

发动机机匣弧面不规则管路的布局参数多目标优化设计

刘 伟, 朱宏彦, 赵玉杰, 岳珠峰
(西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710129)

摘 要: 管路布局优化是降低发动机管路振动应力的重要手段,提出了一种发动机机匣弧面上不规则管路布局参数的多目标优化设计方法。从发动机机匣弧面的 U 形管路出发,建立了具有复杂布局走向的不规则单管路的参数化建模方法。分析了布局参数对管路的危险固有频率、多点激励响应的灵敏度。综合考虑错频和最大响应等多个目标,采用多目标遗传优化算法,对不规则管路的布局参数实施了优化设计。结果表明:管形布局优化设计效果显著,错开了两个危险固有频率禁带;管路结构在相同激励下最大位移幅值下降约 35%,最大应力幅值下降近 50%,为发动机管路的振动控制和动力学正向设计提供了参考。

关 键 词: 发动机管路; 布局参数; 灵敏度; 频率禁带; 多点激励; 振动控制

中图分类号: V23 **文献标志码:** A

Multi-objective optimization design of layouts parameters for irregular pipeline on engine case

LIU Wei, ZHU Hongyan, ZHAO Yujie, YUE Zhufeng
(School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: Optimization design of pipeline layout is an important means to reduce the vibration stress of engine pipeline. The multi-objective optimization design process and method for the layout parameters of the irregular pipeline were proposed. Based on the U-shaped pipeline with curved surface of engine case, a parameterized modeling method of an irregular pipeline with complex layout was established. The sensitivities of layout parameters to the dangerous natural frequencies and multi-point excitation response of the pipeline, such as the resonance frequencies, the maximum displacement and stress amplitude under multi-point excitation, were analyzed. In view of the constraints of multi-frequency and vibration responses, the method of multi-objective genetic algorithm was adopted to realize the optimal design of layout parameters of irregular pipeline. The results showed that the optimization of layouts was effective, two forbidden bands of dangerous natural frequencies were staggered. Under the same excitation, the maximum displacement amplitude of pipeline structure decreased about 35%, and the maximum stress amplitude decreased nearly 50%. It can provide a reference for the vibration controlling and dynamic forward design system of engine pipeline.

收稿日期:2020-06-25

基金项目:国家自然科学基金(51875460); 航空基金(2018ZB53016); 西北工业大学研究生种子基金(CX2020113)

作者简介:刘伟(1981—),男,副教授,博士,主要从事飞行器管路系统动力学研究。

引用格式: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.

Key words: engine pipeline; layout parameters; sensitivity; multi-frequency constraints; multi-point excitation; vibration controlling

管路系统是液压、燃油等介质的传输通道,犹如航空发动机的“血管”。在恶劣的开车振动环境中,管路经常发生振动疲劳失效,严重制约了发动机的寿命及其可靠性^[1-6]。研究表明合理的管形布局能够实现调频和降低应力^[7-13],但是由于发动机各种不规则管路结构形式复杂,难以提前确定各个布局尺寸对管路振动响应的影响。目前发动机管形布局设计仍然有较大的经验性,给管路系统的振动失效埋下了隐患。因此,建立发动机管路的管形布局优化方法来错开共振频带和降低振动应力,对提高其疲劳寿命具有重要的意义。

敷设布局设计一直是航空发动机管路系统研究的重要内容。近几年很多学者提出了新的智能优化算法。陈艳秋等^[14]以调频和振动幅值最小为优化目标,采用了遗传算法对航空发动机外部管路的支承参数包括支承位置、个数和刚度进行优化设计。Ren 等^[15]提出了一种航空发动机曲面空间表示方法和空间分割方法,改进了遗传算法的起始策略和方向准则。赵柏莹等^[16]提出一种基于工程规则的管路自动布局与模拟退火算法相结合的综合优化方法。柳强等^[17]针对航空发动机分支管路多目标敷设问题,以分支管路长度最小化、分支点数量最小化以及管路平滑度最优为优化目标,研究了基于避障 Steiner 树的分支管路多目标布局设计方法。Qu 等^[18]提出了一种新的三维连接图,采用并行搜索策略和动态更新机制解决直-支管路的路径优化问题。张禹等^[19]提出一种填充-包围式航空发动机布局空间信息提取方法。于嘉鹏等^[20]以管路长度和压力损失作为优化目标,提出一种基于自适应天牛须搜索算法的管路自动布局方法。这些方法极大地丰富了发动机管路的自动优化敷设设计手段。但是已有的研究中,布局优化大多针对敷设路径的主动避障和最短寻径,没有涉及管路本身的动力学特性,造成管路的振动失效问题难以获得有效改善。一旦发生振动失效后,也难以准确定位源头关键尺寸参数和指导改进。因此,在敷设布局设计的基础上,需要进一步将管路布局参数与动力学影响联系起来,对布局参数进行细节优化设计,以获得符合动力学性能要求的最终管形结构。

本文建立了发动机弧面不规则管路的参数化建模方法,分析了不同布局参数对管路结构的动

态特性和多点激励下振动响应的灵敏度,以多频带错频和降低最大振动响应为设计目标,给出了管形布局参数的优化设计方案。本文方法为航空发动机管路的动力学正向设计提供了参考。

