

· 港 口 ·



离岸码头结构无基准动态位移测试技术^{*}

王承强^{1,2}, 陈忠华^{1,2}, 贾 宇^{1,2,3}, 魁庆磊⁴

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029;

2. 水文水资源和水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029;

3. 河海大学 水利水电学院, 江苏南京 210098; 4. 中国地震局工程力学研究所, 河北三河 065201)

摘要: 在结构位移测试方法研究现状的基础上, 提出无基准测试码头动态位移的思路并建立相应测试及分析系统。选定无源伺服位移传感器采集动态信号, 通过仿真试验系统研究传感器对不同形式荷载作用的振动响应规律, 针对准静态位移工况, 提出基于传感器采集信号与测试系统仿真模型反演结构位移真实值的修正方法, 形成可变荷载作用下码头结构的动态位移无基准测试技术。开展现场动态位移测试试验, 结合基于舒适度的码头位移限值研究及有限元建模分析计算, 验证技术的可靠性。结果表明, 该技术操作简单、结果可靠、受环境影响小, 可实现远程自动监测。

关键词: 码头结构; 动态位移; 无基准; 测试技术

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0048-08

Dynamic displacement testing technology without benchmark for offshore wharf structure

WANG Cheng-qiang^{1, 2}, CHEN Zhong-hua^{1, 2}, JIA Yu^{1, 2, 3}, CHI Qing-lei⁴

(1.Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China;

3.Hohai University, College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Nanjing 210098, China;

4.Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Sanhe 065201, China)

Abstract: Based on the research status of the testing method of structural displacement, we propose the idea of measuring dynamic displacement of wharf without benchmark, and establish the corresponding test and analysis system. We select the passive servo sensor to collect the dynamic signal, and study vibrational response law of the sensor to different loading forms by the simulation test system, propose a correction method to obtain actual value of structure displacement based on inverse analysis by the simulation model of the test system and signals of sensors aiming at the working condition of quasi-static displacement, develop the dynamic displacement testing technology without benchmark for dock structure under variable load, and carry out field dynamic displacement test to verify the reliability of the proposed technology combining with the research on wharf displacement limit based on comfort level and the analysis and calculation of finite element modeling. The results show that the technology is simple to operate, reliable in results, less affected by the environment, and can realize remote automatic monitoring.

Keywords: wharf structure; dynamic displacement; without benchmark; testing technology

近年来, 我国水运事业蓬勃发展, 大型、超大型船舶运输的需求使港口建设向深水延伸。离

岸深水条件下, 风、浪、流等环境荷载、船舶荷载以及机械荷载的共同作用为港口及码头工程的

收稿日期: 2020-04-24

*基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2018YFF0215005)

作者简介: 王承强(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为水工结构病害诊断。

长效服役带来诸多挑战^[1-2], 比如: 高桩码头作为码头结构的主要形式之一, 广泛分布于我国经济社会发展活跃的东南沿海地区; 但由于高重心的结构形式, 其在上述可变荷载作用下极易出现较大的整体位移; 结构构件因此发生损伤, 工程的使用性和安全性受到严峻威胁。

监测荷载作用下的结构响应可反映结构自身的性能状态, 为工程维护提供技术支撑。然而, 相对于大坝、桥梁等工程, 码头结构健康监测技术的关注度不高。码头位移监测涉及结构的整体位移, 包括水平向位移和铅垂向位移, 据此可评估结构的整体安全状态。目前码头位移监测主要集中在静态位移观测, 通常采用大地测量、GPS(全球定位系统)等技术^[3]。而关于码头动态位移测试技术的研究较少, 较被认可的是相对位移的测试方法: 刘现鹏等^[4]在天津港某高桩码头结构健康监测中, 采用光纤光栅式传感器对应变和构件之间的相对位移进行监测; 朱彤等^[5]基于光纤光栅传感技术对大连新港某30万t原油码头的沉箱式靠船墩及钢管混凝土拱桥建立应变监测系统。离岸深水码头由于兴起时间不长, 更是缺乏系统的、可准确进行动态位移监测的技术: 离岸通常不具备参照基准, 且风暴潮环境下人工测读困难; 另外, 还承受船舶荷载、机械荷载等可变荷载作用, 导致码头动态位移特征多样, 从高频到低频、从动态到准静态的不同类型动态位移, 均对监测设备和分析方法提出更高的要求。

