

复杂管系“管形布局-卡箍位置”建模与协同优化方法

金则安, 史文昊, 刘智泉, 刘伟, 岳珠峰

(西北工业大学 力学与交通运输工程学院, 陕西 西安 710129)

摘 要:航空发动机上敷设复杂管形-多卡箍管路设计时,难以确定布局尺寸对管路结构动态特性的影响,不能快速甄别管路的关键布局参数,盲目性较大且效率低下。在复杂管系的管形布局方法基础上提出卡箍位置参数化方法,实现了卡箍和管路协同建模及优化设计,并开展了优化前后的试验对比验证。采用点间参数化线段插值方法定义了卡箍位置,可实现各形状管型及卡箍位置的同时变换。将原可行性问题转换为适用于动力学结构的多目标优化问题,并利用实例验证了该方法的可行性,管路的动力学性能显著提高。使用 Spearman 相关系数识别各参数局部灵敏度,并提出利用超立方抽样蒙特卡洛法将原始优化数据转换为具有统计显著性的工程适用区间,实现了该协同优化方法的工程应用。

关 键 词:参数化;卡箍位置;灵敏度;多目标优化;动力学性能

中图分类号:V23

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2026)02-0307-10

发动机管路系统的性能与可靠性已成为保障动力系统安全运行的重要问题之一。作为连接发动机各子系统的关键组件,管路-卡箍系统在强振动工况下面临严峻挑战,对于设计来说,管形布局与卡箍位置的选择是一个重要且复杂的工作。已有研究表明,管形结构形式和约束条件是管路系统调频的重要手段,能够显著地影响管路振动响应^[1-3],而发动机管路系统受多个振源影响,其固有频率容易出现在共振频率带内,管路很可能由于长时间处于共振环境下发生跑冒滴漏的问题。因此,管形与卡箍位置的匹配优化显得尤为重要,将其与动力学影响联系起来,才能真正打通管路的动力学正向设计。

在管路-卡箍位置优化领域,综合国内外研究现状,目前管形设计与卡箍位置优化研究多独立开展,两者的匹配机制尚未形成系统方法;管形优化常忽略卡箍安装约束,卡箍布局优化则基于固定管形,缺乏对两者耦合关系的全局考量。在卡箍位置的优

化方面,Elishakoff 等^[4]提出非概率凸集模型,为不确定性条件下卡箍参数分析提供了理论基础。Ben-Haim 等^[5]基于区间模型描述卡箍刚度不确定性,推动了非概率方法在管路优化中的应用。Jones 等^[6]提出的高效全局优化方法显著提升了复杂管路卡箍位置的寻优效率。此外,Kwong 等^[7]将传递矩阵法与遗传算法结合,通过优化卡箍布局降低液压系统低频噪声,验证了智能算法在管路振动控制中的有效性。Hansson 等^[8]采用壳单元与梁单元耦合建模,为复杂管路卡箍位置优化提供了精细化的动力学分析基础。Zhang 等^[9]基于非概率灵敏度分析,筛选对最大应力、位移及一阶固有频率不敏感的卡箍,结合序列二次规划优化剩余卡箍位置,使管路最大应力响应标准差降低 44%。Gao 等^[10]针对 L 型管路,通过遗传算法优化卡箍位置,创新性地提出“安全域”概念,确定卡箍满足避振要求的可移动范围。吕尚等^[11]针对空间管路,采用切比雪夫多项式进行全局与局部灵敏度分析,提出“局部灵敏度-布局寻优”方法,求解效率较遗传算法提升 86.87 倍。於为刚等^[12]基于模态位移特性,提出卡箍位置自动优化方法,将卡箍施加于模态位移最大处,实现管路

收稿日期:2025-08-27

基金项目:国防技术基础项目(JSZL2021607A001-32)资助

作者简介:金则安(2001—),博士研究生

通信作者:刘伟(1981—),教授 e-mail:liuwei@nwpu.edu.cn

基频最大化。

国内外学者围绕管路卡箍的可靠性优化设计展开了广泛研究,形成了一系列理论与方法。Liu等^[13]基于 Timoshenko 梁理论构建直管-卡箍系统有限元模型,分别以避振和振动幅值最小化为目标,通过粒子群算法和遗传算法优化卡箍位置,揭示了卡箍布局对管路动态可靠性的关键作用。在可靠性分析方法上,Bichon等^[14]提出的 EGRA 方法将主动学习思想引入 Kriging 代理模型,通过 EFF 函数筛选失效边界样本,提升了复杂系统可靠性分析效率。Echard等^[15]提出的 AK-MCS 算法结合 Kriging 与蒙特卡洛模拟,通过 U 学习函数减少样本误分类,为管路-卡箍系统小失效概率问题提供了高效解决方案。此外,Tang等^[16]针对复杂分支管路,以卡箍处最大应变和失效概率为目标,通过参数化有限元分析优化布局,明确了管形与卡箍位置对疲劳可靠性的耦合影响。胡兆樑^[17]提出基于等分法与 Kriging 代理模型的管路布局优化方法,通过遗传算法实现管形最短路径与固有频率避振优化,同时采用多目标 EGO 算法优化卡箍位置,使管路一阶、二阶固有频率远离激振源,提升系统动态可靠性;王文双等^[18]针对船舶机舱管路,提出基于 IABC-GA 的协同优化方法,将管形路径、卡箍位置与设备布局统筹考虑,通过约束管路卡箍的间隙、避障等要求,实现系统全局可靠性提升,较传统串行优化效果提升 11.8%。沈兴铨等^[19-20]开展充液直管和 P 型卡箍的疲劳试验,建立基于临界平面法的多轴疲劳寿命模型,结合 AK-MCSi 和 DC-CV-Voronoi 顺序抽样方法,分析管形参数(如管径、直管段长度)和卡箍参数(如橡胶垫圈厚度)对疲劳失效概率的影响,明确了关键参数对系统可靠性的敏感性,为管形与卡箍位置的综合可靠性设计提供了试验支撑。尽管国内外学者分别围绕管形布局、卡箍位置的单方面优化设计发展了多种方法,但在两者的协同建模及动力学性能耦合优化方面仍缺乏成功探索。

