

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.06.008

制孔机器人在制孔过程中的振动抑制研究^{*}

戎新萍¹, 徐海璐¹, 袁祖强²

(1. 南京工业大学浦江学院 机电学院, 江苏 南京 211134; 2. 南京工业大学 机械学院, 江苏 南京 211816)

摘要:针对制孔机器人在制孔过程中的振动抑制问题,对典型的双关节制孔机器人进行了研究,仅考虑进给方向钻削力对制孔机器人系统的影响,分析了制孔过程中振动产生的机理,提出了模糊补偿抑振的控制算法。根据拉格朗日方程建立了制孔机器人的动力学模型,再结合根据斜角切削理论建立的钻削力模型,当制孔机器人处于某一特定姿态下时,借助 Matlab/Simulink 平台进行了仿真。利用模糊控制器将制孔机器人末端执行器在轴向钻削力的作用下即将产生的动态变化量提前补偿给各个关节之后,各个关节在制孔过程中的偏转量明显减弱。研究表明,模糊补偿的抑振算法能增强制孔机器人系统的刚度,进一步保证孔的质量。

关键词:制孔机器人;模糊控制;振动抑制;钻削力

中图分类号:TH113.1;TP241.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)06-0591-05

Vibration suppression of hole making robot in process of making holes

RONG Xin-ping¹, XU Hai-lu¹, YUAN Zu-qiang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Pujiang Institute of Nanjing University of Technology, Nanjing 211134, China; 2. Mechanics Institute, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: Aiming at the problem of vibration suppression of the hole making robot in the process of making holes, a typical example of a two-joint hole drilling robot to study the control algorithm was took. The effect of the feed direction drilling force on the system of the hole making robot was only considered. The mechanism of vibration in the process of making holes was analyzed. Finally the fuzzy compensation inhibit vibration control algorithm was put forwarded. According to the Lagrange equation, the dynamic model of the hole robot was established, and the drilling force model was established according to the theory of oblique cutting model. Then the simulation was carried out by the Matlab/Simulink platform under a particular position. After a fuzzy controller was used to compensate the dynamic change of the end effector of the hole making robot in the process of the axial drilling force to each joint in advance, the deflection of each joint in the hole making process was obviously weakened. The results indicate that the stiffness of the system can be enhanced by adding the vibration suppression algorithm with fuzzy compensation, which further ensures the quality of the hole.

Key words: hole making robot; fuzzy control; vibration suppression; drilling force

0 引言

与数控机床相比,机器人制孔技术拥有更大的工作空间、更高的集成度、更好的柔性度以及经济效益,因此制孔机器人在工业生产制造业中得到了广泛的应用^[1]。制孔机器人一般是由关节机器人、制孔终端执行器、检测及标定系统组成,其中关节机器人是个串联悬臂结构,关节处存在谐波减速器等柔性元件,因此刚

度较弱^[2]。在制孔过程中,虽然各关节处于锁死状态,但由于钻削力的存在,制孔机器人各个关节的转角会发生微小变化,产生颤振现象,影响制孔精度。该颤振是由于系统内在反馈所引起的。动态变化的钻削力,即是系统产生振动的原因,又是系统产生振动的结果。因此,想要对其加以控制来抑制振动就显得比较困难。

目前,大部分学者只研究了工业机器人在定位过程中的振动抑制,而很少有人研究工业机器人在制孔

收稿日期:2016-12-02

基金项目:南京工业大学浦江学院校级课题项目(njpj2015-2-04)

作者简介:戎新萍(1990-),女,江苏扬州人,硕士研究生,助教,主要从事机电控制方面的研究. E-mail: rongxinpingnuaa@126.com

过程中的振动抑制问题。AZEDDIEN KINSHEEL^[3]提出力/位双环混合控制机器人末端执行器的制孔路径,内环为关节的位置控制,外环为外界力控制,最后通过仿真实验证明了力/位混合控制能有效地改善机器人末端执行器制孔时的路径偏差,但并没有说明该方法能有效地减少机器人在制孔过程中的振动;王继虎^[4]建立了制孔过程的有限元模型,进行仿真,分析了制孔时钻削力的产生机理,最后通过优化进给量、切削速度、钻头直径等工艺参数来保证工业机器人的制孔精度;马超虹^[5]在分析压脚对工业机器人变形、制孔精度影响的基础上,证明了切削力与压脚压力的比值在一定范围内才能保证孔的质量;沈孝栋^[6]建立了制孔机器人的系统模型,并在机器人某一位姿下分析了关节的变形以及钻削力的变化与钻削速度之间的关系,最后进行了 Simulink 仿真,仿真结果表明,转速越高钻削力波动越小,产生的振动越小。

