

文章编号: 1674-2869(2016)03-0273-04

# 用于道路安全预警的结冰传感器的应用研究

尹麒焕, 李 杰, 胡小弟\*

武汉工程大学交通研究中心, 湖北 武汉 430074

**摘 要:** 为了监测道路表面的结冰状况并开发有效的道路结冰预警系统, 结冰传感器起着至关重要的作用, 而且它必须对结冰厚度以及结冰速率非常敏感. 然而, 目前国内外已有的结冰传感器还无法达到这种要求. 研发了用于道路安全预警的结冰传感器, 使得道路结冰安全预警成为可能. 通过室内实验先对该道路结冰传感器进行了标定, 得出了结冰厚度与结冰频率的对应关系, 使其能准确的测定路面结冰厚度的具体数值; 然后通过室内实验模拟路面结冰的过程, 分别在不同环境温度条件下监测结冰厚度和结冰速率, 得出了结冰厚度与时间的对应关系曲线, 验证了其可靠性. 实验结果表明: 该结冰传感器灵敏度较高, 其测量精度达到 0.1 mm; 能探测到结冰厚度的具体数值以及结冰速率的变化趋势, 而且实验结果能够在上位机上直观地显示出来. 因此, 研发的结冰传感器可以应用于道路并监测结冰厚度和结冰速率, 从而为道路结冰安全预警系统的建立打下基础.

**关键词:** 交通安全; 道路结冰; 结冰传感器; 结冰厚度监测

**中图分类号:** U421.4      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2016.03.014

## Application Research on Ice Sensor for Road Safety Warning

YIN Qihuan, LI Jie, HU Xiaodi\*

Transportation Research Center of Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The ice sensor plays the most important role in monitoring the icing condition of pavement surface and developing an effective warning system of icy roads, and it must be sensitive to the ice thickness and the variation of ice thickness. However, the existing ice sensor can not meet this requirement. In this study, an innovative ice sensor was developed through a special technology and it makes the warning system of icy roads possible. This sensor was calibrated first by the laboratory test and the corresponding relationship between the icing thickness and the icing frequency was obtained so that the ice thickness can be measured accurately. And then, the icing process of the road surface was simulated in the laboratory, and the relationship curve of the ice thickness with the icing time was drawn through measuring the icing thicknesses and the icing rates at different temperatures so that the reliability was verified. The results show that the ice sensor has a high sensitivity to the variation of ice thickness and the precision is better than 0.1 mm; the data of ice thickness and icing rate could be collected and presented on the upper computer directly. So this ice sensor should be available for the warning system of icy roads.

**Keywords:** traffic safety; road icing; ice sensor; ice thickness monitor

## 1 引 言

随着现代化经济的飞速发展,我国汽车保有

量正在持续增长.据统计,我国民用汽车保有量呈现逐年增加的趋势,车辆的急速增加意味着道路交通安全问题也将越来越突出.除了人为因素以

收稿日期: 2016-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278389);湖北省交通厅科技项目(2013-731-1-3);武汉市科技计划项目(2014010202010098)

作者简介: 尹麒焕,硕士研究生. E-mail: 1121525549@qq.com

\*通讯作者: 胡小弟,博士,教授. E-mail: 1246493105@qq.com

外,影响车辆行驶安全的因素还有很多,比如车辆本身的状况、道路服务水平,以及气候环境等等.其中,气候环境,包括雨水、雾、结冰、大风等,对行车安全的影响难以掌控,尤其是当道路结冰时,由于机动车驾驶员难以直接识别路面结冰状况,不能做出正确的驾驶反应,往往更容易引起突发事件,引发重大安全事故.因此,研究和开发一种用于道路安全预警的结冰传感器来监测路面结冰,为及时进行路面结冰预警提供可靠的依据,可以有效地防止安全事故的发生.

当路面温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 时,路面的积雪、积水甚至潮湿的空气都会在路表凝结成冰.当路面结冰厚度达到 $2\text{ mm}\sim 3\text{ mm}$ 时,路面抗滑能力大大下降,严重影响道路行车安全<sup>[1]</sup>.在道路构造物的局部路段,结冰现象更容易出现.以桥梁为例,桥梁路段一般都没有下承物,表面热量散失得较快,而相较于道路的其他部位,跨江跨海的大桥周围的空气也较为潮湿,因此在桥梁表面更易结冰.

