

微穿孔板吸声体声学性能的仿真研究

孙文娟^{1,2}, 孔德义¹, 尤 晖¹, 段秀华^{1,2}, 刘 英^{1,2}, 钱玉洁^{1,2}, 赵 湛³

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所 传感技术联合国家重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学 自动化系, 安徽 合肥 230026;

3. 中国科学院电子学研究所 传感技术国家重点实验室, 北京 100080)

摘要: 介绍微穿孔板吸声体的基本理论, 通过 MATLAB 仿真深入分析了微穿孔板吸声体各参数对其吸声性能的影响特性, 设计了基于 LabVIEW、MATLAB 的微穿孔板吸声体声学仿真设计平台, 通过 LabVIEW 调用 MATLAB Script 节点可以方便、直观的根据具体工程应用背景要求设计所需要的微穿孔板吸声体结构, 实现了 LabVIEW、MATLAB 的完美结合。实验证明该仿真设计平台使用方便、计算准确。

关键词: 微穿孔板; 仿真; 吸声特性

中图分类号: TB52

文献标识码: A

文章编号: 1006-2394(2012)03-0010-04

Simulation on the Acoustics Performance of Micro-perforated Panel Absorber

SUN Wen-juan^{1,2}, KONG De-yi¹, YOU Hui¹, DUAN Xiu-hua^{1,2}, LIU Ying^{1,2}, QIAN Yu-jie^{1,2}, ZHAO Zhan³

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences,

Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: The basic theory of Micro-perforated panel absorber is introduced in this paper. Effect of sound absorption characteristics of parameters on the Micro-perforated panel absorber is analyzed through the MATLAB simulation. And a simulation design system of micro-perforated panel absorber is developed with MATLAB and LABVIEW code, which can design the micro-perforated panel absorber structure according to the requirements of the specific engineer application background conveniently. The practical application shows that the simulation design system is convenient to use and calculates accurately.

Key words: micro-perforated panel; simulation; absorption characteristics

微穿孔板吸声体是由穿孔直径在 1 mm 以下的薄板和板后空腔组成的共振吸声结构, 是下一代最吸引人的新型吸声材料, 最早是由马大猷教授提出的。随后, 国内外众多学者也纷纷展开对微穿孔板的研究。由于不需另加对环境存在污染的纤维材料等多孔性吸声材料便可获得良好的吸声效果, 是一种环境友好型吸声结构, 而且微穿孔板可用各种材料制成, 在提倡环保的今天微穿孔板吸声体在各个领域得到越来越广泛的应用。

1 微穿孔板吸声体的基本理论

马大猷教授利用 Rayleigh 对微管中声波分析的严格理论以及 Crandall 的简化推导, 采用声电类比的方

法得到适合微穿孔板的基本理论如下。

微穿孔板吸声体的结构及等效电路如图 1 所示。

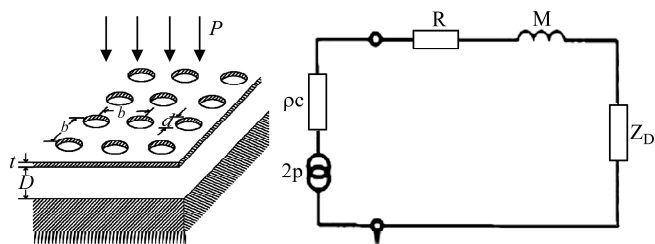


图 1 微穿孔板吸声体的结构及等效电路

图中, P 是垂直入射的声压, R 和 M 分别为微穿孔板的声阻和声抗, ρc 为空气的特性阻抗 (ρ 是空气的密度, c 为声波在空气中传播的速度), d 为穿孔直径, b 为孔间距, t 为穿孔板的厚度, 微穿孔板吸声体为共振

收稿日期: 2011-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目计划(973 计划)(2011CB302104)

作者简介: 孙文娟(1986—), 女, 硕士研究生, 研究方向为噪声与振动控制。

吸声结构, Z_D 为板后空腔的声阻抗率, 按一般计算:

$$Z_D = -j\rho c \cdot \cot(\omega D/c) \quad (1)$$

当平面声波垂直入射时, 微穿孔板吸声体的吸声系数(被吸收的声功率与入射声功率的比值)为:

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + [\omega m - \cot(\omega D/c)]^2} \quad (2)$$

