

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2024.09.008

# 基于管-实体单元耦合的串联管路动力学建模及降应力优化

刘芳名, 孙伟

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 针对空间串联管路迫切需要减振的问题,提出了一种基于管-实体单元耦合的空间串联管路有限元建模方法,并在此基础上执行了以降低应力响应为目标的卡箍布局优化.详细描述了建模理念,即卡箍及管接头等应力较大区域采用实体单元建模,其他区域采用管单元建模,最终将各部分耦合起来完成整体建模.创建了具体的优化模型,并给出了利用遗传算法进行优化的流程.以典型的串联管路为对象进行了实例研究,通过仿真与试验验证了所创模型的合理性.执行了降应力优化,获得了系统最优卡箍布局,优化后的系统基频最大共振应力相较于初始状态降低了27.05%.

**关键词:** 管-实体单元耦合;串联管路;动力学建模;降应力;优化

中图分类号: TB 535 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)09-1277-11

## Dynamic Modeling and Stress Reduction Optimization of Series Pipelines Based on Pipe-Solid Element Coupling

LIU Fang-ming, SUN Wei

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SUN Wei, E-mail: weisun@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** To handle the urgent need for vibration reduction of spatial series pipelines, a finite element modeling method for spatial series pipelines based on pipe-solid elements coupling was proposed, and on this basis, the clamp layout optimization with the goal of reducing stress response was performed. The modeling concept is described in detail, that is, the regions with high stress, such as clamps and pipe joints, are modeled by solid elements, the other regions are modeled by pipe elements, and finally the parts are coupled together to complete the overall modeling. A specific optimization model is created, and the process of optimization using the genetic algorithm is given. A typical series pipeline is taken as the object for a case study, and the rationality of the model is verified by simulation and experiment. Stress reduction optimization is performed, the optimal clamp layout of the system is obtained, and the maximum resonance stress of the optimized system fundamental frequency was reduced by 27.05% compared with the initial state.

**Key words:** pipe-solid element coupling; series pipeline; dynamic modeling; stress reduction; optimization

管路系统是航空发动机系统中最重要的重要组成部分,其主要功能为运输燃料、滑油、空气等工作介质.结构上管路系统一般包含管体、连接件、密封件、支撑件等,并且很少以单根管工作的情况出现,其中串联管路是最常见的结构之一.在泵体的脉动激励和航空发动机转子的基础激励

作用下,管路系统可能在很宽的频带内发生共振,过大的振动应力可能带来卡箍松动、管接头开裂、管体裂纹等问题,从而严重影响管路系统甚至整个航空发动机的工作可靠性与安全性.因此,对航空发动机管路系统进行以降低应力响应为目标的减振研究是十分必要的.

收稿日期: 2023-05-07

基金项目: 国家科技重大专项项目(J2019-I-0008-0008).

作者简介: 刘芳名(1997-),男,山东烟台人,东北大学硕士研究生;孙伟(1975-),男,辽宁营口人,东北大学教授,博士生导师.

当前,以航空发动机管路为对象或者为背景进行减振的研究尚不多见,但是针对飞机、核工业、车辆、输油、输气等管路,研究者已经提出了多种可作为航空发动机管路减振借鉴的方法,包括在工程服役阶段装备减振模块以提高管路系统的阻尼,比如贴敷阻尼层<sup>[1]</sup>、加装电磁阻尼器<sup>[2]</sup>等;在设计阶段调整管路结构以改变系统的振动特性,如管型调整<sup>[3-4]</sup>、支撑件布局调整<sup>[5]</sup>等.由于航空发动机工作环境特殊、对附加质量的限制等,许多减振措施大多不易直接在航空发动机管路减振中应用,因此,通过调整卡箍布局来提高管路系统的振动特性往往被认为是一种最有效、最经济的减振方法<sup>[6-7]</sup>.本文将面向航空发动机串联管路,研究通过卡箍布局优化来降低管路系统振动应力的方法.

为了实现基于卡箍布局调整的串联管路系统减振设计,首先需要创建其动力学分析模型.当前,关于串联管路动力学建模仅有少量研究.Zhang等<sup>[8]</sup>基于铁木辛柯梁理论,针对含有一种简易管接头的平面直管建立了有限元模型,其核心思想是将整个管接头离散成弹簧,连接两部分直管,最终通过模态锤击试验验证了其合理性.针对充液串-并联管路,Guo等<sup>[9]</sup>基于传递矩阵法提出了一种将管接头等效成相应尺寸粗管的建模方法,并通过有限元软件校验了模型的合理性.相较于串联管路,面向单管路的动力学建模已有大量研究,相关建模方法也可作为本研究的重要参考.例如,Zhang等<sup>[10]</sup>提出了一套针对多支撑的平面管路系统半解析建模体系.刘中华等<sup>[11]</sup>考虑了卡箍真实结构及螺栓预紧力的影响,建立了含实体单元等多种单元的管路动力学模型.综上可知,目前对于管体及相关弹性支撑件已有很多相对成熟的建模与分析方法,但对串联管路系统中管接头模拟的研究还不充分.已有的研究通常将管接头等效成一段粗管,没有考虑管接头给串联管路系统带来的刚度影响,因而尚未形成一种较为通用的建模方法.

管路减振的核心在于降低管路的振动应力,因而在基于卡箍布局调整的串联管路系统减振研究中还需要明确求解管路系统振动应力的方法.目前,对于求解管路系统应力响应已有一些研究.Qu等<sup>[12]</sup>针对一种两端固支的液压复合管,在考虑流固耦合的情况下,利用Hamilton原理建立了动力学方程,并通过离散分析方法求解了随机振动下的应力响应.类似地,Li等<sup>[13]</sup>基于有限

元法针对两端固定的液压直管进行了动力学建模,分析了其在随机振动作用下的振动特性,并同样采用离散分析方法求解了应力响应.Verma等<sup>[14]</sup>基于CAESAR II软件建立了一种针对高温高压回路的应力分析模型,其约束采用多点刚性支撑的方式,为工程应用提供了一种方法.可见,相关学者对管路系统进行的应力响应分析大多是针对两端固支或者管体多点固支的情况,这与航空发动机管路通过卡箍弹性支撑完全不同.此外,在基于管、梁单元的管路建模研究中,实践显示引入卡箍弹性支撑的方法对管路振动应力的求解非常敏感,导致通常难以获得准确的应力响应值.而在基于纯实体单元的管路建模中,由于单元数量多且需考虑卡箍预紧力效应、接触行为等,导致计算应力响应非常低效,进而难以适应基于卡箍布局调整的串联管路系统减振优化.因而需要研发一种兼顾求解振动应力精度与效率的新的串联管路动力学建模方法.

