

航空发动机管路系统动力学与减振研究进展*

马 辉^{1,2}, 汪伟伟¹, 郭旭民^{1,2}, 高培鑫³, 孙 伟^{1,2}, 杨天智^{1,2},
林君哲^{1,2}, 李 晖^{1,2}, 石 岩^{4,5}, 王 鑫⁶, 韩清凯^{1,2}

(1. 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳, 110819)

(2. 东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室 沈阳, 110819)

(3. 烟台大学机电汽车工程学院 烟台, 264005)

(4. 西北工业大学国家卓越工程师学院 西安, 710129)

(5. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 沈阳, 110043)

(6. 中国航发沈阳发动机研究所 沈阳, 110015)

摘要 航空发动机管路系统是影响整机服役性能的关键功能单元,其结构涉及多个部件的相互耦合。在多种激励载荷与多物理场共同作用下,管路系统易出现振动超限及疲劳失效问题。因此,在航空发动机管路系统设计过程中,需要构建兼具精度与计算效率的动力学模型,开展优化设计与振动抑制分析以提升航空发动机管路系统服役性能。首先,系统阐述了支撑部件力学建模方法,以及管体半解析法、传递矩阵法、有限元法、谱单元法、绝对节点坐标法及组合建模方法的原理特点、适用范围与理论差异;其次,从卡箍布局和管路走向优化方面总结了管路系统动态优化设计的研究进展;然后,围绕隔振路径-支撑结构设计、本体减振-附加减振装置,以及源头消脉-流体脉动抑制等3种技术路径,系统总结了管路系统振动抑制方法的研究进展;最后,展望了航空发动机管路系统在未来研究中亟待解决的关键科学问题与技术发展方向,旨在为航空发动机管路系统的动力学建模和低振动设计提供理论依据与技术支撑。

关键词 航空发动机;管路系统;动力学建模;优化设计;振动抑制

中图分类号 TH113.1

1 管路振动问题

航空发动机管路系统是保障燃油、滑油及空气等工作介质传输与调控的核心载体,受限于复杂的空间几何构型与严苛的工作环境,发动机管路在流体激励、转子基础激励与燃烧室宽频声振等多物理场耦合作用下,极易引发振动超限,导致管路和卡箍等支撑部件的松脱和裂纹故障,如图1所示的某航空发动机管路系统及典型失效形式^[1-5],直接危及飞行安全。管路系统振动失效的主要原因在于其耦合振动机理不清晰,在设计阶段缺乏有效方法准确预估实际工况下的振动特性。目前,工程中的振动失效问题发生后,多依赖反复调整管路走向和卡箍位置进行经验性试凑,而缺乏系统的动态设计与振动抑制方法。因此,构建高保真动力学模型,实现振动响应的准确预测,并在此基础上发展支撑结构与管路的正向优化设计与振动抑制方法,对于保障航空

发动机管路系统的服役性能与可靠性具有重要理论意义和工程价值。

在流体激励诱发管路系统振动研究领域,相关问题通常归属于流固耦合振动范畴。根据流体运动特征,可分为定常流体与管体耦合,以及非定常流体与管体耦合两类。针对定常输流管路,早期研究多基于线性运动方程,围绕失稳判据和线性动力学特性展开,随后逐步发展到基于非线性运动方程的振动与后失稳行为分析。此后,悬臂输流管三维非线性动力学理论逐步完善,进一步揭示了定常输流条件下管路颤振、失稳及复杂运动演化规律,推动了定常输流管路理论体系的发展。相比之下,非定常内流条件下的动力学行为更为复杂。针对脉动流和瞬态流等工况,已形成流体瞬态守恒方程与管路振动方程耦合的分析框架,其中14方程传递矩阵法可用于描述管内压力波动、流体运动与管体轴向、横向及

* 国家自然科学基金资助项目(52305096, 52275135)

收稿日期:2026-05-03;修回日期:2026-05-29

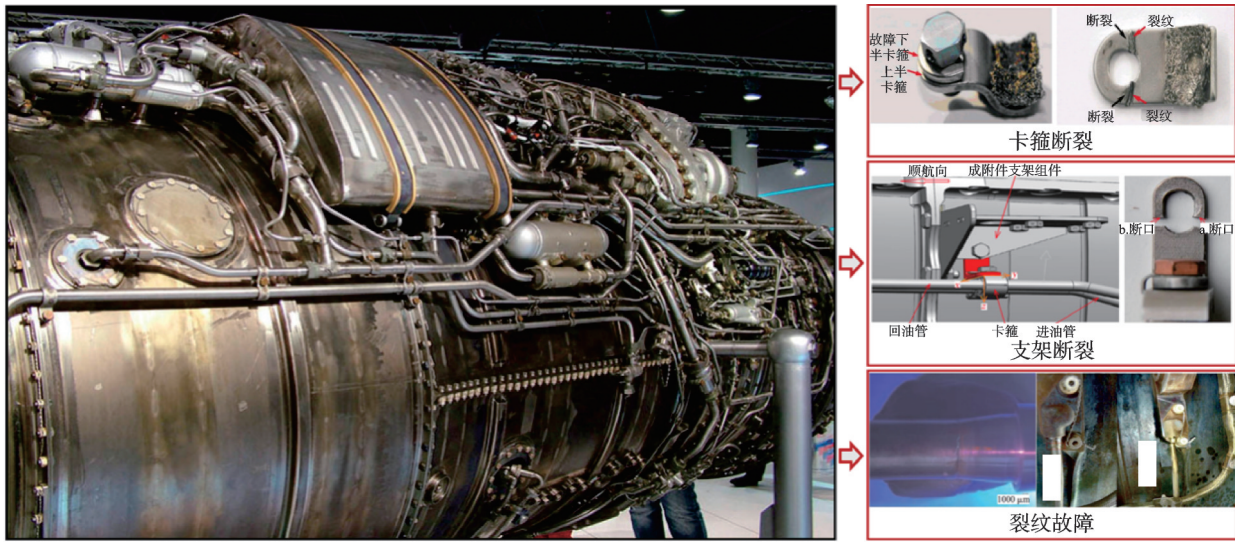


图1 某航空发动机管路系统及典型失效形式^[1-5]

Fig.1 Aero-engine piping system and its common failure modes^[1-5]

扭转振动之间的流固耦合关系。复杂边界、非定常流动、多相流及复杂构形下的振动预测与共振规避仍是输流管路动力学研究的重要方向。

基于上述理论基础,航空管路系统动力学建模、振动响应预测与振动控制已取得较为系统的研究进展,主要包括3个方面:①围绕飞机液压管路和航空发动机管路系统,开展流固耦合建模、卡箍刚度表征、多源激励响应及管路优化设计研究^[6-8];②面向输流管路非线性动力学,分析稳定性、后失稳响应、大变形建模及复杂边界条件下的动力学行为^[9-10];③针对管路振动抑制与控制,研究被动、主动和半主动控制等减振方法^[11]。这些研究为航空管路系统动力学建模与振动抑制提供了重要基础,但对支撑边界模型、系统振动特性、多源激励传递路径及抑振设计之间内在联系的讨论仍相对不足。

总体来看,航空发动机管路系统动力学分析与振动抑制研究已形成较为完整的研究框架,并在支撑部件建模、流固耦合振动分析及管路振动响应预测等方面取得了重要进展。然而,航空发动机管路振动并非单一结构响应问题,而是复杂装配边界、多源激励与流固耦合共同作用下的动力学问题。其中,卡箍等支撑部件会改变系统等效边界条件,进而影响管路固有频率、模态振型和幅频响应;流体脉动、基础激励等多源激励则会通过不同传递路径影响关键位置的振动与动应力响应。因此,复杂支撑边界的准确表征、管路系统模态特性与振动响应预测,以及兼顾计算效率和试验一致性的建模方法,仍是航空发动机管路动力学研究中需要进一步解决的问题。

2 管路系统支撑部件力学参数确定方法

航空发动机管路系统的支撑部件(如卡箍和支架-卡箍结构)主要用于连接管路与机匣,起到限位、减振和调节系统动力学特性的作用。由于支撑部件的刚度、阻尼及滞回耗能特性决定了管路系统的等效边界条件,其力学参数表征精度将影响后续模态、频响和动应力响应预测。因此,有必要对支撑部件的力学建模、参数测试和反推辨识方法进行归纳,为管路系统动力学分析提供边界参数基础。

