舒亚^[19]修改了传统光纤传感器的设计,实现了对厚冰的测量,高达10 mm;2016年,李薇等^[16]将忆阻器与光纤传感器相结合,有效地消除光路扰动,同时扩大结冰厚度测量范围,高达38 mm。但由于道路结冰影响因素过多,需模拟的真实道路状况十分复杂,光纤式结冰传感器在道路上的应用与研究较少。

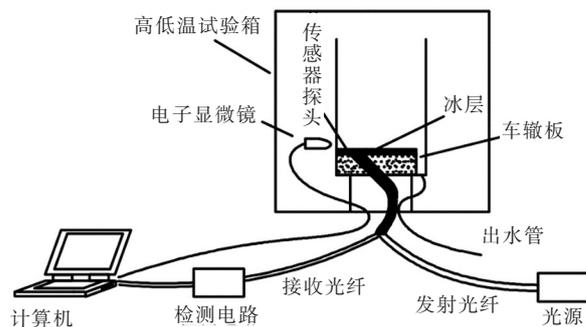
针对上述情况,本文旨在研发适用于道路上的光纤式结冰传感器,用于实时检测沥青道路表面结冰状况。通过控制沥青路面积水、降雨以及融雪3种条件下的结冰主要影响因素,进行室内试验,研究沥青路面结冰冰型;通过光纤性能指标对比分析、光纤传感器探头分布模式研究及检测电路优化设计,遴选出合适的光纤、探头分布模式及电路布置,最终完成光纤式结冰传感器的设计;考虑温度和光强因素对路面结冰厚度检测结果的影响,通过一系列相关试验确定电压-结冰冰厚特性曲线,并进行室外验证试验。本文研发的光纤式结冰传感器可为道路养护和管理部门以及出行者提供实时的路面安全信息,降低交通事故的发生。

1 室内模拟道路结冰过程

自然状态下,复杂的气候环境形成不同的结冰冰型,而结冰冰型的不同将直接影响结冰传感器的检测结果,由此会带来难以克服的系统误差。本文结合不同的结冰影响因素,通过室内试验模拟沥青路面积水、降雨以及融雪3种结冰条件下的结冰冰型,进而确定光纤式结冰检测传感器探头模式的设计。

理论研究表明:温度是影响冰型的关键因素。本文基于高低温试验箱(-40~150℃)将试验温度控制为-11℃,并用游标卡尺对路面积水和融雪积水厚度进行标定,使得结冰厚度为10 mm;在模拟降雨结冰时调节喷雾系统,采用喷2 s停1 min的循环法使

结冰充分,同样使结冰厚度为10 mm。试验中以切割的车辙板作为模拟沥青路面,分别搭建3种沥青路面结冰条件试验平台,如图1所示。



(a) 结冰检测试验平台布局



(b) 高低温试验箱

图1 沥青路面结冰条件试验平台

为更加清晰地进行结冰冰型比较,采用1280×960高分辨率数码显微镜,采用USB连接电脑,使用自带的APP进行俯视拍照,可得到不同冰型的内部结构,如图2所示。

通过对沥青路面3种结冰条件下的结冰冰型进行模拟试验发现:结冰温度和厚度相同时,沥青路面积水结冰和降雨结冰两种冰层均呈现乳白色、不透明的状态,并且冰层内部充满气泡和裂纹,融雪积水结冰的冰型无明显变化,只是透明度略低。所以,在本文的试验条件下,3种结冰条件下的结冰冰型无明显变化,属于同一种冰型。