本研究是在课题组前期已建立的发动机机匣弧面不规则管路参数化建模方法基础上^[21],提出了卡箍位置的参数化方法,可描述多卡箍-复杂管形的管路系统;提出一种具有工程适用性的动力学协同优化方法,引入概率分析技术将优化数据转化为具有统计显著性的工程适用区间,形成管路动力学设计优化闭环。通过这一研究,期望为发动机管路系统的设计提供新的理论依据和实践指导,为未来的

发动机技术进步铺平道路。

1 弧面管路-卡箍的参数化建模方法

典型的发动机弧面不规则管路具有多卡箍支撑、管形复杂的特征。管路的参数化建模是后续优化和灵敏度分析的基础,下面分别从管形建模与卡箍位置建模两部分介绍多卡箍发动机弧面管路的协同参数化建模方法。

1.1 弧面管形布局的参数化建模方法

课题组前期已建立发动机机匣弧面不规则管路的参数化建模方法^[21],故本文中管形建模只介绍关键参数。如图 1 所示,圆弧面可以视为一个圆柱坐标系,一段不规则管路按照图中构造点 $A \rightarrow G \rightarrow C \rightarrow H \rightarrow I \rightarrow F$ 沿弧面敷设,管路的 2 个直线平行段沿着柱高 Z 轴方向。

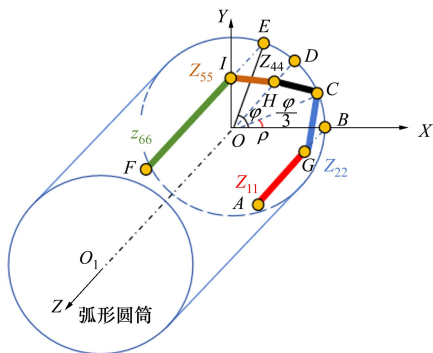


图 1 弧面管参数化建立示意图

其中,复杂形管中 BE 段是带有弧度的弯管,实际圆弧导管是采用多段弯折的方式,将管路弧形 BE 段分成 n 个直线段来代替。图 1 中 $n = 3$,将圆弧段转变为了 3 条直管 BC 、 CD 和 DE 。此时在直角坐标系 $OXYZ$ 中, AB 、 $BCDE$ 和 EF 共同形成了一段简单 U 型管,构造点分别以字母 $A \sim F$ 来表示,其中 $AB = Z_{11}$, $EF = Z_{66}$ 。

实际工程中由于避障等要求,假设有时在 B 、 D 、 E 处无法布置管路,此时在 B 、 D 、 E 处基础上根据可用空间做偏移,形成 G 、 H 、 I 点,这三点的坐标可通过 B 、 D 、 E 三点分别向 Z 轴平移 Z_{22} 、 Z_{44} 、 Z_{55} 得到,即 $GB = Z_{22}$, $HD = Z_{44}$, $IE = Z_{55}$ 。此时在简单 U 形管 5 个参数的基础上增加了 3 个参数,形成了不规则形管路 $AGCHIF$,最终各构造点的坐标如(1)式所示。

$$\begin{cases} A: (\rho, 0, Z_{11}) \\ G: (\rho, 0, Z_{22}) \\ C: \left(\rho \cos \frac{\varphi}{3}, \rho \sin \frac{\varphi}{3}, 0 \right) \\ H: \left(\rho \cos \frac{2\varphi}{3}, \rho \sin \frac{2\varphi}{3}, Z_{44} \right) \\ I: (\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, Z_{55}) \\ F: (\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, Z_{66}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为管路沿着机匣圆弧面敷设半径(一般情况下该半径等于机匣半径 + 管路与机匣间的间隙要求 + 管路半径); φ 为导管沿着机匣弧面布局时所经过的圆截面角度。确定了所有构造点的直角坐标后,就可以采用商业软件实施管路的参数化建模。首先定义上述 8 个变量并赋初值,并用(1)式确定管线沿途各个构造点的直角坐标。其次,将各个构造点坐标按走向顺序依次连接,即可完成管线的折线图。最后在每段折线之间定义过渡圆角半径(一般为 2 ~ 4 倍管路外径),并赋予管路截面尺寸,就获得了最终的弧面复杂形管路。利用该方法可建立任意形状的弧面管路模型。

1.2 卡箍位置参数化建模方法

在建立管形布局基础上添加卡箍约束。本文涉及的工况为中低频(发动机导管的常见频率小于 1 000 Hz,约覆盖一般航空导管的 3~5 阶固有频率,这些频率特性决定了管路的动力学响应)、小幅值线性响应。因此本文将卡箍简化为 3 个方向的线刚度弹簧,即 k_t^x (沿管轴向), k_t^y, k_t^z 方向(沿管截面的 2 个横向),该简化基于动刚度辨识试验^[22],在考察频段内能有效表征卡箍的动力学特性。

