



# L型布置内河框架直立式码头结构模态分析\*

杨振东<sup>1,2</sup>, 何光春<sup>1,3</sup>, 朱 攀<sup>1,2</sup>

(1.重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2.重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3.重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400074)

**摘要:**以重庆某平面布置为“L型”的内河框架直立式码头为依托, 采用MIDAS建立空间刚架模型并进行模态分析, 提取关键模态分析结构的振型特点。初步探讨其动力特性, 为结构设计、振动故障诊断以及结构动态特性的优化设计提供依据。

**关键词:**L型布置; 模态分析; 内河框架码头; MIDAS; 动力特性

中图分类号: U 656.1<sup>1</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)02-0068-05

## Modal analysis on structure of L-style inland river frame-structure vertical terminal

YANG Zhen-dong<sup>1,2</sup>, HE Guang-chun<sup>1,3</sup>, ZHU Bo<sup>1,2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University,

Chongqing 400074, China; 3. Southwest Water-transport Engineering Institute, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Taking an open-style high-pile frame wharf in the inland river in Chongqing as an example, this paper establishes the spatial steel frame model using MIDAS to extract the key mode to analyze the characteristics of the vibration shape. The research on the dynamic characteristics provides a basis for the structural design, vibration diagnosis and optimization design of structural dynamic characteristics.

**Key words:** L-style layout; modal analysis; inland river frame-structure terminal; MIDAS; dynamic characteristics

振动现象是码头结构经常遇到的问题之一, 由于振动会造成结构共振或疲劳而破坏结构, 因此了解结构本身具有的振动特性将避免结构在施工或运营中因振动因素造成不必要的损失。模态是码头结构的固有振动特性, 每一个模态具有特定的固有频率、振型和阻尼比。通过模态分析可以清楚了解码头在某一易受影响的频率范围内各阶主要模态的特性, 就可能预言码头在此频段内在外部或内部各种振源作用下实际振动响应, 从而可以用来避免码头结构共振, 掌握码头结构变形趋势, 了解结构耗散外部能量的能力等。所以对码头进行模态分析非常有必要, 可以为码头结

构的振动故障诊断和预报以及码头结构动态特性结构优化等提供设计依据。同时也对码头钢筋混凝土结构的耐久性评估等具有理论指导意义和工程实用价值。

### 1 数学模型<sup>[1-4]</sup>

模态分析是把原物理坐标系统中描述的响应向量放到所谓的“模态坐标系统”中描述, 这一坐标系统每个基向量恰好是振动系统的一个特征向量, 利用各向量之间的正交性, 可使描述响应向量的各个坐标互相独立而无耦合, 于是振动方程变成一组互相无耦合的方程, 各个坐标均可单

收稿日期: 2012-07-11

\*基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(210176); 重庆市教委科技项目(KJ100426)

作者简介: 杨振东(1987—), 男, 硕士研究生, 从事水工结构工程设计与研究。

独求解。具体振动方程的变换及求解如下所示:

由结构动力学给出一个  $N$  自由度线形系统, 其运动微分方程为:

$$M \times \ddot{X} + C \times \dot{X} + K \times X = F \quad (1)$$

式中:  $M, C, K$  分别为系统的质量、阻尼、刚度矩阵;  $X, F$  分别为系统各点的位移响应向量和激励力向量 (对于模态分析,  $F$  即为结构自重)。式 (1) 是一组耦合方程, 当系统自由度很大时, 求解十分困难。将耦合方程变化为非耦合的独立方程组, 这就是模态分析必须解决的问题。

对式 (1) 两边进行拉氏变换, 得:

$$(s^2 M + sC + K) \times X(s) = F(s) \quad (2)$$

令  $s = j\omega$ , 则式 (2) 变为:

$$(K - \omega^2 M + j\omega C) \times X(\omega) = F(\omega) \quad (3)$$

引入模态坐标, 令  $X = \phi \times q$ , 其中  $\phi$  为振型矩阵,  $q$  为模态坐标, 代入式 (3) 有:

$$(K - \omega^2 M + j\omega C) \times \phi(q) = F \quad (4)$$

根据振型矩阵对于质量、刚度矩阵的正交性关系, 有

$$\phi^T M \phi = \begin{bmatrix} m_1 & & \\ & \ddots & \\ & & m_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\phi^T K \phi = \begin{bmatrix} K_1 & & \\ & \ddots & \\ & & K_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