2 光纤式结冰传感器的设计

2.1 光纤的选择

根据纤芯材料的不同,光纤主要分为石英光

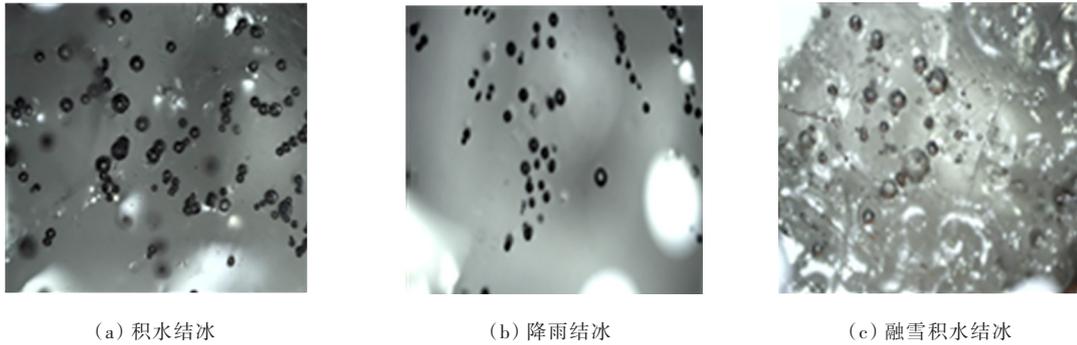


图2 相同温度和结冰厚度条件下3种结冰冰型

纤(SOF)和聚合物光纤(POF)两大类。目前,研究人员研制的纤式结冰传感器,大部分使用的是(SOF)和石英光纤(SOF)的性能指标^[21]如表1所示。

表1 POF和SOF性能指标

光纤类型	芯径/ μm	数值孔径	受光角/ (°)	典型波长/ nm	典型损耗/ (dB·km ⁻¹)	弹性模量/GPa	拉伸长度/ %	光源成本/ \$	连接器成本/ \$/ \$	连接时间/ min
POF	500~1 000	0.50	60	650	125	3.2	5~10	3~5	0.25~5.00	1~5
SOF	62.5	0.14	16	850/1 300	3.5/1	100.0	100	6~25	5~25	1~20

注:表中850/1 300,3.5/1,850和1 300为SOF的两种典型波长,单位为nm,3.5和1分别对应850和1 300波长的损耗。

通过表1的参数对比可以发现:POF的芯径、数值孔径以及受光角都大于SOF,能够接收更多的反射光,可以提高纤式结冰传感器的精确度、灵敏度以及测量范围。POF的弹性模量只有3.2 GPa,与沥青混凝土相当,埋在道路内部可以更好地与道路材料相容,有效避免应力集中现象;POF的柔韧性与SOF相比更好,在车载作用下,POF能更好地适应沥青路面的变形;而且POF的成本更低,光纤与纤之间的连接更简单方便,所以POF的性价比更优。本文选择江苏某公司生产的PMMA芯POF设计纤式结冰检测传感器,具体参数如表2所示。

表2 PMMA芯POF参数

项目	单位	要求
结构参数	芯径	1 960±120
	数值孔径	0.5±0.15
	受光角	(°) 60
光学性能	650 nm 衰减	dB/km ≤200
机械性能	弹性模量	GPa 2.0
	拉伸屈服强度	N 260.0

2.2 传感器探头分布模式设计

目前,纤传感器探头分布模式主要分为小圆

头式、同轴式、扇形式、楔形式、双斜端面式以及复合端面式等多种形式。由于室内试验模拟的沥青路面在积水、降雨与融雪3种条件下的结冰冰型属于同一种冰型,且道路结冰预警需要提供实时的信息,结合同轴式传感器探头分布模式灵敏度高的特点,本文选择同轴式传感器探头分布模式进行结冰检测传感器设计。

同轴式纤传感器探头分布模式如图3所示。区域1是由一根根纤组成的发射纤束,区域2和3代表接收纤束。光源发射的光通过发射纤束传输至传感器与路面齐平的端面,若路面无结冰,发射光直接射入空气,接收纤束不能接收到任何信号;若路面出现结冰,入射光在冰层内部会发生一系列反射、散射、吸收以及透射作用。并且冰层较薄时,反射光较强,散射光较弱;随着冰层厚度的增加,总光强达到一个峰值;冰层厚度继续增加,反射光减弱,散射光增强,整体光强减小。

2.3 弱信号检测

根据朗伯-比耳定律,光经过冰层时,会发生反射、折射、透射以及散射一系列物理现象,接收纤接收到的余下的反射光以及散射光强度比较微弱^[22]。因此为了将有用光信号从强噪声中提取出

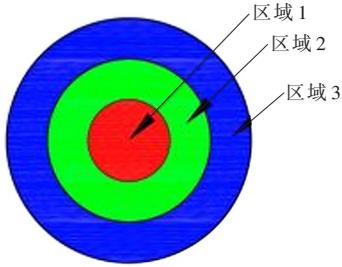


图3 同轴式光纤传感器探头分布模式

来,结冰厚度检测只能采用弱信号检测技术。

弱信号检测常用的方法有:窄带滤波法、同步累积分法、相关检测法以及锁定放大法^[23]。在锁定放大检测法中,锁定放大器由同步积分器和相关器级联构成。同步积分器输入交流,输出同频、经滤波的方波信号,并传输至相关器,然后输出直流信号。锁定放大法能大幅度抑制无用噪声,改善信噪比,具有很高的检测灵敏度,因此本文的弱信号检测方法选用锁定检测法。弱信号检测电路结构设计如图4所示。

为了避开低频干扰、直流漂移以及可见光的干扰,方波信号发生器发射1 kHz的方波信号,通过驱动电路,驱动红外发光二极管,发出红光;经过冰层的调制,光电检测器将检测到的微弱光信号转换成微弱的电流;前置放大器能够将微弱的电流放大,

