

基于有限测点信息的管路振动载荷识别方法研究

李淑芸¹, 高轩¹, 郑修鹏², 陈洪恩¹, 刘皓晨¹, 杨飒³, 陈晖³, 陈振茂¹

(1. 西安交通大学航天航空学院, 710049 西安; 2. 中国核电工程有限公司, 100840 北京;
3. 西安航天动力研究所, 710100 西安)

摘 要:提出和验证了基于有限测点信息对管路系统进行振动载荷参数识别的方法。开展了典型发动机管路振动正问题有限元建模,并对所建有限元模型的有效性进行了实验验证;基于奇异值分解算法、遗传算法和禁忌搜索算法,提出和验证了对管路系统未知振动载荷信息进行重构识别的方法,实现了基于仿真信号和振动测量信号的载荷重构。结果发现:基于最小二乘法和奇异值分解算法的载荷重构计算速度快但易受信号噪声的影响,而遗传算法和禁忌搜索算法具有更好的鲁棒性,针对仿真和实测振动信号均可实现振动载荷的有效重构。

关键词:奇异值分解法;遗传算法;禁忌搜索算法;载荷识别;管路振动

中图分类号:O327

文献标志码:A

文章编号:1000-4939(2025)05-1049-08

Identification method of pipeline vibration loads with limited measurement information

LI Shuyun¹, GAO Xuan¹, ZHENG Xiupeng², CHEN Hong'en¹, LIU Haochen¹, YANG Sa², CHEN Hui², CHEN Zhenmao¹

(1. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049 Xi'an, China; 2. China Nuclear Power Engineering Co. Ltd., 100840 Beijing, China; 3. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, 710100 Xi'an, China)

Abstract: In this paper, methods for identification of vibration load parameters of pipeline system based on information of limited measurement points are proposed and validated. We make finite element simulation modelling for the forward vibration analysis of typical rocket engine pipelines; experimental verification of the forward finite element numerical model, establishment of methods for identification of the unknown load parameters of the pipeline system based on the singular value decomposition, genetic algorithm and Tabu search optimization algorithm, and validation using simulated and measured vibration signals at limited points. The numerical results show that the load reconstruction based on the singular value decomposition method is fast, but is easily affected by signal noise, while the genetic algorithm and the Tabu search algorithm have better robustness and can reconstruct the load parameters efficiently for both the simulated and measured vibration signals.

Key words: singular value decomposition; genetic algorithm; Tabu search; load identification; pipeline vibration

收稿日期:2023-07-12

通信作者:陈振茂,教授。E-mail:chenzm@mail.xjtu.edu.cn

引用格式:李淑芸,高轩,郑修鹏,等. 基于有限测点信息的管路振动载荷识别方法研究[J]. 应用力学学报, 2025, 42(5): 1049-1056.

LI Shuyun, GAO Xuan, ZHENG Xiupeng, et al. Identification method of pipeline vibration loads with limited measurement information[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(5): 1049-1056.

投稿网站: <https://ejam.xjtu.edu.cn> 微信公众号:应用力学学报

管路系统被称为液体火箭发动机的血管,是保证发动机可靠工作的关键部件之一。发动机管路系统空间结构和振动载荷复杂^[1-3],且工作时处于高压、大温差、高过载等恶劣工况,因此由振动引起的故障问题是重要关注课题。过强的振动可能引起卡箍或管接头松动等故障,甚至引起管壁裂缝、流体泄漏导致恶性事故,极大的威胁发动机甚至火箭的运行安全^[4-7]。另一方面,在发动机运行和试车过程中,由于空间狭窄、管路系统结构复杂、传感器附加质量等原因,往往只能设置有限测点对管路振动信息进行测量^[8],无法直接得到管路的全局振动状态。为避免发动机管路系统振动所导致的严重事故^[9-11],及早分析振动来源,对管路系统进行全局振动预示与健康评估,并基于评价结果采取相应减振和安全措施,降低管路系统不良振动的影响,是提高发动机完整性的重要手段^[12-14]。

针对发动机管路振动剧烈的问题,国内外的科研人员对振动来源进行分析,确定影响振动响应的的相关参数,并提出了相应的结构及布局改善措施^[15-16];然而这样的方法往往只针对某一具体型号,无法推广,不具有一般性。同时,传统的载荷识别方法多需要构造传递矩阵,使得重构结果的真实性和折扣,国内外的研究也往往集中于提高方法的抗噪能力^[17-20],且使用反问题方法识别载荷的手段仍不完善。

