

GH4169 材料小阻尼精确测试方法研究^{*}

闫松¹, 张志伟¹, 李芙东²

(1. 航天液体动力全国重点实验室 西安, 710100)

(2. 西安交通大学机械工程学院 西安, 710049)

摘要 针对高温合金材料小阻尼的精确测试问题, 设计了基于非接触测试的试验方案, 通过激光测振获取悬臂梁的自由衰减时域响应, 采用控制力矩的方式消除固支端可能引入的摩擦阻尼。首先, 在时域对自由衰减响应信号进行带通滤波, 采用自由衰减法计算悬臂梁的前 3 阶阻尼比; 其次, 在频域根据采样率和采样时长做快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, 简称 FFT) 全景谱, 分别对频谱曲线第 1、第 2 和第 3 阶峰值 ± 5 Hz 频率范围采用线性调频 Z 变换方法 (chirp Z transform, 简称 CZT) 进行频谱细化, 获得该频带范围内极高分辨率的共振峰频谱; 最后, 利用半功率带宽法获得材料的阻尼比。结果表明: 基于带通滤波的自由衰减法可以从时域衰减曲线获得 GH4169 悬臂梁的前 3 阶模态阻尼比, 基于 CZT 变换的频域阻尼识别方法在不增加采样分辨率和数据样本点的情况下, 可以识别阻尼比为 10^{-5} 量级的高温合金的材料阻尼。本测试分析方法可以为整体式涡轮颤振和受迫响应计算提供精确的材料阻尼数据。

关键词 涡轮颤振; 材料阻尼; GH4169 材料; 半功率带宽法; 线性调频 Z 变换方法

中图分类号 O329; TH113.1; TH825

引言

液体火箭发动机中若要对整体式涡轮盘的颤振进行预测分析, 需要精确地量化材料阻尼。整体式涡轮盘工作时, 材料阻尼与气动阻尼之和决定了涡轮盘工作是否稳定。当气动阻尼为零甚至为负时, 即使材料阻尼很低, 也是唯一的能量耗散源^[1]。除了颤振预测外, 在评估涡轮受迫响应高周疲劳风险时, 也需要材料阻尼数据来精确计算强迫振动响应量级。

高阻尼可以确保振动快速衰减和低振幅振动, 但阻尼的精确测量仍被认为具有挑战性^[2]。与界面摩擦阻尼相比, 金属材料的阻尼值往往很小, 材料阻尼只有在外部阻尼被消除的情况下才有意义。从机理上看, 金属材料的内部阻尼受腐蚀疲劳、晶粒尺寸和孔隙率的影响; 从表观来看, 阻尼与频率、应力幅值和温度之间存在函数关系; 此外, 阻尼还取决于疲劳循环次数^[3]。

目前, 已有多种不同的技术和几何形状被用来测量材料阻尼。3 种最常用的方法是自由衰减法、半功率带宽法和共振驻留法^[4]。此外, 还发展了小波变换法^[5]、声衰减时间^[6]等阻尼测试方法。

自由衰减法要求振动信号的频率成分单一, 对于小阻尼材料响应的衰减往往很慢, 且得到的是 1 阶频率所对应的阻尼, 当应用于多模态叠加响应时, 需要构造滤波器将单阶模态分离。半功率带宽法可以直接从频率响应曲线描述单个振动模态的阻尼系数, 当其应用于小阻尼试样测试时, 对应响应曲线上非常窄的共振峰, 由于频率分辨率不足^[7]和曲线拟合技术存在误差^[8], 给小阻尼识别带来极大困难。Gibert 等^[9]在进行阻尼识别时, 使用了高频率分辨率, 共振时在半功率带宽内获得了 5~10 个频率点, 以准确识别阻尼系数; 但这导致了较长的测试时间, 并且对于金属小阻尼材料, 在半功率带宽内 5~10 个频率点是难以精确识别阻尼比的。针对频率分辨率不足的问题, 研究人员提出了各种频谱细化方法, 如快速傅里叶变换+傅里叶变换 (fast Fourier transform and Fourier transform, 简称 FFT+FT) 法、缩放快速傅里叶变换 (zoom fast Fourier transformation, 简称 ZoomFFT) 法^[10]以及 CZT 法^[11-14]等。其中: ZoomFFT 通过移频和重采样实现频谱细化, 适用于细化倍数较低的场合; FFT+FT 法和 CZT 法都能极大地提高频率分辨率, 但 FFT+FT 法适

