

# Study on Early Warning Model of Pavement Ice and Snow in Southern Jiangsu

Yang Yang, Si Chen

Jiangsu Zhong Lu Engineering Technology Research Institute Co., Ltd, Nanjing, 210000, China

**Abstract:** This electronic document defines the standard format of the Chinese academic conference proceedings published by the HongKong New Century Cultural Publishing House (HKNCCP). The elements such as the paper title, author, affiliation, abstract, section title, main text, figure, table and references are defined, and this document is formatted according to the SRP standard, which illustrates all the formats.

**Keywords:** South area of Jiangsu; Ice and snow weather; Support vector machine; Icing warning

## 苏南地区路面冰雪状况预警模型研究

杨阳, 陈思

江苏中路工程技术研究院有限公司, 南京, 中国, 210000

**摘要:** 为了提升苏南地区冰雪天气预测准确性, 为结冰预警提供切实准确的参考, 本文针对苏南地区冰雪天气致灾因素进行分析, 通过比较多变量多项式统计模型与支持向量机模型, 建立苏南地区冰雪状况预警模型及跨江钢桥面预警模型, 并采用现场实验验证计算模型的准确性。

**关键词:** 苏南地区; 冰雪天气; 支持向量机; 结冰预警

### 1 引言

受气候条件的影响, 苏南地区高速公路冰雪灾害多发, 给高速公路的通行能力, 行车安全带来不利影响。为此, 本文通过结合高速公路路面冰雪监测技术和设备, 建立苏南地区路面冰雪天气路面结冰时间预测模型, 为苏南地区高速公路冰雪天气下的应急响应提供科学依据。

### 2 苏南地区冰雪天气影响性因素分析

通过对苏南地区路面冰雪特征分析, 充分考虑形成冰雪的环境影响因素, 如降雪(雨)量、气温、湿度、风速等, 并结合高速公路结构、设计等自身情况, 进行高速公路冰雪灾害的敏感性分析, 得到冰雪天气致灾因素如下表 1 所示。

Table 1. Analysis of the influencing factors of ice snow weather  
表 1. 冰雪天气影响因素分析表

道路设计因素	道路平面设计	行驶速度、汽车质量、平曲线半径、路面横向倾角等
	道路纵断面设计	纵坡坡度、纵坡长度、行驶速度、汽车质量
	易结冰段	天气条件、桥梁位置、隧道和涵洞位置、行驶速度等
环境因素	降雪	12h 降雪量、24h 降雪量、积雪天数
	降雨	12h 降雨量
	温度	气温、路面/桥面温度
	湿度	空气湿度、路面/桥面湿度
	雾	能见度
	风	风速、风向
	气压	大气压强
路面性能因素	交通量	重车交通量、
	路面摩擦因素	行驶速度、汽车质量、天气条件、冰雪路面状况
	路面附着系数	行驶速度、汽车质量、天气条件、冰雪路面状况

### 3 路面结冰影响因素选取

冰雪天气对高速公路行车安全最大的危害就在于路面结冰,若能够对路面结冰进行预警评估,建立结冰时间预测模型,将可以有效提高高速公路管理部门对冰雪天气应急能力。建立结冰时间预测模型<sup>[1]</sup>,首要确定的是结冰时间预测模型的输入指标(自变量)和结冰时间模型的输出指标(因变量)。

#### 3.1 影响因素敏感性分析

针对上文提出的苏南地区冰雪天气影响性因素分析可知,冰雪天气致灾因素主要包括道路和桥梁设计因素、环境因素和路面性能因素<sup>[2][3]</sup>。其中设计因素和路面性能因素相对稳固,对路面结冰敏感性程度相对较低,故本文重点围绕环境因素选取结冰预警模型评价指标。

#### 3.2 影响因素选取原则

相关性。在选择结冰影响因素的过程中,所选取的因素必须与结冰具有相联系。

可靠性。所选取的因素能够通过现有的技术设备测得可用的数据,只有数据可靠,得到的结冰预警模型才具备借鉴意义<sup>[4]</sup>。

可操作性。结冰模型实验是在冷库环境下进行,故在选择结冰影响因素过程中,所选取的影响因素能够通过观测或利用现有技术设备测量出准确数据。

#### 3.3 影响因素选取结果

综合结冰预警模型敏感性因素分析,结合室内冷库模拟实验,主要通过控制温度、降雨量、风速三大主要影响因素,进行路面结冰形成过程的初步探索。

#### 3.4 结冰预警评估模型方法确定

本文选取的结冰时间影响因素为温度、降雨量、风速,同时研究交通量对结冰时间的影响。要得到结冰时间与影响因素之间的数学关系,需要建立一个以结冰时间为输出变量(因变量),以结冰影响因素:温度、降雨量、风速为输入变量(自变量)的数学模型<sup>[5][6]</sup>。对于非线性关系数据的处理,多变量多项式模型是一种非常经典的模型,能够表示任意一个非线性函数。因此,多变量多项式在应用于结冰时间预测时必然在很大程度上降低了预测误差,不仅能够提高