文献[21]提出了将有限测点信息与反问题方法相结合,通过重构未知的振动结构和载荷参数,结合精细有限元模型通过仿真计算对管路系统振动和强度进行全局评估。当管路的约束和载荷参数均未知时,若同时重构,一方面由于未知参量的属性不同,反问题求解时无法实现同时有效修正;另一方面未知参量数目较多,问题的不适定性较高,会影响收敛精度和效率。针对这一问题,结合发动机系统生产、试车的实际情况,文献[22-23]提出了对约束参数和载荷参数分步反演重构的方法,基于冷态信号先期重构约束条件,然后在约束参数已知的前提下利用实际振动测量信号对载荷进行重构,提高了重构的准确度和效率。但该方法采用了共轭梯度方法进行载荷和约束重构,评价结果易受到初值选取和信号信噪比的影响,因此,研究其他反演重构方法对载荷识别的有效性非常必要。

考虑到发动机管路系统主要连接于高速旋转的泵体之间,因此其振动往往包含几个或多个频率,其

振动形式为两端固定的基础激励谐振动和随机振动。根据线性叠加原理,可以利用频谱分析将振动响应按频率分解,通过重构各频率下的激励实现载荷重构^[24-29]。由于实验室条件限制,本研究采用集中力激励的振动问题来验证所提方法的有效性。

本研究提出和验证了基于典型反演优化方法和有限测点振动测量信息对管路系统振动载荷进行识别的方法。通过将载荷重构问题转化为测量和计算振动残差函数最小的优化问题,利用有限振动测量信号特征量,基于确定论和随机算法对管路系统未知的载荷参数进行重构识别,对不同反演方法的重构效果进行分析比较。

1 管路振动识别方法

1.1 基于有限测点信息的管路载荷参数识别方法

管路系统未知载荷的反演重构问题可以转化为优化问题进行求解。选取目标函数为式(1)所示一定载荷条件下计算所得振动信号与真实结构测量信号特征参数的残差函数,则载荷的反演问题可以转化为在载荷参数可行域内寻找最优解使得目标函数极小的优化问题。

$$\varepsilon(\mathbf{c}) = \sum_{m=1}^M |X_m(\mathbf{c}) - X_m^{\text{obs}}|^2 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{c}$ 为待求振动系统载荷参数向量; X_m^{obs} 为实验测量振动信号特征参数,可取为位移/加速度/应变振动信号,一般需包含待求载荷方向的振动响应; $X_m(\mathbf{c})$ 为当载荷参数为 $\mathbf{c}$ 时利用有限元数值模拟计算所得振动测点信号的特征参数; M 为测点数量。考虑到约束状态在试车或运行过程中可认为不变,本研究主要考虑利用有限测点振动信号对振动载荷参数进行反演重构的问题。

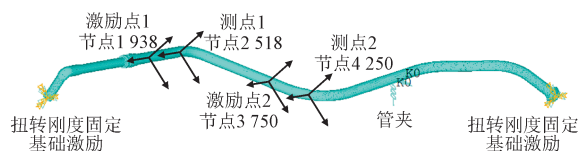


图1 典型管路载荷反演模型及加载、测点位置示意图
Fig. 1 Typical pipeline load inversion model and schematic diagram of loading and measurement point positions

如图1所示典型发动机管路系统,其振动激励主要是两端的基础位移或加速度激励。为简化建模,考虑到管路中部管夹的结构特征,其扭转刚度和

管轴向平移刚度可以忽略,即用2个径向刚度表征中部管夹,而端部转动自由度约束,在平动自由度施加基础激励。

选取载荷特征参数向量 $\mathbf{c}$ 各分量为管两端基础激励3个方向的信号特征量,当基础激励为简谐激励信号,载荷特征量可以选为激励位移幅值,其激励频率从信号分析中直接获得。而对于实际发动机的随机振动激励,需要对激励信号功率谱密度(power spectrum density, PSD)曲线的幅值和频域分布进行重构识别。由于PSD曲线分布复杂,直接进行重构会导致不适定性太高而无法有效实现。但考虑到管路稳态振动问题的线性可叠加特性,可以对PSD曲线的不同窄小频段分别重构,然后将不同频段的载荷进行综合,即可获取总的激励载荷PSD信息。所以,对于随机激励载荷,向量 $\mathbf{c}$ 的载荷特征参数可选为窄带PSD值的大小(给定频率和带宽),即同样可以用6个未知参数来表征载荷。

