

基于 ANSYS 平台的多支撑空间单管路避振优化

王东海^{1,2}, 高志辉^{1,2}, 孙伟^{1,2}

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 2. 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室: 沈阳 110819)

摘要: 为了合理地确定航空发动机中卡箍的布局, 以有效避开发动机转子的激振频率, 进而大幅度降低管路系统的振动水平, 基于 ANSYS 平台, 针对多卡箍支撑的空间管路开展卡箍布局优化研究。描述了空间管路的有限元建模过程, 将卡箍的位置作为设计变量, 卡箍的可移动范围作为约束条件, 以管路系统最大第 1 阶固有频率作为目标函数, 建立了空间管路避振优化模型, 并给出了先执行灵敏度分析再进行优化求解的方法。结果表明: 基于灵敏度分析减少了设计变量的数量后, 其优化结果与考虑所有设计变量的优化结果基本一致; 优化后管路系统第 1 阶固有频率增大, 避开了所设定的激振频率。通过试验校验了所创建的有限元模型的合理性, 并在此基础上进行了卡箍布局优化实践。

关键词: 避振优化; 多支撑; 空间单管路; 卡箍; 灵敏度分析; 航空发动机

中图分类号: V231.92

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.02.014

Optimization of Spatial Single Pipeline with Multi-supports for Vibration Avoidance Based on ANSYS Platform

WANG Dong-hai^{1,2}, GAO Zhi-hui^{1,2}, SUN Wei^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System Ministry of Education, Shenyang 110819, China)

Abstract: To rationally determine the layout of aeroengine pipeline clamps, effectively avoid the excitation frequencies of the engine rotor, and thereby greatly reduced the vibration level of pipeline system, based on the ANSYS platform, the optimization study of clamps layout to avoid vibration was carried out for the spatial pipeline supported by multiple clamps. The finite element modeling process of the spatial pipeline was described. The location of the clamps was taken as the design variable, the movable range of the clamps as the constraint, and the maximum first-order natural frequency of the pipeline system as the objective function. The optimization model for vibration avoidance of the spatial pipeline was established, and the method of performing sensitivity analysis first and then optimization was given. The results show that after reducing the number of design variables based on sensitivity analysis, the optimization results are basically consistent with those that consider all design variables. After the optimization, the first-order natural frequency of the pipeline system was increased, and the preset excitation frequencies were avoided. The rationality of the finite element model was verified by bench test, and on this basis, the practice of optimizing the clamps layout was carried out.

Key words: optimization for vibration avoidance; multi-supports; spatial single pipeline; clamp; sensitivity analysis; aeroengine

0 引言

航空发动机外部管路系统作为燃油、滑油、空气等工作介质和能量的主要运输通道, 其可靠性直接影响到发动机的安全性及寿命。由于管路彼此之间以及管路与机匣之间通常通过多个卡箍连接, 在工作过

程中, 管路会受到发动机转子、传动组件和泵源压力脉动的激励而产生振动, 过大的振动会造成卡箍松动、产生接头裂纹或发生断裂等故障^[1-2], 严重影响飞机的飞行安全。因此, 亟需解决航空发动机管路系统振动问题。

目前针对飞机、车辆、石化运输等行业中管路系

收稿日期: 2021-01-27 基金项目: 国家科技重大专项(J2019-I-0008-0008)资助

作者简介: 王东海(1994), 男, 硕士。

引用格式: 王东海, 高志辉, 孙伟. 基于 ANSYS 平台的多支撑空间单管路避振优化[J]. 航空发动机, 2023, 49(2): 118-125. WANG Donghai, GAO Zhi-hui, SUN Wei. Optimization of spatial single pipeline with multi-supports for vibration avoidance based on ANSYS platform[J]. Aeroengine, 2023, 49(2): 118-125.

