基于瞬态分析的浮动核电站高能管路 冲击疲劳寿命评估

白凡,柳勇,吴君,戴春辉,肖颀,王苇

(武汉第二船舶设计研究所 热能动力技术重点实验室,武汉 430205)

摘要:目的 合理评估浮动核电站高能管路在水下冲击载荷下的疲劳寿命。方法 开展高能管路静载、模态 和瞬态响应分析,得到管路在水下冲击作用下的应力时程曲线,为管路疲劳寿命估算提供基本应力谱输入。 基于冲击疲劳损伤模型,运用 nCode 疲劳分析软件,估算管路的冲击疲劳寿命。结果 管路在一次冲击载荷 作用下会经历多次应力循环,最大应力值超过材料屈服极限的 11%。管路在横向冲击作用下的冲击疲劳寿 命为 3.95×10⁴ 次。结论 管路在冲击载荷作用下的最大应力响应发生在冲击输入的正向三角波之后,反向三 角波之内,是由于惯性效应造成的响应滞后现象。管路固定端、弯头和三通是应力集中区域,管路疲劳破 坏一般发生在这些局部区域。 关键词:浮动核电站;高能管路;水下冲击;疲劳寿命 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2019.02.020

中图分类号: TM623 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0095-06

Fatigue Life Assessment for High-energy Pipe of Floating Nuclear Power Station under Shocking Based on Instantaneous Analysis

BAI Fan, LIU Yong, WU Jun, DAI Chun-hui, XIAO Qi, WANG Wei

(Science and Technology on Thermal Energy and Power Laboratory, Wuhan 2nd Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China)

ABSTRACT: Objective To estimate the fatigue life of high-energy pipes in floating nuclear power station under underwater impact. **Methods** The static response, mode shapes and dynamic response of the high-energy pipe were predicted to obtain the stress history of the pipe under underwater impact to provide basis stress spectrum import of the fatigue analysis. Based on the fatigue damage model, the impact fatigue life of the pipe was estimated with the aid of the FE-based fatigue analysis program nCode. **Result** The pipe stress would experience a number of cycles and the maximum stress exceeded the material yield limit by 10% during underwater impact. The impact fatigue life of the pipe under transverse impact was 3.95×10^4 . **Conclusion** The maximum stress response occurs after the positive triangular wave and in the negative triangular wave of the impact load. It is a response lag phenomenon caused by the effect of inertia. The stress concentration region is located at the fixed end, elbow and tee branch. The fatigue rupture of pipe usually occurs in this region.

KEY WORDS: floating nuclear power station; high-energy pipe; underwater impact; fatigue life

美国于19世纪60年代在一艘第二次世界大战舰 船上建造了第一座海上浮动核电站,主要用于偏远地

区的供电和供热。近年来,随着对海洋资源的重视, 各国纷纷将目光投向这种被称为"全球最强移动电 源"的浮动核电站,以突破海上开发的能源供给瓶颈。 俄罗斯在 2000 年开始了海上浮动核电站船队计划, 并将在 2019 年前建造至少两艘浮动核电站,其中名 为"罗蒙诺索夫号"的浮动核电站已于 2017 年投入使 用。中国从 2016 年开始建设首座浮动核电站,并计 划于 2019 年投入运营,主要任务为保障大陆架及岛 屿上的石油和天然气田供电。随着浮动核电站的发展 和利用,其安全性问题受到了工程界广泛关注。虽然 浮动核电站在海上可以躲避地震引起的强烈振动,但 其在运行过程中可能会遭受触礁和恐怖袭击等突发 事件,因此确保浮动核电站的运行安全对于核电工程 师是一个新的挑战。

浮动核电站的高温高压管路担负着运输高能工 质的任务,如发生破损将会导致泄漏事故,引起动力 系统故障。泄漏的高温高压蒸汽还会对周围结构和设 备产生强大喷射力,危及船舶使用安全。浮动核电站 在运行过程中,由于导弹攻击和触礁等事件,会受到 冲击载荷的作用,严重威胁管路的结构安全。通过静 强度计算和设计,可以保证管路在单次冲击作用下的 结构安全,却无法保证管路在多次冲击作用下的安全 性能。在多次冲击载荷作用下,管路会因为损伤累计 而导致疲劳破坏。统计表明,90%的机械零件失效是 由疲劳引起的^[1]。

