

沥青混合料水-温-光损伤超声波评价及预测方法

程永春,张 鹏,王叶丹,陶敬林,焦峪波

(吉林大学 交通学院,吉林 长春 130025)

摘 要:通过室内水-温-光循环试验,将降水、高温和日照 3 种环境因素对沥青混合料的损伤进行模拟。利用超声波检测技术,测定不同温度、不同含水量的沥青混合料试件在水-温-光循环过程中超声波参数性质的变化,从而对其损伤进行初步判断。通过试件劈裂强度与冻融劈裂强度的衰减来定义其损伤,并应用支持向量机理论,建立波速与沥青混合料损伤程度的回归预测模型,形成了沥青混合料水-温-光损伤无损检测方法。研究结果表明:利用超声波形及频谱的特性变化,可以对水-温-光循环过程中不同形式的沥青混合料的损伤程度进行初步判断;借助支持向量机理论对沥青混合料水-温-光损伤进行超声波评价,相关系数最大值为 0.97,最小值为 0.90,预测平均误差为 4.53%,表现出较高的精度及稳定性。

关键词:道路工程;沥青混合料;水-温-光循环;超声波;支持向量机

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Ultrasonic evaluation and prediction of asphalt mixture damage under the coupling effects of water-temperature-radiation

CHENG Yong-chun, ZHANG Peng, WANG Ye-dan, TAO Jing-lin, JIAO Yu-bo

(School of Transportation, Jilin University, Changchun 130025, Jilin, China)

Abstract: The laboratory water-temperature-radiation cycle test was designed and carried out to simulate the damage of asphalt mixture caused by the environmental factors of rain, high temperatures and sunshine. The ultrasonic changes were determined while passing through the asphalt mixture specimen under different temperatures and water contents in different process of water-temperature-radiation cycles. Then, the damage of specimen was assessed preliminarily based on the ultrasonic changes. The splitting strength and freezing-splitting strength attenuation were defined as the damage parameters. Besides that, the regression prediction model of the ultrasonic velocity and damage coefficient of asphalt mixture was constructed by using the Support Vector Machine (SVM) to predict the asphalt mixture damage in different conditions. This ultrasonic evaluation and prediction method can assess the damage of asphalt mixture specimen without destroying the specimen itself. The results show that the preliminary judgment of the asphalt mixture damage degree under the water-temperature-ultraviolet cycle can be determined by the changing of the ultrasonic waveform and spectral characteristics. The ultrasonic damage assessment based on support vector machine theory indicates that the maximum and minimum value of the correlation coefficient are 0.97 and 0.90 respectively, and the average prediction error is 4.53%, which reflected the

high accuracy and stability of this method. 5 tabs, 6 figs, 17 refs.

Key words: road engineering; asphalt mixture; water-temperature-radiation cycle; ultrasonic detection; support vector machine

0 引 言

利用水-温-光循环试验可以对沥青混合料的耐候性给出一个预测^[1]。沥青混合料在水-温-光循环作用下自身结构发生了本质性的变化,如空隙率的增大,沥青结合料的老化等,从而导致沥青混合料宏观力学性能的下降。对这一试验结果采用一种无损检测方法,即超声波法,利用超声波在不同介质中传播时波速、波形和频率等参数的变化,对试件进行性能检测,避免了进行大量的常规破坏性试验,可以达到事半功倍的效果^[2-4]。超声波检测技术在土木工程领域已有广泛应用,但现阶段沥青混合料性能测试方法仍以室内试件破坏试验为主,利用超声波检测技术对沥青混合料损伤识别刚处于起步阶段^[5-6]。国内外研究者都是利用最小二乘法建立波速与测试指标的数学关系,通过对波速测试获取相应的力学指标^[7-9]。然而,沥青混合料是一种由集料、胶浆和空隙组成的三相复合结构,超声波在其内部传播时难免会发生反射、折射、绕射等现象,使得测试数据有一定的随机性和跳动性。而最小二乘法回归建模方法无法分析随机效应自变量,计算精度过低,在特定区域可能有不错效果,但推广能力低,并不适合沥青混合料性能的检测^[10-11]。

