

内嵌流体欧拉梁减振评价及残余振动衰减分析

荆栋, 徐晖, 王绪伟

(西安交通大学强度与振动教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了评价内嵌式黏性流体单元自适应减振方法(IVFUM)消减运动柔性结构残余振动的效果,进行了内嵌黏性流体欧拉梁在旋转态下的自适应减振试验,并对试验所测试的残余振动衰减信号进行了处理.针对旋转态下内嵌黏性流体欧拉梁残余振动信号具有刚体衰减转动的慢变信号与柔性结构残余振动快变信号相耦合的特征,提出一种简明、实用和精度良好的减振效果评价体系——单自由度等效阻尼比法,结合非线性最小二乘法对信号进行处理,并编制了相应的程序.信号分析结果可有效地评价结构内嵌黏性流体方式对运动的工程柔性欧拉梁残余振动的减振效果.

关键词: 内嵌黏性流体单元法(IVFUM);残余振动;信号处理;等效阻尼比;减振

中图分类号: O328 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)03-0354-05

Evaluation of Self-Adaptive Vibration Suppression for Interior Inlay Viscous Fluid Euler Beam and Analysis of Rotating Remnant Vibration Attenuation

JING Dong, XU Hui, WANG Xuwei

(MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of vibration suppression of the interior inlay viscous fluid unit method(IVFUM), a self-adaptive remnant vibration suppression experiment for the rotating interior inlay viscous fluid Euler beam was carried out, and the remnant vibration attenuation signal was processed. Considering that the case studied is characterized by coupled slowly varying signal of rigid body attenuated rotation and quickly varying signal of flexible structure remnant vibration, an evaluation system named SDOF(Single Degree of Freedom) equivalent damping ratio method regarding vibration suppression effect was presented to process the vibration signal via nonlinear least square method, and the corresponding program was coded. The analytical results efficiently evaluated the remnant vibration suppression effect of the rotating flexible Euler beam with interior inlay viscous fluid.

Keywords: interior inlay viscous fluid unit method (IVFUM); remnant vibration; signal process; equivalent damping ratio; vibration suppression

基于运动的工程柔性结构需要精确、快速、平稳地控制残余振动的工程背景,本课题组提出了内嵌式黏性流体单元自适应减振方法(IVFUM).这是一种新型的柔性结构残余振动被动控制方式,柔性结构利用内嵌流体或固体的方式来自适应地控制和减

弱自身的残余振动.研究人员采用理论分析、试验和数值计算相结合的方法探讨了 IVFUM 减振的规律、特点和内在机理,揭示了内嵌黏性流体单元减振效果的自适应性和有效性,证实了其在定频稳态激励下,对柔性结构具有确切、有效的减振效果^[1-5].

在旋转态下,内嵌黏性流体欧拉梁的残余振动表现为复杂的衰减信号,即具有刚体衰减转动的慢变信号与柔性结构残余振动快变信号相耦合的特征(见图1),这种信号是由电机停电后自由减速阶段所产生的强迫振动和电机停转后的自由衰减振动混合构成的。

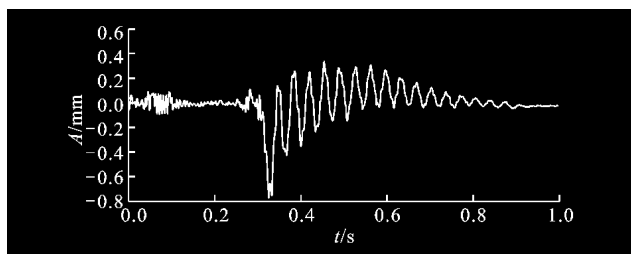


图1 2 Hz旋转态下梁自由端部的时域响应信号

本文针对旋转态下内嵌黏性流体欧拉梁残余振动的衰减振荡特点,提出一种简明、实用和精度良好的减振效果评价体系——单自由度等效阻尼比方法,采用理论分析和试验相结合的方法,探讨内嵌黏性流体自适应减振的机理,评价内嵌黏性流体方式对运动的工程柔性欧拉梁残余振动的减振效果。

