DOI: 10.3901/JME.2013.02.001

花萼状涡流传感器及其飞机金属结构疲劳损伤监测试验研究*

丁 华 何宇廷 杜金强 焦胜博
(空军工程大学航空航天工程学院 西安 710038)

摘要: 飞机金属结构疲劳损伤的实时在线监测, 对于保证飞行安全是极其重要的。在文献[13]的基础之上, 提出一种花萼状涡流传感器, 并搭建基于该传感器的疲劳裂纹监测系统, 进行程序载荷谱下的 2A12-T4 铝合金拉伸疲劳试验件的疲劳损伤在线监测试验, 通过对比传感器监测结果和疲劳裂纹断口定量分析结果, 对传感器的疲劳裂纹定量监测能力进行验证。监测试验结果与试件断口定量分析对比结果表明, 在试件疲劳裂纹扩展过程中, 传感器的各感应线圈通道的幅值比信号的变化较为明显, 同时具有阶跃特征, 当裂纹从一个感应线圈通道位置扩展至其相邻通道位置时, 该感应线圈通道的幅值比信号会急剧增加, 而当裂纹穿出其相邻通道位置时, 该感应线圈通道的幅值比信号增加速度显著减缓; 根据阶跃特性, 将各感应线圈通道的幅值比信号开始快速增加的“拐点”作为裂纹前缘进入相应感应线圈通道的特征, 花萼状涡流传感器可以实现疲劳裂纹的定量监测, 监测精度为 1 mm; 离疲劳源较近的感应线圈通道的幅值比信号可定性监测结构的疲劳累积损伤程度。

关键词: 结构健康监测 花萼状涡流传感器 断口定量分析 飞机金属结构 疲劳损伤

中图分类号: TP 212 V215

Rosette Eddy Current Sensor and Its Experimental Research on Aircraft Metallic Structure Fatigue Damage Monitoring

DING Hua HE Yuting DU Jinqiang JIAO Shenbo

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038)

Abstract: Fatigue damage monitoring of aircraft metallic structure is critical to flight safety. Based on the previous work of ref.[13], a kind of rosette eddy current sensor is proposed, and monitoring experiment of 2A12-T4 aluminum alloy under constant load based on constructed fatigue-crack monitoring system is carried out, which intends to validate the quantitative crack-monitoring capability of rosette eddy sensor through comparison between experimental result and fractographic quantitative analysis result. The comparison result shows that amplitude ratio of sensing-channel signal is sensitive to the crack propagation, and has step feature. When the crack extends from the position of sensing-channel to adjacent channel position, the amplitude ratio of sensing-channel signal increases sharply, and then increases slowly after the adjacent channel position. Viewing the changing-point as indication of crack position, the quantitative-monitoring capability of fatigue crack is achieved by rosette eddy current sensor with precision of 1 mm, and the sensing-channels near fatigue source are capable of qualitative-monitoring of accumulated fatigue damage.

Key words: Structural health monitoring Rosette eddy current sensor Fractographic quantitative analysis

Aircraft metallic structure Fatigue damage

0 前言

飞机金属材料结构在使用过程中由于疲劳载荷、磨损、环境腐蚀、材料老化、构件缺陷以及其

他自然及人为因素的作用而极有可能发生损伤直至破坏, 其中疲劳失效是飞机构件基本和主要的破坏模式。作为主承力构件的金属结构一旦产生疲劳裂纹, 对结构和系统的寿命往往具有致命性的影响, 特别是当疲劳裂纹达到一定程度时, 会发生突然断裂, 造成结构崩溃, 导致惨重的事故和重大的经济损失。1954年英国“慧星号”事故就是由于飞机气