图 2 为一段管路中心线,以此为例说明卡箍位置参数化方法。该段管路含有 2 个弯曲构造点 i 和 $i+1$,通过半径为 r 的圆弧弯曲过渡后形成 4 个切点 1 ~ 4,假设需在切点 2 与切点 3 之间的直线管路段某任意位置处布置一个卡箍。由上文管形优化已知构造点的坐标出发,此处设构造点 $i, i+1$ 坐标分别为 $(x_i, y_i, z_i), (x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$,那么求得切点 2 与切点 3 的位置坐标即可利用插值法定义卡箍位置。

设切点 2,3 的位置坐标分别为 $(x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$,首先要确定方向向量,由于切点 2,3 都在中间管线处,那么仅求得一个方向向量即可。

$$\bar{\mathbf{d}} = (x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i, z_{i+1} - z_i) \quad (2)$$

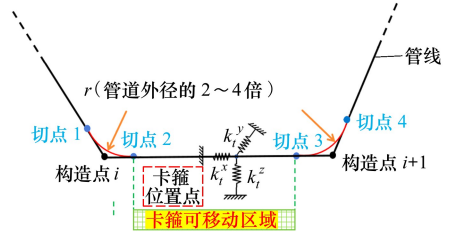


图 2 卡箍位置参数化示意图

单位化得到卡箍处管路布局走向的单位矢量,即

$$\hat{\mathbf{d}} = \frac{\bar{\mathbf{d}}}{|\bar{\mathbf{d}}|} = \frac{(x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i, z_{i+1} - z_i)}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}} \quad (3)$$

这样就利用方向向量确定了过渡圆角与管路中心折线段切点的位置坐标。切点 2 位置为

$$\begin{cases} x_2 = x_i + r \cdot \hat{\mathbf{d}} \\ y_2 = y_i + r \cdot \hat{\mathbf{d}} \\ z_2 = z_i + r \cdot \hat{\mathbf{d}} \end{cases} \quad (4)$$

切点 3 位置为

$$\begin{cases} x_3 = x_{i+1} - r \cdot \hat{\mathbf{d}} \\ y_3 = y_{i+1} - r \cdot \hat{\mathbf{d}} \\ z_3 = z_{i+1} - r \cdot \hat{\mathbf{d}} \end{cases} \quad (5)$$

得到中间直线段的两切点后,则可以通过线性插值法定义卡箍的位置。设卡箍点的位置为 (x_t, y_t, z_t) , t 为开区间 $(0, 1)$ 上的任一实数,称其为位置插值因子。则卡箍位置可由(6)式计算。

$$\begin{cases} x_t = (1 - t) \cdot x_2 + t \cdot x_3 \\ y_t = (1 - t) \cdot y_2 + t \cdot y_3 \\ z_t = (1 - t) \cdot z_2 + t \cdot z_3 \end{cases} \quad t \in (0, 1) \quad (6)$$

此时该卡箍点必在切点 2,3 之间,且可以通过位置插值因子 t 来改变卡箍点在管路直线段的位置。位置插值因子是卡箍在直线管段上的位置表征参数,也是本文的优化变量。这样就利用两切点间单参数线段插值函数的方法给出了 1 个卡箍在管段中的位置。另外,当一段直线段中存在 2 个卡箍时该方法同样适用,仅需将 1 个切点坐标转换为先布置的卡箍坐标即可,如图 3 所示。

率先布置的卡箍 1 位置坐标由(6)式表述,则卡箍 2 的位置计算公式为

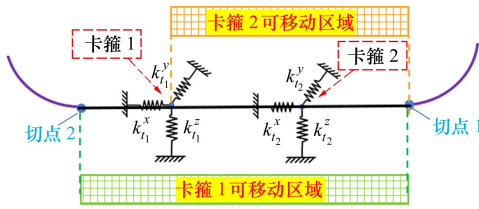


图3 多卡箍位置参数化示意图

$$\begin{cases} x_{t_2} = (1 - t_2) \cdot x_t + t_2 \cdot x_3 \\ y_{t_2} = (1 - t_2) \cdot y_t + t_2 \cdot y_3 \\ z_{t_2} = (1 - t_2) \cdot z_t + t_2 \cdot z_3 \end{cases} \quad t_2 \in (0, 1) \quad (7)$$

推广到一般情形,若一条直线管路中有 n 个相邻卡箍,便定义 n 个参数 $t_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 控制卡箍在其所在直线段中任意变化,且卡箍点的位置坐标只要将位置插值因子代入其位置计算式中即可。以上为弧面管路插入卡箍模型参数化建模方法,利用该方法可为任意弧面管路的直线段采用参数化方法添加多个卡箍,结合前文所述管形参数化创建方法可实现二者的协同建模。

2 管路-卡箍系统协同优化方法

在管路动力学分析中,识别危险频率是保障管路安全的核心前提。在振动环境下,危险频率 ω_i 对应的频段更易成为振动能量的“聚集区”,使管路长期承受超出设计阈值的交变载荷,引发管路结构疲劳、接头松动泄漏、结构断裂等风险。本文优化方法融合管形几何参数(弧面敷设角度 φ 、各构造点 Z 轴偏移量)和卡箍位置参数(位置插值因子 t_i),形成“管形-卡箍”参数联动的协同优化机制。该机制通过多参数协同调整,既保证管形布局在避障约束下的合理性,又通过卡箍位置的同步优化实现局部刚度的精准调控,从而协同避开危险频段。同时,将无特定目标的可行性调频优化问题与辅助目标函数相结合,形成协同优化闭环,使优化解能在复杂动力学环境中兼顾整体布局合理性与局部约束有效性。

