专刊——航空装备结构动力学

航空液压管路系统振动疲劳寿命评估 的响应谱方法

隋国浩¹, 阎善腾¹, 杨永博^{1,2}, 张亚辉^{1*}

(1.大连理工大学 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2.珠海格力电器股份有限公司, 广东 珠海 519070)

摘要:目的 实现航空液压管路系统在一致/多点激励作用下,高周疲劳寿命的准确高效获取。方法 考虑管 内流体 Coriolis 力和夹具的附加阻尼效应,建立一致/多点激励作用下,航空液压管路系统振动疲劳寿命评 估的响应谱方法。首先,采用复模态叠加法,在状态空间对其控制方程进行降阶,推导出一致/多点激励作 用下航空液压管路随机应力响应的显式表达。然后,基于现有的疲劳响应谱方法,依次引入与模态速度与 基础激励相关的广义相关系数,并计入非比例阻尼以及多点激励效应,建立一致/多点激励作用下航空液压 管路系统疲劳响应谱方法组合格式。结果 采用雨流计数法验证了本文方法的计算精度,并讨论了分析效率。 同时,探究了管内流体流速与激励的部分相干性对于管路系统疲劳寿命的影响。结论 本文方法计算效率极 高,且计算精度稳定,并考虑了管内流体负载与多点激励效应对疲劳寿命影响,能够满足工程中复杂管路 系统振动疲劳的分析需求。

关键词: 航空液压管路; 疲劳响应谱法; 高周疲劳; 非经典阻尼; 多点随机激励; 频域方法 中图分类号: O324 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)09-0001-10 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2024.09.001

Response Spectrum Method for Vibration Fatigue Life Assessment of Aero-hydraulic Pipelines

SUI Guohao¹, YAN Shanteng¹, YANG Yongbo^{1,2}, ZHANG Yahui^{1*}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China; 2. GREE Electric Appliances, Inc. of Zhuhai, Guangdong Zhuhai 519070, China)

ABSTRACT: The work aims to realize the accurate and efficient assessment of the high-cycle fatigue life of aero-hydraulic pipeline systems under fully/partially coherent base excitation. A response spectrum method was proposed to evaluate the high-cycle fatigue life of aero-hydraulic pipeline systems under uniform/multi-support excitation, considering the Coriolis force induced by the fluidand the additional damping of fixtures. Firstly, a complex modal superposition method was employed. The system was decoupled into a series of single-degree-of-freedom systems in state space. Combining with random vibration theory,

引文格式:隋国浩,阎善腾,杨永博,等.航空液压管路系统振动疲劳寿命评估的响应谱方法[J].装备环境工程,2024,21(9):1-10.

SUI Guohao, YAN Shanteng, YANG Yongbo, et al. Response Spectrum Method for Vibration Fatigue Life Assessment of Aero-Hydraulic Pipelines[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(9): 1-10.

*通信作者(Corresponding author)

收稿日期: 2024-08-09;修订日期: 2024-09-19

Received: 2024-08-09; Revised: 2024-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(12032008)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (12032008)

an explicit expression for the stress response of aero-hydraulic pipeline systems under fully/partially coherent base excitation was derived. Subsequently, based on the existing fatigue response spectrum method, the generalized correlation coefficients related to modal velocity and base excitation were introduced, accounting for the non-proportional damping and multi-support excitation effect, and a specified fatigue response spectrum method of aero-hydraulic pipeline systems under fully/partially coherent base excitationwas established. The rain-flow counting method was used to verify the accuracy of the proposed method, and the analysis efficiency was discussed. At the same time, the influence of fluid velocity and the partial coherence of excitation on the fatigue life of the systemswas investigated. The proposed method possesses high efficiency and stable accuracy, introducing fluid load and multi-support excitation effect on the fatigue life, which can meet the needs of fatigue analysis of complex aero-hydraulic pipeline systems in engineering.

KEY WORDS: aero-hydraulic pipelines; fatigue response spectrum method; high-cycle fatigue; non-classical damping; multi-support random excitation; frequency-domain method

液压管路系统是飞机飞行控制系统的重要部件, 受管内流体和随机激励的长时间影响^[1],会在很宽的 频带范围内产生持续的交变应力,从而导致局部的振 动疲劳失效^[2-3]。因此,在设计和开发阶段,需要高 效的方法对管路系统进行随机疲劳寿命评估。

航空液压管路是分布于整个飞机机体的多跨连续体^[4],由于结构复杂多变,通常采用有限元法 (FEM)对其进行分析。为进一步降低计算成本、改 善分析效率,针对确定性的载荷,Gao等^[5]通过部件 模态综合法分析了大跨度多支撑航空液压管路的动 力学响应,显著提高了FEM的分析效率。考虑到管 内流体 Coriolis 力和夹具阻尼使管路有限元(FE)模 型具有非经典阻尼特性,Liu等^[6]利用复模态叠加法 (CMSM)对其进行了降阶、解耦,提高了计算效率。 针对随机激励问题,Zhai等^[7]在状态空间将输流管路 FE 模型解耦后,通过虚拟激励法(PEM)计算了输 流直管的随机动力响应。Yang等^[8]结合谱迭代法和 PEM 计算了管内流体脉动和随机机体运动下液压管 路的非平稳随机响应。

目前关于多跨管路的大部分研究都假设管路受一致激励作用。然而,由于航空液压管路的空间跨度较大^[4],即便在同一振源作用下,各约束处的基础振动作用也会存在显著相位差。同时,液压管路系统所受到的基础激励来源复杂,且各约束处还存在着显著的刚度差异,这导致不同约束处基础运动的功率谱会存在差别,但彼此又并非完全无关,这类问题可以统称为多点激励问题。Yang等^[9]将混响射线矩阵方法扩展为随机振动理论,在多点基础激励下对三维多跨液压管道的稳态随机响应进行了分析,其结论说明了不同激励谱间的部分相干性也是随机响应乃至随机疲劳所必须要考虑的问题。

现阶段,广泛采用的静力设计与安全系数评级体系能够满足结构强度需求,疲劳问题越发受到关注。 在管内流体和外部激励的影响下,学者们针对航空液 压管路的疲劳失效机理开展了大量研究。Mehmood 等^[2-3]通过对飞机金属液压管路的疲劳条纹进行失效 分析,揭示了应力集中部位的裂纹成核,并用有限元方 法和分析应力集中系数来绘制应力状态。Zhang 等^[10] 考虑了高压和温度变化对管路疲劳寿命的影响。Yan 等^[11]研究了管路部件的疲劳失效机理。闫国华等^[12] 通过电镜观测了某型发动机高压液压管路的裂纹形 貌,并开展了相关仿真工作。

