

激光冲击强化技术的理论模型及参数优化研究

邹超荣¹, 吴九汇¹, 何卫锋², 程礼²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 空军工程大学工程学院, 710038, 西安)

摘要: 为了提高激光冲击强化的效果, 研究了一维激光冲击强化理论模型及关键参数的优化方法。根据激光冲击强化技术的原理, 建立了一维激光冲击强化理论模型, 推导了激光束透射系数的解析表达式。利用 Matlab 软件得到了约束层的相对介电常数、约束层厚度、等离子体厚度, 以及吸收涂层相对介电常数、吸收涂层厚度等关键参数对透射系数的影响曲线, 并根据厚度对透射系数的影响曲线来确定约束层、等离子体层和吸收涂层的厚度。研究表明, 通过透射系数的影响曲线对关键参数进行优化后, 对铝合金板进行激光冲击强化处理, 可使铝合金板表面变形深度增加 3 倍多, 从而为激光冲击强化技术中关键参数的选取提供了理论指导。

关键词: 激光冲击强化; 约束层; 等离子体; 吸收涂层

中图分类号: O121.8; G558 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0096-05

Theoretical Model and Parameter Optimization for Laser Shock Processing

ZOU Chaorong¹, WU Jiuhui¹, HE Weifeng², CHENG Li²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To improve the effect of laser shocking process, an analytical expression of the transmission coefficient of laser beam is derived with one-dimensional laser shock hardening model. The impacts of the relative permittivity and thickness of constrained layer, and the absorbing coating, plasma thickness on the transmission coefficient are analyzed. The relative permittivity of constrained layer and absorbing coating ought to be given firstly due to their higher sensitivity for the transmission coefficient, then the thickness of the constrained layer, plasma and absorbing coating is determined. The experiment indicates that with the optimized critical parameters, the surface deformation depth of the aluminium alloy plate gets 3 times deeper.

Keywords: laser shock processing; constrained layer; plasma layer; absorbing coating

激光冲击强化技术是一种新型的表面处理方法,但在国内的应用则处于起步阶段^[1]。激光冲击强化技术又称为激光喷丸技术,与传统的材料表面处理方法相比,有非接触、无热影响区以及强化效果突出等优点,美国的 Lawrence Livemore 国家重点实验室将 2024-T3 铝合金经过高能激光冲击强化后,疲劳寿命比常规喷丸处理提高了 50 倍^[1]。目

前,约束层的选取一般采用透明材料,如水、K9 玻璃、水玻璃等,并通过测量激光冲击波的峰值压力来选择确定材料及其厚度。吸收涂层一般使用黑漆、铝箔和胶带,也是通过实验来选择材料及其厚度。本文提出了一维激光冲击强化理论模型,并由该模型推导了激光束透射系数的解析表达式,利用 Matlab 软件得到了关键参数对透射系数的影响曲线,

收稿日期: 2012-04-19。 作者简介: 邹超荣(1985—),男,硕士生;吴九汇(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 教育部新世纪人才支持计划资助项目(NCET-09-0644);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2012-12-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121210.1008.003.html>

提出了激光冲击强化技术中关键参数的理论选取方法。

1 激光冲击强化技术简介

如图1所示,将强激光脉冲通过透明约束层照射在不透明的吸收涂层上,使涂层吸收激光能量,电离形成等离子蒸汽,在等离子体未爆炸前,由于约束层的阻碍作用,等离子蒸汽被保持在工件与约束层

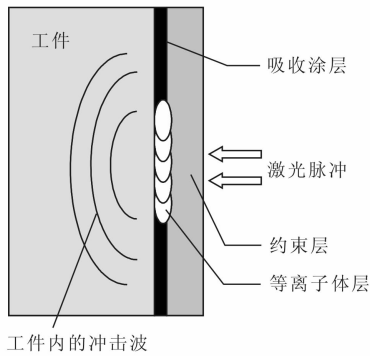
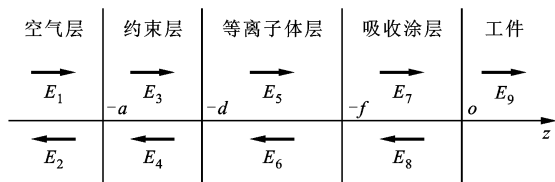