前人的这些方法虽然有一定的效果,但大多都属于被动控制的方法,成本较高,与如今快速发展的需求不相符。因此,本研究以最典型的双关节机器人为例,在某一特定的位姿下,进行制孔过程中的振动抑制算法研究,在前人研究的基础上,提出模糊补偿抑振的控制方法。

1 系统建模

建立精确的系统模型是进行控制研究的基础,其制孔机器人以最典型的双关节机器人为例。本研究基于 Spong 建立单关节简化模型,系统结构简化图如图 1 所示。

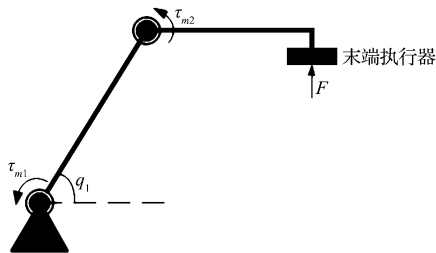


图 1 系统结构简化图

其动能与实际制孔机器人系统的动能之间的相对误差极小^[7]。末端执行器采用的是悬挂式,制孔机器人处于特定位姿下,关节 1 的转角为 60°,关节 2 的转角为 0°,伺服电机采用三闭环控制结构^[8],所输出的力矩经谐波减速器传递给关节。所有的柔性集中在关节处,连杆则被视为刚性杆,质量分布均匀,忽略传动系统的间隙、摩擦力等非线性因素,且仅考虑进给方向钻削力对制孔机器人的影响。笔者利用拉格朗日方法建立制孔机器人的动力学模型,再结合利用斜角切削理论建立的钻削力数学模型^[9]。

制孔机器人系统的数学模型:

$$\begin{cases} M(q)\ddot{q} + C(q)\dot{q}^2 + D(q)\dot{q} + G(q) = \tau + \tau_e \\ J_m\dot{\theta}_m + \frac{1}{n}(\tau + \tau_e) = \tau_m \\ \tau = K_q\left(\frac{1}{n}\theta_m - q\right) \\ \tau_e = J^T(q)F \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_m —电机输入力矩; J_m —电机转子转动惯量; τ —关节驱动力矩; τ_e —钻削力矩; θ_m —电机转子的转动角度; q —连杆的转动角度; $M(q)$ —关节转动惯量; $C(q)$ —向心力速度; $D(q)$ —科氏力系数; $G(q)$ —重力项; K_q —关节刚度矩阵; n —谐波减速器的减速比, $n > 1$; $J^T(q)$ —力的雅克比矩阵。

2 振动分析

制孔机器人对柔性关节进行简化,在某一特定位姿下进行制孔时,其进给方向的振动模型如图 2 所示。

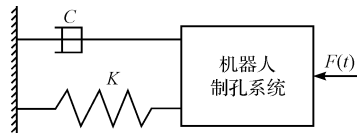


图 2 系统进给方向振动模型图

图注: K —制孔机器人的操作刚度矩阵; C —制孔机器人的阻尼矩阵; $F(t)$ —进给方向的钻削力。

K 为制孔机器人的操作刚度矩阵:

$$K = J^{-T}(q) \cdot K_q \cdot J^{-1}(q) \quad (2)$$

C 为制孔机器人的阻尼矩阵^[10-11]:

$$C = \text{diag}(c_1, c_2) \quad (3)$$

$$c_i = \xi_i \cdot \bar{c}_i$$

式中: c_i —制孔机器人关节 i 的阻尼, ξ_i —制孔机器人关节 i 的阻尼比, $\bar{c}_i$ —制孔机器人关节 i 的临界阻尼系数。

为了进一步分析钻削力与系统振动之间的关系,本研究利用 Matlab/Simulink 搭建了制孔机器人系统的数学模型,在 $t = 2$ s 时标准麻花钻开始钻孔。

