

航空带垫卡箍刚度及阻尼特性分析与试验验证

刘学峰, 张源麟, 张德聪, 于 涛, 高培鑫
(烟台大学 机电汽车工程学院, 山东 烟台 264010)

摘 要: 研制了带垫卡箍刚度测试装置, 分别对不同规格卡箍线刚度和扭转刚度进行了测量, 并将卡箍刚度测量数值引入卡箍-管路系统有限元模型, 通过管路固有特性数值计算与试验测试结果对比, 误差在 5% 左右, 验证了卡箍刚度参数的准确性。进一步搭建了卡箍阻尼测量系统, 通过测量卡箍动态传递率, 获得相对应的模态阻尼比, 并将卡箍阻尼测量数值引入卡箍-管路系统有限元模型, 得到的管路振动响应数值计算结果与试验对比, 误差在 30% 左右, 进一步验证了阻尼测量方法的有效性。该方法可以为航空复杂管路系统卡箍支撑的设计提供技术参考。

关 键 词: 带垫卡箍; 管路系统; 支撑刚度; 阻尼特性; 振动响应

中图分类号: V233

文献标志码: A

Analysis and test verification of stiffness and damping characteristics of aviation clamp with cushion

LIU Xuefeng, ZHANG Yuanlin, ZHANG Decong, YU Tao, GAO Peixin

(School of Electromechanical and Automotive Engineering,
Yantai University, Yantai Shandong 264010, China)

Abstract: The stiffness test device of clamp with cushion was developed. The linear stiffness and torsional stiffness of different specifications of clamp were measured respectively. The measured value of clamp stiffness was introduced into the finite element model of clamp pipeline system. The error was about 5% by comparing the numerical calculation of pipeline inherent characteristics with the test results, verifying the accuracy of clamp stiffness parameters. Furthermore, a clamp damping measurement system was built, and the corresponding modal damping ratio was obtained by measuring the dynamic transmissivity of the clamp. The measured value of the clamp damping was introduced into the finite element model of the clamp pipe system. The error between the numerical calculation results and the test results was about 30%, which further verified the effectiveness of the damping measurement method. This method can provide the technical reference for design of the clamp support of aviation complex pipeline system.

Key words: clamp with cushion; pipeline system; support stiffness; damping characteristics; vibration response

收稿日期: 2021-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(51805462)

作者简介: 刘学峰(1996—), 男, 硕士生, 主要从事动力学分析与控制。

通信作者: 高培鑫(1986—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事机械结构动力学分析。E-mail: peigaox@ytu.edu.cn

引用格式: 刘学峰, 张源麟, 张德聪, 等. 航空带垫卡箍刚度及阻尼特性分析与试验验证[J]. 航空动力学报, 2022, 37(2): 274-282.

LIU Xuefeng, ZHANG Yuanlin, ZHANG Decong, et al. Analysis and test verification of stiffness and damping characteristics of aviation clamp with cushion[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(2): 274-282.

飞机上的液压管路广泛应用大量的带垫卡箍,其质量直接关系到飞机的飞行安全^[1]。卡箍主要由金属骨架和橡胶衬垫组成,其中衬垫的材料主要有丁腈橡胶、聚四氟乙烯、乙丙橡胶和硅橡胶等^[2]。衬垫的主要作用为阻尼隔振以及防止卡箍与管道磨损等。由于卡箍具有一定的柔性和阻尼作用,因而其对管路系统的振动特性产生较大的影响。卡箍在液压管路系统中起增强管路刚度、禁锢管路位置,增大系统阻尼的作用,其性能对管路系统振动的影响非常大,航空液压管路系统在泵源的脉动激励以及飞机机体的基础激励下,会导致管路系统的刚度下降,使管路的振动加大,致使管路出现疲劳断裂等故障,因此,研究卡箍的刚度特性以及阻尼特性有着十分重要的意义。

目前,对于橡胶卡箍特性的研究较少,对于卡箍的研究主要集中于以金属毡为内垫的卡箍,尹泽勇等^[3]针对不同类型的卡箍,通过建立卡箍有限元模型,利用静态加载方式获得卡箍不同方向刚度值,并通过试验验证计算结果的正确性。柴清东等^[4-5]对以金属毡为内垫的单联和双联卡箍进行了刚度测试及试验验证。刘伟、徐培原等^[6-7]对发动机管路卡箍的动力灵敏度进行了分析,并对卡箍的位置进行了布局优化。郑敏等^[8]分析了多种国外带垫卡箍的结构、材料特点和使用条件,并提出了鉴定试验项目。王晶等^[9]研究了卡箍对航空液压管路动态应力的影响,并提出了弯管卡箍的安置配置原则。

同时,闫辉、姜洪源、敖宏瑞等^[10-12]针对航空管路支撑用的金属橡胶隔振器的能量耗散性能、静态承载能力、过临界的能力以及结构参数对隔振性的影响进行了细致的研究。其他学者^[13-15]则对金属橡胶卡箍的工艺参数对隔振性能的影响进行了分析,并获得了金属橡胶卡箍的最优参数。朱彬等^[16]从理论上解释了金属橡胶非线性刚度和阻尼产生的机理,为分析金属橡胶的刚度、阻尼特性提供了理论基础。近年来,对于带垫卡箍的研究越来越多,高晔等^[17]基于扫频响应反推出卡箍支撑刚度及阻尼。李占营等^[18]从理论推导了管路在卡箍支撑下的响应。Gao等^[19]采用理论分析的方法确定了卡箍螺栓预紧力对刚度和阻尼的影响。Guo等^[20]采用切比雪夫多项式逼近法对卡箍刚度进行了不确定性分析。但是,以上研究主要针对的是用于航空发动机的以金属毡为内垫的卡箍,