目前,以减振为目标的管路系统卡箍布局优化已有大量研究.例如,Wang等<sup>[15]</sup>以空间单管路为对象,执行了以避振为目标的卡箍布局优化,进一步,他们<sup>[16]</sup>又以减少随机振动响应为目标,研究了随机激励下航空发动机空间管路卡箍布局的优化.高志辉等<sup>[17]</sup>以激振频率与管路1阶固有频率的差值为目标函数,针对多卡箍支撑的L型管进行了卡箍布局优化.Zhang等<sup>[18]</sup>针对L型管,以最大共振响应最小化为优化目标进行了卡箍布局优化研究.另外,Herrmann等<sup>[19]</sup>结合试验和有限元仿真,通过优化空间管路的支撑位置,显著降低了研究对象的噪声.Zhang等<sup>[20]</sup>以多刚性支撑的空间单管路为研究对象,提出了在优化设计中引入接触边界条件的方法,以支撑位置为设计变量进行了管路系统避振优化并通过试验进行了验证.上述对于管路系统卡箍布局优化的研究大多是以避振、降幅为目标.由于求解管路应力的复杂性,目前以降低管路振动应力为目标的卡箍布局优化还有待进一步深入研究.

综上,本文提出了一种基于管-实体单元耦合的空间串联管路有限元建模方法,并在此基础上执行了以降低应力响应为目标的卡箍布局优化.详细描述了建模理念,即卡箍及管接头区域采用实体单元建模,其他区域采用管单元建模,最终将各部分耦合起来完成整体建模.创建了以卡箍位置为设计变量,以降低应力响应为目标的优化模型,并给出了利用遗传算法对优化模型进

行求解的流程.最后,进行了实例研究,通过试验证明了建模方法的合理性并实现了以降低应力响应为目标的卡箍布局优化.

## 1 基于管-实体单元耦合的串联管路动力学建模

本节主要描述基于管-实体单元耦合的串联管路动力学建模理念、建模过程中关键技术点(包括管接头的模拟、卡箍力学特性的模拟和各单元之间的耦合)以及求解应力响应的方法.

### 1.1 基于管-实体单元耦合的建模理念

为了保证创建的串联管路动力学模型同时具有较高的求解精度和求解效率,进而满足后续以降应力为目标的卡箍布局优化要求,这里基于ANSYS平台描述了一种管-实体单元耦合的建模方法.

该建模理念可表述为:在管路应力较大区域选用高精度实体单元,在应力较小区域采用求解效率较高的管单元,最后将两者耦合在一起完成串联管路动力学建模.本文以图1所示的典型的空间串联管路为例描述此建模理念.图2为该管路简谐激励作用下的应力响应云图,从中可以看出应力较大区域通常在串联管路的约束区,包含管接头及卡箍区域.这主要是由于含约束、装配或连接的区域在振动过程中给系统带来的剪切应力起主导作用而引起的.

基于管-实体单元耦合的串联管路动力学建模理念如图3所示.需要说明的是,这里的管接头

及卡箍区域除了包含这些结构与管体的接触区域外,在两侧还包含一部分外延管体以确保精确捕捉到管路系统的最大应力.此外,这里为了与后续串联管路降应力优化相匹配,对管接头及卡箍的动力学建模作了一定的简化以提升求解效率及便于参数化处理,以下将进行具体描述.

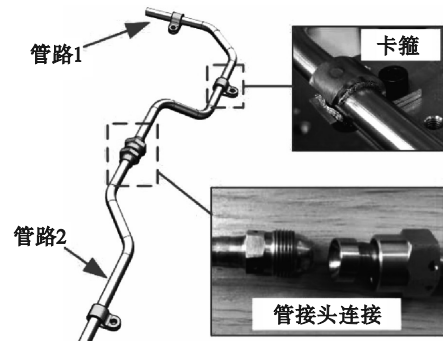


图1 典型的空间串联管路  
Fig. 1 Typical spatial series pipeline

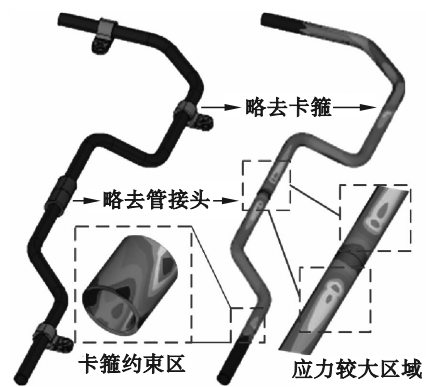


图2 管路简谐激励作用下的应力响应云图  
Fig. 2 Stress response contour of pipeline under simple harmonic excitation

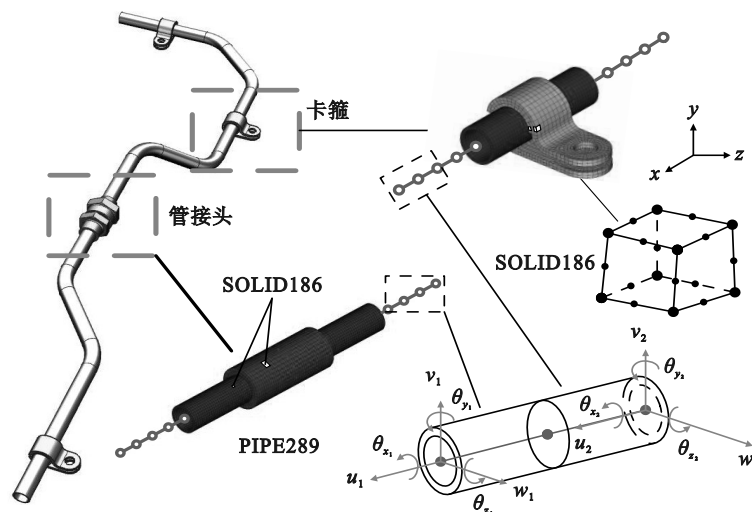


图3 基于管-实体单元耦合的串联管路动力学建模理念示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of the dynamic modeling concept of the series pipeline based on pipe-solid element coupling

## 1.2 管接头的模拟方法

管接头作为连接件将 2 根单管连接在一起,其典型内部结构如图 4 所示,各管路 with 接头部分焊接,接头之间通过 1 个外套螺母拧紧在一起.为了使创建的管接头模型具有通用性,即适合各种管接头结构形式,这里在建模时将两部分接头与外套螺母看作 1 个等效圆柱壳,用实体单元进行分网,并通过接触对与管体连接,见图 5.该圆柱壳外径  $D_{\text{Joint}}$  与厚度  $B_{\text{Joint}}$  可以取球、锥接头圆柱形状区域的外径与厚度,其材料参数与管体相同.