式中: D 为空腔的深度(微穿孔板与后壁的距离), 微穿孔板吸声体的声阻抗率(单位面积的声阻抗):

$$Z = R + j\omega M + Z_D \quad (3)$$

相对声阻抗(用空气中的特性阻抗 ρc 进行归一化)为:

$$Z/\rho c = r + j\omega m - j\rho c \cdot \cot(\omega D/c) \quad (4)$$

其中, r (相对声阻)和 m (相对声质量)分别为:

$$r = \frac{32\mu t}{\rho c d^2} \cdot k_r, k_r = \frac{1}{1 + \frac{k^2}{32} + \frac{2k}{8} \cdot \frac{d}{t}} \quad (5)$$

$$m = \frac{t}{\rho c} \cdot k_m, k_m = 1 + \frac{1}{9 + \frac{k^2}{2}} + 0.85 \frac{d}{t} \quad (6)$$

k_r 和 k_m 为相对声阻常数和声质量常数, μ 为空气的运动粘度系数($1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), p 是穿孔率(穿孔部分的面积与总面积的比值), 为设计简便, 采用圆孔正方形排列时, 穿孔率为:

$$p = \frac{\pi d^2}{4b^2} \quad (7)$$

k 为穿孔常数:

$$k = \frac{\omega}{\mu} \cdot \frac{d}{2} = \frac{2\pi f}{\mu} \cdot \frac{d}{2} \quad (8)$$

微穿孔板吸声体在共振时吸声系数达到最大值, 此时, 最大吸声系数为:

$$\alpha_0 = \frac{4r}{(1+r)^2} \quad (9)$$

吸声系数达到最大的频率即共振频率 f_0 满足:

$$2\pi f_0 m - \cot(2\pi f_0 D/c) = 0 \quad (10)$$

半吸收频带宽度为:

$$\Delta f/f_0 = (2\pi f_0 D/c) \cdot (1+r) \quad (11)$$

2 微穿孔板吸声体的声学性能研究

微穿孔板吸声体的吸声性能由多个参数共同决定, 为了对其特性进行分析, 根据微穿孔板吸声体的基本理论, 取一些典型的参数值采用 MATLAB 通过数值仿真对其吸声特性进行研究。在保持其他参数不变而只改变其中一个参数的情况下, 得到穿孔直径 d 、板厚 t 、穿孔率 p 和空腔厚度 D 对微穿孔板吸声体吸声性能的影响曲线如图 2~图 9 所示。