^{*} 国家重点实验室基金资助项目 (HTKJ2021KL011004)

收稿日期: 2022-03-12; 修回日期: 2022-08-24

合于输入数据和输出数据差别较大的场合,CZT法更适合于宽频谱分析^[15]。郑成琪等^[16]采用分段正弦扫频试验,每个扫频段只包含1阶模态频率,通过频率细化和频谱校正来减小阻尼识别的误差。Lee等^[17]采用半功率带宽法研究了过时效工艺对Ti-6Al-4V合金阻尼性能和断裂韧性的影响,测得材料的阻尼损耗因子最低为 26.1×10^{-4} 。文献[18]通过测量一端固定的弯曲梁自由振动的对数衰减率,分别确定了未热处理、固溶处理和时效处理3种Mg-6Al-1Zn试样的阻尼性能。Granick等^[19]通过共振驻留试验技术,调查了2024-T4材料阻尼与应力幅值及频率之间的关系,得知空气中测得的阻尼主要是气动阻力,与位移振幅和频率有关;而在真空中测得的阻尼完全是材料阻尼,与应力振幅无关,仅与频率有关。温金鹏等^[20]采用基础激励下的共振驻留法,研究了用双悬臂梁试件测试材料阻尼的原理和实施途径,发现双悬臂梁的平衡程度对阻尼识别精度有显著影响。

笔者针对液体火箭发动机热端部件常用的GH4169材料^[21]小阻尼测试问题,设计了一套基于非接触的试验方案,采用基于带通滤波的自由衰减法进行阻尼的精确识别,通过一次敲击试验获得了GH4169材料的前3阶频率阻尼比。为了验证时域阻尼识别结果的准确性,在频域中应用基于CZT变换的半功率带宽法识别材料的阻尼比,频域与时域识别结果具有很好的一致性。同时,还测得发动机中另一种常用材料1Cr18Ni9Ti的阻尼比。

1 材料阻尼测试方法

1.1 自由衰减法

通过力锤对悬臂梁施加脉冲激励,记录悬臂梁末端的速度响应曲线。自由衰减法中阻尼比 ζ 可由振动同一方向上相邻的 k 个振幅值平均得到,即

$$\zeta = \frac{1}{2\pi k} \ln(X_q/X_{q+k}) \quad (1)$$

实际测试时结构的自由衰减振动响应中往往包含了多个频率成分,若直接使用自由衰减法进行阻尼计算会带来较大误差。笔者采用基于滤波的自由衰减法对振动响应信号进行处理。首先,对响应信号作FFT变换,得到悬臂梁的第1、第2和第3阶固有频率;其次,分别以FFT得到的前3阶固有频率为中心频率,对时域响应信号进行带通滤波,以消除其他振动模式(如扭转振动),获得仅该阶固有频率下的结构弯曲振动响应;最后,针对滤波后的响应,

分别按式(1)计算得到不同频率下的阻尼比。基于滤波的自由衰减法原理如图1所示。本研究带通滤波选用256阶fir滤波器和汉宁窗,通带选择在FFT识别得到的固有频率基础上 ± 10 Hz。