2.1 优化约束设置

为实现共振频段的有效错开,可依据扫频获取的频带数据精准分析其共振频带带宽,进而科学设置频率禁带。

航空发动机的主要振源往往在特征频率附近存

在一定的能量带宽,而非单一谱线。结合本课题组前期对各发动机的振动实测数据,特征频率附近的显著振动能量通常分布在 $\pm(40 \sim 60)$ Hz 范围内。因此,本研究取禁带宽度为 50 Hz,以覆盖该典型波动区间,确保管路在实际运行中能有效避开共振风险。如图4所示,本文认定激励频率 ω_i 的 ± 50 Hz 为频率禁带宽,即认为当结构的第 n 阶固有频率 ω_n 落在频率禁带 $(\omega_i - 50) \leq \omega_n \leq (\omega_i + 50)$ 时,结构有较高的共振风险。

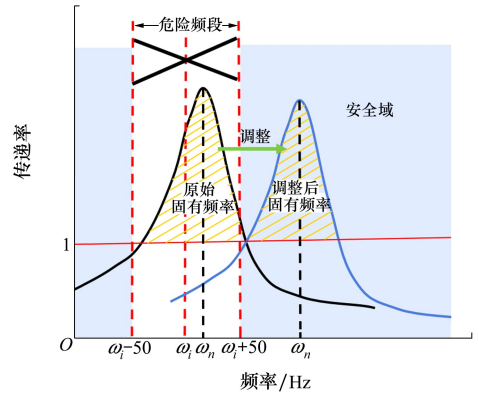


图4 调频原则

分别调节管形布局与卡箍位置参数以调整结构的刚度矩阵与质量矩阵,将原本落在频率禁带的 ω_n 调整为 ω'_n 以达到避开危险共振带的目的。需要注意的是,刚度与质量变化后一定会导致结构的全部固有频率发生变化,所以优化约束应保证全面,避免原先不在频率禁带的固有频率落入其中。一般地,假设危险共振频率为 ω_i ,若某 n 阶固有频率 ω_n 优化前满足

$$\omega_n \in [\omega_i - 50, \omega_i + 50]$$

则优化约束一般为

$$\omega_n < \omega_i - 50, \omega_{n+1} > \omega_i + 50$$

或

$$\omega_{n-1} < \omega_i - 50, \omega_n > \omega_i + 50$$

综上,本文协同优化问题的一般公式为

$$\omega_n \notin [\omega_i - 50, \omega_i + 50], \forall n = 1, 2, \dots \quad (8)$$

2.2 可行性问题转化

仅有上述优化约束的情况下,在进行优化计算时有着非常多的限制,无法确定算法何时停止,亦无法证明解的质量,故提出将无目标可行性问题转化为动力学多目标优化问题。

相比于不采用目标函数的无目标搜索方法,使

用精心设计的辅助目标函数能显著提高优化算法找到符合期望解的能力和效率,该目标函数可以为优化找到方向。对于本文的结构动力学优化问题,核心目标是让结构在特定“禁带”频率范围内的动态响应(如应力幅值、位移幅值、加速度幅值等)尽可能小,故定义多个互补或权衡的辅助目标。

为构建精准的辅助目标函数,需分场景开展优化设计。引入随机振动测试场景,可增强优化解的工程适用性;对弧面管路施加符合实际工况的随机振动谱,通过结构参数优化使管路在随机振动环境下的应力幅值 s 与变形幅值 d_1 达到最小化目标。另外,在危险(共振)频率工况下,对结构施加 1 mm 的正弦位移激励,并以管路的位移幅值 d_2 最小化为优化指标。这一过程本质上是调频优化的协同体现:当系统经协同优化后,其固有频率成功避开危险频带时,共振现象得到抑制,管路在危险频率激励下的位移幅值 d_2 自然会显著降低。综上,该多目标问题表达式为

$$\min g_1(x) = s;$$
$$\min g_2(x) = d_1;$$
$$\min g_3(x) = d_2;$$
$$\text{st. } \omega_n \notin [\omega_i - 50, \omega_i + 50], \forall n = 1, 2, \dots$$

(9)

3 试验验证

本试验模型针对一根弧面复杂管路展开研究。如图 5 所示,该模型将管形布局的 8 个参数与 3 个卡箍的位置插值因子 t_1, t_2, t_3 作为优化变量,通过算法迭代实现参数协同优化,最终实现对管路共振频带的精准调控,进而验证多目标优化方法的合理性与有效性。

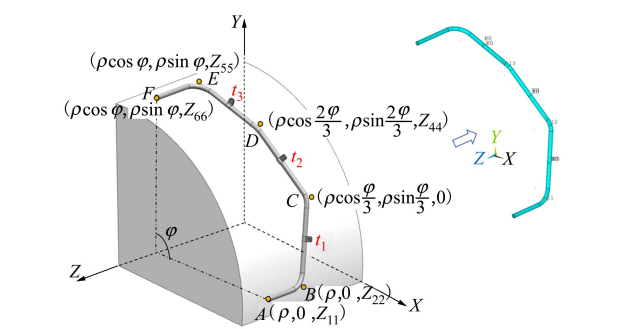


图 5 三卡箍管路优化前模型图

表 1 为优化前管路-卡箍的各参数初始尺寸及其优化上、下限,其中优化上、下限根据实际管路布局空间的可设计域决定。

表 1 不规则管路优化前初始值及设计域

布局参数	初始值	设计下限	设计上限
$\varphi/(^{\circ})$	81	70	90
Z_{11}/mm	200	160	210
Z_{22}/mm	30	0	40
Z_{44}/mm	70	0	90
Z_{55}/mm	40	0	70
Z_{66}/mm	200	160	210
t_1	0.5	0	1
t_2	0.5	0	1
t_3	0.5	0	1