1 发动机机匣弧面管路的参数化建模方法

1.1 U 形管路

研究布局参数对管路结构动态性能的影响,需首先对管形结构的几何布局进行参数化建模,它是后续灵敏度分析和优化设计的基础。这里以一段 U 形管路为例,演示发动机弧面上管路的参数化建模方法。

如图 1 所示,发动机机匣弧面可以视为一个圆柱坐标系,一段 U 形管路沿着机匣弧面敷设,假设管路的两个直线平行段沿着柱高方向。实际工程中弧形管路由于约束的需要,常采用多段弯折的加工方式,U 形管路中弧形弯管 BE 段分解成 n 个直线段的组合来代替,例如图 1 中 $n=3$,这样弧形弯管 BE 段转变为三段直线管路 BC、CD 和 DE。

如图 1 所示的直角坐标系 $Oxyz$ 中,U 形管沿路的所有弯折点分别以字母 A~F 来表示,其位置的直角坐标可以表示为 $\rho, \varphi, n, h_A, h_F$ 五个参

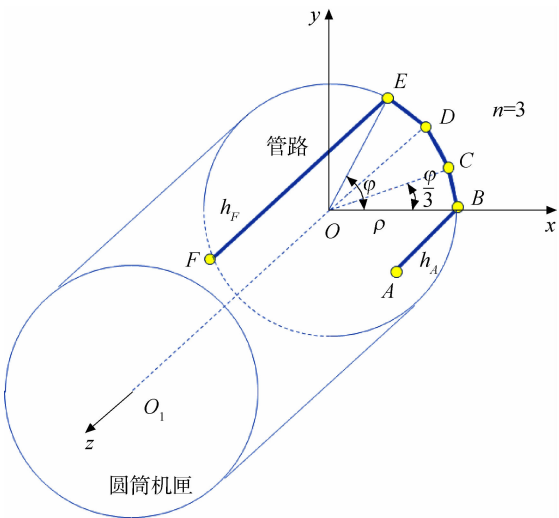


图 1 发动机圆筒机匣外部敷设一段 U 形管路简化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a U-shaped pipeline laid outside the cylinder engine case

数的函数,如式(1)所示。表 1 中列出了这五个参数的几何意义。

$A: (\rho, 0, h_A)$

$B: (\rho, 0, 0)$

$C: \left(\rho \cos \frac{\varphi}{3}, \rho \sin \frac{\varphi}{3}, 0\right)$

$D: \left(\rho \cos \frac{2\varphi}{3}, \rho \sin \frac{2\varphi}{3}, 0\right)$

$E: (\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, 0)$

$F: (\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, h_F)$

(1)

确定了所有弯折点的直角坐标后,就可以借助于商用软件(UG 等),采用上述参数化方法来实施管路的建模。流程如图 2 所示,首先在软件中定义表 1 中的五个变量并赋初值,根据机匣半径给出其上管路的柱坐标。然后,用式(1)函数给出管线沿途各个弯折点的直角坐标。再次,将各个弯折点坐标按走向顺序依次连接,即可完成管线的中线折线图。最后在每段折线之间定义过渡圆角半径 R_{bl} (一般手册要求为 $R_{bl}=4D$, D 为管路外径),就获得了最终的机匣弧面上的一段 U 形管路。

表 1 U 形管路参数化建模的五个参数及其几何意义
Table 1 Five parameters and their geometric meanings of parameterized modeling of U-shaped pipeline

参数	几何意义
ρ	弧面弯曲半径,即管路沿着机匣圆弧面敷设半径,一般情况下该半径应设置为: $\rho=r_c+r_g+r_p$,其中 r_c 为机匣半径, r_g 为管路与机匣间的间隙要求, r_p 为管路半径
φ	弧面弯曲角度,即导管沿着机匣弧面布局时所经过的圆截面角度 n 为圆截面角度“以直代曲”的分割段数。即用 n 段直线段管路来代替机匣弧面曲线管路。它的取值与 φ 相关,若以 $20^\circ\sim 30^\circ$ 做一次弯折,这里取 $n=\left[\frac{\varphi}{25}\right]$,符号 $[\]$ 表示取整。
h_A	U 形管路平行直线段的长度
h_F	U 形管路另一条平行直线段的长度

表 2 展示了用上述方法完成的三种 U 形管路几何模型。表中采用了不同机匣半径、管径以及布局参数值。可见,该方法能够完成发动机机匣弧面的 U 形导管敷设布局参数化建模。

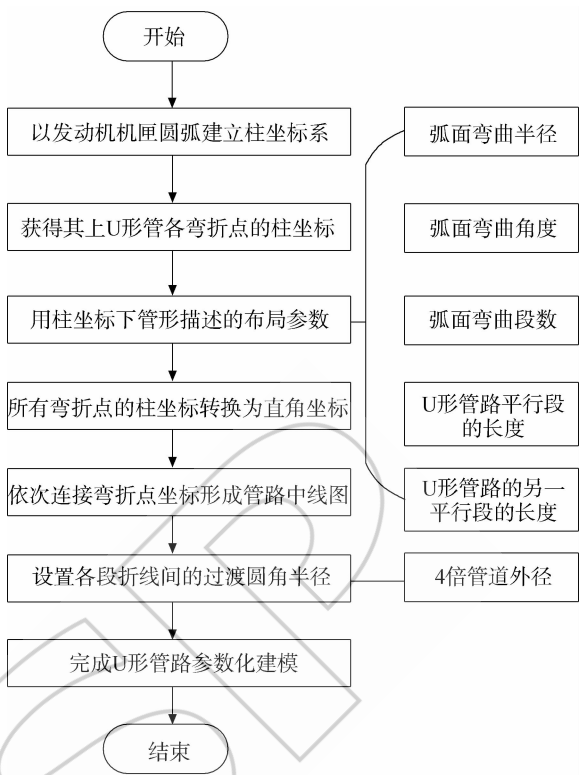


图 2 发动机机匣弧面上 U 形管路的参数化建模流程图
Fig. 2 Flowchart of parameterized modeling of a U-shaped pipeline on engine case

