

基于环境激励的港口起重机工作模态分析*

龚凌诸¹, 杨晓翔², 钟舜聪^{2*}, 郭金泉², 许忠福¹, 梁崇忠¹

(1. 福建省特种设备监督检验院, 福建 福州 350001; 2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:针对港口起重机难以施加激振力的问题,采用自然环境激励技术(NExT)对港口起重机进行了工作模态分析。在自然风的随机激励下,对某港口 40 t 位起重机进行了模态试验。采用响应点与参考点之间的互功率谱的幅值图代替集总传递函数的幅值图进行了模态分析。由所有测点和参考点间的互功率谱,通过拟合各响应点同参考点之间的互功率谱来识别起重机前 4 阶低阶模态参数(振型、频率和阻尼)。研究表明,利用环境激励法对港口起重机的模态参数识别是行之有效的,该方法可推广应用于其他大型特种设备的模态试验和分析。

关键词:环境激励;工作模态;模态分析;港口起重机;自然环境激励技术

中图分类号:TH113.1;TP206.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)04-0422-03

Operational modal analysis of harbor crane under ambient excitation

GONG Ling-zhu¹, YANG Xiao-xiang², ZHONG Shun-cong^{2*},
GUO Jin-quan², XU Zhong-fu¹, LIANG Chong-zhong¹

(1. Fujian Institute of Special Equipment Inspection, Fuzhou 350001, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at solving the excitation problems of a 40 t harbor crane, operational modal analysis using natural excitation technique (NExT) were investigated. Ambient excitation, such as that caused by wind, was employed to excite the crane. With the unknown input (excitation) signal, only the response signals were recorded. Taking one of the response signals as the reference, the cross power spectra of response signals were calculated and used for modal identification of the crane. The first four lower modal parameters (frequencies, damping ratios and mode shapes) were obtained. The results indicate that operational modal analysis of harbor cranes using NExT is applicable. Therefore, NExT could be recommended in modal testing and analysis of other special equipments.

Key words: ambient excitation; operational modal; modal analysis; harbor crane; natural excitation technique(NExT)

0 引 言

研究起重机的结构模态参数对起重机的抗震、抗风、结构健康监测以及裂纹/损伤检测与诊断具有非常重要的作用。一般地,起重机结构的模态参数主要包括频率、阻尼和模态振型。通常是通过通过对起重机进行模态试验来获取这些模态参数。传统的试验模态分析是通过测试结构中各个部位在特定激励下的振动响应,根据所记录的激励信号和响应信号用模态分析理论进行分析处理,以得到结构的动力学固有特性。这种方法需要对试验对象施加激励力(如使用力锤或者

激振器等),并必须同时记录激励力信号和响应数据^[1-3]。对于质量相对较轻、体积比较小的试验对象,传统的试验模态分析可以得到理想的试验结果。但对于像桥梁、起重机、高速客车等大型结构的试验模态分析,由于激励力相对较小,很难激振试验对象,或者对试验对象会造成一定程度的破坏。为了解决此类问题,工作模态分析方法(环境激励模态分析方法)被提出并被应用于自行火炮^[4]、高速客车^[5]、桥梁^[6]等大型结构的模态分析。

自然环境激励技术(Natural Excitation Technique, NExT)^[7]是使用自然力(比如风等)作为激振源,对各种结构进行工作模态分析的技术。与传统的模态试验

收稿日期:2010-12-15

基金项目:教育部回国留学人员启动基金资助项目(教外司留[2008]890号);福建省质量技术监督局资助项目(MZJK2009-614-50)

作者简介:龚凌诸(1969-),男,福建宁德人,高级工程师,主要从事特种装备检测技术方面的研究。E-mail: gonglingzhu@sina.com

通信联系人:钟舜聪,男,研究员,硕士生导师。E-mail: sczhong@fzu.edu.cn

相比,它不需要特定的试验条件(如自由支撑等)、激励设备(如力锤和激振器等)即可在实际工作环境下进行试验,极大地减低了试验成本,并提高了工作效率。试验时,不用记录激励力信号,只要得到不同响应点的振动响应,就可以得到试验对象的模态参数。