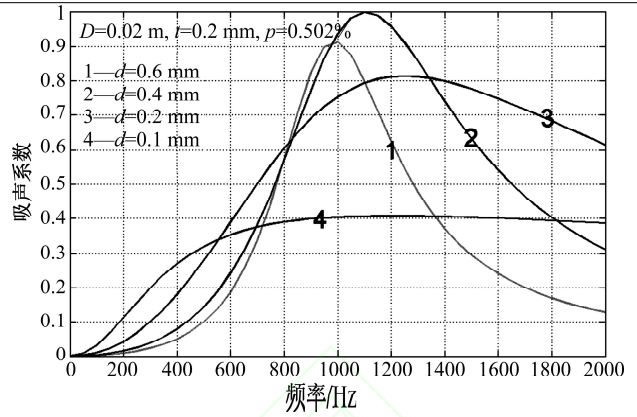


图2 改变穿孔直径对微穿孔板吸声体吸声系数的影响

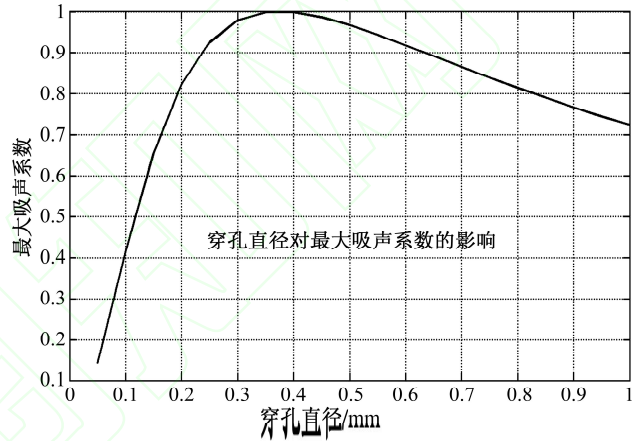


图3 穿孔直径对 α_0 的影响

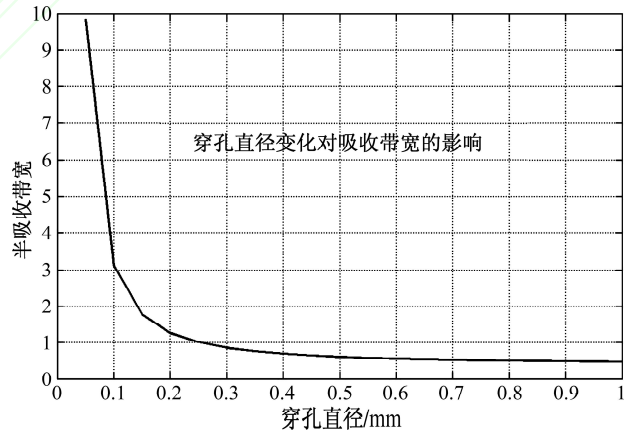


图4 穿孔直径对带宽的影响

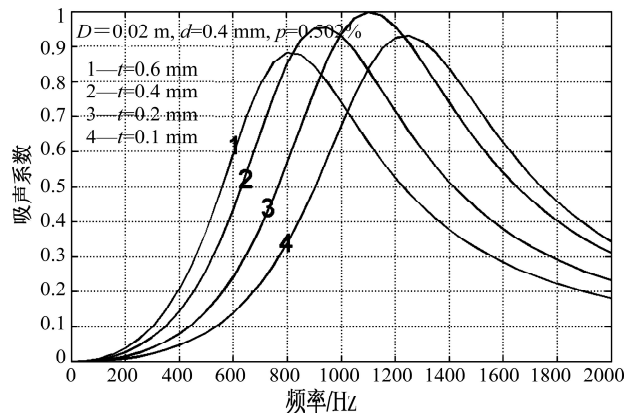


图5 改变板厚对微穿孔板吸声体吸声系数的影响

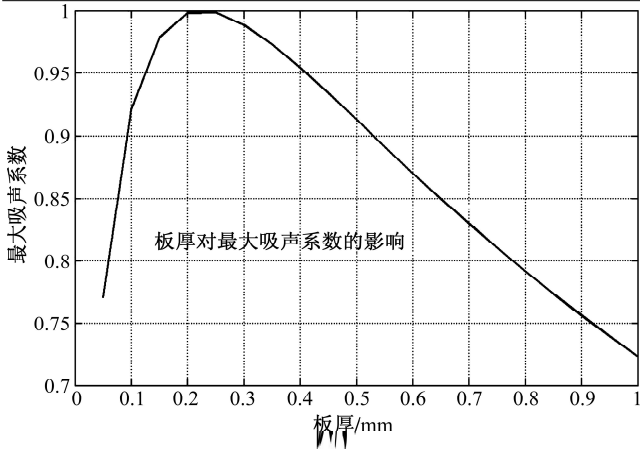


图6 板厚对 α_0 的影响

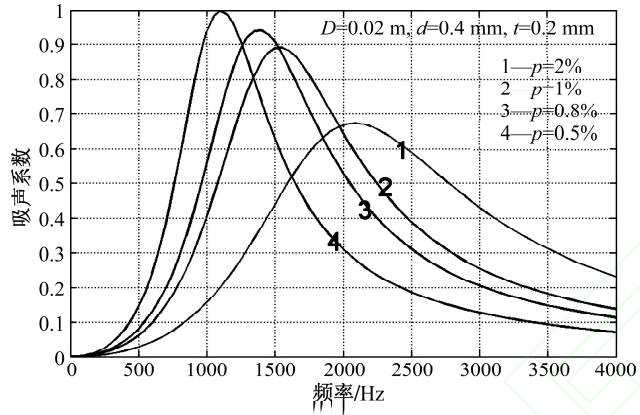


图7 改变穿孔率对微穿孔板吸声体吸声系数的影响

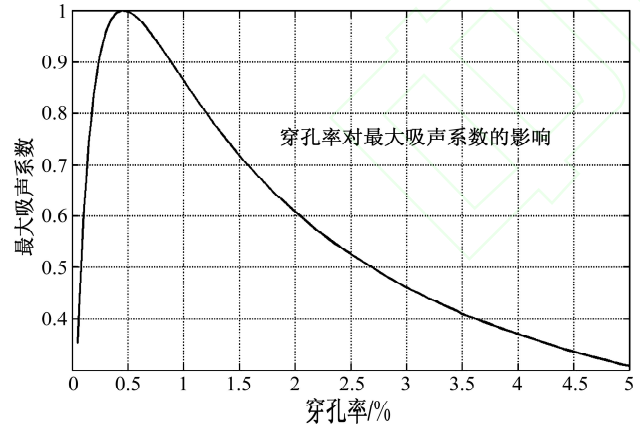


图8 穿孔率对 α_0 的影响

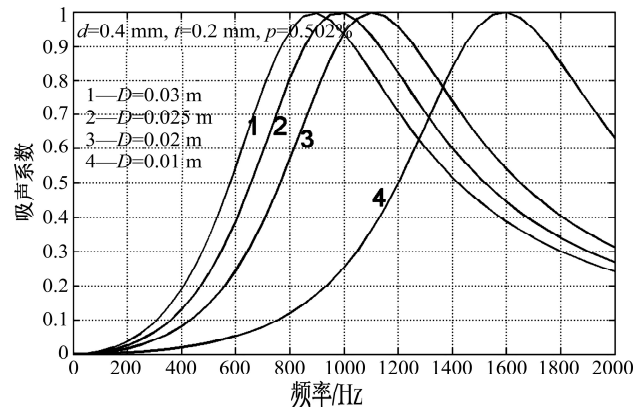


图9 改变空腔厚度对微穿孔板吸声系数的影响

(1) 从图2~图4中可以发现,当穿孔直径变小时,最大吸声系数变小,吸收频带加宽;穿孔直径变大时,吸收频带变窄。孔径值变化时存在一个特定值,使得共振吸声系数出现最大值。当穿孔直径小于0.1 mm时,吸收带宽迅速增加,由此可以看出单层微穿孔板在吸收带宽方面的潜力是非常大的。

(2) 图5和图6揭示出当板厚增大时,共振频率向低频方向移动,其值变化时存在一个特定值,使得共振吸声系数出现最大值,板厚并非越小越好,其余参数确定时可以找到一个最优的板厚值。