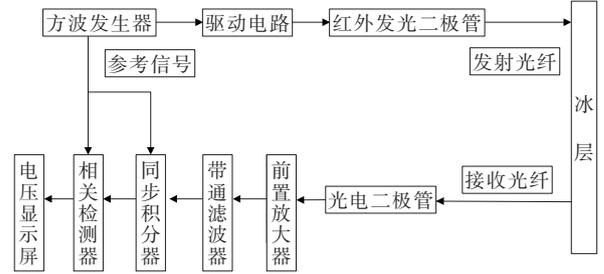


图4 弱信号检测电路结构设计示意图

并转换成电压,一定程度上能提高信噪比;为了防止锁定放大器饱和,需用到带通滤波器;背景光和外界噪声等误差信号通常是缓变的随机信号或者是近似直流信号,可以通过调制光源来消除干扰^[24]。而实际有用的信号为方波信号发生器发射的1 kHz的方波信号,误差信号是近似直流或随机的。在后续电路中连接锁定放大器,此时的参考频率与光源调制频率相同,通过这种方法即可滤去上述误差信号,将有用的信号解调出来。同步积分器和相关检测器构成锁定放大器,能大幅度抑制无用噪声,改善信噪比,具有很高的检测灵敏度,是检测电路的关键所在;最后将转换成的电压显示出来,从而绘制出电压和冰厚特性曲线。本文所绘系统电路图如图5所示。

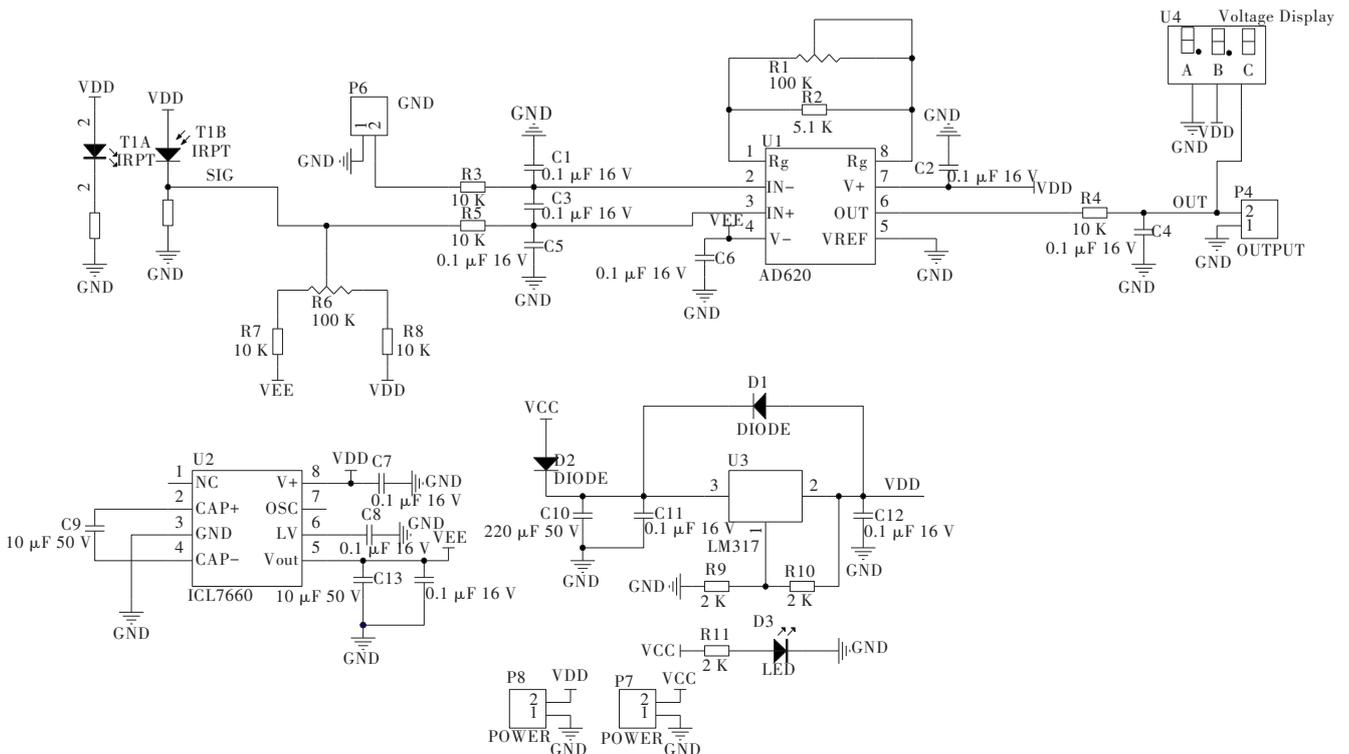


图5 系统电路图

由于设计光纤式结冰检测传感器时采用PMMA芯POF作为传输介质,PMMA芯POF在光波长为650 nm时损耗最低,所以传感器光源选用红外发光二极管,其发射的红光波长为650 nm,检测设备硬件实物如图6所示。

