

穿孔机械阻抗板的吸声特性研究

于永杰, 吴楠, 卞徐胤, 赵晓丹

(江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要:为提高低频吸声性能,在机械阻抗板(MIP)上穿少量微孔形成穿孔机械阻抗板(MIPMP)吸声结构。对MIPMP结构吸声性能进行初步研究,建立计算模型,用驻波管测量吸声系数。结果表明,MIPMP结构的吸声为机械阻抗和微穿孔的共同作用。吸声曲线出现两个吸声峰:一个在200~300 Hz,由机械阻抗引起,吸声系数可达0.95;一个出现在300~600 Hz,由微穿孔引起。计算模型与实验结果所示趋势一致:随穿孔率的增大,机械阻抗单元吸声峰值先增大后减小,向高频移动,微穿孔单元吸声峰值逐渐减小,带宽增大,向高频移动;随背腔的增厚,机械阻抗单元吸声峰值变大,频率基本不变,微穿孔单元吸声峰值略减小,向低频移动。MIPMP与微穿孔板(MPP)构成的复合吸声结构在200~1600 Hz有好的吸声性能。

关键词:机械阻抗板;穿孔机械阻抗板;穿孔率;背腔;微穿孔板;复合吸声结构

中图分类号: TB535 **文献标识码:** A

Study on the Acoustic Absorption Properties of Mechanical Impedance Panel With Micro-perforations

YU Yongjie, WU Nan, BIAN Xuyin, ZHAO Xiaodan

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The mechanical impedance panel with micro-perforations (MIPMP) absorber is fabricated by piercing micropores on a mechanical impedance panel (MIP) to improve the low-frequency absorption properties. The calculation model of MIPMP is established and several samples are tested by using the standing wave tube. The results show that the absorption mechanism of the MIPMP absorber is a combination of mechanical resonance and cavity resonance. The sound absorption curves appear two peaks which are caused by mechanical impedance from 200 Hz to 300 Hz, in which the absorption coefficient is 0.95 at its highest and micro-perforations form 300 Hz to 600 Hz respectively. The calculation model and the experimental results show the same variation trends: as the perforation rate rises, the peak caused by mechanical impedance increases at first then decreases and moves towards higher frequency, the peak caused by micro-perforations decreases and moves towards higher frequency but the bandwidth becomes wider; as the air-cavity extends, the peak caused by mechanical impedance highly increases but the peak frequency basically has no variation, the peak caused by micro-perforations slightly drops and moves towards lower frequency. The combined absorber composed of MIPMP and micro-perforated panel (MPP) shows good acoustic properties from 200 Hz to 1600 Hz.

Key words: mechanical impedance panel; mechanical impedance panel with micro-perforations; perforation rate; back cavity; micro-perforated panel; combined absorber

0 引言

共振吸声结构是常见的一类吸声材料,其中微穿孔板(MPP)^[1]是典型的共振吸声结构,具有清洁、廉价、耐高温、高压等优点,应用广泛,但其低频

吸声性能不够理想,国内外很多学者对此做了诸多工作^[2-8]。机械阻抗板(MIP)是把金属薄板与粘弹性材料结合,声波激励板共振,通过粘弹性材料消耗声能,亦可视为共振吸声结构,但其吸声频带较窄。

收稿日期: 2016-02-24

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程基金资助项目(PAPD);江苏高校品牌专业建设工程基金资助项目

作者简介: 于永杰(1987-),男,山东菏泽人,硕士生,主要从事噪声与振动控制的研究。E-mail:1058666961@qq.com。通信作者:赵晓丹(1964-),男,江苏镇江人,教授,主要从事噪声与振动控制及信号处理的研究。E-mail:zhaoxiaodan@ujs.edu.cn。

赵晓丹等^[9-12]提出在微穿孔板背腔内引入机械阻抗结构,选择适当的粘弹性材料使机械阻抗板在低频发生共振,以加强复合结构的低频吸收,该方法行之有效;但要想获得较宽的吸声频带需要多层机械阻抗板,又会使结构变复杂。对此,以机械阻抗板为基础,提出在机械阻抗板上穿少量微孔构成穿孔机械阻抗板(MIPMP),建立了吸声系数的计算模型,用驻波管测量样品吸声系数,并将穿孔机械阻抗板与微穿孔板结合组成复合吸声结构。研究表明,穿孔机械阻抗板复合微穿孔板吸声结构在中低频有良好的吸声效果。