2.1 卡箍力学建模方法

卡箍作为航空发动机管路系统的关键支撑部件,其支撑刚度、连接状态及装配参数会改变管路系统的等效边界条件,进而影响系统固有特性和振动响应^[12]。现有卡箍等效模型主要包括线性弹簧模型、分段线性模型^[13]、立方非线性模型和 Bouc-Wen 模型,卡箍的不同建模方法如图 2 所示。线性弹簧模型将卡箍简化为线性刚度边界,适用于小振幅或弱非线性条件下的模态与频响分析。在此基础上,相关研究进一步考虑卡箍实际宽度^[14]、多方向约束及阻尼效应^[15-16]。这类模型形式简洁、参数物理意义明确,但难以描述接触状态变化、局部滑移和材料耗能引起的非线性行为。当卡箍恢复力或等效刚度随振动幅值或加载状态发生变化时,分段线性模型和立方非线性模型分别从非光滑刚度变化和连续非线性刚度变化两个角度对线性边界进行修正。分段线性模型通过分段刚度或双线性恢复力描述支撑刚

度的阶段性变化^[17];立方非线性模型则采用三次多项式描述幅值相关的刚度软化或硬化特征^[18-19]。前者更适合表征接触状态变化或局部滑移引起的非光滑力学特征,后者则侧重描述恢复力随振幅连续变化的非线性刚度特征。Bouc-Wen模型进一步引入内部滞后变量,将卡箍恢复力由位移的单值函数扩展为与加载历史相关的滞后演化关系,能够描述循

环振动中的路径依赖和能量耗散特性^[20-22]。与立方非线性模型相比,Bouc-Wen模型对滞后耗能过程的表征能力更强,在非共振区域具有更高预测精度,但其参数数量较多,辨识难度和计算成本也更高。因此,卡箍模型应结合振动幅值、接触状态、耗能机制及响应分析目标进行综合选择,以准确描述非线性支撑边界对系统模态、频响和动应力响应的影响。

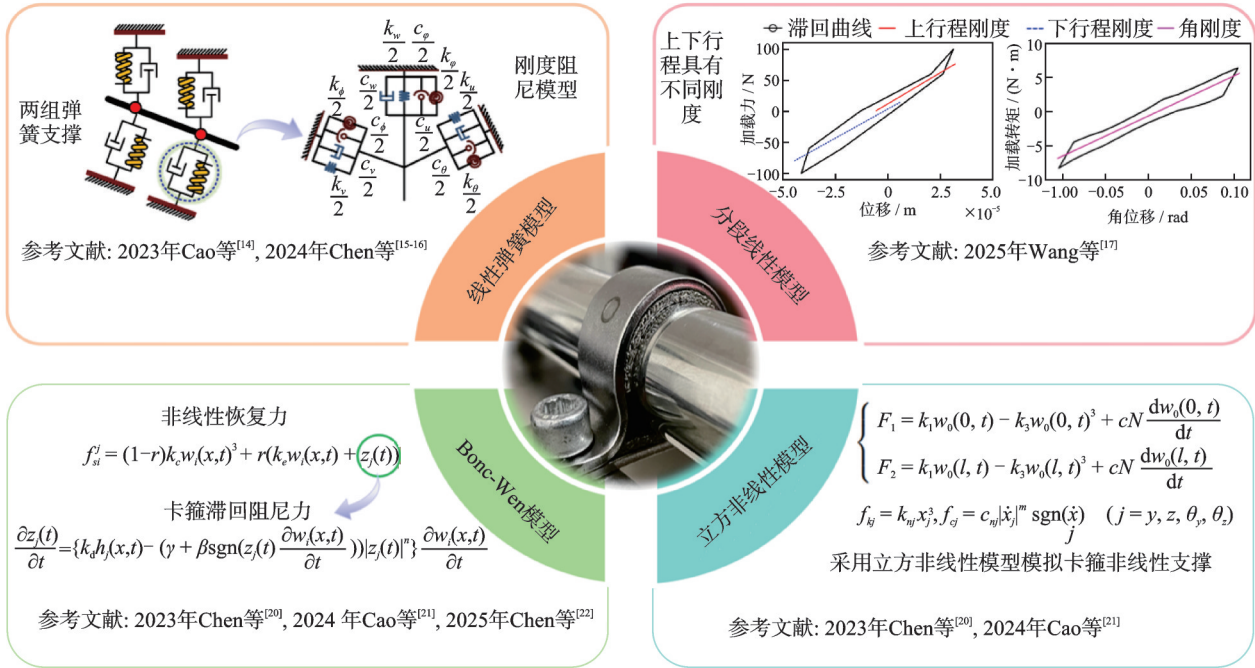


图2 卡箍的不同建模方法

Fig.2 Different modeling strategies for the clamp

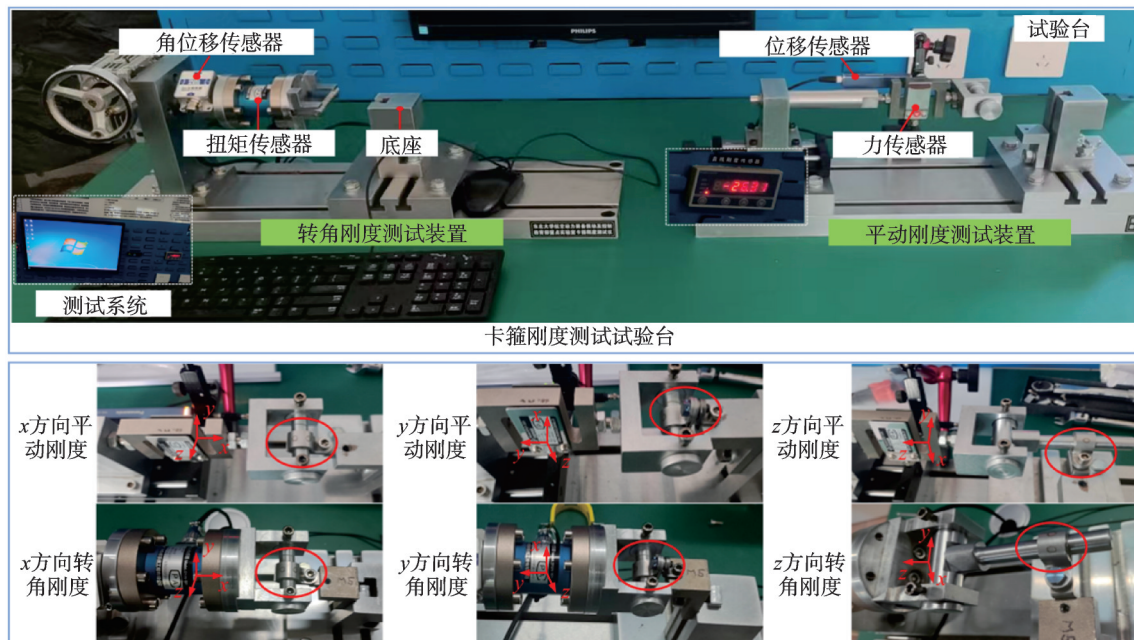
2.2 卡箍力学参数的试验测量与反推辨识

试验测量是获取卡箍参数的关键途径。通过专用试验装置获取卡箍力-位移滞回曲线,拟合得到不同方向的等效刚度和阻尼参数,为卡箍支撑管路系统的动力学分析提供边界参数输入。同时,建立对应的卡箍有限元模型,结合管路振动试验,可进一步验证参数辨识结果的合理性。例如,Fu等^[23]基于自主设计的试验装置,获取了金属橡胶卡箍在4个方向上的力-位移滞回曲线,并采用最小二乘法拟合得到其横向与转角刚度,所建立的接触有限元模型与试验结果误差在6%以内,验证了该参数获取方法的有效性。Zhang等^[24]进一步设计了支架-卡箍刚度测量装置,通过该装置测量了支架-卡箍系统6个方向上的刚度,进一步将测量的刚度引入空间管路模型。卡箍刚度测试装置如图3所示。通过固有频率试验对比验证了支撑参数的适用性。Shi等^[25]通过试验测试了不同退化阶段下卡箍螺钉的预紧力与拧