1 旋转态下内嵌黏性流体欧拉梁残余振动衰减信号的理论分析

1.1 残余振动消减效果评价方法的选择

在作者所查阅的文献资料中,尚未发现关于旋转态下残余振动信号处理的类似研究工作,本文所做的工作是对这类信号进行分析处理的有益尝试。作为评价振动衰减信号的方法,应该满足的原则是:能够描述信号的衰减特性;参数是可行和可靠的。通过对比分析,优先考虑信号的振幅衰减率和等效阻尼比,因为阻尼表示系统耗损能量的能力,阻尼愈大,输入能量就可以在愈短的时间内耗损完毕,结构从受激励振动到重又静止的时间过程就愈短,增大阻尼是抑制振动特别是共振响应的重要途径。因此,选用信号的等效阻尼比 ζ 作为特征参数来评价内嵌流体介质的减振效果; ζ 大者信号衰减快,说明该内嵌黏性流体介质减振效果好。

1.2 内嵌黏性流体欧拉梁残余振动衰减信号的力学建模

由于旋转态下内嵌黏性流体欧拉梁残余振动衰减信号的尾部凸现阻尼单自由度系统自由振动衰减的特征,故利用单自由度(SDOF)阻尼模型来识别运动柔性结构的等效模态阻尼比 ζ 。

(1)将理论表达式 $y(t)=Ae^{-\zeta\omega_n t}\sin(\omega_d t+\varphi)$ 转

换为识别式 $y(t)=b_1 e^{-b_2 t}\sin(b_3 t+b_4)$ 。

(2)信号最大值归一化:确定采样信号 $\hat{y}_i$ 的最大值 $\hat{y}_{\max}$ 后做变换 $y_i=\hat{y}_i/\hat{y}_{\max}$,则变换后 $y_{i,\max}=1$,这样便消去了参数 b_1 。

(3)消去相位角 b_4 :把纵坐标平移到 $y_{i,\max}$ 处,可以得到此时的相位角 $b_4=\pi/2$ 。

通过上述技术,可以将四参数模型转化为二参数模型

$$y(t)=e^{-b_2 t}\sin\left(b_3 t+\frac{\pi}{2}\right)=e^{-b_2 t}\cos(b_3 t) \quad (1)$$

然后根据已有的数据拟合出其等效阻尼比和固有频率。识别目标参数为

$$\left. \begin{aligned} b_2 &= n = \zeta \omega_n \\ b_3 &= \omega_d = \omega_n (1 - \zeta^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} \omega_n &= (b_2^2 + b_3^2)^{1/2} \\ \zeta &= \frac{b_2}{(b_2^2 + b_3^2)^{1/2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

1.3 非线性最小二乘法的实现

对单自由度系统的自由衰减振动,响应函数为

$$y(t)=b_1 e^{-b_2 t}\sin(b_3 t+b_4) \quad (3)$$

简记为

$$y(t)=f(t;b)$$

式中

$$b=(b_1, b_2, b_3, b_4)^T$$

最小二乘方程

$$(A^T A)\Delta = A^T (y - f)$$

式中

$$A=(a_{ij})=(\partial f_i / \partial b_j)$$

试验采样序列

$$y=(y_1, y_2, \dots, y_n)^T_{n \times 1}$$

理论曲线采样序列

$$f=(f_1, f_2, \dots, f_n)^T_{n \times 1}$$

采用高斯-牛顿迭代解法进行求解,其基本思想是:将非线性最小二乘问题的法方程组中的 $f_i(b)$ 在已知初始点 $b^{(0)}$ 处作泰勒展开,略去二次及以上项,用所得的函数近似替代 $f_i(b)$,按线性最小二乘法求得 $b^{(1)}=b^{(0)}+\Delta_j$,再将其在 $b^{(1)}$ 处泰勒展开,并重复以上步骤,直至误差小于某个精度要求。其解为

$$\Delta = A^+ (y - f); \quad A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$$