若阻尼矩阵也近似被对角化, 即有:

$$\phi^T C \phi = \begin{bmatrix} C_1 & & \\ & \ddots & \\ & & C_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

对式 (4) 前乘  $\phi^T$  得

$$(K_i - \omega^2 M_i + j\omega C_i) \times q = \phi^T \times F \quad (8)$$

这样, 相互耦合的  $N$  自由度系统的方程组经正交变换, 成为模态坐标下相互独立的  $N$  自由度系统的方程组, 解耦后的第  $i$  个方程, 可表示为:

$$(K_i - \omega^2 M_i + j\omega C_i) q_i = \sum \phi_{ij} \phi^T F_j \quad (9)$$

$$(j=1, 2, \dots, n)$$

式中:  $K_i, M_i, C_i$  分别为模态刚度、模态质量、模

态阻尼;  $\phi_{ij}$  为模态振型。

从式 (9) 可知: 采用模态坐标后,  $N$  自由度系统的响应相当于  $N$  个模态坐标下单自由度系统的响应之和。采用归一化方法使模态质量归一, 记模态质量归一化振型为  $\phi$  即:

$$\phi^T M \phi = I \quad (10)$$

$$\phi^T K \phi = \omega^2 \quad (11)$$

可知:  $K_i$  为模态固有频率,  $N$  自由度系统有  $N$  个固有频率。

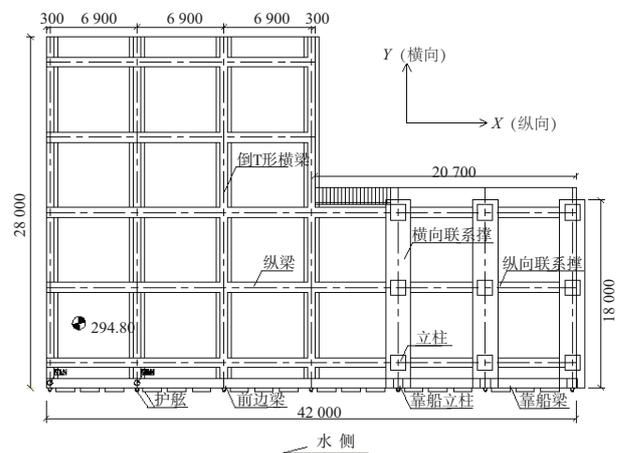
## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

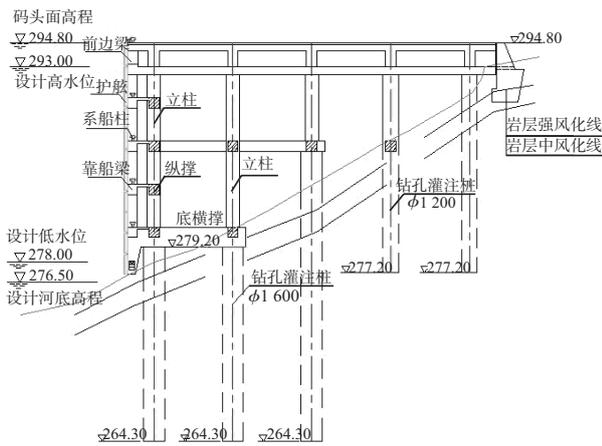
以重庆某码头为例, 码头为顺岸式布置, 根据工程实际情况, 采用了“L”型布置的直立高桩框架结构形式。码头平台的宽度下游为 28 m, 上游为 16 m, 码头前沿长度为 42 m, 如图 1 所示。该工程水工结构按 2 级建筑物设计, 采用框架直立结构<sup>[5]</sup>, 排架间距为 6.9 m, 6 跨, 共布置 7 榀排架。下游侧 4 榀排架横向桩距为 6 m, 共 4 跨, 5 列桩基; 上游侧 3 榀排架横向桩距为 6 m, 共 2 跨, 3 列桩基。桩基采用嵌岩钻孔灌注桩, 前 3 排桩径为 1.6 m, 共 21 根, 后两排桩径 1.2 m, 共 8 根。前两排桩顶用底横撑连接。设计高、低水位差为 15.00 m; 5 层系缆。

