

# 汽车车内噪声主动控制系统仿真

徐志坚, 张心光, 王岩松, 刘宁宁

(上海工程技术大学 汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:**降低汽车空腔的振动,是抑制汽车车内噪声的有效途径之一;以激振器、作动器和控制器等为主要部件,搭建了简化的汽车车内噪声主动控制系统,该系统通过将汽车空腔模型简化为板件,以减弱板件振动为目标,实现了汽车车内噪声主动控制;采用简谐正弦及余弦信号作为激振器发出的激励,用于模拟板件的初始振动,控制器通过采用模糊控制算法直接控制压电陶瓷作动器的振动,压电陶瓷作动器的振动用于抑制板件的振动,完成了汽车车内噪声主动控制系统仿真;仿真结果表明,研究采用的汽车车内噪声主动控制系统,使汽车空腔振动降低23%,为解决由汽车发动机和动力总成的振动所引发的汽车车内噪声问题提供了一个有效途径。

**关键词:**汽车;噪声;主动控制系统

## Simulation of Automobile Interior Noise Active Control System

Xu Zhijian, Zhang Xinguang, Wang Yansong, Liu Ningning

(College of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Reducing the vibration of the automobile cavity is one of the effective ways to eliminate automobile interior noise. This paper set up a simplified automobile interior noise active control system with vibration exciter, actuator and controller as the main components, and the system simplify the automobile cavity model for plate to weaken vibration plate as the goal, then achieve automobile interior noise active control. Using simple harmonic sine and cosine signal as incentives from the vibrator, which is used for simulateing initial vibration of plate. Controller by using fuzzy control algorithm directly controls the vibration of the piezoelectric ceramic actuators, the vibration of the piezoelectric ceramic actuators is used for eliminating the vibration of the plate, accordingly, completed the simulation of the automobile interior noise active control system. Simulation results show that the automobile interior noise active control system adopted in this paper made automobile cavity vibration reduced by 23%, to solve the problem of the automobile interior noise caused by automobile engine and powertrain vibration provides an effective method.

**Keywords:** automobile; noise; active control system

## 0 引言

汽车车内噪声作为评价汽车乘坐舒适性的一项重要指标,越来越受到人们的重视。噪声被动控制方法大多能对中、高频段的噪声进行有效的抑制,但无法有效抑制以低频段噪声为主的汽车车内噪声<sup>[1]</sup>。

噪声主动控制能有效抑制以低频段噪声为主的汽车车内噪声,主要分为有源声控制和有源力控制两大类<sup>[2]</sup>。有源声控制的降噪区域仅局限于次级声源附近,需要大量次级声源才能达到较好降噪效果。不同于有源声控制,有源力控制<sup>[3]</sup>具有结构紧凑等优点,对于抑制由结构振动产生的噪声更加有效。

在有源力控制中,控制算法多采用最小均方(least mean square, LMS)算法和模糊逻辑控制(fuzzy logic control, FLC)算法。Emborg<sup>[4]</sup>采用了基于滤波-X最小均方算法的前馈控制器,在萨博轿车上进行了车内噪声主动控制研究;陈勇等<sup>[5]</sup>应用压电元件针对大型复合材料圆柱壳设计了压电自适应壳结构,并对其径向振动进行了振动主动控制研究;Doug-

las<sup>[6]</sup>给出了多通道滤波-XLMS快速算法,并将其应用到噪声主动控制系统中;路小波等<sup>[7]</sup>采用滤波-XLMS算法对压电竖直悬挂柔性梁的振动控制系统进行了实验研究。但是,采用LMS算法建立噪声主动控制系统,通常是需要先建立被控对象的精确的数学模型,通过对其数学模型进行不断的修正,才能建立出噪声主动控制系统。因此,该方法不仅费时费力,而且可能存在由于数学模型的精确性不足而导致汽车车内噪声主动控制系统不稳定的情况。FLC算法优于最小均方算法,在噪声主动控制系统设计中不需要建立被控对象的精确的数学模型,因而避免了繁琐复杂的计算的同时,使得控制机理和策略易于接受与理解,同时具有较强的鲁棒性,已经有许多学者将其应用到结构控制领域<sup>[8]</sup>。

利用MATLAB/Simulink软件,搭建简化的汽车车内噪声主动控制系统——有源力控制系统。将板件为控制对象,以简谐信号作为激振器发出的激励,模拟板件的初始振动,控制器将通过采用模糊控制算法设计,控制作动器的振动,从而振动抑制板件的振动,以实现汽车车内噪声主动控制系统仿真。通过将研究中采用的汽车车内噪声主动控制系统控制前后比较,研究中简化的汽车车内噪声主动控制系统是有效的,可为解决由汽车发动机和动力总成的振动所引发的汽车车内噪声问题研究与应用提供一定程度的参考。