通过以上分析, 本文建立以无源伺服技术^[6]驱动的位移传感器为核心的测试系统, 引入振动信号仿真系统; 开展可变荷载作用下码头结构动态位移模拟分析, 特别对船舶荷载作用时码头实际位移过程进行阐述并修正该工况下的测试技术; 最后进行码头动态位移现场测试研究, 讨论所提测试技术的可靠性。

1 码头结构动态位移无基准测试技术的提出

1.1 传统测试方法

光学仪器观测^[7]需要建立基准点, 而对于离

岸深水码头, 难以在码头观测点与岸上基准点或工作基点之间建立起有效的观测网; 另外, 光学仪器观测属于定点测量, 而船舶撞击点位置不确定, 因此测试船舶靠泊过程中产生的位移很难获得满意结果; 并且受测试距离和测试环境的影响很大, 对操作要求高, 效率偏低。

GPS 测量^[8-9]针对的是结构静态位移, 观测时间不宜少于 30 min; 此外, 测点附近不宜有障碍物和电磁辐射源。因此, GPS 观测法也不适用于码头位移测试。

位移计测量法较为准确, 但仅能测得结构相对基准体的位移, 至于无基准体参照的结构绝对位移仍不可知。此外测试时要把前后桩台分缝中的杂物清除, 使两桩台完全分开, 保证码头前桩台在作业时不受后桩台的影响; 当前后桩台相互挤压时该方法则不可用。

1.2 动态位移无基准测试技术

可变荷载作用下的码头位移动态多样, 既有周期性振动, 又有非周期性准静态位移。但可以确定的是, 结构位移过程中同时具有速度及加速度, 动圈往复式拾振器可通过此信号计算得到位移。由前述分析可知: 离岸码头位移测试具有基准点布设困难、位移幅值小、位移频率低、关注绝对位移、极端环境频发的特点, 因此, 本文提出基于无源伺服振动传感器^[10-11]的码头结构动态位移无基准测试技术。

1.2.1 测试系统

测试系统主要由传感器、放大器、数据采集仪和信号控制分析软件组成, 见图 1。其中传感器采用基于无源伺服技术的低频振动仪, 可根据需要提供测点的加速度、速度或位移参量; 配备相应放大器, 数据采集仪及信号控制分析包。

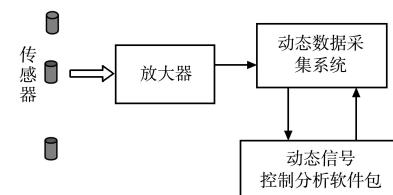


图 1 动态位移测试系统

1.2.2 振动信号仿真分析系统

仿真是根据研究系统构造可描述真实系统结构和行为的数学模型，然后通过计算机运行模型，模拟实际系统的行为及其随时间变化的过程，再结合对仿真运行过程的观察和统计，得到被仿真的系统的参数和基本特性，以此推算实际系统的真参数和性能。仿真分析可说明被测试系统的技术特性，其过程见图 2。



图 2 测试技术的仿真分析过程

基于低频标准振动台的控制技术^[12] 和无源伺服振动传感器响应原理^[13]，针对可变荷载作用下码头结构位移的动力响应规律，建立动态位移无基准测试系统的数学仿真模型，并经标准振动台校准检验。本数学模型的核心是通过增加无源反馈网络的单自由度二阶系统模拟无源伺服传感器，求解考虑反馈力的系统运动微分方程得出传递函数，即传感器的数学模型表达式。模型具有基于无源伺服振动传感器的测试系统对动态位移信号的响应机制，即传感器的属性特征，与被测对象的结构形式无关；当不同特征的码头动态位移时程曲线作为输入信号输入模型时，输出的信号便为测试系统实测的时程曲线。因此，已知测试系统实测信号后，可通过本仿真模型反求测试系统的输入信号，即待测对象的实际位移信息。