统的减振开展了很多研究,开发了包括基于粘弹性阻尼层、动力吸振、电磁阻尼等减振方法。Bi 等^[3]提出利用粘弹性材料贴敷在输油/输气管道外表面来降低地震振动;Gao 等^[4]采用在飞机管路上附加约束阻尼层的减振方法,分析了粘弹性层和约束层参数对管路系统振动特性的影响;Song 等^[5]提出采用调谐质量阻尼器(也称动力吸振器)控制输油/输气管道的振动;Omid^[6]研发了 1 种被动电磁阻尼器来减小输油管道的振动;Pisarski 等^[7]应用运动式电磁装置来抑制输送空气管道过大的振动。由于航空发动机的工作环境特殊,上述减振措施还不易直接在航空发动机管路系统中应用。在管路系统中卡箍起着支撑和约束的作用,其位置分布会对管路系统的振动特性产生重要影响。因此,可以通过优化卡箍布局来减小管路振动,这也是一种最可行、最经济的减振方法。李鑫等^[8]通过粒子群算法优化卡箍布局,使管路在激振源频率点处的特征阻抗加权和最小;刘伟等^[9]利用有限元法对管路系统进行灵敏度分析,进一步采用罚函数法对卡箍位置进行优化;Tang 等^[10]建立了液压管路系统在随机激励下的参数化模型,通过优化卡箍位置减小管路振动;Herrmann 等^[11]以减小噪声和振动为优化目标,对液压管道系统卡箍的夹持位置进行了优化;Zhang 等^[12]通过调整卡箍位置达到减振目的;Kwong 等^[13]采用遗传算法来优化液压管道系统的卡箍位置;Zhang 等^[14]通过非概率灵敏度分析筛选出优化目标函数不敏感的卡箍位置,对剩余卡箍位置进一步优化,改善管路系统振动特性。上述管路系统卡箍布局优化大多面向飞机管路,目前直接以航空发动机中具有无规则构型的空间管路为对象进行卡箍布局优化的研究,公开报道较少。

本文以含多卡箍支撑的空间单管路为例,主要利用 ANSYS 软件完成空间管路有限元建模、灵敏度分析及支撑卡箍的布局优化。

1 基于 ANSYS 的空间单管路有限元建模

航空发动机空间管路具有复杂的几何型线,在管路设计研发阶段通常是在一定的敷设准则约束下,利用 3 维 CAD 软件完成设计。要建立实际敷设在机匣外边的管线与有限元模型之间的对应关系,需重点考虑 2 方面问题:管体有限元建模和卡箍的模拟方法。

1.1 管体有限元建模

以一个典型的 3 支撑空间管路为例,具体描述了由管体 CAD 模型转换为有限元模型的建模过程。空间管路 CAD 模型及其关键点如图 1 所示。对其进行有限元建模,需要获得该管体的型线数据:主要包括直线段两 endpoints 坐标和圆弧处的曲率半径和圆心坐标等;还需要获取空间管路的截面参数,即管路的内径和外径。为了实现快速建模,整个提取过程可以基于 CAD 系统二次开发程序以实现选中模型自动提取数据,本文提取了 14 个用于建模的关键点坐标。

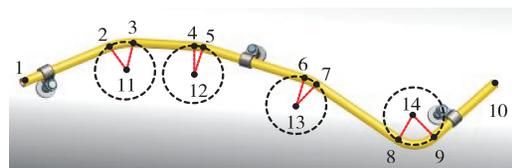


图 1 空间管路 CAD 模型及关键点

基于上述提取的关键点坐标,利用 ANSYS 软件完成几何模型创建,进一步可选用 PIPE289 管单元完成单元划分,创建的管体有限元模型如图 2 所示。



图 2 基于 ANSYS 创建的空间管路有限元模型

在管体建模过程中,为了后续更加准确地有限元模型中建立模拟卡箍支撑的弹簧单元,需要在管体上找到任意 2 个节点间的距离等于卡箍的宽度 W 。因此在管路有限元模型中划分单元长度时,要使卡箍宽度和单元长度满足

$$W = tl_e \quad (t = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

式中: l_e 为有限元模型中单元长度; t 为卡箍宽度范围内单元的数量。

另外,为了便于后续卡箍布局优化,可对管体结构进行均匀划分,即每个单元的长度一致。

1.2 卡箍的模拟方法

卡箍对管路起支撑及约束作用,其产生的支撑刚度及阻尼对管路系统动力学有重要影响。在动力学建模中,卡箍通常用弹簧-阻尼单元来模拟,对于空间管路,弹簧单元在管路系统中的位置及弹簧单元的方向是卡箍建模过程中必须考虑的问题。本节详细描述了对应空间管路用弹簧单元模拟卡箍的方法。