1 理论分析

1.1 MIPMP 吸声结构

MIP 吸声结构由薄板、粘弹性材料、空腔及刚性壁面组成。入射声波激励板振动,通过粘弹性材料消耗声能,如图 1 所示。MIPMP 是在机械阻抗板上开少量微孔,该结构由穿孔薄板、粘弹性材料、空腔及刚性壁面组成,如图 2 所示。微穿孔板的穿孔率通常取 1%~3%^[13],设计的 MIPMP 的穿孔率较传统微穿孔板低,低频声波部分透射,当入射声波激励板共振时,声能在微穿孔和粘弹性材料的共同作用下被大量吸收。

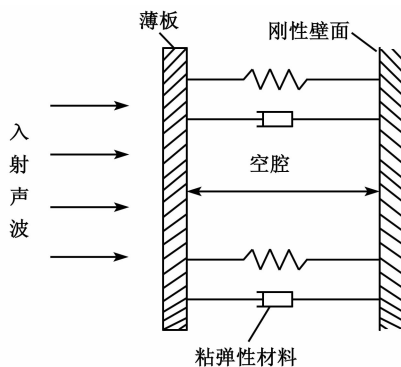


图1 机械阻抗板结构示意图

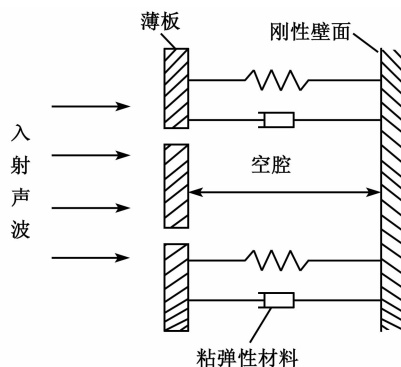


图2 穿孔机械阻抗板结构示意图

1.2 MIPMP 计算模型

MIPMP 微穿孔单元采用微穿孔吸声理论^[14]计算,机械阻抗单元按单自由度弹簧振子系统处理,机械阻抗单元与微穿孔单元构成并联关系,如图 3 所示。

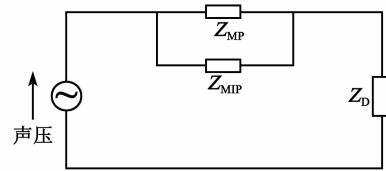


图3 穿孔机械阻抗板等效电路

MIP 的力阻抗^[15]为

$$Z_M = R_{MIP} + j\left(\omega M_{MIP} - \frac{K_{MIP}}{\omega}\right) \quad (1)$$

式中: R_{MIP} 和 K_{MIP} 分别为粘弹性材料的阻尼系数和弹性系数; M_{MIP} 为机械阻抗板的质量; ω 为角频率。

在声场中机械阻抗板对应的声阻抗为

$$Z_{MIP} = \frac{R_{MIP} + j\left(\omega M_{MIP} - \frac{K_{MIP}}{\omega}\right)}{S_0^2} \quad (2)$$

式中 S_0 为机械阻抗板的面积。

微穿孔单元的声阻抗为

$$Z_{MP} = \frac{\rho_a c_a (r_{MP} + j\omega m_{MP})}{S_0} \quad (3)$$

式中 $\rho_a c_a$ 为空气特性阻抗。

$$r_{MP} = \frac{0.147t}{\sigma d^2} k_r \quad (4)$$

$$k_r = \sqrt{\left(1 + \frac{k^2}{32}\right) + \frac{\sqrt{2}}{8} \frac{kd}{t}} \quad (5)$$

$$m_{MP} = \frac{0.294 \times 10^{-3} t}{\sigma} k_M \quad (6)$$

$$k_M = 1 + \left(9 + \frac{k^2}{2}\right)^{-1/2} + 0.85 \frac{d}{t} \quad (7)$$

式中: $k = d \sqrt{f/10}$ 为微穿孔板常数, f 为声频率; t 为开孔机械阻抗板的厚度; d 为微穿孔直径; σ 为穿孔率。

空腔部分的声阻抗为

$$Z_D = \frac{\rho_a c_a \coth\left(\frac{j\omega D}{c_a}\right)}{S_0} \quad (8)$$