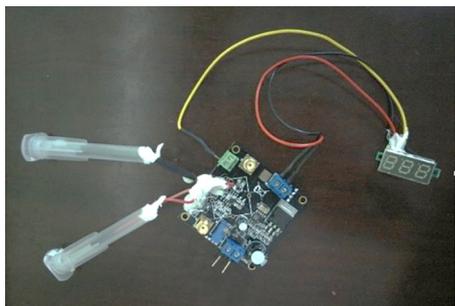


图6 硬件电路实物

设计的聚合物光纤传感器如图7所示,且传感器在道路之中的埋设采用微管法,首先将传感器插入金属管内部,然后固定金属管,待沥青路面碾压成型后,抽出金属管,并用环氧树脂填充孔隙,防止水分渗入。传感器埋设的位置应当避免车辆碾压,推荐将其埋设在路缘带内部。



图7 聚合物光纤传感器

3 沥青路面结冰试验结果与讨论

3.1 温度对沥青路面结冰厚度检测结果的影响分析

PMMA聚合物光纤属于热塑性材料,其热膨胀系数为 $8.3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ^[25],随着温度的降低,光纤发生收缩,会发生横向、竖向变形,导致光纤内部的光通量减小,因此无论是发射光纤发射的光,还是接收光纤接收到的光信号都将减小,从而影响检测精度,甚至导致检测结果产生误差。

依据全反射原理,光被束缚在光纤中传输,而不

会发生外泄。PMMA聚合物光纤的热光系数为 $-8.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,表明其折射率会随着温度的改变而改变^[26]。因此在温度发生变化时,光纤中传输的光因不满足全反射条件而发生泄漏现象,使光通量发生改变,影响检测结果。根据热光效应,温度的改变会引起聚合物光纤折射率的变化,其计算如下:

$$n_1(T) = n_1(T_0) + k_1(T - T_0) \quad (1)$$

$$n_2(T) = n_2(T_0) + k_2(T - T_0) \quad (2)$$

式中: $T_0=20^{\circ}\text{C}$; n_1 为聚合物光纤纤芯的折射率; n_2 为聚合物光纤包层的折射率; k_1 、 k_2 为纤芯与包层的热光系数。

由上述理论分析得知:随着温度的降低,光纤式结冰检测传感器的检测结果将偏小。因此本文通过控制结冰厚度、升高温度,分析温度对结冰检测结果的影响,结果如图8所示。

由图8可知:结冰厚度相同时,随着温度的降低,各曲线呈现稍微下降的趋势,但这种变化并不明显。为更加直观呈现微小变化,本文将结冰厚度为0、1 mm、3 mm、7 mm、14 mm、21 mm和28 mm时温度对输出结果的累积影响绘成图9。

由图9可知:随着温度的升高,多组结冰厚度下的累积检测电压基本保持不变,因此试验结果表明温度对光纤式结冰传感器的检测结果影响较小,可忽略不计。

3.2 模拟光照条件下光强对沥青路面结冰厚度检测结果的影响分析

由于PMMA芯POF在650 nm波长时损耗最低,所以发光元件选用的是红光发光二极管,其发出的是650 nm的红光。因为可见光的范围为390~780 nm,所以传感器在实际工作过程中必然受到外界650 nm可见光的干扰,影响检测结果,因此,后续结冰厚度检测需要在无光与可见光条件下进行。

一天之中,不同时刻的太阳光强度不相同,本文选择使用可见光分光光度计,在冬季(11月、12月、1月)每月的上旬、中旬以及下旬中分别选择具有代表性的两天,检测太阳光中可见光的强度。冬季晴天和阴天太阳光中可见光的平均强度检测结果如表3所示。