式中: $\Delta=(\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4)^T$; $\Delta_j=b_j^{(k)}-b_j^{(k-1)}$ ($j=1, 2, 3, 4$)

用高斯-牛顿方法进行计算的2个要点如下。

(1)初始值 b_0 的选择对拟合结果影响很大,初始值选择不当可能不收敛。程序提供了求取较准确初始值的几种不同算法(包络中线拟合法、粗略估计

拟合法、波形鼠标取点法等), 这些方法对于大多数问题是切实可行的。

(2) $A^T A$ 的奇异性通常引起较大的误差, 甚至影响收敛性。本程序解方程不是直接计算 A^+ , 而是通过 Cholesky 分解技术, 把该矩阵求逆的计算转化为单个数值的乘除法, 这样可以改善问题的收敛性能和计算精度。

1.4 实例分析

在旋转态下的内嵌黏性流体欧拉梁残余振动衰减信号中, 刚体衰减转动的慢变信号表现为趋势项(见图2、图3), 易见趋势项是非线性的(低频曲线)。本文建立了消除低频曲线趋势项的“包络中线估计法”, 从波形分析的角度入手, 寻找到波形中线的函数描述, 采用“以折线代曲线”的思想求取包络中线的表达式, 从而得到比曲线拟合法求解更令人满意的结果。根据方程(1)表示的二参数模型对信号进行预处理, 将所有离散点减去均值, 使信号均值为0, 对信号进行零均值化, 把信号的非零包络中线变为与时间轴(横轴)重合来消除趋势项, 把坐标轴从测试起点移动到最大值点, 使信号模型变为余弦信号零相位。对预处理后的信号采用了3种曲线拟合方法: ①MATLAB 内置 lsqcurvefit 拟合法; ②中值采

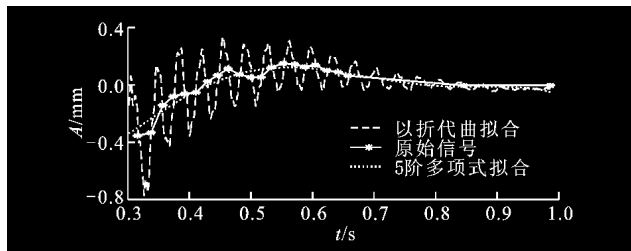
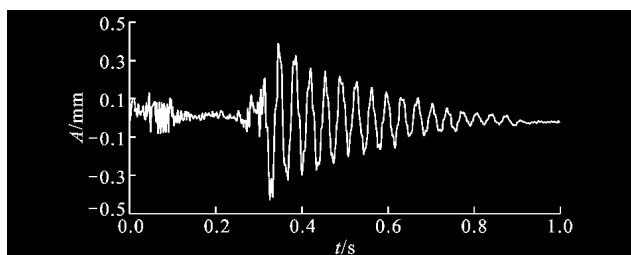
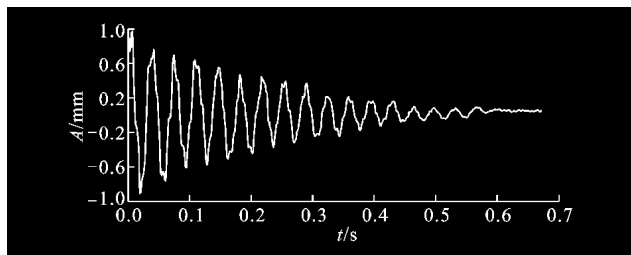