支持向量机(SVM)是建立在统计学习理论的VC维理论和结构风险最小原理基础上的学习方法,在解决小样本、非线性及高维模式识别问题时有许多特有的优势,算法结果是全局最优解,有很强的推广能力^[12]。这为 SVM 方法在沥青混合料无损检测中的应用提供了条件。为此,本文通过室内水-温-光循环试验,模拟夏季降水-高温日照循环条件下沥青路面损伤。在不同次数的水-温-光循环作用下,通过超声波参数性质的变化反映沥青混合料内部结构的损伤程度,并基于支持向量机理论,建立沥青混合料水-温-光损伤回归预测模型。

1 试验方法及结果

1.1 试验方法

1.1.1 水-温-光循环试验

结合实际工程,针对 102 国道试验路段的配合

比设计进行试验研究。试验级配为 SMA-16,试验用沥青为盘锦-AH90[#] 重交通石油沥青,技术指标如表 1 所示。研究中所用的粗集料和细集料为内蒙古中旗产石灰岩,矿粉为吉林郭家店出产,对集料的基本指标进行测试,测试结果如表 1、表 2 所示。经试验测试,最佳油石比为 5.5%。为了区分环境因素对不同空隙结构沥青混合料结构损伤的影响差异,将沥青混合料试件分为 A、B、C、D、E 共 5 组,各组试件成型方式如表 3 所示。在 20 ℃恒温室中安装降水模拟系统,模仿夏季雨水对路面的冲刷作用。该系统主要由循环水泵、蓄水池、输水管道以及降水喷头构成,如下页图 1 所示。经实际测试,该系统可以模拟的降雨量为 30 mm/d,相当于大雨的雨量(25~50 mm/d)。在 60 ℃保温箱中安装紫外线灯管,模拟高温日照对沥青路面的作用。每根紫外线灯管功率为 20 W,共使用 6 根,保温箱内表面积约为 6 m²,由此可算得其辐射量为 2 000 MW/m²,是自然光最高辐射量的 5.3 倍,故该系统可以模拟强烈日照的辐射效果,如下页图 2 所示。

表 1 粗集料压碎值和磨耗值指标

Tab. 1 Crushing value and abrasion value of coarse aggregate

指 标	测试值	规范限值
压碎值/%	11.7	≤28
磨耗值/%	23.5	≤30

表 2 矿粉技术指标

Tab. 2 Technical index of mineral powder

指 标	筛孔尺寸/mm	通过率/%	规范限值
级配	0.6	100	100
	0.15	94.5	90~100
	0.075	80.2	75~100
亲水系数	0.78		<1
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.741		>2.50

表 3 试件成型方式

Tab. 3 Modeling process of specimen

试件编号	马歇尔试件双面击实/次	油石比/%
A	75	5.5
B	75	5.0
C	75	6.5
D	50	5.5
E	90	5.5

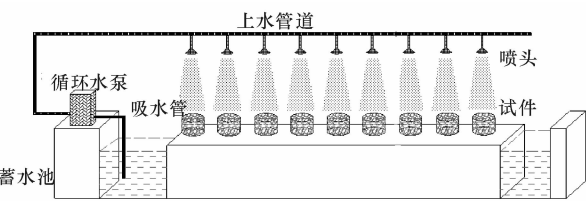
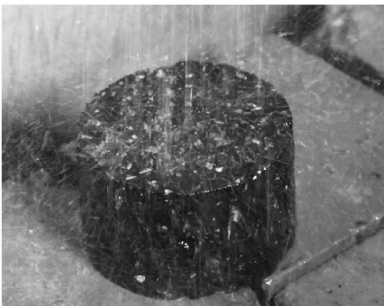