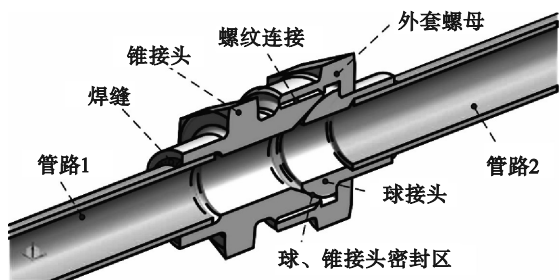


图 4 典型管接头机械结构剖面图

Fig. 4 Section view of the mechanical structure of a typical pipe joint

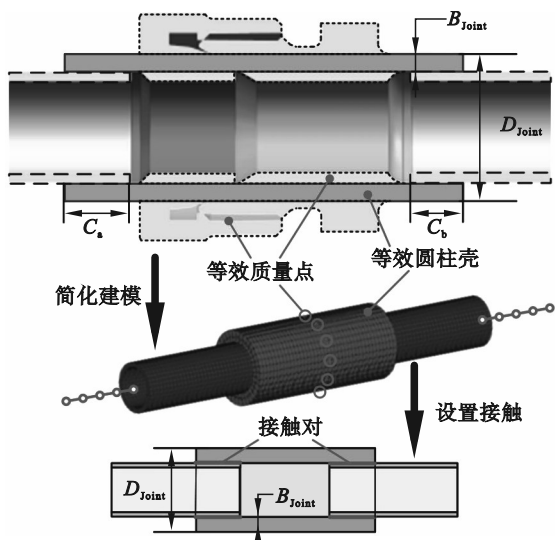


图 5 管接头简化模型示意图

Fig. 5 Simplified diagram of the pipe joint

这种建模方式还需要配以必要的质量及刚度修正才能真正反映管接头对管体的力学影响.在质量修正上,主要针对形状复杂的外套螺母(图 5 中虚线包裹的区域),本文通过将 MASS21 结构质量单元均匀附加在管接头简化模型上进行模拟.具体做法是通过组合使用循环命令“\*do”与定义单元命令“E”,在简化后的模型周向建立质量单元.

进一步,为了模拟真实管接头与外套螺母的

连接刚度,需要合理设置管接头与管体之间的接触参数,主要包含法向接触刚度系数和摩擦系数 2 个参数.需要说明的是,当管接头型号不同时,管路管接头的长度也会变化,其对刚度也会有影响.因而需要通过合理设置接触长度  $C_a$ 、 $C_b$  (见图 5) 并配合法向接触刚度系数  $K$  和摩擦系数  $\mu$  修正来正确模拟管接头的连接刚度.具体参数修正可采用反推辨识法<sup>[21]</sup>,即通过匹配测试及仿真获得的自由态串联管路固有频率来获得管接头与管体之间的接触参数.

通过上述建模方法即可得到通用的管接头部分区域的实体有限元模型,可用于与管体单元进行耦合.

## 1.3 卡箍的模拟方法

图 6 给出典型的金属毡卡箍的基本结构,其主体为金属箍带与金属橡胶(金属毡),二者焊接在一起,再通过螺栓连接实现将管路夹紧.

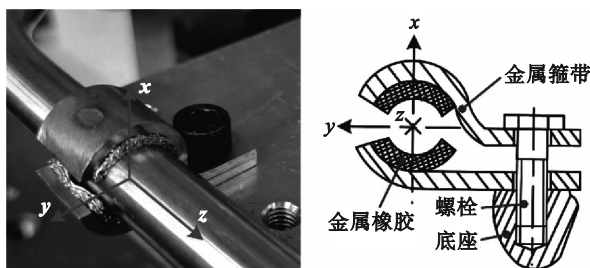


图 6 金属毡卡箍结构图

Fig. 6 Structural diagram of the metal felt clamp

在管路系统动力学建模过程中,通常用弹簧-阻尼单元<sup>[22]</sup>模拟卡箍对管路的支撑作用.这里为了更加精确模拟卡箍的力学行为,同时又兼顾管路系统动应力及卡箍布局优化的求解效率,描述了一种新的卡箍模拟方法.

参见图 7,在所创建的卡箍模型中,卡箍箍带及金属橡胶均采用实体单元,二者通过“VGLUE”命令黏接在一起以达到模拟焊接的效果;在金属毡与管体之间建立接触对来模拟卡箍对管体的支撑刚度;卡箍螺栓区域通过建立刚性区(命令为“CERIG”)并用梁单元(可选用 BEAM188 梁单元)连接的方式来模拟螺栓与箍带之间的刚度耦合;对箍带边缘节点施加约束以模拟箍带被压紧,同时约束螺栓底部以模拟对整个管路系统的固定.

此外,为了提升建模分析以及后续优化计算的效率,本文提出了一种改变金属毡弹性模量来模拟螺栓对卡箍预紧的方法.其依据为随着螺栓

预紧力的增大,金属毡会被压实变硬,因而需要适当增大金属毡的弹性模量.

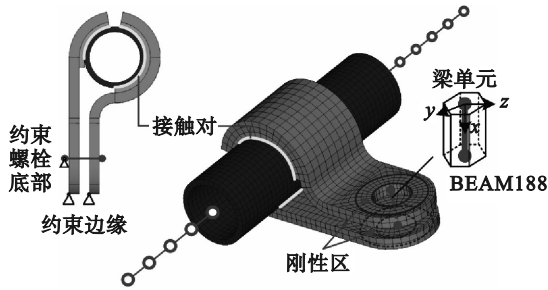


图7 卡箍有限元模型

Fig. 7 Finite element model of the clamp

进一步,卡箍与管路接触区同样也需要确定法向接触刚度系数 $K$ 和摩擦系数 $\mu$ .这2个参数同样可通过反推辨识法确定.