表 2 不同布局参数的 U 形管路模型示例
Table 2 Examples of U-shaped pipeline models with different layout parameters

管路	布局参数赋值	实际管形图
1	$\rho=r_c+r_g+r_p$, 其中 $r_c=400\text{ mm}, r_g=10\text{ mm}, r_p=6\text{ mm}$	
	$\varphi=81, (n=3)$	
	$h_A=150\text{ mm}, h_F=150\text{ mm}$	
	$R_{bl}=4D=4\times 12=48\text{ mm}$	
2	$\rho=r_c+r_g+r_p$, 其中 $r_c=600\text{ mm}, r_g=10\text{ mm}, r_p=8\text{ mm}$	
	$\varphi=45, (n=2)$	
	$h_A=200\text{ mm}, h_F=100\text{ mm}$	
	$R_{bl}=4D=4\times 16=64\text{ mm}$	
3	$\rho=r_c+r_g+r_p$, 其中 $r_c=300\text{ mm}, r_g=8\text{ mm}, r_p=4\text{ mm}$	
	$\varphi=145, (n=5)$	
	$h_A=50\text{ mm}, h_F=120\text{ mm}$	
	$R_{bl}=4D=4\times 8=32\text{ mm}$	

1.2 L 形或 Z 形管路

发动机管路布局中还有其他典型的管形布局,例如 L 形和 Z 形。它们无需重新建模,均可以在上述 U 形管路基础上做一些变化得到。其中,L 形即为减去 U 形管路的某一条平行边而获得,例如减去图 1 中 U 形管路的 EF 段,即能够得到 L 形管路,如图 3(a)所示。Z 形管路可以将 U 形管路的一条平行边反方向延伸而获得,例如将图 1 中 EF 段的 z 方向改为 $-z$ 方向,得到的沿着机匣弧面布置的 Z 形管路,如图 3(b)所示。

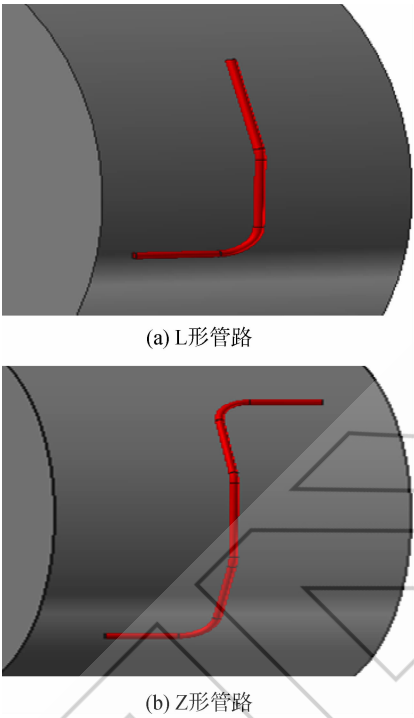
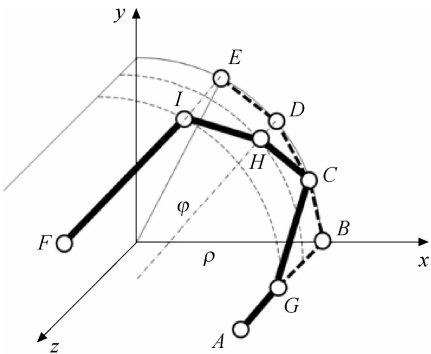


图 3 L 形、Z 形管路可以在 U 形管路基础上变化得到
Fig. 3 L-shaped pipeline,Z-shaped pipeline can be derived from U-shaped pipeline

1.3 不规则管路

更加复杂走向的管形布局形式,也可以从图 1 提出的 U 形管路基础上进行其他的变化得到。如图 4(a)所示一段不规则管路,需要在图 1 中的 U 形管路 $A\sim F$ 各个弯折点坐标的基础上,再增加 G,H,I 点。这三点的坐标可以通过 B,D,E 点分别沿 z 轴方向平移一个距离 BG,DH,EI 得到,此时在原有布局参数的基础上再增加了三个布局参数为: L_{BG},L_{DH},L_{EI} 。在管线坐标连接步骤中,直接用 G,H,I 点的坐标替换原来 B,D,E 三点的坐标即可,从而得到不规则布局的管路模型如图 4(b)所示,其他更加复杂的不规则单管路的建模方法与之类似,增加布局参数即可。



(a) 不规则管路布局参数示意图



(b) 不规则管路

图 4 不规则管路可以在 U 形管路基础上变化得到
Fig. 4 Irregular pipeline can be derived from U-shaped pipeline