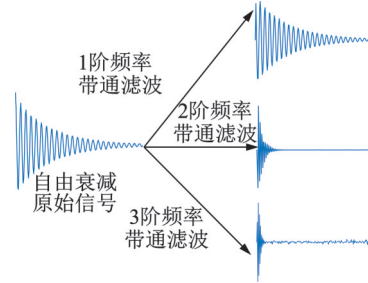


图1 基于滤波的自由衰减法原理

Fig.1 The principle of filter-based free decay method

1.2 半功率带宽法

半功率带宽法使用响应的频谱测量材料的阻尼。通过FFT变换,将时域上的自由衰减振动信号转换到频域上,使用每阶模态的频谱曲线。在共振频率 f_0 上,幅值响应最大,最大幅值下降 $1/\sqrt{2}$ 所对应的2个频率 f_1 和 f_2 称为半功率点。半功率带宽法频谱图如图2所示。 f_2 与 f_1 之差称为半功率带宽,其反映了阻尼大小。半功率带宽法中阻尼比 ζ 为

$$\zeta = (f_2 - f_1)/2f_0 \quad (2)$$

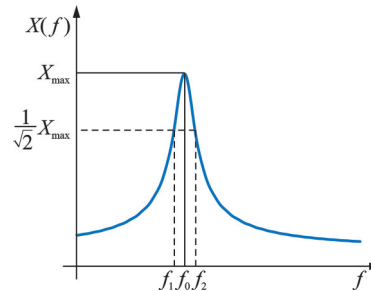


图2 半功率带宽法示意图

Fig.2 Schematic diagram of the Half-Power bandwidth method

半功率带宽法不受振动信号中存在多个频率成分的限制,但测量精度受限于半功率带宽的准确计算,尤其是对于高温合金等小阻尼材料,阻尼比的精确计算受到频率分辨率的制约,因此发展了各种频谱细化方法。

1.3 CZT 频谱细化方法

标准的FFT进行的是从 $-f_s/2$ 到 $f_s/2$ 的等间隔频谱采样,当采样频率 f_s 和采样时长 T 确定后,频率分辨率 Δf 是确定的, $\Delta f = 1/T$ 。对于小阻尼材料,增加频率分辨率意味着增加采样时长,频率分辨率

提高1倍则采样时长需要增加1倍。CZT算法^[22]是一种在 z 平面上沿着螺旋线轨道计算有限带宽的变换方法,其基本原理是在折叠频率范围内,任意选择起始频率和频率分辨率,在有限带宽内对信号进行Z变换^[15]。CZT变换能提供高分辨率的频谱数据,且具有指定带宽的能力。CZT的频率分辨率 $\Delta f = (f_u - f_l)/T/f_s$,其中: f_u 为结束频率; f_l 为开始频率。与FFT相比,CZT更加灵活,给定采样率和采样时长后,通过调整开始频率 f_l 和结束频率 f_u 就可以调整频率分辨率。笔者在利用CZT变换进行半功率带宽阻尼识别时,首先使用采样率 f_s 和采样时长 T 做FFT全景谱,然后选取FFT谱中的3个独立频带,每个频带中只包含一个频率成分,对每个频带做CZT细化谱,再采用半功率带宽法计算阻尼比。

2 金属材料阻尼测试试验

2.1 试验条件及方案

小阻尼测试试验方案如图3所示。设计悬臂梁试件悬臂端长为96.7 mm,宽为12.6 mm,高为1.6 mm,所采用的热处理方法与发动机正式产品的热处理方法相同。为了消除其他阻尼源,使测试结果仅与材料阻尼有关,设计了专用夹具夹持试件固定端。采用力矩扳手控制固支端的螺栓拧紧力矩,以避免悬臂梁与夹具之间引入摩擦阻尼。经过实测不同力矩下的材料阻尼值,发现采用50 N·m的拧紧力矩可以避免固支端的摩擦。试验时,通过非接触激光测振获取悬臂梁响应速度曲线。为了增强反光效果,在悬臂梁顶部测点处粘贴反光片以提升信噪比。采用力锤对悬臂梁根部施加脉冲激励,通过数采设备同步触发三维激光测振仪(PSV-400-3D)进行三方向的振动数据采集,解码控制器将测得的光信号转换为振动速度信号,三方向的振动速度信息