(3) 从图7和图8中可以看出,随着穿孔率的增加,微穿孔板的吸声系数迅速下降,并且吸声系数峰值向高频移动,而带宽明显增加。穿孔率的变化存在一个特定值,使得共振吸声系数出现最大值。

(4) 从图9可看出,空腔厚度的改变对最大吸声系数影响不大,主要是影响吸声带宽和共振频率。空腔厚度减小,低频的吸声性能下降,而高频的吸声系数有所上升,共振频率向高频方向移动。而空腔的厚度受到空间的限制又不能无限增加,因而在微穿孔板吸声体中,合适的空腔厚度显得很重要。

总之,孔径、板厚、穿孔率、空腔厚度等参数对微穿孔吸声体的吸声性能影响很大。研究分析过程中发现,孔径尽可能小为好;选用较厚的板也可以提高吸声系数;宜选用较小的穿孔率,而且不宜超过4%;在条件允许的情况下,空腔厚度易尽可能大,对提高低频吸声系数有利;这些参数的选择要根据实际情况,综合考虑各种因素而决定。

3 微穿孔板吸声体声学仿真平台设计及系统功能实现

在对微穿孔板吸声体声学性能深入研究的基础上,设计了基于LabVIEW、MATLAB的微穿孔板吸声体声学仿真设计平台。在混合编程中,利用LabVIEW设计用户图形界面,负责数据输入和显示,MATLAB在后台提供优化算法供LabVIEW调用。

本设计平台提供两种设计方式,可以根据用户的需求进行选择。两种设计方式的思路及步骤如下。

3.1 已知结构参数,计算微穿孔板特性

输入已知的微穿孔板吸声体的结构参数 d 、 t 、 b 和 D ,并输入所计算的频段范围,按计算按钮,即可快速计算最大吸声系数 α_0 、共振频率 f_0 等吸声特性如图10所示;按曲线图按钮可得到吸声特性曲线图,吸声系数、相对声阻 r 和相对声质量 m 相对于不同频率的变化曲线图,如图11所示。按返回即可返回到选择界面重新进行计算方式的选择。