1.2.1 卡箍的模拟

在 ANSYS 中选用 COMBIN14 弹簧单元来模拟卡箍的力学特性。管路卡箍局部及弹簧单元对如图 3 所示。从图 3(a) 中可见,在建模时,可在 x 和 y 方向分别建立 2 个相互垂直的弹簧单元组成 1 个弹簧对来模拟卡箍的支撑作用,其中 x 方向为卡箍豁口方向, y 方向为金属箍带垂直的方向。1 个弹簧对通常不足以有效模拟卡箍的支撑,在实际建模过程中可按需要预设多个弹簧对。按照前期经验,每个卡箍位用 2 个弹簧对来模拟(图 3(b)),虚线框标定了卡箍支撑区。弹簧单元的位置可根据实际卡箍所在管路系统中的位置直接对应加以确定,这里令每个卡箍区有 2 个管单元(每个管单元有 3 个节点)。

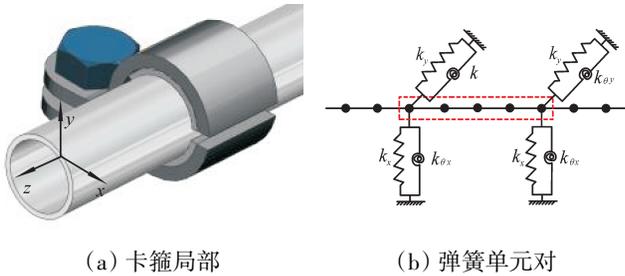


图3 管路卡箍局部及弹簧单元对

在航空发动机上,空间管路通过卡箍固定在机匣上,卡箍对管路的固定是有方向的。在实际应用中,卡箍可以按照需要沿着管轴 360° 旋转固定在机匣结构上。这就引出一个问题:模拟卡箍支撑刚度的弹簧单元的方向如何确定。假如必须精确找出图 3(a) 中所描述的 x 和 y 方向,则建模将十分困难。在详细描述模拟卡箍力学特性的弹簧单元建模方法的基础上,分析了弹簧单元的方向对管路系统动力学特性的影响。

1.2.1.1 弹簧单元方向的计算

为了在空间中找到 2 个相互垂直的弹簧单元方向,在卡箍所在的直线段上建立 1 个局部坐标系,其中直管段的轴线方向为局部坐标系的 z 轴方向,则 x 和 y 方向就可以代表 2 个弹簧单元的方向(已经相互垂直)。直线段上弹簧单元方向如图 4 所示。图中,

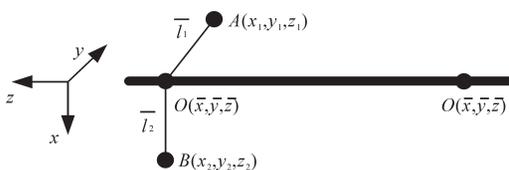


图4 直线段上弹簧单元方向

$\bar{l}_1 = \bar{l}_2$ 为弹簧单元的长度,2 个弹簧单元相交于直线段上的点 $o(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, $O(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ 为直线段上任取的另 1 点的坐标值。基于这些已知条件,再选定 1 个定位坐标,就可以确定代表弹簧单元线段端点 A, B 的坐标值。

以确定 A 点坐标为例,假定 A 点的 1 个方向坐标 x_1 已知,这相当于对相互垂直的弹簧对进行了定位。利用已知的 2 个弹簧单元相互垂直条件以及弹簧单元长度,可得

$$\begin{cases} (\bar{X} - \bar{x})(x_1 - \bar{x}) + (\bar{Y} - \bar{y})(y_1 - \bar{y}) + (\bar{Z} - \bar{z})(z_1 - \bar{z}) = 0 \\ \sqrt{(x_1 - \bar{x})^2 + (y_1 - \bar{y})^2 + (z_1 - \bar{z})^2} = \bar{l}_1 \end{cases} \quad (2)$$

进而可确定 y_1 和 z_1 的坐标值。

具体在 ANSYS 中可通过命令“CS”在直线段上建立局部坐标系,在局部坐标系中设定 2 个相互垂直的弹簧方向,并在假定弹簧单元长度的基础上,确定弹簧单元另一端点坐标的具体值。

1.2.1.2 弹簧单元方向的影响

上述模拟卡箍力学特性的弹簧单元在空间管路系统中的建模方法,只是确保了 2 个弹簧对相互垂直且与管路有效连接,实际上弹簧单元的方向还是任意的。下面考核弹簧单元的方向对管路系统振动特性的影响。针对图 1 描述的 3 支撑空间管路系统,任取 2 种不同的方案,2 种弹簧单元方向不同的管路系统有限元模型如图 5 所示。假定每个弹簧对中的弹簧单元 x 和 y 方向线刚度都为 4×10^6 N/m,角刚度都为 30 N·m/rad。