式中 D 为穿孔机械阻抗板到刚性壁面的距离。机械阻抗部分与微穿孔部分为并联关系,空腔部分再与二者串联,则 MIPMP 的声阻抗为

$$Z_{MIPMP} = \frac{Z_{MIP} Z_{MP}}{Z_{MIP} + Z_{MP}} + Z_D \quad (9)$$

相对声阻抗率为

$$Z_{MIPMP} = \frac{Z_{MIPMP} \cdot S_0}{\rho_a c_a} \tag{10}$$

声波垂直入射时, MIPMP 结构的吸声系数为

$$\alpha_{MIPMP} = \frac{4r_{MIPMP}}{(1 + r_{MIPMP})^2 + x_{MIPMP}^2} \tag{11}$$

式中: $r_{MIPMP} = \text{Re}(z_{MIPMP})$ 为相对声阻率; $x_{MIPMP} = \text{Im}(z_{MIPMP})$ 为相对声抗率。

通过计算模型对 MIPMP 吸声结构进行算例分析。图 4 是在 50 mm 背腔下, 穿孔率分别为 0.1%、0.3%、0.7% 时 MIPMP 吸声系数计算曲线。图中, 第 1 个吸声峰随穿孔率的增大先升高后降低, 峰值频率逐渐向高频移动; 第 2 个吸声峰随穿孔率的增大逐渐降低, 峰值频率向高频移动, 频段宽度逐渐增加。

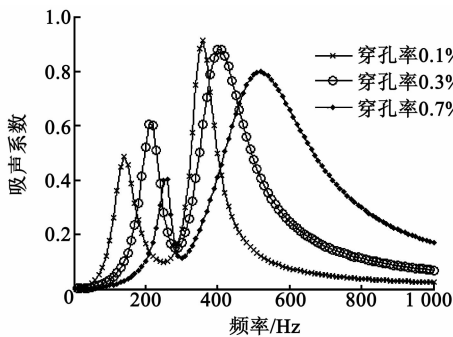


图 4 不同穿孔率 MIPMP 吸声系数

图 5 为穿孔率 0.7% 时, 背腔深度分别为 50 mm、80 mm、110 mm 时的 MIPMP 吸声系数计算曲线。图中, 第 1 个吸声峰随背腔深度的增加而升高, 但峰值频率维持在 250 Hz 附近; 第 2 个吸声峰随背腔厚度的增加略有下降, 频段宽度变窄, 向低频移动。图 4、5 中的第 2 个吸声峰的变化规律与微穿孔板随穿孔率和板后空腔的变化特性相似。图 5 中的第 1 个吸声峰的共振频率不受背腔深度的影响, 此特点与机械阻抗板相似, 故断定第 2 个吸声峰主要由微穿孔引起,

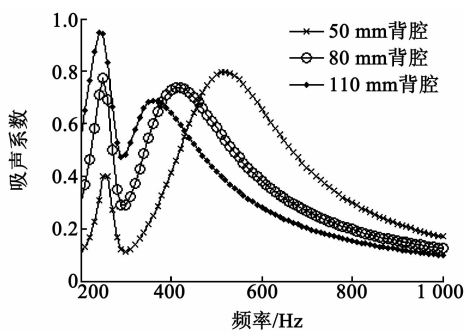


图 5 不同背腔深度下 MIPMP 吸声系数

第 1 个吸声峰主要由机械阻抗引起。

2 实验研究

2.1 MIPMP 吸声系数

实验仪器为声望 SWZ 驻波管和声望 VS302USB 双通道声学分析仪。粘弹性材料粘贴在驻波管外端, 然后将机械阻抗板与之粘合, 用金属套筒套在驻波管外端, 形成板后空腔与刚性壁面。图 6 为驻波管测试系统连接示意图。机械阻抗板直径为 $\varnothing 107$ mm, 厚为 0.8 mm, 质量为 19.72 g, 粘弹性材料的阻尼系数 (R) 和弹性系数 (K) 分别为 2.47 N/(m/s) 和 54 450 N/m。实验中, 在 MIP 上开直径 $\varnothing 1$ mm 的微孔, 背腔一定的情况下, 测量穿孔率为 0.37%、0.69%、0.97% 时 MIPMP 结构的吸声系数; 穿孔率一定情况下, 测量背腔深度为 50 mm、80 mm、110 mm 时 MIPMP 结构的吸声系数。