开始制孔时钻头以一定的进给量向下移动,最先接触到工件的是钻头的横刃,随后钻头的主切削刃和副切削刃都参与切削,直到主切削刃完全参与钻削,在这过程中钻削力急剧发生变化,差不多经过 1 s 的时间就达到了最大值;又由于制孔机器人的关节具有柔性,在钻削力的作用下发生微小的偏转,进而使得制孔机器人末端执行器的空间位置发生了变化,最终导致钻头的瞬时进给量发生了变化,进给量的突变又影响了钻削力的大小,周而复始。因此,动态变化的钻削力既是系统产生振动的原因,又是系统产生振动的结果。

仿真得到未加入控制算法时切削用量 c 、轴向钻削力 F 、关节 1 和关节 2 的转角(q_1 、 q_2) 随时间的动态变化图,如图 3 所示。

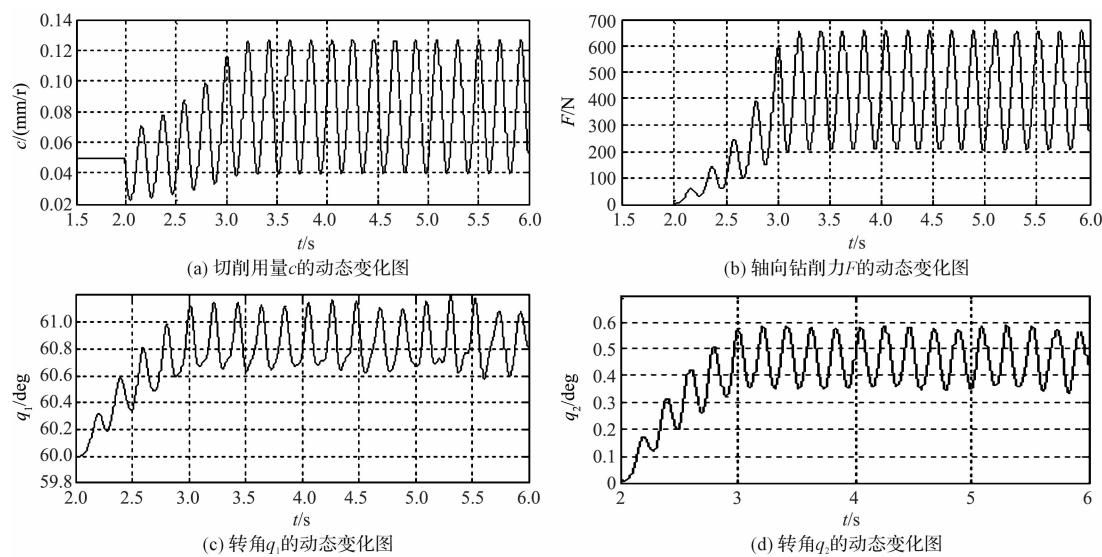


图3 未加入控制算法时切削用量 c 、轴向钻削力 F 、转角 q_1 、 q_2 随时间的动态变化图

3 控制算法

由以上分析可知,动态变化的钻削力是导致系统产生振动的原因,又是其结果。对钻削力进行实时监测,若提前知道制孔机器人各个关节在瞬时进给方向钻削力的作用下将产生多大的偏转 Δq ,并把 Δq 补偿到各个关节的输入端,利用伺服电机来阻碍各关节即将发生的偏转,则可以进一步增强制孔机器人系统的刚度。但是外界作用力与各关节转角之间的关系比较复杂,且该系统又是一个典型的时变、非线性系统,所以本研究利用模糊控制器来实现外界作用力与各关节增角之间的转换。

又由于不同的位姿,制孔机器人的刚度矩阵不一样,本研究以关节1、关节2的理论位置 q_{cmd} 与实际位置 q 之差,以及瞬时轴向钻削力 F 的大小作为模糊控制器的输入量,并设置适当的量化因子 k_e 和比例因子 k_d ,利用模糊控制规则得出各个关节在轴向钻削力作用下的微小偏移量 Δq ,最后补偿给各个关节。