* 国家高技术研究发展计划资助项目(863计划, 2009AA04Z406)。20120509收到初稿, 20121112收到修改稿

密座舱因飞行高度变化不断受到增压、减压循环作用,导致机身金属结构出现疲劳效应而断裂破坏引起的^[1]。

因此,通过金属结构疲劳损伤监测,发现疲劳裂纹并对其扩展过程进行主动原位在线实时监测,进而判断出损伤程度、发出预警信息,对于保证飞行安全极其重要^[2]。

在国内,结构健康监测领域的研究取得了一定的进展,并且已开始实际工程应用,例如大型桥梁、隧道、大坝、海洋平台、高层建筑和航空航天器等^[3-7]。但在航空航天领域,对健康监测开展的研究较晚,专门针对飞机金属结构疲劳损伤监测的研究比较少。飞机结构往往工作于较恶劣的环境中,这就要求传感器必须满足耐久性、稳定性、与结构相容性等要求,而传统的传感器往往很难满足工程需求。因此,研发损伤识别精度和准确度较高、耐久性较好、抗干扰能力强、综合效费比高的飞机金属结构疲劳损伤监测传感器,仍是一个亟待解决的问题^[8]。而同时,涡流阵列传感器作为一个新兴分支已逐渐成为涡流无损检测技术和结构健康监测技术中的研究重点,目前,涡流阵列传感器已逐渐应用于蒸汽管道广布微裂纹、核反应堆壳体裂纹、高温部件表面裂纹、管棒条型材、大面积金属曲面裂纹的无损检测和在线监测等领域^[9-12]。

针对飞机金属结构疲劳损伤在线监测的迫切需求,提出一种花萼状涡流传感器,并搭建基于该传感器的疲劳裂纹监测系统,进行程序载荷谱下的 2A12-T4 铝合金拉伸疲劳试验件的疲劳损伤在线监测试验。通过对比传感器在线监测结果和疲劳裂纹断口定量分析结果,对传感器的疲劳裂纹定量监测能力进行验证。

1 花萼状涡流传感器

GOLDFINE 等^[13]提出了一种 Rosette 涡流传感器,并且 YANKO 等^[14]对 Rosette 传感器进行了半解析建模。本文通过对 Rosette 传感器进行改进,提出了一种花萼状涡流传感器,其是一种柔性平面涡流阵列传感器,可用于金属结构损伤的在线定量监测,花萼状涡流传感器的典型外形结构示意图如图 1 所示。

图 1 中的典型外形结构示意图中,激励线圈从中心圆处呈辐射状向四周螺旋展开,在激励线圈的螺旋线间隔内分布着环状感应线圈,激励线圈中通激励电流 I ,用于在传感器监测空间内产生激励磁

图 1 花萼状涡流传感器典型外形结构示意图

场,环状感应线圈用于感应激励磁场在监测空间内的反射场,而反射场跟传感器监测空间内的电磁特性参数和空间边界条件紧密相关,结构的损伤伴随着结构电磁特性参数和边界条件的改变,这即为花萼状涡流传感器可用于结构损伤监测的原理。在花萼状涡流传感器中,激励线圈采用双排线布局,目的在于增强所产生的激励磁场的大小以提高传感器输出信号的信噪比。

图 1 所示的花萼状涡流传感器只是一个示意图,激励线圈可以在径向上辐射更大的空间,同时可以分布更多的环状感应线圈,以拓展传感器的监测范围。另外,整个传感器在外形上像玫瑰花的花萼一样向外延伸,故将传感器命名为花萼状涡流传感器。

需要注意的是,图 1 所示的典型外形结构示意图是本文提出的花萼状涡流传感器的基本结构,其可以存在很多不同的变化结构形式,如图 2、3 所示。

图 2 花萼状涡流传感器 I 型

图 2 中所示的 I 型传感器中,半圆形结构布局用于适应传感器对半圆形孔边裂纹的在线监测,同时可以根据实际孔边监测结构将传感器的外形调整为 1/4 圆布局或其他任意角度的扇形布局。图 3 所示的 II 型传感器的设计目的在于在能够定量感知裂纹损伤径向尺寸的同时,也能够感知裂纹损伤的角度,通过对扇形感应线圈的细化可以提高对裂纹损伤扩展角度的监测灵敏度。

图3 花萼状涡流传感器 II 型

2 疲劳裂纹监测系统设计

2.1 系统总体设计

基于花萼状涡流传感器的疲劳裂纹监测系统主要包括激励源、花萼状涡流传感器、高频数据采集系统、信号采集与处理软件等部分，其总体框图如图4所示。

图4 疲劳裂纹监测系统总体框图

在图4中，激励源由 AFG3101 信号发生器和宽带功率放大器产生，用于驱动花萼状涡流传感器；传感器感应线圈的输出电压信号通过高频数据采集系统(本文采用 DPO4104 示波器+信号调理电路)实现信号采集、滤波和放大；信号采集与处理软件对高频数据采集系统进行控制，从采集系统缓存中读取各感应线圈通道监测数据，对获得的数据进行预处理、特征量提取以及裂纹损伤的定量识别；试验件通过 MTS810 材料试验系统模拟实际飞机金属结构的疲劳裂纹扩展，传感器通过螺栓连接方式固定于被监测试件表面。