仿真精度和拟合精度,还能充分的利用变量的信息,具有更好的理论和实践意义,能够较真实的反应结冰时间与各影响因素之间的关系。故本文对多项式多变量统计和支持向量机这两类模型开展比选分析,通过对比两种模型结果的拟合度,得到最优模型。

### 4 苏南地区路面结冰预警评估模型研究

#### 4.1 基于多变量多项式统计模型的结冰时间预测模型

利用多变量多项式函数建立路面结冰时间关系模型。文章主要考虑温度(°C)、风速(m/s)、降雨量(mm)3个变量为自变量,结冰时间(min)为因变量,考虑到多变量多项式统计模型在合适的阶数情况下,模型精度愈高,反之则愈低,结合相关文献,一般将拟合次数取5阶之内比较可靠,因此为了确保模型的精度及稳定性,选择拟合阶数为2、3、4次。

利用 Mathematica 8.0 软件中的 Fit[] 函数对结冰模型建立,将 52 组测试数据导入软件的过程,以及生成的不同阶数的模型方程。为了便于计算,数据录入将温度用 1、2、3、4 指代。1 指代-1~-3°C,2 指代-3~-5°C,3 指代-5~-7°C,4 指代-7~-9°C。具体如下图 1 所示:

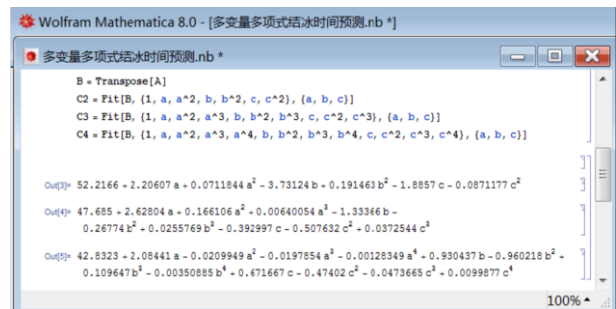


Figure 1. Model equations of different orders generated by Mathematica 8.0 software of Fit [ ]

图 1. 利用 Mathematica 8.0 软件中的 Fit[] 函数导入软件生成不同阶数的模型方程

通过 Mathematica 8.0 软件建立的多变量多变的 2、3、4 阶模型分别为:

2 阶模型:

$$t = 52.2166 + 2.20607a + 0.0711844a^2 - 3.73124b + 0.191463b^2 - 1.8857c - 0.0871177c^2 \quad (1)$$

3 阶模型:

$$t = 47.685 + 2.62804a + 0.166106a^2 + 0.00640054a^3 - 1.33366b - 0.26774b^2 + 0.0255769b^3 - 0.392997c - 0.507632c^2 + 0.0372544c^3 \quad (2)$$

4 阶模型:

$$t = 42.8323 + 2.08441a - 0.0209949a^2 - 0.0197854a^3 - 0.00128349a^4 + 0.930437b - 0.960218b^2 + 0.10964b^3 - 0.00350885b^4 + 0.671667c - 0.47402c^2 - 0.0473665c^3 + 0.0099877c^4 \quad (3)$$

上述三个模型中, 其中: a——温度/°C; b——

降雨量/mm; c——风速/m/s; t——结冰时间/s。

### 4.2 基于支持向量机 SVM 结冰时间预测模型

将通过实验所收集的结冰时间数据看作时间序列  $\{x(t), t=1, 2, \dots, n\}$ , 则其预测模型可以描述为:

$$X(t) = \phi[X(t-1), X(t-2), \dots, X(t-p)] \quad (4)$$

式中:  $\phi$  为非线性函数;  $p$  为嵌入维数。本节构造一个多输入、单输出支持向量机预测模型, 按照表 3-1 可以得到支持向量机的输入向量和输出向量。样本总数为  $n-p$  组, 为验证支持向量机预测效果, 本文将样本分为训练样本和检验样本。

Table 2. Correlation analysis of actual freezing time and fourth order model prediction value  
表 2. 结冰时间实际值与四阶模型函数预测值相关性分析表

样本数	输入向量	输出向量
第一个样本	$X(t), \dots, X(p-1), X(p)$	$X(p+1)$
.....	.....	.....
第 t-p 个样本	$X(t-p), \dots, X(t-2), X(t-1)$	$X(t)$
.....	.....	.....
第 n-p 个样本	$X(n-p), \dots, X(n-2), X(n-1)$	$X(n)$

