

文章编号: 1006-2343 (2006) 03-94-03

基于疲劳可靠性的起重机结构安全检测

毛文刚¹, 姜武², 王德禹¹

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 结构力学研究所, 上海 200030, Email: mwgang@sjtu.edu.cn;
2. 江苏, 南通市特种设备检验所, 南通 220040)

摘要: 目前国内起重机都是通过每年定期对其重要部位进行检测后, 来判断结构的安全状况, 这种检测方式具有很大的盲目性, 本文通过对起重机工作过程中的应力-时间历程进行分析, 计算出其疲劳可靠度指标曲线, 并参考起重机结构需要进行检测的最低目标可靠度指标曲线, 来判断结构的安全状况并确定结构需要进行检测的时间点, 这种基于疲劳可靠性的起重机结构安全检测方法既节约了检测成本, 又保证了其能安全有效的运行。

关键词: 疲劳可靠度指标; 结构安全检测; 疲劳累积损伤
中图分类号: TH213.5 **文献标识码:** A

Safety Inspection of Crane Structure Based on Fatigue Reliability

MAO Wen-gang¹, JIANG Wu², WANG De-yu¹

(1. Institution of Structure Mechanics, School of Naval Architecture and Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 200030, China; 2. Jiangsu, Nantong Special Equipment Inspection Institution, Nantong 220040, China)

Abstract: Nowadays in our country crane structure health status are estimated through monitoring the important crane structure component every year and this monitoring method has much blindness. This paper calculates the fatigue reliability index curve through analysis of crane stress-history course, judges the security of the crane and works out the next monitoring time referred the minimum target reliability index curve which shows crane needed monitoring. This crane structure health monitoring method based on fatigue reliability saves monitoring cost and also insures crane operation safely.

Key words: fatigue reliability index; structure health monitoring; accumulated fatigue damage

目前国内起重机结构的安全检测, 都是通过每年定期对其重要部位进行检测, 并根据检测结果凭经验和规范判断其工作状态的好坏。H. A. Layioghlu, A. A. Layioghlu^[1]认为每年都对结构进行安全检测不一定有必要, 这样会造成经济上的浪费。孙晓燕, 黄承逵, 赵国藩等人^[2]曾以桥梁结构的动态可靠度指标为基础, 在保证其安全性的同时从经济性角度出发来制定结构具体的检测和维修方案。而国外对于大型结构的安全检测已经开始采用一种基于疲劳可靠性的检测方式: Toula Onoufriou^[3]考虑到对海洋平台进行检测的过程中结构水下检测费用比较昂贵的问题, 对结构不同部位进行疲劳可靠性分析, 将结构划分为安全等级不同的几个区域, 并选取不同区域具有代表性的点作为检测点, 然后以这些测点的疲劳可靠度指标曲线为基础, 参考不同区域的安全等级来确定其具体的检测时间间隔。T. M. Madhavan Pillai等^[4]考虑到结构检测时间间隔内疲劳和极限应力的影响, 计算出海洋平台的可靠度指标, 并根据相应的失效准则, 来确定结构需要进行检测的时间计划表。

本文应用基于疲劳可靠性的安全检测方式来对起重机结构进行安全检测, 通过对起重机结构在实际工作状况下的应力-时间历程进行分析, 计算出结构的疲劳可靠度指标曲线, 并与结构的最低目标可靠度指标进行比较, 来判断结构的安全状况以及下次需要再次进行检测的时间间隔。

1 基于疲劳可靠性安全检测理论

1.1 基于疲劳可靠性的安全检测概述

基于疲劳可靠性的安全检测, 首先要对结构的第一次检测的数据指标曲线, 参考其最低目标可靠度指标曲线进行分析处理, 得出结构的疲劳可靠度指标, 将这两条曲线的交点作为结构第二次检测的时间点。如果对结构进行检测后发现本次检测的疲劳可靠度指标已经低于结构的最低目标可靠度指标, 则需要对其进行维修, 使其达到一定的安全值并重新计算结构经过维修后的疲劳可靠度指标曲线(可靠度指标变大), 再来确定第二次的检测时间点。到达第二次检测的时间点后, 再根据此次检测的数据, 应用条件概率公式计算出结构在第一个服役周期期间没有发生破坏情况下的疲劳可靠度指标曲线, 从而确定起重机第三次需要进行检测的时间点, 如此循环下去, 直到起重机服役结束。