在系统软件实现上，基于 SignalExpress 开发传感器信号采集与处理系统，实现对传感器信号的实

时采集、处理和显示。选取传感器各感应线圈的输出电压信号与激励线圈的驱动电流信号(通过电流取样电路获得)之间的幅值比 A_R 和相位差 $\Delta\phi$ 作为传感器的特征量(为便于表述，在后续节中，将该特征量简称为幅值比和相位差)。首先对示波器进行初始化，确定示波器的采集模式、采样长度、触发方式、输入阻抗等参数；然后采集各通道数据，采用基于多重相关法的特征量提取算法得到各通道输出信号与驱动信号的幅值比和相位差并图形显示；最后根据各个感应线圈通道特征量变化规律及通道与裂纹长度对应关系进行损伤识别。

2.2 特征量提取的多重相关法

针对谐波激励的花萼状涡流传感器，如何从感应线圈的含噪声原始信号中提取出幅值和相位是后期对结构损伤进行定量和定性评价的关键。花萼状涡流传感器的原始输出信号具有强背景噪声，弱输出信号的特点，本文采取多重相关法提取各感应线圈通道的幅值比和相位差。

多重信号相关法是利用两路信号的自相关和互相关的多次运算提高信噪比。考虑两个相同频率 ω_0 且含噪信号 $x(t)$ 和 $y(t)$

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \phi_0) + N_x(t) \quad (1)$$

$$y(t) = B \sin(\omega_0 t + \phi_1) + N_y(t) \quad (2)$$

式中， A 、 B 分别为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的幅值； $N_x(t)$ 、 $N_y(t)$ 分别为噪声信号； ϕ_0 、 ϕ_1 分别为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的初相位。

对 $x(t)$ 进行自相关运算得^[15-16]

$$\begin{aligned} R_x(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [A \sin(\omega_0 t + \phi_0) + N_x(t)] \times \\ &\quad [A \sin(\omega_0(t + \tau) + \phi_0) + N_x(t + \tau)] dt = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [A \sin(\omega_0 t + \phi_0) \times A \sin(\omega_0(t + \tau) + \phi_0)] dt + \\ &+ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A \sin(\omega_0 t + \phi_0) \times N_x(t + \tau) dt + \\ &+ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A \sin(\omega_0(t + \tau) + \phi_0) \times N_x(t) dt + \\ &+ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T N_x(t + \tau) \times N_x(t) dt \end{aligned} \quad (3)$$

式中， T 为信号长度， τ 为信号延迟量。式(3)中第一项是信号的自相关函数，第二项和第三项是信号和噪声之间的互相关函数，最后一项是噪声自身的自相关函数。在理想高斯白噪声情况下，当 T 趋于无穷时，后三项趋于 0，即

$$R_x(\tau) = \frac{A^2}{2} \cos(\omega_0 \tau) \quad (4)$$

但是在实际测量过程中, 由于 T 不可能趋于无穷同时噪声不是理想高斯白噪声, 故信号经一次自相关运算的实际信号

$$R_x(\tau) = \frac{A^2}{2} \cos(\omega_0 \tau) + N'_x(t) \quad (5)$$

式中, 自相关运算后的噪声信号 $N'_x(t)$ 要比初始噪声 $N_x(t)$ 小很多, 即信号经一次自相关运算后信噪比提高。在考虑非理想白噪声和非无穷 T 下信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 一次互相关运算后实际信号

$$R_{xy}(\tau) = \frac{AB}{2} \cos(\omega_0 \tau + \phi_1 - \phi_0) + N'_{xy}(t) \quad (6)$$

经分析, 信号经过一次自相关运算后相位变为 0, 频率不变; 信号经过互相关运算后相位差和频率保持不变, 信噪比提高。把一次自相关输出信号和互相关输出信号进行多次相同的自相关和互相关运算则可以提高信噪比。将该方法应用于花萼状涡流传感器的含噪声输出信号处理中, 可较好地提取出各通道感应线圈的幅值比和相位差。