紧力矩之间的关系,建立了适用于航空发动机卡箍不同退化阶段的拧紧力矩修正模型。

在实际工程中,支撑卡箍受制造公差与装配偏差的影响,其力学参数不可避免地呈现分散性。这导致标准试验条件下获得的力学参数难以表征实际装配状态下的边界约束,限制了对卡箍-管路耦合系统振动响应的预测精度。围绕上述问题,近年来逐步形成了以试验数据驱动的参数反推辨识方法^[26-27]。对于线性支撑模型,辨识对象主要为等效刚度和阻尼参数,通常以固有频率、频响函数或扫频响应误差的最小化为目标进行优化^[28-29]。随着卡箍模型由线性边界等效逐步转向非线性恢复力和滞后耗能表征,参数辨识也从等效刚度和阻尼修正进一步拓展到非线性参数与滞后参数辨识。

综上,支撑部件建模与参数辨识共同决定了管路系统边界条件的描述精度。从力学建模本质上看,卡箍支撑模型可视对恢复力-位移关系及其滞后特性的不同近似:线性弹簧模型对应单值线性恢

图3 卡箍刚度测试装置^[24]Fig.3 Test rig for measuring clamp stiffness^[24]

复力;分段线性模型通过分段刚度或双线性恢复力描述接触状态变化引起的非光滑力学行为;立方非线性模型通过三次项描述刚度软化或硬化现象;Bouc-Wen模型通过滞回变量表征加载历史相关的恢复力与耗能特性。相应地,参数获取方法也由部件级试验测量逐步拓展为基于固有频率、频响函数、扫频响应和应力响应的系统级反推辨识。前者为卡箍等效刚度、阻尼及滞回特性提供基础参数,后者进一步修正了实际装配状态下的支撑边界条件。

3 管路系统动力学建模方法与振动预测

管路系统振动特性直接影响航空发动机运行稳定性与服役寿命。为实现高精度振动预测与设计优化,需构建合理的管路系统动力学模型。本节围绕半解析法、传递矩阵法、有限元法、谱单元法、绝对节点坐标法及组合建模法,归纳其在管路动力学建模中的研究进展与适用特点。

3.1 半解析法

半解析法通常先建立管路系统运动微分方程,再通过假设模态法、Galerkin法、Rayleigh-Ritz法或级数展开等方法对连续控制方程进行降维离散,得到有限维动力学方程。在此基础上,可结合特征值分析、稳定性判据、谐波平衡法和时域积分方法,求

解系统固有特性、稳定性、稳态周期响应及瞬态响应。该方法在保留管路连续体动力学特征的基础上,通过模态截断或级数展开实现模型降维,兼具较好的建模精度和计算效率。从建模对象来看,半解析法最初多用于输流直管或简单支撑管路的固有特性、临界流速和稳态响应分析。这类方法通常基于Galerkin法或能量法建立低维动力学方程,可用于研究弹性支承位置及流体参数对系统动力学特性的影响^[30]。

随着研究对象由简单直管向多卡箍支撑空间管路拓展,半解析建模逐渐引入特征单元划分思想,即将复杂管路分解为直管段、弯管段、连接弹簧、接头和卡箍等基本单元,并分别建立能量表达式,再基于拉格朗日方程推导得到系统动力学方程^[31]。这种处理方式提高了半解析法对规则空间管路和多支撑管路的适用性。此外,半解析模型可进一步考虑流体泊松效应、流体密度、流速以及接头几何形状等因素对管路动力学特性的影响^[15-16],并可引入支撑软化非线性^[18]和滞回恢复力^[20]等非线性卡箍模型,用于分析非线性支撑边界对系统稳定性、幅频响应和振动响应预测精度的影响。需要注意的是,当管路长径比较小或局部动应力响应成为关注重点时,基于梁理论的半解析模型精度会下降。因此,可通过模态展开将壳模型与非线性支撑模型耦合,提高卡箍-管路系统动应力响应的描述能力^[22]。半解析法具有建模过程高效和物理意义明确等优点,但在复

杂装配边界、任意空间构型及局部应力集中问题上,其建模通用性和局部响应描述能力仍受到一定限制。表 1 为半解析建模方法,对比了管路系统常见半解析动力学建模方法。

表 1 半解析建模方法
Tab.1 Semi-analytical modeling methods

文献	理论与离散方法	支撑模型	求解算法	说明
Zhang 等 ^[31]	Timoshenko 梁,多项式离散	线性弹簧模型	广义特征值求解	规则管路,利用弹簧处理异面连接,解决复杂构型全局模态构造难题
Chen 等 ^[15]	Timoshenko 梁,Galerkin 离散	线性弹簧模型	复模态特征值求解	L 形输流管路,构造了直段和弯段路连接的力平衡和位移协调条件
Chen 等 ^[16]	Timoshenko 梁,傅里叶级数展开	线性弹簧模型	Newmark- β 法	任意复杂空间管路,辅助多项式修正边界不连续
Chen 等 ^[18]	Euler-Bernoulli 梁,Galerkin 离散	立方非线性模型	谐波平衡法	直管路,基于频域算法揭示卡箍软化非线性幅频跳跃特性
Chen 等 ^[20]	Timoshenko 梁,Galerkin 离散	Bouc-Wen 模型	谐波平衡法	并联管路,结合参数辨识精确求解强非线性流固耦合响应
Chen 等 ^[22]	Mindlin-Reissner 壳,傅里叶级数展开	Bouc-Wen 模型	Newmark- β 法	小长径比管路,基于罚函数法实现非线性支撑与连续壳体的耦合

3.2 传递矩阵法

传递矩阵法是一种基于频域求解的管路动力学建模方法,具有矩阵维度低、求解效率高等优点,适用于链式、分支及并联充液管路的振动与流固耦合分析。管路流固耦合动力学模型主要包括 4 方程、6 方程、8 方程、12 方程和 14 方程模型。其中,14 方程模型是目前较为完善的管路流固耦合动力学模型。对于弯管结构,传统传递矩阵法通常将其等效为多段直管,容易增加模型规模并降低求解效率;连续弯管传递矩阵模型则可直接描述弯管段的流固耦合传递关系,从而提高含弯管充液管路的建模效率^[32]。对于并联管路,传递矩阵法可通过管间变形协调关系、耦合矩阵和矩阵维数扩展等方式描述多管路之间的结构耦合^[33]。在振动传递分析方面,该方法可与功率流法相结合,用于分析并联管路系统中不同路径的能量传递特征,并识别主要振动传递路径^[34]。同时,针对基础激励、流体脉动激励和随机激励等复杂工况,传递矩阵法也可用于多源激励下充液管路系统的频域响应求解^[35-36]。

3.3 有限元法

有限元法是一种通过离散化连续结构形成数值求解模型的管路动力学分析方法,能够有效处理复杂几何形状、边界条件及流固耦合问题。本小节从梁单元、壳单元和实体单元等典型有限元建模形式出发,归纳其在管路系统动力学建模与振动预测中的应用特点。

3.3.1 梁单元

包括 Euler-Bernoulli 梁理论和 Timoshenko 梁理论在内的梁单元有限元模型是有限元法中应用较为广泛的建模形式。梁单元具有自由度少、建模效率高和适合整体动力学响应分析等优点,可用于管路固有特性及流固耦合振动分析。针对连接软管对管路边界条件的影响,可将其等效为支撑刚度引入梁单元模型,用于分析流体压力对系统固有频率的影响^[14]。针对柔性机匣、卡箍支撑与多管路耦合问题,可采用机匣-多管路联合建模方法,并结合功率流法分析支撑边界对振动传递路径的影响^[37]。针对流体脉动激励,可将管路截面的脉动压力作用等效为节点力并引入有限元模型,从而在保证计算精度的同时提高振动响应求解效率^[38]。

3.3.2 壳单元和实体单元

在流固耦合管路系统动力学建模中,传统梁单元难以精确描述横向剪切变形及高阶模态特征和局部应力分布,因此可采用壳单元、实体单元及混合单元建立更精细的管路有限元模型,以提高局部响应预测精度。壳单元能够较好描述管壁变形、厚壁效应和几何非线性特征,适用于对截面变形和高阶模态有较高要求的管路动力学分析。针对厚壁管路及几何参数对固有特性的影响,可采用分层有限元法建立流固耦合模型,并分析管路半径与长度比、半径与厚度比等参数对固有频率的影响^[39]。实体单元具有较强的局部几何和应力描述能力,可与梁单元结合,用于输流管路应力响应^[40]、裂纹损伤和振动传递可视化分析^[41]。其中,管体可采用实体单元离散,流体域可采用梁单元等简化形式描述,并通过位移协