进行道路结冰安全预警迫在眉睫,而路面结冰传感器的可靠性直接关系到道路安全预警的效果,因此,对于道路安全预警的结冰传感器的应用研究十分必要.目前,国内外已研制出的结冰传感器有光纤式<sup>[2]</sup>、红外式<sup>[3]</sup>、振动式<sup>[4]</sup>、电容式<sup>[5]</sup>、压电平膜式<sup>[6]</sup>等不同种类,光纤式结冰传感器和红外式结冰传感器抗干扰能力较差、振动式结冰传感器探头较脆弱易损坏、电容式结冰传感器深度结冰时难以监测、压电平膜式结冰传感器需要进行温度补偿,这些传感器均存在一定程度的缺陷,难以适应道路上的恶劣环境,因此无法直接应用于道路结冰预警,但其在航空、电力等领域形成了较为成熟的结冰检测和预警技术,可为道路工程所借鉴<sup>[7]</sup>.

在相关技术部门的支持下,本文对一种可应用于道路安全预警的结冰传感器进行了应用研究.该结冰传感器具有探头体积小、结构简单、抗干扰能力强、信号处理迅速和最小检出精度高等一系列优点,是目前比较理想的一种能应用于道路领域的结冰传感器.本文对该结冰传感器的具体性能进行了相关测试,通过室内实验验证了其灵敏度与可靠性.

## 2 道路结冰传感器的基本原理

道路结冰传感器是道路结冰安全预警的核心部分,也直接决定着预警工作能否正常进行,其工作原理示意图如图1所示.

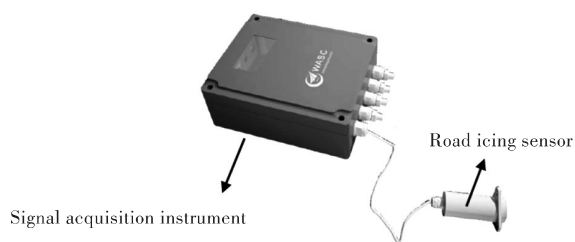


图1 道路结冰传感器示意图

Fig.1 Schematic diagram of road icing sensors

道路结冰传感器的基本工作原理:道路结冰传感器是一种机械式传感器,它采用电磁谐振原理,由电磁振动线圈和解算器的交流放大器组成一个闭环振荡系统.当该闭环振荡系统达到稳定工作时,会产生一个固定频率的输出信号.在结冰条件下,该频率会随着冰层厚度的增加而上升,此频率信号被后续电路放大、采样,以及进行数字信号处理及标度变换后,得到结冰厚度和速率,数据可通过RS485或RS232的数字量形式输出.结合此原理,将道路结冰传感器埋设在道路上,能够实时采集路面结冰的具体厚度和结冰速率,反馈给行驶路人,为道路交通安全提供保障.

相比其他类型的结冰传感器,道路结冰传感器抗干扰能力较强;结冰厚度探测范围较宽,可达到 $0.1\text{ mm}\sim 12.7\text{ mm}$ ;结冰厚度测量的精度较高,精度可达 $(0.3\pm 0.1)\text{ mm}$ ;探头部分采用全金属制作,温度工作范围较宽,最低可达到 $-40^{\circ}\text{C}$ ,最高可达到 $70^{\circ}\text{C}$ ,不易损坏;传感器内部电路板均经过三防处理,能够很好地适应道路上复杂多变的恶劣环境,可以用于道路上进行结冰监测.监测数据可以通过无线信号发出,能够在室内实时采集,为安全预警提供了便利的条件.

## 3 实验部分

室内实验主要包括冰厚标定实验和路面结冰模拟实验.冰厚标定实验的目的是标定道路结冰传感器;路面结冰模拟实验的目的是验证其灵敏度和可靠性,为路面结冰预警系统的现场实时预警提供保障.

### 3.1 传感器的安装与固定

根据实验室的相关条件和现有仪器设备(主要是高低温试验箱),充分考虑实验的可操作性,笔者自主开发了一套固定结冰传感器的夹具,将结冰传感器竖向固定起来,便于实验.将固定好的传感器放置于高低温箱中,采用人工喷水的方式,使其结冰,然后在上位机上显示结冰的厚度及其

速率. 组装后的道路结冰传感器实物图如图2所示.