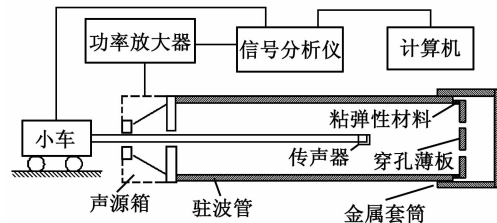


图 6 驻波管测试系统连接示意图

图 7 为 50 mm 背腔下, 穿孔率分别为 0.37%、0.69%、0.97% 的 MIPMP 的吸声系数曲线。由图可见, 随着穿孔率的增大, 第 1 个吸声峰先升高后降低, 最大值出现在穿孔率为 0.69% 时, 且峰值频率随穿孔率的增大向高频移动; 第 2 个吸声峰逐渐降低, 频段变宽, 向高频移动。

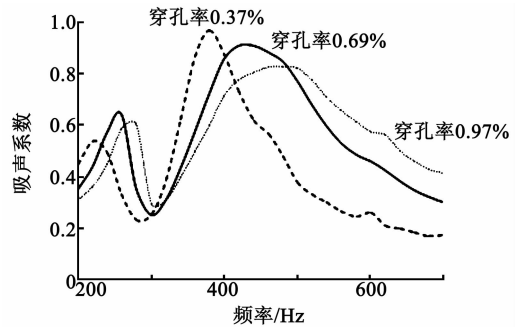


图 7 不同穿孔率 MIPMP 吸声系数实验结果

图 8 为穿孔率 0.69% 时, 机械阻抗板在 50 mm、80 mm、110 mm 背腔深度下的吸声系数曲线。由图可见, 随着背腔深度的增加, 第 1 个吸声峰逐渐升高, 共振频率稍微向低频移动; 第 2 个吸声峰向低频移动, 峰值变小, 频段变窄。图 7、8 与计算模

型所呈现的 MIPMP 结构的吸声特性规律基本一致,证明理论分析所得结论:第 1 个吸声峰由机械阻抗引起,第 2 个吸声峰由微穿孔引起。

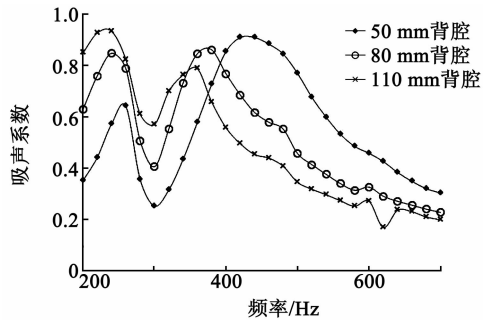


图 8 不同背腔深度下 MIPMP 吸声系数实验结果

2.2 复合结构吸声系数

将 MPP 与 MIPMP 组成复合吸声结构,如图 9 所示。MPP 参数为:直径 $\varnothing 100$ mm,厚度 0.8 mm,孔径 $\varnothing 0.8$ mm,穿孔率 3%,背腔深度 D_1 为 50 mm; MIP 参数为:直径 $\varnothing 106$ mm,板厚 0.8 mm,质量 19.27 g; MIPMP 参数为:直径 $\varnothing 106$ mm,板厚 0.8 mm,质量 19.27 g,孔径 $\varnothing 1$ mm,穿孔率 0.69%,背腔深度 D_2 为 50 mm,阻尼系数 2.12 N·s/m,弹性系数 79 155 N/m。图 10 为 MPP+MIP 与 MPP+MIPMP 两种复合结构吸声系数曲线。由图可见, MIPMPP+MPP 复合吸声结构在 200~1 600 Hz 出