对于用于重构的振动测量信号 X_m^{obs} ,需用和待求载荷相同的特征参数来表征,即对于简谐振动选用幅值,对于随机振动选择一定频率和频宽的PSD数值。同时,一般位移振动信号包含更多的结构振动信息,会有更好的重构效果,且其测点布置也需要参照管路结构和振型特征进行合理选择。

1.2 振动系统载荷反演识别算法

为求解目标函数式(1)的反问题,即残差最小的优化问题,可以采用各种优化问题求解算法。高轩等^[22]利用共轭梯度确定论优化算法,基于振动信号进行了载荷和约束刚度的重构,获得了较好的结果,但也发现共轭梯度计算方法具有依赖初值选取,信号信噪比不良时收敛性易受影响的问题。为解决上述问题,本研究引入3种优化算法对系统载荷进行反演识别。

1.2.1 基于奇异值分解算法的载荷识别方法

对于线性振动系统,系统的总响应可由各部分激励的响应线性叠加而成,即

$$\mathbf{x}^j = \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_0^{ij} \cdot \mathbf{P}_i \quad (2)$$

其中: $\mathbf{x}^j$ 代表第 j 个测点的响应; $\mathbf{x}_0^{ij}$ 代表在第 i 个激励位置施加单位激励时第 j 个测点的响应; $\mathbf{P}_i$ 代表第 i 个激励位置施加的激励(其中 $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)。将上述等式写作矩阵形式,有

$$\mathbf{x}_{m \times 1} = \mathbf{S}_{m \times n} \mathbf{P}_{n \times 1} \quad (3)$$

其中: $\mathbf{x}$ 为测点的响应信息; $\mathbf{P}$ 为激励信息; $\mathbf{S}$ 为该振动系统的柔度阵,为保证有唯一解存在,应有 $m \geq n$, 即测点信息的个数大于等于激励的个数。

由于 $\mathbf{S}$ 非方阵不能直接求逆,因此引入奇异值分解法,将其分解为 $\mathbf{S} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}^T$ 的形式,其中 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 分别为 m 和 n 阶正交矩阵, $\mathbf{D}$ 为 $m \times n$ 阶对角阵。由此可通过矩阵分解的形式求解出未知的系统激励信息为

$$\mathbf{P} = \mathbf{V} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{x} \quad (4)$$

1.2.2 基于遗传算法的载荷识别方法

遗传算法(genetic algorithm, GA)属启发式随机优化算法,具有鲁棒性强、通用性好、无需考虑目标函数的连续性等优点,并且方便进行大型解空间的搜索^[24]。

遗传算法从代表问题可能潜在解集的一个种群开始,这个种群由若干数目的个体组成。初代种群产生之后按照适者生存和优胜劣汰的原理,逐代演化产生越来越好的近似解。在每一代中根据问题域中个体的适应度大小来挑选个体,并借助遗传算子进行选择、交叉和变异,产生出代表新的解集的种群^[25]。这个过程将导致种群像自然进化一样,后代种群比前代更加适应于环境,末代种群中的最优个体可以作为问题的近似最优解(图2)。

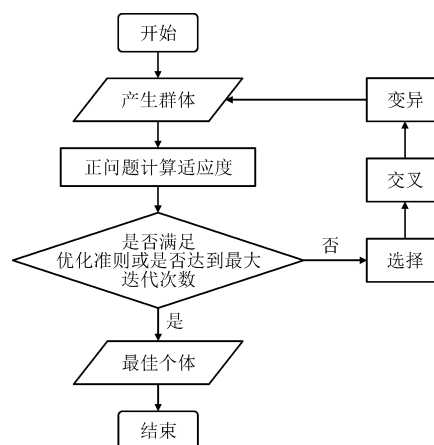


图2 遗传算法载荷参数重构流程

Fig. 2 Load parameter reconstruction process of genetic algorithm

针对残差函数式(1)最小的优化问题,选择载荷参数向量作为遗传种群的搜索空间,依据图2所示流程可从测量所得振动信号反演获取最优载荷参数。具体计算步骤如下。

1) 根据工程经验和先期正问题计算,选取各载荷特征量的大小范围,即选定解的上下界。对于简

谐振动,如为集中载荷其幅值可选为 $-10 \sim 10 \text{ kN}$,对于随机振动可选为 $0 \sim 10\,000 \text{ g}^2 \text{ Hz}^{-1}$ 。