对于以橡胶为内垫的卡箍的刚度特性和阻尼特性的研究存在不足,并且缺少对卡箍阻尼的测试。

因此,本文主要针对航空带垫卡箍的刚度特性和阻尼特性进行了试验与数值分析研究。首先,通过设计卡箍刚度测试试验装置,对卡箍静刚度进行了试验测试,获得了卡箍不同方向上线刚度和扭转刚度值;然后,搭建卡箍动态阻尼测量系统,在不同激励水平下,对卡箍动态性能进行了测试分析,得到卡箍模态阻尼比。通过对卡箍管路系统进行固有特性分析以及振动响应预估,验证了卡箍刚度和阻尼参数测量的准确性。

1 卡箍刚度特性测试

1.1 卡箍刚度测量原理

航空带垫卡箍结构如图1所示,卡箍结构包含箍带和橡胶垫片两部分。根据其结构特点,将卡箍刚度定义为 x 和 y 两个方向,如图2所示,每个方向包含线刚度和扭转刚度。

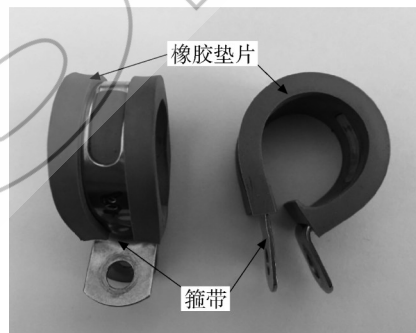


图1 卡箍结构

Fig.1 Clamp structure

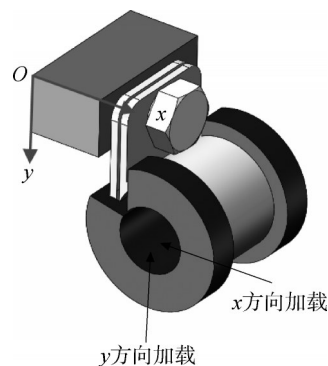


图2 卡箍加载方向

Fig.2 Clamp loading direction

卡箍两个方向上的线刚度^[3]可以定义为

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta x} \quad (1)$$

式中 ΔF 分别为 x 、 y 方向上的加载力变化量, Δx

为 x 、 y 方向上的位移变化量。

由扭转刚度定义式获得卡箍两个方向上的扭转刚度,扭转刚度定义式为

$$K_{\theta} = \frac{\Delta T}{\Delta \theta} \quad (2)$$

式中 ΔT 分别为 x 、 y 方向上的扭矩变化量, $\Delta \theta$ 分别为 x 、 y 方向上的扭转角度变化量。

1.2 刚度测试装置设计

卡箍线刚度以及扭转刚度测试装置如图3和图4所示。卡箍线刚度测试装置分为3个部分,加载机构,卡箍固定机构,测试机构。加载部分使用丝杠滑台加载,对卡箍施加正向力和反向力。固定机构在正面和顶面各有一个螺纹孔,通过正面和顶面的螺纹孔可以调节卡箍受力方向,实现由 x 方向受力转为 y 方向受力。固定机构可调节卡箍位置并实现紧固功能。测试机构有千分表和力传感器,可以读出卡箍受的力和位移变化量。卡箍扭转刚度测试装置分为加载机构,卡箍固定机构,测试机构。加载机构使用蜗轮蜗杆进行加载,对卡箍施加正向扭矩和反向扭矩,加载过程平稳,能精确的控制转动角度,固定机构可调节卡箍位置并紧固卡箍。测试机构有扭矩传感器和数显倾角仪,可以读出卡箍所受的扭矩及扭转角度。

