

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.033

温室设施环境中声频自适应校准研究*

朱松明¹ 蔡卫明^{1,2} 汪宁² 贺惠农¹

(1. 浙江大学农业部设施农业装备与信息化重点实验室, 杭州 310058;

2. 俄克拉荷马州立大学生物系统与农业工程系, Stillwater, OK 74078)

摘要: 针对温室设施环境中采用声波促长技术时,由于环境设施对声音的来回反射、设施材料对不同声频的吸收作用等影响,使得实际声波信息失真,造成加载的声波与期望的声波相差较大,提出一种解决方案。通过及时修正声频发生系统传递函数特性参数,采用一种基于前馈补偿的闭环控制方法实现对设施环境中所加载声频的自适应校准。在一个内部长、宽、高分别为 1.2 m、0.53 m、0.9 m 的人工气候箱内进行声波加载试验,结果表明,该方法提高了声波在设施环境中的加载精度,对纯音、组合声频、音乐声频等类型的声波均达到了良好的校准作用,输出精度都在 98% 以上。

关键词: 设施农业 声波调控 闭环控制 自适应校准

中图分类号: S625.5⁺1; Q68 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)03-0180-06

Self-adaptive Calibration of Acoustic Waves in Controlled Greenhouse

Zhu Songming¹ Cai Weiming^{1,2} Wang Ning² He Huinong¹

(1. Key Laboratory of Equipment and Informatization in Environment Controlled Agriculture,

Ministry of Agriculture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Oklahoma State University, Stillwater, OK 74078, USA)

Abstract: Some kind of audible sound can help plants or animals to grow healthily and faster. However, the acoustic waves was hard to be produced accurately as they would be absorbed or reflected back and forth in controlled environments such as greenhouse, plant factory, or aquaculture factory. A solution for improving audible sound output based on a closed-loop feed-forward control method was proposed. The output sound can be corrected by updating the transfer function of sound generation system. Proof tests were conducted in an artificial climate cabinet with 1.2 m × 0.53 m × 0.9 m. The results showed that pure tones, combination sound of pure tones, and normal music can be produced with over 98% output accuracy.

Key words: Protected agriculture Acoustic regulation Closed-loop control Self-adaptive calibration

引言

温室设施栽培及设施水产养殖作为作物生产及水产养殖的重要技术手段^[1],近年来在国内外得到了较大发展,技术研究工作也取得了较大进步。以更少的物质、能源消耗和绿色环保为目标,国内外开展了大量的提高设施栽培及养殖生产效率方面的研

究,一些新型农业高新技术及装备开始应用于温室设施栽培中^[2-3]。现代物理农业技术及装备作为一种发展生态农业、可持续发展农业的重要途径,由于其高效、节能环保等优点,在设施作物栽培中的应用也越来越受到重视。但是,目前设施生产装备普遍存在成本相对较高、智能化水平较低等缺点。

在温室设施中合理配置作物生产装备可以有效

收稿日期: 2012-10-09 修回日期: 2012-11-19

* 国家科技重大专项资助项目(2008ZX07101-006)和国家留学基金资助项目(201206320038)

作者简介: 朱松明,教授,博士生导师,主要从事设施农业工程、水产养殖工程研究,E-mail: zhusm@zju.edu.cn

通讯作者: 贺惠农,副教授,博士,主要从事植物声频控制技术、振动控制研究,E-mail: nnhe@mail.hz.zj.cn

地提高设施栽培作物生产效率和降低生产成本。声频调控技术作为一种现代物理农业新技术,主要是通过生物生长环境中声波的调控,来实现农产品的优质高产。有研究表明,不同频率及强度的声波对植物生长的促进效果是不一样的。声波对农作物的促长效果关键取决于对声频的调控方式,这种作物增产方式已被证明可以应用于设施栽培作物的生产中^[4-5]。但是,目前植物声频调控方法基本都是采用开环的方式^[6-7],即以某确定的声音文件作为声源输出至发声器(音箱)。在设施作物栽培室中采用声频促长技术时,由于环境设施对声音的来回反射、设施材料对不同声频的吸收作用^[8-9]等影响,使得实际声频信息失真度较大,造成加载的声频与期望的声频相差较大,在一定程度上影响了声频对作物的促长效果。为了提高设施作物生产的效率,设计一种更适合设施环境中应用的植物声频调控装备很有必要。