其中,模糊控制器的输入量分别为:连杆1理论位置与实际位置之差 e_1 、轴向钻削力的大小 e_2 、连杆2理论位置与实际位置之差 e_3 ,输出量分别为连杆1和连杆2的补偿量 u_1 、 u_2 。由图3可以看出 e_1 的基本论域为 $[-1.2, 1.2]$, e_2 的基本论域为 $[0, 650]$, e_3 的基本论域为 $[-0.6, 0.6]$,令 $k_{e1} = 0.25, k_{e2} = 4.6 \times 10^{-3}, k_{e3} = 5$ 使得 e_1 的模糊论域为 $[-3, 3]$, e_2 的模糊论域为 $[0, 3]$, e_3 的模糊论域为 $[-3, 3]$,取 u_1 、 u_2 的模糊论域都为 $[-3, 3]$,隶属函数都为三角形,输入量 e_1 、 e_3 和输出量 u_1 、 u_2 的模糊子集都为 $\{\text{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}\} = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$,输入量 e_2 的模糊子集为 $\{\text{零、小、中、大}\} = \{Z, S, M, B\}$ 。

经过多次仿真最终确定该模糊控制器的模糊控制

规则如表1所示。

表1 模糊控制器的控制规则

规则号	e_1	e_2	e_3	u_1	u_2
1	Z	Z	NB	Z	NB
2	Z	Z	NM	Z	NM
.....					
30	NB	Z	NS	NB	NS
31	NB	Z	PS	NB	PS
.....					
60	NB	B	NB	NB	NB
61	NM	B	PB	NS	Z
62	PS	B	PS	NS	NS
.....					
90	PM	M	PM	Z	PS
91	PB	M	Z	PS	Z
92	NM	M	NS	NM	NM
.....					
120	NM	S	PB	PS	PS
121	NS	S	NM	NS	NM
122	PS	S	NB	PS	NM
.....					

整个制孔机器人系统的控制框图如图4所示。

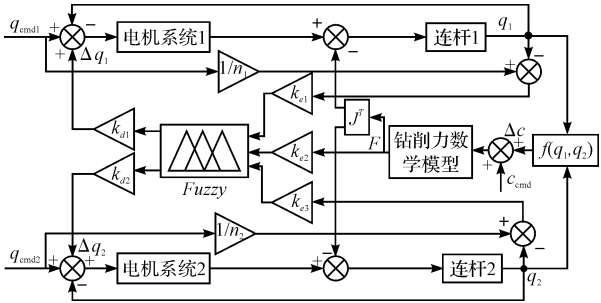


图4 制孔机器人系统控制框图

图注: $f(q_1, q_2)$ —瞬时进给量变化量 Δc 的求取公式^[12]; c_{cmd} —给定的进给量。

4 仿真验证

基于 Matlab/Simulink 仿真平台,该实验搭建了整个系统的动力学模型。其中制孔机器人的特定姿态为 $q_{cmd1} = 60^\circ$ 、 $q_{cmd2} = 0^\circ$,结构参数引用的是文献[13]中柔性关节机械臂的结构参数,标准麻花钻头的直径

$D = 5 \text{ mm}$,给定进给量 $c = 0.05 \text{ mm/r}$,转速 $n = 500 \text{ r/min}$,钻削的工件材料为钛合金 Ti-6Al-4V。

仿真得到加入模糊补偿控制器后,制孔机器人在这一特定姿态下,制孔过程中的动态进给量 c 、轴向钻削力 F 以及各连杆的转动角度 q_1 、 q_2 随时间的动态变化图如图 5 所示。