图1 激光冲击强化示意图

之间,当继续吸收激光辐射能量后,等离子体蒸汽体积瞬间急剧膨胀,发生爆炸,使约束层被击穿,形成激光支持的爆轰波(强冲击波)。爆轰波作用于工件上产生的压力高达 10^9 Pa 数量级,这个压力远远大于材料的动态屈服极限,从而使材料产生强烈的塑性形变,造成工件表层组织中的位错密度增加,形成亚结构。这种亚结构组织可大大提高材料的表面硬度、屈服强度和疲劳寿命,从而改善了材料的性能^[2-3]。

2 理论模型

如图2所示,激光束沿 z 轴方向传播,依次穿过空气层、约束层、等离子体层和吸收涂层到达工件上。图中在与 z 轴垂直的方向,一次激光脉冲产生的等离子体的体积可达 mm^3 量级,而空气层和约束层的厚



E_1, E_3, E_5, E_7, E_9 : 空气层、约束层、等离子体层、吸收涂层和工件中沿 z 轴方向传播的电磁波的电场分量;

E_2, E_4, E_6, E_8 : 空气层、约束层、等离子体层和吸收涂层中沿 $-z$ 轴方向传播的电磁波的电场分量

图2 一维激光冲击强化理论模型

度则是 mm 量级,远远大于激光波长(1 064 nm)。因此,在 z 轴方向,可以用一维模型进行分析,并将激光作为平面电磁波来处理。图2中各层介质均为均匀介质,箭头表示电磁波的传播方向,各电场分量的表达式如下

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_{10} e^{-jk_1(z+a)}; E_2 = E_{20} e^{jk_1(z+a)} & z \leq -a \\ E_3 &= E_{30} e^{-jk_2(z+d)}; E_4 = E_{40} e^{jk_2(z+d)} & -a < z \leq -d \\ E_5 &= E_{50} e^{-jk_3(z+f)}; E_6 = E_{60} e^{jk_3(z+f)} & -d < z \leq -f \\ E_7 &= E_{70} e^{-jk_4 z}; E_8 = E_{80} e^{jk_4 z} & -f < z \leq 0 \\ E_9 &= E_{90} e^{-jk_5 z} & 0 < z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: E_{i0} ($i=1, 2, 3, \dots, 9$) 为电场分量的振幅; k_1, k_2, k_4, k_5 为电磁波在空气层、约束层、吸收涂层及工件中传播时的波数; a, d, f 为 z 轴的坐标值; k_3 为电磁波在等离子体中传播的波数。

假设等离子体为均匀非磁化等离子体,电磁波在等离子体中传播时会被等离子体吸收而衰减,则

$$k_3 = \beta - j\alpha \quad (2)$$

式中: β 为相位常数; α 为衰减常数。由文献[4-6]得

$$\beta = \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_v^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_v^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_v^2} \frac{\omega_v}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \left\{ -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_v^2} \right) + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_v^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_v^2} \frac{\omega_v}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

式中: ω 为电磁波角频率; c 为光速; ω_p 为等离子体的角频率; ω_v 为等离子体的碰撞频率。当 $\omega > \omega_p$ 时,电磁波才能在等离子体中传播。当 ω 高频时,即

$$\omega \gg \omega_v; \omega \gg \omega_p \quad (5)$$

则

$$\beta = \frac{\omega}{c} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \frac{\omega_v \omega_p^2}{2\omega^3} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)^{-1/2} \quad (7)$$

等离子体的介电常数为

$$\epsilon = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_v^2} - j \frac{\omega_v}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \omega_v^2} \right) \quad (8)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数。碰撞频率

$$\omega_v = 2.3 \times 10^{10} \frac{\omega_p^2}{\omega_p} \quad (9)$$

根据分界面上电场与磁场切向分量必须连续的边界条件,当 $z = -a$ 时

$$\left. \begin{aligned} E_{10} + E_{20} &= E_{30} e^{jk_2 b} + E_{40} e^{-jk_2 b} \\ \frac{1}{\eta_1} E_{10} - \frac{1}{\eta_1} E_{20} &= \frac{1}{\eta_2} E_{30} e^{jk_2 b} - \frac{1}{\eta_2} E_{40} e^{-jk_2 b} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