图 1 降水模拟系统

Fig. 1 Simulation system of precipitation



(a) 动水冲刷试验



(b) 高温辐射试验

图 2 试件的处理方法

Fig. 2 Processing method of specimens

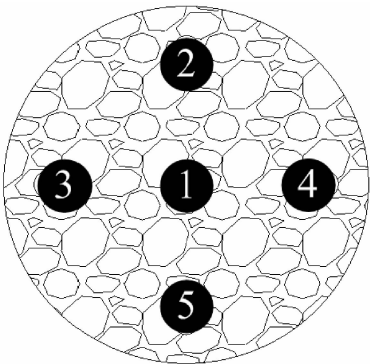
本试验采用动水冲刷和 60℃保温箱辐射相互循环的方法对试件进行水-温-光循环预处理,每次循环过程为:将试件放入 20℃环境中用动水冲刷 12 h,再将试件放入 60℃保温箱中高温辐射 12 h,每组试件进行 12 次循环。

1.1.2 超声波检测试验

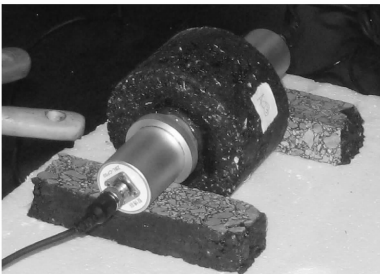
借助北京智博联科技有限公司研发的 ZBL-U520/510 非金属超声波监测仪对沥青混合料试件进行检测。为了减少声能损耗,在与探头接触的试件表面涂抹凡士林作为耦合剂。考虑到沥青混合料试件的非均匀性,在每个试件上均匀布置 5 个超声测点,处理数据时,舍弃 1 个最大值和 1 个最小值,利用 3 个中间值作为样本数据,测试方法如图 3 所示。

1.2 试验结果及分析

在水-温-光循环过程中,对 5 组试件进行超声波测试。试件损伤前后典型波形图和频谱图如下页



(a) 测点布置



(b) 超声测试方法

图 3 沥青混合料试件超声波测试方式

Fig. 3 Ultrasonic testing method of asphalt mixture specimen

图 4 所示。

由图 4 可以看出,水-温-光循环损伤后试件的超声波参数的性质发生了以下变化。

(1)波形畸变:损伤之后的波形显得杂乱无章,出现多峰值现象,振幅衰减明显。这是由于水-温-光循环导致试件的空隙率增大,超声波在有损伤的试件中传播时,在损伤界面会产生绕射、反射、折射等,最后叠加成一个综合的超声波信号,导致波形的畸变。波形畸变越剧烈表明损伤的程度越严重,损伤的范围越大。

(2)频率减小:超声波在有损伤的试件传播过程中,声能发生衰减,不同频率成分的衰减程度不同,其高频部分的较低频部分衰减严重,从而使接收波的主频向低频端漂移。

(3)声时延长:这是因为水-温-光循环作用使试件的整体性遭到破坏,其内部出现大量空隙,而空隙中空气的声阻抗率远小于集料和沥青膜的声阻抗率,使得超声脉冲波只能绕过空隙传播,因此传播的路程增大,使测得的声时延长。

为了定量描述超声波波形畸变程度及频率衰减程度,定义波形畸变率 α 与频率衰减度 β 为

$$\alpha = \frac{l}{l_0} \times 100\% = \frac{vt}{vt_0} \times 100\% = \frac{t}{t_0} \times 100\% \quad (1)$$