### 2.2 数值模型

本文利用有限元软件 Midas 对该码头结构进行建模及模态分析, 采用 Shell 和 Beam 两种空间单元来分别模拟码头面板和桩、柱、梁、靠船构



a) 平面图



b) 典型断面图  
图1 码头结构

件等：模型梁单元1 508个单元，壳单元900个单元，共计2 408个单元，2 282个节点。混凝土弹性模量取 $3.15 \times 10^4$  MPa，泊松比为1/6。建立空间刚架模型，见图2，模型中X轴与Y轴如码头平面图1a)所示，垂直方向为Z轴。

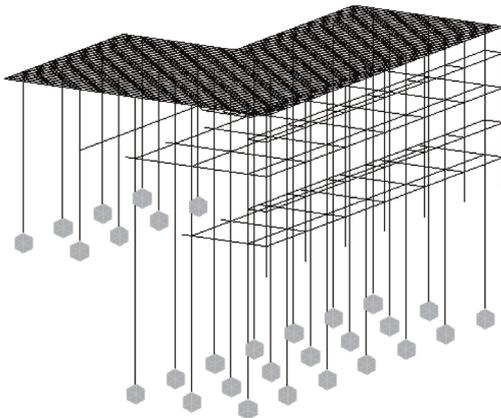


图2 数值模型

### 2.3 边界条件及荷载

#### 2.3.1 边界条件

设计中要求桩基采用嵌岩灌注桩，则根据地质条件确定桩基嵌固点位置，在模型中将嵌固点设置为固结，各方向位移均为零。

#### 2.3.2 计算荷载

模态分析考虑整体结构的固有频率，频率大小的变化直接反映结构的刚度变化。当结构经受过重大荷载作用局部破坏后，可以通过测定结构固有频率的变化来评定结构的健康程度<sup>[6]</sup>。模态分析计算时只需考虑结构自重作用；各构件自重均在有限元软件中设置参数自动施加；混凝土密度取

$2\ 500\text{ kg/m}^3$ 。重力加速度取  $9.8\text{ m/s}^2$ 。

### 2.4 模态及结果分析

采用有限元软件对结构的空刚架模型进行模态分析计算，由结果得到结构第7阶振型在X、Y方向的振型参与质量已超过了90%，如表1所示。

表1 振型参与质量

模态	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z	
	质量/%	合计/%	质量/%	合计/%	质量/%	合计/%
1阶	79.69	79.69	0.55	0.55	0	0
2阶	1.17	80.87	85.60	86.15	0	0
3阶	6.50	87.37	1.75	87.90	0	0
4阶	0.52	87.89	1.12	89.01	0.03	0.03
5阶	0.87	88.76	0.63	89.64	0.03	0.06
6阶	0.76	89.52	0.35	89.99	0.01	0.07
7阶	0.70	90.22	0.71	90.70	0.07	0.14

由于高阶模态不容易被激发，所以文中采用1~7阶振型的模态分析已满足实际工程分析的要求，故只取码头结构前7阶模态进行分析，其模态值以及固有频率和周期如表2所示，各阶模态振型如图3~9所示。模型中视角同时选取为：左面（码头横向）和正面（码头纵向）。

表2 前7阶模态固有频率和周期

模态	频率/(rad·s <sup>-1</sup> )	频率/Hz	周期/s
1阶	7.986 612	1.271 109	0.786 715
2阶	8.799 336	1.400 458	0.714 052
3阶	10.053 357	1.600 041	0.624 984
4阶	31.571 446	5.024 752	0.199 015
5阶	34.103 457	5.427 734	0.184 239
6阶	34.757 723	5.531 863	0.180 771
7阶	40.211 277	6.399 824	0.156 254