调建立流固耦合关系,从而在提高局部响应预测能力的同时控制计算成本。

3.4 谱单元法

谱单元法是一种基于频域精确解构造单元动态刚度矩阵的建模方法,兼具较高的求解精度与计算效率。Lee等^[42]较早采用谱单元法建立了内含非定常流体的均匀直管动力学模型,将管体轴向、横向位移以及流体压力和流速统一纳入耦合控制方程。Sun等^[43]采用谱单元法建立了充液卡箍-管路系统动力学模型,并研究了直管、L形管和并联系统的固有特性。此外,Bu等^[44]提出了适用于多约束、多附件输流管的增强型谱单元方法,并实现固有频率、振型、频响和波矢的统一求解。针对多源激励工况,Sun等^[45]建立了同时考虑轴向与横向流固耦合效应的管路系统谱单元模型,分析了基础激励与脉动激励共同作用下L形及并联输流管路的振动响应。同时,谱单元法还可用于基于带隙超结构的管路减振设计^[46]。

3.5 绝对节点坐标法

相比有限元法在处理复杂边界条件与流固耦合问题上的普适性,绝对节点坐标法在刻画管路系统大变形、强非线性及柔性运动耦合方面具有独特优势。绝对节点坐标法通过在节点上同时定义位置与梯度坐标,避免了传统梁单元中的附加转角变量,能够更准确地描述大变形条件下的几何非线性行为。Chen等^[47]采用绝对节点坐标法建立了悬臂管路的动力学模型,通过试验和仿真研究了流体激励导致的管路结构振动。Yuan等^[48-49]将绝对节点坐标法扩展至三维管路系统,揭示了管路系统的面内与面外振动特性。Guo等^[50]基于绝对节点坐标法建立了空间管路动力学模型,计算了输流管路的非线性振动响应。此外,Guo等^[51]提出了三维空间管路动力学模型,研究了直管系统的大幅振动特性。Dai等^[52]采用绝对节点坐标法,建立了考虑流体脉动激励的

L形管路动力学模型,分析了管路支撑布置对管路系统振动特性的影响,该研究结果表明在中部增加支撑可有效降低振动水平。

3.6 组合建模法

针对复杂管路系统,单一建模方法往往难以同时兼顾精度与计算效率。为克服有限元法、半解析法和传递矩阵法在局部精度或复杂管路系统计算效率上的局限,组合建模方法通过合理整合不同建模策略的优势,便于分析输流管路系统的流固耦合动力学行为。目前,主流的组合方法主要包括有限元-特征线法和有限元-传递矩阵法^[53],二者的核心思想相同,均采用特征线法或传递矩阵法求解流体域的压力或流场分布,基于有限元法模拟管路实体域的动力学模型,进而通过迭代算法模拟双向流固耦合动力学行为。对于航空发动机液压系统中常见的串联和分支管路,Guo等^[54]将半解析法与改进传递矩阵法相结合,建立了柔性机匣-并联充液管路系统动力学模型,分析了机匣柔性对充液管路系统振动特性的影响。Ji等^[55-56]提出了双域动态子结构法,实现了管路系统的模型降阶,并进一步提出了有限元-半解析法和有限元-谱单元法,高效模拟输流管路系统的动力学行为。

半解析法通常基于能量原理或控制方程,通过假设模态、Galerkin离散或级数展开获得低维动力学模型;传递矩阵法以状态向量沿管路拓扑路径的频域传递为核心,适合描述振动和压力波的传播、反射及路径耦合;有限元法则通过场变量离散和整体矩阵组装建立系统动力学方程,可用于特征值、频域响应和时域瞬态分析。谱单元法、绝对节点坐标法和组合建模方法则分别在频域动态刚度求解、大变形非线性描述和全局-局部耦合建模等方面具有优势。为便于比较不同管路动力学建模方法的特点,从建模精度、计算效率、适用范围及主要特点等方面进行了归纳总结,管路系统动力学建模方法对比如表2所示。

表 2 管路系统动力学建模方法对比
Tab.2 Comparison of dynamic modeling methods for piping systems

建模方法	精度	计算效率	适用范围	主要特点
半解析法	中高	高	规则或分段管路	物理意义清晰,适合参数分析;复杂管路和局部应力描述能力有限
传递矩阵法	中高	高	规则分支和并联管路	适合频域与传递路径分析;复杂拓扑和强非线性处理较困难
有限元法	高	中	复杂几何和边界管路	通用性强,可分析局部应力;模型规模和计算成本较高
谱单元法	高	较高	频域响应和波传播问题	单元数量少、频域精度高;复杂边界和时域问题扩展较难
绝对节点坐标法	高	中低	大变形和强非线性管路	适合几何非线性动力学分析;自由度多、求解复杂
组合建模方法	中高	中高	全局-局部耦合问题	兼顾整体效率和局部精度;子模型耦合关系较复杂

4 管路系统动态优化设计

管路系统在复杂多源激励作用下易出现共振超限。通过动态优化设计调节固有频率、降低振动响应和动应力水平,可提高管路系统振动可靠性。本节从卡箍布局和管路走向优化两个方面梳理现有研究进展。

4.1 卡箍布局优化设计

卡箍布局优化的核心是通过调整支撑位置改变管路系统的等效边界条件,从而调节固有频率和振动响应水平。现有研究主要从避共振设计和响应幅值控制两个方面展开:一方面通过提高或调整系统固有频率,使其避开发动机转子激励频率;另一方面通过降低振动幅值或动应力响应,提高管路系统抗振安全裕度。

4.1.1 避共振优化设计

在管路动力学设计中,优化系统固有频率并避开转子激励频率是抑制共振的核心手段。从优化目

标来看,卡箍布局优化设计通常以卡箍安装位置为设计变量,以固有频率提升或避共振约束满足等为优化目标。例如,针对 L 形和 Z 形管路,可通过优化卡箍安装位置显著提高第 1 阶固有频率^[57]。对于多卡箍空间管路,结合卡箍位置灵敏度分析的局部寻优方法能够在提高基频的同时显著提升计算效率^[58]。对于充液管路,卡箍布局优化还可同时改善管路固有频率和流体脉动响应特性^[59]。

4.1.2 降幅值优化设计

降低振幅是提高系统抗振性能的另一关键途径。与避共振优化侧重频率调节不同,降幅值优化更加关注管路关键位置的实际响应水平,常以共振响应或动应力峰值最小化为优化目标。在频率与振幅双目标优化中,可在满足避共振约束的基础上,同时提高基频并降低共振响应幅值^[60]。针对管路服役寿命与可靠性问题,也可基于降阶有限元模型,以振动应力最小化为目标优化卡箍布局,从而实现动应力优化设计^[61]。表 3 为常见的卡箍布局优化设计方法。

表 3 卡箍布局优化设计方法
Tab.3 Clamp layout optimization methods

优化类型	参考文献	优化目标	优化方法
避共振优化设计	孙圣哲等 ^[57]	1 阶固有频率最大	全局高效优化方法
	吕尚等 ^[58]	管路基频提升	局部灵敏度寻优算法
降振幅优化设计	Zhang 等 ^[60]	基频最大化与共振响应最小	遗传算法
	刘芳名等 ^[61]	振动应力最小	遗传算法

4.2 管路走向优化设计

与卡箍布局优化主要关注局部支撑位置不同,管路走向优化设计通过调整管路路径、形状及空间分布,实现动态性能、空间利用率与装配可行性的综合最优。这类研究可分为几何路径优化、多管协同布局以及基于动力学特性的参数化优化等方向。在几何路径优化方面,管路长度、分支点数量、路径平滑度和避障约束等是主要优化目标。针对复杂发动机外部空间,可结合包围盒、栅格矩阵和智能优化算法处理障碍物约束,实现管路长度与压力损失的多目标优化^[62]。在多管协同布局方面,优化目标由单根管路路径扩展到多管成束敷设、卡箍位姿和支撑布局的协同优化。考虑双联卡箍约束的多管协同敷设方法可同时优化管路路径参数与卡箍位姿参数,从而提高多管系统的空间布置协调性和支撑设计合理性^[63]。在基于动力学特性的参数化

