

集装箱起重机的脉动风场仿真及响应分析*

邱惠清¹, 吴志君^{1,2}

(1. 同济大学机械工程学院 上海, 201804) (2. 中国电子科技集团公司第二十一研究所 上海, 200233)

摘要 基于准定常假定, 采用谐波叠加法仿真集装箱起重机的脉动风场并对其进行脉动风载作用下的抖振响应分析。风场仿真结果表明, 除自谱的低频误差较大外, 风速样本的功率谱密度与目标值完全一致。岸桥前梁端点的位移响应谱表明, 低频的脉动风载荷对岸桥的基频模态具有最强的激振效应, 且紊流风作用下岸桥前梁端点顺风向抖振最大位移高达53 mm, 可能会激起梁上小车与轨道的耦合振动, 影响梁上电动小车行驶安全性, 而横向和竖向脉动风下的振动位移很小, 可忽略不计。

关键词 集装箱起重机; 脉动风场; 谐波叠加法; 抖振响应

中图分类号 TH213.8; TH113.1

1 问题的引出

对图1所示的集装箱起重机(简称岸桥)通过紊流风场模拟, 并结合有限元理论分析岸桥结构风载下的抖振响应, 为前梁上小车运行安全性评估提供参考。目前, 结构脉动风载荷的仿真主要应用于大型桥梁及高层建筑的抗风设计。对于大型岸桥, 因其常年工作在岸边且高度和长度分别为70 m和140 m, 所以强风下的风载荷相当大。此外, 强风的频率分布较宽, 容易激起结构的低频振动。可见, 岸桥的脉动风载响应分析相当重要, 脉动风载响应分析的前提是获得结构的脉动风场。目前, 有两种途径可获得脉动风场: 风洞试验法和数值仿真法。笔者仅讨论后者。文献[1-2]对比总结了谐波叠加法、自滑动平均

的线性滤波法和本征正交分解法3种风场仿真方法的优缺点、精度和效率。结论表明, 加权谐波叠加法(weighted amplitude wave superposition, 简称WAWS)的实现较为简单且精度适中, 应用较广泛, 且该方法在样本长度为一整周期时精度最高, 常作为各算法对比的参考精度, 缺点是该方法耗时较长, 应用中可兼顾精度和效率来弥补。笔者采用谐波叠加法仿真岸桥脉动风速场并利用Ansys软件实现岸桥脉动风载下的抖振响应分析。

2 仿真基本方程

2.1 平均风模型

在近地表的内边界层中, 一般假定平均风速^[3]具有恒定的方向, 其强度采用以下对数规律

$$U(z) = 2.5u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

其中: u_* 为剪切风速; z_0 为地表粗糙度; z 为离地高度。

假定 $U(10) = 20 \text{ m/s}$, $z_0 = 1.266 \times 10^{-3} \text{ m}$, 由式(1)得到 $u_* = 0.8914 \text{ m/s}$ 。

2.2 扰动风模型

扰动风速 u 可假定为零均值高斯稳态随机过程^[4-5], 其完整的数学描述由各变量的互功率谱密度

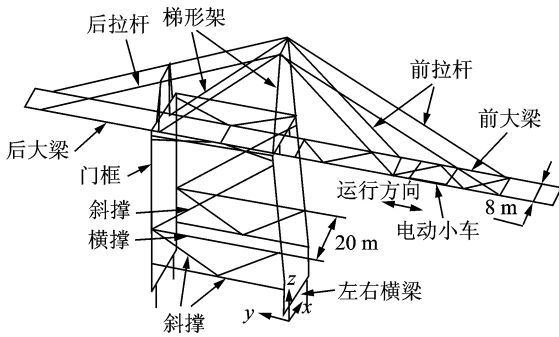


图1 岸桥主结构示意图

* 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2009AA043000);上海市科学技术委员会重点科技攻关资助项目(06DZ11202);上海市科委上海工程技术研究中心建设资助项目(08DZ2210103)

收稿日期:2011-06-22;修改稿收到日期:2011-09-07

矩阵决定。在实际应用中,互功率谱密度采用自功率谱密度和相干函数表示。

2.3 脉动风速仿真方程

以仿真1维 m 变量随机过程为例进行说明,1维 m 变量随机过程的谱密度矩阵为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