本研究主要介绍基于环境激励的港口起重机工作模式分析。

1 基于互功率谱的环境激励技术

线性系统在白噪声激励下两点响应的互相关函数可以表示成同脉冲响应函数类似的表达形式,即衰减正弦函数的和,且每个衰减正弦都有一个自然频率和阻尼比同结构的各阶模态相对应。因此,可以将响应的互相关函数代替脉冲响应函数,利用传统的模态识别方法进行参数识别,对于单输入、多输出采用 IDT 法或单参考点复指数法;对于多输入、多输出可采用多参考点复指数法或者特征系统实现法^[8]。利用多参考点复指数法可以得到自然频率和阻尼,但是不能获得模态振型。利用参考点与输出点之间的互功率谱,可以求出了振动模态^[9]。对于环境激励的桥梁,利用结构的响应点输出的自功率谱和互功率谱可以识别系统的模态参数^[10-12]。利用功率谱识别环境激励的桥梁结构模态参数,主要基于以下3点假定:

(1) 假定结构是实模态系统。实际工程中的模态分析和参数识别都是建立在实模态的基础上。对于一个实模态系统,由激励和响应之间的关系得到频响函数如下:

$$h_{ik}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_{ir}\phi_{kr}}{(j\omega - \lambda_r)(j\omega - \bar{\lambda}_r)} \quad (1)$$

式中: N —模态阶数, ϕ_{ir} —第 r 阶模态的振型在 i 点处的振型矢量, ϕ_{kr} —第 r 阶模态在 k 点处的振型矢量, λ_r 和 $\bar{\lambda}_r$ —结构的一对共轭特征值。

由公式(1)可知,频响函数包含了结构的所有模态信息。在结构的响应可测、激励不可测得情况下,假设结构上某一参考点的响应为激励,其他点的响应与此点有某种线性相关性,建立起响应点与参考点之间的传递函数进行系统识别。若在结构上取一点固定参考点 p ,则传递率为:

$$a_i(\omega) = \frac{x_i(\omega)}{x_p(\omega)} \quad (2)$$

(2) 假定激励力信号为平直谱信号,它的功率谱密度在覆盖结构全部模态的频率范围内为近似的分布,可以得到:

$$a_i(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^m h_{ik}(\omega)}{\sum_{k=1}^m h_{pk}(\omega)} \quad (3)$$

式中: $h_{ik}(\omega)$ 和 $h_{pk}(\omega)$ — i 点对 k 点以及 p 点对 k 点传递函数, m —阶数。

(3) 第3个假定,结构的各阶实模态不密集,彼此之间不存在耦合或者耦合很小。则在固有频率 $\omega_r = |\lambda_r|$ 处的系统响应就以第 r 阶模态的振动为主,则式(3)可以近似为:

$$a_i(\omega) = \frac{\frac{\phi_{ir}}{(j\omega - \lambda_r)(j\omega - \bar{\lambda}_r)} \sum_{r=1}^N \phi_{ir}}{\frac{\phi_{pr}}{(j\omega - \lambda_r)(j\omega - \bar{\lambda}_r)} \sum_{r=1}^N \phi_{pr}} = \frac{\phi_{ir}}{\phi_{pr}} \quad (4)$$

式(4)中, p 点作为参考点是固定不动的, ϕ_{pr} 是定值,式(4)可写成:

$$a_i(\omega) = \frac{\phi_{ir}}{\phi_{pr}} = C_1 \phi_{ir} \quad (5)$$

由公式(5)可知直接读取测试曲线 $a_i(\omega)$ 在 ω_r 处的值(幅值和相位)就可以近似得到结构 r 阶振型。另外 $x_i(\omega)$ 可以表示为:

$$x_i(\omega) = \frac{\phi_{ir}}{(j\omega - \lambda_r)(j\omega - \bar{\lambda}_r)} \sum_{r=1}^N \phi_{kr} \quad (6)$$