2)种群初始化。设置进化代数计数器 $n = 0$,设置最大进化代数 N 。采用实数编码在选定的参数空间中随机生成 m 个可能的载荷向量(即个体),记为初始群体集合 $P(0)$ 。

3)个体评价。取式(1)定义的振动响应计算值与测量目标值间的残差的倒数为个体适应度,计算第 n 代群体集合 $P(n)$ 中各个体的适应度。即针对每个个体对应的载荷参数向量,基于有限元模型和商用软件计算振动系统的位移或应变响应,然后基于式(1)计算残差。个体的残差越小则与最优解越接近,定义残差最小的个体为当前的最优个体。

4)终止条件判断。若迭代次数达到预设的代数时即 $n = N$,则以进化过程中所得到的当前最小残差个体作为最优解输出,并终止计算。或若当前最优个体的残差已小于给定的阈值,同样终止计算,输出收敛结果。若不满足上述终止条件,则进行后续步骤。

5)选择运算。将选择算子作用于群体,采用锦标赛法,每次随机选出若干个(一般为2或3个)载荷向量个体,依据残差最小原则选出一个个体,直至种群选满作为生成新一代个体的基础。

6)交叉运算。为保证种群多样性,将交叉算子作用于群体,产生新的个体。采用混合交叉算法,即对选择运算获得的各优势个体两两混合交叉获取 m 个新的个体(载荷向量),每个新个体的值为其父代值的 α 倍与母代值的 $(1 - \alpha)$ 倍之和,其中 $0 < \alpha < 1$, α 为交叉运算因子,一般取 $0.6 \sim 0.7$ 。

7)变异运算。将变异算子作用于群体,即依据给定变异概率将新生成的载荷个体替换为在解空间中完全随机选取的载荷向量。通常变异概率不会很大,但可为种群的多样性提供一定保证,使运算结果不会轻易落入局部最优解中。

8)基于群体集合 $P(n)$,利用上述选择、交叉、变异运算得到下一代群体集合 $P(n + 1)$ 。

9)回到步骤3),计算新群体中各个个体对应的振动响应参数和残差,直到收敛。

1.2.3 基于禁忌搜索算法的载荷识别方法

禁忌搜索(tabu search, TS)算法是一种亚启发式随机搜索算法,是局部搜索算法的改进^[26]。它从一组初始可行解出发,选择一系列的搜索方向进行“探路”并从其中选择最优的邻域解从而获得每一

步的迭代值^[27]。同时通过引入禁忌列表,将已经搜索过的区域进行标记,从而避免重复搜索而陷入局部最优;禁忌长度代表禁忌列表中解的被禁忌步数,过少可能陷入局部最优,过长则需大量计算时间;特赦规则可保证不会因禁忌而错过最优解^[28]。

针对本研究式(1)目标函数,通过以下步骤对载荷参数进行反演识别。

1)确定载荷参数搜索范围以及禁忌算法相关参数,包括禁忌长度 L 、候选解个数 M 、最大迭代次数 N 或计算终止容差范围,置空禁忌表。

2)通过工程经验选取可行的初始载荷向量,或在搜索空间中随机生成 m 个可能的载荷向量(即个体),记为初始解集 $P(0)$ 。

3)计算初始解集对应的系统响应,并基于式(1)计算残差。

4)若达到最大迭代次数 N 或残差在容差范围内,停止计算并输出当前最优解;若不满足终止准则,则进行以下操作。

5)生成当前解的 M 个邻域解,选取相应残差最小的候选解作为新解。

6)判断新解是否满足特赦规则:若新解的残差小于之前任何一个解,可特赦;若所有可能解都已被禁忌,特赦一个残差最小的解;若满足,新解作为当前最优解,更新禁忌表,否则选取未被禁忌且残差最小的候选解作为当前解并更新禁忌表。

7)回到步骤3),计算新解对应的振动响应参数和残差,直到收敛。

2 基于模拟和测量信号的典型发动机管路振动载荷识别

本研究给出的管路振动正问题模型和反演算法,ANSYS软件APDL语言开发了典型发动机管路结构振动载荷识别程序。为验证方法和程序的有效性,利用数值模拟计算所得振动信号和利用管路振动实验室测量振动信号分别进行了载荷重构。为考虑振动噪声的影响,在计算信号中施加了5%的白噪声。以下分别给出基于模拟和测量信号的重构计算结果。