该矩阵为Hermite矩阵,一般为非对称阵。主对角线为自功率谱密度,为非负实数;除主对角线外为互功率谱密度,一般均为复数。

互功率谱密度可表示为

$$S_{ij} = \sqrt{S_i S_j} \text{coh}(\omega) e^{i\varphi(\omega)} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

文献[6]建议相位 $\varphi(\omega)$ 按下式选取

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} 0.25\pi\omega^* & (\omega^* \leq 0.1) \\ -10\pi\omega^* + 1.25\pi & (0.1 < \omega^* \leq 0.125) \\ [-\pi, \pi] \text{之间的随机数} & (\omega^* > 0.125) \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\omega^* = \frac{\omega\Delta z}{2\pi U(z)}$ 为无量纲坐标。

因复数值的互功率谱密度涉及复数运算,增加仿真耗时,故工程中常忽略互谱相位部分,取 $\varphi(\omega) = 0$,这样简化使得谱密度矩阵变为实对称阵。矩阵分解的结果也为实矩阵,提高了脉动风场的仿真效率。

式(2)谱密度矩阵的Cholesky分解为

$$\mathbf{S} = \mathbf{T}(\omega)\mathbf{T}^H(\omega) \quad (5)$$

其中: $\mathbf{T}(\omega) = \begin{bmatrix} T_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ T_{21} & T_{22} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{m1} & T_{m2} & \cdots & T_{mm} \end{bmatrix}$,为下三角阵;

H 为矩阵Hermite的共轭转置算子。

采用Shinozuka-Deodatis法,随机过程可模拟为

$$u_i(t_j) = 2\sqrt{\Delta\omega} \sum_{r=1}^i \sum_{k=1}^{N_\omega} T_{ir}(\omega_{rk}) \cos(\omega_{rk}t_j + \phi_{rk}) \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, N_t) \quad (6)$$

其中: $\omega_{rk} = (k-1+r/m)\Delta\omega$,为双索引频率; ϕ_{rk} 为 $[0, 2\pi]$ 上独立随机相位角。

该方法称为加权谐波叠加法。当仿真的时域样

本长度等于式(6)的周期 T_0 时,仿真的随机过程在均值和相关性方面是各态历经的。式(6)的周期为

$$T_0 = \frac{2\pi m}{\Delta\omega} = \frac{2\pi m N_\omega}{\omega_c} \quad (7)$$

考虑到时域采样必须满足采样定律,当给定 $\Delta\omega, \omega_c$ 时, $\Delta t, N_t$ 由下式确定

$$\begin{cases} \Delta t \Delta\omega \leq \frac{\pi}{N_\omega} \\ N_t \geq T_0 / \Delta t = 2N_\omega m = Mm \end{cases} \quad (8)$$

为提高式(6)的计算效率,该方法普遍采用快速傅里叶变换技术实现。式(6)可化为

$$u_i(p\Delta t) = \text{Re} \left\{ \sum_{r=1}^i C_{ir}(q\Delta t) \exp \left[j \left(\frac{r\Delta\omega}{m} \right) (p\Delta t) \right] \right\} \quad (9)$$

其中: $p = 0, 1, \dots, M \times m - 1; i = 1, 2, \dots, m; q = 0, 1, \dots, M - 1; q$ 为 $\frac{p}{M}$ 的余数; $M \geq 2N$,常取 $M = 2N$ 。

仿真风速时程一整周期的时域点数 $N_t = M \times m$,随仿真维数 m 呈正比增加,从而式(6)的计算量呈平方增加;但在工程应用中没有必要仿真整个周期,而应根据精度要求来适当选取时域点数。式(9)中 $C_{ir}(q\Delta t)$ 取

$$C_{ir}(q\Delta t) = \sum_{k=0}^{M-1} B_{ir}(k\Delta\omega) \exp \left(jkq \frac{2\pi}{M} \right) \quad (10)$$

其中

$$B_{ir}(k\Delta\omega) = \begin{cases} 2\sqrt{\Delta\omega} T_{ir}(\omega_{rk}) \phi_{rk} & (0 \leq k \leq N-1) \\ 0 & (N \leq k \leq M-1) \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可看出, C_{ir}, B_{ir} 为一傅里叶变换对,可以利用快速傅里叶变换进行快速计算。