由上式可知,集总传递函数的极点数值与响应点的位置无关,所以可以用响应点与参考点之间的互功率谱的幅值图代替集总传递函数的幅值图进行模态分析。

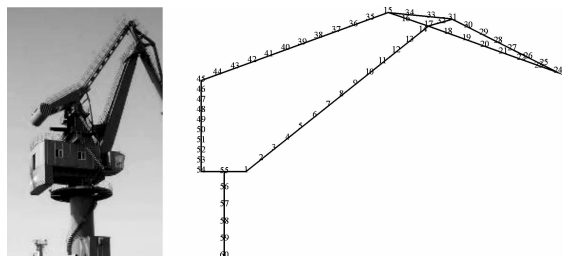
2 港口现场测试和分析

某港口起重机的结构如图1(a)所示,它有35 m高,吨位为40 t。由于其结构尺寸大、造型复杂,给起重机施加外部激振力难度较大。现场试验采用环境激励(海风作为激励源)。

根据起重机的结构特点,起重机模态试验设计选用了60个测点,具体测点分布如图1(b)所示。这里值得指出的是,起重机的臂架是个变结构机构,选择图1(b)所示的臂架位置作模态试验主要是考虑安放传感器时候工作人员的安全性。图1(a)所示的臂架接近垂直,给传感器的放置带来困难和不便。但是这个问题可以通过布放数量足够多的传感器之后再改变臂架的角度来实现如图1(a)所示的模态试验。

试验采用的模态试验和分析系统包括北京东方振动和噪声技术研究所的16通道动态信号采集和分析仪、信号分析和模态分析软件,以及江苏联能的加速度传感器。在整个试验过程中不必记录激励力信号,仅

仅记录每个测点的振动响应信号。测试中每个测点的采样点数为 1 024, 采样频率 1 000 Hz, 每个测点共采集 50 段数据, 因此每一测点的纪录时间约为 50 s。具有代表性的测点 4 和测点 31 的时域振动曲线及其自功率谱图如图 2、图 3 所示。由得到所有测点和参考点间的互功率谱, 通过拟合各响应点同参考点之间的互功率谱求得各阶模态参数。



(a) 某 40 t 位 35 m 高大型港口起重机 (b) 港口起重机简化模型及测试点分布图

图 1 某港口起重机结构实物及简化模型

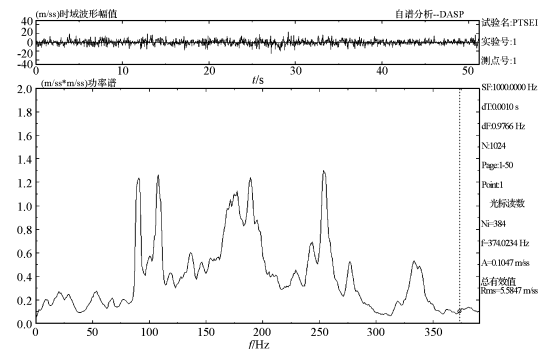


图 2 测点 4 时域振动曲线及其功率谱

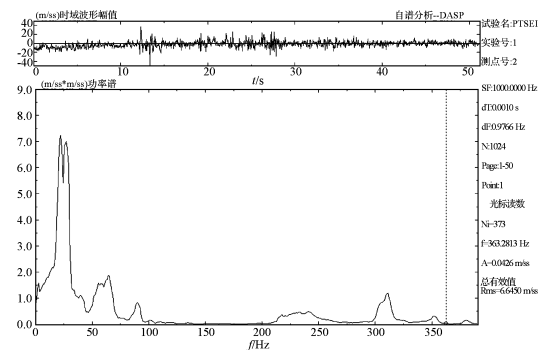


图 3 测点 31 的时域振动曲线及其功率谱

在分析过程中, 取第 4 测点作为参考点, 由各个测量点以及参考点的实测数据可以计算各测量点同该参考点响应间的互功率谱图。以 31 测点为例子, 所得到的测点 31 和参考点 4 的互功率谱图如图 4 所示, 以及利用实模态单自由度拟合的模态参数。