当 $z = -d$ 时

$$\left. \begin{aligned} E_{30} + E_{40} &= E_{50} e^{jk_3 b_1} + E_{60} e^{-jk_3 b_1} \\ \frac{1}{\eta_2} E_{30} - \frac{1}{\eta_2} E_{40} &= \frac{1}{\eta_3} E_{50} e^{jk_3 b_1} - \frac{1}{\eta_3} E_{60} e^{-jk_3 b_1} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

当 $z = -b_2$ 时

$$\left. \begin{aligned} E_{50} + E_{60} &= E_{70} e^{jk_4 b_2} + E_{80} e^{-jk_4 b_2} \\ \frac{1}{\eta_3} E_{50} - \frac{1}{\eta_3} E_{60} &= \frac{1}{\eta_4} E_{70} e^{jk_4 b_2} - \frac{1}{\eta_4} E_{80} e^{-jk_4 b_2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

当 $z = 0$ 时

$$\left. \begin{aligned} E_{70} + E_{80} &= E_{90} \\ \frac{1}{\eta_4} E_{70} - \frac{1}{\eta_4} E_{80} &= \frac{1}{\eta_5} E_{90} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5$ 分别为电磁波在空气层、约束层、等离子体层、吸收涂层及工件中传播时的波阻抗; b 为约束层的厚度; b_1 为等离子体层的厚度; f 为吸收涂层厚度。激光的透射系数为

$$\varphi = \left| \frac{E_{90}}{E_{10}} \right| = \left| \frac{2\eta_5}{\eta_5 + \eta_4} \frac{1 + R_3}{e^{jk_4 b_2} + R_4 e^{-jk_4 b_2}} \cdot \frac{1 + R_2}{e^{jk_3 b_1} + R_3 e^{-jk_3 b_1}} \frac{1 + R_1}{e^{jk_2 b} + R_2 e^{-jk_2 b}} \right| \quad (14)$$

式中: R_4 为吸收涂层与工件分界面的反射系数, 且

$$R_4 = \frac{\eta_5 - \eta_4}{\eta_5 + \eta_4} \quad (15)$$

R_3 为等离子体层与吸收涂层分界面的反射系数, 且^[7-8]

$$R_3 = \frac{Z_{in}(-b_2) - \eta_3}{Z_{in}(-b_2) + \eta_3} \quad (16)$$

$$Z_{in}(-b_2) = \eta_4 \frac{\eta_5 + j\eta_4 \tan k_3 b_2}{\eta_4 + j\eta_5 \tan k_3 b_2} \quad (17)$$

R_2 为约束层与等离子体层分界面的反射系数, 且

$$R_2 = \frac{Z_{in}(-d) - \eta_2}{Z_{in}(-d) + \eta_2} \quad (18)$$

$$Z_{in}(-d) = \eta_3 \frac{Z_{in}(-b_2) + j\eta_2 \tan k_3 b_1}{\eta_3 + jZ_{in}(-b_2) \tan k_3 b_1} \quad (19)$$

R_1 为空气层与约束层分界面的反射系数, 且

$$R_1 = \frac{Z_{in}(-a) - \eta_1}{Z_{in}(-a) + \eta_1} \quad (20)$$

$$Z_{in}(-a) = \eta_2 \frac{Z_{in}(-d) + j\eta_2 \tan k_2 b}{\eta_2 + jZ_{in}(-d) \tan k_2 b} \quad (21)$$

式中: $Z_{in}(-a)$ 为空气与约束层分界面上的等效波阻抗; $Z_{in}(-d)$ 为约束层与等离子体层分界面上的等效波阻抗; $Z_{in}(-b_2)$ 为等离子体层与吸收涂层分界面上的等效波阻抗。

