

文章编号: 2096-3424(2024)03-0316-05

DOI: 10.3969/j.issn.2096-3424.2023.007

# 基于 FEA 与应力在线监测的 RTG 钢结构 疲劳寿命预测

徐彬<sup>a</sup>, 王腾<sup>a</sup>, 林明辉<sup>a</sup>, 刘媛媛<sup>b</sup>, 李芳<sup>a</sup>

(上海应用技术大学 a. 机械工程学院; b. 工程训练中心, 上海 201418)

**摘要:** 疲劳是轮胎式集装箱门式起重机 (RTG) 钢结构发生破坏的主要因素之一。针对 RTG 的工作特点和动力学特性, 提出一种适用于 RTG 钢结构的疲劳寿命预测方法。采用有限元分析 (FEA) 获取其自重应力, 与应力在线监测获取的外载荷应力进行线性叠加, 获得其工作过程中的完整的应力谱样本; 采用雨流计数法获取  $S-N$  特征曲线, 基于 Miner 法则进行时域疲劳寿命预测; 采用 Welch 函数进行快速傅里叶变换, 将应力谱样本转换为频域信号, 基于 Dirlik、ZB 模型进行频域疲劳寿命预测。分析结果表明, 3 种模型的相对误差非常小, 时域方法需要大量的应力谱样本, 频域方法计算效率更高, 3 种模型均可应用于工程实际。

**关键词:** 起重机; 疲劳寿命预测; 有限元分析; 应力在线监测

**中图分类号:** TH114; TH218 **文献标志码:** A

## Fatigue life prediction of RTG steel structures based on FEA and stress online monitoring

XU Bin<sup>a</sup>, WANG Teng<sup>a</sup>, LIN Minghui<sup>a</sup>, LIU Yuanyuan<sup>b</sup>, LI Fang<sup>a</sup>

(a. School of Mechanical Engineering; b. Center of Engineering Training, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

**Abstract:** Fatigue is one of the primary factors responsible for the failure of the steel structure of the rubber tire container gantry crane (RTG). A fatigue life prediction method was proposed based on the working conditions and dynamic properties of RTG. Firstly, finite element analysis (FEA) was adopted to compute stress of gravity, and the entire stress spectrum sample was approached through linear superposition with external load stress obtained from stress online monitoring. Then, rainflow counting method was employed to obtain  $S-N$  curve, and time-domain fatigue life prediction was performed based on Miner rules fatigue. Next, the stress spectrum samples were converted into frequency domain signals through the Welch function for fast Fourier transform, and

收稿日期: 2023-02-07

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”生物医药科技支撑专项(20S31905500); 上海应用技术大学中青年教师科技人才发展基金(ZQ2020-23); 上海应用技术大学引进人才科研启动项目(YJ2021-45)资助

作者简介: 徐彬(1981-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为机电装备及智能控制。E-mail: 17317871686@163.com

引文格式: 徐彬, 王腾, 林明辉, 等. 基于 FEA 与应力在线监测的 RTG 钢结构疲劳寿命预测 [J]. 应用技术学报, 2024, 24(3): 316-320.

**Citation:** XU Bin, WANG Teng, LIN Minghui, et al. Fatigue life prediction of RTG steel structures based on FEA and stress online monitoring[J]. Journal of Technology, 2024, 24(3): 316-320.



then the fatigue life prediction in frequency domain was conducted based on Dirlik and ZB models. The analysis revealed that the relative errors associated with the three models were minimal. The time-domain approach necessitated the utilization of an extensive array of stress spectrum samples, whereas the frequency-domain technique offered a more computationally efficient alternative. The three models holds significant promise for widespread application in engineering practice.