实际试验过程中,采用力矩扳手将卡箍拧紧,

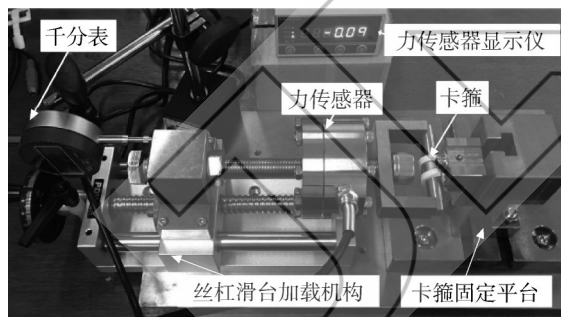


图3 卡箍线刚度试验装置

Fig.3 Clamp line stiffness test device

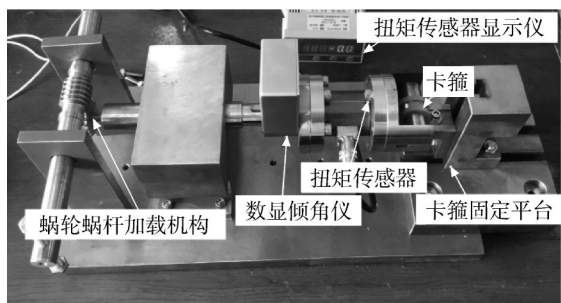


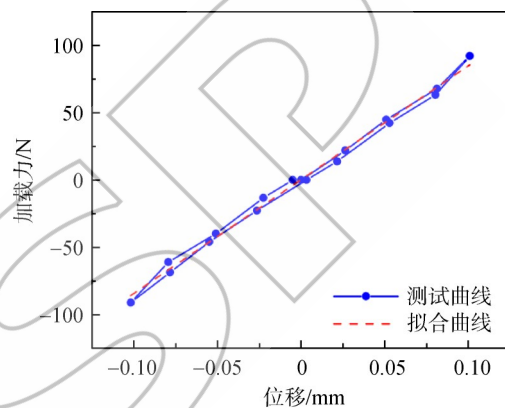
图4 卡箍扭转刚度试验装置

Fig.4 Clamp torsional stiffness test device

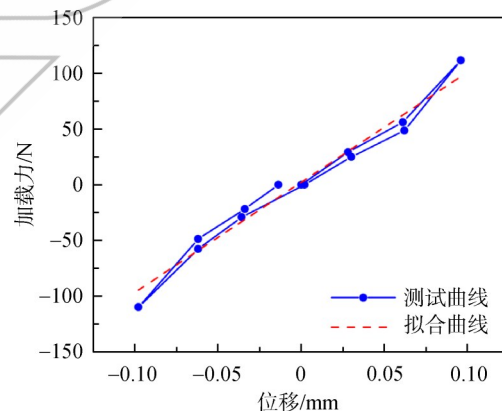
拧紧力矩为 $7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。在试验过程中,首先正向加载,然后正向卸载,再反向加载,最后反向卸载。将试验数据使用最小二乘法进行线性拟合,得到卡箍刚度的拟合值。

1.3 卡箍刚度测试结果

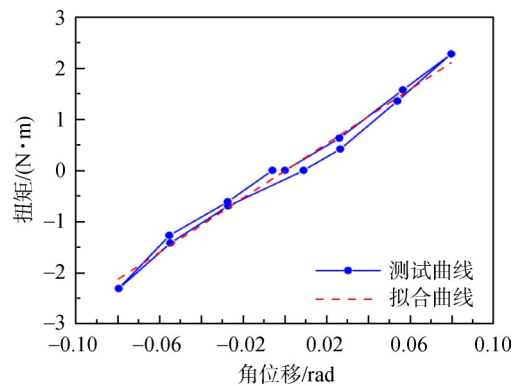
基于卡箍刚度测量装置,分别对飞机上常用的内径为8、12、20 mm(卡箍型号分别记为 $\phi 8$ 、 $\phi 12$ 、 $\phi 20$)的3种典型规格带垫卡箍线刚度和扭转刚度进行测量。 $\phi 8$ 卡箍线刚度测试曲线分别如图5所示。



(a) x 方向线刚度测试



(b) y 方向线刚度测试



(c) x 方向扭转刚度测试

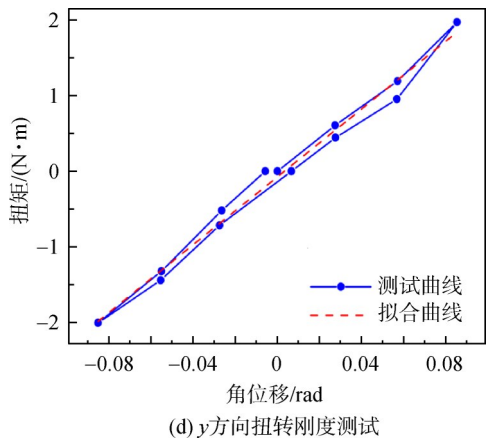


图5 φ8卡箍刚度测试曲线及拟合刚度
Fig.5 Stiffness test curve and fitting stiffness of φ8 clamp

考虑到卡箍制造过程中的误差,对3种型号φ8、φ12、φ20卡箍分别取5个进行试验,结果取5个卡箍刚度的平均值。通过试验得到φ8、φ12、φ20这3种型号不同方向的刚度值,结果如表1所示,表中 K_x 、 $K_{\theta x}$ 为 x 方向线刚度和扭转刚度, K_y 、 $K_{\theta y}$ 为 y 方向线刚度和扭转刚度。

表1 卡箍刚度值
Table 1 Clamp stiffness value

卡箍 型号	$K_x/10^5$ (N/m)	$K_y/10^5$ (N/m)	$K_{\theta x}/$ ((N·m)/rad)	$K_{\theta y}/$ ((N·m)/rad)
φ8	8.45	9.85	26.54	22.4
φ12	4.87	7.90	19.25	16.62
φ20	1.22	3.34	15.44	10.45

从试验结果可以看出,3种型号卡箍刚度近似于线性。其中卡箍 y 方向线刚度大于 x 方向线刚度, x 方向扭转刚度大于 y 方向扭转刚度。这是由于卡箍的非对称结构引起不同方向刚度差异。并且随着卡箍直径增大,卡箍刚度呈减小趋势。卡箍线刚度范围在 $10^5\sim10^6$ N/m之间,扭转刚度范围在 $10.45\sim26.54$ (N·m)/rad之间。

2 阻尼特性测试

2.1 测试原理

动态传递率^[14]是反映卡箍隔振性能的主要参数,可以定义为

$$\eta = \frac{a_{out}}{a_{in}} \tag{3}$$

式中 a_{out} 为系统的输出加速度,单位为 m/s^2 ; a_{in} 为

系统的输入加速度,单位为 m/s^2 。

通过传递率可以计算出系统的模态阻尼比,传递率公式又可以表示为

$$\eta = \frac{\sqrt{1+(2\zeta\gamma)^2}}{\sqrt{(1-\gamma^2)^2+(2\zeta\gamma)^2}} \tag{4}$$

