

# 卡箍性能对管路系统动力学特性影响分析

吕金华<sup>1</sup>,臧朝平<sup>1</sup>,许本胜<sup>1,2</sup>,刘忠华<sup>3</sup>,张让威<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016;

2. 桂林航天工业学院 机械工程学院,广西 桂林 541004;

3. 中国航空工业集团 沈阳发动机设计研究所,辽宁 沈阳 110000)

**摘要:**卡箍是管路系统的连接部件,对管路系统起到调频和减振的重要作用。卡箍性能受到拧紧力矩、加工误差以及金属毡性能退化的影响。对卡箍直管系统在不同拧紧力矩下进行模态试验,发现随着拧紧力矩的增加,管路系统固有频率不断增大,当拧紧力矩达到  $6\text{ N}\cdot\text{m}$  时,管路系统频率达到稳定。建立卡箍直管系统的精确实体模型,通过仿真研究卡箍加工误差以及金属毡性能退化对管路系统特性的影响,发现卡箍加工误差对管路系统固有频率影响很小,但是金属毡性能退化会对管路系统固有频率产生明显影响,甚至导致第3阶固有频率下降超过20%。该结论对管路系统的设计、维护具有指导意义。

**关键词:**卡箍;管路系统;动力学特性;拧紧力矩;金属毡性能退化

**中图分类号:** O327    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5276(2020)03-0043-04

## Analysis of Influence of Clamp Performance on Dynamic Characteristics of Pipe System

LV Jinhua<sup>1</sup>, ZANG Chaoping<sup>1</sup>, XU Bensheng<sup>1,2</sup>, LIU Zhonghua<sup>3</sup>, ZHANG Rangwei<sup>3</sup>

(1. College of Energy & Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Mechanical Engineering, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China;

3. Shenyang Aeroengine Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** The clamp is the connecting part in pipe system, which plays an important role in frequency modulation and vibration reduction in the pipe system. The clamp performance is affected by tightening moment, manufacturing error and degradation of metal felt performance. In the modal tests for the straight pipe system with clamp under different tightening torques, it is found that the natural frequency of the pipe system increases with the increase of the tightening torques and when the tightening torques reaches to  $6\text{ N}\cdot\text{m}$ , its frequency comes to stability. The solid model of the clamp straight pipe system, is established accurately, and a study of the influence of the clamp manufacturing error and the degradation of the metal felt performance on the dynamic characteristics of the pipe system is made by the simulation. It is found that clamp manufacturing error has little influence on the natural frequencies of the pipe system, but degradation of the metal felt performance has obvious influence on the natural frequencies of the pipe system, even the third natural frequency is made reduced over 20%. This conclusion is of important guiding significance for the design and maintenance of the pipe system.

**Keywords:** clamp; pipe system; dynamic characteristics; tightening torque; performance degradation of metal felt

## 0 引言

管路系统是航空发动机的组成部分,在工作中管路系统将发动机各部件、附件之间及其与飞机间相互连接,输送各自规定的流体,完成发动机的运行、控制及操作工作<sup>[1]</sup>。卡箍是将管路固定到机体结构上的重要零件,在航空发动机中被广泛采用。卡箍对管路系统还起到调频和减振的重要作用<sup>[2]</sup>。

国内外学者在卡箍对管路系统动力学特性影响方面做了许多研究。刘伟等人将卡箍支撑视为末端固定的平移约束弹簧单元,讨论了卡箍数量和刚度对管路系统动力

学特性的影响<sup>[3]</sup>。KWONG A H M 等人采用遗传算法对管路卡箍布局进行了优化,并用试验验证了其理论的可靠性<sup>[4]</sup>。HERRMANN J 等人利用有限元优化卡箍布局来抑制管路的振动噪声<sup>[5]</sup>。目前,研究多集中于卡箍布局对管路系统特性的影响,而忽视了卡箍性能对管路系统特性的影响。

卡箍性能受到拧紧力矩、加工误差、金属毡性能退化等的影响<sup>[6]</sup>。本文首先在不同拧紧力矩下对卡箍直管系统进行模态试验以研究拧紧力矩对管路系统固有频率的影响,其次建立卡箍直管系统的精确实体模型,在此基础上通过仿真研究卡箍加工误差、金属毡性能退化对管路系统固有频率的影响。

第一作者简介:吕金华(1994—),男,江苏淮安人,硕士研究生,研究方向为结构与振动。

# 1 卡箍拧紧力矩对管路系统特性影响

## 1.1 卡箍直管系统在不同拧紧力矩下的模态试验

卡箍直管系统的零件如图 1 所示,图 1(a)为夹具,负责将直管一端固支;图 1(b)为直管,长 403 mm,截面为同心圆,外径为 9.5 mm,内径为 7.5 mm;图 1(c)为 3 个同规格卡箍,每个卡箍包含金属毡、金属支架、螺栓和 L 型支架 4 个部分。将直管两端分别用夹具和 1 号卡箍固定,组建的卡箍直管系统如图 2 所示,直管左端伸进夹具 40 mm,1 号卡箍距离直管右端 40 mm,卡箍拧紧力矩设置为 1 N·m。模态试验在铸铁平台上完成,最大程度降低了环境的影响。