### 1.4 单元耦合方法

参照图3,为了完成串联管路有限元建模,还需将管接头及卡箍区域用实体单元模拟的管体同其他区域用管单元模拟的管体耦合在一起.参见图8,可以通过在管接头及卡箍区域管体端面建立刚性区将实体单元与管单元的自由度绑定起来.具体操作为:选中指定刚性区的需要绑定自由度的全部节点,使用“CERIG”命令指定主节点并建立刚性区,这里选择以管单元一端的节点为刚性区的主节点.

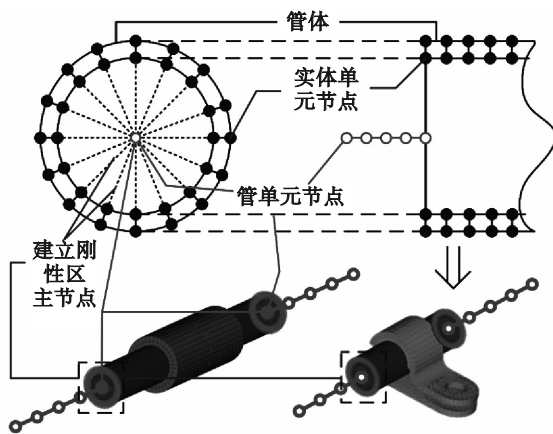


图8 实体单元与管单元的节点耦合

Fig. 8 Node coupling of the solid element and the pipe element

基于管-实体单元耦合的空间串联管路有限元模型,可以进行后续的动力学分析.

### 1.5 求解应力响应

本文基于创建的空间串联管路有限元模型,描述在简谐激励作用下管路系统应力响应的求

解方法.具体操作步骤如下:

1) 固有特性求解.完成建模后,进入求解模块并指定分析类型为模态分析,这里可以选择分块兰索斯法,执行求解后即可得到管路系统的各阶固有频率和振型.这些是后续进行应力响应求解的基础.

2) 应力响应求解.在模态分析完成后,设置分析选项为谐响应分析,同时设置激振力及系统的阻尼.对于所研究的管路系统,其阻尼主要来自卡箍,但是工程中卡箍提供的阻尼往往难以准确确定,故本文通过模态阻尼比的方式引入阻尼,具体地,可通过“MDAMP”命令设置不同阶次的模态阻尼比来引入阻尼.采用基础激励的方式以模拟管路实际在机匣上的主要受力状态,指定激振频率范围后执行求解,可使用“EXPSOL”命令指定频率扩展解即得到各频率点对应的应力响应.

3) 提取最大应力值.考虑到后续优化主要面向基频共振应力响应,因而这里主要描述求解当激振频率等于1阶固有频率时的管路的最大应力响应.使用“\*GET”命令即可得到最大应力响应值,这里的应力响应指的是等效应力 $(\sigma_{eqv})_{max}$ ,其表达式为

$$(\sigma_{eqv})_{max} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \quad (1)$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别对应第一、第二和第三主应力.

## 2 基于卡箍布局调整的串联管路优化方法

本节描述基于卡箍布局调整的串联管路优化方法,其包含优化模型、卡箍位置参数化以及优化求解等.

### 2.1 优化模型建立

尽管在航空发动机管路设计标准中,对管路系统的动态特性有明确的避振要求,但在实际的服役状态下要使管路完全避开共振几乎是不可能的,且最有可能发生基频共振.因此这里的优化问题定义为:通过调整卡箍布局,使串联管路基频最大共振应力最小.下面从设计变量、约束条件和目标函数三方面描述串联管路卡箍布局优化模型的建立过程.

参见图9,各卡箍的位置为设计变量,具体定

位可通过改变卡箍与选定参考点之间的距离  $L_{\text{clamp}}^i$  来表征. 卡箍只能布置在直线上且需要与折弯有一定的距离, 因而设计变量的约束条件可描述为  $a_i \leq L_{\text{clamp}}^i \leq b_i (i=1, 2, \dots, m)$ ,  $a_i, b_i$  分别为第  $i$  个卡箍的上下极限位置, 这里  $m$  是系统的卡箍数量. 目标函数可表述为基频最大共振应力最小, 最大共振应力的求解方法可通过 1.5 节描述的求解方法求得.

由此, 建立其优化模型:

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & (\sigma_{\text{eqv}})_{\text{max}}, \\ \text{s.t.} \quad & a_i \leq L_{\text{clamp}}^i \leq b_i \quad (i=1, 2, \dots, m). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

### 2.2 卡箍位置参数化

在基于卡箍布局调整的串联管路降应力优化中, 需要随着卡箍位置  $L_{\text{clamp}}^i$  的改变而重新更新管路系统的有限元模型. 模型更新可以针对划分完网格的有限元模型来实施, 这就需要将卡箍位置由单元的节点编号来描述<sup>[13]</sup>, 即重新设定新的设计变量. 由于网格划分的限制, 在管路有限元模型更新过程中, 会出现卡箍定位不准的情况. 为此, 本文描述了一种通过变换卡箍位置坐标来更新创建管路几何模型的数据信息进而实现模型重构的方法.

卡箍的位置坐标是重构管路动力学模型的主要数据, 因而需要建立代表设计变量的卡箍位置  $L_{\text{clamp}}^i$  与起始点坐标  $\mathbf{P}_{\text{clamp}}^i$  之间的几何换算关系. 下面以图 9 中 1 个卡箍及其所在直管段为例进行描述. 首先是局部坐标系的建立, 以该管段起始点  $\mathbf{P}_k^i$  为参考点, 也即局部坐标系原点,  $\mathbf{P}_f^i$  为该管段的终止点, 通过二者可以将管线方向定义为局部坐标系的  $z$  轴正方向; 再通过设计阶段确定的卡箍夹持方向确定  $\mathbf{P}_x^i$  和  $\mathbf{P}_y^i$  两点, 进而确定局部坐

标系的  $x, y$  轴正方向.

用矩阵  $\mathbf{T}_{\text{cs}}^i$  表示所建立的局部坐标系, 其表达式为

$$\mathbf{T}_{\text{cs}}^i = [\mathbf{x}_{\text{cs}}^i \quad \mathbf{y}_{\text{cs}}^i \quad \mathbf{z}_{\text{cs}}^i]. \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{x}_{\text{cs}}^i, \mathbf{y}_{\text{cs}}^i, \mathbf{z}_{\text{cs}}^i$  分别是该局部坐标系的  $x, y, z$  轴向量, 在后续卡箍坐标定位过程中, 仅需要用到  $z$  轴向量  $\mathbf{z}_{\text{cs}}^i$ .