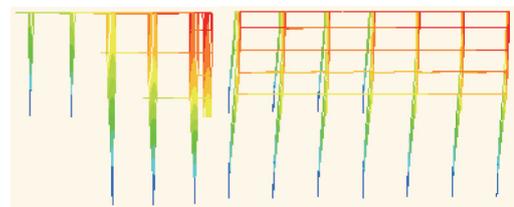


图3 第1阶模态振型

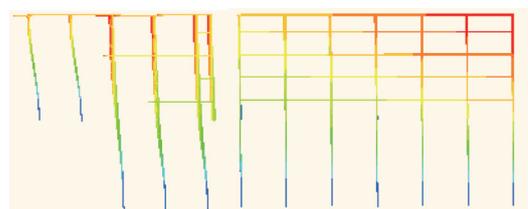


图4 第2阶模态振型

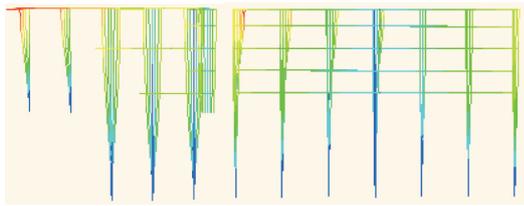


图5 第3阶模态振型

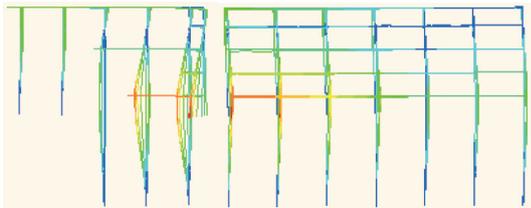


图6 第4阶模态振型

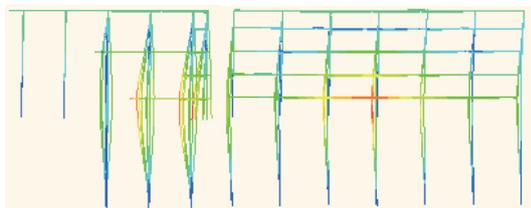


图7 第5阶模态振型

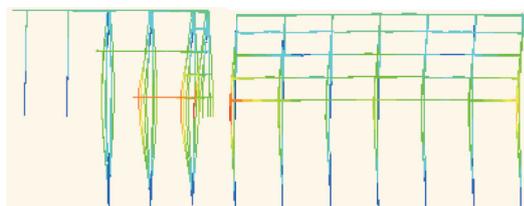


图8 第6阶模态振型

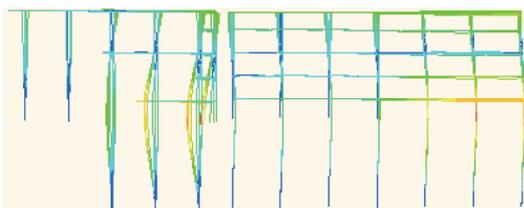


图9 第7阶模态振型

由表2得出的前3阶振型的固有频率比较相近,在实际使用过程中最容易引起码头的共振。所以在布置码头面设备和装卸机械时,无论是码头纵向还是横向都应避免使用与前3阶振型固有频率相近的设备。

由振型图可以直观地看出,第1,2阶模态振型分别表现为码头结构的横向和纵向整体振动,而振动首先出现在结构刚度较小的位置和方向,这说明整体振动最容易被激发;第3阶模态振型开始表现为各排架在X-Y平面内的扭动,即第1阶到

第3阶振型为平面内的水平运动,没有垂直方向的运动,码头面板由于四周边缘没有明显的约束,面板位移较大。其中,在第1阶模态中码头顶部前沿位置在X方向振幅上下游均为0.016 8 m,基本一致;而在Y方向受码头“L”型布置影响,上、下游振幅分别为0.007 4 m和-0.004 5 m,即发生了约2倍关系的反向变形趋势,虽数值不大,但当考虑外荷载作用时该数值将成倍增加,易造成较大的不协调变形,不利于抗震,如图3所示。在第2阶模态中码头呈现出振幅在上游顶部达到最大,并向下游和下层依次递减的状况,如图4所示。

第4阶到第7阶振型主要为以码头桩基嵌固点为对称点的反对称弯曲模态,在对称点的两侧形成以桩基嵌固点为结点的波浪形状,同时在水平方向也有小幅运动。从而表现为各排架在纵、横向的近S型平扭耦合。除第5阶是在码头中间跨底横撑有较大振幅外,其余3阶模态都是在上下游边跨底横撑出现较大振幅,如图6~9所示。

### 3 结论

1) 码头结构前7阶模态分布呈明显的分段集中,即1~3阶模态、4~7阶模态频率差别不大,说明结构在各方向刚度的分布较均匀,整体性较好,利于抗震。而这两段之间,频率呈现明显的跃升,因此要尽量避免出现频率1.271~1.600 Hz和5.025~6.400 Hz范围内的激励源。