图2 不同拟合方式得到的中线形状



(a) 消除趋势项后的信号



(b) 移轴后的信号

图3 消除趋势项和移轴之后的信号

样拟合法; ③根据拟合模型, 用鼠标从信号图上选择2个点截取该段信号, 利用非线性最小二乘法进行拟合。基于 MATLAB 软件平台编制了专用信号处理程序, 程序计算结果给出了相应的模态参数: 等效模态阻尼比 ζ (或阻尼系数 n); 梁的第一阶无阻尼固有频率 ω_n 。

图4~图6表示了分别采用分段拟合法、MATLAB 内置 lsqcurvefit 拟合法和中值采样拟合法处理残余振动衰减信号的结果, 可以看出分段拟合法对等效模态阻尼比 ζ 的识别具有良好精度, 基本能满足振荡衰减信号的分析要求。

2 工程试验研究

2.1 工程试验背景及原理

试验模拟的工作态为旋转运动的机械臂到达目的地后电机停止运动。机械臂由于“转动-停止”脉冲激励所产生的残余振动会持续一段时间, 这会对机械臂完成设定动作造成不良影响, 是有害的。试验力图从振动控制的角度测试和研究欧拉梁在内嵌流体后相应的力学行为。

电机运行状况: 由伺服电机状态(转动-停止)激励, 全程驱动控制。电机速度变换为梯形模式(见图7): 静止($t_0=0$) $\rightarrow$ 匀加速转动($t_0 \leq t \leq t_1$) $\rightarrow$ 匀速转

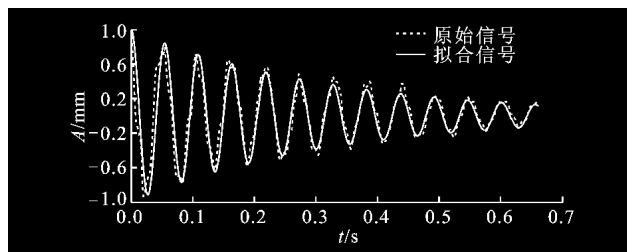


图4 分段拟合法拟合的结果

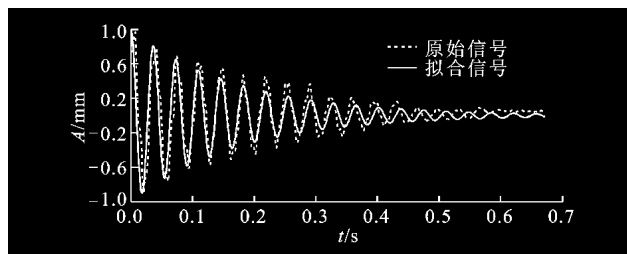


图5 MATLAB 内置 lsqcurvefit 拟合的结果

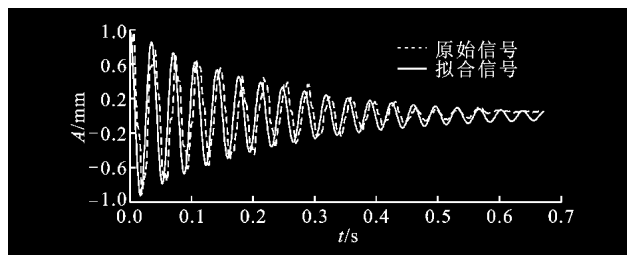


图6 中值采样拟合法拟合的结果

动($t_1 \leq t \leq t_2$) $\Rightarrow$ MHMA 电机断电(t_2) $\Rightarrow$ 匀减速转动($t_2 \leq t \leq t_3$) $\Rightarrow$ 停止(t_3)。

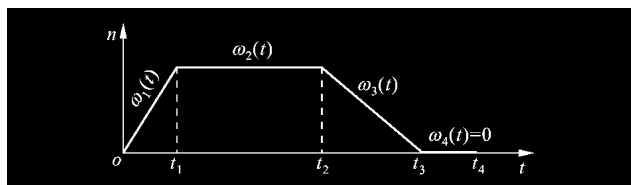


图7 伺服电机转速控制示意图

测试目标:内嵌流体欧拉梁自由端的响应;梁在 $t_2 < t < t_3$ 区间的强迫振动(过渡过程)和 $t_3 < t < t_4$ 区间的自由衰减振动(残余振动)。 t_4 为梁停止振动时刻。测试对象为 t_2 时刻断电后,从欧拉梁端部传感器得到的响应信号。