图 6 为根据表 1 管路初始值尺寸搭建的试验平台,经扫频验证弧面铝合金夹具基频大于 2 000 Hz,远大于管路考察固有频率范围,不会影响管路-卡箍系统的扫频结果。

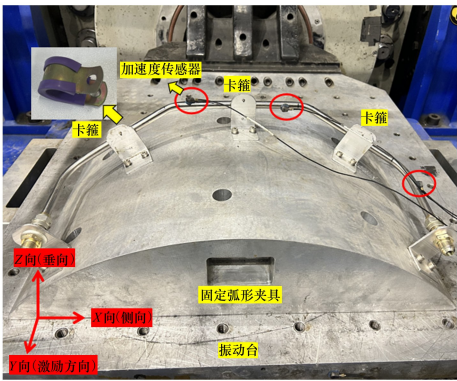


图 6 试验台示意图

使用模态试验结合遗传算法的方法对卡箍的三方向线刚度进行动刚度识别^[22],本试验所使用的卡箍 X 方向动刚度约为 5 293 N/m, Y 方向动刚度约为 $9.772\ 1 \times 10^5$ N/m, Z 方向动刚度约为 $9.536\ 9 \times 10^5$ N/m,利用该动刚度进行卡箍弹簧单元的定义。

在得到卡箍动刚度的基础上对试验管路进行模态仿真,对比振型后确认其各阶固有频率,如表 2 所示。

表 2 不规则管型优化前试验及仿真结果

模态	固有频率/Hz		随机振动(仿真)		
	试验	仿真	阻尼比	应力幅值	变形幅值
				s/MPa	d_1/mm
一阶	283.42	294.01	0.009		
二阶	549	532.74	0.012	5.456	1.61×10^{-2}
三阶	589	559.46	0.015		

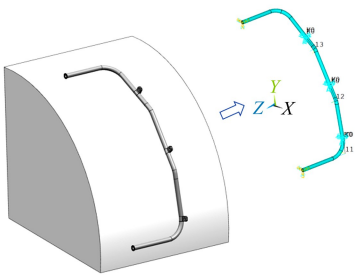


图 8 优化后管路模型

假设外界激励频率为 540 Hz,则第 2,3 阶固有频率均位于危险频率带之内,则优化约束为 $\omega_2 \leq (540 - 50)\text{Hz} = 490\text{Hz}$; $\omega_3 \geq (540 + 50)\text{Hz} = 590\text{Hz}$ 。

为构造辅助目标函数,在模态分析仿真计算基础上进行随机振动仿真,得到其轴向应力幅值 s 与变形幅值 d_1 如表 2 所示。同时,进行共振仿真(频率为 540 Hz,基础位移为 1 mm),计算得管路上某节点位移响应幅值的位移幅值 d_2 约为 3.12 mm,结果如图 7 所示,则优化目标设置为随机振动下的应力幅值 s 与变形幅值 d_1 最小化、共振工况下 d_2 最小化。

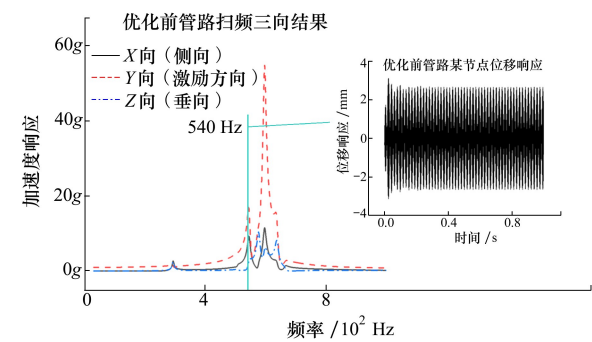


图 7 优化前扫频共振结果

使用上文所述方法进行建模并使用遗传算法进行多目标优化,由于本实例使用了多个目标函数,选用非支配排序遗传算法求解上述多目标优化问题。该算法在应对具有冲突目标、非线性约束的工程优化问题上表现稳健,适用于本文中管形与卡箍位置协同调优的场景。优化过程中设置终止准则为达到预设的最大迭代次数(500)。优化结果如图 8 及表 3 所示。

表 3 不规则管路优化结果

参数		优化值	参数		优化值
布局参数	$\varphi/(^{\circ})$	70.142	1 阶固有频率/Hz	260.06	
	Z_{11}/mm	161.38	2 阶固有频率/Hz	451.48	
	Z_{22}/mm	0.227 68	3 阶固有频率/Hz	642.89	
	Z_{44}/mm	1.357 60	随机振动		
	Z_{55}/mm	16.67	应力幅值/MPa	4.012 8	
	Z_{66}/mm	184.6	随机振动		
	t_1	0.055 70	变形幅值/mm	7.7×10^{-3}	
	t_2	0.073 60			
	t_3	0.012 28			

对优化后不规则管路进行扫频试验,结果如图 9 所示,在危险频率带 490~590 Hz 之内未出现明显共振。将该参数代回仿真模型中,同时对优化后模型施加相同共振频率(频率为 540 Hz,基础位移为 1 mm)激励,管路上相同节点位移响应幅值约 1.339 mm;以上结果均可说明该优化方法可靠且经得起试验验证。