其中 ζ 为阻尼比; γ 为频率比,当共振时,频率比 $\gamma=1$ 。

在共振态下,由式(4)得到

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{4(\eta^2-1)}} \tag{5}$$

由式(5)即可得到模态阻尼比。

2.2 卡箍动态传递率测试系统搭建

为了对卡箍的动态特性进行分析研究,搭建如图6所示的试验系统,图中 M 代表卡箍固定的实心钢棒的质量, C 代表卡箍阻尼, K 代表卡箍刚度。由于卡箍作为液压管路与机体之间的支撑元件,受到来自机体的基础激励,因此,利用振动台模拟机体的振动,分别沿卡箍 x 、 y 方向施加激励。液压管路通过卡箍紧固在振动台的支座上,卡箍的预紧力在整个试验过程当中保持恒定为7 N·m,在支座表面以及液压管路表面分别布置加速度传感器,前者用于采集系统的激励输入,后者用来采集系统的响应输出。

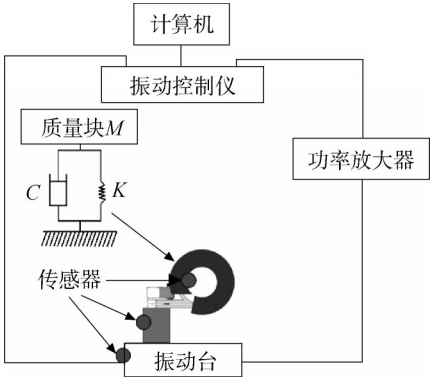


图6 试验系统结构
Fig.6 Test system structure

图7中加速度传感器1采集试验系统的输入信号,加速度传感器2采集系统的输出信号。

2.3 卡箍动态传递率试验结果

对3种型号卡箍分别进行5组试验,结果取5个卡箍动态传递率的平均值。通过试验得到φ8、φ12、φ20这3种型号分别在 x 、 y 方向施加1g、3g、5g(g 表示重力加速度)加速度时的动态传递率 η 结果如表2所示,以及对应的模态阻尼比如表3

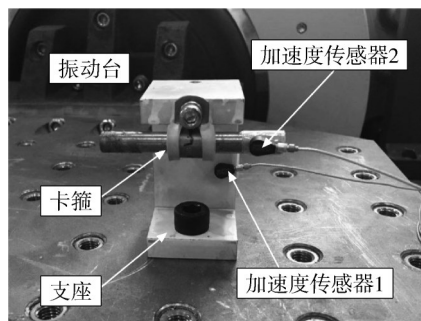
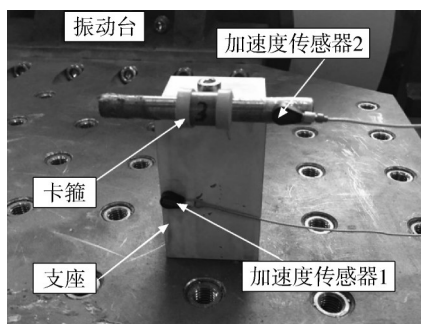
(a) x 方向激励(b) y 方向激励

图7 卡箍阻尼特性试验

Fig.7 Test on damping characteristics of clamp

所示。其中 $\phi 8$ 卡箍 x 、 y 方向动态传递曲线分别如图8所示。

表2 卡箍动态传递率

Table 2 Dynamic transmissibility of clamp

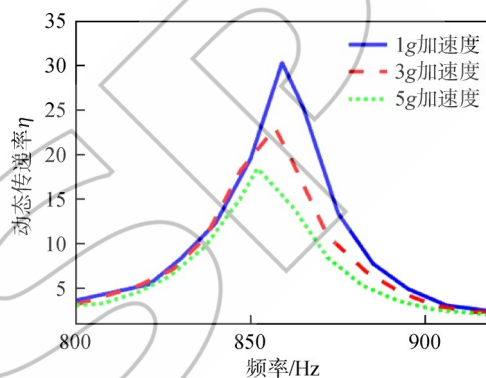
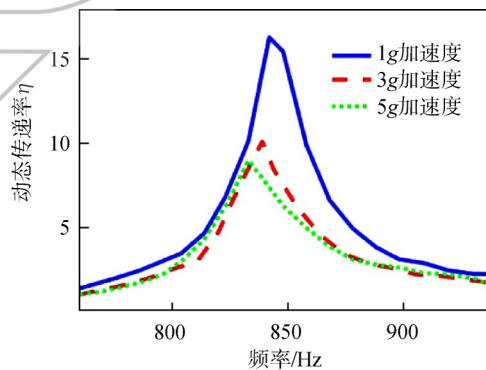
卡箍型号	方向	激励加速度		
		1g	3g	5g
$\phi 8$	x	34.78	29.45	22.75
	y	16.83	12.55	10.18
$\phi 12$	x	32.90	22.38	14.02
	y	11.83	8.93	5.32
$\phi 20$	x	14.25	8.45	6.80
	y	7.14	4.66	3.77