2.2 工程试验结构模型

本文的研究对象为悬臂铝质柔性欧拉梁,状态为空梁以及分别内嵌1/3、1/2、2/3、3/3体积的流体(水或硅油),尺寸为600 mm $\times$ 12 mm $\times$ 30 mm。基于IVFUM减振机理,梁内部应留有空间来内嵌流体,同时梁还要承受高达600 r/min的旋转试验,存在结构强度和安全性问题,原理性、结构性和动强度上的约束导致外形尺寸加大。

2.3 试验数据处理结果与减振效果评价分析

运用上述方法及程序对试验信号进行分析处理,得到内嵌流体欧拉梁等效模态阻尼比 ζ (或阻尼系数 n)、梁的第一阶无阻尼固有频率 ω_n 与梁的旋转频率 ω 之间的关系,如图8~图11所示。

试验数据处理结果分析如下:

(1)从信号等效阻尼比 ζ 的分析结果来看, ζ 的变化趋势随 ω 的增加而降低,其绝对数值偏小(4.5%以下)。

(2)旋转频率在5 Hz以下时,内嵌流体介质对欧拉梁具有减振作用,尤其内嵌1/3水时效果最为明显。

(3)旋转频率在5 Hz以上时,空梁的 ζ 大于内嵌流体梁的 ζ ,没有体现出内嵌流体的减振作用。

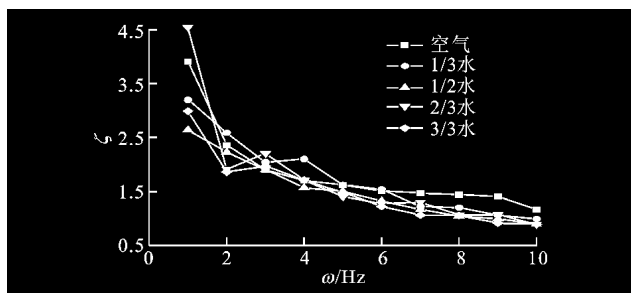


图8 梁内嵌水时等效阻尼比与旋转频率的关系

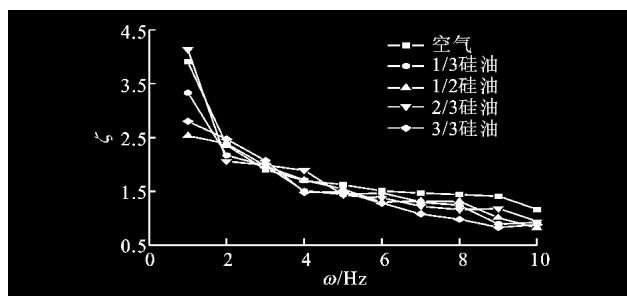


图9 梁内嵌硅油时等效阻尼比与旋转频率的关系

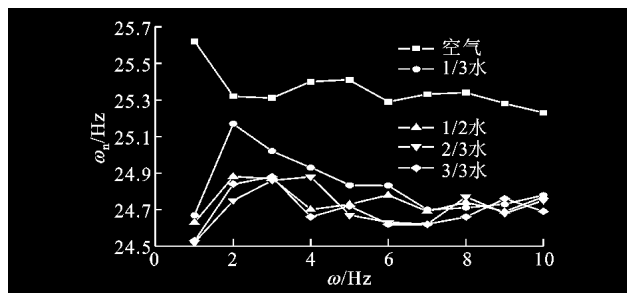


图10 梁内嵌水时固有频率与旋转频率的关系

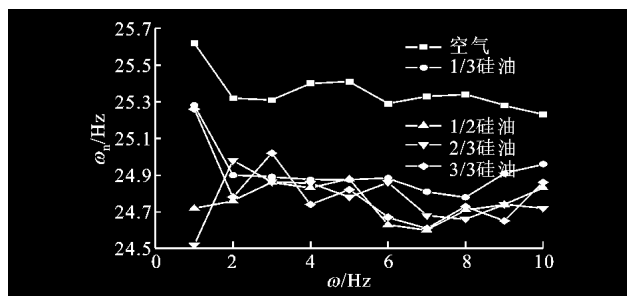


图11 梁内嵌硅油时固有频率与旋转频率的关系

(4)一般而言,低速旋转时梁中内嵌流体介质对梁的减振具有一定的正面作用。

(5)从对平均固有频率的分析结果来看,空梁的固有频率比内嵌流体的大,其变化趋势随旋转频率的增加而减小,内嵌流体梁的固有频率在旋转频率为2~10 Hz之间时也呈下降趋势,其原因较为复杂,有待进一步深入研究。

3 结 论

(1)本文提出了一种新的残余振动减振效果评价体系——单自由度等效阻尼比法,结合非线性最小二乘法处理内嵌黏性流体欧拉梁旋转态下的残余振动衰减信号,可以有效地评价内嵌黏性流体介质对旋转态下欧拉梁残余振动的减振效果。

(2)本文对内嵌黏性流体欧拉梁旋转态下残余振动衰减信号的处理是一个初步尝试。拟合识别等效模态阻尼比 ζ 具有一定的随机性(分散性),据此对内嵌黏性流体运动欧拉梁结构在旋转态下的残余

振动衰减效果所进行的评价是定性半定量的。

(3) 旋转态下内嵌黏性流体欧拉梁在一定条件下可以自适应消减残余振动,但是由于内嵌流体的运动不可控,以及流体流动与晃动在梁残余振动过程中固有的随机干扰作用,给问题分析带来了复杂性,有待于采用更合适的方法进一步研究。

(4) 在柔性机构残余振动控制中,可以选取合适的模型,并对内嵌流体的类型、质量、动力黏度、外部激励等影响因素加以优化,使内嵌流体达到最优的减振效果,如改进单自由度阻尼系统模型,完善参数识别方法和信号处理的全程操作技术,加大旋转态试验的样本数,进行科学统计分析,提高平均值的精度,采用多次、多方法拟合的大样本分析技术等。