## 1 噪声主动控制仿真系统

汽车车内噪声主动控制仿真系统主要包括激振器、传感

收稿日期:2017-04-17; 修回日期:2017-05-09。

基金项目:国家自然科学基金项目(51675324,51609132);校科研创新项目(E3-0903-16-01218,E3-0903-17-01265)。

作者简介:徐志坚(1990-),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事噪声控制方向的研究。

张心光(1982-),男,江苏徐州人,博士,硕士研究生导师,主要从事噪声控制和动力系统建模方向的研究。

器, 电荷放大器、数据采集卡、模糊控制器、压电驱动电源、压电陶瓷作动器等, 如图 1 所示。

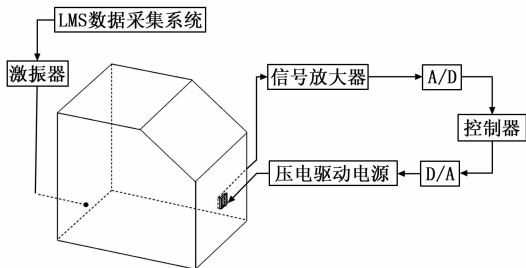


图 1 噪声主动控制系统

在图 1 中, 激励信号采用简谐正弦及余弦信号, 该信号迫使汽车空腔模型壁板发生受迫振动, 从而使空腔模型内部出现较大的噪声; 空腔模型前壁板上的传感器能够迅速检测到振动的响应情况, 并将信号传递到模糊控制器中, 经控制器处理迅速做出反应, 生成控制信号, 输入到压电陶瓷驱动电源, 直接施加给空腔模型前壁板上的压电陶瓷作动器, 使得压电陶瓷作动器按照给定的控制规律振动, 抑制空腔模型壁板的振动, 从而实现降低空腔模型内部噪声的目的, 噪声主动控制系统设计与实现思路如图 2 所示。

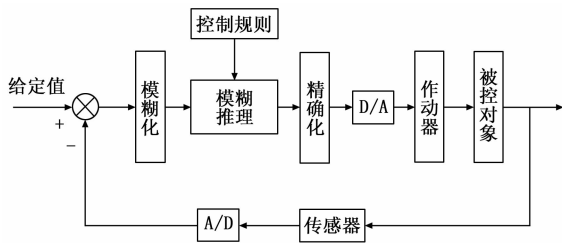


图 2 噪声主动控制系统设计与实现思路

传感器和作动器作为噪声主动控制仿真系统的主要部件, 采用压电材料, 分别用于振动信号的测量和抑制<sup>[9]</sup>。压电材料主要有压电陶瓷、高分子聚合物和压电复合材料。与其他压电材料相比, 压电陶瓷的力电转换效果性能较好, 具有响应速度快、能量密度高等优点<sup>[10]</sup>。因此, 研究中的传感器和作动器采用压电陶瓷片, 其相关参数见表 1。

表 1 压电陶瓷片相关参数

参数	数值
压电应变常数 $d_{31}/(\text{pC}/\text{N})$	750
质量密度 $\rho_{\text{PZT}}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7 400
相对介电常数 $\epsilon/\epsilon_0$	4 500
杨氏弹性模量 $E_{\text{PZT}}/\text{GPa}$	40

压电材料既是电介质, 又是弹性体。因此, 既具有力学特性又具有电学特性。当压电材料作为弹性体时, 由正压电效应可知在外界作用力的作用下压电材料会发生弹性形变。根据胡克定律可知, 其应变  $S$  和应力  $T$  之间存在一定的关系:

$$S = sT \quad (1)$$

其中:  $s$  为弹性柔度系数矩阵, 单位为  $\text{m}^2/\text{N}$ 。因为压电材料与某些晶体的结构类似, 所以也具有对称性, 因此, 其弹性柔度系数矩阵可表达为下式:

$$s = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

所以, 压电材料的应变  $S$  与应力  $T$  关系的矩阵表达式可描述为:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