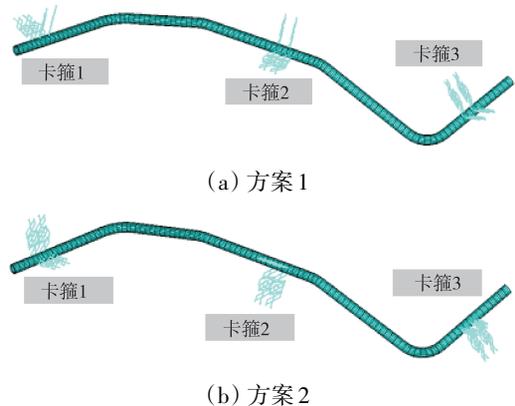


图5 2种弹簧单元方向不同的管路系统有限元模型

从图 5(a) 中可见,对于方案 1,模拟卡箍支撑的弹簧单元方向与各卡箍真实的固定方向一致,即弹簧单元的方向与所在管路直线段局部坐标系中的 x 轴和 y 轴(图 3(a))保持一致;从图 5(b) 中可见,对于方

案 2, 模拟卡箍支撑的弹簧单元方向与各卡箍所在管路直线段局部坐标系中的 x 轴和 y 轴错开一定的角度: 第 1 个卡箍支撑方向与所在直线段局部坐标系的 x 轴和 y 轴错开 60° , 第 2 个卡箍支撑方向与所在直线段的局部坐标系的 x 轴和 y 轴错开 45° , 第 3 个卡箍支撑方向与所在直线段的局部坐标系的 x 轴和 y 轴错开 90° 。

对应上述 2 种建模方案, 可获得的空间管路的固有频率见表 1。

表 1 不同弹簧单元方向管路系统固有频率对比 Hz

阶数	方案 1	方案 2
1	670.24	670.24
2	713.40	713.40
3	827.29	827.29
4	1121.10	1121.10
5	1392.10	1392.10

从表中可见, 虽然对应于方案 1、2, 管路系统中弹簧单元的方向明显不同, 但是用这 2 种模型求解的固有频率结果完全一致, 说明在明确模拟卡箍力学特性的弹簧单元位置的基础上, 只要保证每个弹簧单元对的 2 个弹簧相互垂直并相交于管路上同一点, 弹簧单元的方向并不影响固有频率。

1.2.2 卡箍刚度辨识

为了完成管路系统的动力学计算, 利用反推辨识法获得弹簧单元的刚度值, 具体辨识方法及原理见文献[15], 以下仅做简要描述。

- (1) 根据锤击试验可测得空间管路的前 s 阶固有频率, 将这些固有频率值作为反推辨识的基础数据;
- (2) 创建含多卡箍支撑的管路系统有限元分析模型, 并同样计算前 s 阶固有频率;
- (3) 基于遗传算法对 2 种频率进行匹配计算, 使 2 种频率偏差最小, 在满足最大迭代次数后输出弹簧线刚度和角刚度值。

基于遗传算法的匹配计算目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^s |f_i - \bar{f}_i| / f_i \quad (3)$$

式中: f_i, \bar{f}_i 分别表示锤击试验以及有限元分析得到的第 i 阶固有频率。

最终可辨识得到图 3(b) 中弹簧 x 和 y 方向的刚度值分别为 $k_x, k_y, k_{\theta_x}, k_{\theta_y}$ 。

2 避振优化模型

在航空发动机管路的设计准则(例如 GJB 3816-

99^[6])中, 对于管路系统的动力学特性有着明确要求: 管路系统的固有频率要避免航空发动机转子系统的激振频率。考虑到大多数航空发动机管路在设计阶段只考核第 1 阶固有频率, 因而本文以获得管路系统最大第 1 阶固有频率为优化目标。只要保证管路系统第 1 阶固有频率 f_1 远大于转子系统所对应的最大激振频率 f_{\max} , 就可以避开此激振频率, 通常取 $f_1 \geq 1.25f_{\max}$, 因而可将 $f_1 - 1.25f_{\max} \geq 0$ 作为优化的 1 个约束条件。

