

Experimental and Numerical Identification of Wet Frequencies for Rectangular-Section Cantilever Beam in Water

Xiaojun Yang, Yuchun Li, Zhe Liu, Yipeng Ou

Department of Hydraulic Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: 947840515@qq.com, ycl2000@tongji.edu.cn, 2867764462@qq.com, oypster@qq.com

Received: Jun. 7th, 2018; accepted: Jun. 20th, 2018; published: Jun. 27th, 2018

Abstract

This paper studies the free bending vibration frequency of rectangular cantilever beam in water. The test model (a cantilever beam in water) is designed, and the natural frequencies of different cases of the rectangular cantilever beam in the water are obtained. The finite element method (ANSYS code) is used for modal analysis of the test model. The test results and FEM results are compared and analyzed. The numerical results agree well with the experimental values. It is showed that the natural frequency of a cantilever beam reduces with the increase of the water depth.

Keywords

Immersed Rectangular Cantilever Beam, Wet Frequency, Test Value, Numerical Solution

水中矩形悬臂梁湿频率的试验与数值识别

杨晓军, 李遇春, 刘哲, 欧亿鹏

同济大学, 土木工程学院, 水利工程系, 上海

Email: 947840515@qq.com, ycl2000@tongji.edu.cn, 2867764462@qq.com, oypster@qq.com

收稿日期: 2018年6月7日; 录用日期: 2018年6月20日; 发布日期: 2018年6月27日

摘要

本文研究了水中矩形悬臂梁的自由弯曲振动固有频率, 设计了水中的悬臂梁试验模型, 得到了不同试验情况下矩形悬臂梁入水固有频率的试验结果, 采用ANSYS有限元软件对该试验模型进行了模态分析, 将

试验结果和ANSYS计算结果进行了比较分析,数值计算结果与试验值总体吻合良好,结果表明一阶固有频率随悬臂梁入水深度的增加而降低。

关键词

水中矩形悬臂梁,湿频率,试验值,数值解

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

悬臂梁是工程中常见的一类工程结构,由于工程的实际需要,许多悬臂梁都是放置在水中,例如水中承台桩、桥梁的桥墩等,这些结构物在地震、风荷载以及波浪等动力荷载作用下会发生振动,计算悬臂梁的振动频率时,水与结构的相互作用是一个不能忽视的因素,如何分析水中悬臂梁的振动频率是一个值得研究的问题。关于流体与结构的相互作用问题,Westergaard [1]首次研究了刚性水坝上的动水压力问题,将水坝视为刚性悬臂梁;对于工程中常见的浸入水中的弹性圆形柱体结构,当需要考虑结构变形的影响时,需要从结构动力学与流体动力学的基本方程出发对流体-结构系统进行耦联振动分析,Lian与Chopra [2]分析了水中悬臂圆柱在地震激励下的动力响应;从工程结构设计考虑,只需考虑水体对结构的动力影响即可,因而在结构与流体的相互作用分析中[3] [4] [5],通常可将流体对结构的动力影响归结为附加在结构上的质量,这个质量称之为“附连水质量”;徐忠汉[6]采用附连水质量方法得到了水中悬臂梁的自振频率的简便计算公式;当柱体部分浸入水中时,张邵文与倪汉根[7]研究了水中悬臂结构振动与水动力特性,给出了附连水的质量分布;王和慧等[8]采用附连水质量方法研究了水中圆锥形柱腿的湿模态特性;以上的研究均是针对圆柱形悬臂梁。周叮[9]研究了弹性悬臂梁两侧受液深不等无限水域作用时的横向自由振动问题,其弹性悬臂梁相当于无限长的坝体。对于水中孤立的矩形悬臂梁,由于解析方法难以获得其频率的精确解析解,主要的困难来自于矩形周边液体的流场(速度势)计算,水中矩形悬臂梁的研究相对较少,另外现有研究多关注于理论求解方法,试验研究相对较少。本文采用试验法与数值法研究水中矩形悬臂梁的一阶自由弯曲振动固有频率,可供实际工程参考。