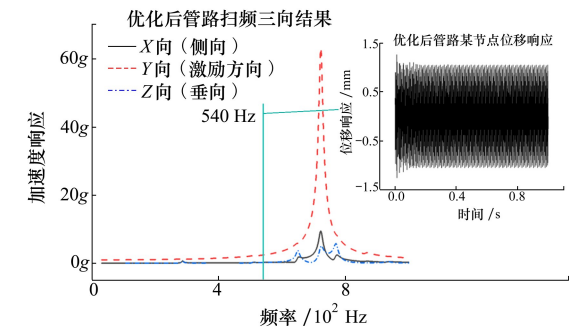


图 9 优化后扫频共振结果

4 基于概率分析的可靠性评估

为探究小范围参数离散化处理与装配精度的矛盾是否会使优化结果产生大幅度偏移,提出基于概率仿真的管路-卡箍可靠性分析方法。首先对优化生成的大量样本点进行后处理分析,利用 Spearman 相关系数识别各设计参数的灵敏度,再通过拉丁超立方抽样构建误差分布空间,结合蒙特卡洛模拟量化加工误差与卡箍定位误差的耦合传播效应,最终将原始优化数据转换为具有统计显著性的适用区间。在确保管路系统成功优化的前提下,为实际加工尺寸与装配位置提供可操作的参数容差范围。

4.1 各参数相关性研究

对于发动机机匣管路-卡箍系统的加工与装配,识别各输入参数与输出参数之间的相关性可以显著降低加工成本及装配卡箍时间。本文利用 Spearman 相关系数进行参数相关性计算。Spearman 相关系数是一种非参数统计量,用于衡量 2 个变量之间的单调关系。其核心思想是将原始数据转换为秩次,通过计算秩次间的相关性来消除数据分布的影响,常用 ρ 表示。其中 $-1 \leq \rho \leq 1$, ρ 值越接近 ± 1 单调性越强, $\rho = 0$ 表示无单调关系。对发动机机匣管路-卡箍系统参数化模型进行局部灵敏度统计计算,其核心计算公式为

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

(10)

式中: d_i 表示设计参数(如角度 φ 、卡箍位置插值因子 t_i 等)与输出量(固有频率 f_i)的秩次差 $R_{X_i} - R_{Y_i}$, n 为样本量(本文样本量取 1 000)。本文以试验验证中优化后模型为例进行说明,如表 4 所示,给出优化解的误差浮动区间。

表 4 误差浮动区间

参数	优化值	误差下限	误差上限
$\varphi/(^{\circ})$	70.142	70	71
Z_{11}/mm	161.38	161	161.5
Z_{22}/mm	0.227 68	0.1	0.23
Z_{44}/mm	1.357 6	1.3	1.40
Z_{55}/mm	16.67	16	17
Z_{66}/mm	184.6	184	185
t_1	0.055 70	0.05	0.1
t_2	0.073 60	0.05	0.1
t_3	0.012 28	0.01	0.1

图 10 为各设计参数在该误差浮动区间内对结构第 2,3 阶危险固有频率相关性识别。

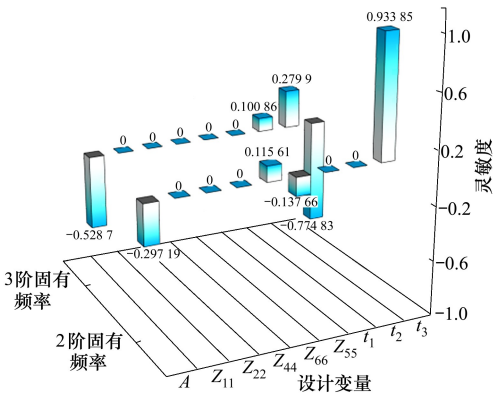


图 10 危险频率局部灵敏度分析

由图 10 可知,对于第 2,3 阶固有频率(危险频率)来说,卡箍位置 t_3 产生的影响最大。在第 2 阶频率中, ρ 约为 0.93,呈正相关,这意味着 t_3 局部偏小会直接导致第 2 阶固有频率偏小,使得该固有频率更易满足 $\omega_2 \leq (540 - 50) \text{ Hz} = 490 \text{ Hz}$ 的约束;对于第 3 阶固有频率来说, ρ 为 -0.77 ,这意味着 t_3 局部偏小会导致第 3 阶固有频率偏大,使得该阶固有频率更易满足 $\omega_3 \geq (540 + 50) \text{ Hz} = 590 \text{ Hz}$ 的约束。结合以上结果可得:卡箍位置 t_3 局部偏小有利于结构的动力学正向设计。

这一分析可以为工程误差容限设计提供直接依据。根据上述分析修改了卡箍位置 t_3 的误差浮动区间,形成容许误差空间,如表 5 所示。

表 5 容许误差空间

参数	优化值	误差下限	误差上限
$\varphi/(^{\circ})$	70.142	70	71
Z_{11}/mm	161.38	161	161.5
Z_{22}/mm	0.227 68	0.1	0.23
Z_{44}/mm	1.357 60	1.3	1.4
Z_{55}/mm	16.670 0	16	17
Z_{66}/mm	184.6	184	185
t_1	0.055 70	0.05	0.1
t_2	0.073 60	0.05	0.1
t_3	0.012 28	0	0.05