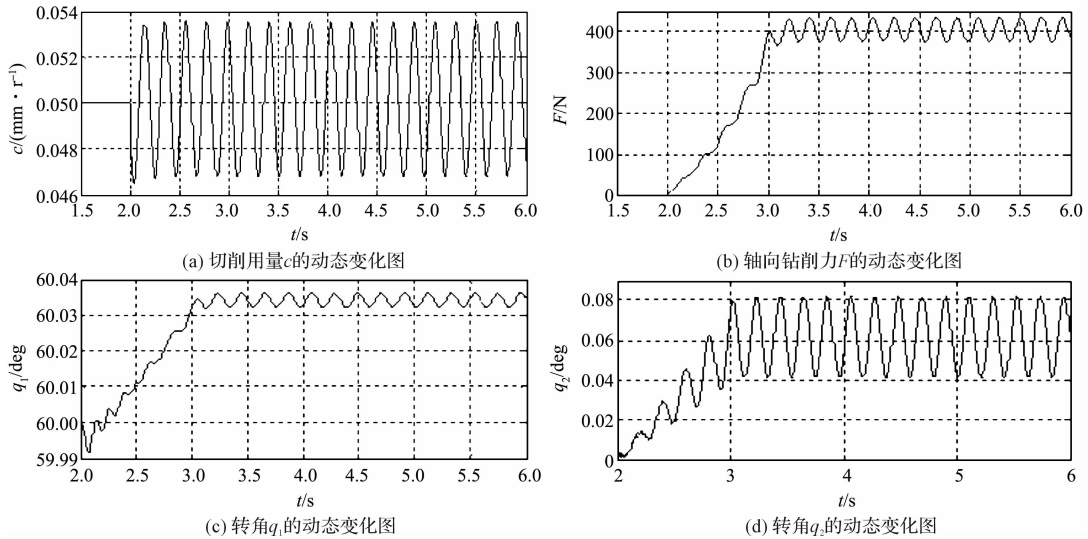


图 5 加入控制算法后切削用量 c 、轴向钻削力 F 、转角 q_1 、 q_2 随时间的动态变化图

对比图 3 可以看出,在加入模糊补偿算法之前进给量 c 处于中心为 0.08 mm 的谐振状态,与给定进给量相差 0.03 mm ,加入该控制算法之后进给量虽然还在时刻变化着,但以给定进给量为中心上下波动着,振幅也减小了 0.015 mm ;轴向钻削力 F 比加入该控制算法之前稳定多了,振幅足足减小了 200 N ;关节 1 的偏转角度比加入该控制算法之前减少了 0.865° ,减少量为补偿之前的 96% ,且振幅也大大减少了;关节 2 的偏转角度比加入该控制算法之前减少了 0.39° ,减少量为补偿之前的 87% ,振幅变为补偿之前的 0.2 倍。

实验结果表明,模糊补偿控制算法对制孔机器人在制孔过程中产生的振动有比较好的抑制效果。

5 结束语

由于制孔机器人关节处存在柔性,使得制孔机器人在制孔过程中受钻削力的影响,产生振动,改变了制孔过程中的瞬时进给量,从而改变了钻削力的大小。因此,动态变化的钻削力既是系统产生振动的原因,又是系统产生振动的结果。若将制孔机器人的末端执行器在轴向钻削力的作用下即将产生的微小偏转量提前补偿给各关节,来增强系统的刚度,从而减小振动。仿真实验结果表明,本研究提出的模糊补偿抑振控制方法有效地减少了制孔机器人在制孔过程中的振动,进一步保证了制孔质量。

但在实际制孔环境下,径向方向的钻削力、跳动等也会制孔精度产生影响。因此,精确的制孔机器人系统模型相当复杂,需要考虑更多的因素加以完善。

参考文献 (References):

- [1] 杜兆才,姚艳彬,王健. 机器人钻铆系统研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2015, 473(4): 26-31.
- [2] 黎田,胡晓宇,姚为,等. 机器人在航天装备自动化装配中的应用研究[J]. 自动化柔性装配应用, 2014, 465(21): 102-104.
- [3] AZEDDIEN KINSHEEL. Hybrid force/position control of robotic drilling system[C]. Control, Decision and Information Technologies (CODIT), New York: IEEE, 2014.
- [4] 王继虎,刘长毅,田威,等. 机器人制孔工艺参数优化有限元仿真分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(S1): 69-72.
- [5] 马超虹. 压脚对机器人制孔影响的实验与分析[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2013.
- [6] 沈孝栋,刘长毅,张柏寿. 考虑关节柔性的机器人制孔过程动力学仿真[J]. 机械设计与制造, 2015(3): 196-200.
- [7] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots[J]. Journal of Dynamic System, Measurement and Control, 1987, 109(1): 310-319.
- [8] ZHANG De li, YANG Hai qiang, AN Lu ling. Two-stage open-loop velocity compensating method applied to multi-mass elastic transmission system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(1): 182-188.