类似地, 全局坐标系用矩阵  $\mathbf{T}_{\text{cs}}^0$  表示:

$$\mathbf{T}_{\text{cs}}^0 = [\mathbf{X}_0 \quad \mathbf{Y}_0 \quad \mathbf{Z}_0] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由此得到第  $i$  个卡箍的位置  $L_{\text{clamp}}^i$  与卡箍起始点坐标  $\mathbf{P}_{\text{clamp}}^i$  间的换算方式, 表达式为

$$\mathbf{P}_{\text{clamp}}^i = [x_k^i + \Delta x_i \quad y_k^i + \Delta y_i \quad z_k^i + \Delta z_i]^T. \quad (5)$$

式中:  $x_k^i, y_k^i, z_k^i$  是第  $i$  个卡箍所对应参考点  $\mathbf{P}_k^i$  的  $x, y, z$  坐标值;  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$  分别表示  $L_{\text{clamp}}^i$  在其对应的局部坐标系的  $x, y, z$  轴方向上的分量, 具体求解式为

$$\Delta x_i = L_{\text{clamp}}^i \cdot \cos(\mathbf{z}_{\text{cs}}^i, \mathbf{X}_0), \quad (6)$$

$$\Delta y_i = L_{\text{clamp}}^i \cdot \cos(\mathbf{z}_{\text{cs}}^i, \mathbf{Y}_0), \quad (7)$$

$$\Delta z_i = L_{\text{clamp}}^i \cdot \cos(\mathbf{z}_{\text{cs}}^i, \mathbf{Z}_0). \quad (8)$$

卡箍终止点坐标  $\mathbf{P}_{\text{clampfinal}}^i$  为

$$\mathbf{P}_{\text{clampfinal}}^i = [x_k^i + \Delta x_i + \Delta x_{\text{clamp}} \quad y_k^i + \Delta y_i + \Delta y_{\text{clamp}} \quad z_k^i + \Delta z_i + \Delta z_{\text{clamp}}]^T. \quad (9)$$

式中,  $\Delta x_{\text{clamp}}, \Delta y_{\text{clamp}}, \Delta z_{\text{clamp}}$  分别表示卡箍宽度在其对应局部坐标系的  $x, y, z$  轴方向上的分量, 具体求解式为

$$\Delta x_{\text{clamp}} = W_{\text{clamp}} \cdot \cos(\mathbf{z}_{\text{cs}}^i, \mathbf{X}_0), \quad (10)$$

$$\Delta y_{\text{clamp}} = W_{\text{clamp}} \cdot \cos(\mathbf{z}_{\text{cs}}^i, \mathbf{Y}_0), \quad (11)$$

$$\Delta z_{\text{clamp}} = W_{\text{clamp}} \cdot \cos(\mathbf{z}_{\text{cs}}^i, \mathbf{Z}_0). \quad (12)$$

其中  $W_{\text{clamp}}$  为卡箍宽度.

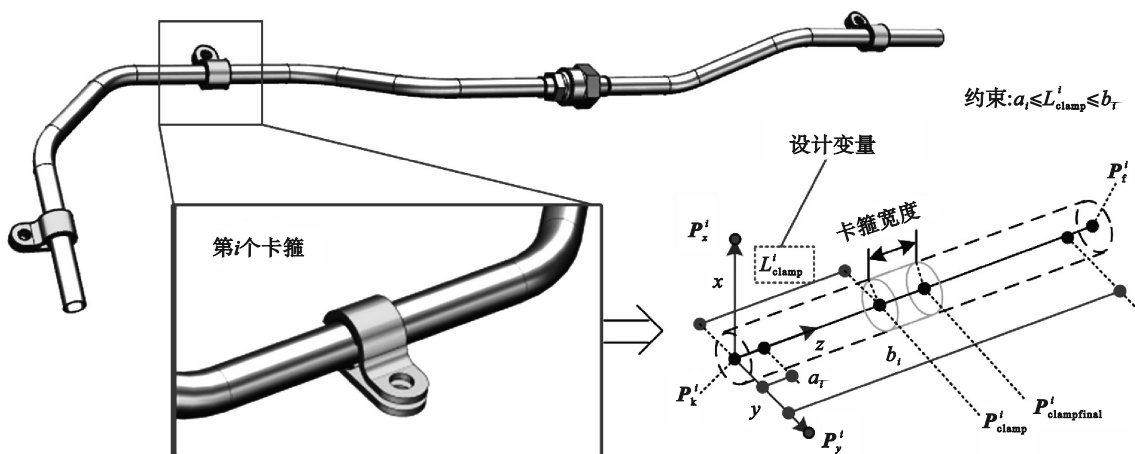


图 9 串联管路优化模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the optimization model of the series pipeline

经上述方法可以得到每次更新后的卡箍接触区管段的初始点和终止点坐标,即得到了卡箍在空间管路中精确的位置.该方法实现了仅通过控制设计变量 $L_{\text{clamp}}^i$ 来更新卡箍在全局的位置,实现了卡箍位置的参数化建模.在此基础上得到了随卡箍位置 $L_{\text{clamp}}^i$ 的改变而更新的几何模型,后续再进行网格划分即可实现有限元模型的更新.

### 2.3 优化求解流程

采用遗传算法<sup>[23]</sup>对所创建的串联管路卡箍布局优化模型进行求解.实施过程可描述为使用Matlab编制的遗传算法程序调用ANSYS中执行用于建模及求解的APDL程序来完成整个优化.其具体步骤如下:

第1步 初始化种群.

首先利用Matlab遗传算法工具箱中的“crtbp”函数创建初始种群;之后定义约束条件的译码矩阵,前文提到的卡箍初始坐标 $P_{\text{clamp}}^i$ 与参考点 $P_k$ 之间的距离 $L_{\text{clamp}}^i$ 的上下极限 $(a_i, b_i)$ 设置为变量的约束条件,达到在算法中设置卡箍的可移动范围的目的;最后利用“bs2rv”函数生成各卡箍所在管段的坐标,生成了初始 $N$ 种卡箍布局方案.

第2步 计算初始种群的目标函数值.

将第1步生成的 $N$ 种卡箍布局方案导出,通过Matlab调用ANSYS读取这些方案中卡箍所在管段的相关坐标;使用新一组卡箍布局方案建模并计算系统在简谐激励作用下的最大等效应力,并将结果输出为文本文件;通过 $N$ 次求解,得到 $N$ 个目标函数值,将最小目标函数值赋给“StressMin”.