**Key words:** crane; fatigue life prediction; finite element analysis (FEA); stress online monitoring

轮胎式集装箱门式起重机 (rubber tire container gantry crane, RTG) 作为装卸集装箱的高端装备, 是影响港口、码头等大型集装箱堆场作业效率及经济收益的关键装备之一。其具有跨度大、起升高度大的本质结构特性, 使用频率高、满载率高、运行速度快的作业特征, 以及作业于港口易受风载荷、腐蚀等环境因素影响的特点, 导致钢结构容易发生疲劳破坏。因此, 提出高鲁棒性的疲劳寿命预测方法, 有重要的科研价值和实际应用前景。

针对起重机械钢结构的剩余寿命, Ávila 等<sup>[1]</sup>以有限元分析方法获取载荷谱, 采用  $S-N$  方法和裂纹扩展理论对起重机主梁进行疲劳寿命研究。Caglayan 等<sup>[2]</sup>通过应变测试获取载荷谱, 再对有限元模型进行优化, 开展了桥式起重机运行轨道的剩余寿命预测。Moskvichev 等<sup>[3]</sup>采用疲劳裂纹的扩展分析方法, 对起重机主梁进行剩余寿命预测。王爱红等<sup>[4]</sup>通过现场采集数据, 以雨流计数法获取测点的应力谱时域特征, 基于 Forman 方程进行了桥式起重机疲劳剩余寿命预测。左盼等<sup>[5]</sup>根据 ANSYS 有限元模型, 以及现场实测数据, 基于径向基神经网络获取应力谱时域信息, 采用断裂力学法进行剩余寿命评估。

上述研究对时域信号进行特征提取, 建立了基于模型的剩余寿命预测模型, 由于起重机械工况复杂、载荷大且状态多变, 时域分析结果的精度受应力谱样本数据量的影响, 因此时域分析周期长、成本高, 而根据 Nyquist 采样定理, 以应力  $S$  最大的频率分量的 2 倍作为采样频率进行频域分析, 可从离散信号重建连续信号, 可将工作量减半, 大幅提升效率。频域法主要包括窄带法、Rice 法、Wirsching-Light 法、 $a_{0.75}$  法、Tovo-Benasciutti 法、Dirlik (DK) 法、Zhao-Baker (ZB) 法等, 当载荷随机过程为窄带随机分布时, DK、ZB 方法有较高的准确性和较好的适用性<sup>[6]</sup>。

为了提升疲劳寿命预测的效率、精度和可靠

性, 本文提出基于 FEA 与应力在线监测获取应力谱, 采用时域与频域相结合的方法, 建立 RTG 钢结构的疲劳寿命预测模型。

## 1 疲劳寿命预测理论

### 1.1 时域方法

根据 RTG 应力分布的特性, 基于 Miner 法则建立时域预测模型。对于  $S-N$  曲线, 综合应力在线监测、数字仿真的方法获取多个工作循环的小子样本, 采用 Rainflow 法, 获取相应的应力谱。

根据 Miner 法则, 总的损伤度为<sup>[7]</sup>:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_{\sigma_i}}{N_{\sigma_i}} = \sum_{i=1}^n \frac{Np(\sigma_i)\Delta\sigma}{N_{\sigma_i}} \quad (1)$$

式中:  $n_{\sigma_i}$  为应力幅值  $\sigma_i$  下的循环数;  $N$  为全寿命周期内应力时域特征的平均循环数,  $N=N_0T$  ( $N_0$  为单位时间以正过零数,  $T$  为时间周期);  $p(\sigma_i)$  为应力幅值  $\sigma_i$  的概率密度函数。

则起重机械钢结构的疲劳寿命为

$$L = 1/D \quad (2)$$

### 1.2 频域方法

通过应变计在线监测的方式获得的应力信号是一种小子样本, 与结构在全寿命周期所受的载荷存在一定误差, 而通过时频域变换为应力的功率谱密度表达式, 可较好地表征所受载荷的统计属性, 同时可直接求取随机过程的谱参数, 大大提高了计算效率。

起重机的载荷是一个窄带随机过程, 因此采用 DK、ZB 方法进行频域分析。

DK 法, 即以指数和 Rayleigh 分布线性组合的方式进行建模, 其疲劳损伤数学模型为<sup>[8]</sup>:

$$D_{DK} = \frac{v_p T}{C} m_0^{k/2} \left[ D_1 \tau^k \Gamma(1+k) + 2^{k/2} \Gamma\left(1 + \frac{k}{2}\right) (D_2 |R|^k + D_3) \right] \quad (3)$$

ZB 法, 提出一种由 Weibull 分布和 Rayleigh

分布线性组合的解析方法,其疲劳损伤数学模型为<sup>[6]</sup>:

$$D_{ZB} = \frac{v_p T}{C} m_0^{k/2} \left[ w \alpha^{\frac{k}{\beta}} \Gamma \left( 1 + \frac{k}{\beta} \right) + (1-w) 2^{\frac{k}{2}} \Gamma \left( 1 + \frac{k}{2} \right) \right] \quad (4)$$