在随机激励环境下,管路的应力响应为宽频带的 随机过程,一般采用功率谱密度(PSD)函数反映响 应在各频率上的能量分布。于志达等[13]对振动疲劳的 分析方法进行了总结,并分析了其优缺点。目前,在 仿真分析中,普遍利用应力响应 PSD,采用单矩法[14-16] 和 Dirlik 法^[17]等成熟的频域分析方法开展系统的高 周疲劳寿命评估工作。王帅等^[18]利用 Dirlik 方法研究 了典型空间管路结构在单、多轴随机振动载荷下的动 强度特性,得到了管路结构随机振动疲劳损伤与激振 方式、方向和动应力响应之间的关系。陈志英等[19] 根据 Dirlik 方法预测了管路系统的随机振动疲劳寿 命,分析了弹性约束刚度值对于结构疲劳寿命的影 响。针对时变 PSD 系统, Yang 等^[8]提出了一种拓展 的频域方法,对考虑液体脉动的液压管路进行了疲劳 损伤评估。上述频域方法在评估管路的疲劳寿命时, 需要先计算整个系统应力响应的 PSD 函数,对于大 规模复杂结构计算成本极高。Sui 等^[20]提出了一种在 随机激励作用下结构高周疲劳寿命快速评估的响应 谱方法,此方法的核心是构造一类受 S-N 曲线与激励 谱控制的疲劳损伤响应谱,以结构与载荷的空间信息 为权重组合得到总的疲劳损伤。由于避免了应力响应 PSD 与谱矩等大量中间变量的计算,此方法计算成 本极低。然而,针对航空液压管路系统所面临的流 体负载以及多点激励的情况,疲劳响应谱法目前还 难以处理。

为实现多点部分相干激励下航空液压管路系统 疲劳寿命的高效预测,本文将疲劳响应谱方法 (FRSM)推广到非经典阻尼系统,考虑一致/多点随 机激励的影响,建立航空液压管路疲劳寿命高效评估 策略。首先,从功率谱密度函数出发,针对非经典阻

 $\cdot 2 \cdot$

尼系统,参考地震领域的复模态法^[21]对其进行解耦、 降阶,将管路动态应力表征为模态位移和速度响应的 线性组合。在多点激励环境下,将管路的应力响应分 解为拟静和动态2部分,以拟静响应反映多点激励的 非一致性。进一步基于 FRSM 的思想,通过引入一系 列新的广义相关系数以及模态速度相关的损伤反应, 建立一致/多点激励下非经典阻尼系统疲劳期望损伤 率的组合公式,实现一致/多点激励条件下航空液压 管路系统疲劳寿命的高效评估。数值算例中,以雨流 计数法的结果作为参考,验证了本文方法的正确性, 并讨论了流体流速以及激励间的部分相干性对航空 液压管路系统疲劳寿命的影响。

1 航空液压管路系统的随机响应分析

1.1 航空液压管路系统的有限元模型

航空液压管路通过夹具固定在飞机机体上,管内输送航空液压油。假设管内充满均匀不可压缩、非黏性的无旋流体,并且流体的流速和压强恒定。管路夹 具通常由金属带和金属橡胶组成,将其模拟为弹簧阻 尼系统^[22-23]。采用管路单元^[5]建立液压管路系统的有 限元模型,包含 n 个无约束自由度和 m 个夹具约束。 基础激励作用下,系统的运动方程可写为如下分块矩 阵形式:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & \boldsymbol{M}_{c} \\ \boldsymbol{M}_{c}^{T} & \boldsymbol{M}_{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{x}}(t) \\ \ddot{\boldsymbol{u}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} & \boldsymbol{C}_{c} \\ \boldsymbol{C}_{c}^{T} & \boldsymbol{C}_{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{x}}(t) \\ \dot{\boldsymbol{u}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K} & \boldsymbol{K}_{c} \\ \boldsymbol{K}_{c}^{T} & \boldsymbol{K}_{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(t) \\ \boldsymbol{u}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{p}(t) \end{bmatrix}$$
(1)

式中:n 维列向量 x(t)代表无约束自由度的绝对 位移;m 维列向量 u(t)和 p(t)分别代表管路夹具约束 处的强迫位移和反作用力;n×n 维的 M、C 和 K 分别 为质量、阻尼和刚度矩阵,下标 c、b 分别对应耦合 自由度和与约束自由度。由于各约束处的机体运动是 非一致的,p(t)为未知量。x(t)和 u(t)包含平动和旋转 分量。采用集中质量模型时,M。为零矩阵。

基础激励作用下,可以将绝对位移 x(t)分解为拟 静位移 $x_s(t)$ 和动态相对位移 $x_d(t)$ ^[24],即 $x(t)=x_s(t)+x_d(t)$,其中拟静位移可以表示为:

$$\boldsymbol{x}_{s}(t) = \boldsymbol{R}\boldsymbol{u}(t), \quad \boldsymbol{R} = -\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{K}_{c}$$
(2)

式中: **R** 为影响矩阵。采用集中质量阵, 假定阻 尼力仅与内部自由度有关, 与边界自由度无关, 则动 态相对位移的运动方程为^[24]:

$$M\ddot{\mathbf{x}}_{d}(t) + C\dot{\mathbf{x}}_{d}(t) + K\mathbf{x}_{d}(t) = -MR\ddot{\mathbf{u}}(t)$$
(3)

1.2 一致激励作用下系统的随机响应

一致激励作用下,管路系统各支座处基础激励的 功率谱密度函数,不存在相位差以及其他的部分相干 性,即各支座处的基础激励完全相干。在一致激励的 情况下,影响矩阵 R 会退化为惯性力指示向量 E,基础运动通过随机过程 $\ddot{u}_b(t)$ 描述。引入恒等式 $M\dot{x}_d(t) - M\dot{x}_d(t) = 0$,则可将式(3)所示的二阶微分 方程组改写为一阶微分方程组:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_{\mathrm{d}}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_{\mathrm{d}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathbf{M} & 0 \\ 0 & \mathbf{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_{\mathrm{d}}(t) \\ \mathbf{x}_{\mathrm{d}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{M}\mathbf{E} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_{\mathrm{b}}(t)$$
(4)

对式(1)所示的非对称线性方程组进行降阶时, 需要先求解一组广义特征值问题^[7],记第*i*阶复特征 值为 λ_i ,2*n*维的右和左复特征向量分别为 $\boldsymbol{\Phi}_{Ri}$ 和 $\boldsymbol{\Phi}_{Li}$, 三者可以分别表示为:

$$\lambda_{i} = -\alpha_{i} + i\beta_{i}, \quad \boldsymbol{\varPhi}_{Li} = \begin{bmatrix} \lambda_{i}\boldsymbol{\varphi}_{Li} + i\boldsymbol{\psi}_{Li} \\ \boldsymbol{\varphi}_{Li} + i\boldsymbol{\psi}_{Li} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\varPhi}_{Ri} = \begin{bmatrix} \lambda_{i}\boldsymbol{\varphi}_{Ri} + i\boldsymbol{\psi}_{Ri} \\ \boldsymbol{\varphi}_{Ri} + i\boldsymbol{\psi}_{Ri} \end{bmatrix}$$
(5)