本文针对目前植物声频发生器在设施作物栽培生产中应用时声频信息容易失真等不足,提出一种基于前馈补偿控制理论的解决方案,采用实时闭环控制方式,对设施环境中声频的自适应校准进行研究。

1 原理与方法

1.1 传统的声波加载方式

现有的声波在设施环境中的加载方法采用如图 1 所示的开环方式。

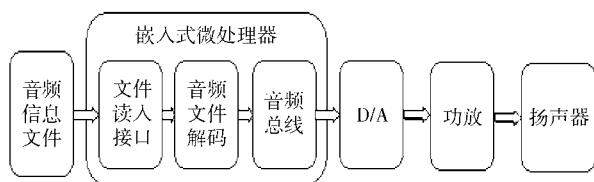


图 1 常见声波加载播放方法原理图

Fig. 1 Structure diagram of common loading way for acoustic player

1.2 声频自适应校准硬件系统结构

声频自适应校准硬件系统组成结构如图 2 所示。该硬件系统主要由嵌入式核心电路板(主要包括双核微处理器、现场可编程逻辑器件、SDRAM、Nand Flash、音频 D/A 转换芯片、A/D 转换芯片等元器件)、声压传感器、音箱以及工业计算机等组成。

其中,设施环境中的声波信息通过声压传感器经过 A/D 转换后实时反馈到硬件平台的数据采集微处理器控制中心,为环境中的声频校准提供原始数据。硬件平台中的音箱是该硬件系统的声波输出终端设备,通过声压传感器可以检测到该声频发生

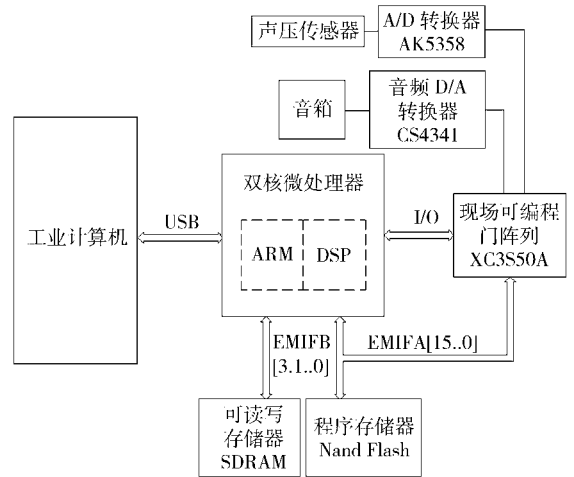


图 2 声频自适应校准硬件平台结构框图

Fig. 2 Structure diagram of hardware platform of audio self-adaptive calibration

系统的实际输出信号。

1.3 声波输出的自适应时域校准原理

声频发生系统框图如图 3 所示。

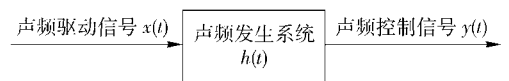


图 3 声频发生系统框图

Fig. 3 Block diagram of audio generating system

该系统的输入输出关系可表示为

$$Y(f) = X(f)H(f) \quad (1)$$

系统的输入可表示为

$$X(f) = Y(f)H^{-1}(f) \quad (2)$$

要获取较准确的控制信号 $y(t)$,关键是要得到对应的系统输入 $x(t)$,通过对系统的逆传递函数 (H_i^{-1}) 特性参数的校准,可以提高声频的输出精度。

校准原理是基于前馈补偿的控制理论,先估算声频发生系统频率响应函数,再对其求逆得到系统传递函数特性。由于实际输出声频信号取决于所估计的传递函数,所以传递函数特性估算的准确度对声频输出自适应时域校准的精度有较大影响^[10-13],自适应时域校准过程如图 4。

校准调控过程分为以下步骤:

(1) 将含有植物促长声频信息的声频文件经过解码后产生目标声频驱动信号,根据该声频驱动信号及加载环境中由声压传感器检测到的实际声频响应信号,对声频发生系统的逆传递特性采用一种非参数频域法进行估算,估算公式为

$$H_i^{-1} = \frac{X_r}{X_n} \quad (3)$$

式中 H_i^{-1} ——声频发生系统的初始逆传递函数
 X_r ——原始声频驱动信号的自功率谱
 X_n ——驱动信号和响应信号的互功率谱

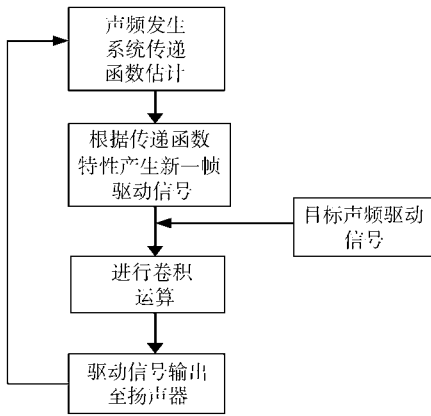


图4 音频自适应校准流程图

Fig.4 Flow diagram of audio self-adaptive calibration

(2) 采用快速傅里叶逆变换 (IFFT) 将式 (3) 中估算得到的系统传递逆传递参数转换到时域, 也就是系统脉冲响应函数的逆

$$h^{-1} = \text{ifft}(H^{-1}) \quad (4)$$

(3) 在实际控制过程中, 由于目标音频时域波形由成千上万个数据点组成, 无法一次对整个信号运用快速傅里叶变换 (FFT) 进行处理, 因此, 类似典型冲击和瞬态冲击的方法在这里并不适用, 本文采用的方法是: 将参考时域分成若干帧来处理, 此时参考时域可表示为

$$r(n) = \sum_i^M r_i(n) \quad (5)$$

对应的驱动可表示为

$$\begin{aligned} x(n) &= r(n) \otimes \text{Hinv}(n) = \\ &\left(\sum_i^M r_i(n) \right) \otimes \text{Hinv}(n) = \\ &\sum_i^M r_i(n) \otimes \text{Hinv}(n) \end{aligned} \quad (6)$$

设 $x_i(n) = r_i(n) \otimes \text{Hinv}(n)$, 则驱动为

$$x(n) = \sum_i^M x_i(n) \quad (7)$$

经过以上处理, 为了保证帧与帧之间的连续性, 本文根据长序列连续卷积分段处理的理论, 采用如图5所示的重叠处理方法, 当前计算出的一帧驱动信号必须和前一帧驱动进行叠加, 然后与下一帧驱动进行叠加, 取其叠加后的部分用于输出, 即可实现长卷积的分段卷积, 还可以保证帧与帧之间的连续性。

由于脉冲响应函数的阶数比较高, 等于帧大小 (1 024, 2 048, 4 096), 若采用线性卷积算法则比较浪费时间, 因此本文采用了化线性卷积为循环卷积的算法, 具体实现原理如下: ① 由于线性卷积的结果为 $2N - 1$ 点, 而 $\text{Hinv}(t)$ 和 $R(t)$ 都是 N 点, 因此首先需要把 $\text{Hinv}(t)$ 和 $R(t)$ 补零扩充为 $2N$ 点 (因

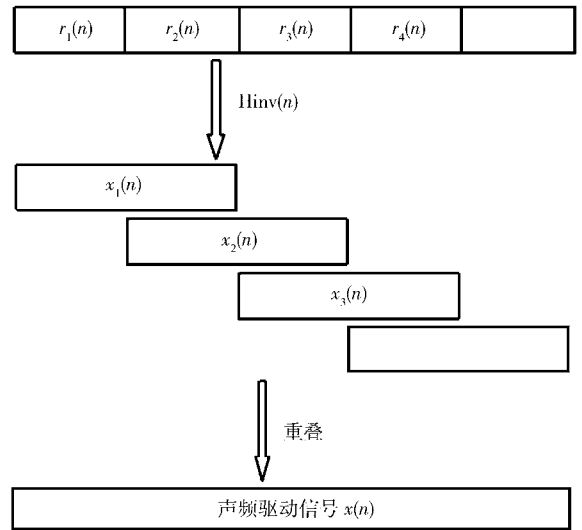


图5 音频驱动信号的产生过程

Fig.5 Creating process of audio drive signals

需采用 FFT 算法, 故不是 $2N - 1$ 点), 然后各自做 FFT, 结果相乘, 相乘结果再做 IFFT, 得到线性卷积结果。② 进行叠加, 得到当前帧输出。