## 2 应力谱的获取方法

由于 RTG 尺寸大、结构复杂,采用有线电阻应变监测方式时,工作量大、效率低,因此提出采用 ZigBee 通信协议的无线电阻应变监测方法,在主要受力结构件布置了 8 个应变监测点,如图 1 所示。根据 Timoshenko 梁理论主梁跨中的监测点为应力最大位置,如图 2 所示。因此,取监测点 1 的应力谱作为疲劳寿命分析的样本数据。



图 1 ZigBee 式应力在线监测

Fig. 1 Stress online monitoring-ZigBee sensors



图 2 主梁跨中监测点

Fig. 2 Monitoring point at the middle of girder

由于 RTG 的自重在线谱中的权重较大,而自重引起的预应力无法通过应变监测的方式获取,因此采用 FEA 的方式,计算出只考虑自重时起重机的载荷谱。若使小车位于主梁跨中,空载状态下进行 FEA,则为监测点 1 的自重应力  $S_0$ 。FEA 的应力云图如图 3 所示,结果为 49.4 MPa。因为自重为恒载荷,所以自重应力可视为静态应力。

另外,起重机在全寿命周期内主要受力结构

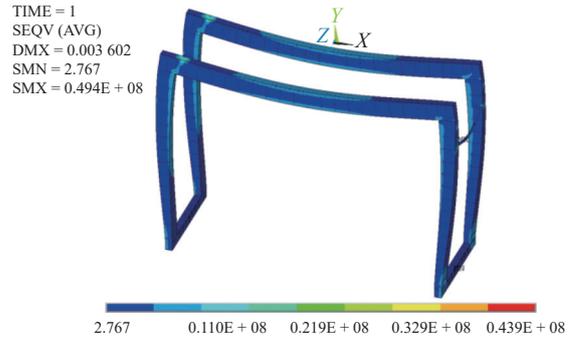


图 3 空载工况 RTG 有限元分析

Fig. 3 Finite element analysis in idle condition of RTG

件处于弹性变形阶段,因此,可将 FEA 的自重引起的应力与应变片在线监测的数值进行线性叠加,从而获得完整的应力值。

通过在线监测多个完整工作班次,工作过程中 RTG 装卸 40 t 额定载荷的集装箱,获取可以准确反映起重机工作周期内的监测点 1 的应力  $S_1$ 。某一时间段  $S_1$  随时间变化的曲线如图 4 所示。通过对  $S_0$  和  $S_1$  进行线性叠加,获得完整的应力  $S$  随时间变化的曲线如图 5 所示。

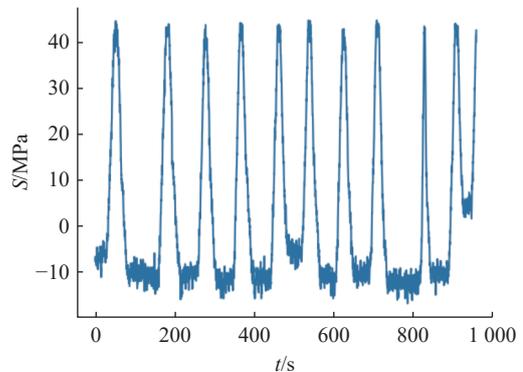


图 4 检测点 1 的在线监测  $S_1$  的时变曲线

Fig. 4 Online monitoring curve of  $S_1$  in time domain of point 1

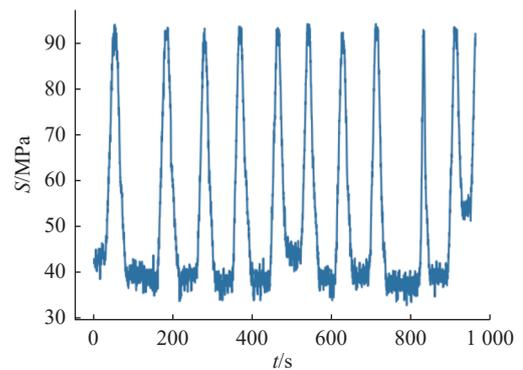


图 5 完整的应力  $S$  的时变曲线

Fig. 5 Time varying curve of the entire stress  $S$

通过 FEA 方法对在线监测结果进行验证,图 6 为额定载荷状态小车位于跨中工况时 FEA

结果,最大应力值位于主梁中点处, Von Mises 等效应力值为 102 MPa。图 5 中通过对  $S_0$  和  $S_1$  进行线性叠加,获得完整的应力  $S$ ,最大等效应力值为 98.7 MPa。与图 6 中的结果比较,相对误差为 3.2%。因此,上述在线监测方法获得的应力谱具有良好的精度,可作为疲劳寿命预测的样本数据。