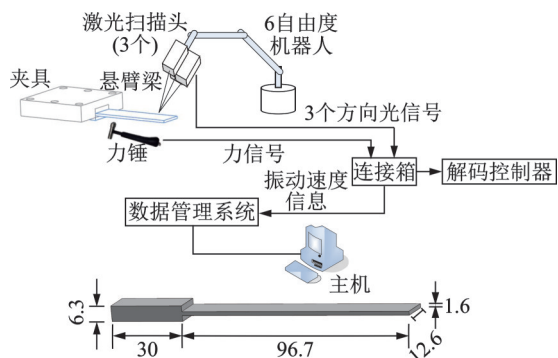


图3 小阻尼测试试验方案(单位:mm)

Fig.3 Schematic diagram of small damping test scheme (unit:mm)

传输到数据管理系统进行阻尼分析。为了获取GH4169悬臂梁完整的时域衰减曲线,分析悬臂梁的弯曲响应,采样率为6 400 Hz,采集时长为60 s。试验现场照片如图4所示。

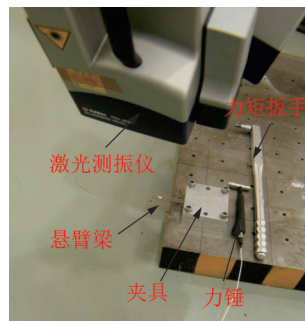


图4 试验现场照片

Fig.4 Photos of test site

2.2 基于带通滤波的自由衰减法结果

GH4169悬臂梁时域自由衰减原始信号如图5所示。对该时域曲线进行FFT变换,结果如图6所示。FFT的频率分辨率为 $1/60=0.0167$ Hz,可以看出,力锤敲击激发了悬臂梁的前3阶弯曲模态,对应的固有频率分别为135.6,840.4和2 313.2 Hz。分别以这3阶频率为中心频率,构造带通滤波器,对自由衰减曲线进行带通滤波。带通滤波选用256阶fir滤波和汉宁窗,通带选择在FFT识别出的固有频率基础上 ± 10 Hz。自由衰减曲线前3阶带通滤波后信号分别如图7~9所示。由图7可以看出,滤波后1阶振动响应信号形状与原始信号基本一致,但滤波后信号轮廓更加光滑,速度幅值在60 s内从535.4 mm/s下降到4.0 mm/s。由图8可以看出,滤波后2阶振动响应信号衰减很快,速度幅值在约7 s内从31.7 mm/s下降到0.6 mm/s,下降幅值约为98.1%。由图9可以看出,滤波后3阶振动响应在约1.4 s内从6.9 mm/s下降到0.1 mm/s,下降幅值约为98.1%。根据式(1)计算所得GH4169悬臂梁前3阶固有频率对应的阻尼比分别为 9.5572×10^{-5} , 1.1211×10^{-4} 和 1.9185×10^{-4} 。