对目标音频驱动信号平均分解成数帧后, 将分解出的一帧驱动信号与式 (4) 中得到的时域函数进行卷积运算, 得到系统的下一帧音频驱动信号以驱动音箱工作, 并测量环境中的实际音频信息, 根据测量结果重新估测得到新的系统传递函数特性。

(4) 不断循环重复步骤 (2) 和 (3), 从而实现音频输出在设施环境中的实时在线自适应校准, 保证输出声波信息的准确可靠。

1.4 校准验证试验平台

校准验证试验在如图6所示的人工气候箱中进行, 人工气候箱中嵌入了一套音频发生及音频自适应校准硬件系统 (硬件组成结构见图2), 该系统可以十分方便地产生不同频率及强度的声波, 并可通过声压传感器对箱体内的声音信息进行实时采集, 可以实现复杂的信号分析及处理算法, 同时通过将系统连接至计算机, 可以实现实时显示输出驱动信号信息以及通过声压传感器监测到的音频信号信息, 为设施中加载声波的校准效果评价提供了方便。

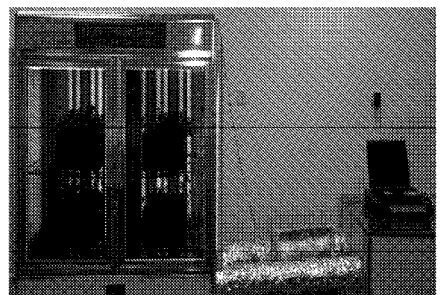


图6 校准验证试验平台

Fig.6 Test platform of calibration verification

将声压传感器安装在人工气候箱的正中央位置,通过信号线连接到声频监测系统,同扬声器输出构成一个闭环控制回路,然后利用系统中的软件编程接口编写控制算法程序实现对采集到的实时声频信息的分析处理,通过实时调整声频发生系统的驱动信号实现对气候箱中加载声波的校准。

2 验证试验

利用图6所示的试验平台,在一个内部长、宽、高分别为1 200 mm、530 mm、900 mm的人工气候箱内进行声波加载试验,对分别加载在人工气候箱中的纯音(单频)、组合频率声频、音乐声频等类型声波进行测试。通过比较校准前、后的时域声频信号,对提出的自适应校准方法进行验证。

2.1 加载纯音(单频)输出的校准效果

图7~9分别是加载1 100 Hz、2 200 Hz、3 300 Hz单频纯音驱动信号时,系统在校准前、后的声频驱动信号与人工气候箱中的实测声频信号时域图。

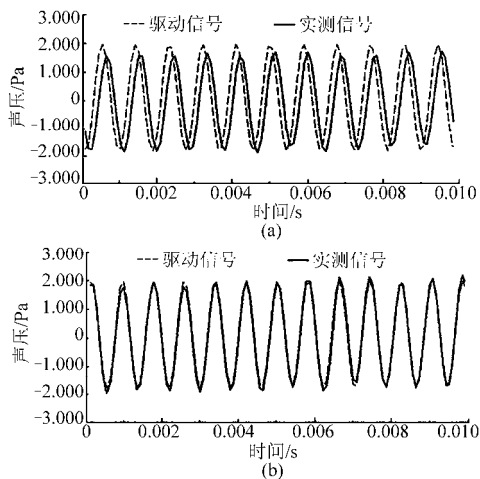


图7 校准前、后的纯音驱动与实测信号时域图(1 100 Hz)

Fig. 7 Time domain diagram of pure tone audio driver and measured audio signals before and after calibration (1 100 Hz)

(a) 校准前 (b) 校准后

由图7~9可知,采用闭环控制后,人工气候箱中加载的纯音输出更稳定,与目标驱动信号更接近,在开环时声压实测值比驱动信号目标值要小,这是人工气候箱体内材料吸收声波造成的;通过比较图7和图9发现,开环时,3 300 Hz声频输出与1 100 Hz声频输出相比较,实际的声压值与目标输出声压值的偏差要大,这说明人工气候箱体内材料对频率高的声波的吸收消耗量比对频率低的吸收消耗量要大。