由试验结果可知:卡箍模态阻尼比在不同激励时的范围在0.015 5~0.142 1之间。在不同激励条件下,系统的1阶模态频率会发生不同程度的偏移。同时,随着激励的增加,卡箍的动态传递率呈非线性下降,对应的模态阻尼比呈非线性上升。证明将卡箍刚度拟合为线性有着一定的局限性,在激励足够大时,刚度不能以线性表达。

表3 卡箍模态阻尼比

Table 3 Modal damping ratio of clamp

卡箍型号	方向	激励加速度		
		1g	3g	5g
$\phi 8$	x	0.015 5	0.018 3	0.023 1
	y	0.033 2	0.044 9	0.056 7
$\phi 12$	x	0.015 7	0.023 4	0.037 8
	y	0.043 5	0.057 5	0.097 1
$\phi 20$	x	0.034 7	0.060 3	0.075 0
	y	0.073 0	0.113 1	0.142 1

(a) x 方向(b) y 方向图8 $\phi 8$ 卡箍动态特性曲线Fig.8 Dynamic characteristic curve of $\phi 8$ clamp

3 试验结果验证

3.1 卡箍刚度验证

为了验证卡箍刚度测量的有效性,建立卡箍管路系统动力学模型,采用Timoshenko梁单元建立管路的有限元模型,梁单元位移向量 $\mathbf{u}^e$ 可以定义为

$$\mathbf{u}^e = [x_A \quad y_A \quad \theta_{xA} \quad \theta_{yA} \quad x_B \quad y_B \quad \theta_{xB} \quad \theta_{yB}]^T \quad (6)$$

其中 x_A 、 x_B 分别为单元 A、B 节点沿 x 方向的位移, θ_{xA} 、 θ_{xB} 分别为 x 方向的转角。其中 y_A 、 y_B 分别为单元 A、B 节点沿 y 方向的位移, θ_{yA} 、 θ_{yB} 分别为 y 方向的转角。

由于卡箍有一定的宽度,将卡箍沿着宽度方向等效离散为 3 个线刚度弹簧和 3 个扭转刚度弹簧。如图 9 所示,图中 k_i 为等效线性弹簧刚度, $k_{\theta i}$ 为等效扭转弹簧刚度。弹簧之间的距离为卡箍宽度的一半,每根弹簧的刚度为该方向测定刚度的 1/3,如式(7)所示,其中 k 为卡箍刚度, i 为弹簧数量。

$$k_i=\frac{k}{i}$$

(7)

将卡箍的等效刚度带入到管路有限元模型中,建立卡箍-管路系统的动力学模型。管路尺寸及材料参数如表 4 所示。

卡箍-管路系统的动力学方程为

$$M\ddot{u}+C\dot{u}+Ku=F_u$$

(8)

表 4 管路尺寸及材料属性

Table 4 Pipe size and material properties

弹性模量/GPa	密度/(kg/m ³)	泊松比	长度/mm	外径/mm	内径/mm
196	7 850	0.3	500	20	15
196	7 850	0.3	500	12	10
196	7 850	0.3	500	8	7

如图 10 所示,管路和卡箍使用螺栓固定在夹具和振动台上。通过锤击法测量卡箍-管路系统的固有频率,与仿真结果对比,可以验证刚度测试的准确性。固有频率对比如表 5 所示。 $\phi 8$ 卡箍频响函数对比如图 11 所示。

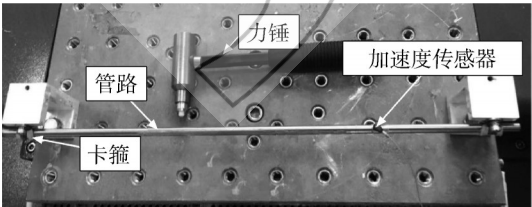


图 10 锤击试验示意图

Fig.10 Schematic diagram of hammer test

在式(7)中 k_i 为等效弹簧刚度,讨论等效弹簧数量 i 对管路固有频率的影响,当等效弹簧数量分别为 1~5 时,误差如图 12 所示,在 $i=1$ 时误差最大, $i=2,3,4,5$ 时,误差基本一致,所以本文仿真取 $i=3$ 。经过试验与仿真的对比,固有频率误

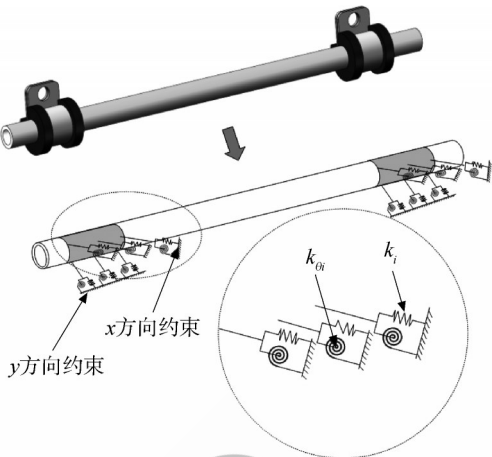


图 9 卡箍-管路系统等效模型

Fig.9 Equivalent model of clamp-pipe system

式中 M 为系统质量矩阵; C 为系统阻尼矩阵; K 为系统刚度矩阵,包括管体刚度及卡箍的等效线刚度和扭转刚度; u 为系统广义坐标; F_u 为外激励矢量。

表 5 固有频率对比

Table 5 Natural frequency comparison

卡箍型号	振型	方向	固有频率/Hz		误差/%
			仿真	试验	
$\phi 8$	1 阶弯曲	x	130.6	133.1	1.9
		y	134.8	140.4	4.15
	2 阶弯曲	x	438.6	434.9	0.9
		y	446.6	435.1	3.4
$\phi 12$	1 阶弯曲	x	148.4	153.2	3.1
		y	156.8	163.7	4.2
	2 阶弯曲	x	495.6	491.4	0.9
		y	518.2	498.6	3.9
$\phi 20$	1 阶弯曲	x	115.2	110.5	4.3
		y	137.5	130.4	5.4
	2 阶弯曲	x	197.5	206.7	4.5
		y	227.3	235.7	3.6