3 铝合金试件疲劳裂纹监测试验

3.1 试验方案

试验件: 2A12-T4 铝合金拉伸疲劳试验件(尺寸为 240 mm×50 mm×4 mm)。

传感器: RS-3 花萼状涡流传感器, 该传感器具有一个激励线圈通道和三个感应线圈通道。

疲劳载荷: 程序载荷幅谱, 如表 1 所示。

表 1 程序载荷谱

载荷类型	应力水平/MPa	应力比	循环次数/次
低载	180	0.06	2 900
高载	200	0.06	100

试验方法如下所述。将试验件安装于疲劳试验机(MTS810)上, 并将传感器安装于螺栓孔处, 连接测量设备; 启动裂纹监测系统和疲劳试验机, 归一化激励信号频率为 0.3, 载荷施加频率为 15 Hz; 试验过程中监测传感器各感应线圈通道的输出信号, 直至试验件断裂停止。疲劳裂纹监测试验现场和传感器安装状态如图 5 所示。

3.2 试验结果分析

试验件在加载 75 个谱块和 2 099 次(227 099 次)循环后断裂, 根据监测结果进行分析。

3.2.1 传感器监测信号处理与分析

首先分析各感应线圈通道的相位差信号 $\Delta\phi$, 如

图 5 试验现场和传感器安装状态

图 6 所示。从图 6 中可以得知, 在试验件疲劳裂纹扩展过程中, 相位差信号 $\Delta\phi$ 有所变化, 但其变化幅度较小, 仅为 0.5° 左右。

图 6 各通道相位差随采样次数变化曲线

图 7 是三个感应线圈通道的幅值比信号 A_R 随信号采样次数的变化规律, 从图 7 中可知在试件疲劳裂纹扩展过程中, 幅值比信号的变化具有单调性且幅度较大。

为进一步分析, 根据采样周期与载荷施加频率对应关系, 并使用平滑法对各通道数据进行降噪滤波处理, 得到传感器输出信号随疲劳载荷循环次数的变化曲线, 如图 8 所示。

图 7 各通道幅值比随采样次数变化曲线

图 8 各通道幅值比随采样次数变化曲线

由图 8 可知,在疲劳裂纹扩展至断裂的过程中,各通道的幅值比信号出现多个“拐点”。根据花萼状涡流传感器自身构造原理,各感应线圈幅值比信号开始快速增加的“拐点”即是裂纹前缘进入相应感应线圈的特征。根据这一特性,定义裂纹长度为在垂直于试件轴线平面内裂纹前缘到孔边之间的距离,可知孔边任一侧裂纹到达 1 mm、2 mm 时所对应的载荷循环次数分别为图 8b 中的 A 点和图 8c 中的 B 点。

3.2.2 断口定量分析

为获得疲劳源的位置、疲劳弧线的分布特点及裂纹长度等信息,使用 PXS-5T 光学体式显微镜对断口疲劳弧线进行观测,观察到的断口如图 9 所示。

图 9 试验件的断口形貌

试验件断口的疲劳弧线清晰可见,可以发现试验件左侧的裂纹萌生于圆孔内表面的缺陷部位,右侧裂纹萌生于孔边,然后以圆角裂纹向前扩展。通过对疲劳断口进行定量分析得到疲劳裂纹扩展曲线,并将疲劳裂纹监测结果与断口定量分析结果进行对比,如图 10 所示。

图 10 裂纹监测试验结果与断口定量分析结果对比

根据断口定量分析曲线,通过线性插值算法得到试验件孔边两侧裂纹长度均超过 1 mm、2 mm 和 3 mm 时的试件疲劳载荷循环次数,如表 2 所示。

表 2 不同裂纹长度对应的载荷循环数

疲劳循环数 C_N /次	左侧裂纹长度 a_L /mm	右侧裂纹长度 a_R /mm
194 000	$a_L \geq 1$	$a_R \geq 1$
202 500	$a_L \geq 2$	$a_R \geq 2$
210 000	$a_L \geq 3$	$a_R \geq 3$