对于较低频率(1 100 Hz)声频,校准前、后箱体中的实测信号与目标驱动信号没有太大变化,在开环时气候箱内加载的声频就基本达到了预期目标效果,这说明该气候箱体内的材质及结构造型对于加

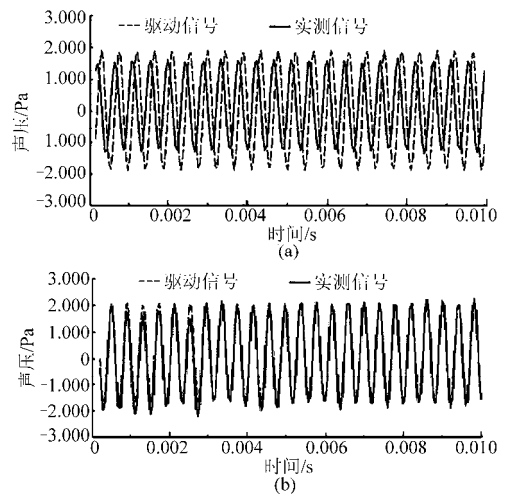


图8 校准前、后的纯音驱动与实测信号时域图(2 200 Hz)

Fig. 8 Time domain diagram of pure tone audio driver and measured audio signals before and after calibration (2 200 Hz)

(a) 校准前 (b) 校准后

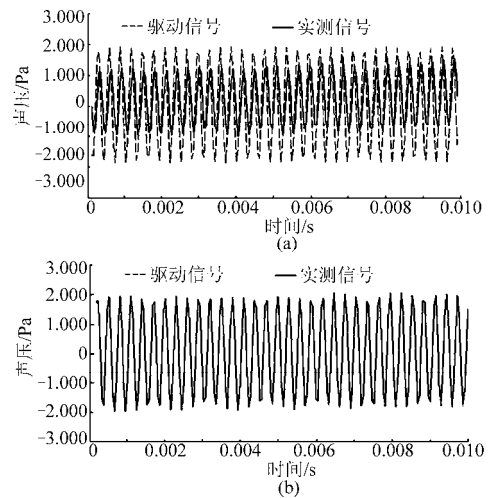


图9 校准前、后的纯音驱动与实测信号时域图(3 300 Hz)

Fig. 9 Time domain diagram of pure tone audio driver and measured audio signals before and after calibration (3 300 Hz)

(a) 校准前 (b) 校准后

载这种组合式声频(1 100 Hz)影响不大,因此,在这种情况下,不采用闭环控制也是可以的。这也表明,针对需要加载的声波类型,通过选取合适的材料,设计合理的设施环境结构同样可以改进设施环境中加载声波的效果;设施环境的造型对不同声波的影响是不一样的。

2.2 加载组合声频输出的校准效果

图10是加载1 100 Hz + 2 200 Hz + 3 300 Hz组合声频驱动信号时,系统校准前、后的声频驱动信号以及人工气候箱中的实测声频信号时域图。

通过图10可以发现,人工气候箱体内材料对于该组合频率声波(1 100 Hz + 2 200 Hz + 3 300 Hz)吸

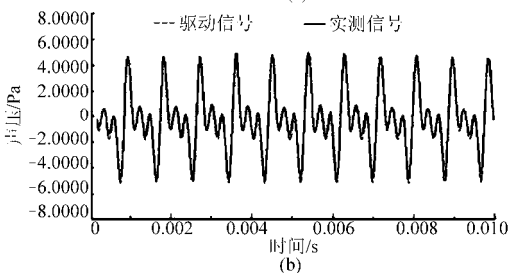
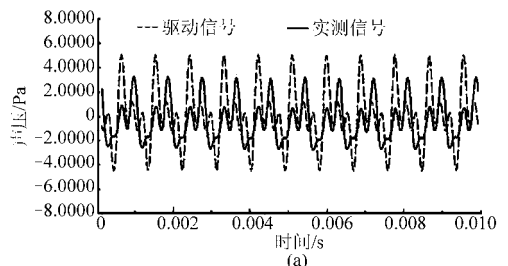