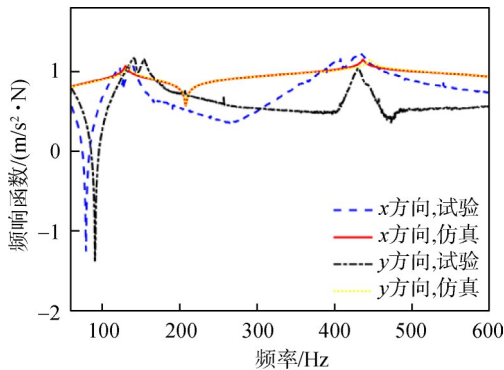


图 11 频响函数对比

Fig.11 Comparison of frequency response function

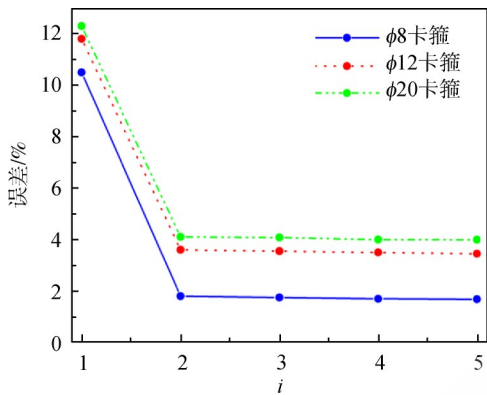


图 12 i 取不同值时误差变化

Fig.12 Error changes when i takes different values

差最大为 5.4%，满足工程应用要求。

3.2 卡箍阻尼验证

可以将测得的阻尼比换算为阻尼系数^[21]。

$$\zeta_n = \frac{\alpha_0}{2\omega_n} \tag{9}$$

式中 α_0 为阻尼系数, ζ_n 为第 n 阶模态阻尼比, ω_n 为第 n 阶固有频率。即系统阻尼矩阵 $C = \alpha_0 M$ 。系统阻尼矩阵采用质量阻尼来确定。

采用 Newmark 逐步积分法可以求解管路的振动响应。

如图 13 所示,将管路和卡箍使用螺栓固定在夹具和振动台上,加速度传感器方向与振动台振动方向一致。

使用电磁振动台分别对卡箍-管路系统沿 x

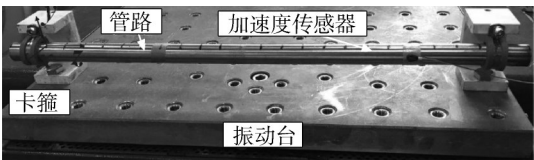


图 13 响应试验示意图

Fig.13 Schematic diagram of response test

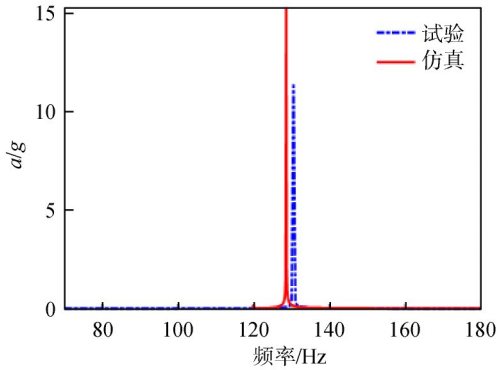
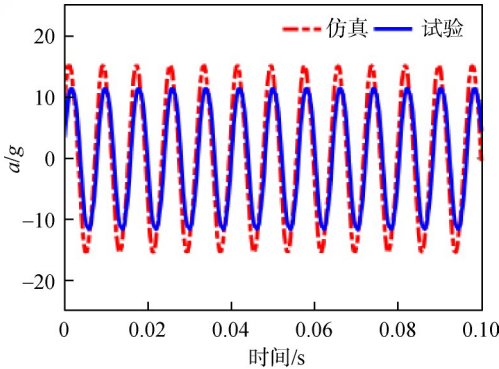
方向施加 1g、3g、5g 的加速度激励,采集管路的加速度响应,与仿真结果对比如表 6 所示。从表中数据可以看出,加速度响应误差基本在 30% 左右,证明卡箍阻尼测试准确。图 14 所示为 $\phi 8$ 卡箍分别在 1g、3g、5g 加速度激励下的加速度 a ,频域信号试验结果与仿真结果的对比。

在不同加速度激励时,卡箍-管路系统 1 阶固有频率有一定的偏移。加速度响应试验与仿真的对比,误差最大为 34.04%,可以满足工程要求。

表 6 加速度响应对比表

Table 6 Acceleration response comparison list

卡箍 型号	激励 加速度	a/g		误差/%
		仿真	试验	
$\phi 8$	1g	15.28	11.39	25.46
	3g	32.45	22.85	29.58
	5g	45.66	30.23	33.79
$\phi 12$	1g	13.25	9.65	27.17
	3g	22.11	15.63	29.31
	5g	29.55	19.68	33.40
$\phi 20$	1g	9.63	7.22	25.03
	3g	15.3	10.46	31.63
	5g	27	17.81	34.04