其中, $\alpha_i = \zeta_i \omega_i$ 和 $\beta_i = \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2}$ 分别为第 *i* 阶模态的阻尼参数和阻尼频率, $i = \sqrt{-1}$ 。

根据复模态叠加法,位移响应可以表示为:

$$\mathbf{x}_{d}(t) = \sum_{i=1}^{r} \left[\mathbf{R}_{i} \delta_{i}(t) + \mathbf{S}_{i} \dot{\delta}_{i}(t) \right]$$
(6)

式中: r 为模态截断数; $R_i = S_i$ 为与振型相关的向量,用于刻画响应的空间信息; $\delta_i(t)$ 和 $\dot{\delta}_i(t)$ 分别为 第i 阶模态坐标及其关于时间的导数,满足方程(7)。

 $\ddot{\delta}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{\delta}_i(t) + \omega_i^2 \delta_i(t) = -\ddot{u}_{\rm b}(t), \quad i = 1, 2, \cdots, r \ (7)$

对于线性系统,结构的应力响应由位移响应线性 变换得到,即 $\sigma(t) = Q^T u(t)$,其中,Q是与结构几何 和刚度相关的转换矩阵。则结构的应力响应可以表示 为:

$$\boldsymbol{R}_{i}^{\sigma} = -\frac{2}{a_{i}^{2} + b_{i}^{2}} \Big[\big(p_{i} \alpha_{i} + q_{i} \beta_{i} \big) \boldsymbol{\varphi}_{\sigma \mathrm{R}i} + \big(q_{i} \alpha_{i} - p_{i} \beta_{i} \big) \boldsymbol{\psi}_{\sigma \mathrm{R}i} \Big]$$

$$\tag{9}$$

$$\boldsymbol{S}_{i}^{\sigma} = \frac{2}{a_{i}^{2} + b_{i}^{2}} \left(p_{i} \boldsymbol{\varphi}_{\mathrm{R}i} + q_{i} \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{R}i} \right)$$
(10)

其中,
$$p_i = a_i c_i + b_i d_i$$
, $q_i = b_i c_i - a_i d_i$
 $c_i = \boldsymbol{\varphi}_{1,i}^T \boldsymbol{M} \boldsymbol{E}, d_i = \boldsymbol{\psi}_{1,i}^T \boldsymbol{M} \boldsymbol{E}$ (11)

Т.,

$$= -2\alpha_{i} \left(\boldsymbol{\varphi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{\varphi}_{\mathrm{R}i} + \boldsymbol{\psi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{R}i} \right) - 2\beta_{i} \left(\boldsymbol{\varphi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{R}i} + \boldsymbol{\psi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{\varphi}_{\mathrm{R}i} \right) +$$
(12)

$$\boldsymbol{\varphi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{C} \boldsymbol{\varphi}_{Ri} - \boldsymbol{\psi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{C} \boldsymbol{\psi}_{Ri}$$

$$b_{i} = -2\alpha_{i} \left(\boldsymbol{\varphi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{\psi}_{Ri} + \boldsymbol{\psi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{\varphi}_{Ri} \right) + 2\beta_{i} \left(\boldsymbol{\varphi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{\varphi}_{Ri} - \boldsymbol{\psi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M} \boldsymbol{\psi}_{Ri} \right) + \qquad (13)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{C} \boldsymbol{\psi}_{Ri} + \boldsymbol{\psi}_{Li}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{C} \boldsymbol{\varphi}_{Ri}$$

(14)

$$\boldsymbol{S}_{\sigma\sigma}(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{r} \left\{ \left(\boldsymbol{R}_{i}^{\sigma} \boldsymbol{R}_{j}^{\sigma\mathrm{T}} + \boldsymbol{\omega}^{2} \boldsymbol{S}_{i}^{\sigma} \boldsymbol{S}_{j}^{\sigma\mathrm{T}} \right) \operatorname{Re} \left[\boldsymbol{S}_{\delta_{i}\delta_{j}}(\boldsymbol{\omega}) \right] - 2\boldsymbol{\omega} \boldsymbol{R}_{i}^{\sigma} \boldsymbol{S}_{j}^{\sigma\mathrm{T}} \operatorname{Im} \left[\boldsymbol{S}_{\delta_{i}\delta_{j}}(\boldsymbol{\omega}) \right] \right\}$$

其中, $S_{\delta_i\delta_j}(\omega)$ 表示模态坐标 $\delta_i(t)$ 和 $\delta_j(t)$ 的互功 率谱密度函数:

$$S_{\delta_{i}\delta_{j}}(\omega) = H_{i}^{*}(\omega)H_{j}(\omega)S_{ii_{b}ii_{b}}(\omega),$$

$$H_{i}(\omega) = \frac{1}{\omega_{i}^{2} - \omega^{2} + 2i\zeta_{i}\omega\omega_{i}}$$
(15)

1.3 多点激励作用下系统的随机响应

多点激励作用下,管路系统各支座处基础激励的 功率谱密度函数可能存在差别,并且还可能包含相位 差以及其他的部分相干性。多点激励下,航空液压管 路系统所承受的基础运动通过随机向量过程 $\ddot{u}(t)$ 描述, $\ddot{u}(t) = [\ddot{u}_1, \dots, \ddot{u}_p, \dots, \ddot{u}_m]^T$ 。此时,系统的动态相 对应力响应表示为:

$$\boldsymbol{\sigma}_{d}(t) = \sum_{p}^{m} \sum_{i=1}^{r} \left[\boldsymbol{R}_{ip}^{\sigma} \delta_{ip}(t) + \boldsymbol{S}_{ip}^{\sigma} \dot{\delta}_{ip}(t) \right]$$
(16)