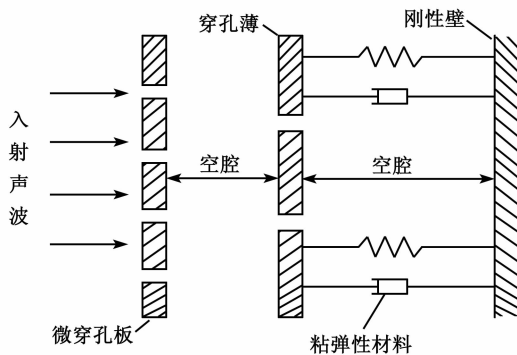


图 9 MPP+MIPMP 复合吸声结构示意图

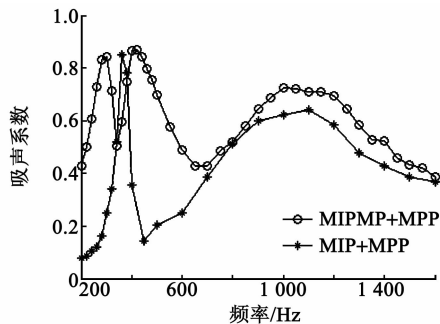


图 10 MPP+MIP 与 MPP+MIPMP 复合结构吸声系数对比

现 2 个吸声峰,且频带更宽,吸声性能明显改善。

3 结论

从理论和实验两方面初步研究了 MIPMP 吸声结构的吸声特性,研究表明:

1) MIPMP 吸声结构在机械阻抗和微穿孔的共同作用下出现双吸声峰,吸声效果对比 MIP 吸声结构显著增强。

2) 随着穿孔率的增大,机械阻抗单元的吸声峰值先增大后减小,实验中,穿孔率为 0.69% 时机械阻抗单元的吸声峰值最大;微穿孔单元的吸声峰值逐渐减小,带宽增大,向高频移动。

3) 随着背腔厚度的增加,机械阻抗单元的吸声峰值逐渐增大,频率基本不变;微穿孔单元的吸声峰值逐渐减小,频带变窄,向低频移动。

4) MPP 与 MIPMP 构成的复合吸声结构在 200~1 600 Hz 频段表现出了良好的吸声效果。MIPMP 结构吸声特性的初步研究为改善吸声材料和结构的低频降噪性能提供了新的思路和参考。计算模型与实验结果所呈现的变化趋势一致,但共振频率和带宽不能良好吻合,MIPMP 结构的吸声机理和吸声系数的精确计算尚需进一步研究。

参考文献:

[1] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975(1):38-50.
 MA Dayou. Theory and design of microperforated panel absorbers[J]. Scientia Sinica, 1975(1):38-50.

[2] 王鹏,王敏庆,刘彦森,等. 并联微穿孔板吸声结构研究[J]. 压电与声光, 2008, 30(4):489-491.
 WANG Peng, WANG Minqing, LIU Yansen, et al. Study on the parallel microperforated panels[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2008, 30(4):489-491.

[3] LIU J, HERRIN D W. Enhancing micro-perforated panel attenuation by partitioning the adjoining cavity [J]. Applied Acoustics, 2010, 71:120-127.

[4] 徐颖,任玉凤,李晨曦. 插入铜纤维薄微穿孔板的吸声性能[J]. 噪声与振动控制, 2011(3):136-140.
 XU Ying, REN Yufeng, LI Chenxi. Study on absorption performance of thin micro-perforated panel penetrated with copper fibers[J]. Noise and Vibration Control, 2011(3):136-140.

[5] 杨军伟,蔡俊,邵隼. 微穿孔板-蜂窝夹芯复合结构的隔声性能[J]. 噪声与振动控制, 2013(4):122-125.
 YANG Junwei, CAI Jun, SHAO Zong. Sound insulation property of the composite structure with micro-