综上所述,采用本文提出的参数化方法,成功实现了发动机弧面上不规则管路的参数化建模,相比于传统的软件直接建模,其优势在于采用若干布局参数来描述管路的所有弯折尺寸和位置等几何特征,为下文不规则管路的布局参数灵敏度讨论和优化设计铺平了道路。

2 布局参数的对不同动力学指标的灵敏度分析

2.1 布局参数的灵敏度

灵敏度分析方法提供了多个布局参数之间重要程度的横向对比,以帮助甄别出主要参数,具有指导布局参数调整和减少优化设计变量的作用。以图 4 所示的发动机机匣弧面上的不规则管路为例,所谓布局参数的灵敏度即为六个布局参数 $[\varphi \ h_A \ h_F \ L_{BG} \ L_{DH} \ L_{EI}]^T$ 对动力学输出量 y 的敏感程度。对于发动机管路结构而言,需要重点考察共振隐患和最大应力。所以本文的动力学输出量 y 选取为管路结构的危险固有频率 ω_{di} (其中 $i=1,2,\dots$,表示危险固有频率的个数)以及结构在多点激励下的最大位移响应幅值 A_s 和应力响应幅值 σ_m 。所谓的危险固有频率即为接近发动机某一激励频率 ω_{ej} (其中 $j=$

1, 2, ⋯, 表示激励频率的个数)。

2.2 管路危险固有频率的灵敏度分析

假设某型航空发动机,重点考察管路结构受到的两个激振频率 $\omega_{ej}(j=1,2)$:①发动机旋转部件转动激励频率 $\omega_{e1}=160\text{ Hz}$;②液压泵的脉动激励频率 $\omega_{e2}=510\text{ Hz}$ 。分析布局参数对不规则管路结构落在共振域中的危险固有频率 ω_{di} 的敏感程度。

管路的材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,其弹性模量为 190 GPa,密度为 7 850 kg/m³,泊松比为 0.3。管路两端连接附件,假设为固定约束。管路的布局参数如表 3 所示,布局参数的值可以根据实际管路可行敷设的空间和位置在一定范围内做调整,这里用上限值和下限值来表征。

采用有限元仿真计算,初始布局参数下管路的固有频率列于表 4 中,可以看到,初始布局参数下管路的第三阶固有频率与发动机旋转件激励频

率 160 Hz 重合;第六阶固有频率与液压泵的脉动频率 510 Hz 重合;这两个固有频率存在很高的共振隐患,为危险固有频率,因此需要对该初始布局做优化设计。

图 5 为各个布局参数对这两个危险固有频率的灵敏度直方图,其中,导管沿着机匣弧面敷设时所经过的圆弧角度 φ 均为影响两个危险固有频率的主要布局参数,负值说明随着的 φ 增大固有频率将减小。不同的是,影响危险固有频率 ω_{d1} 的布局参数还有 h_F 、 L_{BG} 和 L_{EI} ,而影响危险固有频率 ω_{d2} 的主要布局参数仅为 L_{BG} 。可见管路布局参数对两个危险固有频率的灵敏度并不相同。

表 3 不规则管路布局参数的初始值及其取值范围
Table 3 Initial value and its range of layout parameters for irregular pipeline

布局参数	初始值	下限值	上限值
h_F/mm	300	120	330
$\varphi/(\text{^\circ})$	81	70	90
L_{DH}/mm	30	0	40
L_{BG}/mm	70	0	90
L_{EI}/mm	40	0	70
h_A/mm	180	160	210

表 4 不规则管路的固有频率仿真结果(初始布局参数)
Table 4 Natural frequency simulation results of irregular pipelines (initial layout parameters)

阶数	固有频率/Hz	是否存在共振隐患
1	70.968	否
2	135.02	较接近
3	159.49	是(接近发动机旋转件激励频率 160 Hz,定义 $\omega_{n3}=\omega_{d1}$)
4	247.66	否
5	338.84	否
6	511.03	是(接近液压泵的脉动频率 510 Hz,定义 $\omega_{n6}=\omega_{d2}$)
7	624.52	否
8	825.20	否

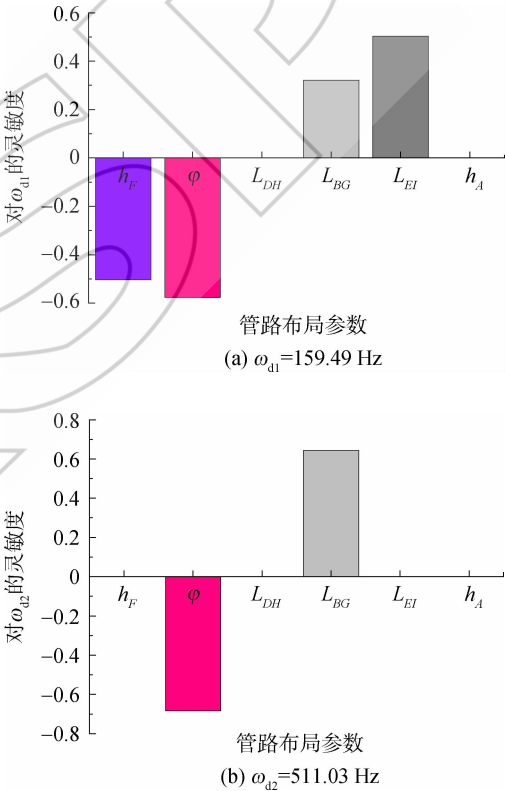


图 5 管路布局参数对两个危险固有频率的灵敏度直方图

Fig. 5 Sensitivity histograms of pipeline layout parameters to the two dangerous natural frequencies