其中, $\mathbf{R}_{ip}^{\sigma} \subseteq \mathbf{S}_{ip}^{\sigma}$ 的表达式与一致激励下的 $\mathbf{R}_{i}^{\sigma} \subseteq$ \mathbf{S}_{i}^{σ} 基本一致。记一致激励下 $\mathbf{R}_{i}^{\sigma} = \mathbf{R}_{i}^{\sigma}(\dots, c_{i}, d_{i}) \subseteq$ $\mathbf{S}_{i}^{\sigma} = \mathbf{S}_{i}^{\sigma}(\dots, c_{i}, d_{i})$, 相应的在多点激励作用下 $\mathbf{R}_{ip}^{\sigma} = \mathbf{R}_{i}^{\sigma}(\dots, c_{ik}, d_{ik})$, $\mathbf{S}_{ip}^{\sigma} = \mathbf{S}_{i}^{\sigma}(\dots, c_{ik}, d_{ik})$, 其中, $c_{ip} = \mathbf{\varphi}_{Li}^{T}\mathbf{M}\mathbf{R}_{p}$, $d_{ip} = \mathbf{\psi}_{Li}^{T}\mathbf{M}\mathbf{R}_{p}$, \mathbf{R}_{p} 代表影响矩阵 \mathbf{R} 的 第 p 列。 $\delta_{ip}(t)$ 满足方程:

$$\ddot{\delta}_{ip}(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{\delta}_{ip}(t) + \omega_i^2 \delta_{ip}(t) = -\ddot{u}_p(t),$$

$$i = 1, 2, \cdots, r, \quad p = 1, \cdots, m$$
(17)

参考地震领域针对大跨度结构的处理方法^[14],将 管路应力响应分解为拟静和动态2部分。其中,拟静 力应力响应用于描述各约束处基础激励的差异性引 发的结构动态平衡位置的变化,即多点激励的非一致 性;动态相对应力响应是由结构在基础激励作用下引 起的,用于表征响应在平衡位置附近的振动。由此, 管路系统应力响应可以表示为:

$$\boldsymbol{\sigma}(t) = \boldsymbol{\sigma}_{st}(t) + \boldsymbol{\sigma}_{d}(t) = \sum_{p=1}^{m} \boldsymbol{G}_{p}^{\sigma} \boldsymbol{u}_{p}(t) + \sum_{p=1}^{m} \sum_{i=1}^{r} \left[\boldsymbol{R}_{ip}^{\sigma} \delta_{ip}(t) + \boldsymbol{S}_{ip}^{\sigma} \dot{\delta}_{ip}(t) \right]$$
(18)

其中, G_p^{σ} 表示仅考虑 $u_p(t)$ 时的拟静应力响应。

根据随机振动理论可知,系统应力响应功率谱密 度函数的表达式为:

$$S_{\sigma\sigma}(\omega) = \sum_{p=1}^{m} \sum_{q=1}^{m} \boldsymbol{G}_{p}^{\sigma} \boldsymbol{G}_{q}^{\sigma^{\mathrm{T}}} S_{u_{p}u_{q}}(\omega) + \sum_{p=1}^{m} \sum_{q=1}^{m} \sum_{j=1}^{r} \left(\boldsymbol{G}_{p}^{\sigma} \boldsymbol{R}_{jq}^{\sigma^{\mathrm{T}}} + i\omega \boldsymbol{G}_{p} \boldsymbol{S}_{jq}^{\sigma^{\mathrm{T}}} \right) S_{u_{p}\delta_{jq}}(\omega) + \sum_{p=1}^{m} \sum_{q=1}^{m} \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{r} \left\{ \left(\boldsymbol{R}_{ip}^{\sigma} \boldsymbol{R}_{jq}^{\sigma^{\mathrm{T}}} + \omega^{2} \boldsymbol{S}_{ip}^{\sigma} \boldsymbol{S}_{jq}^{\sigma^{\mathrm{T}}} \right) \right\}$$

$$\operatorname{Re} \left[S_{\delta_{ip}\delta_{jq}}(\omega) \right] - 2\omega \boldsymbol{R}_{ip}^{\sigma} \boldsymbol{S}_{jq}^{\sigma^{\mathrm{T}}} \operatorname{Im} \left[S_{\delta_{iq}\delta_{jq}}(\omega) \right] \right\}$$

式中: $S_{u_p u_q}(\omega)$ 表示基础位移的互功率谱密度函数; $S_{u_p \delta_{jq}}(\omega)$ 表示基础位移 u_p 与单自由度系统响应 δ_{jq} 的互功率谱密度函数; $S_{\delta_{lq} \delta_{jq}}(\omega)$ 表示单自由度系统响应 δ_{iq} 与 δ_{jq} 间的互功率谱密度函数。在工程中,通常以加速度描述基础的运动状态,考虑到航空液压管路的夹具可能安装在机体的不同区域,并且激励之间还存在相干性,引入相干函数 $\gamma_{pq}(\omega)$,则基础加速度的功率谱密度函数可以表示为:

$$S_{ii_{p}ii_{q}}(\omega) = \gamma_{pq}(\omega) \sqrt{S_{ii_{p}ii_{p}}(\omega)S_{ii_{q}ii_{q}}(\omega)},$$

$$\gamma_{pq}(\omega) = \exp\left[-\left(\frac{\alpha\omega d_{pq}}{v_{s}}\right)^{2}\right]$$
(20)

式中: α 为非相干参数; v_s 为剪切波波速; d_{pq} 为激励 p 和 q 间的距离。

2 疲劳寿命评估的响应谱方法

2.1 疲劳寿命分析的时域和频域方法

时域中通常采用循环计数方法与损伤累计准则 评估结构的疲劳损伤。在随机环境中,还需要通过蒙 特卡洛模拟获取疲劳损伤的期望。首先需要生成应力 响应样本,采用雨流计数法统计应力时程的应力循环 信息后,即可根据 Palmgren-Miner 准则与 S-N曲线计 算一段时间内的损伤累积量,进而通过时间平均获取 期望损伤率。

利用频域方法评估疲劳寿命时,通常利用应力响 应的谱矩信息表征其循环幅值的概率密度函数 p(S)。 根据 *P-M* 准则,随机应力过程作用时间 *T* 时,系统 的期望累计损伤为 $D = vT \int p(S) / N(S) dS$, *v* 表示单 位时间的循环周数。设结构中某处应力分量 $\sigma(t)$ 的自 功率谱密度函数为 $S_{\sigma\sigma}(\omega)$,则其第 *k* 阶谱矩为:

$$n_k = \int_{-\infty}^{\infty} \left|\omega\right|^k S_{\sigma\sigma}(\omega) \mathrm{d}\omega \tag{21}$$

对于宽带问题,评估方法多样,Lutes 等^[15-16]根 据窄带方法的思想,提出了适用于宽带随机过程的单 矩法,得到期望损伤率 *D*_{SM}为:

$$\dot{D}_{\rm SM} = \frac{2^{3b/2}}{2\pi C} \Gamma\left(\frac{b}{2} + 1\right) m_{2/b}^{b/2}$$
(22)

Dirlik 法通过蒙特卡洛模拟建立宽带响应峰值的 概率密度函数的半经验公式,在工程中得到了广泛的 认可。其应力范围概率密度函数表达式为^[17]:

$$p(S) = \frac{\frac{D_1}{Q}e^{-\frac{Z}{Q}} + \frac{D_2Z}{R^2}e^{-\frac{Z^2}{2R^2}} + D_3Ze^{-\frac{Z^2}{2}}}{2\sqrt{m_0}},$$

$$Z = \frac{S}{2\sqrt{m_0}}$$
(23)