4.2 基于概率仿真的可靠性分析方法及验证

当样本容量足够大时,样本期望值将收敛于总

体期望值。这一统计特性为蒙特卡洛数值模拟方法提供了理论支撑,使其能够通过大规模样本抽样来确保失效概率估计值渐进逼近真实值。本文的管路-卡箍系统有限元模型通过参数化命令流构建,这一特点使得模型能够在较低的时间成本下高效生成大规模样本数据,因此本研究采用蒙特卡洛模拟方法进行系统可靠性概率分析。本文采用拉丁超立方抽样方法,其核心思想是对输入变量的概率分布进行等概率分层,并在每一层内实现均匀抽样,从而确保样本在多维空间中的投影分布均匀,显著提高样本的空间覆盖效率。对于每个输入变量 X_i ,将其定义域划分为 n 个区间 $[x_i^{(k-1)}, x_i^{(k)}]$,每层概率为 $1/n$,并在每层中生成 1 个随机位置。由于本文的输入参数为装配累积误差,适用于使用均匀分布进行求解,故 $X_i \sim U(a, b)$,即

$$x_i^{(k)} = a + \frac{k - u_k}{n}(b - a), u_k \in U(0, 1) \quad (11)$$

对每个输入变量独立生成 1 个随机排列 $\pi_i: \{1, 2, \dots, n\} \rightarrow \{1, 2, \dots, n\}$,确保各变量层序号的独立性。最后组成多维样本矩阵 $\mathbf{S} \in \mathbf{R}^{n \times d}$,其中第 j 行样本为

$$\mathbf{S}_j = (x_1^{(\pi_1(j))}, x_2^{(\pi_2(j))}, \dots, x_d^{(\pi_d(j))}) \quad (12)$$

基于表 5 容许误差区间进行分析,为后续的可靠性分析与优化设计提供更真实的输入条件,确保研究结果在实际应用中的适用性。利用拉丁超立方抽样方法将区间分割为 400 层,验证加工误差与卡箍定位误差耦合传播是否会使调频失败。抽样求解并进行最大、最小值搜索分析,得到结果如图 11 所示。

经过验证发现,在上述误差范围内 2 阶危险固有频率所在区间为 (442.1, 461.11) Hz; 3 阶危险固有频率所在区间为 (629.4, 649.44) Hz,均在危险频率带之外。同时,施加随机振动下管路应力幅值变化区间为 (3.41, 5.21) MPa,比优化前的 5.456 MPa

减小 4.5% ~ 37.5%,变形幅值变化区间为 $(6.8 \times 10^{-3}, 9.1 \times 10^{-3})$ mm,比优化前 1.61×10^{-2} mm 减小 43.47% ~ 57.76%,以上结果均可说明该优化方法可靠,形成了动力学优化设计闭环。

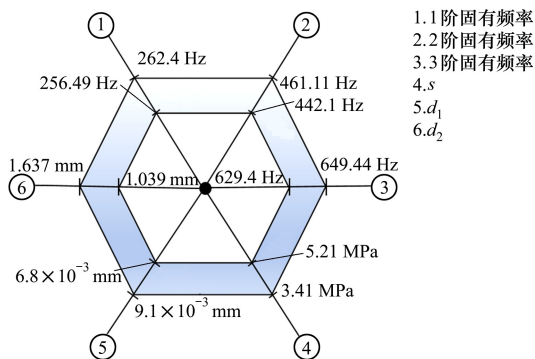


图 11 误差浮动蛛网图

5 结论

本文建立了复杂管系“管形布局-卡箍位置”建模与协同优化方法,得到的主要结论有:

1) 通过增量坐标法来描述管形弯折坐标点,并在局部管路上定义卡箍位置插值因子,实现了沿弧面敷设复杂管路时管形布局-卡箍位置的协同参数化建模。

2) 构建了以随机振动应力幅值、变形幅值及共振位移幅值最小化为目标的辅助目标函数,将原可行性调频问题转换为多目标优化问题。实现了管形布局和卡箍位置协同优化设计,优化后不但有效避开危险共振频带,第 2, 3 阶固有频率错频量分别达到 88.5 Hz 和 102.9 Hz;并且随机振动应力均方值降低 37.5%,共振位移幅值降低约 57.1%,有效提高了被设计管路的动力学性能。

3) 利用 Spearman 方法经概率分析识别各参数局部灵敏度,甄别出关键设计参数 t_3 ,并由此提出考虑管形弯折加工与卡箍装配误差的容许区间。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 陈艳秋, 朱铎根, 李琳. 金属橡胶用于航空发动机外部管路减振的实验研究[C]//中国航空学会第十届航空发动机结构强度与振动会议, 安徽, 2001: 397-399.