3 数值优化及实验验证

激光透射系数有 5 个可变参数, 分别为约束层相对介电常数 ϵ_1 、约束层厚度 b 、等离子体层厚度 b_1 、吸收涂层相对介电常数 ϵ_2 及吸收涂层厚度 b_2 。实验中采用型号为 SGR-60 的纳秒 Nd:YAG 固体激光器, 波长为 1 064 nm, 脉宽为 10 ns, 光斑能量为 5 J, 吸收涂层为黑漆, 工件为 40 mm × 20 mm × 1 mm 的铝合金板。根据吸收涂层材料, 选择 ω_p 为 5×10^{10} rad/s。

图 3 表示透射系数随约束层相对介电常数的变化曲线, 相对介电常数不同则表示约束层材料不同。取约束层的厚度为 0.6 mm, 等离子体层的厚度为 0.5 mm, 吸收涂层的相对介电常数为 2, 涂层厚度为 0.5 mm。由图 3 可以看到, 当约束层的相对介电常数为 81 时, 透射系数取得峰值。由于水的相对介电常数为 81, 所以可选择水作为约束层。

由图 3 可知, 约束层的相对介电常数在某些值时, 透射系数可以达到极大值, 选择透射系数取得极大值时对应的相对介电常数的物质, 可以提高激光冲击的强化效果。

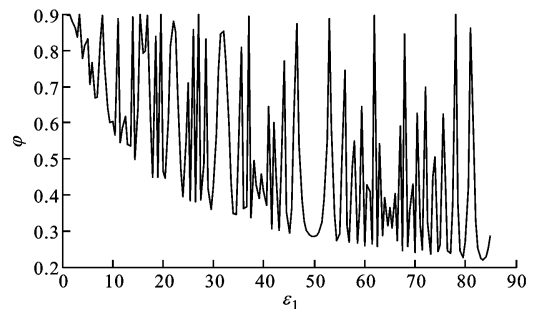


图 3 透射系数随约束层相对介电常数的变化

约束层不仅能增大冲击波的峰值压力, 而且能展宽冲击波的脉宽。取约束层为水, 等离子体厚度为 0.5 mm, 吸收涂层相对介电常数为 2, 涂层厚度为 0.5 mm。如图 4 所示, 当约束层厚度为 0.6 mm 时, 透射系数取得最大值。

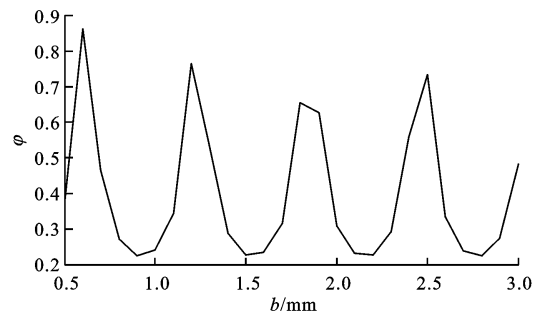


图 4 透射系数随约束层厚度的变化

图 5 为等离子体层厚度对透射系数的影响曲线,约束层为水, b 为 0.6 mm, ϵ_2 为 2, b_2 为 0.5 mm,当 b_1 为 0.1 mm 时, φ 为最大值,但激光电磁波的频率必须大于等离子体的频率,否则激光将会被全部反射。

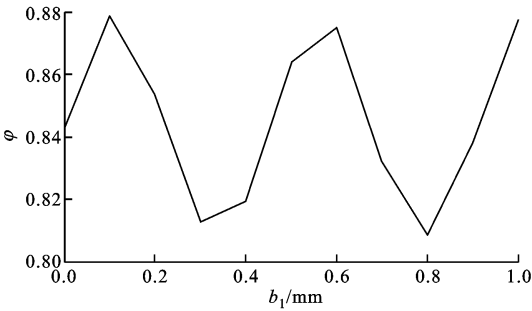


图 5 透射系数随等离子体层厚度的变化

图 6 表示透射系数随吸收涂层相对介电常数的变化情况,约束层为水, b 为 0.6 mm, b_1 为 0.5 mm, b_2 为 0.5 mm,当涂层的相对介电常数为 4.5 时,透射系数最大。此外,吸收涂层还应具有低汽化热、低导热率、易于涂敷和清洗等性能,才能提高吸收效率,提升等离子冲击波的峰值压力,增强冲击强化的效果。