其中:

$$\chi_{m} = \frac{m_{1}}{m_{0}} \sqrt{\frac{m_{2}}{m_{4}}}, \quad \gamma = \frac{m_{2}}{\sqrt{m_{0}m_{4}}},$$

$$D_{1} = \frac{2\left(\chi_{m} - \gamma^{2}\right)}{1 + \gamma^{2}}, \quad R = \frac{\gamma - \chi_{m} - D_{1}^{2}}{1 - \gamma - D_{1} + D_{1}^{2}}$$

$$D_{2} = \frac{1 - \gamma - D_{1} + D_{1}^{2}}{1 - R}, \quad D_{3} = 1 - D_{1} - D_{2},$$

$$Q = \frac{1.25(\gamma - D_{3} - D_{2}R)}{D_{1}}$$
(24)

2.2 一致激励作用下疲劳寿命评估的响应 谱法

Sui 等^[20]基于单矩法,分析了单一模态造成的损伤对总损伤的贡献,定义了疲劳损伤响应谱:

$$\dot{D}_{i}^{1/b} = 2\sqrt{2m_{2/b,ii}} \left[\frac{\Gamma(b/2+1)}{2\pi C}\right]^{1/b}$$
(25)

疲劳损伤响应谱是以自振频率为自变量,以模态阻尼比为参数,与载荷谱和材料疲劳性能相关的 曲线族,与结构具体的空间特征信息无关。与传统 频域方法不同,疲劳响应谱方法更侧重于分析过程 中将响应的计算与疲劳的分析相融合,避免了功率 谱密度函数以及谱矩的计算,直接建立了结构应力 振型和振型参与系数等空间特征与结构疲劳期望损 伤率之间的关系,极大地简化了分析步骤,降低了 计算成本。

目前,疲劳响应谱方法是以单矩法为基础开展的,要建立一致激励作用下航空液压管路系统疲劳寿 命评估的响应谱法,首先需要通过某应力分量的功率 谱密度函数 $S_{\sigma\sigma}(\omega)$ 获取各应力响应分量的谱矩。将 式(14)代入式(21)得:

$$m_{k} = \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{r} \left(r_{i}^{\sigma} r_{j}^{\sigma} \rho_{k,ij}^{dd} - 2r_{i}^{\sigma} s_{j}^{\sigma} \rho_{k,ij}^{dv} + \omega^{2} s_{i}^{\sigma} s_{j}^{\sigma} \rho_{k,ij}^{vv} \right).$$

$$\sqrt{m_{k,ii} m_{k,jj}}$$
(26)

式中: $r_i^{\sigma} \subseteq s_i^{\sigma}$ 表示向量 $R_i^{\sigma} \subseteq S_i^{\sigma}$ 中的元素; $m_{k,ii}$ 表示模态响应 δ_i 的 k 阶谱矩; $\rho_{k,ij}^{dd} \setminus \rho_{k,ij}^{dv} \subseteq \rho_{k,ij}^{vv}$ 为广 义相关系数,其表达式见式(27)。

$$\rho_{k,ij}^{dd} = \frac{m_{k,ij}}{\sqrt{m_{k,ii}m_{k,jj}}},
\rho_{k,ij}^{dv} = \frac{m_{k+1,ij}^{*}}{\sqrt{m_{k,ii}m_{k,jj}}},$$
(27)
$$\rho_{k,ij}^{vv} = \frac{m_{k+2,ij}}{\sqrt{m_{k+2,ij}}}$$

其中:

 $\sqrt{m_{k,ii}m_{k,ii}}$

$$m_{k,ij} = \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^k \operatorname{Re}\left[S_{\delta_i \delta_j}(\omega)\right] d\omega,$$

$$m_{k,ij}^* = \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^k \operatorname{Im}\left[S_{\delta_i \delta_j}(\omega)\right] d\omega$$
(28)

将式(26)代入式(22)中,并利用式(25)化 简得:

$$\dot{D}^{2/b} = \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{r} \left(r_{i}^{\sigma} r_{j}^{\sigma} \rho_{2/b,ij}^{\text{dd}} - 2r_{i}^{\sigma} s_{j}^{\sigma} \rho_{2/b,ij}^{\text{dv}} + s_{i}^{\sigma} s_{j}^{\sigma} \rho_{2/b,ij}^{\text{vv}} \right).$$

$$\dot{D}_{i}^{\frac{1}{b}} \dot{D}_{i}^{\frac{1}{b}}$$
(29)

式(29)可以称为基于复模态叠加法建立的疲劳 响应谱法的 CQC 组合格式,记为 CCQC。在此基础 上,忽略模态响应间的相关性,即可得到疲劳响应谱 法的 CSRSS 组合格式,即:

$$\dot{D}^{2/b} = \sum_{i=1}^{r} \left(r_{i}^{\sigma} r_{i}^{\sigma} \rho_{2/b,ii}^{dd} - 2r_{i}^{\sigma} s_{i}^{\sigma} \rho_{2/b,ii}^{dv} + s_{i}^{\sigma} s_{i}^{\sigma} \rho_{2/b,ii}^{vv} \right) \dot{D}_{i}^{\frac{2}{b}}$$
(30)

2.3 多点激励作用下疲劳寿命评估的响应 谱法

多点激励的情况与一致激励类似,通过其功率谱 密度函数计算得到对应的谱矩信息,并将其代入单矩 法的计算公式中,利用疲劳损伤响应谱的计算公式进 行化简,即可得到相应的多点激励作用下航空液压管 路系统疲劳寿命评估的响应谱法,即:

$$\dot{D}^{2/b} = \sum_{p=1}^{m} \sum_{q=1}^{m} g_{p} g_{q} \rho_{2/b, u_{p} u_{q}} \dot{D}_{u_{p}}^{1/b} \dot{D}_{u_{q}}^{1/b} + 2\sum_{p=1}^{m} \sum_{q=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} g_{p} \left(r_{jq}^{\sigma} \rho_{2/b, u_{p} \delta_{jq}} \dot{D}_{u_{p}}^{1/b} \dot{D}_{\delta_{jq}}^{1/b} + \frac{s_{jq}^{\sigma} \rho_{2/b, u_{p} \delta_{jq}} \dot{D}_{u_{p}}^{1/b} \dot{D}_{\delta_{jq}}^{1/b}}{\sum_{p=1}^{m} \sum_{q=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \left(r_{ip}^{\sigma} r_{jq}^{\sigma} \rho_{2/b, \delta_{ip} \delta_{jq}} \dot{D}_{\delta_{ip}}^{1/b} \dot{D}_{\delta_{jq}}^{1/b} + 2s_{ip}^{\sigma} r_{jq}^{\sigma} \rho_{2/b, \delta_{ip} \delta_{jq}} \dot{D}_{\delta_{ip}}^{1/b} \dot{D}_{\delta_{jq}}^{1/b} \right) + \dot{D}_{\delta_{ip}}^{1/b} \dot{D}_{\delta_{jq}}^{1/b} + s_{ip}^{\sigma} s_{jq}^{\sigma} \rho_{2/b, \delta_{ip} \delta_{jq}} \dot{D}_{\delta_{ip}}^{1/b} \dot{D}_{\delta_{jq}}^{1/b} \right)$$