收稿日期: 2005 - 09 - 05

1.2 基于疲劳可靠性安全检测的分析流程

结构基于疲劳可靠性安全检测的分析流程如下图 1 所示:

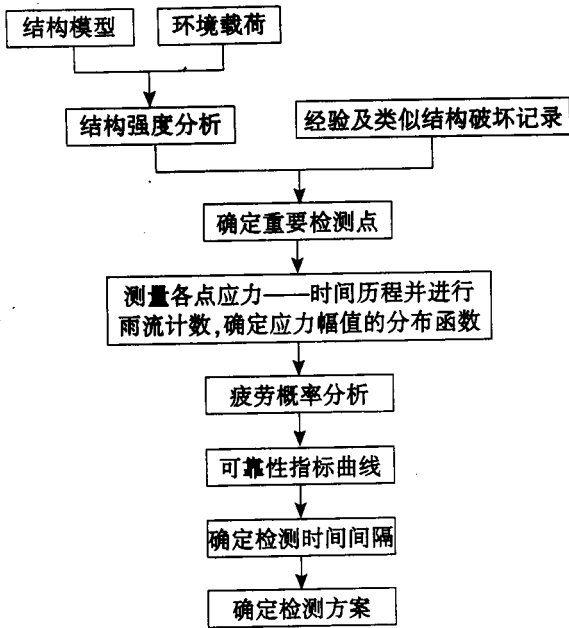


图 1 基于疲劳可靠性的结构检测分析流程

首先对结构的具体结构形式及其受力情况进行分析,确定能反应结构安全状况的检测节点;然后在检测过程中测量这些节点的应力-时间历程,并计算出它们的疲劳可靠度指标曲线;最后参考结构的最低目标可靠度指标曲线确定结构下一次需要进行检测的时间间隔。

2 起重机基于疲劳可靠性的安全检测

起重机从建造安装开始到投入使用的整个寿命期间,必须对其结构进行实时的安全检测,下面将以南通中远川崎造船厂的一台 300 吨门座式起重机横梁为例,说明基于疲劳可靠性的起重机横梁安全检测的具体分析过程,并制定出合理的检测和维修计划,在最大限度地避免事故发生的同时,取得最大的经济效益。

2.1 确定起重机横梁的安全检测点

起重机横梁结构安全点的选取,主要是通过对实际工作载荷下的横梁结构进行分析计算,并结合起重机作业和检测的历史记录以及同类型起重机结构的破坏情况,来确定横梁的危险区域,并在这些区域选取适当的点作为安全检测点。

(1) 建立横梁结构的有限元模型(如图 2 所示),利用 MSC/Nastran 计算出起重机横梁上高应力区域以及应力集中区域。

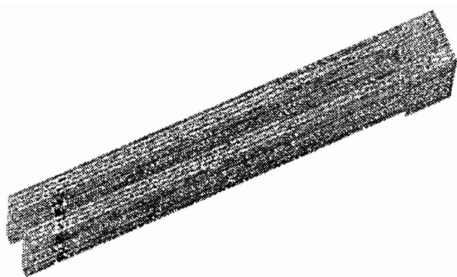


图 2 起重机横梁的有限元模型

(2) 对于已经服役多年的起重机,若其结构经过修理,还要特别注意修理区域以及在施工过程中易损伤区域检测点的选取;根据同类型起重机结构的工作破坏情况,在一些易发生损伤的区域选取适当的点作为检测点。

当考虑到起重机横梁结构的对称性时,结构检测点的选取可如图 3 所示。

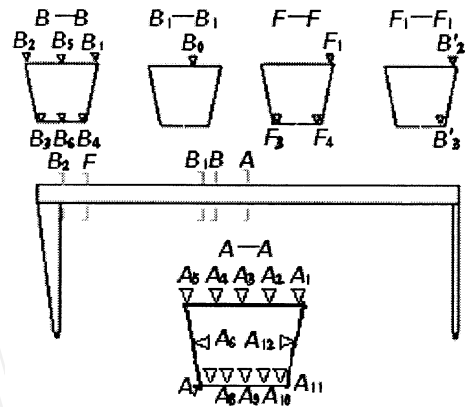


图 3 起重机横梁结构的检测点

2.2 结构的最低目标可靠度指标

最低目标可靠度指标 m_{min} 是指在对结构进行检测时,为保证结构的安全性其疲劳可靠度指标必须满足的最低标准。当结构构件的疲劳可靠度指标大于 m_{min} 时,结构处于安全状态;反之,则说明结构安全度偏低,需要进行检测或维修。起重机横梁的 m_{min} 可参考相关大型结构标准^[3],由于横梁的破坏将会导致起重机的整体失效,因此取其 $m_{min} = 3 \sim 1$ 。