由表3可以得出:冬季不同时段太阳光中可见光光强为45~453 W/m^2 。若在夜间,即无光条件下,太阳光光强为0。所以确定外界可见光的影响范围为

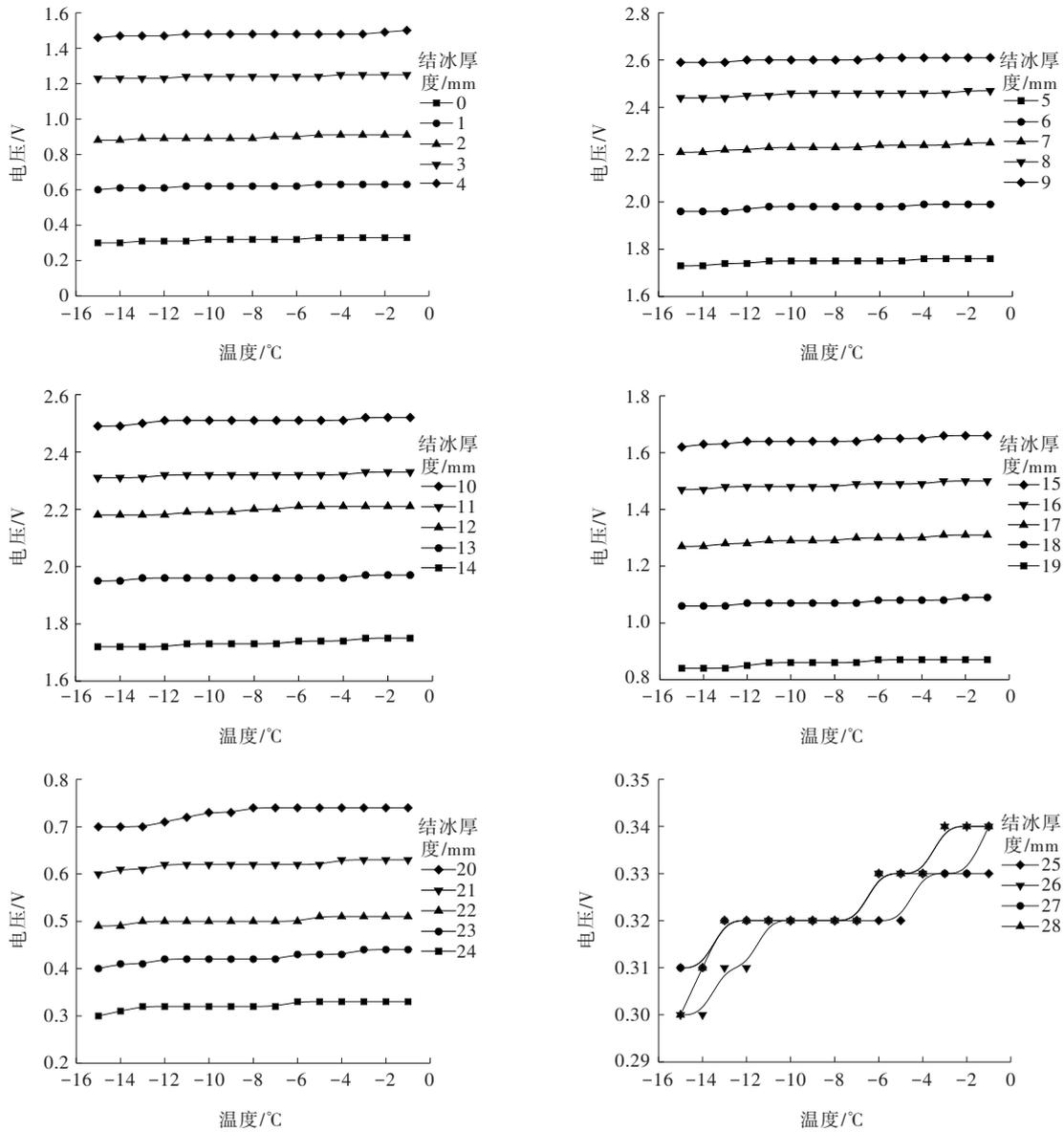


图8 相同结冰厚度、不同温度下传感器输出电压

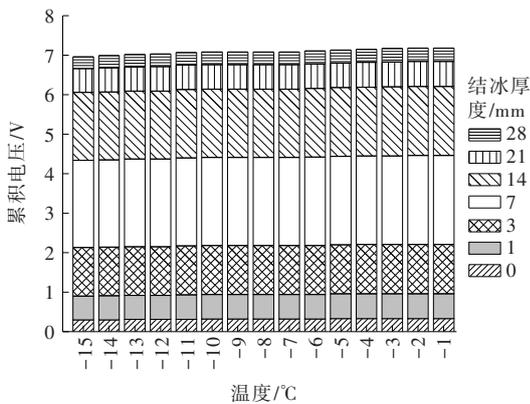


图9 温度对结冰检测结果的影响

0~453 W/m²。通过保持冰厚不变,增大光强,当增幅为0~240 W/m²时,电压增量的极限值为0.15 V,

表3 冬季不同时段太阳光中可见光平均强度

时间段	平均光强/(W·m ⁻²)	
	晴天	阴天
08:00—10:00	252	57
10:00—12:00	410	86
12:00—14:00	453	125
14:00—16:00	362	78
16:00—17:00	213	45