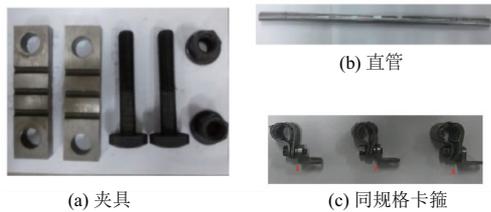


图 1 卡箍直管系统的零件



图 2 卡箍直管系统

卡箍直管系统在 1 N·m 拧紧力矩下的激光模态测试如图 3 所示。在直管表面从固支处每隔 40 mm 布置 1 个测点,共布置 10 个测点。在 1 号测点左边附近用力锤激励,用多普勒激光测振仪逐个采集各个测点的速度响应数据。对力锤产生的激励信号以及多普勒激光测振仪采集的速度响应信号进行处理,可以得到卡箍直管系统在 1 N·m 拧紧力矩下前 3 阶固有频率<sup>[7]</sup>。

在 2~7 N·m 之间,以 1 N·m 为步长,重复上述试验,可以得到卡箍直管系统分别在 1~7 N·m 拧紧力矩下的前 3 阶固有频率,如表 1 所示。



图 3 卡箍直管系统模态试验

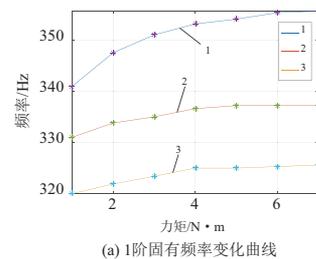
表 1 卡箍直管系统分别在 1~7 N·m 拧紧力矩下的前 3 阶固有频率

拧紧力矩/N·m	1 阶频率/Hz	2 阶频率/Hz	3 阶频率/Hz
1	340.93	376.56	679.69
2	347.50	385.00	691.88
3	351.00	389.00	698.44
4	353.12	391.88	712.19
5	354.06	393.43	713.13
6	355.31	394.69	713.44
7	355.63	395.31	716.25

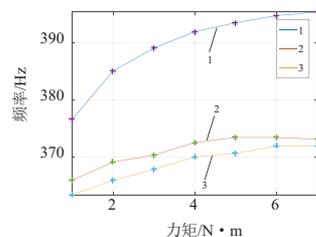
由表 1 可知,随着拧紧力矩的增加,管路系统前 3 阶固有频率不断增大,这是由于拧紧力矩的增加加大了管路的连接刚度,但系统频率并不是随着拧紧力矩的增加无限变大,拧紧力矩越大对管路系统固有频率的影响程度越低,当达到 6 N·m 后继续增加拧紧力矩,系统频率基本不再发生变化。

## 1.2 以 2、3 号卡箍组建的直管系统在不同拧紧力矩下的模态试验

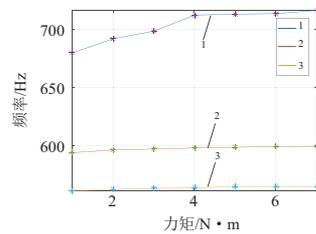
分别以 2、3 号卡箍代替图 2 中的 1 号卡箍组建卡箍直管系统,重复 1.1 节卡箍直管系统在不同拧紧力矩下的模态试验,得到以 2、3 号卡箍组建的卡箍直管系统在 1~7 N·m 拧紧力矩下的前 3 阶固有频率,如图 4 所示。



(a) 1阶固有频率变化曲线



(b) 2阶固有频率变化曲线



(c) 3阶固有频率变化曲线

图 4 3 个卡箍直管系统前 3 阶固有频率与拧紧力矩的关系

由图4可知,3个卡箍直管系统的前3阶固有频率都在 $6\text{ N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩下达到稳定,继续增加拧紧力矩,管路系统固有频率基本不变化,但是管路系统局部应力会变大,容易导致管路系统局部破坏,这就要求在管路设计过程中需要权衡卡箍拧紧力矩的大小。

同样由图4可知,3个卡箍直管系统在 $7\text{ N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩下的前3阶固有频率差距明显,特别是第3阶固有频率,频差超过20%,这表明3个卡箍的刚度明显不同。此时,3个卡箍的拧紧力矩相同,刚度差异是由加工误差以及金属毡性能退化引起的,这说明卡箍加工误差以及金属毡性能退化对管路系统特性产生了明显影响。因此,本文将建立卡箍直管系统的精确实体模型,并在此基础上通过仿真进一步分析卡箍加工误差以及金属毡性能退化对管路系统固有频率的影响。