(a) 激励加速度为 1g

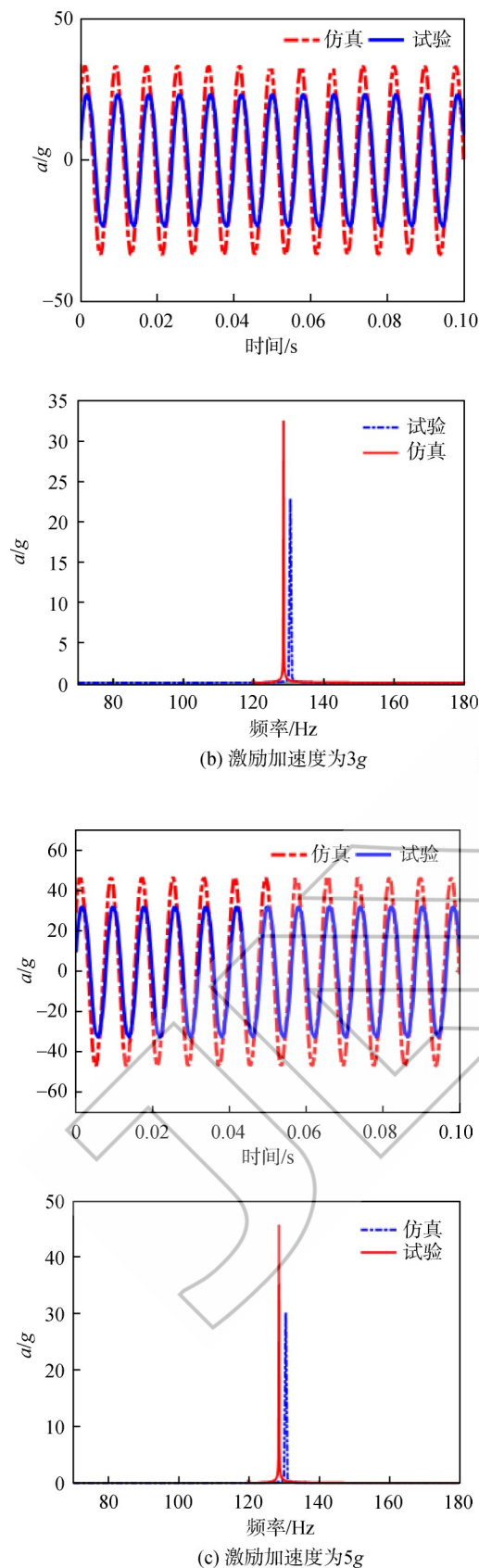


图14 加速度响应对比图

Fig.14 Diagram of acceleration response comparison

同时,随着激励的增加,卡箍-管路系统的加速度响应呈非线性增加,这是由于随着激励的增加,卡箍的模态阻尼比呈非线性增加。证明将卡箍等效为线性弹簧单元有着一定的局限性,在激励足够大时,无法等效为线性弹簧单元。

4 结 论

1) 卡箍刚度近似于线性,且随着规格直径增加,刚度呈减小趋势,通过将刚度数据引入卡箍-管路系统动力学模型,固有频率计算数值与测试结果保持一致,验证了卡箍刚度测试方法的有效性。

2) 卡箍模态阻尼比随激励增加呈非线性增加,导致管路的加速度响应随着激励的增加呈现非线性增加,将模态阻尼比引入卡箍-管路系统动力学模型,加速度响应计算数值与测试结果保持一致。验证了卡箍阻尼测试方法的有效性。

本文所提出的卡箍刚度和阻尼参数的测试方法,为航空管路系统卡箍设计、卡箍布局优化以及卡箍阻尼隔振提供了技术参考。

参考文献:

- [1] 欧阳飞,肖伟,吴涛.发动机滑油弯管卡箍衬垫故障分析[J].失效分析与预防,2012,4(4):248-252.
OUYANG Fei, XIAO Wei, WU Tao. Failure analysis of clamp of bending tube in engine[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 4(4):248-252. (in Chinese)
- [2] 彭亚岚,王景鹤.北京航空材料研究院生产MS21919系列卡箍[J].橡胶工业,2004,51(9):520.
PENG Yalan, WANG Jinghe. MS21919 series clamps produced by Beijing Institute of Aeronautical Materials[J]. China Rubber Industry, 2004, 51(9):520. (in Chinese)
- [3] 尹泽勇,陈亚农.卡箍刚度的有限元计算与实验测定[J].航空动力学报,1999,14(2):179-182.
YIN Zeyong, CHEN Yanong. Finite element analysis and experimental measurement of stiffness of hoop[J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(2):179-182. (in Chinese)
- [4] 柴清东,朴玉华,马辉,等.卡箍-管路系统固有特性计算与试验方法[J].航空动力学报,2019,34(5):1029-1035.
CHAI Qingdong, PIAO Yuhua, MA Hui, et al. Calculation of natural characteristics and experimental methods of the clamp-pipe system[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(5):1029-1035. (in Chinese)
- [5] 柴清东,付强,马辉,等.单-双联卡箍管路系统建模及动力学特性分析[J].振动与冲击,2020,39(19):114-120.
CHAI Qingdong, FU Qiang, MA Hui, et al. Modeling and dynamic characteristics analysis for a pipeline system with single double-clamp[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(19):114-120. (in Chinese)