所以本文把结冰检测光强分为0、0~240 W/m²以及240~480 W/m²共3种试验条件。

考虑到路表污染物对检测结果的影响,本文在试验中向水中添加适量的泥砂,配制浓度为15%~30%的泥水混合液来模拟沥青道路结冰真实状

况。采用滑动变阻器控制灯泡的亮度,模拟可见光光强的变化。当可见光的光强分别位于 $0\sim 240\text{ W/m}^2$ 、 $240\sim 480\text{ W/m}^2$ 时,冰厚的检测结果变化均在 1 mm 之内,所以可见光对冰厚检测结果的影响,可分为上述两个范围进行试验。最终3种试验条件下的结冰厚度与电压关系曲线如图10所示。

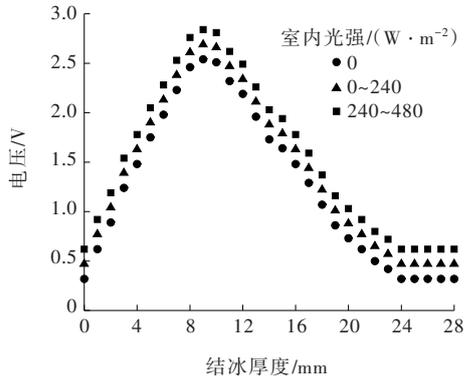


图10 3种可见光条件下沥青路面结冰特性曲线

由图10可知:3种试验条件下的初始电压均不为0,因为在传感器探测端头,发射光纤和接收光纤是用塑料包层包裹起来的裸纤,必然会发生光耦合现象,所以即使沥青路面没有积水,接收光纤也会接收到光信号。在一定范围内,电压随结冰厚度的增加而增加,这是因为冰层越厚,冰层内部的折射光通道越宽,返回到探测器的光强度就越大;结冰厚度达到 9 mm 时,电压达到峰值,继续增加结冰厚度,接收到的总光强减弱,结冰特性曲线呈先下降最后趋于平直的状态,这是因为冰层厚度继续增加,冰层内部的吸收、散射等现象越明显,返回到探测器的光强度越小。另外,曲线前坡的斜率大于后坡的斜率;通过比较相同结冰厚度下电压的大小,发现 $0\sim 240\text{ W/m}^2$ 可见光条件下比无光条件下大 0.15 V ,即与无光条件下的结冰特性曲线相比, $0\sim 240\text{ W/m}^2$ 可见光条件下的结冰特性曲线沿Y轴向上移动 0.15 个单位; $240\sim 480\text{ W/m}^2$ 可见光条件下比 $0\sim 240\text{ W/m}^2$ 可见光条件下大 0.15 V ,即与 $0\sim 240\text{ W/m}^2$ 可见光条件下的结冰特性曲线相比, $240\sim 480\text{ W/m}^2$ 可见光条件下的结冰特性曲线沿Y轴向上移动 0.15 个单位。通过非线性拟合,得到无光条件下结冰特性曲线方程为:

$$y=0.32+0.48x-0.18x^2+0.06x^3-0.01x^4 \quad (3)$$

则 $0\sim 240\text{ W/m}^2$ 与 $240\sim 480\text{ W/m}^2$ 可见光条件下的结冰特性曲线方程如下:

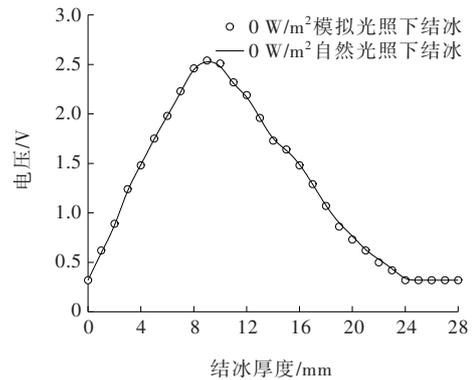
$$y=0.47+0.48x-0.18x^2+0.06x^3-0.01x^4 \quad (4)$$