压电材料作为电介质时, 由逆压电效应可知在外界电场的作用下压电材料内部发生极化, 其上下表面会产生电荷使其发生形变。可用电位移  $D$  和电场强度  $E$  来表征压电材料的电学行为, 其表达式如下:

$$D = \epsilon E \quad (4)$$

式中,  $\epsilon$  为介电常数, 而压电材料的极化程度与其有关, 当电场强度  $E$  增加时会引起的电位移  $D$  的变化其变化量可以用介电常数  $\epsilon$  表示, 同时压电材料的固有电容也与介电常数  $\epsilon$  有关, 而压电材料的固有电容对其作为传感器时的工作频率的下限值有很大的影响。对于各向异性的电介质材料来讲, 材料的介电性需要用六个独立的介电常数分量来描述; 而对于各向同性的电介质材料仅用一个介电常数分量来描述。因为压电材料与六角晶体的结构具有类似的对称性, 所以被极化的压电材料其介电常数只有  $\epsilon_{11}$ 、 $\epsilon_{22}$  和  $\epsilon_{33}$ , 其余为 0, 即

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此, 压电材料电学特性的矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

在车内噪声主动控制系统中, 控制算法的研究是关键, 关系到系统稳定性、消声效果和实时性。

模糊控制对于难以建立精确数学模型或者非常复杂的系统都有很好的控制效果。基于专家的操作经验和操作者的经验<sup>[11]</sup>建立起来的模糊控制模型通过模糊推理完成控制决策过程, 实现对被控对象的调节控制, 能获得较好的人工控制效果<sup>[12]</sup>。

模糊控制器是实现模糊控制的载体, 其设计的好坏直接关系到噪声主动控制的效果如何。模糊控制器一般是可以靠软件编程来实现的。实现模糊逻辑控制的一般步骤: 首先, 通过传感器把要监测的物理量变成电量, 在通过模数转换器 (A/D) 把它转换成精确的数字量, 精确数字输入经过模糊逻辑控制器, 首先把这个精确的数字量转换成模糊集合的隶属函数, 这

一步就是精确量的模糊化。其次, 根据制定出的模糊控制规则, 并进行模糊逻辑推理, 以便得到一个模糊输出集合, 即一个新的模糊隶属函数, 这一步为模糊控制规则形成和推理, 其目的是利用模糊输入值获取适当的控制规则, 为每个控制规则确定适当的隶属度, 并通过加权计算合并那些规则的输出。最后, 根据模糊逻辑推理得到的输出模糊隶属函数, 用不同的方法找一个具有代表性的精确值作为控制量, 这一步为模糊输出量的解模糊判决, 意图把分布范围概括合并成单点的输出值, 加到压电陶瓷作动器上实现控制<sup>[13]</sup>。

### 2 传感器和作动器的布置

研究中将汽车空腔模型简化为平板, 平板的相关材料属性如表 2 所示, 并在平板变形量最大处的上下表面分别布置传感器和作动器。

表 2 平板的相关材料属性

参数	数值
长度 $a_l/mm$	400
宽度 $b_l/mm$	400
厚度 $h_l/mm$	1
质量密度 $\rho_l/(kg/m^3)$	2 700
泊松比 $\mu_l$	0.33
杨氏弹性模量 $E_l/GPa$	70

应用 COMSOL/Multiphysics 软件对平板进行模态分析, 以掌握其振动特性, 并确定待控制振动模态, 约束方式为四边固定, 模态分析的部分计算结果如表 3 和图 3 所示。

表 3 平板模态分析结果

阶数	1	2	3	4
固有频率/Hz	72.23	117.06	123.64	182.43

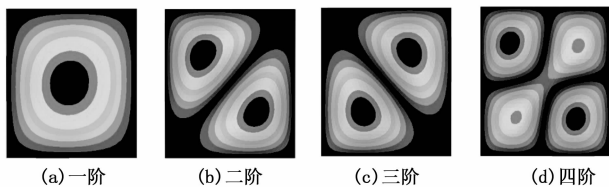


图 3 平板结构模态应变云图

由表 3 和图 3 的计算分析结果可知, 平板的第一阶模态固有频率为 72.23 Hz, 其结构振动变化主要以第一阶振型为主, 其最大模态应变位于平板的中心处, 根据最大模态力准则, 确定压电作动器和传感器的粘贴位置, 如图 4 所示。

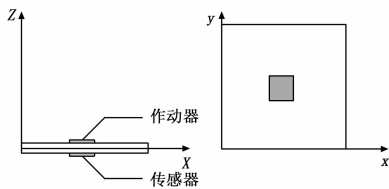


图 4 压电作动器和传感器的粘贴位置

### 3 仿真分析

研究中采用两个多维的状态空间模型分别来模拟实际的外

扰通道和控制通道。根据系统的输入和输出的观测信息来估计它的数学模型, 采用的是从输入输出数据中估计系统状态空间表达式, 即系统状态方程模型估计。对于单输入单输出 (Single Input Single Output, SISO) 系统而言, 表达式为:

$$X(n+1) = AX(n) + Bu(n)$$

$$Y(n) = CX(n) + Du(n) \tag{7}$$

式 (7) 中,  $u(n)$  为输入向量;  $Y(n)$  为输出向量;  $X(n)$  为状态向量;  $A$  为系统矩阵;  $B$  为分配向量;  $C$  为量测向量;  $D$  为入出向量。