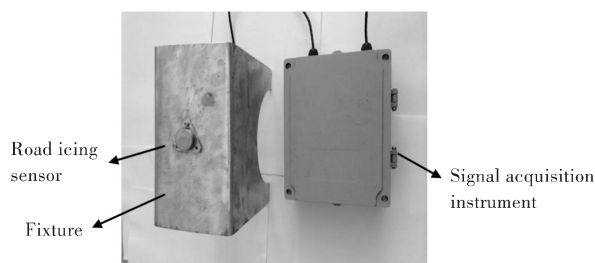


图2 道路结冰传感器实物图

Fig. 2 Physical figure of road icing sensor

### 3.2 冰厚标定实验

此实验的目的是为了得出结冰厚度和频率的对应关系,运用此对应关系进行编程,数据采集界面能够直接显示路面结冰厚度. 标定过程如下:将高低温箱的温度设置为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,待温箱温度恒定后,对着结冰传感器喷水,使其结冰,采集传感器固定频率的输出信号,同时用游标卡尺测出结冰厚度并做好记录;继续向结冰传感器喷水,重复以上步骤,取得一系列结冰厚度和频率. 挑选一些较有代表性的数据进行回归分析,标定得出结冰厚度和频率的对应关系.

### 3.3 室内结冰模拟实验

1)路面结冰影响因素. 温度是影响路面结冰与否的最主要因素,大气温度不仅影响雨水的温度,还会影响路表的温度. 雨水在下落后的主要接触对象是路面,热量交换主要发生在雨水和路面之间<sup>[8]</sup>,因此温度是实验要考虑的主要变量.

2)实验方案设计. 考虑到室内模拟实验的可操作性,将温度作为室内模拟实验的单一变量,有助于得出温度与结冰厚度的对应关系,为路面结冰安全预警提供可靠依据. 当环境温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,自然界的水就会凝结成冰. 在实验中,设计的环境变量为温度: $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降雨用喷水的方式来模拟,水温为 $0\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,实验在高低温箱中进行.

实验时,控制高低温箱的环境温度分别为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,当温度稳定后采用人工喷洒的方式将 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水喷洒到结冰传感器顶面,待传感器表面结冰后通过上位机显示界面观察结冰厚度,直到结冰厚度不再发生变化时停止实验,上位机自动记录结冰完成时间,实验数据通过 excel 文件保存以便随时查阅.

路面结冰模拟的结冰传感器表面结冰状态如

图3所示.



图3 结冰传感器表面结冰状态

Fig. 3 Frozen state of icing sensor

## 4 结果与分析

### 4.1 冰厚标定实验

基于结冰传感器的基本原理可知,结冰的厚度与结冰频率之间存在一定的对应关系,因此在实验之前需要标定结冰的厚度与结冰频率之间的关系,以达到通过结冰频率直接得出结冰厚度的目的,从而简化后续实验的操作过程. 结冰传感器的冰厚标定实验数据如表1所示.

表1中冰厚标定数据符合水凝结成冰的一般特性,说明通过表中的标定数据编程后可以根据结冰频率得出结冰厚度的具体数值,后面所测出的结冰厚度均是根据此标定数据计算得出.

表1 冰厚标定实验数据

Tab. 1 Experimental data of ice thickness calibration

number	ice thickness / mm	ice frequency / Hz
1	0	5 991
2	0.5	6 091
3	1.0	6 332
4	1.5	6 768
5	2.0	6 843
6	2.5	7 367
7	3.0	7 420
8	3.5	7 480
9	4.0	7 522
10	4.5	7 560
11	5.0	7 569
12	5.5	7 572
13	6.0	7 581
14	6.5	7 588
15	7.0	7 592

## 4.2 路面结冰模拟实验

根据实验方案和实验方法在高低温试验箱中进行路面结冰模拟实验,待实验完成后处理 excel 里面保存好的实验数据. 然后把这些数据进行拟合获得不同温度下结冰厚度随时间变化的关系曲线如图4所示.