3.2.3 试验结果与断口定量分析结果对比

由图 10 可知,监测结果与断口定量分析结果吻合较好。同时,根据表 2 中断口定量分析的结果,

将两侧裂纹长度均超过 1 mm、2 mm、3 mm 时对应的循环次数在图 8 中标出。在单侧裂纹长度达到 1 mm 至两侧裂纹均超出 2 mm 的过程中, 感应通道 2 的幅值比信号急剧增加; 当两侧裂纹长度均超过 2 mm 后, 感应通道 2 的幅值比增加速度显著减缓; 当试验件断裂时, 感应通道 2 的幅值比急剧增加。感应通道 3 的幅值比信号表现出与感应通道 2 相同的变化趋势。同时在图 8 中可以看出, 感应通道 1 的幅值比信号从疲劳试验开始就缓慢增加, 感应通道 2 的幅值比信号也在疲劳试验开始后不久增加, 而根据断口定量分析可知此时试件未产生裂纹, 即这部分的信号增量对应于结构疲劳累积损伤。

综合上述分析可知, 将各感应线圈通道的幅值比信号开始快速增加的“拐点”作为裂纹前缘进入相应感应线圈的特征, 则花萼状涡流传感器可以实现疲劳裂纹的定量监测, 监测精度为 1 mm。

4 结论

(1) 在试验件疲劳裂纹扩展过程中, 花萼状涡流传感器的各感应线圈通道的相位差信号变化幅度较小, 仅为 0.5° 左右, 而幅值比信号的变化具有单调性且变化幅度较大。

(2) 花萼状涡流传感器各感应线圈通道的幅值比信号随裂纹扩展具有阶跃特征。当裂纹从一个感应线圈通道位置扩展至其相邻通道位置时, 该感应线圈通道的幅值比信号会急剧增加, 而当裂纹穿出其相邻通道位置时, 该感应线圈通道的幅值比信号增加速度显著减缓。

(3) 将各感应线圈通道的幅值比信号开始快速增加的“拐点”作为裂纹前缘进入相应感应线圈的特征, 花萼状涡流传感器可以实现疲劳裂纹的定量监测, 监测精度为 1 mm, 断口定量分析结果验证了传感器监测结果的准确性。

(4) 当未出现裂纹时, 结构的疲劳累积损伤引起感应通道 1 的幅值比信号缓慢增加, 即离疲劳源较近的感应线圈通道的幅值比信号可定性监测结构的疲劳累积损伤程度。

参 考 文 献

- [1] 陈志伟, 王智. 军用飞机结构疲劳寿命研究[J]. 机械强度, 2005, 27(3): 381-387.
CHEN Zhiwei, WANG Zhi. Fatigue life research on military aircraft structures[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(3): 381-387.
- [2] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
YUAN Shenfang. Structural health monitoring and damage control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [3] 周奎, 王琦, 刘卫东, 等. 土木工程结构健康监测的研究进展综述[J]. 工业建筑, 2009, 39(3): 96-101.
ZHOU Kui, WANG Qi, LIU Weidong, et al. A Summary review of recent advances in research on structural health monitoring for civil engineering infrastructures[J]. Industrial Construction, 2009, 39(3): 96-101.
- [4] 伍山雄, 李芳. 大跨斜拉桥结构健康监测系统数据处理方法研究[J]. 施工技术, 2009, 38(2): 94-96.
WU Shanxiong, LI Fang. Research on monitoring data processing method about long-span cable-stayed bridge SHM system[J]. Construction Technology, 2009, 38(2): 94-96.
- [5] 孟丛林, 邓俊, 傅波. 飞行器结构健康监测系统设计与应用[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(增刊): 542-545.
MENG Conglin, DENG Jun, FU Bo. Design and application of vehicle structural health monitoring system[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(Suppl.): 542-545.
- [6] 史学涛. 结构健康监测系统的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
SHI Xuetao. The research of structural health monitoring system[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [7] 马少杰. 飞机结构健康监测的智能涂层技术及分析[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
MA Shaojie. The study of intelligent coating technology for structural health monitoring on aircraft[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2006.
- [8] CUI Ronghong, HE Yuting, YU Zhiming, et al. Structural surface crack monitoring method based on electrical potential technique and modern surface technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(4): 601-606.
- [9] RENATO G. Advanced eddy currents system for inspection of VVER steam generator tubing[C/CD]//7th international Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Dubrovnik, Croatia, 2008.
- [10] YANKO S, DAVE G. MWM-array sensors for in situ monitoring of high-temperature components in power plants[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(11): 1527-1536.
- [11] YANG Binfeng, LUO Feilu, CAO Xiongheng, et al. Array pulse eddy current imaging system used to