2.3 起重机结构的疲劳可靠度指标曲线

起重机在正常工作情况下,对图 3 选取的各检测节点进行检测,测量出各节点的应力-时间历程(如下图 4),对其进行雨流计数统计,得出不同应力幅值的作用次数,并由此拟合出结构应力幅值的概率密度函数 $f(S)$ (服从 Weibull 分布^[5]),最后计算结构在各测点的疲劳可靠度指标曲线。

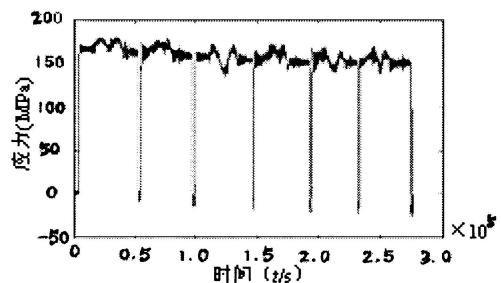


图 4 结构测点 A9 的应力-时间历程

(1) 选取结构的临界损伤值 D_c 以及结构工作过程中承受的应力幅值 D_i 的作用次数 n 为随机变量。

(2) 结构的极限安全状态方程为:

$$Z = D_c - D_i$$

式中,结构的临界损伤 D_c 服从均值为 1.0,标准差为 0.1 的对数正态分布^[6]。

而结构检测节点处的 Miner 累积损伤值 D_i 可以通过结构检测点处的应力-时间历程估算出来。

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} = \frac{\frac{m}{C} S_i^m}{\frac{m}{C} S_e^m} = \frac{n_i S_i^m}{n_e S_e^m}$$

上式中: C, m 为起重机结构构件 $S-N$ 曲线 $N = CS^{-m}$ 的材料参数; S_e 为变幅荷载作用下的等效等幅应力幅值:

$$S_e^m = \frac{\int_0^t n_i S_i^m ds}{n_0} = \frac{f(S) S^m ds}{n_0}$$

累积损伤 D_i 的分布^[6]跟横梁结构的 $S-N$ 曲线有关, 根据独立同分布中心极限定理, 当结构承受的总循环次数 n 很大时, 不论 S 服从何种类型的分布, D_i 均服从正态分布:

$$N \left(\frac{n S_e^m}{C} = \frac{n^{2m}}{C} \right)$$

(3) 将累积损伤 D_i 与临界损伤 D_c 转化成对数正态分布, 则结构的可靠度指标为:

$$(t) \frac{\mu_{D_c} - \mu_{D_i}}{\sqrt{\frac{\sigma_{D_c}^2}{D_c^2} + \frac{\sigma_{D_i}^2}{D_i^2}}}$$

$\mu_{D_c}, \mu_{D_i}, \sigma_{D_c}, \sigma_{D_i}$ 分别为结构临界损伤和累积损伤的均值和变异系数。

(4) 结构在已经承受了 n_1 次交变荷载作用后还没有破坏的情况下, 其剩余寿命期间的疲劳可靠度指标可以通过下式求得的条件概率来转换得到:

$$P_N(n) = p(N > n + n_1 | N > n_1) = \frac{1 - F_N(n + n_1)}{1 - F_N(n_1)}$$

(5) 如果计算出来的疲劳可靠度指标仍然小于最低目标可靠度指标, 就需要对结构具体的构件进行维修, 并使得维修好后测点处的疲劳可靠度指标达到一定的标准值。

2.4 起重机横梁的具体检测方案

按照上述理论, 根据起重机检测过程中测量的各个测点应力-时间历程, 计算出其疲劳可靠度指标曲线, 并参考结构的最低目标可靠度指标 β_{min} , 确定其下次需要进行检测的时间间隔, 测点 A9 的计算结果如下图 5 所示。