2.1 典型发动机管路振动正问题模型

针对图1的典型发动机管路结构,首先进行了管路系统振动正问题建模和计算。管道整体由直管

与弯管连接而成,包含管路中部的管夹和与发动机本体固定的法兰,管路两端直线距离约 1.43 m,空间总长度约 1.86 m。基于 ANSYS 软件 APDL 语言,采用 PIPE289 直管单元和 EBLOW290 弯管单元对直管和弯管部分进行了有限元建模,直管与弯管部分之间完全刚性连接。单元网格大小取为 0.5 mm,共有 7 319 个结点、3 659 个单元。管夹等效为 2 个刚度相同的径向线弹簧单元。对于集中激励,在管路中部各施加 3 个平动方向的相同频率正弦激励;基础激励则在管端部 3 个平动方向设定给定位移激励;对于随机振动,则施加给定中心频率和带宽的窄带功率谱密度(PSD)随机激励。管路所用具体材料弹性模量 196.5 GPa,泊松比 0.3,密度 7 890 kg/m³。

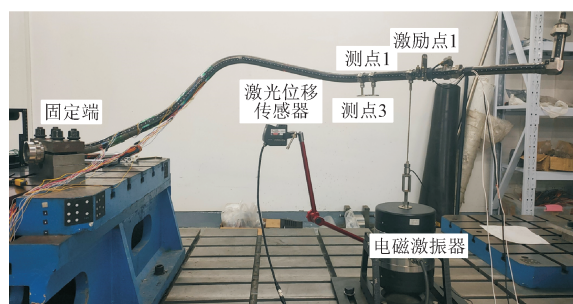


图3 典型管路系统振动测量系统

Fig.3 Typical pipeline system vibration measurement system

为验证所建有限元模型的有效性,对图3所示单端固定管路搭建了振动实验系统,进行了管路系统固有频率的测量和计算。通过锤击加载和对管路振动自由衰减响应信号进行频谱分析,实验测量了管路低阶固有频率,可得该管路单端固定三阶固有频率分别为 7.08、31.10、111.27 Hz。基于前述有限元模型和实验管路边界条件,修改图1典型管路约束条件并计算悬臂管路前三阶固有频率和实验结果的比较如表1所示。可以看出,该管路的实验及仿真所得前三阶固有频率之间的误差小于 5%,证明了所建有限元模型的有效性。

表1 管路单端固定固有频率测量及仿真结果比较(单位:Hz)

Tab.1 Comparison of measurement and simulation results for natural frequency of single end fixed pipeline (unit:Hz)

方案	一阶	二阶	三阶
实验	7.08	31.10	111.27
仿真	7.37	31.33	105.92

在实验室条件下进行了管路振动实验。如图3所示,管路一端由抱箍固定,电磁激励器通过连杆对管路平直部分施加简谐激励,并串联力传感器测量

实际动态载荷,位移传感器测量各个测点的位移幅值,最后由动态信号测试分析系统记录各测点的响应及相应振动信息。实验测量及仿真结果比较如表2所示。可见对于不同频率,计算所得振动幅值和实验测量结果十分接近,再次证明了所建有限元模型的有效性。

表2 管路单端固定简谐振动试验与仿真结果

Tab.2 Vibration test and simulation results of single end fixed pipeline

频率/Hz	载荷幅值/N	方案	位移幅值/mm	
			测点1	测点3
15	75.51	实验	-1.68	-1.43
		仿真	-1.69	-1.44
20	195.37	实验	-1.37	-0.83
		仿真	-1.09	-0.65

2.2 基于数值模拟信号的典参数重构结果

首先基于有限元模型数值模拟计算信号对图1所示两端固定的典型管路结构进行集中力简谐振动载荷参数重构。管路有限元模型与2.1节相同。在管路中部的1 938(激励点1)和3 750(激励点2)号节点处施加频率为 60 Hz 的 X、Y、Z 方向简谐激励力,振幅均为 200 N。以 2 518(测点1)和4 250(测点2)号节点的 X、Y、Z 方向位移幅值作为振动信号特征参数,激励的幅值作为重构的目标值,即待求振动系统载荷特征参数向量。为考虑噪声的影响,对模拟计算信号中施加 5% 的白噪声,以分析不同方法的抗噪能力和鲁棒性。重构中遗传算法的参数为:种群大小 40,交叉概率 0.7,变异概率 0.05,最大代数 200。禁忌算法参数为:候选解个数 20,禁忌长度 5,最大迭代次数 200。基于 3 种优化算法重构所得载荷参数结果如表3~表5所示。