图10 校准前、后的组合声频驱动与实测信号时域图

Fig.10 Time domain diagram of combined audio driver and measured audio signals before and after calibration

(a) 校准前 (b) 校准后

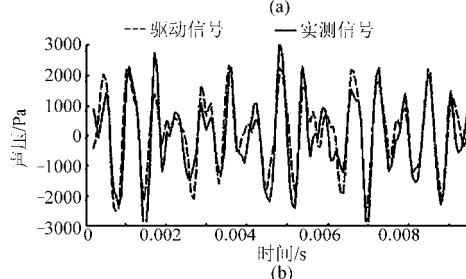
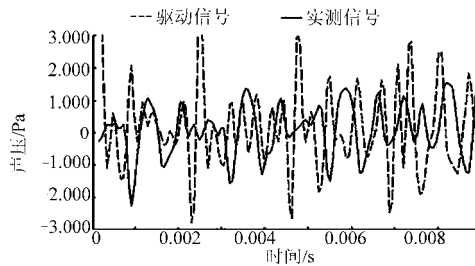


图11 校准前、后的音乐驱动与实测信号时域图

Fig.11 Time domain diagram of music driver and measured audio signals before and after calibration

(a) 校准前 (b) 校准后

收较多,造成了在开环时声压实测值比驱动信号目标值小,采用闭环控制后,人工气候箱中加载的组合频率声波输出与目标驱动信号更接近;这说明本文的自适应校准对于组合频率声波也可以达到良好效果。

2.3 加载音乐输出的校准效果

图11是加载音乐(英文歌曲:Yesterday once more)驱动信号时,系统开环和闭环时声频驱动信号与气候箱中的实测声频信号时域图。

从图11中可以发现,在开环输出时,该段音乐声频驱动信号在气候箱中的加载声波失真较大,一方面是由于该段音乐中较高频率成分多,声波被设施材料吸收消耗较多;另一方面可能是由于人工气候箱内部的结构对该段音乐中的主频影响较大。采用闭环校准控制后,有效地修正了这种失真,达到了预期的校准目标,证明提出的声波在该设施环境中的自适应校准是有效可行的。

3 结论

(1) 针对声波信息在设施环境中容易失真等不足,设计了一套声波发生及反馈校准系统。

(2) 提出了一种基于前馈补偿的闭环控制方法,通过及时修正声频发生系统传递函数特性参数,实现对设施环境中声频的自适应校准。

(3) 通过声频校准验证试验,对分别加载在人工气候箱中的纯音(单频)、组合频率声频、以及音乐声频等类型声波进行了测试,测试结果表明,对于在设施环境中1100 Hz、2200 Hz、3300 Hz单频纯音,1100 Hz + 2200 Hz + 3300 Hz的组合声频,以及音乐声频等不同类型的声波均达到了良好的校准作用,输出精度均达到98%以上,是一种可用于开发新型植物声频发生器以及对设施环境中声波参数的调控方法。

参考文献

- 丁为民,汪小岳,李毅念,等. 温室环境控制与温室模拟模型研究现状分析[J]. 农业机械学报,2009,40(5):162~168.
Ding Weimin, Wang Xiaochan, Li Yinian, et al. Review on environmental control and simulation models for greenhouses [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 162~168. (in Chinese)
- 商守海,周增产,卜云龙,等. JPWZ-1型微型植物工厂的研制[J]. 农业工程,2012,2(1):44~47.
Shang Shouhai, Zhou Zengchan, Bu Yunlong, et al. Development of JPWZ-1-type micro plant factory [J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(1): 44~47. (in Chinese)
- 贺冬仙,杨珀,朱本海. 密闭式植物工厂的嵌入网络式环境监控系统[J]. 农业工程学报,2007,23(12):156~160.
He Dongxian, Yang Po, Zhu Benhai. Web-based environmental control system for closed plant factories [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12): 156~160. (in Chinese)
- 侯天贞,李保明,滕光辉,等. 植物声频控制技术在设施蔬菜生产中的应用[J]. 农业工程学报,2009,25(2):156~160.
Hou Tianzhen, Li Baoming, Teng Guanghui, et al. Application of acoustic frequency technology to protected vegetable production [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 156~160. (in Chinese)
- Qi L, Teng G, Hou T, et al. Influence of sound wave stimulation on the growth of strawberry in sunlight greenhouse [J].