选择样本数据并做去噪归一化等预处理, 构造训练集。通过对已知数据的分析选择核函数

$$K(x_j, x) = \exp\left(-\frac{\|x_j - x\|^2}{\sigma^2}\right) \text{ 和适当的参数。}$$

利用训练样本建立目标函数, 通过二次规划问题来寻求最优分类面。由求得的最优解来构造决策函

数, 即  $f(x) = \sum(a_j^* - a_i)K(x_j, x) + b$  用测试样本集计算某一状态下结冰时间预测值。

将 8 组预测样本输入模型, 得到 8 组样本结冰时间的预测值, 误差分析如下表 3 所示:

Table 3. Actual freezing time and support vector machine prediction value  
表 3. 结冰时间实际值与支持向量机预测值

组数	1	2	3	4	5	6	7	8
实际值	19	13	18	12	31	11	19	24
预测值	19.3	14.3	17.99	12.38	29.14	11.45	20.10	24.77

Table 4. Correlation analysis of ice time actual value and support vector machine predicted value  
表 4. 结冰时间实际值与支持向量机预测值相关性分析表

	实际值	实际值	支持向量机预测值
实际值	Pearson 相关性	1	0.990
	显著性 (双侧)		0.000
	平方与叉积的和	412.875	359.729
	协方差	58.982	51.390

	N	8	8
支持向量机预测值	Pearson 相关性	0.990	1
	显著性 (双侧)	0.000	
	平方与叉积的和	359.729	320.296
	协方差	51.390	45.757
	N	8	8

综上所述, 结冰时间的实际值与 SVM 支持向量机预测值的相关性高达 99.0%, 属于高度相关, 可见, 通过 SVM 支持向量机预测所得出的效果非常好。

### 4.3 多变量多项式模型与 SVM 支持向量机模型结冰时间预测的比较

多变量多项式四阶函数与 SVM 支持向量机模型预测的相关性如下表 5、6 所示:

Table 5. Error rate of predicted and actual value of Multivariable polynomial and SVM

表 5. 多变量多项式与 SVM 支持向量机预测值与实际值误差率

组号	1	2	3	4	5	6	7	8
多变量多项式	-0.075	0.112	-0.029	0.006	-0.078	0.177	0.046	0.008
支持向量机	0.018	0.102	-0.001	0.032	-0.060	0.041	0.058	0.032

Table 6. Correlation analysis and comparison between the actual value and the predicted value of multivariate polynomials and support vector machines

表 6. 多变量多项式与支持向量机实际值与预测值相关性分析比较

	多变量多项式	SVM 支持向量机
相关系数 r	0.974	0.990

综上所述, SVM 支持向量机预测误差较多变量多项式预测误差率较平稳, 整体误差率波动较小。在不需要了解结冰时间与温度、降雨量、风速之间的关系情况下对非线性数据都具有较好的拟合能力。由于 SVM 支持向量机的隐含层效果, 更加强了结冰时间预测结果的可靠性。

## 5 苏南地区跨江钢桥面结冰预警评估模型研究

### 5.1 Logistic 回归函数简介

Logistic 回归函数主要可以用来解决二分类变量的问题, 由于 Logistic 回归函数的取值范围在 0~1 之间, 常常用来上建立气象风险等级或概率预报模型<sup>[7]</sup>。且近些年来在降水、地质灾害、雷暴等预报模型建立方面得到了广泛应用。

### 5.2 Logistic 回归模型建立

Logistic 回归函数  $y = f(x)$  的一般表达式为:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(a+bx)}}, y \in (0,1) \quad (5)$$

其本身是非线性的, 具有 S 形分布特征, 可通过线性转化为:

$$n\left(\frac{y}{1-y}\right) = a + bx \quad (6)$$

即可看作因变量为  $n\left(\frac{y}{1-y}\right) = a + bx$ , 自变量为  $x$  的线性回归模型。通过一定样本  $Y_i, X_i$ , 采用最小二乘拟合法, 即可获得 Logistic 函数  $y = f(x)$  的方程式。Logistic 函数曲线有 3 个关键点, 分别求解 Logistic 函数一阶和二阶导数。令  $y' = 0$ , 得到  $x = -a/t$ , 表征曲线变化速度最快的基点 (随  $x$  变化,  $y$  反应最敏感); 令  $y'' = 0$ , 得到  $x = (-a \pm 1.31)$ , 表征曲线变化过程的两个拐点 (曲线变化起始点和饱和点)。