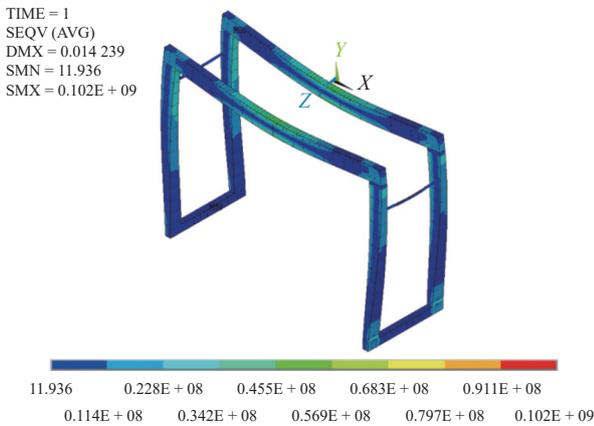


图 6 额定载荷小车位于跨中工况时 FEA 应力云图

Fig. 6 Stress contour of FEA in rated load while trolley at the middle of girder

### 3 案例分析

基于时域方法,以前述 FEA 与应力在线监测融合获取的应力  $S$  的样本数据为基础,采用雨流计数法进行循环计数,图 7 为  $S-N$  雨流计数柱状图,在 1 000 样本点中,应力值为 38 MPa 的占比最大,约 520 次,应力最大值 98 MPa 对应的循环次数约为 100 次。

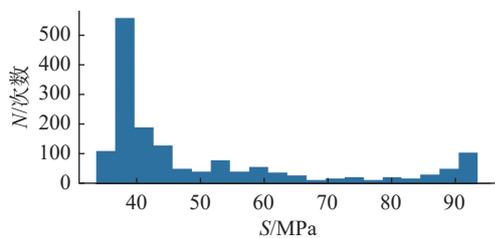


图 7  $S-N$  雨流计数法

Fig. 7  $S-N$  by rainflow method

基于 Miner 法则,计算出 RTG 的疲劳寿命为 729 861 873 s。在时域预测做出假设:设备每年运行 365 d,每天连续工作 24 h,则疲劳寿命  $L$  为 23.14 a。

由于起重机的工作特点决定了其应力的信号为低频信号,为了减少频域分析中外界噪声的干

扰,引入 butterworth 低通滤波器,将高频信号过滤掉。采用 Welch 方法首先对信号进行分段加窗处理,求出各段功率谱后获取平均功率谱。为了减少时频转换所截取的数据段前后的跳变,对数据先乘以 hann 窗函数,使其前后数据能平滑过渡。

基于可解释型语言 Python3.9 建立 DK、ZB 2 种疲劳寿命预测模型,图 8 为 DK 和 ZB 2 种模型进行频域分析后获得的  $S-N$  曲线与 Rainflow 方法获得  $S-N$  曲线。由图 8 可知,DK 与 ZB 模型分析结果误差很小,应力值在 10 MPa 以上时 DK 与 ZB 2 种模型的曲线几乎重叠,只有在 10 MPa 以下时两者有明显差异;与 Rainflow 时域分析结果进行比较可知,对于出现频率较低的 60 MPa 以上的高应力幅值,存在有一定误差,2 种频域模型相对保守,而对于出现频率较高的低于 60 MPa 的应力幅值,3 种模型分析的结果几乎一致,这也是起重机正常工作状态时所处的应力区间。因此,DK、ZB 2 种频域模型显示出良好的精度。