第3步 生成多个子代个体(新的卡箍位置).

通过适应度函数“ranking”计算每个个体的适应度值,高适应度的个体会作为父代遗传给下一代,低适应度的个体会逐渐被淘汰;之后,个体进行选择(“select”函数)、交叉(“recombine”函数)和变异(“mut”函数)操作,生成新的子代个体,即得到更优的解.

第4步 计算子代种群的目标函数值.

类似于第2步,将新得到的子代 $N$ 个个体的卡箍布局写入文本文件.通过调用ANSYS执行应力求解并输出,计算每个个体对应的目标函数值.

第5步 比较得到最小的目标函数值.

将子代种群中的最小的目标函数值与“StressMin”进行比较,若子代最小目标函数值小

于“StressMin”,则更新“StressMin”为子代最小目标函数值.

第6步 输出最优卡箍位置.

在达到最大迭代次数之前,重复迭代第3~5步,直至达到最大迭代次数.此时,最小目标函数值对应的一组卡箍位置即为最优的卡箍位置,可使得系统在基频激励下的最大共振应力最小.

## 3 实例研究

### 3.1 问题描述

选取如图10所示的3个卡箍支撑空间串联管路,来校验所提出的有限元建模方法,并以此为基础实施卡箍布局优化.该空间串联管路由2根单管组成,其外径为 $D=12\text{ mm}$ ,内径为 $d=10\text{ mm}$ .系统中各零部件材料参数见表1.3个卡箍结构完全相同,宽度均为 $W_{\text{clamp}}=14\text{ mm}$ ,通过螺栓拧紧在夹具上并控制拧紧力矩为 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ .

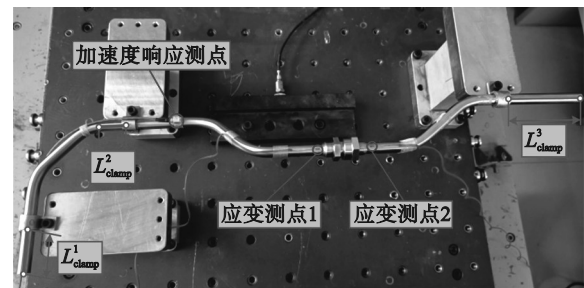


图10 多卡箍支撑空间串联管路

Fig. 10 Spatial series pipeline structure supported by multiple clamps

表1 管路系统各构件的材料参数

Table 1 Material parameters of each component of the pipeline system

构件	弹性模量/GPa	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比
管路	204	7 800	0.285
管接头	204	7 800	0.285
卡箍箍带	240	7 800	0.285
金属毡	0.6	7 800	0.285
螺栓	210	7 800	0.285

初始状态,3个卡箍与参考点之间的距离分别为: $L_{\text{clamp}}^1=38\text{ mm}$ , $L_{\text{clamp}}^2=23\text{ mm}$ , $L_{\text{clamp}}^3=66\text{ mm}$ .针对该串联管路搭建振动试验系统,见图11.试验设备包括:金盾EF-1000F电磁振动台、PCB 086C01模态力锤、LMS 16通道便携式数据采集前端、PCB 356A01微型三轴加速度传感器、TSK-1B-120-1A-11L2M2S应变片和移动工作站.

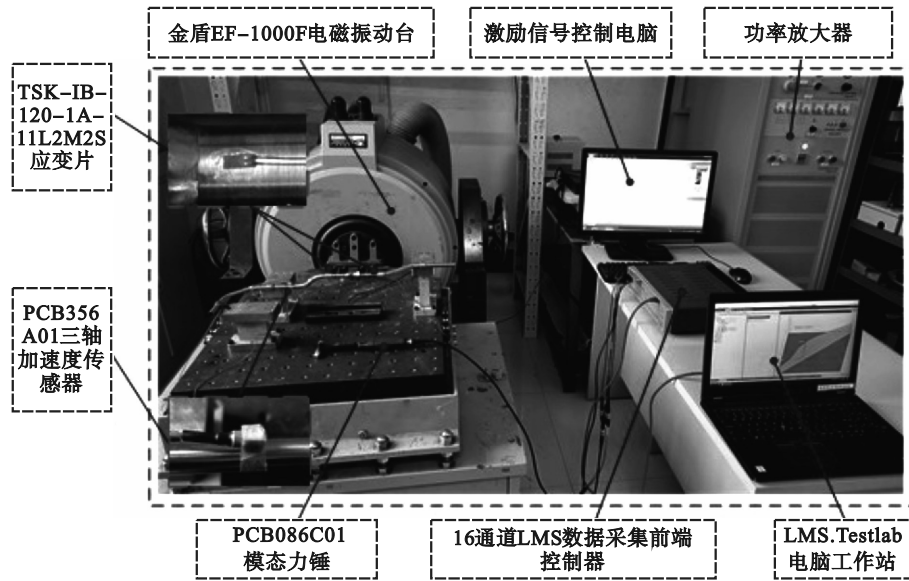


图 11 管路系统的振动测试系统

Fig. 11 Vibration test system of the pipeline system

利用该试验系统进行固有频率、模态阻尼比及应力响应测试,获得的固有频率结果用于辨识卡箍的接触参数,获得的模态阻尼比用于管路动力学模型中阻尼的输入,获得的应力响应结果主要用于校验所创建模型的合理性.上述结果将列在后续模型验证环节.

### 3.2 有限元模型验证

参照 1.2 节的描述,为了完成空间串联管路的有限元建模,需要进行必要的参数输入.通过实测可获得管与管接头的接触长度,分别为  $C_a=20\text{ mm}$ ,  $C_b=20\text{ mm}$ ;通过锤击法对自由态串联管路进行固有频率测试,进一步采用反推辨识法可获得管接头部分的接触系数,分别为接触刚度系数  $K=4 \times 10^{-3}$  与摩擦系数  $\mu=0.3$ ;同样采用锤击法对 3 个卡箍约束的串联管路进行固有频率测试,由此辨识卡箍约束区的接触参数,分别为接触刚度系数  $K=1$  与摩擦系数  $\mu=0.3$ ;随后,采用半功率带宽法可获得阻尼引入所需的模态阻尼比,具体值见表 2.

表 2 模态阻尼比  
Table 2 Modal damping ratio

模态阻尼比阶次	1	2	3
模态阻尼比数值	0.021	0.013	0.010

进一步,按照第 1 部分描述的方法并结合上述确定的参数,创建基于管-实体单元耦合的串联管路有限元模型,见图 12.