## 2 卡箍直管系统实体建模

### 2.1 卡箍直管系统有限元模型

卡箍直管系统几何模型如图5所示,其中卡箍和金属毡的三维模型是按照1号卡箍尺寸建立的。以2阶四面体单元对卡箍直管系统进行网格划分,直管网格尺寸设为 $2\text{ mm}$ ,卡箍和金属毡网格尺寸设为 $1\text{ mm}$ ,建立的卡箍直管系统有限元模型如图6所示。卡箍直管系统各部件材料参数如表2所示,其中的直管密度是根据直管实际质量和直管几何模型的体积计算得到的。为了简化分析,认为直管和金属毡、金属毡和卡箍之间为固支约束。



图5 卡箍直管系统几何模型



图6 卡箍直管系统有限元模型

表2 卡箍直管系统各部件材料参数

部件名称	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	弹性模量/Pa	泊松比
直管	7 633.36	$2.1\times 10^{11}$	0.3
卡箍	7 850.00	$2.1\times 10^{11}$	0.3
金属毡	1 850.00	$2.1\times 10^{11}$	0.3

在直管右端和卡箍中L型支撑的上、下表面施加固支约束,在螺栓柱表面施加 Bolt pretension 约束模拟螺栓连接,根据公式 $T=0.2Fd$ (其中 $T$ 为拧紧力矩, $F$ 为螺栓预紧力, $d$ 为螺栓直径)可以得到 $7\text{ N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩对应的螺栓预紧力为 $5833\text{ N}$ 。先对卡箍直管系统进行静力学分析,然后将静力分析结果作为初始条件,进行模态分析,得到卡箍直管系统有限元模型在 $7\text{ N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩下的前3阶仿真频率,与试验结果对比如表3所示。

表3 卡箍直管系统在 $7\text{ N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩下仿真频率与试验频率对比

模态阶次	仿真频率/Hz	试验频率/Hz	频差/(%)
1阶	434.46	355.63	22.17
2阶	520.39	395.31	31.64
3阶	957.89	716.25	33.74

由表3可知,卡箍直管系统前3阶仿真频率和试验频率的频差都超过20%,这说明卡箍直管系统有限元模型与实际管路系统差别较大,需要对卡箍直管系统有限元模型进行修正,使其可以真实反映实际管路系统的动力学特性。

### 2.2 模型修正

卡箍直管系统有限元模型中金属毡的弹性模量初始设置为45号钢的弹性模量,与实际金属毡的弹性模量差别较大。因此本文选择金属毡的弹性模量作为修正参数,以1号卡箍直管系统在 $7\text{ N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩下的前3阶固有频率为修正目标进行修正,修正后的金属毡材料参数如表4所示,修正后的卡箍直管系统前3阶仿真频率与试验频率对比如表5所示。

表4 修正后的金属毡材料参数

部件名称	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	弹性模量/Pa	泊松比
金属毡	1 850	$1.25\times 10^7$	0.3

表5 修正后的卡箍直管系统前3阶仿真频率与试验频率对比

模态阶次	仿真频率/Hz	试验频率/Hz	频差/(%)
1阶	366.93	355.63	3.18
2阶	377.43	395.31	-4.52
3阶	750.16	716.25	4.73

由表5可知,修正后的卡箍直管系统前3阶仿真频率与试验频率的频差绝对值都在5%以内,这说明修正后的卡箍直管系统的有限元模型可以反映实际管路系统的动力学特性,可以在此模型的基础上仿真卡箍加工误差以及金属毡性能退化对管路系统特性的影响。

## 3 卡箍加工误差对管路系统特性影响

本文研究的3个卡箍几何尺寸如图7所示,卡箍其他的重要尺寸,因为不方便测量,所以暂不考虑。3个卡箍的几何尺寸参数如表6所示。由于加工误差,3号卡箍的几何尺寸明显小于1号卡箍。参考表6中3个卡箍的几何尺寸,在图7中以1号卡箍尺寸建立的卡箍直管系统几何模型的基础上,通过仿真得到卡箍长度、金属支架厚度以及金属毡厚度分别减小10%后管路系统的固有频率,如表7所示。最大频差是金属毡厚度减小10%后直管系统第3阶固有频率的频差,只有1.34%。由图5可知,因为3个卡箍的刚度差异,3个管路系统第3阶固有频率的频差超过20%。这说明,卡箍加工误差对卡箍刚度影响很小,卡箍的刚度差异更多是由金属毡性能退化引起的。