通过 Simulink/MATLAB 进行二维模糊控制器设计。结合四边简支的平板的振动主动控制研究, 模糊控制系统中的控制通道模型和干扰通道模型根据上述方法在 Simulink/MATLAB 中建立, 控制系统中的输入信号来自于压电陶瓷传感器所获得的信号, 并以此作为模糊控制器的调节依据, 通过模糊控制器内部的推理, 输出相应的用于驱动压电陶瓷作动器电压控制信号, 最终使干扰信号尽量地减少。研究中以参考输入加速度和加速度响应的偏差  $e$  及其变化率  $ec$  作为模糊控制器的输入量, 把用于驱动压电陶瓷作动器的控制电压作为控制器的输出量  $u$ 。于是, 假设模糊控制器的输入量为  $e$  和  $ec$ ,

对输入量  $e$  和  $ec$  和输出量  $u$  采用下面 7 个模糊子集来表示它们的模糊状态: NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB。这里 NB 表示“负大”, NM 表示“负中”, NS 表示“负小”, ZO 表示“零”, PS 表示“正小”, PM 表示“正中”, PB 表示“正大”。对于输入输出语言变量应用三角形隶属度函数, 并建立了“以最快的速度使平板振动加速度为零”标准的模糊控制规则, 模糊算法如 “If  $e$  is PS and  $ec$  is NM, then  $u$  is PS”, 模糊控制规则见表 4。

表 4 模糊控制的推理规则

$e \backslash ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

在进行模糊控制系统设计时采用 Simulink/MATLAB 自带的 Fuzzy logic 工具箱搭建了 SISO 车内噪声主动控制仿真系统模型, 如图 5 所示。

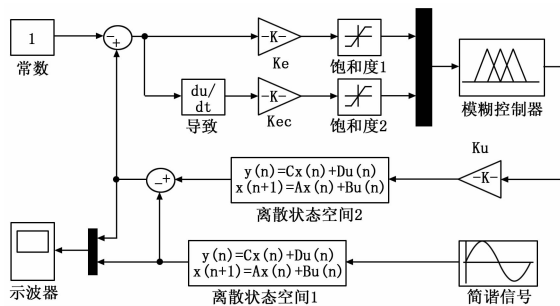


图 5 SISO 车内噪声主动控制仿真系统模型

一致性, 提高各余度信号的一致性, 降低余度表决的虚警率; 提高电传飞控系统控制系统整个控制范围内指令信号及反馈信号精度, 从而提高电传飞行控制系统整个控制范围内的控制精度; 同时降低了机械部分设计以及飞控就是计算机设计的复杂性, 在节省设计成本的同时能够提高了系统的维护性。

#### 参考文献:

- [1] Liu M, Zhang L, Shi P, et al. Robust Control of Stochastic Systems Against Bounded Disturbances With Application to Flight Control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61: 1504-1515.
- [2] Zheng X Q, Liang T, Bin Z, et al. Design and simulation of a self-repairing flight control system for UAV [A]. Control and Decision Conference (CCDC), 2012 24th Chinese [C]. IEEE, 2012: 1732-1736.

[3] Kwatny H G, Bennett W H, Berg J. Regulation of relaxed static

(上接第 59 页)

在图 5 中,  $K_e$  和  $K_{ec}$  分别为控制器输入量偏差  $e$  及其变化率  $ec$  量化因子;  $K_u$  为控制器的输出量  $u$  比例因子, 以平板为模拟控制对象, 采用简谐正弦及余弦信号作为激振器发出的激励, 用于模拟平板的初始振动, 控制器通过采用模糊控制算法推理, 输出控制电压, 进而控制作动器的振动, 用于抑制平板的振动, 完成了汽车车内噪声主动控制系统仿真, 仿真结果如图 6 所示。