为了保证浮动核电站高温高压管路在长期服役 期间的结构安全,有必要开展冲击疲劳分析。余芬和 韩景强等^[2]建立了一种飞机结构件冲击疲劳寿命预 测模型,并通过相关的试验数据对所建模型的准确性 与有效性进行了验证。邹希和张森等^[3]得出了一种基 于损伤力学的飞机构件冲击疲劳寿命预估方法。肖正 明和项载毓等^[4]在结构瞬态分析的基础上开展了铸 造起重机桥架的冲击疲劳寿命分析。王显会和石磊^[5] 针对某特种车架开展了冲击载荷下的瞬态响应分析 和疲劳寿命评估。可见,结构的冲击疲劳问题已经受 到工程界广泛关注。

文中针对浮动核电站高能管路开展静载、模态和 冲击瞬动响应分析,为管路疲劳寿命计算提供基本应 力谱输入。提出了基于应变疲劳的冲击损伤模型,运 用 Ncode 疲劳分析软件,估算管路在横向冲击载荷作 用下的疲劳寿命。

1 冲击疲劳损伤模型

1.1 瞬态响应的振型叠加法

在船舶抗冲击强度设计中,一般采用冲击响应谱 方法计算结构在冲击作用下的最大响应^[6-7],但是, 管路在单次冲击作用下,会经历多次应力循环,因此 必须开展管路瞬态响应分析,得到管路在时间域上的 位移、应力和应变响应,才能预测管路的冲击疲劳 寿命^[2-5]。瞬态响应分析法属于结构动力学问题,在 动载荷作用下,结构响应的基本动力学方程组可以 表示为:

 $\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\delta}}(t) + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{\delta}}(t) + \boldsymbol{K}\boldsymbol{\delta}(t) = F(t) \tag{1}$

式中: *M* 为系统质量矩阵; *C* 为阻尼矩阵; *K* 为 刚度矩阵; *F*(*t*)为外载荷向量; *&*(*t*)为总位移向量。求 解动力学方程可以采用直接积分法,也可以采用振型 叠加法。直接积分法需要将时间离散,并采用隐式或 者显示的递推数值算法。当求解时间域较长时,会消 耗大量计算资源,而且由于截断误差的累积,计算精 度也会随时间的延长而降低。

利用振型叠加法求解瞬态响应问题,第一步是求 解系统运动微分方程的特征值(固有频率)及特征向 量(正则振型);第二步是将运动微分方程通过正交 变换转换到模态坐标中,实现微分方程组的解耦;第 三步求解解耦的各自独立的常微分方程,并将其结果 叠加后,得到整个系统的运动响应。由于振型叠加法 体现了系统的固有频率和周期性运动特性,因此适合 预测结构在冲击作用下的应力循环过程。

根据振型叠加法,将式(1)中的位移向量*δ*(*t*) 投影到模态坐标上,即:

$$\delta(t) = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{x} = \sum_{i=1}^{m} \phi_i \boldsymbol{x}_i \tag{2}$$

式中: *m* 为系统自由度; ϕ_i 为广义位移基向量, 也就是系统的正则振型向量; x_i 为广义位移值。 $\boldsymbol{\sigma}$ 为 振型矩阵, $\boldsymbol{\sigma} = [\boldsymbol{q} \quad \boldsymbol{\phi} \quad \cdots \quad \boldsymbol{\phi}_m]$; *x* 为广义位移向量, $x = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_N]^T$ 。

-[ʌ] ʌ2 ʌŊ]。 振型矩阵有如下特性:

 $\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{I} , \quad \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\Omega}$ (3)

式中: **Ω** 为固有频率矩阵。将式(1)两端的左侧分别乘以 **Φ**^T,并将式(2)代入后可以得到模态坐标下的结构运动方程:

$$\ddot{x}(t) + \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{C} \boldsymbol{\Phi} \dot{x}(t) + \boldsymbol{\Omega} \boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{F}(t) \tag{4}$$

如果式(4)中的阻尼矩阵 C 为振型阻尼:

$$\boldsymbol{\phi}_{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}\boldsymbol{\phi}_{j} = 2\boldsymbol{\omega}_{i}\boldsymbol{\xi}_{j}\boldsymbol{\delta}_{ij} \tag{5}$$