如图 4 所示, 起重机有高频振动频率成分存在。但是从结构损伤评价及设计修改的模态试验目的出发, 主要研究低阶模态。在分析过程中本研究主要识

别对起重机的动态特性起决定作用的低频区段 (≤ 30 Hz) 的模态, 得到的起重机前 4 阶模态频率和阻尼如表 1 所示, 其模态振型如图 5 所示。

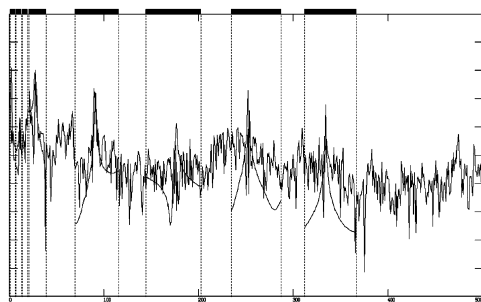


图 4 测点 31 和参考点 4 的互功率谱以及实模态单自由度拟合

表 1 港口起重机的模态频率和阻尼

阶数	f/Hz	$\eta/(\%)$
1	1.469	3.001
2	9.561	0.672
3	16.861	0.302
4	26.119	0.467

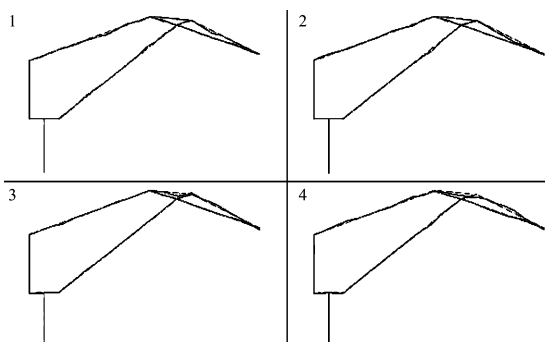


图 5 港口起重机的前 4 阶模态振型

为了检查起重机模态分析的振型结果的可靠性, 这里引入了振型相关矩阵校验。振型相关矩阵校验可以用来校核各阶模态振型之间的正交性, 矩阵关于主对角线对称, 主对角线的元素都为 1。矩阵元素的行号和列号分别代表了两阶模态, 其大小表示了这两阶模态振型的正交性, 为归一化后的两阶模态振型标量乘积, 值越小表示正交性越好。理想的模态分析结果的振型相关矩阵除主对角元素外, 其他元素的值都较小。如图 6 所示, 起重机各模态振型具有较好的正交性, 模态分析结果可以接受^[13-14]。

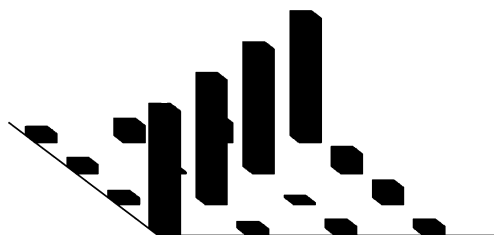


图 6 港口起重机前 4 阶振型相关矩阵校验

(下转第 439 页)

切削热和切削变形对表面粗糙度影响均较小,选择一个相对合适的精加工余量就不会对表面粗糙度产生显著影响。

主运动线速度对表面粗糙度的影响,在一定范围内随着线速度的提高,表面粗糙度的值随之减小,表面质量逐渐提高^[7],即 $R_{a(\text{实际})} = k \times R_{a(\text{理论})}$ 。通过试验及数据分析,得到影响系数基本趋势如图6所示。