$$y=0.62+0.48x-0.18x^2+0.06x^3-0.01x^4 \quad (5)$$

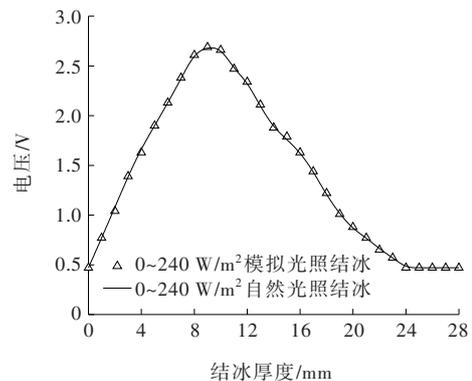
式中: y 和 x 分别对应传感器输出电压和冰厚。

3.3 模拟光照和自然光照下沥青路面结冰对比试验

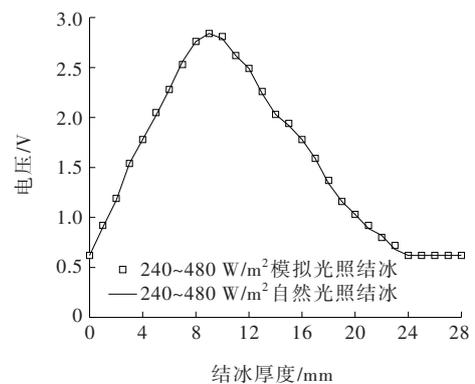
由于本文设计的检测设备需要在真实道路环境下进行检测,为了验证模拟光照条件下的电压-冰厚特性曲线方程,需要进行自然光照条件下的验证试验,即分别在模拟光照和自然光照下进行光强为 0 、 $0\sim 240\text{ W/m}^2$ 和 $240\sim 480\text{ W/m}^2$ 的结冰特性对比试验,结果如图11所示。



(a) 无光照条件



(b) $0\sim 240\text{ W/m}^2$ 光强条件



(c) $240\sim 480\text{ W/m}^2$ 光强条件

图11 不同光强条件下模拟光照与自然光照结冰特性曲线对比

由图 11 可知:从具体数值看出,在某些点上,实际的电压值有所不同,不过相差较小。图中显示出不同光强条件下的两条曲线均具有较好的一致性。

通过以上 3 种光强条件下模拟光照与自然光照的对比试验,发现在正常光照范围内传感器室内外对同一冰厚的检测结果具有较高的一致性,表明本文在试验室内通过模拟试验设计的聚合物光纤道路结冰传感器能够在室外自然环境中进行正常检测,能够满足实际工程检测需要。

4 结 论

(1) 从芯径、数值孔径、受光角、弹性模量、拉伸长度以及连接器成本等多项指标,全面分析比较聚合物光纤(POF)与石英光纤(GOF)。最终选择检测精度高、灵敏度高且检测范围大的 PMMA 芯 POF 为传输介质;然后选择同轴式探头分布模式封装输入和输出光纤,并设计弱信号检测电路,完成光纤式结冰检测传感器的整体设计。

(2) 低温会引起塑料光纤体积收缩,本文研究低温对结冰厚度检测结果的影响,发现在 $-15\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,温度变化对检测结果的影响较小,可忽略不计。

(3) 自然界可见光会对沥青路面结冰厚度检测结果造成影响,本文使用可见光分光光度计测量冬季外界可见光,并确定其范围。通过在试验室进行模拟光照条件下的相关试验,得到光强为 $0, 0\sim 240\text{ W/m}^2$ 以及 $240\sim 480\text{ W/m}^2$ 时的结冰特性曲线。依据曲线得知当结冰厚度为 0 时,输出电压均不为 0;当结冰厚度增加时,输出电压先增加后减小最后趋于平直。

(4) 通过自然光照条件下验证性试验,发现在正常光照范围内传感器室内外对同一冰厚的检测结果具有较高的一致性,表明本文在试验室内通过模拟试验设计的聚合物光纤道路结冰传感器能够在室外自然环境中进行正常检测,满足实际工程检测需要,最终确定不同光强下的传感器输出电压-结冰厚度特性曲线方程。

参考文献:

[1] 万渝嘉.冰雪天气下高速公路交通事故分析与预防对策

研究[D].南京:东南大学,2015.