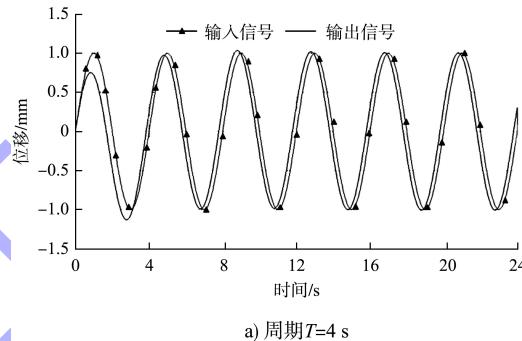
1.2.3 测试方法

1) 构建基于传感器群的采集系统，包括位移传感器和振动传感器。2) 布设采集系统，确定以结构段为单元进行监测的思路；该结构段包括桩基、横梁、纵梁和面板；进一步为单元监测选定传感器的最优布设点，即角点区域。3) 设定采集时间窗口，并确定相关采样频率，保证数据采集的针对性及高效性。4) 针对作用荷载工况，确定相应的解译采集信号的方法。

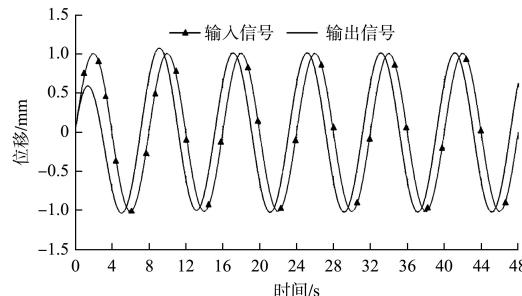
2 周期荷载作用下码头结构动态位移模拟分析

码头结构的环境荷载如风、波浪、水流作用，

以及机械作业荷载均属于周期荷载。以正弦信号为周期信号的代表，输入振动传感器，动态位移无基准测试系统的仿真输出结果见图 3。当输入信号即码头结构振动频率为周期性信号时，振动传感器的输出信号与输入信号具有很好的相似性，输出与输入信号之间的相位差稳定，系统为线性的，输入与输出幅值的比为固定值，即灵敏度系数。因此，采用该测试系统，将采集到的信号（输出信号）除以灵敏度系数便得到真实信号（输入信号）。该测试系统可用于周期性振动信号的测试。



a) 周期 $T=4$ s



b) 周期 $T=8$ s

图 3 输入正弦信号时测试系统的仿真输出

3 船舶荷载作用下码头结构动态位移模拟分析

3.1 实际位移过程

船舶荷载作用如靠泊船舶作用，风、波浪、水流对泊船作用，是可变荷载作用下码头结构动态位移规律研究中较为复杂的荷载作用形式。选取典型码头工程，对船舶撞击力作用下码头结构运动规律展开简化分析。