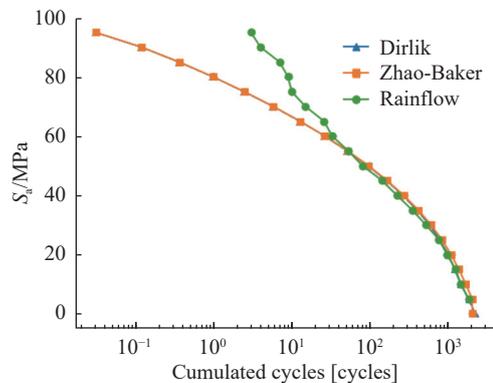


图 8 3 种模型的  $S-N$  曲线比较

Fig. 8 Comparison of  $S-N$  curves of three models

采用 DK 模型,计算 RTG 钢结构的疲劳寿命  $L$  约为 23 年,而采用 ZB 模型,计算 RTG 钢结构的疲劳寿命  $L$  为 22.33 年。与基于时域模型预测的 23.14 年比较,相对误差非常小,进一步说明上述时域、频域预测模型具有良好的精度和可靠性,可用于大型装备钢结构疲劳寿命预测的工程实践。

### 4 结 语

(1) 考虑 RTG 自重应力的影响,通过 FEA 与应力在线监测融合的方法,获取的应力谱样本具有良好的精度。

(2) 综合时域与频域方法,建立了高可靠性的

时频域疲劳预测方法。采用 rainflow 对应力谱样本进行技术, 基于 Miner 法则进行时域分析, 采用 Dirlik、ZB 模型进行频域分析, 计算出 RTG 钢结构的疲劳寿命, 3 种模型间的误差非常小, 这些模型均可应用于工程实际。

#### 参考文献:

- [1] ÁVILA G, PALMA E, DE PAULA R. Crane girder fatigue life determination using SN and LEFM methods[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017 ( 79 ) : 812-819.
- [2] CAGLAYAN O, OZAKGUL K, TEZER O, *et al.* Fatigue life prediction of existing crane runway girders[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010 ( 66 ) : 1164-1173.
- [3] MOSKVICHEV V V, CHABAN E A. Analysis of propagation of fatigue cracks in crane girders[J]. *Inorganic Materials*, 2019 ( 55 ) : 1496-1502.
- [4] 王爱红, 徐格宁, 高有山. 桥式起重机随机应力谱获取及疲劳剩余寿命估算 [J]. *机械工程学报*, 2012, 48 ( 18 ) : 192-198.
- [5] 左晔, 杨蓉萍, 马浩钦, 等. 基于径向神经网络的桥式起重机剩余寿命评估 [J]. *机械强度*, 2021, 43 ( 6 ) : 1450-1455.
- [6] 程侃, 赵礼辉, 刘斌, 等. 频域疲劳寿命预测方法对比与分析 [J]. *农业装备与车辆工程*, 2018, 56 ( 9 ) : 5.
- [7] 刘潇然, 孙秦. 非嵌入多项式混沌法在 PSN 曲线拟合中的应用 [J]. *应用力学学报*, 2021, 38 ( 3 ) : 1252-1257.
- [8] 付景静, 王晨升, 才福友, 等. 联合收割机行走半轴频域疲劳分析方法的对比研究 [J]. *机械强度*, 2022, 44 ( 1 ) : 203-214.

(编辑 陈 红)

#### (上接第 295 页)

- [30] 张陈扬, 刘慧丛, 韩东晓, 等. 微米级 SiC/Ni-Co-P 复合镀层的制备及影响因素 [J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2021, 41 ( 5 ) : 579-584.
- [31] WANG X, LI C, ZHAO T. Fabrication and characterization of poly ( melamine- formaldehyde ) /silicon carbide hybrid microencapsulated phase change materials with enhanced thermal conductivity and light-heat performance [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 183: 82-91.
- [32] 李宝智. 硅烷偶联剂用于非金属粉体表面改性的机理及应用中应注意的问题 [J]. *有色矿冶*, 2006 ( S1 ) : 57-58.
- [33] 李敏, 刘金河, 何孔高.  $\beta$ -SiC 粉体表面改性的研究 [J]. *池州学院学报*, 2013, 27 ( 6 ) : 62-63.
- [34] 刘浩, 聂晨晨, 谢贵明, 等. 聚合物从表面接枝改性无机粒子的进展 [J]. *塑料*, 2022, 51 ( 3 ) : 66-72.

(编辑 张永博)