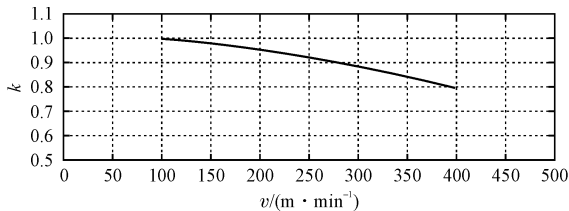


图6 主运动线速度与表面粗糙度的关系

k —主运动线速度表面粗糙度影响系数; v —切削主运动线速度

6 结束语

本研究通过对球头铣刀精铣曲面轮廓时影响表面粗糙度的几何因素和物理因素的分析,给出了走刀行距、进给率、刀具倾斜角度、切削背吃刀量、主运动线速

度对表面粗糙度的影响关系式或关系图。研究结果表明,该研究对提高加工表面的质量、改进切削参数、减少试切次数、控制切削加工周期、降低生产成本等都具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] 胡昌明,贺红亮,胡时胜. 45 钢的动态力学性能研究[J]. 爆炸与冲击,2003(3):188-192.
- [2] 任秉银,唐余勇. 数控加工中的几何建模理论及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.
- [3] CHEN J S, HUANG Y K, CHEN M S. Feedrate optimization and tool profile modification for the high-efficiency ball-end milling process[J]. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**,2005,45(9):1070-1076.
- [4] MIZUGAKI Y, KIKKAWA K, TERAH H, et al. Theoretical estimation of machined surface profile based on cutting edge movement and tool orientation in ball-nosed end milling[J]. **Annals of the CIRP**,2003,52(1):49-52.
- [5] 赵晓明,胡德金,赵国伟. 5 坐标数控加工中工件表面形貌的计算机仿真[J]. 上海交通大学学报:自然科学版,2003,37(5):690-694.
- [6] 邓维鑫,周奎,司徒渝,等. 基于 VERICUT 的水轮机叶片主轴联动数控加工仿真技术研究[J]. 机械,2009,36(7):28-30.
- [7] 霍颖. 基于等残留高度法的五轴 NC 加工刀位轨迹规划[D]. 西安:西北工业大学机电学院,2005.

[编辑:张翔]

(上接第 424 页)

3 结束语

针对大型港口起重机难以激振的问题,本研究利用工作模态分析试验技术对 40 t 的港口起重机进行试验模态分析。采用响应点与参考点之间的互功率谱的幅值图代替集总传递函数的幅值图进行模态分析。由所有测点和参考点间的互功率谱,通过拟合各响应点同参考点之间的互功率谱求得各阶模态参数。在自然风的随机激励下,笔者对某一 40 t 港口起重机进行了模态试验和分析。试验结果表明利用环境激励法对港口起重机的模态参数识别是行之有效的,该法可推广应用于其他大型特种设备(如大型游乐设施等)的模态试验和分析。

另外,由于港口起重机尺寸比较大,往往需要很长的电缆线连接传感器和测试系统,这就给传感器的布放带来了诸多不便。特别是在传感器使用数量较多的场合,各条电缆线的互相缠绕是个需要考虑的问题。所以无线传感系统的使用是大型特种设备检验的发展趋势。

参考文献 (References):

- [1] SAMPAIO R P C, MAIA N M M, SILVA J M M. Damage detection using the frequency-response-function curvature method[J]. **Journal of Sound and Vibration**,1999,226(5):1029-1042.

- [2] ZHONG Shun-cong, OYADIJI S O. Crack detection in simply supported beams without baseline modal parameters by stationary wavelet transform[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**,2007,21(4):1853-1884.
- [3] ZHONG Shun-cong, OYADIJI S O. Analytical predictions of natural frequencies of cracked simply supported beams with a stationary roving mass[J]. **Journal of Sound and Vibration**,2008,311(1-2):328-352.
- [4] 王宝元,刘朋科,衡刚,等. 自行火炮工作模态分析试验分析[J]. 兵工学报,2009,30(7):853-856.
- [5] 金新灿,孙守光,邢鸿麟,等. 环境随机激励下高速客车的工作模态分析[J]. 铁道学报,2003,25(5):24-28.
- [6] 姜浩,郭学东,杨焕龙. 环境激励下桥梁结构参数识别方法的研究[J]. 振动与冲击,2008,27(11):126-128.
- [7] JAMES G H, GARNE T G, LAUFFER J P. The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structure[J]. **International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis**,1995,10(4):260-277.
- [8] 续秀忠,华宏星,陈兆能. 基于环境激励的模态参数识别方法综述[J]. 振动与冲击,2002,21(3):1-5.
- [9] 申凡,郑敏,鲍明. 用互功率谱进行未知激励下的模态振型识别[J]. 南京理工大学学报,2000,24(2):117-120.
- [10] 杨凯,迟毅林. 基于薄片材料的无损检测方法概述[J]. 机械,2009,36(11):67-68.
- [11] 胡赞,熊小勇,肖斌有. 基于 UG 技术的采棉机变速箱体的模态分析[J]. 机械,2010,37(12):18-20.
- [12] 刘宗政,陈晨,郭隆德,等. 基于环境激励的桥梁模态参数识别[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(3):301-303.
- [13] 陈凯亮,李俊源,姜献峰. 基于 ABAQUS 软件的多轴器动力座模态分析[J]. 轻工机械,2010,28(2):41-43.
- [14] 曹巨江,李龙刚. 基于 ANSYS 软件的弧面凸轮分度箱输出轴的模态分析[J]. 轻工机械,2010,28(3):41-43.

[编辑:张翔]