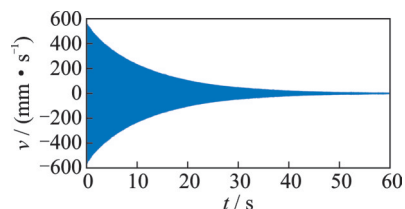


图5 GH4169悬臂梁时域自由衰减原始信号

Fig.5 The original time-domain free decay signal of GH4169 cantilever beam

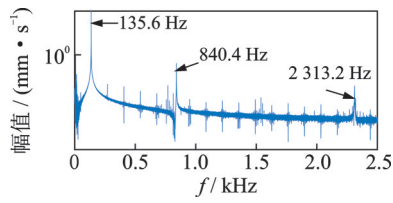


图6 GH 4169悬臂梁自由衰减曲线的FFT

Fig.6 FFT of free attenuation curve of GH4169 cantilever beam

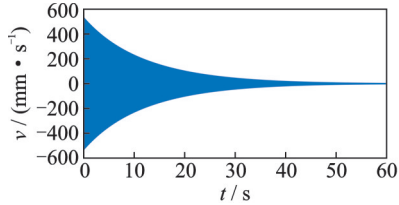


图7 自由衰减曲线1阶带通滤波后信号

Fig.7 First-order bandpass filtering of free attenuation signals

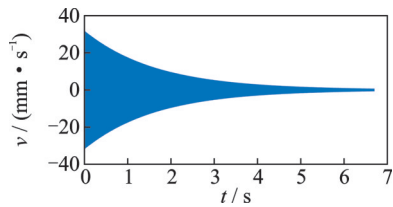


图8 自由衰减曲线2阶带通滤波后信号

Fig.8 Second-order bandpass filtering of free attenuation signals

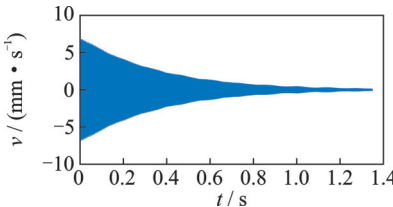


图9 自由衰减曲线3阶带通滤波后信号

Fig.9 Third-order bandpass filtering of free attenuation signals

2.3 基于CZT变换的半功率带宽法结果

以FFT所得135.6, 840.4和2 313.2 Hz为中心频率, ± 5 Hz为带宽进行CZT变换, 得到细化峰值对应的最大频率分别为135.635 8, 840.367 9和2 313.110 1 Hz。前3阶基于CZT的半功率带宽法分别如图10~12所示。由图10(a)可知, 频率分辨率 $\Delta f = 10 \div 60 \div 6400 = 2.604 2 \times 10^{-5}$ Hz, 频率135.635 8 Hz对应的最大峰值为 2.06×10^7 。幅值下降 $1/\sqrt{2}$ 处作一条水平线, 该水平线与频谱曲线的交点通过水平线上、下2个频率点进行线性插值得到, 如图10(b)所示。表1给出了GH4169悬臂梁自由衰减法和半功率带宽法阻尼比结果。

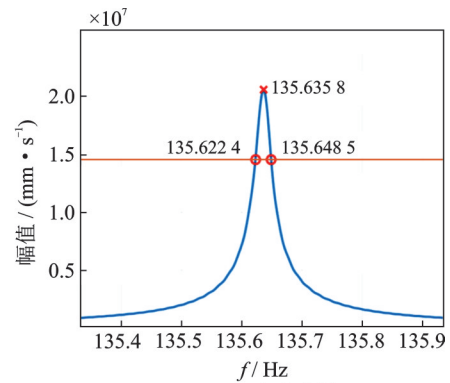
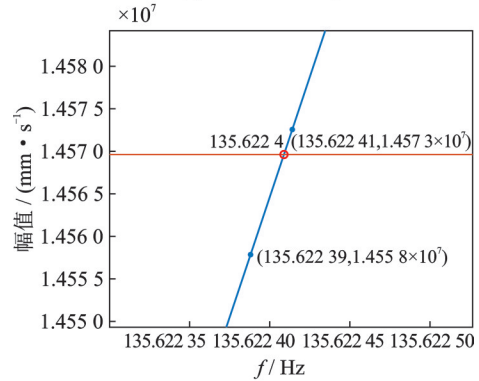
(a) CZT细化频谱
(a) CZT refined spectrum(b) 局部放大图
(b) Local enlarged view

图10 基于CZT的半功率带宽法(第1阶)

Fig.10 CZT based half power bandwidth method (1st order)

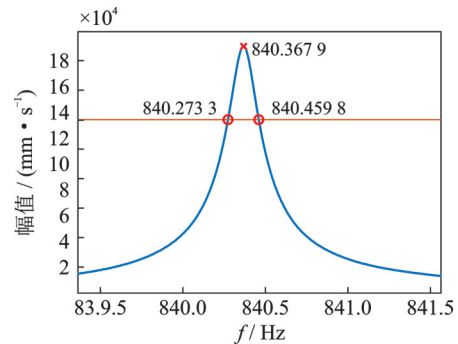


图11 基于CZT的半功率带宽法(第2阶)