基于创建的模型,对 1 条 3 个卡箍约束状态下的管路进行固有频率求解,相关结果见表 3.基

于管-实体单元的模型 3 阶固有频率与试验的偏差均在 3% 以内,与全实体单元的计算结果也十分接近,因此认为基于所提模型计算得到的固有特性是合理的.

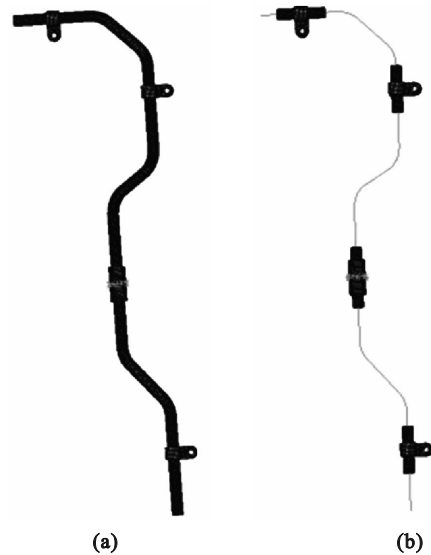


图 12 串联管路的有限元模型

Fig. 12 Finite element model of series pipeline

- (a) — 全实体有限元模型;
- (b) — 管-实体单元耦合有限元模型.

随后,对 3 个卡箍约束状态下的管路进行振动应力求解.这里振动应力仿真计算和测试对应的激励力包含了串联管路系统基频的谐振扫频基础激励,激励幅度为 1 g. 2 个应变测点的布置可参见图 10. 仿真计算与实测获得的振动应力对比分别见图 13 和图 14. 图 15 给出实体单元模型与管-实体单元模型在相同条件下的应力云图,

2 种模型的云图在保留实体的区域仅略微不同, 应力较大区域几乎都保留了下来. 表 4 给出与图 13~14 对应的两测点处共振应力响应的比对, 可以看出最大偏差小于 10%, 而该情况下仿真得到的最大等效应力 $(\sigma_{\text{eqv}})_{\text{max}}$  为 10.23 MPa; 对应的全实体单元模型在该激励下的最大等效应力为 10.6 MPa, 二者偏差为 -3.5%; 而 2 种模型在 2 个试验测点位置的应力响应值的求解结果也十分接近.

表 3 卡箍夹持状态下的有限元模型与实测获得的固有频率比对

Table 3 Comparison of natural frequencies obtained by the finite element model and experiment under the clamped state

阶次	试验 $f_1$ Hz	实体 $f_2$ Hz	管-实体 $f_3$ Hz	$(f_3 - f_1)/f_1$ %
1	128.12	124.89	125.06	-2.39
2	540.62	539.12	550.77	1.88
3	775.00	800.68	786.95	1.54

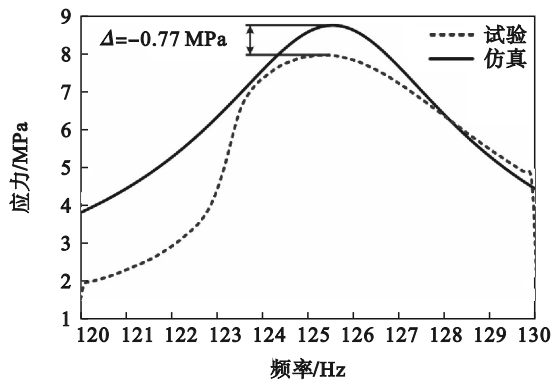


图 13 应变测点 1 位置的应力响应与仿真对比  
Fig. 13 Comparison of the stress response at the strain gauge point 1 position with the simulation

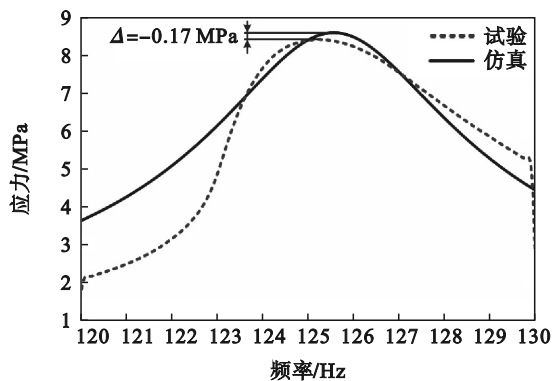


图 14 应变测点 2 位置的应力响应与仿真对比  
Fig. 14 Comparison of the stress response at the strain gauge point 2 position with the simulation

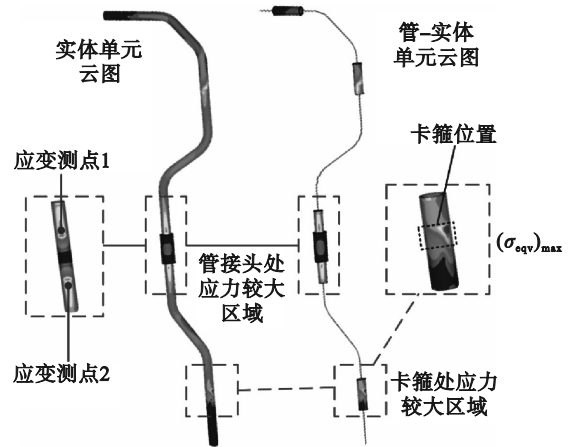


图 15 简谐激励作用下的应力云图

Fig. 15 Stress contour under simple harmonic excitation

表 4 试验获得的基频共振应力响应与仿真结果的比对  
Table 4 Comparison of fundamental frequency resonance stress response obtained by experiment with simulation results

测点	试验 $\sigma_1$ MPa	实体 $\sigma_2$ MPa	管-实体 $\sigma_3$ MPa	$(\sigma_3 - \sigma_1)/\sigma_1$ %
1	7.97	8.87	8.74	9.66
2	8.43	8.80	8.60	2.02

此外, 从求解模态起始至得到应力响应的过程中, 全实体模型耗时 496.78 s, 而管-实体单元耦合模型仅用了 24.27 s, 求解效率提升了 19.47 倍.

综上, 可以认为本文所创建的基于管-实体单元耦合的空间串联管路有限元模型是合理的, 在此基础上, 进行后续卡箍布局优化研究.

### 3.3 卡箍布局优化

本节以所创建的卡箍-串联管路系统有限元模型为基础模型, 按 2.3 节描述的方法进行以降低应力响应为目的的卡箍布局优化.