$$(31)$$

式中: g_p 、 $r_{ip}^{\sigma} \subseteq s_{ip}^{\sigma}$ 分别表示 G_p^{σ} 、 $R_{ip}^{\sigma} \subseteq S_{ip}^{\sigma}$ 的 响应分量, $\rho_{k,u_pu_q} \setminus \rho_{k,u_p\delta_{jq}} \setminus \rho_{k,\lambda_p\delta_{jq}} \setminus \rho_{k,\delta_{ip}\delta_{jq}} \setminus \rho_{k,\delta_{ip}\delta_{jq}}$ 和 $\rho_{k,\delta_{in}\delta_{in}}$ 为广义相关系数,其表达式见式(32)。

$$\rho_{2/b,u_{p}u_{q}} = \frac{m_{2/b,u_{p}u_{q}}}{\sqrt{m_{2/b,u_{p}u_{p}}m_{2/b,u_{q}u_{q}}}},
\rho_{2/b,u_{p}\delta_{jq}} = \frac{m_{2/b,u_{p}\delta_{jq}}}{\sqrt{m_{2/b,u_{p}u_{p}}m_{2/b,\delta_{jq}\delta_{jq}}}},
\rho_{2/b,u_{p}\delta_{jq}} = \frac{m_{2/b,u_{p}\delta_{jq}}^{*}}{\sqrt{m_{2/b,u_{p}u_{p}}m_{2/b,\delta_{jq}\delta_{jq}}}},
\rho_{2/b,\delta_{ip}\delta_{jq}} = \frac{m_{2/b,\delta_{ip}\delta_{jq}}}{\sqrt{m_{2/b,\delta_{ip}\delta_{jq}}m_{2/b,\delta_{jq}\delta_{jq}}}},
\rho_{2/b,\delta_{ip}\delta_{jq}} = \frac{m_{2/b,\delta_{ip}\delta_{jq}}}{\sqrt{m_{2/b,\delta_{ip}\delta_{jp}}m_{2/b,\delta_{jq}\delta_{jq}}}},$$
(32)

式甲: $m_{2/b,u_pu_p}$ 等表示 $u_p(t)$ 等随机过程的第2/b 阶谱矩; $m_{2/b,u_pu_q}$ 等表示由 $u_p(t)$ 与 $u_q(t)$ 等随机过程 的互功率谱密度函数计算得到的2/b阶谱矩,如式 (28)所示; $m_{2/b,u_p\delta_{iq}}^*$ 与 $m_{2/b,\delta_m\delta_{ip}}^*$ 的表达式见式(33)。

$$m_{2/b,u_{p}\delta_{jq}}^{*} = -\int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^{k} \operatorname{Im}\left[S_{u_{p}\delta_{jq}}(\omega)\right] d\omega,$$

$$m_{2/b,\delta_{ip}\dot{\delta}_{jq}}^{*} = \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^{k} \operatorname{Im}\left[S_{\delta_{iq}\dot{\delta}_{jq}}(\omega)\right] d\omega$$
(33)

式(31)即为 FRSM 法针对多点激励模型疲劳期 望损伤率的组合公式。 $\dot{D}_{u_p}^{l/b}$ 代表约束 k 的机体位移产 生的损伤反应,取决于位移 PSD 和材料 S-N 曲线。 $\dot{D}_{\delta_{v_p}}^{l/b}$ 和 $\dot{D}_{\delta_{v_p}}^{l/b}$ 分别代表在约束 k 的机体加速度激励下 第 i 阶 SDOF 振子产生的损伤反应。 $\dot{D}_{\delta_{v_p}}^{l/b}$ 和 $\dot{D}_{\delta_{v_p}}^{l/b}$ 除了 与机体加速度功率谱和材料 S-N 曲线有关,还与第 i 阶 SDOF 振子的固有频率和阻尼比有关。三者表达式 可以统一写为:

$$\dot{D}_{x}^{1/b} = 2^{3/2} \left[\frac{\Gamma(b/2+1)}{2\pi C} \right]^{1/b} \sqrt{m_{2/b,x}}, \quad x = u_{p}, \delta_{ip}, \dot{\delta}_{ip} (34)$$

在 FRSM 的实施过程中,需要预先通过数值模拟 和实验生成 FDRS,通过固有频率和阻尼比确定损伤 反应的具体数值,进一步根据式(29)~(31)所示 的组合公式评估结构的疲劳寿命。

3 数值算例

3.1 精度与效率分析

考虑飞机翼尖的一段液压管路(如图 1 所示), 管路材料为 6061-T6 铝合金,管内液体为 10[#]航空液 压油(YH-10)。管路模型通过夹具固定在飞机机体 上。弹簧阻尼系统在各方向的等效刚度和等效黏性阻 尼参数见表 1。令管内流体流速为 3.192 m/s, 流体压强 为 26 MPa。实模态分析得知, 管路模型在[0, 2000] Hz 范围内共有 35 阶模态,结构的模态阻尼比 $\zeta_i = 0.005$ 。



图 1 航空液压管路模型 Fig.1 Aero-hydraulic pipeline model

表 1 各方向的夹具的等效刚度和等效黏性阻尼参数 Tab.1 Equivalent stiffness and equivalent viscous damping coefficients of clamps in each direction

		1	
等效刚度	数值	等效黏性阻尼参数	数值
$K_x/(\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^{-1})$	1×10^{11}	$C_x/(\mathbf{N}\cdot\mathbf{s}\cdot\mathbf{m}^{-1})$	0
$K_y/(\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^{-1})$	3.92×10^{6}	$C_y/(\mathbf{N}\cdot\mathbf{s}\cdot\mathbf{m}^{-1})$	120.51
$K_z/(\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^{-1})$	6.18×10^{6}	$C_z/(\mathbf{N}\cdot\mathbf{s}\cdot\mathbf{m}^{-1})$	184.75
$K_{\theta x}/(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m}\cdot\mathbf{rad}^{-1})$	1×10^{11}	$C_{\theta x}/(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m}\cdot\mathbf{s}\cdot\mathbf{rad}^{-1})$	0
$K_{\theta y}/(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m}\cdot\mathbf{rad}^{-1})$	58.84	$C_{\theta y}/(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m}\cdot\mathbf{s}\cdot\mathbf{rad}^{-1})$	0.001 8
$K_{\theta z}/(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m}\cdot\mathbf{rad}^{-1})$	27.37	$C_{\theta z}/(\mathbf{N}\cdot\mathbf{m}\cdot\mathbf{s}\cdot\mathbf{rad}^{-1})$	0.000 9