优化方面,管路走向不再只服从几何布置要求,而是进一步与固有频率、避振性能和结构应力等动力学指标相结合^[64]。表 4 为管路走向优化设计方法总结。

管路系统动态优化的本质是通过支撑边界和结构构型的调整,改变系统模态分布、共振区间及振动能量传递路径。卡箍布局优化主要通过改变局部边界刚度和约束位置调节系统固有特性,管路走向优化则通过改变空间构型、管段长度和连接关系影响整体模态耦合与局部动应力分布。现有研究多以固有频率提升、共振规避或响应幅值降低为目标,而未充分考虑支撑非线性、多源激励传递路径及局部动应力响应之间耦合关系。因此,管路动态优化设计应由单一频率避振向模态调控和振动响应控制相结合的综合优化方向发展。

表 4 管路走向优化设计方法
Tab.4 Pipeline routing optimization methods

优化方向	参考文献	优化目标	设计变量	主要内容
几何路径优化	于嘉鹏等 ^[62]	管路长度与流体压力损失最小化	管路中心线节点坐标	自适应天牛须算法,利用包围盒/栅格矩阵处理障碍物
多管协同布局	柳强等 ^[63]	路径和卡箍位姿协同优化	管路路径参数与双联卡箍位姿参数	考虑双联卡箍约束,采用改进多目标进化算法实现路径与支撑同步优化
基于动力学特性的参数化优化	Ji等 ^[64]	最小应力	管路形状	梁-实体单元耦合建模,利用粒子群算法求解

5 管路系统振动抑制方法

管路系统振动抑制的核心在于削弱激励输入、改变振动传递路径或增强结构耗能能力。围绕这一目标,现有研究主要从支撑结构减振、附加减振装置与表面阻尼、流体脉动抑制等方面展开,分别对应边界条件调控、结构耗能增强和源端激励削弱。本节围绕上述 3 类方法梳理管路系统振动抑制研究进展。

5.1 支撑结构减振方法

支撑结构减振的核心是通过调节支撑刚度、阻尼和约束位置,改变管路系统的等效边界条件及振动传递路径。在工程实践中,管路振动抑制通常需要结合试验测试结果,通过调整支撑方案、卡箍约束方式和阻尼配置等手段实现关键部位振动控制^[65]。现有支撑结构减振研究主要集中在高阻尼支撑材料、新型卡箍结构、支撑参数优化和功能集成化卡箍等方面。在高阻尼支撑材料方面,金属橡胶因具有

较强耗能能力而常用于卡箍减振设计。相关试验表明,新型金属橡胶毡垫的损耗因子相对传统金属橡胶提升约 40.0%~43.8%,说明其具有更好的减振性能^[66]。在新型卡箍结构方面,分段式管夹可通过改变接触和耗能形式提高振动抑制效果。在 6g 和 8g 加速度激励工况下,该类管夹可使管路加速度最高衰减 91.0%、动应力最高衰减 38.8%,且激励强度越大,减振优势越明显^[67]。

在支撑参数优化方面,卡箍刚度、阻尼、安装位置和数量会共同影响系统稳定性与隔振性能。高阻尼卡箍虽然能够拓宽高频隔振带宽,但也可能降低系统稳定性,因此需要结合隔振频带和稳定性要求综合确定支撑参数。同时,可基于振动加速度和振动应力响应建立定量评价方法,用于比较不同卡箍配置下的抑振效果^[17]。在功能集成化方向,智能卡箍通过集成压电、摩擦电等功能单元,可兼具支撑减振、自供电、状态监测和自感知能力,为航空管路在线监测与智能维护提供了新的技术途径^[68]。图 4 为管路支撑结构与相应的抑振性能分析方法。

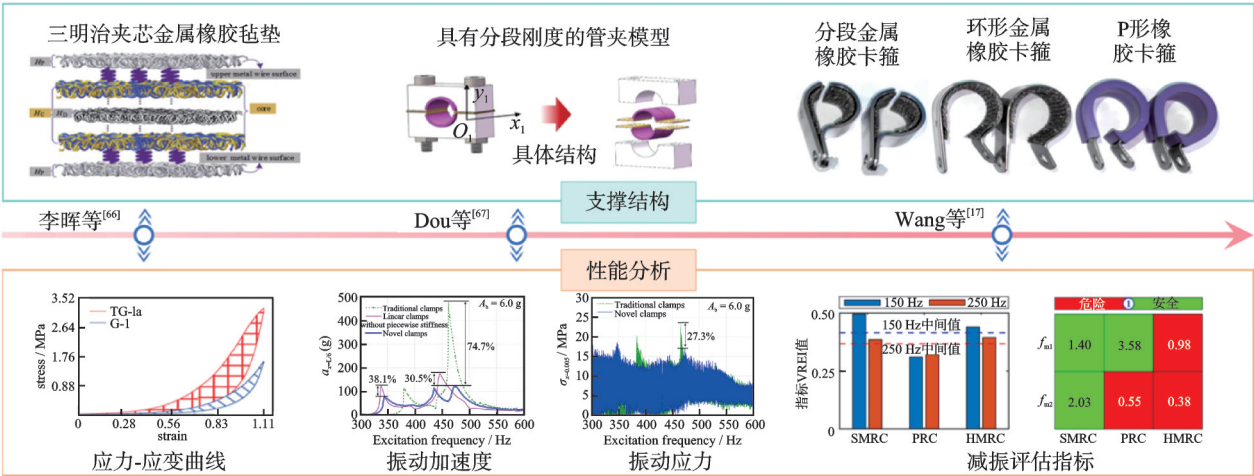


图 4 管路支撑减振结构及性能分析方法
Fig.4 Pipeline vibration-isolation supports and corresponding performance analysis methods

5.2 附加减振装置与表面阻尼方法

附加减振装置与表面阻尼方法的共同特点是通

过引入附加耗能机制,改变管路系统的能量分配与耗散路径。其中,离散吸振结构主要包括颗粒碰撞阻尼、动力吸振器^[69]、非线性能量阱等形式,依靠局

部附加自由度、碰撞摩擦或非线性能量转移实现振动能量吸收;表面阻尼设计则包括被动阻尼层、主动约束阻尼层等形式,主要通过黏弹性材料剪切变形、界面耗能或主动调控实现分布式减振。在离散吸振结构方面,非线性能量阱可在不明显改变系统固有特性的情况下实现多模态自适应能量吸收,从而降低共振频带内的振动幅值^[70]。在表面阻尼设计方

面,黏超弹性材料惯性阻尼器可用于管路多模态弯曲共振的宽频抑制^[71]。约束阻尼层可通过建立管路系统动力学模型,分析阻尼层参数对管路振动特性的影响^[72]。此外,拓扑优化方法可用于阻尼层轻量化设计,在减少 70% 材料用量的情况下仍保持与全覆盖状态接近的抑振性能^[73]。表 5 为散吸振结构与表面阻尼设计振动抑制方法总结。

表 5 离散吸振结构与表面阻尼设计振动抑制方法

Tab.5 Vibration suppression methods using discrete vibration absorbers and surface damping treatments

抑制策略	参考文献	技术方案	关键创新点	说明
离散吸振结构	Mao 等 ^[70]	非线性能量阱	多模态自适应能量吸收	主共振控制效率约 76.28%
	Jing 等 ^[71]	黏超弹性材料惯性阻尼器	引入黏超弹性材料,分析在多模态条件下的抑制作用	一阶减振效率最高可达 98.26%
表面阻尼处理	Ma 等 ^[72]	约束阻尼层	建立了含约束阻尼层管路系统的机理模型	揭示了约束阻尼层参数对管路振动的影响机制
	Du 等 ^[73]	黏弹性阻尼层拓扑优化	提出渐进式拓扑优化方法	30% 体积下性能仅降 2.46%,实现高效轻量化

5.3 流体脉动抑制方法

压力脉动是引发管路振动与噪声的主要原因。针对高压、高速及变工况条件下的流体振动问题,现有研究多通过在泵出口或近端管路串联消脉动装置,从源端削弱压力波动以抑制下游管路振动与噪声。根据控制方式不同,流体脉动抑制方法可分为被动吸收结构和主动/半主动抑制方法。前者主要依靠流体惯性、腔体容积和气体压缩性等效应降低压力脉动幅值,典型结构包括亥姆霍兹共振器、扩张腔式抑制器和皮囊式消振器等;后者则通过可调结构参数、压电执行器或控制算法实时调节系统响应,以适应复杂变工况下的脉动抑制需求。在被动吸收结构方面,亥姆霍兹脉动衰减器可结合集中参数法与分布参数法建立理论模型,并用于航空液压系统宽频压力脉动抑制。试验结果表明,该亥姆霍兹脉动衰减器在 21 MPa 高压工况下脉动衰减率可达 40%,在 0~