2.3 管路多点激励响应的灵敏度分析

不规则管路模型中有 a、b 两个固定接头,如图 6(a)所示,发动机运行过程中,两个接口处的激励环境经常有所差异。这里采用多点响应谱来描述,所谓响应谱是系统在每一阶固有频率激励作用时的峰值响应,它与系统的固有频率和阻尼相关,响应类型可以是位移、速度或者加速度。为

了能够实现动响应预测,工程师通常会创建一个设计响应谱,这可以看作是发动机管路结构所在区域内所有已知和预计振动的包络,并将设计响应谱作为结构分析的实际激励输入。这里假设结构阻尼比为 0.02,管路 y 方向的频率-位移设计响应谱,如图 6(b)所示。

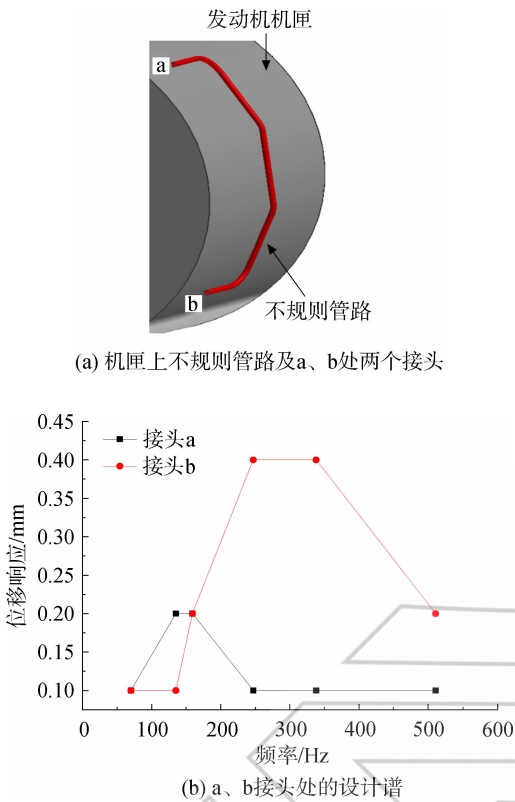


图 6 发动机管路固定端处的多点激励响应谱
Fig. 6 Multi-point excitation response spectrum at fixed end of engine pipeline

采用多点响应谱(MPRS)的方法,计算得到的该管路结构的最大位移幅值为 0.39642mm,出现在不规则管路的弧段的第一弯折处,如图 7(a)所示。图 7(b)为振动的等效应力响应云图,最大应力出现在管路的下约束点 B 端,为 74.824MPa,而且,从管道截面方向看去,为管截面下缘 90° 位置,该处为管道的振动疲劳裂纹的易发生位置。

分析布局参数对管路在多点激励下的最大位移和应力幅值的灵敏度,将不规则管路的布局参数视为设计域内的变量(参数变化范围同表 3),如图 8(a)和图 8(b)所示,影响位移和应力响应幅值的布局参数相同,主要为 φ 和 L_{EI} ,影响位移响应的次要参数为 h_A 和 h_F 。

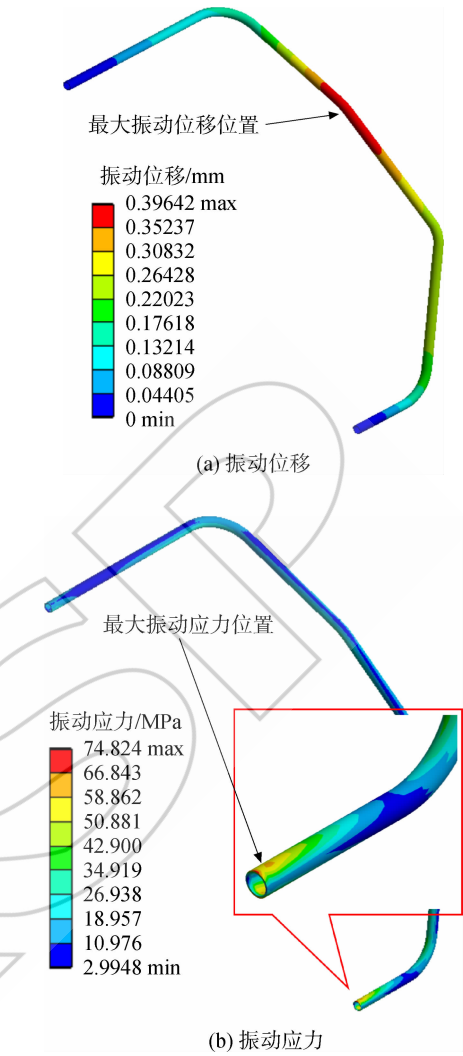
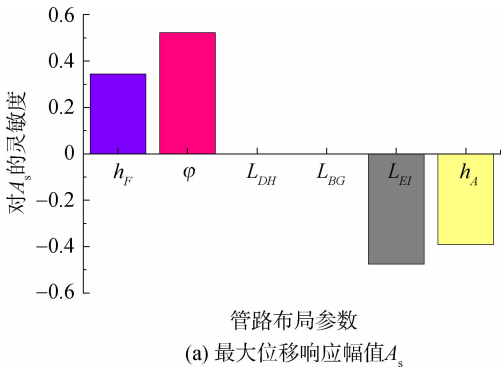