某矿石码头采用 SUC2000H-RO 鼓型橡胶护舷，将船舶撞击力简化为图 4 表示的时间历程 $F(t)$ ，对边排架作用横向荷载 $F(t)$ 和纵向荷载

0.3F(t)的工况进行数值计算。码头位移时间历程见图5, 可以看出, 最大横向位移为-6.51 mm, 最大纵向位移为-1.12 mm。

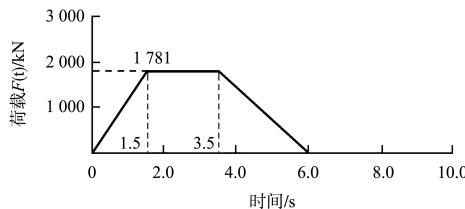


图4 荷载的时间历程

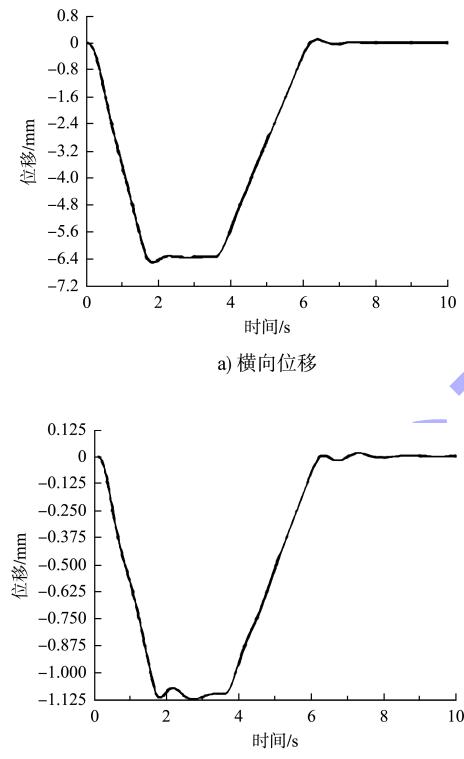
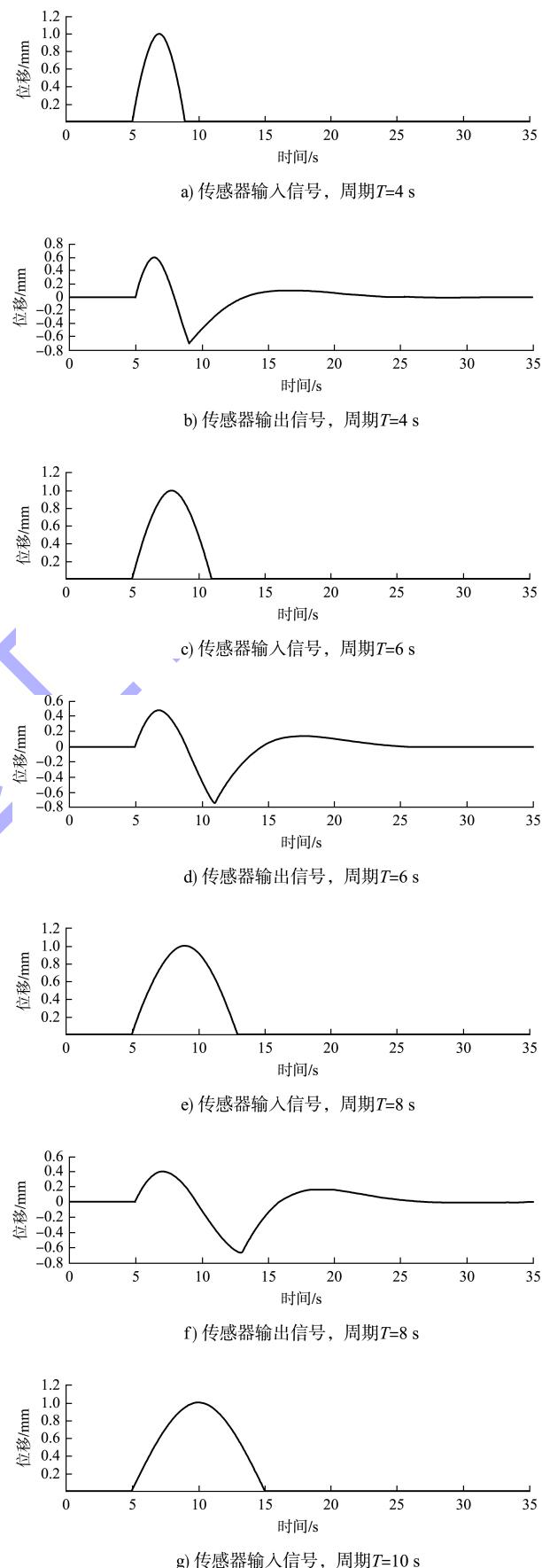


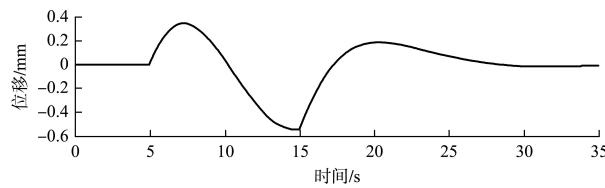
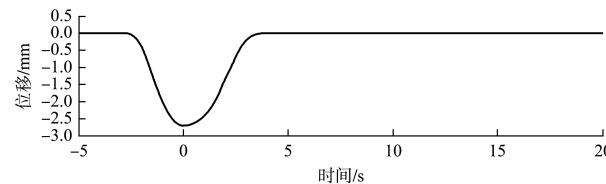
图5 船舶荷载作用下码头位移响应模拟