采用时域雨流计数法和 FRSM 来计算管路模型 疲劳寿命的期望, 以验证 FRSM 的正确性。6061-T6 铝合金的 *S-N* 曲线参数^[25]分别为 *b*=9.84 和 *C*=5.97× 10²¹。FRSM 则按流程计算管路模型的疲劳期望损伤率, 以部分阻尼比为参数的 FDRS 曲线族, 如图 2 所示。



图 2 谷种阻尼比恒优下的 FDRS 曲线 Fig.2 FDRS curves with various damping ratios

复振型组合公式计算的疲劳寿命期望沿管长的 分布与时域雨流计数法的结果对比如图 3 所示。可以 看出, CCQC 与雨流计数法的结果最接近, CSRSS 结果偏大,证明了本文方法的正确性。CSRSS 没有 忽略阻尼,但相对误差为 20.126%,表明复振型组合 公式需要考虑损伤反应间的相关性。采用 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1620 v4 3.50 GHz 处理器评估各方 法的计算效率。时域雨流计数法需要分析大量的时间 历程样本,样本容量为 5 000 时,大约需要 3.6 h 得 到整个管路模型的疲劳寿命期望。FRSM 法的计算时 间主要花费在模态分析上,实模态和复模态的计算时 间分别为 8、35 s。复模态分析过程中的矩阵维度是 实模态的 2 倍,并且需要计算 2 组复振型,因此计算 时间略长。CQC 和 SRSS 组合公式分别需要计算 1 296、36次求和,这些运算在不到 1 s 的时间内就可 以完成。因此,FRSM 法的分析效率远高于时域法。



3.2 管内流速的影响

考虑 3.1 节的模型, 令管内流体流速从 3 m/s 逐步提高至 20 m/s, 分别采用 FRSM 复振型和忽略模态 响应阻尼耦合效应的实振型组合公式^[26]计算管路模 型疲劳寿命的期望。管路模型的最小疲劳寿命期望随 管内流体流速的变化曲线如图 4 所示。



当流体流速小于 8.5 m/s 时,复振型和实振型组 合公式的结果比较接近。随着管内流体流速升高,2 组结果间的差距逐渐增大。针对流速较高的工况,必须采用复振型组合公式。CSRSS的结果普遍大于CCQC,并且随着流速增大它们之间的差距减小。在[12,13.8] m/s和[18.7,19.7] m/s的流速范围内,CSRSS和CCQC非常接近。因此,对于流速较高的工况,CSRSS得到的结果相对激进。当流速在[8.5,12] m/s,CSRSS的误差较大,需要采用CCQC考虑损伤反应间的相关性。

通过时域雨流计数法计算管内流体流速为 8.55、 19.35 m/s 时管路模型疲劳寿命的期望,并与 CCQC 和 CQC 的结果作比较,如图 5 所示。在 2 种工况下, CCQC 的相对误差在 2%以内。CQC 在流速为 8.55 m/s 的工况下可以保证较高的精度,但当流速为 19.35 m/s 时,误差增大至 50%, CQC 给出的管路模型最小疲 劳寿命的出现位置也不同于雨流计数法。因此,实振 型组合公式只适用于流速较小的情形。





3.3 非一致激励的影响

考虑一段多跨航空液压管路模型,如图 6 所示。 管内流体为 10[#]航空液压油(YH-10),其密度为 872 kg/m³,压强为 26 MPa,并且以 3 m/s 的速度恒 定流动。采用 FEM 将管路模型离散为 365 个输流管 路单元,并将管路夹具模拟为弹簧阻尼系统,弹簧阻

2 / . .

尼系统在各方向的等效刚度和等效黏性阻尼参数, 如表 1 所示。根据实模态分析,管路模型在[0,2000] Hz 共有 64 阶模态。取前 65 阶模态参与计算以保证 结果精确,令各阶模态的阻尼比 $\zeta_i = 0.005$ 。本文方 法需要预先生成 FDRS 曲线族,结果如图 7 所示。 根据复模态分析得到的系统固有频率和阻尼比在图 7 中确定损伤反应 $\dot{D}^{1/b}_{\delta_k}$ 和 $\dot{D}^{1/b}_{\delta_k}$,最后计算系统的疲劳 寿命。

当机体受到非一致随机激励的影响,这种非一致 性包含激励间的相干性和不同的机体区域 2 方面因 素。PSD曲线的具体信息如表 2^[1]所示。针对激励间 的相干性,令机体加速度 PSD 满足表 2 中 D 对应的 数值,考虑以下 3 种激励工况:

Case 1 部分相干,即 v_s =3 096 m/s, α =0.1; Case 2 完全相干,相当于一致激励,即 $\gamma_{kl}(\omega)$ =1; Case 3 统计上相互独立,即 $\gamma_{kl}(\omega)$ =0, $k \neq l_o$



图 7 不同阻尼比情况下计算得到的疲劳损伤响应律 Fig.7 FDRS calculated with different damping ratios

表 2 DO-160G 机载设备随机振动试验谱 Tab.2 Random vibration test spectrum of DO-160G airborne equipment

									g /Hz
位置	10 Hz	28 Hz	31 Hz	40 Hz	51.7 Hz	100 Hz	250 Hz	500 Hz	2 000 Hz
仪表板、控制台、设备架	0.02		0.02			0.002		0.002	0.000 13
机身	0.012			0.012	0.02			0.02	0.001 26
机舱、吊塔	0.02	0.02		0.04			0.04	0.08	0.02

使用本文方法计算管路系统的寿命,如图 8a 所示。Case 1、2、3 的最小寿命分别为 2.1、39.8、1.4 a。 以部分相干模型为基准,可以看出,夹具激励间的 非一致性会对疲劳寿命结果产生很大影响。针对本 节算例,该结构的完全相干模型会高估系统的疲劳 性能,而完全不相干模型会低估疲劳性能。夹具激 励间的非一致性对结构疲劳性能的影响,本质上体 现于不同激励谱作用下各阶振型参与情况的改变, 其具体影响需要针对于特定的结构与载荷工况开展 分析。