2) 针对主要振型,由于码头“L”型布置,码头结构上下游刚度存在不一致,尤其是Y方向刚度存在一定差别。振动发生时,位于码头前沿3层以上的立柱、靠船梁以及上游纵、横撑的是最危险的受力构件,因此可适当加大其尺寸以增加结构刚度,将共振危害降至最低,以达到更好的抗震效果。

3) 第1阶振型频率(基频)为1.271 Hz,在振动发生时将会首先出现,在码头顶部X方向振幅达到最大,从而得出船舶荷载的纵向激励(X方向)将在振动中占有主导性的作用。此外,第3阶模态振型也有X方向振动,因此,为避免结构产生共振,在船舶靠岸时,可对其停靠角度做出一定规定,

并且做好充分的防护工作。

4) 在4~7阶模态分析中, 主要形成以码头桩基嵌固点为对称点的反对称弯曲模态, 在对称点两侧形成以桩基嵌固点为结点的波浪形状。同时, 水平方向小幅运动与此垂直方向的弯曲一起构成了一个空间运动模态。该阶模态有车辆或岸吊荷载的垂直激励时, 在振动响应中占有主导性作用。

5) 由于桩间土对码头结构动力特性存在着不可忽略的影响, 而在建立本模型时未有考虑桩间土作用从而使得到的码头结构基频偏大, 高估了码头动力特性, 在实际中应对这一情况予以考虑。

参考文献:

[1] 周世良, 吴飞桥, 王全, 等. 三峡库区架空墩式散货码头结构模态分析[J]. 港工技术, 2010(3): 25-27.

[2] 王多垠. 内河架空直立式集装箱码头结构特性的模态分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(3): 463-466.

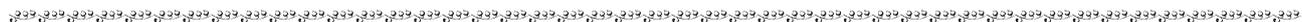
[3] 王多垠, 石兴勇, 吴友仁, 等. 重庆寸滩架空直立式集装箱码头结构有限元分析[J]. 水运工程, 2006(4): 35-37.

[4] 克拉夫 R, 彭津 J. 结构动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[5] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].

[6] 涂杨志. 模态分析在工程结构中的应用[J]. 铁道勘测与设计, 2004(6): 9-13.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第53页)

6) 为了保障大桥施工期及建成后船舶通航安全, 必须设置相关助航设施和配套安全设施, 以保证航道畅通和通航安全。建议桥梁建设单位在下阶段委托有资质的单位对桥区航道的助航设施进行设计, 并落实有关施工期及建成后航道维护和通航安全保障措施。

参考文献:

[1] GB 50139—2004 内河通航标准[S].

[2] 长江水利委员会水文局. 安徽省望东长江大桥水文分析及河势演变计算分析报告[R]. 武汉: 长江水利委员会水文局, 2009.

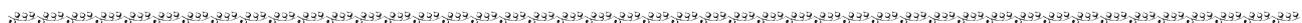
[3] 武汉大学, 长江水利委员会水文局. 安徽省望东长江大桥桥址河段河工模型试验研究报告[R]. 武汉: 武汉大学, 2009.

[5] 安徽省交通规划设计研究院. 安徽省望东长江大桥工程可行性研究报告[R]. 合肥: 安徽省交通规划设计研究院, 2009.

[4] 长江航道规划设计研究院. 安徽省望东长江公路大桥桥梁通航净空尺度与技术要求论证研究报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2009.

[6] 长江航道测量中心. 安徽省望东长江大桥桥址河段洪、中、枯水位流速流向及船舶航迹线观测报告[R]. 武汉: 长江航道测量中心, 2005.

(本文编辑 武亚庆)



### 中昌航道招聘公告

上海中昌航道工程有限公司成立于2011年, 为中昌海运的控股子公司, 股票代码: 600242。主要从事航道疏浚、围垦造地、港口工程等业务, 因公司发展需要, 现向社会诚聘英才。

一、招聘信息:

- (一) 总经理1名
- (二) 副总经理1名
- (三) 项目经理5名
- (四) 经营管理部经理/副经理1名

二、联系方式:

公司网址: <http://www.zchy.net.cn/>      招聘邮箱: [zchd\\_hr@163.com](mailto:zchd_hr@163.com)

联系电话: 021-61075083 ;      联系人: 王女士

联系地址: 上海市虹口区杨树浦路248号瑞丰国际大厦      邮政编码: 200080