设置遗传算法的一些参数: 最大迭代次数为  $T=50$ , 每一代个体数为  $N=5$ , 设计变量维数为  $r=3$ , 交叉概率  $P_c=0.7$ , 变异概率  $P_m=0.05$ . 执行卡箍布局优化, 迭代过程见图 16.

可以看出, 在迭代到第 14 代时结果已经收敛. 管路最大等效应力从初始的 11.98 MPa, 经过优化后降低到 8.74 MPa, 应力响应降幅为 27.05%. 此时 3 个卡箍与其各自参考点的距离分别是  $L_{\text{clamp}}^1 = 54 \text{ mm}$ ,  $L_{\text{clamp}}^2 = 66 \text{ mm}$ ,  $L_{\text{clamp}}^3 = 88 \text{ mm}$ , 即是当前串联管路系统在基频共振条件下使最大共振应力最小的卡箍布局方案.

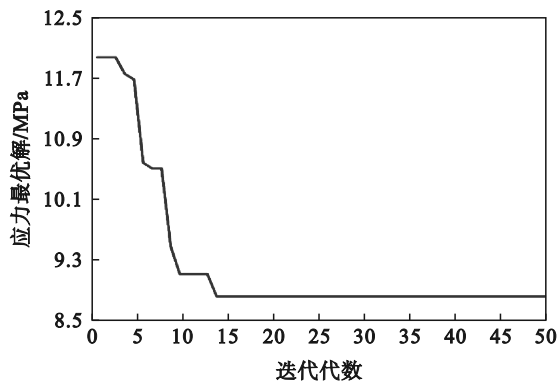


图 16 卡箍位置优化迭代过程

Fig. 16 Iterative process of clamp position optimization

## 4 结 论

1) 为满足以降应力为目标的空间串联管路卡箍布局优化需求,本文提出了一种基于管-实体单元耦合的串联管路动力学建模方法,具体为:在卡箍及管接头可能应力较大的区域采用实体单元建模,其他区域采用管单元建模,最终将各部分耦合起来完成整体建模.同时详细描述了三维建模过程中需着重考虑的管接头及卡箍的力学特性模拟方法.

2) 以具体的 3 个卡箍约束空间串联管路为对象进行了实例研究,结果表明用所提建模方法获得的前 3 阶固有频率与实测值最大偏差为  $-2.39\%$ , 2 个测点的基频共振应力最大偏差为  $-9.66\%$ . 另外,用所提模型获得的固有频率及振动应力与全实体单元获得的结果进行了对比,结果表明,两者结果基本一致,但是在振动应力求解上,所提出的基于管-实体单元耦合建模方法具有更高的计算效率,例如,在相同计算资源下,管-实体单元耦合模型从开始模态求解到应力求解效率相比全实体模型提升了 19.47 倍.

3) 以降低管路基频激励共振应力为目标,创建了基于卡箍布局调整的串联管路优化模型,并给出了采用遗传算法对该优化模型进行求解的流程.在此优化研究中,提出了一种通过变换卡箍位置坐标来更新创建管路几何模型的数据信息进而实现模型重构的方法.实例研究显示,通过所描述的优化方法,可获得使串联管路基频最大共振应力最小的卡箍布局,优化后的卡箍布局对应的基频最大共振应力相比较于初始状态降低了 27.05%.

## 参考文献:

- [1] Gao P X, Zhai J Y, Qu F Z, et al. Vibration and damping analysis of aerospace pipeline conveying fluid with constrained layer damping treatment[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 232(8): 1529-1541.
- [2] Pisarski D, Konowrocki R, Szmids T. Dynamics and optimal control of an electromagnetically actuated cantilever pipe conveying fluid[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 432: 420-436.
- [3] Ji W H, Sun W, Wang D H, et al. Optimization of aero-engine pipeline for avoiding vibration based on length adjustment of straight-line segment [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2022, 17(1): 11.
- [4] 张禹, 鹿浩, 吕董, 等. 基于 IMOFA 的航空发动机管路多目标优化布局[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(8): 1120-1126.  
(Zhang Yu, Lu Hao, Lyu Dong, et al. Multi-objective optimization layout of aero-engine pipe routing based on IMOFA [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(8): 1120-1126.)
- [5] Liu X D, Sun W, Gao Y, et al. Optimization of pipeline system with multi-hoop supports for avoiding vibration, based on particle swarm algorithm [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Science, Part C: Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 235(9): 1524-1538.
- [6] 刘旭东, 孙伟. 多卡箍支撑的管路系统振动特性半解析建模及支撑位置优化[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(19): 32-40.  
(Liu Xu-dong, Sun Wei. Semi-analytical dynamic modeling and support location optimization of pipeline system with multi-clamp support [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(19): 32-40.)
- [7] 张宇, 孙伟, 刘旭东. 充液管路振动特性半解析建模及卡箍布局优化[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(11): 4262-4270.  
(Zhang Yu, Sun Wei, Liu Xu-dong. Semi-analytical modeling of vibration characteristics for liquid-filled pipeline and clamps layout optimization [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(11): 4262-4270.)
- [8] Zhang D C, Juan M X, Zhang Z Y, et al. A dynamic modeling approach for vibration analysis of hydraulic pipeline system with pipe fitting [J]. *Applied Acoustics*, 2022, 197: 108952.
- [9] Guo X M, Xiao C L, Ge H, et al. Dynamic modeling and experimental study of a complex fluid-conveying pipeline system with series and parallel structures [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, 109: 186-208.
- [10] Zhang Y, Sun W, Ma H W, et al. Semi-analytical modeling and vibration analysis for U-shaped, Z-shaped and regular spatial pipelines supported by multiple clamps [J]. *European Journal of Mechanics: A/Solids*, 2023, 97: 104797.
- [11] 刘中华, 李建福, 孙志航, 等. 考虑螺栓连接的航空发动机管路建模及振动特性分析[J]. *航空发动机*, 2021, 47(6): 45-49.  
(Liu Zhong-hua, Li Jian-fu, Sun Zhi-hang, et al. Modeling and analysis of vibration characteristics of aeroengine pipeline with bolt connection [J]. *Aeroengine*, 2021, 47(6): 45-49.)
- [12] Qu W, Zhang H L, Sun W Q, et al. Stress response of the hydraulic composite pipe subjected to random vibration [J]. *Composite Structures*, 2021, 255: 112958.

(下转第 1333 页)