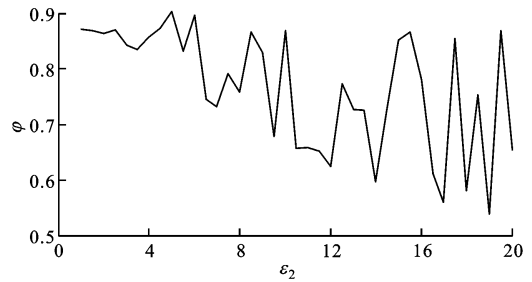


图 6 透射系数随涂层相对介电常数的变化

图 7 中的约束层为水, b 为 0.6 mm, b_1 为 0.5 mm, ϵ_2 为 2,当 b_2 为 0.37 mm 时,透射系数最大。若吸收涂层太厚,会对冲击波产生衰减,太薄又可能会烧蚀工件。

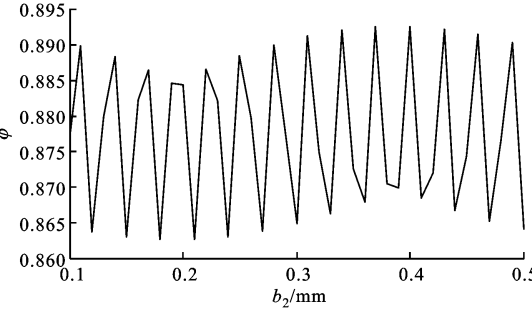


图 7 透射系数随吸收涂层厚度的变化

由图 3~图 7 可知,由于激光冲击强化的 5 个参数对透射系数的灵敏度不同,因此应优先选取对透射系数影响敏感的参数。激光冲击强化参数的优化方法为:先根据图 3、图 6 选择约束层和吸收涂层的相对介电常数,再根据图 4、图 5、图 7 选择各层的厚度。为了说明上述理论模型及优化结果的正确性,进行了相关实验,即用声音传感器来测量激光等离子体冲击波经过衰减后的声音波形来判断激光冲击强化的效果。图 8 为没有水约束层、吸收涂层时的声波曲线。图 9 为优化处理后的声波曲线,是采用 1.1 mm 厚的水作为约束层、相对介电常数为 2 的黑漆作为吸收涂层时测得的声波曲线。从图 8、图 9 中可以看出,优化前后声音波形变化较大,优化后的

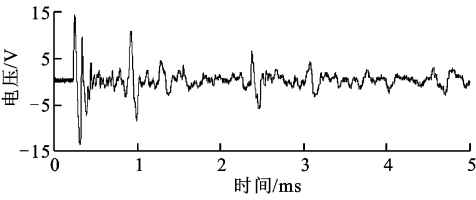


图 8 优化前的声音波形

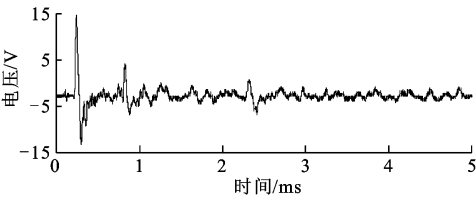


图 9 优化后的声音波形

声波经过第 1 个峰值后迅速衰减,在激光冲击处理的有效时间内能量更集中,从而能够将更多的激光能量转化为冲击波能量作用于工件上。经实验对比,优化后的铝合金板表面变形深度是未优化时的 3 倍多,显著提高了冲击强化的效果。

4 结 论

本文通过激光冲击强化技术的原理建立了一维激光冲击强化理论模型,并由该模型推导了激光透射系数的表达式,给出了关键参数的优化方法。利用一维激光冲击强化理论模型可以优化激光冲击强化技术的关键参数,使激光冲击强化效果达到最优。采用 1.1 mm 厚、相对介电常数为 81 的水作为约束层,当激光电磁波的波长为 1 064 nm、等离子体的角频率为 5×10^{10} rad/s、等离子体层的厚度为 0.1 mm、吸收涂层(厚度为 0.43 mm)的相对介电常数为 2 时,激光的透射系数最大,此时激光能量到达吸收涂层最多,工件可以获得最好的强化效果。

参考文献:

- [1] 张永康. 激光加工技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 259-260.
- [2] HU Binjie, WEI Gang, LAI Shengli. SMM analysis of reflection, absorption, and transmission from nonuniform magnetized plasma slab [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999, 27(4): 1131-1136.
- [3] BERTHE L, FABBRO R, PEYRE P. Shock wave from a water-confined laser-generated plasma [J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(6): 2826-2832.
- [4] 孙承伟. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社,

2002: 162-170.