1 000 Hz 范围内最大插入损失为 19 dB^[74]。气液耦合圆筒型皮囊消振器则可通过阻抗匹配和宽温设计实现宽频抑制,在航空液压泵试验台上,394.2~1 540 Hz 频段内最大插入损失可达 29.6 dB,常温与高温工况下时域脉动幅值削减率最高分别约为 75.7% 和 68.0%^[75]。

在主动和半主动抑制方面,相关方法通常通过调节蓄能结构参数、利用压电执行器产生反相脉动,或采用自适应控制算法实现压力波动抑制。其中,基于改进窄带自适应陷波滤波器的前馈主动抑制方法可面向航空液压系统噪声控制,在高压液压系统复杂变工况下实现稳定的窄带噪声抑制^[76]。总体来看,现有源端消脉动装置研究主要集中于飞机液压管路系统,针对航空发动机燃油和润滑油管路的专门设计、宽工况适应性以及与结构振动响应的耦合抑制研究仍相对有限。表 6 为管路系统流体脉动抑制方法总结。

表 6 管路系统流体脉动抑制方法

Tab.6 Fluid pulsation control methods for pipeline systems

抑制策略	参考文献	技术方案	说明
被动吸收结构	Zhou 等 ^[74]	亥姆霍兹脉动衰减器	结合集中和分布参数法建模,在 21 MPa 下衰减率达 40%,最大插入损失 19 dB
	徐远志等 ^[75]	气液耦合圆筒型皮囊消振器	面向机载液压系统实现宽频宽温抑制,在约 394.2~1540 Hz 内最大插入损失约 29.6 dB,常温工况下脉动削减率最高约 75.7%
主动和半主动抑制	Wu 等 ^[76]	基于改进窄带自适应陷波滤波器的前馈主动抑制	在高压航空液压系统复杂工况下保持稳定的窄带噪声抑制效果

不同振动抑制方法的本质差异在于其作用对象不同,即分别从边界条件、结构耗能和激励输入等层面调控管路系统动力学响应。支撑结构减振主要通过改变边界刚度、边界阻尼和支撑位置,调节系统固有特性、模态耦合关系及振动传递路径;附加减振装置与表面阻尼方法则通过引入附加自由度或分布式耗能层,改变系统能量分配和耗散机制,从而降低共振响应和局部动应力;流体脉动抑制主要作用于激励输入端,通过削弱压力脉动幅值或改变激励相位,降低流固耦合振动输入。由此可见,支撑减振、附加耗能和源头消脉分别对应边界条件调控、结构耗能和激励输入调控。对于多源激励下的航空发动机管路系统,振动抑制不应仅关注局部响应幅值降低,还应结合主导振动路径识别,明确振动能量由激励源向关键响应部位传递的过程,从而实现边界、耗能和激励输入的协同调控。

6 总结与展望

航空发动机管路系统在多源激励下呈现显著的耦合振动特性。随着半解析法、传递矩阵法、有限元法、谱单元法、绝对节点坐标法及组合建模方法的发展,管路系统动力学建模与振动预测已具备较好的理论与方法基础;同时,动态优化与振动抑制技术的应用也推动了低振动设计研究的发展。现有研究的验证主要包括3个层面:①通过力-位移曲线、固有频率和频响函数等指标获取或修正支撑边界参数;②通过模态频率、频响特性、功率流和动应力响应等指标校核动力学模型;③通过响应幅值、应力水平和压力脉动衰减等指标评价优化设计与抑振效果。

6.1 总结

1) 在非线性支撑表征与参数辨识方法方面,相关研究已从线性弹簧模型逐步发展至可描述滞回耗能特性的Bouc-Wen等非线性模型。针对制造公差与装配偏差导致的支撑参数不确定性,基于试验数据驱动的参数反推辨识方法已成为修正实际装配边界条件、提升系统预测精度的关键途径之一。

2) 在建模方法体系与组合建模策略方面,半解析法、传递矩阵法、谱单元法、有限元法及绝对节点坐标法构成了互补的建模体系,分别适用于不同几何复杂度、非线性程度和计算效率需求下的动力学分析。组合建模方法(如有限元-传递矩阵法等)结合了不同方法的优势,可兼顾复杂多分支管路系统的局部高精度与全局计算效率。

3) 在管路动态优化设计与振动抑制方面,通过卡箍布局与管路走向的动态优化,可规避共振区间并降低振动响应;阻尼器、约束阻尼层与高阻尼支撑等结构设计,可与被动或主动流体脉动抑制方法相结合,实现宽频、多工况下的结构耗能增强与源端压力脉动抑制。

6.2 展望

面向下一代高性能航空管路系统,管路动力学研究仍面临诸多挑战,建议重点关注以下6个方向。

1) 系统级降阶建模与机理-数据融合分析。航空发动机管路系统具有高维、多耦合和强非线性特征,未来需在机理建模基础上发展高效降阶模型与快速分析方法,在保证精度的同时,提升工程迭代效率。随着人工智能和数据驱动方法的发展,可将机理模型、试验测试数据和服役监测数据相结合,构建物理约束代理模型、物理信息神经网络和数字孪生模型,实现管路固有特性、振动响应和疲劳风险的快速评估。同时,可利用机器学习方法开展模型修正、边界条件反演和多源激励响应识别,形成机理模型与数据驱动方法融合的智能化管路动力学分析框架。

2) 复杂管路系统的动力学解耦与传递路径分析。针对航空发动机管路系统强耦合特征,关键问题在于揭示复杂构型下流固耦合、结构耦合与边界非线性共同作用的主导机制,并定量识别关键振动传递路径与敏感连接部位,为隔振和减振措施提供依据。未来亟需发展高效动力学解耦方法,识别耦合模态的形成机制、耦合强度的主导来源及其随工况变化的演化规律。同时,应面向工程应用建立振动传递路径分析框架,对传递路径进行定量表征与排序,明确对关键响应贡献最大的连接界面和支撑部位。

3) 管路测试与振动放大可视化技术。管路系统响应测试常面临测点布置受限、背景噪声强和局部振动难以捕捉等问题,亟需发展可信、可重复且可用于机理分析的局部动态响应获取方法。未来应面向复杂空间构型与局部关键区域,发展非接触测振与振动可视化测试方法,重点推进视觉测振^[77]、振动放大可视化和全场振动测量技术^[78],实现对局部振动模态与振型演化特征的直观呈现,用于关键部位诊断与隔振方案效果评估,并为模型参数校核提供高质量试验依据。

4) 振动抑制一体化设计与轻量化材料应用。

针对多源激励与多物理场耦合背景下的宽频、变工况振动抑制问题,未来应进一步开展多域协同优化,实现支撑参数、阻尼配置与流体脉动控制的系统级协同设计。同时推进复合材料管路、高阻尼卡箍等轻量化方案在宽频抑振中的应用机理、连接可靠性与工程可实施性研究,并建立面向工程应用的评价指标与试验验证方法体系,实现管路系统减振与轻量化的综合优化。

5) 连接界面接触非线性与磨损退化机理。针对管路系统中卡箍-管路及接头处连接界面的接触强非线性与磨损问题,关键科学问题在于界面状态如何改变系统等效边界与耦合特性,并进一步影响固有特性和振动响应。未来需重点关注接触界面力学参数的试验测量与辨识方法,获取不同工况下接触界面参数。进一步建立精细化接触力学模型,揭示接触参数对摩擦磨损演化的影响机制,并阐明界面退化对管路系统振动传递路径、固有特性及共振边界的影响规律。此外,可结合机器学习方法和监测数据,开展连接界面状态识别、接触参数反演和磨损退化趋势预测,为支撑边界状态评估和预防性维护提供数据支撑。

6) 服役工况下的疲劳寿命与可靠性评估。在多源激励、热流固耦合与随机载荷共同作用下,未来需建立动力学响应与疲劳损伤之间的定量关联,实现动力学预测与寿命评估贯通。在此基础上,应建立基于动力学响应的剩余疲劳寿命评估框架,识别寿命敏感的动力学要素(如支撑刚度/阻尼、装配偏差、预紧力退化与脉动载荷特征等)及其不确定性对响应与损伤的传递影响,形成面向工程应用的寿命评价指标与试验验证方法,并给出关键参数对寿命影响的敏感度及相应的安全裕度。此外,可发展机理数据双驱动的疲劳损伤预测、剩余寿命评估和可靠性动态更新方法,为航空发动机管路系统的健康管理和预测性维护提供支撑。