由以上模拟数值计算可知, 船舶荷载作用下的码头位移为准静态过程: 从船舶撞击到码头时起, 码头位移呈单调增大; 当船舶有效撞击能被吸收后, 码头位移到达最大; 随后恢复力推动船舶, 码头位移逐渐恢复, 位移单调递减至初始的零位移。

3.2 位移测试技术仿真试验

船舶荷载作用下的码头位移曲线具有单峰性质, 采用半周期的正弦信号作为测试系统输入信号, 测试系统的仿真输出见图6。



h) 传感器输出信号, 周期 $T=10\text{ s}$ 

a) 仿真输入位移信号

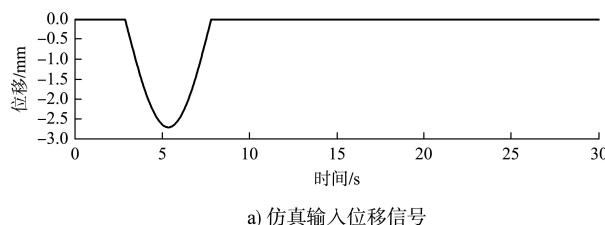
图 6 输入信号为半周期正弦信号的测试系统的仿真输出

由图 6 可见, 当输入信号为单峰非周期性信号时, 测试系统的输出信号与输入信号便失去了相似性, 系统是非线性的, 不能直接从实测数据求得待测物理量。

3.3 位移测试修正方法

尽管如此, 在掌握测试系统的输入、输出模型, 并了解码头在船舶撞击力作用下的位移特征的基础上, 可以借助测试系统仿真模型由输出信号推求输入信号。以下为由测试系统实测船舶撞击时的码头位移信号, 推求码头真实位移的方法。

采用半正弦波作为输入曲线得到的测试系统仿真输出曲线与实测位移曲线的对比见图 7。若以实测位移曲线为标准, 调整图 7 中仿真输出曲线拟合实测曲线, 则在拟合的过程中, 与该仿真输出曲线对应的输入曲线也随之发生变化, 如图 8 所示。仿真输入曲线中开始位移及恢复原位的两个拐点趋于光滑, 鉴于调整前后的输出曲线与实测曲线较为接近, 故位移幅值改变较小。当仿真输出曲线完全拟合为实测曲线时, 与此时的输出曲线对应的输入曲线即为时域中码头的真实位移过程。



a) 仿真输入位移信号

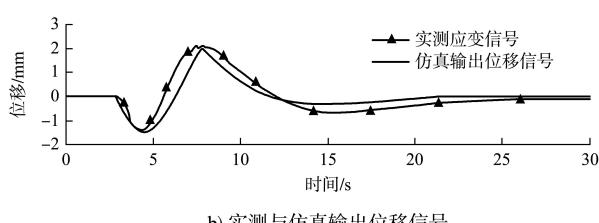
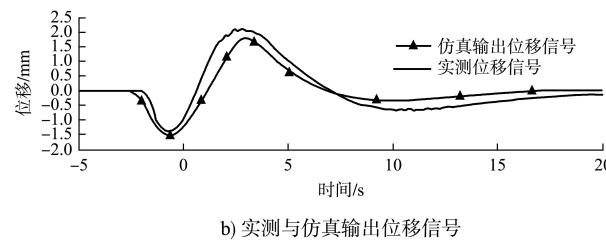


图 7 半正弦波输入信号时的测试系统输出位移与实测位移



b) 实测与仿真输出位移信号

图 8 与实测位移拟合的输出信号关联的测试系统输入信号

在实际工程中, 仅获得位移的大小, 并不必将仿真输出曲线与实测曲线完全拟合, 即可通过仿真模型反演出较准确的测量结果。

4 无基准动态位移测试可靠性研究

重力式码头依靠结构自重保持稳定性, 对较大的地面荷载及船舶冲击荷载的适应性强, 工程实际中其动态位移程度通常微小, 监测工作主要针对静态位移。但是, 本文的测试技术仍可作为尝试使用的手段。

高桩码头的动态位移普遍存在且幅值较大, 故对环境荷载、机械荷载及船舶荷载作用下的高桩码头水平位移情况展开现场实测试验, 综合相应荷载条件下码头工作人员的舒适度研究以及有限元数值分析计算, 对测试结果的可靠性进行判断。