2. 实验装置

本试验的主要目的是研究部分入水矩形悬臂梁的自由弯曲振动频率,考虑试验梁截面尺寸的不同和梁入水深度的变化,以及水槽大小尺寸的改变对悬臂梁固有频率的影响。本试验悬臂梁示意图如图1所示,梁长度为 H ,入水深度为 h ,悬臂梁横截面为矩形(具体参数见表1),悬臂梁模型置于开口水槽中,悬臂梁下端固定于刚性底座上,以模拟悬臂梁固端支撑条件,通过改变水深,模拟部分入水悬臂梁的自由弯曲振动。

本试验中,在悬臂梁上端固定白色小贴片,用于反射位移传感器发射的激光,位移测量采用HL-G112-S-J型号的激光位移传感器(测量范围: $120\text{ mm} \pm 60\text{ mm}$,分辨率为: $8\text{ }\mu\text{m}$,试验采样频率 1024 Hz),试验时人工拨动梁片,使之产生自由振动,测量白色小贴片中点处的位移信号,然后通过数据采集仪(型号 INV306N-5260)以及传感器配套软件 Dasp V10 对光信号测量数据进行采样记录和频谱分析,得到悬臂梁在不同试验情况下的时程曲线和一阶频率。

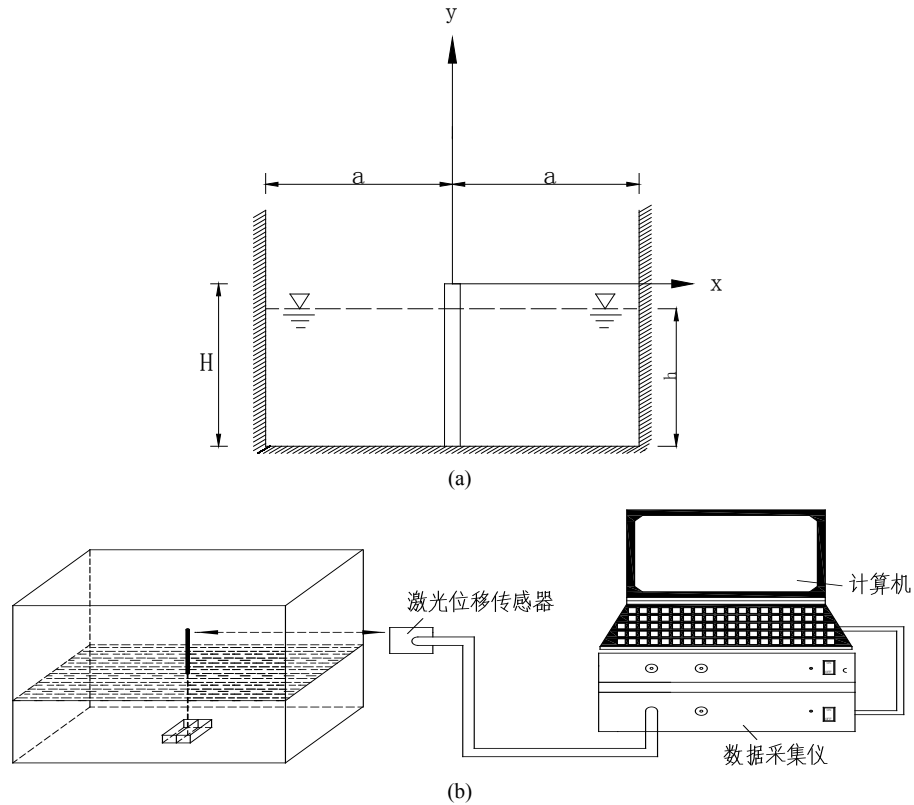


Figure 1. Testing cantilever beam in water and experimental device: (a) Diagram for cantilever beam; (b) Diagram for measuring device

图 1. 水中悬臂梁示意图及试验装置: (a) 悬臂梁示意图; (b) 试验测量装置图

Table 1. The parameter table for rectangular cross section beam

表 1. 矩形截面试验梁参数表

试验梁编号	材料	长度(mm)	截面尺寸(mm × mm)
XBL1	304 不锈钢	180	0.8 × 37
XBL2	304 不锈钢	180	0.8 × 10

3. 试验结果

3.1. 频率测量

本试验共对 2 组悬臂梁(XBL)进行试验研究,为减小试验的偶然误差,对每组 XBL 均进行 5 次试验,分别选取试验梁自由振动衰减过程中一段时程曲线进行数据分析得到对应试验梁的自振频率。图 2 为梁的振动响应测量曲线,对其进行 FFT 傅里叶分析,得到其一阶自振频率。