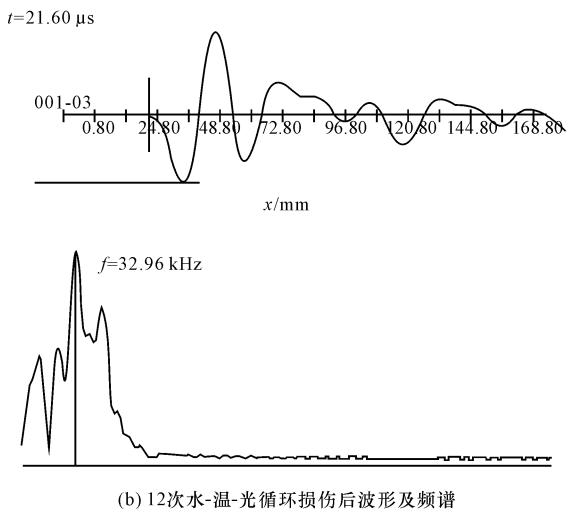
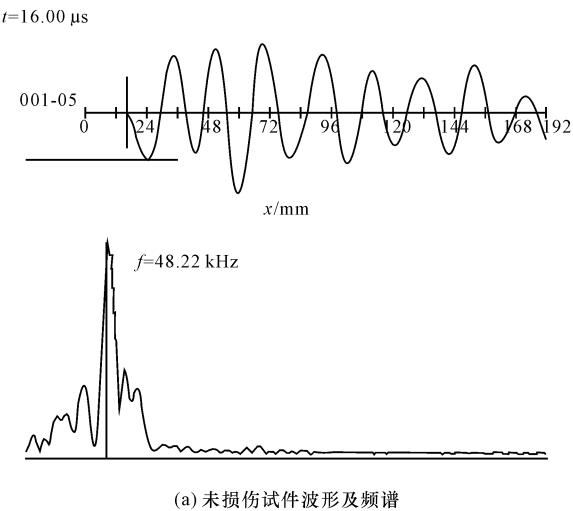


图 4 试件损伤前后典型波形图

Fig. 4 Waveform and spectrum before and after the damage

$$\beta=\frac{f_0-f}{f_0}\times 100\% \tag{2}$$

式中: l 为畸变波长(m); l_0 为总波长(m); v 为超声波速(m/s); t_0 为超声波传播总时长(μ s); t 为畸变波形对应的时长(μ s); f_0 为初始频率(kHz); f 为衰变频率(kHz)。

经比较计算,在水-温-光循环过程中各组试件的波形畸变率 α 与频率衰减度 β 如表 4 所示。

由表 4 可见,超声波形畸变率 α 与频率衰减度 β 随水-温-光循环次数的增加皆存在增大趋势,而且 B、D 两组试件变化幅度要明显大于其他 3 组。对波形畸变率 α 而言,B、D 两组试件由于沥青用量较少、击实不充分等原因,使其空隙率增大,沥青膜变薄,导致抗水-温-光损伤能力降低。所以在 6 次水-温-光循环后,有的测点波形已经全段发生畸变, α 值达到 100%,无法通过 α 值判断损伤程度,但可从

表 4 α 与 β 变化

Tab. 4 Changes of α and β

参数	试件 编号	不同水-温-光循环次数(次)的 α 、 β 变化值					
		2	4	6	8	10	12
α	A	26.5	24.4	37.1	69.0	66.8	78.2
	B	63.2	88.2				
	C	16.4	32.8	37.5	35.2	61.9	66.7
	D	76.7	91.6				
	E	29.5	24.3	36.8	61.9	70.4	74.1
β	A	9.8	11.6	16.3	25.2	30.9	34.6
	B	10.4	10.3	19.0	27.5	34.2	39.3
	C	9.4	12.5	11.7	20.2	19.7	31.6
	D	12.3	15.7	21.2	17.6	32.9	37.8
	E	7.9	16.4	15.8	22.7	29.1	33.6