参 考 文 献

- [1] ZHU L, CHEN C, JIANG Y. Simulation analysis and experimental investigation on the fluid-structure interaction vibration characteristics of aircraft liquid-filled pipelines under the superimposed impact of external random vibration and internal pulsating pressure[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(17): 8008.
- [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] 崔向敏, 潘冬, 彭楠, 等. 航空发动机外部管路支架断裂分析及优化[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2020, 33(4): 46-52.
CUI Xiangmin, PAN Dong, PENG Nan, et al. Fracture analysis and optimization of aeroengine external pipeline bracket[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2020, 33(4): 46-52.(in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 王姚杰. V2500航空涡扇发动机P4.9管路断裂失效分析[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- [6] GAO P X, YU T, ZHANG Y L, et al. Vibration analysis and control technologies of hydraulic pipeline system in aircraft: a review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(4): 83-114.
- [7] 汪博, 高培鑫, 马辉, 等. 航空发动机管路系统动力学特性综述[J]. *航空学报*, 2022, 43(5): 131-154.
WANG Bo, GAO Peixin, MA Hui, et al. Dynamic characteristics of aero-engine pipeline system: review[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(5): 131-154.(in Chinese)
- [8] ZHU H Y, WANG S H, JIN Z, et al. Research progress in aircraft pipeline dynamics characterization: a review[J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2025, 13(5): 285.
- [9] 陈伟, 曹润青, 胡嘉纯, 等. 细长输流管道大变形动力学研究进展[J]. *力学进展*, 2025, 55(1): 113-174.
CHEN Wei, CAO Runqing, HU Jiachun, et al. Recent advances in research on large-deformation dynamics of slender pipes conveying fluid[J]. *Advances in Mechanics*, 2025, 55(1): 113-174.(in Chinese)
- [10] TANG Y, ZHANG H J, CHEN L Q, et al. Recent progress on dynamics and control of pipes conveying fluid[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2025, 113(7): 6253-6315.
- [11] DING H, JI J C. Vibration control of fluid-conveying pipes: a state-of-the-art review[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2023, 44(9): 1423-1456.
- [12] QU X C, GUO X M, MA H, et al. Mechanical characteristics of pipe clamp under parallel and angular misalignment[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2026, 54(1): 2630399.
- [13] DOU B, LI M, DING H. A novel retaining clip for vibration reduction of fluid-conveying pipes by piecewise constraints[J]. *Mechanical Systems and Signal Process-*

- ing, 2024, 210: 111159.
- [14] CAO Y M, GUO X M, MA H, et al. Dynamic modeling and natural characteristics analysis of fluid conveying pipeline with connecting hose[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 193: 110244.
- [15] CHEN W J, CAO Y M, GUO X M, et al. Semi-analytical dynamic modeling and fluid-structure interaction analysis of L-shaped pipeline[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 196: 111485.
- [16] CHEN W J, GUO Z W, CHEN S, et al. Semi-analytic modeling and experimental verification of arbitrary aero-engine complex spatial pipeline[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2024, 131: 505-534.
- [17] WANG W W, MA H, LIU S H, et al. Vibration suppression of spatial pipes with varied clamp configurations: dynamic modeling and experimental validation [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 241: 113437.
- [18] CHEN W J, CAO Y M, GUO X M, et al. Nonlinear vibration analysis of pipeline considering the effects of soft nonlinear clamp[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, 43(10): 1555-1568.
- [19] CAO Y M, CHEN W J, MA H, et al. Dynamic modeling and experimental verification of clamp - pipeline system with soft nonlinearity[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111(19): 17725-17748.
- [20] CHEN W J, CAO Y M, CHEN S, et al. Semi-analytical dynamic modeling of parallel pipeline considering soft nonlinearity of clamp: a simulation and experimental study[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 201: 110648.
- [21] CAO Y M, MA H, GUO X M, et al. Comparison of nonlinear modeling methods for the composite rubber clamp[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, 45(5): 763-778.
- [22] CHEN W J, QU X C, ZHANG R X, et al. Nonlinear stress analysis of aero-engine pipeline based on semi-analytical method[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2025, 46(3): 521-538.
- [23] FU Q, ZENG J, MA H, et al. A mechanical calculation model for the nonlinear mechanical behavior of the metal rubber clamp in aero engine[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2025, 53 (4) : 3159-3178.
- [24] ZHANG R X, GUO X M, WANG W W, et al. Natural characteristics of a bracket-clamp-spatial pipeline system considering the influence of axial and torsional stiffness[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2025, 54: 2540462.
- [25] SHI Y, GUO X M, MA H, et al. Mechanism analysis and experimental study on preload force and tightening torque of screws considering different degradation stages of aero-engine clamps[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2026, 54(1): 2650416.
- [26] 吕金华, 臧朝平, 张让威, 等. 基于测试数据的卡箍非线性等效建模方法[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(9): 1944-1952.
- LÜ Jinhua, ZANG Chaoping, ZHANG Rangwei, et al. Nonlinear equivalent modeling method for clamp based on test data[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(9): 1944-1952.(in Chinese)
- [27] 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)
- [28] XU K P, XU C, LIU Y C, et al. A multi parameter synchronous identification method for stiffness and damping of single fixed clamp based on Pareto algorithm [J]. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 2024, 29(4): 502-513.
- [29] XU K P, WANG R Z, WANG B. Multi-parameter synchronous identification method for dual metal rubber clamps considering directional differences in mechanical properties[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15: 11239.
- [30] 赵千里, 孙志礼, 柴小冬. 具有弹性支承输流管路的振动分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(6): 1222-1226.
- ZHAO Qianli, SUN Zhili, CHAI Xiaodong. Vibration analysis of flow pipelines with elastic support[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(6): 1222-1226.(in Chinese)
- [31] 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.
- [32] GUO X M, CAO Y M, MA H, et al. Dynamic analysis of an L-shaped liquid-filled pipe with interval uncertainty[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 217: 107040.
- [33] 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.

- [34] GUO X M, GE H, XIAO C L, et al. Vibration transmission characteristics analysis of the parallel fluid-conveying pipes system: numerical and experimental studies[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 177: 109180.
- [35] GUO X M, GAO P X, MA H, et al. Vibration characteristics analysis of fluid-conveying pipes concurrently subjected to base excitation and pulsation excitation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 189: 110086.
- [36] GUO X M, GU J F, LI H, et al. Dynamic modeling and experimental verification of an L-shaped pipeline in aero-engine subjected to base harmonic and random excitations[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2024, 126: 249-265.
- [37] GUO X M, MA H, GE H, et al. Vibration transmission characteristics analysis of a flexible casing-multiple pipes system[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 217: 111536.
- [38] CAO Y M, MA H, GUO X M, et al. Fluid pulsation excitation characterization and pipeline vibration response analysis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 231: 112691.
- [39] FAKIRI H, HADJOU A. A new fluid-structure coupling model: case of a pipe under internal pressure[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2023, 15(5): 1-15.
- [40] SHI Y, LV S, SUN W, et al. Dynamics modeling of the liquid-filled pipe system by coupling the incompatible solid and virtual beam elements[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2025, 33: 1-13.
- [41] JI W H, SUN W, MA H W, et al. Dynamic modeling and analysis of fluid-delivering cracked pipeline considering breathing effect[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 264: 108805.
- [42] LEE U, PARK J. Spectral element modelling and analysis of a pipeline conveying internal unsteady fluid[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, 22(2): 273-292.
- [43] SUN Z H, YU R Y, WANG X, et al. Dynamic analysis of liquid-filled clamp-pipe systems based on the spectral element method[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2024, 95(1): 24.
- [44] BU Y, TANG Y, YANG T Z, et al. Enhanced dynamic modeling of pipes conveying fluid with multiple constraints and accessories based on spectral element method[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 237: 113097.
- [45] SUN Z H, ZHANG X F, XU H D, et al. An efficient spectral element method for dynamic analysis of fluid-conveying pipes under base and pulsation excitations[J]. *Computers & Structures*, 2026, 320: 108017.
- [46] TANG Y, LI S J, JIA S, et al. Vibration suppression of L-shaped pipelines conveying fluid based on multi-directional bandgap generation[J]. *Ocean Engineering*, 2026, 352: 124520.
- [47] CHEN W, YAN H, CAO R Q, et al. Theoretical and experimental investigations on large-deformation dynamics of the standing cantilevered pipe conveying fluid[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 220: 111688.
- [48] YUAN J R, DING H. Dynamic model of curved pipe conveying fluid based on the absolute nodal coordinate formulation[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 232: 107625.
- [49] YUAN J R, DING H. Three-dimensional dynamic model of the curved pipe based on the absolute nodal coordinate formulation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 194: 110275.
- [50] GUO Z L, NI Q, ZHOU X, et al. Three-dimensional dynamics of supported pipe conveying fluid with arbitrary initial spatial shape[J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2024, 104: 105196.
- [51] GUO Z L, NI Q, CAO R Q, et al. Large-amplitude vibrations of cantilevered pipe conveying fluid with arbitrary initial configuration in three-dimensional sense[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2025, 113(4): 3079-3096.
- [52] DAI H L, XING H R, HE Y X, et al. Parametric resonance and suppression for L-shaped pipe conveying pulsating fluid[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2025, 57(4): 103318.
- [53] JI W H, SUN W, WANG D H, et al. A hybrid finite element and extended transfer matrix method for the dynamic modeling of fluid-conveying pipeline with breathing cracks[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 212: 111276.
- [54] GUO X M, CAO Y M, MA H, et al. Vibration analysis for a parallel fluid-filled pipelines-casing model considering casing flexibility[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 231: 107606.
- [55] JI W H, MA H W, SUN W, et al. Nonlinear dynamic modeling and analysis of the fluid-transporting cracked pipe using the hybrid semi-analytical and finite element method[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 216: 111505.
- [56] JI W H, MA H W, LIU F M, et al. Dynamic analysis of cracked pipe elbows: numerical and experimental studies[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*