- CHEN Yanqiu, ZHU Xingen, LI Lin. Experimental study on the use of metal rubber for vibration damping of external pipelines of aero-engine[C]//Proceedings of the Tenth Conference on Strength and Vibration of Aero-Engine Structures, Anhui, 2001: 397-399. (in Chinese)
- [3] 刘伟, 张展. 90°弯管的三段弯曲式管形优化设计[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(1): 142-151.
- LIU Wei, ZHANG Zhan. Optimal design of a three-section-bending 90° elbow pipe[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(1): 142-151. (in Chinese)
- [4] ELISHAKOFF I, ELISSEFF P, GLEGG S A L. Nonprobabilistic, convex-theoretic modeling of scatter in material properties[J]. AIAA Journal, 1994, 32(4): 843-849.
- [5] BEN-HAIM Y, ELISHAKOFF I. Convex models of uncertainty in applied mechanics[M]. New York: Elsevier, 2013.
- [6] JONES D R, SCHONLAU M, WELCH W J. Efficient global optimization of expensive black-box functions[J]. Journal of Global Optimization, 1998, 13: 455-492.
- [7] 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.
- [8] HANSSON P A, SANDBERG G. Dynamic finite element analysis of fluid-filled pipes[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190(24/25): 3111-3120.
- [9] 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.
- [10] GAO Z, WANG D, SUN W, et al. Establishment of a dynamic finite element model of an L-type pipeline system and optimization of hoop supporting position based on the genetic algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(16): 149-157.
- [11] 吕尚, 孙伟, 季文豪, 等. 基于卡箍位置灵敏度分析的空间管路系统避振优化[J]. 振动与冲击, 2024, 43(17): 110-122.
- LYU Shang, SUN Wei, JI Wenhao, et al. Vibration avoidance optimization of spatial pipeline system based on clamp position sensitivity analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(17): 110-122. (in Chinese)
- [12] 於为刚, 赵正大, 陈果, 等. 一种管道卡箍位置自动优化方法[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(1): 29-33.
- YU Weigang, ZHAO Zhengda, CHEN Guo, et al. An automatic optimization method of pipeline clamp positions[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(1): 29-33. (in Chinese)
- [13] LIU X, 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, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(9): 1524-1538.
- [14] BICHON B J, ELDRED M S, SWILER L P, et al. Efficient global reliability analysis for nonlinear implicit performance functions[J]. AIAA Journal, 2008, 46(10): 2459-2468.
- [15] ECHARD B, GAYTON N, LEMAIRE M. AK-MCS: an active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo simulation[J]. Structural Safety, 2011, 33(2): 145-154.
- [16] 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.
- [17] 胡兆樑. 航空发动机管路卡箍布局优化及可靠性分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- HU Zhaoliang. Optimization and reliability analysis of aircraft engine line clamp layout[D]. Shenyang: Northeastern University, 2022. (in Chinese)
- [18] 王文双, 杨远松, 刘海洋, 等. 基于IABC-GA的管路协同机舱设备布局优化方法研究[J]. 大连理工大学学报, 2025, 65(1): 67-78.
- WANG Wenshuang, YANG Yuansong, LIU Haiyang, et al. Research on optimization method of pipeline collaborative engine room equipment layout based on IABC-GA[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2025, 65(1): 67-78. (in Chinese)
- [19] 沈兴铿, 徐鹤鸣, 刘伟, 等. P型橡胶卡箍的拉压疲劳性能测试和寿命预测[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(3): 494-503.
- SHEN Xingkeng, XU Heming, LIU Wei, et al. Tension-compression fatigue performance testing and fatigue life prediction of P-type rubber clamp[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 56(3): 494-503. (in Chinese)
- [20] 周洪民, 沈兴铿, 刘伟, 等. 基于全局灵敏度分析的管路结构优化设计[J]. 力学季刊, 2024, 45(4): 941-952.

- ZHOU Hongmin, SHEN Xingkeng, LIU Wei, et al. Optimization design of pipeline structure based on global sensitivity analysis [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2024, 45(4): 941-952. (in Chinese)
- [21] 刘伟, 朱宏彦, 赵玉杰, 等. 发动机机匣弧面不规则管路的布局参数多目标优化设计[J]. 航空动力学报, 2021, 36(1): 148-156.
- LIU Wei, ZHU Hongyan, ZHAO Yujie, et al. Multi-objective optimization design of layouts parameters for irregular pipeline on engine case[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(1): 148-156. (in Chinese)
- [22] 刘伟, 朱宏彦, 吕朋葵, 等. 金属橡胶卡箍的线刚度与角刚度的动力学辨识方法[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(9): 1636-1644.
- LIU Wei, ZHU Hongyan, LYU Pengzhen, et al. Dynamic identification method for linear stiffness and angular stiffness of metal rubber clamp[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44(9): 1636-1644. (in Chinese)

A modeling and collaborative optimization method for pipe shape layout and clamp position in complex piping system

JIN Ze'an, SHI Wenhao, LIU Zhiquan, LIU Wei, YUE Zhufeng

(School of Mechanics and Transportation Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In the design and failure analysis of a complex multi-clamp piping system in an aero-engine, it is difficult to determine the influence of layout dimension on its structural dynamic characteristics and to rapidly identify its key layout parameters, leading to high blindness and low efficiency. Based on the pipe layout method for a complex piping system, this study proposes a clamp position parameterization method to enable the simultaneous modeling and collaborative optimization of various pipe shapes and clamp layouts. Experiments are conducted to validate the method before and after optimization. First, the inter-point parameterized line segment interpolation method is adopted to define clamp positions, thus allowing the simultaneous transformation of various pipe shapes and clamp positions. Second, the original feasibility problem is transformed into a multi-objective optimization one suitable for dynamic structural analysis. Numerical instances validate the feasibility of this method, with the piping system's dynamic performances significantly improved. Finally, the Spearman correlation coefficient is employed to identify the local sensitivity of each parameter. The hypercube sampling Monte Carlo method is used to convert raw optimization data into statistically significant engineering applicable intervals, realizing the engineering application of the collaborative optimization method.

Keywords: parameterisation; clamps position; sensitivity; multi-objective optimisation; kinetic performance

引用格式: 金则安, 史文昊, 刘智泉, 等. 复杂管系“管形布局-卡箍位置”建模与协同优化方法[J]. 西北工业大学学报, 2026, 44(2): 307-316.

JIN Ze'an, SHI Wenhao, LIU Zhiquan, et al. A modeling and collaborative optimization method for pipe shape layout and clamp position in complex piping system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2026, 44(2): 307-316. (in Chinese)