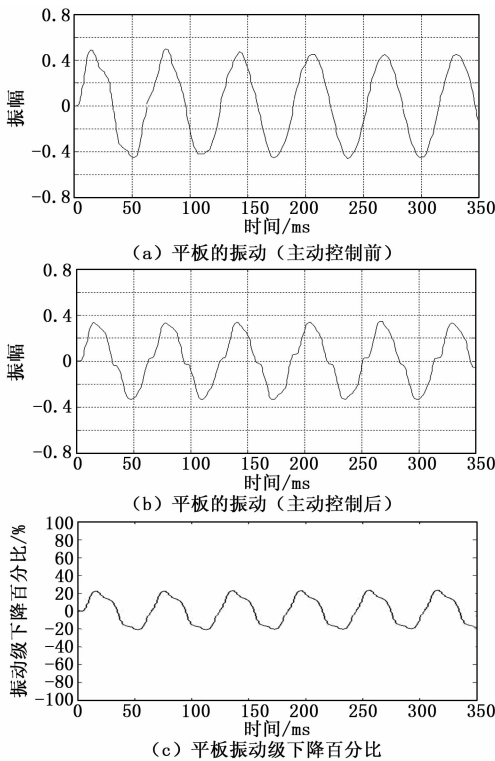


图 6 汽车车内噪声主动控制系统仿真

由图 6 (c) 可知, 在平板受到简谐振动载荷的作用下, 通过主动控制以后, 平板的振动有所减小, 基频下计算的振动级下降了约 23%。

## 4 结论

搭建了简化的汽车车内噪声主动控制系统, 该系统通过将

stability aircraft [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1991, 36: 1315-1323.

- [4] Junkui Y, Zaikang Q. Control Analysis and Autopilot Design for Static Unstable Missiles [A]. 2010 International Conference on Electrical and control Engineering (ICECE) [C]. IEEE, 2010: 623-628.

[5] 飞机设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

[6] 杜永良, 潘妍红. 波音 777 飞机高升力控制系统余度管理分析 [J]. 民用飞机设计与研究, 2012 (3): 33-34.

[7] 张西涛. 某电传飞控系统角位移传感器设计优化 [J]. 测控技术, 2013, 32 (12): 9-12.

[8] 杜永良, 高亚奎. 位移传感器仿真器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3492-3493.

[9] Savransky S D. Engineering of creativity: Introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving [M]. CRC Press, 2002.

汽车空腔模型简化为板件, 以减弱板件振动为目标, 实现了汽车车内噪声主动控制。采用简谐正弦及余弦信号作为激振器发出的激励, 用于模拟板件的初始振动, 控制器通过采用模糊控制算法直接控制压电陶瓷作动器的振动, 压电陶瓷作动器的振动用于抑制板件的振动, 完成了汽车车内噪声主动控制系统仿真研究。通过仿真结果表明, 研究采用的汽车车内噪声主动控制系统, 使汽车空腔振动级下降, 因此对由汽车发动机和动力总成的振动所引发的汽车车内噪声问题采取模糊控制是可行的。

#### 参考文献:

[1] 张强, 靳晓雄, 华春雷, 等. 车内噪声自适应有源控制系统建模与仿真 [J]. 机械设计与研究, 2009, 25 (4): 62-66.

[2] 常振, 王登峰, 郑联珠, 等. 车内噪声主动控制系统设计与试验研究 [J]. 公路交通科技, 2003, 20 (6): 150-153.

[3] 崔怀峰, 陈南. 基于多主体系统的封闭空腔有源力控制技术 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (13): 85-92.

[4] Emborg U. Application of active noise control in Saab 340 and Saab 2000 [A]. Nordic Conf. Veh. Mach. Vip [C]. Stockholm, Sweden, 1994.

[5] 程勇, 陶宝祺, 刘果, 等. 压电复合材料壳结构振动主动控制 [J]. 压电与声光, 1998, 20 (4): 228-232.

[6] Douglas S. C. Fast Implementations of the Filtered-XLMS and LMS Algorithms for Multichannel Active Noise Control [J]. IEEE Transactions Speech and Audio Processing, 1999, 7 (4): 454-465.

[7] 路小波, 陶云刚, 何延伟. 基于压电元件的振动主动控制 [J]. 振动、测试与诊断, 1999, 19 (2): 92-94.

[8] 魏井君, 邱志成, 叶春德, 等. 基于模糊控制的压电挠性梁的振动主动控制实验研究 [J]. 振动与冲击, 2008, 27 (12): 91-96.

[9] 边义祥, 杨成华. 基于压电材料的振动能量回收技术现状综述 [J]. 压电与声光, 2011, 33 (4): 612-622.

[10] 李传兵, 廖昌荣. 压电智能结构的研究进展 [J]. 压电与声光, 2002, 24 (1): 42-46.

[11] 蔡成涛, 朱齐丹. 基于模糊控制器的移动机器人路径规划仿真 [J]. 计算机仿真, 2008 (03): 182-185, 284.

[12] 汤兵勇. 模糊控制理论与应用应用技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[13] 张吉礼. 模糊-神经网络控制原理与工程应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.