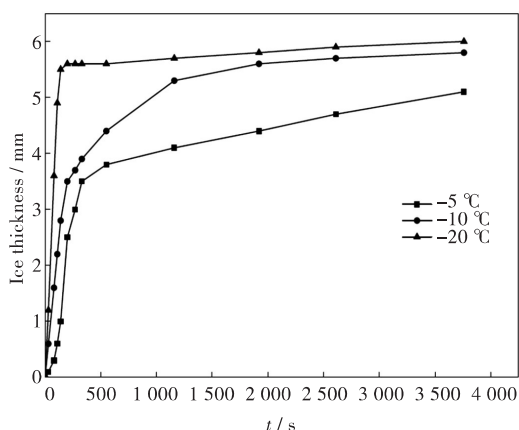


图4 结冰厚度与时间的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between ice thickness and time

从图4可以看出,对于此结冰传感器而言,结冰厚度曲线普遍存在着一个明显的“拐点”,过了“拐点”之后,结冰厚度随着时间的变化较为缓慢(即结冰速率逐渐减小);温度不同,“拐点”出现的位置不同,温度越低,“拐点”处结冰厚度越大,达到“拐点”需要的时间越短;在“拐点”之前,结冰厚度与时间成正比关系,温度越低,结冰速率越大;在“拐点”过了之后,结冰厚度与时间依然成正比关系,但结冰速率普遍较小,结冰厚度虽略有增长,然而增长得十分缓慢. 在每一个特定的温度下,传感器探测到的最大结冰厚度是一定的,因而当传感器表面结的冰达到一定厚度时,传感器探测到的结冰速率显著下降,结冰速率的显著下降意味着曲线斜率的减小,斜率的减小直接导致了“拐点”的出现.“拐点”的意义在于揭示了水凝结成冰的内在规律,结冰速度先快后慢,因而在结冰的初期进行预警所起到的预警效果是最理想的.

## 5 结 语

此结冰厚度随时间变化的关系曲线符合结冰传感器的一般特性,因此可以认为,该传感器的测量是可靠的,能够满足道路结冰预警系统关于监测结冰厚度的相关要求. 因此,可以将其应用于路面结冰安全预警系统中监测结冰厚度和结冰速率.

目前,结冰传感器的种类较多,但应用于道路

领域的极少,且都存在一定程度的缺陷,加之在预警方面的研究有限,使其在道路领域发挥的功效甚微. 道路结冰传感器有着其独特的优点能够更好地适应道路领域,在以后的研究中把它应用于道路结冰探测中并与结冰预警有效的结合起来,将产生显著的社会效益,具有广泛的应用前景.

## 参考文献:

- [1] 熊竹,秦杰君. 基于模拟实验的路面结冰预测研究[J]. 公路工程,2014,39(1):216-220.  
XIONG Z, QIN J J. A study of road surface ice prediction based on simulate experiment [J]. Highway engineering, 2014, 39(1):216-220.
- [2] 李薇,叶林,张杰,等. 光纤式结冰传感器的试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(8):16-18.  
LI W, YE L, ZHANG J, et al. Experimental study on the fiber-optic sensor for direct ice detection [J]. Journal of Huazhong university of science & technology (Natural science edition), 2009, 37(8):16-18.
- [3] HOOVER G A. Aircraft ice detectors and related technologies for on ground and in flight applications [R]. Atlantic city: FAA technical center, 1993:4-20.
- [4] ROY S, IZAD A, DEANNA R G, et al. Smart ice detection systems based on resonant piezoelectric transducers [J]. Sensors and actuators a: physical, 1998, 69(3):243-250.
- [5] PRUZAN D A, KHATKHATE A A. Capacitive ice detector development [R]. Washington: transportation research board, 1993:23-27.
- [6] 张杰,王敏,张洪,等. 谐振平膜型结冰传感器的智能温度补偿[J]. 计量与测试技术,2005,32(8):4-5.  
ZHANG J, WANG M, ZHANG H, et al. Intelligent temperature compensation of resonant diaphragm [J]. Metrology & measurement technique, 2005, 32(8):4-5.
- [7] 欧彦,蒲翔. 路面结冰监测技术研究进展[J]. 公路,2013(4):191-195.  
OU Y, PU X. Review on icing detection techniques of pavement [J]. Highway, 2013(4):191-195.
- [8] 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.  
DAN H C, LIU Y, LING G X, et al. Probing freezing process of ice on asphalt pavement with fiber-optic ice sensor [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2014, 31(4):7-15.

本文编辑:龚晓宁