- es, 2024, 281: 109580.
- [57] 孙圣哲, 孙中翰, 董泽光, 等. 发动机管路固有振动特性调整的卡箍安装位置优化设计[J]. 推进技术, 2025, 46(4): 312-324.
- SUN Shengzhe, SUN Zhonghan, DONG Zeguang, et al. Optimization design of clamps layout for adjusting natural vibration characteristics of engine pipes[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(4): 312-324. (in Chinese)
- [58] 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.
- LÜ 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)
- [59] 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)
- [60] ZHANG Y, SUN W, JI W H, et al. Hoop layouts optimization for vibration reduction of L-shaped pipeline based on substructure-analytical model and genetic algorithm[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(5): 243.
- [61] 刘芳名, 孙伟. 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[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(9): 1277-1286, 1333.
- LIU Fangming, SUN Wei. Dynamic modeling and stress reduction optimization of series pipelines based on pipe-solid element coupling[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2024, 45(9): 1277-1286, 1333. (in Chinese)
- [62] 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 antennae search algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(20): 174-184. (in Chinese)
- [63] 柳强, 刘贝贝, 于嘉鹏, 等. 考虑双联卡箍约束的航空发动机多管束束敷设优化方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(19): 218-229.
- LIU Qiang, LIU Beibei, YU Jiapeng, et al. Multi-pipe bundle layout optimization for aero-engine considering double-clamp constraints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(19): 218-229. (in Chinese)
- [64] JI W H, SUN W, MA H, et al. Parametric finite element modeling and topology optimization for stress reduction of spatial pipeline based on beam/solid element coupling[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2025, 239(8): 2864-2881.
- [65] 袁伟, 孙亮, 赵杰, 等. 往复压缩机管系刚度控制减振技术及其应用[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(4): 777-783.
- YUAN Wei, SUN Liang, ZHAO Jie, et al. Stiffness control and vibration reduction technology for reciprocating compressor piping system and its application[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(4): 777-783. (in Chinese)
- [66] 李晖, 孙占彬, 刘小川, 等. 新型三明治夹芯金属橡胶毡垫本构模型研究[J]. 力学学报, 2024, 56(9): 2596-2603.
- LI Hui, SUN Zhanbin, LIU Xiaochuan, et al. Study on constitutive model of new sandwich metal rubber felt pads[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(9): 2596-2603. (in Chinese)
- [67] DOU B, LUO Z B, DENG T C, et al. A vibration-reduction pipe clamp with piecewise stiffness[J]. Applied Mathematical Modelling, 2026, 151: 116452.
- [68] ZHU Q Y, ZHU L P, WANG Z Z, et al. Hybrid triboelectric-piezoelectric nanogenerator assisted intelligent condition monitoring for aero-engine pipeline system[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 519: 165121.
- [69] 任志英, 朱怀文, 梁盛涛, 等. 用于管路的二重动力吸振器设计与试验[J]. 振动、测试与诊断, 2025, 45(1): 103-109.
- REN Zhiying, ZHU Huaiwen, LIANG Shengtao, et al. Design and experimental study of frequency adjustable dual dynamic vibration absorber for nuclear power unit pipeline[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(1): 103-109. (in Chinese)
- [70] MAO X Y, DING H, CHEN L Q. Bending vibration control of pipes conveying fluids by nonlinear torsional absorbers at the boundary[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(8): 1690-1704.
- [71] JING J, MAO X Y, DING H, et al. Vibration control of pipes by the visco-hyperelastic inertial damper[J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113(20): 27407-27433.
- [72] MA H W, JI W H, ZHANG H, et al. Nonlinear vibration of series-parallel fluid-conveying spatial-pipe sys-

- tems with constrained-layer damping[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025, 296: 110334.
- [73] DU D X, MA H W, SUN W. Vibration suppression analysis of spatial pipelines with viscoelastic damping layer based on the topology optimization[J]. Applied Sciences, 2026, 16(1): 20.
- [74] ZHOU S H, JIAO H Y, LIU D X, et al. Numerical and experimental analysis of pressure pulsation attenuator based on Helmholtz resonator[J]. Applied Sciences, 2023, 13(14): 8381.
- [75] 徐远志,王任源,焦宗夏.基于气液耦合原理的飞机液压系统流体脉动消振器[J].航空学报,2024,45(15):50-64.
- XU Yuanzhi, WANG Renyuan, JIAO Zongxia. Attenuator for fluid pulsation in aircraft hydraulic systems based on gas-liquid coupling principle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(15): 50-64. (in Chinese)
- [76] WU C J, JIAO Z X, XU Y Z, et al. Active control method for fluid borne noise in aerospace fluid systems of variable operation statuses[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 214: 111375.
- [77] 王泽慧,汪利,焦柯,等.基于视频测量的结构连续模态辨识[J].振动、测试与诊断,2025,45(3):551-557.
- WANG Zehui, WANG Li, JIAO Ke, et al. Structural continuous modal identification by video measurement [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(3): 551-557. (in Chinese)
- [78] 谢瑞丽,许巍,陈新,等.基于单高速相机3D-DIC的涡轮叶片全场振动测量[J].振动、测试与诊断,2024,44(1):18-23.
- XIE Ruili, XU Wei, CHEN Xin, et al. Full-field vibration of turbine blade based on single-camera high-speed 3D digital image correlation[J]. Journal of Vibration,

Measurement & Diagnosis, 2024, 44(1): 18-23. (in Chinese)



第一作者简介:马辉,男,1978年9月生,博士、教授、博士生导师。入选教育部新世纪人才、科睿唯安全球高被引科学家、爱思唯尔中国高被引学者。主要研究方向为旋转机械动力学与数字孪生、旋转机械智能诊断与寿命预测、航空发动机管路系统动力学及振动控制等。主持两机专项课题、重点研发计划课题、国家自然科学基金、企业横向课题等项目40余项。以第一或通信作者身份在《IEEE Transactions on Industrial Informatics》《Mechanical Systems and Signal Processing》《航空学报》《机械工程学报》等期刊发表论文270余篇,其中SCI检索论文213篇,SCI他引8100余次。授权发明专利53项,出版学术专著2部。获中国振动工程学会科学技术一等奖1项、二等奖1项,教育部和辽宁省自然科学二等奖2项。兼任国际机构与机器科学联合会(IFToMM)转子动力学技术委员会委员、《Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics》《Engineering Failure Analysis》《振动工程学报》等国内外期刊副主编和编委。

E-mail: huima@me.neu.edu.cn

通信作者简介:高培鑫,男,1986年9月生,博士、教授。主要研究方向为航空管路振动分析与控制。

E-mail: peigaox@ytu.edu.cn