参考文献:

- [1] ZHANG Xiongwen, LI Jun, XU Hui, et al. Numerical study of self-adaptive vibration suppression for flexible structure using interior inlay viscous fluid unit method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 297: 627-634.
- [2] 黄志祥,徐晖,徐立勤. 内嵌黏性流体欧拉梁的自适应减振模式研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(9): 1099-1103.
- [3] HUANG Zhixiang, XU Hui, XU Liqin. Adaptive vibration suppression mode for Euler beam with interior inlay viscous fluid [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(9): 1099-1103.
- [3] 黄志祥,徐晖,徐立勤. 内嵌流体自适应减振方法(IVFUM)中流体运动数值模拟[J]. 应用力学学报, 2006, 23(4): 520-524.
- [3] HUANG Zhixiang, XU Hui, XU Liqin. Numerical simulation for fluid-moving in self-adaptive vibration suppression method with interior inlay viscous fluid unit (IVFU) [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(4): 520-524.
- [4] CHENG Jianlian, XU Hui. Using inner mass impact damper for attenuating structures vibration [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(17): 5355-5369.
- [5] CHENG Jianlian, XU Hui, YAN Anzhi, et al. Using inner mass impact damper for attenuating structural vibration and experimental research [C]//Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics 2005. Monmouth Junction, USA: Science Press USA Inc., 2005: 1016-1022.

(编辑 葛赵青)