4.1 基于舒适度的码头位移限值讨论

4.1.1 水平位移限值的表达形式

JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》^[14]、GB 50017—2017《钢结构设计规范》^[15]、SL 266—2014《水电站厂房设计规范》^[16]中的水平位移限值, 采用水平位移与结构高度或侧移构件高度比值的表达形式。以上标准规范对结构提出的水平位移限值主要从安全性和使用性角度考虑。

码头结构需要同时考虑结构可靠性、设施使

用性、人员舒适度3方面,而且人员舒适度的要求标准比设施使用性、结构可靠性的要求标准更加严格,因此码头水平位移限值宜采用绝对值的表达形式。

4.1.2 水平位移限值建议值

参考现行规范要求并依据水平位移限值表达形式,经过对船舶撞击力、机械作业荷载及环境荷载等作用下码头操作人员舒适度的大样本调研,总结认为:当水平位移小于5.0 mm时,码头面人员“无感”;当水平位移在5.0~10 mm时,码头面人员“有感”;当水平位移大于10 mm时,码头面人员“扰人”。

表1 模型参数

码头名称	桩型	泥面高程/m	桩顶高程/m	直桩自由长度/m	嵌固点深度/m
某矿石码头	φ1200 mm 混凝土管桩(直桩)、φ1200 mm 钢管桩(斜桩)	-20.50	3.00	23.50	6.0(大管桩) 6.0(钢管桩)
某集装箱码头	φ1200 mm 混凝土管桩	-15.00	2.85	17.85	6.0

4.3 码头动态位移现场测试研究

4.3.1 环境荷载作用

环境荷载作用码头时,水平位移计算值与实测最大值见表2。

表2 环境荷载作用下码头水平位移计算值与实测值

码头	风速/(m·s ⁻¹)			水平位移	
	流速/(m·s ⁻¹)	波高/m	计算值/mm	实测最大值/mm	
某矿石码头	1.5	0.19	0.13	0.36	0.32
某集装箱码头	2.9	0.15	0.21	0.58	0.51

由表2可知,有限元建模计算值与实测值相接近。实际测量中,每个结构段上均布设有传感器群,可较全面地反映结构段位移;通过傅利叶函数展开对位移信号进行频域分析,可辨识位移采集中干扰荷载的影响。

环境荷载作用观测期间,码头面操作人员的不舒适程度皆为“无感”,这也说明实测值的合理性。

4.3.2 机械作业荷载作用

机械作业荷载作用于码头时,水平位移计算值与实测最大值见表3,此时码头的环境因素见表2。表3中的计算值考虑了环境荷载作用,是环境荷载与机械作业荷载分别作用码头时位移计算

4.2 基于有限元的码头位移数值分析

以现场实测的某矿石码头、某集装箱码头为研究对象,分别按照空间和平面模型,采用通用有限元软件计算可变荷载在实测工况下码头的水平位移。

计算以一个码头结构段为原型建立整体计算模型,有限元单元模型包含所有基桩、横梁、纵向梁系和面板等,基桩顶端与横梁固接,泥面以下按嵌固点法,各单元皆按线弹性考虑。

2座码头均为大型深水泊位,在结构形式上有所差别,桩型、桩的泥面以上自由长度值及嵌固点深度计算值见表1。

值的绝对值之和。

表3 机械作业荷载作用下码头水平位移计算值与实测值

码头名称	水平位移计算值/mm		水平位移实测最大值/mm
	空间	平面	
某矿石码头	5.7	5.7	4.7
某集装箱码头	4.0	3.7	3.4

由表3可见,码头位移空间模型计算值与平面模型计算值以及实测值之间相差不大;但数值计算按最不利情况进行,而实际测量中传感器布设于结构段的角点区域,位移采集过程中设定了时间窗口,在时间窗口内机械作业荷载作用不一定出现最不利情况,故计算值一般大于实测值。此外,每一个结构段上均布设有传感器群,对比分析监测荷载作用段与其相邻结构段的采集数据,可大致从实测结果中区分环境荷载等因素作用下结构段位移所占比例。比如,对比表2、3可知,通常情况下,环境荷载在2座码头引起的结构位移分别近似为0.32及0.51 mm,这在机械作用下码头位移实测值中的占比较小。