- [5] 赵青, 刘述章, 童洪辉. 等离子体技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 38-43.
- [6] 庄钊文, 袁乃昌, 刘少斌, 等. 等离子体隐身技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 11-14.
- [7] 马西奎. 电磁场理论及应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 249-253.
- [8] 杨儒贵. 电磁场与电磁波 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 198-202.

(编辑 管咏梅)

(上接第89页)

3 结 论

本文将流形学习引入到动力学系统的模态识别研究中,提出了一种基于局部线性嵌入的、仅依赖于输出的模态识别新方法。该方法仅需要利用多个测点的响应信号,而不需要测量激励信号,且对激励类型无特别限制,其潜在的工程应用前景十分广阔。仿真结果表明,基于局部线性嵌入的模态识别方法所识别的模态固有频率和振型精度较高,特别是在阻尼较大时,对于贡献量较大的模态,精度高于PCA法。

参考文献:

- [1] CONTI C, DEHOMBREUX P, VERLINDEN O, et al. Analysis of the performance of operational data analysis methods [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1996, 10(5): 579-593.
- [2] KERSCHEN G, GOLINVAL J C, VAKAKIS A, et al. The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems: an overview [J]. Nonlinear Dynamics, 2005, 41(1/2/3): 147-169.
- [3] HAN S, FEENY B. Application of proper orthogonal decomposition to structural vibration analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(5): 989-1001.
- [4] LENAERTS V, KERSCHEN G, GOLINVAL J C. Proper orthogonal decomposition for model updating of non-linear mechanical systems [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(1): 31-43.
- [5] PONCELET F, KERSCHEN G, GOLINVAL J C, et al. Output-only modal analysis using blind source separation techniques [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(6): 2335-2358.
- [6] ZHOU Wenliang, CHELIDZE D. Blind source separa-

tion based vibration mode identification [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(8): 3072-3087.

- [7] 王靖. 流形学习的理论与方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 24-26.
- [8] ROWEIS S T, SAUL L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding [J]. Science, 2000, 290(22): 2323-2326.
- [9] CHANG Hong, YEUNG Dit-Yan. Robust locally linear embedding [J]. Pattern Recognition, 2006, 39(6): 1053-1065.

【本刊相关文献链接】

- 方兵, 张雷, 赵继, 等. 轴承结合部动态参数识别与等效分析模型的研究. 2012, 46(11): 69-74.
- 田红亮, 赵春华, 朱大林, 等. 整个螺栓结合部的法向连接刚度及试验验证. 2012, 46(9): 31-36.
- 郭年程, 史文库, 刘文军, 等. 驱动桥的整体有限元动态模拟. 2012, 46(9): 91-95.
- 杨大显, 袁奇, 吴聪. 单桩式海上风力机支撑结构强度振动分析. 2012, 46(7): 26-31.
- 马天兵, 裘进浩, 季宏丽. 用于壁板结构多模态振动主动控制的改进最小控制合成(MCS)算法. 2012, 46(7): 87-92.
- 谢航, 廖与禾, 林京. 一种含噪声多模态调频调幅信号的提取方法. 2012, 46(7): 93-97.
- 郭空明, 江俊. 采用 Kagome 夹心板的航天器安装板振动控制. 2012, 46(7): 128-134.
- 邢铭宗, 赵飞, 姜歌东, 等. 一种确定自回归滑动平均模型最小阶次的新方法. 2011, 45(12): 99-103.
- 康伟, 张家忠, 李凯伦. 利用本征正交分解的非线性 Galerkin 降维方法. 2011, 45(11): 58-62.
- 梅冠华, 张家忠. 时滞惯性流形在三维壁板颤振数值分析中的应用. 2011, 45(9): 40-46.

(编辑 葛赵青)