通过调整卡箍位置可找到管路系统的最大第 1 阶固有频率, 所以卡箍位置是此优化问题的设计变量。按照管路系统设计准则, 卡箍并不能在空间管路任一位置对管路进行支撑, 因而在执行优化的过程中, 需要描述空间管路中每个卡箍可以变动的范围(即设计变量的约束条件)。以 3 卡箍支撑的空间管路为例, 其空间管路卡箍位置如图 6 所示。 l_1, l_2 和 l_3 分别为各卡箍距对应的参考点 N_1, N_2 和 N_3 的距离, 也即卡箍的位置或设计变量。卡箍应位于管路的直线段且距离弯管区有一定的距离, 因而将约束条件描述为 $a_i \leq l_i \leq b_i, a_2 \leq l_2 \leq b_2, a_3 \leq l_3 \leq b_3, a_i, b_i (i=1, 2, 3)$ 分别为各卡箍位置的下限和上限。

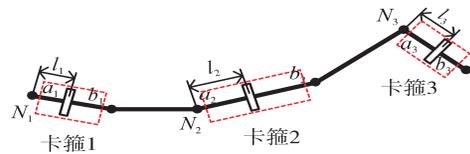


图 6 空间管路卡箍位置

由于整个寻优过程是基于空间管路有限元模型进行的, 因而还需要建立卡箍位置与节点编号的对应关系, 即把原来的以卡箍位置表达的设计变量变成以卡箍所在节点编号来表达。设前面所述的参考点 N_1, N_2 和 N_3 也是各卡箍所在位置节点的参考编号, 代表各卡箍位置的节点编号为 $n_i (i=1, 2, 3)$, 也即新的设计变量。图 6 中各卡箍位置对应的节点编号具体值

$$n_i = l_i / 0.5l_e + N_i + 1 \quad (i=1, 2, 3) \quad (4)$$

式中: $0.5l_e$ 为相邻 2 节点间的距离, 对应每个管单元有 3 个节点的情况。

基于式(4)也可将卡箍位置的约束条件变为对应节点编号的约束条件。在优化执行过程中, 优化算法会在约束条件的限制下不断迭代生成代表卡箍位置的新的节点编号, 进一步按照第 1 章描述的方法完成

参数化的管路建模与模态计算。

假如管路系统中卡箍数量为 r ,经过以上分析,最终的空间管路避振优化模型的数学表达式为

$$\begin{aligned} \min \quad & -f_1 \\ \text{s.t.} \quad & n_{ai} \leq n_i \leq n_{bi} \quad (i = 1, 2, \dots, r) \\ & f_1 - 1.25f_{\max} \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

3 优化实施方法

针对第2章描述的优化模型,提出利用ANSYS软件平台先进行灵敏度分析再实施优化求解的方法。

3.1 灵敏度分析方法

灵敏度分析求解的是管路系统的第1阶固有频率对卡箍位置的灵敏度,其目标是剔除那些对管路振动特性影响较小的卡箍,进而减少系统中设计变量数以提升优化设计的执行效率。ANSYS灵敏度分析包含于概率设计(Probabilistic Design System, PDS)模块中,其提供了2种分析方法,分别是蒙特卡罗法(Monte Carlo)和响应面法(Response Surface Methodology, RSM)。本文采用响应面法进行求解,其具体流程如图7所示。

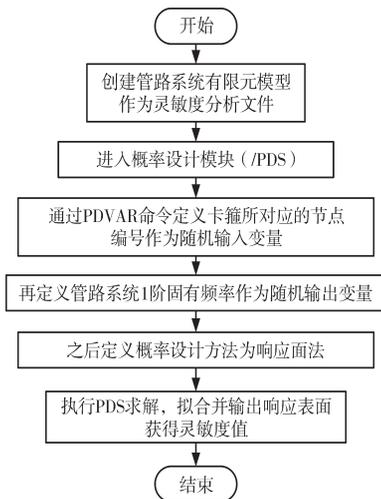


图7 灵敏度分析流程

需要说明的是,这里的响应面是通过随机输入卡箍位置得到一系列管路系统固有频率,进一步拟合仿真计算结果而形成的。

3.2 优化方法

基于ANSYS优化模块对管路系统卡箍位置进行布局优化,使管路系统第1阶固有频率最大,进而避开激振源频率而满足避振要求。

ANSYS优化过程主要包括2部分:优化分析文件

和优化控制文件。优化分析文件过程包含管路系统有限元建模并进行模态分析得到管路系统的固有频率;优化控制文件过程包括定义设计变量、约束条件和目标函数,并且指定优化方法和优化迭代的最大次数,最后进行优化运算并列表显示优化结果。在ANSYS优化模块中提供了2种优化方法,分别是0阶方法和1阶方法。