Fig.11 CZT based half power bandwidth method (2nd order)

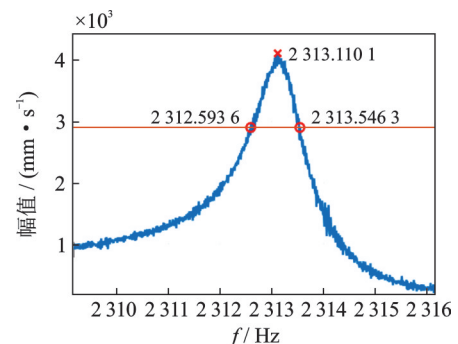


图12 基于CZT的半功率带宽法(第3阶)

Fig.12 CZT based half power bandwidth method (3rd order)

表 1 自由衰减法和半功率带宽法阻尼比结果

Tab.1 Damping ratio results of free attenuation method and half power bandwidth method

阶数	固有频率/ Hz	阻尼比		数值 差 %
		自由 衰减法	CZT 半功率 带宽法	
1	135.636	9.56×10^{-5}	9.63×10^{-5}	0.81
2	840.368	1.12×10^{-4}	1.11×10^{-4}	0.99
3	2 313.110	1.92×10^{-4}	1.95×10^{-4}	1.81

3 重复性试验验证

为了验证笔者提出的小阻尼测试系统的稳定性,开展了同一批次 GH4169 材料 12 件试样的阻尼测试,分别采用基于带通滤波的自由衰减法和基于 CZT 变换的半功率带宽法进行了阻尼分析。2 种方法所得 GH4169 材料 12 根试样的阻尼比均值和标准差如表 2 所示。时域法测得 GH4169 的 1 阶阻尼比均值为 9.128×10^{-5} ,标准差为 3.974×10^{-6} ;频域法测得 GH4169 的 1 阶阻尼比均值为 9.313×10^{-5} ,标准差为 3.440×10^{-6} 。2 种方法测得的阻尼均值非常接近,差别仅为 1.99%,且标准差比均值小一个数量级。这说明测试重复性好,验证了本方法对小阻尼试样测试的有效性。

表 2 2 种方法所得 GH4169 材料 12 根试样的阻尼比均值和标准差

Tab.2 Mean and standard deviation of damping ratio of 12 samples of GH4169 obtained by two methods

模态 阶数	时域法		频域法	
	均值	标准差	均值	标准差
1	9.13×10^{-5}	3.97×10^{-6}	9.31×10^{-5}	3.44×10^{-6}
2	1.16×10^{-4}	2.27×10^{-5}	1.15×10^{-4}	1.64×10^{-5}
3	2.02×10^{-4}	4.06×10^{-5}	2.07×10^{-4}	4.10×10^{-5}

采用 2 种方法拟合 12 件试样,得到的 GH4169 前 3 阶弯曲模态的阻尼比如图 13 所示。可以看出,随着频率的增加,2 种方法测试的散差均增加,且高

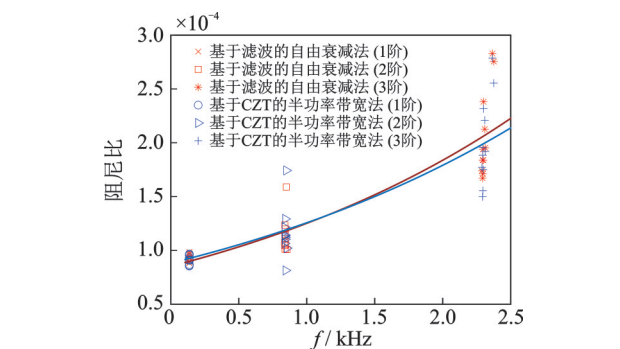


图 13 GH4169 前 3 阶弯曲模态的阻尼比

Fig.13 Damping ratio of the first three bending modes of GH4169

阶模态阻尼比大于低阶模态阻尼比。采用本研究频域法对 12 件 1Cr18Ni9Ti 试样的材料阻尼进行了测试,其 1 阶阻尼比均值为 3.280×10^{-4} 。GH4169 和 1Cr18Ni9Ti 时域衰减对比如图 14 所示。可以看出,时域上 GH4169 材料振动衰减的速率比 1Cr18Ni9Ti 要小的多,相关材料阻尼特性可以为发动机结构选材提供数据支撑。