图 7 不规则管路在多点激励下的幅值响应云图
(初始布局参数)

Fig. 7 Amplitude response contours of irregular pipeline under multi-point excitation (the initial layout parameters)



(a) 最大位移响应幅值 A_s

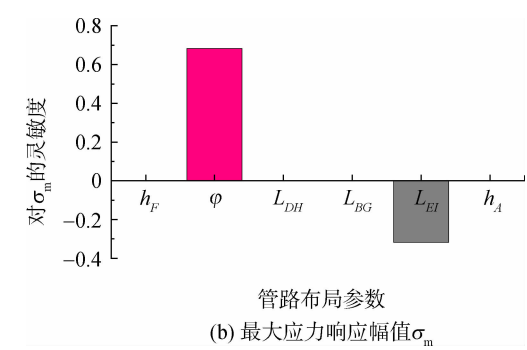


图 8 布局参数对管路在多点激励下最大响应幅值的灵敏度直方图

Fig. 8 Sensitivity histograms of layout parameters to the maximum response amplitude of pipeline under multi-point excitation

3 基于响应面法的管形布局参数多目标优化设计

管路的布局参数对不同目标的灵敏度特性并不一致,甚至有些参数对不同目标还呈现矛盾趋势。因此,对一段管路进行布局参数设计时不能顾此失彼,应该权衡多个目标,考虑多个参数对多个目标的不同影响规律,在此基础上获得能够满足多个指标的设计方案的管路布局优化方案。

3.1 优化目标

为了达到错开共振频段的要求,这里以 $\pm 50\text{ Hz}$ 为频率禁带宽,即认为当管路结构的某个危险固有频率 ω_{di} 落在频率禁带 $(\omega_{ej}-50)\leq\omega_{di}\leq(\omega_{ej}+50)$ 时,结构有较高的共振风险。

需要注意的是,管路布局参数优化后,由于结构尺寸的变化,不但原来落在危险频带内的固有频率会发生改变,还可能会导致临近阶数的固有频率也发生变化。例如本例中,分析管路结构的频率特性(表 4),第二阶、第三阶固有频率均落在频率禁带 1 内,因此需要整体提高管路系统的固有频率才能使第二阶、第三阶固有频率跳出该频率禁带。所以优化目标应定为:第一阶固有频率低于 $(160-50)\text{ Hz}$,第二阶固有频率应高于 $(160+50)\text{ Hz}$ 。同理,为了避开频率禁带 2,第五阶固有频率应低于 $(510-50)\text{ Hz}$,第六阶固有频率应高于 $(510+50)\text{ Hz}$,因此选取这四个频率作为优化目标,使它们各自错开两个危险共振频段。同时控制多点激励下的最大位移响应幅值 A_s 小于许用值 0.3 mm ,并以最小化管路在多点响应谱下的最大应力响应幅值 σ_m 为目标。综上,制定出管路系

统的多个优化目标为

$$\begin{cases} \omega_{n1} \leq (160-50)\text{ Hz} \\ \omega_{n2} \geq (160+50)\text{ Hz} \\ \omega_{n5} \leq (510-50)\text{ Hz} \\ \omega_{n6} \geq (510+50)\text{ Hz} \\ A_s \leq 0.3\text{ mm} \\ \min \sigma_m \end{cases} \quad (2)$$

3.2 多目标遗传优化算法

考虑到本例中布局参数和目标较多,且取值范围较大,输出量可能会存在复杂的非线性或者无规律变化,若采用响应面法需要较多的抽样点,且存在无法得到高精度响应面的风险。因此,本文采用多目标遗传算法(MOGA)对优化对象的六个布局参数进行直接寻优计算,获得推荐优化设计点。从参数化建模到最终管路多目标优化设计的完整流程如图 9 所示。

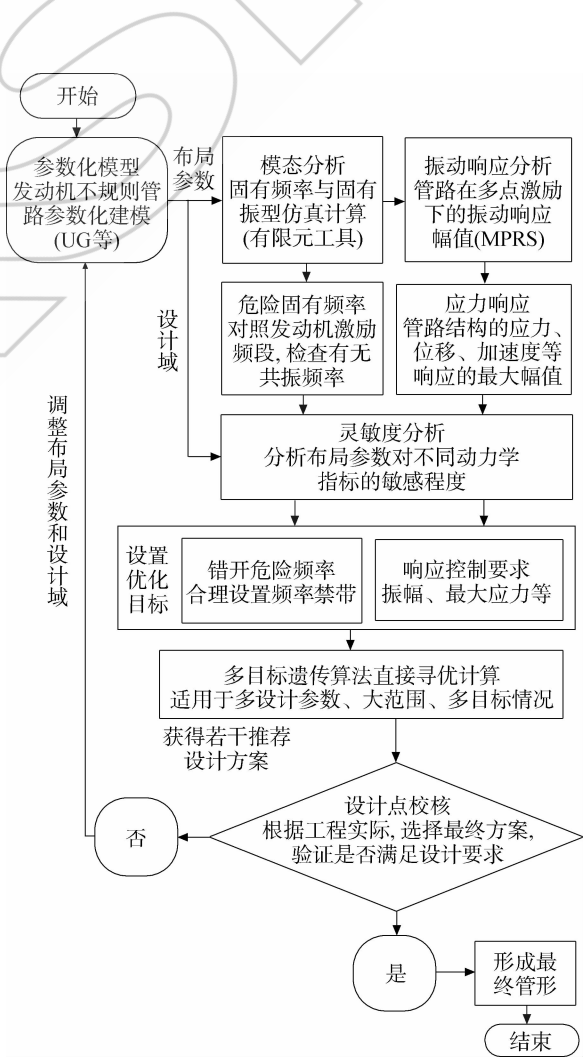


图 9 发动机管路布局参数多目标优化设计流程

Fig. 9 Multi-objective optimization design process of engine pipeline layout parameters