β 的变化来判断。

因此,可以利用超声波形特性变化,对水-温-光循环过程中沥青混合料的损伤程度进行初步判断,并为预测模型的建立奠定基础。

2 水-温-光损伤预测模型的建立

2.1 建立模型

基于统计学习理论的支持向量机是一种有坚实理论基础的小样本学习方法,有优良的学习能力和泛化能力,能够很好地解决建立数学模型的复杂性与推广能力之间的矛盾^[13]。SVM 方法的基本思想是:定义最优线性超平面,并把寻找最优线性超平面的算法归结为求解一个凸规划问题^[14-15]。进而基于 Mercer 核展开定理,通过非线性映射把样本空间映射到一个高维特征空间(Hilbert 空间),使在特征空间中可以应用线性学习机的方法解决样本空间中的高度非线性分类和回归等问题^[16-17]。

为区分不同温度及含水量对超声波速的影响,分别在 20℃、0℃、-20℃ 以及饱水状态下对试件进行超声波测试。而后,在 20℃ 条件下,借助 MTS 多功能试验机进行间接拉伸试验和冻融劈裂试验,测试试件的劈裂强度 R_T 与冻融劈裂强度 R'_T 。

定义 R_T 、 R'_T 损伤系数分别为 ξ_1 、 ξ_2

$$\begin{cases} \xi_1 = (1 - \frac{P_i}{P_0}) \times 100\% \\ \xi_2 = (1 - \frac{Q_i}{Q_0}) \times 100\% \end{cases} \tag{3}$$

式中: P_0 、 Q_0 分别为未进行水-温-光循环处理试件的劈裂强度和冻融劈裂强度; P_i 、 Q_i 分别为进行 i 次水-温-光循环处理后各试件的劈裂强度和冻融劈裂强度。

本文定义损伤系数 ξ 为

$$\xi=(\xi_1+\xi_2)/2 \tag{4}$$

各种环境条件下超声波速与损伤系数关系散点如图 5 所示。

分别利用多项式核函数、径向基核函数及 Sig-moid 核函数对样本数据进行回归分析。结果显示,径向基核函数有较小的拟合误差和较广的泛化能力误差,故选取径向基函数作为核函数,径向基函数表达式为

$$K(x_i,x)=e^{-\frac{|x_i-x|^2}{g^2}} \tag{6}$$

式中: x_i 为输入变量; g 为核函数参数。

以前 12 次水-温-光循环试验数据为样本,利用 K-ford Cross Validation(K-CV)算法对原始数据进行交叉验证,对惩罚因子 C 与核函数参数 g 进行离散化查找,通过控制均方误差确定每组数据 C 与 g 的最优值,然后利用最优参数对 SVM 进行训练,并对原始数据进行回归分析。对各组试件追加 2 次水-温-光循环试验,将试验结果与预测结果进行对比。回归预测结果如表 5 所示,预测值与实际值比较如下页图 6 所示。

表 5 SVM 回归预测结果

Tab. 5 Regression and prediction results of SVM

试验条件	试件编号	惩罚因子 C	核函数参数 g	相关系数	预测损伤/%	实际损伤/%	预测误差/%
20 ℃	A	16.00	0.18	0.93	22.69	22.94	1.09
	B	4.00	4.00	0.95	24.68	26.07	5.33
	C	2.83	1.41	0.96	18.27	16.82	8.62
	D	11.31	2.83	0.90	39.88	39.02	2.20
	E	2.00	2.00	0.91	25.38	26.12	2.83
0 ℃	A	1.00	1.00	0.90	25.15	22.94	9.63
	B	16.00	2.83	0.95	27.24	26.07	4.49
	C	2.00	1.00	0.92	16.92	16.82	0.59
	D	4.41	11.31	0.92	36.88	39.02	5.48
	E	1.41	1.00	0.93	26.13	26.12	0.04
-20 ℃	A	2.00	1.41	0.92	21.42	22.94	6.63
	B	1.00	1.41	0.92	25.89	26.07	0.69
	C	11.31	1.00	0.95	18.15	16.82	7.91
	D	1.41	1.41	0.97	40.02	39.02	2.56
	E	16.00	8.00	0.93	25.75	26.12	1.42
饱水状态	A	8.00	2.00	0.92	20.78	22.94	9.42
	B	2.00	2.00	0.91	27.41	26.07	5.14
	C	0.50	11.31	0.93	15.85	16.82	5.77
	D	5.66	2.83	0.97	40.92	39.02	4.87
	E	1.41	0.71	0.95	27.66	26.12	5.90