卸船机作业过程的观测结果表明,卸船机在起吊作业、纵向行走过程的启动和制动、卸船机纵向行走跨越结构分段缝等过程中均引起码头水

位移。卸船机作业过程观测期间，码头面操作人员的不舒适程度皆为“无感”，这与实测的水平位移最大值 4.7 mm 契合度较好。

4.3.3 船舶撞击荷载作用

当船舶撞击力作用时，按照撞击力作用于 1 个排架（现场观测到的实际作用排架），计算船舶撞击力作用下的码头水平位移。

某 20 万吨级矿石卸船码头每结构段为 9~10 个排架，按护舷位置，船舶撞击点通常为第 2 或第 5

排架；某集装箱码头（某三期工程）每结构段为 11 个排架，护舷布置在奇数排架，撞击点通常为第 3 或第 5 排架。

船舶撞击力作用下的码头水平位移计算值及其与实测值（该实测值经过了仿真模型反演）的对比见表 4，此时码头的环境因素见表 2。表 4 中的计算值考虑了环境荷载作用，是环境荷载与船舶撞击力分别作用码头时位移计算值的绝对值之和。

表 4 船舶撞击力作用下码头水平位移的计算值与实测值

码头名称	船名	靠船速度/ (m·s ⁻¹)	撞击力/ kN	撞击点 位置	水平位移计算值/mm		水平位移 实测值/mm
					空间	平面	
某矿石码头	SAMJOHNLIBERTY	0.11	2 500	2 排架	6.8	7.4	4.0
	CHINAPROGRESS	0.08	2 650	5 排架	2.7	2.8	2.0
	ALPHAERA	0.03	1 300	5 排架	1.3	1.4	0.6
	WUGANGORIENT	0.02	1 000	2 排架	2.7	3.0	1.7
	DOCERIVER	0.03	1 000	5 排架	1.0	1.1	0.4
某集装箱码头	MAERSKSTEPNICA	0.10	2 240	5 排架	3.0	2.9	1.8
	ANLEXPLORER	0.13	2 020	3 排架	4.7	4.4	5.0
	新汕头	0.08	1 880	3 排架	4.4	4.1	2.8
	HYUNDAIVOYAGER	0.14	2 320	3 排架	5.4	5.1	5.2
	SAFMARINEMERU	0.09	1 900	3 排架	4.5	4.2	2.6
	向平	0.04	400	3 排架	0.9	0.9	0.8
	MAERSKSEVILLE	0.05	1 350	5 排架	1.8	1.8	0.9

由表 4 可见，船舶撞击力作用下码头位移空间模型计算值与平面模型计算值相差不大；而计算值与实测值之间存在一定偏差，这主要是由于数值计算中可变荷载输入时难以完全符合实际荷载工况，比如船舶实际撞击码头时存在一定角度等。动态无基准测试技术中所涉及的无源伺服反馈传感器具有良好的低频特性，可以辨识低至 0.05 Hz 的振动；振动信号仿真系统理论计算结果与实际标定结果在低频部分误差小于 8%。因此，测试系统在低频振动测量中是可靠的。此外，实际测量中仅需获得位移的大小，这使得通过仿真信号与实测信号拟合反求实际位移较为容易实现。从样本数据总体的角度分析，实测值与计算值存在正相关性，且差值相对于实测值属同一量级，故实测值是合理的。此外，在数十次船撞击的测试结果中，码头面人员不舒适的程度均为“无

感”，而测得的码头最大水平位移为 5.2 mm，这说明本测试技术的量测结果具有可信性。

5 结论

1) 对于低频周期性可变荷载，如风、浪、流荷载以及机械作业荷载作用，码头位移可由本文的无基准动态位移测试方法直接测得；即使存在多种荷载耦合作用时，通过多结构段布设传感器群以及测试信号的傅利叶拆分等方法，也可求得位移幅值。

2) 对于低频准静态荷载，如船舶冲击荷载作用，利用振动信号仿真分析系统对采集信号进行溯源分析后，可反演码头实际位移的近似值。

3) 该测试方法具有以下优点：传感器布设方便快捷，灵活性好；操作简单，测试结果可靠，受环境影响小；无需基准，在采用基于云端的无

线传输和接收储存技术并研发分析控制软件后, 可实现远程自动监测。因此, 鉴于当前离岸码头位移缺乏有效测试技术的现状, 动态位移无基准测试方法可为后续测试提供参考。