顺风向和竖风向风速的功率谱密度可分别采用Kaimal谱和Panofsky谱^[3]。前者比后者低频含量高且风速的功率谱主要分布在5 Hz以下,故仿真的频率上限设为5 Hz。考虑到岸桥深度(x 向)相对较小,忽略前后相关性。顺风向风速的相干函数采用二维Davenport相干函数。横风向的相干函数类似顺风向的表达式,但系数 C_y, C_z 比顺风向值小1/3左右,即 $C_{z2} = 2C_{z1}/3 = 6.7, C_{y2} = 2C_{y1}/3 = 10.5$ 。顺、横和竖风向的功率谱密度如表1所示。

3 岸桥仿真实例

虽然理论上对风场3个脉动分量之间的相关性有一定的研究,但实际应用中为简化通常忽略风速在3个方向之间的相关性,即仅考虑单向风速空间相关性进行仿真,从而将三向相关风速场简化为3个

表 1 三向脉动风功率谱密度表

脉动风	双边自功率谱/(m ² ·s ⁻¹ ·Hz ⁻¹)	双边互功率谱/(m ² ·s ⁻¹ ·Hz ⁻¹)
顺风向 $u(t)$ (Kaimal 谱) $f = \frac{nz}{U(z)}, n = \frac{\omega}{2\pi}$	$\frac{2nS_u(n)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{\frac{5}{3}}}$ $\sigma_u^2 \Big _{n_{\min}}^{n_{\max}} = \frac{6u_*^2}{(50f+1)^{\frac{2}{3}}} \Big _{f_{\min}}^{f_{\max}}$	$S_{uij} = \sqrt{S_i S_j} e^{-\tilde{f}}, S_u(n) = 2\pi S_u(\omega)$ $\tilde{f} = \frac{2n \sqrt{C_z^2 \Delta z^2 + C_y^2 \Delta y^2}}{U_i + U_j}; C_z, C_y = 10, 1.6$
横风向 $v(t)$ $f = \frac{nz}{U(z)}, n = \frac{\omega}{2\pi}$	$\frac{2nS_v(n)}{u_*^2} = \frac{15f}{(1+9.5f)^{\frac{5}{3}}}$ $\sigma_v^2 \Big _{n_{\min}}^{n_{\max}} = \frac{45}{19} \frac{u_*^2}{(9.5f+1)^{\frac{2}{3}}} \Big _{f_{\min}}^{f_{\max}}$	$S_{vij} = \sqrt{S_i S_j} e^{-\tilde{f}}, S_v(n) = 2\pi S_v(\omega)$ $\tilde{f} = \frac{2n \sqrt{C_z^2 \Delta z^2 + C_y^2 \Delta y^2}}{U_i + U_j}; C_z, C_y = 6.7, 10.5$
竖风向 $w(t)$ (Panofsky 谱) $f = \frac{nz}{U(z)}, n = \frac{\omega}{2\pi}$	$\frac{2nS_w(n)}{u_*^2} = \frac{6f}{(1+4f)^2}$ $\sigma_w^2 \Big _{n_{\min}}^{n_{\max}} = \frac{3}{2} \frac{u_*^2}{(4f+1)} \Big _{f_{\min}}^{f_{\max}}$	$S_{wij} = \sqrt{S_i S_j} e^{-\tilde{f}}, S_w(n) = 2\pi S_w(\omega)$ $\tilde{f} = \frac{2n \sqrt{C_z^2 \Delta z^2 + C_y^2 \Delta y^2}}{U_i + U_j}; C_z, C_y = 0.8$

独立的单向风速场。图1中主梁左、右桁架间距约为8 m,仅约两个节点间距(按5 m的节点间距计算)。忽略三向风速在 x 方向上的相关性,将顺、横和竖向风速场均简化为一维多变量场。因为前、后拉杆迎风面积远小于主梁和门架,且下部左、右横梁接近地面,故两者的风载荷可忽略不计。根据图2主要承风部件的离散仿真点,风场可简化为顺风向一维85变量的稳态随机场,横风向一维36变量的稳态随机场,竖风向一维29变量的稳态随机场。上述仿真风场离散点一般近似选取有限元模型的等间隔节点。理论上只需将有限元节点坐标输出进行仿真就可以获得风速场。各向风场仿真节点号如表2所示。