式中: ω_i 为固有角频率; ξ_j 为模态阻尼比; δ_{ij} 为 Kronecker delta 张量。那么,式(4)可以写成 *m* 个独立的单自由度振动方程:

$$\ddot{x}_{i}(t) + 2\omega_{i}\xi_{i}\dot{x}_{i}(t) + \omega_{i}^{2}x_{i}(t) = \phi_{i}^{T}F(t)$$
(6)

求解式(6)的 m 个二阶常微分方程,得到每个 振型响应结果 $x_i(t)$ 。进一步利用式(2),通过线性 叠加得到系统位移响应 $\delta(t)$ 。

1.2 应变疲劳理论

当应力值达到材料屈服极限的 80%时,一般采用 应变疲劳理论预测结构寿命^[5]。在恒幅对称应变循环 加载过程中,管路材料的应力-应变响应为滞后环。 不同应变恒幅下的稳态滞后环项点的连线反映了不同应变幅 ε_a 循环下的应力幅 σ_a 响应,称为循环 σ_a - ε_a 曲线。材料的循环 σ_a - ε_a 曲线可以用如下的 Remberg-Osgood 弹塑性应力-应变关系描述。

$$\varepsilon_{a} = \varepsilon_{ea} + \varepsilon_{pa} = \frac{\sigma_{a}}{E} + \left(\frac{\sigma_{a}}{K'}\right)^{1/n'}$$
(7)

式中: ε_{ea} 弹性应变幅; ε_{pa} 为塑性应变幅; E 为 弹性模量; K 为循环强度系数, 具有应力量纲(MPa); n 为循环应变硬化指数, 无量纲。

根据 Massing 假设, 应力变程 $\Delta \sigma$ 和应变变程 $\Delta \varepsilon$ 的滞后环曲线表示为:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{\rm e} + \Delta \varepsilon_{\rm p} = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'}\right)^{1/n'} \tag{8}$$

式中: $\Delta \varepsilon_e$ 为弹性应变变程; $\Delta \varepsilon_p$ 为塑性应变变程。 采用 Manson-Coffin 低周应变疲劳公式描述材料 疲劳性能:

$$\varepsilon_{\rm a} = \varepsilon_{\rm ea} + \varepsilon_{\rm pa} = \frac{\sigma_{\rm f}'}{E} (2N)^b + \varepsilon_{\rm f}' (2N)^c \tag{9}$$

式中: N 为材料应变疲劳寿命; σ'_{f} 为疲劳强度 系数,具有应力量纲; ε'_{f} 为疲劳延性系数,无量纲; b 为疲劳强度指数,无量纲; c 为疲劳延性指数,无 量纲。

对于非对称应变循环载荷,采用 Morrow 平均应 力修正经验公式:

表 2 管路材料循环 σ_a-ε_a曲线参数

管路材料应变-疲劳寿命曲线参数

运用 ANSYS 商用有限元软件建立浮动核电站某 蒸汽管路的三维有限元网格,如图 1 所示。该管路模

疲劳延性系

数*ε'*,

0.2057

循环应变硬化指数 n'

0.1139

疲劳延性指

数 c

-0.4604

循环强度系数 K/MPa

1257

有限元模型

3.1 几何模型和有限元网格

疲劳强度指

数 b

-0.2209

表 3

疲劳强度系

数 σ'_f /MPa

2277

3

$$\varepsilon_{\rm a} = \varepsilon_{\rm ea} + \varepsilon_{\rm pa} = \frac{\sigma_{\rm f}' - \sigma_{\rm m}}{E} (2N)^b + \varepsilon_{\rm f}' (2N)^c \quad (10)$$

式中: σ_m 为平均应力。由式(10)可看出,当 应变幅不变,平均应力越大,则寿命N越短。可见, 拉伸平均应力是有害的,压缩平均应力则可提高疲 劳寿命。

1.3 损伤累计理论

通常单次冲击的能量并不足以造成结构失效, 然 而在多次冲击载荷作用下, 结构会因疲劳损伤累积而 产生裂纹。工程中最常用的疲劳损伤累计理论为 Minor 线性损伤理论。若构件在某恒幅载荷作用下, 循环至破坏的寿命为 N, 则可定义其在经受 n 次循环 时的损伤为:

D = n/N (11) 结构在应变循环 $\Delta \epsilon_i$ 作用下, 经受 n_i 次循环的损

伤为 $D_i=n_i/N_i$,则总损伤为:

$$D = \sum_{i=1}^{k} n_i / N_i \tag{12}$$

2 管路系统及材料性能

浮动核电站蒸汽管路材料采用 0Cr18Ni10Ti 不锈 钢,其在 260 ℃下的基本物理性能见表 1。在式(7) 中取 *E*=183 GPa,并根据 0Cr18NI10Ti 不锈钢循环应 力-应变实验曲线^[8],拟合得到其他材料参数,见表 2。 同样的,在式(9)中取 *E*=183 GPa,然后根据 0Cr18NI10Ti 不锈钢应变-疲劳寿命实验曲线^[9]拟合 得到其他参数,见表 3。

表1 管路材料基本力	学性能
------------	-----

线膨胀系数/℃-1	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	屈服强度/MPa	拉伸极限/MPa
18.36×10 ⁻⁶	183	7950	0.292	210	455

型包括直管、弯管、阀门和弹簧阻尼支吊架等部件。 采用四边形壳单元划分管路结构网格,用弹簧阻尼单 元模拟支吊架,用集中质量单元表征阀门附加质量。 模型网格节点总数为3821。



图 1 浮动核电站蒸汽管路三维有限元模型

3.2 边界条件与载荷

-45.14

有限元模型中施加的位移边界条件包括:管路端 口 C 施加纵向冷拉位移;管路端口 C 横向和纵向为 固定约束,管路端口 G 和 H 为固定端。冷拉位移是 为了改善管路热态应力状态,在冷态安装过程中人为 对管路施加一定量的拉伸位移。施加的静态载荷包 括:垂直方向弹簧支吊架的预拉力、重力、温度载荷。 施加的动态载荷为水下横向冲击载荷。

水下冲击载荷采用由"两点三线谱"[10]转换而成 的加速度载荷,如图2所示,它由一个正向三角波和 一个反向三角波组成。其他静载荷见表 4。

表 4 管路静载荷

管路 C 端 纵向冷拉 位移/mm	弹簧支吊架 ①预拉力/kN	弹簧支吊架 ②预拉力/kN	温度载 荷/℃	重力加速 度/(N·m ⁻²)
30	7.44	3.5	260	9.8
735	a/(m·s ⁻²)	20	5.81 4	3.03

图 2 "两点三线"谱对应的加速度时程曲线

2.49



t/ms

a 第1阶





4 仿真和结果分析

4.1 静力分析

静载条件下的管路应力并不直接产生材料疲劳 损伤,但会改变交变应力的平均应力水平,从而影响 管路寿命。管路在冷拉位移、热位移、支吊架预拉力、 重力和温度等静态位移和载荷作用下的 Mises 等效应 力分布如图 3 所示。可以看出,在管路端口和管路弯 头处的应力较大。



图 3 静力条件下管路等效应力分布

4.2 模态分析

设置管路端口 C、G 和 H 为固定端, 开展管路前 60阶模态分析。图 4 给出了管路前 6 阶振型,其阶 数越高,频率越高。图 5 列出了管路前 60 阶固有频 率,其值的变化范围为 6.3~612.9 Hz。



b 第2阶



d 第4阶

管路前6阶振型



e 第5阶

图 4



f 第6阶

700 600 500 [™]H⁄参 単 第 300 200 100 0 10 20 30 40 50 60 阶数 图 5 管路前 60 阶固有频率

4.3 冲击分析

在模态分析的基础上,开展瞬态冲击计算,得到 管路在横向冲击下的动力响应。在 24 ms 时刻,管路 整体应力响应达到最大。图 6 给出了管路在 24 ms 时 刻的 Mises 等效应力云图,可以看出,管路弯头和固 定端处应力较大。参考图 2 可知,应力最大响应发 生在正向三角波之后,反向三角波之内,这是由于 结构惯性造成的响应滞后现象。图 7 给出了三通处 应力时程曲线,由于结构阻尼的作用,循环应力幅 值逐渐衰减。