3.2. 水体区域尺寸的改变对试验结果的影响

由于实际水体区域无穷大,理论分析时通常也将水体的区域视为无穷大,而试验难以将水体区域设计成无穷大,所以本节将讨论通过改变水箱大小来验证改变水体尺寸对悬臂梁自振频率的影响。试验选用长宽高为 30 cm × 30 cm × 35 cm (小水箱,见图 3)和 60 cm × 60 cm × 35 cm (大水箱,见图 4)的长方体开口水箱,改变箱内水深,得到在不同水深情况下悬臂梁 XBL1 和 XBL2 的自振频率,比较每根试验梁在小水箱和大水箱中的自振频率随水深的变化结果。

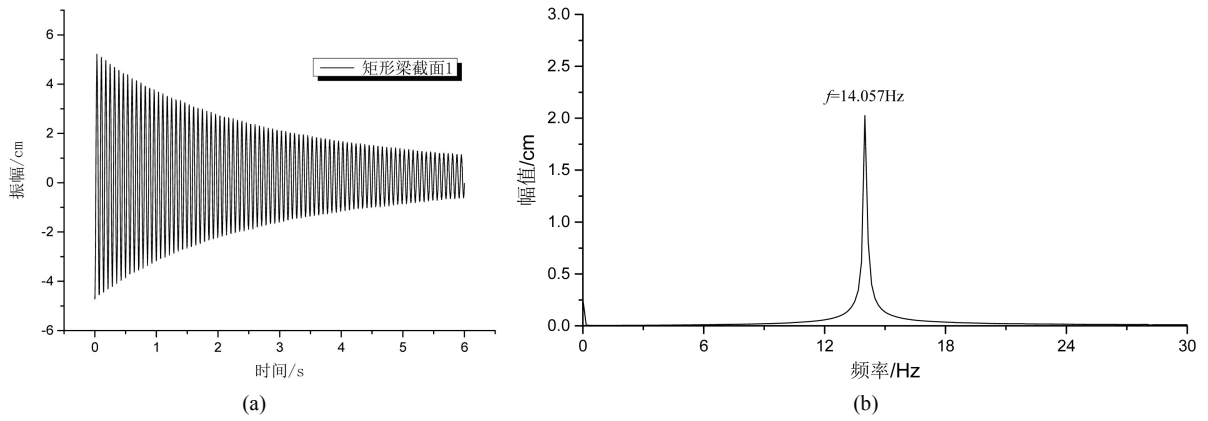


Figure 2. The displacement time-history curve and FFT spectrum diagram of cantilever beam: (a) The displacement time-history curve; (b) Result of FFT

图 2. 悬臂梁位移时程曲线及 FFT 频谱图: (a) 位移时程曲线; (b) FFT 结果图



Figure 3. The photo of small test tank

图 3. 小水箱试验实物图

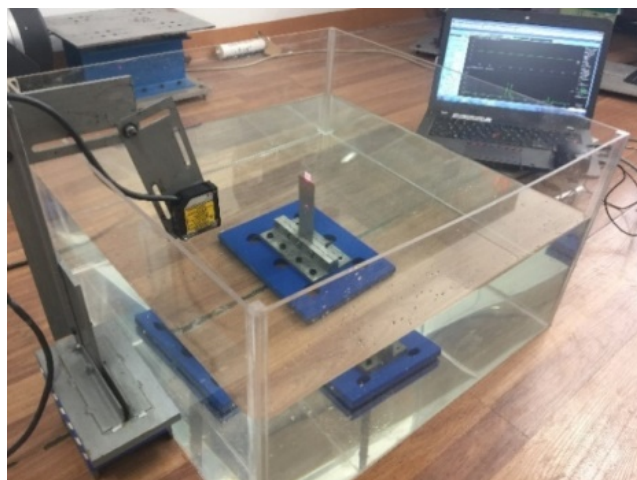


Figure 4. The photo of big test tank

图 4. 大水箱试验实物图

将二个水箱内测量的结果显示于图 5 和图 6，由图 5 和图 6 可知，悬臂梁弯曲振动的第一阶固有频率随水深的增加而逐渐减小，水箱水平尺寸的改变对试验梁频率变化的影响微小，有限的水箱区域对梁振动的影响主要来自于水波振动的影响，水箱大小的不同，水箱边壁产生的回波反作用于悬臂梁的影响也不同。在本试验中，水箱尺寸的改变对试验总体的影响可忽略不计，因此可以认为小水箱与无限水域近似相同，在 ANSYS 模拟时可只采用小水箱来进行计算，结果对比时可以只对比小水箱情况下悬臂梁的自振频率变化。