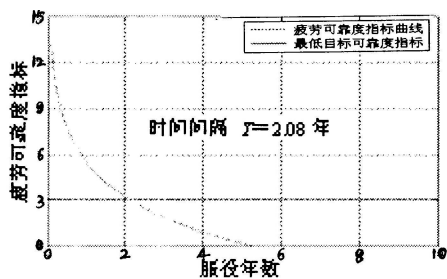


图 5 起重机测点 A9 下次检测的时间间隔

同时测点 A12、F4 及 B6 处下次需要进行检测的时间间隔分别为 3.70 年、6.95 年以及 8.0 年, 而其它测点处的时间间隔都在 10 年以上, 最后根据上述数据并参考相关文献, 制定出起重机横梁结构下次检测时间间隔内的安全检测计划表; 然后可以按照上述理论通过对结构下个检测时间点处测量的各测点应力-时间历程进行分析, 制定下次的检测计划, 如此循环下去, 直到起重机结构服役结束。

3 结论

通过对上述起重机横梁结构的安全检测结果进行分析, 并综合比较起重机横梁固定周期 (年检) 的安全检测方式与

基于疲劳可靠性的安全检测方式 (其疲劳可靠度指标曲线分别如下图 6、7 所示), 得出如下结论:

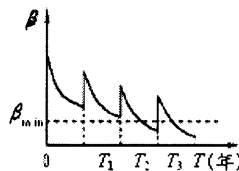


图 6 结构的年度安全检测

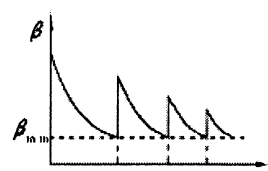


图 7 结构基于疲劳可靠性的安全检测

(1) 在起重机投入使用的初期, 其结构的完整性及安全性有充分的保证, 若按照固定周期的安全检测方式对其进行检测, 结构在前几次检测时间点处的疲劳可靠度指标大于结构需要进行安全检测的最低目标可靠度指标 β_{min} , 从而增加了很多不必要的检测; 而基于疲劳可靠性的检测总的检测次数要少于周期性检测, 这一点从经济性上讲很有吸引力。

(2) 在起重机使用的中、后期, 由于结构承受载荷作用及各种损伤的影响, 结构的安全性势必降低, 若按照固定周期的安全检测方式对起重机横梁进行检测, 结构在到达下一个检测时间点时, 其疲劳可靠度指标已经低于 β_{min} , 这样会给起重机结构带来安全隐患; 而基于疲劳可靠性的起重机横梁安全检测方式, 可以保证结构的可靠度指标总是高于最低目标可靠度指标, 从而确保结构在检测期间具有足够的安全性。

(3) 基于疲劳可靠性的起重机横梁结构安全检测方式可以在检测完成后为起重机的安全状况提供一个可信的安全度指标; 而固定周期的检测方式则不行。

(4) 基于疲劳可靠性的起重机横梁结构安全检测方式, 使结构各个检测节点处的可靠度指标变化很平稳, 这样可以更好的保证结构操作的安全性。

参考文献:

- [1] H. Alayiluglu, A. Alayiluglu. Finite element and experimental bases of a practical bridge management and maintenance system [J]. Computers and Structures 73 (1999) 281 ~ 293.
- [2] 孙晓燕, 黄承彦, 赵国藩, 等. 基于动态可靠度和经济优化相结合的服役桥梁维修加固风险决策 [J]. 工程力学, 2004, 10: 5 ~ 10.
- [3] Toulou Onoufriou. Reliability based inspection planning of offshore structures [J]. Marine Structures, 1999, 12: 521 ~ 539.
- [4] T.M. Madhavan Pillai, A. Meher Prasad. Fatigue reliability analysis in time domain for inspection strategy of fixed offshore structures [J]. Ocean Engineering, 2000, 27: 167 ~ 186.
- [5] 高镇同. 疲劳统计学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [6] 赵尚传, 赵国藩, 贡金鑫. 在役钢筋混凝土结构基于可靠性的疲劳寿命分析 [J]. 工程力学, 2002, 8: 7 ~ 11.
- [7] 幸坤涛, 刘洪滨, 岳清瑞. 在役钢结构吊车梁剩余疲劳寿命的可靠寿命评估 [J]. 工程力学, 2004, 6: 101 ~ 105.

作者简介: 毛文刚 (1980—), 男, 上海交通大学硕士研究生, 主要研究方向: 大型港口机械的疲劳寿命估算及其可靠性安全检测研究, 共发表论文两篇。