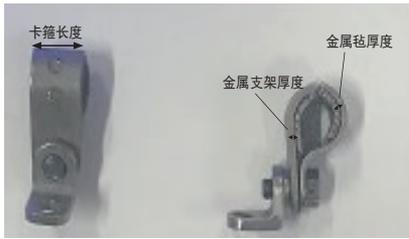


图7 卡箍几何尺寸

表6 3个卡箍的主要几何尺寸参数 单位:mm

卡箍编号	卡箍长度	金属支架厚度	金属毡厚度
1	14.52	2.00	2.00
2	14.27	1.95	1.71
3	14.15	1.88	1.72

表7 考虑卡箍加工误差后直管系统的前3阶仿真频率与原始直管系统仿真频率对比

卡箍尺寸	变化率/(%)	1阶模态		2阶模态		3阶模态	
		频率/Hz	频差/(%)	频率/Hz	频差/(%)	频率/Hz	频差/(%)
卡箍长度	-10	365.17	-0.48	366.18	-0.20	367.85	0.25
金属支架厚度	-10	375.80	-0.43	377.40	-0.01	378.27	0.22
金属毡厚度	-10	742.90	-0.97	743.54	-0.80	760.55	1.34

## 4 金属毡性能退化对管路系统特性影响

基于第2节中建立的卡箍直管系统有限元模型以及2、3号卡箍直管系统的试验数据,通过模型修正辨识2、3号卡箍中金属毡的弹性模量,如表8所示。

表8 3个卡箍金属毡弹性模量 单位:Pa

卡箍编号	金属毡弹性模量
1	$1.25 \times 10^7$
2	$3.50 \times 10^6$
3	$2.80 \times 10^6$

由表8可知,3号卡箍与1号卡箍相比,金属毡性能退化严重。参考表8中3个卡箍的金属毡弹性模量,在 $2.50 \times 10^6 \sim 1.25 \times 10^7$  Pa之间,以 $2.50 \times 10^6$  Pa为步长,共取5个属毡弹性模量值,依次带入卡箍直管系统有限元模型中,进行带预应力的模态分析,得到在不同金属毡弹性模量下的管路系统前3阶仿真频率,与表6中原始卡箍直管系统前3阶仿真频率对比,如表9所示。

表9 考虑金属毡性能退化的管路系统前3阶仿真频率与原始管路系统仿真频率对比

弹性模量/Pa	1阶模态		2阶模态		3阶模态	
	频率/Hz	频差/(%)	频率/Hz	频差/(%)	频率/Hz	频差/(%)
$2.50 \times 10^6$	336.10	-8.40	349.65	-7.36	574.50	-23.42
$5.00 \times 10^6$	354.90	-3.28	366.46	-2.91	660.31	-11.98
$7.50 \times 10^6$	316.16	-1.57	372.09	-1.41	704.63	-6.07
$1.00 \times 10^7$	364.59	-0.06	375.23	-1.30	731.64	-2.53
$1.25 \times 10^7$	366.93	0.00	377.43	0.00	750.16	0.00

金属毡性能退化会对管路系统前3阶固有频率产生明显影响,特别是第3阶固有频率,下降超过了20%。因此,在管路系统的使用过程中,要注意卡箍金属毡性能退化问题,及时更换使用时间过长的卡箍。

## 5 结语

通过上述研究,得出以下结论:

1) 随着拧紧力矩的增加,卡箍直管系统前3阶固有频率不断增大,但拧紧力矩越大对直管系统固有频率的影响程度越低,当达到 $6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 后继续增加拧紧力矩,直管系统频率基本不再发生变化。

2) 卡箍金属毡性能退化会对卡箍直管系统前3阶固有频率产生明显影响,特别是第3阶固有频率,下降超过了20%。因此,在管路系统的使用过程中,需要及时更换使用时间过长的卡箍。

本文的研究对管路系统的设计、维护具有一定的指导意义,但是必须指出的是本文的结果建立在简单直管系统研究的基础之上,如果要推广到复杂管路系统,还需要做进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 杜林森. 航空发动机双管耦合振动的建模与分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [2] 李枫, 刘伟, 韦顺超, 等. 航空液压管道卡箍等效刚度及其影响因素研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(9):1472-1476.
- [3] 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.
- [4] KWONG A H M, EDGE K A. A method to reduce noise in hydraulic system by optimizing pipe clamp location[J]. Journal of Systems and Control Engineering, 1998, 212(14):267-280.
- [5] HERRMANN J, HAAG T, GAUL L. Experimental and numerical investigation of the dynamics in spatial fluid-filled piping systems[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123:3422-3426.
- [6] 赵爽. 航空发动机外部管路的动力学特性及流固耦合分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [7] CASTELLINI P, REVEL G M, TOMASINI E P. Laser doppler vibrometry: a review of advances and applications[J]. Shock & Vibration Digest, 1998, 30(6):443-456.

收稿日期:2019-03-08