- [2] 燕南,谭景文,戴琪.冰雪天气下道路交通事故成因及安全保通对策[J].华东公路,2010(3):21-23.
- [3] MCBRIDE J. Economic impact of highway snow and ice control[R],1976.
- [4] MEINDL T, MONIACI W, PASERO E, et al. An embedded hardware-software system to detect and foresee road ice formation[C]//The 2006 IEEE International Joint Conference on Neural Network Proceedings. Vancouver, BC, Canada, 2006:4884-4891.
- [5] 尹胜生.飞机机场地面结冰探测系统研究与设计[D].武汉:华中科技大学,2012
- [6] 崔丽琴.基于 CAV444 的电容式冰厚传感器及其检测系统的研究[D].太原:太原理工大学,2010.
- [7] WANG M H, SHI W. Detection of ice and mixed ice - water pixels for MODIS ocean color data processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47 (8):2510-2518.
- [8] WANG H P, DAI J G. Strain transfer analysis of fiber bragg grating sensor assembled composite structures subjected to thermal loading[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 162: 303-313.
- [9] XIANG P, WANG H P. Optical fibre-based sensors for distributed strain monitoring of asphalt pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(9): 842-850.
- [10] CHEN T, LI Z H, SONG X C, et al. Crack detection and monitoring in viscoelastic solids using polymer optical fiber sensors[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(3): 035005.
- [11] WANG H P, JIANG L Z, XIANG P. Improving the durability of the optical fiber sensor based on strain transfer analysis[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 42:97-104.
- [12] WANG H P, JIANG L Z, XIANG P. Priority design parameters of industrialized optical fiber sensors in civil engineering[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 100: 119-128.
- [13] IKIADES A A, ARMSTRONG D J, HARE G G, et al. Fiber optic sensor technology for air conformal ice detection[C]//Industrial and Highway Sensors Technology, RI, SPIE, 2004:357-368.
- [14] IKIADES A, HOWARD G, ARMSTRONG D J, et al. Measurement of optical diffusion properties of ice for direct detection ice accretion sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 140(1):24-31.
- [15] IKIADES A A, ARMSTRONG D J, HOWARD G. Optical

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.011

考虑车辆悬架的加速度与国际平整度指数的理论关系研究

吕文江¹,张震^{2*}

(1.陕西交通控股集团有限公司,陕西 西安 710075; 2.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:国际平整度指数(I_{IRI})已成为表征道路路面平整度的最广泛使用指标之一,然而目前在利用车辆竖向加速度数据计算 I_{IRI} 等方面的研究仍然存在一些问题,如:未充分考虑车辆悬架参数对测试结果的影响;所建立车辆加速度与 I_{IRI} 之间的回归分析方程适用性低。该文研究了一种考虑试验车辆悬架参数的路面平整度指标 I_{IRI} 的确定方法,通过实际试验路测试发现,计算结果与道路多功能检测车的测试结果间相对误差为10%左右,验证了研究方法的可靠性。

关键词:道路工程;路面平整度;国际平整度指数(I_{IRI});车辆悬架参数

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

0 引言

路面平整度被定义为道路表面相较于理想平面的竖向偏差,是影响路面行驶质量的关键因素,也是道路交工验收和运营养护控制的关键性指标^[1-2]。另外,路面平整度作为车辆系统的激励输入,在车辆行

驶过程中引起振动,影响车辆的平顺性、操纵稳定性、燃油经济性、运输效率以及造成车辆部件的磨损和疲劳损伤。因此,准确和精确的测量与表征是道路平整度必不可少的^[3-4]。

一般来说,表征路面平整度的指标分为两类:断面轮廓类指标和振动响应类指标。断面轮廓类指标如功率密度谱(PSD)^[5]、道路高程均方根(E_{RMSE})^[6]、

- diffusion and polarization characteristics of ice accreting in dynamic conditions using a backscattering fibre optic technique[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 140(1):43-50.
- [16] 李薇,侯睿,程立.基于忆阻桥效应的光纤式双光路结冰探测方法[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(2):206-210.
- [17] 邹建红.斜端面光纤式飞机结冰冰型检测技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [18] 但汉成,刘扬,凌桂香,等.光纤式结冰传感器探测沥青路面结冰过程[J]. *公路交通科技*, 2014, 31(4):7-15
- [19] 谭舒亚.路面结冰检测技术的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [20] TODOROKI S I. Silica glass optical fiber and fiber fuse[M]. *Fiber Fuse*. Tokyo:Springer, 2014: 1-16.
- [21] 贾涛.基于多模光纤的ROF技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [22] 王建鸣.朗伯-比耳定律的物理意义及其计算方法的探讨[J]. *高等函授学报(自然科学版)*, 2000, 13(3):32-33.
- [23] 夏均忠,刘远宏,冷永刚,等.微弱信号检测方法的现状分析[J]. *噪声与振动控制*, 2011, 31(3):156-161.
- [24] 曾令峰.一种新型低成本稳定调制光源的设计与实现[J]. *光电子技术*, 2015, 35(1):34-38.
- [25] 常新龙,李明,王渭平,等.埋入式聚合物光纤传感器应变传递影响参数分析[J]. *激光与红外*, 2010, 40(5):515-519.
- [26] 何伟,徐先东,姜德生.聚合物封装的高灵敏度光纤光栅温度传感器及其低温特性[J]. *光学学报*, 2004, 24(10):1316-1319.

收稿日期:2023-07-13(修改稿)

基金项目:陕西省交通科技项目(编号:2018-9,2023-67,2023-67)

作者简介:吕文江,男,博士,高级工程师.E-mail:1020927009@qq.com

*通信作者:张震,男,博士研究生.E-mail:zhangzh_nwchd@163.com