表3 基于奇异值分解算法的载荷重构结果(单位:N)

Tab.3 Load reconstruction results based on SVD (unit:N)

载荷	目标值	重构值	含噪重构值
F1	200	200.00	214.25
F2	200	200.00	6 789.11
F3	200	200.00	275.16
F4	200	200.00	220.06
F5	200	200.00	-10 332.89
F6	200	200.00	-8 021.25

由表3~表5可以看出,基于奇异值分解算法所

得的重构结果与真实值非常接近。但当重构特征参数含有噪声时,基于奇异值分解算法所得到的重构结果误差较大;而遗传算法和禁忌搜索算法的重构载荷相较实际载荷基本一致,证明了算法鲁棒性和程序有效性。

表4 基于遗传算法的载荷重构结果

Tab. 4 Load reconstruction results based on GA

载荷	目标值/N	重构值/N	含噪重构值/N	含噪误差/%
F1	200	195.47	208.91	4.46
F2	200	194.23	185.79	-7.11
F3	200	202.71	190.91	-4.55
F4	200	201.64	198.60	-0.70
F5	200	193.42	184.45	-7.78
F6	200	209.58	218.76	9.38

表5 基于禁忌搜索算法的载荷重构结果

Tab. 5 Load reconstruction results based on TS

载荷	目标值/N	重构值/N	含噪重构值/N	含噪误差/%
F1	200	214.54	239.35	19.68
F2	200	189.44	174.42	-12.79
F3	200	195.21	197.69	-1.16
F4	200	207.40	194.84	-2.58
F5	200	200.46	184.52	-7.74
F6	200	202.26	218.88	9.44

2.3 基于实际测量信号的参数重构结果

在实验室条件下,基于测量信号对典型管路未知的载荷参数进行重构。如图3所示,在距固定端998 mm(激励点1)施加频率为15、20 Hz的Z方向简谐激励力,通过正问题计算获取距固定端885 mm处(测点1)的Z向位移幅值信号作为参数进行载荷重构,同时计算和测量距固定端846 mm处(测点3)的Z向振动位移进行重构载荷结果的有效性校验。由于测点位移较小,测量信号不可避免的存在误差。重构中遗传算法和禁忌算法的最大代数均为40;其余重构参数与2.2节相同。重构计算结果如表6~表8所示。

在获取位移信息和柔度阵之后,由于只需做矩阵运算,该方法计算速度极快,仅需不足0.1 s。但由于奇异值分解法重构载荷依赖于传递矩阵,由于系数阵条件数问题线性方程组的解受观测值噪声的影响严重^[29],通过矩阵计算所得重构载荷可能与真实值相去甚远,说明该方法的抗噪能力较差;而遗传

算法和禁忌搜索算法作为随机全局搜索算法,由于其良好的鲁棒性,在经过大量计算之后往往可以避免局部最优解,即使信号参数中包含噪声,重构结果与真实值之间的误差也都在合理范围之内。但由于迭代过程中需要重复进行有限元计算,当模型复杂、网格划分密集时计算量巨大,往往需要几小时甚至几十小时,时间成本较大。

因此,基于奇异值分解算法的载荷重构方法仅适用于测量精度高的情况,而遗传算法和禁忌搜索算法则更具有普适性。通过校验测点3的测量位移和重构位移对比,也同样证明了上述结论。

表6 基于奇异值分解算法的单端固定管路简谐振动载荷重构结果

Tab. 6 Load reconstruction results for simple harmonic vibration of single end fixed pipeline based on SVD

频率/ Hz	真实 载荷/ N	测点1 测量位移/ mm	重构 载荷/ N	校验测点3 测量位移/ mm	校验测点3 重构位移/ mm
15	75.51	-1.68	53.54	-1.43	-1.15
20	195.37	-1.37	109.31	-0.83	-0.60

表7 基于遗传算法的单端固定管路简谐振动载荷重构结果

Tab. 7 Load reconstruction results for simple harmonic vibration of single end fixed pipeline based on GA