针对激励区域的影响,令激励间的相干性满足 Case 1,将图 6 中 6 个夹具分为 2 组,第一组包含夹 具 1~3, 第二组包含夹具 4~6, 各组夹具处在相同的 机体激励区域。分别令 2 组夹具的激励满足表 2 中的 3 种 PSD 曲线,产生 9 种激励工况。各工况下系统的 最小寿命如图 8b 所示。其中,B3-D 代表夹具 1~3 处 激励 PSD 为曲线 B3,夹具 4~6 的为曲线 D,以此类 推。可以看出,2 组夹具采用不同的激励对疲劳寿命 结果产生了很大影响。B3-B3 工况的寿命最小,仅为 3.4 h,激励 D-D 的最大,为 2.1 a。对比发现,曲线 D 的高频分量比曲线 B3 更大,可以推断低频激励更 容易使模型失效。此外,互换 2 组夹具的激励功率谱 得到了不同的寿命,这可能是由于管路模型的非对称 性造成的。



图 8 考虑多点激励的管路系统寿命对比 Fig.8 Comparison of pipeline fatigue life of multi-support excitation: a) expected fatigue life of case 1-3; b) expected fatigue life of different base excitation

4 结论

本文针对一致/多点激励作用下复杂航空液压管路的疲劳寿命评估问题,提出了一种高效的疲劳响应 谱方法,并得到以下结论:

1)本文方法具有与雨流计数法基本一致的计算 结果,并且计算效率极高,能够满足不同流速以及不 同载荷相干关系下航空液压管路系统疲劳寿命的分 析需求。

2)管内流体流速对于复振型和实振型组合公式的结果产生较大影响。当流速较小时,2组结果相近,两组结果间的差距随着流速升高逐渐增大;当流速较高时,实振型组合公式不再适用。

3) 夹具激励间的非一致性会对疲劳寿命结果产 生很大影响,因此在结构设计过程中需要对多点激励 效应开展详细分析。

参考文献:

- RTCA. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment: Document DO-160G[S]. Radio Technical Commission for Aeronautics, 2010.
- [2] MEHMOOD Z, HAMEED A, JAVED A, et al. Analysis of Premature Failure of Aircraft Hydraulic Pipes[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 109: 104356.
- [3] MEHMOOD Z, HAMEED A, SAFDAR S, et al. Multiaxial Stress Mapping and Fatigue Failure Prediction of Aircraft Hydraulic Pipes[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 121: 105168.
- [4] WANG S P, TOMOVIC M, LIU H. Aircraft Hydraulic Systems[M]. Amsterdam: Elsevier, 2016: 53-114.
- [5] GAO P X, ZHAI J Y, YAN Y Y, et al. A Model Reduction Approach for the Vibration Analysis of Hydraulic Pipeline System in Aircraft[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 49: 144-153.
- [6] LIU Z H, SHAN Z C, ZHANG X F, et al. Uncertain Frequency Response Analysis of Clamp-Pipe Systems via the Coordinate Transformed Polynomial Chaos Expansion[J].

International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 199: 104720.

- [7] ZHAI H B, WU Z Y, LIU Y S, et al. Dynamic Response of Pipeline Conveying Fluid to Random Excitation[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(8): 2744-2749.
- [8] YANG Y B, QIN Z H, ZHANG Y H. Random Response Analysis of Hydraulic Pipeline Systems under Fluid Fluctuation and Base Motion[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 186: 109905.
- [9] YANG Y B, ZHANG Y H. Random Vibration Response of Three-Dimensional Multi-Span Hydraulic Pipeline System with Multipoint Base Excitations[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 166: 108124.
- [10] ZHANG F L, YUAN Z H, ZHANG F Z, et al. The Analysis and Estimation of Vibration Fatigue for Pipe Fitting in Aviation Hydraulic System[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 837-855.
- [11] YAN Y Y, CHAI M J. Sealing Failure and Fretting Fatigue Behavior of Fittings Induced by Pipeline Vibration[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 136: 105602.
- [12] 闫国华,杜豪,刘勇,等. 航空发动机液压管路疲劳寿 命预测模型研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(8): 171-175.
 YAN G H, DU H, LIU Y, et al. Research on Fatigue Life Prediction Model of Aero-Engine Hydraulic Pipeline[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(8): 171-175.
- [13] 于志达,欧阳昱,卢耀辉,等.动态载荷作用下大型复杂结构的振动疲劳分析方法综述[J].装备环境工程,2019,16(11):13-18.
 YU Z D, OUYANG Y, LU Y H, et al. Review of Vibration Fatigue Analysis Methods for Large Complex Structures under Dynamic Loads[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(11):13-18.
- [14] 叶继红,孙建梅. 多点激励反应谱法的理论研究[J]. 应用力学学报,2007,24(1):47-53.
 YE J H, SUN J M. Respense Spectrum Method for Multi-Support Seismic Excitations[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(1):47-53.
- [15] LUTES L D, LARSEN C E. Improved Spectral Method for Variable Amplitude Fatigue Prediction[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(4): 1149-1164.

- [16] LARSEN C E, LUTES L D. Predicting the Fatigue Life of Offshore Structures by the Single-Moment Spectral Method[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1991, 6(2): 96-108.
- [17] TURAN D. Application of Computers in Fatigue Analysis[D]. Coventry, West Midlands, UK: University of Warwick, 1985
- [18] 王帅,李佰灵,贾亮. 空间管路结构单多轴随机振动环 境下的疲劳损伤研究[J]. 强度与环境,2012,39(6): 36-41.
 WANG S, LI B L, JIA L. The Fatigue Damage Research of Space Pipeline Structures under Uniaxial/Multiaxial Random Vibration[J]. Structure & Environment Engineering, 2012, 39(6): 36-41.
 [19] 陈志英,张兴森,周平. 基于多点随机激励的发动机管
- [17] [新志英, 永天林, 尚子. 至] 多点随机战励的及初机管路振动疲劳寿命分析[J]. 推进技术, 2019, 40(7): 1620-1627. CHEN Z Y, ZHANG X S, ZHOU P. Vibration Fatigue

Life Analysis of Engine Piping System Based on Multi-Point Random Excitation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(7): 1620-1627.

[20] SUI G H, ZHANG Y H. Response Spectrum Method for Fatigue Damage Assessment of Mechanical Systems[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 166: 107278.

- [21] ZHOU X Y, YU R F, DONG D. Complex Mode Superposition Algorithm for Seismic Responses of non-Classically Damped Linear MDOF System[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2004, 8(4): 597-641.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
 LIN J H, ZHANG Y H. Pseudo Excitation Method[M].
 Beijing: Science Press, 2004.
- [25] Metallic Materials Properties Development and Standardization: MMPDS11[S]. Federal Aviation Administration, 2016.
- [26] YANG Y B, SUI G H, ZHANG Y H. Response Spectrum Method for Fatigue Damage Assessment of Aero-Hydraulic Pipeline Systems[J]. Computers & Structures, 2023, 287: 107119.