2.2 分析与讨论

由拟合结果和预测结果可以得出如下结论。

(1)拟合结果显示,相关系数最大值为 0.97,最小值为 0.90,而文献[8]中利用最小二乘法拟合精度最大值为 0.83,最小值仅为 0.54。说明该方法能

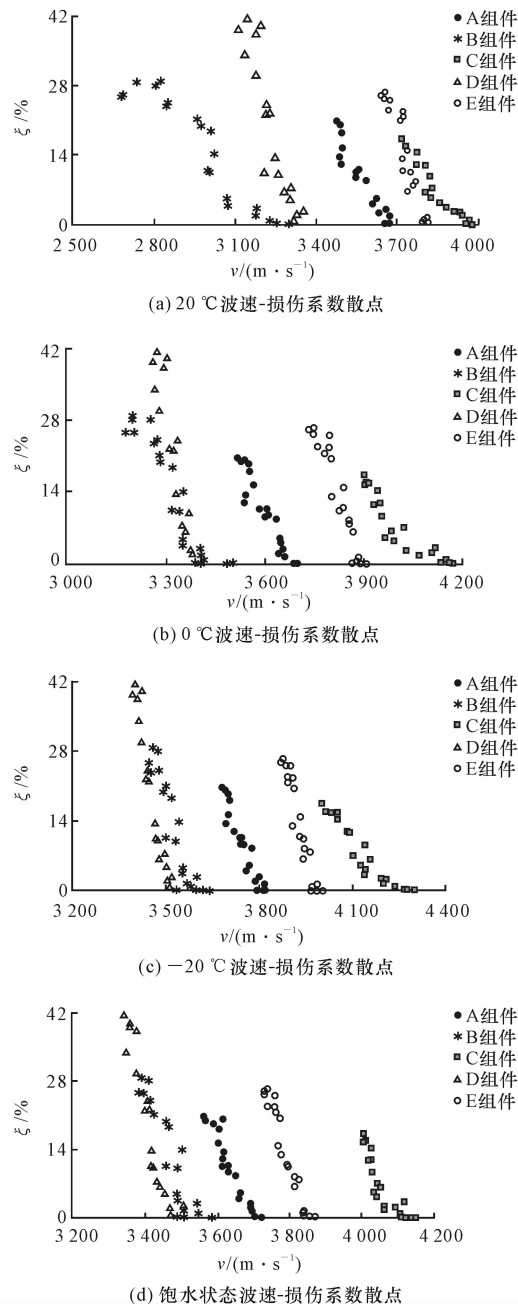


图 5 波速与劈裂抗拉强度损伤系数散点

Fig. 5 Scatters of ultrasonic velocity and damage coefficient

选取超声波速 v 为自变量,将损伤系数作为因变量,利用下式对两者进行归一化处理

$$X=(\lambda_{\max}-\lambda_{\min})(x-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})+\lambda_{\min} \tag{5}$$

式中: x 为原始数据; X 为归一化后的数据; λ_{\max} 、 λ_{\min} 为映射的范围参数,设 $\lambda_{\max}=1$, $\lambda_{\min}=-1$ 。

兼顾全部数据,跳跃性较小,并且有较高的拟合精度,避免了过拟合与欠拟合现象的发生,能很好地反映超声波速与损伤系数的关系。

(2)该方法对试件损伤预测结果良好,与实测数据相比,相对误差最大值为 9.63%,最小值为 0.04%,平均误差为 4.53%。说明该方法精度较高而且稳定性较好,可以有效地解决小样本、非线性问题,并具有较强的推广能力。