4. ANSYS 数值结果与试验结果对比

采用 ANSYS 程序(R14.0)求解本问题，流体单元选用 fluid 80，该单元采用可压缩的水体单元，由于假定水体为不可压缩的流体，可将水体压缩模量尽可能取大一些，这里取水体压缩模量取为 2.069×10^{12} N/m²，采用 solid 45 单元来模拟悬臂梁。将水体与结构交接面上的位移耦合在一起，这一交接边界处理有一定近似性，根据已有的大量计算结果分析，这样处理的计算结果可满足计算精度要求。水体四周外围面采用法向位移约束，水体自由表面设为主自由度，梁节点设为主自由度。悬臂梁与液体的耦合系统 ANSYS 有限元模型见图 7，悬臂梁的一阶振型可见图 8。

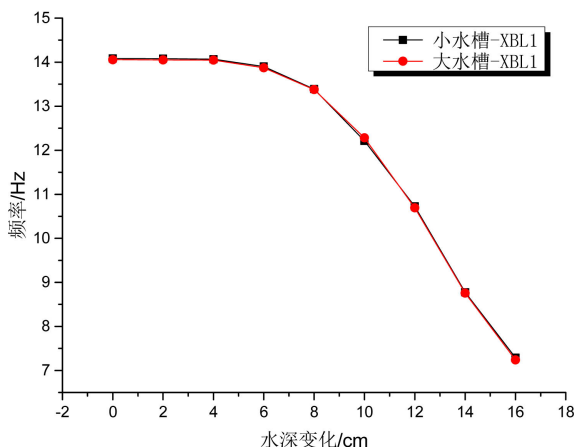


Figure 5. The contrast diagram of XBL1 frequency

图 5. XBL1 自振频率对比图

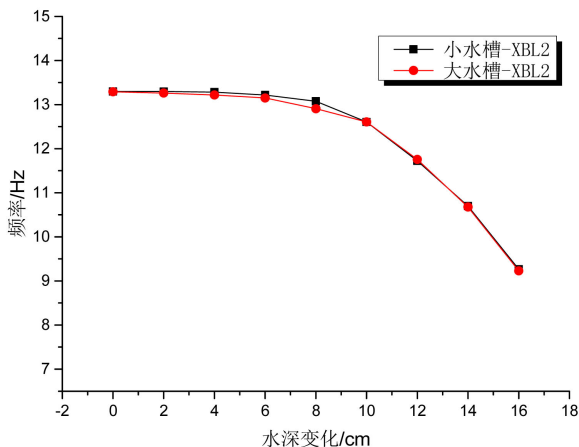


Figure 6. The contrast diagram of XBL2 frequency

图 6. XBL2 自振频率对比图

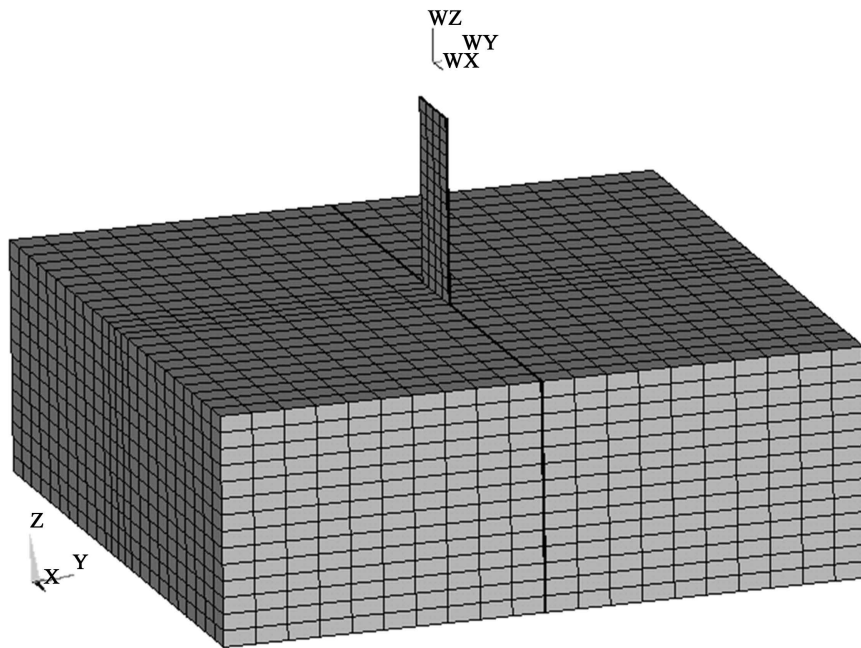