考虑到计算效率以及对本研究的适用性,本节优化选用0阶方法,采用ANSYS软件实现管路系统避振优化流程如图8所示。

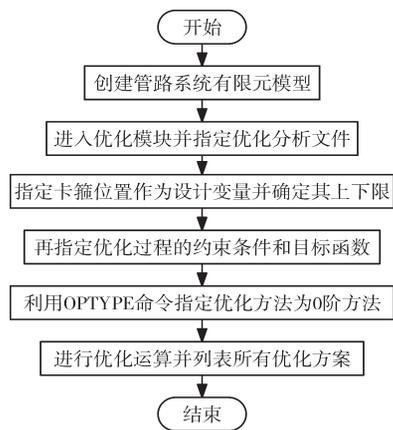


图8 管路系统避振优化流程

优化具体过程如下。

第1步:创建空间管路有限元建模并进行模态分析,以负的第1阶固有频率作为优化问题的目标函数,将此文件作为优化分析文件。

第2步:进入优化模块(/OPT),指定优化分析文件。

第3步:定义卡箍位置(用节点编号来表达卡箍位置)作为设计变量、卡箍可移动范围和避开激振源频率作为状态变量,并且指定目标函数。

第4步:利用“OPTYPE”命令选用0阶方法并指定优化迭代次数。

第5步:通过“OPEXE”命令开始优化运算,显示优化结果。

4 实例研究

4.1 问题描述

仍以3卡箍支撑的空间管路系统为例,验证本文提出的空间管路卡箍布局优化方法的有效性。管路几何和材料参数见表3。

3个卡箍初始位置分别为 $l_1=30\text{ mm}$ 、 $l_2=40\text{ mm}$ 、 $l_3=$

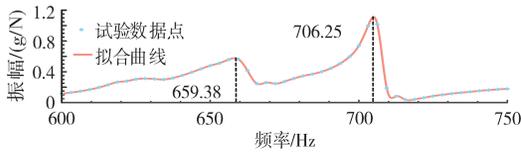
表 3 管路几何及材料参数

弹性模量 E / GPa	密度 ρ / (kg/m^3)	泊松比 μ	内径/ mm	外径/ mm	曲率半径 R / mm
204	7800	0.285	10	12	35

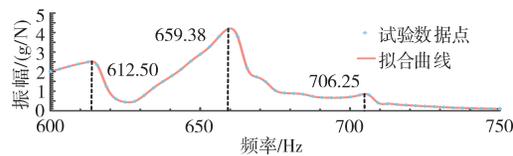
36 mm。针对此空间管路组建用于获得固有频率的锤击试验测试系统,如图 9 所示。试验设备包括移动工作站、LMS 8 通道便携式数据采集前端控制器、PCB 086C01 模态力锤和 PCB 356A01 微型 3 轴加速度传感器。通过移动力锤在管路不同点锤击,用加速度传感器拾取响应,选用信噪比最高的测点形成频响函数,如图 10 所示。从图中可见,在所考虑的频率范围内,共产生 3 阶固有频率(x 方向仅激发出 2 阶),将用于校验所创建的有限元模型的合理性。



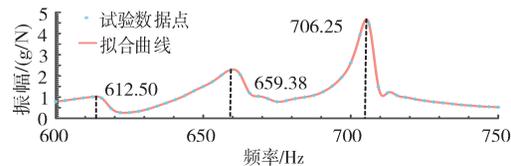
图 9 锤击试验测试系统



(a) x 方向频率响应拟合曲线(径向)



(b) y 方向频率响应拟合曲线(径向)



(c) z 方向频率响应拟合曲线(轴向)

图 10 测得的管路系统频响函数

4.2 有限元模型正确性确认

采用反推辨识法确定用于模拟卡箍力学特性的弹簧单元的参数。根据锤击试验得到管路系统前 3 阶固有频率(见表 4),利用试验数据与不断被修正的管路系统总刚度矩阵得到的固有频率进行匹配计算,