(3)利用 SVM 方法可以针对测试数据的离散性大小,对不同形式的沥青混合料通过调整惩罚因子 C 与核函数参数 g 来实现模型的普适性。同时,通过交叉验证选取不同 C 值与 g 值,克服了试算的盲目性,提高了运算效率。

3 结 语

(1)通过超声波检测方法,可快速评价水-温-光循环过程中不同成型方式与不同沥青用量沥青混合料的损伤状态,并有效地预测了其损伤程度。

(2)利用超声波形及频谱的特性变化,通过定义波形畸变率与频率衰减度,对水-温-光循环过程中沥青混合料的损伤进行初步定量判断;通过 SVM 方法建立了超声波速与沥青混合料损伤系数的回归预测模型,对不同形式的沥青混合料试件的模型参数进行优化选取,从而对其损伤程度进行具体评价及预测。

(3)回归预测结果表明该方法回归预测精度较高,稳定性较好,并且有较强的推广能力,能够准确地反映超声波速与损伤系数的关系,快速评价沥青混合料的损伤状态,有很强的实际意义。

(4)本文对沥青混合料水-温-光损伤检测方法进行了一系列的介绍。而实际的沥青路面水-温-光损伤影响因素复杂多变,因此有必要对不同状态下沥青路面损伤机理进行宏微观层次的研究。

参考文献:

References:

- [1] 程永春,张 鹏,焦峪波,等. 水-温-光循环作用下沥青混合料性能衰减研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2013,34(8):990-994.

CHENG Yong-chun, ZHANG Peng, JIAO Yu-bo, et al. Attenuated performance of asphalt mixture under water-temperature-radiation cycle action[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(8): 990-994.