图10 方式1计算示意图



图12 方式2计算示意图

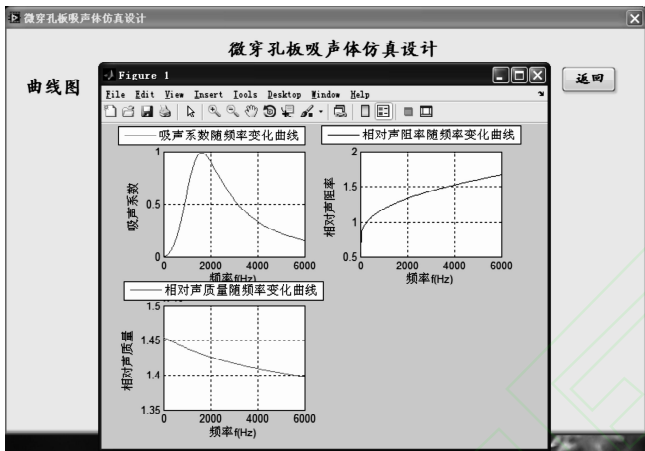


图11 LabVIEW调用MATLAB Script节点显示曲线

3.2 已知微穿孔吸声特性,计算结构参数
这种设计方式比较复杂,详细的设计步骤如下。

- (1) 根据具体工程应用背景的频带范围,确定合适的共振频率 f_0 和最大吸声系数 α_0 。
- (2) 选取合适的 k 值。

研究中发现,当 $k < 1$ 时,要保证频带的宽度要求很厚的空腔; $k > 2$ 时,所需空腔厚度减小了许多,但此时频带宽度降低。既要保证吸收频带又要有较薄的空腔厚度, k 可在 1.0 ~ 1.6 之间取值。

(3) 由式(8),可以求得 $d = 2k \cdot \frac{\mu}{2\pi f}$

(4) 由式(9)可得, $r = [2(1 + \sqrt{1 - \alpha_0 - \alpha_0})] / \alpha_0$
由式(10)可得, $m = 1/2\pi f_0 \cdot \tan(2\pi f_0 D/c)$

(5) 由式(5)、式(6)联立,通过拟牛顿迭代法可以求得板厚 t 和穿孔率 p 。

至此,微穿孔板吸声体的结构参数已全部求出。计算示意图如图12所示。

3.3 实验验证

对于第一种设计方式,运用驻波管采用驻波比法进行实验测试,获得了比较满意的结果。测试结果与声学仿真设计平台计算值的对比如图13所示。

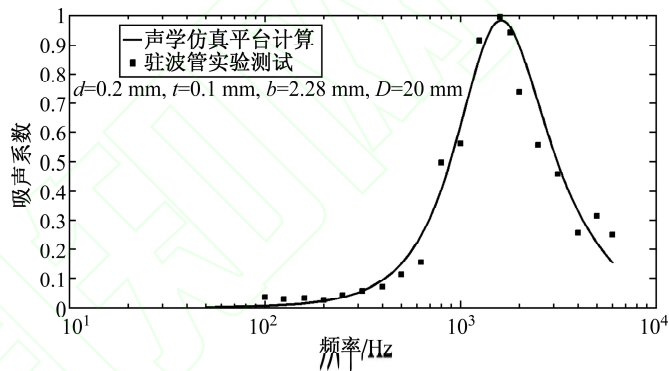


图13 本设计平台仿真与驻波管实验测试对比

对于第二种设计方式,选用文献[7]中的工程应用背景,对某风机噪声进行实例设计。共振频率 f_0 定为 392 Hz,共振处最大吸声系数 α_0 定为 0.95。应用声学仿真设计平台系统进行计算,得到的结构参数列于表1中,与文献[7]中的设计方法所得的数值进行对比,结果比较理想。

表1 计算所得微穿孔板吸声结构参数

参数名称	孔径 d /mm	板厚 t /mm	穿孔率/%
文献[7]数值	0.31	0.31	0.55
本设计平台	0.30	0.29	0.57

4 结论

在针对不同的具体工程应用背景要求设计所需要的微穿孔板吸声体结构时,要综合考虑各个参数对其吸声特性的影响,以期满足实际需求。本文所设计的微穿孔板吸声体声学仿真设计平台使用方便直观,计算准确,满足实际工程设计的需求。

参考文献:

[1] Jorge P. Arenas, Malcolm J. Crocker. Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials[J]. sound&vibration, 2010(6): 12-16.