据式(6)和式(11),初始参数设置为: $\omega_c = 10\pi \text{ rad/s} = 5 \text{ Hz}$, $N_w = N = 128$ (可选), $M = 2N = 256$, $N_i = mM\Delta\omega = \omega_c/N_w \approx 0.039 \text{ Hz}$, $\Delta t = \pi/\omega_c = 0.1 \text{ s}$, $F_s = 10 \text{ Hz}$, $T_0 = N_i\Delta t = 2176 \text{ s} \approx 36 \text{ min}$ 。

图3~5分别为节点1,2和85的顺风向风速时程片

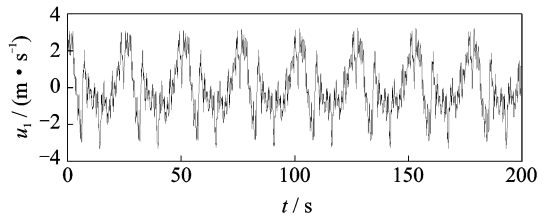


图3 节点1的顺风向风速时程片段

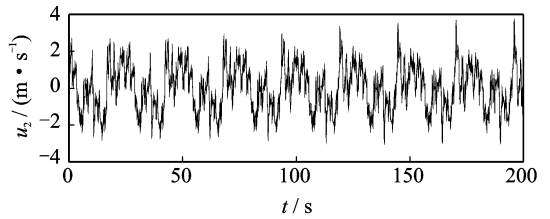


图4 节点2的顺风向风速时程片段

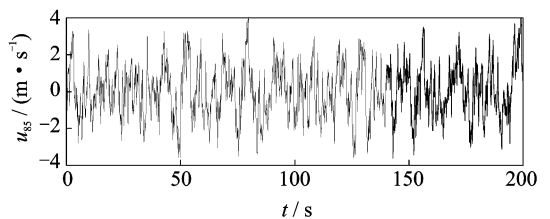


图5 节点85的顺风向风速时程片段

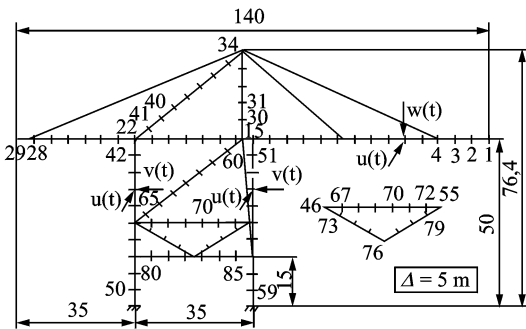


图2 主要承风部件离散仿真点

表2 各向风速场仿真节点号

仿真风向	顺风向	横风向	竖风向
仿真节点号	1~85	30~65	1~29

程片段。由图可知,因节点1,2空间上较近,故这两

以顺风向风场仿真($m = 85$)为例进行说明,根

点风速时程较相似,而与节点85时程相差较大;低编号节点1,2时程的频率离散间隔较大,故两时程将会出现明显的正弦趋势项。例如,节点1的基频与第2阶频率仅相差 m 倍,故基频正弦分量会反映在时程曲线中。相反,节点85频率成分最为丰富,也最接近零均值随机过程。这种因频率成分随节点编号大小不同而不同的缺陷是本算法的不足之处。图3~5通过滤除小于 $\Delta\omega$ 频率成分已消除了明显的正弦趋势项,使低编号节点时程近似为零均值随机时程。

为表示时域点数与精度的关系,笔者对时域点数 $N_t = M \ll mM$ 的风场片段进行了谱分析。自谱密度采用频率 n 与无量纲功率密度 $nS(n)/\sigma^2$ 的函数曲线。图6和图7分别为节点1,2顺风向风速的自功率谱密度与目标值。图8为节点1,2顺风向风速的互谱密度(包括相位)与目标值。