频率/ Hz	真实 载荷/ N	测点1 测量位移/ mm	重构 载荷/ N	校验测点3 测量位移/ mm	校验测点3 重构位移/ mm
15	75.51	-1.68	77.09	-1.43	-1.65
20	195.37	-1.37	190.28	-0.83	-1.05

表8 基于禁忌搜索算法的单端固定管路简谐振动载荷重构结果

Tab. 8 Load reconstruction results for simple harmonic vibration of single end fixed pipeline based on TS

频率/ Hz	真实 载荷/ N	测点1 测量位移/ mm	重构 载荷/ N	校验测点3 测量位移/ mm	校验测点3 重构位移/ mm
15	75.51	-1.68	78.06	-1.43	-1.67
20	195.37	-1.37	202.13	-0.83	-1.11

3 结 论

本研究建立了典型发动机管路振动正问题有限元模型,提出和实现了基于3种反演优化算法进行管路振动载荷重构,分别利用数值模拟振动信号和实验测量振动信号对管路系统的载荷参数进行了反

演重构,对方法的精度和有效性进行了验证。结果发现,基于最小二乘法 and 奇异值分解算法的载荷重构计算速度快但易受信号误差的影响,而属于随机算法的遗传算法和禁忌搜索算法具有更好的鲁棒性,针对仿真和实测振动信号均可实现载荷的有效重构,但需要更大的计算量。下一步拟结合不同算法优势,以实现同时提高精度和减少计算量的目标。

参考文献:

- [1] 高志辉,王东海,孙伟,等. L型管路系统动力学有限元建模及基于遗传算法的卡箍支撑位置优化[J]. 振动与冲击, 2022, 41(16): 149-157.
- GAO Zhihui, WANG Donghai, SUN Wei, 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 (in Chinese).
- [2] 杜飞平. 航天液体动力关键技术研究进展与趋势[J]. 应用力学学报, 2023, 40(1): 7-15.
- DU Feiping. Research progress and trend of key technologies of aerospace liquid propulsion [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(1): 7-15 (in Chinese).
- [3] THOMAS D J. Advanced active-gas 3D printing of 436 stainless steel for future rocket engine structure manufacture [J]. Journal of manufacturing processes, 2022, 74: 256-265.
- [4] 何涛,黄敏超,胡小平,等. 某火箭发动机故障检测及诊断算法设计分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(增刊1): 50-55.
- HE Tao, HUANG Minchao, HU Xiaoping, et al. Design analysis of fault detection and diagnosis algorithms for rocket engine [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S1): 50-55 (in Chinese).
- [5] 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 Xudong. 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 (in Chinese).
- [6] 刘英元,陈海峰,耿直,等. 液体火箭发动机振动故障特征信号提取方法[J]. 火箭推进, 2019, 45(1): 77-82.
- LIU Yingyuan, CHEN Haifeng, GENG Zhi, et al. Extraction method of characteristic signal for vibration fault of liquid rocket engine [J]. Journal of rocket propulsion, 2019, 45(1): 77-82 (in Chinese).
- [7] 张翔,徐洪平,安雪岩,等. 液体火箭发动机稳态运行故障数据聚类分析研究[J]. 火箭推进, 2015, 41(2): 118-122.
- ZHANG Xiang, XU Hongping, AN Xueyan, et al. Clustering analysis for fault data in steady process of liquid propellant rocket engine [J]. Journal of rocket propulsion, 2015, 41(2): 118-122 (in Chinese).
- [8] 李斌,闫松,杨宝锋. 大推力液体火箭发动机结构中的力学问题[J]. 力学进展, 2021, 51(4): 831-864.
- LI Bin, YAN Song, YANG Baofeng. Mechanical problems of the large thrust liquid rocket engine [J]. Advances in mechanics, 2021, 51(4): 831-864 (in Chinese).
- [9] 赵松波. 基于改进优化算法的液体火箭发动机故障检测与诊断研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2019.
- [10] 李艳军. 新一代大推力液体火箭发动机故障检测与诊断关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [11] 洪涛. 液体火箭发动机涡轮增压实时故障检测算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [12] 朱凤宇. 液体火箭发动机试车台健康管理关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [13] 吴建军,朱晓彬,程玉强,等. 液体火箭发动机智能健康监控技术研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(1): 1-13.
- WU Jianjun, ZHU Xiaobin, CHENG Yuqiang, et al. Research progress of intelligent health monitoring technology for liquid-propellant rocket engines [J]. Journal of propulsion technology, 2022, 43(1): 1-13 (in Chinese).
- [14] 陈文丽,周磊,刘瑞敏. 液体火箭发动机试验台健康评估与故障预测方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(6): 59-64.
- CHEN Wenli, ZHOU Lei, LIU Ruimin. Research on health evaluation and fault prediction methods for liquid rocket engine test-stand [J]. Missiles and space vehicles, 2018(6): 59-64 (in Chinese).
- [15] PAVLOU D G, CORREIA J A. Dynamic response of pipelines under impact and harmonic loading [J]. Proceedings of the institution of civil engineers-maritime engineering, 2019, 172(1): 15-22.
- [16] QU W, ZHANG H L, LI W, et al. Influence of support stiffness on dynamic characteristics of the hydraulic pipe subjected to basic vibration [J]. Shock and vibration, 2018, 2018(1): 4035725.
- [17] 徐培原,刘伟. 发动机外部管路系统的卡箍布局多目标优化[J]. 航空发动机, 2020, 46(6): 46-52.
- XU Peiyuan, LIU Wei. Multi-objective optimization of clamps layout for engine external pipeline system [J]. Aeroengine, 2020, 46(6): 46-52 (in Chinese).
- [18] REYNOLDERS E. System identification methods for (operational) modal analysis: review and comparison [J]. Archives of computational methods in engineering, 2012, 19(1): 51-124.
- [19] CHANG X T, YAN Y J, WU Y F. Study on solving the ill-posed problem of force load reconstruction [J]. Journal of sound and vi-