参考文献:

- [1] 张志明. 我国沿海深水港口建设技术进展和面临的重大技术问题[J]. 水运工程, 2009(1): 195-202.
- [2] 鲁子爱, 翟秋. 深水大跨码头结构研究[J]. 水运工程, 2011(1): 104-108.
- [3] 黄长虹, 韦灼彬. 海港码头结构健康监测[J]. 水运工程, 2009(4): 106-109.
- [4] 刘现鹏, 刘红彪, 韩阳, 等. 基于光纤 Bragg 光栅传感器的现役高桩码头结构健康监测系统设计与实施[J]. 水道港口, 2016, 37(2): 170-176.
- [5] 朱彤, 刘向前, 周晶. 基于光纤光栅传感技术的圆沉箱靠船墩结构健康监测[J]. 水运工程, 2011(5): 156-162.
- [6] 余天莉, 高峰, 尚帅锟. 无源伺服技术拓展振动速度传感器量程的研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(4): 222-227.
- [7] 陈俊. 两种码头桩定位方法的比较与分析[J]. 港口科

(上接第 20 页)

2) 通过对泡沫铝夹芯板与内藏弹簧的圆管支撑杆件组成的双重耗能三角门防撞体系撞击分析发现, 随着弹簧刚度的降低, 面板吸收能量占比逐渐增加, 当弹簧轴向刚度为 0.01EA 时, 面板耗能占比为 37.4%, 远高于其他部件, 防撞系统的损伤将从面板后的支承体系逐渐转换到面板上, 面板成为防撞系统损伤耗能的第一道防线, 当防撞面板受撞损伤较大时可方便对其进行更换, 更加符合防撞系统的设计思路。

3) 对比传统防撞系统, 含有新型防撞系统的三角闸门各支承杆件反力峰值降低幅度在 8%~28%, 新型防撞系统对三角闸门主体结构和顶底枢的船舶撞击防护效果更好。研究成果可为船闸三角闸门防撞体系的设计和工程应用提供参考。

技, 2010(5): 5-7.

- [8] 杨富春, 黄张裕, 洪毅, 等. GPS 在码头水平位移监测中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(6): 155-158.
- [9] 张晓杰, 赵晓红, 曹胜敏. 码头水平位移监测的方法及其精度分析与探讨[J]. 港工技术, 2016, 53(1): 98-100.
- [10] 黄浩华, 杨学山, 黄振平. 891 型测振仪: 无源伺服技术的应用[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(3): 94-101.
- [11] 龚庆磊, 杨学山, 尚帅锟. 无源伺服反馈多输出低频振动传感器[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 105-111.
- [12] 龚庆磊. 低频标准振动台系统和振动校准技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.
- [13] 龚庆磊, 韩炜, 何先龙. 基于无源伺服传感器的振动测量系统[J]. 振动与冲击, 2009, 28(4): 153-156, 157.
- [14] 中国建筑科学研究院. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] 中冶京诚工程技术有限公司. 钢结构设计规范: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [16] 水利部水利水电规划设计总院. 水电站厂房设计规范: SL 266—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.

(本文编辑 王璁)

参考文献:

- [1] 林江, 朱召泉. 船闸闸门受撞安全性研究[J]. 水运工程, 2007(6): 78-82.
- [2] 朱颖, 朱召泉, 王新. 一种三角闸门的防撞结构: ZL201821746408.3[P]. 2019-07-30.
- [3] 朱颖. 大跨度三角闸门防撞系统设计与数值分析研究[D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [4] Deshpande V S, Fleck N A. Isotropic constitutive models for metallic foams[J]. Journal of the mechanics and physics of solids, 2000, 48(6): 1253-1283.
- [5] 贾泰华. 泡沫铝夹芯板应用于车架的有限元仿真分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [6] Livermore software technology corporation. Ls-dyna keyword user's manual [R]. Livermore: Livermore software technology corporation, 2003.

(本文编辑 郭雪珍)