Figure 7. FE model of cantilever beam and fluid
图 7. 悬臂梁与流体有限元模型

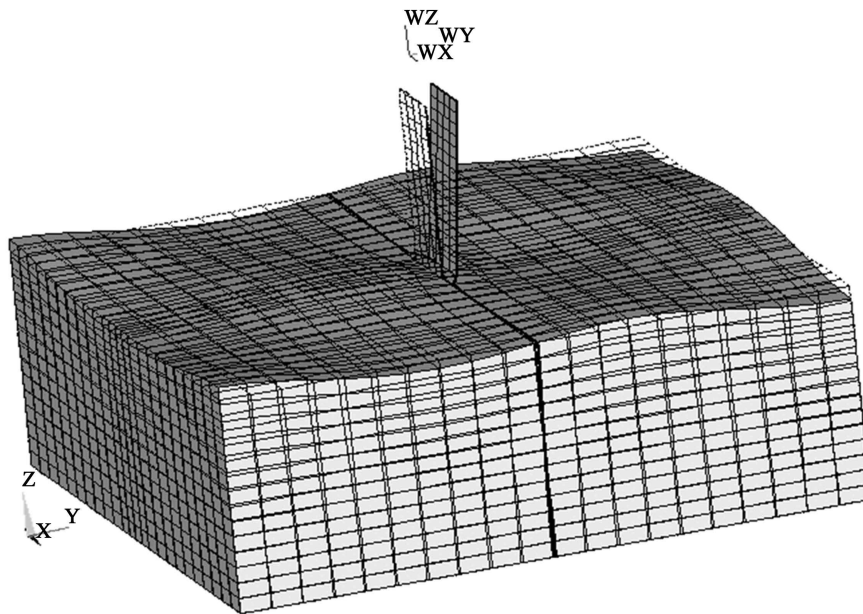


Figure 8. The first mode of cantilever beam
图 8. 悬臂梁第一阶振型

将有限元计算频率与实际实测频率列于表 2 及图 9、图 10，由表 2 以及图 9 和图 10 可以看出，悬臂梁弯曲振动的第一阶固有频率随着水深的增加而逐渐减小，试验结果与 ANSYS 模拟结果总体上吻合良好，当水深较浅时，附连水的效应很小，这时相当于无水的情形，此时试验结果与 ANSYS 模拟结果非常一致；但当水深较深时，两者误差略有增大，分析其原因为：1) 水体有限元模型的边界条件具有近似性；2) 试验的实际条件与计算模型有一定的差异。

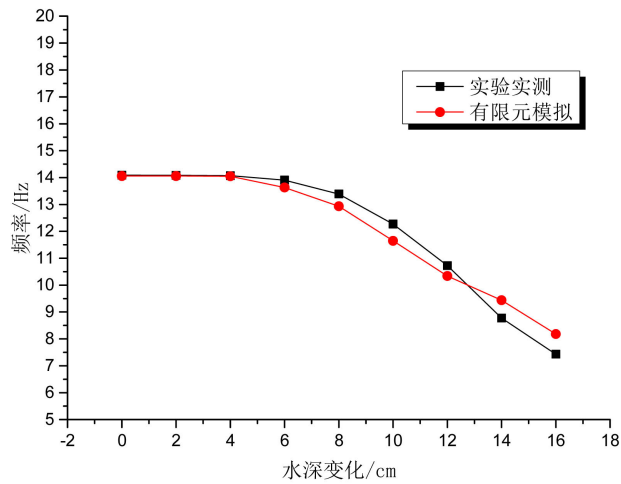


Figure 9. The measured frequencies and ANSYS calculated frequencies of XBL1
 图 9. XBL1 实测频率与 ANSYS 模拟频率对比图