- Computer and Computing Technologies in Agriculture III. Boston: Springer, 2010, 317: 449 ~ 454.
- 6 杨方. 植物音频促长装置的研究与设计[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2004.
Yang Fang. Research and design of promotion growth of plant audio frequency [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 7 姜仕仁, 向小东. 基于动物鸣声和音乐混合的声频促长器的开发[J]. 浙江科技学院学报, 2011, 23(4): 271 ~ 275.
Jiang Shiren, Xiang Xiaodong. Growth-boost equipment based on animal voice and music: development and application [J]. Transactions of Zhejiang University of Science and Technology, 2011, 23(4): 271 ~ 275. (in Chinese)
- 8 Yang Fan, Bao Zhiyi, Zhu Zhujun, et al. The investigation of noise attenuation by plants and the corresponding noise-reducing spectrum [J]. Journal of Environment Health, 2010, 72(8): 8 ~ 15.
- 9 Daesung Kima, Kihyun Kima, Semyung Wang, et al. Maximization of the directivity ratio with the desired audible gain level for broadband design of near field loudspeaker arrays [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(23): 5 517 ~ 5 529.
- 10 贾继德, 陈剑, 王军. 车内噪声分析与控制研究[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 204 ~ 208.
Jia Jide, Chen Jian, Wang Jun. Analysis and control of the interior noise in passenger car [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 204 ~ 208. (in Chinese)
- 11 李建平, 魏宝刚. 松子开闭声学特性的试验研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 84 ~ 86.
Li Jianping, Wei Baogang. Experimental study on acoustical characteristics of pine nut with open and closed shells [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(12): 84 ~ 86. (in Chinese)
- 12 惠力, 杨英, 周扬, 等. 自适应滤波在声学测波仪数据处理中的应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2009, 17(4): 26 ~ 30.
Hui Li, Yang Ying, Zhou Yang, et al. Application of adaptive filter in the data processing of acoustics wave gauge [J]. Meteorological Hydrological and Marine Instruments, 2009, 17(4): 26 ~ 30. (in Chinese)
- 13 Pandey A. Adaptive gain processing with offending frequency suppression for digital hearing aids [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2012, 20(3): 1 043 ~ 1 055.
-

(上接第 160 页)

参 考 文 献

- 1 Smelt J P P M. Recent advances in the microbiology of high pressure processing[J]. Trends in Food Science & Technology, 1998, 9(4): 152 ~ 158.
- 2 Zoeren-Grobden D V, Schrijver J, Berg H V D, et al. Human milk vitamin content after pasteurisation, storage, or tube feeding[J]. Archives of Disease in Childhood, 1987, 62(2): 161 ~ 165.
- 3 Pathomrungsyounggul P, Lewis M J, Grandison A S. Effects of calcium-chelating agents and pasteurisation on certain properties of calcium-fortified soy milk[J]. Food Chemistry, 2010, 118(3): 808 ~ 814.
- 4 柏劲松, 雒亚洲, 刘成玉. 巴氏杀菌机的结构及应用[J]. 机电产品开发与创新, 2010, 23(3): 76 ~ 77.
Bai Jinsong, Luo Yazhou, Liu Chengyu. The structure and application of pasteur sterilization machine [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2010, 23(3): 76 ~ 77. (in Chinese)
- 5 殷涌光. 食品机械与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- 6 赵思明. 食品工程原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 7 张洪流. 化工原理[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2006.
- 8 GB/T 4789. 2—2010 食品卫生微生物学检验 菌落总数测定[S].
GB/T 4789. 2—2010 National food safety standard Food microbiological examination: aerobic plate count[S]. (in Chinese)
- 9 Milzutani K, Chen Y, Yamashita H, et al. Thermostabilization of ovotransferrin by anions for pasteurization of liquid egg white[J]. Biosci. Biotechnol. Biochem., 2006, 70(8): 1 839 ~ 1 845.
- 10 USDA/ARS. Egg pasteurization manual (ARS 74-48)[M]. Albany, CA: USDA/ARS, 1969.