使匹配计算值不断逼近设定的最优值,在达到最大迭代次数后输出此时的弹簧单元刚度,即: $k_x = 5.68 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_y = 0.60 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_{\theta_x} = 0.10 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $k_{\theta_y} = 4.50 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。将得到的线性刚度值和角刚度值代入有限元模型中计算管路系统固有频率,将仿真结果与试验结果进行对比。通过仿真及试验获得的空间管路固有频率对比见表 4。

表 4 通过仿真及试验获得的空间管路固有频率对比

阶次	ANSYS 仿真/Hz	试验/Hz	偏差/%
1	614.98	612.50	0.40
2	665.15	659.38	0.88
3	713.78	706.25	1.07

从表中可见,仿真计算结果与试验结果最大偏差为 1.07%,说明此有限元模型具有合理性,可以作为基础模型用于后续卡箍支撑位置优化。

4.3 卡箍位置灵敏度分析

基于 ANSYS 概率设计模块对不同卡箍位置进行灵敏度分析,其分析结果如图 11 所示,卡箍移动范围约束条件见表 5。

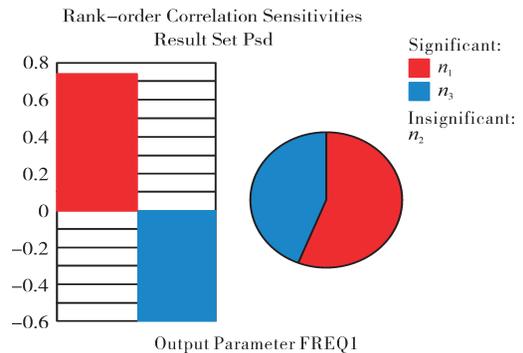


图 11 灵敏度分析结果

表 5 卡箍移动范围约束条件

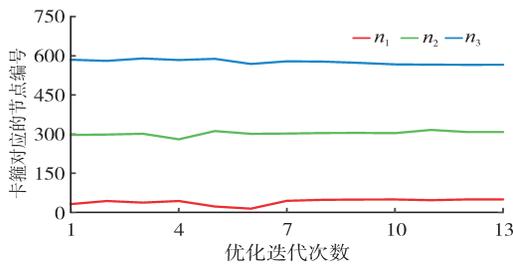
卡箍编号	卡箍位置下限 a_i	卡箍位置上限 b_i
1	8	48
2	23	63
3	16	56

从图中可见,卡箍 1、3 在可移动范围内对管路系统第 1 阶固有频率影响较大,卡箍 2 的变化几乎不影响管路系统第 1 阶固有频率。因此,按照此灵敏度分析结果,可在后续的优化求解中去掉卡箍 2,将设计变量变为 2 个。

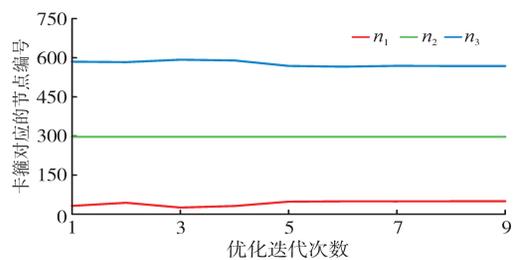
4.4 卡箍支撑位置优化

以 ANSYS 有限元模型为基础模型进行卡箍支撑

位置优化,假设航空发动机转子的激振频率 $f_{\max} = 500 \text{ Hz}$,则按照标准要求管路系统的第1阶固有频率(简称FREQ1)必须大于625 Hz,可见原始卡箍位并不满足需求(表4)。基于ANSYS优化模块对管路系统卡箍位置进行优化布局,分别以考虑所有3个设计变量和考虑2个设计变量进行优化求解。其中,考虑2个设计变量时,是将第2个卡箍位置保持不变,只优化剩余的2个卡箍位置。在优化过程中卡箍位置变化如图12所示,基于ANSYS的优化结果见表6。



(a) 考虑3个设计变量



(b) 考虑2个设计变量

图12 在优化过程中卡箍位置变化

表6 基于ANSYS的优化结果

设计变量数	n_1	n_2	n_3	FREQ1/Hz
3	50	308	566	660.66
2	50	297	568	658.92

根据上述优化求解结果可知,用2个及3个设计变量执行优化时,无论是收敛的设计变量值还是目标函数值都基本一致。本文所述的先进行灵敏度分析以减少设计变量,而后再实施具体优化的方法是合理的。另外,优化后的管路系统第1阶固有频率大于1.25倍的激振源频率,实现了管路系统避振要求。