- bration, 2019, 440:186-201.
- [20] LI X W, ZHAO H T, CHEN Z, et al. Force identification based on a comprehensive approach combining Taylor formula and acceleration transmissibility[J]. Inverse problems in science and engineering, 2018, 26(11):1612-1632.
- [21] LIU J, MENG X H, ZHANG D Q, et al. An efficient method to reduce ill-posedness for structural dynamic load identification[J]. Mechanical systems and signal processing, 2017, 95:273-285.
- [22] 高轩, 陈洪恩, 王猛, 等. 基于有限测点的复杂管路全局振动预示方法[J]. 火箭推进, 2022, 48(2):45-55.
GAO Xuan, CHEN Hong'en, WANG Meng, et al. A global vibration evaluation method based on information of limited measuring points for a complex pipeline[J]. Journal of rocket propulsion, 2022, 48(2):45-55 (in Chinese).
- [23] 西安交通大学, 西安航天动力研究所. 一种基于有限测点的管路振动全面检测预示方法: CN202110074903. 4[P]. 2022-04-05.
- [24] WANG C, FEI Y, TAO L, et al. Uncorrelated multi-source random dynamic load identification based on minimization maximum relative errors and genetic algorithm[J]. International journal of applied electromagnetics and mechanics, 2016, 52(1/2):691-699.
- [25] 曹银行, 柳贡民, 张龙. 基于遗传算法的分支管路系统动力学优化设计[J]. 振动与冲击, 2021, 40(9):221-227.
CAO Yinxing, LIU Gongmin, ZHANG Long. Dynamic optimization design of branch pipeline system based on genetic algorithm[J]. Journal of vibration and shock, 2021, 40(9):221-227 (in Chinese).
- [26] 陈庆莹, 安斯光, 吴秀山. 基于禁忌搜索算法的机械优化设计[J]. 煤矿机械, 2018, 39(5):169-170.
CHEN Qingying, AN Siguang, WU Xiushan. Optimization design of mechanical based on improved Tabu search method[J]. Coal mine machinery, 2018, 39(5):169-170 (in Chinese).
- [27] 牟乃夏, 徐玉静, 李洁, 等. 遗传禁忌搜索算法收敛性和时间复杂度分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(4):118-122.
MU Naixia, XU Yujing, LI Jie, et al. Analyses of convergence and time complexity of genetic tabu search algorithm[J]. Journal of Henan Polytechnic University (natural science), 2018, 37(4):118-122 (in Chinese).
- [28] 王超. 基于混合遗传禁忌搜索算法的多目标柔性作业车间调度问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [29] 陈凤坤. 病态性的诊断处理和病态复线性方程组的解法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.

(编辑 李坤璐)