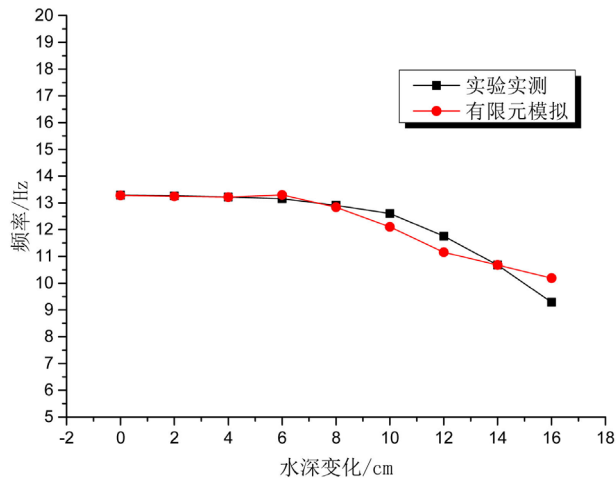


Figure 10. The measured frequencies and ANSYS calculated frequencies of XBL2
 图 10. XBL2 实测频率与 ANSYS 模拟频率对比图

Table 2. The measured frequencies and ANSYS calculated frequencies of XBL1 and XBL2
 表 2. XBL1, XBL2 实测频率与 ANSYS 模拟频率对比表

水深(cm)	XBL1		XBL2	
	实测频率(Hz)	有限元频率(Hz)	实测频率(Hz)	有限元频率(Hz)
0	14.085	14.057	13.289	13.279
2	14.081	14.056	13.263	13.242
4	14.069	14.050	13.218	13.215
6	13.903	13.631	13.151	13.299
8	13.388	12.933	12.907	12.839
10	12.270	11.645	12.605	12.100
12	10.725	10.342	11.756	11.154
14	8.774	9.441	10.677	10.679
16	7.430	8.179	9.290	10.189

5. 结论

本文采用试验法与数值法研究了一阶水中矩形悬臂梁的自由弯曲振动固有频率, 试验与 ANSYS 模拟结果都表明, 采用有限的水体区域可以很好地模拟无限水域对悬臂梁的振动影响, 随着水深的增加, 悬臂梁弯曲振动的第一阶固有频率逐渐减小, 试验结果与 ANSYS 模拟结果总体上吻合良好, 当水深较深时, 两者误差略有增大, 采用有限元方法(ANSYS 程序)能很好模拟入水矩形悬臂梁的自由弯曲振动, 其结果可供工程设计参考使用。

参考文献

- [1] Westergaard, H.M. (1933) Water Pressures on Dams during Earthquakes. *Trans ASCE*, **98**, 418-432.
- [2] Liaw, C.Y. and Chopra, A.K. (1974) Dynamics of Towers Surrounded by Water. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **3**, 33-49. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290030104>
- [3] Li, S., Karney, B.W. and Liu, G. (2015) FSI Research in Pipeline Systems—A Review of the Literature. *Journal of Fluids and Structures*, **57**, 277-297. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.06.020>
- [4] Escaler, X., Torre, O.D.L. and Goggins, J. (2017) Experimental and Numerical Analysis of Directional Addedmass Effects in Partially Liquid-Filled Horizontal Pipes. *Journal of Fluids and Structures*, **69**, 252-264. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2017.01.001>
- [5] McIver, M. and McIver, P. (2016) The Added Mass for Two-Dimensional Floating Structures. *Wave Motion*, **64**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2016.02.007>
- [6] 徐汉忠. 水中悬臂梁的自振频率的简便计算公式[J]. 河海大学学报, 1986, 4(4): 10-20.
- [7] 张邵文, 倪汉根. 水中悬臂结构振动与水动力特性研究[J]. 大连理工大学学报, 1996, 36(3): 329-333.
- [8] 王和慧, 黄玉盈, 刘忠族, 杨自春. 水中圆锥形柱腿的自振特性分析[J]. 应用力学学报, 1996, 13(2): 64-70.
- [9] 周叮. 两侧受液时悬臂梁的自由振动分析[J]. 工程力学, 1991, 8(3): 107-115.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0530, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojav@hanspub.org