表6中给出的是有限元模型中的节点编号,为了指导工程设计,还需要将上述节点编号变为与参考点的距离。根据式(4)得到优化后各卡箍与参考点的距离分别为 $l_1 = 48 \text{ mm}$, $l_2 = 40 \text{ mm}$, $l_3 = 19 \text{ mm}$ 。

5 结论

(1)在包含卡箍的空间管路系统有限元建模时,

无需关注卡箍对实际管路的约束方向,只需确定卡箍的位置以及保证模拟卡箍力学特性的各弹簧对中的2个弹簧单元相互垂直且相交于管路轴线。

(2)用所创建的空间管路有限元模型进行固有频率计算,前3阶固有频率计算结果与试验结果偏差小于1.5%,证明了有限元模型的合理性。

(3)以第1阶固有频率最大为优化目标,给出了卡箍位置与节点编号的计算公式,将设计变量由卡箍位置转换为节点编号,在合理设定约束条件的前提下建立了便于寻优的空间管路避振优化模型。

(4)基于ANSYS优化模块对管路系统卡箍位置进行优化布局,并利用灵敏度分析不同卡箍位置对管路系统第1阶固有频率的影响程度,通过减少优化过程中的设计变量(卡箍位置)提高优化效率。实例研究表明,ANSYS优化模块可以找到管路系统最优的卡箍位置,从而有效避开激振源频率实现避振优化。

参考文献:

- [1] 刘中华,李兴泉,贾铎,等.航空发动机液压管路裂纹故障分析[J].航空发动机,2020,46(5):66-70.
LIU Zhonghua, LI Xingquan, JIA Duo, et al. Crack fault analysis of hydraulic pipe for an aeroengine[J]. Aeroengine, 2020, 46(5): 66-70. (in Chinese)
- [2] 刘中华,贾铎,刘鑫.某航空发动机卡箍断裂故障分析[J].航空发动机,2019,45(3):77-81.
LIU Zhonghua, JIA Duo, LIU Xin. Fracture failure analysis of clamp for an aeroengine[J]. Aeroengine, 2019, 45(3): 77-81. (in Chinese)
- [3] Bi K, Hao H. Numerical simulation on the effectiveness of using viscoelastic materials to mitigate seismic induced vibrations of above-ground pipelines[J]. Engineering Structures, 2016, 123(15): 1-14.
- [4] Gao P, Zhai J, Qu F, 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.
- [5] Song G, Zhang P, Li L, et al. Vibration control of a pipeline structure using pounding tuned mass damper[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 142(6): 04016031.
- [6] Omid K. Effects of the passive electromagnetic damper on the behavior of a fluid-conveying pipeline[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(7): 2329-2339.
- [7] 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.
- [8] 李鑫,王少萍.基于卡箍优化布局的飞机液压管路减振分析[J].振

- 动与冲击, 2013, 32(1): 14-20.
- LI Xin, WANG Shaoping. Vibration control analysis for hydraulic pipelines in an aircraft based on optimized clamp layout [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(1): 14-20. (in Chinese)
- [9] 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 supports' positions for engine pipelines [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(12): 2756-2762. (in Chinese)
- [10] Tang Z, Lu Z, Li D, et al. Optimal design of the positions of the hoops for a hydraulic pipelines system[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(12): 4840-4855.
- [11] 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(5): 5557-5562.
- [12] Zhang X, Liu W, Zhang Y, et al. Experimental investigation and optimization design of multi-support pipeline system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34(10): 1-15.
- [13] Kwong A H M, Edge K A. A method to reduce noise in hydraulic systems by optimizing pipe clamp locations[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 1998, 212(4): 267-280.
- [14] Zhang Z, Zhou C, Wang W, et al. Optimization design of aeronautical hydraulic pipeline system based on non-probabilistic sensitivity analysis[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2019, 233(5): 815-825.
- [15] 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.
- [16] 航空工业总公司. 航空发动机管路系统通用技术要求: GJB 3816-99[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 1999: 1-9.
- Aviation Industry Corporation. General technical requirements for aeroengine line system: GJB 3816-99 [S]. Beijing: General Armaments Department of the Chinese People's Liberation Army, 1999: 1-9. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)