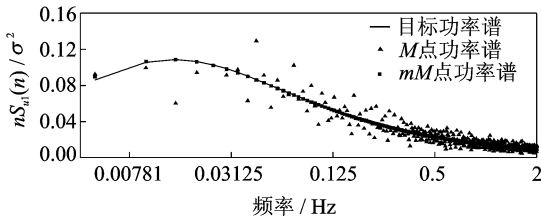


图6 节点1顺风向风速的归一化自功率谱与目标值

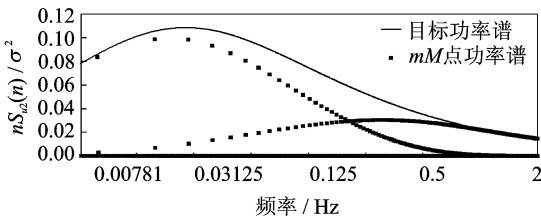


图7 节点2顺风向风速的归一化自功率谱与目标值

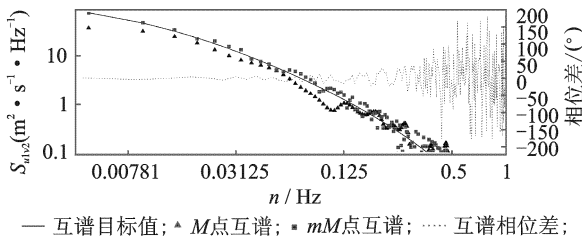


图8 节点1,2顺风向风速互功率谱与目标值

整个风场实现和谱分析过程均由Matlab编程实现。图6~8分别由Matlab中Periodogram, Cpsd谱估计函数实现。

图6和图8表明:当仿真时程长度等于整周期(mM)时,节点1时程的功率谱密度和互谱 S_{n1v2} 与目标值完全重合。图7中节点2的自谱在低频部分误差较大,在高频部分(>0.5 Hz)仍然完全吻合。事实上

为实现互谱特征,这些损失的部分低频自谱分量被分配到其他频率成分中了。图7中 ω_{1k} 离散频率点处的功率谱(高处曲线)损失被分配到 ω_{2k} 频率成分(低处曲线)中。随着节点编号增加,这种功率谱分配更加明显且离散谱将包含更多的频率成分,但各点时程的总功率是相同的。这种以牺牲低频自谱密度精度来实现互谱的特点为WAWS算法一大特点。图8中互谱相位估计曲线表明:在低频部分(<0.5 Hz),相位与目标零相位误差很小;在高频部分(>0.5 Hz),相位基本在 $(-180, 180)$ 上随机分布,此时互谱密度非常低,相位误差完全为随机的计算误差。参考文献[7]的岸桥模态分析结果,岸桥的前5阶低频均在1 Hz以下,故采用本研究的仿真风场样本可以激起岸桥的主要低频模态。

4 岸桥的抖振响应分析

岸桥抖振响应分析的前提必须知道作用在结构上风载荷时程。参考文献[4]的公式,顺风向脉动风压与脉动风速近似满足

$$q_f = 2 \times 0.613U(z)v_f \quad (12)$$

式(12)表明顺风向脉动风压 q_f 不仅与顺风向脉动风速 v_f 相关也与平均风速 $U(z)$ 相关。

横风向和竖风向脉动风压仅与脉动风速相关

$$q_f = 0.613v_f^2 \quad (13)$$

单根梁(或门腿)上各段的风载荷为

$$F = Aq_fC_f \quad (14)$$

其中: A 为各段有效迎风面积(m^2); q_f 为各段脉动风压(Pa); C_f 为无量纲的风力系数,可参考文献[8]中表1的起重机主要构件杆体型系数 μ_y 近似确定。

将所得脉动风载荷场采用APDL语言输入到图9岸桥有限元模型,求得其动力响应。该模型主梁与门框采用Beam44梁单元;斜撑与拉杆采用分别采用Pipe16管单元与link8梁单元实现。材料均为Q345B,其密度 $\rho = 7820$ kg/ m^3 ,弹性模量 $E = 210$ GPa,泊松比 $\mu = 0.3$ 。该模型直接约束4个支腿的所有移动自由度。为减少计算量,三向的脉动风载荷分

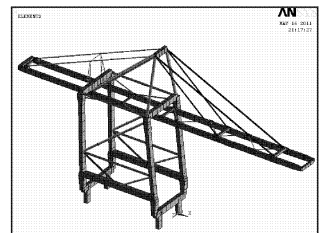


图9 岸桥结构的有限元模型

别施加并求解各方向的动力响应。下面以顺风向为例进行讨论。

图10为节点1的 x 向位移时程曲线,与图4和图5的激励力周期相似。图11为该节点的 x 向位移时程的功率谱密度曲线,其峰值频率接近岸桥第1阶固有频率0.28 Hz^[7]。