### 5.3 桥、路面结冰温度条件分析

道路结冰是指雨、雪、冻雨或雾滴落到温度低于 0°C 的地面而出现的积雪或结冰现象<sup>[8]</sup>。桥、路面结冰

必须同时满足温度和降水两个条件，温度条件必须具备道路下垫层温度小于等于  $0^{\circ}\text{C}$ 。基于沪宁高速主线桥梁及路面的温度观测样本，拟合不同环境气温条件阈值的道路下垫桥、路面温度小于等于  $0^{\circ}\text{C}$  的频率分布，建立路面结冰的温度条件风险概率模型。

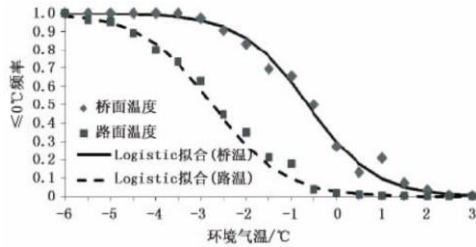


Figure 2. Conditional frequency distribution of freezing temperature to expressway from Nanjing to Shanghai  
图 2. 沪宁高速桥、路面结冰温度条件频率分布

图 2 反映一个事实：在相同环境温度条件下桥面比路面更容易结冰。如实况气温在  $-1\sim 0^{\circ}\text{C}$  时车辆行驶雨后积水（雪）或低能见度、潮湿路面时可能比较安全（频率低于 10%），但一旦进入桥面，很有可能遭遇道路结冰的危险。当环境气温大于等于  $0^{\circ}\text{C}$  时，路面不会发生道路结冰，而桥面仍有可能发生。当环境气温大于等于  $2^{\circ}\text{C}$  时，桥面不再发生道路结冰。

当然，高速公路环境复杂，车辆碾压摩擦、尾气排放、道路灰尘等因素会放大预报不确定性，因此有必要制作不确定性的风险概率预报产品<sup>[9]</sup>。但是，这并不影响我们得出结论：高速公路桥面先于路面结冰的临界环境气温存在约  $2^{\circ}\text{C}$  差效应。因此，在桥梁段结冰预警模型时，在一般路面段的基础上，增加  $2^{\circ}\text{C}$  差效应考虑，即是桥梁段路面的结冰预警模型。

## 6 结论

经过综合比选，最终选定支持向量机 SVM 结冰

时间预测模型作为苏南地区路面冰雪状况预警模型。为验证该模型在实际道路条件下的泛化能力，本次选取沪宁高速及扬溧高速路段，采用移动单点式设备对气象资料进行搜集，对本文提出的道路结冰预警模型的相关参数展开实测，以确保该模型的准确性和可靠性。

本文选取温度、降雨量、风速作为苏南地区结冰预警模型影响因素，分别基于 SVM 支持向量机及多变量多项式模型得到苏南地区结冰时间预警模型，通过相关性分析，最终选取 SVM 支持向量机作为最终结冰预警模型，并通过回归函数得到桥梁与道路  $2^{\circ}\text{C}$  结冰温差效应。

## References (参考文献)

- [1] Zi Kui, Study on ice monitoring and warning and application of ice suppression materials in expressway. Changsha University of Technology. 2016.
- [2] Qihuan Yin, Research on road icing safety warning system based on multi parameters. Wuhan University of Engineering. 2016.
- [3] Guoqiang Sun, Zheng Fu, Chuzhi Ding, Juzhe Qin, Ting Wang. Field test of an organic snow melting agent for road pre wetting and anti icing in winter. Highway Transportation Technology (Application Technology Version). 2013, 9(11), 105-108.
- [4] Shidong Zhou. Study on traffic safety warning and disposal measures of expressway in ice snow weather. Changsha University of Technology. 2015.
- [5] Lei Shi, Research on the meteorological detection and early warning system of expressway under the condition of ice and snow. Highway Transportation Technology (Application Technology Version). 2012, 8(09), 311-314.
- [6] Mingming Liu, Jianping Pan, Haiming Yang. Study on the early warning and evaluation model of snow and ice disaster in mountain highway. Highway Transportation Technology. 2011(03), 27-30.
- [7] Zhu Xiong, Jiejun Qin. Research on prediction of road icing based on simulation experiment. Highway Engineering. 2014, 39(01), 216-237.
- [8] Lixun Wang. Experimental study on anti sliding performance of new anti sliding materials for ice and snow pavement. Highway. 2017, 62(05), 233-237.
- [9] Qiuyun Wang. Study on simulation test and numerical prediction technology of high and low temperature stress in shanghai nanjing expressway. Nanjing University of Information Engineering, 2011.