(3) 广义预测控制器

采用广义预测控制器 GPC 来代替传统的 PID 调节器,这是一种有效的大滞后控制策略,通过它可以预测到过热汽温在未来一段时间内的变化,从而提前调整喷水阀位,有效抑制过热汽温的变化。

2 实时优化控制配线图

目前,DCS 系统能实现由常规控制模块组成的各种经典控制策略,但难于实现由各类现代控制算法如广义预测控制、模糊智能前馈控制等组成的优化控制方案,为此针对亚临界机组采用独立于 DCS 系统的 INFIT-300M 优化控制装置,它以 SIEMENS S7-300 系列 PLC 为硬件载体,与 DCS 间采用硬接线方式,并作为一个扩充的分散处理单元融入到整个 DCS 系统中。

INFIT 接收 DCS 送出的机组负荷指令、实际负荷、主汽压力设定等信号,应用先进控制算法计算出机组的优化控制指令(锅炉指令、汽机指令、减温水门指令)修正当前 DCS 控制指令,以达到改善机组协调及 AGC 控制性能的目的。

INFIT 实时优化控制系统具有以下特点:

(1) 整体控制结构的改进

INFIT 系统在整体控制结构上仍采用前馈+反馈的控制模式,但在反馈控制部分采用解决大滞后对象控制问题的预测控制技术,取代了原有的 PID 控制。通过提前预测被调量(如主汽压力、汽温等参数)未来变化趋势,而后根据被调量未来变化量进行控制,有效提前调节过程,从而大幅提高了机组 AGC 控制系统的闭环稳定性和抗扰动能力。

(2) 对机组运行特性参数进行全工况实时校正

常规 DCS 的控制回路,其控制参数一经整定结束就不会改变,对于日后机组工况的变化无能为力;INFIT 系统采用神经网络学习算法来实时校正机组运行中与控制系统密切相关的各种特性参数(包括燃料热值、汽耗率、机组滑压曲线、中间点温度设定曲线、制粉系统惯性时间等),并根据这些特性参数实时计算 AGC 控制系统的前馈和反馈回路中的各项控制参数,使得整个系统始终处于在线学习的状态,控制性能不断向最优目标逼近。

3 改造应用效果

根据上述对某发电厂 300 MW 亚临界机组的改造与设计,对改造后的机组进行现场试验运行,将其控制效果与改造前相比,机组运行良好,目前已投入正式生产运行状态,具体指标如下:

3.1 稳态品质

机组改造前,机组在稳态运行时主汽压力基本处于 ± 0.4 MPa 的等幅振荡过程,遇大幅扰动时压力偏差更大且长时间不能稳定;改造后,稳态时机组主汽压力非常平稳,偏差 < 0.2 MPa,且遇大幅扰动时基本能在一个控制周期内迅速调节至新的稳定工况。由于改造后机组的主汽压力的稳定,导致其他运行参数(如过热汽温、再热汽温等)也相应的更为稳定。

3.2 变负荷性能

改造前,设定负荷速率为 10.5 MW/min (3.28%),而实际变负荷速率仅为 $1.0\% \sim 1.5\%$ 之间;而改造后,实际变负荷速率与设定速率基本吻合,且控制精度提高后动态偏差减小,也十分有利于机组在 AGC 变负荷结束后迅速稳定。

4 结论

INFIT 实时优化控制系统采用先进的预测控制技术设计了全新的火电机组 AGC 控制系统,并已在某发电厂 300 MW 亚临界机组进行了应用,且机组运行良好,很好地解决了目前 AGC 控制所存在的难题;文中所提出的优化方案同样适用于超临界机组 AGC 控制系统。

参考文献:

- [1] 张铁军,吕剑虹,华志刚. 机炉协调系统的模糊增益调度预测控制[J]. 中国电机工程学报,2005,25(4):158-165.
- [2] 杨亮,牛玉广,高志存. 2×600 MW 超临界机组协调控制系统分析与优化[J]. 热电技术,2008(3):49-52.
- [3] 池永,李伯俊. 200 MW 火电机组电气系统 DCS 改造[J]. 热电技术,2004(1):29-31.
- [4] 解晓杰,孙建平. 基于多模型切换的过热汽温控制策略[J]. 电力科学与工程,2010,26(7):42-45.
- [5] 马平,周宇华. 模型预测控制在电厂过热汽温系统中的仿真研究[J]. 电力科学与工程,2010,26(10):43-46.

(许雪军编发)

(上接第 13 页)

- [2] 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.
- [3] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报,1998(23):21-29.
- [4] 刘克,田静,焦风雷,等. 微穿孔板吸声体的研究进展[J]. 声学学报,2005,30(6):498-505.
- [5] 王佐民,蔺磊,姜在秀. 切向流对微穿孔共振吸声结构声学性能的影响[J]. 声学学报,2009,34(4):350-354.
- [6] 张斌. 计及孔间相互作用的微穿孔板吸声特性研究[J]. 应用声学,2010,29(2):134-140. (许雪军编发)