图 6 管路前 60 阶固有频率

4.4 网格敏感性分析

为验证应力计算结果的网络无关性,保证疲劳寿



命预测载荷输入的准确性,开展模型网格敏感性分析。表 5 列出了采用不同网格密度有限元模型计算得 到的静载和冲击作用下管路最大应力,可见当网格节 点数达到 3821 之后,管路最大应力值与网格节点数 基本无关,并且冲击作用下管路整体应力响应最大时 刻不随网格节点数量增加而改变。图 8 对比了冲击作 用下不同网格密度管路模型在最大整体应力响应时 刻的等效应力分布,可见管路的应力分布规律也基本 与网格节点数无关。

表 5 网格敏感性分析表

网格节 点数	静载条件下 管路最大应 力/MPa	冲击作用下管路 最大应力/MPa	冲击作用下管路整 体应力响应最大时 刻/ms
3821	154.4	234.4	24
5096	151.4	227.3	24

4.5 冲击疲劳分析

从图 8 可见, 三通处在冲击过程中最大应力达到 了 234 MPa, 超过材料屈服极限的 11%, 因此管路的 冲击疲劳分析应采用应变疲劳理论。基于管路应力分 析结果, 运用疲劳分析软件 nCode 评估管路冲击疲劳 寿命。运用 nCode 软件的混合加载方式, 将静载分析 和冲击分析的应力计算结果叠加, 作为疲劳分析的载 荷输入条件。图 9a 给出了单次冲击作用下管路损伤 分布图, 图 9b 为管路寿命分布图。可以看出, 在管



图 8 三通处应力时程曲线



a 单次冲击损伤分布

b 寿命分布

图 9 管路冲击疲劳分析结果

路固定端、弯头和三通处的寿命较短。由于结构疲劳 破坏一般发生在应力集中的局部区域,因此管路寿命 由局部区域寿命决定。最小寿命区域为管路三通鞍点 处,该区域在单次冲击作用下的损伤为 2.53×10⁻⁵, 其寿命为 3.95×10⁴次。

5 结论

文中针对浮动核电站高能管路开展冲击疲劳寿 命分析,评估管路寿命,得到如下结论。

1)管路在一次冲击载荷作用下会经历多次应力 循环,最大应力值超过材料屈服极限的11%,因此管 路疲劳寿命评估应采用应变疲劳理论。

2)将"两点三线"冲击响应谱转换到时域上,得到的加速度时程曲线由一个正向三角波和一个反向三角波组成。管路在冲击载荷作用下的最大应力响应发生在正向三角波之后,反向三角波之内,这是由于惯性效应造成的响应滞后现象。

3)管路固定端、弯头和三通处是应力集中区域,管路疲劳破坏一般发生这些局部区域。经估算, 该管路在横向冲击作用下的冲击疲劳寿命为 3.95× 10⁴次。

参考文献:

- [1] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 第一版. 武汉: 华中科技大 学出版社, 2002.
- [2] 余芬,韩景强,张伟钢.基于冲击模型的飞机结构件疲 劳寿命预测及可靠性分析[J].飞机设计,2016,36(3): 39-42.
- [3] 邹希,张森,胡伟平,等.基于损伤力学的某飞机构件 冲击疲劳寿命预测[J].机械强度,2012,34(4):578-583.
- [4] 肖正明,项载毓,伍星,等.基于瞬态动力学的铸造起 重机桥架疲劳裂纹形成寿命研究[J].机械设计,2015, 32(8): 62-68.
- [5] 王显会,石磊.某特种车架在冲击载荷下的瞬态响应 分析及疲劳寿命评估研究[J].汽车工程,2009,31(8): 769-773.
- [6] 张晓阳, 刘建湖, 潘建强, 等. 各主要海军国家设备抗冲击标准之评述[J]. 船舶力学, 2011, 15(11): 1322-1334.
- [7] BV043/85, 联邦德国国防军舰艇建造规范—冲击安 全[S].
- [8] 赵永翔,杨冰,李朋州.平均应变对 0Cr18Ni10Ti 钢随 机循环应力-应变关系的影响规律[J].核动力工程, 2005,26(2):148-152.
- [9] 赵永翔,杨冰,李朋州.平均应变对 0Cr18Ni10Ti 管道 钢随机应变-疲劳寿命关系的影响规律[J].核动力工程, 2005, 26(2): 153-157.
- [10] GJB1060.1—91, 舰船环境条件要求—机械环境[S].