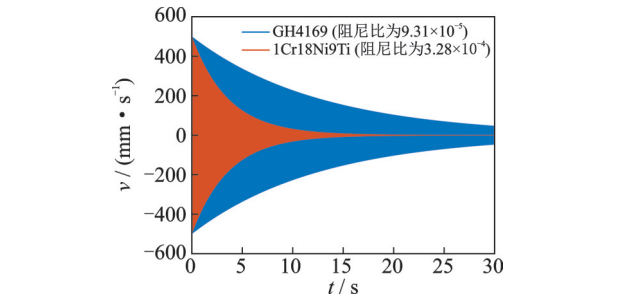


图 14 GH4169 和 1Cr18Ni9Ti 时域衰减对比

Fig.14 Time domain attenuation comparison between GH4169 and 1Cr18Ni9Ti

4 结束语

笔者开发了一套适用于金属材料小阻尼精确测试的试验系统,采用激光测振仪获得试样的时域衰减曲线,基于带通滤波的自由衰减法和基于 CZT 变换的半功率带宽法计算阻尼比,试验重复性好,可完成材料阻尼比为 10^{-5} 量级的阻尼测试。研究结果表明,基于滤波的自由衰减法可精确获得 GH4169 材料的前 3 阶阻尼比,基于 CZT 变换的半功率带宽法与时域法所得结果一致,2 种方法计算得到的 1 阶阻尼比均值差别不大于 2%。本系统方法重复性和稳定性好,可快速完成小阻尼的精确测试。

参 考 文 献

[1] 李斌,闫松,杨宝锋.大推力液体火箭发动机结构中的力学问题[J].力学进展,2021,51(4):831-864.
LI Bin, YAN Song, YANG Baofeng. Mechanical problems of the large thrust liquid rocket engine[J]. Advances in Mechanics, 2021, 51(4): 831-864. (in Chinese)

[2] LABONNOTE N, MALO K A. Damping measurements in timber beams using impact testing[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics. Leuven, Belgium: Nternational Conference Structural Dynamics Katholieke Universiteit Eurodyn, 2011: 1097-1101.

[3] COLAKOGLU M. Factors effecting internal damping in Aluminum [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2004, 42(1): 95-105.