3.3 优化结果与分析

执行文中第 3.2 节的优化计算流程,大约实施了 550 次迭代计算后,所有目标均达到收敛条件,获得推荐设计点。一般来讲,符合目标要求的设计点可能有多组,这些方案下的目标结果非常接近,均满足设计要求。如表 5 所示,列出了三个推荐设计方案,对比优化前后的多个目标值,采用布局参数优化方法的设计效果非常显著,不但避开了发动机的多个共振频率,即布局优化后原来的危险共振固有频率已经消除。而且最大位移响应幅值 A_s 降至约 0.262 mm,较原设计下降约

35%,最大应力响应幅值 σ_m 降至 36.915 MPa,较原设计下降近 50%。

将上述三种方案下的布局参数的管路进行重新建模,再次计算其模态特性,以校核是否会出现新的危险共振频率。优化前后的管路的前七阶固有频率分布情况如图 10 所示,可以看到优化后的三种设计方案,所有固有频率均避开了 (160 ± 50) Hz(频率禁带 1)和 (510 ± 50) Hz(频率禁带 2)两个共振频带。至此验证了优化后的管形布局满足多个目标要求,管路的布局参数优化设计完成。

表 5 发动机不规则管路布局参数优化前后的结果对比
Table 5 Comparison of engine irregular pipeline layout parameters before and after optimization

参数		初值	数值		
			方案一	方案二	方案三
布局参数	h_F/mm	300.000	188.250	198.480	188.290
	$\varphi/({}^\circ)$	81.000	70.413	70.413	72.170
	L_{DH}/mm	70.000	31.805	31.800	39.074
	L_{BG}/mm	30.000	40.770	40.776	41.525
	L_{EI}/mm	40.000	46.064	56.920	40.456
	h_A/mm	180.000	206.530	205.300	202.810
设计目标	ω_1/Hz	159.000	105.660	104.140	104.650
	ω_2/Hz	247.000	212.660	210.650	210.500
	ω_5/Hz	511.000	450.660	451.280	433.900
	ω_6/Hz	624.000	608.700	612.010	576.230
	A_s/mm	0.210	0.257	0.259	0.262
	σ_m/MPa	55.240	36.915	37.185	37.529

4 结 论

本文建立了发动机不规则管路布局参数的多目标优化设计方法及其流程,为发动机管路的动力学正向设计提供了方法和思路。主要结论如下:

1) 从 U 形管路出发,定义合理的布局参数来描述具有复杂布局的管路的弯折尺寸和位置等几何特征,建立了发动机机匣弧面上不规则单管路的参数化建模方法。

2) 管路的布局参数对于固有频率、多点激励响应等不同的动力学目标量,其灵敏度及其影响趋势有所不同。需要针对具体动力学指标来甄别主要影响参数,并权衡其对不同目标的矛盾,以指导布局参数的调整并减少优化设计变量。

3) 管形布局参数的多目标优化设计效果显著,不但同时避开发动机多个频率禁带,而且最大

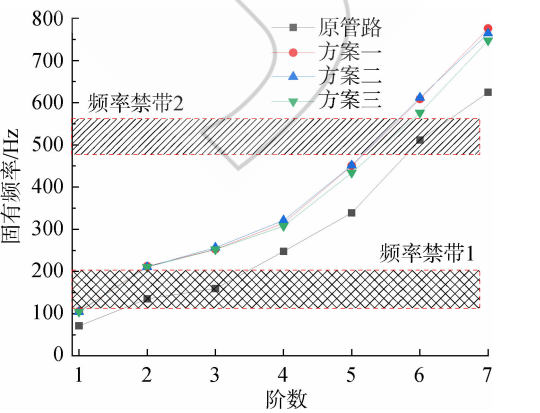


图 10 管路布局参数优化后所有固有频率均避开了两个频率禁带

Fig. 10 All of natural frequencies keep away from the two frequency bands after optimization of pipeline layout parameters

位移和最大应力也有大幅降低,表明采用该方法来实现发动机管路振动控制并提高管路的疲劳寿命是可行的。

参考文献:

- [1] 康力,洪杰,徐雷,等.航空发动机外部管路的振动响应分析[J].航空发动机,2015,41(2):50-54.
KANG Li,HONG Jie,XU Lei,et al. Vibration response analysis of aeroengine external pipelines[J]. Aeroengine, 2015,41(2):50-54. (in Chinese)
- [2] 张正.商用航空发动机管路的振动特性分析[D].上海:上海交通大学,2018.
ZHANG Zheng. Vibration characteristics analysis of commercial aircraft engine pipeline [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2018. (in Chinese)
- [3] 黄道琼,王振,杜大华,等.大推力液体火箭发动机中的动力学问题[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2019,49(2):23-34.
HUANG Daoqiong,WANG Zhen,DU Dahua,et al. Structural dynamics of the large thrust liquid rocket engines [J]. Scientia Sinica:Physica, Mechanica and Astronomica, 2019,49(2):23-34. (in Chinese)
- [4] 王国鹏,万利,周杨娜.航空发动机管路振动故障研究[C]//中国航空结构动力学专业组第十六届学术交流会论文集.中国振动工程学会:中国振动工程学会,2008:201-204.
- [5] 胡安辉,周立江,高伟.发动机燃油管断裂故障分析[J].失效分析与预防,2012,7(3):192-196.
HU Anhui,ZHOU Lijiang,GAO Wei. Failure analysis of fuel oil pipe in an areo-engine [J]. Failure Analysis and Prevention,2012,7(3):192-196. (in Chinese)
- [6] 李会娜,高庆,江雅婷,等.发动机长悬臂管路动力学特性优化及试验验证[J].航天器环境工程,2015,32(4):400-403.
LI Huina,GAO Qing,JIANG Yating,et al. Dynamics optimization and experimental validation of the long cantilever engine pipelines[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015,32(4):400-403. (in Chinese)
- [7] 陈志英,郑家祥,李建福.航空发动机空气管路应力优化设计[J].航空发动机,2018,44(4):1-7.
CHEN Zhiying,ZHENG Jiexiang,LI Jianfu. Optimization design method of aero-engine air duct system [J]. Aero-engine,2018,44(4):1-7. (in Chinese)
- [8] IBRAHIM R A. Overview of mechanics of pipes conveying fluids;Part I fundamental studies[J]. Journal of Pressure Vessel Technology,2010,132(3):034001.1-034001.32.
- [9] 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)
- [10] KHEIRI M,PAÏDOUSSIS M P,DEL POZO G C,et al. Dynamics of a pipe conveying fluid flexibly restrained at the ends [J]. Journal of Fluids and Structures,2014,49:360-385.
- [11] 李占营,王建军,邱明星.航空发动机空间管路系统的流固耦合振动特性[J].航空动力学报,2016,31(10):2346-2352.
LI Zhanying,WANG Jianjun, QIU Mingxing. Vibration control analysis for hydraulic pipelines in an aircraft based on optimized clamp layout[J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(10):2346-2352. (in Chinese)
- [12] 郭家良,王维,贾文强,等.航空发动机外部管路调频方法研究[J].航空发动机,2017,43(6):33-38.
GUO Jialiang,WANG Wei,JIA Wenqiang,et al. Investigation on frequency modulation methods of aeroengine external pipe[J]. Aeroengine,2017,43(6):33-38. (in Chinese)
- [13] HU Y J,ZHU W D. Vibration analysis of a fluid-conveying curved pipe with an arbitrary undeformed configuration[J]. Applied Mathematical Modelling,2018,64:624-642.
- [14] 陈艳秋,朱梓根.基于遗传算法的航空发动机管路优化设计[J].航空动力学报,2002,17(4):421-425.
CHEN Yanqiu,ZHU Zigen. Piping system design of aero-engine using genetic algorithms [J]. Journal of Aerospace Power,2002,17(4):421-425. (in Chinese)
- [15] REN T,ZHU Z L,DIMIROVSKI G M,et al. A new pipe routing method for aero-engines based on genetic algorithm[J]. Journal of Aerospace Engineering,2014,228(3):424-434.
- [16] 赵柏萱,刘检华,宁汝新,等.一种基于工程规则的管路自动布局与综合优化技术[J].机械工程学报,2015,51(21):121-131.
ZHAO Baixuan,LIU Jianhua,NING Ruxin,et al. An automatic pipe routing and optimization technology based on engineering constraints [J]. Journal of Mechanical Engineering,2015,51(21):121-131. (in Chinese)
- [17] 柳强,毛莉.基于MOPSO的航空发动机分支管路多目标布局优化[J].机械工程学报,2018,54(19):197-203.
LIU Qiang,MAO Li. Multi-objective layout optimization for branch pipe of aero-engine based on MOPSO [J]. Journal of Mechanical Engineering,2018,54(19):197-203. (in Chinese)
- [18] QU Y F,JIANG D,YANG Q Y. Branch pipe routing based on 3D connection graph and concurrent ant colony optimization algorithm [J]. Journal of Intelligent Manufacturing,2018,29(7):1647-1657.
- [19] 张禹,白晓兰.面向航空发动机管路智能布局的空间信息提取方法研究[J].机械设计与制造,2016(2):221-222,227.
ZHANG Yu,BAI Xiaolan. Research on the extraction of the information in the intelligent pipe-routing layout space for aero-engines [J]. Machinery Design and Manufacture, 2016(2):221-222,227. (in Chinese)
- [20] 于嘉鹏,袁鹤翔,杨永华,等.基于自适应天牛须算法的航空发动机管路布局优化[J].机械工程学报,2020,56(20):174-184.
YU Jiapeng,YUAN Hexiang,YANG Yonghua,et al. Aero-engine pipe layout optimization based on adaptive beetle anten-nae search algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering,2020,56(20):174-184. (in Chinese)