- perforated panels and honeycomb core[J]. *Noise and Vibration Control*, 2013(4):122-125.
- [6] PARK S H. Acoustic properties of micro-perforated panel absorbers backed by Helmholtz resonators for the improvement of low-frequency sound absorption[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013,332:4895-4911.
- [7] QIAN Y J, KONG D Y, LIU Y, et al. Improvement of sound absorption characteristics under low frequency for micro-perforated panel absorbers using super-aligned carbon nanotube arrays[J]. *Applied Acoustics*, 2014,82:23-27.
- [8] DUAN X H, WANG H Q, LI Z B, et al. Sound absorption of a flexible micro-perforated panel absorber based on PVDF piezoelectric film[J]. *Applied Acoustics*, 2015,88:84-89.
- [9] 赵晓丹,丁瑞,胡鹏. 运用弹性支撑背板提高微穿孔板低频吸声性能[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(5):567-570.
ZHAO Xiaodan, DING Rui, HU Peng. Low-frequency sound absorptivity improvement of micro-perforated panel absorber by elastic supported back-wall [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2012,33(5):567-570
- [10] 赵晓丹,李晓,丁瑞. 机械阻抗与声阻抗结合提高微穿孔板低频吸声性能[J]. *声学学报*, 2014, 39(3):360-364.
ZHAO Xiaodan, LI Xiao, DING Rui. Enhancement of low-frequency sound absorption of micro-perforated panels by adding a mechanical impedance [J]. *Acta Acustica*, 2014,39(3):360-364.
- [11] 吴楠,范向前,赵晓丹. 结合机械阻抗的微穿孔板吸声计算及试验研究 [J]. *压电与声光*, 2015, 37(3):480-484.
WU Nan, FAN Xiangqian, ZHAO Xiaodan. Acoustic calculation and experimental research of micro-perforated panel combined with the mechanical impedance [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2015,37(3):480-484.
- [12] ZHAO X D, FAN X Q. Enhancing low frequency sound absorption of micro-perforated panel absorbers by using mechanical impedance plates [J]. *Applied Acoustics*, 2015, 88:123-128.
- [13] 焦风雷,刘克,丁辉. 关于微穿孔板吸声体频带宽度极限的讨论[J]. *应用声学*, 2001,20(6):36-40.
JIAO Fenglei, LIU Ke, DING Hui. Discussions on the utmost frequency band of micro-perforated panel absorber [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2001,20(6):36-40.
- [14] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计 [J]. *声学学报*, 1997,22(5):385-393.
MA Dayou. General theory and design of microperforated-panel absorbers [J]. *Acta Acustica*, 1997, 22(5):385-393.
- [15] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. *声学基础* [M]. 2版. 南京:南京大学出版社, 2001.

(上接第 879 页)

- HUANG Jun, JING Hong. Gesture control research based on leap motion [J]. *Computer Systems & Applications*, 2015,24(10):259-263.
- [2] 徐崇斌,周明全,沈俊辰,等. 一种基于 Leap Motion 的直观体交互技术 [J]. *电子与信息学报*, 2015,37(2):353-359.
XU Chongbin, ZHOU Mingquan, SHEN Junchen, et al. Leap Motion based intuitive volume interaction technology [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2015,37(2):353-359.
- [3] 潘佳佳,徐昆. 基于 Leap motion 的三维自由手势操作 [J]. *中国科技论文*, 2015,10(2):207-212.
PAN Jiajia, XU Kun. Three-dimensional freehand gesture manipulation based on Leap Motion [J]. *China Sciencepaper*, 2015,10(2):207-212.
- [4] PIETIKAINEN M. Image analysis with local binary patterns [C]//Heidelberg: SCIA 2005 :14th Scandinavian Conference on Image Analysis, 2005:115 - 118.
- [5] MOHANDÉS M, ALIYU S, DERICHE M. Arabic sign language recognition using the Leap Motion controller [J]. *IEEE*, 2014,1:960-965.
- [6] CHEN Yanmei, DING Zeyu, CHEN Yenlun, et al. Rapid recognition of dynamic hand gestures using leap motion [J]. *IEEE*, 2015,7:1419-1424.
- [7] MARIN G, BOMINIO F, ZANUTTIGH P. Hand gesture recognition with the Leap Motion and kinect devices [J]. *IEEE*, 2014,4:1565-1569.
- [8] 梁燕. SVM 分类器的扩展及其应用研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2008.
- [9] 奉国和. SVM 分类核函数及参数选择比较 [J]. *计算机工程与应用*, 2011,47(3):123-128.
FENG Guohe. Parameter optimizing for support vector machines classification [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011,47(3):123-128.
- [10] 王华秋,王斌. 优化的邻近支持向量机在图像检索中的应用 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2014(9):66-71.
WANG Huaqiu, WANG Bin. Application of optimized proximal support vector machine in image retrieval [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2014(9):66-71.