- [9] YUSUF ALTINATS. Manufacturing automation-metal cutting mechanics machine tool vibrations and CNC design[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [10] 朱 健. 钻铷机械手钻孔过程的刚度分析[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院,2013.
- [11] 张 聪. 用于机械手装箱生产线的理罐机的设计[J]. 包装与食品机械,2016(5):28-32.
- [12] Zeng xi PAN, Hui ZHANG. Analysis and suppression of chatter in robotic machining process[C]. **International Conference on Control, Automation and System**, New York: IEEE,2007.
- [13] 戎新萍,张得礼,王小平. 基于解耦的柔性关节机械臂振动抑制方法研究[J]. 机电工程,2015,32(1):14-20.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

戎新萍,徐海璐,袁祖强. 制孔机器人在制孔过程中的振动抑制研究[J]. 机电工程,2017,34(6):591-595.

RONG Xin-ping, XU Hai-lu, YUAN Zu-qiang. Vibration suppression of hole making robot in process of making holes[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(6):591-595.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第576页)

4 结束语

本研究采用随机波浪载荷计算方法,结合ABAQUS软件分别对完好和损伤两种状态的导管架式风机基座的动态响应进行计算。采用快速傅里叶变换分别对不同重现期内的随机波浪载荷作用下的完好基座位移数据做频谱分析,得到基座的前3阶固有频率,与有限元模态分析得到的风机基座前3阶的固有频率基本吻合。同时,研究相同重现期内的随机载荷作用下的完好与损伤状态下的基座的动态响应,两者获得的基座固有频率出现了变化,与两种模型做有限元模态分析得到的固有频率相吻合。

本研究同时也提供了一种基座健康监测的可行参考方案:可以通过在环境载荷激励下,单点测响应的方法获得基座动态响应,通过分析其前3阶的固有频率的变化可为基座的健康监测提供参考,及时发现存在的问题,保障离岸风机机组持续平稳运行。后续将针对离岸风机基座损伤位置的定位展开相关研究工作。

参考文献(References):

- [1] 刘 林,葛旭波,张义斌,等. 我国海上风电发展现状及分析[J]. 能源技术经济,2012,24(3):66-72.
- [2] 张振国,王长进,李银朋,等. 海洋石油工程概论[M]. 北京:中国石化出版社,2014.
- [3] 朱锴年. 风力发电机组塔架制造工艺与制量控制[J]. 机电工程技术,2016,45(10):136-140.
- [4] 陈雪峰,李继猛,程 航,等. 风力发电机状态监测和故障诊断技术的研究与进展[J]. 机械工程学报,2011,47(9):45-52.
- [5] 俞聿修. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连:大连理工大学出版社,2011.
- [6] 李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评枯、健康监测及识别述评[J]. 地震工程与工程振动,2002,22(3):82-90.
- [7] FRANK VAN GERVEN. Optimising the design of a steel substructure for offshore wind turbines in deeper waters[D]. Delft: Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology,2011.
- [8] 曹 兵,王义刚,YOU Zai-jin. 三种设计波高计算方法比较[J]. 海洋工程,2006,24(4):75-80.
- [9] LANGLEY RM, AH EI-SHAARAWI. On the calculation of extreme wave heights: a review[J]. **Ocean Engineering**, 1986,13(1):93-118.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 龚凌诸,杨晓翔,钟舜聪. 基于环境激励的港口起重机工作模态分析[J]. 机电工程,2011,28(4):422-424.
- [13] 鲍鹏宇. 结构损伤监测信号处理方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化学院,2013.
- [14] 王晓光. 基于运行模态的桥梁结构损伤识别对比研究[D]. 西安:长安大学机械工程学院,2015.
- [15] CAWLEY R D, ADAMS. The location of defects in structures from measurements of the natural frequencies[J]. **Journal of Strain Analysis**,1979,14(2):49-57.
- [16] KAUSHAR H, BARAD D S, SHARMA VISHAL VYAS. Crack detection in cantilever beam by frequency based method[J]. **Procedia Engineering**,2013(51):770-775.

[编辑:周昱晨]