- [6] 刘伟,曹刚,翟红波,等.发动机管路卡箍位置动力灵敏度分析与优化设计[J].航空动力学报,2012,27(12):2756-2762.
LIU Wei, CAO Gang, ZHAI Hongbo, et al. Sensitivity analysis and dynamic optimization design of support' positions for engine pipelines[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12):2756-2762. (in Chinese)
- [7] 徐培原,刘伟.发动机外部管路系统的卡箍布局多目标优化[J].航空发动机,2020,46(6):46-52.
XU Peiyuan, LIU Wei. Multi-objective optimization of clamps layout for engine external pipeline system[J]. Aeroengine, 2020, 46(6):46-52. (in Chinese)
- [8] 郑敏,章怡宁,景绿路,等.国外新型带垫固定卡箍分析[J].航空标准化与质量,2009,38(5):12-16.
ZHENG Min, ZHANG Yining, JING Lulu, et al. Analysis of foreign new type fixed clamp with gasket[J]. Aeronautic Standardization and Quality, 2009, 38(5):12-16. (in Chinese)
- [9] 王晶,陈果,郑其辉,等.卡箍对飞机液压管道动态应力的影响分析[J].航空计算技术,2014,44(1):64-67.
WANG Jing, CHEN Guo, ZHENG Qihui, et al. Effect of clamp on aircraft hydraulic pipeline dynamic stress[J]. Aeronautical Computing Technique, 2014, 44(1):64-67. (in Chinese)
- [10] 闫辉,姜洪源,李瑰贤,等.航空发动机管路支承用金属隔振器性能研究[J].中国机械工程,2007,18(12):1443-1447.
YAN Hui, JIANG Hongyuan, LI Guixian, et al. Research on the performance of metal Isolator used in the pipeline support of aeroengine[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(12):1443-1447. (in Chinese)
- [11] 姜洪源,董春芳,敖宏瑞,等.航空发动机用金属橡胶隔振器动态性能的研究[J].航空学报,2004,25(2):140-142.
JIANG Hongyuan, DONG Chunfang, AO Hongrui, et al. Research on dynamic and static characteristics of metal rubber Isolator used in aero-engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(2):140-142. (in Chinese)
- [12] 敖宏瑞,姜洪源,王树国,等.支承发动机管路的金属橡胶阻尼器隔振性能研究[J].机械设计,2003,20(2):14-17.
AO Hongrui, JIANG Hongyuan, WANG Shuguo, et al. Designing research of dynamic hydrocyclones' component for treating oily waste water[J]. Journal of Machine Design, 2003, 20(2):14-17. (in Chinese)
- [13] 吕金华,臧朝平,许本胜,等.卡箍性能对管路系统动力学特性影响分析[J].机械制造与自动化,2020,49(3):43-46.
LÜ Jinhua, ZANG Chaoping, XU Bensheng, et al. Analysis of influence of clamp performance on dynamic characteristics of pipe system[J]. Machine Building and Automation, 2020, 49(3):43-46. (in Chinese)
- [14] 陈艳秋,朱梓根.用于管路的薄金属橡胶减振器的性能研究[J].航空动力学报,2001,16(2):175-178.
CHEN Yanqiu, ZHU Zigen. Damping characteristics of thin metal rubber damper for aeroengine piping system[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2):175-178. (in Chinese)
- [15] 李鑫,张利剑,何银铜.改进PSO的金属橡胶卡箍隔振仿真分析与参数优化[J].智能系统学报,2015,10(4):599-606.
LI Xin, ZHANG Lijian, HE Yintong. Simulation analysis and parameter optimization of vibration isolation of metal rubber clamps based on the modified PSO[J]. CAAI (Chinese Association for Artificial Intelligence) Transactions on Intelligent Systems, 2015, 10(4):599-606. (in Chinese)
- [16] 朱彬,马艳红,洪杰.金属橡胶刚度阻尼模型理论分析[J].北京航空航天大学学报,2011,37(10):1298-1302.
ZHU Bin, MA Yanhong, HONG Jie. Theoretical analysis on stiffness and damping characteristics of metal rubber[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(10):1298-1302. (in Chinese)
- [17] 高晔,孙伟,马辉.基于实测扫频响应反推管路卡箍支承刚度及阻尼[J].振动与冲击,2020,39(8):58-63.
GAO Ye, SUN Wei, MA Hui. Inverse identification of the pipeline support stiffness and damping of the hoop based on the measured sweep frequency response[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(8):58-63. (in Chinese)
- [18] 李占营,王建军,邱明星.简谐激励下柔性卡箍支承管路系统响应[J].航空动力学报,2017,32(11):2705-2712.
LI Zhanying, WANG Jianjun, QIU Mingxing. Responses of pipe system with flexible clamp under harmonic excitation[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11):2705-2712. (in Chinese)
- [19] GAO Y, SUN W. Inverse identification of the mechanical parameters of a pipeline hoop and analysis of the effect of preload[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2019, 14(3):358-368.
- [20] GUO X M, MA H, ZHANG X F, et al. Uncertain frequency responses of clamp-pipeline systems using an interval-based method[J]. IEEE Access, 2020, 8(2):29370-29384.
- [21] 刘晶波,杜修力,李宏男,等.结构动力学[M].北京:机械工业出版社,2005.

(编辑:王碧珺)