- [4] SHEEN R L. Experimental measurement of material damping for space structures in simulated zero-G; AFIT/CI/NR 83-84T [R]. Cambridge, Boston Metropolitan Area; Massachusetts Institute of Technology, 1983.
- [5] 姚千斌, 杨智春, 李斌. 基于小波变换方法的材料小阻尼识别[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(7): 850-855. YAO Qianbin, YANG Zhichun, LI Bin. Damping identification of materials using wavelet transform [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2007, 26(7): 850-855. (in Chinese)
- [6] 张教超, 王敏庆, 马建刚. 结构阻尼的声衰减时间测量方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(2): 330-333. ZHANG Jiaochao, WANG Mingqing, MA Jiangang. Measurement method of structural damping based on sound attenuation time[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(2): 330-333. (in Chinese)
- [7] PLUNT J. The power injection method for vibration damping determination of body panels with applied damping treatments and trim [J]. SAE Transactions, 1991, 100: 1563-1571.
- [8] SEYBERT A F. Estimation of damping from response spectra[J]. Journal of Sound and Vibration, 1981, 75(2): 199-206.
- [9] GIBERT C, BLANC L, ALMEIDA P, et al. Modal tests and analysis of a radial impeller at rest; influence of surrounding air on damping[C]//The ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. Copenhagen: ASME, 2012: 1121-1131.
- [10] 应怀樵, 沈松, 刘进明. “ZOOMBDF”法高精度求系统阻尼比的探讨[J]. 振动、测试与诊断, 1997, 17(2): 44-48. YING Huaiqiao, SHEN Song, LIU Jinming. Investigation on high precision calculation for damping ratio using "ZOOMBDF" method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1997, 17(2): 44-48. (in Chinese)
- [11] 罗文波, 王莉. 用CHIRP-Z变换法识别小阻尼系统的品质因数[J]. 振动与冲击, 1997, 16(3): 42-44. LUO Wenbo, WANG Li. Quality factor identification by CHIRP Z-transform in small damping system [J]. Journal of Vibration and Shock, 1997, 16(3): 42-44. (in Chinese)
- [12] 樊新海, 曾兴祥, 张丽霞, 等. 基于CZT的频谱细化算法及应用[J]. 装甲兵工程学院学报, 2012, 26(1): 59-62. FAN Xinhai, ZENG Xingxiang, ZHANG Lixia, et al. Algorithm and application of spectrum zoom based on chirp Z transform [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2012, 26(1): 59-62. (in Chinese)
- [13] 钱克矛, 李川奇. 频谱校正的线性调频Z变换方法[J]. 振动工程学报, 2000, 13(4): 628-632. QIAN Kemao, LI Chuanqi. New spectrum correction method based on chirp Z transform [J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(4): 628-632. (in Chinese)
- [14] SHILLING S A. A study of the chirp Z-transform and its applications [D]. Manhattan: Kansas State University, 1972.
- [15] 丁康, 潘成灏, 李巍华. ZFFT与Chirp-Z变换细化选带的频谱分析对比[J]. 振动与冲击, 2006, 25(6): 9-12. DING Kang, PAN Chenghao, LI Weihua. Spectrum analysis comparison between ZFFT and Chirp-Z transform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(6): 9-12. (in Chinese)
- [16] 郑成琪, 程晓农. 金属阻尼性能测试方法的现状与发展[J]. 实验力学, 2004, 19(2): 248-256. ZHENG Chengqi, CHENG Xiaonong. Present status and future of damping measurement for metals [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(2): 248-256. (in Chinese)
- [17] LEE D G, LEE S, LEE Y T. Effect of precipitates on damping capacity and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 486(1/2): 19-26.
- [18] EL-MORSY A W, FARAHAT A I Z. Effect of aging treatment on the damping capacity and mechanical properties of Mg-6Al-1Zn alloy [J]. The Scientific World Journal, 2015, 2015: 170458.
- [19] GRANICK N, STERN J E. Material damping of aluminum by a resonant-dwell technique; NASA TN D-2893 [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 1965.
- [20] 温金鹏, 杨智春, 李斌, 等. 材料阻尼测试方法研究[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(3): 220-224. WEN Jinpeng, YANG Zhichun, LI Bin, et al. A method for material damping measurement [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(3): 220-224. (in Chinese)
- [21] 孙纪国, 何学青, 阳代军, 等. 大推力氢氧发动机关键制造技术[J]. 火箭推进, 2022, 48(2): 117-126. SUN Jiguo, HE Xueqing, YANG Daijun, et al. Key manufacturing technology for large thrust LH2/LOX cycle engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(2): 117-126. (in Chinese)
- [22] RABINER L, SCHAFER R, RADER C. The chirp Z-transform algorithm [J]. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 1969, 17(2): 86-92.



第一作者简介: 温松, 男, 1988年2月生, 博士、高级工程师。主要研究方向为液体火箭发动机结构动力学、视觉测量技术。曾发表《大推力液体火箭发动机结构中的力学问题》《力学进展》2021年第51卷第4期)等论文。

E-mail: ys060599@126.com