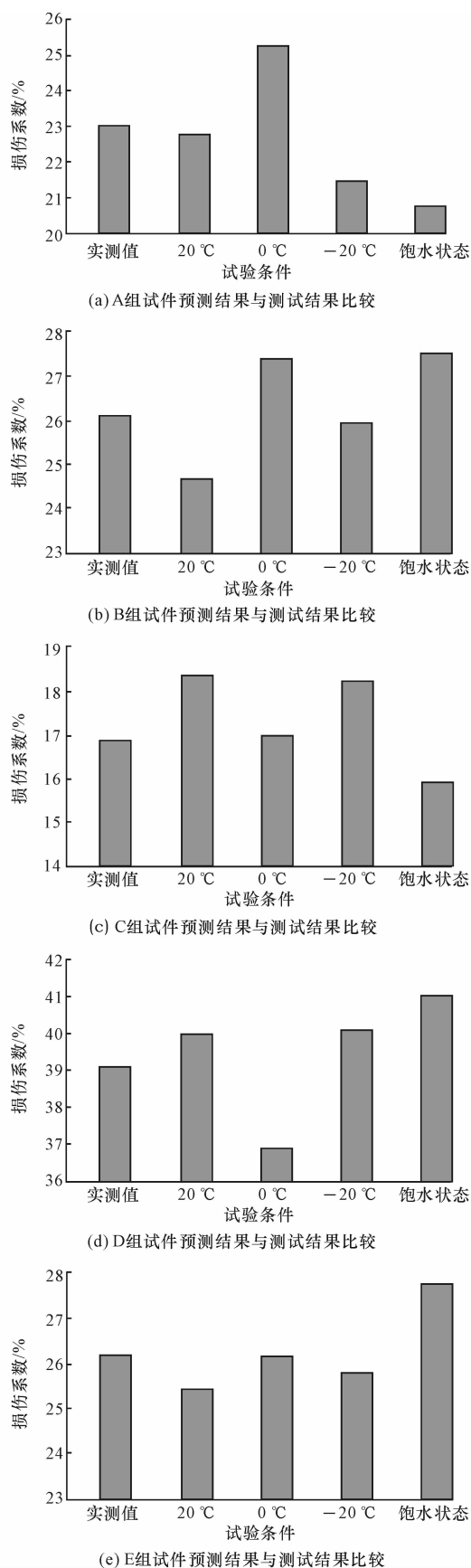


图 6 不同条件下 SVM 预测结果与测试结果比较

Fig. 6 Comparison between prediction and actual value

- (in Chinese)
- [2] 穆德法,贺拴海. 炎热天气对钢渣混凝土抗压强度的影响[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(3): 6-9.
MU De-fa, HE Shuan-hai. Effect of hot weather on compressive strength of steel slag concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(3): 6-9. (in Chinese)
 - [3] Norambuena-Contreras J, Castro-Fresno D, Vega-Zamamilla A, et al. Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test[J]. NDT&E International, 2010, 43(7): 629-634.
 - [4] Hassan A M T, Jones S W. Non-destructive testing of ultra high performance fiber reinforced concrete(UHP-FRC): a feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35(12): 361-367.
 - [5] 董晓红,马芹永,吴金荣. 超声波法在双层式沥青混凝土路面结构强度检测中的应用[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(2): 464-468.
DONG Xiao-hong, MA Qin-yong, WU Jin-rong. Application of ultrasonic method in strength testing of double-layer asphalt concrete pavement structure[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(2): 464-468. (in Chinese)
 - [6] Kotze R, Wiklund J, Haldenwany R. Optimisation of Pulsed Ultrasonic Velocimetry system and transducer technology for industrial applications [J]. Ultrasonics, 2013, 53(2): 459-469.
 - [7] Tigdemir U Y, Kalyoncuoglu S F. Application of ultrasonic method in asphalt concrete testing for fatigue life estimation[J]. NDT&E International, 2004, 37(8): 597-602.
 - [8] 李 芬,沈成武,李永信,等. 基于超声波检测技术的沥青混凝土探伤研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2006, 30(2): 293-296.
LI Fen, SHEN Cheng-wu, LI Yong-xin, et al. Research on damage of asphalt concrete by ultrasonic inspection method[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2006, 30(2): 293-296. (in Chinese)
 - [9] 易军艳. 沥青混合料的渗水特性及抗冻性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
YI Jun-yan. Reserch on freezing-thawing performance and permeability of asphalt mixture[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
 - [10] Zheng H, Lu H F. A least-squares support vector machine (LS-SVM) based on fractal analysis and CIELab parameters for the detection of browning degree on mango (*Mangifera indica* L.) [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 83(4): 47-51.
 - [11] 潘宝峰. 动水压力作用下路面材料损伤的评价方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
PAN Bao-feng. Study on the evaluation method of pavement materials damage under hydrodynamic pressure [D]. Dalian: Dalian University of Teehnology, 2010. (in Chinese)
 - [12] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory [M]. New York: Springer-Verlag, 1995.
 - [13] Fauvel M, Benediktsson J A, Chanussot J. Parsimonious mahalanobis kernel for the classification of high dimensional data[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(3): 845-854.
 - [14] Chamkalani A, Mohammadi A H, Eslamimanesh A, et al. Diagnosis of asphaltene stability in crude oil through “two parameters”SVM model[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 81(10): 202-208.
 - [15] Du P J, Tan K, Xing X S. Wavelet SVM in reproducing kernel hilbert space for hyperspectral remote sensing image classification[J]. Optics Communications, 2010, 283(24): 4978-4984.
 - [16] Pang S N, Ban T, Kadobayashi Y, et al. Personalized mode transductive spanning SVM classification tree [J]. Information Sciences, 2011, 181(11): 2071-2085.
 - [17] Ch S, Anand N, Panigrahi B K, et al. Stream flow forecasting by SVM with quantum behaved particle swarm optimization [J]. Neurocomputing, 2013, 101(2): 18-23.