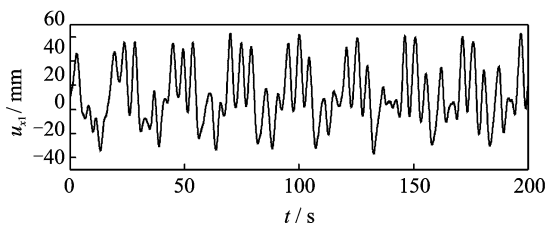


图10 节点1的 x 向位移时程曲线

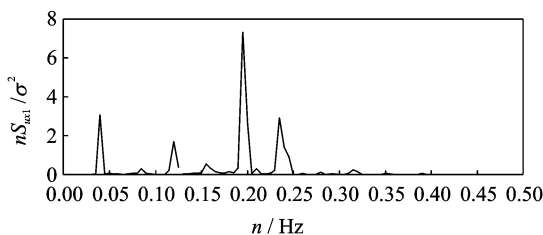


图11 节点1的 x 向位移的归一化响应功率谱

表3 各向紊流风场下节点1最大位移值 mm

紊流风向	顺风向 u	横风向 v	竖风向 w
最大位移值	53	0.05	0.033

由表3可以看出,顺风向梁上节点1抖振位移最大值为53 mm,而该点横风向和竖风向抖振位移很小可忽略不计,计算最大侧向位移而将顺风向定为从岸桥侧向吹来,抖振响应的计算仅需考虑顺风向即可。事实上,风是从任一方向吹来,此时风载也各不相同。为了得到较精确岸桥前、后摆动位移,将顺风向设置为大梁的轴向。如果想得到较为精确的竖风向抖振响应,则考虑一定的风攻角^[3]。这种处理会使竖风向具有一定的平均风速分量,计算的脉动风压更接近实际,计算结果更合理。

5 结束语

结合岸桥实例,讨论了谐波叠加法在实现多变量随机场中存在的问题和其解决方法,指出WAWS法实质是牺牲部分自谱密度来实现互谱特征,故绝大多数节点时程自谱密度低频误差较大。对比仿真样本的功率谱和目标值,除自谱低频误差较大外,两者结果在整周期时完全吻合。采用Ansys软件对岸桥进行抖振响应分析,前梁端点的最大抖振位移表

明脉动风场下的岸桥顺风向抖振响应较大,这将激起梁上小车与轨道的侧向耦合振动进而影响小车速行的平稳性和安全性。

参 考 文 献

- [1] 胡亮. 基于谱表示法的结构随机风速风压场模拟 [D]. 上海: 同济大学, 2010.
- [2] Ubertini F, Giuliano F. Computer simulation of stochastic wind velocity fields for structural response analysis: comparisons and applications [J]. Advances in Civil Engineering, 2010(2100): 1-20.
- [3] 张相庭. 结构风压与风振计算 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1985: 1-72.
- [4] Deodatis G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 12(3): 778-787.
- [5] Shinozuka M, Deodatis G. Simulation of stochastic processes and fields [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1997, 12(4): 203-207.
- [6] 王之宏. 风载荷的模拟研究 [J]. 建筑结构学报, 1994, 15(1): 44-52.
Wang Zhihong. Simulation of wind loading [J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(1): 14-52. (in Chinese)
- [7] 邓国萍, 吴志君, 邱惠清. 岸边集装箱起重机门架结构的有限元分析与比较 [J]. 中国工程机械学报, 2011, 9(1): 20-26.
Deng Guoping, Wu Zhijun, Qiu Huiqing. Finite element analysis and comparison of doorframe structure in container crane [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2011, 9(1): 20-26. (in Chinese)
- [8] 黄鹏, 王勇军, 顾明. 港口集装箱起重机平均风荷载试验研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(10): 1384-1398.
Huang Peng, Wang Yongjun, Gu Ming. Experimental research on mean wind loads of a quayside container crane [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(10): 1384-1389. (in Chinese)



第一作者简介: 邱惠清, 男, 1948年4月生, 教授、博士生导师。主要研究方向为机械振动、结构动态分析与工程机械智能化。曾发表《集装箱起重机梯子平台快速设计系统研究》(《同济大学学报》2006年第11期) 等论文。

E-mail: qhq-tj@163.com