- detect corrosion[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 18(2): 196-198.
- [12] JOUBERT P Y, BIHAN L Y. Multi sensor probe and defect classification in eddy current tubing inspection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 129(1-2): 10-14.
- [13] GOLDFINE N, ZILBERSTEIN V, CARGILL J S, et.al. MWM-array eddy current sensors for defection of cracks in regions with fretting damage[J]. Material Evaluation, 2002, 60(7): 870-877.
- [14] YANKO S. Deep Penetration Magnetoquasistatic Sensors[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [15] 刘君华, 白鹏, 汤晓君. 基于 LabWindows/CVI 的虚拟仪器设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- LIU Junhua, BAI Peng, TANG Xiaojun. Virtual instrument design under LabWindows/CVI[J]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [16] 郑胜峰, 楼梅燕, 范文晶, 等. 一种基于多重相关法的相位差测量方法[J]. 宇航计测技术, 2008, 28(5): 58-60.
- ZHENG Shengfeng, LOU Meiyan, FAN Wenjing, et al. Measuring method for phase difference based on multi-layer correlation[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2008, 28(5): 58-60.
- 作者简介: 丁华, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为结构健康监测技术。
E-mail: cckpiediullut@163.com
何宇廷(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为结构健康监测技术、结构寿命预测及管理, 飞行安全理论等。
E-mail: hyt666@tom.com

《机械工程学报》被 EI 收录论文目次(2012 年第 9 期)

- 基于约束函数的变胞机构变胞方程 刘江南 于德介 (1)
- 隧道传感系统微位移机构的主从关联优化设计 夏 一 杜 纲 傅 星 (10)
- 水陆两栖蛇形机器人的研制及其陆地和 underwater 步态 郁树梅 王明辉 马书根等 (18)
- 一般 6-4 台体型并联机构位置正解分析 张 英 廖启征 魏世民 (26)
- Stewart 并联机构位置奇异研究 李保坤 曹 毅 张秋菊等 (33)
- 一种并联机器人误差综合补偿方法 谢 平 杜义浩 田培涛等 (43)
- 带有任意边缘裂纹的自由圆板流固耦合动力特性 侣晓辉 卢文秀 褚福磊 (50)
- 双密度双树复小波变换及其在机械故障微弱特征提取中的应用 陈彬强 张周锁 何正嘉 (56)
- 局部特征尺度分解方法及其在齿轮故障诊断中的应用 程军圣 杨 怡 杨 宇 (64)
- 基于统计模拟的无显式小波幅频特性计算与分析 赵学智 叶邦彦 陈统坚 (72)
- 深海采矿整体系统动力学建模及联动开采作业过程快速仿真分析 戴 瑜 刘少军 (79)
- 多非线性弹性约束下轧机辊系振动特性 刘浩然 刘 飞 侯东晓等 (89)
- 基于各向异性的 Galfenol 复合悬臂梁三维非线性耦合模型 朱翔鸥 舒 亮 吴桂初等 (95)
- 高速下轿车转向系非线性振动的分岔特性 王 威 宋玉玲 薛彦冰 (103)
- 地铁车辆连挂冲击非线性动力学模型 张锁怀 孟 旭 (111)
- 基于拓扑与形状优化的柴油机机体低振动设计 杜宪峰 李志军 毕凤荣等 (117)
- 轴向运动矩形板的谐波共振与稳定性分析 胡宇达 冯志强 (123)
- 基于等距特征映射和支持向量机的转子故障诊断方法 孙 斌 薛广鑫 (129)
- 动力模块车组的运动建模与规划 潘大雷 郭为忠 高 峰 (136)
- 面向机电耦合振动抑制的电主轴系统匹配特性研究 吕 浪 熊万里 侯志泉 (144)
- 多工位装配序列粒子群优化算法 王丰产 孙有朝 李 娜 (155)
- 基于自适应蚁群算法的工艺路线优化 常智勇 杨建新 赵 杰等 (163)
- 网格曲面上测地 B 样条曲线交互操作与重用 刘 斌 韩 林 林俊义等 (170)
- 改进空化模型和修正湍流模型在螺旋桨空化模拟中的评估分析 杨琼方 王永生 张志宏 (178)
- 基于 Pareto 解集蚁群算法的拆卸序列规划 邢宇飞 王成恩 柳 强 (186)